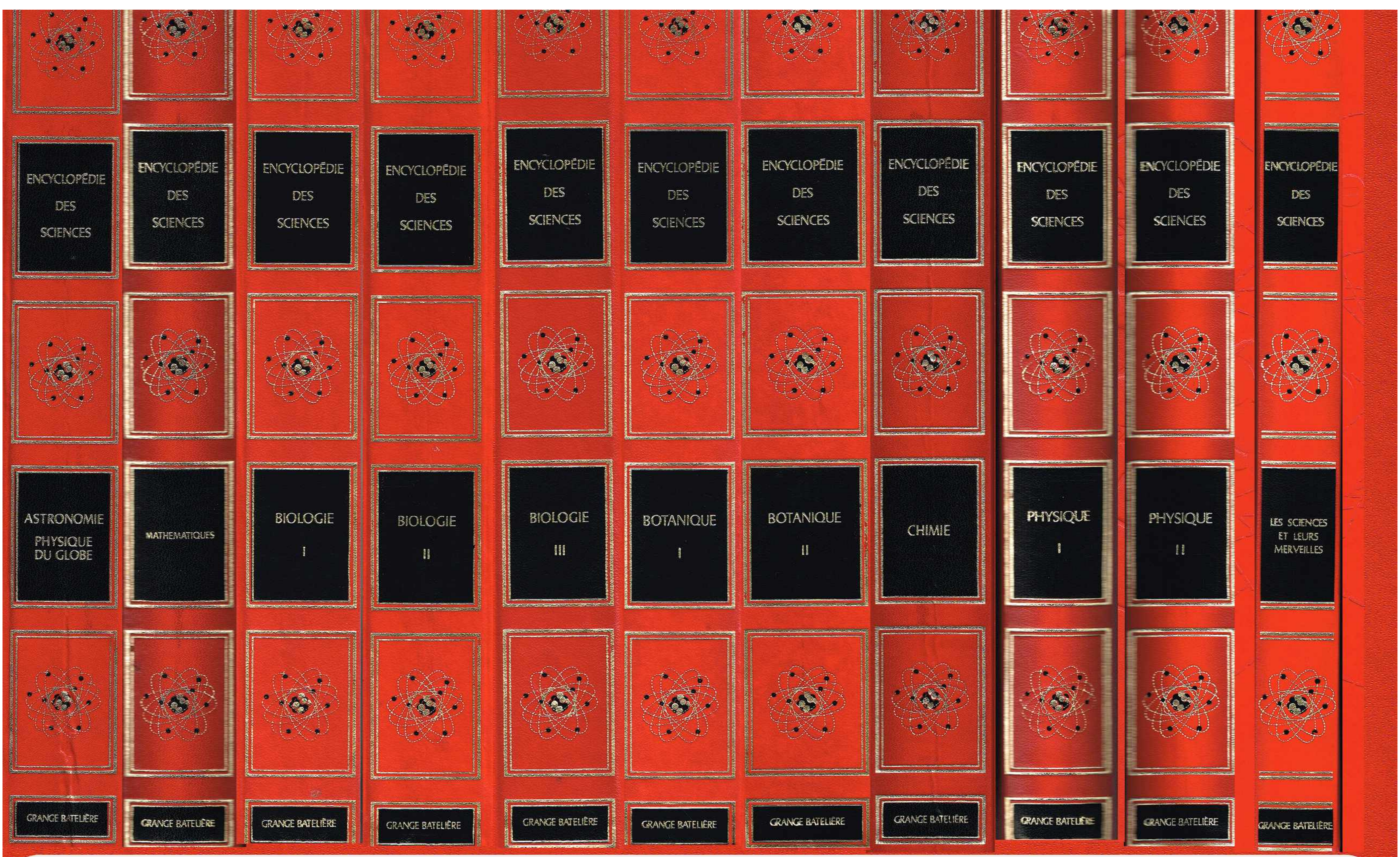

GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES
21 VOLUMES – GRANGE BATELIÈRE, 1978
ÉD. ATLAS, PARIS - ÉD. KISTER, GENÈVE - ÉD. ÉRASME, BRUXELLES

ENCYCLOPÉDIE
DES
SCIENCES

MATHEMATIQUES

GRANGE BATELIÈRE

LEXIQUE DE MATHÉMATIQUES

SUPPLÉMENT AU VOLUME XIII DE LA GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

ABRÉVIATIONS

adj.	adjectif	*n.*	nom	*p. ex.*	par exemple
ex.	exemple	*par ext.*	par extension	*syn.*	synonyme

A

absorbant. *adj.* Un élément a d'un ensemble E muni d'une loi T est absorbant si, pour tout b appartenant à E, $a \mathrm{T} b = b \mathrm{T} a = a$.

accumulateur. *n.* Registre de l'U.A.L. (unité arithmétique et logique) dans lequel sont placés les résultats de la plupart des opérations élémentaires.

adhérent. *adj.* Tout point qui appartient à l'*adhérence* (ou fermeture) d'une partie A d'un espace topologique est dit point adhérent à A.

adresse. *n.* Numéro du registre mémoire ou mot mémoire contenant une information et permettant d'accéder à celle-ci.

aléatoire. *adj.* Soumis au hasard.

aléatoire. *adj.* **(fonction).** Se dit d'une fonction F telle que sa valeur F (x) dépend du résultat du tirage d'une ou plusieurs variables aléatoires.

aléatoire. *adj.* **(variable).** Soit $\mathcal{E}$ un espace des événements possibles. Soit X une application de $\mathcal{E}$ sur R, telle que l'image inverse par X de tout intervalle de R soit un élément de E, tribu associée à $\mathcal{E}$. X est dit variable aléatoire définie sur l'espace probabilisable ($\mathcal{E}$, E). On dit que X est une variable aléatoire purement *discrète* si la réalisation des événements non nuls de $\mathcal{E}$ ne peut conduire qu'à une série discrète de valeurs $x_n \in$ R, et absolument *continue* sur l'intervalle non nul $[a, b] \in$ R si aucun point de cet intervalle ne correspond à la réalisation d'un événement impossible.

algébrique. *adj.* **(entier).** Racine d'un polynôme à coefficients entiers, dont le coefficient du terme de plus fort degré est égal à 1. *Ex. :* $\sqrt{2}$ (racine de $x^2 - 2$).

algébrique. *adj.* **(extension).** Se dit d'une extension simple K (l) d'un corps K, telle qu'il existe au moins un polynôme non nul $f(x)$ à coefficients dans K admettant l pour racine : $f(l) = 0$.

algébrique. *adj.* **(nombre).** Racine d'un polynôme à coefficients entiers. *Ex. :* $\sqrt{\frac{2}{3}}$ (racine de $3x^2 - 2$).

analytique. *adj.* **(fonction).** Se dit d'une fonction dont le développement en série de Taylor converge vers la valeur de la fonction (voir *holomorphe*).

anneau. *n.* Un ensemble A muni de deux lois de composition interne (une addition et une multiplication) est un *anneau* si :
1° A est un groupe abélien pour l'addition ;
2° la multiplication est associative ;
3° la multiplication est distributive par rapport à l'addition.

anneau intègre. Un anneau A est dit intègre ou anneau d'intégrité s'il n'existe pas d'éléments x, y de A différents tous deux de 0, tels que $xy = 0$.

application (d'un ensemble dans un autre ensemble). Relation telle que tout élément de l'ensemble de départ ait une image et une seule.

archimédien. *adj.* **(corps).** Qualifie un corps ordonné K dans lequel la propriété suivante est vérifiée : Pour tout couple (a, b) d'éléments de K strictement positifs, il existe un entier n tel que $n b \geqslant a$.

assembleur. *n.* Programme destiné à traduire en langage machine binaire un programme écrit en langage machine symbolique.

axiomatisation. *n.* La méthode axiomatique est au principe de toute mathématique rigoureuse. Bien avant d'avoir été employée avec une maîtrise parfaite dans les *Éléments* d'Euclide, elle a été abondamment décrite par Platon et par Aristote. Mais alors il ne s'agissait que de poser des énoncés primitifs et d'en dériver d'autres qui « consonnent » ou « s'harmonisent » avec eux. Autrement dit, il s'agissait d'une bonne approche de l'idée de déduction purement logique. Mais le caractère des énoncés primitifs était laissé dans l'ombre et prêtait à des confusions ; on a beaucoup discuté sur le fait que ces énoncés étaient des vérités primitives au sens d'évidences premières accessibles à l'expérience immédiate, ou des conventions, ou des définitions. Depuis la fin du XIXe siècle, la généralisation de la méthode axiomatique a permis la mise en lumière de principes ensemblistes sous-jacents aux différentes disciplines mathématiques. Il a fallu axiomatiser la théorie des ensembles qu'on a ainsi trouvée au principe de toutes les mathématiques, ce qui conduit à la découverte des fameux paradoxes. L'application de la méthode axiomatique à la théorie des ensembles dut alors passer pour le principe des définitions implicites (on renonce à définir directement la notion d'ensemble implicitement définie par l'ensemble des axiomes) inhérent à la méthode axiomatique moderne inaugurée par Hilbert dans les *Fondements de la Géométrie* et caractérisée par le fait que les notions primitives, telles que point, droite, plan, sont des objets sans contenus intuitifs, définis pour les seules relations réciproques posées sous forme d'axiomes.

axiome de choix. L' « axiome de choix », qui doit son nom au mathématicien Zermelo, dit que si t est une famille d'ensembles disjoints et non vides, il est toujours possible de choisir dans chacun des membres de la famille un élément unique et de réunir tous les éléments ainsi distingués en un ensemble bien défini. En termes plus mathématiques, l'axiome énonce que le « produit cartésien » des membres de la famille t n'est pas vide, c'est-à-dire que parmi les sous-ensembles de l'ensemble $\cup t$ obtenu en réunissant tous les éléments de tous les membres de t, il y a au moins un sous-ensemble dont l'intersection avec chacun des membres de t est constituée par un élément unique.

B

base. *n.* Partie libre et génératrice d'un espace vectoriel. Tout espace vectoriel admet des bases.

base d'un système de numération. Nombre de symboles utilisés pour représenter un nombre dans ce système.

bidual. *n.* Soit E un espace normé et E' son dual topologique ; on appelle bidual de E l'espace E'', dual topologique de E' muni de la topologie forte.

bijection. *n.* Application telle que son application réciproque est aussi une application.

bilinéaire. *adj.* **(forme).** Se dit d'une application de E × E (où E est un espace vectoriel) dans son corps de base K, linéaire par rapport au premier et au deuxième arguments.

binaire. *adj.* **(additionneur).** Se dit d'un circuit électronique réalisant l'addition en base 2.

binaire. *adj.* **(système).** Se dit d'un système de numération en base 2, c'est-à-dire utilisant les seuls symboles 0 et 1.

bistable. *n.* Voir *flip flop*.

bit. *n.* Chiffre binaire (de l'anglais *b*inary dig*it*) ; *par ext.* signal logique.

bon ordre. Un ensemble est muni d'un bon ordre si toute partie non vide de cet ensemble admet un plus petit élément.

bornée. *adj.* **(partie).** Qualifie une partie d'un espace métrique contenue dans une boule de rayon fini.

borne inférieure. On appelle borne inférieure d'une partie d'un ensemble ordonné le plus grand des *minorants* de cette partie.

borne supérieure. On appelle borne supérieure d'une partie d'un ensemble ordonné le plus petit des *majorants* de cette partie.

boucle. *n.* En informatique, séquence d'instructions exécutée plusieurs fois de suite.

boule. *n.* L'ensemble des points d'un espace métrique E, dont la distance à un point $a \in E$ est inférieure à un nombre $r > 0$ (respectivement inférieure ou égale) est dit boule ouverte (respectivement fermée) de centre a et de rayon r.

C

calcul infinitésimal. Inventé simultanément et indépendamment par Newton et Leibniz, le calcul infinitésimal a soulevé bien des difficultés avant que ne fût éclairci (au XIX[e] siècle) le concept de *limite*, puis rigoureusement défini celui de *nombre réel* (voir le chapitre *Histoire des Mathématiques*). Cette expression, aujourd'hui vieillie et remplacée par le terme *analyse* (héritage de l'expression *analyse infinitésimale* due à Euler et très répandue au siècle dernier), désigne l'ensemble des méthodes du calcul différentiel, du calcul intégral et du calcul des variations.

canonique. *adj.* **(analyse).** L'analyse canonique est une méthode statistique de traitement de données multidimensionnelles, qui consiste à étudier les relations entre deux groupes de variables.

caractéristique universelle. Ce concept leibnizien désigne l'art d'exposer les pensées au moyen d'un ensemble de signes et d'expressions qui en rendent possible et aisée la manipulation par les ressources du calcul.

cardinal. *n.* Deux ensembles ont même cardinal s'il existe une bijection de l'un sur l'autre. Pour un ensemble fini, le cardinal est le nombre d'éléments de cet ensemble.

catégorie. *n.* Un ensemble C muni d'une loi de composition interne (notée $\circ$) associative est une catégorie si :
1° il existe deux applications α et β de C dans une partie C_0 de C telles que la restriction de α et β à C_0 soit l'identité;
2° le composé $g \circ f$ de deux éléments de C est défini si et seulement si $\alpha(g) = \beta(f)$; on a alors :
$$\alpha(g \circ f) = \alpha(f) \text{ et } \beta(g \circ f) = \beta(g);$$
3° pour tout élément f de C, on a :
$$f \circ \alpha(f) = f = \beta(f) \circ f.$$

Cauchy (suite de). Si une suite (x_n) appartient à un espace métrique (E, d), elle est dite *de Cauchy* si pour tout $\varepsilon > 0$ il existe un entier p tel que dès que n et m sont des entiers supérieurs à p, on ait : $d(x_n, x_m) < \varepsilon$.

centrée. *adj.* **(variable aléatoire).** On dit que la variable aléatoire X est centrée si l'espérance mathématique de X est nulle : $E(X) = 0$.

cercle. *n.* Le cercle est, dans le plan, le lieu des points situés à une distance constante d'un point fixe. L'équation dans un système orthonormé d'un cercle de centre (α, β) et de rayon r est :
$$(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2 = r^2.$$

chaîne. *n.* Une combinaison linéaire à coefficients entiers de p-simplexes singuliers est appelée p-chaîne ou chaîne p-dimensionnelle.

chargeur. *n.* Programme destiné à charger en mémoire d'autres programmes. Parfois appelé *éditeur de liens*.

circulaire. *adj.* **(fonction).** Une fonction circulaire directe mesure un segment en fonction d'un angle, tandis qu'une fonction circulaire inverse mesure un angle en fonction d'un segment.

clan. *n.* Famille de parties d'un ensemble stable pour les opérations de réunion et de passage au complémentaire (donc aussi d'intersection).

code. *n.* Ensemble de symboles et de règles d'utilisation de ces symboles pour représenter des informations de façon conventionnelle.

codimension. *n.* Soit E un espace vectoriel. On dit qu'un sous-espace F est de codimension finie s'il admet un supplémentaire G dans E qui soit de dimension finie. Et l'on pose :
$$\text{codim } F = \dim G.$$

col. *n.* Voir *minimax*.

compact. *adj.* Un espace topologique E est dit compact si, de tout recouvrement ouvert de E, on peut extraire un recouvrement fini; il est dit localement compact s'il est séparé et si chacun de ses points possède au moins un voisinage compact.

compilateur. *n.* Programme destiné à traduire en langage machine binaire un programme écrit dans un langage évolué.

complément à deux. Mode de représentation des nombres négatifs. Dans une représentation à n bits, le nombre $-$ N ($N > 0$) est représenté par $2^n - N$.

complémentaire (d'une partie dans un ensemble). Soit A une partie de l'ensemble E; l'ensemble des éléments de E qui n'appartiennent pas à A est le complémentaire de A dans E, noté $\complement_E^A$ ou $E - A$.

complet. *adj.* Un espace métrique E est dit complet si toute suite de Cauchy de points de E admet une limite dans l'espace E.

complexe. *adj.* **(nombre).** Se dit d'un nombre du type $a + bi$ où a et b sont des nombres réels et i une racine du polynôme $x^2 + 1$; a est la partie réelle, b la partie imaginaire.

compteur ordinal. Registre de l'unité de contrôle contenant l'adresse de la prochaine instruction à exécuter pendant le déroulement d'un programme. Son contenu est mis à jour à chaque instruction.

conforme. *adj.* **(transformation).** Transformation géométrique qui conserve les angles. Toute fonction d'une variable complexe, holomorphe, définit une transformation conforme.

congru. *adj.* Si $\mathcal{R}$ est la relation d'équivalence définie sur $\mathbb{Z}$ par $a \mathcal{R} b$ si et seulement si $a - b$ est un multiple de k (k entier non nul), on dit que a est congru à b modulo k et on note : $a \equiv b$ (k). *Ex.* : $5 \equiv 23$ (3).

congruence. *n.* Relation d'équivalence particulière définie sur $\mathbb{Z}$ (voir *congru*).

conique. *n.* Les coniques sont les courbes obtenues par intersection d'un cône et d'un plan. En coordonnées cartésiennes, ces courbes sont le lieu des points solutions des équations du second degré à deux inconnues.

continuité. *n.* Une application f d'un espace topologique E dans un espace topologique F est continue en un point $a \in E$ si $f(x)$ admet $f(a)$ pour limite lorsque x tend vers a.

contractante. *adj.* **(application).** Soit f une application d'un espace métrique (E, d) dans un autre (F, d') et k un nombre strictement compris entre 0 et 1 ($0 < k < 1$). On dit que f est contractante si :
$$\forall x,\ y \in E,\ d'(f(x), f(y)) \leqslant k d(x, y).$$

contraction. *n.* Opération qui consiste à égaler dans un monôme un indice de covariance et un indice de contravariance, en sous-entendant alors la sommation. Un tenseur mixte (m, p) devient alors un tenseur mixte $(m - 1, p - 1)$.

convention d'Einstein. Convention qui permet de sous-entendre une sommation dans un monôme lorsque celui-ci comporte un indice répété deux fois, une fois en tant qu'indice de covariance, une autre comme indice de contravariance.

convergence. *n.* On dit qu'une suite (x_n) d'un espace métrique (E, d) converge vers un point $l \in E$ (ou admet l pour limite dans E) si pour tout $\varepsilon > 0$, il existe un entier p tel que, dès que n est un entier supérieur à p, on ait $d(l, x_n) < \varepsilon$.

convergence simple. Soit une suite f_n de fonctions à valeurs dans un espace métrique F; on dira que la suite f_n converge simplement vers f si :
$$\forall x \in E,\quad \forall \varepsilon > 0 \quad \exists m \in \mathbb{N}$$
$$\forall n \geqslant m : d(f_n(x), f(x)) \leqslant \varepsilon.$$
L'entier m ainsi déterminé dépend de ε et de x.

convergence uniforme. Mode de convergence d'une suite de fonctions, tel que la distance entre un élément f_n de la suite et la limite devienne arbitrairement petite, mais indépendamment de la variable; pour tout $\varepsilon > 0$, il existe m tel que, dès que $n \geqslant m$, alors, et pour tout x, on a : $d(f_n(x), f(x)) \leqslant \varepsilon$.

convexe. *adj.* **(ensemble).** Une partie A d'un espace vectoriel E est dite convexe si, toutes les fois que deux points a, b appartiennent à A, tout le segment $[\vec{a}, \vec{b}]$ est contenu dans A : $\forall \vec{a}, \vec{b} \in A$, $\forall \lambda \in [0,1]$: $\lambda \vec{a} + (1 - \lambda) \vec{b} \in A$.

convexe. *adj.* **(figure).** Se dit d'une figure géométrique telle que si deux points lui appartiennent, alors le segment qui joint ces points lui appartient.

convolution. *n.* Loi de composition définie entre fonctions localement intégrables sur un ensemble X par :
$$(f, g) \mapsto f * g,$$
où
$$f * g(x) = \int_x f(x - t)\, g(t)\, dt.$$

coordonnées. *n.* 1° *Coordonnées bipolaires.* Les coordonnées bipolaires d'un point P d'un plan sont les deux distances de P à deux points fixes appelés « pôles » ou « foyers ». 2° *Coordonnées cartésiennes.* Un système de référence cartésien étant fixé dans le plan, les coordonnées cartésiennes d'un point P du plan sont les mesures des deux segments ayant pour extrémités d'une part l'origine, d'autre part le point d'intersection avec l'un des axes de la droite parallèle à l'autre axe et passant par P. 3° *Coordonnées elliptiques.* Les coordonnées elliptiques d'un point P du plan dans lequel on a fixé deux foyers sont respectivement la somme et la différence des coordonnées bipolaires de P par rapport à ces deux foyers. 4° *Coordonnées polaires.* Si dans le plan est fixée une demi-droite orientée dont l'origine est le point O, munie d'un vecteur unitaire $\vec{i}$, les coordonnées polaires d'un point P du plan sont la distance $|\overrightarrow{OP}|$ et l'angle $(\vec{i}, \overrightarrow{OP})$.

corps. *n.* Un anneau sera appelé corps si ses éléments distincts du zéro de l'addition forment un groupe pour la multiplication.

corrélation (coefficient de). Mesure du degré de liaison entre deux variables aléatoires X et Y. Il existe plusieurs définitions des coefficients de corrélation (de Pearson, etc.); mais, sauf indication contraire, il s'agit du coefficient ρ défini pour tout couple X et Y admettant des espérances mathématiques E (X) et E (Y) et des écarts types σ (X) et σ (Y), tels que :
$$\rho = \frac{E[(X - E(X))\ (Y - E(Y))]}{\sigma(X)\, \sigma(Y)}.$$

corrélation (fonction de). La fonction de corrélation $C(\tau)$ est la fonction de τ formée par la covariance $E(y(t)\, y(t + \tau))$ pour une fonction aléatoire stationnaire $y(t)$.

corrélées. *adj.* **(variables aléatoires).** Se dit de deux variables aléatoires X et Y telles que le coefficient de corrélation entre X et Y soit différent de zéro. A distinguer de variables aléatoires *liées*.

correspondance. *n.* Soit E et F deux ensembles; on appelle correspondance de E dans F toute application de $E \to \mathfrak{P}(F)$ où $\mathfrak{P}(F)$ est l'ensemble des parties de F. Une correspondance Φ est généralement notée $\Phi : E \Rightarrow F$.

correspondances (analyse des). Méthode particulière d'analyse factorielle.

covariance. *n.* La covariance entre deux variables aléatoires X et Y est l'espérance mathématique, quand elle existe, du produit XY.

cycle. *n.* Une chaîne p-dimensionnelle dont le bord est nul est elle-même un bord; on l'appelle p-cycle.

D

décimal. *adj.* **(système).** Qualifie le système de numération à base 10.

définition imprédicative. Cette notion est apparue avec les paradoxes de la théorie des ensembles. On dit qu'un ensemble est défini de façon imprédicative si la définition renvoie à la

totalité à laquelle l'ensemble appartient. En langage logique, une définition est imprédicative si elle définit un objet qui est une des valeurs prises par une variable liée occurente dans l'expression symbolique de la définition. Poincaré et Russell ont essayé, de différente façon, d'éviter les définitions imprédicatives.

dénombrable. *adj.* **(ensemble).** Se dit d'un ensemble équipotent à l'ensemble $\mathbb{N}$ des entiers naturels.

dense. *adj.* Une partie A d'un espace topologique E est dite dense dans E si sa fermeture est égale à E.

densité de probabilité. La densité de probabilité $f(x)$, définie sur l'intervalle de définition de la variable aléatoire continue X, $[a, b]$, $a \neq b$, est telle que :

$$Pr(x \leqslant X \leqslant x + dx) = f(x)\,dx \quad (x \in [a, b]).$$

densité de probabilité normale. La variable aléatoire X continue, définie sur $(-\infty, +\infty)$, est normale si la densité de probabilité $f(x)$ associée peut se mettre sous la forme :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\, e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}}$$

où $x_0 \in R$ et $\sigma \in R_+$.

dérivée. *n.* Soit I un intervalle de $\mathbb{R}$ et f une application de I dans $\mathbb{R}$. Lorsque la limite du rapport :

$$\frac{f(x_0 + h) - f(x_0)}{h}$$

existe pour h tendant vers 0 (avec $x_0 \in I$), on dit que f est dérivable en x_0. L'application qui, à tout $x \in I$, fait correspondre la limite obtenue s'appelle application dérivée ou dérivée de f.

déterminant. *n.* Sur un espace vectoriel E, seule forme multilinéaire alternée qui prenne la valeur + 1 pour les vecteurs de la base canonique.

dialectique. *n.* Au sens où on l'a utilisé dans le texte, ce terme, qui a eu droit à la plus grande fortune, désigne le discours par lequel on essayait de donner aux mathématiques le statut qui leur revient dans le « monde intelligible ». On lit souvent que la dialectique trouve son origine dans les discussions antiques dont Zénon, disciple de Parménide, nous a laissé le souvenir dans les fameux paradoxes associés à son nom. Mais, déjà avec Aristote, le terme dialectique déchoit des hauteurs platoniciennes : on l'applique aux syllogismes dont les prémisses ne sont pas nécessairement vraies.

différence symétrique (de deux ensembles). C'est l'ensemble des éléments qui appartiennent à l'un seulement des deux ensembles, noté :

$$A \triangle B = \complement_{A\cup B}(A\cap B).$$

différentielle. *n.* Application linéaire continue l, approximant la différence des valeurs prises par une fonction f (définie sur un ouvert de $\mathbb{R}^n$) en deux points, donc telle que $\|f(x) - f(y) - l(x-y)\|$ soit négligeable devant $\|x - y\|$.

dimension. *n.* Toutes les bases d'un espace vectoriel ont le même nombre d'éléments; ce nombre est appelé dimension de l'espace vectoriel.

Dirac (distribution de). La densité de probabilité de Dirac $\delta(x - x_0)$ est la densité de probabilité associée à la variable aléatoire X continue sur $(-\infty, +\infty)$ telle que $Pr(X \neq x_0) = 0$. Elle est définie par la propriété fondamentale de la distribution de Dirac :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} y(x)\,\delta(x - x_0)\,dx = y(x_0),$$

valable pour toute fonction $y(x)$ à valeurs dans $\mathbb{R}$.

discriminante. *adj.* **(analyse).** Qualifie la méthode statistique de traitement de données multidimensionnelles à but explicatif ou prévisionnel.

disjoints. *adj.* **(sous-ensembles).** Se dit de sous-ensembles dont l'intersection est vide.

distance. *n.* Une distance d sur un ensemble E est une application de $E \times E$ dans l'ensemble des nombres réels positifs ou nuls, telle que, quels que soient les points x, y et z appartenant à E, on ait :

$$d(x, y) = 0 \Leftrightarrow x = y;$$
$$d(x, y) = d(y, x);$$
$$d(x, y) \leqslant d(x, z) + d(z, y).$$

On dit encore métrique définie sur E.

distribution. *n.* Soit $\mathfrak{D}$ l'espace vectoriel des fonctions à valeurs réelles définies sur $\mathbb{R}^n$, indéfiniment différentiables et à support compact. On dit qu'une suite (φ_p) de $\mathfrak{D}$ converge vers O dans l'espace $\mathfrak{D}$ si les supports des fonctions φ_p sont contenus dans un même compact et si toutes les dérivées partielles successives convergent uniformément vers O sur $\mathbb{R}^n$. On appelle distribution tout élément T du dual topologique de l'espace $\mathfrak{D}$ muni de la topologie sus-indiquée.

diviseur. *n.* Dans un anneau, a est un diviseur de b s'il existe un élément k de l'anneau tel que $b = ka$. *Ex. :* dans $\mathbb{Z}$, 3 est un diviseur de 12.

dual. *n.* Ensemble des formes linéaires sur un espace vectoriel E; pour les opérations d'addition et de produit par un scalaire il possède une structure d'espace vectoriel. On le note E^*.

dual topologique. Soit E un espace vectoriel topologique. On appelle dual topologique de E l'espace E' des formes linéaires continues sur E.

duale. *adj.* **(base).** Si $(e_i)_{i\in I}$ désigne une base d'un espace vectoriel E, les formes linéaires $(e^j)_{j\in I}$ telles que $e^j(e_i) = 0$ si $i \neq j$ et $+ 1$ si $i = j$ forment une base de E^*, dite base duale de celle de E.

E

écart type. Racine positive de la variance.

échantillon. *n.* L'échantillon $\{x_1 \dots x_n\}$ de taille n est le résultat du tirage de la variable aléatoire à n dimensions $\{X_1 \dots X_n\}$, telle que les variables aléatoires X_i soient mutuellement indépendantes et soient régies par la même loi de probabilité. Le tirage répété n fois d'une variable aléatoire X de loi $F(x)$ est donc une méthode possible pour la constitution d'un échantillon de taille n.

éditeur de liens. Voir *chargeur.*

effet Condorcet. Voici le texte de Condorcet où apparaît ce concept : « Supposons, en effet, toujours trois candidats, et que les électeurs soient au nombre de soixante; qu'il y ait vingt-trois voix pour l'ordre Pierre, Paul, Jacques; aucune pour l'ordre Pierre, Jacques, Paul; deux pour l'ordre Paul, Pierre, Jacques; dix-sept pour l'ordre Paul, Jacques, Pierre; dix pour l'ordre Jacques, Pierre, Paul et huit pour l'ordre Jacques, Paul, Pierre; (...). Les trois propositions adoptées par la pluralité seraient donc :
— Pierre est préférable à Paul;
— Jacques est préférable à Pierre;
— Paul est préférable à Jacques.
Et il est évident que ces trois propositions ne peuvent être vraies en même temps, puisque (...) de deux quelconques, admises ensemble, résulte nécessairement une conséquence contradictoire avec la troisième... (si bien que) l'élection donne un résultat absurde, ou plutôt elle n'en donne aucun, tandis que, suivant la méthode ordinaire, Pierre ayant vingt-trois, Paul dix-neuf et Jacques dix-huit voix, l'élection décide en faveur de Pierre. »

Élée, éléates. Élée est une ville du sud de l'Italie, sur les bords de la mer Tyrrhénienne. Colonie phocéenne, elle est la patrie des philosophes « éléates », Zénon et Parménide en particulier.

élément neutre. Un élément e d'un ensemble E muni d'une loi de composition interne (notée T) est un élément neutre pour la loi T si, pour tout élément x de E, on a les égalités :

$$x \mathbin{T} e = e \mathbin{T} x = x.$$

élément symétrique. Si E est un ensemble muni d'une loi de composition interne (notée T) possédant un élément neutre e, on dira qu'un élément x' de E est symétrique d'un élément x de E si :

$$x \mathbin{T} x' = x' \mathbin{T} x = e.$$

ellipse. *n.* C'est une conique dont l'équation peut se mettre sous la forme :

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1.$$

ellipsoïde. *n.* C'est une quadrique qui peut se représenter par l'équation :

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1.$$

endomorphisme. *n.* Application linéaire d'un espace vectoriel dans lui-même.

ensemble. *n.* Mot le plus général pour désigner un « groupement » d'objets; mais tout groupement d'objets n'est pas forcément un ensemble (voir *axiomes de la théorie des ensembles*).

ensemble des parties d'un ensemble. C'est l'ensemble dont les éléments sont les parties de l'ensemble E considéré; il est noté $\mathfrak{P}(E)$ et comprend les parties propres, la partie vide et la partie pleine.

ensemble-quotient. Ensemble des classes d'équivalence d'un ensemble E muni d'une relation d'équivalence $\mathfrak{R}$; on le note $E/\mathfrak{R}$. *Ex. :* si $E = \mathbb{Z}$ et si $\mathfrak{R}$ est la congruence modulo 2, $E/\mathfrak{R}$ se réduit à deux classes : celle des nombres pairs et celle des nombres impairs.

entier relatif (nombre). Nombre égal à un nombre entier ou à son opposé.

entrées-sorties. Toutes les opérations d'échange d'information entre l'unité centrale et les organes périphériques en informatique.

épistémologie. *n.* Ce terme est introduit en France au début du XX[e] siècle par Couturat dans le lexique qu'il joint à la traduction par Cadenat de l'ouvrage de Russell : *An Essay of the Foundations of Geometry* (1897). Couturat, inspiré par la philosophie kantienne, définit l'épistémologie comme la « théorie de la connaissance appuyée sur l'étude critique des Sciences ». Bientôt, Lalande et Robert consignent à peu près la même définition dans leurs dictionnaires respectifs, et Meyerson consacre l'usage définitif du terme en 1907 (dans « Identité et Réalité »).
Après les *Fondements de la Géométrie* de Hilbert, les études épistémologiques se sont émancipées de toute autorité philosophique. L'idée même de « théorie de la connaissance » est critiquée, et l'esprit de système, banni du corps des sciences, ne peut plus sévir dans les études qui prennent les sciences pour objet (voir *Critique,* n° 308, janvier 1973, p. 53-66).

équation. *n.* Soit f et g deux applications d'un ensemble E dans un ensemble F. La relation :

$$f(x) = g(x)$$

s'appelle *équation* et tout élément x de E pour lequel la relation est vraie s'appelle solution de l'équation. Résoudre l'équation, c'est déterminer l'ensemble K de toutes les solutions :

$$K = \{x \mid f(x) = g(x)\}.$$

équation différentielle. Soit E un espace vectoriel normé sur $\mathbb{R}$ et f une application continue sur $\mathbb{R} \times E$ à valeurs dans E. L'équation $\frac{dy}{dt} = f(t, y)$ s'appelle équation différentielle du premier ordre. Une solution de cette équation est une application φ dérivable sur un intervalle I de $\mathbb{R}$ et telle qu'en tout point x de I l'on ait :

$$\varphi'(x) = f(x, \varphi(x)).$$

Plus généralement, l'équation :

$$\frac{d^n y}{dt^n} = f\left(t, y, \frac{dy}{dt}, \dots, \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}}\right)$$

s'appelle équation différentielle d'ordre n.

équation linéaire. Soit E et F deux espaces vectoriels; on appelle équation linéaire toute équation de la forme : $f(\vec{x}) = \vec{0}_F$ où f est une application linéaire de E dans F.

équidécomposable. *adj.* Deux figures sont dites équidécomposables si on peut les décomposer en un même nombre de triangles respectivement égaux.

équipotent. *adj.* Deux ensembles sont équipotents s'ils peuvent être mis en bijection.

équivalence (classe d'). Sous-ensemble constitué par des éléments équivalents.

équivalence (relation d'). Relation binaire réflexive, symétrique et transitive.

ergodique. *adj.* **(chaîne).** Chaîne markovienne telle qu'il n'existe pas d'états qui ne puissent être atteints à partir d'un état initial quelconque. Si P est la matrice stochastique associée, de rang $m \times n$, on a donc :

$$\forall i,\ 1 \leqslant i \leqslant m;$$
$$\forall j,\ 1 \leqslant j \leqslant n;$$
$$\exists n \in N^{*}_{+}\ (P^n)_{ij} \neq 0.$$

espace de Banach. Espace vectoriel normé complet.

espace de Hilbert. On appelle espace de Hilbert un espace vectoriel E muni d'une forme bilinéaire symétrique dont la forme quadratique associée est définie positive; cette forme quadratique définit une norme par laquelle l'espace E est complet.

espace localement convexe. Un espace vectoriel topologique E est dit localement convexe si tout point admet un système fondamental de voisinages convexes.

espace probabilisable. $\mathcal{E}$ est un espace probabilisable s'il est un espace d'événements possibles tel qu'à tout élément e de $\mathcal{E}$ et à tout élément d'une tribu associée à $\mathcal{E}$ on peut associer une probabilité intrinsèque de réalisation.

espace réflexif. On dira qu'un espace normé E est réflexif s'il est identique à son bidual E''.

espace vectoriel normé. Soit E un espace vectoriel sur $\mathbb{R}$. On appelle alors norme sur E toute fonction, notée $\vec{x} \to \|\vec{x}\|$, possédant les trois propriétés suivantes :

1° $\|\vec{x}\| > 0$ pour $\vec{x} \neq \vec{0}$; $\|\vec{0}\| = 0$.
2° $\|\lambda.\vec{x}\| = |\lambda|\ \|\vec{x}\|,\ \lambda \in \mathbb{R}$.
3° $\|\vec{x} + \vec{y}\| \leqslant \|\vec{x}\| + \|\vec{y}\|$.

Si E est muni d'une telle norme, on l'appelle espace vectoriel normé. Un espace vectoriel normé est un espace topologique.

espace vectoriel semi-normé. Un espace vectoriel est dit semi-normé s'il est muni d'une famille de semi-normes $(P_i)_i \in I$ ayant la propriété suivante : quel que soit l'ensemble fini $J \in I$, il existe k tel que P_k majore tous les P_j, $j \in J$.

espace vectoriel topologique. On appelle espace vectoriel topologique un ensemble E muni d'une structure espace vectoriel sur $\mathbb{R}$ et, d'autre part, d'une topologie compatible avec la structure vectorielle, c'est-à-dire telle que l'addition $\vec{x}, \vec{y} \to \vec{x} + \vec{y}$ est *continue* de $E \otimes E \to E$ et que la multiplication $\lambda, \vec{x} \to \lambda\vec{x}$ est également *continue* de $\mathbb{R} \otimes E \to E$.

espaces de Sobolev. Soit Ω un ouvert de $\mathbb{R}^n$; on appelle espace de Sobolev d'ordre 1 l'espace défini par :

$$H^1(\Omega) = \left\{ v | v \in L^2(\Omega), \frac{\partial v}{\partial x_1} \in L^2(\Omega), \dots \frac{\partial v}{\partial x_n} \in L^2(\Omega) \right\}$$

où $\frac{\partial v}{\partial x_i}$ désigne la dérivée au sens des distributions par rapport à x_i.
Plus généralement, on définit des espaces de Sobolev d'ordre n, en faisant intervenir les dérivées partielles successives d'ordre $\leqslant n$.

espérance mathématique. Soit X une variable aléatoire. L'espérance mathématique E (X) de X est :

$$E(X) = \sum_i x_i F(x_i)$$

si X est une variable aléatoire discrète et $F(x_i)$ la loi de probabilité associée; ou bien elle est :

$$E(X) = \int_a^b x f(x)\, dx$$

si X est une variable aléatoire continue, définie sur l'intervalle $[a, b]$, et si $f(x)$ est la densité de probabilité associée.

estimateur. *n.* Soit $\{X_1 \dots X_n\}$ une suite de variables aléatoires mutuellement indépendantes et régies par la même loi de probabilité $F_\alpha(x)$, cette dernière dépendant d'un paramètre α. On appelle estimateur $\widehat{\alpha}_n$ de α toute variable aléatoire $\widehat{\alpha}_n = f(X_1 \dots X_n)$ telle que, si $\{x_1 \dots x_n\}$ est un échantillon de taille n résultat du tirage de $\{X_1 \dots X_n\}$, $\alpha^*_n = f(x_1 \dots x_n)$ puisse être considéré comme une valeur approchée de α.

estimateur asymptotiquement sans biais. Estimateur $\widehat{\alpha}_n$ d'un paramètre α tel que :

$$\lim_{n \to \infty} E(\widehat{\alpha}_n) = \alpha.$$

estimateur sans biais. Estimateur $\widehat{\alpha}_n$ d'un paramètre α tel que :

$$\forall_n\ E(\widehat{\alpha}_n) = \alpha.$$

explicative. *adj.* **(variable).** Variable intervenant dans les problèmes de régression; appelée aussi *variable exogène.*

expliquée. *adj.* **(variable).** Variable intervenant dans les problèmes de régression; appelée aussi *variable endogène.*

F

face. *n.* Dans un p-simplexe S, on appelle face chacun des $(p-1)$-simplexes formés par $p-1$ sommets de S. Un p-simplexe possède donc $p-1$ faces.

facteur. *n.* Nouvelle variable résultant d'une analyse factorielle.

factoriel. *adj.* **(axe).** Se dit d'un axe associé à un vecteur propre d'une matrice, étudiée par une méthode d'analyse factorielle.

factorielle. *adj.* **(analyse).** Qualifie une méthode statistique de traitement de données multidimensionnelles. On distingue l'analyse en facteurs communs et facteurs spécifiques, l'analyse en composantes principales et l'analyse des correspondances.

fermé. *adj.* Complémentaire d'un sous-ensemble ouvert dans un espace topologique.

fermeture. *n.* La fermeture (ou adhérence) d'une partie A d'un espace topologique E est le plus petit fermé de E qui contienne A.

finitisme de Hilbert. On appelle ainsi l'exigence de Hilbert, qui ne voulait admettre dans la théorie de la preuve (ou métamathématique) que des arguments finitistes, c'est-à-dire :
1° qui ne considèrent que des collections *finies* d'objets ou de fonctions *bien définies,* et donc dont on peut calculer univoquement la valeur;
2° qui n'affirment l'existence d'aucun objet sans indiquer en même temps le moyen de le construire;
3° qui ne parlent jamais de l'ensemble de *tous* les objets x d'une collection *infinie* (quand on dit qu'un théorème vaut pour tous ces x, cela veut dire seulement que pour chaque x, en particulier, on peut répéter le raisonnement qui l'établit en général).

flip flop. *n.* Circuit électronique à deux états permettant de mémoriser une information logique; appelé aussi *bistable.*

foncteur. *n.* Un foncteur d'une catégorie C dans une catégorie C' est une application F de l'ensemble C dans l'ensemble C' telle que :
1° $F[\alpha(f)] = \alpha[F(f)]$ et $F[\beta(f)] = \beta[F(f)]$;
2° si $g \circ f$ est défini dans C, alors :

$$F(g \circ f) = F(g) \circ F(f).$$

fonction. *n.* Relation telle que tout élément de l'ensemble de départ ait au plus une image. Si l'on réduit l'ensemble de départ à l'ensemble de définition de la fonction, la fonction est alors une application. On utilise plutôt le terme fonction lorsque l'ensemble d'arrivée est $\mathbb{R}$ (fonction numérique) ou $\mathbb{C}$ (fonction complexe).

fonction convexe, concave. Soit f une application d'un espace vectoriel E dans $\mathbb{R}$; on dit que f est une application convexe si $\forall \vec{x}, \vec{y} \in E$, $\forall \lambda \in [0, 1]$, on a l'inégalité :

$$f(\lambda\vec{x} + (1-\lambda)\vec{y}) \leqslant \lambda f(\vec{x}) + (1-\lambda) f(\vec{y}).$$

On dira qu'elle est concave si $-f$ est convexe.

fonction logique. Fonction ne pouvant prendre que deux valeurs, vrai ou faux, selon les valeurs des variables.

forme bilinéaire définie positive. Une forme bilinéaire définie sur $E \times E$ (E espace vectoriel) est dite définie positive si :
1° $B(\vec{x}, \vec{x}) \geqslant 0 \quad \forall \vec{x} \in E$;
2° $B(\vec{x}, \vec{x}) = 0 \Rightarrow \vec{x} = \vec{0}$.

frontière. *n.* On appelle frontière d'une partie A d'un espace topologique E l'intersection de l'adhérence de A et du complémentaire de l'intérieur de A :

$$Fr(A) = \bar{A} \cap \complement_E \mathring{A}$$

G

galoisienne. *adj.* **(extension).** Se dit d'une extension algébrique simple L d'un corps K telle que, si un polynôme de degré n, irréductible dans K, y admet une racine, alors il en possède n et s'y décompose donc en un produit de n facteurs irréductibles du premier degré.

gaussienne. *adj.* **(variable aléatoire).** Une variable aléatoire X est dite gaussienne si elle est définie sur $(-\infty, +\infty)$ et si la densité de probabilité associée est normale.

génératrice. *adj.* **(partie).** Se dit d'une partie G d'un espace vectoriel E, telle que tout élément de E puisse s'obtenir comme combinaison linéaire d'éléments de G.

gradient. *n.* Vecteur à n composantes et dont les coordonnées sont les dérivées partielles du premier ordre d'une fonction réelle définie sur un ouvert de $\mathbb{R}^n$.

groupe. *n.* Un groupe est un ensemble G muni d'une loi de composition interne partout définie, et qui possède les propriétés suivantes :
1° elle est associative;
2° elle possède un élément neutre;
3° tout élément de G admet un symétrique unique.

groupe commutatif. Un groupe est commutatif (ou abélien) si sa loi de composition interne est commutative.

groupe de substitutions. La théorie des groupes de substitutions ou, comme on dit aussi, de permutations renvoie à la théorie de Galois dont on trouvera un bref résumé dans le chapitre *Histoire des Mathématiques,* au paragraphe consacré à l'algèbre au XIX[e] siècle.

groupe quotient. Si H est un sous-groupe distingué d'un groupe G, l'ensemble quotient $G/\mathcal{R}$, où $\mathcal{R}$ est la relation d'équivalence $x\mathcal{R}y$ si et seulement si $x^{-1}y \in H$, est un groupe pour la loi $\bar{x}\bar{y} = \overline{xy}$ ($\bar{x}$ désigne un élément de $G/\mathcal{R}$, x un élément de G et xy le composé dans G de x et de y). Ce groupe est appelé groupe quotient de G par le sous-groupe distingué H.

H

hasard. *n.* Antécédent de tout événement ou de tout phénomène dont la manifestation ne peut pas être prédite à l'avance, soit par ignorance des causes présidant à sa réalisation, soit par indéterminisme fondamental.

hiérarchique. *adj.* **(classification).** Se dit de la méthode statistique consistant à déterminer des classes sur un ensemble de données multidimensionnelles par un procédé itératif.

holomorphe. *adj.* Qualifie une fonction dérivable de variable complexe. Toute fonction d'une variable complexe, holomorphe, est analytique et *vice versa.*

homéomorphe. *adj.* Deux espaces topologiques sont homéomorphes lorsqu'il existe un homéomorphisme de l'un sur l'autre. De tels espaces ont les mêmes propriétés topologiques.

homéomorphisme. *n.* Bijection continue d'un espace topologique sur un autre espace topologique, telle que sa réciproque soit aussi une application continue.

homologie (groupe d'). Ensemble des classes d'équivalence de p-cycles pour la relation : A $\sim$ B, s'il existe une $(p + 1)$-chaîne C, telle que A-B soit le bord de C.

homologue. *adj.* Deux segments, deux angles appartenant à deux figures géométriques sont dits homologues s'il existe, entre les deux figures, une correspondance biunivoque qui les fait correspondre.

homomorphisme d'anneaux. Une application f d'un anneau A dans un anneau A' est un homomorphisme d'anneaux si :
— $f(x + y) = f(x) + f(y)$;
— $f(xy) = f(x) f(y)$ pour tous les éléments x, y de A.

homomorphisme de groupes. Une application f d'un groupe G dans un groupe G' est un homomorphisme de groupes si :

$$f(xy) = f(x) f(y)$$

pour tout x, tout y appartenant à G (les lois internes de G et G' étant notées multiplicativement).

homotope. *adj.* Deux applications continues (ou *arcs*) f et g de l'intervalle [0, 1] dans un espace E sont dites homotopes s'il existe une « déformation continue de f sur g conservant les extrémités », H : [0, 1] × [0, 1] → E et telle que :

$$\begin{cases} H(t, 0) = f(t) \\ H(t, 1) = g(t). \end{cases}$$

hyperbole. *n.* Une hyperbole est une conique dont l'équation peut se mettre sous la forme :

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1.$$

hyperboloïde à deux nappes. L'hyperboloïde à deux nappes est une quadrique qui peut se représenter par l'équation :

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1.$$

hyperboloïde à une nappe. L'hyperboloïde à une nappe est une quadrique qui peut se représenter par l'équation :

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1.$$

hyperplan. *n.* Soit un espace vectoriel E. On appelle hyperplan de E tout sous-espace de E de codimension 1.

hypothético-déductif. *adj.* Une science est dite « hypothético-déductive » quand elle peut s'organiser en un ensemble d'énoncés dont un petit nombre, admis au titre d'hypothèses, permet, moyennant l'usage de règles déterminées, d'obtenir par des déductions plus ou moins longues et complexes les autres énoncés. En ce sens, toute science hypothético-déductive doit son caractère à l'application de la méthode axiomatique (voir *axiomatisation*).

I

idéal. *n.* Un idéal à gauche d'un anneau A est une partie I de A vérifiant :
— I est un sous-groupe du groupe additif de A ;
— pour tout élément x de A, $xI = I$ (pour un idéal à droite, la seconde propriété devient $Ix = I$).

idempotent. *adj.* Dans un ensemble E muni d'une loi T, un élément a est idempotent pour la loi T si $a T a = a$.

image. *n.* Si f est une application linéaire d'un espace vectoriel E dans un espace vectoriel F, l'ensemble f (E) est appelé image de f et se note $Im(f)$.

imaginaire. *adj.* **(nombre).** Se dit d'un nombre complexe dont la partie réelle est nulle. *Ex. :*

$$i\sqrt{2}, \quad -3\,i.$$

inclusion. *n.* Relation entre deux ensembles, qui exprime que tout élément de l'un des ensembles (A) est aussi élément de l'autre ensemble (B) ; se note $\subset$. *Ex. :*

$$A \subset B \Leftrightarrow [x \in A \Rightarrow x \in B].$$

indépendantes. *adj.* **(variables aléatoires).** Se dit d'un ensemble de variables aléatoires $\{X_k\}_{k=1, N}$ définies sur des espaces d'événements possibles $\mathcal{E}_1, \ldots \mathcal{E}_N$ telles que pour tous $i, j \leqslant N$:

$$\forall a_i \in \mathcal{E}_i \text{ et } a_j \in \mathcal{E}_j$$
$$\Pr(a_i \supset a_j) = \Pr(a_i) \Pr(a_j).$$

indexage. *n.* Mode d'adressage consistant à ajouter à l'adresse spécifiée dans une instruction le contenu du registre d'index. On peut ainsi, dans une boucle, atteindre des adresses successives avec la même instruction en incrémentant ce contenu à chaque itération.

indice. *n.* La valeur (entière) de l'intégrale :

$$\frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} \frac{dz}{z - a}$$

représente le nombre algébrique de fois où la courbe γ tourne autour du point a, et s'appelle l'indice de a par rapport à la courbe γ.

indirect. *adj.* **(adressage.)** Se dit de la méthode d'accès à une information consistant à indiquer dans une instruction non pas l'adresse de l'information cherchée, mais l'adresse d'un mot contenant l'adresse de l'information.

inductif. *adj.* **(ensemble).** Un ensemble ordonné E est inductif si toute partie totalement ordonnée de E admet un majorant.

infini. *n.* ou *adj.* Dès sa naissance comme science déductive, la mathématique a rencontré la notion d'infini, sous diverses formes; on distingue traditionnellement (depuis Aristote) *l'infini actuel* et *l'infini potentiel*. Jusqu'au XIX^e siècle, seul ce dernier avait un statut mathématique : il désigne la possibilité de poursuivre indéfiniment un processus opératoire. Aristote pensait que les mathématiciens n'ont pas besoin de recourir à l'infini mais seulement à une grandeur finie aussi grande que nécessaire. Par infini « actuel » ou « en acte », on désigne un infini donné, un « être ». C'est pourquoi les premiers « actualistes » ont été des théologiens, critiques à l'égard de la doctrine d'Aristote qui ne permettait ni au monde ni à Dieu d'être infinis. Mathématiquement, les totalités infinies actuellement données ont reçu droit de cité avec la création d'une arithmétique de l'infini.

instruction. *n.* Ordre d'exécution d'une opération élémentaire réalisable par le calculateur.

intégrale. *adj.* **(courbe).** Famille de solutions d'une équation différentielle d'ordre n, définies implicitement et dépendant de n paramètres.

intégrale de Lebesgue. Généralisation de la notion d'intégrale au cas de certaines fonctions pour lesquelles on ne peut définir une intégrale au sens de Riemann.

intégrale de Riemann-Stieltjes. Forme linéaire continue pour la topologie de la convergence uniforme, sur l'espace de Banach des fonctions numériques définies et continues sur un intervalle de $\mathbb{R}$.

intérieur. *n.* L'intérieur d'une partie A d'un espace topologique E est le plus grand ouvert contenu dans A.

intérieur relatif. Soit E un espace vectoriel topologique et A une partie de E; on appelle intérieur relatif de A (et l'on note r_iA) l'intérieur de A considéré comme sous-ensemble de $\mathcal{A}$, où $\mathcal{A}$ désigne la plus petite variété affine contenant A — $\mathcal{A}$ étant muni de la topologie induite par celle de E.

intersection. *n.* Pour deux ensembles, désigne l'ensemble de leurs éléments communs; désigne également l' « opération » qui associe à deux ensembles leur intersection, notée $\cap$. *Ex. :*

$$x \in A \cap B \Leftrightarrow [x \in A \textbf{ et } x \in B].$$

irrationnel. *adj.* **(nombre).** Se dit d'un nombre qui ne peut pas être représenté par le quotient de deux nombres entiers. *Ex. :* $\sqrt{2}$, π.

irréductible. *adj.* **(fraction).** Qualifie une fraction constituée par le quotient de deux nombres entiers premiers entre eux.

isométrie. *n.* Correspondance biunivoque entre deux figures géométriques, telle que les segments et les angles déterminés par les points qui se correspondent soient égaux. Deux figures entre lesquelles il existe une isométrie sont dites isométriques ou égales.

isomorphisme. *n.* Un isomorphisme est un homomorphisme (de groupes, d'anneaux, de corps) bijectif.

L

langage machine. Code binaire représentant les instructions utilisées par le calculateur.

langage symbolique. Langage permettant d'écrire des programmes au moyen de symboles sans avoir à connaître le langage machine.

libre. *adj.* **(partie).** Se dit de la partie d'un espace vectoriel dont aucun élément n'est combinaison linéaire des autres.

liées. *adj.* **(variables aléatoires).** Variables aléatoires qui ne sont pas indépendantes.

limite. *n.* Une application f d'un espace topologique E dans un autre espace topologique F tend vers la limite l quand x tend vers a par valeurs dans A (A $\subset$ E), si pour tout voisinage W de l dans F il existe un voisinage V de a dans E tel que :

$$f(V \cap A) \subset W.$$

linéaire. *adj.* **(application).** Une application f d'un espace vectoriel E dans un espace vectoriel F (tous deux sur le même corps K) est dite linéaire si la propriété $f(aX + bY) = af(X) + bf(Y)$ est vérifiée pour tous les éléments a et b de K et tous les éléments X et Y de E.

linéaire. *adj.* **(forme).** Application linéaire d'un espace vectoriel dans son corps de base.

locale. *adj.* **(notion ou propriété).** Notion ou propriété topologique qu'il suffit de vérifier dans un voisinage de chaque point, et non de façon globale.

logique du premier ordre et **logique du second ordre.** Une *logique du premier ordre* se caractérise par le fait qu'elle n'admet comme seules variables que les variables d'individus, tandis qu'*au second ordre* sont admises des variables de prédicat : on peut alors appliquer les quantificateurs non plus seulement à des variables d'individus mais à des variables de sous-ensembles, et considérer par exemple une relation $\mathcal{R}$ (qui est un certain sous-ensemble d'un produit cartésien d'ensembles donnés) ou une suite $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ (qui, en tant qu'application d'un ensemble E dans $\mathbb{N}$, est encore un certain sous-ensemble du produit E × $\mathbb{N}$) comme des variables quantifiables.

loi de composition externe. On appelle loi de composition externe entre éléments d'un ensemble Ω (ensemble des opérateurs) et éléments d'un ensemble E une application de $\Omega \times$ E dans E.

loi de composition interne. Une loi de composition interne dans un ensemble E est une application d'une partie A de E × E dans E. 1° *Loi associative.* Une loi de composition interne (notée T) partout définie sur un ensemble E est associative si, pour tous les éléments x, y, z de E, on a : $(x \mathrel{T} y) \mathrel{T} z = x \mathrel{T} (y \mathrel{T} z)$. 2° *Loi commutative.* Une loi de composition interne (notée T) partout définie sur un ensemble E est commutative si, pour tous les éléments x, y de E, on a l'égalité :

$$x \mathrel{T} y = y \mathrel{T} x.$$

loi de « participation mystique ». Cette loi est particulièrement efficiente dans les danses et les cérémonies rituelles des « primitifs ». La raison profonde de ces cérémonies, pour ceux qui les célèbrent comme pour ceux qui y assistent, est, nous dit Lucien Lévy-Bruhl (*le Surnaturel et la Nature dans la Mentalité primitive*, P.U.F., Paris, 1963, p. 129), la « communion, la fusion mystique qui les identifie, suivant les cas, avec l'ancêtre mythique ou totémique,

homme-animal ou homme-plante, ou avec les "génies" des espèces animales et végétales, ou avec les ancêtres et les morts du groupe... »

loi des trois états. A. Comte la définit de la façon suivante : « En étudiant ainsi le développement total de l'intelligence humaine dans ses diverses sphères d'activité, depuis son premier essor le plus simple jusqu'à nos jours, je crois avoir découvert une grande loi fondamentale, à laquelle il est assujetti par une nécessité invariable, et qui me semble être solidement établie, soit sur les preuves rationnelles fournies par la connaissance de notre organisation, soit sur les vérifications historiques résultant d'un examen attentif du passé. Cette loi consiste en ce que chacune de nos conceptions principales, chaque branche de nos connaissances passe successivement par trois états théoriques différents : l'état théologique, ou fictif; l'état métaphysique, ou abstrait; l'état scientifique, ou positif. En d'autres termes, l'esprit humain, par sa nature, emploie successivement dans chacune de ses recherches trois méthodes de philosopher, dont le caractère est essentiellement différent et même radicalement opposé : d'abord la méthode théologique, ensuite la méthode métaphysique et enfin la méthode positive. De là, trois sortes de philosophies, ou de systèmes généraux de conceptions sur l'ensemble des phénomènes, qui s'excluent mutuellement : la première est le point de départ nécessaire de l'intelligence humaine, la troisième son état fixe et définitif; la seconde est uniquement destinée à servir de transition. » (Première leçon du *Cours de Philosophie positive*, éd. Hermann, 1975, Paris, p. 21.)

M

maïeutique. *n.* Il s'agit de l'art dont Socrate s'attribue (dans le *Théétète* de Platon) la spécialité et qui consiste à « accoucher » les esprits des pensées qu'ils contiennent à leur insu.

majorant. *n.* Dans un ensemble ordonné E, un majorant d'un sous-ensemble A est un élément M de E supérieur ou égal à tous les éléments de A.

markovienne. *adj.* **(chaîne).** Qualifie une chaîne de variables aléatoires $\{x_1, \dots x_k, \dots x_n\}$ telle que x_k $(2 < k \leqslant n)$ soit indépendante de toutes les variables x_i, $i \neq k$, à l'exception de x_{k-1}.

matrice. *n.* Mode de représentation d'une application linéaire, par lequel on range dans un tableau une succession de vecteurs-colonne, images des vecteurs d'une base de l'espace de départ exprimés par leurs composantes dans une base de l'espace d'arrivée.

matrice jacobienne. Soit f une application définie sur un ouvert U de $\mathbb{R}^p$ à valeurs dans $\mathbb{R}^n$, différentiable en un point $\vec{a} = (a_1, \dots a_p)$ de U. La matrice b_{ij} associée à l'application linéaire $Df(\vec{a})$ est définie par la relation :

$$b_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial x_j}(\vec{a})$$

où $(f_i)_{1 \leqslant i \leqslant n}$ désigne la famille des composantes de f; une telle matrice est appelée matrice jacobienne associée à f au point $\vec{a}$.

matrice de jeu. Matrice attachée à un jeu à deux personnes U dont l'élément U_{ij} est l'utilité à laquelle conduit l'application par le joueur A de la stratégie A_i et par le joueur B de la stratégie B_j.

maximal. *adj.* Un élément a d'un ensemble ordonné est maximal s'il n'admet pas de majorant strict, autrement dit si $x \geqslant a \Rightarrow x = a$.

médiane. *adj.* **(valeur).** La valeur médiane de la variable aléatoire X admettant la densité de probabilité $f(x)$ définie sur l'intervalle $[a, b]$, est la valeur $x_o \in [a, b]$ telle que :

$$\int_a^{x_o} f(x)\,dx = \int_{x_o}^{b} f(x)\,dx = \frac{1}{2}$$

mémoire centrale. Partie de l'unité centrale d'un calculateur constituée d'un grand nombre de registres (ou mots mémoires) destinés à stocker des informations; chaque mot mémoire est repéré par son adresse.

méromorphe. *adj.* **(fonction).** Se dit d'une fonction de variable complexe holomorphe sur un domaine D, à l'exception d'une partie de D sans points d'accumulation, formée par ses pôles.

mesure de densité. Une fonction réelle continue et positive p définit une mesure dite de densité p par rapport à la mesure de Lebesgue, par :

$$f \to \int f(x)\,p(x)\,dx.$$

Si m est une mesure positive sur X et p une fonction positive localement intégrable sur X, l'application $f \to \int f \cdot p \cdot dm$ est dite mesure de densité p pour m. C'est la généralisation de la dérivation.

mesure de Radon. Une mesure de Radon positive sur un ensemble X est une forme linéaire continue et positive sur l'espace vectoriel $\mathcal{K}$ (X) des fonctions continues sur X, nulles en dehors d'un compact de X.

méthode des moindres carrés. Méthode utilisée pour résoudre les problèmes de régression. On distingue la méthode des moindres carrés ordinaire et la méthode des moindres carrés généralisée.

métrique. *adj.* **(espace).** Se dit d'un ensemble muni d'une distance ou métrique.

métrisable. *adj.* Se dit d'un espace topologique tel qu'il existe une métrique qui engendre sa topologie. On dit encore espace *régulier*.

minimax ou **col.** *n.* U_{ij}, élément d'une matrice de jeu de rang $m \times n$ pour un jeu à deux personnes de somme nulle, est un minimax si :

$$U_{ij} \leqslant U_{ik},\ k = 1, n$$
$$U_{ij} \geqslant U_{lj},\ l = 1, m.$$

minorant. *n.* Dans un ensemble ordonné E, un minorant d'un sous-ensemble A est un élément m de E inférieur ou égal à tous les éléments de A.

mode. *n.* Le mode de la variable aléatoire X admettant la densité de probabilité $f(x)$ est la valeur x_o, si elle existe et si elle est unique, pour laquelle $f(x)$ est maximum.

moment. *n.* Le moment d'ordre n $(n \in N_+)$ de la variable aléatoire X est l'*espérance mathématique* de la variable aléatoire X^n.

moyenne. *adj.* **(valeur).** La valeur moyenne de la variable aléatoire X est l'*espérance mathématique* de X.

multinômiale. *adj.* **(loi).** La loi multinômiale de rang k est la loi de probabilité régissant le tirage répété n fois de la variable aléatoire discrète X pouvant assumer k valeurs distinctes. Si n_i est le nombre de résultats donnant la i-ème valeur x_i de X, alors :

$$\Pr(n_1, \dots n_k) = \frac{n!}{\prod_i n_i!} \prod_i p_i^{n_i}$$

où p_i est la probabilité d'obtenir x_i en un tirage et $\sum_i n_i = n$.

multiple. *n.* ou *adj.* Dans un anneau, b est un multiple de a s'il existe un élément k de l'anneau tel que $b = ka$. *Ex. :* dans $\mathbb{Z}$, 10 est un multiple de 5.

N-O

norme. *n.* Pour une variable aléatoire discrète, la norme N de la variable aléatoire est :

$$N = \sum_i F(x_i)$$

où $F(x_i)$ est la loi de probabilité associée à X. Pour une variable aléatoire continue, définie sur l'intervalle $[a, b]$, la norme est :

$$N = \int_a^b f(x)\,dx$$

où $f(x)$ est la densité de probabilité associée à X.

noyau. *n.* Partie d'un espace vectoriel E dont tous les éléments ont une image, par une application linéaire f : E → F, égale au vecteur nul de F.

optimum. *n.* Soit f une application de E dans $\mathbb{R}$. Un élément x^* de E sera dit optimum de f s'il est un maximum ou un minimum de la fonction c'est-à-dire :

$$f(x) \leqslant f(x^*)\ \forall x \in E \text{ (maximum)}$$
$$f(x) \geqslant f(x^*)\ \forall x \in E \text{ (minimum)}.$$

Si E est un espace topologique et si l'une ou l'autre de ces propriétés a lieu dans un voisinage U de x^*, on dira que l'on a affaire à un optimum local.

ordonnance. *n.* Ordre sur les paires d'éléments d'un ensemble.

ordre. *n.* Relation binaire sur un ensemble, réflexive, antisymétrique et transitive. Un ordre est total si deux éléments quelconques sont toujours comparables; sinon, il est partiel.

orientable. *adj.* Qualifie une surface admettant une décomposition en triangles (gauches) orientés, telle que l'ensemble des orientations n'admette pas de « contradiction ».

ouvert. *adj.* Qualifie un sous-ensemble d'un espace topologique tel que pour tout point de ce sous-ensemble il existe une boule ouverte ayant ce point pour centre, et contenue dans le sous-ensemble.

P

parabole. *n.* Une parabole est une conique dont l'équation peut se mettre sous la forme :

$$y^2 - 4\,cx = 0.$$

paraboloïde elliptique. Le paraboloïde elliptique est une quadrique qui peut se représenter par l'équation :

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 2\,z.$$

paraboloïde hyperbolique. Le paraboloïde hyperbolique est une quadrique qui peut se représenter par l'équation :

$$-\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 2\,z.$$

partie (d'un ensemble). Soit E un ensemble; tout ensemble A tel que $A \subset E$ est une partie de E.

partition (d'un ensemble). Recouvrement d'un ensemble par des parties disjointes.

période. *n.* On dit qu'une application f de $\mathbb{R}$ dans $\mathbb{R}$ admet la période T ou est périodique de période T ou encore est T-périodique si pour tout x réel on a :

$$f(x + T) = f(x).$$

périphérique. *n.* Organe extérieur à l'unité centrale et permettant à celle-ci d'échanger des informations avec le monde extérieur.

plan. *n.* L'espace étant rapporté à un système orthonormé, un plan est le lieu des points vérifiant une équation de la forme : $ax + by + cz + d = 0$.

pleine. *adj.* **(partie).** La partie pleine d'un ensemble est cet ensemble lui-même.

plus grand élément. Dans un ensemble ordonné E, un plus grand élément d'un sous-ensemble A est un élément de A supérieur ou égal à tous les éléments de A qui lui sont comparables.

plus petit élément. Dans un ensemble ordonné E, un plus petit élément d'un sous-ensemble A est un élément de A inférieur ou égal à tous les éléments de A qui lui sont comparables.

Poisson (loi de). Loi de probabilité F (n) associée à la variable aléatoire discrète X, définie sur N_+, telle que :

$$F(n) = \frac{e^{-m}\,m^n}{n!},$$

où $m = E(X) \in R_+^*$.

premier. *adj.* **(nombre).** Se dit d'un nombre entier relatif n'admettant pas d'autres diviseurs que lui-même et l'unité.

préordre (sur un ensemble). Relation binaire, réflexive et transitive.

primitive. *n.* La fonction G dérivable en tout point d'un intervalle I est une primitive de la fonction g sur I si sa dérivée en tout point de I est égale à g.

principe de récurrence ou **d'induction complète.** Ce principe dit que, si un ensemble d'entiers naturels S contient 0 et s'il contient $n + 1$ à chaque fois qu'il contient n, alors S coïncide avec l'ensemble $\mathbb{N}$ de tous les entiers naturels.

probabilité intrinsèque. Grandeur objective caractérisant un événement aléatoire, telle que la fréquence d'apparition de cet événement dans une suite d'épreuves répétées en soit une approximation. Par extension mathématique, on peut appeler probabilité toute application P d'un espace probabilisable $(\mathcal{E}, E)$ dans $\mathbb{R}_+$ satisfaisant aux axiomes :

$$\forall a \in (\mathcal{E}, E) \quad 0 \leqslant P(a) \leqslant 1, \quad P(\mathcal{E}) = 1$$

et telle que pour tout couple d'événements exclusifs $a, b \in (\mathcal{E}, E)$:

$$P(a \cup b) = P(a) + P(b).$$

problème aux limites. Recherche des solutions d'une équation aux dérivées partielles, satisfaisant à une ou plusieurs conditions initiales (on dit encore *problème de Cauchy*).

programme. *n.* Ensemble des informations (instructions, valeurs numériques, réservations de zones mémoire pour stocker des données) nécessaires à la résolution d'un problème donné.

propre. *adj.* 1° *Sous-espace :* partie d'un espace vectoriel formée par tous les vecteurs propres ayant la même valeur propre associée. 2° *Valeur, vecteur :* un vecteur V colinéaire à son image par une application linéaire est dit vecteur propre de cette application ; le rapport de colinéarité est dit valeur propre associée.

propre. *adj.* **(partie).** Partie d'un ensemble qui n'est ni vide ni pleine.

puissance du continu. Cardinal d'un ensemble équipotent à l'ensemble $\mathbb{R}$ des nombres réels.

puissance d'un ensemble. Cardinal de cet ensemble.

Q-R

quadrique. *n.* Les quadriques sont les surfaces décrites par des coniques situées dans des plans parallèles lorsque leurs sommets décrivent d'autres coniques. C'est le cas de toute surface dont l'équation en coordonnées cartésiennes est du second degré en x, y et z.

racine carrée du nombre a. Racine positive du polynôme $X^2 - a$, où a est un nombre réel positif ; on la note $\sqrt{a}$.

raisonnement indirect. Exprimé symboliquement par la formule :

$$[(\neg p \rightarrow q) \wedge (\neg p \rightarrow \neg q)] \rightarrow p.$$

Il permet d'établir un énoncé p en montrant qu'à partir de la négation de p, on peut déduire des contradictions. Supposons, par exemple, qu'on veuille établir « qu'il existe un entier n ayant la propriété P. On partira de sa négation : « Aucun entier n n'a la propriété P. » Les contradictions qui s'en déduisent montrent « qu'il est faux qu'aucun entier n n'a la propriété P ». Jusqu'à ce point, les mathématiciens de toute obédience acceptent la conclusion. Mais les intuitionnistes se séparent des classiques en refusant de passer de cette conclusion à la suivante : « Il existe un entier n qui a la propriété P », tant qu'on n'a pas effectivement exhibé ou « construit » un tel entier. Le raisonnement indirect est donc un type de preuve non constructive, acceptée sans problèmes seulement dans la mathématique classique.

rang. *n.* Le rang d'une application linéaire, ou de sa matrice relativement à deux bases données, est la dimension du sous-espace image.

rationnel. *adj.* **(nombre).** Se dit d'un nombre qui peut être représenté par le quotient de deux nombres entiers.

rayon de convergence. Rayon du cercle du plan complexe tel qu'en tout point intérieur une série entière donnée soit convergente, et qu'en tout point extérieur elle soit divergente. On ne peut rien dire *a priori* du comportement de la série en un point de la circonférence de ce cercle.

réciprocité. *n.* Propriété de la transformation de Fourier, telle que la transformation de Fourier est la réciproque de sa conjuguée.

recouvrement. *n.* Un recouvrement ouvert (respectivement fermé) d'un sous-espace F d'un espace topologique E est une collection d'ouverts (respectivement de fermés) de E tels que leur réunion contienne F. En d'autres termes, les sous-ensembles $A_1, ..., A_n$ forment un recouvrement de l'ensemble E si leur réunion contient E.

redondance. *n.* Caractérise une information formellement superflue. Pratiquement, elle peut être utilisée pour des raisons de sécurité.

réduite. *adj.* **(variable aléatoire).** Soit X une variable aléatoire admettant une variance σ^2 (X). La variable aléatoire $Y = X/\sigma^2(X)$ est la variable aléatoire réduite associée à X.

registre. *n.* Association de plusieurs bistables permettant de stocker un mot ou un nombre binaire de plusieurs bits.

registre d'adresse mémoire. Registre dans lequel est chargée l'adresse d'un mot mémoire pour y être décodée avant une opération de lecture ou d'écriture.

registre de base. Registre dans lequel est chargée l'adresse de base d'une séquence d'instruction, en début de séquence, lorsque l'adressage dans le calculateur se fait par base et déplacement.

registre de données mémoire. Registre pour lequel transitent toutes les informations échangées entre la mémoire centrale et d'autres parties du calculateur.

registre d'index. Registre dont le contenu est ajouté à l'adresse spécifiée dans l'instruction lorsqu'il s'agit d'un adressage indexé.

registre d'instruction. Registre dans lequel est chargée l'instruction binaire pour y être décodée avant exécution.

règlement. *n.* Résultat chiffré d'une partie (théorie des jeux).

régression. *n.* Méthode statistique consistant à « expliquer » une variable (régression simple) ou plusieurs (régression multiple) en fonction d'autres variables.

régulière. *adj.* **(chaîne).** Chaîne d'événements aléatoires dont la matrice stochastique P de rang $m \times n$ est telle que :

$$\forall i \; (1 \leqslant i \leqslant m) \quad \forall j \; (1 \leqslant j \leqslant n)$$

$$\exists k \in \mathbb{N}_+^* \quad (P^k)_{ij} \neq 0.$$

relation (entre deux ensembles). Relation définie par un triplet (E, F, G) où E est l'ensemble de départ, F l'ensemble d'arrivée et G le graphe de la relation, c'est-à-dire l'ensemble des couples (de E x F) pour lesquels la relation est vraie.

représentant (d'une classe d'équivalence). Un quelconque des éléments de cette classe. La connaissance d'un représentant d'une classe suffit à déterminer celle-ci.

résidu. *n.* Nom donné au coefficient du terme en $1/z$ dans le développement en série de Laurent d'une fonction de variable complexe au voisinage d'un point singulier.

résidu aléatoire. Variable aléatoire mesurant l'écart entre la variable à expliquer et une fonction préalablement choisie des variables explicatives.

résoluble par radicaux. Propriété d'une équation algébrique selon laquelle ses racines s'expriment à l'aide des quatre opérations et de l'extraction de racines m-ièmes.

réunion. *n.* Pour deux ensembles, c'est l'ensemble des éléments qui appartiennent à l'un ou à l'autre des ensembles. *Ex. :*

$$x \in A \cup B \Leftrightarrow [x \in A \textbf{ ou } x \in B].$$

Désigne également l' « opération » qui associe à deux ensembles leur réunion, notée $\cup$.

rupture de séquence. Passage d'une instruction à une autre instruction qui n'est pas forcément située à l'adresse suivante.

S

semi-norme. *n.* Une semi-norme sur un espace vectoriel E est une fonction $p : E \rightarrow \mathbb{R}^+$ ayant les propriétés suivantes :

1° $p(\vec{x}) \geqslant 0 ; \; p(\vec{0}) = 0$

2° $p(\lambda\vec{x}) = |\lambda| \; p(\vec{x}) \; \lambda \in \mathbb{R}$

3° $p(\vec{x} + \vec{y}) \leqslant p(\vec{x}) + p(\vec{y})$.

Une norme est une semi-norme.

séparé. *adj.* Un espace topologique E est dit séparé si pour tout couple de points x et y de E il existe deux ouverts d'intersection vide, l'un contenant x et l'autre y.

séquentiel. *adj.* **(circuit).** Qualifie un circuit électronique logique, dont l'état dépend à la fois de l'état des entrées et des états précédents.

série. *n.* Une série numérique est définie par une suite (a_n) de nombres — avec $n \in \mathbb{N}$ et par la suite (S_n) $n \in \mathbb{N}$ telle que $S_p = a_o + a_1 + ... a_p$ pour tout $p \in \mathbb{N}$ (suite des sommes partielles).

série entière. Une série entière est une série de fonctions dont le terme général est un monôme $a_n (z - z_o)^n$; on dit que z_o est le centre de la série.

série de Fourier. Série trigonométrique associée à une fonction T-périodique f. Une des façons de l'exprimer est :

$$\sum_{n \in \mathbb{Z}} c_n e^{inx},$$

en posant :

$$c_n = \frac{1}{T} \int_0^T f(x) \, . \, e^{-\frac{2\pi}{T} inx} \, dx.$$

signe, sens, dénotation. Selon F. de Saussure, un *signe* est un phénomène double où un signifiant (vocal, écrit, gestuel) est relié à un signifié qui est la contrepartie conceptuelle du signifiant. Le signifié d'un signe est solidaire d'une langue donnée, naturelle ou artificielle.

Le *sens*, lui, est un contenu de pensée (voir les quelques indications sur Frege dans le texte *Logique*) essentiellement susceptible d'être traduit par d'autres signes dans une autre langue. Mais le sens d'une expression (suite de signes) ne se livre que de façon différentielle, c'est-à-dire par rapport à et en fonction du contexte de l'expression. L'analyse du sens d'une expression n'implique aucun renvoi du langage à quelque chose d'extérieur à lui et se maintient dans l'enceinte du discours.

Mais le discours se rapporte aussi aux choses, réalités extralinguistiques, et ce rapport, désigné comme *dénotation* ou référence, institue la question de la valeur de la vérité d'une expression.

similarité (indice de). Indice de mesure de proximité, utilisé dans les méthodes statistiques de classification.

similitude. *n.* Correspondance biunivoque entre deux figures géométriques, telle que deux segments homologues soient toujours proportionnels avec le même rapport k, appelé rapport de similitude.

simple. *adj.* **(extension).** Se dit d'une extension L d'un corps K telle qu'il existe $l \in L$ tel que L soit le corps K (l) engendré par K et l.

sous-anneau. *n.* Un sous-anneau B d'un anneau A est une partie B de A qui est elle-même un anneau pour les lois de A induites sur B.

sous-corps. *n.* Un sous-corps L d'un corps K est une partie L de K qui est elle-même un corps pour les lois induites sur L de celles de K.

sous-ensemble. *n.* Un sous-ensemble A de l'ensemble E est un ensemble tel que $A \subset E$ (voir aussi *partie d'un ensemble*).

sous-groupe. *n.* Si G est un groupe, une partie H de G est un sous-groupe de G si H est un groupe pour la loi induite de celle de G. H sera un sous-groupe de G si et seulement si la propriété suivante est vérifiée : si $x \in H$ et $y \in H$, alors $xy^{-1} \in H$.

sous-groupe distingué. Un sous-groupe H d'un groupe G est un sous-groupe distingué (ou invariant) de G si, pour tout élément x de G, on a :

$$xHx^{-1} = H.$$

sous-programme. *n.* Partie de programme, pouvant être exécutée plusieurs fois, à la suite d'appels pouvant figurer en n'importe quel point du programme. Le sous-programme n'est stocké qu'une fois, même s'il doit être exécuté plusieurs fois.

spectre. *n.* Ensemble de toutes les valeurs propres d'une application linéaire.

sphère. *n.* Une sphère est, dans l'espace, le lieu des points situés à une distance r constante d'un point fixe C (α, β, γ). Son équation est :

$$(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2 + (z - \gamma)^2 = r^2.$$

sphérique. *adj.* 1° *Angle :* angle plan que font deux tangentes à deux côtés d'un triangle sphérique en leur point d'intersection. 2° On désigne par *excès sphérique* la quantité dont la somme des angles d'un triangle sphérique dépasse celle des angles d'un triangle plan. 3° Un *triangle sphérique* est la partie d'une surface sphérique délimitée par trois arcs de grand cercle (chacun des arcs étant plus petit qu'un grand demi-cercle).

stochastique. *adj.* **(processus, modèle).** Le calcul classique des probabilités s'applique à des épreuves où chaque résultat possible est un nombre. Cependant, bien des situations réelles relèvent de modèles aléatoires de nature plus complexe, par exemple l'évolution d'une population donnée en fonction du temps.
— Une probabilité p est une application d'une classe $\mathcal{B}$ de parties d'un ensemble Ω ($\mathcal{B}$ ayant les propriétés d'une tribu), sur le segment fermé [0, 1] (la probabilité d'un événement *certain* est évidemment égale à 1). On appelle espace de probabilité le triplet (Ω, $\mathcal{B}$, p).
— Une variable aléatoire à valeurs dans Ω_1 est une application (mesurable) d'un espace de probabilité (Ω, $\mathcal{B}$, p) dans Ω_1 muni d'une tribu $\mathcal{B}_1$.
— Un *processus stochastique* est une famille de variables aléatoires, c'est-à-dire qu'à tout temps t est associée une variable aléatoire prenant ses valeurs dans un ensemble numérique. Un processus stochastique est ainsi une fonction aléatoire dont l'argument est le temps, dont le déroulement est à la fois irréversible et inéluctable.

stratégie. *n.* Ensemble de règles déterminant la conduite d'un joueur, compte tenu de toutes les réactions possibles de l'adversaire (ou des adversaires), jusqu'au règlement final de la partie.

stratégie dominante. Stratégie A_k telle que, quelle que soit la stratégie B_i choisie par l'adversaire, elle ne conduise pas à un règlement inférieur à une autre stratégie A_j. La matrice de jeu U de rang $m \times n$ est donc telle que :

$$\forall i \ (1 \leqslant i \leqslant n)$$
$$\forall j \ (1 \leqslant j \leqslant m),\ U_{ki} \geqslant U_{ji}.$$

stratégie mixte. Manière de conduire un jeu telle que, au cours d'une série répétée de parties, la stratégie appliquée varie d'une partie à l'autre de façon aléatoire, la stratégie A_i ayant une probabilité définie P_i d'être appliquée.

suite. *n.* En mathématiques, une suite est une application de l'ensemble $\mathbb{N}$ des nombres entiers naturels dans un ensemble quelconque E. Cette application associe à chaque entier n de $\mathbb{N}$ un élément e (unique) de E d'où la notation : $e_0, e_1, e_2, \ldots, e_n, \ldots$

suite de choix. Ce concept est dû à Brouwer. On le définira sur l'exemple simple des nombres naturels. Une suite α est obtenue par des choix successifs, tels qu'on puisse imposer au cours du processus des restrictions sur les choix ultérieurs. C'est donc une suite de couples (a_i, R_i), où R_i représente les conditions sur les suites d'entiers; ces conditions se restreignent progressivement, c'est-à-dire que $R_i\alpha$ implique $R_{i+n}\alpha$. Les suites de choix ne sont pas des objets achevés; à chaque instant, on n'en connaît qu'un segment initial.

supplémentaires. *n.* Sous-espaces vectoriels d'un espace vectoriel E n'ayant que le vecteur nul en commun et engendrant E par addition.

sur-corps. *n.* Un corps K est dit sur-corps d'un corps L si L est un sous-corps de K.

symbolique. *adj.* **(calcul).** Méthode de résolution des équations de convolution partant du fait que la transformée de Laplace d'un produit de convolution est égale au produit simple des transformées. On change alors de structure algébrique de référence.

système d'exploitation. Ensemble de programmes destinés à l'exploitation la plus facile possible du calculateur par le plus grand nombre possible d'utilisateurs, ceux-ci n'étant pas forcément des spécialistes du matériel utilisé.

système fondamental de voisinages. Soit $(V_i)_{i \in I}$ une famille de voisinages d'un élément a d'un espace topologique E. On dit qu'il s'agit d'un système fondamental de voisinages si tout voisinage de a contient l'un des V_i.

système de référence cartésien (dans le plan et l'espace). Un système cartésien est la donnée de deux (dans le plan) ou de trois (dans l'espace) droites orientées se coupant en un point O (origine), sur chacune desquelles est fixée un vecteur unitaire.

système orthonormé. Un tel système est un système cartésien dans lequel les vecteurs unitaires sont de longueurs égales et les axes orthogonaux.

T-U-V-W-Z

table de vérité. Représentation des fonctions logiques par une table où figurent toutes les intersections de base et la valeur correspondante de la fonction.

tableau de contingence. Tableau construit de telle sorte qu'à l'intersection de la ligne i et de la colonne j on trouve le nombre d'individus possédant à la fois les caractères i et j. Un tel tableau se prête généralement bien à une analyse des correspondances.

temps réel. Mode d'utilisation d'un calculateur, tel que celui-ci travaille au rythme d'un phénomène extérieur pour acquérir des données concernant ce phénomène et les traiter au fur et à mesure qu'elles arrivent.

tenseur (en dualité). Un tenseur covariant d'ordre p sur un espace vectoriel E est une forme p-linéaire sur l'espace E. Un tenseur contravariant d'ordre q sur E est une forme q-linéaire sur l'espace dual E^*.

tensoriel. *adj.* **(produit).** Forme multilinéaire de plusieurs tenseurs, qui prend pour valeur le produit des valeurs prises par ces tenseurs. Le produit tensoriel peut être contracté en opérant, *par ex.*, une contraction d'indices sur les composantes du produit.

terme. *n.* En logique aristotélicienne, on désigne par là les éléments autres que la copule qui composent la phrase type construite sur le moule : « Socrate est mortel »; dans cet exemple *Socrate* et *mortel* sont des termes; les termes sont donc les sujets ou prédicats des propositions.
Au sens technique de la logique mathématique contemporaine, « terme » se définit par récurrence selon les règles (1) et (2) :
(1) Une variable ou une constante est un terme;
(2) Pour un symbole de fonction f et des termes $t_1, \ldots t_m$, $f\,(t_1, \ldots t_m)$ est un terme (voir texte *Logique*,).

théorème de Bolzano-Weierstrass. Il s'énonce comme suit : « Tout ensemble de nombres réels infini borné admet au moins un point d'accumulation », ou encore : « De toute suite de réels bornée on peut extraire au moins une suite partielle convergente. » La démonstration de ce théorème fondamental de l'analyse repose sur la loi du tiers exclu, et c'est pourquoi il tombe sous la critique des intuitionnistes.

théorème de Zorn. Théorème dont l'énoncé est le suivant : tout ensemble ordonné inductif admet un élément maximal.

théorie de la connaissance. On appelle ainsi toute théorie philosophique qui s'interroge sur la nature et la portée de la connaissance humaine, sur son degré d'objectivité et la mesure dans laquelle nous pouvons ajouter foi à ce qu'elle prétend nous apprendre sur la réalité. En demandant ce qu'est la connaissance, par opposition à la croyance et à l'opinion, et en mettant en doute l'apport des sens, Platon a élaboré la première théorie de la connaissance.

théorie de la réminiscence. C'est la plus vieille théorie qui correspond à celle, plus moderne, de l'*a priori*. Partant de l'impossibilité de donner une explication expérimentale satisfaisante et cohérente aux vérités mathématiques et, de manière générale, à toutes les propriétés intelligibles, Platon établit cette doctrine pour montrer que la mathématique n'est que la reproduction ou la répétition assourdie de souvenirs, la réeffectuation d'un savoir mathématique séparé du monde sensible, inaccessible aux contingences du devenir et du temps.

théorie des « visions du monde ». Le terme allemand, dû à Dilthey, est « Weltansehbauungen ». Dilthey pense que l'homme a une indéracinable tendance à forger des interprétations globales de la réalité, des « visions du monde », c'est-à-dire des systèmes plus ou moins cohérents d'idées et de représentations, de principes éthiques et d'expressions religieuses et artistiques. Ces systèmes, subjectifs et relatifs, constituent néanmoins un aspect authentique de la vie.

topologie. *n.* Un ensemble E est muni d'une topologie si on a défini sur E une famille de parties, appelées parties ouvertes, vérifiant les propriétés suivantes :
— E et $\varnothing$ sont des ouverts;
— toute réunion (finie ou infinie) d'ouverts est un ouvert;
— toute intersection finie d'ouverts est un ouvert.

topologie affaiblie du primal. On appelle topologie affaiblie de E la topologie d'espace vectoriel définie par la famille de semi-normes :

$$P_{A'}\,(\vec{e}) = \sup \left| < e', e > \right| \overleftarrow{e'} \in A'$$

A' partie finie de E'.

topologie faible du dual. On appelle topologie faible de E' la topologie d'espace vectoriel semi-normé, définie par la famille de semi-normes :

$$P_A\,(\overleftarrow{e'}) = \sup \left| < e, e' > \right| \vec{e} \in A$$

A partie finie de E.

topologie forte du dual. Soit E un espace vectoriel normé, E' son dual topologique. On appelle topologie forte du dual la topologie définie par la norme :

$$\|\overleftarrow{e'}\| = \sup \left| < \overleftarrow{e'}, \vec{e} > \right| \quad \|\vec{e}\| \leqslant 1.$$

transcendant. *adj.* **(nombre).** Nombre qui n'est racine d'aucun polynôme à coefficients entiers; e, π sont des nombres transcendants.

transcendante. *adj.* **(extension).** Extension simple K (l) d'un corps K telle qu'aucun polynôme non nul à coefficients dans K n'admette l pour racine.

transfini. *adj.* **(nombre).** Cardinal d'un ensemble contenant un ensemble équipotent à l'ensemble $\mathbb{N}$ des entiers naturels.

tribu. *n.* Famille de parties d'un ensemble, formant un clan, telle qu'une réunion dénombrable de parties soit encore dans la famille.

ultramétrique. *n.* Distance (ou métrique) particulière utilisée en classification.

union (de deux ensembles). Voir *réunion*.

unité arithmétique et logique. Ensemble de circuits réalisant les opérations de types arithmétique et logique.

unité centrale. Constituée de l'unité arithmétique et logique, de l'unité de contrôle et de la mémoire centrale, elle constitue un ensemble indépendant pouvant exécuter des programmes. Elle communique avec le monde extérieur par les périphériques.

unité de contrôle. Ensemble de circuits assurant le bon déroulement des opérations. L'unité de contrôle reçoit les instructions une à une, les décode et les fait exécuter.

utilité. *n.* Règlement d'un jeu tel qu'une transformation linéaire appliquée à l'ensemble des règlements n'affecte pas la conduite des joueurs.

valeur absolue (d'un nombre réel). x étant un nombre réel, on appelle valeur absolue de x et on note $|x|$ le nombre réel positif égal à x si x est positif et à $-x$ si x est négatif.

variance. *n.* Soit X une variable aléatoire. On appelle variance σ^2 associée à X l'espérance mathématique du carré de la variable centrée correspondante :

$$\sigma^2 = E(X - E(X))^2.$$

vide. *adj.* **(ensemble** ou **partie).** C'est l'ensemble qui n'a aucun élément, noté $\varnothing$. *Ex. :* $\forall x, x \notin \varnothing$. La mathématique n'a pas horreur du vide : on rencontre souvent l'ensemble vide, mais il n'y en a qu'un.

voisinage. *n.* Toute partie d'un espace topologique E contenant au moins un ouvert contenant lui-même un point $a \in E$ est dite voisinage de a.

NOTE RELATIVE AU GÉNÉRIQUE DU VOLUME XIII

Ont collaboré à ce volume :

M. BELLEC, pour les ensembles, les nombres.
M. BELLEC et C. PARDOUX, pour l'analyse de données.
B. GOLDFARB et J. THÉPOT, pour l'introduction aux mathématiques.
B. GOLDFARB, pour l'algèbre linéaire, les équations algébriques, l'analyse, le calcul tensoriel.
R. HARA, pour le langage ensembliste.
R. LESTIENNE, pour statistiques et probabilités.
C. PARDOUX, pour la géométrie, la trigonométrie, la topologie, les courbes et surfaces.
Y. RIO, pour l'introduction à l'informatique.
H. SINACEUR, pour mathématiques et philosophie.
A. et H. SINACEUR, pour logique.
A. SINACEUR, pour mathématiques et société,
mathématiques et pédagogie, histoire des mathématiques.
C. SOFFER-SACOTTE, pour les structures algébriques, la géométrie analytique.
J. THÉPOT, pour l'analyse combinatoire, les graphes, l'analyse fonctionnelle,
le calcul numérique, les mathématiques financières
et les mathématiques économiques.

ERRATA

Page 39, dans le paragraphe « la divisibilité », 6e et 7e lignes, lire : — il existe dans $\mathbb{Z}$ un élément neutre pour la multiplication, le nombre 1, tel que $a1 = 1a = a$.

Page 181, légende en bas, lire :

▼ Figure 10 : distribution de probabilité d'observer en une seconde, k désintégrations d'une substance radio-active subissant en moyenne 10 désintégrations par seconde.

SYMBOLES MATHÉMATIQUES USUELS

$\Rightarrow$	*implique*
$\Leftrightarrow$	*équivalent à*
$\forall$	*quel que soit... (ou : pour tout...)*
$\exists$	*il existe au moins un...*
$R \vee S$	*disjonction* (R *ou* S)
$R \wedge S$	*conjonction* (R *et* S)
$\neg R$	*négation (non* R*)*
$[a, b]$	*intervalle fermé d'origine a d'extrémité b*
$]a, b]$	*intervalle semi-ouvert à gauche*
$[a, b[$	*intervalle semi-ouvert à droite*
$]a, b[$	*intervalle ouvert*

ENSEMBLES DE NOMBRES

$\mathbb{N}$	*ensemble des entiers naturels*
$\mathbb{N}^*$	*ensemble des entiers naturels,* 0 *exclu*
$\mathbb{D}$	*ensemble des nombres décimaux*
$\mathbb{Q}$	*ensemble des nombres rationnels*
$\mathbb{Q}^*$	*ensemble des nombres rationnels,* 0 *exclu*
$\mathbb{R}$	*ensemble des nombres réels*
$\mathbb{R}^*$	*ensemble des nombres réels,* 0 *exclu*
$\mathbb{C}$	*ensemble des nombres complexes*

SYMBOLES DE LA THÉORIE DES ENSEMBLES

$\varnothing$	*ensemble vide*
$\{a, b\}$	*ensemble ayant pour éléments a et b*
Card E	*cardinal de l'ensemble* E
$\in$	*appartient à (ou : est élément de)*
$\notin$	*n'appartient pas à*
$\subset$	*est inclus dans*
$\not\subset$	*n'est pas inclus dans*
$\cup$	*réunion*
$\cap$	*intersection*
$\bigcup_{i \in I} E_i$	*réunion d'un ensemble d'ensembles (réunion de la famille* E_i *pour i appartenant à* I*)*
$\bigcap_{i \in I} E_i$	*intersection d'un ensemble d'ensembles*
$E \times F$	*produit cartésien de deux ensembles* E *et* F (E *croix* F)
(x, y)	*couple*
(x, y, z)	*triplet*
$(x_1, x_2, \ldots x_n)$	*n-uplet*
$\prod_{i \in I} E_i$	*produit cartésien de la famille* E_i *pour i appartenant à* I
E^n	*produit cartésien de n ensembles égaux à* E
$E \triangle E$	*différence symétrique de deux ensembles*
$\complement_E F$	*complémentaire de* F *dans* E
$\mathcal{P}(E)$	*ensemble des parties d'un ensemble* E

RELATIONS

$x \equiv y$ *(mod.* $\mathcal{R}$*)*	*x congru à y modulo* $\mathcal{R}$
$E/\mathcal{R}$	*ensemble quotient de l'ensemble* E *par la relation d'équivalence* $\mathcal{R}$
$\preccurlyeq \quad \leqslant$	*relation d'ordre*
$\prec \quad <$	*relation d'ordre strict*
$x \mathcal{R} y$	*x est lié à y par la relation* $\mathcal{R}$
$f : x \mapsto f(x)$	*x a pour image f (x) par l'application f*
$f : E \rightarrow F$ ou $E \xrightarrow{f} F$	*application f d'un ensemble* E *dans un ensemble* F
Id E	*application identique de* E
f^{-1}	*application réciproque de l'application f*
$f \circ g$	*composé des applications f et g (f rond g)*

AUTRES SYMBOLES

$\sum_{i=1}^{n} x_i$	*somme des n éléments* $x_1, x_2, \ldots x_n$
$\prod_{i=1}^{n} x_i$	*produit des n éléments* $x_1, x_2, \ldots, x_n$
$\frac{df}{dx}$ *ou* $f'(x)$	*dérivée de f*
df	*différentielle de f*
$\frac{\partial f}{\partial x_i}$	*i-ième dérivée partielle de f*
dfx_0 *ou* dx_0f	*différentielle de f au point* x_0
$\int f(x)\,dx$	*intégrale de f.* $\iint$ *intégrale double.*
$\lvert x \rvert$	*valeur absolue de x ou module de x*
$\lVert x \rVert$	*norme de x*
$n!$	*factorielle n*
$\alpha, \beta, \lambda, \mu$	*scalaires*
Ω	*ensemble d'opérateurs*
grad. f	*gradient de la fonction f*
div. V	*divergence du champ de vecteurs* V
rot. V	*rotationnel du champ de vecteurs* V

INDEX DES NOMS CITÉS

Les références sont données par l'indication du numéro de la page où se trouve le terme, suivi, le cas échéant, des lettres *a* ou *b* se rapportant respectivement à la colonne de gauche ou à la colonne de droite de chaque page.

Les références sont données, pour les illustrations, par le numéro de la page en caractères gras et, pour le texte, par le numéro de la page en caractères maigres pour une simple citation, et en italique pour un développement plus complet.

Pour les différentes variantes se rattachant à un même terme, un astérisque indiquera le renvoi à ce dernier. *Ex. :*

compteur ordinal
* C.O.
C.O. (compteur ordinal) 246 a

F

G

H

I

J

L

M

N

O

P

Q

R

S

T

U

V

Z

GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

MATHÉMATIQUES

GRANGE BATELIÈRE, ÉDITIONS ATLAS, PARIS - ÉDITIONS KISTER, GENÈVE
ÉDITIONS ÉRASME, BRUXELLES-ANVERS

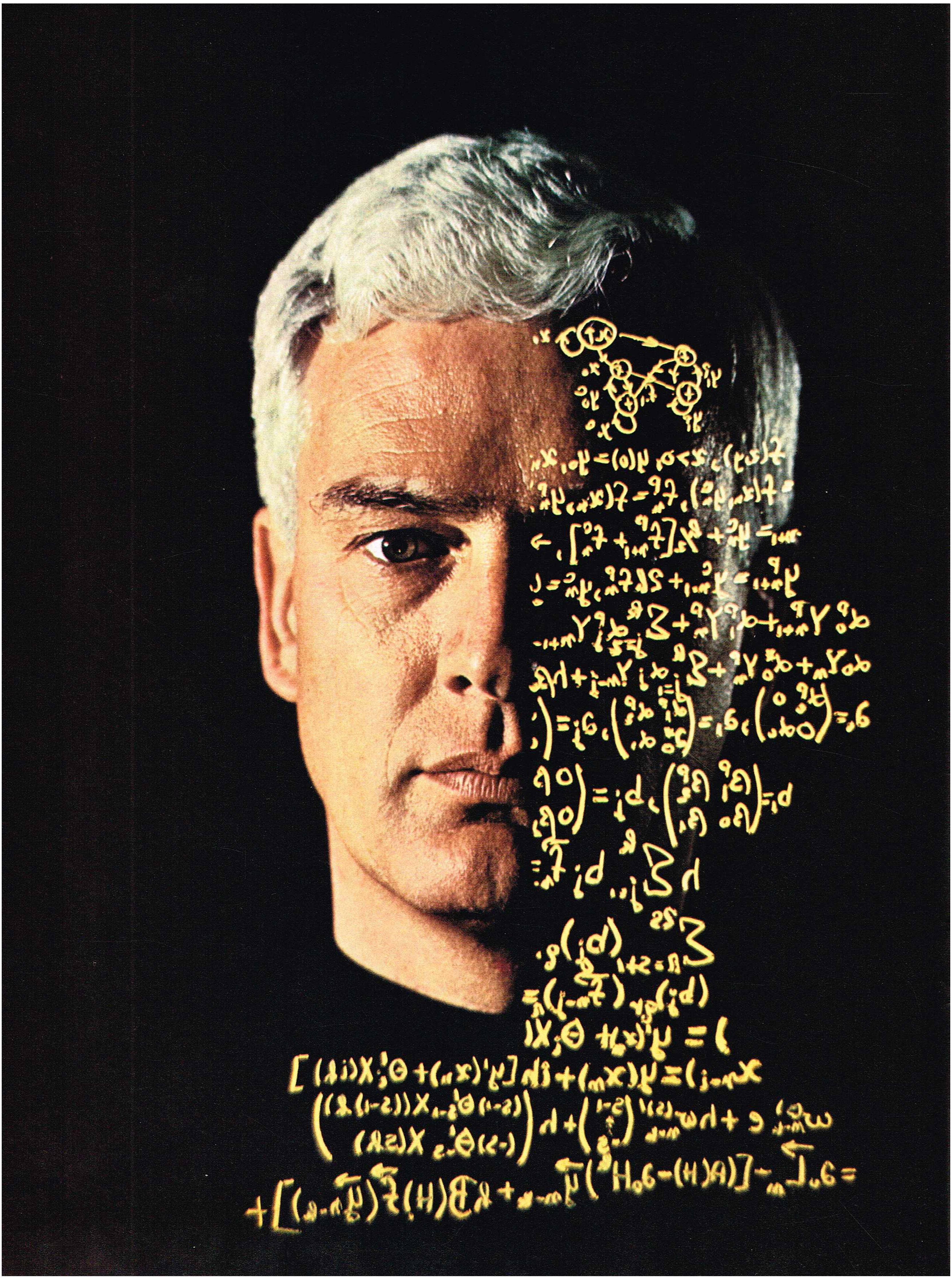

Publiée sous le haut patronage de :
Messieurs les professeurs :
Jean DORST, membre de l'Institut,
Charles FEHRENBACH, membre de l'Institut,
Roger HEIM, membre de l'Institut
Monsieur l'amiral André JUBELIN,
Messieurs les professeurs :
Pierre LÉPINE, membre de l'Institut,
Louis LEPRINCE-RINGUET, de l'Académie française,
Jean-François LEROY, professeur au Muséum national d'histoire naturelle,
Henri NORMANT, membre de l'Institut,
Monsieur Jacques PICCARD, docteur ès sciences h.c.

Ont collaboré à ce volume :

M. BELLEC, pour les ensembles, les nombres.
M. BELLEC et C. PARDOUX, pour l'analyse de données.
B. GOLDFARB et J. THÉPOT, pour l'introduction aux mathématiques.
B. GOLDFARB, pour l'algèbre linéaire, les équations algébriques, l'analyse, le calcul tensoriel.
R. HARA, pour le langage ensembliste.
R. LESTIENNE, pour statistiques et probabilités.
C. PARDOUX, pour la géométrie, la trigonométrie, la topologie, les courbes et surfaces.
Y. RIO, pour l'introduction à l'informatique.
H. SINACEUR, pour mathématiques et philosophie, logique, mathématiques et société, mathématiques et pédagogie, histoire des mathématiques.
C. SOFFER-SACOTTE, pour les structures algébriques, la géométrie analytique.
J. THÉPOT, pour l'analyse combinatoire, les graphes, l'analyse fonctionnelle, le calcul numérique, les mathématiques financières et les mathématiques économiques.

Les schémas portant la référence Richard Colin ont été réalisés d'après des croquis fournis par les auteurs.

Réalisation	IDÉES ET ÉDITIONS 16, avenue de Friedland, 75008 Paris
Comité de direction	Simone DEVAUX, Uberto TOSCO.
Rédaction	Patrick PHLIPONEAU, Françoise MENU, Marie-Noëlle PAILLETTE, Vanina DORÉ, Monique LIONS-GENTIL.
Recherche de l'illustration	Mathilde RIEUSSEC.
Mise en pages	Tito TOPIN et Serge BROCHE.
Illustrations techniques	Richard COLIN.
Coordinateur des dessins	Mario LOGLI.
Fabrication	Sylvia COLIN, Jocelyne TÉPÉNIER.
Directeur de la publication	G. BORDES.

Dans ce volume :

LES MATHÉMATIQUES

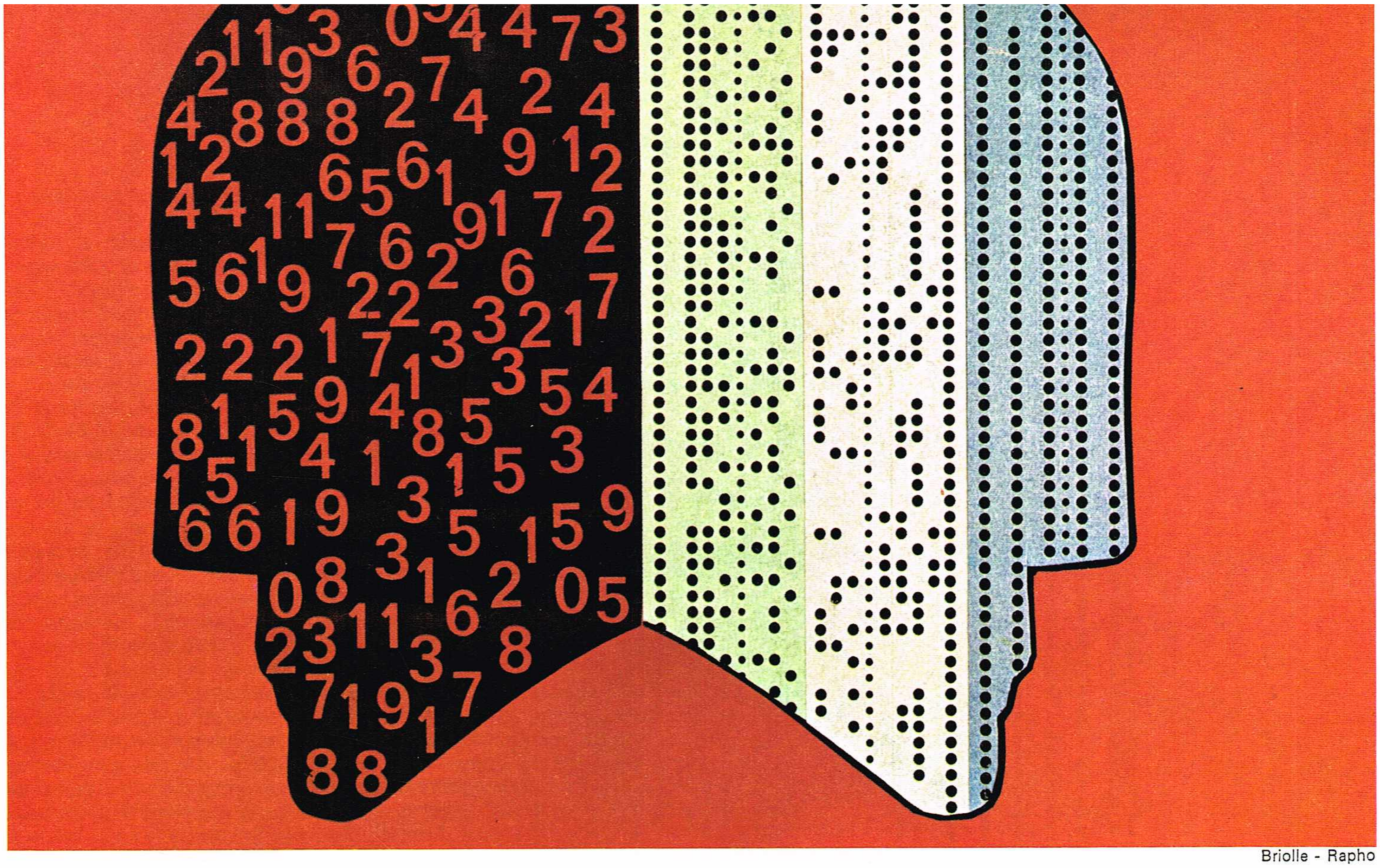

Briolle - Rapho

▲ La carte perforée, *élément indispensable, de nos jours, de l'utilisation du calculateur électronique, a été inventée, sous une forme moins élaborée, il y a 250 ans ; on s'en servit pour la première fois sur des métiers à tisser.*

LES MATHÉMATIQUES

Au cours de ces cinquante dernières années, la part consacrée aux mathématiques dans les enseignements des lycées et des collèges n'a cessé d'augmenter. Impossible donc aujourd'hui d'espérer revêtir la robe de l'avocat, la blouse du chirurgien ou le tablier du charcutier sans avoir, des années durant, endossé la toge prétexte du mathématicien. Qu'il semble lointain le temps des humanités grecques et latines qui permettait à tel fils d'instituteur de province, lauréat du concours général de thème grec et grand amateur de poésie, d'accéder aux plus hautes fonctions politiques !

Cette évolution est due, à l'évidence, au développement des sciences et des techniques et à leur influence déterminante sur la croissance économique de nos pays. L'omniprésente informatique, par exemple, est grande consommatrice de mathématiques, et les progrès considérables réalisés en ce domaine rendent nécessaire la formation d'un grand nombre de personnes possédant un bon niveau en mathématiques.

Il faut cependant noter que cette évolution a également coïncidé (ce n'est, bien sûr, pas un hasard) avec un développement sans précédent de la science mathématique *elle-même. Les programmes de l'enseignement ont été largement modifiés, non sans susciter des réactions parfois vives à l'encontre de ces mathématiques dites modernes. Il est bon de préciser cependant que ces mathématiques ne sont pas aussi modernes qu'on veut bien le dire ! En tant que telles, elles ont plus d'un siècle (ce qui est un âge fort raisonnable), puisqu'elles sont le point d'aboutissement d'un mouvement qui débute avec les travaux de Galois, de Cauchy et de Cantor, et date du siècle dernier. De plus, loin de sacrifier aux attraits de la modernité, ce mouvement est inspiré par les principes du classicisme le plus pur, car il est essentiellement l'expression d'un retour aux sources auxquelles la science mathématique va puiser à la fois son autonomie par rapport aux autres sciences et son unité. Autant dire que le qualificatif « moderne » est usurpé à plus d'un titre (comme toujours d'ailleurs).*

La méthode

Où donc les mathématiques ont-elles trouvé leur unité, sinon au cœur même de la démarche intellectuelle que l'on retrouve aussi bien en analyse, en algèbre, en arithmétique qu'en géométrie ? Cette démarche est connue sous le nom de « méthode axiomatique ».

La ***méthode axiomatique*** *est généralement définie de la manière suivante : « De certaines propositions, appelées axiomes et supposées vraies, on déduit d'autres propositions par un enchaînement rigoureux, c'est-à-dire gouverné selon les règles de la logique formelle, elle-même soigneusement formalisée et axiomatisée. » Ainsi donc, si l'on admet cette définition, la méthode axiomatique serait purement déductive. Il s'agit là d'une restriction très couramment admise, qui peut conduire à de graves erreurs pédagogiques. A cet égard, Nicolas Bourbaki, mathématicien polycéphale, dit fort bien : « Ce que se propose pour but essentiel l'axiomatique, c'est précisément ce que le formalisme logique, à lui seul, est incapable de fournir, l'intelligibilité profonde des mathématiques [...]. La méthode axiomatique trouve son point d'appui dans la conviction que, si les mathématiques ne sont pas un enchaînement de syllogismes se déroulant au hasard, elles ne sont pas davantage une collection d'artifices plus ou moins astucieux faits de rapprochements fortuits où triomphe la pure habileté technique. »*

En réalité, la méthode axiomatique se décompose en deux phases distinctes, bien qu'étroitement complémentaires : une phase inductive et une phase déductive.

Au cours de la phase inductive, *le mathématicien donne libre cours à son imagination et à son intuition afin de déterminer l'énoncé qu'il désire établir. Pour cela, il se fiera à son propre jugement ainsi qu'à son expérience, c'est-à-dire à ce qu'il connaît du développement historique de son champ d'étude. Souvent, il s'agira de généraliser un résultat déjà connu en escomptant une certaine régularité des concepts étudiés. Allant du particulier au général, le mathématicien tente de résoudre ainsi la question : Que démontrer ? Suivra alors la* phase déductive, *au cours de laquelle il enchaînera les propositions d'une manière rigoureuse à partir des prémisses soigneusement formulées : « Le terrain que l'intuition a conquis ainsi d'un seul bond, il reste ensuite à l'organiser, à bâtir maillon par maillon la chaîne de propositions qui aboutira au résultat cherché. » (J. Dieudonné) Allant maintenant du général au particulier, le mathématicien tente de répondre à la question : Comment démontrer ? En réalité, ces deux phases sont étroitement liées. Elles se succèdent à la faveur d'un mouvement dialectique au cours duquel les concepts mathématiques sont définis et s'enrichissent dans un processus de synthèse permanent.*

Au bout du compte, seul subsiste le résultat de la phase déductive, c'est-à-dire une écriture de propositions agencées de manière cohérente. Mais ce résultat doit sa portée mathématique au fait qu'il a émergé d'un processus intellectuel évoluant de manière dialectique. Ainsi, contrairement à l'image qu'elle donne d'elle-même, la démarche mathématique ne se déroule pas de manière aveugle et mécanique dans un univers sans âme. A en croire le sens commun, le mathématicien serait semblable à une sorte d'explorateur des forêts tropicales qui se fraye un chemin rectiligne à travers une nature putride et inhospitalière, regardant droit devant lui sans jamais se retourner, sans risquer un coup d'œil sur ce qui l'entoure. Une telle image est bien imparfaite et ne rend guère compte de l'originalité de l'activité du mathématicien. La comparaison serait plus acceptable dans un univers surréaliste. L'explorateur est en communion intense avec la forêt qu'il pénètre ; chacun de ses pas modifie le relief du sol, la forme des arbres et la couleur de leurs feuilles. A chaque instant, il constate que le chemin parcouru s'est profondément transformé ; il ne vient pas d'où il est parti. Subitement pourvu du don d'ubiquité, voici qu'il réalise qu'il progresse dans plusieurs directions à la fois, bernant ainsi la rose des vents métamorphosée en girouette.

Restreindre la démarche mathématique à sa phase inductive, c'est, sous couleur de spontanéisme soi-disant génial, faire preuve de laxisme et de facilité en se contentant de vagues heuristiques ; de même, la restreindre à sa phase déductive, c'est la condamner à la stérilité et à l'ésotérisme dans une contemplation aveugle de truismes plus ou moins tautologiques.

▼ Il n'est pas possible de lire des mathématiques comme on lit un roman...

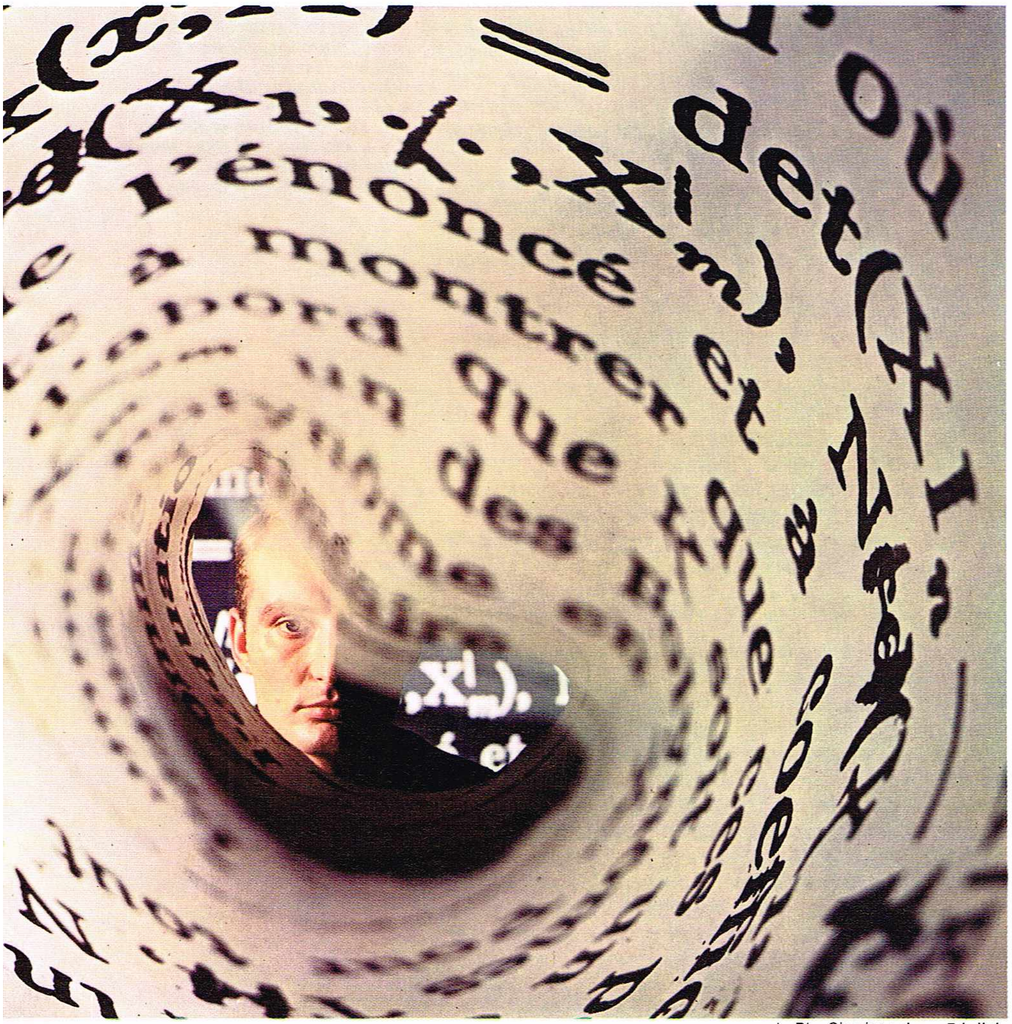

J.-Ph. Charbonnier - Réalités

Des ensembles

Appliquant ainsi au fil des siècles la méthode axiomatique — même sans trop se le dire — les mathématiciens ont progressivement conduit leur science à un point d'évolution où ils ont vivement ressenti la nécessité de dégager ce qui constituait la trame des diverses branches des mathématiques qu'ils distinguaient jusque-là.

La théorie des ensembles est ainsi apparue au cours du XIX^e siècle. Sorte de théorie du langage mathématique, elle fournit une représentation claire et maniable des règles de logique élémentaire. Les notions d'ensemble, de sous-ensemble, d'application sont définies de manière formelle, ainsi que les règles opérationnelles que l'on connaît (réunion, intersection...) qui sont alors parfaitement explicitées. Ainsi la théorie des ensembles n'est pas sortie toute casquée du cerveau d'un mathématicien génial (bien que Cantor le fût). Elle est la conséquence quasi inéluctable d'un développement de la science mathématique selon la méthode axiomatique ; elle est autant le fruit de la nécessité que du hasard.

L'ensemble $\mathbb{R}$ *des nombres réels est, de par sa construction même, un des ensembles les plus riches (sinon le plus riche) des mathématiques. En effet, de multiples concepts y sont définis avec de nombreuses propriétés les reliant. En appliquant la méthode axiomatique, on dégagera trois structures fondamentales ; c'est-à-dire que l'on regroupera les concepts et leurs propriétés en très grands agrégats. Cette classification n'est pas arbitraire ; elle est le fruit de l'expérience acquise au cours du développement antérieur de la science mathématique. Le mathématicien entrevoit son intérêt scientifique en subodorant les généralisations auxquelles elle pourra conduire.*

On distingue ainsi trois grands types de concepts définis sur $\mathbb{R}$ *et de nature mathématique différente :*

— des opérations (addition et multiplication) à l'aide desquelles il est possible de combiner certains nombres pour en obtenir d'autres ;

— une relation notée $\leqslant$ *qui permet de comparer deux nombres quelconques ;*

— une opération « valeur absolue » grâce à laquelle il est possible d'évaluer la proximité de deux nombres.

En opérant cette distinction, il est clair que l'on appauvrit sensiblement l'ensemble $\mathbb{R}$ *: ces trois types de concepts ne sont pas indépendants, car ils sont définis de manière constructive à partir d'un corps de concepts plus limité. Par exemple, la définition de la valeur absolue découle de celle de la relation* $\leqslant$ *puisque*

$$|x| = \begin{cases} +x & si \quad x \geqslant 0 \\ -x & si \quad x \leqslant 0. \end{cases}$$

Mais le mathématicien peut à loisir ignorer ces relations de dépendance et de compatibilité pour considérer chaque type de concepts de manière isolée et le soumettre à l'épreuve de la méthode axiomatique. Prenons l'addition, par exemple ; elle vérifie les propriétés évidentes :

(G1) $x + (y + z) = (x + y) + z$

(G2) $x + y = y + x$

(G3) il existe un nombre, 0, tel que $0 + x = x + 0 = x$

(G4) $x + (-x) = 0.$

Le mathématicien va induire de ces quatre propriétés une structure générale : la structure de groupe. *Il lui reste alors à déduire de manière rigoureuse toutes les propositions qui découlent de la définition par les propriétés G1, G2, G3, G4 pour voir se bâtir une nouvelle théorie, parfaitement indépendante de l'idée initiale qui avait consisté à isoler quelques concepts particuliers de* $\mathbb{R}$ *pour les généraliser. Cela étant fait, il pourra remarquer — à sa grande satisfaction — qu'il retrouve cette structure de groupe dans d'autres branches des mathématiques (groupes de transformations géométriques, par exemple) qui bénéficient du même coup de tous les résultats de la théorie élaborée. Il va sans dire que cela constitue une version très simpliste de la genèse de la théorie des groupes. Il a fallu beaucoup de temps et de mathématiciens pour qu'elle accède au rang de théorie !*

Structures en mathématiques

Il est malaisé de donner une vue d'ensemble de la science mathématique. On peut néanmoins affirmer sans crainte qu'elle ne se présente guère sous la forme stratifiée et officielle des programmes scolaires et universitaires, et qu'elle est aujourd'hui plus que jamais en pleine évolution, toujours en quête de sa propre unité.

Ainsi que nous venons de le voir à propos des nombres réels, trois grands types de structures doivent être distingués.

— Des structures algébriques (groupe, anneau, corps, espace vectoriel...) qui traitent d'ensembles munis de lois de composition, grâce auxquelles on combine certains éléments pour en obtenir d'autres.

— Des structures topologiques qui fournissent une formalisation abstraite des notions intuitives de voisinage, de limite, de continuité, etc.

— Des structures d'ordre qui expriment la possibilité de comparer des éléments.

Structure algébrique ⟶ COMBINER
Structure topologique ⟶ APPROCHER
Structure d'ordre ⟶ COMPARER

Ces trois structures mères *constituent la charpente de l'édifice mathématique tel qu'il se présente aujourd'hui. Au-delà de ce premier noyau apparaissent ce que l'on pourrait appeler les* structures multiples, *qui se situent à la confluence de deux ou plusieurs structures mères. Ainsi, l'algèbre topologique est l'étude des opérations algébriques compatibles avec une structure topologique donnée, celles qui sont continues pour la topologie que l'on considère. L'analyse fonctionnelle est précisément de ce type-là, puisqu'elle développe l'étude des espaces vectoriels topologiques. De même, la topologie algébrique est l'étude des opérations s'effectuant sur certains ensembles de points définis par des propriétés topologiques (simplexe, cycle...). Son développement récent correspond à une tendance de la science mathématique à l'algébrisation de toutes ses branches, qui, issues de l'analyse, sont fondées sur des arguments et des procédés de raisonnement constructifs et non point déductifs.*

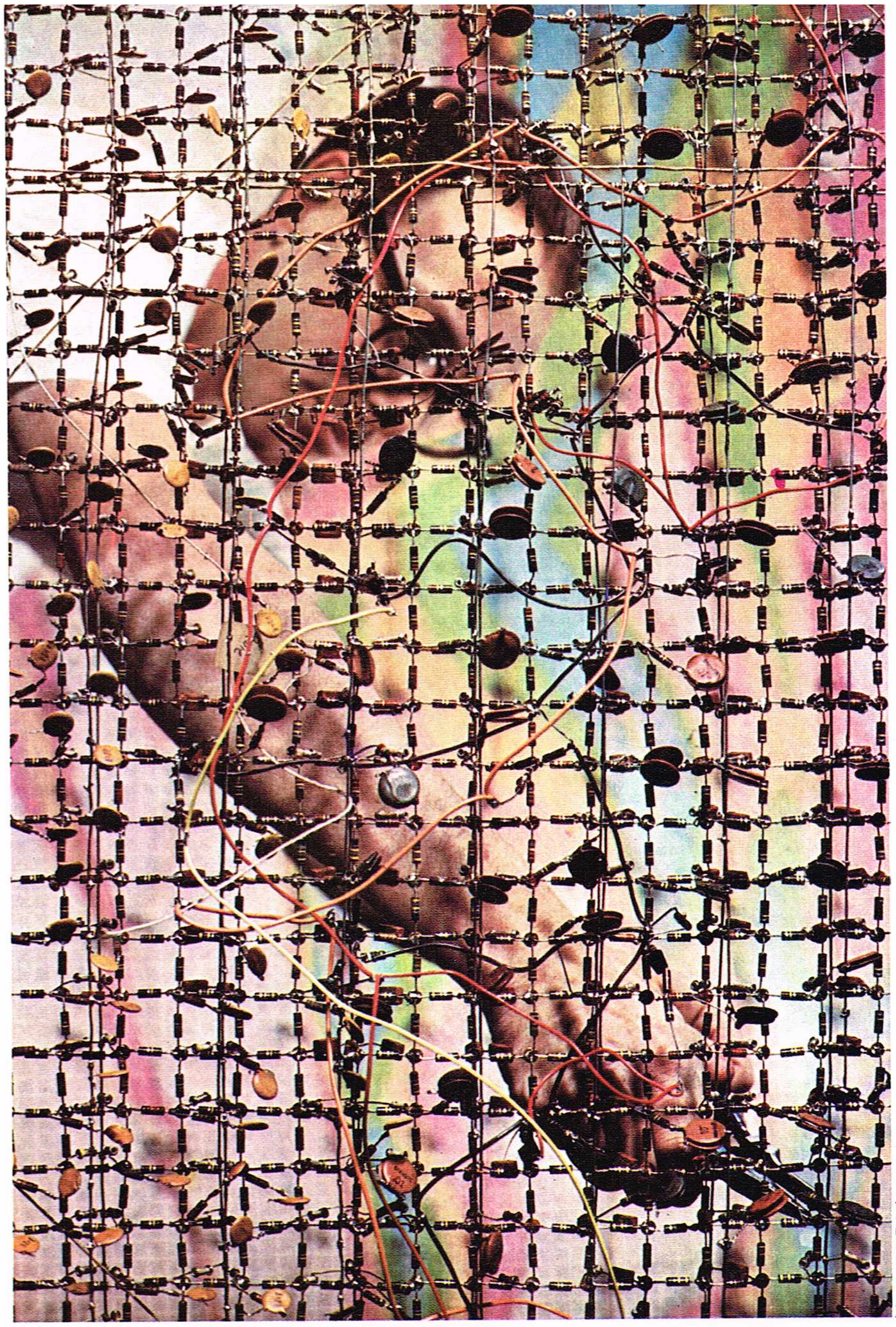

Munroe - Rapho

▲ L'omniprésente informatique est grande consommatrice de mathématiques.

Mathématique et arbitraire

Nous avons montré que la démarche mathématique procède d'un balancement continuel induction ⇌ déduction. C'est l'assimilation abusive à la seule déduction qui, pour beaucoup, semble donner à la science mathématique un aspect « autoritaire » de science qui ne peut que dire la vérité. En réalité, il s'agit là d'un artifice qui consiste à oublier le problème de l'adéquation des axiomes de base à ce que l'on cherche à étudier : en écartant volontairement les cas qui ne vérifient pas les hypothèses qu'ils prennent pour base de leurs modèles, les économistes ou les physiciens font un choix sur lequel la discussion est souvent acharnée ; de même, en délimitant le cadre de l'étude par un système d'axiomes, les mathématiciens prennent une position qu'il importe de montrer sans ambiguité dans son caractère non absolu.

Beaucoup d'exemples pourraient être donnés à ce propos, et le plus frappant est peut-être celui qui est fourni par la statistique, elle-même fondée sur le calcul des probabilités. Les magnifiques idées de Pascal nécessitèrent bien vite une formalisation claire de cet outil : il fallait définir la probabilité pour lui appliquer alors en toute rigueur les règles de la logique. Beaucoup (de Laplace à Poincaré et Hadamard...) se heurtèrent à la notion de hasard, et il semble bien que, depuis des siècles, ce mystérieux hasard soit ce qui sépare mathématiciens et philosophes réunis pour en discuter. Alors, malheureusement, on a parfois recours au formalisme le plus ardu pour définir un outil — la probabilité — que l'on ne cherche à justifier (si l'on suit l'ordonnancement scolaire ou universitaire) qu'après de longs et difficiles développements par la loi des grands nombres, loi qui, présentée au contraire dans son contexte concret, fait apparaître l'ambiguïté première du calcul des probabilités : elle oblige en effet à se poser de multiples questions, en particulier sur la répétition d'une expérience dans des conditions bien définies, et bien d'autres encore.

On ne peut donc pas assigner à la science mathématique cet aspect mystique, mais tellement stérile, de science « éthérée », dégagée de tout sectarisme, de tout subjectivisme, et qui ne se discute pas. Ce n'est pas le développement technique en lui-même d'une question (le calcul des probabilités, par exemple) qui peut être suspecté, mais le fondement de son développement.

De la pédagogie

L'autre aspect usuellement mis en évidence dans la caractérisation de la science mathématique est la nécessité de sa démarche logique et formelle, autrement dit de son procédé déductif. Le XIX^{e} siècle a été celui d'une certaine révolution pour la pratique mathématique ; la rigueur de la déduction a été installée par l'axiomatique. C'est en ce sens qu'il faut considérer les mathématiques comme abstraites. Cependant, il ne faut pas assimiler rapidement le terme abstrait et le terme moderne, comme y invitent un grand nombre de clichés de notre vie de tous les jours. Tout d'abord, on ne devrait pas oublier que les « mathématiques modernes » ne sont en aucune façon une rupture avec les autres mathématiques (et l'on entend souvent par là, celles que l'on peut se représenter), et que l'on n'a fait que suivre

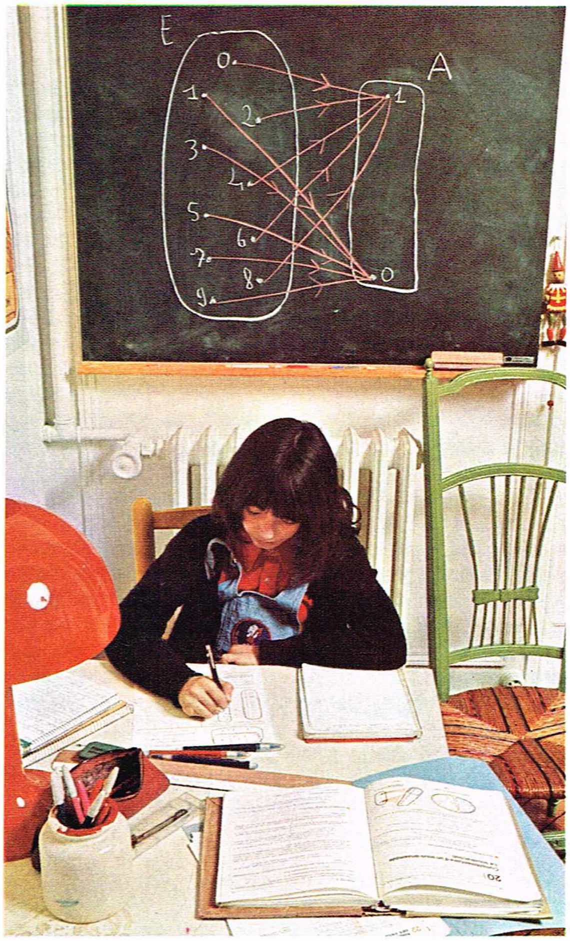

J.-C. David

▶ *On devine l'angoisse de ceux qui ne comprennent pas, à dix ou douze ans (sans parler aussi de leurs aînés), qu'une droite puisse être « le supplément d'un hyperplan »...*

l'évolution générale de la pensée humaine. Ensuite, que ce formalisme a déjà plus d'un siècle et ne répond donc sûrement plus à cette épithète, qui se trouve le plus souvent utilisée comme un épouvantail.

Il y a certainement un fond bien justifié à cette idée, car le souci de rigueur dans la méthode semble avoir conduit à de notables exagérations. Cela est d'autant plus clair après que l'on a bien mis en évidence la nécessité de la phase inductive dans la pratique mathématique. Nous reprendrons bien volontiers les termes de M.-D. Revuz, par lesquels il nous paraît cerner les problèmes de base que l'enseignement actuel des mathématiques n'a pas résolus : « Reprocher aux mathématiques d'être abstraites est une sottise : elles le sont par nature ; mais reprocher à un enseignement des mathématiques de ne pas montrer nettement d'où et comment les mathématiques ont été abstraites est légitime. » On pourrait résumer ces termes en disant que l'abstraction ne peut être prise pour une fin en soi, et que chaque concept mathématique abstrait est l'aboutissement d'une longue suite de développements sur des thèmes au départ plus familiers à notre compréhension. Autrement dit, il n'est possible de saisir avec fruit ces notions, fort peu « parlantes » en général, qu'à l'aide de leur histoire. Il y a une unité profonde de la science mathématique dans le temps et dans l'espace, et l'on devine l'angoisse de ceux qui ne comprennent pas, à dix ou douze ans (sans parler aussi de leurs aînés), qu'une droite puisse être « le supplémentaire d'un hyperplan », à moins qu'elle ne soit définie comme « un ensemble de points muni d'une bijection g

avec l'ensemble $\mathbb{R}$ telle que toute autre bijection f de *D* sur $\mathbb{R}$ s'en déduise par translation : f *(M)* = g *(M)* + a »!

C'est cette unité qui lui donne sa dynamique propre et lui permet de progresser, contrairement à une idée trop répandue — même par certain dictionnaire — selon laquelle la mathématique est figée, immuable, et n'a plus de secrets. Les mathématiques ont aussi des bases concrètes (et souvent, elles ont là la source de leurs plus grandes difficultés, ainsi l'idée de probabilité évoquée plus haut) et une histoire dont l'ignorance met une barrière à tout essai de compréhension ; harmonieusement liées, elles guident vers un exposé plus formel dégagé de toute ambiguïté et de tout ésotérisme.

Mathématique et histoire

Il n'y a pas plus de mathématiques modernes sans aucun lien avec l'édifice mathématique construit au fil des siècles qu'il n'y a de nouvelle physique relativiste contredisant la mécanique classique de Newton ; chacune est un modèle et correspond à une certaine échelle, les plus récentes tentant de représenter concurremment deux types de phénomènes tout en les unifiant. Ainsi, l'étude des figures géométriques que sont le cercle, l'ellipse, la parabole et l'hyperbole est-elle devenue l'étude « réunifiée » des sections planes du cône de révolution, le développement de l'algèbre linéaire et multilinéaire posant ensuite un cadre général aux courbes et surfaces du second degré, coniques et quadriques. On peut citer encore le cas de la droite, dont on a parlé plus haut, envisagée d'abord comme le plus court chemin d'un point à un autre (et donc définie par ces deux points), puis comme sous-espace vectoriel, enfin comme structure isomorphe à l'ensemble $\mathbb{R}$. *La notion de mesure fournit encore un exemple de réunification pour les notions de longueur, de surface, de volume, et même aussi de probabilité ; il est essentiel de ne montrer un développement théorique de l'intégration qu'au travers de ces idées, faute de quoi on ne joue qu'un jeu d'abstraction outrancière. On ne peut d'ailleurs comprendre où va et où peut aller l'esprit dans sa recherche de rigueur pour la construction mathématique qu'en évoquant les étapes antérieures et les nécessités qui ont poussé à leur formulation. C'est alors, et alors seulement qu'apparaîtront l'utilité du travail du mathématicien et sa place dans la démarche générale de la pensée humaine.*

Il n'est pas possible de lire des mathématiques comme on lit un roman, sauf lorsqu'on ne cherche à tirer de sa lecture qu'un vague souvenir de titres et de sous-titres. Le but de la science mathématique ne peut être atteint que par des moyens (dont le moins important n'est pas le langage) dont la maîtrise ne peut s'acquérir qu'au terme d'une certaine pratique.

Nous avons donc pris le parti dans ce volume de ne pas rechercher un exposé didactique. La littérature mathématique est abondante et peut suffire à toute demande de ce type. Nous avons surtout cherché à donner ici un aperçu démystificateur sur la science mathématique. Nous avons donc pensé que le chapitre Histoire des mathématiques *devait être la pierre centrale de ce volume, et non pas une introduction à de multiples développements techniques. Il nous a donc semblé intéressant de placer cet aperçu historique en fin de volume, après les différentes matières traitées. Une première lecture des premiers chapitres pourra ainsi permettre de saisir plus complètement l'évolution des mathématiques.*

Il n'a pas été non plus dans notre intention de faire un exposé complet de chaque matière. Nous avons plutôt tenté de donner un aperçu simple des problèmes, tout en dépassant le stade de quelques considérations de salon. La bibliographie indiquée au terme de chaque chapitre donne, par contre, l'occasion à celui qui le désirerait de poursuivre ses idées sur la matière.

B. GOLDFARB

et J. THÉPOT

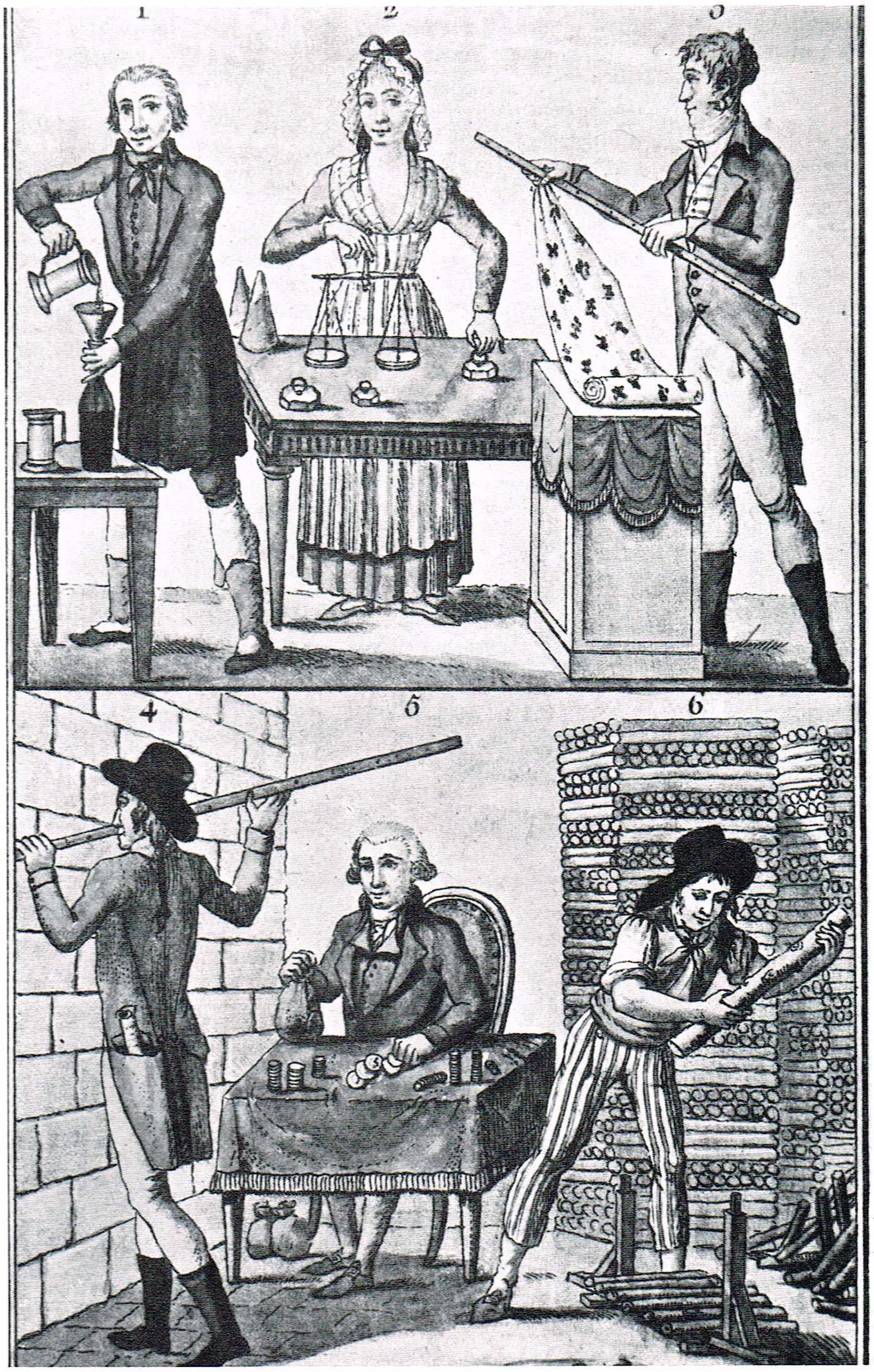

Snark International

▲ ***La notion de mesure fournit un exemple de réunification pour les notions de longueur, de surface, de volume, et même aussi de probabilité.***

MATHÉMATIQUES ET PHILOSOPHIE

Au moment où la philosophie semble décriée, la philosophie mathématique n'est pas seulement vivante, mais douée de moyens techniques qui en assurent l'éternité. J. Hadamard remarquait justement, dans une préface (1926) aux *Fondements des mathématiques* de F. Gonseth, que c'est « un bien étrange phénomène, sans précédent dans l'histoire de la pensée », qu' « une science parvenue à l'état positif [soit] en train de faire marche arrière et de revenir à l'état métaphysique », ce qui est précisément le cas de la mathématique, réputée si simple, si ancienne, et si parfaite. Et de fait, il y a en mathématiques, depuis la fin du XIX^e siècle, comme un retour à la philosophie, à une pensée profonde qui sonde l'être mathématique pour en formuler, enfin, la nature sans quitter le terrain de la rigueur, sans déroger aux principes qui ont établi la réputation de cette discipline depuis que la philosophie grecque l'a promue au rang de modèle de toute rigueur, de type idéal de tout discours, et en particulier du discours philosophique.

Les liens se sont tissés entre la mathématique et la philosophie depuis qu'il existe une mathématique rigoureuse, c'est-à-dire, hypothético-déductive. Ce n'est pas un hasard si l'idée d'*universalité* qui semblait caractériser les énoncés mathématiques de manière essentielle a présidé à la naissance des grands discours philosophiques. Maints philosophes auraient bien voulu qu'on pût dire aujourd'hui de certaines propositions philosophiques ce qu'on dit de la démonstration mathématique : que ce qui était une démonstration pour Euclide le demeure toujours pour nous. Malheureusement, le discours philosophique n'a jamais pu produire le système dont il rêvait. C'est pourquoi nous allons essayer d'abord de voir quelle fut l'intention première de ce discours, aujourd'hui périmé. Cela nous permettra ensuite de mieux mesurer la signification de la renaissance effective d'une certaine philosophie mathématique à partir du XIX^e siècle. Mais auparavant, à quoi se réduit le projet philosophique traditionnel, contemporain de l'émancipation des mathématiques à l'égard des magies et des techniques, et devenu aujourd'hui sans importance, dans sa forme primitive, pour les mathématiques ensemblistes, axiomatisées, « appuyées » sur la logique mathématique contemporaine ?

Les rapports des mathématiques avec la philosophie

Le privilège de la « réflexion » ; le projet du rationalisme traditionnel

En fait, il semble que la *révélation* du discours démonstratif ait été, d'emblée et en même temps, la principale source de la philosophie comme discours rigoureux. Toutefois, le discours philosophique, qui aspirait à la rigueur, en transformant celle-ci en thème explicite propre tombant dans le champ de ses compétences, visait plus haut. Il voulait fonder d'abord cette rigueur mathématique qui avait le défaut d'être limitée aux mathématiques et, en tant que telle, était incapable de se fonder elle-même. C'est pourquoi l'on voit Platon, déjà, s'efforcer de développer une critique des mathématiques comme domaine scientifique spécifique, trop étroit pour le projet de critique et de fondation radicale qui anime la philosophie en tant que telle. Il fallait retrouver dans un discours plus primitif, dans une racine plus profonde, les raisons ultimes qui permettent de caractériser la rigueur mathématique par les propriétés qui lui reviennent en propre et en droit, et qui en font une activité intellectuelle indépendante de l'univers matériel et contraignante pour tout sujet. Or, ce discours, c'est la dialectique.

Le postulat général de toute la philosophie occidentale est par là suffisamment indiqué. Il ne dit rien d'autre que ceci : la possibilité, bien que chaque fois soumise à rude épreuve, d'un discours fondamental ou d'une démarche fondatrice qui livre la vérité ultime des techniques démonstratives. La théorie de la réminiscence est la première tentative pour expliquer le fait de l'indépendance de ces techniques envers toutes les contingences de nature subjective ou expérimentale, de leur apparence omnitemporelle, interprétée dans le sens d'objets idéaux, éternels, non soumis aux vicissitudes du temps, dans le sens d'une *mathésis universelle* et essentielle, comme l'on dira beaucoup plus tard. Or, toutes les grandes philosophies ultérieures, tous les rationalismes sont autant d'essais d'explication conçus pour les mêmes faits.

Ainsi, l'évidence cartésienne, par exemple. Elle est d'abord celle du *cogito*, du « je pense », manifestée au terme d'un doute méthodiquement mené comme seul foyer de résistance à ce doute, comme seul élément qui ne se laisserait réduire qu'au prix d'une réduction à l'absurde de l'ensemble de l'entreprise. La vérité mathématique elle-même ne résiste pas au doute : Descartes imagine un Malin Génie qui rendrait l'homme capable de douter de la vérité de $2 + 2 = 4$. Toutefois, je ne peux douter, dit-il, que *je* doute ; et que je puisse être trompé prouve encore que je pense, et donc que j'existe en tant que tel.

Si bien que, du point de vue du sujet connaissant, tout repose sur cette évidence, qui est un *intuitus* (intuition = vision) modèle, car le *cogito*, dont la connaissance n'est que l'établissement d'un point ferme dans le doute universel et radical, met fin à l'universalité du doute en instaurant une vérité sur laquelle s'articulera toute la chaîne des certitudes. Fournissant un échantillon de

▼ Page extraite des « Éléments » d'Euclide, édition traduite en latin par Zamberto (Florence, Bibliothèque nationale). Dans cette œuvre qui date de 300 avant J.-C., Euclide propose la première* méthode axiomatique *d'une théorie mathématique, la géométrie.

Pineider

l'évidence propre à une vérité indubitable, le *cogito,* dit un commentateur, permet de considérer comme telle tout ce qui possède une vérité comparable. Les énoncés mathématiques eux-mêmes ne constituent que des vérités relatives au *cogito,* parce que la vérité du *cogito* est encore plus simple que celle des vérités mathématiques. Celles-ci peuvent fonder les représentations sensibles ; celui-là fonde toute représentation possible. Il est condition nécessaire de tout ce que nous pensons ; car « il est impossible que nous puissions jamais penser à aucune chose que nous n'ayons en même temps l'idée de notre âme », que le *cogito* n'accompagne notre pensée.

Est-ce autre chose qu'entreprend Kant ? Certes, si l'on considère la différence d'horizon, due essentiellement à l'importance, aux yeux de Kant, de la physique newtonienne ; en second lieu, à une différence de langage, due elle aussi à la constitution, au temps de Kant, d'une science rationnelle de la nature ; en troisième lieu enfin, au fait que sa conception ne jaillit pas d'innovations techniques, mais d'une interprétation des propositions élémentaires de la mathématique traditionnelle. Soit la géométrie euclidienne, par exemple. On ne peut dire qu'elle se fonde sur l'expérience. Ce serait attenter à son universalité. Or, elle se fonde sur l'idée d'espace. Celle-ci ne pouvant être un donné empirique, elle ne peut être un pur concept. Si la notion de concept est distincte ici de celle de concept *abstrait,* c'est-à-dire extrait de l'expérience, elle ne repose pas non plus sur un concept *pur,* c'est-à-dire qu'en dernier ressort, elle est irréductible à la pure logique. N'étant ni purement logique, ni expérimentale, on lui crée une forme nouvelle d'état civil : le concept d'*intuition pure,* par lequel Kant limite le pouvoir de l'entendement, disons, de logique pure, à la forme de la sensibilité. Cette forme, celle de l'espace en l'occurrence, est irréductible à un concept, comme l'illustre l'exemple de l'égalité indirecte des figures, qui, ainsi que les mains, ne sont superposables que par retournement dans l'espace, c'est-à-dire que la symétrie ne conserve certaines propriétés de la figure qu'en inversant celle-ci, phénomène dont l'analyse logique ne peut nullement rendre compte, ce qui est vrai tant que l'on ne dispose pas du groupe des transformations qui conservent les angles en grandeur tout en changeant leur signe. Il en résulte pourtant que les jugements mathématiques sont *synthétiques* (irréductibles à la logique) et *purs* (non d'origine expérimentale). Or, non seulement c'est le philosophe critique qui met au jour cette vérité de nature d'ailleurs philosophique, mais de plus l'idée de synthèse rationnelle est au principe de toute science. Et nulle science n'échappe à la fondation de mode désormais *critique*.

Après Kant, Husserl retrouve une inspiration plus cartésienne, mais inscrite dans le projet général et rationaliste tout à fait dans la lignée de Platon, de Descartes et de Kant. Husserl entreprend, dès les *Recherches logiques,* de montrer que la mathématique et la logique constituent un domaine qui ne peut se confondre avec les conditions subjectives qui permettent d'en prendre connaissance. Par là, Husserl suit l'enseignement de son grand contemporain, G. Frege, pour lequel les mathématiques (en vérité l'arithmétique), étant un prolongement de la logique, ne peuvent être élucidées par l'étude de leur genèse psychologique. Mais Husserl ne suit pas Frege jusqu'au bout ; il réeffectue la philosophie cartésienne dans la mesure où il analyse la constitution de la « conscience » comme région privilégiée et fondatrice de toute expérience, systématiquement explorée dans les *Méditations cartésiennes,* qui s'offrent comme un *recommencement* radical de la philosophie, comme (d'après J. T. Desanti) l'effort le plus têtu de Husserl, et peut-être de toute la tradition rationaliste occidentale, pour ressaisir et repenser le projet d'une fondation des mathématiques, et par suite des sciences, ailleurs qu'en elles-mêmes, sur une évidence ultime, apodictique (universelle et nécessaire), en tant qu' « intuition » (ou évidence) pure, et pour cette raison susceptible de servir de support à des jugements apodictiques.

Tous les cas considérés ici — on a laissé de côté la tradition empiriste qui est, sous sa forme ancienne et classique, condamnée dès l'origine à la stérilité sur ce point, puisqu'elle professe que les concepts mathématiques résultent d'une genèse empirique jamais démontrée, ou prouvée, ou construite — procèdent à un essai de subordination du savoir mathématique, à son enracinement dans un sol que met à nu une analyse soit dialectique, soit métaphysique, soit transcendantale. Bien que rien de commun ne relie la nécessité de déployer le contenu lui-même du savoir à celle de définir *a priori* ses conditions de possibilité, on trouve à la racine de tous ces projets l'idée que le savoir mathématique a des secrets que seule peut livrer la philosophie. Bref, qu'il ne vaut que dans la mesure où il peut être « intériorisé » par un discours distinct de lui, et qui le dépasse.

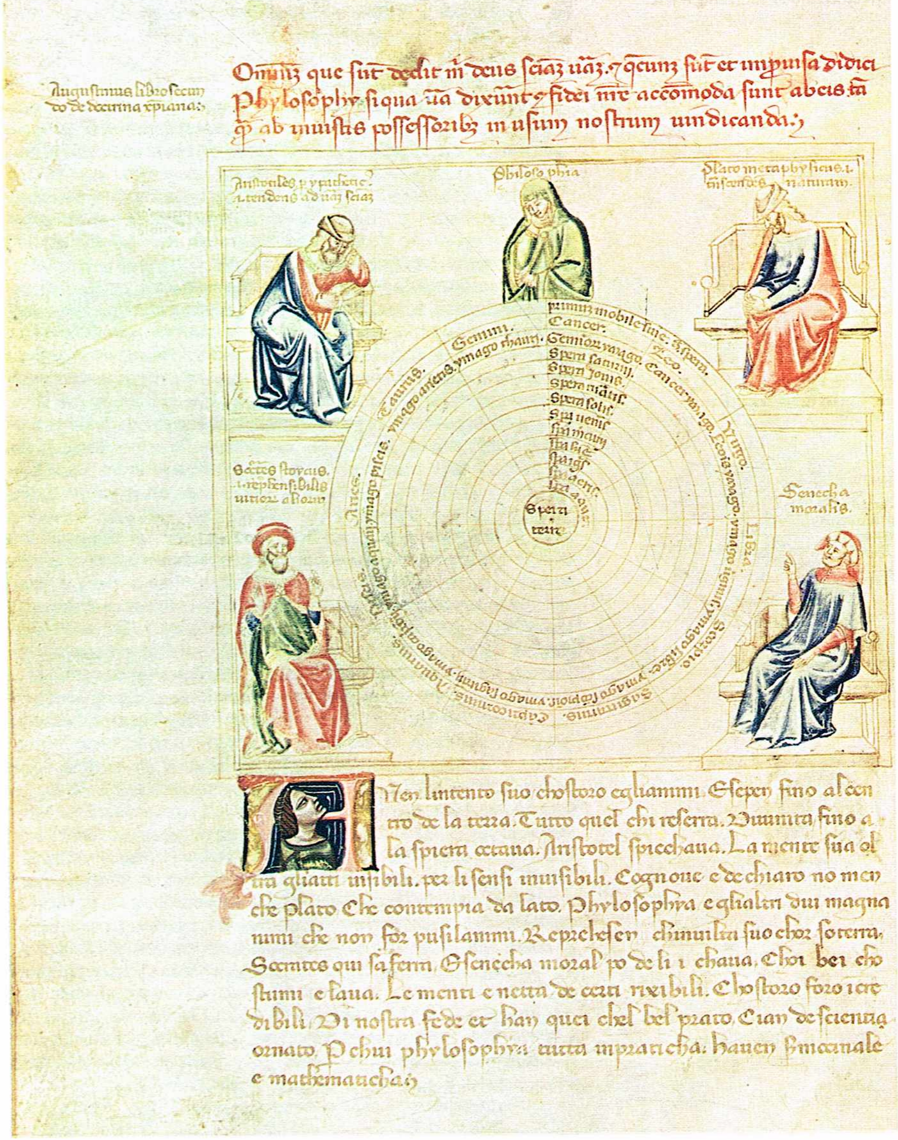

Giraudon

▲ ***La* Philosophie *entourée d'*Aristote, *de* Platon, *de* Socrate *et de* Sénèque *: planche ancienne tirée du* Panégyrique *de* B. Visconti *de B. de Bologna (XIVe siècle).***

Le rôle actif de la philosophie : l'idée de discours démonstratif

Mais reconnaître la tendance et le caractère « intériorisateurs » et « assimilateurs » de l'investigation philosophique traditionnelle ne devrait pas occulter le fait que la forme de vérité visée dans cette investigation a, en fait, des rapports plus complexes avec la mathématique comme théorie, et l'idée de théorie comme propriété permanente du rationnel et du scientifique. A cet égard, il y a si peu de discontinuité et de contraste entre l'exigence philosophique et l'exigence mathématique qu'à l'origine, c'est la mathématique qui a, pour ainsi dire, assimilé et intériorisé le projet philosophique.

L'Antiquité grecque

En effet, il est au moins une chose bien certaine, c'est que la figure de la mathématique grecque, où l'idée de mathématique s'est identifiée à celle de démonstration, est fondamentalement différente de la mathématique d'origine égyptienne et babylonienne. Ce qui fait cette différence, c'est sans doute, non le caractère *rigoureux,*

dans la mesure où une technique pure peut bien être rigoureuse, mais le caractère méthodiquement discursif, l'idée d'un système hypothético-déductif, c'est-à-dire fondé sur des hypothèses de départ explicites, dites axiomes ou postulats, dont on examine les conséquences logiques. D'où la mise en œuvre d'une technique démonstrative tellement précise et rigoureuse qu'elle reste encore pour nous un modèle de rigueur. Une technique : Euclide procède toujours à partir d'un énoncé qui est donné comme hypothèse, qu'il explique par un cas « concret » pour ensuite le prouver, le *démontrer*. La démonstration est ici le moment le plus important, le plus spécifique des textes mathématiques grecs. Or, elle est reliée à une tendance profondément hostile à l'expérience et à l'intuition, exprimée avec force par Platon qui veut que l'énoncé arithmétique porte « sur les nombres en tant que nombres, sans admettre d'aucune manière qu'on fasse ce discours en lui proposant des nombres pourvus d'un corps visible et tangible » (*République,* 525 d). Il y a donc une science des nombres à partir du moment où l'on tourne le dos à l'arithmologie figurée. Il y a une science des nombres dans la mesure où **le** nombre ne se confond pas avec **les** nombres concrets. D'ailleurs, cela vaut exactement pour la géométrie : elle nous intéresse, non parce qu'elle sert « pour l'établissement d'un camp, pour le siège d'une place, pour la concentration ou le déploiement d'une armée, ou pour tout ce qu'encore un plan de bataille, un ordre de marche comportent en eux-mêmes de figures », mais parce qu'elle « force à contempler la *réalité* » (*République,* 526 d-e), dans la mesure où celle-ci n'est ni l'utilité, ni la technique des figures « visibles et tangibles », qui ne peuvent en aucun cas fournir le point de départ à la géométrie comme science. Pour cette raison, Euclide, fidèle à la tradition exprimée par Platon, manifeste constamment le souci d'affranchir autant que possible ses définitions et ses démonstrations de toute représentation tactile ou visuelle. Il ne considère pas telle ou telle figure, mais toutes les figures de tel type : *Dans* **tout** *parallélogramme,* dira-t-il, *les compléments des parallélogrammes situés de part et d'autre de la diagonale sont équivalents entre eux.* Ou encore : **Toute** *pyramide à base triangulaire peut être divisée en deux pyramides à base triangulaire équivalentes et semblables (c'est-à-dire égales) entre elles et semblables à la pyramide entière, et en deux prismes équivalents, et la somme des deux prismes est supérieure à la moitié de la pyramide entière.* Si l'on considère **tout** parallélépipède, **toute** pyramide, c'est que ce n'est pas **ce** parallélépipède ni **cette** pyramide qui donnent la preuve exigée par la géométrie. C'est donc en persévérant dans la voie de l'épuration logique, de la rigueur démonstrative, en réalisant une intention qui anime l'écriture mathématique d'Euclide, que Leibniz remarquera plus explicitement encore que : « La force de la démonstration est indépendante de la figure tracée, qui n'est là que pour faciliter l'intelligence de ce qu'on veut dire et fixer l'attention ; ce sont des propositions *universelles,* c'est-à-dire les définitions, les axiomes et les théorèmes déjà démontrés qui font le raisonnement et le contiendraient quand la figure n'y serait pas. » C'est pourquoi, déjà, J. Schenbelius et C. Herlinus ont, dès le XVI[e] siècle, l'un donné des figures sans leurs lettres, l'autre réduit les mêmes démonstrations en syllogismes et prosyllogismes. Incontestablement, logique et mathématique sont liées chez Euclide, bien que la logique ne se révèle que par l'exigence, encore non satisfaite, d'un discours pur, que ne justifient ni l'expérience visuelle, ni le souci de formules utiles permettant l'évaluation d'une aire ou d'un volume, ni le recours à l'intuition.

Une théorie extrêmement séduisante a été développée par l'historien A. Szabó pour expliquer cet état de fait : elle consiste à mettre en rapport l'anti-empirisme et l'hostilité à l'intuition avec la découverte du raisonnement indirect. Cette thèse a le mérite de souligner que le raisonnement indirect n'est ni intuitif ni empirique, et qu'il ne recourt ni au « visible », ni au « tangible », ni même au calculable. Mais elle suggère également que, si les premiers mathématiciens ont recouru à cette technique, c'est parce que les *monstrations,* empiriques et intuitives, ne les satisfaisaient plus. Ainsi, jamais l'attitude spontanée ou commune n'aurait pu concevoir l'échec des tentatives empiriques en vue de déterminer une mesure commune entre la diagonale du carré et son côté. Il fallait s'apercevoir que la nécessité d'admettre l'existence de grandeurs géométriques incommensurables entre elles est absolument incontournable, si incontournable que, derechef, on doit produire le concept d'incommensurabilité, qui ne vaut que dans la mesure où « côté », « diagonale », « carré » ont acquis le statut d'objets mathématiques, c'est-à-dire une « réalité » du même type que celle de l' « objet » qui s'est révélé incommensurable. La technique de preuve induit un *nouvel objet* dont la nature exige que les anciens objets soient repensés conformément à la nature qu'ils révèlent. C'est en cela que consiste ce qu'on a appelé « révolution » ou « miracle » grec.

Bulloz

Palais de la Découverte

▶ ***A gauche, planche ancienne du XV[e] siècle illustrant les rapports des mathématiques avec la philosophie. A droite, le philosophe et mathématicien* Bernhard Bolzano *(1781-1848).***

Mais cet abandon de l'expérience dans des disciplines qui tiraient leur prestige de leur utilité n'est-il pas étonnant? Certes. Soulignons bien, avant de donner une explication de ce phénomène, la place de choix que le raisonnement indirect occupe dans les *Éléments* d'Euclide. Il y a tout lieu de penser qu'au temps de Platon, il fut considéré comme la preuve mathématique par excellence. Ainsi, c'est après avoir, grâce à un raisonnement indirect, mis Théétète dans l'embarras, que Socrate semble réclamer autre chose que des arguments vraisemblables « dont l'usage en géométrie ferait que Théodore (maître de Théétète et géomètre lui-même) ne vaudrait pas même un seul liard s'il y recourait ». Comment alors expliquer ce fait? Et cet autre qui l'accompagne : l'orientation anti-empirique? Il est difficile de croire que, spontanément, une mathématique empiriste se soit muée en théorie d'idéalités mathématiques. Il est difficile, lorsqu'il s'agit de la naissance des mathématiques en Grèce, et donc de l'idée de démonstration, de faire abstraction de l'influence de la doctrine éléatique.

Les philosophes d'Élée se caractérisent, en effet, par le mépris qu'ils professèrent pour tout ce qui est empirique. La vérité, selon Parménide, ne peut être saisie que par la pensée (λόγῳ). Et c'est Parménide qui, le premier, applique les principes logiques de la non-contradiction et du tiers exclu pour établir que l'être ne peut être soumis à la génération. Car, ou bien il se serait produit à partir d'un *être,* ou bien d'un non-être. Dans le premier cas, il y aurait eu un être avant l'être; dans le second, un être qui aurait été un non-être. Il en résulte, par un raisonnement typique et spécifique des Éléates, que l'être n'est pas soumis au devenir. Après Parménide, Zénon, auquel on attribue les fameux paradoxes, est un des plus illustres représentants de cette école de pensée. C'est pourquoi Aristote le considère comme le créateur de la dialectique, et l'on peut considérer la dialectique comme la créatrice des mathématiques, comme l'institutrice de l'usage des hypothèses, et, pour tout dire, de la méthode hypothético-déductive. Si bien qu'il apparaît qu'à l'origine, la mathématique n'était qu'une branche développée de la dialectique. C'est ce que peut montrer une analyse philosophique du vocabulaire des mathématiques grecques, à laquelle a procédé A. Szabó, et que nous ne pouvons ici examiner dans le détail.

Ce qui est certain, c'est que le souci, typiquement grec, de logique dans une discipline comme les mathématiques a conduit à la création d'une logique, c'est-à-dire d'un exemple de discipline démonstrative non mathématique *(cf.* la partie historique du chapitre sur *la Logique)*. En effet, « la logique est aussi susceptible de démonstrations que la géométrie, dira plus tard Leibniz, et l'on peut dire que la logique des géomètres ou les manières d'argumenter qu'Euclide a expliquées et établies en parlant des propositions sont une extension ou promotion particulière de la logique générale ». L'œuvre logique d'Aristote, inventeur de la logique formelle, apparaît à Kant, selon une formule devenue célèbre, si parfaite que, depuis son fondateur, elle n'aurait fait « aucun pas en avant et que, par conséquent, selon toute apparence, elle semble close et achevée ». Ce jugement est certes aujourd'hui dépassé. Mais cela ne peut faire oublier qu'Aristote a précisé l'idée de déduction en énumérant quelques règles valides, et qu'il a doté en outre la logique d'une sorte d'axiomatisation. Qui plus est, il semble n'avoir médité sur les règles du raisonnement qu'en songeant à établir les principes de la discussion. Ainsi, bien que le terme *dialectique* ait chez lui un sens différent de celui de Zénon ou de Platon, c'est en vue de réglementer une dialectique envahissante qu'est née la logique d'Aristote.

Le renouveau du XIXe siècle

Il ne serait pas exagéré de dire que la renaissance de cet esprit *dialectique* au XIXe siècle n'a pas été étrangère aux retrouvailles entre logique et mathématique. Mais cet esprit dialectique n'a rien à voir avec la dialectique hégélienne; il se nourrit plutôt de l'exigence de faire revivre la philosophie dans l'horizon même de la mathématique. Ou, si l'on veut, c'est dans la mathématique elle-même que se ressent le besoin d'une réflexion logique et philosophique.

Pour comprendre cette situation, il nous faut d'abord rappeler que toute l'originalité de la mathématique moderne consiste à avoir introduit l'idée de *variation.* Il n'en pouvait être question dans l'Antiquité grecque : la critique que Platon adresse aux géomètres de son temps exprime une exigence respectée; elle consiste à dénoncer l'inadéquation entre la nature de la science et le langage employé par ceux qui la manient. « Leur langage, dit Platon, dans *la République* (527 a), est, je pense, tout à fait risible et sent la servilité; car, tenant un langage qui est celui de gens qui pratiquent une action et dont la pratique est le but, ils parlent de « carrer », de « tendre le long de », de « poser au plus de » [...] alors que cette étude est tout entière une occupation dont *la connaissance* est le but. » Mais la mathématique moderne ne renie pas ce que les mathématiciens grecs connaissaient sans lui reconnaître de statut théorique. Au cours, donc, du XVIIe siècle, cette idée de variation s'impose. Elle conquiert un statut mathématique par la notion de *fonction* « qui s'introduit, remarque Bourbaki, à juste titre, et se précise d'une foule de manières au cours du XVIIe siècle », car, ajoute-t-il, « toute cinématique repose sur une idée intuitive, et, en quelque sorte, expérimentale, de quantités variables, avec le temps, c'est-à-dire de fonctions du temps ».

Le temps dans les mathématiques? Il y a là de quoi scandaliser les amoureux de la rigueur, surtout depuis que la notion de fonction devait être, au XIXe siècle, élargie de manière que, par l'expression $y = f(x)$, on ne comprenne rien d'autre que le pur concept de l'opération « f » faisant correspondre au *système* des objets « x » le *système* des objets $f(x)$. Dirichlet disait, dès 1837, qu'il n'est pas nécessaire que y dépende de x *selon la même loi;* il n'est même pas nécessaire d'avoir une dépendance exprimable par des opérations algébriques. Épurer les mathématiques, « omnitemporelles » par excellence, de leur « chute » dans le temps, devenait ainsi une entreprise mathématiquement pensable, aussi bien que logiquement nécessaire. Dans cette voie s'était déjà avancé B. Bolzano qui déclare péremptoirement dans ses fameux *Paradoxes de l'infini* (1850), lorsqu'il critique (§ 12) la notion d'infini telle qu'elle est exposée par l'article *Infini* du dictionnaire de Klugel, que même nos mathématiciens éminents, comme Cauchy, se sont trompés en pensant l'infini « comme une grandeur variable dont la *valeur* croît *indéfiniment* et, par suite, devient plus grande que toute *grandeur donnée* aussi grande qu'elle soit ». La limite de cette croissance infinie serait la *grandeur infiniment grande*... Ce qui est erroné dans cette définition éclate à partir du fait que ce que les mathématiciens appellent une *grandeur variable* n'est pas à proprement parler une *grandeur,* mais le pur et simple concept, la pure et simple *représentation* d'une grandeur qui n'est pas unique mais qui comporte un ensemble infini de grandeurs, de valeurs distinctes ». Évidemment, cette thèse de Bolzano n'acquiert toute sa portée que si le domaine infini des nombres réels est correctement construit. Cependant, grâce à la mise au jour du soubassement ensembliste de l'analyse classique, il aboutit à éliminer de l'idée de fonction toute idée de *variable au sens intuitif,* liée généralement à la notion de temps.

Or, Bolzano est à la fois un *philosophe,* qui s'est intéressé aux mathématiques parce qu'on s'y donnait la peine de *démontrer* des choses *évidentes,* et un *mathématicien.* Il a voulu allier les exigences de la philosophie et des mathématiques, et c'est dans cette association qu'il a pu réveiller l'intérêt pour la logique chez les mathématiciens, et l'intérêt pour les mathématiques chez les logiciens, à un moment où les logiciens se recrutaient essentiellement parmi les philosophes.

Toutefois, le plus curieux dans l'histoire, c'est que ce moment « bolzanien » de la mathématique moderne reproduit les éléments essentiels de la mathématique ancienne. En effet, Bolzano est philosophiquement platonicien. Il croit, comme Weierstrass plus tard, à l'existence en soi des êtres mathématiques; il est anti-empiriste parce que le souci logique le pousse à mettre en lumière le fondement des mathématiques qu'il découvre lié à des notions que l'expérience ne peut fournir : par exemple, l'infini actuel; enfin, il utilise le raisonnement indirect, dans l'idée que ce qui *n'*est *pas contradictoire est vrai* (voir dans le chapitre *Logique* les précisions qu'a apportées la logique moderne sur ces deux notions) et que de la non-contradiction à l'existence, la conséquence est bonne.

C'est encore plus résolument que le fondateur de la logique et de la philosophie contemporaines, G. Frege, s'est engagé sur cette voie de l'association philosophico-mathématique, mariage dont est née la logique mathématique pour laquelle Boole, d'une certaine façon, n'a pas fait plus que Leibniz. Or, l'originalité de Frege est d'avoir continué l'analyse et poursuivi l'élargissement de la notion de fonction jusqu'à créer une *jonction réelle* entre mathématique et logique, qui lui a permis, dans une entreprise partiellement manquée, de reconstruire logiquement la mathématique ou ce qui, de celle-ci, se réduisait à l'arithmétique des entiers naturels, ce qui n'était pas encore, du temps de Frege « rigoureusement » réalisé pour la géométrie. Or, Frege est, comme Bolzano, platonicien : « Que trois tombe sous le concept de nombre premier est une vérité objective ; ce n'est pas une idée que je trouve en moi ; c'est un fait toujours et objectivement valable, que nous dormions ou veillions, que nous le pensions ou pas. » Mais il est, en outre, comme on sait, logiciste, c'est-à-dire que, pour lui, les ressources logiques sont nécessaires et suffisantes pour penser l'arithmétique et tout ce qui peut se construire à partir d'elle, c'est-à-dire beaucoup de choses.

Il ressort de ces indications que la mathématique a partie liée avec la philosophie au moins dans ses moments cruciaux : celui où elle naît, où naît l'idée de démonstration, et celui où elle renaît pour réinvestir cette ancienne idée de la rigueur dans les nouveaux domaines conquis depuis le XVII^{e} siècle, c'est-à-dire essentiellement le calcul infinitésimal, et plus généralement l'analyse. Nous avons soigneusement laissé de côté le fait, somme toute contingent, qu'au XVII^{e} siècle, certains philosophes étaient mathématiciens : Descartes et Leibniz l'attestent, dont les philosophies mathématiques respectives dépendent de la mathématique que chacun avait en vue. Mais les mathématiques se sont développées après eux avec autant de rapidité que de désordre.

C'est après cette floraison technique que reparut l'exigence de tout remettre en ordre, d'entreprendre la révision des principes, de dépasser les vues directement reliées aux applications, de substituer, comme disait Lejeune-Dirichlet, les idées au calcul. Cette substitution, ce retour au concept n'allaient cependant pas s'accomplir sans difficultés. Ils sont à l'origine de la problématique des fondements.

La fondation de la nouvelle philosophie

Si l'on considère les discussions du début de ce siècle sur les mathématiques, on s'aperçoit, à les comparer avec les philosophies mathématiques de Descartes et de Kant, qu'elles ont pour ainsi dire élargi l'horizon de la réflexion philosophico-mathématique. L'idée de mathématique a pris comme un nouveau départ, et les différentes élaborations qu'elle a suscitées apparaissent comme autant de manifestations décisives des ressorts de la philosophie mathématique contemporaine dans la mesure où elle a rendu la philosophie à son lieu, aux mathématiques, à un lieu dont le seul problème est de savoir s'il se maintient et comment, mais qui incontestablement est élaboré et produit par **G. Frege**.

D'abord, ce n'est donc pas un hasard si G. Frege constate, dans ses *Fondements de l'arithmétique* (1884), que son « exposé a pris un tour plus philosophique qu'il ne semblera à beaucoup de mathématiciens... une recherche fondamentale sur le concept de nombre ne peut manquer d'être marquée de philosophie. La tâche est commune aux mathématiques et à la philosophie ». S'il s'est engagé dans cette voie, ce n'est pas parce qu'il a dû professer, comme nous l'avons déjà indiqué, que les nombres sont des êtres mathématiques existant indépendamment de la pensée humaine et constituant un monde qui n'a pas besoin d'être fondé par autre chose que la logique pour pouvoir être compris ; c'est également pour deux autres raisons, plus essentielles.

La première concerne la signification de l'œuvre *logique* de Frege, inaugurée par la *Begriffsschrift* (1879) ou idéographie, l'ouvrage de logique le plus original et le plus profond depuis Aristote. Dans l'esprit de Frege, cette idéographie conduisait naturellement à élaborer une théorie générale des suites (Reihenlehre) dans le dessein de montrer que le principe de récurrence, l'un des axiomes de l'arithmétique, peut être élucidé de manière purement logique. Ce faisant, il montrait, contre la logique alors dominante (on est en 1879), celle de S. Mill, que l'empirisme n'a pas son mot à dire dans ce domaine. Qu'il est oiseux, voire incongru, de chercher dans les théories empiriques de l'induction une explication à l'induction complète. Du coup, et pour la première fois de manière convaincante, le rapport entre les mathématiques et les sciences de la nature se trouve irrémédiablement rompu, et rend impossible toute référence à la nature, à la physique ou à la subjectivité, auxquelles on recourait quand l'essentiel de la philosophie consistait, de Descartes à Kant, à expliquer le monde de l'expérience.

La seconde se rapporte à la perspective philosophique propre à Frege. Celle-ci est originale au sens fort. Elle constitue l'humus et l'horizon de la philosophie post-frégéenne, dans la mesure où elle a contraint le néo-kantisme, la phénoménologie naissante, la pensée analytique dans ses versions linguistique et épistémologique, à tenir compte de ses interrogations. Or, pour Frege, comme l'a souligné son meilleur commentateur, M. Dummet, la première tâche de la philosophie, ou plus exactement de l'enquête philosophique, c'est l'analyse du *sens*. Mais qu'est-ce que le sens ? R. Thom, proche d'une inspiration frégéenne, nous dit : « Tout mathématicien doté de tant soit peu d'honnêteté intellectuelle reconnaîtra que, dans chacune de ses démonstrations, il est capable d'attacher *un sens* à chacun des symboles qu'il manifeste : en cela, il diffère du physicien théoricien, qui, très fréquemment, n'hésite pas à se confier magiquement aux vertus du formalisme aveugle dans l'espoir — souvent déçu — que les lumières de la fin dissiperont les ténèbres du commencement. » Certes, cela veut dire que les mathématiques ont un *contenu propre,* et cela dit ce que Frege voulait dire. Mais la portée de l'analyse du sens qu'il institua va plus loin : il s'agit de montrer que toute thèse philosophique est dénuée de sens tant que l'on ne s'est pas entendu sur l'analyse du sens de certaines expressions. Il faut avant tout élucider le sens des expressions en jeu dans un problème pour pouvoir le poser, pour pouvoir se demander si ce qu'on dit est vrai et pour quelles raisons cela le serait. Autrement, il se peut qu'interviennent non seulement des différences de style dans l'analyse, mais des malentendus sur ce dont il est question, sur la chose analysée elle-même. La philosophie est alors œuvre d'élucidation, d'explicitation du langage. Par suite, il nous faut savoir comment travaille le langage, et donc établir la manière correcte de son fonctionnement. Autrement dit, il nous faut construire une théorie logique, et une théorie logique qui soit conforme à la *philosophie du sens,* une théorie

Cliché Musées nationaux

▶ ***Tapisserie française du XVI^{e} siècle représentant « Madame Arithmétique » prodiguant ses enseignements à un groupe de jeunes nobles (musée de Cluny, Paris).***

de la définition et de l'inférence valide qui satisfasse l'exigence de cette philosophie, une théorie de la vérité qui rende compte de la manière dont elle se rapporte à — et utilise — les procédures du langage. Donc quelque chose, en fin de compte, d'encore plus profond que ce qu'on exige pour que le discours mathématique usuel soit entendu, c'est-à-dire de plus profond qu'une sémantique ensembliste.

Il y a comme l'ouverture à une ontologie précise dont on ne peut pas dire qu'aujourd'hui les problèmes soient clos. On a comme l'écho du grand désir de Platon de parvenir « à un principe qui se suffise » (*Phédon,* 101 e). Mais l'écho seulement. Car il ne s'agit pas de produire une dialectique supérieure au discours qu'elle analyse, mais d'asseoir, analytiquement, pas à pas, le discours analysé sur le langage qu'effectivement il implique.

Le problème des fondements des mathématiques

Mais la perspective, enfin mise au jour par Frege, n'était pas simple. Il ne s'agissait pas seulement de spéculer à nouveaux frais à partir de cette interrogation originaire, mais d'établir précisément l'arithmétique sur autre chose que le hasard des signes, sur des lois logiques vraies. Or, au bout de cette entreprise enfin réalisée dans les monumentales *Grundgesetze der Arithmetik,* s'est découverte une antinomie communiquée à Frege par une lettre célèbre de B. Russell.

Les paradoxes

Découverte en même temps, et sous une autre forme, par Cantor (1899) et par Zermelo, l'antinomie de Russell fut suivie par la mise au jour d'autres paradoxes, parmi lesquels on distingue aujourd'hui ceux qui sont de nature *logique* et ceux qui sont de nature *sémantique*.

A titre d'exemple, disons brièvement en quoi consiste le paradoxe de Russell (1902) : on appelle ensemble une collection arbitraire d'objets qui sont dits appartenir à cet ensemble. Les ensembles peuvent appartenir à, ou, en d'autres termes, être éléments d'autres ensembles. Mais un ensemble peut-il s'appartenir à lui-même ? Non, sans doute, car l'ensemble des chats n'est pas un chat. Pourtant, il existe des ensembles qui peuvent s'appartenir à eux-mêmes : l'ensemble de tous les ensembles. Si l'on considère E comme l'ensemble des ensembles F tel que F n'est pas un ensemble de lui-même, il en résulte que E est un élément de E si et seulement si E n'est pas un élément de E.

La nature des paradoxes est soit purement mathématique, exigeant alors une reconstruction de la théorie des ensembles jusqu'alors disponible dans les premiers travaux de Cantor, soit plutôt épistémologique, exigeant une logique qui précise le sens de la notion de vérité, de désignation, d'expressibilité, etc. C'est précisément ce qui montre que la philosophie mathématique va s'engager nécessairement sur deux voies appelées à se conjoindre et à se consolider mutuellement : mathématique (ensembliste) et logique.

Le logicisme

Le logicisme, c'est la reprise de la thèse de Frege. Mais, dans la version de **B. Russell,** cette thèse professe que *toutes* les mathématiques se réduisent à la logique ; et cela est affirmé dans l'horizon nouveau constitué par la nécessité de reconstruire l'édifice mathématique en évitant les antinomies. En ce sens, le logicisme est un réductionnisme. Il confond en une les deux solutions exigées par la théorie des ensembles : la solution mathématique et la solution sémantique. Logique et mathématiques sont donc une seule et même chose : la logique mathématique ; ce qui met en relief le caractère mathématique de la nouvelle logique, qu'on peut distinguer de la mathématique pure, comme le montre l'œuvre gigantesque des *Principia mathematica* (1910-1913), dont les trois volumes, rédigés en collaboration avec Whitehead, ont été la Bible des logiciens mathématiciens jusqu'aux premiers manuels de logique dus aux disciples de Hilbert : celui de Hilbert-Ackermann (1928) et celui, plus important, de Hilbert-Bernays (1934-1939).

Mais l'intérêt de la position logiciste ne vient pas tant de son caractère plus philosophique que technique, que du fait que ce caractère est lui-même à l'origine d'une investigation systématique sur les paradoxes, qui a conduit, comme l'a remarqué Gödel, à la mise en lumière du caractère contradictoire de nos intuitions logiques, et à la constitution d'une « doctrine des types » (B. Russell *in Principles of Mathematics,* 1903, App. B).

La distinction entre les types logiques semble, pour B. Russell, fournir la clef du mystère. Nous pouvons remarquer tout d'abord que cette distinction introduit des différences entre les divers niveaux des concepts. Par là, elle met en œuvre une analyse du sens — ou de la signification — conformément à l'exigence de Frege. Mais cette analyse semble animée par un style philosophique bien classique dont on trouve l'équivalent chez Aristote. Si « on résout les arguments qui sont de véritables raisonnements en les détruisant », on résout « ceux qui sont seulement apparents en faisant des distinctions » (*Réfutations sophistiques,* 1766).

Mais que doit signifier une analyse des significations, après la découverte des antinomies logiques, plus sérieuses qu'apparentes, et qui, de plus, semblent mettre en doute le sens commun, voire la logique elle-même qui, disait Poincaré, « n'est plus stérile [puisqu'] elle engendre des contradictions » ? La théorie des types rémédiait à cette fâcheuse situation dans la mesure où elle permettait de faire disparaître ce qui semblait à Russell la racine des contradictions : les définitions imprédicatives qui distinguent les éléments d'un ensemble par des termes qui se réfèrent à cet ensemble, autrement dit, qui emploient le quantificateur universel sans précaution. Sans entrer dans des détails de peu de sens pour ce propos, on dira, étant donné une fonction propositionnelle $\varphi(x)$, qu'il existe un certain nombre de valeurs de x pour lesquelles cette *fonction a un sens,* c'est-à-dire est vraie ou fausse. Soit a l'une de ces valeurs, alors $\varphi(a)$ est une proposition vraie ou fausse. Mais $\varphi(x)$ peut également être toujours vraie ou toujours fausse. Ainsi, « si x est humain, x est mortel » est toujours vraie, mais « x est humain » l'est seulement quelquefois. Donc une *fonction propositionnelle* (on désigne par là une *formule ouverte,* c'est-à-dire qui contient des variables libres ; *cf.* le chapitre *Logique*) peut être considérée de trois manières : soit en substituant une constante à une variable, soit en affirmant toutes les valeurs de la fonction, soit en affirmant certaines valeurs seulement. Pour éliminer les contradictions dans le cadre du « sens commun », il faut, lorsque j'affirme toutes les valeurs d'une fonction $\varphi(x)$, que le domaine des valeurs de x soit bien déterminé, « c'est-à-dire, écrit Russell, qu'il doit y avoir une totalité quelconque de valeurs possibles de x. Si maintenant je crée, ajoute-t-il, des valeurs définies en termes de cette totalité, la totalité paraît, de ce fait, agrandie, et c'est pourquoi les nouvelles valeurs qui s'y réfèrent se référeront à une totalité agrandie. Mais puisqu'elles doivent être comprises dans cette totalité, celle-ci ne peut jamais les rattraper. C'est comme d'essayer de sauter sur l'ombre de votre tête » (*Histoire de mes idées philosophiques,* Gallimard, 1961, p. 102). Lorsque le menteur dit : « Je mens », s'il dit par là : « Tout ce que j'affirme est faux », cette assertion se réfère alors à la totalité de ses assertions, et c'est seulement dans cette mesure que se produit le paradoxe. Or, il est possible de définir une hiérarchie de propositions telle que celles du premier ordre ne se réfèrent pas à la totalité des propositions du premier ordre. Une fonction propositionnelle ne peut plus, ainsi, se prendre elle-même comme valeur de son argument. Le menteur pourra alors bien dire : « J'affirme une fausse proposition de premier ordre qui est fausse. » Mais cette proposition, dit Russell, « est elle-même une proposition de second ordre. Il n'affirme donc ainsi aucune proposition de premier ordre. Ce qu'il dit est ainsi tout simplement faux, et l'argument selon lequel c'est également vrai tombe ». Ainsi, la théorie des types s'attaque à la raison des paradoxes : elle élimine leur risque en supprimant la possibilité de cette « référence à soi réflexive » qui comprend « comme membre d'une totalité, quelque chose qui se réfère à cette totalité qui ne peut avoir un sens défini que si la totalité est déjà fixée ». L'élimination des paradoxes en résulte, car, désormais, il est impossible de confondre la relation d'appartenance d'un élément à un ensemble et la relation d'inclusion d'une partie d'un ensemble dans un autre. Les quantificateurs ne pourront se rapporter qu'à un type déterminé de variables, jamais à tous les types possibles.

Toutefois, l'ensemble des mathématiques n'est pas encore sauvé. Pour ce, il a fallu introduire le fameux axiome de réductibilité dont Wittgenstein disait que, s'il était vrai, ce serait par hasard qu'il le serait. Cet axiome, permettant dans la version ramifiée des types (nous n'examinons pas toutes les versions de cette théorie) de considérer toute fonction propositionnelle d'un niveau quelconque comme ayant la même extension qu'une fonction propositionnelle élémentaire, semble réintroduire par une porte de derrière des définitions imprédicatives.

Quoi qu'il en soit, la contribution du logicisme à l'analyse du langage est décisive. La solution aux antinomies a été à l'origine également de la théorie des descriptions, dont le point central est qu'une expression « peut contribuer au sens d'une phrase sans posséder aucun sens quand elle est seule ».

Par là aussi, elle satisfaisait un requisit de l'analyse frégéenne : qu'on doit chercher ce que les mots veulent dire non pas isolément mais pris dans leur *contexte*. Ce principe du contexte, produit par et pour une réflexion philosophique, n'a pas été seulement déterminant dans la philosophie analytique, qui a pris ses distances envers la logique, mais reste parfois actif dans une réflexion purement technique, qui s'est libérée de l'horizon logiciste, sans le renier. Car les théories des types essayées par H. Wang et Lorenzen ont rendu caduques les vieilles objections, et l'idée d'une distinction entre les différentes couches du langage a donné à une vieille idée philosophique des interprétations exactes intéressantes, au-delà des frontières logicistes. En effet, l'idée, par exemple, de distinguer entre catégories différentes d'objets n'est pas absente même de la fondation de la théorie des ensembles de Newman-Bernays où deux univers disjoints sont admis, celui des classes et celui des ensembles. Mais il y a davantage, il est possible aujourd'hui de passer d'une théorie pluricatégoriale (qui admet plus d'une sorte d'objets fondamentaux) à une théorie monocatégoriale (qui n'admet qu'une seule sorte d'objets). Ce qui est une manière, non seulement d'apprécier la valeur interne d'un style d'analyse logique, mais aussi d'être plus sûr quant à sa validité, à un moment où les philosophies se sont si fondues dans les techniques qu'il faut une multiphilosophie pour comprendre ces techniques, enracinées, pour les plus récentes, dans une pensée logique encore grosse d'avenir.

Le formalisme

Mais il fallait que le logicisme se rendît compte qu'« avec l'infini commence la véritable mathématique », autrement dit que l'essentiel était, après les antinomies, de fonder l'analyse telle que la pratique le mathématicien, et en sorte que son travail pût se poursuivre dans la sérénité. « Dans sa fondation de l'analyse, Weierstrass, disait **Hilbert**, a accepté sans réserve et utilisé à maintes reprises ces formes de déduction logique dans lesquelles le concept de l'infini entre en jeu, comme lorsqu'on traite de *tous* les nombres réels ayant une certaine propriété ou lorsqu'on démontre qu'il *existe des* nombres réels avec une certaine propriété. » Ce que Hilbert dit de Weierstrass, il pouvait le dire également de Dedekind, de Cantor, et d'autres mathématiciens qui ont vu surgir, sous leurs yeux, la nécessité de considérer des totalités infinies, autrement dit de manipuler l'*infini actuel*.

Légitimer donc l'infini actuel, telle doit être la tâche immédiate du mathématicien. Cette tâche s'impose comme un choix à la pensée mathématique. Car elle ne semble pas la seule offerte. Outre qu'on peut bannir purement et simplement l'infini actuel, on peut aussi l'admettre de diverses manières. Ce sont donc plusieurs voies qui s'offrent.

La première en date est celle de **Zermelo.** Elle puise à deux sources :

— Zermelo s'inspire d'abord de Dedekind, qui avait élaboré une théorie des systèmes comme soubassement logique de sa théorie des nombres. Mais ce n'est pas seulement le matériau qui inspire Zermelo. Une idée plus profonde de Dedekind, plus profonde que le fait que les entiers naturels ou finis sont fondés sur l'existence d'ensembles infinis dénombrables, est qu'il utilise des *axiomes* (généralement attribués à Peano) pour définir ces entiers et les considère comme des conditions de structure sur des objets de nature non spécifiée. Ce type de méthode, il l'a lui même introduit dans sa *théorie des idéaux* (on appelle « idéal » une sous-structure de la structure d'« anneau », qui permet notamment le passage à la structure « d'anneau quotient », de même qu'un sous-groupe d'un groupe [commutatif] permet de considérer le « groupe quotient »), qui l'avait déjà opposé à Kronecker, dans les débuts de la seconde moitié du XIX[e] siècle.

— Zermelo a pris, ensuite, une leçon décisive dans les *Fondements de la géométrie* de Hilbert qui est une réalisation plus explicite encore de l'idée d'axiomatique moderne. Au lieu de définir l'objet dont traite une discipline mathématique, on part d'un certain nombre d'axiomes écrits à l'aide de symboles donnés, par exemple celui de la relation d'appartenance par le truchement de laquelle est signifiée l'existence de certains ensembles. L'ensemble des axiomes définit ainsi implicitement le concept d'ensemble, comme dans l'axiomatique formelle de la géométrie où Hilbert n'admet pas d'avance les relations primitives comme déterminées dans leur contenu, car elles ne le sont que par les axiomes, et ne sont utilisées que par ce qui en est formulé expressément par les axiomes. D'une certaine manière, les axiomes ont ainsi force de définition, en ce sens que, au lieu de définir les notions de « point » ou de « droite » et de « plan » comme le faisait Euclide, non sans embarras, ils définissent des lettres appartenant à trois domaines d'individus distincts d'un calcul *logique* (dans le cas où l'on pousse la formalisation plus loin). Il en est à peu près de même de la théorie des ensembles de Zermelo, qui ne laisse plus de place aux antinomies.

Dans l'horizon de ce nouveau style, il n'est plus directement question de fonder les axiomes, dont celui de l'infini. Ce qui importe aux mathématiciens-techniciens, la réduction de la théorie des ensembles à quelques principes précisément formulés et soigneusement distincts de toute préoccupation étrangère, est par là assuré. En particulier, la fondation de la théorie axiomatique des ensembles semble être du ressort d'un domaine différent : celui de la métamathématique.

Mais cette solution technique implique deux attitudes philosophiques.

L'une, implicite, a occupé aussi peu les philosophes que les mathématiciens, à l'exception du seul Desanti : c'est le problème des conditions d'une « reproduction » de théorie, qui est précisément une reproduction d'axiomes s'effectuant selon certaines modalités dialectiques du passage de l'implicite à l'explicite (*Idéalités mathématiques*, Éd. Seuil, 1968).

L'autre attitude concerne la philosophie explicite qui s'est immédiatement greffée sur le problème des théories axiomatiques et de leur fondation : le formalisme, précisément.

En gros, le formalisme est d'abord une conception des mathématiques qui donne toute son importance à la notion de *symbole*, à laquelle elle tend à réduire la vieille notion d'être mathématique, qui n'y est plus de mise. « La condition préalable à l'application des raisonnements logiques... c'est que quelque chose, écrivait Hilbert, soit donné à la représentation : à savoir certains objets concrets, extralogiques, qui sont présents dans l'intuition en tant que données vécues, immédiates, préalablement à toute activité de pensée. Pour que le raisonnement logique soit doué de solidité, il faut que l'on puisse embrasser ces objets du regard dans toutes leurs parties, et que l'on puisse reconnaître par intuition immédiate, en même temps que ces objets eux-mêmes, comme des données qui ne se laissent pas réduire à quelque chose d'autre, ou qui, en tout cas, n'ont pas besoin d'une telle réduction, la façon dont ils se présentent, dont ils se distinguent les uns des autres, la façon dont ils se suivent ou dont ils sont rangés les uns à côté des autres. Telle est la position philosophique fondamentale que je considère comme essentielle pour les mathématiques aussi bien que pour toute espèce de pensée, de compréhension et de communication scientifique. *En mathématiques, en particulier, l'objet de notre examen, ce sont les signes concrets eux-mêmes dont la forme nous apparaît immédiatement avec évidence,* conformément à notre position fondamentale, et demeure parfaitement reconnaissable. » Autrement dit, comme l'écrira encore Tarski, on peut considérer « les énoncés comme des inscriptions et par suite comme des corps physiques concrets »

(textes cités par R. Martin, *Logique contemporaine et Formalisation,* P. U. F., 1964, pp. 28-29). Au commencement, disait encore Hilbert, il y a le signe. Comme si Hilbert supposait nécessaire, tout simplement, de savoir lire et écrire, inscrire et discerner des signes, pour pratiquer une science.

Le formalisme s'est, ensuite, assigné la tâche de formaliser toutes les mathématiques, tâche qu'a rendue possible leur axiomatisation.

Toutes les mathématiques, au moins jusqu'au niveau atteint par les *Principia mathematica* de Russell et Whitehead, doivent pouvoir être reconstruites en *systèmes formels,* à partir de certains axiomes et à l'aide d'un certain nombre de règles d'inférence; cela consiste donc à monter pour ainsi dire des mécanismes logiques où n'intervient jamais le sens des formules sur lesquelles on opère.

Hilbert va plus loin. La notion de système formel, établie ainsi indépendamment de toute représentation, ne suffit pas. Il faut s'assurer que l'application des règles d'inférence aux axiomes ne conduit jamais à une contradiction, c'est-à-dire qu'elle ne permet jamais de dériver à la fois $a = b$ et $a \neq b$, ou $1 = 2$. Cette assurance doit faire l'objet d'un métathéorème d'impossibilité soustrait au moindre doute; c'est un élément d'une métathéorie qui étudie les démonstrations formelles et qui est donc une *métamathématique* ou *théorie de la démonstration.* Dans cette dernière théorie, Hilbert emploie une arithmétique *finitiste,* mettant en œuvre « un raisonnement direct, pourvu de contenu, qui s'accomplit en expériences de pensée sur des objets donnés à l'intuition en dehors de tout présupposé axiomatique ». Il s'agit en fait d'une arithmétique concrète immédiate, acceptable par tous les mathématiciens, y compris ceux qui refusaient résolument de considérer une collection infinie comme une donnée actuelle. C'est donc une arithmétique minimale et philosophiquement neutre, mais qui n'a été élaborée que sur les principes philosophiques d'une conception formaliste *muée en technique de formalisation,* d'autant plus fondée qu'il y a un « parallélisme absolu, comme disait J. Herbrand (*Écrits logiques,* P. U. F., 1968, p. 37), entre le raisonnement mathématique et les combinaisons de signes », parallélisme qui rend naturelle l'étude des systèmes de signes pour eux-mêmes. Mais ce formalisme ne promet pas seulement de concilier toutes les écoles nées du refus de l'infini actuel, de son adoption, ou d'attitudes nuancées intermédiaires, il a l'ambition de restaurer l'idée de rigueur absolue historiquement attachée aux mathématiques. Il prétend fonder, en dernière analyse la mathématique existante par des moyens si sévèrement sélectionnés que leur refus est inadmissible. C'est pourquoi Herbrand écrivait encore qu'il cherche seulement à examiner des théories existantes et étudie les caractères des propositions qui y sont vraies; il ne prend pas part aux discussions que celles-ci soulèvent; il ne cherche pas à les départager. Bref, le formalisme apparaît philosophiquement neutre, ce qu'il est incontestablement dans ses intentions. Faut-il penser que les théorèmes de Gödel (1931), dont résulte l'impossibilité de réaliser le programme de Hilbert, montrent en même temps l'impossibilité du neutralisme philosophique impliqué par le finitisme conçu comme moyen de sauvegarder, en dernier ressort, l'ensemble de la mathématique? De simples restrictions finitistes ne semblent pas en mesure de démontrer avec précision la légitimité du point de vue formaliste, qui s'appuie, en fin de compte, sur la croyance qu'aux énoncés intuitifs correspondent toujours des énoncés dérivables des axiomes d'un système formel. Ainsi était détruite, à sa base, une idée chère à Hilbert mais également partagée, quoique sous une autre forme, par les logicistes. Ce qui est rendu impossible par là, c'est plus qu'une philosophie, c'est l'homogénéité philosophique des mathématiques.

L'intuitionnisme

Gödel est parvenu à ses résultats en se servant, dans son travail, de *tout* ce qu'alors on pouvait savoir. Il a abattu les cloisons qui séparaient artificiellement les théories mathématiques différentes, en appliquant une mathématique intuitive à l'analyse de la mathématique formelle, en élargissant l'idée du finitisme, de celle d'arithmétique *minimale* susceptible de battre les intuitionnistes sur leur propre terrain à l'aide d'un armement encore plus limité que le leur, à celle d'une arithmétique intuitive, c'est-à-dire à la considération du programme intuitionniste. Avec Gödel, la réflexion formaliste et la réflexion intuitionniste, comme les résultats obtenus par l'école logiciste, perdent leur statut proprement philosophique pour n'être considérées qu'en qualité d'*outils.* Si cette position épistémologique, implicite dans les résultats de Gödel, n'a pas été extrêmement favorable au programme de Hilbert, elle a permis de consacrer l'importance de l'intuitionnisme au point de vue classique même, dès le moment que ce point de vue quittait le pragmatisme mathématicien pour s'intéresser aux problèmes des fondements des mathématiques.

Qu'est-ce alors que l'intuitionnisme? C'est une conception des mathématiques développée par **Brouwer** et son école (dont les plus illustres sont Beth et Heyting). D'accord avec le logicisme, il reproche aux axiomaticiens de construire des édifices de rhétorique à la signification non assurée, mais contre les logicistes il tend à établir que les mathématiques constituent une activité spécifique et indépendante de l'esprit, irréductible, en tant que telle, à la logique pure. Cette attitude originale aboutit, derrière le refus de la théorie des ensembles de Cantor et de Zermelo, à ne rien admettre qui mette en œuvre l'idée de totalité infinie actuelle. Anticipant l'idée que l'évidence du fini ne permet pas de procurer à l'infini une évidence qu'il n'a pas, de par sa nature, elle donne une nouvelle portée à l'ancien intuitionnisme; elle donne raison à Kronecker contre Cantor et Dedekind et rejette ainsi les principaux résultats admis au fondement de l'analyse, tels que le théorème de Bolzano-Weierstrass. Bref, il y a là de quoi ouvrir la voie à une nouvelle réflexion sur les notions d'*objet,* d'*existence* et de *preuves mathématiques.*

On a eu trop tendance à considérer qu'un objet mathématique était donné dès le moment où son caractère non contradictoire était établi. Pour l'intuitionniste, le critère purement logique de non-contradiction ne suffit pas. De manière plus générale, il ne suffit pas de la compatibilité, dans le sens de la non-contradiction à l'intérieur d'une théorie mathématique, pour établir l'existence de ses objets. La vérité n'a pas seulement à être non contradictoire. En mathématiques, il faut plus; il faut une *construction,* et c'est la possibilité de celle-ci qui est décisive. Cela rappelle, certes, une attitude plus traditionnelle : Descartes et Kant étaient convaincus de l'inadéquation de la logique formelle aux objets mathématiques, dans la mesure où, pour Descartes, elle ne suffit pas à les inventer, et dans la mesure où, pour Kant, la mathématique est en elle-même une activité synthétique pure, irréductible à la logique, qui est par essence analytique. Autrement dit, le raisonnement mathématique n'est pas seulement l'enchaînement d'inférences formelles : il procède, comme disait Kant, « dans l'intuition de l'objet ». Mais le néo-intuitionnisme va plus loin : existence signifie *constructibilité.* Ce qui n'est pas constructible est donc rejeté, parce que non intuitif. C'est pourquoi l'axiome de choix est rejeté par les intuitionnistes de différentes obédiences, et cela indépendamment de la question de savoir si cet axiome est compatible avec les autres. La compatibilité en soi, ou d'une théorie, garantirait aussi peu l'existence que, au point de vue intuitionniste, le manque de preuve, l'innocence d'un criminel. C'est donc positivement que l'objet mathématique est caractérisé, et intrinsèquement qu'il est intuitif. Mais l'idée de construction domine toute la production intuitionniste; elle vaut également pour le concept de déduction : une formule n'est *prouvée* que si elle résulte d'une construction.

On voit par là que l'intuitionnisme n'est pas hostile à la logique, mais il lui assigne le moment précis de son intervention : quand il s'agit d'analyser le langage d'une théorie mathématique déjà avérée. Cette logique peut être formalisée dans le cadre intuitionniste et l'a été effectivement par Heyting.

Par exemple, l'implication $A \rightarrow B$ y peut être prouvée comme une construction transformant toute preuve de A en une preuve de B; ou bien, selon Kolmogorov, comme le problème qui consiste à réduire le problème de B à celui de A, ce qui s'accorde en soi avec la conception intuitionniste de l'identité entre un énoncé mathématique et sa construction. De même, il y a une idée intuitionniste de l'arithmétique des entiers. Tout entier est confondu avec sa construction, et la suite n'est supposée donnée

Lauros - Giraudon

▲ ***Première page avec frontispice tirée d'un ouvrage d'Histoire naturelle, rédigé en Italie au XVe siècle.***

qu'en ce sens, et non comme totalité infinie actuelle. La suite des entiers joue, aux yeux de Brouwer, un rôle fondamental ; elle est à la racine des êtres mathématiques ; le procédé qui permet de la parcourir dérive d'une intuition primitive où intervient l'écoulement du temps. Enfin, avec les entiers intuitifs à la base, on peut définir des types de suites, dont les suites de choix. Celles-ci permettent de construire un continu qui n'est pas, comme celui de l'analyse arithmétisée, composé de points qui sont les éléments d'un continu linéaire ; il embrasse seulement des parties, divisibles sans limite, sans cesser d'être continues. C'est un « milieu de libre devenir », sur la base duquel il est aussi possible d'élaborer une théorie des nombres réels ou une topologie.

Cependant, s'il y a un aspect par lequel l'intuitionnisme est devenu célèbre, c'est la mise en doute des principes logiques tels qu'ils étaient enseignés par une tradition qui remonte à Aristote. L'intuitionnisme rejette, comme on le sait, la validité dans l'infini du *tertium non datur* ou tiers exclu (principe suivant lequel une proposition est soit vraie, soit fausse). Une démonstration appuyée sur ce principe n'emporterait pas l'adhésion. L'alternative « deux points doivent être distincts ou confondus » n'est pas contraignante, car il existe un couple de points qui ne sont ni l'un ni l'autre, comme l'illustre le développement décimal de π où l'on désigne par R le rang décimal où commence pour la première fois la suite 1 2 3 4 5 6 7 8 9. Si nous définissons un nombre réel tel que $\rho = \pi + 10^{-k}$, on peut écrire de proche en proche le développement de ρ. En particulier, $\rho = \pi$ est vrai si une démonstration générale établit que, dans le développement décimal de π, la suite précitée n'apparaît jamais. Bien que ρ soit univoquement déterminé, des principes constructifs ne permettent pas d'affirmer s'il est ou bien différent de π, ou bien égal à π : s'il est différent, c'est qu'on a trouvé le nombre *k*, et s'il est égal, c'est que l'on dispose de la démonstration générale mentionnée. Le tiers exclu ne s'applique pas. De plus, selon Brouwer, l'application sans limite du tiers exclu suppose la résolubilité de tout problème mathématique. Le programme de Hilbert tient implicitement compte de cette critique dans l'idée d'une arithmétique minimale. C'est déjà là un lien entre théorie de la démonstration et intuitionnisme. En effet, pour les démonstrations de non-contradiction, on pare au défaut de puissance des méthodes strictement finitistes en atténuant le point de vue finitiste par l'adjonction de méthodes démonstratives nouvelles. Par exemple, on se fie à celles des intuitionnistes pour disposer d'une évidence maximale, faute d'une arithmétique minimale ; c'est la voie indiquée par Herbrand et dans laquelle s'engage Gentzen dès 1936 pour démontrer la non-contradiction d'une importante partie de l'arithmétique élémentaire (en utilisant le principe d'induction transfinie jusqu'à ε_0). La relation étroite entre l'arithmétique classique et l'intuitionnisme s'énonce précisément dans le théorème de Kolmogorov-Gödel, qui nous apprend que la non-contradiction de l'arithmétique classique est (logiquement) *équivalente* à celle de l'arithmétique intuitionniste. Dès lors qu'il existe ainsi une *interprétation* intuitionniste d'*une* théorie classique, celle de l'arithmétique, la voie est ouverte à une extension possible (?) de ce fait à d'*autres* théories, et la nécessité posée d'une réflexion à poursuivre sur la notion de démonstration.

Les différentes attitudes à l'égard du problème des fondements des mathématiques n'ont donc plus aujourd'hui leur signification d'origine. Si entre logicistes et intuitionnistes s'est élevée une querelle de priorité, le débat entre formalistes et intuitionnistes s'enracine davantage dans le problème des fondements proprement dits. L'intuitionnisme a évolué et n'a pas été aussi peu fécond qu'on le craignait, tandis que le formalisme est revenu sur des promesses trop amples, tout en ayant dû étendre ses moyens, pour la réalisation du programme de Hilbert révisé, au-delà de ce qui était intuitivement assuré pour l'intuitionnisme strict. Tout s'est donc passé comme si les diverses attitudes n'avaient fait que s'offrir les unes aux autres des outils indispensables à la réalisation (plus ou moins limitée) de leurs exigences.

Philosophie et épistémologie des mathématiques

Les conceptions les plus philosophiques des mathématiques se sont muées en techniques si précises que la réflexion philosophique y est devenue sinon impossible, du moins trop exigeante pour qu'il soit pratiquement possible de concilier la pertinence et l'intelligibilité philosophique. Car c'est le philosophe qui est aujourd'hui un profane. Dans la mesure où les mathématiques ne s'offrent plus comme discours à dépasser vers un discours philosophique ultime et fondateur, on peut se demander si quelque philosophie peut encore avoir sa place *au voisinage des* mathématiques.

Problèmes philosophiques des mathématiques actuelles

La première tâche qui s'offre à une telle interrogation, c'est de préciser de quelles mathématiques il s'agit. La totalité intégrale des mathématiques, construite de proche en proche, capable d'éclairer le pur et l'appliqué, d'expliquer la nature ultime des êtres et des démarches, c'est sans doute un beau rêve, mais il ne semble pas avoir grand sens. Qu'en est-il alors de l'*unité* des mathématiques ?

Longtemps, les mathématiques ont vécu sur une distinction bien nette entre le discret et le continu, séparés par un fossé qu'*on n'a comblé jusqu'ici que pour le creuser davantage*. Depuis Descartes, on n'a cessé de jeter les ponts entre les deux domaines. D'abord un parallélisme de structure entre la géométrie et l'algèbre, qui s'est de plus en plus précisé. Ensuite, le développement de l'analyse, c'est-à-dire le « saut » dans des considérations où le concept d'infini joue un rôle. Enfin, l'arithmétisation de l'analyse, c'est-à-dire l'élaboration purement arithmétique du contenu linéaire, qui a permis à Hilbert de réduire la géométrie elle-même, ou plutôt les types de géométrie à l'arithmétique des réels. Le tour de force admiré consacre l'unité de la grandeur et du nombre, indique que ce qui s'applique au calcul des nombres réels s'applique également au calcul avec des segments de droite. Or, c'est la méthode axiomatique qui a procuré ces résultats.

Cette méthode est féconde par elle-même, mais aussi par les problèmes qu'elle pose. Elle conduit aux idées de formalisation et de système formel. Mais elle permet aussi d'élucider et d'expliciter la nature de types abstraits de structure, de poser les problèmes au plus haut degré de généralité et de précision, de montrer l'intérêt de l'appareil du langage et de la logique, la nécessité de distinguer le système et ses interprétations, puisque l'étude d'un système formel induit celle d'une métathéorie qui, si elle est précise, doit avoir les moyens de nommer sans confusion les termes et les formules du système qu'elle étudie.

Mais cette unité méthodologiquement assurée par l'axiomatisation n'est pas aussi entière au niveau le plus profond, c'est-à-dire de la fondation justifiée du continu, où intervient l'infini, sur le discontinu qui peut être infini potentiel, mais qu'il n'y a aucune nécessité à considérer

Snark International

◀ *Dessin original tiré de* **Assiculi... adversus mathematiquos atque philosophos** *de* **Giordano Bruno** *(1548-1600), penseur et écrivain du XVI^e^ siècle. Il réussit à propager et à défendre le* **Système Copernic,** *mais sa cosmologie lui valut de périr sur le bûcher en 1600.*

comme ensemble achevé : ne suffit-il pas de dire, comme Poincaré, que « quand je parle de tous les nombres entiers, je veux dire : tous les nombres entiers qu'on a inventés, et tous ceux que l'on pourra inventer un jour... et c'est ce « que l'on pourra » qui est l'infini » ? On a vu qu'il n'est pas possible de joindre l'infini à partir de finitismes stricts. Suffit-il d'adjoindre aux moyens intuitivement assurés, qui ne reposent pas sur l'infini actuel, des énoncés axiomatiques tels que ceux de l'infini ou du choix par simple droit et autorité de législation axiomatique ? Est-ce une raison suffisante pour justifier cela que d'alléguer, ce qui est le recours constant du « working mathematician », qu'il nous faut produire des fondations susceptibles de reproduire l'acquis classique, dont personne ne met en doute la signification pour la mathématique aussi bien appliquée que pure ? Est-ce là le signe du caractère arbitraire des choix classiques, qui ne justifieraient alors que des développements liés à leur tour aux développements et aux exigences de domaines étrangers à la mathématique ? Non, sans doute. Car il semble précisément que les parties les moins liées aux domaines étrangers sont celles qui ont un caractère « spéculatif », et qui sont le fruit de l'imagination logique. Cela empêche pour le moins tout jugement précipité, toute philosophie arrêtée des mathématiques qui mobilisent chaque fois à nouveau une réflexion philosophique. Car une chose est certaine : c'est que les mathématiques sont en perpétuelle interrogation sur leur organisation, les rapports entre leurs différentes parties, leurs différents résultats, les meilleures manières de les agencer. Elles sont toujours en réorganisation. Mais elles ne cessent pas de se poser des problèmes au sujet de leur validité. C'est pourquoi les théories de la démonstration ne tendent pas à donner une réponse définitive à un problème définitivement formulable, mais suivent le mouvement de cette liberté créatrice, même si sa création n'est point l'écoulement continu et sans heurts des propositions et des théorèmes. Les mathématiques alors ne prouvent pas, pour reprendre ici une expression bien connue, le mouvement en marchant, mais elles produisent les principes de leur propre mouvement. Qu'est-ce à dire sinon qu'il est imprudent, non seulement de philosopher sur les mathématiques à partir d'une philosophie atrophiée, mais aussi de croire qu'il n'y a pas de rapport entre philosophie mathématique et mathématique, puisque cette croyance fut celle du programme de Hilbert, lequel a été, précisément, c'est-à-dire mathématiquement, réfuté ?

Épistémologie et histoire des mathématiques

S'il existe donc une réflexion philosophique, techniquement armée, capable de maintenir dans son interrogation l'exigence de sonder la validité mathématique dans une théorie de la preuve, inachevée et prometteuse, susceptible de réaliser des progrès suffisamment significatifs pour avoir des répercussions sur le cadre logique usuel, dont elle révèle l'extrême simplicité par rapport aux constructions multiples qu'on peut y réaliser, cette réflexion se maintient et se cultive au sein de cette mathématique supérieure qui s'occupe (encore et toujours) [*cf.*, par exemple, maints articles de G. Kreysel] des fondements. Le philosophe, c'est le mathématicien que la mathématique suscite pour débloquer une problématique, dépasser une situation figée par des attitudes d'école, dégeler un point de vue ancré dans la technique. Le philosophe, c'est le mathématicien soucieux de la signification des démarches qu'il effectue, qu'il engage sur la base d'une analyse du matériau auquel il donne une nouvelle perspective, ou qu'il gagne à une nouvelle fonction. Un travail de pensée gît souvent sous l'écorce conceptuelle. Et c'est du travail de philosophe, au sens propre, que sa mise en chantier en vue de sa restitution, non pas en tant qu'activité mentale inaccessible, mais en tant que téléologie intellectuelle dont on doit expliciter la démarche et les moyens dans une configuration conceptuelle donnée. Parfois ce travail est déjà indiqué par le mathématicien : posant qu'il existe deux théories des ensembles, l'une qui admet l'axiome de constructibilité, l'autre qui le rejette. Quand on admet la constructibilité, on admet, évidemment, un certain nombre de conséquences et de propriétés qui en résultent, dont le fait que l'axiome est compatible avec les autres axiomes de la théorie. Cette consistance relative en établit la vérité dans le domaine des ensembles constructibles. D'où la nécessité d'une analyse de la notion de constructibilité. Mais cette analyse n'est pas conduite conceptuellement. Le concept se déploie dans la technique. Car c'est un travail nécessairement technique, lui-même impossible sans analyse conceptuelle, sans élucidation de la notion de constructibilité dans ce contexte. C'est-à-dire que les techniques mathématiques ne se réduisent plus toutes à des problèmes qu'on peut confier à des sous-traitants. Elles fournissent les conditions minimales de la rationalité mathématique.

C'est précisément ce qui justifie l'analyse épistémologique de moments mathématiques privilégiés, qu'on poursuit en France, depuis les analyses par trop philosophiques d'A. Comte jusqu'aux exigences plus raffinées de Bachelard, de Cavaillès et de Desanti. Leur justification est exprimée par L. Brunschvicg, qui pensait que c'est le développement de la mathématique « qui nous instruit des fonctions de l'intelligence », ce qui demeure vrai si l'on prend soin de briser les cadres factices des facultés, de briser même ce sur quoi L. Brunschvicg bâtissait : le cadre factice de « l'intelligence occidentale », de l'idée ambiguë de développement, de l'illusion d'une critique philosophique extérieure. Mais l'idée d'un chemin qui n'est ni l'étude de l'activité mentale mathématicienne, ni la réflexion outillée sur l'idée de construction, de preuve, voire de déduction, et qui permet une caractérisation intrinsèque du « réel » mathématique, ne peut être interdite.

A une condition cependant, qui doit être effectivement remplie : que l'épistémologue participe à la fois « du mouvement de l'intelligence et de la rigueur logique ». Qu'il y participe : c'est-à-dire qu'il s'interdise de fixer des notions mobiles ou de mobiliser des notions inertes. Qu'il saisisse que la logique mathématique elle-même est un des mouvements de l'intelligence.

Ce mouvement de l' « intelligence » a été caractérisé par Cavaillès comme un mouvement « dialectique ». Cela s'entend d'abord négativement : car ni l'expérience au sens physique, ni aucun *a priori* logique ne saurait fonder les mathématiques. Ni non plus, à vrai dire, aucune genèse empirique, car « l'enfant devant son boulier est mathématicien, et tout ce qu'il y peut faire est mathématique ». La mathématique est dès son « commencement » mathématique à part entière. Mais son devenir effectif reflète une structuration où l'on distingue des aspects paradigmatiques et des constructions thématiques. Une construction paradigmatique est, par exemple, le mouvement formel, « le moment de la variable » où, « en remplaçant les déterminations d'actes par la place vide pour une substitution, on s'élève progressivement à un degré d'abstraction qui donne l'illusion d'un formel irréductible ». Tel serait le moment hilbertien pris dans son mode de réflexion sur les systèmes formels et leurs interprétations. Toutefois, « la formalisation n'est réalisée que lorsque au dessin des structures se superposent, systématisées, les règles les régissant. La *thématisation*

prend son départ dans l'enchaînement saisi cette fois dans son vol, trajectoire qui se mue en sens » (*Sur la logique et la théorie de la science,* pp. 29-30). Style second qui est le moment métamathématique où le thème principal est la fondation du mouvement démonstratif lui-même.

C'est dans cette voie que s'est engagé J. T. Desanti, convaincu qu'une épistémologie des mathématiques doit rompre toute attache avec les discours philosophiques en « s'installant dans le contenu des énoncés scientifiques. Pour les mathématiques comme pour les autres sciences, il faut « ou se taire ... ou bien en parler de l'intérieur, c'est-à-dire en les pratiquant » (*Philosophie silencieuse,* Seuil, 1969, p. 108). Mais il y a des problèmes épistémologiques, c'est-à-dire des systèmes d'expressions appartenant à un domaine théorique donné et qui exigent, à un moment du développement de cette théorie, une attention particulière, la mise en chantier d'une réflexion indispensable, soit pour lever un obstacle à l'intelligibilité de la théorie, soit pour parvenir à une intelligibilité supérieure. Ainsi, la théorie naïve des ensembles a-t-elle entre 1900 et 1908 posé un certain nombre de problèmes :

— exigence d'une démonstration de la proposition « Tout ensemble peut être bien ordonné »;

— exigence de restrictions sur le concept d'ensemble pour éviter les paradoxes;

— exigence enfin de déterminer le statut de l'axiome de choix, indispensable à la démonstration du théorème de bon ordre.

Or, si la première et la troisième exigences ont un caractère régional, la seconde implique le programme d'une axiomatisation au sens abstrait qui doit être la reproduction de l'édifice ensembliste tout entier muni de garanties anti-contradictoires, c'est-à-dire, en fait, l'élaboration d'un langage rigoureusement construit. Nous avons déjà remarqué plus haut que Desanti s'est attaché à l'analyse du mouvement complexe d'axiomatisation dans les *Idéalités mathématiques*. Mais on peut envisager une épistémologie qui, au-delà des raffinements intrinsèques, s'intéresserait aux variétés stylistiques de la construction mathématique, qui tâcherait d'intégrer l'individuel, le processus concret du travail dans l' « œuvre » mathématicienne.

Ainsi, comme le remarque G. G. Granger (*Essai d'une philosophie du style,* A. Colin, 1968, p. 20), on peut introduire la notion de nombre complexe de plusieurs manières sans modifier les propriétés opératoires caractérisant la structure algébrique du « corps des complexes ». La représentation trigonométrique fait intervenir un angle, l'argument, et un nombre réel, le module. Le mathématicien danois du XVIII^e siècle Wessel l'a proposé dans l'intention d'établir un calcul qui porte à la fois sur les grandeurs et les « directions ». L'être mathématique ainsi constitué peut être envisagé de deux manières : soit comme élément statique, ou vecteur, soit comme un opérateur appliqué à des vecteurs. Le premier cas suggère un passage naturel des coordonnées polaires aux coordonnées cartésiennes. Mais le second suggère, grâce à l'apport intuitif de l'image géométrique, une construction immédiate des lois de la multiplication des nombres complexes. Toutefois, d'autres concepts sont possibles du « corps » des complexes : soit comme matrice carrée régulière d'un certain type, soit plus abstraitement comme corps d'extension des réels. Ces différentes façons constituent des faits de style. Ces faits peuvent être à l'origine de véritables variations conceptuelles et peuvent déterminer l'orientation d'un concept. Le « style » révèle donc un aspect du travail mathématique, « une dialectique de son développement interne » qui vient enrichir l'épistémologie de nouvelles nuances, de nouveaux aperçus sur ce travail.

Mais ce type d'épistémologie, aussi proche qu'il soit du travail mathématique, comme le souhaite Desanti, reçoit la mathématique constituée. Ce savoir accompli, le philosophe n'a donc pas à l'énoncer. Mais seulement à détruire le discours aveugle et second qui l'accompagne, à déchiffrer, au plus près de l'activité mathématique, ce qui enchaîne et éclaire les motivations qui lui sont propres. Il ne peut donc, à partir de là, ériger quelque nouveau système philosophique, mais seulement expliciter la philosophie que ce savoir véhicule, et le considérer moins pour en tirer une leçon philosophique que pour en saisir l'effectivité, fût-ce au point limite qu'est l'état momentané d'un savoir.

LE LANGAGE ENSEMBLISTE

Nous étudierons le langage ensembliste en nous appuyant le plus possible sur des notions intuitives. Cette façon de procéder permet d'acquérir très rapidement ce langage, indispensable pour progresser en mathématiques.

Par contre, elle présente des dangers : les notions intuitives, courantes, « naïves », sont trop imprécises. Ce sera l'objet du chapitre suivant traitant de la *théorie des ensembles* que de redéfinir plus rigoureusement certaines notions, de montrer sur quels choix elles reposent.

De toute façon, en mathématiques, il ne s'agit pas tant d'approfondir des notions « en soi » que d'étudier les rapports entre les divers êtres mathématiques. L'étude des relations existant entre plusieurs notions éclaire davantage chacune d'elles que leur étude isolée ou leur approfondissement à perte de vue.

Ensembles et éléments

Le mot **ensemble** est le mot le plus « neutre » que l'on puisse utiliser pour désigner un groupement imaginaire d'objets; mais il ne suffit pas d'imaginer un ensemble pour qu'il existe. Pourtant, dans un premier temps, nous nous en contenterons en nous limitant à des ensembles définis de façon indiscutable.

Ainsi : $\{0, 2, 4, 6, 8\}$ est un ensemble (l'ensemble des 5 premiers nombres pairs). De même : $\{x, y, z\}$ est l'ensemble de 3 objets x, y, z. Tout objet qui « fait partie » de l'ensemble considéré est appelé **« élément de l'ensemble »**; « x est élément de l'ensemble E » pourra s'écrire également : « $x \in E$ », qui se lit « x appartient à E » (E désigne à la fois l'ensemble et le nom de cet ensemble). Ainsi, si $E = \{0, 2, 4, 6, 8\}$, on peut écrire : $4 \in E$ et $0 \in E$. Par contre, 7 n'appartient pas à l'ensemble E : on notera $7 \notin E$, qui se lit « 7 n'appartient pas à E ». La notion d'appartenance n'est pas une notion de propriété : un même élément peut appartenir à plusieurs ensembles. Il n'y a pas de propriété privée en mathématiques !

On remarquera que, très souvent (mais pas toujours), les ensembles sont désignés par des lettres majuscules (E, A, B, ...) alors que les éléments sont désignés par des lettres minuscules (a, b, x, y, ...). Ceci se complique

▶ **La Mathématique** *d'Agostino di Duccio, sculpture ornant le bas-relief d'une chapelle en Italie (Rimini).*

Giraudon

du fait qu'un ensemble est un objet mathématique comme les autres; il peut donc être considéré comme élément d'un autre ensemble. Par exemple, une droite D est un ensemble de points; mais cette même droite est un élément de l'ensemble des droites d'un plan contenant D.

Les accolades sont réservées aux ensembles; elles entourent les éléments d'un ensemble. On distinguera par conséquent l'élément a (ou l'objet a) de *l'ensemble à un seul élément* $\{a\}$, appelé singleton; un ensemble à 2 éléments $\{a, b\}$ est une paire, ou doubleton.

Définition (construction) d'un ensemble

Un ensemble peut être défini de deux façons :

— par une description superficielle, mais complète, exhaustive, en citant tous ses éléments; c'est la définition en *extension.*

Exemple : $E = \{0, 2, 4, 6, 8\}$ est défini en extension, puisque l'on a cité tous ses éléments : 0, 2, 4, 6, 8.

Un objet qui n'est pas sur cette « liste » n'appartient pas à l'ensemble : $15 \notin E$, par exemple. Chaque élément de l'ensemble ne doit être écrit qu'une fois; si un même élément se retrouve écrit deux fois, il faut en supprimer une : $\{3, 7, 4, 7\} = \{3, 7, 4\}$; par contre, l'ordre n'a pas d'importance : $\{3, 7, 4\} = \{3, 4, 7\} = \{7, 4, 3\} = ...$

— par une description qui permette de comprendre quels sont les éléments qui appartiennent ou qui n'appartiennent pas à l'ensemble, sans les citer tous. C'est la définition en *compréhension,* par une propriété caractéristique des éléments de l'ensemble que l'on veut définir, c'est-à-dire par une propriété :

- que tous les éléments de l'ensemble ont;
- qu'ils sont les seuls à avoir.

Il est cependant nécessaire de « puiser » les éléments du nouvel ensemble dans un ensemble plus vaste (le référentiel), afin d'être sûr de définir un nouvel ensemble.

Exemple : si $\mathbb{N}$ désigne l'ensemble des entiers naturels ($\mathbb{N} = \{0, 1, 2, 3, ...\}$), nous pouvons définir l'ensemble E des nombres entiers naturels qui sont pairs et strictement inférieurs à 10 en écrivant :

$$E = \{x \in \mathbb{N} \mid x \text{ est pair et } x < 10\}.$$

Les accolades indiquent qu'il s'agit d'un ensemble; « $x \in \mathbb{N}$ » indique que les éléments de E sont des éléments de $\mathbb{N}$, c'est-à-dire des entiers naturels; la barre se lit « tels que » et « x est pair et $x < 10$ » est la propriété caractéristique des éléments de E. On lira donc : « E est égal à l'ensemble des x appartenant à $\mathbb{N}$ tels que x est pair et x est strictement inférieur à 10 ». Les entiers qui vérifient ces conditions sont : 0, 2, 4, 6, 8,

$$\text{donc } E = \{0, 2, 4, 6, 8\}.$$

Autre exemple : avec $\mathbb{R}$ = ensemble des nombres réels.

$$E = \{x \in \mathbb{R} \mid \sin x = 1\}$$
$$= \left\{\frac{\pi}{2}, \left(\frac{\pi}{2} + 2\pi\right), \left(\frac{\pi}{2} + 4\pi\right), ..., \left(\frac{\pi}{2} + 2k\pi\right)...\right\}$$

Nous insisterons enfin sur le fait qu'un ensemble n'est bien défini que lorsque l'on peut répondre par oui ou par non, de façon indiscutable, et pour tout objet, à la question : « Cet objet est-il élément de E ? »

Ainsi, dans l'exemple précédent : $15 \notin E$, $\pi \notin E$, $\frac{5\pi}{2} \in E$, la tour Eiffel $\notin$ E.

Par contre, l' « ensemble des grands champions automobiles », ou l' « ensemble des personnes à cheveux bruns » ne sont pas définis; ce ne sont pas des ensembles : les propriétés sont trop vagues, et se prêtent à des interprétations différentes pour un même individu.

Ensembles finis ou infinis

Un ensemble peut être fini ou infini :

$$\{0, 2, 4, 6, 8\} \text{ est fini.}$$

L'ensemble des nombres entiers pairs :

$$P = \{0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, ...\} \text{ est infini.}$$

Ensemble vide

Un ensemble qui n'a pas d'éléments est un ensemble vide; on le note $\varnothing$ ou $\{\ \}$. Par exemple :

$$F = \{x \in \mathbb{N} \mid x > 7 \text{ et } x < 5\} = \varnothing$$

car aucun entier naturel n'est à la fois strictement supérieur à 7 et strictement inférieur à 5.

$\mathbb{N}$ = ensemble des **nombres entiers naturels**
= { 0, 1, 2, 3, ... }

$\mathbb{Z}$ = ensemble des **nombres entiers relatifs**
= { ..., − 3, − 2, − 1, 0, 1, 2, 3, ... }

$\mathbb{D}$ = ensemble des **nombres décimaux,** c'est-à-dire des nombres dont le développement décimal illimité ne contient que des zéros à partir d'un certain rang.

exemple : 7,25 = 7,250 00 ...
12 = 12,000 0 ...

Ils peuvent toujours se mettre sous la forme $\frac{x}{10^n}$, x étant un entier relatif.

$\mathbb{Q}$ = ensemble des **nombres rationnels**, c'est-à-dire des nombres x tels qu'il existe 2 entiers relatifs p et q vérifiant $x = \frac{p}{q}$.

$\mathbb{Q}$ est aussi l'ensemble des nombres dont le développement décimal illimité est *périodique* c'est-à-dire que le même «groupe de chiffres» se répète indéfiniment :

$\frac{11}{7} = 1,\overline{571\,428}\,571\,428\,5\ ...$ $\quad \frac{13}{3} = 4,333\,3\ ...$

La périodicité n'apparaît quelquefois qu'à la 30^e décimale ou plus tard encore.

$\mathbb{R}$ = ensemble des **nombres réels**
= ensemble des nombres rationnels et irrationnels
= ensemble des nombres dont le développement décimal illimité est périodique ou apériodique (sans période)

nombres irrationnels : nombres dont le développement décimal illimité est *apériodique.*
$\sqrt{2}$ = 1,414 213 ...
π = 3,141 59 ...
sont des nombres irrationnels.

$\mathbb{C}$ = ensemble des **nombres complexes**

nombres complexes : nombres de la forme $a + ib$, où a et b sont deux réels et i un nombre «imaginaire pur» tel que $i^2 = -1$

on a : $\mathbb{N} \subset \mathbb{Z} \subset \mathbb{D} \subset \mathbb{Q} \subset \mathbb{R} \subset \mathbb{C}$

Richard Colin

$\in$: relation d'appartenance entre un élément x et un ensemble E
$x \in E$ se lit «x appartient à E»
$x \notin E$ se lit «x n'appartient pas à E»

$\subset$: relation d'inclusion entre deux ensembles ou entre deux parties
$A \subset B$ se lit «A est inclus dans B»
$A \not\subset B$ se lit «A n'est pas inclus dans B»
$B \supset A$ se lit «B contient A»

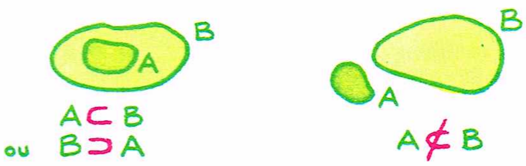

$=$: relation d'égalité entre deux objets de même nature
$A = B \Rightarrow$ A et B ne sont qu'un seul et même objet

Richard Colin

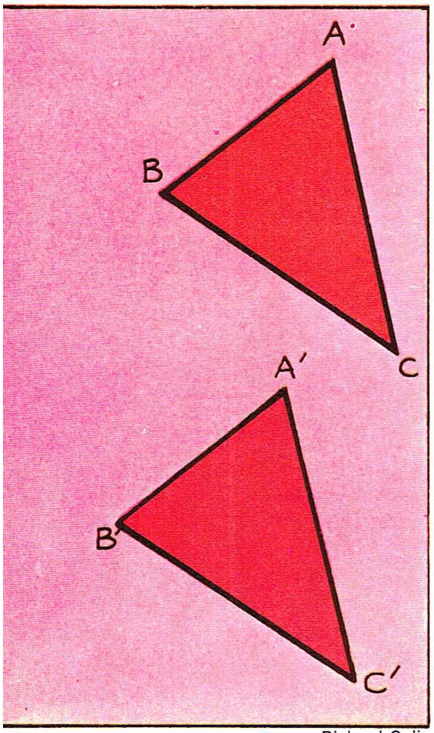

Richard Colin

▲ *Les deux triangles* ABC *et* A′B′C′ *se « ressemblent beaucoup »; ils sont même « superposables ». Mais ils ne sont pas égaux pour autant, car ils sont* distincts.

▶ *Ci-contre, de haut en bas, représentations schématiques, à l'aide de diagrammes de Venn, du* **complémentaire d'un sous-ensemble**; *de l'*intersection **de deux ensembles**; *de* **deux ensembles disjoints.**

Rien ne distingue un ensemble vide d'un autre ensemble vide; il n'y a donc qu'un ensemble vide (en fait, on pose l'existence d'un tel ensemble); et quel que soit l'objet x, $x \notin \varnothing$.

Égalité

La notion « moderne » d'égalité exclut la possibilité que deux objets distincts soient égaux. C'est en fait l'identité. Deux objets ne sont égaux que s'il s'agit d'un seul et même objet; $(3 + 2)$ et $(4 + 1)$ désignent en fait le même objet, le nombre 5; la relation d'égalité : $3 + 2 = 4 + 1$ est donc vérifiée. Par contre, deux triangles distincts ABC et A′B′C′ (avec A différent de A′ par exemple) ne peuvent être égaux, puisque distincts. C'est ce qui explique la disparition des défunts « cas d'égalité des triangles » des manuels scolaires récents; de même, on parlera d'aires égales et non de surfaces égales pour deux figures distinctes (l'aire étant la mesure de la surface), etc.

Ensembles égaux

Deux ensembles ne seront égaux que s'ils ont exactement les mêmes éléments, autrement dit que s'il ne s'agit que d'un seul et même ensemble.

Exemple :

$K = \{11, 13, 15, 17, 19\}$
$L = \{x \in \mathbb{N} \mid x \text{ est impair}, \ x > 10 \text{ et } x < 20\}$

L a pour éléments : 11, 13, 15, 17, 19
donc $K = L$.

Inclusion

Si l'on considère seulement certains éléments d'un ensemble, on considère une *partie* de cet ensemble; on dit encore un sous-ensemble de cet ensemble.

Exemple : $A = \{0, 4, 8\}$ est un sous-ensemble ou une partie de $E = \{0, 2, 4, 6, 8\}$ puisque A est constitué uniquement d'éléments de E. On note : $A \subset E$: « A est INCLUS dans E ». L'inclusion est une relation *entre deux ensembles* ou *sous-ensembles.*

Par définition :

$$A \subset E \Leftrightarrow [x \in A \Rightarrow x \in E]$$

Le signe $\Leftrightarrow$ se lit et signifie « équivalent à ».
Le signe $\Rightarrow$ se lit et signifie « implique » ou « entraîne ».

Si A est inclus dans E, tout élément de A est élément de E, et réciproquement, si tout élément de A est élément de E, alors A est inclus dans E. Il revient au même d'écrire $A \subset B$ (A est inclus dans B) ou $B \supset A$ (B contient A).

★ Tout ensemble est inclus dans lui-même. Pour tout ensemble E, $E \subset E$; E est la *partie pleine* de E.

★ L'ensemble vide $\varnothing$ est inclus dans tout ensemble : pour tout ensemble E, $\varnothing \subset E$; $\varnothing$ est la partie vide de E. (On peut en effet toujours affirmer que les éléments de $\varnothing$ sont aussi éléments de E; personne ne pourra montrer un élément de $\varnothing$ qui n'appartient pas à E, puisque $\varnothing$ n'a pas d'éléments !)

★ Toute partie de E qui n'est ni vide ni pleine est une *partie propre* de E.

★ Il existe un ensemble formé de toutes les parties de E, noté $\mathfrak{P}(E)$.

Exemple : $A = \{x, y, z\}$.

$$\mathfrak{P}(A) = \{\varnothing, \{x\}, \{y\}, \{z\}, \{x, y\}, \{y, z\}, \{z, x\}, \{x, y, z\}\}$$

Il y a donc 6 parties propres de A et $2^3 = 8$ parties de A au total.

Complémentaire d'un sous-ensemble

Soit E un ensemble, et A une partie de E. Les éléments de E qui ne sont pas éléments de A forment un ensemble, le complémentaire de A par rapport à E, noté $\complement_E A$ ou $(E - A)$ ou encore $\bar{A}$.

$$\complement_E A = \{x \in E \mid x \notin A\} \quad \text{et :}$$

$$x \in \complement_E A \Leftrightarrow x \in E \quad \text{et} \quad x \notin A$$

Exemple :

$E = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$
$P = \{0, 2, 4, 6\}$

$$\complement_E P = \{1, 3, 5, 7\}$$

en particulier :

$$\complement_E \varnothing = E \qquad \complement_E E = \varnothing \qquad \complement_E(\complement_E A) = A$$

Richard Colin

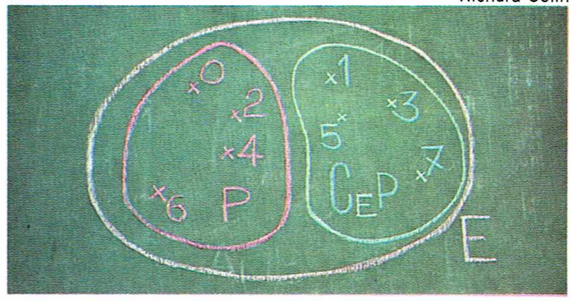

« Opérations » sur les ensembles

Nous grouperons ici toutes les « opérations » qui associent à deux ensembles un troisième ensemble.

Intersection de deux ensembles

Soit A et B deux sous-ensembles d'un ensemble E; l'ensemble des éléments communs à A et à B, c'est-à-dire l'ensemble des éléments qui appartiennent à la fois à A et à B, est l'intersection de A et de B, notée « $A \cap B$ » et lue « A inter B » :

$$A \cap B = \{x \in E \mid x \in A \quad \text{et} \quad x \in B\}$$

ou encore :

$$x \in A \cap B \Leftrightarrow x \in A \quad \text{et} \quad x \in B$$

Exemple :

$A = \{0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30\}$
$B = \{0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40\}$
$A \cap B = \{0, 15, 30\}$

Richard Colin

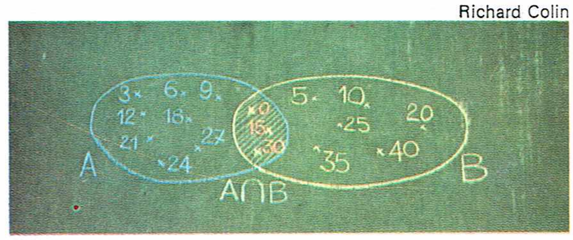

L'intersection de deux ensembles peut être vide, mais elle existe toujours :

Exemple : $C = \{0, 10, 20, 30\}$
$D = \{5, 6, 7\}$
$C \cap D = \varnothing$

Richard Colin

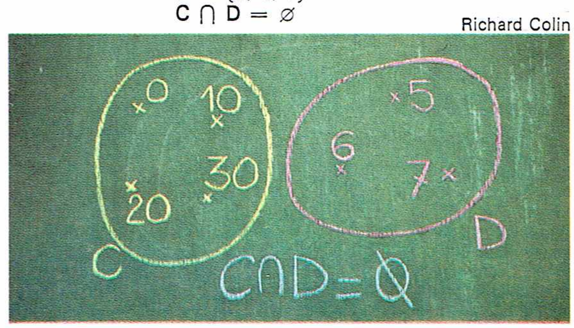

$\cap$: intersection (de deux ensembles ou parties)
$A \cap B$ se lit : «A inter B»

$\cup$: union ou réunion (de deux ensembles ou parties)
$A \cup B$ se lit «A union B»

$\bigcap_{i \in I} A_i$: intersection de toutes les parties A_i dont l'indice i appartient à I (ensemble d'indices)
Si $I = \{1, 2, 3, ..., n\}$

$$\bigcap_{i \in I} A_i = A_1 \cap A_2 \cap A_3 \ldots \cap A_n$$

$\bigcup_{i \in I} A_i$: union de toutes les parties A_i telles que $i \in I$

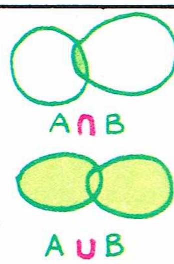

Richard Colin

Les ensembles sont alors DISJOINTS.

Remarquons que, si $A \subset B$, alors $A \cap B = A$.

Exemple : $I = \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$
$J = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$
$I \subset J \Rightarrow I \cap J = I = \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$

et réciproquement : $I \cap J = I \Rightarrow I \subset J$.

Enfin, $\varnothing \cap A = \varnothing$ pour tout ensemble A.

Réunion de deux ensembles

Soit deux sous-ensembles A et B de E ; l'ensemble de tous les éléments de A et de B, c'est-à-dire l'ensemble des éléments qui appartiennent soit à A, soit à B, soit aux deux à la fois, s'appelle la réunion des ensembles A et B :

$$A \cup B = \{x \in E \mid x \in A \quad \text{ou} \quad x \in B\}$$

ou :

$$x \in A \cup B \Leftrightarrow x \in A \quad \text{ou} \quad x \in B$$

On remarquera que le « ou » utilisé ici est un « ou » inclusif, c'est-à-dire qu'il inclut la possibilité d'avoir les deux assertions à la fois ; par conséquent, les éléments de l'intersection sont aussi dans la réunion :

$$A \cap B \subset A \subset A \cup B$$
$$A \cap B \subset B \subset A \cup B$$

Remarquons que $A \cup A = A$ et $A \cup \varnothing = A$ pour tout ensemble A ; enfin, que, si $A \subset B$, alors $A \cup B = B$ et réciproquement : $A \cup B = B \Rightarrow A \subset B$.

Exemple : avec l'ensemble précédent (pris pour l'intersection) :

$A \cup B = \{0, 3, 6, 9\ 12, 15, 18, 21,$
$24, 27, 30, 5, 10, 20, 25, 35, 40\}$

Richard Colin

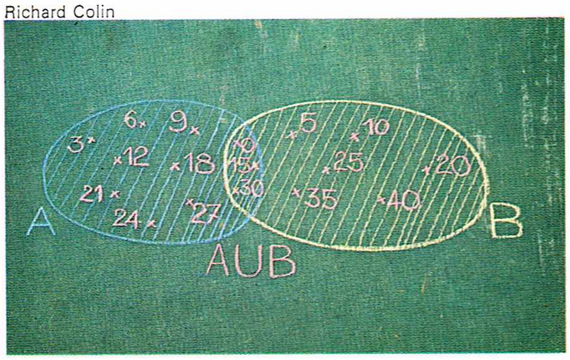

◄ ***Représentation schématique, à l'aide d'un diagramme de Venn, de la* réunion *de deux ensembles.***

Autre exemple : $C = \{0, 2, 4, 6\}$
$D = \{1, 3, 5\}$
$C \cup D = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$

Richard Colin

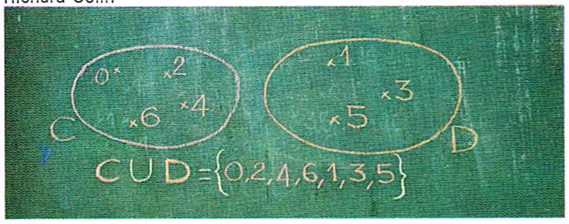

◄ ***Un autre exemple de la* réunion *de deux ensembles.***

Différence symétrique de deux ensembles

Soit A et B deux sous-ensembles de E. La différence symétrique de A et de B est l'ensemble des éléments qui appartiennent soit à A seulement, soit à B seulement : on la note « $A \Delta B$ », qui se lit : « A delta B »

$$A \Delta B = \{x \in E \mid (x \in A \text{ et } x \notin B) \quad \text{ou} \quad (x \notin A \text{ et } x \in B)\}$$
$$= \{x \in E \mid x \in A \cup B \quad \text{et} \quad x \notin A \cap B\}$$

Plus simplement : $A \Delta B = \complement_{A \cup B} (A \cap B)$
$= (A \cup B) - (A \cap B)$.

Exemple : avec le même exemple que pour l'intersection et la réunion :

$A \Delta B = \{3, 6, 9, 12, 18, 21, 24, 27,$
$5, 10, 20, 25, 35, 40\}$

(on retire de $A \cup B$ tous les éléments de $A \cap B$).

Les propriétés de la réunion et de l'intersection seront étudiées dans le chapitre suivant.

Richard Colin

Δ : **différence symétrique de 2 ensembles**
A Δ B se lit : « A delta B »
A Δ B = A ∪ B − A ∩ B

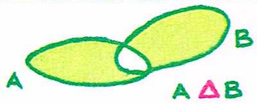

$\complement_E A$: **complémentaire de A dans E**

A × B : **produit cartésien de l'ensemble A par l'ensemble B.**
Se lit : « A croix B »

A = {a, b, c}
B = {x, y}
A × B = {(a,x)(b,x)(c,x)(a,y)(b,y)(c,y)}

card A : **se lit : « Cardinal de A »**

A = {a, b, c} card A = 3

Relations binaires

Couples

Considérons une paire $\{x, y\}$; nous savons que $\{x, y\} = \{y, x\}$; autrement dit, l'« ordre » dans lequel sont rangés x et y n'a pas d'importance. Un couple sera, au contraire, un ensemble de deux éléments sur lequel a été défini un « ordre ».

Dans le couple (x, y), noté avec des parenthèses, « x est avant y », ou « x est la première projection (ou composante), y est la seconde projection (ou composante) ». Par conséquent, les couples (x, y) et (y, x) ne sont pas égaux.

Deux couples (x, y) et (x', y') sont égaux si, et seulement si, leurs premières projections sont égales entre elles et leurs secondes projections sont égales :

$$(x, y) = (x', y') \Leftrightarrow x = x' \text{ et } y = y'$$

Exemples :

$$(2 + 4, 10) = (6, 2 \times 5)$$
$$(15, 150) = (5 \times 3, 5 \times 30)$$

En fait, n'ayant pas vraiment défini ce qu'était un « ordre », la définition d'un couple repose sur une distinction formelle entre le premier et le second élément du couple, ainsi que nous le verrons au chapitre suivant.

Produit cartésien de deux ensembles

Soit E et F deux ensembles, et soit $E \times F$ (qui se lit « E croix F ») l'ensemble de *tous* les couples (x, y) tels que x est élément de E et y est élément de F :

$$E \times F = \{(x, y) \mid x \in E \quad \text{et} \quad y \in F\}$$

$E \times F$ est le produit cartésien de E par F.

Comme les couples (x, y) et (y, x) sont différents, les produits cartésiens $E \times F$ et $F \times E$ ne sont pas égaux. Il suffit d'inverser les couples de $E \times F$ pour obtenir $F \times E$.

On remarquera au passage que l'on n'a pas précisé d'ensemble de référence pour les couples (x, y) dans la définition de $E \times F$; c'est que l'on définit en fait le produit cartésien à partir de la définition rigoureuse d'un couple (*cf.* chapitre suivant).

Exemples :

— Soit $E = \{1, 3, 5\}$
$F = \{0, 47\}$
$E \times F = \{(1, 0), (1, 47), (3, 0), (3, 47), (5, 0), (5, 47)\}$
$F \times E = \{(0, 1), (0, 3), (0, 5), (47, 1), (47, 3), (47, 5)\}$

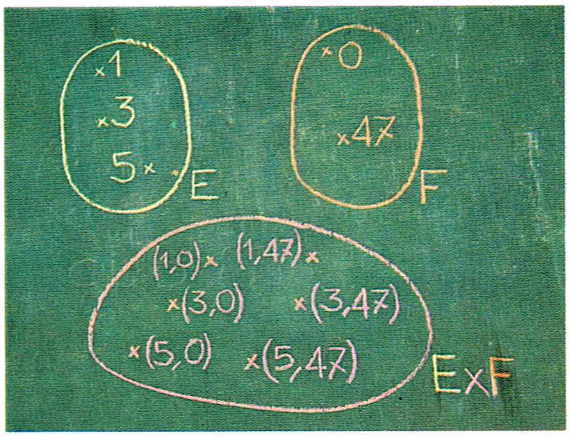

Richard Colin

◄ ***Diagramme de Venn du* produit cartésien *de deux ensembles.***

▼ **Plan muni du système de coordonnées** ***défini par R. Descartes (1596-1650), et à l'origine du terme*** **produit cartésien.**

— Soit un plan euclidien P muni d'un système d'axes de coordonnées cartésiennes. A chaque point M du plan sont alors associés deux nombres réels, son abscisse x et son ordonnée y, donc un couple (x, y), et réciproquement, à chaque couple (x, y) de deux nombres réels, est associé un point et un seul du plan.

On pourra identifier tout point M du plan P avec le couple (x, y) de ses coordonnées et raisonner dans $\mathbb{R} \times \mathbb{R}$, produit cartésien de $\mathbb{R}$ par $\mathbb{R}$ ($\mathbb{R}$ = ensemble des nombres réels), au lieu de raisonner dans le plan muni du système de coordonnées défini par René Descartes (1596-1650) : c'est là l'origine du terme produit cartésien.

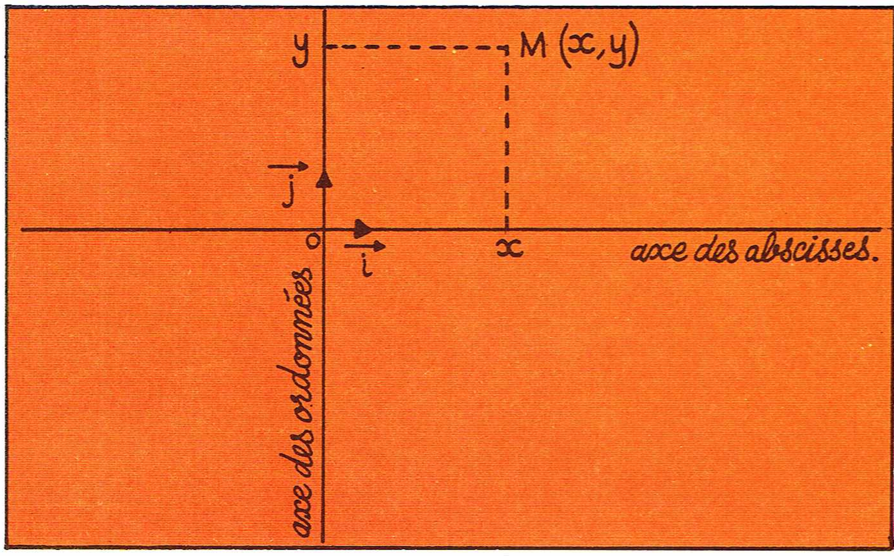

On note E^2 le produit cartésien de E par lui-même, et plus généralement, E^n le produit cartésien de n fois l'ensemble E.

$$\textit{Exemple} : \mathbb{R}^2 = \mathbb{R} \times \mathbb{R} ; \mathbb{R}^4 = \mathbb{R} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R}$$

$$\mathbb{R}^n = \underbrace{\mathbb{R} \times \mathbb{R} \times \ldots \times \mathbb{R}}_{n \text{ fois}}$$

Un élément de $\mathbb{R}^4$ est un quadruplet : (x_1, x_2, x_3, x_4) avec $x_1 \in \mathbb{R}$, $x_2 \in \mathbb{R}$, $x_3 \in \mathbb{R}$ et $x_4 \in \mathbb{R}$.

Un élément de $\mathbb{R}^n$ est un *« n-uplet » : $(x_1, x_2, \ldots, x_n)$* avec $x_1 \in \mathbb{R}, \ldots, x_n \in \mathbb{R}$.

Diagonale de E^2

Soit E un ensemble, et $E \times E = E^2$ le produit cartésien de E par lui-même. La diagonale de E^2 est l'ensemble de tous les couples (x, x) avec $x \in E$. On la note souvent Δ (delta) ou Δ_E :

$$\Delta_E = \{(x, y) \in E \times E \mid x = y\}$$

(Naturellement cette partie de $E \times E$ ne peut être définie dans un produit $E \times F$ avec $F \neq E$.)

Graphe d'une relation

Soit E et F deux ensembles, et $E \times F$ le produit cartésien de E par F. Une relation binaire de E vers F, c'est au fond l'ensemble des « liens » qui existent entre un élément de E et un élément de F (d'où le nom de binaire, puisqu'elle met en cause *deux* éléments à la fois) ; elle est donc définie par un ensemble de couples (x, y), tels que x est lié à y, avec $x \in E$ et $y \in F$, c'est-à-dire par une partie de $E \times F$. Cette partie du produit cartésien $E \times F$ est le graphe de la relation.

Réciproquement, toute partie de $E \times F$ définit une relation binaire de E vers F (puisqu'elle définit un ensemble de couples (x, y), donc des « liens »).

E est l'ensemble de départ et F est l'ensemble d'arrivée (puisque l'on va de E vers F).

Les relations binaires sont souvent désignées par des majuscules anglaises $\mathcal{R}$, $\mathcal{S}$, $\mathcal{T}$ ou par des symboles (qui désignent souvent une « loi de composition interne ») : $\top, \perp, \star, \Delta$, etc. ($\top$ se lit souvent « truc » et $\perp$ « anti-truc »).

Si, par exemple, G est le graphe de la relation $\mathcal{R}$ de E vers F, pour exprimer que x (élément de E) est lié par $\mathcal{R}$ à y (élément de F), on peut écrire :

« $(x, y) \in G$ » ou « $x \mathcal{R} y$ » ou « $\mathcal{R}(x, y)$ »

▶ *Ci-contre, en haut,* **diagramme sagittal d'une relation :** *chaque flèche a pour point de départ un élément de l'ensemble de départ* **E** *et pour point d'arrivée un élément de l'ensemble d'arrivée* **F.** *En bas,* **le tableau cartésien** *représentant le graphe de la relation ci-dessus.*

Si x n'est pas lié par $\mathcal{R}$ à y, on écrira : $(x, y) \notin G$ ou « x non $\mathcal{R}$ y » ou « non $\mathcal{R}$ (x, y) ».

Une relation entre deux objets est une affirmation, une assertion, qui peut être ou ne pas être vérifiée. On admettra que, si une relation entre deux objets X et Y n'est pas vérifiée, son « contraire » est vérifié.

Par exemple :

si $a \in E$ n'est pas vrai, $a \notin E$ est vrai
si $A \subset B$ n'est pas vrai, $A \not\subset B$ est vrai
(A non inclus dans B)

Exemples :

— Soit $E = \{3, 4, 5\}$
$F = \{9, 12, 17\}$
$E \times F = \{(3, 9), (3, 12), (3, 17), (4, 9), (4, 12), (4, 17), (5, 9), (5, 12), (5, 17)\}$

Soit $G = \{(3, 9), (3, 12), (4, 12)\}$ le graphe de la relation. G définit en fait la relation $\mathcal{R}$: « ... divise ... » (au sens de la division euclidienne habituelle de reste nul) de E vers F.

En effet : 3 divise 9, 3 divise 12 et 4 divise 12, mais 3 ne divise pas 17, 4 ne divise pas 9, etc., donc

$$(3, 17) \notin G ; \quad (4, 9) \notin G, \text{ etc.}$$

Le graphe G d'une relation binaire de E vers F est donc bien l'ensemble des couples (x, y) de $E \times F$ tels que x est lié à y par la relation :

$$G = \{(x, y) \in E \times F \mid x \mathcal{R} y\}$$

— Soit E un ensemble, $\mathcal{P}(E)$ l'ensemble de ses parties. L'inclusion entre deux parties de E est une relation de $\mathcal{P}(E)$ vers lui-même. Le graphe de cette relation est l'ensemble des couples (A, B) de parties de E tels que $A \subset B$.

Diagramme sagittal d'une relation

C'est le diagramme « avec les flèches », à partir des diagrammes de Venn des ensembles. Chaque flèche a pour point de départ un élément de l'ensemble de départ et pour point d'arrivée l'élément de l'ensemble d'arrivée lié à l'élément de départ considéré.

Pour l'exemple précédent :

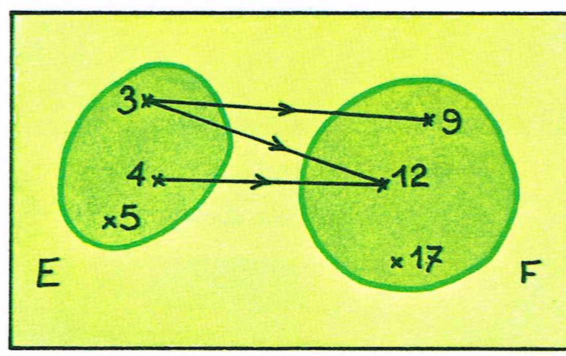

Tableau cartésien

Toujours avec l'exemple précédent, on met une croix dans chaque case correspondant à un élément du graphe :

Richard Colin

F \ E	3	4	5
9	X		
12	X	X	
17			

Ce tableau s'appelle « tableau cartésien » par analogie avec le plan muni d'un système de coordonnées cartésiennes. Remarquons que représenter le produit cartésien $E \times F$ dans ce tableau revient à mettre une croix dans chaque case.

Relation binaire dans un ensemble

Lorsque l'ensemble d'arrivée est le même que l'ensemble de départ (E = F), on peut définir une relation $\mathcal{R}$ de E vers lui-même ou une « relation $\mathcal{R}$ dans E ».

Exemple :

$$E = \{7, 4, 12, 48\}$$

$E \times E = \{(7,7), (4,4), (12,12), (48,48), (7,4), (7,12), (7,48), (4,7), (4,12), (4,48), (12,7), (12,4), (12,48), (48,7), (48,4), (48,12)\}$

$G = \{(7,7), (4,4), (12,12), (48,48), (4,12), (12,48), (4,48)\}$

G est le graphe de la relation « ... divise ... » définie dans E ; mais l'on remarquera que les couples (7, 7) (4, 4), etc., ne peuvent faire partie du graphe que parce que E est à la fois ensemble de départ et d'arrivée.

Le diagramme sagittal est ici :

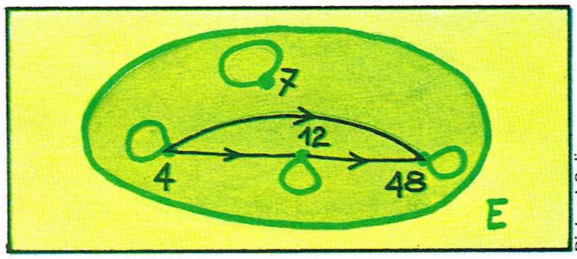

Richard Colin

Propriétés des relations binaires dans un ensemble

Soit E un ensemble et $\mathcal{R}$ une relation binaire définie dans E. La relation $\mathcal{R}$ définie dans E peut être :

★ ***Réflexive***

Pour tout $x \in E$, $x \mathcal{R} x$. Tout élément de E est lié à lui-même.

Exemple :

— l'égalité est réflexive : pour tout objet a, $a = a$;

— la relation de parallélisme dans l'ensemble des droites du plan est réflexive : toute droite est parallèle à elle-même (deux droites du plan sont parallèles si et seulement si elles sont d'intersection vide ou confondues).

★ ***Antiréflexive***

Pour tout $x \in E$, x non $\mathcal{R}$ x. Aucun élément de E n'est lié à lui-même.

Exemples :

— la relation < « strictement inférieur » définie dans $\mathbb{N}$ (ou dans $\mathbb{R}$) est antiréflexive : quel que soit le nombre x, x n'est pas strictement inférieur à x ;

— la relation « D est perpendiculaire à D′ » dans l'ensemble des droites du plan est antiréflexive : aucune droite n'est perpendiculaire à elle-même.

★ ***Ni réflexive, ni antiréflexive***

Il existe $x \in E$, $y \in E$ tels que x non $\mathcal{R}$ x et $y \mathcal{R} y$. Certains éléments de E sont liés à eux-mêmes, d'autres non.

Exemple : la relation « ... divise ... » dans l'ensemble $H = \{0, 1, 2, 3\}$.

En effet, 1 divise 1, etc., mais 0 ne divise pas 0.

Dans les deux derniers cas, la relation est non réflexive.

★ ***Symétrique***

Pour tous $x \in E$, $y \in E : x \mathcal{R} y \Rightarrow y \mathcal{R} x$. Si x et y sont liés par $\mathcal{R}$, il en est de même pour y et x.

Exemple :

— l'égalité est symétrique pour tous objets x, y :

$$x = y \Rightarrow y = x$$

— la relation « D est parallèle à D′ » est symétrique :

$$D \mathbin{/\!/} D' \Rightarrow D' \mathbin{/\!/} D$$

— la relation « D est perpendiculaire à D′ » est symétrique : $D \perp D' \Rightarrow D' \perp D$.

★ ***Antisymétrique***

Pour tous $x \in E$, $y \in E : x \mathcal{R} y$ et $y \mathcal{R} x \Rightarrow x = y$.

Il n'existe pas deux éléments *distincts* appartenant à l'ensemble E qui soient liés « dans les deux sens » à la fois, c'est-à-dire que l'on ait à la fois $x \mathcal{R} y$ et $y \mathcal{R} x$.

Exemples :

— la relation $\leqslant$ dans $\mathbb{N}$

$$3 \leqslant x \text{ et } x \leqslant 3 \Rightarrow x = 3$$

— la relation d'inclusion dans $\mathcal{P}$ (E), ensemble des parties de E.

★ ***Ni symétrique ni antisymétrique***

Il existe x, y, z, t, éléments de E tels que :

$$x \mathcal{R} y \text{ et } y \mathcal{R} x$$
$$\text{et } z \mathcal{R} t \text{ et } t \text{ non } \mathcal{R} z$$

Il existe des couples liés symétriquement et d'autres qui ne le sont pas.

Dans les deux derniers cas, la relation est non symétrique.

★ ***Transitive***

Pour tous $x \in E$, $y \in E$, $z \in E$
[ou pour tout $(x, y, z) \in E \times E \times E$] :

$$x \mathcal{R} y \text{ et } y \mathcal{R} z \Rightarrow x \mathcal{R} z$$

Exemples :

— l'égalité est transitive pour tous les objets a, b, c : $a = b$ et $b = c \Rightarrow a = c$;

— la relation $\leqslant$ est transitive :

$$3 \leqslant 5 \text{ et } 5 \leqslant 7 \Rightarrow 3 \leqslant 7$$

★ ***Non transitive***

Il existe $x \in E$, $y \in E$, $z \in E$ tels que :

$$x \mathcal{R} y \text{ et } y \mathcal{R} z \text{ et } x \text{ non } \mathcal{R} y$$

Exemple : dans un ensemble $\{x, y, z, t\}$ « rangé » ou ordonné, la relation :

y est le successeur immédiat (ou le « voisin ») de x
z est le successeur immédiat (ou le « voisin ») de y
n'entraîne pas que z soit le successeur immédiat de x.

• • • •
x y z t

Relation d'équivalence

Une relation binaire définie dans un ensemble E qui est réflexive, symétrique et transitive est une relation d'équivalence dans E.

Exemples :

— l'égalité : $x = y \Leftrightarrow x$ et y sont un seul et même objet. L'égalité sur un ensemble E est une relation d'équivalence dont le graphe est l'ensemble des couples (x, x), donc la diagonale de $E \times E$;

— soit $\mathcal{R}$ la relation définie dans $\mathbb{N} \times \mathbb{N}$ par :

$$(x, y) \mathcal{R} (x', y') \Leftrightarrow [x - y = x' - y' \text{ ou } y - x = y' - x']$$

$\mathcal{R}$ est une relation d'équivalence (deux couples d'entiers sont équivalents s'ils ont la même différence entre leurs projections).

D'une façon générale, les relations, définies sur un ensemble, fondées sur « même », sont des relations d'équivalence.

Par exemple, dans $\mathcal{P}$ (E), ensemble des parties de E, la relation « A a le même cardinal que B », avec A et B éléments de $\mathcal{P}$ (E) (donc A et B parties de E), est une relation d'équivalence. En effet : A a le même cardinal que A ; si A et B ont le même cardinal, B et A ont aussi le même cardinal ; si A et B ont le même cardinal et si B et C ont le même cardinal, alors A et C ont le même cardinal ; et ceci pour toutes parties A, B, C de E (le nombre d'éléments d'un ensemble est le cardinal de cet ensemble).

Éléments équivalents

Soit $\mathcal{R}$ une relation d'équivalence sur E. Deux éléments x et y de E liés par $\mathcal{R}$ sont dits « équivalents suivant la relation $\mathcal{R}$ » ou « équivalents modulo $\mathcal{R}$ ».

Dans certains cas, on utilise la relation d'équivalence notée : $x \equiv y$ (mod. a), qui se lit : « x congru à y modulo a ». C'est la congruence modulo a, qui exprime que deux éléments x et y d'un ensemble répondant par ailleurs à certaines conditions (c'est un groupe commutatif noté additivement) sont liés si $x - y$ est un multiple de a (il existe q entier, positif ou négatif, tel que $x - y = qa$).

Exemple : dans $\mathbb{Z}$ muni de l'addition : $85 \equiv 65$ (mod. 4), car $85 - 65 = 5 \times 4$, de même $16 \equiv 12$ (mod. 2).

($\mathbb{Z}$ est l'ensemble des entiers relatifs, c'est-à-dire des entiers positifs ou négatifs.)

Classe d'équivalence modulo $\mathcal{R}$, ou suivant la relation $\mathcal{R}$

Soit x un élément de l'ensemble E. L'ensemble des éléments y de E liés à x, donc équivalents à x, est « la classe d'équivalence de x modulo $\mathcal{R}$ », ou « la classe d'équivalence de x suivant la relation $\mathcal{R}$ » :

$$C_x = \{y \in E \mid x \mathcal{R} y\}$$

On note également $\dot{x}$ la classe d'équivalence de x.

Tout élément d'une classe d'équivalence est un représentant de cette classe.

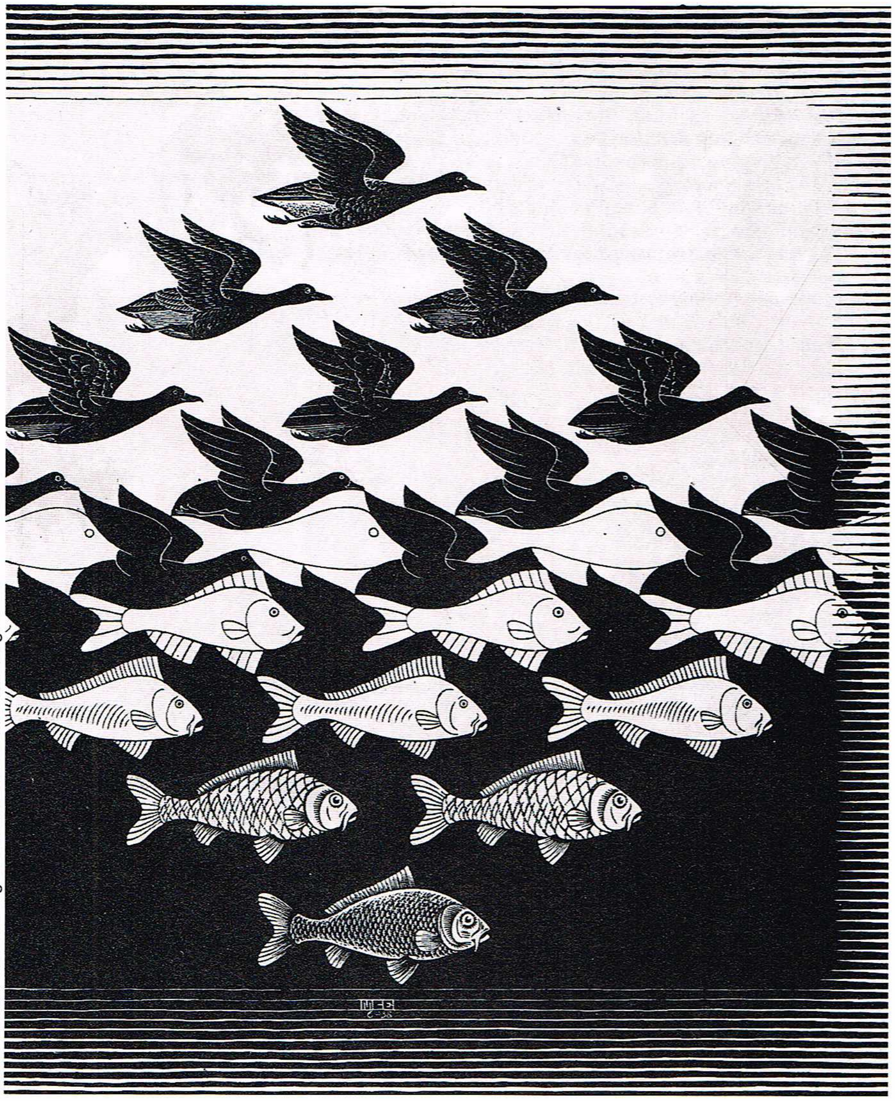

M. C. Escher, L'air et l'eau I - 1938
Escher Foundation - Haags Gemeentemuseum - The Hague

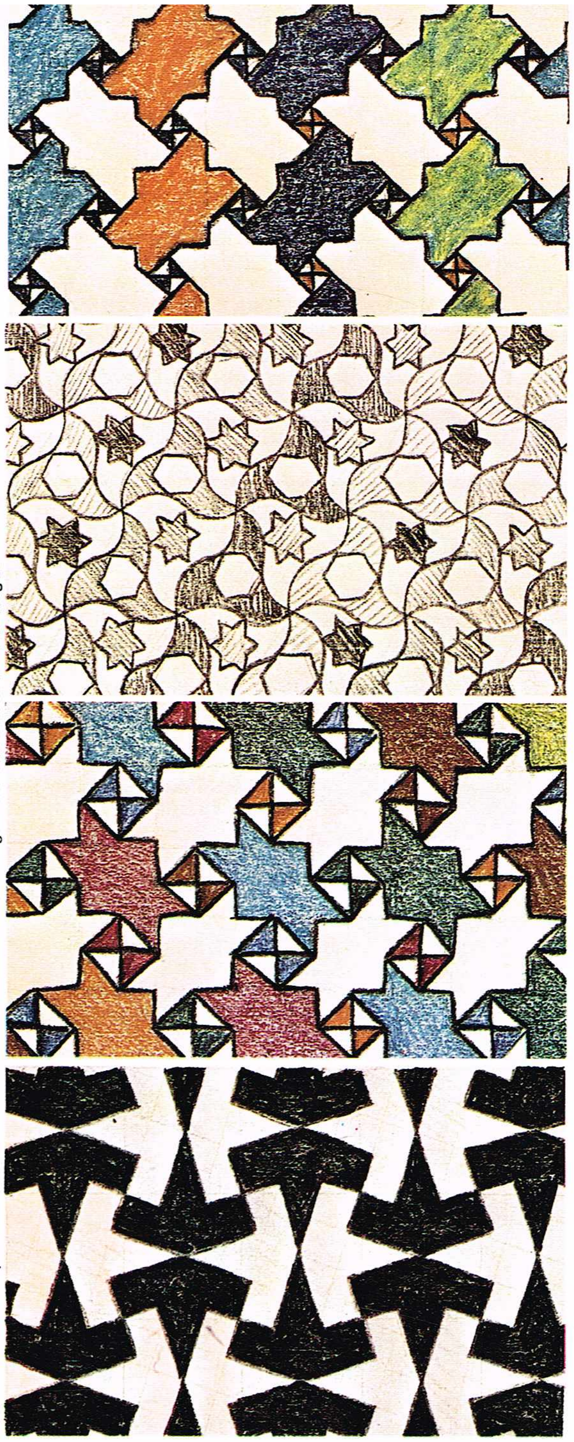

M. C. Escher, Mosaïque de l'Alhambra - 1936 - Escher Foundation - Haags Gemeentemuseum - The Hague

▲ ▼ *A partir d'un « pavé » type, ou motif, il s'agit de recouvrir* **tout le plan**, *sans trou, en disposant régulièrement le même pavé. Ce motif est dessiné de façon à ce que le* **complémentaire** *de l'ensemble des poissons soit un ensemble d'oiseaux (naturellement, l'ensemble de ces motifs forme une* **partition** *du plan; et l'ensemble des motifs, complets ou partiels, forme sur une page — une partie du plan — une* **partition** *de cette page).*

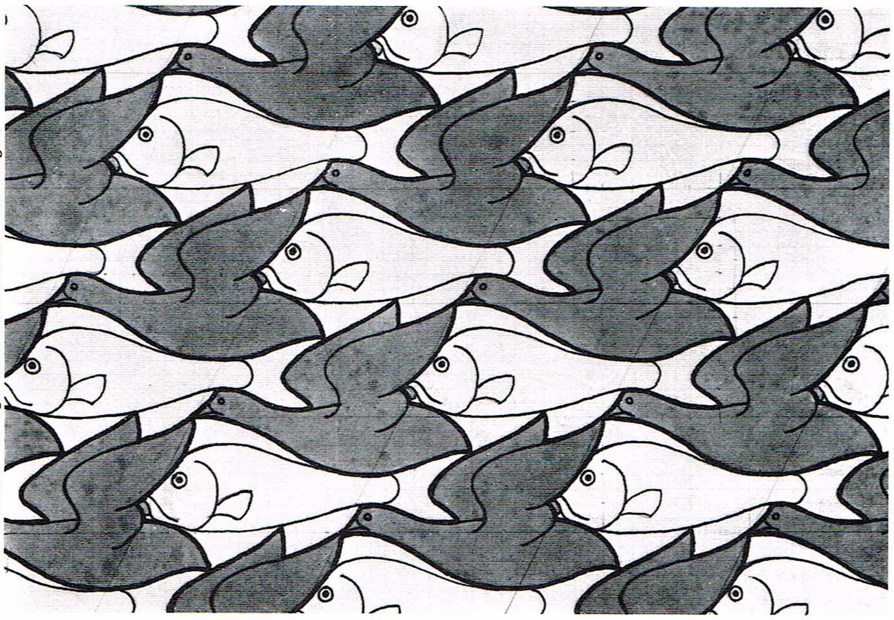

M. C. Escher, L'air et l'eau I - 1938
Escher Foundation - Haags Gemeentemuseum - The Hague

Si deux éléments sont équivalents, leurs classes d'équivalence sont égales :

$$x \mathfrak{R} y \Leftrightarrow C_x = C_y \Leftrightarrow y \in C_x \Leftrightarrow x \in C_y$$

Partition d'un ensemble

Soit E un ensemble. Un ensemble $\{A_1, A_2, ..., A_n\}$ de parties de E forme une partition de E si et seulement si :

— Aucune partie n'est vide :

$$\text{pour tout } i : A_i \neq \varnothing \quad 1 \leqslant i \leqslant n$$

— L'intersection de deux parties distinctes est vide :

$$\text{pour tout } i, \; \text{pour tout } j, \; i \neq j : A_i \cap A_j = \varnothing \quad 1 \leqslant i \leqslant n \quad 1 \leqslant j \leqslant n$$

— La réunion de toutes les parties est égale à E.

$$\bigcup_{1 \leqslant i \leqslant n} A_i = E$$

Une assiette qui se casse en quelques morceaux fournit une bonne image d'une partition, souvent involontaire dans ce cas !

Exemple : $E = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$
$A_1 = \{0, 2, 4, 6\}$
$A_2 = \{1, 3, 5\}$
$A_3 = \{7\}$

$\{A_1, A_2, A_3\}$ est une partition de E.

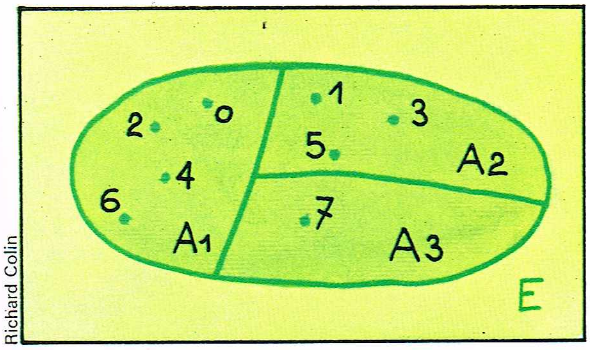

Richard Colin

◄ *Représentation schématique de la* **partition d'un ensemble E.**

Partition de E en classes d'équivalence

L'ensemble des classes d'équivalence suivant une relation $\mathcal{R}$ définie sur E est une partition de E.

Exemple : soit $E = \{a, b, c\}$

$$\mathcal{P}(E) = \{\ \varnothing, \{a\}, \{b\}, \{c\}, \{a, b\}, \{a, c\}, \{b, c\}, \{a, b, c\}\ \}$$

Soit $\mathcal{R}$ la relation d'équivalence définie sur E par : « ... a le même cardinal que ... »

Les classes d'équivalence suivant $\mathcal{R}$ sont :

$A_1 = \{\varnothing\}$: ensemble des parties à 0 élément ;

$A_2 = \{\{a\}, \{b\}, \{c\}\}$: ensemble des parties à 1 élément ;

$A_3 = \{\{a, b\}, \{a, c\}, \{b, c\}\}$: ensemble des parties à 2 éléments ;

$A_4 = \{\{a, b, c\}\}$: ensemble des parties à 3 éléments.

On remarquera que $A_1 = \{\varnothing\}$ n'est pas vide, mais est un singleton, ensemble à un élément (ici cet élément est « l'objet » $\varnothing$).

Ces classes A_1, A_2, A_3, A_4 forment bien une partition de $\mathcal{P}(E)$: $\{A_1, A_2, A_3, A_4\}$.

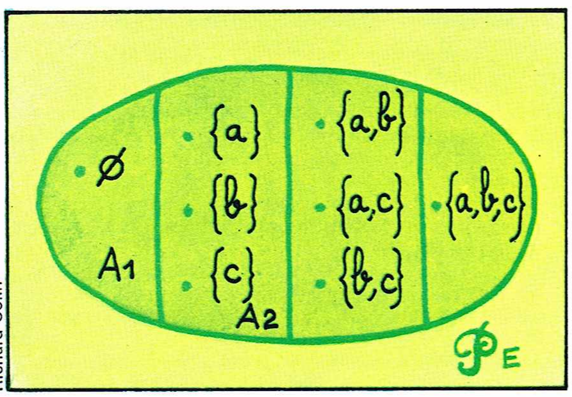

Richard Colin

◄ *Représentation schématique d'une* **partition de** $\mathcal{P}$ *(E) en* **classes d'équivalence.**

Ensemble quotient

L'ensemble des classes d'équivalence modulo la relation d'équivalence $\mathcal{R}$ définie sur l'ensemble E est l'ensemble quotient de E par la relation $\mathcal{R}$, noté $E/\mathcal{R}$.

Relations d'ordre dans un ensemble

Une relation définie dans un ensemble E qui est : réflexive, antisymétrique et transitive, est une *relation d'ordre large.*

Exemples :

— la relation $\leqslant$ (inférieur ou égal) dans $\mathbb{R}$ est une relation d'ordre large ;

— l'inclusion définie dans $\mathcal{P}(E)$ est une relation d'ordre large.

Une relation définie dans un ensemble E qui est : antiréflexive, antisymétrique et transitive, est une *relation d'ordre strict.*

Exemple : la relation $<$ (strictement inférieur) dans $\mathbb{R}$.

Une relation d'ordre (large) définit un ordre sur E : E muni de cette relation d'ordre, est un *ensemble ordonné.*

On note souvent $\leqslant$ ou $\preccurlyeq$ une relation d'ordre large, même s'il ne s'agit pas de relations d'inégalité habituelles (sur $\mathbb{N}$, $\mathbb{Z}$, $\mathbb{R}$).

Une « relation d'ordre » (sans précisions) est une relation d'ordre large. Remarquons qu'une « relation d'ordre strict » n'est donc pas une relation d'ordre.

Ordre total, ordre partiel

L'ordre défini sur un ensemble E peut être :

★ ***Total :*** si deux éléments quelconques de E peuvent être toujours classés ou comparés l'un par rapport à l'autre.

Pour tout $(x, y) \in E \times E$, $x \mathcal{R} y$ ou $y \mathcal{R} x$.

Exemple : la relation $\leqslant$ dans $\mathbb{R}$ définit un ordre total sur $\mathbb{R}$.

★ ***Partiel :*** il existe au moins deux éléments de E qui ne peuvent être classés ou comparés l'un par rapport à l'autre.

Il existe $(x, y) \in E \times E$: x non $\mathcal{R}\ y$ et y non $\mathcal{R}\ x$.

Exemples :

— L'inclusion dans $\mathcal{P}(E)$ définit un ordre partiel (par exemple, on ne peut classer par inclusion $\{a\}$ et $\{b, c\}$ ou $\{a, b\}$ et $\{a, c\}$) ;

— La relation « ... divise ... » définit dans $\mathbb{N}$ un ordre partiel (il existe par exemple $[3, 20]$ tel que ni 3 ne divise 20, ni 20 ne divise 3).

Il y a donc deux possibilités pour un « ordre large » :

— ordre large et total

— ordre large et partiel

et deux possibilités pour un « ordre strict » :

— ordre strict et total

— ordre strict et partiel.

Fonction de E dans F

Soit $\mathcal{R}$ une relation de E vers F, de graphe G : $\mathcal{R}$ est une fonction si, et seulement si pour tout $(x, y) \in G$, et pour tout $(x', y') \in G$: $x = x' \Rightarrow y = y'$.

C'est-à-dire que tout élément de l'ensemble de départ est lié *au plus* à un élément de l'ensemble d'arrivée (donc soit à aucun élément, soit à un élément).

On note en général une fonction par une lettre minuscule : $f, g, h, \ldots$; une flèche ($\rightarrow$ ou $\mapsto$) relie les ensembles de départ et d'arrivée :

$$\text{« } f : E \rightarrow F \text{ » ou « } f : E \mapsto F \text{ » ou « } E \xrightarrow{f} F \text{ »}$$

Exemples :

— $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$
$\quad x \rightarrow 3x + 2$

— $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$
$\quad x \rightarrow \dfrac{3x}{x - 7}$

— $h : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$
$\quad x \rightarrow \dfrac{3x}{x - 7}$

Exemple : dans E = { 3, 4, 5, 20 }, le diagramme sagittal de la relation d'ordre total "... ⩽ ..." est :

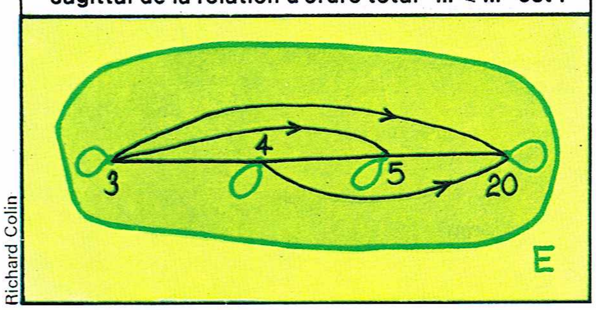

Richard Colin

◄ **Relation d'ordre total.**

Exemple : dans E = { 3, 4, 5, 20 }, le diagramme sagittal de la relation "... divise..." est :

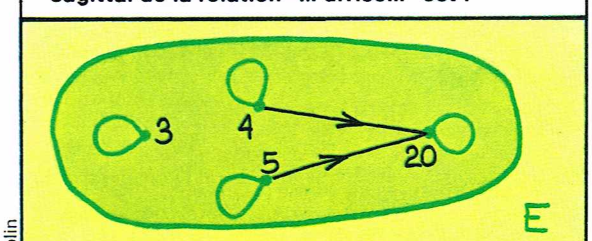

Richard Colin

3 ne divise ni 4, ni 5, ni 20 (le reste de la division de ces nombres par 3 n'est pas nul)

◄ **Relation d'ordre partiel.**

Domaine de définition d'une fonction

Soit f une fonction de E dans le graphe G. L'ensemble des éléments de E qui sont liés à un (et un seul) élément de F est le domaine de définition de la fonction f, noté D_f en général.

$$D_f = \{x \in E \mid \text{il existe } y : (x, y) \in G\}$$

Exemples : $f : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$

$$x \to \frac{10x + 2}{(5x + 3)(x - 5)}$$

On ne peut diviser un nombre par zéro; donc il faut que $(5x + 3)$ et $(x - 5)$ soient non nuls. Les valeurs qui annulent le dénominateur étant :

$-\frac{3}{5}$ et 5, le domaine de définition sera :

$$D_f = \mathbb{R} - \left\{-\frac{3}{5}, 5\right\} = \left]-\infty, -\frac{3}{5}\right[\cup \left]-\frac{3}{5}, 5\right[\cup \left]5, +\infty\right[$$

D_f est le complémentaire dans $\mathbb{R}$ de l'ensemble :

$$\left\{-\frac{3}{5}, 5\right\}.$$

Remarquons que si $g : \mathbb{N} \to \mathbb{R}$

$$x \to \frac{10x + 2}{(5x + 3)(x - 5)}$$

$$D_g = \mathbb{N} - \{5\} = \complement_{\mathbb{N}}\{5\}$$

puisque 5 est le seul entier naturel qui annule le dénominateur, donc pour lequel l'expression $\frac{10x + 2}{(5x + 3)(x - 5)}$ n'est pas définie.

Application

C'est une fonction dont le domaine de définition est égal à l'ensemble de départ tout entier. Tout élément x de l'ensemble de départ est donc lié à un et un seul élément y de l'ensemble d'arrivée; y est *l'image de x, notée f (x)* [qui se lit *f de x*] :

f application de E dans F, de graphe G (ou de graphe fonctionnel G) $\Leftrightarrow$ pour tout $x \in E$, il existe un et un seul élément $y \in F$ tel que $(x, y) \in G$.

Exemple : $f : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$

$x \to ax + b$ avec $a, b \in \mathbb{R}$

L'image de x est : $f(x) = ax + b$

(si $f : x \to 3x + 2$, $f(5) = 17$)

En écrivant $y = f(x)$, c'est-à-dire $y = ax + b$, on retrouve l'équation d'une droite dans un système de coordonnées cartésiennes.

Image d'une partie A de E

Soit $f : E \to F$ une application et A une partie de E; l'ensemble des éléments de F qui sont l'image d'au moins un élément de A est l'image de A par f :

$$f(A) = \{y \in F \mid \text{il existe au moins un } x \in A \text{ tel que } y = f(x)\}$$

Exemple :

$f : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$

$x \to 3x^2 + 1$

$f(5) = 3 \times 5^2 + 1 = 76$
$f(10) = 3 \times 10^2 + 1 = 301$
$f(1) = 3 \times 1^2 + 1 = 4$

Donc, si $A = \{1, 5, 10\}$ est une partie de $\mathbb{R}$, l'image de A par f est :

$$f(A) = \{f(1), f(5), f(10)\} = \{4, 76, 301\}$$

Image réciproque d'une partie de l'ensemble d'arrivée

Soit B une partie de F. L'ensemble de tous les éléments de E dont l'image est élément de B est l'image réciproque de B, notée $f^{-1}(B)$.

Exemple : avec $f : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$

$x \to 3x^2 + 1$

Si $B = \{49, 76\}$

$f^{-1}(B) = \{-4, 4, -5, 5\}$

car $f(-4) = f(4) = 49$ et $f(-5) = f(5) = 76$.

Ensemble des applications de E dans F

L'ensemble de toutes les applications de E dans F est noté F^E, ou $\mathcal{F}(E, F)$. C'est une partie de l'ensemble $\mathcal{P}(E \times F)$, puisque le graphe de toute application est une partie de $E \times F$.

Si $E = F$, on note cet ensemble E^E ou $\mathcal{F}(E)$.

Exemple : $\mathbb{R}^{\mathbb{R}} = \mathcal{F}(\mathbb{R})$ est l'ensemble de toutes les applications de $\mathbb{R}$ dans $\mathbb{R}$.

Application surjective

Si l'image de l'ensemble de départ, $f(E)$, est égale à l'ensemble d'arrivée F, l'application est surjective :

f application de E dans F :
f surjective $\Leftrightarrow f(E) = F$.

Exemple : $f : \mathbb{R} \to \mathbb{R}_+$ ($\mathbb{R}_+$ est l'ensemble des réels positifs).

$x \to x^2$

Application injective

Soit f une application de E dans F.

Si à deux éléments distincts x et x' correspondent deux images distinctes, l'application est injective :

f injective $\Leftrightarrow$ pour tout $(x, x') \in E \times E$:
$x \neq x' \Rightarrow f(x) \neq f'(x)$
$\Leftrightarrow$ pour tout $(x, x') \in E \times E$:
$f(x) = f(x') \Leftrightarrow x = x'$

(si deux éléments ont la même image, ils sont égaux).

Application bijective

C'est une application qui est à la fois injective et surjective.

Tout élément de E a alors une et une seule image, et tout élément de F est alors image d'un et d'un seul élément de E.

Composition de deux applications

Soit E, F, G, trois ensembles, et f, g deux applications :

$$f : E \to F \quad \text{et} \quad g : F \to G$$

on peut également noter $E \xrightarrow{f} F$ et $F \xrightarrow{g} G$.

L'application composée « $g \circ f$ » qui se lit « g rond f » est une application de E dans G définie par :

$$\text{pour tout } x \in E : g \circ f(x) = g\{f(x)\}$$

Exemple :

$f : \mathbb{N} \to \mathbb{R}_+$
$x \to 3x + 2$
$g : \mathbb{R}_+ \to \mathbb{R}$
$x \to 5x^2 - 100$

$g \circ f : \mathbb{N} \to \mathbb{R}$
$x \to 5(3x + 2)^2 - 100.$

On ne peut ici définir $f \circ g$ car l'ensemble d'arrivée de g n'est pas l'ensemble de départ de f.

On peut écrire également : $g : \mathbb{R}_+ \to \mathbb{R}$
$y \to 5y^2 - 100$

et, en posant $y = f(x)$: $g \circ f(x) = g(f(x)) = g(y)$ dans l'exemple ci-dessus

$y = 3x + 2;$
$g \circ f(x) = g(y) = 5y^2 - 100 = 5(3x + 2)^2 - 100.$

Application identique dans un ensemble

C'est l'application qui, à tout élément de l'ensemble, associe ce même élément. On la note I_E, ou id_E

$$I_E : E \to E$$
$$x \to x$$

Son graphe est évidemment l'ensemble des couples (x, x) de $E \times E$, donc la diagonale de $E \times E$.

Application réciproque

Si $f : E \to F$ est une bijection, l'application réciproque $f^{-1} : F \to E$ est l'application telle que $g \circ f = f \circ g = I_E$.

Exemple : soit $f : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$
$x \to 3x + 2.$

L'application réciproque est $f^{-1} : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$

$$x \to \frac{1}{3}(x - 2)$$

Vérification :

$$f^{-1} \circ f(x) = \frac{1}{3}\Big((3x + 2) - 2\Big) = x = id_{\mathbb{R}}x$$

$$f \circ f^{-1}(x) = 3\left(\frac{1}{3}(x - 2)\right) + 2 = x = id_{\mathbb{R}}x$$

Richard Colin

▲ ***Première notion d'ensemble : A, l'ensemble des formes jaunes ; B, l'ensemble des formes rouges.***

LES ENSEMBLES

La notion d'ensemble est une notion primitive des mathématiques ; nous ne donnerons donc pas de définition d'un ensemble, pas plus qu'en géométrie, par exemple, on ne définit ce qu'est un point. Cependant il ne faut pas en conclure que l'usage du mot *ensemble* est arbitraire, au contraire il est strictement régi par des axiomes, sans quoi l'on aboutirait rapidement à des contradictions.

En reprenant l'exposé des diverses notions introduites au chapitre précédent, nous allons dégager à chaque étape les *axiomes* nécessaires pour garantir l'existence cohérente d'objets mathématiques appelés ensembles. Une véritable présentation axiomatique de la théorie des ensembles reposant sur une bonne connaissance de la logique, le lecteur pourra se reporter à la bibliographie.

Dans une seconde partie, nous montrerons comment, à l'aide de méthodes reposant sur les propriétés des ensembles, on peut étendre les notions usuelles de *dénombrement* et de *numération*.

Les axiomes

Égalité - appartenance

Le principal concept (non défini) de la théorie des ensembles est celui d'**appartenance.** Si x appartient à A, on dira que x est un élément de A, et on écrira : $x \in A$; la négation étant notée $x \notin A$.

Une relation élémentaire entre ensembles est l'**égalité** $A = B$.

La notion d'appartenance est liée à celle d'égalité de la façon suivante : deux ensembles sont égaux si, et seulement si, ils ont les mêmes éléments **(axiome d'extensionalité)**.

L'égalité entre ensembles est une relation :
— *réflexive :* $A = A$ pour tout ensemble A ;
— *symétrique :* si $A = B$, alors $B = A$;
— *transitive :* si $A = B$ et $B = C$, alors $A = C$.

Inclusion - sous-ensembles

Si A et B sont deux ensembles et si tout élément de A est élément de B, on dira que A **est inclus dans** B, ou que A est un **sous-ensemble** de B, ou que A est une **partie** de B ; on écrira indifféremment :

$$A \subset B \qquad B \supset A$$

L'inclusion entre deux ensembles est une relation :
— *réflexive :* $A \subset A$ pour tout ensemble A ;
— *transitive :* si $A \subset B$ et $B \subset C$, alors $A \subset C$;
— *antisymétrique :* si $A \subset B$ et $B \subset A$, alors $A = B$.

La plupart des démonstrations d'égalité entre deux ensembles se font à l'aide de cette dernière propriété.

L'axiome de sélection - paradoxe de Russell

A part l'axiome d'extensionalité, tous les principes fondamentaux de la théorie des ensembles ont pour objet la construction de nouveaux ensembles à partir d'anciens. On le fera à l'aide de deux types d'énoncés :

$$x \in A \qquad A = B$$

par application des opérateurs logiques usuels et des règles sur ces opérateurs (voir *Logique*), mais il faudra imposer une restriction supplémentaire, sous peine de se heurter à des paradoxes.

En effet supposons que S (x) soit un énoncé du type précédent. On peut définir un ensemble pour

$$X = \{x \mid S(x)\}$$

X étant l'ensemble de tous les x pour lesquels la propriété S (x) est vraie
et en prenant pour S (x) l'énoncé $x \notin x$

$$X = \{x \mid x \notin x\}$$

on constate alors que la proposition $X \in X$ est antinomique car : — si $X \in X$ alors X élément de X vérifie la propriété caractéristique $X \notin X$;
— si $X \notin X$ la propriété S (X) est vraie donc $X \in X$; dans les deux cas on aboutit à une contradiction.

Ce paradoxe mis en évidence par Russell peut être illustré de façon plus concrète par l'exemple suivant : « Si le barbier d'un village rase tous les habitants qui ne se rasent pas eux-mêmes, ce barbier se rase-t-il lui-même ? S'il se rase il doit appartenir à la catégorie de ceux qui ne se rasent pas eux-mêmes, mais s'il ne se rase pas, il appartient au groupe de ceux qu'il doit raser. » Dans les deux cas, qui sont les seuls possibles, il y a contradiction.

▶ *Page ci-contre, en haut, à gauche,* Bertrand Russell, *mathématicien, philosophe et sociologue, est d'abord un logicien, l'un des promoteurs de la logistique. On lui doit notamment* Principia mathematica *qu'il rédigea en collaboration avec N. Whitehead en 1903.*

On élimine ce paradoxe en posant le principe fondamental suivant : à tout ensemble A et toute condition S (x), il correspond un ensemble B dont les éléments sont exactement les éléments de A pour lesquels S (x) est vraie **(axiome de sélection).**

Ainsi, pour tout ensemble A, on peut construire l'ensemble B tel que :

$$B = \{x \in A \mid S(x)\}$$

Les éléments de B sont tous les éléments de A pour lesquels S (x) est vraie.

En particulier : $B = \{x \in A \mid x \notin x\}$ est un ensemble, appelé partie russellienne de A. Cet ensemble est tel que $B \notin A$.

En effet, si $B \in B$, alors B vérifie les conditions imposées aux éléments de B, à savoir $B \in A$ et $B \notin B$; si $B \notin B$, alors on a $B \notin A$ ou $B \in B$. Seule la deuxième hypothèse n'aboutit pas à une contradiction, mais à condition que $B \notin A$.

L'ensemble A est arbitraire, on voit ainsi qu'il existe toujours quelque chose (B) qui n'appartient pas à un ensemble quelconque A.

En d'autres termes, rien ne contient tout. De même, on démontre que l'ensemble de tous les ensembles n'existe pas.

Nous savons maintenant qu'il est possible de construire un nouvel ensemble en donnant une propriété caractéristique de certains éléments d'un ensemble déjà connu. C'est ce qu'on appelle la définition *en compréhension*.

Ensembles particuliers

Faisons l'hypothèse qu'il existe un ensemble A, ce qui sera justifié ultérieurement (on posera comme axiome l'existence d'ensembles infinis). On peut construire :

$$\{x \in A \mid x \neq x\}$$

cet ensemble n'a aucun élément, c'est l'**ensemble vide,** noté $\varnothing$. On démontre que l'ensemble vide est sous-ensemble de tout ensemble.

Si a et b sont deux ensembles, il existe un ensemble A tel que $a \in A$ et $b \in A$, c'est ce qu'affirme l'**axiome de la paire.**

L'ensemble $\{x \in A \mid x = a \quad \text{ou} \quad x = b\}$ qui ne contient que a et b est noté $\{a, b\}$.

Si $b = a$ alors $\{a, b\} = \{a, a\} = \{a\}$
a est le seul élément de l'ensemble $\{a\}$.

Ainsi, on peut construire l'ensemble $\{\varnothing\}$ qu'il ne faut pas confondre avec $\varnothing$, car ce dernier ensemble n'a pas d'élément, alors que $\{\varnothing\}$ en a un : $\varnothing$.

Unions et intersections

C'est un nouvel axiome qui va nous permettre de réunir les éléments d'une famille d'ensembles en un ensemble global :

pour toute famille d'ensembles $\mathcal{F}$, il existe un ensemble qui contient tous les éléments appartenant à au moins un ensemble de la famille **(axiome de la réunion).**

On note cet ensemble : $\bigcup \mathcal{F}$ ou $\bigcup\limits_{X \in \mathcal{F}} X$.

Dans le cas particulier d'une paire $\{A, B\}$ on adopte la notation $A \cup B$. De la définition de la réunion il résulte que x appartient à $A \cup B$ si, et seulement si x appartient soit à A, soit à B, soit aux deux :

$$A \cup B = \{x \mid x \in A \quad \text{ou} \quad x \in B\}$$

Les axiomes d'extensionalité et de sélection suffisent à définir et à assurer l'unicité de l'**intersection** d'une famille non vide d'ensembles.

Comme $\mathcal{F} \neq \varnothing$, on peut considérer un élément quelconque A de $\mathcal{F}$, alors :

$$\{x \in A \mid x \in X \text{ pour chaque X de } \mathcal{F}\}$$

définit un ensemble qui, en fait, ne dépend pas du choix arbitraire de A. On note cet ensemble :

$$\bigcap \mathcal{F} \quad \text{ou} \quad \bigcap_{X \in \mathcal{F}} X$$

et dans le cas d'une paire

$$A \cap B = \{x \in A \mid x \in B\} = \{x \in B \mid x \in A\} = \{x \mid x \in A \text{ et } x \in B\}.$$

Les propriétés de la *réunion* et de l'*intersection* sont les suivantes :

$A \cup \varnothing = A$
$A \cap \varnothing = \varnothing$
$A \cap A = A$, $A \cup A = A$ — *idempotence*
$A \cup B = B \cup A$, $A \cap B = B \cap A$ — *commutativité*
$A \cup (B \cup C) = (A \cup B) \cup C$, $A \cap (B \cap C) = (A \cap B) \cap C$ — *associativité*
$A \cap (A \cup B) = A$, $A \cup (A \cap B) = A$ — *absorption*
$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$, $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$ — *distributivité*

$A \subset B$ si et seulement si $A \cup B = B$
$A \subset B$ si et seulement si $A \cap B = A$.

Complémentaires et parties

Si A et B sont deux ensembles, la différence entre A et B, ou **complémentaire de** B **dans** A, est l'ensemble défini par :

$$A - B = \{x \in A \mid x \notin B\} = \complement_A B$$

Il n'est pas nécessaire de supposer $B \subset A$.

Si A et B sont des sous-ensembles d'un même ensemble E, on posera $\complement_E A = \overline{A}$ et $\complement_E B = \overline{B}$.

Les propriétés fondamentales de la *complémentation* sont données par :

$A \cap \overline{A} = \varnothing$
$A \cup \overline{A} = E$
$\overline{A \cap B} = \overline{A} \cup \overline{B}$, $\overline{A \cup B} = \overline{A} \cap \overline{B}$ — *lois de Morgan*
$A \subset B$ si et seulement si $A \cap \overline{B} = \varnothing$
$A \subset B$ si et seulement si $\overline{A} \cup B = E$
$A \subset B$ si et seulement si $\overline{B} \subset \overline{A}$.

On appelle différence symétrique de A et de B l'ensemble $A \,\Delta\, B = (A - B) \cup (B - A)$.

Cette opération est *commutative, associative* et est telle que $A \,\Delta\, \varnothing = A$ et $A \,\Delta\, A = \varnothing$.

La collection de tous les sous-ensembles d'un ensemble donné E est encore un ensemble, c'est ce qu'assure l'**axiome des parties** d'un ensemble :

$\mathcal{P}(E) = \{X \mid X \subset E\}$ ensemble des parties de l'ensemble E.

Ainsi :

$$\mathcal{P}(\{a, b\}) = \{\varnothing, \{a\}, \{b\}, \{a, b\}\}$$
$$\mathcal{P}(\varnothing) = \{\varnothing\}, \qquad \mathcal{P}(\{\varnothing\}) = \{\varnothing, \{\varnothing\}\}, \text{ etc.}$$

Définition d'un ensemble

Définition en extension
E = { 1, 2, 3, 4, 6, 12 }
On dresse la liste des éléments de l'ensemble considéré.

Définition en compréhension.
E = { x | $x \in$ N et x divise 12 }

se lit « ensemble des x tel que x est un entier naturel et x divise 12 ».

Plus généralement :
E = { $x \in$ A | S (x) }
« les éléments de E sont tous les éléments de A pour lesquels la propriété S (x) est vraie. »

Richard Colin

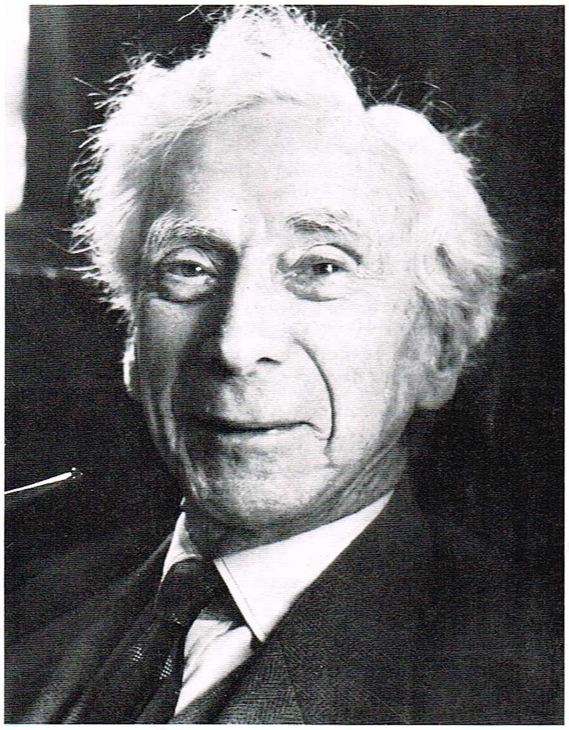

Publifoto

Couple - produit cartésien

La notion de paire $\{a, b\}$ va être complétée par celle de paire ordonnée ou couple.

Par définition, le **couple** (x, y) est l'ensemble $\{x, \{x, y\}\}$, définition due à Kuratowski.

x est le premier terme (première projection) du couple, y le second terme (seconde projection).

Alors que $\{a, b\} = \{b, a\}$ en général (si $a \neq b$) $(a, b) \neq (b, a)$.

On démontre que deux couples sont égaux si, et seulement si leurs projections sont égales.

Soit deux ensembles A et B, existe-t-il un ensemble qui contienne tous les couples (a, b) avec a dans A et b dans B ?

Comme $a \in A$, $\{a\} \subset A$; de même $\{b\} \subset B$, donc $\{a, b\} \subset A \cup B$. Par suite $\{a\} \in \mathcal{P}(A \cup B)$; $\{a, b\} \in \mathcal{P}(A \cup B)$ et la paire $\{\{a\}, \{a, b\}\}$ est un sous-ensemble de $\mathcal{P}(A \cup B)$, donc appartient à $\mathcal{P}(\mathcal{P}(A \cup B))$.

Tous les couples (a, b) appartiennent à l'ensemble $\mathcal{P}(\mathcal{P}(A \cup B))$ dès que $a \in A$ et $b \in B$. L'axiome d'extensionalité permet d'assurer l'existence d'un ensemble que l'on notera $A \times B$ tel que :

$A \times B = \left\{x \in \mathcal{P}\left(\mathcal{P}(A \cup B)\right) \mid x = (a, b), a \in A, b \in B\right\}$

l'axiome de sélection en garantit l'unicité.

$A \times B = \{(a, b) \mid a \in A, b \in B\}$ est le **produit cartésien** des ensembles A et B.

Relations binaires

Étant donné deux ensembles A et B, on appelle **graphe** ou **relation de** A **vers** B tout sous-ensemble $\mathcal{R}$ du produit cartésien $A \times B$.

A est l'ensemble de départ, B l'ensemble d'arrivée. Si $(x, y) \in \mathcal{R}$, on dit que x est un antécédent de y, y est une image de x par $\mathcal{R}$. Au lieu de noter $(x, x) \in \mathcal{R}$, on pose souvent $x \mathcal{R} x$.

Si $A = B$, alors tout sous-ensemble de $A \times A$ définit une relation binaire sur A.

Ainsi la relation d'inclusion entre les sous-ensembles d'un ensemble U est caractérisée par le sous-ensemble de $\mathcal{P}(U) \times \mathcal{P}(U)$ formé des couples (A, B) tels que $A \subset B$.

Préordre et ordre

Une relation binaire dans un ensemble E est une **relation de préordre** (ou un **préordre**) si elle est *réflexive* et *transitive*, c'est-à-dire vérifie :

— pour tout x, $x \mathcal{R} x$;
— si $x \mathcal{R} y$ et $y \mathcal{R} z$ alors $x \mathcal{R} z$.

Richard Colin

▲ **Intersection :** ***l'ensemble A des enfants qui portent au moins un vêtement rouge et l'ensemble B des enfants qui portent au moins un vêtement bleu se coupent; l'enfant habillé de rouge et de bleu correspond à l'intersection des ensembles A et B.***

Richard Colin

▲ **Inclusion :** ***l'ensemble des triangles jaunes est inclus dans l'ensemble des formes de couleur jaune.***

Une relation binaire dans un ensemble E est une **relation d'ordre** (ou un **ordre**) si elle est *réflexive, antisymétrique* et *transitive,* soit :

— pour tout x, $x \mathcal{R} x$
— si $x \mathcal{R} y$ et $y \mathcal{R} x$, alors $x = y$
— si $x \mathcal{R} y$ et $y \mathcal{R} z$, alors $x \mathcal{R} z$.

La relation d'inclusion dans $\mathcal{P}$ (E) est une relation d'ordre. Divers symboles sont employés pour traduire une relation d'ordre, citons $\leqslant$, $<$, $\subset$, $\subseteq$, $\preceq$, ...

La relation d'ordre est **totale** si deux éléments quelconques de l'ensemble sont comparables. La relation d'inclusion dans $\mathcal{P}$ (E) n'est pas un ordre total, c'est un ordre **partiel.** Un ensemble sur lequel on a défini une relation d'ordre est dit **ordonné.**

Soit (E, $\leqslant$) un ensemble ordonné et A une partie de E. L'élément m de E est un **majorant** de A si m est supérieur à tous les éléments de A :

$$\text{pour tout } x \in A \text{ on a } x \leqslant m.$$

Si μ est un élément de A tel que pour tout x de A, $x \leqslant \mu$, μ est le **plus grand élément** de A. Enfin on appelle **borne supérieure** de A le plus petit des majorants de A. De façon analogue, on définit les notions duales des précédentes : minorant, plus petit élément, borne inférieure.

Si toute partie non vide d'un ensemble ordonné admet un plus petit élément, l'ordre défini sur cet ensemble est un **bon ordre.**

Équivalence

On appelle **relation d'équivalence** ou **équivalence** sur un ensemble E tout préordre $\mathcal{R}$ symétrique sur E, c'est-à-dire une relation binaire sur E qui est :

— *réflexive :* pour tout x, $x \mathcal{R} x$;
— *transitive :* si $x \mathcal{R} y$ et $y \mathcal{R} z$, alors $x \mathcal{R} z$;
— *symétrique :* si $x \mathcal{R} y$, alors $y \mathcal{R} x$.

Lorsqu'il existe une relation d'équivalence sur E, l'image $\mathcal{R}$ (x) de x par $\mathcal{R}$ est appelée **classe d'équivalence** de x modulo $\mathcal{R}$; on la note généralement $\overline{x}$. $\mathcal{R}$ étant réflexive, $\overline{x}$ contient toujours un élément (lui-même), donc $\overline{x} \neq \varnothing$; les propriétés de $\mathcal{R}$ entraînent que si $x \mathcal{R} y$ alors $\overline{x} = \overline{y}$ et réciproquement si $\overline{y} = \overline{x}$, alors $x \mathcal{R} y$.

Pour connaître une classe d'équivalence, il suffit d'en citer un élément, ce sera le **représentant** de la classe.

L'ensemble des classes d'équivalence forme une **partition** de E, c'est-à-dire un recouvrement de E en sous-ensembles disjoints. Cet ensemble est l'ensemble **quotient** de E par la relation d'équivalence $\mathcal{R}$; on le note $E/\mathcal{R}$. On a $E/\mathcal{R} \subset \mathcal{P}$ (E).

Fonction - Application

Une relation de E vers F est une **fonction** si, pour tout couple (x, y) et tout couple (x', y') appartenant à $\mathcal{R}$, $x = x'$ implique $y = y'$ (condition d'univocité).

L'ensemble $\{x \in E \mid (x, y) \in \mathcal{R}\}$ est le domaine, ou encore le domaine de définition, de la fonction.

Une **application** de E vers F est une fonction dont le domaine de définition est E tout entier. On emploie souvent la notation $f : E \rightarrow F$.

L'ensemble de toutes les applications de E dans F est un sous-ensemble de l'ensemble des parties $\mathcal{P}$ (E $\times$ F) ; il sera noté F^E ou $\mathcal{F}$ (E, F).

Si A est un sous-ensemble de E, l'image de A par l'application f est l'ensemble des éléments y de F pour lesquels il existe au moins un x dans A tel que $f(x) = y$. On appelle image de f et on note Im f l'ensemble f (E). On désigne par f^{-1} (B) l'ensemble des éléments x de A pour lesquels $f(x)$ appartient à B (B étant un sous-ensemble de F).

Par définition, une application $f : E \rightarrow F$ est *surjective* quand $f(E) = F$. Elle est *injective* si $f(x) = f(x')$ implique $x = x'$. Elle est *bijective* quand elle est à la fois injective et surjective.

Si f est bijective, il y a correspondance univoque entre E et F, à tout x appartenant à E correspond un, et un seul, $y = f(x)$, alors on peut associer à tout y l'unique x ainsi défini. L'application $F \rightarrow E$ correspondante est dite *application réciproque* de f, on la note : f^{-1}.

On démontre qu'il existe une bijection entre l'ensemble $\mathcal{R}$ (E) des équivalences sur E et l'ensemble $\mathcal{P}$ (E) des partitions de E; il revient donc au même de se donner explicitement une équivalence sur E ou de se donner la partition correspondante.

Dénombrement

Nous allons maintenant présenter les principales notions attachées aux problèmes de **dénombrement** par l'intermédiaire des **cardinaux** et des **ordinaux.**

Dans le langage courant, un nombre cardinal est celui qui mesure la quantité (n objets), un nombre ordinal est celui qui indique l'ordre (n-ième objet); nous allons montrer comment ces notions peuvent s'étendre aux ensembles infinis.

Nous supposerons établie l'existence de $\mathbb{N}$, ensemble des entiers naturels (voir *Nombres*) dont la construction repose sur un nouvel axiome, l'**axiome de l'infini.** Nous admettrons l'axiome du choix (le produit cartésien d'une famille d'ensembles non vides est non vide ou, ce qui est équivalent, pour tout ensemble E il existe une application f de $\mathfrak{P}$ (E) — $\varnothing$ dans E qui à tout X non vide inclus dans E associe un élément x de X).

Nombres cardinaux

A la base de toute tentative de dénombrement se trouve la notion d'**équipotence :** deux ensembles A et B sont équipotents s'il existe une bijection de A sur B.

Cette relation est manifestement réflexive, symétrique et transitive, mais nous ne pouvons pas parler de relation d'équivalence, car nous n'avons défini les relations binaires que sur un ensemble, et l'ensemble de tous les ensembles n'existe pas.

Par exemple, l'ensemble des nombres pairs est équipotent à l'ensemble des nombres impairs (considérer l'application qui à $2n$ associe $2n-1$ pour $n \geqslant 1$); l'ensemble des nombres pairs est équipotent à $\mathbb{N}$ (à n on associe $2n$). Ces trois ensembles sont donc équipotents entre eux.

Le second exemple met en évidence une propriété importante de $\mathbb{N}$: l'existence d'une bijection de $\mathbb{N}$ sur une de ses parties propres ($\neq \mathbb{N}$). Pour Dedekind, un **ensemble infini** est un ensemble équipotent à une de ses parties propres. Une autre définition est la suivante : un ensemble E est infini s'il n'existe aucun entier n tel que E soit équipotent à $\{1, 2, ... n\}$. Si on admet l'axiome du choix, les deux définitions sont équivalentes.

De deux ensembles équipotents on dit qu'ils ont même **puissance** ou encore même **cardinal.** On notera $\overline{\overline{A}}$ le cardinal de A (notation de Cantor).

Si A est un ensemble fini, par définition il existe un entier n tel que A soit équipotent à $\{1, 2, ..., n\}$. Si B est un ensemble fini, il est équipotent à $\{1, 2, ..., n'\}$. Alors A est équipotent à B si, et seulement si $n = n'$. On montre que l'on peut identifier $\overline{\overline{A}} = \overline{\overline{B}}$ avec n.

Si A n'est pas un ensemble fini, on dit que son cardinal est **transfini.**

Opérations sur les cardinaux

Soit a et b deux cardinaux, A et B deux ensembles tels que $\overline{\overline{A}} = a$, $\overline{\overline{B}} = b$, $A \cap B = \varnothing$ (cette dernière hypothèse n'est nécessaire que pour la définition de la somme), on pose :

$$a + b = \overline{\overline{A \cup B}}$$

$$a \cdot b = \overline{\overline{A \times B}}$$

$a^b = \overline{\overline{\mathcal{F}(B, A)}}$; $\mathcal{F}$ (B, A) est l'ensemble des applications de B dans A.

Dans le cas où a et b sont des nombres finis, on retrouve les opérations usuelles, l'intérêt d'une telle méthode est d'étendre ces opérations aux nombres transfinis.

Pour tous les *nombres cardinaux, finis* ou *non*, les règles de calcul suivantes sont encore valides :

$$(a + b) + c = a + (b + c)$$
$$(a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c)$$
$$a + b = b + a$$
$$a \cdot b = b \cdot a$$
$$a \cdot (b + c) = a \cdot b + a \cdot c$$
$$a^c \cdot b^c = (a \cdot b)^c$$
$$a^b \cdot a^c = a^{b+c}$$
$$(a^b)^c = a^{b \cdot c}$$

Vérifions la dernière égalité. Soit A, B, C des ensembles tels que $\overline{\overline{A}} = a$, $\overline{\overline{B}} = b$, $\overline{\overline{C}} = c$; l'égalité sera vraie si et seulement si $\mathcal{F}\big(C, \mathcal{F}(B, A)\big)$ est équipotent à $\mathcal{F}$ (B $\times$ C, A). Considérons un élément générique du premier ensemble : à un élément z de C, on associe une application qui, à l'élément y de B, fait correspondre x dans A. La connaissance de z et y détermine donc x de façon unique, ce qui définit une application de B $\times$ C dans A. Il y a donc correspondance biunivoque entre

$$\mathcal{F}\big(C, \mathcal{F}(B, A)\big) \text{ et } \mathcal{F}(B \times C, A).$$

Comparaison de cardinaux

Soit a et b deux cardinaux; on dira que a est inférieur ou égal à b ($a \leqslant b$) s'il existe une injection d'un ensemble de cardinal a dans un ensemble de cardinal b.

On démontre le résultat fondamental par le théorème suivant.

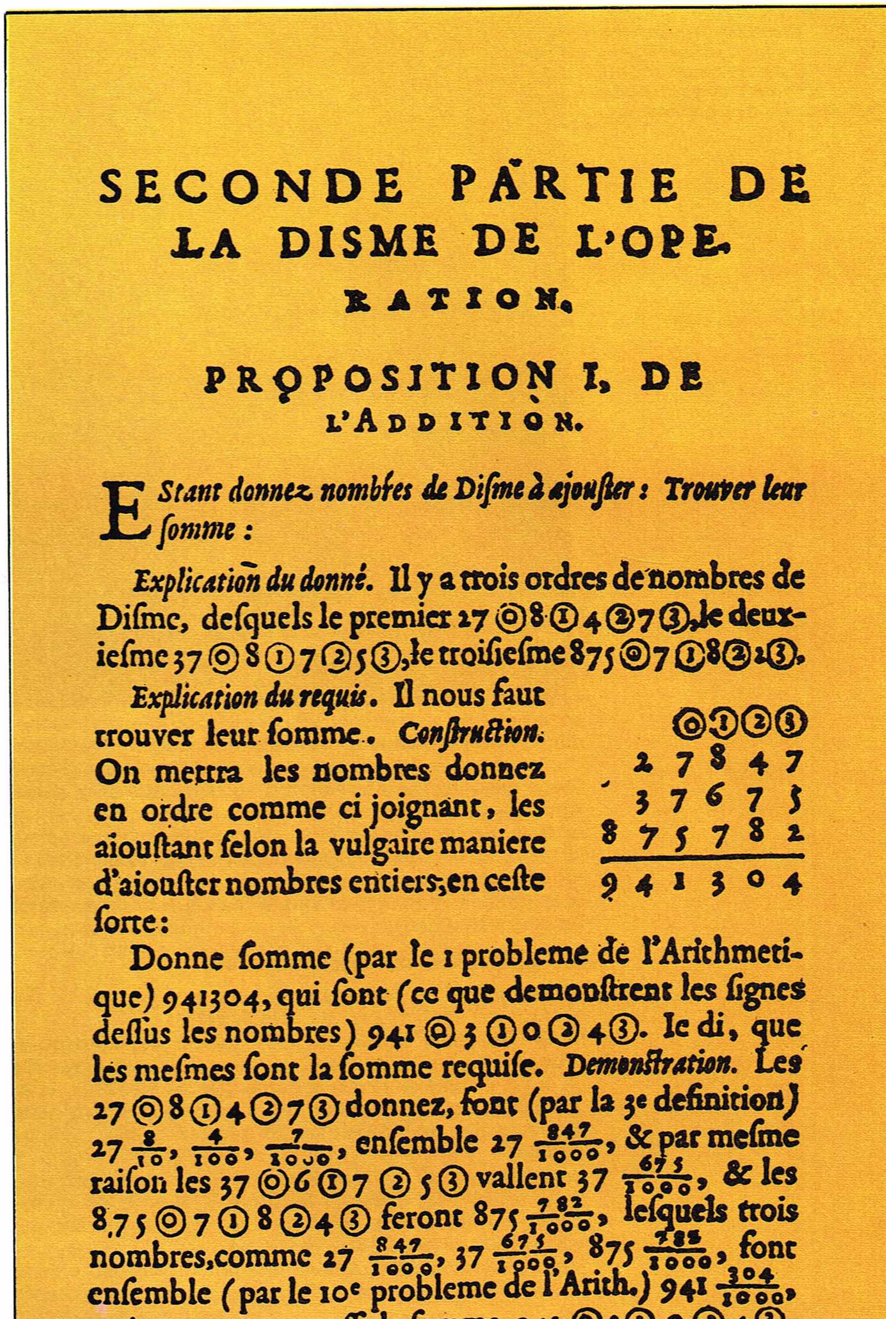

SECONDE PARTIE DE LA DISME DE L'OPERATION.

PROPOSITION I. DE L'ADDITION.

Estant donnez nombres de Disme à ajouster : Trouver leur somme :

Explication du donné. Il y a trois ordres de nombres de Disme, desquels le premier 27 ⓪ 8 ① 4 ② 7 ③, le deuxiesme 37 ⓪ 8 ① 7 ② 5 ③, le troisiesme 875 ⓪ 7 ① 8 ② 2 ③.

Explication du requis. Il nous faut trouver leur somme. Construction. On mettra les nombres donnez en ordre comme ci joignant, les aioustant selon la vulgaire maniere d'aiouster nombres entiers, en ceste sorte:

			⓪	①	②	③
		2	7	8	4	7
		3	7	6	7	5
	8	7	5	7	8	2
	9	4	1	3	0	4

Donne somme (par le 1 probleme de l'Arithmetique) 941304, qui sont (ce que demonstrent les signes dessus les nombres) 941 ⓪ 3 ① 0 ② 4 ③. Ie di, que les mesmes sont la somme requise. Demonstration. Les 27 ⓪ 8 ① 4 ② 7 ③ donnez, font (par la 3e definition) 27 8/10, 4/100, 7/1000, ensemble 27 847/1000, & par mesme raison les 37 ⓪ 6 ① 7 ② 5 ③ vallent 37 675/1000, & les 875 ⓪ 7 ① 8 ② 4 ③ feront 875 782/1000, lesquels trois nombres, comme 27 847/1000, 37 675/1000, 875 782/1000, font ensemble (par le 10e probleme de l'Arith.) 941 304/1000, mais autant vaut aussi la somme 941 ⓪ 3 ① 0 ② 4 ③, c'est

Palais de la Découverte, Paris

▲ ***Page extraite de l'œuvre de Stevin (édition 1634), l'Introduction des fractions décimales, dont la première édition a été publiée à Leyde (Hollande) en 1585.***

▶ ***Le mathématicien russe* Georg Cantor *(1845-1918) ; il est surtout connu comme créateur de la* théorie des ensembles.**

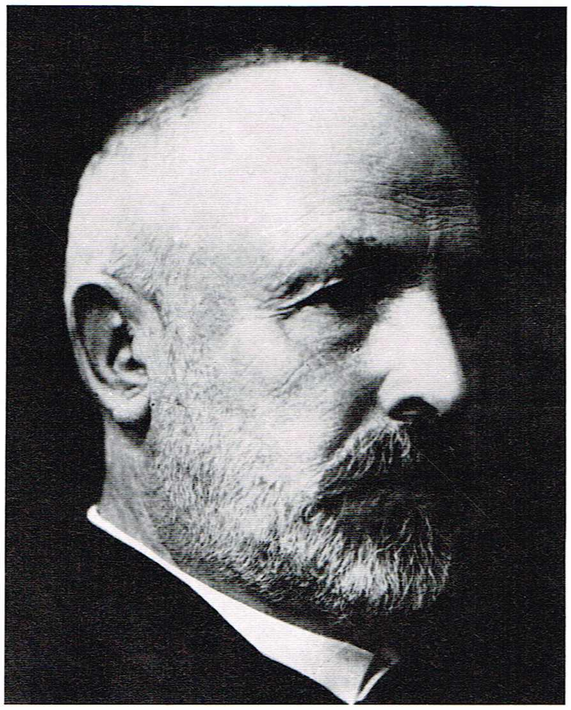

F. Arborio Mella

Théorème de Cantor-Bernstein

Soit A et B deux ensembles. S'il existe une injection de A dans B et une injection de B dans A, alors il existe une bijection de A sur B.

Il en résulte que la relation que nous venons de définir entre cardinaux est antisymétrique. Elle est aussi réflexive et transitive, mais ce n'est pas une relation d'ordre, car, nous le verrons plus loin, il n'y a pas d'ensemble de tous les cardinaux.

La puissance du dénombrable

Le cardinal de l'ensemble $\mathbb{N}$ sera noté comme l'a fait Cantor par le symbole $\aleph_0$ (aleph zéro).

Un ensemble équipotent à $\mathbb{N}$ est dit **dénombrable.** Pour mettre en évidence la bijection entre un ensemble A et $\mathbb{N}$, il suffit de réussir à numéroter les éléments de A. Le schéma suivant indique un procédé permettant cette numérotation pour un produit de deux ensembles dénombrables :

$$
\begin{array}{ccccccccc}
a_{11} & \rightarrow & a_{12} & & a_{13} & \rightarrow & a_{14} & & \dots \\
 & \swarrow & & \nearrow & & \swarrow & & \nearrow & \\
a_{21} & & a_{22} & & a_{23} & & a_{24} & & \dots \\
\downarrow & \nearrow & & \swarrow & & \nearrow & & \swarrow & \\
a_{31} & & a_{32} & & a_{33} & & a_{34} & & \dots \\
 & \swarrow & & \nearrow & & \swarrow & & \nearrow & \\
a_{41} & & a_{42} & & a_{43} & & a_{44} & & \dots \\
\downarrow & \nearrow & & \swarrow & & \nearrow & & & \\
\dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots &
\end{array}
$$

On démontre ainsi que tout produit cartésien fini d'ensembles finis ou dénombrables est dénombrable, on a les règles de calcul suivantes :

$$\aleph_0 + \aleph_0 = \aleph_0 \ ; n\aleph_0 = \aleph_0 \quad n \text{ entier naturel}$$
$$\aleph_0 \cdot \aleph_0 = \aleph_0 \ ; \aleph_0^n = \aleph_0 \quad n \text{ entier naturel}$$

On verra par la suite (voir *Nombres*) de nombreux exemples d'ensembles dénombrables.

La puissance du continu

Nous allons démontrer que l'ensemble des nombres réels $\mathbb{R}$ n'est pas dénombrable. Le cardinal de $\mathbb{R}$ est noté **C (puissance du continu).** Comme $\mathbb{R}$ contient $\mathbb{N}$, on a nécessairement $\mathbf{C} > \aleph_0$.

Tout d'abord, remarquons que, pour tout ensemble A, $\overline{\overline{\mathcal{P}(A)}} = 2^{\overline{\overline{A}}}$. Ceci résulte de la bijection que l'on peut établir entre $\mathcal{P}$ (A) = $\mathcal{F}$ (A, {0, 1}) ; il suffit d'associer à toute partie X de A l'application définie sur A qui, à un élément y, associe 1 si y appartient à A, 0 sinon.

Il existe une injection évidente de A dans $\mathcal{P}$ (A), celle qui, à l'élément a de A, associe $\{a\}$; nous allons démontrer (par le théorème suivant) qu'il n'existe pas de surjection de A sur $\mathcal{P}$ (A), il en résultera que $\overline{\overline{A}} < 2^{\overline{\overline{A}}}$.

Théorème de Cantor

Si A est un ensemble, l'ensemble $\mathcal{P}$ (A) des parties de A n'est pas équipotent à A.

Soit f une application de A dans $\mathcal{P}$ (A) et soit $X = \{a \in A \mid a \notin f(a)\}$.

Pour démontrer que f n'est pas surjective, il suffit de prouver que $X \in \mathrm{Im} f$. Faisons un raisonnement par l'absurde. Supposons $f^{-1}(\{X\}) \neq \varnothing$, alors il existe $x \in A$ tel que $f(x) = X$.

Deux cas sont à envisager : ou bien $x \notin X$, il s'ensuit que $x \notin f(x)$, et par définition de X, $x \in X$, ou bien $x \in X$, donc $x \notin f(x)$, et comme $f(x) = X$, $x \notin X$. Les deux cas mènent à une contradiction ; donc $f^{-1}(\{X\}) = \varnothing$ et f n'est pas surjective.

En remarquant que $\overline{\overline{\mathcal{F}(\mathbb{N}, \{0, 1\})}} = 2^{\aleph_0}$, et en se servant du développement binaire des nombres réels (voir *Nombres*) pour établir la bijection entre $\mathbb{R}$ et $\mathcal{F}$ (N, {0, 1}), ensemble des suites composées uniquement de 0 et de 1, on démontre que $\mathbf{C} = 2^{\aleph_0}$ d'où l'inégalité stricte :

$$\aleph_0 < \mathbf{C} = 2^{\aleph_0}$$

ce qui prouve que $\mathbb{R}$ n'est pas dénombrable.

Indiquons les règles de calcul concernant $\aleph_0$ et **C** :

$$\mathbf{C} + \mathbf{C} = \mathbf{C} ; \quad n\mathbf{C} = \mathbf{C} \qquad n \in \mathbb{N}$$
$$\mathbf{C} \cdot \mathbf{C} = \mathbf{C} ; \quad \mathbf{C}^n = \mathbf{C}$$
$$\aleph_0 \cdot \mathbf{C} = \mathbf{C} \cdot \aleph_0 = \mathbf{C}$$
$$n^{\aleph_0} = \mathbf{C}, \quad \aleph_0^{\aleph_0} = \mathbf{C}, \quad \mathbf{C}^{\aleph_0} = \mathbf{C} \quad (2 \leqslant n < \aleph_0)$$
$$n^{\mathbf{C}} = 2^{\mathbf{C}}, \quad \aleph_0^{\mathbf{C}} = 2^{\mathbf{C}}, \quad \mathbf{C}^{\mathbf{C}} = 2^{\mathbf{C}}, \quad (2^{\mathbf{C}})^{\mathbf{C}} = 2^{\mathbf{C}}.$$

Nous nous limiterons à quelques démonstrations :

$$\mathbf{C}^{\aleph_0} = (2^{\aleph_0})^{\aleph_0} = 2^{\aleph_0 \cdot \aleph_0} = 2^{\aleph_0} = \mathbf{C}$$

de même $\mathbf{C}^{\mathbf{C}} = (2^{\aleph_0})^{\mathbf{C}} = 2^{\aleph_0 \cdot \mathbf{C}} = 2^{\mathbf{C}}$

La relation $\mathbf{C}^n = \mathbf{C}$ exprime le fait que $\mathbb{R}^n$ peut être mis en bijection avec $\mathbb{R}$. Par ailleurs, les relations $\mathbf{C} < 2^{\mathbf{C}}$ et $2^{\mathbf{C}} = \mathbf{C}^{\mathbf{C}}$ montrent que l'ensemble des fonctions réelles à valeurs réelles a une puissance strictement supérieure à celle de $\mathbb{R}$.

La relation fondamentale $\overline{\overline{A}} < 2^{\overline{\overline{A}}}$ met en évidence l'existence d'une suite strictement croissante de cardinaux transfinis qui eux-mêmes succèdent aux cardinaux finis. Une telle suite s'écrit :

$$\text{(a)} \qquad \aleph_0, \quad 2^{\aleph_0}, \quad 2^{2^{\aleph_0}}, \quad 2^{2^{2^{\aleph_0}}}, \quad \dots$$

Nous pouvons alors considérer le nombre cardinal Ω_0 associé à la réunion d'une famille d'ensembles de cardinaux $\aleph_0, 2^{\aleph_0}, 2^{2^{\aleph_0}}, \dots$; Ω_0 est supérieur à tous ces cardinaux, et à la suite (a) on peut faire succéder la suite :

$$\text{(b)} \qquad \Omega_0, \quad 2^{\Omega_0}, \quad 2^{2^{\Omega_0}}, \quad 2^{2^{2^{\Omega_0}}}, \quad \dots$$

On construit ainsi une suite transfinie, strictement croissante, de cardinaux (c). On démontre qu'une telle suite n'est pas un ensemble :

$$\text{(c)} \quad \aleph_0, 2^{\aleph_0}, 2^{2^{\aleph_0}}, \dots, \Omega_0, 2^{\Omega_0}, 2^{2^{\Omega_0}}, \dots, \Omega_1, 2^{\Omega_1}, 2^{2^{\Omega_1}}, \dots$$

L'axiome du choix permet de démontrer que tout cardinal transfini, ou coïncide avec un élément de (c) ou peut être inséré entre deux éléments de (c).

L'hypothèse du continu, conjecturé par Cantor lui-même, consiste à affirmer qu'il n'y a aucun nombre cardinal entre $\aleph_0 = 2^{\aleph_0}$.

L'hypothèse du continu généralisé assure qu'il n'y a aucun nombre cardinal entre a et 2^a.

Une autre approche de ce problème va être exposée avec l'étude des nombres ordinaux.

Nombres ordinaux

Pour des ensembles totalement ordonnés, la notion d'ensembles équipotents peut être renforcée par celle d'ensembles isomorphes. Deux ensembles totalement ordonnés $(M, \leqslant)$ et $(M_*, \leqslant_*)$ sont isomorphes (ou semblables) s'il existe une bijection f de M sur M_* telle que, pour tout couple (x, y) d'éléments de M $x \leqslant y$ si, et seulement si, $f(x) \leqslant_* f(y)$.

La relation ainsi définie est réflexive, symétrique et transitive, mais, pas plus que pour la relation d'équipotence, nous n'avons ici une relation d'équivalence. Il faudrait pour cela que l'ensemble de tous les ordinaux existât, ce qui est faux.

De deux ensembles isomorphes on dit qu'ils ont même **type d'ordre**. On note $\overline{(M, \leqslant)}$ le type d'ordre de l'ensemble M ordonné par la relation $\leqslant$.

Les **nombres ordinaux** seront les types d'ordres des ensembles bien ordonnés. Un ensemble ordonné est par définition **bien ordonné** si toute partie non vide de cet ensemble admet un plus petit élément.

L'ensemble $\mathbb{N}$ muni de la relation d'ordre usuelle est un ensemble bien ordonné. On désigne par ω le type d'ordre correspondant.

L'ensemble $\mathbb{N}$ muni des *ordres* définis par :

(1) $1 \leqslant 2 \leqslant 3 \ldots\ldots\ldots\ldots \leqslant 0$
(2) $2 \leqslant 3 \leqslant 4 \ldots\ldots\ldots\ldots \leqslant 0 \leqslant 1$
(3) $0 \leqslant 2 \leqslant 4 \leqslant \ldots\ldots \leqslant 1 \leqslant 3 \leqslant 5 \ldots$
(4) $0 \leqslant 3 \leqslant 6 \leqslant \ldots\ldots$
$\leqslant 1 \leqslant 4 \leqslant 7 \leqslant \ldots \leqslant 2 \leqslant 5 \leqslant 8 \ldots$

est encore bien ordonné, mais les nombres ordinaux correspondants sont différents.

(1) possède un plus grand élément alors que $(\mathbb{N}, \leqslant)$ n'en a pas.

$\mathbb{N}$ peut être bien ordonné d'une infinité de façons créant une infinité de nombres ordinaux différents; cette propriété s'étend à tout ensemble de puissance supérieure à celle de $\mathbb{N}$.

Notons qu'un ensemble peut être totalement ordonné sans être bien ordonné (la réciproque est fausse). Il suffit de considérer $\mathbb{N}$ ordonné par :

$$0 \leqslant 2 \leqslant 4 \leqslant 6 \ldots \leqslant 7 \leqslant 5 \leqslant 3 \leqslant 1$$

Le sous-ensemble des nombres pairs n'a pas de plus petit élément.

Mais cela ne peut se produire que pour des ensembles infinis. Deux ensembles finis de même cardinal n et totalement ordonnés sont semblables. On identifiera leur nombre ordinal à n, indiquant ainsi que le résultat du dénombrement dans le cas fini est indépendant de l'ordre choisi pour dénombrer. Il n'en est pas de même pour les ensembles infinis.

Opérations sur les ordinaux

Nous nous limiterons à définir la somme de deux **ordinaux.**

Étant donné deux ordinaux α et β, on considère les ensembles bien ordonnés $(A, \leqslant_A)$, $(B, \leqslant_B)$ tels que :

$$\overline{(A, \leqslant_A)} = \alpha \quad \text{et} \quad \overline{(B, \leqslant_B)} = \beta, \quad A \cap B = \varnothing.$$

Alors $\alpha + \beta = \overline{(A \cup B, \leqslant_{AB})}$ où $\leqslant_{AB}$ est une relation de bon ordre telle que $x \leqslant_{AB} y$ si et seulement si $x \leqslant_A y$ ou $x \leqslant_B y$ au lieu de $x \in A$ et $y \in B$. Tous les éléments de A précèdent ceux de B.

On démontre que $\alpha + \beta$ est indépendant des ensembles A et B choisis.

L'addition des nombres ordinaux finis a les mêmes propriétés que l'addition des nombres finis. L'addition de nombres ordinaux n'est pas, en général, commutative.

Considérons les ensembles $\mathbb{N}$ et $\mathbb{N}^* = \mathbb{N} - \{0\}$ munis de la relation d'ordre usuelle. Ils sont semblables. $(\mathbb{N}, \leqslant)$ est la réunion ordonnée des ensembles bien ordonnés $(\{0\}, \leqslant)$ et $(\mathbb{N}^*, \leqslant)$. Le nombre ordinal de $\{0\}$ est 1, celui de $(\mathbb{N}, \leqslant)$ est ω; on a donc : $1 + \omega = \omega$.

La réunion ordonnée des ensembles bien ordonnés $(\mathbb{N}^*, \leqslant)$ et $(\{0\}, \leqslant)$ est l'ensemble ordonné (1) ci-dessus. Son type d'ordre $\omega + 1$ est différent de ω.

D'où $1 + \omega \neq \omega + 1$.

Les nombres ordinaux des ensembles (2), (3), (4) sont respectivement

$$\omega + 1, \quad \omega + 2, \quad \omega + \omega + \omega.$$

Comparaison d'ordinaux

Étant donné deux ensembles bien ordonnés $(A, \leqslant_A)$ et $(B, \leqslant_B)$, le second est un **segment initial** du premier si B est un sous-ensemble de A qui, chaque fois qu'il contient un élément de A, contient tous ses prédécesseurs, l'ordre $\leqslant_B$ étant la restriction de $\leqslant_A$ à l'ensemble B.

α et β étant deux ordinaux, on dira que β est inférieur à α, $(\beta \leqslant_0 \alpha)$, s'il existe des ensembles bien ordonnés $(A, \leqslant_A)$ et $(B, \leqslant_B)$ tels que $\alpha = \overline{(A, \leqslant_A)}$ et $\beta = \overline{(B, \leqslant_B)}$ avec $(B, \leqslant_B)$ segment initial de $(A, \leqslant_A)$.

Cette relation est réflexive, antisymétrique et transitive, mais, comme les nombres ordinaux ne forment pas un ensemble, on ne peut pas parler de relation d'ordre. Cependant on démontre que, sur tout ensemble de nombres ordinaux, la relation $\leqslant_0$ induit un bon ordre, donc un ordre total.

Un ensemble K d'ordinaux qui, lorsqu'il contient un ordinal, contient tous ses prédécesseurs pour la relation $\leqslant_0$, est appelé segment initial d'ordinaux, on le note $(K, \leqslant_0)$. L'ensemble P (α) des ordinaux qui précèdent l'ordinal α pour $\leqslant_0$ est un segment initial d'ordinaux, et réciproquement tout segment initial d'ordinaux peut se mettre sous la forme P (α). La correspondance qui à α associe P (α) est donc une correspondance biunivoque entre ordinaux et segments initiaux d'ordinaux, et on démontre qu'en général le type d'ordre de P (α) est α. On a ainsi :

$$\overline{P(\omega)} = \omega$$

(il suffit de vérifier que ω est précédé par et seulement par tous les ordinaux 0, 1, 2, 3, ...)

$$\overline{P(\omega + 1)} = \omega + 1$$

($\omega + 1$ est précédé par et seulement par 0, 1, 2, ..., ω)

$$\overline{P(n)} = n$$
$$\overline{P(0)} = 0$$

Étant donné un segment initial d'ordinaux, il existe un nombre ordinal qui domine tous les ordinaux du segment, c'est le type d'ordre du segment lui-même. Ajoutant un tel nombre ordinal au segment, on obtient un nouveau segment initial d'ordinaux qui contient strictement le premier. On réitère le procédé. On est ainsi amené à construire une suite transfinie strictement croissante de nombres ordinaux, analogue en quelque sorte à la suite transfinie des cardinaux du paragraphe précédent.

On peut classer les nombres ordinaux en deux catégories : la première constituée par les ordinaux qui ont un antécédent immédiat dans la suite transfinie des ordinaux, la seconde constituée par les ordinaux qui n'en ont pas. A la première catégorie appartiennent les ordinaux finis supérieurs à 0 et $\omega + 1$, $\omega + 2 \ldots$; à la seconde appartiennent ω, $\omega + \omega = \omega_2$, ... On peut représenter la suite transfinie des idéaux de la façon suivante :

0	1	2	3 . . . . . . ω
	$\omega + 1$	$\omega + 2$	$\omega + 3$ . . . . . ω_2
	$\omega_2 + 1$	$\omega_2 + 2$	$\omega_2 + 3$ . . . . . ω_3
	.	.	. .
	.	.	. .
	.	.	. .
	$\omega_n + 1$	$\omega_n + 2$	ω_n

. . . .

A tout nombre ordinal est associé un cardinal bien défini, celui de tout ensemble ayant un type d'ordre égal au nombre ordinal. Les ensembles qui ont pour ordinaux ω, $\omega + 1$, $\omega + 2$, ..., ω_2 ont tous la puissance du dénombrable. A tout nombre cardinal donné correspond toute une classe de nombres ordinaux. Nous n'approfondirons pas plus ici ces propriétés.

Signalons cependant que l'on peut démontrer l'équivalence entre l'axiome du choix et l'axiome de Zermelo : « Tout ensemble peut être bien ordonné ».

Nous terminerons par une citation de Cantor au sujet des relations $\omega + 1 = \omega + 1$ et $1 + \omega = \omega$: « Nous l'avons vu, c'est la position relative du fini par rapport à l'infini qui importe; si le fini précède il est absorbé par l'infini et disparaît, s'il suit l'infini il subsiste et transforme celui-ci en un nouvel infini différent du premier. »

BIBLIOGRAPHIE

BOURBAKI, *Théorie des ensembles,* Paris, Hermann, 1970; *Éléments d'histoire des mathématiques,* Paris, Hermann, 1960. - BOUVIER, *la Théorie des ensembles,* coll. « Que sais-je ? », Paris, P.U.F., 1969. - BREUER, *Initiation à la théorie des ensembles,* Paris, Dunod, 1969. - CAVAILLES, *Philosophie mathématique,* Paris, Hermann, 1962. - DESANTI, *la Philosophie silencieuse,* Paris, Seuil, 1975. - EXBRAYAT et MAZET, *Algèbre 1,* Paris, Hatier, 1971. - GODEMENT, *Cours d'algèbre,* Paris, Hermann, 1966. - HALMOS, *Introduction à la théorie des ensembles,* Paris, Gauthier-Villars, 1967. - LE LIONNAIS, *les Grands Courants de la pensée mathématique,* Paris, Blanchard, 1962.

▶ *Sur cette planche, tirée de l'*Histoire des mathématiques* de Montucla, divers systèmes de numération et caractères arithmétiques utilisés par un certain nombre d'auteurs à différentes époques. On remarquera que chez Boèce il manque encore une notation pour le zéro.*

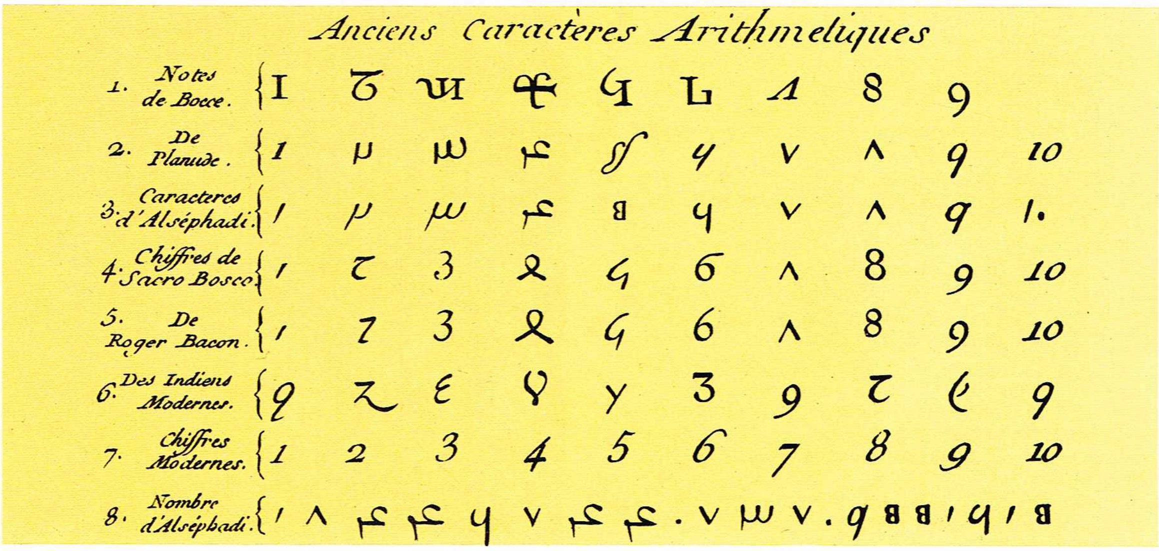

Ciccione

Buscaglia

▶ *Le logicien et mathématicien italien,* Guiseppe Peano *(1858-1932) ; on lui doit notamment un exposé axiomatique de la théorie des nombres entiers.*

LES NOMBRES

Les entiers naturels

La notion de nombre entier qui nous est si familière n'a été élaborée que très lentement au cours de l'histoire. Compter, c'est-à-dire mettre en correspondance les objets de deux collections, est une opération qui ne nécessite pas l'usage de mots spécifiques. Lévy-Bruhl a remarqué que dans certaines sociétés primitives ces mots sont tout à fait ignorés sans pour autant rendre impossible la démarche qu'ils impliquent.

Les mots numérateurs ne suffisent pas non plus à établir l'existence de nombres abstraits, ils ont été longtemps marqués par des valeurs magiques ou affectives dont il reste encore des traces de nos jours (le nombre 13). Avec Pythagore, les nombres se détachent de représentations réelles pour être pensés comme des arrangements privilégiés de points. C'est seulement au XIX^{e} siècle, avec l'essor de l'axiomatique, que les mathématiciens s'affranchissent de toute représentation pour définir les nombres dits naturels.

On doit à Peano (1858-1932) et à R. Dedekind (1831-1916) un exposé axiomatique de la théorie des nombres entiers. Nous allons montrer comment on peut déduire l'arithmétique élémentaire de cinq axiomes (qui sont, à quelques modifications secondaires près, ceux qui ont été formulés par Peano en 1889) :

I) 1 est un nombre naturel ;
II) pour tout nombre naturel n, il existe un nombre naturel n' unique, appelé *successeur* de n ;
III) 1 n'est le successeur d'aucun nombre ;
IV) deux nombres naturels différents ont deux successeurs différents ;
V) une propriété vraie pour le nombre 1, et qui, si elle est vraie pour un nombre naturel, est alors vraie pour son successeur, est vraie pour tout entier naturel.

L'axiome **V** est très important, car il fonde le raisonnement par récurrence. Ainsi, il va servir à définir par récurrence l'*addition :*

Le système

$$\textbf{(1)}\quad \begin{cases} m+1=m' & \text{(successeur de } m) \\ m+n'=(m+n)' & \text{(successeur de } m+n) \end{cases}$$

permet de définir de façon unique une opération, $+$, qui, à tout couple (m, n) d'entiers naturels, associe un entier naturel unique $m+n$, appelé somme de m et de n.

Tout d'abord, remarquons grâce à l'axiome **IV** que $(m+n)'$ est unique, donc également $m+n'$. Soit alors P (n) la propriété : « $m+n$ est défini de façon unique par le système **(1)** pour tout nombre naturel n » ; P (1) est vraie. En outre, d'après la remarque précédente, si P (n) est vraie, alors P (n') l'est aussi. L'axiome **V** permet d'affirmer que P (n) est vraie pour tout entier naturel n, c'est-à-dire que $m+n$ est défini de façon unique pour tout couple m et n.

De même, on définira par récurrence la *multiplication :* le système :

$$\textbf{(2)}\quad \begin{cases} m \cdot 1 = m \\ m \cdot n' = (m \cdot n) + m \end{cases}$$

permet de définir de façon unique une opération, $\cdot$, qui à tout couple (m, n) d'entiers naturels associe un entier naturel unique $m \cdot n$ (noté aussi mn) appelé *produit* de m et de n. La démonstration est analogue à la précédente.

Toujours en utilisant l'axiome **V**, on démontre que l'addition et la multiplication des entiers naturels ont les propriétés suivantes :

(Aa) $(a+b)+c=a+(b+c)$
(associativité de l'addition)

(Ca) $a+b=b+a$
(commutativité de l'addition)

(Am) $(a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c)$
(associativité de la multiplication)

(Cm) $a \cdot b = b \cdot a$
(commutativité de la multiplication)

(D_1) $a \cdot (b+c) = a \cdot b + a \cdot c$
(distributivité de la multiplication par rapport à l'addition)

(D_2) $(a+b) \cdot c = a \cdot c + b \cdot c$
(distributivité de la multiplication par rapport à l'addition)

◀ *L'arithmétique dans une miniature du* **De arithmetica arte** *qui fait partie du traité de Cassiodore sur les arts libéraux (Paris, Bibliothèque nationale).*

Remarque

Les axiomes de Peano tels que nous les avons énoncés définissent l'ensemble $\mathbb{N}^* = \{1, 2, 3, ...\}$; une autre version fait intervenir le zéro, il suffit de le substituer à 1 dans les axiomes (et alors $0' = 1$). Dans le système **(1)** on remplace la première égalité par $m + 0 = m$, et dans le système **(2)** par $m \cdot 0 = 0$. Toutes les autres considérations du paragraphe restent inchangées.

Ordre sur $\mathbb{N}$

L'ensemble $\mathbb{N} = \{0, 1, 2, 3, ...\}$ des entiers naturels est ordonné par la relation suivante :

$a \leqslant b$ (a est inférieur ou égal à b) ou encore $b \geqslant a$ (b est supérieur ou égal à a) si, et seulement si il existe un nombre naturel c tel que $a + c = b$; cette relation est manifestement réflexive, antisymétrique et transitive. C'est une *relation d'ordre total,* car, pour tout couple (a, b), l'une ou l'autre des deux assertions $a \leqslant b$ ou $b \geqslant a$ est vraie.

Cet ordre est compatible avec l'addition et la multiplication, ce qui revient à dire :

si $a \leqslant b$ alors $a + c \leqslant b + c$ et $ac \leqslant bc$; en effet $a \leqslant b$ équivaut à $b = a + d$, alors $b + c = a + d + c = a + c + d$ (d'après Aa et Ca), donc $a + c \leqslant b + c$; de même, $bc = (a + d)\, c = ac + dc$ et $ac \leqslant bc$.

On démontre que l'équation $a + x = b$, pour deux entiers naturels quelconques a et b, admet au plus une solution dans $\mathbb{N}$. Cette solution existe si, et seulement si $a \leqslant b$, on la note $b - a$, c'est la différence entre b et a' et l'opération correspondante est la *soustraction*.

Les entiers relatifs

Nous venons de remarquer que la soustraction ne peut pas toujours être effectuée pour deux entiers quelconques. Pour combler cette lacune, nous allons construire un nouvel ensemble, noté $\mathbb{Z}$, celui des entiers relatifs.

Cette extension ne peut se faire sans précaution. Les opérations que l'on définira sur le nouvel ensemble doivent coïncider avec celles qui sont déjà connues sur $\mathbb{N}$, considéré comme partie de $\mathbb{Z}$. Nous allons montrer de façon rigoureuse comment construire $\mathbb{Z}$ à partir des entiers naturels.

Le problème que nous nous proposons de résoudre est celui de donner un sens à $a - b$ quels que soient les entiers a et b et pas seulement dans le cas où $a \geqslant b$. Nous savons déjà que la proposition suivante :

(1) $a - b = c - d$ si, et seulement si $a + d = b + c$ est vraie pour $a \geqslant b$ et $c \geqslant d$, c'est-à-dire quand $a - b$ et $c - d$ sont des entiers naturels. C'est cette restriction qu'il nous faut abolir.

Considérons la relation suivante sur $\mathbb{N} \times \mathbb{N}$:

$(a, b) \sim (c, d)$ si, et seulement si $a + d = b + c$ où la soustraction n'intervient plus.

Cette relation est une relation d'équivalence, c'est-à-dire une relation

— *réflexive :* $(a, b) \sim (a, b)$

— *symétrique:* si $(a, b) \sim (b, a)$ alors $(b, a) \sim (a, b)$

— *transitive :* si $(a, b) \sim (a', b')$ et $(a', b') \sim (a'', b'')$ alors $(a, b) \sim (a'', b'')$.

La vérification est immédiate.

Nous pouvons donc obtenir une partition de l'ensemble $\mathbb{N} \times \mathbb{N}$, ensemble des couples d'entiers naturels, en *classes d'équivalence* deux à deux disjointes.

Ainsi : $(2, 3) \sim (7, 8)$ car $2 + 8 = 7 + 3$

$(2, 3)$ et $(7, 8)$ appartiennent à la même classe notée indifféremment $[2, 3]$ ou $[7, 8]$.

On note $[a, b]$ la classe à laquelle appartient le couple (a, b) que l'on appellera *représentant* de la classe.

Nous désignerons alors par $\mathbb{Z}$ l'ensemble des classes d'équivalence :

$$\mathbb{Z} = \{[a, b] \mid a, b \in \mathbb{N}\}$$

Il reste à définir dans $\mathbb{Z}$ les opérations, somme, produit, qui l'ont été dans $\mathbb{N}$. Pour cela, on pose

(2) $\quad [a, b] + [c, d] = [a + c, b + d]$

(3) $\quad [a, b] \cdot [c, d] = [ac + bd, ad + bc]$.

Par convention, la multiplication l'emporte sur l'addition, ce qui évite l'usage excessif de parenthèses dans une expression du type $ac + bd$, par exemple.

Les définitions **(2)** et **(3)** ne sont acceptables que si elles sont indépendantes des représentants cités; en d'autres termes, si $(a', b') \sim (a, b)$ et $(c', d') \sim (c, d)$ implique

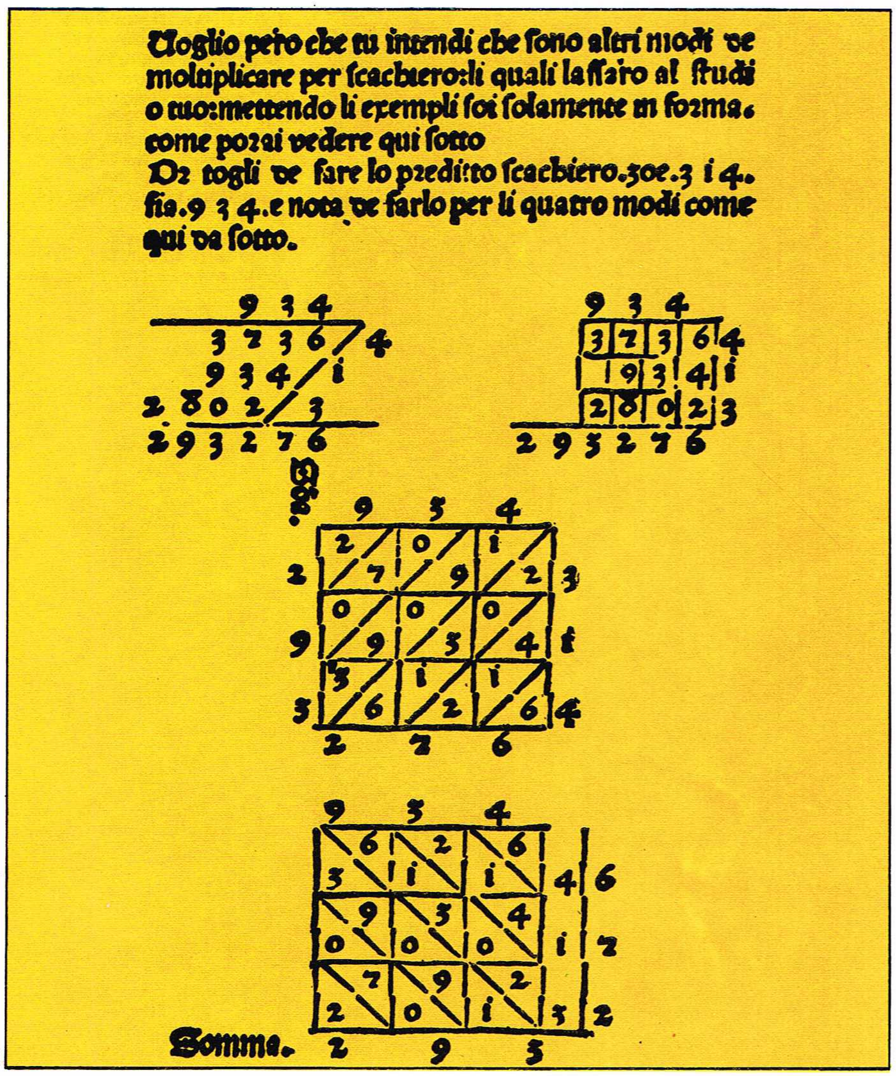

Palais de la Découverte, Paris

▲ ***Page extraite d'un ouvrage d'arithmétique édité à Trévise en 1478 et montrant diverses formes de* multiplication.**

$$[a', b'] + [c', d'] = [a, b] + [c, d] = [a + c, b + d]$$

et

$$[a', b'] \cdot [c', d'] = [a, b] \cdot [c, d] = [ac + bd, ad + bc].$$

On dira alors que les opérations considérées sont compatibles avec la relation d'équivalence.

Vérifions la première propriété. Cela revient à montrer que $[a' + c', b' + d'] = [a + c, b + d]$. Par hypothèse, $(a', b') \sim (a, b)$, ce qui équivaut à $a' + b = b' + a$, de même $c' + d = d' + c$, il en résulte

$(a' + b) + (c' + d) = (b' + a) + (d' + c)$, soit encore $(a' + c') + (b + d) = (b' + d') + (c + a)$, d'où le résultat.

Nous nous sommes servi du fait que $[a, b] = [c, d]$ si, et seulement si $(a, b) \sim (c, d)$, c'est-à-dire, $a + d = b + c$; cela va nous permettre de faire la remarque suivante :

Si $b \geqslant a$, l'unique solution de l'équation $a + x = b$ dans $\mathbb{N}$ est parfaitement connue et notée $b - a$; on aura

$$a + (b - a) = b = b + 0 \text{ d'où } [a, b] = [0, b - a].$$

Si $a \geqslant b$, alors $a = a + 0 = b + (a - b)$ et $[a, b] = [a - b, 0]$.

Toute classe peut se mettre sous l'une ou l'autre de ces deux formes : $[n, 0]$ ou $[0, n]$.

Si nous considérons la bijection qui, à la classe $[0, n]$, associe l'entier n, nous nous apercevons que c'est un isomorphisme (une bijection qui conserve les structures définies sur chaque ensemble); plus précisément :

$$[0, n] + [0, m] = [0, m + n]$$
$$[0, n] \cdot [0, m] = [0 \cdot m + n \cdot 0, 0 \cdot 0 + n \cdot m] = [0, n \cdot m]$$

cela nous permet d'identifier l'ensemble des classes de la forme $[0, n]$ avec l'ensemble $\mathbb{N}$ et de justifier l'égalité $[0, n] = n$ (en toute rigueur, ceci est illégitime car $[0, n]$ appartient à l'ensemble des classes d'équivalence de $\mathbb{N} \times \mathbb{N}$ pour une certaine relation d'équivalence et n appartient à $\mathbb{N}$). On posera $[n, 0] = -n$, et alors

$$\mathbb{Z} = \{n, -n \mid n \in \mathbb{N}\}.$$

$\mathbb{Z}$ muni de l'addition est un groupe commutatif, c'est-à-dire un ensemble muni d'une loi

— *commutative :*

$$[a, b] + [c, d] = [c, d] + [a, b],$$

— *associative :*

$$([a, b] + [c, d]) + [e, f] = [a, b] + ([c, d] + [e, f])$$

ce qui rend inutile l'usage des parenthèses,

— *possédant un élément neutre :* $[0, 0] = 0$

ainsi $[a, b] + [0, 0] = [a + 0, b + 0] = [a, b]$,

— *et telle que chaque élément* $[a, b]$ *possède un symétrique* $[a', b']$ vérifiant $[a, b] + [a', b'] = [0, 0]$; en effet, $[a, b] + [b, a] = [a + b, b + a] = [0, 0]$. En particulier, le symétrique de $[0, n] = n$ sera $[n, 0] = -n$.

Le symétrique de tout élément est unique.

Pour le vérifier, supposons que l'on ait :

$\alpha + (-\alpha) = \alpha + (-\beta) = 0$, alors $(-\alpha) + \alpha + (-\alpha) = (-\alpha) + \alpha + (-\beta)$ d'où $0 + (-\alpha) = 0 + (-\beta)$ et $-\alpha = -\beta$

si $a \leqslant b$ $[a, b] = [0, b - a] = b - a$;

si $a \geqslant b$ $[a, b] = [a - b, 0] = -(a - b)$;

or $[a - b, 0] + [b - a, 0] = [0, 0]$.

Le symétrique de $a - b$ est donc $b - a$, et dans tous les cas on a $[a, b] = b - a$.

Nous sommes maintenant en mesure d'affirmer que l'équation $a + x = b$ admet une solution unique dans $\mathbb{Z}$, quels que soient a et b, à savoir $x = b - a$.

Il nous reste à examiner les propriétés de la multiplication dans $\mathbb{Z}$. Elle est

— *commutative :* $[a, b] \cdot [c, d] = [c, d] \cdot [a, b]$,

— *associative :*

$$([a, b] \cdot [c, d]) \cdot [e, f] = [a, b] \cdot ([c, d] \cdot [e, f]) ;$$

en outre

$$[a, b] \cdot ([c, d] + [e, f]) = [a, b] \cdot [c, d] + [a, b] \cdot [e, f]$$

ce que l'on traduit en disant que la multiplication est distributive par rapport à l'addition. Les démonstrations se font en se reportant aux définitions des opérations sur les classes données plus haut.

$\mathbb{Z}$ muni de ces deux lois est un *anneau commutatif.*

De façon générale *(cf. Structures),* on appelle anneau le triplet $(A, +, \cdot)$ où A est un ensemble sur lequel on a défini deux opérations $+$ et $\cdot$, c'est-à-dire deux applications de $A \times A \to A$ possédant les propriétés suivantes:

— $(A, +)$ est un groupe *abélien* (commutatif) ;

— la multiplication est *associative ;*

— la multiplication est *distributive* à droite et à gauche par rapport à l'addition.

Si la multiplication est commutative, on dit que l'anneau est commutatif. $\mathbb{Z}$ en est un des exemples les plus importants.

On démontre que $\mathbb{Z}$ est le plus petit anneau contenant $\mathbb{N}$ dans lequel l'équation $a + x = b$ admet toujours une solution.

Propriétés des nombres entiers

L'ordre

Parmi d'autres propriétés remarquables, $\mathbb{Z}$ possède celle d'être un ensemble totalement ordonné (étant donné deux éléments quelconques a et b de $\mathbb{Z}$, on a toujours $a \leqslant b$ ou $b \leqslant a$).

Nous allons montrer comment l'ordre total obtenu sur $\mathbb{N}$ induit un ordre total sur $\mathbb{Z}$ respectant la structure d'anneau.

Un anneau A *ordonné* est un anneau sur lequel est définie une structure d'ordre total compatible avec les lois de l'anneau, c'est-à-dire vérifiant :

(01) Deux éléments quelconques a et b sont comparables

$$\forall a \in A, \quad \forall b \in A \qquad a \leqslant b \text{ ou } b \leqslant a$$

(02) $\forall c \in A \qquad (a \leqslant b \Rightarrow a + c \leqslant b + c)$

(03) $a \leqslant b, \quad c \geqslant 0 \Rightarrow ac \leqslant bc$

Dans un anneau ordonné, on a l'équivalence

(1) $a \leqslant b \Leftrightarrow b - a \geqslant 0.$

Ce qui nous permettra de reformuler la définition d'un anneau ordonné sous une autre forme équivalente qui se révélera utile.

Un anneau ordonné est un anneau pour lequel on peut déterminer un sous-ensemble P, que l'on appellera sous-ensemble des éléments positifs, $(x > 0 \Leftrightarrow x \in P)$, tel que :

(01′) pour tout élément a de $A^* = A - \{0\}$ une, et une seule, des relations $a > 0$, $-a > 0$ est vraie ;

(02′) $a \geqslant 0, b \geqslant 0 \Rightarrow a + b \geqslant 0$;

(03′) $a \geqslant 0, b \geqslant 0 \Rightarrow ab \geqslant 0.$

Supposons A ordonné selon la première définition. Comme l'ordre est total pour tout élément a, $a \geqslant 0$ ou $a \leqslant 0$; si $a \leqslant 0$ alors $a + (-a) \leqslant -a$ d'après **(02)**, donc $0 \leqslant -a$ et **(01′)** est vrai. Si $a \geqslant 0$, $b \leqslant a + b$ d'après **(02)**, comme $b \geqslant 0$ la transitivité de la relation d'ordre implique $a + b \geqslant 0$, donc **(02′)** est vraie. **(03′)** est une conséquence immédiate de **(03)**.

Réciproquement supposons A ordonné selon la seconde définition. On vérifie immédiatement que la relation $a \leqslant b$ si, et seulement si $a - b \geqslant 0$ est une relation d'ordre total. **(02)** se déduit immédiatement de la définition de l'ordre. Enfin, de $a \leqslant b$, $c \geqslant 0$, on déduit $b - a \geqslant 0$, d'où $bc - ac \geqslant 0$ (d'après **03′**) et $ac \leqslant bc$. Il y a bien équivalence entre les deux définitions.

C'est la deuxième définition qui nous servira : $\mathbb{N}$ considéré comme partie de $\mathbb{Z}$ a bien les propriétés requises et permet donc de faire de $\mathbb{Z}$ un anneau ordonné.

La divisibilité

Un des problèmes fondamentaux dans $\mathbb{N}$ comme dans $\mathbb{Z}$ est celui de la résolution de l'équation $ax = b$ et plus généralement celui de l'étude des propriétés de divisibilité dans ces ensembles.

Faisons d'abord quelques remarques :

— il existe dans $\mathbb{Z}$ un élément neutre pour la multiplication, le nombre 1 tel que $a1 = 1a = 1$;

— la multiplication dans $\mathbb{Z}$ est une opération régulière : $ac = bc, c \neq 0 \Rightarrow a = b$,

ce qui équivaut à la proposition suivante :

$$ab = 0 \Rightarrow a = 0 \quad \text{ou} \quad b = 0.$$

Comme on le voit en remarquant que $ac = bc$, $c \neq 0$, $\Leftrightarrow (a - b)\, c = 0$, $c \neq 0$. La première propriété exprime que $\mathbb{Z}$ est un anneau unitaire, la deuxième que c'est un anneau intègre.

Si b est un entier quelconque, tout entier a pour lequel l'équation $ax = b$ admet une solution entière est appelé *diviseur de b*. Par la suite, nous emploierons indifféremment les expressions a est un diviseur de b, b est divisible par a, b est un multiple de a, que nous noterons $a \mid b$.

Ainsi, pour tout entier a, $a \mid 0$. Par contre $0 \mid b$ si, et seulement si $b = 0$. L'équation $0x = b$ a une infinité de solutions si $b = 0$, aucune solution si $b \neq 0$. L'équation $ax = b$ a une solution unique si $a \neq 0$ (ceci résulte de la régularité de la multiplication), solution notée $\frac{b}{a}$.

$\frac{b}{a}$ n'est donc définie que pour $a \neq 0$.

Tout entier a possède quatre diviseurs triviaux $1, -1, a, -a$. D'ailleurs, si a est un diviseur de b, c'est-à-dire s'il existe un entier x tel que $b = a \cdot x$, alors $b = (-a)(-x)$, ce qui montre que $-a$ est un diviseur de b. Dans la théorie de la division, il n'y a pas lieu de faire une distinction entre deux nombres opposés, et nous ne considérerons que les positifs.

Étudions dans $\mathbb{N}$ la relation $a \mid b$. Elle est réflexive, antisymétrique ($a \mid b$ et $b \mid a \Leftrightarrow a = b$) et transitive ($a \mid b$, $b \mid c \Rightarrow a \mid c$) ; c'est donc une relation d'ordre. On dira que $a \prec b$ (a est antérieur à b) si, et seulement si a divise b. Contrairement à la relation d'ordre usuelle dans $\mathbb{N}$ qui est une relation d'ordre total (a et b sont toujours comparables), cette deuxième relation d'ordre est une relation d'ordre partiel : $2 \prec 12$, car 12 est un multiple de 2 mais 2 et 5 ne sont pas comparables. Étant donné deux entiers a et b, le plus petit entier postérieur à a et b au sens de la relation $\prec$ est appelé *plus petit commun multiple (ppcm)* de a et b ; le plus grand entier antérieur à a et b au sens de la relation $\prec$ est le *plus grand commun diviseur (pgcd)* de a et de b. L'ensemble N ainsi ordonné est un treillis *(cf. Structures)*.

La détermination du *pgcd* de deux nombres a et b peut se faire grâce à un procédé dû à Euclide et connu sous le nom d'*algorithme d'Euclide*.

Étant donné deux entiers a et b, il existe toujours un entier q (quotient) et un entier r (reste) tels que :

$a = bq + r \qquad 0 \leqslant r < b \qquad$ division euclidienne

(il suffit de choisir pour q le plus grand entier tel que $bq \leqslant a$ et de prendre $r = a - bq$)

q et r sont déterminés de façon unique.

Supposons que α soit un diviseur de a et de b ($a \geqslant b$), α divise r, α est donc un diviseur commun de r et de b, le *pgcd* de a et b est donc le même que celui de b et r ; on réitère le procédé jusqu'à ce que l'on trouve un reste nul, l'avant-dernier reste est alors le *pgcd*. Appliquons cet algorithme à la recherche du *pgcd* de 336 et 144 ; on a :

$$336 = 144\,(2) + 48$$
$$144 = 48\,(3) + 0$$

le *pgcd* de 336 et 144 est 48.

On vérifie sans peine que tous les diviseurs communs de 336 et 144 sont exactement ceux de 48.

Deux entiers a et b sont *premiers entre eux* si, et seulement si leur *pgcd* est 1.

Si on multiplie ou divise deux nombres par m, leur *pgcd* est multiplié ou divisé par m. Par conséquent, en divisant deux nombres par leur *pgcd*, on obtient deux nombres premiers entre eux.

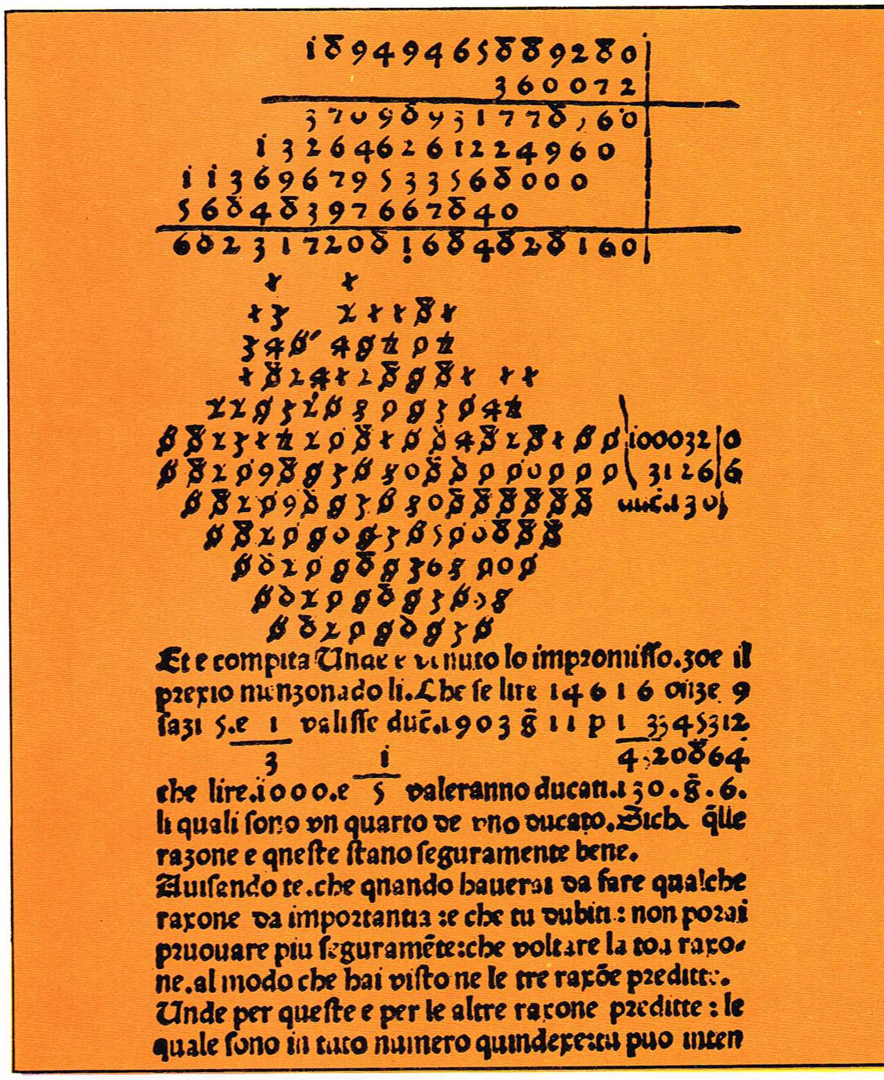

Palais de la Découverte, Paris

▲ **Une division** ***par effaçage : page extraite du même ouvrage d'arithmétique (Trévise, 1478).***

▶ *La table des nombres premiers de 1 à 997.*

Nombres premiers de 1 à 997

1	2	3	5	7	11	13	17	19	23	29	31	37
41	43	47	53	59	61	67	71	73	79	83	89	97
101	103	107	109	113	127	131	137	139	149	151	157	163
167	173	179	181	191	193	197	199	211	223	227	229	233
239	241	251	257	263	269	271	277	281	283	293	307	311
313	317	331	337	347	349	353	359	367	373	379	383	389
397	401	409	419	421	431	433	439	443	449	457	461	463
467	479	487	491	499	503	509	521	523	541	547	557	563
569	571	577	587	593	599	601	607	613	617	619	631	641
643	647	653	659	661	673	677	683	691	701	709	719	727
733	739	743	751	757	761	769	773	787	797	809	811	821
823	827	829	839	853	857	859	863	877	881	883	887	907
911	919	929	937	941	947	953	967	971	977	983	991	997

Richard Colin

▼ **Le crible d'Ératosthène :** *méthode qui consiste à déterminer la table des nombres premiers.*

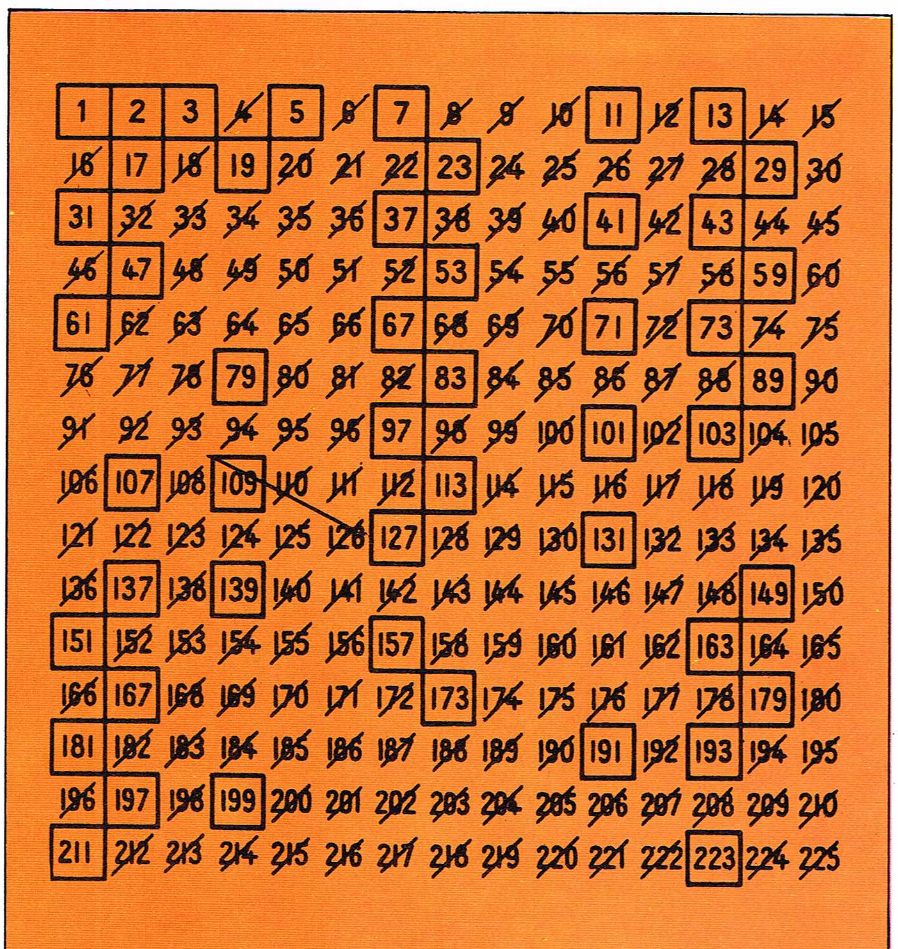

Palais de la Découverte, Paris

La propriété suivante est un des théorèmes fondamentaux de la théorie de la divisibilité : si un entier k divise le produit ab et si k est premier avec a, alors k divise b.

Pour le démontrer, supposons a, b, k non nuls. Par hypothèse, le *pgcd* de k et a est 1, il en résulte que le *pgcd* de kb et ab est b ; or k divise ab, k divise aussi kb, donc k divise le *pgcd* de kb et ab, et k divise b.

Ce résultat se généralise à un nombre quelconque de termes. En particulier, si k est premier avec a, il est aussi premier avec toute puissance de a.

Quant aux propriétés du *ppcm*, elles se déduisent de celles du *pgcd*, compte tenu du fait que :

$$ppcm\ (a, b) \cdot pgcd\ (a, b) = ab.$$

En effet, si $pgcd\ (a, b) = d$ alors $a = da'$, $b = db'$ avec a' et b' premiers entre eux. Soit m un multiple commun de a et b ; alors $m = ac = be = da'c = db'e$, d'où $a'c = b'e$; b' divisant $a'c$ et étant premier avec a' divise c ; on peut écrire

$$m = ac = da'c = da' \frac{c}{b'} b' = \frac{c}{b'} da'b'.$$

Tout multiple commun de a et b est multiple de $da'b'$; on en déduit que $ppcm\ (a, b) = da'b'$, d'où le résultat annoncé.

Les nombres premiers

Un nombre premier est un nombre qui n'a pas de diviseur propre (des diviseurs autres que lui-même et 1), par exemple 2, 3, 5, 7, 11, ...

Tout nombre entier peut être décomposé en produit de facteurs premiers, et cela de façon unique (à condition d'ordonner les facteurs),

$$a = p_1^{t_1} \cdot p_2^{t_2} \cdots p_r^{t_r}$$

où $p_1, \ldots, p_r$ sont des nombres premiers vérifiant

$$p_1 < p_2 < \ldots < p_r$$

et $t_1, \ldots, t_r$ des exposants entiers.

Cette décomposition est appelée *décomposition canonique*.

Supposons qu'il existe deux décompositions de a en facteurs premiers et groupons au début de chaque décomposition les éléments *communs* aux deux en un produit A.

Alors $a = AP = AQ$ implique $P = Q$. Soit alors p un des facteurs premiers intervenant dans le produit P, p est premier avec chacun des facteurs de Q (d'après la définition même de A), mais p divise Q (puisque p divise P), il y a donc contradiction, et l'hypothèse de l'existence de deux décompositions est fausse.

La décomposition canonique s'obtient en cherchant les facteurs premiers dans l'ordre croissant comme sur l'exemple suivant :

$n = 10\,800$

10 800	2
5 400	2
2 700	2
1 350	2
675	3
225	3
75	3
25	5
5	5
1	

$10\,800 = 2^4 \cdot 3^3 \cdot 5^2.$

Ceci va nous permettre de déterminer rapidement le *pgcd* ou le *ppcm* de deux nombres a et b, connaissant leur décomposition canonique. Soit $p_1, ..., p_r$ tous les facteurs premiers intervenant dans les deux décompositions (éventuellement sous la forme $p_i^\circ = 1$) avec les ordres de multiplicité (exposants) $t_1, ..., t_r$ pour a, $u_1, ..., u_r$ pour b ; si on désigne par m_i le plus petit des deux nombres t_i et u_i et par M_i le plus grand, alors :

$$pgcd\ (a, b) = p_1^{m_1} \cdot p_2^{m_2} \dots p_r^{m_r}$$

$$ppcm\ (a, b) = p_1^{M_1} \cdot p_2^{M_2} \dots p_r^{M_r}$$

La répartition des nombres premiers est un problème posé dès l'Antiquité grecque et qui reste encore ouvert. Euclide, déjà, a montré l'existence d'une infinité de nombres premiers grâce à l'argument suivant : soit $p_1, p_2, ..., p_k$, k nombres premiers ; alors $n = (p_1 \cdot p_2 \dots p_k) + 1$ est premier avec $p_1 \cdot p_2 \dots p_k$, car si un nombre divisait à la fois le produit $p_1 \cdot p_2 \dots p_k$ et n, il devrait diviser 1.

D'autre part, n admet au moins un facteur premier, ce facteur est nécessairement distinct des $p_1, ..., p_k$; il existe donc un nombre premier distinct des k nombres premiers considérés.

La distribution des nombres premiers dans l'ordre croissant des entiers est extrêmement irrégulière, et a fait l'objet de recherches nombreuses et très approfondies. Si l'on désigne par $n!!$ le produit des nombres premiers inférieurs ou égaux à n : $2!! = 2$, $3!! = 4!! = 6$, $5!! = 6!! = 30$, $7!! = 8!! = 9!! = 10!! = 210$ $11!! = 12!! = 2\,310$, $13!! = 14!! = 15!! = 16!! = 30\,030$, etc.
alors $n!! + 1$ peut être premier ou non mais

$$n!! + 2, ..., n!! + n$$

sont tous des nombres composés (non premiers).

Par suite, on peut trouver dans la liste des nombres premiers des trous de longueur arbitraire, par exemple deux nombres premiers consécutifs dont la différence est au moins égale à 100, il suffit de remarquer que $101!! + 2$, ..., $101!! + 101$ est suite de 100 nombres composés. Mais on peut aussi rencontrer plusieurs nombres premiers très proches, par exemple 101, 103, 107, 109. Cependant, les nombres premiers se raréfient à mesure qu'ils deviennent de plus en plus grands.

On démontre que, si l'on désigne par $\pi\ (n)$ le nombre de nombres premiers inférieurs ou égaux à n, on a la relation :

$$\lim_{n \to \infty} \frac{\pi\ (n)}{n} = 0 \left(\text{plus précisément } \pi\ (n) \text{ tend vers } \frac{n}{\text{Log}\, n}\right)$$

D'autre part, les nombres premiers se raréfient plus lentement que les carrés des nombres entiers ; la série $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2}$ est convergente alors que la série $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{p_n}$ des inverses des nombres premiers ordonnés en une suite croissante $p_1, ..., p_n, ...$ est divergente.

Palais de la Découverte, Paris

▲ ***Le mathématicien* Pierre de Fermat *(1601-1665) célèbre pour ses nombreuses découvertes en arithmétique. Ses principaux écrits ont été publiés par son fils, en 1679, sous le titre de* Varia Opera mathematica.**

L'hypothèse de Fermat

Pierre de Fermat (1601-1665), conseiller au Parlement de Toulouse, est célèbre pour ses nombreuses découvertes en arithmétique. Reprenant un problème posé par Diophante d'Alexandrie au IVᵉ siècle : trouver tous les triangles rectangles dont les trois côtés sont mesurés par des nombres entiers, c'est-à-dire, résoudre dans $\mathbb{N}$ l'équation :

$$x^2 + y^2 = z^2$$

dont la solution est donnée par

$$y = ab, \quad z = \frac{a^2 + b^2}{2}, \quad x = \frac{a^2 - b^2}{2}$$

Fermat déclare avoir découvert une méthode remarquable prouvant que l'équation :

$$x^n + y^n = z^n$$

n'a aucune solution en nombres entiers pour n supérieur à 2. Malheureusement, il ne laissa pas de trace de sa démonstration. Des travaux ultérieurs, dus en particulier à Kummer au XIXᵉ siècle, montrèrent que l'hypothèse de Fermat est exacte pour de nombreuses valeurs de n, mais la démonstration complète n'en a pas encore été élaborée.

▶ *Figure arithmétique extraite des Œuvres de Newton (édition du XIX[e] siècle).*

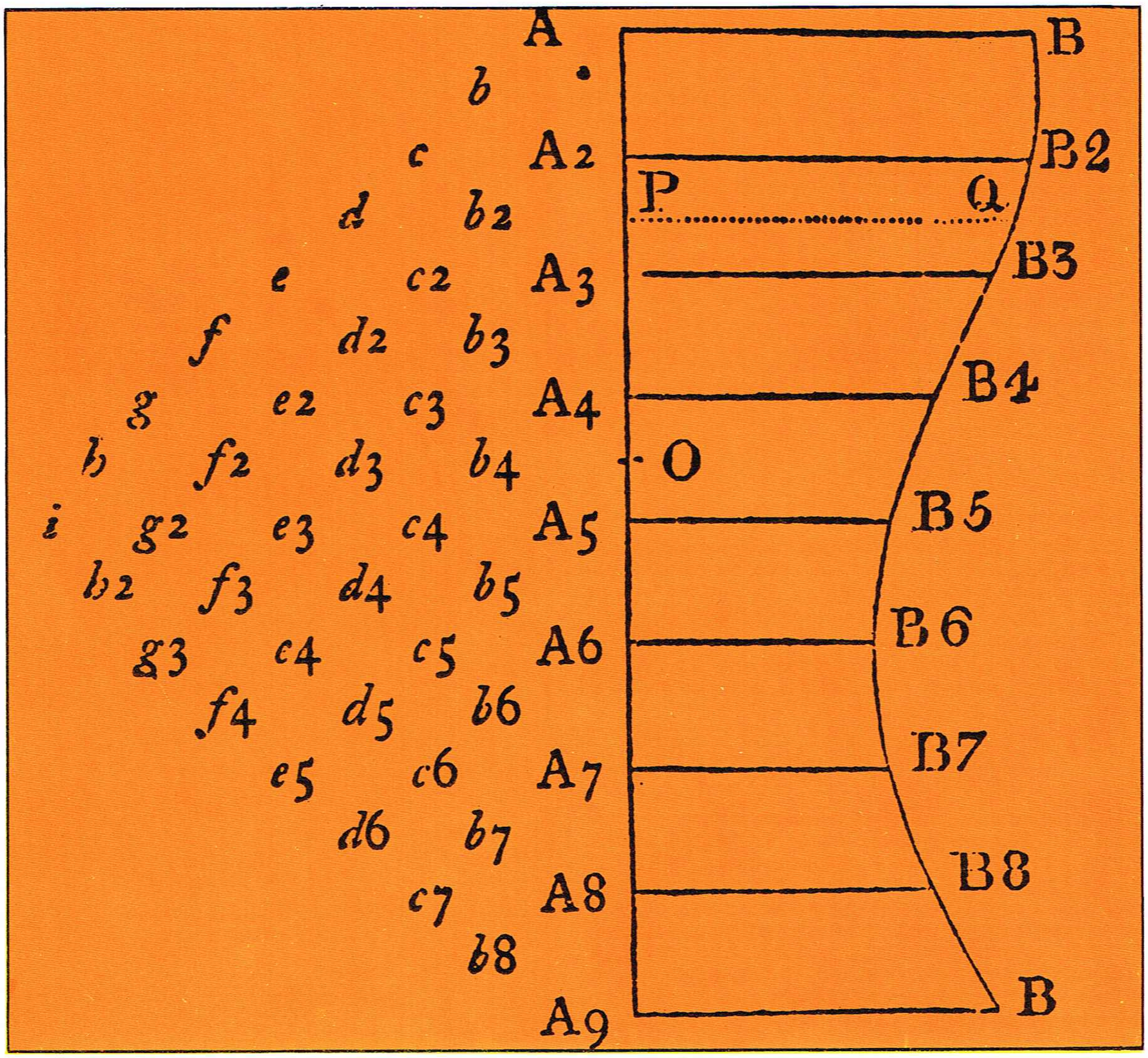

Snark International

Les nombres rationnels

De même que l'équation $a + x = b$ n'a pas toujours de solution dans $\mathbb{N}$, l'équation $ax = b$ n'a pas de solution dans $\mathbb{N}$, ni dans $\mathbb{Z}$ pour toutes les valeurs du couple (a, b). Cela va nous amener à définir un nouvel ensemble de nombres, $\mathbb{Q}$, ensemble des nombres rationnels, dans lequel l'équation $ax = b$ peut être résolue pour tout a $(\neq 0)$ et tout b.

Nous construirons cet ensemble $\mathbb{Q}$ par un procédé analogue à celui que nous avons utilisé pour $\mathbb{Z}$. La relation que nous allons considérer dans $\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}^*$ $(\mathbb{Z}^* = \mathbb{Z} - \{0\})$ est la suivante :

$$(a, b) \sim (c, d) \text{ si, et seulement si } ad = bc.$$

On vérifie sans peine que cette relation est une relation d'équivalence, ce qui permet d'obtenir une partition de $\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}^*$ en classes d'équivalence deux à deux disjointes.

Nous désignerons par $\frac{a}{b}$ la classe à laquelle appartient le couple (a, b) et par $\mathbb{Q}$ l'ensemble des classes d'équivalence :

$$\mathbb{Q} = \left\{ \frac{a}{b} \;\middle|\; a \in \mathbb{Z}, b \in \mathbb{Z}^* \right\}$$

Il reste encore à définir sur $\mathbb{Q}$ une addition et une multiplication qui prolongent celles que l'on connaît dans $\mathbb{Z}$; pour cela nous poserons :

$$\frac{a}{b} + \frac{c}{d} = \frac{ad + bc}{bd}$$

$$\frac{a}{b} \cdot \frac{c}{d} = \frac{ac}{bd}$$

ce qui, *a priori,* a un sens puisque $bd \neq 0$ (la classe $\frac{a}{b}$ n'est définie que pour $b \neq 0$).

Considérons dans $\mathbb{Q}$ le sous-ensemble des classes de la forme $\left\{ \frac{a}{1} \;\middle|\; a \in \mathbb{Z} \right\}$; ce sous-ensemble est isomorphe à $\mathbb{Z}$; en effet l'application φ qui, à l'élément a de $\mathbb{Z}$ associe la classe $\frac{a}{1}$, est bijective (elle est manifestement surjective, et si $\frac{a}{1} = \frac{b}{1}$, alors $(a, 1) \sim (b, 1)$, d'où $a = b$, ce qui prouve qu'elle est injective) et vérifie :

$$\varphi\,(a + b) = \frac{a + b}{1} = \frac{a}{1} + \frac{b}{1} = \varphi\,(a) + \varphi\,(b)$$

$$\varphi\,(a \cdot b) = \frac{a \cdot b}{1} = \frac{a}{1} \cdot \frac{b}{1} = \varphi\,(a) \cdot \varphi\,(b).$$

Par suite, on identifiera $\frac{a}{1}$ et a (comme on l'avait fait pour $[0, n]$ et n), ce qui permettra de considérer $\mathbb{Z}$ comme un sous-ensemble de $\mathbb{Q}$.

$\mathbb{Q}$ possède toutes les propriétés de $\mathbb{Z}$; comme $\mathbb{Z}$, $\mathbb{Q}$ est un anneau commutatif, unitaire, intègre $(c \neq 0,$ $ac = bc \Rightarrow a = b)$, mais en outre dans $\mathbb{Q}$ l'équation $ax = b$ admet une solution unique pour tout couple (a, b) $(a \neq 0)$.

En effet, posons $a = \frac{a_1}{a_2}$, $\quad x = \frac{x_1}{x_2}$, $\quad b = \frac{b_1}{b_2}$

$(a_1 \neq 0$ car $a \neq 0$; $b_2 \neq 0)$, alors $ax = b$ équivaut à $\frac{a_1\,x_1}{a_2\,x_2} = \frac{b_1}{b_2}$ ou encore $(a_1\,b_2)\;x_1 = (a_2\,b_1)\;x_2$ par définition de l'égalité entre deux rationnels ; il en résulte $\frac{x_1}{x_2} = \frac{a_2\,b_1}{a_1\,b_2}$;

▶ *Page ci-contre, document ancien extrait d'un ouvrage maghrébin et utilisant dans un « dessin magique » des symboles numériques (musée du Caire).*

la solution existe ($a_1 b_2 \neq 0$) ; elle est unique, on la désigne par $\frac{b}{a}$.

L'ensemble $\mathbb{Q}^* = \mathbb{Q} - \{0\}$ des nombres rationnels non nuls est un groupe commutatif pour la multiplication. Il suffit de vérifier que tout rationnel α non nul admet un symétrique tel que $\alpha\alpha' = \alpha'\alpha = 1$, ce qui est une conséquence immédiate de la résolution dans l'équation $ax = b$. On aura $\alpha' = \frac{1}{\alpha}$.

On en déduit de façon immédiate la régularité de la multiplication dans $\mathbb{Q}$. Supposons $\alpha x = \alpha y$, $\alpha \neq 0$; alors

$$\frac{1}{\alpha}(\alpha x) = \frac{1}{\alpha}(\alpha y) \text{ et } x = y.$$

Un anneau commutatif qui est aussi un groupe pour la multiplication est un *corps (cf. Structures)*. Si la deuxième loi est commutative, le *corps est commutatif.*

Ainsi $\mathbb{Q}$ est un corps commutatif. C'est le plus petit des corps commutatifs contenant $\mathbb{Z}$ dans lequel l'équation $ax = b$ a une solution pour tout a ($\neq 0$) et tout b appartenant à $\mathbb{Z}$.

Nous allons maintenant montrer comment s'étend à $\mathbb{Q}$ l'ordre naturel de $\mathbb{Z}$.

Pour tout couple d'entiers a, b avec $b \neq 0$, $\frac{a}{b} \geqslant 0$ si, et seulement si $ab \geqslant 0$ et pour deux nombres rationnels quelconques α, β, $\alpha \leqslant \beta$ si, et seulement si $\alpha - \beta \geqslant 0$.

Alors les propriétés **(01′)**, **(02′)**, **(03′)** du paragraphe précédent sont vérifiées.

On montre aisément que ces conditions sont équivalentes à $\frac{a}{b} \geqslant 0$ si, et seulement si $ab \geqslant 0$ ($a \in \mathbb{Q}, b \in \mathbb{Q}^*$).

L'ordre ainsi défini dans $\mathbb{Q}$ prolonge l'ordre obtenu dans $\mathbb{Z}$.

Le corps $\mathbb{Q}$ satisfait à la propriété suivante : « Pour tout couple (a, b) de nombres rationnels strictement positifs, il existe un entier n tel que $b \geqslant na$. » Propriété que l'on traduit en disant que $\mathbb{Q}$ est un *corps archimédien.*

Combien y a-t-il d'éléments dans $\mathbb{Q}$? Nous allons voir qu'il y en a exactement autant que dans $\mathbb{N}$, résultat qui peut paraître paradoxal si l'on oublie que $\mathbb{N}$, comme $\mathbb{Q}$, n'est pas un ensemble fini. L'application de $\mathbb{Q}$ dans $\mathbb{N} \times \mathbb{N}^*$ qui à $\frac{a}{b}$ associe le couple (a, b) est manifestement bijective, donc Card $\mathbb{Q}$ = Card ($\mathbb{N} \times \mathbb{N}^*$).

Les éléments de $\mathbb{N} \times \mathbb{N}^*$ peuvent être rangés de la façon suivante :

```
(0, 1) → (0, 2)    (0, 3) → (0, 4) ...
       ↙         ↗        ↙
(1, 1)    (1, 2)    (1, 3)    (1, 4) ...
  ↓     ↗        ↙         ↗    ↓
(2, 1)    (2, 2)    (2, 3)    (2, 4) ...
       ↙         ↗        ↙
(3, 1)    (3, 2)    (3, 3)    (3, 4) ...
  ↓     ↗        ↙         ↗
(4, 1)    (4, 2)    (4, 3) ...
```

Il est possible de les numéroter en suivant les flèches (procédé diagonal) ; on déduit que

$$\text{Card } \mathbb{N} \times \mathbb{N}^* = \text{Card } \mathbb{N},$$

d'où le résultat annoncé : Card $\mathbb{Q}$ = Card $\mathbb{N}$, ce qui s'énonce encore :

$\mathbb{Q}$ est dénombrable.

Les nombres réels

Soit $\sqrt{2}$ le nombre dont le carré est égal à 2. Nous allons montrer que $\sqrt{2}$ ne peut pas être rationnel. En effet, supposons qu'il existe un nombre rationnel $\frac{p}{q}$, avec p et q premiers entre eux, tel que $\frac{p}{q} = \sqrt{2}$, alors $2 = \frac{p^2}{q^2}$ et $p^2 = 2q^2$.

2 divise $2q^2$, donc 2 divise p^2 et 2 divise p (il suffit de considérer la décomposition de p en facteurs premiers) ; si 2 divise p, 4 divise p^2 donc $2q^2$; donc 2 divise q^2 ce qui contredit que p et q soient premiers entre eux puisque 2 divise également p^2 ; l'hypothèse $\sqrt{2}$ rationnel

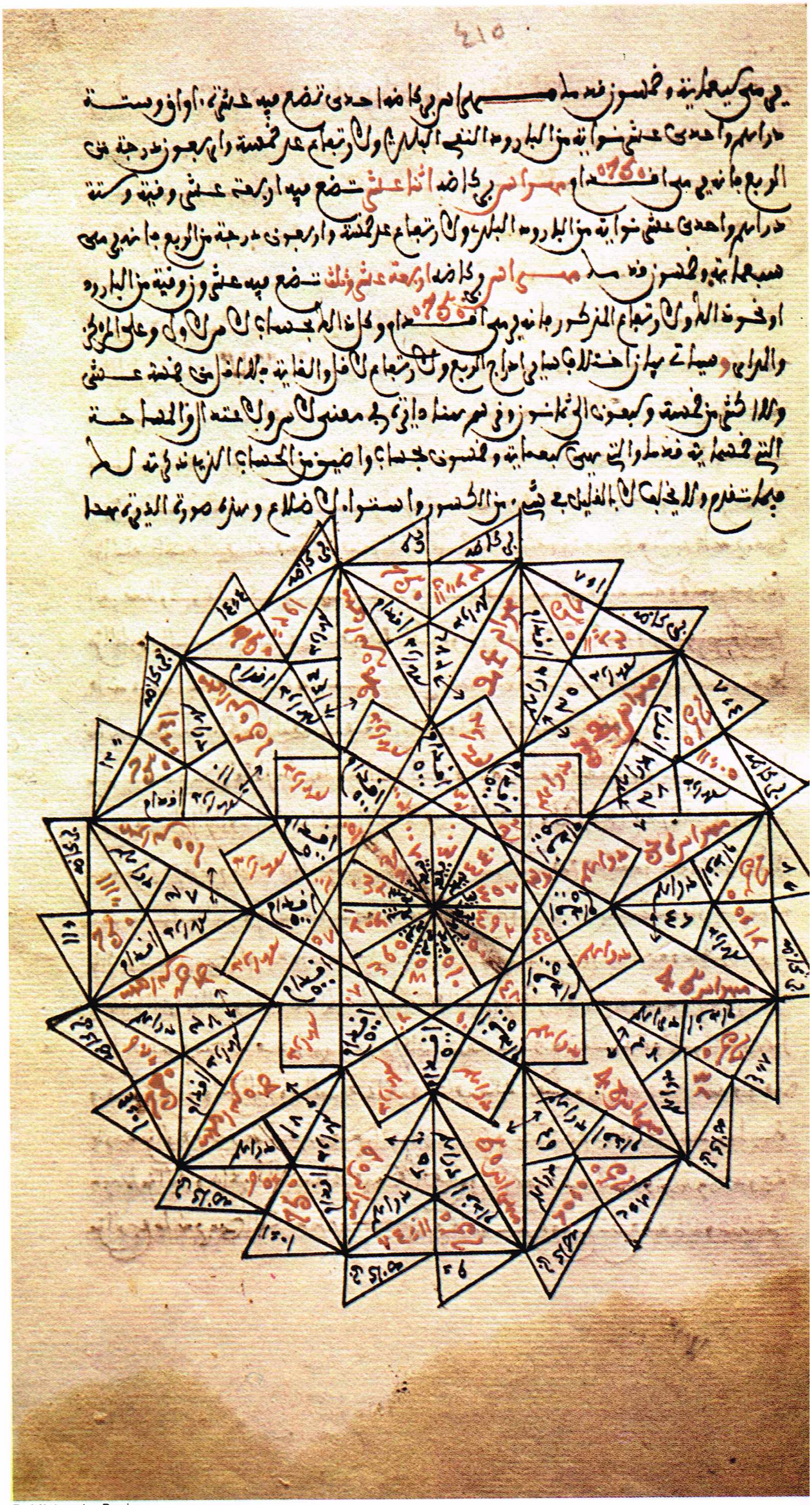

R. Michaud - Rapho

est donc illégitime. Nous venons ainsi de mettre en évidence la nécessité de construire un ensemble plus vaste que $\mathbb{Q}$, permettant notamment de résoudre des équations du type $x^2 = 2$. Cet ensemble sera l'ensemble des nombres réels $\mathbb{R}$.

L'ensemble $\mathbb{R}$ a pour caractéristique essentielle d'être un corps continu.

Un corps ordonné K est dit continu s'il satisfait à la condition suivante, appelée postulat de continuité de Dedekind :

Étant donné une partition des éléments de K en deux classes non vides et séparées, c'est-à-dire telles que tout élément de la première classe soit inférieur (au sens de l'ordre de K) à tout élément de la seconde, il existe dans K un et un seul élément séparateur (coupure) des deux classes (ce qui revient à dire un, et un seul, élément s tel que tout élément de la première classe ne soit pas supérieur à s, et que tout élément de la seconde ne soit pas inférieur à s).

Une des méthodes de construction des réels consiste à considérer l'ensemble formé de :

1) tous les nombres rationnels ;

2) toutes les partitions de l'ensemble $\mathbb{Q}$ des nombres rationnels en classes non vides et séparées dont la coupure n'appartient pas à $\mathbb{Q}$.

On identifie un nombre rationnel quelconque α à la partition de $\mathbb{Q}$ en deux classes non vides et séparées par α, précisant que α appartient à la seconde classe. Alors il est aisé de définir sur $\mathbb{R}$ une addition, une multiplication et une relation d'ordre.

Nous nous limiterons à montrer comment on définit l'addition.

Soit A et B deux partitions de $\mathbb{Q}$ en deux classes non vides et séparées (A_1, A_2) et (B_1, B_2). Par A + B nous désignerons la partition de $\mathbb{Q}$ qui admet comme première classe l'ensemble des nombres rationnels de la forme $a_1 + b_1$, où a_1 appartient à A_1 et b_1 appartient à B_1, et comme seconde classe tous les autres nombres rationnels.

Le nombre réel A + B ainsi défini est appelé somme des nombres réels A et B. On démontrerait sans peine que toutes les propriétés de l'addition dans $\mathbb{Q}$ sont encore vraies dans $\mathbb{R}$.

Le même procédé nous permettra de définir le produit AB de deux nombres réels et d'étendre à $\mathbb{R}$ l'ordre défini sur $\mathbb{R}$, faisant de $\mathbb{R}$ un corps continu, extension ordonnée du corps des rationnels $\mathbb{Q}$.

Si nous reprenons l'exemple cité plus haut, on définira $\sqrt{2}$ à l'aide de la partition de $\mathbb{Q}$ en deux classes non vides et séparées : celle des rationnels dont le carré est inférieur ou égal à 2, celle des rationnels dont le carré est supérieur ou égal à 2. Il existe dans $\mathbb{R}$ un et un seul élément qui sépare ces deux classes ; on le note $\sqrt{2}$.

L'ensemble $\mathbb{R}$ des nombres réels n'est pas dénombrable. $\mathbb{R}$ peut être mis en correspondance biunivoque avec l'intervalle $]0, 1[= \{x \mid x \in \mathbb{R}, 0 < x < 1\}$, comme l'illustre la figure ci-dessous ; il suffit donc de démontrer que $]0, 1[$ n'est pas dénombrable.

I.G.D.A.

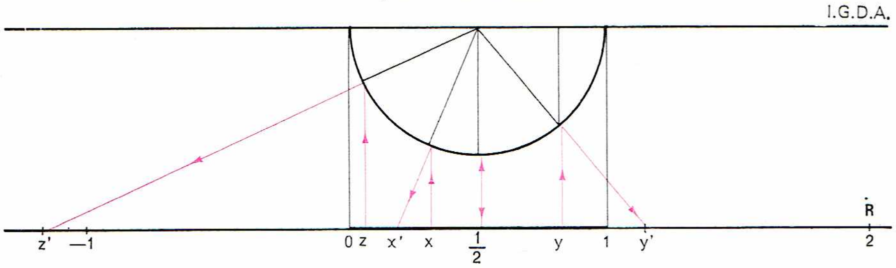

▲ ***Correspondance biunivoque de l'ensemble] 0,1 [avec l'ensemble $\mathbb{R}$ des nombres réels.***

Tout nombre réel de l'intervalle $]0, 1[$ admet une représentation décimale unique $x = 0, x_1 x_2 \ldots, x_n \ldots$, où $x_1, x_2, \ldots, x_n, \ldots$ sont des entiers non tous nuls et non tous égaux à 9 à partir d'un certain rang. Réciproquement, tout développement décimal de ce type représente un élément bien déterminé de $]0, 1[$. Il sera suffisant, pour notre propos, de montrer que l'ensemble de ces développements décimaux n'est pas dénombrable. Nous le démontrerons par l'absurde à l'aide du procédé diagonal de Cantor.

Supposons que l'ensemble des développements décimaux des nombres réels de l'intervalle $]0, 1[$ soit dénombrable ; alors on peut tous les numéroter par l'intermédiaire d'une suite $a_1, a_2, \ldots, a_n$, de nombres compris entre 0 et 1 ; $a_1, \ldots, a_n, \ldots$, admettent des développements décimaux :

$$a_1 = 0, a_{11}\, a_{12} \ldots a_{1n} \ldots$$
$$a_2 = 0, a_{21}\, a_{22} \ldots a_{2n} \ldots$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$a_n = 0, a_{n1}\, a_{n2} \ldots a_{nn} \ldots$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots$$

Le développement décimal infini $b = 0, b_1\, b_2 \ldots b_n \ldots$, défini pour tout n, par $b_n \neq 0$, $b_n \neq 9$, $b_n \neq a_{nn}$ (par exemple $b_n = 2$ si $a_{nn} = 1$, $b_n = 1$ si $a_{nn} \neq 1$) est du type considéré ; il devrait appartenir à la suite $a_1, a_2, \ldots, a_n, \ldots$, ce qui est absurde, car b diffère de a_1 pour le premier chiffre après la virgule, de a_2 pour le second chiffre, de a_n pour le n-ième chiffre.

L'hypothèse faite est donc fausse, et on peut affirmer que $\mathbb{R}$ n'est pas dénombrable.

Comme $\mathbb{Q}$ est dénombrable, il existe une infinité non dénombrable d'irrationnels ; en effet si $\mathbb{R} - \mathbb{Q}$ était dénombrable, $\mathbb{R}$ le serait.

Les nombres algébriques

Parmi les nombres irrationnels, on considère un sous-ensemble, celui des *nombres algébriques réels* : on appelle ainsi tout nombre réel a qui est racine d'un polynôme

$$P(X) = a_n X^n + a_{n-1} X^{n-1} + \ldots + a_1 X + a_0$$

dont les coefficients sont des entiers de signes quelconques.

Ainsi $\sqrt{2}$ qui est racine du polynôme $X^2 - 2$ est un nombre algébrique. Tout nombre rationnel $\frac{p}{q}$ $(q \neq 0)$ est un nombre algébrique, $\frac{p}{q}$ est racine de $qX - p = 0$.

Si $a_n = 1$, a est un *entier algébrique réel.* Tout nombre algébrique est le quotient d'un entier algébrique réel par un entier. Pour le constater, il suffit de poser $X = \frac{x}{a_n}$ et de multiplier le polynôme P par $(a_n)^{n-1}$, alors

$$P(x) = x^n + a_{n-1}\, x^{n-1} + a_n \cdot a_{n-2} \cdot x^{n-2} + a_n \cdot a_0$$

L'ensemble des nombres réels algébriques est dénombrable, comme le montre le raisonnement suivant :

On remarque que tout nombre algébrique a est racine d'un polynôme P (X) et d'un seul vérifiant : les coefficients de P (X) sont des entiers rationnels premiers entre eux dans leur ensemble (sinon on divise tous les coefficients par leur *pgcd*), P (X) est irréductible dans $\mathbb{Z}$ (si P admet une racine entière α, d'ordre n, on considère le polynôme P′ obtenu en simplifiant P par $(X - \alpha)^n$). Appelons degré de a le degré de P (X), et hauteur de a le maximum des valeurs absolues des coefficients de P (X).

Pour d, h entiers positifs fixés, $E_{h,\,d}$ désigne l'ensemble des entiers algébriques de degré d et de hauteur h. $E_{h,\,d}$ est manifestement un ensemble fini. D'autre part, comme l'ensemble $\mathbb{N} \times \mathbb{N}$ est dénombrable, alors la réunion des ensembles $E_{h,\,d}$ pour toutes les valeurs possibles de h et de d est dénombrable, donc aussi l'ensemble des nombres réels algébriques.

Il existe donc dans $\mathbb{R}$ des nombres qui ne sont pas algébriques : ce sont les *nombres transcendants.*

Les nombres transcendants

Liouville donna en 1851 un procédé de construction de nombres transcendants :

soit a un nombre réel tel que, pour tout entier n, il existe une infinité de fractions irréductibles $\frac{p}{q}$ pour lesquelles $\left| a - \frac{p}{q} \right| < \frac{1}{q^n}$.

On démontre assez facilement qu'un tel nombre est transcendant, et on peut construire des nombres a satisfaisant à une telle condition en prenant des sommes de séries très rapidement convergentes à termes rationnels, par exemple :

$$a = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{2}\right)^{n^n}$$

Le problème de savoir si un nombre donné est ou non transcendant est souvent fort difficile à résoudre et fait appel à des résultats assez élaborés d'analyse.

Hermite (1822-1901) a démontré que $e = 2{,}718...$, base des logarithmes népériens, est un nombre transcendant. Plus tard, Lindemann (1852-1939) a établi la transcendance de $\pi = 3{,}141\ 59...$

Les méthodes actuellement employées sont liées à l'approximation, par des nombres rationnels, des nombres dont on cherche à démontrer la transcendance. Mais jusqu'à présent, on n'a pas pu établir la transcendance ou l'irrationalité de la constante d'Euler :

$$C = \lim_{n \to \infty} \left(1 + \frac{1}{2} + ... + \frac{1}{n} - \text{Log } n\right)$$

définie par des séries qui convergent très lentement.

L'approximation des irrationnels par les rationnels est d'un grand intérêt ; c'est l'objet principal de la *théorie des approximations diophantiennes* (du nom de Diophante d'Alexandrie, mathématicien du IVe siècle). Dans le cas d'un seul irrationnel, les *fractions continuées* jouent un rôle essentiel (leurs propriétés servirent à Huyghens, dès 1650, pour le calcul des engrenages des horloges astronomiques), mais les résultats déterminants pour cette théorie furent établis par Liouville en 1884 et par Roth en 1955.

Les nombres complexes

Dès le XVIe siècle, les algébristes italiens Tartaglia (1506-1559), Cardan (1501-1576) et Ferrari (1522-1565) eurent l'idée audacieuse de désigner par le symbole $\sqrt{-1}$ la racine carrée apparemment inexistante de -1.

Ils purent alors résoudre non seulement les équations du 2e degré, mais aussi celles du 3e et même du 4e. Malgré les travaux importants de D'Alembert, puis de Gauss, il faudra attendre le XVIIIe siècle et les publications d'Euler pour voir disparaître chez les mathématiciens toute méfiance à l'égard des nombres « imaginaires ».

L'impossibilité de résoudre dans $\mathbb{R}$ l'équation $x^2 + 1 = 0$ suggère l'idée de créer un ensemble de nombres plus vaste. Cependant, dans un premier temps, cela peut paraître impossible, car jamais dans un corps ordonné on ne pourra extraire la racine carrée d'un nombre négatif. Extraire la racine carrée d'un tel nombre $-a$ équivaut en fait à trouver une racine du polynôme $x^2 + a$ qui est strictement positif comme somme d'un nombre positif a et d'une quantité non négative x^2.

La racine carrée d'un nombre négatif ne pourra appartenir à aucun corps ordonné qui soit une extension de $\mathbb{R}$.

On démontre même plus : aucun corps ordonné, construit comme une extension ordonnée de $\mathbb{R}$, ne possède de racine d'un polynôme réel (à coefficients dans $\mathbb{R}$), irréductible dans $\mathbb{R}$.

L'adjonction à $\mathbb{R}$ d'une racine carrée d'un nombre réel négatif, ou plus généralement d'une racine d'un polynôme réel irréductible dans $\mathbb{R}$, pourra être faite à condition de renoncer à l'ordre. Le nouvel ensemble ainsi obtenu ne pourra être totalement ordonné.

Une des extensions les plus importantes de ce type va être le *corps des complexes,* obtenu par adjonction à $\mathbb{R}$ d'une racine du polynôme $x^2 + 1$.

Divers procédés permettent de construire le corps des complexes; nous en décrirons un des plus simples. Comme le calcul complexe opère sur des expressions du type $a + bi$ où a et b sont des nombres réels et i une racine du polynôme $x^2 + 1$, nous définirons sur l'ensemble $\mathbb{C}'$ des couples de nombres réels (a, b) l'addition et la multiplication suivantes :

(1) $(a, b) + (c, d) = (a + b, c + d)$

(2) $(a, b)\ (c, d) = (ac - bd, ad + bc)$

$\mathbb{C}'$ muni de ces deux opérations est un corps.

Nous nous limiterons à déterminer le symétrique par rapport à la multiplication de tout couple (a, b) différent de $(0, 0)$, élément neutre pour l'addition ; ce sera :

$$\left(\frac{a}{a^2 + b^2}, \frac{-b}{a^2 + b^2}\right)$$

car

$$(a, b) \cdot \left(\frac{a}{a^2 + b^2}, \frac{-b}{a^2 + b^2}\right) =$$

$$\left(\frac{a^2}{a^2 + b^2} + \frac{b^2}{a^2 + b^2}, \frac{-ab}{a^2 + b^2} + \frac{ab}{a^2 + b^2}\right) = (1, 0)$$

où $(1, 0)$ est l'élément neutre de la multiplication.

La correspondance qui associe à tout élément a de $\mathbb{R}$ le couple $(a, 0)$ est un isomorphisme de $\mathbb{R}$ dans le sous-ensemble de $\mathbb{C}'$ formé par les couples $(a, 0)$. Cette correspondance est en effet manifestement bijective et telle que

$$(a, 0) + (b, 0) = (a + b, 0)$$

$$(a, 0)\ (b, 0) = (ab, 0)$$

compte tenu des identités **(1)** et **(2)** précédentes.

Si on identifie alors le couple $(a, 0)$ de $\mathbb{C}'$ et l'élément a de $\mathbb{R}$, ce qui peut se faire tout en respectant l'addition et la multiplication dans $\mathbb{C}'$, on obtient le corps $\mathbb{C}$, extension du corps $\mathbb{R}$.

Tout élément de $\mathbb{C}$ peut se mettre sous la forme $a + bi$ où $i = (0, 1)$. C'est une conséquence immédiate de l'identité :

$$(a, b) = (a, 0) \cdot (1, 0) + (b, 0)\ (0, 1)$$

Dans $\mathbb{C}$, on aura les égalités suivantes :

$$a + bi + c + di = a + c + (b + d)\ i$$

$$(a + bi) \cdot (c + di) = ac - bd + (ad + bc)\ i$$

$$(a + bi)\ (a - bi) = a^2 + b^2 \qquad (i\ (-i) = 1)$$

De la dernière égalité, il résulte $i^2 = -1$, ce qui n'est pas surprenant, car i (comme aussi $-i$) a été choisi comme racine du polynôme $x^2 + 1 = 0$.

Les règles de calcul sur les nombres complexes $z = a + ib$ sont les mêmes que celles que l'on connaît dans $\mathbb{R}$, compte tenu du fait que l'on pourra remplacer i^2 par -1 dès que cette quantité apparaîtra, ce qui rend le calcul dans $\mathbb{C}$ très opérationnel.

Si un corps $\mathbb{C}''$ contient une racine j du polynôme $x^2 + 1$, alors l'ensemble des nombres $a + bj$ constitue un sous-corps de $\mathbb{C}''$ isomorphe à $\mathbb{C}$. C'est le plus petit sur-corps de $\mathbb{R}$ dans lequel $x^2 + 1$ est réductible.

En construisant $\mathbb{C}$ comme une extension algébrique de $\mathbb{R}$ dans laquelle le polynôme $x^2 + 1$ admet une racine, on obtient un résultat beaucoup plus fort, connu sous le nom de *théorème de D'Alembert :* « Dans $\mathbb{C}$ tout polynôme non constant admet au moins une racine. »

Il en résulte que tout polynôme de degré n peut se décomposer dans $\mathbb{C}$ en produit de n facteurs du premier degré. On traduit cette propriété en disant que $\mathbb{C}$ est algébriquement clos.

En particulier, tout nombre complexe a n racines n-ièmes; en effet, à tout nombre complexe α on peut associer n nombres complexes x tels que $x^n = \alpha$.

La représentation géométrique des nombres complexes va être la source de nombreuses applications, notamment pour les transformations géométriques et la trigonométrie (schéma ci-dessous).

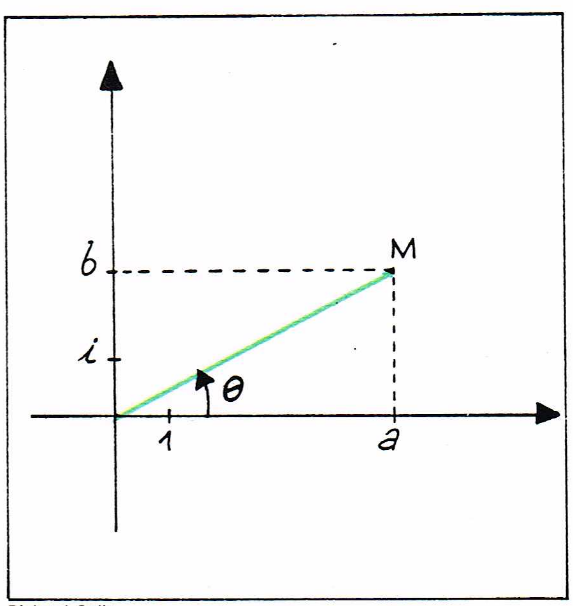

Richard Colin

◀ ***On appelle affixe du nombre complexe z = a + ib le point M de coordonnées (a, b) dans un repère orthonormé ; alors*** $z = a + ib = \rho\ (\cos\theta + i \sin\theta) = \rho \cdot e^{i\theta}$ ***(pour cette dernière égalité, se reporter au chapitre*** **Trigonométrie*).***

▶ *Page ci-contre, un ruban perforé pour ordinateur. Les caractères numériques sont représentés dans le* système binaire.

▼ *Figuration du nombre, nombres figurés et calcul concret : exemples de figurations digitales numériques extraits de* Sùmma, *œuvre de* Pacioli, *Venise, 1494.*

Les quaternions

On généralise les nombres complexes en nombres hypercomplexes de la forme :

$$a = b_0 e_0 + \dots + b_{n-1} e_{n-1}$$

où les b sont des nombres réels, les e des nombres complexes, appelés unités du système considéré et vérifiant :

$$e_j \, e_k = \sum_{s=0}^{n-1} \gamma_{jks} \, e_s.$$

On obtient divers systèmes suivant les valeurs que l'on donne aux γ_{jks}.

Les nombres complexes ordinaires sont d'ordre 2 et vérifient :

$$e_0 e_0 = e_0, \quad e_0 e_1 = e_1 e_0 = e_1, \quad e_1 e_1 = - e_0$$

$$(e_0 = 1, \quad e_1 = i)$$

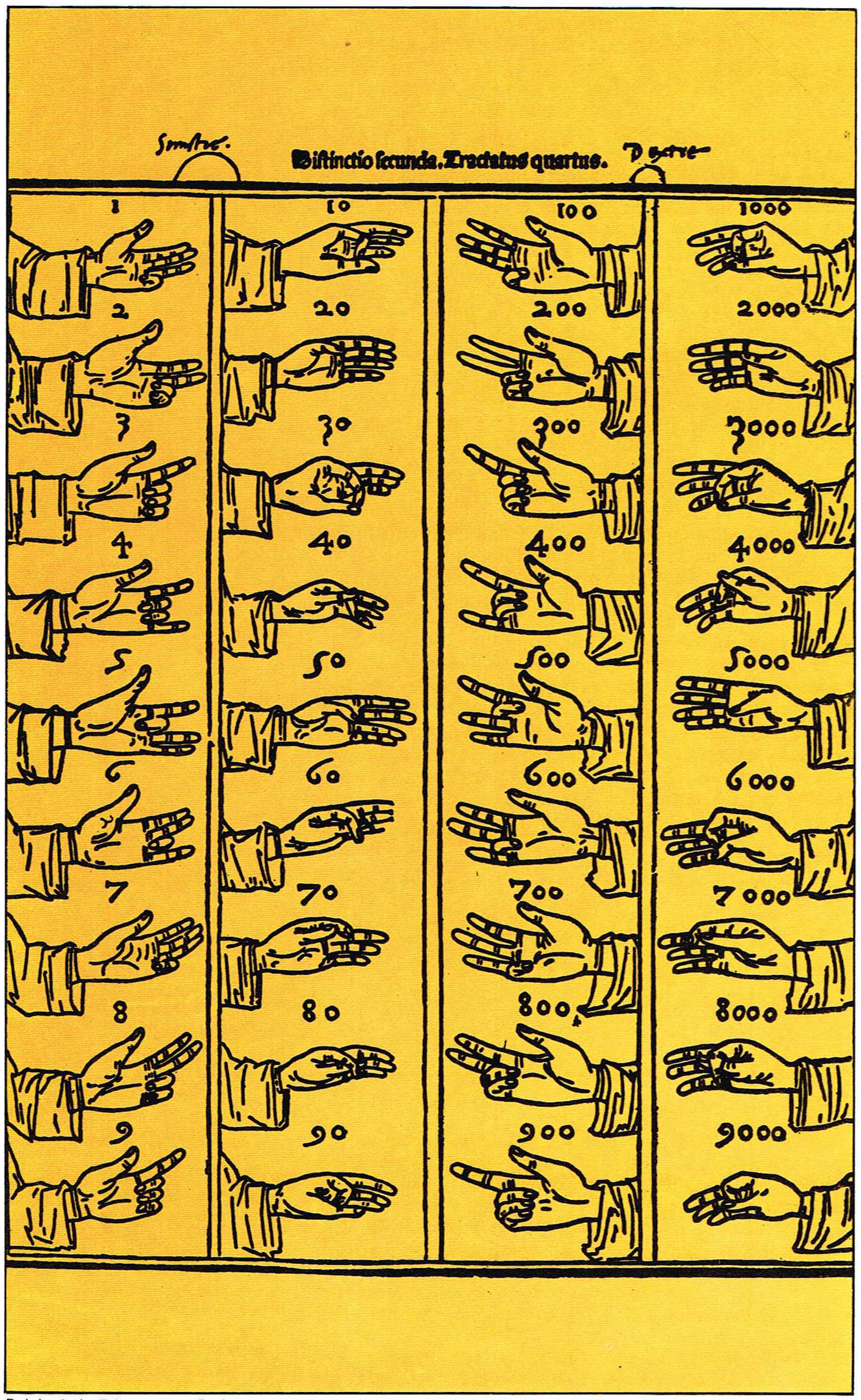

Palais de la Découverte, Paris

Le plus célèbre des systèmes d'ordre 4 est celui des quaternions, dû à Hamilton et vérifiant :

$$e_j e_j = - e_0 \qquad e_j e_k = + e_h$$
$$e_k e_j = - e_k$$

où j, h, k est une permutation circulaire des nombres 1, 2, 3.

Systèmes de numération

Les entiers

Toutes les constructions que nous venons de décrire ne dépendaient pas de la manière de représenter les nombres naturels, entiers, rationnels, réels. Cependant, cette représentation a une grande importance dans tous les problèmes d'arithmétique appliquée, que ce soit dans la vie quotidienne ou dans la recherche scientifique et technique.

Le système actuel de *représentation décimale* des nombres ou *système décimal,* ou encore *système à base dix,* d'origine indienne, est parvenu en Europe à la fin du XII[e] siècle, grâce au rayonnement mathématique arabe, par l'intermédiaire de Leonardo Filonacci, auteur du *Liber abaci* (1202). Il en a résulté un progrès décisif par rapport aux systèmes de numération grec et romain.

Dans le système de numération décimale, comme dans tout système de numération positionnelle, les nombres entiers positifs sont représentés à l'aide d'une suite ordonnée finie d'entiers non négatifs tous strictement inférieurs à un nombre fixé à l'avance qui sera *la base* du système, 10 dans le cas de la représentation décimale.

L'usage du signe —, de la virgule et d'une suite infinie d'entiers inférieurs à la base permet alors de représenter tout nombre réel. Pour les nombres réels ainsi représentés, les règles d'addition et de multiplication seront très simples et faciliteront le calcul, même pour des nombres très grands. Elles seront valides quelle que soit la base, en particulier en base 2 qui est d'une très grande utilité pour le calcul automatique *(cf. Informatique).*

Tout entier positif peut s'écrire (grâce aux divisions avec reste suivant les puissances décroissantes de b) d'une façon et d'une seule sous la forme :

$$a = q_m b^m + q_{m-1} b^{m-1} + \dots + q_1 b + q_0$$

où q_i est un entier positif vérifiant pour tout i $0 \leqslant q_i < b$.

A une représentation de ce type, on peut faire correspondre biunivoquement la suite finie $q_m q_{m-1} \dots q_1 q_0$. D'où, la base b étant fixée, une correspondance biunivoque entre un nombre entier positif quelconque et la suite $q_m q_{m-1} \dots q_1 q_0$ (suite qui ne commence jamais par zéro). Dans le cas $b = 10$, les q_i sont 0, 1, ..., 9 ; on obtient la représentation décimale usuelle.

Exemple : $9\,326 = 910^3 + 310^2 + 210 + 6.$

Si on veut représenter un nombre en base 12, il est nécessaire d'introduire deux symboles nouveaux ; on ne peut en effet utiliser 11 et 12 qui sont déjà des représentations en base 10. On se servira, par exemple, des symboles 0, 1, 2, 3, ..., 9, ⊥, ⊤.

Les nombres représentés en base dix par 12, 13, 23, 24, 115, 250 seront représentés dans un tel système par :

10, 11, 1⊤, 20, 97, 18⊥.

Les mêmes nombres dans le système binaire (base 2, les seuls chiffres utilisés sont 0 et 1) seront représentés par 1 100, 1 101, 10 111, 11 000, 1 110 011, 11 111 010.

Pour déterminer la représentation de 13 (base 10) en base 2, on commence par chercher la plus grande puissance de 2 qui divise 13, ici $13 = 2^3 + 5$, puis la plus grande puissance de 2 qui divise 5 :

$$13 = 2^3 + 2^2 + 1 = 1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0$$

d'où la représentation 13 (base 10) → 1 101 (base 2).

Les règles d'addition et de multiplication sont bien connues dans le système décimal, mais il n'y a pas de différence fondamentale entre le choix de 10 comme base ou d'un entier quelconque, ces règles sont analogues en base b à ce qu'elles étaient en base 10. On montrera sur un exemple comment se calcule le produit de deux nombres a et b représentés en base 10 par $a = 115$, $b = 24$, en base 12 par $a = 97$, $b = 20$, et en base 2 par $a = 1\,110\,011$, $b = 11\,000$. Alors :

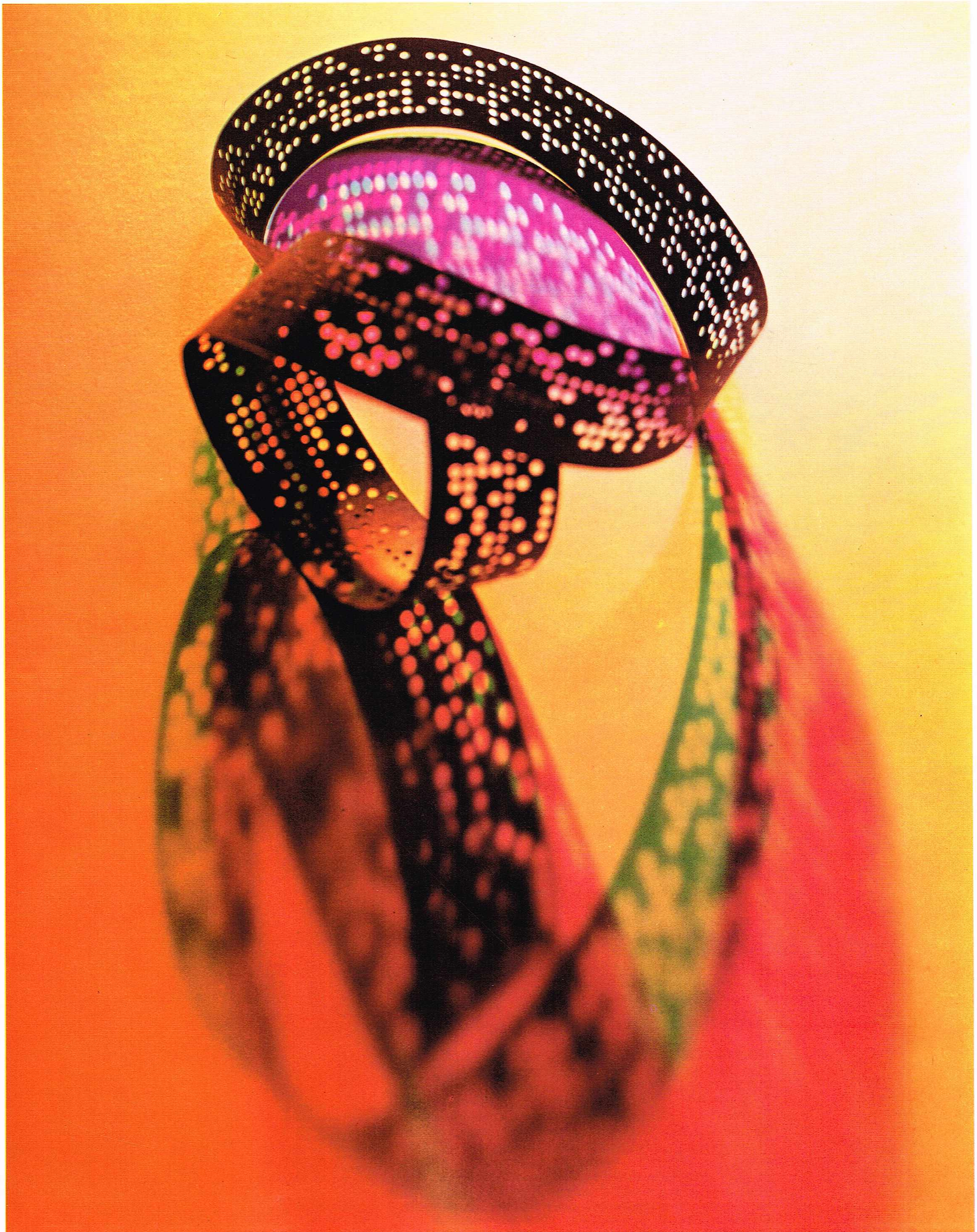

Yan - Rapho

base 10 (A)

$$\begin{array}{r} 115 \\ \times\ 24 \\ \hline 460 \\ 230 \\ \hline 2760 \end{array}$$

base 12 (B)

$$\begin{array}{r} 97 \\ \times\ 20 \\ \hline 00 \\ 172 \\ \hline 1720 \end{array}$$

base 2 (C)

$$\begin{array}{r} 1\,110\,011 \\ 11\,000 \\ \hline 0000000 \\ 0000000 \\ 0000000 \\ 1110011 \\ 1110011 \\ \hline 101011001000 \end{array}$$

Vérification en base 10 de l'opération (B) :

$$2\,760 = 1 \cdot 12^3 + 7 \cdot 12^2 + 2 \cdot 12$$

Vérification en base 10 de l'opération (C) :

$$2\,760 = 2^{11} + 2^9 + 2^7 + 2^6 + 2^3.$$

Les rationnels

A côté des nombres entiers positifs on peut représenter par une suite finie de chiffres inférieurs à la base fixée, et à l'aide de la virgule, tout nombre rationnel du type suivant :

$$\textbf{(r)}\ a = q_m b^m + q_{m-1} b^{m-1} + \ldots + q_1 b + q_0 + q_{-1} b^{-1} + \ldots + q_{-n} b^{-n}$$

La représentation de a dans le système sera :

$$q_m\, q_{m-1} \ldots q_1\, q_0,\, q_{-1}\, q_{-2} \ldots q_{-n}$$

A partir d'une représentation en base b d'un nombre rationnel de ce type, on peut en obtenir une autre en ajoutant après q_{-n} un nombre quelconque de zéros. On confondra ces représentations, et il y aura toujours à cette identification près correspondance biunivoque entre un nombre et sa représentation.

Tous les nombres rationnels n'admettent pas une représentation de ce type, ni *a fortiori* tous les nombres réels. Pour obtenir un développement en base b d'un nombre réel quelconque, on procédera par approximations successives par des rationnels du type cité. Soit a un nombre réel positif, $q_m\, q_{m-1} \ldots q_0$ le plus grand entier inférieur ou égal à a, $q_m\, q_{m-1} \ldots q_0,\, q_{-1}$ le plus grand rationnel du type **(r)** avec un chiffre après la virgule, inférieur ou égal à a, $q_m\, q_{m-1} \ldots q_0,\, q_{-1}\, q_{-2}$ le plus grand rationnel de type **(r)** avec deux chiffres après la virgule inférieur ou égal à a, etc. On engendre ainsi une suite avec une infinité de chiffres après la virgule

$$q_m\, q_{m-1} \ldots q_1\, q_0,\, q_{-1}\, q_{-2} \ldots q_{-n}$$

Une telle suite va représenter le nombre a ; quelle que soit la précision imposée, on pourra approcher le nombre réel a par un tel développement (il suffit de choisir n suffisamment grand).

Deux nombres réels distincts ont deux représentations distinctes. Tout développement $q_m\, q_{m-1} \ldots q_0,\, q_{-1} \ldots q_{-n} \ldots$ représente un nombre réel positif bien déterminé, à savoir le nombre qui sépare la classe des nombres réels inférieurs ou égaux au nombre rationnel $q_m \ldots q_0,\, q_{-1} \ldots q_{-n}$ pour tout entier positif n, de la classe des nombres réels supérieurs ou égaux à ce nombre rationnel.

La représentation d'un nombre réel négatif s'obtient en faisant précéder du signe — le développement de sa valeur absolue.

BIBLIOGRAPHIE

BOREVITCH Z.-I. et CHAPAREVITCH I.-R., *Théorie des nombres,* trad. franç., Paris, Gauthier-Villars, 1967. - BOURBAKI, *Éléments d'histoire des mathématiques,* Paris, Hermann, 1960. - CHEVALLEY C., *Encyclopédie française*. - GODEMENT R., *Cours d'algèbre,* Paris, Hermann, 1966. - ITARD J., *les Nombres premiers,* Paris, Presses universitaires de France, coll. « Que sais-je ? », n° 571, 1969 ; *Arithmétique et Théorie des nombres,* Paris, Presses universitaires de France, coll. « Que sais-je ? », n° 1093, 2e édition 1967. - LE LIONNAIS, *les Grands Courants de la pensée mathématique,* Paris, Blanchard, 1962. - SAMUEL, *Théorie algébrique des nombres,* Paris, Hermann, 1967.

STRUCTURES ALGÉBRIQUES

La notion de *structure algébrique* s'est dégagée progressivement au cours du XIXe siècle ; c'est l'aboutissement d'un processus d'axiomatisation de la recherche qui a conduit les mathématiciens à la création d'êtres mathématiques nouveaux rassemblant les propriétés communes à divers ensembles concrets étudiés jusqu'alors de façon spécifique.

L'étude des structures algébriques constitue l'objet de ce qu'on appelle l'algèbre moderne. Mais les origines de l'algèbre sont beaucoup plus anciennes puisque c'est aux Babyloniens et aux Égyptiens que l'on doit les premières règles de calcul sur les entiers naturels et les nombres rationnels positifs.

Puis les Grecs, avec Euclide et plus tard Diophante, développèrent les règles du calcul algébrique abstrait, mais le champ de leurs recherches, encore très réduit, ne se prêtait pas à l'axiomatisation, le zéro et les nombres négatifs n'apparaissant qu'au haut Moyen Age chez les mathématiciens hindous.

Ce sont les algébristes italiens du XVIe siècle qui introduiront les nombres complexes pour la résolution des équations du 3e et du 4e degré.

D'autre part, la notation algébrique prend la forme que nous lui connaissons aujourd'hui à la fin du XVIe siècle avec Viète, qui, le premier, introduisit des lettres dans les équations algébriques, et surtout avec Descartes.

La fin du XVIIe siècle et le XVIIIe siècle produiront peu de nouvelles découvertes en algèbre, et il faudra attendre les années 1800 pour que les recherches dans ce domaine prennent un nouvel essor (citons en particulier Gauss et Cauchy).

C'est l'œuvre d'Abel et surtout de Galois qui marque le passage de l'algèbre classique à l'algèbre moderne en

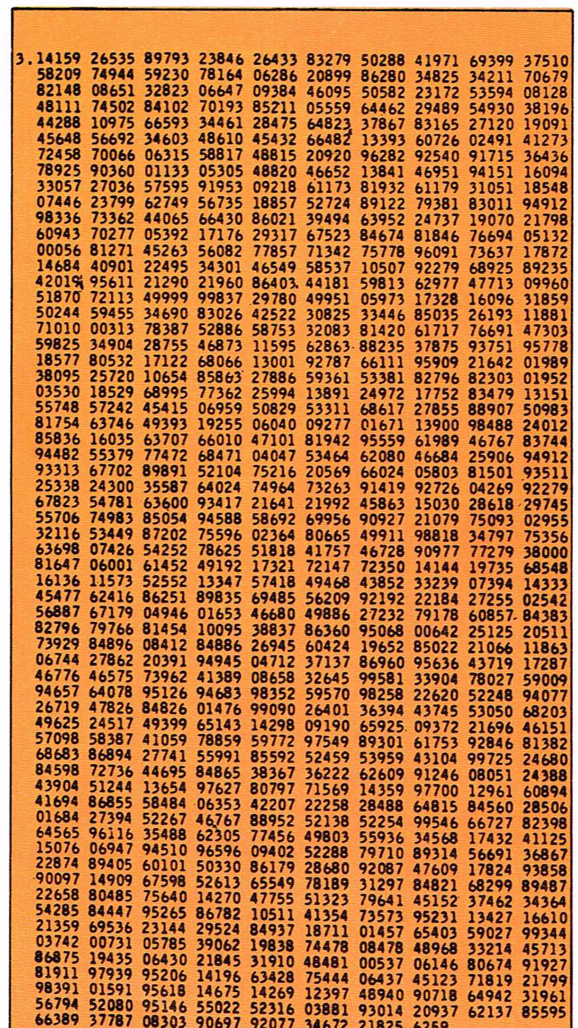

Palais de la Découverte, Paris

▶ ***Représentation décimale du nombre π.***

reliant l'étude des équations algébriques à celle des groupes de permutation qui lui sont liés. Diverses notions abstraites commencent à apparaître : celle de groupe, qui domine les premières recherches ; celle de loi de composition dégagée par les mathématiciens anglais entre 1830 et 1850 ; puis les études sur les nombres algébriques, qui sont à l'origine de recherches sur les corps et les anneaux (Dedekind, Hilbert). La synthèse de ces divers courants par l'usage de la méthode axiomatique, qui marque le début de l'algèbre moderne, apparaît pour la première fois dans le livre de Steinitz : *Algebraische Theorie der Körper* (1910) ; puis l'étude des structures se poursuit et s'enrichit grâce à Artin, Nœther et aux mathématiciens de leur école ; le livre de Van der Waerden, *Moderne Algebra* (1930), premier exposé d'ensemble de l'algèbre moderne, a été le point de départ de toutes les recherches d'algèbre contemporaines.

L'objet de ce chapitre est l'étude de certaines structures algébriques fondamentales comme celles des groupes, des anneaux et des corps, ainsi que des notions de base qui s'y rattachent ; pour des développements ultérieurs, on pourra se reporter au chapitre *Algèbre linéaire*.

Lois de composition et catégories

Lois de composition interne

Si l'on se fixe un ensemble E, on appelle *loi de composition interne dans E* une application f d'une partie A de l'ensemble produit E × E (voir chapitre *Les ensembles*) dans E. Au couple (x, y) de A, la loi de composition interne fait correspondre un élément unique z de E :

$$(x, y) \rightarrow z = f(x, y)$$

Si A = E × E, la loi est *partout définie sur E, c'est alors une loi interne sur E ; z* s'appelle le *composé* de x et de y pour cette loi, et on le note avec des symboles divers :

$$x + y; \quad x \cdot y \quad \text{ou} \quad xy; \quad x \perp y; \quad x \top y$$

Une loi notée par le signe + s'appelle le plus souvent *addition* (le composé $x + y$ est alors la *somme* de x et de y) ; une loi notée par le signe · ou sans signe sera appelée *multiplication* (le composé $x \cdot y$ ou xy est alors le *produit* de x et de y) ; une loi quelconque sera généralement notée $x \perp y$ ou $x \top y$.

Citons comme exemples de lois de composition interne partout définies l'addition, la multiplication, l'exponentiation dans l'ensemble $\mathbb{N}$ des entiers naturels ; mais la soustraction $x - y$ dans $\mathbb{N}$ n'est définie que pour les couples (x, y) tels que $x \geqslant y$; de même, la division x/y dans $\mathbb{N}$ n'est définie que pour les couples (x, y) tels que y soit différent de zéro et que x soit multiple de y.

Dans ce qui suit, nous ne parlerons, sauf précision contraire, que de lois partout définies.

Associativité

Soit E un ensemble muni d'une loi de composition interne notée $\top$. Étant donné x, y et z, trois éléments de E, on peut calculer les composés $(x \top y) \top z$ et $x \top (y \top z)$. La loi interne $\top$ sera *associative* si, quels que soient les éléments x, y, z de E, on a l'égalité :

$$(x \top y) \top z = x \top (y \top z)$$

le composé est alors noté $x \top y \top z$.

Plus généralement, on peut alors définir le composé de $x_1, x_2, \ldots x_n$ dans cet ordre :

$$x_1 \top x_2 \top \ldots \top x_n.$$

L'addition, la multiplication des nombres de $\mathbb{N}$, $\mathbb{Z}$, $\mathbb{Q}$, $\mathbb{R}$, $\mathbb{C}$ (voir *Théorie des ensembles*) sont associatives ; en revanche, l'exponentiation des entiers naturels ne l'est pas : en effet $(2^1)^2 \neq 2^{(1^2)}$.

Commutativité

La loi $\perp$ sera *commutative* si, pour tous les éléments x et y de E, on a l'égalité :

$$x \top y = y \top x$$

Si cette propriété est vérifiée pour un couple (x, y) d'éléments de E, on dit alors que x et y sont *permutables*.

L'addition et la multiplication des nombres de $\mathbb{N}$, $\mathbb{Z}$, $\mathbb{Q}$, $\mathbb{R}$, $\mathbb{C}$ sont commutatives, mais l'exponentiation des entiers naturels ne l'est pas. Si la loi $\top$ est à la fois associative et commutative, le composé de n éléments $x_1, x_2, \ldots, x_n$ de E, dans n'importe quel ordre cette fois, sera défini de manière unique :

Ciccione

▲ *Le mathématicien français* **Évariste Galois** *(1811-1832). Dans une note rédigée quelques heures avant de mourir dans un duel, Galois résume sa* **théorie des équations algébriques.**

$$x_1 \top x_2 \top \ldots \top x_n = x_2 \top x_1 \top \ldots \top x_n = \ldots = x_n \top x_1 \top x_2 \top \ldots \top x_{n-1}$$

La notation additive sera généralement réservée à des lois commutatives.

Élément neutre

Un élément e de E sera appelé *élément neutre* pour la loi $\top$ si, pour tout élément x de E, on a les égalités :

$$x \top e = e \top x = x.$$

Il existe, comme on le voit facilement d'après la définition, au plus un élément neutre e pour une loi donnée ; e est alors permutable avec tout élément de E ; l'élément neutre d'une loi additive (notée par le signe +) est généralement noté 0, celui d'une loi multiplicative (notée par · ou sans signe) sera en général noté 1 (par analogie avec les éléments neutres respectivement pour l'addition et la multiplication dans $\mathbb{N}$, $\mathbb{Z}$, $\mathbb{Q}$, $\mathbb{R}$, $\mathbb{C}$). Remarquons que l'exponentiation dans $\mathbb{N}$ n'admet pas d'élément neutre, non plus que la multiplication dans l'ensemble des nombres pairs.

Éléments réguliers

Lorsque $x = x'$, on a évidemment, pour tout élément a de E : $a \top x = a \top x'$ et $x \top a = x' \top a$.

Réciproquement, si :

$$a \top x = a \top x' \quad \text{entraîne} \quad x = x'$$

$\top$ ou $\perp$ ou $*$	**: désigne en général une loi de composition dans un ensemble.**
$\top$	**se lit souvent « truc ».**
$\perp$	**se lit souvent « antitruc ».**
$*$	**se lit « étoile ».**

quel que soit x appartenant à E, on dira que a est *régulier à gauche* pour la loi $\top$; on définit de même un élément *régulier à droite* (on dit qu'on peut simplifier par a ces égalités).

Si a est régulier à gauche et à droite, il est *régulier* pour la loi $\top$. S'il existe un élément neutre e de la loi $\top$, e est régulier. Tout nombre est régulier pour l'addition dans $\mathbb{N}$, $\mathbb{Z}$, $\mathbb{Q}$, $\mathbb{R}$, $\mathbb{C}$ mais 0 n'est pas régulier pour la multiplication dans ces ensembles; pour l'exponentiation dans $\mathbb{N}$, tout entier naturel autre que 0 et 1 est régulier.

Éléments symétriques

Si $\top$ admet un élément neutre e, on dira qu'un élément x' de E est *symétrique* d'un élément x de E si :

$$x \top x' = x' \top x = e.$$

On dit qu'un élément x est *symétrisable* s'il existe un élément symétrique de x. L'élément neutre est toujours son propre symétrique, c'est d'ailleurs le seul élément symétrisable de l'addition et de la multiplication dans $\mathbb{N}$. Dans l'addition des nombres réels ou complexes, tout élément est symétrisable. Dans la multiplication de $\mathbb{Q}$, $\mathbb{R}$ ou $\mathbb{C}$, tout élément sauf 0 est symétrisable. L'élément symétrique de x pour une loi additive sera noté $-x$ et appelé *opposé* de x, il sera noté x^{-1} (ou $1/x$) pour une loi multiplicative et appelé *inverse* de x.

Ajoutons quelques remarques :

— le composé de x et de x lui-même sera noté additivement :

$$x + x \quad \text{ou} \quad 2\,x$$

— et multiplicativement :

$$xx \quad \text{ou} \quad x^2$$

— plus généralement, on posera :

$$\underbrace{x + x + \ldots + x}_{n \text{ fois}} = nx \quad \text{et} \quad \underbrace{x \cdot x \cdot \ldots \cdot x}_{n \text{ fois}} = x^n \ (n \in \mathbb{N}).$$

$0x$ désignera l'élément neutre d'une loi additive, et x^0 celui d'une loi multiplicative.

Si A est une partie d'un ensemble E, muni d'une loi de composition interne notée $\top$ telle que :

$$x \in \text{A} \quad \text{et} \quad y \in \text{A entraîne } x \top y \in \text{A}$$

on dit que A est *stable* pour $\top$ ou encore que A est une *partie stable* de E pour cette loi. La restriction de la loi $\top$ à une partie stable de A de E est appelée loi *induite par* $\top$ sur A. (*Exemple :* la partie de $\mathbb{N}$ formée des nombres pairs est stable pour l'addition et la multiplication.)

Lois de composition externes et relations entre lois de composition

Lois de composition externes

On appelle loi de composition externe entre éléments d'un ensemble Ω (dit *ensemble des opérateurs* de la loi) et éléments d'un ensemble E une application f de $\Omega \times$ E dans E : à tout couple formé d'un élément α de Ω et d'un élément x de E, on fait correspondre un élément y de E :

$$y = f(\alpha, x) \qquad \text{(noté généralement } y = \alpha\, x \text{ ou } y = x\, \alpha)$$

Les éléments de Ω (que nous désignerons par des lettres grecques) sont appelés les *opérateurs* de la loi. Étant donné une loi interne associative sur un ensemble E, notée multiplicativement, l'application qui au couple (n, x) (où n est un entier naturel différent de 0 et x un élément de E) fait correspondre nx ou x^n est une loi de composition externe entre éléments de $\mathbb{N}^*$ et éléments de E. On peut prendre également pour E l'ensemble des vecteurs de $\mathbb{R}^2$ et pour ensemble d'opérateurs l'ensemble $\mathbb{R}$: au couple $(\alpha, \vec{V})$ on fait correspondre le vecteur $\alpha\,\vec{V}$, multiplication d'un vecteur par un scalaire.

On peut encore prendre pour E l'ensemble des fonctions dérivables de n variables réelles $x_1, \ldots, x_n$ et comme opérateurs les dérivations partielles par rapport aux variables : $\dfrac{\partial}{\partial x_1}, \ldots, \dfrac{\partial}{\partial x_n}$; la loi externe fera alors correspondre au couple $\left(\dfrac{\partial}{\partial x_i}, f\right)$, où $f \in$ E, l'application $\dfrac{\partial f}{\partial x_i}$.

Relations entre lois de composition

Si un ensemble d'opérateurs sur E, Ω, est muni d'une loi interne associative (notée multiplicativement) telle qu'on ait, pour tous les éléments α, β de Ω et x de E, l'égalité :

$$\alpha\,(\beta\, x) = (\alpha\, \beta)\, x$$

on dira que la loi externe est *associative* par rapport à la loi interne de Ω.

Si c'est l'ensemble E qui est muni d'une loi interne commutative (notée additivement) telle que, pour tous éléments x, y de E et tout α de Ω, on ait l'égalité :

$$\alpha\,(x + y) = \alpha\, x + \alpha\, y$$

on dira que la loi interne est *distributive* par rapport à la loi interne de E.

Si dans E sont définies deux lois de composition, la première associative et commutative (notée additivement), la seconde associative (notée multiplicativement), on dira que la loi multiplicative est *distributive à gauche* par rapport à la loi additive si :

$$x\,(y + z) = xy + xz.$$

On définit de même la *distributivité à droite* par :

$$(y + z)\, x = yx + zx$$

Si la loi multiplicative est distributive à gauche et à droite par rapport à la loi additive, elle est *distributive* par rapport à celle-ci. Étant donné une loi multiplicative associative sur un ensemble E, la loi externe $(n, x) \to x^n$ est associative par rapport à la multiplication dans $\mathbb{N}^*$ puisque $(x^m)^n = x^{mn}$; si la loi sur E est également commutative, alors $(x, y)^m = x^m y^m$ et la loi externe est distributive par rapport à la loi interne de E; la multiplication des nombres appartenant à $\mathbb{N}$, $\mathbb{Z}$, $\mathbb{Q}$, $\mathbb{R}$, $\mathbb{C}$ est distributive par rapport à l'addition de ces nombres.

Nous avons, jusqu'à maintenant, considéré un ensemble E sur lequel étaient définies une (ou plusieurs) loi de composition interne et une (ou plusieurs) loi de composition externe avec un ensemble d'opérateurs Ω; ces lois et les conditions auxquelles elles sont assujetties (associativité, élément neutre, etc.) déterminent ce qu'on appelle une *structure algébrique* sur E, et la suite de ce chapitre sera consacrée à l'étude de structures algébriques particulières. Nous allons tout d'abord, avant de procéder à une étude plus détaillée des groupes, des anneaux et des corps, donner quelques éléments sur les *catégories*.

Catégories

Un ensemble C muni d'une loi de composition interne (en général non partout définie) associative sera appelé une *catégorie* si les propriétés suivantes sont vérifiées (voir fig. 1) :

fig. 1

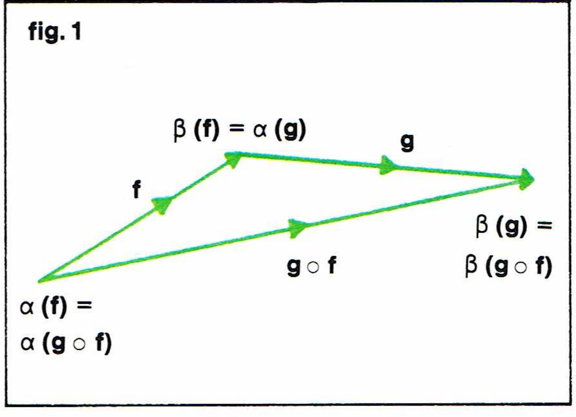

▶ **Figure 1 : composition *dans une catégorie* C.**

— il existe deux applications α et β de C dans une partie C_0 de C telles que la restriction de α et β à C_0 soit l'identité (si $f \in C_0$, alors $\alpha\,(f) = \beta\,(f) = f$);

— le composé $g \cdot f$ de deux éléments de C existe si, et seulement si, $\alpha\,(g) = \beta\,(f)$; on a alors :

$$\alpha\,(g \circ f) = \alpha\,(f) \quad \text{et} \quad \beta\,(g \circ f) = \beta\,(g)$$

— pour tout élément f de C, on a :

$$f \circ \alpha\,(f) = f = \beta\,(f) \circ f.$$

Un élément f de C est appelé *sommet* s'il appartient à C_0, *flèche de source* $\alpha\,(f)$ *et de but* $\beta\,(f)$ dans le cas contraire. Les applications d'un ensemble dans un autre,

par exemple, forment une catégorie pour la loi de composition habituelle des applications (voir chapitre *Les ensembles*) : une flèche f sera une application d'un ensemble E dans un ensemble E′, sa source $\alpha(f) = id_E$ (application identique de E), son but $\beta(f) = id_E$ (ces applications ne forment pas à proprement parler un ensemble, nous utiliserons néanmoins, par souci de simplification, le terme de « catégorie des applications »).

Foncteur

Un *foncteur* d'une catégorie C dans une catégorie C′ est une application F de l'ensemble C dans l'ensemble C′ telle que :

— $F[\alpha(f)] = \alpha[F(f)]$ et $F[\beta(f)] = \beta[F(f)]$

— si $g \cdot f$ est défini dans C, alors
$$F(g \cdot f) = F(g) \cdot F(f).$$

On appelle parfois un tel foncteur *foncteur covariant;* un foncteur contravariant est alors une application qui « renverse le sens » des flèches ($F(g \circ f) = F(f) \circ F(g)$).

Si l'on considère par exemple la catégorie des homomorphismes de groupes (voir plus loin), l'application qui à un homomorphisme d'un groupe G dans un groupe G′ fait correspondre l'application sous-jacente de l'ensemble G dans l'ensemble G′ est un foncteur de la catégorie des homomorphismes de groupes dans la catégorie des applications ; un tel foncteur est appelé *foncteur d'oubli.*

Produits et sommes

Partant d'une catégorie C, considérons une famille $(S_i)_{i \in I}$ de sommets de C_0, on dira qu'un élément S de C_0 est une *somme* (respectivement un *produit*) des S_i si les conditions suivantes sont vérifiées (voir fig. 2 et 3) :

fig. 2

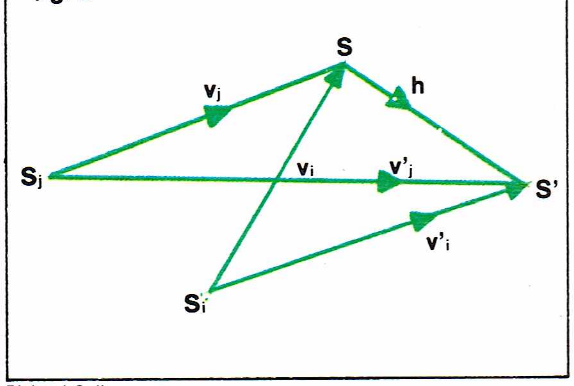

Richard Colin

fig. 3

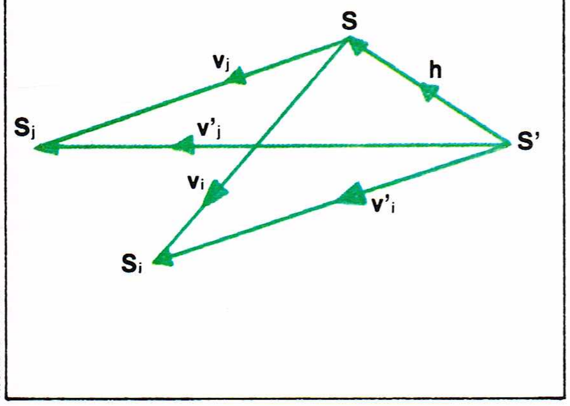

Richard Colin

— pour tout $i \in I$, il existe une flèche v_i de C de source S_i, de but S (respectivement de source S, de but S_i) ;

— si S′ est un autre sommet tel que, pour tout $i \in I$, on ait une flèche v'_i de C de source S_i, de but S′ (respectivement de source S′, de but S_i), alors il existe une flèche unique h de source S et de but S′ (respectivement de source S′, de but S) telle qu'on ait l'égalité :

$h \cdot v_i = v'_i$ (respectivement $v_i \cdot h = v'_i$) pour tout $i \in I$.

Nous verrons par la suite des exemples de produits et de sommes dans des catégories ; notons simplement que le produit cartésien de n ensembles : $A_1 \times A_2 \times \ldots \times A_n$ (voir chapitre *Les ensembles*) est un produit de la famille (A_i) dans la catégorie des applications (l'application identique de chacun des A_i est identifiée à l'ensemble lui-même).

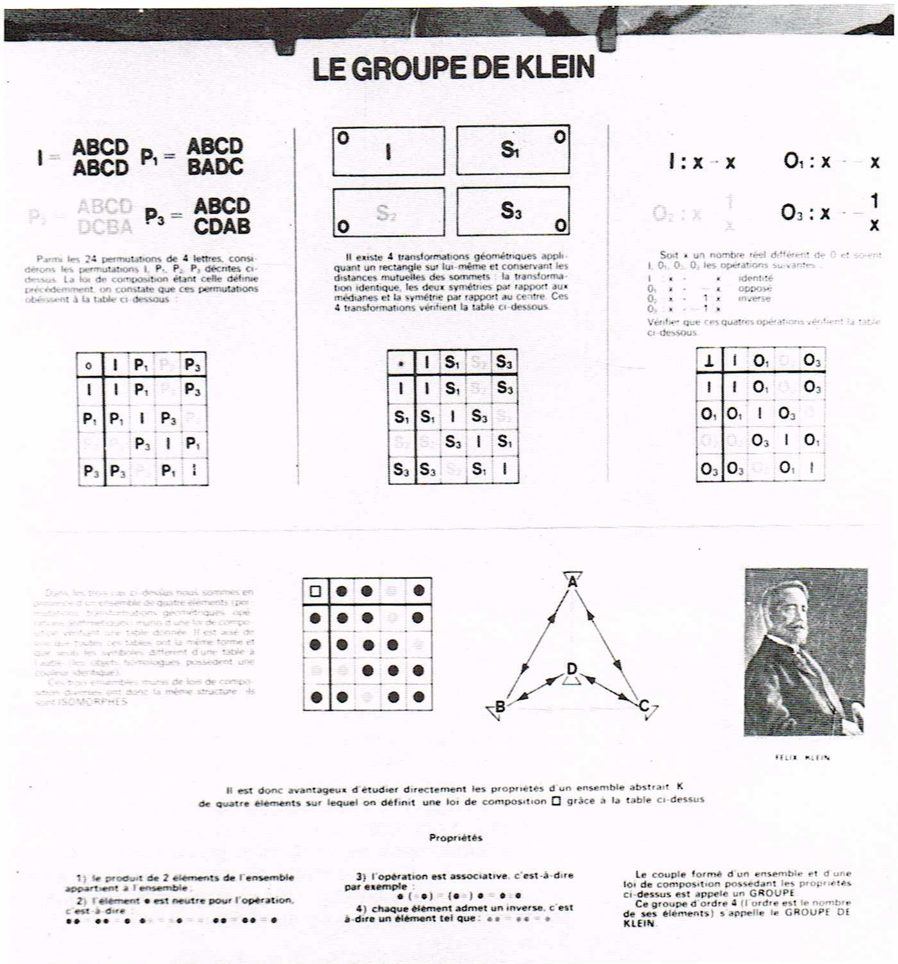

Palais de la Découverte, Paris

▲ *On doit à* **Félix Klein,** *mathématicien allemand (1849-1925), d'importants travaux, notamment sur l'application de la* **théorie des groupes** *à la géométrie.*

◀ *En haut,* **figure 2 :** *somme S de la famille $(S_i)_{i \in I}$ où I est un ensemble d'indices quelconque .*
En bas, **figure 3 :** *produit S de la famille $(S_i)_{i \in I}$ où I est un ensemble d'indices quelconque.*

Groupes

Groupes et sous-groupes

Groupes

Fixons-nous un ensemble G, sur lequel existe une loi de composition interne partout définie ; on dira que cette loi (que nous noterons multiplicativement) détermine sur G une *structure de groupe* (ou encore que G est un groupe) si elle possède les propriétés suivantes :

— elle est associative : $(xy)z = x(yz)$ (pour tous éléments x, y, z de G) ;

— elle possède un élément neutre unique e : $ex = xe = x$ (pour tout $x \in G$) ;

— chaque élément x de G admet un symétrique unique x^{-1} : $x^{-1}x = xx^{-1} = e$.

Si de plus la loi est commutative ($xy = yx$), le groupe G est alors *commutatif* ou *abélien* (dans ce cas, la loi sera souvent notée additivement). Un groupe G est *fini* s'il comporte un nombre fini d'éléments n, n est alors *l'ordre* du groupe ; il est *infini* dans le cas contraire.

Comme exemples de groupes, citons les ensembles $\mathbb{Z}$, $\mathbb{Q}$, $\mathbb{R}$, $\mathbb{C}$ pour l'addition (l'ensemble $\mathbb{N}$ des entiers naturels n'est pas un groupe pour l'addition puisque aucun élément, sauf 0, n'admet de symétrique) ; si on considère la multiplication sur $\mathbb{R}$, elle vérifie les deux premières propriétés, mais 0 n'admet pas de symétrique : c'est l'ensemble $\mathbb{R}$ moins zéro qui est un groupe pour la multiplication. Tous ces groupes sont des groupes abéliens infinis. Le groupe $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ des entiers *modulo n,* ensemble quotient de $\mathbb{Z}$ par la relation d'équivalence $\mathcal{R} : x\mathcal{R}y$ si, et seulement si $x - y = nz$ ($z \in \mathbb{Z}$) (voir

chapitre *Les ensembles*), dont les éléments sont donc les classes d'équivalence suivant $\mathcal{R}$, est un groupe pour l'addition (voir ci-dessous) ; c'est un groupe fini d'ordre n (voir fig. 4).

fig. 4

A₁

$+$	$\bar{0}$	$\bar{1}$	$\bar{2}$
$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{1}$	$\bar{2}$
$\bar{1}$	$\bar{1}$	$\bar{2}$	$\bar{0}$
$\bar{2}$	$\bar{2}$	$\bar{0}$	$\bar{1}$

A₂

$\times$	$\bar{0}$	$\bar{1}$	$\bar{2}$
$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$
$\bar{1}$	$\bar{0}$	$\bar{1}$	$\bar{2}$
$\bar{2}$	$\bar{0}$	$\bar{2}$	$\bar{1}$

B₁

$+$	$\bar{0}$	$\bar{1}$	$\bar{2}$	$\bar{3}$	$\bar{4}$	$\bar{5}$
$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{1}$	$\bar{2}$	$\bar{3}$	$\bar{4}$	$\bar{5}$
$\bar{1}$	$\bar{1}$	$\bar{2}$	$\bar{3}$	$\bar{4}$	$\bar{5}$	$\bar{0}$
$\bar{2}$	$\bar{2}$	$\bar{3}$	$\bar{4}$	$\bar{5}$	$\bar{0}$	$\bar{1}$
$\bar{3}$	$\bar{3}$	$\bar{4}$	$\bar{5}$	$\bar{0}$	$\bar{1}$	$\bar{2}$
$\bar{4}$	$\bar{4}$	$\bar{5}$	$\bar{0}$	$\bar{1}$	$\bar{2}$	$\bar{3}$
$\bar{5}$	$\bar{5}$	$\bar{0}$	$\bar{1}$	$\bar{2}$	$\bar{3}$	$\bar{4}$

B₂

$\times$	$\bar{0}$	$\bar{1}$	$\bar{2}$	$\bar{3}$	$\bar{4}$	$\bar{5}$
$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$
$\bar{1}$	$\bar{0}$	$\bar{1}$	$\bar{2}$	$\bar{3}$	$\bar{4}$	$\bar{5}$
$\bar{2}$	$\bar{0}$	$\bar{2}$	$\bar{4}$	$\bar{0}$	$\bar{2}$	$\bar{4}$
$\bar{3}$	$\bar{0}$	$\bar{3}$	$\bar{0}$	$\bar{3}$	$\bar{0}$	$\bar{3}$
$\bar{4}$	$\bar{0}$	$\bar{4}$	$\bar{2}$	$\bar{0}$	$\bar{4}$	$\bar{2}$
$\bar{5}$	$\bar{0}$	$\bar{5}$	$\bar{4}$	$\bar{3}$	$\bar{2}$	$\bar{1}$

Richard Colin

▲ **Figure 4 ;**
A : *addition (1) et multiplication (2) dans $\mathbb{Z}/3\mathbb{Z}$;*
B : *addition (1) et multiplication (2) dans $\mathbb{Z}/6\mathbb{Z}$.*

Si E est un ensemble, considérons l'ensemble des applications biunivoques (ou bijections) de E sur lui-même ; cet ensemble est muni d'une structure de groupe pour la composition des applications ; en effet :

— $f \circ (g \circ h) = (f \circ g) \circ h$ (quelles que soient les applications f, g, h) ;

— l'application identique de E est élément neutre ;

— chaque élément admet un symétrique unique, l'application réciproque.

Le groupe, noté S_E, s'appelle *groupe symétrique* de l'ensemble E. Si l'ensemble E comporte n éléments, le groupe symétrique de E est encore appelé *groupe de substitution*, et on le note alors S_n.

Sous-groupes

Fixons-nous un groupe (multiplicatif) G. Une partie H de G sera un *sous-groupe* de G, si H est lui-même un groupe pour la loi induite par celle de G. On a les résultats suivants : H est un sous-groupe de G si, et seulement si, l'une ou l'autre des conditions suivantes est vérifiée :
(1) H est une partie stable de G (si $x \in H$ et $y \in H$, alors $xy \in H$), et le symétrique de tout élément de H appartient encore à H ;
(2) si $x \in H$ et $y \in H$, alors $xy^{-1} \in H$.

En effet, si H est un groupe, il est évidemment stable pour la multiplication de G puisque la loi induite sur H par celle de G doit être partout définie ; l'élément neutre e' de H est le même que e, élément neutre de G, puisqu'on a : $e'e' = e'$ et donc $e' = e'(e'e'^{-1}) = e'e'^{-1} = e$; il en résulte que l'élément symétrique (ou inverse) de x dans H est identique à son inverse dans G, ce qui démontre **(1)**, d'où on déduit immédiatement **(2)**. Réciproquement, partant de l'hypothèse **(2)**, on en déduit que l'élément neutre e de G appartient à H (il suffit de prendre $y = x$) d'où, si $y \in H$, alors $y^{-1} \in H$ (on prend $x = e$), et la stabilité se déduit immédiatement : $x(y^{-1})^{-1} = xy \in H$; il en résulte qu'il existe bien sur H une loi de composition interne partout définie, évidemment associative (puisqu'elle possède cette propriété dans G), admettant un élément neutre e, et telle que tout élément de H possède un symétrique dans H : H est un groupe.

Nous avons vu que les ensembles $\mathbb{Z}$, $\mathbb{Q}$, $\mathbb{R}$, $\mathbb{C}$ sont des groupes pour l'addition ; il est immédiat que, pour cette même loi, $\mathbb{Z}$ est un sous-groupe de $\mathbb{Q}$ qui est lui-même un sous-groupe de $\mathbb{R}$, lui-même un sous-groupe de $\mathbb{C}$. Un sous-groupe du groupe additif $\mathbb{Z}$ qui n'est pas réduit au seul élément 0 sera formé de tous les entiers de la forme pn (multiples de n) où $p \in \mathbb{Z}$ et n est le plus petit élément positif de ce sous-groupe (un tel ensemble est encore noté $n\mathbb{Z}$).

Étant donné un groupe multiplicatif G et un élément x de G distinct de e, considérons l'ensemble des éléments de G de la forme x^n pour $n \in \mathbb{Z}$. Cet ensemble constitue un sous-groupe H de G dont x est le *générateur*. Ce groupe H, que l'on appelle *groupe cyclique* ou *groupe monogène*, est évidemment abélien.

Il peut être :

soit infini, et c'est alors l'ensemble formé des éléments :

$$\dots x^{-n}, \dots, x^{-1}, x^0 = e, x, \dots x^n, \dots$$

soit fini dans le cas où il existe un entier positif tel que $x^n = e$; si n est le plus petit entier possédant cette propriété, H est alors un groupe fini d'ordre n formé des éléments :

$$e, x, \dots, x^{n-1}.$$

Citons comme exemple de groupe cyclique fini le groupe multiplicatif engendré par -1 : c'est un groupe d'ordre 2 formé des éléments -1 et $+1$.

Groupes quotients

Classes suivant un sous-groupe

Fixons-nous un groupe multiplicatif G et supposons définie une relation d'équivalence $\mathcal{R}$ sur G. On dira que la relation d'équivalence $\mathcal{R}$ est *compatible à gauche* avec la loi du groupe si la propriété suivante est vérifiée :

si x et x', éléments de G, sont tels que $x \mathcal{R} x'$, alors $yx \mathcal{R} yx'$ pour tout $y \in G$.

On définit de même une relation *compatible à droite* :

$x \mathcal{R} x'$ entraîne $xy \mathcal{R} x'y$ (pour tout $y \in G$).

Si $\mathcal{R}$ est compatible à droite et à gauche avec la loi de G, on dit que $\mathcal{R}$ est *compatible* avec cette loi ; elle vérifie dans ce cas :

si $x \mathcal{R} x'$ et $y \mathcal{R} y'$, alors $xy \mathcal{R} x'y'$.

Supposons maintenant donnée une relation d'équivalence $\mathcal{R}$ sur G compatible à gauche ; si x et y de G sont tels que $x \mathcal{R} y$, on aura aussi $e = x^{-1}x \mathcal{R} x^{-1}y$ et donc $x^{-1}y$ appartient à la classe d'équivalence H de e (H est la partie de G formée des éléments x tels que $x \mathcal{R} e$) ; montrons que H est un sous-groupe de G, c'est-à-dire, comme nous l'avons vu, que si $x \in H$ et $y \in H$, alors $xy^{-1} \in H$: $y \in H$ s'écrit encore $y \mathcal{R} e$, d'où $e = y^{-1}y \mathcal{R} y^{-1}$, et donc $xy^{-1} \mathcal{R} x$; par transitivité (voir chapitre *Les ensembles*), on obtient, puisque $x \mathcal{R} e$, $xy^{-1} \mathcal{R} e$ et donc $xy^{-1} \in H$. Réciproquement, on montre facilement que, si H est un sous-groupe quelconque de G, la relation $x \mathcal{R} y$ si, et seulement si $x^{-1}y \in H$ est une relation d'équivalence compatible à gauche avec la loi du groupe, d'où le résultat.

Toute relation d'équivalence $\mathcal{R}$ compatible à gauche avec la loi d'un groupe G est de la forme $x^{-1}y \in H$, H étant un sous-groupe quelconque de G ; de même, toute relation d'équivalence $\mathcal{R}$ compatible à droite avec la loi d'un groupe G est de la forme $yx^{-1} \in H$, H étant un sous-groupe quelconque de G. La classe d'un élément x de G suivant une relation compatible à gauche sera donc formée des éléments xy de G tels que $y \in H$: on la note xH ; Hx sera la classe de x suivant une relation compatible à droite ; ces classes s'appellent respectivement *classes à gauche* et *classes à droite suivant* (ou *modulo*) H.

Toutes ces classes ont même puissance puisqu'on peut établir une correspondance biunivoque entre xH et yH ; en particulier, si G est d'ordre fini, comme H l'est nécessairement aussi, et que les classes suivant H n'ont pas d'éléments communs, on en déduit la propriété suivante :

dans un groupe fini, l'ordre d'un sous-groupe quelconque est un diviseur de l'ordre du groupe.

Sous-groupes distingués et groupes quotients

Un sous-groupe H de G s'appelle *sous-groupe distingué* (ou *invariant*) de G si l'on a :

$$xHx^{-1} = H \quad (\text{pour tout } x \in G) ;$$

un sous-groupe H sera distingué si, pour tout $y \in H$ et tout $x \in G$, on a : $xyx^{-1} \in H$.

Les classes à gauche et à droite suivant H sont alors confondues, puisque $xHx^{-1} = H$ entraîne $xH = Hx$ et la relation d'équivalence $\mathcal{R}$:

$$x^{-1}y \in H \text{ est compatible avec la loi du groupe.}$$

Si l'on considère l'ensemble quotient $G/\mathcal{R}$ dont les éléments sont les classes d'équivalence de G suivant $\mathcal{R}$, on peut définir sur cet ensemble la loi de composition

suivante ($\bar{x}$ désigne la classe suivant $\mathcal{R}$ d'un élément quelconque x de G) :

$$\overline{xy} = \bar{x}\bar{y}.$$

Cette loi est bien partout définie sur $G/\mathcal{R}$ et vérifie de plus que :

— elle est associative (puisque la loi de G l'est) ;

— elle possède un élément neutre $\bar{e}$;

— tout élément $\bar{x}$ admet un symétrique $\bar{x}^{-1} = \overline{x^{-1}}$.

$G/\mathcal{R}$ est donc un groupe encore noté G/H et appelé *groupe quotient* de G par le sous-groupe distingué H.

Notons que si la loi de composition d'un groupe G est commutative, pour tous les éléments x, y de G on a : $xyx^{-1} = y$; donc tout sous-groupe d'un groupe abélien est distingué ; en particulier, considérons le groupe additif $\mathbb{Z}$: nous avons vu que ses sous-groupes sont de la forme $n\mathbb{Z}$ avec $n \in \mathbb{N}^*$; la relation $x - y \in n\mathbb{Z}$ s'écrit encore :

$$x \equiv y \ (modulo \ n)$$

et se lit x est *congru* à y *modulo n* ; les groupes quotients de $\mathbb{Z}$ par un sous-groupe $n\mathbb{Z}$ seront notés $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$, et un tel groupe s'appelle *groupe additif des entiers rationnels modulo n ;* c'est un groupe fini d'ordre n (fig. 4 A_1 et B_1).

Homomorphismes de groupes produits

Homomorphismes de groupes

Une application f d'un groupe G dans un groupe G′ (dont les lois sont notées multiplicativement) est un *homomorphisme* de groupes si :

$$f(xy) = f(x) f(y)$$

(pour tout x, tout y appartenant à G) ; dans ce cas, si e désigne l'élément neutre de G, e' celui de G′

— $e' = f(e)$; $f(x^{-1}) = [f(x)]^{-1}$;

— f (G) est un sous-groupe de G′ appelé *image* de f noté Im (f) ;

— l'ensemble f^{-1} (e') est un sous-groupe distingué de G, appelé *noyau* de l'homomorphisme et noté Ker (f) ; rappelons que f^{-1} (e') est formé des éléments x de G tels que $f(x) = e'$.

Si, de plus, l'application f est bijective, f est alors un *isomorphisme*, et l'application réciproque f^{-1} est un isomorphisme de G′ sur G ; les groupes G et G′ sont alors dits *isomorphes :* en particulier, tout groupe cyclique G d'ordre n est isomorphe à $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ (si $G = \{e, x, x^2, ..., x^{n-1}\}$, l'application f telle que

$$f(e) = \bar{0}, f(x) = \bar{1}, ..., f(x^{n-1}) = \overline{n-1}$$

est un isomorphisme de G sur $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$).

Un homomorphisme de G dans lui-même s'appelle un *endomorphisme* de G, et un endomorphisme bijectif s'appelle un *automorphisme* de G : si a est un élément fixé d'un groupe G, l'application f_a de G dans G définie par $f_a(x) = axa^{-1}$ est un automorphisme de G ; l'ensemble de tels automorphismes f_a pour $a \in G$ forme un groupe pour la loi de composition des applications ; ce groupe s'appelle groupe des *automorphismes intérieurs* de G.

Si H est un sous-groupe distingué de G, l'application f de G sur G/H définie par $f(x) = \bar{x}$ est un homomorphisme surjectif que l'on appelle *homomorphisme canonique* de G sur G/H ; si maintenant f est un homomorphisme de G dans un groupe G′, appelons s l'homomorphisme canonique de G sur G/Ker (f) (nous avons vu que Ker (f) est un sous-groupe distingué de G) ; le groupe quotient G/Ker (f) est isomorphe à l'image f (G) par l'application k :

$$k(\bar{x}) = f(x) ;$$

d'autre part, l'application identique : $i(x') = x'$ de f (G) dans G′ est un homomorphisme injectif (canonique). Nous avons alors procédé à ce qu'on appelle la *décomposition canonique* de l'homomorphisme f, c'est-à-dire écrit f comme le composé de trois homomorphismes canoniques : $f = i \circ k \circ s$ où

— s est l'homomorphisme canonique de G sur Ker (f) ;

— k est l'isomorphisme canonique de G/Ker (f) sur f (v) ;

— i est l'homomorphisme canonique de f (G) dans G′.

Groupe produit

Comme le composé de deux homomorphismes est encore un homomorphisme, les homomorphismes de groupes forment une catégorie pour la composition des applications (sous la réserve faite précédemment) ; considérons n sommets (ou objets) de cette catégorie ; $G_1, ..., G_n$; chacun des G_i est un groupe (identifié à son application identique), et l'ensemble produit $G = G_1 \times G_2 \times ... \times G_n$ (encore noté $\prod_{i=1,...,n} G_i$) peut être muni d'une structure de groupe de la façon suivante : considérons sur G la loi de composition donnée par la formule

$$(x_1, ..., x_n)(y_1, ..., y_n) = (x_1y_1, ..., x_ny_n)$$

— elle est associative (cela résulte de l'associativité des lois de $G_1, ..., G_n$) ;

— elle possède un élément neutre $e = (e_1, ..., e_n)$ (où e_i désigne l'élément neutre de G_i pour $1 \leqslant i \leqslant n$) ;

— tout $x = (x_1, ..., x_n)$ admet un inverse

$$x^{-1} = (x_1^{-1}, ..., x_n^{-1}).$$

Le groupe G s'appelle *groupe produit* des groupes $G_1, ..., G_n$ (le résultat, ainsi que ce qui va suivre, est encore valable pour une famille quelconque $(G_i)_{i \in I}$ de groupes).

Pour tout i, l'application p_i de G dans G_i définie par $p_i(x_1, ..., x_n) = x_i$ est évidemment un homomorphisme de groupes ; supposons de plus donnés un groupe G′ ainsi que n homomorphismes $p'_1, ..., p'_n$ de G′ dans les groupes G_i, il existe alors un unique homomorphisme h de G′ dans G tel que pour tout $i = 1, ..., n$, on ait $p_i \cdot h = p_i$; c'est l'homomorphisme : $h(x') = (p_1'(x'), ..., p_n'(x'))$ pour tout $x' \in G'$. Le groupe G est donc un produit de $G_1, ..., G_n$ dans la catégorie des homomorphismes de groupes.

Anneaux et corps

Anneaux

Un ensemble A muni de deux lois de composition internes (une addition et une multiplication) est appelé un *anneau* si :

— A est un groupe abélien pour l'addition ;

— la multiplication est associative ;

— la multiplication est distributive par rapport à l'addition.

Les hypothèses sur l'addition dans A s'expriment par les égalités :

$$x + (y + z) = (x + y) + z \ (associativité)$$
$$x + y = y + x \ (commutativité)$$

par l'existence d'un élément neutre noté 0 tel que :

$$x + 0 = x$$

et par l'existence, pour tout x, d'un élément opposé à x, $-x$, tel que :

$$x + (-x) = 0 \quad \text{ou encore} \quad x - x = 0.$$

Les hypothèses sur la multiplication s'expriment par les égalités :

$$x(yz) = (xy)z \quad (associativité) ;$$
$$\left.\begin{array}{l} x(y+z) = xy + xz \\ (y+z)x = yx + zx \end{array}\right\} (distributivité).$$

Si la multiplication est commutative, on dit que l'anneau est *commutatif* ou *abélien*.

Si la multiplication possède un élément neutre, cet élément, qui s'appelle *élément unité* de A, est alors en général noté 1 et A est appelé *anneau unitaire*. Nous avons vu que $\mathbb{Z}$ est un groupe abélien pour l'addition, et que la multiplication sur $\mathbb{Z}$ est associative et distributive par rapport à l'addition ; $\mathbb{Z}$, muni de ces deux lois, est donc un anneau que l'on appelle *anneau des entiers rationnels ;* c'est un anneau commutatif unitaire (d'élément unité $+1$) ; de même, comme nous le verrons par la suite, pour tout $n \in \mathbb{N}^*$, $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ est un anneau abélien unitaire.

Nous allons voir maintenant quelques propriétés des anneaux :

— $y + (-x)$ noté $y - x$ nous donne la soustraction, opération inverse de l'addition et par rapport à laquelle la multiplication est distributive ;

— le produit d'un élément quelconque de A par 0 est

toujours égal à 0 ($x0 = x(y - y) = xy - xy = 0$), mais inversement, il peut exister des éléments x, y de H différents de 0 tels que $xy = 0$; de tels éléments sont alors appelés *diviseurs* de zéro. Un anneau commutatif, non réduit à 0 et dépourvu de diviseurs de zéro, est appelé *anneau intègre* ou *anneau d'intégrité* : l'anneau $\mathbb{Z}$ est un anneau intègre mais l'anneau $\mathbb{Z}/6\mathbb{Z}$ (voir fig. 4B₂) a des diviseurs de zéro : $\overline{2} \cdot \overline{3} = \overline{0}$, on voit qu'un anneau $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ est intègre si, et seulement si n est premier ;

— si A est abélien, la formule du binôme de Newton est vérifiée :

$$(x + y)^n = x^n + C_n x^{n-1} y + \ldots + C_n x^{n-p} y^p + \ldots + C_n^{n-1} x y^{n-1} + y^n \quad (n \in \mathbb{N}^*)$$

cette formule étant encore valable dans un anneau non commutatif si x et y sont permutables (c'est-à-dire si $xy = yx$) ;

— s'il existe un entier positif n tel que, pour tout élément x de A, on ait $nx = 0$, on dit que A est de *caractéristique non nulle* ; si n est le plus petit entier vérifiant cette propriété, A est de caractéristique n ; si ce n'est le cas d'aucun entier, l'anneau est de *caractéristique nulle* : $\mathbb{Z}$ est de *caractéristique nulle*, alors que $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$, pour n premier, est de caractéristique n.

Sous-anneaux

Si une partie B d'un anneau A est elle-même un anneau pour les lois induites sur B par celles de A, on dit que B est un sous-anneau de A ; les sous-anneaux de A sont les parties B de A qui vérifient les deux propriétés :

— B est un sous-groupe du groupe additif de A ;

— B est stable pour la multiplication.

$\mathbb{Z}$ est un sous-anneau de $\mathbb{Q}$ qui est lui-même un sous-anneau de $\mathbb{R}$, lui-même un sous-anneau de $\mathbb{C}$; les sous-groupes $n\mathbb{Z}$ de $\mathbb{Z}$ sont des sous-anneaux de $\mathbb{Z}$ (on peut remarquer que, bien que $\mathbb{Z}$ soit un anneau unitaire, pour $n \geqslant 2$ ces anneaux ne sont pas unitaires ; en revanche, les sous-anneaux d'un anneau commutatif ou intègre sont eux-mêmes respectivement commutatifs ou intègres).

Idéaux

Si B est un sous-anneau de A, la relation $x \mathcal{R} y$ si, et seulement si $x - y \in B$ est une relation d'équivalence compatible avec l'addition mais, en général, pas avec la multiplication ; en effet, si $\mathcal{R}$ est compatible à gauche avec la multiplication, on doit avoir pour tout élément z de A

$$x \mathcal{R} y \text{ entraîne } zx \mathcal{R} zy$$

ou encore

$$x - y \in B \text{ entraîne } zx - zy \in B \text{ (ou } z(x - y) \in B)$$

ce qui n'est généralement pas vrai pour un sous-anneau quelconque ; pour obtenir une relation compatible avec la multiplication, on est donc conduit à considérer des sous-anneaux particuliers.

On appelle *idéal à gauche* de A une partie I de A qui vérifie les deux propriétés suivantes :

(1) — I est un sous-groupe du groupe additif de A ($a \in I$ et $b \in I$ entraîne $a - b \in I$)

(2) — pour tout élément x de A, $xI = I$ (si $x \in A$ et $a \in I$ alors $xa \in I$)

On définit de même un *idéal à droite* par la propriété **(1)** et la propriété :

(2') — pour tout élément x de A, $Ix = I$.

Un idéal à gauche et à droite est appelé *idéal bilatère* de A (remarquons que, si A est commutatif, tout idéal de A est bilatère).

Si A est un anneau quelconque, $\{0\}$ et A sont des idéaux bilatères de A ; un idéal distinct de $\{0\}$ et A s'appelle *idéal propre* de A ; les idéaux de $\mathbb{Z}$ sont les sous-anneaux $n\mathbb{Z}$, car, pour tout élément p de $\mathbb{Z}$, $p(na) = n(pa) \in n\mathbb{Z}$.

Voyons maintenant quelques propriétés des idéaux :

— l'intersection d'une famille d'idéaux à gauche est encore un idéal à gauche ; en particulier, l'intersection de tous les idéaux à gauche qui contiennent une partie donnée H de A est encore un idéal à gauche, appelé idéal à gauche *engendré* par H ; on dit alors que H est un *système de générateurs* de cet idéal (ces propriétés sont encore valables si on remplace partout « idéal à gauche » par « idéal à droite » ou « idéal bilatère ») ;

— si a est un élément fixé de A, aA (formé des éléments ax où $x \in A$) est un idéal à droite, Aa (formé des éléments xa où $x \in A$) est un idéal à gauche de A. Si A est un anneau unitaire, l'idéal à gauche Aa contient a, et il est clair que tout idéal à gauche contenant a contiendra aussi Aa : Aa est l'idéal à gauche engendré par a ; si, de plus, A est commutatif, l'idéal $aA = Aa$ engendré par a se note (a) et s'appelle *idéal principal ;* un anneau intègre unitaire dont tout idéal est principal s'appelle un anneau principal : $\mathbb{Z}$ est un anneau principal ;

— si A est un anneau commutatif, on appellera *idéal maximal* un idéal I qui possède les propriétés suivantes :

1) I est différent de A ;

2) il n'existe pas d'idéal de A, différent de A et de I lui-même, qui contienne I.

Ces propriétés peuvent encore s'exprimer :

— l'idéal I est maximal si I est un élément maximal pour l'inclusion de l'ensemble des idéaux de A distincts de A (voir chapitre *Les ensembles*) ;

— dans $\mathbb{Z}$, l'idéal $6\mathbb{Z}$ n'est pas maximal, car il est contenu dans les idéaux $2\mathbb{Z}$ et $3\mathbb{Z}$, mais $7\mathbb{Z}$ est maximal : un idéal $p\mathbb{Z}$ de $\mathbb{Z}$ sera maximal si, et seulement si p est premier.

Anneaux quotients

Nous avons vu, c'est ce qui nous a amené à la définition d'un idéal, que, si $\mathcal{R}$ est une relation d'équivalence sur un anneau A compatible avec l'addition :

$$x \mathcal{R} y \text{ si, et seulement si, } x - y \in I \text{ (où I est un sous-groupe de A),}$$

elle n'est compatible à gauche avec la multiplication que si I est un idéal à gauche de A ; de même, elle n'est compatible à droite avec la multiplication que si I est un idéal à droite de A. Pour que $\mathcal{R}$ soit compatible avec l'addition et la multiplication, il faut et il suffit donc que I soit un idéal bilatère de A. L'ensemble quotient $A/\mathcal{R}$ est alors un anneau si on le munit de l'addition :

$$\bar{x} + \bar{y} = \overline{x + y}$$

pour laquelle, nous l'avons vu, $A/\mathcal{R}$ possède une structure de groupe et de la multiplication :

$$\bar{x}\bar{y} = \overline{xy}$$

qui est bien associative et distributive par rapport à l'addition. On appelle $A/\mathcal{R}$ *anneau quotient* de A par I, et on le note A/I.

Homomorphismes d'anneaux

Une application f d'un anneau A dans un anneau A' est un homomorphisme d'anneaux si :

$$f(x + y) = f(x) + f(y) \quad \text{et} \quad f(xy) = f(x)f(y)$$

pour tous les éléments x, y de A. Dans ce cas, on a aussi :

— $f(0) = 0$; $f(-x) = -f(x)$;

— f (A) est un sous-anneau de A' ;

— l'ensemble $f^{-1}(0)$ est un idéal bilatère de A appelé noyau de l'homomorphisme ;

— en outre, si A et A' sont unitaires d'éléments unités respectifs e et e', $f(e) = e'$.

L'application de A sur A/I, où I est un idéal bilatère de A, définie par : $f(x) = \bar{x}$, est un homomorphisme surjectif, appelé *homomorphisme canonique* de A sur A/I.

Comme dans le cas des homomorphismes de groupes, un homomorphisme bijectif d'un anneau A sur un anneau A' s'appelle un *isomorphisme* de A sur A' (A et A' sont alors *isomorphes*) ; un homomorphisme de A dans lui-même s'appelle un *endomorphisme* de A et un *automorphisme* de A s'il est bijectif.

Si f est un homomorphisme d'un anneau A dans un anneau A', on peut procéder, comme dans le cas des groupes a', à sa décomposition canonique.

Si f est un homomorphisme d'un anneau A dans un anneau A', g un homomorphisme de A' dans un anneau A'', le composé $g \circ f$ est encore un homomorphisme d'anneaux : les homomorphismes d'anneaux forment une catégorie pour la composition des applications ; si $A_1, \ldots, A_n$ sont n anneaux, considérons l'ensemble produit $A = A_1 \times \ldots \times A_n$; nous avons vu que A est un groupe pour l'addition :

$$(x_1, \ldots, x_n) + (y_1, \ldots, y_n) = (x_1 + y_1, \ldots, x_n + y_n) ;$$

si, de plus, on considère la multiplication définie par :

$$(x_1, \ldots, x_n) \cdot (y_1, \ldots, y_n) = (x_1 y_1, \ldots, x_n y_n),$$

ces deux lois confèrent à A une structure d'anneau ; on voit facilement que A, *anneau produit* de $A_1, \ldots, A_n$, est leur produit dans la catégorie des homomorphismes d'anneaux (ces résultats sont également valables pour une famille quelconque $(A_i)_{i \in I}$ d'anneaux).

Corps

Certains éléments d'un anneau peuvent admettre un symétrique pour la multiplication : c'est le cas, dans $\mathbb{Z}$, de -1 et de 1 ; nous allons voir qu'un corps est un anneau caractérisé par la propriété que tous ses éléments, sauf le zéro de l'addition, possèdent un inverse pour la multiplication.

Un ensemble K, muni d'une addition et d'une multiplication, est un corps s'il possède les deux propriétés :

— K est un anneau pour ces deux lois ;

— les éléments de K distincts du zéro de l'addition forment un groupe pour la multiplication.

L'ensemble des éléments distincts de zéro d'un corps K se notera généralement K^* : c'est le *groupe multiplicatif* du corps ; on peut remarquer qu'un corps possède au moins deux éléments : les éléments unités de chacune des deux lois.

Un corps est dit *commutatif* si son groupe multiplicatif est abélien.

Un corps K est de *caractéristique n* si l'anneau K est de caractéristique n.

L'anneau $\mathbb{Z}$ n'est pas un corps puisque ses éléments n'admettent en général pas d'inverse pour la multiplication ; en revanche, $\mathbb{Q}$, $\mathbb{R}$, $\mathbb{C}$ sont des corps commutatifs.

Voyons maintenant quelques propriétés des corps :

— dans un corps, un produit est nul si, et seulement si l'un des facteurs au moins est nul ; ce qui revient à dire qu'un corps ne peut avoir de diviseurs de zéro ; en effet, si :

$$ab = 0 \text{ (avec } a \neq 0)$$

comme a admet un inverse a^{-1} pour la multiplication,

$$a^{-1}ab = b = 0.$$

Nous avons vu que, si n n'est pas premier, les anneaux $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ possèdent des diviseurs de zéro (ce sont les classes des éléments m, p de $\mathbb{Z}$ tels que $mp = n$) ; de tels anneaux ne sont donc pas des corps ; en revanche, si p est premier, $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ est un corps de caractéristique p : dans $\mathbb{Z}/3\mathbb{Z}$ par exemple, qui comporte les trois éléments $\bar{0}$, $\bar{1}$ et $\bar{2}$, $\bar{1}$ et $\bar{2}$ sont leur propre inverse pour la multiplication (voir fig. $4A_2$) ; plus généralement :

si A est un anneau commutatif et I un idéal maximal de A, alors A/I est un corps.

Citons encore les propriétés suivantes :

— tout anneau intègre unitaire fini est un corps ;

— les seuls idéaux (à gauche ou à droite) d'un corps K considéré comme anneau sont $\{0\}$ et K ; en effet, considérons un idéal à gauche I de K (le raisonnement est analogue pour un idéal à droite) ; si $I \neq \{0\}$, il existe $x \neq 0$ appartenant à I, d'où $x^{-1}x = 1 \in I$ et donc $y \cdot 1 = y$ appartient à I pour tout élément y de K : I = K.

Sous-corps

Une partie L de K qui est elle-même un corps pour l'addition et la multiplication induites par celles de K s'appelle un sous-corps de K ; on dit alors que K est un *surcorps* ou une *extension* du corps L. Un sous-corps L de K est une partie de K qui vérifie les propriétés suivantes :

— L est un sous-anneau de K (K étant considéré comme anneau) ;

— les inverses dans K de tous les éléments de L appartiennent à L.

$\mathbb{Q}$ est un sous-corps de $\mathbb{R}$, $\mathbb{C}$ une extension de $\mathbb{R}$. Tout sous-corps d'un corps K distinct de K est appelé *sous-corps propre* de K. Un corps est dit *premier* s'il ne contient aucun sous-corps propre : si p est premier, $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ est un corps premier. L'intersection d'une famille quelconque de sous-corps de K est encore un sous-corps de K ; en particulier, l'intersection de tous les sous-corps contenant une partie non vide B de K est un sous-corps de K : c'est le sous-corps de K *engendré* par B.

Homomorphismes de corps

Les corps étant des anneaux particuliers, un homomorphisme d'un corps K dans un corps K′ est simplement un homomorphisme d'anneau de K dans K′ ; mais ces homomorphismes possèdent une propriété qui nous donne des résultats particulièrement simples.

En effet, nous savons que le noyau d'un homomorphisme d'un anneau A dans un anneau A′ est un idéal bilatère de A ; comme les seuls idéaux d'un corps sont $\{0\}$ et le corps lui-même, si f est un homomorphisme d'un corps K dans un corps K′, deux cas peuvent se présenter :

— $f^{-1}(0) = K$ et $f(K)$ est un anneau réduit à 0 (pour tout élément x de K, $f(x) = 0$) ;

ou bien

— $f^{-1}(0) = \{0\}$; f est alors un homomorphisme injectif de K dans K′ et $f(K)$ est un corps isomorphe à K ; en particulier, si f est surjectif, les corps K et K′ sont isomorphes.

Corps des fractions d'un anneau intègre

Nous avons vu qu'un corps est dépourvu de diviseurs de zéro ; de même, tout sous-anneau de ce corps possède cette propriété d'où il résulte que tout sous-anneau d'un corps commutatif est un anneau intègre. Nous allons voir que réciproquement, étant donné un anneau intègre A, il est possible de trouver un corps commutatif K dont A soit un sous-anneau ; on dit encore que l'on va *plonger* A dans un corps K.

Soit donc A un anneau intègre, notons A^* l'ensemble des éléments non nuls de A ; la relation :

$$xy' = x'y$$

définit une relation d'équivalence $\mathcal{R}$ dans l'ensemble $A \times A^*$:

$$(x, x') \,\mathcal{R}\, (y, y') \text{ si, et seulement si } xy' = x'y ;$$

on peut définir de plus dans $A \times A^*$, une addition par :

$$(x, x') + (y, y') = (xy' + x'y, x'y')$$

et une multiplication par :

$$(x, x') \cdot (y, y') = (xy, x'y')$$

On vérifie facilement que ces lois sont associatives et commutatives, que la multiplication est distributive par rapport à l'addition, et que, de plus, $\mathcal{R}$ est compatible avec ces lois. On peut donc définir dans l'ensemble quotient $K = A \times A^*/\mathcal{R}$ l'addition et la multiplication habituelles qui sont, si l'on convient de noter x/x' la classe d'équivalence $\overline{(x, x')}$:

$$x/x' + y/y' = (xy' + x'y)/x'y'$$
$$(x/x') \cdot (y/y') = xy/x'y'$$

— en outre, la multiplication a un élément neutre, y'/y' noté 1 (y' est un élément quelconque de A^* : pour tout $z' \in A^*$, $z'/z' = y'y'$) car :

$$(x/x') \cdot (y'/y') = (y'/y') \cdot (x/x') = x/x' \; (y'xx' = y'x'x)$$

— l'addition a un élément neutre, $0/y'$ noté $\bar{0}$ (pour tout y' de A^*, tout z' de A^*, on a $0/y' = 0/z'$) car :

$$x/x' + 0/y' = xy'/x'y' = (x/x') \cdot \bar{1} = x/x'$$

— tout élément x/x' a un opposé pour l'addition, $(-x)/x' : x/x' + (-x)/x' = 0/xx' = \bar{0}$

— tout élément x/x' distinct de $\bar{0}$ a un inverse pour la multiplication, x'/x (si $x/x' \neq \bar{0}$, alors $x \in A^*$) :

$$(x/x') \cdot (x'/x) = xx'/xx' = \bar{1}$$

K est donc bien un corps commutatif ; ce corps ne contient pas A mais, si l'on considère la partie B de K comportant les éléments de la forme xx'/x' où $x \in A$, on voit qu'elle constitue un sous-anneau de K isomorphe à A (xx'/x correspondant à x par cette bijection) ; en identifiant B à A, on obtient bien un corps commutatif K′, isomorphe à K qui contient A. K′ s'appelle le *corps des fractions* de A.

Si l'on prend pour A l'anneau $\mathbb{Z}$, le corps K′ n'est autre, par construction, que le corps $\mathbb{Q}$ des nombres rationnels.

BIBLIOGRAPHIE

BOURBAKI N., *Éléments de mathématiques,* première partie, livre II : *Algèbre,* Paris, Hermann, 1951 (2e édition). - EHRESMANN C., *Catégories et Structures,* Paris, Dunod, 1964. - GODEMENT R., *Cours d'algèbre,* Paris, Hermann, 1966. - LANG S., *Algebra,* Addison-Wesley Publishing Company (1re édition, 1969). - QUEYSANNE M., *Algèbre,* Paris, Armand Colin, 1964. - QUEYSANNE M. et DELACHET A., *l'Algèbre moderne,* « Que sais-je ? », no 661, Paris, P.U.F., 1960. - VAN DER WAERDEN, *Moderne Algebra,* Berlin Springer, 1943 (3e édition en allemand) ; traduction anglaise, New York, Vujar, 1949.

▶ *Le* chevalier de Méré *(v. 1607-1685) ; il connut* Pascal *vers 1652.*

Palais de la Découverte, Paris

COMBINATOIRE

Tout enfant sorti des classes primaires est censé savoir compter. Compter les billes contenues dans un sac, déterminer le nombre de voix obtenues par un candidat lors d'une élection sont des opérations simples — fastidieuses peut-être ; mais elles ne posent guère de problèmes de *méthode*. Il s'agit uniquement de procéder à une *énumération* en prenant toutes les billes du sac ou tous les bulletins de l'urne un à un.

Par contre, évaluer le nombre d'anagrammes que l'on peut réaliser avec les lettres du mot *« Anticonstitutionnellement »,* calculer combien il y a de donnes possibles dans un jeu de tarots contenant les 3 bouts sont des opérations qui deviennent inextricables si l'on ne dispose pas de méthodes de dénombrement qui permettent de faire l'économie d'une énumération directe de toutes les possibilités. La combinatoire est justement l'étude de ces méthodes de dénombrement. Elle est à la base du calcul des probabilités : historiquement, elle est née d'un problème posé à Pascal par le chevalier de Méré (1654). L'auteur des *Provinciales* sut le résoudre et fournit ainsi les premiers éléments des probabilités.

La combinatoire : la mathématique des grands nombres

Soit A un ensemble (fini) ; on appelle cardinal de A (noté card A) le nombre d'éléments de A. Lorsque le nombre card A semble *a priori* très élevé, il sera souvent possible de montrer mathématiquement qu'il existe une bijection entre A et un sous-ensemble particulier de l'ensemble F^E des applications d'un ensemble E dans un ensemble F. C'est pour cela que la combinatoire s'est avant tout consacrée au dénombrement des ensembles d'applications.

Exemple 1 — Arrangements

Soit à résoudre le problème suivant : de combien de façons différentes peut-on regrouper n éléments en sous-ensembles ordonnés de p éléments ($p \leqslant n$) ? Ce nombre-là est égal au cardinal de l'ensemble $\mathfrak{J}$ des applications injectives d'un ensemble E de p éléments dans un ensemble F à n éléments (schéma ci-dessous).

Soit $a \in$ E. Son image par une injection peut prendre n valeurs. Une fois une valeur choisie, un deuxième élément a a, quant à lui, le choix entre $n - 1$ valeurs (la valeur prise par a lui est interdite puisque l'application est injective). Pour les deux premiers éléments, il y a $n\ (n - 1)$ possibilités, et ainsi de suite. Au bout du compte, nous obtenons

$$A_n^p = (n - 1)\ (n - 2)\ \ldots\ (n - p + 1).$$

Ce nombre s'appelle nombre d'arrangements de n éléments p à p.

Lorsque $p = n$, l'on obtient le nombre de *bijections* d'un ensemble E sur lui-même. Ce nombre, que l'on nomme « factorielle n », se note $n\,!$.

$$n\,! = 1 \times 2 \times 3 \times 4 \times \ldots \times n$$

On convient en outre d'écrire : $1\,! = 1$; $0\,! = 1$.

Exemple 2 — Combinaisons

Si l'on convient d'identifier les arrangements qui diffèrent seulement par l'*ordre* des p éléments, on obtient l'ensemble des combinaisons de n éléments p à p. Cela revient à définir sur l'ensemble $\mathfrak{J}$ une relation d'équivalence $\mathfrak{R}$: on dira que $i \mathfrak{R} i'$ si, et seulement si i (E) $= i'$ (E). Le nombre de combinaisons est égal alors au cardinal de l'ensemble quotient $\mathfrak{J}/\mathfrak{R}$. Toutes les classes d'équivalence de la relation $\mathfrak{R}$ contiennent $p\,!$ injections : toute partie $\mathcal{E}$ de F de n éléments définit une classe d'équivalence $A\mathcal{E} = \{i \mid i\ (E) = \mathcal{E}\}$. $A\mathcal{E}$ est donc l'ensemble des bijections de $E \to \mathcal{E}$, donc card $A\mathcal{E} = p\,!$, donc card $\mathfrak{J}/\mathfrak{R} = \dfrac{\text{card}\ \mathfrak{J}}{p\,!}$; le nombre se note C_n^p (ou $\binom{p}{n}$) :

$$C_n^p = \frac{n\ (n - 1)\ \ldots\ (n - p + 1)}{p\,!} = \frac{n\,!}{p\,!\ (n - p)\,!}$$

on démontre les deux égalités : **(1)** $C_n^p = C_n^{n-p}$

(2) $C_n^p = C_{n-1}^p + C_{n-1}^{p-1}$

Enfin le binôme de Newton $(1 + x)^n$ se développe de la manière suivante :

$$(1 + x)^n = 1 + nx + C_n^2\, x^2 + C_n^3\, x^3 + \ldots + C_n^k\, x^k + \ldots x^n$$

Les coefficients du développement peuvent être réunis dans un tableau (triangle de Pascal) que l'on construit à l'aide de l'égalité **(2)** :

▶ *Le triangle de Pascal.*

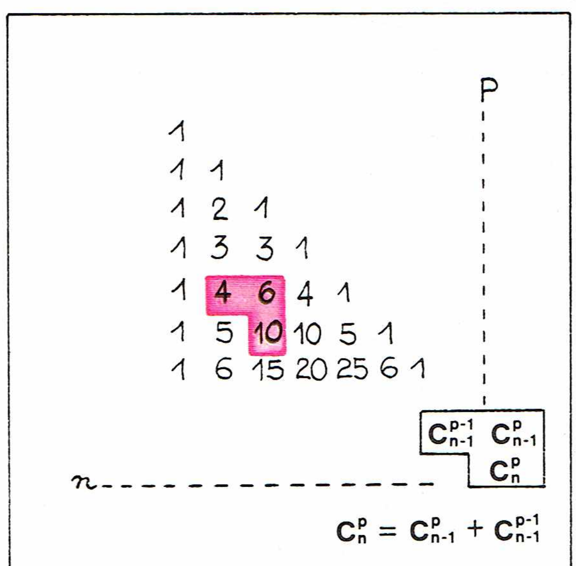

Richard Colin

Richard Colin

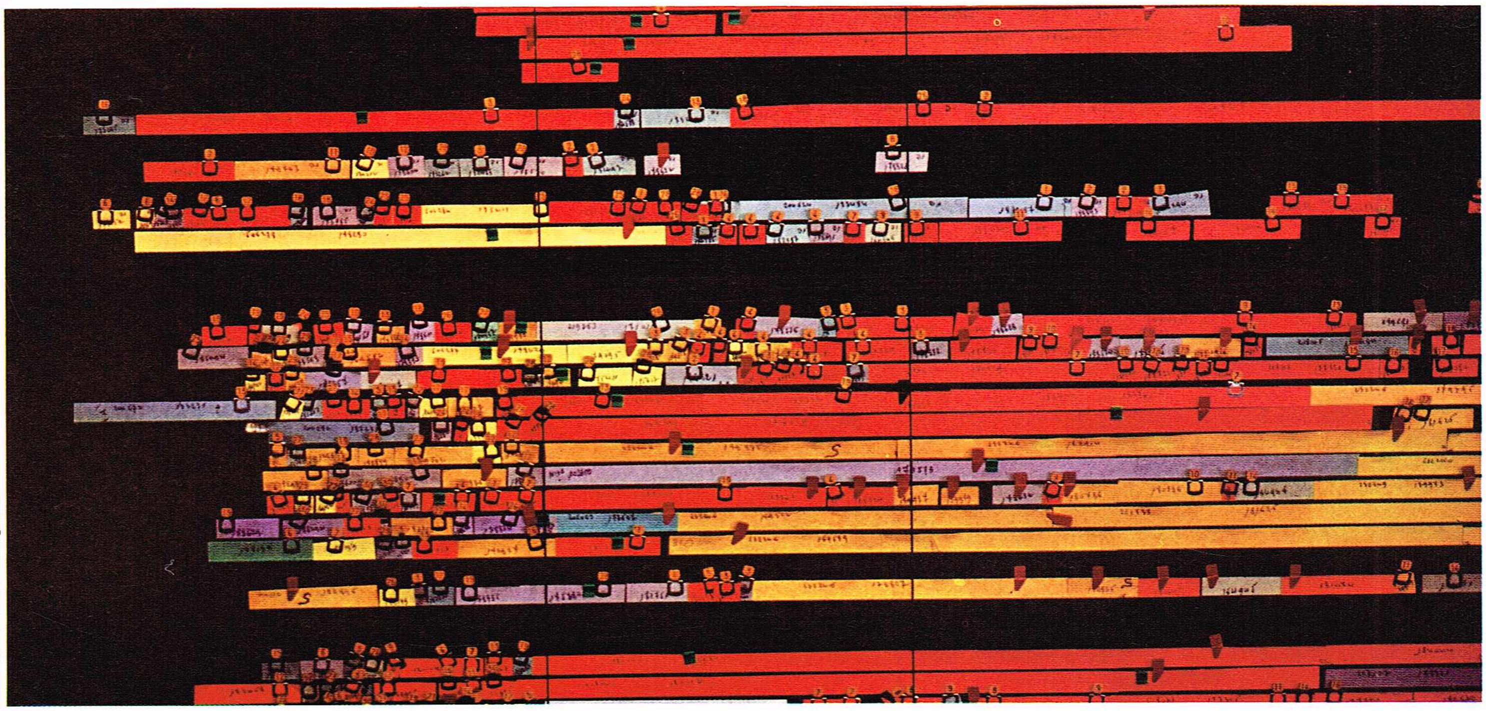

Erich Hartmann - Magnum

▲ *La théorie des graphes a donné naissance à un grand nombre d'applications en echerche opérationnelle comme, notamment ici, la planification de l'écoulement de la production d'une firme automobile.*

LES GRAPHES

Un petit dessin vaut mieux qu'un grand discours. NAPOLÉON

Dans la vie courante, nous sommes souvent amenés à représenter des situations ou des problèmes par des schémas comportant des points reliés par des flèches : ainsi en est-il d'une carte routière, d'un réseau électrique ou de l'organigramme des services d'une firme. A l'évidence, ce mode de représentation possède, dans le domaine industriel, militaire ou domestique, des vertus pratiques et pédagogiques incontestables; plus encore, on s'est rendu compte qu'il pouvait faciliter la résolution de certains problèmes : en 1736, Euler étudia comment il était possible de parcourir les sept ponts de la ville de Kœnigsberg sans franchir deux fois le même. En montrant l'impossibilité du problème, il dégagea les premiers éléments de ce qui constitue aujourd'hui la *théorie des graphes*. Pour parler néanmoins de la théorie des graphes, il faudra attendre le XXe siècle, le développement de la théorie des ensembles et la systématisation de la démarche axiomatique : deux ouvrages fondamentaux doivent à cet égard être mentionnés : celui de D. Kœnig (Leipzig, 1936) et celui de C. Bergé (Paris, 1957).

La théorie des graphes constitue une des branches des mathématiques les plus florissantes : elle suscite l'intérêt de nombreux mathématiciens : il existe en effet beaucoup de conjectures non démontrées (dont la résolution semble d'autant plus délicate que l'énoncé est simple), et chaque année voit arriver une moisson abondante et internationale de résultats qui tentent de les résoudre.

Par ailleurs, la théorie des graphes a largement débordé sur d'autres branches des mathématiques. On en étudie aussi les applications aux groupes finis, aux catégories, ou en topologie. Les graphes ont aussi donné naissance à un grand nombre d'applications en recherche opérationnelle : les problèmes de transport, d'ordonnancement des tâches, de planning, de stocks, sont traités désormais à l'aide de méthodes et d'algorithmes (non combinatoires) qui en sont directement issus (algorithme du flot maximal de Ford et Fulkerson, méthode P. E. R. T., etc.). Là encore, les progrès réalisés au cours des vingt dernières années ont été importants, suscités par l'émergence des problèmes d'organisation et de planification qui se posent actuellement aux vastes structures administratives et industrielles, rendus possibles par le développement des ordinateurs et de l'informatique.

Définitions et propriétés générales

On appelle *graphe* le couple G = (X, **U**) formé par un ensemble fini X d'éléments appelés « *sommets* » et par une famille **U** de couples de sommets que l'on convient d'appeler « *arcs* ».

$$X = \{x_1, x_2, ..., x_n\}$$
$$\mathbf{U} = \{u_1, u_2, ..., u_m\}$$
$$\mathbf{U} \in X \times X$$

Un graphe est en général orienté : c'est-à-dire que l'on distingue l'arc (x_i, x_j) de l'arc (x_j, x_i) ; on suppose ici qu'entre deux sommets x_i, x_j il existe *au plus* un arc (x_i, x_j). Si l'on ne tient pas compte de l'orientation des arcs, on parlera de graphe *simple* (et d'arêtes plutôt que d'arcs). On peut ainsi définir un graphe par G = (X, Γ) où Γ est une *multiapplication* $X \Rightarrow X$ (c'est-à-dire une *application* de $X \rightarrow \mathfrak{P}(X)$). Il est clair que **U** est alors le « graphe », au sens usuel de l'analyse, de Γ :

$$\mathbf{U} = \{(x, y) \mid x \in X, y \in \Gamma(x)\}$$

Exemple :

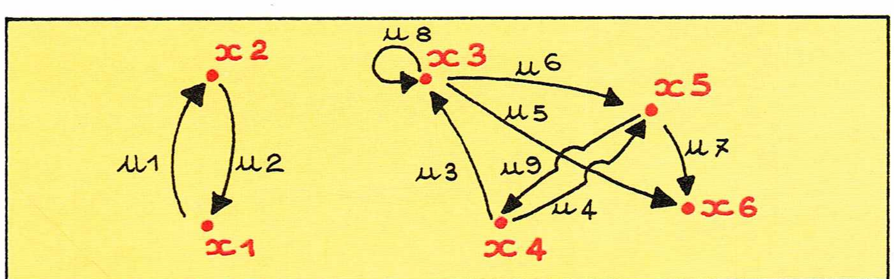

Richard Colin

le graphe comporte 6 sommets et 9 arcs (il n'est pas connexe).

$X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\}$
$\mathbf{U} = \{(x_1, x_2), (x_2, x_1), (x_4, x_3), (x_4, x_5), (x_3, x_6), (x_3, x_5), (x_5, x_6), (x_3, x_3), (x_5, x_4)\}$
(ou $\mathbf{U} = \{u_1, u_2, u_3, ..., u_9\}$).

Un arc tel que (x_3, x_3) s'appelle une *boucle*.

Matrice boolienne d'un graphe

Il s'agit d'une matrice a_{ij} carrée d'ordre *n* définie par
$a_{ij} = 1$ si $(x_i, x_j) \in \mathbf{U}$
$= 0$, sinon.

La matrice du graphe donné en exemple est :

$$\begin{array}{c} \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{array} \\ \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{array}$$

L'indice de ligne correspond au sommet d'origine, l'indice de colonne au sommet extrémité.

Quelques définitions

Considérons un arc (x_i, x_j). Si x_i est appelé extrémité initiale, x_j extrémité finale, x_i est le prédécesseur de x_j, x_j le successeur de x_i. Deux *arcs* seront dits *adjacents* s'ils ont une extrémité commune (par exemple (x_4, x_5) et (x_3, x_5)). Deux *sommets* sont dits *adjacents* s'ils sont distincts et reliés par un arc.

Un *chemin* est une suite *ordonnée* d'arcs tels que l'extrémité finale de chaque arc coïncide avec l'extrémité initiale du suivant; exemple : (x_4, x_3) ; (x_3, x_5) ; (x_5, x_6).

Un *circuit* est un chemin dont le sommet initial coïncide avec le sommet terminal ; exemple :

(x_4, x_3) ; (x_3, x_5) ; (x_5, x_4).

Une *chaîne* est une suite ordonnée d'arcs adjacents ; exemple : (x_3, x_6) ; (x_3, x_3) ; (x_4, x_3) (ou d'arêtes dans un graphe *simple*).

Un *cycle* est une chaîne fermée ; exemple :

(x_3, x_6) ; (x_3, x_5) ; (x_5, x_6).

On imposera de plus qu'il n'utilise pas deux fois le même arc.

Soit A une partie de X. On notera ω^+ (A) (respectivement ω^- (A)) l'ensemble des arcs ayant l'extrémité initiale (seulement) dans A (respectivement : extrémité finale).

$$\omega^+ (A) = \{(x_i, x_j) \mid x_i \in A, x_j \notin A\}$$
$$\omega^- (A) = \{(x_i, x_j) \mid x_i \notin A, x_j \in A\}$$
$$\omega (A) = \omega^+ (A) \cup \omega^- (A)$$

par exemple : si $A = \{x_4, x_3\}$

$\omega^+ (A) = \{u_4, u_5, u_6\}$ et $\omega^- (A) = \{u_9\}$

Recherche d'un flot maximal dans un réseau de transport

Un réseau de transport est un graphe particulier qui permet de représenter certains problèmes pratiques (problèmes de transports, d'affectation des tâches). Un réseau de transport est un graphe G = (X, **U**) tel que :

— il existe un sommet unique x_0 (appelé l'*entrée* du réseau) qui n'a pas de prédécesseur ;

— il existe un sommet unique x_n *(la sortie)* qui n'a pas de successeur ;

— à chaque arc est associé un nombre appelé sa *capacité*. On notera C_{ij} ou C_k la capacité de l'arc $u_k = (x_i, x_j)$;

— on supposera, pour simplifier, qu'entre deux sommets x_i, x_j du graphe, il existe au plus un arc.

Exemple d'un réseau de transport

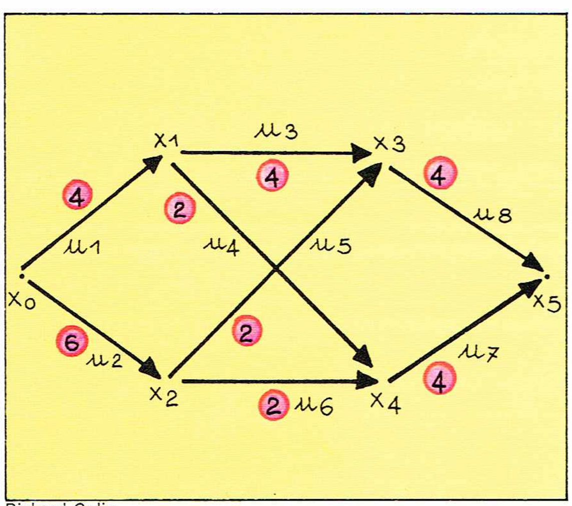

▶ ***Exemple schématique d'un* réseau de transport.**

Richard Colin

Un réseau est donc à l'image d'un réseau électrique reliant une entrée (pôle + d'un accumulateur) à une sortie (pôle —). Chaque arc comporte des résistances, des capacités, des selfs, et l'on peut chercher à déterminer le *flux de courant* traversant le réseau, sachant qu'il n'y a pas d'accumulation d'électricité en un sommet autre que x_0 et x_n : la quantité d'électricité qui arrive en un sommet doit être égale à celle qui en part (loi de Kirchhoff) ; d'autre part, la quantité s'écoulant dans un arc est au plus égale à la capacité dudit arc.

On définit donc ainsi un flot dans un réseau : on appelle flot $\vec{\Phi}$ *dans un réseau* (X, **U**) possédant *m* arcs, un ensemble de nombres $\vec{\varphi} = (\varphi_1, \varphi_2, ..., \varphi_m)$, le nombre φ_k étant associé à l'arc *k*, tels que :

$$\text{(i)} \quad \sum_{k \in \omega^- \{x_j\}} \varphi_k = \sum_{k \in \omega^+ \{x_j\}} \varphi_k \quad \text{pour } x_j \in X - \{x_0, x_n\}$$
$$0 \leqslant \varphi_k \leqslant C_k \qquad \forall k = 1, 2, ..., m$$

La quantité de flot entrant dans les réseaux est égale à

$$\sum_{k \in \omega^+ (x_0)} \varphi_k$$

elle est évidemment égale à la quantité qui en sort :

$$\Phi = \sum_{k \in \omega^+ (x_0)} \varphi_k = \sum_{k \in \omega^- (x_m)} \varphi_k$$

la valeur commune à ces deux expressions est appelée *valeur du flot dans le réseau*.

Problème du flot maximal

Trouver dans le réseau G = (X, **U**) le flot de valeur Φ^* maximale.

Algorithme de Ford et Fulkerson de recherches d'un flot maximal dans un réseau

La méthode est une méthode itérative : on suppose que l'on connaît un flot, et on cherche à l'améliorer. Lors de la *j*-ième itération, on détermine un flot $\vec{\varphi}^{(j)} = \vec{\varphi}^{(j-1)} + \vec{\eta}^{(j)}$; la procédure s'arrête lorsque l'on ne peut plus faire augmenter la valeur du flot. La méthode est une méthode matricielle, dont voici le principe appliqué à l'exemple donné ci-dessus. Nous représentons ce réseau par sa matrice des capacités : il s'agit d'une matrice carrée (n, n) $\{C_{ij}\}$ où C_{ij} représente la capacité de l'arc (x_i, x_j) ; si l'arc (x_i, x_j) n'existe pas, on pose par convention $C_{ij} = 0$.

On part avec un flux initial $\vec{\varphi}^{(0)} = \vec{0}$. Comment l'améliorer ? On voit que l'on peut passer de $x_0 \rightarrow x_1 \rightarrow x_3 \rightarrow x_5$.

1^re^ itération

Au maximum, on fait passer 4 unités de $x_0 \rightarrow x_5$ par ce chemin.

On pose $\Phi^{(1)} = 4$ et $\vec{\varphi}^{(1)} = (4, 0, 4, 0, 0, 0, 0, 4)$.

On va donc modifier la matrice de manière à tenir compte du passage de flot $\vec{\varphi}^{(1)}$ [voir $M^{(0)}$]. Les capacités des arcs (x_0, x_1), (x_1, x_3) et (x_3, x_5) deviennent nulles. Par contre, celles des arcs (x_1, x_0), (x_3, x_1) et (x_5, x_3) deviennent égales à 4. (En effet, on peut admettre que l'on peut faire remonter une unité de x_1 à x_0 en en retenant une de celles qui passent de x_0 à x_1.)

2^e^ itération

On poursuit la même procédure : il est possible d'augmenter la valeur du flot $\vec{\varphi}^{(1)}$ en empruntant le chemin (x_0, x_2, x_4, x_5). Sur la matrice $M^{(1)}$, on voit que l'on peut faire passer au plus 2 unités. On obtient alors le flux :

$$\vec{\varphi}^{(2)} = (4, 2, 4, 0, 0, 2, 2, 4)$$

et $\Phi^{(2)} = 4 + 2 = 6$. Les capacités des arcs (x_0, x_2) (x_2, x_4) et (x_4, x_5) deviennent alors (4, 0, 0), celles de (x_2, x_0), (x_4, x_2) et (x_5, x_4) : (2, 2, 2).

3^e^ itération

On augmentera le flot en suivant le « chemin »

$(x_0, x_2, x_3, x_1, x_4, x_5)$

l'arc (x_3, x_1) n'existe pas, mais il est possible d'augmenter néanmoins le flot en détournant une unité qui va de x_1 à x_3 vers x_4. Compte tenu des capacités, on voit que le flux est amélioré de la sorte de 2 unités

$$\vec{\varphi}^{(3)} = (4, 4, 2, 2, 2, 2, 4, 4)$$
$$\Phi^3 = 8$$

Si l'on cherche à poursuivre la procédure, on ne parviendra pas à trouver un chemin composé d'arcs de capacités non nulles grâce auquel l'on puisse atteindre x_5. Donc $\vec{\varphi}^* = \vec{\varphi}^{(3)}$; $\Phi^* = 8$. On remarquera que le flot $\vec{\varphi}^*$ s'obtient en faisant la différence des matrices $M^{(0)} - M^{(3)}$.

Ford et Fulkerson ont montré que le flot $\vec{\varphi}^*$ obtenu par cette méthode est un flot maximal.

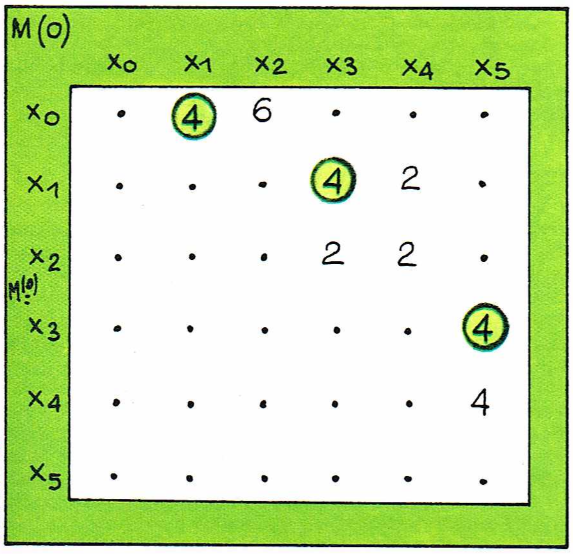

Richard Colin

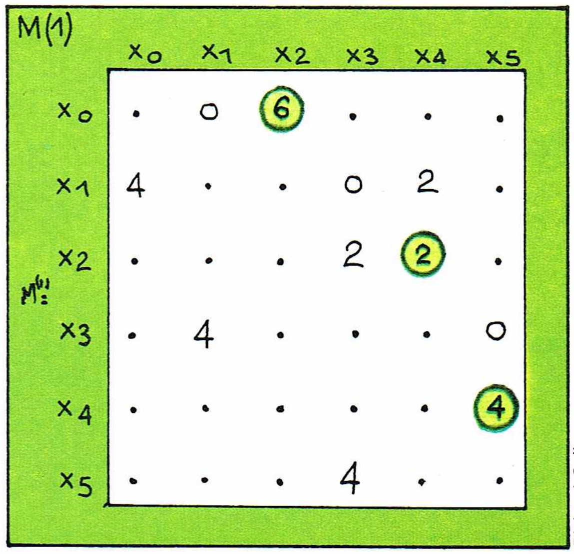

Richard Colin

◀ *La matrice* $M^{(j)}$ *indique les capacités réelles du réseau, sachant que le flot* $\varphi^{(j)}$ *y circule. Les O (ou les ●) indiquent des arcs qui, soit ne sont pas parcourus par le flot, soit sont saturés par celui-ci. Lorsque, au cours d'une itération, l'on sature un arc [par exemple l'arc* (x_1, x_4), *ou le troisième] cela revient à admettre que l'on a augmenté la capacité de l'arc contraire* (x_4, x_1) *; ce que l'on indique sur la matrice de l'itération.*

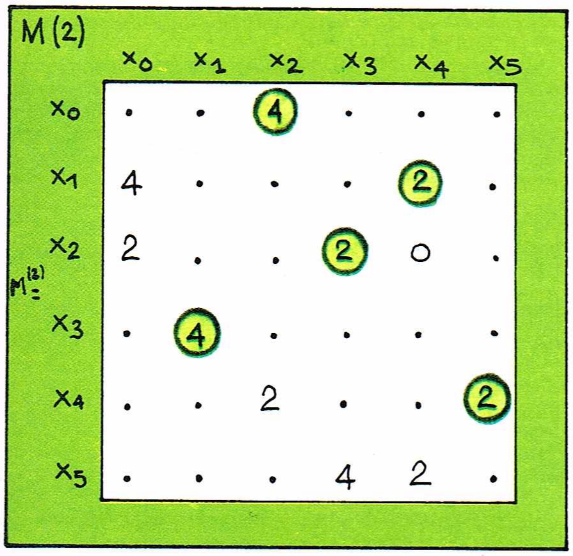

Richard Colin

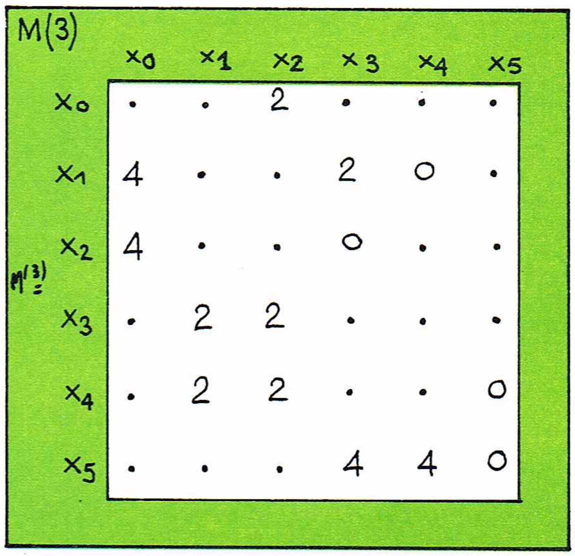

Richard Colin

Théorème de dualité - Maxflow - Min cut

Ce théorème (1957) apporte une intéressante caractérisation d'un flot optimal : soit $A \subset X$ tel que $x_0 \notin$ et $x_n \in A$, l'ensemble $\omega^-(A)$ est appelé *une coupe de capacité* $C_A = \sum_{k \in \omega^-(A)} C_k$. Dans l'exemple précédent, avec $A = \{x_3, x_5, x_n\}$, on a $C_A = 8$. Le théorème s'énonce sous la forme suivante : *Dans un réseau de transport, la valeur maximale d'un flot est égale à la capacité minimale d'une coupe.* Dans l'exemple, $\Phi^* = C_A$ et toute coupe du graphe a une capacité supérieure à celle de A.

Chemins critiques — Méthode P.E.R.T.

Considérons un entrepreneur chargé de construire une maison. Il s'agit d'un projet dont la réalisation nécessite l'accomplissement de plusieurs opérations (ou tâches) :

- **A** = creusage des fondations,
- **B** = construction du gros œuvre,
- **C** = mise en place de l'installation électrique,
- **D** = du chauffage,
- **E** = réalisation des peintures extérieures,
- **F** = des peintures intérieures.

Toutes ces opérations sont soumises à certaines contraintes temporelles : par exemple, les fondations doivent être terminées avant de commencer le gros œuvre ; il est nécessaire d'avoir fini de monter le circuit électrique avant de commencer les peintures intérieures. Par contre, il est possible de réaliser simultanément les peintures extérieures et l'installation du chauffage. On représente l'ensemble des travaux par un graphe construit ainsi :

— à chaque opération est associé un *arc ;*

— les sommets du graphe correspondent à des *étapes* marquant le début de certaines opérations et la fin d'autres ;

— il existe un sommet « début des travaux » et un sommet « fin des travaux ».

L'exemple précédent peut se représenter ainsi :

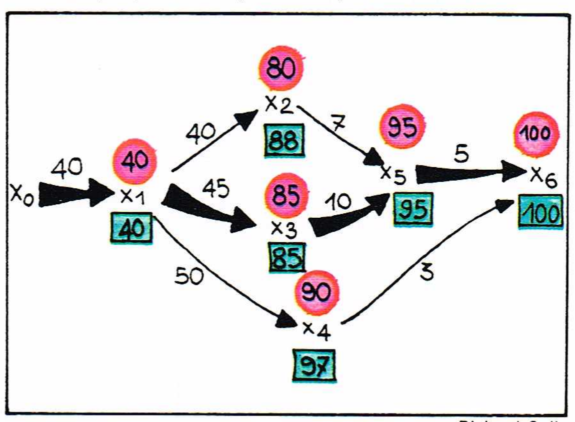

Richard Colin

◀ *Graphe représentant l'ensemble des travaux entrepris lors de la construction d'une maison.*

x_0 = début des travaux
x_1 = début du gros œuvre
x_2 = début de l'installation de l'électricité
x_3 = début de l'installation du chauffage
x_4 = début des peintures extérieures
x_5 = début des peintures intérieures
x_6 = fin des travaux.

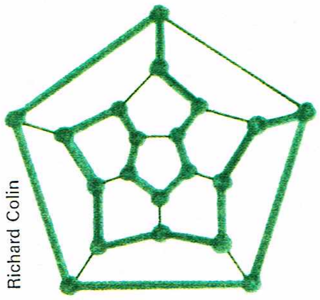

Richard Colin

▲ ***Polyèdre à 12 faces pentagonales et à 20 sommets illustrant l'exemple du* jeu hamiltonien *(voir texte).***

La durée de chaque tâche est évaluée préalablement et figure sur le graphe (en jours). Attribuons à x_0 la date 0. Nous cherchons à évaluer la date à laquelle seront achevés les travaux : pour cela nous déterminons, par chaque tâche, la *date au plus tôt à laquelle* elle peut être réalisée, compte tenu de ses relations d'antériorité.

Soit t_{ij} la durée de la tâche (x_i, x_j). On calcule, pour chaque sommet x_i, la date t_i, date au plus tôt à laquelle on doit être en x_i. On calcule les t_i de proche en proche en partant de x_0 ($t_0 = 0$) par la formule

$$t_i = \max_h (t_h + t_{ij}) \ \forall h \mid (x_h, x_i) \in \omega^- (x_i).$$

Dans l'exemple $t_0 = 0, t_1 = 40, t_2 = 80, t_3 = 85, t_4 = 90,$

$$t_5 = \max \{t_3 + 10, t_2 + 7\} = 95,$$
$$t_6 = \max \{t_5 + 5, t_4 + 3\} = 100.$$

En effet, on ne peut réaliser la tâche (x_5, x_6) *avant* que la plus longue des deux tâches précédentes (x_2, x_5) et (x_3, x_5) ne soit terminée. Il est clair que la durée totale de la construction est donnée par des

$$t = 100.$$

Pour que la durée totale ne dépasse pas 100, il faut ne pas commencer les peintures intérieures après

$$t_5^* = 100 - 5 = 95$$

ni les peintures extérieures après $t_4^* = 100 - 3 = 97$. On détermine ainsi la *date au plus tard* de réalisation des tâches :

$$t_2^* = 95 - 7 = 88, \quad t_3^* = 95 - 10 = 85,$$
$$t_1^* = \min \{88 - 40, 85 - 45, 97 - 50\} = 40, \ t_0^* = 0.$$

En effet, il ne faut pas terminer la tâche (x_0, x_1) après 40 jours, sinon la durée totale de la construction dépassera 100 jours : on calcule ainsi les t_i^* de proche en proche en partant de x_n (avec $t_n = 100$) par la formule :

$$t_i^* = \min_h (t_h - t_{ij}) \quad \forall h \mid (a_i, a_h) \in \omega^- (a_i).$$

Recherche du chemin critique

Le chemin critique est formé des sommets pour lesquels il y a coïncidence de leur date au plus tard et de leur date au plus tôt : $t_i = t_i^* \Leftrightarrow x_i$ appartient *au chemin critique*.

Ces étapes sont à surveiller étroitement : elles sont critiques dans la mesure où le moindre retard les affectant contribue à dépasser la durée totale du projet. Dans l'exemple, le chemin critique est :

$$(x_0, x_1, x_3, x_5, x_6)$$

* *intervalle de flottement* $(t_i^* - t_i)$ *d'une étape* x_i *:* il est nul par les tâches critiques ;

* *marge totale de la tâche* (x_i, x_j) *:* à partir de la date t_i, on peut retarder le début de la tâche (x_i, x_j) de $t_j^* - t_i - t_{ij}$ sans augmenter la durée totale des travaux.

L'intérêt de la **méthode P. E. R. T.** *(Program Evaluation Research Task)* réside en ce qu'elle permet de déterminer les tâches critiques. Il est alors possible de chercher à diminuer la durée totale du projet en tentant de décomposer les tâches critiques en opérations dont certaines pourront être réalisées simultanément avec d'autres tâches. Dans l'exemple, si on sépare la tâche « chauffage » en deux opérations : pose des radiateurs et des tuyaux d'une part, et construction de la cave, pose de la chaudière d'autre part (tâches (x_1, x'_3) et (x_1, x''_3)), on obtient un nouveau graphe, ci-dessous, (sachant que l'on peut réaliser les peintures intérieures, dès que les radiateurs et les tuyaux sont posés) :

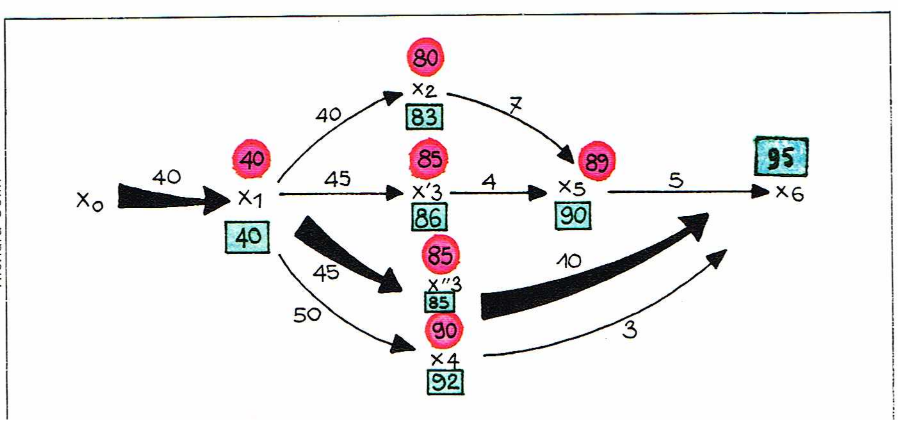

Richard Colin

La durée totale du projet a été réduite à 95 jours. Mentionnons enfin qu'il existe d'autres méthodes pour déterminer le chemin critique d'un graphe : la méthode des potentiels, qui ne nécessite pas le tracé du graphe, ou bien encore la méthode de Bellman qui repose sur la technique et les principes de la programmation dynamique.

Problèmes hamiltoniens

Soit G = (X, **U**) un graphe comprenant n sommets. On dit qu'un *chemin* $\mu = [x_1, x_2, ..., x_n]$ est *hamiltonien* s'il passe une fois et une seule par chaque sommet du graphe. De même, on dira qu'un *circuit* $\mu = [x_1, x_2, ..., x_1]$ est hamiltonien s'il passe une fois et une seule par chaque sommet du graphe. Dans un graphe *simple*, on définit de même une *chaîne* hamiltonienne ou un *cycle* hamiltonien.

Exemple : W. Hamilton proposa en 1859 le jeu suivant : soit 20 villes réparties sur le globe terrestre : $a, b, c, ..., t$ que l'on représente pour simplifier par les sommets d'un dodécaèdre régulier (polyèdre à 12 faces pentagonales et à 20 sommets). On se propose de passer une fois et une seule par chacune de ces villes et de revenir à son point de départ en utilisant les seules arêtes du dodécaèdre. Ce jeu revient à chercher un cycle hamiltonien par le graphe de la figure ci-contre dans la marge (le problème étudié par Euler dans les 7 ponts de Kœnigsberg est un problème analogue).

En recherche opérationnelle, on est souvent amené à résoudre des problèmes d'ordonnancement : un certain nombre de tâches sont à réaliser : on construit alors le graphe dont les sommets représentent les tâches : deux sommets x_i et x_j sont alors reliés par un arc s'il est possible de réaliser x_i *avant* x_j. Un ordonnancement des tâches est ainsi représenté par un chemin hamiltonien. La recherche d'un tel chemin (d'un circuit, d'une chaîne ou d'un cycle) est ce que l'on appelle un problème hamiltonien.

Nous nous restreindrons ici à l'étude des cycles hamiltoniens dans un graphe *simple*. Il s'agit à ce jour d'un problème ouvert puisque l'on n'a pas encore réussi à trouver des conditions nécessaires et suffisantes d'existence d'un cycle hamiltonien. L'on ne possède que des conditions suffisantes qui toutes procèdent de la remarque suivante : soit x un sommet d'un graphe, on appelle degré (et on note $d(x)$) le nombre d'arcs incidents (intérieurement et extérieurement) au sommet x. Il semble intuitif que, plus les degrés sont élevés, plus y il a de chances pour que le graphe admette un cycle hamiltonien. Depuis Dirac (1952), on a vu apparaître dans la littérature plusieurs théorèmes d'existence utilisant la séquence des degrés de tous les sommets du graphe.

Le théorème le plus récent et en un certain sens le plus général (c'est-à-dire qui réduit tous les précédents à des corollaires) date de 1971 et est dû au mathématicien V. Chvátal.

Théorème de Chvátal

Soit un graphe simple G *à* n *sommets,* $n \geqslant 3$*, dont la suite des degrés rangés par ordre non décroissant* $d_1 \leqslant d_2 \leqslant ... \leqslant d_n$ *vérifie la propriété : pour tout* $k \leqslant \frac{n}{2}$ *on a l'implication suivante :*

$$d_k \leqslant k \Rightarrow d_{n-k} \geqslant n - k.$$

Alors le graphe G *admet un cycle hamiltonien.*

Les deux théorèmes suivants sont antérieurs à celui de Chvátal. Ils s'en déduisent désormais très facilement.

Théorème d'Ore (1960)

Soit G *un graphe simple, à* n *sommets* $(n \geqslant 3)$. *Si pour tout couple de sommets* (x, y) *non adjacents on a :*

$$d(x) + d(y) \geqslant n,$$

alors le graphe admet un cycle hamiltonien.

En effet, rangeons les sommets par ordre de degrés non décroissants. Si un point x_k vérifie $d_k = d(x_k) \leqslant k \leqslant \frac{n}{2}$ alors x_k possède au plus k voisins, et il y a donc $n - k$ sommets non adjacents à x_k dont le degré est, d'après l'hypothèse, supérieur ou égal à $n - k$, soit :

$$d_{n-k} \geqslant n - k.$$

D'où le résultat en appliquant le théorème de Chvátal.

Théorème de Dirac (1952)

Soit G *un graphe à n sommets,* $n \geqslant 3$, *tel que pour tout sommet x* $d(x) \geqslant \frac{n}{2}$, *alors ce graphe admet un cycle hamiltonien.* Ceci découle du théorème d'Ore.

Autres problèmes — autres méthodes

Conjecture des quatre couleurs

Est-il possible de colorier toute carte de géographie avec quatre couleurs, de sorte que deux régions ayant une ligne de frontière commune soient de différentes couleurs ? Ce problème célèbre n'a toujours pas reçu de solution, mais il a suscité l'intérêt des mathématiciens. En fait, il s'agit d'un problème de graphe que l'on peut formuler ainsi : on appelle *nombre chromatique* d'un graphe G le plus petit nombre de couleurs nécessaires pour colorier les sommets de sorte que deux sommets adjacents distincts ne soient pas de même couleur. On le désigne par γ (G). Un graphe planaire est un graphe que l'on peut représenter sur un plan sans que deux arcs quelconques puissent se couper ailleurs qu'en un sommet.

Il existe de très nombreux travaux sur le sujet depuis 1875. Mentionnons les résultats les plus récents :

- Un graphe planaire qui ne contient pas de cycles de longueur 3 est coloriable avec trois couleurs (Grünbaum 1963).
- Si G est un graphe planaire, alors γ (G) $\leqslant$ 4.

Noyau d'un graphe

Soit un graphe G (X, Γ), on dit qu'un sous-ensemble S $\subset$ X est un *noyau* s'il vérifie les deux propriétés :

(1) $x \in S \quad \Gamma(x) \cap S = \varnothing$
(2) $x \notin S \quad \Gamma(x) \cap S \neq \varnothing$

ce graphe (ci-dessous) admet deux noyaux $\{a, c\}$ et $\{b, d\}$.

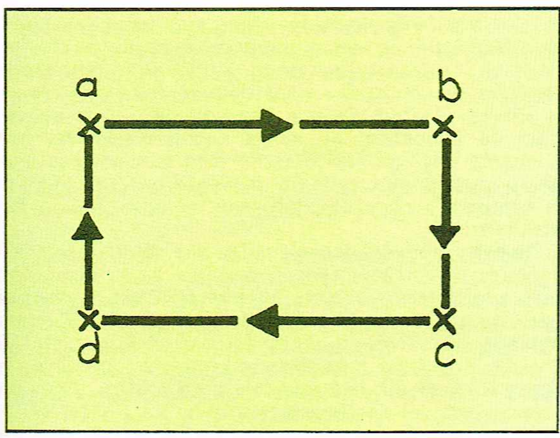

Richard Colin

Un graphe peut représenter un ordre partiel sur X,

$$x \leqslant y \Leftrightarrow y \in \Gamma(x)$$

S est donc alors un ensemble d'éléments non comparables entre eux tels que tout élément pris en dehors soit préféré par au moins un élément de S.

Cette notion permet de résoudre certains jeux (jeux dits de Nim), notamment le jeu popularisé par le film d'A. Resnais *l'Année dernière à Marienbad.* En associant à ce jeu un certain graphe, on montre que le joueur qui gagne est celui qui parvient à être une fois dans le noyau et à y revenir à chaque fois (c'est pour cela que celui qui joue en second peut gagner !).

BIBLIOGRAPHIE

BERGE C., *Graphes et Hypergraphes,* Dunod, 1973. - FORD L.R. et FULKERSON D.R., *Flow in Networks,* Princeton Press, 1962; traduction française, Gauthier-Villars, 1967. - KAUFMAN A., *Introduction à la combinatoire en vue des applications,* Dunod, 1969. - ROY B., *Algèbre moderne et Théorie des graphes,* t. 1 et t. 2, Dunod, 1970. - SACHE A., *la Théorie des graphes,* « Que sais-je ? », P.U.F., 1974.

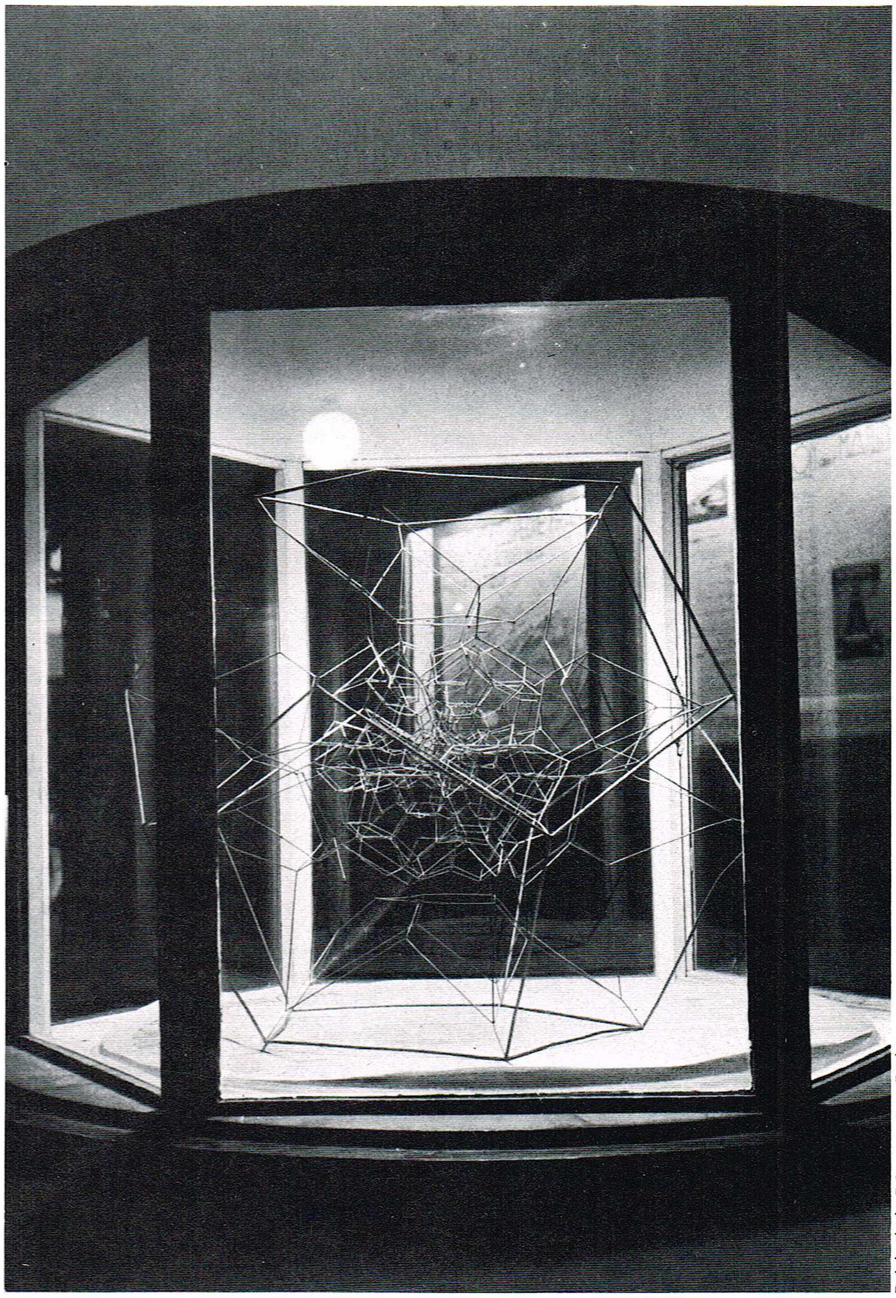

Palais de la Découverte - Paris

▲ ***Représentation à trois dimensions d'un solide à quatre dimensions.***

ALGÈBRE LINÉAIRE

L'algèbre linéaire est, dans le cadre actuel de son développement, une synthèse de plusieurs courants. Dans des domaines aussi divers que le calcul sur les nombres, la résolution des équations, les problèmes de géométrie classique (à résoudre tant par des méthodes synthétiques qu'analytiques), les équations différentielles, etc., tous les mathématiciens ont eu à traiter des problèmes linéaires et ont contribué à l'évolution de la méthode mathématique vers ce que l'on peut appeler la *pensée linéaire.*

Car il s'agit bien d'une forme de pensée mathématique, et il est clair maintenant que le concept de linéarisation d'un problème est très fécond. Les propriétés abondantes et des plus diversifiées que l'on peut trouver pour tout ce qui satisfait au cadre linéaire donnent à toute approximation de cette forme un très grand intérêt.

Il faut voir que cette notion est des plus anciennes et que, depuis la règle de trois jusqu'à la géométrie différentielle, en passant par la linéarisation de la théorie de Galois ou même l'étude des fonctions elliptiques, on a toujours — plus ou moins consciemment — résolu des problèmes linéaires.

On peut mentionner que les applications couvrent tous les domaines.

— Sur le plan local, car, depuis l'idée classique de la pente de la tangente à une courbe, égale à la valeur de la dérivée, jusqu'à la notion d'application linéaire dérivée dans un espace de Banach, on a approximé une fonction par une application linéaire ou affine (ainsi encore des courbes définies comme enveloppes de leurs tangentes).

— Sur le plan global, car on cherche souvent à mettre un problème dans un cadre linéaire : c'est par exemple la notion moderne de distribution qui généralise celle de fonction, ou mieux encore celle de mesure.

De Grassmann (1809-1877) à Hilbert (1862-1943), de nombreux mathématiciens ont contribué à l'élaboration formelle de ce puissant outil. On peut ainsi citer : Möbius (1790-1868), Hamilton (1805-1865), Sylvester (1814-1897), Weierstrass (1815-1897), Cayley (1821-1895), Hermite (1822-1901), Kronecker (1823-1891), Lie (1842-1899), et bien d'autres encore.

Description d'un espace vectoriel — Bases

La structure d'un espace vectoriel est déterminée par les opérations que l'on peut réaliser sur ses éléments, c'est-à-dire le produit par un élément du corps de base (scalaire) et l'addition. L'associativité de l'addition permet de combiner encore plus globalement les éléments d'un espace vectoriel E par l'intermédiaire d'éléments du corps de base K. Soit $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite d'éléments de E; on appelle *combinaison linéaire* des x_n toute expression de la forme $\sum_{n \in \mathbb{N}} \alpha_n x_n$ où $\alpha_n \in K$, et telle que seulement un nombre fini des α_n soit différent de zéro. Dans ce cas, on a en fait une somme finie de termes, tous éléments de E. Le résultat a donc bien un sens et est un élément de E Notre propos, maintenant, va être de montrer comment il est possible de décrire tous les éléments de E — et « aux moindres frais » (c'est-à-dire avec le minimum de choses données *a priori*) — par cette construction, grâce à la structure d'espace vectoriel sur E.

Soit donc un ensemble d'éléments de E appelé S. On désigne par $\{S\}$ l'ensemble des combinaisons linéaires d'éléments de S (il faut bien noter que, même si S ne contient qu'un nombre fini d'éléments, $\{S\}$ peut être infini même non dénombrable dès lors que Card K n'est pas fini), qui est bien évidemment un sous-espace vectoriel de E : on dit que S *engendre* $\{S\}$. On peut remarquer que $\{S\}$ est le plus petit des sous-espaces vectoriels de E qui contiennent S. Dans le cas où $\{S\} = E$, on dit que S est un *système de générateurs* de E, ou que E est engendré par S (fig. 1).

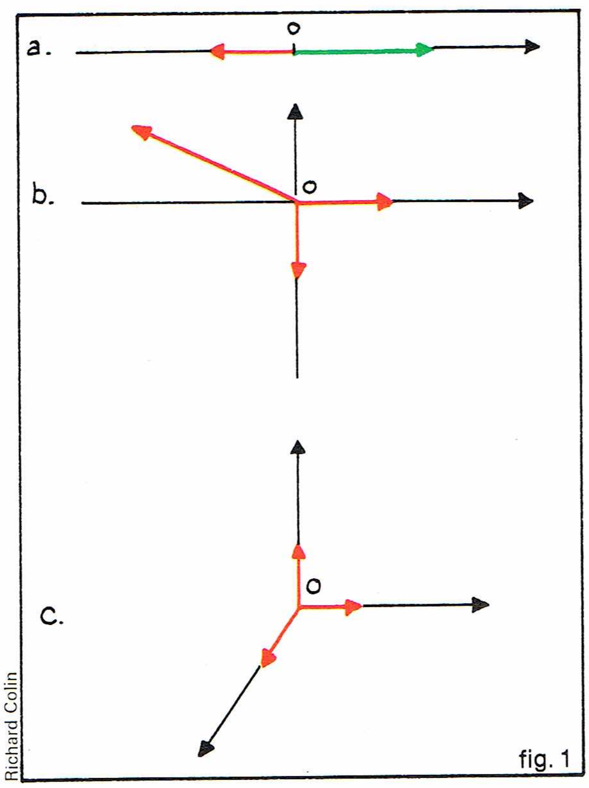

Richard Colin

▶ **Figure 1** — ***dans ces trois dessins, on montre successivement : a, un système générateur de 2 éléments pour $\mathbb{R}$ (espace vectoriel sur lui-même); b, un système générateur de 3 éléments pour $\mathbb{R}^2$ (espace vectoriel sur $\mathbb{R}$); c, un système générateur de 3 éléments pour $\mathbb{R}^3$ (espace vectoriel sur $\mathbb{R}$).***

D'autre part, il est clair que si l'on ajoute à S des éléments qui sont combinaisons linéaires d'éléments de S, on ne modifie pas $\{S\}$. Un système générateur de E reste donc générateur si on le complète par d'autres éléments de E. La question est alors de savoir s'il est possible d'en enlever mais tout en laissant à S son caractère générateur; elle est déjà presque résolue d'après ce que nous avons déjà dit puisqu'un élément « semble être en trop » dans S s'il est combinaison linéaire d'autres éléments de S.

On définit alors un *système libre* ou *indépendant linéairement* comme un système tel que la seule combinaison linéaire de ses éléments qui soit nulle soit celle où tous les scalaires sont nuls; soit :

$$\alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + ... + \alpha_p x_p \Rightarrow \alpha_1 = \alpha_2 = ... = \alpha_p = 0$$

Dans le cas contraire — le système est dit *lié* ou *linéairement dépendant* — on aurait une combinaison linéaire nulle :

$$\alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + ... + \alpha_p x_p = 0$$

où l'un, au moins, des α_i serait non nul, soit par exemple α_k, et l'on pourrait écrire :

$$x_k = \frac{-1}{\alpha_k} (\alpha_1 x_1 + ... + \alpha_{k-1} x_{k-1} + \alpha_{k+1} x_{k+1} + ... + \alpha_p x_p)$$

donc x_k serait combinaison linéaire des autres x_i.

On doit remarquer tout de suite qu'un système libre reste libre si on lui ôte certains de ses éléments, mais par contre peut perdre ce caractère si on lui en ajoute. C'est donc la situation opposée à celle des systèmes générateurs.

Si maintenant un système B, libre dans E, est tel que $\{B\} = E$ (donc s'il est générateur aussi), on dit que B est une *base* de E.

Lorsque l'on peut trouver une famille finie S, génératrice de E ($\{S\} = E$), on dit que E est de *dimension finie*. Dans le cas contraire, on dit que E est de *dimension infinie*, ce que l'on note $\dim_K E = +\infty$.

Il est très facile de montrer que tout espace vectoriel de dimension finie admet une base; toutefois ce résultat ne peut être étendu au cas de la dimension infinie que par une démonstration assez délicate faisant intervenir le lemme de Zorn. Ce que l'on voit déjà, c'est qu'une base de E contient au moins autant d'éléments que n'importe quel système libre, et n'en contient pas plus qu'un quelconque système générateur. C'est bien là le compromis du « descriptif aux moindres frais » qui était cherché.

De cette propriété découle le fait que deux bases quelconques d'un même espace vectoriel E, de dimension finie, ont le même nombre d'éléments. C'est ce nombre que l'on appelle la *dimension* de E, notée $\dim_K E$ (cette notation, qui précise le corps de base de E, se simplifie en dim E lorsque aucune confusion n'est possible, le corps K ayant été fixé une fois pour toutes). Pour un espace vectoriel de dimension infinie, deux bases quelconques sont équipotentes, c'est-à-dire qu'il existe une bijection de l'une sur l'autre. Un exemple simple montre l'influence du corps K sur la dimension de E : dans l'espace vectoriel $\mathbb{R}^2$ sur le corps $\mathbb{R}$, les deux vecteurs $e_1 = (1, 0)$ et $e_2 = (0, 1)$ forment un système libre, car la combinaison linéaire

$$\alpha_1 e_1 + \alpha_2 e_2 = \alpha_1 \cdot (1, 0) + \alpha_2 \cdot (0, 1) = (\alpha_1, 0) + (0, \alpha_2) = (\alpha_1, \alpha_2)$$

ne peut être égale au vecteur nul (0, 0) que si $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$; d'autre part, ils forment un système générateur car, si (x, y) est un élément quelconque de $\mathbb{R}^2$, on a bien

$$(x, y) = x e_1 + y e_2$$

La base ainsi formée est dite *base canonique* de $\mathbb{R}^2$ et on a $\dim_{\mathbb{R}} \mathbb{R}^2 = 2$. Toutefois, on sait que $\mathbb{R}^2$ possède une structure de corps, donc d'espace vectoriel sur lui-même, si l'on y définit le produit :

$$(\alpha, \beta) \cdot (x, y) = (\alpha x - \beta y, \alpha y + \beta x)$$

Dans ces conditions, tout vecteur de $\mathbb{R}^2$ est le produit d'un vecteur fixe, à composantes non nulles, de $\mathbb{R}^2$ par un élément (cette fois pris comme scalaire) de $\mathbb{R}^2$. Puisqu'un système formé d'un seul vecteur non nul est libre, on en déduit que toute base de $\mathbb{R}^2$, espace vectoriel sur lui-même, est formée par un seul élément et que $\dim_{\mathbb{R}^2} \mathbb{R}^2 = 1$.

Les notions de base et de dimension sont donc liées à la structure de l'espace vectoriel considéré E (donc entre autres au corps de base choisi), et non seulement aux éléments, non structurés, de E. La propriété fondamentale d'une base est donnée par le théorème qui suit.

Théorème. Pour tout élément x d'un espace vectoriel E sur un corps K, muni d'une base B, il existe *une et une seule* combinaison linéaire d'éléments de B, à coefficients dans K, qui soit égale à x. (On dira que tout élément de E se décompose de façon unique selon les vecteurs de base.)

En effet, B étant générateur, une telle combinaison linéaire existe. D'autre part, s'il en existait deux :

$\sum_{i \in I} \alpha_i e_i = x$ et $\sum_{i \in I} \beta_i e_i = x$ où seul un nombre fini parmi les α_i comme parmi les β_i ne sont pas nuls, on pourrait écrire :

$$0 = x - x = \sum_{i \in I} (\alpha_i - \beta_i)\, e_i = \sum_{i \in I} \gamma_i e_i$$

où seul un nombre fini de coefficients γ_i est différent de zéro. Donc la combinaison linéaire $\sum_{i \in I} \gamma_i e_i$ du système libre formé par les vecteurs e_i, est nulle ; ce qui n'a lieu que si tous les termes γ_i sont nuls. Par conséquent, $\alpha_i = \beta_i$ pour tout $i \in I$. Les deux décompositions ne peuvent donc être différentes si B est libre, donc *a fortiori* si c'est une base.

Le résultat suivant est couramment utilisé pour construire une base.

Théorème (base incomplète). Soit L un système libre de E et G une partie génératrice de E ; alors il est possible de construire une base de E en « complétant » L par une partie de G.

Il est donc bien clair que, de tout système générateur, on peut extraire au moins une base.

Ce théorème est très aisé à démontrer en dimension finie mais le lemme de Zorn est encore une fois nécessaire si l'on veut étendre ce résultat au cas de la dimension infinie. On en déduit qu'un sous-espace vectoriel V d'un espace vectoriel E (sur un corps K) de dimension finie est aussi de dimension finie, et l'on a :

$$\dim_K V \leqslant \dim_K E\,;$$

l'égalité ne peut avoir lieu que si V = E (et l'on pose par convention que la dimension de l'espace vectoriel $\{0\}$ est nulle).

L'intersection de deux sous-espaces vectoriels est un sous-espace vectoriel, mais leur réunion n'en est pas un en général. Plus exactement, on peut définir le sous-espace vectoriel engendré par la réunion de deux sous-espaces vectoriels U et V, c'est-à-dire l'ensemble des combinaisons linéaires d'éléments appartenant soit à U, soit à V. Ce sous-espace se nomme somme de U et V et se note U + V (il est bien formé d'éléments de la forme $u + v$ où $u \in U$ et $v \in V$). Dans le cas particulier où $U \cap V = 0$, on dit que la somme est directe et l'on note $U \oplus V$.

Ainsi, l'intersection dans $\mathbb{R}^3$ de deux plans passant par l'origine est une droite (s'ils ne sont pas confondus) passant par O (*fig.* 2) ; l'intersection d'un plan passant par O et d'une droite passant par O, non contenue dans ce plan, est $\{O\}$; si la droite est incluse dans le plan, l'intersection est égale à cette droite (*fig.* 3). La réunion de deux plans, par contre, n'est pas un sous-espace vectoriel. Dans $\mathbb{R}^2$, la réunion de deux droites n'est pas un sous-espace vectoriel, comme le montre la règle du parallélogramme (*fig.* 4). La somme de deux plans sécants de $\mathbb{R}^3$ n'est autre que $\mathbb{R}^3$; mais cette somme n'est pas directe. La somme d'un plan et d'une droite perpendiculaire à ce plan en O (*fig.* 5) est encore $\mathbb{R}^3$, et cette somme est directe.

Dans le cas où $E = U \oplus V$, une base de E est formée par la réunion d'une base de U et d'une base de V, et si la dimension de E est finie, on a :

$$\dim_K E = \dim_K U + \dim_K V.$$

Cette propriété se généralise par la formule :

$\dim_K (U + V) = \dim_K U + \dim_K V - \dim_K (U \cap V)$ sur laquelle on ne s'étendra pas ici, mais que l'on peut vérifier sur les exemples qui suivent.

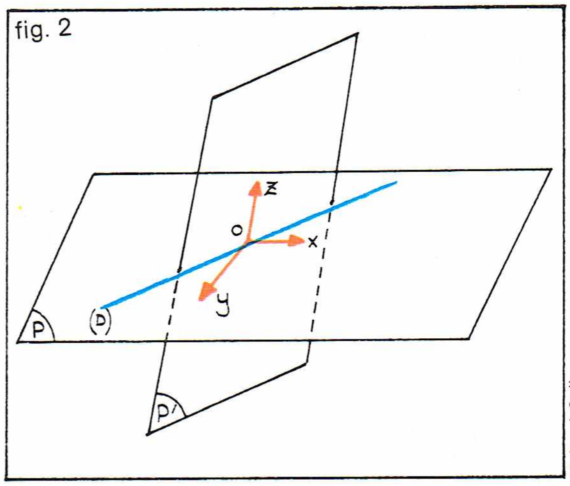

Richard Colin

◀ **Figure 2 :** ***intersection* (D) *du plan* (P) *défini par* Ox *et* Oy *et d'un plan* (P') *passant par* Oz.**

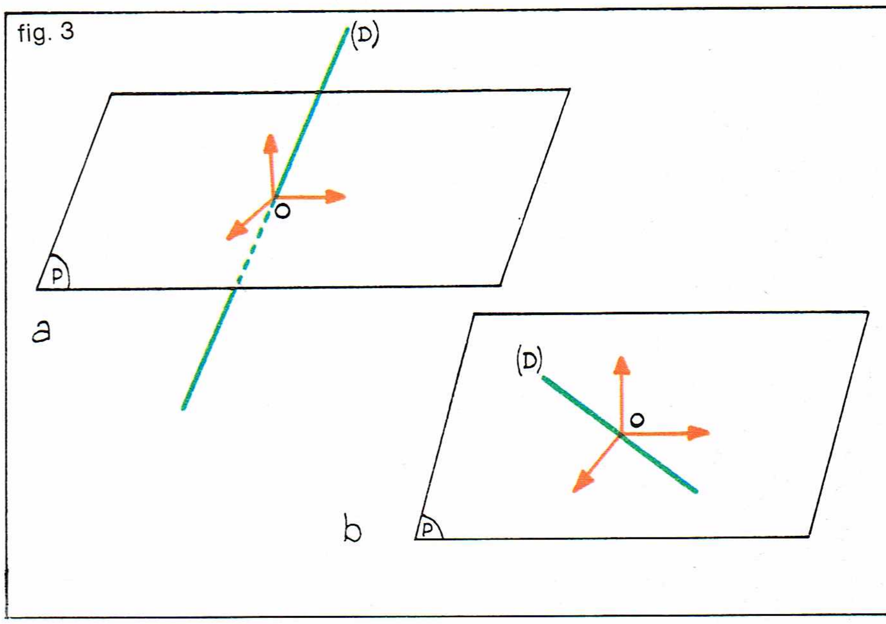

Richard Colin

▲ **Figure 3 :** ***intersection d'un plan* (P) *et d'une droite* (D) — a, (D) *non contenue dans* (P) ; b, (D) *contenue dans* (P).**

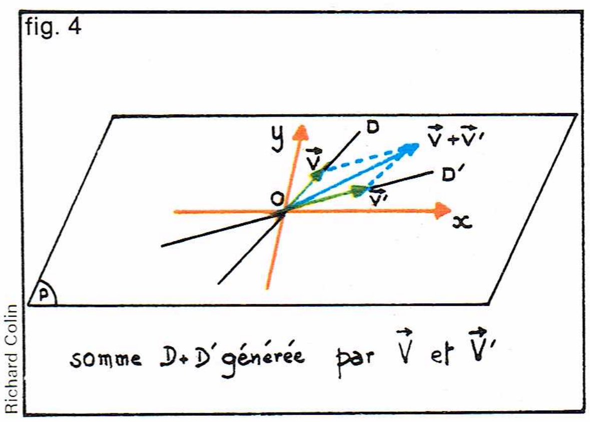

Richard Colin

◀ **Figure 4 :** ***la règle du parallélogramme montre que la somme* D + D' *est distincte de la réunion* D ∪ D'.**

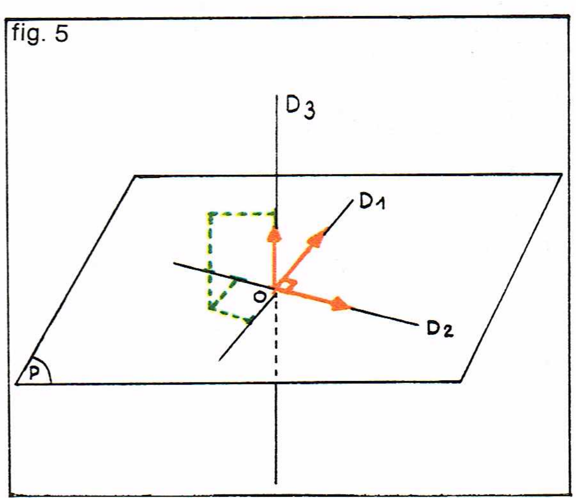

Richard Colin

◀ **Figure 5 :** ***l'espace*** $\mathbb{R}^3$ ***est obtenu comme somme directe du plan* (P) *et de la droite* D3.**

Ainsi, soit P le plan « horizontal » de $\mathbb{R}^3$, soit :

$$P = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \quad \text{tels que } z = 0\}$$

et D_3 la droite « verticale », soit

$$D_3 = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \quad \text{tels que } x = 0 \text{ et } y = 0\}$$

on a bien $\mathbb{R}^3 = P \oplus D_3$; en désignant par D_1, D_2, D_3 les trois axes orthonormés usuels, on a bien $P^2 = D_1 \oplus D_2$ et évidemment $\mathbb{R}^3 = D_1 \oplus D_2 \oplus D_3$ (*fig.* 6).

▼ **Figure 6 : cf.** ***développement dans le texte ci-contre.***

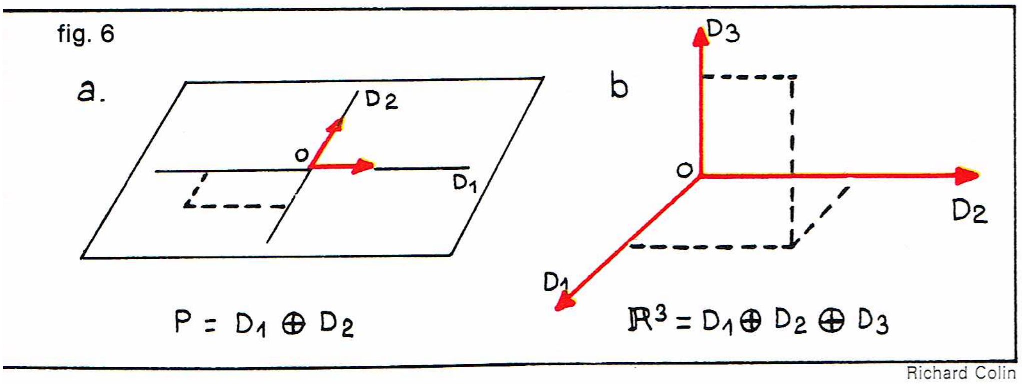

Richard Colin

On a jusqu'à présent, dans ce paragraphe, utilisé les ensembles $\mathbb{R}^2$, $\mathbb{R}^3$ et plus généralement $\mathbb{R}^n$ comme exemples. Ce n'est pas le fait d'un simple hasard : pour l'étude des espaces vectoriels de dimension finie, ces ensembles jouent un rôle fondamental que le résultat qui suit va expliciter.

Théorème. Tout espace vectoriel réel E, de dimension finie n, est isomorphe à l'espace vectoriel — sur $\mathbb{R}$ — $\mathbb{R}^n$.

Ce résultat fondamental permet de comprendre les limites des concepts utilisés selon qu'on s'intéresse à des espaces vectoriels de dimension finie ou infinie. Il se généralise : tout espace vectoriel E sur un corps K tel que $\dim_K E = n$ est isomorphe à K^n. Il provient du fait qu'un isomorphisme g d'espaces vectoriels se doit de « retranscrire » les lois additive et multiplicative, soit :

$$g\,(X + Y) = g\,(X) + g\,(Y)$$
$$g\,(a \cdot X) \;= a \cdot g\,(X)$$

donc l'image d'un vecteur quelconque de E, par g, est connue dès lors que l'on connaît les images des vecteurs d'une base donnée de E : si $v_1, v_2, ..., v_n$ désigne la base choisie dans E, tout vecteur $X \in E$ s'écrit : $X = \sum_{i=1}^{i=n} \alpha_i v_i$,

et alors

$$g\,(X) = \sum_{i=1}^{i=n} g\,(\alpha_i v_i) = \sum_{i=1}^{i=n} \alpha_i g\,(v_i)\,;$$

la connaissance de

$$\{g\,(v_1), g\,(v_2), ..., g\,(v_n)\}$$

permet alors, si l'on se donne $\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_n$, donc X, de déterminer g (X). Il suffit donc de pouvoir faire se correspondre, de manière biunivoque, les vecteurs d'une base de E et ceux d'une base de $\mathbb{R}^n$, ce qui est réalisable puisqu'il y en a n exactement de part et d'autre.

L'isomorphisme étant une relation d'équivalence, on peut écrire : deux espaces vectoriels de même dimension sont « identiques, à un isomorphisme près ». Ceci veut dire qu'ils sont en fait une seule et même structure d'espace vectoriel.

C'est à H. Grassmann, mathématicien allemand, que l'on doit le passage, décisif pour le développement de l'algèbre linéaire, des espaces de dimension 1, 2 et 3 — visualisables — à ceux de dimension n, de façon axiomatique claire.

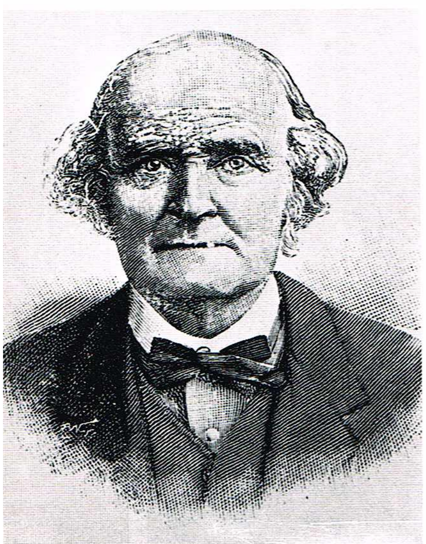

Collection Viollet

▲ ***Le mathématicien anglais*** **Arthur Cayley** ***(1821-1895).***

Applications linéaires

On vient d'utiliser une application conservant les structures (donc un homomorphisme) qui, de plus, était bijective. Ce sont ces applications, conservant la structure linéaire (en ce sens que l'image d'une combinaison linéaire est la combinaison linéaire des images), qui permettent de donner un sens global au calcul matriciel tel que Cayley le formula, et à ses développements fondamentaux dus à Hermite et à Sylvester. On les appelle *applications linéaires*, et ce sont donc des applications g d'un espace vectoriel E dans un espace vectoriel F, sur un même corps K, vérifiant :

$$g\,(ax + by) = a\,g(x) + b\,g(y)$$

pour tous $x \in E$, $y \in E$, $a \in K$ et $b \in K$.

Quelques idées générales sur ces applications vont permettre de les utiliser, pour la résolution des systèmes d'équations linéaires entre autres.

On voit tout d'abord que $g\,(x - x) = g\,(x) - g\,(x)$, donc $g\,(0) = 0$. Mais il peut exister d'autres éléments de E ayant 0 pour image. L'ensemble de ces éléments est un sous-espace vectoriel de E, que l'on appelle *noyau* de g, ce qui se note Ker g (de la racine celtique « kernel »). On a toujours $0 \in \text{Ker}\, g$; si $\{0\} = \text{Ker}\, g$, alors g est une injection, car, si $g\,(x) = g\,(y)$, on a

$$g\,(x - y) = g\,(x) - g\,(y) = 0,$$

donc $x - y \in \text{Ker}\, g$, d'où $x - y = 0$, soit $x = y$. Cette propriété, qui permet en fait de « translater » toutes les autres, est bien particulière aux applications linéaires.

Pour étudier si l'on a une surjection, on doit considérer l'ensemble des points de F qui sont images d'un élément de E au moins. On introduit alors l'ensemble des points-images, soit l'image de g, que l'on note Im g, qui est un sous-espace vectoriel de F. Ces ensembles, lorsque E est de dimension finie, sont liés par la relation fondamentale :

$$\dim_K E = \dim_K \text{Ker}\, g + \dim_K \text{Im}\, g.$$

En particulier, si g est une application linéaire de E dans lui-même (ou endomorphisme), on obtient le résultat :

$$g \text{ injective} \Leftrightarrow g \text{ surjective} \Leftrightarrow g \text{ bijective}$$

que l'on peut même étendre aux applications de E dans F, pourvu que les deux espaces vectoriels soient de dimensions finies.

Lorsque F = K, on dit que l'on a une forme linéaire ; ceci a bien un sens puisque K est un espace vectoriel sur lui-même. Dans ce cas, le sous-espace Im g est inclus dans K ; il est donc de dimension 0 ou 1, et le noyau de g, si E est de dimension finie, est donc de dimension n ou $n - 1$. Dans le premier cas, la forme linéaire est la forme nulle (tout vecteur a pour image 0) ; et dans le second cas, on dit que le noyau est un hyperplan.

L'ensemble des applications linéaires de E dans F est un espace vectoriel sur le même corps, lorsqu'on y définit les opérations d'addition et de produit par un scalaire usuelles ; on le note $\mathcal{L}$ (E, F). Lorsque E = F, la composition des applications lui donne une structure d'algèbre, et on le note $\mathcal{L}$ (E). Enfin, si F = K, on obtient l'ensemble des formes linéaires sur E, que l'on nomme *dual* de E, noté E*.

On va regarder maintenant comment l'on peut caractériser un élément quelconque de $\mathcal{L}$ (E, F), et l'on s'y intéressera plus spécialement pour les espaces vectoriels E et F de dimension finie.

Une base $B = \{e_i\}_{i \in I}$ de E étant donnée, tout élément $x \in E$ possède une décomposition unique $x = \sum_{i \in I} \alpha_i e_i$, selon cette base (et où seul un nombre fini de termes ne sont pas nuls). Soit $g \in \mathcal{L}$ (E, F), alors, en raison des conditions de linéarité de g, on a :

$$\varphi\,(x) = \sum_{i \in I} \alpha_i\, \varphi(e_i)$$

La connaissance de x équivaut à celle de la suite $(\alpha_i)_{i \in I}$, donc $g\,(x)$ sera entièrement connu par la donnée de tous les éléments $g\,(e_i)$, images des vecteurs de la base B. Ceci revient à dire qu'une application linéaire est déterminée totalement par les images des vecteurs d'une base de l'espace de départ. De cette idée découle toute la théorie des matrices, introduite par Sylvester, et dont les développements sont immenses.

Matrices — Calcul matriciel

L'utilisation des tableaux rectangulaires de nombres est connue depuis très longtemps, et de nos jours, il n'est pratiquement pas de domaine (où les nombres jouent un rôle) qui ne les utilise. Toutefois, ce n'est qu'au XIXe siècle que le mathématicien anglais Arthur Cayley précisa la

notion de matrice comme étant une forme de représentation, disons un « modèle », pour une transformation linéaire. Il en déduisit un exposé clair du calcul matriciel, lequel a pour but essentiel de simplifier toutes les écritures ayant trait aux opérations sur des applications linéaires. Cette justification — sur des bases mathématiques claires — de l'utilisation des tableaux de nombres a permis tous les plus fructueux développements que l'on connaît actuellement.

Soit deux espaces vectoriels réels ou complexes E et F, de dimensions finies n et p (ce que nous supposerons dans tout ce paragraphe) ; une base $B_E = \{e_1, e_2, ..., e_n\}$ de E, une base $B_F = \{f_1, f_2, ..., f_p\}$ de F et $g \in \mathcal{L}$ (E, F). Alors, pour tout élément $x = \sum_{j=1}^{j=n} \alpha_j e_j$, on a $\varphi(x) = \sum_{j=1}^{j=n} \alpha_j\, g(e_j)$. Puisque $g(e_j) \in$ F pour toutes les valeurs de j, chacun de ces vecteurs possède une décomposition dans la base B :

$$g(e_j) = \sum_{i=1}^{i=p} \beta_{ij} f_i$$

Cette fois, l'écriture comporte deux indices pour montrer que, pour chaque élément $g(e_j)$, il existe une suite de p coefficients. On dispose par conséquent de $n \times p$ nombres réels ou complexes β_{ij} qui définissent entièrement tous les vecteurs $g(e_1)$, $g(e_2)$, ..., $g(e_n)$, donc l'application g elle-même. Très exactement, β_{ij} est la i-ième composante du vecteur $g(e_j)$, c'est-à-dire sa coordonnée selon le vecteur f_i de la base B_F. Par convention, en rangeant colonne par colonne les composantes des vecteurs $g(e_j)$, on obtient la *matrice* de l'application g relativement aux bases B_E et B_F :

$$\begin{pmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} \ldots \beta_{1j} \ldots \beta_{1n} \\ \beta_{21} & \beta_{22} \ldots \beta_{2j} \ldots \beta_{2n} \\ \vdots & \vdots \quad\; \vdots \\ \beta_{i1} & \beta_{i2} \ldots \beta_{ij} \ldots \beta_{in} \\ \vdots & \vdots \quad\; \vdots \quad\; \vdots \\ \beta_{p1} & \beta_{p2} \ldots \beta_{pj} \ldots \beta_{pn} \end{pmatrix}$$

On dit que l'on a une matrice (p, n), ou encore à p lignes et n colonnes, et l'on note, en abrégé, cette matrice :

$$(\beta_{ij})_{\substack{i=1,2,...,p \\ j=1,2,...,n}}$$

(n et p sont les dimensions de la matrice).

Voici quelques matrices remarquables dans le cas E = F (les matrices sont alors des matrices carrées), on identifiera cet espace vectoriel, grâce à l'isomorphisme vu plus haut, à $\mathbb{R}^n$ (ou $\mathbb{C}^n$ dans le cas d'un espace vectoriel complexe) muni de sa base canonique.

La matrice de $g : x \rightarrow 0$ est donc $(0)_{\substack{i=1,2,...,n \\ j=1,2,...,n}}$ (matrice nulle).

La matrice de $g : x \rightarrow x$ est alors la matrice identité où seuls ne sont pas nuls — et valent 1 — les éléments de la diagonale, c'est-à-dire ceux pour lesquels les deux indices sont égaux.

La matrice de $g : x \rightarrow \alpha x$, où α est un scalaire, est $\begin{pmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & \alpha \end{pmatrix}$.

La rotation d'angle θ autour de l'origine, application de $\mathbb{R}^2$ dans $\mathbb{R}^2$, est représentée par la matrice :

$$\begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}$$

Richard Colin

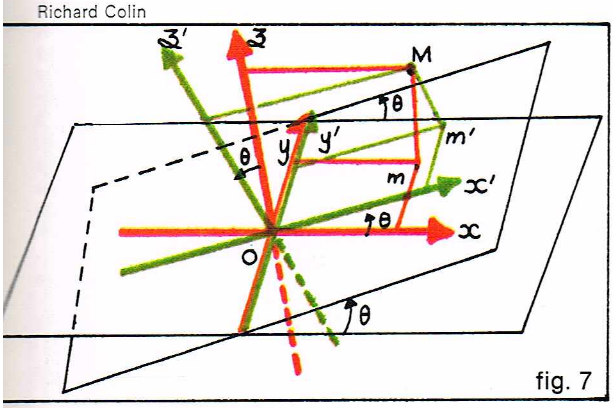

◀ **Figure 7 : *rotation d'angle θ autour de l'axe* Oy.**

La rotation d'angle θ, autour de l'axe Oy (*fig.* 7), application de $\mathbb{R}^3$ dans $\mathbb{R}^2$, admet pour matrice :

$$\begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix}$$

Soit $A = (a_{ij})_{\substack{i=1...p \\ j=1...n}}$ une matrice (p, n) et

$$X = \sum_{i=1}^{n} x_i e_i \in E.$$

On définit le produit AX pour que le résultat soit l'image de X par l'application linéaire : $g : E \rightarrow F$ dont A est la matrice relativement aux bases canoniques. Puisque :

$$g(X) = \sum_{i=1}^{p} x_i\, g(e_i), \quad \text{on a } g(X) = \sum_{i=1}^{n} x_i \sum_{j=1}^{p} a_{ji} f_j$$

d'après la définition d'une matrice. On a donc un vecteur à p composantes dont la j-ième (le facteur de f) vaut exactement $\sum_{i=1}^{n} x_i a_{ji}$. Or la j-ième ligne de A s'écrit : $(a_{1j}, a_{2j}, ..., a_{nj})$, et si l'on définit le produit de cette ligne par le vecteur-colonne des x_i comme étant égal à :

$$x_1 a_{1j} + x_2 a_{2j} + ... + x_n a_{nj}$$

(somme des produits de termes se correspondant), alors le produit de la matrice A (matrice (p, n)) par le vecteur-colonne X (ou matrice $(n, 1)$) est obtenu en faisant le produit de chaque ligne de matrice A par le vecteur X comme on vient de la définir (et qui n'est que la généralisation de la notion classique du produit scalaire de deux vecteurs, mais dans $\mathbb{R}^n$), et en rangeant les résultats obtenus en un vecteur-colonne.

$$(a_{j1}\, a_{j2} \; . \; . \; . \; a_{jn}) \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{pmatrix} = a_{j1} x_1 + a_{j2} x_2 + \; . \; . \; . \; + a_{jn} x_n$$

$$\begin{pmatrix} a_{11} & . \; . \; . & a_{1n} \\ a_{21} & . \; . \; . & a_{2n} \\ . & & . \\ . & & . \\ . & & . \\ a_{p1} & . \; . \; . & a_{pn} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ . \\ . \\ . \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{j=1}^{j=n} a_{1j} x_j \\ \sum_{j=1}^{j=n} a_{2j} x_j \\ . \\ . \\ \sum_{j=1}^{j=n} a_{pj} x_j \end{pmatrix}$$

Opérations usuelles

De façon générale, le calcul matriciel s'obtient en « décalquant » sur les matrices telles qu'elles sont définies, les opérations usuelles sur les applications, et leurs propriétés.

Posons donc

$$A = (a_{ij})_{\substack{i=1,2,...p \\ j=1,2,...n}} \quad \text{et} \quad B = (b_{ij})_{\substack{i=1,2,...,p \\ j=1,2,...,n}}$$

deux matrices (p, n).

On dit qu'elles sont égales si, pour toutes les valeurs de i et de j, on a : $a_{ij} = b_{ij}$. En effet, deux applications linéaires sont égales si les images des vecteurs de base coïncident.

La somme des deux matrices A et B est la matrice C, matrice (n, p), obtenue en faisant la somme des termes correspondants de A et B : $c_{ij} = a_{ij} + b_{ij}$ pour toutes valeurs de i et de j ; si A représente l'application g_1 et si B représente l'application g_2 par rapport à deux bases données, alors C = A + B représente $g_1 + g_2$ dans ces mêmes bases.

Soit maintenant $k \in$ K, un élément du corps de base (réel ou complexe). Alors, kA est la représentation de l'application kg si l'on pose :

$$kA = (ka_{ij})_{\substack{i=1,2,...,p \\ j=1,2,...,n}}$$

Ces deux opérations donnent à l'ensemble des matrices (p, n), à coefficients dans le corps K, une structure d'espace vectoriel sur K. Cet espace se désigne par $\mathcal{M}_{p,\,n}$ (K) ; il est isomorphe à $\mathcal{L}$ (E, F), et l'on a donc :

$$\dim_K \mathcal{L}\ (E, F) = \dim_K \mathcal{M}_{p,\,n}\ (K) = n \times p.$$

Toutefois il faut noter que cet isomorphisme dépend étroitement des bases choisies de E et de F ; en ce sens, on dit qu'il n'est pas canonique. Cependant c'est un moyen bien commode pour identifier les deux ensembles. Une application linéaire ne peut donc être associée à une matrice que par l'intermédiaire d'une base de chacun des espaces vectoriels E et F. On verra justement plus loin l'effet d'un changement de base sur une matrice.

Le produit matriciel

Soit E, F, G trois espaces vectoriels sur un même corps K. Soit $g_1 \in \mathcal{L}$ (E, F) et $g_2 \in \mathcal{L}$ (F, G), on sait que $g_2 \circ g_1 (x) = g_2 [g_1 (x)]$ pour $x \in E$; c'est l'opération de composition des applications. Le produit matriciel est une opération entre matrices de telle sorte que B · A (si B et A sont respectivement les matrices de g_2 et g_1 relativement à des bases données) soit la matrice associée à l'application $g_2 \circ g_1$ (par rapport aux bases déjà choisies). Les conditions dans lesquelles on peut réaliser cette opération sont définies par le fait que F, espace d'arrivée pour g_1, est aussi l'espace de départ pour g_2 ; la dimension de F devra donc être aussi bien le nombre de colonnes de B que le nombre de lignes de A. D'autre part, si $n = \dim_K E$, $p = \dim_K F$ et $q = \dim_K G$, alors A est une matrice (p, n), B une matrice (q, p) et C (matrice de $g_2 \circ g_1$) une matrice (q, n).

D'où la règle suivante : le produit de deux matrices B et A n'est réalisable que si le nombre de colonnes de B est égal au nombre de lignes de A. Dans ce cas, le produit d'une matrice (q, p) par une matrice (p, n) est une matrice (q, n).

Sans chercher à montrer rigoureusement — ce qui nécessiterait quelques calculs lourds — la méthode du produit matriciel, on la justifie en notant qu'une matrice est une collection de vecteurs-colonnes. Il est donc logique d'avoir à multiplier la première matrice par chaque colonne de la seconde ; ceci amène à formuler que le produit de B par la première colonne de A donne la première colonne de C, et ainsi de suite jusqu'à la dernière colonne de A qui donne — par produit avec B — la dernière colonne de C. On peut donc énoncer la formule du produit matriciel :

$$c_{ij} = \sum_{k=1}^{k=p} b_{ik}a_{kj} = b_{i1}a_{1j} + b_{i2}a_{2j} + \dots + b_{ip}a_{pj}$$

Autrement dit, le terme situé à la i-ième ligne et j-ième colonne de C = B × A est le produit de la i-ième ligne de B par la j-ième colonne de A, au sens déjà défini plus haut.

Cette règle est schématisée ci-dessous :

$$\begin{pmatrix} b_{i1}\ b_{i2}\ \dots\dots\dots\dots\ b_{ip} \end{pmatrix} \dots \begin{pmatrix} & \vdots \\ \dots & c_{ij} \\ & \vdots \end{pmatrix}$$
$$\begin{pmatrix} a_{1j} \\ a_{2j} \\ \vdots \\ a_{pj} \end{pmatrix}$$

$$\text{où } C_{ij} = (b_{i1}\, b_{i2} \dots b_{ip}) \begin{pmatrix} a_{1j} \\ a_{2j} \\ \vdots \\ a_{pj} \end{pmatrix} = b_{i1}\, a_{1j} + b_{i2}\, a_{2j} + \dots + b_{ip}\, a_{pj}$$

Les propriétés suivantes, connues pour les applications linéaires, ne surprendront donc pas.

Propriété 1. Le produit matriciel n'est pas commutatif. Il n'est d'ailleurs pas toujours possible de réaliser A × B lorsqu'on peut calculer B × A. Cela ne peut se faire que si le nombre de colonnes de A est égal au nombre de lignes de A *et* si le nombre de colonnes de B est égal au nombre de lignes de A. Donc, si A est une matrice (p, n), il faut que B soit une matrice (n, p) ; alors AB est une matrice (p, p) et BA une matrice (n, n), qui ne peuvent être égales si $n = p$. Mais, même si $n = p$, de toutes façons la commutativité n'est pas règle mais exception.

Propriété 2. Soit $I_n = (\delta_{ij})_{\substack{i = 1,2,\dots,\,n \\ j = 1,2,\dots,\,n}}$ la matrice identité d'ordre n.
Alors, pour toute matrice A d'ordre n, on a :

$$A \times I_n = I_n \times A = A.$$

En effet, I_n correspond à la transformation identité.

Propriété 3. Le produit matriciel est associatif :

$$(AB)\ C = A\ (BA) = ABC.$$

Propriété 4. Le produit matriciel est distributif par rapport à la somme :

$$A \cdot (B + C) = A \cdot B + A \cdot C$$
$$(A + B) \cdot C = A \cdot C + B \cdot C$$

et, de plus, pour tout élément $k \in K$, on a :

$$(kB) \cdot C = k\ (B \cdot C) = B \cdot (kC).$$

Propriété 5. Soit $0_{p,\,n} = (0)_{\substack{i = 1,2,\dots,\,p \\ j = 1,2,\dots,\,n}}$ la matrice nulle de dimensions (p, n).
Alors,
pour toute matrice A, de dimension (n, q) :

$$0_{p,\,n} \times A = 0_{p,\,q}$$

et pour toute matrice B, de dimension (q, p) :

$$B \times 0_{p,\,n} = 0_{q,\,n}$$

Avant de formuler quelques exemples, notons le cas particulier de l'ensemble des matrices carrées d'ordre n, soit $\mathcal{M}_n$ (K). C'est un espace vectoriel de dimension n^2. Sur cet ensemble, on peut définir une seconde loi de composition interne : le produit matriciel (de même que sur l'ensemble $\mathcal{L}$ (E) on peut définir le produit de composition des applications). Chacun des deux ensembles $\mathcal{L}$ (E) et $\mathcal{M}_n$ (K) est alors muni d'une structure d'algèbre non commutative.

La rotation d'angle θ autour de l'origine dans $\mathbb{R}^2$ est représentée par la matrice, relativement à la base canonique,

$$M\theta = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}$$

A l'aide des formules de trigonométrie, on peut voir que :

$$M_\theta \times M_\varphi = M_\varphi \times M_\theta = M_{\theta+\varphi}$$

ce qui s'explique clairement sur la figure 8.

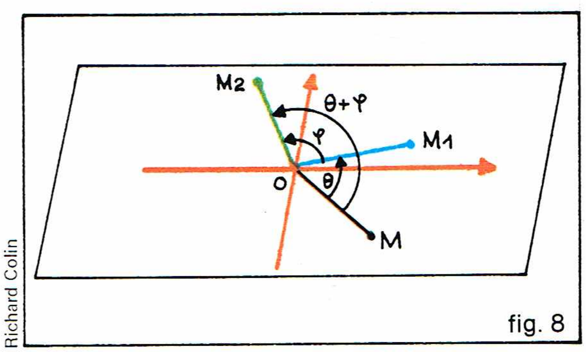

fig. 8

Richard Colin

▶ **Figure 8** : *rotation d'angle θ autour de l'origine O (dans $\mathbb{R}^2$) composée avec une rotation d'angle φ autour de O* :
$(\overrightarrow{OM}, \overrightarrow{OM_1}) = \theta$
$(\overrightarrow{OM_1}, \overrightarrow{OM_2}) = \varphi$
$(\overrightarrow{OM}, \overrightarrow{OM_2}) = \theta + \varphi$.

On en déduit que $M_\theta \times M_{-\theta} = M_{-\theta} \times M_{-\theta} = I_2$. Dans cet exemple, il est clair que, pour toute matrice M_θ, il existe une matrice (soit $M_{-\theta}$) qui, multipliée par M_θ, donne l'identité : on dit que $M_{-\theta}$ est la matrice inverse de M_θ. Toute matrice $A \in \mathcal{M}_n$ (K) ne possède pas cette propriété : en effet, ceci revient à étudier si l'application linéaire f dont A est la matrice — relativement à une base donnée — possède une application réciproque ; ceci n'a lieu que si f est bijective, ou encore injective puisque l'on est en dimension finie. La propriété suivante permettra de caractériser les matrices possédant une inverse.

L'application f est injective si, et seulement si, les vecteurs $f(e_1), f(e_2), \dots, f(e_n)$ forment un système libre dès que $\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ est une base de E.

Soit en effet $S = \{f(e_1), f(e_2), \dots, f(e_n)\}$, qui est libre si $\sum_{i=1}^{i=n} \alpha_i f(e_i) = 0$ implique que $\alpha_i = 0$ pour toutes les

valeurs de i. Mais, par linéarité, on a :

$$\sum_{i=1}^{n} \alpha_i f(e_i) = \sum_{i=1}^{n} f(\alpha_i e_i) = f\left(\sum_{i=1}^{n} \alpha_i e_i\right)$$

et on sait que :

$$x = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i e_1 \in E$$

Donc, dire que S est libre, c'est dire que $f(X) = 0$ implique $X = 0$, donc que f est injective.

Réciproquement, si f est injective, pour tout $X \in E$, donc de la forme $X = \sum_{i=1}^{n} a_i e_i$, on a $f(X) = 0$ seulement si $X = 0$.

D'autre part, la linéarité de f donne :

$$f\left(\sum_{i=1}^{n} a_i e_i\right) = \sum_{i=1}^{n} a_i f(e_i).$$

On a donc les implications :

$$f(X) = f\left(\sum_{i=1}^{n} a_i e_i\right) = \sum_{i=1}^{n} a_i f(e_i) = 0 \Rightarrow$$

$$\sum_{i=1}^{n} a_i e_i = 0 \Rightarrow a_i = 0$$

pour toute valeur de i ; la seconde implication étant la transcription du fait que $(e_i)_{i=1,2,\dots,n}$ est une base, donc un système libre. Cette propriété donne le résultat fondamental qui suit.

Théorème. La matrice $A \in \mathcal{M}_n(K)$ est inversible (possède une inverse) si, et seulement si, les vecteurs-colonnes de A forment un système libre.

On peut remarquer que pour une matrice (2, 2) qui s'écrit $\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$, les vecteurs-colonnes sont linéairement indépendants si :

$$\alpha_1 \begin{pmatrix} a \\ c \end{pmatrix} + \alpha_2 \begin{pmatrix} b \\ d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \Rightarrow \alpha_1 = \alpha_2 = 0$$

soit encore :

$$\begin{pmatrix} \alpha_1 a + \alpha_2 b \\ \alpha_1 c + \alpha_2 d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \Rightarrow \alpha_1 = \alpha_2 = 0.$$

Or les équations simultanées : $\begin{cases} \alpha_1 a + \alpha_2 b = 0 \\ \alpha_1 c + \alpha_2 d = 0 \end{cases}$ ont la solution $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$, unique, sauf si $\frac{a}{c} = \frac{b}{d}$, auquel cas α_2 peut être choisi quelconque et $\alpha_1 = -\frac{b}{a}\alpha_2$ dès que $a \neq 0$. On reconnaît là la notion de dépendance linéaire exprimée sous forme de proportionnalité.

Rang d'une application linéaire.

Si la matrice A n'est pas inversible, l'application linéaire f à laquelle elle est associée n'est pas bijective, donc pas surjective. On pense donc alors à caractériser l'ensemble $\mathrm{Im}\, f$, sous-espace vectoriel de F ($f : E \to F$) tel que $\dim_{\mathbb{K}} \mathrm{Im}\, f < \dim_{\mathbb{K}} F$ (sinon $\mathrm{Im}\, f = F$ et f serait surjective) par sa dimension. Ce nombre, qui est encore le nombre maximal de vecteurs-colonnes de A linéairement indépendants, s'appelle le rang de f et se note $rg\,(f)$ [*fig.* 8 bis].

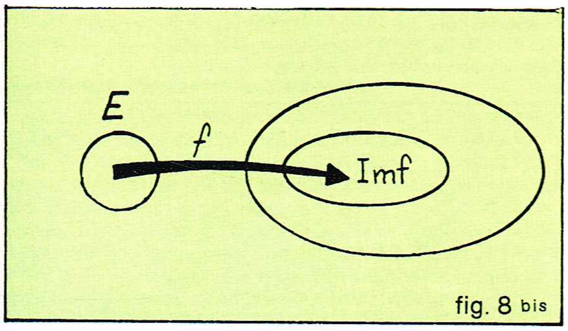

Richard Colin

◀ **Figure 8 bis :** ***rang d'une application linéaire.***

On peut montrer que ce nombre est caractéristique de f, et ne dépend pas des bases choisies pour la matrice A. Il joue un rôle fondamental dans la théorie des systèmes d'équations linéaires. Plus généralement encore, on dit que $f \in \mathcal{L}(E, F)$ est de rang fini si le sous-espace vectoriel $\mathrm{Im}\, f$ est de dimension finie (ce, pour le cas où E et F sont de dimensions quelconques). Bien évidemment, pour une matrice carrée A inversible, on a $rg\, A = \dim E$.

Pour illustrer ces notions, on considère l'exemple suivant :

soit $E = \mathbb{R}^3$ et $F = \mathbb{R}^2$ (géométriquement représentés par l'espace à 3 dimensions, et le plan « horizontal » des deux premières coordonnées) et l'application $f : \mathbb{R}^3 \to \mathbb{R}^2$ définie en tout point par : $f(x, y, z) = (x, 0)$. Cette application (*fig.* 9) n'est autre que la projection sur le premier axe de $\mathbb{R}^2$; elle n'est pas surjective puisque les images ont concentrées seulement sur le premier axe du plan. L'ensemble $\mathrm{Im}\, f$ est donc très exactement cette droite ; il est donc de dimension 1. On peut noter que l'ensemble $\mathrm{Ker}\, f$ est défini par les points $(0, y, z)$ où y et z sont quelconques, car $f(0, y, z) = (0, 0)$. Cet ensemble est donc le plan yOz défini par le second et le troisième axes de $\mathbb{R}^3$. On aurait pu aussi directement voir que la matrice de f relativement aux bases canoniques de $\mathbb{R}^2$ et $\mathbb{R}^3$ s'écrit $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ et que le seul système libre parmi les vecteurs-colonnes est formé par le premier.

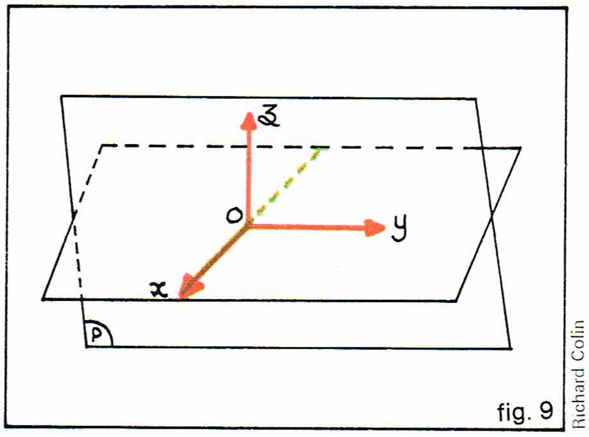

Richard Colin

◀ **Figure 9 :** ***pour la projection* p : (x, y, z) → (x, 0, 0) *de* $\mathbb{R}^3$ *sur l'axe* Ox, *le plan* (P) *défini par* Oy *et* Oz *représente* Ker (p), *et l'axe* Ox *représente* Im (p).**

Changement de base

Pour finir cette brève présentation des outils du calcul matriciel, on va étudier l'effet d'un changement de base sur une matrice carrée (on se bornera à ce seul cas).

Soit donc $\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ une base de E, et $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ une nouvelle base de E dont chacun des vecteurs s'exprime en fonction de l'ancienne :

$$v_1 = \sum_{j=1}^{n} a_{1j} e_j, \quad v_2 = \sum_{j=1}^{n} a_{2j} e_j, \dots, \quad v_n = \sum_{j=1}^{n} a_{nj} e_j$$

(les indices doubles nous permettent de garder la même lettre de référence pour les composantes tout en les différenciant pour chaque décomposition). La matrice :

$$A = (a_{ij})_{\substack{i=1,\dots,n \\ j=1,\dots,n}}$$

est la représentation de l'application identité par rapport, respectivement, aux bases $(v_i)_{i=1,\dots,n}$ et $(e_i)_{i=1,\dots,n}$ (le lecteur peut vérifier que l'image de v_i, donc v_i lui-même, s'écrit $a_{i1} e_1 + a_{i2} e_2 + \dots + a_{in} e_n$, d'où l'expression de la matrice A).

Prenons alors un vecteur $X \in E$; dans la première base, il se décompose en $\sum_{i=1}^{n} x_i e_i$ et, dans la seconde, en $\sum_{i=1}^{n} p_i v_i$.

L'expression de v_i dans la première base, soit $\sum_{j=1}^{n} a_{ij} e_j$, donne donc :

$$X = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} p_i a_{ij} e_j = \sum_{j=1}^{n} \left(\sum_{i=1}^{n} p_i a_{ij}\right) e_j.$$

Appelons alors $X_{(e_i)}$ et $X_{(v_i)}$ les vecteurs-colonnes

représentant X dans les bases $(e_i)_{i=1,\ldots,n}$ et $(v_i)_{i=1,\ldots,n}$ respectivement ; la relation :

$X_{(ei)} = A \times X_{(vi)}$ **(1)** traduit le résultat ainsi obtenu ; dans cette égalité, A est donc la matrice où le k-ième vecteur-colonne est formé des composantes k dans la base $(e_i)_{i=1,\ldots,n}$, du vecteur V_k.

Puisque A est une matrice inversible (car l'application associée est bijective), on peut multiplier, à gauche, chaque membre de l'égalité **(1)** par la matrice A^{-1}, et on obtient $A^{-1} X_{(ei)} = X_{(vi)}$ (puisque $AA^{-1} = I_n$).

Soit maintenant $f \in \mathcal{L}$ (E), M sa matrice relativement à la base $(e_i)_{i=1,\ldots,n}$ et M' sa matrice relativement à la base $(v_i)_{i=1,\ldots,n}$. Pour tout élément $x \in E$, soit $y = f(x)$, ce qui s'écrit :

$$Y_{(ei)} = MX_{(ei)} \quad \text{et} \quad Y_{(vi)} = M'X_{(vi)}.$$

De plus :

$$X_{(ei)} = AX_{(vi)} \quad \text{et} \quad Y_{(ei)} = AY_{(vi)} ;$$

donc $$Y_{(ei)} = MAX_{(vi)} = AY_{(vi)}$$

ce qui donne encore :

$$Y_{(vi)} = A^{-1}\,MAX_{(vi)} ; \quad \text{mais } Y_{(vi)} = M'X_{(vi)}$$

donc, par comparaison, on obtient la relation fondamentale :

$$M' = A^{-1} \cdot M \cdot A$$

On montrera plus loin des applications de cet important résultat. Ajoutons simplement que deux matrices carrées A et B sont dites *équivalentes*, si elles représentent le même endomorphisme mais dans deux bases différentes ; elles sont donc telles qu'il existe une matrice Q inversible vérifiant $B = Q^{-1} \cdot A \cdot Q$. Il s'agit là d'une relation d'équivalence entre matrices carrées de même ordre.

La dualité

Si E est un espace vectoriel sur un corps K, l'ensemble des applications linéaires de E dans K, ou encore formes linéaires sur E, est un espace vectoriel sur K pour les deux lois classiques ; on l'appelle *espace dual* de E, et on le note E*. Cette idée peut se prolonger, et on peut ainsi définir l'ensemble des applications linéaires de E* dans K (formes linéaires sur E*) que l'on appelle *bidual* de E, noté E**. Des liens étroits peuvent être tracés entre les espaces E, E* et E** ; et, malgré son apparence abstraite (tel que nous venons de le poser), ce problème est né sur des idées très concrètes de géométrie, par l'étude des transformations par polaires réciproques (due à Poncelet) et des formes quadratiques (Möbius, Chasles, etc.).

On a vu que, si $\dim_K E = n$ et $\dim_K F = p$, alors $\dim_K \mathcal{L}(E, F) = np$. On en déduit que, si E est de dimension finie n, alors E* est aussi de dimension finie n (toutefois, si E est de dimension infinie, E* est aussi de dimension infinie, mais il n'existe plus d'isomorphisme entre eux). L'isomorphie de E et E* va être définie par une base de E*. Soit $(e_i)_{i=1,\ldots,n}$ une base de E. Tout élément $x \in E$ s'écrit $x = \sum_{i=1}^{n} x_i e_i$, et cette décomposition est unique. Pour chaque valeur de l'indice i, l'application $e^i : x \to x_i$ est une forme linéaire sur E. On a ainsi n éléments du dual E*, soit $e^1, e^2, \ldots, e^n$, qui forment un système libre — ce qu'on montre aisément — donc une base de E*, qu'on nomme *base duale* de la base $(e_i)_{i=1,\ldots,n}$. Les formes linéaires e^i peuvent être définies, de façon concise, par :

$$e^i(e_j) = 0 \quad \text{si} \quad i \neq j$$
$$e^i(e_i) = 1$$

que l'on peut encore simplifier par l'usage du symbole de Kronecker δ_{ij} défini par :

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si} \quad i = j \\ 0 & \text{si} \quad i \neq j \end{cases}$$

On a alors :

$$e^i(e_j) = \delta_{ij}$$

L'isomorphisme [à la base $(e_i)_{i=1,\ldots,n}$, on fait correspondre la base $(e^i)_{i=1,\ldots,n}$] ainsi construit n'est pas canonique puisqu'il dépend de la base choisie dans l'espace E.

Formes bilinéaires

Soit E et F deux espaces vectoriels sur le même corps de base K. L'ensemble produit E × F peut être muni d'une structure d'espace vectoriel sur K par les 2 lois :

$$(a, \alpha) + (b, \beta) = (a + b, \alpha + \beta)$$
$$\text{si } a \in E,\ b \in E,\ \alpha \in F,\ \beta \in F$$
$$\lambda\,(a, \alpha) = (\lambda a, \lambda\alpha) \quad \text{si} \quad \lambda \in K,\ a \in E \text{ et } \alpha \in F.$$

Les axiomes de structure se vérifient aisément sur *l'espace vectoriel produit* E × F, et l'on montre que si E et F sont de dimensions finies, alors

$$\dim_K (E \times F) = \dim_K E + \dim_K F.$$

Appelons *forme bilinéaire* définie sur E × F une application de E × F dans K qui soit linéaire par rapport à chacun de ses arguments. Une telle application

$$f = E \times F \to K$$

doit donc vérifier :

$$f(a + kb, \alpha) = f(a, \alpha) + kf(b, \alpha)$$
$$f(a, \alpha + k\beta) = f(a, \alpha) + kf(a, \beta).$$

Une forme bilinéaire bien connue est celle dite produit scalaire : si E et F sont de même dimension finie n sur K, soit $x \in E$ décomposé sous la forme $(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ relativement à une base donnée de E, et soit $y \in F$ décomposé en $(y_1, y_2, \ldots, y_n)$ par rapport à une base donnée de F ; alors $(x, y) \to x_1 y_1 + x_2 y_2 + \ldots + x_n y_n = \sum_{i=1}^{n} x_i y_i$ est une forme bilinéaire sur E × F, appelée *produit scalaire* de x et y. Si $E = F = \mathbb{R}^2$ ou si $E = F = \mathbb{R}^3$, on retrouve la notion analytique du produit scalaire dans le plan ou dans l'espace. On définit une forme bilinéaire sur E × E* (dite produit scalaire sur E × E*) par :

$$(x, f) \to \langle x, f \rangle = f(x) \quad \text{si} \quad f \in E^* \quad \text{et} \quad x \in E.$$

La notation $\langle x, f \rangle$ est plus spécialement utilisée dans les questions relatives à l'espace dual ; on dit que l'on a des crochets de dualité. Cette application est canonique puisque le résultat ne dépend pas de bases choisies entre E et E*. En fixant $x \in E$, et en faisant varier $f \in E^*$, on obtient une forme linéaire sur E*, donc un élément — lié à x — du bidual E**, et que l'on notera $\hat{x}$; $\hat{x} : f \to \langle x, f \rangle$. L'application de E dans E** ainsi mise en évidence, qui à tout $\hat{x} \in E$ associe $x \in E^{**}$, est linéaire ; c'est un morphisme canonique de E dans E** qui va permettre de dégager les liens de dualité.

Tout d'abord, dans le cas où l'espace E est de dimension finie n, on a encore

$$\dim_K E^{**} = \dim_K (E^*)^* = \dim_K E^* = \dim_K E = n.$$

De plus supposons que l'on ait deux éléments $\hat{x}$ et $\hat{y}$ égaux, alors $\langle \hat{x}, f \rangle = \langle \hat{y}, f \rangle$ pour tout $f \in E^*$, donc $\langle \hat{x} - \hat{y}, f \rangle = 0$, en prenant successivement pour f les formes $e^1, e^2, \ldots, e^n$, on obtient :

$$x_1 - y_1 = 0, \quad x_2 - y_2 = 0, \quad \ldots, \quad x_n - y_n = 0$$

donc $x = y$.

Par conséquent, le morphisme $x \to \hat{x}$ est injectif, donc bijectif, ce qui entraîne : si E est de dimension finie, les espaces E et E** sont canoniquement isomorphes.

Il est donc possible d'identifier E et E** (à un isomorphisme près), et par conséquent de considérer E comme le dual de E*. La dualité est ainsi un phénomène « symétrique » présentant une réciprocité : E et E* sont duaux l'un de l'autre. Cette propriété permet de conclure que chaque élément de E peut être considéré comme une forme linéaire sur E* (en identifiant x et $\hat{x}$ définis dans l'isomorphisme canonique).

Dans le cas où l'espace vectoriel E est de dimension infinie, il faut noter que l'homomorphisme $x \to \hat{x}$ est injectif, mais non surjectif. L'isomorphisme, mis en évidence si $\dim_K E < +\infty$ (*fig.* 10), n'en est plus un en dimension infinie.

Richard Colin

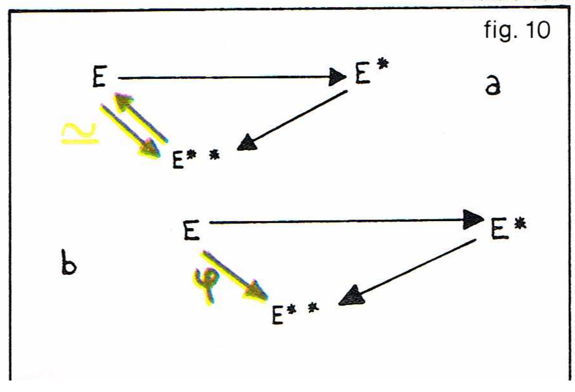

▶ **Figure 10 : a, *en dimension finie,* E *et* E** *sont isomorphes ;* b, *en dimension infinie,* φ *est seulement surjective.***

Transposition.

Soit E et F deux espaces vectoriels sur le corps K, et $f \in \mathcal{L}$ (E, F). Pour tout $g \in \mathcal{L}$ (F*, E*) et tout $\alpha \in F^*$, $g(\alpha) \in E^*$, donc $g(\alpha) : E \to K$; d'autre part $f : E \to F$ et $\alpha : F \to K$ impliquent que $\alpha \circ f : E \to K$. On peut alors montrer qu'il existe une application $g \in \mathcal{L}$ (F*, E*) et une seule telle que : $g(\alpha) = \alpha \circ f$. Cette application se nomme transposée de f, ce qui s'écrit ${}^tf$, et est donc définie par :

(1) $$\langle {}^tf(\alpha), x\rangle = \langle \alpha, f(x)\rangle$$

pour tout $x \in E$ et pour tout $\alpha \in F^*$.

La représentation matricielle de ${}^tf$ est très simple à déterminer. Si E est de dimension n et F de dimension p, soit $(e_j)_{j=1,\dots,n}$ une base de E et $(f_i)_{i=1,\dots,p}$ une base de F; on désigne par $(e^j)_{j=1,\dots,n}$ et $(f^i)_{i=1,\dots,p}$ les bases duales. Alors si $A = (a_{ij})_{\substack{i=1,\dots,p\\ j=1,\dots,n}}$ est la matrice de f relativement aux bases choisies de E et F, l'égalité **(1)** permet de montrer que la matrice B de ${}^tf$ relativement aux bases duales est définie par $b_{ij} = a_{ji}$.

Cela revient à dire que B est une matrice (n, p) obtenue à partir de A en inversant (en transposant, ce qui explique le nom choisi pour ${}^tf$) le rôle des lignes et des colonnes.

Les principales règles de calcul en transposition sont :

— ${}^t(f+g) = {}^tf + {}^tg \quad {}^t(kf) = k\,{}^t(f) \quad {}^t(g \circ f) = {}^tf \circ {}^tg$
— Si f admet une réciproque, il en est de même pour ${}^tf$ et $({}^tf)^{-1} = {}^t(f^{-1})$

Et de même que E et E** sont isomorphes si E est de dimension finie, on a (pour des espaces E et F de dimensions finies) un isomorphisme entre $\mathcal{L}$ (E, F) et $\mathcal{L}$ (F*, E*) qui n'est autre que l'application $f \to {}^tf$. Dans ce cas, on a donc : ${}^t({}^tf) = f$.

Orthogonalité

Soit E et F deux espaces vectoriels sur un même corps K et $g : E \times F \to K$ une forme bilinéaire sur $E \times F$. On dit que $x \in E$ et $\alpha \in F$ sont *orthogonaux relativement à g* si $g(x, \alpha) = 0$. Dans le cas où $F = E^*$, ceci revient à dire que $\langle x, \alpha\rangle = \alpha(x) = 0$, et on dit simplement que α et x sont orthogonaux.

Une partie A de E et une partie B de F sont orthogonales relativement à g si l'on a $g(x, \alpha) = 0$ pour tout élément de $x \in E$, et tout $\alpha \in F$. Dans le cas où A est un sous-espace vectoriel de E, l'ensemble des éléments de F orthogonaux à tous les éléments de A est un sous-espace vectoriel de F, dit *orthogonal de A dans F, relativement à g*, noté $A^\perp$. De même pour l'orthogonal d'un sous-espace vectoriel B de F, qui se note $B^\perp$; lorsque $F = E^*$, on ne précise plus la forme g. Cette notion n'est que la généralisation algébrique de la notion classique — en géométrie — d'orthogonalité.

Lorsque l'espace vectoriel E est de dimension finie n, si le sous-espace $A \subset E$ est de dimension p, l'orthogonal $A^\perp$ est de dimension $n - p$; dans ce cas (dimension finie), on a encore « symétrie » entre F (dans E) et $F^\perp$ (dans E*) puisque $(F^\perp)^\perp = F$, car alors $(F^\perp)^\perp$ est un sous-espace vectoriel de E** donc de E, de dimension $n - (n - p) = p$.

Les notions de transposition et d'orthogonalité (en dimension finie) sont liées par le résultat :

$$\text{si } f \in \mathcal{L}(E, F), \quad \text{alors } (\operatorname{Im} f)^\perp = \operatorname{Ker}({}^tf).$$

Dans le cas d'espaces de dimensions finies, le lien est alors plus précis encore entre une application et sa transposée, car alors $rg\, f = rg\,({}^tf)$ que l'on montre à l'aide du résultat précédent, et qui donne beaucoup de développements dans les techniques d'optimisation et les méthodes de résolution des systèmes d'équations linéaires.

Il est certain que la dualité s'est révélée comme une des notions les plus fécondes en mathématiques.

Systèmes d'équations linéaires

Soit E et F deux espaces vectoriels sur le même corps K. On appelle *équation linéaire* une équation de la forme $f(x) = b$ où $f \in \mathcal{L}$ (E, F) et $b \in F$. Lorsque $F = K$, alors $f \in E^*$: on a une équation linéaire scalaire. De même, un ensemble fini d'équations $f_i(x) = b_i$ où $f_i \in \mathcal{L}$ (E, F) et $b_i \in F$ s'appelle un système linéaire (scalaire lorsque F = K). Résoudre ces équations consiste à trouver les éléments $x \in E$ qui les vérifient. Ce type d'équations se trouve dans tous les domaines, et la mise au point des techniques de recherche des solutions, œuvre de Frōbenius (1849-1917), Kronecker (1823-1891), Weierstrass (1815-1897), etc., a été l'une des grandes étapes du développement des mathématiques. Le formalisme des espaces vectoriels donne une méthode pratique de résolution, quels que soient l'espace E, l'espace F et le nombre d'équations du système, grâce au puissant outil qu'est le calcul matriciel.

Dans ce qui suit, on suppose que E est un espace vectoriel réel de dimension finie p, muni d'une base $(e_j)_{j=1,\dots,p}$ et F un espace vectoriel réel de dimension finie n, $(f_i)_{i=1,\dots,n}$ en étant une base; on se donne $f \in \mathcal{L}$ (E, F) et $b \in F$, et on cherche l'ensemble des $x \in E$ tels que $f(x) = b$.

On peut écrire :

$$x = \sum_{j=1}^{p} x_j e_j, \quad \text{donc } f(x) = \sum_{j=1}^{p} x_j f(e_j).$$

Puisque $(f_i)_{i=1,\dots,n}$ est une base de F et que $f(e_j) \in F$, on peut aussi écrire :

$$f(e_j) = \sum_{i=1}^{n} a_{ij} f_i.$$

Et l'égalité — composante par composante — entre b et $f(x)$ donne :

$$b_i = \sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_j \quad \text{pour } i = 1, 2, \dots, n.$$

Soit donc n équations scalaires à p inconnues. La matrice $A = (a_{ij})_{\substack{i=1,\dots,n\\ j=1,\dots,p}}$ est la matrice de f relativement aux deux bases choisies, et si l'on pose X, représentation de x dans la base $(e_j)_{j=1,\dots,p}$, et B représentation de b dans la base $(f_i)_{i=1,\dots,n}$ sous forme de vecteur-colonne, on obtient la forme matricielle AX = B.

Quelques remarques simples permettent de cerner le problème :

— si $b \notin \operatorname{Im} f$, il n'y a aucune solution;
— si $b \in \operatorname{Im} f$, il y a au moins une solution.
* Si $b = 0$, les solutions forment l'ensemble Ker f, et il y a toujours au moins la solution dite triviale $x = 0$; le système est dit homogène.
* Si $b \neq 0$ et si $z \in \operatorname{Ker} f$, pour toute solution x, $x + z$ est aussi solution, car
$f(x + z) = f(x) + f(z) = f(x) = b$.

Les deux ensembles Im f et Ker f déterminent totalement les solutions. Le cas particulier où $n = p$ se discute comme suit.

(1) Si l'application f est bijective, la matrice A possède une inverse A^{-1} et, de l'équation AX = B, on déduit $A^{-1}AX = A^{-1}B$, soit $X = A^{-1}B$.

La solution est unique, ce qui était prévisible puisque f est bijective.

En particulier, si $b = 0$, on retrouve le fait que Ker $f = \{0\}$. On retrouve un *système* dit *de Cramer*, du nom du mathématicien suisse Cramer (1704-1752), où le système homogène associé n'admet que la solution triviale $x = 0$, et qui admet alors une solution unique. Résoudre un système de Cramer revient à trouver l'inverse de la matrice du système; les procédés pratiques d'inversion de matrices sont exposés au paragraphe *Algorithme de Gauss ou du pivot* du chap. *calcul numérique.*

(2) Lorsque l'application f n'est pas bijective, il n'est plus nécessaire de supposer *a priori* que $n = p$, car on ne cherche pas à inverser la matrice A.

L'idée directrice est alors de se ramener, en « éliminant » si besoin est des inconnues et des équations, à un système de Cramer (la notion claire de rang d'un système est due au mathématicien allemand G. F. Frōbenius). On cherche pour cela si certaines équations ne sont pas redondantes, c'est-à-dire s'il n'y a pas d'équations linéairement dépendantes (par exemple :

$$2x + y - 3z + t = 0, \quad x + 2y - 2z + 2t = 1$$

et $x - y - z - t = 1$ sont redondantes, car la première est égale à la somme des deux autres). Autrement dit, on calcule alors le rang r de la matrice A, ce qui permet d'affirmer que l'on a réellement r équations ($r \leqslant p$ et $r \leqslant n$). Sur les p inconnues, il faudra donc en supposer $p - r$ arbitraires et résoudre le système en fonction de celles-ci. Les r inconnues qui sont alors déterminées sont dites *inconnues principales*, et les $(p - r)$ autres non

principales. Dans chaque équation, on fait passer dans le second membre tout ce qui est relatif aux équations non principales, et on obtient alors un système de Cramer de r équations à r inconnues que l'on sait résoudre.

Voici un exemple :

$$\begin{aligned} 2x - y + 4z + t &= -4 \\ 3x + 2y - 3z - 5t &= 17 \\ 5x - 3y + 8z + 2t &= -10 \end{aligned}$$

C'est un système de rang 3 ; il y aura une inconnue non principale, par exemple t, et donc indétermination d'ordre 1.

On écrit alors le système :

$$\begin{aligned} 2x - y + 4z &= -4 - t \\ 3x + 2y - 3z &= 17 + 5t \\ 5x - 3y + 8z &= -10 - 2t. \end{aligned}$$

que l'on résout par la méthode du pivot.

La théorie des systèmes linéaires est un outil fondamental pour les méthodes modernes de l'économie sans oublier les applications diverses dans toute science exacte.

Déterminants

Une forme linéaire sur un espace vectoriel E (de corps de base K) est une application de E dans K vérifiant l'hypothèse de linéarité. Cette notion s'étend à celle de *forme n-linéaire*, qui est une application de l'espace vectoriel produit $E^n = E \times E \times \ldots \times E$ (n fois), dans K, linéaire par rapport à chacun des arguments (si $n = 2$, on retrouve la notion de forme bilinéaire). Il faut ici bien distinguer la linéarité par rapport à chaque variable de la linéarité simple par rapport aux éléments de E^n. Dans le premier cas, on a :

$$\begin{aligned} f(\lambda X) &= f[\lambda(x_1, x_2, \ldots, x_n)] = f(\lambda x_1, \lambda x_2, \ldots, \lambda x_n) \\ &= \lambda f(x_1, \lambda x_2, \ldots, \lambda x_n) \\ &= \lambda^2 f(x_1, x_2, \ldots, \lambda x_n) = \lambda^n f(X) ; \end{aligned}$$

tandis que dans le second : $f(\lambda X) = \lambda f(X)$, ce qui revient à dire que l'on a ici une forme linéaire sur E.

On dit qu'une forme n-linéaire sur E, f, est alternée si elle s'annule dès que deux des arguments sont égaux ; ceci équivaut au fait que la valeur de f se change en son opposé si l'on permute deux arguments :

$$f(x_1, x_2, \ldots, x_i, \ldots, x_j, \ldots, x_n) = -f(x_1, x_2, \ldots, x_j, \ldots, x_i, \ldots, x_n)$$

L'ensemble des formes n-linéaires alternées sur E forme bien évidemment un espace vectoriel sur K pour les opérations usuelles :

$$(f, g) \rightarrow f + g \quad \text{et} \quad (\lambda, f) \rightarrow \lambda f.$$

Le résultat suivant est en fait la clef de ce paragraphe.

Si $\{x_1, x_2, \ldots, x_n\}$ forme un système lié, alors $f(x_1, x_2, \ldots, x_n) = 0$ si f est une forme n-linéaire alternée sur E.

Si f est une forme n-linéaire alternée sur E et si $f(x_1, x_2, \ldots, x_n) = 0$, alors $\{x_1, x_2, \ldots, x_n\}$ est un système lié dans E.

fig. 11

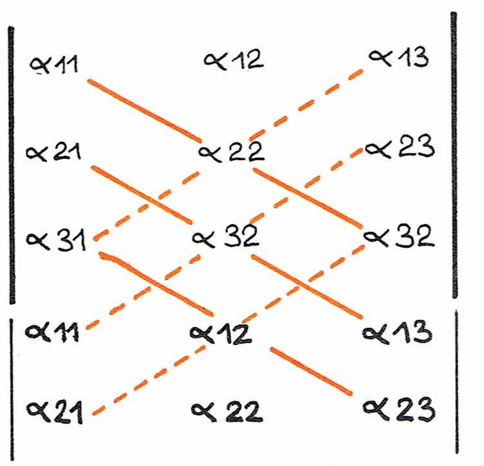

Il définit l'idée d'une grandeur caractérisant la dépendance ou l'indépendance d'un système de vecteurs. La définition axiomatique des déterminants a été donnée par Kronecker et Weierstrass, bien que l'outil ait été connu et utilisé depuis le début du XIX[e] siècle, essentiellement rattaché au calcul vectoriel, très exactement au produit extérieur (ou produit vectoriel) et au produit mixte, pour les éléments de l'espace à 3 dimensions.

Définition

On appelle *déterminant* relatif à la base $(e_i)_{i=1,\ldots,n}$ du système $\{x_1, x_2, \ldots, x_n\}$ de vecteurs de E, la valeur de la forme n-linéaire alternée unique qui prend la valeur $+1$ pour les vecteurs de la base.

Chaque vecteur se décomposant dans la base donnée :

$x_k = \sum_{i=1}^{i=n} \alpha_{ik} e_i$, le déterminant du système $\{x_1, x_2, \ldots, x_n\}$ est écrit :

$$\begin{vmatrix} \alpha_{11} & \ldots & \alpha_{1i} & \ldots & \alpha_{1n} \\ \alpha_{21} & \ldots & \alpha_{2i} & \ldots & \alpha_{2n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \alpha_{k1} & \ldots & \alpha_{ki} & \ldots & \alpha_{kn} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \alpha_{n1} & \ldots & \alpha_{ni} & \ldots & \alpha_{nn} \end{vmatrix}$$

avec des barres droites simples (afin de ne pas confondre avec l'écriture matricielle).

On peut considérer qu'une matrice carrée d'ordre n est formée de ses n vecteurs-colonnes, vecteurs à n composantes. On parlera donc, par abréviation, du déterminant d'une matrice au lieu du déterminant du système des vecteurs-colonnes de cette matrice.

Calcul des déterminants d'ordre 1, 2 et 3

En partant du cas le plus simple, on a $|\alpha_{11}| = \alpha_{11}$ (ne pas confondre ici les barres du déterminant avec le symbole d'une valeur absolue sur $\mathbb{R}$ ou d'un module sur $\mathbb{C}$) ; puis à l'ordre 2 :

$$\begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{vmatrix} = \alpha_{11}\alpha_{22} - \alpha_{12}\alpha_{21}$$

(produit des « extrêmes » diminué du produit des « moyens »).

fig. 12

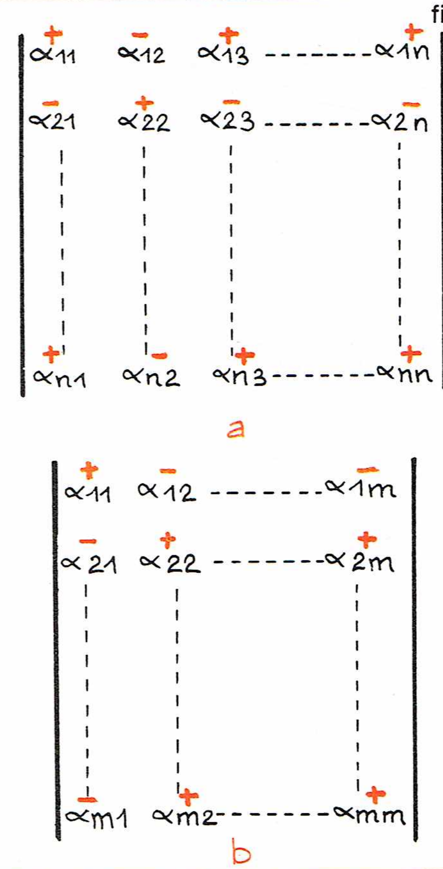

► *A gauche, figure 11 : développement d'un déterminant d'ordre 3 par la règle de Sarrus. A droite, figure 12 : deux exemples d'affectation de signes pour le calcul d'un déterminant : a, d'ordre impair ; b, d'ordre pair.*

Richard Colin

Richard Colin

Enfin, à l'ordre 3, on a la règle dite *règle de Sarrus* : on reprend sous le déterminant les 2 premières lignes pour pouvoir tracer (*fig.* 11) les trois « diagonales principales » partant des éléments de la première colonne, et les trois « diagonales non principales » partant des éléments de la dernière colonne. Sur chaque « diagonale », on fait le produit des trois éléments; on affecte les résultats du signe + pour les diagonales principales, et du signe — pour les autres, et l'on obtient le nombre :

$$\alpha_{11}\alpha_{22}\alpha_{33} + \alpha_{12}\alpha_{23}\alpha_{31} + \alpha_{13}\alpha_{21}\alpha_{32}) - (\alpha_{31}\alpha_{22}\alpha_{13} + \alpha_{32}\alpha_{23}\alpha_{11} + \alpha_{33}\alpha_{21}\alpha_{12})$$

(on peut constater que c'est la généralisation du calcul à l'ordre 2).

Méthode générale de calcul

Au-delà de l'ordre 3, l'idée du calcul est de procéder par récurrence; la méthode est dite : « *développement par rapport à une ligne ou une colonne* ».

A tout élément α_{ij} du déterminant, on associe :

(1) un signe, + ou — selon sa position, égal à celui de $(-1)^{i+j}$; il découle donc de ceci que deux éléments voisins en ligne ou en colonne, mais pas en diagonale, se voient affectés de signes opposés;

(2) un déterminant d'ordre $n - 1$, appelé *mineur* de α_{ij}, obtenu en supprimant dans le déterminant initial la ligne et la colonne sur lesquelles se trouve α_{ij};

(3) son *cofacteur*, égal au produit des deux précédents. La fig. 12 montre deux exemples d'affectation de signe pour n pair, puis n impair, et la fig. 13 schématise le mineur d'un élément.

La valeur d'un déterminant est alors obtenue en choisissant une ligne ou une colonne quelconque, en faisant le produit de chaque élément de celle-ci par son cofacteur, et en sommant sur toute la ligne ou la colonne considérée. Le résultat est indifférent au choix de la ligne ou de la colonne. Le calcul d'un déterminant d'ordre n revient alors à celui de n déterminants d'ordre $(n - 1)$, soit $n\ (n - 1)$ déterminants d'ordre $(n - 2)$, et donc à celui de

$$n\ (n-1)\ (n-2)\ \ldots \times 3 = \frac{1}{2}n!$$

déterminants d'ordre 2 que l'on sait aisément calculer. Le procédé est en général fastidieux dès que la valeur de n dépasse 6 ou 7.

Dans cette méthode, il faut choisir la ligne ou la colonne présentant le plus d'éléments nuls. En particulier, le déterminant d'une matrice triangulaire (*a fortiori* si elle est diagonale) est égal au produit des éléments de la diagonale.

Un certain nombre de propriétés permettent même de modifier l'écriture d'un déterminant sans en changer la valeur. Utilisées pour obtenir un grand nombre de zéros, ces propriétés sont la transcription de celles des formes n-linéaires alternées.

Propriété 1 : det A = det ^{t}A.

Propriété 2 : permuter deux lignes — ou deux colonnes — revient à changer la valeur du déterminant en son opposée.

Propriété 3 : multiplier tous les éléments d'une même ligne — ou d'une même colonne — d'un déterminant par un nombre équivaut à multiplier la valeur du déterminant par ce nombre. Ce qui entraîne que det $(k\text{A}) = k^n$ det A, si n est l'ordre de A et $k \in$ K un scalaire.

Propriété 4 : ajouter à une ligne (resp. colonne) une combinaison linéaire des autres lignes (resp. colonnes) ne change pas la valeur d'un déterminant.

Les opérations entre déterminants se définissent alors simplement.

(1) La somme de deux déterminants D et D', ne différant que par une ligne (resp. colonne) de même position k, est un déterminant identique, mais dont la k-ième ligne (resp. colonne) est égale à la somme des k-ièmes lignes (resp. colonnes) de D et D'.

(2) Le produit de deux déterminants est le déterminant de la matrice produit.

De cette règle, on déduit une interprétation globale des déterminants. En effet, puisque

$$\det(\text{AB}) = (\det \text{A}) \times (\det \text{B}),$$

on a : det (AB) = det (BA). Or deux matrices semblables M et N sont liées par une relation $\text{M} = \text{P}^{-1} \cdot \text{N} \cdot \text{P}$, donc : $\det \text{M} = \det(\text{P}^{-1} \cdot \text{N} \cdot \text{P}) = \det(\text{P}^{-1}\text{N}) \cdot \det \text{P} = \det \text{P}^{-1} \cdot \det \text{N} \cdot \det \text{P} = \det \text{P}^{-1} \cdot \det \text{P} \cdot \det \text{N}$, soit det M = det $(\text{P}^{-1}\ \text{P}) \cdot$ det N = det N puisque $\text{P}^{-1}\ \text{P} = \text{I}_n$ et que det $\text{I}_n = +1$.

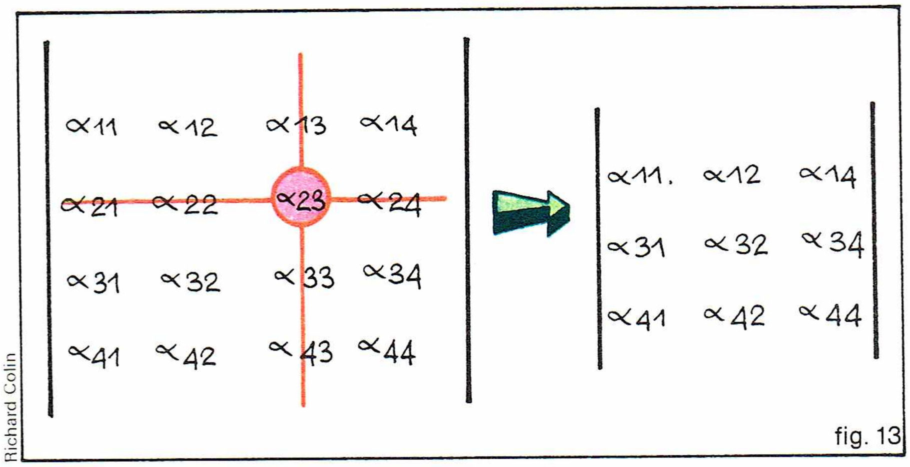

▲ **Figure 13 :** ***caractérisation du mineur d'un élément.***

Il est donc plus clair, maintenant, de parler du déterminant d'un endomorphisme, et l'on peut énoncer comme suit.

Théorème. Soit $f \in \mathcal{L}$ (E) ; f est inversible si et seulement si la matrice de f, relativement à une base quelconque de E, a un déterminant non nul.

Applications. Les utilisations des déterminants sont nombreuses. Toutefois l'outil n'est pas toujours simple à manier. Ceci explique que les méthodes de calcul numérique utilisées dans les programmes de calcul scientifique soient basées sur des algorithmes plus proches des concepts linéaires. Toutefois deux applications pratiques méritent d'être mentionnées :

— la recherche du rang d'une matrice;

— l'orientation dans un espace vectoriel réel de dimension finie.

● Le théorème ci-dessous décrit totalement la première de ces questions.

Théorème. Si E et F sont deux espaces vectoriels de dimensions finies (non nécessairement égales) sur le corps K, si $f \in \mathcal{L}$ (E, F) et si A est la matrice de f relativement à deux bases choisies de E et F, alors le rang de cette application vérifie :

$$rg\ f = \dim f(\text{E}) = \dim \text{Im}\, f = rg\ \text{A} = rg\ {}^tf = rg\ {}^t\text{A}$$

et ce nombre est encore le nombre maximal de vecteurs-colonnes — ou de vecteurs-lignes — linéairement indépendants que l'on peut extraire de A, soit aussi la dimension du plus grand mineur non nul qu'il est possible de trouver dans A.

● Dans le second problème, il s'agit d'une application très utile en physique, et qui consiste à distinguer deux classes de bases pour un espace vectoriel réel E, de dimension finie p, par l'intermédiaire d'une relation d'équivalence. Si $(e_i)_{i=1,\ldots,n}$ et $(f_j)_{j=1,\ldots,p}$ sont deux bases de E, on dira qu'elles sont équivalentes si le déterminant du système formé par l'une d'elles, par rapport à l'autre base, est positif; il s'agit bien d'une relation d'équivalence. Alors, pour une base B donnée, l'ensemble de toutes les bases de E peut être scindé en deux classes :

— les bases équivalentes à B, dites bases directes ou orientées positives;

— les autres bases, dites rétrogrades ou orientées négatives.

Mais les déterminants sont en réalité un outil d'algèbre multilinéaire dont les utilisations, fastidieuses dans le cas linéaire, peuvent souvent être évitées.

Les invariants

C'est encore une question de géométrie (la classification des courbes du second degré) qui est à l'origine du problème de la réduction des matrices, c'est-à-dire la recherche d'une base dans laquelle la matrice d'un endomorphisme prend une forme simple : diagonale, triangulaire ou encore forme de Jordan. Les études de A. Cayley, C. Hermite et J. J. Sylvester se sont révélées d'une rare fécondité par leur aspect unificateur des problèmes existants et leurs multiples applications; la théorie des représentations du groupe linéaire est en fait née de leurs travaux. C'est également la « théorie spectrale », et donc

le lien concret entre l'algèbre linéaire, l'analyse et l'algèbre tensorielle, qui est issue de leurs recherches.

Le premier problème est de déterminer s'il existe — et dans ce cas, de caractériser — des sous-espaces vectoriels de dimensions les plus petites possibles (le meilleur cas sera la dimension 1) qui soient invariants pour un endomorphisme f d'un espace vectoriel E de dimension finie p. Lorsqu'un tel sous-espace F est de dimension 1, il est engendré par un seul vecteur, non nul, dont l'image doit donc être dans F et par suite être un multiple de V. On est donc conduit à poser la définition suivante : un vecteur V ∈ E, non nul, est dit *vecteur propre* pour $f \in \mathcal{L}$ (E) s'il existe un scalaire k tel que f (V) = kV **(1)**.

On dit que k est une valeur propre de f s'il existe un vecteur V ∈ E, non nul, vérifiant **(1)**.

A un vecteur propre V ne correspond qu'une seule valeur propre k, dite valeur propre associée à V ; tandis qu'à une valeur propre k correspond une infinité de vecteurs propres
[car, si f (V) = kV, alors f (aV) = af (V) = akV = k (aV)] dont l'ensemble, complété par le vecteur nul, forme un sous-espace vectoriel, que l'on appelle *sous-espace propre* associé à k. C'est un des sous-espaces invariants recherchés ; il est distinct de {0}, et sa dimension est donc au moins égale à 1. L'étude des dimensions des sous-espaces propres donne les résultats fondamentaux de la réduction des matrices.

Dans un espace du type $\mathbb{R}^p$, le but est d'abord la recherche des droites stables par f, c'est-à-dire dont les vecteurs aient des images homothétiques. Dans $\mathbb{R}^3$ par exemple, on cherche à « voir » si une transformation linéaire ne peut pas être ramenée à des dilatations le long de trois axes de coordonnées. La résolution analytique du problème tend souvent à faire oublier son aspect tant géométrique que linéaire. C'est pourquoi, à l'exception d'une méthode de calcul, on posera le plus souvent la question des sous-espaces propres, et non celle des valeurs propres.

Calcul des valeurs propres

Si k est valeur propre associée au vecteur propre V, on a : f (V) = kV, soit f (V) — kV = 0. Or f (V) — kV est l'image du vecteur V par l'application linéaire $f — k \cdot$ Id, donc V ∈ Ker ($f — k \cdot$ Id). Comme V est non nul, ce sous-espace doit être distinct de {0}, et donc l'application $f — k \cdot$ Id ne doit pas être bijective et ne possède alors pas de réciproque. Par conséquent, si on se donne une base de E, et si par rapport à cette base A est la matrice de f, et I celle de l'application identité (cas de la dimension finie), les valeurs propres de f seront les solutions de l'équation :

$$\det (A - kI) = 0.$$

Si E est de dimension p, alors A est d'ordre p et det (A — kI) est un polynôme de degré p en k qu'on appelle *polynôme caractéristique* de l'endomorphisme f, ou de la matrice A.

Pour une valeur propre donnée k, l'équation matricielle (A — kI) V = 0 où V est un vecteur à p coordonnées permet de déterminer les sous-espaces propres. Puisque ce système homogène de p équations à p inconnues a une matrice non inversible, son rang r est strictement plus petit que p ; la différence entre p et r est la dimension du sous-espace propre. C'est en effet ce nombre qui caractérise le nombre d'inconnues non principales du système, donc son degré d'indétermination. On peut le voir encore d'une autre façon : p = dim Im ($f — k$I) + dim Ker ($f — k$I) donc dim Ker ($f — k$I) = $p — r$.

Les propriétés algébriques des sous-espaces propres se résument dans le théorème qui suit.

Théorème. Si k_1 et k_2 sont deux valeurs propres distinctes d'une application $f \in \mathcal{L}$ (E), et si G (k_1) et G (k_2) sont les sous-espaces propres associés, on a :

$$G (k_1) \cap G (k_2) = \{0\}.$$

De plus si $k_1, k_2, ..., k_n$ sont toutes les valeurs propres distinctes de f, et si $V_1, V_2, ..., V_n$ sont des vecteurs propres qui leur sont respectivement associés, la famille de vecteurs $\{V_1, V_2, ..., V_n\}$ est libre.

Comme les systèmes libres de E ont au plus p éléments lorsque $\dim_k$ E = p, il y a au plus p valeurs propres distinctes. Pour chercher s'il existe un certain nombre de sous-espaces de E, invariants par f, et dont la somme directe soit E, il faut et il suffit de chercher une base de E formée de vecteurs propres. Dans ce cas, l'endomorphisme f opère indépendamment dans chaque direction de l'espace à p dimensions, et chaque fois comme une homothétie.

La matrice A de f, relativement à cette base de vecteurs propres, prend une forme diagonale, car, pour tout vecteur V_i (i = 1, 2, ..., p) de la base, on a f (V_i) = k_iV_i et le i-ième vecteur-colonne de A ne possède qu'une coordonnée non nulle, la i-ième, qui est égale à k_i, et A prend bien la forme ci-dessous.

$$\begin{pmatrix} k_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & k_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & k_3 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & k_n \end{pmatrix}$$

On parle dans ce cas de matrice (ou d'endomorphisme) *diagonalisable*. Une condition nécessaire et suffisante pour qu'il en soit ainsi est donnée par le théorème qui suit.

Théorème. Soit E de dimension finie sur le corps K. L'application $f \in \mathcal{L}$ (E) est diagonalisable si et seulement si toutes les racines du polynôme caractéristique sont dans K, et si, pour toute valeur propre, la dimension du sous-espace propre associé est égale à l'ordre de multiplicité de cette valeur propre dans le polynôme caractéristique.

En particulier, si f possède p valeurs propres distinctes toutes dans K, chacune ne peut être que racine simple du polynôme caractéristique. Cette condition n'est que suffisante ; elle n'est pas nécessaire.

Il n'est pas toujours possible de diagonaliser une matrice. La réduction à la forme triangulaire, moins intéressante, mais plus fréquemment possible, consiste à trouver une base de E telle que la matrice exprimée dans cette base soit triangulaire (inférieure ou supérieure). Ceci est réalisable dès que toutes les racines du polynôme caractéristique de f sont des éléments de K ; par exemple, si K = corps algébriquement clos *(cf. les Nombres)*, tout endomorphisme de E est « triangulaire ». La diagonale de la matrice triangulaire est alors formée par les valeurs propres.

La **forme réduite de Jordan**, forme de matrice triangulaire supérieure A = $(a_{ij})_{\substack{i=1,...,n \\ j=1,2,...,n}}$ telle que, parmi les éléments au-dessus de la diagonale, seuls les éléments $a_{i,\,i+1}$ puissent être non nuls (et dans ce cas égaux à 1) — les éléments diagonaux étant les valeurs propres, chacune comptée avec son ordre de multiplicité — peut être obtenue dès que l'endomorphisme est nilpotent (c'est-à-dire si une puissance de f est nulle, donc aussi les suivantes). L'exemple ci-dessous montre une forme réduite de Jordan (les éléments diagonaux ne sont pas nécessairement distincts).

$$\begin{pmatrix} k_1 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & k_{n-1} & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & k_n \end{pmatrix}$$

Un très célèbre résultat — le théorème de Cayley-Hamilton — est à l'origine de nombreux développements. Sous une forme particulièrement simple, il montre que si $f \in \mathcal{L}$ (E) admet $P(x) = a_0 + a_1x + ... + a_px^p$ pour polynôme caractéristique ($\dim_K$ E = p), alors l'endomorphisme a_0Id + a_1f + ... + a_pf^p (où $f^k = f \circ f \circ ... \circ f$, k fois) est identiquement nul (tout élément de E a pour image le vecteur nul). Si A est la matrice de f relativement à une base quelconque, on a donc : a_1I + a_1A + ... + a_pA^p = 0.

On dit que le polynôme caractéristique est un polynôme annulateur de A ou de f.

La théorie des polynômes sur un anneau permet alors de dire (en dimension finie) que l'ensemble des polynômes annulateurs d'une matrice A (qui n'est pas vide puisqu'il contient le polynôme caractéristique) possède un élément de plus petit degré tel que tout autre élément en soit multiple : c'est le *polynôme minimal* de A (ou de f) dont le degré est au plus égal à p. Les racines de ce polynôme sont les mêmes que celles du polynôme caractéristique : les valeurs propres. Elles sont invariantes

— comme les polynômes d'ailleurs — par changement de base ; leur ensemble est appelé *spectre de f*, noté Sp (f).

La notion de fonction de matrice, jusque-là limitée aux fonctions polynômiales, a pu alors être généralisée, et des expressions telles que le logarithme d'une matrice, une exponentielle de matrice, un sinus de matrices, etc. (dont l'usage s'avère primordial dans la résolution des systèmes d'équations différentiels), peuvent être considérées et calculées sans même avoir à utiliser de séries dans un espace vectoriel normé (en sortant donc du cadre linéaire sans nécessité expresse). La détermination du spectre d'une matrice apparaît donc comme fondamentale pour la connaissance d'un opérateur linéaire sur un espace vectoriel de dimension finie. Il suffit même souvent pour traiter certaines questions de localiser la plus grande des valeurs propres (par exemple, comparer son module à l'unité). Le théorème de Perron-Frobenius est une intéressante méthode de localisation ; on peut en donner deux versions selon que la matrice est irréductible ou non.

On dit qu'une matrice carrée est *irréductible* si une même permutation effectuée sur les vecteurs-colonnes et sur les vecteurs-lignes permet de partitionner la matrice obtenue en une matrice de la forme :

$$\begin{pmatrix} M & O \\ P & Q \end{pmatrix} \quad \text{ou bien} \quad \begin{pmatrix} M & P \\ O & Q \end{pmatrix}$$

où M et Q sont deux sous-matrices carrées et O un bloc de zéros. Dans le cas contraire, la matrice est *réductible*. La figure 14a schématise la reconnaissance d'une matrice réductible tandis que la figure 14b fait apparaître un bloc de zéros diagonal qu'aucun échange simultané de lignes et colonnes ne peut placer dans l'une des positions en haut à droite ou en bas à gauche : la matrice est irréductible.

Il s'agit en fait de procéder à une permutation sur les vecteurs de la base choisie, c'est-à-dire dans le cas de la figure 14a, par exemple, de passer de la base (e_1, e_2, e_3, e_4) à la base (e_1, e_3, e_4, e_2). C'est un changement de base particulier caractérisé par une matrice de permutation qui n'est autre que la matrice identité où l'on a permuté les vecteurs-colonnes correspondant à ceux des vecteurs de base échangés ; ainsi, dans le cas examiné, c'est la matrice :

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

et l'on vérifie par le calcul que :

$$\begin{pmatrix} 2 & 2 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & 0 & 0 \\ 3 & 3 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 2 & 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 & 0 & 2 & 0 \\ 3 & 1 & 3 & 2 \\ 2 & 0 & 2 & 0 \\ 1 & 2 & 1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

comme pour n'importe quel changement de base. L'utilisation de ces matrices est très courante dans l'étude des tableaux de données économiques pour étudier les interactions dans les systèmes d'échanges.

Théorème de Perron-Frobenius (cas irréductible)

Soit A une matrice carrée, à éléments positifs ou nuls, irréductible. Alors, il existe une valeur propre $k > 0$, plus grande que toute autre en valeur absolue, qui est simple (ordre de multiplicité égal à 1) et à laquelle correspond un vecteur propre dont toutes les composantes sont strictement positives ; cette valeur propre est donnée par la formule :

$$k = \max_{\substack{v > 0 \\ v \neq 0}} \left[\min_i \frac{(Av)_i}{v_i} \right]$$

(l'indice i désigne la i-ième coordonnée du vecteur et $v \geqslant 0$ signifie qu'aucune composante de v n'est négative).

Dans le cas où A est réductible, la valeur propre de plus grand module peut éventuellement être nulle (dans ce cas, 0 est la seule valeur propre), multiple, et les vecteurs propres qui lui correspondent ont des coordonnées positives ou nulles.

Grâce à ce théorème, on a pu construire un algorithme qui permet de trouver, sans trop de calculs, une bonne valeur approchée de k même si l'ordre de la matrice A est grand.

Les matrices à éléments positifs dont on vient de parler se rencontrent fréquemment : ainsi en probabilité où l'on utilise les *matrices stochastiques* qui sont telles que la somme des éléments (non négatifs) d'une même ligne soit égale à 1.

La plus grande valeur propre est alors $k = 1$ et le vecteur $(1, 1, 1, ..., 1)$ est un vecteur propre associé. Cette propriété est équivalente à la définition.

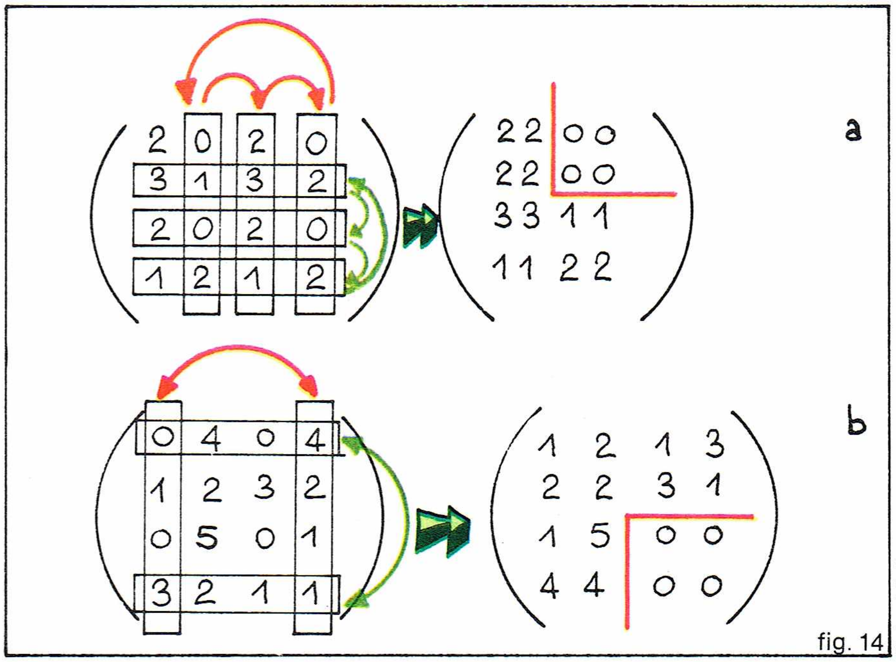

fig. 14

Richard Colin

▲ **Figure 14 — a, matrice réductible :** ***une permutation des lignes et des colonnes permet d'isoler un bloc carré de zéros, non situé sur la diagonale ;*** **b, matrice irréductible :** ***le bloc de zéros ne peut être que diagonal.***

Formes quadratiques

Si $f : E \times E \to K$ est une forme bilinéaire sur E, on dit que $Q(x) = f(x, x)$ est la *forme quadratique associée à f*. La dénomination est claire puisque

$$Q(ax) = f(ax, ax) = a^2 f(x, x) = a^2 Q(x).$$

On dit que Q est *positive* si $Q(x, x) \geqslant 0$ pour tout $x \in E$; elle est *définie positive* si de plus $Q(x, x) = 0$ n'a lieu que pour $x = 0$. A toute forme bilinéaire f, sur E, on associe la matrice $M = (m_{ij})_{\substack{i = 1, 2, ..., p \\ j = 1, 2, ..., p}}$ relativement à une base $(e_i)_{i = 1, ..., p}$ par : $m_{ij} = f(e_i, e_j)$. On définit ainsi un isomorphisme, mais non canonique, entre l'ensemble des formes bilinéaires sur E et l'ensemble $\mathcal{M}_p$ (K) des matrices carrées d'ordre p.

Si X est le vecteur-colonne représentant x et Y celui représentant y dans la base $(e_i)_{i = 1, ..., p}$, on a alors :

$$f(x, y) = {}^tY \cdot {}^tM \cdot X = {}^tX \cdot {}^tM \cdot Y$$

Lorsque f est symétrique, soit $f(x, y) = f(y, x)$, on a :

$$Q(x + y) = Q(x) + Q(y) + 2 f(x, y) ;$$

donc à toute forme quadratique Q on peut associer une forme bilinéaire symétrique f, dite *forme polaire* de Q par :

$$f(x, y) = \frac{1}{2} [Q(x + y) - Q(x) - Q(y)]$$

L'application $f \to Q$ est donc une bijection de l'ensemble des formes bilinéaires symétriques dans l'ensemble des formes quadratiques sur E. On peut donc écrire :

$$Q(x) = {}^tX \cdot M \cdot X$$

puisque, si M est la matrice de f, on peut dire que M est la matrice de Q ; cette matrice est symétrique, car :

$$m_{ij} = f(e_i, e_j) = f(e_j, e_i) = m_{ji}, \text{ donc } M = {}^tM.$$

Le problème de la réduction des matrices symétriques à la forme diagonale est donc le même que celui de la transformation — par changement de base — d'une forme quadratique en une somme algébrique de carrées. La représentation globale des courbes du second degré a trouvé là son terme après les énumérations fastidieuses longtemps enseignées. Une étude simple de la question à l'aide de la notion de dualité conduit aux deux résultats suivants.

Loi d'inertie de Sylvester

Soit f une forme bilinéaire symétrique réelle sur un espace vectoriel réel E de dimension p, et Q la forme quadratique associée. Alors, il existe une base $(v_i)_{i=1,\ldots,p}$ telle que $f(v_i, v_j) = \delta_{ij}$ (symbole de Kronecker) — base *orthonormale* relativement à f — et un couple unique $(m, n) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N}$ tels que, dans cette base, on ait :

$$Q(x) = \sum_{i=1}^{i=m} x_i^2 - \sum_{j=m+1}^{j=m+n} x_j^2 \qquad \text{avec } m + n = \text{rg}(f).$$

Théorème. Pour toute matrice symétrique réelle M d'ordre p, il existe une matrice T réelle d'ordre p telle que $T^{-1} = {}^tT$ (on dit que T est *orthogonale*) et que la matrice $T^{-1} \cdot M \cdot T$ soit diagonale.

Ainsi la forme bilinéaire symétrique définie sur $\mathbb{R}^3$:

$$f(x, y) = x_1y_1 + x_2y_2 + x_3y_3 - 2(x_2y_3 + x_3y_2 + x_3y_1 + x_1y_3 + x_1y_2 + x_2y_1)$$

est représentée relativement à la base canonique par la matrice

$$M = \begin{pmatrix} 1 & -2 & -2 \\ -2 & 1 & -2 \\ -2 & -2 & 1 \end{pmatrix}, \quad \text{symétrique.}$$

La forme quadratique associée :

$$Q(x) = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 - 4(x_2x_3 + x_3x_1 + x_1x_2)$$

peut se réduire à la forme :

$$Q(x) = [x_1 - 2(x_2 + x_3)]^2 + \frac{3}{2}(x_2 - x_3)^2 - \frac{9}{2}(x_2 + x_3)^2$$

tandis que la matrice M se diagonalise sous la forme :

$$\begin{pmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & -3 \end{pmatrix}$$

L'exemple de la matrice M montre la conservation de la somme des éléments diagonaux, après changement de base ; on peut aussi le constater sur l'exemple de matrice réductible vu plus haut. Il s'agit encore d'un invariant, appelé *trace* d'un endomorphisme f, noté Tr (f), égal à la somme de ses valeurs propres (l'espace E étant de dimension finie, il s'agit là d'une somme finie), ou encore à la somme des éléments diagonaux de la matrice représentant f dans une base quelconque.

Algèbre linéaire et groupes de transformation

Dans ce paragraphe, on va donner une classification élémentaire, par la structure de groupe, de quelques types de transformations linéaires d'un espace vectoriel E de dimension finie sur un corps K.

Le *groupe linéaire* $GL_K(E)$, ensemble des endomorphismes injectifs (ou automorphismes) de E, muni de la loi de composition des applications, est le plus large de ceux-ci. C'est à l'intérieur de ce groupe que l'on caractérise deux sous-groupes particuliers : le *groupe orthogonal* et le *groupe unitaire*.

Adjoint d'un endomorphisme

Sur E, soit S une forme bilinéaire symétrique telle que les deux applications linéaires partielles soient injectives (on dit que S est *non dégénérée*). Alors, pour toute application $f \in \mathcal{L}(E)$, il existe un endomorphisme unique f^* tel que :

$$S[f(x), y] = S[x, f^*(y)] \text{ pour tout couple } (x, y) \in E \times E.$$

Cet endomorphisme s'appelle l'*adjoint* de f. Le lien de cette notion avec la dualité, que la notation sous-entend, est plus net lorsqu'on sait que, relativement à toute base $(e_i)_{i=1,\ldots,n}$ telle que $S(e_i, e_j) = \delta_{ij}$ (symbole de Kronecker) — ou base orthonormale relativement à S — la matrice M^* de f^* et celle, M, de f sont liées par :

$$M^* = {}^tM \quad \text{si} \quad K = \mathbb{R} \quad \text{et} \quad M^* = {}^t\overline{M} \quad \text{si} \quad K = \mathbb{C}$$

($\overline{M}$ désigne la matrice dont les éléments sont les conjugués de ceux de M). Les principales propriétés de l'adjoint sont résumées dans le tableau I.

Tableau I
Propriétés de l'adjoint d'un endomorphisme

Corps de base K = R		Corps de base K = C
$(f + g)^*$	=	$f^* + g^*$
$(f \circ g)^*$	=	$g^* \circ f^*$
$(f^*)^*$	=	f
rg (f^*)	=	rg (f)
$(\alpha f)^* = \alpha f^*$		$(\alpha f)^* = \overline{\alpha} f^*$
$\text{Tr}(f^*) = \text{Tr}(f)$		$\text{Tr}(f^*) = \overline{\text{Tr}(f)}$
$\det(f^*) = \det(f)$		$\det(f^*) = \overline{\det(f)}$

▶ **Tableau I :** ***propriétés de l'adjoint d'un endomorphisme.***

Transformation orthogonale

On suppose que $K = \mathbb{R}$, et on cherche à caractériser les transformations linéaires qui conservent les distances. On dit que $f \in \mathcal{L}$ (E) est *orthogonale relativement à S* si, pour tout couple $(x, y) \in E \times E$, on a :

$$S[f(x), f(y)] = S(x, y).$$

Si Q est la forme quadratique associée à S, ceci revient à $Q[f(x)] = Q(x)$, pour tout $x \in E$. Alors f et son adjointe vérifient $f \circ f^* = f^* \circ f = \mathrm{Id}$.

Par suite f est inversible et $f^{-1} = f^*$. Ceci justifie donc la définition suivante.

Une matrice A est *orthogonale* si elle vérifie :

$$A \times {}^tA = {}^tA \times A = I \quad \text{ou encore : } A^{-1} = {}^tA.$$

Leurs propriétés sont nombreuses.

Propriété 1. Si A est orthogonale, alors $|\det A| = +1$. Lorsque $\det A = +1$, on dit que la matrice est *droite* ; si $\det A = -1$, la matrice est dite *gauche*.

Propriété 2. Si A est orthogonale, toute valeur propre k de A vérifie $|k| = 1$.

En particulier, les valeurs propres d'une matrice orthogonale droite d'ordre 3 sont : 1, e^{ix} et e^{-ix} pour une certaine valeur réelle de x ; c'est-à-dire que l'application linéaire associée est une rotation d'angle x autour d'un axe Δ, dont tous les points sont invariants (ce qui explique la valeur propre 1). L'application linéaire associée à une matrice orthogonale gauche d'ordre 3 est une symétrie par rapport soit à un plan, soit à un point.

Les transformations orthogonales relativement à S décrivent un sous-groupe de $GL_{\mathbb{R}}(E)$ qu'on note O $(n, \mathbb{R})$ lorsque $S(x, y) = \sum_{i=1}^{i=p} x_i y_i$ (produit scalaire). Lorsque E est un espace vectoriel normé par le produit scalaire usuel — on dit que E est un *espace euclidien* — les transformations orthogonales de E sont les isométries de E.

Forme hermitienne

Le but est ici de reprendre les notions qui ont permis la construction du groupe orthogonal, mais lorsque le corps de base est $\mathbb{C}$.

Si E est un espace vectoriel sur $\mathbb{C}$, une application $h : E \times E \to \mathbb{C}$ est dite *forme hermitienne* si les relations

$$\begin{cases} h(ax + x', y) = ah(x, y) + h(x', y) \\ h(a, by + y') = \bar{b}h(x, y) + h(x, y') \\ h(x, y) = \overline{h(y, x)} \end{cases}$$

sont vérifiées pour tous éléments $x \in E$, $y \in E$, $x' \in E$, $y' \in E$, $a \in \mathbb{C}$ et $b \in \mathbb{C}$.

Cette notion étend celle de forme bilinéaire symétrique réelle au cas complexe. Dans ce cas, $h(x, x)$ est réel et l'application $x \to h(x, x)$ s'appelle forme quadratique hermitienne associée à h.

Soit une base $(e_i)_{i=1,\ldots,p}$ de E ; la matrice $H = (h_{ij})$ définie par :

$h_{ij} = h(e_i, e_j)$ caractérise la forme hermitienne h, puisque, si $x = \sum_{i=1}^{i=p} x_i e_i$ et $y = \sum_{j=1}^{j=p} y_j e_j$, on a $h(x, y) = \sum_{i=1}^{i=p}\sum_{j=1}^{j=p} x_i \bar{y}_j h_{ij}$.

Cette matrice vérifie ${}^tH = \bar{H}$ puisque

$$h_{ji} = h(e_j, e_i) = \overline{h(e_j, e_i)} = \overline{h_{ji}}.$$

L'inégalité de Schwarz : $|h(x, y)|^2 \leqslant h(x, x) \times h(y, y)$ est la propriété de base des formes hermitiennes.

Une forme hermitienne est dite *non dégénérée* si la matrice H associée est inversible, soit si $\det H \neq 0$ (lorsque $h(x, x) \geqslant 0$ pour tout $x \in E$, on dit que la forme est positive). Alors, la forme quadratique Q associée à h définit une application $N : E \to \mathbb{R}^+$, $N : x \to \sqrt{Q(x)}$ qui vérifie :

$$N(x) = 0 \Leftrightarrow x = 0$$
$$N(\alpha x) = |\alpha|\, N(x) \quad \text{si } \alpha \in \mathbb{C} \text{ et } x \in E$$
$$N(x + y) \leqslant N(x) + N(y) \quad \text{si } x \in E \text{ et } y \in E$$

et qui s'appelle une *norme* sur E. Un espace vectoriel complexe E, de dimension finie, muni de la norme issue d'une forme hermitienne non dégénérée positive est appelé *espace hermitien*. Alors, à toute application $f \in \mathcal{L}$ (E) correspond un endomorphisme unique f^* (adjoint de f) tel que : $h[f(x), y] = h[x, f^*(y)]$ pour tout couple $(x, y) \in E \times E$, dont les propriétés sont résumées dans le tableau I.

Les matrices M de f et M* de f^* relativement à toute base orthonormale de E sont adjointes : $M^* = {}^t\bar{M}$.

Groupe unitaire

Comme dans le cas du groupe orthogonal, on peut montrer que, sur un espace hermitien E, de dimension finie, tout endomorphisme bijectif $u \in \mathcal{L}$ (E) tel que $u = u^*$ vérifie aussi : $h[u(x), u(y)] = h(x, y)$ et $N[u(x)] = N(x)$ si h est la forme hermitienne qui définit la norme N sur E.

Un tel endomorphisme s'appelle *automorphisme unitaire* ; cette dénomination provient du fait que le nombre complexe $\det u$ est de module égal à 1. Une matrice carrée d'ordre n, A, à coefficients complexes, telle que

$$A^* \cdot A = A \cdot A^* = I, \quad \text{soit } A^* = {}^t\bar{A} = A^{-1},$$

est donc appelée *matrice unitaire*. En particulier, une matrice unitaire réelle est une matrice orthogonale.

Les automorphismes unitaires d'un espace hermitien de dimension finie forment un sous-groupe de $GL_{\mathbb{C}}$ (E), le *groupe unitaire*, que l'on désigne par U $(n, \mathbb{C})$.

Parmi les opérateurs unitaires, ceux dont le déterminant est exactement $+1$ forment un sous-groupe de U $(n, \mathbb{C})$, le *groupe spécial unitaire* noté SU $(n, \mathbb{C})$; de même que parmi les transformations orthogonales, celles dont le déterminant vaut $+1$ forment un sous-groupe de O $(n, \mathbb{R})$, le *groupe spécial orthogonal* noté SO $(n, \mathbb{R})$. Plus généralement, dans le groupe GL_K (E) les endomorphismes dont le déterminant est égal à $+1$ (qui sont donc des automorphismes de E) forment un sous-groupe, le *groupe spécial linéaire* SL (n, K).

Le tableau II schématise les liens entre ces groupes d'opérateurs (les flèches rouges symbolisent une inclusion).

L'extension pour $K = \mathbb{C}$ des résultats obtenus pour les endomorphismes symétriques est le théorème : pour toute matrice hermitienne H, il existe une matrice unitaire U telle que la matrice $U^{-1} \cdot H \cdot U$ soit diagonale.

On dit aussi que toute matrice hermitienne est diagonalisable dans le groupe unitaire, de même que toute matrice symétrique est diagonalisable dans le groupe orthogonal.

▼ **Tableau II :** ***liaisons entre groupes de transformation.***

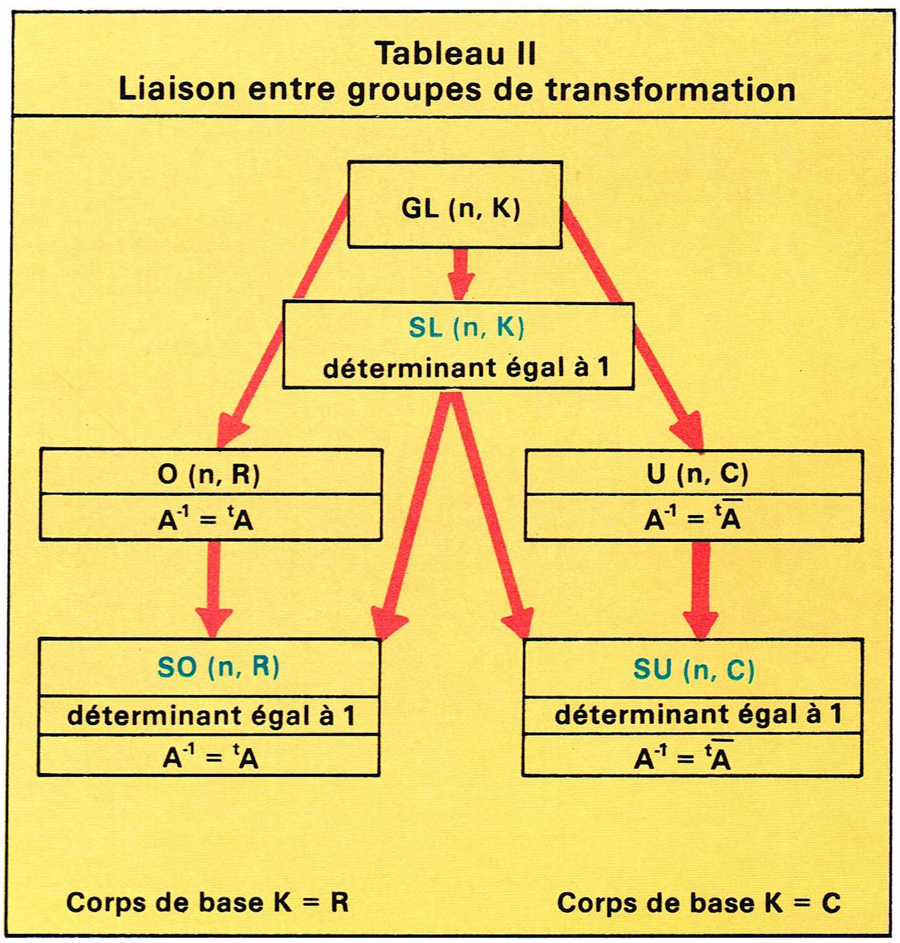

Espaces vectoriels de dimension infinie

La structure d'espace vectoriel est très riche, les propriétés des opérateurs linéaires (plus spécialement ceux des groupes de transformation cités ci-dessus) offrent des applications extrêmement diverses, que ce soit pour d'autres développements mathématiques ou pour des applications en physique, en statistiques, en économie, etc. La simplicité, mais en même temps la richesse du concept de linéarité, lui donnent cette importance fondamentale, et l'utilisation du calcul matriciel, par exemple, n'en est certes pas le plus petit aspect. Il est tout de même des barrières qu'il faut poser dès que l'on cherche à décrire et étudier des espaces vectoriels qui ne sont plus de dimension finie. L'outil matriciel, ainsi, n'est plus disponible ; mais ce n'est pas la seule limitation. La première distinction est celle qui intervient sur les bases et plus encore sur la dimension d'un espace vectoriel, car bien évidemment la description globale d'un espace vectoriel par un nombre fini de ses éléments est exceptionnellement féconde. Tout espace vectoriel de dimension p sur un corps K est isomorphe à K^p, c'est-à-dire qu'il n'y a en fait qu'une seule structure d'espace à p dimensions sur K ; on ne peut rien dire d'analogue en dimension infinie. Puis, dès que l'on s'intéresse aux applications linéaires, les différences sont encore plus sensibles ; une application linéaire n'est plus bijective dès qu'elle est seulement injective ou surjective. Les applications développées sur le concept de rang ne sont plus utilisables lorsque le sous-espace vectoriel f (E) est de dimension infinie. Le fossé est très large pour les questions de dualité, et tout le schéma de « réciprocité », basé sur l'application de E dans E**, ne peut plus être utilisé. En particulier, il n'est plus vrai que ${}^t({}^tf) = f$, ou que rg $({}^tf) =$ rg f.

Bien entendu, tous les problèmes des invariants doivent être pensés différemment quoique les concepts de base, valeurs propres et vecteurs propres restent les mêmes. La pratique de leur détermination ne peut plus être systématisée par les déterminants et les systèmes d'équations linéaires ; ce sont des considérations spécifiques à chaque problème particulier qui permettent de le résoudre. Plus généralement, c'est toute la théorie spectrale qui est à reconstruire, mais il faut cette fois de nouveaux outils.

C'est avec la topologie et l'analyse moderne que l'on a pu poursuivre l'étude des espaces vectoriels de dimension infinie : espaces vectoriels topologiques et surtout espaces de Hilbert. Les espaces de fonctions ont, en effet, fourni les plus nombreux exemples d'ensembles sur lesquels on définit aussi bien une structure linéaire qu'une structure métrique avec un produit scalaire et même une norme : ensemble des fonctions continues sur un intervalle fermé borné de $\mathbb{R}$; ensemble des fonctions intégrables au sens de Lebesgue ou bien surtout ensemble des fonctions de carré intégrable, au sens de Lebesgue, noté $\mathfrak{L}^2$, qui par passage à l'ensemble quotient par une relation d'équivalence donne l'espace de Hilbert L^2.

Nouvelles tendances de l'algèbre linéaire

La notion d'espace vectoriel sur un corps cède la place à celle, plus générale, de *module* sur un anneau A ou encore A-module. La définition s'obtient en remplaçant, dans celle d'un espace vectoriel sur un corps K, le corps K par l'anneau A. On voit ainsi qu'un anneau unitaire peut être envisagé comme un module sur lui-même.

On définit de même les bases d'un module mais, et là se trouve une première différence fondamentale, tout module ne peut être muni d'une base ; par exemple le $\mathbb{Z}$ module $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$. Un module qui admet une base est dit *module libre*.

Module libre

Les morphismes de modules sont encore appelés applications linéaires. Les différentes propriétés des anneaux entraînent une classification variée des modules : selon que l'anneau est intègre, principal, etc.

Un module M sur un anneau intègre A est dit *sans torsion* si $ax = 0$ ($a \in$ A et $x \in$ M) implique $a = 0$ ou $x = 0$. Cette classe de modules s'est révélée avoir de nombreuses propriétés. Ainsi, si A est un anneau principal (anneau intègre, unitaire et dont tout idéal est principal, c'est-à-dire engendré par les multiples d'un seul élément), et si M est un A-module de type fini (qui admet un système générateur fini) et sans torsion, alors M est un module libre. La seconde hypothèse est ici fondamentale, car, par exemple, $\mathbb{Q}$ est un $\mathbb{Z}$ module sans torsion, mais non libre.

Soit A un anneau intègre et K le corps obtenu par les quotients d'éléments de A (corps des fractions de A). Si l'on a un A-module libre M, on peut considérer l'espace vectoriel sur K, engendré par M. Alors pour tout sous-module M' de M, on peut chercher le nombre maximal d'éléments linéairement indépendants dans M' ; ce nombre — dimension du sous-espace engendré par M' — est appelé le *rang* de M'. Dans le cas d'un sous-module libre dont une base possède p éléments, le rang est alors égal à p. Le résultat fondamental s'énonce par le théorème qui suit.

Théorème. Soit A un anneau principal, M un A-module libre de rang fini p. Si M' est un sous-module de M, M' est libre et de rang fini $r \leqslant p$. D'autre part, on peut trouver une base $(e_1, e_2, ..., e_p)$ de M, un entier $r \leqslant p$ et des éléments non nuls $a_1, a_2, ..., a_r$ de A tels que :

$(a_1e_1, a_2e_2, ..., a_re_r)$ soit une base de M'
a_i divise a_{i+1} pour $i = 1, 2, ..., r-1$.

L'importance de cette structure de module est très grande. Les anneaux nœthériens généralisant les anneaux de Dedekind, dans de multiples applications de l'algèbre (ainsi en géométrie algébrique), jouent un rôle fondamental. Il y a là, comme pour les espaces vectoriels, un effort pour la linéarisation des problèmes. Pour ne pas rentrer en détail dans ce domaine qui demanderait de longs développements explicatifs, on définira ici seulement les modules et anneaux nœthériens.

Soit A un anneau ; un A-module M est dit *nœthérien* si tout sous-module de M est de type fini. Toute suite croissante de sous-modules est alors stationnaire, c'est-à-dire reste fixe au-delà d'un certain rang. Par conséquent, toute famille non vide de sous-modules de M possède un élément maximal. On dit qu'un anneau A est nœthérien si, lorsqu'on le considère comme un A-module, c'est un anneau nœthérien ; un anneau principal est donc nœthérien. Il s'agit là d'un outil très important pour l'algèbre non commutative et la théorie des nombres. De nombreux développements sont dus à des mathématiciens contemporains : Eilenberg, Krull, Mac-Lane.

Il faut citer encore l'*algèbre homologique* dont l'origine vient des théories de l'homologie et de l'homotopie, et dont une importante application est justement de déterminer la limite des propriétés des modules par rapport à celles des espaces vectoriels ; pour cela, on définit des modules associés à un A-module donné M, et qui se réduisent à {0} lorsque A est un corps. Les travaux de Henri Cartan et d'Alexandre Grothendieck ainsi que de Samuel Eilenberg ont largement fait progresser cette branche que l'on peut maintenant considérer comme autonome.

BIBLIOGRAPHIE

ARTIN E., *Algèbre géométrique,* Gauthier-Villars. - BOURBAKI N., *Algèbre,* I à III, VI, VII, IX, Hermann ; *Éléments d'histoire des mathématiques,* Hermann. - DIEUDONNÉ J., *Algèbre linéaire et Géométrie élémentaire,* Hermann. - FÉLIX L., *Exposé moderne des mathématiques élémentaires,* Dunod. - GODEMENT R., *Cours d'algèbre,* Hermann. - KEMENY, SNELL, THOMSON, *Algèbre moderne et Activités humaines,* Dunod. - QUEYSANNE M., *Cours d'algèbre,* Armand Colin.

LES ÉQUATIONS ALGÉBRIQUES

La résolution des équations algébriques a certainement été l'origine de développements parmi les plus importants des mathématiques. Les méthodes de recherche des solutions de telles équations, dès que le degré est supérieur à l'unité, ont fait intervenir de tout autres concepts que ceux utilisés pour les équations linéaires. Longtemps, les algébristes ont cherché à inclure l'extraction des racines n-ièmes parmi les opérations élémentaires de l'algèbre. En cherchant dans cette voie, ils parvinrent à résoudre les équations de degrés 2, 3 et 4, mais on dut attendre le XIXe siècle pour dresser une résolution d'ensemble des équations par la notion des groupes de Galois dont une très importante application est le théorème d'Abel sur la résolubilité des équations par radicaux.

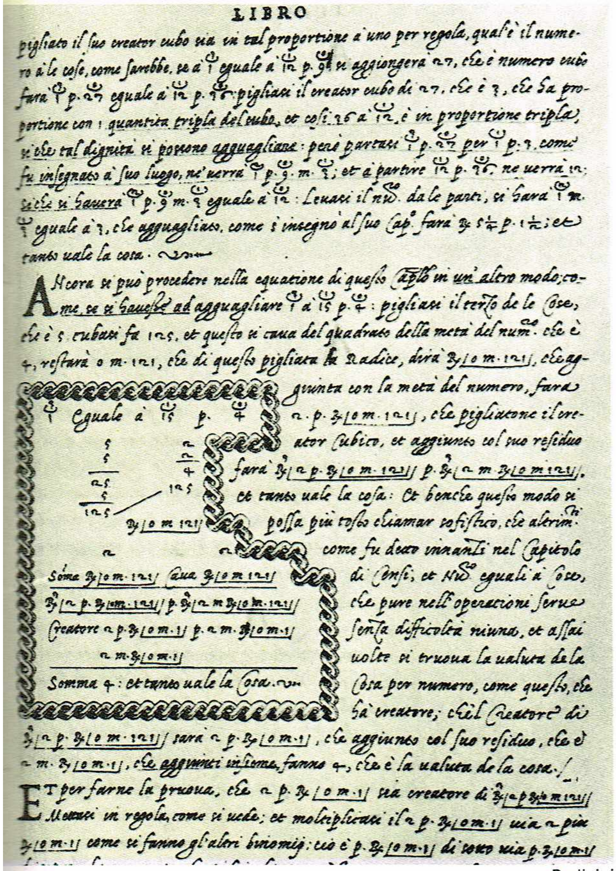
LIBRO

Pedicini

Pineider

▲ *A gauche, une page manuscrite de l'***Algèbre** *de* **R. Bombelli,** *mathématicien italien à qui l'on doit le premier exposé sur les nombres complexes, contenant des règles de calcul.*
A droite, **Nicolas Tartaglia** *à qui l'on doit notamment les formules de résolution pour l'équation générale du troisième degré.*

La méthode affine

Les équations du premier degré, grâce à l'outil formel de l'algèbre linéaire, se résolvent sans aucun problème. Sur un ensemble E, muni de deux lois — notées additivement et multiplicativement — qui lui confèrent une structure d'anneau, la recherche des éléments X tels que $AX = B$, où A et B sont donnés dans E, revient à la recherche de l'élément A^{-1}, inverse de A, lorsqu'il existe, ou sinon à un problème déjà expliqué dans le cadre des espaces vectoriels et qui se transpose aisément dans le cadre des modules sur un anneau : on interprète l'élément A comme une application linéaire de E dans lui-même, et l'on recherche tout d'abord l'ensemble des éléments images puis leurs « translatés » par l'élément B.

La méthode affine, qui est ainsi brièvement résumée, couvre entièrement la résolution des problèmes linéaires. Les techniques matricielles ont permis de dresser des méthodes algorithmiques complètes de résolution des équations du premier degré.

Le second degré

Le saut est alors très grand pour passer aux équations de degré supérieur; jusqu'ici, les équations linéaires n'utilisent que les opérations fondamentales définissant la structure, tandis que, dès le second degré, on voit apparaître l'extraction de radicaux. Dans l'équation

$$az^2 + bz + c = 0 \quad \text{où } a \neq 0,$$

l'étude du discriminant $\Delta = b^2 - 4\,ac$ permet de distinguer les trois cas bien connus (a, b, c sont des nombres réels).

Lorsque $\Delta > 0$, on peut écrire :

$$a\left(z - \frac{-b + \sqrt{\Delta}}{2\,a}\right)\left(z - \frac{-b - \sqrt{\Delta}}{2\,a}\right) = 0$$

d'où l'on déduit l'existence de deux racines réelles distinctes.

Lorsque $\Delta = 0$, on a alors $a\left(z + \frac{b}{2\,a}\right)^2 = 0$, et l'équation possède une racine double réelle.

Lorsque $\Delta < 0$, on a recours à la construction des nombres complexes pour écrire :

$$a\left(z - \frac{-b + i\sqrt{\Delta}}{2\,a}\right)\left(z - \frac{-b - i\sqrt{-\Delta}}{2\,a}\right) = 0.$$

C'est à l'Italien R. Bombelli que l'on doit le premier exposé sur les nombres complexes, contenant des règles de calcul; cet exposé contient d'ailleurs en germe de nombreux concepts d'algèbre linéaire.

Les deux racines sont alors deux nombres complexes conjugués. Les règles de calcul sur le corps $\mathbb{C}$ permettent la généralisation immédiate du procédé de résolution de $az^2 + b + c = 0$ lorsque a, b, c sont des nombres imaginaires.

Équations de degrés 3 et 4

La forme générale : $ax^3 + bx^2 + cx + d = 0$ **(1)** de l'équation du troisième degré peut se ramener à celle, plus simple, **(2)** $z^3 + pz + q = 0$ où p et q sont des expressions rationnelles de a, b, c et d :

$$p = \frac{-b^2 + 3\,ac}{3\,a^2} \quad \text{et} \quad q = \frac{2\,b^3 - 9\,abc + 27\,a^2d}{27\,a^3}$$

Il suffit pour cela de poser $z = x + \frac{b}{3\,a}$ après avoir divisé les deux membres de l'équation de départ par le terme a, supposé non nul (sinon l'équation serait de degré 2).

C'est au début du XVI[e] siècle que Scipion del Ferro trouve alors la formule de résolution :

$$z = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}}$$

Cette sensationnelle découverte relança, à travers des querelles d'écoles, les recherches sur les équations. Hyeronimus Cardan (1501-1576), après Nicolas Tartaglia, en 1545, publie les formules de résolution qu'il complète en formulant quelques observations. Il remarque ainsi que les équations du troisième degré peuvent avoir trois racines; que la somme des racines de **(1)** est toujours égale à $-\frac{b}{a}$. La méthode de Cardan pour résoudre **(2)** consiste à poser $z = y + t$, ce qui donne

$$y^3 + t^3 + (3\,yt + p)\,(y + t) + q = 0.$$

▲ *Frontispice de l'*Algèbre nouvelle *de* F. Viète, *maître des Requêtes de l'Hôtel du Roi (1540-1603); il fut un des grands mathématiciens de son siècle.*

On cherche alors les racines de cette nouvelle équation telles que $3yt + p = 0$; on a donc le système :

$$\begin{cases} y^3 + t^3 = -q \\ yt = -\dfrac{p}{3} \end{cases}$$

En posant alors $\alpha = y^3$ et $\beta = t^3$, on a :

$$\alpha + \beta = -q \quad \text{et} \quad \alpha\beta = -\frac{p^3}{27}$$

Les nombres α et β sont donc racines de l'équation du second degré en u :

$$u^2 + qu - \frac{p^3}{27} = 0. \qquad \textbf{(3)}$$

Par suite si γ représente l'une des trois déterminations du nombre $\sqrt[3]{\alpha}$, et $1, j, j^2$ les trois racines cubiques de l'unité, les trois valeurs possibles pour y sont γ, $j\gamma$ et $j^2\gamma$. Puis de $t = -\dfrac{p}{3y}$, on obtient les trois valeurs possibles correspondantes pour t :

$$-\frac{p}{3\gamma}, \quad -\frac{pj^2}{3\gamma} \quad \text{et} \quad -\frac{pj}{3\gamma}.$$

Par conséquent, les solutions de **(2)** sont :

$$z_1 = \gamma - \frac{p}{3\gamma}, \quad z_2 = j\gamma - \frac{pj^2}{3\gamma}, \quad z_3 = j^2\gamma - \frac{pj}{3\gamma}.$$

La discussion porte sur les racines de l'équation **(3)**, dont le discriminant est : $\Delta = 4\left(\dfrac{q^2}{4} + \dfrac{p^3}{27}\right)$. Lorsque $\dfrac{q^2}{4} + \dfrac{p^3}{27} > 0$ pour l'équation **(2)**, on a une racine réelle et deux autres complexes conjuguées :

— lorsque $\dfrac{q^2}{4} + \dfrac{p^3}{27} < 0$, l'équation **(2)** admet trois racines réelles ;

— lorsque $\dfrac{q^2}{4} + \dfrac{p^3}{27} = 0$, on trouve deux racines réelles, dont une double.

Malgré son intérêt, cette méthode est peu employée ; on lui préfère des méthodes numériques, faisant appel, par exemple, à la trigonométrie.

C'est un élève de Cardan, Luigi Ferrari, qui, en 1545, énonce la règle pour résoudre l'équation générale du quatrième degré :

$$x^4 + px^3 + qx^2 + rx + s = 0 \qquad \textbf{(4)}$$

Auparavant, l'équation bicarrée $y^4 + my^2 + n = 0$ avait été longuement étudiée et Cardan avait remarqué qu'elle pouvait avoir quatre racines. La voie est alors ouverte plus largement encore avec les travaux de Viète sur les relations entre coefficients et racines d'une équation algébrique, puis ceux de Girard (1595-1632) qui prolonge l'idée — énoncée par Cardan — de l'ordre de multiplicité d'une racine, et va aboutir au célèbre *théorème de Gauss-d'Alembert*.

La méthode de Ferrari transforme l'équation de départ, du quatrième degré, en une équation du troisième degré, théoriquement résoluble. Comme pour le second degré, on considère le premier membre de **(4)** comme le début du développement d'un carré parfait dont un terme est inconnu, et on a :

$$\left(x^2 + \frac{p}{2}x + t\right)^2 - \left[\left(t + \frac{p^2}{4} - q\right)x^2 + \left(\frac{pt}{2} - r\right)x + \frac{t^2}{4} - s\right] = 0$$

Il suffit alors de chercher à déterminer t de telle sorte que le crochet soit un carré parfait, pour que l'on n'ait plus à résoudre que deux équations simples du second degré. Cette condition est réalisée dès que le trinôme entre crochets admet une racine double, soit si :

$$\left(\frac{pt}{2} - r\right)^2 - 4\left(t + \frac{p^2}{4} - q\right)\left(\frac{t^2}{4} - s\right) = 0$$

et l'on reconnaît là une équation du 3^e degré en t.

La résolution des équations de degré supérieur à quatre posa dès lors un problème à tous les mathématiciens qui ont longtemps essayé de poursuivre, avec le 5ᵉ degré, les méthodes de résolution par radicaux. L'obstacle fut infranchissable, et, vers la fin du XVIIIᵉ siècle, Leibnitz est encore l'un des derniers à se préoccuper de ce problème. Une longue période de tâtonnements s'ouvrait alors, et ce sont les recherches de Lagrange (1736-1813) qui vont dégager, à partir des relations entre coefficients et racines, la voie que Galois (1811-1832) va prendre pour résoudre d'une façon globale le problème des équations algébriques.

Polynômes

On désigne par K un corps commutatif, et par K [X] l'anneau des polynômes à une indéterminée à coefficients dans K, c'est-à-dire des expressions de la forme $\sum_{n=0}^{\infty} a_n X^n$ où tous les scalaires a_n du corps K sont nuls à partir d'un certain rang. On rappelle qu'un idéal I d'un anneau A est un sous-groupe additif de A tel que, si $X \in A$ et $y \in I$, alors $Xy \in I$. Par conséquent, tout idéal est un sous-anneau (la réciproque étant fausse). Dans l'anneau K [X], les idéaux possèdent des propriétés très particulières, dont la plus importante est sans nul doute d'être principaux : c'est-à-dire que pour tout idéal $\mathfrak{J} \subset K[X]$, on peut trouver un polynôme $P \in \mathfrak{J}$ tel que tout élément de $\mathfrak{J}$ soit un multiple de P par un élément de K [X] ; donc pour tout $Q \in \mathfrak{J}$, il existe un polynôme $A \in K[X]$ tel que $Q = P \cdot A$. Ce polynôme P est unique à une constante multiplicative près. Celui dont le coefficient du terme de plus haut degré est 1 est dit base de l'idéal.

On dit qu'un idéal $\mathfrak{J}$ est premier si la condition :

$$A \cdot B \in \mathfrak{J} \Rightarrow A \in \mathfrak{J} \text{ ou bien } B \in \mathfrak{J}.$$

On peut rapprocher cette définition de celle d'un polynôme p (X) irréductible si :

$$p(X) = q(X)\, r(X) \Rightarrow q(X) = c \in K \text{ ou bien } r(X) = c \in K.$$

On montre d'ailleurs que si un idéal $\mathfrak{J}$ est premier, son polynôme de base est irréductible, et réciproquement.

Soit L un corps contenant le corps K, on dit que L est un sur-corps de K ; par exemple, $\mathbb{C}$ est un sur-corps de $\mathbb{R}$ qui est lui-même un sur-corps de $\mathbb{Q}$. La loi externe définie par : $(l, k) \to l \cdot k$ où $l \in L$ et $k \in K$, donne à L une structure d'algèbre sur K ; on dit alors que L est une extension de K, par exemple $\mathbb{C}$ est une extension de $\mathbb{R}$. Soit alors $\alpha \in L$, à tout polynôme $f(X) \in K[X]$, on peut faire correspondre le scalaire $f(\alpha) \in L$; et lorsque f (X) décrit K [X], les $f(\alpha)$ correspondants décrivent un sous-anneau de L, dit engendré par K et α, et que l'on note $K[\alpha]$.

En reprenant la même construction, mais cette fois avec le corps K (X) des fractions rationnelles en X à coefficients dans K, quotient de deux polynômes de K [X], soit $\frac{f(X)}{g(X)}$, si $\alpha \in L$, on obtient un sous-corps de L en considérant les scalaires $f(\alpha)/g(\alpha)$ pour tous les polynômes $f(X) \in K[X]$ et $g(X) \in K[X]$ tels que $g(\alpha) \neq 0$; on l'appelle sous-corps engendré par K et α et on le note $K(\alpha)$. On remarque tout de suite que si $\alpha \in K$, alors $K(\alpha) = K$, et si $\alpha \notin K$, $K(\alpha) \underset{\neq}{\supset} K$.

Définition

Le sur-corps L de K est une extension simple de K, s'il existe un élément $\alpha \in L$ tel que $L = K(\alpha)$.

Ce sont ces extensions qui permettent de rechercher l'ensemble des racines d'une équation algébrique : on considère un polynôme f (X) irréductible sur un corps K, et on va chercher un sur-corps de K dans lequel f (X) possède une racine.

Définition

Soit $L = K(\alpha)$ une extension simple de K. Elle est transcendante sur K s'il n'existe aucun polynôme f (X) non nul, à coefficients dans K, tel que $f(\alpha) = 0$. Elle est dite algébrique dans le cas contraire. Ce sont évidemment les extensions algébriques simples qui vont permettre l'étude des équations algébriques. Leurs propriétés sont très larges.

On montre que, si $K(\alpha)$ est algébrique simple, alors le corps $K(\alpha)$ est égal à l'anneau $K[\alpha]$. Ceci permet de voir que toute extension algébrique simple $K(\alpha)$ est isomorphe à l'anneau quotient de K [X] par l'idéal des polynômes multiples d'un certain polynôme irréductible normé (c'est-à-dire dont le coefficient du terme de plus haut degré est égal à l'unité). Soit d le degré de ce polynôme irréductible ; alors tout élément z de $k(\alpha)$ se met de façon unique sous la forme :

$$z = a_0 + a_1\alpha + \ldots\ldots + a_{d-1}\alpha^{d-1}$$

où $a_i \in K$ pour tout i.

En effet, puisque $z \in K(\alpha)$, $z \in K[\alpha]$, donc on peut trouver un polynôme f tel que $z = f(\alpha)$. Soit p (X) le polynôme irréductible de degré d. La division de f (X) par p (X) s'écrit : $f(X) = q(X)\, p(X) + r(X)$ avec r (X) polynôme de degré inférieur à d, ou bien $r(X) = 0$. Par conséquent, $f(\alpha) = r(\alpha)$ puisque $p(\alpha) = 0$. On a donc bien une représentation du type indiqué pour z.

On reconnaît donc que $K(\alpha)$ est un espace vectoriel sur K, de dimension finie, égale à d. Ce nombre s'appelle le degré de l'extension $K(\alpha)$ et se note $d = [K(\alpha) : K]$. Les extensions transcendantes simples de K sont, par contre, des espaces vectoriels de dimension infinie sur K.

Le corps des nombres complexes $\mathbb{C}$ est une extension de degré 2 (ou encore quadratique), soit $\mathbb{R}(i)$ du corps des réels $\mathbb{R}$, le polynôme irréductible associé étant $x^2 + 1$; et l'on sait bien que les éléments de $\mathbb{C}$ s'écrivent de façon unique $a + bi$. Le corps $\mathbb{Q}(\sqrt{2})$ dont les éléments se représentent par $a + b\sqrt{2}$ (où $a \in \mathbb{Q}$ et $b \in \mathbb{Q}$), est une extension quadratique du corps $\mathbb{Q}$ des nombres rationnels, le polynôme irréductible associé étant $x^2 - 2$.

Si maintenant on se donne un polynôme $p(X) \in K[X]$ irréductible sur K, on cherchera donc une extension algébrique simple $K(\alpha)$ dont le polynôme irréductible associé soit p (X), afin de trouver une racine de p (X) dans ce sur-corps.

L'étude qui vient d'être faite montre que le corps $K[X]/(p(X))$ satisfait aux conditions imposées, en désignant par $(p(X))$ l'idéal des polynômes multiples de p (X). Cette construction permet de définir un symbole α, racine d'un polynôme irréductible sur K. On peut noter que l'extension cherchée est unique à un isomorphisme près laissant les éléments de K invariants (on dit un K-isomorphisme).

On donne à cette construction le nom justifié d'*adjonction symbolique*. C'est ainsi que Cauchy construisit les nombres complexes par le corps quotient

$$\mathbb{R}[X]/(X^2 + 1).$$

Il faut bien sûr rapprocher ces notions d'extensions algébriques ou transcendantes de celles de nombres algébriques ou transcendants sur un corps K, le parallélisme entre les définitions étant évident.

L'adjonction symbolique que nous venons de définir montre donc que, si l'on se donne un corps K, un polynôme p (X) irréductible dans K, alors il existe une extension algébrique simple (de degré fini) L telle que, si p (X) possède une racine dans L, il en possède m (si m est le degré de p (X)) ; autrement dit, telle que p (X) s'y décompose en facteurs irréductibles de degré 1. Une telle extension est dite galoisienne.

Il s'agit là de l'une des notions de base posées par Galois pour sa théorie des équations algébriques. C'est Lagrange qui lui avait ouvert la voie en observant sur les exemples d'équations de degrés 3 et 4 le grand intérêt de l'étude du nombre N de valeurs prises par une fonction rationnelle des racines lorsque l'on permute celles-ci. Il définit les « résolvantes de Lagrange » :

$$z_p = \sum_{k=1}^{n} \omega_p^k x_k,$$

où $x_1, x_2, \ldots, x_n$ désignent les n racines d'une équation algébrique de degré n et $(\omega_p)_{p=1,\ldots,n}$ les racines n-ièmes de l'unité, et montre dans un très célèbre mémoire que la détermination des racines x_k est assurée dès que l'on connaît les nombres z_p. Un mémoire de Vandermonde (1735-1796), mathématicien français, dont les résultats ne furent entièrement démontrés que par Carl Friedrich Gauss (1777-1855), complète les recherches de Lagrange.

Palais de la Découverte - Paris

▶ ***Le mathématicien norvégien* Niels-Henrik Abel *(1802-1829) ; il montra que les équations algébriques générales ne peuvent pas être résolues algébriquement quand leur degré est supérieur au quatrième.***

Groupes de Galois — Théorème d'Abel

On rappelle qu'une permutation d'un ensemble E est une bijection de E sur E. Lorsque E est un ensemble fini, on représente une permutation par un tableau à deux lignes, chaque élément de la ligne supérieure étant placé au-dessus de son image. L'ensemble des permutations d'un ensemble fini, muni de la loi de composition usuelle des applications, forme un groupe, que l'on appelle le groupe symétrique.

Soit K un corps et L une extension galoisienne de K. Les automorphismes de L qui laissent K invariant (automorphies par rapport à K, de L) forment un groupe, qui est le groupe de Galois de L par rapport à K. C'est à Julius Dedekind (1831-1916) que l'on doit cette définition remplaçant celle du groupe de permutations des racines d'une équation telle que Galois, en 1830, l'avait énoncée. Le lien entre ces deux formes s'établit comme suit : si p (X) est un polynôme irréductible dans un corps K, les racines $x_1, x_2, ..., x_p$ de ce polynôme engendrent une extension galoisienne L de K. Soit G le groupe de Galois de L par rapport à K ; si f est un élément de G, toute racine de p (X) est transformée par f en une autre racine. Par conséquent, f induit sur les racines de p (X) une permutation qui, réciproquement, détermine f.

Soit alors q (X) un autre polynôme irréductible dans K et M l'extension de K construite à partir des zéros $y_1, y_2, ..., y_q$ de q (X). On voit alors que, lorsque la résolution de p (X) = 0 donne celle de q (X) = 0, les racines de q (X) sont des expressions rationnelles de celles de p (X), donc sont des éléments de L ; par suite, M est un sous-corps de L. Le principe de Galois consiste à construire ces corps intermédiaires échelonnés entre K et L. Soit T un de ces corps, alors les T-automorphismes de L forment un sous-groupe H de G. Réciproquement, soit H un sous-groupe de G ; les éléments de L invariants par les automorphismes de H forment un sur-corps S de K. On a donc construit une correspondance entre les corps intermédiaires entre K et L et les sous-groupes de G, et une autre en sens contraire. C'est là que le théorème fondamental de Galois se place en montrant que ces deux correspondances sont réciproques. C'est-à-dire que, si T est un corps intermédiaire et si H est le groupe des T-automorphismes de L, alors T est aussi le sous-corps de L formé par les éléments invariants par tous les éléments de H. Donc, si H est un sous-groupe de G et si T est le corps formé par les éléments invariants par les éléments de H, alors H est aussi le groupe des T-automorphismes de L. Pour cette raison, on dit que le corps T et le groupe H sont associés.

La théorie de Galois permet de résoudre le problème de la résolubilité des équations radicaux, qui consiste à trouver une expression formée des quatre opérations et de l'extraction de racines p-ièmes qui soit solution d'une équation p (X) = 0, algébrique. On a pu ainsi trouver la condition générale pour qu'une équation soit résoluble par radicaux.

Soit donc un corps K et un polynôme irréductible dans K, p (X). Chaque racine de p (X) construite par radicaux est algébrique sur K : elle est racine d'un polynôme q (X) irréductible dans K. Soit L l'extension de K construite à partir de ces radicaux (racines de p (X)) et de tous les autres zéros des polynômes q (X) ; soit G le groupe de Galois de cette extension, qui est galoisienne. Les racines de p (X) sont dans L, et engendrent un corps M intermédiaire entre K et L. On sait qu'on peut associer à M un sous-groupe H de G, et que le groupe de Galois de l'extension L est alors G/H.

Le mathématicien norvégien Niels-Henrik Abel (1802-1829) a démontré que les groupes de Galois engendrés par des radicaux possèdent la propriété dite de résolubilité ; c'est-à-dire qu'il existe une suite de sous-groupes G_1 (= G), G_2, ..., G_{n-1}, G_n (= {1}) commençant par G, finissant par le groupe formé du seul élément unité (dit groupe unité), tels que chaque G_i soit un sous-groupe distingué de G_{i-1} (c'est-à-dire $G_i \, G_{i-1} \, G_i^{-1} \subset G_i$), le groupe quotient G_{i-1}/G_i étant cyclique (c'est-à-dire fini et engendré par un seul élément). On montre ainsi que le groupe des permutations d'un ensemble à 3 éléments est résoluble ; de même le groupe — à 24 éléments — des permutations d'un ensemble à 4 éléments est résoluble : il est engendré en fait par les permutations :

$$\pi_1 = \begin{pmatrix} a & b & c & d \\ b & a & d & c \end{pmatrix}, \quad \pi_2 = \begin{pmatrix} a & b & c & d \\ b & c & a & d \end{pmatrix}, \quad \pi_3 = \begin{pmatrix} a & b & c & d \\ b & a & c & d \end{pmatrix}$$

et si l'on pose G_2 = groupe engendré par π_1 et π_2, G_3 = groupe engendré par π_1 et $\pi_2 \pi_1 \pi_3^{-1}$,

$$\left[\text{on rappelle que } \pi_3^{-1} = \begin{pmatrix} a & b & c & d \\ b & a & c & d \end{pmatrix}\right]$$

et G_4 = groupe engendré par π_1, alors la suite G, G_2, G_3, G_4, $\mathcal{E}$ où $\mathcal{E}$ est formé par la seule $\pi_0 = \begin{pmatrix} a & b & c & d \\ a & b & c & d \end{pmatrix}$ vérifie les conditions énoncées, les groupes quotients ayant pour ordres respectifs 2, 3, 2, 2.

Si maintenant on en revient au problème de départ, on voit (théorème d'Abel) que, pour qu'une équation algébrique soit résoluble par radicaux, il faut et il suffit que son groupe de Galois soit résoluble.

Il est donc maintenant évident que toute équation de degré 3 est résoluble par radicaux (précédemment, on a donné les formules explicites de Cardan), et qu'il en est de même pour toutes les équations de degré 4.

L'étude du groupe de permutation d'un ensemble à n éléments, pour $n \geqslant 5$, que l'on ne peut faire ici en détail, montre qu'il n'est en général pas résoluble (à moins d'imposer des conditions restrictives sur l'équation). Le théorème d'Abel montre donc qu'une équation de degré supérieur ou égal à 5 ne peut en général être résoluble par radicaux.

Ce théorème met donc ainsi un point final à ce très vieux problème pour lequel les plus grands mathématiciens ont essayé les plus diverses des méthodes pour trouver une solution. C'est d'ailleurs en essayant de résoudre par radicaux l'équation de degré 5 qu'Abel se convainquit de l'impossibilité de le faire et, reprenant la voie ouverte par Lagrange — sur les permutations des racines dans leurs expressions rationnelles — énonça son résultat en utilisant l'extraordinaire théorie de Galois.

BIBLIOGRAPHIE

DUBREUIL-JACOTIN P. et M., *Algèbre,* Dunod. - GALOIS É., *Œuvres,* Gauthier-Villars. - LANG S., *Algèbre.* - SAMUEL P., *Théorie algébrique des nombres,* Hermann.

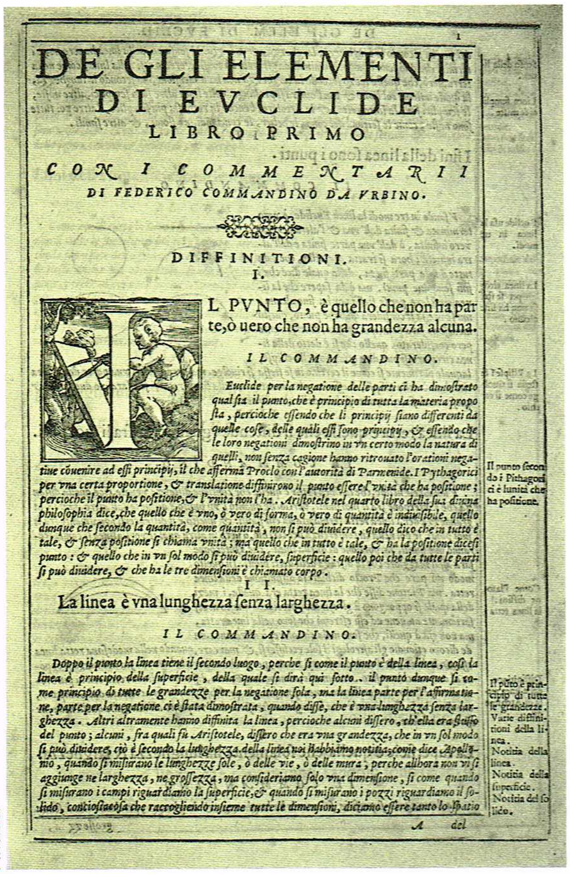

DE GLI ELEMENTI DI EVCLIDE

LIBRO PRIMO

CON I COMMENTARII DI FEDERICO COMMANDINO DA VRBINO.

DIFFINITIONI.

I.

IL PVNTO, è quello che non ha parte, ò uero che non ha grandezza alcuna.

IL COMMANDINO.

II.

La linea è vna lunghezza senza larghezza.

IL COMMANDINO.

Pineider

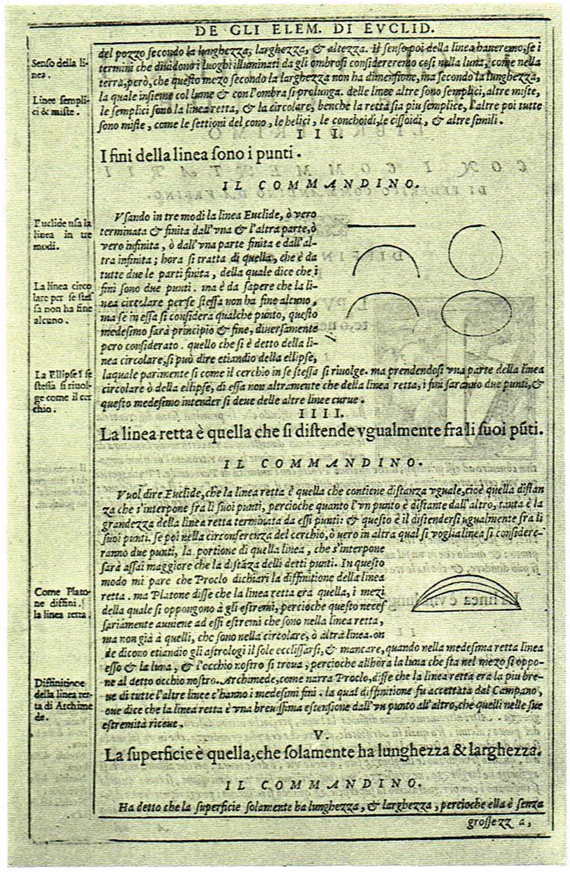

DE GLI ELEM. DI EVCLID.

III.

I fini della linea sono i punti.

IL COMMANDINO.

IIII.

La linea retta è quella che si distende vgualmente fra i suoi pũti.

IL COMMANDINO.

V.

La superficie è quella, che solamente ha lunghezza & larghezza.

IL COMMANDINO.

Pineider

◀ ***Deux pages extraites des Éléments d'Euclide, œuvre qui peut être considérée comme l'une des premières synthèses de la géométrie.***

LA GÉOMÉTRIE

La *géométrie,* comme son nom l'indique, naquit du besoin pratique de mesurer des parcelles de terrain. Il est certain que déjà les Égyptiens avaient trouvé des méthodes de mesure et avaient même élaboré un début de science géométrique. La tradition veut que la géométrie grecque naisse vers le VI[e] siècle av. J.-C. avec *Thalès de Milet*. Elle s'est ensuite progressivement affinée et développée avec *Pythagore,* au V[e] siècle, *Eudoxe,* au IV[e] siècle, qui obtinrent un nombre appréciable de résultats géométriques : inscription de sphères dans un cône, similitude des triangles, principales propriétés du cercle, polygones et polyèdres réguliers, sections coniques. En utilisant et en complétant ces résultats, *Euclide* (fin du IV[e] siècle av. J.-C.) réalisa avec ses *Éléments* la première synthèse de la géométrie. Il eut le souci de fonder la géométrie et donna un exemple important d'élaboration d'un système axiomatique. Aujourd'hui, les fondements de ce système se révèlent très peu assurés. C'est seulement à la fin du XIX[e] siècle — et surtout avec *D. Hilbert* — que la géométrie euclidienne fut fondée de façon satisfaisante.

D. Hilbert, dans son livre *Grundlagen der Geometrie* (1899), donna la première construction axiomatique qui ne devait rien à l'intuition. Le système d'axiomes utilisé est divisé en cinq groupes; la grande originalité de son œuvre est que le contenu concret, ou conceptuel, n'est pas présupposé, mais est introduit par la formulation des axiomes. D'autre part, D. Hilbert formula les conditions auxquelles doit obéir un système d'axiomes pour être satisfaisant : cohérence, indépendance, saturation. Il établit l'indépendance du postulat d'Euclide sur les parallèles par rapport aux autres axiomes et prouva aussi qu'on peut construire des géométries non contradictoires en conservant tous les axiomes euclidiens, sauf celui des parallèles.

Aujourd'hui, la géométrie comporte un domaine de recherche immense, allant de la géométrie plane aux géométries à *n* dimensions, de la géométrie classique aux géométries définies par un groupe de transformations (selon le *Programme d'Erlangen* de *F. Klein*), de la géométrie algébrique à la géométrie différentielle et à l'*analysis situs* ou topologie.

La géométrie élémentaire

La géométrie plane

Les axiomes

En géométrie plane, on considère un ensemble de base appelé *plan*. Les éléments de cet ensemble sont appelés *points*. Une partie quelconque d'un plan se nomme une *figure*.

D. Hilbert parvint le premier à formuler une trentaine d'axiomes qui, non seulement, introduisent des relations entre le plan et certaines de ses figures, mais encore construisent le plan et définissent les figures fondamentales.

Ces axiomes se divisent en cinq groupes :

— axiomes d'appartenance,
— axiomes d'ordre,
— axiomes de congruence ou d'égalité,
— axiome des parallèles (ou d'Euclide),
— axiomes de continuité.

● *Les axiomes d'appartenance* expriment les relations d'appartenance et d'inclusion entre points, droites et plans; par exemple : « par deux points passe une droite et une seule » (*fig.* 1).

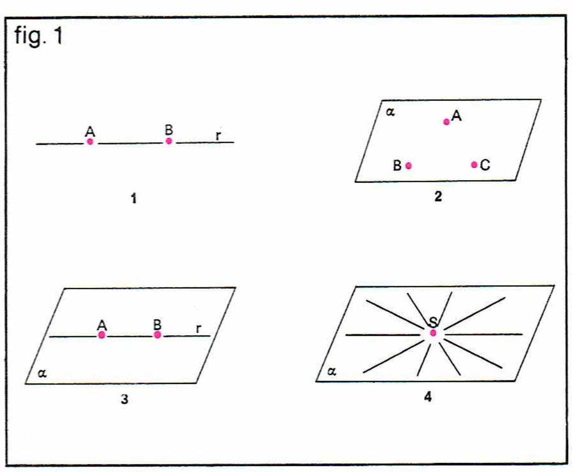

I.G.D.A.

◀ **Figure 1 : 1)** ***deux points distincts déterminent une droite; 2) trois points distincts n'appartenant pas à une même droite déterminent un plan; 3) si deux points d'une droite appartiennent à un plan, alors la droite appartient à ce plan; 4) l'ensemble des droites d'un même plan sécantes en un point S, forme un faisceau de centre S.***

fig. 4

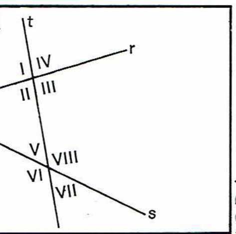

▲▶ *A gauche,* **figure 4** — *une droite coupant deux droites coplanaires, détermine des angles : alternes-externes (I-VII et IV-VI); alternes-internes (II-VIII et III-V); correspondants (I-V, II-VI, IV-VIII et III-VII); internes conjugués (II-V et III-VIII); externes conjugués (I-VI et IV-VII).* *A droite,* **figure 2** : **1)** *le segment AB;* **2)** *deux segments consécutifs;* **3)** *deux segments adjacents;* **4)** *une demi-droite d'origine O;* **5)** *axiome de Pasch;* **6)** **P et Q** *appartiennent au même demi-plan de bord* **r, Q** *et* **R** *appartiennent chacun à un des demi-plans de bord* **r** *et il existe alors un point* **r** *entre* **Q** *et* **R.** ▼ *Ci-dessous,* **figure 5** — *triangles :* **1)** *angle externe à un angle d'un triangle;* **2)** *triangle équilatéral;* **3)** *triangle isocèle.* *En bas,* **figure 7** : *un angle externe d'un triangle est égal à la somme des angles internes non adjacents.*

fig. 5

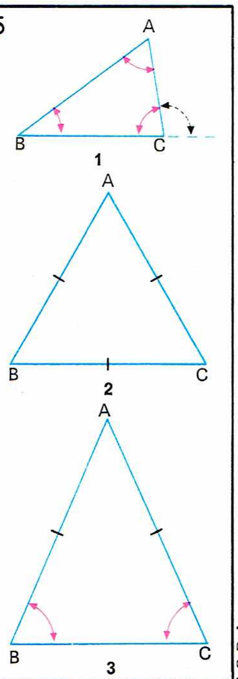

I.G.D.A.

fig. 7

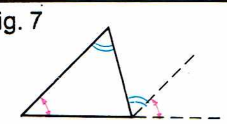

I.G.D.A.

fig. 2

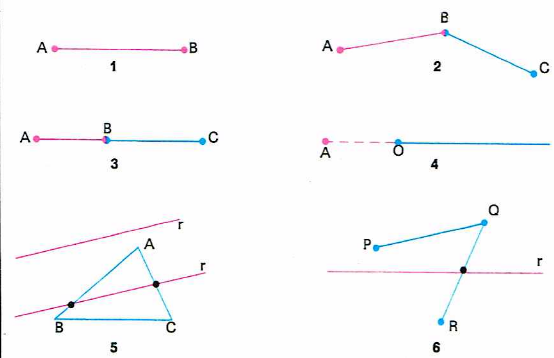

I.G.D.A.

fig. 3

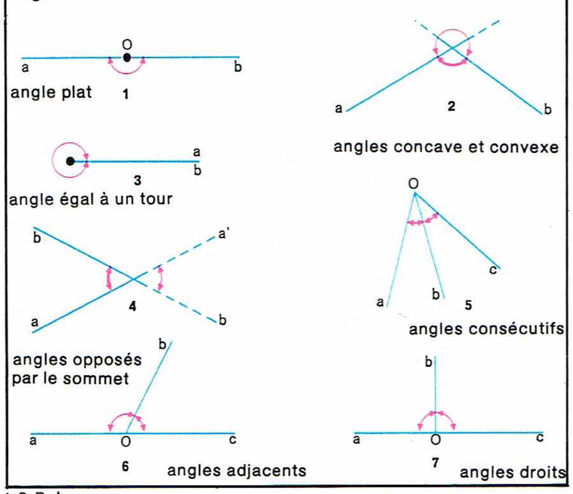

I.G.D.A.

● *Les axiomes d'ordre* précisent l'emploi et les propriétés du mot « entre »; par exemple : « sur la droite définie par deux points distincts A et B, il existe au moins un point C situé entre ces deux points (et donc au moins une infinité dénombrable de points) »; l'axiome de *Pasch* affirme que : « si A, B et C sont trois points non alignés, et *r*, une droite de leur plan telle qu'aucun des trois points ne lui appartienne, alors *r* coupe deux ou aucun des segments parmi les segments AB, BC et AC » (le segment AB est constitué, par définition, de A et de B et des points situés entre A et B) (*fig.* 2).

● *Les axiomes d'égalité* expriment les propriétés de l'égalité géométrique, sans recours à l'intuition du déplacement des objets indéformables. L'égalité géométrique ne doit pas être confondue avec la notion d'égalité de la logique et de la théorie des ensembles : deux segments distincts peuvent être égaux, pourvu qu'ils appartiennent à la même classe d'équivalence (l'égalité étant ici une relation d'équivalence); on parlera plutôt par la suite de *figures isométriques* que de « figures égales »; ce qualificatif, qui évoque une *égalité de mesure,* sera justifié plus loin. En considérant une classe de segments deux à deux égaux, on arrive au concept de *longueur,* et en considérant une classe d'angles deux à deux égaux, on arrive au concept d'*amplitude angulaire* (*fig.* 3).

● *L'axiome des parallèles.* On peut tirer des axiomes précédents que, par un point A extérieur à une droite *r,* il est possible de mener une droite qui ne coupe pas *r.* Par définition, deux droites parallèles sont deux droites coplanaires qui ne se coupent pas.

Axiome d'Euclide : soit une droite *r* et A un point extérieur à *r,* dans le plan déterminé par *r* et A, il existe, au plus, une droite qui passe par A et qui ne coupe pas *r.*

Il résulte de ce qui précède et de ce dernier axiome que, par un point extérieur à une droite, il passe une unique parallèle à cette droite. L'introduction de cet axiome des parallèles simplifie les fondements de la géométrie et allège considérablement son élaboration.

On démontre notamment que deux droites coplanaires formant avec une autre droite qui les coupe des angles alternes-internes égaux sont parallèles; ou encore : que deux droites coplanaires formant avec une autre droite qui les coupe des angles conjugués supplémentaires (leur somme est égale à un angle plat) sont parallèles; ou encore des angles correspondants, ou alternes-externes, égaux (*fig.* 4).

On démontre aussi que des segments parallèles qui ont leurs extrémités sur deux droites parallèles sont égaux; que si deux droites sont parallèles, toute droite perpendiculaire à l'une est perpendiculaire à l'autre.

● *Les axiomes de la continuité* précisent enfin les conditions de passage à la limite dans l'espace et de mesure des grandeurs. L'*axiome d'Archimède* permet l'introduction de la continuité en géométrie : « Entre deux points A, B d'une droite, choisissons un point A_1 et déterminons des points distincts A_2, A_3, ..., tels que les segments AA_1, A_1A_2, A_2A_3, ... soient égaux; il existera toujours un point A_n tel que B soit situé entre A et A_n. » On peut écrire aussi l'axiome d'Archimède pour les angles. Les axiomes et postulats euclidiens ont été reconnus insuffisants pour justifier les raisonnements des « éléments » fondés sur la continuité et sur l'ordre; ce qui amena *Dedekind, Cantor, Weierstrass,* vers 1870, à formuler un *postulat de la continuité de la droite,* et d'autre part *Pasch* à introduire le *postulat d'ordre* à travers les axiomes de la géométrie.

Correspondance biunivoque – Figures isométriques

Par définition, deux figures sont dites *isométriques* (ou égales) s'il existe entre elles une correspondance ponctuelle biunivoque, appelée aussi *isométrie,* telle que les segments et les angles déterminés par les points qui se correspondent soient toujours égaux. Si les correspondants de trois points A, B, C sont respectivement A′, B′, C′, on appelle correspondant ou *homologue* à AB le segment A′B′, et ainsi de suite.

Le triangle

Par définition, on appelle *triangle* ABC (si A, B et C sont trois points non alignés) la figure constituée des segments AB, BC, AC appelés côtés et des points simultanément intérieurs aux angles convexes $\widehat{ABC}$, $\widehat{BCA}$, $\widehat{CAB}$ (*fig.* 5).

fig. 6

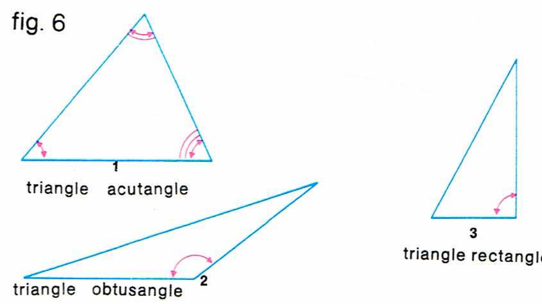

I.G.D.A.

Remarquons que tout triangle est une figure *convexe,* une figure *convexe* étant par définition une figure telle que, si deux points A et B lui appartiennent, alors le segment AB lui appartient. Il y a trois cas bien connus d'égalité des triangles :

— deux triangles ayant deux côtés égaux et l'angle compris entre ces côtés égal sont égaux;

— deux triangles ayant un côté égal et les angles adjacents à ce côté égaux sont égaux;

— deux triangles ayant leurs trois côtés égaux sont égaux.

On démontre qu'un côté d'un triangle est plus petit que la somme des deux autres et plus grand que leur différence. Ce résultat est généralisé en topologie sous le nom d'inégalité triangulaire (voir *Topologie*) (*fig.* 6).

On démontre que le postulat d'Euclide implique que la somme des angles d'un triangle plan est égale à un angle plat ou, de même, que tout angle externe d'un triangle est égal à la somme des angles internes non adjacents (*fig.* 7).

Distances, lieux, symétries

Par définition, la *distance* entre deux points est la longueur de leur segment; la distance d'un point à une

droite est la distance de ce point à sa projection sur la droite. On en déduit que la distance d'un point à une droite est le minimum des longueurs des segments ayant pour extrémités le point considéré et un point de la droite. On définit la distance de deux droites parallèles comme la distance d'un point de l'une à l'autre (*fig.* 8).

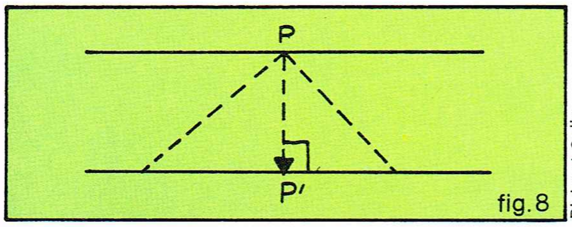

fig. 8

Richard Colin

On appelle *lieu des points* qui jouissent d'une propriété donnée l'ensemble de tous les points pour lesquels cette propriété est vérifiée. On démontre facilement que le lieu des points équidistants des extrémités d'un segment est la perpendiculaire élevée en son centre qu'on appelle *axe* du segment. On démontre aussi que le lieu des points d'un plan à une distance donnée *d* d'une de ses droites *m* est la réunion de deux parallèles à la droite (*fig.* 9).

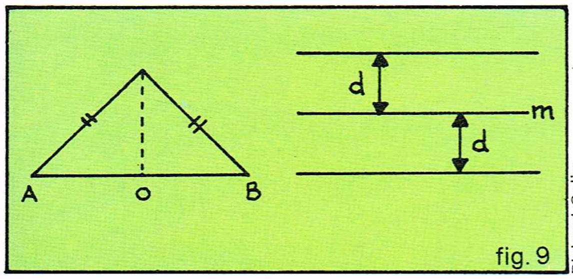

fig. 9

Richard Colin

Par définition, une circonférence (ou par extension, un cercle) est le lieu des points d'un plan à égale distance d'un point, appelé *centre*. Cette distance commune se nomme *rayon*, et le *diamètre* est le double du rayon (*fig.* 10 et 11).

On démontre que deux cercles dont les rayons sont égaux sont égaux.

Par définition, deux points sont dits *symétriques* par rapport à un point O si O est le milieu de leur segment; on les dit symétriques par rapport à une droite *s* (axe de symétrie) si celle-ci est l'axe de leur segment. La figure F' symétrique d'une figure F par rapport à O (respectivement par rapport à *s*) est lieu des points symétriques des points de F par rapport à O (respectivement par rapport à *s*).

On démontre le théorème suivant très important : *deux figures symétriques sont isométriques.*

Grandeurs géométriques

Considérons un ensemble (généralement infini) d'êtres entre lesquels on peut établir une relation d'équivalence. Sur les classes d'équivalence, on se donne une opération interne qu'on appelle somme et une relation d'ordre total compatible. Il est donc permis de parler de multiple d'une grandeur. En pratique, chaque « grandeur » est à son tour une classe de figures géométriques équivalentes : les segments, les angles, les polygones sont des classes de grandeurs homogènes en identifiant l'équivalence avec la congruence dans les deux premiers cas, avec l'équi-décomposabilité dans le troisième. On a l'habitude de parler de somme et de comparaison de figures géométriques, en sous-entendant de se référer aux grandeurs.

Lorsqu'on se fixe un élément arbitraire V dans une classe de grandeurs homogènes, le rapport *k* d'une grandeur G de la classe par rapport à V s'appelle mesure de G par rapport à l'unité V; et si on a une correspondance biunivoque entre *k* et G, on traduit toute relation d'équivalence, de somme par rapport à la mesure. Le choix de l'unité de mesure se fait en considération des besoins : l'unité de longueur est le *mètre*, celle de l'amplitude angulaire est le *degré* ou le *radian* (*fig.* 12, 13, 14).

Par définition, deux classes K et K' de grandeurs respectivement homogènes, en correspondance biunivoque, sont dites proportionnelles si les rapports de deux gran-

fig. 12

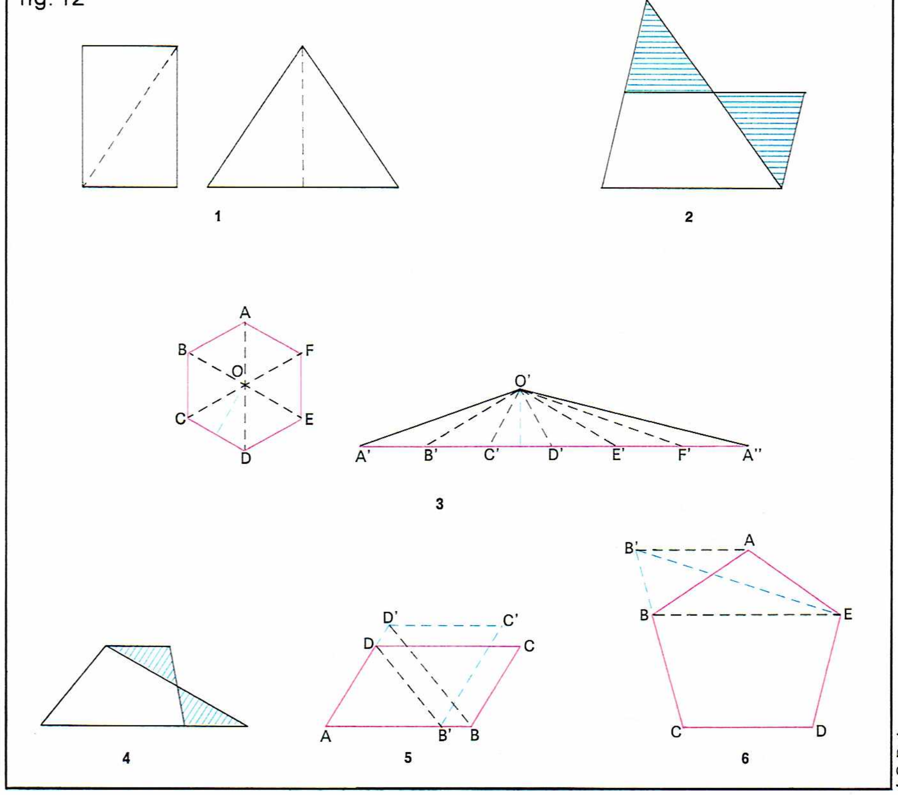

I.G.D.A.

▲ **Figure 12** — ***polygones équivalents : 1) équivalence de deux polygones décomposables en un même nombre de triangles respectivement égaux; 2) équivalence d'un triangle avec un parallélogramme; 3) équivalence d'un polygone régulier avec un triangle; 4) équivalence d'un trapèze avec un triangle; 5) équivalence de deux parallélogrammes; 6) équivalence d'un polygone avec un autre polygone ayant un côté en moins.***

▼ ***Ci-dessous,*** **figure 13 — 1) premier théorème d'Euclide :** ***le carré qui a comme côté un côté de l'angle droit d'un triangle rectangle est équivalent au rectangle dont les côtés sont l'hypoténuse et la projection de ce côté sur l'hypoténuse;*** **2) théorème de Pythagore :** ***le carré construit sur l'hypoténuse d'un triangle rectangle est équivalent à la somme des carrés construits sur les côtés de l'angle droit;*** **3) deuxième théorème d'Euclide :** ***le carré construit sur la hauteur relative à l'hypoténuse d'un triangle rectangle est équivalent au rectangle qui a pour côtés les projections sur l'hypoténuse des deux côtés de l'angle droit.***

En bas, **figure 14 : 1)** ***les deux théorèmes d'Euclide permettent la construction du carré équivalent à un rectangle donné;*** **2)** ***le carré construit sur la somme (différence) de deux segments est équivalent à la somme des carrés construits sur chacun d'eux, augmentée (diminuée) du double du rectangle qui les a comme côtés.***

fig. 13

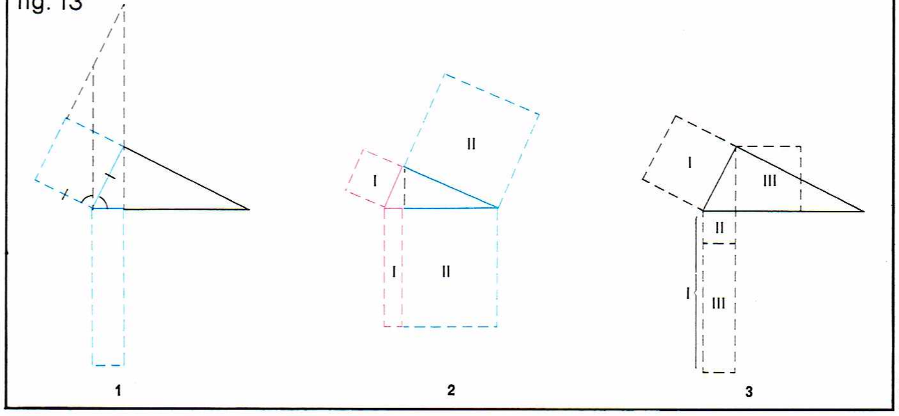

I.G.D.A.

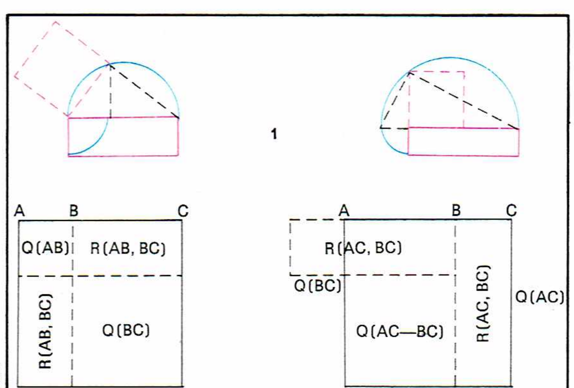

fig. 14

I.G.D.A.

fig. 10

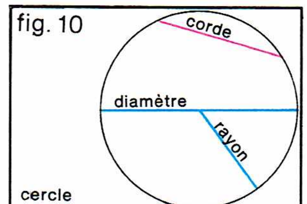

fig. 11

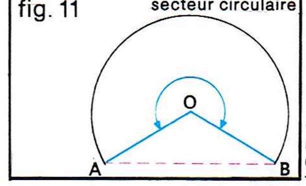

I.G.D.A.

▲ *Le mathématicien et philosophe grec,* Thalès*; on lui doit avant tout d'avoir rapporté d'Égypte en Grèce les fondements de la véritable géométrie.*

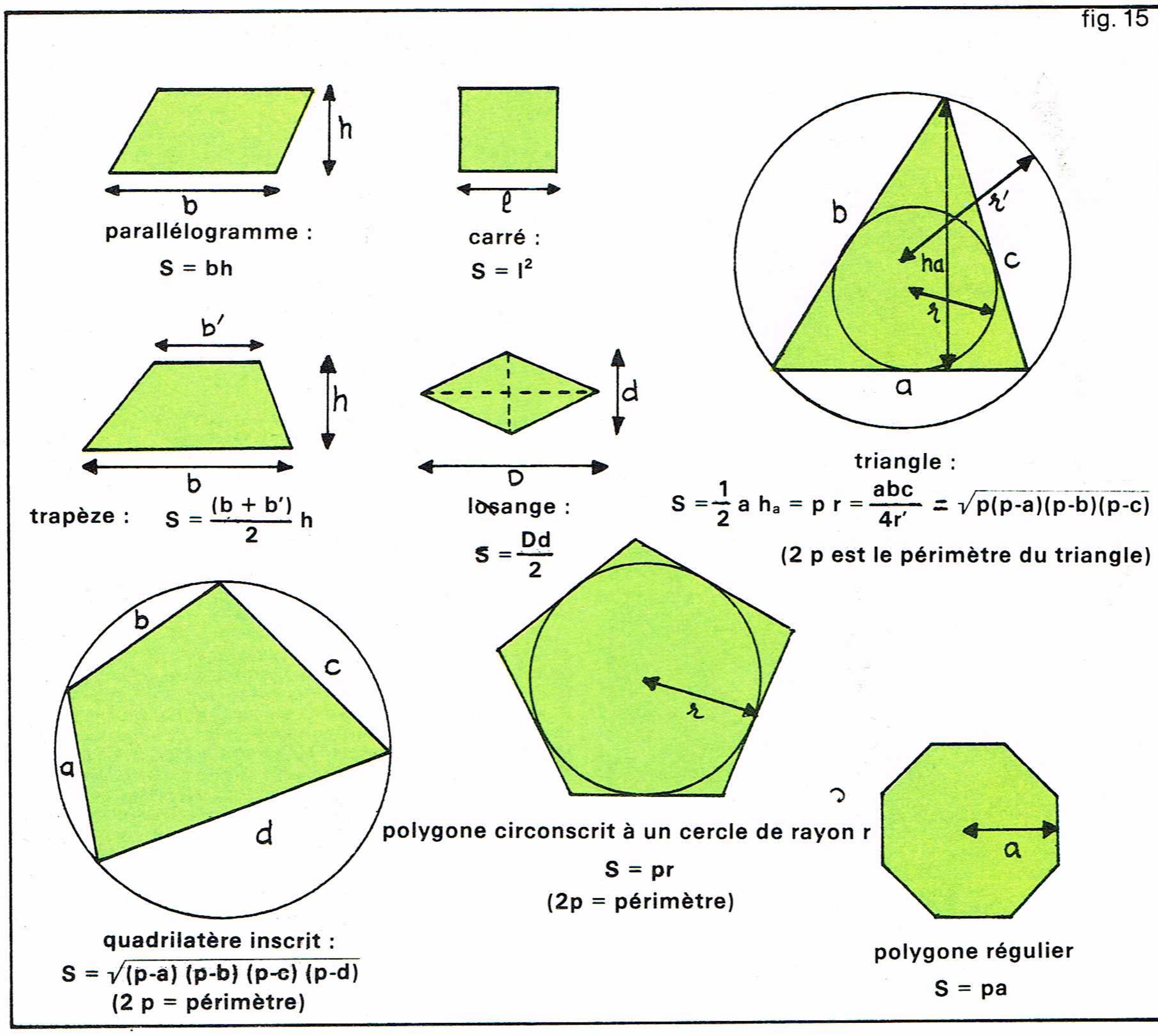

▶ **Figure 15 :** *les mesures de surfaces des principales figures géométriques.*

▼ **Figure 16** — *conséquences du théorème de Thalès :* 1) *construction du quatrième segment proportionnel;* 2) *division d'un segment en parties proportionnelles à des segments donnés;* 3) *division d'un segment intérieurement et extérieurement dans le rapport* k, *où* k *est un nombre réel.*

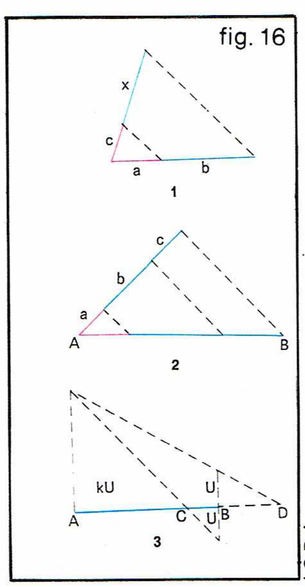

deurs A, B de K et des correspondants A′, B′ de K′ sont toujours égaux.

L'égalité A : B = A′ : B′ s'appelle proportion et jouit des propriétés arithmétiques des proportions numériques.

On démontre le critère de proportionnalité suivant : une condition nécessaire et suffisante pour que deux classes K et K′ de grandeurs respectivement homogènes et en correspondance biunivoque soient proportionnelles est que :

— l'équivalence de deux grandeurs de K implique toujours celle des correspondants de K′;

— si, pour trois grandeurs A, B, C de K, on a : A = B + C, alors, pour les correspondants de K′, on a : A′ = B′ + C′.

En appliquant ce critère, on démontre que tous les arcs d'un cercle (ou tous les secteurs d'un cercle) et les angles correspondants au centre sont proportionnels.

De ces résultats, on peut déduire les mesures des surfaces des principales figures géométriques (*fig.* 15).

Les grandeurs homogènes dont nous venons de parler sont dites du *premier genre,* quand on identifie l'équivalence avec la congruence (c'est le cas des segments et des angles), et du *second genre* quand on identifie l'équivalence avec l'équidécomposabilité. On appelle grandeurs du *troisième genre* celles pour lesquelles l'équivalence n'est identifiable ni avec la congruence, ni avec l'équidécomposabilité. La méthode qui remonte à Eudoxe et qui fut utilisée systématiquement par Archimède pour traiter ces grandeurs est fondée sur le procédé d'« exhaustion » qui repose sur le postulat de la continuité.

Ce procédé a été utilisé pour mesurer la longueur d'un arc de cercle (et du cercle) et la surface d'un cercle. Il a été ainsi établi que le rapport entre un cercle et son diamètre est le nombre π, dont la transcendance a été démontrée par F. von Lindemann en 1882 :

$\pi = 3{,}141\,592\,653\,589\,793\,238\,462\,643\,383\,279\,50\ldots$

(Archimède avait déjà réussi à démontrer que le nombre π était compris entre $3 + \frac{10}{71}$ et $3 + \frac{1}{7}$). On en déduit que la longueur d'un cercle de rayon r est égale à $2\,\pi r$. Le même procédé permet d'établir que la surface d'un cercle de rayon r est égale à πr^2.

La similitude

Du critère de proportionnalité, on déduit le *théorème de Thalès :* Un faisceau de droites parallèles détermine sur deux droites sécantes deux classes de segments proportionnels.

De ce théorème, on déduit que, si on se donne deux points A et B et un nombre réel k, il existe un seul point C intérieur au segment AB et, si $k \neq 1$, un seul point D sur son prolongement, tels que $AC/BC = k$, $AD/BD = k$ (*fig.* 16).

Il est usuel de dire que C et D divisent le segment AB intérieurement et extérieurement dans le rapport k; le quaterne ordonné ABCD est un groupe harmonique (voir *Géométrie projective*).

Deux figures sont dites semblables s'il est possible de trouver une correspondance biunivoque entre leurs points telle que deux segments homologues soient toujours proportionnels avec le même rapport k, appelé rapport de *similitude* (dans le cas particulier où ce rapport vaut 1, on a l'égalité).

Dans l'ensemble des figures d'un plan, la similitude est une relation d'équivalence.

Comme pour l'isométrie, on peut donner des définitions plus précises pour les polygones. Plus précisément : deux polygones sont semblables s'il existe entre leurs sommets une correspondance biunivoque telle que les angles homologues soient égaux et les côtés homologues proportionnels.

Pour les triangles, on a trois critères particuliers de similitude.

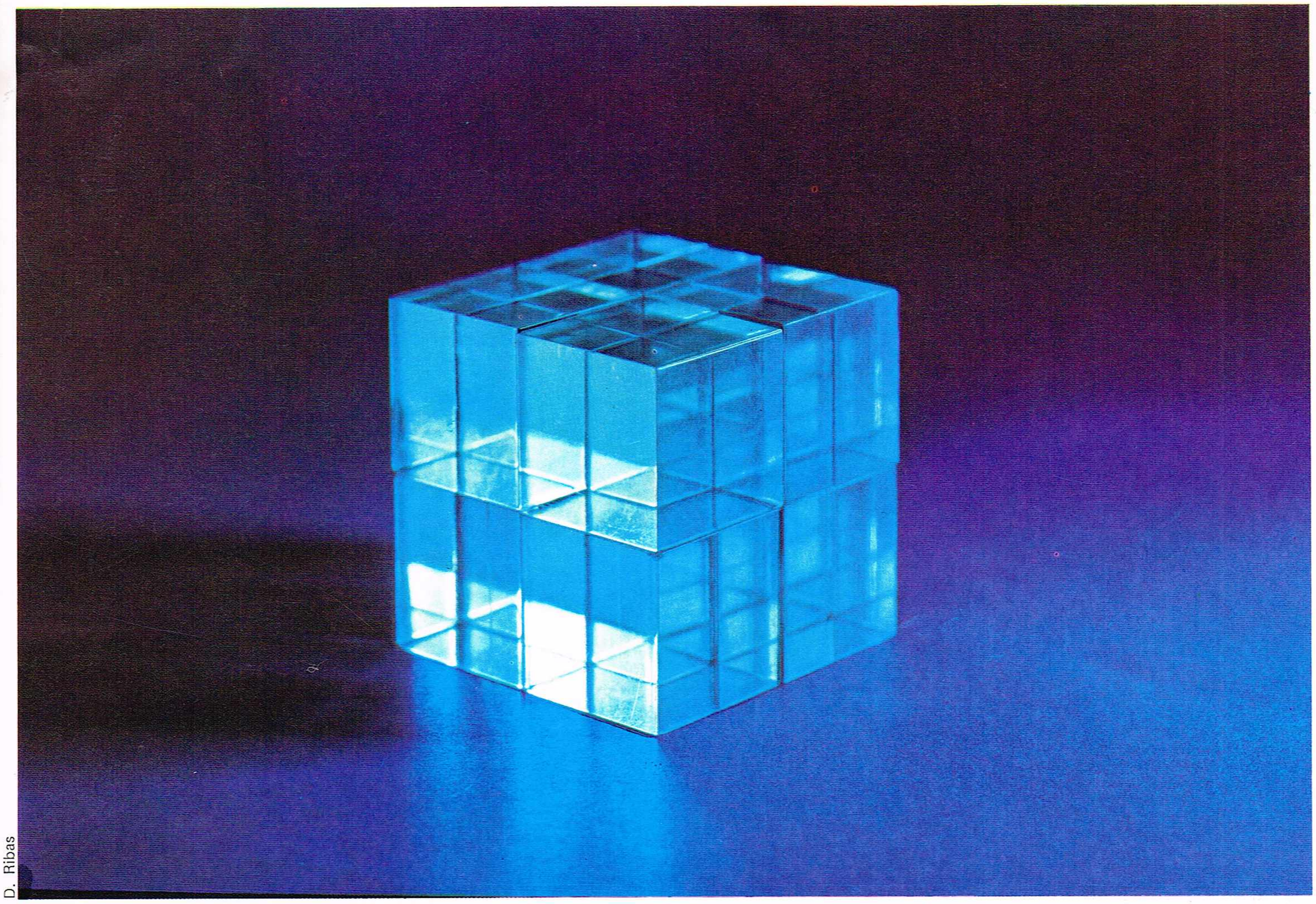

▲ ***Le cube qui a comme arête l'unité de mesure linéaire est pris comme unité de mesure du volume d'un polyèdre.***

La géométrie dans l'espace

Les axiomes

Tous les axiomes de la géométrie plane et leurs conséquences sont valables en géométrie dans l'espace. Il existe des axiomes supplémentaires *d'appartenance à l'espace* tels que : « étant donné un plan, il existe au moins un point qui ne lui appartienne pas et par conséquent une infinité » (*fig.* 17, 18, 19, 20, 21).

Tous les concepts de la géométrie plane tels que :

— l'orthogonalité
— le parallélisme
— la distance
— le lieu
— la symétrie

se généralisent en géométrie dans l'espace. Par exemple, on dit que : « deux plans sont parallèles s'ils n'ont pas de points communs » (*fig.* 21).

Principales figures de l'espace

Par définition, deux demi-plans ayant la même origine *s* déterminent deux régions, chacune d'elles s'appelant *dièdre* d'arête *s* et de faces α et β. Les concepts d'égalité, d'amplitude, d'inégalité, de somme de dièdres s'établissent de la même manière que pour les angles (*fig.* 22).

Considérons un polygone (plan) convexe à *n* côtés, un point V n'appartenant pas à son plan, et les *n* demi-droites ayant leur origine en V et passant chacune par un sommet du polygone; l'ordre des sommets du polygone induit un ordre pour les demi-droites, de sorte qu'on peut prendre en considération les angles dont les côtés sont les couples de demi-droites consécutives. La surface constituée par l'ensemble de ces angles divise l'espace en deux régions; celle qui ne contient pas les prolongements des demi-droites s'appelle *angle solide* convexe : V en est le sommet, les *n* demi-droites en sont les arêtes, tandis que les faces de l'angle solide sont les angles qui viennent d'être définis (*fig.* 23).

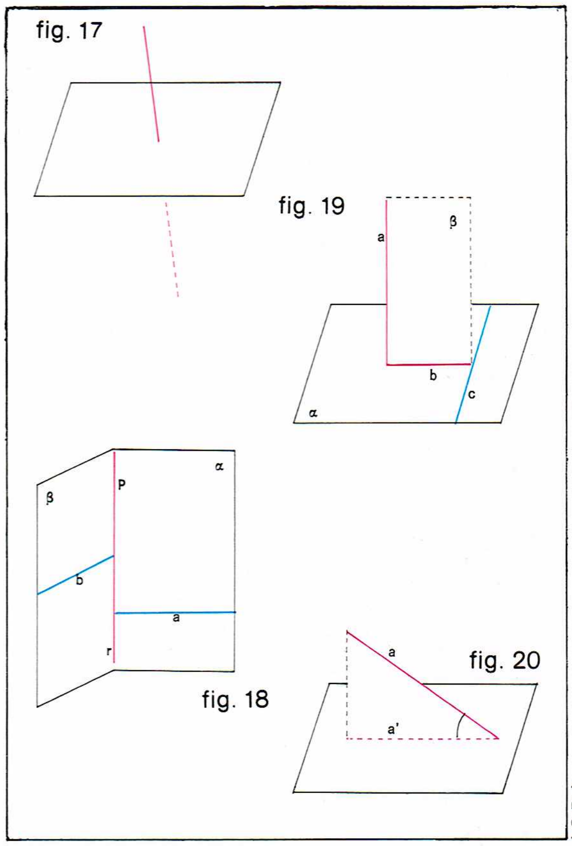

◀ ***Figure* 17 : *demi-droite appartenant à un demi-espace déterminé par un plan.***
Figure* 18 : *par un point extérieur à deux droites non sécantes, passe une seule droite qui les intersecte toutes les deux.
Figure* 19 : *théorème des trois perpendiculaires.
Figure* 20 : *angle d'une droite avec un plan qu'elle intersecte.

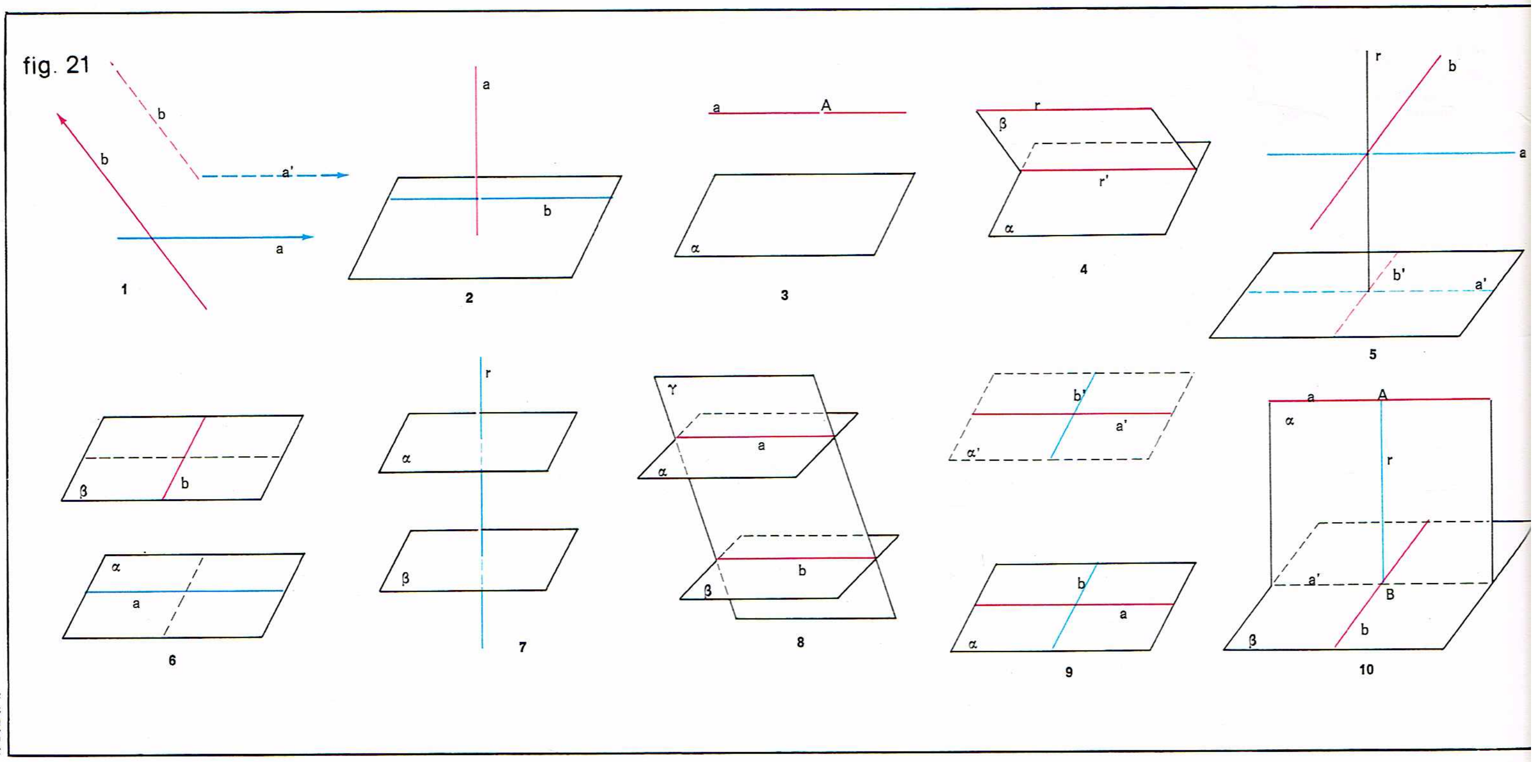

I.G.D.A.

▲ **Droites et plans** *(figure 21)* : ***1, angle de deux droites orientées; 2, droites orthogonales; 3, plan et droite parallèles; 4, plan passant par une droite parallèle à un plan; 5, plan et droites perpendiculaires à une droite en des points distincts; 6, unicité du plan passant par une droite et parallèle à une autre droite qui ne coupe pas la première; 7, plans perpendiculaires à une droite en des points distincts; 8, intersections parallèles d'un plan avec des plans parallèles; 9, plan parallèle à un autre, déterminé par 2 droites sécantes parallèles à 2 droites du plan donné; 10, distance de 2 droites non sécantes.***

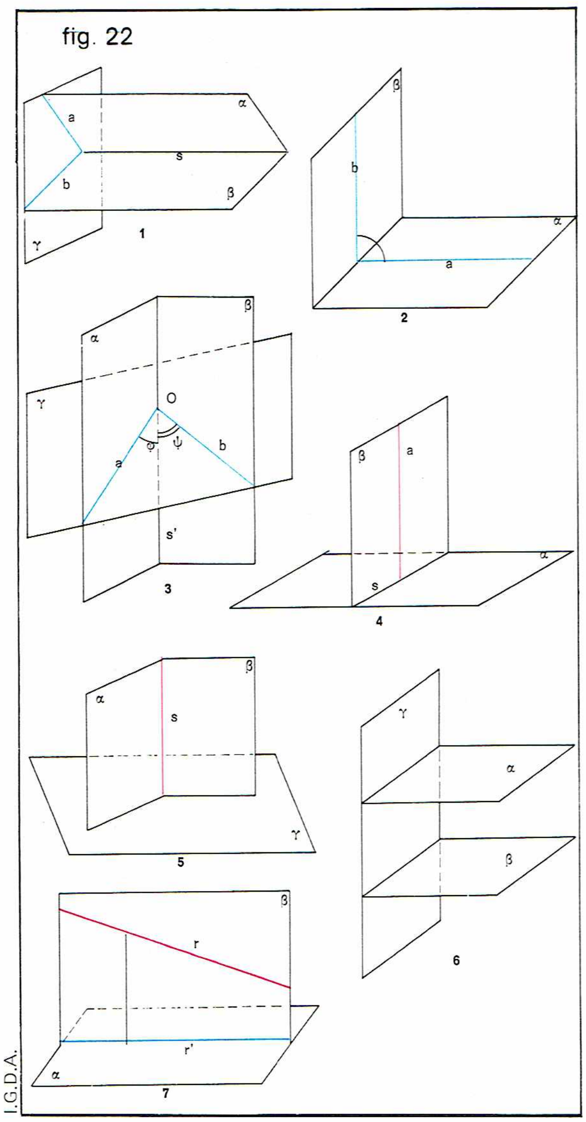

I.G.D.A.

▶ **Dièdres** *(figure 22).* ***Plans perpendiculaires : 1, section normale d'un dièdre; 2, dièdre droit; 3, section inclinée d'un dièdre; 4, 5, 6, plans perpendiculaires; 7, unicité du plan perpendiculaire à un plan donné passant par une droite non perpendiculaire à ce dernier.***

On définit aussi les *polyèdres* qui sont des grandeurs du *troisième genre,* c'est-à-dire qu'il est possible de définir une relation d'équivalence dans l'ensemble des polyèdres, mais deux polyèdres équivalents ne sont généralement pas décomposables en un nombre fini de parties égales : la comparaison entre pyramides demande déjà le procédé d' « exhaustion ». On appelle *volume* l'abstraction relative à toute une classe de polyèdres équivalents. Comme unité de mesure du volume d'un polyèdre, on prend le cube qui a comme arête l'unité de mesure linéaire (*fig.* 24).

La géométrie moderne

En géométrie élémentaire, on a étudié des critères d'équivalence entre figures : on a parlé de figures égales, de figures équivalentes, de figures semblables. Dans la première partie du XIX[e] siècle, se développèrent d'autres types de géométrie (la plus importante étant la *géométrie projective*) : en résumé, elles établissaient de nouveaux critères d'équivalence entre figures. Le mathématicien *F. Klein* fut ainsi amené à exposer à l'université d'Erlangen un grand projet de classification des géométries, auquel fut précisément donné le nom de *programme d'Erlangen*. Il donna pour longtemps les idées de base des recherches en géométrie et montra la possibilité de construire de nouvelles géométries, qui furent ensuite étudiées avec succès. Plus récemment, le développement des recherches complique un peu le cadre général de la géométrie, mais le programme d'Erlangen reste toujours une œuvre des plus valables pour une vision plus claire et synthétique de la géométrie.

La géométrie et la théorie des groupes

Le *programme d'Erlangen* se réfère essentiellement aux espaces $\mathbb{R}^n$, $\mathbb{C}^n$ et P_n ($\mathbb{R}$) (voir *Topologie*), mais on peut l'appliquer à d'autres espaces.

L'idée centrale de F. Klein est la suivante : tout type de géométrie est caractérisé par une relation d'équivalence à laquelle on peut associer un groupe G de bijections de l'espace E sur lui-même (si E est un espace topologique, on parlera d'un groupe d'homéomorphismes [voir *Topologie*]).

On vérifie facilement que dans l'ensemble P (E) des parties de E, la relation « $A \sim B$ s'il existe une bijection f du groupe G telle que $B = f(A)$, $(A, B \in P(S))$ » est une relation d'équivalence :

si i est l'application identique telle que $i(x) = x$, on a $i(X) = X$, donc $X \sim X$;

si $Y = f(X)$ et $Z = g(Y)$, on a $Z = g(f(X))$, et l'application composée de f et g étant encore biunivoque, de $X \sim Y$ et $Y \sim Z$, on tire $X \sim Z$.

Un groupe G dans S donne donc la possibilité de parler de *figures équivalentes* respectivement à G, et d'établir la « géométrie du groupe G dans S ». Si G′ est un sous-groupe de G et si deux figures X et Y sont équivalentes par rapport à G′, alors elles le sont par rapport à G.

Dans la géométrie de G, cela a un sens de considérer une classe K d'objets si, par effet des correspondances de G, un objet de K se transforme en un objet de K : par exemple, on verra qu'en géométrie projective, on parle de l'ensemble des quadrangles (ou par abstraction, du concept de quadrangle : un quadrangle étant, par définition, une figure formée par quatre points et les six droites qui les joignent) puisque, par effet d'une *transformation projective*, un quadrangle devient un autre quadrangle; mais on ne parle pas de parallélogramme puisqu'un parallélogramme peut se transformer en une autre figure. Tous les êtres qu'on peut considérer dans la géométrie de G peuvent aussi être considérés dans la géométrie de G′ si $G' \subset G$: les correspondants de G′ sont en fait des correspondants particuliers de G. Par exemple, la notion de « triangle rectangle » appartient à la géométrie des similitudes et par conséquent à la géométrie métrique euclidienne; inversement, la notion de périmètre est valable en géométrie métrique euclidienne, mais non en géométrie des similitudes (transformons par une similitude un polygone, on obtient un polygone de périmètre différent).

En général, on dit qu'une géométrie est *subordonnée* à une autre si le groupe de la première est un sous-groupe de celui de la seconde : naturellement, l'espace doit être

Palais de la Découverte, Paris

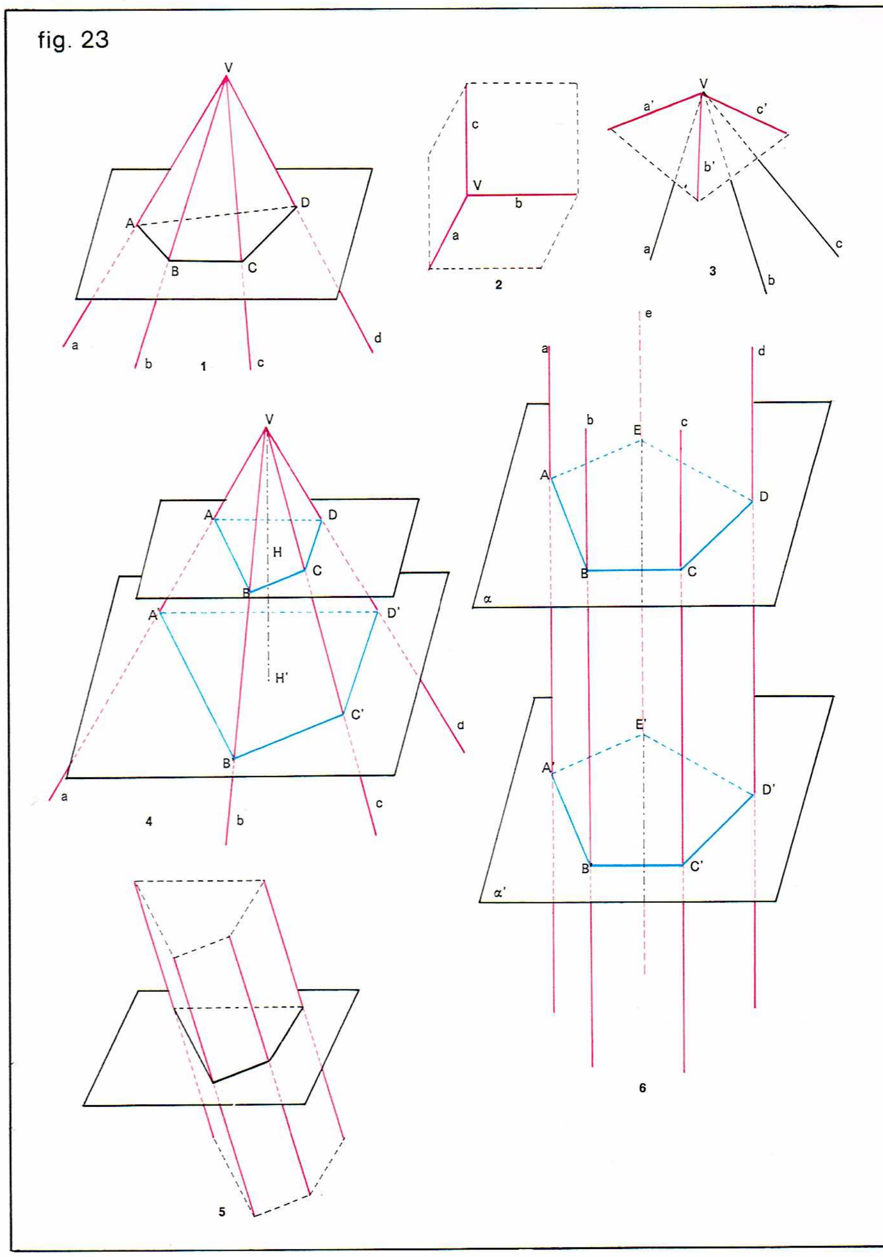

I.G.D.A.

▲ *A gauche, le mathématicien* Félix Klein. *A droite, figure 23 ;* angles solides : 1, *angle solide convexe ;* 2, *trièdre trirectangle ;* 3, *trièdre polaire ;* 4, *similitude des polygones obtenus en coupant un angle solide par des plans parallèles ;* 5, *prisme convexe indéfini ou angle solide impropre ;* 6, *égalité des sections droites d'un même prisme.*

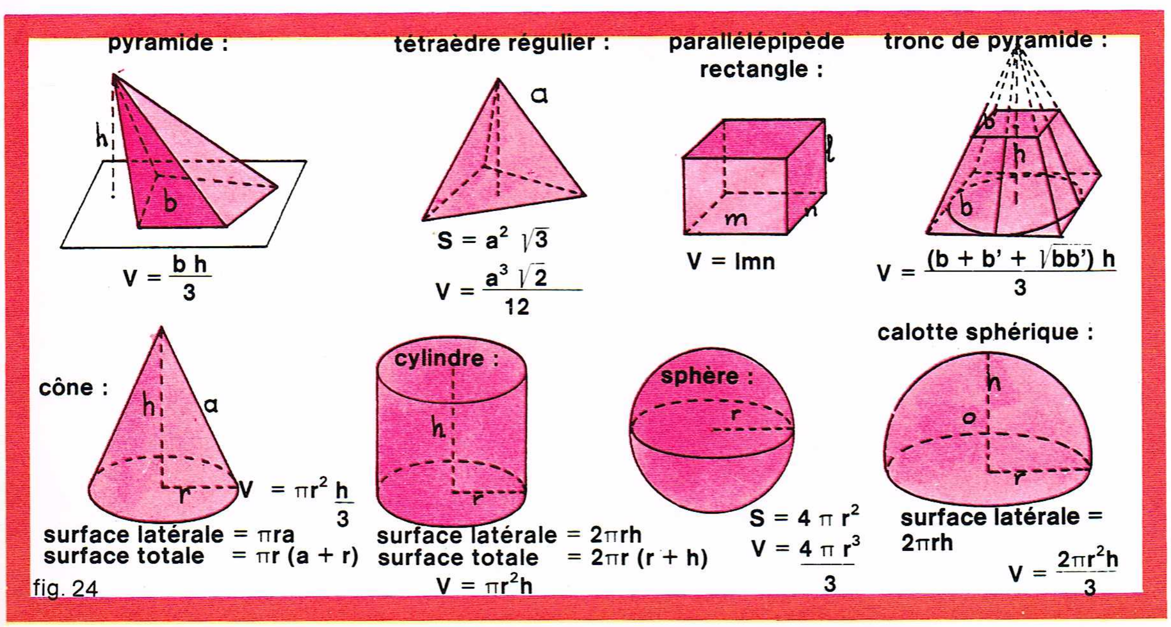

Richard Colin

◀ *Figure 24 : on appelle* volume *l'abstraction relative à toute une classe de polyèdres équivalents.*

le même, néanmoins il est encore possible de considérer une subordination dans le cas où l'espace où opère le premier est contenu dans celui du second (on verra plus tard la relation entre la géométrie affine et la géométrie projective).

Soit F une figure; on appelle *invariant* de F dans la géométrie du groupe G (ou invariant par rapport à G) un nombre x (F), associé à F, qui a la même valeur pour toutes les figures transformées de F dans G, c'est-à-dire que $x(F) = x(g(F))$, pour tout $g \in G$. On dit inversement qu'une autre figure K (F) associée à F est *covariante* avec F (ou aussi qu'elle est invariante) lorsque

$$g(K(F)) = K(g(F))$$

(sa transformée par g coïncide avec la figure associée à g (F). Par exemple, le périmètre d'un polygone est un de ses invariants par rapport au groupe des isométries; le centre d'un cercle est une figure covariante avec le cercle lui-même par rapport au même groupe.

La géométrie projective

La table des matières du programme de F. Klein débute par la géométrie projective. Quelques-uns de ses aspects étaient connus depuis longtemps (on pourrait remonter aux géomètres grecs, comme *Apollonios* et *Pappus*, et plus récemment à *Desargues* et *Pascal*), mais elle fut systématiquement étudiée à partir du XIXe siècle (*Poncelet, Chasles, Gergonne, von Staudt* et les autres).

D'un point de vue analytique, on peut introduire la **géométrie projective** à partir de l'espace projectif $P_n(\mathbb{R})$ (voir *Topologie*) : les points y sont représentés par des $(n+1)$-uplets de nombres réels, non tous nuls (appelés coordonnées projectives homogènes), avec la convention que les coordonnées $(x_0, x_1, ..., x_n)$ et $(\rho x_0, \rho x_1, ..., \rho x_n)$, avec $\rho \neq 0$, représentent le même point; pour simplifier le raisonnement, on remplacera progressivement n par 2 (ou 3).

Comme ensembles particuliers de points de l'espace projectif, mentionnons les *hyperplans,* lieux des points dont les coordonnées satisfont à une équation du 1er degré homogène :

$$(1) \qquad u_0 x_0 + u_1 x_1 + ... + u_n x_n = 0$$

où les u_i sont des nombres réels non tous nuls.

Les u_i sont les coordonnées de l'hyperplan (**1**), et deux hyperplans dont les coordonnées sont proportionnelles coïncident.

La géométrie projective est la géométrie du groupe des *homographies,* c'est-à-dire de l'ensemble des applications de $P_n(\mathbb{R})$ dans lui-même qui au point (x_i) associe le point (y_i) tel que :

$$y_i = a_{i0}x_0 + a_{i1}x_1 + ... + a_{in}x_n$$
$$(i = 0, 1, ..., n)$$

avec det $|a_{ik}| \neq 0$ (voir *Algèbre linéaire*).

Signalons un important invariant projectif (c'est-à-dire une quantité invariante par homographie), le birapport (A, B, C, D) de quatre points A, B, C, D d'une droite qui vaut : $\frac{\overline{CA}}{\overline{CB}} : \frac{\overline{DA}}{\overline{DB}}$. Ce birapport est aussi appelé rapport anharmonique et, dans le cas où il a pour valeur -1, rapport harmonique.

On peut remplacer en géométrie projective le corps des nombres réels par le corps des nombres complexes ou un corps quelconque.

La géométrie projective peut aussi s'étudier par voie axiomatique, sans l'usage d'une méthode analytique.

En géométrie projective, on considère un espace comprenant une infinité d'objets appelés points, droites, plans liés par trois groupes de postulats :

- les postulats d'appartenance;
- les postulats d'ordre;
- les postulats de continuité.

Observons avant d'énoncer ces postulats que, dans ce qui précède, les mots point et hyperplan peuvent être échangés. Cette remarque contient, en substance, le principe de *dualité* de *Poncelet* qu'on va appliquer en faisant correspondre à chaque proposition sa duale.

Les postulats d'appartenance :

[**P1**] *Deux points distincts déterminent une droite unique qui les contient.*	[**P1'**] *Deux plans distincts déterminent une droite qui leur appartient.*
[**P2**] *Un point et une droite ne passant pas par ce point déterminent un plan qui les contient.*	[**P2'**] *Un plan et une droite non contenue dans ce plan déterminent un point qui leur appartient.*

[**P3**] *Si un point appartient à une droite et celle-ci à un plan, le point appartient au plan.*

Indiquons deux de leurs conséquences immédiates :

1) *Deux droites distinctes se coupant en un point forment un plan (appelé conjugué des deux droites).*	1') *Deux droites appartenant à un plan se coupent en un point (appelé intersection des deux droites).*
2) *Trois points n'appartenant pas à une même droite déterminent un plan auquel ils appartiennent.*	2') *Trois plans ne passant pas par une même droite déterminent un point qui leur appartient.*

On remarque donc que deux droites coplanaires « se rencontrent » toujours, de même que deux plans.

Observons en outre qu'on passe des propositions écrites à gauche à celles écrites à droite en changeant les mots « point » et « plan ». On dit que [P1], [P1'] sont duaux. Quand on a démontré un théorème en géométrie projective, on a automatiquement prouvé son dual. Le postulat [P3] qui coïncide avec son dual est dit autodual.

Pour exclure des exemples d'espaces trop réduits, on ajoute l'axiome suivant :

[**P4**] *Il existe au moins cinq points tels que quatre quelconques d'entre eux ne soient pas coplanaires.*

La géométrie projective considère six formes fondamentales :

1re espèce

Ponctuelle : ensemble des points d'une droite.	*Faisceau :* ensemble des plans passant par une droite *(axe)*.

Faisceau de droites : ensemble des droites d'un plan passant par un point *(centre)*.

2e espèce

Système plan : ensemble des points et des droites d'un plan.	*Gerbe :* ensemble des droites et des plans passant par un point.

3e espèce

Espace : considéré comme ensemble de ses points et de ses plans.

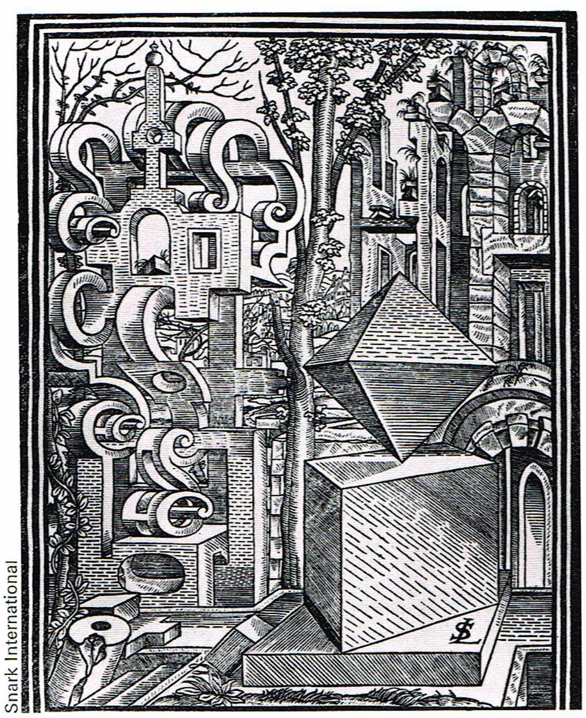

Snark International

▶ *Page ci-contre, en bas; figure* **31 :** *un* **quaterne harmonique;** *figure* **31' :** *un* **ordre circulaire;** *figure* **32 : postulat d'ordre.**

▶ *Gravure extraite de la* **Géométrie** *de Giovanni Pomodoro (1624).*

Mentionnons les applications fondamentales :

La projection des points d'une droite r du point O (n'appartenant pas à *r*) est la bijection, entre *r* et le faisceau de centre O situé dans le plan O*r*, qui à tout point P de *r* associe la droite OP (*fig.* 25).

La section d'un faisceau de plans avec un plan ω (n'appartenant pas au faisceau) est l'application duale de la projection de *r* sur O (*fig.* 26).

La projection des points d'une droite r sur une droite s ne coupant pas *r* est la bijection entre *r* et le faisceau d'axe *s* qui au point P associe le plan *s*P (*fig.* 27).

La section d'un faisceau de plans par une droite s non coplanaire avec l'axe du faisceau est l'application duale de la projection de *r* sur *s* (*fig.* 28).

Dans le plan, on a un autre type de dualité, la dualité plane : dans toute proposition de la géométrie plane, on peut remplacer les mots point et droite. Si F est une figure plane de points et droites, on la projette du point extérieur O (on obtient ainsi une figure de droites et plans), et ensuite on applique la dualité spatiale : on obtient une figure de droites et points.

Par exemple, dans le plan, on a l'opération duale par dualité plane de la projection de *r* de O : la section d'un faisceau avec une droite.

Le théorème des triangles homologiques est fondamental : si, dans un même plan ou dans l'espace, deux triangles ABC et A′B′C′ sont tels que les droites joignant respectivement les trois couples de sommets homologues AA′, BB′, CC′ se rencontrent en un même point S, les trois points de concours des couples de droites portant les côtés homologues des deux triangles sont alignés, et réciproquement (*fig.* 29).

On a aussi un théorème des *quadrangles homologiques* (*fig.* 30).

Les points (A, B, C, D) d'une droite forment un *quaterne harmonique* s'il existe un quadrangle plan MNPQ de telle sorte que A soit l'intersection de MN et PQ, B celle de MP et NQ, et que C soit situé sur MQ et D sur NP : le théorème du quadrangle affirme que, les points A, B, C étant donnés, le point D est univoquement déterminé, indépendamment du choix du quadrangle MNPQ (*fig.* 31).

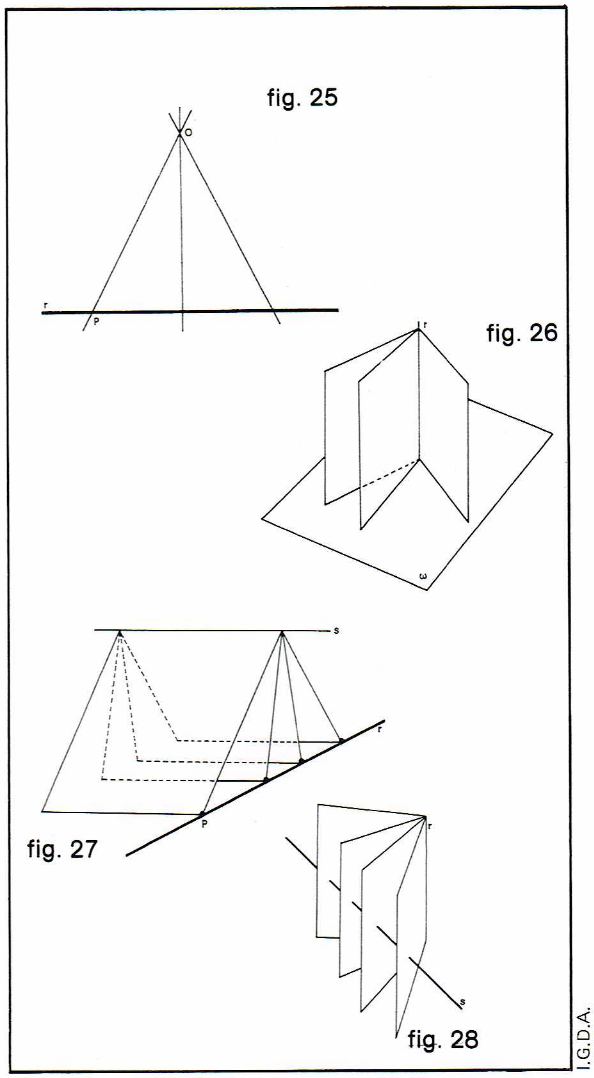

◀ ***Figures* 25, 26, 27, 28 : *voir explications dans le texte.***

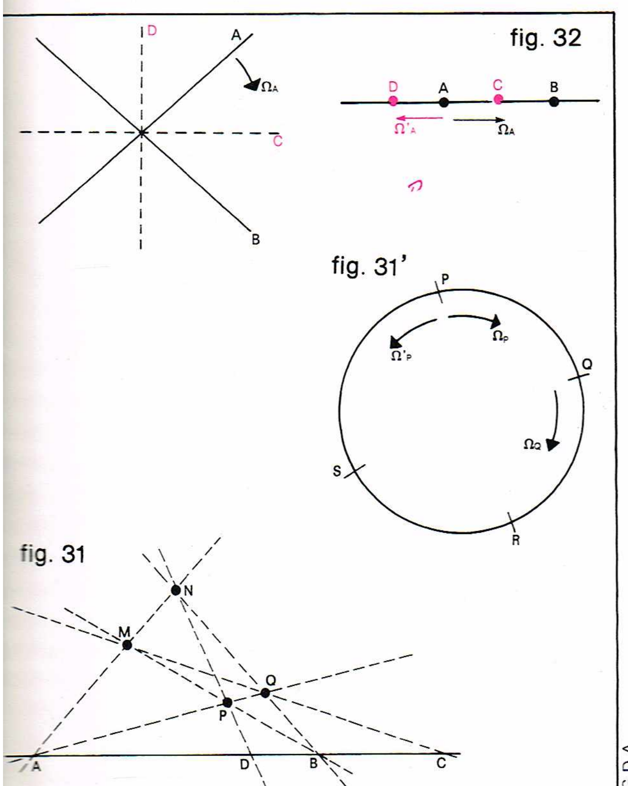

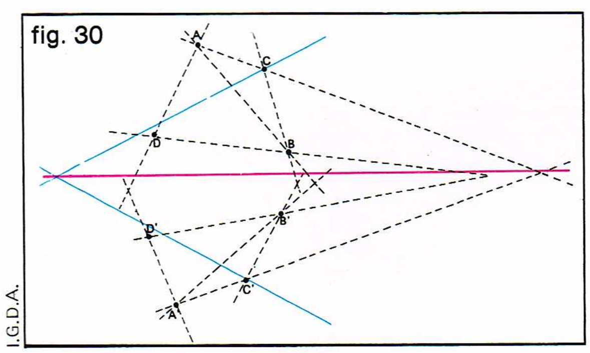

◀ ***Figure* 30 : *théorème des* quadrangles homologiques.**

▼ ***Figure* 29 : *théorème des* triangles homologiques.**

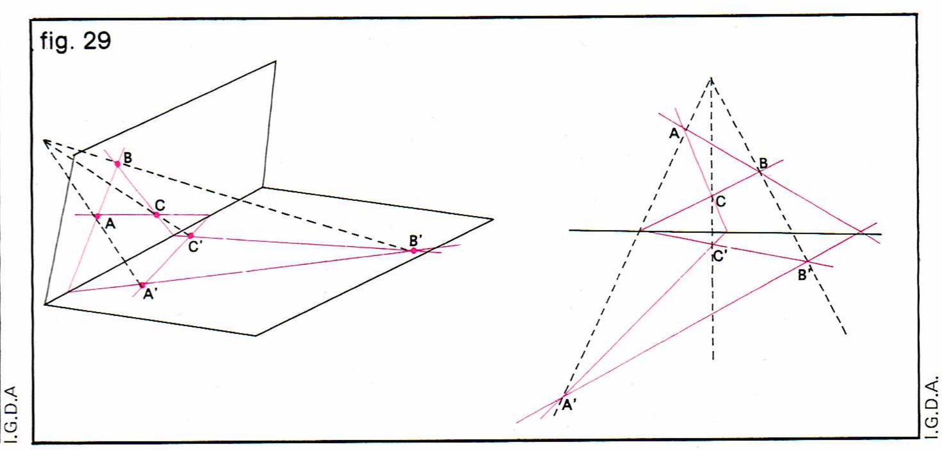

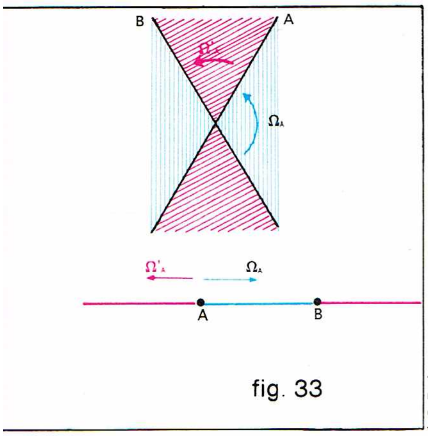

I.G.D.A.

▲ ***Figure* 33 : *voir explications dans le texte.***

Les axiomes jusqu'ici introduits sont satisfaits aussi par des modèles ayant un nombre fini de points. Pour avoir une géométrie plus proche de l'intuition, on a besoin d'en ajouter d'autres.

Éclaircissons avant tout ce qu'on entend par *ordre circulaire :* on essaye en substance de caractériser la manière avec laquelle on suit les points d'un cercle parcouru dans un certain sens. Si on lui enlève un point P, il devient un segment. On peut ainsi dire qu'un ordre circulaire Ω dans un ensemble I est une famille Ω_p d'ordres totaux (un pour chaque $P \in I$) dans $I - \{P\}$, de telle manière que si dans Ω_p $Q < R < S$, alors dans Ω_Q : $R < S < P$ (*fig.* 31').

Nous appellerons *inverse* de Ω (et on désigne par Ω') l'ordre circulaire formé des ordres inverses des Ω_p.

Donnons alors un nouveau postulat (d'ordre) :

[**P5**] *Sur une forme de première espèce, il existe deux ordres circulaires, inverses l'un de l'autre, tels que, deux éléments A, B étant donnés, il existe au moins un élément C qui précède B dans* Ω_A (*fig.* 32).

Il s'ensuit qu'il existe aussi un élément D qui précède A dans Ω_B ; que Ω_A n'admet ni de minimum, ni de maximum, et que toute forme de première espèce (et aussi toute forme de 2ᵉ et de 3ᵉ espèce) a des éléments infinis.

Étant donné deux éléments A, B et l'ordre Ω_A, l'ensemble des éléments qui dans Ω_A précède B s'appelle un *segment* d'extrémités A, B. Si on considère aussi l'ordre Ω', on a deux segments d'extrémités A, B (ils sont dessinés avec des couleurs différentes sur la figure 33).

On admettra alors l'axiome (d'invariance des ordres) :

[**P6**] *L'image d'un segment par une projection et une section est un segment (c'est-à-dire que les ordres se conservent par projections et sections).*

Étant donné deux couples [A, B], [C, D] d'éléments distincts d'une forme de première espèce, il peut arriver que C, D (*fig.* 34) soient situés sur le même segment d'extrémités A, B (dans un tel cas, A et B aussi sont situés sur le même segment CD) [*fig.* 32]. Dans ce cas, on dit que les couples [A, B], [C, D] ne sont pas séparés, et dans le cas contraire qu'ils sont séparés (ce qui arrive, par exemple, lorsque A, B, C, D sont des éléments d'un quaterne harmonique).

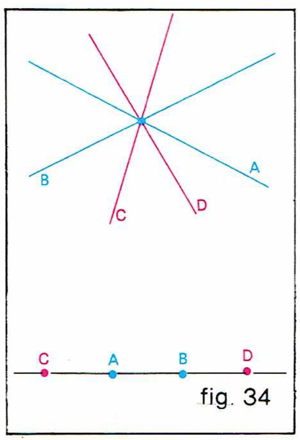

I.G.D.A.

▲ ***Figure* 34 : *voir explications dans le texte.***

Donnons enfin l'axiome de la continuité sous la forme de Dedekind :

[**P7**] *Étant donné une partition d'un segment d'une forme de première espèce en deux classes, telles que (dans un des ordres de la forme) tout élément de la première classe précède tout élément de la seconde, alors il existe un élément maximal dans la première classe ou un élément minimal dans la seconde.*

Une projectivité entre des formes de 1ʳᵉ espèce est une bijection qui s'obtient en appliquant successivement un nombre fini de projections et de sections. Une projectivité entre deux formes de 2ᵉ espèce, deux systèmes plans, par exemple, fait correspondre à un point d'un des plans un point ou une droite de l'autre, ou aux points d'une droite du premier les points d'une droite ou les droites d'un faisceau de l'autre.

Dans le premier cas, la projectivité est une *homographie* ou *collinéation,* dans le second une *réciprocité* ou *corrélation*. Deux formes de 3ᵉ espèce sont projectives lorsque à un point de l'une correspond un point ou un plan de l'autre et qu'aux points d'une ponctuelle correspondent les points d'une ponctuelle ou les plans d'un faisceau... Dans le premier cas, on a une *homographie,* dans le second une *réciprocité*.

Les projectivités d'une forme assignée dans elle-même forment un groupe.

Sur une forme Φ d'espèce k ($k = 1, 2, 3$), déterminons $k + 2$ éléments distincts A_i (pour $k = 2, 3$, supposons que 3 d'entre eux n'appartiennent pas à une forme de 1ʳᵉ espèce) ; sur une autre forme Φ' de la même espèce, déterminons $k + 2$ éléments A_i, avec les mêmes conditions. Il existe une et une seule projectivité entre les deux formes qui à A_i associe A_i'. Dans l'exemple de la figure 35, on a reporté la construction d'une telle projectivité dans le cas où Φ et Φ' sont des ponctuelles (la séquence d'opérations, à partir de Φ, est la suivante : projections de S, section avec *t*, projections de S', sections avec Φ'). La construction est une preuve directe de l'existence d'une telle projectivité.

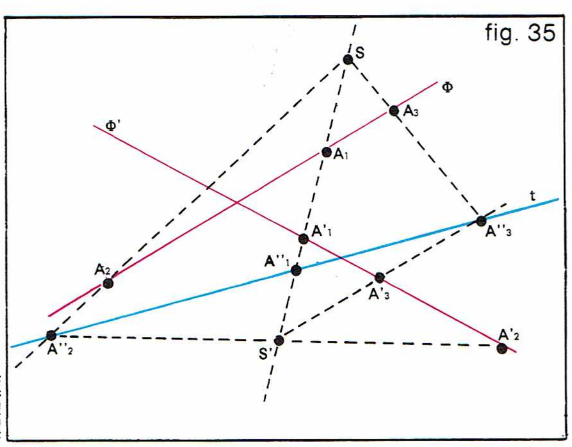

I.G.D.A.

▶ ***Figure* 35 : *projectivité entre deux ponctuelles* (Φ *et* Φ').**

La géométrie projective peut aussi se construire à partir de la géométrie euclidienne (ou plus précisément affine). Considérons les directions de l'espace ordinaire (c'est-à-dire les ensembles de droites deux à deux parallèles), et appelons-les *points impropres,* tandis que les points de l'espace sont appelés *points propres*.

On appelle ensuite *droite impropre* l'ensemble des points impropres d'un plan, et *plan impropre* l'ensemble de tous les points impropres. On constate facilement que les axiomes de la géométrie projective sont vérifiés. Toute droite propre acquiert un point ultérieur, son point impropre, qu'on « rejoint » en parcourant la droite dans l'un ou l'autre de ses sens ; la droite devient une *courbe fermée,* comme un faisceau de droites.

La géométrie affine et ses subordonnées

La **géométrie affine,** tout en n'ayant pas eu l'importance historique de la géométrie projective, est assez importante par de nombreux aspects. Pour donner une idée générale, on peut dire qu'en géométrie affine, outre toutes les notions d'appartenance, on garde celle de parallélisme, mais non celle de perpendiculaire, distance, etc.

D'un point de vue analytique, l'espace affine est l'espace $\mathbb{R}^n$, c'est-à-dire l'ensemble des n-uplets de nombres réels, muni du groupe des affinités, qui au point x fait correspondre le point y tel que :

$$y_i = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \ldots + a_{in}x_n + b_i, \quad (i = 1, 2, \ldots, n)$$

avec $\det |a_{ik}| \neq 0$.

En géométrie affine, deux parallélogrammes quelconques sont équivalents, tandis que ne le sont pas un parallélogramme et un quadrilatère qui n'est pas un parallélogramme. Parmi les coniques, deux ellipses sont équivalentes, de même que deux hyperboles et deux paraboles ; mais une ellipse et une hyperbole ne sont pas équivalentes. On ne parle pas de rectangle, de losange, de cercle, puisque dans la définition de telles figures interviennent des concepts étrangers à la géométrie affine.

On peut aussi parler de géométrie affine sur un corps, en considérant comme espace l'ensemble des n-uplets ordonnés d'éléments du corps. On peut aussi passer de la géométrie affine à la géométrie projective. Dans l'espace affine, introduisons les *points impropres,* on obtient un espace projectif. Réciproquement, étant donné un espace projectif, on fixe un de ses hyperplans α comme *hyperplan impropre :* appelons parallèles les hyperplans qui se coupent en α et appelons affinités les homographies qui conservent α : on a alors un *espace affine*.

La géométrie affine peut aussi se définir par voie axiomatique ; il suffit de modifier à bon escient quelques axiomes de la géométrie projective (en particulier, au lieu de [**P5**], on postulera l'existence sur une droite de deux ordres totaux, l'un inverse de l'autre).

On peut définir, à partir d'un espace affine, un espace vectoriel de la manière suivante. Considérons les couples ordonnés de points (*fig.* 36), et établissons entre eux la relation d'équivalence suivante *(équipollence) :* si A, B, X, Y sont des points de coordonnées a_i, b_i, x_i, y_i (i variant de 1 à n), on pose :

$$(A, B) \sim (X, Y) \text{ si } b_i - a_i = y_i - x_i \text{ quel que soit } i.$$

Les classes d'équivalence s'appellent les *vecteurs libres* de l'espace. Les différences indiquées s'appellent provisoirement *composantes* du vecteur libre. Soit deux vecteurs u, v de composantes (u_i), (v_i) et un nombre réel k (si l'espace est défini sur un autre corps, un élément du corps) ; on définit le vecteur $u + v$ comme le vecteur de composantes $(u_i + v_i)$ et le vecteur ku comme le vecteur de composantes (ku_i). De cette manière, l'ensemble des vecteurs libres est muni d'une structure d'espace vectoriel sur $\mathbb{R}$ (ou plus généralement, sur le corps sur lequel est défini l'espace affine). Les (u_i) sont les composantes du vecteur u par rapport à la base formée des vecteurs de composantes (*fig.* 37) :

$$(1, 0, ..., 0), \quad (0, 1, ..., 0), \quad ..., \quad (0, 0, ..., 0, 1).$$

Pour d'autres applications, il peut être utile de considérer dans l'ensemble des couples de points d'autres relations d'équivalence : par exemple, celle qui associe des couples ordonnés équipollents et appartenant à la même droite.

Parmi les affinités d'un espace sur lui-même, notons en particulier :

— les *translations* qui forment un groupe, qu'on peut identifier au groupe additif des vecteurs libres ;

— *la symétrie par rapport à un point A*. Les symétries ne forment pas un groupe, mais l'ensemble des translations et des symétries forme un groupe ;

— *les homothéties :* on les obtient en « dilatant » ou en « contractant » l'espace par rapport à un de ses points appelé centre. Si les coordonnées du centre sont a_i, les homothéties sont données par :

$$y_i = px_i + b_i \quad (p \neq 0 \quad \text{et} \quad p \neq 1)$$

avec $b_i = a_i\,(1 - p)$. Les homothéties de centre donné (application identique comprise) forment un groupe, ainsi que toutes les homothéties et les translations de l'espace.

On a des géométries subordonnées à la géométrie affine : la **géométrie des similitudes** fondée sur le groupe des similitudes qui est un sous-groupe de celui des affinités, et la **géométrie métrique euclidienne** subordonnée à la géométrie semblable puisque son groupe de transformation, qui est celui des isométries, est un sous-groupe de celui des similitudes.

Fixons dans l'espace affine à n dimensions un n-uplets e_i de vecteurs linéairement indépendants, c'est-à-dire une base de l'espace vectoriel associé (voir *Algèbre linéaire*) ; si on se fixe une origine O, on a un système de référence : à tout point P, on associe comme coordonnées les composantes du vecteur d'extrémités O, P. Toute autre base e'_i qui s'obtient ainsi à partir de e_i : $e'_i = \sum_{k=1}^{n} a_{ik}\, e_k$ avec :

$$\textbf{(1)} \qquad \sum_{i=1}^{n} a^2_{ik} = 1 \qquad \sum_{i=1}^{n} a_{ik}\, a_{ik'} = 0 \text{ pour } k \neq k'$$

sera dite orthonormale. Les similitudes sont les bijections de $\mathbb{R}^n$ dans lui-même représentées par :

$$y_i = \rho \sum_{k=1}^{n} a_{ik}\, x_k + b_i,$$

où les a_{ik} satisfont à **(1)**, et ρ est un nombre réel positif. Pour $n = 1$, on retrouve toutes les affinités de $\mathbb{R}$; pour $n = 2$, on a les correspondances qui à (x_1, x_2) associent (y_1, y_2) :

$$y_1 = \rho\,(x_1 \cos \alpha \mp x_2 \sin \alpha) + b_1$$
$$y_2 = \rho\,(x_1 \sin \alpha \pm x_2 \cos \alpha) + b_2 ;$$

les similitudes correspondant aux signes supérieurs sont dites directes, les autres inverses. Toutes les similitudes, ainsi que les seules similitudes directes, forment un groupe.

Les isométries sont les similitudes pour lesquelles on a : $\rho = 1$. Les isométries forment un groupe, ainsi que les isométries directes : elles transforment une base orthonormale en une base orthonormale.

Un couple de droites distinctes non parallèles admet un invariant par rapport au groupe des similitudes : leur angle ; un couple de points distincts n'en admet pas. Par contre, un tel couple admet un invariant par rapport au groupe des isométries : leur distance. Pour le traité axiomatique de la géométrie euclidienne, voir la *Géométrie élémentaire*.

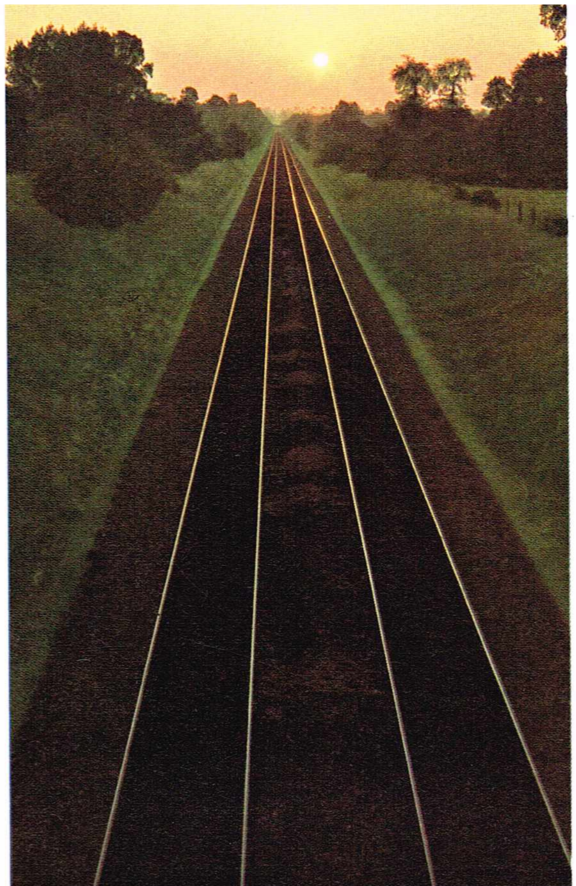

M. Varin-Pitch

▼ ***Figure 36* ; *équipollence : les couples de points joints par les flèches de même couleur sont équipollents.***
Figure 37* ; *règle pratique pour additionner deux vecteurs du plan.

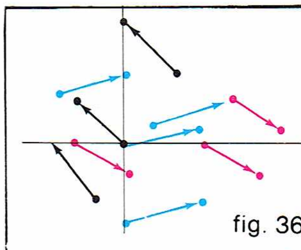

fig. 36

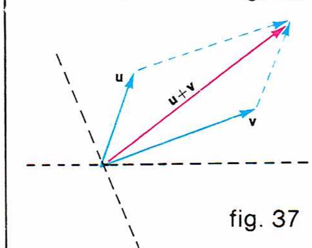

fig. 37

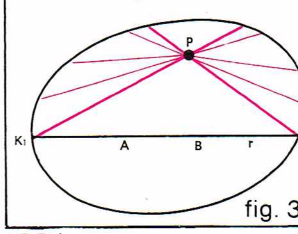

fig. 38

I.G.D.A.

▲ ***Figure 38* : *modèle de géométrie hyperbolique plane obtenu en prenant comme « points » et « droites » les points et les segments de droites intérieurs à la conique.***

Aperçu sur les géométries non euclidiennes

On appelle **géométrie non euclidienne** une géométrie de caractère métrique dans laquelle le *postulat des parallèles* ou *postulat d'Euclide* est remplacé par un axiome non équivalent. Ces géométries sont de deux types.

— *La géométrie hyperbolique,* dans laquelle on admet que, dans un plan donné, par un point extérieur à une droite, on peut mener une infinité de parallèles. Cette géométrie fut introduite par *N. Lobatchevski* au début du XIX[e] siècle.

— *La géométrie elliptique,* dans laquelle deux droites coplanaires se coupent toujours. Pour pouvoir admettre un tel postulat, il est ainsi nécessaire de laisser tomber aussi l'axiome d'Archimède. Cette géométrie est due à *B. Riemann.*

De telles géométries peuvent se traiter de diverses façons. Ici, nous n'en montrerons qu'une pour la géométrie hyperbolique.

Dans le plan projectif réel, considérons une conique $\mathcal{C}$ de points réels et non dégénérée. On a un modèle de géométrie hyperbolique plane en prenant comme « points » les points intérieurs à $\mathcal{C}$ et comme « droites » les segments de droites intérieurs à $\mathcal{C}$. Il est immédiat de constater que, étant donné une « droite » r et un « point » P qui lui est extérieur, toutes les « droites » passant par P contenues dans un certain angle fermé n'intersectent pas r. Comme « distance » entre A et B, on peut prendre le nombre $k\lg\,(A, B, K_1, K_2)$, où k est une constante à fixer une fois pour toutes, et K_1, K_2 les intersections de la droite AB avec $\mathcal{C}$ (pour la notion de birapport, voir la *Géométrie projective*). Le groupe fondamental est celui des homographies qui transforment la conique $\mathcal{C}$ en elle-même (celles-ci conservent la distance définie plus haut) [voir *fig.* 38].

BIBLIOGRAPHIE

ARTIN E., *Algèbre géométrique,* trad. par M. Lazard, Gauthier-Villars, Paris, 1967. - CHOQUET G., *l'Enseignement de la géométrie,* Hermann, Paris, 1964. - DELACHET, *la Géométrie élémentaire,* P.U.F., Paris, 1966, collection « Que sais-je ? », n° 1211 ; *la Géométrie contemporaine,* P.U.F., Paris, 1969, collection « Que sais-je ? », n° 401. - DIEUDONNÉ J., *Algèbre linéaire et Géométrie élémentaire,* 3[e] édition, Hermann, Paris, 1968. - DONEDDU A., *Géométrie euclidienne plane,* Dunod, Paris, 1968. - HILBERT D., *les Fondements de la géométrie,* édition critique avec introduction et compléments préparée par P. Rossier, Dunod, Paris, 1971.

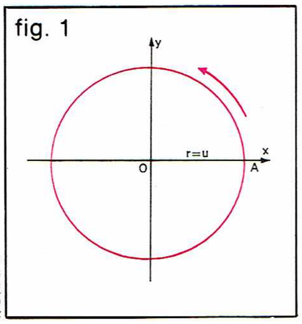

▲ *Figure 1 : le cercle trigonométrique.*

TRIGONOMÉTRIE

Le mot « trigonométrie » signifie étymologiquement « mesure des triangles ». En fait, l'objet de cette science est de faire le lien entre des grandeurs linéaires (longueurs, surfaces) et des grandeurs angulaires, par l'intermédiaire des *fonctions circulaires*. Elle doit son origine à des problèmes d'arpentage et d'astronomie.

On distingue la *trigonométrie plane*, qui ne traite en général que des figures planes, et la *trigonométrie sphérique*, plus compliquée, dont l'objet est l'évaluation des éléments de certaines figures de l'espace.

Les études théoriques commencées par les Babyloniens et les Grecs (Hipparque, Ptolémée), furent poursuivies d'abord par les Arabes, et ensuite en Europe par Regiomontanus, Copernic, Viète. Neper, avec la découverte des logarithmes (1614), donna à la trigonométrie de nouvelles possibilités, et de nouveaux développements furent trouvés par les mathématiciens des XVII[e] et XVIII[e] siècles : Legendre, Cauchy, J. Bernoulli, Newton, Leibniz, Delambre; et le grand mérite d'avoir porté la théorie à sa version définitive appartient à Euler (1707-1783).

Théorie des fonctions trigonométriques

Étant donné un plan, choisissons un point quelconque O du plan comme origine et un segment u comme unité de mesure de longueur; on choisit un système d'axes cartésiens orthogonaux $\overrightarrow{Ox}$ et $\overrightarrow{Oy}$ d'origine O (voir *Géométrie analytique*) avec des sens positifs tels que l'on passe de $\overrightarrow{Ox}$ à $\overrightarrow{Oy}$ par une rotation contraire au sens des aiguilles d'une montre, appelée sens trigonométrique (*fig.* 1).

Tout point du plan, et de là, tout point P d'un cercle de centre O et de rayon u, peut être repéré à l'aide de deux nombres qui s'obtiennent en mesurant avec u les deux segments x et y, projections de P sur les axes $\overrightarrow{Ox}$ et $\overrightarrow{Oy}$, et s'écrira : $P = P(x, y)$. Les angles ont comme origine le demi-axe positif $\overrightarrow{Ox}$ et comme sens positif le sens trigonométrique.

Comme unité de mesure angulaire, on utilise le *degré :* $1° = 1/360$ de l'angle égal à un tour complet, avec ses deux sous-multiples, la minute (1′) et la seconde (1″) (60′ = 1°, 60″ = 1′); le *radian :* 1 rd = angle qui représente sur le cercle un arc de longueur égale au rayon du cercle; le degré est utilisé dans les applications pratiques, le radian dans les études théoriques.

La partie du plan limitée par le cercle de centre O et de rayon $r = u$ se nomme *cercle trigonométrique*.

Puisqu'on utilise fréquemment les deux unités angulaires, il est important de voir rapidement la relation qui les lie et les valeurs qu'ont les angles les plus importants mesurés avec ces unités. Pour avoir la mesure en radians d'un angle, il suffit de diviser un arc qu'il sous-tend par le rayon du cercle auquel appartient cet arc. Étant donné que la longueur d'un cercle de rayon r est $c = 2\pi r$, on a immédiatement :

un angle égal à un tour complet = 360° = 2 π rd.

Pour passer d'un système de mesure à l'autre, on utilise alors simplement la proportion :

$$\alpha°/\alpha \text{ rd} = 360°/2\pi$$

Tableau des unités de mesure de quelques angles remarquables

Degrés	**360**	**270**	**180**	**120**	**90**	**60**	**30**
Radians	**2π**	**3π/2**	**π**	**2π/3**	**π/2**	**π/3**	**π/6**

Les fonctions trigonométriques circulaires directes

On distingue *les fonctions circulaires directes* qui mesurent un segment en fonction d'un angle et *les fonctions circulaires inverses* qui mesurent un angle en fonction d'un segment. Sauf mention contraire, on mesurera dans cette partie les angles en radians.

Considérons (*fig.* 2) un cercle trigonométrique et désignons par α un angle orienté dont le premier côté coïncide avec le demi-axe $\overrightarrow{Ox}$; soit M l'intersection de l'autre côté de l'angle avec le cercle. Les fonctions qu'on va définir mettent en relation l'angle qui définit M avec trois segments. Désignons par A l'intersection du cercle avec $\overrightarrow{Ox}$, par M_1 et M_2 les projections de M sur les axes $\overrightarrow{Ox}$ et $\overrightarrow{Oy}$, et par T l'intersection de la tangente en A au cercle et de l'autre côté de l'angle; on pose :

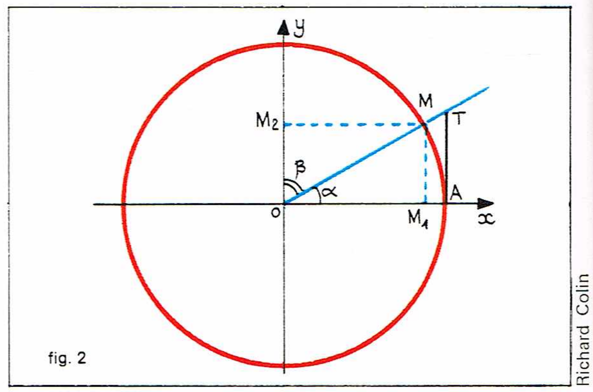

$$\sin\alpha = \frac{M_1M}{OA} \qquad \cos\alpha = \frac{OM_1}{OA} \qquad \text{tg}\,\alpha = \frac{AT}{OA}$$

c'est-à-dire qu'on définit :

le **sinus** d'un angle α (ou d'un arc de cercle $\widehat{AM}$) comme le nombre positif ou négatif qui mesure le segment M_1M par rapport au rayon;

le **cosinus** d'un angle α (ou d'un arc $\widehat{AM}$) comme le nombre positif ou négatif qui mesure le segment OM_1 par rapport au rayon;

la **tangente** d'un angle α (ou d'un arc $\widehat{AM}$) comme le nombre positif ou négatif qui mesure le segment AT par rapport au rayon.

Étant donné que les segments qui interviennent dans les définitions des fonctions trigonométriques sont parallèles à un des deux axes cartésiens, on peut leur attribuer un signe.

Comportement et graphes de ces fonctions : on peut tracer les graphes des trois fonctions sin x, cos x et tg x. Sin x et cos x sont des fonctions définies sur $\mathbb{R}$ et périodiques de période 2π, c'est-à-dire que :

$$\sin(x + 2\pi) = \sin x \quad \text{et} \quad \cos(x + 2\pi) = \cos x;$$

la tangente définie pour $x \neq (2k + 1)\frac{\pi}{2}$ (k entier), est périodique de période π :

$$\text{tg}\,(x + \pi) = \text{tg}\,x.$$

Il est donc suffisant de les représenter sur un intervalle de longueur égale à leur période. Faisons décrire à M un tour complet du cercle trigonométrique à partir de A, on obtient alors les différentes valeurs des fonctions pour construire les trois graphes. Ces fonctions sont continûment dérivables (voir *Analyse*), ce qui facilite l'étude de leurs sens de variation (*fig.* 3, 4, 5) :

$$(\sin x)' = \cos x$$
$$(\cos x)' = -\sin x$$
$$(\text{tg}\,x)' = 1 + \text{tg}^2 x = \frac{1}{\cos^2 x}$$

On utilise aussi une quatrième fonction trigonométrique : la cotangente, définie ainsi :

$$\text{cotg}\,x = \text{tg}\left(\frac{\pi}{2} - x\right);$$

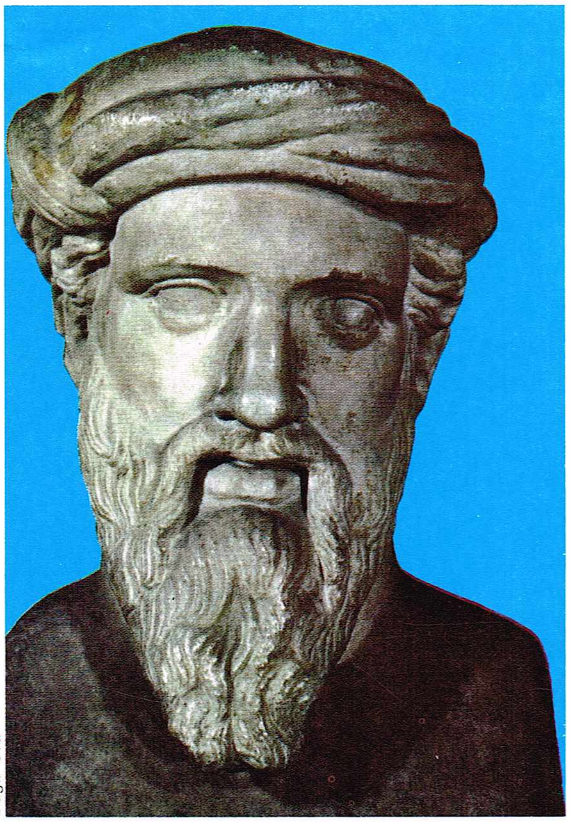

Tableau des valeurs des fonctions trigonométriques pour quelques angles remarquables					
α	0	π/6	π/4	π/3	π/2
sin α	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	1
cos α	1	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
tg α	0	$\frac{\sqrt{3}}{3}$	1	$\sqrt{3}$	$+\infty$
cotg α	$+\infty$	$\sqrt{3}$	1	$\frac{\sqrt{3}}{3}$	0

◀ *Le philosophe et mathématicien* Pythagore *(VI^e siècle av. J.-C.).*

▼ *Figure* 3 : *graphe des fonctions* sin x *et* cos x.
Figure 4 : *graphe de la fonction* tg x.
Figure 5 : *graphe de la fonction* cotg x.

fig. 3

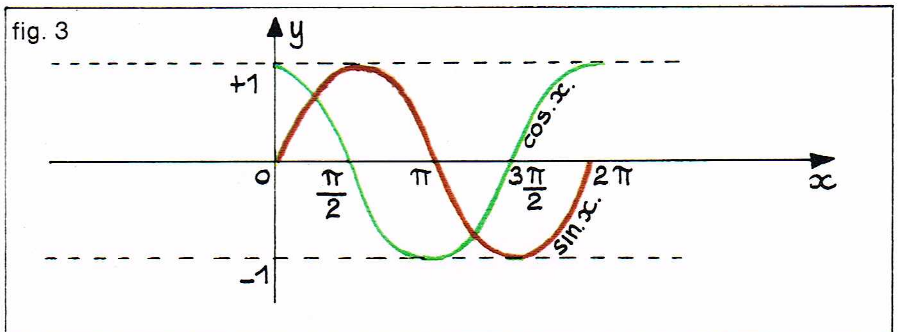

x	0		$\frac{\pi}{2}$		π		$\frac{3\pi}{2}$		2π
cos x	1	→	0	→	−1	→	0	→	1
sin x	0	→	1	→	0	→	−1	→	0

fig. 4

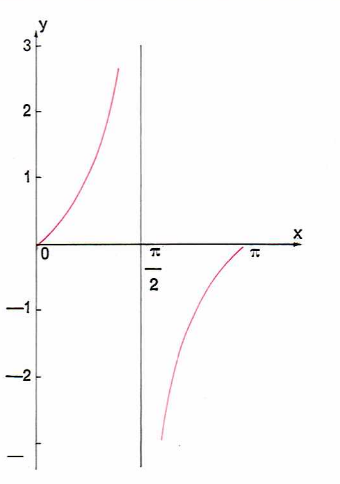

fig. 5

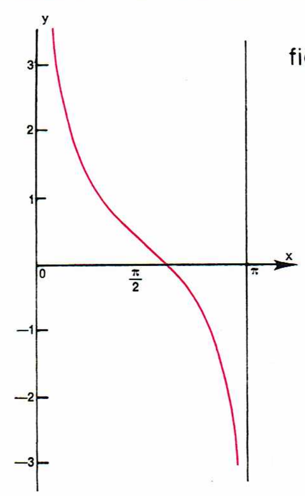

définie pour tout $x \neq k\pi$ ($k \in \mathbb{N}$), elle est périodique de période π comme la tangente, et sa dérivée est égale à :

$$(\text{cotg } x)' = -\frac{1}{\sin^2 x} = -(1 + \text{cotg}^2 x)$$

En examinant le cercle trigonométrique, on peut trouver une relation qui ramène à deux le nombre des fonctions circulaires directes indépendantes; en effet :

$$\cos \alpha = \frac{OM_1}{OA} = \frac{M_2M}{OA} = \sin \beta$$

(si on regarde la figure tournée de 90°), ce qui entraîne que :

$$\cos \alpha = \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right).$$

Les coordonnées d'un point M d'une circonférence de rayon unité sont donc le cosinus et le sinus de l'angle qui sous-tend l'arc $\widehat{AM}$.

Les deux triangles OMM_1 et OTA étant semblables, on a :

$\frac{M_1M}{OM_1} = \frac{AT}{OA}$, ce qui entraîne que : $\text{tg } \alpha = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha}$.

En appliquant le théorème de Pythagore au triangle OMM_1, on obtient :

$$\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1\,;$$

et en divisant les deux membres par $\cos^2 \alpha$:

$$1 + \text{tg}^2 \alpha = \frac{1}{\cos^2 \alpha}$$

Ce sont les trois relations fondamentales auxquelles on a souvent recours dans la théorie et les applications. On déduit facilement de ces relations :

$$\text{cotg } \alpha = \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} \quad \text{et} \quad 1 + \text{cotg}^2 \alpha = \frac{1}{\sin^2 \alpha}.$$

Réduction au premier quadrant

On appelle **réduction au 1^er quadrant** l'opération qui consiste à ramener toute fonction trigonométrique d'un angle quelconque à une fonction trigonométrique d'un angle $< \frac{\pi}{2}$. En tenant compte de la propriété de périodicité

de ces fonctions, on peut toujours ajouter ou retrancher à leur argument un angle d'amplitude $2\,k\pi$ ($k \in \mathbb{N}$), et ainsi se ramener à un angle positif $< 2\pi$. On peut, d'autre part, toujours décomposer un angle quelconque β compris entre 0 et 2π en somme d'un angle α compris entre 0 et $\frac{\pi}{2}$ et d'un angle égal à $\frac{\pi}{2}$ $\left(\text{ou } \pi \text{ ou } \frac{3\pi}{2}\right)$, mais quand l'angle de départ est compris entre 0 et $-\frac{\pi}{2}$, on peut éviter de passer à un angle positif ; la réduction au premier quadrant s'effectue par l'intermédiaire du tableau suivant dont on vérifie facilement les résultats sur le cercle trigonométrique :

angle β (en radians)	sin β	cos β	tg β
π/2 − α	cos α	sin α	1/tg α
π/2 + α	cos α	− sin α	− 1/tg α
π − α	sin α	− cos α	− tg α
π + α	− sin α	− cos α	tg α
3π/2 − α	− cos α	− sin α	1/tg α
3π/2 + α	− cos α	sin α	− 1/tg α
− α	− sin α	cos α	− tg α

▶ *Tableau des principales* **fonctions trigonométriques.**

Formules d'addition et de soustraction

Calculons les fonctions circulaires des angles somme ou différence de deux angles α et β. Considérons le cercle trigonométrique et deux angles adjacents α et β d'origine OA ; soit $\overset{\frown}{AP}$ et $\overset{\frown}{PQ}$ les arcs correspondant à ces deux angles, N l'intersection de la perpendiculaire abaissée de Q sur OA, H l'intersection de la perpendiculaire abaissée de Q sur OP, M l'intersection avec QN de la parallèle à OA passant par H, et K l'intersection de la perpendiculaire abaissée de H sur OA (*fig.* 6).

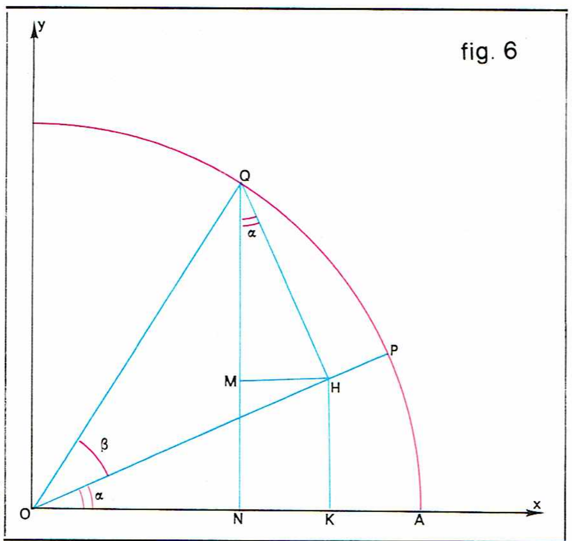

▶ ***Figure 6 :*** *représentation graphique des* **formules d'addition.**

I.G.D.A.

On a :

(1) $$\sin(\alpha+\beta) = \frac{NQ}{OA} = \frac{KH}{OA} + \frac{MQ}{OA} = \frac{OH}{OA}\sin\alpha + \frac{HQ}{OA}\cos\alpha = \sin\alpha\cos\beta + \cos\alpha\sin\beta\,;$$

(2) $$\cos(\alpha+\beta) = \frac{ON}{OA} = \frac{OK}{OA} - \frac{NK}{OA} = \frac{OH}{OA}\cos\alpha - \frac{HQ}{OA}\sin\alpha = \cos\alpha\cos\beta - \sin\alpha\sin\beta.$$

Ces deux formules constituent les **formules d'addition.** En remplaçant β par $-\beta$, on obtient les **formules de soustraction :**

(3) $\sin(\alpha-\beta) = \sin\alpha\cos\beta - \cos\alpha\sin\beta$

(4) $\cos(\alpha-\beta) = \cos\alpha\cos\beta + \sin\alpha\sin\beta$.

En posant $\beta = \alpha$, on obtient :

(5) $\sin 2\alpha = 2\sin\alpha\cos\alpha\,;$

(6) $\cos 2\alpha = \cos^2\alpha - \sin^2\alpha = 2\cos^2\alpha - 1 = 1 - 2\sin^2\alpha.$

En tenant compte de l'égalité $\text{tg}\,\alpha = \frac{\sin\alpha}{\cos\alpha}$ et des formules précédentes d'addition et de soustraction, on obtient :

(7) $$\text{tg}(\alpha+\beta) = \frac{\text{tg}\,\alpha + \text{tg}\,\beta}{1 - \text{tg}\,\alpha\,\text{tg}\,\beta}$$

(8) $$\text{tg}(\alpha-\beta) = \frac{\text{tg}\,\alpha - \text{tg}\,\beta}{1 + \text{tg}\,\alpha\,\text{tg}\,\beta}$$

(9) $$\text{tg}\,2\alpha = \frac{2\,\text{tg}\,\alpha}{1 - \text{tg}^2\alpha}$$

Dans de nombreux problèmes, on utilise les formules suivantes qui expriment $\sin\alpha$ et $\cos\alpha$ en fonction de la tangente de l'arc moitié : $\text{tg}\frac{\alpha}{2}$. On les obtient à partir des formules **(5)** et **(6)** en remplaçant α par $\frac{\alpha}{2}$, et enfin en divisant numérateur et dénominateur par $\cos^2\frac{\alpha}{2}$:

$$\sin\alpha = \frac{2\,\text{tg}\frac{\alpha}{2}}{1+\text{tg}^2\frac{\alpha}{2}} \qquad \cos\alpha = \frac{1-\text{tg}^2\frac{\alpha}{2}}{1+\text{tg}^2\frac{\alpha}{2}}$$

en divisant membre à membre, on obtient :

$$\text{tg}\,\alpha = \frac{2\,\text{tg}\frac{\alpha}{2}}{1-\text{tg}^2\frac{\alpha}{2}}$$

$\sin(\alpha+\beta) = \sin\alpha.\cos\beta + \cos\alpha.\sin\beta$

$\cos(\alpha+\beta) = \cos\alpha.\cos\beta - \sin\alpha.\sin\beta$

$\sin(\alpha-\beta) = \sin\alpha.\cos\beta - \cos\alpha.\sin\beta$

$\cos(\alpha-\beta) = \cos\alpha.\cos\beta + \sin\alpha.\sin\beta$

$$\text{tg}(\alpha+\beta) = \frac{\text{tg}\,\alpha + \text{tg}\,\beta}{1 - \text{tg}\,\alpha.\,\text{tg}\,\beta}$$

$$\text{tg}(\alpha-\beta) = \frac{\text{tg}\,\alpha - \text{tg}\,\beta}{1 + \text{tg}\,\alpha.\,\text{tg}\,\beta}$$

$\sin 2\alpha = 2\sin\alpha.\cos\alpha$

$\cos 2\alpha = \cos^2\alpha - \sin^2\alpha = 2\cos^2\alpha - 1 = 1 - 2\sin^2\alpha$

$$\text{tg}\,2\alpha = \frac{2\,\text{tg}\,\alpha}{1 - \text{tg}^2\alpha}$$

$$\sin\alpha = \frac{2\text{tg}\frac{\alpha}{2}}{1+\text{tg}^2\frac{\alpha}{2}} \qquad \cos\alpha = \frac{1-\text{tg}^2\frac{\alpha}{2}}{1+\text{tg}^2\frac{\alpha}{2}}$$

$$\text{tg}\,\alpha = \frac{2\,\text{tg}\frac{\alpha}{2}}{1-\text{tg}^2\frac{\alpha}{2}}$$

Formules de transformation

On appelle ainsi les quatre formules qui transforment une somme ou une différence de sinus ou cosinus en un produit; on les obtient en additionnant et soustrayant entre elles les formules **(1)** et **(3)**, et ensuite les formules **(2)** et **(4)**. On obtient ainsi *les formules de Werner :*

formules de Werner
$\sin \alpha \cos \beta = \frac{1}{2}\left[\sin(\alpha+\beta) + \sin(\alpha-\beta)\right]$
$\cos \alpha \sin \beta = \frac{1}{2}\left[\sin(\alpha+\beta) - \sin(\alpha-\beta)\right]$
$\cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2}\left[\cos(\alpha+\beta) + \cos(\alpha-\beta)\right]$
$\sin \alpha \sin \beta = -\frac{1}{2}\left[\cos(\alpha+\beta) - \cos(\alpha-\beta)\right]$

Posons $\alpha + \beta = p$ et $\alpha - \beta = q$, c'est-à-dire $\alpha = \left(\frac{p+q}{2}\right)$ et $\beta = \left(\frac{p-q}{2}\right)$, on obtient alors *les formules de transformation :*

formules de transformation
$\sin p + \sin q = 2 \sin \frac{p+q}{2} \cos \frac{p-q}{2}$
$\sin p - \sin q = 2 \cos \frac{p+q}{2} \sin \frac{p-q}{2}$
$\cos p + \cos q = 2 \cos \frac{p+q}{2} \cos \frac{p-q}{2}$
$\cos p - \cos q = -2 \sin \frac{p+q}{2} \sin \frac{p-q}{2}$

Fonctions trigonométriques circulaires inverses (ou réciproques)

A toute valeur de la variable x, il correspond une valeur unique d'une fonction circulaire directe, mais la réciproque n'est pas vraie. En effet, considérons l'équation $\sin x = a$ où a est un nombre réel donné; il y a une infinité de valeurs de x qui satisfont à cette équation si a est un nombre compris entre -1 et $+1$; sauf si $a = \pm 1$, il y a deux angles compris entre 0° et 360° qui satisfont l'équation. Considérons, par exemple, l'équation

$$\sin x = \frac{\sqrt{3}}{2},$$

prenons le point $\left(0, \frac{\sqrt{3}}{2}\right)$ et menons par ce point la parallèle à l'axe des x (*fig.* 7), on a deux intersections avec le cercle trigonométrique pour lesquelles l'équation est satisfaite :

$$x = \widehat{AOP} = \frac{\pi}{3}$$

$$x = \widehat{AOP'} = \frac{2\pi}{3}$$

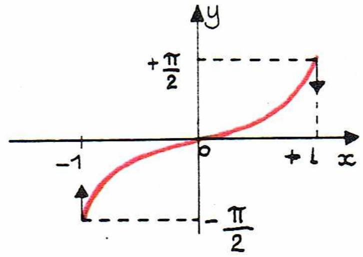

fig 8

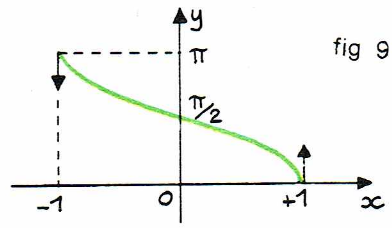

fig 9

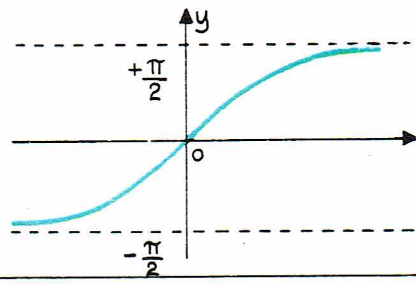

fig 10

▲ ***Figure* 8 : *fonction* Arc sinus.**
***Figure* 9 : *fonction* Arc cosinus.**
***Figure* 10 : *fonction* Arc tangente.**

Il est pratique d'exprimer toutes les solutions d'une équation de ce type par une formule unique :

$$\sin x = a \quad \Rightarrow \quad x = (-1)^k \alpha + k\pi$$
$$\cos x = a \quad \Rightarrow \quad x = \pm \alpha + 2k\pi$$
$$\operatorname{tg} x = a \quad \Rightarrow \quad x = \alpha + k\pi$$

où α est le plus petit angle positif satisfaisant l'équation proposée, et k un entier relatif.

Lorsque les fonctions circulaires directes ont été introduites en analyse mathématique, il a été nécessaire de définir aussi leurs **fonctions réciproques.** Or, on a vu que ces fonctions ne sont pas monotones; on ne pourra donc définir des fonctions réciproques que si on se restreint à des intervalles sur lesquels ces fonctions sont strictement monotones (voir *Analyse*).

On définit ainsi les fonctions **Arc sinus, Arc cosinus** et **Arc tangente** comme fonctions réciproques de la restriction du sinus à $\left[-\frac{\pi}{2}, +\frac{\pi}{2}\right]$, de la restriction du cosinus à $[0, \pi]$, et enfin de la restriction de la tangente à $\left[-\frac{\pi}{2}, +\frac{\pi}{2}\right]$ respectivement.

Ainsi, Arc sin est une bijection strictement croissante de $[-1, +1]$ sur $\left[-\frac{\pi}{2}, +\frac{\pi}{2}\right]$, et par définition (*fig.* 8) :

$$y = \operatorname{Arc\,sin} x \quad \Leftrightarrow \quad x = \sin y$$
$$-1 \leqslant x \leqslant +1 \qquad -\frac{\pi}{2} \leqslant y \leqslant +\frac{\pi}{2}$$

Arc cos est une bijection strictement décroissante de $[-1, +1]$ sur $[0, \pi]$ (*fig.* 9) :

$$y = \operatorname{Arc\,cos} x \quad \Leftrightarrow \quad x = \cos y$$
$$-1 \leqslant x \leqslant +1 \qquad 0 \leqslant y \leqslant \pi$$

Arc tg est une bijection strictement croissante de $\mathbb{R}$ sur $\left]-\frac{\pi}{2}, +\frac{\pi}{2}\right[$ (*fig.* 10) :

$$y = \operatorname{Arc\,tg} x \Leftrightarrow \qquad x = \operatorname{tg} y$$
$$x \in \mathbb{R} \qquad -\frac{\pi}{2} \leqslant y \leqslant +\frac{\pi}{2}$$

Le théorème des fonctions réciproques (voir *Analyse*) permet de calculer les dérivées de ces fonctions, on a :

$$(\operatorname{Arc\,sin} x)' = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} \text{ pour } x \in]-1, +1[$$

▼ ***Figure* 7 : $\widehat{AOP} = \frac{\pi}{3}$ et $\widehat{AOP'} = \frac{2\pi}{3}$ sont les deux angles compris entre 0° et 360° qui satisfont l'équation $\sin x = \frac{\sqrt{3}}{2}$.**

fig. 7

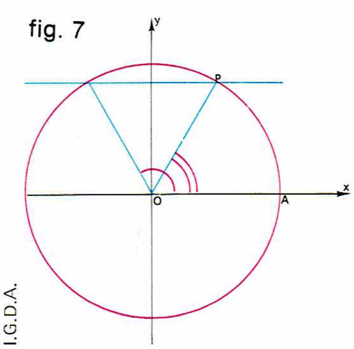

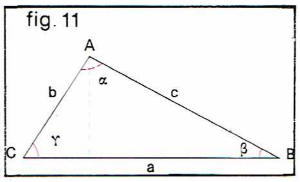

I.G.D.A.

▲ ***Figure* 11 : *théorème des projections.***

$$(\text{Arc}\cos x)' = -\frac{1}{\sqrt{1-x^2}} \text{ pour } x \in]-1, +1[$$

$$(\text{Arc tg}\, x)' = \frac{1}{1+x^2}.$$

Ces fonctions sont très utilisées en calcul intégral et permettent d'écrire le nombre π comme intégrale définie ; par exemple : $\frac{\pi}{2} = \int_0^1 \frac{dx}{\sqrt{1-x^2}}$

Trigonométrie plane

La **trigonométrie plane** étudie les relations métriques entre les éléments de figures planes délimitées par des segments de droite. De telles figures étant toujours décomposables en triangles, la résolution des triangles est particulièrement importante. Dans ce paragraphe et dans le suivant, les angles seront mesurés en degrés.

Résoudre un triangle signifie : étant donné quelques éléments suffisant à le déterminer univoquement, calculer les autres. Un angle est généralement déterminé quand on connaît une de ses fonctions trigonométriques, car on sait qu'il est toujours $< 180°$, et dans le cas où on hésite entre un angle aigu et un angle obtus, on peut toujours recourir au calcul d'une seconde fonction du même angle.

Nous savons par la géométrie élémentaire qu'un triangle est déterminé quand trois de ses éléments, dont au moins un côté, sont donnés (un côté peut être remplacé par la surface).

Théorème des sinus

Quand trois éléments d'un triangle sont donnés, la solution s'obtient alors par la résolution d'un système de trois équations à trois inconnues. Comme première équation, on a celle de la géométrie élémentaire :

$$\alpha + \beta + \gamma = 180°$$

les deux autres sont données par le théorème des sinus qu'on admettra :

Dans un triangle quelconque, le rapport entre un côté et le sinus de l'angle opposé est constant et égal au diamètre du cercle circonscrit :

$$\frac{a}{\sin\alpha} = \frac{b}{\sin\beta} = \frac{c}{\sin\gamma}.$$

Théorème des projections

Tout côté d'un triangle est égal à la somme des produits de chacun des autres côtés par les cosinus des angles qu'ils forment avec le premier. Abaissons du sommet A d'un triangle la perpendiculaire sur le côté BC (*fig.* 11), on obtient deux triangles rectangles : si β et γ sont aigus, la base a est égale à la somme suivante :

$$a = b\cos\gamma + c\cos\beta$$

On peut vérifier que si γ (par exemple) est obtus, $\cos\gamma$ est négatif et la formule est toujours valable.

Théorème du cosinus ou de Carnot

Dans un triangle quelconque, le carré d'un des côtés est égal à la somme des carrés des autres diminuée du double produit de ces deux côtés par le cosinus de l'angle compris entre eux :

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2\,bc\cos\alpha$$

Pour démontrer ce théorème, il suffit d'écrire les trois relations du théorème des projections relativement aux côtés a, b, c dans l'ordre, de multiplier respectivement par a, $-b$, $-c$, et puis d'additionner membre à membre.

Dans le cas particulier d'un triangle rectangle en A, l'expression se réduit au bien connu théorème de Pythagore.

On a encore en trigonométrie plane d'autres formules comme celles de **Neper** et de **Briggs** qui permettent d'exprimer une fonction trigonométrique d'un angle d'un triangle en fonction des autres angles et des côtés de ce triangle. Ces formules ont de multiples applications et permettent d'obtenir, en particulier, de nouvelles expressions de la surface d'un triangle comme la *formule d'Erone :*

$$S = \sqrt{p\,(p-a)\,(p-b)\,(p-c)},$$

où a, b, c sont les longueurs des trois côtés du triangle et $p = \frac{1}{2}(a+b+c)$.

Applications de la trigonométrie plane

Les fonctions trigonométriques et les formules de trigonométrie ont d'importantes et nombreuses applications. Les premières constituent un puissant moyen de calcul en mathématiques, en physique et dans toutes les sciences dont la théorie se base sur l'analyse mathématique, les secondes permettent de résoudre des problèmes pratiques de mesure, de distances et de calcul d'angles, en topographie, en géodésie, en astronomie.

Les fonctions trigonométriques sont évidemment très importantes pour la représentation des phénomènes périodiques. On peut écrire les développements de $\sin x$ et $\cos x$ en séries entières (voir *Analyse*) en exprimant x en radians :

$$\sin x = \sum_{n=0}^{+\infty} (-1)^{n+1} \cdot \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)!}$$

$$\cos x = \sum_{n=0}^{+\infty} (-1)^n \frac{x^{2n}}{2n!}$$

Ces relations permettent de définir aussi les fonctions trigonométriques pour des valeurs complexes de x.

On peut aussi en déduire la *formule d'Euler :*

$$e^{ix} = \cos x + i\sin x.$$

Dans beaucoup d'ouvrages d'analyse, les fonctions trigonométriques sont introduites par la définition suivante : pour x réel, on appelle respectivement cosinus et sinus de x les parties réelles et imaginaire de e^{ix}, soit : $e^{ix} = \cos x + i\sin x$. Il en résulte que :

$$\cos t = \frac{e^{it} + e^{-it}}{2}$$

$$\sin t = \frac{e^{it} - e^{-it}}{2i}$$

et on déduit de ces formules et des propriétés de la fonction exponentielle les propriétés des fonctions trigonométriques.

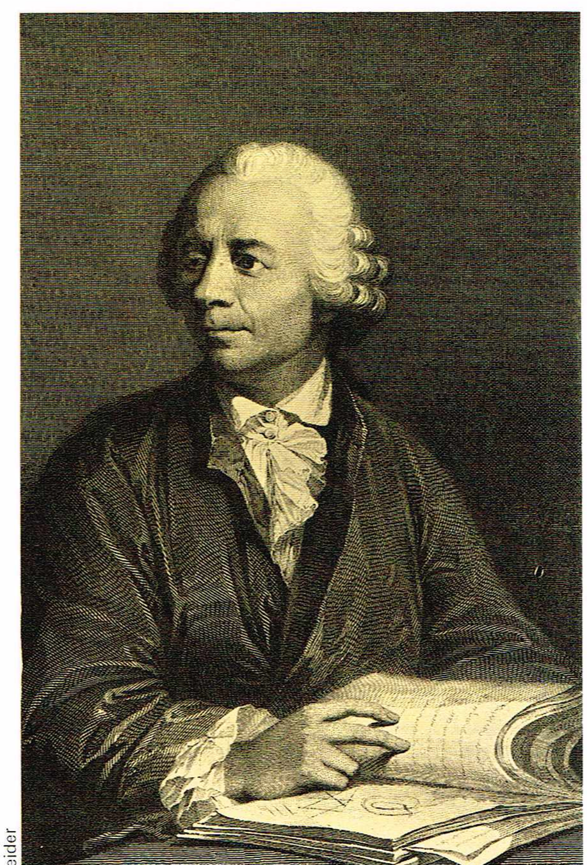

Pineider

▶ ***Le mathématicien suisse* Leonhard Euler *(1707-1783).***

Trigonométrie hyperbolique

Donnons aussi les définitions des *fonctions hyperboliques* qui jouent pour la géométrie du *plan hyperbolique* le même rôle que les fonctions circulaires pour le *plan euclidien*. Pour tout x réel, on appelle *cosinus hyperbolique* de x, *sinus hyperbolique* de x, et *tangente hyperbolique* de x, respectivement les nombres :

$$\text{ch } x = \frac{1}{2}(e^{x} + e^{-x})$$

$$\text{sh } x = \frac{1}{2}(e^{x} - e^{-x})$$

$$\text{th } x = \frac{\text{sh } x}{\text{ch } x} = \frac{e^{2x} - 1}{e^{2x} + 1}.$$

Remarquons que le cosinus hyperbolique est une fonction paire, tandis que les deux autres sont des fonctions impaires. Un calcul simple montre que l'on a :

$$\text{ch}^2 x - \text{sh}^2 x = 1 \quad \text{pour tout } x.$$

Par dérivation, on obtient facilement :

$$(\text{ch } x)' = \text{sh } x,$$

$$(\text{sh } x)' = \text{ch } x,$$

$$(\text{th } x)' = 1 - \text{th}^2 x = \frac{1}{\text{ch}^2 x}.$$

En considérant la définition de ch x, on s'aperçoit que ch x est toujours $\geqslant 1$, et il en résulte que sh x est une application strictement croissante de $\mathbb{R}$ dans $\mathbb{R}$. On voit que sh x tend vers $-\infty$ et $+\infty$ pour x tendant respectivement vers $-\infty$ et $+\infty$: cette fonction est donc bijective de $\mathbb{R}$ sur $\mathbb{R}$. Puisque sh $0 = 0$, le nombre sh x est du signe de x ; par suite, la fonction paire ch x est strictement croissante pour $x \geqslant 0$; d'autre part, ch x tend vers $+\infty$ quand x tend vers $+\infty$ ou vers $-\infty$. Enfin la fonction th x dont la dérivée est toujours strictement positive, est strictement croissante, et pour x tendant vers l'infini, on a :

$$\lim_{x \to -\infty} \text{th } x = -1, \qquad \lim_{x \to +\infty} \text{th } x = +1 ;$$

on en déduit que th x est bijective de $\mathbb{R}$ sur $]-1, +1[$.

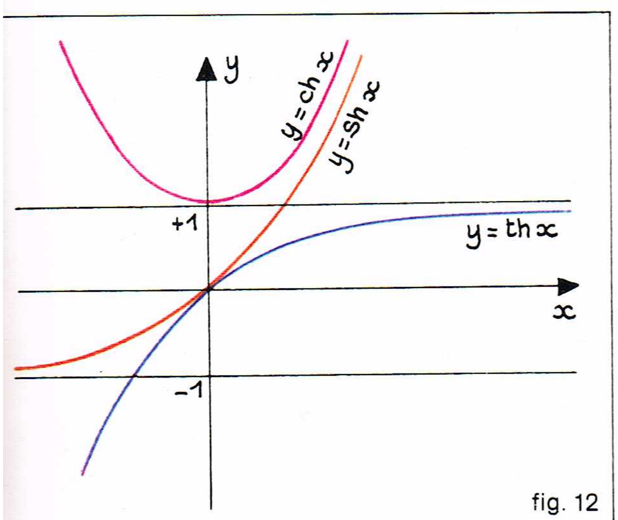

fig. 12

On désigne par Arg sh x la bijection réciproque de $\mathbb{R}$ sur $\mathbb{R}$ de sh x, par Arg ch x la bijection réciproque de $[1, +\infty[$ sur $\mathbb{R}^+$ de ch x, et enfin par Arg th x la bijection réciproque de $]-1, +1[$ sur $\mathbb{R}$:

$$y = \text{Arg sh } x, x \in \mathbb{R} \Leftrightarrow x = \text{sh } y, \quad y \in \mathbb{R}$$

$$y = \text{Arg ch } x, x \geqslant 1 \Leftrightarrow x = \text{ch } y, \quad y \geqslant 0$$

$$y = \text{Arg th } x, -1 < x < +1 \Leftrightarrow x = \text{th } y, \quad y \in \mathbb{R}$$

Trigonométrie complexe

Les fonctions trigonométriques circulaires et hyperboliques s'étendent au domaine complexe de manière naturelle, en utilisant les développements en série ou (ce qui revient au même, puisque e^z est défini comme somme d'une série) au moyen des formules :

$$\cos z = \frac{e^{iz} + e^{-iz}}{2} \qquad \sin z = \frac{e^{iz} - e^{-iz}}{2i}$$

$$\text{ch } z = \frac{e^{z} + e^{-z}}{2} \qquad \text{sh } z = \frac{e^{z} - e^{-z}}{2}$$

qui mettent en évidence, par passage au domaine complexe, les liens étroits entre la trigonométrie circulaire et la trigonométrie hyperbolique. Ces fonctions sont analytiques dans tout le plan, et on a des relations du type :

$$\text{ch} z = \cos iz \qquad \sin iz = i \text{sh } z$$

qui sont valables en particulier quand z est un nombre réel et qui permettent de *déduire la trigonométrie hyperbolique de la trigonométrie circulaire et réciproquement.*

Applications pratiques

Pour les problèmes qui ont trait à la résolution des triangles, on mesure les angles en degrés. On va exposer quelques problèmes typiques dans lesquels interviennent des formules de trigonométrie : il sera ici simplement question de problèmes de topographie et d'astronomie où n'existent matériellement que les sommets des triangles. La mesure des angles se fait au moyen d'un théodolite.

Dans la résolution des problèmes, on notera b la base qui est une longueur de référence dont la valeur est connue ; elle est choisie de telle sorte que le triangle dont elle fait partie soit celui dont on veut déterminer un élément.

Distance d'un point O à un point P visible, mais non accessible

On mesure la base AO $= b$ et les deux angles $\beta = \widehat{OAP}$ et $\alpha =$ AOP. Du théorème du sinus, on déduit (*fig.* 13) :

$$OP = AO \frac{\sin \beta}{\sin \widehat{APO}} = b \frac{\sin \beta}{\sin (\alpha + \beta)}$$

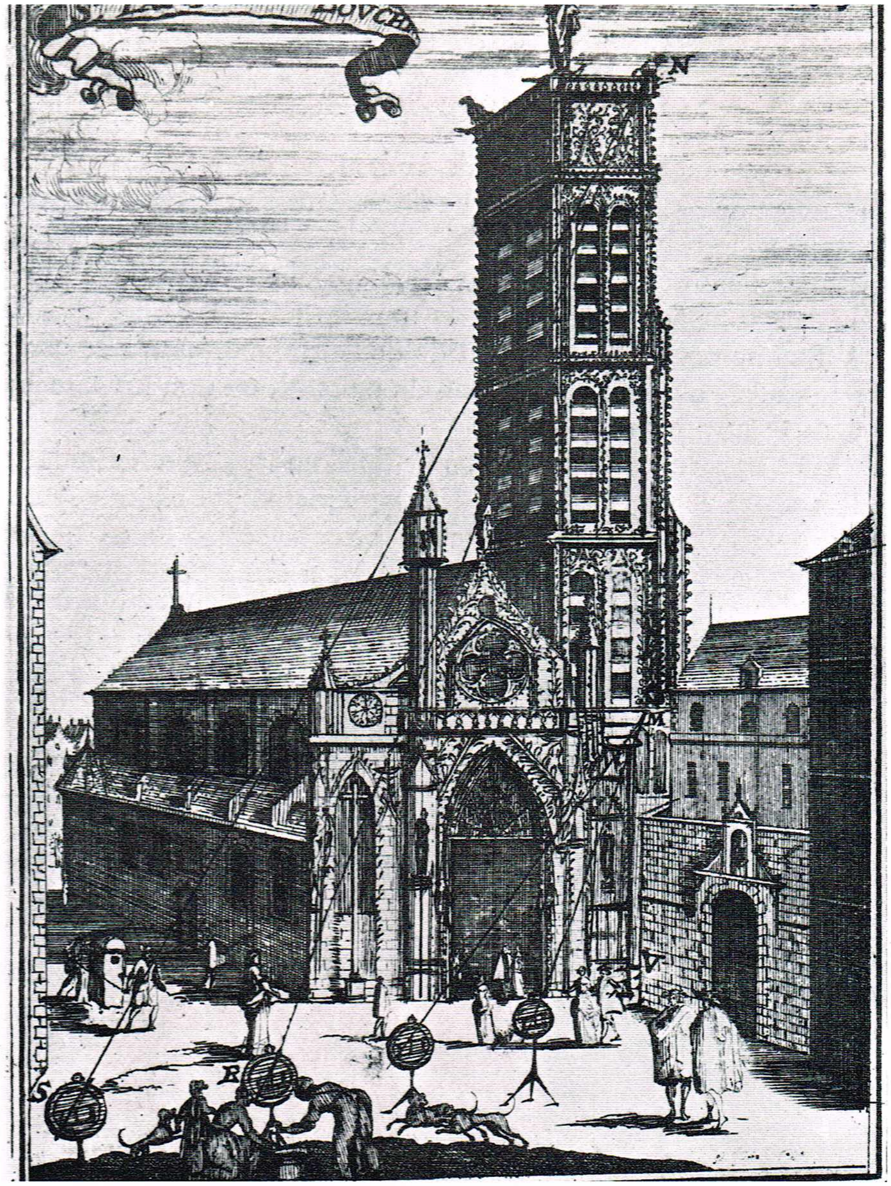

Collection Viollet

▲ ***Planche illustrant un manuel de trigonométrie du XVII^e siècle et montrant des calculs trigonométriques effectués à partir de l'église Saint-Jacques-la-Boucherie à Paris.***

◀ ***Figure 12 : les fonctions hyperboliques.***

▼ ***Figure 13 : détermination de la distance d'un point O à un point P visible, mais non accessible.***

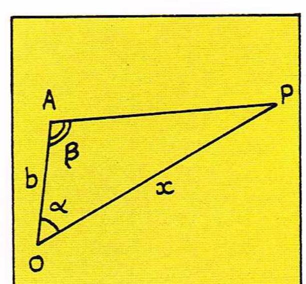

fig. 13

▶ *Page ci-contre, à gauche, figure* **18** : *théorème du cosinus; figure* **19** : *théorème du sinus.*

Il existe une méthode semblable pour mesurer la distance de deux points A et B visibles, mais non accessibles.

Hauteur d'une montagne relativement à un plan horizontal passant par un point O

Soit V le sommet de la montagne et A le pied de la perpendiculaire abaissée de V sur le plan horizontal passant par O (*fig.* 14).

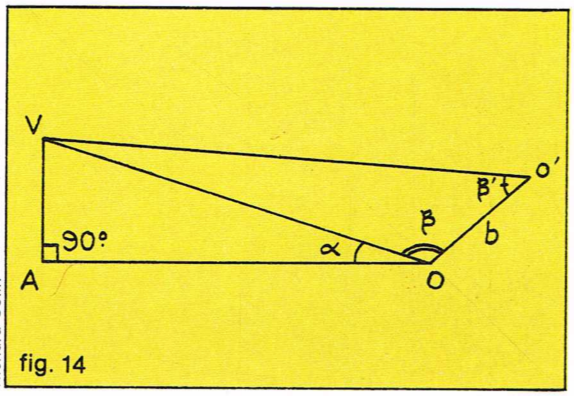

fig. 14

Richard Colin

▶ *Figure* **14** : *détermination de la hauteur d'une montagne relativement à un plan horizontal passant par un point* **O.**

On mesure la base $OO' = b$, qui en général n'appartient pas à un plan horizontal, et les angles α, β, β'.

$$OV = b\frac{\sin\beta'}{\sin\widehat{OVO'}}, \quad \widehat{OVO'} = 180° - (\beta + \beta')$$

$$AV = OV \sin\alpha$$

et en substituant, on obtient :

$$AV = b\frac{\sin\beta' \sin\alpha}{\sin(\beta + \beta')}$$

Distance de la Lune

On se trouve ici dans le cas du premier problème où P représente la Lune, et A et O deux points de la surface terrestre. On peut par exemple prendre comme base le rayon terrestre et lire la hauteur de la Lune en un point M', celle-ci étant au zénith d'un point M" situé sur le même méridien que M. Appliquons le théorème du sinus (*fig.* 15) :

$$\frac{R}{\sin\widehat{M'LO}} = \frac{OL}{\sin\widehat{LM'O}}$$

où R est le rayon terrestre ; en tenant compte de

$$\widehat{OM'L} = 90° + \beta,$$

$$\widehat{M'LO} = 180° - (\alpha + \beta + 90°) = 90° - (\alpha + \beta),$$

on obtient :

$$OL = R\frac{\cos\beta}{\cos(\alpha + \beta)}.$$

▶ *Page ci-contre, à droite : on appelle* **triangle sphérique** *la partie de la surface délimitée par trois arcs de grand cercle reliant les points deux à deux.*

Distance du Soleil

Le problème ne peut pas se résoudre comme pour la Lune parce qu'une base quelconque de la Terre sera toujours trop petite par rapport à la distance à mesurer. Soit l la distance Terre-Lune. On mesure α quand la Lune est exactement à son premier quartier ; la distance cherchée Terre-Soleil d_s est ainsi l'hypoténuse d'un triangle rectangle dont on connaît un côté et un angle (*fig.* 16) :

$$d_s = \frac{l}{\cos\alpha}$$

Il existe aussi une méthode pour calculer la distance des étoiles.

Trigonométrie sphérique

Considérons sur une surface sphérique de rayon R trois points n'appartenant pas au même grand cercle ; on appelle **triangle sphérique** la partie de la surface délimitée par trois arcs de grand cercle (plus petits qu'un grand demi-cercle) reliant les points deux à deux (ceux-ci représentent sur la sphère leur distance minimale). La longueur des côtés du triangle sphérique est égale au produit du rayon de la sphère par l'angle au centre qui les sous-tend ; l'**angle sphérique** est l'angle plan que font les deux tangentes aux deux côtés en leur point d'intersection.

Étant donné un côté d'un triangle sphérique, on peut, en le considérant comme un arc, parler d'une de ses fonctions trigonométriques. A tout angle d'un triangle sphérique, on peut faire correspondre un arc : on mène par le sommet de l'angle un diamètre de la sphère et le plan qui lui est perpendiculaire et qui passe par le centre de la sphère ; ce dernier intersecte la sphère selon un grand cercle C qui, à son tour, rencontre les côtés de l'angle en deux points P et P' (*fig.* 17). L'arc $\widehat{PP'}$ de C est l'arc cherché correspondant à l'angle α : puisque $\alpha' = \alpha$, on a $\widehat{PP'} = \alpha \cdot R$. On n'en déduira pas que les éléments d'un triangle sphérique peuvent être considérés indifféremment arcs ou angles ; dans ce paragraphe, on les mesurera en radians (en prenant le rayon comme unité de mesure, la mesure d'un côté donne aussi sa longueur).

La mesure de tout angle et de tout côté d'un triangle sphérique est comprise entre 0 et π.

A tout triangle sphérique, on peut faire correspondre un *trièdre* de sommet O (centre de la sphère) et dont les arêtes passent par les sommets du triangle. Des propriétés du trièdre, on peut déduire celles du triangle sphérique :

— un côté est plus grand que la différence et plus petit que la somme des deux autres ;

— la somme des côtés est comprise entre 0 et 2π ;

— la somme des angles est comprise entre π et 3π ;

— un angle externe est plus grand que la différence et plus petit que la somme des deux angles internes opposés :

fig. 15

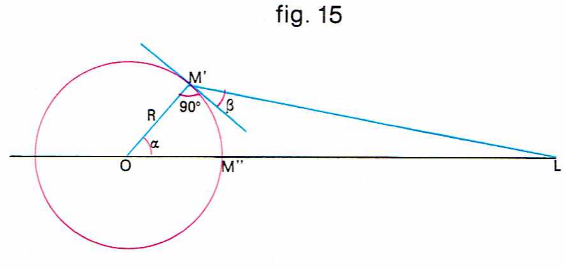

fig. 16

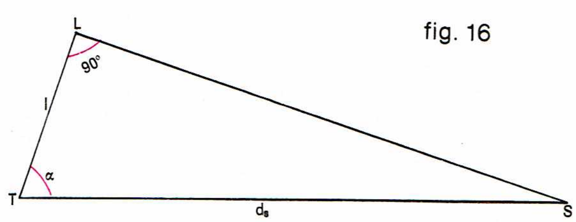

fig. 17

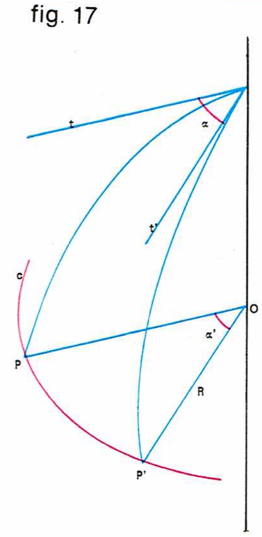

I.G.D.A.

▶ *Figure* **15** : *détermination de la distance de la Lune. Figure* **16** : *détermination de la distance du Soleil. Figure* **17** : *triangle sphérique.*

fig 18

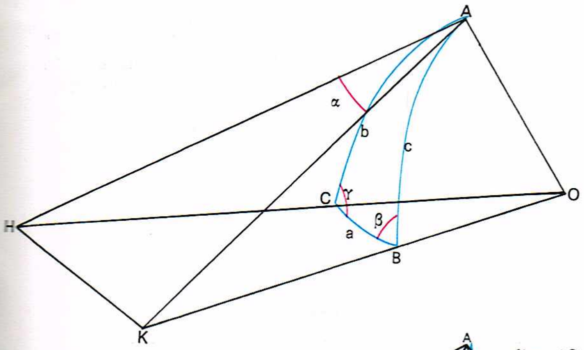

fig. 19

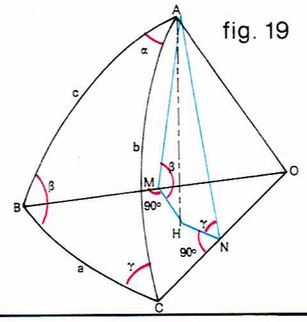

I.G.D.A.

— à des angles égaux, correspondent des côtés égaux ; au plus grand angle est opposé le plus grand côté.

On appelle **excès sphérique** d'un triangle la quantité dont la somme des angles du triangle sphérique dépasse celle des angles du triangle plan. En utilisant les notations introduites pour les triangles plans, on a :

$$e = \alpha + \beta + \gamma - \pi.$$

Pour la résolution des triangles sphériques, on peut établir des équations algébriques entre les fonctions circulaires des côtés et des angles.

Théorème du cosinus

On mène par un sommet, par exemple A, d'un triangle sphérique ABC, les tangentes aux deux côtés b et c (*fig.* 18) afin qu'elles rencontrent les deux autres arêtes du trièdre correspondant au triangle. En égalisant les deux expressions de HK obtenues avec le théorème de Carnot appliqué aux deux triangles plans HAK et HOK :

$$HK^2 = AH^2 + AK^2 - 2\,AH\,AK\cos\alpha$$

$$HK^2 = OH^2 + OK^2 - 2\,OH\,OK\cos a$$

$$AK = AO\,\mathrm{tg}\,c, \qquad AH = AO\,\mathrm{tg}\,b$$

$$OK = \frac{AO}{\cos c}, \qquad OH = \frac{AO}{\cos b}.$$

En égalisant et en substituant, on obtient :

$$\cos a = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos \alpha.$$

En écrivant les deux formules analogues, on a les systèmes suivants qui permettent de calculer trois éléments d'un triangle, connaissant les trois autres :

$$\begin{cases} \cos a = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos \alpha \\ \cos b = \cos c \cos a + \sin c \sin a \cos \beta \\ \cos c = \cos a \cos b + \sin a \sin b \cos \gamma \end{cases}$$

Théorème du sinus

En partant toujours du triangle sphérique ABC, on mène de A la perpendiculaire AH au plan BOC et de H la perpendiculaire aux rayons OB et OC (*fig.* 19). En tenant compte que par construction $\widehat{ANH} = \gamma$ et $\widehat{AMH} = \beta$ (AM et AN sont perpendiculaires respectivement à OB et OC), on a :

$$AH = AM \sin\beta = R \sin c \sin\beta$$

$$AH = AN \sin\gamma = R \sin b \sin\gamma.$$

En égalisant, on obtient :

$$\sin c \sin\beta = \sin b \sin\gamma$$

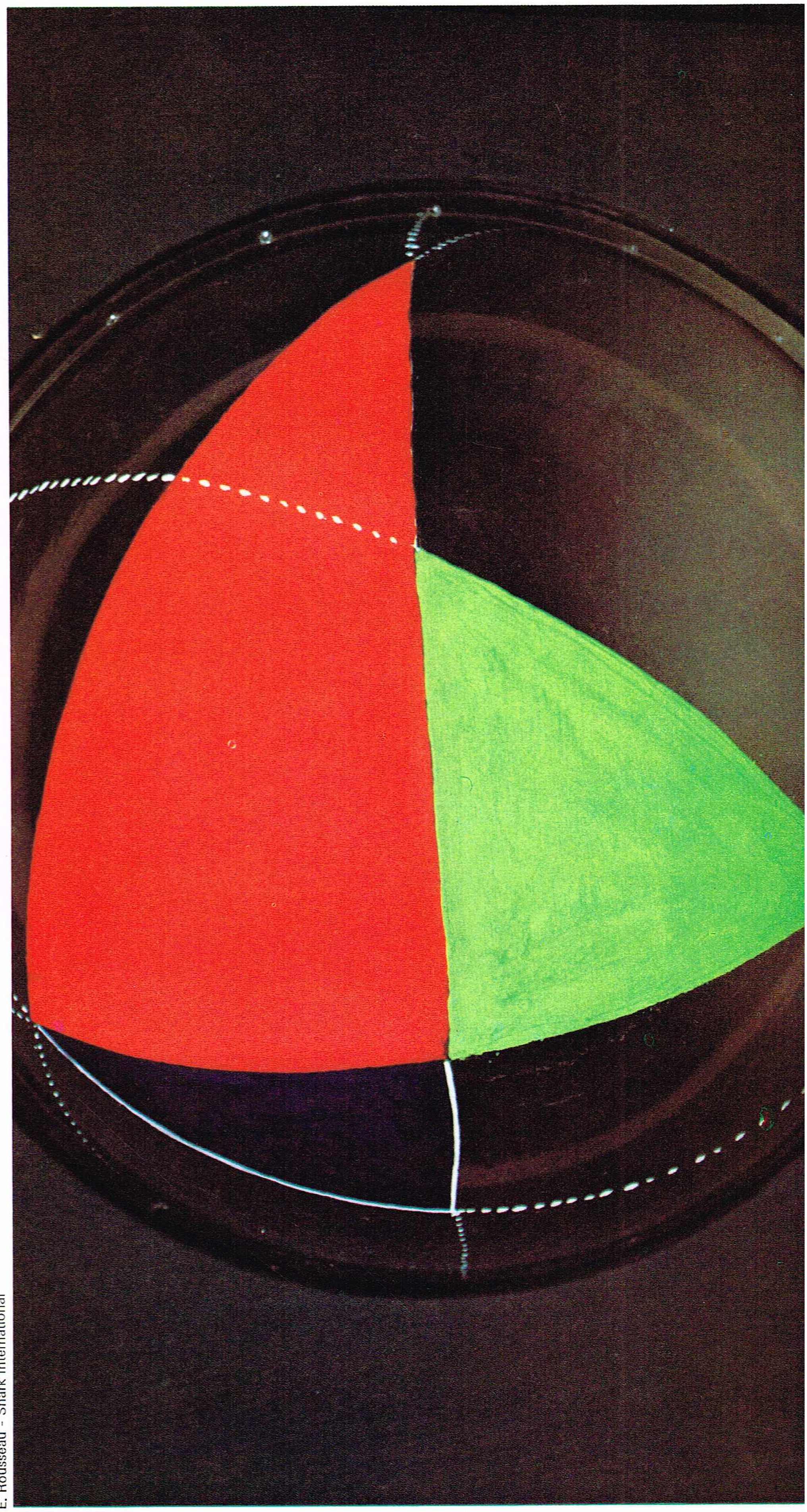

E. Rousseau - Snark International

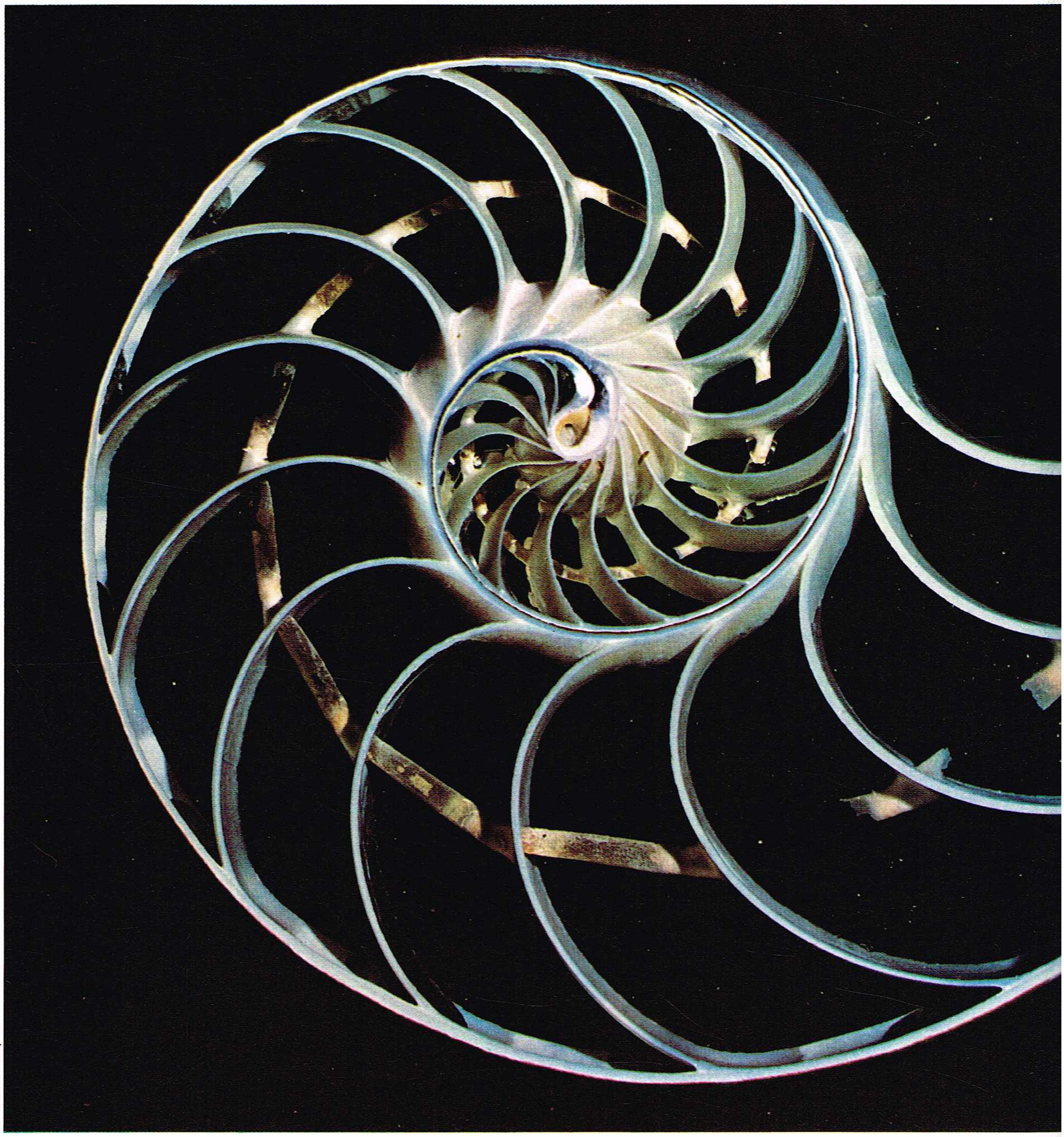

▶ *La coupe dans une coquille de nautile montre la succession des loges qui constituent une spirale à angle constant (spirale logarithmique).*

C. Nuridsany

et l'énoncé du théorème est : *dans tout triangle sphérique, les sinus des côtés sont proportionnels aux sinus des angles opposés :*

$$\frac{\sin a}{\sin \alpha} = \frac{\sin b}{\sin \beta} = \frac{\sin c}{\sin \gamma}$$

A partir des formules des théorèmes du cosinus et du sinus, il est possible de résoudre un triangle sphérique ; comme il a déjà été vu avec les triangles plans, il est préférable d'utiliser aussi pour les triangles sphériques des formules qui permettent de déterminer immédiatement quelque élément inconnu. On tire de ces théorèmes l'expression des plus connues, comme celles de Delambre et Neper.

BIBLIOGRAPHIE

CAMPBELL R., *la Trigonométrie*, collection « Que sais-je ? », n° 692, Paris, 1956. - CHAMBADAL L. et OVAERT J.-L., *Cours de mathématiques, Notions fondamentales d'algèbre et d'analyse*, Gauthier-Villars, Paris, 1966. - DELACHET A., *les Logarithmes et leurs applications*, collection « Que sais-je ? », n° 850, Paris, 1970.

GÉOMÉTRIE ANALYTIQUE

La géométrie analytique permet d'étudier, à l'aide de l'analyse, les problèmes géométriques. C'est l'expression d'une réalité géométrique par une relation entre des variables grâce à l'usage d'un système de référence, ou système de coordonnées, et au principe de la représentation graphique.

Dans l'Antiquité, les coordonnées étaient surtout utilisées pour permettre des représentations astronomiques ou topographiques, mais déjà les Grecs, Archimède et surtout Apollonios, s'aperçurent de la possibilité de donner une forme graphique à des équations : Apollonios écrit explicitement les équations des coniques en coordonnées obliques. Plus tard, les développements de l'algèbre furent accompagnés de tentatives de résolution par l'intermédiaire d'interprétations géométriques, et la géométrie analytique, sous une forme encore très rudimentaire, fut utilisée avec un intérêt croissant par diverses branches mathématiques naissantes. Fermat et surtout Descartes, avec son œuvre *Géométrie* en 1637, lui fourniront un apport fondamental ; c'est au XVIII[e] siècle qu'elle prendra son essor et la forme qu'on lui connaît aujourd'hui. Elle s'étend alors à l'espace, et tous les grands mathématiciens de l'époque contribueront à son développement :

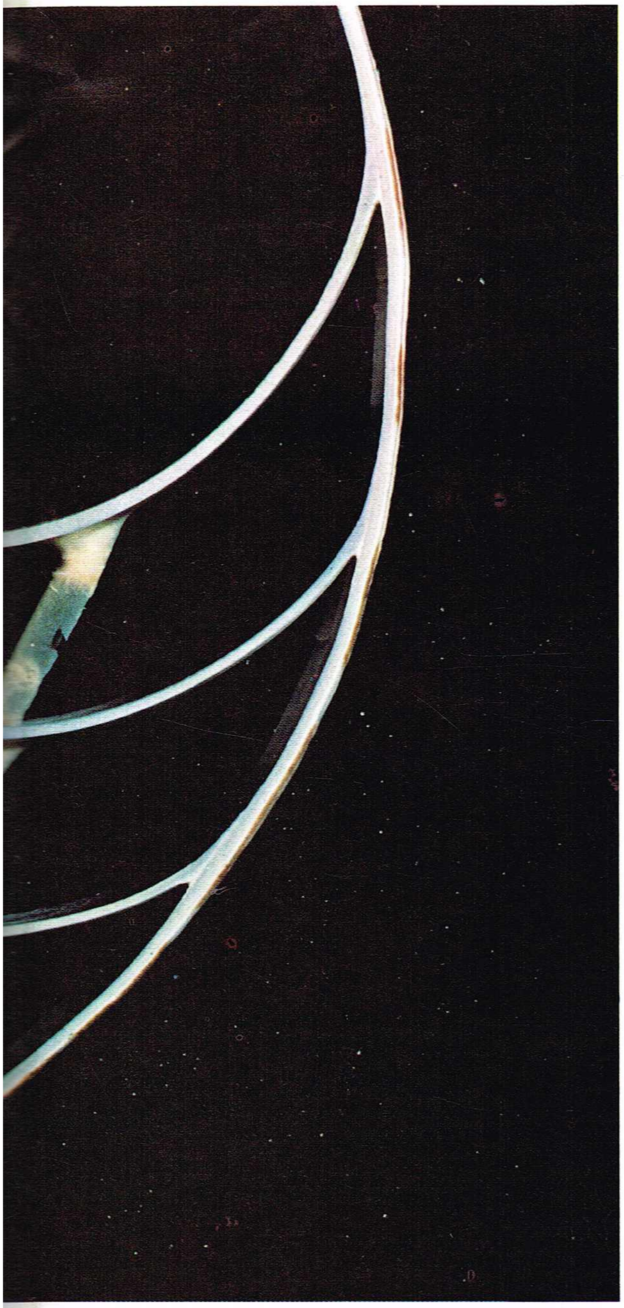

citons en particulier Euler, Lagrange et Monge. Outre les problèmes qu'elle permet de résoudre, la géométrie analytique a contribué à la naissance et au développement de nombreuses recherches, dans diverses branches des mathématiques, qui allaient se révéler extrêmement fécondes.

L'étude analytique d'un problème géométrique peut se séparer en trois phases :

— traduction des liens géométriques entre les éléments de la figure en expressions algébriques;

— résolution purement analytique;

— interprétation géométrique des résultats obtenus.

Nous allons voir ici les notions fondamentales qui permettent d'aborder une résolution en général et nous allons traiter, dans le plan et dans l'espace, les problèmes géométriques d'intérêt majeur. (Pour des développements ultérieurs, on pourra se reporter à la *Topologie*.)

Géométrie analytique plane

Coordonnées cartésiennes

Choisissons dans un plan deux droites orientées $x'Ox$ et $y'Oy$ (les *axes*) qui se coupent en O *(origine)*, et fixons sur chacune un vecteur unitaire, $\vec{i}$ et $\vec{j}$: on a construit un système de référence cartésien. Si P_1 est un point du plan, traçons par P_1 les parallèles aux axes; chacune rencontre l'autre axe en un point H et K (*fig.* 1). Les coordonnées cartésiennes (x_1, y_1) de P_1 sont les mesures des segments OH, OK; x_1 est *l'abscisse* de P_1, y_1 son *ordonnée*. Réciproquement, le couple (x_1, y_1) étant donné, l'intersection des droites parallèles à Oy et Ox menées par le point H d'abscisse x_1 sur Ox et le point K d'abscisse y_1 sur Oy est un point P_1 unique. On a donc une correspondance biunivoque entre l'ensemble des couples (x_1, y_1) éléments de $\mathbb{R}^2$ et le plan rapporté à un système d'axes de coordonnées. A partir des points O et P_1, on peut définir le vecteur OP_1, et on peut écrire :

$$\overrightarrow{OP_1} = x_1\vec{i} + y_1\vec{j}$$

où x_1, y_1 sont les composantes du vecteur $\overrightarrow{OP_1}$.

Si $P_1\ (x_1, y_1)$ et $P_2\ (x_2, y_2)$ sont deux points du plan, le vecteur d'origine P_1 et d'extrémité P_2 est le vecteur

$$\overrightarrow{P_1P_2} = (x_2 - x_1)\,\vec{i} + (y_2 - y_1)\,\vec{j} = \overrightarrow{OP_2} - \overrightarrow{OP_1}$$

Si les unités de mesure sont égales, nous pouvons utiliser la formule de Carnot (voir *Trigonométrie*) pour calculer la longueur du vecteur $\overrightarrow{P_1P_2}$, qui est aussi la distance des points P_1 et P_2 : si α est l'angle formé par les axes Ox et Oy, on aura :

$$|\overrightarrow{P_1P_2}| = \sqrt{(x_2-x_1)^2 + (y_2-y_1)^2 - 2\,(x_2-x_1)\,(y_2-y_1)\cos\alpha}$$

Outre des unités de mesure égales, on prend habituellement $\alpha = \frac{\pi}{2}$ et on obtient ainsi un *système cartésien orthonormé* (c'est ce que nous utiliserons par la suite) ; dans ce cas, les composantes d'un vecteur coïncident avec ses projections orthogonales sur les axes, $\cos\alpha = 0$, et la formule de la distance de deux points se réduit à l'expression du théorème de Pythagore.

Changements de systèmes de coordonnées

Pour résoudre certains problèmes, il peut être utile, et même parfois indispensable, de passer à un deuxième système de référence obtenu d'abord par translation de l'origine et ensuite par une rotation des axes (c'est le cas le plus fréquent de passage entre deux systèmes cartésiens orthonormés). Comme le montre la *figure* 2, on trouve facilement les nouvelles coordonnées X et Y du point P (x, y) en fonction des anciennes coordonnées, de la rotation et de la translation (qui amènent les axes Ox et Oy à coïncider avec les axes OX et OY) ; on aura :

$$X = x\cos\theta - y\sin\theta + X_0$$
$$Y = y\cos\theta + x\sin\theta + Y_0$$

Autres types de coordonnées

Comme nous l'avons vu, un système de coordonnées dans un plan est une correspondance (biunivoque dans le cas cartésien) entre ce plan et $\mathbb{R}^2$; si l'on fixe l'une des coordonnées, on obtient une *courbe coordonnée :* dans le cas d'un repère cartésien, les courbes coordonnées sont des droites parallèles aux axes. Ce type de coordonnées est commode lorsqu'on a affaire à des figures polygonales (par exemple pour des calculs de longueurs ou d'aires). Mais dans d'autres cas, il sera de loin préférable de choisir un système dans lequel les courbes coordonnées sont du même type que la figure géométrique que nous voulons étudier. Nous allons voir ainsi trois autres types de coordonnées.

Coordonnées polaires

Fixons-nous une demi-droite orientée Ox de vecteur unitaire $\vec{i}$ (axe *polaire*) et d'origine le point O *(pôle) ;* les coordonnées polaires d'un point P sont : la distance $\rho = |\overrightarrow{OP}|$ *(rayon vecteur)* et θ l'angle $(\vec{i}, \overrightarrow{OP})$ *(angle polaire)* [*fig.* 3]. Pour passer des coordonnées polaires aux coordonnées cartésiennes d'un système orthonormé tel que l'axe polaire coïncide avec l'axe Ox et le pôle avec l'origine, on a immédiatement :

$$x = \rho\cos\theta \qquad \rho = \sqrt{x^2 + y^2}$$
$$y = \rho\sin\theta \qquad \theta = \text{Arc tg}\,\frac{y}{x}$$

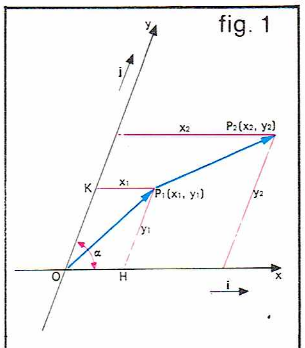

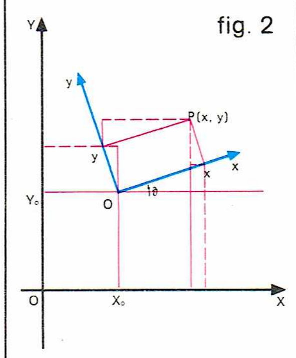

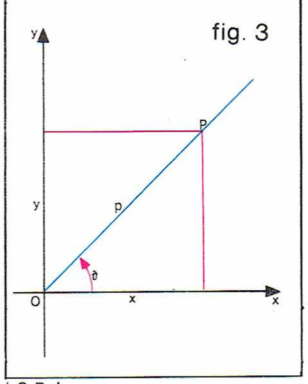

I.G.D.A.

▲ *Figure* 1 : *les coordonnées cartésiennes dans le plan.*
Figure* 2 : *changement du système de référence obtenu par translation de l'origine puis par rotation des axes.
Figure* 3 : *les coordonnées polaires :* ρ, *rayon vecteur;* θ, *l'angle polaire.

▶ *Un autre type de construction complexe engendrée par la nature : une graine isolée d'Erodium ou « bec-de-héron » (Géraniacées) constitue une torsade spiralée.*

C. Nuridsany

Si on veut avoir une correspondance biunivoque entre les coordonnées polaires des points du plan et les points de ce plan (à l'exclusion du pôle), on doit ajouter les deux conditions : $0 < \rho < \infty$ et $0 \leqslant \theta < 2\pi$; le pôle est défini par la seule condition $\rho = 0$, θ étant arbitraire ; on l'appelle *point singulier* du système de coordonnées. Si, au contraire, on veut éviter la discontinuité qui résulte du pôle, on peut utiliser les coordonnées généralisées avec ρ et θ variant de $-\infty$ à $+\infty$ qui ne sont évidemment plus en correspondance biunivoque avec les points du plan. Les courbes coordonnées sont des cercles de centre O et des demi-droites d'origine O (*fig.* 4).

Coordonnées bipolaires

Soit F et F′ deux points fixes appelés *pôles* ou *foyers ;* les coordonnées bipolaires d'un point P sont les deux distances ρ et ρ' de P à F et F′. Il n'y a pas de correspondance biunivoque entre les coordonnées bipolaires et les points du plan puisque à chaque couple (ρ, ρ') (dont la somme est supérieure ou égale à la distance FF′) correspondent deux points qui sont symétriques par rapport à la droite passant par F et F′. Les courbes coordonnées sont des cercles ayant pour centre les deux foyers (*fig.* 4).

fig. 4

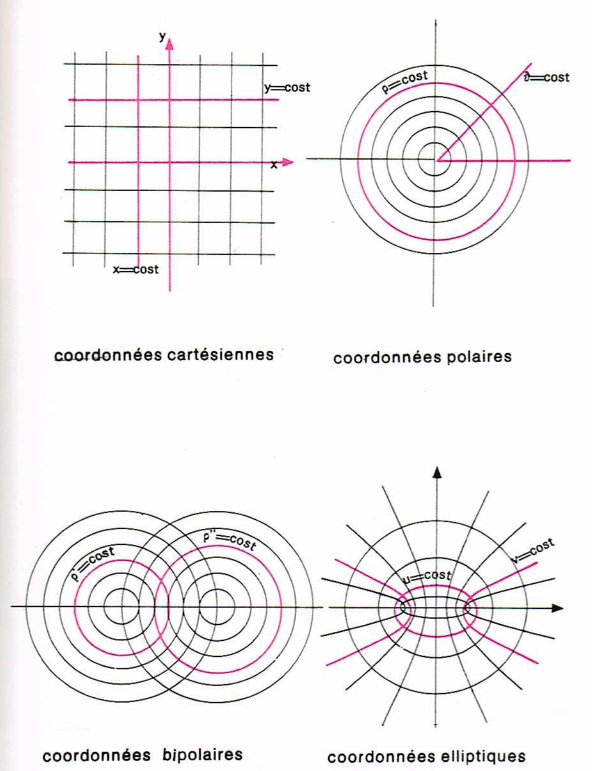

I.G.D.A.

◀ **_Figure 4 : coordonnées dans le plan et courbes coordonnées._**

Coordonnées elliptiques

Fixons-nous deux foyers F et F′ comme pour les coordonnées bipolaires ; les deux coordonnées elliptiques d'un point P sont respectivement la somme et la différence des deux coordonnées bipolaires :

$$u = \rho + \rho' \qquad v = \rho - \rho'$$

Les courbes coordonnées sont des ellipses et des hyperboles de foyers F et F′ (*fig.* 4).

La droite

Fixons-nous un repère orthonormé dans le plan. La *droite* est le lieu géométrique caractérisé par la propriété suivante : le rapport des composantes de n'importe quel vecteur dont l'origine et l'extrémité sont sur la droite est constant. Considérant un vecteur ayant pour origine le point P_0 (x_0, y_0) sur une droite D et pour extrémité un point P (x, y) variable de D, on aura $\dfrac{(y - y_0)}{(x - x_0)} =$ constante. Notons que l'expression analytique d'une droite ou d'une courbe en général est constituée d'une (ou plusieurs) équation qui lie les coordonnées des points de la courbe : un point appartient à la courbe si et seulement si ses coordonnées vérifient l'équation (ou les équations simultanément). Si on choisit une valeur pour une des deux variables, l'équation permet en principe de trouver la ou les valeurs de l'autre.

Les composantes d'un vecteur libre unitaire parallèle à une droite,

$$\vec{r} = \lambda\vec{i} + \mu\vec{j}$$

sont appelées *cosinus directeurs* de la droite. Un vecteur libre parallèle à la droite sera un *vecteur directeur* de la droite. Les projections de $\vec{r}$, vecteur directeur unitaire, ne sont autres que les cosinus des deux angles que forme $\vec{r}$ avec $\vec{i}$ et $\vec{j}$, vecteurs unitaires des axes. Si on prend un vecteur $\overrightarrow{P_0P_1}$ constant et un vecteur $\overrightarrow{P_0P}$ variable tous les deux sur une droite donnée (*fig.* 5), on peut écrire :

$$\textbf{(1)} \qquad \frac{y - y_0}{x - x_0} = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} = \frac{\mu}{\lambda} \qquad (\text{si } \lambda \neq 0)$$

La première égalité fournit l'équation de la droite passant par deux points P_0 (x_0, y_0) et P_1 (x_1, y_1). Le rapport :

$$\frac{\mu}{\lambda} = m$$

est la tangente de l'angle formé par la droite avec l'axe Ox et appelé *coefficient angulaire* ou *pente* de la droite. En introduisant les symboles a, b, c, p, fonctions des constantes x_0, y_0, λ et μ, on obtient la forme :

$$ax + by + c = 0 \quad \text{ou} \quad y = mx + p$$

Si on veut mettre en évidence les segments h et k déterminés par l'intersection de la droite avec les axes de coordonnées, on peut écrire l'équation sous la forme :

$$\frac{x}{h} + \frac{y}{k} = 1$$

qui s'obtient facilement à partir de l'équation **(1)** en prenant comme points P_0 et P_1 les deux points d'intersection de la droite avec les axes.

Nous allons mentionner enfin les *équations paramétriques* de la droite qui nous donnent immédiatement les coordonnées, en fonction d'un paramètre t, des points d'une droite passant par P_0 (x_0, y_0) et de vecteur directeur $\vec{V}$ de composantes λ et μ :

$$x = x_0 + \lambda t$$
$$y = y_0 + \mu t$$

En éliminant t, on retrouve une des formules précédentes. Partant de **(1)**, on obtient les équations paramétriques en posant :

$$t = \frac{y - y_0}{\mu} = \frac{x - x_0}{\lambda}.$$

L'équation $y = mx + p$, avec m constante et p un paramètre variable, représente un *faisceau impropre* de droites, c'est-à-dire toutes les droites admettant pour vecteur directeur un vecteur de composantes λ et μ telles que $\dfrac{\mu}{\lambda} = m$. Plus généralement, l'équation du premier degré, combinaison linéaire de deux droites quelconques

$$\alpha\,(a_1x + b_1y + c_1) + \beta\,(a_2x + b_2y + c_2) = 0$$

représente toutes les droites d'un *faisceau*. Il est *propre* si les deux droites passent par un point M (l'équation est alors la représentation de toutes les droites passant par M), *impropre* lorsque les deux droites sont parallèles (voir *Géométrie*).

Pour trouver la condition de perpendicularité de deux droites, on peut rappeler l'expression du *produit scalaire* de deux vecteurs. Si

$$\vec{u} = a_1\vec{i} + b_1\vec{j} \quad \text{et} \quad \vec{v} = a_2\vec{i} \text{ et } b_2\vec{j}$$

sont un vecteur directeur de chacune des droites respectivement, les droites forment un angle α tel que

$$\vec{u} \cdot \vec{v} = |\vec{u}| \cdot |\vec{v}| \cdot \cos\alpha = a_1a_2 + b_1b_2$$

fig. 5

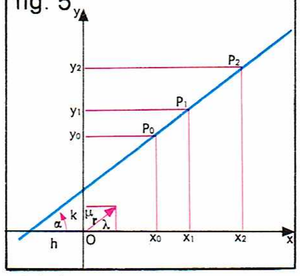

I.G.D.A.

▲ **_Figure 5 : la droite dans le plan : le vecteur libre unitaire parallèle à la droite (r) et les cosinus directeurs (μ et λ)._**

et lorsque α est un angle droit, on doit avoir

$$\vec{u}\cdot\vec{v} = a_1a_2 + b_1b_2 = 0 \quad \text{ou} \quad \frac{b_1}{a_1} = -\frac{a_2}{b_2}, \quad m_1 = -\frac{1}{m_2}$$

Il en résulte la règle suivante : une condition nécessaire et suffisante pour que deux droites soient perpendiculaires est que leurs coefficients angulaires vérifient la relation

$$m_1m_2 = -1.$$

Le problème géométrique de l'intersection de deux droites se ramène au problème purement algébrique de la résolution d'un système de deux équations du premier degré à deux inconnues x et y. De façon analogue, le cas plus général de l'intersection de lieux géométriques représentés par des équations revient à la résolution du système formé par ces équations.

Pour trouver l'aire S d'un triangle de sommets P_1 (x_1, y_2), P_2 (x_2, y_2), P_3 (x_3, y_3), on a la formule suivante :

$$S = \frac{1}{2}\cdot \left| (x_2 - x_1)\ (y_3 - y_1) - (y_2 - y_1)\ (x_3 - x_1) \right|.$$

(En coordonnées obliques, il faut multiplier cette expression par sin α.)

Le cercle

L'équation d'un cercle dans un système orthonormé se trouve exprimée analytiquement comme le lieu des points situés à une distance constante d'un point fixé. Si on appelle C (α, β) le centre et r le rayon, un point sera à une distance r de C si et seulement si :

$$(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2 = r^2$$

qui devient :

$$x^2 + y^2 - 2\,\alpha x - 2\,\beta y + \gamma = 0 \quad (\gamma = \alpha^2 + \beta^2 - r^2).$$

On obtient ainsi une équation du second degré à deux inconnues qui présente les deux caractéristiques suivantes : les termes en x^2 et y^2 ont le même coefficient, et il n'y a pas de terme en xy. Étant donné une équation possédant ces deux caractéristiques :

$$ax^2 + ay^2 + bx + cy + d = 0 \quad (a \neq 0)$$

on peut encore l'écrire :

$$\left(x + \frac{b}{2\,a}\right)^2 + \left(y + \frac{c}{2\,a}\right)^2 + \frac{d}{a} - \left(\frac{b}{2\,a}\right)^2 - \left(\frac{c}{2\,a}\right)^2 = 0$$

Pour que cette équation soit celle d'un cercle de centre $\left(\alpha = -\frac{b}{2\,a}, \beta = -\frac{c}{2\,a}\right)$, de rayon r, il faut et il suffit que la valeur de r ainsi trouvée soit réelle :

$$r^2 = \left(\frac{b}{2\,a}\right)^2 + \left(\frac{c}{2\,a}\right)^2 - \frac{d}{a} \geqslant 0.$$

L'équation de la tangente à un cercle en un point P_0 (x_0, y_0) se déduit de la propriété d'orthogonalité entre le rayon et la tangente ; les cosinus directeurs du rayon CP_0 sont proportionnels à $x_0 - \alpha$ et $y_0 - \beta$, et l'équation de la tangente est (*fig.* 6) :

$$(x_0 - \alpha)\ (x - x_0) + (y_0 - \beta)\ (y - y_0) = 0$$

En coordonnées polaires, l'équation d'un cercle centré au pôle, de rayon r, se trouve considérablement simplifiée ; elle s'écrit en effet : $\rho = r$.

Les coniques

On désigne sous le nom de *coniques* les courbes obtenues par intersection d'un cône par un plan.

On se fixe : une droite *f (directrice)*, un point F *(foyer)* et un nombre réel positif *e (excentricité)* ; on appelle *conique propre* (ou non dégénérée) *réelle* le lieu des points P du plan qui satisfont la relation PF = r (constante) ou bien $\frac{PF}{PD} = e$ où D est la projection orthogonale

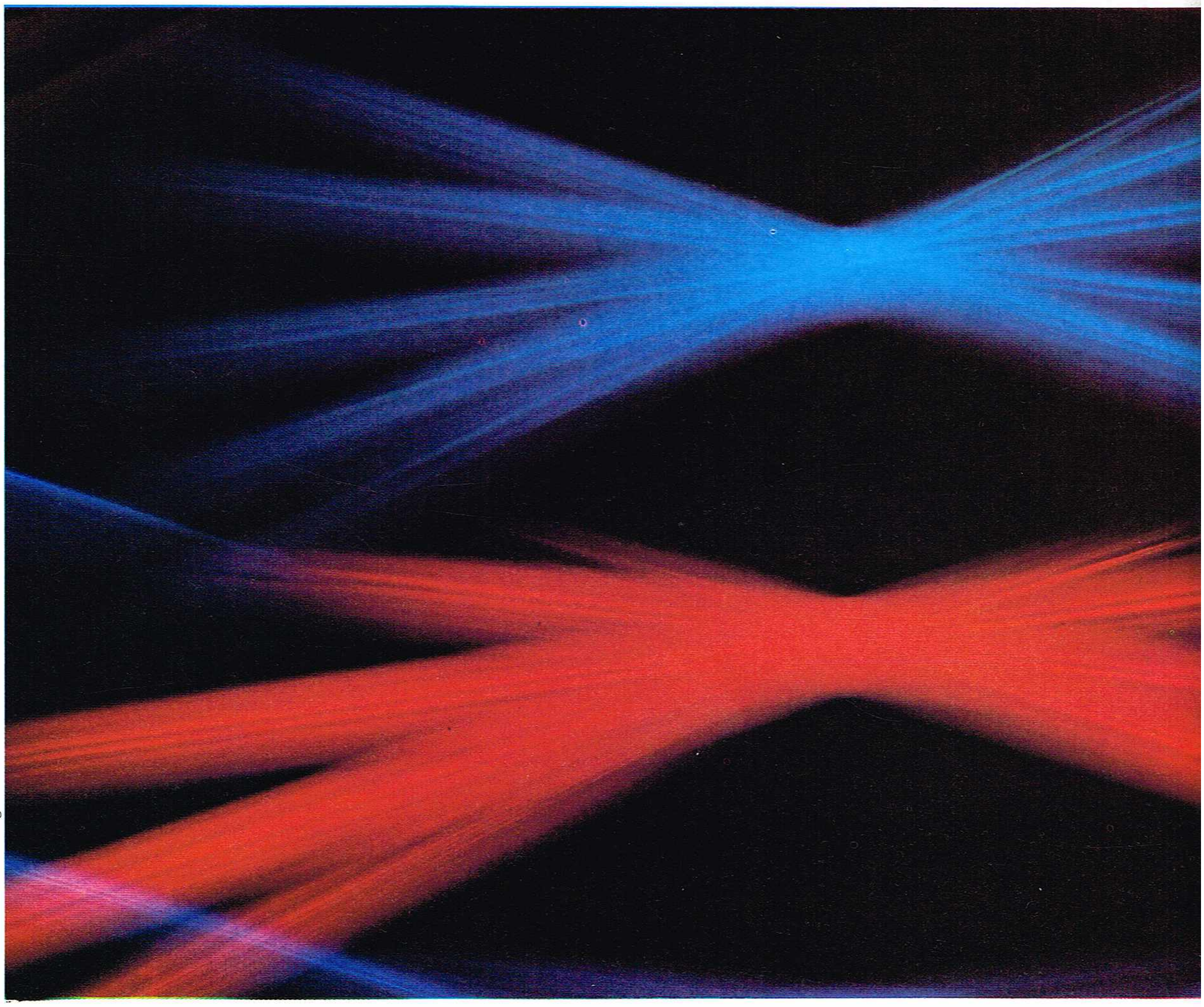

Erich Hartmann - Magnum

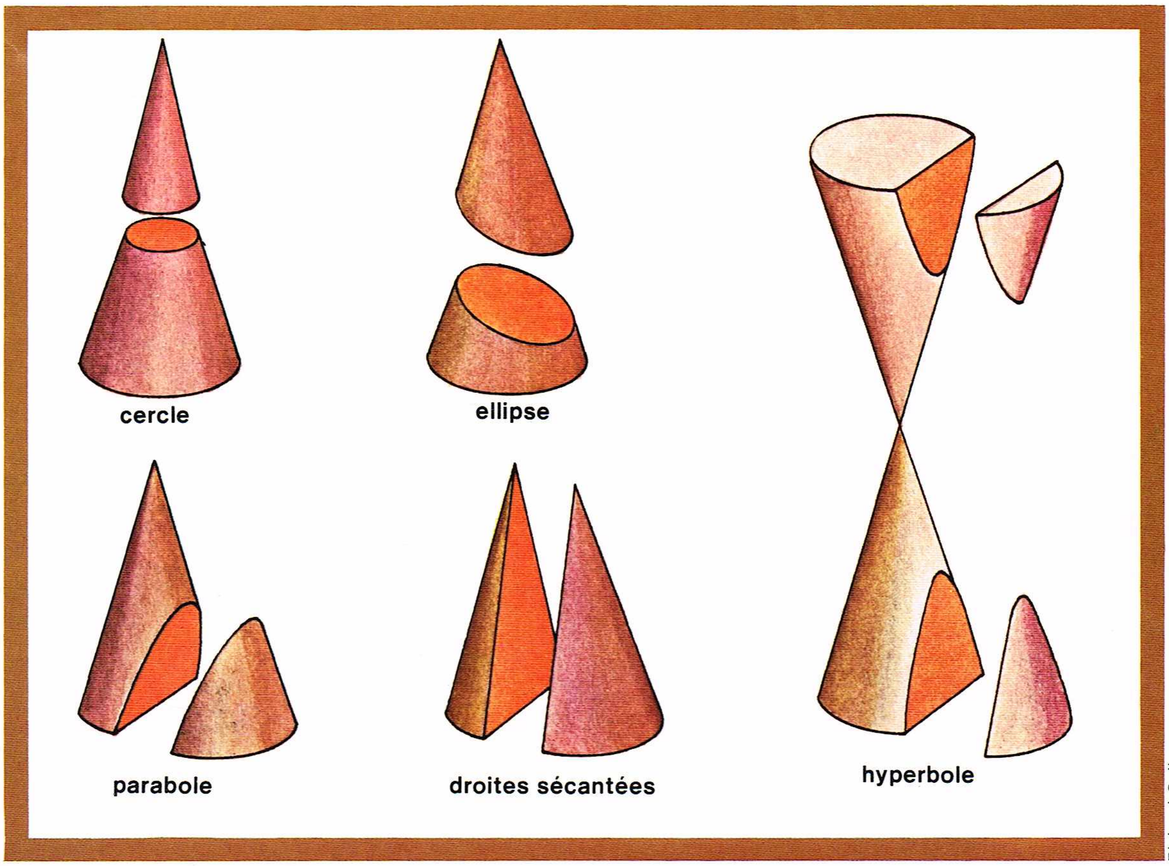

Richard Colin

◀ **Sections coniques d'Apollonios :** ***Apollonios découvrit que la section par un plan d'un cône à base circulaire engendre des courbes ou* coniques.**

▼ ***Figure* 6 ; *le* cercle *de centre* C (α, β), *de rayon* r, *et sa tangente au point* P_0 (x_0, y_0).**

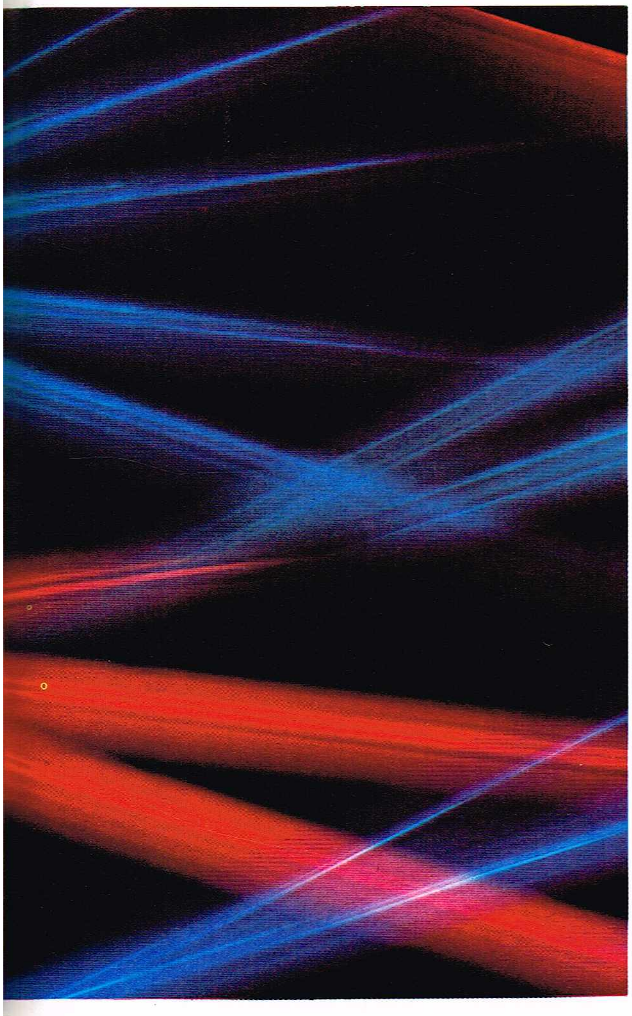

de P sur *f*. Dans le premier cas, on a le cercle de centre F, de rayon *r*. Dans le second, on peut choisir un système de coordonnées (*fig.* 7) tel que l'axe O*x* coïncide avec la droite perpendiculaire à *f* passant par F. On appelle *c* et *h* respectivement les abscisses de F et D par rapport à une origine que nous fixerons tout à l'heure. La conique est le lieu des points dont les coordonnées sont les solutions de l'équation :

$$(1 - e^2)\, x^2 + y^2 - 2\,(c - e^2 h)\, x + c^2 - e^2 h^2 = 0.$$

Cette expression n'est pas la forme la plus générale de l'équation d'une conique à cause du choix particulier de l'axe O*x* : on démontrera cependant qu'une équation quelconque du second degré à deux inconnues se ramène à l'un des cas suivants :

a) il n'y a pas de solution réelle : dans ce cas, on parle de courbe *imaginaire ;*

b) le premier membre est le produit de deux polynômes linéaires, dans ce cas la conique est réduite à une ou deux droites : on parle de *conique dégénérée ;*

c) c'est l'équation d'une conique propre réelle.

Pour étudier les propriétés des coniques, nous allons choisir l'origine O du système de coordonnées de manière à rendre l'expression analytique de celles-ci la plus simple possible.

I) $e \neq 1$

On choisira O tel qu'on ait l'égalité $\frac{c}{e^2} = h$ et on orientera l'axe O*x* de O vers F : l'équation peut alors s'écrire

$$\frac{x^2}{\frac{c^2}{e^2}} + \frac{y^2}{(1 - e^2)\,\frac{c^2}{e^2}} = 1$$

On peut poser $a = \frac{c}{e}$, $b^2 = \pm\,(1 - e^2)\,\frac{c^2}{e^2}$, et on devra considérer deux cas, selon que *e* est supérieur ou inférieur à 1 ; on obtient ainsi les deux types de coniques propres dont les équations peuvent s'écrire :

(1) $\qquad e < 1 \qquad \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$

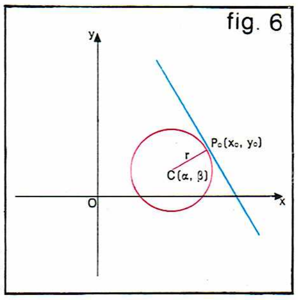

I.G.D.A.

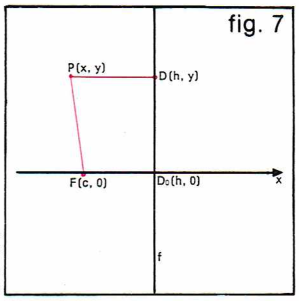

I.G.D.A.

▲ ***Figure* 7 ; *système de référence pour une* conique : *l'axe* x *coïncide avec la droite passant par le* foyer F *et perpendiculaire à la* directrice f.**

▶ ***Figure* 8 : *l'*ellipse.**

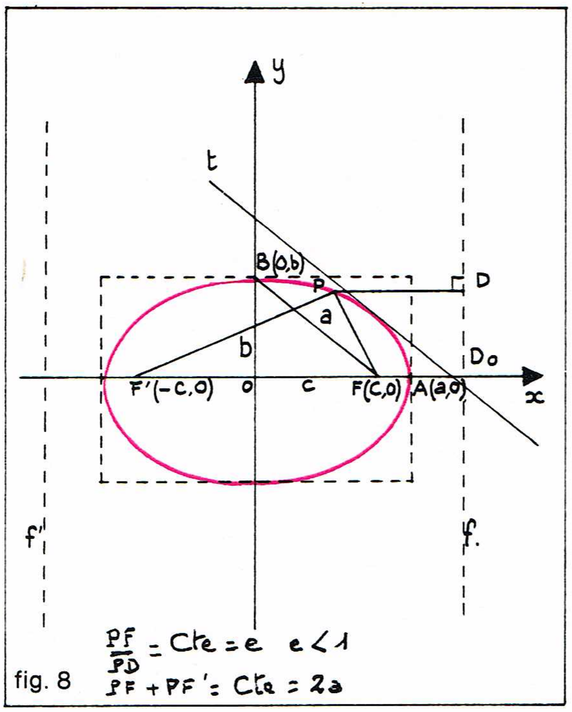

Richard Colin

▶ ***Figure* 9 : *l'*hyperbole.**

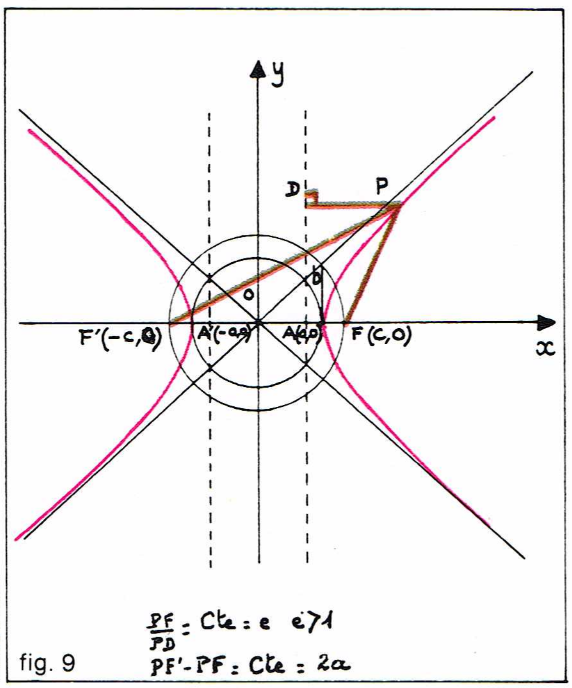

Richard Colin

(si $a = b$, on a un cercle)

(2) $\quad e > 1 \qquad \dfrac{x^2}{a^2} - \dfrac{y^2}{b^2} = 1$

II) $e = 1$

Choisissons l'origine des axes au milieu de FD_0 ; on a ainsi :

(3) $\qquad y^2 - 4\,cx = 0$

Si l'équation d'une conique peut se mettre sous la forme **(1)**, on l'appelle une *ellipse*, sous la forme **(2)** une *hyperbole*, et sous la forme **(3)** une *parabole*.

Nous allons maintenant étudier séparément ces trois coniques.

L'ellipse

Considérons l'équation **(1)**. L'origine O, *centre* de l'ellipse, est centre de symétrie, les axes Ox et Oy (*axes* de l'ellipse) sont axes de symétrie. Si on explicite l'équation en x et en y, on trouve

$$y = \pm \frac{b}{a}\sqrt{a^2 - x^2} \qquad x = \pm \frac{a}{b}\sqrt{b^2 - y^2}$$

comme les expressions situées sous le radical doivent être positives, tous les points de la courbe sont situés à l'intérieur ou sur le rectangle centré à l'origine et de côtés 2 a et 2 b (*fig.* 8) ; les quatre points situés au milieu des côtés de ce rectangle sont les *sommets* de l'ellipse, a et b les *demi-axes*. En utilisant les deux égalités

$$a^2 = \frac{c^2}{e^2}, \qquad b^2 = (1 - e^2)\,\frac{c^2}{e^2},$$

on obtient l'expression de la distance focale en fonction des demi-axes : $c^2 = a^2 - b^2$; le foyer F est donc situé entre O et A. La directrice a pour équation : $x = \dfrac{c}{e^2} = \dfrac{a}{e}$ et le point D_0 est donc à l'extérieur de OA. Par symétrie de la courbe, on a un autre foyer F′ et une autre directrice f' ; l'axe Ox sur lequel sont situés les deux foyers est appelé *axe focal*.

L'équation de la tangente à l'ellipse en un point $P_0\ (x_0, y_0)$ est :

$$\frac{xx_0}{a^2} + \frac{yy_0}{b^2} = 1$$

Citons encore une propriété de l'ellipse : la somme des distances d'un point P de l'ellipse aux deux foyers est constante et égale à 2 a.

La représentation paramétrique de l'ellipse est :

$$x = a\cos\theta \qquad y = b\sin\theta$$

où θ est l'angle du vecteur $\overrightarrow{OP}$ avec l'axe Ox. En élevant au carré, en divisant la première égalité par a^2, la seconde par b^2 et en ajoutant, on retrouve bien l'équation **(1)**.

L'hyperbole

Revenons à l'équation **(2)**. De même que pour l'ellipse, l'origine O est centre de symétrie (*centre* de l'hyperbole), les axes de coordonnées sont des axes de symétrie. En explicitant l'équation, on obtient :

$$x = \pm \frac{a}{b}\sqrt{y^2 + b^2} \qquad y = \pm \frac{b}{a}\sqrt{x^2 - a^2}.$$

L'hyperbole passe donc par les deux points A (a, 0) et A′ (— a, 0) appelés *sommets* et se trouve à l'extérieur de la région du plan délimitée par les deux droites $x = -a$ et $x = a$ (elle ne rencontre donc pas l'axe Oy) ; elle admet comme *asymptotes* les deux droites $y = \pm \dfrac{b}{a}x$ dont elle se rapproche lorsque x tend vers l'infini, et est constituée de deux *branches*, comme on le voit sur la *figure* 9. Comme l'ellipse, elle a deux *foyers* F et F′ situés à l'extérieur du segment AA′ : des égalités

$$a^2 = \frac{c^2}{e^2}, \qquad b^2 = (e^2 - 1)\,\frac{c^2}{e^2}$$

on déduit leur distance à l'origine :

$$c = \sqrt{a^2 + b^2}.$$

Les directrices ont pour équation $x = \pm \dfrac{a}{e}$, et comme $e > 1$, elles coupent le segment AA′ ; si l'on trace deux cercles centrés en O de rayons respectifs OA $= a$ et OF $= c$, le premier rencontre les asymptotes à leurs points d'intersection avec les directrices, le second les rencontre à leurs points d'intersection avec les droites $x = \pm a$. Il en résulte que b représente le segment de perpendiculaire à l'axe focal compris entre le sommet et une asymptote.

La tangente à l'hyperbole en un point $P_0\ (x_0, y_0)$ a pour équation :

$$\frac{xx_0}{a^2} - \frac{yy_0}{b^2} = 1$$

Dans le cas particulier où $a = b$, les asymptotes sont perpendiculaires, et l'hyperbole est dite alors *équilatère*.

Si on prend comme nouveaux axes de coordonnées Ox' et Oy' les asymptotes (pas nécessairement perpendiculaires), l'équation de l'hyperbole prend une forme particulièrement simple :

$$x'y' = k^2 \left(k^2 = \frac{c^2}{4}\right).$$

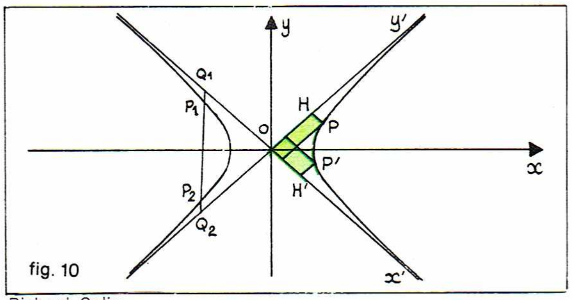

Richard Colin

◄ *Figure* 10 : *deux propriétés de l'hyperbole : égalité des aires des parallélogrammes construits sur les asymptotes et ayant comme sommets opposés l'origine et un point* P *sur l'hyperbole ; égalité des segments* P_1Q_1 *et* P_2Q_2 *déterminés par l'intersection d'une corde avec l'hyperbole et les asymptotes.*

En utilisant cette équation de l'hyperbole, on en déduit que les parallélogrammes ayant deux côtés sur les asymptotes et comme sommets opposés l'origine O et un point P sur l'hyperbole ont une aire constante (*fig.* 10).

$A = x'y' \sin \alpha = k^2 \sin \alpha$ (α est l'angle formé par les axes de coordonnées).

Parmi les autres propriétés remarquables de l'hyperbole, citons les suivantes :

a) l'hyperbole est le lieu des points dont la différence des distances à deux points fixes (foyers) est constante ;

b) l'aire du triangle formé par une tangente à l'hyperbole et par les asymptotes est constante, quelle que soit la tangente ;

c) les deux segments P_1Q_1 et P_2Q_2 (*fig.* 10), déterminés par l'intersection d'une corde et des deux asymptotes, sont égaux ; cela rend très facile la construction de la courbe une fois connus les asymptotes et un point.

Les équations paramétriques de l'hyperbole s'expriment à l'aide des fonctions hyperboliques (voir *Trigonométrie*) :

$$x = a \operatorname{ch} t \qquad y = b \operatorname{sh} t \qquad \text{où } t \text{ est l'angle}$$

formé par $\overrightarrow{OP}$ avec l'axe Ox.

La parabole

Regardons maintenant l'équation **(3)** ; l'axe Ox (*axe* de la parabole) apparaît comme axe de symétrie. Elle admet un seul axe et un seul foyer F. Comme $e = 1$, on voit immédiatement que la parabole est le lieu des points équidistants d'une droite (la directrice) et d'un point (le foyer). La courbe passe par le milieu du segment FD_0, *sommet* de la parabole où elle est tangente à l'axe Oy (*fig.* 11). L'équation de la tangente en un point P_0 (x_0, y_0) est :

$$yy_0 - 2c(x + x_0) = 0$$

Parmi les propriétés remarquables de la parabole, retenons :

a) la directrice est le lieu des points symétriques du foyer par rapport aux tangentes, lorsqu'on fait varier celles-ci ;

b) le lieu des points qui sont la projection orthogonale du foyer sur la tangente, lorsque celle-ci varie, est la droite tangente à la parabole en son sommet (axe Oy) ;

c) la parabole est la limite d'une ellipse ou d'une hyperbole dont on a fait tendre un des foyers vers l'infini, l'autre restant fixe.

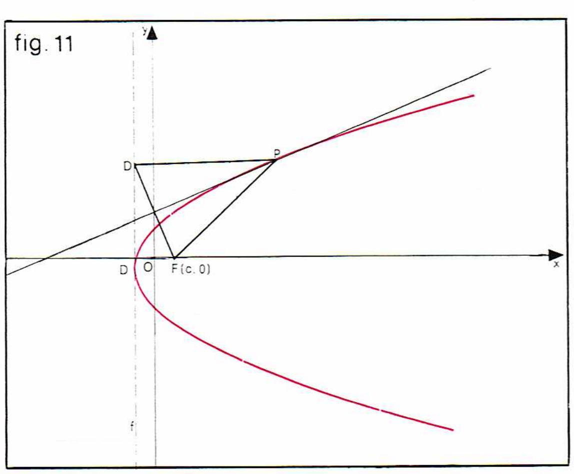

I.G.D.A.

◄ *Figure* 11 : *la* parabole.

Géométrie analytique dans l'espace

Coordonnées dans l'espace à trois dimensions

Dans l'espace, un système de coordonnées cartésiennes est formé de trois droites orientées (axes Ox, Oy, Oz), généralement orthogonales, passant par un point O (origine), munies de trois vecteurs unitaires $\vec{i}$, $\vec{j}$, $\vec{k}$, que nous supposerons de longueur égale. Les axes pris deux à deux déterminent les *plans de coordonnées ;* les *surfaces coordonnées* (par analogie avec les courbes coordonnées dans le plan) obtenues en fixant une coordonnée et en laissant varier les deux autres sont ici des plans perpendiculaires à l'axe dont la coordonnée est tenue constante. Par extension de ce qui se passe dans le plan, pour repérer le point P_1 de coordonnées x_1, y_1, z_1 (z_1 est la *cote*) et le vecteur $\overrightarrow{OP_1}$, on peut écrire :

$$P_1\,(x_1, y_1, z_1) \quad \overrightarrow{OP_1} = x_1\vec{i} + y_1\vec{j} + z_1\vec{k}$$

Si P_1 et P_2 sont deux points de l'espace, le vecteur d'origine P_1 et d'extrémité P_2 s'écrira :

$$\overrightarrow{P_1P_2} = \overrightarrow{OP_2} - \overrightarrow{OP_1} = (x_2 - x_1)\,\vec{i} + (y_2 - y_1)\,\vec{j} + (z_2 - z_1)\,\vec{k}$$

et sa longueur, dans le cas d'un système orthonormé, sera :

$$\left|\overrightarrow{P_1P_2}\right| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

En étendant à l'espace les coordonnées polaires par l'adjonction de l'axe normal Oz, on obtient les coordonnées *cylindriques* (ou *semi-polaires*) : les relations entre ρ, θ, x et y restent les mêmes, et la cote z est la même dans les deux systèmes (*fig.* 12). Dans ce cas, les surfaces coordonnées sont :

- z = cste : plans perpendiculaires à l'axe Oz ;
- θ = cste : demi-plans d'origine Oz et formant l'angle θ avec le plan xOz ;
- ρ = cste : cylindre d'axe Oz et de rayon ρ.

▼ Figure 12 ; coordonnées cylindriques : *ρ et θ sont les coordonnées polaires du plan et z coïncide avec la coordonnée cartésienne.*

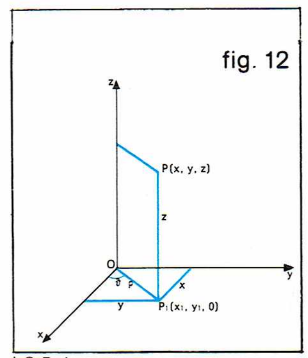

I.G.D.A.

Comme autre extension du système de coordonnées polaires, on a le système de coordonnées *sphériques :* les trois coordonnées sont alors (*fig.* 13) :

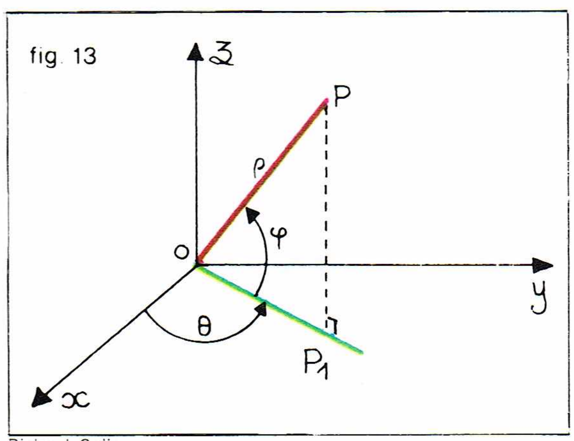

Richard Colin

◄ *Figure* 13 : coordonnées sphériques.

$\rho = \left|\overrightarrow{OP}\right|$ *rayon vecteur*, distance du point à l'origine ;

φ, *latitude*, est l'angle $(\overrightarrow{OP_1}, \overrightarrow{OP})$ où P_1 est la projection orthogonale de P sur le plan xOy ;

θ, *longitude*, est l'angle $(\overrightarrow{Ox}, \overrightarrow{OP_1})$.

Les relations entre les coordonnées sphériques et les coordonnées cartésiennes sont les suivantes :

$$x = \rho \cos \varphi \cos \theta ; \quad y = \rho \cos \varphi \sin \theta ; \quad z = \rho \sin \varphi ;$$

et les surfaces coordonnées :

- ρ = cste : sphère de centre O de rayon ρ ;
- φ = cste : demi-cône de révolution d'axe Oz ;
- θ = cste : demi-plan d'origine l'axe Oz et formant l'angle φ avec le demi-axe positif Ox.

Choisissant un système dans lequel l'axe Ox coïncide avec l'axe terrestre et d'origine le centre de la Terre, en coupant les surfaces coordonnées par la surface de la Terre (supposée sphérique), on obtient les *parallèles* (φ = cste) et les *méridiens* (θ = cste).

▼ *Ci-dessous, surfaces réglées. En bas, figure* **14** : **cylindre** *et* **cône de révolution.**

La droite et le plan

L'espace étant rapporté à un système orthonormé, un plan peut être défini par un point et une direction perpendiculaire. La direction est donnée par un vecteur libre $\vec{u}$ de composantes a, b, c, et le point P_0 par ses coordonnées x_0, y_0, z_0. La condition que doivent vérifier tous les vecteurs du plan d'origine P_0 et d'extrémité un point quelconque du plan, P, est :

$$\overrightarrow{P_0P} \cdot \vec{u} = 0;$$

explicitant le produit scalaire, on obtient

$$a\,(x - x_0) + b\,(y - y_0) + c\,(z - z_0) = 0$$

et on trouve une équation de type

$$ax + by + cz + d = 0$$

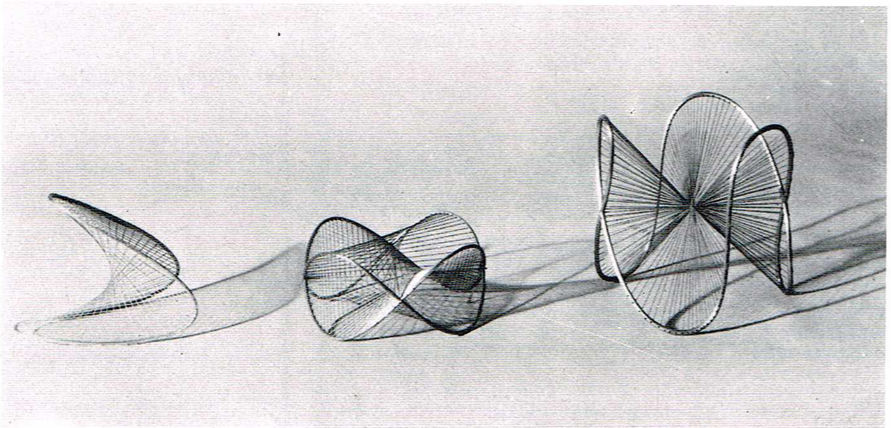

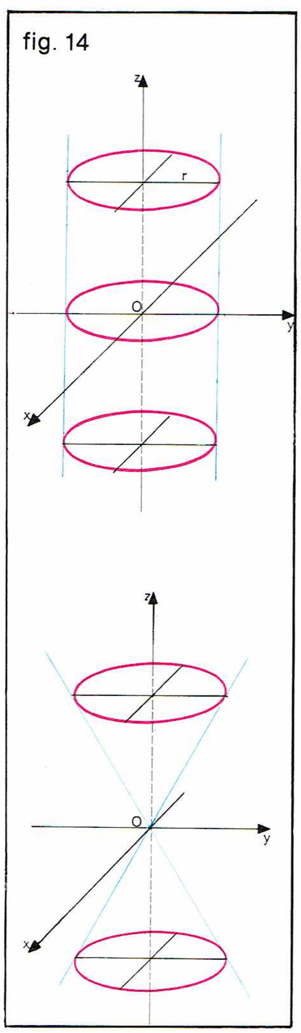

Le plan est ainsi représenté par une équation linéaire en x, y et z, et on peut voir que toute équation de ce type représente un plan perpendiculaire au vecteur de composantes a, b, c ; on peut remarquer que, si une variable ne figure pas dans l'équation d'un plan, celui-ci est parallèle à l'axe correspondant à la variable manquante. Si deux coefficients sont nuls, le plan est parallèle à l'un des trois plans de coordonnées.

Une droite peut être caractérisée comme l'intersection de deux plans, et on peut donc la représenter par le système formé des équations de deux plans qui la contiennent (*équations cartésiennes* de la droite). On peut aussi la définir (comme on l'a vu dans le plan) par un point P_0 (x_0, y_0, z_0) et un vecteur directeur $\vec{r}$ (l, m, n), et on obtient les « équations paramétriques » de la droite, où λ est un paramètre :

$$\begin{cases} x = x_0 + \lambda l \\ y = y_0 + \lambda m \\ z = z_0 + \lambda n \end{cases}$$

qui peuvent se mettre sous la forme (si les composantes de $\vec{r}$ sont non nulles)

$$\frac{(x - x_0)}{l} = \frac{(y - y_0)}{m} = \frac{(z - z_0)}{n} = \lambda$$

et on obtient alors la forme *normale* de l'équation d'une droite.

Si on se donne les équations de deux droites non parallèles

$$\frac{(x - x_1)}{l_1} = \frac{(y - y_1)}{m_1} = \frac{(z - z_1)}{n_1}$$

$$\frac{(x - x_2)}{l_2} = \frac{(y - y_2)}{m_2} = \frac{(z - z_2)}{n_2},$$

une condition nécessaire et suffisante pour qu'elles soient coplanaires est que leurs vecteurs directeurs $\vec{r_1}$ et $\vec{r_2}$ et le vecteur $\overrightarrow{P_1P_2}$ soient coplanaires [où P_1 (x_1, y_1, z_1) est sur la première, P_2 (x_2, y_2, z_2) sur la deuxième], c'est-à-dire :

$$\begin{vmatrix} x_2 - x_1 & l_1 & l_2 \\ y_2 - y_1 & m_1 & m_2 \\ z_2 - z_1 & n_1 & n_2 \end{vmatrix} = 0$$

Surfaces de révolution et surfaces réglées

On appelle *surface de révolution* la surface décrite par une courbe quelconque lorsqu'on la fait tourner autour d'une droite *(axe de révolution)* ; une surface est *réglée* si, en n'importe lequel de ses points, il passe au moins une droite tout entière contenue dans la surface.

La sphère

C'est le lieu des points situés à une distance r d'un point C (α, β, γ) qui est le *centre* de la sphère ; les coordonnées de ses points vérifient l'équation :

$$(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2 + (z - \gamma)^2 - r^2 = 0$$

L'intersection d'une sphère avec un plan est soit vide, soit un point (plan tangent), soit un cercle.

Le cône et le cylindre

Étant donné deux droites coplanaires, si l'on fait tourner l'une d'elles autour de l'autre (axe de révolution) on obtiendra une surface qui sera un *cône de révolution* si les droites se coupent en un point *(sommet)* ou un *cylindre de révolution* si les droites sont parallèles (*fig.* 14). Plus généralement, on appelle *cône* la surface décrite par toutes les droites *(génératrices)* passant par un point fixe et par un point d'une courbe $\mathcal{L}$ *(directrice)*, et *cylindre* celle décrite par toutes les droites parallèles passant par un point de $\mathcal{L}$; ce sont évidemment, de par leur construction, des surfaces réglées. L'équation d'un cylindre de révolution d'axe Oz et de rayon r est :

$$x^2 + y^2 = r^2.$$

Celle d'un cône de révolution d'axe Oz, de sommet l'origine, est :

$$x^2 + y^2 - m^2 z^2 = 0.$$

Les intersections avec des plans $z = h$ donnent des cercles (de rayon r pour le cylindre) centrés sur l'axe Oz, alors que les intersections avec des plans contenant l'axe Oz seront des couples de droites.

Les quadriques

On appelle *quadrique* toute surface dont l'équation en coordonnées cartésiennes est du second degré en x, y et z. C'est ce qui correspond, dans l'espace, aux coniques dans le plan. Les intersections des quadriques avec les plans de coordonnées et des plans parallèles à ceux-ci sont des coniques : une fois celles-ci connues, on connaît le type et l'allure de la surface. On peut considérer toutes les quadriques comme les surfaces décrites par des coniques situées dans des plans parallèles lorsque leurs sommets décrivent deux autres coniques. Nous avons les types suivants :

Ellipsoïde

C'est une quadrique qui peut se représenter par l'équation suivante :

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b_2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$$

Les trois plans de coordonnées la coupent suivant les ellipses principales (*fig.* 15)

plan $z = 0$: $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$ (de demi-axes a et b)

plan $y = 0$: $\frac{x^2}{a^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$ (de demi-axes a et c)

plan $x = 0$: $\frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$ (de demi-axes b et c)

Les plans de coordonnées sont des plans de symétrie de l'ellipse, les axes de coordonnées sont des axes de symétrie. Tous les points de l'ellipsoïde sont à l'intérieur du parallélépipède de côtés 2 a, 2 b et 2 c, et toutes les sections pour des plans sont des ellipses. Si deux demi-axes sont égaux (par exemple, $a = b$), on a un ellipsoïde de révolution (ici autour de l'axe Oz) ; dans ce cas, les intersections avec certaines surfaces coordonnées (ici les plans $z = h$) sont alors des cercles. Si tous les demi-axes sont égaux, on obtient évidemment une sphère. Un ellipsoïde est la surface décrite par une infinité d'ellipses dont les sommets se déplacent sur deux autres ellipses.

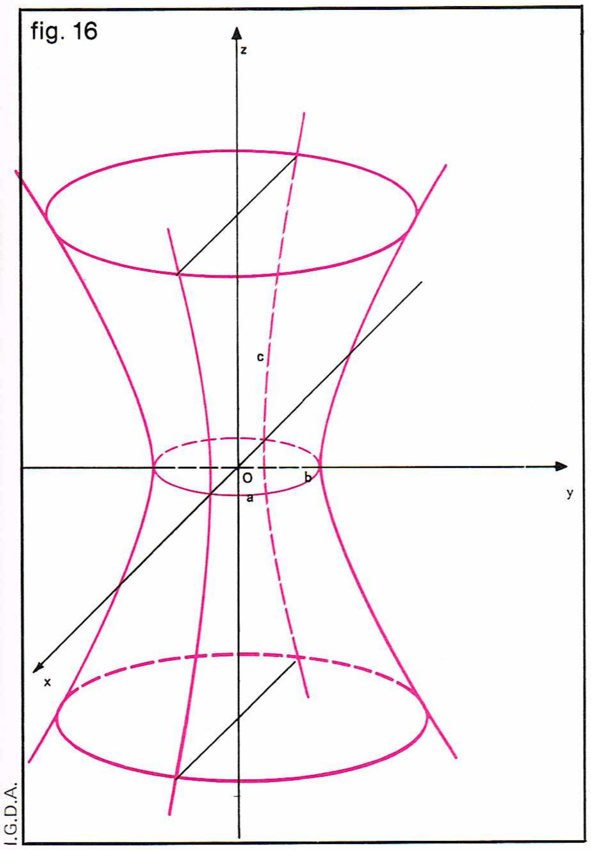

I.G.D.A.

Hyperboloïde à une nappe

Son équation, lorsque sa position par rapport aux axes de coordonnées est celle de la *figure* 16, est :

$$\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}-\frac{z^2}{c^2}=1$$

et les sections principales :

plan $z=0: \frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}=1$ (ellipse de demi-axes a et b)

plan $y=0: \frac{x^2}{a^2}-\frac{z^2}{c^2}=1$ $\left(\text{hyperbole d'asymptotes } z=\pm\frac{c}{a}x\right)$

plan $x=0: \frac{y^2}{b^2}-\frac{z^2}{c^2}=1$ $\left(\text{hyperbole d'asymptotes } z=\pm\frac{c}{b}y\right)$

Cet hyperboloïde admet les mêmes éléments de symétrie que l'ellipsoïde, son intersection avec les axes Ox et Oy (il ne coupe pas Oz) nous donne les quatre sommets $(\pm a, 0, 0)$ et $(0, \pm b, 0)$. L'hyperboloïde à une nappe est la surface décrite par des ellipses dont les sommets se déplacent sur deux hyperboles, deux sommets opposés se déplaçant chacun sur une branche de la même hyperbole. On peut démontrer à partir de l'équation qu'il s'agit d'une surface réglée : par chaque point de sa surface passent deux droites distinctes lui appartenant tout entières. Il est engendré par deux familles de droites telles que deux droites prises chacune dans une famille se rencontrent toujours alors que deux droites de la même famille ne se rencontrent jamais. Si $a = b$, les sections par les surfaces coordonnées $z = h$ sont des cercles, et l'hyperboloïde est alors de révolution autour de Oz.

Hyperboloïde à deux nappes

C'est la surface représentée sur la *figure* 17.

Avec un système de coordonnées bien choisi, son équation est :

$$-\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}-\frac{z^2}{c^2}=1$$

Il admet comme sections principales :

$$\text{plan } z=0: -\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}=1$$

$$\left(\text{hyperbole d'asymptotes } y=\pm\frac{b}{a}x\right)$$

$$\text{plan } x=0: \frac{y^2}{b^2}-\frac{z^2}{c^2}=1$$

$$\left(\text{hyperbole d'asymptotes } z=\pm\frac{c}{b}y\right)$$

Le plan $y = 0$ ne rencontre pas la surface ; les sections par des plans $y = k$ avec $k < -b$ ou $k > b$ sont des ellipses. Ainsi, cet hyperboloïde est la surface décrite par des ellipses dont les sommets se déplacent sur deux hyperboles perpendiculaires, mais cette fois deux sommets opposés se déplacent sur la même branche d'hyperbole.

Les éléments de symétrie sont les mêmes que dans le cas de l'ellipsoïde et de l'hyperboloïde à une nappe.

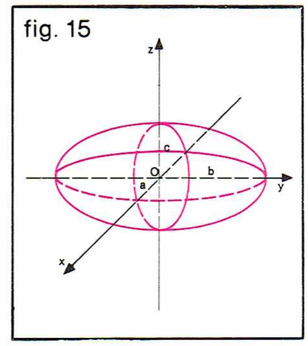

I.G.D.A.

▲ ***Figure* 15 : ellipsoïde.**

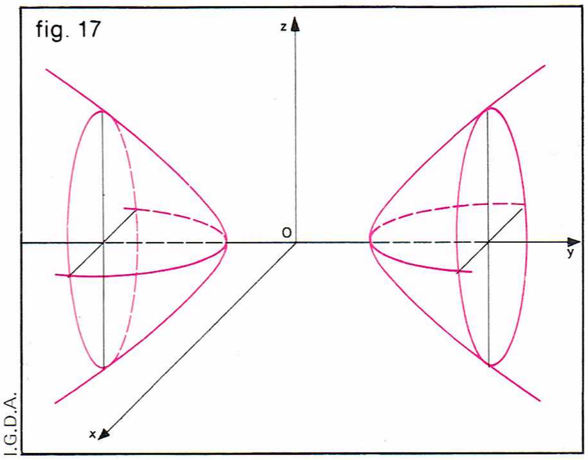

I.G.D.A.

◀ ***A gauche, figure* 16 : hyperboloïde à une nappe.**
***A droite, figure* 17 : hyperboloïde à deux nappes.**

Paraboloïde elliptique

Si sa disposition par rapport aux axes est celle de la *figure* 18, son équation est :

$$\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}=2z$$

Il admet les plans xOz et yOz comme plans de symétrie, l'axe Oz comme axe de symétrie. Les sections principales sont :

$$\text{plan } x=0: \frac{y^2}{b^2}-2z=0$$

(parabole d'axe Oz de sommet l'origine)

$$\text{plan } y=0: \frac{x^2}{a^2}-2z=0$$

(parabole d'axe Oz de sommet l'origine)

L'intersection avec le plan $z = 0$ est réduite à l'origine, les sections par des plans $z = k > 0$ sont des ellipses centrées sur l'axe Oz.

Le paraboloïde elliptique est la surface décrite par des ellipses dont les sommets se déplacent sur deux paraboles perpendiculaires, de même sommet, de même axe, situées du même côté du plan $z = 0$.

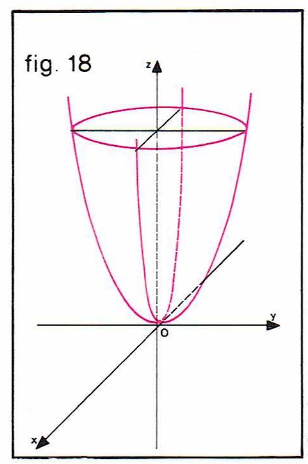

I.G.D.A.

▲ ***Figure* 18 : paraboloïde elliptique.**

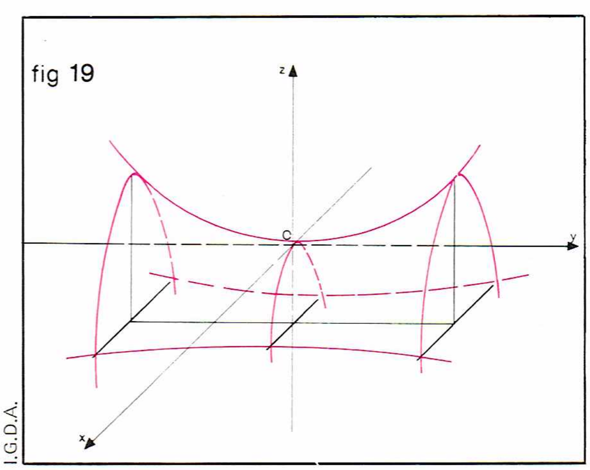

I.G.D.A.

◀ ***Figure* 19 : paraboloïde hyperbolique.**

▶ *Un paraboloïde hyperbolique.*

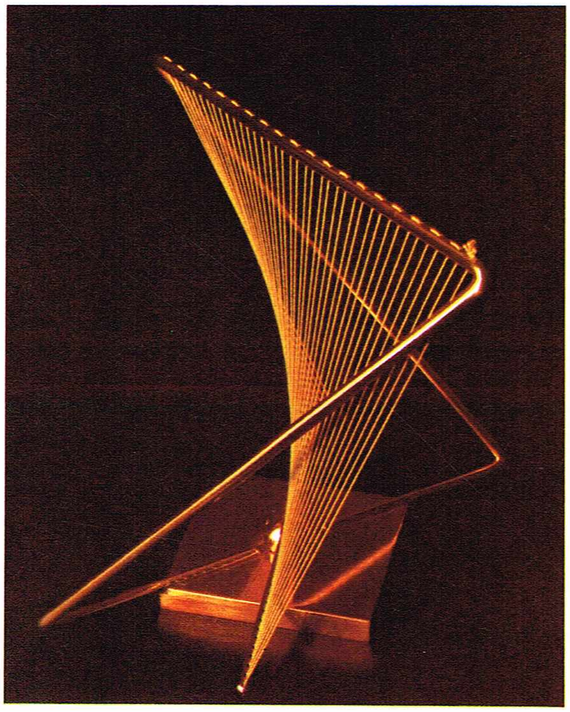

Palais de la Découverte, Paris

Paraboloïde hyperbolique

Son équation, dans le système d'axes de la *figure* 19, s'écrit :

$$-\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}=2z$$

Il admet les mêmes éléments de symétrie que le paraboloïde elliptique ; les sections principales sont :

plan $x=0:\frac{y^2}{b^2}-2z=0$

(parabole d'axe Oz de sommet l'origine située du côté des z positifs)

plan $y=0:-\frac{x^2}{a^2}-2z=0$

(parabole d'axe Oz de sommet l'origine située du côté des z négatifs)

plan $z=0: y=\pm\frac{b}{a}x$ (deux droites)

plan $z=k^2:-\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}=2k^2$

(hyperbole d'axe focal parallèle à Oz)

plans $z=-k^2:\frac{x^2}{a^2}-\frac{y^2}{b^2}=2k^2$

(hyperbole d'axe focal parallèle à Ox)

Un paraboloïde hyperbolique est la surface obtenue lorsqu'on déplace une parabole dans une direction perpendiculaire à son plan, son sommet décrivant une autre parabole, de concavité opposée, située dans un plan perpendiculaire à celui de la première et d'axe parallèle à celui de celle-ci.

On a vu qu'il passait par le point O deux droites appartenant à la surface, et on peut démontrer que c'est une propriété que possèdent tous les points du paraboloïde hyperbolique. De même que l'hyperboloïde à une nappe, il est engendré par deux familles de droites ayant les mêmes caractéristiques.

BIBLIOGRAPHIE

CASANOVA, *Cours de mathématiques spéciales,* t. III, *Géométrie analytique,* Belin, 1965. - DELACHET, *la Géométrie analytique,* « Que sais-je? », n° 1047, P. U. F., 1967. - QUINET, *Cours élémentaire de mathématiques supérieures,* t. VI, *Géométrie analytique plane,* Dunod, 1966.

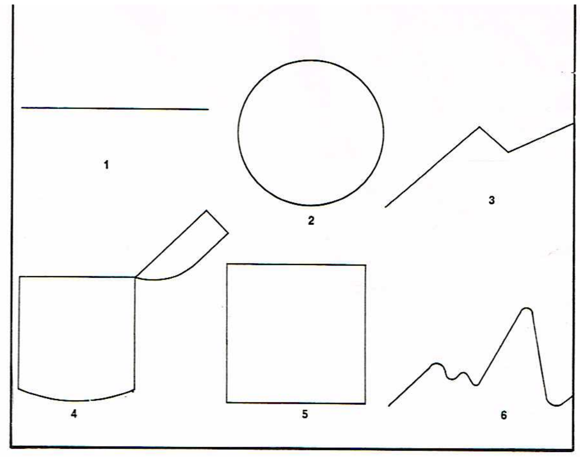

I.G.D.A.

TOPOLOGIE

Considérons les six courbes de la *figure* 1 ; elles ne sont pas équivalentes d'après les critères de la géométrie élémentaire. Toutefois, on remarque intuitivement que les courbes 1, 3 et 6 ont des propriétés communes que les autres ne possèdent pas : on peut les déformer continûment l'une dans l'autre, mais aucune d'entre elles ne peut être déformée en les autres. On peut en dire de même des courbes 2 et 5.

On dit que les courbes 1, 3 et 6 sont *topologiquement équivalentes,* ainsi que les courbes 2 et 5 ; tandis que la courbe 4 ne l'est à aucune des autres. Par analogie, les surfaces délimitées par un cube ou une sphère sont topologiquement équivalentes. La topologie est la partie des mathématiques qui étudie cette notion intuitive de continuité et de limite.

Jusqu'au début du XIX^e^ siècle, les mathématiciens utilisèrent les notions de limite et de continuité sans les définir rigoureusement. C'est à cette époque qu'*A. Cauchy, N. Abel* et *B. Bolzano* définirent la limite d'une suite numérique et la continuité d'une fonction numérique d'une variable numérique ; ce fut le début de la topologie.

G. Hilbert chercha à axiomatiser les notions de limite et de continuité ; il introduisit pour cela les voisinages. Mais ce furent M. Fréchet et F. Riesz qui, au début du XX^e^ siècle, firent les premières études axiomatiques des notions de point limite et de continuité. Tandis que M. Fréchet fondait son étude sur une notion générale de distance, F. Riesz procédait à une définition axiomatique directe de la notion de point limite et, de cette façon, arrivait le premier à la notion d'espace topologique. Un peu plus tard, F. Hausdorff donna aux axiomes de la topologie une forme à peu près identique à celle qui est utilisée aujourd'hui. La notion de compact fut dégagée par P. S. Alexandroff, P. Urysohn et A. Tychonov. Enfin, vers 1940, la définition des filtres, par H. Cartan, mettait un point final à l'histoire de la notion de limite.

Les espaces métriques et les espaces topologiques

Les espaces métriques

La notion d'espace métrique, introduite par *M. Fréchet* en 1906 et développée peu après par *F. Hausdorff,* est directement issue d'une analyse de la distance usuelle.

L'analyse des principales propriétés de la distance entre deux points dans l'espace euclidien conduit à la définition axiomatique suivante : on appelle distance sur un ensemble E une application d de E $\times$ E dans l'ensemble $\mathbb{R}_+$ des nombres réels positifs ou nuls tels que, quels que soient les éléments x, y et z de E, on ait :

a) $d(x, y)=0 \Leftrightarrow x=y$;

b) $d(x, y)=d(x, y)$;

c) $d(x, y) \leqslant d(x, z)+d(z, y)$.

Cette dernière propriété est appelée *inégalité triangulaire,* car elle est la généralisation de la classique inégalité entre les longueurs des côtés d'un triangle : tout côté d'un triangle est au plus égal à la somme des deux autres.

Un ensemble E muni d'une telle distance est appelé *espace métrique.*

Remarquons que $d(x, y)$ est bien un nombre réel positif ou nul : d'après **a)**, **c)** et **b)**, on a en effet pour tout x et y appartenant à E :

$$0=d(x, x) \leqslant d(x, y)+d(y, x)=2\,d(x, y)$$

On démontre aussi l'inégalité :

$$d(x, z) \geqslant |d(x, y)-d(y, z)|$$

(tout côté d'un triangle est au moins égal à la différence des deux autres).

Si (E, d) et (E', d') sont deux espaces métriques, une bijection f de E sur E' sera appelée *isométrie* si elle conserve la distance, c'est-à-dire si $d'[f(x), f(y)] = d(x, y)$ pour tout x et $y \in E$. Deux espaces métriques sont dits *isométriques* s'il existe une isométrie de l'un sur l'autre. Ils présentent alors « par transport » des propriétés semblables.

Donnons quelques exemples importants d'espaces métriques :

I) Soit $x = (x_1, x_2, ..., x_n)$ et $y = (y_1, y_2, ..., y_n)$ deux éléments de R^n, on pose :

$$d_2(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i - y_i)^2}$$

On peut facilement vérifier que l'application $d_2 : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}_+$ définie par $(x, y) \to d_2(x, y)$ est une distance sur R^n.

Par définition, d_2 est la distance euclidienne sur R^n.

On appelle aussi cette métrique la métrique naturelle de R^n.

II) Les applications m et s de $\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n$ dans $\mathbb{R}_+$ définies par :

$$m(x, y) = \max_{1 \leqslant i \leqslant n} (|x_i - y_i|) \text{ et } s(x, y) = \sum_{i=1}^{n} |x_i - y_i|$$

sont aussi des distances sur $\mathbb{R}^n$. On démontre aisément que $m \leqslant d_2 \leqslant s \leqslant nm$. On en verra les conséquences plus loin.

III) Soit E un ensemble quelconque. L'application d de $E \times E \to \mathbb{R}$ définie ainsi :

$$d(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \neq y \\ 0 & \text{si } x = y \end{cases}$$

est une distance sur E. On l'appelle *métrique discrète* ou *distance triviale*.

IV) Si E est un espace métrique muni d'une distance d, tout sous-ensemble A de E est un espace métrique, dit *sous-espace métrique* de E pour la distance induite d' définie ainsi :

$$d'(x, y) = d(x, y) \quad x, y \in A$$

V) Soit E un ensemble non vide et f une application injective de E dans $\mathbb{R}$. On peut montrer que l'application de $E \times E$ dans $\mathbb{R}$ définie par :

$$(x, y) \to d(x, y) = |f(x) - f(y)|$$

est une distance sur E.

On verra plus loin que les espaces métriques dont les éléments sont des fonctions sont parmi les plus importants (voir *Analyse fonctionnelle*).

VI) Une classe très importante d'espaces métriques est constituée par les *espaces vectoriels normés* en définissant la distance de deux éléments x et y comme la norme de leur différence, soit :

$$d(x, y) = \|x - y\|.$$

Rappelons la définition d'un *espace vectoriel normé* réel (resp. complexe) : soit E un espace vectoriel sur $\mathbb{R}$ (resp. $\mathbb{C}$) ; une *norme* sur E est une application de E dans $\mathbb{R}$, notée $x \to \|x\|$, telle que, quels que soient $x \in E$, $y \in E$, $\lambda \in \mathbb{R}$ (resp. $\mathbb{C}$), on ait les propriétés :

a) $\|x\| \geqslant 0, \quad \|x\| = 0 \Rightarrow x = 0$

b) $\|\lambda x\| = |\lambda| \, \|x\|$;

c) $\|x + y\| \leqslant \|x\| + \|y\|$ (inégalité de Minkowski).

Un espace vectoriel normé réel (resp. complexe) est la donnée d'un espace vectoriel E sur $\mathbb{R}$ (resp. sur $\mathbb{C}$) et d'une norme sur E. Ces espaces sont les espaces métriques dont les propriétés « ressemblent le plus » à celles des espaces numériques habituels.

VII) *La droite numérique achevée*

Désignons par $\overline{\mathbb{R}}$ la droite numérique achevée :

$$\overline{\mathbb{R}} = \mathbb{R} \cup \{-\infty\} \cup \{+\infty\},$$

qui est obtenue en adjoignant à l'ensemble $\mathbb{R}$ des nombres réels deux nouveaux éléments que l'on désigne traditionnellement par $-\infty$ et $+\infty$, vu le rôle qu'ils jouent en analyse. Remarquons que l'application f définie par :

$$f(x) = \frac{x}{1 + x} \; x \in \mathbb{R},$$

$$f(+\infty) = +1 \text{ et } f(-\infty) = -1$$

est une bijection de $\mathbb{R}$ sur le segment $[-1, +1]$. On peut donc transporter la distance usuelle sur $\mathbb{R}$, en définissant une distance sur $\overline{\mathbb{R}}$ par : $d'(x, y) = |f(x) - f(y)|$; et bien entendu, f est une isométrie de $\overline{\mathbb{R}}$, muni de cette distance d', sur le segment fermé $[-1, +1]$ muni de la distance habituelle.

On verra que, dans un espace métrique, on peut traiter d'un grand nombre de notions de l'analyse mathématique. Pour cela, on a besoin de donner quelques définitions.

On appelle *boule ouverte* (resp. *fermée*) de centre a et de rayon r fini > 0, dans un espace métrique (E, d), et on note $B(a, r)$ (resp. $\overline{B}(a, r)$) l'ensemble des points E dont la distance à a est inférieure (resp. inférieure ou égale) à r.

Exemples

I) Considérons dans $\mathbb{R}^n$ muni de la distance euclidienne l'ensemble : $B(O, r) = \{x \in \mathbb{R}^n : d_2(O, x) < r\}$ (*fig.* 2, 3).

Pour $n = 1$: $B(O, r) = \{x \in \mathbb{R} : |x| < r\}$, la boule ouverte de centre O et de rayon r n'est autre que l'intervalle ouvert $]-r, +r[$ et on a : $\overline{B}(O, r) = [-r + r]$.

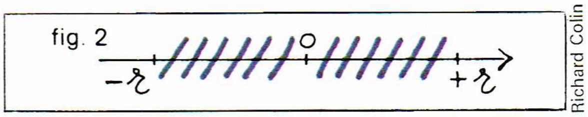

◄ **Figure 2.**

Pour $n = 2$: $B(O, r)$ est le disque de centre O et de rayon r sans bord et $\overline{B}(O, r)$ est le disque avec bord.

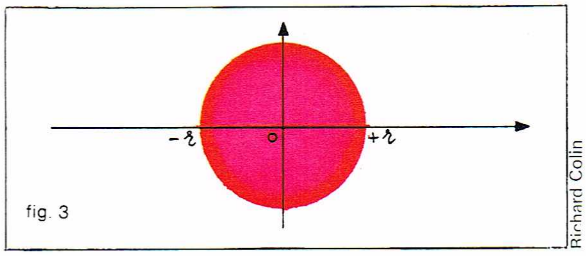

◄ **Figure 3.**

Pour $n = 3$: nous rencontrons avec $B(O, r)$ une boule au sens usuel.

II) Considérons maintenant les boules de centre O et de rayon r dans $\mathbb{R}^2$ muni des distances m et s définies précédemment :

$B_m(O, r)$ n'est autre qu'un carré de centre O (*fig.* 4 a).

$B_s(O, r)$ est le carré ci-dessous (*fig.* 4 b) :

▼ *Figures* **4a** *et* **4b**.

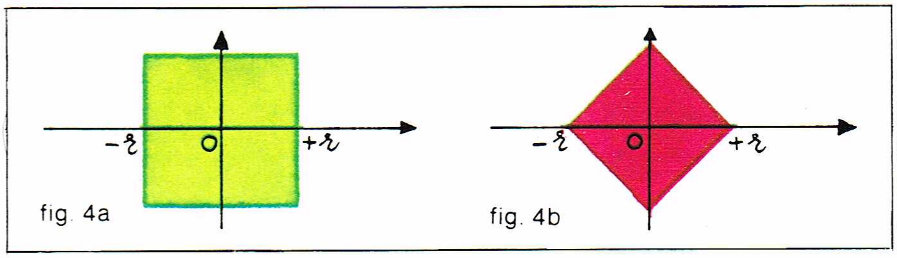

III) Dans un ensemble E muni de la métrique discrète, une boule fermée de rayon < 1 se réduit à son centre, une boule fermée de rayon $\geqslant 1$ est l'espace tout entier.

Une partie d'un espace métrique est dite *bornée* si elle est contenue dans au moins une boule de rayon fini : ainsi $\mathbb{R}$ n'est pas borné ; tout ensemble muni de la métrique discrète est borné.

On dit que deux distances d et d' définies sur un même espace métrique sont *équivalentes* s'il existe deux constantes $a, b \in \mathbb{R}$ telles que :

$$d(x, y) \leqslant ad'(x, y) \quad \text{et} \quad d'(x, y) \leqslant bd(x, y)$$

pour tous $x, y \in E$.

On peut constater que les distances d_2, m et s définies sur $\mathbb{R}^n$ sont équivalentes puisque :

$$m \leqslant d_2 \leqslant s \leqslant nm.$$

◄ ***Page ci-contre, à droite; figure* 1 : *les courbes* 1, 3, 6 *sont* topologiquement équivalentes *parce qu'on peut les déformer* continûment *l'une dans l'autre; de même pour les courbes* 2 *et* 5. *La courbe* 4, *par contre, n'est* topologiquement équivalente *à aucune des autres.***

Ces inégalités se traduisent par les inclusions :

$$B_m\left(x, \frac{r}{n}\right) \subset B_s(x, r) \subset B_{d2}(x, r) \subset B_m(x, r).$$

On a pour $n = 2$ (*fig.* 5) :

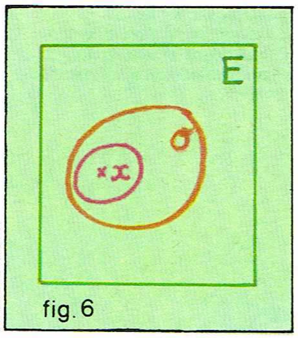

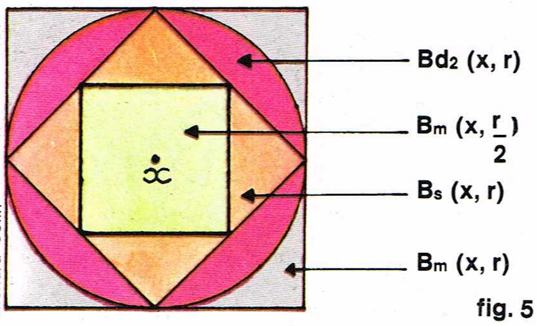

fig. 5

▲ *A gauche, figure* 6 ; *à droite, figure* 5.

Soit (E, d) un espace métrique et $\mathcal{O}$ une partie de E, on dit que $\mathcal{O}$ est un *ouvert* si, quel que soit $x \in \mathcal{O}$, il existe une boule ouverte de centre x contenu dans $\mathcal{O}$ (*fig.* 6).

Toute boule ouverte B (a, r) d'un espace métrique est un ouvert : soit en effet un élément x d'une telle boule, le nombre $r_x = r - d(a, x)$ est positif ; et $y \in B(x, r_x)$, on a :

$$d(y, a) \leqslant d(y, x) + d(x, a) < r_x + d(a, x) = r,$$
$$\text{donc } B(x, r_x) \subset B(a, r)$$

D'après ce qu'on vient de voir, un sous-ensemble de E ouvert quand E est muni d'une certaine distance d, l'est aussi quand E est muni d'une distance d' équivalente à d.

Soit A une partie d'un espace métrique (E, d), on dit que A est *fermée* dans E si son complémentaire dans E est un ouvert et on appelle *fermeture* (ou *adhérence*) de A et on note $\bar{A}$ le plus petit fermé contenant A. Si $x \in \bar{A}$, on dit que x est *adhérent* à A. On dit que A est *dense* dans E si $\bar{A} = E$.

On appelle *intérieur* de A et on note $\mathring{A}$ le plus grand ouvert contenu dans A. Si $x \in \mathring{A}$, on dit que x est *intérieur* à A.

La *frontière* de A (notée Fr A) est l'ensemble $\bar{A} \cap \overline{\complement_E A}$.

Un espace métrique E est dit *séparable* s'il est fini ou s'il contient une partie dénombrable dense dans lui-même.

Les espaces topologiques

Appelons topologie sur un ensemble muni d'une métrique l'ensemble de ses parties ouvertes ; alors, deux métriques distinctes sur un même ensemble peuvent ainsi donner lieu à la même topologie (on a vu que c'était le cas lorsqu'elles sont équivalentes). Beaucoup de notions ou de définitions ne dépendent pas de la métrique choisie, mais seulement de la topologie ; par exemple, les notions de fermé, de fermeture, d'intérieur, de frontière et la notion de limite (qui sera définie plus loin) ; on dit que ce sont des *notions topologiques*. Par contre, les notions de boules, d'ensemble borné, de suites de Cauchy, d'espace complet (ces deux dernières notions seront définies plus loin) dépendent essentiellement de la distance choisie ; elles peuvent être altérées si on passe à une distance équivalente ; on les appelle des *notions métriques*.

Les notions et propriétés topologiques ne dépendent que des trois propriétés suivantes de la famille des ouverts :

(O1) E et $\varnothing$ sont des ensembles ouverts ;

(O2) toute réunion *(finie ou infinie)* d'ensembles ouverts est un ensemble ouvert ;

(O3) toute intersection *finie* d'ouverts est un ouvert.

Ceci suggère de les prendre comme *axiomes* d'une nouvelle théorie, celle des *espaces topologiques*, théorie généralisant et englobant celle des propriétés topologiques des espaces métriques.

On appelle *espace topologique* E la donnée d'un ensemble E et d'une famille de parties, appelées parties ouvertes de la topologie, vérifiant les trois propriétés **(O1)**, **(O2)** et **(O3)**.

Remarque : par passage au complémentaire, il résulte immédiatement des énoncés **(O1)**, **(O2)** et **(O3)** trois énoncés **(F1)**, **(F2)** et **(F3)** équivalents aux précédents et concernant les fermés de E :

(F1) $\varnothing$ et E sont des ensembles fermés ;

(F2) toute intersection *(finie ou infinie)* de fermés est fermée ;

F(3) toute réunion *finie* de fermés est fermée.

Exemples

— Sur un ensemble quelconque E, prenons pour parties ouvertes l'ensemble de toutes les parties de E. Cette topologie est dite *discrète*. Prenons pour parties ouvertes l'ensemble des deux seules parties $\varnothing$ et E : on obtient la topologie *grossière*.

— Tout espace métrique définit évidemment un espace topologique, si on prend comme ouverts les parties que nous avons appelées ouvertes dans l'espace métrique. Cette topologie est dite *topologie naturelle*.

— Soit E un espace topologique et F une partie de E ; on peut faire de F un espace topologique, en prenant comme ouverts les intersections avec F des ouverts de la topologie de E. F est alors appelé *sous-espace topologique* de E, et sa topologie est dite topologie *induite* par celle de E.

— Si E et F sont deux espaces topologiques, on appelle pavé ouvert de $E \times F$ tout sous-ensemble de la forme $U \times V$ où U est un ouvert de E et V un ouvert de F. On vérifie facilement que ces ensembles ainsi définis sur le produit possèdent tous les axiomes que doivent vérifier les ensembles ouverts d'une topologie. Cette topologie s'appelle *topologie produit*. Remarquons que la topologie naturelle de $\mathbb{R}^2$ est la topologie naturelle de $\mathbb{R}$ par elle-même.

— Soit E un espace topologique et ρ une relation d'équivalence sur E. Dans l'ensemble quotient E/ρ, on appelle ouverts les ensembles de classes d'équivalence tels que leur réunion soit un ouvert de E. Cette topologie s'appelle *topologie quotient*. En particulier, si E est $\mathbb{R}^{n+1} - \{0\}$, c'est-à-dire $\mathbb{R}^{n+1}$ auquel on supprime le point O de coordonnées toutes nulles, et si ρ est la relation qui associe les points de coordonnées proportionnelles, on définit la topologie de l'espace projectif réel à n dimensions $P_n(\mathbb{R})$ (voir *Géométrie*).

Un espace topologique est dit *séparé* si, quels que soient les points x et y distincts de E, il existe deux ouverts d'intersection vide, l'un contenant x et l'autre y (propriété de séparation de Hausdorff).

On remarquera que tout espace métrique est séparé : en effet, soit les deux boules ouvertes de centre x et y et de rayon $\frac{d(x, y)}{2}$; on démontre facilement qu'elles sont d'intersection vide (*fig.* 7).

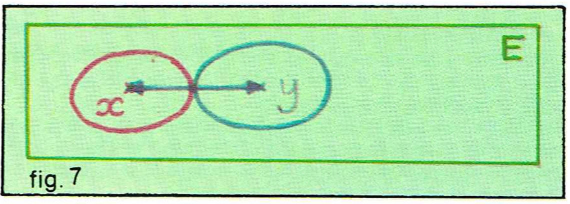

▶ *Figure* 7.

Cette propriété est très intéressante, car elle permet — comme on le verra plus loin — de montrer l'unicité de la limite d'une suite dans un tel espace. *Les espaces topologiques non séparés n'ont qu'un usage très limité en analyse.*

On dit qu'un espace topologique est *métrisable* s'il existe une métrique qui engendre sa topologie ; mais une telle métrique n'est pas donnée, car s'il en existe une, il en existe une infinité (sauf si $E = \varnothing$) : si une distance d définit sa topologie, kd ($k \in \mathbb{R}_+$) la définit aussi.

Un espace topologique métrisable est dit *régulier*. On peut vérifier que la topologie discrète est métrisable, une des métriques étant la métrique discrète ; par contre, la topologie grossière n'est pas métrisable, car elle n'est même pas séparée.

Soit E un ensemble dans lequel sont définies deux topologies T_1 et T_2. On dit que T_1 est plus fine ou plus forte que T_2 si toute partie ouverte pour T_2 est aussi ouverte pour T_1 (c'est-à-dire que l'ensemble des ouverts de T_1 contient l'ensemble des ouverts de T_2). La topologie discrète est, par exemple, plus fine que toutes les autres topologies sur E ; la topologie grossière est la moins fine de toutes les topologies.

Voisinages et continuité

En analyse, une des premières approches de la notion de continuité repose sur l'idée qu'une fonction continue f d'une variable réelle x doit être telle qu'à de petites variations de x correspondent de petites variations de $f(x)$; cette condition exprime en fait que le graphe $y = f(x)$ doit être, au sens intuitif, une courbe continue. Si on conserve un point de vue géométrique, en notant d'abord que la fonction f peut être interprétée comme une application de l'axe des x sur l'axe des y, chaque valeur de x étant appliquée sur une valeur $f(x)$ de l'axe y déterminée de manière unique. On peut alors exprimer la continuité de f en x' en disant que des points *suffisamment proches* de x' sur l'axe des x sont appliqués par f en des points *arbitrairement proches* $f(x')$ sur l'axe des y.

Introduisons maintenant les *voisinages* pour préciser la notion de continuité : on appelle *voisinage* d'un point a d'un espace topologique E toute partie de E contenant au moins un ouvert contenant lui-même a.

Soit $(V_i)_{i \in I}$ une famille de voisinages de a dans E. On dit que c'est un *système fondamental de voisinages* de a si tout voisinage de a contient l'un des V_i. On démontre le théorème suivant : un espace topologique E est séparé si, et seulement si, pour tout $a \in E$, l'intersection de tous les voisinages fermés de a se réduit à $\{a\}$ (*fig.* 8).

De par sa définition, on voit que la notion de voisinage de a est très proche de celle d'ouvert contenant a, avec laquelle elle fait souvent double emploi.

Cette nouvelle notion de voisinage permet d'introduire celles de *limite* et de *continuité*.

Soit E et E′ deux espaces topologiques, A une partie de E et a un point de E adhérent à A ; on dit, si f est une application de A dans E′, que $f(x)$ *tend vers la limite l lorsque* x *tend vers* a *par valeurs dans A* si, quel que soit le voisinage V′ de l dans E′, il existe un voisinage V de a dans E tel que :

$$f(V \cap A) \subset V'.$$

Exemples

— Ainsi, si f est une application $\mathbb{R}$ dans E′, l'expression $f(x)$ tend vers l lorsque x tend vers a par valeur supérieure signifie que : quel que soit le voisinage V′ de l dans E′, il existe $\eta > 0$ tel que $(|x - a| \leqslant \eta, x \geqslant a)$ entraîne $f(x) \in V'$. Ici $E = \mathbb{R}$ et $A = [a, +\infty[$.

— Dans les mêmes conditions, l'expression $f(x)$ tend vers l lorsque x tend vers $+\infty$, signifie que, quel que soit le voisinage V′ de l dans E, il existe α réel tel que $x \geqslant \alpha$ entraîne $f(x) \in V'$. Ici $E = \overline{\mathbb{R}}$, $A = \mathbb{R}$, $a = +\infty$.

Soit f une application d'un espace topologique E dans un espace topologique E′. On dit que f est *continue* en un point a de E si, quel que soit V′ voisinage de $f(a)$, il existe V, voisinage de a, tel que : $f(V) \subset V'$;

ou encore :

si l'image réciproque par f de tout voisinage de $f(a)$ est un voisinage de a ;

ou encore :

si $f(x)$ tend vers $f(a)$ quand x tend vers a.

S'il s'agit d'espaces métriques, on peut encore dire :

si, quel que soit $\varepsilon > 0$, il existe $\eta > 0$ tel que $d(a, x) < \eta$ entraîne $d(f(a), f(x)) < \varepsilon$;

ce qui est encore équivalent à :

si, quel que soit la boule de centre $f(a)$, il existe une boule de centre a dont l'image par f appartienne à la précédente (*fig.* 9).

On démontre aisément que l'application composée de deux applications continues est continue.

Cette notion de continuité est *locale*, car elle ne dépend que des voisinages du point considéré. On remarquera qu'elle est une généralisation de la continuité telle qu'elle était connue pour $E = E' = \mathbb{R}$.

M.C.Escher, *le Ruban de Möbius* II - 1963 - Escher Foundation - Haags Gemeentemuseum - The Hague

▲ ***Le ruban de Möbius, ruban à une seule face, dans une interprétation artistique de M. C. Escher.***

Une application de E dans E′ est dite *continue* si elle est continue en tout point de E.

Si une application d'un espace topologique E dans un espace topologique E′ est continue en un point a de E, elle le reste *a fortiori* si on remplace la topologie de E par une topologie plus fine, et celle de E′ par une moins fine.

Remarquons que, si (E, d) et (E', d') sont des espaces métriques et si une application f de E dans E′ est continue en un point a de E, elle le reste si on remplace d et d' par des distances équivalentes. Notons aussi que f est

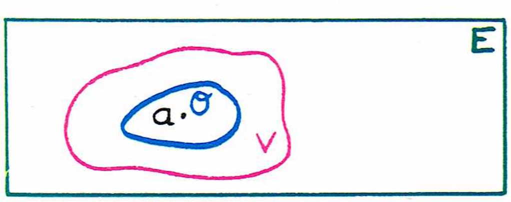

fig. 8

Richard Colin

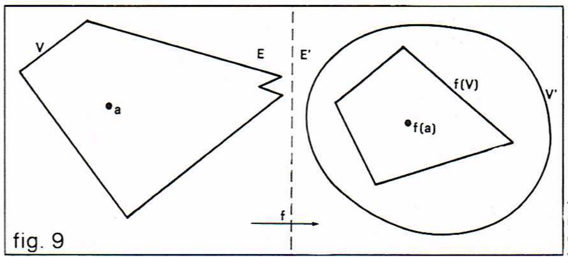

fig. 9

I.G.D.A.

◀ ***A gauche, figure 8 : notion de voisinage. A droite, figure 9 : application continue au point* a *d'un espace E dans un espace E′.***

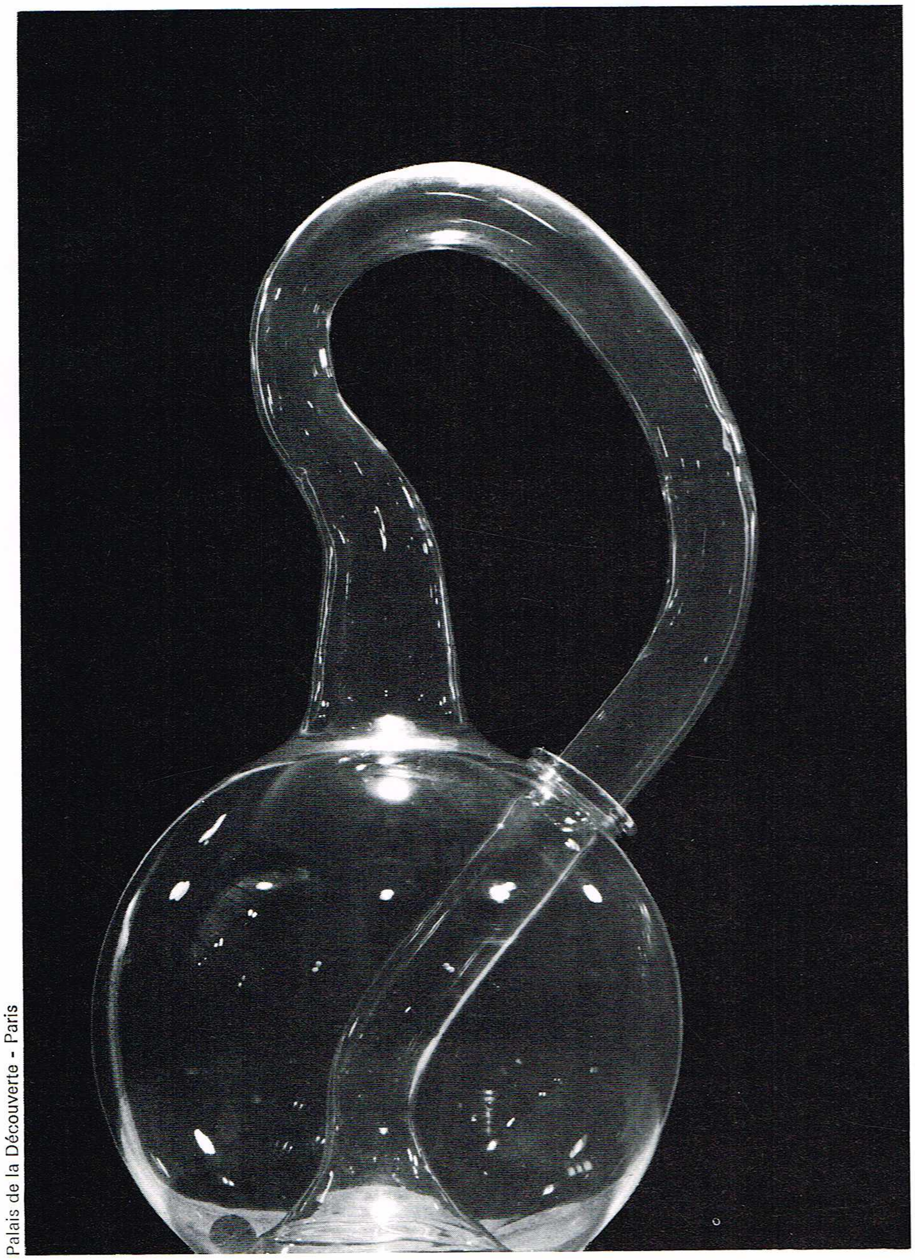

Palais de la Découverte - Paris

▲ ***La* bouteille de Klein** *imaginée par le mathématicien allemand Félix Klein en 1882 : cette curieuse bouteille, dont le col traverse la paroi et vient faire jonction avec le fond, ne comporte ni face interne ni face externe.*

toujours continue si E est un espace topologique discret, ou si E′ est un espace topologique grossier.

Dans tout espace métrique (E, d), la fonction distance en un point donné a : $x \rightarrow d(a, x)$, application de E dans $\mathbb{R}_+$, est partout continue; cela résulte de ce que :

$$|d(a, x) - d(a, x_0)| \leqslant d(x_0, x).$$

On a un théorème important pour les applications continues d'un espace topologique E dans un espace topologique E′ : l'image réciproque par f de tout ouvert de E′ est un ouvert de E et l'image réciproque de tout fermé de E′ est un fermé de E. Signalons que, par une application continue, l'image directe d'un ouvert n'est pas ouverte en général.

Étudions maintenant des applications particulièrement importantes en topologie : les homéomorphismes, dont on a déjà signalé l'intérêt au début de cette partie.

On appelle **homéomorphisme** d'un espace topologique E sur un espace topologique E′ toute bijection de E sur E′ telle qu'elle-même et sa réciproque soient continues.

Remarquons qu'il ne faut pas croire que toute application bijective et continue soit nécessairement un homéomorphisme.

Exemple

Soit $E = [a, b[\cup \{c\}$ où a, b et $c \in \mathbb{R}$ et $c > b$, et soit f une application de E dans $E' = [a, b]$ telle que :

$$f(t) = \begin{cases} t & \text{si } t \neq c \\ b & \text{si } t = c \end{cases}$$

Cette application est bijective et continue, mais son application réciproque n'est pas continue.

On dit que deux espaces topologiques E et E′ sont *homéomorphes* s'il existe au moins un homéomorphisme de l'un sur l'autre. *Ces deux espaces ont alors les mêmes propriétés topologiques*, c'est-à-dire *les mêmes propriétés pour tout ce qui concerne les ensembles ouverts, les ensembles fermés et les voisinages.*

Exemples

— L'intérieur d'un disque et l'intérieur d'un triangle dans un plan euclidien sont des espaces métriques homéomorphes.

— Le demi-plan $y > 0$, la région $y > x^2$ située au-dessus de la parabole $y = x^2$, la région $y < x^2$ située au-dessous de cette parabole, dans le plan $\mathbb{R}^2$, sont homéomorphes.

— La droite réelle, munie de sa métrique naturelle, et la droite réelle, munie de sa métrique discrète, ne sont pas homéomorphes, puisque, sur cette dernière, toutes les parties sont ouvertes et qu'il n'en est pas de même sur la première.

— On peut vérifier que l'application f de $\overline{\mathbb{R}}$ dans $[-1, +1]$ qui à $x \in \mathbb{R}$ fait correspondre $\dfrac{x}{1 + |x|}$, est un homéomorphisme, donc $\overline{\mathbb{R}}$ et $[-1, +1]$ sont homéomorphes.

Notons que les homéomorphismes d'un espace sur lui-même forment un groupe et, dans une classe d'espaces, la relation : « il existe un homéomorphisme entre E et E′ », est une relation d'équivalence.

Toutes les notions précédentes de continuité et d'homéomorphie sont topologiques. Il est utile d'avoir une notion de continuité plus forte, qui n'est plus seulement topologique, utilisant le fait qu'on peut « comparer » les voisinages de deux points distincts d'un espace métrique grâce aux rayons des boules. Plus précisément, on dira qu'une application f : (E, d) → (E′, d') est *uniformément continue* si :

quel que soit $\varepsilon > 0$, il existe $\eta > 0$, tel que : $d(x, y) < \eta$ entraîne $d'(f(x), f(y)) < \varepsilon$;

ou encore :

quel que soit $\varepsilon > 0$, il existe $\eta > 0$, tel que : $B(x, \eta) \subset f^{-1}(B(f(x), \varepsilon))$ quel que soit $x \in E$.

Par exemple, sur la droite réelle, la fonction x est uniformément continue, mais la fonction x^2 ne l'est pas; en effet, on a :

$|(x + h)^2 - x^2| = |2hx + h^2| \geqslant 2hx$ si $h \geqslant 0, x \geqslant 0$;

alors pour ε donné, si on cherche h tel qu'on ait :

$$|2hx + h^2| \leqslant \varepsilon,$$

on doit nécessairement prendre $|h| \leqslant \dfrac{\varepsilon}{2|x|}$ et il est par suite impossible de choisir η indépendant de x.

De même $(x, y) \rightarrow xy$ n'est pas une application uniformément continue de $\mathbb{R}^2$ dans $\mathbb{R}$.

Un cas particulier de cette situation est fourni par les applications *lipschitziennes :* on dit qu'une application f : (E, d) → (E′, d') est lipschitzienne de rapport k ($k \in \mathbb{R}_+$) si on a :

$d'(f(x), f(y)) \leqslant k\,d(x, y)$ quels que soient $x, y \in E$;

ainsi, l'image réciproque par f de la boule de centre $f(x)$ et de rayon r contient la boule de centre x et de rayon r/k. Si $k = 1$, on a une *isométrie;* si $k < 1$, on dit que l'application est *contractante* (*fig.* 10).

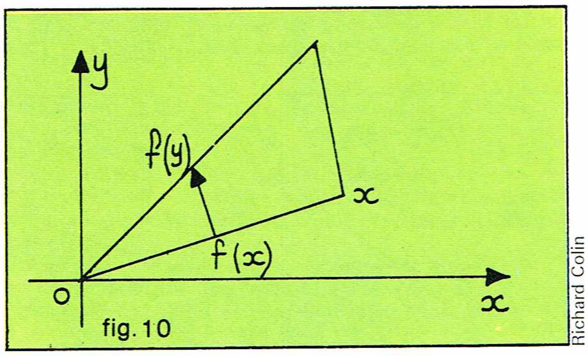

Richard Colin

▶ ***Figure 10 :*** *la fonction* $f(x) = \dfrac{x}{2}$ ***est un exemple de*** **fonction contractante.**

Par exemple, l'application de $\mathbb{R}^2$ dans $\mathbb{R}^2$ qui à $x = (x_1, x_2)$ fait correspondre $\left(\frac{x_1}{2}, \frac{x_2}{2}\right)$ est contractante de rapport $\frac{1}{2}$.

Limites de suites — Espaces métriques complets

Soit E un espace topologique. Soit $x_0, x_1, ..., x_n, ...$, une *suite* de points de E. C'est une application de l'ensemble des entiers $\mathbb{N}$ dans E. On dit que la suite (x_n) *converge vers un point l de E* si, quel que soit le voisinage V de l, il existe un entier n_0 tel que, pour $n \geqslant n_0$, tous les x_n appartiennent à V.

Dans le cas où E est un espace métrique, on a encore : une suite (x_n) de (E, d) converge vers un point l de E ou a pour limite l si la suite des nombres réels : $d(l, x_0)$, $d(l, x_1)$, ..., $d(l, x_n)$, ..., converge vers 0;
ou encore :
quel que soit $\varepsilon > 0$, il existe un entier n_0 tel que, pour tout $n \geqslant n_0$, on ait : $d(l, x_n) \leqslant \varepsilon$.

Remarques

— Si une suite est convergente dans un espace topologique E, elle l'est *a fortiori* si on remplace la topologie de E par une topologie moins fine.

— Si une suite d'un espace topologique E admet une limite et si E est séparé, cette limite est nécessairement unique. On en déduit qu'étant donné qu'un espace métrique est toujours séparé, si une suite d'un tel espace admet une limite, cette limite est unique.

— On appelle suite extraite de la suite (x_n) toute suite de la forme $k \to x_{n_k}$, où $k \to n_k$ est une suite strictement croissante d'entiers $\geqslant 0$. *Si (x_n) converge vers x, toute suite extraite de (x_n) converge vers x*, la réciproque n'étant pas vraie.

— Pour qu'une application f d'un espace topologique E dans un espace topologique E′ soit continue en un point x de E, il faut que l'image par f de toute suite de points de E convergeant vers x soit une suite de points de E′ convergeant vers $f(x)$. Si E est métrisable, la condition est également suffisante.

— Pour qu'un point x d'un espace topologique E soit adhérent à une partie A de E, il suffit qu'il existe une suite d'éléments de A qui converge vers x. Si E est métrisable, cette condition est également nécessaire.

Ainsi, si E est métrisable, l'adhérence $\overline{A}$ d'une partie A de E est l'ensemble des limites des suites de A qui sont convergentes dans E. On en déduit immédiatement que, pour qu'une partie d'un espace topologique métrisable E soit fermée, il faut et il suffit qu'elle contienne toutes les limites de ses suites convergentes dans E.

Donnons une nouvelle définition importante : soit (E, d) un espace métrique. Une suite (x_n) dans E est appelée *suite de Cauchy* si :
quel que soit $\varepsilon > 0$, il existe $p \in \mathbb{N}$ tel que : pour tout $n \geqslant p$ et tout $m \geqslant p$, on ait : $d(x_n, x_m) < \varepsilon$;
ou encore :
$d(x_m, x_n)$ tend vers 0 quand n et m tendent vers $+\infty$.
On démontre facilement que toute suite de Cauchy est bornée.

On démontre aussi que, si une suite (x_n) a une limite x, alors (x_n) est de Cauchy. En effet, soit $p \in \mathbb{N}$ tel que si $n \geqslant p$, on ait $d(x, x_n) < \frac{\varepsilon}{2}$; alors, si $n \geqslant p$ et $m \geqslant p$, on a :

$$d(x_n, x_m) \leqslant d(x_n, x) + d(x, x_m) < \varepsilon.$$

Mais, la réciproque de cette propriété n'est pas vraie en général, d'où la définition : un espace métrique E est dit *complet* si toute suite de Cauchy d'éléments de E a une limite dans E.

L'avantage de tels espaces est qu'on peut y montrer l'existence d'une limite sans connaître explicitement cette limite, procédé essentiel en analyse.

Exemples

— L'espace métrique E = [0, 1[pour la distance euclidienne n'est pas complet, car la suite $\left(x_n = 1 - \frac{1}{n}\right)$ est de Cauchy, mais n'a pas de limite dans E.

— Considérons la suite des entiers naturels : $x_n = n$; elle n'est manifestement pas de Cauchy pour la distance naturelle de $\mathbb{R}$, mais elle est une suite de Cauchy pour la d' déjà définie puisqu'elle converge vers $+\infty$ dans $\overline{\mathbb{R}}$:

$$d'(x, y) = \left|\frac{x}{1 + |x|} - \frac{y}{1 + |y|}\right|.$$

Un espace vectoriel normé complet est appelé *espace de Banach*. Ces espaces seront utilisés en analyse fonctionnelle.

Si E est un espace métrique et F un sous-espace métrique de E, alors : si F est complet, F est fermé dans E, et si E est complet et F fermé dans E, F est complet.

On démontre que $\mathbb{R}$ *muni de sa métrique naturelle est un espace métrique complet*. Ce résultat est très important en analyse et permet de déduire que :

— tout intervalle fermé de $\mathbb{R}$ est complet;

— tout espace métrique produit de deux espaces complets étant complet, $\mathbb{R}^n$ *est complet* pour la métrique euclidienne ainsi que pour toutes les métriques qui lui sont équivalentes.

Espaces compacts

Si E est un espace topologique et $\{U_i, i \in I\}$ une famille de parties de E, on dit que cette famille recouvre E si

$$E = \bigcup_{i \in I} U_i$$

Un espace topologique E est dit *compact* s'il est séparé et si, de tout recouvrement de E par une famille d'ouverts $\mathcal{O}_i$, $i \in I$, de E, on peut en extraire un recouvrement fini (c'est-à-dire qu'il existe une partie finie F de I telle que :

$$E = \bigcup_{i \in F} \mathcal{O}_i).$$

On peut montrer par passage au complémentaire que cette dernière propriété est équivalente à la suivante : si une famille de fermés de E est d'intersection vide, alors il en existe une sous-famille dont l'intersection est déjà vide.

Remarques

— On en déduit immédiatement que, si E est un espace métrique compact, alors E est borné (il suffit de considérer un recouvrement de E par des boules ouvertes de même rayon).

— L'ensemble des intervalles ouverts $]n - 1, n + 1[$, $n \in \mathbb{Z}$, est un recouvrement ouvert de $\mathbb{R}$; il n'a pas d'autre sous-recouvrement que lui-même, car, si on supprime l'intervalle $]n - 1, n + 1[$, le point n n'est plus recouvert. Ceci prouve que $\mathbb{R}$ *n'est pas compact*.

— Si E est un espace topologique séparé et A une partie de E, alors : si A est compacte, A est fermée dans E, et si E est compact et A fermée dans E, A est compacte.

— Une réunion *fine* de parties compactes d'un espace topologique E séparé est une partie compacte de E.

Énonçons l'important **théorème de Borel-Lebesque :** *pour qu'une partie A de $\mathbb{R}$ soit compacte, il faut et il suffit qu'elle soit fermée et bornée dans $\mathbb{R}$.*

Conséquences

— Le même raisonnement où on remplace les intervalles par des hypercubes prouve que *les parties compactes de $\mathbb{R}^n$ sont exactement les parties fermées et bornées de $\mathbb{R}^n$.*

— On a vu que la droite achevée $\overline{\mathbb{R}}$ est homéomorphe à l'intervalle $[-1, +1]$. Il s'ensuit que $\overline{\mathbb{R}}$ *est compact, ainsi que $\overline{\mathbb{R}^n}$.*

Étudions maintenant l'importance de la notion de compacité pour les applications continues.

Si E et E′ sont deux espaces topologiques séparés et f une application continue de E dans E′, alors l'image $f(K)$ de toute partie compacte K de E est compacte. Il s'ensuit que, si E est un espace compact, E′ un espace topologique séparé et f une application injective et continue de E dans E′, alors f est un homéomorphisme de E sur $f(E)$.

On en déduit des propriétés intéressantes en analyse pour les applications continues à valeurs réelles.

— Si E est un espace compact et f une application continue de E dans $\mathbb{R}$, alors f est bornée et atteint ses bornes, c'est-à-dire qu'il existe $a \in E$ et $b \in E$ tels que, quel que soit $x \in E$, on ait : $f(a) \leqslant f(x) \leqslant f(b)$;

En effet, $f(E)$ est une partie fermée et bornée de $\mathbb{R}$. Les nombres réels $\sup_{x \in E} f(x)$ et $\inf_{x \in E} f(x)$ sont limites de suites d'éléments de $f(E)$, donc appartiennent à $f(E)$, car $f(E)$ est fermé.

Le mathématicien français **Émile Picard** *(1856-1941) à qui l'on doit, entre autres, une importante méthode de calcul des solutions d'équations par approximations successives : cette méthode est connue sous le nom de* **théorème du point fixe.**

Harlingue - Viollet

— Si E est un espace compact et f une application continue de E dans $\mathbb{R}$ telle que $f(x) > 0$ pour tout $x \in E$, alors il existe $m > 0$ tel que, pour tout $x \in E$, on ait $f(x) \geqslant m$. En effet, puisque $m = \inf_{x \in E} f(x) \in f(E)$, on a $m > 0$.

Si E est un espace compact et si (E', d') est un espace métrique, alors toute application continue de E dans E′ est bornée. En effet, quel que soit $a \in E$, $x \to d(a, f(x))$ est continue, donc bornée.

Théorème de Heine : *si (E, d) est un espace métrique compact, (E′, d′) un espace métrique et f une application continue de E dans E′, alors f est uniformément continue.*

Soit une suite (x_n) d'éléments d'un espace topologique E; on dit que a est *point adhérent à la suite* si, pour tout voisinage V de a, il existe une infinité de valeurs de l'entier n telles que $x_n \in V$. Si une suite converge vers a, elle admet a comme point adhérent.

Énonçons une condition nécessaire et suffisante pour qu'un espace métrisable soit compact.

Théorème de Bolzano-Weierstrass : *si E est un espace métrisable, pour qu'il soit compact, il faut et il suffit que toute suite d'éléments de E admette au moins un point adhérent (ou que de toute suite, on puisse extraire une sous-suite convergente).*

Donnons sa conséquence immédiate : si E est un espace métrique compact, alors E est complet. Réciproquement, on montre qu'un espace métrique complet E est compact si et seulement s'il vérifie la propriété suivante de *précompacité :* pour tout $\varepsilon > 0$, il existe un recouvrement fini de E par des boules de rayon ε.

Un autre théorème important, qui sera utilisé en analyse fonctionnelle, est le **théorème de Tychonoff :** *tout produit, fini ou non, d'espaces compacts est compact. Inversement, si un produit d'espaces non vides est compact, chacun d'eux est compact.*

La démonstration de ce théorème repose sur la *théorie des filtres*, qui, bien que de plus en plus importante et utilisée, n'a pas été abordée dans cet exposé par souci de simplicité.

La notion de compacité est très forte; il suffit souvent d'avoir à sa disposition des *espaces localement compacts* qui sont d'un usage constant en analyse : on dit qu'un espace topologique E est localement compact s'il est séparé et si chacun de ses points possède au moins un voisinage compact.

Remarques

— Tout espace métrique dont les boules fermées sont compactes est localement compact. Il s'ensuit que $\mathbb{R}^n$ *est localement compact*. Mais on doit bien noter qu'un espace métrique peut être localement compact (notion purement topologique) sans que ses boules fermées soient forcément compactes. On se convaincra de l'importance des espaces localement compacts en remarquant que tous les espaces de la géométrie : $\mathbb{R}$, $\mathbb{R}^n$, surfaces, courbes, sont localement compacts.

— Tout espace compact est évidemment localement compact; tout espace topologique discret est localement compact.

— Si E est un espace localement compact et si A est une partie ouverte (resp. fermée) de E, alors le sous-espace topologique A de E est localement compact.

Application : **critères de non-homéomorphisme**
La compacité et la locale compacité étant invariantes par homéomorphismes, on peut montrer que deux espaces topologiques ne sont pas homéomorphes, parce qu'un de ces espaces est compact ou localement compact et que l'autre ne l'est pas. Par exemple, les intervalles $[0, 1]$ et $[0, 1[$ ne sont pas homéomorphes, parce que le premier est compact et que le second ne l'est pas. Un espace vectoriel de dimension finie est localement compact, par contre un espace vectoriel de dimension infinie ne l'est pas (voir le théorème de *F. Riesz* dans le chapitre *Analyse*) ; donc ils ne sont pas homéomorphes. Naturellement, ces critères sont très élémentaires, et la plupart des cas de non-homéomorphisme leur échappent. Par exemple, les deux espaces $[0, 1[$, $]0, 1[$ sont tous deux localement compacts mais on démontre qu'ils ne sont pas homéomorphes. Deux espaces vectoriels normés de dimensions finies différentes sont tous deux localement compacts, mais ne sont pas homéomorphes (la démonstration est difficile).

La méthode des approximations successives

On doit à *É. Picard* une méthode de construction de solution d'équations par approximations successives formulée sous le nom de *théorème du point fixe*.

Pour le théorème des fonctions implicites et le théorème d'existence de la solution d'une équation différentielle, le théorème du point fixe est l'outil indispensable. Il est donc un des principaux théorèmes d'existence en mathématiques.

Théorème du point fixe : soit E un espace métrique *complet* et f une application contractante de E dans lui-même, c'est-à-dire qu'il existe une constante k, $0 < k < 1$, telle que : $d(f(x), f(y)) \leqslant kd(x, y)$ quels que soient x et y dans E. Alors l'équation $f(x) = x$ a une solution unique dans E. De plus, quel que soit $x_0 \in E$, la suite (x_n)

définie par récurrence par $x_1 = f(x_0), \ldots, x_{n+1} = f(x_n), \ldots$ converge vers cette solution.

La démonstration est très simple, et on voit clairement le rôle joué par les suites de Cauchy. Remarquons d'abord que l'unicité est évidente : si $f(x) = x$ et $f(y) = y$, on a : $d(f(x), f(y)) = d(x, y) \leqslant kd(x, y)$, ce qui entraîne : $d(x, y) = 0$. Il suffit donc de montrer que (x_n) est convergente, car, si sa limite est x, on obtient $x = f(x)$ en faisant tendre n vers l'infini dans la relation de récurrence $x_{n+1} = f(x_n)$, puisque f est continue.

Or, on a :

$$d(x_{p+1}, x_p) = d(f(x_p), f(x_{p+1})) \leqslant kd(x_p, x_{p-1}),$$

d'où, par récurrence sur p :

$$d(x_{p+1}, x_p) \leqslant k^p d(x_1, x_0) ;$$

par inégalité triangulaire, on a pour $q \geqslant p$:

$$d(x_p, x_q) \leqslant \sum_{r=p}^{q-1} d(x_{r+1}, x_r) \leqslant \left(\sum_{r=p}^{q-1} k^r\right) d(x_1, x_0) ;$$

ce qui entraîne que :

$$d(x_q, x_p) \leqslant \frac{k^p}{1-k} d(x_1, x_0) ;$$

cette dernière expression tend vers 0 quand p tend vers $+\infty$. La suite (x_n) est donc de Cauchy et admet une limite x, puisque E est complet.

Remarquons que, si on fait tendre q vers l'infini dans l'inégalité précédente, on obtient :

$$d(x_q, x_p) \leqslant \frac{k^p}{1-k} d(x_1, x_0) ;$$

ce qui précise la rapidité de convergence de la suite (x_n) vers x.

BIBLIOGRAPHIE

BOURBAKI N., *Éléments de mathématiques : Topologie générale*, ch. I à IV, nouvelle édition, Hermann, Paris, 1971. - CHOQUET G., *Cours d'analyse*, t. II, *Topologie*, nouvelle édition, Masson, Paris, 1969. - DIEUDONNÉ J., *Éléments d'analyse*, t. I, *les Fondements de l'analyse moderne*, nouvelle édition, Gauthier-Villars, Paris, 1968. - SCHWARTZ L., *Analyse : Topologie générale et Analyse fonctionnelle*, Hermann, Paris, 1970. - WALLACE A. H., *Introduction à la topologie algébrique*, traduite par J.-L. Verley, Gauthier-Villars, Paris, 1973.

Palais de la Découverte - Paris

◄ **Karl Weierstrass** ***(1815-1897).***

ANALYSE

Le terme « analyse » est, pour tout utilisateur des mathématiques, pris au sens d'analyse infinitésimale ; c'est-à-dire que d'emblée il pose les problèmes du continu, de l'infini et donc de limite. On dit souvent que l'analyse commence où l'algèbre s'arrête ; cette image n'oublie certainement pas que le continu prend naissance avec la construction du corps des nombres réels $\mathbb{R}$ (Dedekind, Weierstrass et Heine-Canter) par sa propriété d'inextensibilité, de telle sorte que $\mathbb{R}$ se construit par des procédés de passage à la limite, tandis que $\mathbb{Q}$ ou $\mathbb{Z}$ (voir *les Nombres*) sont envisagés comme des constructions algébriques stables : anneaux, corps. L'utilisation de la topologie permet de préciser davantage ce point.

C'est donc bien par souci de distinction avec la synthèse algébrique que s'est développée l'analyse en mathématiques, à partir de la notion de continu telle que la mécanique, par exemple, avec l'idée de mouvement, de vitesse, d'accélération, la fournit.

Malgré l'extension du calcul infinitésimal depuis le XVII^e siècle, ce n'est qu'à la fin du XIX^e siècle avec les travaux de Georg Cantor (1845-1918) que les concepts pourront être délimités formellement tant pour le continu que pour l'infini. Le développement de la topologie (Riemann, Fréchet) donnera alors un cadre global à l'analyse mathématique classique.

La démarche du mathématicien tendant à plus de généralité en se posant la question de l'approximation linéaire des fonctions conduisit à construire le calcul différentiel sur les espaces de Banach, puis la géométrie différentielle — généralisant à plus de trois dimensions l'idée de Descartes — et aboutit à ce pseudo-paradoxe qu'est l'algébrisation de l'analyse, que l'on retrouve par exemple dans les théories modernes de la mesure (où l'on fait une harmonieuse synthèse de l'analyse et de l'algèbre par l'intermédiaire de la notion de dualité).

Au cœur de toute l'analyse mathématique se trouve la notion de correspondance « fonctionnelle » : pour l'évolution des grands courants d'idées mathématiques, c'est là une des plus fructueuses sources, et l'on peut encore y voir un lien étroit entre l'algèbre et la mathématique du continu. Cette interpénétration des domaines est encore affirmée par la théorie analytique des nombres premiers, ou bien d'autres travaux récents.

Analyse classique

Variables et fonctions

Dans cette première partie, on va dresser un cadre général de l'analyse classique. On ne considère que des nombres réels, laissant le cas complexe pour un développement ultérieur. Les concepts seront dégagés dans leur sens le plus élémentaire afin de montrer la nécessité de généralisations.

Une *grandeur variable*, ou plus simplement une *variable*, est une grandeur susceptible de prendre plusieurs valeurs ; une *grandeur constante*, ou encore une *constante*, garde en revanche une valeur donnée. Selon les conditions du problème posé, une même grandeur peut être soit variable, soit constante : par exemple, au cours de l'étude d'un phénomène physique, la température d'ébullition de l'eau est une constante dès que toutes les conditions sont spécifiées, mais elle devient une variable si l'on fait varier la pression ambiante.

C'est au mathématicien allemand Bernhardt Riemann (1826-1866) que l'on doit la définition claire d'une *fonction :* « Le nombre y est fonction du nombre x qui varie dans un champ donné G si, à tout nombre x situé dans D, correspond par une loi déterminée mais de nature et d'expression absolument quelconque un nombre y et un seul ; x est appelé la variable indépendante. » Sa définition fait écho à celle de son compatriote Gustav Dirichlet (1805-1859) : « On dit que y est une fonction de x si, lorsqu'on se fixe une certaine valeur de x quelconque choisie dans un certain ensemble, on en déduit une valeur de y et une seule. »

Il s'agit là d'un tournant dans le développement de l'analyse mathématique prise en tant qu'étude des modes de variation simultanée de nombres liés entre eux. En effet, jusqu'au XVIII^e siècle, on a pu se contenter d'une certaine notion de fonction, très ambiguë, car non séparée

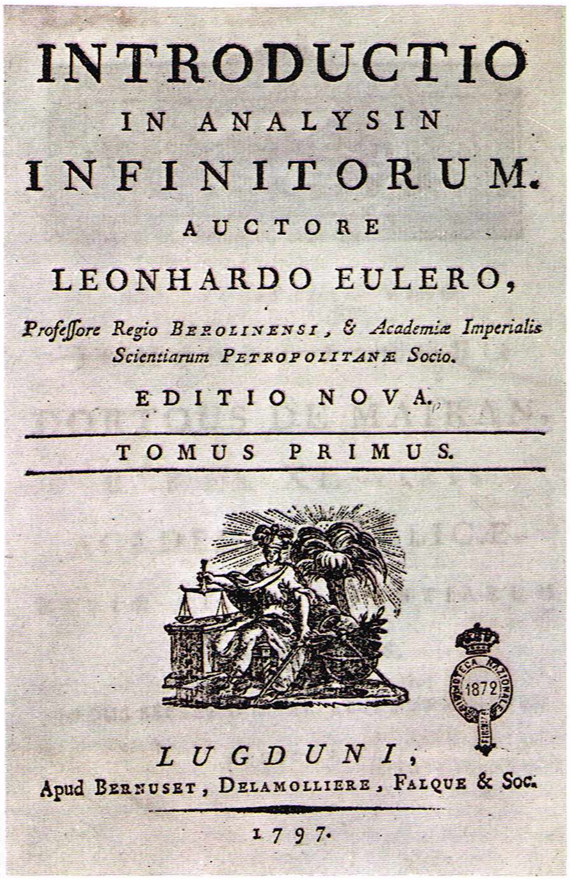
INTRODUCTIO IN ANALYSIN INFINITORUM.

AUCTORE LEONHARDO EULERO,

Professore Regio Berolinensi, & Academiæ Imperialis Scientiarum Petropolitanæ Socio.

EDITIO NOVA.

TOMUS PRIMUS.

LUGDUNI,

Apud Bernuset, Delamolliere, Falque & Soc.

1797.

Pineider

▶ *Frontispice de l'* « Introduction à l'analyse des infiniment petits » *de Leonhard Euler dans une édition, datée de 1797, de cette œuvre publiée pour la première fois en 1748.*

▶ *Page ci-contre en haut à gauche, figure 3 : représentation graphique correspondant à deux fonctions distinctes. En haut à droite, figure 6 :*

a, la fonction $y = \text{Arc}\cos\sqrt{1-t^2}$ *est définie et continue pour* $t \in [-1, +1]$;

b, la fonction $y = \begin{cases} -1 & \text{si } x < 0 \\ 0 & \text{si } x = 0 \\ +1 & \text{si } x > 0 \end{cases}$ *présente une discontinuité de première espèce en* $x = 0$;

c, la fonction $y = \sin\frac{1}{x}$ *présente une discontinuité de seconde espèce en* $x = 0$;

d, la fonction $y = \cos\frac{\pi}{x}$ *est définie et continue pour tout* $x \neq 0$; *on ne peut pas prolonger par continuité cette fonction en* $x = 0$.

d'un contexte analytique et incluant la continuité ; mais après Leonhard Euler (1707-1783), dès les travaux de Jean-Baptiste-Joseph Fourier (1768-1830), et surtout ceux d'Augustin-Louis Cauchy (1789-1857), il devint nécessaire de donner une définition intrinsèque à la notion de correspondance fonctionnelle.

Par le tableau suivant, on a cherché à exprimer la dépendance entre la température T d'ébullition de l'eau et la pression atmosphérique p :

p (mm de mercure)	300	400	500	600	700
T (°C)	75,8	83,0	88,7	93,5	97,7

Sur la première ligne sont reportées diverses valeurs de la pression et, sur la seconde — en regard sur chaque colonne — les valeurs correspondantes de la température. On peut donc dire que la température T est fonction de la pression p ; il est nécessaire, toutefois, d'ajouter quelques observations. Tout d'abord, on note que le tableau ne contient pas toutes les valeurs numériques que peut prendre la grandeur « pression ». En second lieu, on voit qu'à chaque valeur de la température, correspond une valeur bien déterminée de la pression ; on peut ainsi penser qu'il est possible d'échanger les rôles des deux lignes du tableau et de considérer la pression atmosphérique comme étant fonction de la température d'ébullition de l'eau.

Notons encore que, parmi les cas tabulés, la valeur de la température T = — 300 °C ne correspond à aucune valeur de la pression, non parce que, sur cette table, on ne peut lire la valeur — 300 °C, mais parce qu'une telle valeur de température n'est physiquement pas admissible (le zéro absolu étant proche de — 273 °C). Ceci éclaire le sens de l'expression « choisie dans un certain ensemble » utilisée dans la définition de G. Dirichlet pour le choix d'une valeur de la variable indépendante.

Définir une fonction signifie donc se donner la possibilité de connaître les valeurs prises par la variable qui dépend — selon une certaine correspondance — des valeurs prises par une autre variable, indépendante ; cela peut se faire par un tableau (la spécification n'est alors que partielle), ou par un graphique en considérant les deux variables comme les coordonnées cartésiennes d'un point du plan (l'avantage est alors d'obtenir une idée globale du comportement de la fonction donnée), soit encore analytiquement, quand cela est possible, lorsque la fonction peut admettre une ou plusieurs « formules » (*fig.* 1 et 2).

Le *domaine de définition* d'une fonction définie par une ou plusieurs « formules » est l'ensemble des valeurs de la variable dépendante pour lesquelles ces « formules » ont un sens. Ainsi, la somme des angles internes d'un polygone est fonction du nombre de côtés ; elle est donc définie seulement pour des valeurs entières et positives de la variable dépendante. La « formule »

$$y = \sqrt{x-2} + \sqrt{7-x}$$

n'a de sens (dans le champ réel) que pour $2 \leqslant x \leqslant 7$; le domaine de définition de cette fonction est donc l'intervalle fermé [2, 7].

On distingue souvent les *fonctions algébriques*, qui se calculent par des opérations rationnelles et des extractions de racines, et les *fonctions transcendantes*, qui sont les fonctions analytiques non algébriques ; parmi ces dernières, on peut citer les fonctions exponentielle, logarithme, trigonométriques directes, et bien d'autres encore. Cette classification n'est, bien sûr, pas exhaustive, et de nombreuses fonctions ne rentrent pas dans le cadre des fonctions analytiques, ainsi la fonction indicatrice des nombres irrationnels :

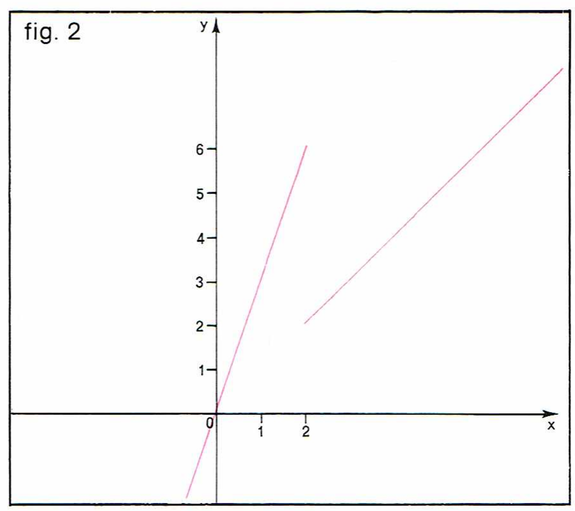

fig. 2

I.G.D.A.

▶ *Figure 2 : graphique de la fonction définie par* $y = 3x$ *pour* $x < 2$, $y = x$ *pour* $x > 2$.

$$\begin{cases} y = 1 & \text{si } x \notin \mathbb{Q} \\ y = 0 & \text{si } x \in \mathbb{Q} \end{cases}$$

Par la représentation graphique des fonctions, on peut faire ressortir une propriété de définition : le graphe d'une fonction n'est coupé par une parallèle quelconque à l'axe des ordonnées Oy qu'en, *au plus*, un point. La figure 3 montre ainsi que la courbe tracée correspond à autant de fonctions distinctes que d'arcs possédant la propriété ci-dessus, c'est-à-dire deux.

Ce sont les propriétés des nombres réels que l'on retrouve dans les caractéristiques de variation des fonctions : structure d'ordre, bornes d'intervalles, que l'on

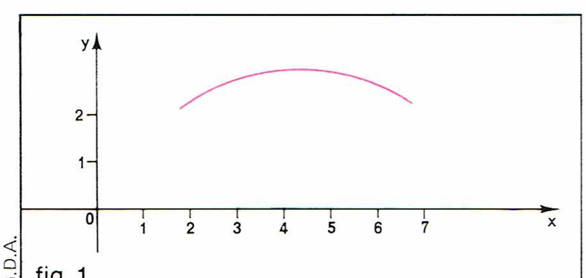

fig. 1

I.G.D.A.

▶ *Figure 1 : graphique de la fonction* $y = \sqrt{x-2} + \sqrt{7-x}$, *pour* $2 \leqslant x \leqslant 7$.

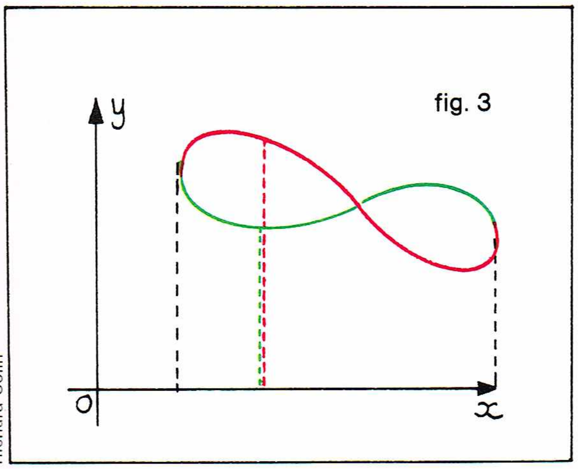

Richard Colin

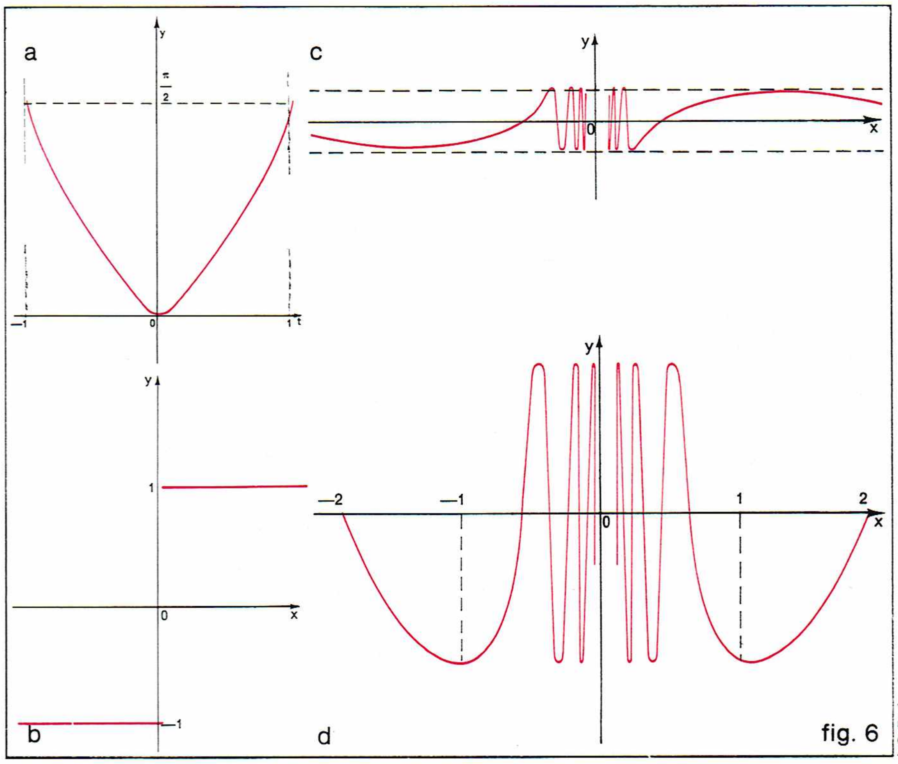

I.G.D.A.

traduit en termes de croissance et d'extrema. Dans ce qui suit, on notera $f(x)$ le nombre associé à la variable x par la correspondance ou fonction $x \mapsto f(x)$.

On dit qu'une fonction est *croissante* sur un domaine D, inclus dans le domaine de définition, si :

$$\forall x_1 \in D, x_2 \in D, x_1 \leqslant x_2 \Rightarrow f(x_1) \leqslant f(x_2).$$

Elle est dite *décroissante* sur D si :

$$\forall x_1 \in D, x_2 \in D, x_1 \leqslant x_2 \Rightarrow f(x_1) \geqslant f(x_2).$$

Elle est dite *monotone* sur D si elle est croissante ou décroissante sur D (*fig.* 4).

On dit qu'une fonction est *paire* si $f(x) = f(-x)$ pour tout $x \in D$, et qu'elle est *impaire* si $f(x) = -f(-x)$ pour tout $x \in D$ (*fig.* 5). La représentation graphique admet dans le premier cas Oy pour axe de symétrie, dans le second cas l'origine O pour centre de symétrie.

La notion de continuité

La topologie induite sur un ensemble par une métrique a permis de définir avec une grande netteté l'idée de *limite* et celle de *continuité* d'une fonction.

On dit que la fonction définie sur l'ensemble $E \subseteq \mathbb{R}$ admet la *limite* L lorsque x tend vers a si, à tout nombre $\varepsilon > 0$ aussi petit qu'on le désire, on peut associer un nombre η — dépendant de ε — tel que, lorsque $|x - a| < \eta$ et $x \in E$, alors $|f(x) - L| < \varepsilon$, ce que l'on écrit $\lim f(x) = L$. En particulier, la fonction est *continue* au point $a \in E$ si L existe et est égal à $f(a)$. On appelle *points de discontinuité* de la fonction les points du domaine de définition en lesquels elle n'est pas continue. Ceux-ci sont de trois types :

tout d'abord les *points à discontinuité éliminable*, par exemple l'origine pour la fonction définie par :

$$y = \sin x \quad \text{si } x \neq 0 \qquad \text{et} \qquad y = 2 \quad \text{si } x = 0$$

puisqu'il suffit de changer la valeur en $x = 0$ en posant $y = 0$ pour obtenir la continuité;

ensuite les *points de discontinuité de première espèce* pour lesquels existent une limite à droite L, une limite à gauche L', et tels que la valeur en ces points soit égale à $\frac{1}{2}(L + L')$; par exemple, la fonction définie par

$$y = \frac{\sqrt{x^2}}{x} \quad \text{si } x \neq 0 \qquad \text{et} \qquad y = 0 \quad \text{si } x = 0;$$

enfin, les *points de discontinuité de seconde espèce*, tels que, soit la limite à gauche, soit la limite à droite, soit les deux, n'existent pas ou bien soient infinies (*fig.* 6).

On peut rappeler qu'une condition nécessaire et suffisante pour que la fonction strictement monotone $x \mapsto f(x)$ définie sur l'intervalle $[a, b]$ soit continue sur cet intervalle, est que cette fonction prenne toutes les valeurs comprises entre $f(a)$ et $f(b)$. Ceci permet entre autres de définir les fonctions réciproques des fonctions

▼ *A gauche, figure 4 : en haut, graphiques de la fonction* y = a^x *:* 1, *pour* a > *1 ;* 2, *pour 0* < a < *1 ; en bas, graphiques de la fonction* y = *log*$_a$ *(x) ;* 3, *pour* a > *1 ;* 4, *pour 0* < a < *1. Les graphiques* 1 *et* 2 *sont ceux des fonctions croissantes, alors que les graphiques* 3 *et* 4 *sont ceux de fonctions décroissantes. A droite, figure 5 : a, un exemple de fonction paire,* y = *cos* x*; b, un autre exemple de fonction paire,* y = *3* x^2 *— 1 ; c, un exemple de* fonction impaire, y = *sin* x.

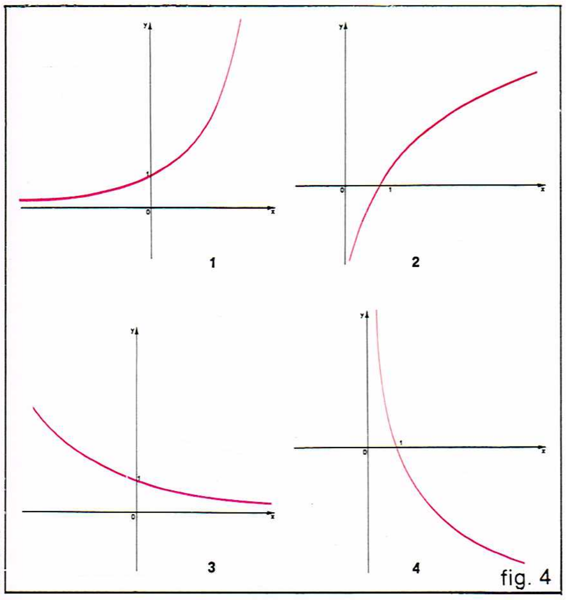

I.G.D.A.

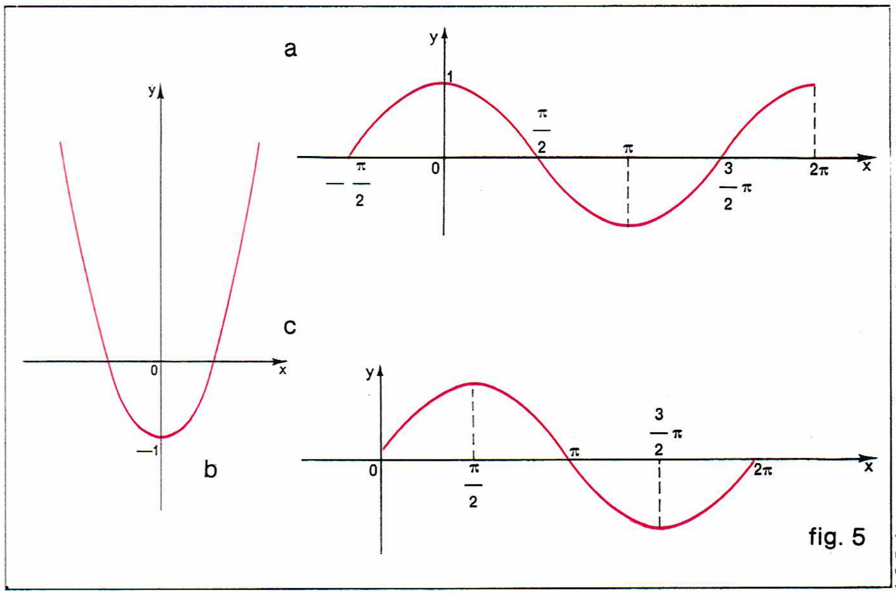

I.G.D.A.

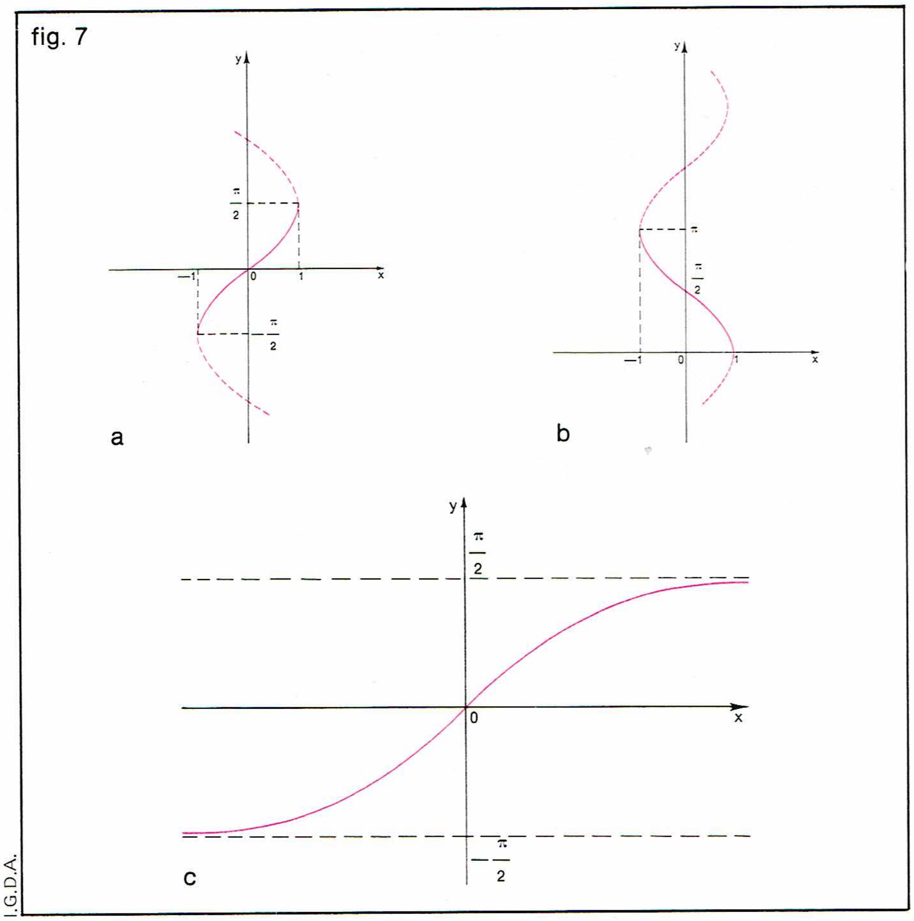

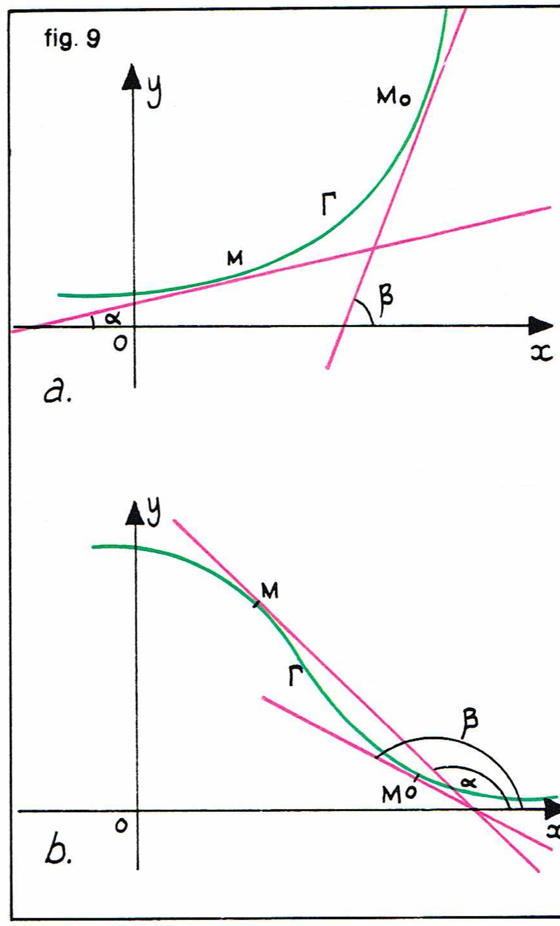

▲ ***A gauche, figure 7 :*** ***a, graphique de la fonction*** ***y = Arc sin x;*** ***b, celui de la fonction*** ***y = Arc cos x;*** ***c, celui de la fonction*** ***y = Arc tg x.*** ***A droite, figure 9*** ***représentant une fonction croissante et une fonction décroissante :*** ***a, la croissance est plus forte en M_0 qu'en M car tg β > tg α;*** ***b, la décroissance est plus forte en M qu'en M_0 car tg α > tg β.***

usuelles continues et strictement monotones sur un intervalle (*fig.* 7).

Citons parmi les principales propriétés des fonctions continues sur un intervalle I fermé borné de $\mathbb{R}$:

a — toute fonction réelle continue dans I est bornée dans I ;

b — toute fonction réelle continue dans I possède un minimum et un maximum dans I, qui sont effectivement atteints par la fonction ;

c — une fonction continue dans I ne peut y changer de signe que si elle s'y annule ;

d — toute fonction réelle, continue dans I, y est *uniformément continue*, c'est-à-dire que, pour tout $\varepsilon > 0$, il existe $\eta > 0$, ne dépendant *que de* ε, tel que, si x' et x'' sont des points de I tels que $|x' - x''| \leqslant \eta$, alors $|f(x') - f(x'')| \leqslant \varepsilon$.

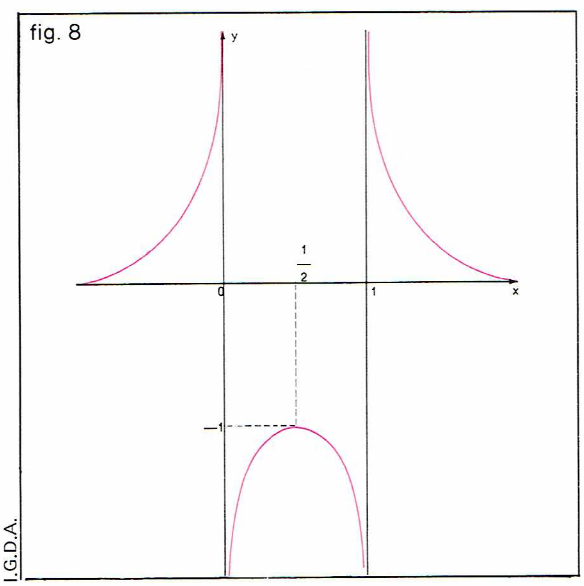

▶ ***Figure 8 :*** ***graphique de la fonction*** $y = \dfrac{1}{4x(x-1)}$ ***continue sur]0, 1[, mais non bornée.***

Les propriétés **a**, **b** et **d** ne sont plus vraies dès que I n'est pas fermé ou n'est pas borné (*fig.* 8).

Dérivées et primitives

L'idée même de la dérivée d'une fonction est très couramment répandue, puisque c'est en fait celle de vitesse d'un mouvement, ou bien celle de pente d'une route, ou même encore celle de moyenne. C'est une considération géométrique qui a permis de développer ce point, et par là même, de construire l'analyse mathématique ; on doit cette étape fondamentale au génial mathématicien allemand Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716).

Sur une courbe Γ parcourue par un mobile M (ou décrite par un point M) dans le sens des abscisses croissantes, on montera ou l'on descendra, aux alentours d'un point M_0, si la fonction représentée par Γ est croissante ou décroissante, et l'on constatera aisément que ce phénomène de montée ou de descente est d'autant plus accentué que la pente de la tangente Γ en M_0 est élevée en valeur absolue (*fig.* 9). De là vient donc l'idée de considérer non plus les cordes joignant deux points de Γ, mais la tangente au point fixe, dont la pente sera la limite — lorsqu'elle existe — de la pente de la corde M_0M lorsque M tend vers M_0 (*fig.* 10).

On appellera donc *dérivée* de la fonction $x \mapsto f(x)$ au point x_0 la limite éventuelle du rapport $\dfrac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$ lorsque x tend vers x_0, ce qui correspond bien à la notion usuelle de vitesse instantanée par rapport à celle de vitesse moyenne. Si cette limite existe, on dit que la fonction est *dérivable* en x_0 ; on note $f'(x_0)$ la valeur de celle-ci, ou encore $\dfrac{df}{dx}(x_0)$.

On montre que toute fonction dérivable est continue. La réciproque est inexacte : le mathématicien allemand Karl Weierstrass (1815-1897) a par exemple montré que la fonction définie par : $\sum_{n=0}^{\infty} a^n \cos \pi\, b^n x$ était continue et

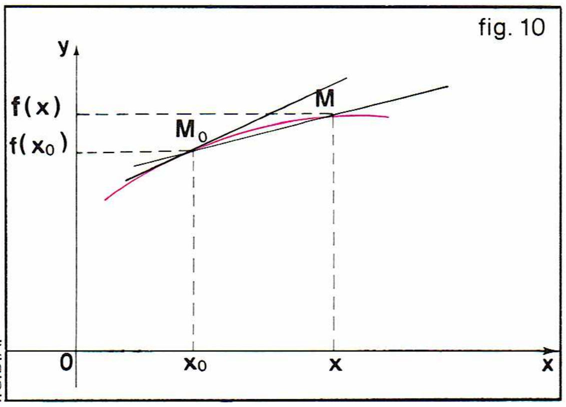

I.G.D.A.

non dérivable, si $0 < a < 1$ et $b \in \mathbb{N}$ tel que $ab > \frac{3\pi}{2} + 1$.

Lorsqu'une fonction $x \mapsto f(x)$ admet une dérivée (ou est dérivable) en tout point d'un domaine D, on peut donc associer à tout point $x \in D$ le nombre $f'(x)$ et définir ainsi une nouvelle fonction dite fonction dérivée $x \mapsto f'(x)$.

L'opération qui consiste, partant d'une fonction donnée $f(x)$, à en déduire la fonction dérivée $f'(x)$, s'appelle donc la *dérivation*, et le tableau 11 résume les résultats les plus notables. Cette opération peut être répétée à nouveau, en partant de la fonction $f'(x)$; on obtient ainsi la fonction *dérivée seconde* $x \mapsto f''(x)$, puis la fonction *dérivée troisième*, et ainsi de suite ; la *dérivée n-ième* $f^{(n)}(x)$ étant donc la dérivée de la dérivée d'ordre $(n-1)$, $f^{(n-1)}(x)$.

La dérivation des fonctions fait partie de la classe des outils fondamentaux de l'analyse mathématique, car elle va permettre de définir une méthode générale pour étudier localement (au voisinage d'un point) le comportement d'une fonction en la remplaçant — lorsque cela est nécessaire — par une fonction plus simple.

On a vu dans les considérations géométriques qui introduisaient l'idée de dérivée que, plus une fonction croissait ou décroissait, plus la pente de la tangente au graphe était élevée en valeur absolue. D'autre part, il est clair que cette pente est négative si la fonction décroît, positive si elle croît. On peut donc se poser la question de savoir ce qui se passe pour un extremum — minimum ou maximum — c'est-à-dire en un point où l'on passe d'un sens de variation à l'autre (il s'agit d'extrema relatifs) ; on retrouve alors que la dérivée est nulle en un tel point et change de signe.

Le **théorème de Rolle** ne fait que préciser ceci en disant qu'une fonction continue sur un intervalle fermé $[a, b]$, et dérivable sur $]a, b[$, telle que $f(a) = f(b)$, admet nécessairement un extremum (au moins) dans $[a, b]$ (*fig.* 12) : en effet, partant du point $(a, f(a))$ en croissant, pour revenir à la même hauteur il faudra « descendre » à un moment donné ; de même, si l'on décroît à partir de $(a, f(a))$, il faudra « remonter ». Si la corde qui joint les extrémités du graphe représentant $x \mapsto f(x)$ sur $[a, b]$ est horizontale, il en sera donc de même de la tangente au graphe en un point (au moins).

C'est cette présentation qui permet de voir que le **théorème des accroissements finis** est la généralisation du théorème de Rolle : si $f(x)$ est continu sur $[a, b]$, et dérivable sur $]a, b[$, alors il existe un point $c \in]a, b[$ tel que $f(b) - f(a) = (b - a) f'(c)$. En d'autres termes, il existe un point c où la tangente est parallèle à la corde joignant $(a, f(a))$ et $(b, f(b))$ (*fig.* 13), puisqu'en ce point $f'(c) = \frac{f(b) - f(a)}{b - a}$. Il suffit d'appliquer le théorème de Rolle à la fonction

$$F(x) = f(x) - f(a) - \frac{f(b) - f(a)}{b - a}(x - a)$$

qui est telle que $F(b) = F(a) = 0$, et l'on a donc un point $c \in]a, b[$ où $F'(c) = 0$, or

$$F'(c) = f'(c) - \frac{f(b) - f(a)}{b - a}$$

Lorsqu'on écrit la formule des accroissements finis sous la forme $f(b) = f(a) + (b - a) f'(c)$, on voit apparaître l'idée qui est exprimée par la *formule de Taylor* (Brook Taylor, 1685-1731, mathématicien anglais), qui consiste à approcher les valeurs d'une fonction autour d'un point a par un polynôme selon les puissances de la différence $(x - a)$; en effet, dans la formule des accroissements finis, en supposant la dérivée continue et b très voisin de a, alors $f'(b)$ est très voisin de $f'(a)$:

$$f'(b) = f'(a) + (b - a)\,\varepsilon,$$

où ε tend vers 0 lorsque $b \to a$. On obtient alors

$$f(b) = (b - a) f'(a) + (b - a)^2\,\varepsilon.$$

Il suffit alors de poursuivre ce procédé en l'appliquant aux dérivées successives tant qu'elles vérifient les hypothèses de départ. On obtient alors que, pour toute fonction $x \mapsto f(x)$ définie et continue sur $[a, b]$, dont les n premières dérivées existent et sont continues sur $]a, b[$, et $(n + 1)$ fois dérivable au point a, on peut écrire :

Tableau 11 - Dérivées usuelles

Fonction	Dérivée	Fonction	Dérivée
c^{te}	0	f + g	f' + g'
x^n	$n\,x^{n-1}$		
Log x	$\frac{1}{x}$	af	af'
sin ax	a cos ax	fg	f'g + fg'
cos ax	− a sin ax	$\frac{f}{g}$	$\frac{f'g - fg'}{g^2}$
tg ax	$\frac{a}{\cos^2 ax}$	f ∘ g	f'g'
e^{ax}	ae^{ax}	f^n	$n\,f^{n-1}f'$
Arc sin x	$\frac{1}{\sqrt{1 - x^2}}$	Log | f |	$\frac{f'}{f}$
Arc cos x	$\frac{-1}{\sqrt{1 - x^2}}$	e^f	$f'e^f$
Arc tg x	$\frac{1}{1 + x^2}$	sin f	f' cos f

▲ *A gauche, figure 10 :* ***représentation graphique*** *du* ***concept de dérivée.***
A droite, tableau 11 : ***dérivées des fonctions les plus usuelles*** *et* ***règles d'opérations sur les dérivées.***

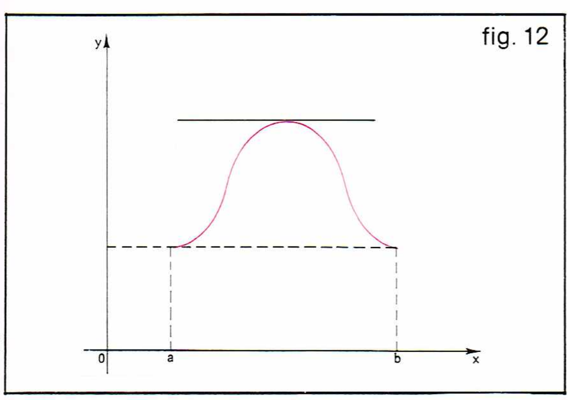

I.G.D.A.

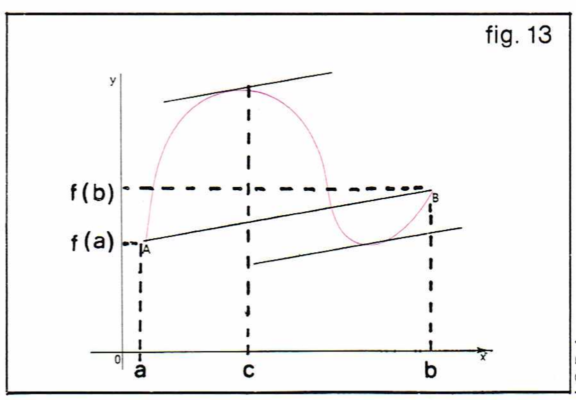

I.G.D.A.

◀ *A gauche, figure 12 :* ***interprétation graphique*** *du* **théorème de Rolle.**
A droite, figure 13 : ***interprétation graphique*** *du* **théorème des accroissements finis.**

Tableau 14 - Développement en série des fonctions analytiques usuelles

Fonction	Développement en série
e^x	$1+\frac{x}{1!}+\frac{x^2}{2!}+\frac{x^3}{3!}+\cdots+\frac{x^n}{n!}+\cdots$
$\sin x$	$x-\frac{x^3}{3!}+\frac{x^5}{5!}+\cdots+(-1)^n\frac{x^{2n+1}}{(2n+1)!}+\cdots$
$\cos x$	$1-\frac{x^2}{2!}+\frac{x^4}{4!}+\cdots+(-1)^n\frac{x^{2n}}{(2n)!}+\cdots$
$(1+x)^m$	$1+mx+\frac{m(m-1)}{2!}x^2+\cdots+\frac{m(m-1)\ldots(m-p+1)}{p!}x^p+\cdots$ si $\lvert x \rvert \leqslant 1$
$\text{Log}(1+x)$	$x-\frac{x^2}{2}+\frac{x^3}{3}-\frac{x^4}{4}+\cdots+(-1)^{n+1}\frac{x^n}{n}+\cdots$ si $x \in]-1,+1]$
$\text{Log}(1-x)$	$-\left(x+\frac{x^2}{2}+\frac{x^3}{3}+\cdots+\frac{x^n}{n}+\cdots\right)$ si $x \in [-1,+1[$
$\text{Arc sin}\, x$	$x+\frac{x^3}{2.3}+\frac{1.3\,x^5}{2.4.5}+\frac{1.3.5\,x^7}{2.4.6.7}+\cdots+\frac{1.3.\ldots(2n-1)x^{2n+1}}{2.4.6.\ldots(2n)(2n+1)}+\cdots$ si $\lvert x \rvert < 1$
$\text{Arc tg}\, x$	$x-\frac{x^3}{3}+\frac{x^5}{5}-\frac{x^7}{7}+\cdots+(-1)^n\frac{x^{2n+1}}{2n+1}+\cdots$ si $\lvert x \rvert < 1$

Tableau 15 - Recherche de primitives

Fonction	Primitive	Fonction	Primitive	Fonction	Primitive
$(ax+b)^p$	$\frac{1}{a(p+1)}(ax+b)^{p+1}$ si $p \neq -1$	$\sqrt{a^2+x^2}$	$\frac{1}{2}\left[x\sqrt{a^2+x^2}+a^2\,\text{Log}(x+\sqrt{a^2+x^2})\right]$	$\sin^n ax \cos ax$	$\frac{1}{a(n+1)}\sin^{n+1}ax$ si $n \neq -1$
$\frac{1}{ax+b}$	$\frac{1}{a}\text{Log}(ax+b)$	$x\sqrt{a^2+x^2}$	$\frac{1}{3}\sqrt{(a^2+x^2)^3}$	$\cos^n ax \sin ax$	$\frac{-1}{a(n+1)}\cos^{n+1}ax$ si $n \neq -1$
$\frac{ax+b}{cx+d}$	$\frac{ax}{c}+\frac{bc-ad}{c^2}\text{Log}(cx+d)$	$\sqrt{a^2-x^2}$	$\frac{1}{2}\left[x\sqrt{a^2-x^2}+a^2\,\text{Arc sin}\frac{x}{a}\right]$	$\text{tg}\, ax$	$-\frac{1}{a}\text{Log}\cos ax$
$\frac{1}{ax^2+bx+c}$	$\frac{2}{\sqrt{4ac-b^2}}\text{Arc tg}\frac{2ax+b}{\sqrt{4ac-b^2}}$ si $4ac-b^2>0$	$\frac{1}{\sqrt{a^2-x^2}}$	$\text{Arc sin}\frac{x}{a}$	e^{ax}	$\frac{1}{a}e^{ax}$
	$\frac{-2}{\sqrt{b^2-4ac}}\text{Arg th}\frac{2ax+b}{\sqrt{b^2-4ac}}$ si $b^2-4ac>0$	$\frac{1}{(ax^2+bx+c)^{3/2}}$	$\frac{2(2ax+b)}{(4ac-b^2)\sqrt{ax^2+bx+c}}$	xe^{ax}	$\frac{e^{ax}}{a^2}(ax-1)$
$\frac{1}{a^2+x^2}$	$\frac{1}{a}\text{Arc tg}\frac{x}{a}$	$\sqrt[n]{ax+b}$	$\frac{n(ax+b)}{(n+1)a}\sqrt[n]{ax+b}$	$\text{Log}\, x$	$x\,\text{Log}\, x - x$
$\frac{1}{a^2-x^2}$	$\frac{1}{2a}\text{Arg th}\frac{x}{a}$	$\sin ax$	$-\frac{1}{a}\cos ax$	$(\text{Log}\, x)^2$	$x(\text{Log}\, x)^2-2x\,\text{Log}\, x+2x$
$\frac{1}{\sqrt{ax+b}}$	$\frac{2}{a}\sqrt{ax+b}$	$\sin^2 ax$	$\frac{1}{2}x-\frac{1}{4a}\sin 2ax$	$\frac{(\text{Log}\, x)^n}{x}$	$\frac{(\text{Log}\, x)^{n+1}}{n+1}$ si $n \neq -1$
$\frac{x}{\sqrt{ax+b}}$	$\frac{2(ax-2b)}{3a^2}\sqrt{ax+b}$	$x \sin ax$	$\frac{\sin ax}{a^2}-\frac{x\cos ax}{a}$	$x^m\,\text{Log}\, x$	$x^{m+1}\left[\frac{\text{Log}\, x}{m+1}-\frac{1}{(m+1)^2}\right]$ si $m \neq -1$
$\sqrt{(ax+b)^n}$	$\frac{2\sqrt{(ax+b)^{n+2}}}{a(n+2)}$	$\cos ax$	$\frac{1}{a}\sin ax$	$\sin(\text{Log}\, x)$	$\frac{x}{2}(\sin \text{Log}\, x - \cos \text{Log}\, x)$
$\frac{x}{a^4+x^4}$	$\frac{1}{2a^2}\text{Arc tg}\frac{x^2}{a^2}$	$\sin ax \cos ax$	$\frac{1}{2a}\sin^2 ax$	$e^{ax}\sin bx$	$\frac{e^{ax}}{a^2+b^2}(a\sin bx - b\cos bx)$
$\frac{x}{a^4-x^4}$	$\frac{1}{4a^3}\text{Log}\frac{a^2+x^2}{a^2-x^2}$	$\frac{1}{\sin ax \cos ax}$	$\frac{1}{a}\text{Log tg}\, ax$	$\text{Arc sin}\frac{x}{a}$	$x\,\text{Arc sin}\frac{x}{a}+\sqrt{a^2-x^2}$

$$f(b) = f(a) + \frac{(b-a)}{1!}f'(a) + \frac{(b-a)^2}{2!}f''(a) + \ldots + \frac{(b-a)^n}{n!}f^{(n)}(a) + \frac{(b-a)^{n+1}}{(n+1)!}\left[f^{(n+1)}(a) + \varepsilon\right]$$

où $\varepsilon \to 0$ lorsque $b \to a$.

La même formule où l'on pose $x = b$ et $a = 0$ est appelée *formule de MacLaurin* (Colin MacLaurin, 1698-1746, mathématicien écossais) et pose le problème suivant : si la fonction f est indéfiniment dérivable, peut-on poursuivre le développement du second membre à un nombre infini de termes (afin d'obtenir une excellente précision d'approximation) ? En effet, la série alors obtenue est-elle convergente, et sa somme est-elle bien égale au premier membre ? La réponse est négative ; seule une certaine catégorie de fonctions, dites alors *analytiques*, possèdent cette propriété (voir *Séries* et *Fonctions de variable complexe*). Le tableau 14 donne les exemples les plus courants de ces fonctions et leur développement en série entière.

Le problème inverse de la dérivation des fonctions est celui de la recherche des primitives. On dit que la fonction F est une *primitive* de la fonction f sur l'intervalle $[a, b]$ si, en tout point de $[a, b]$, F est dérivable, et sa dérivée égale à f. On parle d'une des primitives de la fonction f, car, si F est une primitive, alors $F + k$, où k est constant, vérifie les mêmes propriétés. Il existe donc une infinité de primitives d'une fonction dès lors qu'il en existe une. On appelle alors *intégrale indéfinie* de la fonction $x \mapsto f(x)$ sur $[a, b]$ l'ensemble des primitives de la fonction sur $[a, b]$, et on note $\int f(x)\,dx$; le signe $\int$ est dit signe d'intégration (ou signe somme).

L'intégration est toutefois à séparer sur deux points de la dérivation :

— une fonction qui admet des primitives (on montre qu'il suffit qu'elle soit continue) n'est pas toujours dérivable ;

— le résultat de l'intégration n'est pas déterminé de manière unique.

Sur le tableau 15, on a figuré les résultats les plus courants de la recherche de primitives (que l'on pourra rapprocher du tableau 11).

Les liens entre cette notion, celle d'aire et celle d'intégrale définie sont développés plus loin, sous le titre *Intégration des fonctions*. Rappelons simplement que l'on appelle figure plane simple une réunion finie de triangles d'un même plan et que ces figures possèdent les propriétés de monotonie, additivité et invariance (voir *Géométrie*).

Pour une figure plane F quelconque, on considère l'ensemble des figures simples contenues dans F, soit $\mathcal{E}_1$, et l'ensemble des figures simples contenant F, soit $\mathcal{E}_2$. S'il existe, pour tout nombre ε aussi petit qu'on le désire, un élément de $\mathcal{E}_1$ et un élément de $\mathcal{E}_2$ tels que la différence de leurs surfaces soit inférieure à ε, on dit que la figure F est *mesurable au sens de Jordan ;* en posant alors $\mathcal{A}_1$, ensemble des nombres, surfaces des éléments de $\mathcal{E}_1$, et $\mathcal{A}_2$ ensemble des nombres, surfaces des éléments de $\mathcal{E}_2$, la surface ou aire de F sera le nombre séparant $\mathcal{A}_1$ et $\mathcal{A}_2$. L'aire d'une surface (*fig.* 16) définie par un arc de courbe est alors définie par la limite — lorsqu'elle existe — des sommes de Darboux :

$$\sum_{i=1}^{n-1}(x_{i+1} - x_i)\,f(x_i) \quad \text{et} \quad \sum_{i=1}^{n-1}(x_{i+1} - x_i)\,f(x_{i+1})$$

lorsque $n \to \infty$; ces sommes représentent la surface des rectangles inférieurs et supérieurs à la courbe. Lorsque la surface est mesurable, alors la limite existe et se note $\int_a^b f(x)\,dx$ (intégrale définie de $f(x)$ sur l'intervalle $[a, b]$).

On peut alors montrer qu'en maintenant a fixe, et en faisant varier b — qu'on pose égal à une variable t — l'aire $\int_a^t f(x)\,dx = S(t)$, si elle existe en tout point t d'un intervalle I, est alors une fonction dérivable de t, et l'on a $S'(t) = f(t)$. En d'autres termes, toute fonction continue $f(x)$ définie sur un intervalle $[a, b]$ admet une primitive sur cet intervalle, qui n'est autre que

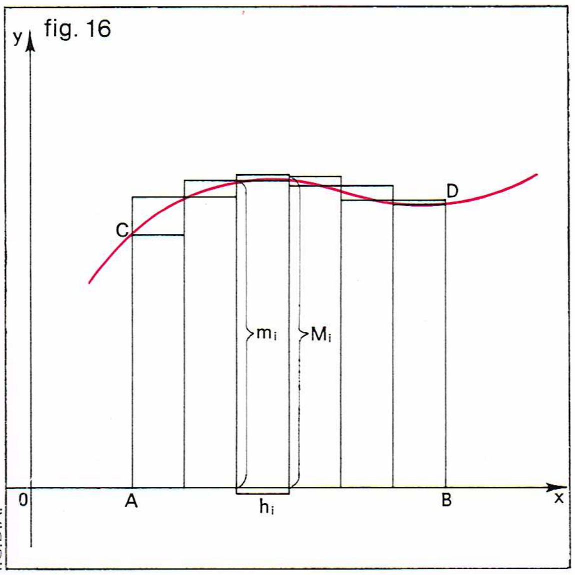

$\int_c^x f(t)\,dt$, où c est un point quelconque de $[a, b]$.

Il est alors aisé d'en déduire que, si F désigne une primitive de f sur l'intervalle $[a, b]$, on a

$$\int_a^b f(x)\,dx = F(b) - F(a),$$

formule permettant la réalisation des calculs.

La restriction sévère que l'on a mise à ce développement en ne formulant de résultats que pour les fonctions continues est levée dans le paragraphe *Intégration des fonctions.*

Fonctions de plusieurs variables

L'extension la plus naturelle des notions de calcul différentiel et intégral introduites pour les fonctions réelles d'une variable réelle est obtenue par l'étude des fonctions réelles de plusieurs variables réelles, c'est-à-dire des applications $f : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$, que l'on représente par l'écriture $y = f(x_1, x_2, ..., x_n)$, où chaque x_i est une variable réelle ; nous noterons parfois X le point $(x_1, x_2, ..., x_n) \in \mathbb{R}^n$, et donc $y = f(X)$. Il n'est pas nécessaire de développer plus particulièrement pour les fonctions de plusieurs variables les notions déjà dégagées de fonction et de domaine de définitions. Dans ce qui suit, on suppose que les variables $x_1, x_2, ..., x_n$ sont indépendantes, c'est-à-dire qu'il n'existe pas de correspondance présupposée entre elles.

Les topologies que l'on peut déterminer sur $\mathbb{R}^n$ permettent de définir les notions de limite et de continuité ; par exemple, soit $y = f(X)$ une fonction définie sur un ensemble $E \subseteq \mathbb{R}^n$ et soit $X^0 = (x_1^0, x^0, ..., x_n^0)$ un point non isolé de E, on dit que $f(X)$ est *continue en* X^0 si, à tout nombre $\varepsilon > 0$ arbitraire, on peut associer un nombre $\eta > 0$ — en général η dépend de ε — tel que $|f(X) - f(X^0)| < \varepsilon$ dès que $X \in E$ est à distance de X^0 inférieure à η.

On définit aussi la continuité partielle par rapport à l'une des n variables réelles x_i en supposant fixes — donc constantes — les $(n-1)$ autres variables ; y est à ce moment fonction d'une seule variable réelle. La continuité par rapport à l'ensemble des n variables réelles est une notion très forte qui inclut chaque continuité partielle ; tandis qu'une fonction continue par rapport à chaque variable n'est pas nécessairement continue « globalement », cette dernière notion entraînant, en fait, la continuité selon n'importe quelle direction de $\mathbb{R}^n$. Par exemple, la fonction définie sur $\mathbb{R}^2$ par $y = \dfrac{x_1 x_2}{x_1^2 + x_1^2}$ si $(x_1, x_2) \neq (0,0)$ et $y = 0$ si $(x_1, x_2) = (0, 0)$ est continue par rapport à x_1 et par rapport à x_2, mais n'est pas continue le long de la bissectrice $x_1 = x_2$ puisque alors $y = \dfrac{1}{2}$ si $(x_1, x_2) \neq (0, 0)$, tandis que $y = 0$ si $(x_1, x_2) = (0, 0)$; cette fonction n'est donc pas continue à l'origine.

L'influence de chaque variable sur la variation de la fonction est mesurée par la *dérivée partielle de* f *par rapport à cette variable :* on appelle dérivée partielle de f par rapport à la variable x_k^0, au point X^0, la dérivée de la fonction de x_k, en x_k^0, obtenue en fixant les autres variables à leur valeur au point X^0 ; on note le résultat $\left(\dfrac{\partial f}{\partial x_k}\right)_{X^0}$, ce symbole n'étant évidemment pas une fraction.

Plus généralement, on appelle dérivée le long de la direction V (V étant un vecteur unitaire issu du point X^0) la limite du rapport $\dfrac{f(X^0 + hV) - f(X^0)}{h}$ lorsque $h \in \mathbb{R}$ tend vers zéro de telle sorte que $X^0 + hV$ reste dans le domaine de définition de f. Il faut noter que, contrairement à ce qui se passe dans le cas des fonctions d'une variable réelle, l'existence des dérivées partielles n'entraîne pas la continuité ; l'existence de la dérivée partielle par rapport à une variable entraîne la continuité partielle par rapport à celle-ci. Toutefois, une propriété plus riche, la différentiabilité, entraîne la continuité et la dérivabilité le long de n'importe quelle direction. La fonction $y = f(x)$ est *différentiable* au point X^0 du domaine de définition E s'il existe un vecteur $P = (p_1, ..., p_n) \in \mathbb{R}^n$ — dépendant de f et de X^0 — vérifiant l'égalité

$$f(X^0 + W) - f(X^0) = \sum_{i=1}^{n} p_i w_i + \varepsilon(W) \cdot \|W\|$$

où $\varepsilon(W)$ est une fonction réelle tendant vers 0 lorsque $\|W\| = (w_1^2 + ... + w_n^2)^{1/2} \to 0)$ pour tout vecteur

$$W = (w_1, ..., w_n) \in \mathbb{R}^n \text{ tel que } X^0 + W \in E.$$

L'expression $df = \sum_{i=1}^{n} p_i w_i$ s'appelle la différentielle de f en X^0 pour l'accroissement W. Le vecteur P s'appelle le *gradient* de f en X^0 et se note grad $_{X^0} f$.

Toute fonction différentiable en un point X^0 est continue en ce point et y admet des dérivées partielles finies selon $\left(\dfrac{\partial f}{\partial x_i}\right)_{X^0} = p_i$ pour tout i ; par contre, la continuité en un point X^0 et l'existence de dérivées partielles finies en ce point n'entraînent pas la différentiabilité de la fonction en X^0 ; il s'agit d'un concept plus fort que l'on retrouve pour les fonctions de variable complexe avec la notion d'holomorphie. On convient de noter dx_i au lieu de w_i et la différentielle s'écrit donc :

$$df = \frac{\partial f}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} dx_2 + ... + \frac{\partial f}{\partial x_n} dx_n$$

Considérons une fonction $z = f(x, y)$ définie et différentiable sur un ensemble $E \subseteq \mathbb{R}^2$. On peut interpréter le couple (x, y) comme un point du plan $(x, y, 0)$ de $\mathbb{R}^3$; les points $(x, y, f(x, y))$ de $\mathbb{R}^3$ forment alors la surface représentative de la fonction. L'accroissement Δz de la fonction résultant du passage de (x, y) à $(x + dx, y + dy)$ s'écarte de la différentielle par la quantité $\varepsilon(W) \cdot \|W\|$ où $\lim_{\|W\| \to 0} \varepsilon(W) = 0$, qui est donc négligeable par rapport à df (sauf lorsque $df = 0$). Ceci signifie géométriquement qu'il est — sauf exceptions — possible d'approcher la surface représentant la fonction au voisinage d'un point par le plan tangent à cette surface en ce point *(fig.* 16 *bis).*

Lorsque la fonction $f(X)$ admet des dérivées partielles finies en tout point $X \in E$, chacune de celles-ci est à son tour une fonction de $X = (x_1, ..., x_n)$ définie sur E. Ceci conduit à la notion de *dérivée partielle seconde ;* par exemple, supposons que chaque $\dfrac{\partial f}{\partial x_i}$ $(i = 1, 2, ..., n)$ soit dérivable par rapport à tout x_k, on obtiendra les dérivées du second ordre :

$$\frac{\partial}{\partial x_1}\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right) = \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2}; \quad \frac{\partial}{\partial x_2}\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right) = \frac{\partial^2 f}{\partial x_2\, \partial x_1};$$

$$..., \frac{\partial}{\partial x_n}\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right) = \frac{\partial^2 f}{\partial x_n\, \partial x_1};$$

et aussi $\dfrac{\partial}{\partial x_j}\left(\dfrac{\partial f}{\partial x_k}\right) = \dfrac{\partial^2 f}{\partial x_j\, \partial x_k}$.

◄ ***Page ci-contre en haut, tableau 14 : développement en série des fonctions analytiques usuelles.***

◄ ***Figure 16 : interprétation graphique du concept d'intégrale définie : recherche de l'aire du trapèze curviligne ABDC.***

◄ ***Page ci-contre en bas, tableau 15 : recherche de primitives.***

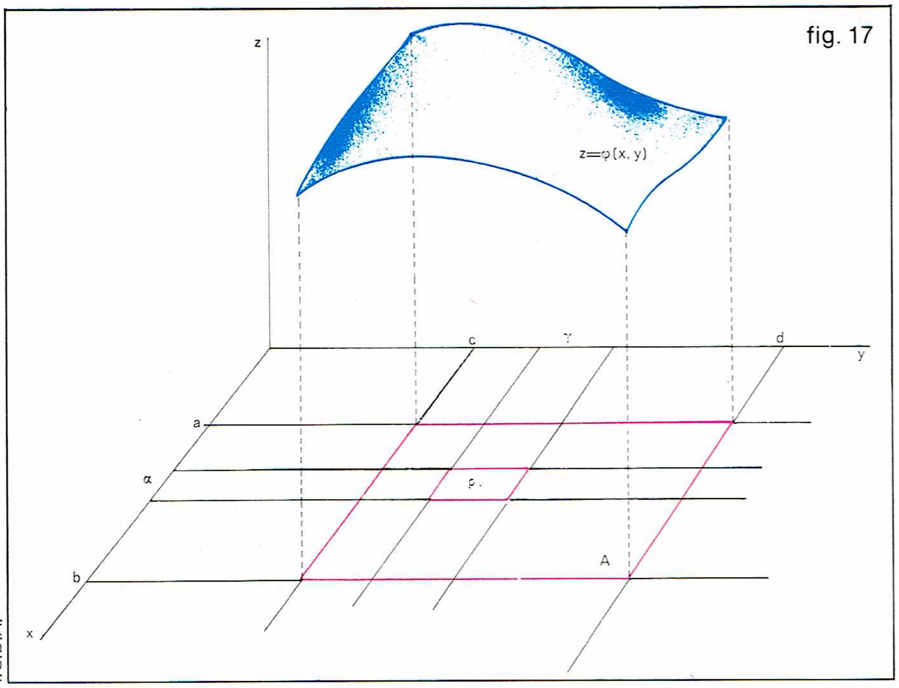

I.G.D.A.

▲ ***Figure 17 :* décomposition d'un rectangle A en rectangles partiels de surface ρ_{ik}, pour l'intégration de la fonction z = φ (x, y).**

On pourrait donc être tenté de conclure à l'existence de $A_n^2 = n\,(n-1)$ dérivées du second ordre.

Un résultat classique connu sous le nom de **théorème de Schwartz** montre que, si $\dfrac{\partial^2 f}{\partial x_i\,\partial x_j}$ et $\dfrac{\partial^2 f}{\partial x_j\,\partial x_i}$ existent et sont finies dans un voisinage de X^0 et sont continues en X^0, alors

$$\left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i\,\partial x_j}\right)_{X^0} = \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_j\,\partial x_i}\right)_{X^0}$$

De façon analogue, on définirait les *dérivées du troisième ordre*, par exemple $\dfrac{\partial^3 f}{\partial x_1\,\partial x_2\,\partial x_3}$, $\dfrac{\partial^3 f}{\partial x_2\,\partial x_1^2}$, etc., ou *d'ordre encore supérieur*, auxquelles on peut étendre le théorème d'interversion de l'ordre des dérivations sous les hypothèses vues ci-dessus ; par exemple

$$\frac{\partial^3 f}{\partial x_1^2\,\partial x_2} = \frac{\partial^3 f}{\partial x_2\,\partial x_1^2}$$

De même, on définira la *différentielle seconde, troisième, ..., n-ième* de *f* ; par exemple, pour une fonction *f* (*x*, *y*) admettant des dérivées secondes continues :

$$d^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(dx)^2 + 2\,\frac{\partial^2 f}{\partial x\,\partial y}\,dx\,dy + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}(dy)^2.$$

Il est alors possible de généraliser l'approximation de l'accroissement de *f* par sa différentielle en montrant, sous des hypothèses de régularité pour la fonction, la formule de Taylor à plusieurs variables, à l'ordre *k* :

$$f\,(X^0 + W) - f\,(X^0) = df + \frac{1}{2!}\,d^2 f + \ldots$$

$$+ \frac{1}{(k-1)!}\,d^{k-1} f + \frac{1}{k!}\,(d^k f)_{X^0 + \theta W},\ \text{où } \theta \in \,]0,\ 1[$$

(il est à noter que chacune des expressions $d^m f$ est en fait un polynôme homogène de degré *m* par rapport aux variables $w_1, w_2, \ldots, w_n$).

Dans de nombreux problèmes existe un lien de dépendance entre variables d'une même fonction ; par exemple, si l'on se donne deux variables *x* et *y* et la fonction $\varphi\,(x, y) = 8\,y^3 + 2\,xy^2 - x^2y - x^3$, il suffit d'assujettir $\varphi\,(x, y)$ à être nul pour créer un tel lien entre *x* et *y*, que l'on dit être implicite. Géométriquement, ceci conduit à dire que l'on ne considérera pas la surface $z = \varphi\,(x, y)$ mais la courbe obtenue sur le plan $z = 0$ par intersection ; on peut donc se demander s'il existe une correspondance qui, à tout *x* choisi dans un certain intervalle I, associe un unique $y = y\,(x)$ tel que $\varphi\,(x, y\,(x)) = 0$ pour tout $x \in$ I. Ainsi, dans notre exemple, on peut voir que les couples (*x*, *y*) tels que $y = \dfrac{x}{2}$ vérifient $\varphi\,(x, y) = 0$.

Sans chercher à donner une forme *explicite* de cette relation, le théorème suivant précise la fonction implicite par ses propriétés : soit $\varphi\,(x, y)$ définie sur le rectangle $x_0 - a \leqslant x \leqslant x_0 + a$, $y_0 - b \leqslant y \leqslant y_0 + b$, continue sur ce rectangle et y admettant des dérivées partielles $\dfrac{\partial \varphi}{\partial x}$ et $\dfrac{\partial \varphi}{\partial y}$ continues, avec $\dfrac{\partial \varphi}{\partial y} \neq 0$ en tout point. Si

$$\varphi\,(x_0, y_0) = 0,$$

alors il existe un intervalle ouvert $x_0 - \alpha < x < x_0 + \alpha$, avec $\alpha \leqslant a$, et une fonction *unique* $y = f\,(x)$ définie sur cet intervalle telle que $y_0 = f\,(x_0)$, $\varphi\,(x, f\,(x)) = 0$ pour tout $x \in \,]x_0 - \alpha,\ x_0 + \alpha[$, qui soit continue et dérivable ; la dérivée de cette fonction est alors donnée par :

$$f'\,(x) = -\,\frac{\dfrac{\partial \varphi}{\partial x}}{\dfrac{\partial \varphi}{\partial y}}$$

L'*intégration* des fonctions de plusieurs variables généralise la notion d'intégrale définie $\int_a^b f\,(x)\,dx$ mais peut être replacée dans le cadre général de la « mesure » (voir *Intégration des fonctions*). Par exemple, soit $z = \varphi\,(x, y)$ une fonction de deux variables définies sur le rectangle $A = [a, b] \times [c, d]$; en partageant le segment $[a, b]$ à l'aide des points α_i et le segment $[c, d]$ à l'aide des points γ_k, on découpe le rectangle R en petits rectangles de surface ρ_{ik}. On peut alors considérer (*fig.* 17) les parallélépipèdes dont les bases sont ces petits rectangles, et limités par la surface représentant $z = \varphi\,(x, y)$, soit au point le plus bas, soit au point le plus haut ; la somme de leurs volumes, lorsqu'elle a une limite pour une surface ρ_{ik} de plus en plus petite, définira alors, par cette limite, la valeur de l'intégrale de $\varphi\,(x, y)$ sur le domaine A : $\iint_A \varphi\,(x, y)\,dxdy$. Ceci peut évidemment se généraliser à un domaine A quelconque, mais mesurable (au sens de Jordan). Dans le même ordre d'idée, on peut définir de façon analogue les intégrales triples

$$\iiint_V \varphi\,(x, y, z)\,dxdydz,$$

ou multiples en général

$$\iint \ldots \int_E \varphi\,(x_1, x_2, \ldots, x_n)\,dx_1\,dx_2 \ldots dx_n.$$

Le calcul des *intégrales doubles* (ce qui se généralise avec *intégrales multiples*) se fait par le **théorème de Fubini** qui permet de se ramener à celui de deux intégrales relatives chacune à une seule variable. Ainsi, dans le cas d'un domaine rectangle $A = [a, b] \times [c, d]$, si $\iint_A \varphi\,(x, y)\,dxdy$ existe, on a :

$$\iint_A \varphi\,(x, y)\,dxdy = \int_c^d dy \int_a^b \varphi\,(x, y)\,dx = \int_a^b dx \int_c^d \varphi\,(x, y)\,dy$$

On considère donc d'abord φ comme fonction de *x*, on l'intègre sur [*a*, *b*] et le résultat obtenu qui dépend de *y*, soit $\psi\,(y)$, est intégré sur [*c*, *d*] (la seconde égalité procède en sens inverse). Dans le cas d'un domaine C quelconque, on établit un résultat analogue :

$$\iint_C \varphi\,(x, y)\,dxdy = \int_c^d dy \int_{\alpha(y)}^{\beta(y)} \varphi\,(x, y)\,dx = \int_a^b dx \int_{\gamma(x)}^{\delta(x)} \varphi\,(x, y)\,dy,$$

où les intervalles d'intégration ne sont plus fixes mais dépendent de la frontière de C (*fig.* 18).

Ainsi, le calcul de $\iint_C (x + y)\,dxdy$, où C est la partie du premier quadrant comprise entre les courbes $x \mapsto e^x$, $x \mapsto e^{-x}$ et la droite $x = 2$ (*fig.* 19), donne :

$$\iint_C (x + y)\,dxdy = \int_0^2 dx \int_{e^{-x}}^{e^x} (x + y)\,dy =$$

$$\int_0^2 \left(xe^x + \frac{1}{2}\,e^{2x} - xe^{-x} - \frac{1}{2}\,e^{-2x}\right) dx =$$

$$e^2 + 3\,e^{-2} + \frac{1}{4}\,(e^4 + e^{-4}) - \frac{1}{2} \# 20{,}96.$$

Le calcul intégral se généralise encore avec l'introduction des intégrales de surface, de volume, etc., ou intégrales vectorielles, que l'on traite plus aisément par l'outil des formes différentielles, aspect particulièrement riche du calcul différentiel sur les espaces de Banach où la notion de dérivée est remplacée par celle d'application linéaire tangente : on peut ainsi traiter l'ensemble des problèmes — quel que soit le nombre de variables — dans un cadre global.

Intégration des fonctions

La mesure

Certainement l'un des aspects les plus connus de l'analyse mathématique, la *théorie de l'intégration* a connu avec la *théorie de la mesure* (et ses prolongements en probabilités) un développement exceptionnel. Une première impression pourrait la faire paraître bien théorique, et surtout bien éloignée des soucis des mathématiciens de l'Antiquité, par exemple. On peut essayer de remédier à cette apparence, car, bien qu'il s'agisse en fait d'une théorie délicate, et dont les méthodes sont difficiles à utiliser, il est possible de mettre en valeur les concepts de base et les raisons qui ont poussé aux diverses généralisations successives que l'on peut recenser depuis Eudoxe (vers 406-vers 355 avant J.-C.) jusqu'à H. Lebesgue (1875-1941), ou même Daniell (1889-1946).

Le but poursuivi est, comme son nom l'indique, de construire un outil théorique permettant de « *mesurer* », et c'est encore une fois un problème de géométrie que l'on trouve à la source de cette démarche. Les formules donnant la surface d'un triangle, d'un quadrilatère, etc., constituent le support théorique de la mesure (d'arpentage, par exemple). Mais l'extension de nos connaissances entraîne, bien entendu, à chercher des possibilités de calcul pour des surfaces moins simples, planes d'abord, puis gauches. C'est donc bien un problème de *mesure d'ensembles* que l'on veut résoudre. Par conséquent, il s'agit de définir les propriétés que l'on peut juger nécessaires à une telle opération et les ensembles sur lesquels on pense effectuer cette mesure. Sur le premier point, on cherche à faire correspondre l'addition (comme pour les aires) des mesures d'ensembles à leur réunion disjointe (*fig.* 20) ; et d'autre part, on cherche à rendre cette

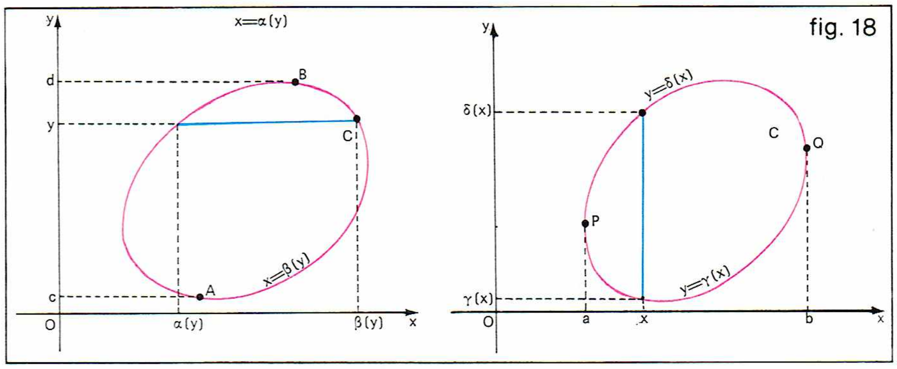

I.G.D.A.

▲◄ ***En haut, figure 18 :** sur chaque dessin, la courbe C est partagée en 2 arcs correspondant à 2 fonctions distinctes, soit de x, soit de y, et qui donnent les limites d'intégration selon l'ordre d'intégration choisi. **A gauche, figure 19 :** domaine D {(x, y) ∈ $\mathbb{R}^2$ tels que $e^{-x} \leqslant y \leqslant e^x$ et $0 \leqslant x \leqslant 2$}.*

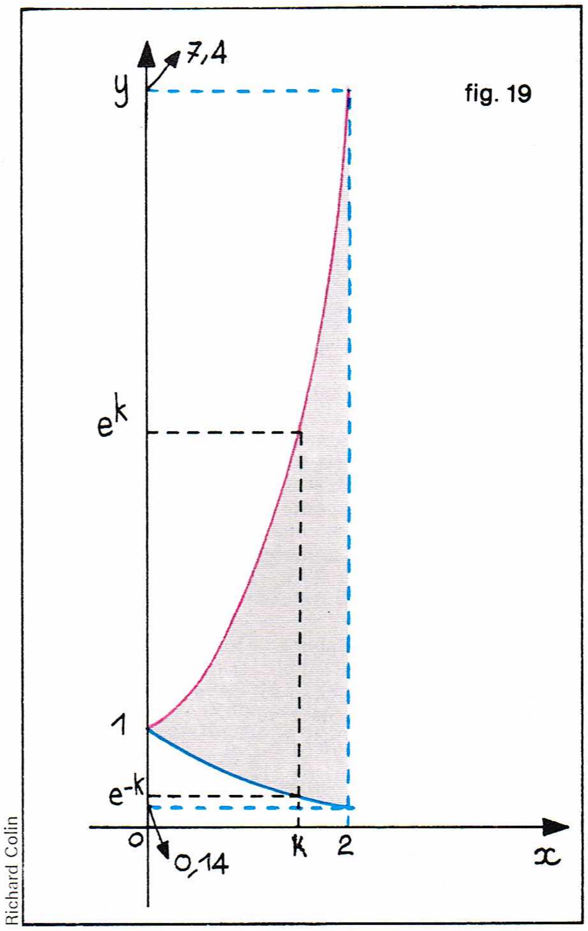

Richard Colin

▼ ***A gauche, figure 20 :** a, addition des aires ; b, non-addition des aires. **A droite, figure 21 :** conservation de la mesure après isométrie.*

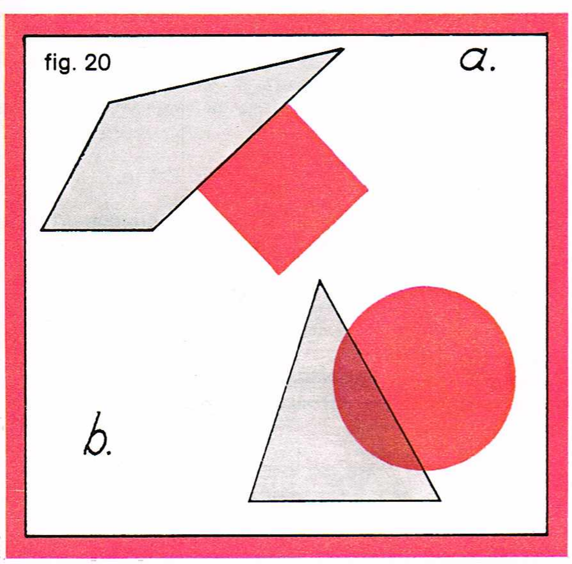

Richard Colin

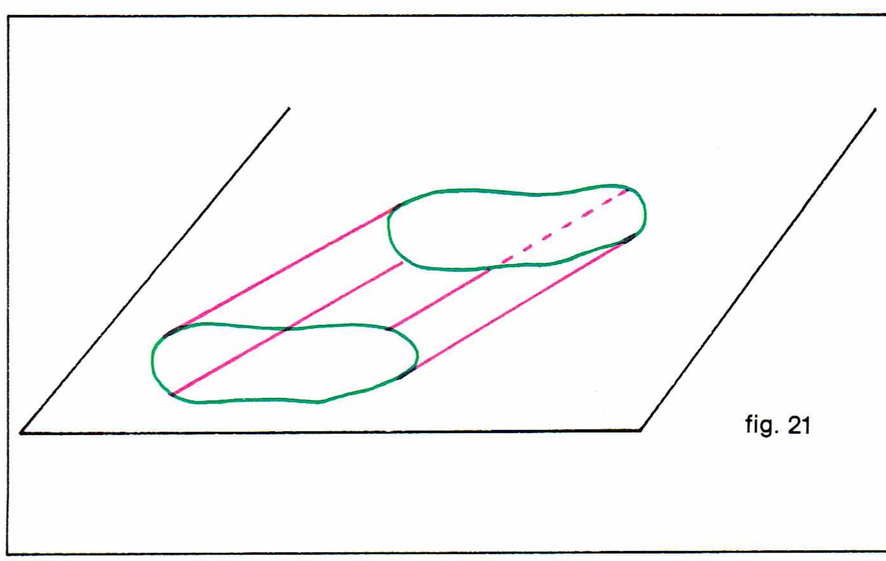

Richard Colin

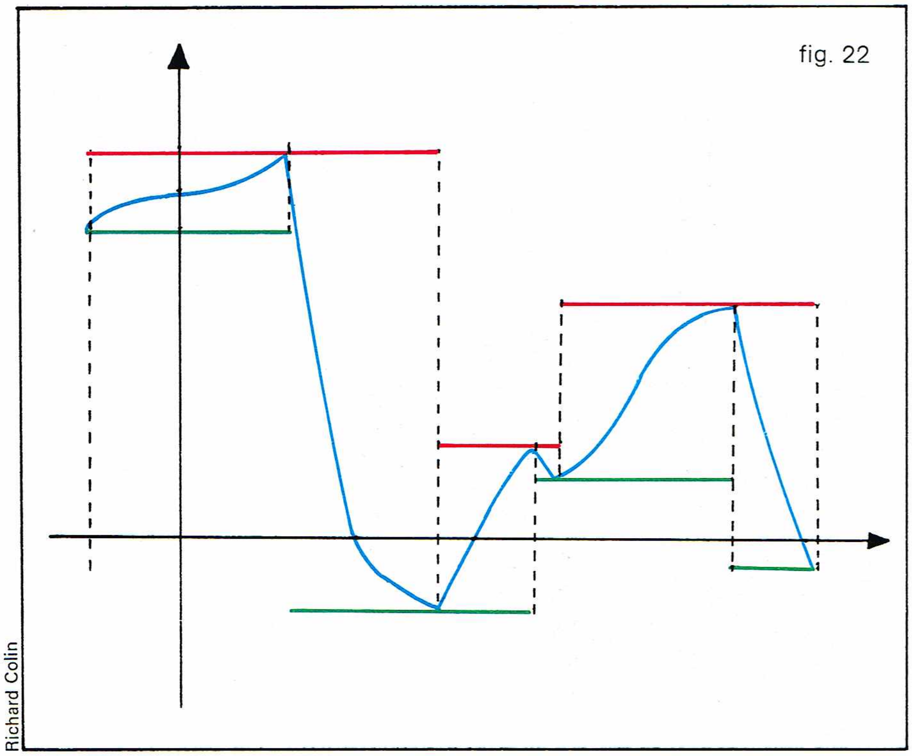

Richard Colin

▲ ***Figure 22 :* encadrement d'une fonction réelle (en bleu) par deux fonctions étagées (en rouge et en vert).**

mesure invariante après un « déplacement sans transformation », c'est-à-dire par exemple, dans le cas du plan, une isométrie, ou bijection du plan pour laquelle les distances entre points sont conservées (*fig.* 21). On est donc amené à définir, à partir de l'ensemble X sur lequel on désire mesurer, une classe de sous-ensembles, $\mathcal{A}$ (ceux que l'on mesurera), et une application $m : \mathcal{A} \to \mathbb{C}$ donnant la mesure. De nombreuses difficultés ont surgi dès que l'on a pris pour $\mathcal{A}$ l'ensemble $\mathfrak{P}$ (X) des parties de X (problème de la mesure universelle, résolu par Banach).

C'est pourquoi, pour établir une cohérence avec les propriétés envisagées pour l'application m, on choisit une *classe stable* pour les opérations de réunion et de différence :

$$\mathrm{A} \in \mathcal{A} \quad \text{et} \quad \mathrm{B} \in \mathcal{A} \Rightarrow \mathrm{A} \cup \mathrm{B} \in \mathcal{A}$$
$$\text{et} \quad \mathrm{A} - \mathrm{B} = \complement_{\mathrm{A}} (\mathrm{A} \cap \mathrm{B}) \in \mathcal{A}$$

(il y a donc aussi stabilité pour l'intersection) : une telle classe $\mathcal{A}$ est appelée *algèbre de Boole* ou *clan*. On dira alors qu'un espace X est mesuré lorsqu'on a défini sur cet ensemble un clan $\mathcal{A}$ et une application (dite mesure) $m : \mathcal{A} \to \mathbb{R}^+$ vérifiant :

$$\begin{cases} m\,(\mathrm{A} \cup \mathrm{B}) = m\,(\mathrm{A}) + m\,(\mathrm{B}) - m\,(\mathrm{A} \cap \mathrm{B}) \\ m\,(\varnothing) = 0 \end{cases}$$

On le note alors $(\mathrm{X}, \mathcal{A}, m)$; en voici deux exemples particulièrement importants :

— Dans l'ensemble X, la famille $\mathcal{A}$ des parties de X ayant un nombre fini d'éléments est un clan, et l'application $m : \mathrm{A} \mapsto n_{\mathrm{A}}$ qui, à tout $\mathrm{A} \in \mathcal{A}$, associe le nombre n_{A} d'éléments de A, est alors une mesure sur X, dite *mesure naturelle*.

— Sur la droite réelle $\mathbb{R}$, les réunions finies d'intervalles bornés disjoints deux à deux forment un clan, dit *clan de Lebesgue ;* on définit alors la *mesure de Lebesgue sur* $\mathbb{R}$ en posant pour tout intervalle borné I d'extrémités a et b, $m\,(\mathrm{I}) = b - a$, $(b \geqslant a)$. La mesure de tout ensemble du clan de Lebesgue est alors déduite par additivité. On note dx cette mesure.

La mesure — ainsi définie — des ensembles trouve son prolongement naturel dans la mesure des fonctions étagées par l'intermédiaire des *fonctions caractéristiques* d'ensembles (on dit parfois *indicatrices*) ; si $(\mathrm{X}, \mathcal{A}, m)$ désigne un espace mesuré, la *fonction caractéristique* φ_{A} d'un ensemble $\mathrm{A} \in \mathcal{A}$ est définie par :

$$\varphi_{\mathrm{A}}\,(x) = 1 \quad \text{si } x \in \mathrm{A} \quad \text{et} \quad \varphi_{\mathrm{A}}\,(x) = 0 \quad \text{si } x \in \complement_{\mathrm{X}} \mathrm{A}.$$

C'est la structure d'espace vectoriel de l'ensemble $\mathfrak{J}$ des fonctions φ_{A} qui amène alors à formaliser par des notions linéaires l'intégrale de Riemann.

L'intégrale de Riemann

L'idée de base de l'intégrale au sens de Riemann est de s'assurer d'un outil mesurant les ensembles définis par des courbes représentatives de fonctions, et respectant la règle d'additivité. Pour cela, on part du cas le plus simple d'une fonction caractéristique d'ensemble, puis on généralise à une combinaison linéaire de ces fonctions, puis à des fonctions « approchées » par de telles combinaisons.

Dans un espace mesuré $(\mathrm{X}, \mathcal{A}, m)$, à tout ensemble $\mathrm{A} \in \mathcal{A}$, on associe sa fonction caractéristique φ_{A} et l'on pose : $\mathrm{I}\,(\varphi_{\mathrm{A}}) = \varphi \int_{\mathrm{A}} dm = m\,(\mathrm{A})$. Par la linéarité de cette correspondance, on peut définir l'intégrale (au sens de Riemann) d'une fonction étagée :

$$f = \sum_{i=1}^{i=n} \alpha_i \, \varphi_{\mathrm{A}_i}$$

par :

$$\mathrm{I}\,(f) = \int f\,dm = \sum_{i=1}^{i=n} \alpha_i m\,(\mathrm{A}_i) \quad \text{avec } \alpha_i \in \mathbb{R}.$$

Il s'agit alors d'étendre cette forme linéaire à un ensemble de fonctions plus vaste que l'ensemble ε des fonctions étagées : les fonctions nulles en dehors d'un ensemble A du clan $\mathcal{A}$ et bornées. Ceci est possible de la façon suivante : une telle fonction φ peut être minorée et majorée respectivement par deux fonctions étagées : $f < \varphi < g$ (*fig.* 22), et il est clair que $\mathrm{I}\,(f) \leqslant \mathrm{I}\,(g)$. Par conséquent, les nombres

$$\int_* \varphi\,dm = \sup \left\{ \int f\,dm \text{ pour } f \in \varepsilon,\ f < \varphi \right\}$$
$$\text{et} \int^* \varphi\,dm = \inf \left\{ \int g\,dm \text{ pour } g \in \varepsilon,\ g > \varphi \right\}$$

sont liés par la relation : $\int_* \varphi\,dm \leqslant \int^* \varphi\,dm.$

On désigne par $\tilde{\varepsilon}$ l'ensemble des fonctions φ pour lesquelles il y a égalité ; c'est un espace vectoriel — pour les lois classiques d'addition et de produit par un scalaire — et on a donc étendu la forme linéaire positive I définie sur ε en une forme linéaire positive $\tilde{\mathrm{I}}$ définie sur $\tilde{\varepsilon}$ dès que l'on pose :

$$\tilde{\mathrm{I}}\,(\varphi) = \int_* \varphi\,dm = \int^* \varphi\,dm$$

Il s'agit là d'une démarche analogue au « *principe d'exhaustion* » d'Eudoxe de Cnide (v. 406-v. 355 av. J.-C.) par lequel on essayait d'approcher l'aire d'un cercle par les surfaces des polygones réguliers inscrits dont on double successivement le nombre de côtés (*fig.* 23) *;* les « *sommes de Darboux* » en sont une autre expression, moins claire toutefois (*fig.* 24).

Sur l'espace $\mathrm{X} = [a, b] \in \mathbb{R}$ où l'on prend le clan $\mathcal{A}$ engendré par les intervalles $[a, d[$ et $[c, b]$, une fonction définie croissante sur $[a, b]$, φ, permet de définir une mesure :

$$\begin{cases} m\,([a, x[) = \varphi\,(x) \\ m\,([a, b]) = \varphi\,(b) \end{cases} \quad \text{pour } x \in]a, b[$$

par rapport à laquelle toutes les fonctions continues réelles sont intégrables. L'intégrale d'une fonction g selon cette mesure est dite *intégrale de Riemann-Stieltjès* et se note :

$$\int_a^b g\,d\varphi.$$

Ceci permet de définir l'intégrale d'une fonction continue réelle g par rapport à une fonction à variation bornée ψ puisque celle-ci est différence de deux fonctions croissantes φ_1 et φ_2 :

$$\int_a^b g\,d\psi = \int_a^b g\,d\varphi_1 - \int_a^b g\,d\varphi_2 \quad \text{si} \quad \psi = \varphi_1 - \varphi_2$$

On peut noter que l'on retrouve l'intégrale classique en prenant $\varphi : x \mapsto x$.

Cette notion joue un rôle très particulier : on montre facilement que l'intégrale de Riemann-Stieltjès est une forme linéaire continue sur l'espace de Banach $\mathbb{R}\,[a, b]$ (muni de la topologie de la convergence uniforme), mais de plus, un très célèbre — et délicat — théorème, le **théorème de F. Riesz,** montre que : *toute forme linéaire continue sur cet espace est une intégrale de ce type.* C'est cette notion que l'on utilise pour définir les intégrales curvilignes.

L'intégrale au sens de Lebesgue

On peut envisager sous deux aspects l'apport de Lebesgue à la théorie de l'intégration. Tout d'abord, au sens « fonctionnel », de même que les nombres réels figurent une extension des nombres rationnels (construction de $\mathbb{R}$ par les coupures ou bien les suites de Cauchy), les fonctions intégrables au sens de Lebesgue étendent, elles, les fonctions intégrables au sens de Riemann (et plus particulièrement les fonctions continues, nulles en dehors d'un ensemble compact). D'autre part, d'un point de vue « ensembliste » et plus rapporté à l'idée générale de mesure, les développements de Lebesgue ont permis de s'affranchir de la simple additivité, et de définir la mesure pour une plus vaste classe d'ensembles, grâce à *l'idée d'additivité dénombrable* posée par Émile Borel (1871-1956) qui se traduit par l'hypothèse suivante : « la réunion d'une famille dénombrable d'éléments de $\mathcal{A}$ est encore un élément de $\mathcal{A}$ », qui donne le nom de *tribu* à une famille $\mathcal{A}$ de parties d'un ensemble X formant déjà un clan. La cohérence avec la notion de mesure est ensuite assurée par la définition d'une mesure *dénombrablement additive* (ou bien *σ-additive*), c'est-à-dire telle que, pour toute famille dénombrable $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ d'éléments de $\mathcal{A}$ deux à deux disjoints ($A_p \cap A_q = \varnothing$ dès que $p \neq q$), on ait :

$$m\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n\right) = \sum_{n \in \mathbb{N}} m\,(A_n).$$

Le premier membre a bien un sens puisque l'on suppose que $\mathcal{A}$ est une tribu, le second membre est donc un nombre réel positif ou $+\infty$. Au sens de Lebesgue, un espace mesuré sera donc un *triplet* $(X, \mathcal{A}, m)$ où $\mathcal{A}$ est une tribu et m une mesure σ-additive.

C'est avec les *mesures de Radon* que se dégage le mieux l'aspect linéaire de l'intégration ; elles seront définies sur des espaces X supposés localement compacts (voir *Topologie*). On désigne par $\mathcal{K}$ (X) l'espace vectoriel des fonctions continues sur X, nulles hors d'un compact de X.

Une *mesure de Radon positive* sur X est une application $m : \mathcal{K}\,(X) \to \mathbb{C}$, linéaire

$$\text{donc } m\,(\alpha f + \beta g) = \alpha m\,(f) + \beta m\,(g)$$

et positive

$$\text{donc } m\,(f) \geqslant 0 \quad \text{si } f \geqslant 0.$$

Palais de la Découverte - Paris

◄ ***Le mathématicien français* Gaston Darboux *(1842-1917) qui a réalisé de nombreux travaux sur les courbes et surfaces algébriques et sur les applications géométriques du calcul infinitésimal.***

Outre la mesure de Lebesgue, mentionnée plus haut, on peut citer :

— la *mesure de Dirac* en un point a, notée δ_a, qui est la forme linéaire $f \mapsto f\,(a)$;

— *la mesure de densité p* (où p est une fonction réelle, continue, positive) par rapport à la mesure de Lebesgue :

$$f \mapsto \int f\,(x)\,p\,(x)\,dx;$$

— la *mesure naturelle* sur un espace discret :

$$f \mapsto \sum_{x \in X} f\,(x).$$

On dit qu'une fonction f définie sur X est *intégrable pour la mesure m* (ou *m-intégrable*) si l'on peut trouver une suite $\{f_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ de fonctions de $\mathcal{K}$ (X), telle que l'expression sup. $\int \varphi\,dm$ pour $\varphi \in \mathcal{K}\,(X)$ et $\varphi \leqslant |f - f_n|$ ait une limite nulle lorsque $n \to \infty$; la suite $\{f_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ est appelée suite *d'approximation en moyenne* de f. Ceci revient à dire que l'on peut approximer la fonction f par une suite de fonctions « suffisamment régulières », puisque l'on cherche à ajuster la différence $|f - f_n|$ au plus près par

▼ ***A gauche, figure 23 : a, approximation de la circonférence ou de l'aire d'un cercle par des polygones réguliers dont le nombre de côtés est systématiquement doublé ; b, détail de cette approximation. A droite, figure 24 : approximation par la méthode des sommes de Darboux de l'aire d'une surface définie par un arc de courbe.***

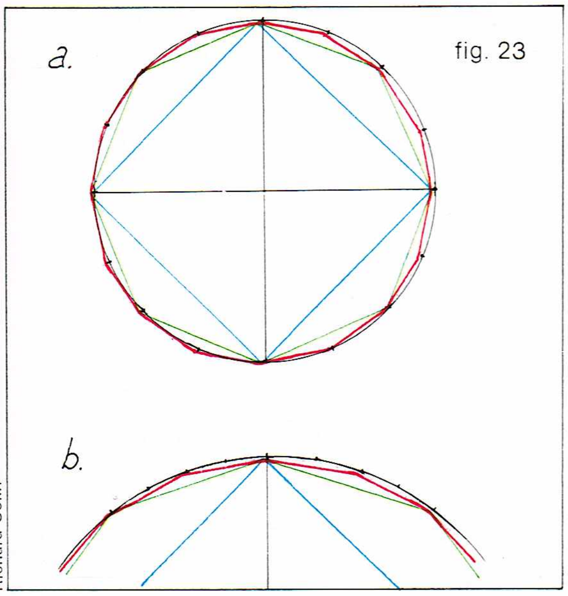

Richard Colin

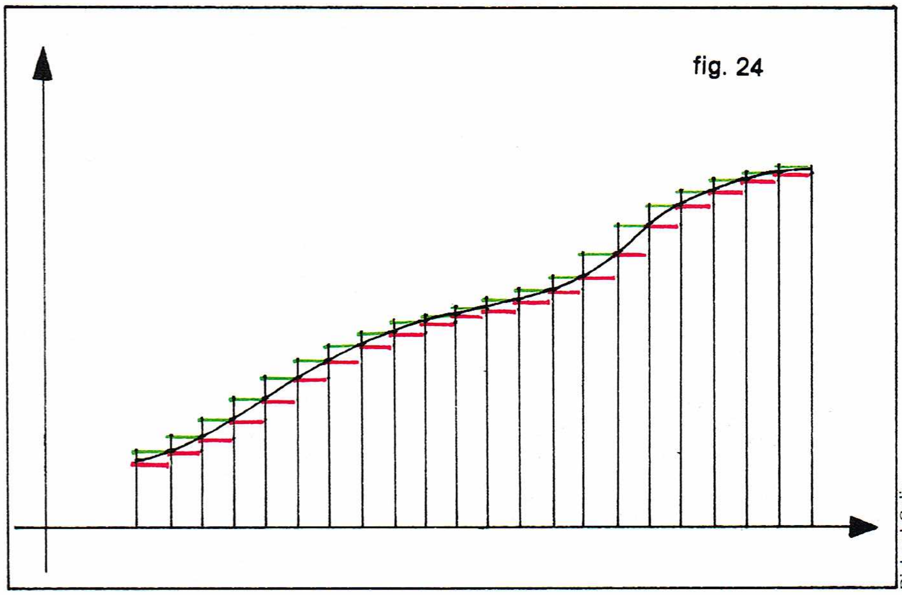

Richard Colin

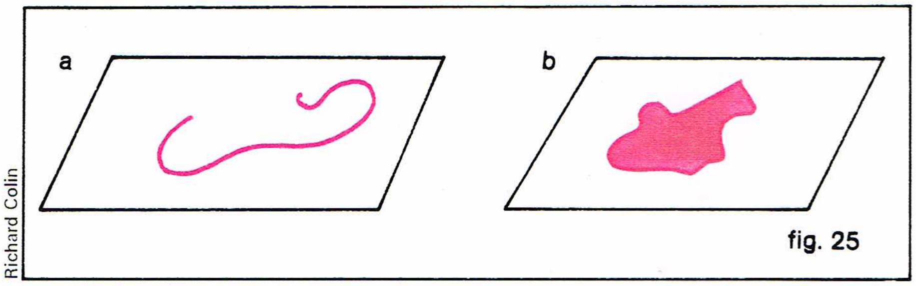

▲ *Figure 25.*
***a*, exemple de surface nulle : une courbe dans un plan ; *b*, exemple de surface non nulle : une surface dans un plan.**

une fonction de moyenne (ou d'intégrale) pratiquement nulle dès que n est assez grand.

On montre que, si la suite $\{f_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ approche f en moyenne, alors la suite des nombres $m(f_n) = \int f_n \cdot dm$ est convergente, et c'est sa limite — qui d'ailleurs reste la même quelle que soit la suite d'approximation choisie — que l'on appelle *intégrale de f par rapport à la mesure m*, soit : $m(f) = \int f \cdot dm = \lim_{n \to \infty} m(f_n) = \lim_{n \to \infty} \int f_n \cdot dm$

Espaces $\mathcal{L}^p$ et L^p

L'ensemble $\mathcal{L}^1(m)$ des fonctions m-intégrables est un espace vectoriel, puisque la mesure m est une forme linéaire ; de plus, il possède la propriété très importante :

$$f \in \mathcal{L}^1(m) \Rightarrow |f| \in \mathcal{L}^1(m).$$

Cet ensemble étend la classe des fonctions intégrables au sens de Riemann puisque :

— toute fonction $f \in \mathcal{K}(X)$ est m-intégrable (la suite d'approximation est la suite constante f pour tout n) ;

— toute fonction étagée, nulle en dehors d'un intervalle borné de $\mathbb{R}$, est intégrable pour la mesure de Lebesgue ; cette propriété est encore vraie pour une limite uniforme de fonctions étagées.

Pour la mesure de Dirac, le résultat est encore plus évident puisque toute fonction f partout finie est δ_a-intégrable ; son intégrale vaut $f(a)$.

De plus, l'application $f \mapsto \int |f| \cdot dm$ est une semi-norme sur $\mathcal{L}^1(m)$. Ce n'est pas une norme dans le cas général ; ainsi, pour la mesure de Lebesgue sur $\mathbb{R}$, tout ensemble réduit à un point (et, en raison de l'additivité dénombrable, tout ensemble dénombrable) admet une fonction caractéristique d'intégrale nulle : en effet, tout point $a \in \mathbb{R}$ peut être placé dans un intervalle ouvert $I =]a - \varepsilon, a + \varepsilon[$ où ε est arbitraire, et par conséquent $\int \varphi_{\{a\}} \cdot dx \leqslant \int \varphi_I \cdot dx = 2\varepsilon$. Il peut donc exister des fonctions $f \neq 0$ telles que $m(|f|) = 0$. Ainsi dans $\mathbb{R}^2$, la surface d'un segment de droite est nulle (*fig.* 25 et 26). Ce point fondamental est à l'origine du second point essentiel de l'intégration au sens de Lebesgue : les propriétés vérifiées *m-presque partout*, c'est-à-dire partout sauf en un ensemble de points dont la mesure est nulle. Ainsi, pour savoir si une fonction $f : X \to \mathbb{C}$ est intégrable, et pour connaître son intégrale, il suffit de connaître les valeurs prises par f en presque tout point de X. Par conséquent deux fonctions égales m-presque partout et intégrables (si l'une l'est, l'autre l'est aussi) ont même intégrale.

On est donc ainsi amené à définir sur l'espace $\mathcal{L}^1(m)$ la relation d'équivalence (R) : $f \sim g$ si et seulement si $f = g$, *m-presque partout*, puis à considérer l'espace quotient $\mathcal{L}^1 \dfrac{(m)}{R}$ (chaque élément de cet espace est donc la classe de toutes les fonctions de $\mathcal{L}^1(m)$, *m-presque partout* égales) que l'on désigne par $L^1(m)$ ou parfois $L^1(X, \mathcal{A}, m)$. Sur cet espace, l'application $\dot{f} \mapsto \int |f|\, dm$ ($\dot{f}$ désigne une classe selon la relation (R) dont f est un représentant) est une véritable norme ; pour la topologie induite par cette norme, $L^1(m)$ est un espace complet : c'est un *espace de Banach*. L'espace $\mathcal{L}^1(m)$ est complet pour la semi-norme $\int |f|\, dm$, mais surtout il est « approché » par l'espace $\mathcal{K}(X)$; c'est-à-dire que, pour la topologie induite par cette semi-norme, $\mathcal{K}(X)$ est dense dans $\mathcal{L}^1(m)$; ce qu'on peut encore traduire par le fait que pour toute fonction m-intégrable, il doit exister une fonction continue nulle hors d'un compact qui « approche » (en moyenne) suffisamment la première.

La notion d'intégrabilité au sens de Lebesgue généralise donc l'idée de fonction intégrable au sens de Riemann. En particulier, on peut citer deux résultats fondamentaux qui montrent bien la richesse de cette extension :

— **le théorème de Beppo-Levi ;** pour que la limite f d'une suite *croissante* de fonctions intégrables réelles $\{f_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ soit intégrable, il faut et il suffit que la suite des nombres $\int f_n \cdot dm$ soit *majorée ;* dans ce cas, on a convergence en moyenne de f_n vers f et

$$\int f \cdot dm = \lim_{n \to \infty} \int f_n \cdot dm ;$$

— **le théorème de Lebesgue (ou de la convergence dominée) ;** si $\{f_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ est une suite de fonctions intégrables, à valeurs complexes, *uniformément majorées* en module par une fonction intégrable, et *convergeant presque partout* vers une fonction f, alors on a convergence en moyenne, f est intégrable et

$$\int f \cdot dm = \lim_{n \to \infty} \int f_n \cdot dm.$$

La comparaison de ces critères d'intégrabilité avec ceux connus dans le cadre de l'intégrale au sens de Riemann montre immédiatement la puissance de l'outil ainsi formé. Par exemple, une simple application du théorème de Beppo-Levi montre qu'on peut intégrer terme à terme une série de fonctions positives :

$$\int \left(\sum_n u_n \right) dm = \sum_n \left(\int u_n \cdot dm \right)$$

dès que la série des intégrales (du second membre) est convergente.

De même, le théorème de Lebesgue permet de définir des conditions affaiblies sous lesquelles il est possible de « dériver sous le signe somme ».

D'autres espaces peuvent être associés, comme $\mathcal{L}^1$ et L^1, à un espace mesuré $(X, \mathcal{A}, m)$. Ils se placent dans un cadre très général, celui des *fonctions mesurables ;* ce terme est malheureusement bien mal adapté au cadre

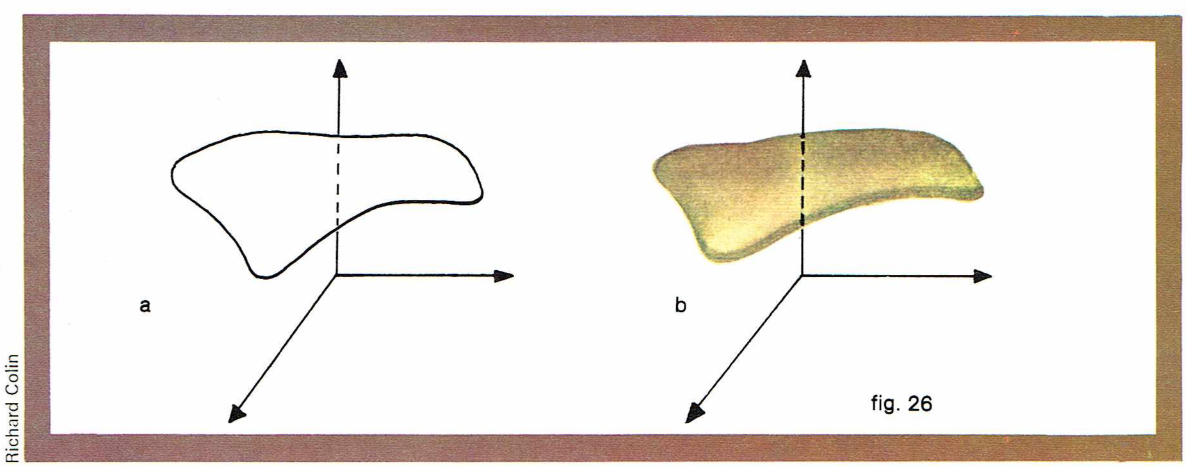

▶ *Figure 26.*
***a*, exemple de volume nul : une surface gauche dans l'espace (épaisseur nulle) ; *b*, exemple de volume non nul : la même forme présentant une épaisseur non nulle.**

général qu'on a tracé ici, car il ne signifie absolument pas que l'on ait affaire à des fonctions que l'on puisse « mesurer »; nous désignons ces dernières — comme nous l'avons vu — par le terme de *fonctions intégrables*.

La définition de ces fonctions, que l'on pourrait juger un peu mystérieuse à ce point de notre présentation : l'application $f : X \to Y$ est m-mesurable si, quel que soit l'ouvert $\mathcal{O} \subset Y$, la fonction caractéristique de l'ensemble $K \cap f^{-1}(\mathcal{O})$ (où K est un compact quelconque de X) est m-intégrable, repose en fait sur une hypothèse « technique » nécessaire à l'exposé rigoureux de la théorie. C'est d'ailleurs une notion délicate, car, après avoir déduit quelques propriétés de ces fonctions, il semblerait que la classe des fonctions mesurables soit particulièrement vaste, au point que l'on chercherait à déterminer des fonctions qui ne le soient pas. Et c'est à l'aide d'une démonstration difficile, faisant intervenir l'axiome du choix, que l'on prouve l'existence de fonctions non mesurables. Précisons tout de suite que toute fonction *m-intégrable* est aussi *m-mesurable*.

L'espace $\mathcal{L}^p(m)$, p étant un nombre réel $1 \leqslant p < +\infty$, est défini comme l'ensemble des fonctions *m-mesurables f*, telles que $|f|^p$ soit intégrable; C' est un *espace vectoriel*. Ces espaces ne sont pas emboîtés, en général, dans un sens ou l'autre : ainsi, pour la mesure de Lebesgue sur $\mathbb{R}$, la fonction $x \mapsto |x|^{-1/2}(1+|x|)^{-1}$ pour $x \neq 0$ est dans $\mathcal{L}^1$ mais non dans $\mathcal{L}^2$, alors que la fonction $x \mapsto (1+|x|)^{-1}$ est dans $\mathcal{L}^2$ mais pas dans $\mathcal{L}^1$.

Pour chaque valeur de p $(1 \leqslant p < +\infty)$, l'espace $\mathcal{L}^p(m)$ étend l'espace $\mathcal{K}(X)$ de telle façon que $\mathcal{K}(X)$ est partout dense dans $\mathcal{L}^p(m)$: ce qui signifie donc que pour chaque fonction $\varphi \in \mathcal{K}(X)$, il existe une fonction $f \in \mathcal{L}^p(m)$ telle que le nombre

$$N_p(f-\varphi) = \left(\int |f-\varphi|^p \, dm\right)^{1/p}$$

soit rendu aussi petit que l'on veut (il y a approximation au sens de $\mathcal{L}^p$, en moyenne d'ordre p).

Intégration et recherche de primitives

A ce point d'avancement de la théorie de l'intégration, on peut se poser la question de savoir si l'on a conservé (avec l'outil ainsi mis au point) la possibilité bien connue de recherche des primitives d'une fonction, et l'intégrale indéfinie au sens usuel.

En particulier, si l'on prend $X = \mathbb{R}$, muni de la mesure de Lebesgue, que devient le résultat? L'application $\varphi : x \mapsto \int_a^x f(t)\,dt$ vérifie $\varphi'(x) = f(x)$, bien connu dès que $f \in \mathcal{K}(X)$.

La réponse est fournie par un **théorème** dû à **Lebesgue** : on désigne par $\varphi_{[a,x]}$ la fonction caractéristique de l'intervalle $[a, x] \subset \mathbb{R}$; alors l'application $x \mapsto \int f \varphi_{[a,x]}\, dm$ est *m-presque partout dérivable* et de dérivée égale à $f(x)$, dès que $f\varphi_{[a,x]}$ est m-intégrable (on dit alors que f est *localement intégrable*). On pose

$$\int f\varphi_{[a,x]}\, dm = \int_a^x f(t)\,dt$$

(on rappelle qu'ici m représente la mesure de Lebesgue sur $\mathbb{R}$), appelé *intégrale (indéfinie) de f*.

Par conséquent toute fonction localement intégrable est presque partout égale à la dérivée de son intégrale (indéfinie).

Le problème réciproque nécessite l'introduction d'un type particulier de fonctions réelles, les *fonctions absolument continues* sur un intervalle $[a, b] \subset \mathbb{R}$. Une telle fonction F satisfait à la propriété : pour tout $\varepsilon > 0$, on peut trouver $\eta > 0$ tel que, dès que les sous-intervalles $[\alpha_k, \beta_k]$ de $[a, b]$ (un nombre fini) ne se recouvrent pas et ont une longueur totale inférieure à η, alors

$$\sum_k |F(\beta_k) - F(\alpha_k)| \leqslant \varepsilon.$$

Entre autres propriétés, les fonctions absolument continues sont uniformément continues, et à variation bornée; de plus, elles peuvent s'exprimer comme différence de deux fonctions croissantes absolument continues. Mais surtout, et c'est là la réponse à la question posée, une fonction $F : [a, b] \to \mathbb{C}$ est une intégrale indéfinie si et seulement si F est absolument continue, et ce à une constante additive près :

$$F(x) = F(a) + \int_a^x F'(t)\,dt.$$

Les résultats que nous avons mentionnés ici et qui précisent donc que, relativement à la mesure de Lebesgue sur $\mathbb{R}$, l'intégration et la dérivation presque partout sont des opérations réciproques, peuvent être mis en forme dans un cadre plus général, celui des mesures de densité sur un espace X, localement compact et dénombrable à l'infini (c'est-à-dire réunion dénombrable de compacts). Si m est une mesure positive sur X et p une fonction positive, localement intégrable sur X, alors l'application $f \mapsto \int f \cdot p \cdot dm$ est une mesure de Radon positive sur X, que l'on appelle *mesure de densité p* pour la mesure m; on la note $p \cdot m$. On dit qu'une mesure positive μ sur X est *de base m* s'il existe une fonction $p \geqslant 0$ localement m-intégrable sur X, telle que $\mu = p \cdot m$.

Le **théorème de Radon-Nikodym** montre alors que, *pour que μ soit de base m, il faut et il suffit que tout ensemble m-négligeable soit μ-négligeable (on dit encore que μ est absolument continue relativement à m)*.

On a là, très certainement (par l'intermédiaire des mesures de densité), la présentation la plus cohérente tant de la dérivation que de l'intégration (il suffit d'ailleurs, pour s'en convaincre, de se reporter au concept physique de densité); c'est ce que l'on retrouve dans les théories modernes des probabilités où l'on fait un abondant usage des formalismes et résultats de la théorie de la mesure.

La notion de fonction absolument continue permet encore de généraliser la formule d'*intégration par parties :*

$$\int_a^b f(x)\,g'(x)\,dx = [f(b)\,g(b) - f(a)\,g(a)] - \int_a^b f'(x)\,g(x)\,dx$$

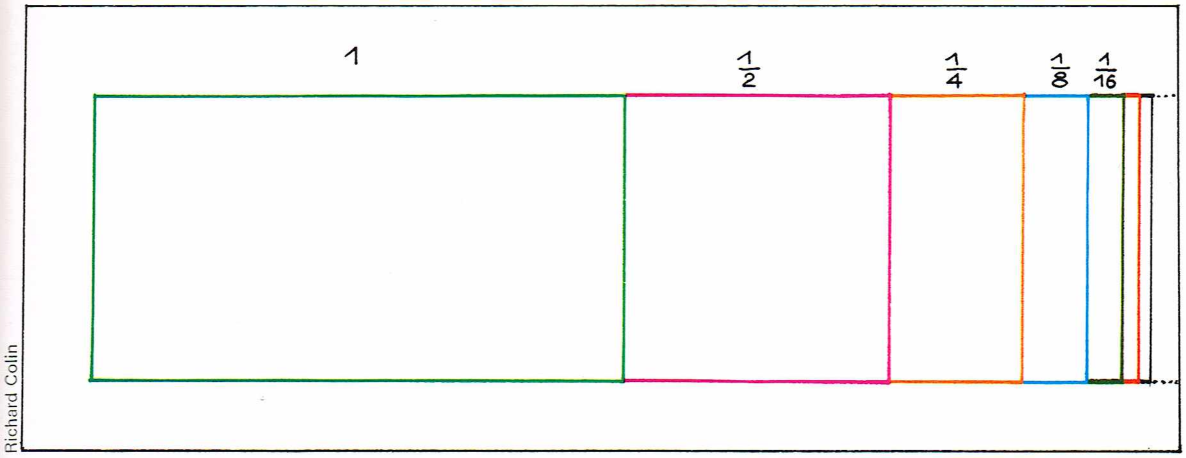

◀ ***Un exemple de série convergente : la série*** $1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \frac{1}{16} + \dots + \frac{1}{2^n}$ ***tend vers 2 quand n tend vers l'infini.***

— bien connue pour des fonctions de classe C^1 sur $[a, b]$ — lorsque f et g sont absolument continues sur $[a, b]$, toujours grâce aux résultats de Lebesgue sur les fonctions presque partout dérivables.

Signalons enfin que la théorie de l'intégration par rapport à une mesure de Radon positive englobe les problèmes de l'*intégration multiple* et retrouve tant le théorème de Fubini sur la décomposition d'une *intégrale n-uplet* sur un domaine de $\mathbb{R}^n$, que la formule du changement de variable.

Les séries

La notion de limite, fondamentale pour la science mathématique, est déjà présente (sous forme rudimentaire) chez les mathématiciens de l'Antiquité par l'intermédiaire des suites $s_1, s_2, ..., s_n, ...$, où l'élément s_n ($n = 1, 2, 3$, etc.) peut être un nombre (réel ou complexe), un vecteur, une fonction, etc. Une suite se présente souvent comme une succession de résultats, pour une opération répétée un nombre illimité de fois, et ainsi reliés à un « algorithme ». Parmi ces procédés, on retiendra comme particulièrement intéressants les *séries* qui se présentent comme une généralisation de l'addition, et les *produits infinis*, généralisant la multiplication.

Séries numériques

Un premier exemple élémentaire de série est celui que l'on obtient si l'on veut représenter un nombre rationnel au moyen des nombres décimaux; par exemple, la représentation décimale du nombre rationnel 1/6 est 0,166 66..., qui « équivaut » à la série :

$$\frac{1}{10} + \frac{6}{10^2} + \frac{6}{10^3} + ... + \frac{6}{10^n} + ...$$

L'intuition suggère alors d'écrire : $\frac{1}{6} = \frac{1}{10} + \frac{6}{10^2} + ...$, c'est-à-dire d'égaler le symbole du second membre au nombre 1/6. On observe tout de suite que l'égalisation entre un tel symbole et un nombre nous entraîne à construire sur ces nouveaux êtres mathématiques des règles de calcul cohérentes avec celles des nombres et avec leurs propriétés. Ainsi, la somme des k premiers termes $\frac{1}{10} + \frac{6}{10^2} + \frac{6}{10^3} + ... + \frac{6}{10^k}$ diffère de $\frac{1}{6}$ d'aussi peu que l'on désire, à condition de choisir k suffisamment grand.

Définissons alors une série : étant donné la suite $a_0, a_1, a_2, ..., a_n$ de nombres (ou plus généralement d'éléments appartenant à un ensemble sur lequel on a défini une opération d'addition et qui est stable pour cette opération), on appelle *série* le symbole

$$a_0 + a_1 + a_2 + ... + a_n + ...,$$

aussi écrit $\sum_{n=0}^{\infty} a_n$ (a_n est le terme général de la série).

Avec cette écriture, on entend construire la suite des sommes partielles :

$$s_0 = a_0, s_1 = a_0 + a_1, s_2 = a_0 + a_1 + a_2, ...,$$
$$s_n = a_0 + a_1 + a_2 + ... + a_n,$$

et donner ainsi à la série les caractères (convergence, divergence, etc.) de cette suite.

S'il existe un nombre fini A tel que $\lim_{n+\infty} s_n = A$, la *série* est dite *convergente*, et l'on dit que A est sa somme : par exemple, la série $1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{2^2} + ... + \frac{1}{2^n} + ...$, alors

$$s_0 = 1, \quad s_1 = 1 + \frac{1}{2} = \frac{3}{2}$$

$$s_n = \frac{1 - \frac{1}{2^{n+1}}}{1 - \frac{1}{2}} = 2\left(1 - \frac{1}{2^{n+1}}\right) \to 2 \text{ lorsque } n \to \infty.$$

Dans le cas où $\lim_{n \to +\infty} s_n = +\infty$ ou bien $-\infty$, la *série* est dite *divergente* : par exemple, $1 + 1 + 1 + ...$; alors $s_1 = 1$, $s_2 = 2$, ..., $s_n = n$, et donc s_n croît sans limite.

Enfin, lorsque $\lim_{n \to \infty} s_n$ n'existe pas, la *série* est dite *oscillante* ou *irrégulière* (par exemple, $1 - 1 + 1 - 1 + ...$; alors $s_0 = 1$, $s_1 = 0$, $s_2 = 1$, $s^3 = 0$, etc.).

Les séries convergentes et les séries divergentes sont dites *régulières*. Notons que, lorsque l'on a $\lim_{n \to \infty} s_n = \infty$ (sans être précisément $+\infty$ ou $-\infty$), pour connaître si la série est divergente ou bien oscillante, il est nécessaire de préciser la façon dont l'axe réel a été « compactifié » : car, lorsqu'il l'a été par l'adjonction des points $+\infty$ et $-\infty$, alors une série dont les sommes partielles sont par exemple

$$s_0 = 0, s_1 = -1, s_2 = +2, s_3 = -3, s_4 = +4, ...,$$

n'admettant pas de limite (ni $+\infty$, ni $-\infty$) est à cause de cela oscillante, tandis que si l'axe réel a été compactifié par l'adjonction du seul point ∞, alors la suite $0, -1, +2, -3, +4, ...$, admet une limite infinie, et la série est alors divergente.

Prenons quelques exemples :

— puisque $\frac{1}{n(n+1)} = \frac{1}{n} - \frac{1}{n+1}$, on constate aisément la convergence de la *série de Mengoli* dont la somme est :

$$2 = \frac{1}{1 \cdot 2} + \frac{1}{2 \cdot 3} + \frac{1}{3 \cdot 4} + ... + \frac{1}{n(n+1)} + ...;$$

— la *série* « *géométrique* »

$$\Sigma q^n = 1 + q + q^2 + ... + q^n + ...$$

(de raison q) a un caractère dépendant de la valeur de q; en effet, puisque $s_n = 1 + q + ... + q^n = \frac{1 - q^{n+1}}{1 - q}$, on reconnaît la convergence (avec une somme égale à $\frac{1}{1-q}$) lorsque $|q| < 1$, la divergence pour $|q| > 1$ et $q = 1$, tandis que la série est oscillante si $q = 1$;

— la série « *harmonique* » $1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + ... + \frac{1}{n} + ...$ est divergente et la somme partielle $s_n = 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + ... + \frac{1}{n}$ vérifie $s_n = \text{Log}\, n + C + \varepsilon(n)$, où $C = 0{,}57...$ *(constante* dite *d'Euler-Mascheroni)* et $\varepsilon(n)$ est un correctif d'approximation qui tend vers zéro lorsque n tend vers l'infini.

Pour toute série $\sum^{\infty} a_n$ on peut considérer la série $\sum^{\infty} |a_n|$; dans le cas où cette dernière série est convergente, alors la première l'est aussi, et l'on dit qu'elle est *absolument convergente*. Toutefois, une série peut converger au sens ordinaire sans être absolument convergente; ainsi en est-il de la série harmonique alternée :

$$1 - \frac{1}{2} + \frac{1}{3} - \frac{1}{4} + ... + (-1)^{n+1}\frac{1}{n} + ...$$

Pour toute série convergente, le terme général a_n doit tendre vers zéro lorsque $n \to \infty$; toutefois, ici encore, il s'agit d'une condition nécessaire mais non suffisante de convergence, ainsi qu'on le vérifie par l'exemple de la série harmonique $1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + ... + \frac{1}{n} + ...$

Propriétés formelles des séries

Une série se présente comme une généralisation « naturelle » de l'opération arithmétique qu'est l'addition, à travers un processus de passage à la limite (où l'on étend un classique algorithme fini à un algorithme infini). L'addition possède de nombreuses propriétés formelles : associativité, commutativité, etc. Dans quelle mesure ces propriétés se conservent-elles (ou donnent-elles lieu à des propriétés analogues) pour les séries? A cette question, on peut répondre qu'en général il n'y a pas conservation; plus précisément en trois points :

— Lorsque l'on regroupe, par une loi quelconque, un ensemble de termes consécutifs, dans une série convergente, on obtient une série convergente et de même somme ; en procédant de même dans une série divergente vers $+\infty$ (respectivement $-\infty$), on retrouve une série divergente vers $+\infty$ (resp. $-\infty$). Par conséquent, la propriété d'associativité reste valable pour les séries régulières.

— Mais, à cette exception près des séries régulières, on ne peut plus rien affirmer. Par exemple, la série $1-1+1-1+\ldots$ est oscillante, alors que la série obtenue à partir de celle-ci en regroupant les termes deux à deux, c'est-à-dire : $(1-1)+(1-1)+(1-1)+\ldots$, soit $0+0+0+\ldots$, est convergente et de somme égale à zéro.

— L'examen de la commutativité nécessite d'abord de préciser la notion de « permutation dans l'ordre des termes » (particulièrement dans le cas d'une infinité de termes) et permet alors de retrouver une notion forte de convergence. Étant donné deux séries $\Sigma\, u_n$ et $\Sigma\, v_m$, on dit que l'une s'obtient à partir de l'autre par permutation de l'ordre des termes lorsque existe une correspondance biunivoque entre les rangs des termes des deux séries, de telle façon que, pour des rangs qui se correspondent, on ait des termes égaux. Par exemple :

$$\Sigma\, u_n = 1-\frac{1}{2}+\frac{1}{3}-\frac{1}{4}+\ldots$$

$$\Sigma\, v_m = 1+\frac{1}{3}-\frac{1}{2}+\frac{1}{5}+\frac{1}{7}-\frac{1}{4}+\ldots$$

Une série convergente, telle que toute autre série obtenue par permutation dans l'ordre des termes soit aussi convergente, est dite *inconditionnellement convergente ;* cette notion est en fait équivalente à celle de la convergence absolue. Une telle série et toutes celles obtenues par le procédé décrit ont la même somme : pour elles, on a donc conservation de la propriété de commutativité.

Opérations sur les séries convergentes

Étant donné deux séries convergentes $\Sigma\, a_n = A$, $\Sigma\, b_n = B$, on définit naturellement les opérations d'*addition* des deux séries et de *multiplication* de l'une d'elles par un nombre :

$$\Sigma\, a_n + \Sigma\, b_n = \Sigma\, (a_n + b_n)$$
$$c \cdot \Sigma\, a_n = \Sigma\, c \cdot a_n$$

les séries obtenues $\Sigma\, (a_n + b_n)$ et $\Sigma\, c \cdot a_n$ sont convergentes, et leurs sommes sont respectivement $A + B$ et $c \cdot A$.

Le *produit* de deux séries $\Sigma\, a_n$ et $\Sigma\, b_n$ conduit formellement à une série double $\sum\limits_{n,\, m} a_n b_m$, pour laquelle on peut envisager divers modes de regroupement de termes pour construire une série $\Sigma\, u_k$. On se limitera ici à citer le produit selon Cauchy, dans lequel le terme u_k est construit de la façon suivante :

$$u_k = a_0 b_k + a_1 b_{k-1} + a_2 b_{k-2} + \ldots + a_k b_0 = \sum_{l=0}^{l=k} a_l b_{k-l}.$$

Cette notion de produit est la plus naturelle pour des séries entières (se reporter au paragraphe sur les *Séries entières*), puisque, dans ce cas, la série produit obtenue est elle aussi une série entière. La convergence de la série $\Sigma\, u_k$ et la relation espérée $U = A \cdot B$ entre les sommes A et B des facteurs et la somme U de la série produit ne sont toutefois assurées qu'avec des hypothèses complémentaires sur les séries $\Sigma\, a_n$ et $\Sigma\, b_n$ (la convergence absolue de ces séries, par exemple).

Critères de convergence des séries

Pour déterminer le caractère d'une série, ce n'est en général pas à la définition de la convergence que l'on a recours, mais plutôt à l'un des multiples critères exposés ci-dessous :

• *Condition de Cauchy*. Une condition nécessaire et suffisante pour que la série $\Sigma\, a_n$ soit convergente est que, pour tout nombre $\varepsilon > 0$, on puisse déterminer un indice N (dépendant en général de ε) tel que, pour tout entier $n \geqslant N$ et tout entier $p > 0$, on ait :

$$|a_{n+1} + a_{n+2} + \ldots\ldots\, a_{n+p}| < \varepsilon.$$

• *Conditions suffisantes de convergence*. Parmi celles-ci on peut citer :

— *le critère de comparaison ;* pour deux séries à termes positifs (c'est-à-dire non négatifs), $\Sigma\, a_n$ et $\Sigma\, b_n$ vérifiant $a_n \leqslant b_n$, lorsque $\Sigma\, b_n$ converge, il en est de même pour $\Sigma\, a_n$, et lorsque $\Sigma\, a_n$ diverge, alors $\Sigma\, b_n$ diverge aussi ;

— *le critère de D'Alembert ;* étant donné la série $\Sigma\, a_n$ $(a_n > 0)$, s'il existe un nombre α, $0 < \alpha < 1$, tel que $\frac{a_{n+1}}{a_n} < \alpha$, alors cette série est convergente ; elle est divergente si $\frac{a_{n+1}}{a_n} \geqslant 1$;

— *le critère de Cauchy*; étant donné la série $\Sigma\, a_n$ $(a_n \geqslant 0)$, s'il existe un nombre β, $0 < \beta < 1$, tel que : $\sqrt[n]{a_n} < \beta$, cette série est convergente ; elle est divergente si : $\sqrt[n]{a_n} \geqslant 1$.

Pour ces trois critères, les conditions (inégalités) à remplir peuvent n'être réalisées qu'à partir d'une certaine valeur de l'indice ; c'est en effet le comportement pour $n \to \infty$ qui détermine la nature de la série. Modifier un nombre fini de termes ne peut donc pas changer le caractère d'une série, mais au plus sa somme lorsque cette série est convergente.

• Un type fréquent de série est celui des *séries alternées*, c'est-à-dire celles dont deux termes consécutifs sont de signes opposés : $u_0 - u_1 + u_2 - u_3 + u_4 - \ldots$ (où $u_n > 0$). Pour qu'une telle série soit convergente, il suffit, outre la condition générale $u_n \to 0$ lorsque $n \to \infty$, qu'elle soit à termes décroissants, c'est-à-dire que l'on ait : $u_0 \geqslant u_1 \geqslant u_2 \geqslant \ldots$

Avant de développer d'autres questions, notons que, sur l'exemple qui nous a servi de présentation, le calcul de la somme de la série peut être réalisé aisément grâce à la série géométrique. On peut en effet écrire :

$$\frac{1}{10}+\frac{6}{10^2}+\frac{6}{10^3}+\frac{6}{10^4}+\ldots =$$
$$\frac{1}{10}+\frac{6}{10^2}\left(1+\frac{1}{10}+\frac{1}{10^2}+\ldots\right) =$$
$$\frac{1}{10}+\frac{6}{10^2}\left(\frac{1}{1-\frac{1}{10}}\right) = \frac{1}{10}+\frac{1}{15} = \frac{1}{6}$$

ce qui correspond bien à la considération de départ.

Séries de fonctions

La notion introduite par les séries numériques s'étend par les séries de fonctions (plus généralement encore par les séries de fonctions vectorielles pour lesquelles on a besoin des outils de l'analyse fonctionnelle, développés au chapitre correspondant) ; dans ce paragraphe, on ne considérera que des fonctions réelles d'une seule variable réelle.

Si $\{u_n(x)\}$ $(n = 0, 1, 2, 3, \ldots)$ désigne une suite de fonctions $u_n(x)$ toutes définies sur le même ensemble $E \subset \mathbb{R}$, pour toute valeur $x_0 \in E$, $\{u_n(x_0)\}$ est une suite numérique ; le symbole $\sum\limits_{n=0}^{\infty} u_n(x_0)$ est alors défini, ainsi que toutes les notions (convergence, divergence, etc.) qui s'y rattachent. Par contre, lorsqu'on considère x comme une variable décrivant E, $\sum\limits_{n=0}^{\infty} u_n(x)$ se présente comme une série de fonctions de la variable x ; si $\sum\limits^{\infty} u_n(x)$ converge pour toute valeur $x \in E$, on dira que la série converge dans E, et la somme $S(x)$ est une fonction définie dans E.

Par exemple, la série géométrique

$$\sum x^n = 1 + x + x^2 + \ldots + x^n + \ldots$$

converge dans l'intervalle $]-1, +1[$ (intervalle ouvert) et y a pour somme $S(x) = \frac{1}{1-x}$. On dit que la série $\sum\limits^{\infty} u_n(x)$ est *absolument convergente* dans E si la série

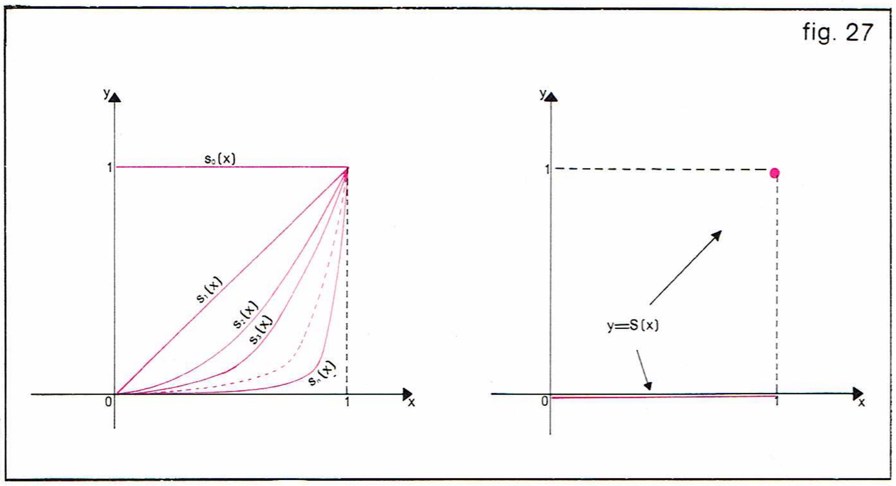

I.G.D.A.

▲ ***Figure 27 :*** ***exemple d'une série de fonctions continues sur un intervalle qui converge (non uniformément) et dont la somme n'est pas continue ; on l'obtient avec*** $u_0(x) = 1$, $u_n(x) = x^{n-1} \cdot (x-1)$ ***sur l'intervalle [0, 1] ; les sommes partielles*** $s_0(x) = 1$, $s_1(x) = x, \ldots,$ $s_n(x) = 1 + (x-1)(1 + x + \ldots + x^{n-1})$ ***montrent que*** $s_n(1) = 1$ ***pour tout*** $n \in \mathbb{N}$, ***donc que*** $S(1) = 1$; ***par contre si*** $x \in [0, 1[$ $s_n(x) = 1 + (x-1) \cdot \dfrac{x^n - 1}{x-1} = x^n$ ***et donc*** $S(x) = 0$.

$\sum^{\infty} |u_n(x)|$ converge dans E.

C'est en cherchant à étendre aux séries de fonctions les quelques opérations déjà connues pour des sommes finies de fonctions (par exemple, le passage à la limite, la continuité, la dérivation ou l'intégration terme à terme) que s'est dégagée la notion fondamentale de *convergence uniforme*.

Lorsque la série $\sum^{\infty} u_n(x)$ converge dans E avec une somme égale à S (x), alors, pour tout $x \in$ E, si l'on fixe $\varepsilon > 0$, on peut trouver un entier $n_0 = n_0(\varepsilon, x)$ tel que, dès que $n \geqslant n_0$, on ait :

$$\left| S(x) - \sum_{k=0}^{n} u_k(x) \right| < \varepsilon.$$

Il arrive que, pour $\varepsilon > 0$ fixé, il soit possible de déterminer l'entier n_0 en ne tenant compte que de ε (par conséquent, cet entier reste le même pour toutes les valeurs de $x \in$ E), de telle façon que la condition précédente soit vérifiée. C'est dans ce cas que l'on dit que la série est uniformément convergente dans E ; il est évident que la notion de convergence uniforme est relative au comportement de la série sur un ensemble, et non pas en un seul point.

Pour la convergence uniforme, on a encore la **condition générale** suivante (dite **de Cauchy**) : une condition nécessaire et suffisante pour que la série $\sum^{\infty} u_n(x)$ converge uniformément dans E est que, pour tout nombre $\varepsilon > 0$,on puisse déterminer un entier $n_0 = n_0(\varepsilon)$, tel que, dès que $n \geqslant n_0$ et $p > 0$ (n et p entiers), on ait :

$$|u_{n+1}(x) + u_{n+2}(x) + u_{n+3}(x) + \ldots + u_{n+p}(x)| < \varepsilon$$

ce, quel que soit $x \in$ E.

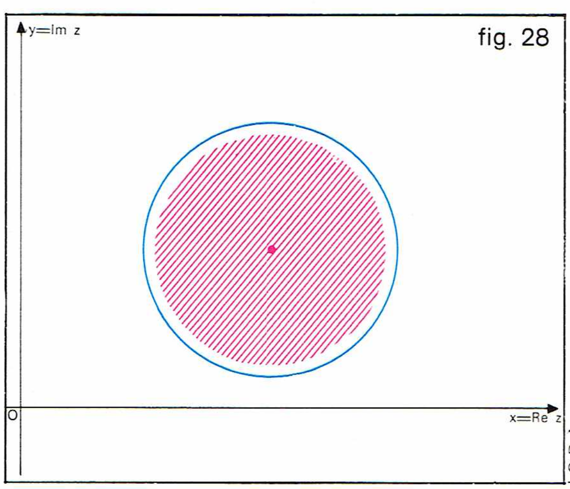

I.G.D.A.

▶ ***Figure 28 :*** ***cercle de convergence de la série entière*** $\sum_{n=0}^{\infty} c_n (z-a)^n$, ***z étant une variable complexe. Le cercle hachuré, concentrique et de rayon inférieur, représente un ensemble de points dans lequel la série donnée est uniformément convergente.***

Dans les applications courantes, on utilise souvent le critère suivant, qui est une condition suffisante : la série $\sum^{\infty} u_n(x)$ est uniformément convergente dans E s'il existe une série numérique $\sum^{\infty} a_n$, à termes positifs, convergente et telle que l'inégalité $|u_n(x)| \leqslant a_n$ soit vérifiée pour tout $x \in$ E.

Ainsi, la série de terme général $\dfrac{\sin x}{2^n} = u_n(x)$ est uniformément convergente dans $\mathbb{R}$ tout entier, puisque $|\sin x| \leqslant 1$, donc que $|u_n(x)| \leqslant \dfrac{1}{2^n}$, cette dernière série convergeant en raison du critère de Cauchy énoncé plus haut.

D'un **théorème** très classique (dit **de la double limite**) concernant les suites de fonctions, on déduit — entre autres — le résultat suivant : la somme d'une série de fonctions continues sur l'ensemble fermé E, uniformément convergente dans E, est une fonction continue sur E.

De même, les théorèmes suivants mettent en valeur l'importance de la notion de convergence uniforme :

— **intégration terme à terme ;** si, pour toutes les valeurs entières de k ($k = 0, 1, 2, \ldots$), $u_k(x)$ est une fonction réelle définie sur l'intervalle fermé $[a, b]$, et intégrable sur le même intervalle, si la série $\sum^{\infty} u_k(x)$ est uniformément convergente dans $[a, b]$ et de somme $f(x)$, alors l'intégrale $\int_a^b f(x)\,dx$ existe, la série

$$\sum_{k=0}^{\infty} \left\{ \int_a^b u_k(x)\,dx \right\}$$

est convergente, et l'on a l'égalité (*fig.* 27) :

$$\int_a^b f(x)\,dx = \sum_{k=0}^{\infty} \left\{ \int_a^b u_k(x)\,dx \right\}$$

— **dérivation terme à terme ;** si la série $\sum^{\infty} u_k(x)$ converge dans l'intervalle fermé $[a, b]$, sa somme étant $f(x)$, si, pour toutes les valeurs entières de k ($k = 0, 1, 2, \ldots$), la fonction $u_k(x)$ est dérivable, et si la série $\sum^{\infty} u'_k(x)$ des dérivées est uniformément convergente dans le même intervalle, alors :

la fonction $f(x)$ est dérivable sur l'intervalle ouvert $]a, b[$

et on a l'égalité : $f'(x) = \sum_{k=0}^{\infty} u'_k(x)$.

Séries entières

Un cas particulier parmi les séries de fonctions, et très utilisé, est constitué par les *séries entières* ou *séries de puissances*. On appelle série entière de la variable x, centrée en a, toute série de la forme :

$$\sum_{n=0}^{\infty} c_n (x-a)^n = c_0 + c_1(x-a) + c_2(x-a)^2 + \ldots + c_n(x-a)^n + \ldots$$

où c_n ($n = 0, 1, 2, \ldots$), a et x sont, de la façon la plus générale, des nombres complexes. En particulier, lorsque $a = 0$ (série centrée à l'origine), la série entière prend la forme $\sum_{n=0}^{\infty} c_n x^n = c_0 + c_1 x + c_2 x^2 + \ldots + c_n x^n + \ldots$

Toute série entière est convergente en son centre ; il existe des séries entières qui convergent dans tout le plan complexe $\left(\text{ainsi la série exponentielle } \sum_{n=0}^{\infty} \dfrac{x^n}{n!}\right)$, d'autres qui convergent en certains points et seulement en ceux-là (par exemple, la série géométrique convergente à l'intérieur du disque unité $|x| < 1$), d'autres enfin qui ne convergent qu'au centre $\left(\text{par exemple, la série } \sum_{n=0}^{\infty} n!\,x^n\right)$.

On montre que, lorsqu'une série entière converge en d'autres points que son centre — mais sans converger dans le plan complexe tout entier —, alors il existe un cercle, appelé cercle de convergence, centré au point a, tel que la série converge en tout point x *intérieur* à ce cercle et diverge en tout point *extérieur* à ce cercle (*fig.* 28). Le rayon de ce cercle est dit *rayon de convergence* de la série. Sur les points de la circonférence, le comportement de la série ne peut être établi de façon générale : il varie selon les cas. Une série entière qui converge dans tout le plan est dite avoir un *rayon de convergence infini*, tandis qu'une série entière ne convergeant qu'en son centre a un *rayon de convergence nul*.

La propriété essentielle du cercle de convergence d'une série entière est que cette série *converge uniformément* dans tout disque fermé de même centre et de rayon strictement plus petit que le rayon de convergence. Il y a même convergence absolue de la série en tout point situé à l'intérieur du cercle de convergence.

Le rayon de convergence dépend de la suite des coefficients c_n, en fait de la suite de leurs modules $|c_n|$. Son calcul s'effectue selon la classique *relation de Hadamard :*

$$\frac{1}{R} = \limsup_{n \to \infty} \sqrt[n]{|c_n|}$$

dans laquelle sont inclus, avec une interprétation évidente, le cas où $R = 0$ et le cas où $R = \infty$.

A l'intérieur du cercle de convergence, on peut aussi bien dériver terme à terme qu'intégrer terme à terme une série entière. La série des dérivées et la série des primitives ont d'ailleurs le même rayon de convergence.

L'étude des séries entières de rayon de convergence non nul a permis à K. Weierstrass de développer l'étude de la théorie des fonctions analytiques de variable complexe.

D'autres types de séries de fonctions ont une utilisation courante, tant en analyse mathématique que dans ses applications : les séries trigonométriques, dont on parlera plus loin pour les développements de fonctions en série de Fourier; les développements en série de fonctions orthogonales; les séries de Dirichlet, particulièrement intéressantes dans les récents développements de la théorie analytique des nombres; ou encore les séries de Laurent, à la base de la théorie des fonctions de variable complexe, pour ne citer que les plus classiques.

Équations différentielles

Il arrive souvent qu'à l'occasion de problèmes (géométriques, physiques, etc.) dans lesquels interviennent une variable indépendante x et une variable y dépendant de x, on ait à considérer — en vue de la solution — une équation liant x, y et ses dérivées (par rapport à x) $y', y'', ..., y^{(n)}$ jusqu'à un certain ordre n :

$$\varphi\,(x, y, y', ..., y^{(n)}) = 0.$$

De l'étude de cette relation, on se propose de déduire le maximum possible d'informations sur la dépendance de y selon x, plus précisément de déterminer la fonction $y = y\,(x)$ qui vérifie, quelle que soit la valeur prise par x dans un certain intervalle, l'équation :

$$\varphi\,(x, y\,(x), y'\,(x), ..., y^{(n)}\,(x)) = 0.$$

L'équation $\varphi\,(x, y, y', ..., y^{(n)}) = 0$ s'appelle *équation différentielle d'ordre n ; n* est ici le plus grand ordre de dérivation parmi les dérivées figurant effectivement dans l'équation (par exemple, $x^2y''' - e^x \cdot y' + (\log x)\, y = 0$ est une équation différentielle d'ordre 3).

Lorsqu'il est possible de transformer l'équation de telle sorte que l'on puisse *résoudre* par rapport à (c'est-à-dire isoler) la dérivée de plus grand ordre, l'équation obtenue : $y^{(n)} = F\,(x, y, y', ..., y^{(n-1)})$ est dite écrite sous sa « forme normale »; il est évident que dans certains cas, une équation différentielle donne lieu à plusieurs « formes normales » :
par exemple, l'équation

$$y'''^2 - xy' + e^x = 0$$

peut s'écrire sous les deux formes normales

$$y''' = (xy' - e^x)^{1/2} \quad \text{ou} \quad y''' = -\,(xy' - e^x)^{1/2}.$$

Résoudre une équation différentielle signifie rechercher l'ensemble de toutes les fonctions $y\,(x)$ vérifiant l'équation donnée. Dans le cas le plus général, on peut dire que

Palais de la Découverte - Paris

◄ ***Famille de solutions d'équation différentielle du premier degré.***

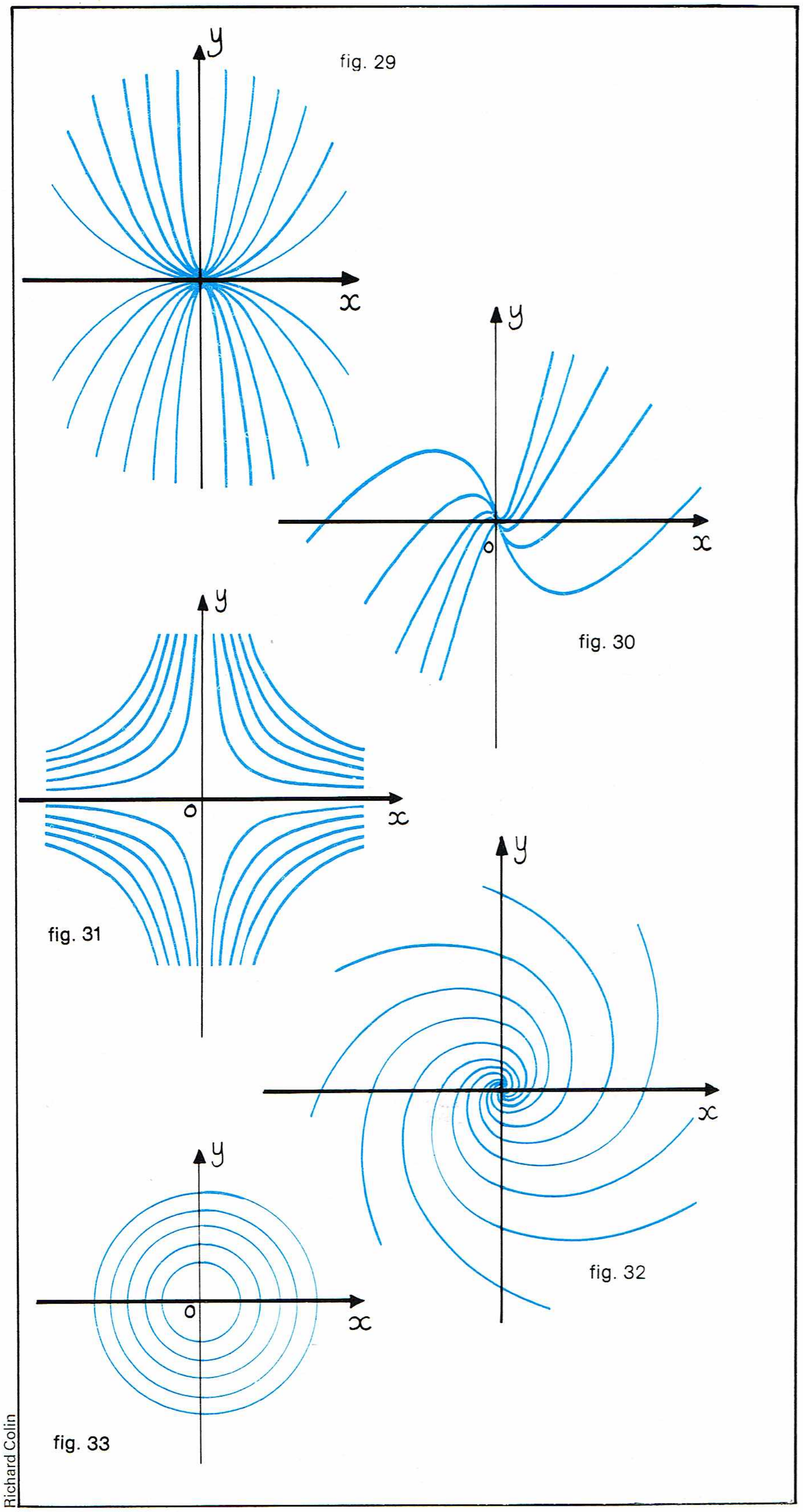

▲ *Figure 29 : famille des solutions* ($y = Cx^2$) *de l'équation* $xy' = 2y$.
Figure 30 : famille des solutions ($y = x \text{ Log } |x| + Cx$) *de l'équation* $xy' = x + y$.
Figure 31 : famille des solutions ($xy = C$) *de l'équation* $xy' = -y$ *avec pour* $C = 0$, $\{x = 0, y = 0\}$.
Figure 32 : famille des solutions ($r = Ce^{\varphi}$) *de l'équation* $y' = \dfrac{x+y}{x-y}$ *avec* $x = r \cos \varphi$, $y = r \sin \varphi$.
Figure 33 : famille des solutions ($x^2 + y^2 = C$) *de l'équation* $yy' = -x$.

lorsqu'une équation différentielle d'ordre n possède des solutions, celles-ci sont définies implicitement par une famille d'équations du type $\Psi (x, y, c_1, c_2, ..., c_n) = 0$, et le **théorème des fonctions implicites** permet de conclure à l'existence d'un ou plusieurs systèmes de fonctions $y = y (x ; c_1, c_2, c_3, ..., c_n)$, chacune dépendant en fait de n paramètres arbitraires.

En adoptant un langage inspiré de considérations à caractère géométrique, on appellera *courbe intégrale de l'équation* une telle famille de solutions ; en effet, on pourrait construire (par dérivation et élimination de paramètres) une équation différentielle d'ordre m, à partir d'une famille de courbes $\varphi (x, y ; a_1, a_2, ..., a_m) = 0$ dépendant effectivement de m paramètres. Par exemple, en partant de la famille des cercles de rayon r fixe et de centre (a, b) variable dans le plan :

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 - r^2 = 0$$

on obtient en dérivant deux fois (autant de fois que de paramètres) :

$$(x - a) + (y - b)\, y' = 0$$

puis

$$1 + y'^2 + (y - b)\, y'' = 0$$

et l'élimination des paramètres a, b entre ces trois équations donne l'équation différentielle du second ordre :

$$(1 + y'^2)^3 - r^2 y''^2 = 0$$

qui admet comme système de courbes intégrales la famille (doublement infinie) des cercles $\varphi (x, y ; a, b) = 0$ de laquelle nous sommes partis, et qui dépend de deux paramètres arbitraires.

L'équation $\Psi (x, y ; c_1, c_2, ..., c_n) = 0$ s'appelle l'*intégrale générale* de l'équation, et pour un *n-uplet* particulier de constantes : $c_1, c_2, ..., c_n$, on obtient $\Psi (x, y ; c_1, c_2, ..., c_n)$ que l'on appelle une *intégrale particulière* ; les *intégrales singulières* sont, elles, des fonctions $y = \gamma (x)$ vérifiant l'équation différentielle mais ne pouvant être considérées comme des cas particuliers de l'intégrale générale.

L'expression exacte de l'intégrale générale par des opérations et fonctions usuelles est réalisable, à un niveau élémentaire, uniquement pour quelques types particuliers d'équations, présentées plus loin. Naturellement, dès que l'on dispose de notions et d'instruments d'analyse mathématique plus « sophistiqués », la classe des équations différentielles résolubles (au sens indiqué) s'élargit beaucoup.

Dans les autres cas, et selon les contraintes du problème pratique de départ, avant de rechercher l'ensemble de toutes les solutions, on essaie de trouver une solution particulière possédant les propriétés demandées par le problème particulier qui est examiné : ces propriétés peuvent avoir trait au comportement de la solution particulière en un point, par exemple aux « conditions initiales » ; la détermination d'une solution vérifiant un système donné de conditions initiales est désignée sous le nom de « *problème de Cauchy* ». D'autres fois, les conditions restrictives peuvent être relatives à des points divers, et l'on dit alors que l'on a un « *problème aux limites* ».

Types simples d'équations du premier ordre

Parmi les équations du premier ordre (*fig.* 29, 30, 31, 32 et 33), on distinguera les suivantes :

● *Les équations à variables séparées ou séparables*, que l'on peut donc mettre sous la forme $A(x)\,dx = B(y)\,dy$, qui donnent alors $\int A(x)\,dx = \int B(y)\,dy + c$ pour intégrale générale.

● *Les équations différentielles exactes*, de la forme $A(x, y)\,dx + B(x, y)\,dy = 0$ où le premier membre est la différentielle exacte d'une certaine « fonction potentiel » $U(x, y)$; il faut donc que

$$\frac{\partial A}{\partial y}(x, y) = \frac{\partial B}{\partial x}(x, y)$$

et $U(x, y) = c$ est alors l'intégrale générale.

● *Les équations homogènes*, qui s'écrivent $y' = f\left(\dfrac{y}{x}\right)$, où $y' = \dfrac{dy}{dx}$; la transformation $y = t \cdot x$

$$(\text{donc } dy = t \cdot dx + x dt)$$

ramène alors ce type d'équation au type précédent.

- *Les équations linéaires,* de la forme

$$y' = A(x)\,y + B(x).$$

L'intégrale générale de cette équation s'obtient en ajoutant à une solution particulière l'intégrale générale de l'équation homogène $y' = A(x)\,y$ associée, et s'écrit sous la forme :

$$y = \exp\left(\int A(x)\,dx\right) \cdot \left[B(x)\exp\left(-\int A(x)\,dx + c\right)\right];$$

la méthode utilisée est celle de la « variation de la constante ».

- *Les équations de Bernouilli :* $y' = A(x)\,y + B(x)\,y^r$, où r est un nombre réel non nul et différent de 1.

La substitution $y = z^{1/1-r}$ (donc $y' = \frac{1}{1-r} z^{\frac{r}{1-r}} \cdot z'$) transforme l'équation donnée en une équation différentielle linéaire, du type précédent, de la variable $z = z(x)$;

- *Les équations de Riccati :*

$$y' = A(x)\,y^2 + B(x)\,y + C(x).$$

La résolution présuppose la connaissance d'une solution particulière $\varphi(x)$; la transformation $y = \varphi(x) + \frac{1}{z}$ ramène alors l'équation donnée à une équation différentielle linéaire relativement à $z = z(x)$.

Dans les quatre derniers types d'équations, il s'agissait d'équations résolues par rapport à y' ; les deux suivantes sont, par contre, des cas que l'on ne peut mettre sous forme normale.

- *L'équation de Lagrange :*

$$y = xA(y') + B(y') \qquad [B(y') \neq y'].$$

En posant $y' = t = t(x)$, on obtient $y = xA(t) + B(t)$; en dérivant, il vient $t = A(t) + xA'(t) \cdot t' + B'(t) \cdot t'$ avec $t' = \frac{dt}{dx}$; d'où l'équation linéaire de la variable $x = x(t)$:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{A'(t)}{t - A(t)} \cdot x + \frac{B'(t)}{t - A(t)}$$

- *L'équation de Clairaut :* $y = xy' + A(y')$. On pose $y' = t$ et on obtient l'intégrale générale $y = cx + A(c)$.

Intégrale singulière : $\begin{cases} x = -A'(t) \\ y = tx + A(t) \end{cases}$ que l'on obtient simplement en dérivant l'équation de départ par rapport à x.

Types simples d'équations du second ordre

- Dans les équations de la forme $F(x, y', y'') = 0$, on pose $y' = t = t(x)$ donc $y'' = t'$. Ceci ramène l'équation à une équation du premier ordre relativement à t de laquelle résulte l'intégrale $\varphi(x, t, c_1) = 0$; par conséquent, on a de nouveau une équation du premier ordre $\varphi(x, y', c_1) = 0$ de laquelle on déduit l'intégrale générale $f(x, y; c_1, c_2) = 0$.
- Dans les équations de la forme $F(y, y', y'') = 0$ on tient compte de l'égalité $y'' = \frac{dy'}{dy} \cdot y'$ pour considérer la transformation $y' = t(y)$. On obtient alors une équation du premier ordre : $F(y, t, t' \cdot t) = 0$ dont l'intégrale générale a la forme $\varphi(y, t; c_1) = 0$. Puis de cette nouvelle équation différentielle du premier ordre $\varphi(y, y'; c_1) = 0$, on obtient l'intégrale générale cherchée sous la forme : $f(x, y; c_1, c_2) = 0$ (*fig.* 34, 35, 36 et 37).

Équations différentielles linéaires d'ordre *n*

Il s'agit d'équations de la forme :

$$p_0(x)\,y^{(n)} + p_1(x)\,y^{(n-1)} + \ldots + p_n(x)\,y = A(x)$$

où les fonctions $p_i(x)$, $(i = 1, 2, \ldots, n)$ et $A(x)$ sont continues dans un intervalle $[a, b]$, avec de plus $p_0(x) \neq 0$ pour tout $x \in [a, b]$. Lorsque le second membre $A(x)$ n'est pas identiquement nul sur $[a, b]$, on dit que l'équation est complète, et si $A(x) = 0$ sur $[a, b]$, on dit que l'on a une équation homogène.

La linéarité du premier membre, relativement à

$$y, y', \ldots, y^{(n)}$$

entraîne que, si $\varphi_1(x)$, $\varphi_2(x)$, ..., $\varphi_k(x)$ représentent des solutions quelconques de l'équation homogène (c'est-à-

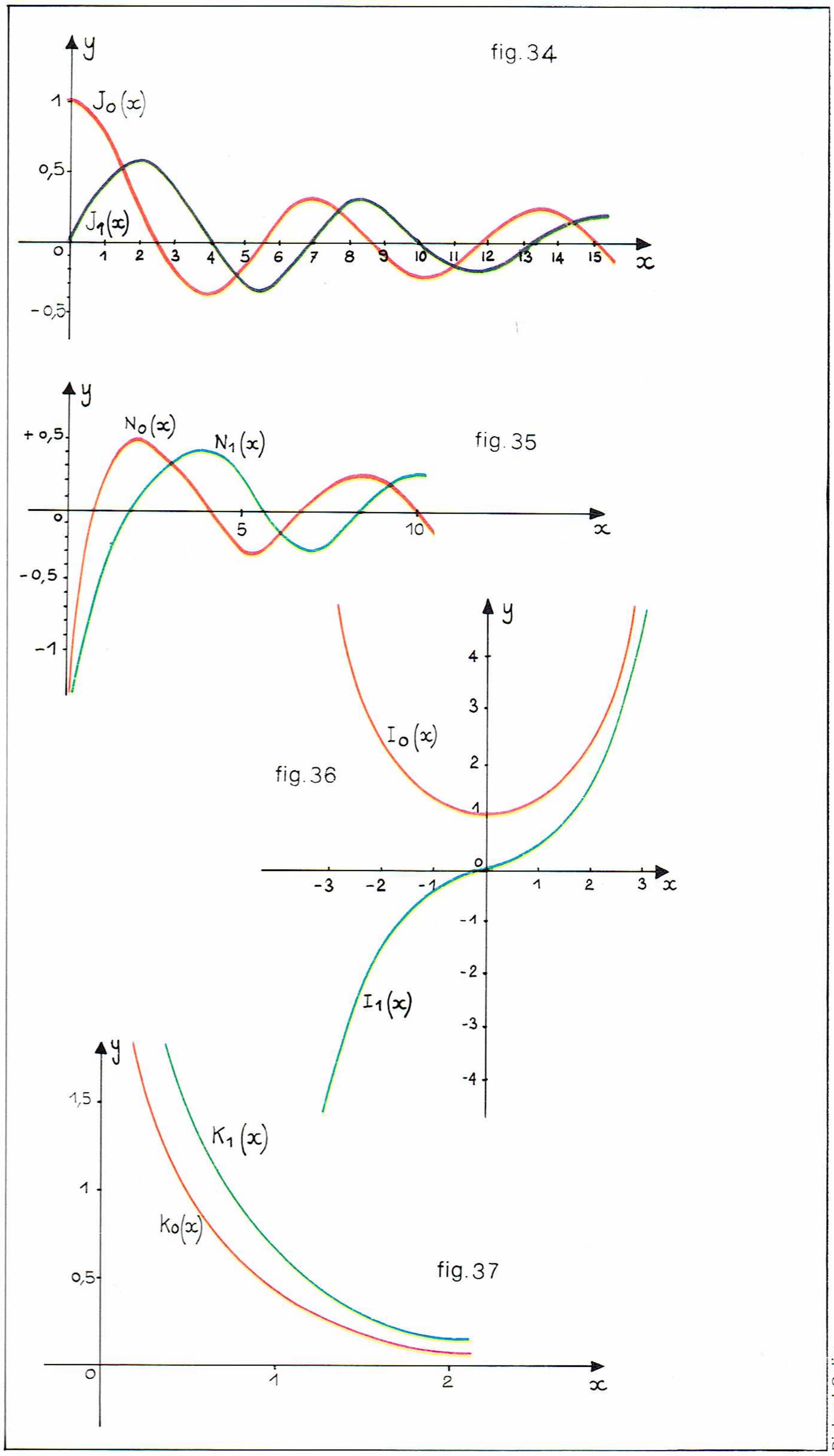

Richard Colin

▲ *Figure 34 : les deux premières* fonctions de Bessel *$J_0(x)$ et $J_1(x)$, solutions de l'équation :* $y'' + \frac{1}{x}y' + \left(1 - \frac{\nu^2}{x^2}\right)y = 0$ *pour* $\nu = 0$ *et* $\nu = 1$.

Figure 35 : les deux premières fonctions de von Neumann, *définies par*

$N_\nu(x) = \frac{\cos\nu\pi \cdot J_\nu(x) - J_{-\nu}(x)}{\sin\nu\pi}$, $\nu \neq \mathbb{Z}$

$N_k(x) = \lim_{\nu \to k} N_\nu(x)$, $k \in \mathbb{Z}$ *pour* $k = 0$ *et* $k = 1$.

Figure 36 : les fonctions $I_0(x)$ et $I_1(x)$, solutions de $x^2y'' + xy' + (x^2 + n^2)\,y = 0$ *pour* $n = 0$ *et* $n = 1$*, sont liées aux fonctions de Bessel $J_0(x)$ et $J_1(x)$ par* $I_n(x) = i^{-n} \cdot J_n(ix)$.

Figure 37 : les deux premières fonctions de Kelvin *$K_0(x)$ et $K_1(x)$ définies par* $K_n(x) = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{I_{-n}(x) - I_n(x)}{\sin n\pi}$ *pour* $n = 0$ *et* $n = 1$.

dire sans second membre), alors toute combinaison linéaire de ces solutions,

$$y(x) = c_1 \varphi_1(x) + c_2 \varphi_2(x) + \dots + c_k \varphi_k(x)$$

(où les c_i sont des constantes) est encore solution de la même équation homogène.

On montre que l'ensemble des solutions d'une équation différentielle linéaire d'ordre n forme, pour les opérations usuelles d'addition et de produit par une constante, un espace vectoriel de dimension finie n. Il est donc suffisant, pour construire l'intégrale générale d'une telle équation, de déterminer exactement n solutions linéairement indépendantes, puisque celles-ci forment alors une base de l'espace des solutions : on dit que l'on a un système fondamental de solutions : $\varphi_1(x), \varphi_2(x), \dots, \varphi_n(x)$; la famille des fonctions $c_1\varphi_1(x) + c_2\varphi_2(x) + \dots + c_n\varphi_n(x)$ dépendant des n paramètres $c_1, c_2, \dots, c_n$ est alors l'intégrale générale de l'équation homogène donnée.

Dans le cas des équations différentielles linéaires complètes, on montre que l'intégrale générale s'obtient en ajoutant à une intégrale particulière $y^*(x)$ la solution générale de l'équation linéaire homogène associée (c'est-à-dire où l'on a remplacé le second membre A (x) par 0) ; donc :

$$y = y^*(x) + c_1\varphi_1(x) + c_2\varphi_2(x) + \dots + c_n\varphi_n(x).$$

Un cas particulier très intéressant et fréquemment rencontré est celui des équations différentielles linéaires à coefficients constants :

$$a_0 y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \dots + a_n y = Q(x)$$

$a_0, a_1, \dots, a_n$ étant des constantes. On considère l'équation homogène associée :

$$a_0 y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \dots + a_n y = 0.$$

La recherche d'un système fondamental de solutions, dans ce cas, conduit à la résolution de l'équation algébrique, dite *équation caractéristique :*

$$a_0 r^n + a_1 r^{n-1} + \dots + a_n = 0$$

où les coefficients a_i sont les mêmes que dans l'équation proposée, et r l'inconnue.

Dans le domaine complexe $\mathbb{C}$, une telle équation admet **(théorème de D'Alembert-Gauss)** n racines $r_1, r_2, \dots, r_n$; les fonctions exp $(r_k x)$ $(k = 1, 2, \dots, n)$ sont des intégrales de l'équation différentielle homogène, puisque :

$$[\exp(r_k x)]^{(p)} = r_k^p \exp(r_k x).$$

Si les racines r_k sont toutes distinctes, les n intégrales particulières $e^{r_k x}$ $(k = 1, 2, \dots, n)$ constituent un système fondamental de solutions, et, par suite, l'intégrale générale qui en résulte est :

$$y = c_1 e^{r_1 x} + c_2 e^{r_2 x} + \dots + c_n e^{r_n x}$$

où $c_1, c_2, \dots, c_n$ sont des *constantes arbitraires*.

Si l'une des racines r est multiple et si m $(\leqslant n)$ désigne son ordre de multiplicité, alors la suite (le *m-uple*) de solutions :

$$e^{rx}, xe^{rx}, x^2 e^{rx}, \dots, x^m e^{rx}$$

forme un système linéairement indépendant, qui, réuni avec les $n - m$ racines distinctes restantes, constitue un système fondamental de solutions, et l'intégrale générale cherchée est combinaison linéaire des éléments de ce système.

Lorsque l'on est dans le cas où l'équation caractéristique admet des racines complexes, bien que les coefficients a_i soient réels, on remarque que pour toute racine complexe $r = \alpha + i\beta$, le nombre complexe conjugué $\bar{r} = \alpha - i\beta$ est aussi racine, de telle sorte que, par combinaison linéaire appropriée des deux solutions $e^{(\alpha + i\beta)x}$ et $e^{(\alpha - i\beta)x}$, et grâce aux formules d'Euler (voir *Trigonométrie*), on obtienne les deux solutions particulières réelles :

$$e^{\alpha x} \cos \beta x \quad \text{et} \quad e^{\alpha x} \sin \beta x.$$

Équations aux dérivées partielles

Lorsque la fonction inconnue est une fonction de deux ou plusieurs variables indépendantes, l'équation qui lie la fonction à ses dérivées, donc en fait les dérivées partielles, jusqu'à l'ordre n, s'appelle *équation aux dérivées partielles* d'ordre n. Ces équations sont fondamentales, par exemple en physique mathématique, en physique théorique (où les problèmes traités admettent usuellement le temps et les coordonnées d'un point arbitraire comme variables indépendantes), en économie mathématique, etc.

La résolution de ces équations est, en général, délicate et complexe. Après avoir posé le problème et quelques considérations de base, nous examinerons ici quelques équations classiques.

● Les *équations aux dérivées partielles du premier ordre*, pour des fonctions de deux variables indépendantes, se présentent sous la forme :

$$\varphi\left(x, y, z, \frac{\partial z}{\partial x}, \frac{\partial z}{\partial y}\right) = 0.$$

Or, il est à constater que, lors d'une dérivation partielle, comme pour une constante additive, on a « disparition » de tout ce qui est fonction de l'autre variable (par exemple, si $z = y^2 + \Psi(x)$, on a $\frac{\partial z}{\partial y} = 2y\Big)$; on voit là le moyen d'obtenir une équation aux dérivées partielles par différence d'équations différentielles classiques au moyen d'une élimination appropriée de fonctions arbitraires. Les solutions d'équations aux dérivées partielles contiendront donc des *fonctions arbitraires*, de même que les solutions d'équations différentielles contiennent des constantes arbitraires.

Ainsi, l'équation aux dérivées partielles du premier ordre, linéaire, s'écrit :

$$A(x, y, z)\frac{\partial z}{\partial x} + B(x, y, z)\frac{\partial z}{\partial y} = C(x, y, z)$$

où A, B, C, sont des fonctions données [une telle équation pourrait être obtenue de l'équation $\varphi(u, v) = 0$, où $u = u(x, y, z)$ et $v = v(x, y, z)$, en éliminant la fonction arbitraire φ].

● Parmi les *équations aux dérivées partielles d'ordre supérieur à* 1, fréquemment utilisées dans tous les domaines de la physique, on peut distinguer :

— *L'équation des cordes vibrantes :*

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

où t représente le temps ; la corde élastique homogène est tendue entre les points (0, 0) et $(l, 0)$ de l'axe x, vibrant ensuite dans le plan Oxy ; l'abscisse d'un point de la corde x détermine au temps t son ordonnée $y = y(x, t)$; enfin a^2 est une constante liée aux caractéristiques physiques de la corde.

Le changement de variable $x + at = u$, $x - at = v$ transforme l'équation de départ en $\frac{\partial^2 y}{\partial u \, \partial v} = 0$, que l'on résout :

$$\frac{\partial y}{\partial u} = f_1(u), \text{ où } f_1 \text{ est arbitraire,}$$

soit $y = f(u) + g(v)$, où f est une primitive de f_1 et g une fonction arbitraire. D'où la solution générale de l'équation :

$$y(x, t) = f(x + at) + g(x - at)$$

où f et g sont deux fonctions (continûment différentiables) deux fois arbitraires. Il est aisé de donner un aspect physique à cette intégrale générale si l'on remarque que la constante a peut s'interpréter comme une vitesse de propagation des ondes.

Le problème de Cauchy, qui correspond aux conditions initiales

$$\begin{cases} y_0(x) = y(x, 0), \text{ forme de la corde à l'instant initial ;} \\ y_1(x) = \frac{\partial y}{\partial t}(x, 0), \text{ vitesse le long de la corde à l'instant initial ;} \end{cases}$$

admet une solution unique :

$$y(x, t) = \frac{1}{2}\left\{ y_0(x + at) + y_0(x - at) \right\} + \frac{1}{2a}\int_{x-at}^{x+at} y_1(u)\, du$$

La résolution de cette équation permet de discuter de nombreux problèmes physiques tels que ceux posés par des vibrations longitudinales ou par des tuyaux sonores.

— *Équation de Laplace :*

$$\Delta V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0.$$

La fonction V (x, y, z) — où (x, y, z) désigne un point quelconque de l'espace — admet comme interprétations physiques les suivantes :

potentiel de gravitation en milieu privé de points matériels ;

potentiel électrique dans un diélectrique uniforme ;

potentiel magnétique, etc.

— *Équation de Poisson :*

$$\Delta V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = f(x, y, z)$$

où $f(x, y, z)$ est une fonction donnée, définie par le problème concret.

Ici V peut être interprété comme :

potentiel de gravitation dans un milieu où $f(x, y, z)$ est proportionnel à la densité de matière ;

potentiel électrostatique dans un milieu où $f(x, y, z)$ est proportionnel à la distribution des charges, etc.

— *Équation de la chaleur :*

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = \frac{1}{k} \frac{\partial V}{\partial t}$$

où V représente la température à l'instant t du point (x, y, z) d'un corps homogène isotrope, et k une constante de diffusion, caractéristique du matériau. Lorsque la température est stationnaire, alors $\frac{\partial V}{\partial t} = 0$, et l'on retrouve l'équation de Laplace.

Dans le cas de l'équation, dite simplifiée : $\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = \frac{\partial V}{\partial t}$, on montre que, pour toute fonction $f(u)$ suffisamment régulière, on a la solution :

$$G_f(x, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2\sqrt{\pi t}} \exp\left(\frac{-(x-u)^2}{4t}\right) \cdot f(u)\, du$$

Le problème de Cauchy, correspondant à la condition initiale $V_0(x) = V(x, 0)$, admet la solution :

$$V(x, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2\sqrt{\pi t}} \exp\left(\frac{-(x-u)^2}{4t}\right) \cdot V_0(u)\, du$$

— *Équation des ondes :*

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 V}{\partial t^2}$$

où c est la vitesse de propagation de l'onde.

Ses applications sont bien connues en théories électromagnétiques. Dans le cas monodimensionnel, on retrouve l'équation des cordes vibrantes.

— *Équation de Schrödinger :*

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{8\pi^2 m}{h^2} (V - W)\, u$$

où m désigne la masse d'une particule dotée de l'énergie totale W, V étant son énergie potentielle, et h la constante de Planck. Cette équation intervient en mécanique quantique.

Fonctions de variable complexe

L'étude des séries entières est, historiquement, à l'origine du développement de l'analyse par les fonctions de variable complexe ; c'est d'abord une extension du cadre des fonctions analytiques (d'où résultent le concept essentiel de dérivation complexe et celui de fonction holomorphe), puis l'étude plus générale menée à l'aide de l'intégrale curviligne : on aborde alors tous les problèmes de primitives. La recherche de solutions globales, étendant les résultats locaux obtenus par la théorie de Cauchy, débouche alors rapidement sur des problèmes de géométrie et de topologie algébrique.

Sur un plan très pratique, l'un des aboutissements de la théorie de Cauchy est le **théorème des résidus** qui est continuellement utilisé en calcul intégral ; il n'est pas exagéré de dire qu'il s'agit d'un des outils mathématiques indispensables à la physique classique.

Loin d'être épuisé, le sujet fait encore l'objet de très nombreuses recherches en liaison étroite avec les résultats acquis en topologie algébrique.

Fonctions holomorphes

La dérivation des fonctions de variable complexe est, comme dans le cas réel, l'outil de base de l'analyse. Mais la différence est grande, et le concept de dérivée par rapport à la variable complexe $z = x + iy$ est particulièrement puissant, puisque en fait il recouvre beaucoup plus

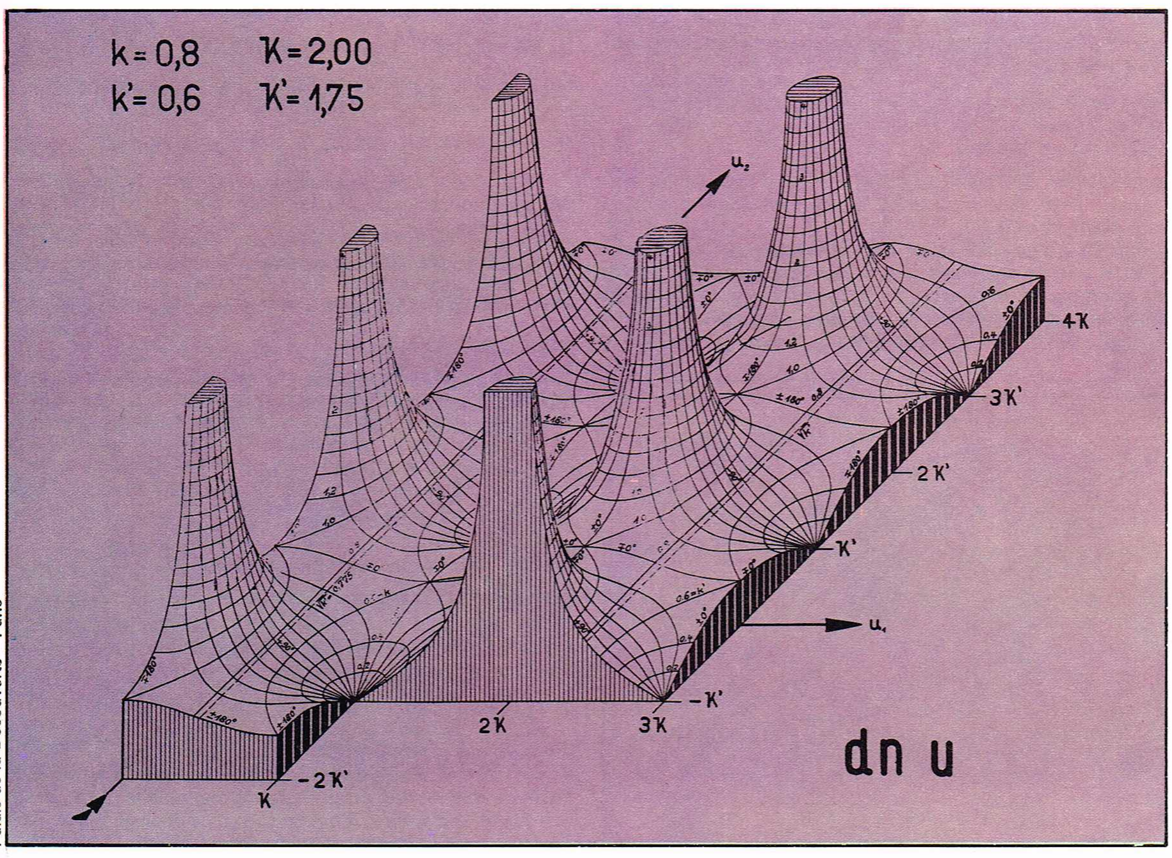

Palais de la Découverte - Paris

◀ ***Relief de la fonction elliptique :*** **dn (u) =** $V_1 - K_2 SN_2(u)$**.**

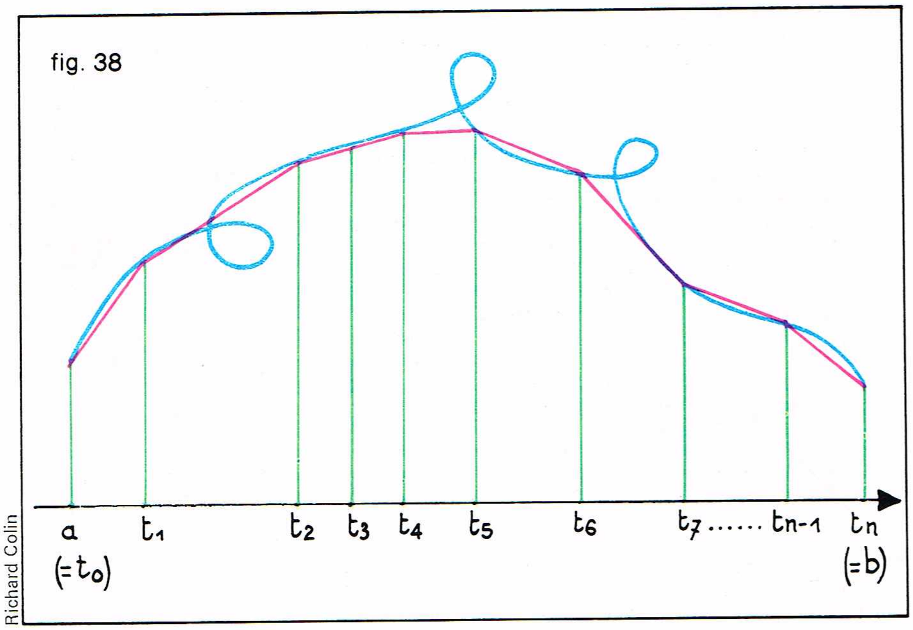

▲ ***Figure 38 : exemple de courbe rectifiable.***

complètement que dans le cas réel l'approximation des valeurs prises par une fonction au voisinage d'un point. La *formule de Taylor,*

$$f(a+h) = f(a) + h f'(a) + \frac{h^2}{2!} f''(a) + ... + \frac{h^n}{n!} f^{(n)}(a) + \frac{h^{n+1}}{(n+1)!} R_n$$

exprimée pour les fonctions réelles d'une variable réelle, permet cette approximation qui est d'autant plus précise que la fonction est à un ordre élevé continûment dérivable.

Mais, malgré ces conditions restrictives, il est aisé de trouver des fonctions « assez régulières » qui ne coïncident pas avec leur développement de Taylor :

$$\sum^{\infty} \frac{1}{n!} f^{(n)}(x_0) \cdot (x - x_0)^n$$

autour d'un point x_0 donné ; par exemple, la fonction définie sur $\mathbb{R}$ par :

$$\begin{cases} f(x) = \exp\left(-\frac{1}{x^2}\right) & \text{si } x \neq 0 \\ f(0) = 0 \end{cases}$$

dont la série de Taylor au point $x_0 = 0$ a tous ses coefficients nuls et converge donc, mais n'est égale à f qu'au seul point $x_0 = 0$.

On dit qu'une *fonction* est *analytique* sur un ouvert $U \subset R$, si elle est égale à son développement de Taylor au point x_0, au voisinage de tout point $x_0 \in U$. Il en est ainsi de multiples fonctions usuelles : logarithme, exponentielle, fonctions trigonométriques circulaires ou hyperboliques, etc. La classe de ces fonctions va se révéler plus aisée à déterminer dès que l'on s'intéressera aux variables complexes.

▼ ***Figure 39 : notion d'homotopie.***

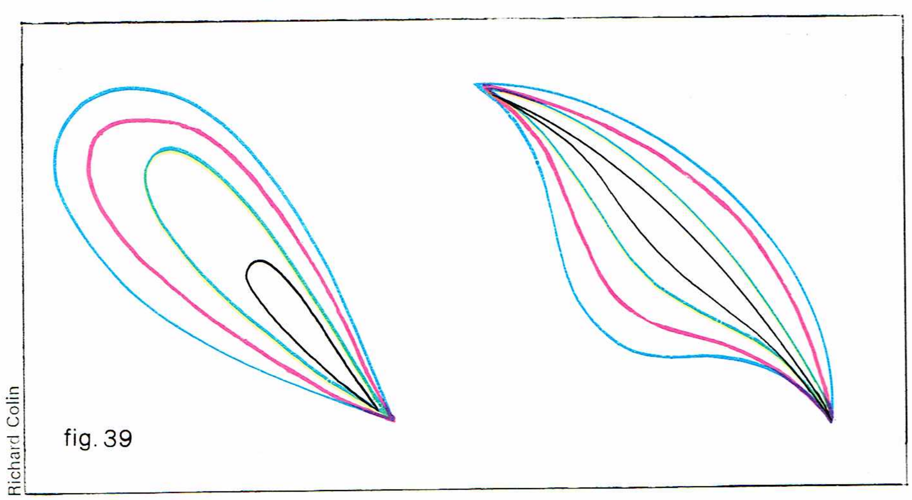

Si donc $f : \Omega \to \mathbb{C}$, où Ω est un ouvert de $\mathbb{C}$, est une fonction de variable complexe, on dit que f est *dérivable* en $a \in \Omega$ si l'expression

$$\lim_{\substack{h \to 0 \\ \neq 0 \\ h \in \mathbb{C}}} \frac{f(a+h) - f(a)}{h} \text{ existe,}$$

(on la note $f'(a)$) en posant $h = h_1 + ih_2$, tel que h tend vers zéro si et seulement si h_1 et h_2 (réels) tendent vers zéro. On dira que f est dérivable ou encore *holomorphe* sur Ω, si ceci est vrai en tout point $a \in \Omega$. Les conditions de Cauchy-Riemann sont des conditions nécessaires et suffisantes d'holomorphie. Si l'on décompose $f(z) = f(x + iy) = P(x, y) + iQ(x, y)$, comme tout nombre complexe, en partie réelle et partie imaginaire, elles s'écrivent :

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial Q}{\partial y}; \qquad \frac{\partial P}{\partial y} = -\frac{\partial Q}{\partial x}$$

Bien entendu, comme pour les fonctions réelles, dérivables, d'une variable réelle, la somme et le produit de fonctions holomorphes, l'inverse d'une fonction holomorphe non nulle sont holomorphes ; le produit de composition — lorsqu'il est licite ($f : \Omega \to G$ et $g : G \to \mathbb{C}$ ont un produit de composition $g \circ f : \Omega \to \mathbb{C}$) — de deux fonctions holomorphes est holomorphe. Dans tous les cas, les formules usuelles de dérivation se transcrivent sans modification.

Si l'on définit, pour $z = x + iy$ et une fonction $f(z)$, les dérivées :

$$\frac{\partial f}{\partial z} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial f}{\partial x} - i\frac{\partial f}{\partial y}\right) \quad \text{et} \quad \frac{\partial f}{\partial \bar{z}} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial f}{\partial x} + i\frac{\partial f}{\partial y}\right)$$

qui se justifient par le fait que :

$$\begin{cases} dz = dx + idy \\ d\bar{z} = dx - idy \end{cases}$$

donc que :

$$dx = \frac{1}{2}(dz + d\bar{z}) \quad \text{et} \quad dy = \frac{1}{2i}(dz - d\bar{z}),$$

donc aussi que :

$$df = \frac{\partial f}{\partial z} dz + \frac{\partial f}{\partial \bar{z}} d\bar{z} \quad \text{puisque } df = \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy,$$

alors la fonction f est holomorphe si et seulement si on a

$$\frac{\partial f}{\partial \bar{z}} = 0.$$

La fonction $z \to z$ est holomorphe, donc les polynômes et les fractions rationnelles (en dehors de leurs pôles, c'est-à-dire des points où s'annule le dénominateur) sont holomorphes. Pour une série entière $\sum^{\infty} a_n z^n$, ayant un rayon de convergence égal à R (qui peut aussi être infini), la fonction $z \to \sum^{\infty} a_n z^n$ qu'elle définit est *holomorphe à l'intérieur* du disque de convergence, c'est-à-dire pour tout $z \in \mathbb{C}$ tel que $|z| < R$.

Par suite, les fonctions

$$\begin{cases} z \to e^z = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{n!} \\ z \to \sin z = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{z^{(2n+1)}}{(2n+1)!} \\ z \to \cos z = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{z^{2n}}{(2n)!} \end{cases}$$

sont holomorphes dans le plan complexe tout entier.

Par contre, les fonctions $z \to \bar{z}$, ou encore $z \to \arg z$, ne sont pas holomorphes.

La notion d'holomorphie, apparemment identique à celle de dérivabilité pour les fonctions réelles d'une variable réelle, est en fait beaucoup plus riche, et par conséquent est un concept mathématique très fort.

Intégrales curvilignes — Théorie de Cauchy

Pour tout segment $[a, b] \subset \mathbb{R}$ et toute application continue $\varphi : [a, b] \to \mathbb{C}$, on appelle *courbe* le couple formé par l'application φ et son image $\varphi([a, b])$, soit $\Gamma = \{\varphi([a, b]), \varphi\}$. On dit que cette courbe est continûment différentiable par morceaux si l'application φ possède cette propriété. On donne le nom de *paramétrage* de Γ à φ. Pour une même courbe Γ, on peut envisager des paramétrages distincts; toutefois, deux paramétrages φ et Ψ de classe C^n seront dits *équivalents :*

$$\begin{cases} \varphi : [\alpha, \beta] \to \mathbb{C} \\ \Psi : [a, b] \to \mathbb{C} \end{cases}$$

pourvu qu'il existe une application $h : [\alpha, \beta] \to [a, b]$, bijective, strictement croissante, de classe C^n telle que : $\varphi = \Psi \circ h$, avec de plus $h'(t) \neq 0$ pour tout $t \in [\alpha, \beta]$.

Ajoutons enfin que, lorsque la fonction de paramétrage φ est telle que, pour toute division

$$a = t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_n = b$$

de l'intervalle $[a, b]$, on a $\sum_{i=1}^{n} |\varphi(t_i) - \varphi(t_{i-1})| < C_\varphi$

où C_φ est une constante qui ne dépend que de φ et non pas du partage $|t_i|$ — on dit que φ est à variation bornée — la *courbe* Γ est dite *rectifiable* (*fig.* 38).

Dans ce cas, $\sum_{i=1}^{n} |\varphi(t_i) - \varphi(t_{i-1})| = L_{\{ti\}}(\varphi)$ représente la longueur de la ligne polygonale inscrite dans Γ, définie par les points M_i ($i = 1, 2, \dots, n$) de la courbe, d'abscisse t_i ($i = 1, 2, \dots, n$). Le pas du partage $\{t_i\}$ étant défini naturellement par $\delta(P) = \sup_i |t_i - t_{i-1}|$ (c'est donc $t_2 - t_1$ dans le cas de figure), si $L_{\{ti\}}(\varphi)$ admet une limite lorsque $\delta(P) \to 0$, cette limite est, bien sûr, la *longueur* de la courbe :

$$\text{longueur } \Gamma = \int_a^b |d\,\varphi(t)| = \int_a^b |\varphi'(t)|\, dt$$

$$= \sup_{\text{partage } \{t_i\}} \sum_{i=1}^{n} |\varphi(t_i) - \varphi(t_{i-1})|.$$

Le dernier terme est appelé *variation* de φ.

Si f est une application d'un ouvert $\Omega \subset \mathbb{C}$, dans $\mathbb{C}$, continue, et si Γ est une courbe paramétrée par φ et $[a, b]$, d'image γ, alors l'expression $\int_a^b f[\varphi(t)]\, d\varphi(t)$ est invariante dans tout changement de paramétrage à l'intérieur de la classe des paramètres équivalents; on la désigne par la notation $\int_\gamma f(z)\, dz$. En particulier, la longueur de γ se note $\int_\gamma |dz|$.

C'est alors tout le problème des primitives, au sens complexe, que l'on peut poser à l'aide des *notions de lacet et d'homotopie* (*fig.* 39), et d'où on peut alors faire ressortir le caractère très particulier des fonctions holomorphes.

Un *lacet* est un chemin, c'est-à-dire une application $\gamma : I = [a, b] \to \mathbb{C}$, dont les extrémités sont égales : $\gamma(a) = \gamma(b)$. Lorsque l'application γ est constante, le *lacet* est dit *constant;* sa trajectoire est réduite à un point. Deux lacets γ_1 et γ_2, contenus dans un ouvert U du plan $\mathbb{C}$, sont dits *homotopes* si l'on peut construire une application $h : I \times I \to \mathbb{C}$ vérifiant :

$$\begin{cases} h(t, a) = \gamma_1(t) \text{ pour tout } t \in I \\ h(t, b) = \gamma_2(t) \\ h(a, u) = h(b, u) \text{ pour tout } u \in I \end{cases}$$

h est donc une « déformation » continue permettant de « passer » de γ_1 à γ_2.

Un ouvert $U \subset \mathbb{C}$ est dit *simplement connexe* lorsque tout lacet γ de U est homotope dans U à un lacet constant (ou homotope à un point).

Le **théorème de Cauchy** exprime alors que, pour une fonction $f : U \to \mathbb{C}$, holomorphe dans un ouvert U simplement connexe, l'intégrale de f le long de tout lacet γ de U est nulle :

$$\int_\gamma f(z)\, dz = 0.$$

Plus généralement, si γ_1 et γ_2 sont deux lacets homotopes d'un ouvert $U \subset \mathbb{C}$ quelconque, pour toute fonction $f : U \to \mathbb{C}$, holomorphe dans U, on a :

$$\int_{\gamma_1} f(z)\, dz = \int_{\gamma_2} f(z)\, dz.$$

Cette intégrale ne dépend donc que de la classe d'homotopie du contour d'intégration (voir *Courbes et surfaces*).

La conséquence est que toute fonction holomorphe dans un ouvert y admet localement une primitive qui est aussi holomorphe; c'est-à-dire que, pour tout point de cet ouvert, on peut déterminer un voisinage de ce point dans lequel la fonction admet une primitive, qui est holomorphe.

Ce théorème permet d'établir la *formule intégrale de Cauchy*. Celle-ci montre que, à l'intérieur (dans un sens qu'il convient de préciser) d'un chemin fermé de $\mathbb{C}$, le comportement d'une fonction holomorphe (dans un ouvert contenant ce chemin) est déterminé par son comportement le long du chemin, uniquement.

L'*indice* d'un point z_0 par rapport à une courbe fermée γ se définit par la formule :

$$I(\gamma, z_0) = \frac{1}{2\pi i} \int_\gamma \frac{dz}{z - z_0}$$

et l'on peut montrer qu'il s'agit d'un entier relatif, qui n'est pas modifié lorsque le chemin γ se déforme continûment, mais sans passer par z_0. De plus, dans chaque composante connexe du complémentaire de l'image de γ, le point z_0 peut se déplacer sans altérer la valeur de $I(\gamma, z_0)$.

Un calcul simple dans le cas où γ est un cercle permet alors de conclure de tout ceci que le nombre $I(\gamma, z_0)$ représente en fait la notion intuitive du nombre de fois où la courbe γ « tourne autour » du point z_0 (*fig.* 40).

C'est en ce sens que la notion d'un point intérieur à un chemin fermé se trouve précisée, et la formule de Cauchy s'écrit alors pour un chemin fermé γ d'un ouvert simplement connexe $U \subset \mathbb{C}$, une fonction f holomorphe dans U et un point $a \in U$ tel que γ ne passe pas par a :

$$I(\gamma, a) \cdot f(a) = \frac{1}{2\pi i} \int_\gamma \frac{f(z)\, dz}{z - a}$$

Il existe une réciproque au théorème de Cauchy, le **théorème de Morera** : toute fonction continue $f : D \to \mathbb{C}$, où D est un ouvert de $\mathbb{C}$, telle que

$$\int_\gamma f(z)\, dz = 0$$

— si γ est un *rectangle* fermé contenu dans D — est holomorphe dans D.

Mais la théorie de Cauchy permet surtout, à ce point, de montrer que toute fonction holomorphe dans un ouvert y est analytique. En effet, il suffit de considérer la formule de Cauchy, et de remarquer que l'on a :

$$\frac{1}{z - a} = \frac{1}{z}\left(1 + \frac{a}{z} + \left(\frac{a}{z}\right)^2 + \dots + \left(\frac{a}{z}\right)^n + \dots\right) \text{ si } |a| < |z|$$

donc on peut écrire :

$$f(a) = \frac{1}{2\pi i} \int_\gamma \sum_{n=0}^{\infty} a^n \frac{f(z)}{z^{n+1}}\, dz$$

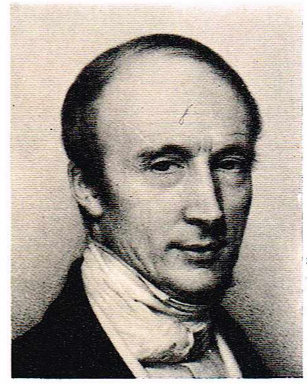
F. Arborio Mella

▲ *Le mathématicien français* ***Augustin-Louis Cauchy*** *(1789-1857) est l'auteur de méthodes de calcul rigoureuses employées encore de nos jours.*

▼ *Figure 40 : indice d'un point par rapport à une courbe γ;* ***il est donné par le nombre de fois où la courbe tourne autour du point;*** ***a, I (0, α) = 1; b, I (0, α) = 2; c, I (0, α) = 0.***

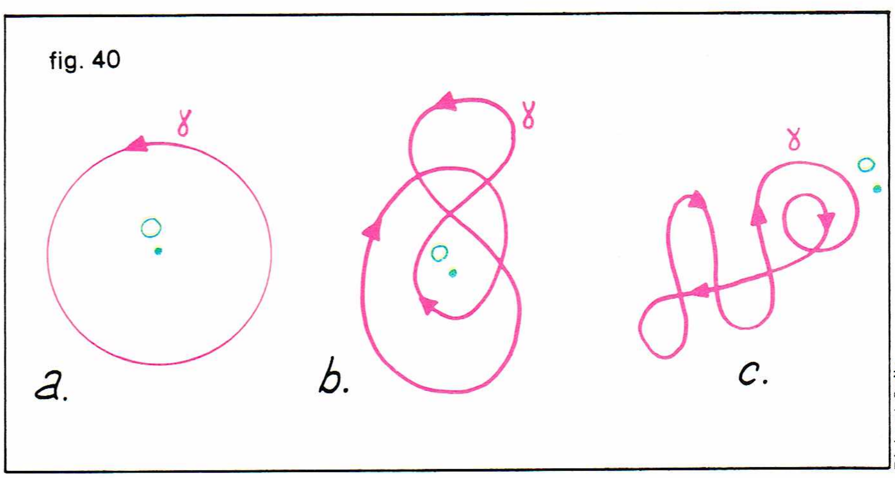

Richard Colin

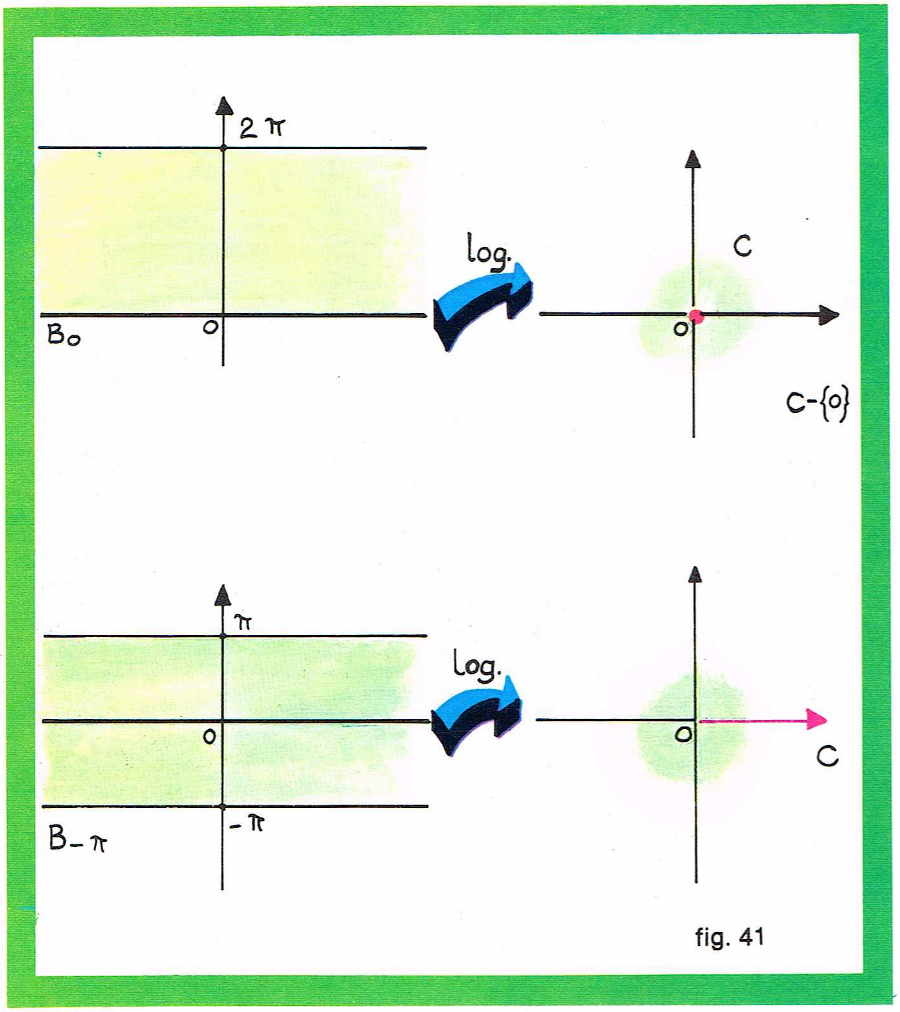

Richard Colin

▲ ***Figure 41 : représentation de la fonction logarithme complexe (voir développement dans le texte).***

L'interversion des opérations intégration et sommation est possible, car la série converge normalement dans le domaine fermé défini par γ, et l'on obtient bien :

$$f(a) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n a^n \quad \text{où} \quad c_n = \frac{1}{2\pi i}\int_{\gamma} \frac{f(z)}{z^{n+1}}\,dz$$

Toute fonction analytique admet une dérivée, donc, pour les fonctions d'une variable complexe les propriétés d'holomorphie et d'analycité sont identiques. Ce résultat, considérable, implique donc qu'une fonction holomorphe est indéfiniment dérivable, donc que la dérivée d'une fonction holomorphe est encore holomorphe. Il est donc légitime de penser que les propriétés des fonctions holomorphes sont très étendues; on peut citer parmi les plus fondamentales celle que donne le **théorème de Liouville :** toute fonction entière (c'est-à-dire holomorphe dans $\mathbb{C}$ tout entier) ne peut être bornée que si elle est constante.

Ce résultat est obtenu à partir des « *inégalités de Cauchy* » qui précisent le comportement des coefficients de la série de Taylor d'une fonction f, holomorphe dans un disque de centre O et de rayon r :

$$|c_n| \leqslant \frac{M(r)}{r^n} \quad (n = 0, 1, 2, ...)$$

si on pose : $M = \sup\limits_{|z| = r} |f(z)|$

Il faut remarquer, d'ailleurs, qu'un résultat connu sous le nom de *« principe du maximum »* entraîne que, si $M = \sup\limits_{|z|=r} |f(z)|$, alors on a aussi $M = \sup\limits_{|z| \leqslant r} |f(z)|$; c'est-à-dire que, si une fonction holomorphe admet un maximum relatif (au sens des modules) à l'intérieur d'un disque fermé contenu dans le domaine d'holomorphie, alors elle est constante dans ce domaine, pourvu que celui-ci soit un ouvert connexe.

Ces trois résultats précisent encore la différence entre les fonctions d'une variable réelle et les fonctions d'une variable complexe, tout au moins en ce qui concerne la condition de fonction dérivable.

Signalons, de plus, que le théorème de Liouville permet une démonstration très simple du théorème fondamental de l'algèbre, le **théorème de D'Alembert** (voir *Équations algébriques*) ; en effet, si un polynôme P (z) — qui est une fonction entière — n'admettait aucun zéro, alors $\frac{1}{P}$ serait aussi une fonction entière, et puisque $\lim\limits_{z\to\infty} |P(z)| = +\infty$, on aurait $\lim\limits_{z\to\infty} \left|\frac{1}{P(z)}\right| = 0$. La fonction $\frac{1}{P}$ entière et bornée serait donc constante. Il s'ensuit donc par l'absurde que le polynôme P admet un zéro, donc n s'il est de degré n, en divisant successivement par les monômes $(z - a_k)$, a_k désignant les zéros successifs.

Sans quitter ce sujet, il faut mentionner un résultat qui indique le comportement d'une fonction holomorphe au voisinage d'un zéro quelconque et qui est très étroitement lié au caractère d'analycité de la fonction. Très exactement, si f désigne une fonction holomorphe dans un ouvert $\Omega \subset \mathbb{C}$ et $a \in \Omega$ un zéro de f, alors, ou bien f est identiquement nulle dans un voisinage de a, ou bien a est le seul zéro de f dans un voisinage de a assez petit (ce théorème est connu sous le nom de **principe des zéros isolés**). Il ne peut donc exister de point limite d'une suite de zéros de f sans que f s'annule partout dans un disque ayant ce point pour centre.

Certaines des propriétés ci-dessus ont un caractère « local » ; il faut noter que, dans le passage à un résultat plus « global », c'est la condition de connexité qui est l'hypothèse nécessaire. Ainsi, on peut montrer que, si $\Omega \subset \mathbb{C}$ est un ouvert *connexe*, l'ensemble des zéros d'une fonction holomorphe dans Ω est un ensemble discret (dont tous les points sont isolés) ou bien Ω tout entier.

On montre encore que, si f et g sont deux fonctions holomorphes dans un ouvert $\Omega \subset \mathbb{C}$, égales sur un sous-ensemble $E \subset \Omega$, non discret, alors elles sont égales partout sur Ω.

Logarithme complexe

On sait qu'on peut définir, dans le cadre des fonctions de variable réelle, la fonction logarithme comme la réciproque de l'application définie sur $\mathbb{R}$ et à valeurs dans $\mathbb{R}_+^*$, $x \mapsto \exp(x)$, puisque, pour ces deux ensembles de départ et d'arrivée, on a une bijection.

L'extension au cas des fonctions de variable complexe est un peu plus délicate.

En posant, pour tout nombre complexe $z = x + iy$, $e^z = e^x$. $e^{iy} = e^x$ (cos $y + i$ sin y), on définit une application $z \mapsto \exp(z)$ sur $\mathbb{C}$ tout entier. Comme $\exp(2\pi i) = 1$, on a $e^{x+iy} = e^{x+i(y+2\pi)}$; donc, on a « périodicité par rapport à la partie imaginaire, de période 2π ». Il suffit donc de partager le plan complexe en bandes horizontales de largeur 2π pour définir une bijection de l'une de ces bandes sur l'ensemble $\mathbb{C} - \{0\}$ par l'application exponentielle complexe ; par exemple, $z \mapsto \exp(z) = e^z$ définit une bijection de la bande $B_0 = \{z \in \mathbb{C}$ tels que $0 < Imz \leqslant 2\pi\}$ sur le plan privé de l'origine, ou bien de la bande ouverte

$$B_{-\pi}\, \{z \in \mathbb{C} \text{ tels que } |Imz| < \pi\}$$

sur le sous-ensemble

$$\mathbb{C} - \{z \in \mathbb{C} \text{ tels que } Imz = 0 \text{ et } Rez \leqslant 0\},$$

soit $\mathbb{C}$ privé du demi-axe réel négatif (*fig.* 41).

On appelle *détermination principale* du logarithme de z la fonction réciproque de l'application $z \mapsto e^z$ de $B_{-\pi}$ sur $\mathbb{C}$ — {demi-axe réel négatif}. On écrira donc

$$\log z = \log |z| + i \arg(z).$$

D'autres déterminations du logarithme sont obtenues en partant d'une autre bande B_α, $\alpha \neq -\pi$. Si l'on note D_α le complémentaire, dans $\mathbb{C}$, de l'image par e^z de la droite $Im\, z = \alpha$, alors e^z définit une bijection de B_α sur D_α, continue ; son application réciproque est appelée $\log_\alpha z$, et vérifie : $\begin{cases} \alpha < I_m(\log z) < \alpha + 2\pi. \\ e^{\log_\alpha z} = z \end{cases}$

Séries de Laurent et résidus

Les séries de Laurent sont un outil qui permet de généraliser le développement en série entière lorsque l'on est en présence d'une fonction holomorphe dans un ouvert, sauf en un nombre fini de points.

Pour une fonction $f : \Omega \rightarrow \mathbb{C}$ holomorphe dans Ω, sauf au point $a \in \Omega$, on va d'abord étendre la formule de Cauchy, puis trouver un développement en série qui ne sera plus celui de f dans un disque, mais dans une couronne. Une telle extension est faite pour des *points isolés* de Ω, c'est-à-dire des points frontières tels qu'on puisse trouver pour chacun un voisinage ne contenant aucun autre point frontière. Si a désigne un point isolé de Ω, on cherchera donc à caractériser f dans un disque : $0 < |z - a| < r$ (privé de son centre a) ; pour plus de généralité, on considérera même une couronne

$$r_1 < |z - a| < r_2.$$

La difficulté qui surgit alors est qu'un tel ensemble n'est pas simplement connexe. Or, cependant, les deux lacets γ_1 et γ_2 définis par les cercles $|z - a| = r_1$ et $|z - a| = r_2$ sont homotopes dans Ω', et cela permet donc d'écrire que, pour toute fonction g holomorphe dans Ω', si

$$\Omega' = \Omega - \{a\} : \int_{\gamma 1} g(z)\, dz = \int_{\gamma 2} g(z)\, dz \quad (\textit{fig. } 42).$$

En prenant la fonction :

$$\begin{cases} g(z) = \dfrac{f(t) - f(z)}{t - z} & \text{lorsque } t \neq z \\ g(z) = f'(z) & \text{lorsque } t = z \end{cases}$$

qui est bien holomorphe dans la couronne

$$C_a = \{z \in \mathbb{C} \text{ tels que } r_1 < |z - a| < r_2\}$$

on obtient :

$$f(z) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma_2} \frac{f(t)}{t - z}\, dt - \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma_1} \frac{f(t)}{t - z}\, dt$$

qui généralise la formule de Cauchy du paragraphe précédent.

Un développement en série de $\dfrac{1}{t - z}$ pour $|t| = r_2$ uniformément convergent dans C_a est $\dfrac{1}{t}\left[\sum_0^{\infty} \left(\dfrac{z}{t}\right)^n\right]$. De même, un développement en série de $\dfrac{1}{t - z}$, mais pour $|t| = r_1$, uniformément convergent dans C_a, est : $-\dfrac{1}{z}\left[\sum_0^{\infty} \left(\dfrac{t}{z}\right)^n\right]$.

Ceci permet alors d'obtenir le développement dit « *en série de Laurent* » ·

$$f(z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} c_n (z - a)^n =$$

$$\sum_{n=-\infty}^{-1} c_n (z - a)^n + \sum_{n=0}^{\infty} c_n (z - a)^n =$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{c_{-n}}{(z - a)^n} + \sum_{n=0}^{\infty} c_n \cdot (z - a)^n$$

où l'on a :

$$c_n = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} \frac{f(z)}{(z - a)^{n+1}}\, dz$$

γ désignant un cercle centré en a, et de rayon r, $r_1 < r < r_2$

On peut montrer que la série $\sum_{n=1}^{\infty} \dfrac{c_{-n}}{(z - n)^n}$ est convergente pour z tel que $|z - a| > r_1$, tandis que la série $\sum_{n=1}^{\infty} c_n (z - a)^n$ l'est pour z tel que $|z - a| < r_2$.

Il faut noter encore que le développement en série de Laurent, une série en puissances de $(z - a)$ et une autre en puissances de $\dfrac{1}{(z - a)}$, est unique dans la couronne C_a.

Bien entendu, lorsque f est holomorphe dans Ω tout entier, on retrouve le développement de Taylor, puisque $c_{-n} = 0$; le point a est dit *point régulier*. Sinon, le point a est dit *point singulier;* c'est très exactement un pôle d'ordre q lorsque $c_{-n} = 0$ pour $n > q$ avec $c_{-q} \neq 0$ (ainsi, l'origine 0 est un pôle d'ordre 37 pour la fonction $\dfrac{e^z}{z^{37}}$) et c'est un *point singulier essentiel* dans les autres cas : ainsi l'origine 0 est un point singulier essentiel pour la fonction $\dfrac{e^z}{z}$.

Pour tout point singulier (pôle ou point singulier essentiel), le coefficient c_{-1} de la série de Laurent de f porte le nom de *résidu de f en a* que l'on note Rés (f, a) :

$$\text{Rés}\,(f, a) = c_{-1} = \frac{1}{2\pi i} \int_{|z - a| = r} f(z)\, dz.$$

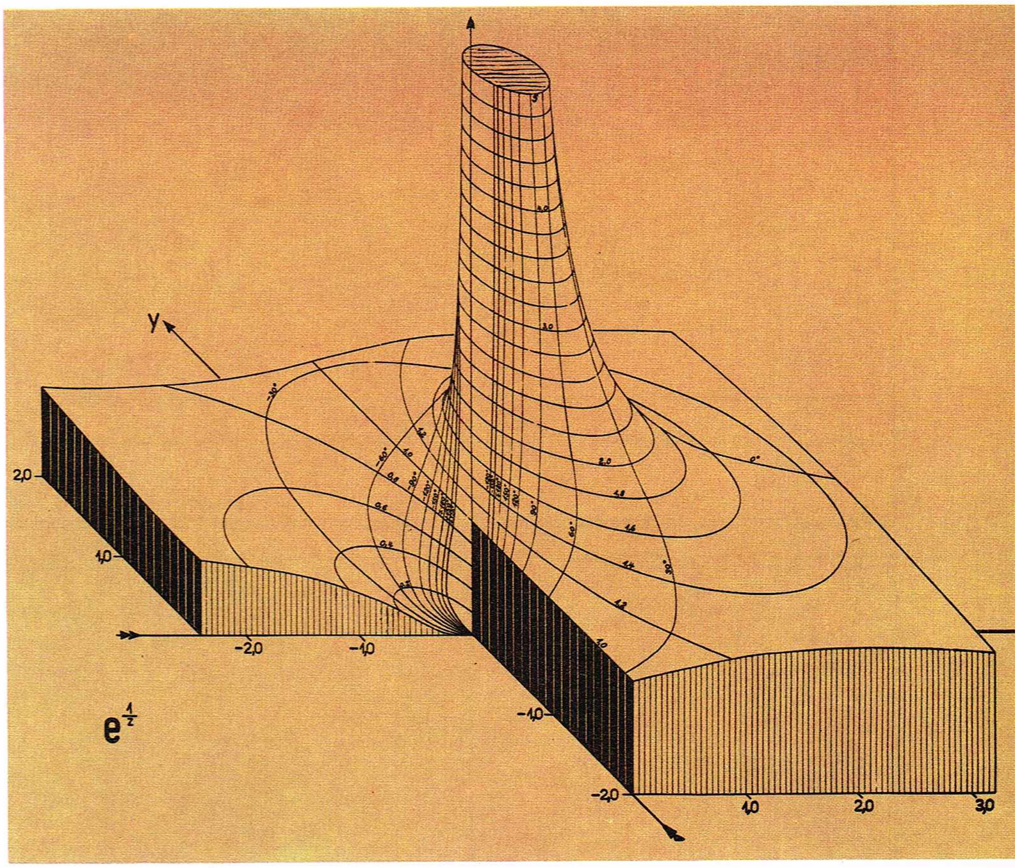

▲ ***Point singulier de la fonction complexe*** $e^{\frac{1}{z}}$

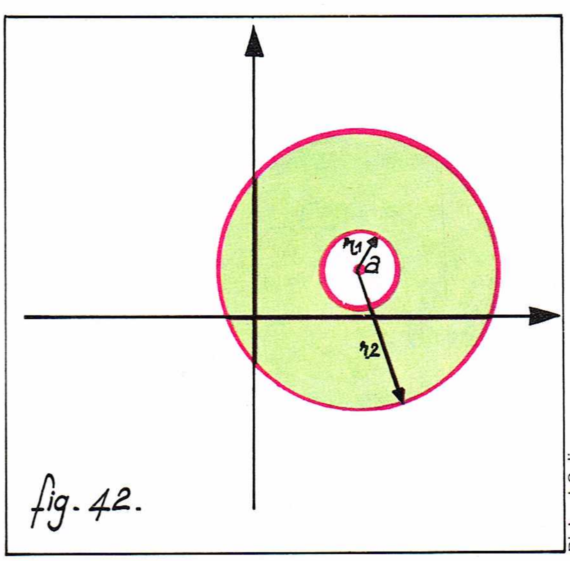

Richard Colin

◄ ***Figure 42 : couronne*** C_a ***définie par*** $r_1 < |z - a| < r_2$.

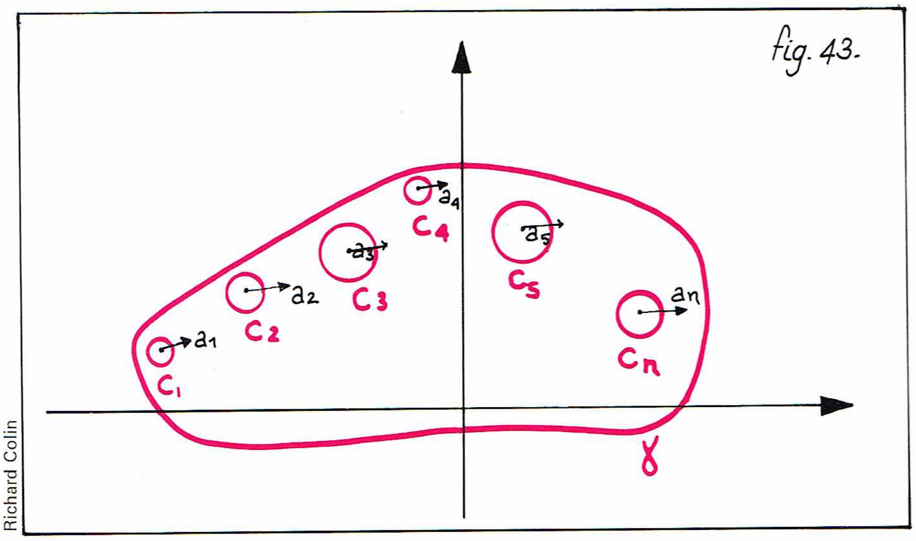

Richard Colin

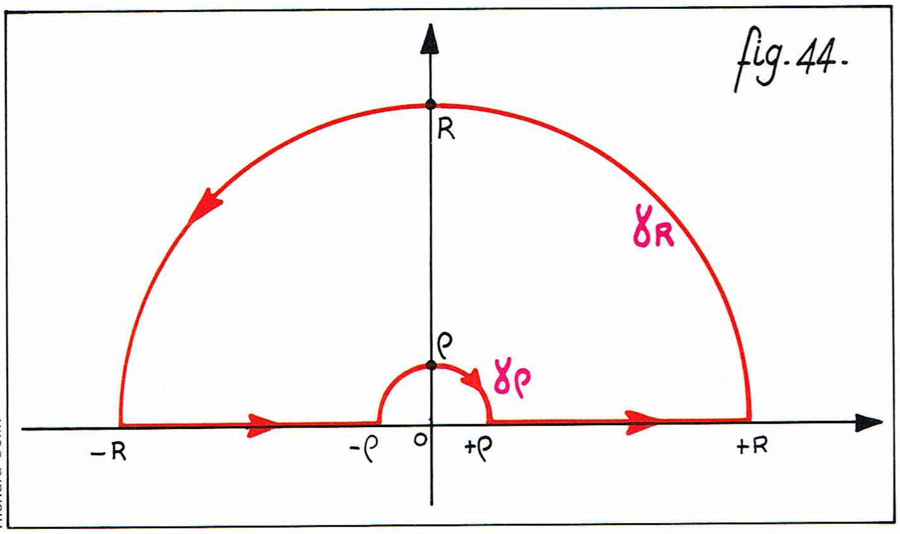

Richard Colin

▲ ***En haut, figure 43 : théorème des résidus.***

Ci-dessus, figure 44 : voir développement dans le texte-ci-contre.

▼ ***Figure 45 : l'intégration de la fonction $z \to e^{z^2}$ sur le contour γ donne 0 grâce au théorème de Cauchy.***

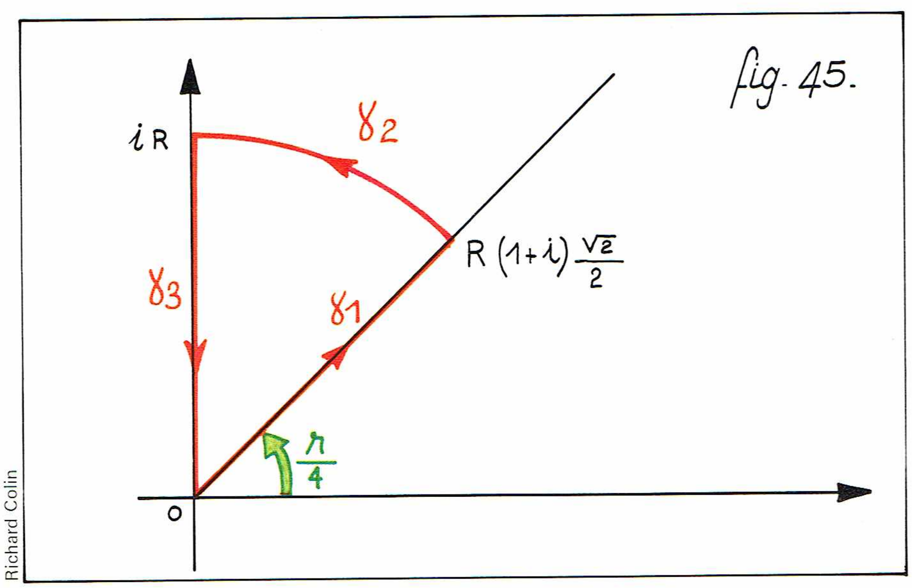

Richard Colin

On peut alors transcrire le théorème de Cauchy pour une fonction ayant un nombre fini de points singuliers, et obtenir le **théorème des résidus :** *Pour une fonction* f : $\Omega \to \mathbb{C}$, *holomorphe dans* Ω *sauf en un nombre fini de points singuliers* a_n (n = 1, 2, ..., *N*), *si* γ *est une courbe fermée contenue dans* Ω, *ne contenant aucun des points* a_n, *on a :*

$$\frac{1}{2\pi i}\int_\gamma f(z)\,dz = \sum_{n=1}^{N} \mathrm{I}(\gamma, a_n) \cdot \text{Rés}\,(f, a_n).$$

Cette formule, qui est bien évidemment une extension de la propriété des fonctions holomorphes, s'explique en remarquant qu'elle donne la limite de l'action des points singuliers sur la valeur de l'intégrale. Plus exactement, si c_n désigne le cercle de centre a_n et de rayon r_n (choisi pour que les cercles soient disjoints et ne coupent pas γ), on a $\mathrm{I}(c_n, a_n) = 0$ si $n \neq m$ et $\mathrm{I}(c_n, a_n) = 1$ (*fig.* 43).

Si l'on pose : $\gamma' = \gamma + \alpha_1 c_1 + \ldots + \alpha_n c_n$ avec $\alpha_n = -\mathrm{I}(\gamma, a_n)$, on a alors $\mathrm{I}(\gamma', a_n) = 0$ pour $n = 1, 2, \ldots, N$. Ce qui permet d'écrire que :

$$0 = \frac{1}{2\pi i}\int_{\gamma'} f(z)\,dz =$$

$$\frac{1}{2\pi i}\left\{\int_\gamma f(z)\,dz - \sum_{n=1}^{n=N} \mathrm{I}(\gamma, a_n)\int_{c_n} f(z)\,dz\right\}$$

et il ne suffit plus que d'appliquer la définition du résidu de f au point a_n.

Des conditions restrictives sur Ω, délicates à expliquer, doivent en fait être rajoutées aux hypothèses du théorème ; elles sont satisfaites dès lors que Ω est un ouvert borné et simplement connexe.

Le théorème des résidus est l'un des outils les plus connus pour les calculs d'intégrales impropres (il est même parfois utilisé dans la résolution approchée de certaines équations).

En voici quelques exemples :

— Pour le calcul de $\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin x}{x}\,dx$, dont on montre aisément la convergence en intégrant par parties

$$f(x) = \frac{\sin x}{x}$$

sur [0, 1] après avoir posé $f(0) = 1$, on a recours à l'intégrale $\int_\gamma \frac{e^{iz}}{z}\,dz$ où $\gamma = \gamma_R - \gamma_\rho$ avec :

$$\begin{cases} \gamma_R \text{ paramétré par } Re^{it} \\ \gamma_\rho \text{ paramétré par } \rho e^{it} \text{ pour } t \in [0, \pi] \end{cases} \quad (\textit{fig. } 44).$$

On applique le théorème de Cauchy :

$$0 = \int_\gamma \frac{e^{iz}}{z}\,dz = \int_{-R}^{-\rho} \frac{e^{ix}}{x}\,dx - \int_0^\pi e^{i\rho e^{it}} \cdot i\,dt +$$

$$\int_\rho^R \frac{e^{ix}}{x}\,dx + \int_0^\pi e^{iRe^{it}} \cdot i\,dt$$

en décomposant sur chaque « partie » de γ.

Puisque

$$\mathrm{I}_m\left[\int_{-R}^{-\rho} \frac{e^{ix}}{x}\,dx + \int_\rho^R \frac{e^{ix}}{x}\,dx\right] = 2\int_\rho^R \frac{\sin x}{x}\,dx$$

et que :

$$\lim_{\rho \to 0} \int_0^\pi e^{i\rho e^{it}} \cdot i\,dt = i\pi$$

$$\text{ainsi que } \lim_{R \to \infty} \int_0^\pi e^{iRe^{it}} \cdot i\,dt = 0$$

que l'on vérifie aisément, on en déduit que :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin x}{x}\,dx = \pi$$

[La notation *Im* (A) désigne la partie imaginaire du nombre complexe A.]

— L'intégration de la fonction $z \to e^{z^2}$ sur le contour γ de la figure 45 donne 0 grâce au théorème de Cauchy. La décomposition de $\int_\gamma e^{z^2}\,dz$ selon chacun des trois

« morceaux » de γ, en tenant compte du paramétrage :

$$\begin{cases} \text{sur } \gamma_1 : z = re^{i\frac{\pi}{4}} & \text{avec } 0 \leqslant r \leqslant R. \\ \text{sur } \gamma_2 : z = Re^{i\theta} & \text{avec } \frac{\pi}{4} \leqslant \theta \leqslant \frac{\pi}{2}. \\ \text{sur } \gamma_3 : z = ir & \text{avec } 0 \leqslant r \leqslant R. \end{cases}$$

permet à l'aide de majorations classiques de calculer les célèbres *intégrales de Fresnel :*

$$\int_0^\infty \cos u^2 du \quad \text{et} \quad \int_0^\infty \sin u^2 du$$

qui sont égales toutes deux à $\frac{\sqrt{2\pi}}{4}$.

Dans ces deux exemples, on ne fait usage que du théorème de Cauchy, car les fonctions considérées le permettaient. Les exemples suivants donnent des applications de la théorie des résidus.

— L'intégrale $\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dx}{(1+x^2)^2}$ se calcule en intégrant la fonction $\frac{1}{(1+z^2)^2}$ sur un demi-cercle, situé dans le demi-plan supérieur centré à l'origine et dont on fait croître indéfiniment le rayon. Cette fonction admet un pôle au point $+i$ dans ce domaine. Pour déterminer le résidu en ce point, il suffit de faire un changement de variable $z = t + i$ et de chercher un développement limité de la fonction $\frac{1}{(1+z^2)^2} = \frac{1}{t^2(t+2i)^2}$ au voisinage du point $t = 0$.

Par décomposition simple,

$$\frac{1}{t^2(t+2i)^2} = \frac{A}{t^2} + \frac{B}{t} + \mathcal{O}(t),$$

ce qui donne :

$$\frac{1}{t^2 \cdot (t+2i)^2} = \frac{1}{t^2} \cdot \frac{-1}{4}\left(\frac{1}{\frac{t}{2i}+1}\right)^2 =$$

$$\frac{1}{t^2} \cdot \frac{-1}{4}\left(1 - \frac{t}{2i}\right) + \mathcal{O}(t)$$

Dans cette expression, le coefficient de $\frac{1}{t}$, égal à $\frac{1}{4i}$, est donc le résidu recherché.

Par conséquent $\int_\gamma \frac{dz}{(1+z^2)^2} = 2\pi i \cdot \frac{1}{4i} = \frac{\pi}{2}$. Il suffit (*fig.* 46) de décomposer la courbe d'intégration en le segment $[-R, +R]$ et le demi-cercle, puis de remarquer que, lorsque $R \to \infty$, l'intégrale sur le demi-cercle tend vers zéro en module, pour conclure que :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dx}{(1+x^2)^2} = \frac{\pi}{2}.$$

— Pour calculer $\int_0^{+\infty} \frac{(\text{Log } x)^2}{1+x^2} dx$, on considère la fonction : $f(z) = \frac{(\text{Log } z)^2}{1+z^2}$ et le contour de la figure 47.

Le paramétrage selon les diverses composantes de ce contour donne :

$$\frac{(\text{Log } x)^2}{1+x^2} \quad \text{sur } [\varepsilon, R]$$

$$\frac{(\text{Log } x + i\pi)^2}{1+x^2} \quad \text{sur } [-R, -\varepsilon]$$

ainsi que :

$$\frac{(\text{Log } R + i\theta)^2}{1 + R^2 e^{2i\theta}} \quad \text{sur } \gamma_R$$

$$\frac{(\text{Log } \varepsilon + i\theta)^2}{1 + \varepsilon^2 e^{2i\theta}} \quad \text{sur } \gamma_\varepsilon$$

Puisque $\frac{(\text{Log } R + i\theta)^2}{1 + R^2 e^{2i\theta}} = \mathcal{O}\frac{[(\text{Log } R)^2]}{R^2}$,

il s'ensuit que : $\lim_{R\to\infty} \int_{\gamma_R} f(z)\, dz = 0$,

de même : $\lim_{\varepsilon\to 0} \int_{\gamma_\varepsilon} f(z)\, dz = 0$.

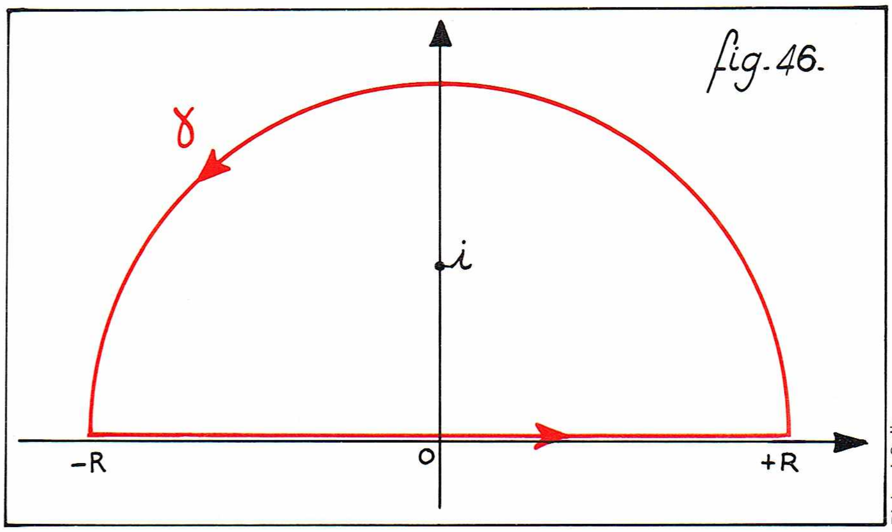

Richard Colin

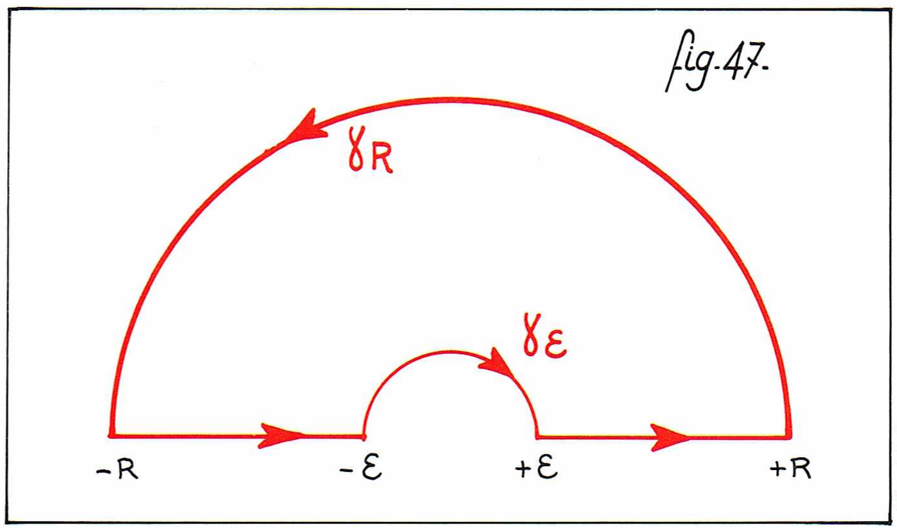

Richard Colin

▲ ***En haut, figure 46 : décomposition de la courbe d'intégration en le segment [— R, + R] et le demi-cercle. Ci-dessus, figure 47 : voir développement de cette application de la théorie des résidus dans le texte.***

Le théorème des résidus montre donc que :

$$\lim_{\substack{\varepsilon\to 0\\ R\to\infty}} \left[\int_\varepsilon^R \frac{(\text{Log } r)^2 + (\text{Log } r + i\pi)^2}{1+r^2} dr\right] = 2\pi i \,\Sigma\, \text{Rés}\,(f, z_k)$$

la sommation concernant tous les pôles z_k du demi-plan supérieur. En fait, il n'y en a qu'un seul : $z = i$. On montre que, pour une fraction $\frac{A(z)}{B(z)}$, le résidu en un pôle simple z_k vaut exactement $\frac{A(z_k)}{B'(z_k)}$. Cela donne ici :

$$\text{Rés}\,(f, i) = \frac{(\text{Log } i)^2}{2i} = \frac{-\pi^2}{8i}.$$

La suite de la décomposition de l'intégrale est :

$$\lim_{\substack{\varepsilon\to 0\\ R\to\infty}} \int_\gamma f(z)\, dz = \int_0^\infty \frac{2(\text{Log } r)^2}{1+r^2} dr +$$

$$2\pi i \int_0^\infty \frac{\text{Log } r}{1+r^2} dr - \pi^2 \int_0^\infty \frac{dr}{1+r^2} =$$

$$-\frac{\pi^2}{8i} \cdot 2\pi i = -\frac{\pi^3}{4}.$$

Les résultats classiques :

$$\int_0^\infty \frac{\text{Log } r}{1+r^2} dr = 0 \quad \text{et} \quad \int_0^\infty \frac{dr}{1+r^2} = \frac{\pi}{2}$$

permettent alors d'écrire le résultat :

$$\int_0^\infty \frac{(\text{Log } x)^2}{1+x^2} dx = \frac{\pi^3}{8}$$

Prolongement analytique

L'idée simple du prolongement par continuité pour les fonctions réelles de variable réelle, que l'on peut illustrer par l'exemple de l'application définie sur $\mathbb{R}-\{0\}$, $f : x \mapsto \exp\left(-\frac{1}{x^2}\right)$, pour laquelle on peut définir une fonction continue sur $\mathbb{R}$, égale à f sur $\mathbb{R}-\{0\}$, soit:

$$g \begin{cases} x \mapsto \exp\left(-\frac{1}{x^2}\right) & \text{si } x \neq 0 \\ 0 \mapsto 0 \end{cases}$$

puisque $\lim\limits_{x\to 0} \exp\left(-\frac{1}{x^2}\right) = 0$ se transcrit pour les fonctions de variable complexe par une notion plus forte : celle du *prolongement analytique*. Partant d'un ouvert $\Omega \subset \mathbb{C}$ et d'une fonction $f : \Omega \to \mathbb{C}$, holomorphe dans Ω, on cherche à construire un ouvert $\Omega' \supset \Omega$, une fonction $g : \Omega' \to \mathbb{C}$ holomorphe dans Ω' telle que $f(z) = g(z)$ si $z \in \Omega$.

En notant R le rayon de convergence (non nul et fini) de la série entière égale à f dans Ω, le problème du prolongement se pose sur la frontière du disque de convergence, c'est-à-dire pour des points $t \in \mathbb{C}$ tels que $|t| = R$. Le point t est alors *point régulier* si le prolongement est possible dans un voisinage de t; sinon, c'est un *point singulier*. Par exemple, grâce aux résultats obtenus sur les séries on sait que $t = +1$ est un point singulier pour $\sum\limits^{\infty} z^n$, que $t = +1$ et $t = -1$ sont points singuliers pour $\sum\limits^{\infty} z^{2n}$, que $t = +1$ est point singulier pour $\sum\limits^{\infty} \frac{z^n}{n}$.

La caractérisation de ces points peut se faire au moyen du **théorème** suivant : soit t un point du disque de convergence — de rayon R, centré à l'origine — de f, tel que $|t| = R$. Soit R_a le rayon de convergence de la série $\sum\limits^{\infty} c_n(a)(z-a)^n$ qui représente f au voisinage de $a = r \cdot t$ (où $0 < r < 1$).

Alors : t est régulier $\Leftrightarrow R_a > R - |a|$
t est singulier $\Leftrightarrow R_a = R - |a|$ (*fig.* 48).

Il est possible d'affirmer l'existence d'au moins un point singulier sur le cercle de convergence d'une fonction analytique. En particulier, si $\sum\limits^{\infty} c_n z^n$ représente f dans Ω et si les coefficients c_n sont tous réels positifs, le point $t = R$ est un point singulier.

Développements eulériens — La fonction Γ

On appelle *fonction méromorphe* sur un ouvert Ω du plan complexe une fonction holomorphe sur un ouvert Ω' obtenu en privant Ω de points isolés qui soient des pôles de cette fonction. Ceci revient à dire que, au voisinage de chaque point de Ω, une fonction méromorphe est un quotient de deux fonctions holomorphes.

On doit à Cauchy une méthode pour exprimer une fonction méromorphe dans $\mathbb{C}$ sous forme de série convergente, en dehors des pôles; il s'agit en fait de généraliser la décomposition des fractions rationnelles en « éléments simples ». Cette méthode permet d'exprimer une fonction impaire, en tout point autre qu'un pôle, par une double sommation dès lors que le module de la valeur de cette fonction sur des cercles de rayons croissant indéfiniment, sans passer par un des pôles, est uniformément borné, soit : $|f(r_n e^{i\rho})| \leqslant K$ pour tout n et tout ρ.

En désignant par a_k les pôles de f, on a :

$$f(z_0) = \sum_{n=0}^{\infty}\left(\sum_{r_n < |a_k| < r_{n+1}} \text{Rés}\left\{\frac{f(z)}{z-z_0}, a_k\right\}\right)$$

L'application de cette méthode permet d'obtenir le développement eulérien de cotg z :

$$\text{cotg}\, z = \frac{1}{z} + 2z \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{z^2 - n^2\pi^2}$$

puis celui de sin z :

$$\sin z = z \cdot \prod_{n=1}^{\infty}\left(1 - \frac{z^2}{n^2\pi^2}\right)$$

D'une façon générale, le **théorème de factorisation de Weierstrass** permet d'exprimer une fonction entière sous forme de produit infini à partir de la connaissance des points où elle s'annule.

Si $\sum\limits_1^{\infty} \frac{1}{|z_n|^{p+1}} < \infty$, alors, en posant

$$P_n(z) = \left(\frac{z}{z_n}\right) + \dots + \frac{1}{p}\left(\frac{z}{z_n}\right)^p$$

le produit infini $\prod\limits_1^{\infty}\left(1 - \frac{z}{z_n}\right) \cdot e^{P_n(z)}$ converge uniformément sur tout compact et représente une fonction entière dont les zéros sont les points z_n.

C'est comme limite d'un produit infini que la célèbre *fonction gamma*, bien connue des statisticiens, des physiciens, etc., a été l'objet des premiers travaux (Euler, Gauss, Weierstrass).

On pose d'abord :

$$\Pi(x, n) = \frac{n!}{(x+1)(x+2)\dots(x+n)} \cdot n^x$$

Puis l'on définit :

$$\Gamma(x+1) = \Pi(x) = \lim_{n\to\infty} \Pi(x, n)$$

Si l'on définit la *constante d'Euler* C par :

$$C = \lim_{n\to\infty}\left(1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n} - \text{Log}\, n\right),$$

on peut alors montrer que :

$$\frac{1}{\Pi(x)} = \frac{1}{\Gamma(x+1)} = e^{Cx} \cdot \prod_1^{\infty}\left[\left(1 + \frac{x}{p}\right) e^{-\frac{x}{p}}\right]$$

et cette fonction est alors définie pour tout x, réel, positif strictement.

Il est alors possible de prolonger sa définition sur tout le plan complexe privé de l'origine :

$$\frac{1}{\Gamma(z)} = z e^{Cz} \prod_1^{\infty}\left[\left(1 + \frac{z}{p}\right) e^{-\frac{z}{p}}\right]$$

et la fonction $z \mapsto \Gamma(z)$ obtenue est analytique, sauf aux points : $z = -1, -2, \dots, -n, \dots$, qui sont des pôles simples. On peut remarquer qu'elle ne s'annule jamais puisque $\frac{1}{\Gamma(z)}$ ne possède pas de pôle.

Un calcul simple montre que :

$$\frac{1}{\Gamma(z)} \cdot \frac{1}{\Gamma(-z)} = -z^2 \prod_1^{\infty}\left(1 - \frac{z^2}{p^2}\right) \quad \text{pour } z \notin \mathbb{Z}$$

ce qui, grâce au développement eulérien de sin z, donne

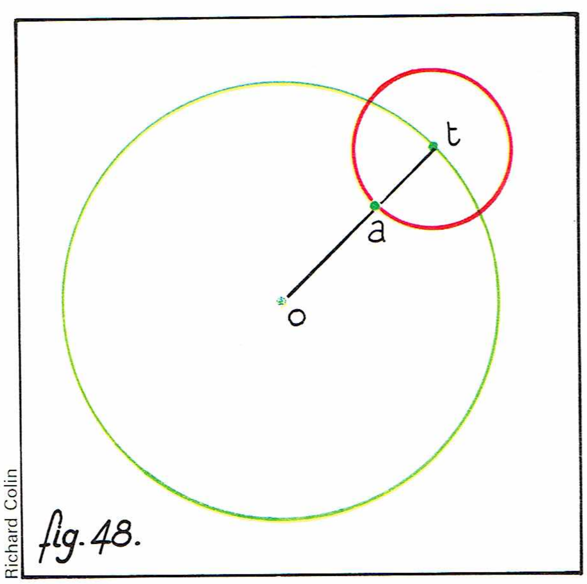

▶ *Figure 48 : points réguliers et points singuliers.*

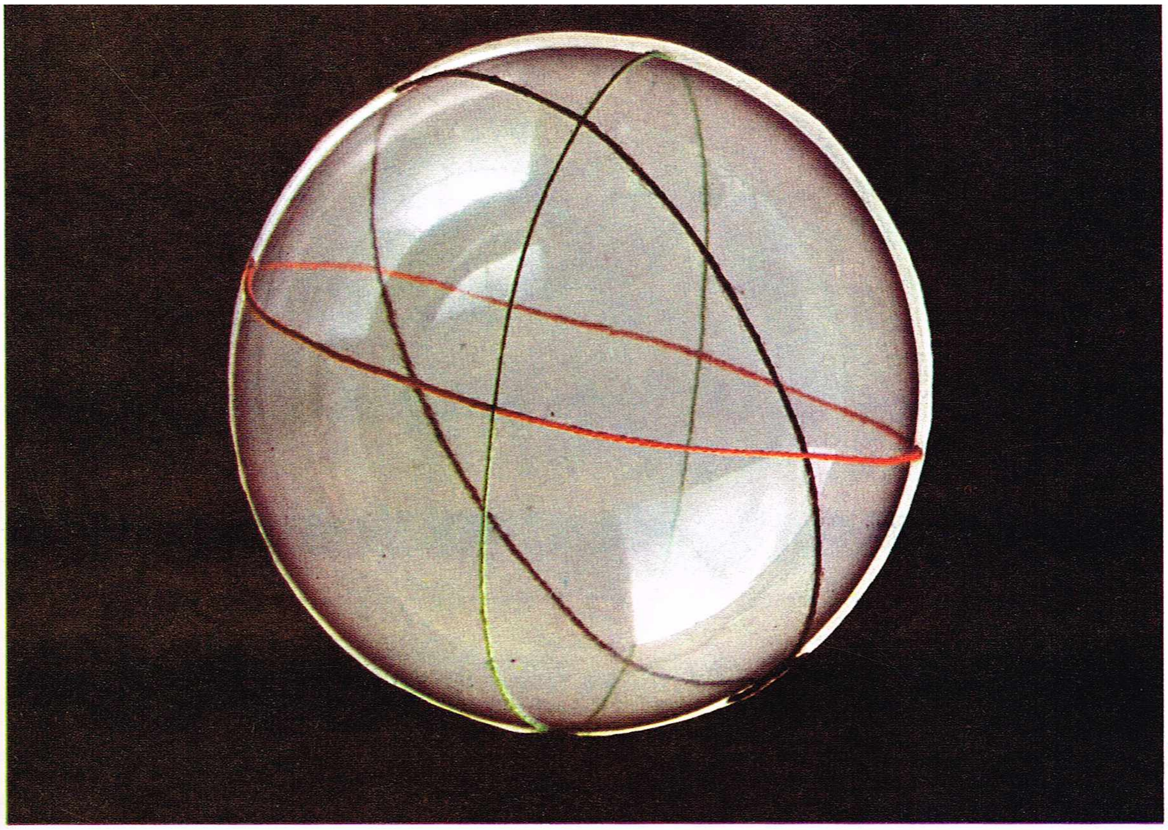

Édouard Rousseau

◀ **Géométrie de Riemann :** ***la somme des angles d'un triangle n'est pas égale à deux droits.***

la *formule des compléments :* $\Gamma(z) \cdot \Gamma(1 - z) = \dfrac{\pi}{\sin \pi z}$
que l'on obtient en notant que : $\Gamma(1 - z) = -z\Gamma(-z)$ [cette relation est obtenue à partir de la plus générale : $x\Gamma(x) = \Gamma(x + 1)$ que l'on retrouvera plus loin].

On en déduit que : $\Gamma\left(\dfrac{1}{2}\right) = \sqrt{\pi}$.

Il est ainsi possible de construire des valeurs successives de cette fonction. C'est à Legendre (1752-1833) que l'on doit la présentation de $\Gamma(z)$ sous la forme d'une intégrale définie. Posant : $E(z, n) = \int_0^n \left(1 - \dfrac{t}{n}\right)^n \cdot t^{z-1}\, dt$, il en déduit :

$$E(z, n) = \int_0^1 (1 - u)^n \cdot u^{z-1} \cdot n^z du = n^z \int_0^1 (1 - u)^n u^{z-1}\, du,$$

puis : $E(z, n) = \dfrac{n!\, n^z}{z(z + 1) \ldots (z + n)} = \dfrac{1}{z} \Pi(z, n)$ en intégrant par parties. Ceci lui permet de redéfinir la fonction $\Gamma(z)$ lorsque $\mathrm{Re}(z) > 0$ par :

$$\Gamma(z) = \int_0^\infty e^{-t} \cdot t^{z-1}\, dt$$

et d'obtenir ainsi sur le demi-plan ouvert où $\mathrm{Re}(z) > 0$ une fonction holomorphe.

Une simple intégration par parties permet alors de retrouver la relation : $\Gamma(z + 1) = z\Gamma(z)$.

L'étude de l'équation fonctionnelle $\Gamma(z + 1) = z\Gamma(z)$ a amené à redéfinir la *fonction gamma* comme étant la solution du système :

$$\begin{cases} \varphi(x + 1) = x\varphi(x) \\ \varphi(1) = 1 \end{cases}$$

soit, en posant $g(x) = \mathrm{Log}\, \varphi(x)$:

$$\begin{cases} g(x + 1) - g(x) = \mathrm{Log}(x) \\ g(1) = 0 \end{cases}$$

Il existe une et une seule fonction *convexe g* vérifiant ces deux dernières relations.

La relation fonctionnelle $\Gamma(x + 1) = x\Gamma(x)$ admet évidemment comme conséquence que $\Gamma(n + 1) = n!$ pour tout entier n positif. Ceci justifie l'appellation parfois donnée de *fonction « interpolant les factorielles »;* en outre, on retrouve que $0! = 1$. Elle permet aussi d'établir la célèbre *formule de Stirling :*

$$n! = \sqrt{2\pi n} \cdot n^n \cdot e^{-n} \left(1 + \varepsilon(n)\right) \text{ avec } \lim_{n \to \infty} \varepsilon(n) = 0,$$

cas particulier de : $\Gamma(x) = \sqrt{2\pi x} \cdot x^{x-1} \cdot e^{-x} (1 + \varepsilon(x))$.

La *fonction bêta* peut être considérée comme une généralisation de la fonction gamma. Pour deux nombres complexes x et y de parties réelles positives, on pose :

$$B(x, y) = \int_0^1 t^{x-1} (1 - t)^{y-1}\, dt$$

et l'on montre que $B(x, y) = B(y, x)$.

Un calcul simple donne :

$$B(x, y) = \frac{\Gamma(x) \cdot \Gamma(y)}{\Gamma(x + y)}$$

Cette fonction vérifie les équations fonctionnelles suivantes :

$$B(x, y) = B(x + 1, y) + B(x, y + 1) = \frac{x + y}{x} B(x + 1, y) = \frac{x + y}{y} B(x, y + 1)$$

$$B(x + 1, y + 1) = \frac{xy}{(x + y)(x + y + 1)} B(x, y)$$

et permet entre autres, grâce à la formule :

$$B(x, x) = 2^{1-2x} \cdot B\left(x, \frac{1}{2}\right)$$

de retrouver la formule de « duplication » :

$$2\sqrt{\pi}\, \Gamma(2x) = 2^{2x} \cdot \Gamma(x) \cdot \Gamma\left(x + \frac{1}{2}\right).$$

Très fréquemment utilisées, ces fonctions ont un impact particulier en probabilités.

Représentation conforme

C'est au mathématicien allemand Riemann (1826-1866) que l'on doit la notion de *courbe analytique complexe*, ou encore *surface de Riemann*, qui a conduit au développement actuel de la géométrie algébrique. Reprenant les travaux de Gauss sur les bijections différentiables qui conservent les angles, il leur donna une nouvelle impulsion en leur appliquant les résultats alors connus de la théorie des fonctions de variable complexe.

En effet, la notion d'holomorphie recouvre la notion géométrique de similitude : en rapportant l'espace vectoriel réel $\mathbb{C}$ (de dimension 2) à sa base usuelle $\{1, i\}$, une similitude directe de centre O, $z \mapsto u \cdot z$ où u est un nombre complexe non nul, $u = a + ib$, est linéaire et admet relativement à cette base la matrice :

$$\begin{pmatrix} a & -b \\ b & a \end{pmatrix}$$

Si maintenant on pose $u = f'(z_0)$, où f est une fonction holomorphe en z_0 : $f = P + iQ$, les conditions de Cauchy-Riemann :

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial Q}{\partial y} \quad \text{et} \quad \frac{\partial P}{\partial y} = -\frac{\partial Q}{\partial x}$$

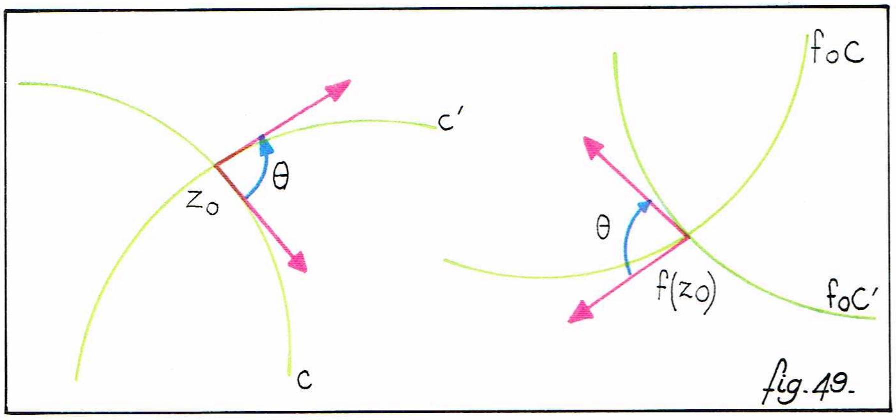

Richard Colin

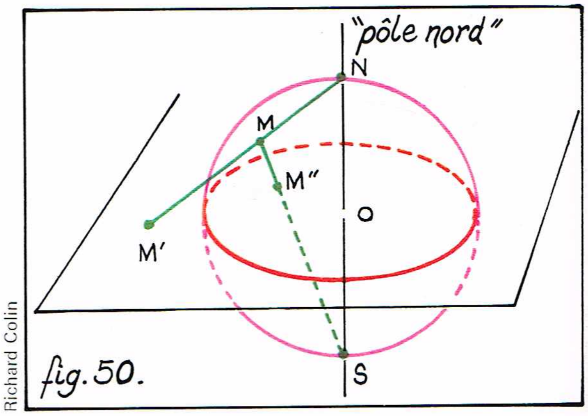

Richard Colin

▲ ***A gauche, figure 49 : conservation des angles. A droite, figure 50 : les deux projections stéréographiques.***

montrent bien que la matrice jacobienne de f, soit :

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial P}{\partial x} & \frac{\partial Q}{\partial x} \\ \frac{\partial P}{\partial y} & \frac{\partial Q}{\partial y} \end{pmatrix}, \text{ est une matrice de similitude.}$$

Par conséquent, si l'on définit une *transformation conforme* comme une application d'un domaine $D \subset \mathbb{R}^2$ dans $\mathbb{R}^2$ différentiable, telle que l'application linéaire dérivée conserve les angles orientés, alors toute fonction f, holomorphe en un point z_0 (resp. sur un domaine D), définit une transformation conforme en z_0 (resp. sur D) dès lors que $f'(z_0) \neq 0$ $\big($resp. $f'(z) \neq 0$ pour tout $z \in D\big)$.

Cette notion d'application conforme introduite par la *conservation des angles* pour l'application dérivée peut s'expliquer comme suit (*fig.* 49).

L'angle de deux courbes est défini comme l'angle de leurs tangentes ; alors une transformation f est conforme si l'angle des courbes C et C′ en z_0 peut être « transporté » sur l'angle des courbes images $f \circ C$ et $f \circ C'$ au point z_0.

Lorsque la fonction f est injective et holomorphe, on montre qu'elle définit un *homéomorphisme* de l'ouvert (supposé de plus connexe) D — où elle admet ces deux propriétés — sur l'ensemble f (D), qui est aussi un ouvert ; de plus, l'application réciproque f^{-1} est holomorphe dans f (D). On dit, dans ce cas, que les domaines D et f (D) sont *conformément équivalents*, ou *isomorphes*. Très exactement, on dit qu'un homéomorphisme d'un ouvert D sur un ouvert D′ défini par une fonction holomorphe est un *isomorphisme* de D sur D′ lorsque l'application réciproque est aussi holomorphe (il s'agit, bien entendu, de prendre en considération non seulement les propriétés topologiques, mais aussi celles induites par l'analyse complexe).

Palais de la Découverte, Paris

▶ ***Le mathématicien allemand*** **Bernhard Riemann** ***(1826-1866) : il développa l'idée d'une géométrie fondée sur l'hypothèse suivant laquelle par un point on ne peut mener aucune parallèle à une droite.***

Le problème fondamental de la représentation conforme est en quelque sorte la réciproque : deux ouverts D et D′ du plan complexe, donnés, sont-ils isomorphes ?

Ses ramifications sont très vastes, et l'on peut citer en particulier la résolution de problèmes aux limites (problème de Dirichlet) relatifs à des potentiels (newtoniens par exemple).

Le problème n'est pas simple, car tout homéomorphisme de D sur D′ n'est pas forcément un isomorphisme. Par exemple, le plan complexe $\mathbb{C}$ et le disque ouvert

$$D = \{z \in \mathbb{C} \text{ tels que } |z| < 1\}$$

sont homéomorphes mais pas isomorphes (car un isomorphisme de $\mathbb{C}$ sur D serait holomorphe et borné, donc constant, et par suite non injectif).

On montre d'abord que, si f est un isomorphisme de D sur D′ et φ un isomorphisme de D sur D (ou *automorphisme* de D), alors $f \circ \varphi$ est encore un isomorphisme de D sur D′. Toutes les représentations conformes de D sur D′ peuvent donc être obtenues à partir de l'une d'entre elles par composition avec un élément quelconque du groupe des automorphismes de D. La détermination de ce groupe peut donc être très utile. Ainsi, il est facile de voir que l'ensemble des automorphismes de C est formé des transformations $z \mapsto az + b$ où a est non nul ; on peut aussi montrer que les automorphismes du disque unité ouvert D sont les transformations homographiques :

$$z \mapsto e^{i\theta}\left(\frac{z + z_0}{1 + \bar{z}_0 \cdot z}\right) \quad \text{où } \theta \in \mathbb{R} \text{ et } z_0 \in D \text{ sont arbitraires.}$$

Enfin le **théorème fondamental** (énoncé par Riemann) **de la représentation conforme** — tout ouvert $V \subset \mathbb{C}$ est isomorphe au disque ouvert unité D s'il est distinct de $\mathbb{C}$ et simplement connexe — permet de répondre au problème posé. Toutefois, il est à noter que la détermination approchée de la fonction holomorphe qui définit l'isomorphisme de V sur D est en général très difficile et relève du calcul numérique.

On peut dire que la représentation conforme est à la fois, parmi les problèmes relatifs aux fonctions de variable complexe, le plus ancien et l'un des plus pratiqués couramment. En effet, la projection stéréographique est une invention grecque et est l'un des outils privilégiés de la cartographie. Il s'agit (*fig. 50*) de l'application qui, à tout point M (x_1, x_2, x_3) de la sphère unité de $\mathbb{R}^3$ tel que $x_3 \neq 1$,

associe le point $M'\left(\frac{x_1}{1 - x_3}, \frac{x_2}{1 - x_3}\right)$ du plan $x_3 = 0$; ce point M′ n'est autre que l'intersection de la droite joignant le « pôle nord » de la sphère au point M avec le plan $x_3 = 0$. Si l'on identifie ce plan au plan complexe, on a l'application :

$$\sigma_1 : (x_1, x_2, x_3) \mapsto \frac{x_1}{1 - x_3} + i\frac{x_2}{1 - x_3}$$

qui est une représentation conforme de la sphère privée du pôle $x_3 = 1$ sur le plan complexe.

On pourrait aussi bien définir la projection stéréographique relative au « pôle sud » $x_3 = -1$, qui, composée avec la symétrie par rapport à l'axe x_1, donne la représentation conforme :

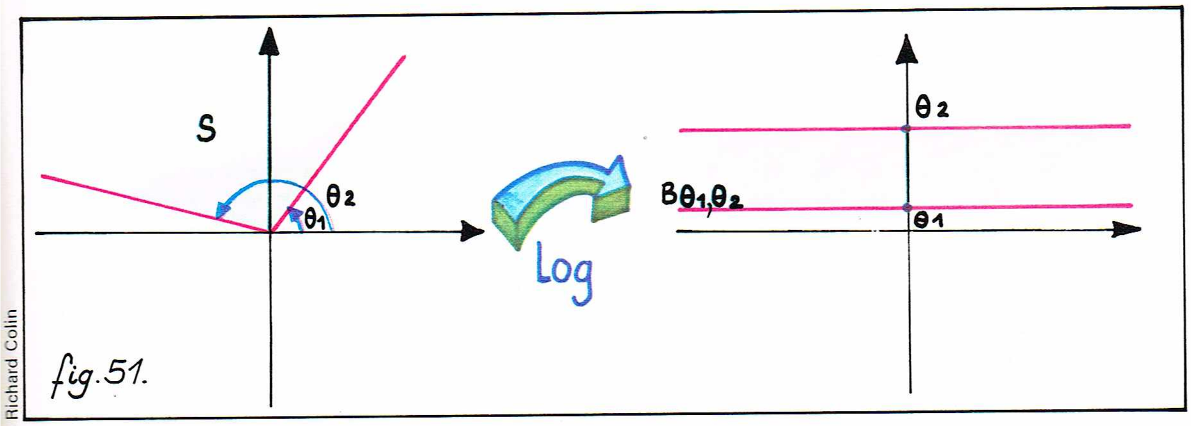

◀ ***Figure 51 :* représentation conforme du secteur S sur la bande B_{θ_1,θ_2} par la fonction logarithme complexe.**

$$\sigma_2 : (x_1, x_2, x_3) \mapsto \frac{x_1}{1 + x_3} - i\,\frac{x_2}{1 + x_3}$$

de la sphère privée du pôle $x_3 = -1$ sur le plan C.

On peut encore donner quelques exemples de représentations conformes. La fonction $z \mapsto \log z$ est, on l'a vu, une représentation conforme du plan privé du demi-axe réel négatif sur la bande $B_{-\pi} = \{z \in C \text{ tels que } |Im\,z| < \pi\}$. C'est donc une représentation conforme (*fig.* 51) du « secteur » $S = \{z \in C \text{ tels que } \theta_1 < \text{Arg}\,z < \theta_2\}$ sur la bande $B_{\theta_1,\theta_2} = \{z \in \mathbb{C} \text{ tels que } \theta_1 < Im\,z < \theta_2\}$.

On peut donc considérer la transformation conforme réciproque réalisée par la fonction : $z \mapsto e^z$ dont la restriction à la bande : $B_0 = \{z \in \mathbb{C} \text{ tels que } 0 < Im\,z < 2\pi\}$ est injective, et qui envoie cette bande sur le plan privé (on dit aussi fendu le long) du demi-axe réel positif. Sur la figure 52, on a représenté la transformation sur les segments des droites $x = k$, inclus dans la bande et sur les droites $y = k'$ de la même bande, et dont les images respectives sont des cercles centrés à l'origine, privés de leur seul point réel positif d'une part et des demi-droites partant de l'origine.

De là, on peut par exemple étudier la transformation associée à $z \mapsto e^{iz}$. Puis, en composant avec celle définie par : $t \to \frac{1}{2}\left(t + \frac{1}{t}\right)$, on obtient la représentation conforme associée à : $z \mapsto \cos z$ sur l'ensemble ouvert $D = \{z \in \mathbb{C}$ tels que $0 < Re\,z < \pi$ et $Im\,z > 0\}$. En particulier, on peut voir que le segment de la droite $y = k$ inclus dans D est transformé en une ellipse dont les foyers sont les points réels $+1$ et -1 et que la demi-droite $x = k'$ incluse dans D est transformée en une hyperbole homofocale (*fig.* 53).

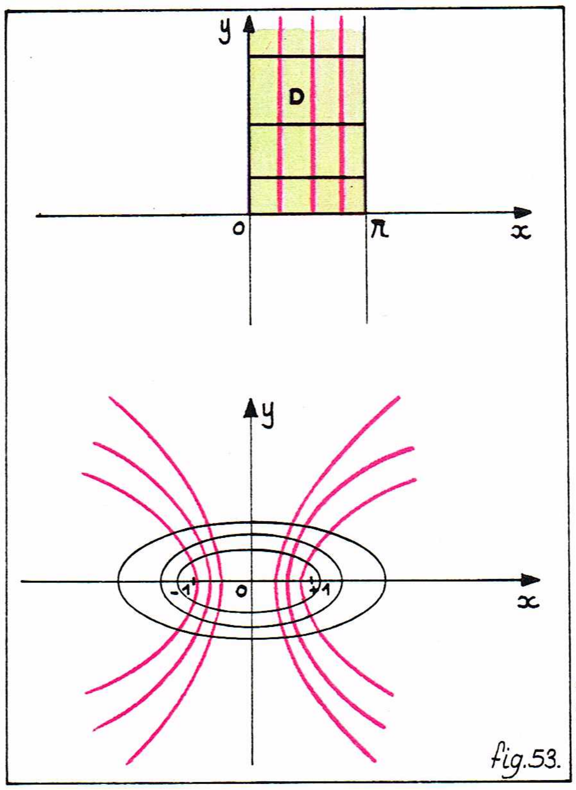

◀ ***Figure 53 :* représentation conforme par la fonction cosinus. Les segments y = Cte de D deviennent des ellipses, et les demi-droites x = Cte de D des hyperboles homofocales.**

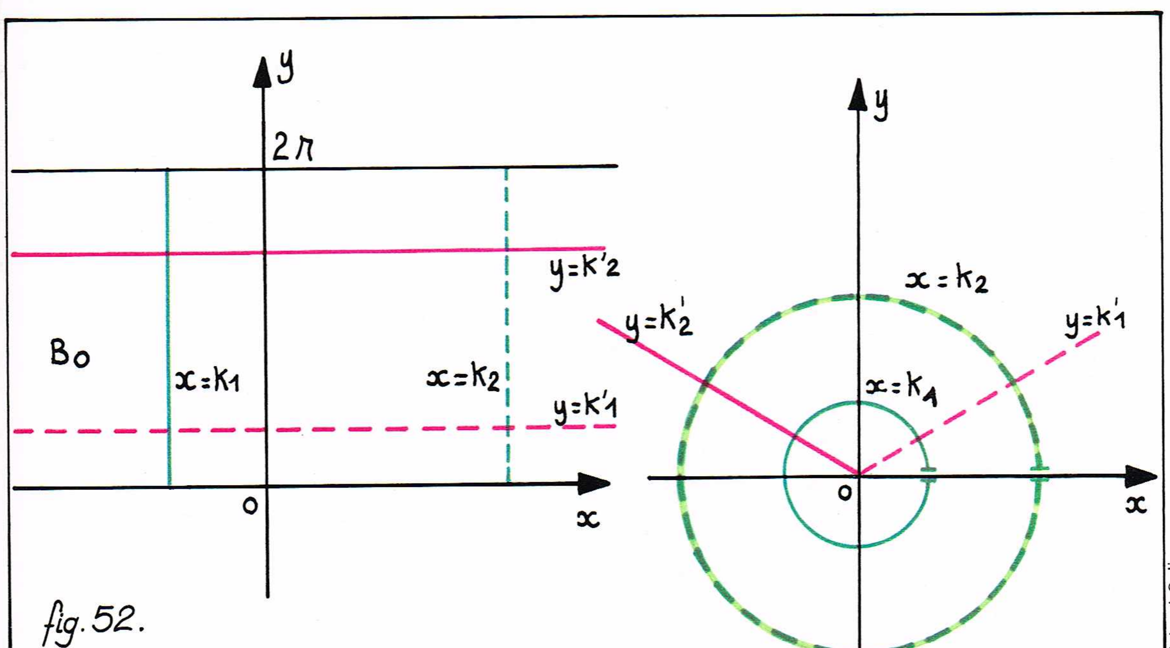

◀ ***Figure 52 :* représentation conforme de la bande B_0 sur $\mathbb{C}$ privé de $\mathbb{R}_+$, par la fonction exponentielle ; transformation des droites x = Cte et y = Cte.**

▶ *Figure 54; série de Fourier de la fonction 2 π-périodique égale à x sur* $]0, 2\pi[$: $y = \pi - 2\left(\frac{\sin x}{1} + \frac{\sin 2x}{2} + \frac{\sin 3x}{3} + \ldots\right)$.

Figure 55; série de Fourier de la fonction 2 π-périodique égale à x sur $[0, \pi]$ *et à — x sur* $[-\pi, 0]$: $y = \frac{\pi}{2} - \frac{4}{\pi}\left(\cos x + \frac{\cos 3x}{3^2} + \frac{\cos 5x}{5^2} + \ldots\right)$.

Figure 56; série de Fourier de la fonction 2 π-périodique égale à x sur $]-\pi, +\pi[$: $y = 2\left(\frac{\sin x}{1} - \frac{\sin 2x}{2} + \frac{\sin 3x}{3} - \ldots\right)$.

Figure 57; série de Fourier de la fonction 2 π-périodique égale à x sur $\left[-\frac{\pi}{2}, +\frac{\pi}{2}\right]$ *et à* $\pi - x$ *sur* $\left[\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}\right]$: $y = \frac{4}{\pi}\left(\sin x - \frac{\sin 3x}{3^2} + \frac{\sin 5x}{5^2} - \ldots\right)$.

Figure 58; série de Fourier de la fonction 2 π-périodique égale à x^2 *sur* $[-\pi, +\pi]$: $y = \frac{\pi^2}{3} - 4\left(\frac{\cos x}{1} - \frac{\cos 2x}{2^2} + \frac{\cos 3x}{3^2} - \ldots\right)$.

Figure 59; série de Fourier de la fonction 2 π-périodique égale à cos x sur $]0, \pi[$ *et à sin x sur* $]-\pi, 0[$: $y = \frac{4}{\pi}\left(\frac{2 \sin 2x}{1 \cdot 3} + \frac{4 \sin 4x}{3 \cdot 5} + \frac{6 \sin 6x}{5 \cdot 7} + \ldots\right)$.

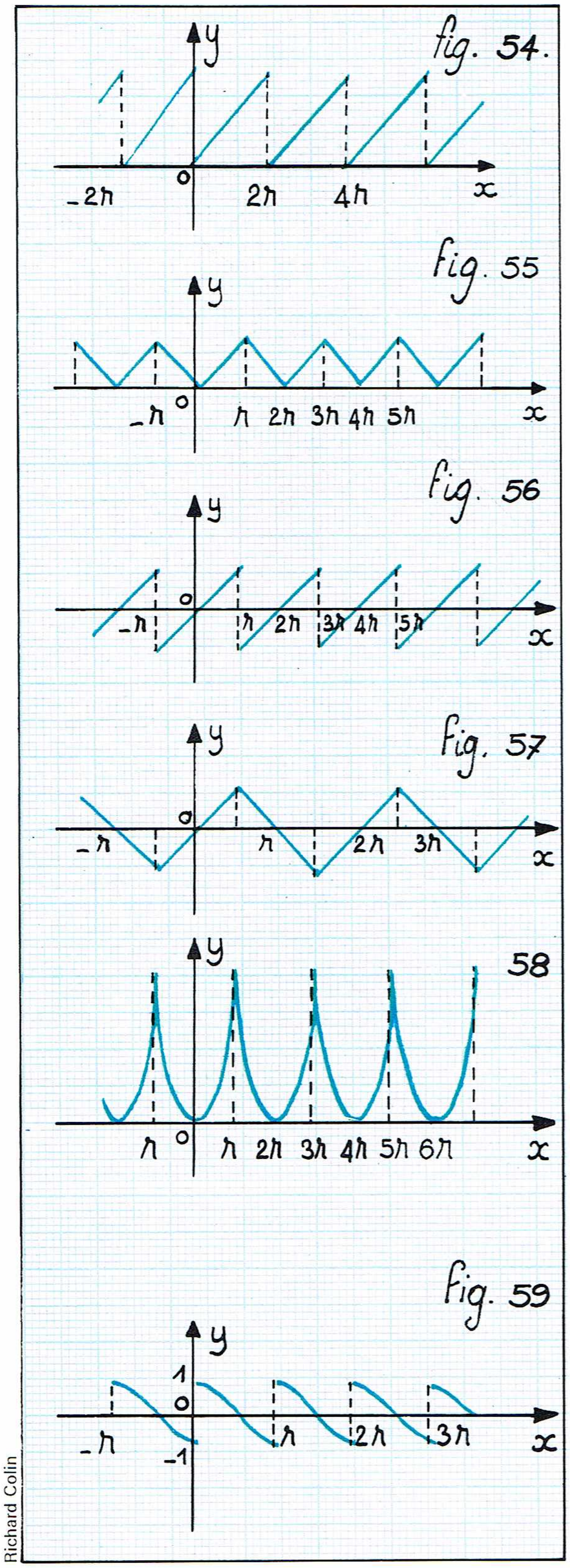

Analyse harmonique

Par les liens très étroits que l'on peut tracer entre l'analyse harmonique et la théorie de l'intégration, par ses applications en physique et par la contribution apportée au concept moderne de fonction, on peut dire que cette branche des mathématiques est la pierre de touche de l'analyse mathématique. C'est en étudiant l'équation des cordes vibrantes $\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$ que le mathématicien suisse Daniel Bernoulli (1700-1782) introduisit une fonction (solution de cette équation) sous forme d'une série trigonométrique :

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{n\pi}{l} x + b_n \sin \frac{n\pi}{l} x\right)$$

L'analogie acoustique a conduit à donner l'appellation « *harmonique* » aux termes de cette série autres que le « niveau fondamental » obtenu pour $n = 1$.

Le développement en série trigonométrique,

$$\sum_{n \geqslant 0} (a_n \cos nx + b_n \sin nx) \quad \text{ou} \quad \sum_{n \geqslant 0} \rho_n \cos (nx + \varphi_n),$$

ou encore $\sum_{n \in \mathbb{Z}} c_n e^{inx}$, des fonctions périodiques allait alors permettre de considérer les fonctions indépendamment des propriétés de continuité, de dérivabilité, etc. C'est ainsi que J. Fourier essaya de représenter des fonctions discontinues comme somme de séries trigonométriques (*fig.* 54, 55, 56, 57, 58, 59) ; le même problème que celui posé par la série de Taylor, c'est-à-dire la convergence de la série de Fourier d'une fonction vers cette fonction, ouvrait alors tous les développements de l'analyse harmonique et de la théorie spectrale.

Séries trigonométriques

Soit f une fonction de variable réelle, 2π-périodique (cette valeur n'étant évidemment pas restrictive pour ce qui suit), que l'on suppose intégrable. On appelle *coefficients de Fourier* de f les nombres $c_n(f) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x)\, e^{-inx}\, dx$ (si la fonction était de période T, on poserait

$$c_n(f) = \frac{1}{T} \int_0^T f(x)\, e^{-\frac{2\pi}{T} inx}\, dx)$$

définis pour tout $n \in \mathbb{Z}$, et on dira que la série

$$\sum_{n \in \mathbb{Z}} c_n(f)\, e^{inx}$$

est la *série de Fourier* de f. Le problème étant de savoir dans quel cas cette série est convergente de somme f (ponctuellement ou uniformément selon les cas), on est amené à étudier l'influence des propriétés éventuelles de f (continuité, différentiabilité, etc.) sur la convergence de la série et à introduire un nouveau type de convergence par les moyennes arithmétiques des sommes de Fourier que l'on appelle les *sommes de Féjer :*

$$\sigma_N(f, x) = \frac{S_0(f, x) + S_1(f, x) + \ldots + S_{N-1}(f, x)}{N} = \sum_{k=-N}^{+N} \left(1 - \frac{|k|}{N}\right) c_k(f)\, e^{ikx}$$

où l'on pose $S_n(f, x) = \sum_{k=-n}^{+n} c_k(f)\, e^{ikx}$ *(somme de Fourier)*.

Les hypothèses fortes que l'on peut (dans certains cas) faire pour la fonction f donnent les résultats suivants :

— si la fonction f est deux fois continûment dérivable, alors la série de Fourier de f converge absolument et uniformément vers f ;

— si la fonction f est différentiable, sa série de Fourier converge uniformément vers f ;

— si la série de Fourier de f est normalement convergente (c'est-à-dire si $\sum_{n \in \mathbb{Z}} |c_n(f)|$ converge), f est somme de sa série de Fourier.

En affaiblissant les hypothèses, on obtient alors que, si f est une fonction continue, les sommes de Fourier $S_n(f, x)$ ne convergent vers $f(x)$ que presque partout (c'est-à-dire à l'exception de points formant un ensemble dont la mesure est nulle) ; par contre, les *sommes de Féjer* $\sigma_N(f, x)$ convergent uniformément vers $f(x)$. Il existe des fonctions continues qui ne sont pas égales à la somme de leur série de Fourier, comme l'a montré Féjer avec la fonction $f(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^2} e^{2iN_k t} \cdot F_{N_k}(t)$ où, pour

tout k, N_k est un entier vérifiant $\lim_{k \to \infty} N_k = +\infty$ (suite d'entiers croissant indéfiniment) et où F_{N_k} est le « polynôme trigonométrique » $F_{N_k}(t) = \sum_{n=1}^{N_k} \frac{\sin nt}{n}$; pour cette fonction f, on a $c_n(f) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^2} c_{n-2N_k}(F_{N_k})$, et la série de Fourier ainsi définie diverge au point 0.

Les fonctions de carré intégrable (voir le paragraphe *Intégration*) possèdent une propriété de convergence pour leur série de Fourier, mais relative à la structure hilbertienne de l'espace L^2, c'est-à-dire que, si f est une fonction 2π-périodique, $f \in L^2[0, 2\pi]$, on a :

$$\lim_{N \to \infty} \left[\int_0^{2\pi} |f(x) - \sum_{-N}^{+N} c_n(f) e^{inx}|^2 dx \right] = 0$$

Pour les fonctions de cette classe, on possède encore les remarquables *formules de Parseval :*

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t)\, g(t)\, dt = \sum_{n \in \mathbb{Z}} c_n(f)\, c_{-n}(g)$$

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} |f(t)|^2 dt = \sum_{n \in \mathbb{Z}} |c_n(f)|^2$$

vérifiées pour tout $f \in L^2[0, 2\pi]$ et tout $g \in L^2[0, 2\pi]$.

La transformation de Fourier

Le développement d'une fonction en série de Fourier fait apparaître une correspondance qui, à une fonction f, 2π-périodique et intégrable, associe une fonction $c_n(f)$ définie pour $n \in \mathbb{Z}$. On va généraliser cette transformation, associant à toute fonction f intégrable son *image* (ou *transformée*) *de Fourier* F définie par :

$$F(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-2\pi i t x} f(x)\, dx ;$$

on note souvent $F = \mathcal{F} f$. Ceci permet d'obtenir un outil d'analyse applicable à des fonctions pour lesquelles les méthodes des séries de Fourier sont inadaptées (éléments de l'espace $L^1[0, 2\pi]$ par exemple). Il faut noter que le coefficient -2π est placé dans cette définition, bien que son usage ne soit pas totalement généralisé ; son plus grand intérêt réside dans la simplicité de la propriété de « réciprocité » qu'on expose plus avant.

Si f est une fonction intégrable, sa transformée de Fourier est continue, bornée et tend vers zéro à l'infini : $\lim_{|t| \to \infty} F(t) = 0$. Cette « régularité » est d'autant plus accentuée que la fonction f est elle-même régulière ; ainsi, lorsque f est p fois continûment dérivable, on a $\mathcal{F} f^{(p)} = (2\pi i t)^p \mathcal{F} f$ et, de plus

$$|F(t)| \leqslant \frac{1}{|2\pi t|^p} \int_{-\infty}^{+\infty} |f^{(p)}(x)|\, dx,$$

ce qui montre qu'alors $\mathcal{F} f = F$ tend vers zéro à l'infini de façon encore plus marquée.

Réciproquement, si $x^p f(x)$ est intégrable, alors $\mathcal{F} f$ est p fois continûment dérivable, et l'on a :

$$(\mathcal{F} f)^{(p)}(t) = \mathcal{F}[(-2\pi i x)^p f(x)].$$

Enfin, une étude plus précise montre que la transformée de Fourier d'une fonction se « disperse » d'autant plus que la fonction est « tassée » (en ce qui concerne leurs valeurs).

On introduit, parallèlement, la *transformation de Fourier conjuguée*, $\overline{\mathcal{F}}$, souvent appelée *réciproque*, définie pour toute fonction intégrable par

$$\overline{\mathcal{F}} f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{2\pi i t x} f(x)\, dx.$$

On peut alors dégager l'aspect essentiel de la transformation de Fourier ; en effet, si une fonction f est intégrable et si sa transformée $\mathcal{F} f$ l'est aussi, on peut écrire que $f = \overline{\mathcal{F}}(\mathcal{F} f)$. En d'autres termes, la transformation de Fourier — pour cette catégorie de fonctions — caractérise une fonction à partir de sa transformée, et *vice versa :*

Palais de la Découverte, Paris

◀ ***Le mathématicien français* Joseph Fourier *(1768-1830) ; ses travaux conduisirent à l'une des grandes études mathématiques du XIXe siècle : celle des séries dites de Fourier.***

c'est la *propriété de réciprocité*. Dans le cas des distributions (voir *Analyse fonctionnelle*), on parlera pour ces transformations $\mathcal{F}$ et $\overline{\mathcal{F}}$ d'isomorphismes continus de l'espace des distributions tempérées.

La propriété fondamentale de la transformation de Fourier est liée à la notion de produit de convolution. On peut considérer les coefficients de la série de Fourier d'une fonction comme une transformée de Fourier définie sur $\mathbb{Z}$ en posant $\widehat{f}(k) = c_k(f)$; or la première formule de Parseval peut s'écrire :

$$c_0(fg) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} c_n(f)\, c_{-n}(g) \quad \text{et} \quad c_m(fg) = c_0(fg e^{imt})$$

implique $c_m(fg) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} c_n(f)\, c_{m-n}(g)$, ce que nous écrirons donc $\widehat{fg}(m) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} \widehat{f}(n)\, \widehat{g}(m-n)$. D'autre part, cette même formule de Parseval peut s'écrire :

$$\sum_{n \in \mathbb{Z}} c_n(f)\, c_n(g)\, e^{int} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x)\, g(t-x)\, dx$$

On voit donc apparaître une loi de composition entre fonctions définies sur un ensemble discret dans le premier cas, sur un ensemble continu dans le second ; on abordera seulement ce dernier cas. Soit f et g deux fonctions intégrables sur $\mathbb{R}$, on appelle *produit de convolution* de f et g la fonction $f * g$ définie par :

$$f * g(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)\, g(t-x)\, dx$$

et l'on montre qu'elle est intégrable. Dans ces conditions, on peut énoncer que $\mathcal{F}(f * g) = (\mathcal{F} f)(\mathcal{F} g)$ et $\mathcal{F}(fg) = (\mathcal{F} f) * (\mathcal{F} g)$. La première de ces formules n'est autre que la formule générale de celle trouvée plus haut pour les coefficients de la série de Fourier, soit $\widehat{fg}(m) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} \widehat{f}(n)\, \widehat{g}(m-n)$. Cette propriété trouve des applications très nombreuses tant dans la résolution des équations aux dérivées partielles qu'en calcul des probabilités.

La transformation de Fourier trouve une cohérence particulièrement nette avec la théorie de l'intégration et le problème de la mesure de Haar dans le cadre des groupes abéliens localement compacts (par exemple $\mathbb{R}$ ou $\mathbb{R}^m$, ou encore le tore $\mathbb{T} = \frac{\mathbb{R}}{2\pi\mathbb{Z}}$ ou encore $\mathbb{Z}$) ; son extension aux fonctions généralisées ou distributions permet de précieuses utilisations en physique.

Giraudon

▲ ***Portrait du mathématicien et physicien français*** **Pierre Simon de Laplace** ***(1749-1827).***

La transformation de Laplace

La transformation de Fourier peut être étendue aux fonctions de plusieurs variables et donne les mêmes résultats principaux. Elle peut être encore étendue au plan complexe, mais en ne considérant cette fois que des fonctions d'une variable réelle, nulles en dehors de l'ensemble $[0, +\infty[$. En raison de cette restriction, on a recours à la *fonction* dite *d'Heaviside*, notée Y, telle que $Y(t) = 0$ si $t < 0$, et $Y(t) = 1$ si $t \geqslant 0$. Si f est donc une fonction nulle hors de $[0, +\infty[$ — si ce n'est pas le cas, on considère alors $Y(t)\,f(t)$ — on appelle *transformée de Laplace de f* la fonction de la variable complexe z définie par : $\mathcal{L}f(z) = \int_0^{+\infty} f(t)\,e^{-zt}\,dt$. Ainsi, la fonction d'Heaviside Y a pour transformée $\frac{1}{z}$, ce que l'on note $\frac{1}{z} \sqsubset Y(t)$ au lieu de $\frac{1}{z} = \mathcal{L}Y$; de même, on voit aisément que $e^{-az} \sqsubset \delta$ si $\delta(t) = 1$ pour $t = a \geqslant 0$ et $\delta(t) = 0$ sinon. Un calcul simple montre que, si $z = x + iy$ en fixant x,

$$\mathcal{L}f(z) = \mathcal{F}\,[f(t)\,e^{-tx}]\left(\frac{y}{2\pi}\right)$$

Le domaine de définition de $\mathcal{L}f$ est déterminé par le fait que, si $\int_0^{+\infty} f(t)\,e^{-tz_0}\,dt$ converge absolument, alors $\int_0^{+\infty} f(t)\,e^{-tz}\,dt$ converge absolument et uniformément dans le demi-plan fermé $Re\,(z) \geqslant Re\,(z_0)$ et dans l'angle $|Arg\,(z - z_0)| \leqslant \theta$ pour $\theta \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right[$ si $\int_0^{+\infty} f(t)\,e^{-tz_0}\,dt$ converge simplement. On définit alors *l'abscisse de convergence absolue* comme l'élément unique $\alpha \in \overline{\mathbb{R}}$ tel que :

$$Re\,(z) > \alpha \Rightarrow \int_0^{+\infty} |f(t)\,e^{-tz}|\,dt < +\infty$$

et

$$Re\,(z) < \alpha \Rightarrow \int_0^{+\infty} |f(t)\,e^{-tz}|\,dt = +\infty$$

et *l'abscisse de convergence* comme l'élément unique $\beta \in \overline{\mathbb{R}}$ tel que :

$$Re\,(z) > \beta \Rightarrow \int_0^{+\infty} f(t)\,e^{-tz}\,dt \text{ converge}$$

et

$$Re\,(z) < \beta \Rightarrow \int_0^{+\infty} f(t)\,e^{-tz}\,dt \text{ diverge;}$$

il est clair que $\beta \leqslant \alpha$. Par exemple, l'abscisse de convergence absolue de $Y(t)$ est $\alpha = 0$.

On montre aussi que la transformée de Laplace est holomorphe dans le demi-plan de convergence,

$$Re\,(z) > \beta\,;$$

dans ce demi-plan, si $F(z) \sqsubset f(t)$, on a $F^{(k)}(z) \sqsubset (-t)^k f(t)$ pour tout k.

Enfin, comme pour la transformation de Fourier, on a la propriété fondamentale :

$$\mathcal{L}\,(f * g) = (\mathcal{L}f)\cdot(\mathcal{L}g).$$

C'est cette propriété qui donne lieu au plus important développement de la transformation de Laplace, le *calcul symbolique*, destiné à résoudre, après lecture des tables de transformées, les équations de convolution de la forme $f * g = h$ où g est inconnue (par transformation de Laplace, ces équations s'écrivent $\mathcal{L}f \cdot \mathcal{L}g = \mathcal{L}h$, soit encore $\mathcal{L}g = \frac{\mathcal{L}h}{\mathcal{L}f}$). Ainsi, pour déterminer f telle que $\int_0^t f(x)\,e^{k(t-x)}\,dx = t$, on pose l'équation sous la forme : $Y(x)\,e^{kx} * f(x) = tY(t)$; en prenant les transformées de Laplace, on obtient $\frac{1}{z-k} \cdot \mathcal{L}f = \frac{1}{z^2}$, soit $\mathcal{L}f = \frac{1}{z} - \frac{k}{z^2}$; par conséquent, la transformation de Laplace étant injective, on a $f(x) = Y(x)\,(1 - kx)$.

Ce calcul symbolique est d'un usage très courant (particulièrement dans les problèmes d'automatique, où les problèmes sont résolus à l'aide d'une transformation opérant sur une variable discrète, la *transformation en z* qui a de multiples applications, économiques par exemple, dès que l'on aborde des modèles dits « avec retard »), en raison de sa simplicité (on se borne en général à lire des tables) et du formalisme très simple qui en est la base et qui trouve une très belle application dans le cas des mesures et des distributions.

BIBLIOGRAPHIE

BOREL E., *Leçons sur la théorie des fonctions,* Gauthier-Villars, Paris. - BOURBAKI N., *Éléments d'histoire des mathématiques,* Hermann ; *Fonctions d'une variable réelle,* Hermann ; *Intégration,* Hermann. - CARNOT L., *la Métaphysique du calcul infinitésimal,* Gauthier-Villars. - CARTAN H., *Calcul différentiel,* Hermann ; *Théorie élémentaire des fonctions analytiques d'une ou plusieurs variables complexes,* Hermann. - DELACHET A., *l'Analyse mathématique,* P. U. F., « Que sais-je ? » ; *Calcul différentiel et intégral,* P. U. F., « Que sais-je ? ». - DIEUDONNÉ J., *Calcul infinitésimal,* Hermann. - FÉLIX L., *Exposé moderne des mathématiques élémentaires,* Dunod. - LE LIONNAIS F. (sous la direction de), *les Grands Courants de la pensée mathématique,* Blanchard. - LELONG-FERRAND J. et ARNAUDIÈS J.-M., *Cours de mathématiques,* t. II, Dunod. - RIESZ F. et NAGY B., *Leçons d'analyse fonctionnelle.* — SAKS B. et ZYGMUND A., *Analytic Functions.* - SCHWARTZ L., *Cours d'analyse,* t. I et II, Hermann ; *Méthodes mathématiques pour les sciences physiques,* Hermann.

ANALYSE FONCTIONNELLE

Espaces fonctionnels

La notion de « fonction » est fondamentale en mathématiques. Ainsi qu'on l'a vu dans le chapitre *Langage ensembliste* une fonction (ou plus généralement une application) est définie comme un procédé « qui met en correspondance » un ensemble E et un ensemble F. Ce procédé associe à tout élément x de E un *élément unique* y de F dont la dépendance à l'égard de x est symbolisée par l'écriture $y = f(x)$. La lettre f représente le procédé en question. L'on parlera donc de la fonction $f: E \to F$.

Il s'agit donc d'une notion suffisamment générale pour être utilisée selon des points de vue très divers. Les algébristes s'intéressent plutôt aux *propriétés globales* des fonctions ; ils les définissent et les étudient dans la mesure où celles-ci « transportent » une structure algébrique d'un ensemble vers un autre (homomorphismes, isomorphismes, etc.). Par contre les analystes s'intéressent plus volontiers aux *propriétés locales*. Ainsi étudient-ils les points de singularité des fonctions, c'est-à-dire les points de l'ensemble de départ où « il se passe quelque chose » (discontinuités, comportement asymptotique, etc.). Mais algébristes et analystes s'accordent sur un point : une fois qu'ils ont jeté leur dévolu sur une fonction f, ils ne sont guère enclins à élargir leur champ d'étude en considérant d'autres fonctions qui, au regard de certains critères, « ressemblent » à f.

A l'inverse le point de vue de l'analyse fonctionnelle consiste à remarquer que l'écriture $f(x)$ présente une symétrie entre « f » et « x ». Dès lors il est tentant de considérer également « f » comme variable.

L'analyse fonctionnelle est donc l'étude des ensembles de fonctions (ou espaces fonctionnels) et des structures algébriques et surtout topologiques dont on peut les munir. Nous verrons d'abord comment un espace fonctionnel est, le plus souvent, un *espace vectoriel topologique* (en abrégé *e. v. t.*). Procédant du général vers le particulier, nous verrons apparaître ensuite : les espaces localement convexes, les espaces de Banach, les espaces de Banach réflexifs, les espaces de Hilbert, enfin les espaces de dimension finie, c'est-à-dire $\mathbb{R}^n$. Ainsi donc, l'analyse fonctionnelle développe des concepts permettant de rassembler dans un même formalisme la topologie, l'analyse, d'une part, et la géométrie et l'algèbre, d'autre part. A cet égard, l'analyse fonctionnelle est d'un intérêt théorique tout à fait évident. Mais elle répond aussi aux besoins de l'analyse numérique : une équation aux dérivées partielles, par exemple, est une équation dans laquelle l' « inconnue » est une *fonction* (d'une ou de plusieurs variables), et non plus un nombre ou un vecteur comme dans les équations algébriques ; il importe donc de déterminer *a priori* l'espace fonctionnel auquel appartiendront la ou les solutions de l'équation. D'autre part, la résolution pratique des problèmes d'analyse numérique nécessite la mise en œuvre de *procédés d'approximation :* « approcher » une fonction suppose que l'on soit en mesure de définir l'idée de « proximité » — c'est-à-dire la notion de voisinage — dans un espace fonctionnel. C'est dire l'intérêt qu'il peut y avoir à étudier les espaces fonctionnels d'un point de vue topologique.

Soit donc E et F deux ensembles ; nous noterons F^E l'ensemble de toutes les applications de E dans F. Cet ensemble est particulièrement vaste et, suivant la nature du problème à résoudre, nous nous restreindrons à tel ou tel sous-ensemble de F^E ; il convient d'ores et déjà de faire la remarque suivante : si l'ensemble d'arrivée F est muni d'une certaine structure (algébrique ou topologique), il est souvent possible de munir F^E d'une structure analogue. L'ensemble de départ E joue un rôle secondaire dans la définition de structures sur l'ensemble F^E : ainsi, si F est un espace vectoriel (sur $\mathbb{R}$), F^E est aussi un espace vectoriel pour les deux opérations :

$$(f+g)(x) = f(x) + g(x) \quad \forall x \in E$$
$$\lambda \cdot f(x) = \lambda \cdot f(x) \quad \forall x \in E, \forall \lambda \in \mathbb{R}$$

Supposons maintenant que F est un espace métrique ; il semble légitime d'espérer que F^E puisse être lui aussi un espace métrique. Cela n'est pas le cas, car il n'est pas possible de munir F^E d'une *distance*. Cependant, en se restreignant au sous-ensemble $(F^E)_b$ des *applications bornées*, on peut obtenir ce résultat : soit en effet d la distance définie sur F, et f et g deux fonctions bornées de F^E ; il est aisé de démontrer que la quantité

$$\delta(f, g) = \sup_{x \in E} d(f(x), g(x))$$

est définie et qu'elle permet de définir une distance sur $(F^E)_b$.

Il est facile de déduire de ces deux résultats que, lorsque F est un espace vectoriel normé (voir *Topologie*), alors l'ensemble $(F^E)_b$ est aussi un espace vectoriel normé en posant :

$$|||f||| = \sup_{x \in E} ||f(x)||$$

Les *espaces métriques complets* sont très appréciés en analyse fonctionnelle : rappelons que, dans de tels espaces, on est assuré de la convergence d'une suite, même si on est dans l'impossibilité d'en déterminer la limite, pourvu qu'il s'agisse d'une suite de Cauchy. Des résultats importants d'analyse sont établis dans le cadre des espaces complets. Il est donc intéressant de savoir dans quelle mesure un espace fonctionnel peut être un espace complet.

On démontre le résultat suivant : *si F est un espace métrique complet, l'espace métrique $(F^E)_b$ est aussi complet.*

Exemple : considérons l'ensemble des fonctions continues de $[a, b] \subset \mathbb{R} \to \mathbb{R}$. Il s'agit de fonctions bornées (l'intervalle $[a, b]$ étant compact, les fonctions continues y sont bornées). Nous avons donc affaire à une espace normé, complet, c'est-à-dire à un *espace de Banach*.

Convergence simple et uniforme d'une suite de fonctions

Nous allons définir deux types de convergence de fonctions : la *convergence simple* et la *convergence uniforme*, et nous montrerons que ces deux types de convergence correspondent à deux topologies différentes de l'espace (F^E) ou $(F^E)_b$.

L'ensemble F sera dorénavant supposé être un espace métrique.

Convergence simple

Nous dirons qu'une suite de fonctions f_n *converge simplement* vers une fonction f si, pour tout $x \in E$,

$$f_n(x) \to f(x)$$

ce qui s'écrit : **(1)**

$$\forall x \in E \quad \forall \varepsilon > 0 \quad \exists m \in \mathbb{N} / \forall n \geqslant m : d[f_n(x), f(x)] \leqslant \varepsilon.$$

L'on notera que l'entier m ainsi déterminé dépend non seulement de ε mais aussi de x. Cette notion de convergence correspond à la *topologie produit* de l'espace F^E. Cette topologie n'est pas métrisable, car elle ne peut pas être définie à l'aide d'une distance (sauf si l'on se restreignait aux fonctions bornées) ; par contre, nous verrons plus loin qu'il est possible de la définir à l'aide d'une *famille de semi-distances*.

Convergence uniforme

Nous dirons que la suite de fonctions f_n *converge uniformément* vers la fonction f si l'entier m déterminé dans l'expression **(1)** peut être choisi indépendamment de x.

Ce qui s'écrit :

$$\forall x \in E \quad \forall \varepsilon > 0 \quad \exists m \in \mathbb{N} \quad \forall n \geqslant m : d(f_n(x), f(x)) \leqslant \varepsilon$$

Si les f_n et f sont des fonctions bornées, cette expression peut s'écrire :

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists m \in \mathbb{N} \quad \forall n \geqslant m : \delta(f_n, f) \leqslant \varepsilon.$$

Dans ce cas, la convergence uniforme n'est autre que la convergence des points f_n de l'espace métrique $(F^E)_b$ vers le point f.

La convergence uniforme entraîne, bien sûr, la convergence simple. Mais la réciproque est fausse, ainsi qu'en témoigne le contre-exemple suivant : soit la suite de fonctions f_n de $\mathbb{R} \to \mathbb{R}$ définie par :

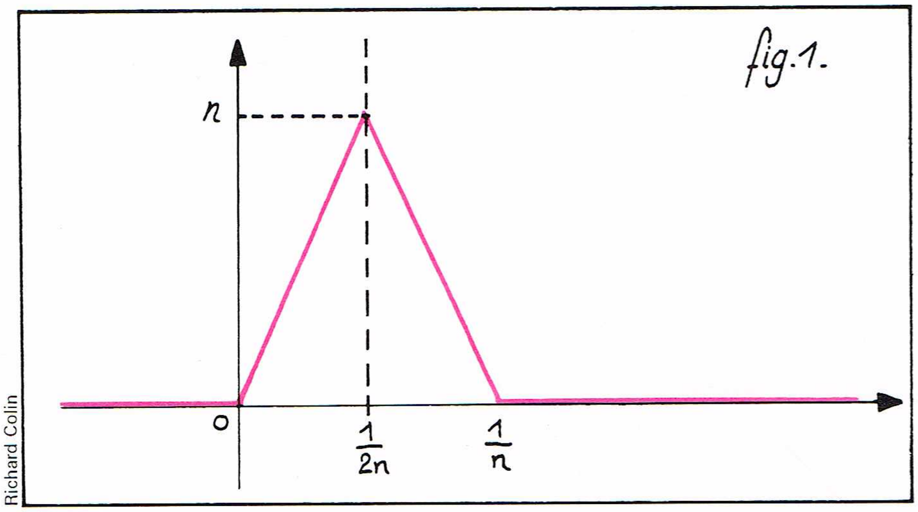

Richard Colin

▲ ***Figure 1 :* graphe de la fonction énoncée dans le texte ci-contre.**

$$f_n(x) = \begin{cases} 0 & x \leqslant 0 \\ 2\,n^2 \cdot x & 0 \leqslant x \leqslant \dfrac{1}{2\,n} \\ -\,2\,n^2\left(x - \dfrac{1}{n}\right) & \dfrac{1}{2\,n} \leqslant x \leqslant \dfrac{1}{n} \\ 0 & x \geqslant \dfrac{1}{n} \end{cases}$$

Le graphe de cette fonction est donné par la *figure* 1.

On montrera que la suite de f_n converge simplement vers la fonction 0. Par contre, elle ne converge pas uniformément vers 0 puisque

$$\delta\,(f_n, 0) = \operatorname*{Sup}_{x \in \mathbb{R}} |f_n\,(x) - 0| = n \to +\infty.$$

La principale vertu de la convergence uniforme est qu'elle « conserve » la notion de continuité par passage à la limite ; en d'autres termes, on démontre que : *la limite uniforme d'une suite de fonctions continues est continue.* L'énoncé d'un tel résultat suppose que l'espace de départ E soit un espace topologique (de façon à pouvoir parler de fonctions continues de E → F). La convergence uniforme est essentielle dans la démonstration de ce résultat : considérons par exemple la suite des fonctions φ_n : [0, 1], → $\mathbb{R}$ définie par $\varphi_n\,(x) = x^n$; φ_n est continue pour tout n et converge *simplement* vers la fonction φ discontinue définie par :

$$\begin{cases} \varphi\,(x) = 0 & 0 \leqslant x < 1 \\ \varphi\,(1) = 1. \end{cases}$$

D'un point de vue topologique, ce résultat exprime le fait que dans l'espace $(\mathrm{F^E})_b$, le sous-espace $(\mathrm{F^E})_{bc}$ des applications bornées et continues est *fermé pour la topologie de la convergence uniforme.*

Espaces vectoriels topologiques

Définition

Un espace fonctionnel est le plus souvent un espace vectoriel ; ainsi que nous venons de le voir, il est possible de le munir d'une ou de plusieurs topologies. L'on choisira la topologie la mieux adaptée au problème que l'on veut résoudre, sachant qu'il ne sera pas toujours possible d'en trouver une qui soit métrisable (voir *Topologie de la convergence simple*). Ainsi donc, le cadre conceptuel de l'analyse fonctionnelle se révèle être naturellement celui des *espaces vectoriels topologiques.* Étant donné un espace vectoriel, il s'agit de déterminer quelles relations de compatibilité doivent exister entre sa structure algébrique et la structure topologique dont on souhaite le munir. Nous verrons qu'un espace vectoriel topologique n'est pas un espace vectoriel muni de n'importe quelle topologie.

Les espaces vectoriels sont en général de dimension infinie. C'est dire l'importance qu'il faut attacher au **théorème de F. Riesz** qui donne une caractérisation topologique des e. v. t. de dimension finie. Soit donc un espace vectoriel E muni d'une topologie $\mathcal{C}$ (métrisable ou non). On dira que E est un espace vectoriel topologique si

l'addition $\quad (\vec{x}, \vec{y}) \in \mathrm{E} \times \mathrm{E} \longrightarrow \vec{x} + \vec{y}$

et la multiplication $\quad (\lambda, \vec{x}) \in \mathbb{R} \times \mathrm{E} \longrightarrow \lambda \cdot \vec{x}$

sont des *applications continues* à *valeur dans E.* On dira alors que la structure vectorielle est compatible avec la structure topologique.

Nous avons rencontré en topologie des espaces vectoriels normés ; il est réconfortant de constater qu'un espace vectoriel normé est un espace vectoriel topologique. Ceci tient aux deux inégalités :

$$\begin{cases} \|(\vec{x} + \vec{y}) - (\vec{a} + \vec{b})\| \leqslant \|\vec{x} - \vec{a}\| + \|\vec{y} - \vec{b}\| & \vec{x}, \vec{y} \in \mathrm{E} \\ \|\lambda\vec{x} - \alpha\vec{a}\| \leqslant |\lambda - \alpha| + |\alpha|\;\|\vec{x} - \vec{a}\| & \lambda, \alpha \in \mathbb{R}. \end{cases}$$

La première permet d'établir la continuité de l'addition, la seconde celle de la multiplication.

Propriétés des voisinages de $\vec{0}$ dans un espace vectoriel topologique

Voyons comment l'ensemble des voisinages de l'origine $\vec{0}$ suffit à caractériser la topologie de l'espace. Cela tient au fait que la structure vectorielle induit une sorte de « solidarité » entre tous les points de l'espace et qu'ainsi « ce qui se passe » à l'origine préfigure « ce qui se passe ailleurs ». Définissons préalablement ce que l'on appelle une partie *équilibrée et absorbante* de E (*fig.* 2).

Une partie A d'un espace vectoriel est dite *équilibrée* si, quels que soient $\lambda \in \mathbb{R}$ avec $|\lambda| \leqslant 1$ et $\vec{x} \in \mathrm{A}$, on a $\lambda\vec{x} \in \mathrm{A}$; géométriquement, on peut dire qu'une partie est équilibrée si elle contient la totalité du segment joignant tout point $\vec{x}$ à son symétrique $-\,\vec{x}$.

A sera dite *absorbante* si, pour tout $\vec{x}$, il existe un nombre $\alpha > 0$ tel que $\forall\lambda : |\lambda| \leqslant \alpha$ entraîne $\lambda\vec{x} \in \mathrm{A}$; c'est-à-dire qu'il est alors toujours possible de « faire rentrer » n'importe quel point de E dans A par une homothétie de rapport suffisamment petit.

Nous allons montrer que la topologie de E est entièrement caractérisée par la donnée d'une famille de voisinages de $\vec{0}$ équilibrés et absorbants. Ce résultat s'énonce sous la forme d'un théorème :

Théorème : *soit* $\mathcal{F}\,(\vec{a})$ *l'ensemble de tous les voisinages d'un point* $\vec{a}$ *de* E ; *alors :*

(2) $\mathcal{F}\,(\vec{a}) = \vec{a} + \mathcal{F}\,(\vec{0})$;

(3) *tout voisinage* $\mathrm{V} \in \mathcal{F}\,(\vec{0})$ *est absorbant ;*

(4) *il existe un système fondamental de voisinage de* $\vec{0}$ *équilibrés.*

Le **(2)** signifie simplement que l'on obtient n'importe quel voisinage $\mathrm{V}a$ de $\vec{a}$ en faisant subir la translation $\vec{a}$ à un voisinage V_o de l'origine.

Pour démontrer **(3)** il suffit d'écrire que la multiplication par un scalaire est une opération continue de $\mathbb{R} \times \mathrm{E} \to \mathrm{E}$. Démontrons le dernier *item* plus en détail : soit V un voisinage de $\vec{0}$; montrons que l'on peut trouver un voisinage W de O, *équilibré*, inclus dans V *(cf. Topologie)*. L'application $(\lambda, \vec{x}) \to \lambda \cdot \vec{x}$ est continue à l'origine : quel que soit donc le voisinage V de O, il existe $\alpha > 0$ et un voisinage W_1 de O tel que $\lambda\mathrm{W}_1$ soit inclus dans V pour tout λ tel que $|\lambda| < \alpha$. Posons $\mathrm{W} = \bigcup_{|\lambda| < \alpha} \lambda\mathrm{W}_1$;

W est bien sûr un voisinage de O inclus dans V ; il nous reste à montrer qu'il est équilibré : soit $\vec{z} \in \mathrm{W}$; montrons que $\forall\mu$ tel que $|\mu| < 1$, $\mu\vec{z} \in \mathrm{W}$. D'après la définition de W, il existe λ ($|\lambda| \leqslant \alpha$) et $\vec{x} \in \mathrm{W}_1$ tels que

$$\vec{z} = \lambda \cdot \vec{x}\,; \quad \mu\vec{z} = \lambda \cdot \mu\vec{x}.$$

Or $|\lambda| < \alpha$ et $|\mu| \leqslant 1$ entraînent que $|\lambda \cdot \mu| < \alpha$ et donc que $\mu\vec{z} \in \mathrm{W}$. W est donc un voisinage équilibré de $\vec{0}$.

De ce résultat fondamental, on peut tirer un certain nombre de conclusions : en particulier, on montrera que si une *application* linéaire d'un e. v. t. E dans un autre F

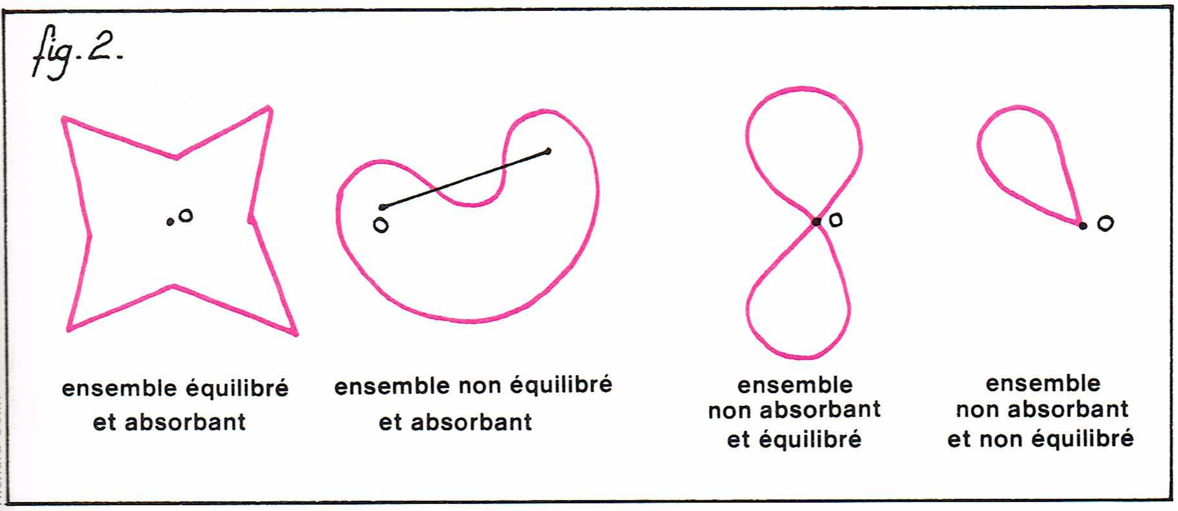

◀ ***Figure 2**: représentation graphique d'une partie* **équilibrée et absorbante** *de E.*

est continue à l'origine, elle est continue partout. Cette proposition est spécialement intéressante pour des espaces de dimension infinie (en dimension finie, toute application linéaire est nécessairement continue).

Espaces vectoriels topologiques de dimension finie

Dans le cas des espaces de dimension finie, tout devient notablement plus simple : il existe alors une seule topologie compatible avec la structure vectorielle et séparée (voir *Topologie*). Cette topologie sera dite « topologie canonique » ; elle se définit à l'aide d'une norme.

Le théorème suivant (dû à F. Riesz) établit une caractérisation des espaces de dimension finie (dans l'espace vectoriel de dimension finie $\mathbb{R}^n$, il y a identité entre les parties compactes et les parties fermées et bornées — ce qui n'est plus le cas en dimension infinie).

Théorème : *pour qu'un espace vectoriel topologique* E *soit de dimension finie, il faut et il suffit qu'il soit localement compact.*

Il convient de noter que ce résultat établit une équivalence entre une propriété de nature algébrique (dimension finie) et une propriété de nature topologique (la locale compacité). Donnons les grandes lignes de la démonstration (*fig.* 3) : soit V un voisinage compact de $\vec{0}$ dans E. 2 V possède, bien sûr, les mêmes propriétés. Soit $\vec{a}$ un élément quelconque de l'ensemble 2 V ; $\vec{a} + \mathring{V}$ est un *voisinage ouvert* de $\vec{a}$; en outre, lorsque $\vec{a}$ parcourt 2 V, les $\vec{a} + \mathring{V}$ constituent un recouvrement *ouvert* de 2 V :

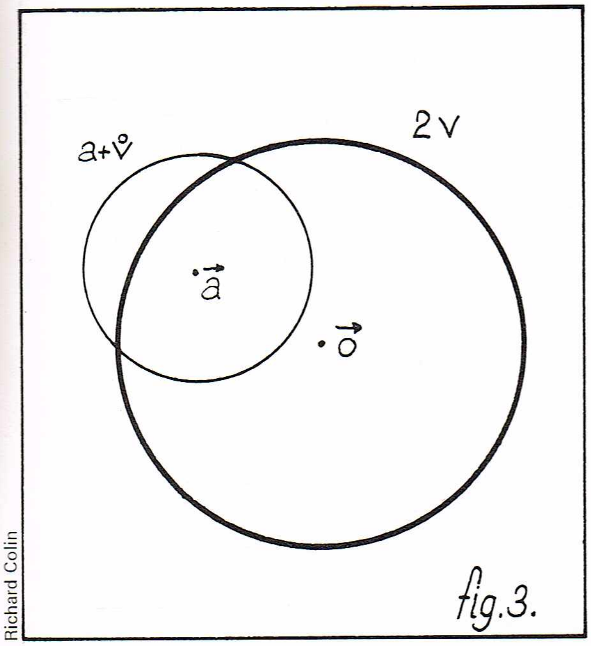

$$2\,V \subset \bigsqcup_{\vec{a} \in 2V} (\vec{a} + \mathring{V})$$

D'après l'hypothèse de compacité, on peut en extraire un recouvrement fini (voir *Topologie*), c'est-à-dire qu'il existe des éléments $\vec{a}_1, \vec{a}_2, ..., \vec{a}_n$ tels que :

$$2\,V \subset \bigsqcup_{i=1}^{n} (\vec{a}_i + V_0).$$

Soit M le sous-espace vectoriel engendré par les a_i ; il est de dimension finie (au plus n) et M + V recouvre 2 V. La démonstration s'achève en montrant qu'en réalité M coïncide avec l'espace tout entier E qui, du même coup, se trouve être de dimension finie.

Ce théorème donne une idée des difficultés que l'on peut rencontrer en analyse fonctionnelle : les espaces de fonctions étant de dimension infinie, ils ne sont pas localement compacts. Aussi bien, il sera plus délicat d'obtenir des convergences de suites de fonctions (puisqu'il y a « moins » de compacts...). On déduit de ce théorème que tout sous-espace vectoriel de dimension finie est nécessairement *fermé* dans E.

Espaces vectoriels semi-normés

Considérons l'ensemble F^E des fonctions de E dans F lorsque F est un *espace vectoriel normé*. Nous avons défini sur cet espace la topologie de la convergence simple dont nous avons vu qu'elle n'était pas *normable*. Nous allons généraliser la notion d'espace normé en définissant celle d'*espace semi-normé*. Nous montrons que l'espace vectoriel topologique F^E est un espace vectoriel semi-normé.

Définition et propriétés élémentaires

Une semi-norme sur un espace vectoriel E est une fonction p : E → $\mathbb{R}^+$ qui possède les trois propriétés suivantes :

(5)	$p\,(\vec{x}) \geqslant 0 ; p^r(\vec{0}) = 0$	$\forall \vec{x} \in E$
(6)	$p\,(\lambda \cdot \vec{x}) = \lvert\lambda\rvert\, p\,(\vec{x})$	$\forall \vec{x} \in E, \lambda \in \mathbb{R}$
(7)	$p\,(\vec{x} + \vec{y}) \leqslant p\,(\vec{x}) + p\,(\vec{y})$	$\forall \vec{x}, \vec{y} \in E.$

Seule la première de ces propriétés distingue une semi-norme d'une norme : en effet, il est possible d'avoir $p\,(\vec{x}) = 0$ avec $\vec{x} \neq \vec{0}$. E sera dit semi-normé s'il est muni d'une famille de semi-normes $(p_i)_{i \in I}$ (que l'on notera $\| \ \|_i$). Grâce à la donnée de cette famille, on peut munir E d'une topologie : on appellera *semi-boule ouverte* $B_i\,(\vec{a}, R)$ de centre $\vec{a}$ et de rayon R → 0 l'ensemble $B_i\,(\vec{a}, R) = \{\vec{x} \in E \mid \|\vec{x} - \vec{a}\|_i < R\}$.

Ainsi donc, une partie 0 de E sera dite *ouverte* si, pour tout point $\vec{a}$ de 0, il est possible de trouver une semi-boule de centre $\vec{a}$ entièrement contenue dans 0 ;

$$\forall a \in 0\ \exists i \in I \quad \text{et} \quad \varepsilon_i > 0 \quad \text{tels que} \quad B_i\,(\vec{a}, \varepsilon_i) \subset 0.$$

On montrera sans peine que les axiomes des ouverts sont bien satisfaits. Il est nécessaire de supposer pour

◀ ***Figure 3**: voir dans le texte la démonstration du théorème de Riesz de dimension finie.*

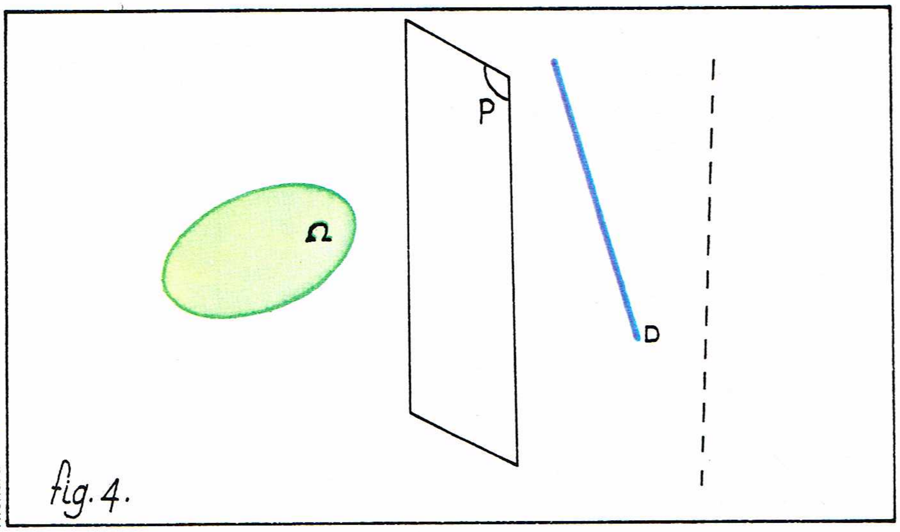

▲ *Figure 4 : forme géométrique (théorème de séparation) du théorème de Hahn-Banach.*

cela que la *famille* des $|p|_{i\ (i\in I)}$ est *filtrante*, c'est-à-dire telle que, pour toute partie $J \subset I$, il existe k tel que $p_k \geqslant p_j\ \forall j \in J$. Il est toujours possible de se ramener à ce cas-là en ajoutant aux (p_i) les sommes finies $\sum_{j\in J} p_j$ (voir *Topologie*).

Nous ne considérons que des espaces semi-normés dont la *topologie* est *séparée* : pour cela, il est nécessaire d'ajouter la condition supplémentaire :

$$\forall \vec{x} \neq \vec{0} \quad \exists i \in I \quad \|\vec{x}\|_i \neq 0.$$

Dans un espace semi-normé, la convergence s'exprime de la manière suivante ; nous dirons que $\vec{x}_n \to \vec{x}$ si

$$\forall i \in I, \forall \varepsilon > 0 \quad \exists N\ (i, \varepsilon)$$

$$\text{tel que } n > N\ (i, \varepsilon) \quad \|\vec{x}_n - \vec{x}\|_i \leqslant \varepsilon$$

D'autre part, la continuité d'une application linéaire d'un espace normé dans un autre s'exprime sous la condition : $\|f\ (\vec{x})\|_F \leqslant k\ \|\vec{x}\|_E$ où k est une constante positive. Lorsque l'espace de départ E est semi-normé, cette condition se généralise de la manière suivante : pour que f soit continue, il faut et il suffit qu'il existe *une* semi-norme $\|\ \|_i$ et une constante k telles que :

$$\|f\ (\vec{x})\|_F \leqslant k\ \|\vec{x}\|_i.$$

Enfin la topologie définie à l'aide d'une famille de semi-normes est compatible avec la structure vectorielle de l'espace : un *espace semi-normé est un espace vectoriel topologique*. D'autre part, on peut se restreindre aux seules semi-normes *continues* (en tant qu'applications de $E \to \mathbb{R}^+$) qui caractérisent la topologie.

Voyons maintenant comment ces notions permettent de décrire les topologies de certains espaces fonctionnels parmi les plus courants.

Exemples d'espaces vectoriels semi-normés

Considérons l'ensemble $\mathcal{C}\ (\mathbb{R}, \mathbb{R})$ des fonctions continues de $\mathbb{R}$ dans $\mathbb{R}$. Nous allons voir que cet espace fonctionnel peut être muni de deux topologies, chacune d'elles faisant de lui un espace semi-normé.

▼ *Figure 5 : ensemble convexe d'un espace vectoriel topologique.*

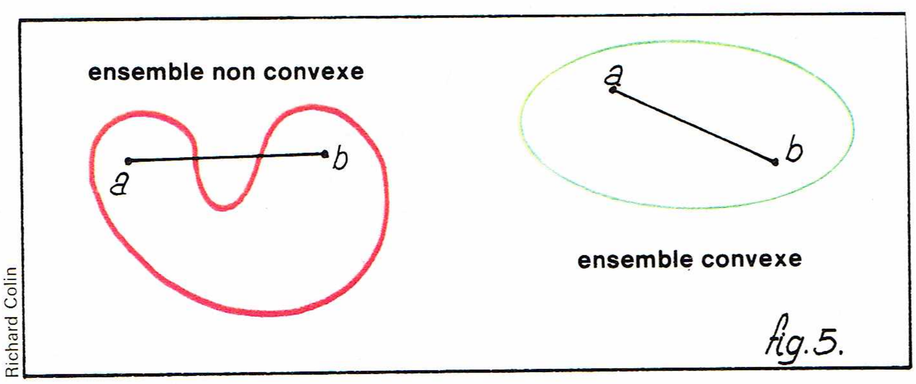

Convergence simple

On peut définir une famille de semi-normes de la manière suivante :

$$\|f\|_x = |f\ (x)| \quad x \in \mathbb{R}.$$

On vérifie que les $\|\ \|_x$ constituent une famille de semi-normes et qu'en outre la topologie qu'elle définit est séparée :

$$\|f\|_x = 0\ \forall x \Rightarrow |f\ (x)| = 0\ \forall x \Rightarrow f \equiv 0.$$

Dire enfin que la suite f_n de $\mathcal{C}\ (\mathbb{R}, \mathbb{R})$ converge vers f par la topologie des semi-normes, c'est dire que :

$$\|f_n - f\|_x \to 0\ \forall x \text{ ou encore que } f_n\ (x) \to f\ (x)$$

c'est exactement dire que f_n converge simplement vers f.

Pour que la famille de semi-normes soit filtrante, il est nécessaire de lui adjoindre d'autres semi-normes construites à l'aide des parties finies de $\mathbb{R}$: ainsi donc, soit $\mathcal{F}$ l'ensemble des parties finies de $\mathbb{R}$:

$$\mathcal{F} = \{A \subset \mathbb{R} \mid \text{Card } A < \infty\}$$

la famille de semi-normes qui définit la topologie de la convergence simple est donc la suivante :

$$\|f\|_A = \sup_{x\in A} |f\ (x)| \quad A \in \mathcal{F}.$$

Convergence compacte

Soit $\mathcal{K}$ l'ensemble des parties compactes de $\mathbb{R}$. Pour tout compact $K \in \mathcal{K}$, on définit :

$$\|f\|_K = \sup_{x\in K} |f\ (x)|.$$

Comme f est continue et K compact, cette expression a un sens. Il s'agit d'une semi-norme. Lorsque K parcourt $\mathcal{K}$, ces semi-normes définissent sur $\mathcal{C}\ (\mathbb{R}, \mathbb{R})$ une autre structure semi-normée.

Ces deux exemples montrent que, sur un même espace, il est possible de définir deux topologies compatibles avec la structure d'espace vectoriel. Comme $\mathcal{F} \subset \mathcal{K}$, la topologie de la convergence compacte $\mathcal{T}_C$ est plus fine que la topologie de la convergence simple $\mathcal{T}_S$. Cela signifie notamment que :

— tout ouvert A pour $\mathcal{T}_S$ est ouvert pour $\mathcal{T}_C$;

— une suite de fonctions f_n qui converge pour la topologie $\mathcal{T}_C$ converge également pour la topologie $\mathcal{T}_S$.

Espaces localement convexes - Théorème de Hahn-Banach

Nous introduisons ici la notion de convexité. Nous montrons en premier lieu qu'*un espace convexe est toujours semi-normable (et réciproquement)*. En second lieu, nous établirons le théorème de Hahn-Banach qui peut s'énoncer sous deux formes : une forme analytique (il s'agit d'un théorème de prolongement) et une forme géométrique (théorème de séparation). Sous sa forme géométrique la plus connue (*fig.* 4), il exprime l'idée intuitive selon laquelle, dans $\mathbb{R}^3$ par exemple, il est possible de « séparer » un *convexe* Ω et une droite D ne rencontrant pas Ω au moyen d'un plan P — la convexité est ainsi une notion essentielle au théorème de Hahn-Banach.

Ensembles convexes d'un espace vectoriel topologique

Soit C une partie ($\neq \varnothing$) d'un e. v. t. E ; on dira que C est convexe s'il vérifie la propriété suivante : quels que soient les points $\vec{a}_1, \vec{a}_2, ..., \vec{a}_m$ de C et les nombres $\lambda_1, ..., \lambda_m$ positifs et tels que $\sum_{i=1}^{m} \lambda_i = 1$, le point $\vec{a} = \sum_{i=1}^{m} \lambda_i \vec{a}_i$ appartient encore à C (*fig.* 5). On démontre qu'il suffit que cette propriété soit vérifiée pour deux points seulement. Dans $\mathbb{R}^n$, géométriquement, cela signifie que le segment joignant deux points quelconques de C est entièrement contenu dans C.

Considérons une partie A quelconque de E ; l'intersection de tous les convexes qui contiennent A est encore un convexe (*fig.* 6) ; c'est le plus petit convexe contenant A, et on l'appelle *enveloppe convexe de A (notée $\hat{A}$)* ; on démontre que

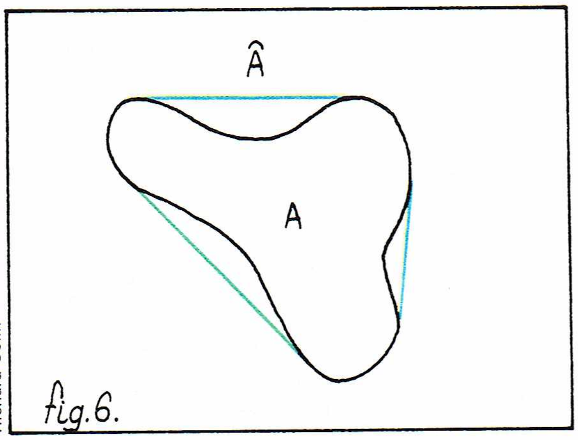

Richard Colin

◀ ***Figure 6 :*** ***on appelle*** **enveloppe convexe** ***de A (notée*** $\hat{A}$***) le plus petit convexe contenant A.***

$$\hat{A} = \left\{ \sum_{i=1}^{m} \lambda_i \vec{a_i} \mid \vec{a_i} \in A ; m \in \mathbb{N} \quad \lambda_i \geqslant 0 \quad \sum_{i=1}^{m} \lambda_i = 1 \right\}$$

Lorsque E est un espace vectoriel topologique, on peut établir quelques résultats, notamment : si C est un convexe, l'adhérence $\bar{C}$ et l'intérieur $\mathring{C}$ sont également convexes.

Espaces vectoriels topologiques localement convexes

Nous dirons que E est localement convexe s'il admet un système fondamental de voisinages *de l'origine* $\vec{O}$ *convexes*. Autrement dit, si tout voisinage V de $\vec{O}$ contient au moins un voisinage V′ de $\vec{O}$ *convexe*.

Énonçons le résultat : *pour qu'un espace vectoriel topologique soit localement convexe, il faut et il suffit qu'il soit semi-normable*.

Il est d'abord clair qu'un espace semi-normable est localement convexe : soit V un voisinage de $\vec{O}$, il contient au moins une demi-boule B_i (O, R), laquelle est, bien sûr, convexe. La réciproque est plus délicate à établir : elle consiste à construire une famille de semi-normes à partir d'un système fondamental de voisinages de $\vec{O}$ convexes et équilibrés (nous avons vu dans les *Espaces vectoriels topologiques* que l'on pouvait en trouver). Soit Ω un tel voisinage, on cherche alors une semi-norme p_Ω telle que Ω soit la semi-boule unité ouverte pour cette semi-norme

$$\Omega = \{\vec{x} \mid p_\Omega(\vec{x}) < 1\}$$

Si l'on parvient à définir une telle semi-norme, il est clair que l'on aura montré que la topologie de E est définie par la famille de semi-normes p_Ω où Ω parcourt l'ensemble des voisinages convexes, équilibrés et ouverts de $\vec{O}$.

A tout convexe C on peut associer une fonction j_C, appelée *jauge* du convexe C, définie par :

$$j_C(\vec{x}) = \inf\{k ; k \geqslant 0 \mid \vec{x} \in k\Omega\}$$

Cette définition signifie que $k \geqslant j_C(\vec{x}) \Leftrightarrow \frac{\vec{x}}{k} \in C$.

On démontre que, lorsque Ω est un ouvert convexe équilibré, la jauge associée est une *semi-norme continue* et qu'en outre $\Omega = \{x \mid j_\Omega(\vec{x}) < 1\}$. Autrement dit, la semi-norme cherchée n'est autre que la jauge de Ω (le fait que Ω soit équilibré est essentiel pour établir les axiomes de définition d'une semi-norme).

Forme analytique du théorème de Hahn-Banach

Sous sa forme analytique, le **théorème de Hahn-Banach** est un *théorème de prolongement*. Qu'est-ce à dire ? Soit $f : A \mapsto F$, on appellera prolongement de f à un ensemble $B \supset A$ une fonction $\tilde{f} : B \mapsto E$ qui coïncide avec f sur A. Autrement dit telle que $\tilde{f}(x) = f(x)\ \forall x \in A$. Dans tous les théorèmes de prolongement que l'on rencontre en analyse, on cherche un prolongement $\tilde{f}$ qui conserve certaines propriétés de f (par exemple continuité, linéarité, etc.) [*fig.* 7].

Le théorème de Hahn-Banach est un théorème de nature essentiellement vectorielle, et on n'y fait intervenir aucune hypothèse topologique. C'est précisément là que réside son intérêt puisqu'il peut être appliqué aux espaces de dimension infinie. Il n'en reste pas moins que l'on en déduira certaines propriétés topologiques dans le cas des espaces localement convexes.

La démonstration s'articule en deux étapes : dans un *lemme* préalable, on montre que l'on peut prolonger la fonction f à un espace possédant une dimension supplémentaire ; puis, grâce au fameux théorème de Zorn, on en déduit le prolongement à l'espace entier.

E est un espace vectoriel et p une *semi-norme*, F un sous-espace de E de *codimension* 1 (voir *Algèbre linéaire*), et f une forme linéaire définie sur F. ($f : F \to \mathbb{R}$) et telle que $f(\vec{x}) \leqslant p(\vec{x})\ \forall x \in F$; il existe alors au moins une forme linéaire $\tilde{f}$ définie sur E tout entier, prolongeant f et telle que $\forall x \in E\ \tilde{f}(\vec{x}) \leqslant p(\vec{x})$.

F est un hyperplan, autrement dit $E = F \oplus D$ où D est une droite (dimension 1).

Soit $\vec{x_1}$ un vecteur de D, donc $\notin$ F (*fig.* 8). Tout élément $\vec{x}$ de E s'écrit d'une manière unique sous la forme

$$\vec{x} = \lambda \vec{x}_1 + \vec{y}$$

où $\lambda \in \mathbb{R}$ et $\vec{y} \in F$. Une forme linéaire $\tilde{f}$ sur E prolongeant f s'exprime sous la forme générale suivante :

$$\tilde{f}(\vec{x}) = t\lambda + f(\vec{y}) \quad \text{où } \tilde{f}(\vec{x_1}) = t \in \mathbb{R}$$

peut être choisie arbitrairement. La démonstration s'achève en déterminant t afin que $\tilde{f}$ soit aussi majorée par p, c'est-à-dire telle que

$$f(\vec{y}) + \lambda t \leqslant p(\vec{y} + \lambda\vec{x_1}) \quad \forall \lambda \in \mathbb{R}, \vec{y} \in F$$

Donnons l'énoncé du **théorème de Hahn-Banach :**

Théorème : *soit E un espace vectoriel et p une semi-norme, F un sous-espace vectoriel quelconque de E, f une forme linéaire définie sur F et telle que*

$$f(\vec{x}) \leqslant p(\vec{x}), \forall \vec{x} \in F.$$

Il existe alors une forme linéaire (non nécessairement unique) définie sur E tout entier, prolongeant f *et telle que* $f(\vec{x}) \leqslant p(\vec{x})\quad \forall \vec{x} \in E$.

Utilisons donc le **théorème de Zorn :**

Théorème : *soit X l'ensemble des couples (G, g) où G est un sous-espace contenant F, et* g *un prolongement de* f *au sous-espace G et majoré par* p *sur G. On définit sur X une relation d'ordre* $\leqslant$ *de la manière suivante :*

$$(G_1, g_1) \leqslant (G_2, g_2) \quad \text{si } G_2 \supset G_1$$

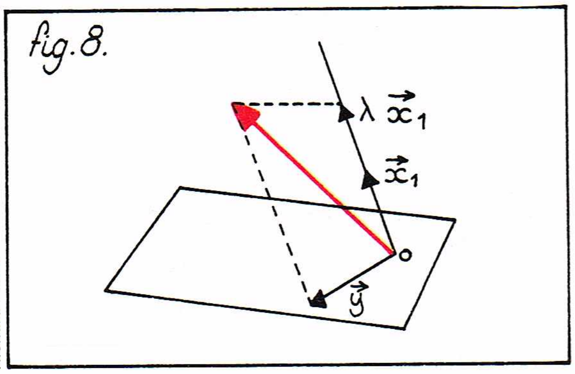

Richard Colin

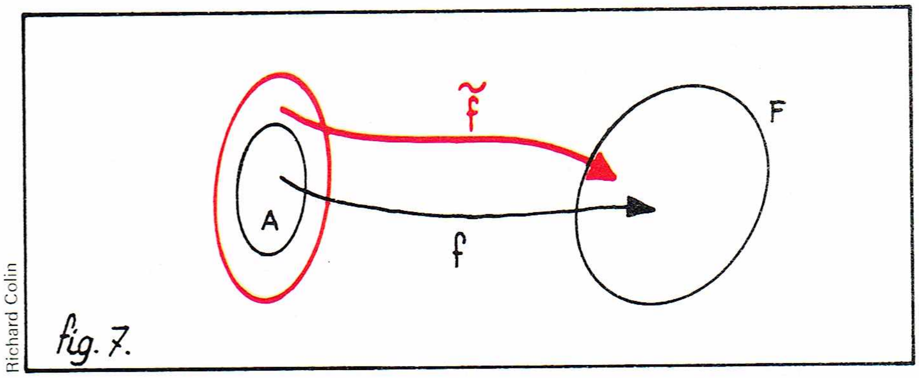

Richard Colin

▼ ***A gauche, figure 8 : voir démonstration dans le texte.***
A droite, figure 7 : dans tous les **théorèmes de prolongement** ***que l'on rencontre en analyse, on cherche un prolongement*** $\tilde{f}$ ***qui conserve certaines propriétés de f.***

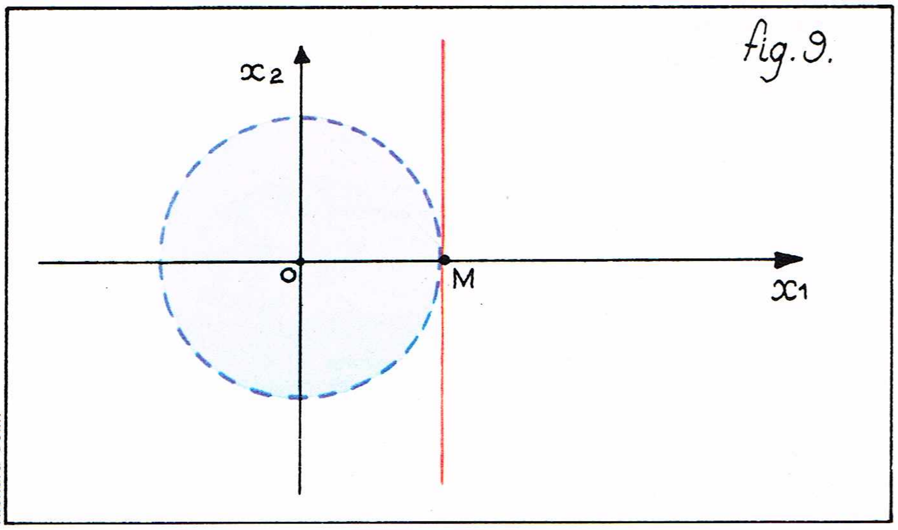

Richard Colin

▲ ***Figure 9 :* exemple d'une application du théorème de Hahn-Banach sous sa forme géométrique.**

et si g_2 *est un prolongement de* g_1. *X est évidemment un ensemble ordonné et non vide car* (*F*, f) $\in X$.

On montre sans peine que X est un *ensemble inductif* (voir *Ensembles*).

Le théorème de Zorn conclut à l'existence d'un élément maximal $(E_1, \tilde{f})$. Utilisons le lemme précédent et montrons que $E_1 = E$: supposons que E_1 soit $\neq$ E, alors il existe $\vec{x}_1 \notin E_1$. Soit E_2 le sous-espace engendré par E_1 et $\vec{x}_1$. E_1 est un hyperplan de E_2 ; d'après le lemme, on pourrait prolonger $\tilde{f}$ à E_2, et, de ce fait, $(E_1, \tilde{f})$ ne serait plus maximal.

Remarque : dans l'énoncé du théorème, on peut remplacer l'inégalité $f(x) \leqslant p(x)$ par l'inégalité

$$|f(x)| \leqslant p(x).$$

Ces deux inégalités sont équivalentes : en effet,

$$f(-x) \leqslant p(-x) = p(x)$$

(p étant une semi-norme), soit $f(x) \geqslant -p(x)$, c'est-à-dire $|f(x)| \leqslant p(x) \; \forall x$.

Examinons ce que l'on peut déduire de ce théorème lorsque E est un espace vectoriel topologique : si l'application linéaire f et si la semi-norme p sont continues, alors le prolongement $\tilde{f}$ de f est lui aussi continu.

De cette première conséquence, on peut tirer le résultat suivant : *si E est localement convexe, F étant un sous-espace de E,* f *une forme linéaire continue sur F, alors il existe une forme linéaire continue* $\tilde{f}$ *sur E prolongeant* f : E est en effet alors semi-normable. Dire que f est continue sur F signifie qu'il existe une semi-norme (continue) p_i et une constante $k \geqslant 0$ telles que

$$|f(x)| \leqslant kp_i(x) \; \forall x \in F.$$

▼ ***Figure 10 :* notion d'intérieur relatif (voir développement dans le texte).**

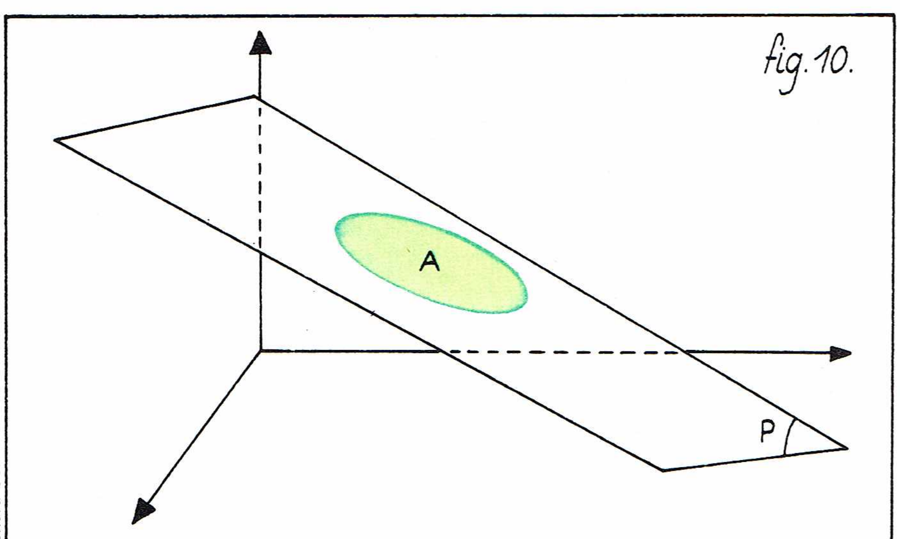

Richard Colin

Il existe donc un prolongement $\tilde{f}$ continu satisfaisant à la même inégalité. L'hypothèse de continuité est essentielle à la démonstration : elle ne suffit pas seulement à assurer la continuité de $\tilde{f}$, mais elle est tout à fait indispensable pour en établir l'existence même.

Remarque : le théorème de Hahn-Banach est également vrai lorsque p est seulement une *sous-norme*. Une sous-norme, comme une semi-norme, vérifie la semi-positivité, ainsi que l'inégalité de convexité (propriétés **(5)** et **(7)** de la définition du paragraphe : *Définitions et propriétés élémentaires*). Par contre, la propriété **(6)** n'est exigée que pour les homothéties de rapport > 0 :

$$p(\lambda\vec{x}) = \lambda p(\vec{x}) \quad \forall \lambda \geqslant 0.$$

On montre que la *jauge* d'un convexe ouvert Ω est une sous-norme ; elle est en plus une semi-norme si et seulement si Ω est *équilibré*. De cette expression plus générale du théorème de Hahn-Banach, l'on peut déduire sa forme géométrique.

Forme géométrique du théorème de Hahn-Banach

On montre en algèbre qu'un hyperplan H de E (sous-espace de codimension 1) peut toujours se définir comme le *noyau* d'une certaine forme linéaire f :

$$H = \{\vec{x} \in E \mid f(\vec{x}) = 0\}.$$

On démontre alors que H est fermé ou dense dans E suivant que f est continue ou non. De même, un *hyperplan affine* $\textcircled{H}$ (c'est-à-dire le translaté d'un hyperplan H) se définit à l'aide d'une forme linéaire f et d'un nombre c de la manière suivante : $\textcircled{H} = \{\vec{x} \mid f(\vec{x}) = c\}$; $\textcircled{H}$ sera fermé ou dense dans E suivant que f est continue ou non. En outre, on établit qu'il existe une seule forme linéaire f telle que $\textcircled{H} = \{\vec{x} \mid f(\vec{x}) = 1\}$. Ces quelques résultats liminaires vont nous permettre de démontrer la forme géométrique du **théorème de Hahn-Banach :**

Théorème : *soit E un espace vectoriel topologique,* Ω *un ouvert non vide, M un sous-espace affine non vide ne rencontrant pas* Ω. *Alors il existe au moins un hyperplan fermé affine* $\textcircled{H}$ *contenant M et ne rencontrant pas non plus* Ω.

Nous illustrerons l'énoncé et la démonstration du théorème à l'aide de l'exemple géométrique suivant : prenons pour E le plan $\mathbb{R}^2$, pour Ω le *disque ouvert* de rayon 1 et pour M le point de coordonnées (1, 0). $\Omega = \{\vec{x} \| \vec{x} \| < 1\}$, donc $\{M\} \cap \Omega = \varnothing$. M est un sous-espace affine (de dimension 0 !). Le théorème permet de conclure à l'existence d'une droite tangente à Ω au point M...

Démonstration du théorème (*fig.* 9) : Ω étant non vide, il est toujours possible de se ramener, par translation, au cas où $\vec{0} \in \Omega$; soit p la jauge de Ω (laquelle est une *sous-norme*) ; elle est de plus continue (dans l'exemple donné, p est la norme euclidienne). Soit F le sous-espace vectoriel engendré par M. Comme $\vec{0} \notin M$, M est un sous-espace affine et non vectoriel. M est donc strictement inclus dans F (dans l'exemple, F est l'axe des x_1), et de plus M est un *hyperplan affine de* F. Il existe donc une forme linéaire unique sur F telle que :

$$M = \{\vec{x} \mid f(\vec{x}) = 1\}$$

(dans l'exemple, $f : (0, x_1) \mapsto x_1$). Démontrons que $\vec{x} \in F \Rightarrow f(\vec{x}) \leqslant p(\vec{x})$. Soit $\vec{x} \in F$; deux cas peuvent se présenter : ou bien $f(\vec{x})$ est < 0, et alors $f(\vec{x}) \leqslant p(\vec{x})$ puisque p est $\geqslant 0$, ou bien $f(x)$ est > 0 ; il existe alors un nombre $\lambda = f(\vec{x})$ tel que $f(\lambda\vec{x}) = 1$, soit $\lambda\vec{x} \in M$, d'où $\lambda\vec{x} \notin \Omega$. C'est-à-dire $p(\lambda\vec{x}) \geqslant 1 = f(\lambda\vec{x})$, d'où l'on conclut $p(\vec{x}) \geqslant f(\vec{x})$, dans ce cas aussi. Finalement $f(\vec{x}) \leqslant p(\vec{x}) \quad \forall \vec{x} \in F$.

D'après le théorème de Hahn-Banach sous sa forme analytique, il existe une forme linéaire $\tilde{f}$ sur E, prolongeant f et telle que : $\tilde{f}(\vec{x}) \leqslant p(\vec{x}) \; \forall \vec{x} \in E$ [dans l'exemple, $\tilde{f}$ est l'application $(x_1, x_2) \mapsto x_1$]. L'équation $f(\vec{x}) = 1$ définit un hyperplan affine fermé H ($\tilde{f}$ est continue) qui contient M.

Si $\vec{x} \in \Omega$, $\tilde{f}(\vec{x}) \leqslant p(\vec{x}) < 1$, alors $\vec{x} \notin H$; donc Ω ne

rencontre pas non plus H (dans l'exemple, H est la droite d'équation $x_1 = 1$, c'est-à-dire la tangente en M au cercle de centre O et de rayon 1).

Ce théorème permet d'obtenir de nombreux résultats en dimension finie, très utiles en optimisation linéaire et convexe. Donnons ici deux résultats :

— *Soit C_1 et C_2 deux convexes non vides de $\mathbb{R}^n$. Pour qu'il existe un hyperplan séparant C_1 et C_2, il faut et il suffit que les intérieurs relatifs de C_1 et de C_2 soient disjoints.*

Précisons la notion d'intérieur relatif (*fig.* 10) : on appelle intérieur relatif d'une partie A de $\mathbb{R}^n$ l'ensemble Ri (A), intérieur de A par rapport au sous-espace affine engendré par A. Exemple : A est un disque dans $\mathbb{R}^3$; il est clair que $\mathring{A}$ est $\varnothing$. Par contre, l'intérieur relatif de A est l'intérieur de A par rapport au plan p : c'est donc l'ensemble des points de A non situés sur le cercle.

Ce théorème prouve donc l'existence d'un hyperplan H d'équation $f(x) = b$ tel que :

$f(\vec{x_1}) \leqslant b \leqslant f(\vec{x_2})$ $\forall \vec{x_1} \in C_1$ $\forall \vec{x_2} \in C_2$ (noter les inégalités au sens large).

— *Soit C un convexe non vide fermé, et K un convexe compact non vide de $\mathbb{R}^n$ disjoints, alors il existe un hyperplan H d'équation* $f(\vec{x}) = b$ *qui les sépare strictement*

$$f(\vec{x}) < b < f(\vec{k}) \quad \forall \vec{x} \in C, \quad \forall \vec{k} \in K.$$

La dualité dans les espaces normés

L'idée de *dualité* est présente dans un grand nombre de résultats aussi bien d'algèbre que d'analyse, même si elle n'est pas toujours explicitée. Depuis longtemps, les mathématiciens avaient conscience que certains problèmes pouvaient susciter deux approches étroitement liées l'une à l'autre, deux approches en « *dualité* » dans un sens très intuitif qu'ils ont cherché à formaliser : il faudra attendre le XX^e siècle et les travaux de Banach pour qu'elles reçoivent une formalisation rigoureuse.

Ainsi, une courbe plane peut être considérée sous deux aspects différents :

(a) soit comme l'ensemble de ses points liés par une équation $y = f(x)$;

(b) soit comme l'enveloppe de ses tangentes.

Deux points de vue différents, certes, mais que l'on sent doués d'une évidente complémentarité : suivant la nature du problème que l'on souhaite résoudre, on privilégiera un point de vue particulier en espérant que la résolution en sera plus aisée. Soit à résoudre, par exemple, le problème suivant (ô combien classique !) : « *trouver les extrema de la fonction* $y = f(x)$ ». L'approche **(a)** se révèle n'être d'aucun intérêt puisqu'elle obligerait à calculer toutes les valeurs prises par la fonction afin de trouver celles qui fournissent les extrema (!) ; l'approche **(b)** est, à l'évidence, la plus féconde puisqu'elle stipule que les extrema correspondent aux points où la tangente est horizontale.

Un tel exemple montre l'intérêt qui peut exister à développer la notion de dualité (déjà évoquée en *Algèbre linéaire*) dans les espaces de fonctions. Appliquée aux espaces vectoriels topologiques, elle fournit un cadre propice à la résolution de certains problèmes d'analyse fonctionnelle. En outre, elle permet d'expliciter les fondements de la théorie de la mesure et de la théorie des distributions. Pour plus de simplicité, nous restreindrons notre étude aux *espaces normés*.

Dual topologique d'un espace normé E

On appelle *dual topologique de E* l'ensemble E′ de formes linéaires continues sur E. E′ est bien évidemment un espace vectoriel. Soit $\overleftarrow{e'}$ un élément de E′; on convient de noter $\langle \overleftarrow{e'}, \vec{e} \rangle$ la valeur prise par la forme linéaire e' au point $\vec{e}$ [ou $\overleftarrow{e'}(\vec{e})$]. Cette notation met en évidence la symétrie qui existe entre l'espace E (le *primal*) et son *dual* E′. L'application de E × E′ ↦ $\mathbb{R}$ définie par

$$(\overleftarrow{e'}\ \vec{e}) \mapsto \langle \overleftarrow{e'}, \vec{e} \rangle$$

est une application bilinéaire que l'on appelle également le *produit scalaire* de $\vec{e} \in E$ et de $\overleftarrow{e'} \in E$ par analogie avec l'exemple géométrique suivant :

Exemple : cas de la dimension finie $\mathbb{R}^n$

Le dual $\mathbb{R}^{n*}$ de $\mathbb{R}^n$ est l'ensemble des *vecteurs lignes* $\mathbb{R}^{n*} = \{\overleftarrow{a} = (a_1, ..., a_n) \mid a_i \in \mathbb{R}\}$. Soit $\vec{x}$ un vecteur de $\mathbb{R}^n$, $x = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$. La valeur prise par la forme linéaire $\overleftarrow{a}$ au point $\vec{x}$ est donnée par :

$$\langle \overleftarrow{a}, \vec{x} \rangle = (a_1, ..., a_n) \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^{n} a_i x_i.$$

Géométriquement, $\langle \overleftarrow{a}, \vec{x} \rangle$ est le produit scalaire des vecteurs $\vec{a}^t$ et $\vec{x}$.

En dimension finie, toutes les applications linéaires sont continues; il y a donc coïncidence entre le *dual algébrique* (ensemble de toutes les formes linéaires, continues ou non) et le *dual topologique*. Cette coïncidence n'existe plus en dimension infinie. E′ étant un espace vectoriel, il est naturel de chercher à en faire un *espace vectoriel topologique*; grâce à la relation de dualité qui le lie à E, il est possible de le munir de deux topologies différentes : la *topologie forte* et la *topologie faible*.

— *Topologie forte du dual :* on appelle topologie forte de E′ la topologie de la convergence uniforme sur les parties bornées; cette topologie est définie à l'aide de la norme :

$$\|\overleftarrow{e'}\|_{E'} = \sup_{\|\vec{e}\|_E < 1} |\langle \overleftarrow{e'}, \vec{e} \rangle|$$

Cette expression a un sens unique puisque $\overleftarrow{e'}$ est une forme linéaire continue (c'est-à-dire qu'il existe A > 0 tel que $|\langle \overleftarrow{e'}, \vec{e} \rangle| \leqslant A \|\vec{e}\|$). L'espace E′ est un espace *normé complet* (puisque $\mathbb{R}$ l'est) ; c'est donc un *espace de Banach*.

— *Topologie faible du dual :* on appelle topologie faible de E′ la topologie de la convergence simple. Il s'agit d'une topologie semi-normable qui, ainsi que nous l'avons déjà vu, est définie par la famille de semi-normes $p_A(\overleftarrow{e'}) = \sup_{\vec{e} \in A} |\langle \overleftarrow{e'}, \vec{e} \rangle|$ où A est une partie finie de E.

C'est une topologie séparée; en outre, c'est la moins finie des topologies compatibles avec la structure vectorielle et qui rendent continues les formes linéaires sur E′ $\overleftarrow{e'} \mapsto \langle \overleftarrow{e'}, \vec{e} \rangle$ pour tout $\vec{e} \in E$. Il est clair que la topologie forte est plus fine que la topologie faible.

Les espaces E et E′ sont doués d'une certaine symétrie au niveau de leurs structures vectorielles. Nous allons donc compléter cette symétrie en définissant une topologie affaiblie sur l'espace E qui sera l'analogue de la topologie faible de E′. L'espace E aura donc lui aussi deux topologies : la *topologie initiale* (ou topologie forte du primal) et cette *topologie affaiblie*.

Topologie affaiblie du primal

On appelle *topologie affaiblie* de E la topologie définie par la famille de semi-normes $p_A(\vec{e}) = \sup_{\overleftarrow{e'} \in A} |\langle \overleftarrow{e'}, \vec{e} \rangle|$ où A′ est une partie finie de E′. On note cette topologie σ (E, E′) : cette notation signifie qu'il s'agit d'une topologie *sur E* définie par des semi-normes construites à l'aide d'éléments *de E′* [on vérifiera ainsi que la topologie faible du dual E′ est la topologie σ (E′, E)]. On notera E_σ l'espace E muni de la topologie σ (E, E′). Il est possible alors de considérer le dual topologique de E_σ, c'est-à-dire l'ensemble des formes linéaires sur E, *continues pour la topologie affaiblie de* σ (E, E′).

La topologie forte de E (topologie initiale) étant plus fine que la topologie σ (E, E′), il est clair que toute forme linéaire *faiblement continue* (c'est-à-dire continue lorsque E est muni de la topologie affaiblie) sera *fortement continue*, autrement dit $(E_\sigma)' \subset E'$. Inversement, soit e' une forme linéaire fortement continue, élément de E′; elle est, à l'évidence, faiblement continue puisqu'on a l'inégalité :

$$|\langle \overleftarrow{e'}, \vec{e} \rangle| \leqslant p_{\overleftarrow{e'}}(\vec{e}) \quad \forall \vec{e} \in E \quad \text{où } p_{\overleftarrow{e'}}(\vec{e}) = |\langle \overleftarrow{e'}, \vec{e} \rangle| \ (!)$$

Ainsi donc, $(E_\sigma)' = E'$. La topologie σ (E, E′) est ainsi la topologie la moins fine compatible avec la structure vectorielle et pour laquelle E′ est encore le dual topologique de E.

F. Arborio Mella

▲ ***Le mathématicien allemand*** **David Hilbert** ***(1862-1943).***

Dualité faible entre E et E′ : soit $\vec{e}$ un élément de E; l'application $\tilde{e} : \overleftarrow{e}' \in E' \mapsto \langle \overleftarrow{e}', \vec{e} \rangle$ est une forme linéaire *sur E′*, continue pour la topologie faible σ (E′, E). C'est donc un élément du dual topologique de l'espace E_σ. En identifiant la forme linéaire $\tilde{e}$ et l'élément $\vec{e}$ (voir *Algèbre linéaire*), on peut écrire $(E_\sigma) \supset E$. Grâce à la particularité de la topologie faible du dual, on montre que cette inclusion est en réalité une *égalité*. Ce résultat illustre bien la symétrie parfaite qui existe entre E_σ et E'_σ pour les topologies σ (E, E′) et σ (E′, E) : *chacun est le dual de l'autre, et la topologie affaiblie de l'un est la topologie faible du dual de l'autre.* Cette belle symétrie n'existe plus lorsque l'on considère les *topologies fortes* de E et de E′. Ainsi donc, dans le cas général, *E est inclus seulement dans le dual fort de E′*. C'est cette question que nous abordons maintenant.

Bidual : espaces réflexifs

Munissons donc E′ de la topologie forte; son dual topologique se note E″ et s'appelle le *bidual de E* et est lui-même muni de sa topologie forte (que l'on définit en utilisant la dualité entre E′ et E″. Nous identifierons E à un sous-espace de E″ par le procédé évoqué ci-dessus (au surplus E, étant normé, $\|\vec{e}\|_E = \|\tilde{e}\|_{E''}$

$$E \to E' \to E'' \ldots$$

On dira que E *est réflexif s'il est identique à son bidual : $E \equiv E''$.*

D'ores et déjà, nous pouvons remarquer une condition nécessaire de réflexivité : l'espace E doit être un espace de Banach; mais cette condition n'est pas suffisante. En réalité, une condition nécessaire et suffisante est donnée par le théorème de Banach.

Théorème : *pour qu'un espace normé E soit réflexif, il faut et il suffit que sa boule unité soit faiblement compacte.*

Ce résultat est à rapprocher du théorème de F. Riesz qui fournit une caractérisation des espaces de dimension finie par la compacité (forte) de la boule unité. En dimension finie, la topologie forte et la topologie faible coïncident, et la réflexivité est toujours réalisée. Le théorème de Banach est ainsi une généralisation du théorème de Riesz. Il illustre l'intérêt des espaces réflexifs : que la boule unité soit faiblement compacte (ce qui entraîne d'ailleurs que l'espace est complet) signifie que l'on pourra établir certaines convergences (faibles).

Nous démontrerons seulement un résultat liminaire au théorème de Banach qui situe bien la nature du problème :

Proposition : *soit E un espace normé, la boule unité de son dual E′ est faiblement compacte.*

La topologie faible sur E′ est celle de la convergence simple. Autrement dit, il s'agit de la topologie induite par l'espace $\mathbb{R}^E$ de toutes les fonctions sur E à valeurs réelles. Pour montrer que B′ est faiblement compacte, on démontrera que B′ est inclus dans une partie compacte de $\mathbb{R}^E$, et qu'en outre B′ est fermé dans $\mathbb{R}^E$. Il est clair que $B' \subset \overline{\prod_{\vec{e} \in A} A(\vec{e})}$ où $A(\vec{e}) = \{\langle \overleftarrow{e}', \vec{e} \rangle \mid \overleftarrow{e}' \in B'\}$. $A(\vec{e})$ est un intervalle borné de $\mathbb{R}$: en effet,

$$\overleftarrow{e}' \in B' \Rightarrow |\langle \overleftarrow{e}', \vec{e} \rangle| \leqslant \|\vec{e}\|.$$

$A(\vec{e})$ est donc un compact de $\mathbb{R}$ et, d'après le théorème de Tychonoff (voir *Topologie*), l'ensemble $\overline{\Pi A(\vec{e})}$, produit de compacts, est compact.

Reste à montrer que B′ est fermé dans $\mathbb{R}^E$: soit $\vec{x}$ et $\vec{y}$ des éléments de E, et λ et μ deux nombres réels. Pour $\vec{x}, \vec{y}, \lambda, \mu$ fixés, la fonction $\Phi_{\vec{x}, \vec{y}, \vec{\lambda}, \vec{\mu}} : \mathbb{R}^E \to \mathbb{R}^E$ définie par $f \mapsto f[\lambda\vec{x} + \mu\vec{y}] - \lambda f(\vec{x}) - \mu f(\vec{y})$ est évidemment continue (pour tout $z \in E$, l'application $f \mapsto f(z)$ est une projection de $\mathbb{R}^E$ sur un de ses facteurs). Donc l'ensemble des fonctions f vérifiant $\Phi_{\vec{x}, \vec{y}, \vec{\lambda}, \vec{\mu}}(f) = 0$, image réciproque du fermé $\{0\}$, est fermé dans $\mathbb{R}^E$. Soit E^* le *dual* algébrique de E. Il est clair que :

$$E^* = \bigcap_{\substack{\vec{x}, \vec{y} \in E, \\ \lambda, \mu \in \mathbb{R}}} \{f / \Phi_{\vec{x}, \vec{y}, \lambda, \mu}(f) = 0\}.$$

Autrement dit, E^*, étant une intersection de fermés, est fermé dans $\mathbb{R}^E$. Soit $\vec{x}$ enfin un élément de E. L'application Ψ_x de $\mathbb{R}^E$ dans $\mathbb{R}$ définie par $\Psi_x(f) = f(x) - \|x\|$ est non moins évidemment continue. Par conséquent, l'ensemble $A_x = \{f \mid \Psi_x(f) \leqslant 0\}$ est une partie fermée de $\mathbb{R}$ (comme image réciproque du fermé $\mathbb{R}^-$), et l'ensemble $A = \bigcap_{\vec{x} \in E} A_x$ l'est également. Il reste à remarquer que $B' = E^* \cap A$, et donc que B′ est fermé dans $\mathbb{R}^E$, c'est-à-dire faiblement fermé dans E′. Ainsi donc, *B′ est faiblement compact dans E′*. Ce résultat liminaire intervient dans la démonstration du théorème de Banach en remarquant que, si E est réflexif, alors il est le dual topologique de E′, et donc, en tant que dual, sa boule unité doit être relativement compacte.

Exemples d'espaces de Banach réflexifs : les espaces $L^p(\mathbb{R}^n; \mathbb{R})$.

Soit $L^p(\mathbb{R}^n; \mathbb{R})$ l'ensemble de fonction f de $\mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ p-intégrables (voir *Analyse*) $p \in \{1, 2, ..., N, ...\}$. L^p est un espace vectoriel normé pour la norme

$$\|f\|_p = \left(\int_{\mathbb{R}} |f(x)|^p\right)^{\frac{1}{p}}$$

On montre que, pour $p \geqslant 2$, le dual de L^p est l'espace L^q où p et q sont liés par l'égalité $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$. Les espaces L^q sont donc tous réflexifs pour $p \geqslant e$. Par contre, pour $p = 1$, on montre que son dual est L^∞ (ensemble des fonctions presque partout bornées sur $\mathbb{R}^n$), mais le dual de L^∞ est strictement plus grand que L^1.

Espaces de Hilbert

Les espaces de Hilbert constituent un cas particulier des espaces de Banach réflexifs. Ils sont les espaces vectoriels topologiques les plus « proches » des espaces de dimension finie ($\mathbb{R}^n$ est d'ailleurs un espace de Hilbert), car ils présentent un certain nombre de qualités géométriques : il existe un isomorphisme canonique entre

l'espace et son dual topologique ; en outre, il est possible de « projeter » sur tout sous-espace fermé. Enfin, on généralise la notion de base en définissant une base hilbertienne, composée d'une infinité dénombrable d'éléments.

Forme bilinéaire

Soit un espace vectoriel, on appelle forme bilinéaire B une application de $E \times E \to \mathbb{R}$ *linéaire par rapport à chacune des variables :*

$$B(\lambda\vec{x}_1 + \mu\vec{x}_2, \vec{y}) = \lambda B(\vec{x}_1, \vec{y}) + \mu B(\vec{x}_2, \vec{y}) \quad \forall \vec{x}_1, \vec{x}_2, \vec{y} \in E$$

$$B(\vec{x}, \lambda\vec{y}_1 + \mu\vec{y}_2) = \lambda B(\vec{x}, \vec{y}_1) + \mu B(\vec{x}, \vec{y}_2) \quad \forall \vec{y}_1, \vec{y}_2, \vec{x} \in E \quad \forall \lambda, \mu \in \mathbb{R}.$$

Une forme bilinéaire est dite *positive* si

$$B(\vec{x}, \vec{x}) \geqslant 0 \quad \forall \vec{x} \in E.$$

Elle sera dite *définie positive* si, en outre, $B(\vec{x}, \vec{x}) > 0$ pour $\vec{x} \neq 0$. Enfin elle sera dite *symétrique* si

$$B(\vec{x}, \vec{y}) = B(\vec{y}, \vec{x}).$$

Si B est une forme bilinéaire symétrique et positive, on a l'**inégalité de Schwarz :**

$$|B(\vec{x}, \vec{y})| \leqslant B(\vec{x}, \vec{x})^{\frac{1}{2}} \cdot B(\vec{y}, \vec{y})^{\frac{1}{2}}.$$

Rappelons-en la démonstration : on peut écrire

$$B(\vec{x} + \lambda\vec{y}, \vec{x} + \lambda\vec{y}) = B(\vec{x}, \vec{x}) + 2\lambda B(\vec{x}, \vec{y}) + \lambda^2 B(\vec{y}, \vec{y})$$

avec $\lambda \in \mathbb{R}$. Dire que B est positive signifie que :

$$B(\vec{x} + \lambda\vec{y}, \vec{x} + \lambda\vec{y}) \geqslant 0 \quad \forall \lambda \in \mathbb{R}$$

soit que l'équation en λ :

$$\lambda^2 B(\vec{y}, \vec{y}) + 2\lambda B(\vec{x}, \vec{y}) + B(\vec{x}, \vec{x})$$

n'a pas de racine réelle, c'est-à-dire

$$\Delta = B^2(\vec{x}, \vec{y}) - B(\vec{x}, \vec{x}) \cdot B(\vec{y}, \vec{y}) \leqslant 0.$$

Espace de Hilbert

Soit H un espace vectoriel sur lequel on a pu définir une forme bilinéaire symétrique, définie positive (ou produit scalaire que l'on va noter $(\vec{x} \mid \vec{y})$). En utilisant l'inégalité de Schwarz, on montre que l'application $\vec{x} \to (\vec{x} \mid \vec{x})^{\frac{1}{2}}$ est une norme. Si H est *complet* pour la dite norme, on dira que H est un *espace de Hilbert.*

Exemples :

$\mathbb{R}^n$ est un espace de Hilbert pour le produit scalaire

$$(\vec{x} \mid \vec{y}) = \sum_{i=1}^{n} x_i y_i.$$

L'espace $L^2(\mathbb{R}^n, \mathbb{R})$ des fonctions de $\mathbb{R}^n$ dans $\mathbb{R}$ de carré intégrable (telles que $\int_{\mathbb{R}^n} (f(x))^2\, dx < +\infty$) est également un espace de Hilbert pour le produit scalaire : $(f \mid g) = \int_{\mathbb{R}^n} f(x) \cdot g(x)\, dx.$

Le théorème de projection

Dans un espace de Hilbert, on définit la notion de projection de manière analogue à ce que l'on réalise géométriquement dans $\mathbb{R}^n$. De nombreux problèmes d'analyse numérique (problèmes d'optimisation, équations aux dérivées partielles, etc.) se résolvent en caractérisant la solution comme la projection d'un certain élément d'un espace de Hilbert (espace L^2 ou *espace* dit *de Sobolev*) sur un sous-ensemble dûment choisi de l'espace. Le théorème s'énonce comme suit :

Théorème : *soit H un espace de Hilbert et F une partie fermée, convexe et non vide de H. Alors chaque point $\vec{a}$ de H a une projection et une seule sur F.*

La démonstration du théorème (*fig.* 11) s'appuie sur un résultat bien connu des géomètres sous le nom de « lemme de la médiane » : étant donné trois points $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ d'un espace de Hilbert, si *m* est le milieu de $(\vec{b}, \vec{c})$, on a l'égalité

$$\|\vec{a} - \vec{b}\|^2 + \|\vec{a} - \vec{c}\|^2 = 2\|\vec{a} - \vec{m}\|^2 + \frac{1}{2}\|\vec{b} - \vec{c}\|^2.$$

Soit donc $\vec{a}$ un point de H. On appelle distance de *a* à F le nombre $d = \min_{\vec{x} \in F} \|\vec{x} - \vec{a}\|$. On peut trouver une suite $\vec{x}_1, \dots, \vec{x}_n$ de points F telle que $d = \lim_{n \to +\infty} \|\vec{x}_n - \vec{a}\|$.

Il nous faut montrer que la suite des $\vec{x}_n$ converge vers un point $\vec{\alpha}$ de F ; la norme $\| \quad \|$ étant une application continue, $\vec{\alpha}$ sera la projection de $\vec{a}$ sur F.

Appliquons le lemme de la médiane aux trois points $\vec{a}, \vec{x}_m$ et $\vec{x}_n$ de F :

$$\frac{1}{2}\|\vec{x}_m - \vec{x}_n\|^2 = \|\vec{a} - \vec{x}_n\|^2 + \|\vec{a} - \vec{x}_m\|^2 - 2\left\|\vec{a} - \frac{\vec{x}_m + \vec{x}_n}{2}\right\|^2.$$

Lorsque *m* et $n \to \infty$, $\|\vec{a} - \vec{x}_n\|^2$ et $\vec{a} - \vec{x}_m\|^2$ tendent vers d^2. En outre, F étant convexe $\frac{\vec{x}_m + \vec{x}_n}{2}$ appartient à F, et donc $\left\|\vec{a} - \frac{x_m + x_n}{2}\right\| \geqslant d^2$. Ainsi donc, le deuxième membre de l'égalité a une limite négative. Or cette limite ne pouvait être que $\geqslant 0$; il en résulte que

$$\lim_{n, m \to \infty} \|\vec{x}_n - \vec{x}_m\| = 0.$$

Autrement dit, la suite des $\vec{x}_n$ est une suite de Cauchy. Comme E est *complet*, cette suite converge vers un élément $\vec{\alpha}$ qui appartient encore à F puisque F est fermé dans H. Il est clair que $\|\vec{a} - \vec{\alpha}\|^2 = d^2$ et que cette limite est unique (l'unicité est due à la convexité de F).

Ce résultat, géométriquement évident, acquiert tout son intérêt lorsqu'on l'applique à des espaces de Hilbert de dimension infinie : en théorie des probabilités par exemple, une variable aléatoire X réelle se définit comme une application particulière (mesurable) d'un ensemble Ω, espace des « événements » dans $\mathbb{R}$; X est alors considéré comme un élément d'un espace fonctionnel $L^2(\Omega, \mathcal{B}, \mathbb{R})$ ($\mathcal{B}$ étant une *σ-algèbre* définie sur Ω). Soit H_X le sous-espace de $L^2(\Omega, \mathcal{B}, \mathbb{R})$ engendré par la variable X. On démontre :

$H_X = \{f \circ X \mid$ où *f* appartient à une certaine classe $\mathcal{L}$ de fonctions de $\mathbb{R} \to \mathbb{R}\}$. H_X est un sous-espace (donc convexe) et fermé de $L^2(\Omega, \mathcal{B}, \mathbb{R})$. Soit une autre variable aléatoire Y. On définit l'espérance conditionnelle de Y par X $\left(\text{notée } E\left(\frac{Y}{X}\right)\right)$ comme la *variable aléatoire, projection de Y sur H_X.*

Dualité dans les espaces de Hilbert

La particularité essentielle des espaces de Hilbert est qu'il existe un isomorphisme linéaire continu entre H et son dual topologique H' : soit $\vec{y} \in H$, on lui fait correspondre, canoniquement, la *forme linéaire* (continue) $U(\vec{y}) : \vec{x} \to (\vec{y} \mid \vec{x})$; $U(\vec{y})$ est un élément du dual H' pour tout $\vec{y}$. En reprenant la notation introduite au chapitre précédent, on écrit : $\langle U(\vec{y}), \vec{x} \rangle = (\vec{y} \mid \vec{x})$.

U est donc une application de H dans H' dont on montre qu'elle est inversible, linéaire, continue et qu'en outre, il s'agit d'une isométrie : c'est-à-dire qu'elle conserve les distances $\|U(\vec{y})\|_{H'} = \|\vec{y}\|_H$. On conviendra donc d'identifier totalement H et H' par l'isomorphisme U

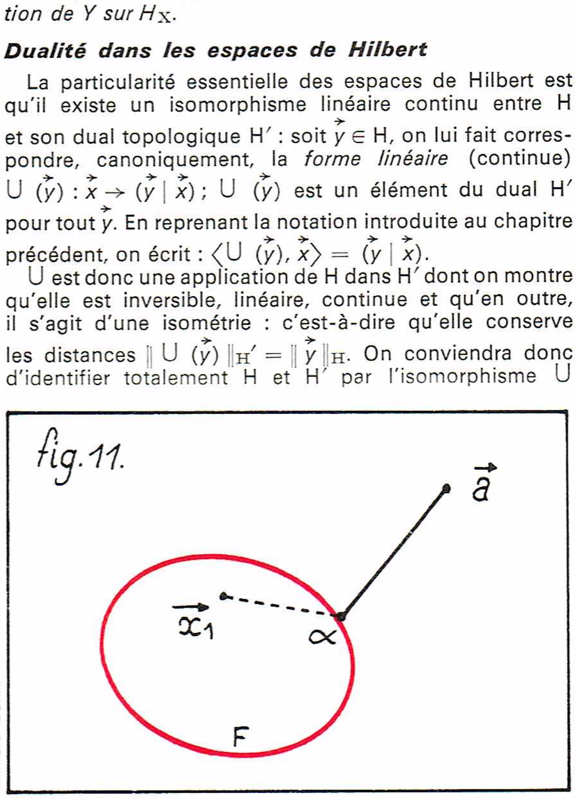

Richard Colin

◀ ***Figure 11 :*** ***le théorème de la projection généralisé aux espaces de Hilbert, une propriété géométrique de l'espace euclidien*** $\mathbb{R}^3$.

(ce qui, du même coup, revient à identifier le produit scalaire $(\cdot | \cdot)$ et l'opération de dualité $\langle \cdot, \cdot \rangle$. Il ressort de l'existence d'un tel isomorphisme qu'un espace de Hilbert est un espace réflexif. L'on peut donc en déduire que la boule unité de H est *faiblement compacte* (théorème de Banach).

Base hilbertienne d'un espace de Hilbert

Soit $(\vec{e_i})_{i \in I}$ une famille de vecteurs d'un espace de Hilbert H. On dira qu'elle constitue un système orthonormé si $\| \vec{e_i} \| = 1 \quad \forall i \in J$

$$(\vec{e_i} \mid \vec{e_j}) = 0 \; i \neq j.$$

Les vecteurs $\vec{e_i}$ sont donc unitaires et deux à deux orthogonaux. Une telle famille sera dite *base hilbertienne* si, de surcroît, le sous-espace engendré par les $\vec{e_i}$ est *dense* dans H. Cela signifie que tout vecteur $\vec{x}$ de H va s'exprimer comme limite d'une série $\sum_{i \in I} x_i \vec{e_i}$ où une infinité au plus dénombrable des x_i est $\neq 0$.

En utilisant le théorème de Zorn, on démontre que *tout espace de Hilbert admet des bases hilbertiennes*, et, qui plus est, qu'elles sont toutes équipotentes : c'est-à-dire si $(\vec{e_i})_{i \in I}$ et $(\vec{f_j})_{j \in I}$ sont deux bases hilbertiennes, Card I = Card J.

Cette propriété montre combien la base hilbertienne est une généralisation de la base que l'on obtient en dimension finie ; elle est d'un grand intérêt en analyse, ainsi qu'en témoignent les 2 exemples suivants.

Polynômes de Legendre

Soit $\mathcal{C}\ [-1, +1]$ l'ensemble des fonctions réelles continues sur $[-1, +1]$, et munissons-le du produit scalaire $(f|g) = \int_{-1}^{+1} f(x) \cdot g(x)\, dx$. L'espace $\mathcal{C}\ [-1, +1]$ muni d'un tel produit scalaire n'est pas un espace de Hilbert puisqu'il n'est pas complet (c'est un espace dit préhilbertien). Néanmoins, il est possible de le « plonger » dans un espace plus grand H, son « complété », dont on montre en intégration qu'il n'est autre que l'espace $L^2([-1, +1], dx)$.

Appelons polynôme de Legendre de degré $n \geqslant 0$ le polynôme :

$$X_n(x) = \frac{1}{2^n\, n!} \frac{d^n}{dx^n} [(x^2 - 1)^n].$$

On vérifie que la suite des polynômes $P_n = \frac{\sqrt{2n+1}}{\sqrt{2}} X_n$ est un système orthonormé de H, c'est-à-dire que

$$\int_{-1}^{+1} P_n(x) \cdot P_m(x)\, dx = \begin{cases} 0 & n \neq m \\ 1 & n = m. \end{cases}$$

Reste à montrer que c'est une base hilbertienne de H. D'abord les P_n engendrent tout l'espace des polynômes (ils sont indépendants puisque orthogonaux) ; ensuite l'ensemble des polynômes est dense dans $\mathcal{C}\ [-1, +1]$ pour la topologie de la convergence uniforme (ce résultat est connu sous le nom de **théorème de Stone-Weierstrass**), donc *a fortiori* pour la topologie préhilbertienne qui est moins fine. Enfin $\mathcal{C}\ [-1, +1]$ est dense dans H qui en est le complété.

Décomposition en série de Fourier

L'on considère ici des espaces de Hilbert sur le corps $\mathbb{C}$. La généralisation se fait sans peine, le produit scalaire $(|)$ étant assujetti à être une forme sesquilinéaire : elle doit vérifier : $B[\vec{x}, \lambda \vec{y}] = \bar{\lambda} B(\vec{x}, \vec{y})$ ou $\lambda \in \mathbb{C}$ et $\bar{\lambda}$ conjugué de λ...

Soit $\mathcal{T}$ l'ensemble des fonctions continues, périodiques sur $\mathbb{R}$ de période 1. On montre que la famille des fonctions $\{e^{2i\pi nx}\}_{n \in \mathbb{Z}}$ constitue une base hilbertienne de $\mathcal{T}$. Les « composantes » d'une fonction f sur cette base sont données par la formule bien connue :

$$C_n(f) = \int_0^1 f(x)\, e^{-2i\pi nx}\, dx \quad n \in \mathbb{Z}$$

et la série $\sum_{n \in \mathbb{Z}} C_n(f)\, e^{2i\pi nx}$ converge vers f dans H (H étant ici le complété de $\mathcal{T}$).

Les distributions

Historiquement, les distributions ont été introduites par les physiciens dans ce qu'ils appellent le calcul symbolique. Il s'agissait de concepts peu rigoureux mais qui possédaient l'avantage de simplifier notablement les calculs : ainsi, les physiciens étaient conduits à considérer la dérivée de fonctions discontinues auxquelles ils appliquaient les règles de calcul usuelles. Ce genre de pratiques était assurément fort suspect aux yeux des mathématiciens ; encore fallait-il expliquer pourquoi elles réussissaient si bien aux physiciens. Il revient au mathématicien français Laurent Schwartz d'avoir élaboré une théorie mathématique nouvelle qui a permis de résoudre cette contradiction (1947) : en définissant une distribution comme un élément du dual d'un espace de fonctions particulier, il a donné la justification théorique du langage des physiciens. Nous présentons donc les distributions en montrant quels phénomènes physiques elles permettent de décrire.

Définition d'une distribution

Soit $\mathcal{D}$ l'espace vectoriel des fonctions $\varphi : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ *indéfiniment dérivables et à support compact* (chaque fonction φ est nulle en dehors d'un compact K_φ que l'on appelle support de φ). Par exemple, la fonction $\theta : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ définie par :

$$\theta(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } |x| > 1 \\ e^{\frac{-1}{1-x^2}} & \text{si } |x| < 1 \end{cases}$$

est un élément de $\mathcal{D}$ (pour $n = 1$) : il faut vérifier que θ est dérivable partout (surtout en $+1$ et -1) et qu'en ces deux points *toutes* ses dérivées sont nulles. L'espace $\mathcal{D}$ est un espace de fonctions que l'on peut munir d'une topologie adaptée à sa structure propre : nous définissons cette topologie en caractérisant la notion de convergence (cela nous suffira amplement ici ; mais on montre que cette *topologie est semi-normable*) : on dira qu'une suite φ_j de $\mathcal{D}$ converge vers une fonction φ de $\mathcal{D}$ si :

— les supports des φ_j sont contenus dans un même ensemble borné, indépendant de j ;

— les dérivées de tout ordre m des φ_j convergent uniformément vers les dérivées correspondantes de φ.

On appelle distribution T une forme linéaire continue sur l'espace vectoriel topologique $\mathcal{D}$. Autrement dit, une distribution est un élément du dual topologique $\mathcal{D}'$ de $\mathcal{D}$.

Une distribution possède donc les propriétés suivantes :

$$\langle T, \varphi_1 + \varphi_2 \rangle = \langle T, \varphi_1 \rangle + \langle T, \varphi_2 \rangle$$
$$\langle T, \lambda \varphi \rangle = \lambda \langle T, \varphi \rangle$$

si φ_j converge vers φ au sens de la topologie de $\mathcal{D}$, les nombres $\langle T, \varphi_j \rangle$ convergent vers $\langle T, \varphi \rangle$.

Exemples

(a) Soit f une fonction de $\mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$, intégrable pour la mesure de Lebesgue ; elle définit une distribution T_f par :

$$\langle T_f, \varphi \rangle = \int_{\mathbb{R}^n} f(\vec{x})\, \varphi(\vec{x})\, dx_1, \ldots, dx_n.$$

Cette intégrale a bien un sens puisque la fonction φ est nulle en dehors d'un certain compact K_φ. Il s'agit bien d'une forme linéaire dont il nous reste à établir la continuité : soit φ_j une suite de fonctions convergentes vers φ dans $\mathcal{D}$: soit K le compact contenant tous les supports des φ_j $|\langle T_f - \varphi_j \rangle - \langle T_f, \varphi \rangle| =$

$$\left| \int_K f(\vec{x}) \cdot \varphi_j(x) \cdot dx_1, \ldots dx_n - \int_K f(\vec{x}) \cdot \varphi(\vec{x})\, dx_1, \ldots dx_n \right|$$

$$\leqslant \left(\int_K |f(x)|\, dx_1, \ldots dx_n \right) . \operatorname{Max}_{x \in K} \left| \varphi(\vec{x}) - \varphi_j(\vec{x}) \right|$$

Comme la convergence des φ_j est uniforme,

$$\operatorname{Max}_{x \in K} |\varphi(\vec{x}) - \varphi_j(\vec{x})| \to 0$$

et ainsi $\langle T_f, \varphi_j \rangle \to \langle T_f, \varphi \rangle$. On remarque que, dans ce cas, T_f est la mesure de densité f. Nous conviendrons désormais d'identifier la distribution T_f et la fonction f : ainsi, nous dirons qu'une distribution est une fonction f si la valeur qu'elle prend pour toute fonction φ de $\mathcal{D}$ est donnée par

$$\langle T, \varphi \rangle \int_{\mathbb{R}^n} f(x)\, \varphi(x)\, dx_1, \ldots, dx_n.$$

(b) Plus généralement, notons D un opérateur de dérivation partielle d'ordre quelconque en $x_1, \ldots, x_n$: la forme linéaire

$$\langle T, \varphi \rangle = \int_{\mathbb{R}^n} f(x)\, D\varphi(x)\, dx_1, \ldots, dx_n \; \langle T_f, D\varphi \rangle$$

est également une distribution que l'on note DT_f. Nous justifierons cette notation dans le paragraphe suivant.

(c) Une distribution bien connue des physiciens est la distribution de Dirac, définie par $\langle \delta, \varphi \rangle = \varphi(\vec{0})$. En un point $\vec{a}$ de $\mathbb{R}^n$, la distribution de Dirac $\delta(\vec{a})$ est définie par $\langle \delta(\vec{a}), \varphi \rangle = \varphi(\vec{a})$.

Distributions mathématiques et distributions des charges en physique

Considérons un solide δ de volume V dans $\mathbb{R}^n$ et de densité $f(\vec{x})$. $f(\vec{x})$ représente la masse d'un élément de volume dV contenant le point $\vec{x}$. Appelons T_f la distribution définie par la fonction f [*cf. exemple* **(a)**]. La masse totale du solide S est donnée par l'intégrale :

$$\int_{V \subset \mathbb{R}^n} f(\vec{x})\, dx_1, \ldots, dx_n = \langle T_f, 1 \rangle.$$

De même, le moment d'inertie par rapport à l'origine est égal à : $\int_V f(\vec{x}) \| \vec{x} \|^2 dx_1, \ldots, dx_n$, soit $\langle T_f, \| \cdot \|^2 \rangle$ où $\| \cdot \|^2$ désigne la fonction $x \longmapsto \| x \|^2$. Ainsi donc, en physique et en mécanique, on est conduit à calculer de nombreuses expressions de la forme $\langle T, \varphi \rangle$ où T représente une « distribution » de masses. Mais c'est en électrostatique, en magnétisme et en mécanique quantique que l'on est conduit à faire un usage plus spécifique des distributions (dans l'exemple pris à l'instant, la notion de « mesure » suffit !). Considérons par exemple la distribution de charges électriques définie par un doublet de moment électrique + 1 placé en O sur la droite $\mathbb{R}$. Ce doublet est « la limite » du système T_ε de deux charges $\left(+\frac{1}{\varepsilon} \text{ et } -\frac{1}{\varepsilon}\right)$ placées aux points 0 et ε.

$$\underset{\left(+\frac{1}{\varepsilon}\right)}{\overset{0}{+}} \longrightarrow \underset{\left(-\frac{1}{\varepsilon}\right)}{\overset{\delta}{+}}$$

T_ε définit une *distribution* dont la valeur en une fonction φ de $\mathfrak{D}$ est donnée par $\langle T_\varepsilon, \varphi \rangle = \frac{1}{\varepsilon} \varphi(\varepsilon) - \frac{1}{\varepsilon} (\varphi(0))$.

Lorsque $\varepsilon \to 0$, $\langle T_\varepsilon, \varphi \rangle$ tend vers $\varphi'(0)$. Nous sommes ainsi amenés naturellement à définir le doublet par la distribution $\langle T, \varphi \rangle = \varphi'(0)$.

Dérivation des distributions

Cherchons à définir la dérivée $\frac{\partial T}{\partial x_1}$ d'une distribution T sur $\mathbb{R}^n$ par rapport à la variable x_1, de telle sorte que, lorsque T est une fonction f continue et à dérivées partielles premières continues, on retrouve $\frac{\partial f}{\partial x_1}$ dans le sens usuel du calcul différentiel classique. Soit donc f une telle fonction :

$$\left\langle \frac{\partial f}{\partial x_1}, \varphi \right\rangle = \int_{\mathbb{R}^n} \frac{\partial f}{\partial x_1} \cdot \varphi\, dx_1, \ldots, dx_n =$$

$$\int_{x_2} \cdots \int_{x_n} dx_2, \ldots, dx_n \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial f}{\partial x_1} \cdot \varphi\, dx_1$$

en intégrant par parties l'intégrale simple $\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial f}{\partial x_1} \cdot \varphi\, dx_1$, on trouve $\left[f \cdot \varphi\right]_{-\infty}^{+\infty} - \int_{-\infty}^{+\infty} f \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x_1} dx_1$. La fonction φ étant à support compact, le terme $\left[f \cdot \varphi\right]_{-\infty}^{+\infty}$ disparaît.

Finalement, on obtient l'égalité $\left\langle \frac{\partial f}{\partial x_1}, \varphi \right\rangle = -\left\langle f, \frac{\partial \varphi}{\partial x_1} \right\rangle$.

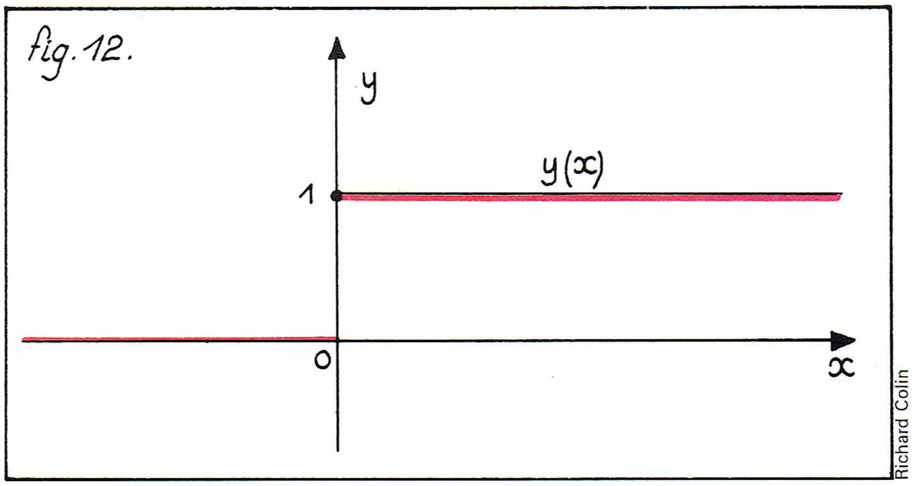

▲ ***Figure 12 : graphe de la fonction d'Heaviside.***

Cette égalité a été obtenue dans le cas où f était différentiable. Nous sommes conduits à la prendre *comme définition* de la dérivée $\frac{\partial T}{\partial x_1}$ en posant :

$$\left\langle \frac{\partial T}{\partial x_1}, \varphi \right\rangle = -\left\langle T, \frac{\partial \varphi}{\partial x_1} \right\rangle$$

On vérifie que cette égalité définit bien $\frac{\partial T}{\partial x_1}$ comme une distribution : il s'agit évidemment d'une forme linéaire sur $\mathfrak{D}$ dont on montre qu'elle est continue pour la topologie définie sur $\mathfrak{D}$.

Plus généralement, on définira les dérivées de tous ordres d'une distribution T par la formule :

$$\langle D^p T, \varphi \rangle = (-1)^{|p|} \langle T, D^p \varphi \rangle$$

où $p = (p_1, \ldots, p_n)$ est un système de n nombres entiers avec $|p| = p_1 + p_2 + \ldots + p_n$, et D^p représente la dérivation $\left(\frac{\partial}{\partial x_1}\right)^{p1} \left(\frac{\partial}{\partial x_2}\right)^{p2} \ldots \left(\frac{\partial}{\partial x_n}\right)^{pn}$.

L'intérêt de cette définition est tout à fait primordial : dans le cas où la distribution T est une fonction intégrable (pas forcément continue), il est possible de définir les dérivées de tous ordres de la fonction f mais il ne s'agit pas en général de fonctions, il s'agit de *distributions*. Ainsi se trouvent justifiées de manière rigoureuse les pratiques des physiciens en calcul symbolique lorsque ceux-ci « dérivaient » des fonctions discontinues.

Exemple : la fonction d'Heaviside (*fig.* 12).

Soit y la fonction de $\mathbb{R} \to \mathbb{R}$ définie par $y(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ 1 & x \geqslant 0 \end{cases}$

Cette fonction est utilisée en électricité sous le nom « échelon unité ». Elle n'est bien sûr pas continue en 0. Calculons la dérivée DY :

$$\langle DY, \varphi \rangle = -\langle Y, D\varphi \rangle =$$

$$-\int_{-\infty}^{+\infty} y(x) \cdot \varphi'(x)\, dx = -\int_0^{\infty} \varphi'(x)\, dx =$$

$$-\left[\varphi(x)\right]_0^{+\infty} = \varphi(0) = \langle \delta, \varphi \rangle$$

on a donc $DY = \delta$. δ est la distribution de Dirac [*cf. exemple* **(c)**] que les électriciens appellent « impulsion unité ». La dérivée seconde D^2y est donnée par

$$\langle D^2 y, \varphi \rangle = \langle D\delta, \varphi \rangle = -\langle \delta, D\varphi \rangle = -\varphi'(0)$$

D^2y est donc la distribution associée au doublet de moment — 1 en 0.

BIBLIOGRAPHIE

LIONS J.-L., *Cours d'analyse numérique*, Hermann. - ROCKAFELLAR R. T., *Conlex Analysis*, Princeton University. - SCHWARTZ L., *Topologie générale et analyse fonctionnelle*, Hermann, 1970. - *Méthodes mathématiques pour les sciences physiques*, Hermann.

CALCUL TENSORIEL

Le calcul tensoriel provient de problèmes posés par la mécanique classique. C'est à Curbastro Gregorio Ricci (1853-1925) et à Tullio Levi-Civita (1873-1941) que l'on doit le premier exposé relatif à cet outil mathématique abstrait, que, d'un point de vue mathématique, on doit considérer comme une extension de la théorie des espaces vectoriels.

La théorie de la relativité générale, qui a vu le jour grâce à l'existence du calcul, a permis, par ricochet, l'extension de ce domaine au travers des problèmes de géométrie différentielle particulièrement étudiés par Élie Cartan (1869-1951).

La présentation mathématique du calcul tensoriel est en fait celle de l'algèbre multilinéaire ; toutefois, le produit tensoriel de deux espaces vectoriels E et F peut être présenté comme solution — unique à un isomorphisme près — d'un problème dit problème universel : $E \otimes F$ et l'application f, bilinéaire, dite *produit tensoriel*, vérifient la propriété : quels que soient l'espace vectoriel G et l'application bilinéaire $g : E \times F \to G$, il existe $l \in \mathcal{L}\ (E \otimes F, G)$ telle que $g = l \circ f$.

On dit parfois encore que l'espace vectoriel $E \otimes F$ est l'espace vectoriel des combinaisons linéaires formelles des éléments de $E \times F$; cette application sera sans doute plus clarifiée par la présentation adoptée ci-dessous :

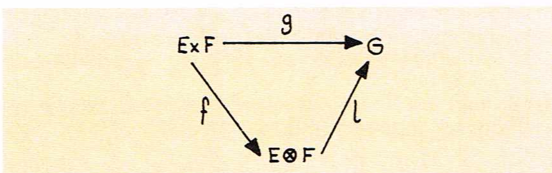

Richard Colin

Produit tensoriel

Considérons un espace vectoriel E, de dimension finie n, sur un corps K. On sait que l'ensemble des applications linéaires de E dans K forme, pour les opérations usuelles d'addition et de produit par un scalaire, un espace vectoriel, appelé dual de E, noté E^*. De plus, si $(e_i)_{i=1,\ldots,n}$ est une base de E, alors les applications e^j définies pour tout $j = 1, 2, \ldots, n$ par :

$$e^j\ (e_i) = \begin{cases} 0 & \text{si } i \neq j \\ 1 & \text{si } i = j \end{cases}$$

forment une base de E^*.

Considérons alors $f \in E^*$ et $g \in E^*$, deux formes linéaires. L'application $t : E \times E \to K$, définie par

$$t\ (x, y) = f\ (x) \cdot g\ (y),$$

est bilinéaire et représente une forme d'association de f et g par l'intermédiaire des valeurs de chacune *prises séparément*. Cette forme bilinéaire sur E est appelée *produit tensoriel* de f et g ; on la note $f \otimes g$. Plus généralement encore, si $f_1, f_2, \ldots, f_p$ sont p formes linéaires sur E, l'application $T : E^p \to K$ définie par :

$$T\ (x_1, x_2, \ldots, x_p) = f_1\ (x_1) \cdot f_2\ (x_2) \ldots f_p\ (x_p)$$

est p-linéaire et « associe » $f_1, \ldots, f_p$ à travers les valeurs de chacune ; on l'appelle produit tensoriel de $f_1, f_2, \ldots, f_p$, noté $f_1 \otimes f_2 \otimes f_3 \ldots \otimes f_p$.

En particulier, les éléments $(e^j)_{j=1,\ldots,n}$ de la base de E^* combinés deux à deux par le produit tensoriel définissent n^2 formes bilinéaires $(e^i \otimes e^j)_{\substack{i=1,\ldots,n \\ j=1,\ldots,n}}$ telles que $e^i \otimes e^j\ (x, y) = x_i y_j$, en désignant par x_i la i-ième coordonnée de x et par y_j la j-ième de y dans la base choisie de E. L'espace vectoriel engendré (c'est-à-dire reconstitué par les opérations d'addition et de produit par un scalaire) par ces formes bilinéaires est désigné par le nom de produit tensoriel de E^* par lui-même, ce qu'on note $E^* \otimes E^*$, ou encore $\underset{2}{\otimes} E$.

Cet espace n'est pas vraiment inconnu ; c'est en réalité l'ensemble des formes bilinéaires sur E. En effet, soit B une telle forme, alors,

$$\text{si } x = \sum_{i=1}^{n} x_i e_i \quad \text{et } y = \sum_{j=1}^{n} y_j e_j$$

sont deux vecteurs quelconques de E, on a :

$$B\ (x, y) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} x_i y_j\ B\ (e_i, e_j)$$

soit, en posant $\lambda_{i,j} = B\ (e_i, e_j)$, on voit que :

$$B\ (x, y) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \lambda_{i,j} e^i \otimes e^j\ (x, y)$$

donc que $B \in \underset{2}{\otimes} E$. Tout élément de $E^* \otimes E^*$ étant une forme bilinéaire, l'ensemble de celles-ci est donc exactement $E^* \otimes E^*$.

On définit donc de même l'ensemble

$$\underbrace{E^* \otimes E^* \otimes \ldots \otimes E^*}_{p \text{ fois}} = \underset{p}{\otimes} E,$$

qui n'est autre que l'espace vectoriel des formes p-linéaires sur E ; il est engendré par les applications de E^p dans K, $e^{i_1} \otimes e^{i_2} \otimes \ldots \otimes e^{i_p}$ où $i_1, i_2, \ldots, i_p$ désignent p valeurs, non nécessairement distinctes, des nombres entiers $1, 2, \ldots, n$. On peut montrer que ces applications sont linéairement indépendantes pour tous les choix différents — il y en a n^p — des indices $i_1, i_2, \ldots, i_p$; par conséquent, $\dim \underset{p}{\otimes} E = n^p$.

Le produit tensoriel ainsi défini tant pour des formes linéaires sur un même espace que pour des espaces tous égaux entre eux peut être généralisé à des espaces différents, mais sur un même corps de base. Prenant deux espaces vectoriels E_1 et E_2, de dimensions n_1 et n_2, sur un corps K et deux formes linéaires $f_1 \in E_1^*$, $f_2 \in E_2^*$ on définit le produit tensoriel $f_1 \otimes f_2$ par :

$$f_1 \otimes f_2\ (x_1, x_2) = f_1\ (x_1) \times f_2\ (x_2), \quad \forall x_1 \in E_1 \quad \text{et} \quad \forall x_2 \in E_2$$

Ce produit tensoriel est une application bilinéaire de $E \times F$ dans K. En appliquant cette opération aux éléments d'une base $(e^i)_{i=1,\ldots,n1}$ de E^*_1 et d'une base $(e'^j)_{j=1,\ldots,n2}$ de E^*_2, on définit $n_1 \times n_2$ formes bilinéaires $(e^i \otimes e'^j)_{\substack{i=1,\ldots,n1 \\ j=1,\ldots,n2}}$ qui engendrent un espace vectoriel, dit produit tensoriel de E^* et F^*, noté $E^* \otimes F^*$, qui n'est autre que l'ensemble des formes bilinéaires sur $E \times F$ (ce que l'on montre par un raisonnement analogue à celui fait pour $F = E$).

L'opération *produit tensoriel* apparaît donc comme un moyen de représentation de la multilinéarité par des outils linéaires, ou en sens inverse comme une « recomposition », par de simples formes linéaires, de formes multilinéaires. Elle permet de dégager un cadre général pour l'algèbre multilinéaire.

On peut noter dès maintenant que la possibilité d'identifier à un isomorphisme près le dual de E^* (soit le bidual E^{**}) à l'ensemble E permet de construire le produit tensoriel $\underbrace{E \otimes E \otimes \ldots \otimes E}_{p \text{ fois}}$, noté aussi $\overset{p}{\otimes} E^*$, ainsi que le produit tensoriel $x_1 \otimes x_2 \otimes \ldots \otimes x_p$ qui est une application p-linéaire de E^{*p} dans K définie par :

$$x_1 \otimes x_2 \otimes \ldots \otimes x_p\ (f_1, f_2, \ldots, f_p) = f_1\ (x_1) \times f_2\ (x_2) \times \ldots \times f_p\ (x_p)$$

quelles que soient $f_1 \in E^*, f_2 \in E^*, \ldots, f_p \in E^*$.

Plus généralement encore, on peut construire le produit tensoriel d'éléments de E et d'éléments de E^*. Soit par exemple deux formes linéaires $f \in E^*$ et $g \in E^*$, et trois éléments X_1, X_2, X_3 de E (donc formes linéaires sur E^*) ; le produit tensoriel $f \otimes g \otimes X_1 \otimes X_2 \otimes X_3$ est une forme 5-linéaire :

$$(x_1, x_2, h_1, h_2, h_3) \to f\ (x_1) \times g\ (x_2) \times h_1\ (X_1) \times h_2\ (X_2) \times h_3\ (X_3)$$

définie sur $E^2 \times E^{*3}$. On peut donc former les n^5 applications

$$e^{i_1} \otimes e^{i_2} \otimes e_{i_3} \otimes e_{i_4} \otimes e_{i_5} \quad \text{de } E^2 \times E^{*3} \text{ dans K}$$

où i_1, i_2, i_3, i_4, i_5 désignent cinq valeurs, non nécessairement distinctes, des nombres $1, 2, \ldots, n$. On note

$$E \otimes E \otimes E^* \otimes E^* \otimes E^*$$

l'espace vectoriel engendré par ces n^5 formes linéaires.

C'est par l'idée du produit tensoriel d'espaces que l'on peut maintenant dégager la notion de tenseur et une loi de composition, dite produit tensoriel, entre ces êtres mathématiques abstraits.

Tenseurs

Un élément de l'espace dual E* est dit *tenseur 1-covariant* (ou tenseur covariant d'ordre 1). Une forme p-linéaire sur E est dite *tenseur p-covariant* (ou tenseur covariant d'ordre p).

La dénomination choisie s'explique ainsi : si u est un élément de E*, on peut écrire $u = \sum_{i=1}^{n} u_i \cdot e^i$ dans la base $(e^i)_{i=1,\dots,n}$ duale de celle $(e_i)_{i=1,\dots,n}$ choisie pour E, avec $u_i = u(e_i)$; si $(\varepsilon_i)_{i=1,\dots,n}$ désigne une autre base de E, liée à la première par les formules de passage $\varepsilon_i = \sum_{j=1}^{n} \alpha_{ji} e_j$, on peut écrire dans la base $(\varepsilon^i)_{i=1,\dots,n}$ duale de $(\varepsilon_i)_{i=1,\dots,n}$ une décomposition $u = \sum_{i=1}^{n} v_i \varepsilon^i$ où $v_i = u(\varepsilon_i)$. Alors v_i s'écrit aussi :

$v_i = u\left(\sum_{j=1}^{n} \alpha_{ji} e_j\right) = \sum_{j=1}^{n} \alpha_{ji} u_j$. Les formules de passage pour les coordonnées (ou composantes) des éléments de E* et pour une base de E sont donc les mêmes : on dit pour cela que l'on a *covariance*.

Un élément de l'espace E (pouvant être, puisqu'on suppose E de dimension finie, considéré comme une forme linéaire sur E*) est dit *tenseur 1-contravariant* (ou tenseur contravariant d'ordre 1). Une forme q-linéaire définie sur E*, c'est-à-dire une application de $(E^*)^q$ dans le corps de base K, linéaire par rapport à chaque argument, est appelée *tenseur q-contravariant* (ou tenseur contravariant d'ordre q). En effet, il y a variation opposée des formules de passage pour les coordonnées d'un vecteur rapporté à une base et les vecteurs de cette base puisque, si $\varepsilon_i = \sum_{j=1}^{n} \alpha_{ji} e_j$, alors $(x^i)_{i=1,\dots,n}$ et $(y^j)_{j=1,\dots,n}$ coordonnées de x respectivement selon les bases $(e_i)_{i=1,\dots,n}$ et $(\varepsilon_j)_{j=1,\dots,n}$ sont liées par : $x^i = \sum_{j=1}^{n} \alpha_{ij} y^j$.

L'algèbre tensorielle fait, on le voit, un usage intensif d'indices. Cela ne saurait surprendre celui qui reconnaît dans cette partie des mathématiques une présentation des phénomènes de multilinéarité. Toutefois, l'usage en devient vite lourd et la répétition des symboles de sommations concernant les divers indices en jeu apparaît dès lors comme un fardeau d'écriture (et de lecture !) bien pesant.

Un jeu de conventions d'écritures permet de tout simplifier. Tout d'abord, on affecte à tout indice qui a une signification de covariance ou de contravariance une position en rapport : les indices de covariance seront supérieurs (sans risque de confusion avec un exposant) tandis que les indices de contravariance seront placés en dessous. Ainsi, on note

$$x = \sum_{i=1}^{i=n} x_i e^i \quad \text{si } x \in E^*$$

alors que
$$y = \sum_{i=1}^{n} y^i e_i \quad \text{si } y \in E ;$$

par suite, on notera $\varepsilon_i = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i^j e_j$ les formules de changement de base dans E.

Dans ces formules de sommation, on remarque que l'indice par rapport auquel s'effectue la somme se trouve toujours une fois en position basse et une fois en position haute ; ceci n'est rien d'autre que la transcription de l'idée de dualité (ou de correspondance par dualité). Cette constatation amène à poser la convention dite *convention d'Einstein* :

Dans tout monôme où figure un même indice répété une fois comme indice covariant (position supérieure) et une fois comme indice contravariant (position inférieure), on considère qu'il s'agit en fait de la somme des monômes obtenus pour les diverses valeurs de cet indice (on sous-entend donc la sommation). Par conséquent, avec cette convention, on écrira $x = x_i e^i$ au lieu de $x = \sum_{i=1}^{n} x_i e^i$, ou bien $\varepsilon_i = \alpha_i^j e_j$ au lieu de $\varepsilon_i = \sum_{j=1}^{n} \alpha_i^j e_j$, ou bien encore : $x^k{}_p{}^l = \alpha^i{}_h{}^j \cdot a_i{}^k \cdot b_j{}^l \cdot c_p{}^h$ au lieu de l'expression usuelle $x^k{}_p{}^l = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} \sum_{h=1}^{q} \alpha^i{}_h{}^j \cdot a_i{}^k \cdot b^{jl} \cdot c^p{}_h$.

Deux remarques s'imposent au sujet de l'utilisation de cette règle. Tout d'abord, le domaine des valeurs d'un indice de sommation n'est plus précisé, et il importe donc bien qu'il n'y ait aucune ambiguïté, ce qui demande une pratique du problème d'autant plus grande que le nombre des indices en jeu est élevé. En second lieu, il est clair que la position d'un indice est primordiale, car la convention d'Einstein ne peut s'appliquer que si l'on a la possibilité d'associer covariance et contravariance. Par conséquent, chaque indice doit être placé en conformité avec sa signification : covariant ou contravariant. On est donc tenté de voir une difficulté supplémentaire dans l'application de ce mécanisme ; ce qui, en réalité est inexact, car l'utilisation simultanée d'indices, toujours délicate, demande en outre la connaissance de leurs domaines de valeurs et de leur signification.

Il a été montré que l'ensemble des tenseurs p-covariants muni des deux opérations usuelles — addition et produit par un scalaire — avait une structure d'espace vectoriel ; on le désigne par $\bigotimes_p E$. Il en est de même pour l'ensemble des tenseurs q-contravariants, $\bigotimes^q E$. Une base de l'espace $\bigotimes_p E$ est obtenue par les éléments

$$e^{i_1} \otimes e^{i_2} \otimes \dots \otimes e^{i_p},$$

produit tensoriel de p vecteurs de la base duale de celle choisie dans E, et une base de l'espace $\bigotimes^q E$ est obtenue par les éléments $e_{j1} \otimes e_{j2} \otimes \dots \otimes e_{jq}$, produit tensoriel de q vecteurs de la base de E (identifiée à la base du bidual E**). Pour tout élément de $\bigotimes_p E$ ou de $\bigotimes^q E$, il existe donc un système de n^p scalaires dans le premier cas, de n^q dans le second, réalisant la décomposition relativement à la base citée : ce sont — conformément à la terminologie usuelle de l'algèbre linéaire — les coordonnées du tenseur relativement à la base donnée.

Ainsi, soit T un tenseur 3-covariant, $T \in \bigotimes_3 E$; ce tenseur est une application de E^3 dans K, et pour tout triplet $(x, y, z) \in E^3$ où $x = x^i e_i$, $y = y^j e_j$, $z = z^k e_k$ (convention d'Einstein), on a :

$$T(x, y, z) = T(x^i e_i, y^j e_j, z^k e_k) = x^i y^j z^k \, T(e_i, e_j, e_k)$$

en développant selon la trilinéarité ; en posant

$$T(e_i, e_j, e_k) = t_{ijk},$$

on obtient $T(x, y, z) = t_{ijk} x^i y^j z^k$, ce qui donne

$$T = t_{ijk} e^i \otimes e^j \otimes e^k$$

par définition des éléments $e^i \otimes e^j \otimes e^k$.

De la même façon, pour un tenseur 4-contravariant $U \in \bigotimes^4 E$, on obtient $U = u^{ijkl} e_i \otimes e_j \otimes e_k \otimes e_l$ en posant $u^{ijkl} = U(e^i, e^j, e^k, e^l)$.

L'obtention, et donc l'utilisation, des coordonnées d'un tenseur est identique à celle de la matrice d'une application linéaire. On verra plus loin qu'il ne s'agit pas d'une coïncidence.

Les tenseurs mixtes se définissent selon le même principe. Par exemple, un tenseur 2-covariant, 1-contravariant, 1-covariant est une forme 4-linéaire sur l'espace $E^2 \times E^* \times E$; l'ensemble de ces tenseurs forme un espace vectoriel qui est engendré par les éléments

$$e^i \otimes e^j \otimes e_k \otimes e^l,$$

les indices i, j, k et l prenant toutes les valeurs entières de

1 à $n = \dim E$. Si T est un tenseur de ce type, on a :

$$T(x, y, F, z) = T(x^i e_i, y^j e_j, F_k e^k, z^l e_l)$$

d'où $$T = T_{ij}{}^k{}_l\, e^i \otimes e^j \otimes e_k \otimes e^l$$

avec $$T_{ij}{}^k{}_l = T(e_i, e_j, e^k, e_l).$$

Les n^4 scalaires $T_{ij}{}^k{}_l$ sont les coordonnées du tenseur mixte T.

Pour tout tenseur, covariant, contravariant ou mixte, les coordonnées sont liées au choix de la base choisie pour l'espace E, puisque alors la base duale (celle de E*) est définie, et donc celle de tout produit tensoriel d'espaces. Dans tout problème, le choix de la base peut nécessiter une modification ultérieure et ne pas être irrévocable. Il est donc nécessaire de disposer — en algèbre tensorielle comme en algèbre linéaire — de formules établissant l'effet d'un changement de base sur un tenseur, donc sur ses coordonnées. Dans le cas d'un tenseur T covariant d'ordre 3, si l'on passe de la base $(e_i)_{i=1,\dots,n}$ à la base $(\varepsilon_i)_{i=1,\dots,n}$ selon $\varepsilon_i = \alpha^j{}_i e_j$ (convention d'Einstein), on a :

$$T = t_{ijk}\, e^i \otimes e^j \otimes e^k \quad \text{dans la première base, et}$$

$$T = v_{ijk}\, \varepsilon^i \otimes \varepsilon^j \otimes \varepsilon^k \quad \text{dans la seconde; donc}$$

$$v_{ijk} = T(\varepsilon_i, \varepsilon_j, \varepsilon_k) = T(\alpha^l{}_i\, e_l, \alpha^m{}_j\, e_m, \alpha^r{}_k\, e_r)$$

soit

$$v_{ijk} = \alpha^l{}_i\, \alpha^m{}_j\, \alpha^r{}_k\, T(e_l, e_m, e_r) = \alpha^l{}_i\, \alpha^m{}_j\, \alpha^r{}_k\, t_{lmr}.$$

On établirait aussi bien pour un tenseur 4-contravariant U ayant les coordonnées u^{ijkl} dans la base (e_i) et w^{ijkl} dans la base (ε_i) :

$$w^{ijkl} = \beta^i{}_m\, \beta^j{}_p\, \beta^k{}_r\, \beta^l{}_s\, u^{mprs}$$

où $\beta^i{}_m$ représente l'élément situé à la i-ième ligne et m-ième colonne dans la matrice inverse de celle formée par les $\alpha^j{}_i$.

Pour un tenseur mixte T, 1-covariant, 1-contravariant, 1-covariant de coordonnées $t_i{}^j{}_k$ et $v_i{}^j{}_k$, on obtiendrait la formule :

$$v_i{}^j{}_k = \alpha^l{}_i\, \beta^j{}_m\, \alpha^r{}_k\, t_l{}^m{}_r.$$

En général, on voit que les coefficients α interviennent pour chaque covariance et les coefficients β pour chaque contravariance. Bien entendu, on pourrait écrire une formule générale de changement de base, mais son intérêt serait très limité en raison de sa complexité d'écriture, ce qu'il est aisé d'imaginer.

Il est à noter que ces expressions réalisent une condition nécessaire et suffisante pour qu'un système de scalaires puisse être considéré comme les coordonnées d'un tenseur de type défini. De cette règle, d'ailleurs, dérivent encore trois autres critères de reconnaissance d'un tenseur par ses coordonnées.

Quelques tenseurs particuliers

A toute application linéaire $L \in \mathcal{L}(E)$, on associe un tenseur mixte T du second ordre 1-contravariant, 1-covariant en posant :

$$T : (F, x) \to F(L(x)) \text{ où } F \in E^* \text{ et } x \in E.$$

Les coordonnées de ce tenseur sont données par :

$$t^i{}_j = T(e^i, e_j) = e^i(L(e_j))\,;$$

or $L(e_j)$ est un élément de E dont les coordonnées — selon la base $(e_i)_{i=1,\dots,n}$ — forment la j-ième colonne de la matrice de L dans la base choisie, et donc sa j-ième composante — soit $e^i(L(e_j))$ — n'est autre que l'élément $m^i{}_j$ situé à la i-ième ligne et j-ième colonne de cette matrice. On en déduit donc l'existence d'une bijection entre l'ensemble $\mathcal{L}(E)$ des applications linéaires de E dans lui-même et l'ensemble $E^* \otimes E$ des tenseurs mixtes 1-contravariant, 1-covariant, puisque les formules usuelles de changement de base montrent que les éléments d'une matrice peuvent être considérés comme les coordonnées d'un tel tenseur mixte.

Si L est une application linéaire de E* dans E, on peut lui associer un tenseur 2-covariant $T \in E^* \otimes E^*$ par :

$$T : (F, G) \to F(L(G)) \quad \text{où } F \in E^* \quad \text{et } G \in E^*.$$

Les coordonnées de ce tenseur sont :

$$t^{ij} = T(e^i, e^j) = e^i(L(e^j))\,;$$

c'est-à-dire que, comme précédemment, les coordonnées de T sont les éléments de la matrice de l'application L. On met donc ainsi en évidence une bijection entre l'ensemble $\underset{2}{\otimes} E$ (soit $E^* \otimes E^*$) et l'ensemble $\mathcal{L}(E^*, E)$.

On peut noter, pour préciser ces liens entre ensembles de tenseurs d'ordre 2 et ensembles d'applications linéaires (ou aussi ensemble des matrices carrées d'ordre n), que ce sont des bijections linéaires, c'est-à-dire des isomorphismes.

Le tenseur — dit *tenseur de Kronecker* — mixte du second ordre 1-covariant, 1-contravariant défini par ses composantes :

$$\delta^i{}_j = 0 \quad \text{si } i \neq j, \quad \delta^i{}_j = 1 \quad \text{si } i = j,$$

correspond — par l'isomorphisme vu plus haut — à l'application identité de l'espace E. On sait que la matrice de cette application est invariante par changement de la base de E ; cette propriété reste vraie pour les composantes du tenseur de Kronecker. En effet, si les coordonnées dans une autre base sont $t^i{}_j$, on peut écrire : $t^i{}_j = \beta^i{}_l\, \alpha^m{}_j\, \delta^l{}_m$, ce qui devient, après avoir simplifié les termes nuls de la somme sous-entendue : $t^i{}_j = \beta^i{}_j\, \alpha^l{}_j$, soit $t^i{}_j = \delta^i{}_j$ puisque les coefficients α et β sont ceux de deux matrices inverses l'une de l'autre.

Parmi les tenseurs du second ordre 2-covariants ou 2-contravariants, on distingue deux cas particuliers : les tenseurs *symétriques* et les tenseurs *antisymétriques*. Dans le premier cas, il s'agit de tenseurs T tels que

$$T(X, Y) = T(Y, X)$$

pour tous $(X, Y) \in E \times E$ pour le cas covariant, pour tous $(X, Y) \in E^* \times E^*$ pour la contravariance; dans le second, il s'agit de tenseurs U tels que

$$U(X, Y) = -U(Y, X).$$

Il est clair qu'on ne peut étendre ces notions aux tenseurs mixtes. Un tenseur 2-covariant sera donc symétrique si ses coordonnées vérifient $t_{ij} = t_{ji}$ pour tout couple (i, j) ; pour un tenseur 2-contravariant symétrique, on aura $t^{ij} = t^{ji}$. Un tenseur 2-covariant sera antisymétrique si ses coordonnées vérifient $t_{ij} = -t_{ji}$ pour tout couple (i, j) ; pour un tenseur 2-contravariant antisymétrique, on a $t^{ij} = -t^{ji}$.

Tout tenseur 2-covariant (de même que tout tenseur 2-contravariant) peut s'écrire comme somme d'un tenseur symétrique et d'un tenseur antisymétrique de mêmes espèces, puisque, si T est de coordonnées t_{ij}, alors le tenseur de composante $\frac{1}{2}(t_{ij} + t_{ji})$ est symétrique, le tenseur de composantes $\frac{1}{2}(t_{ij} - t_{ji})$ est antisymétrique, et de plus :

$$t_{ij} = \frac{1}{2}(t_{ij} + t_{ji}) + \frac{1}{2}(t_{ij} - t_{ji}).$$

Mais bien évidemment, d'après les isomorphismes vus plus haut, les propriétés des tenseurs d'ordre 2 se recoupent avec celles des applications linéaires.

Un tenseur p-covariant est dit alterné s'il s'annule lorsqu'on l'applique à p vecteurs dont deux sont égaux. On voit que, si $p = 2$, un tel tenseur est antisymétrique. On définit de même les tenseurs q-contravariants alternés. Il est alors facile de montrer qu'un tenseur est alterné dès que, dans une base fixée, ses coordonnées sont des fonctions alternées des indices. Par conséquent, un tenseur alterné d'ordre $p > \dim E = n$ est nul, puisque, pour toute coordonnée $t_{i_1 i_2 \dots i_p}$, les indices $i_1, i_2, \dots, i_p$ prennent leurs valeurs parmi 1, 2, ..., n, donc deux d'entre eux au moins sont égaux.

Lorsque l'espace vectoriel E est un espace euclidien (c'est-à-dire muni d'une forme bilinéaire symétrique dont la forme quadratique associée est définie positive), il est possible d'associer les tenseurs de même ordre des types définis plus haut (on parle de *tenseurs affines*) : on parle alors de *tenseur euclidien*. Si l'on effectue le produit scalaire de deux éléments X et Y de E, on écrit

$$\langle X, Y \rangle = \langle x^i e_i, y^j e_j \rangle = x^i y^j \langle e_i, e_j \rangle$$

(convention d'Einstein) ; soit $\langle X, Y \rangle = g_{ij} x^i y^j$, si l'on pose $g_{ij} = \langle e_i, e_j \rangle$ (les signes $\langle\ \rangle$ désignent ici le résultat de la forme bilinéaire symétrique donnant à E son caractère euclidien). En tenant compte de ce que le produit scalaire est invariant par changement de base, et qu'il est

commutatif (car la forme bilinéaire est supposée symétrique), les scalaires g_{ij} sont les composantes (covariantes) d'un tenseur euclidien, que l'on appelle le *tenseur fondamental de l'espace E*.

Ceci n'est valable que parce que tout espace euclidien est isomorphe à son dual — donc peut lui être identifié — par l'intermédiaire de la correspondance qui, à tout $x \in E$, associe la forme linéaire définie par $y \to \langle x, y \rangle$ pour tout $y \in E$. Les propriétés de la forme bilinéaire fondamentale (ici désignée par $\langle\ \rangle$) font de cette application un isomorphisme d'espaces vectoriels qui ne dépend aucunement d'une quelconque base de E : c'est donc bien un isomorphisme canonique qui permet de passer de E à E* ou, si l'on préfère, de remplacer, lorsque besoin est, un élément $x \in E$ par un élément de E* sans qu'aucune propriété linéaire en soit affectée.

Ainsi, un vecteur (contravariant) $x \in E$ se décompose sur une base $(e_i)_{i=1,...,n}$ selon $x = x^i e_i$, les scalaires x^i étant appelés composantes contravariantes de x. L'élément $f_x \in E^*$ associé à x par l'isomorphisme précédent admet pour composantes, notées $(f_x)_i$, dans la base duale $(e^i)_{i=1,...,n}$ $(f_x)_i = \langle x, e_i \rangle = g_{ij}x^j$. Puisque l'on peut identifier x et f_x, il est donc légitime de donner à ces scalaires, qui sont les composantes covariantes d'un élément de E*, le nom de composantes covariantes de x ; on les note donc x_i, et elles vérifient $x_i = g_{ij}x^j$ (sommation sous-entendue).

Par conséquent, ainsi que le montre la construction des tenseurs affines (éléments d'un produit tensoriel d'espaces E ou E*), de tels tenseurs, d'un même ordre, définissent un seul et même tenseur dit *tenseur euclidien* dont les différentes composantes covariantes, contravariantes ou mixtes se déduisent entre elles par produit (et sommation sous-entendue) par g_{ij} ou g^{ij} (éléments de la matrice inverse) ; ces opérations étant *au plus* répétées N fois, si N désigne l'ordre du tenseur (c'est-à-dire la somme du degré de covariance et du degré de contravariance).

Opérations sur les tenseurs

C'est par les opérations de calcul tensoriel que l'on va dégager la puissance de cet outil très abstrait ; les structures obtenues montrent sa valeur par rapport à ce qui a été obtenu dans le cadre linéaire.

Tout d'abord, concernant les tenseurs d'un même type (c'est-à-dire de même degré de covariance et contravariance), on construit la structure usuelle d'espace vectoriel par l'intermédiaire d'une loi additive et d'un produit par un scalaire. L'addition d'un tenseur T et d'un tenseur T' de même espèce est donc définie par un tenseur T + T' tel que :

$$(T + T')(X_1, X_2, ..., X_N) = T(X_1, X_2, ..., X_N) + T'(X_1, X_2, ..., X_N)$$

ce qui est possible puisque T et T' opèrent sur les mêmes espaces. Il est clair que cette addition donne à l'ensemble des tenseurs d'un même type une structure de groupe commutatif. Le produit d'un tenseur T par un scalaire α est un tenseur du même type, αT, tel que :

$$(\alpha T)(X_1, X_2, ..., X_N) = \alpha \cdot T(X_1, X_2, ..., X_N).$$

Cette loi externe complète alors la structure linéaire de l'ensemble des tenseurs d'une même espèce : p-covariant ou q-contravariant, ou bien mixte m-covariant et n-contravariant.

Mais, dépassant cette structure, on dispose d'une opération supplémentaire, le produit tensoriel, qui va permettre de définir sur de vastes ensembles de tenseurs un cadre d'algèbre.

Si T_1 est un tenseur $\binom{p}{q}$ — p-covariant, q-contravariant — et T_2 un tenseur d'espèce $\binom{m}{n}$, on définit le produit tensoriel $T_1 \otimes T_2$ comme un tenseur d'espèce $\binom{p+m}{q+n}$, tel que :

$$T_1 \otimes T_2 (X_1, ..., X_p, Y_1, ..., Y_q, X'_1, ..., X'_m, Y'_1, ..., Y'_n) = T_1(X_1, ..., X_p, Y_1, ..., Y_q) \cdot T_2(X'_1, ..., X'_m, Y'_1, ..., Y'_n).$$

Le premier tenseur est en fait une forme $(p + q)$-linéaire, le second une forme $(m + n)$-linéaire ; leur produit tensoriel est une forme $(p + m + q + n)$-linéaire. Il ne s'agit donc pas d'une loi de composition interne sur l'ensemble des tenseurs d'un type donné.

Les coordonnées du produit tensoriel s'obtiennent par produit des coordonnées concernées des tenseurs dont on fait le produit. Ainsi, si T_1 est un tenseur $\binom{3}{2}$ et T_2 un tenseur $\binom{2}{1}$, le produit tensoriel $T_1 \otimes T_2$ est d'espèce $\binom{5}{3}$ et ses coordonnées sont

$$T_1 \otimes T_2 (e_i, e_j, e_k, e^h, e^l, e_r, e_s, e^t) = T_1(e_i, e_j, e_k, e^h, e^l) \times T_2(e_r, e_s, e^t)$$

donc $(T_1 \otimes T_2)_{i,j,k,}{}^{h,l,}{}_{r,s,}{}^{t} = (T_1)_{i,j,k,}{}^{h,l,} \cdot (T_2)_{r,s,}{}^{t}$.

Les principales propriétés du produit tensoriel sont données par :

$$U \otimes (T_1 + T_2) = U \otimes T_1 + U \otimes T_2 ;$$
$$(T_1 + T_2) \otimes U = T_1 \otimes U + T_2 \otimes U \text{ (distributivité)}$$
$$T \otimes (\lambda \cdot U) = (\lambda T) \otimes U = \lambda \cdot (T \otimes U).$$
$$(T_1 \otimes T_2) \otimes T_3 = T_1 \otimes (T_2 \otimes T_3) \text{ (associativité)}.$$

Par conséquent, l'application : $(T_1, T_2) \to T_1 \otimes T_2$ est bilinéaire. On peut noter que si T_1 et T_2 sont deux tenseurs, leur produit de composition au sens des applications — lorsqu'il a un sens — n'est pas en général égal à leur produit tensoriel : $T_1 \circ T_2 \neq T_1 \otimes T_2$.

Le produit d'un tenseur p-covariant par un tenseur m-covariant est un tenseur $(p + m)$-covariant. Il vient donc à l'idée d'associer les espaces $\underset{p}{\otimes} E$ de façon à regrouper tous les tenseurs covariants. Pour cela, on définit l'ensemble $\underset{\omega}{\otimes} E$ comme somme directe des espaces vectoriels $\underset{p}{\otimes} E$, donc $\underset{\omega}{\otimes} E = \overset{\infty}{\underset{p=0}{\oplus}} \left(\underset{p}{\otimes} E\right)$ avec :

$$\underset{0}{\otimes} E = E, \quad \underset{1}{\otimes} E = E^*, \quad \underset{2}{\otimes} E = E^* \otimes E^*, \text{ etc.}$$

Tout élément de $\underset{\omega}{\otimes} E$, dit tenseur affine covariant, sera donc une somme de tenseurs p-covariants ($p \in \mathbb{N}$) dont seul un nombre fini est non nul. Il devient alors possible de définir une addition et un produit tensoriel à l'intérieur de $\underset{\omega}{\otimes} E$. Les différentes propriétés que l'on établit alors aisément munissent cet ensemble d'une structure d'anneau qui, combinée à celle d'espace vectoriel, en fait *l'algèbre des tenseurs covariants sur E*.

Cette construction est évidemment réalisable pour les tenseurs contravariants, et *l'algèbre des tenseurs contravariants sur E*, $\overset{\omega}{\otimes} E$, est définie par :

$$\overset{\omega}{\otimes} E = \overset{\infty}{\underset{q=0}{\oplus}} \left(\overset{q}{\otimes} E\right),$$

de façon analogue, avec $\overset{0}{\otimes} E = K$ (corps de base),

$$\overset{1}{\otimes} E = E, \quad \overset{2}{\otimes} E = E \otimes E, \text{ etc.}$$

En dehors des opérations fondamentales, addition et produit tensoriel, définies plus haut, il existe encore une opération qui, à un tenseur d'ordre N, associe un tenseur N-2, il s'agit de la *contraction*, qui consiste à égaler un indice de covariance et un indice de contravariance (pour faire donc après la somme sous-entendue par la convention d'Einstein), ce qui fait donc jouer aux espaces E et E* leur rôle de dualité ; d'un tenseur de type $\binom{p}{q}$, on obtient donc un tenseur d'ordre $\binom{p-1}{q-1}$. Cette opération pouvant être répétée tant que le tenseur obtenu est mixte. Par exemple, on sait identifier une matrice carrée à un tenseur mixte $\binom{1}{1}$ du second ordre dont les coordonnées $\alpha_j{}^i$ sont les coefficients de la matrice. La contraction lui associe un tenseur d'ordre 0, donc un scalaire qui n'est autre que la trace de la matrice $\Sigma\, \alpha_{ii}$.

L'utilisation combinée de cette opération et du produit tensoriel définit alors un *produit contracté*, obtenu par contraction d'indices dans le produit tensoriel. Ainsi, en prenant T défini par les composantes $T^{ij}{}_k$ et U par les composantes $U^l{}_m$, on contracte le produit $T \otimes U$ de composantes $T^{ij}{}_k U^l{}_m = V^{ij}{}_k{}^l{}_m$ en égalant j et k, ce qui donne un tenseur contracté $(T \otimes U)_c$ de composantes $V^{ij}{}_j{}^l{}_m$, soit $W^{il}{}_m$, que l'on peut à nouveau contracter pour

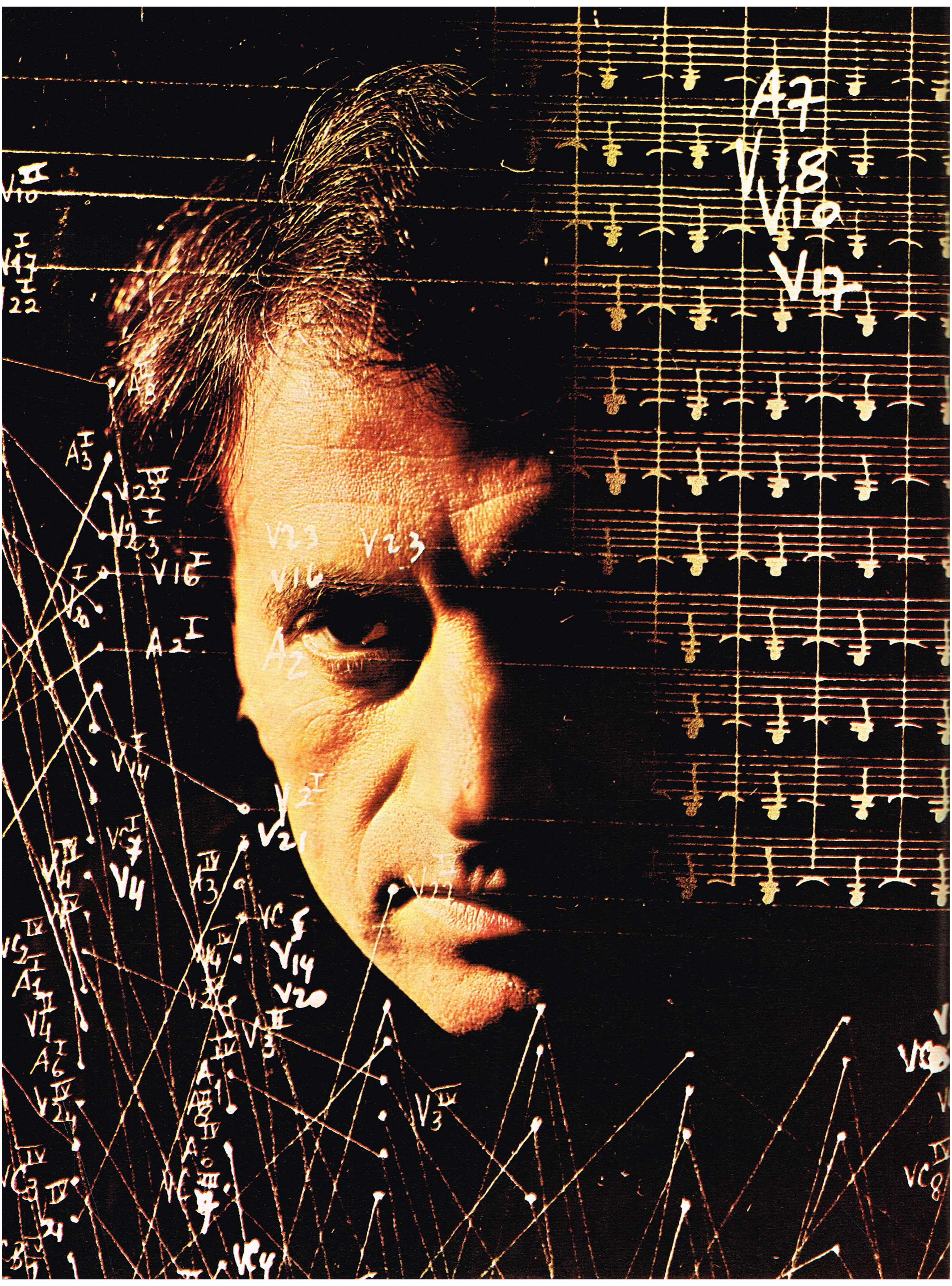
A7
V18
V10
V9
V23
V23
V16
A2

obtenir un tenseur de composantes $W^{im}{}_{m}$, soit Z^i après sommation.

Deux exemples montrent bien qu'il s'agit d'un cadre abstrait général pour représenter des opérations déjà connues, mais dont la nature différente ne permettait pas de les associer.

Prenons $T \in E^*$ défini par ses coordonnées t_i et $X \in E$ défini par ses coordonnées x^i ; le produit $T \otimes X$ est défini par ses coordonnées $t_i x^j$ que l'on note $u_i{}^j$, et le produit contracté $(T \otimes X)_c$ est alors le scalaire $u_i{}^i = t_i x^i$, qui n'est autre que le produit scalaire usuel $\langle T, X \rangle$.

En prenant maintenant un tenseur T mixte du second ordre, associé à une application linéaire L de matrice $(\alpha_j{}^i)$ et $X \in E$ défini par ses coordonnées x^k, le produit $T \otimes X$ a pour composantes $u_j{}^{ik} = \alpha_j{}^i x^k$; la contraction $j = k$ donne un tenseur de composantes $y^i = \alpha^i{}_j x^j$, c'est-à-dire que $(T \otimes X)_c = L(X)$.

Les tenseurs et les opérations définies sur eux permettent donc de définir une idée générale regroupant celles déjà obtenues par la linéarité, puis la multilinéarité.

Enfin, une autre opération établit un lien avec l'analyse et la géométrie différentielle moderne : *le produit extérieur*.

Dans l'ensemble $\overset{2}{\otimes} E$ des tenseurs 2-covariants sur E, les expressions $e^i \otimes e^j - e^j \otimes e^i$, que l'on note $e^i \wedge e^j$, sont des tenseurs alternés. La famille de ces vecteurs forme une base du sous-espace vectoriel A_2 des tenseurs alternés 2-covariants $\left(\text{sous-espace de } \underset{2}{\otimes} E\right)$, qui est donc de dimension $\dfrac{n(n-1)}{2}$.

Plus généralement, dans l'ensemble $\underset{p}{\otimes} E$, les expressions

$$e^{i_1} \wedge e^{i_2} \wedge \ldots \wedge e^{i_p} = \sum_{\sigma \in S_p} \varepsilon(\sigma)\, e^{i\sigma(1)} \otimes e^{i\sigma(2)} \otimes \ldots \otimes e^{i\sigma(p)}$$

(où σ désigne une permutation du groupe « symétrique » S_p, de signature $\varepsilon(\sigma)$ [c'est-à-dire $\varepsilon(\sigma) = (-1)^N$ où N désigne le nombre de transpositions de σ], pour

$$1 \leqslant i_1 < i_2 < \ldots < i_p \leqslant n)$$

sont des tenseurs alternés p-covariants. La famille de ces tenseurs forme une base du sous-espace vectoriel A_p des tenseurs alternés p-covariants (sous-espace de $\underset{p}{\oplus} E$) qui est donc de dimension $\dfrac{n!}{p!\,(n-p)!}$. Cet espace vectoriel peut être ainsi considéré comme le produit extérieur de E p fois par lui-même, ce que l'on note $\underset{p}{\wedge} E = A_p$.

De l'idée ainsi développée pour E et ses vecteurs de base, on dérive l'idée généralisée de produit extérieur de deux tenseurs, application bilinéaire de $A_p \times A_q$ dans A_{p+q} correspondant au produit tensoriel, application bilinéaire de $\underset{p}{\otimes} E \times \underset{q}{\otimes} E$ dans $\underset{p+q}{\otimes} E$; mais ici le produit tensoriel est insuffisant, car deux tenseurs alternés n'ont pas en général un produit tensoriel alterné.

On définit pour tout tenseur p-covariant T un tenseur p-covariant alterné $\overline{T}$, dit *antisymétrisé* de T, par :

$$\overline{T}(x_1, x_2, \ldots, x_p) = \frac{1}{p!} \sum_{\sigma \in S_p} \varepsilon(\sigma)\, T(x_{\sigma(1)}, x_{\sigma(2)}, \ldots, x_{\sigma(p)})$$

en conservant les notations vues ci-dessus.

Par exemple,

$$\text{si } p = 2, \overline{T}(x_1, x_2) = \frac{1}{2}\left[T(x_1, x_2) - T(x_2, x_1)\right].$$

Lorsque T est lui-même alterné, alors $\overline{T} = T$; cette condition est donc nécessaire et suffisante pour qu'un tenseur soit alterné. Par conséquent, l'opération d'antisymétrisation applique $\underset{p}{\otimes} E$ dans son sous-espace $\underset{p}{\wedge} E$; c'est en fait une projection.

Le produit extérieur de deux tenseurs T et T' est alors défini comme l'antisymétrisé de leur produit tensoriel, soit : $T \wedge T' = \overline{T \otimes T'}$; et cette opération est bien une application bilinéaire de $A_p \times A_q$ dans A_{p+q}, qui est associative et non commutative ; on a, en fait,

$$T' \wedge T = (-1)^{pq}\, T \wedge T'.$$

De même que l'on a construit $\underset{\omega}{\otimes} E$ pour disposer d'une structure respectant les produits tensoriels, on construit *l'algèbre extérieure des tenseurs alternés covariants* :

$$\underset{\omega}{\wedge} E = \bigoplus_{p=0}^{\infty} A_p, \qquad \text{en posant } A_0 = K.$$

Bien évidemment, $\underset{\omega}{\wedge} E$ est une sous-algèbre de $\underset{\omega}{\otimes} E$.

Les principes de dualité qui guident tout ce qui précède s'appliquent encore et permettent de définir, de manière duale, les produits extérieurs $e_{i_1} \wedge e_{i_2} \wedge e_{i_3} \wedge \ldots \wedge e_{i_q}$, et donc de poser $A^{[q]} = \overset{q}{\wedge} E$, sous-espace vectoriel de $\overset{q}{\otimes} E$, de dimension $\dfrac{n!}{q!\,(n-q)!}$, ainsi que l'antisymétrisation comme application projetant $\overset{q}{\otimes} E$ sur $\overset{q}{\wedge} E$. Le produit extérieur de deux tenseurs contravariants définit alors une application de $A^{[m]} \times A^{[q]}$ dans $A^{[m+q]}$, qui conduit à poser l'algèbre extérieure des tenseurs alternés contravariants $\overset{\omega}{\wedge} E$ comme la somme directe $\bigoplus_{p=0}^{\infty} A^{[p]}$, sous-algèbre de $\overset{\omega}{\otimes} E$. Dans ce cas, on peut donc définir le produit extérieur de m vecteurs de E, analogue au produit extérieur de p formes linéaires sur E, puisque l'on peut identifier (par isomorphisme) tout vecteur de E à un élément du dual E*.

Les produits extérieurs permettent de tracer un cadre simple pour les déterminants, en se plaçant dans l'espace $A^{[n]}$ où $n = \dim E$. Cet espace de dimension 1 admet la base $e^1 \wedge e^2 \wedge \ldots \wedge e^n$; la valeur de cette forme pour le n-uplet de vecteurs $(X_1, X_2, \ldots, X_n)$ est le déterminant de ces n vecteurs par rapport à la base $(e_1, e_2, \ldots, e_n)$. Le calcul de déterminants trouve ainsi sa place normale dans le cadre général de l'algèbre multilinéaire qu'est l'algèbre tensorielle.

L'algèbre extérieure trouve aussi une issue particulièrement féconde dans le calcul différentiel sur une variété.

Parmi les nombreuses applications des tenseurs, la théorie de la relativité utilise les notions fondamentales d'analyse tensorielle sur les espaces euclidiens réels et sur les espaces riemanniens.

Pour tout vecteur X d'un espace euclidien réel E muni d'une base (e_i), les composantes contravariantes x^i sont définies par $X = x^i e_i$. La différentiation de cette égalité selon les règles classiques donne :

$$dX = dx^i e_i + x^i de_i.$$

Chaque vecteur de_i peut être répété par ses composantes contravariantes que l'on note $\omega^j{}_i$, c'est-à-dire que :

$$de_i = \omega^j{}_i e_j.$$

Par conséquent, après avoir redistribué les indices, on peut écrire :

$$dX = (dx^i + x^k \omega^i{}_k)\, e_i,$$

ce qui montre que les composantes contravariantes du vecteur dX sont les quantités $dx^i + \omega^i{}_k x^k$ que l'on nomme *différentielles absolues de* x^i pour chaque valeur de i.

Cette démarche peut être répétée, de façon analogue, pour un tenseur euclidien. Un résultat important, *le théorème de Ricci*, a trait au tenseur fondamental g_{ij} : la différentielle absolue du tenseur fondamental est nulle.

L'utilisation des coordonnées curvilignes permet d'autre part de poser la notion de dérivée covariante, et de définir les symboles de Christoffel de première et deuxième espèces dont l'utilisation est très fréquente pour le calcul différentiel classique sur les champs de vecteurs.

BIBLIOGRAPHIE

BOURBAKI M., *Algèbre*, ch. I à III, Hermann, 1971. - CARTAN É., *Leçons sur la géométrie des espaces de Riemann*, Gauthier-Villars, 1946. - DELACHET A., *le Calcul tensoriel*, P. U. F., 1969, coll. « Que sais-je ? ». - GOUYON R., *Calcul tensoriel*, Vuibert, 1963. - LEVI-CIVITA T., *Lezioni di calcolo differenziale assoluto*, 1925. - LICHNEROWICZ A., *Algèbre et analyse linéaires*, Masson, 1947 ; *Éléments de calcul tensoriel*, A. Colin, 1950. - SCHWARTZ L., *les Tenseurs*, Hermann, 1975.

Palais de la Découverte, Paris

▲ *Le mathématicien français* **Henri Poincaré** *(1854-1912).*

COURBES ET SURFACES

L'*Analysis situs*, maintenant nommée topologie, a pris un second essor dès la fin du XIX[e] siècle. La topologie algébrique s'est alors développée, prenant naissance essentiellement dans les travaux du mathématicien français *H. Poincaré* (1854-1912) pour devenir une branche autonome en pleine expansion grâce aux nouvelles techniques algébriques de classification.

La dimension

Une notion très utilisée est celle de *dimension*. Il est courant de dire que la droite est de dimension 1, le plan de dimension 2, l'espace ordinaire de dimension 3 et plus généralement que $\mathbb{R}^n$ est de dimension n. Essayons de trouver une définition générale. La notion de dimension ne peut pas appartenir purement et simplement à la théorie des ensembles puisqu'on peut établir une correspondance univoque et continue, mais non biunivoque entre $\mathbb{R}$ et $\mathbb{R}^n$. La dimension devra donc être définie par l'intermédiaire de considérations de topologie.

Une première approche peut être la suivante : un plan peut être recouvert de rectangles (on pense alors à une paroi recouverte de bandes [*fig.* 1-*a*]). On peut trouver des points appartenant à *trois* rectangles, mais on peut éviter (en recourant à un recouvrement approprié) la présence de points appartenant à quatre rectangles. Une région spatiale peut être recouverte avec des parallélépipèdes : on peut toujours trouver des points communs à *quatre* parallélépipèdes et éviter la présence de points communs à plus de quatre parallélépipèdes (*fig.* 1-*b*). Le nombre critique, écrit en italique *(trois, quatre)*, dépasse donc de 1 celui qu'on appelle naturellement la dimension de l'espace.

Une approche assez naturelle peut être faite à l'aide de l'observation suivante : le contour d'une région tridimensionnelle est bidimensionnel, celui d'une région bidimensionnelle est unidimensionnel : en réalité, les choses ne sont pas toujours ainsi ; la définition d'un contour doit alors être élaborée de façon plus précise, et c'est l'objet de l'*homologie*.

Si E est un espace métrisable, on dit que celui-ci est :

(1) de dimension — 1 s'il est vide ;

(2) de dimension $\leqslant n$ ($n = 0, 1, 2, \ldots$) en un de ses points x lorsque, pour tout voisinage V de x, il existe un voisinage U de x avec $U \subseteq V$, dont le contour est de dimension $\leqslant n - 1$;

(3) de dimension $\leqslant n$ si en tout point sa dimension est $\leqslant n$;

(4) de dimension n en un de ses points x lorsque sa dimension en x est $\leqslant n$, mais non $\leqslant n - 1$;

(5) de dimension n si sa dimension est $\leqslant n$, mais non $\leqslant n - 1$.

Pour $n = 0$, **(2)** indique qu'un espace est de dimension 0 en x si tout voisinage de x en contient un autre dont le contour est vide ; si cela arrive pour tout $x \in E$, la dimension de E est 0. On peut ensuite obtenir les espaces de dimension 1, et ainsi de suite.

Par exemple, un espace qui contient un nombre fini de points est de dimension 0, $\mathbb{R}^n$ est de dimension n, tandis que $\mathbb{Q}^n$ est de dimension 0.

Notons la dimension de E par dim E, on a :

$$\dim (A \cup B) \leqslant \dim A + \dim B + 1 ;$$
$$\dim (A \times B) \leqslant \dim A + \dim B$$

si A et B ne sont pas tous les deux vides.

La notion de dimension permet de définir d'une façon générale celle de courbe. Les courbes planes peuvent être définies comme des ensembles fermés et connexes (un sous-espace topologique E' de E est connexe s'il n'existe pas deux ouverts disjoints de E, U_1 et U_2, tels que $E' \subset U_1 \cup U_2$) ne contenant aucun point intérieur ; mais on ne peut pas définir d'une façon analogue les courbes non planes. Plus généralement, une courbe est un ensemble fermé et connexe à une dimension, cette définition étant topologiquement invariante. On définit l'*ordre* d'un point p d'une courbe comme le plus petit entier n tel qu'il y ait des voisinages de p, de diamètre arbitrairement petit, et dont les frontières contiennent au plus n points de la courbe.

La notion de courbe continue est importante ; on appelle ainsi le *chemin* décrit par un point qui se déplace continûment. On peut donc dire qu'une courbe continue est une image par une application univoque et continue du segment [0, 1]. Le même point peut être l'image de plusieurs points du segment, et dans ce cas, il est point multiple de la courbe, ainsi la *courbe de Peano* (carré considéré comme une courbe de $\mathbb{R}^2$ et image du segment [0, 1]).

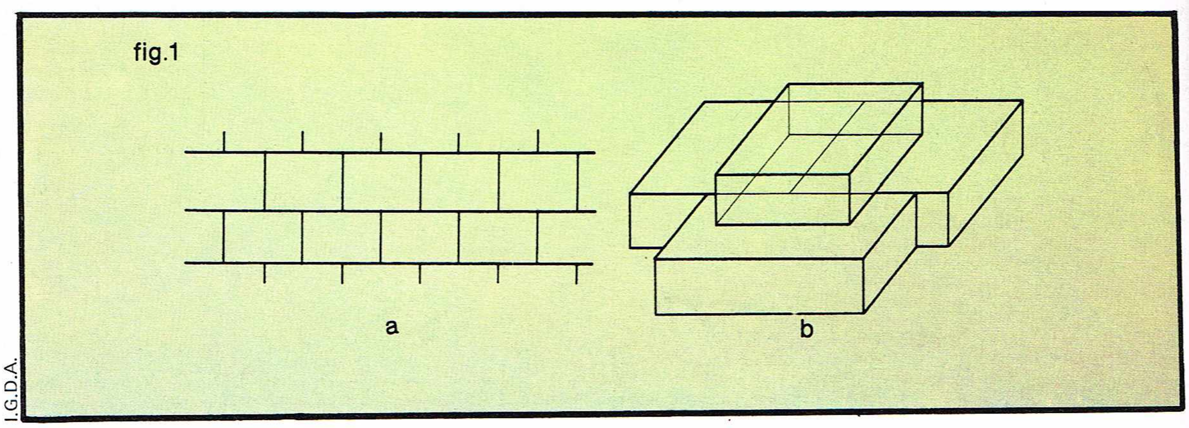

I.G.D.A.

▶ ***Figure 1a-1b** : exemple graphique simplifié d'un procédé intuitif pour parvenir à la définition topologique de la notion de dimension.*

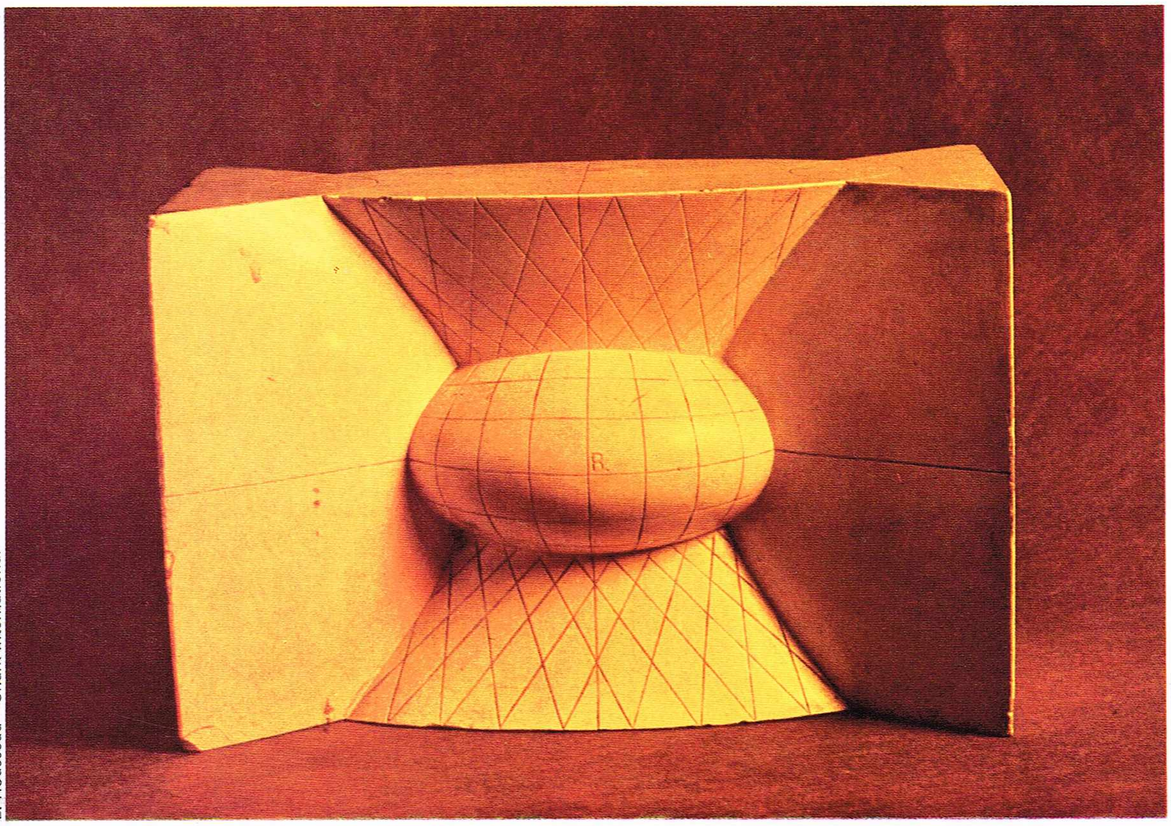

E. Rousseau - Snark International

◀ *Toute surface peut être triangulée, c'est-à-dire qu'on peut la diviser en un nombre fini ou infini dénombrable de triangles. Ici, une surface courbe.*

▼ *Ci-dessous, figure 2 :* triangulation *d'une sphère (1) ; d'un cylindre (2) ; d'un ruban de Möbius (3) ; d'un tore (4). En bas, figure 3 : exécutant les identifications indiquées, on obtient la* bouteille de Klein *(à gauche) et le* plan projectif *(à droite).*

Triangulation d'une surface

Les faces d'un polyèdre de $\mathbb{R}^3$ sont des polygones, et on peut diviser un polygone en des triangles (voir *Géométrie*). La surface d'un polyèdre peut ainsi être considérée comme un système de triangles qui vérifie les conditions :

(1) un point intérieur à un triangle n'appartient à aucun autre triangle ;
(2) chaque côté appartient à deux triangles qui ne possèdent comme points communs que ceux qui appartiennent à ce côté (triangles adjacents) ;
(3) les triangles qui ont un sommet commun définissent un cycle, deux triangles consécutifs étant adjacents ;
(4) entre deux triangles quelconques, on peut insérer une chaîne de triangles, deux triangles consécutifs étant adjacents.

Toute image topologique d'un triangle ordinaire est appelée *triangle* (gauche). Toute surface peut être triangulée, c'est-à-dire qu'on peut la diviser en un nombre fini (si la surface est compacte) ou infini dénombrable de triangles satisfaisant aux conditions qui viennent d'être énoncées. Pour une même surface, il existe plusieurs triangulations vérifiant les quatre conditions mentionnées.

On dit que deux surfaces sont équivalentes si on peut passer de l'une à l'autre par une déformation continue. On peut ainsi classer les surfaces, les surfaces compactes étant les plus faciles à classer. Tout d'abord, on distingue les surfaces orientables et les surfaces non orientables. Toute surface possède une décomposition en triangles (pour les hypersurfaces, il s'agira de simplexes) ; sur chaque triangle, on peut définir un sens de parcours (il en existe deux différents). Si, pour la surface S, chaque triangle de sa décomposition peut être orienté de telle façon que l'ensemble des orientations soit *cohérent*, on dit alors que la surface est orientable (*fig.* 2 et 3).

Deux surfaces compactes sont équivalentes si et seulement si elles ont même type d'orientabilité et même caractéristique d'Euler-Poincaré. La caractéristique d'une surface est un nombre entier qu'on calcule après avoir réalisé sa triangulation (on peut toujours décomposer une surface compacte en un nombre fini de polygones) : si S est le nombre de sommets, A le nombre d'arêtes, F le nombre de faces, on démontre que $S - A + F$ est indépendant de la triangulation ; ainsi dans l'espace à trois dimensions, on a :

fig. 2

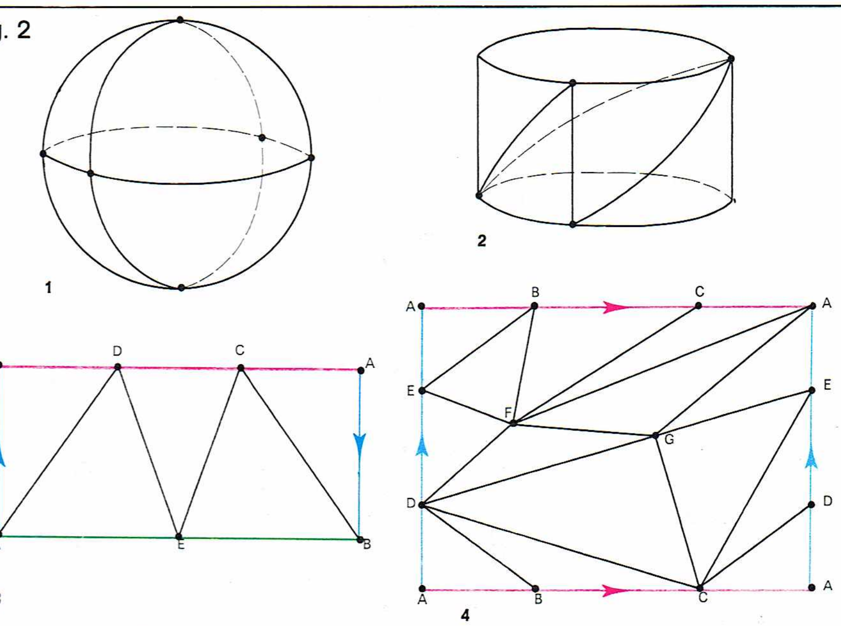

I.G.D.A.

fig 3

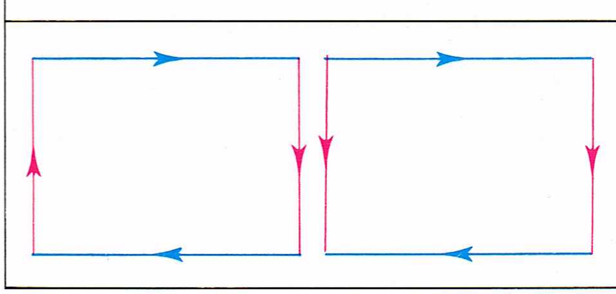

I.G.D.A.

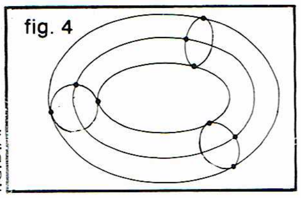

▲ *Figure 4 : pour le tore, la* caractéristique S — A + F *est zéro ; dans cette représentation « polyédrique », on a en fait :* S = *9,* A = *18,* F = *9.*

$$S - A + F = 2$$

pour tout polyèdre convexe ; ce nombre est appelé *caractéristique d'Euler-Poincaré* de la surface.

La caractéristique d'une surface orientable s'écrit : $n = 2 - 2\gamma$, avec γ entier positif ou nul, et on appelle γ le *genre* de la surface ; pour une surface non orientable, on a : $n = 2 - \gamma$, avec γ entier supérieur ou égal à 1 (*fig.* 4).

Classer les surfaces consiste à énumérer les différentes classes de surfaces équivalentes. Le genre d'une surface compacte est un outil essentiel et direct pour la classification : ainsi, on montre que pour toute surface compacte orientable de genre γ, il y a équivalence avec un tore à γ poignées (*fig.* 5) [un tore à une poignée étant une surface obtenue en faisant tourner un cercle autour d'une droite de son plan qui ne la coupe pas].

Variété topologique et différentiable

La topologie nous permet de préciser proprement les concepts de *courbe, surface*...

En géométrie euclidienne et en géométrie analytique, on rencontre des types particuliers de courbes et de surfaces (par exemple, les coniques et les quadriques). Nous verrons quelles sont les difficultés qui se présentent lorsqu'on cherche à passer à une définition générale. La droite s'identifie (en géométrie analytique) avec l'ensemble $\mathbb{R}$. On dit qu'une courbe est un ensemble équipotent à $\mathbb{R}$, mais ce concept est trop général puisque le plan est aussi équipotent à $\mathbb{R}$. En entendant par courbe un espace homéomorphe à $\mathbb{R}$, on exclut par exemple la circonférence, et maintenant notre notion est trop restreinte. Une courbe est plutôt un espace *localement* homéomorphe à $\mathbb{R}$, c'est-à-dire homéomorphe morceau par morceau (chaque point possède un voisinage homéomorphe à un intervalle), et une surface est un espace localement homéomorphe à $\mathbb{R}^2$.

Tout ceci amène à la définition de *variété topologique*. Une variété topologique V_n est un espace qu'on peut recouvrir d'ouverts, chacun d'eux étant homéomorphe à une boule ouverte de $\mathbb{R}^n$: la variété qui en résulte est de dimension n. Tout homéomorphisme d'un ouvert V_n sur une boule ouverte de $\mathbb{R}^n$ est appelé une *carte* de V_n. Si $x \in V_n$: il peut arriver que x appartienne au domaine de deux cartes φ et Ψ (*fig.* 6). Alors, en lui associant les points du type $\varphi(x)$, $\Psi(x)$, on obtient un homéomorphisme d'un ouvert de $\mathbb{R}^n$ sur un autre : celui-ci s'appelle *changement de carte*. Si $\varphi(x)$ ainsi que $\Psi(x)$ sont des n-uplets de nombres réels : $\varphi(x) = (x_1, x_2, ..., x_n)$ et $\Psi(x) = (y_1, y_2, ..., y_n)$, alors le changement de carte se représente par les équations :

$$y_i = f_i(x_k)$$

les fonctions f_i étant continues et inversibles.

On dit que V_n est une variété différentiable de *classe* C^r (ou une r-variété) si elle est une variété topologique dotée d'une carte telle que tout changement de carte se passe par des fonctions f_i de classe C^r, c'est-à-dire continues et admettant des dérivées (par rapport aux x_k) continues au moins jusqu'à l'ordre r. On remarquera que les variétés de classe C^s, pour $s > r$, sont des cas particuliers de celles qui sont de classe C^r. S'il existe des dérivées continues de tous ordres, on parle de classe C^∞, et si les f_i sont des fonctions développables en séries entières au voisinage de chaque point, on parle de *variétés analytiques* ou de classe C^ω.

On dit aussi que les cartes φ, Ψ... définissent un *atlas* de classe C^r, de $\mathbb{R}^n$ sur V_n ; l'ensemble des points de tous les atlas de classe C^r, pour lesquels les changements réciproques de carte sont de classe C^r, définissent sur V_n une *structure de variété différentiable*.

Par exemple, une surface sphérique est une variété analytique représentable avec non moins de deux cartes (*fig.* 7) ; un plan projectif est une variété analytique représentable avec non moins de trois cartes ; un tore est aussi une variété analytique, etc.

Simplexes

Pour généraliser les notions et les résultats de triangulation, de surface orientée, etc., à des courbes et des surfaces, non plus dans des espaces de dimension trois, mais dans des espaces de dimension quelconque, on a recours à des outils plus abstraits. Les simplexes et la topologie algébrique (homologie, homotopie) sont à la base de cette extension.

Une branche assez importante de la topologie est la *topologie algébrique*, dans laquelle on applique de façon intensive les notions et les techniques de l'algèbre abstraite. Par exemple, la formule d'Euler s'obtient en faisant appel à la topologie algébrique. Plus généralement, pour un polyèdre dont la surface n'est pas homéomorphe à celle d'une sphère, le nombre S — A + F varie : par exemple, il prend la valeur zéro pour le tore (*fig.* 5). L'idée globale est d'exprimer des propriétés topologiques par l'intermédiaire de caractères algébriques (la théorie des groupes y intervient de façon fondamentale) et numériques.

On se place dans un espace euclidien de dimension n, E. Soit $x_0, x_1, ..., x_p$, $p + 1$ points linéairement indépendants dans E. Alors, l'ensemble S des points $(y^1, y^2, ..., y^n)$ de E vérifie :

▶ *Figure 5 : a, tore à une poignée :* $\gamma = 1$, $n = 0$; F = 2, S = 2, A = 4. *b, tore à deux poignées :* $\gamma = 2$; $n = -2$. *c, sphère (tore sans poignées) :* $\gamma = 0$, $n = 2$.

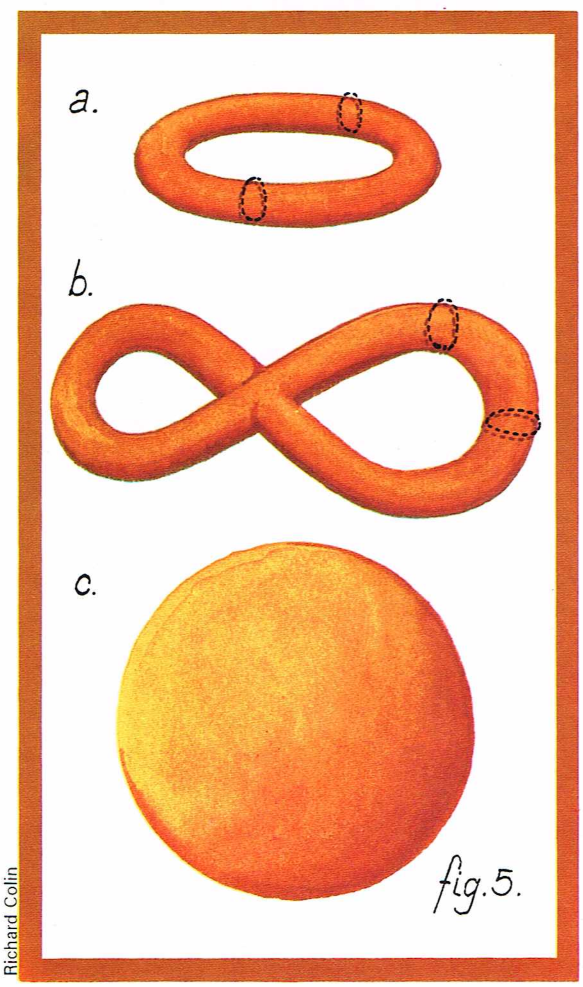

▶ *Ci-contre, à droite, figure 6 : tout homéomorphisme d'un ouvert d'une variété topologique* V_n *sur une boule ouverte de* $\mathbb{R}^n$ *est appelé une carte de* V_n.

▼ *Figure 7 : les deux cartes d'une sphère.*

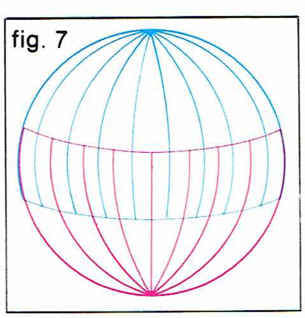

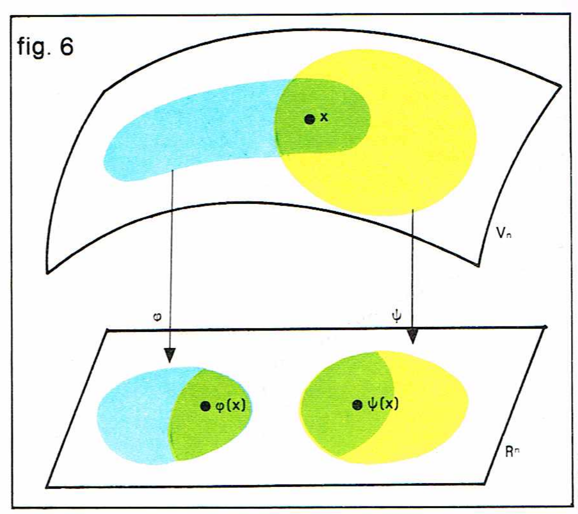

$$y^i = \sum_{k=0}^{k=p} \lambda_k x^i{}_k \qquad (\text{pour } 1 \leqslant i \leqslant n)$$

$$\lambda_k \leqslant 0 \qquad \text{et} \qquad \sum_{k=0}^{k=p} \lambda_k = 1$$

s'appelle le *p-simplexe euclidien de sommets* $x_0, x_1, ..., x_p$, noté $(x_0, x_1, ..., x_p)$.

Par exemple, si $p = 2$, soit z le point qui divise le segment x_1x_2 dans le rapport $\frac{\lambda_2}{\lambda_1}$, alors le point qui divise le segment $x_0 z$ dans le rapport $\frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\lambda_0}$ est bien un point du 2-simplexe, qui est donc formé par les points du triangle $x_0x_1x_2$.

On peut raisonner de manière analogue pour montrer que le 3-simplexe de sommets x_0, x_1, x_2, x_3 est le « tétraèdre » défini par ces points (ce qui nous permet de deviner intuitivement que le 1-simplexe de sommets x_0 et x_1 n'est autre que le segment d'extrémités x_0 et x_1).

A chaque valeur du $(p + 1)$-uplet $(\lambda_0, \lambda_1, ..., \lambda_p)$ de nombres positifs tels que $\sum_{k=0}^{k=p} \lambda_k = 1$, correspond un point du simplexe. La correspondance ainsi définie est bijective, en raison de l'indépendance linéaire des x_j. C'est pourquoi l'on peut dire que les scalaires $\lambda_0, \lambda_1, ..., \lambda_p$ s'appellent les *coordonnées barycentriques* du point $(y^1, y^2, ..., y^n)$ correspondant dans le simplexe.

Pour caractériser, dans le 3-simplexe euclidien, ses faces — au sens usuel — on peut voir que chacune d'entre elles n'est autre que le 2-simplexe défini par les 3 sommets de cette face. Ceci amène à définir, d'une manière plus générale, une *face m-dimensionnelle*, qui est le m-simplexe de m sommets choisis parmi les p du simplexe de départ. On utilise le terme de face — sans préciser plus — lorsque $m = p - 1$; les faces d'un 1-simplexe de sommets x_0 et x_1 sont donc les deux sommets, par exemple. Il y a donc $(p + 1)$ faces pour un p-simplexe euclidien. Ainsi, si dans la définition du p-simplexe, on prend successivement :

$$\lambda_0 = 0, \quad \lambda_1 = 0 ..., \lambda_p = 0,$$

alors les points obtenus décrivent chacune des $(p + 1)$ faces du p-simplexe.

On citera deux propriétés essentielles des simplexes euclidiens.

Propriété 1 : tous les points d'un segment joignant deux points d'un simplexe sont dans le simplexe; autrement dit, tout simplexe euclidien est convexe.

Propriété 2 : le p-simplexe S de sommets $x_0, x_1, ..., x_p$ est exactement formé de l'ensemble des points des segments qui joignent chaque sommet x_k à la face opposée (c'est-à-dire la face obtenue en prenant $\lambda_k = 0$).

Parmi les simplexes *simples*, on peut citer surtout le *p-simplexe euclidien standard* Δ_p (de l'espace à $p + 1$ dimensions), où les sommets sont formés des suites de nombres (0, 0, ..., 0, 1, 0, ..., 0) où seule une coordonnée est non nulle et égale à 1. Dans cet exemple (que l'on peut rapprocher de la base « canonique » de $\mathbb{R}^p$), la recherche des coordonnées barycentriques d'un point du simplexe est très aisée; on a en fait : $\lambda_k = y^{k+1}$, où y^{k+1} est la $(k + 1)$-ième composante du point y de Δ_p.

Supposons maintenant donné S, un p-simplexe euclidien $(x_0, x_1, ..., x_p)$. Il existe une application linéaire et une seule de Δ_p sur S telle que l'image du i-ième sommet (0, 0, ..., 1, ..., 0), où le terme non nul est à la i-ième place de Δ_p, soit x_{i-1}. Cette application est de plus continue; on la nomme *p-simplexe singulier associé à S*, et on la note $(x_0, x_1, ..., x_p)$. Plus généralement, on appelle p-simplexe singulier une application continue de Δ_p dans E (espace euclidien de dimension $p + 1$). C'est à l'aide de ces applications que l'on construit maintenant ce qui correspond à notre idée intuitive de courbe limitant une surface (ou encore de surface limitant un solide), c'est-à-dire le bord d'un simplexe.

Dans un p-simplexe, on a pu définir $(p + 1)$ faces, qui sont chacune un $(p - 1)$ simplexe. On pourrait de même penser à « remonter » un simplexe par ses faces; pour cela, et compte tenu de la nécessité de disposer d'une structure (loi interne, par exemple additive) algébrique, on définit une *p-chaîne* ou chaîne p-dimensionnelle de E comme une combinaison linéaire à coefficients entiers de p-simplexes singuliers de E, soit une expression de la forme $\sum_i n_i s_i$, où seul un nombre fini de n_i sont non nuls. On choisit $n_i \in \mathbb{Z}$, de telle façon que les p-simplexes singuliers de E engendrent ainsi un groupe abélien additif C_p (E), dit *groupe* des p-chaînes de E.

Le bord d'un simplexe est alors défini par une opération qui, composée avec elle-même, est identiquement nulle. Ceci est naturel; en effet, le bord d'un triangle (son périmètre), le bord d'un segment (ses extrémités) ont leurs bords respectifs réduits à zéro. L'extrapolation au p-simplexe est donc pleinement justifiée. D'autre part, pour la même raison qui nous a fait définir une p-chaîne de E à partir de p-simplexes singuliers, c'est sur des p-simplexes singuliers que l'on définira l'opération passage au bord. Soit donc $(x_0, x_1, ..., x_p)$ un p-simplexe singulier, on désigne par f_{xk} le $(p - 1)$-simplexe singulier associé à la face opposée au sommet x_k. Alors l'opérateur *bord* d est défini par :

$$d\,(x_0, x_1, ..., x_p) = \sum_{k=0}^{k=p} (-1)^k f_{xk}$$

On en déduit alors que l'on a bien $d^2\,(x_0, x_1, ..., x_p) = 0$.

D'autre part, on définit le bord d'une p-chaîne $\sum_i n_i s_i$ par $\sum_i n_i ds_i$ et, en particulier si C est une 0-chaîne de E, on pose $dC = 0$.

Ceci amène à envisager toutes les p-chaînes dont le bord est nul, afin de retrouver parmi elles celles qui sont des bords. On appelle *p-cycle* dans un espace E une p-chaîne C telle que $dC = 0$.

On complète cet ensemble de définition en appelant *p-bord* de E toute p-chaîne B de E telle qu'il existe une $(p + 1)$-chaîne C de E vérifiant $B = dC$.

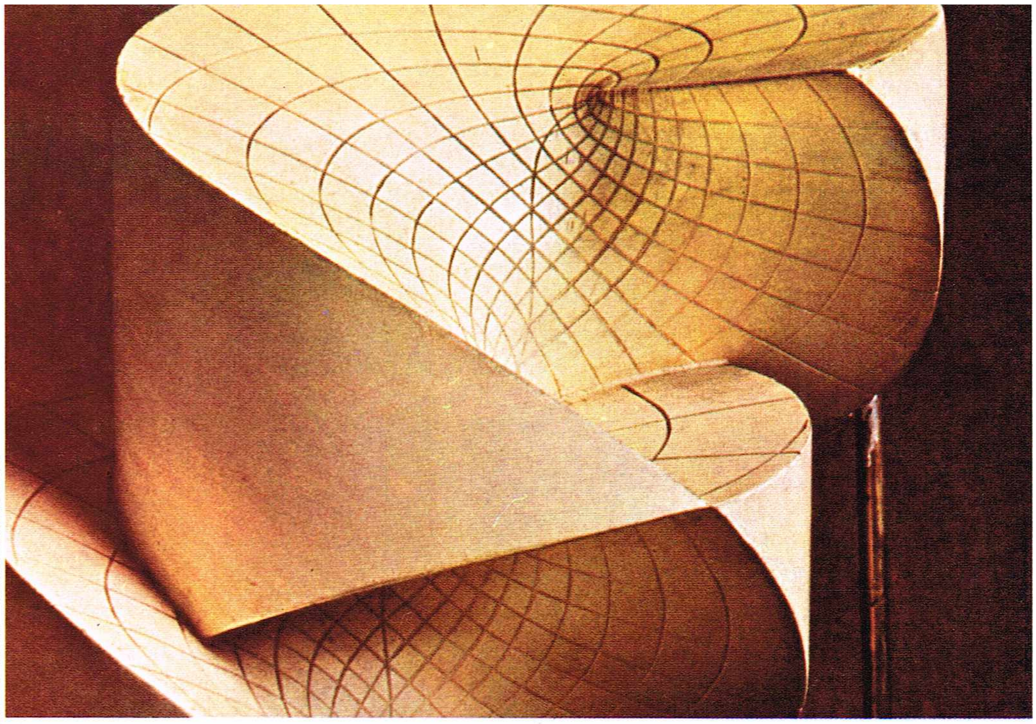

E. Rousseau - Snark International

▲ ***Une surface* de Riemann *: les travaux du mathématicien allemand sur les relations entre la théorie des fonctions et la théorie des surfaces sont considérés comme les premières bases de la topologie.***

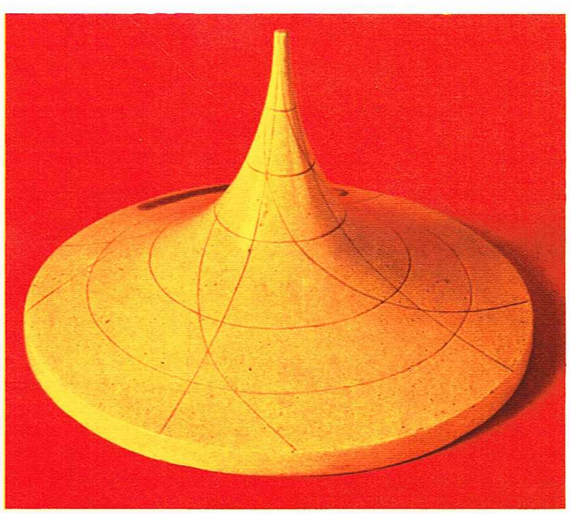

E. Rousseau - Snark International

◀ ***Une surface courbe.***

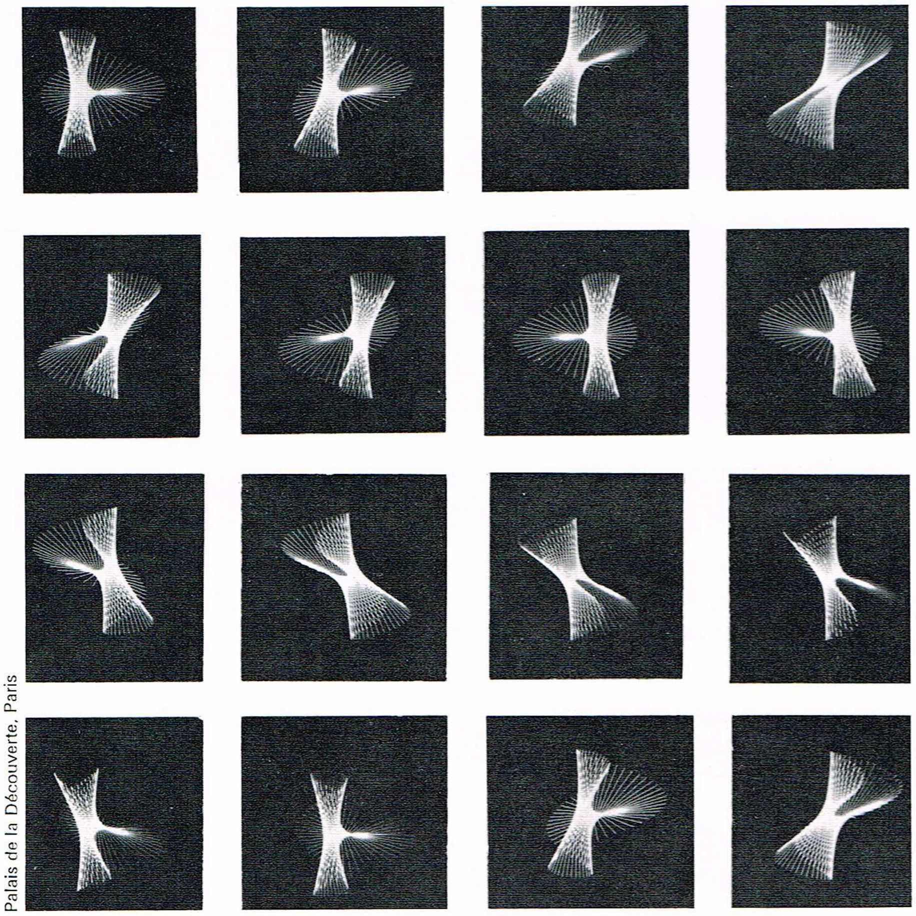

Palais de la Découverte, Paris

▲ *Rotation d'une* **surface réglée de Möbius.**

Notions d'homologie

Les p-cycles de E forment un sous-groupe de C_p (E), que l'on notera Z_p (E), les p-bords de E forment un sous-groupe de C_p (E), que l'on notera B_p (E). L'opérateur bord, soit d, définit un homomorphisme de C_p (E) dans C_{p-1} (E) pour lequel Z_p (E) et B_p (E) sont respectivement le noyau et l'image. Puisque la relation $d^2 = 0$ est vérifiée pour toute chaîne, il s'ensuit que

$$B_p\ (E) \subset Z_p\ (E)\ ;$$

plus exactement, B_p (E) est un sous-groupe de Z_p (E).

L'idée générale de l'homologie est alors d'effectuer une classification parmi les cycles de E. Non pas pour énumérer ceux d'entre eux qui sont des bords, mais en vue de leur distinction ultérieure.

Soit deux p-cycles A et B de E. S'il existe une $(p+1)$-chaîne C de E telle que $A - B = dC$, on dit alors que A et B sont *homologues* dans Z_p (E), ce qu'on écrit $A \sim B$, car il s'agit bien d'une relation d'équivalence entre p-cycles. Les classes d'équivalences pour cette relation dans Z_p (E) sont appelées *classes d'homologie de dimension p sur* E. C'est évidemment de ces classes d'homologie que l'on peut arriver à faire une liste simple. Mais la relation d'homologie n'est autre que : $A \sim B \Leftrightarrow A - B \in B_p$ (E). Les classes d'homologie qui nous intéressent ne sont donc autres que les éléments du groupe quotient $Z_p(E)/B_p(E)$ que l'on appelle p-*ième groupe d'homologie* de E, ou encore *groupe d'homologie* p-*dimensionnel*, et qu'on désigne par H_p (E).

L'étude de la structure de ces groupes, de leurs générateurs et des liens entre ceux-ci permettra de déterminer les bords dans E.

On dit que les p-cycles $C_1, C_2, \ldots, C_m$ sont linéairement indépendants dans E si la seule combinaison linéaire $a_1C_1 + a_2C_2 + \ldots a_mC_m$ à coefficients entiers, homologue à zéro [donc bord d'un $(p+1)$ cycle], est celle pour laquelle $a_1 = a_2 = \ldots = a_m = 0$. C'est le plus grand nombre de p-cycles linéairement indépendants d'une variété V que l'on appelle le *nombre de connexions*, ou *nombre de Betti*, de dimension p de V.

Un cas particulier est celui d'un p-cycle C non homologue à zéro, mais pour lequel il existe un nombre $k \in \mathbb{N}$ tel que $kC \sim 0$; alors le plus petit entier k qui réalise cette condition est appelé le *coefficient de torsion* de dimension p de V.

Le p-ième groupe d'homologie d'une variété V est somme finie de groupes cycliques, et le nombre de connexions de dimension p n'est autre que le nombre des groupes cycliques infinis intervenant dans H_p (V) ; tandis que les ordres des groupes finis sont des multiples du coefficient de torsion de dimension p de V. Les *relations de dualité de Poincaré* montrent l'égalité, pour une variété compacte et orientable de dimension p, des nombres de connexions de dimensions n et $p - n$, ce pour toutes les valeurs de n entières comprises entre 0 et p ; ainsi que l'égalité des coefficients de torsion de dimensions n et $p - n - 1$ pour les mêmes valeurs de n.

Les nombres de connexions possèdent la propriété fondamentale d'être invariants pour tout homéomorphisme de V.

Le *théorème de dualité d'Alexander* pour les sommes finies de simplexes globalise un certain nombre de résultats tels que le théorème de Jordan sur la découpe en 2 parties du plan euclidien par une ligne simple fermée, ou le *théorème de Brouwer* (qui généralise le résultat précédent à une variété compacte de dimension $p - 1$ dans un espace de dimension p), ou encore le théorème de l'invariance de la dimension topologique.

Si K désigne un nombre fini ou une infinité dénombrable de simplexes tels que deux simplexes quelconques aient soit un côté commun, soit une intersection vide, et que tout point de K appartienne à un nombre fini de simplexes (alors on dit que K est un complexe, de dimension n si tous les simplexes ont une dimension au plus égale à n), alors le nombre de connexions de dimension r de k est égal au nombre de connexions de dimension $n - r - 1$ de l'ensemble $\complement K$.

La généralisation des notions précédentes permet de décrire des cas tels que celui d'une pomme rongée par deux vers, où les canaux tracés ne se rencontrent pas et ne forment donc jamais une *coupure* du fruit, mais néanmoins délimitent une *bordure* des chemins suivis (*fig.* 8). Soit donc E un espace et F un sous-espace. Un *p-cycle relatif de E modulo F* est une p-chaîne C de E telle que dC soit une $(p-1)$ chaîne de F. De manière analogue, un p-bord relatif de E modulo F est une p-chaîne B de E, telle qu'il existe une p-chaîne s de F et une $(p+1)$ chaîne t de E vérifiant $dt = s + B$.

Les p-cycles relatifs de E modulo F forment un sous-groupe de C_p (E) qu'on note Z_p (E, F) ; les p-bords relatifs de E modulo F forment un sous-groupe de C_p (E), noté B_p (E, F), et on voit que B_p (E, F) est un sous-groupe de Z_p (E, F), ce qui permet de définir le p-ième groupe d'homologie relatif de E, modulo F, soit

$$H_p\ (E, F) = Z_p\ (E, F) / B_p\ (E, F).$$

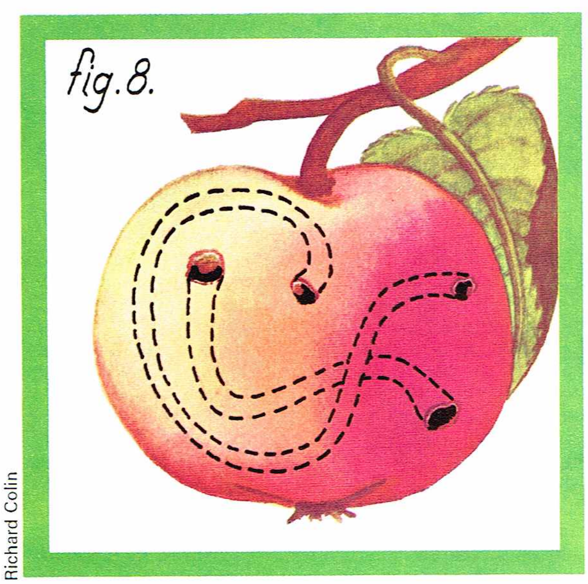

Richard Colin

▶ *Figure 8 :* ***généralisation*** **des notions d'homologie** ***(voir développement dans le texte ci-contre).***

Ce groupe contient comme éléments les classes de p-cycles relatifs de E modulo F, pour la relation d'équivalence définie par : deux éléments de Z_p (E, F) sont équivalents si leur différence est un élément de B_p (E, F).

Le calcul des groupes d'homologie et d'homologie relative permet ainsi une connaissance plus précise des propriétés topologiques de toutes les surfaces n-dimensionnelles. Un outil très précieux dans les calculs de certains groupes d'homologie est le *théorème d'excision* qui montre que l'homomorphisme :

$$H_p\,(E - U,\, F - U) \rightarrow H_p\,(E,\, F)$$

induit par l'application inclusion est un isomorphisme dès que U est un sous-ensemble de F tel que $\bar{U} \subset \mathring{F}$ — avec F sous-espace de E — et ce pour toutes les valeurs de p. Autrement dit, il est possible de supprimer *(d'exciser)* certains sous-ensembles dans F, sans pour autant que l'homologie relative (et là réside un grand intérêt de cette généralisation) de E modulo F soit transformée.

Notions d'homotopie

Un aspect très intéressant de la topologie algébrique est la théorie de l'homotopie des arcs.

Soit I l'intervalle formé $[0, 1]$ de $\mathbb{R}$, muni de la topologie induite par celle de $\mathbb{R}$. Un *arc* α d'un espace topologique E est une application continue de I dans E, c'est-à-dire une fonction continue $\alpha\,(t)$ $(0 \leqslant t \leqslant 1)$ dont les valeurs sont des points de E. Ordinairement, pour tout arc α on a une courbe image, lieu des points de E qui sont images par α d'un point de I ; mais l'arc ne se réduit pas à un tel lieu, il est plutôt une de ses représentations paramétriques. Ainsi, dans $\mathbb{R}^2$, les arcs : $x_k = kt^2$ et $x_k = kt$ ont la même courbe image — le segment d'extrémités (0, 0) et (1, 2) — mais sont différents. En général, si f est un homéomorphisme de I dans lui-même, l'application composée de f et α, soit $\alpha \circ f$, a la même courbe image que l'arc α. Puisque l'on n'a pas demandé que α soit injective, un point de E peut être image de plusieurs points de I. Dans cet ordre d'idée, Peano a construit un arc de $\mathbb{R}^2$ dont la courbe image est un carré. Les points $\alpha\,(0)$ et $\alpha\,(1)$ sont appelés les *extrémités* de l'arc α ; lorsque $\alpha\,(0) = \alpha\,(1)$, on dit que l'on a un *lacet*, et si $\alpha\,(t)$ est constant, on parle d'arc nul.

Dans l'ensemble des arcs de E, on introduit une opération non définie partout : le *produit homotopique*. Étant donné deux arcs de E, α et β, leur produit $\alpha\beta$ (dans cet ordre) est défini si $\alpha\,(1) = \beta\,(0)$ et est donné par :

$$\alpha\beta\,(t) = \begin{cases} \alpha\,(2\,t) \text{ pour } 0 \leqslant t \leqslant \dfrac{1}{2} \\ \beta\,(2\,t - 1) \text{ pour } \dfrac{1}{2} < t \leqslant 1 \end{cases}$$

Une telle application est continue, et manifestement on a :

$$\alpha\beta\,(0) = \alpha\,(0) \qquad \text{et} \qquad \alpha\beta\,(1) = \beta\,(1)$$

Intuitivement, on peut interpréter t comme une variable intermédiaire ; alors α et β sont les lois horaires de deux mouvements dans E, qui se développent dans l'unité de temps I ; $\alpha\beta$ est alors une nouvelle loi horaire qui se réalise en effectuant dans la première moitié de I le mouvement α à vitesse double, et dans la seconde moitié, le mouvement β également à double vitesse. Le produit homotopique définit dans l'ensemble des arcs de E une structure algébrique.

Convenons maintenant de définir dans un tel ensemble une relation d'équivalence, *l'homotopie*. On dira que deux arcs α et γ de E sont homotopes (*fig.* 9) s'il existe une application continue H de I^2 dans E telle que :

$$H_1) \quad \begin{cases} H\,(t, 0) = \alpha\,(t) \\ H\,(t, 1) = \gamma\,(t) \end{cases}$$

Il est ensuite utile de considérer une relation plus forte, dite d'*homotopie relative* ($\sim$), qu'on a lorsque α, γ, H satisfont en plus de $\mathbf{H_1}$ à :

$$H_2) \quad \begin{cases} \alpha\,(0) = \gamma\,(0) = H\,(0, u) \\ \alpha\,(1) = \gamma\,(1) = H\,(1, u) \end{cases} \qquad (\textit{fig. } 10)$$

D'un point de vue intuitif, on peut dire que α et β sont homotopes lorsque l'on peut transformer par continuité l'un en l'autre ; en posant $u = u_0$, H (t, u_0) est alors un des arcs qui réalise un tel passage.

Inversement, si l'on pose $t = t_0$, H (t_0, u) est l'arc *décrit* par un point dans la transformation. Dans l'homotopie relative, on désire que tous les arcs H (t, u_0) — et de là en particulier α et γ — aient les mêmes extrémités.

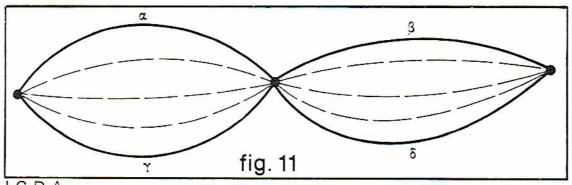

fig. 11

I.G.D.A.

◀ *Figure 11 : le produit homotopique est compatible avec l'homotopie relative.*

Il est facile de vérifier que les deux relations sont des relations d'équivalence. En outre, le produit homotopique est compatible avec l'homotopie relative, c'est-à-dire que si $\alpha \sim \gamma$ et $\beta \sim \delta$ et si $\alpha\beta$ existe, alors $\gamma\delta$ est aussi défini et $\alpha\beta \sim \gamma\delta$ (*fig.* 11).

On appelle *classes d'homotopie* d'un point x de E les classes d'équivalence de l'homotopie relative dans l'ensemble des lacets ayant leurs extrémités en x. Désignons par $\mathcal{C}_\alpha$ la classe à laquelle appartient le lacet α ; on peut alors définir une opération interne dans l'ensemble $\mathcal{C}$ des classes $\mathcal{C}_\alpha$ comme suit :

$$\mathcal{C}_\alpha\,\mathcal{C}_\beta = \mathcal{C}_{\alpha\beta}$$

(en fait, si $\gamma \in \mathcal{C}_\alpha$ et $\delta \in \mathcal{C}_\beta$, alors $\mathcal{C}_{\gamma\delta} = \mathcal{C}_{\alpha\beta}$, et par conséquent il en résulte des opérations qui dépendent seulement des classes $\mathcal{C}_\alpha$, $\mathcal{C}_\beta$ et non des arcs α, β). Cette opération est toujours définie et fait de $\mathcal{C}$ un groupe que l'on appelle *groupe d'homotopie de x*.

On dira que E est *connexe par arcs* si, pour tout couple (x, y) de points de E, il existe toujours un arc de E d'extrémités x et y. Si E est connexe par arcs, les groupes d'homotopie de ses points sont isomorphes à un même groupe que l'on appelle *groupe fondamental*, ou premier groupe d'homotopie, ou *groupe de Poincaré* de E, et que l'on note π (E). Deux espaces homéomorphes ont le même groupe fondamental.

Le plan $\mathbb{R}^2$, l'espace $\mathbb{R}^3$, une surface sphérique, bien que n'étant pas homéomorphes, ont le même groupe d'homotopie : en fait, deux arcs avec les mêmes extrémités sont relativement homotopes, et de là, à tout point on peut associer une seule classe d'homotopie ; alors π (E) se réduit à un groupe à un élément : l'élément neutre.

Dans la couronne circulaire, on a inversement des lacets non homotopes au lacet nul (*fig.* 12-1), et le groupe d'homotopie est isomorphe au groupe additif des entiers relatifs ($\mathbb{Z}^+$). Sur le tore (*fig.* 12-2) on a deux types de lacets non homotopes au lacet nul et non réductibles l'un à l'autre ; c'est pourquoi, dans ce cas, π (E) est isomorphe au groupe additif des nombres complexes $x + iy$ tels que x et y soient entiers.

fig. 9

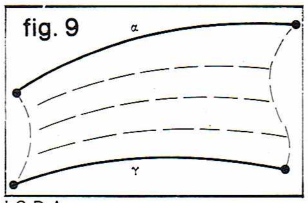

I.G.D.A.

fig. 10

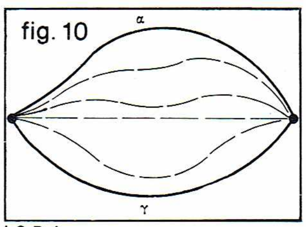

I.G.D.A.

▲ *En haut, figure 9 : l'homotopie de deux arcs. Ci-dessus, figure 10 : l'homotopie relative.*

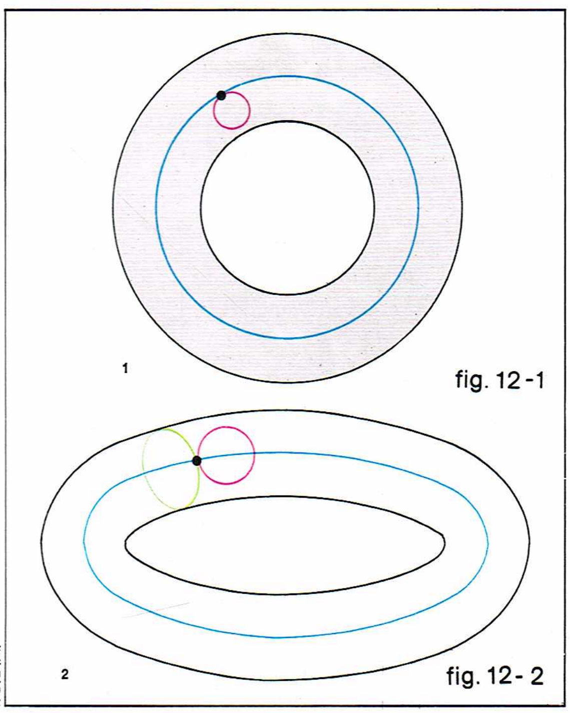

fig. 12-1

fig. 12-2

I.G.D.A.

◀ *Figure 12 : lacets homotopes au lacet nul (en rouge) et non homotopes au lacet nul (en bleu et en vert) illustrés par l'exemple d'une couronne circulaire (1) et par celui d'un tore (2).*

La notion d'homotopie s'étend aux applications continues d'un espace donné X dans un espace donné E : l'homotopie entre les applications f et g est réalisée par une application continue H de X $\times$ I dans E avec

$$\begin{cases} H(x, 0) = f(x) \\ H(x, 1) = g(x) \qquad \text{pour tout } x \in X \end{cases}$$

En particulier, appelons S_n la sphère n-dimensionnelle, lieu des points de $\mathbb{R}^{n+1}$ tels que $\sum_{i=1}^{i=n+1} x_i^2 = 1$; on peut étendre les considérations précédentes et obtenir un nouveau groupe π_n (E).

La théorie des applications homotopes étend considérablement la notion de continuité. Certains résultats combinent homotopie et groupes d'homologie ; le principal d'entre eux est :

soit X et E deux espaces topologiques, Y et F respectivement deux sous-espaces. Soit f et g deux applications de X dans E, telles que Y soit appliqué dans F, et homotopes. Si l'on désigne par f_* et g_* les morphismes de H_p (X, Y) dans H_p (E, F) induits par f et g, alors $f_* = g_*$, et ce pour toute valeur de p.

En conséquence, si $f : X \to E$ et $g : E \to X$ continues sont telles que $f(Y) \subset F$ et $g(F) \subset Y$ et si $f \circ g$ est homotope à l'identité de E et $g \circ f$ homotope à l'identité de X, alors le morphisme f_* induit par f,

$$f_* : H_p(X, Y) \to H_p(E, F)$$

est un isomorphisme pour tout $p \in \mathbb{N}$.

Il résulte encore de là que si E et F sont des espaces topologiques, $f : E \to F$ et $g : F \to E$ des applications continues, alors, si $f \circ g$ et $g \circ f$ sont homotopes aux applications identités de F et de E respectivement, alors :

$$f_* : H_p(E) \to H_p(F)$$

induit par f est un isomorphisme, pour toute valeur de p.

L'homotopie et l'homologie permettent ainsi de distinguer, du point de vue topologique, des espaces que l'on pourrait croire homéomorphes alors qu'ils ne le sont pas.

BIBLIOGRAPHIE

BOURBAKI N., *Topologie générale*, ch. I à IV, Hermann. - GODBILLON C., *Éléments de topologie algébrique*, Hermann. - GODEMENT R., *Topologie algébrique et Théorie des faisceaux*, Hermann. - LELONG-FERRAND J., *Géométrie différentielle*, Masson. - LICHNEROWICZ A., *Théorie globale des connexions et des groupes d'holonomie*, Cremonese, Rome. - SPANIER E. H., *Algebric Topology*, Mac Graw Hill. - WALLACE A. H., *Introduction à la topologie algébrique*, Gauthier-Villars. - ZISMAN M., *Topologie algébrique élémentaire*, Armand Colin.

▼ ***Le ruban de Möbius.***

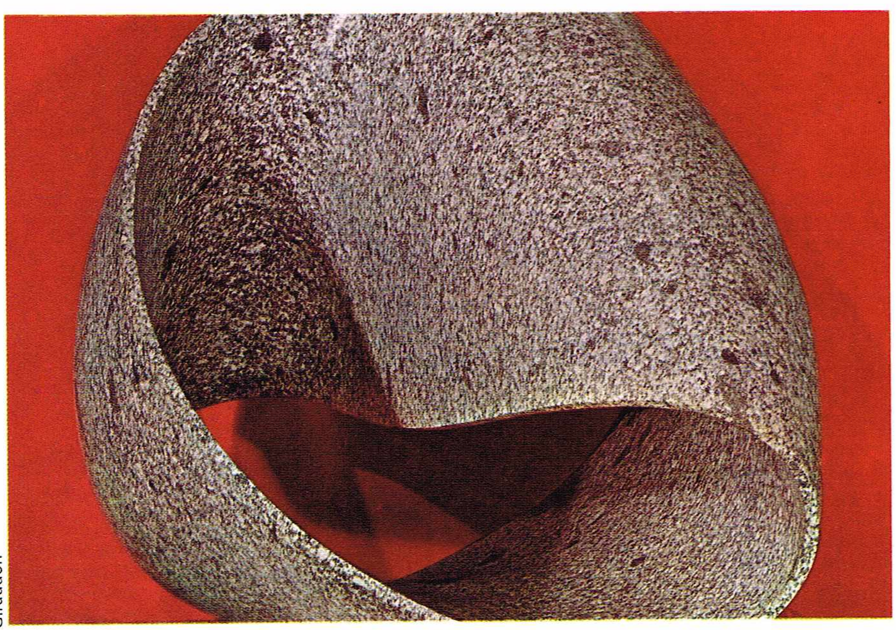

Giraudon

STATISTIQUE ET PROBABILITÉS

Généralités

Chacun sait ce que signifie le concept de statistique. On fait la statistique des accidents de la route, du nombre de naissances ou des gagnants à la Loterie nationale. Cela veut dire que l'on compte le nombre des accidents de la route qui se sont produits dans un laps de temps donné, ou celui des naissances survenues dans la population de tel ou tel pays, ou enfin celui des personnes qui ont eu la chance de gagner telle ou telle somme à la Loterie.

La statistique est donc simplement une technique, une sorte de comptabilité des événements qui se sont produits dans le passé.

La notion de probabilité est liée à cette technique, mais elle est tournée vers le futur. Si je vous demande : que va-t-il vous arriver cette année ? La réponse à ma question contiendra la notion de probabilité. A la base de cette notion on trouve une supposition fondamentale *a priori :* à savoir que, toutes choses égales par ailleurs, les divers événements dont on a fait la statistique sont équivalents, en ce sens que chacun d'eux a une égale probabilité de se reproduire dans le futur comme il s'est produit dans le passé. Ainsi, si une partie de pile ou face a donné jusqu'à maintenant 60 « piles » et 40 « faces », on considérera que chacun de ces 100 événements a la même probabilité de se reproduire au 101ᵉ essai, et que par conséquent, pour ce nouvel essai, on a 60 % de chances d'obtenir « pile » ou simplement que la probabilité d'obtenir « pile » est 0,6. Cette équivalence des divers événements passés n'est, soulignons-le, rien de plus qu'une hypothèse de travail, que rien ne justifie, si ce n'est son efficacité pratique.

La probabilité intrinsèque

La notion empirique de probabilité qui résulte d'une statistique est, naturellement, toujours sujette à révision. Chaque fois qu'une nouvelle expérience est faite, le résultat de cette expérience modifie, en général, les proportions entre les divers résultats survenus, et donc la « probabilité » de chacun d'eux pour un essai ultérieur. Le concept de probabilité s'affranchit de cette contrainte et acquiert une indépendance par rapport à l'expérience, si nous supposons qu'il existe une grandeur appelée *probabilité intrinsèque,* liée à chaque événement susceptible de se produire, grandeur dont les statistiques donnent une évaluation plus ou moins approchée.

Ainsi, nous pouvons attribuer, pour des raisons de symétrie évidentes, à l'événement « pile » la probabilité intrinsèque 0,5, et affirmer que l'évaluation de cette probabilité au terme de 100 parties (0,6 dans notre exemple) ne constitue qu'une évaluation grossière de la probabilité intrinsèque.

Il est possible de démontrer, sous des conditions très générales, que l'évaluation des probabilités intrinsèques (auxquelles nous réserverons par la suite le terme de probabilité) au moyen d'une statistique est d'autant meilleure que le nombre d'événements enregistrés dans la statistique est plus grand.

L'espace d'événements possibles

On se demande souvent quelle est la probabilité de tel événement, alors même qu'aucune expérience n'a été faite pour donner une statistique à cet égard. On considère alors l'ensemble des événements possibles, ou plus précisément, l'ensemble des *résultats* physiquement distincts pouvant résulter d'une *épreuve* ou d'un *essai.* Cet ensemble forme l'*espace des événements possibles.* Il est parfois utile de se représenter cet espace. La *figure* 1 illustre, par exemple, l'espace $\mathcal{E}$ des événements possibles pour un tirage de dés.

L'hypothèse d'égale probabilité a priori

Afin de répondre à une question « probabilistique » du type : quelle est la probabilité de tirer un chiffre pair en jetant le dé ? on énumère les événements favorables, c'est-à-dire, dans ce cas, les événements « sortie d'un 2 », « sortie d'un 4 », « sortie d'un 6 ». Le rapport entre le nombre des événements favorables (N_f) et le nombre total

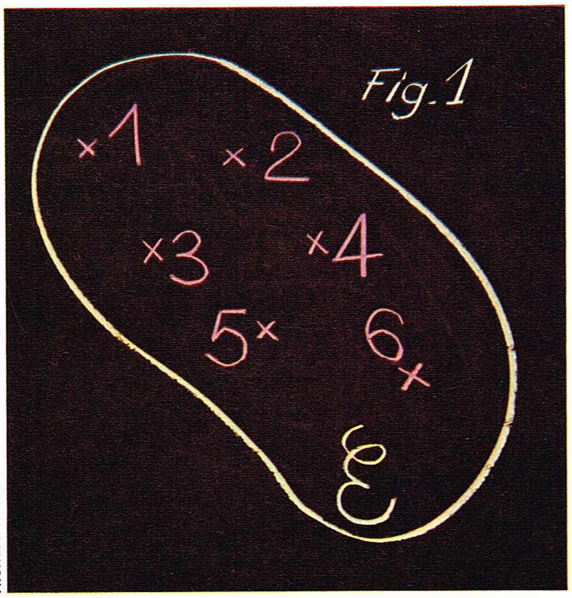

Richard Colin

Richard Colin

▲ *A gauche, figure 1 : l'espace* $\mathcal{E}$ *des* **événements possibles** *pour un tirage de dés. A droite, l'évaluation de la probabilité est fondée sur une supposition* **a priori** *: celle de l'équivalence de chacun des événements élémentaires qui forment l'espace des événements possibles.*

des événements possibles (N) est, par hypothèse, la probabilité en question. On écrit :

(1) $$P = \frac{N_f}{N}.$$

Ici encore, l'évaluation de la probabilité est fondée sur une supposition *a priori :* celle de l'équivalence de chacun des événements élémentaires qui forment l'espace des événements possibles. C'est cette hypothèse, par exemple, qui nous a permis d'attribuer la probabilité 0,5 à chacun des événements « pile » et « face », parce qu'il n'y a dans ce cas que deux événements possibles, et qu'ils sont considérés comme équivalents.

La fécondité de cette hypothèse, qu'on appelle souvent l'*hypothèse d'égale probabilité a priori,* est l'unique justification qui puisse en être donnée. Dans certains cas, la fécondité de cette hypothèse résulte de la propre volonté des observateurs. Dans les jeux, par exemple, on cherche délibérément à créer les conditions de son application, sans jamais y parvenir parfaitement; car, comme on peut le remarquer, chaque face d'un dé diffère des autres par un détail quelconque, sans quoi il ne serait pas possible de les distinguer. En fait, on rencontre dans la nature d'innombrables cas où l'*hypothèse d'égale probabilité a priori* se révèle d'une fécondité surprenante, à tel point que l'on peut se demander si l'on a bien compris toute la portée ou toute la signification d'un tel succès.

Probabilités composées : lois de composition

Événements élémentaires et événements composés

Considérons un espace d'événements élémentaires, par exemple celui des résultats possibles du tirage d'un dé. A chaque question probabilistique on peut associer l'ensemble des événements élémentaires favorables, qui, conformément à la relation **(1)**, permet de calculer la probabilité en question.

Un tel ensemble d'événements élémentaires favorables est aussi appelé, par extension, *un événement.* Ainsi, nous demanderons : Soit A le sous-espace de $\mathcal{E}$ tel que..., quelle est la probabilité pour que l'événement A se produise? Dans le jeu de dés, on peut définir, par exemple, l'événement A comme « sortie d'un chiffre impair », l'événement B « sortie du chiffre un », l'événement C « sortie des chiffres 5 ou 6 », D « sortie d'un chiffre pair », etc. Graphiquement (*fig.* 2), à chacun de ces événements correspond une région de $\mathcal{E}$ contenant exclusivement les événements élémentaires favorables.

Quelle que soit la définition de l'événement E, la relation **(1)** indique que

(2) $$0 \leqslant Pr\{E\} \leqslant 1.$$

On peut construire, à partir des événements ainsi définis, d'innombrables autres événements; « A et B », par exemple, est le sous-espace contenant l'ensemble des événements élémentaires favorables à la fois à A et à B; « A ou B » est l'événement formé par les événements favorables, soit à A, soit à B. Appelant E et F, respectivement, les événements précédents (*fig.* 3), on écrit :

$$E = A \cap B$$
$$F = A \cup B.$$

— Si A et B s'excluent mutuellement, c'est-à-dire s'ils n'ont aucun événement élémentaire en commun, E est vide :

$$Pr\{E\} = 0.$$

— Si $A \cup B = \mathcal{E}$, et si A et B s'excluent mutuellement, on dit que A et B sont complémentaires. On écrit $B = \bar{A}$. Il est clair que $Pr\{A \cup \bar{A}\} = Pr\{\mathcal{E}\} = 1$.

La signification de ces termes devient évidente si l'on considère des exemples particuliers, comme celui du jeu de dés cité plus haut. Dans la *figure* 2 les événements B et C sont exclusifs, les événements A et D sont complémentaires. De façon générale, les événements élémentaires de n'importe quel espace des événements possibles sont toujours mutuellement exclusifs.

Probabilités conditionnelles

Il est parfois important de considérer un événement particulier comme définissant un nouvel espace des événements possibles. C'est le cas, par exemple, pour la question

▼ *Figure 2 : à chacun des événements A, B, C et D, correspond une région de* $\mathcal{E}$ *contenant exclusivement les* **événements élémentaires favorables.**

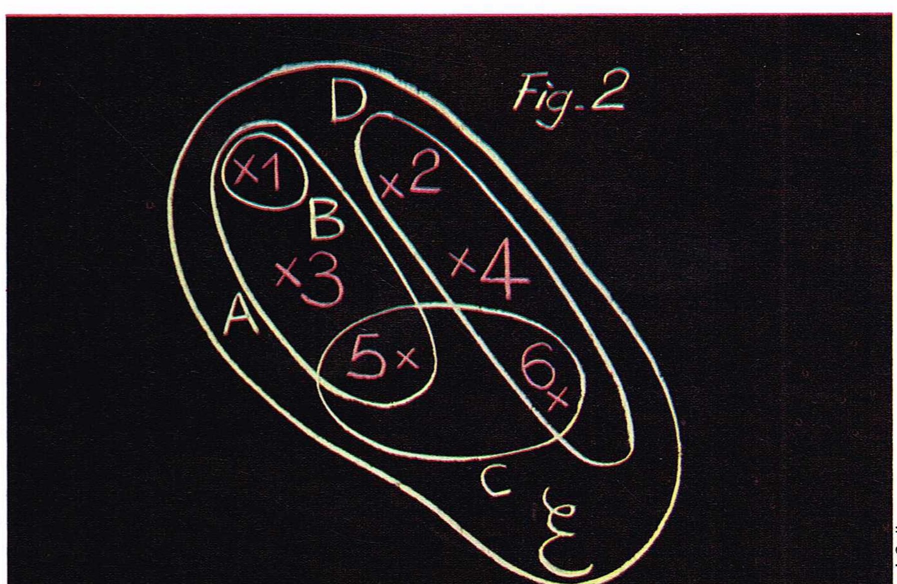

Richard Colin

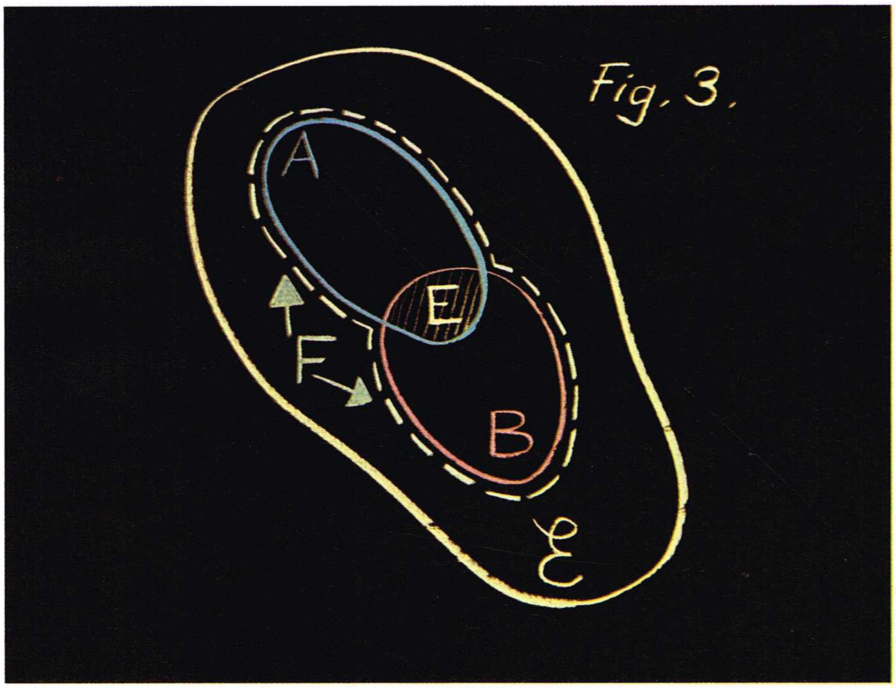

Richard Colin

▲ ***Figure 3 : voir développement dans le texte.***

suivante : « quelle est la probabilité d'avoir tiré un 1 si, pour une raison quelconque, nous savons que le résultat du tir est impair ? » Une telle probabilité est appelée *probabilité conditionnelle*, et l'événement G correspondant se met sous la forme :

$$G = B/A.$$

Pr (B/A) est donc la probabilité pour que B se produise, sachant que A s'est effectivement produit. On a :

$$Pr\{G\} = Pr\{B/A\} = \frac{N_f}{N_A}$$

Lois de composition

La relation précédente donne immédiatement le moyen d'établir deux théorèmes fondamentaux de la théorie des probabilités. Étant donné que :

$$Pr\{B/A\} = \frac{N_f}{N_A}$$

peut s'écrire :

$$Pr\{B/A\} = \frac{\frac{N_f}{N}}{\frac{N_A}{N}} = \frac{Pr\{A \cap B\}}{Pr\{A\}}$$

on obtient :

(3) $$Pr\{A \cap B\} = Pr\{A\} \times Pr\{B/A\}.$$

D'autre part, le comptage des événements favorables pour l'union de deux événements donne immédiatement :

$$Pr\{A \cup B\} = Pr\{A\} + Pr\{B\} - Pr\{A \cap B\}$$

expression dans laquelle le dernier terme compense le fait que les événements de la région commune à A et B sont contenus dans chacun des termes précédents et sont donc comptés deux fois dans la somme de ces termes. Si A et B sont exclusifs, $Pr\{A \cap B\}$ est nulle.
La formule précédente se réduit alors à :

(4) $Pr\{A \cup B\}$, A et B exclusifs $= Pr\{A\} + Pr\{B\}$

Tribus et espaces probabilisables

La possibilité de construire, à partir des éléments d'un espace $\mathcal{E}$ d'événements possibles, une multitude d'autres événements (grâce aux lois de composition) conduit les mathématiciens à associer à l'espace $\mathcal{E}$, supposé non vide, les espaces E, dits *tribus de parties de* $\mathcal{E}$, tels que

1) $\mathcal{E} \in E$
2) $e \in E \Rightarrow \bar{e} \in E$
3) Si $\{e_k\}_{k=1,\ldots,n} \in E$, alors $\{e_1 \cup e_2 \ldots \cup e_N\} \in E$.

Le couple $\{\mathcal{E}, E\}$ formé par l'ensemble $\mathcal{E}$ et une tribu de parties de $\mathcal{E}$ est appelé un *espace probabilisable*. On réserve généralement le terme d'*épreuve* pour les événements élémentaires de $\mathcal{E}$, tandis que le terme *événement* s'applique à tout élément $e \in E$. $\{\mathcal{E}\}$ est l'événement certain, $\{\varnothing\}$ (partie vide), en tant qu'élément de E, est l'événement impossible.

Dans ce texte, toute application $Pr : E \to [0, 1]$ telle que $Pr\{\mathcal{E}\} = 1$ et telle que pour tout couple exclusif $e_i, e_j \in E$ (tel que $e_i \cap e_j = \varnothing$), $Pr\{e_i \cup e_j\} = Pr\{e_i\} + Pr\{e_j\}$ peut définir la *probabilité Pr sur la tribu E* (en mathématiques, par conséquent, la probabilité peut se définir en dehors de la restriction de l'hypothèse d'égale probabilité *a priori* pour les épreuves — ou événements élémentaires de $\mathcal{E}$).

Variables aléatoires et distributions de probabilité

Le concept de variable aléatoire

Supposons que nous ayons un espace des événements possibles $\mathcal{E}$ et que nous décidions d'attribuer à une variable algébrique X la valeur x_1 si le tirage au sort sur $\mathcal{E}$ réalise l'événement e_1, la valeur x_2 si le tirage au sort réalise l'événement e_2, etc. Par exemple, $\mathcal{E}$ est l'espace des événements possibles au jeu de roulette et X prend la valeur de la perte ou du gain que nous réaliserons si la bille s'arrête sur telle ou telle case.

On dit que X est une *variable aléatoire*. Dans ce cas, elle est attachée à l'espace des événements $\mathcal{E}$, ou, plus précisément, elle est définie par une application de l'espace des événements possibles sur le corps des réels :

$$\{e_n\} \to X = x_n \in R.$$

Notons que cette application (définie *a priori*) peut être, ou non, biunivoque. Par exemple, pour le jeu de dés, on peut définir X comme la variable qui prend les valeurs 1, 2, ..., 6 quand le dé indique respectivement un 1, un 2 ou un 6 ; mais X pourrait aussi être définie comme la variable, prenant la valeur 1 quel que soit le numéro indiqué sur le dé, excepté quand celui-ci est un 6, auquel cas X prend la valeur 2, etc.

Une variable aléatoire X est *discrète* si les valeurs possibles pour $X = x_1 \ldots, x_n$ forment un ensemble de valeurs discrètes, ou *continue* si X peut prendre une valeur quelconque de l'intervalle $[x_a, x_b] \in R$ (c'est le cas, par exemple, de la variable aléatoire définie par les positions possibles d'une aiguille sur le cadran d'un appareil de mesure).

Loi de probabilité se rapportant à une variable aléatoire discrète

Définition

L'union de tous les événements élémentaires auxquels est associée la même valeur x_j de X définit un événement aléatoire a_j. Par définition, la probabilité pour que X prenne la valeur x_j est égale à la probabilité de réalisation de l'événement a_j.

Si l'application de $\mathcal{E}$ sur R est biunivoque, a_j se réduit à un seul événement élémentaire e_j, mais ceci n'est pas toujours le cas. Dans les deux exemples tirés du jeu de dés cités plus haut, la probabilité pour que X prenne la valeur 1, par exemple, est respectivement égale à la probabilité de réalisation des événements :
— le dé indique un 1 (= 1/6) ;
— le dé indique un chiffre quelconque à l'exception du 6 (= 5/6).

La probabilité pour que X prenne la valeur x_j définit une application F (x_j), que nous allons appeler *loi*, ou en suivant un usage ancien quoique impropre, la *distribution de probabilité* de la variable aléatoire X. Cette application est limitée, puisque les probabilités vérifient la relation **(2)**. Nous écrirons, en utilisant une notation évidente :

(5) $$\begin{cases} Pr(X = x_j) = F(x_j) \\ 0 \leqslant F(x_j) \leqslant 1 \\ \Sigma F(x_j) = 1 \end{cases}$$

où la dernière relation exprime le fait que la variable aléatoire X prend nécessairement l'une quelconque des valeurs possibles x_j.

La distribution hypergéométrique

Comme exemple d'une distribution de probabilité se rapportant à une variable discrète, nous prendrons la distribution hypergéométrique, liée au problème suivant : soit une population U de n objets. Supposons que nous choisissons au hasard r objets parmi cette population U. Le nombre de lots de r objets, sans distinguer leur ordre et sans prendre deux fois le même objet, qui puisse se faire à partir de la population U est $\binom{n}{r} = \frac{n!}{[r!\,(n-r)!]}$.

Considérons maintenant chacun de ces lots comme un événement élémentaire d'un espace $\mathcal{E}$ des événements possibles, et supposons, en outre, que les n objets de la population U sont de deux types : n_1 sont du type A, et les $n - n_1$ restants du type B. Appelons K la variable aléatoire qui prend la valeur définie, à chaque tirage, par le nombre k d'objets du type A présent dans le lot. Quelle est la distribution de probabilité F (k) se rapportant à K?

Pour rendre notre discussion plus concrète, nous pouvons supposer que U est une urne contenant n_1 boules blanches et $n - n_1$ boules noires. Nous tirons au hasard r boules hors de l'urne. F (k) représente dans ce cas la probabilité pour que le lot tiré contienne k boules blanches et $r - k$ boules noires (*fig.* 4).

La probabilité en question est, d'après **(1)**.

$$Pr = \frac{N_f}{N} = \frac{N_f}{\binom{n}{r}}$$

où N_f est le nombre de lots de r boules contenant exactement k boules blanches. On a $\binom{n_1}{k}$ manières de choisir ces k boules blanches parmi les n_1 boules blanches disponibles. Chaque choix peut être combiné avec $\binom{n-n_1}{r-k}$ manières de choisir les $r - k$ boules noires ; de sorte que :

$$F_{(k)} = \frac{\binom{n_1}{k}\binom{n-n_1}{r-k}}{\binom{n}{r}} \quad \textbf{(6)}$$

Il est facile de démontrer, en se servant des définitions des coefficients binominaux, que F (k) peut aussi s'écrire :

$$F_{(k)} = \frac{\binom{r}{k}\binom{n-r}{n_1-k}}{\binom{n}{n_1}}$$

La *figure* 5 représente la distribution F (k) dans le cas particulier $r = 4$, $n_1 = 5$, $n = 10$. Dans cet exemple, k peut prendre seulement les valeurs : 0, 1, 2, 3 et 4. Les probabilités respectives sont : 5/210, 50/210, 100/210, 50/210, 5/210. Il est clair que les relations **(5)** sont satisfaites dans ce cas particulier. Un calcul sans difficulté établit la généralité de ce résultat.

Loi de probabilité pour une variable aléatoire continue

Définition

Soit X une variable aléatoire continue, définie sur l'intervalle $[x_a, x_b]$ — où $x_a < x_b$. La probabilité pour que la variable X prenne une valeur quelconque de l'intervalle $[x_1, x_2]$ définit une application F (x_1, x_2) ; les relations **(5)** généralisées s'écrivent dans ce cas :

$$\textbf{(7)} \quad \begin{cases} Pr\,(x_1 \leqslant X \leqslant x_2) = F\,(x_1, x_2) \\ 0 \leqslant F\,(x_1, x_2) \leqslant 1 \\ F\,(x_a, x_b) = 1 \end{cases}$$

On note que la fonction F (x_1, x_2) dépend des deux limites de l'intervalle. On introduit la *densité de probabilité* avec une seule variable définie par :

$$\textbf{(8)} \quad f\,(x) = \frac{d}{dx} F\,(x_a, x),$$

d'où :

$$\textbf{(9)} \quad F\,(x_1, x_2) = \int_{x_1}^{x_2} f\,(x)\,dx$$

Si dx est un intervalle infinitésimal en x, les **relations (7)** s'écrivent, au vu de **(9)** :

▲ *Figure 4 : le problème de l'urne.*

Richard Colin

$$\textbf{(10)} \quad \begin{aligned} & Pr\,(x \leqslant X \leqslant x + dx) = f\,(x)\,dx \\ & 0 \leqslant \int_{x_1}^{x_2} f\,(x)\,dx \leqslant 1 \\ & \int_{x_a}^{x_b} f\,(x)\,dx = 1. \end{aligned}$$

La fonction F (x_a, x) étant monotone et croissante dans l'intervalle (x_a, x_b), f (x) est définie positive par **(8)**. Dans les relations ci-dessus nous supposons implicitement $x_1 \leqslant x_2$; dans le cas contraire, nous devrions prendre les valeurs absolues des intégrales.

Les notions de *distributions de probabilité* F (x_a, x) et de *densité de probabilité f* (x) se rapportant à une variable aléatoire continue sont d'une importance fondamentale, en particulier pour la physique statistique.

La distribution de Gauss

C'est surtout l'immense champ d'applications de la distribution de Gauss qui justifie la réflexion précédente. Celle-ci, qu'on appelle aussi *distribution normale*, est définie sur l'intervalle (— ∞, + ∞) par la densité associée :

$$\textbf{(11)} \quad f\,(x) = N\,(x - x_0, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\, e^{-\frac{(x - x_0)^2}{2\sigma^2}}$$

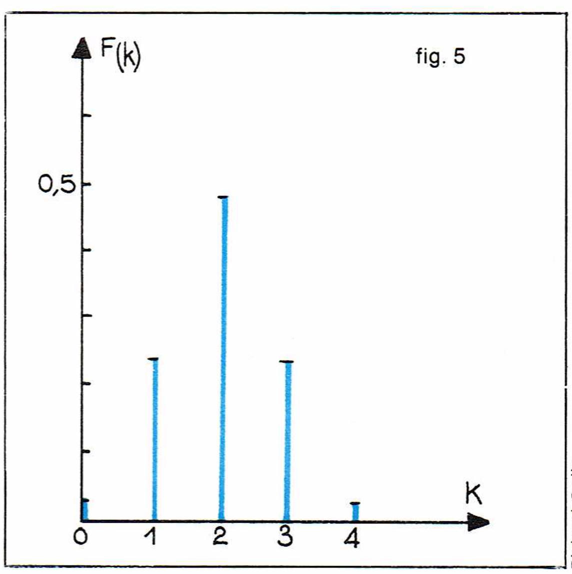

◀ *Figure 5 : distribution F (k) dans le cas particulier r = 4, n_1 = 5, n = 10 ; k peut prendre seulement les valeurs 0, 1, 2, 3 et 4.*

Richard Colin

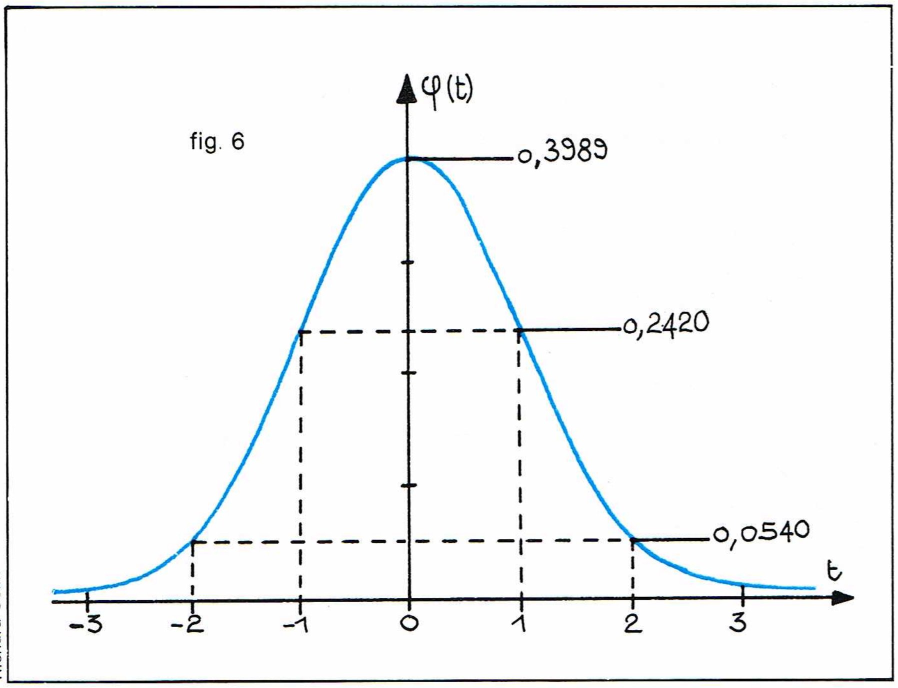

▲ ***Figure 6 :*** ***densité associée à la*** **distribution normale, centrée *et* réduite.**

où σ et x_0 sont deux paramètres, dont le premier est positif. Quand x_0 est nul, on dit que la distribution est *centrée* et quand σ vaut 1, la distribution est *réduite*. On écrit d'habitude la distribution centrée et réduite de la façon suivante :

$$\textbf{(12)} \qquad N(t, 1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} = \varphi(t)$$

Il est clair que le passage de **(11) à (12)** est toujours possible, moyennant un changement de variable aléatoire. La *figure* 6 représente la densité associée à la distribution centrée et réduite. Diverses applications de la distribution de Gauss sont énumérées au long de ce chapitre.

Loi de probabilité se rapportant à plusieurs variables

Cas des variables discrètes

Soit X une variable aléatoire susceptible de prendre les valeurs $x_1, ..., x_n$ et Y une autre variable aléatoire susceptible de prendre les valeurs $y_1, ..., y_n$. A chaque événement élémentaire de l'espace des événements possibles sont alors associées non pas seulement une, mais deux valeurs (x_j, y_k), la première se rapportant à X et la seconde à Y. La probabilité de réalisation des événements correspondants définit une distribution de probabilité $F(x_j, y_k)$ telle que :

$$Pr(X = x_j \text{ et } Y = y_k) = F(x_j, y_k)$$

$$0 \leqslant F(x_j, y_k) \leqslant 1$$

$$\sum_{j,k} F(x_j, y_k) = 1$$

en application des relations **(5)**.

Représentons par $F_1(x_j)$ la distribution de probabilité de la variable aléatoire X, et par $F_2(y_k)$ la distribution de probabilité de la variable aléatoire Y. Par définition $F_1(x_j)$ est la probabilité pour $X = x_j$, indépendamment de la valeur prise par Y. D'où :

$$\textbf{(13)} \qquad F_1(x_j) = \sum_k F(x_j, y_k)$$

De même :

$$\textbf{(14)} \qquad F_2(y_k) = \sum_j F(x_j, y_k).$$

Les distributions $F_1(x_j)$, $F_2(y_k)$ sont parfois appelées *distributions marginales* de la distribution à deux dimensions $F(x_j, y_k)$. Un cas particulièrement important est celui pour lequel nous avons :

$$\textbf{(15)} \qquad F(x_j, y_k) = F_1(x_j)\, F_2(y_k).$$

Il est facile de voir que dans ce cas les relations **(13)** et **(14)** sont automatiquement satisfaites, car

$$\sum_j F_1(x_j) = \sum_k F_2(y_k) = 1.$$

Quand $F(x_j, y_k)$ se met sous la forme **(15)**, on dit que les variables X et Y sont *indépendantes*. En comparant avec la relation **(3)**, on voit qu'une définition équivalente de l'indépendance des variables X et Y est :

$$\textbf{(16)} \qquad Pr\left(Y/X\right) = Pr(Y)$$

et *vice versa*.

Cas des variables continues

L'application du raisonnement précédent — moyennant l'extension au cas de deux variables aléatoires des relations **(10)** — n'offre pas de difficultés particulières. On introduit alors la densité de probabilité $f(x, y)$ pour deux variables aléatoires avec les propriétés :

$$Pr(x \leqslant X \leqslant x + dx \text{ et } y \leqslant Y \leqslant y + dy) = f(x, y)\, dx\, dy$$

$$0 \leqslant \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} f(x, y)\, dx\, dy \leqslant 1$$

$$\int_{x_a}^{x_b} \int_{y_a}^{y_b} f(x, y)\, dy = 1$$

et :

$$\textbf{(17)} \qquad f_1(x) = \int_{y_a}^{y_b} f(x, y)\, dy$$

$$f_2(y) = \int_{x_a}^{x_b} f(x, y)\, dx$$

où $f_1(x)_1$ et $f_2(y)$ sont les densités de probabilité se rapportant à X et Y ; on les appelle aussi *densités marginales de f (x, y)*.

De la même façon que précédemment, on dit que X et Y sont indépendantes quand :

$$\textbf{(18)} \qquad f(x, y) = f_1(x)\, f_2(y)$$

Moments d'une densité de probabilité

Définitions

Soit n un entier positif ou nul,

— le moment d'ordre n de la densité de probabilité $f(x)$ est défini par la somme :

$$\mathcal{M}_n = \int_{x_a}^{x_b} x^n f(x)\, dx$$

— le moment d'ordre 0 est appelé *norme* de $f(x)$ et vaut 1, par suite de **(10)** :

$$\mathcal{M}_0 = \int_{x_a}^{x_b} f(x)\, dx = 1$$

— le moment d'ordre 1 est appelé l'*espérance mathématique* de X

$$\textbf{(19)} \qquad \mathcal{M}_1 \equiv \langle x \rangle \equiv E(X) = \int_{x_a}^{x_b} x f(x)\, dx$$

De façon plus générale, si $y = y(x)$ est une fonction de x définissant une nouvelle variable aléatoire Y, l'espérance mathématique pour Y est :

$$\textbf{(20)} \qquad E(Y) = \int_{x_a}^{x_b} y(x)\, f(x)\, dx$$

En effet, si $f(x)$ est la probabilité pour que

$$x \leqslant X \leqslant x + dx$$

et $F(y)$ est la probabilité pour que $y \leqslant Y \leqslant y + dy$, nous avons :

$$E(Y) = \int_{y_a}^{y_b} yF(y)\, dy = \int_{y_a}^{y_b} yf(x) \left|\frac{dx}{dy}\right| dy = \int_{x_a}^{x_b} y(x)\, f(x)\, dx$$

Cette relation est immédiate quand $y(x)$ est monotone ; le lecteur peut vérifier qu'elle s'applique aussi en dehors de cette condition. On note que :

$$\text{(21)} \qquad \mathcal{M}_n = E(X^n)$$

— la *variance* relative à $f(x)$ est par définition :

$$\text{(22)} \qquad \sigma^2 = E[(X - \langle x \rangle)^2]$$

par suite de **(20)**

$$\text{(23)} \qquad \sigma^2 = \int_{x_a}^{x_b} (x - \langle x \rangle)^2 f(x)\, dx$$

Soit, en développant l'expression entre parenthèses :

$$\text{(24)} \qquad \sigma^2 = E(X^2) - E(X)^2$$

Par suite de **(23)**, σ^2 ne peut être négatif, car l'intégrant comporte seulement des termes définis positifs. La racine positive de la variance, σ, s'appelle *l'écart type* se rapportant à $f(x)$.

Toutes ces définitions s'appliquent, dûment modifiées, aux variables aléatoires discrètes. En particulier, l'espérance mathématique $E(x) = \sum_j x_j F(x_j)$ est la moyenne des x_j pondérés par $F(x_j)$; si les probabilités $F(x_j)$ sont toutes égales, E (X) est la moyenne arithmétique des x_j ; si X est définie comme prenant la valeur 0 quel que soit l'événement $a_j \neq a_i$ et la valeur 1 pour l'événement a_i, E (X) se réduit à la probabilité p_i de l'événement a_i.

Fonction caractéristique

La transformée de Fourier de la densité de probabilité $f(x)$:

$$\text{(25)} \qquad \varphi(k) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{ikx} f(x)\, dx$$

existe toujours, car $f(x)$ est une fonction sommable. Elle est appelée *fonction caractéristique* associée à $f(x)$, ou fonction génératrice des moments. Cette dernière dénomination provient du fait qu'en portant le développement en série de Taylor de e^{ikx} autour de $x = 0$ dans **(25)**, on obtient :

$$\varphi(k) = \int \left[1 + ikx - \frac{k^2}{2} x^2 + \dots + \frac{(ik)^n}{n!} x^n + \dots\right] f(x)\, dx$$

$$\text{(26)} \qquad = \mathcal{M}_0 + ik\mathcal{M}_1 - \frac{k^2}{2}\mathcal{M}_2 + \dots + \frac{(ik)^n}{n!}\mathcal{M}_n + \dots$$

Réciproquement, la connaissance de $\varphi(k)$ détermine la distribution $f(x)$. La transformation inverse de **(25)** est :

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-ikx} \varphi(k)\, dk$$

Nous avons alors cet important résultat : *la connaissance de tous les moments d'une distribution de probabilité définit complètement cette distribution* (puisqu'elle donne immédiatement la fonction caractéristique).

La distribution G

Appliquons les considérations précédentes à la distribution G définie sur $(0, +\infty)$ par la densité :

$$\text{(27)} \qquad G(\alpha, \beta, x) = A x^\alpha e^{-\beta x}$$

où α et β sont deux paramètres réels positifs et A est la constante de normalisation :

$$\text{(28)} \qquad A = \frac{\beta^{\alpha+1}}{\Gamma(\alpha + 1)}$$

$$\text{où } \Gamma(x + 1) \equiv \int_0^\infty y^x e^{-y} dy \qquad (-1 < x < +\infty)$$

Pour trouver la fonction caractéristique de cette distribution, démontrons le lemme suivant.

Lemme : $\forall \alpha$ réel > 0 et $\forall \beta$ (Re $\beta > 0$),

$$\gamma(\alpha, \beta) = \int_0^\infty x^\alpha e^{-\beta x} dx = \frac{\Gamma(\alpha + 1)}{\beta^{\alpha+1}}.$$

Pour β réel, cette relation est la conséquence immédiate du changement de variable $y = \beta x$.

Pour β complexe, on a, en posant $z = \beta x$

$$\gamma(\alpha, \beta) = \frac{1}{\beta^{\alpha+1}} \int_A^B z^\alpha e^{-z} dz \qquad (\textit{fig. } 7)$$

La fonction $f(z) = z^\alpha e^{-z}$, $\alpha > 0$ n'a pas de pôles dans la région Re $z > 0$. En sommant sur le contour ABCA :

$$\oint f(z)\, dz = \int_A^B f(z)\, dz + \int_B^C f(z)\, dz + \int_C^A f(z)\, dz = 0.$$

Quand le rayon du cercle BC tend vers l'infini, $f(z)$ tend vers 0 sur tous les points du parcours. Par suite :

$$\int_A^B f(z)\, dz = \int_A^C f(z)\, dz = \int_0^\infty z^\alpha e^{-z} dz = \Gamma(\alpha + 1)$$

La fonction caractéristique associée à **(27)** est donc :

$$\varphi(k) = A \int_0^\infty x^\alpha e^{-(\beta - ik)x} dx = \left[\frac{\beta}{\beta - ik}\right]^{\alpha+1}$$

Les premiers moments de la distribution G (α, β, x) sont, en application de **(26)** :

$$\text{(29)} \qquad \begin{aligned} \mathcal{M}_0 &= \varphi(0) = 1 \\ \mathcal{M}_1 &= -i\varphi'(0) = \frac{\alpha + 1}{\beta} \\ \mathcal{M}_2 &= -\varphi''(0) = \frac{(\alpha + 1)(\alpha + 2)}{\beta^2} \end{aligned}$$

Il est facile de vérifier que ces valeurs coïncident avec la définition des moments $\left(\mathcal{M}_n = \int_{x_a}^{x_b} x^n f(x)\, dx\right)$.

On note que, pour la distribution G, E (X) ne coïncide pas avec la *valeur plus probable* de x (définie par $f'(x) = 0$), soit $x = \dfrac{\alpha}{\beta}$

La *figure* 8 représente les distributions G (1, 1, x) et G (5, 1, x).

La distribution de Dirac - Applications

Définition

Considérons la « déformation » subie par la densité normale **(11)** quand, x_0 étant fixé, on fait diminuer la valeur de σ. La valeur centrale $N(0, \sigma) = \dfrac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$ augmente, tandis que la courbe se rétrécit autour de la valeur

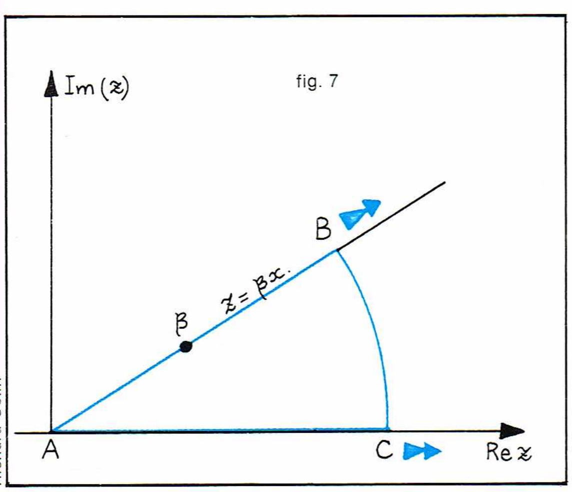

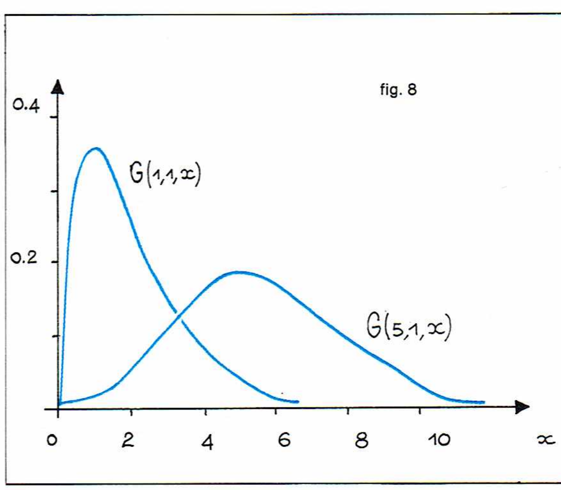

◄ ***A gauche, figure 7 : voir développement dans le texte ci-dessus. A droite, figure 8 : distributions G (1, 1, x) et G (5, 1, x).***

▶ *Figure 9 : pour σ très petit, la densité normale demeure presque nulle en tout point, sauf au voisinage de x_0, où elle prend des valeurs très grandes.*

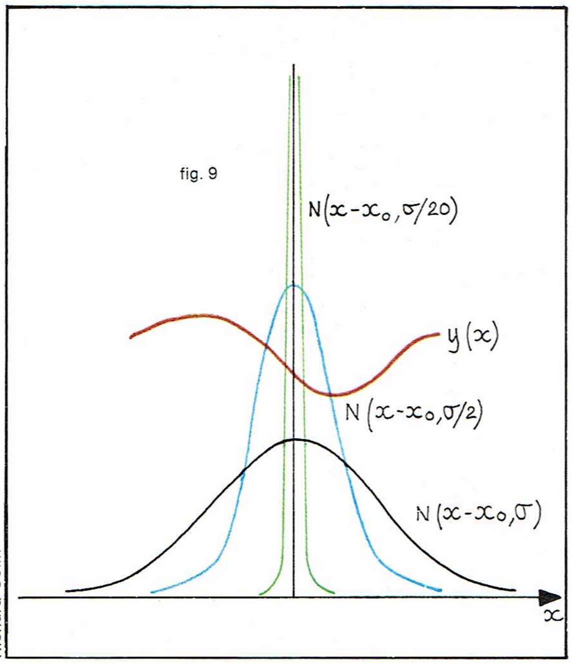

Richard Colin

$x = x_0$, de telle sorte que la condition de normalisation reste vérifiée : $\forall \sigma > 0, \int_{-\infty}^{+\infty} N(x - x_0, \sigma)\, dx = 1$. Pour σ très petit, la distribution demeure presque nulle en tout point, sauf au voisinage de x_0, où elle prend des valeurs très grandes (*fig.* 9). Considérons maintenant une somme du type : $\mathfrak{J} = \int_{-\infty}^{+\infty} y(x)\, N(x - x_0, \sigma)\, dx$ où $y(x)$ est une fonction « suffisamment » régulière en x_0. Il est clair que, à mesure que σ diminue, l'expression au-dessous du signe somme ne prend de valeurs non négligeables qu'au voisinage immédiat de $x = x_0$. Dans ce voisinage, $y(x)$ reste voisin de la valeur $y(x_0)$, de sorte que :

$$\lim_{\sigma \to 0} \mathfrak{J} = y(x_0) \int_{-\infty}^{+\infty} N(x - x_0, \sigma)\, dx = y(x_0).$$

Nous définirons *la densité δ de Dirac* à travers la propriété fondamentale suivante : $y(x)$ étant une fonction bien définie en x_0,

$$\textbf{(30)} \qquad \int_{-\infty}^{+\infty} y(x)\, \delta(x - x_0)\, dx = y(x_0).$$

Cette densité peut être représentée symboliquement par :

$$\delta(x - x_0) = \lim_{\sigma \to 0} N(x - x_0, \sigma).$$

Cette représentation de la distribution δ est trop étroite pour couvrir toute la généralité de la propriété **(30)**, pour laquelle nous n'avons imposé aucune condition de régularité sur la fonction $y(x)$; par suite, elle ne constitue pas une définition de la densité. Elle suffit cependant dans les applications pratiques que nous ferons.

Propriétés de la densité δ

$\delta(x - x_0)$ étant nulle, quel que soit $x \neq x_0$, la propriété fondamentale **(30)** peut aussi s'écrire :

$$\int_{x_1}^{x_2} y(x)\, \delta(x - x_0)\, dx = \begin{cases} y(x_0) & \text{si } x_0 \in]x_1, x_2[\\ 0 & \text{si } x_0 \notin [x_1, x_2] \end{cases}$$

En effectuant un changement de variable convenable dans la relation ci-dessus, le lecteur vérifiera que, si $g(x)$ est une fonction nulle aux points x_i ($i = 1, n$) et telle que $\forall i\ g'(x_i) \neq 0$, on a :

$$\textbf{(31)} \qquad \delta(g(x)) = \sum_i \frac{1}{|g'(x_i)|}\, \delta(x - x_i)$$

Application aux fonctions de variables aléatoires

Soit $Y = g(X)$ une fonction de la variable aléatoire X définie sur l'intervalle $[x_a, x_b]$ et régie par la densité de probabilité $f(x)$. La densité de probabilité $F(y)$ relative à Y est donnée par la relation :

$$\textbf{(32)} \qquad F(y) = \int_{x_a}^{x_b} f(x)\, \delta(y - g(x))\, dx$$

En effet, les moments de la distribution $F(y)$, qui, comme nous l'avons vu, définissent complètement cette distribution, sont :

$$\mathcal{M}_n = \int_{y_a}^{y_b} y^n F(y)\, dy = \int_{y_a}^{y_b}\int_{x_a}^{x_b} y^n f(x)\, \delta(y - g(x))\, dxdy = \int_{x_a}^{x_b} [g(x)]^n f(x)\, dx$$

ce qui concorde bien avec **(20)** et **(21)**.

La relation **(32)** s'étend immédiatement au cas d'une variable aléatoire Y fonction de différentes variables aléatoires $X_1, X_2, ..., X_n$; si $f(x_1, x_2, ..., x_n)$ est la densité de probabilité (à n dimensions) relative à $X_1 ..., X_n$ et si Y est définie par la fonction $Y = g(x_1, x_2, ..., x_n)$, on a :

$$\textbf{(33)} \quad F(y) = \int f(x_1, x_2, ..., x_n)\, \delta(y - g(x_1, x_2, ..., x_n))\, dx_1 dx_2 \ldots dx_n$$

Somme de variables aléatoires

Les sommes de variables aléatoires vérifient les propriétés fondamentales suivantes :

— *Espérance mathématique*

Si $Y = X_1 + X_2 + ... + X_n$, alors

$$\textbf{(34)} \qquad E(Y) = E(X_1) + E(X_2) + ... + E(X_n)$$

— *Variance*

Si $Y = X_1 + X_2 + ... + X_n$ et si les variables $X_1, X_2, ... X_n$ sont indépendantes, alors

$$\textbf{(35)} \qquad \sigma_y^2 = \sigma_{x1}^2 + \sigma_{x2}^2 + ... + \sigma_{xn}^2$$

Les relations **(34)** et **(35)** sont simplement des applications des définitions **(19)** et **(23)** sur la distribution **(33)**, avec $g(x_1, x_2, ..., x_n) = x_1 + x_2 ... + x_n$ [quand $X_1, X_2, ..., X_n$ sont indépendantes, $f(x_1, x_2, ..., x_n)$ est de la forme $f_1(x_1)\, f_2(x_2) \ldots f_n(x_n)$ — voir **(18)**].

La distribution binominale et ses approximations

La distribution binominale

La distribution binominale se rapporte aux problèmes très généraux d'*épreuves répétées* (simultanément ou successivement) sur une même variable aléatoire X, régie, à chaque tirage, par la même loi de probabilité $f(x)$.

Définition

Soit $\mathcal{E}$ un espace d'événements possibles, A un événement $\in \mathcal{E}$. Dans un essai isolé, A a la probabilité p de se produire. La distribution binominale donne la probabilité d'obtenir k épreuves favorables, c'est-à-dire, donnant A pour résultat, quand l'épreuve est répétée n fois.

Pour chaque essai, nous avons deux résultats possibles : ou A se produit (probabilité p), ou $\bar{A}$, l'événement complémentaire, se produit (probabilité $q = 1 - p$). Considérons une séquence quelconque de n événements ; par exemple, la séquence $S = A, \bar{A}, A, \bar{A}, \bar{A}$, etc., dans laquelle l'événement A se produit k fois. Cette séquence a pour probabilité :

$$Pr(S) = Pr\{A \cap \bar{A} \cap A \cap \bar{A} \cap \bar{A} ...\} = pqpqq ... = p^k q^{n-k}$$

d'après **(3)** et **(16)**. En effet, c'est la probabilité de l'événement composé « A se produit dans le premier essai et $\bar{A}$ dans le second, etc. », compte tenu du fait que les événements successifs sont indépendants.

Le nombre de séquences telles que S, contenant exactement k fois A, est $\binom{n}{k}$. La réalisation de chacune de ces séquences exclut celle des autres, de sorte que la probabilité pour que l'une ou l'autre de ces séquences se produise est :

(36) $$P(k) = \binom{n}{k} p^k q^{n-k}$$

en application de **(4)**.

Exemple. Dans le jeu de pile ou face, la probabilité de « pile » est $\frac{1}{2}$. La probabilité d'obtenir 4 fois « pile » dans dans une partie de 5 essais est :

$$P(4) = \binom{5}{4}\left(\frac{1}{2}\right)^5 \simeq 0{,}152.$$

On note que la distribution **(36)** est différente de la distribution hypergéométrique **(6)**. Dans l'exemple du tirage de boules dans une urne, la distribution **(6)** se rapporte au tirage successif de r boules dans une même urne (de sorte que la probabilité d'obtenir une boule blanche varie d'un tirage à l'autre). Au contraire, la distribution **(36)** se rapporte au tirage de n boules dans n urnes identiques, ou encore au tirage de n boules dans une urne, à condition que l'on recompose l'urne initiale après chaque tirage.

Moments

Les moments de la distribution **(36)** se déduisent de la *loi du binôme de Newton :*

$$\sum_{i=0}^{n} \binom{n}{i} a^{n-i} b^i = (a+b)^n$$

qui donne immédiatement

$$\mathcal{M}_0 = \sum_{k=0}^{n} \binom{n}{k} p^k q^{n-k} = (p+q)^n = 1.$$

Le calcul des moments d'ordre supérieur s'effectue de même, en posant $k' = k - 1$. On trouve :

(37) $$E(k) = np \qquad \sigma^2(k) = npq.$$

Distribution de Poisson

Définition ; moments

La distribution de Poisson est une approximation de la distribution binominale, valable quand la probabilité p est très petite et le nombre de tirages n très grand, de sorte que le nombre de cas favorables ($\sim np$) reste de l'ordre de quelques unités.

Posons $\lambda = np$; on a :

$$P(k) = \frac{n!}{k!\,(n-k)!} p^k q^{n-k} \simeq \frac{1}{k!} n^k \left(\frac{\lambda}{n}\right)^k \left(1 - \frac{\lambda}{n}\right)^n$$

puisque $n \gg k$. Pour n très grand, nous avons :

$$\mathrm{Log}\left(1 - \frac{\lambda}{n}\right)^n = n\,\mathrm{Log}\left(1 - \frac{\lambda}{n}\right) = n\left(-\frac{\lambda}{n} - \frac{\lambda^2}{2n^2} \ldots\right) \simeq -\lambda$$

et

$$P(k) \simeq \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}.$$

Cette relation définit la *distribution de Poisson*.

Les moments correspondants se calculent aisément, compte tenu de la relation $\sum_{k=0}^{\infty} \frac{\lambda^k}{k!} = e^{\lambda}$. On trouve :

$$\mathcal{M}_0 = 1 \qquad E(k) = \lambda \qquad \sigma^2(k) = \lambda.$$

Exemple d'application : substances radio-actives

Un exemple courant de l'application de l'approximation de Poisson est la désintégration d'une substance radio-active de grande durée de vie τ. Un échantillon d'une telle substance est composé d'un nombre très grand : $n \sim 10^{23}$ atomes, chacun d'eux ayant une probabilité très petite de se désintégrer pendant la durée de l'observation $\Delta t \ll \tau$.

Ainsi, le nombre moyen de désintégrations observées dans un microgramme de Ra^{226} ($\tau \simeq 5 \cdot 10^{10}$ s) à travers un angle solide de 0,002 4 sr en une seconde, est

$$\lambda = np \simeq 10.$$

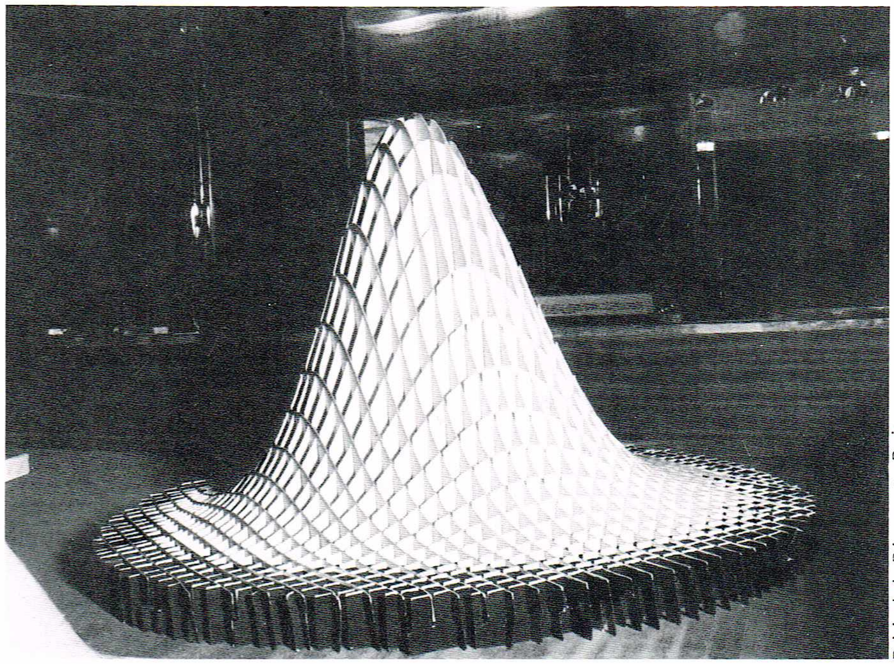

Palais de la Découverte, Paris

▲ ***Surface de Gauss.***

La *figure* 10 représente la distribution de probabilité d'observer k désintégrations en une seconde. On note que si la probabilité p n'était pas aussi petite (durée de vie du même ordre de grandeur que le temps de mesure et grand angle solide), l'approximation de Poisson deviendrait injustifiée dans cette application.

Distribution de Gauss

La distribution de Gauss ou normale définie en **(11)** constitue une autre approximation de la distribution binominale **(36)** *dans la limite où $n \to \infty$, p et q* restant fixés. Dans cette limite, le nombre de succès $\sim np \to \infty$ avec n, de même que le nombre de cas défavorables $\sim nq$. On a :

$$P(k) = \frac{n!}{k!\,(n-k)!} p^k q^{n-k}$$

(38) $$\xrightarrow[n \to \infty]{} N(k - np, \sqrt{npq})$$

En effet, quand $n \gg 1$, $P(k)$ ne prend de valeurs appréciables que dans le voisinage de $E(k) = np$, et les

▼ ***Figure 10 : distribution en une seconde, k désintégrations d'une substance radio-active subissant en moyenne 10 désintégrations par seconde.***

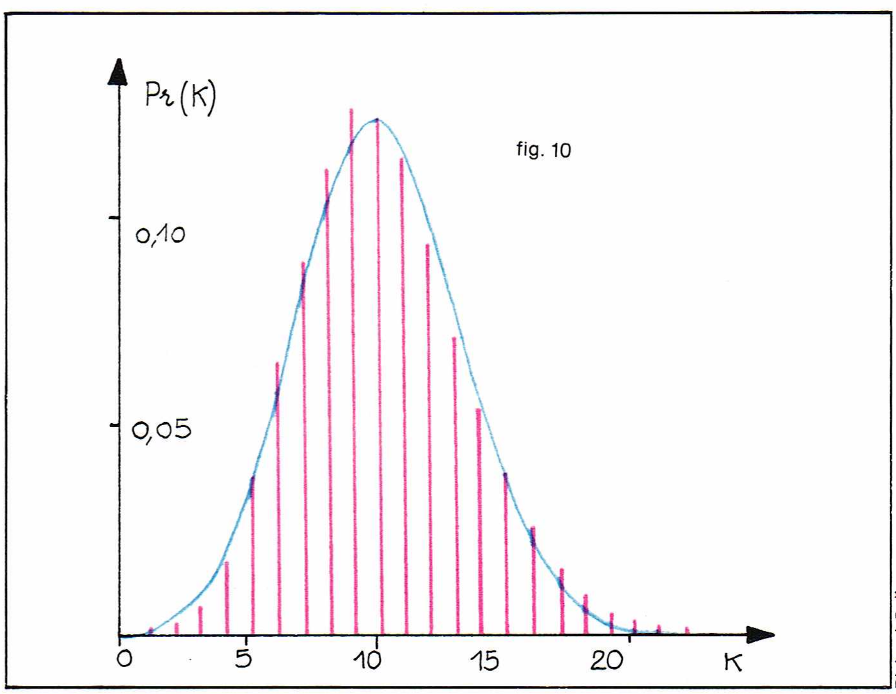

Richard Colin

factorielles en n, k et $n-k$ tendent vers la fonction de Stirling :

$$z! \simeq \sqrt{2\pi z}\left(\frac{z}{e}\right)^z$$

Utilisant cette expression pour les factorielles présentes dans **(38)** :

$$\mathrm{P}(k) \to \frac{\sqrt{n}}{\sqrt{2\pi k\,(n-k)}}\left(\frac{np}{k}\right)^k\left(\frac{nq}{n-k}\right)^{n-k}$$

Posant $\xi = k - np$

$$\mathrm{P}(k) \simeq \frac{\sqrt{n}}{\sqrt{2\pi\,(np+\xi)\,(nq-\xi)}}\left(\frac{np}{np+\xi}\right)^{np+\xi}\left(\frac{nq}{nq-\xi}\right)^{nq-\xi}$$

$$\simeq \frac{\sqrt{n}}{\sqrt{2\pi\,(np+\xi)\,(nq-\xi)}}\exp-\left\{(np+\xi)\,\mathrm{Log}\left(1+\frac{\xi}{np}\right)+(nq-\xi)\,\mathrm{Log}\left(1-\frac{\xi}{nq}\right)\right\}$$

Pour $\xi \ll np$ et $\xi \ll nq$, on obtient, en développant les logarithmes et en ne retenant que les termes dominants :

$$\mathrm{P}(k) \simeq \frac{1}{\sqrt{2\pi npq}}\exp-\frac{\xi^2}{2npq} = \mathrm{N}(k-np, \sqrt{npq})$$

Moments

Les moments de la distribution normale sont :

$$\mathcal{M}_n(\xi) = \int_{-\infty}^{+\infty}\xi^n\,\mathrm{N}(\xi, \sqrt{npq})\,d\xi, \quad \xi = k - np$$

En se servant de l'intégrale définie $\int_0^{\infty} e^{-t^2}dt = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$ et en intégrant par parties, on obtient pour les premiers moments :

$$\mathcal{M}_0 = 1$$
$$\mathrm{E}(k) = np$$
$$\sigma^2(k) = npq$$

Ces relations sont identiques aux relations **(37)** indiquant que les trois premiers moments de la distribution de Gauss $\mathrm{N}(k-np, \sqrt{npq})$ coïncident avec les moments de la distribution binominale. La comparaison des deux distributions montre que l'approximation gaussienne est satisfaisante dans les applications pratiques, dès que $n \gtrsim 10$ (*fig.* 10).

Fonction caractéristique

La fonction caractéristique **(25)** de la distribution normale $\varphi(k) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{ikx}\,\mathrm{N}(x-x_0, \sigma)\,dx$

$$\textbf{(39)} \qquad \varphi(k) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{+\infty} e^{ikx}\,e^{-(x-x_0)^2/2\sigma^2}\,dx$$

peut se calculer en utilisant le lemme suivant.

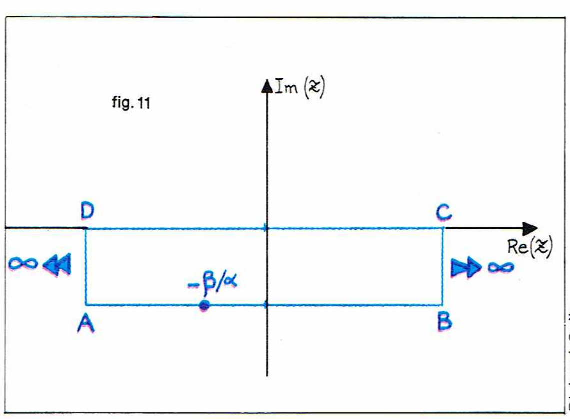

▶ *Figure 11 : voir développement dans le texte ci-contre.*

Lemme

$$\mathfrak{I}(\alpha, \beta) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\alpha^2x^2+2\beta x}\,dx, \ \beta \text{ réel ou complexe}$$

$$\textbf{(40)} \qquad = \frac{\sqrt{\pi}}{\alpha}\,e^{\beta^2/\alpha^2}$$

En effet

$$\mathfrak{I}(\alpha, \beta) = e^{\beta^2/\alpha^2}\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\left(\alpha x-\frac{\beta}{\alpha}\right)^2}dx$$

Posant $z = \alpha x - \frac{\beta}{\alpha}$.

$$\mathfrak{I}(\alpha, \beta) = \frac{1}{\alpha}\,e^{\beta^2/\alpha^2}\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} e^{-z^2}\,dz \qquad (\textit{fig.}\ 11)$$

La fonction $f(z) = e^{-z^2}$ n'a pas de pôles dans le plan complexe. Intégrant sur le contour ABCD :

$$\oint f(z)\,dz = \int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} f(z)\,dz + \int_{\mathrm{B}}^{\mathrm{C}} f(z)\,dz + \int_{\mathrm{C}}^{\mathrm{D}} f(z)\,dz + \int_{\mathrm{D}}^{\mathrm{A}} f(z)\,dz = 0$$

Quand les côtés BC et AD tendent vers l'infini, $f(z)$ tend vers 0 sur tous les points des parcours correspondants. D'où :

$$\int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} f(z)\,dz = \int_{\mathrm{D}}^{\mathrm{C}} f(z)\,dz = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-z^2}\,dz, \quad z \text{ réel} = \sqrt{\pi},$$

ce qui complète la démonstration.
Combinant **(39)** et **(40)**, on obtient :

$$\varphi(k) = e^{-\frac{k^2\sigma^2}{2}+ikx_0}$$

Lois des grands nombres

Les lois des grands nombres constituent le noyau de la théorie des probabilités. La première loi, en particulier, assure que la fréquence des événements favorables tend bien vers la probabilité, quand celle-ci existe, conformément à la supposition de base de notre exposé. La seconde loi, d'un autre côté, indique que la distribution de probabilité d'une somme de variables aléatoires tend, presque toujours, vers une distribution normale, à mesure que le nombre de variables de la somme augmente. Comme, dans les cas usuels, la convergence de la distribution vers une distribution normale est très rapide, cette loi permet de comprendre la grande portée de la distribution normale.

Les deux lois des grands nombres peuvent se présenter sous diverses formes, suivant le degré de généralité exigé. Les difficultés des démonstrations augmentent malheureusement avec ce degré de généralité. Pour cette raison, nous nous contenterons d'énoncer ces théorèmes, laissant aux lecteurs intéressés la liberté de chercher dans les livres spécialisés les détails des démonstrations. Les discussions de ces détails appartiennent aux théories mathématiques des probabilités.

Première loi

Soit $\{X_k\}$ une séquence de variables aléatoires indépendantes, chacune d'elles régie par la même distribution de probabilité. Si l'espérance mathématique $\mathrm{E}(\mathrm{X}) = \mu$ existe, alors, nous avons pour tout $\varepsilon > 0$

$$\lim_{n\to\infty} Pr\left\{\left|\frac{X_1 + \ldots X_n}{n} - \mu\right| > \varepsilon\right\} = 0$$

On notera qu'il n'est pas nécessaire que les autres moments de la distribution de probabilité, et en particulier σ, existent (c'est-à-dire soient finis).

La première loi des grands nombres peut s'appliquer aussi quand les variables aléatoires $X_1, X_2, \ldots, X_n$ ne suivent pas la même distribution de probabilité. Dans ce cas, toutefois, les diverses distributions doivent remplir certaines conditions supplémentaires. Le théorème s'applique, en particulier, si l'une des deux conditions suivantes au moins est satisfaite :

a - toutes les variables X_i sont limitées, c'est-à-dire $\exists$ un nombre A tel que $\forall i\ |X_i| < \mathrm{A}$;

b - les variances existent, et S^2 étant la variance de la somme $(S^2 = \Sigma\,\sigma_i^2)$, $\frac{S}{n} \to 0$ quand $n \to \infty$.

L'espérance mathématique de la somme étant donnée par **(34)**, la limite μ sera dans ce cas la moyenne arithmétique des espérances mathématiques respectives :

$$\mu = \frac{1}{n} \Sigma \mu_i.$$

Appliquons maintenant la première loi des grands nombres aux variables aléatoires X_i qui prennent les valeurs 1 ou 0 selon que le résultat du i-ième essai d'une séquence d'*épreuves répétées* est favorable ou non. $Y = \Sigma X_i$ est le nombre d'événements favorables obtenus au total, et $f = \Sigma \frac{X_i}{n}$ la fréquence. Par ailleurs,

$$E(X) = 0\,(1 - p) + 1\,(p) = p$$

est la probabilité de succès pour n'importe quel essai. La première loi assure donc que la fréquence tend vers la probabilité, quand le nombre d'épreuves tend vers l'infini.

Deuxième loi (Théorème de la limite centrale)

Soit $\{X_k\}$ une séquence de variables aléatoires indépendantes, chacune d'elles régie par la même distribution de probabilité. Si l'espérance mathématique $E(X) = \mu$ et la variance $E(X^2) - E(X)^2 = \sigma^2$ existent, alors pour tout couple α, β ($\alpha < \beta$) :

$$\lim_{n \to \infty} Pr \left\{ \alpha < \frac{X_1 + ... X_n - n\mu}{\sigma \sqrt{n}} < \beta \right\} = \Phi(\beta) - \Phi(\alpha)$$

où

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x} e^{-t^2/2}\, dt$$

Pour montrer plus clairement que ce théorème implique que la distribution de la somme $Y = \Sigma X_i$ tend vers une distribution normale, posons :

$$T = \frac{(Y - \bar{Y})}{\sigma \sqrt{n}} \qquad \alpha = t \qquad \beta = t + dt$$

nous obtenons :

$$Pr\{t < T < t + dt\} = N(t, 1)$$

D'où, en se servant de **(32)** :

$$F(y) = \int N(t, 1)\, \delta\,(y - t\sigma\sqrt{n} - \langle y \rangle)\, dt$$
$$F(y) = N(y - \langle y \rangle, \sigma\sqrt{n})$$

Comme la première loi, la seconde loi des grands nombres peut s'étendre au cas où les variables aléatoires $X_1, ..., X_n$ ne suivent pas la même distribution de probabilité, pourvu que les diverses distributions satisfassent certaines conditions générales. Elle s'applique en particulier quand la condition **a** définie plus haut est satisfaite et que l'écart type correspondant à la somme, soit S_n, tend vers l'infini quand $n \to \infty$.

Si X_i prend la valeur 1 ou 0 selon que le résultat du i-ième essai d'une séquence d'épreuves répétées est favorable ou non, nous obtenons le résultat suivant : la limite, pour $n \to \infty$, de la distribution binominale est une distribution normale. Dans ce cas, la seconde loi implique aussi que la fréquence doit tendre vers la probabilité. En effet, à mesure que n augmente, la variance de la fréquence $\frac{Y}{n}$ — soit $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ — diminue, la distribution se rétrécit autour de l'espérance mathématique, qui est, dans ce cas, la probabilité elle-même.

Corrélations

Par définition, deux événements aléatoires A et B sont dits *indépendants* si la réalisation de l'un quelconque d'entre eux n'influe pas sur la réalisation de l'autre. La probabilité de la réalisation de l'événement composé $A \cap B$ (A et B) est alors simplement le produit des probabilités de réalisation de chacun d'eux.

Si X et Y sont deux variables aléatoires indépendantes et $f_1(x)$ et $f_2(y)$ sont les densités de probabilité associées, la densité de probabilité associée à $X \cap Y$ est

$$f(x, y) = f_1(x)\, f_2(y). \qquad \textbf{(18)}$$

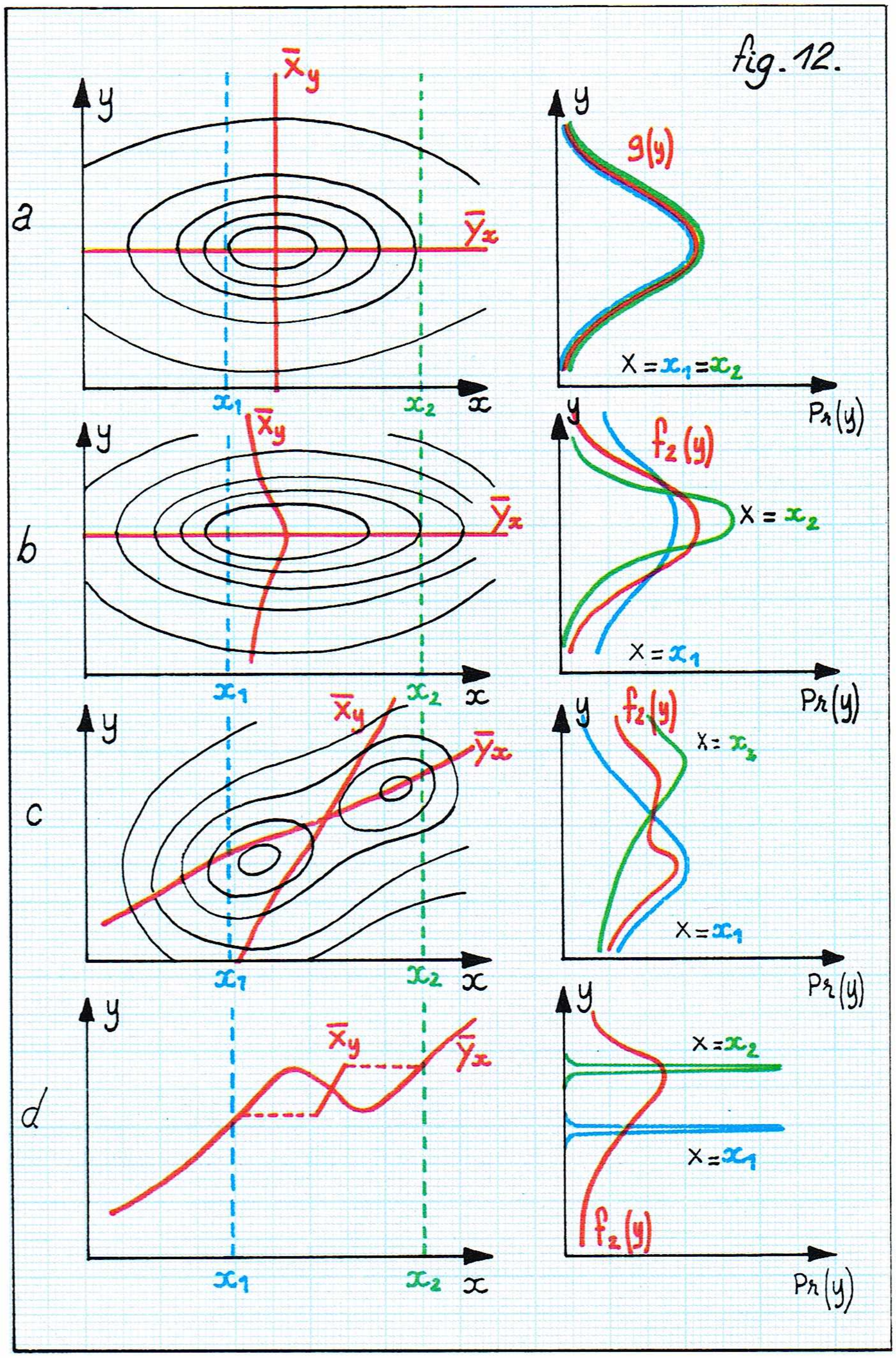

▲ ***Figure 12 :** quatre exemples de densités de probabilité à deux dimensions pour deux variables aléatoires X et Y diversement liées : a, X et Y sont indépendantes ; b, elles sont liées, bien que la droite de régression $\bar{Y}x$ soit parallèle à l'axe des x ; c, cas général ; d, cas des deux variables liées par la relation Y = Y (X).*

Deux événements aléatoires tels que la réalisation de l'un d'eux modifie les probabilités de réalisation de l'autre sont dits *liés*. La probabilité de réalisation de l'événement composé $A \cap B$ est donnée par **(3)**. La densité de probabilité associée à deux variables aléatoires X et Y liées ne prend pas la forme simple **(18)**.

On dit aussi, souvent, que les variables X et Y sont *corrélées*. Il faut toutefois utiliser ce terme avec prudence, car, comme on le verra, on introduit un coefficient de corrélation entre X et Y qui peut être nul, même pour deux variables liées.

Courbes de régression

Considérons la densité de probabilité à deux dimensions $f(x, y)$ et portons-la sur un diagramme à deux dimensions (x, y), par exemple sous la forme de courbes de niveau (*fig.* 12). La densité de probabilité associée à Y, pour x fixé, est proportionnelle à $f(x, y)$:

$$\textbf{(41)} \qquad \underset{X = x}{g(y)} = f(x, y) \,/ \int f(x, y)\, dy$$

Si X et Y sont deux variables indépendantes, cette densité est :

$$g\underset{X=x}{(y)} = f_1(x) f_2(y) / f_1(x) \int f_2(y)\, dy = f_2(y).$$

Elle reste constamment égale à la distribution marginale $f_2(y)$. En langage imagé, on dira que n'importe quelle coupe effectuée à $x =$ cte reproduit la distribution marginale associée à y. Le fait que les distributions obtenues à $x =$ cte reproduisent toutes la distribution marginale ne fait que traduire directement l'indépendance mutuelle de X et Y.

Cette propriété n'est évidemment plus vraie dans le cas de deux variables aléatoires liées. Considérons la valeur moyenne z de la distribution **(41)**. z est la valeur moyenne des résultats y que l'on peut obtenir sachant que l'on a obtenu $X = x$. Par définition de la moyenne **(19)** :

$$z = \int y g\underset{X=x}{(y)}\, dy = \int y f(x, y)\, dy \Big/ \int f(x, y)\, dy$$

La courbe décrite par z quand on fait varier x tout au long de l'intervalle (x_a, x_b) de définition de X s'appelle la *courbe de régression de Y en X*.

On peut définir de la même manière la *courbe de régression de X en Y*, définie par l'espérance mathématique de X obtenue à y fixé, quand y varie tout au long de l'intervalle (y_a, y_b) de définition de Y.

Il est évident que, dans le cas où X et Y sont indépendantes, les courbes de régression de Y en X et de X en Y sont des droites parallèles, respectivement à l'axe des x et à l'axe des y. Cependant, le fait que les courbes de régression soient des droites parallèles aux axes n'est pas une condition suffisante pour que X et Y soient indépendantes. En effet, non seulement le moment d'ordre 1, (l'espérance mathématique), mais la distribution de probabilité elle-même de Y à x fixé (ou de X à y fixé) ne doit pas dépendre de x (ou de y). Par exemple, sur la *figure* 12 *b*), la courbe de régression $z = \varphi(x)$ est parallèle à l'axe des x, mais les variables X et Y ne sont manifestement pas indépendantes.

Un cas extrême de liaison entre X et Y est le cas où Y est une fonction univoque de X : $Y = Y(X)$. Dans ce cas, on dit que Y est strictement liée à X. La densité $f(x, y)$ est nulle partout, sauf aux points $y = y(x)$. La courbe de régression $z = \varphi(x)$ se confond avec cette fonction, et les distributions de probabilité à x fixé sont les distributions δ de Dirac : il n'y a aucune dispersion possible des résultats de tirage de Y à x fixé. En particulier, la variance σ_g^2 associée à la **distribution (41)** est nulle.

Coefficient de corrélation de Pearson

La variance σ^2_g de la distribution de Y pour x fixé donne donc une idée de l'intensité avec laquelle les variables X et Y sont liées. La valeur moyenne de cette grandeur

$$\textbf{(42)} \qquad \sigma_D^2 = \int \sigma_g^2 f_1(x)\, dx$$

est reliée au coefficient de *corrélation de Pearson* $\eta_{Y/X}$ par la relation :

$$\textbf{(43)} \qquad \eta_{Y/X}^2 = 1 - \sigma_D^2 / \sigma_Y^2$$

où σ_Y^2 est la variance de la distribution marginale $f_2(y)$.

$\eta_{Y/X}^2$ est toujours compris entre 0 et 1. Il est nul si $\sigma_z^2 = 0$, ou $z =$ cte. La courbe de régression de Y en X est alors une droite parallèle à l'axe des x, ce qui n'implique pas nécessairement que X et Y soient indépendantes. Il est égal à 1 quand Y est une fonction univoque de X ($\sigma_D^2 = 0$).

L'équation **(43)** ne définit pas le signe du coefficient de corrélation de Pearson $\eta_{Y/X}$. Si $z = \varphi(x)$ est une fonction monotone, on choisit le signe de dérivée de cette fonction ($\eta_{Y/X}$ positif si un accroissement de x favorise un accroissement de y, et négatif dans le cas contraire).

Coefficient de corrélation ρ

Malgré ses avantages, le coefficient de corrélation de Pearson n'est pas la seule mesure possible du degré de liaison entre deux variables aléatoires. On utilise plus fréquemment encore le coefficient ρ, défini par :

$$\textbf{(44)} \qquad \rho = \frac{\langle (x - \langle x \rangle)\,(y - \langle y \rangle) \rangle}{\sigma_X\, \sigma_Y},$$

qui est le rapport de l'espérance mathématique du produit des variables centrées au produit des variances correspondantes. ρ peut encore s'écrire :

$$\textbf{(45)} \qquad \rho = \frac{\langle xy \rangle - \langle x \rangle \langle y \rangle}{\sigma_X\, \sigma_Y}$$

Il est, en valeur absolue, inférieur ou égal à 1. En effet, si nous appelons Ξ et H les variables centrées correspondant à X et Y prenant les valeurs ξ et η respectivement,

$$\textbf{(46)} \qquad \rho^2 = \frac{\langle \xi\eta \rangle^2}{\langle \xi^2 \rangle \langle \eta^2 \rangle}$$

d'après **(44)** et **(23)**.

D'autre part, quel que soit λ, l'expression $(\lambda\xi - \eta)^2$ est $\geqslant 0$. Par suite :

$$\langle (\lambda\xi - \eta)^2 \rangle \geqslant 0$$
$$\lambda^2 \langle \xi^2 \rangle - 2\lambda \langle \xi\eta \rangle + \langle \eta^2 \rangle \geqslant 0 \quad \forall \lambda ;$$

le discriminant réduit de cette expression,

$$\langle \xi\eta \rangle^2 - \langle \xi^2 \rangle \langle \eta^2 \rangle,$$

est donc toujours négatif ou nul *(inégalité de Schwartz)*. Comparant avec **(46)** :

$$\textbf{(47)} \qquad \rho^2 \leqslant 1$$

La valeur extrême de ρ, $|\rho| = 1$, est obtenue pour $X - \langle X \rangle = a\,(Y - \langle Y \rangle)$, c'est-à-dire quand il existe une dépendance linéaire entre les deux variables.

Le coefficient de corrélation de deux variables aléatoires indépendantes est nul ; écrivant ρ conformément à **(45)**, on a, dans ce cas : $\langle xy \rangle = \int xy f_1(x) f_2(y)\, dxdy$

$$= \int x f_1(x)\, dx \int y f_2(y)\, dy = \langle x \rangle \langle y \rangle$$

A l'opposé, le fait que $\rho = 0$ ne prouve pas que X et Y soient indépendantes.

Loi normale à deux variables

Un cas particulièrement important de distribution à deux dimensions est le cas où la densité de probabilité de Y, à x fixé, est normale [c'est-à-dire est donnée par **(11)**], de même que la loi de probabilité de X à y fixé.

La densité à deux dimensions $f(x, y)$ centrée, définie pour x et $y \in (-\infty, +\infty)$, peut alors se mettre sous la forme :

$$\textbf{(48)} \qquad f(x, y) = \frac{\sqrt{\delta}}{2\pi} \exp\left\{ -\frac{1}{2}(ax^2 - 2bxy + cy^2) \right\}$$

où $\delta = ac - b^2$.

La densité marginale de x est :

$$f_1(x) = \frac{\sqrt{\delta}}{2\pi} e^{-\frac{ax^2}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp -\frac{1}{2}(-2bxy + cy^2)\, dy.$$

Le changement de variable $t = y - xb/c$ donne :

$$\textbf{(49)} \qquad f_1(x) = N\left(x, \sqrt{\frac{c}{\delta}}\right).$$

De même, la densité marginale de y est :

$$\textbf{(50)} \qquad f_2(y) = N\left(y, \sqrt{\frac{a}{\delta}}\right).$$

En utilisant les mêmes notations, la densité de probabilité $g\underset{X=x}{(y)}$ de la variable Y à x fixé est :

$$\textbf{(51)} \qquad g\underset{X=x}{(y)} = N\left(y - \frac{xb}{c}, \frac{1}{\sqrt{c}}\right);$$

tandis que la densité de probabilité $h\underset{Y=y}{(x)}$ de la variable Y à y fixé est :

$$\textbf{(52)} \qquad h\underset{Y=y}{(x)} = N\left(x - \frac{yb}{a}, \frac{1}{\sqrt{a}}\right).$$

La densité **(48)** a donc la propriété remarquable suivante : aussi bien les densités conditionnelles $g(y)$ et $h(x)$ que les densités marginales $f_1(x)$ et $f_2(y)$ sont normales (mais avec des largeurs différentes).

Les équations **(51)**, **(52)** montrent en outre que les courbes de régression sont des droites passant par l'origine. La droite de régression de Y en X a pour pente $\frac{b}{c}$ et celle de X en Y a pour pente $\frac{a}{b}$.

Corrélation

La valeur moyenne du produit XY est :

$$\langle xy\rangle = \iint xy\, f(x, y)\, dx\, dy$$

$$= \frac{\sqrt{\delta}}{2\pi}\int xe^{-\frac{ax^2}{2}} dx \int y \exp -\frac{1}{2}(cy^2 - 2\,bxy)\, dy$$

En utilisant le changement de variable $t = y - \frac{xb}{c}$ et en intégrant par parties l'intégrale sur y, puis celle sur x, on trouve :

(53) $$\langle xy\rangle = \frac{b}{\delta}$$

d'où :

$$\rho = \frac{b}{\sqrt{ac}}$$

où nous avons utilisé **(45)**, **(49)** et **(50)**.

Le coefficient de corrélation de Pearson est donné par **(43)** :

$$\eta^2_{Y/X} = 1 - \sigma^2_D / \sigma^2_Y$$

où $\sigma^2_D = \frac{1}{c}$ et $\sigma^2_Y = \frac{a}{\delta}$ par **(42)**, **(52)** et **(50)** :

$$\eta^2_{Y/X} = \frac{b^2}{ac} = \rho^2.$$

On trouverait de même : $\eta^2_{X/Y} = \frac{b^2}{ac} = \rho^2.$

Pour la distribution normale à deux dimensions, les coefficients de corrélations de Pearson et le coefficient ρ prennent la même valeur absolue. La convention de signe donnée plus haut pour le coefficient $\eta_{Y/X}$ assure qu'ils ont également le même signe.

Réécrivons la distribution **(48)** en fonction des paramètres ρ, σ_X et σ_Y.

On trouve :

(54) $$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\,\sigma_X\sigma_Y\sqrt{1-\rho^2}} \exp -\frac{1}{2}\left\{\frac{1}{1-\rho^2}\left(\frac{x^2}{\sigma_X^2} - 2\rho\frac{xy}{\sigma_X\sigma_Y} + \frac{y^2}{\sigma_Y^2}\right)\right\}$$

Fonction caractéristique

La fonction caractéristique de la distribution **(48)** :

$$\varphi(u, v) = \iint_{-\infty}^{+\infty} e^{i(ux + vy)} f(x, y)\, dx\, dy$$

se calcule aisément en utilisant le lemme **(40)**. On obtient :

$$\varphi(u, v) = e^{\frac{1}{2\delta}(cu^2 + 2\,buv + av^2)}$$

Il est remarquable que cette relation peut encore s'écrire, en utilisant **(49)**, **(50)** et **(53)** :

(55) $$\varphi(u, v) = \exp -\frac{1}{2}(\langle x^2\rangle u^2 + 2\langle xy\rangle uv + \langle y^2\rangle v^2)$$

Notons enfin que la fonction caractéristique $\varphi_1(u)$ associée à la densité marginale $f_1(x)$ est, par définition **(17)** de celle-ci :

(56) $$\varphi_1(u) = \int e^{iux} dx \int f(x, y)\, dy = \varphi(u, o).$$

Distribution de deux variables gaussiennes indépendantes

Pour $\rho = 0$ (ou $b = 0$), la densité **(54)** devient simplement :

(57) $$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\,\sigma_X\sigma_Y}\exp -\frac{1}{2}\left(\frac{x^2}{\sigma_X^2} + \frac{y^2}{\sigma_Y^2}\right) = N(x, \sigma_X) \times N(y, \sigma_Y).$$

Par conséquent, $f(x, y)$ est dans ce cas la densité de probabilité correspondant à deux variables gaussiennes X et Y indépendantes. Nous avons donc l'importante propriété suivante : pour un couple de variables gaussiennes, la nullité du coefficient de corrélation est équivalente à l'indépendance de ces variables.

La *figure* 13 présente, en perspective, la densité de distribution pour deux variables indépendantes normales, centrées et réduites ($\sigma_X = \sigma_Y = 1$).

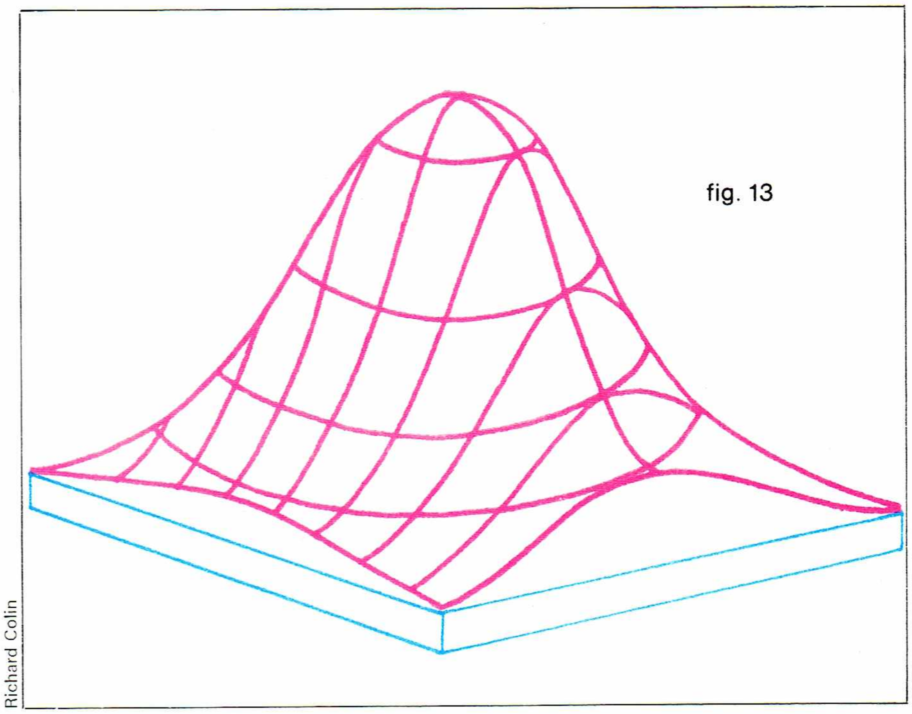

fig. 13

Richard Colin

▲ ***Figure 13 : représentation, en perspective, de la densité de distribution pour deux variables indépendantes normales, centrées et réduites ($\sigma_X = \sigma_Y = 1$).***

Réduction en facteurs

La transformation linéaire $X' = \alpha X + \beta$ laisse invariant le coefficient de corrélation ρ. En effet,

$$\langle X'Y\rangle = \alpha\langle XY\rangle + \beta\langle Y\rangle, \langle X'\rangle\langle Y\rangle = \alpha\langle X\rangle\langle Y\rangle + \beta\langle Y\rangle \quad \text{et} \quad \sigma'_X = \alpha\sigma_X.$$

Par contre, la transformation plus générale :

(58) $$\begin{cases} X' = \alpha X + \beta Y \\ Y' = \alpha' X + \beta' Y \end{cases}$$

modifie le coefficient de corrélation. Si nous supposons pour simplifier que X et Y sont des variables indépendantes, centrées et réduites, c'est-à-dire telles que $\langle X\rangle = \langle Y\rangle = 0$, $\langle X^2\rangle = \langle Y^2\rangle = 1$, on obtient :

(59) $$\begin{aligned} \langle X'Y'\rangle &= \alpha\alpha' + \beta\beta' \\ \sigma^2_{X'} &= \alpha^2 + \beta^2 \\ \sigma^2_{Y'} &= \alpha'^2 + \beta'^2. \end{aligned}$$

D'où :

$$\rho' = \frac{\alpha\alpha' + \beta\beta'}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}\sqrt{\alpha'^2 + \beta'^2}}$$

Bien entendu, la transformation inverse est possible. Partant de deux variables X' et Y' normales et centrées (ce qui est toujours possible moyennant un changement de variable trivial), d'écarts quadratiques σ'_X et σ'_Y et de corrélation ρ', on peut trouver (d'une infinité de manières) des nombres α, β, α', β' vérifiant **(59)**.

La transformation inverse de **(58)** :

(60) $$\begin{cases} X = (\beta' X' - \beta Y')\,(\alpha\beta' - \alpha'\beta) \\ Y = (-\alpha' X' + \alpha Y')\,(\alpha\beta' - \alpha'\beta) \end{cases}$$

définit deux variables aléatoires X et Y indépendantes, normales, centrées et réduites, dont la densité de probabilité :

$$f(x, y) = N(x, 1)\, N(y, 1)$$

est celle qui est représentée sur la *figure* 13.

Cette transformation s'appelle la *réduction en facteurs* des variables aléatoires gaussiennes X et Y. En statistique, il est extrêmement important, à partir d'un ensemble de variables aléatoires gaussiennes corrélées deux à deux, d'obtenir un ensemble en nombre égal (ou inférieur, si

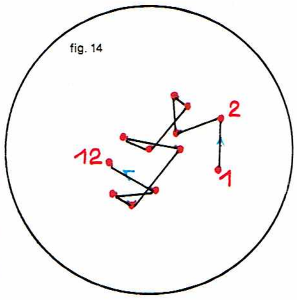

Richard Colin

▲ *Figure 14 : un exemple* **de processus markovien :** *les déplacements aléatoires d'une particule sous l'effet des chocs aléatoires des molécules d'un liquide.*

certaines des variables définies ne sont pas linéairement indépendantes) de variables gaussiennes indépendantes, qui sont évidemment plus aptes à caractériser le problème statistique posé. Cette recherche générale des facteurs constitue alors l'*analyse factorielle* (voir *Analyse des données*).

Variables gaussiennes à N dimensions

La forme des équations **(55)** et **(58)** suggère l'avantage qu'il y a, lorsqu'on traite le problème de variables gaussiennes corrélées, de traiter l'ensemble des variables aléatoires sous forme matricielle. La généralisation des résultats obtenus dans le cas de deux variables s'exprime alors ainsi :

a - Généralisation de **(55)**.

Soit $\underset{\sim}{t} = \begin{vmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_N \end{vmatrix}$ le vecteur formé par les variables $t_1, ..., t_N$

associées dans la transformation de Fourier aux variables aléatoires $\underset{\sim}{X} = \begin{vmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_N \end{vmatrix}$

La fonction caractéristique associée à la densité de probabilités de N variables gaussiennes *centrées* est :

$$\varphi(\underset{\sim}{t}) = e^{-\frac{1}{2}\underset{\sim}{t}^T \underset{\sim}{V} \underset{\sim}{t}}$$

où T symbolise la transposition et où $\underset{\sim}{V}$ est la matrice des variances de dimension N × N.

$$\textbf{(61)} \qquad \underset{\sim}{V} = \begin{Vmatrix} \langle X_1^2 \rangle & \langle X_1X_2 \rangle & \dots & \langle X_1X_N \rangle \\ \langle X_1X_2 \rangle & \langle X_2^2 \rangle & \dots & \langle X_2X_N \rangle \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \langle X_1X_N \rangle & \langle X_2X_N \rangle & \dots & \langle X_N^2 \rangle \end{Vmatrix}$$

Nous dirons que les variables aléatoires $\underset{\sim}{X}$ suivent une distribution normale centrée N ($\underset{\sim}{X}$, $\underset{\sim}{V}$).

b - Généralisation de **(56)**.

Chaque sous-ensemble $\underset{\sim}{Y} = \begin{vmatrix} X_i \\ \vdots \\ X_k \end{vmatrix}$ à p dimensions

(p < N) de X suit une loi N ($\underset{\sim}{Y}$, $\underset{\sim}{W}$), où la matrice des variances $\underset{\sim}{W}$ est formée à partir de la matrice $\underset{\sim}{V}$ en ne retenant que les lignes et les colonnes correspondant à (X_i, ..., X_k). En d'autres termes, les lois marginales à p dimensions sont normales.

c - Généralisation de **(57)**.

Séparons les $\underset{\sim}{X}$ variables en deux sous-ensembles $\underset{\sim}{Y}$ et $\underset{\sim}{Z}$ de dimensions p et q respectivement. Une condition nécessaire et suffisante pour que $\underset{\sim}{Y}$ et $\underset{\sim}{Z}$ soient indépendantes est que E ($\underset{\sim}{Y}\underset{\sim}{Z}^T$) = 0. En d'autres termes, il faut et il suffit pour cela que toutes les valeurs moyennes du type $\langle Y_k Z_l \rangle$, ($1 \leqslant k \leqslant p$ et $1 \leqslant l \leqslant q$) soient nulles.

d - Généralisation de **(58)** et **(60)**.

Soit A une matrice de dimension k × N. La transformation

$$\textbf{(62)} \qquad \underset{\sim}{Y} = \underset{\sim}{A}\underset{\sim}{X}$$

définit un vecteur aléatoire $\underset{\sim}{Y}$ qui suit une loi N ($\underset{\sim}{Y}$, $\underset{\sim}{W}$), où $\underset{\sim}{W} = \underset{\sim}{A}\ \underset{\sim}{V}\ \underset{\sim}{A}^T$. Si $\underset{\sim}{V}$ est régulière, on peut trouver une matrice $\underset{\sim}{A}$ telle que $\underset{\sim}{W}$ = 1 (matrice unité), de telle sorte que $\underset{\sim}{Y}$ suive une distribution N ($\underset{\sim}{Y}$, 1) normale, centrée et réduite, à k dimensions.

Processus et fonctions stochastiques

Chaînes de Markov

Considérons un espace $\mathcal{E}$ d'événements aléatoires a_i. Nous avons étudié le problème du tirage répété des événements de l'espace $\mathcal{E}$, quand la probabilité affectée à chaque événement a_i ne dépend que de cet événement et reste la même tout au long de la série d'épreuves.

Supposons maintenant que la probabilité affectée à l'événement a_i ne dépende pas seulement de cet événement, mais encore des événements survenus au cours des tirages précédents. On dit que les épreuves successives forment une chaîne. Un cas particulièrement fréquent est celui où les probabilités en question ne dépendent pas des résultats de *tous* les essais précédents, mais seulement du dernier d'entre eux. On dit, dans ce cas, que la chaîne des événements $\{a_i\}$ successifs est une *chaîne de Markov*.

Dans un processus markovien, on a donc à considérer les probabilités $P_{ij} = P_r(a_j/a_i)$ pour que l'événement a_j se produise au n-ième essai, sachant que l'événement a_i s'est produit à l'essai précédent. Un exemple particulièrement remarquable de processus markovien est donné par le mouvement brownien des petites particules colloïdales en suspension dans un liquide, quand on les observe au microscope. Sous l'effet des chocs aléatoires des molécules du liquide, la particule subit des déplacements aléatoires, sa position à l'instant de la n-ième observation dépendant de sa position à la (n — 1)-ième observation (*fig.* 14).

Au lieu de parler de l'espace $\mathcal{E}$ des événements possibles a_i (i = 1, N), on parle souvent de l'espace $\mathcal{E}$ des N états possibles. Le passage de l'état a_i à l'état a_j est alors appelé *transition* $a_i \to a_j$. Dans le mouvement brownien, il y a une infinité d'états possibles (les positions de la particule colloïdale) et la transition est le passage d'une position à l'autre.

Les probabilités de transition P_{ij} forment une *matrice stochastique* $\underset{\sim}{P}$. Cette dénomination est liée à la propriété suivante :

$$\sum_{j=1}^{N} P_{ij} = \sum_{j=1}^{N} P_r(a_j/a_i) = 1$$

(la somme des éléments de la matrice le long d'une même ligne est égale à 1), car au cours d'une transition, le système ne peut passer que de l'état i à l'un des N états possibles.

La probabilité pour que le système passe de l'état i à un état j en deux étapes est la somme sur k des transitions $a_i \to a_k$, $a_k \to a_j$:

$$P_{ij}^{(2)} = \sum_{k=1}^{N} P_{ik} P_{kj}$$

c'est-à-dire $\qquad \underset{\sim}{P}^{(2)} = \underset{\sim}{P}^2$

Par suite : $\qquad \underset{\sim}{P}^{(n)} = \underset{\sim}{P}^n$

et si on appelle $\underset{\sim}{\pi} = \| \pi_1 \dots \pi_N \|$ la matrice ligne représentant les probabilités pour que le système se trouve, à l'instant initial, dans l'état (a_1, ..., a_N), la probabilité pour que, après n étapes, les systèmes se trouvent dans l'état j est donnée par :

$$P_j^{(n)} = \sum_i \pi_i P_{ij}^{(n)}$$

soit : $\qquad \underset{\sim}{P}^{(n)} = \underset{\sim}{\pi}\,\underset{\sim}{P}^n$

Une chaîne pour laquelle, à partir de n'importe quel état, on peut atteindre n'importe lequel des autres états (après un nombre variable d'étapes) est appelée *chaîne ergodique*. Mathématiquement, une chaîne ergodique est définie par la propriété suivante : pour tout couple d'états initiaux et finals i et k, la matrice stochastique est telle qu'il existe une puissance $\underset{\sim}{P}^n$ de $\underset{\sim}{P}$ telle que

$$(P^n)_{ik} \neq 0.$$

S'il existe une puissance n de $\underset{\sim}{P}$, soit $\underset{\sim}{P}^n$, telle que tous les éléments $(P^n)_{ik}$ sont différents de zéro, la chaîne est appelée *régulière*. Dans une chaîne régulière, tous les états peuvent être atteints à partir de n'importe quel état initial, en n étapes exactement.

Équilibre statistique

Les chaînes ergodiques et les chaînes régulières possèdent les importantes propriétés suivantes :

a - pour une chaîne ergodique,

$$\lim_{n \to \infty} \frac{P + P^2 + \dots P^n}{n} = A$$

où A est une matrice stochastique dont toutes les lignes sont identiques. La matrice ligne $\underset{\sim}{\alpha} = \| a_1, a_2 \dots a_n \|$ qui les compose est telle que $\underset{\sim}{\alpha}\underset{\sim}{P} = \underset{\sim}{\alpha}$;

b - pour une chaîne régulière :

(63) $$\lim_{n \to \infty} \mathrm{P}^n = \mathrm{A}$$

où A est une matrice stochastique dont toutes les lignes sont identiques. La matrice ligne $\underset{\sim}{\alpha} = \|a_1, a_2 \dots a_n\|$ qui les compose est telle que $\underset{\sim}{\alpha}\, \underset{\sim}{\mathrm{P}} = \underset{\sim}{\alpha}$.

En d'autres termes, pour une chaîne régulière, il arrive un moment où l'addition d'étapes supplémentaires ne modifie plus sensiblement les probabilités pour que le système se retrouve dans tel ou tel état, et ces probabilités sont les mêmes quel que soit l'état initial : un équilibre statistique s'établit entre les diverses transitions possibles.

Nous ne démontrerons pas ces propriétés dans le cas général, mais nous pouvons aisément vérifier la seconde dans le cas simple où N = 2. Dans ce cas, la matrice stochastique s'écrit :

$$\underset{\sim}{\mathrm{P}} = \begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{vmatrix}$$

La probabilité $p_{11}^{(n)}$ d'obtenir l'état (1) à partir du même état, après n étapes, est :

$$p_{11}^{(n)} = p_{11}^{(n-1)}\, p_{11} + p_{12}^{(n-1)}\, p_{21}.$$

De même :

$$p_{22}^{(n)} = p_{21}^{(n-1)}\, p_{12} + p_{22}^{(n-1)}\, p_{22}.$$

Utilisons le fait que :

$$p_{12}^{(n-1)} = 1 - p_{11}^{(n-1)}$$

et

$$p_{21} = 1 - p_{22};$$

$$p_{11}^{(n)} = p_{11}^{(n-1)}\, p_{11} + (1 - p_{11}^{(n-1)})\,(1 - p_{22})$$

$$= p_{11}^{(n-1)}\,(p_{11} + p_{22} - 1) + (1 - p_{22}).$$

Posons : $$q = (p_{11} + p_{22} - 1)$$
$$r = 1 - p_{11}$$
$$s = 1 - p_{22}.$$

On obtient : $$p_{11}^{(n)} = p_{11}^{(n-1)}\, q + s.$$

De même : $$p_{22}^{(n)} = p_{22}^{(n-1)}\, q + r.$$

Par récurrence, on obtient :

(64) $$p_{11}^{(n)} = \frac{r}{1-q}\, q^n + \frac{s}{1-q}$$

(65) $$p_{22}^{(n)} = \frac{s}{1-q}\, q^n + \frac{r}{1-q}$$

qui donne bien

$$p_{11}^{(0)} = p_{22}^{(0)} = 1\,; \quad p_{11}^{(1)} = p_{11},\ p_{22}^{(1)} = p_{22}.$$

Les autres termes de $\underset{\sim}{\mathrm{P}}^n$ sont :

(66) $$p_{12}^{(n)} = 1 - p_{11}^{(n)}, \quad p_{21}^{(n)} = 1 - p_{22}^{(n)}.$$

Si la chaîne à deux états est régulière, $|q| < 1$. En effet, $|q| = 1$ impliquerait, soit $p_{11} = p_{22} = 1$ (les états (1) et (2) restent toujours identiques à eux-mêmes), soit $p_{11} = p_{22} = 0$ (les états (1) et (2) se changent toujours alternativement l'un dans l'autre). On a donc $\lim\limits_{n \to \infty} q^n = 0$.

Par suite :

$$\lim_{n \to \infty} \underset{\sim}{\mathrm{P}}^{(n)} = \underset{\sim}{\mathrm{A}} = \begin{vmatrix} \dfrac{s}{1-q} & \dfrac{r}{1-q} \\[2ex] \dfrac{s}{1-q} & \dfrac{r}{1-q} \end{vmatrix}$$

où nous avons utilisé **(64)**, **(65)** et **(66)**. La matrice $\underset{\sim}{\mathrm{A}}$ a bien les propriétés indiquées en **(63)**.

Applications

Une application particulièrement simple des chaînes de Markov est constituée par le problème du cheminement aléatoire à une dimension. Supposons que la puce Pépita puisse sauter le long d'une ligne, de la position 1 à la position N (*fig.* 15). Quand elle se trouve dans une position $k \neq 1 \neq \mathrm{N}$, elle a une probabilité p de sauter

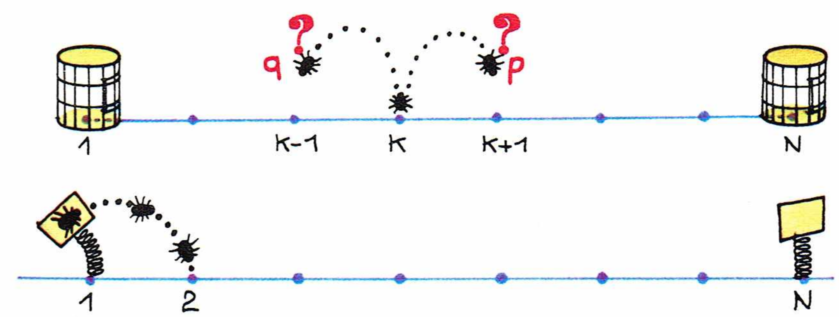

fig. 15

Richard Colin

▲ ***Figure 15 :*** ***chaînes dont les états extrêmes sont absorbants ou réflexifs (cas de la puce Pépita).***

vers la position $k + 1$, et une probabilité q de sauter vers la position $k - 1$. Les positions extrêmes 1 et N peuvent être des cages ($p_{11} = p_{\mathrm{NN}} = 1$, auquel cas les positions 1 et N sont dites *absorbantes*), ou des ressorts qui renvoient Pépita vers la position adjacente ($p_{12} = p_{\mathrm{N},\,\mathrm{N}-1} = 1$, auquel cas les positions 1 et N sont dites *réflexives*).

Les matrices stochastiques correspondant à ces deux chaînes sont :

$$\underset{\sim}{\mathrm{P}} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ q & 0 & p & \dots & 0 \\ 0 & q & 0 & \dots & 0 \\ \dots & & & & \\ 0 & \dots & q & 0 & p \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \qquad \underset{\sim}{\mathrm{P}} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ q & 0 & p & \dots & 0 \\ 0 & q & 0 & \dots & 0 \\ \dots & & & & \\ 0 & \dots & q & 0 & p \\ 0 & \dots & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}$$

respectivement. La probabilité pour que, dans le premier de ces exemples, la puce Pépita partie de la position i se retrouve après n sauts dans la cage de la position 1 est $(\mathrm{P}^n)_{i1}$. La probabilité pour qu'elle s'y retrouve enfermée après un nombre quelconque de sauts est r_i, que nous pouvons calculer de la façon suivante : au premier saut, la puce a la probabilité p de se retrouver en $i + 1$ et q de se retrouver en $i - 1$. Par conséquent :

(67) $$r_i = p r_{i+1} + q r_{i-1}$$

valable pour $2 \leqslant i \leqslant \mathrm{N} - 1$, à condition de poser

(68) $$r_1 = 1, \quad r_{\mathrm{N}} = 0.$$

Pour résoudre cette équation, posons $r_i = x^i$. En substituant r_i dans **(67)**, on obtient : $px^2 - x + q = 0$, qui admet deux solutions $\left(\text{sauf si } p = q = \frac{1}{2}\right)$ $x = 1$ et $x = \frac{q}{p}$. Comme **(67)** est une équation linéaire aux différences finies, la solution générale est :

$$r_i = \mathrm{A} + \mathrm{B} \left(\frac{q}{p}\right)^i.$$

Les conditions initiales **(68)** fixent A et B. Finalement :

(69) $$r_i = \frac{\left(\dfrac{q}{p}\right)^{\mathrm{N}-1} - \left(\dfrac{q}{p}\right)^{i-1}}{\left(\dfrac{q}{p}\right)^{\mathrm{N}-1} - 1}$$

Dans le cas où $p = q = \frac{1}{2}$, l'équation **(67)** s'écrit :

$$2\, r_i = r_{i+1} + r_{i-1}$$

et, compte tenu de **(68)**, admet pour solution $r_i = \dfrac{\mathrm{N} - i}{\mathrm{N} - 1}$

Naturellement, la probabilité pour que Pépita rentre dans la cage située à la position N est $1 - r_i$.

Un problème tout à fait semblable est celui de deux joueurs A et B. La mise initiale de A est de i francs, celle de B est $\mathrm{N} - i$ francs. A chaque partie, A a la probabilité p de gagner 1 franc, et q de perdre 1 franc. La probabilité pour que, après un nombre quelconque de parties, A soit ruiné est évidemment donnée par **(69)**, après substitution de N — 1 par N, et $i - 1$ par i, car aux N états correspondant au capital 1, ...N francs pour A il faut ajouter l'état pour lequel ce capital est de 0 franc.

Prenons pour terminer un exemple d'application des chaînes de Markov à la génétique. Supposons qu'un

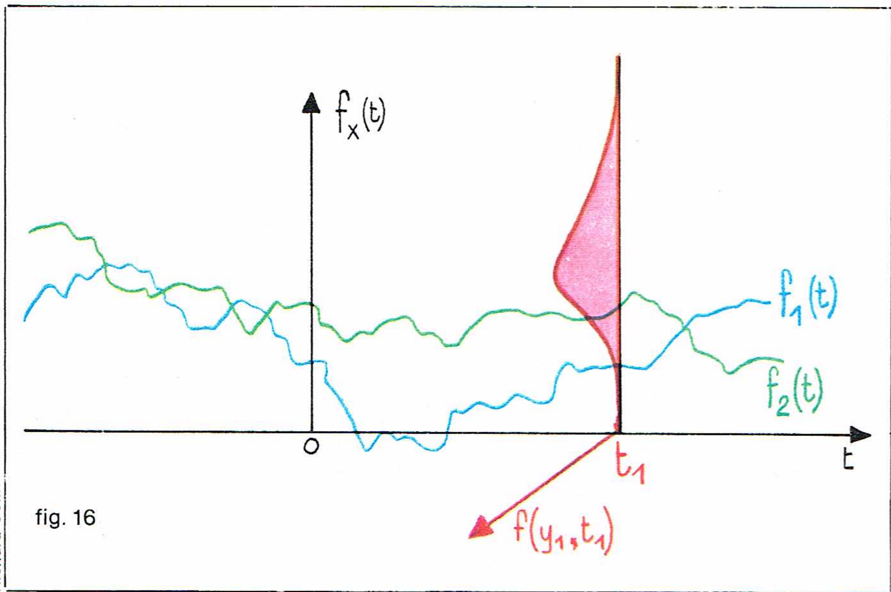

Richard Colin

▲ *Figure 16 : deux exemples de fonctions aléatoires dépendant d'un seul paramètre* t.

certain caractère soit lié aux chromosomes d'une certaine paire. Appelons D tout chromosome portant ce caractère, et *d* tout chromosome qui ne le porte pas. La paire de chromosomes en question, chez un individu donné, peut donc être l'une quelconque des combinaisons DD (état « dominant »), D*d* (état « hybride ») ou *dd* (état « récessif »).

Le croisement d'un individu dominant (DD) avec un individu hybride (D*d*) peut donner lieu, comme on le voit aisément, aux combinaisons suivantes chez leurs enfants : DD $\left(\text{probabilité } \frac{1}{2}\right)$ ou D*d* $\left(\text{probabilité } \frac{1}{2}\right)$.

Celui d'un individu hybride avec un individu hybride peut donner lieu aux combinaisons suivantes : DD $\left(\frac{1}{4}\right)$, D*d* $\left(\frac{1}{2}\right)$, *dd* $\left(\frac{1}{4}\right)$.

Celui d'un individu récessif avec un individu hybride peut donner lieu aux combinaisons suivantes : D*d* $\left(\frac{1}{2}\right)$, *dd* $\left(\frac{1}{2}\right)$.

Au total, le fait de croiser un individu quelconque avec un individu hybride est un processus markovien dont la matrice stochastique est :

$$\underset{\sim}{P} = \begin{vmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} \\ 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{vmatrix}$$

Si nous croisons de nouveau les enfants de la 1re génération avec un individu hybride, les probabilités d'obtenir les états dominants, hybrides ou récessifs à la deuxième génération sont données par :

$$\underset{\sim}{P}^2 = \begin{vmatrix} \frac{3}{8} & \frac{1}{2} & \frac{1}{8} \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} \\ \frac{1}{8} & \frac{1}{2} & \frac{3}{8} \end{vmatrix}$$

qui ne possède pas d'élément nul. Le processus markovien en question est donc une chaîne régulière. Sa limite pour un nombre très grand de générations est évidemment :

$$\lim_{n \to \infty} \underset{\sim}{P}^n = \begin{vmatrix} \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} \end{vmatrix}$$

car les multiplications successives de $\underset{\sim}{P}$ par lui-même préservent la 2e ligne de $\underset{\sim}{P}$. On a donc le résultat suivant : quel que soit l'état de l'aïeul que nous avons croisé avec un hybride, si toutes les générations successives sont systématiquement croisées avec des hybrides, il s'établit au bout d'un grand nombre de générations un équilibre statistique tel que $\frac{1}{4}$ des enfants sont du type dominant, $\frac{1}{4}$ du type récessif et $\frac{1}{2}$ du type hybride.

Fonctions aléatoires

Une fonction aléatoire est une fonction $f_X(t)$ dont la forme dépend du résultat du tirage d'une (ou plusieurs) variable aléatoire X. Les fonctions aléatoires peuvent être définies sur le corps des réels ou sur celui des complexes ; et elles peuvent dépendre d'un seul ou de plusieurs paramètres t. Nous ne nous préoccuperons ici que des fonctions aléatoires à valeurs réelles, dépendant d'un seul paramètre t. Le plus souvent, ce paramètre est le temps (auquel cas la fonction aléatoire est à proprement parler un processus stochastique), mais cela n'est pas nécessaire.

La *figure* 16 présente deux exemples de fonctions aléatoires de ce type. La fonction $f_1(t)$ est la fonction obtenue quand l'événement $X = x_1$ est réalisé, et la fonction $f_2(t)$ est la fonction obtenue quand l'événement $X = x_2$ est réalisé.

A un instant $t = t_1$ fixé, $Y = f_X(t_1)$ est une variable aléatoire. Appelons $f(y_1 ; t_1)$ la densité qui lui est associée. Les propriétés statistiques de la fonction aléatoire sont définies par la connaissance de toutes les densités de probabilité :

(70) $$f(y_1, y_2, ..., y_N ; \ t_1, t_2, ..., t_N)$$

pour que Y prenne la valeur y_1 en t_1, y_2 en t_2 ... y_N en t_N pour un ensemble quelconque d'instants $t_1, ..., t_N$.

Naturellement, on peut aussi considérer la fonction caractéristique :

$$\varphi(u_1, ..., u_N ; t_1, ..., t_N) = \int e^{i(u_1 y_1 + ... u_N y_N)} \times f(y_1, ..., y_N ; t_1, ..., t_N) \, dy_1, ..., dy_N$$

dont la connaissance équivaut à celle de

$$f(y_1, ..., y_N ; t_1, ..., t_N)$$

[voir **(26)**].

Les *moments* les plus simples associés à **(70)** sont :

— l'*espérance mathématique*

$$\langle y(t) \rangle = \int y f(y ; t) \, dy ;$$

▼ *Figure 17 : voir développement dans le texte page 189.*

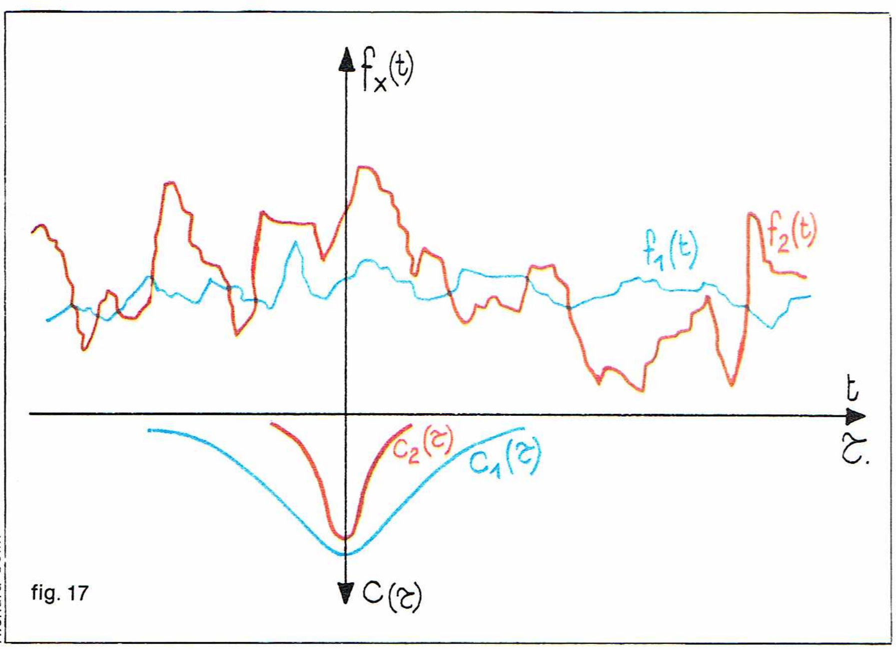

Richard Colin

— la *covariance*

$$\langle y_1(t_1)\, y_2(t_2)\rangle = \int y_1 y_2 f(y_1, y_2; t_1, t_2)\, dy_1 dy_2$$

qui donne, en faisant $t_1 = t_2 = t$, le moment d'ordre 2 associé à $f(y; t)$.

Fonctions aléatoires stationnaires

Une fonction aléatoire $f_X(t)$ est dite stationnaire si toutes ses propriétés statistiques sont invariantes pour toute translation de l'axe des temps. Autrement dit $f_X(t)$ est stationnaire si les densités de probabilités **(70)** ne dépendent que des différences $t_2 - t_1, \ldots, t_N - t_1$ et non de la valeur particulière t_1 :

$$f(y_1, y_2, \ldots, y_N; t_1, t_2, \ldots, t_N) = f(y_1, y_2, \ldots, y_N; 0, t_2 - t_1, \ldots, t_N - t_1)\ \forall\, t_1.$$

Dans ce cas, le moment d'ordre 1, $\langle y(t)\rangle$, ne peut être qu'une constante indépendante de t. La covariance est une fonction de la différence $\tau = t_2 - t_1$. Elle s'appelle la *fonction de corrélation* de $f_X(t)$:

$$C(\tau) = \langle y_1(t)\, y_2(t - \tau)\rangle$$

Il est clair que $C(\tau)$ est une fonction paire de τ :

$$C(\tau) = \langle y_1(t)\, y_2(t - \tau)\rangle = \langle y_1(t-\tau)\, y_2(t)\rangle = C(-\tau)$$

et qu'elle est maximale pour $\tau = 0$:

$$|C(\tau)| \leqslant C(0) = \langle y^2(t)\rangle$$

En effet le coefficient de corrélation entre $y(t)$ et $y(t+\tau)$ est : d'après **(47)**

$$\rho = \frac{\langle y(t)\, y(t+\tau)\rangle - \langle y(t)\rangle^2}{\langle y^2(t)\rangle - \langle y(t)\rangle^2} = \frac{C(\tau) - \langle y(t)\rangle^2}{C(0) - \langle y(t)\rangle^2} \leqslant 1,$$

La fonction de corrélation mesure donc, en quelque sorte, la « rigidité » de la fonction aléatoire $f_X(t)$. Moins la valeur $y(t)$ prise par cette dernière à l'instant t influe sur les valeurs qu'elle peut prendre à l'instant voisin $t + \tau$, plus la fonction de corrélation tend rapidement vers 0 (*fig.* 17).

Si la fonction de corrélation $C(\tau)$ est continue à l'origine, la fonction aléatoire $f_X(t)$ est *continue en moyenne quadratique*, c'est-à-dire que l'on a :

$$\lim_{\tau \to 0} \langle [y(t+\tau) - y(t)]^2\rangle = 2\langle y^2(t)\rangle - 2\langle y(t+\tau)\, y(t)\rangle = 2\,[C(0) - C(\tau)] = 0.$$

Une fonction aléatoire dont l'espérance mathématique $\langle y(t)\rangle = m$ est stationnaire, et dont la covariance $\langle y_1(t_1)\, y_2(t_2)\rangle = C(\tau = t_1 - t_2)$ est continue à l'origine et est également stationnaire, est dite fonction aléatoire *stationnaire d'ordre deux*. Une telle fonction, dont les premiers moments sont stationnaires, n'est pas nécessairement stationnaire au sens strict puisque nous n'imposons pas de condition de stationnarité pour les moments d'ordre supérieur. Cependant, une *fonction aléatoire gaussienne*, c'est-à-dire telle que toutes les densités de probabilités **(70)** sont des distributions normales à N dimensions, est stationnaire au sens strict si elle est stationnaire d'ordre deux. Cela résulte du fait que tous les moments d'une distribution normale sont fixés, si les deux premiers moments le sont.

Analyse harmonique

Dans de très nombreux arrangements expérimentaux de physique (en électronique et électrotechnique en particulier) les appareils utilisés transforment la fonction aléatoire $y = f_X(t)$, dite signal d'entrée, en une autre fonction $z = \varphi_X(t)$, dite signal de sortie. La transformation $\mathcal{F} : f_X(t) \to \varphi_X(t)$ est le plus souvent linéaire et homogène, c'est-à-dire qu'elle obéit aux relations :

$$\textbf{(71)}\quad \begin{cases} \lambda f_X(t) \to \lambda \varphi_X(t) & \forall \lambda \text{ réel ou complexe} \\ f_X(t) + f_Y(t) \to \varphi_X(t) + \varphi_Y(t) \end{cases}$$

$$\textbf{(72)}\quad f_X(t - t_0) \to \varphi_X(t - t_0)$$

Les fonctions exponentielles $e^{i\omega t}$ sont les fonctions propres de telles transformations :

$$\textbf{(73)}\quad e^{i\omega t} \to \lambda e^{i\omega t}.$$

Pour cette raison, il est extrêmement important de savoir décomposer un signal d'entrée en somme d'exponentielles complexes (ou, de façon équivalente, en somme de fonctions sinus). C'est ce que l'on appelle faire l'analyse harmonique du signal d'entrée.

Vérifions la propriété **(73)**. Pour cela, appelons $R(t)$ la transformée de la *fonction de Dirac* $\delta(t)$ dans la transformation linéaire $\mathcal{F}$. Étant donné **(30)** :

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} y(\theta)\, \delta(t - \theta)\, d\theta$$

nous avons, par suite de **(71)** et **(72)** :

$$\textbf{(74)}\quad z(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} y(\theta)\, R(t - \theta)\, d\theta$$

Si $y(\theta) = e^{i\omega\theta}$, nous avons :

$$\textbf{(75)}\quad z(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\omega\theta} R(t - \theta)\, d\theta = g(\omega)\, e^{i\omega t}$$

où

$$\textbf{(76)}\quad g(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-i\omega t'} R(t')\, dt'$$

est appelé le *gain* de la transformation $\mathcal{F}$. L'équation **(75)** est bien identique à **(73)** avec $\lambda = g(\omega)$.

La *transformation de Fourier*, déjà introduite en **(25)** est à la base de l'analyse harmonique, puisqu'elle consiste à écrire $y(t)$ sous la forme de sommes d'exponentielles $e^{i\omega t}$. On a :

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\omega t}\, \eta(\nu)\, d\nu$$

$$\eta(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-i\omega t}\, y(t)\, dt$$

où $\nu = \dfrac{\omega}{2\pi}$. Le gain **(76)** est donc la transformée de Fourier de la « réponse percussionnelle », c'est-à-dire de la réponse à un signal en forme de fonction de Dirac.

Un *filtre passe-bande* est caractérisé par un gain tel que

$$g(\nu) = 0 \quad \text{si } \nu < \nu_1 \text{ ou } \nu > \nu_2$$
$$g(\nu) = 1 \quad \nu_1 \leqslant \nu \leqslant \nu_2$$

La réponse percussionnelle correspondante est :

$$R(t) = e^{i\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}t}\, \frac{\sin \pi(\nu_2 - \nu_1)\, t}{\pi t}$$

Supposons que la fonction de corrélation $C(\tau)$ du signal d'entrée possède une transformée de Fourier $\gamma(\nu)$:

$$\textbf{(77)}\quad \gamma(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-i\omega\tau}\, C(\tau)\, d\tau$$

$$\textbf{(78)}\quad C(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\omega\tau}\, \gamma(\nu)\, d\nu.$$

La transformée de Fourier de la fonction de corrélation est une fonction réelle et paire, parce que $C(\tau)$ est réelle et paire. De plus, elle est toujours positive, comme cela résulte de l'importante propriété suivante :

$$\textbf{(79)}\quad \langle |z(t)|^2\rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \gamma(\nu)\, |g(\nu)|^2\, d\nu.$$

En effet : $\langle |z(t)|^2\rangle$

$$= \left\langle \iint y(\theta_1)\, R(t - \theta_1)\, y(\theta_2)\, R^*(t - \theta_2)\, d\theta_1 d\theta_2 \right\rangle$$

où nous avons utilisé **(74)** et compte tenu du fait que la réponse peut être une fonction complexe.

$$\langle |z(t)|^2\rangle = \iint \langle y(\theta_1)\, y(\theta_2)\rangle\, R(t - \theta_1)\, R^*(t - \theta_2)\, d\theta_1\, d\theta_2$$

$$= \iint C(\theta_1 - \theta_2)\, R(t - \theta_1)\, R^*(t - \theta_2)\, d\theta_1\, d\theta_2$$

Introduisant **(77)** :

$$\langle |z(t)|^2\rangle = \iiint e^{i\omega(\theta_1 - \theta_2)}\, \gamma(\nu)\, R(t - \theta_1)\, R^*(t - \theta_2)\, d\theta_1\, d\theta_2\, d\nu$$

$$= \int \gamma(\nu) \left[\int R(t - \theta_1)\, e^{-i\omega(t - \theta_1)}\, d\theta_1\right] \left[\int R^*(t - \theta_2)\, e^{i\omega(t - \theta_2)}\, d\theta_2\right] d\nu$$

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} \gamma(\nu)\, |g(\nu)|^2\, d\nu.$$

Parimage - Caméra Press

▲ ***Le jeu de la roulette :** l'erreur, ici, est de confondre les notions de **fréquence et de nombre de cas favorables.** L'écart type sur la première diminue avec le nombre de coups joués, mais celui sur le second augmente.*

Enfin, de **(78)** et **(79)**, on déduit que :

$$\textbf{(80)} \qquad \langle y^2 (t) \rangle = \mathrm{C}\,(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \gamma\,(\nu)\, d\nu,$$

$$\textbf{(81)} \qquad \langle |z\,(t)|^2 \rangle = \int_{\nu_1}^{\nu_2} \gamma\,(\nu)\, d\nu,$$

où $z\,(t)$ est la réponse obtenue après passage dans un filtre passe-bande pour la bande de fréquence (ν_1, ν_2), par suite de la définition du gain correspondant. Les formules **(79)**, **(80)** et **(81)** relient les puissances moyennes des signaux d'entrée et de sortie à la connaissance de la transformée de Fourier $\gamma\,(\nu)$ de la fonction de corrélation.

Quelques considérations sur les probabilités

Les probabilités et la vie courante

La mémoire de la chance

Le hasard n'a ni conscience ni mémoire. Cette vérité d'allure banale est pourtant à l'origine d'un des aspects les plus paradoxaux de la théorie des probabilités, celui qui heurte le plus le sens commun.

Il est difficile à quelqu'un qui joue à la roulette d'admettre que, s'il a observé depuis le début de la partie une série de cinq coups pendant lesquels « rouge » est toujours sorti, la probabilité d'obtenir « rouge » au sixième est encore exactement égale à la probabilité d'obtenir « noir ». Il lui semble que, puisque au cours d'une très longue série de coups les nombres de « rouges » et « noirs » sont toujours à peu près égaux, si on a observé au départ une longue série de « rouges », la roulette doit se rattraper en jouant « noir » plus souvent par la suite.

L'erreur, ici, est de confondre les notions de *fréquence et de probabilité,* d'une part, et de *nombre de fois que « rouge » et « noir » sortent dans une partie,* de l'autre. Il est parfaitement exact que, conformément à la deuxième loi des grands nombres, dans une suite de tirages répétés et mutuellement indépendants, la fréquence doit tendre vers la probabilité et que l'écart type sur la *fréquence* diminue quand le nombre de coups joués augmente. Mais l'écart type sur le *nombre* de fois que l'on obtient « rouge », ou « noir », lui, augmente comme la racine carrée du nombre de coups joués. Un grand écart par rapport à l'espérance mathématique dans une première série de coups n'implique pas un écart en sens contraire dans la deuxième série. Les écarts types des diverses séries s'ajoutent toujours quadratiquement, conformément à la relation **(35)**, quand les séries sont mutuellement indépendantes.

Pourtant le type de raisonnement du joueur de roulette ci-dessus est extrêmement fréquent. Citons ainsi la réflexion selon laquelle, puisqu'on n'a pas eu d'accident de circulation avec sa voiture depuis longtemps, on serait plus particulièrement menacé d'en avoir un dans un proche avenir, ou encore celle selon laquelle, étant donné qu'il fait mauvais depuis quarante jours, la chance devient plus grande pour qu'il fasse beau le lendemain, ne serait-ce que pour vérifier l'adage « après la pluie le beau temps ». Dans ces deux derniers exemples, c'est le contraire qui est vrai, car les épreuves successives ne sont pas absolument indépendantes, il existe un coefficient de corrélation *positif* entre eux (une journée de mauvais temps, au moins sous les climats tempérés, entraîne une plus grande probabilité de mauvais temps pour le lendemain).

Les probabilités négligeables

Un deuxième aspect subjectif de la théorie des probabilités provient de la difficulté d'appréhender correctement les chances qu'un événement qui a une très petite probabilité de se produire se produise effectivement. E. Borel parle à ce sujet de la « loi unique du hasard », loi que l'on peut formuler ainsi : un événement qui a une probabilité négligeable ne se produit pas. Pourtant on entend fréquemment autour de nous des réflexions du type suivant : puisqu'il y a cent mille billets à cette tombola, j'ai une chance sur cent mille de gagner le gros lot. Comme de toutes façons *quelqu'un* gagne ce lot, pourquoi ne serait-ce pas moi ? Ainsi se persuade-t-on d'acheter un billet. Du point de vue de la seule théorie des probabilités, cependant, il faudrait jouer cent mille fois à cette tombola (ce qui est impossible au cours d'une vie) pour avoir une chance sérieuse de remporter ce gros lot.

Ainsi, à la question : à partir de quel niveau peut-on considérer une probabilité comme négligeable ? la théorie des probabilités répond : quand le nombre d'épreuves est très petit devant l'inverse de la probabilité. Le nombre d'épreuves varie énormément suivant la nature de l'événement considéré. Il est donc utile de fixer quelques ordres de grandeur.

— La vie d'un homme adulte est d'environ 20 000 journées. Nous pourrons donc, chacun pour soi, légitimement vivre sans souci des événements qui pour-

raient nous arriver, et dont la probabilité de se produire, par personne et par jour, est petite devant 1/20 000 ; par exemple : gagner le gros lot d'une loterie de cent mille billets (probabilité 10^{-5}, s'il existe un tirage par jour) ; avoir un accident mortel de la circulation à Paris (probabilité de l'ordre de 10^{-6}), etc.

— La population de la planète est de quelques milliards, et si nous cumulons toutes les générations passées, le nombre d'êtres humains ayant vécu sur terre reste inférieur à 10^{10}. Par conséquent, nous pouvons négliger les chances qu'un événement dont la probabilité de se produire, par personne et par jour, est petite devant 10^{-15}, soit arrivé une fois dans l'histoire humaine. Telle est, par exemple, la probabilité d'obtenir 50 fois « pile » en suivant au jeu de pile ou face. Considérant que tous les hommes de tous les temps n'ont certainement pas joué en moyenne une partie de cinquante coups de pile ou face chaque jour, il est pratiquement exclu qu'un tel événement se soit effectivement produit, même une seule fois.

— Certaines lois de la physique, en particulier les lois de la thermodynamique, sont des lois statistiques. Le deuxième principe de la thermodynamique, par exemple, nous enseigne qu'une fois l'équilibre atteint, un litre de gaz occupant un ballon d'un litre l'occupe uniformément, les molécules ne se groupant jamais, par exemple, dans la moitié inférieure du ballon et laissant l'autre moitié vide. Évaluons la probabilité de mettre en évidence, par exemple, une fluctuation de densité ou de pression entre la moitié supérieure et la moitié inférieure du ballon, à la précision relative extraordinaire de 10^{-9} (un milliardième). Il y a dans le ballon environ $4 \cdot 10^{22}$ molécules de gaz, chacune d'elles ayant la probabilité $\frac{1}{2}$ de se trouver dans l'une ou l'autre moitié du récipient. L'équation **(38)** nous apprend que la distribution de probabilité d'avoir N_A molécules dans la moitié inférieure est

$$N\,(N_A - 2 \cdot 10^{22}, 10^{11}).$$

Une fluctuation relative supérieure à 10^{-9} correspond à $N_A < 2 \cdot 10^{22} - 2 \cdot 10^{13}$ ou $N_A > 2 \cdot 10^{22} + 2 \cdot 10^{13}$, c'est-à-dire à un écart supérieur à 200 écarts types ($\sigma = 10^{11}$). La probabilité correspondante est beaucoup plus petite que 10^{-15}.

— On estime généralement que le nombre d'atomes de matière dans l'univers est inférieur à 10^{100} atomes, et qu'il s'est écoulé, depuis le big bang primitif, environ 12 milliards d'années, soit un temps inférieur à 10^{18} s. Tout phénomène physique de l'échelle atomique qui aurait une probabilité de se produire inférieure ou de l'ordre de 10^{-120} par seconde n'a donc pratiquement aucune chance de s'être jamais réalisé dans l'univers.

Probabilités d'ignorance et indéterminisme fondamental

Dans la plupart des applications de la théorie des probabilités, l'événement aléatoire survient au terme d'une succession de causes physiques qui entraîne inéluctablement son apparition. Ainsi, connaissant parfaitement la position du dé au moment où il est lancé, l'impulsion que lui donne le joueur, et la géométrie et les conditions de rugosité des faces du dé et de la table, il est, en principe, possible de prédire quel sera le numéro tiré. Mais l'écheveau des causes est si embrouillé qu'il est impossible de faire le calcul. Dans ce cas, l'utilisation du calcul des probabilités ne fait donc que cacher notre incapacité pratique de calculer la trajectoire du dé. Bien entendu, le plus souvent, certaines données des problèmes posés nous échappent. Ainsi, nous ne connaissons pas exactement la position et l'impulsion initiales du dé, etc. Dans les problèmes de physique statistique, notre ignorance est encore plus grande : nous ignorons généralement tout de la position et de l'impulsion initiales de chacune des $4 \cdot 10^{22}$ molécules d'un litre de gaz. Dans les jeux de hasard, cette ignorance est parfois volontaire (les cartes sont distribuées retournées). Bref, dans tous ces cas, on parle de *probabilité d'ignorance*.

Notre ignorance des paramètres du problème n'exclut nullement que les grandeurs physiques correspondantes aient réellement une valeur, mais nous ne voulons pas ou nous ne pouvons pas les mesurer. L'efficacité du calcul des probabilités, dans ce cas, tire souvent avantage de la multiplicité même des causes pouvant influer sur le résultat final. Cette multiplicité détermine généralement les conditions d'applications des lois des grands nombres.

Mais l'on sait, depuis 1927, que l'ignorance n'est pas le seul fondement possible du concept de probabilité. L'avènement de la mécanique quantique a montré, au contraire, qu'il est impossible d'assigner une valeur précise à la plupart des grandeurs physiques généralement attachées à un système physique concret (atomes, molécules, etc.). En particulier, il est impossible de construire un arrangement expérimental tel qu'à la fois la *position* et la *vitesse* d'un atome aient une signification précise. Le résultat de la mesure de telles grandeurs est le résultat d'un tirage au hasard, qui n'est déterminé par aucune cause sous-jacente (pour autant, du moins, que la théorie physique actuelle soit correcte). Ce hasard est le reflet d'une solution de continuité fondamentale dans les processus de mesure. On dit, non sans un certain excès de langage, qu'il s'agit d'un *indéterminisme fondamental*. Comme tous les corps, même ceux à notre échelle, même ceux à l'échelle astronomique, obéissent, en dernier ressort, aux lois de la mécanique quantique, on voit que le concept de probabilité a sans doute des racines plus profondes et une portée beaucoup plus large que la simple probabilité d'ignorance, par laquelle il a été historiquement fondé.

Quelques exemples

Le paradoxe de Saint-Pétersbourg

Pour se libérer d'une grosse dette envers Paul, Pierre envisage de jouer avec lui au jeu de pile ou face, de la façon suivante : au premier coup, si la pièce montre « pile » le jeu s'arrête et Pierre est libéré de sa dette, mais si « face » sort, Pierre donne deux francs à Paul et le jeu continue une autre fois ; si, au deuxième coup, « pile » sort, le jeu s'arrête ; si « face » sort, Pierre donne quatre francs à Paul et le jeu continue encore.

A chaque partie perdue par Pierre, celui-ci donne à Paul le double de la somme qu'il lui a donnée à la partie précédente. Le jeu s'arrête dès que, enfin, « pile » sort.

Afin de connaître si cette façon de jouer est avantageuse pour lui, Pierre calcule l'espérance de gain de Paul. Il trouve que cette espérance est de un franc pour la première partie, de un franc encore pour la seconde (une chance sur deux de jouer cette partie et une chance sur deux de gagner 4 francs), de un franc encore pour la troisième, et ainsi de suite... Au total, l'espérance de gain de Paul est infinie. Aucune dette ne vaut la peine d'accepter les règles de ce jeu.

En pratique cependant, la réalité est fort différente. Si Pierre perd les n premières parties, il doit donner à Paul, partie après partie, une somme totale de

$$2 + 4 + \ldots 2^n = 2^{n+1} - 2 \text{ francs.}$$

Il ne peut se permettre de perdre qu'un petit nombre de fois, faute de quoi il se trouve bientôt insolvable. Possédât-il 10 millions de francs, il ne pourrait perdre sans faire faillite que 22 fois en suivant. L'espérance de gain de Paul, en définitive, n'est donc que de 22 francs.

L'exemple ci-dessus nous amène à méditer sur le comportement des personnes qui, jouant aux jeux de hasard (roulette), appliquent la tactique suivante : en cas de perte, doubler la mise avec obstination et rejouer, jusqu'au succès final. En réalité, même si, dans un jeu parfaitement équitable, le joueur qui applique cette tactique est assuré de finir par équilibrer ses pertes, voire d'obtenir un bénéfice, l'avantage décisif de la banque vient de ce qu'elle est normalement capable de pousser le jeu plus loin du côté des pertes que les joueurs. Ceux-ci sont acculés à la faillite avant elle, et, par suite, l'espérance de gain de la banque est en faveur de cette dernière.

Le problème de l'aiguille (Buffon)

Supposons que nous ayons un parquet, fait de lames de bois parallèles de largeur $2a$, et que nous lancions sur ce parquet, au hasard, une aiguille rectiligne de longueur $2l < 2a$. Quelle est la probabilité pour que l'aiguille coupe une des raies du parquet ?

On voit immédiatement sur la *figure* 18 que le problème dépend de deux variables aléatoires indépendantes : l'ordonnée y ($-a \leqslant y < a$) du point M, milieu de

▶ *Figure 18 : le problème de l'aiguille (Buffon).*

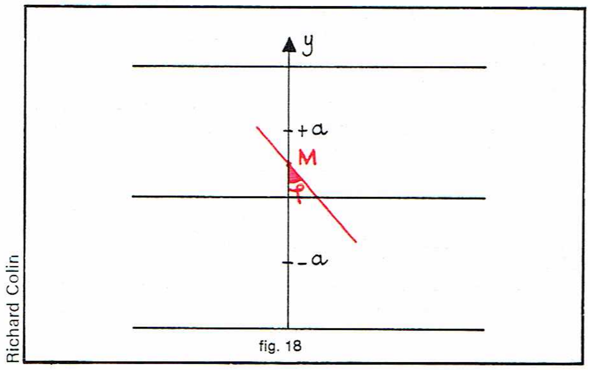

fig. 18

l'aiguille, par rapport à la ligne de parquet la plus proche, et l'angle φ $\left(-\frac{\pi}{2} \leqslant \varphi < \frac{\pi}{2}\right)$ que fait l'aiguille avec la perpendiculaire tracée de M sur les lignes du parquet. Ces deux variables aléatoires admettent des densités de probabilités uniformes :

$$f_1(y) = \frac{1}{2a}\,dy$$

$$f_2(\varphi) = \frac{1}{\pi}\,d\varphi$$

comme $l < a$, l'aiguille ne peut couper que la raie considérée. La condition nécessaire et suffisante pour cela est $|y| \leqslant l \cos \varphi$.

Par **(3)**, la probabilité p cherchée est

$$p = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} f_2(\varphi)\,d\varphi \int_{-l\cos\varphi}^{l\cos\varphi} f_1(y)\,dy = \frac{2\,l}{a\pi}$$

En son temps (le XVII^{e} siècle), ce résultat a beaucoup intrigué les philosophes. Comment un problème dans lequel il n'est question que de réseau et de segments rectilignes peut-il engendrer le nombre π ? Quel rapport ce nombre entretient-il avec les fondements de la théorie des probabilités ? Cette curiosité, toutefois, est sans objet. Le nombre π, comme le prouve par exemple le développement en série de Taylor de la fonction $y = \text{arc tg}\, x$, se retrouve comme valeur de beaucoup de séries de fractions rationnelles. Le problème de l'aiguille reste néanmoins une curieuse et amusante façon de mesurer ce nombre. L'astronome Wolf, en 1850, fit 5 000 épreuves et mesura la fréquence des succès. Il en déduisit $\pi = 3{,}159\,6$. L'écart observé est tout à fait compatible avec la distribution des résultats de mesure prévue par la deuxième loi des grands nombres.

Des garçons et des filles

Soit le problème suivant (Gamow) : dans un pays où la polygamie est admise, un édit indique que les femmes ayant accouché d'un garçon doivent être stérilisées ; limitant ainsi le nombre de garçons, la loi espère augmenter la proportion de filles dans la nation. Dans ce pays, il n'y a donc que des familles avec un garçon, une fille et un garçon, deux filles et un garçon, ... n filles et un garçon. La pratique de la stérilisation limite évidemment le nombre moyen d'enfants de chaque famille. Augmente-t-elle cependant, comme on pourrait le croire, la proportion de filles ?

La réponse est non. Car, au premier accouchement, toutes les femmes ont autant de chances de mettre au monde un garçon qu'une fille. Et à l'accouchement suivant (qui ne concerne plus que la moitié des femmes, celles qui ont une fille première-née), les mêmes ont encore une probabilité $\frac{1}{2}$ d'avoir un garçon ou une fille. Et ainsi de suite.

Le nombre moyen de garçons par famille avec enfants est évidemment un. Celui des filles, malgré les apparences, est un également : les familles avec plusieurs filles ne font que compenser les familles à fils unique. On a :

$$\langle n_F \rangle = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{n-1}{2^n} = 1.$$

Les probabilités en biologie

Depuis les travaux de Mendel (1865), les biologistes sont convaincus de l'importance de la théorie des probabilités pour l'explication d'un très grand nombre de phénomènes biologiques tels que la reproduction, les mutations génétiques dans les chromosomes, la réplication de ceux-ci dans la division cellulaire, etc. L'intervention du hasard dans les phénomènes vitaux est même si grande que certains voient en lui l'explication fondamentale des phénomènes de la vie et de l'évolution (par exemple, le livre de Jacques Monod, *le Hasard et la Nécessité*).

La génétique et ses deux grandes branches, la génétique des populations d'une part, la génétique évolutive de l'autre, font donc un très large appel aux techniques statistiques.

A partir d'un petit nombre de constituants (quatre atomes essentiels, carbone, oxygène, hydrogène, azote), on fabrique par combinaison un nombre plus grand de briques fondamentales de la matière vivante : les 20 acides aminés. Quatre molécules, toujours les mêmes, constituent les barreaux des longues chaînes de la double hélice de l'acide désoxyribonucléique, qui peut comporter jusqu'à 10^7 ou 10^8 échelons. L'ADN présent dans les chromosomes détermine le patrimoine héréditaire. Celui-ci est préservé dans la réplication, phénomène intervenant dans la division cellulaire, et combiné dans la reproduction. Dans ce dernier phénomène, le patrimoine héréditaire d'un individu est combiné (généralement à parts égales, mais parfois non, comme dans la reproduction bactérienne) avec le patrimoine héréditaire d'un autre individu, sur la base du hasard.

Le hasard intervient aussi dans les phénomènes de mutation, c'est-à-dire de changement dans l'ordre ou dans la structure des barreaux de l'ADN. Ces mutations peuvent être induites (elles peuvent par exemple être le résultat accidentel du passage d'un rayon cosmique) ou spontanées, en particulier au cours de la réplication. Certains pensent même que les mutations spontanées pourraient avoir une relation avec l'indéterminisme fondamental dont nous avons parlé plus haut, la fonction d'onde de la molécule d'ADN pouvant assumer virtuellement plusieurs états avec des probabilités de réalisation pour chacun d'eux. Quoi qu'il en soit, il existe donc en général une probabilité petite, mais non nulle, de transformation génétique à chaque étape de la division cellulaire. La stabilité du patrimoine héréditaire ne peut donc s'expliquer que par l'intervention d'équilibres entre des transitions en sens inverses, comme nous en avons mentionné dans l'étude des processus markoviens.

Chez l'homme, le patrimoine génétique est contenu dans les 46 chromosomes. Au cours de la reproduction, 23 chromosomes du gamète mâle sont combinés deux à deux avec les 23 chromosomes du gamète femelle. Il y a donc, au total, 4^{23} ensembles complets de chromosomes, c'est-à-dire plus de 600 milliards d'enfants génétiquement différents les uns des autres, pouvant être engendrés par un même couple de parents. Seuls de vrais jumeaux, issus d'une même cellule originale, possèdent exactement les mêmes caractères génétiques. Dans tous les autres cas, il y a seulement une certaine chance, facile à calculer, pour que deux enfants, ou deux individus de la n-ième génération, aient dans leur carte génétique le même chromosome, et, partant, les mêmes caractères liés à ce chromosome.

Les données statistiques

La visualisation des données statistiques

Les réponses à une question donnée, faisant partie d'une enquête statistique, varient d'un individu à l'autre. On observe que le pourcentage de réponses « oui » fluctue selon l'échantillon de personnes interrogées. Pour avoir une idée assez précise de la *probabilité intrinsèque* (en admettant qu'elle existe) attachée à cette réponse, il faut interroger un échantillon suffisamment large : si les conditions d'application de la deuxième loi des grands nombres sont remplies, plus le nombre de personnes interrogées est important, meilleure sera l'évaluation de cette probabilité.

Le résultat de la mesure d'une grandeur physique fluctue selon le type d'appareil utilisé et l'habileté de l'expérimentateur. Une mesure unique ne donnera, le plus souvent, qu'une indication grossière sur la valeur réelle de cette grandeur physique : pour avoir une idée plus précise sur cette grandeur, il est souvent utile de procéder à une série de mesures indépendantes. Les résultats se répartissent alors de part et d'autre d'une valeur intermédiaire « moyenne ». Cette valeur est adoptée comme estimation de la grandeur, et les écarts observés autour d'elle donnent une indication sur la précision de cette estimation : plus les mesures sont dispersées, plus large est la zone d'incertitude sur la valeur réelle de la grandeur. Ici encore, plus nombreuses sont les mesures, meilleure est, en général, la précision de l'estimation.

En outre, comme on l'a vu, il existe une classe de phénomènes physiques (les phénomènes quantiques) pour lesquels la grandeur physique mesurée n'a pas de valeur définie au moment de la mesure. Ce sont seulement les probabilités respectives pour que la mesure de cette grandeur donne telle ou telle valeur qui sont définies. Pour évaluer avec précision ces probabilités, il faut donc procéder à une série nombreuse d'expériences. Chacune d'elles, de plus, est entachée d'erreurs expérimentales et la détermination des résultats de mesures possibles nécessite donc, dans ce cas, plusieurs séries de mesures.

En définitive, dans de très nombreuses situations, on a donc une statistique de résultats. Cette statistique, sous forme brute, se présente comme une suite ennuyeuse de nombres : la première mesure a donné tel résultat, la seconde tel autre, etc. Le problème est de disposer ces résultats (par exemple sous forme de graphiques) de telle sorte que l'information contenue (par exemple, la liste des résultats de mesures possibles pour une grandeur quantique et la précision de l'estimation de chacune d'elles) soit immédiatement perceptible. C'est le problème de la *visualité des données* dont nous parlerons dans cette section.

Formulons le problème particulier d'une suite de mesures d'une grandeur physique $\mathcal{M}$ (ces mesures pourront être faites chacune dans les mêmes conditions sur le même système, mais nous ne l'exigeons pas).

L'ensemble des mesures fournit une statistique de résultats. Si la première mesure conduit au résultat m_1, la seconde m_2, etc., la statistique se représente comme la séquence des nombres $(m_1, ..., m_n)$.

Il est clair, cependant, que cette statistique *n'est pas* la séquence des valeurs $(\mu_1, ..., \mu_n)$ prises par la grandeur au long des mesures, à cause des erreurs expérimentales commises. Chaque mesure est entachée d'une certaine erreur, qui, en général, varie d'une mesure à l'autre ; la séquence des μ est liée à la séquence des m par :

$$m_i = \mu_i + \delta\mu_i$$

où $\delta\mu_i$ représente l'erreur commise dans la i-ième mesure. Le problème du physicien est de déduire, dans la mesure du possible, les μ_i à partir des m_i.

Les erreurs peuvent être de deux types : *systématiques* et *statistiques*. Les erreurs systématiques découlent de certains défauts de l'appareil de mesure. Il appartient aux physiciens de chercher à les corriger en améliorant l'appareillage et en l'étalonnant avec une meilleure précision. Nous ne considérerons pas ici ces erreurs systématiques, mais le résidu irréductible des erreurs statistiques, découlant de la précision nécessairement limitée des appareils ou d'autres raisons ; ces erreurs provoquent une dispersion des résultats de mesure, chacun d'eux se présentant comme le résultat du tirage d'une variable aléatoire « mesure de $\mathcal{M}$ », et ceci même dans le cas de mesures faites dans les mêmes conditions sur le même système.

Distinguons ici trois cas. Le premier, et le plus restrictif, est celui des résultats de mesures d'une grandeur telle que :

a - $\mathcal{M}$ prend une valeur unique tout au long de la séquence de mesures : $\mu_1 = \mu_2 = ... \mu_n = \mu_0$;

b - les causes d'erreurs sont multiples et indépendantes. L'erreur totale commise est une variable aléatoire, somme d'un nombre très grand de variables aléatoires (chaque erreur particulière), chacune d'elles étant régie par une « bonne » distribution de probabilité, au sens de la seconde loi des grands nombres.

Nous appellerons C_1 la classe de statistiques qui satisfont aux conditions ci-dessus. La classe C_1 comprend les séquences de résultats de mesure d'une grandeur physique $\mathcal{M}$ effectuée dans les mêmes conditions sur le même système, pourvu que les causes d'erreurs soient multiples et indépendantes.

Ces conditions sont approximativement réalisées dans l'exemple de la mesure de la longueur d'une table à l'aide d'une règle ; parmi les causes d'erreurs, citons : la position de la règle qui n'est jamais parfaitement d'équerre avec le bord de la table, lequel n'est en outre pas parfaitement en coïncidence avec la première graduation de la règle ; l'erreur de parallaxe entre le plan de la table, celui des graduations de la règle et les yeux de l'observateur ; l'épaisseur des graduations et les erreurs d'interpolation entre, etc. Un meilleur exemple, célèbre car il a été utilisé par Bessel pour vérifier les conclusions de la théorie probabilistique des mesures, est celui de la mesure de l'ascension droite et de la déclinaison d'une étoile ; dans ce cas, en plus des causes d'erreurs du type précédent, on trouve les fluctuations de l'indice de réfraction de l'air atmosphérique, etc.

La clause **b** implique que l'erreur totale est une variable aléatoire qui suit (de très près) une distribution gaussienne ; si l'appareil est convenablement étalonné, cette distribution est centrée sur μ_0. Les mesures faites dans les mêmes conditions sur le même système sont donc caractérisées par la distribution des résultats :

(82) $$f(m) = N(m - \mu_0, \sigma_0)$$

Un cas moins restrictif est représenté par la classe C_2 de statistiques de mesures d'une grandeur $\mathcal{M}$ telle que :

a - la grandeur $\mathcal{M}$ ne prend pas la même valeur au long de la séquence de mesures, mais les valeurs successives de $\mathcal{M}$ sont liées entre elles par une relation analytique connue ;

b - les mesures de $\mathcal{M}$ sont régies par une distribution gaussienne (ou approximativement gaussienne) telle que la variance de cette distribution dépend de la valeur μ prise par $\mathcal{M}$, selon une relation analytique connue, $\sigma = \sigma(\mu)$.

Un exemple de statistique de cette classe est donné par les taux de comptage dans l'observation d'un échantillon de substance radio-active. La grandeur $\mathcal{M}$ est le nombre moyen de désintégrations par unité de temps. Au cours du temps ce nombre diminue suivant une loi exponentielle, du type :

$$\Delta\overline{N}(t) \simeq \frac{N_0}{\tau} e^{-t/\tau} \Delta t$$

dans laquelle, en général, les paramètres τ et N_0 ne sont pas connus. Le nombre réel de désintégrations observées, ΔN, n'est pas le nombre $\Delta\overline{N}$, à cause des fluctuations quantiques. Chaque atome de l'échantillon a une probabilité définie de se désintégrer dans l'intervalle de temps considéré, et le nombre total de désintégrations observées suit une distribution binominale — c'est-à-dire, pratiquement, une distribution de Poisson, ou encore une distribution gaussienne pourvu que $\Delta\overline{N}(t) > 10$, avec $\sigma = \sqrt{Npq} \simeq \sqrt{\Delta\overline{N}}(t)$ (*fig.* 19).

Notez que, dans cette expression, $\Delta\overline{N}(t)$ n'est en général pas connu. Dans le cas d'une mesure isolée,

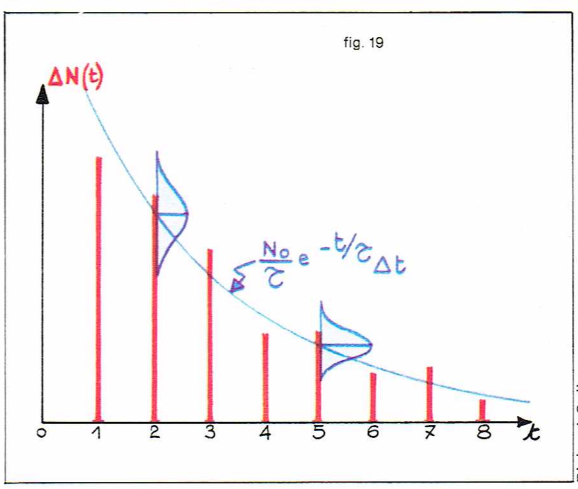

◄ ***Figure 19 :*** ***distribution binominale que suit le nombre total de désintégrations d'un échantillon de substance radio-active.***

Richard Colin

Parimage - Caméra Press

▲ ***Un exemple de visualisation des données statistiques.***

$\Delta \bar{N}$ (t) est remplacée par son évaluation ΔN (t), conformément au principe de Bayes que nous étudierons ci-après.

Finalement, considérons le cas encore plus général des statistiques de mesures où non seulement la valeur prise par la grandeur $\mathcal{M}$ mais encore les précisions de mesure varient d'une mesure à l'autre, sans qu'aucune loi de variation pour les μ ou les $\delta\mu$ ne soit connue à l'avance. On supposera cependant que la précision de l'appareil de mesure utilisé pour la i-ième mesure, soit σ_i, est connue; cela veut dire que, considérant la i-ième mesure isolément, dont le résultat m_i a été obtenu avec un appareil ayant la précision σ_i, la probabilité ***a priori*** pour que la valeur réellement prise par $\mathcal{M}$ soit μ_i est, conformément au principe de Bayes :

(83) $$f(\mu_i) = \mathrm{N}\,(m_i - \mu_i, \sigma_i)$$

[comparez avec **(82)**].

Toute l'information disponible dans une statistique de mesures de cette classe (que nous appellerons classe C_3) est l'ensemble des paires (m_i, σ_i) relatives à chaque mesure et à la précision avec laquelle cette mesure a été effectuée. Les (m_i, σ_i) peuvent être considérés comme le résultat d'un tirage effectué sur deux variables aléatoires M et Σ, généralement corrélées, et régies par une distribution de probabilité à deux dimensions ρ (m, σ).

La donnée des (m_i, σ_i) constituant la statistique des résultats de mesure suffit, dans le cas de mesures gaussiennes, à donner la totalité de l'information disponible quant à la séquence de mesures de M. Toutefois, présentée sous la forme banale d'une double liste de résultats de mesures et d'écarts types associés, cette information ne fait pas ressortir les traits essentiels de son contenu physique, et elle est peu commode, pour autant que le nombre de mesures effectuées soit assez important.

C'est la raison pour laquelle on préfère, en général, présenter de façon plus condensée et plus suggestive les résultats de mesures, fût-ce au prix d'une perte plus ou moins importante d'information.

Richard Colin

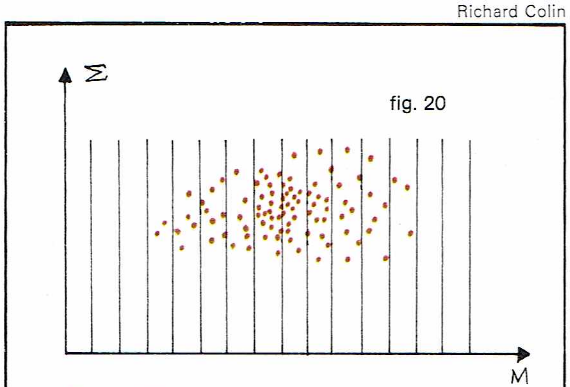

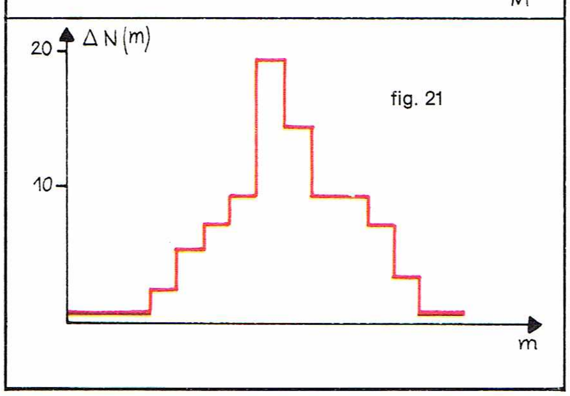

▶ ***Figure 20 : le diagramme à deux dimensions (M, Σ) ; figure 21 : l'histogramme ΔN (m).***

Le diagramme (M, Σ)

La présentation la plus naturelle de cette information est le diagramme à deux dimensions (M, Σ) (*fig.* 20); dans ce diagramme la i-ième mesure apparaît comme un point de coordonnées (m_i, σ_i). La densité de points dans ce diagramme, conformément à la première loi des grands nombres, tend vers la densité de probabilité ρ (m, σ). Toutefois, cette représentation, bien qu'elle occasionne une perte minimale d'information (due uniquement à l'imprécision du dessin, etc.) reste peu suggestive.

Liaison entre ρ (m, σ) et φ (μ)

En fait la distribution des résultats de mesures ρ (m, σ) est liée à la distribution φ (μ) par :

(84) $$\rho\,(m, \sigma) = \int \varphi\,(\mu)\,\lambda\,(\sigma/\mu)\,\mathrm{N}\,(m - \mu, \sigma)\,d\mu$$

car la probabilité d'obtenir pour résultat de mesure (m, σ) est, par suite de **(3)** et **(4)**, égale à la somme des probabilités pour que $\mathcal{M}$ prenne en réalité la valeur μ multipliée par la probabilité λ (σ/μ) de faire la mesure avec la précision σ, sachant que $\mathcal{M}$ a pris la valeur μ, et multipliée par la probabilité d'obtenir le résultat m, sachant que $\mathcal{M}$ a pris la valeur μ et que la mesure est faite avec la précision σ, cette dernière étant N ($m - \mu$, σ) d'après **(82)**.

Histogrammes

Dans la limite où σ est négligeable,

$$\rho\,(m, \sigma) \simeq \int \varphi\,(\mu)\,\lambda\,(\sigma/\mu)\,\delta\,(m - \mu)\,d\mu = \varphi\,(m)\,\lambda\,(\sigma/m)$$

par **(30)**. La distribution φ (μ) est simplement dans ce cas la distribution marginale de ρ (m, σ). Cela nous conduit à une méthode simple, qui donne une bonne idée du spectre φ (μ) et qui est utile même dans le cas où les erreurs sont plus importantes; cette méthode consiste à diviser l'axe M du diagramme précédent en segments, ordinairement de même longueur, et à construire ce que l'on appelle l'histogramme ΔN (m) en portant le nombre de points contenus dans chaque intervalle en fonction de m (*fig.* 21).

La présentation des résultats sous la forme d'un histogramme, quoique très simple et assez explicite, a deux inconvénients liés à deux sources de perte d'information :

— nous savons quel est le nombre total de mesures qui donne un résultat dans chacun des intervalles Δm, mais nous perdons la position exacte de chaque mesure à l'intérieur de ces intervalles;

— chaque mesure est traitée de la même manière, quelle que soit sa précision; l'information de cette précision est perdue.

Afin de minimiser cette perte d'information, il convient de choisir pour taille des intervalles une longueur de l'ordre de $\langle\sigma\rangle$, l'erreur moyenne commise dans les mesures. De cette façon, il y a une bonne chance pour que les μ_i correspondant aux mesures m_i appartenant au i-ième segment appartiennent aussi au même segment ou aux segments immédiatement voisins. En outre, avec $\Delta m \simeq \langle\sigma\rangle$, il est fort probable que les mesures se distribuent de façon approximativement homogène au long de chaque segment. En effet, dans le cas extrême où la grandeur M prendrait chaque fois la même valeur μ, on observerait une dispersion des résultats de mesure due aux erreurs de mesure, telle que les densités de points aux abscisses $m = \mu + \langle\sigma\rangle$ et $m = \mu$ sont, approximativement, dans le rapport $e^{-\frac{1}{2}} \simeq 0{,}61$. La technique de l'histogramme, qui équivaut à supposer une répartition homogène des résultats de mesure le long de chaque segment, ne perd donc, en général, que peu d'information. Le choix de longueur de segment (le « bin » des Anglo-Saxons) indiqué plus haut est en définitive un bon compromis entre le désir de représenter de façon aussi immédiate que possible les données expérimentales et leur signification, et le désir de ne pas perdre l'information disponible. Néanmoins, le choix de l'intervalle peut être influencé par d'autres facteurs; notamment, quand la statistique de mesures est pauvre (les mesures peu nombreuses), il peut être préférable de prendre un intervalle de longueur Δm plus grand, soit pour mieux visualiser le spectre obtenu, soit pour se rapprocher dans chaque intervalle des conditions d'applications des lois des grands nombres.

Idéogrammes

La méthode des idéogrammes a l'avantage d'éviter la perte d'information inhérente à la méthode de l'histogramme, tout en restant très suggestive. Malheureusement, cette méthode conduit en général à des calculs peu pratiques.

L'idéogramme gaussien, le plus utilisé, est par définition la fonction aléatoire obtenue en remplaçant chaque point (m_i, σ_i) du diagramme (M, Σ) par une gaussienne $N(m - m_i, \sigma_i)$ et en faisant la somme de toutes les gaussiennes ainsi obtenues (*fig.* 22).

$$\textbf{(85)} \qquad I(m) = \sum_i N(m - m_i, \sigma_i)$$

Ainsi tient-on compte de l'abscisse exacte de chaque mesure m_i, et également de la précision associée. On doit noter, cependant, que le choix de la fonction $N(m - m_i, \sigma_i)$ dans cette technique est assez arbitraire. Dans le cas d'une mesure isolée, cette distribution représente, d'après **(83)**, la probabilité *a priori* pour que la valeur réelle de la grandeur $\mathcal{M}$ soit m, mais la somme **(85)** n'a pas d'interprétation aussi simple. En définitive, sauf dans des cas très particuliers, l'utilisation des idéogrammes gaussiens ne présente pas d'avantages décisifs sur la technique, plus simple, des histogrammes.

Problèmes d'estimation

Dans le cas plus simple de statistiques de mesures gaussiennes répétées (c'est-à-dire faites dans les mêmes conditions sur le même système), les mesures se répartissent conformément à la distribution

$$f(m) = N(m - \mu_0, \sigma_0)$$

obtenue en remplaçant, dans **(84)**,

$$\varphi(\mu) \text{ par } \delta(\mu - \mu_0) \text{ et } \lambda(\sigma/\mu) \text{ par } \delta(\sigma - \sigma_0).$$

L'estimation de $\varphi(\mu)$ se réduit, dans ce cas, à l'estimation du paramètre μ_0. Une estimation correcte de μ_0 est la moyenne arithmétique μ^* :

$$\mu^* = \frac{1}{N}\sum_i m_i$$

En effet, μ^* est une variable aléatoire dont la limite, pour $n \to \infty$, est μ_0, conformément à la première loi des grands nombres. Par ailleurs, la variance sur μ^* est, d'après **(35)** :

$$\Delta^2 = \frac{\sigma_0^2}{N}$$

Cette variance coïncide avec la valeur déduite de la seconde loi des grands nombres : c'est la plus petite possible. On dit que Δ est la précision de l'estimation.

En général σ_0 n'est pas connu, et pour évaluer Δ, on doit faire d'abord une estimation de σ_0. La moyenne arithmétique des $(m_i - \mu_0)^2$ est, selon les lois des grands nombres, une estimation correcte de σ_0.

Substituant dans cette expression μ_0, qui n'est pas connu, par μ^*, on obtient une nouvelle variable aléatoire T dont l'espérance mathématique est :

$$\begin{aligned}\langle T\rangle &= \frac{1}{N}\langle\sum_i (m_i - \mu^*)^2\rangle \\ &= \frac{1}{N}\{N\langle m_i^2\rangle + N\langle\mu^{*2}\rangle - 2N\langle\mu^{*2}\rangle\} \\ &= \langle m_i^2\rangle - \langle\mu^{*2}\rangle = \sigma_0^2 + \mu_0^2 - \frac{\sigma_0^2}{N} - \mu_0^2 \\ &= \frac{N-1}{N}\sigma_0^2\end{aligned}$$

où nous avons utilisé **(34)** et **(24)**.

Choisissons alors pour estimation de σ_0 et Δ :

$$\textbf{(86)} \qquad \sigma_0^{*2} = \frac{N}{N-1}T = \frac{1}{N-1}\sum_i (m_i - \mu^*)^2$$

$$\Delta^* = \sqrt{\sum_i \frac{(m_i - \mu^*)^2}{N(N-1)}}$$

Considérons le cas plus général de statistique de mesures pour lesquelles $\varphi(\mu)$ prend encore la forme $\delta(\mu - \mu_0)$, mais $\lambda(\sigma/\mu) \neq \delta(\sigma - \sigma_0)$ (autrement dit, la grandeur $\mathcal{M}$ prend encore la valeur μ à chaque mesure, mais la précision dépend des conditions, variables, de la mesure). La formule **(84)** s'écrit dans ce cas :

$$\rho(m, \sigma) = \lambda(\sigma)\, N(m - \mu_0, \sigma),$$

où nous écrivons $\lambda(\sigma)$ au lieu de $\lambda(\sigma/\mu_0)$, car μ_0 a une probabilité 1 de se produire.

Le problème de l'estimation du paramètre μ_0 est dans ce cas plus compliqué.

De nouvelles techniques nous aideront à trouver la solution.

On peut noter, cependant, que l'espérance mathématique de M est μ_0 :

$$\langle M\rangle = \int m\rho(m, \sigma)\, dm\, d\sigma = \mu_0$$

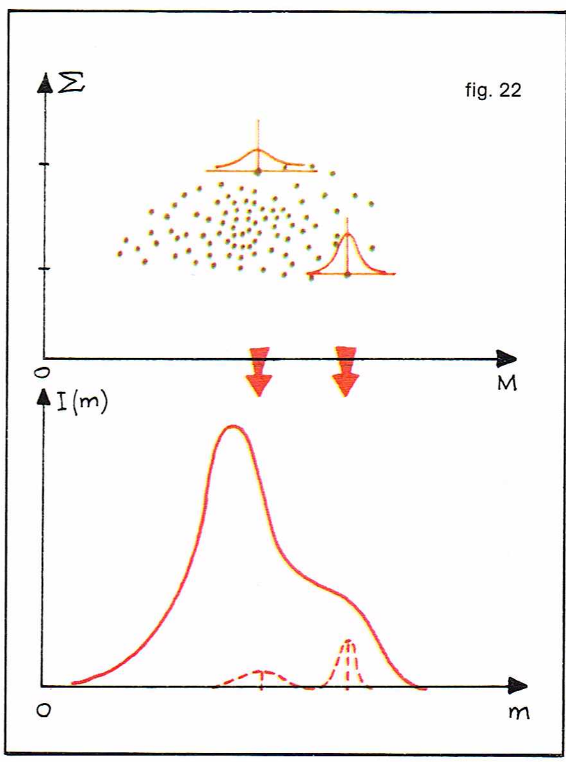

Richard Colin

◀ ***Figure 22 :*** **l'idéogramme gaussien.**

μ_0 est aussi la valeur plus probable de M. Dans la limite des grands nombres, les histogrammes (comme les idéogrammes) correspondants atteignent par conséquent leur maximum au voisinage de $m = \mu_0$. En outre, la distribution $\lambda(\sigma)$ est simplement, dans ce cas, la distribution marginale de $\rho(m, \sigma)$:

$$f(\sigma) = \int \rho(m, \sigma)\, dm = \lambda(\sigma) \int N(m - \mu_0, \sigma)\, dm = \lambda(\sigma)$$

de sorte que l'histogramme des erreurs donne une estimation de $\lambda(\sigma)$.

Si l'on considère maintenant les classes plus générales de statistiques gaussiennes, du type C_2 et C_3, on s'aperçoit que les raisonnements qui précèdent ne permettent pas d'obtenir à leur égard beaucoup d'informations sur la loi $\varphi(\mu)$ qui gouverne la variable $\mathcal{M}$. Il faut alors avoir recours à d'autres techniques, dites de test d'hypothèses, dont nous décrivons deux exemples (le χ^2 et le maximum de vraisemblance) par la suite.

Dans ces techniques, la question de déduire $\varphi(\mu)$ des distributions (M, Σ) est supposée résolue : en partant d'une distribution $\varphi'(\mu)$ choisie à titre d'hypothèse *(a priori)*, on cherche à évaluer le degré de compatibilité de cette hypothèse avec la distribution (M, Σ) obtenue expérimentalement.

La problématique est alors la suivante : étant donné que le résultat expérimental est ceci, quelle probabilité a-t-on pour que le résultat soit la conséquence d'un tirage selon la loi $\varphi'(\mu)$ plutôt que la conséquence d'un tirage selon $\varphi''(\mu)$? La réponse à cette question fait appel à ce que l'on appelle la *probabilité des causes*, et est fondée sur le principe de Bayes.

Théorème de Bayes

Soit A un événement physique dont la réalisation peut être la conséquence de l'une quelconque des causes (exclusives les unes des autres) $B_1, B_2, ..., B_n$ sans que l'on sache avec certitude laquelle de ces causes (ou hypothèses) est responsable de la matérialisation de A.

Appelons en outre $Pr(B_1), ..., Pr(B_n)$ les probabilités *a priori* pour que les causes $B_1, B_2, ..., B_n$ soient présentes indépendamment de la réalisation ou non-réalisation subséquente de A. $Pr(B_i \cap A)$ est la probabilité pour que A se produise à travers la cause B_i. $Pr(A/B_i)$ est la probabilité pour que A se produise, sachant que la condition B_i a été réalisée. $Pr(B_i/A)$ est la probabilité pour que l'antécédent B_i se soit produit, sachant que l'événement A s'est effectivement réalisé. On a :

$$Pr(B_i \cap A) = Pr(B_i) \times Pr(A/B_i) = Pr(A) \times Pr(B_i/A)$$

par **(3)**. D'où :

$$Pr(B_i/A) = \frac{Pr(B_i)}{Pr(A)}\, Pr(A/B_i) \tag{87}$$

Si B_k est une autre hypothèse :

$$Pr(B_k/A) = \frac{Pr(B_k)}{Pr(A)}\, Pr(A/B_k) \tag{88}$$

en faisant le rapport de **(87)** et **(88)**

$$\frac{Pr(B_i/A)}{Pr(B_k/A)} = \frac{Pr(B_i)}{Pr(B_k)}\, \frac{Pr(A/B_i)}{(Pr\, A/B_k)} \tag{89}$$

Si les causes B_i et B_k sont *a priori* équiprobables :

$$\frac{Pr(B_i/A)}{Pr(B_k/A)} = \frac{Pr(A/B_i)}{Pr(A/B_k)} \tag{90}$$

En l'absence de toute information extérieure sur la probabilité *a priori* des diverses hypothèses $B_1, ..., B_n$, on attribuera donc à chacune d'elles, en constatant que A s'est réalisé, une probabilité *a posteriori* proportionnelle à la probabilité pour que A se produise quand celle-ci est réalisée. En termes un peu abrupts, on dira que l'on choisit des probabilités des causes proportionnelles aux probabilités des effets. Il ne faut pas oublier cependant que, si pour une raison quelconque extérieure à la réalisation actuelle de A, on ne considère pas les hypothèses $B_1, ..., B_n$ comme équiprobables *a priori*, c'est la formule **(89)** qu'il faut appliquer et non la formule **(90)**.

Si l'événement A ne peut survenir que par l'une quelconque des causes B_i :

$$Pr(A) = \sum_{i=1}^{n} Pr(B_i \cap A) \tag{91}$$

par **(4)**. D'où, en portant **(91)** dans **(87)** :

$$Pr(B_i/A) = \frac{Pr(B_i)\, Pr(A/B_i)}{\sum_{i=1}^{n} Pr(B_i)\, Pr(A/B_i)}. \tag{92}$$

Soit C un autre événement, également susceptible de se produire quand la condition B_i est réalisée. Évaluons $Pr(C/A)$, probabilité pour que C se produise, sachant que A s'est produit :

$$Pr(C/A) = \sum_{i=1}^{n} Pr(C \cap B_i/A) = \sum_{i=1}^{n} Pr(B_i/A)\, Pr(C/A \cap B_i) \tag{93}$$

par **(3)**, en tenant compte du fait que l'une quelconque des hypothèses B est certainement valable. Portant **(92)** dans **(93)** :

$$Pr(C/A) = \frac{\sum_{i=1}^{n} Pr(B_i)\, Pr(A/B_i)\, Pr(C/A \cap B_i)}{\sum_{i=1}^{n} Pr(B_i)\, Pr(A/B_i)} \tag{94}$$

Illustrons **(94)** par un exemple simple. Supposons que l'on ait trois urnes. L'une contient deux pièces d'or, la seconde une pièce d'or et une pièce d'argent, la troisième deux pièces d'argent. Pierre tire au hasard une pièce de monnaie dans une urne : c'est une pièce d'or (événement A). Quelle est la probabilité pour que, en tirant la 2ᵉ pièce de la même urne, celle-ci soit également en or (événement C) ? Ici N = 3. $Pr(B_i) = \frac{1}{3}\, \forall_i$. $Pr(A/B_1) = 1$, $Pr(A/B_2) = \frac{1}{2}$. $Pr(C/A \cap B_1) = 1$. Toutes les autres probabilités sont nulles. **(94)** donne alors : $Pr(C/A) = \frac{2}{3}$.

Estimateurs

Nous avons rencontré, au cours de cette section, plusieurs exemples d'estimation de paramètres (moyennes, variances, etc.) de la densité de probabilité $\varphi(\mu)$ attachée à la variable aléatoire $\mathcal{M}$.

D'une façon générale, on appelle *estimateur* α^*_K du paramètre α associé à la loi de probabilité $\varphi(\mu, \alpha)$, le terme général d'une suite de variables aléatoires $\alpha^*_1, ..., \alpha^*_N$, tel que α^*_K est une fonction des K variables aléatoires $\mathcal{M}_1, ..., \mathcal{M}_K$, et prenant la valeur $\alpha^*_K = f(\mu_1, ..., \mu_K)$, considérée comme valeur approchée de α.

Par définition, on dit que α^*_K est *sans biais* si $E(\alpha^*_K) = \alpha$ et *asymptotiquement sans biais* si on a seulement $\lim_{N \to \infty} E(\alpha^*_N) = \alpha$. Il est dit *convergent en probabilité* si $\forall \eta > 0$, $\lim_{N \to \infty} Pr\{|\alpha^*_N - \alpha| \geqslant \eta\} = 0$, et *convergent en moyenne quadratique* si $\lim_{N \to \infty} E\,|\alpha^*_N - \alpha|^2 = 0$. On peut montrer qu'un estimateur convergent en moyenne quadratique est certainement convergent en probabilité. Enfin, l'estimateur est dit *convergent au sens presque sûr* si

$$\lim_{N \to \infty} \alpha^*_N = \alpha,$$

sauf pour un ensemble de probabilité nulle d'événements élémentaires possibles.

Comme la convergence en moyenne quadratique, la convergence au sens presque sûr entraîne la convergence en probabilité. Le lecteur pourra s'assurer que les estimateurs que nous avons rencontrés **(86)** sont sans biais. On peut montrer qu'ils sont convergents au sens presque sûr.

Tests d'hypothèses

Le test de χ^2

La formule **(84)** :

$$\rho\,(m, \sigma) = \int \varphi\,(\mu)\,\lambda\,(\sigma/\mu)\,\mathrm{N}\,(m - \mu, \sigma)\,d\mu$$

relie la distribution des résultats de mesures, $\rho\,(m, \sigma)$, à la distribution « vraie » de la grandeur physique $\mathcal{M}$, $\varphi\,(\mu)$. Le passage de la première à la seconde implique, avant tout, la connaissance de la distribution des erreurs

$$\lambda\,(\sigma/\mu).$$

Dans un premier temps, nous allons supposer que les variables Σ et M sont indépendantes (il est toujours possible de diviser le plan (M, Σ) en régions de M, telles que, en chaque région, l'hypothèse de l'indépendance entre M et Σ soit compatible avec les données expérimentales), de sorte que

$$\lambda\,(\sigma/\mu) = \lambda\,(\sigma)$$

où $\lambda\,(\sigma)$ est la distribution marginale de $\rho\,(m, \sigma)$:

$$\lambda\,(\sigma) = \int \rho\,(m, \sigma)\,dm$$

Dans ces conditions, une évaluation correcte de $\lambda\,(\sigma)$ est la distribution des erreurs telle qu'elle est observée dans les N mesures (m_i, σ_i) :

$$\lambda^*\,(\sigma) = \frac{1}{\mathrm{N}}\left[\sum_i \delta\,(\sigma - \sigma_i)\right]$$

de sorte que nous écrirons :

(95) $$\rho\,(m, \sigma) \approx \int \varphi\,(\mu)\,\lambda^*\,(\sigma)\,\mathrm{N}\,(m - \mu, \sigma)\,d\mu$$

A partir d'une distribution $\varphi'\,(\mu)$ choisie à titre d'essai, nous pouvons alors calculer, moyennant **(95)**, la distribution $\rho'\,(m, \sigma)$ se rapportant à $\varphi'\,(\mu)$. Le test de χ^2 a pour objet de nous permettre d'évaluer le degré de compatibilité entre la répartition obtenue expérimentalement et l'hypothèse $\rho'\,(m, \sigma)$, en supposant que les (m_i, σ_i) obtenus sont le résultat d'un tirage de N événements avec la distribution de probabilité $\rho'\,(m, \sigma)$. La distribution $\varphi^*\,(\mu)$ qui réalise la meilleure compatibilité est acceptée comme estimation de $\varphi\,(\mu)$.

Distribution de χ^2

Par définition, le χ^2 pour N variables aléatoires X_i, indépendantes, est donné par l'expression :

(96) $$\chi^2 = \sum_i \chi_i^2 = \sum_i \frac{(x_i - \bar{x}_i)^2}{\sigma_i^2}$$

Dans cette expression, $\bar{x}_i$ et σ_i représentent l'espérance mathématique et la variance relative à X_i. Les X_i étant des variables aléatoires, le χ^2 est une variable aléatoire qui fluctue autour de la valeur moyenne :

(97) $$\langle\chi^2\rangle = \sum_{i=1}^{\mathrm{N}} \frac{\langle(x_i - \bar{x}_i)^2\rangle}{\sigma_i^2} = \mathrm{N}$$

d'après **(22)**.

La distribution de probabilité du χ^2 dépend de la forme des distributions de probabilités des X_i. Si tous les X_i suivent une distribution normale, nous avons :

$$f\,(x_i) = \mathrm{N}\,(x_i - \bar{x}_i, \sigma_i),$$

et comme les X_i sont indépendants :

$$f\,(x_1, \ldots, x_{\mathrm{N}}) = f\,(x_1) \ldots f\,(x_{\mathrm{N}}) = \frac{1}{(2\,\pi)^{\mathrm{N}/2}\,\sigma_1 \ldots \sigma_{\mathrm{N}}} \exp\left\{-\sum_{i=1}^{\mathrm{N}} \frac{(x_i - \bar{x}_i)^2}{2\,\sigma_i^2}\right\}$$

La distribution de χ^2 est, d'après **(33)** :

$$\mathrm{F}\,(\chi^2) = \frac{1}{(2\,\pi)^{\mathrm{N}/2}\,\sigma_1 \ldots \sigma_{\mathrm{N}}} \int \exp\left\{-\sum_{i=1}^{\mathrm{N}} \frac{(x_i - \bar{x}_i)^2}{2\,\sigma_i^2}\right\} \delta\left(\chi^2 - \sum_{i=1}^{\mathrm{N}} \frac{(x_i - \bar{x}_i)^2}{\sigma_i^2}\right) \times dx_1 \ldots dx_{\mathrm{N}}$$

Posant $\xi_i = \dfrac{x_i - \bar{x}_i}{\sigma_i}$

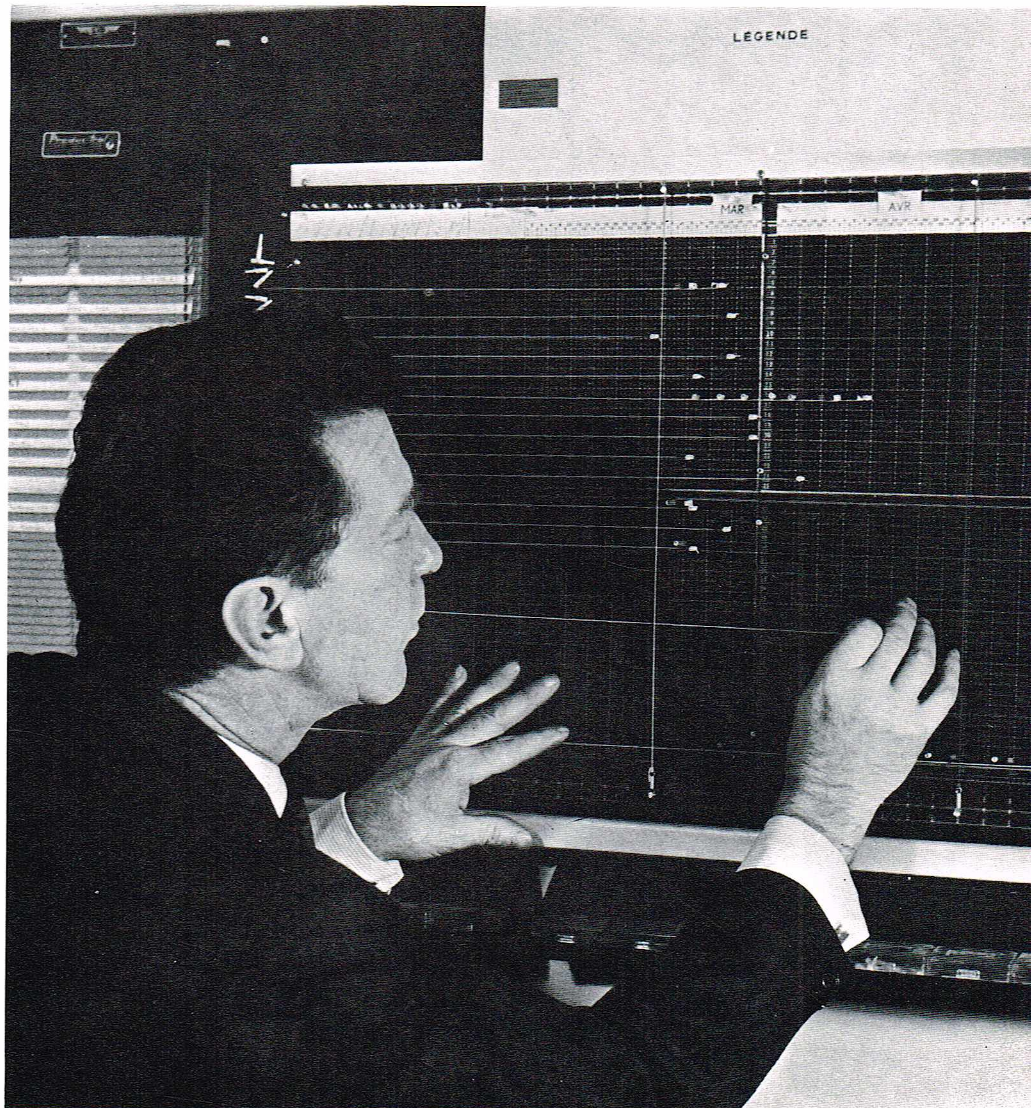

Ciccione - Rapho

▲ ***Les lois de probabilités permettent de se faire une idée des chances que l'on a de voir survenir telle ou telle conjoncture.***

(98) $$\mathrm{F}\,(\chi^2) = \frac{1}{(2\,\pi)^{\mathrm{N}/2}} \int e^{-\sum_i \frac{\xi_i^2}{2}}\,\delta\left(\chi^2 - \sum_i \xi_i^2\right) d\xi_1 \ldots d\xi_{\mathrm{N}}$$

et posant $r^2 = \sum_i \xi_i^2$

$$\mathrm{F}\,(\chi^2) = \mathrm{cte} \int_0^\infty e^{-\frac{r^2}{2}}\,\delta\,(\chi^2 - r^2)\,r^{\mathrm{N}-1}\,dr$$

car la somme **(98)** est étendue à tout l'espace à N dimensions d'une fonction constante sur la surface de la sphère. Cette surface est proportionnelle à $r^{\mathrm{N}-1}$; la constante sera identifiée ci-dessous en **(100)**. Appliquant **(31)** :

$$\mathrm{F}\,(\chi^2) = \mathrm{cte} \int e^{-\frac{r^2}{2}}\,\frac{\delta\,(\chi - r)}{2\,\chi}\,r^{\mathrm{N}-1}\,dr$$

$$= \frac{\mathrm{cte}}{2}\,e^{-\frac{\chi^2}{2}}\,\chi^{2\left(\frac{\mathrm{N}-2}{2}\right)}$$

La distribution de probabilité de χ^2 est donc une distribution G :

(99) $$\mathrm{F}\,(\chi^2) = \mathrm{G}\left(\frac{\mathrm{N}-2}{2}, \frac{1}{2}, \chi^2\right)$$

(voir **27**). La constante de normalisation vaut :

(100) $$\frac{\mathrm{cte}}{2} = \frac{\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{\mathrm{N}}{2}}}{\Gamma\left(\frac{\mathrm{N}}{2}\right)}$$

d'après **(28)**.

▶ ***Figure 23 :** voir développement dans le texte ci-dessous.*

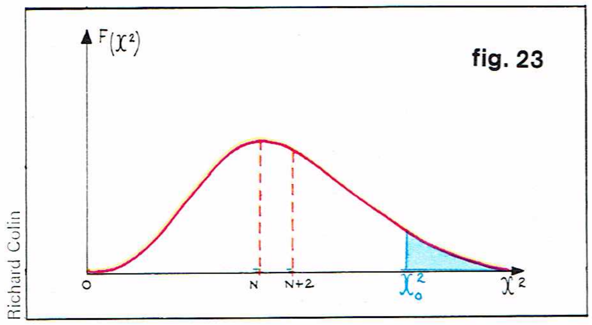

Les équations **(29)** donnent alors :

$$\langle \chi^2 \rangle = \mathrm{N}$$

en accord avec **(97)**, et

$$\sigma^2_{\chi^2} = 2\,\mathrm{N}$$

Le χ^2 le plus probable (maximum de la densité de probabilité) est $\chi^2_m = \mathrm{N} - 2$ (pour $\mathrm{N} \geqslant 2$). Il ne coïncide pas avec l'espérance mathématique $\langle \chi^2 \rangle = \mathrm{N}$.

Comportement asymptotique

Le χ^2 est une somme de variables aléatoires [les χ_i^2 de l'expression **(96)**], qui sont toutes régies par la même distribution de probabilité :

$$\mathrm{G}\left(-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \chi_i^2\right),$$

pour laquelle l'espérance mathématique ($\chi_i = 1$) et la variance ($\chi_i = 2$) existent. La seconde loi des grands nombres nous donne alors le comportement asymptotique de la distribution de χ^2 pour les grandes valeurs de N :

$$\mathrm{F}\,(\chi^2) \xrightarrow[\mathrm{N} \to \infty]{} \mathrm{N}\,(\chi^2 - \mathrm{N}, \sqrt{2\,\mathrm{N}})$$

En pratique, l'expression précédente est utilisée pour $\mathrm{F}\,(\chi^2)$ quand $\mathrm{N} \geqslant 30$.

Utilisation du χ^2

Soit $\varphi_i\,(x)$ les distributions de probabilités se rapportant aux X_i :

$$\langle x_i \rangle = \int x\,\varphi_i(x)\,dx$$

$$\sigma_i^2 = \int (x - \langle x_i \rangle)^2\,\varphi_i\,(x)\,dx$$

A priori, nous pouvons prédire la probabilité pour que le χ^2 **(96)** résultant d'un tirage sur les X_i tombe dans l'intervalle $(\chi^2, \chi^2 + d\chi^2)$. Cette probabilité est $\mathrm{F}\,(\chi^2)\,d\chi^2$, donnée en **(99)**. En particulier, si χ_0^2 est un nombre donné à l'avance :

$$Pr\,(\chi^2 \geqslant \chi_0^2) = \int_{\chi_0^2}^{\infty} \mathrm{F}\,(\chi^2)\,d\chi^2 \qquad (fig.\ 23)$$

Si la limite χ_0^2 est choisie telle que, par exemple, $Pr\,(\chi^2 \geqslant \chi_0^2) = 0{,}001$, nous obtiendrons un $\chi^2 \geqslant \chi_0^2$ seulement une fois sur mille tirages. L'éventualité que cela se produise dans un tirage unique est pratiquement exclue.

A l'inverse, supposons les x_i donnés et les $\varphi_i\,(x)$ inconnus. Si, à partir d'un choix $\varphi_i'\,(x)$ pris à titre d'essai, nous arrivons à une valeur de χ^2 qui dépasse χ_0^2 nous conclurons qu'il est pratiquement exclu que les hypothèses $\varphi_i\,(x)$ soient les véritables distributions qui régissent les variables X_i. On considérera comme possibles les familles $\varphi_i'\,(x)$ qui mèneront à une valeur de χ^2 plus petite que χ_0^2 ; la famille $\varphi_i'\,(x)$ qui mènera à la valeur de χ^2 la plus petite aura notre préférence et sera retenue comme estimation des $\varphi_i\,(x)$.

Les familles exclues d'après le critère du χ^2 sont toujours exclues *en probabilité*. On dit que l'exclusion est faite au *degré de confiance* $1 - Pr\,(\chi^2 \geqslant \chi_0^2)$ (= 99,9 % dans l'exemple choisi). Le choix du degré de confiance est une question de rigueur scientifique. En général on considère comme raisonnables des niveaux de confiance de 95 ou 99 %. Il faut noter que d'un autre côté nous devons nous méfier aussi des familles $\varphi_i'\,(x)$ qui conduisent à des valeurs trop petites de χ^2, par exemple quand la probabilité d'obtenir un χ^2 plus grand que le χ^2 obtenu dépasse 98 %. En général, quand cela arrive, cela veut dire qu'en choisissant les $\varphi_i'\,(x)$ on a surestimé les variances σ_i^2 (*fig.* 24).

Application aux problèmes d'estimation

Retournons aux problèmes d'estimation et servons-nous du critère du moindre χ^2 comme critère d'estimation. Dans le cas de mesures gaussiennes répétées, les résultats de mesures se répartissent conformément à la distribution **(82)** :

$$f\,(m) = \mathrm{N}\,(m - \mu_0, \sigma_0)$$

Définissant le χ^2 comme :

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(m_i - \mu_0)^2}{\sigma_0^2}$$

on a pour estimation de μ_0, au sens de la méthode du moindre χ^2, la valeur μ_0^* donnée par :

$$\textbf{(101)} \qquad \left(\frac{\partial \chi^2}{\partial \mu_0}\right)_{\mu_0^*} = 0$$

$$\mu_0^* = \sum_i \frac{m_i}{\mathrm{N}}$$

Cette valeur coïncide avec l'estimation faite en s'aidant de la loi des grands nombres.

Si les mesures ne sont pas faites avec la même précision,

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(m_i - \mu_0)^2}{\sigma_i{}^2}.$$

La condition **(101)** admet pour solution :

$$\mu_0^* = \frac{\sum_i \frac{m_i}{\sigma_i^2}}{\sum_i \frac{1}{\sigma_i^2}}$$

μ_0^* est la moyenne des m_i, pondérés par les paramètres de précision $\left(\frac{1}{\sigma_i^2}\right)$.

La variable aléatoire μ_0^* a pour espérance mathématique et pour variance :

$$\mathrm{E}\,(\mu_0^*) = \mu_0$$

$$\sigma^2\,(\mu_0^*) = \left(\sum_i \frac{1}{\sigma_i^2}\right)^{-1}$$

L'écart type $\sigma\,(\mu_0^*)$ nous donne la précision de l'estimation μ_0^*.

Soit N le nombre total de mesures. La relation **(101)** définit une relation entre les N variables m_i : de sorte que le χ^2 obtenu en identifiant μ_0 à μ_0^* ne doit pas se comparer à la distribution de χ^2 à N degrés de liberté, mais à la distribution de χ^2 à N — 1 degrés de liberté.

De façon générale, si les hypothèses $\varphi_i'\,(x)$ dépendent de certains paramètres inconnus α_k ($k = 1, n$), la méthode du moindre χ^2 permet d'évaluer ces paramètres à travers les n relations :

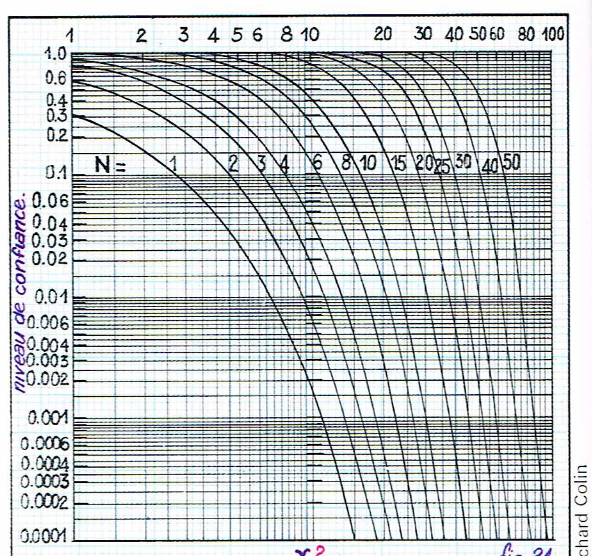

▶ ***Figure 24 :** le choix du degré de confiance est une question de rigueur scientifique.*

$$\left(\frac{\partial\chi^2}{\partial\alpha_k}\right)_{\alpha_k^*} = 0$$

mais le χ^2 calculé avec ces α_k^* suit alors une distribution de χ^2 à N — n degrés de liberté.

Application aux histogrammes

Le nombre N_j de mesures (m_i, σ_i) tombant dans le j-ième segment de l'histogramme, est une variable aléatoire. Si $\varphi(\mu)$ est la loi de distribution de la grandeur $\mathcal{M}$, la probabilité pour qu'une mesure tombe dans l'intervalle Δm_j, est, d'accord avec **(95)** :

$$\textbf{(102)} \qquad p_j = \int_{\Delta m_j, \sigma} \rho\,(m, \sigma)\; dm\; d\sigma$$

$$\textbf{(103)} \qquad \simeq \int_{\Delta m_j, \sigma} \varphi\,(\mu)\; \lambda^*\,(\sigma)\; \mathrm{N}\,(m - \mu, \sigma)\; d\mu\; d\sigma$$

La probabilité pour qu'une mesure ne tombe pas dans le j-ième segment de l'histogramme est $q_j = 1 - p_j$. D'autre part, chaque mesure est indépendante des autres, de sorte que le nombre total N_j de mesures qui tombent dans le segment (j) de l'histogramme obéit à la distribution binominale avec les paramètres p_j et q_j donnés par **(102)** ou **(103)**. En particulier :

$$n_j = \mathrm{E}\,(N_j) = Np_j$$

$$\sigma_j = \sigma\,(N_j) = \sqrt{Np_jq_j}$$

où N est le nombre total de mesures.

Écrivons le χ^2 :

$$\chi^2 = \sum_j \frac{(N_j - n_j)^2}{\sigma_j{}^2}.$$

On note que dans cette expression σ_j est la variance relative à l'espérance mathématique n_j et n'a rien à voir avec le nombre réel N_j de mesures qui tombent effectivement dans le segment considéré. En dépit de la pratique courante, il est donc incorrect de substituer σ_j par $\sqrt{N_j}$, quand on veut comparer les distributions de χ^2 avec l'expression **(99)**.

Le χ^2 obtenu nous permet d'évaluer le degré de compatibilité d'une hypothèse donnée avec l'histogramme obtenu ; l'hypothèse $\varphi^*(\mu)$ qui minimise ce χ^2 sera, éventuellement, retenue comme estimation de $\varphi(\mu)$.

Quelques réserves s'imposent cependant. On notera d'abord que, si nous avons l intervalles au total sur l'histogramme, les l variables N_j ne sont pas réellement indépendantes ; nous avons en effet la condition de « normalisation » :

$$\sum_{j=1}^{l} N_j = N$$

qui lie les N_j entre eux. Cette condition diminue le nombre de variables réellement indépendantes de l à $l - 1$, de sorte que le χ^2 suit une loi de distribution à $l - 1$ degrés de liberté.

La seconde observation est que, en toute rigueur, les distributions des N_i ne sont pas gaussiennes, mais binominales, de sorte que la distribution **(99)** n'est pas strictement valide pour le χ^2. Toutefois, nous savons que la distribution binominale tend très rapidement vers une distribution gaussienne. L'erreur commise en se servant de la distribution de χ^2 **(99)** est négligeable, pourvu que tous les $N_j \geqslant 10$ (*fig.* 10). Pour cette raison, on exclut généralement du calcul de χ^2 les cellules d'histogramme telles que $N_j < 10$.

Extension au cas de variables corrélées

Nous avons vu **(62)** qu'à partir d'un ensemble de N variables aléatoires $\underset{\sim}{X}$, centrées, gaussiennes et corrélées les unes aux autres, il est possible de trouver un ensemble de N variables aléatoires $\underset{\sim}{Y}$ gaussiennes, centrées, réduites et indépendantes. Il suffit pour cela que la matrice des variances $\underset{\sim}{V}$ **(61)** soit régulière.

Les $\underset{\sim}{Y}$ sont reliées aux $\underset{\sim}{X}$ par une transformation linéaire $\underset{\sim}{Y} = \underset{\sim}{A}\underset{\sim}{X}$. Dans cette transformation, la variable aléatoire unidimensionnelle $\chi^2 = \underset{\sim}{X}^T\underset{\sim}{V}^{-1}\underset{\sim}{X}$ est conservée :

$$\chi^2 = \underset{\sim}{Y}^T\underset{\sim}{W}^{-1}\underset{\sim}{Y} = \sum_i y_i^2 \qquad \text{car } (\underset{\sim}{A}\underset{\sim}{V}\underset{\sim}{A}^T)^{-1} = \underset{\sim}{1}.$$

Cette variable aléatoire n'est autre que le χ^2 défini en **(96)** pour les variables centrées et réduites.

Soit donc $\underset{\sim}{X}$ un ensemble de N variables aléatoires gaussiennes, admettant une matrice des variances $\underset{\sim}{V}$ régulière. Le χ^2 :

$$\chi^2 = [\underset{\sim}{X} - \bar{\underset{\sim}{X}}]^T\,\underset{\sim}{V}^{-1}\,[\underset{\sim}{X} - \bar{\underset{\sim}{X}}],$$

suit donc une loi normale de χ^2 **(99)** à N degrés de liberté.

Bien que ce résultat ne soit strictement valable que pour un ensemble de variables gaussiennes, le χ^2 défini de la même manière pour des variables aléatoires $\underset{\sim}{X}$ suivant des lois proches de la loi normale (telles les populations des segments dans les histogrammes, pourvu que $\bar{N}_j > 10$) suit, de très près, une loi de χ^2 à N degrés de liberté.

Le maximum de vraisemblance

Cette méthode de test d'hypothèse, introduite par Fischer, se base directement sur le théorème de Bayes **(89)**.

Soit $\varphi'(\mu)$ une distribution possible pour la grandeur physique $\mathcal{M}$, et $\varphi''(\mu)$ une autre distribution également possible. Soit (m_i, σ_i) la distribution expérimentale observée dans le plan (M, Σ). Le théorème de Bayes **(89)** s'écrit dans ce cas :

$$\frac{Pr\{\varphi'(\mu) / (m_i, \sigma_i)\}}{Pr\{\varphi''(\mu) / (m_i, \sigma_i)\}} = \frac{Pr\{\varphi'(\mu)\}\; Pr\{(m_i, \sigma_i) / \varphi'(\mu)\}}{Pr\{\varphi''(\mu)\}\; Pr\{(m_i, \sigma_i) / \varphi''(\mu)\}}.$$

S'il n'y a aucune raison externe de privilégier l'une plutôt que l'autre des hypothèses $\varphi'(\mu)$, $\varphi''(\mu)$, les probabilités *a priori* de ces hypothèses sont égales :

$$\textbf{(104)} \qquad \frac{Pr\{\varphi'(\mu) / (m_i, \sigma_i)\}}{Pr\{\varphi''(\mu) / (m_i, \sigma_i)\}} = \frac{Pr\{(m_i, \sigma_i) / \varphi'(\mu)\}}{Pr\{(m_i, \sigma_i) / \varphi''(\mu)\}}.$$

Les probabilités des hypothèses sont entre elles dans le même rapport que les probabilités d'obtenir la distribution (m_i, σ_i) par un tirage sur $\varphi'(\mu)$ et $\varphi''(\mu)$ respectivement.

Les épreuves (m_i, σ_i) sont le résultat d'un tirage répété N fois sur la densité de probabilité $\rho\,(m, \sigma)$ liée à $\varphi(\mu)$ par **(84)** ou **(95)**. On a :

$$Pr\{(m_i, \sigma_i) / \varphi(\mu)\} = Pr\{(m_i, \sigma_i) / \rho\,(m, \sigma)\} =$$

$$\textbf{(105)} \qquad \prod_{i=1}^{N} \rho\,(m_i, \sigma_i)\; dm_i\; d\sigma_i$$

par **(3)**, chaque tirage étant indépendant des autres. Supposons que les hypothèses $\varphi(\mu)$ possibles dépendent d'un paramètre inconnu, que l'on cherche à ajuster,

$$\varphi(\mu) = \varphi(\mu, \alpha), \qquad \text{alors :}$$

$$\rho\,(m, \sigma) = \rho_\alpha\,(m, \sigma).$$

L'expression **(105)**, où nous pouvons fixer arbitrairement les dm_i et les $d\sigma_i$, prend des valeurs variables selon la valeur de α. La fonction

$$F\,(\alpha) = A\; Pr\{(m_i, \sigma_i) / \varphi(\mu, \alpha)\},$$

où A est une constante de normalisation, peut être considérée, conformément à **(104)**, comme la distribution de probabilité de α, sachant que la séquence des N tirages sur M, Σ a donné les résultats (m_i, σ_i).

L'estimation α^* est donnée, dans la méthode du « maximum de vraisemblance », par la condition $\left(\frac{\partial F}{\partial \alpha}\right)_{\alpha^*} = 0$;

cette condition peut aussi s'écrire :

$$\textbf{(106)} \qquad \left(\frac{1}{F}\frac{\partial F}{\partial \alpha}\right)_{\alpha^*} = \left(\frac{\partial}{\partial \alpha} \operatorname{Log} F\right)_{\alpha^*} = 0.$$

qui est plus facile à manipuler que la précédente (F n'est jamais strictement nulle, ne serait-ce que par suite des erreurs qui étendent le spectre des valeurs possibles de m de $-\infty$ à $+\infty$). Compte tenu de **(105)**, **(106)** s'écrit en effet :

$$\frac{\partial}{\partial \alpha}\left[\sum_i \operatorname{Log} \rho_\alpha\,(m_i, \sigma_i)\right] = 0.$$

La distribution $F\,(\alpha)$ est généralement caractérisée par son maximum α^* et par sa variance

$$\sigma_\alpha^2 = \int (\alpha - \bar{\alpha})^2\, F\,(\alpha)\, d\alpha \qquad (\textit{fig. } 25).$$

▶ ***Figure 25 :** la distribution F (α) est généralement caractérisée par son maximum α^*.*

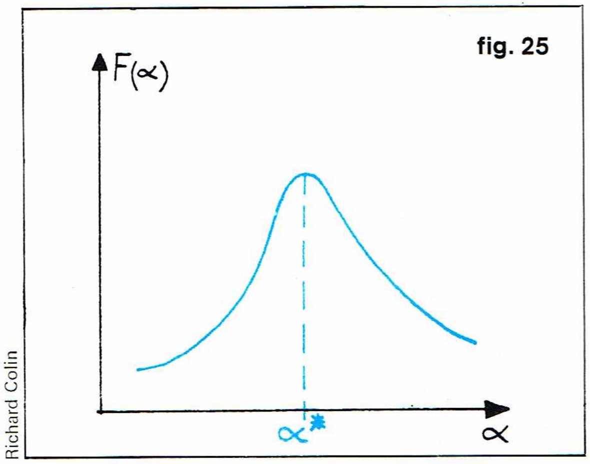

Richard Colin

Dans l'approximation où F (α) suit une distribution normale, on a : $F(\alpha) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp - \frac{(\alpha - \overline{\alpha})^2}{2\sigma^2}$.

La condition **(106)** donne dans ce cas $\alpha^* = \overline{\alpha}$, tandis que la variance est donnée par :

(107) $$\sigma^2_{\alpha} = -\left[\frac{\partial^2}{\partial\alpha^2} \text{Log } F(\alpha)\right]^{-1}_{\alpha^*}$$

Cette relation est utilisée couramment pour définir la prévision de l'estimation α^*, même quand F (α) n'est pas strictement gaussienne. On doit noter que, si F (α) est très éloignée d'une distribution normale, **(107)** perd toute signification. Seule la donnée de la distribution F (α) dans son ensemble peut alors permettre d'interpréter correctement la précision de l'estimation α^*.

Relation avec la méthode du χ^2

Maximum de vraisemblance et moindre χ^2 sont deux méthodes de test d'hypothèses équivalentes pour l'estimation de la moyenne d'une variable aléatoire dont la distribution est normale. C'est en particulier le cas lorsqu'il s'agit d'estimer la valeur réelle μ_0 d'une grandeur physique $\mathcal{M}$ au moyen d'une suite de mesures gaussiennes répétées. En effet, si

$$f(m) = N(m - \mu_0, \sigma_0)$$

on a :

$$F(\mu_0) = Pr(m_1 \dots m_N/\mu_0) =$$

$$\frac{1}{(\sigma\sqrt{2\pi})^N} \exp - \frac{1}{2}\sum_i \frac{(m_i - \mu_0)^2}{\sigma_0^2} dm_1 \dots dm_N$$

$$\text{Log } F(\mu_0) = -\frac{1}{2}\sum_i \frac{(m_i - \mu_0)^2}{\sigma_0^2} + \text{cte} = -\frac{\chi^2}{2} + \text{cte}$$

et : $$\left(\frac{\partial \text{ Log } F(\mu_0)}{\partial\mu_0}\right)_{\mu_0^*} = 0 \Leftrightarrow \left(\frac{\partial\chi^2}{\partial\mu_0}\right)_{\mu_0^*} = 0.$$

L'avantage de la méthode de maximum de vraisemblance est de permettre également d'évaluer la variance :

$$\text{Log } F(\sigma_0^2) = -\frac{N}{2} \text{Log } \sigma_0^2 - \frac{1}{2}\sum_i \frac{(m_i - \mu_0)^2}{\sigma_0^2} + \text{cte}$$

$$\left(\frac{\partial \text{ Log } F(\sigma_0^2)}{\partial\sigma_0^2}\right)_{\sigma_0^{*2}} = 0 \Rightarrow$$

$$-\frac{N}{2}\frac{1}{\sigma_0^{*2}} + \frac{1}{2}\sum_i \frac{(m_i - \mu_0)^2}{\sigma_0^{*4}} = 0$$

soit $$\sigma_0^{*2} = \sum_i \frac{(m_i - \mu_0)^2}{N}$$

On comparera ce résultat avec **(86)** où μ_0 a été remplacé par son estimation μ^*.

Exemple d'application

Considérons à titre d'exemple la détermination de la vie moyenne τ d'une substance radio-active, dans les trois situations suivantes : la durée de l'observation Δt est $\gg \tau$, et les incertitudes sur les temps de désintégration sont négligeables par rapport à τ **[a]** ; la durée de l'observation est limitée, $\Delta t < \tau$ (cas des vies moyennes longues) **[b]** ; les erreurs sur les temps de désintégration sont appréciables par rapport à τ (cas des vies moyennes très courtes) **[c]**.

a - La densité de probabilité pour qu'un atome présent au temps $t = 0$ se désintègre au temps θ est

(108) $$\varphi(\theta) = \frac{1}{\tau} e^{-\theta/\tau}.$$

Les erreurs sur les temps t_i mesurés étant négligeables, nous écrirons $\lambda(\sigma/\theta) = \delta(\sigma)$, de sorte que nous pouvons écrire :

$$f(t) = \int \rho(t, \sigma)\, d\sigma =$$

(109) $$\frac{1}{\tau}\int e^{-\theta/\tau}\, \delta(\sigma)\, N(t - \theta, \sigma)\, d\sigma\, d\theta = \frac{1}{\tau} e^{-t/\tau}$$

où nous avons utilisé **(84)**.

D'autre part :

$$F(\tau) = A\, Pr(t_1 \dots t_N/\tau) = A \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{\tau} e^{-t_i/\tau}$$

La condition du maximum de vraisemblance **(106)** donne alors :

(110) $$\tau^* = \frac{1}{N}\sum_i t_i$$

La première loi des grands nombres assure en effet que $\lim_{N \to \infty} \tau^* = E(t) = \tau$, où E ($t$) est l'espérance mathématique de t, régie par la loi de probabilité **(109)**.

La précision de l'estimation τ^* peut être évaluée à l'aide de **(107)** :

$$\sigma_{\tau^*} = -\left[\frac{\partial^2}{\partial\tau^2} \text{Log } F(\tau)\right]^{-1/2}_{\tau^*} = \frac{\tau^*}{\sqrt{N}}$$

Bien que F (τ) ne soit pas gaussienne, cette valeur est très proche de l'écart type de la variable τ^* définie par **(110)** ; en effet chacun des tirages t_i est régi par la loi **(109)** égale à $G\left(0, \frac{1}{\tau}, t\right)$ [donnée en **(27)**], dont la variance est $\sigma^2 = \tau$ d'après **(29)**. La somme des t_i admet donc pour variance $N\tau$ d'après **(35)**.

b - Si la durée d'observation Δt est limitée, on doit substituer **(108)** par :

$$\varphi(\theta) = \frac{1/\tau\, e^{-\theta/\tau}}{\int_0^{\Delta t} 1/\tau\, e^{-\theta/\tau}\, d\theta} = \frac{e^{-\theta/\tau}}{\tau(1 - e^{-\Delta t/\tau})}$$

définie sur l'intervalle $0 \leqslant \theta < \Delta t$, ce qui entraîne, au lieu de **(109)**,

$$f(t) = \frac{e^{-t/\tau}}{\tau(1 - e^{-\Delta t/\tau})}$$

$$F(\tau) = \frac{A}{\tau^N (1 - e^{-\Delta t/\tau})^N} e^{-\sum_i t_i/\tau}$$

L'estimation τ^*, solution de l'équation **(106)**, est solution de :

$$-N\tau^* + \Sigma\, t_i + N\,\Delta t \frac{e^{-\Delta t/\tau^*}}{1 - e^{-\Delta t/\tau^*}} = 0$$

Soit, au premier ordre en Δt :

$$\tau^* \simeq \frac{1}{N}\sum_i t_i + \Delta t\, e^{-\frac{N\Delta t}{\sum_i t_i}}$$

c - Soit σ_0 la précision de mesure sur les instants des désintégrations. Portant $\lambda^*(\sigma) = \delta(\sigma - \sigma_0)$ et utilisant **(95)**, nous avons, après intégration sur σ :

$$f(t) = \frac{1}{\tau}\int e^{-\theta/\tau}\, N(t - \theta, \sigma_0)\, d\theta$$

D'où : $$F(\tau) = \frac{A}{\tau^N} \prod_{i=1}^{N} \int e^{-\theta/\tau}\, N(t_i - \theta, \sigma_0)\, d\theta$$

La solution τ^* de la condition de maximum de vraisemblance **(106)** peut être recherchée par les méthodes de calcul numérique. Elles indiquent quelles corrections (petites) doivent être apportées à **(110)** pour tenir compte des erreurs de mesure.

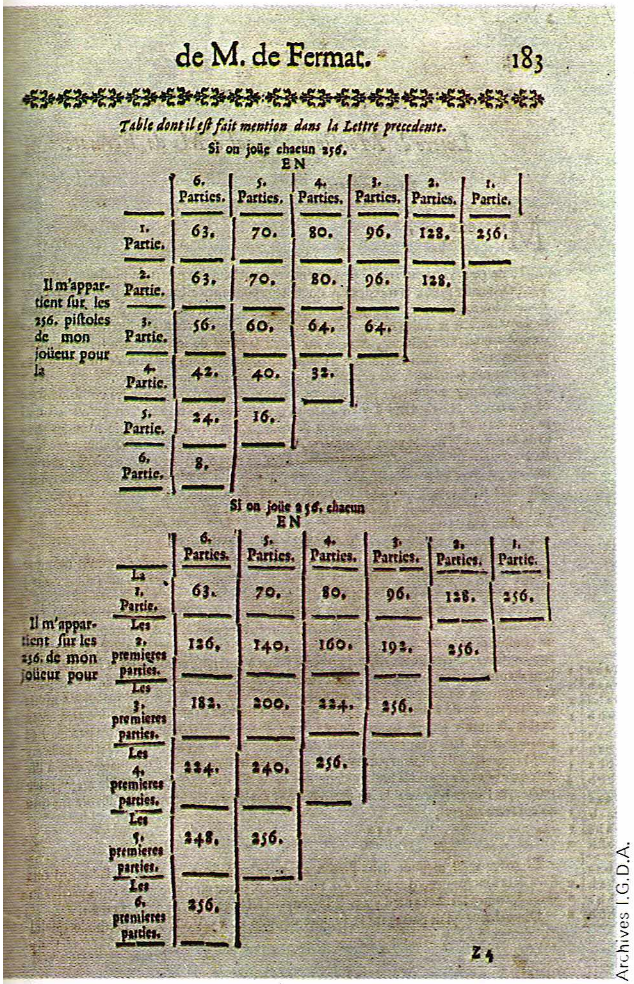

de M. de Fermat. 183

Table dont il est fait mention dans la Lettre precedente.

Si on joüe chacun 256.

EN

Il m'appartient sur les 256. pistoles de mon joüeur pour la

	6. Parties.	5. Parties.	4. Parties.	3. Parties.	2. Parties.	1. Partie.
1. Partie.	63.	70.	80.	96.	128.	256.
2. Partie.	63.	70.	80.	96.	128.	
3. Partie.	56.	60.	64.	64.		
4. Partie.	42.	40.	32.			
5. Partie.	24.	16.				
6. Partie.	8.					

Si on joüe 256. chacun

EN

Il m'appartient sur les 256. de mon joüeur pour

	6. Parties.	5. Parties.	4. Parties.	3. Parties.	2. Parties.	1. Partie.
La 1. Partie.	63.	70.	80.	96.	128.	256.
Les 2. premieres parties.	126.	140.	160.	192.	256.	
Les 3. premieres parties.	182.	200.	224.	256.		
Les 4. premieres parties.	224.	240.	256.			
Les 5. premieres parties.	248.	256.				
Les 6. premieres parties.	256.					

Z 4

Archives I.G.D.A.

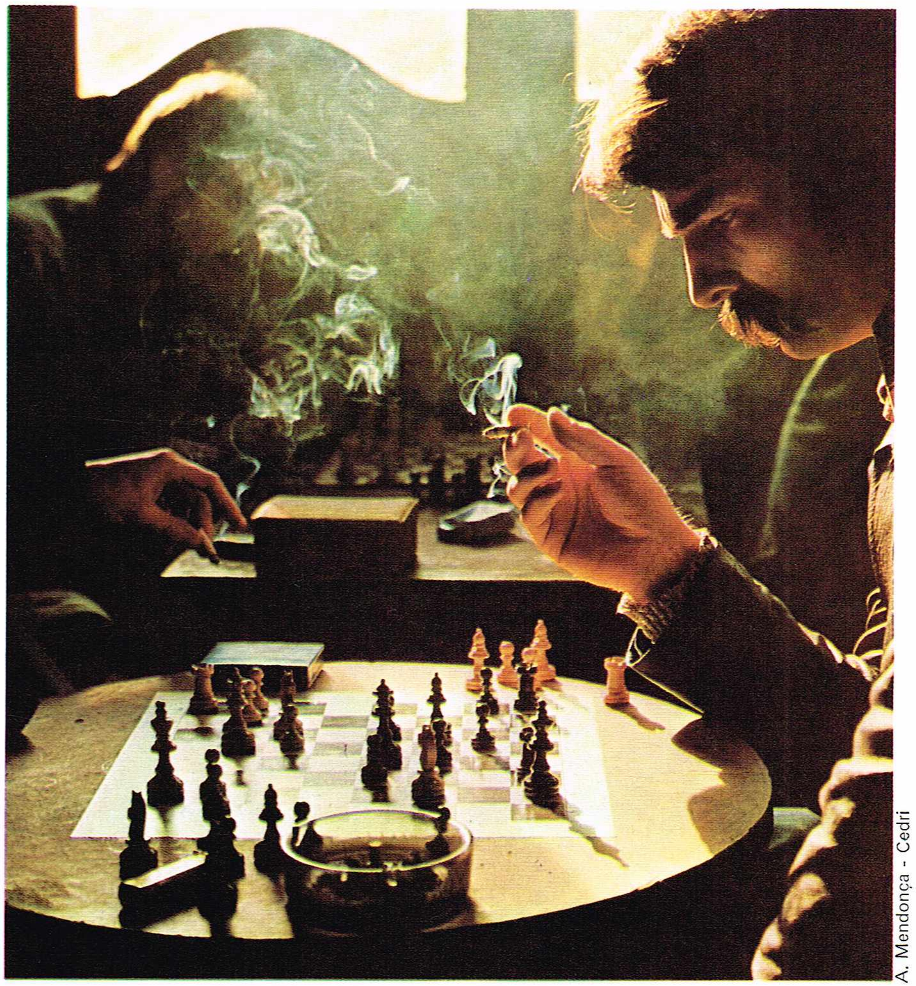

A. Mendonça - Cedri

▲ *A gauche, cette page, tirée d'une édition de 1679 sur les travaux de Fermat, reproduit la table jointe à une lettre envoyée à ce même Fermat par Pascal, dans laquelle il l'entretient de questions relatives aux probabilités dans le jeu de hasard. A droite, au jeu d'échecs, la théorie ne permet pas de décider concrètement quelle est la stratégie optimale pour chacun des deux joueurs.*

Éléments de théorie des jeux

Introduction

L'analyse des jeux de hasard (pile ou face, jeu de roulette, etc.) a joué un grand rôle dans le développement de la théorie de probabilités. Blaise Pascal, qui a défini de nombreux concepts de cette dernière, avait souvent en tête les questions que lui posait son ami le chevalier de Méré, joueur invétéré. Plus tard, la théorie des probabilités a largement dépassé ce champ d'application et est devenue une science mathématique fondamentale, en particulier pour les sciences physiques.

Les relations de la théorie des jeux avec les problèmes concrets de stratégie sont plus lâches. John von Neumann, le mathématicien hongrois qui, autour de 1928, a posé les bases de cette théorie, n'avait pas pour ambition de définir la meilleure façon possible de jouer aux échecs ou au poker, mais d'analyser en termes logiques et mathématiques la situation à laquelle les joueurs d'échecs ou de poker sont confrontés, du fait de leur acceptation des règles de ces jeux. Les résultats obtenus par la théorie ne sont pas (sauf dans les cas les plus simples) directement utilisables, en ce sens qu'ils ne dictent pas la conduite que tel ou tel joueur doit tenir dans telle ou telle situation concrète. Par contre, ils permettent d'établir parfois qu'il existe une méthode optimale pour jouer à ces jeux, en fonction des buts que le joueur cherche à atteindre. Par exemple, au jeu d'échecs, la théorie permet de démontrer qu'il existe une stratégie optimale pour chacun des deux joueurs, mais elle ne permet pas de décider concrètement quelle est cette stratégie. Si elle le faisait, d'ailleurs, le jeu perdrait tout intérêt, car le résultat de la partie serait connu des deux joueurs avant même que celle-ci commence.

Cependant, de même que le champ d'application de la théorie des probabilités déborde largement les jeux de hasard, celui de la théorie des jeux déborde largement le cadre des jeux dont les résultats se comptent en points ou en argent gagnés ou perdus. En tant que théorie de l'analyse logique et mathématique des situations conflictuelles, tenant compte des résultats désirés ou redoutés par les partenaires, elle peut être utile pour éclairer les décisions des hommes politiques, des stratèges militaires, ou des hommes d'affaires placés en situation de concurrence. Ce n'est donc sans doute pas par hasard que cette branche des mathématiques a connu un vif développement après la Seconde Guerre mondiale, dans le climat de la guerre froide. Dans un tel climat, la possession des armes absolues que l'on sait faisait que les problèmes de décisions stratégiques avaient pris le pas sur les problèmes d'équipement militaire.

La théorie des jeux est donc une théorie de la *décision formelle*. Les circonstances dans lesquelles ces décisions doivent être prises peuvent englober une part de hasard (le risque), comme dans le jeu de poker, mais ce n'est pas toujours le cas. Dans de nombreuses situations, au contraire, l'effet de toutes les décisions possibles est connu avec précision, et une seule d'entre elles produit le meilleur résultat recherché. Il faut donc se garder de confondre la théorie des jeux avec celle des jeux de hasard. Cependant, comme on le verra, même dans les situations conflictuelles complètement déterminées, les joueurs ont parfois intérêt à introduire un élément d'incertitude en variant, d'une partie à l'autre et de façon aléatoire, la stratégie qu'ils choisissent. Par ce biais, la notion de probabilité est alors réintroduite dans leur jeu.

Notons enfin que, puisque la théorie prend en compte non seulement les données (règles du jeu) de la situation en question, mais aussi les résultats désirés ou redoutés par les joueurs, selon un ordre de préférence qui peut être subjectif, la théorie ne vise pas toujours à déterminer un comportement rationnel des joueurs, au sens où ce comportement serait dicté uniquement par des considérations objectives. Ce fait nous retient de parler, à propos de la théorie des jeux, de théorie de la décision rationnelle, et rapproche la théorie des jeux des sciences sociales et de la psychologie.

Utilités

Afin de théoriser les problèmes de stratégie, il est nécessaire, non seulement de bien connaître les règles du jeu, qui fixent les conséquences de chacune des décisions des joueurs et le moment où le jeu s'arrête, mais encore de chiffrer son résultat, ou, comme on dit, le règlement. Les règlements attribués en théorie des jeux à tel joueur ne correspondent pas nécessairement à des sommes perdues ou gagnées. Ce peut être **+ 1** pour « gagné », **— 1** pour « perdu » et **0** pour « match nul », mais aussi n'importe quelles autres valeurs. Il se peut, par exemple, que d'un point de vue psychologique, le joueur estime qu'il est plus dommageable pour lui de perdre qu'il n'est avantageux de gagner. Il affectera alors au règlement de la situation « perdu » une valeur — ***a***, $a > 1$, ou bien au règlement de la situation « gagné » une valeur ***b***, $b < 1$. On suppose généralement, en théorie des jeux, que les règlements sont définis sur une échelle relative, c'est-à-dire que n'importe quel changement d'échelle du type $y = ax + b$ n'affectant pas les préférences relatives des joueurs n'affecte pas les décisions de ceux-ci. Dans ce cas, on désigne les règlements sous le nom d'*utilités*. Les utilités sont donc définies à une transformation linéaire près. Il est toujours possible de choisir arbitrairement les utilités 0 et 1, et les autres utilités sont alors fixées comme dans l'exemple ci-dessus, par les appréciations relatives des autres résultats possibles du jeu.

▼ ***Figure 26 : les 23 configurations finales possibles au jeu de tic-tac-toe.***

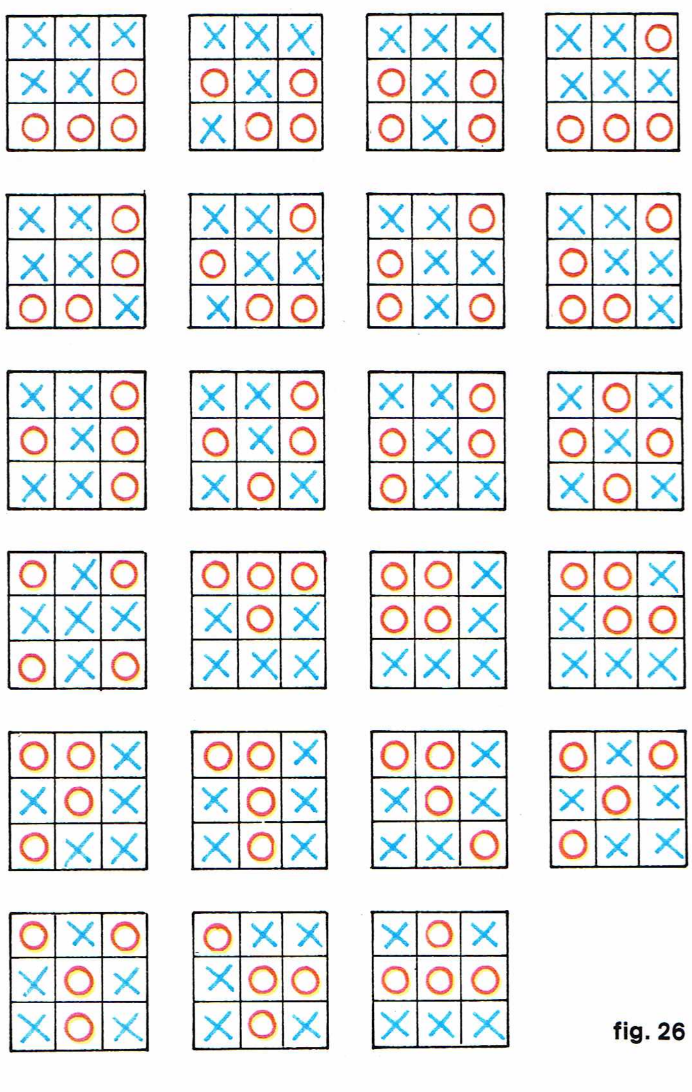

fig. 26

Richard Colin

Naturellement, le résultat recherché par le joueur, à l'aide de la théorie des jeux, sera de *maximaliser l'utilité*. Dans les situations dans lesquelles le hasard intervient, on choisira de *maximaliser l'espérance d'utilité,* au sens de la théorie des probabilités **(19)**. Ce choix ne représente pas nécessairement un comportement rationnel (maximalisation du gain final), sauf dans l'hypothèse où les joueurs jouent un grand nombre de parties successives. Supposons, pour fixer les idées, que le joueur doive tirer un billet de loterie de l'un des deux chapeaux A et B disposés devant lui, et qui contiennent chacun 20 billets. Dans le chapeau A, 2 billets donnent droit à 100 F, 4 à 5 F, 4 sont vides, 4 donnant une amende de 5 F et 6 une amende de 10 F. Dans le chapeau B, 1 seul billet donne droit à 100 F, 6 à 5 F, 5 sont vides, 4 donnant une amende de 5 F et 4 une amende de 10 F. En termes d'espérance d'utilité, tirer un billet du chapeau A (espérance de gain de 7 F) est deux fois meilleur que tirer un billet du chapeau B (espérance de gain de 3,5 F). Cependant, en une partie, le résultat le plus probable est de perdre 10 F avec le premier billet et de gagner 5 F avec le second : un homme prudent pourrait donc préférer cette deuxième solution.

Les utilités affectées à tel ou tel résultat par chacun des joueurs ne sont pas nécessairement les mêmes, l'ordre des préférences ou les rapports entre ces préférences pouvant différer d'un joueur à l'autre. Une classe particulièrement importante de jeux, cependant, est celle des jeux à *deux personnes de somme nulle,* pour lesquelles les utilités affectées par l'un des joueurs (tels les gains et les pertes) sont égales et opposées à celles affectées par l'autre joueur. Sauf exception, nous ne traiterons dans ce qui suit que de situations rentrant dans ce cadre.

Stratégies

On appelle stratégie l'énoncé de la conduite d'un joueur, compte tenu de chacune des réactions possibles de l'adversaire à chacun des coups qu'il joue.

Le déroulement d'une partie et son utilité sont déterminés, dans un jeu à deux personnes, par un couple de stratégies : celle du joueur, et celle de l'adversaire.

Il ne faut pas confondre le nombre de stratégies et le nombre de déroulements possibles d'une partie. Considérons, pour fixer les idées, le jeu de tic-tac-toe. Ce jeu, qui se joue sur un damier 3 × 3 cases, consiste, pour le joueur A, à essayer d'aligner 3 croix, pendant que son adversaire B essaie, de son côté, d'aligner 3 ronds. Chacun des joueurs place alternativement une croix ou un rond, en commençant par une croix (*fig.* 26). Quand « A » a placé 5 croix, et « B » a placé 4 ronds, le damier est entièrement rempli. Nous supposerons, pour simplifier, que les joueurs décident de toujours poursuivre la partie jusqu'à compléter le damier, et ne s'arrêtent pas, comme c'est l'habitude, dès que l'un d'eux a aligné trois signes.

Il y a $\frac{9!}{5!4!} = 126$ manières distinctes de remplir le damier, et $9! = 362\,880$ déroulements possibles d'une partie.

Numérotons les cases de 1 à 9. Une stratégie possible pour A consiste à décider : « au premier coup, je place une croix dans la case 1 ; au troisième, si B a rempli la case 2, je placerai une croix en 3 ; s'il a rempli 3, je placerai une croix en 4... s'il a rempli 9, je placerai ma croix en 5. Au cinquième coup, etc. » Étant donné que B a 8 choix possibles (de 2 à 9) au deuxième coup, et que dans chacune de ces alternatives A peut décider de placer sa marque dans l'une quelconque des 7 cases libres, le nombre de stratégies possibles au troisième coup est 7^8. De même, au cinquième, il est de 5^6, et au septième, de 3^4. Au neuvième coup, il n'y a qu'une stratégie possible, celle de placer sa croix dans la seule case restée libre. Au total, le nombre de stratégies possibles pour l'ensemble de la partie est :

$$9 \times 7^8 \times 5^6 \times 3^4 \simeq 6{,}6\ 10^{13}.$$

Tous ces nombres sont, en réalité, surévalués car il est raisonnable de considérer comme équivalentes toutes les figures qui ne diffèrent que par une symétrie par rapport à un bord du damier ou par une rotation de 90°. Ainsi, compte tenu de ces symétries, le nombre de manières distinctes de

remplir le damier tombe de 126 à 23, et le nombre de déroulements possibles tombe de 362 880 à

$$23 \times 5! \times 4! = 66\,240.$$

Le nombre de stratégies possibles est donc, en général, très grand, même pour les jeux les plus simples. Si grand que soit ce nombre, cependant, il ne peut être infini, à partir du moment où le nombre de coups possibles et le nombre de choix à chaque coup restent finis.

Dès que chacun des joueurs a choisi une stratégie, le déroulement de la partie devient inéluctable. Si le joueur ignore la stratégie choisie par son adversaire, il ne peut prédire le résultat de la partie, mais un observateur qui saurait quel couple de stratégies a été choisi pourrait le faire. On peut donc associer à tout couple de stratégies (i, j) un résultat, ou une utilité, que nous désignerons par U_{ij}. La matrice U_{ij}, où i varie de 1 à n (nombre de stratégies possibles pour le premier joueur) et j de 1 à m (nombre de stratégies possibles pour le deuxième), est appelée *matrice de jeu*.

Stratégies dominantes et minimax

Considérons, dans un jeu à deux personnes de somme nulle, l'ensemble des stratégies possibles A_i pour le joueur A et l'ensemble des stratégies possibles B_j pour B. Soit U_{ij} la matrice de jeu.

Comparons deux stratégies possibles pour A, soit A_k et A_l. Si les utilités procurées par A_k sont supérieures ou au moins égales à celles procurées par A_l, quelle que soit la stratégie B_j choisie par B, on dit que A_k *domine* A_l. Si A_k domine toutes les autres stratégies $A_l \neq A_k$, A_k est une *stratégie dominante*.

On peut distinguer des jeux pour lesquels :
— il existe une stratégie dominante pour chacun des joueurs ;
— il n'existe de stratégie dominante que pour l'un des joueurs ;
— il n'existe pas de stratégie dominante.

Dans le premier cas, la conduite à tenir pour les joueurs A et B est évidente : ils choisiront chacun la stratégie dominante correspondante. Le résultat du jeu est déterminé par ce choix.

Dans les deux autres cas, le choix des joueurs n'est pas évident.

Cependant, chaque stratégie A_i offre des utilités U_{ij} variables selon la stratégie choisie par l'adversaire. Considérons la plus mauvaise d'entre elles :

$$U_i^* = \text{Min}\ (U_{i1}, \ldots, U_{in}).$$

En l'absence de stratégie dominante, un joueur avisé A (et qui suppose que son adversaire saura profiter de toute imprudence de sa part) choisira la stratégie A_k qui assure le meilleur résultat parmi les plus mauvais $U^*_k = \text{Max}\ (U^*_1, \ldots, U^*_m)$. Tout autre choix laisserait à B la possibilité de lui infliger un résultat plus défavorable. Son adversaire, B, appliquera naturellement la même tactique. Finalement, les joueurs A et B choisiront un couple de stratégies correspondant à un *col* (le col est un point le plus bas dans une ligne horizontale de la matrice de jeu, et un point le plus haut dans la ligne verticale correspondante). On l'appelle aussi un *minimax*.

Si U_{kl} et U_{mn} sont deux cols, alors ils ont même valeur, et U_{kn} et U_{ml} sont également deux cols de même valeur : n'importe lequel de ces couples de stratégies produit donc la même utilité. En effet, par définition des cols, on peut écrire :

$$U_{kl} \geqslant U_{ml} \geqslant U_{mn}$$
$$U_{kl} \leqslant U_{kn} \leqslant U_{mn}$$

D'où $U_{kl} = U_{ml} = U_{mn} = U_{kn}$ (*fig.* 27).

Le *principe minimax* selon lequel les joueurs doivent choisir un col de la matrice de jeu, s'il en existe, constitue donc la règle à suivre pour tous les jeux à deux personnes de somme nulle.

Tous les jeux *à information parfaite* (c'est-à-dire dans lesquels les décisions prises par l'adversaire au coup précédent sont connues du joueur, et pour lesquels, par conséquent, le hasard ne joue aucun rôle) présentent des cols. En effet, considérons les deux derniers coups joués, et supposons, pour fixer les idées, que ceux-ci sont joués successivement par A (n alternatives) et B (m alternatives). La matrice de jeu correspondant à ce sous-jeu à deux coups possède n lignes et m^n colonnes. Parmi

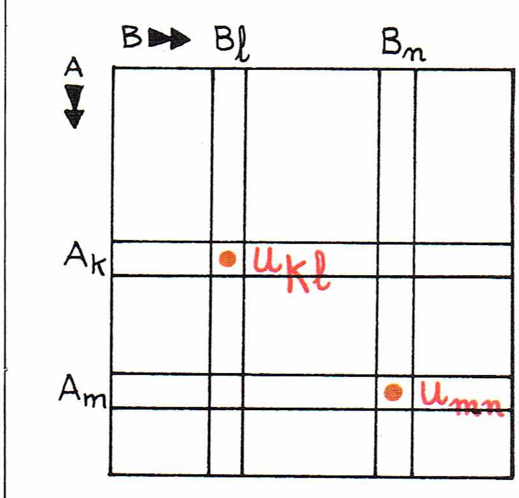

fig. 27

◄ *Figure 27 : voir développement dans le texte ci-contre.*

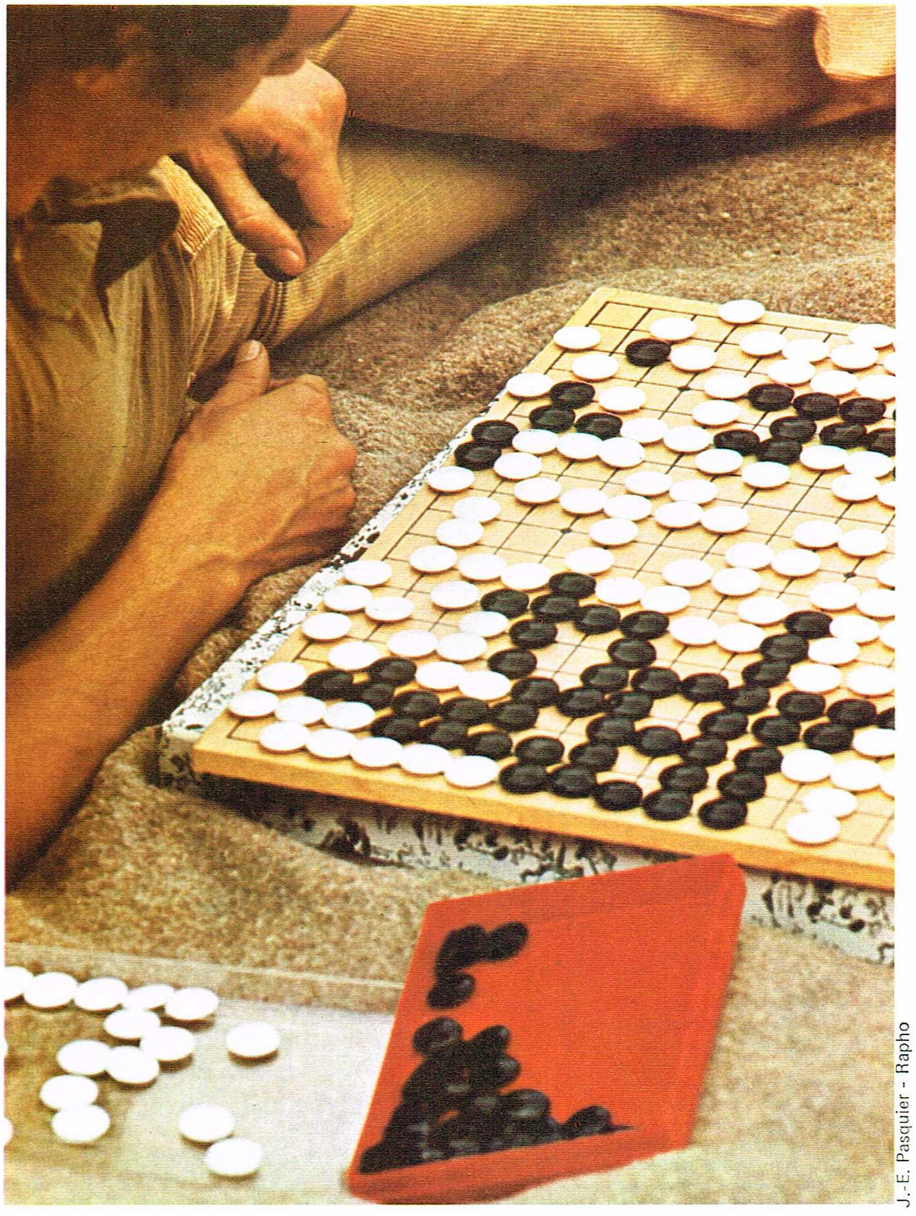

▼ *Le jeu de* **Go.** *Tous les jeux à information parfaite, présentent des cols.*

ces m^n colonnes, il en existe toujours au moins une qui regroupe tous les minimums correspondant aux n lignes. La stratégie correspondante peut être en effet reformulée ainsi : choisir l'alternative qui conduit au minimum de gain pour A. Par définition, le maximum de ces minimums est un col. Il est donc superflu de jouer ces derniers coups, dont le résultat, pour des joueurs avisés, est connu d'avance. Le jeu se trouve donc ramené à un jeu amputé de deux coups, et ainsi de suite.

Dans la pratique, les dimensions des matrices correspondant aux jeux réels sont le plus souvent telles qu'il est impossible d'expliciter les stratégies qui conduisent à des cols. C'est ce qui permet aux jeux à information parfaite, tels que le jeu d'échecs, de garder un intérêt car, dans le cas contraire, toutes les parties de jeux d'échecs disputées par des joueurs avertis aboutiraient au même résultat (ou à des résultats équivalents en termes d'utilités).

Stratégies mixtes

Les jeux ou les situations conflictuelles à information parfaite sont exceptionnels. Dans la plupart des situations concrètes, les adversaires ont la possibilité de cacher l'un à l'autre une partie des décisions qu'ils prennent au cours de la partie. Les décisions tenues secrètes par le joueur B, par exemple, empêchent le joueur A d'envisager un comportement différent selon ces décisions. Par rapport au jeu à information parfaite où toutes les décisions sont connues, le nombre de stratégies possibles pour A s'en trouve diminué, et la matrice de jeu réduite. Cette matrice réduite peut encore, éventuellement, présenter un col, mais il arrive fréquemment qu'elle n'en présente plus.

Illustrons ces considérations par un exemple simple. Considérons le jeu suivant : A met dans sa main ouverte (droite ou gauche) un bouton, puis B fait de même. Les joueurs comparent alors leurs mains, et le règlement s'établit selon le schéma suivant (*fig.* 28) :

A a le choix entre deux stratégies,
« D » et « G » (choisir la main droite ou la main gauche).
B a le choix en quatre stratégies :

1 choisir *d* quel que soit le choix de A
2 choisir *d* si D et *g* si G
3 choisir *g* si D et *d* si G
4 choisir *g* quel que soit le choix de A.

La matrice de jeu correspondante est donc :

	1	2	3	4
D	2	2	— 1	— 1
G	— 2	3	— 2	3

Elle comporte, comme prévu, un col en D3, de valeur — 1. Le joueur A doit mettre le bouton dans la main droite (pour ne pas risquer de perdre 2 points) et B doit le mettre dans la main gauche pour gagner 1 point.

Ce jeu est évidemment dépourvu d'intérêt. Examinons donc la variante selon laquelle A, au lieu de mettre le bouton dans sa main ouverte, garde sa main fermée et ne l'ouvre qu'une fois que B a fait son propre choix. Les stratégies possibles pour A restent les mêmes, mais les stratégies 2 et 3, pour B, n'ont plus de sens : les seules possibilités qui s'offrent à lui sont de choisir lui-même soit de placer le bouton dans la main droite, soit dans la gauche. La matrice 2 × 2 correspondant à ce nouveau jeu est :

	1	4
D	2	— 1
G	— 2	3

Si A joue une seule partie, son comportement dépendra essentiellement de son caractère. S'il est audacieux, il cachera le bouton dans la main gauche, espérant que B fera de même. S'il est prudent, il préférera le cacher dans la main droite, pour ne pas risquer de perdre plus d'un point.

Dans un jeu répété un grand nombre de fois, A ne peut pas adopter toujours la même stratégie. S'il le faisait, B aurait tôt fait de le remarquer et d'adapter sa propre stratégie de façon à gagner. Ainsi, si A choisissait de toujours cacher le bouton dans la main gauche, B choisirait toujours la droite et A perdrait 2 points à chaque partie. Pour confondre son adversaire, A doit donc choisir tantôt une stratégie, tantôt une autre; et pour être sûr que B ne risque pas de deviner son choix, il changera de stratégie de façon aléatoire, tirant au sort entre la stratégie D, à laquelle il affectera la probabilité x, et la stratégie G (probabilité $1 - x$). Bien entendu, B fera de même, affectant la probabilité y à la stratégie 1 et $1 - y$ à la stratégie 4.

L'espérance d'utilité, dans ce cas, est :

$$E = 2xy - x(1-y) - 2y(1-x) + 3(1-x)(1-y) = y(8x-5) - 4x + 3.$$

Pour $x = \frac{5}{8}$, la fréquence y choisie par B n'affecte pas l'espérance d'utilité, $E = \frac{1}{2}$. En choisissant cette valeur de x, A est donc assuré, à la longue, d'obtenir un demi-point par partie (en moyenne).

D'autre part, $E = x(8y-4) - 5y + 3$. Pour $y = \frac{1}{2}$, la fréquence choisie par A n'affecte pas non plus l'espérance d'utilité, $E = \frac{1}{2}$. Il est facile de montrer que le couple de fréquences $\left(x = \frac{5}{8}, y = \frac{1}{2}\right)$ est celui qui conduit au meilleur résultat possible à la fois pour A et B. Par exemple, si A choisit $x > \frac{5}{8}$, B peut réagir en choisissant $y < \frac{1}{2}$, ce qui assure une espérance d'utilité inférieure à $\frac{1}{2}$ (*fig.* 29).

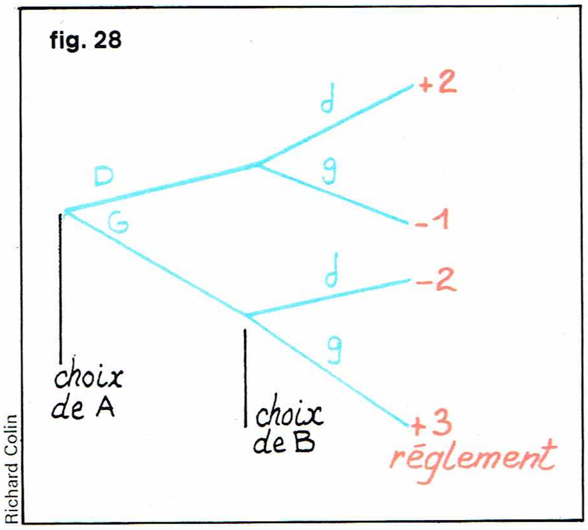

Richard Colin

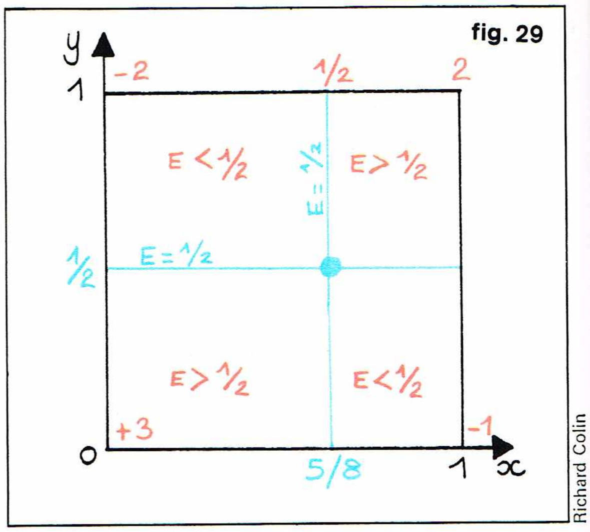

Richard Colin

▶ *A gauche, figure 28 : représentation du règlement des joueurs au bouton (voir texte ci-dessus). A droite, figure 29 : l'existence d'une stratégie mixte optimale est une propriété générale des jeux à deux personnes de somme nulle.*

Le couple de fréquences $\left(x = \frac{5}{8}, y = \frac{1}{2}\right)$ est appelé, dans ce cas, la *stratégie mixte optimale*, et l'espérance de gain associée, $E = \frac{1}{2}$, est appelée *valeur du jeu*. L'existence d'une stratégie mixte optimale (ou de plusieurs stratégies mixtes optimales de même valeur) est une propriété générale des jeux à deux personnes de somme nulle. Si la matrice de jeu possède un col, ce col est un cas particulier de stratégie optimale (pour lequel les fréquences affectées sont 1 et 1). Comme dans le cas des cols, cependant, il est le plus souvent impossible de résoudre en pratique le problème de déterminer quelle est ou quelles sont la ou les stratégies mixtes optimales correspondant à une situation concrète.

Examinons les conditions que la stratégie mixte optimale d'un jeu à deux personnes de somme nulle doit remplir. Appelons U_{ij} les éléments de la matrice de jeu à n lignes (stratégies $A_1 \dots A_n$) et m colonnes (stratégies $B_1 \dots B_m$). Les probabilités affectées par B aux stratégies $A_1 \dots A_n$ sont $x_1, \dots, x_n$, et les probabilités affectées par B aux stratégies $B_1 \dots B_m$ sont $y_1, \dots, y_m$. L'espérance d'utilité est :

$$E = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} U_{ij}\, x_i\, y_j.$$

Quelle que soit la stratégie choisie par B, l'espérance de gain de A doit être au moins égale à la valeur du jeu, soit v. Par conséquent, pour chaque m :

$$\textbf{(111)} \qquad \sum_{i=1}^{n} U_{ij}\, x_i \geqslant v \quad (m \text{ inéquations}).$$

D'autre part, les x_i, étant des probabilités, doivent satisfaire les relations :

$$x_i \geqslant 0 \qquad (n \text{ inéquations})$$

$$\textbf{(112)} \qquad \sum_{i=1}^{n} x_i = 1$$

De même, les relations auxquelles doivent satisfaire les y sont :

$$\textbf{(113)} \qquad \sum_{j=1}^{m} U_{ij}\, y_j \leqslant v \quad (n \text{ inéquations})$$

équivalentes à

$$\sum_{j=1}^{m} - U_{ij}\, y_j \geqslant -v$$

$$y_j \geqslant 0 \quad (m \text{ inéquations})$$

$$\textbf{(114)} \qquad \text{et} \qquad \sum_{i=1}^{m} y_j = 1.$$

La résolution des systèmes d'inéquations **(111)** à **(114)** peut se faire par approximations successives.

Notons enfin que, dans le cas simple où $n = m = 2$, la résolution du problème de stratégie optimale est immédiate, en utilisant la propriété, remarquée dans l'exemple du jeu de bouton-bouton, que, au point x^*, y^* cherché, $\overrightarrow{\text{grad}}\, E$ est nul (l'espérance d'utilité ne dépend ni de la valeur de x, pour $y = y^*$ fixé, ni de la valeur de y, pour $x = x^*$ fixé).

Ce point est donc solution de $\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{\partial E}{\partial y} = 0$.

Si nous écrivons la matrice de jeu sous la forme :

(115)

		B_1	B_2
	Pr	y	$1-y$
A_1	x	a	b
A_2	$1-x$	c	d

l'espérance d'utilité est :

$$\textbf{(116)} \qquad E = axy + bx\,(1-y) + cy\,(1-x) + d\,(1-x)\,(1-y)$$

et :

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{\partial E}{\partial y} = 0 \Rightarrow$$

$$\textbf{(117)} \qquad x^* = \frac{d-c}{(a+d)-(b+c)} \qquad y^* = \frac{d-b}{(a+d)-(b+c)}$$

On pourra vérifier sans difficulté que, si la matrice ne possède pas de col, le point (x^*, y^*) se trouve bien dans le carré $0 \leqslant x \leqslant 1$ et $0 \leqslant y \leqslant 1$.

Nous avons considéré jusqu'ici des jeux à deux personnes de somme nulle dont les joueurs, connaissant parfaitement toutes les règles du jeu, peuvent construire, au moins en principe, la matrice de jeu. L'examen de celle-ci dicte alors leur conduite. Cependant, dans les situations de conflit réel, il n'est pas rare que les règles du jeu échappent, au moins en partie, aux joueurs, qui ne peuvent apprécier qu'après coup le résultat global des stratégies qu'ils choisissent et comparer leurs différentes efficacités — c'est-à-dire leurs différentes utilités — au terme d'une longue suite ou répétition de parties.

Pour examiner quel peut être, dans cette situation, le comportement des joueurs, reprenons l'exemple simple du jeu à deux personnes de somme nulle qui ne présente que deux stratégies possibles, à la fois pour A et B. La matrice de jeu est de la forme **(115)**. Si elle présente une stratégie dominante ou un col, un examen empirique des résultats acquis au cours d'un nombre suffisant de parties aura tôt fait de convaincre les joueurs de l'existence de cette stratégie dominante ou de ce col. Dans ce cas, en effet, l'attitude des joueurs est déterminée sans ambiguïté : ils doivent appliquer les stratégies correspondantes, qui leur assurent le maximum de gain sans risque.

Dans le cas d'un jeu dont la matrice ne présente pas de col, toutefois, la situation est différente : les joueurs doivent appliquer une stratégie mixte dont les probabilités associées, x^* et y^*, ne peuvent être évaluées que s'ils connaissent la matrice dans son ensemble. Au cours des premières parties, ils se fixent donc *a priori* une stratégie mixte caractérisée par les probabilités x et y. Celle-ci leur assure, en moyenne, une utilité donnée par **(116)**. Au bout d'un certain nombre de parties, le joueur A peut essayer d'améliorer son gain en modifiant la probabilité x associée à la stratégie A_1. Si l'utilité moyenne obtenue avec cette nouvelle stratégie mixte est plus élevée, il en déduit logiquement qu'il a eu raison de modifier, dans cette direction, la probabilité x et la modifiera encore, jusqu'à optimisation de son gain.

Naturellement, pendant ce temps, le joueur B fera de même. De plus, il est naturel de supposer que chacun des joueurs changera d'autant plus souvent, ou d'autant plus fortement, la probabilité x (pour A) ou y (pour B) que l'amélioration du gain obtenu lors de la dernière série aura été plus forte. Au total, leur comportement sera conforme à ce que l'on appelle un *modèle dynamique de jeu*, que l'on peut caractériser par le système d'équations :

$$\textbf{(118)} \qquad \frac{dx}{dt} = \alpha^2 \frac{\partial E}{\partial x} \qquad \frac{dy}{dt} = -\beta^2 \frac{\partial E}{\partial y}$$

où les constantes positives α^2 et β^2 mesurent l'intensité avec laquelle les joueurs A et B réagissent aux améliorations obtenues en variant les paramètres des stratégies mixtes qu'ils appliquent. La 2e équation **(118)** comporte un signe —, du fait que si le gain de A est E, le gain de B est — E.

Explicitant ces équations à l'aide de **(116)**, le système **(118)** se réduit au système d'équations :

$$\frac{dx}{dt} = uy + v$$

$$\frac{dy}{dt} = -\eta x - \theta$$

où $u = \alpha^2\,(a + d - b - c)$, $v = \alpha^2\,(b - d)$, $\eta = \beta^2\,(a + d - b - c)$, $\theta = \beta^2\,(c - d)$.

Ce système admet pour solution :

$$x = A \cos \omega t + B \sin \omega t + x^*$$

$$y = \frac{\beta}{\alpha}\left[B \cos \omega t - A \sin \omega t\right] + y^*$$

où les x^*, y^* sont donnés par **(117)** et $\omega = \sqrt{u\eta}$. Les partenaires choisissent des stratégies mixtes qui, au cours du temps, décrivent dans le plan (x, y) une ellipse centrée

▶ *Figure 30 : les partenaires choisissent des stratégies mixtes qui, au cours du temps, décrivent une ellipse centrée sur x^* et y^*, couple de stratégies mixtes optimal.*

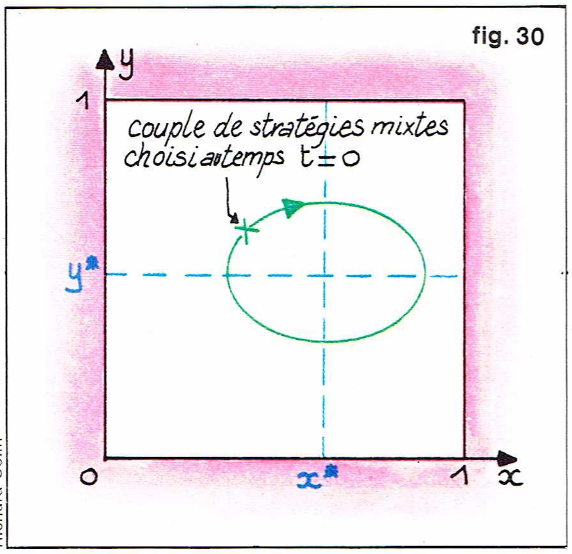

sur x^* et y^*, couple de stratégies mixtes optimal (*fig.* 30). Cette ellipse est décrite avec une vitesse angulaire uniforme. Si le point initial n'est pas trop éloigné du point x^*, y^*, de telle sorte que l'ellipse est décrite dans son entier sans sortir du carré $0 \leqslant x \leqslant 1$, $0 \leqslant y \leqslant 1$, le gain moyen obtenu par les deux joueurs au long d'un cycle complet sera le même que s'ils avaient choisi dès l'abord le couple optimal x^*, y^*.

Jeux de somme non nulle ; ententes

Pour conclure ce rapide examen des principes fondamentaux de la théorie des jeux, examinons quelques cas de jeux à deux personnes de somme non nulle, c'est-à-dire tels que les utilités attribuées à chaque résultat par les deux joueurs ne sont pas exactement opposées. Ce sera le cas, par exemple, si les préférences des joueurs ne sont pas rangées par chacun d'eux dans le même ordre avec les mêmes poids relatifs, ou si le règlement attribue des gains différents à chaque joueur, par le truchement d'une « banque », de telle sorte que ce qui est gagné par A n'est pas nécessairement perdu par B.

Dans ce cas nous n'avons plus affaire à une matrice de jeu, mais à deux : la matrice des utilités évaluée du point de vue de A, et celle évaluée du point de vue de B. L'attitude face à ces jeux sera illustrée par un exemple simple. Supposons que la matrice de jeu pour le joueur A soit la matrice U_1, tandis que pour le joueur B elle est U_2 :

	B_1	B_2
A_1	2	— 1
A_2	— 2	3

U_1

	B_1	B_2
A_1	— 2	4
A_2	2	— 1

U_2

Si le jeu était de somme nulle, A aurait intérêt à appliquer la stratégie mixte caractérisée par la fréquence $x^* = \frac{5}{8}$ solution de la première des équations **(117).** De même, B aurait intérêt à appliquer la stratégie mixte caractérisée par la fréquence $y^* = \frac{5}{9}$. Dans le cas où A et B appliquent ce couple de stratégie mixte, l'espérance de gain pour A est :

$$E_A = \frac{25}{72}(+2) + \frac{20}{72}(-1) + \frac{15}{72}(-2) + \frac{12}{72}(+3) = \frac{1}{2}$$

tandis que pour B elle est :

$$E_B = \frac{25}{72}(-2) + \frac{20}{72}(+4) + \frac{15}{72}(+2) + \frac{12}{72}(-1) = \frac{2}{3}$$

Cependant, il est facile de se rendre compte que les joueurs A et B ont intérêt à s'entendre.

Supposons, par exemple, qu'ils décident de partager leurs gains. Dans ce cas, leur entente qui est totale a pour effet de remplacer chacune des matrices de jeu U_1 et U_2 par la matrice $U_3 = \frac{(U_1 + U_2)}{2}$:

	B_1	B_2
A_1	0	$\frac{3}{2}$
A_2	0	1

U_3

telle que A choisit certainement la stratégie dominante A_1 et B la stratégie dominante B_2. Le couple (A_1, B_2) assure à chacun un gain de $\frac{3}{2}$ par partie, soit une amélioration de gain de 1 point pour A et de $\frac{5}{6}$ de point pour B par rapport à ce qu'ils pourraient attendre d'un jeu sans entente.

Naturellement, B pourra faire valoir que ce partage des bénéfices de l'entente est injuste, et réclamer l'application de matrices de règlement légèrement différentes, telles que $U_4 = U_3 - \frac{1}{12}$ et $U_5 = U_3 + \frac{1}{12}$ (pour les joueurs A et B respectivement), qui assurent une équipartition des améliorations et gains. Leur jeu, cependant, n'en sera pas modifié.

L'entente entre A et B, cependant, peut encore améliorer les gains de chacun des joueurs, même si elle ne remet pas en cause le mode d'attribution des règlements. Pour le voir, portons en abscisse du diagramme (*fig.* 31) le gain de A, et en ordonnées le gain de B. Les couples de stratégies A_1B_1, A_1B_2, A_2B_1 et A_2B_2 déterminent les points P, Q, R, S. Toute entente entre les joueurs ne peut que conduire à un point intérieur du quadrilatère PQRS. Cependant, en l'absence d'entente, A est assuré d'obtenir au moins $x = \frac{1}{2}$, et y est assuré d'obtenir $\frac{2}{3}$. Ils n'accepteront donc de s'entendre que pour un couple de stratégies mixtes coordonnées qui améliore leurs certitudes de gain, c'est-à-dire pour un point quelconque du triangle MNO. Ils préféreront, en outre, arrêter leur choix sur un point du segment MN, car seuls les points de ce segment ne leur permettent pas d'améliorer simultanément leurs gains par un déplacement dans OMN. Le segment MN constitue l'*ensemble d'entente*. La discussion entre A et B portera donc seulement sur la question de savoir lequel des points de ce segment sera retenu. Plus le point retenu sera proche de M, meilleur sera l'avantage retiré par B. Plus il sera proche de N, meilleur sera l'avantage retiré par A. Le choix final dépend donc de l'influence respective de A et B et de l'idée qu'ils se font d'un juste règlement.

▼ *Figure 31 : diagramme du jeu avec entente (voir développement dans le texte ci-contre).*

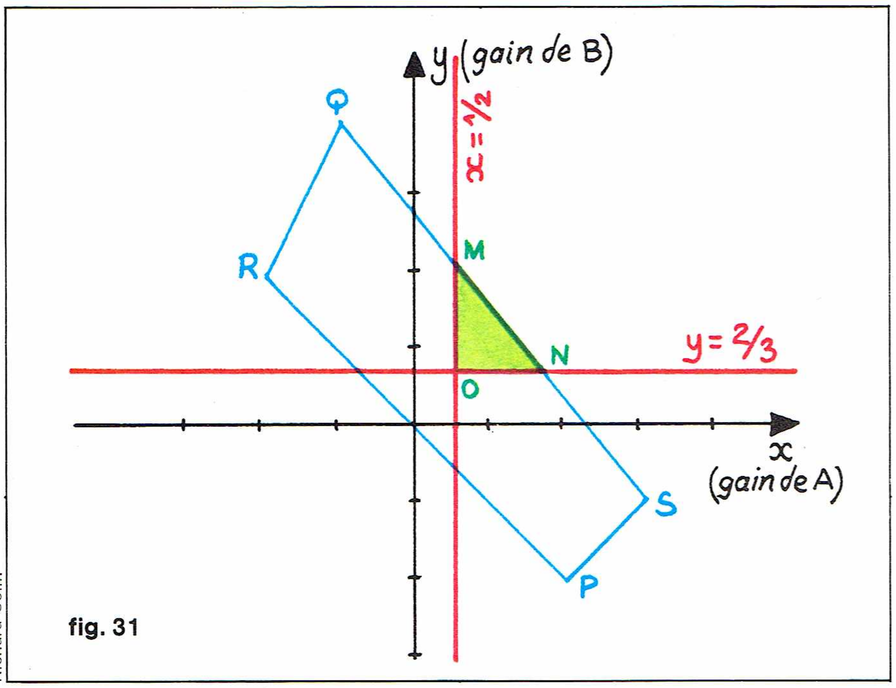

ANALYSE DES DONNÉES

L'analyse des données regroupe les méthodes utilisées pour « décrire » de vastes ensembles de données. La complexité des phénomènes naturels se laissant rarement appréhender par l'observation d'une ou deux variables, l'intérêt d'une étude multidimensionnelle est d'éviter des choix *a priori* de caractères significatifs.

Seul l'ordinateur peut traiter des tableaux de grande dimension, ce qui explique le développement récent de telles méthodes. Nous ne parlerons pas ici de la phase préliminaire à toute analyse statistique : celle de la collecte des données, qui, ainsi que l'interprétation des résultats obtenus, ne concerne pas seulement le statisticien.

Il existe plusieurs techniques d'analyse multidimensionnelle, toutes ayant pour objectif de discerner les traits principaux des données recueillies.

Analyse factorielle

La plus ancienne de toutes les analyses factorielles, l'**analyse en facteurs communs et spécifiques** (Spearman), a été élaborée pour résoudre des problèmes du type suivant : à partir de relevés de notes obtenues par des enfants (les « *individus* ») à un certain nombre d'épreuves scolaires (les « *variables* » $X_1, X_2..., X_j, ...X_p$), il s'agit de trouver un *petit nombre* de nouvelles variables $F_1, F_2,..., F_l, ...F_k$, les *facteurs communs et spécifiques*, caractérisant le niveau scolaire d'un enfant.

On suppose que chaque X_j s'exprime comme combinaison linéaire des facteurs F_l ; l'ensemble des notes mesurées par les X_j peut ainsi être remplacé, de manière approximativement équivalente, par un ensemble de notes mesurées par les F_l ; les facteurs F_l « expliquent » donc la réussite — ou l'échec — scolaire d'un enfant.

On voit que cette analyse exige des hypothèses restrictives, contrairement aux autres analyses factorielles qui vont être exposées.

Analyse factorielle en composantes principales

Supposons qu'on dispose pour classer un ensemble d'individus de chacune de leurs mesures sur un ensemble de caractères quantitatifs appelés variables. On peut ranger ces observations dans un tableau X à *n* lignes et *p* colonnes si on suppose que les individus sont au nombre de *n* et les variables au nombre de *p* ; x_{ij} représente dans ce tableau la valeur de la *j*-ième variable x_j pour le *i*-ième individu.

Dans un langage géométrique, on peut représenter le tableau X de deux façons : soit *n* points dans $\mathbb{R}^p$, le *i*-ième point M_i représentant le *i*-ième individu et ayant pour coordonnées sur le *j*-ième axe cartésien de $\mathbb{R}^p$ (associé à X_j) la valeur prise par cet individu pour la *j*-ième variable (dans le cas de trois variables, voir *fig.* 1) ; soit *p* points (caractères) dans l'espace $\mathbb{R}^n$.

On choisit pour représenter les données l'espace qui a la dimension la plus petite et c'est en général celui des variables. Dans ce cas, on a alors un nuage de *n* « points individus » dans l'espace des variables $\mathbb{R}^p$ qu'on munit de la métrique euclidienne, et lorsque *p* est supérieur à 3, on ne peut visualiser les données.

Le principe de l'analyse en composante principale consiste à remplacer les *p* variables par un petit nombre de nouvelles variables $F_1, F_2, ... F_k$ appelées *facteurs*, combinaisons linéaires des précédentes, sans perdre trop d'informations, ce qui revient géométriquement à projeter le nuage des *n* points sur un sous-espace de dimension aussi faible que possible sans trop de distorsion. Il s'agit donc de choisir un nouveau système d'axes (qu'on prendra orthogonaux) qui s'adapte le mieux possible à la forme du nuage.

Si on a, par exemple, trois individus et deux variables et si on suppose que les trois points M_1, M_2 et M_3 ne sont pas alignés dans l'espace des variables, le problème est de rechercher une droite D telle que les projections M'_1, M'_2 et M'_3 donnent le plus de renseignements possibles sur les positions relatives de M_1, M_2 et M_3 (*fig.* 2).

On peut imaginer beaucoup de critères mathématiques rendant compte de la « fidélité » de la nouvelle représentation. Citons-en quelques-uns :

— la somme des longueurs $M_iM'_i$ est minimale ;

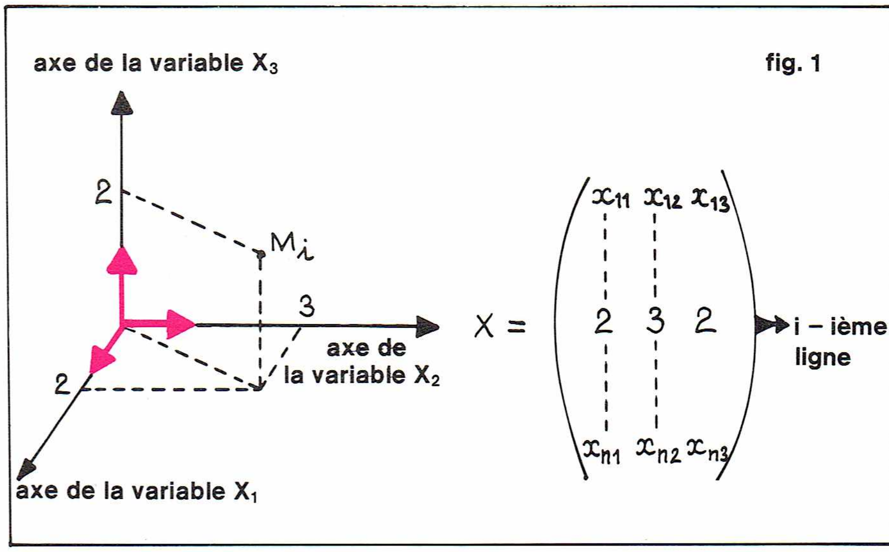

Richard Colin

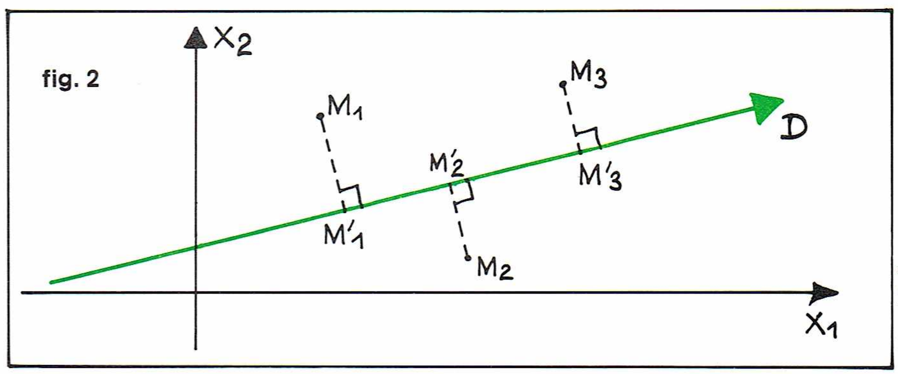

Richard Colin

▲ ***En haut, figure 1 : un exemple de tableau X et sa représentation géométrique dans le cas de trois variables. Ci-dessus, figure 2 : recherche d'une droite D dans le cas de trois individus et de deux variables.***

— le maximum des longueurs $M_iM'_i$ est minimal ;

— la somme des carrés des longueurs $M_iM'_i$ est minimale ;

— si on accorde plus d'importance à certains individus plutôt qu'à d'autres, c'est-à-dire si on affecte à chaque individu un poids p_i, on peut minimiser :

$$\sum_i p_i M_i M'_i \quad \text{ou} \quad \sum_i p_i \overline{M_i M'_i}^2$$

Le *critère* choisi dans l'*analyse en composantes principales* est le suivant :

$$\text{maximiser} \sum_{i,k} \overline{M'_i M'_k}^2,$$

où M'_i et M'_k sont les projections orthogonales de M_i et M_k sur un sous-espace de $\mathbb{R}^p$ de faible dimension.

Appelons G le *centre de gravité* (ou *point moyen*) du nuage des points M_i (G a pour *j*-ième coordonnée $\left.\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_{ij}\right)$. On montre facilement que :

$$\sum_{i,k} \overline{M'_i M'_k}^2 = 2n \sum_i \overline{G'M'_i}^2.$$

On en conclut que le critère de l'analyse en composantes principales est équivalent au critère suivant : la somme des carrés des projections des GM_i est maximale.

Recherche des axes factoriels

Appelons v_{jk} la *covariance* entre les variables X_j et X_k :

$$v_{jk} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (x_{ij} - \bar{x}_j)(x_{ik} - \bar{x}_k)$$

et V la *matrice des covariances* des *p* variables :
V est une *matrice carrée* de dimension *p*, *symétrique*

$$(\text{covar}(X_j, X_k) = \text{covar}(X_k, X_j)),$$

positive (${}^t w \, V \, w \geqslant 0$ quel que soit le vecteur *w* de $\mathbb{R}^p$) et même définie, car si elle ne l'est pas, cela signifie qu'il

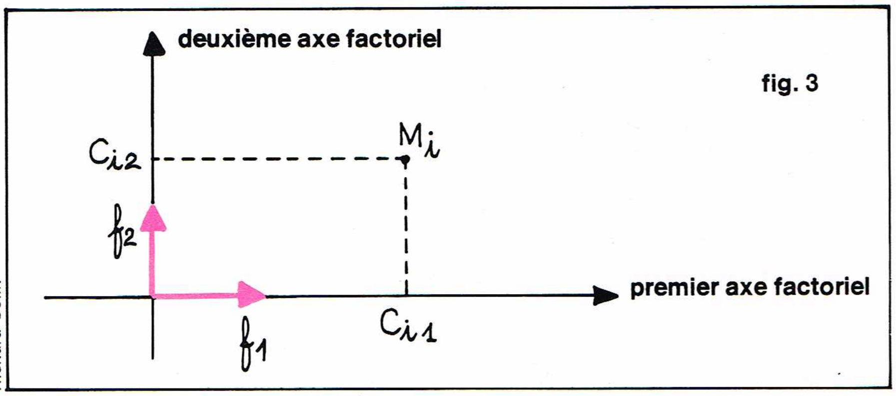

fig. 3

Richard Colin

▲ ***Figure 3 :** voir développement dans le texte* **Interprétation statistique.**

▼ ***Ci-dessous, figure 4 :** dans ce cas, l'individu (2) est très bien représenté, tandis que (1) et (3) le sont moins bien.*
***En bas, figure 5 :** dans cet exemple, la variable X_j, qui est proche du plan $(\vec{f}_1, \vec{f}_2)$, est bien représentée, tandis que la variable X_k l'est moins bien.*

existe une même relation linéaire entre les variables pour chaque observation et qu'on a une variable expliquée par les $(p-1)$ autres; on ne considère alors que $(p-1)$ variables, ce qui entraîne qu'on n'envisagera que le cas où V est une *matrice symétrique définie positive.*

Une telle matrice possède p valeurs propres réelles, strictement positives. Classons les vecteurs propres unitaires $\vec{f}_l$ dans l'ordre décroissant des valeurs propres (si on a des valeurs propres multiples, le classement n'est pas unique; ce problème ne sera pas envisagé ici).

On démontre que : *le sous-espace à m dimensions (m < p) sur lequel le nuage se projette avec une déformation minimale est engendré par les m premiers vecteurs propres.*

On appelle *l-ième axe factoriel* l'axe défini par le l-ième vecteur propre, et le l-ième vecteur propre est appelé *l-ième composante principale.*

Interprétation statistique

Quel que soit le point M_i, il est possible de le repérer dans la base $\vec{f}_1, \vec{f}_2, ..., \vec{f}_l, ..., \vec{f}_p$. Appelons c_{il} la l-ième coordonnée de M_i dans cette nouvelle base (*fig.* 3).

Au l-ième axe factoriel, on peut donc associer une variable F_l qu'on appelle *l-ième facteur* et qui a pour composantes : $c_{1l}, c_{2l}, ..., c_{il}, ..., c_{nl}$.

On peut considérer les facteurs comme de nouvelles variables et l'ordre dans lequel sont rangés les c_{il} sur le l-ième axe factoriel peut permettre d'interpréter le l-ième facteur. Mais il faut être très prudent et s'assurer avant d'interpréter que les proximités constatées sur l'axe factoriel correspondent réellement à une proximité dans l'espace et non seulement à un « effet d'optique » dû à la projection. On montre que :

$$\cos\,(\overrightarrow{GM_i}, \vec{f}_k) = \frac{\overrightarrow{GM_i} \cdot \vec{f}_k}{\|\overrightarrow{GM_i}\|}$$

et si, par exemple, pour un point M_i, on a :

$$\cos^2\,(\overrightarrow{GM_i}, \vec{f}_1) + \cos^2\,(\overrightarrow{GM_i}, \vec{f}_2) \# 1$$

on pourra en conclure que M_i est très proche du plan des deux premiers axes factoriels. Sur la *figure* 4, l'individu **(2)** est parfaitement représenté, tandis que **(1)** et surtout **(3)** le sont moins bien.

On démontre que la *moyenne* d'un facteur est égale à la composante de la projection du point moyen G sur l'axe factoriel qui lui correspond et que sa *variance* est égale à la valeur propre associée. On a ainsi sur le premier axe factoriel la plus grande dispersion des projections des « points individus ». On peut donc dire que les axes factoriels ont la propriété d'extraire progressivement le plus d'informations possibles sur l'ensemble du nuage. Le coefficient choisi pour mesurer la fidélité de la projection du nuage sur les m premiers axes factoriels est :

$$\frac{\sum_{l=1}^{m} \lambda_l}{\sum_{l=1}^{p} \lambda_l} = \frac{\sum_{l=1}^{m} \lambda_l}{\text{trace de V}}$$

coefficient égal à 1 pour $m = p$ (déformation nulle).

On peut représenter les variables sur un axe factoriel ou un plan factoriel en projetant sur cet axe ou ce plan leurs axes et vecteurs unitaires (*fig.* 5).

Soit e'_j la projection du vecteur unitaire de la j-ième variable. On montre facilement que sa composante sur le l-ième axe factoriel est f_{lj}. Si la longueur de e'_j est voisine de 1 dans le plan des deux premiers axes factoriels, cela signifie que l'axe de la variable X_j est proche du plan de ces deux premiers axes. Il est donc intéressant de considérer les positions des extrémités des vecteurs e'_j par rapport au cercle de centre 0 et de rayon 1. Sur la *figure* 5, la variable X_j est bien représentée : elle est proche du plan $(\vec{f}_1, \vec{f}_2)$, tandis que la variable X_k l'est moins bien.

On démontre que le coefficient de corrélation entre la variable X_j et le facteur F_l est égal à :

$$r\,(X_j, F_l) = \frac{\sqrt{\lambda_l}}{\sqrt{v_{jj}}} f_{lj}$$

Si toutes les variables ont des dispersions voisines, on pourra donc dire que le l-ième facteur est le plus corrélé avec les variables pour lesquelles les f_{lj} sont les plus grands en valeur absolue (corrélation directe si les f_{lj} sont positifs et inverse s'ils sont négatifs).

Si on a des points M'_i voisins de l'axe de la variable X_j dans le plan des deux premiers axes factoriels, cela peut vouloir signifier que M_i est proche de l'axe de la j-ième variable dans $\mathbb{R}^p$ si le nuage n'est pas trop déformé. Ceci implique alors que la variable X_j caractérise le i-ième individu, mais il vaut mieux prendre la précaution de vérifier que cette proximité a toujours lieu dans le plan des 3ᵉ et 4ᵉ axes factoriels, car un point M_i peut être situé en projection sur l'axe de la variable X_j, tout en étant fort éloigné de cet axe dans l'espace $\mathbb{R}^p$.

Un axe factoriel peut donc être interprété à l'aide des variables ou par l'intermédiaire de l'échantillon d'individus envisagé, cette dernière interprétation ayant l'avantage d'être moins tautologique que celle qui s'appuie sur les variables elles-mêmes; cependant il faut avoir conscience que le lien établi entre deux familles de variables à l'aide d'un échantillon d'individus risque de n'être qu'accidentel et il est nécessaire d'être prudent avant de tirer une conclusion.

Lorsque les données sont hétérogènes, l'analyse en composantes principales est plus intéressante si elle est faite sur des variables centrées réduites, ceci afin d'éliminer les effets de taille.

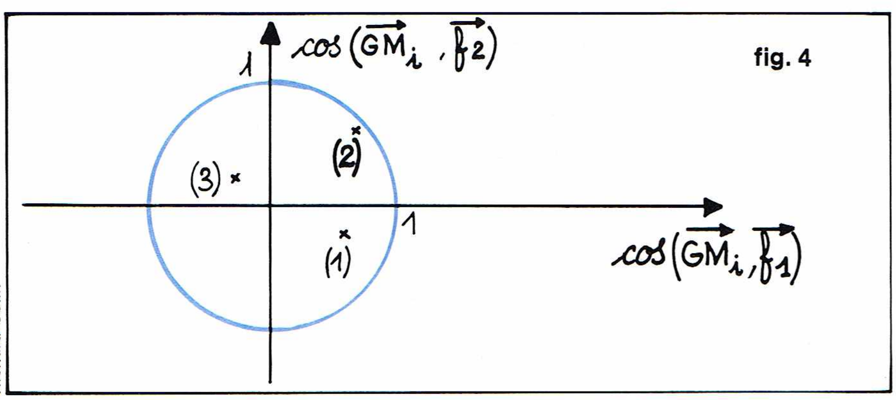

fig. 4

Richard Colin

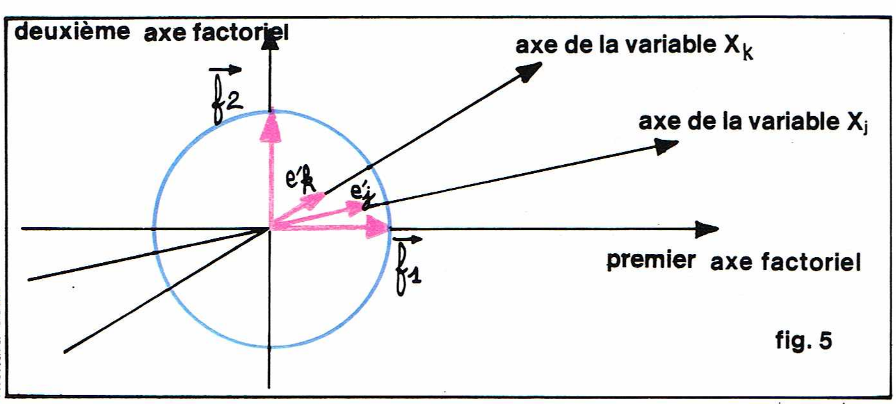

fig. 5

Richard Colin

Analyse factorielle des correspondances

Nous allons la présenter à partir d'un exemple. Supposons que l'on s'intéresse aux résultats d'élections dans les diverses circonscriptions de Paris ; on dresse alors un tableau $K = (k_{ij})$ où l'on trouve à l'intersection de la ligne i et de la colonne j le nombre de suffrages obtenus par le candidat j dans la circonscription i.

L'analyse des correspondances permet de comparer les circonscriptions (deux circonscriptions se ressembleront d'autant plus que les pourcentages de chaque candidat par rapport au nombre de suffrages comptabilisés dans chacune d'elles seront plus proches) ou les candidats (deux candidats sont d'autant plus proches que les pourcentages des suffrages obtenus dans chaque circonscription par rapport au nombre total des suffrages obtenus par chacun d'eux sont plus voisins).

Deux *remarques* s'imposent ici :

— l'ensemble I des n circonscriptions et l'ensemble J des p candidats jouent des rôles tout à fait symétriques ;

— la comparaison des lignes ou des colonnes se fait non sur les données brutes mais sur les profils de ces lignes ou de ces colonnes.

Si l'on pose : $k = \sum_{i,j} k_{ij}, \quad f_{ij} = \frac{k_{ij}}{k} \quad f_i = \sum_j f_{ij}$

le profil de la circonscription i est le vecteur

$$f^i_{\mathrm{J}} = \frac{1}{f_i} f_{i\mathrm{J}} \quad \text{avec} \quad f_{i\mathrm{J}} = (f_{i1}, f_{i2}, \ldots, f_{ip})$$

On considère le nuage des n circonscriptions :

$$\mathcal{N}(\mathrm{I}) = \{(f^i_{\mathrm{J}}, f_i) \mid i = 1, \ldots, n\}$$

où f^i_{J} est le vecteur déjà cité et f_i un coefficient de pondération et symétriquement le nuage :

$$\mathcal{N}(\mathrm{J}) = \{(f^j_{\mathrm{I}}, f_j) \mid j = 1, \ldots, p\}$$

où $f^j_{\mathrm{I}} = \frac{1}{f_j} \; {}^t(f_{1j}, f_{2j}, \ldots, f_{nj}) \qquad f_j = \sum_i f_{ij}$.

La distance du χ^2 définie par

$$d^2(i, i') = \sum_j \frac{1}{f_j} \left(\frac{f_{ij}}{f_i} - \frac{f_{i'j}}{f_{i'}}\right)^2 = \left\| f^i_{\mathrm{J}} - f^{i'}_{\mathrm{J}} \right\|^2_{f_{\mathrm{J}}}$$

$$d^2(j, j') = \sum_i \frac{1}{f_i} \left(\frac{f_{ij}}{f_j} - \frac{f_{ij'}}{f_{j'}}\right)^2 = \left\| f^j_{\mathrm{I}} - f^{j'}_{\mathrm{I}} \right\|^2_{f_{\mathrm{I}}}$$

traduit la proximité que nous avons décrite dans la présentation et surtout qui respecte le **principe d'équivalence distributionnelle,** à savoir : *si deux vecteurs colonnes (ou lignes) ont même profil et si on leur substitue dans le tableau une colonne (ou une ligne) unique égale à leur somme, alors la distance distributionnelle entre éléments de I (de J) n'est pas modifiée.*

Cette propriété est fondamentale car elle rend la méthode peu sensible aux partitions adoptées dans les ensembles I et J. Dans l'exemple que nous avons choisi, le découpage des ensembles I et J s'imposait mais ce n'est pas toujours le cas. Ainsi, imaginons une enquête sur la consommation alimentaire des ménages ; faut-il mettre sous des rubriques différentes les dépenses concernant les boissons gazeuses et les jus de fruits ? C'est inutile, si ces dépenses ont des profils voisins (c'est-à-dire représentent des comportements similaires) ; cela peut être intéressant sinon, mais la question ne se pose plus si l'on a choisi comme distance celle du χ^2. La stabilité des résultats obtenus en analyse des correspondances provient de ce qu'ils sont relativement indépendants de l'arbitraire des nomenclatures.

Si on modifie l'échelle des axes, plus précisément si on représente la i-ième ligne par le vecteur

$$\mathrm{OM}_i = \left(\frac{f_{i1}}{f_i\sqrt{f_1}}, \frac{f_{i2}}{f_i\sqrt{f_2}}, \ldots, \frac{f_{ip}}{f_i\sqrt{f_p}}\right) = (x_{i1}, \ldots, x_{ip})$$

alors $d^2(i, i') = \sum_j (x_{ij} - x_{i'j})^2$

comme dans l'analyse en composantes principales.

L'analyse des correspondances revient à effectuer une analyse en composantes principales sur des points dont les coordonnées ont été modifiées de telle sorte que la distance entre ces points, calculée sur le tableau initial, soit une distance du χ^2.

Analyser la correspondance entre I et J, c'est mesurer à quel point le phénomène étudié diffère de l'indépendance statistique entre I et J.

S'il y avait indépendance statistique, c'est-à-dire si pour tout i de l'ensemble I et tout j de l'ensemble J $f_{ij} = f_i f_j$, alors :

$$\mathrm{OM}_i = \left(\frac{f_i f_1}{f_i\sqrt{f_1}}, \frac{f_i f_2}{f_i\sqrt{f_2}}, \ldots, \frac{f_i f_p}{f_i\sqrt{f_p}}\right) = \left(\sqrt{f_1}, \sqrt{f_2}, \ldots, \sqrt{f_p}\right) = \mathrm{OG}$$

tous les points du nuage seraient confondus avec le centre de gravité $\mathrm{G} = \sum_i f_i \mathrm{M}^i$.

Ceci est généralement faux, et étudier la dépendance entre I et J revient à déterminer la « forme » du nuage $\mathcal{N}(\mathrm{I})$ ou $\mathcal{N}(\mathrm{J})$: recherche des directions d'allongement, axes principaux d'inertie, etc.

C'est encore, dans le cas où le tableau analysé est un tableau de contingence, mesurer en quoi la quantité :

$$d^2 = \sum_{i,j} k \frac{(f_{ij} - f_i f_j)^2}{f_i f_j}$$

réalisation d'un $\chi^2_{(p-1)(n-1)}$, diffère significativement de zéro.

On démontre que l'inertie totale du nuage $\mathcal{N}(\mathrm{I})$, de même que celle du nuage $\mathcal{N}(\mathrm{J})$, est égale à $\frac{d^2}{k}$, la matrice d'inertie H étant $\mathrm{R}^t\mathrm{R}$ où R est une matrice de terme général

$$r_{ij} = \frac{f_{ij} - f_i f_j}{\sqrt{f_i f_j}},$$

la matrice d'inertie du nuage $\mathcal{N}(\mathrm{J})$ est ${}^t\mathrm{R}\,\mathrm{R} = \mathrm{S}$.

Les valeurs propres non nulles de H et S sont les mêmes ; de plus, si u est un vecteur propre de H, on a

$$\mathrm{H}u = \mathrm{R}\,{}^t\mathrm{R}u = \lambda u$$

d'où, en multipliant par ${}^t\mathrm{R}$:

$$({}^t\mathrm{R}\,\mathrm{R})\,{}^t\mathrm{R}u = \lambda\,{}^t\mathrm{R}u$$

${}^t\mathrm{R}u$ est vecteur propre de S.

Il en résulte une relation linéaire particulièrement simple entre les facteurs des deux analyses.

La symétrie des opérations effectuées dans l'un ou l'autre nuage a pour conséquence que l'analyse en composantes principales peut se faire indifféremment dans l'espace des individus ou dans celui des variables. Pratiquement, cela permet de choisir l'espace de dimension la plus faible.

On peut signaler rapidement quelques *résultats* complémentaires : le nuage $\mathcal{N}(\mathrm{I})$ appartient à l'hyperplan orthogonal à OG. OG est vecteur propre de H, associé à la valeur propre 0 ; la recherche des vecteurs propres et valeurs propres de H se ramène à celle des vecteurs propres et valeurs propres de W où :

$$\mathrm{W}_{kl} = \sum_i \frac{f_{ik} f_{il}}{f_i\sqrt{f_l}\sqrt{f_k}}$$

OG étant le vecteur propre de W associé à la valeur propre 1. Toutes les autres valeurs propres de W sont comprises entre 0 et 1.

La représentation simultanée des deux nuages sur les plans factoriels, la possibilité de projeter sur ces plans des individus (ou des variables) supplémentaires améliorent la puissance de la méthode.

L'interprétation des facteurs se fait à partir des graphiques (plans des axes 1 — 2, 1 — 3, 2 — 3, etc.) à l'aide des listes de contributions qui mesurent l'importance de chaque élément dans l'apparition d'un facteur, ou rendent compte de la contribution du facteur à tel ou tel élément.

L'exemple choisi (comparaison des résultats d'élection dans différentes circonscriptions) est celui d'un tableau de contingence, mais l'analyse des correspondances a de multiples applications : tableaux de mesure, tableaux de note d'intensité, tableaux de description logique (tableaux remplis de 1 et de 0 suivant la présence ou l'absence d'un certain caractère pour un individu donné). On démontre dans ce dernier cas que si le tableau logique est mis sous forme disjonctive complète, son analyse est équivalente à celle du tableau de contingence associé.

fig. 6 ATTRIBUT / MARQUE	Qualité				Agréable				Cher				Lot		
	ord.	moy.	sup.	lux.	non	moy.	assez	très	peu	moy.	assez	très	1	2	3
Air France	15	65	13	7	20	50	28	2	22	55	22	1	29	61	10
Anfa	12	48	25	15	27	26	27	20	7	40	32	21	18	47	35
Astor	7	30	45	18	7	33	46	14	3	23	55	19	0	37	63
Balto	14	57	25	4	19	35	34	12	20	48	29	3	16	52	32
Belga	16	64	10	10	7	41	43	9	7	53	37	3	14	63	18
Blue Ribbon	6	39	37	18	7	34	35	24	4	35	51	10	5	58	37
Boule d'or	33	49	15	3	13	52	27	8	15	62	22	1	37	48	15
Camel	12	46	28	14	11	37	32	20	3	27	46	24	3	25	72
Carlton	5	37	45	13	10	29	42	19	1	31	55	13	14	52	34
Chesterfield	4	36	34	26	10	32	28	30	2	17	59	22	0	18	82
Egée	40	51	7	2	18	36	35	11	28	52	19	1	45	40	15
Ernte 23	11	60	25	4	9	39	40	12	8	33	47	12	7	68	25
Flash	12	62	16	10	5	41	42	12	3	46	47	3	9	69	22
Gitanes Maryland	44	50	5	1	22	52	23	3	46	45	7	2	56	32	12
H. B.	13	49	15	13	14	34	28	24	4	31	54	11	16	59	25
Hellas	2	27	27	44	12	37	32	19	3	22	46	29	10	50	40
High Life	16	63	15	6	14	43	30	13	32	36	28	4	29	40	36
Hunter	7	34	34	25	5	32	39	24	5	21	62	12	16	46	38
John Silver	6	57	30	7	3	32	39	26	5	33	53	9	6	51	43
Minors	3	19	45	33	11	40	30	19	3	20	56	21	3	26	71
Muratti	1	10	45	44	5	23	37	35	1	12	65	22	2	17	81
Newport	6	33	33	28	16	29	33	22	0	21	67	12	6	51	43
Parliament	12	26	35	27	14	29	43	14	10	21	48	21	11	40	49
Peer Export	3	24	58	15	4	26	41	29	3	32	56	9	2	43	55
Peter Stuyvesant	2	24	49	25	5	33	32	30	1	18	61	20	4	31	65
Rothmans	1	11	43	45	4	20	41	35	0	10	69	21	1	25	74
Roxy	17	55	21	7	14	37	37	12	21	42	33	4	16	58	26
Viceroy	2	35	42	21	5	28	43	24	2	23	52	23	2	44	54
Visa	12	63	27	8	10	46	38	6	13	69	17	1	24	60	16
Week-End	6	29	38	27	21	29	33	17	11	42	30	17	15	31	54

Richard Colin

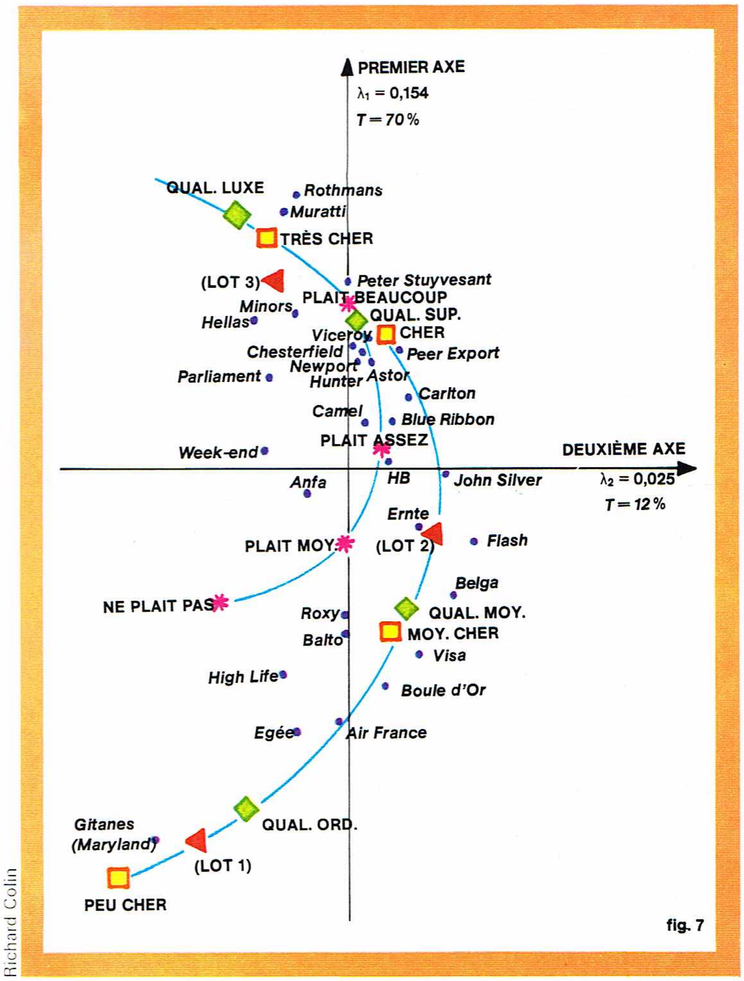

▲ *Figures 6 et 7 : deux illustrations tirées de l'ouvrage de J.-P. Benzecri et coll. :* l'Analyse des correspondances, *tome II de* l'Analyse des données *(Dunod) et portant sur l'analyse de 30 marques de cigarettes.*

L'analyse des correspondances issue de l'étude de tableaux de contingence suppose que le tableau initial soit un *tableau de nombres positifs*. Si tel n'est pas le cas, on peut procéder par dédoublement des colonnes.

L'analyse des correspondances est due au professeur J.-P. Benzecri (voir *Bibliographie*).

Exemple d'application : analyse de 30 marques de cigarettes (*fig.* 6 et 7). Chaque marque a été testée auprès de 100 fumeurs interrogés sur ses caractéristiques de qualité, d'agrément et de coût. La cohérence des réponses a été vérifiée par une comparaison avec 3 lots de paquets de cigarettes de qualité différente.

L'analyse des correspondances donne de très bons résultats : en effet les deux premiers axes totalisent 82 % de l'inertie du nuage.

Sur le schéma on remarque que le premier axe classe dans l'ordre croissant les différentes modalités de la qualité, de l'agrément et du prix, et que le deuxième axe oppose les valeurs extrêmes (peu cher, très cher, ordinaire, luxe) aux valeurs moyennes.

Analyse discriminante

On suppose que sur une population répartie *a priori* en q classes disjointes, on a mesuré p variables. L'objectif de l'analyse discriminante est de rechercher sur les variables une formule, linéaire ou autre, qui permette de déterminer la classe à laquelle doit être affecté chaque individu.

Par exemple, le dossier médical d'un sujet i (n sujets) contient les résultats numériques de p examens

$$(x_{i1}, x_{i2}, ..., x_{ip})$$

et un diagnostic y_i (q modalités). Une analyse discriminante indiquera les examens qui permettent le mieux de différencier les diagnostics et donc éventuellement de déceler ceux qui sont le moins utiles ; d'autre part la formule établie sur les variables les plus discriminantes donnera le diagnostic de tout nouveau malade.

Les n individus peuvent être représentés dans $\mathbb{R}^p$, muni de la métrique usuelle (*fig.* 8). A chaque point x_i on affectera la masse $m_i = \frac{1}{n}$. Le problème revient à chercher dans $\mathbb{R}^p$ la direction qui sépare au mieux les q groupes.

Si on désigne par I l'ensemble des individus, pour u fixé,

$V_I(u) = \sum_{i \in I} m_i\, u(x_i)^2$ est la **variance totale,**

$V_{g_r}(u) = \sum_{x_i \in g_r} m_i\, u(x_i - \bar{g}_r)^2$ est la **variance intra-classe** de la classe g_r,

$V_{\mathcal{G}}(u) = \sum_{g_r \in \mathcal{G}} m_{g_r}\, u(\bar{g}_r - \bar{g})^2$ est la **variance inter-classes,**

avec $u(t) = \sum_{j=1}^{p} u_j t_j$

$\bar{g}_r$ centre de gravité de la classe g_r

$m_{g_r} = \sum_{x_i \in g_r} m_i$ masse de la classe g_r

$\bar{g}$ centre de gravité de $\mathcal{G} = \{g_1, g_2, ..., g_q\}$

Le critère choisi consiste à rendre la variance inter-classes la plus grande possible (centres de gravité des

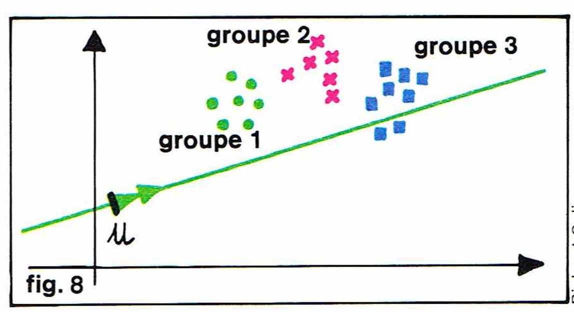

Richard Colin

▶ *Figure 8 : la direction $\vec{u}$ sépare les trois groupes.*

classes espacés) et les variances inter-classes les plus faibles possibles (classes peu dispersées). Plus précisément on cherchera à maximiser le rapport

$$\frac{V_{\mathcal{G}}(u)}{\sum_{g_r \in \mathcal{G}} V_{g_r}(u)}$$

Or on sait d'après le théorème de Huyghens que :

$$V_I(u) = V_{\mathcal{G}}(u) + \sum_{g_r \in \mathcal{G}} V_{g_r}(u)$$

Le problème posé équivaut à maximiser $\frac{V_{\mathcal{G}}(u)}{V_I(u)}$, u étant un vecteur unitaire.

Si on désigne par T la matrice des variances totales et par B la matrice des variances inter-classes, la solution du problème sera telle que $T^{-1}Bu = \lambda u$, λ étant la plus grande valeur propre associée à la matrice $T^{-1}B$.

On est ramené au problème suivant : effectuer une analyse en composantes principales sur le nuage $\mathcal{G}$ des centres de gravité de forme quadratique d'inertie B, l'espace vectoriel des individus I étant muni de la métrique T^{-1}.

Dans la pratique, n (nombre des individus étudiés) doit surpasser p (nombre de paramètres de dispersion), sinon on ne connaît pas la dispersion des classes autour de leur centre et on ne peut savoir à quelle classe rattacher un nouvel individu. Diverses méthodes de calcul ont été proposées (Fischer, Mahalanobis).

Régression linéaire

La régression linéaire répond à un problème moins descriptif que l'analyse factorielle : on a n observations sur $p + 1$ variables (en général n est nettement plus grand que p), et il s'agit d'examiner comment on peut expliquer une de ces variables [la $(p + 1)$-ième par exemple] à l'aide d'une combinaison linéaire des p autres.

La représentation géométrique la plus simple consiste à se placer dans l'espace euclidien orthonormé $\mathbb{R}^n$ en considérant chacune des variables x comme un point de $\mathbb{R}^n$ dont les composantes dans la base de $\mathbb{R}^n$ sont les valeurs que cette variable a prises respectivement pour les n observations. Pour la commodité des développements ultérieurs on supposera que toutes les *variables* sont *centrées*. Mentionnons que l'opération de centrage s'interprète géométriquement comme la projection orthogonale des variables non centrées sur l'hyperplan orthogonal à la « bissectrice » des axes (droite de vecteur directeur $\left\{\frac{1}{\sqrt{n}}, \frac{1}{\sqrt{n}}, ..., \frac{1}{\sqrt{n}}\right\}$ dans la base choisie).

Ces variables $x_1, x_2, ..., x_p$ engendrent un sous-espace vectoriel W de $\mathbb{R}^n$ dans lequel il s'agit de trouver le point $\hat{y}$ « le plus proche possible » du point y représentant la $(p + 1)$-ième variable (*fig.* 9).

L'intention explicative, voire prédictive, d'un tel modèle est claire : connaître la valeur $\hat{y}_i$ que $\hat{y}$ a prise à la i-ième observation permet d'approcher la valeur y_i de y pour cette même observation. Mais la précision de cette approximation dépend évidemment de la distance de y à $\hat{y}$ et de i. La variable y peut aussi se prêter plus ou moins bien à une régression linéaire en l'ensemble des variables x_j. Inversement, le fait de trouver une bonne régression ne doit pas entraîner imprudemment à des conclusions sur les variables considérées.

On suppose que $y_1, y_2, ..., y_i, ..., y_n$ sont les réalisations d'un échantillon de taille n d'une variable aléatoire Y, de même que $x_{j1}, x_{j2}, ..., x_{ji}, ..., x_{jn}$ celles d'une variable aléatoire X_j. Le modèle linéaire suppose qu'entre les p variables explicatives $X_1, ..., X_j, ..., X_p$ et la variable expliquée Y existe la relation suivante :

$$E(Y/X_1, X_2, ..., X_j, ..., X_p) = \sum_{j=1}^{p} \beta_j X_j,$$

donc que : $$Y = \sum_{j=1}^{p} \beta_j X_j + \varepsilon$$

Cela revient à supposer que Y ne diffère d'une combinaison linéaire des X_j que par un résidu aléatoire d'espérance nulle.

Puisqu'on dispose d'un échantillon de taille n de chacune des variables Y, $X_1, ..., X_j, ..., X_p$, on a les relations suivantes :

$$\begin{aligned} y_1 &= \beta_1 x_{11} + \beta_2 x_{21} + ... + \beta_j x_{j1} + ... + \beta_p x_{p1} + e_1 \\ &\vdots \\ y_i &= \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + ... + \beta_j x_{ji} + ... + \beta_p x_{pi} + e_i \\ &\vdots \\ y_n &= \beta_1 x_{1n} + \beta_2 x_{2n} + ... + \beta_j x_{jn} + ... + \beta_p x_{pn} + e_n \end{aligned}$$

Ce système d'équation peut s'écrire sous forme matricielle :

$$\vec{y} = X\vec{\beta} + \vec{e}$$

où : $$\begin{aligned} {}^t\vec{y} &= (y_1, y_2, ..., y_i, ..., y_n), \\ {}^t\vec{\beta} &= (\beta_1, \beta_2, ..., \beta_j, ..., \beta_p), \\ {}^t\vec{e} &= (e_1, e_2, ..., e_i, ..., e_n), \end{aligned}$$

et $$X = \begin{pmatrix} x_{11} & ... & x_{j1} & ... & x_{p1} \\ x_{1i} & ... & x_{ji} & ... & x_{pi} \\ x_{1n} & ... & x_{jn} & ... & x_{pn} \end{pmatrix}$$

Pour estimer β, on est obligé de faire des hypothèses sur les résidus et les variables explicatives. Si on peut sans trop de risque faire des hypothèses assez fortes sur les résidus, on emploie la *méthode des « moindres carrés ordinaires » (M.C.O.)* qui donne pour estimation de $\vec{\beta}$:

$$\vec{b} = ({}^tXX)^{-1}\, {}^tX\vec{y}$$

Cette méthode revient à calculer $\vec{b}$ qui minimise :

$$\|\vec{y} - X\vec{b}\|^2 = {}^t(\vec{y} - X\vec{b})\, (\vec{y} - X\vec{b})$$

qui n'est autre que le carré de la distance euclidienne de y à la variété linéaire engendrée par les p vecteurs colonnes de X.

Sous ces mêmes hypothèses, on démontre que l'estimateur associé à l'estimation $\vec{b}$ est un « bon estimateur », c'est-à-dire qu'il est sans biais et convergent.

Lorsque les hypothèses sur les résidus ne sont manifestement pas remplies, on emploie une méthode qui en demande de moins fortes, mais qui est plus compliquée : *« la méthode des moindres carrés généralisée » (M.C.G.)*.

Remarque : dans certains problèmes de régression, il peut être nécessaire d'imposer des contraintes : par exemple, si les coefficients β_j représentent des prix, ils doivent être positifs ou nuls, s'ils représentent des probabilités, ils doivent être compris entre 0 et 1 ; on est alors dans le domaine de la *programmation quadratique*.

Il est naturel de dire que la régression est d'autant « meilleure » que $\|e\| = \|y - \hat{y}\|$ est plus faible.

On mesure la qualité de la régression par le rapport :

$$R = \frac{\|\hat{y}\|}{\|y\|};$$

on a $0 \leqslant R \leqslant 1$ et la régression est évidemment d'autant

fig. 9

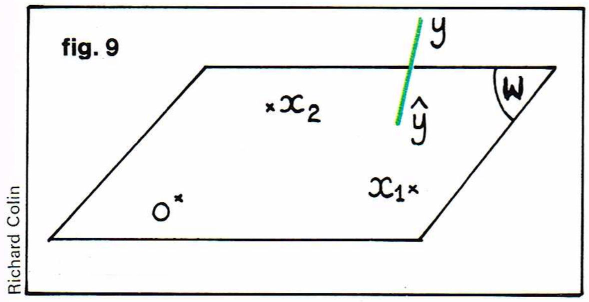

fig. 10

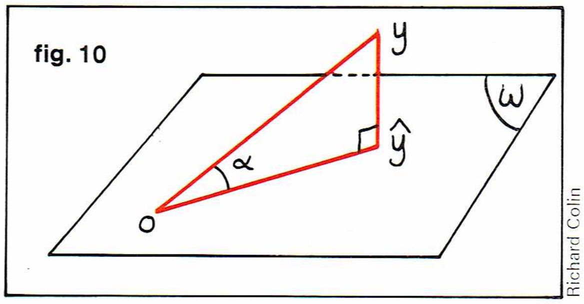

◄ *A gauche, figure 9 : les variables $x_1, x_2, ..., x_p$ engendrent un sous-espace vectoriel W de $\mathbb{R}^n$ dans lequel il s'agit de trouver le point $\hat{y}$ « le plus proche possible » du point y représentant la $(p + 1)$-ième variable. A droite, figure 10 : $R = \left\|\frac{\hat{y}}{y}\right\|$ est donc analogue à un coefficient de corrélation puisque si $\mathbb{R}^n$ est muni de la métrique euclidienne, $R = \cos \alpha$.*

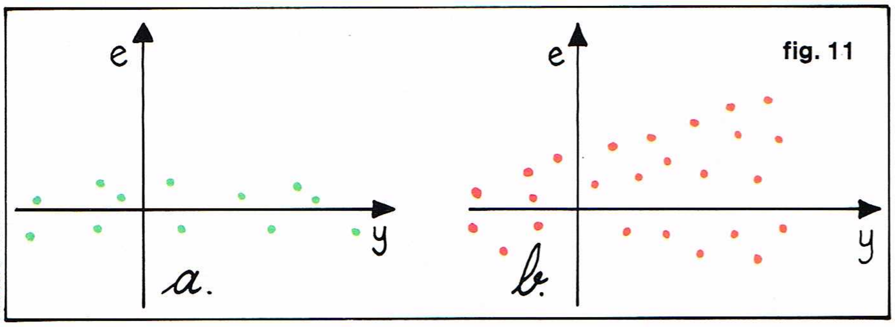

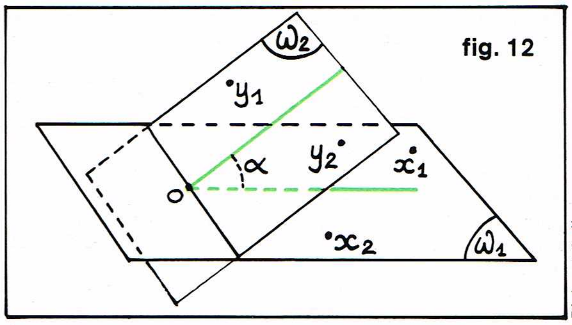

▲ *A gauche, figure 11 : a, tous les y sont approximés avec la même précision, qui est bonne ; b, l'approximation est d'autant plus mauvaise que y_i est grand — il faut donc modifier le modèle. A droite, figure 12 : représentation géométrique dans l'espace $\mathbb{R}^n$ des individus.*

meilleure que R est voisin de 1. Puisque $\mathbb{R}^n$ est muni de la métrique euclidienne, R n'est autre que le cosinus de l'angle $\widehat{yO\hat{y}}$. R est donc analogue à un coefficient de corrélation (*fig.* 10).

Si les variables ont été préalablement centrées :

$$R = \frac{\|\vec{\hat{y}}\|}{\|\vec{y}\|} = \frac{\|\vec{\hat{y}}\|^2}{\|\vec{y}\|\,\|\vec{\hat{y}}\|} = \frac{\text{covar}\,(y, \hat{y})}{\sigma_y \cdot \sigma_{\hat{y}}}$$

car :

$$\|\vec{y}\| = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} y_i^2} = \sqrt{n}\,\sigma_y\,;$$

$$\|\vec{\hat{y}}\| = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \hat{y}_i^2} = \sqrt{n}\,\sigma_{\hat{y}}\,;$$

et $\vec{y} - \vec{\hat{y}}$ étant orthogonal à $\vec{\hat{y}}$, on a :

$\|\vec{\hat{y}}\|^2 = \|\vec{y}\|^2 - \|\vec{y} - \vec{\hat{y}}\|^2$, ce qui entraîne que :

$$\|\vec{\hat{y}}\|^2 = \sum_{i=1}^{n} y_i\hat{y}_i = n\,\text{covar}\,(y, \hat{y}).$$

On déduit de ces résultats que R n'est autre que le coefficient de corrélation entre y et $\hat{y}$. On l'appelle *coefficient de corrélation multiple* entre la variable y et l'ensemble $\{x_1, x_2, ..., x_j, ..., x_p\}$ des variables explicatives.

On utilise aussi un autre rapport pour mesurer la qualité de la régression :

$$F = \frac{\|\vec{\hat{y}}\|^2/p}{\|\vec{y} - \vec{\hat{y}}\|^2/n-p} = \frac{n-p}{p}\,\frac{\|\vec{\hat{y}}\|^2}{\|\vec{y}\|^2 - \|\vec{\hat{y}}\|^2} = \frac{n-p}{p}\,\frac{R^2}{1-R^2}$$

Considéré comme une statistique d'échantillon, ce rapport suit, moyennant certaines hypothèses, une *distribution de Fischer-Snédecor* à p et $(n - p)$ degrés de liberté et, par référence à une table donnant la distribution de F, on peut juger de la « signification » de la régression. Ce rapport permet aussi de juger de l'intérêt d'inclure certaines variables dans la régression en mesurant « le pouvoir explicatif » de $(p - q)$ variables restantes alors que les q premières ont été utilisées.

Les rapports R et F ne donnent pas un examen détaillé de la qualité de la régression. Pour se rendre compte de l'approximation faite quand on remplace y_i par $\hat{y}_i$, il faut examiner la variation des quantités $e_i = y_i - \hat{y}_i$ en fonction de i. Pour cela, la méthode est de représenter dans un plan les couples (y_i, e_i), ce qui permet de se rendre compte si le résidu e_i est influencé par la valeur de y_i (*fig.* 11).

Il y a d'autres méthodes statistiques qui s'apparentent à la régression linéaire : la **régression polynômiale** qui se résout avec les mêmes techniques que la régression linéaire et l'**analyse de la variance** qui utilise des modèles de régression avec des variables explicatives qualitatives.

Il existe aussi des méthodes de **régression multiple** utilisées lorsqu'on a plusieurs variables à expliquer à l'aide des mêmes variables explicatives.

Analyse canonique

On peut considérer que l'analyse canonique généralise la régression linéaire, en ce sens qu'elle consiste à confronter deux groupes de variables quantitatives qui ont été mesurées sur n individus :

— p variables $X_1, X_2, ..., X_p$ appartenant à un certain domaine (par exemple économique),

— q variables $Y_1, Y_2, ..., Y_q$ appartenant à un autre domaine (par exemple sociologique) ;

et à trouver jusqu'à quel point on peut prévoir l'un des deux groupes à partir de l'autre.

On place les données dans un tableau R à n lignes et $(p + q)$ colonnes après avoir centré les variables :

$$R = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{21} & \dots & x_{p1} & y_{11} & y_{21} & \dots & y_{q1} \\ x_{1i} & x_{2i} & \dots & x_{pi} & y_{1i} & y_{2i} & \dots & y_{qi} \\ \vdots & & & & \vdots & & & \\ x_{1n} & x_{2n} & \dots & x_{pn} & y_{1n} & y_{2n} & \dots & y_{qn} \end{pmatrix}$$

On adopte la représentation géométrique dans l'espace $\mathbb{R}^n$ des individus comme pour la régression linéaire (*fig.* 12).

En généralisant l'idée développée dans le modèle de la régression, il s'agit de trouver un vecteur $\vec{U}_1$ du sous-espace W_1 engendré par les variables x et un vecteur $\vec{U}_2$ du sous-espace W_2 engendré par les variables y de telle sorte que $\vec{U}_1$ et $\vec{U}_2$ fassent entre eux l'angle le plus petit possible.

Statistiquement, cela revient à chercher deux variables, chacune étant une combinaison linéaire d'un des deux groupes de variables considérées, qui soient le plus correlées possible. Ceci peut permettre, mais avec précaution, de prévoir comment se comporte, par exemple, un individu sur U_2 si on connaît son comportement selon « l'aspect » U_1.

Notons déjà que si W_1 et W_2 sont identiques, alors toute combinaison linéaire des x est combinaison linéaire des y et réciproquement. Par contre, si $W_1 \cap W_2 = \varnothing$, toute combinaison linéaire des y est orthogonale à toute combinaison linéaire des x et on dit alors que les variables y et x sont totalement différentes.

On vient de considérer deux situations extrêmes entre lesquelles il existe une infinité de situations intermédiaires possibles.

On démontre que la solution du problème posé s'obtient par le calcul des valeurs propres et vecteurs propres des matrices $V_{xx}^{-1}\,V_{xy}\,V_{yy}^{-1}\,V_{yx}$ et $V_{yy}^{-1}\,V_{yx}\,V_{xx}^{-1}\,V_{xy}$ où V_{xx} et V_{yy} désignent respectivement les matrices des covariances des variables x et des variables y, et V_{xy} désigne une matrice à p lignes et q colonnes dont le terme général de la i-ième ligne et j-ième colonne est égal à covar (x_i, y_j) [V_{yx} se définit d'une façon semblable]. Ces deux matrices ne sont pas du même ordre si $p \neq q$, mais sont de même rang. Elles correspondent aux opérateurs produit des projecteurs de W_1 sur W_2 et de W_2 sur W_1.

On démontre que ces deux matrices ont des valeurs propres égales toutes positives ou nulles et que le nombre de leurs valeurs propres égales à 1 est égal à la dimension de $W_1 \cap W_2$.

On démontre aussi que le premier couple $(\vec{U}_1, \vec{U}_2)$, solution du problème, correspond respectivement aux vecteurs propres unitaires de

$$V_{xx}^{-1}\,V_{xy}\,V_{yy}^{-1}\,V_{yx} \text{ et } V_{yy}^{-1}\,V_{yx}\,V_{xx}^{-1}\,V_{xy}$$

associés à la plus grande valeur propre différente de 1. On l'appelle premier couple de *variables canoniques*, et la valeur propre correspondante est égale au carré du coefficient de corrélation linéaire entre ces deux variables.

On peut évidemment, comme en analyse factorielle, poursuivre l'étude en cherchant les couples suivants de variables associées $(U_1^{(2)}, U_2^{(2)})$, $(U_1^{(3)}, U_2^{(3)})$, ... On

démontre que $U_1^{(k)}$ et $U_1^{(l)}$ associés à des valeurs propres distinctes sont non correlés, de même que $U_1^{(k)}$ et $U_2^{(l)}$.

Pour interpréter les variables canoniques et par exemple U_1 on peut calculer les corrélations de chacune des variables x avec U_1 pour essayer de savoir dans quelle mesure chacune d'elles participe à sa constitution.

On peut projeter les variables x et y dans des plans engendrés par les variables canoniques de W_1 et dans des plans engendrés par celles de W_2, ce qui permet de visualiser les résultats d'une manière un peu semblable à ce qui a été fait pour l'analyse factorielle.

L'analyse canonique est ainsi une généralisation de la régression et concerne des ensembles de variables quantitatives qu'on a quelque raison de partitionner en deux sous-ensembles. On montre que l'analyse des correspondances et l'analyse discriminante peuvent être considérées comme des cas particuliers de l'analyse canonique.

Classifications automatiques

Ce sont les naturalistes qui, à la suite de Linné (1707-1778), ont établi avec l'inventaire systématique du règne animal et du règne végétal la plus célèbre des classifications. Leurs groupements en règnes, embranchements, ordres, familles, tribus, genres, espèces fournissent un exemple particulièrement riche de classification hiérarchique. L'avènement des ordinateurs, l'élaboration de critères de classification et la mise au point d'algorithmes ont permis d'étendre ces méthodes à des domaines variés, en sciences exactes et en sciences humaines.

Toute classification a pour but de déterminer des regroupements sur un ensemble de données afin d'en obtenir une perception simplifiée mais globale. En termes mathématiques, cela revient à construire une partition de l'ensemble considéré. On distinguera la notion de **classification** de celle de **classement** qui consiste à placer un élément quelconque dans une classe déjà déterminée. Les problèmes abordés peuvent être de nature extrêmement diverse : ainsi on peut chercher à regrouper des régions suivant leurs activités économiques, élaborer une nomenclature de ces activités, analyser des réponses à un questionnaire, étudier la répartition de la faune ou de la flore d'une certaine région, etc.

Il existe plusieurs méthodes de résolution du problème de classification. On peut procéder :

— *par regroupements successifs des constituants :* on suppose au stade initial que tous les individus appartiennent à des classes différentes ; à chaque pas, on regroupe certains d'entre eux dans une même classe ; les partitions deviennent de moins en moins fines *(classification ascendante) ;*

— *par fractionnements successifs des classes :* au stade initial, tous les individus sont dans une même classe que l'on sépare en deux ou plusieurs sous-ensembles disjoints, puis on réitère le procédé *(classification descendante).*

Classification hiérarchique ascendante

La **première étape** consiste à définir une mesure de proximité sur l'ensemble des individus à classer. On appelle *mesure de proximité* la donnée d'un tableau symétrique $n \times n$ où la case (i, j) indique la ressemblance des individus i et j. Le choix de cette mesure est un des points les plus délicats et nécessite une bonne connaissance du domaine étudié. Parmi les mesures de proximité, on peut citer :

- *l'indice de similarité s*

s est une application $E \times E \to \mathbb{R}^+$ telle que

$s(x, y) = s(y, x) \quad \forall x, y \in E$
$s(x, x) = s(y, y) \geqslant s(x, y) \quad \forall x, y \in E$

Lorsque pour chaque individu on relève la présence ou l'absence de p caractères (variables), on peut poser :

s = nombre de caractères possédés à la fois par i et j
t = nombre de caractères non possédés à la fois par i et j
u = nombre de caractères possédés par i et non par j
v = nombre de caractères possédés par j et non par i

Les indices suivants ont été utilisés par les taxinomistes :

indice de Sokal et Nichener (1958) : $\dfrac{s+t}{p}$

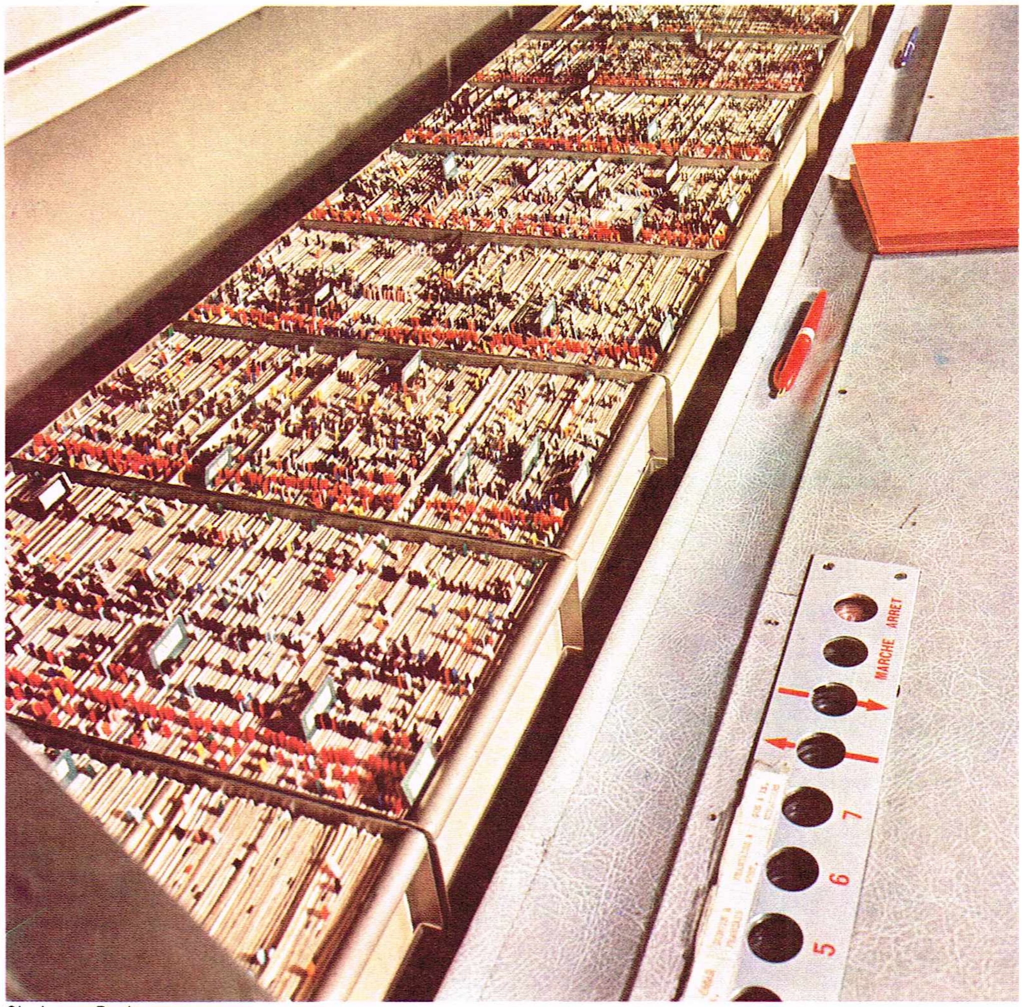

Ciccione - Rapho

▲ ***Casiers à fiches.***

indice de Rogers et Tanimoto (1960) : $\dfrac{s+t}{s+t+u}$

indice de Sokal et Sneath : $\dfrac{s+t}{u+v}$

- *l'indice de dissimilarité*

$d : E \times E \to \mathbb{R}^+$ vérifiant
(a) $d(x, y) = d(y, x) \quad \forall x, y \in E$
(b) $d(x, x) = 0$

- *l'indice de distance*

d vérifie **(a)**, **(b)** et **(c)**
(c) $d(x, y) = 0 \Rightarrow x = y \quad \forall x, y \in E$

- *la distance*

d vérifie **(a)**, **(b)**, **(c)** et **(d)**
(d) $d(x, y) \leqslant d(x, y) + d(y, z) \quad \forall x, y, z \in E$

- *la distance ultramétrique*

d vérifie **(a)**, **(b)**, **(c)** et **(e)**
(e) $d(x, y) \leqslant \text{Max}\,(d(x, z), d(z, y)) \quad \forall x, y, z \in E$

On démontre que **(d)** $\Rightarrow$ **(e)** et que si d est une distance ultramétrique, alors tout triangle est isocèle, et lorsque deux boules ont un point commun, l'une est incluse dans l'autre. L'indice de similarité est transformé en indice de dissimilarité par $d(x, y) = s(x, x) - s(x, y)$.

A toute partition d'un ensemble on peut associer une distance ultramétrique en posant :

$\forall i \in E\ d(i, i) = 0$, $d(i, j) = 1$ pour tous les couples i, j appartenant à deux classes distinctes.
$d(i, j) = l\ (0 < l < 1)$ si i et j appartiennent à la même classe.

Ainsi la mesure de proximité peut être une distance et même une distance ultramétrique, mais ce choix n'est pas toujours possible ; cela dépend essentiellement de la nature des données.

Dans la **deuxième étape,** on est amené à agglomérer des classes; il faudra donc définir une proximité entre parties de E (parties éventuellement réduites à un élément). Si A et B désignent deux parties non vides de E et d, l'indice de proximité sur E, on peut poser :

— $\delta_{max}(A, B) = \mathrm{Max}\{d(x, y) \mid x \in A, y \in B\}$
— $\delta_{min}(A, B) = \mathrm{Min}\{d(x, y) \mid x \in A, y \in B\}$
— $\delta_{max\ min}(A, B) =$
$$\mathrm{Max}\left\{\underset{x \in A}{\mathrm{Max}}\ \underset{y \in B}{\mathrm{Min}}\ d(x, y),\ \underset{y \in B}{\mathrm{Max}}\ \underset{x \in A}{\mathrm{Min}}\ d(x, y)\right\}$$
— si E est un espace métrique
$$\delta_g(A, B) = d(G_A, G_B)$$

G_A, G_B désignant les centres de gravité de A et B.

Les δ sont des indices de proximité mais en général pas des distances.

Là encore il faut choisir l'indice qui s'adapte le mieux au phénomène étudié. Lorsque le choix ne s'impose pas, il est prudent de se préoccuper de la stabilité des résultats obtenus.

Les **étapes suivantes** consistent à regrouper pas à pas les classes les plus proches. Au bout de $(n - 1)$ pas au plus, la procédure s'arrête.

La *figure* 13 montre comment on peut visualiser la procédure.

▼ ***Figure 13 :*** ***l'ordre des individus* a, b, ... e *sur l'axe est sans importance; il est choisi de façon à éviter le chevauchement des branches.***

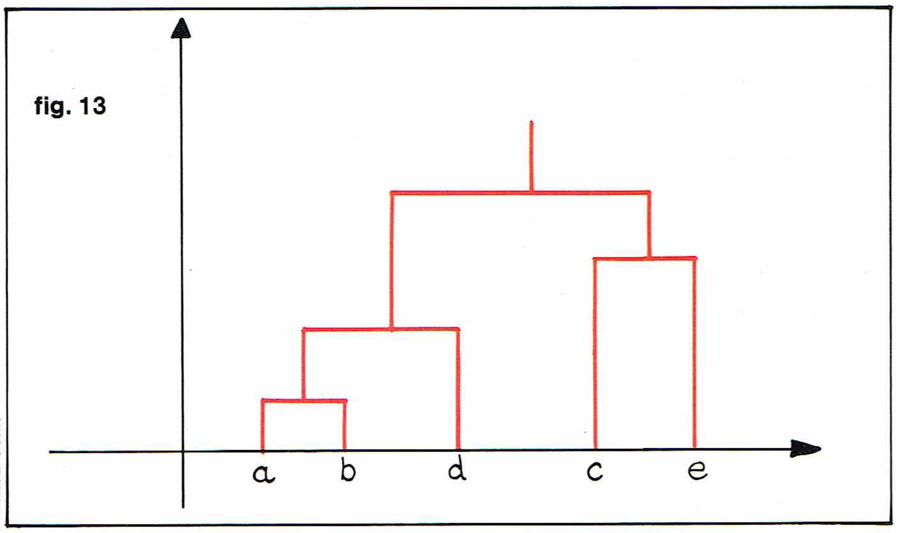

Ici quatre pas ont été nécessaires. L'arbre ainsi construit permet de découvrir les partitions successives apparues à chaque pas. La partition initiale en classes à un élément $\{a\}, \{b\}, \{c\}, \{d\}, \{e\}$ devient à l'issue du premier pas $\{a, b\}, \{c\}, \{d\}, \{e\}$ puis $\{a, b, d\}, \{c\}, \{e\}$ et enfin $\{a, b, d\}, \{c, e\}$ avant le regroupement final. Les partitions réalisées sont de moins en moins fines (on dit qu'une partition P est plus fine qu'une partition P', si tout élément de P est élément de P').

Hiérarchie stratifiée et ordonnance

La procédure aurait pu aussi bien être représentée (*fig.* 14) sous forme de hiérarchie de parties de E .

H est une hiérarchie de parties de E si :
— H est un sous-ensemble de parties de E ($H \subset \mathfrak{P}(E)$)
— $\{x\} \in H \quad \forall x \in E$
— $E \in H$
— $A \cap B \in \{A, B, \varnothing\} \quad \forall A \in H, \quad \forall B \in H$

ce qui traduit que deux éléments de H sont disjoints ou sinon l'un est inclus dans l'autre.

La donnée d'une hiérarchie H ne permet pas de savoir dans quel ordre se sont effectués les regroupements. Par exemple, c et e peuvent avoir été réunis avant a, b et d. Pour préciser que l'ordre des groupements est connu, on dit que l'on a une *hiérarchie stratifiée*, alors dans l'arbre de classification on connaît l'ordre de formation des nœuds, ce que l'on visualise en les traçant d'autant plus haut qu'ils correspondent à des regroupements plus tardifs. Les partitions compatibles avec une hiérarchie stratifiée sont celles que l'on obtient en coupant par des horizontales l'arbre de classification associé.

La *figure* 15 montre cinq classifications compatibles avec l'arbre de la *figure* 13.

L'examen de cet arbre permet de dire en outre si telle paire d'éléments de E a été réunie ou non avant telle autre. Une hiérarchie stratifiée sur E induit un ordre sur les paires d'éléments de E, un tel ordre est appelé *ordonnance* sur E.

Pour l'exemple choisi on aura :

$\{a, a\} = \{b, b\} = \{c, c\} = \{d, d\} = \{e, e\} < \{a, b\} < \{a, d\} = \{b, d\} < \{c, e\} < \{a, c\} = \{a, e\} = \{b, c\} = \{b, e\} = \{d, c\} = \{d, e\}$.

▶ ***Figure 14 :*** ***visualisation, sous forme de hiérarchie de parties de E, de la procédure.***

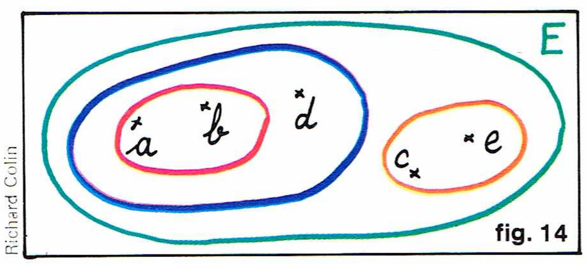

Hiérarchie indicée et ultramétrique

On améliore encore les résultats précédents en adoptant une mesure sur l'axe vertical de l'arbre : à chaque nœud sera associé un indice d'autant plus grand que le nœud sera plus élevé sur l'axe vertical, on dira alors que l'on a une *hiérarchie indicée*.

Une hiérarchie indicée est une hiérarchie stratifiée sur laquelle on a défini une fonction réelle V qui est telle que :
$\forall x \in I \quad V(x) = 0$ (les classes à un seul élément ont un indice nul).
$A \subset B \Rightarrow V(A) \leqslant V(B)$ [l'indice voit sa valeur augmenter à mesure que l'on s'élève dans l'arbre].

On démontre que toute hiérarchie indicée induit sur E une distance ultramétrique en prenant :

$$d(i, j) = \mathrm{Min}\{V(A) \mid A \in H, i \in A, j \in A\} \qquad \forall i, j \in E$$

$d(i, j)$ est l'indice de la plus petite classe contenant à la

▶ ***Figure 15 :*** ***cinq classifications compatibles avec l'arbre de la figure 13.***

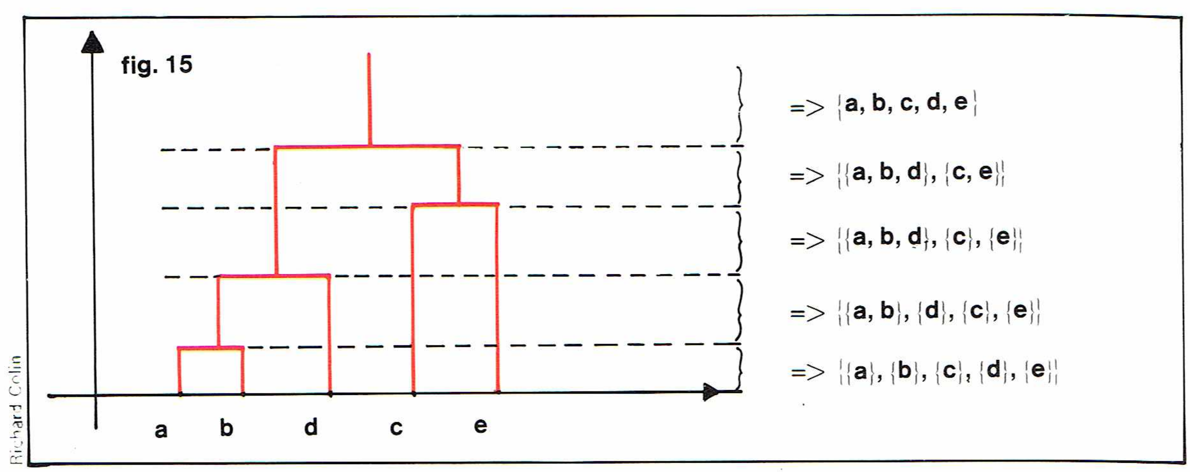

fois i et j ; c'est encore l'indice du premier nœud rassemblant à la fois i et j. Réciproquement on démontre qu'à toute distance ultramétrique correspond une hiérarchie indicée équivalente (induisant la même ordonnance) à la famille des hiérarchies indicées associées à une même hiérarchie stratifiée.

Ceci montre tout l'intérêt de la distance ultramétrique. Pour construire un arbre de classification, on cherche à approcher l'indice de proximité par une distance ultramétrique. On démontre que parmi toutes les ultramétriques inférieures à d (indice de proximité) il en existe une supérieure à toutes les autres (ultramétrique sous dominante de d) et que c'est la plus proche de d pour n'importe quelle distance entre indices de dissimilarité. Divers algorithmes sont utilisés.

Procédés opérant par dichotomies

L'objectif est toujours d'obtenir une partition de E en classes qui regroupent les éléments qui se ressemblent le plus, mais cette fois en opérant par fractionnements successifs de l'ensemble E.

Partitionner E en deux classes équivaut à définir une application booléenne sur E (application qui prend la valeur 1 pour les éléments d'une classe et la valeur 0 pour les autres). Il paraîtra logique de définir une « distance » (au sens indice de proximité) entre classes puis de choisir parmi les $2^{n-1} - 1$ applications booléennes celle qui maximise la distance entre deux classes. Le même procédé permet de fractionner les deux classes obtenues, etc. (*fig.* 16 et 17). On obtient ainsi une *segmentation* de l'ensemble E.

Un des inconvénients consiste en ce que deux individus séparés lors de la première dichotomie seront très éloignés alors qu'ils diffèrent peut-être seulement par le premier caractère ayant servi à établir la séparation.

Là encore divers algorithmes ont été proposés, trop nombreux pour que nous puissions en rendre compte ici.

fig. 16

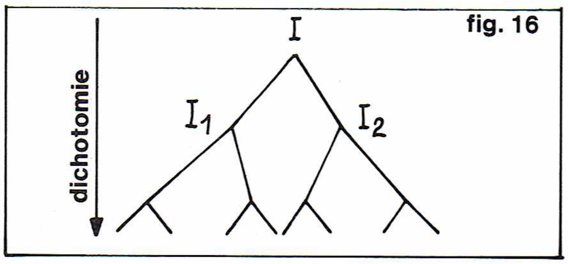

Tableau récapitulatif des différentes méthodes utilisées en analyse des données.

But	Méthodes	Nature des variables	
But descriptif	Analyse en composantes principales	Variables quantitatives	
	Analyse des correspondances	Variables quantitatives ou qualitatives	
But explicatif ou prévisionnel		Variables à expliquer	Variables explicatives
	Analyse discriminante	p quantitatives	1 qualitative
	Régression	1 quantitative	p quantitatives
	Analyse canonique	p quantitatives	q quantitatives
But descriptif	Classification	Variables qualitatives et/ou quantitatives	

▲ *Tableau récapitulatif des différentes méthodes utilisées en analyse des données.*

BIBLIOGRAPHIE

ANDERSON T. W., *An Introduction to Multivariate Statistical Analysis,* Wiley and Son, New York, 1958. - BENZECRI J.-P., *l'Analyse des données : tome I, la Taxinomie, tome II, l'Analyse des correspondances,* Dunod, Paris, 1973. - KANE E. J., *Statistique économique et Économétrie,* Colin, Paris, 1971. - LEBART L. et FENELON J. P., *Statistique et informatique appliquées,* Dunod, Paris, 1971. - LINNIK Y. V., *la Méthode des moindres carrés,* Dunod, Paris. - MALINVAUD E., *Méthodes statistiques de l'économétrie,* Dunod, Paris, 1969. - MORONEY M. J., *Comprendre la statistique,* Marabout Université, Paris, 1970. - ROMEDER J. M., *Analyse discriminante,* Masson, Paris, 1971. - VANGREVELINGHE G., *Économétrie,* Hermann, Paris, 1973. - Publication du Centre d'études économiques d'entreprise, sous la direction de G. MORLAT : *Analyse de données multidimensionnelles* (3 tomes), Paris, 1971.

◄ *Figure 16 : représentation simplifiée d'une partition par* **dichotomies.**

fig. 17

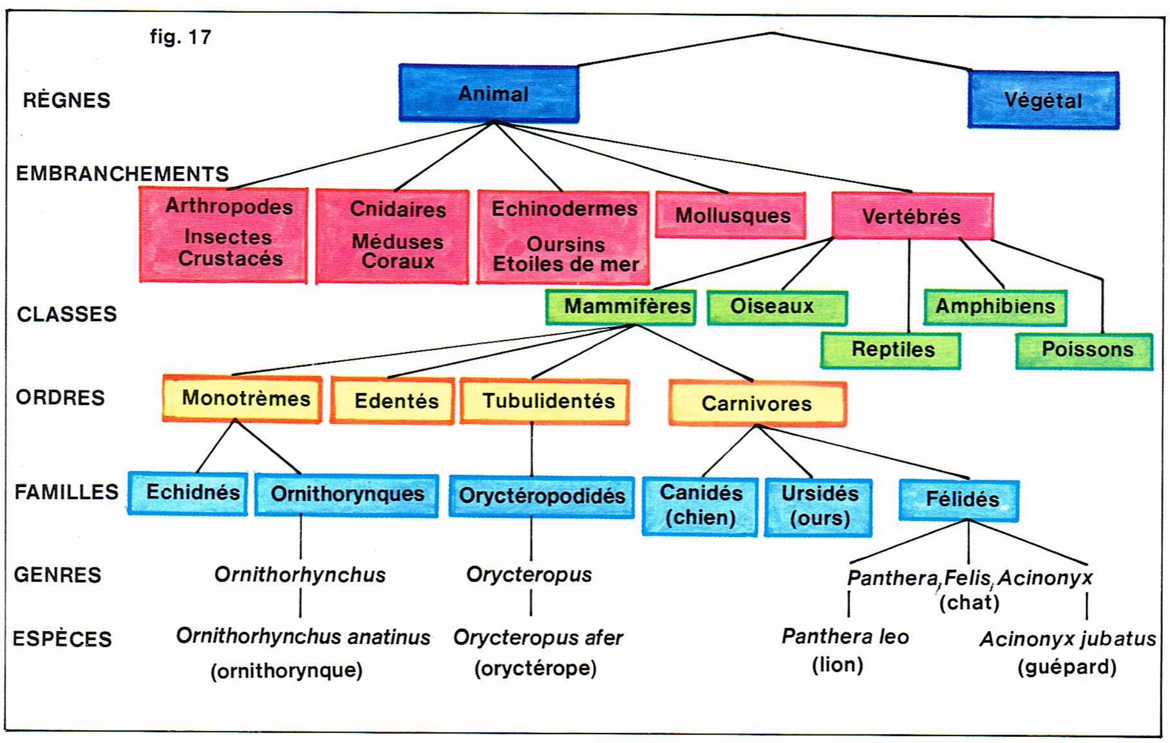

◄ *Figure 17 : illustration tirée du tome I* la Taxinomie, *2e édition, 1976, de l'ouvrage* l'Analyse des données *par J.-P. Benzecri et coll. (Dunod).*

Photo Research International

CALCUL NUMÉRIQUE

De tous temps l'homme a cherché à calculer, mesurer, évaluer les phénomènes auxquels il s'est trouvé confronté. Les géomètres de l'antique Égypte étaient chargés de mesurer la surface des champs que périodiquement le Nil recouvrait d'un limon salvateur et bienfaisant. Pour cela il leur fallait non seulement avoir imaginé un *instrument de mesure* (chaîne d'arpenteur, etc.), mais encore disposer d'une *méthode* permettant de calculer la surface d'un champ quelle qu'en soit la forme. Cette méthode ne pouvait exister que fondée sur un support théorique solide c'est-à-dire sur la géométrie. La géométrie leur démontrait que tout polygone pouvait se décomposer en triangles, la méthode consistait à déterminer la formule donnant la surface d'un triangle; restait la mesure proprement dite qui, se réduisant ainsi à une succession d'opérations élémentaires de simple manutention, pouvait dès lors être confiée à quelques travailleurs d'outre-Nil.

Le calcul numérique était né de cette confrontation entre un corps de théorie (le cas échéant créé pour la circonstance), et un problème réel. L'avènement de l'informatique et l'irruption des ordinateurs dans le monde du XXe siècle ont permis au calcul numérique de connaître un développement sans précédent. Ce développement est à l'évidence commandé par le nombre croissant de problèmes qui, aujourd'hui, dans de multiples domaines (physique, technologie, économie, recherche opérationnelle, etc.), suggèrent une formalisation mathématique et, subséquemment, une résolution numérique aussi rapide et précise que possible.

Songeons par exemple au programme « Apollo » et notamment à la première expédition sur la Lune de juillet 1969 : la trajectoire du vaisseau spatial, sa vitesse à chaque instant, l'angle de sa rentrée dans l'atmosphère, etc., sont autant de grandeurs mesurables qui sont obtenues au terme de calculs mathématiques très élaborés, et qu'il doit être possible de faire de manière instantanée si les circonstances (même les plus imprévues) l'exigent. Tous les paramètres sont calculés à partir d'un *modèle* mathématique global décrivant toutes les relations qui existent entre eux, ainsi que les équations qui les régissent. Grâce à ce modèle, il est possible de prévoir l'évolution du système.

L'homme de la rue a quelque peine à imaginer la complexité d'un tel modèle, mais il peut percevoir que la démarche des techniciens et ingénieurs de la N. A. S. A. reste au fond très semblable à celle des géomètres égyptiens : le passage d'un problème réel à sa résolution pratique se fait toujours en trois étapes : la *mise au point du modèle* mathématique décrivant (au mieux) le problème réel (ici le modèle doit faire appel aussi bien à l'astronomie, à la balistique, à l'électronique, qu'aux mathématiques), la *mise au point de la méthode* (ou *algorithme*) pour conduire les calculs, enfin l'*élaboration du programme informatique*, c'est-à-dire la traduction de l'algorithme en un langage accessible au calculateur électronique. La chaîne d'arpenteur est devenue ordinateur.

Il est certain que ces trois étapes restent étroitement complémentaires : les possibilités de l'informatique astreignent tout algorithme à certaines contraintes que l'on ne peut négliger (coût du temps de passage, capacité de mémoire, etc.). De même les progrès de la recherche mathématique sont indispensables pour la résolution de nouveaux problèmes (notamment dans le domaine de l'analyse numérique, c'est-à-dire l'étude des équations aux dérivées partielles). C'est précisément cette deuxième étape qui est le champ d'action du calcul numérique. Le calcul numérique est donc la science de l'algorithme.

Définition d'un algorithme

Un algorithme est une suite d'opérations élémentaires (en général algébriques) qui conduit à la résolution (exacte ou approchée) d'un problème. Un algorithme est donc formé d'une succession d'*étapes* (ou *itérations*) qui s'enchaînent de manière logique.

La solution sera exacte ou approchée suivant la nature du problème posé. Un calcul est dit exact lorsque la solution recherchée est donnée de manière analytique, c'est-à-dire à l'aide d'une formule composée d'opérations algébriques connues (par exemple : la recherche des racines d'une équation du deuxième degré, l'inversion d'une matrice, etc.). Le calcul approché répond, quant à lui, à l'émergence de problèmes plus complexes dont il n'existe pas de solution analytique. On cherche donc à se rapprocher de la solution théorique avec une précision choisie à l'aide d'un *algorithme convergent* mais qui ne l'atteindrait qu'en un nombre infini d'itérations (recherche de racine d'une équation de degré > 2, calcul d'intégrale par interpolation, résolution d'équations différentielles non linéaires ou aux dérivées partielles, recherche d'optimum, etc.).

Exemple : donnons un exemple simple qui, illustrant ce type de méthodes, donne une idée des difficultés qui peuvent surgir. Considérons l'équation à une inconnue :

$$g(x) = x \tag{1}$$

où g est une fonction numérique. Géométriquement, la solution est l'ensemble des points d'intersection de la courbe $y = g(x)$ avec la première bissectrice. Partant d'un point x_0, il est facile de construire le point $x_1 = g(x_0)$ puis $x_2 = g(x_1)$, etc. Sur la *figure 1* il est clair que l'on définit ainsi une suite x_n à l'aide de la formule récurrente $x_{n+1} = g(x_n)$ et que cette suite converge vers x^*, solution du problème posé.

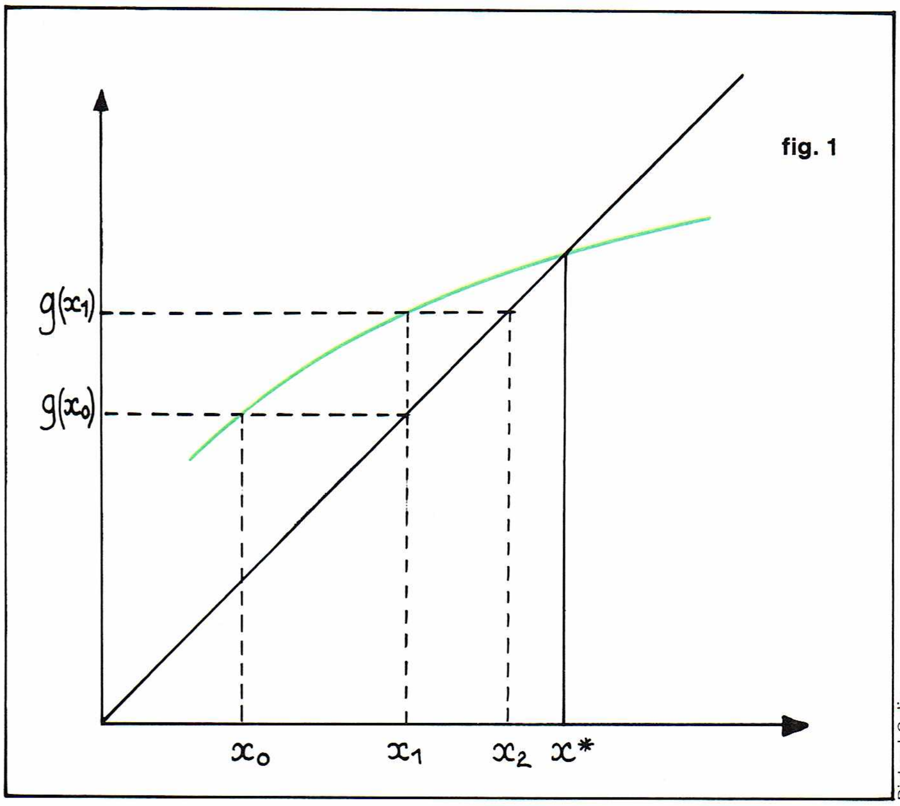

▲ ***Figure 1 :*** *un* **algorithme** ***est une suite d'opérations élémentaires qui conduit à la résolution d'un problème;*** ***la*** **formule récurrente** $x_{n+1} = g(x_n)$ ***définit une suite*** x_n ***qui converge vers*** x^*.

◄ ***Page ci-contre, une des salles du centre de contrôle de la N. A. S. A.***

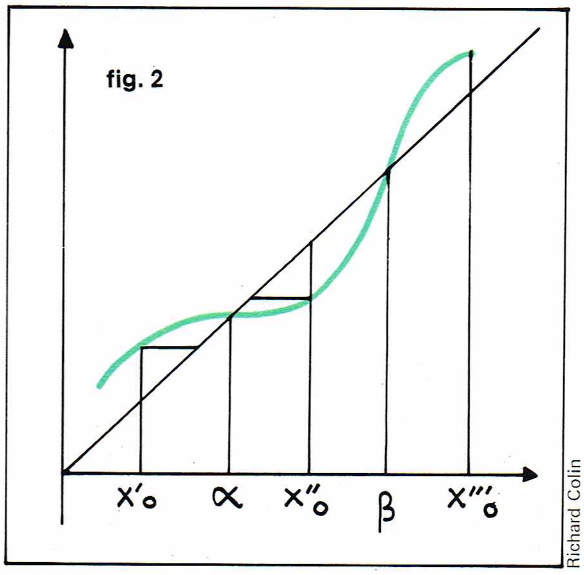

◄ ***Figure 2 : en prenant comme valeur initiale*** x'_0 ***ou*** x''_0***, l'algorithme converge vers*** α ***mais il n'est pas possible de trouver une valeur initiale qui le fasse converger vers*** β ***qui est également solution de*** $g(x) = x$.

L'algorithme ainsi décrit est un *processus itératif* (ou à approximations successives). A chaque étape de l'algorithme, on se rapproche de la solution, on détermine le résultat de l'étape $n+1$ à l'aide de celui de l'étape n.

Il est aisé de voir que si l'algorithme converge et si, en outre, la fonction est continue, alors la limite x^* de la suite x_n est solution de l'équation. Mais la convergence elle-même suppose que la fonction y vérifie certaines hypothèses. De surcroît, cette convergence peut dépendre de la valeur initiale choisie.

Ainsi, dans le cas représenté sur la *figure* 2, en prenant comme valeur initiale de x_0' ou x_0'', l'algorithme converge vers α mais il n'est pas possible de trouver une valeur initiale qui le fasse converger vers β qui est également solution de l'équation **(1)**; de plus, en x_0''' le processus diverge ! La convergence d'un algorithme va donc dépendre des propriétés mathématiques des concepts qui interviennent dans sa définition. Mais d'un point de vue pratique, il est important de pouvoir connaître en outre la *vitesse de convergence* dudit algorithme. La vitesse de convergence peut par exemple être mesurée par le nombre d'itérations nécessaire pour passer d'une valeur initiale x_0 à une valeur contenue dans un voisinage de rayon ε de la solution x^*. Si la vitesse de convergence est trop faible, il pourra être nécessaire de changer l'algorithme ou de modifier celui-ci afin de diminuer le temps de passage sur l'ordinateur.

Nous venons de voir un exemple simple où la solution était un nombre. Dans certains problèmes plus généraux, x représente un vecteur de $\mathbb{R}^p$ ou même une fonction. Ainsi la résolution d'une équation différentielle peut être approchée par un processus (*méthode* dite *d'Euler* par exemple). Pour parler de convergence d'un tel algorithme, il faut qu'au préalable on ait défini non seulement l'*espace fonctionnel* dans lequel on cherche à s'approcher de la solution mais encore que l'on ait muni cet espace d'une norme ou d'une distance (c'est donc dans le cadre de l'analyse fonctionnelle [voir *Analyse fonctionnelle*] qu'on pourra replacer ce type de problèmes).

Erreur

Considérons un processus itératif du type de celui donné en exemple, où x désigne plus généralement un vecteur ou une fonction, c'est-à-dire mathématiquement un élément d'un espace vectoriel topologique (par exemple normé), la suite x_n converge donc vers la solution x^*, autrement dit : $\lim_{n\to\infty} \| x_n - x^* \| = 0$

Supposons que l'on arrête le processus à l'itération N, alors l'*erreur absolue* commise en prenant x_N comme solution approchée est :

$$e_n = \| x_N - x^* \|;$$

l'*erreur relative* est alors donnée par

$$e'_n = \frac{\| x_n - x^* \|}{\| x^* \|}$$

Ne connaissant pas x^*, il s'agit de trouver des majorations de e_n, e'_n (ne dépendant pas de x^*) de manière à évaluer une borne supérieure de l'erreur (absolue ou relative) commise en arrêtant l'algorithme à l'étape N. Là encore, les majorations possibles dépendent des propriétés mathématiques de l'algorithme considéré.

Méthodes de résolution d'un système d'équations linéaires

Considérons le système de n équations à n inconnues suivant :

$$\begin{cases} a_{11} x_1 + \dots + a_{1n} x_n = b_1 \\ a_{21} x_1 + \dots + a_{2n} x_n = b_2 \\ a_{n1} x_1 + \dots + a_{nn} x_n = b_n \end{cases}$$

En définissant la matrice A et les vecteurs $\vec{x}$ et $\vec{b}$ par :

$$\text{A} \begin{bmatrix} a_{11}.. & a_{1n} \\ & \vdots \\ a_{n1} & a_{nn} \end{bmatrix}, \quad \vec{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad \vec{b} = \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix}.$$

On peut mettre le système sous forme matricielle :

$$A\vec{x} = \vec{b}.$$

D'après ce qui a été vu en algèbre linéaire, cette équation matricielle a une solution unique $\vec{x}^*$ si, et seulement si, le déterminant de la matrice A est non nul *(système* dit *de Cramer);* la solution cherchée est alors obtenue en inversant la matrice A : $\vec{x}^* = A^{-1} b$.

Une méthode d'inversion de matrice a déjà été donnée (voir *Algèbre linéaire*) : elle oblige à calculer un grand nombre de déterminants (n^2 déterminants d'ordre $n-1$) ce qui rend le calcul particulièrement fastidieux lorsque n est grand. D'un point de vue pratique, il est préférable d'utiliser d'autres méthodes plus opérationnelles. Il en est de deux types :

— les **méthodes exactes** qui sont des algorithmes finis de calcul de solutions (méthode de Gauss, méthode du pivot) ;

— les **méthodes itératives,** analogues à l'exemple développé dans le chapitre précédent, qui permettent d'obtenir les solutions, avec la précision voulue, à l'aide de processus convergents infinis (méthode des approximations successives, méthode de Seidel, méthode de relaxation). Les approximations (erreurs d'arrondis, etc.) inévitables font que même les résultats des méthodes exactes sont approchés ; l'utilisation des méthodes itératives donne lieu, de surcroît, à l'erreur inhérente à la méthode. Notons d'ores et déjà que l'efficacité des méthodes itératives va dépendre du bon choix de la valeur initiale et de la rapidité de la convergence du processus.

▶ ***Tableau synoptique du principe de la méthode des éliminations successives.***

Soit donc à résoudre le système :

$$\begin{cases} 2x_1 + 3x_2 + x_3 = 4 & \textbf{(a)} \\ x_1 - x_2 - 2x_3 = 1 & \textbf{(b)} \\ x_1 + 4x_2 + x_3 = 1 & \textbf{(c)} \end{cases}$$

Étape 1 : on divise l'équation **(a)** par le coefficient de x_1 dans cette équation. D'où l'équation **(a')**; on élimine x_1 des équations **(b)** et **(c)** en retranchant à chacune d'elles l'équation **(a')** :

$$\begin{aligned} x_1 + \frac{3}{2}x_2 + \frac{1}{2}x_3 &= 2 & \textbf{(a')} \\ -\frac{1}{2}x_2 - \frac{5}{2}x_3 &= -1 & \textbf{(b')} \\ \frac{5}{2}x_2 + \frac{1}{2}x_3 &= -1 & \textbf{(c')} \end{aligned}$$

Étape 2 : on conserve l'équation **(a')**; on élimine x_2 de l'équation **(c')** en divisant l'équation **(b')** par le coefficient de x_2 dans cette équation ; d'où l'équation **(b")**. On élimine x_2 de **(c')** en retranchant de cette équation l'équation **(b")** multipliée par $\frac{5}{2}$:

$$\begin{aligned} x_1 + \frac{3}{2}x_2 + \frac{1}{2}x_3 &= 2 & \textbf{(a')} \\ x_2 + 5x_3 &= 2 & \textbf{(b")} \\ -12x_3 &= -6 & \textbf{(c")} \end{aligned}$$

Étape 3 : ce système est sous forme diagonale ; il admet pour solution :

$$x_1 = \frac{1}{2}$$

$$x_2 = -\frac{1}{2}$$

$$x_3 = \frac{5}{2}$$

Méthode des éliminations successives ou méthode de Gauss

La méthode consiste à remarquer que la résolution d'un système linéaire mis sous forme diagonale est facile à résoudre.

Exemple :

$$\begin{cases} 2x_1 + x_2 - x_3 = 1 & (2) \\ 3x_2 + x_3 = 4 & (3) \\ 3x_3 = 3 & (4) \end{cases}$$

De l'équation **(4)** on tire $x_3 = 1$ que l'on reporte dans l'équation **(3)** pour obtenir la valeur de $x_2 = 1$; l'équation **(2)** donne alors celle de $x_1 \left(= \frac{1}{2}\right)$. L'*algorithme de Gauss* consiste à mettre le système à résoudre sous forme diagonale en procédant à certaines combinaisons linéaires des équations, de manière à éliminer une ou plusieurs variables. Ces combinaisons successives s'effectuent sur les coefficients du système ; à chaque étape, dans la pratique, on se contente d'écrire les coefficients, sous forme de *tableaux*.

Voyons le principe de la méthode sur un exemple que nous résoudrons de manière synoptique à gauche par l'élimination successive des variables, à droite par la manipulation des tableaux des coefficients (ci-dessous).

Tableau 0 :

$$\begin{array}{ccc|c} \boxed{2} & 3 & 1 & 4 \\ 1 & 1 & -2 & 1 \\ 1 & 4 & 1 & 1 \end{array}$$

Tableau 1 : on multiplie la première ligne par $\frac{1}{2}$ que l'on soustrait alors des deux autres.

2 s'appelle *pivot ;* on l'encadre dans le tableau 0 :

$$\begin{array}{ccc|c} 1 & \frac{3}{2} & \frac{1}{2} & 2 \\ 0 & \boxed{-\frac{1}{2}} & -\frac{5}{2} & -1 \\ 0 & \frac{5}{2} & \frac{1}{2} & -1 \end{array}$$

Tableau 2 : on ne modifie pas la première ligne. On multiplie la deuxième par -2. Cette ligne ainsi transformée est multipliée par $-\frac{5}{2}$ pour être ajoutée à la troisième de manière à faire apparaître un 0 à la place du $\frac{5}{2}$ du tableau 1 .

$\boxed{-\frac{1}{2}}$ est le deuxième pivot :

$$\begin{array}{ccc|c} 1 & \frac{3}{2} & \frac{1}{2} & 2 \\ 0 & 1 & 5 & 2 \\ 0 & 0 & \boxed{-12} & -6 \end{array}$$

$\boxed{-12}$ est le troisième pivot

ou en multipliant la dernière ligne par $-\frac{1}{12}$.

Tableau 3 :

$$\begin{array}{ccc|c} 1 & \frac{3}{2} & \frac{1}{2} & 2 \\ 0 & 1 & 5 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{1}{2} \end{array}$$

On voit donc déjà apparaître la notion de *pivot.* La méthode du pivot que nous présentons maintenant est donc une forme améliorée de la méthode de Gauss.

Méthode du pivot

La méthode du pivot consiste à mettre le système sous forme *diagonale* en effectuant des combinaisons linéaires des lignes analogues à celles qui interviennent dans la méthode de Gauss.

Exemple : nous reprenons l'exemple précédent en utilisant la disposition pratique sous forme de tableaux que nous avons introduits :

Tableau 0 :

$$\begin{array}{ccc|c} \boxed{2} & 3 & 1 & 4 \\ 1 & 1 & -2 & 1 \\ 1 & 4 & 1 & 1 \end{array}$$

Le premier pivot étant choisi (ici le coefficient de x_1 dans la première équation), la méthode consiste à procéder à des combinaisons de lignes de manière à faire apparaître un $\boxed{1}$ à la place du pivot et des 0 à la place des autres coefficients de la première ligne. Le *tableau 1* s'obtient donc de la même façon que dans l'exemple précédent :

Tableau 1 :

$$\begin{array}{ccc|c} 1 & \frac{3}{2} & \frac{1}{2} & 1 \\ 0 & \boxed{-\frac{1}{2}} & -\frac{5}{2} & -1 \\ 0 & \frac{5}{2} & \frac{1}{2} & -1 \end{array}$$

On prend comme deuxième pivot le coefficient de x_2 dans la deuxième équation (on aurait tout aussi bien pu prendre la troisième équation). On multiplie la deuxième ligne par -2 puis par $-\frac{3}{2}$ $\left(\text{respectivement } -\frac{5}{2}\right)$ pour l'ajouter ainsi transformée à la première (respectivement troisième) ligne de manière à faire apparaître des 0 en lieu et place de $\frac{3}{2}$ et $\frac{5}{2}$; on obtient ainsi le *tableau 2 :*

Tableau 2 :

$$\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & -7 & -1 \\ 0 & 1 & 5 & 2 \\ 0 & 0 & \boxed{-12} & -6 \end{array}$$

En prenant comme troisième pivot $\boxed{-12}$ et en procédant de la même façon, on aboutit au *tableau 3 :*

Tableau 3 :

$$\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & \frac{5}{2} \\ 0 & 1 & 0 & -\frac{1}{2} \\ 0 & 0 & 1 & \frac{1}{2} \end{array}$$

La solution du système est là encore :

$$x_1 = \frac{5}{2}, \quad x_2 = -\frac{1}{2}, \quad x_3 = \frac{1}{2}.$$

Exemple : cette méthode est également utilisée pour calculer l'*inverse d'une matrice donnée.* Donnons-en le principe sans en fournir la justification théorique. Sur l'exemple précédent, il suffit d'appliquer la méthode du pivot au tableau suivant :

$$\begin{array}{ccc|ccc} 2 & 3 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -2 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{array}$$

En prenant successivement les éléments diagonaux du bloc de gauche comme pivots, on obtient au bout de la troisième étape :

$$\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & \frac{3}{4} & \frac{1}{12} & -\frac{7}{12} \\ 0 & 1 & 0 & -\frac{1}{4} & \frac{1}{12} & \frac{5}{12} \\ 0 & 0 & 1 & \frac{1}{4} & -\frac{5}{12} & -\frac{1}{12} \end{array}$$

Le bloc de droite du tableau ainsi obtenu est la matrice inverse de la matrice cherchée.

Avantages comparés des méthodes proposées

Du point de vue de l'utilisation, la meilleure méthode est celle qui donne lieu au plus petit nombre d'opérations élémentaires (addition, multiplication). Il est possible de calculer le nombre N d'opérations requises dans l'application des 3 méthodes, en fonction du nombre n d'inconnues.

Méthode de Cramer (déterminants)	$N_c = (n^2 + n)\, n\,! - 1$
Méthode de Gauss (élimination successive)	$N_g = 2\, n\, (n+1)\, (n+2) + [n\, (n-1)]$
Méthode du pivot	$N_p = 4\, n^3 - 2\, n$

▲ *Avantages comparés des 3 méthodes proposées en fonction du nombre n d'inconnues.*

Pour $n \geqslant 4$, on a les inégalités $N_g \simeq N_p < N_c$. Ainsi la méthode de Gauss semble préférable pour la résolution de gros systèmes linéaires : supposons que l'on ait à résoudre un système de 10 équations et que l'on utilise un calculateur qui effectue 10^4 opérations par seconde. Le temps T nécessaire pour résoudre le système est dans les 3 cas : $T_c \simeq$ 24 heures ! T_g 2 1/10 sec. $T_p \simeq$ 4 1/10 sec. On comprend pourquoi la méthode de Cramer n'a aujourd'hui qu'un intérêt académique.

Méthode des approximations successives

Lorsque le nombre des inconnues devient trop important, l'application des méthodes exactes que nous venons de voir s'avère bien trop compliquée. On leur préfère alors des méthodes numériques approchées. L'une d'elles est la méthode des approximations successives :

Considérons le système linéaire **(5)** : $A\vec{x} = \vec{b}$. Il est toujours possible de trouver une matrice H et un vecteur $\vec{k}$ tels que **(5)** devienne **(6)** : $\vec{x} = H\vec{x} + \vec{k}$. Si A est la matrice (a_{ij}), on vérifiera sans peine que la matrice H est égale à :

$$H = \begin{bmatrix} 0 - \frac{a_{12}}{a_{11}} \cdots - \frac{a_{1n}}{a_{11}} \\ \\ 0 \\ \\ -\frac{a_{n1}}{a_{nn}} \qquad\qquad 0 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \vec{k} = \begin{bmatrix} \frac{b_1}{a_{11}} \\ \\ \\ \frac{b_n}{a_{nn}} \end{bmatrix}$$

Cette transformation est toujours possible si la matrice A est inversible. En effet, on peut supposer qu'alors les éléments de la diagonale sont tous $\neq 0$, quitte à modifier l'ordre des lignes ou des colonnes. On choisit une valeur initiale

$\vec{x}^0 = [x_1^0, ..., x_n^0]$ (en général on prend $\vec{x}^0 = (0, ... 0, ... 0)$).

On calculera x^1 par la formule $\vec{x}^1 = \vec{H}x^0 + \vec{k}$. A la i-ième itération, on aura $\vec{x}^{i+1} = \vec{H}x^i + \vec{k}$. Si le processus converge vers une limite $\vec{x}^*$, alors il est clair que $\vec{x}^*$ est solution du système considéré. Pour que l'algorithme converge, il faut et il suffit que toutes les valeurs propres de la matrice H soient en modules inférieures à 1. Cette condition est assurée lorsque les coefficients diagonaux de la matrice A sont, en module, plus grands que la somme des autres éléments de leur ligne (et leur colonne) :

$$|\alpha_{ii}| > \sum_{j \neq i} \alpha_{ij}$$

Exemple : soit à résoudre le système :

$$\begin{aligned} 10\, x_1 - 2\, x_2 - 2\, x_3 &= 6 \\ -x_1 + 10\, x_2 - 2\, x_3 &= 7 \\ -x_1 - x_2 + 10\, x_3 &= 8 \end{aligned}$$

le système s'écrit sous la forme **(6)** :

(6) k	$x_1^{(k)}$	$x_2^{(k)}$	$x_3^{(k)}$
0	0,6	0,7	0,8
1	0,88	0,92	0,93
2	0,97	0,974	0,98
3	0,991 8	0,993	0,994 4

Le processus converge vers la solution (évidente) $x_1^* = x_2^* = x_3^* = 1$, sans l'atteindre en un nombre fini d'itérations. Cependant, il faut noter que ce processus itératif jouit de la *propriété d'autocorrection :* une erreur de calcul isolée ne perturbe pas le résultat final, une approximation erronée étant toujours considérée comme un nouveau vecteur initial. On peut apporter quelques améliorations à cette méthode de manière à accélérer la convergence du processus : tel est l'objet par exemple de la *méthode de Seidel*, qui consiste essentiellement à tenir compte, lors de la k-ième approximation de l'inconnue x_i, des k-ièmes approximations des inconnues $x_1, ..., x_{i-1}$ déjà calculées. Il existe d'autres méthodes (*méthode de relaxation* par exemple) qui sont exposées dans la littérature spécialisée.

Résolution approchée des systèmes d'équations non linéaires

Position du problème

Le cas linéaire que nous venons de traiter recouvre un grand nombre de problèmes. Il n'en reste pas moins que certains phénomènes physiques sont régis par des relations non linéaires. D'où l'importance que l'on est en droit d'attacher aux méthodes de résolution de tels systèmes.

Soit donc le système de n équations à n inconnues :

$$\begin{cases} f_1\ (x_1, ..., x_n) = 0 \\ f_2\ (x_1, ..., x_n) = 0 \\ \quad \vdots \\ f_n\ (x_1, ..., x_n) = 0 \end{cases}$$

On peut représenter le système sous la forme abrégée usuelle : $\overrightarrow{f(\vec{x})} = \vec{0}$ où f désigne l'application de $\mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^n$ définie à l'aide des applications f_i :

$$f(\circ) = \begin{bmatrix} f_1\ (\circ) \\ f_2\ (\circ) \\ f_n\ (\circ) \end{bmatrix}$$

Les méthodes qui existent sont assorties de conditions particulièrement contraignantes sur la fonction f. C'est dire que ce genre de méthodes ne répondra qu'à une classe assez limitée de problèmes. Nous présenterons deux algorithmes de résolution : la *méthode de Newton* qui fait appel au calcul différentiel et la *méthode des approximations successives* qui généralise celle que l'on a rencontrée dans le cas linéaire.

La méthode de Newton

Cette méthode s'inspire aussi des principes de la méthode des approximations successives : elle définit un algorithme qui à chaque itération donne une valeur $\vec{x}^{(p)}$ approchée de la solution, qui sert également au calcul de l'approximation suivante $\vec{x}^{(p+1)}$. Cherchons à établir

la règle de calcul. On peut écrire $\vec{x}^{(p+1)} = \vec{x}^{(p)} + \vec{\varepsilon}^{(p)}$. Nous allons chercher à déterminer $\varepsilon^{(p)}$ de telle façon que $x^{(p+1)}$ vérifie « le mieux possible » la condition $f(x) = \vec{0}$, ce qui s'écrit

(7) $$f(\vec{x}^{(p+1)}) = f(\vec{x}^{(p)} + \vec{\varepsilon}^{(p)}) = \vec{0}$$

On suppose que la fonction f est continûment dérivable dans un certain domaine Ω convexe et ouvert de $\mathbb{R}^n$. On peut donc définir la matrice jacobienne de l'application f :

$$W(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1}(\vec{x}), & \dots, & \frac{\partial f_1}{\partial x_n}(\vec{x}) \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1}(\vec{x}) & & \frac{\partial f_n}{\partial x_n}(\vec{x}) \end{bmatrix}$$

Transformons **(7)** en écrivant le développement limité (vectoriel !) de la fonction f au voisinage du point $\vec{x}^{(p)}$:

$$f(\vec{x}^{(p)} + \varepsilon^{(p)}) = f(\vec{x}^{(p)}) + W(\vec{x}^{(p)}) \cdot \vec{\varepsilon}^{(p)} + \mathcal{O}(\|\vec{\varepsilon}^{(p)}\|)$$

En nous bornant ainsi au premier terme du développement limité, nous pouvons écrire l'égalité suivante qui constitue une approximation de la condition **(7)** :

$$f[\vec{x}^{(p)}] + W(\vec{x}^{(p)}) \cdot \vec{\varepsilon}^{(p)} = \vec{0}$$

en supposant que la matrice $W(\vec{x}^{(p)})$ est inversible (lorsque $\vec{x}^{(p)}$ n'est pas un point singulier de la fonction f), on obtient : $\vec{\varepsilon}^{(p)} = -W(\vec{x}^{(p)})^{-1} \cdot f(\vec{x}^{(p)})$; par conséquent on obtient le vecteur $\vec{x}^{(p+1)}$ selon la règle :

(8) $$\vec{x}^{(p+1)} = \vec{x}^{(p)} - W^{-1}(\vec{x}^{(p)}) \cdot f[\vec{x}^{(p)}]$$

Exemple : soit le système :

$$\begin{cases} x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 = 1 \\ 2x_1^2 + x_2^2 - 4x_3 = 0 \\ 3x_1^2 - 4x_2 + x_3^2 = 0 \end{cases}$$

On part du vecteur initial $x_1^{(0)} = x_2^{(0)} = x_3^{(0)} = 0{,}5$, d'où l'on obtient $f(\vec{x}^{(0)}) = \begin{bmatrix} -0{,}25 \\ -1{,}25 \\ -1{,}00 \end{bmatrix}$.

La matrice jacobienne $W(\vec{x})$ est donnée par :

$$W(\vec{x}) = \begin{bmatrix} 2x_1 & 2x_2 & 2x_3 \\ 4x_1 & 2x_2 & -4 \\ 6x_1 & -4 & 2x_3 \end{bmatrix}$$

On a $$W(\vec{x}^{(0)}) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & -4 \\ 3 & -4 & 1 \end{pmatrix}$$

et $$W^{-1}(\vec{x}^{(0)}) = \begin{pmatrix} \frac{3}{8} & \frac{1}{8} & \frac{1}{8} \\ \frac{7}{20} & \frac{1}{20} & -\frac{3}{20} \\ \frac{11}{20} & -\frac{7}{40} & \frac{1}{40} \end{pmatrix}$$

On calcule ainsi $\vec{x}^{(1)}$ par la forme **(8)**. Le résultat des trois premières itérations est donné dans ce tableau :

(k)	$x_1^{(k)}$	$x_2^{(k)}$	$x_3^{(k)}$
0	0,5	0,5	0,5
1	0,875	0,5	0,375
2	0,789 81	0,496 62	0,369 93
3	0,785 21	0,496 62	0,369 92

Il va sans dire que la convergence de l'algorithme n'est pas toujours assurée et que certaines conditions portant sur l'application f et sur la valeur initiale $\vec{x}^{(0)}$ doivent être réalisées. Ainsi que nous l'avons déjà vu en introduction, la limite de l'algorithme peut dépendre de la valeur initiale.

Il s'agit donc également d'étudier la *stabilité* de la solution par rapport à $\vec{x}^{(0)}$.

La méthode des approximations successives

Soit à résoudre un système non linéaire de la forme

$$\begin{cases} x_1 = \varphi_1(x_1, \dots, x_n) \\ \vdots \\ x_n = \varphi_n(x_1, \dots, x_n) \end{cases}$$

que l'on peut écrire sous forme abrégée

(9) $$\vec{x} = \overrightarrow{\varphi(\vec{x})}$$

la solution $\vec{x}^*$ de cette équation, si elle existe, est un *point fixe* de l'application φ. On cherche à savoir à quelles conditions on peut obtenir x^* comme limite du processus itératif défini par :

(10) $$\vec{x}^{(p+1)} = \varphi(\vec{x}^{(p)})$$

Définition : l'application φ de $A \subset \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^n$ sera dite contractante dans A s'il existe une constante a : $0 < a < 1$ telle que

$$\|\varphi(x_1) - \varphi(x_2)\| \leqslant a\,\|x_1 - x_2\| \quad \forall x_1, x_2 \in A$$

où $\| \ \|$ désigne la norme euclidienne usuelle de $\mathbb{R}^n$. Si l'application φ est contractante dans A, partie fermée de $\mathbb{R}^n$, alors le processus itératif défini en **(10)** converge vers un vecteur $\vec{x}^*$ solution de **(9)**. En outre, cette convergence est indépendante du choix de la valeur initiale $\vec{x}^{(0)}$. Enfin l'erreur absolue commise en stoppant la procédure à l'étape p est majorée selon la formule :

$$\|\vec{x}^* - \vec{x}^{(p)}\| \leqslant \frac{a^p}{1-a} \|x^{(1)} - x^{(0)}\|.$$

La solution $\vec{x}^*$ est alors unique. La méthode des approximations successives peut être également appliquée au système général **(11)** $f(\vec{x}) = \vec{0}$. Considérons le système

(12) $$\vec{x} + f(\vec{x}) = \vec{x}.$$

Toute solution de **(11)** est solution de **(12)**. On peut donc espérer dans certains cas [c'est-à-dire au voisinage de la solution x^* de **(11)**] appliquer cette méthode au cas général en posant $\overrightarrow{\varphi(\vec{x})} = \vec{x} + \overrightarrow{f(\vec{x})}$...

Optimisation

Position du problème

Un problème d'optimisation consiste, d'une façon générale, à déterminer la valeur x^* d'un vecteur $\vec{x}$ de $\mathbb{R}^n$ maximisant — ou minimisant — une fonction *objectif* $f(\vec{x})$. D'autre part le vecteur $\vec{x}^*$ est assujetti à appartenir à une certaine partie K de $\mathbb{R}^n$: $f(\vec{x}) = \underset{x \in k}{\text{Opt}}\, f(\vec{x})$

où $$f : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$$

Suivant la nature de l'ensemble K on aura affaire à des types de problèmes différents. On distinguera trois cas :

— $K = \mathbb{R}^n$; il s'agit alors d'un problème d'optimisation sans contraintes ou de recherche d'un *optimum libre* ;

— K est défini par des contraintes de la forme :

$$K = \{\vec{x} \in \mathbb{R}^n)\ \ g_j(\vec{x}) = b_j \quad j = 1, \dots, p\} ;$$

il s'agit alors d'un problème d'optimisation *sans contraintes d'égalité ;*

— K est défini par des contraintes de la forme :

$$K = \{\vec{x} \in \mathbb{R}^n \,/\, g_j(\vec{x}) \leqslant b_j \quad j = 1, \dots, p\}$$

il s'agit dans ce cas d'un problème d'optimisation *sous contraintes d'inégalité.*

Notons au préalable qu'il est toujours possible d'exprimer un problème de maximisation sous la forme d'un problème de minimisation — et réciproquement. En effet, on peut toujours écrire :

$$\text{Max}\, f(\vec{x}) = -\text{Min}\,[-f(\vec{x})]$$

Nous restreindrons donc notre exposé au problème de la maximisation. La théorie mathématique va nous permettre de connaître les conditions portant sur la fonction f et sur l'ensemble K qui assurent l'existence (et l'unicité dans certains cas) d'une solution au problème :

(13) $$\underset{\vec{x} \in K}{\operatorname{Max}} f(\vec{x})$$

Théorème :

— *Si f est une fonction continue et si l'ensemble* K *est une partie compacte de* $\mathbb{R}^n$ *(c'est-à-dire fermée et bornée), alors il existe au moins une valeur* $\vec{x}^*$ *de* $\vec{x}$ *solution de* **(13)**.

— *Si de plus la fonction f est strictement concave et si l'ensemble* K *est convexe, alors la solution* $\vec{x}^*$ *est unique.*

La première assertion n'est rien d'autre que l'expression du théorème de Weierstrass (voir *Topologie*).

Démontrons la seconde : supposons que $\vec{x}^*$ et $\vec{y}^*$ soient deux solutions distinctes de **(13)**. Soit $\vec{z}$ un point du segment joignant $\vec{x}^*$ à $\vec{y}^*$; $\vec{z}$ peut se mettre sous la forme

$$z = \lambda\vec{x}^* + (1 - \lambda)\vec{y}^* \quad \text{où} \quad \lambda \in]0,1[$$

f étant strictement concave, on écrit :

$$f(\vec{z}) = f(\lambda\vec{x}^* + (1 - \lambda)\vec{y}^*) > \lambda f(\vec{x}^*) + (1 - \lambda) f(\vec{y}^*)$$

or $f(\vec{x}^*) = f(\vec{y}^*)$ par conséquent $f(\vec{z}) > f(\vec{x}^*)$ et x^* ne serait plus solution de **(13)**. Pour résoudre numériquement le problème **(13)**, il existe deux classes de méthodes que l'on retrouvera dans les 3 cas que nous venons de distinguer : d'une part les *méthodes directes* qui utilisent des conditions *nécessaires* d'optimalité qui s'obtiennent en employant certaines caractérisations issues du calcul différentiel ; d'autre part, les méthodes itératives qui consistent, partant d'un point $\vec{x}_0$ réalisable (c'est-à-dire appartenant à K), à définir une suite de points de K $\vec{x}_1, ..., \vec{x}_\nu$ tels qu'à chaque étape on « améliore » la fonction objectif : $\varphi(\vec{x}_0) < \varphi(\vec{x}_1) ... < \varphi(\vec{x}_\nu) < ...$ Si la procédure converge, on est en droit d'espérer que la limite soit solution du problème **(13)**. Encore faudra-t-il s'assurer que l'on n'obtient pas ainsi un optimum local qui dépendrait de la valeur initiale. Les méthodes itératives diffèrent entre elles par la procédure employée pour passer d'un point $\vec{x}_\nu$ de l'algorithme au suivant $\vec{x}_{\nu+1}$. En général, on cherchera $\vec{x}_{\nu+1}$ sous la forme $\vec{x}_{\nu+1} = \vec{x}_\nu + t_\nu \cdot \vec{d}_\nu$ où $t_\nu \in \mathbb{R}$ et $\vec{d}_\nu$ est un vecteur de $\mathbb{R}^n$ qui représente une *direction admissible* choisie de telle façon que, en la suivant, on augmente la valeur de la fonction f ; t_ν représente le « pas » du déplacement que l'on détermine de manière à améliorer réellement la fonction f (une trop grande valeur de t_ν pourrait conduire à une décroissance de f) *tout en restant dans le domaine admissible K*. Le tableau ci-dessous résume les méthodes les plus couramment utilisées dans les problèmes d'optimisation.

Nous n'évoquerons ici qu'une partie des méthodes de ce tableau. En particulier, nous n'aborderons pas ici la programmation linéaire (et la programmation quadratique) qui fera l'objet de développements ultérieurs (voir *Mathématiques et science économique*).

Optimisation sans contraintes - Méthode directe

Soit donc le programme suivant :

(14) $$\underset{x \in \mathbb{R}^n}{\operatorname{Max}} f(x).$$

Nous supposons que la fonction objectif f est de classe C^2.

Montrons qu'une *condition nécessaire* pour que $\vec{x}^*$ soit un maximum de f s'écrit

(15) $$\frac{\partial f}{\partial x_i}(\vec{x}^*) = 0 \quad i = 1, ..., n.$$

Cette condition n'est en effet nullement suffisante puisqu'elle serait également vérifiée pour un minimum ou pour ce que l'on appelle un *point-selle*. En outre elle est une condition nécessaire d'*optimalité locale*.

Au voisinage de x^*, on écrit le développement de Taylor de la fonction f à l'ordre 2 :

(16) $$f(\vec{x}^* + \vec{h}) - f(\vec{x}^*) = \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial f}{\partial x_i}(\vec{x}^*) \cdot h_i + \mathcal{O}(\|\vec{h}\|).$$

En appelant *vecteur gradient* le vecteur $\nabla f(\vec{x}^*)$ de composantes $\left[\frac{\partial f}{\partial x_1}(\vec{x}^*), \frac{\partial f}{\partial x_2}(\vec{x}^*), ..., \frac{\partial f}{\partial x_n}(\vec{x}^*)\right]$, on réécrit l'égalité **(16)**.

(17) $$f(\vec{x}^* + \vec{h}) - f(\vec{x}^*) = \nabla f(\vec{x}^*) \cdot \vec{h} + \mathcal{O}(\|\vec{h}\|),$$

où « · » désigne le produit scalaire dans $\mathbb{R}^n$. Dire que $\vec{x}^*$ est un maximum local, c'est dire qu'il existe un voisinage $V(\vec{0})$ tel que :

$$f(\vec{x}^* + \vec{h}) \leqslant f(\vec{x}^*) \quad \forall \vec{h} \in V(\vec{0}).$$

Pour $\|\vec{h}\|$ suffisamment petit (c'est-à-dire inférieur à ε fixé à l'avance) il vient :

(18) $$\nabla f(\vec{x}^*) \cdot \vec{h} \leqslant 0 \quad \forall h \quad \|\vec{h}\| \leqslant \varepsilon.$$

Il est clair que cette inégalité entraîne $\overrightarrow{\nabla f(x^*)} = \vec{0}$. En effet, il suffit d'écrire l'inégalité **(18)** successivement pour $h = (0, ... h_i, ... 0)$ et $(0, ... 0, - h_i, ... 0)$ pour i variant de 1 à n.

$$f(\vec{x}^*) = \underset{\vec{x} \in \mathbb{R}^n}{\operatorname{Max}} f(\vec{x}) \Rightarrow \nabla f(\vec{x}^*) = \vec{0}.$$

La recherche du maximum peut donc se ramener à la résolution du système **(15)**. A cet égard, pour résoudre le système, on peut développer une de ces méthodes présentées dans le chapitre précédent. Comme nous l'avons dit, rien n'indique que la résolution d'un tel système conduise à une solution du problème de maximisation. Les deux problèmes ne sont pas équivalents. La seule chose que l'on puisse affirmer, c'est que l'ensemble des solutions **(14)** est inclus dans celui des solutions de **(15)**.

Optimisation sans contraintes - Méthode du gradient

La méthode du gradient est une méthode itérative qui est fondée sur les considérations suivantes : soit un point x_0 de $\mathbb{R}^n$. Certains déplacements $\vec{h}$ au voisinage de ce point vont produire un accroissement de la fonction f. Nous pouvons caractériser ces déplacements en écrivant la formule **(17)** :

$$f(x_0 + h) - f(x_0) = \overrightarrow{\nabla f(x_0)} \cdot \vec{h} + \mathcal{O}(\|h\|)$$

Contraintes	Méthodes directes	Méthodes itératives
Sans contraintes	**Annulation des dérivées partielles**	**Méthode du gradient** **Méthode du gradient conjugué**
Contraintes d'égalité	**Multiplicateurs de Lagrange**	**Contraintes linéaires** **Programmation linéaire (simplex)** **Programmation, quadratique (Danzig, Wolfe)** **Méthode du gradient projeté (Rosen)**
Contraintes d'inégalité	**Multiplicateurs de Kuhn et Tücker**	**Contraintes non linéaires** **Méthode des directions admissibles** **Méthodes des pénalités**

▶ *Tableau récapitulatif des méthodes les plus couramment utilisées dans les problèmes d'optimisation.*

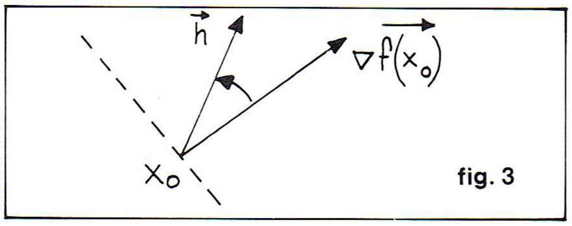

Richard Colin

◄ *Figure 3 : la fonction f augmentera pour tout déplacement $\vec{h}$ suffisamment petit vérifiant :* $\overrightarrow{\nabla f(x_0)} \cdot \vec{h} \geqslant 0$.

Au premier ordre, l'on peut dire que la fonction f augmentera pour tout déplacement $\vec{h}$ suffisamment petit vérifiant : $\overrightarrow{\nabla f(x_0)} \cdot \vec{h} \geqslant 0$, c'est-à-dire pour tout vecteur $\vec{h}$ faisant un angle aigu avec le vecteur gradient (*fig.* 3) : le déplacement qui assure le plus grand accroissement de la fonction est celui qui correspond à la direction du gradient lui-même.

La méthode du gradient consiste donc, à chaque itération, à suivre la direction du gradient aussi longtemps que la fonction augmente : plus précisément, à l'itération ν on se trouve en un point $\vec{x}_\nu$. On cherche $\vec{x}_{\nu+1}$ sous la forme :

$$\vec{x}_{\nu+1} = \vec{x}_\nu + t_\nu \ \overrightarrow{\nabla f(\vec{x}_\nu)} \quad t_\nu \in \mathbb{R}$$

t_ν est la valeur du pas qui donne la plus grande valeur de la fonction f selon la direction $\overrightarrow{\text{grad} f(x_\nu)}$. Autrement dit, t_ν est solution du problème de maximisation à une variable :

$$\underset{t \in \mathbb{R}}{\text{Max}} \, f(\vec{x}_\nu + t \, \nabla f(\vec{x}_\nu))$$

Exemple : soit à résoudre le problème de maximisation à 2 variables x_1 et x_2

$$\underset{(x_1, x_2) \in \mathbb{R}^2}{\text{Max}} \quad f(x_1, x_2) = -(x_1 - 2)^2 - 2(x_2 - 1)^2$$

La solution est bien sûr évidente : $x^* = 2$ et $x_2^* = 1$. En tout point x les composantes du vecteur gradient sont données par

$$\nabla f(x) = \begin{cases} -2(x_1 - 2) \\ -4(x_2 - 1) \end{cases}$$

Partons d'une valeur initiale $\vec{x}^0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$; $\nabla f(\vec{x}_0) = \begin{pmatrix} 4 \\ 4 \end{pmatrix}$.

On détermine t_0 qui maximise $f\left[\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} 4 \\ 4 \end{pmatrix}\right]$, soit :

$$\frac{d}{dt}\left[(4t - 2)^2 + 2(4t - 1)^2\right] = 0, \quad \text{ce qui donne } t_0 = \frac{1}{3}.$$

On a donc $\vec{x^1} = \begin{pmatrix} \frac{4}{3} \\ \frac{4}{3} \end{pmatrix}$. On calcule ici $\nabla f(x^1) = \begin{pmatrix} \frac{4}{3} \\ -\frac{4}{3} \end{pmatrix}$

puis t_1, etc.

Les calculs correspondant aux trois premières itérations sont rassemblés dans le tableau suivant :

	x_ν	$\nabla f(x_\nu)$	t_ν
0	(0,0)	(4,4)	1/3
1	(4/3, 4/3)	(4/3, - 4/3)	1/3
2	(16/9, 8/9)	(4/9, 4/9)	1/3
3	(52/27 , 28/27)	....	....

Cette méthode comporte les avantages et les inconvénients de toutes les méthodes itératives tels que nous les avons évoqués dans les chapitres précédents. L'exemple que nous venons de développer ne pose quant à lui aucun problème d'unicité puisque la fonction objectif choisie est une fonction concave.

Optimisation sous contraintes d'égalité - Multiplicateurs de Lagrange

Soit à résoudre le problème d'optimisation suivant :

$$\text{Max} \, f(\vec{x}) \qquad n \geqslant m$$
$$|g_j(\vec{x}) = b_j \qquad j = 1, \ldots m$$

que l'on peut réécrire sous une forme vectorielle :

$$\text{Max} \, f(\vec{x})$$
$$|\vec{g}(\vec{x}) = \vec{b}$$

où g représente une application de $\mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^m$ et $\vec{b}$ un vecteur de $\mathbb{R}^m$. L'idée qui vient immédiatement à l'esprit consiste à tenter de se ramener à un problème sans contraintes en exprimant certaines variables en fonction de $n - m$ variables libres à l'aide des m contraintes d'égalité. Cette démarche est directement fondée sur le *théorème des fonctions implicites;* l'application de ce théorème en un point $\vec{x}^*$, maximum local, permet (sous les bonnes hypothèses) de trouver des considérations nécessaires d'optimalité qui généralisent donc celles que nous avons rencontrées dans le paragraphe consacré à la méthode directe : le développement de cette méthode aboutit à définir des coefficients réels $\lambda_1, \ldots, \lambda_m$ (ou un vecteur $\vec{\lambda}$ de $\mathbb{R}^m$) pour chaque contrainte, que l'on appelle *multiplicateurs de Lagrange*, et à introduire une fonction nouvelle : $L(x_1, \ldots, x_n, \lambda_1, \ldots, \lambda_m)$ notée $L(\vec{x}, \vec{\lambda})$,

définie par : $L(\vec{x}, \vec{\lambda}) = f(\vec{x}) - \sum_{j=1}^{m} \lambda_j \left[g_j(\vec{x}) - \vec{b}_j\right]$

ou mieux : $L(\vec{x}, \vec{\lambda}) = f(\vec{x}) - \vec{\lambda} \cdot (g(\vec{x}) - \vec{b})$.

La condition nécessaire d'optimalité s'exprime en écrivant que $\vec{x}^*$ doit satisfaire les contraintes :

$$\textbf{(19)} \qquad g(\vec{x}^*) - b = 0$$

et que le gradient (par rapport à $\vec{x}$) du *lagrangien* est nul :

$$\textbf{(20)} \qquad \nabla f(x^*) - \vec{\lambda}^* \cdot \nabla g(x^*) = \vec{0}.$$

On peut regrouper les conditions **(19)** et **(20)** sous une forme plus condensée :

$$\textbf{(21)} \qquad \begin{cases} \nabla_x L(\vec{x}^*, \vec{\lambda}^*) = \vec{0}. \\ \nabla_\lambda L(\vec{x}^*, \vec{\lambda}^*) = \vec{0}. \end{cases}$$

Il s'agit d'un système de $n + m$ équations à $n + m$ inconnues $x_1, \ldots, x_n$ et $\lambda_1, \ldots, \lambda_m$. On notera la symétrie que ces formules accordent à $\vec{x}$ et à $\vec{\lambda}$; celle-ci traduit le fait qu'un problème d'optimisation peut se formuler dans le cadre plus général de la dualité. Nous retrouverons ce point de vue dans le chapitre *Mathématiques et science économique*.

La méthode des multiplicateurs de Lagrange, qui, répétons-le, ne fournit qu'une condition nécessaire d'optimalité, a été généralisée dans le cas de contraintes d'inégalité, c'est-à-dire pour résoudre un problème de la forme :

$$\text{Max} \, f(\vec{x})$$
$$g_j(\vec{x}) \leqslant b_j \; j = 1, \ldots, m$$
$$\vec{x}_i \geqslant 0 \qquad i = 1, \ldots, n$$

Notons la contrainte de positivité des variables. On définit alors, de manière analogue, une série de m coefficients appelés $\mu_1, \ldots, \mu_m$, appelés *multiplicateurs de Kühn et Tücker*, et qui permettent de définir un ensemble de conditions qui généralisent **(21)**.

Maximisation sous contraintes d'inégalité - Méthodes itératives

Méthode Rosen (gradient projeté)

La méthode du gradient projeté s'applique au cas où les *contraintes* sont *linéaires :*

$$\text{Max} \;\; f(\vec{x})$$
$$\vec{A}x \leqslant \vec{b}$$
$$\vec{x} \geqslant 0$$

A représente une matrice (m, n) et $\vec{b}$ un vecteur de $\mathbb{R}^n$. La méthode s'inspire des principes de la méthode du gradient adaptée à la recherche d'un optimum libre : partant d'un point réalisable $\vec{x}^0$, on « améliore » la fonction objectif en se déplaçant suivant la direction

$$\vec{d}_0 = \nabla f\ (\vec{x}_0).$$

On se déplace tant que la fonction objectif croît et tant que l'on n'atteint pas une contrainte (la *contrainte* sera dite alors *saturée*, mais il peut y en avoir plusieurs). Si l'on atteint une contrainte en un point $\vec{x}_1$, on calcule le vecteur $\nabla f\ (\vec{x}_1)$ que *l'on projette sur la ou les contraintes saturées*. La projection $\vec{d}_1$ ainsi déterminée fournit la direction du déplacement de l'itération suivante. En fait, une fois calculé le vecteur gradient $\nabla f\ (\vec{x}_0) = \vec{\delta}_\nu$, on considère uniquement sa projection sur l'ensemble des contraintes saturées en $\vec{x}_\nu$ qui « empêcherait » de prendre la direction $\vec{\delta}_\nu$: ainsi, sur la *figure* 4, en $\vec{x}_1$, si le gradient de *f* est égal à $\vec{\delta}'_1$, on ne projettera pas sur la contrainte 1, mais on gardera le déplacement $\vec{\delta}'_1$.

Certains artifices de calcul matriciel permettent, à chaque itération, de calculer explicitement le vecteur projection, c'est-à-dire la direction $\vec{d}_\nu$ à suivre pour atteindre $\vec{x}_{\nu+1}$. La linéarité des contraintes assure la convexité de l'ensemble des points admissibles.

D'autres méthodes sont couramment pratiquées pour la résolution de problèmes d'optimisation. Elles s'inspirent toutes des mêmes arguments que celle du gradient projeté. Lorsque les contraintes ne sont plus linéaires (par exemple convexes, de manière à assurer la convexité de l'ensemble des points réalisables), la recherche de directions admissibles $\vec{d}_\nu$ à partir d'un point réalisable $\vec{x}_\nu$ est beaucoup plus délicate : il est alors extrêmement malaisé de se déplacer sur des contraintes non linéaires car cela nécessite une série de calculs d'une rare complexité. Il existe principalement deux types de méthodes pour résoudre ce genre de problèmes : la méthode des directions admissibles, et celle des pénalités.

▼ ***Figure 4 :* *voir développement dans le texte*** **Méthode Rosen (gradient projeté).**

Méthode des directions admissibles (Zoutendijk)

Si, lors d'une itération, on se trouve sur la frontière du domaine en un point $\vec{x}_\nu$, on déterminera la direction admissible $\vec{d}_\nu$ qui fait revenir à l'intérieur du domaine, c'est-à-dire que l'on ne se déplace plus selon la direction du gradient $\nabla f\ (\vec{x}_\nu)$ mais selon une direction $\vec{d}_\nu$ qui vérifie $\nabla f\ (\vec{x}_\nu) \cdot \vec{d}_\nu > 0$, de telle façon, néanmoins, que l'on reste dans le domaine des points réalisables.

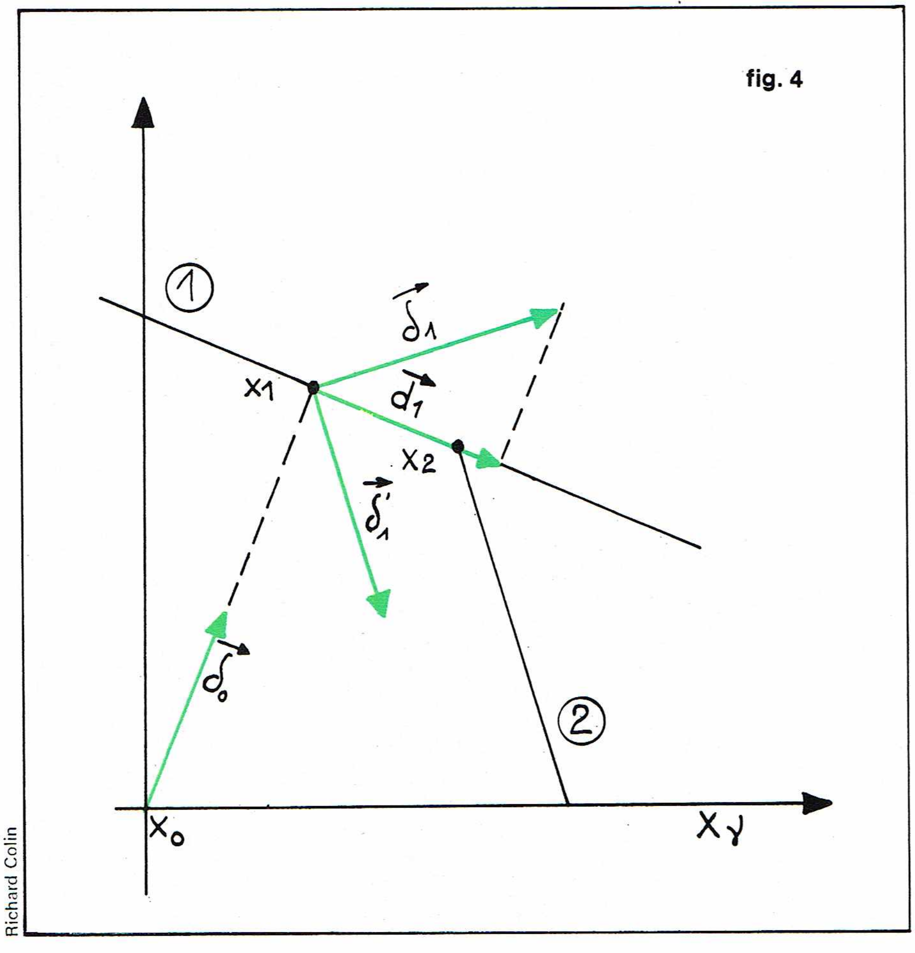

Richard Colin

Méthode des pénalités

La méthode des pénalités est une méthode assez largement utilisée dans la pratique. La formulation la plus courante semble en être celle de Fiacco-Mac Cormick. Sans entrer dans les détails, donnons le principe de ce genre de méthode. Soit donc un problème d'optimisation du type :

$$\textbf{(22)} \qquad \begin{array}{l} \text{Max } f\ (\vec{x}) \\ g_i\ (\vec{x}) > 0 \end{array}$$

Les contraintes de positivité des variables sont incluses dans les fonctions $g_i\ (\vec{x})$. La méthode consiste à modifier la fonction objectif d'une certaine manière, de façon à remplacer le problème initial **(22)** par une séquence de problèmes sans contraintes (que l'on peut résoudre par une méthode du type gradient) dont les solutions convergent vers l'optimum recherché. Le principe de pénalisation revient à modifier la fonction objectif en y faisant figurer les fonctions qui définissent les contraintes de telle sorte que l'on soit « fortement pénalisé » si l'on s'aventure en dehors du domaine réalisable

$$P = \{\vec{x} / g_i\ (\vec{x}) \geqslant 0\}.$$

Considérons par exemple la fonction de pénalité définie par :

$$\Phi\ (y) = \begin{cases} 0 & y \geqslant 0 \\ -\infty & y < 0 \end{cases}$$

On modifie alors la fonction objectif de la manière suivante :

$$\Psi\ (x) = f\ (x) + \sum_{j=1}^{m} \Phi\ [g_j\ (\vec{x})]$$

Si l'on cherche à minimiser *sans contraintes* la fonction Ψ, on a de fortes chances de rester dans le domaine P : si l'un des $g_j\ (\vec{x})$ devient < 0, alors $\Phi\ [g_j\ (\vec{x})]$ devient $-\infty$ et la violation d'une contrainte est de ce fait fortement pénalisée. Il serait prématuré de crier victoire et de croire que l'on peut ainsi remplacer tout problème d'optimisation *avec contraintes* par un problème *sans contraintes*. En effet la fonction Ψ n'est pas continue puisque la fonction Φ ne l'est point. Impossible donc d'utiliser une méthode de gradient, car, dès que l'on atteint une contrainte, on ne peut plus calculer le gradient. On est donc tenu de choisir une fonction de pénalisation continue; par exemple :

$$\Phi\ (y) = \begin{cases} 0 & y \geqslant 0 \\ -y^2 & y < 0 \end{cases}$$

Mais dans ce cas, on peut s'attendre à ce que certaines contraintes soient violées car la « pénalisation » n'est pas suffisamment forte. Pour éviter donc le plus grand nombre de ces violations, on pondère largement par un coefficient K > 0 en posant :

$$\textbf{(23)} \quad \text{Max} \left[f\ (\vec{x}) + \text{K} \sum_{j=i}^{m} \Phi\ [g_j\ (\vec{x})] \right] = \underset{\vec{x}}{\text{Max}}\, \Psi\ (\vec{x}, \text{K}).$$

La méthode consiste à résoudre le problème **(23)** pour différentes valeurs de K : on considère une suite décroissante : $K_0 > K_1 > ... > K_\nu > K_{\nu+1}$;

soit $\vec{x}^*\ (K_0)$, $\vec{x}^*\ (K_1)$, ..., $x^*\ (K_\nu)$ les solutions correspondantes du problème **(23)**. La présence de la pénalisation nous assure que tous ces points sont intérieurs au domaine P. Il reste à espérer que la suite $\vec{x}^*\ (K_\nu)$ converge vers la solution $\vec{x}^*$ du problème initial **(22)**.

$$\lim_{\nu \to \infty} x^*\ (K_\nu) = x^* ?$$

$$\lim_{\nu \to \infty} \Psi\ [x^*\ (K_\nu)] = f\ (\vec{x}^*) ?$$

Cette convergence est réalisée si, entre autres, les fonctions *f*, g_j et Φ vérifient certaines hypothèses de convexité et de différentiabilité.

Approximation - Interpolation

Les fonctions les plus connues et les plus utilisées dans les calculs sont celles qui sont données de manière analytique et qui peuvent être calculées par des ordinateurs à l'aide des opérations élémentaires préprogrammées.

Ainsi en est-il de la fonction polynôme (de degré n) :

(24) $\pi_n(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots a_nx^n$

des fonctions rationnelles de la forme :

(25) $$R^n(x) = \frac{a_0 + a_1x + \dots a_nx^n}{b_0 + b_1x + \dots b_nx^n}$$

ou encore des polynômes trigonométriques :

(25') $$T_n(x) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{k=1}^{n}(a_k \cos kx + b_k \sin kx).$$

Il arrive que, dans la pratique, l'on se trouve en présence de fonctions que l'on ne peut exprimer sous forme analytique de manière simple et opérationnelle. Il arrive aussi que l'on ne connaisse la fonction que par les valeurs qu'elle prend en un nombre déterminé de points $x_1, \dots, x_n$. Ces valeurs sont données dans un tableau **(26)** du type :

x_1	$y_1 = f(x_1)$
x_2	$y_2 = f(x_2)$
⋮	⋮
x_i	$y_i = f(x_i)$
⋮	⋮
x_n	$y_n = f(x_n)$
⋮	⋮
x_{n+1}	$y_{n+1} = f(x_{n+1})$

Si l'on souhaite calculer la valeur prise par la fonction en un point $x \neq x_i$, il faudra se contenter d'une valeur approchée. Pour cela on cherchera à remplacer la fonction f par une fonction connue aisément calculable, un polynôme $\pi_m(x)$. On pourrait tout aussi bien chercher des fonctions du type **(25)** ou **(25')**. Le tout est de choisir un polynôme $\pi_m(x)$ de telle sorte qu'il ne soit pas trop « différent » (dans un sens à préciser) de la fonction f. A cet égard, on peut envisager deux types de méthodes : l'approximation et l'interpolation.

L'approximation

Nous avons eu déjà l'occasion de rencontrer (voir *Analyse des données*) un exemple d'approximation : la *régression linéaire*. Plus généralement, on peut chercher à « approcher » les points (x_i, y_i) par une courbe du 2ᵉ, 3ᵉ ou m-ième degré (*fig.* 5). Il s'agira donc de déterminer le polynôme $\pi_m^*(x) = a_0^* + a_1^*x + \dots a_m^*x^m$ qui minimise la distance euclidienne $\sum_{i=1}^{n}[y_i - \pi_m(x_i)]^2$.

Appelons $\Phi(a_1, a_2, \dots, a_m)$ cette expression ; le problème revient donc à résoudre le problème d'optimisation :

$$\min_{a_1, \dots a_m \in \mathbb{R}^m} \Phi(a_1, a_2, \dots, a_m).$$

On se trouve donc en présence d'un problème sans contraintes que l'on résoudra en usant des méthodes décrites dans le chapitre précédent.

L'interpolation

Étant donné un tableau tel que **(26)**, on cherche à trouver un polynôme $\pi_m(x)$ tel que :

$$\pi_m(x_i) = f(x_i) \qquad \forall i = 1, \dots, n$$

Autrement dit, il s'agit de faire passer la courbe de la fonction $\pi_m(x)$ par tous les points (x_i, y_i) [*fig.* 6] :

Il est possible de démontrer que le polynôme de plus bas degré passant par $n + 1$ points est, au plus, de degré n. Nous allons donner la *formule d'interpolation de Newton*.

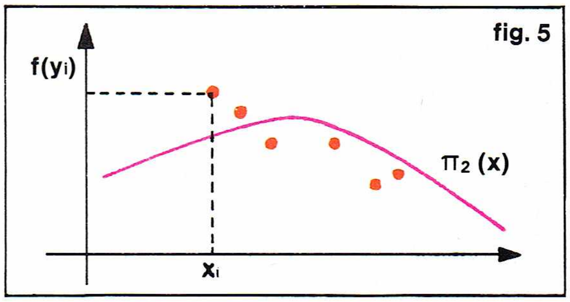

Richard Colin

◄ ***Figure 5 ;*** *l'approximation : courbe de la fonction $\pi_2(x)$.*

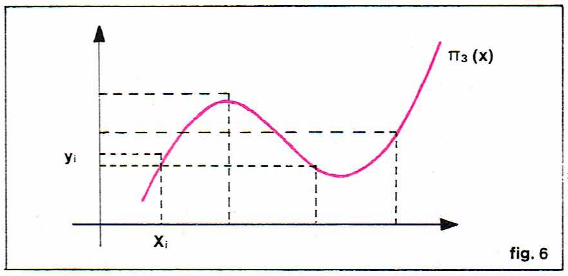

Richard Colin

◄ ***Figure 6 ;*** *l'interpolation : courbe de la fonction $\pi_3(x)$.*

Pour cela, il nous faut introduire quelques notions liminaires.

Dérivées discrètes d'ordre h

Étant donné deux points du tableau x_i, x_{i+1}, nous définirons la *dérivée discrète du premier ordre* $f[x_i, x_{i+1}]$ par la formule :

$$f[x_i, x_{i+1}] = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{x_{i+1} - x_i}$$

Étant donné maintenant 3 points x_{i-1}, x_i, x_{i+1}, nous définirons la *dérivée discrète du deuxième ordre*

$$f[x_{i-1}, x_i, x_{i+1}]$$

▼ ***Le calculateur scientifique du centre de calcul analogique de la faculté des sciences d'Orsay (France).***

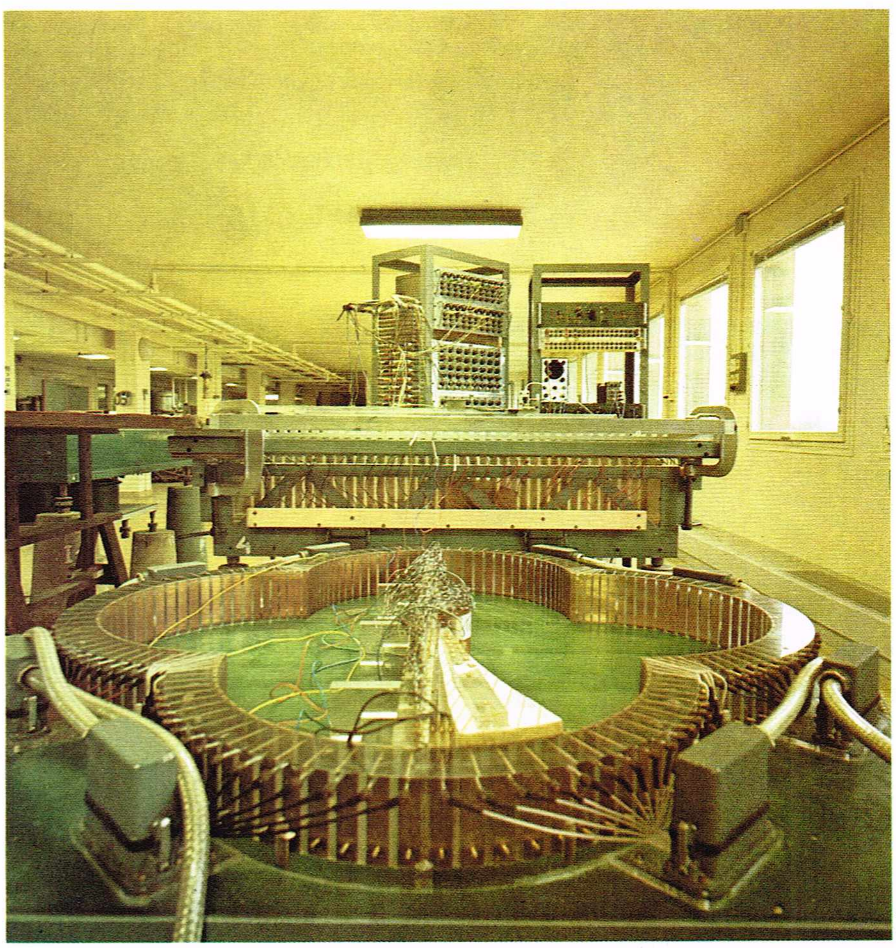

Parimage

de la manière suivante :

$$f\,[x_{i-1}, x_i, x_{i+1}] = \frac{f\,[x_{i+1}, x_i] - f\,[x_i, x_{i-1}]}{x_{i+1} - x_i}$$

Plus généralement, étant donné $k + 1$ points

$$(x_i, x_{i+1}, \ldots, x_{i+k+1})$$

on appellera *dérivée discrète d'ordre k* l'expression :

$$f\,[x_i, x_{i+1}, \ldots, x_{i+k+1}] = \frac{f\,[x_{i+1}, \ldots, x_{i+k+1}] - f\,[x_i, \ldots, x_{i+k}]}{x_{i+k+1} - x_i}$$

Formule d'interpolation de Newton

Considérons la dérivée discrète première sur l'intervalle $[x, x_1]$: $f(x) = f(x_1) + (x - x_1)\,f\,[x_1, x]$; on peut remplacer $f\,[x_1, x]$ par $f\,[x_2, x_1] + (x - x_2)\,f\,[x_1, x_2, x]$; en continuant ainsi le procédé, on obtient l'égalité :

$$f(x) = f(x_1) + (x - x_1)\,f\,[x_1, x_2] + (x - x_1)(x - x_2)\,f\,[x_1, x_2, x_3] + \ldots + \ldots (x - x_1) \ldots (x - x_n)\,f\,[x_1, \ldots, x_{n+1}] + \mathrm{E}(x)$$

où $\mathrm{E}(x)$ est le reste qui est égal à

$$(x - x_1) \ldots (x - x_{n+1})\,f\,[x_1, \ldots, x_{n+1}, x].$$

Ainsi donc, on peut écrire la formule d'interpolation de Newton :

$$\pi_n(x) = f(x_1) + (x - x_1)\,f\,[x_1, x_2] + \ldots + (x - x_1) \ldots (x - x_m)\,f\,[x_1, \ldots, x_{n+1}]$$

$\pi_n(x)$ est un polynôme de degré n qui passe par les $n + 1$ points (x_i, y_i). La procédure de calcul du polynôme $\pi_n(x)$ se simplifie notablement lorsque les points x_i sont répartis selon des intervalles réguliers sur $[a, b]$:

$$x_2 - x_1 = x_3 - x_2 = \ldots = x_{n+1} - x_n = k.$$

On peut définir alors la différence finie du premier ordre Δy_i par :

$$\Delta y_i = y_i - y_{i-1} = f(x_i) - f(x_{i-1})\,;$$

et à l'ordre n :

$$\Delta^n y_i = \Delta^{n-1} y_i - \Delta^{n-1} y_{i-1}.$$

La formule de Newton s'écrit alors, en partant du point (x_{n+1}, y_{n+1}) :

$$\pi_n(x) = y_{n+1} + (x - x_{n+1})\frac{\Delta y_{n+1}}{k} + (x - x_{n+1})(x - x_n)\frac{\Delta^2 y_{n+1}}{2!\,k^2} + \ldots + (x - x_{n+1}) \ldots (x - x_2)\frac{\Delta^n y_{n+1}}{n!\,k^n} \qquad (27)$$

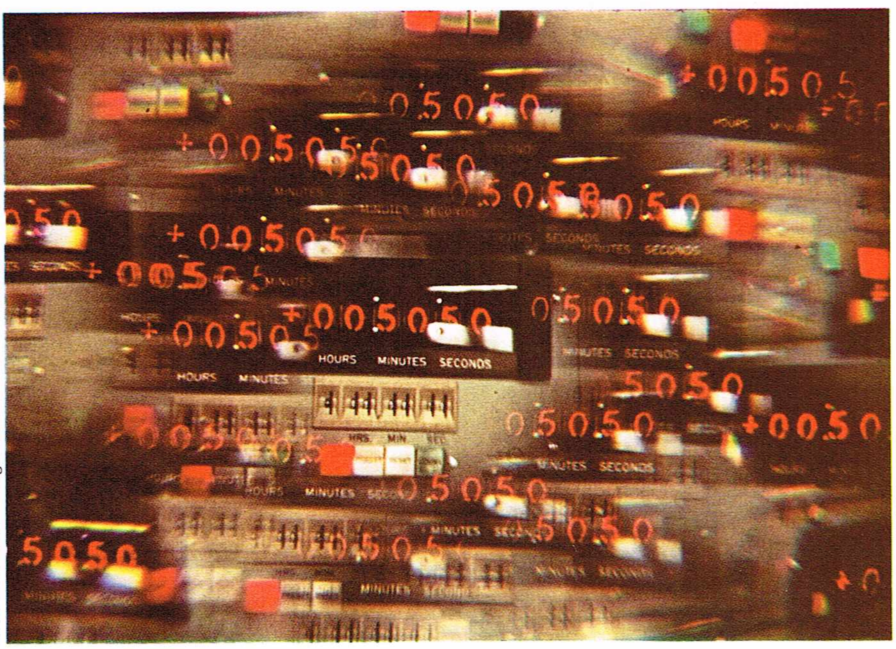

Erich Hartmann - Magnum

Applications au calcul d'intégrales

Les méthodes d'interpolation et d'approximation que l'on vient d'étudier dans les paragraphes précédents sont d'une grande importance dans le calcul numérique des intégrales définies. Soit donc une fonction $f(x)$ donnée sous forme analytique, dont on ne connaît pas de primitives mais dont on souhaite calculer l'intégrale sur un intervalle $[a, b]$ $(a > -\infty, b < +\infty)$

$$\mathrm{I} = \int_a^b f(x)\,dx.$$

On peut chercher une valeur approchée de I : pour cela, on découpe l'intervalle $[a, b]$ selon n intervalles égaux $[x_i, x_{i+1}]$ tels que $x_{i+1} = x_{i+k}$

$$x_1 = a, \ldots, x_{n+1} = b \qquad k = \frac{b - a}{(n + 1)}$$

La méthode consiste à choisir une bonne interpolation $\tilde{f}$ de la fonction f sur $[a, b]$ et à prendre comme valeur approchée de I la somme :

$$\int_a^b f(x)\,dx \simeq \sum_{i=1}^{n} \int_{x_i}^{x_{i+1}} \tilde{f}(x)\,dx.$$

Par exemple on pourra prendre pour fonction $\tilde{f}$ le polynôme $\pi_n(x)$ donné par la formule **(27)**. L'on obtient ainsi :

$$\int_{x_i}^{x_{i+1}} f(x)\,dx = \int_{x_i}^{x_{i+1}} \left[f(b) + \frac{(x - b)}{k}\Delta f(b) + \frac{(x - b)(x - x_n)}{2!\,k^2}\Delta^2 f(b) + \ldots + \frac{\ldots (x - b)(x - x_n)(\ldots)(x - x_2)}{n!\,k^n}\Delta^n f(b) \right] + \int_{x_{i-1}}^{x_i} \mathrm{E}^n(x)\,dx.$$

Si l'on pose $x = b + \alpha k$ $(\alpha < 0)$,

$$\int_{x_i}^{x_{i+1}} f(x)\,dx = \left[f(b) + \frac{\alpha^2}{2}\Delta f(b) + \frac{\alpha^2}{12}(2\alpha + 3)\Delta^2 f(b) + \ldots \right]_{i-(n+1)}^{i-n} + \frac{k^{n+2}}{(n+1)!}\int_{i-(n+1)}^{i-n} \alpha(\alpha + 1) + \ldots (\alpha + n)\,f^{(n+1)}(\xi)\,d\alpha$$

Cette formule est connue sous le nom de *formule de Newton-Cotes*. On peut l'établir d'une manière plus générale en calculant les coefficients du polynôme en un point quelconque du découpage $(x_j, f(x_j))$. Cette formule permet également de connaître une majoration de l'erreur commise grâce à la donnée du dernier terme.

Intégration des équations différentielles

Position du problème

Un des problèmes les plus couramment traités en calcul numérique est la résolution d'équations différentielles du type :

$$\left[\frac{dx}{dt} = \dot{x}(t) = f\,[x(t), t]\right] \qquad (28)$$

$$x(t_0) = x_0$$

Les conditions d'existence et d'unicité d'une solution $x^*(t)$ de ce type d'équation ont déjà été présentées et sont connues (voir *Analyse*). Il arrive fréquemment que l'équation différentielle **(28)** ne relève pas d'un type connu (linéaire, de Riccati, etc.). L'on ne possède donc aucune formule analytique permettant d'en obtenir la solution. L'on cherche alors une solution approchée de l'équation ; différentes méthodes de résolution existent ainsi qui, toutes, sont fondées sur le principe suivant : on commence par « discrétiser » l'intervalle $[t_0, t]$ sur lequel on veut intégrer l'équation **(28)** en le subdivisant en N intervalles de longueur $h = \dfrac{t - t_0}{\mathrm{N}}$ au moyen

de N + 1 points intermédiaires $t_0, t_1, \ldots$ avec $t_i = t_{i-1} + h$ et $t_N = t$.

On cherche à attribuer à tous ces points une suite de (N + 1) valeurs $\tilde{x}_0, \tilde{x}_1, \ldots, \tilde{x}_N$ qui constituent des approximations des valeurs prises par la solution $x^*(t)$ de l'équation **(28)**. On obtient ainsi un tableau **(29)** des valeurs approchées :

$$\textbf{(29)} \qquad \begin{matrix} t_0 & \tilde{x}_0 \\ t_1 & \tilde{x}_1 \\ \vdots & \vdots \\ t_N & \tilde{x}_N \end{matrix}$$

Toutes les méthodes consistent à déterminer la valeur $\tilde{x}_{n+1}$ à partir des valeurs $\tilde{x}_0, \ldots, \tilde{x}_n$ grâce à une relation du type :

$$\tilde{x}_{n+1} = F(\tilde{x}_0, \tilde{x}_1, \ldots, \tilde{x}_{n+1};\ n, f).$$

La méthode sera dite implicite si F ne dépend pas de $\tilde{x}_{n+1}$: $\tilde{x}_{n+1} = F(\tilde{x}_0, \tilde{x}_1, \ldots, \tilde{x}_n, n, f)$; elle sera dite explicite dans le cas contraire. Les méthodes diffèrent dans le choix de la fonction F. Cette fonction ne peut être choisie de manière arbitraire : elle doit satisfaire notamment certaines conditions de *compatibilité* avec l'équation **(28)** et de *convergence*.

Conditions de compatibilité

Les valeurs approchées $(\tilde{x}_0, x_1, \tilde{x}_N)$ ne coïncident pas en général avec les valeurs théoriques exactes

$$(x_0^*, \ldots, x_N^*) \qquad [x_n^* = x^*(t_n)]$$

et donc la quantité $l_{n+1} = x_{n+1}^* - F(x_0^*, x_1^*, \ldots, x_n^*)$ est $\neq 0$. Le rapport $\tau_{n+1} = \dfrac{l_{n+1}}{h}$ sera appelé *erreur de troncature locale à la* $(m+1)$*-ième étape*. Une méthode sera dite compatible avec l'équation différentielle **(28)** si elle satisfait aux conditions :

(a) $F(\tilde{x}_0, \tilde{x}_1, \ldots, \tilde{x}_{n+1};\ n, 0) = 0$

(b) $|F(\tilde{x}_0, \ldots, \tilde{x}_{nM};\ n, f) - F(\tilde{x}'_0, \ldots, \tilde{x}'_{n+1};\ n, f)| \leqslant C \sum_{i=0}^{n+1} |\tilde{x}_i - \tilde{x}'_i|\ ;\ C > 0$

(c) $\lim_{h \to 0} \tau = 0$ où $\tau = \max_{1 \leqslant i \leqslant N+1} |\tau_i|$

La qualité τ mesure l'*erreur de troncature de la méthode ;* elle mesure la qualité de l'approximation choisie. Il est certain que, dans le cas général, ni τ_{n+1}, ni l_{n+1} ne sont donnés sous forme analytique. L'on ne peut en connaître que des majorations qui permettent cependant d'établir la condition **(c)**.

Conditions de convergence

Soit une approximation du type **(29)** de la solution. On appellera *erreur absolue* à l'étape $(n+1)$-ième la quantité : $e_{n+1} = x_{n+1} - x_{n+1}$ $\quad n = 0, \ldots, N-1$.

Il est clair que l'erreur absolue dépend avant tout de l'erreur de troncature à l'étape $(n+1)$. Que la méthode soit compatible ne signifie par pour autant que :

$$\textbf{(30)} \qquad \lim_{h \to 0} e = 0 \quad \text{avec} \quad e = \max_{0 < i < N} |e_i|.$$

En effet, l'erreur d'approximation commise à l'étape n se propage à l'étape $n+1$; aussi l'on peut avoir simultanément :

$$\lim_{h \to 0} \tau = U \qquad \lim_{h \to 0} l = +\infty.$$

Dans un tel cas, la méthode sera dite divergente. Elle sera convergente si la condition **(30)** est réalisée.

Méthodes multisteps

Les méthodes multisteps font appel à des fonctions F linéaires, c'est-à-dire de la forme :

$$\textbf{(31)} \qquad \tilde{x}_{n+1} = \sum_{i=0}^{r} a_i \tilde{x}_{n-i} + h \sum_{i=1}^{r} b_i f_{n-i}$$

où a_i et b_i sont des coefficients réels et

$$f_{n-i} = f(\tilde{x}_{n-i}, t_{n-i}).$$

On démontre que les méthodes multisteps sont *compatibles* et *convergentes*.

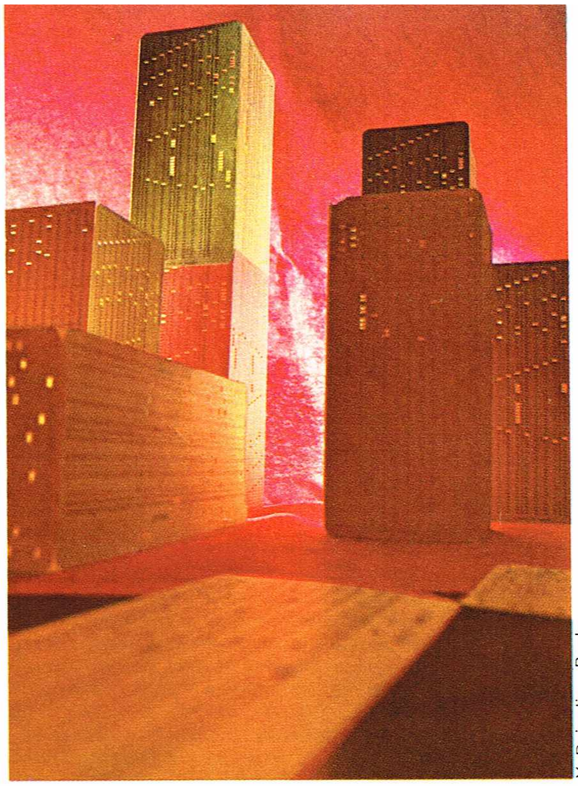

Y. Dejardin - Rapho

La **méthode « one step »** dite **méthode d'Euler** est la plus connue et la plus simple :

$$\tilde{x}_{n+1} = \tilde{x}_n + hf(\tilde{x}_n, t_n).$$

Écrite sous la forme :

$$\frac{\Delta \tilde{x}_{n+1}}{h} = f(\tilde{x}_n, t_n)$$

cette égalité n'est autre que la « discrétisation » de l'équation différentielle **(28)** (c'est-à-dire que l'on remplace la dérivée $\dfrac{dx}{dt}$ par la dérivée discrète $\dfrac{\Delta y_{n+1}}{n}$). Dans la définition des méthodes multisteps plus générales, on fait intervenir les valeurs prises lors des n étapes précédentes. On obtient alors les coefficients a_i et b_i de la formule **(31)** en écrivant la formule de Newton-Cotes. On peut en effet écrire l'équation différentielle **(28)** sous forme intégrale :

$$\textbf{(32)} \qquad x(t) = x(t_0) + \int_{t_0}^{t} f[x(\tau), \tau]\, d\tau$$

La **méthode de « différence centrale »** :

$$\tilde{x}_{n+1} = \tilde{x}_{n-1} + 2^h f_n$$

La **méthode d'Adams** :

$$\tilde{x}_{n+1} = \tilde{x}_n + \frac{h}{24}[55 f_n - 59 f_{n-1} + 37 f_{n-2} - 9 f_{n-3}]$$

Une **méthode du quatrième ordre** :

$$\tilde{x}_{n+1} = \tilde{x}_n + \frac{h}{2-4}(9 f_{n+1} + 19 f_n - 5 f_{n-1} + f_{n-2})$$

Notons que cette dernière méthode est une méthode implicite puisque f_{n+0} dépend de $\tilde{x}_{n+1}$. Il existe encore d'autres méthodes multisteps.

La **méthode d'Adams-Brashforth** est une combinaison de la méthode d'Adams et de la méthode du quatrième ordre que l'on vient de donner. Il existe encore d'autres méthodes multisteps.

En dehors des méthodes multisteps, mentionnons la **méthode** dite **de Runge-Kutta** dont le principe consiste à approximer la valeur prise par la dérivée en $\tilde{x}_{n+1}$ par un développement de Taylor de la fonction f en $\tilde{x}_n$. L'ordre de ce développement peut être aussi élevé que l'on souhaite ; sous certaines conditions, cette méthode est une méthode convergente.

BIBLIOGRAPHIE

ABADIE J., *Non Linear Programming*, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1967. - DEMIDOVITCH B. et MARON I., *Éléments du calcul numérique*, Éditions Mir, Moscou, 1973. - FIACCO et Mc CORMICK, *Non Linear Programming*, John Viley and Sons, New York, 1968. - SEGALEN et JOUVENT, *la Programmation non linéaire*, Dunod, Paris, 1971.

LOGIQUE

Le terme « logique » est un des plus multivoques que la tradition philosophique nous ait légués. Il n'est guère plus précis que « métaphysique » ou « morale ». C'est pourquoi l'on est souvent tenté de le préciser soit en l'attribuant à quelque auteur de système, comme lorsqu'on parle de la logique d'Aristote, de la logique de Kant, ou de la logique de Hegel, voire de la logique de Husserl, soit en indiquant de quel type de logique il s'agit, comme lorsqu'on dit « logique modale », « logique intuitionniste », ou « logique plurivalente », etc.

Notre terme s'appliquait donc à des matières aussi diverses, parfois même franchement hétérogènes. Mais aujourd'hui on l'applique à une discipline qui est un genre de mathématique, et à travers elle, à un objet qui n'est précisément autre que la mathématique elle-même. Autrement dit, c'est une manière de parler mathématiquement des mathématiques, mais une manière qui a des exigences propres, c'est-à-dire qu'on ne l'obtient pas par simple extension du langage mathématique à un domaine nouveau.

Mais si le sujet concerné par la « logique mathématique » n'est pas des plus faciles à définir, les logiciens mathématiciens s'y arrêtent aussi peu que les mathématiciens eux-mêmes s'arrêtent sur l'objet de la mathématique. L'accord entier est réalisé sur des techniques que les débats philosophiques, toujours ouverts, n'entament point. Car, aussi intéressantes et profondes qu'elles puissent sembler, les techniques n'exigent en réalité que des langages qui soient compatibles avec elles, ce qu'on peut satisfaire sans se lier par un langage unique. En revanche, un minimum de points sont acquis dès le départ : comme, par exemple, que la logique mathématique étudie des langues formalisées, c'est-à-dire des objets reproduisant une structure mathématique, qu'elle ne prétend par conséquent nullement refléter toute la richesse de la langue naturelle, qu'elle n'investit pas non plus les modalités du « nécessaire », du « possible » ou du « réel » sur lesquels on n'est pas encore parvenu à une clarté suffisante malgré d'énormes progrès réalisés dans les dernières discussions à ce sujet, que la logique mathématique classique admet comme un principe logique sain le principe du tiers exclu, qu'elle ne refuse pas, moyennant les précautions requises, l'usage de l'infini dans les mathématiques classiques.

Giraudon

▶ *Le système à la fois le plus ancien et le plus représentatif du sens que nous donnons aujourd'hui au terme* « logique » *est la* théorie du syllogisme *créée par le philosophe* Aristote *(384-322 av. J.-C.).*

C'est dire que la logique mathématique s'est élaborée en restreignant le domaine de ses investigations et sa curiosité aux questions qu'elle pouvait résoudre mathématiquement ; c'est par des renoncements qu'elle est devenue une discipline rigoureuse, précise, et féconde. Comment ? C'est ce que nous allons exposer.

Histoire de la logique

Chacun sait que le système à la fois le plus ancien et le plus représentatif du sens que nous donnons aujourd'hui au terme « logique » est la *théorie du syllogisme* créée par le philosophe grec Aristote qui a vécu de 384 à 322 avant J.-C. On a tenté de remonter au-delà d'Aristote pour retrouver les éléments qui auraient mis ce dernier sur la voie de sa découverte. Mais toutes les recherches effectuées dans cette direction sont demeurées indécises. Le mieux qu'elles établissent est ce que nous savons déjà : que l'art de la discussion, le souci d'en formuler les principes, d'en articuler les degrés, de préciser toujours la conclusion à laquelle on veut arriver et le point duquel on part avaient déjà conduit à isoler certains principes du raisonnement logique et à former une habitude, consciemment cultivée, du sens logique. La première trace s'en trouve déjà dans le poème de Parménide, qui nie au nom de la cohérence logique tout ce qu'Héraclite prétendait enseigner à partir de l'expérience directe, opposant ainsi ce qui est matière d'opinion et ce qui doit relever de la science. C'est le commencement d'une dialectique philosophique fondée sur une méthode rigoureuse aboutissant, en mathématiques, et en mathématiques seulement, à des conclusions définitives, grâce au même procédé que Platon désigne par l'expression « par hypothèse » (ἐξ ὑποθέσεως), et qui vise à établir un rapport purement logique entre certaines propositions.

Cependant rien ne permet de dégager de l'œuvre de Platon un système de logique aussi explicite que la théorie aristotélicienne du syllogisme. Celle-ci ne forme qu'une partie de l'œuvre logique d'Aristote qui occupe plusieurs volumes groupés sous le nom d' *« Organon »* et comprenant :

— les *Catégories* qui traitent la théorie des termes ;
— *De l'interprétation*, consacré à la théorie des propositions ;
— les *Premiers Analytiques* ou théorie du syllogisme proprement dit ;
— les *Seconds Analytiques* ou théorie de la démonstration, c'est-à-dire du raisonnement scientifique ;
— les *Topiques* ou théorie du raisonnement dialectique ;
— *la Rhétorique* ou théorie du discours à effet oratoire.

L'ordre de ces traités ne reproduit pas celui de leur genèse historique, et les titres n'en sont pas, pour la plupart, le fait d'Aristote lui-même. Par exemple, Aristote a écrit les *Catégories* (de κατηγορεῖν qui signifie : attribuer quelque chose à quelqu'un ou quelque chose) et une partie des *Topiques* avant d'avoir élaboré sa théorie du syllogisme. C'est qu'il se proposait une enquête générale sur les conditions du discours et sur la nature de l'attribution ; mais, en affirmant que toute proposition revient à un jugement qui se compose d'un sujet et d'un attribut reliés par l'intermédiaire du verbe être, il doit préciser les diverses fonctions que peuvent remplir les termes : s'ils peuvent être, d'une part, sujets ou attributs, ils désignent, d'autre part, une substance (homme, cheval), ou bien indiquent le temps, le lieu, la qualité, la relation, etc.

Les *Premiers Analytiques* donnent d'abord une définition du syllogisme ; c'est, suivant Aristote, un discours « dans lequel certaines choses étant posées, une autre en résulte nécessairement par le seul fait que celles-là sont posées ». Apparemment, cette définition implique l'idée même d'inférence correcte, sous-jacente au concept d'hypothèse selon Platon, qui visait à préciser la notion de conséquence logique. Mais en fait, elle est plus restrictive : la définition des prémisses que donnent les *Premiers Analytiques* conduit à une classification élémentaire en quatre types ; « une prémisse est une proposition qui énonce quelque chose sur quelque chose d'autre de manière affirmative ou négative » (24 A 16). Sachant que toute proposition nous dit si un attribut appartient (B appartient à tout A) ou n'appartient pas (B n'appartient à aucun A) au tout, propositions universelles affir-

matives ou négatives, on peut avoir une partie seulement du sujet (B appartient à quelque A ou n'appartient pas à quelque A) ; d'où la division des propositions qui constituent les prémisses aussi bien que la conclusion d'un syllogisme en propositions universelles, affirmatives ou négatives, et particulières, affirmatives ou négatives, symbolisées depuis les *Scholastiques* par les lettres *a, e, i, o* (*a, i* pour les propositions affirmatives [de *affirmo*] ; *e, o* pour les négatives [de *nego*]. *S*a*P* équivaut à « tous les S sont P » ; *S*i*P* à « quelques S sont P » ; *S*e*P* à « nul S n'est P » ; *S*o*P* à « non tous les S sont P ») et ayant entre elles les rapports logiques qu'illustre le fameux carré :

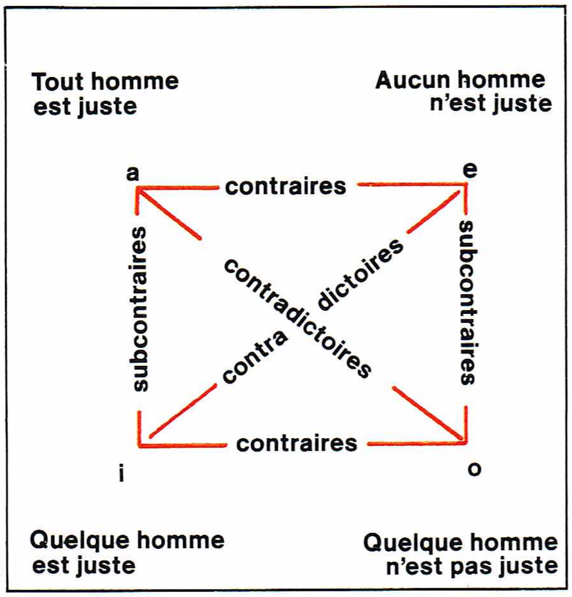

Richard Colin

L'aspect peut-être le plus important de la syllogistique d'Aristote est l'idée axiomatique qui l'anime.

Aristote part des *syllogismes* dits *de la première figure,* qui sont les plus parfaits, c'est-à-dire les plus « évidents », pour démontrer les modes d'autres figures par application de certaines règles. Par exemple, le syllogisme en Barbara de la première figure : si A est affirmé de tout B, et B de tout C, A est nécessairement affirmé de tout C est un syllogisme parfait dont la conclusion est immédiate étant donné la hiérarchie entre les termes A, B, C.

D'autre part, le *syllogisme de la deuxième figure :* si M est affirmé de tout N mais d'aucun O, O n'est affirmé d'aucun N (syllogisme en Camestres qui se réduit à Celarent) ; mais « M n'est affirmé d'aucun O » équivaut à « O n'est affirmé d'aucun M », ce qui permet de retrouver le deuxième mode de la première figure. C'est là une méthode directe de réduction d'un syllogisme concluant à un syllogisme de la première figure : mais on ne peut l'appliquer en toute circonstance.

Considérons, par exemple, le syllogisme suivant (syllogisme en Baroco réduit par voie indirecte à Barbara) : si M est affirmé de tout N, mais non de quelque O, alors N peut ne pas être affirmé de quelque O, car, dit Aristote, s'il est affirmé de tout O et si M est affirmé de tout N, alors M est affirmé de tout O, contrairement à l'hypothèse qui nous dit qu'il n'est pas affirmé de quelque O. Ce qui suppose le recours à un principe logique non explicitement posé :

$$\big((P \wedge Q) \rightarrow R\big) \leftrightarrow \big((P \wedge \neg R) \rightarrow \neg Q\big)$$

Aristote montre donc que tous les modes de toute figure se réduisent, directement ou indirectement, à ceux de la première figure. Il rassemble en tout 14 modes concluants et exclut, par la méthode du contre-exemple, toutes les autres possibilités.

La syllogistique d'Aristote montre donc à l'œuvre un esprit logique et axiomatique parfaitement conscient de ses tâches ; et c'est surtout le premier système logique qui utilise correctement des variables (de termes). Mais le champ d'application de cette logique est limité par la nature des propositions considérées ; de plus, certains principes logiques effectivement utilisés restent tout à fait implicites ; enfin, comme Aristote, dans les *Topiques* et les *Analytiques,* ne considère les propositions et les syllogismes que comme les « images » produites dans l'esprit des autres par certaines expressions verbales, il ne distingue point entre les mots et les choses, entre un nom et ce qu'il désigne.

Si Théophraste qui succède à Aristote (décédé en 322) à la tête du Lycée, n'apporte que des modifications de détail au système dont il a hérité, le premier stoïcisme, dont la formation doit beaucoup à Euclide de Mégare, dit le Socratique, et à son école, manifeste pour la logique un intérêt que le stoïcisme romain des I[er] et II[e] siècles perdra à peu près complètement, au profit de la morale. L'ancien stoïcisme, dont le centre est situé à Athènes, au III[e] siècle avant J.-C., s'est donc illustré, d'une part par les grands noms de Zénon de Cittium (336-264), de Cléanthes (331-232), de Chrysippe (280-210) à propos duquel on disait : « si les Dieux font de la dialectique, ils ne se servent pas d'une autre que de celle de Chrysippe », d'autre part par Philon, élève de Diodore, qui a défini le connecteur « si... alors » au sens extensionnel de l'implication matérielle.

On peut dire que les stoïciens, dont nous ne connaissons la doctrine que par ce que nous en ont rapporté Cicéron, Sextus Empiricus et Diogène Laërce, ont accompli une extension de la logique d'Aristote. Celui-ci utilisait « naïvement », pour prouver la validité ou l'invalidité des syllogismes, des lois logiques dont la syllogistique ne pouvait rendre compte ; pour expliciter cette base implicite il fallait une logique différente, à la fois par sa structure et par son intention. En effet, les stoïciens ne s'intéressent pas seulement à la question de savoir si un prédicat convient à un sujet, mais à des propositions susceptibles en général d'être vraies ou fausses. Il en résulte d'abord une distinction entre le signe, le sens et la dénotation : car une proposition peut être vraie ou fausse à condition de n'être pas confondue avec l'énoncé de la proposition qui n'est pas susceptible, lui, d'être vrai ou faux. Les stoïciens possédaient donc les rudiments d'une sémantique.

Ensuite, en cherchant la façon dont les propositions s'impliquent mutuellement, ils isolent les différents connecteurs propositionnels. Sextus Empiricus nous rapporte une sorte de table de vérité pour l'implication ; il nous dit qu'il y a quatre manières de combiner les éléments d'une implication : antécédent vrai et conséquent vrai, antécédent faux et conséquent vrai, antécédent vrai et conséquent faux, antécédent faux et conséquent faux ; l'implication n'étant fausse que si l'antécédent est vrai et le conséquent faux.

Enfin, les stoïciens utilisaient des *variables de proposition,* et ont développé une conception déductive de la logique des propositions. Ce qu'on peut bien voir dans les schémas d'inférence correspondant aux anapodictiques de Chrysippe, c'est-à-dire à des propositions qui n'ont pas besoin de démonstration :

(1) *Si le premier, le second*
Le premier
Donc le second

justifiant, par exemple, le célèbre raisonnement : « s'il fait jour, il fait clair ; or il fait jour, donc il fait clair ».

(2) *Si le premier, le second*
Non le second
Donc non le premier

illustré, par exemple, par « s'il fait jour, il fait clair ; or il ne fait pas clair, donc il ne fait pas jour ».

(3) *Non à la fois le premier et le second*
Or le premier
Donc non le second

par exemple : « il n'est pas vrai que Platon soit mort et vivant ; or Platon est mort, donc Platon n'est pas vivant ».

(4) *Le premier ou le second*
Or le premier
Donc non le second,

par exemple : « ou il fait jour, ou il fait nuit ; or il fait jour, donc il ne fait pas nuit ».

(5) *Le premier, ou le second*
Non le premier
Donc le second

par exemple : « ou il fait jour ou il fait nuit, or il ne fait pas jour, donc il fait nuit ».

Mais ce ne sont là que les rudiments d'un système dont on est loin de connaître tous les éléments ; suffisamment riche pourtant pour avoir éveillé un sens logique parfaitement visible dans les efforts consacrés aux antinomies logiques dont celle du menteur : l'homme qui dit « je mens », s'il dit vrai, dit faux ; et s'il dit faux, dit vrai en même temps.

Parmi les diverses spéculations médiévales on ne trouve aucune innovation qui égale le système d'Aristote ou celui des stoïciens. En revanche la philosophie logique se développe avec Abélard (1079-1142), qui inaugure le problème des universaux, marque le point de départ de la méthode de discussion scolastique vulgarisée par les fameuses disputes, distingue entre l'implication vraie en vertu de sa forme et celle qui ne peut être vérifiée sans recours aux faits, analyse la copule « est » en vue de réduire tout énoncé catégorique à un énoncé de la forme « A est B ».

Ockham, Buridan, Albert de Saxe et le Pseudo Scot ont continué cette réflexion au cours du XIV[e] siècle, en l'orientant essentiellement vers l'élaboration d'une logique de la déduction qui a abouti à un certain nombre de lois logiques correspondant à des théorèmes classiques du calcul propositionnel ; par exemple, « toute partie d'une conjonction suit la conjonction dont elle fait partie », c'est-à-dire « $A \wedge B \rightarrow A$ » et « $A \wedge B \rightarrow B$ ».

On doit convenir que la logique « moderne » a très peu contribué à la formation de ce qu'on appelle aujourd'hui la logique. *La Logique ou l'Art de penser* d'Antoine Arnauld (1612-1694) et Pierre Nicole (1625-1695) a vulgarisé la distinction entre extension et compréhension d'un concept (entre l'ensemble des objets qui tombent sous lui et l'ensemble des attributs qui le composent). Mais on peut considérer que Joachim Jung et Arnold Genlinex, le premier par son influence directe sur Leibniz, le second par l'idée qu'il a maintenue d'une logique pure, ont perpétué l'exigence qui alimentera les différents projets leibniziens.

Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) est le premier qui soit allé plus loin dans le sens d'une logique comme langue artificielle susceptible de permettre la reconstruction de toute la pensée. C'est son projet d'une *caractéristique universelle* qui donne un contenu original à l'*Ars magna* de Raymond Lulle (1233-1315), constitue un début de réalisation de l'idée cartésienne de langue universelle, et inaugure une algébrisation de la logique dont le seul défaut est d'être restée ignorée. Leibniz, en effet, n'a pas publié le plus important de son œuvre logique qui ne vit le jour qu'après la naissance de la logique mathématique proprement dite, à la fin du XIX[e] siècle. Jusque-là, on citait Leibniz davantage pour sa *théorie de la connaissance* qui donne de celle-ci le schéma suivant :

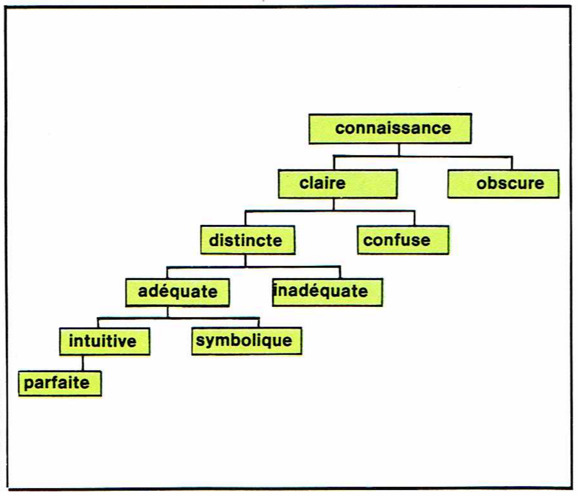

Richard Colin

▶ ***A gauche, schéma de la* théorie de la connaissance *selon Leibniz. A droite,* George Boole *(1815-1864), l'un des créateurs de l'algèbre de la logique.***

que pour ses essais logiques, bien que l'idée de connaissance symbolique ne puisse être précisée que par une connaissance entièrement fondée sur une manipulation de symboles si réglée qu'elle semble aveugle, c'est-à-dire conforme à certaines règles fixées à l'avance et appliquées automatiquement, comme dans le *calcul de l'identité algébrique* $(a + b)\ (a - b) = a^2 - b^2$, où l'on pose :

$$\begin{array}{r} a + b \\ a - b \\ \hline a^2 + ab \\ - ab - b^2 \\ \hline a^2 + 0 - b^2 \end{array}$$

Or l'idée d'établir la logique comme calcul résout l'antinomie inhérente à toute conception axiomatique de la logique puisque toute théorie axiomatique suppose déjà une logique ; les calculs au contraire n'en supposent pas.

Bernard Bolzano (1781-1848) s'adonne également à des recherches logiques d'autant plus intéressantes qu'elles sont l'œuvre d'un précurseur de la théorie des ensembles, soucieux de démonstrations mathématiques rigoureuses, purement « analytiques », ce qui signifie pour lui d'abord purement logiques. Dans son œuvre monumentale, la *Wissenschaftslehre,* ce qui retient l'attention, c'est surtout son élucidation du concept d' « analyticité » en étroite liaison avec l'idée de validité universelle. Une proposition est universellement valide suivant Bolzano si le résultat de toute substitution à un élément déterminé de cette proposition donne une proposition vraie ; elle est universellement non valide si toute substitution de ce genre donne une proposition fausse. L'analyticité d'une proposition par rapport à un de ses éléments constituants, c'est sa validité ou invalidité universelle par rapport à cet élément ; mais en un sens plus restreint, une proposition est analytique si elle est analytique eu égard à tous ses éléments constituants, à l'exclusion des « termes » logiques. Mais Bolzano ne dispose d'aucun critère pour distinguer ce qui est « logique » de ce qui ne l'est pas. En revanche, ses définitions de la non-contradiction d'un ensemble de propositions et de l'implication formelle sont toutes modernes et annoncent les méthodes d'Alfred Tarski.

La remise en chantier la plus considérable reste cependant celle de l'école anglaise, avec essentiellement George Boole (1815-1864) et Augustus de Morgan (1806-1878), créateurs de l'algèbre de la logique. Tous deux étaient attentifs aux similitudes de structure entre lois logiques et lois algébriques. Les efforts de Boole culminent dans l'axiomatisation de Huntington (1874-1952).

Le style algébrique de Boole, dont la seule différence avec Leibniz est, dit-on parfois, qu'il a publié ses travaux au contraire de celui-ci, ne prend les dimensions d'une véritable logique mathématique qu'avec l'œuvre de Richard Dedekind (1831-1916), dont le but explicite est de fonder les mathématiques sur une logique algébrique suffisamment développée pour répondre aux finesses de l'analyse. Dedekind est le seul auteur qui

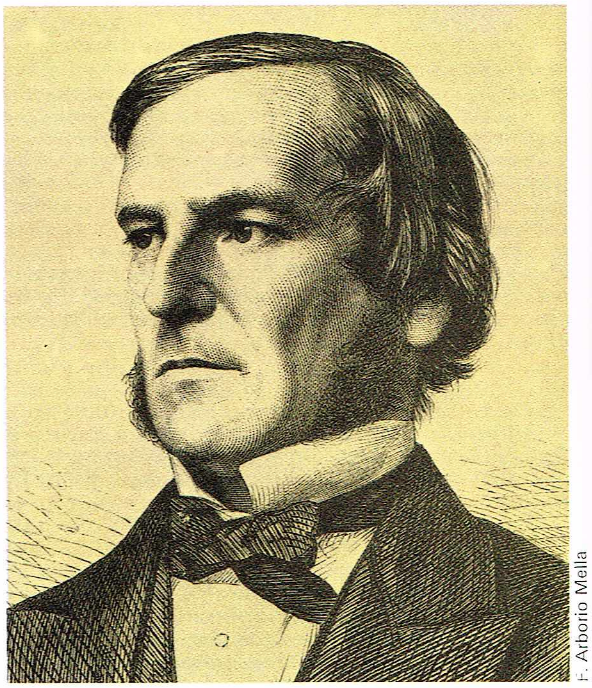
F. Arborio Mella

donne, avant l'école italienne, toute son ampleur au style algébrique en logique, et cela grâce à sa théorie des systèmes qui est une application originale de l'algèbre de la logique au problème des fondements des mathématiques, dans toute la richesse qu'il a à la fin du XIXe siècle. On peut certes dire que c'est avec Dedekind, et Golttlob Frege (1848-1925) mais d'un autre point de vue, que naît la logique mathématique moderne, comme discipline propre, *non plus orientée exclusivement sur l'algébrisation de la logique qui préoccupait Boole, mais sur l'ensemble des problèmes rencontrés en mathématique.*

L'entreprise de Frege illustre remarquablement l'extension originale qu'est en train de prendre à ce moment notre discipline. On répétera, bien sûr, que Frege a été le premier à avoir élaboré un système axiomatisé du calcul des propositions, le premier à introduire les quantificateurs et surtout à en faire un emploi cohérent, le premier à concevoir une logique du second ordre avec quantification des variables de prédicat (ou de classe), mais son originalité profonde réside dans la façon dont il a fait l'analyse de certaines propositions qu'il a pris soin de « choisir » suffisamment complexes pour ne pas devoir chercher une extension, avérée impossible, des résultats obtenus sur des propositions simples à des propositions moins simples. Ayant profité du travail d'axiomatisation de l'arithmétique élémentaire, dû surtout à Hermann Grassmann (1809-1877), et des résultats d'Ernst Schröder d'une part, de Karl Weierstrass (1815-1897) de l'autre, il a pu isoler l'élément essentiel dont la logicisation emportait d'emblée celle de l'ensemble de l'arithmétique, et, par voie de conséquence, celle de l'analyse. Il s'agit de l'*induction mathématique*, que l'empirisme régnant réduisait soit à un raisonnement par analogie, soit, directement ou indirectement, à une induction empirique. Hermann Lotze (1817-1881), dont Frege suivait les cours à l'université de Göttingen, développa une critique vigoureuse de ces vues empiristes. Mais le mérite de Frege reste entier en ce sens qu'il a constitué une logique du second ordre indispensable à l'insertion du principe d'induction dans un corps de propositions purement logiques. Cela a naturellement conduit Frege à élaborer les principes du calcul des propositions, à faire une étude du concept d'égalité, à montrer l'usage de la quantification, à déployer, enfin, en étroite connexion avec les exigences de cette dernière, une conception sémantique de la logique, c'est-à-dire une logique liée à une théorie de la vérité, la plus élaborée qu'on connaisse avant la sémantique ensembliste de Tarski. Tout cela fait évidemment de Frege, non seulement le plus grand logicien de tous les temps, le Newton de la logique mathématique dont la fécondité est suffisamment attestée aujourd'hui par le génie de Gödel et de Tarski, mais aussi le Descartes de la philosophie contemporaine, sans lequel on ne comprendrait ni Wittgenstein, ni Carnap, de même qu'il serait impossible de comprendre Malebranche ou Leibniz sans référence à Descartes.

L'œuvre monumentale de Bertrand Russell (1872-1970) et Alfred Whitehead (1861-1947), les *Principia mathematica,* a tiré le plus grand bénéfice des travaux de Frege, malgré l'absence d'influence directe. Elle combine le style frégéen à l'héritage reçu de l'école de Boole et enrichi par la grande synthèse de Schröder. L'intérêt de ce monument vient de ce qu'il fut publié après la découverte du paradoxe dit de Russell (et/ou de Cantor) sur les ensembles qui se comprennent eux-mêmes comme éléments; aussi est-il devenu la référence des travaux axés sur la question des fondements des mathématiques et marqués par une double orientation : axiomatique, celle-ci ayant permis, grâce à Hilbert, de montrer l'unité profonde de la géométrie et de l'arithmétique ensembliste, la théorie des ensembles ayant elle-même, avec Zermelo, fait sienne la méthode hilbertienne. C'est dans cette perspective, et en réponse au défi intuitionniste, que s'est formulé le fameux programme de Hilbert, par rapport auquel doivent être compris les premiers résultats de Gödel sur la complétude de la logique du premier ordre, aussi bien que sur l'incomplétude de la logique du second ordre, et par suite de l'arithmétique élémentaire.

La logique mathématique

Actuellement en logique on ne peut se passer de langages formels. L'idée d'une formalisation du langage remonte à Leibniz, mais n'a été réalisée qu'avec la *Begriffsschrift* (1879) de Frege. Non seulement la langue naturelle n'est pas assez exacte pour convenir à l'expression des données mathématiques, mais encore elle peut donner lieu à de dangereuses méprises. Mais l'idée de langage formel implique celle de son interprétation, ou de ses modèles. La *théorie des modèles,* qui n'a été constituée qu'après la découverte de la logique mathématique, permet un exposé élémentaire très clair de la logique. La notion clef en est naturellement celle de *vérité,* dont la définition fait le lien entre le langage formel et son interprétation, par l'intermédiaire des modèles; en effet, définir la vérité d'une proposition suppose donnés, non seulement la proposition elle-même, mais aussi le modèle dans lequel on interprète celle-ci (voir la définition plus loin).

Une proposition A est vraie dans un modèle $\mathcal{M}$, si dans le modèle $\mathcal{M}$ on associe la valeur « vrai » à la proposition A; $\mathcal{M}$ constitue dans ce cas un modèle de la proposition A. Sinon A est fausse dans $\mathcal{M}$ et $\mathcal{M}$ n'est pas un modèle de A. Plus généralement $\mathcal{M}$ est un modèle d'un ensemble de propositions Σ si $\mathcal{M}$ est un modèle pour toute proposition de l'ensemble Σ.

Le calcul des propositions

Cette définition de la vérité étant préalablement posée, nous pouvons présenter succinctement le langage formel le plus simple, dénommé *calcul propositionnel.* Celui-ci est l'étude d'un ensemble d'énoncés simples tels que « Jean est sorti » ou « 2 + 2 = 4 » appelés *propositions atomiques* et d'énoncés plus complexes, obtenus en composant les énoncés simples à l'aide de mots de liaison appelés les **connecteurs propositionnels** comme « et », « ou », « si... alors », etc. Au niveau le plus intuitif cet ensemble d'énoncés peut être interprété comme un « monde possible » où toute proposition est *soit vraie soit fausse,* et où la valeur de vérité de toute proposition complexe ne dépend que de la valeur de vérité des propositions simples : on exprime cette dernière propriété en disant que les **connecteurs** considérés sont **extensionnels.** « Parce que » fournit un exemple simple d'une conjonction qui ne peut donner lieu à un connecteur propositionnel. En effet, étant donné quatre propositions, toutes supposées vraies : « X est mort », « X a mangé un mets empoisonné », « Il neige », « C'est l'été », par combinaison des deux premières on obtient une proposition vraie : « X est mort parce qu'il a mangé un mets empoisonné », tandis que la combinaison des deux dernières donne une proposition fausse : « Il neige parce que c'est l'été ».

Archives I.G.D.A.

▲ **Alfred North Whitehead,** ***auteur, avec Bertrand Russell, des* Principia mathematica *; on leur doit également la construction de la logique symbolique.***

On dénombre habituellement cinq connecteurs extensionnels : un *connecteur unaire* se rapportant à une proposition unique, la *négation*, notée $\neg$, et quatre *connecteurs binaires* reliant entre elles deux propositions, la *conjonction*, la *disjonction*, le *connecteur « si... alors »* et le *« si et seulement si »*, notés respectivement $\wedge$, $\vee$, $\Rightarrow$, $\Leftrightarrow$. Ce ne sont pas les seuls possibles mais les plus courants.

On définit chacun de ces connecteurs en indiquant la valeur de vérité prise par le composé le plus simple auquel il donne lieu, en fonction des diverses combinaisons possibles de valeurs de vérité (vrai et faux) attribuées aux propositions atomiques composantes. Ainsi la négation d'une proposition est vraie exactement quand cette proposition est fausse ; la conjonction de deux propositions n'est vraie que dans le seul cas où les deux propositions sont vraies, elle est fausse si l'une des deux ou les deux sont fausses ; la disjonction de deux propositions n'est fausse que dans le seul cas où les deux propositions sont fausses, elle est vraie si l'une des deux (ou les deux) est vraie ; l'implication dite matérielle, c'est-à-dire le connecteur désigné ci-dessus par « si... alors », n'est fausse que si la proposition antécédente est vraie et la conséquente est fausse ; elle est vraie si l'antécédent et le conséquent sont vrais, si l'antécédent et le conséquent sont faux, et si l'antécédent est faux et le conséquent vrai ; « si et seulement si » est vrai si les deux propositions sont simultanément vraies ou simultanément fausses, il est faux si l'une des deux est vraie tandis que l'autre est fausse.

On notera en passant que le $\vee$ du calcul propositionnel correspond à la *disjonction inclusive* de la langue usuelle, et que l'implication matérielle est définie en désaccord total avec l'usage intuitif usuel de l'expression « implique » qui désigne généralement une sorte de *connexion nécessaire* entre deux phénomènes. Une proposition comme « si $2 + 2 = 5$, alors la Seine traverse Paris » est une proposition vraie du point de vue du calcul propositionnel, tandis qu'elle n'a pas de sens dans la langue usuelle, vu qu'il n'y a aucun rapport entre l'antécédent et le conséquent.

De manière plus *formelle*, le langage du calcul des propositions P est constitué d'abord d'un certain nombre de **symboles primitifs**, c'est-à-dire non définis, qui sont :

— les *lettres de proposition : p, q, r*, etc., en nombre infini, qui représentent les propositions atomiques ;

— les *symboles de connecteurs :* $\neg$, $\wedge$, $\vee$, $\rightarrow$, $\leftrightarrow$.

Cette liste est redondante, car pour définir P, il suffit de $\neg$ et de l'un seulement des quatre connecteurs binaires cités les trois autres pouvant s'exprimer en fonction de celui-ci et de la négation. Nous choisirons ici le couple de connecteurs ($\neg$, $\wedge$). Dans certains cas, un seul connecteur suffit pour définir P ; cela arrive lorsque ce connecteur inclut en lui-même l'idée d'une négation, par exemple la barre de Scheffer, notée p/q, qui est équivalente à $\neg\, p \vee \neg\, q$;

— les *symboles de parenthèses :* (,).

Toute suite finie de symboles pris parmi les précédents est un **mot** ; parmi les mots on distingue ceux qu'on appelle les expressions bien formées ou **formules du calcul des propositions**, définies inductivement par les règles suivantes :

— toute lettre de proposition isolée est une formule ;

— si A est une formule, ($\neg$ A) est une formule ;

— si A et B sont des formules, (A $\wedge$ B) est une formule ;

— un mot est une formule seulement s'il est obtenu par un nombre fini d'applications des trois règles précédentes.

On peut également donner une définition récursive de la notion de **formule**, fondée sur la longueur des suites finies de symboles du vocabulaire initial : un symbole isolé est une formule si et seulement si c'est une lettre de proposition.

Une suite finie A de symboles de longueur $n > 1$ est une formule si et seulement s'il existe des formules B et C de longueur inférieure à n telles que A est soit ($\neg$ B) soit (B $\wedge$ C).

En termes ensemblistes, on peut encore dire (d'une troisième façon) que l'ensemble des formules F est le plus petit sous-ensemble de P contenant les lettres de proposition et tel que s'il contient les formules A et B, il contienne aussi ($\neg$ A) et (A $\wedge$ B).

Étant donné cette définition inductive de l'ensemble des formules, l'appartenance d'une propriété à toutes les formules ne pourra être établie que par induction ; pour une propriété φ on établira :

— que toute lettre de proposition a la propriété φ ;

— que si la formule A est de la forme ($\neg$ B) et que B ait la propriété φ, alors A a la propriété φ ;

— que si A est de la forme (B $\wedge$ C) et que B et C aient la propriété φ, alors A a la propriété φ.

Sémantique formelle de P

Rappelons que nous nous plaçons dans le cadre d'une logique bivalente, c'est-à-dire précisément où il y a deux valeurs de vérité : le *vrai*, représenté par le symbole 1, et le *faux* représenté par 0. Une lettre de proposition peut avoir une de ces deux valeurs.

Soit A une formule contenant n lettres de proposition, disons : $p_1, p_2, ..., p_n$. Assigner une valeur de vérité déterminée à chacune des lettres de proposition p_i, c'est définir une fonction δ définie sur l'ensemble $\{p_1, p_2, ..., p_n\}$ et à valeurs dans $\{0, 1\}$. La valeur de vérité de A est relative à une telle assignation, appelée souvent encore distribution de valeurs de vérité sur les lettres de proposition apparaissant dans A. Plus généralement on parlera de distribution de valeurs sur les lettres de proposition du langage P et on définira récursivement la notion de valeur de A pour une distribution donnée δ :

— si A se réduit à une lettre de proposition, sa valeur de vérité est déjà connue ;

— si A est de la forme $\neg$ B, la valeur de vérité de A est l'*opposée* de celle de B (0 si B a la valeur 1, 1 si B a la valeur 0) ;

— si A est de la forme (B $\wedge$ C), sa valeur est 1 si B et C ont toutes deux la valeur 1 ; sinon c'est 0.

Une formule A est dite *tautologie* si elle a la valeur 1 pour toute distribution de valeurs de vérité sur les lettres de proposition qu'elle contient : ce qu'on note $\vdash$ A.

La valeur d'une formule A pour une distribution donnée se calcule facilement de proche en proche : partant de la valeur assignée aux lettres de proposition, on calcule progressivement la valeur des sous-formules de A, de la plus simple à la plus complexe, pour arriver enfin à A. On peut réunir sous forme de tableau les résultats indiquant la valeur de vérité de A pour toutes les distributions de valeurs possibles sur les lettres de proposition qu'elle contient ; pour n lettres on a 2^n possibilités (il faut se souvenir ici qu'on a défini une distribution de valeurs de vérité sur n lettres comme une fonction :

$$\{0, 1, 2, ..., n\} \rightarrow \{0, 1\},$$

et connaître par ailleurs le résultat élémentaire de la théorie des ensembles selon lequel l'ensemble de telles fonctions est de cardinal 2^n). Ce tableau s'appelle la **table de vérité** de A.

Par exemple, prenons pour A la formule :

$$p \wedge (\neg\, q \wedge \neg\, (p \wedge r)).$$

p q r	$\neg$q	p$\wedge$r	$\neg$(p$\wedge$r)	$\neg$q$\wedge\neg$(p$\wedge$r)	A
1 1 1	0	1	0	0	0
1 1 0	0	0	1	0	0
1 0 1	1	1	0	0	0
1 0 0	1	0	1	1	1
0 1 1	0	0	1	0	0
0 1 0	0	0	1	0	0
0 0 1	1	0	1	1	0
0 0 0	1	0	1	1	0

Richard Colin

▶ *La* table de vérité *de A.*

Ce procédé simple (devenu courant en logique essentiellement depuis les travaux de Post en 1921), quoique parfois assez long, fournit un moyen mécanique et fini pour déterminer si une formule est une tautologie : on écrit sa table de vérité et on vérifie si on trouve la valeur 1 à toutes les lignes de la table. Notons en passant qu'une

formule qui n'est pas une tautologie peut être soit une *formule neutre*, vraie pour certaines distributions de valeurs sur ses lettres de proposition, fausse pour d'autres, ainsi que c'est le cas de notre formule A précédente, soit une *antilogie* (ou *contradiction*) si elle est fausse pour toute distribution de valeurs. Notons surtout que ce procédé fournit une définition formelle très commode des connecteurs propositionnels que nous avons présentés de façon intuitive plus haut :

p	¬p	p	q	p ∧ q	p ∨ q	p ⟶ q	p ⟷ q
1	0	1	1	1	1	1	1
0	1	1	0	0	1	0	0
		0	1	0	1	1	0
		0	0	0	0	1	1

Richard Colin

Nous venons de dégager la notion cardinale de tautologie ; soulignons qu'il s'agit là d'une *notion syntaxique*, en ce sens qu'elle ne fait pas appel aux modèles. D'un point de vue *sémantique* on peut définir formellement (par induction encore une fois) l'expression « A est vraie dans un modèle $\mathcal{M}$ », en entendant par modèle simplement un sous-ensemble de P ; on notera $\mathcal{M} \models A$. Une *formule* A sera alors *valide* si elle est vraie dans tous les modèles de P.

Le **premier théorème de complétude** établit l'équivalence logique des concepts de validité et de tautologie et autorise par conséquent l'utilisation des tables de vérité pour déterminer si une formule est ou non valide. Ce premier théorème sera suivi d'un autre du même nom mais de plus large portée. Symboliquement $\vdash A$ si et seulement si $\models A$; on remarquera que le signe $\vdash$ s'emploie dans un contexte syntaxique et le signe $\models$ dans un contexte sémantique. Ce premier théorème établit en fait leur équivalence.

Définition du concept de déduction formelle

Il faut introduire d'abord dans notre langage P la **règle d'inférence** connue sous le nom de *modus ponens* qui établit que de « A » et « A → B » on peut conclure à « B ». Puis on dira que A est *déductible* d'un ensemble de formules Σ, symboliquement : $\Sigma \vdash A$, si et seulement s'il existe une suite finie $B_0, B_1, ..., B_n$ de formules telle que A soit précisément B_n et que toute formule B_i soit, ou bien un élément de l'ensemble Σ, ou bien une tautologie, ou bien obtenue par application du *modus ponens* à deux formules antérieures dans la suite. La suite $B_0, B_1, ..., B_n$ constitue une déduction de A à partir de Σ. Notons que A est déductible de l'ensemble vide si et seulement si c'est une tautologie. La propriété la plus importante de la déduction est énoncée par le **théorème de la déduction :**
si $B_0, B_1, B_2, ..., B_n \vdash A$ *alors* $B_0, B_1, B_2, ..., B_{n-1} \vdash B_n \rightarrow A$.

Le théorème de complétude élargi

Un ensemble Σ de formules est dit inconsistant si et seulement si $\Sigma \vdash A$ pour toute formule A.

Par ailleurs nous avons déjà vu que $\mathcal{M}$ est un modèle de Σ si et seulement si toute formule de Σ est vraie dans $\mathcal{M}$. Σ est dit satisfaisable si et seulement s'il a au moins un modèle. Le **théorème** suivant, le plus important du calcul des propositions, donne un critère pour déterminer quand un ensemble de formules est satisfaisable : Σ *est consistant si et seulement s'il est satisfaisable*. Comme le précédent ce théorème jette un pont entre le point de vue syntaxique et le point de vue sémantique.

Un corollaire de nature purement sémantique est connu sous le nom de **théorème de compacité :** Σ *est satisfaisable si tout sous-ensemble fini de* Σ *est satisfaisable.*

Le théorème de compacité a de nombreuses applications dont nous ne pouvons parler ici.

Le calcul des prédicats du premier ordre

Une phrase comme « tous les nombres sont plus grands que 1 » constitue dans le calcul propositionnel une proposition atomique qu'on ne cherche pas à analyser plus précisément. Nous allons maintenant présenter un langage plus riche où cette analyse sera possible ; le calcul des prédicats étudie, en effet, les expressions du type : « tous », « il y a », « quelques », etc., et ce qu'on appelle *prédicats*, ou mieux et pour les désigner par leur nom mathématique usuel aujourd'hui, les *relations* mettant en jeu un ou plusieurs individus, comme : « est rouge », « plus grand que », « appartient à », ou même « est » qui s'emploie en des sens bien différents. Les noms des individus entrant dans la relation considérée sont désignés comme des *constantes d'individu ;* le nombre des individus auxquels s'applique la relation s'appelle le *nombre de places* de la relation ou du prédicat.

Par exemple « est un homme » dans « Socrate est un homme » est un prédicat à une place ; « plus grand que » est un prédicat à deux places ; « *sept* est la somme de *trois* et *quatre* » nous donne l'exemple d'un prédicat à trois places. Plus généralement on parlera de relations à *n* places où *n* est un nombre entier positif.

Formellement les prédicats seront notés par des majuscules latines P, Q, ... et P (x) signifiera : « x a la propriété P ». L'expression « pour tout... » est appelée *quantificateur universel*, notée $\forall$; « il y a », « il existe », « quelques » sont synonymes et s'appellent *quantificateur existentiel*, noté $\exists$. « Tout x a la propriété P » sera donc noté : $\forall x\, P(x)$; « il existe un x ayant la propriété P » sera noté : $\exists x\, P(x)$. On sait que $\exists x\, P(x)$ est logiquement équivalent à $\neg\ \forall x \neg\ P(x)$, en sorte qu'on peut se limiter, pour définir formellement L, au seul symbole du quantificateur universel.

Dans les expressions « $\forall x\, P(x)$ » et « $\exists x\, P(x)$ », x s'appelle une *variable liée* ou *muette ;* ce qui signifie que le sens de l'expression n'est pas changé si on substitue partout à x, y ou toute autre minuscule latine. « $\forall x\, P(x)$ » a la même signification que « $\forall y\, P(y)$ ».

Définition formelle du langage L

Le langage L est déterminé par deux groupes de symboles : les *symboles de relation* et les *symboles de constantes d'individus*. Pour compléter la liste des symboles primitifs, il faut ajouter :

— les symboles : $x_0, x_1, x_2, ...$, appelés *variables d'individus ;*
— les *connecteurs propositionnels*, disons $\neg$ et $\wedge$;
— le *quantificateur universel* $\forall$;
— les *parenthèses gauche* et *droite* (,).

Toute suite finie de symboles pris dans cette liste est un mot de L, et on définit l'ensemble des formules ou expressions bien formées par induction, d'une manière analogue à celle déjà employée pour le calcul propositionnel :

(1) les formules atomiques sont de la forme $P(x_1, x_2, ..., x_n)$ où P est un prédicat à *n* places et les x_i des variables d'individus ;
(2) si A et B sont des formules, $(\neg A)$ et $(A \wedge B)$ sont des formules ;
(3) si x est une variable d'individu et A une formule, $\forall x\, A$ est une formule ;
(4) une suite de symboles n'est une formule que si elle est obtenue par un nombre fini d'applications des règles **(1)**, **(2)** et **(3)**.

Variables libres et variables liées

Supposons que $\forall x B$ est une sous-formule d'une formule A ; B est appelée la *portée* du quantificateur universel $\forall x$. Toute occurrence de x dans $\forall x B$ est une *occurrence liée* de x dans A. Une occurrence non liée de x dans A est une *occurrence libre*.

Soit, par exemple, dans la formule :

$$P(x, y) \rightarrow \forall x\, (\forall y\, R(x, y) \rightarrow Q(x, y))$$

La première occurrence de x est libre, les trois autres occurrences de x sont liées, les première et dernière occurrences de y sont libres, la seconde et la troisième sont liées ; la formule $\forall y\, R(x, y) \rightarrow Q(x, y)$ constitue la portée du quantificateur universel $\forall x$, et $R(x, y)$ celle du quantificateur universel $\forall y$.

Une variable est libre dans une formule A si elle y a au moins une occurrence libre dans A. Une *formule* est *close* si aucune des variables qu'elle contient n'y est libre. Une formule close est une proposition en ce sens qu'elle est soit vraie, soit fausse, tandis qu'à une *formule non close* ou *ouverte*, appelée *forme propositionnelle*, on

ne peut associer de valeur de vérité déterminée. Par exemple, dans l'arithmétique usuelle, la forme propositionnelle « $x < 5$ » est vraie pour certains entiers, fausse pour d'autres ; la proposition « $\forall x\ (x < 5)$ » est fausse et la proposition « $\exists x\ (x < 5)$ » est vraie. On aura remarqué au passage qu'il suffit de quantifier la variable libre x dans « $x < 5$ » pour transformer la forme propositionnelle en proposition, « $x < 5$ » étant vraie pour certains entiers, on dira qu'elle est *réalisable* ou *satisfaisable* dans $\mathbb{N}$. Mais elle n'est pas *valide* dans $\mathbb{N}$ puisqu'elle n'est pas vraie pour tous les éléments de $\mathbb{N}$.

Si x est une variable d'individu et z une variable ou une constante d'individu, si A est une formule quelconque, S_z^x A désigne la formule obtenue en substituant z à toutes les occurrences libres de x dans A.

Modèles

Soit X un ensemble et k un entier positif. Un k-tuple d'éléments de X est une suite ordonnée d'éléments de X ; l'ensemble de tous les k-tuples de X est noté X^k. Un prédicat P à k-places sur X est un ensemble de k-tuples formés d'éléments de X, c'est-à-dire un sous-ensemble de X^k ; on dit que les éléments de ce sous-ensemble *satisfont* P. Par exemple, si X est l'ensemble des entiers naturels, l'ensemble : $\{(x, y) \in X^2 ; x < y\}$ est une relation binaire (à 2 places) satisfaite par le couple (3,4) mais non par le couple (4,3).

Un *monde possible* ou modèle $\mathcal{M}$ du langage L se constitue d'une part d'un ensemble X, ou *univers*, non vide ; d'autre part d'une fonction $\mathfrak{I}$ qui interprète toute lettre de prédicat à k-places comme une relation à k-places sur X, et toute constante d'individu comme un élément de X ; $\mathcal{M} = (X, \mathfrak{I})$. On remarquera que la situation est beaucoup plus compliquée qu'en calcul des propositions, car ici les propositions ou formules closes énoncent quelque chose sur les *individus* du modèle considéré ; il n'est plus aussi aisé de décider si une proposition de langage L est vraie ou fausse dans tel modèle, alors qu'on disposait d'un moyen de résoudre la même question pour toute proposition du langage P et pour tout modèle de P.

Plus précisément considérons une proposition A de L et cherchons si A est vraie dans le modèle $\mathcal{M}$; si A est de la forme $\neg$ B ou encore de la forme B $\wedge$ C, il est clair que nous saurons répondre à la question si nous savons si B et C sont vraies dans $\mathcal{M}$; mais si A est de la forme $\forall x$ B, il se peut que x soit libre dans B et par conséquent B n'est plus une formule close alors que A l'était. Dans ce dernier cas cela n'a pas de sens de demander si B est vraie dans $\mathcal{M}$; tout ce que nous pouvons demander, c'est si pour chaque élément a en particulier de l'ensemble X constituant le domaine de base de $\mathcal{M}$, B est vraie ou non. Mais supposons que B soit elle-même de la forme $\forall y$ C, on retrouve la même difficulté : on ne pourra poser la question de la vérité de C que pour un couple d'éléments a, b de X. Plus généralement, si on convient de noter A $(x_0, x_1, ..., x_n)$ une formule A de L où les variables libres de A forment un sous-ensemble de $\{x_0, x_1, ..., x_n\}$, on demandera si A est vraie lorsqu'on prend le n-uplet $(a_0, a_1, ..., a_n)$ d'éléments de X pour les variables

$$x_0, x_1, ..., x_n.$$

Nous ne pouvons développer ici les moyens qui permettent de résoudre proprement cette difficulté ; ceux-ci conduiraient évidemment à une définition par induction de la relation $\mathcal{M} \models$ A, qui signifie que la proposition A est vraie dans $\mathcal{M}$ ou que $\mathcal{M}$ satisfait A ou encore que $\mathcal{M}$ est un modèle de A. Mais pour permettre une comparaison avec ce qui se passe dans le calcul propositionnel, nous pouvons présenter cette définition par récurrence dans une situation simplifiée : on considérera qu'une formule atomique est de la forme P $(a_1, a_2, ..., a_n)$ où P est une lettre de prédicat et les a_i des constantes, éléments de X. Dans ce cas :

1) $\mathcal{M} \models$ P $(a_1, a_2, ..., a_n)$ si $(a_1, a_2, ..., a_n)$ satisfait l'interprétation (P) de P dans $\mathcal{M}$;

2) $\mathcal{M} \models \neg$ B si et seulement si non $\mathcal{M} \models$ B ;

3) $\mathcal{M} \models$ B $\wedge$ C si et seulement si $\mathcal{M} \models$ B et $\mathcal{M} \models$ C ;

4) $\mathcal{M} \models \forall x$ A si et seulement si pour tout $a \in X$, $\mathcal{M} \models S_a^x$ A.

Par exemple, si X est l'ensemble des nombres naturels et P la relation $<$, on a $\mathcal{M} \models \forall x\ (P\ (6, x) \rightarrow P\ (3, x))$, mais non $\mathcal{M} \models \forall x\ (P\ (3, x) \rightarrow P\ (6, x))$. On dira que A est universellement valide si $\mathcal{M} \models$ A pour tout modèle $\mathcal{M}$ de L.

Maintenant, dans le cas où A n'est pas une proposition ou formule close, c'est-à-dire, avec la convention adoptée plus haut si A est de la forme A $(x_1, x_2, ..., x_n)$, on dira qu'elle est universellement valide si et seulement si sa clôture universelle $\forall x_1 \forall x_2 ... \forall x_n$ A $(x_1, x_2, ..., x_n)$ est valide.

Étant donné un ensemble Σ de propositions, $\mathcal{M}$ est un modèle de Σ, si et seulement si $\mathcal{M}$ est un modèle pour toute proposition appartenant à Σ. Une proposition ou un ensemble de propositions est *satisfaisable* (ou *réalisable*) si et seulement s'il a au moins un modèle.

Une proposition A est *conséquence* d'une proposition B si et seulement si tout modèle de B est aussi un modèle de A.

Il reste à définir la notion de *déduction formelle* avant de citer les théorèmes importants du calcul des prédicats : le théorème de complétude et le théorème de compacité. La situation est tout à fait analogue à celle qu'offrait le calcul des propositions. Considéré comme système formel, L se compose d'un certain nombre d'axiomes et de règles d'inférence.

Les axiomes sont de deux types :

— les axiomes propositionnels, toute tautologie T de calcul des propositions peut donner lieu à un axiome de L quand on substitue convenablement aux lettres de propositions contenues dans T des formules de L ;

— les axiomes concernant l'usage des quantificateurs ; par exemple si A et B sont des formules de L et x une variable non libre dans A, alors la formule $\forall x\ (A \rightarrow B) \rightarrow (A \rightarrow \forall x\ B)$ est un axiome logique.

Quant aux règles d'inférence, on en admet deux :

— le *modus ponens* déjà utilisé en calcul des propositions ;

— la *règle de généralisation propre* ou *calcul des prédicats :* de A on peut inférer $\forall x$ A.

Moyennant ces données, la notion de déduction est absolument la même qu'en calcul des propositions : ajoutons simplement qu'on appelle **théorème** une proposition qui se déduit des axiomes donnés, à l'aide des règles d'inférence admises. « A est un théorème » s'écrit : si Σ est un ensemble de propositions, $\Sigma \vdash$ A signifie qu'il existe une déduction (ou preuve) de A à partir des axiomes et de Σ. On écrit en général simplement $\Sigma \vdash$ A, étant naturellement sous-entendu que les axiomes font également partie des hypothèses. Σ est dit *inconsistant* si toute formule de L se déduit de Σ et *consistant* dans le cas contraire. On peut énoncer alors :

— Le **théorème de complétude de Gödel :** *toute proposition A est un théorème de L si et seulement si A est (universellement) valide. C'est-à-dire $\vdash$ A si $\models$ A.* D'où l'équivalence logique de la notion syntaxique de déduction et de la notion sémantique de conséquence.

— Le **théorème de complétude élargi :** *soit Σ un ensemble de propositions ; Σ est consistant si et seulement s'il a un modèle.*

— Le **théorème de compacité :** *un ensemble de propositions Σ a un modèle si et seulement si tout sous-ensemble fini de Σ a un modèle.*

Conclusion

Ce sont là quelques-uns des concepts fondamentaux de la logique mathématique qui connaît encore actuellement un développement des plus intenses. Elle n'a pas seulement réalisé tous les programmes logiques anciens en leur donnant l'exactitude et la concision voulues, en écartant des disciplines rigoureuses ambiguïtés et malentendus issus d'une maîtrise insuffisante des moyens d'expression, en précisant l'idée de fondement des mathématiques non seulement par l'élaboration explicite des principes utilisés le plus souvent implicitement, mais encore des concepts de déduction et de démonstration ; bref, en réalisant cette idée surgie peu à peu dans les mathématiques modernes, qu'il ne suffit pas d'accumuler des résultats, qu'il est indispensable pour une science rigoureuse de savoir où elle va et comment elle y va. Il n'est donc pas étonnant que les résultats les plus impressionnants de la logique mathématique soient des résultats négatifs : ils nous disent ce qu'il est vain de chercher et nous orientent sur ce qu'il est toujours possible, pour ainsi dire, *a priori*, de trouver.

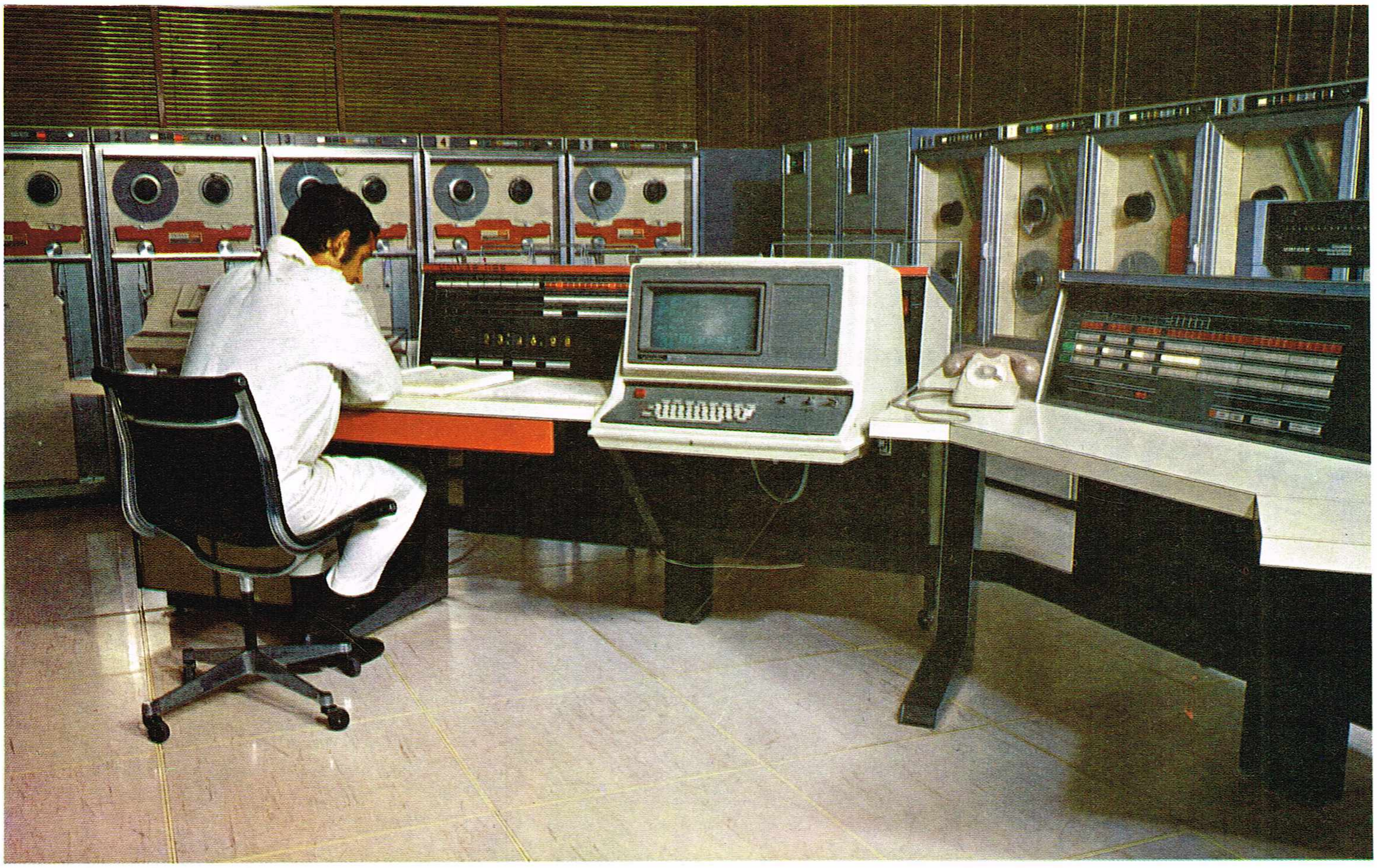

Univac

▲ *L'informatique prend une importance croissante par la généralisation de l'emploi des ordinateurs, instruments à la fois de travail et de recherche.*

INITIATION A L'INFORMATIQUE

Généralités

L'informatique, considérée comme science du traitement rationnel de l'information, support des connaissances et des communications, n'est pas une discipline très récente. Cependant, les progrès technologiques ayant permis la réalisation de machines de plus en plus complexes, l'informatique prend une importance croissante dans presque tous les secteurs d'activité, par la généralisation de l'emploi des ordinateurs, instruments à la fois de travail et de recherche.

La machine de Pascal constitue en quelque sorte le point de départ du développement des machines à calculer. Il s'agit d'une machine à roues dentées fonctionnant suivant le principe encore utilisé aujourd'hui des compteurs totalisateurs mécaniques. Chaque roue comporte dix positions, portant les chiffres de 0 à 9. Lors du passage de 9 à 0, la roue fait avancer d'une position la roue suivante. L'opération de base, sur une telle machine, est l'addition. On peut également réaliser des multiplications par additions successives portant sur les puissances de 10 successives.

Le développement de cette technique a abouti aux machines à calculer mécaniques effectuant les quatre opérations (et quelquefois des opérations plus complexes, comme l'extraction de racines carrées) et imprimant les résultats. Si les performances de telles machines représentent un grand pas en avant par rapport à la machine de Pascal, les principes de base et le mode d'emploi n'en sont pas moins les mêmes. Il faut introduire manuellement les données, et actionner les touches d'opérations dans l'ordre voulu pour obtenir le résultat. De plus, il est souvent nécessaire de noter des résultats intermédiaires, soit pour les réintroduire dans une phase ultérieure du calcul, soit pour prendre des décisions sur la façon de mener la suite du calcul.

Pour automatiser ces opérations il faut donc que le calculateur puisse stocker des résultats intermédiaires, et soit capable d'enchaîner les opérations et, éventuellement, de modifier l'enchaînement en fonction de certains résultats.

Par exemple, si on cherche les solutions réelles d'une équation du second degré,

$$ax^2 + bx + c = 0$$

on calcule d'abord : $\Delta = b^2 - 4ac$;
ensuite, si $\Delta < 0$, il faut arrêter le calcul, car dans ce cas l'équation n'a pas de solution réelle ;
si $\Delta \geqslant 0$, on peut calculer les solutions :

$$x_1 = \frac{-b - \sqrt{\Delta}}{2a}, \qquad x_2 = \frac{-b + \sqrt{\Delta}}{2a}$$

Bien entendu, il est cependant nécessaire d'introduire les données ainsi que la suite d'opérations à effectuer et les conditions dans lesquelles les effectuer.

C'est à peu près ce que réalisaient les machines mécanographiques, associées à un bloc de calcul. Ces machines étaient munies d'un bloc de commande câblé et pouvaient

▼ *La « machine arithmétique » de Pascal (Paris, musée des Arts et Métiers).*

Ciccione

effectuer des calculs et des opérations tels que des tris, en utilisant des cartes perforées comme support de l'information.

Par ailleurs, le mathématicien anglais Babbage avait, au milieu du XIXe siècle, conçu un type de machine capable de recevoir les données d'un problème et la suite d'opérations à effectuer pour arriver au résultat souhaité *(Analytical Engine)*. Certains principes se retrouvent dans les calculateurs actuels, mais la technologie entièrement mécanique de l'époque et la complexité de la machine n'en ont jamais permis la réalisation complète.

Deux éléments importants ont permis l'évolution vers les machines actuelles.

Le *premier est technologique :* le développement de l'électronique a permis la réalisation de machines de plus en plus performantes en capacité, en rapidité et en complexité.

Le *deuxième est théorique :* c'est l'introduction par *Goldstine* et *von Neumann,* en 1947, de la notion de programme enregistré.

L'idée consiste à stocker ensemble le programme et les données dans la mémoire de la machine, sans faire *a priori* de distinction sur leur nature. La distinction se fait par la façon logique de les structurer, non par la façon physique de les introduire dans la machine.

Avec l'apparition de la notion de programme enregistré, la structure générale des machines s'est à peu près fixée. La technologie et les méthodes d'utilisation des calculateurs, en particulier les moyens de communication avec la machine, continuent d'évoluer grâce aux progrès techniques d'une part, aux travaux théoriques d'autre part.

Représentation de l'information

Pour pouvoir traiter une information, il est nécessaire que cette information soit sous une forme accessible à l'organe de traitement, c'est-à-dire que cet organe puisse « comprendre » l'information. Cela suppose deux choses :

— un support physique de l'information ;

— un mode de représentation (« support logique ») sur le support physique.

Voici deux représentations différentes d'une même chose sur le même support physique (*fig.* 1) :

fig. 1

1 :

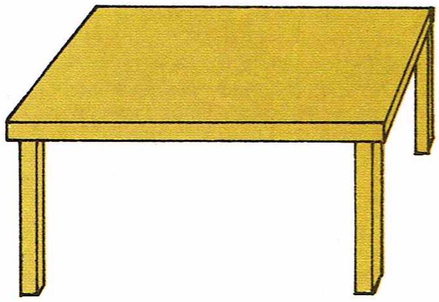

2 : **TABLE**

Richard Colin

▶ ***Figure 1 :* un exemple de deux représentations différentes d'une même chose sur le même support physique.**

Dans les deux cas, le support physique est constitué de traits d'encre sur du papier. Dans le premier cas le mode de représentation est graphique, figuratif ; dans le deuxième cas, c'est une représentation à l'aide d'un mot de la langue française.

On peut de la même façon, prendre le mot TABLE et le faire supporter par des supports physiques différents, par exemple :

— comme précédemment, on peut l'écrire ;

— on peut le prononcer et l'enregistrer à l'aide d'un magnétophone. Dans ce cas, le support physique de l'information est la bande magnétique.

Dans ce qui suit, nous allons essentiellement traiter des modes de représentation de l'information plutôt que des supports physiques.

Représentation des nombres

Les nombres sont représentés à l'aide de symboles appelés chiffres. Il existe plusieurs modes de représentation, ou systèmes de numération.

● *Les systèmes non pondérés :* chaque symbole a une valeur intrinsèque, ne dépendant pas de l'emplacement du symbole dans la représentation. C'est le cas de la numération romaine.

● *Les systèmes de position :* une pondération est introduite par la position du symbole. Une catégorie importante est constituée par les systèmes à base constante. Dans un système à base b (b est un nombre entier), on représente les nombres à l'aide de b symboles : $S_0, S_1, ..., S_{b-1}$ représentant les valeurs entières de 0 à $b - 1$. Ainsi, dans le système décimal ($b = 10$) on utilise les chiffres 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9. On représente les nombres avec ces symboles et éventuellement un point pour séparer la partie entière de la partie fractionnaire (l'usage en informatique est d'utiliser le point et non la virgule, conformément à l'écriture anglo-saxonne des nombres ; compte tenu de l'importance croissante de l'usage des ordinateurs, et pour éviter des notations multiples pouvant créer des confusions, l'utilisation du point tend à se généraliser dans les autres disciplines).

La représentation suivante :

$$a_n\, a_{n-1} \dots a_1\, a_0 \cdot a'_1\, a'_2 \dots a'_p \qquad \text{(I)}$$

désigne le nombre :

$$N = a_n\, b^n + a_{n-1}\, b^{n-1} + \dots a_1\, b + a_0 + a'_1\, b^{-1} + a'_2\, b^{-2} + \dots + a'_p\, b^{-p} \qquad \text{(II)}$$

Tous les a, a' étant des symboles pris parmi $S_0, S_1, ..., S_{b-1}$.

Pour simplifier les notations, nous avons confondu les symboles et les valeurs qu'ils représentent. (I) est une représentation symbolique, alors que (II) est une expression arithmétique. Nous verrons qu'il convient d'être prudent lorsqu'on fait ce genre de confusion (voir *Adresse symbolique*).

Passage dans une base donnée

Considérons le nombre précédent ; nous allons traiter séparément la partie entière, notée E(N) et la partie fractionnaire F(N).

Posons $N_1 = E(N)$, on a :

$$N_1 = a_n\, b^n + a_{n-1}\, b^{n-1} + \dots + a_1\, b + a_0.$$

On peut mettre b en facteur dans les n premiers termes :

$$N_1 = b\,(a_n\, b^{n-1} + a_{n-1}\, b^{n-2} + \dots + a_1) + a_0.$$
$$(\text{avec } a_0 < b)$$

Sous cette forme, on voit que a_0 est le reste de la division entière de N_1 par b, le quotient étant :

$$N_2 = a_n\, b^{n-1} + a_{n-1}\, b^{n-2} + \dots + a_1.$$

De même, a_1 est le reste de la division entière de N_2 par b.

En recommençant l'opération jusqu'à l'obtention d'un quotient nul, on obtient successivement les valeurs correspondant aux chiffres de la représentation de N dans le système à base b.

Exemple

Trouver la représentation en système octal (base 8) du nombre décimal 253

253 : 8 = 31 reste 5
31 : 8 = 3 reste 7
3 : 8 = 0 reste 3

La représentation octale est donc 375.

Posons maintenant $M_1 = F(N)$, on a $M_1 < 1$:

$$M_1 = a'_1\, b^{-1} + a'_2\, b^{-2} + \dots + a'_p\, b^{-p};$$

calculons $b \times M_1$:

$$b \times M_1 = a'_1 + a'_2\, b^{-1} + \dots + a'_p\, b^{-p+1}$$

on voit que a'_1 est la partie entière de $b \times M_1$.

Posons $M_2 = F(b \times M_1) = a'_2\, b^{-1} + \dots a'_p\, b^{-p+1}$; de même a'_2 est la partie entière de $b \times M_2$.

En continuant l'opération, on obtient les différents chiffres de la représentation de M_1 dans le système à base b. Il faut remarquer que cette représentation n'est pas toujours finie. Dans la démonstration précédente, nous avions supposé *a priori* une représentation finie. De plus une partie fractionnaire à représentation finie dans une base peut avoir une représentation infinie dans une autre.

Exemple

La fraction $F = \frac{1}{3}$ est représentée en décimal par $F = 0.3333...$ avec une infinité de 3 et par $F = 0.1$ en système à base 3.

Autre exemple

Trouver la représentation en système à base 5 du nombre décimal 0.5.

$0.5 \times 5 = 2.5$ 2 partie entière, .5 partie fractionnaire

$0.5 \times 5 = 2.5$, etc.

La représentation cherchée est donc 0.2222...

Nous venons de voir deux algorithmes (algorithme : suite d'opérations à effectuer) permettant de convertir, d'un système de numération à un autre, les parties entières et fractionnaires d'un nombre. Remarquons que dans les exemples donnés, il s'agissait de passer du système décimal à un autre système; les calculs étaient effectués en décimal, c'est-à-dire dans le système de départ. On peut également faire la conversion en effectuant les calculs dans le système d'arrivée. Il suffit alors, dans ce système, de calculer l'expression (**II**) où les a et a' désignent les chiffres de la représentation de départ et b la base de départ. Reprenons un exemple précédent à l'envers :

convertir N = 375 (OCTAL) en décimal,

$$N = 3 \times 8^2 + 7 \times 8 + 5 = 253 \text{ (DÉCIMAL)}$$

Les systèmes habituellement utilisés en informatique (voir tableau I) sont les suivants.

— *Système décimal :* utilisé essentiellement dans les opérations d'entrée de données ou de sortie de résultats car c'est le système auquel tout le monde est habitué.

— *Système binaire :* c'est dans ce système que travaillent les calculateurs électroniques.

— *Système octal.*

— *Système hexadécimal :* système à base 16. On utilise les lettres A, B, C, D, E, F, comme chiffres représentant les valeurs 10, 11, 12, 13, 14, 15.

L'intérêt des systèmes octal et hexadécimal est que la conversion du binaire dans l'un de ces systèmes et l'inverse sont immédiats. Cette propriété est d'ailleurs vraie quand deux systèmes sont tels que la base de l'un est une puissance entière de la base de l'autre.

En effet, reprenons l'expression :

$$N_1 = a_n b^n + a_{n-1} b^{n-1} + ... + a_p b^p + a_{p-1} b^{p-1} + ... + a_1 b + a_0$$

et divisons par b^p (division entière) :

$$N_1 : b^p = a_n b^{n-p} + a_{n-1} b^{n-1-p} + ... + a_p;$$

$$\text{reste} = a_{p-1} b^{p-1} + a_{p-2} b^{p-2} + ... + a_1 b + a_0$$

Les p derniers chiffres de N_1 : $a_p a_{p-1} ... a\, a_0$ représentent donc dans le système de base b la valeur du dernier chiffre dans le système de base b^p. Donc, pour passer du système à base b au système à base b^p, on groupe les chiffres par groupes de p en commençant par le chiffre des unités, et on remplace chaque groupe par le chiffre ayant même valeur dans le système de base b^p.

Le passage inverse se fait en remplaçant chaque chiffre par sa valeur exprimée sur p chiffres dans la base b.

Exemples

Passer de la représentation binaire 10110100 à la représentation octale : 10110100 → 264 (OCTAL).

Passer de la représentation hexadécimale A74 en binaire :

A → 1010, 7 → 0111, 4 → 0100 soit 101001110100.

L'octal et l'hexadécimal constituent des notations abrégées plus faciles à utiliser que le binaire, en en étant cependant très proches.

— *Système décimal codé binaire* (DCB) : il s'agit d'une représentation mixte. Le système de numération est décimal mais au lieu d'utiliser les chiffres décimaux, on les remplace par le nombre binaire exprimé sur quatre bits (**bit :** chiffre binaire, abréviation de l'anglais, **B***inary* *Dig***it**).

Exemple : 48 en décimal;

4 s'écrit 0100, 8 s'écrit 1000, 48 s'écrit 01001000.

— *Codes binaires pondérés :* en général, ils sont destinés à coder les chiffres décimaux. Ils s'expriment au moyen de 4 bits, chacun ayant un poids correspondant à sa position.

Tableau I - Représentation des premiers nombres entiers dans différents systèmes de numérotation.

Décimal	Binaire	Octal	Hexadécimal	DCB
1	1	1	1	0001
2	10	2	2	0010
3	11	3	3	0011
4	100	4	4	0100
5	101	5	5	0101
6	110	6	6	0110
7	111	7	7	0111
8	1000	10	8	1000
9	1001	11	9	1001
10	1010	12	A	0001 0000
11	1011	13	B	0001 0001
12	1100	14	C	0001 0010
13	1101	15	D	0001 0011
14	1110	16	E	0001 0100
15	1111	17	F	0001 0101
16	10000	20	10	0001 0110
17	10001	21	11	0001 0111
18	10010	22	12	0001 1000
19	10011	23	13	0001 1001
20	10100	24	14	0010 0000
21	10101	25	15	0010 0001
22	10110	26	16	0010 0010
23	10111	27	17	0010 0011
24	11000	30	18	0010 0100
25	11001	31	19	0010 0101
26	11010	32	1A	0010 0110

▲ *Tableau I :* ***les systèmes de numération habituellement utilisés en informatique.***

Exemple : le code 2421. Dans ce code 1110 représente $2 + 4 + 2 = 8$. Il faut pouvoir coder tous les nombres de 0 à 9 avec les poids disponibles (ainsi, 6211 ne permet pas de coder 5). Remarquons que le code DCB est un code pondéré particulier : code 8421.

Les codes redondants

Les parasites électriques peuvent affecter les transmissions entre organes de traitement et faire qu'un bit soit mal détecté (0 au lieu de 1, ou inversement). Dans ce cas, il existe des méthodes permettant de détecter et éventuellement de corriger les erreurs. Elles consistent à ajouter des bits supplémentaires, qui ne sont pas significatifs du point de vue de l'information considérée (ces bits sont dits « redondants »), mais permettent de vérifier s'il y a eu erreur ou non.

— *Codes à parité fixe*

On ajoute un bit, appelé bit de parité, tel que le nombre total de bits égaux à 1 soit pair (respectivement impair), si on a choisi de travailler en parité paire (respectivement impaire). Si une erreur de transmission s'est produite, portant sur un bit, un contrôle de parité nous avertit de l'erreur, car la parité a été changée.

Exemple

En DCB, 8 et 9 s'écrivent respectivement 1000 et 1001. Ajoutons un bit de parité impaire en dernière position. On obtient respectivement 10000 et 10011. Si en cours d'opération, on trouve un code tel que 10001, on sait qu'il y a erreur, car ce code n'a pas de parité impaire. Bien entendu, un tel procédé ne permet que de détecter une erreur et non de la corriger. Il ne permet pas non plus de détecter deux erreurs simultanées, car, dans ce cas, la parité reste inchangée.

Tableau II - Code de Hamming impair obtenu à partir du code DCB					
Décimal	**DCB**	**Bit n° 1 (1, 3, 5, 7)**	**Bit n° 2 (2, 3, 6, 7)**	**Bit n° 4 (4, 5, 6, 7)**	**Code de Hamming résultant**
0	0000	1	1	1	1101000
1	0001	0	0	0	0000001
2	0010	1	0	0	1000010
3	0011	0	1	1	0101011
4	0100	0	1	0	0100100
5	0101	1	0	1	1001101
6	0110	0	0	1	0001110
7	0111	1	1	0	1100111
8	1000	0	0	1	0011000
9	1001	1	1	0	1110001
Bits n°	↑↑↑↑ 3, 5, 6, 7				

▲ ***Tableau II :* type de code autocorrecteur.**

— *Codes autocorrecteurs (codes de Hamming)*

Dans le cas où une erreur peut provoquer des conséquences inacceptables, il existe un procédé de codage permettant de localiser une erreur, donc de la corriger puisque le caractère est binaire. Supposons qu'un code contienne initialement n bits. On va chercher, en ajoutant p bits de parité à ce code, à déterminer, en cas d'erreur, quel est le bit erroné. Le code obtenu comporte en tout $n + p$ bits ; l'information recherchée, en cas d'erreur, sera le numéro du bit erroné et doit être fournie par les p bits supplémentaires. On doit donc avoir $2^p \geqslant n + p + 1$.

En effet, on considère les cas suivants :

1 : Pas d'erreur.
2 : Erreur sur le premier bit.
3 : Erreur sur le second.
⋮
$n + p$: Erreur sur le $n + p - 1$-ième bit.
$n + p + 1$: Erreur sur le $n + p$-ième bit.

Soit en tout, $n + p + 1$ cas différents.

On peut donc *a priori* dresser une table du nombre minimal de bits supplémentaires, en fonction du nombre de bits du code initial :

n	1	2	3	4	5	6	...	11	12	13	...	26
p	2	3	3	3	4	4		4	5	5		5

Nous allons mettre en place un tel code, en prenant par exemple : $n = 4$ donc $p = 3$. Ces trois bits seront des bits de parité, portant chacun sur une partie seulement du code. En vérifiant la parité de chaque groupe, nous pouvons fabriquer un nombre binaire de 3 bits, chaque bit valant 0 si la parité du groupe correspondant est correcte, 1 si elle est incorrecte. Cherchons à déterminer ces groupes, de telle façon que le nombre obtenu soit le numéro du bit erroné s'il y a erreur et 000 dans le cas où le code est correct.

Écrivons les valeurs binaires correspondant aux nombres de 1 à 7 :

	c_1	c_2	c_3
1	0	0	1
2	0	1	0
3	0	1	1
4	1	0	0
5	1	0	1
6	1	1	0
7	1	1	1

On voit qu'un contrôle de parité doit porter sur le groupe 4 5 6 7, pour déterminer le bit c_1, puisque celui-ci doit être à 1 si et seulement si une erreur s'est produite dans ce groupe ; un contrôle doit porter sur 2 3 6 7 pour déterminer c_2 et sur 1 3 5 7 pour déterminer c_3. Donc, il faut un bit de parité dans chacun de ces groupes. Les bits 1, 2 et 4 ne figurent chacun que dans un groupe. Ce sont donc ceux-là que l'on va choisir comme bits de parité, les bits 3 5 6 7 représentant le code initial. Pour éviter les confusions, on attribue aux bits les numéros correspondant à leur place dans le code résultant bien que le raisonnement précédent ne repose que sur la notion de numéro attribué au bit (ainsi, on pourrait numéroter les bits dans l'ordre 7 4 6 1 5 2 3 au lieu de 1 2 3 4 5 6 7).

Le *tableau* II montre un code de Hamming impair obtenu à partir du code DCB.

On peut vérifier l'effet de correction sur un exemple :
Soit le code de 5 : 1001101
changeons un bit : 1001001
Parité 1 3 5 7 : paire. Erreur, $c_1 = 1$
Parité 2 3 6 7 : impaire. Correct, $c_2 = 0$
Parité 4 5 6 7 : paire. Erreur, $c_3 = 1$
d'où $c_1c_2c_3 = 1\ 0\ 1$, soit 5 en décimal ; c'est bien le 5e bit qui avait été changé.

Ce procédé permet donc de corriger une erreur ; cependant, s'il y a deux erreurs, il est impossible de s'en rendre compte. Pour cela, on peut ajouter un bit de parité supplémentaire portant sur la totalité des bits. En cas d'erreur double, les contrôles de parité partiels ne seront pas satisfaits, alors que le contrôle total sera satisfait.

Ces divers procédés relèvent d'une notion qui est la notion de distance dans un code. Sans préciser exactement de quoi il s'agit, disons simplement, en raisonnant de manière intuitive, que plus les messages (ou mots) possibles d'un code sont différents entre eux, plus on a de chances de pouvoir corriger des erreurs, en choisissant d'interpréter systématiquement un mot erroné comme provenant du mot qui lui ressemble le plus dans le code : on suppose en effet que les erreurs multiples susceptibles de changer complètement l'aspect du message sont beaucoup moins probables que les erreurs simples n'apportant que de légères modifications.

Nous voyons qu'il est théoriquement possible de s'affranchir des erreurs, mais en pratique on est conduit à utiliser des codages plus longs que si on était sûr de ne pas avoir d'erreurs. Ceci a des conséquences économiques non négligeables. En effet, pour une capacité donnée de stockage, transmission ou traitement de l'information, on utilise une partie de cette capacité et du temps de traitement pour faire des contrôles sur de l'information redondante. Il est donc souhaitable de chercher à réaliser du matériel assez fiable pour n'avoir à faire que des contrôles simples (par exemple, contrôle de parité), en sachant que ces contrôles couvrent pratiquement tous les risques d'erreurs pouvant subsister. Cette condition augmente évidemment les coûts d'études du matériel, mais permet de réduire le coût d'exploitation.

Éléments de logique

Physiquement, les calculateurs électroniques ne réalisent que des opérations logiques. Nous verrons que certaines conventions permettent d'effectuer certaines opérations telles que des opérations arithmétiques, à l'aide d'opérations logiques.

Une variable logique est une variable ne pouvant prendre que deux valeurs : vrai ou faux. Conventionnellement, on représente ces valeurs respectivement par 1 ou 0, mais il ne faut pas attribuer à cette représentation un sens arithmétique (on pourrait aussi bien utiliser les symboles V et F ou + et —, etc.).

Une fonction logique de variables logiques est une fonction qui, pour toute combinaison des valeurs des variables, prend soit la valeur vrai, soit la valeur faux. Soit n variables logiques indépendantes, il existe 2^n combinaisons différentes des valeurs de ces variables, puisque chacune peut prendre deux valeurs ; pour chaque combinaison, une fonction logique peut prendre deux valeurs, il existe donc 2^{2^n} fonctions logiques différentes de n variables logiques.

On peut représenter une fonction logique à l'aide d'une table de vérité, en plaçant dans une colonne les combinaisons des variables, et dans une autre les valeurs correspondantes de la fonction.

Fonctions d'une variable

Il y en a quatre différentes (*tableau* III) :

Tableau III - Fonctions d'une variable.							
F_0		F_1		F_2		F_3	
Var.	F.	Var.	F.	Var.	F.	Var.	F.
0	0	0	0	0	1	0	1
1	0	1	1	1	0	1	1

◀ ***Tableau III :** les 4 fonctions d'une variable (Var = variable, F = fonction).*

La seule intéressante est la fonction F_2, appelée complémentation. On la représente par $F_2(a) = \bar{a}$, la barre indiquant la complémentation.

Fonctions de deux variables

Il y en a 2^{2^2}, soit 16. Certaines ont des propriétés intéressantes pour l'application pratique dans la réalisation des circuits logiques électroniques. Nous allons en examiner quelques-unes (*tableau* IV) :

Tableau IV - Table de vérité des fonctions de deux variables.							
Variables		F_1	F_6	F_7	F_8	F_{13}	F_{14}
0	0	0	0	0	1	1	1
0	1	0	1	1	0	1	1
1	0	0	1	1	0	0	1
1	1	1	0	1	0	1	0

◀ ***Tableau IV :** table de vérité des fonctions de deux variables.*

F_1 : fonction intersection, ou fonction ET
Notation $F_1(a, b) = a \wedge b$ ou $a \cdot b$

F_6 : fonction OU EXCLUSIF
Notation $F_6(a, b) = a \oplus b$

F_7 : fonction réunion, ou fonction OU
Notation $F_7(a, b) = a \vee b$ ou $a + b$

F_8 : fonction exclusion ou fonction NI
Notation $F_8(a, b) = a \downarrow b$
Cette fonction est complémentaire de F_7, on peut donc écrire $F_8 = \overline{F_7}$. Pour cette raison on adopte plus souvent la notation $F_8 = \overline{a \vee b}$ ou $\overline{a + b}$

F_{13} : fonction implication
Notation $F_{13}(a, b) = a \Rightarrow b$

F_{14} : fonction incompatibilité
Notation $F_{14}(a, b) = a \mid b$
On adopte plus souvent la notation $F_{14} = \overline{a \cdot b}$ ou $\overline{a \wedge b}$
On appelle aussi cette fonction NON-ET
En effet, on voit que $F_{14} = \overline{F_1}$

Les fonctions 1, 6, 7, 8, 14 sont commutatives.
Les fonctions 1, 6, 7 sont associatives, c'est-à-dire :

$(a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c)$ on peut donc écrire $a \cdot b \cdot c$
$(a \vee b) \vee c = a \vee (b \vee c) = a \vee b \vee c$
$(a \oplus b) \oplus c = a \oplus (b \oplus c) = a \oplus b \oplus c$

Les fonctions ET (1) et OU (7) sont distributives l'une par rapport à l'autre, ce qui s'exprime par :

$$a \cdot (b \vee c) = (a \cdot b) \vee (a \cdot c)$$
$$a \vee (b \cdot c) = (a \vee b) \cdot (a \vee c)$$

Elles ont également les propriétés suivantes, qu'il est facile de vérifier en s'aidant des tables de vérité :

— Propriété d'idempotence : $a \cdot a = a$
$a \vee a = a$
— Propriété d'absorption : $a \cdot (a \vee b) = a$
$a \vee (a \cdot b) = a$
— Élément neutre : $a \cdot 1 = a$
$a \vee 0 = a$

1 et 0 sont respectivement éléments neutres des fonctions ET et OU.

La fonction OU EXCLUSIF (F_6) possède la propriété suivante :

$$a \oplus 1 = \bar{a}$$
$$a \oplus 0 = a$$

— Théorème de Morgan :

$$\overline{a \cdot b} = \bar{a} \vee \bar{b}$$
$$\overline{a \vee b} = \bar{a} \cdot \bar{b}$$

Décomposition canonique des fonctions logiques

Soit F $(a, b, c, ...)$ une fonction de plusieurs variables, on peut l'écrire sous la forme suivante :

$$F(a, b, c...) = a \cdot F(1, b, c...) \vee \bar{a} \cdot F(0, b, c...)$$

car si a vaut 1, $\bar{a}$ vaut 0 et seul F $(1, b, c...)$ compte, de même si a vaut 0 seul F $(0, b, c...)$ compte.

F $(1, b, c...)$ et F $(0, b, c...)$ peuvent se décomposer de la même façon. Par exemple, prenons le cas d'une fonction de trois variables F (a, b, c) :

$$F(a, b, c) = a \cdot F(1, b, c) \vee \bar{a} \cdot F(0, b, c)$$

On peut continuer :

$$F(1, b, c) = b \cdot F(1, 1, c) \vee \bar{b} \cdot F(1, 0, c)$$

et $$F(0, b, c) = b \cdot F(0, 1, c) \vee \bar{b} \cdot F(0, 0, c)$$

En décomposant de même les quatre nouveaux termes et en reportant dans F (a, b, c), on obtient :

$$\begin{aligned} F(a, b, c) = \; & a \cdot b \cdot c \cdot F(1, 1, 1) \vee a \cdot b \cdot \bar{c} \cdot F(1, 1, 0) \\ \vee \; & a \cdot \bar{b} \cdot c \cdot F(1, 0, 1) \vee \bar{a} \cdot b \cdot c \cdot F(0, 1, 1) \\ \vee \; & a \cdot \bar{b} \cdot \bar{c} \cdot F(1, 0, 0) \vee \bar{a} \cdot b \cdot \bar{c} \cdot F(0, 1, 0) \\ \vee \; & \bar{a} \cdot \bar{b} \cdot c \cdot F(0, 0, 1) \vee \bar{a} \cdot \bar{b} \cdot \bar{c} \cdot F(0, 0, 0) \end{aligned}$$

En remplaçant F (0, 0, 0), F (0, 0, 1), etc., par les valeurs tirées de la table de vérité, la fonction se réduit à une réunion d'intersections dans lesquelles interviennent toutes les variables, soit sous forme directe, soit sous forme complémentée. Ces intersections sont appelées intersections de base.

Exemple

Soit la fonction de trois variables définie par sa table de vérité :

a	b	c	F
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	0

On peut écrire F de la façon suivante :

$$F = \bar{a} \cdot \bar{b} \cdot c \vee \bar{a} \cdot b \cdot c \vee a \cdot \bar{b} \cdot \bar{c} \vee a \cdot b \cdot \bar{c}$$

Cette façon d'exprimer une fonction logique à partir des intersections est appelée première forme normale ou première forme canonique. Il en existe une seconde qui consiste à exprimer la fonction par une intersection de réunions, appelées réunions de base.

Il nous suffit de la première pour remarquer que toutes les fonctions logiques, quel que soit le nombre de variables, peuvent s'exprimer en utilisant seulement les fonctions ET, OU et complémentation. En fait, on aurait pu introduire ces opérations de façon axiomatique. En effet, un ensemble muni d'opérations possédant les propriétés des fonctions ET, OU, complémentation, décrites ci-dessus, possède une structure d'algèbre de Boole.

D'un point de vue pratique, on dit que ces trois fonctions constituent un groupe complet, car elles permettent la réalisation de toutes les fonctions logiques. Les fonctions $\overline{a \cdot b}$ et $\overline{a \vee b}$ sont particulièrement intéressantes, car chacune forme à elle seule un groupe complet ; on peut en effet réaliser les fonctions ET, OU et complémentation en utilisant l'une ou l'autre de ces deux fonctions comme le montrent les relations suivantes, faciles à vérifier :

$$\bar{a} = \overline{a \cdot a} \qquad a \cdot b = \overline{\overline{(a \cdot b)} \cdot \overline{(a \cdot b)}} \qquad a \vee b = \overline{\overline{(a \cdot a)} \cdot \overline{(b \cdot b)}}$$

$$\bar{a} = \overline{a \vee a} \qquad a \cdot b = \overline{\overline{(a \vee a)} \vee \overline{(b \vee b)}} \qquad a \vee b = \overline{\overline{(a \vee b)} \vee \overline{(a \vee b)}}$$

Réalisation des fonctions logiques

Les premières réalisations furent à base de contacts électriques et de relais. Deux contacts placés en série dans un circuit constituent un opérateur ET, car ils doivent être tous les deux fermés pour que le circuit électrique soit fermé. Deux contacts en parallèle constituent un opérateur OU. Un contact « à ouverture » ouvrant le circuit lorsqu'il est actionné constitue un opérateur de complémentation.

Exemples

Quand A *et* B sont actionnés, la lampe L s'allume. On peut écrire L = A · B (*fig.* 2).

▶ ***Figures 2, 3, 4 : trois exemples de réalisation des fonctions logiques à l'aide d'éléments électromécaniques.***

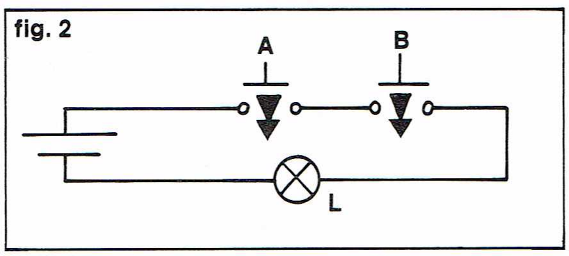

Richard Colin

Quand A *ou* B (ou les deux) est actionné, la lampe L s'allume. On peut écrire L = A ∨ B (*fig.* 3).

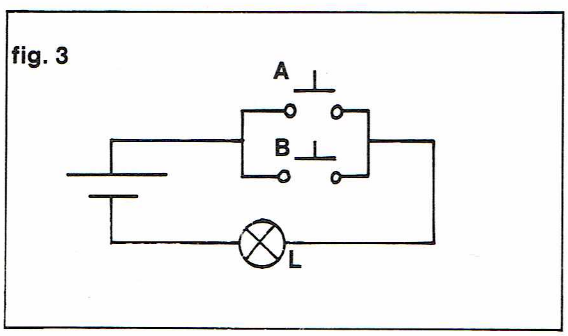

Richard Colin

Une commande en « va-et-vient » d'après la *figure* 4 peut être représentée par la fonction $L = A \cdot B \vee \bar{A} \cdot \bar{B}$.

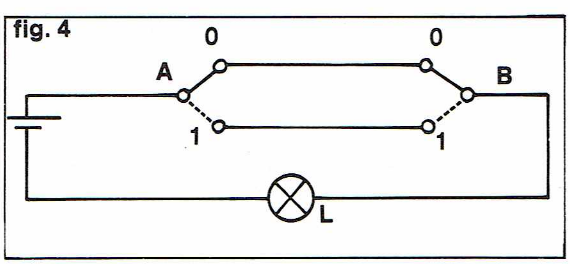

Richard Colin

Les premiers calculateurs électroniques furent réalisés avec des tubes électroniques (diodes, triodes, thyratrons, etc.). Le développement des transistors, puis des circuits intégrés a fait considérablement évoluer la technologie. En effet, les fabricants de circuits intégrés offrent actuellement des gammes très étendues de circuits, depuis les plus simples jusqu'aux plus complexes (les machines à calculer électroniques de poche ne comportent souvent qu'un seul circuit intégré). Pour un ingénieur ayant à concevoir un organe d'ordinateur, ces circuits constituent des « boîtes noires », car il n'est pas nécessaire de connaître en détail comment ils sont faits, mais plutôt comment on doit les utiliser.

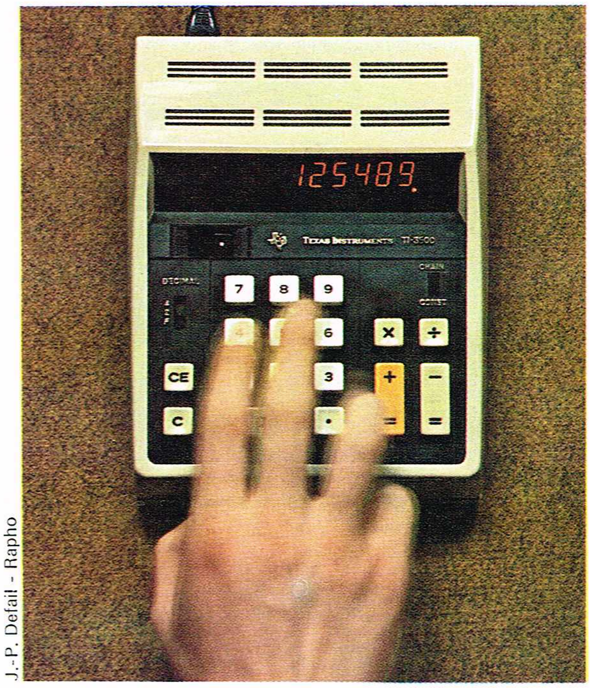

J.-P. Defail - Rapho

▶ ***Les machines à calculer électroniques de poche ne comportent souvent qu'un seul circuit intégré.***

Ces circuits ont deux états électriques possibles. Un état correspond à une tension électrique supérieure à un seuil haut, l'autre à une tension inférieure à un seuil bas. Les circuits sont conçus de telle façon qu'ils ne peuvent pas prendre un état stable entre les seuils haut et bas en utilisation normale. Deux conventions sont possibles pour attribuer une valeur logique à ces niveaux électriques. En logique positive, le 1 logique est représenté par le niveau haut, en logique négative, le 1 est représenté par le niveau bas (*fig.* 5).

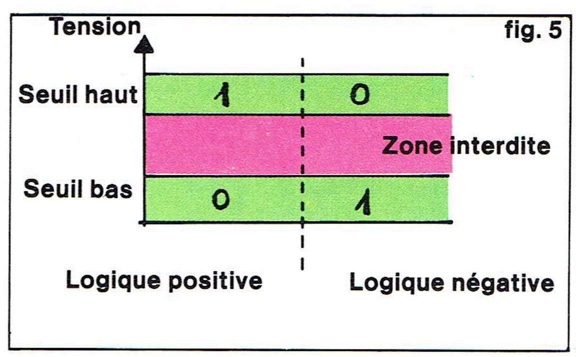

Richard Colin

▶ ***Figure 5 : représentation schématique des états électriques des circuits logiques.***

Les noms donnés aux circuits correspondent aux fonctions réalisées en logique positive. Voici les circuits simples les plus courants et leurs représentations.

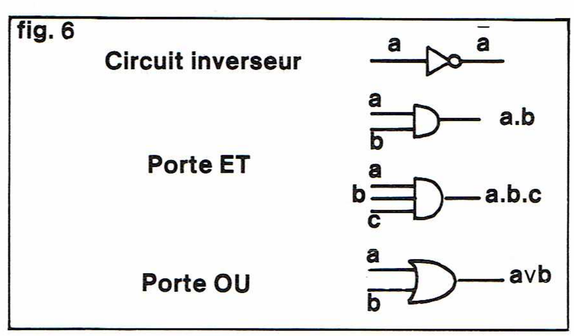

Richard Colin

En logique négative, une porte ET réalise en fait une fonction OU et réciproquement (voir Théorème de Morgan) [*fig.* 6].

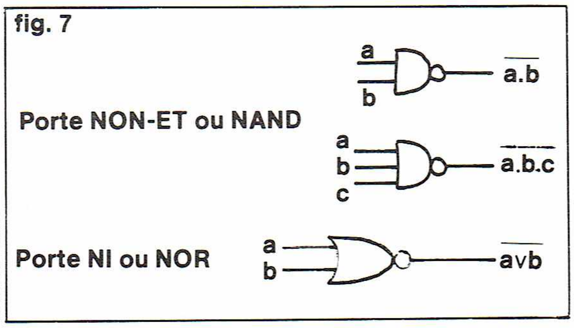

En logique négative, une porte NAND réalise une fonction NI et réciproquement (voir Théorème de Morgan) [*fig.* 7].

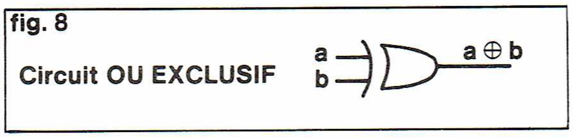

Les schémas de la *figure* 9 représentent la fonction $S = a \cdot \bar{b} \vee b \cdot c$ en logique positive.

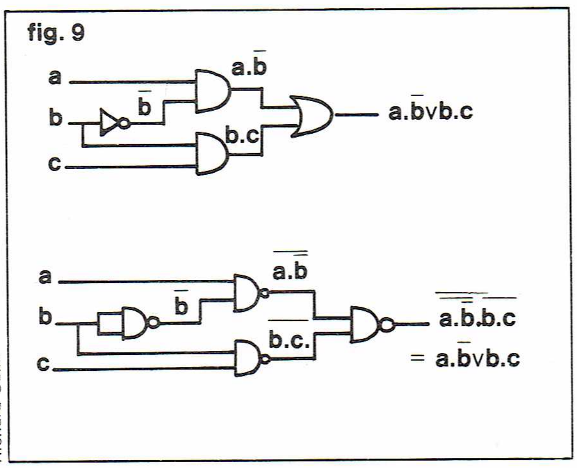

Une catégorie importante de circuits est constituée par les circuits séquentiels. Nous n'avions considéré que des fonctions logiques, dont les sorties ne dépendent que de l'état des entrées. Dans les circuits séquentiels, l'état des sorties dépend de l'état présent et des états précédents des entrées.

Considérons la *figure* 10 :

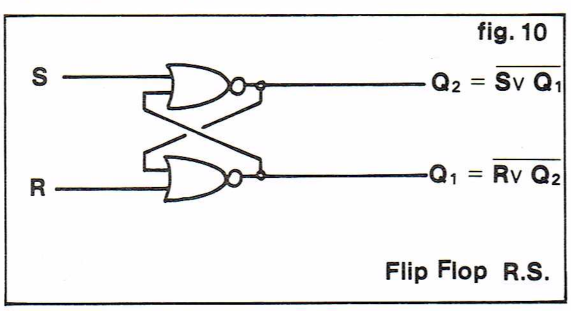

Supposons $S = R = 0$ et $Q_1 = 1$.

On a alors : $Q_2 = \overline{S \vee Q_1} = \overline{0 \vee 1} = 0$

d'autre part : $Q_1 = \overline{R \vee Q_2} = \overline{0 \vee 0} = 1$. Il n'y a pas contradiction avec l'hypothèse $Q_1 = 1$. Cet état est donc possible. Supposons toujours : $S = R = 0$ et $Q_1 = 0$

on a alors $Q_2 = \overline{S \vee Q_1} = \overline{0 \vee 0} = 1$

et $Q_1 = \overline{R \vee Q_2}$ $\overline{0 \vee 1} = 0$

Cet état est aussi possible. Ce circuit a donc deux états possibles quand $R = S = 0$. Supposons qu'il soit dans l'un de ces états, et que S devienne égal à 1.

On aura $Q_2 = \overline{1 \vee Q_1} = 0$ quel que soit Q_1

et $Q_1 = \overline{R \vee Q_2} = \overline{0 \vee 0} = 1$

Si S redevient égal à 0, Q_2 est maintenu à 1 par Q_1 et Q_1 à 0 par Q_2. Cet état, étant stable pour $R = S = 0$, subsiste après que S soit redevenu égal à 0. Si on fait passer S plusieurs fois à 1 puis revenir à 0, l'état des sorties ne change pas, si R reste toujours à 0.

Par contre si c'est R qui passe à 1, puis revient à 0, c'est Q_2 qui prend la valeur 1 et Q_1 la valeur 0. Ce circuit permet donc de transformer une information passagère (passage temporaire à 1 puis retour à 0) en une information permanente. Il réalise donc une fonction de mise en mémoire. Selon l'état des sorties, on peut savoir laquelle des deux entrées est passée à 1 la dernière. Remarquons que si les deux entrées sont simultanément à 1, on aura $Q_1 = Q_2 = 0$. Lorsque les entrées reviendront à 0, c'est la dernière à revenir à 0 qui déterminera l'état du système. Un tel circuit est appelé Flip Flop R. S.

Considérons maintenant la *figure* 11 :

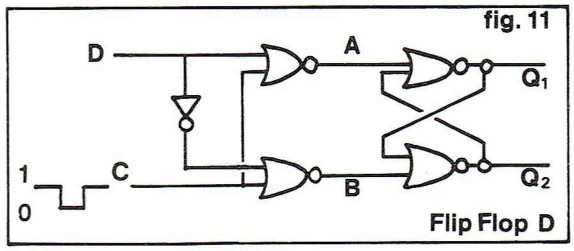

L'entrée C est appelée *entrée d'horloge* ou *entrée d'écriture*. Par rapport au Flip Flop R. S., nous avons ajouté un inverseur et deux portes. En l'absence de l'impulsion d'horloge ($C = 1$), on a $A = B = 0$; on a donc soit $Q_1 = 0$, $Q_2 = 1$, soit $Q_1 = 1$, $Q_2 = 0$. Pendant l'impulsion d'horloge ($C = 0$), on a $A = \bar{D}$ et $B = D$, donc un des points A et B est à 0, l'autre à 1. Les sorties Q_1 Q_2 vont prendre l'état correspondant, à savoir $Q_1 = 1$, $Q_2 = 0$ si $D = 1$ et $Q_1 = 0$, $Q_2 = 1$ si $D = 0$ pendant l'impulsion d'horloge.

Ce circuit permet donc de mémoriser l'état de l'entrée D au moment de l'impulsion d'horloge seulement.

Un tel circuit est appelé Flip Flop D. C'est un circuit dit de type synchrone, car il ne peut changer d'état qu'au moment de l'impulsion d'horloge, contrairement au Flip Flop R. S. (appelé asynchrone).

Structure et fonctionnement des ordinateurs

Arithmétique binaire dans les calculateurs

L'addition en binaire peut se réaliser simplement, chiffre à chiffre, comme en décimal, en utilisant la table d'addition :

$0 + 0 = 0$
$0 + 1 = 1$
$1 + 0 = 1$
$1 + 1 = 10$ Soit 0 et un report égal à 1.

Exemple

```
      (1) (1)
       1   1   1   0   0
  +
       1   0   1   0   1
  ---------------------
   1   1   0   0   0   1
```

Nous voyons que la table d'addition en binaire présente une grande ressemblance avec une table de vérité de fonction logique. On peut donc convenir de représenter un chiffre binaire par une variable logique. Pour simplifier les conventions on représentera le 1 de la numération à base deux par un 1 logique (le contraire serait possible). Dans ces conditions, l'addition consiste à déterminer chaque chiffre du résultat et la retenue en fonction des chiffres de même rang des opérandes et du report du rang précédent. On peut donc définir deux fonctions logiques : la somme modulo 2, S et la retenue R, de trois variables *a*, *b*, R' ; *a* et *b* représentent les chiffres des nombres à additionner, R' la retenue précédente.

◄ ***Figures 6, 7, 8 :** représentation de circuits simples les plus courants correspondant à des fonctions réalisées en logique positive.*
***Figure 9 :** exemple de réalisation d'une fonction logique à partir de fonctions élémentaires.*

◄ ***Figure 11 :** circuit séquentiel de type synchrone : Flip Flop D.*

◄ ***Figure 10 :** circuit séquentiel de type asynchrone : Flip Flop R. S.*

a	*b*	R′	R	S
0	0	0	0	0
0	0	1	0	1
0	1	0	0	1
0	1	1	1	0
1	0	0	0	1
1	0	1	1	0
1	1	0	1	0
1	1	1	1	1

Les fonctions peuvent s'écrire

$$S = a \oplus b \oplus R'$$
$$R = a \cdot b \vee b \cdot R \vee a \cdot R$$

On pourra, par exemple, réaliser ces fonctions à l'aide de circuits logiques suivant la *figure* 12.

Nous pouvons enfermer ce circuit dans une « boîte noire » et le représenter désormais par la *figure* 13.

▼ A gauche, figure 13 : circuit de la figure 12 enfermé dans une « boîte noire ». A droite, figure 12 : un additionneur binaire.

fig. 13

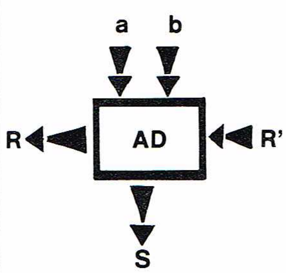

Richard Colin

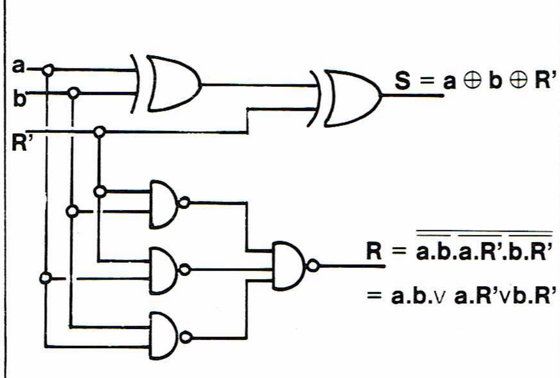

fig. 12 **Additionneur binaire**

Richard Colin

En mettant en parallèle plusieurs circuits identiques, on pourra effectuer une addition, chaque report étant envoyé sur l'étage suivant (*fig.* 14).

▼ Figure 14 : additionneur parallèle à n bits. Figure 15 : représentation de la soustraction A — B. Figure 16 : additionneur soustracteur parallèle.

fig. 14

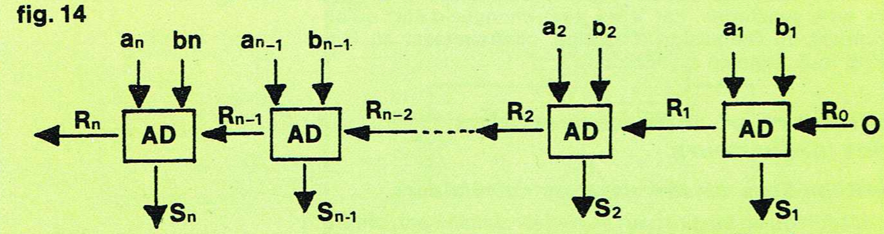

Additionneur parallèle à n bits

fig. 15

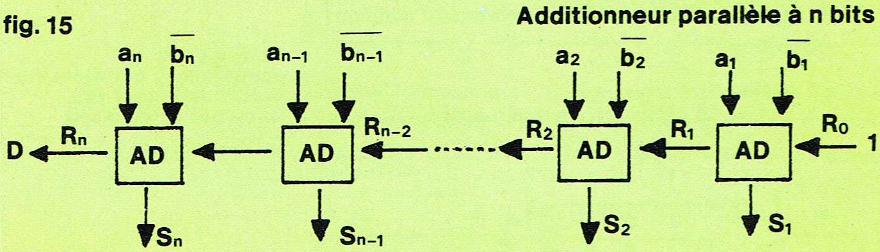

fig. 16

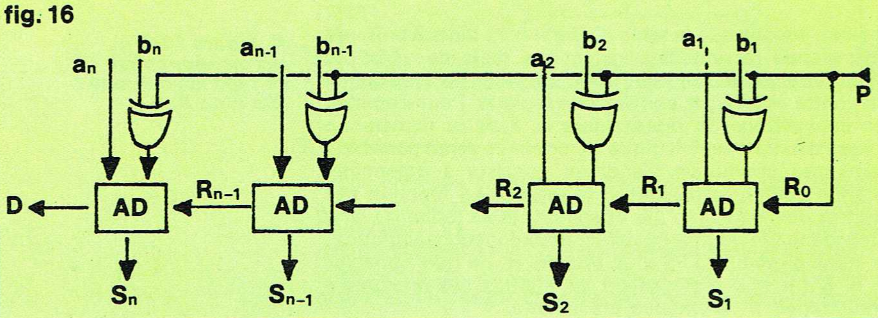

Richard Colin

Si on utilise une représentation des nombres sur *n* bits, il se peut que le résultat réel s'exprime sur $n + 1$ bits (Report $R_n = 1$). Dans ce cas il se produit un dépassement de capacité, car le bit supplémentaire est perdu. En général la retenue R_n est mémorisée, ce qui permet après l'opération de vérifier s'il y a eu ou non dépassement. Si on dispose de *n* bits on peut représenter naturellement les nombres de 0 à $2^n - 1$. On voit que si on ajoute 1 à $2^n - 1$, on obtiendra, avec notre additionneur, 0 comme résultat et un dépassement de capacité. L'additionneur travaille donc modulo 2^n. On peut utiliser cela pour traiter des nombres négatifs. En effet, soit *p*, $0 \leqslant p \leqslant 2^{n-1}$, on a : $-p \equiv 2^n - p$ (Mod. 2^n) ; on peut donc représenter $-p$ par $2^n - p$ qui est positif. Pour qu'une configuration binaire ne puisse pas représenter deux nombres différents, on représente de cette façon les nombres de -2^{n-1} à $2^{n-1} - 1$. Soit $0 \leqslant p < 2^{n-1}$, *p* contient au maximum $n - 1$ bits significatifs, donc le premier bit est 0 ; $-p$ est représenté par $p' = 2^n - p$, donc $2^{n-1} \leqslant p' \leqslant 2^n - 1$, donc le premier bit vaut 1. Le premier bit permet donc de connaître le signe d'un nombre. Cette représentation appelée « complément à 2 » est très souvent utilisée dans les calculateurs électroniques. Pour obtenir le complément à 2 de *p*, on complémente chaque bit et on ajoute 1 au résultat.

Exemple : soit $n = 5$
$p = 3$ en binaire $p = 00011$
on complémente les bits : 11100
on ajoute 1 : 11101 $= -p$

Vérification :
```
   00011
+  11101
 -------
(1)00000
```

Le dernier report étant le dépassement, le résultat sur 5 bits est bien 0.

En représentant ainsi les nombres pour faire l'opération $p - q$ (ou $p + (-q)$), on fait en réalité l'opération $p + 2^n - q$, soit $2^n + p - q$. Si $p - q > 0$, le résultat est plus grand que 2^n, il y a dépassement et il reste $p - q$ qui est le résultat cherché. Si $p - q < 0$, le résultat est inférieur à 2^n, il n'y a pas de dépassement. On peut écrire $2^n + p - q = 2^n - (q - p)$. On obtient donc un résultat représentant un nombre négatif, puisque dans ce cas $q - p > 0$. On dispose ainsi d'un moyen pour faire des additions algébriques et des soustractions. Pour soustraire un nombre, on additionne son complément à 2.

On peut représenter la soustraction A — B par la *fig.* 15.

On applique sur les entrées les niveaux logiques *a* et $\bar{b}$ et 1 sur l'entrée de report du 1er étage, ce qui revient à former le complément à deux de B.

Si on veut pouvoir réaliser au choix une addition ou une soustraction, il faut avoir la possiblité de complémenter ou non les entrées *b* et d'appliquer un niveau 0 ou 1 sur l'entrée de report. La complémentation peut se faire à l'aide d'un circuit OU EXCLUSIF d'après la *figure* 16.

Si P vaut 0, les bits *b* ne sont pas complémentés et R_0 vaut 0, on fait donc l'opération A + B. Si P vaut 1, les bits *b* sont complémentés et R_0 vaut 1, l'opération est donc A — B.

Nous pouvons donc réaliser ces opérations. Cependant il faut que les opérandes soient présents sur les entrées et il faut prendre en compte le résultat. Pour cela, on utilise des registres. Un registre est un ensemble de flips flops permettant de mémoriser en même temps plusieurs bits. Le nombre et le rôle exact des registres varient d'un type de calculateur à l'autre. Cependant, on trouve très souvent la structure de la *figure* 17.

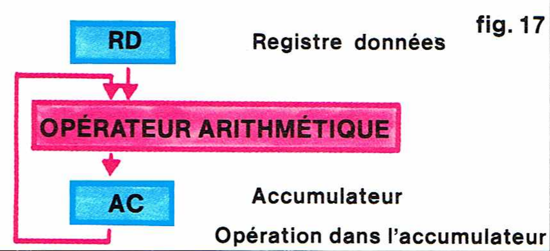

fig. 17

Richard Colin

Un registre (RD) contient un opérande. Un autre registre (AC) contient l'autre opérande et sert à stocker le résultat. En pratique, l'opération se déroule ainsi : RD et AC sont chargés avec les opérandes. Leurs sorties étant connectées sur les entrées du circuit arithmétique, le résultat apparaît sur les entrées de AC. Une impulsion d'écriture dans AC mémorise le résultat à la place du contenu précédent, qui est perdu. Cette structure permet d'additionner (ou soustraire) successivement plusieurs nombres, en ajoutant chaque fois un nouveau nombre au contenu de l'accumulateur (d'où le nom d'accumulateur).

Multiplication - Division

La multiplication se fait en binaire comme en décimal, en multipliant le multiplicande par chaque chiffre du multiplicateur, et en ajoutant chaque fois le résultat décalé d'une position vers la gauche. En binaire, l'opération est particulièrement simple puisqu'on n'a à multiplier que par 0 ou 1. L'opération se réduit donc à des additions et des décalages.

Exemple :

$$\begin{array}{rr} & 10010 \\ \times & 10111 \\ \hline & 10010 \\ + & 10010 \\ + & 10010 \\ + & 00000 \\ + & 10010 \\ \hline = & 110011110 \end{array}$$

Si les nombres sont exprimés sur n bits, le résultat peut avoir $2n$ bits. En effet :

$$(2^n - 1) \times (2^n - 1) = 2^{2n} - 2^{n+1} + 1$$

La multiplication demande donc une capacité doublée. Pour cela, on associe à l'accumulateur un deuxième registre, appelé souvent MQ (Multiplicateur Quotient). On peut remarquer, cependant, que chaque addition ne porte que sur n bits, les bits de poids inférieur n'intervenant plus, l'un après l'autre. On peut alors réaliser la multiplication d'après l'algorithme qui suit.

Initialisation : on met AC à 0. On charge le multiplicande dans RD, le multiplicateur dans MQ (*fig.* 18).

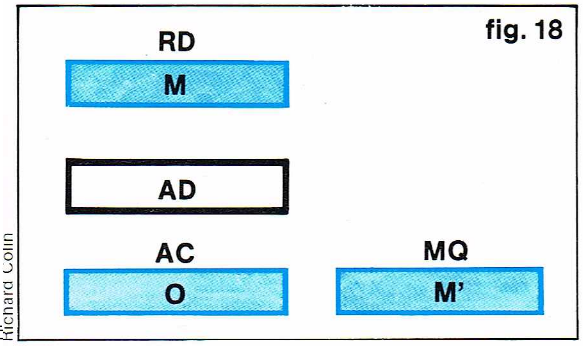

1 — Si le bit le plus à droite de MQ vaut 1, passer à l'étape 2. Sinon passer à l'étape 3.

2 — Additionner le multiplicande au contenu de AC.

3 — Décaler le contenu de l'ensemble AC — MQ d'une position vers la droite; le dernier bit de MQ est perdu. Décaler le résultat de l'addition à droite est équivalent à décaler le multiplicande à gauche lors de l'addition suivante.

4 — Recommencer n fois l'opération à partir de 1. Après n opérations le résultat se trouve dans l'ensemble AC — MQ.

On peut en déduire une méthode pour effectuer les divisions par soustractions successives, similaire à la division en décimal.

Initialisation : charger le dividende dans AC — MQ, le diviseur dans RD.

1 — Soustraire le contenu de RD (diviseur) du contenu de AC (poids forts du dividende).

Si le résultat dans AC est négatif, passer à l'étape 2.

Si le résultat est positif, passer en 3.

2 — Le dividende est plus grand que les poids forts du diviseur. Le chiffre obtenu pour le quotient est 0. Restaurer la valeur initiale de AC en ajoutant le dividende, puis passer à l'étape 4.

3 — Le chiffre obtenu pour le quotient est 1.

4 — Décaler le contenu de l'ensemble AC — MQ d'une position à gauche, en rentrant à droite de MQ la valeur trouvée pour le chiffre du quotient.

5 — Recommencer n fois l'opération à partir de 1. Après n opérations, le quotient se trouve dans MQ et le reste dans AC.

Unité arithmétique et logique (U. A. L.)

Avec un additionneur et des registres, il est possible de réaliser les quatre opérations arithmétiques. Il est facile d'imaginer effectuer d'autres opérations entre registres, toujours d'après le même principe (*fig.* 19).

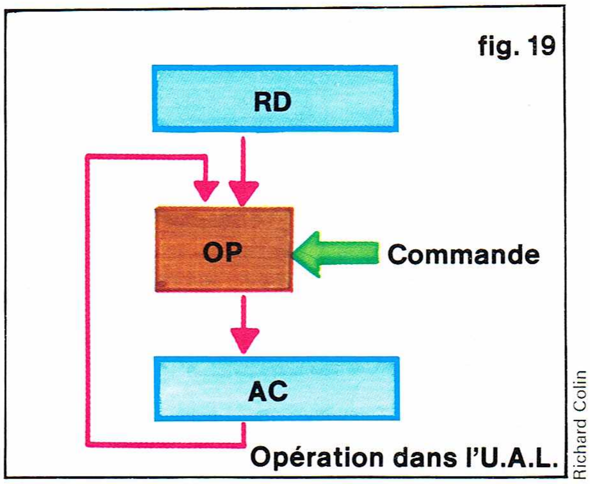

◄ ***Figure 19 :*** **OP** ***désigne ici un circuit qui réalise l'opération spécifiée par les signaux de commande.***

Cet ensemble constitue l'unité arithmétique et logique. En fait, on peut en donner une définition plus générale comme étant un ensemble de circuits réalisant des opérations à caractère arithmétique ou logique entre les contenus d'un certain nombre de registres (*fig.* 20). Certaines opérations peuvent ne concerner qu'un seul registre.

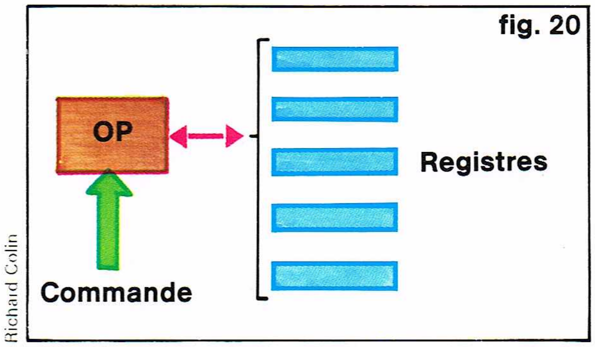

◄ ***A gauche, figure 18 : schéma de l'initialisation pour réaliser la multiplication. A droite, figure 20 : opération dans l'U. A. L. entre les contenus d'un certain nombre de registres.***

Mémoire

L'un des points importants pour le traitement automatique est la nécessité pour l'organe de traitement de pouvoir stocker des informations. Il faut distinguer entre deux sortes de mise en mémoire.

— Stockage d'information en vue d'une utilisation ultérieure (par exemple des données ou des résultats d'un calcul). Dans ce cas il s'agit de produire ces informations sous une forme facile à réutiliser si besoin est.

— Stockage des informations immédiatement nécessaires à la conduite du traitement et à l'obtention des résultats. Dans ce cas, il faut pouvoir accéder rapidement à n'importe quelle information. Pour cela les calculateurs sont munis d'une mémoire centrale. La mémoire centrale est constituée d'un très grand nombre de registres, appelés aussi « mots mémoire », destinés à mémoriser les données d'un problème et les informations relatives au déroulement du traitement (le programme).

A mesure que le traitement s'effectue, les informations nécessaires sont transférées de la mémoire dans des

◄ ***Page ci-contre, figure 17 : structure permettant la réalisation d'opérations dans un accumulateur.***

registres de l'U. A. L. ou d'autres registres, pour y être traitées. Des résultats peuvent être transférés de l'U. A. L. vers la mémoire.

Une information en mémoire est repérée par le numéro du registre qui la contient. C'est ce qu'on appelle l'adresse du mot mémoire.

A la mémoire sont associés deux registres particuliers.

— Le registre d'adresse mémoire (R.A.M.). Lorsqu'on veut accéder à un mot mémoire, son adresse est chargée dans le R.A.M. Un circuit décodeur d'adresse met alors le mot sélectionné en communication avec le registre de données mémoire.

— Le registre de données mémoire. C'est par ce registre que transitent toutes les informations échangées entre la mémoire et d'autres organes du calculateur (*fig.* 21).

fig. 21

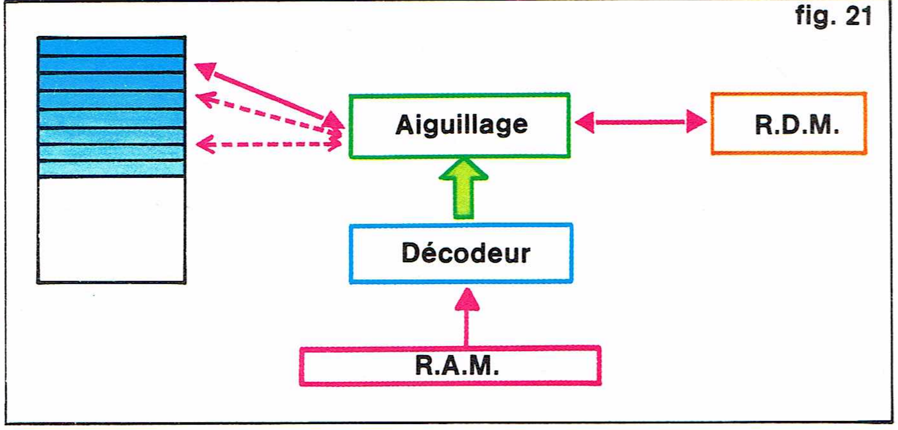

Richard Colin

▲ *Figure 21 : représentation schématique de l'organisation de la* mémoire.

▶ *Page ci-contre, à gauche, figure 22 : structure de l'*unité de contrôle.

▼ *A gauche, partie interne de l'*unité centrale *d'un système 360/IBM. A droite, partie interne d'un calculateur électronique.*

Certains calculateurs ont une partie de leur mémoire constituée de flips flops électroniques, ce qui permet des échanges très rapides. Cependant, dans la grande majorité des cas, la mémoire est constituée de tores de ferrite. La ferrite présente un cycle d'hystérésis presque rectangulaire. Lorsqu'elle est excitée par un courant électrique circulant dans un circuit primaire, elle prend une aimantation dont le sens est lié au sens du courant. L'aimantation subsiste après l'arrêt du courant; si on force l'aimantation à changer de sens, on peut recueillir une impulsion électrique dans un circuit secondaire. On peut donc associer un sens d'aimantation à 0 et l'autre à 1. On écrit donc un 0 ou un 1 selon le sens du courant d'excitation. En lecture, on force l'aimantation dans le sens correspondant à 0. S'il y a changement de sens, c'est-à-dire si l'information était 1, on obtient une impulsion électrique au circuit secondaire (circuit de lecture).

Un tel procédé de lecture est destructif puisqu'on efface l'information pour la lire. A la lecture, l'information est transférée dans R.D.M. Les circuits sont conçus de façon à effectuer automatiquement une réécriture de l'information dans le mot qui vient d'être lu; ainsi l'information reste en mémoire.

Les mémoires à ferrite constituent des mémoires permanentes; elles gardent l'information même si l'alimentation électrique du calculateur est coupée, contrairement aux registres électroniques qui perdent l'information dans ce cas.

Unité de contrôle - Instructions machine

Nous avons vu le principe selon lequel les opérations sont effectuées dans l'U.A.L., et les échanges avec la mémoire. Ces opérations nécessitent certains signaux de commande qui peuvent être soit des niveaux logiques appliqués sur certaines entrées, destinées à déterminer l'opération à effectuer, soit des impulsions destinées à commander successivement les différentes phases de l'opération. Ces signaux sont délivrés par l'unité de contrôle, qui comporte essentiellement deux éléments :

— Un registre d'instructions (R.I.) destiné à recevoir les instructions, associé à un décodeur d'instruction qui, en fonction du code contenu dans R.I., génère les

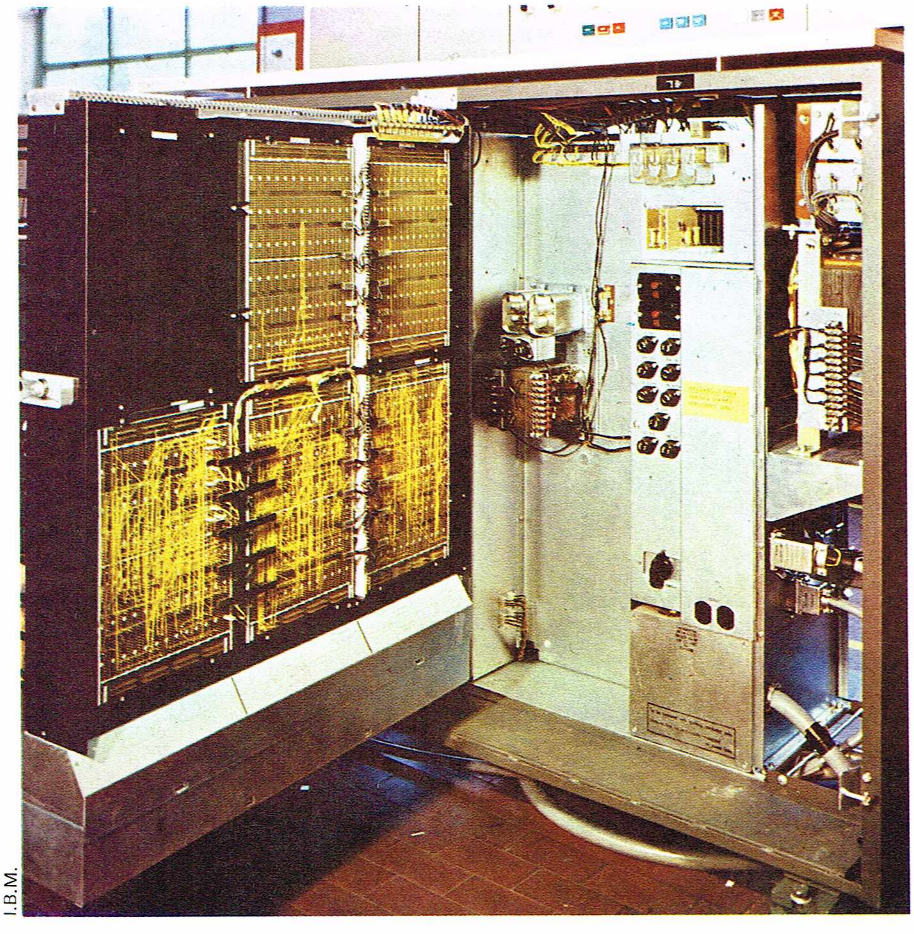

I.B.M.

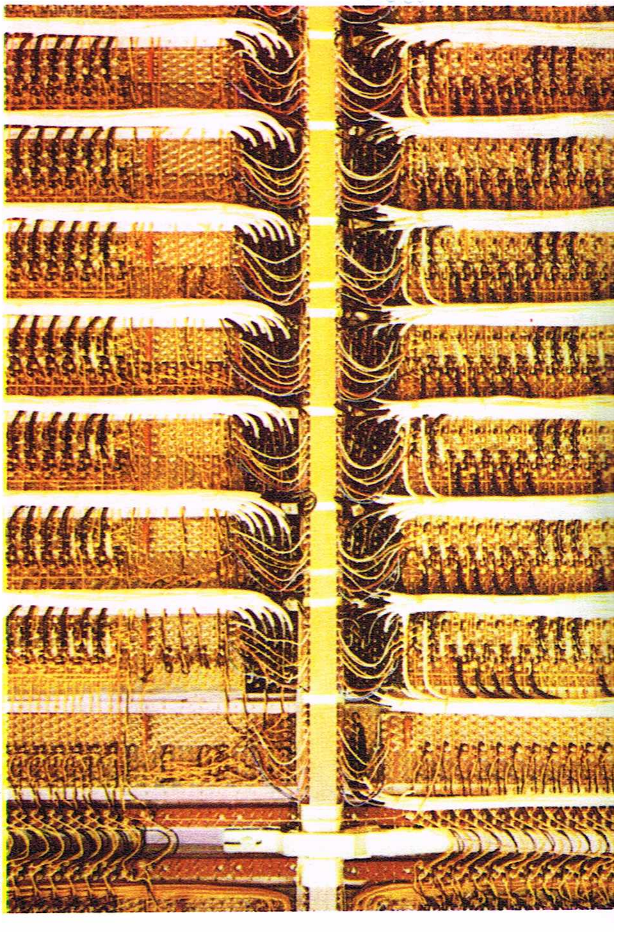

Archives I.G.D.A.

niveaux logiques de commande et d'aiguillage des impulsions d'horloge.

— Une base de temps qui génère en permanence toutes les impulsions qui peuvent être nécessaires. Ces impulsions sont aiguillées vers les circuits correspondants par le décodeur d'instructions.

Chaque instruction correspond à une opération élémentaire réalisable par les circuits des différentes unités. Ces instructions sont évidemment codées en binaire. Ce code constitue le langage machine. C'est le seul que l'unité de contrôle peut « comprendre » (*fig.* 22).

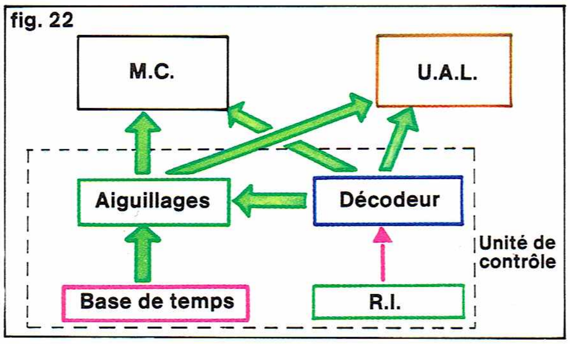

Richard Colin

Généralement, une instruction comprend plusieurs parties qui sont décodées séparément :

— Une partie « Code Opération » qui indique le type d'opérations à effectuer.

— Une partie « opérandes » qui spécifie où et comment les opérandes doivent être pris. Selon les opérations, les opérandes peuvent être soit en mémoire, soit dans l'U.A.L., soit dans l'instruction elle-même. Cette partie est donc interprétée en fonction du code opération. *A priori*, le nombre d'opérandes dépend de l'opération. Par exemple, pour une division, on pourrait faire figurer dans l'instruction les adresses où prendre le diviseur, le dividende, et où ranger le quotient et le reste. Cela ferait quatre adresses à faire figurer dans l'instruction. D'autre part, les instructions d'un programme étant stockées en mémoire, on pourrait également faire figurer l'adresse de l'instruction suivante à exécuter.

En fait, dans la plupart des cas, on ne fait figurer qu'une adresse par instruction machine, en décomposant certaines opérations en plusieurs étapes de nature différente :

— transferts d'un seul opérande à la fois entre mémoire et U.A.L. ;

— opérations portant sur un seul opérande pris en mémoire, les autres étant pris dans l'U.A.L.

Ainsi une addition peut se faire en trois instructions :

— charger l'accumulateur avec le premier opérande ;

— additionner le deuxième opérande au contenu de l'accumulateur ;

— ranger le contenu de l'accumulateur (résultat) en mémoire.

Une telle décomposition est avantageuse pour les calculs enchaînés. On n'a pas toujours besoin de ranger en mémoire des résultats intermédiaires, ils restent dans l'accumulateur (ou dans d'autres registres de l'U.A.L.).

Pour la succession des instructions, on range simplement les instructions successives à des adresses consécutives. Dans certains cas, après une opération, il faut effectuer une séquence d'instructions qui n'est pas rangée immédiatement à la suite. Cela peut se faire par une instruction de branchement, qui n'effectue aucune opération, mais qui indique à l'unité de contrôle l'adresse où commence la séquence suivante. Cela permet les ruptures de séquence, notion fondamentale pour l'utilisation des ordinateurs.

Les ruptures de séquences

Il est souvent nécessaire de prendre des décisions en cours de traitement. En fonction de certains résultats, la suite des calculs peut se dérouler de différentes façons (voir l'exemple d'équation du second degré en début d'article). La décision consiste à choisir la séquence suivante, au moyen d'instructions de branchement (*fig.* 23). Ces décisions ne sont possibles que si on peut effectivement accéder à n'importe laquelle des séquences possibles. On voit ici apparaître l'importance de la notion de programme enregistré. Si tout le programme est présent en mémoire, n'importe quelle séquence est accessible à tout moment. Au contraire, si les opérations étaient commandées extérieurement, cela ne serait pas possible, car cela supposerait un changement de l'organe de commande. Par exemple, pour un programmateur électromécanique, il faudrait modifier la disposition des contacts.

Cette notion de rupture de séquence offre plusieurs possibilités très précieuses :

— Comme nous l'avons vu, on peut, par des **tests sur des résultats,** choisir la suite du traitement.

— **Boucles de programme.** Lorsqu'une même séquence doit être exécutée plusieurs fois de suite, on peut, en fin de séquence, faire un branchement au début. Pour que le programme ne boucle pas indéfiniment, il faut que la séquence comporte un test de sortie de la boucle (*fig.* 24).

Par exemple, on peut compter les itérations et se brancher à une autre séquence après un nombre d'itérations déterminé.

On peut aussi tester un résultat et sortir de la boucle quand ce résultat répond à un certain critère ; on voit ici que le nombre d'itérations n'est pas fixé *a priori* dans le programme mais dépend des données du problème ; cela ne serait pas possible dans le cas d'une commande extérieure, et est donc lié à la notion de programme enregistré.

— **Sous-programmes.** Lorsqu'une séquence d'instructions doit être effectuée à différentes reprises au cours d'un traitement, on peut ne la faire figurer qu'une fois en mémoire. Lorsqu'on veut la faire exécuter, on y effectue un branchement en gardant en mémoire l'adresse d'où s'est fait le branchement. La séquence se termine par un branchement à l'adresse ainsi mémorisée. De cette façon, on peut « appeler » cette séquence nommée sous-programme de n'importe quel point du programme. Lorsqu'elle est terminée, l'exécution du programme appelant reprend là où elle s'était interrompue. Un sous-programme peut lui-même faire appel à d'autres sous-programmes. Cela permet, en outre, une conception modulaire du traitement, chaque sous-programme pouvant être écrit indépendamment, et utilisé par plusieurs programmes différents (*fig.* 25).

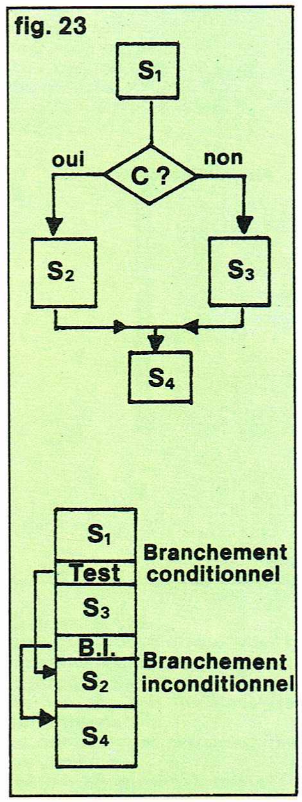

Richard Colin

▲ ***Figure 23 :* organigramme et implantation en mémoire d'un traitement avec branchement conditionnel. Exécuter la séquence S_1 ; si la condition C est remplie, exécuter S_2 puis S_4 sinon S_3 puis S_4. Les différentes séquences étant les unes derrière les autres en mémoire, il est nécessaire de terminer S_3 par un branchement en S_4, pour ne pas exécuter S_2 après S_3.**

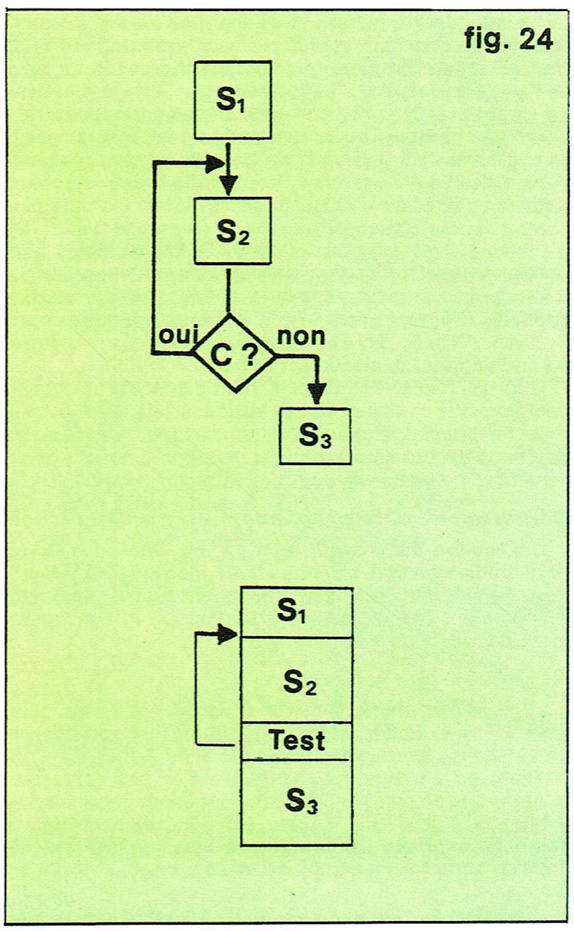

Richard Colin

◀ ***Figure 24 :* organigramme et implantation en mémoire d'une boucle.**

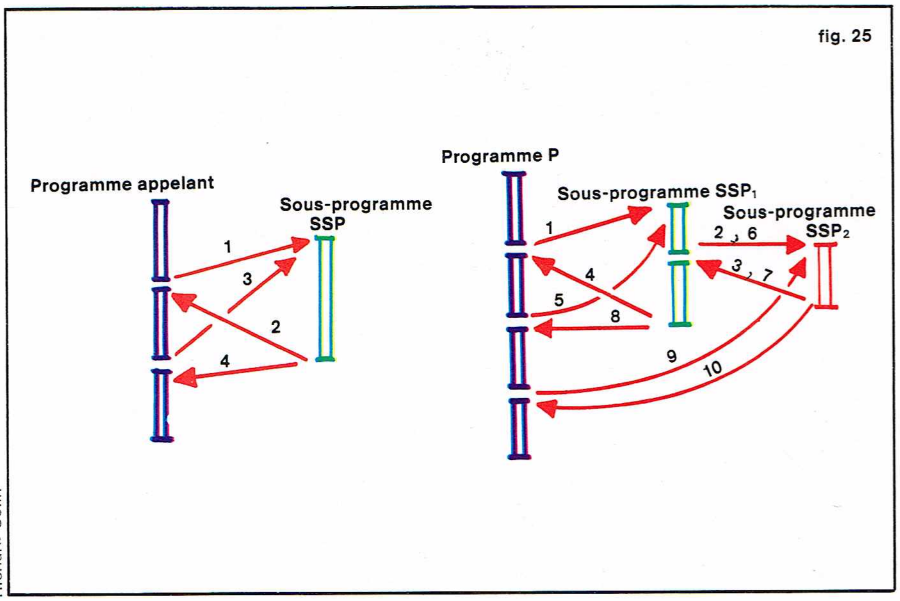

Richard Colin

▲ ***Figure 25 :*** ***exemples de branchements à des sous-programmes. Les traits doubles représentent des séquences d'instructions, les flèches des branchements, les numéros l'ordre des branchements.*** **Ex. 1 :** ***le programme P appelle deux fois le sous-programme SSP.*** **Ex. 2 :** ***le programme P appelle deux fois le sous-programme SSP1 et une fois SSP2. Le sous-programme SSP1 appelle SSP2 une fois, chaque fois qu'il est lui-même appelé.***

▶ ***Figure 26 :*** ***transferts successifs entre les registres et l'unité centrale, lors de l'exécution d'une*** **instruction comportant une lecture en mémoire.** ***C.O. est incrémenté en même temps que l'instruction est chargée dans R.D.M.***

▶ ***Figure 27 :*** ***instruction comportant une écriture en mémoire.***

Comme nous l'avons vu dans ce qui précède, les branchements sont souvent liés à des tests. Les instructions de branchements conditionnels consistent en général à effectuer le branchement à l'adresse indiquée si une condition est remplie; sinon l'exécution se poursuit en séquence. Les conditions testées sont par exemple le signe du contenu de l'accumulateur, l'égalité à zéro, le dépassement de capacité.

Unité centrale

L'unité arithmétique et logique, l'unité de contrôle et la mémoire centrale constituent l'unité centrale. Les caractéristiques peuvent varier considérablement d'un modèle d'ordinateur à l'autre (taille des mots mémoire, nombre de mots en mémoire, nombre d'instructions élémentaires, temps d'exécution d'une instruction), mais tous possèdent cette structure générale. Certains points de structure relèvent de conceptions différentes. On peut citer le rôle des registres et le mode d'adressage. Les registres peuvent être spécialisés, c'est-à-dire que chaque registre correspond à une fonction bien définie; on peut rencontrer au contraire un certain nombre de registres généraux pouvant tous servir à un certain nombre de fonctions telles que : accumulateur, multiplicateur quotient, registre de base ou d'index (voir plus loin). On peut rencontrer aussi différents modes d'adressage selon les machines. Dans certains calculateurs, les adresses sont obtenues directement dans les instructions. Dans d'autres, les instructions ne comportent qu'une adresse relative (appelée déplacement), définie par rapport à une adresse de base. A l'exécution, les adresses réelles sont obtenues en additionnant déplacement et base.

Tous ces choix sont généralement dictés par des considérations sur certaines caractéristiques telles que : taille de la mémoire, opérations élémentaires réalisables par les différents circuits opérationnels, de façon à constituer un ensemble cohérent et le plus performant possible.

Déroulement d'un programme en machine

L'exécution d'un programme en machine consiste en l'exécution successive d'opérations élémentaires suivant des séquences déterminées. Nous allons voir comment se déroulent l'exécution d'une instruction et l'enchaînement des instructions.

Recherche de l'instruction

La première phase consiste à accéder à l'instruction devant être exécutée. Il faut donc connaître son adresse en mémoire; pour cela, un registre de l'unité centrale contient en permanence l'adresse de la prochaine instruction à exécuter. Nous verrons comment cette adresse est tenue à jour. Ce registre est généralement appelé compteur ordinal; par la suite, il sera désigné par les initiales C.O. La recherche se décompose en plusieurs étapes :

— Transfert du contenu du C.O. dans le registre d'adresse mémoire (R.A.M.).

— Un cycle de lecture est déclenché; le contenu du mot dont l'adresse est dans le R.A.M. est recopié dans le registre de données mémoire (R.D.M.).

— Le contenu de R.D.M. est recopié dans le registre d'instruction (R.I.). A ce moment, l'instruction est en place dans R.I.; elle peut être décodée et exécutée. Simultanément, le contenu de C.O. est incrémenté, c'est-à-dire que C.O. contient maintenant l'adresse suivante.

Exécution

Le code opération de l'instruction contenue dans R.I. est décodé par le décodeur d'instruction qui active les circuits correspondant à l'opération. Il faut alors distinguer entre les différents types d'opérations possibles.

— **Instructions comportant une adresse :**

● *avec lecture d'un opérande en mémoire* (*fig.* 26)

⋆ la partie adresse de l'instruction est recopiée dans R.A.M;

⋆ un cycle de lecture est déclenché;

⋆ le contenu de R.D.M. est pris en charge par les circuits préalablement activés par le décodeur d'instruction, et l'opération est exécutée.

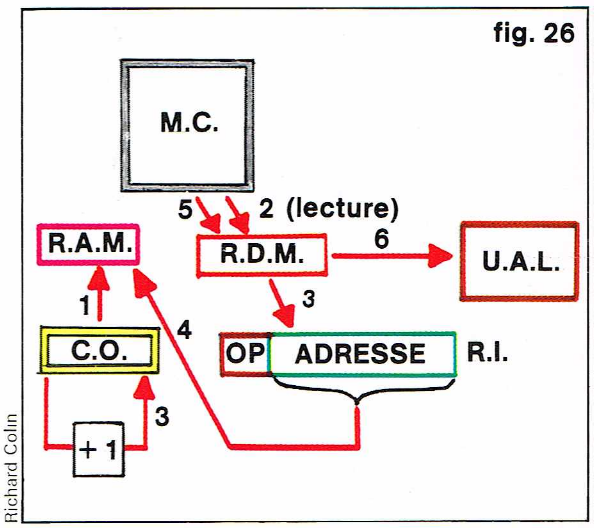

Richard Colin

● *instruction d'écriture en mémoire* (*fig.* 27) :

⋆ la partie adresse de l'instruction est recopiée dans R.A.M;

⋆ le contenu du registre à ranger en mémoire est recopié dans R.D.M;

⋆ un cycle d'écriture est déclenché.

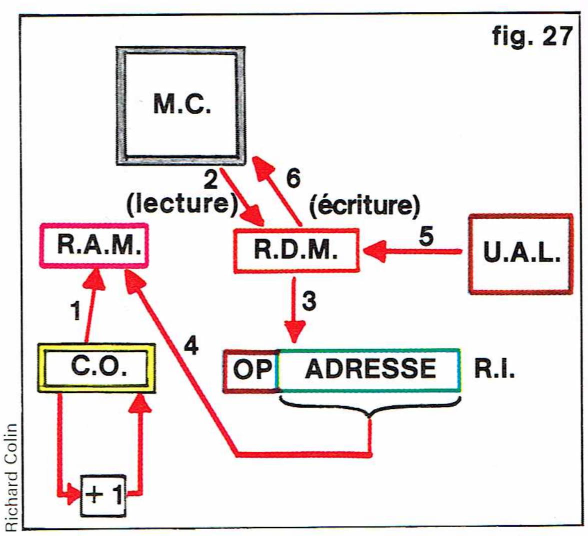

Richard Colin

● *l'instruction est une instruction de branchement* (conditionnel ou inconditionnel) : si les conditions de branchement sont réunies, ou s'il s'agit d'un branchement inconditionnel, la partie adresse de l'instruction est recopiée dans C.O (*fig.* 28).

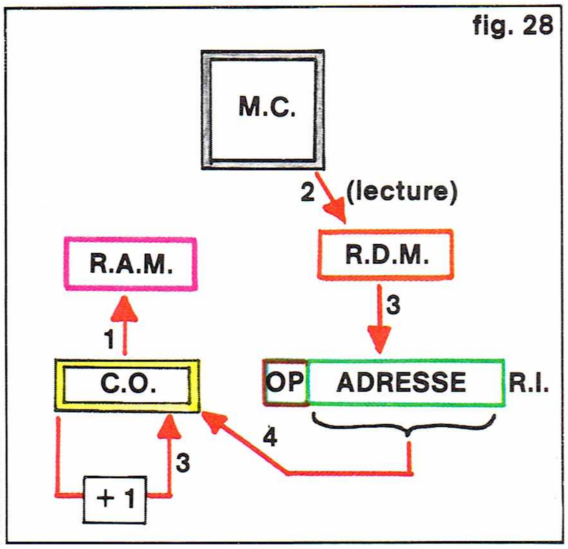

Richard Colin

◀ *Figure 28 : instruction de branchement ; la partie adresse de l'instruction est transférée dans C.O. à la place du contenu précédent.*

— **Instructions ne comportant pas d'adresse**

Ce sont des opérations ne faisant pas intervenir la mémoire, mais uniquement des informations déjà présentes dans les registres de l'unité centrale. L'opération est alors exécutée conformément à l'instruction.

Dans tous les cas, le compteur ordinal contient l'adresse de l'instruction suivante à exécuter, le calculateur recommence alors les différentes étapes pour l'instruction suivante, et le programme se déroule ainsi. Il est seulement nécessaire de charger l'adresse de démarrage dans le compteur ordinal, avant de lancer l'exécution du programme ; ensuite tout se déroule sans autre intervention. Le processus décrit ci-dessus n'est en fait que le processus de base. Il peut s'ajouter un certain nombre d'étapes intermédiaires. Celles-ci dépendent de la structure détaillée de l'unité centrale et du type d'instruction rencontré.

Adressage indirect

Au lieu de spécifier dans l'instruction l'adresse de l'opérande, on indique l'adresse d'un mot contenant l'adresse de l'opérande. Ce procédé est employé lorsqu'on ne peut pas connaître *a priori* l'adresse de l'opérande ; il est utilisé, par exemple, pour les transferts d'information à des sous-programmes. La seule information qu'un sous-programme reçoit est l'adresse de retour, qui lui est transmise au moment de l'appel. Si les informations dont il a besoin ont été placées dans des mots ayant des positions définies par rapport à l'adresse de retour, le sous-programme peut calculer les adresses où trouver ses arguments et aller les chercher par adressage indirect. A l'exécution d'un adressage indirect, il y a un cycle mémoire supplémentaire, le contenu du mot adressé dans l'instruction étant transféré dans le R.I. à la place de l'adresse qui y figurait, avant la phase d'exécution (*fig.* 29).

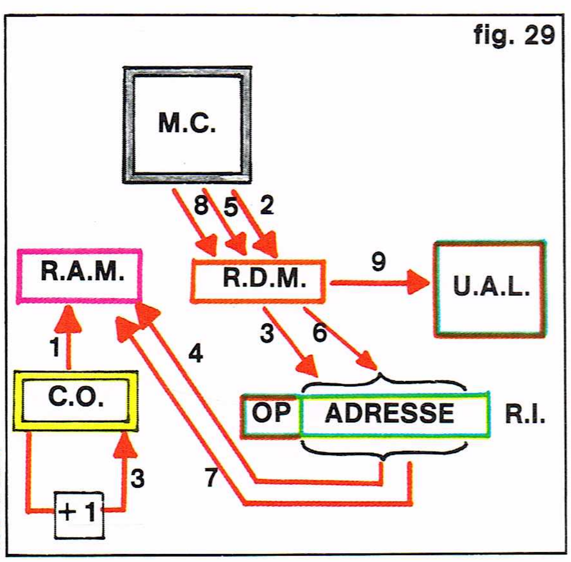

Richard Colin

Indexage

Certaines machines sont pourvues de registres d'index. Lorsqu'une instruction indexée est décodée, le contenu du registre d'index est ajouté à l'adresse figurant dans l'instruction. On peut ainsi, à partir d'une seule adresse, accéder à plusieurs mots mémoire en faisant varier le contenu du registre d'index. Ce procédé est très utile lorsqu'on a à traiter des informations contenues dans des tables (une table est constituée de plusieurs mots successifs contenant des informations de même type). On peut en effet explorer toute la table en n'utilisant que la première adresse (*fig.* 30).

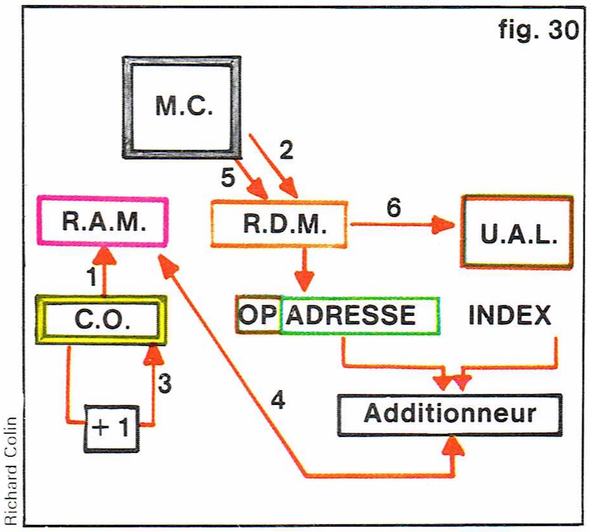

Richard Colin

◀ *Figure 30 : instruction avec adressage indexé.*

D'après la façon dont se déroulent les opérations, nous pouvons voir qu'il n'y a aucune différence de nature entre les instructions et les données. Tout est en mémoire. Les informations représentant des instructions doivent seulement être structurées correctement, pour éviter que des données ne soient transférées dans le registre d'instructions et interprétées comme des instructions. Cela peut se produire, par exemple, lorsqu'en rédigeant un programme on fait une erreur dans un calcul d'adresse se traduisant par un branchement à une mauvaise adresse. De plus, il est possible, pour le programme, de déplacer ou modifier certaines de ses instructions. En effet, celles-ci étant en mémoire, peuvent être transférées dans l'U.A.L. pour y être traitées tout comme des données, puis remises en mémoire.

Les entrées-sorties

Le calculateur doit échanger des informations avec le monde extérieur (chargement des programmes, lecture des données, sortie de résultats). Pour cela il est muni d'unités d'entrées-sorties (*fig.* 31).

▼ *A gauche, figure 29 : instruction comportant une lecture avec adressage indirect.*
A droite, figure 31 : structure générale des calculateurs électroniques.

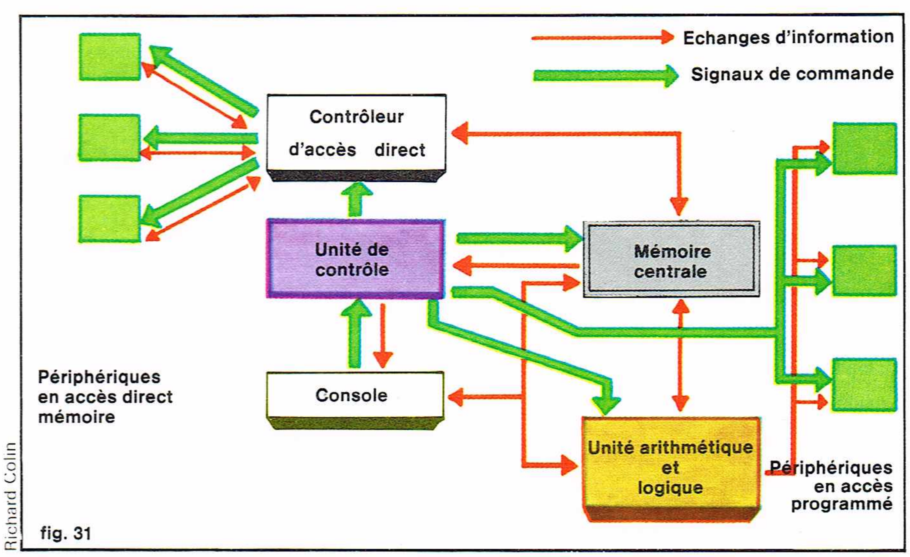

Richard Colin

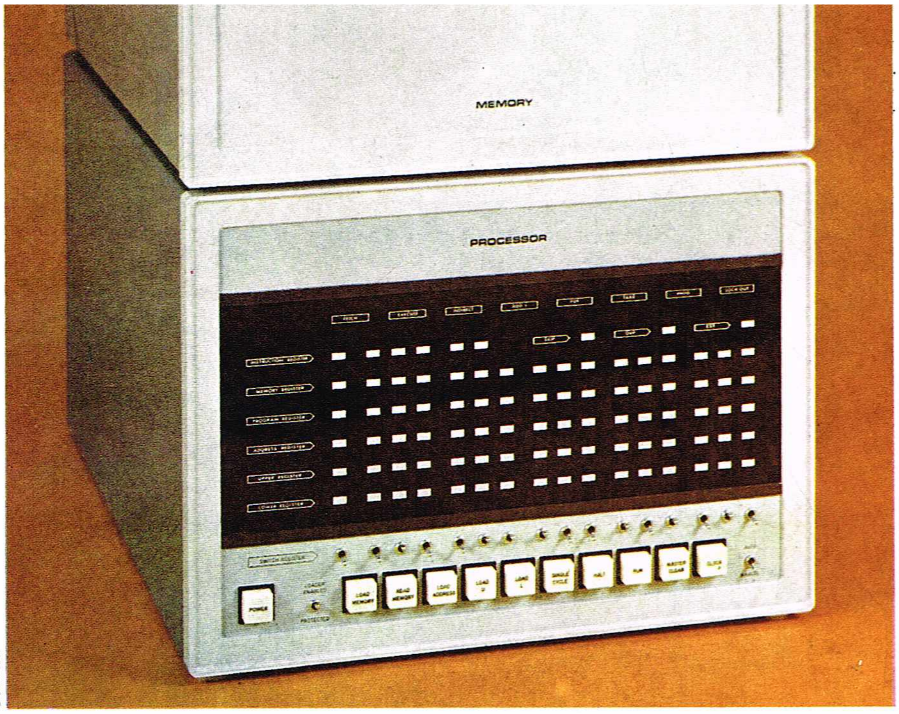

Selenia

▲ Console *du calculateur Selenia GP-16.*

La console du calculateur

La console est directement associée à l'unité centrale. Elle permet de commander manuellement certaines opérations qui, ordinairement, se déroulent de façon interne. Elle comporte deux types d'éléments :

— Des interrupteurs (ou clés), poussoirs, etc., permettant de coder des informations binaires, de les charger en mémoire ou dans certains registres, de provoquer des opérations élémentaires en déclenchant certains cycles au niveau de l'unité de commande.

— Des voyants lumineux permettant de visualiser les contenus de mots mémoire, de registres et l'état de l'unité centrale.

Elle permet donc, en principe, d'utiliser le calculateur, en chargeant programmes et données manuellement et en regardant les résultats directement en mémoire. Il est évident qu'une telle méthode n'est pas très efficace. Elle est employée uniquement pour vérifier des points de détail dans le fonctionnement du calculateur ou dans le déroulement d'un programme.

Les périphériques

Les périphériques sont des organes d'entrées-sorties, plus ou moins spécialisés, permettant des communications plus rapides et sous des formes plus appropriées que la console du calculateur. Leur fonction consiste à transposer une représentation des informations interne au calculateur (donc binaire) en d'autres représentations, sur des supports physiques variés ou *vice versa*. Il existe différents types de périphériques, cependant les échanges avec l'unité centrale se font pratiquement toujours selon les mêmes principes. Ces échanges peuvent se faire de deux façons :

— *Échanges programmés :* c'est l'unité centrale qui gère et commande toutes les opérations par son unité de contrôle. Toutes les opérations doivent donc figurer explicitement dans le programme.

— *Échanges en accès direct :* certains périphériques sont munis de circuits de commandes indépendants, et peuvent accéder par eux-mêmes à la mémoire centrale. Dans ce cas, le rôle de l'unité centrale consiste à initialiser le contrôleur du périphérique qui prend en charge le détail des opérations. De cette façon, l'unité centrale peut effectuer un travail interne pendant que le périphérique effectue ses transferts.

En plus des informations lues ou écrites, l'U.C. et le périphérique échangent des informations de contrôle. L'U.C. envoie des commandes et peut tester l'état du périphérique. En effet, les périphériques, comportant presque toujours des organes mécaniques, sont beaucoup plus lents que l'U.C. Celle-ci doit donc attendre que le périphérique ait terminé une action avant d'envoyer une nouvelle commande.

Il existe plusieurs types de périphériques, correspondant à différents besoins.

Communication directe homme-machine

— *Clavier alphanumérique :* semblable à un clavier de machine à écrire, il transmet au calculateur les codes correspondant aux touches frappées.

— *Téléimprimante :* elle imprime sur papier les caractères d'imprimerie correspondant aux codes transmis par le calculateur.

— *Écrans de visualisation à rayons cathodiques :* en affichant des points lumineux à des positions correspondant aux valeurs transmises par le calculateur, ils permettent de représenter soit des dessins, soit des caractères (donc des textes).

On trouve très souvent associés un clavier et une téléimprimante ou un écran. Cette combinaison permet le dialogue entre un opérateur, qui transmet des informations par le clavier, et un programme qui transmet des informations par l'écran ou la téléimprimante. Ce dialogue ne peut avoir lieu que sous la forme prévue dans le programme. Les programmes d'entrées-sorties comportent toujours des tests sur la nature de l'information qu'ils reçoivent. Par exemple, si l'opérateur doit entrer un nombre, et qu'il frappe un caractère non numérique (il arrive qu'on frappe la lettre O à la place du chiffre zéro), le programme ne doit pas en tenir compte, et recommencer la séquence de lecture.

Entrées-sorties sur cartes ou rubans perforés

On utilise beaucoup les cartes ou les rubans perforés, lorsqu'un dialogue n'est pas nécessaire entre l'utilisateur et le calculateur. Cartes ou rubans peuvent être perforés sur une perforatrice indépendante du calculateur, et lus en bloc par un lecteur connecté au calculateur.

▼ *A gauche, système GE-115 à cartes (General Electric) : la* carte perforée *représente l'unique support pour l'introduction, la mémoire et le traitement des données de ce système. A droite, détail d'une* imprimante *reliée aux systèmes électroniques.*

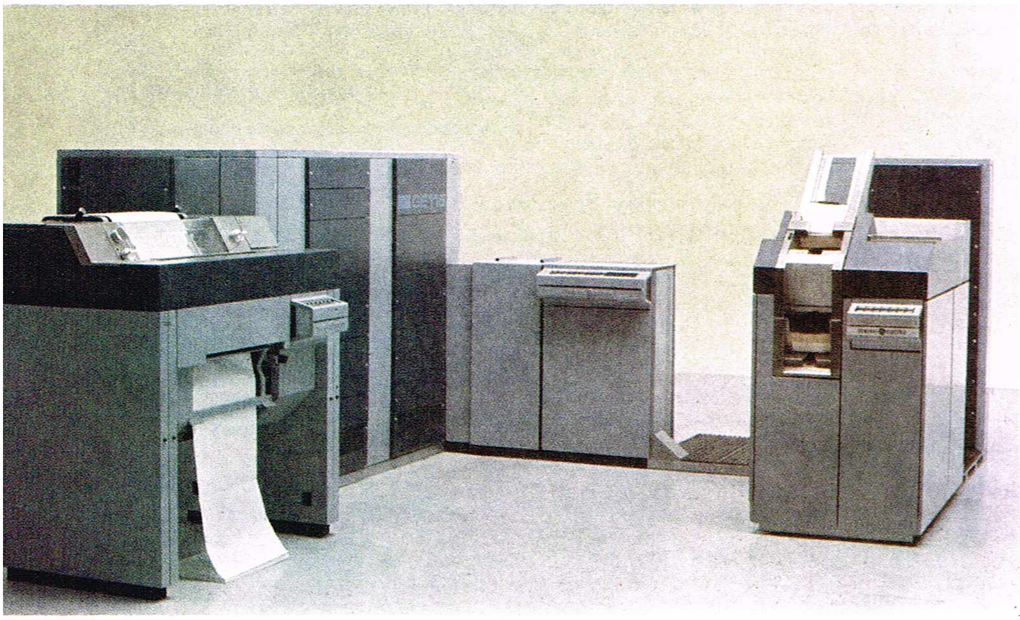

I.B.M.

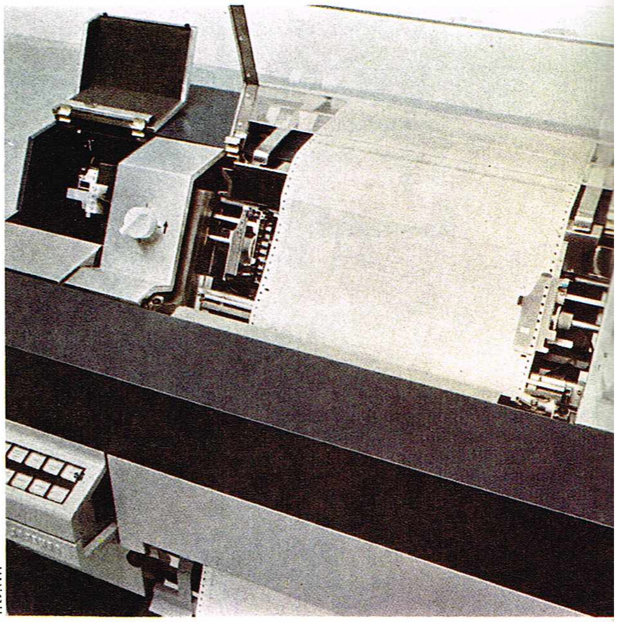

I.B.M.

On peut éventuellement faire perforer des résultats si on veut les réutiliser comme données pour d'autres programmes.

Imprimantes rapides

Très souvent, les résultats d'un programme doivent simplement être imprimés. Les imprimantes rapides impriment une ligne à la fois, contrairement aux téléimprimantes, associées à un clavier, qui impriment caractère par caractère.

Traceurs de courbes

Ils permettent de dessiner des figures, en commandant les déplacements d'une plume sur un papier.

Mémoires de masse

Pour stocker de grandes quantités d'informations on utilise des unités :

à bande magnétique,
à disque magnétique,
à tambour magnétique,
à feuillets magnétiques.

Ces périphériques ne sont pas destinés à la communication directe ou indirecte homme-machine. Ils permettent le stockage d'informations avec les avantages suivants :

— La même unité permet lecture et écriture sur le même support.

— Ils permettent d'accéder à toute l'information qu'ils contiennent, quel que soit l'ordre des opérations de lecture ou écriture qu'on veut effectuer.

— Ils ont des capacités élevées.

— Ils présentent des vitesses de transfert avec l'U.C. très élevées.

Périphériques spéciaux

Des équipements automatiques de mesure de grandeurs physiques (pressions, températures, tensions électriques, etc.) peuvent être connectés à un calculateur. Ainsi le calculateur peut enregistrer et surveiller ce qui se passe, par exemple dans une installation industrielle ou expérimentale. De même le calculateur peut être connecté à des organes de télécommande et commander lui-même ces installations.

Écriture et manipulation des programmes

Dans ce qui précède nous avons toujours considéré des cas d'exécution de programmes supposés en mémoire, sans préciser la manière de les y faire parvenir. Le programme, tel qu'il se présente en mémoire lors de l'exécution, est sous forme binaire, en langage machine. On peut envisager d'écrire ce programme directement en binaire, et de le charger en mémoire à l'aide des clés de la console. C'est, apparemment, la méthode la plus directe, elle présente cependant de graves inconvénients :

— les risques d'erreurs sont importants à l'écriture du programme, la relecture en est difficile ;

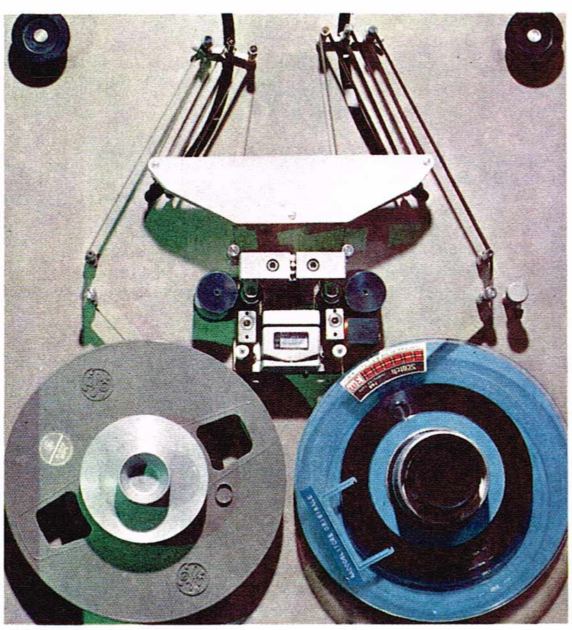

I.B.M.

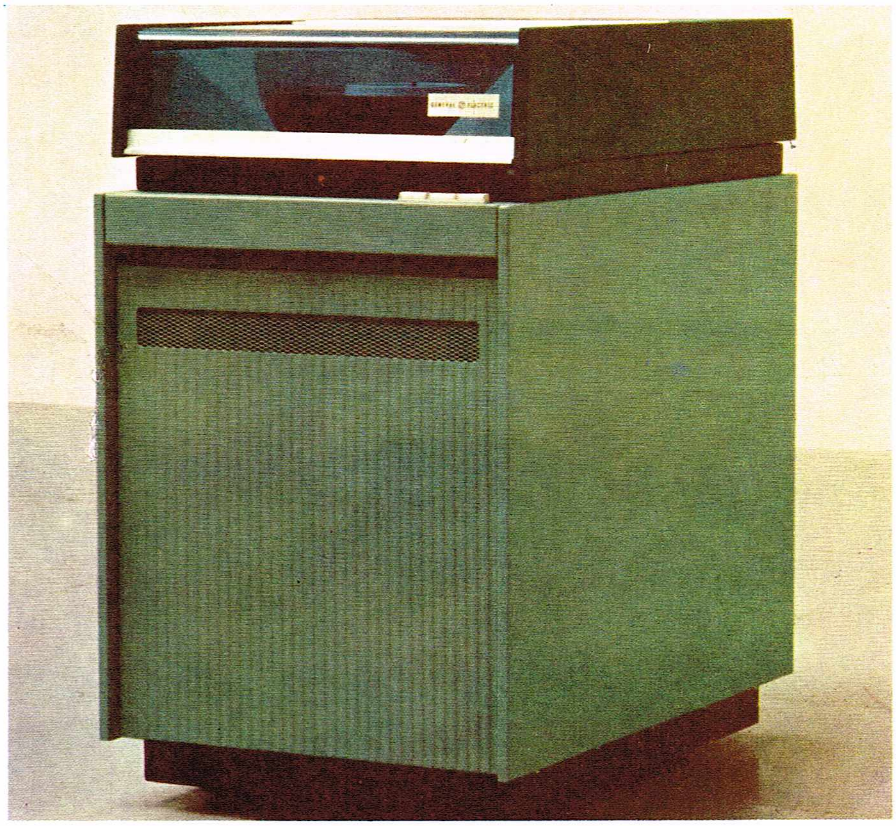

General Electric

▲ ***Unité à* disques magnétiques *; le disque présente par rapport au ruban le grand avantage de permettre un traitement non séquentiel des données.***

— l'introduction manuelle présente d'autant plus de risques de fausses manœuvres que le programme est plus long ; l'opération est lente et immobilise le calculateur pendant toute sa durée.

L'emploi de cette méthode ne peut donc pas être généralisé, cependant nous verrons quelques cas où cela peut être utile. Nous voyons que l'utilisation pratique d'un calculateur pose deux types de problème : — l'écriture des programmes, et — la manipulation des programmes (chargement). Pour faciliter ces opérations, on a recours à un ensemble de programmes spécialisés ; nous allons voir comment.

L'écriture des programmes

Le nombre des opérations élémentaires que peut réaliser un calculateur, peut être plus ou moins grand, selon le type de machine, mais c'est toujours un nombre fini, allant de quelques instructions à quelques dizaines en ce qui concerne les instructions courantes. Il est alors plus pratique d'utiliser des symboles, plus proches de la signification de l'opération, que des codes purement numériques, sans rapport avec l'opération et donc plus difficiles à retenir et à ne pas confondre. Par exemple, on peut convenir de représenter l'addition par le symbole ADD, la division par DIV, le branchement inconditionnel par JMP (en anglais *jump* = saut), etc. De même, on peut utiliser des symboles pour repérer des informations (nombres ou instructions) à l'intérieur même du programme, par exemple appeler X, Y, ou Z (ou de toute autre façon) des adresses dans le programme auxquelles on a besoin de faire référence. Ceci est à rapprocher de l'utilisation, en mathématiques, de lettres pour représenter les nombres, avec cependant la distinction importante qu'en informatique on représente les adresses et non les contenus.

Ainsi, l'instruction ADD X signifie : ajouter au contenu actuel de l'accumulateur le contenu du mot mémoire d'adresse X, et non la valeur X qui, elle, est une adresse. L'avantage d'une telle notation est qu'elle permet de faire référence, lors de l'écriture d'un programme, à des informations sans avoir besoin de connaître explicitement leur adresse. La valeur exacte de l'adresse ne sera en effet déterminée que plus tard, mais dans tout le programme, un même symbole représente toujours une seule adresse (ou une seule opération s'il s'agit d'un code opération).

◀ ***Détail d'une* mémoire à ruban.**

Considérons l'exemple très simple suivant. On veut ajouter un nombre à un autre nombre ; on dispose des opérations suivantes :

— chargement de l'accumulateur symbolisé par : CHA
— addition au contenu de l'accu. » » ADD
— rangement du contenu de l'accu. » » RCA
— arrêt du programme » » HLT

Il faut également disposer d'un moyen de réserver des mots mémoire pour les nombres à additionner ; supposons qu'on utilise le symbole DC suivi d'une constante. Le programme peut alors s'écrire ainsi :

CHA X	chargement du contenu de X dans l'accu.
ADD Y	addition du contenu de Y
RCA Y	rangement du résultat dans Y
HLT	arrêt
X/DC 25	définition des adresses X et Y et de leur
Y/DC 7	contenu initial

Nous voyons les symboles X et Y apparaître plusieurs fois de façon différente : — dans les instructions elles-mêmes, comme partie adresse de l'instruction et — comme définition d'adresse précédant le symbole DC. Chaque symbole peut apparaître autant de fois que cela est nécessaire comme partie adresse d'instruction mais doit apparaître une fois et une seule, comme définition d'adresse. Ainsi, si la première instruction du programme occupe l'adresse 0, et si chaque instruction occupe un mot, X représente l'adresse 4, Y l'adresse 5. Après l'exécution de ce programme, le contenu de X n'aura pas changé ; celui de Y sera remplacé par la somme des deux nombres, soit 32.

Supposons qu'on veuille réécrire ce programme de telle façon que les contenus des adresses X et Y ne soient pas modifiés en cours d'exécution. Il faut alors définir une autre adresse où l'on rangera le résultat. Le programme s'écrit alors ainsi :

```
  CHA X
  ADD Y
  RCA Z
  HLT
X/DC  25
Y/DC  7
Z/DC  0
```

Après exécution, le résultat se trouvera à l'adresse Z. Les contenus de X et Y auraient aussi pu être des résultats de calculs préalables ; dans ce cas la valeur numérique définie dans le programme est sans importance, mais il faudrait que la partie du programme calculant ces valeurs les range aux adresses correspondantes, au moyen d'instructions RCA X et RCA Y. Il faut remarquer la présence de l'instruction HLT à la fin du calcul ; en effet, sans cette instruction, le calculateur continuerait à prendre pour des instructions le contenu des adresses suivantes, ce qui a des conséquences imprévisibles mais souvent désastreuses dans un programme (destruction du programme en mémoire, par exemple).

Nous disposons ainsi d'une méthode pour écrire des programmes, d'une façon plus claire et plus pratique qu'en langage machine binaire, grâce à la possibilité d'utiliser des symboles. Cependant le programme doit être en binaire, au moment de le faire exécuter par le calculateur.

Traduction en langage machine

La traduction du programme symbolique en programme binaire est effectuée par un programme généralement appelé assembleur. Le travail de ce programme consiste essentiellement en deux points :

— Répertorier tous les symboles définissant des adresses dans le programme. Pour cela, l'assembleur lit une à une les instructions, en les comptant (nous supposerons pour simplifier qu'une instruction occupe toujours un mot mémoire). Chaque fois qu'il rencontre un symbole définissant une adresse il range ce symbole dans une table avec la valeur correspondante du comptage c'est-à-dire l'adresse.

— Remplacer, dans chaque instruction, le code opération symbolique par le code binaire correspondant. Les codes opérations sont obtenus à partir d'une table permanente, faisant partie de l'assembleur. Les adresses sont obtenues à partir de la table qui a été préalablement constituée. Les codes ainsi obtenus (opération et adresse) sont assemblés de façon à constituer une instruction machine.

L'assembleur, lorsqu'il effectue la traduction, occupe une partie de la mémoire du calculateur. D'autre part, les adresses ne sont pas toujours affectées définitivement à l'assemblage. En effet, s'il est toujours possible de définir une adresse à l'intérieur d'un programme, en convenant d'appeler adresse Ø l'adresse du premier mot occupé par le programme, on ne peut pas toujours choisir *a priori* l'adresse effective en mémoire à partir de laquelle on chargera le programme, pour le faire exécuter. Pour certains types de tâches, on utilise plusieurs programmes qui doivent résider simultanément en mémoire ; selon les besoins, ces programmes n'occuperont pas toujours les mêmes parties de la mémoire. De plus, l'assemblage d'un programme, surtout si ce programme est important, est une opération qui demande de la place en mémoire, et du temps de traitement. Il est alors plus rentable et plus commode de ne faire l'assemblage qu'une seule fois, et de disposer ensuite d'un programme binaire. Le programme binaire assemblé n'est donc pas directement chargé en mémoire centrale, mais est stocké par exemple sur bande ou disque magnétique, ou sur ruban perforé.

Chargement

Un programme ayant été traduit en binaire doit être chargé en mémoire centrale, pour être exécuté. On utilise pour cela un autre programme, appelé généralement *chargeur*. La nature des opérations effectuées par le chargeur dépend de deux choses.

— *La façon dont se fait l'adressage dans l'unité centrale, au cours de l'exécution.* Si l'adressage est fait par adresses, chaque instruction doit contenir l'adresse effective de l'opérande, qui peut dépendre de l'adresse initiale de chargement. Si l'adressage se fait par base et déplacement, toutes les adresses sont relatives, par rapport à une adresse de base définie dans le programme, et qui sera chargée dans le registre de base au début de l'exécution. Ces adresses relatives sont indépendantes du point de chargement.

— *Le type de code binaire généré par l'assembleur, dans le cas de l'adressage par adresses.* Si l'adresse de chargement a été choisie à l'écriture du programme, l'assembleur génère directement les adresses effectives. On dit qu'il s'agit d'un assembleur donnant un code binaire absolu. Le programme ainsi assemblé devra obligatoirement être chargé à l'adresse prévue. Par contre, si l'adresse de chargement doit rester au choix de l'utilisateur, l'assembleur ne peut pas générer les adresses effectives.

Ainsi dans l'exemple précédent, X représente l'adresse 4 dans le programme, mais si on choisit de le charger à partir de l'adresse 15ØØ, X devra représenter l'adresse 15Ø4 en mémoire. Selon les cas, le chargeur recopiera simplement en mémoire le code binaire, tel qu'il l'aura lu, ou bien calculera les adresses effectives, en ajoutant aux adresses définies dans le programme l'adresse de chargement, avant de mettre en place le code binaire. Dans ce dernier cas, le chargeur doit pouvoir faire la distinction, dans le code binaire généré par l'assembleur, entre les mots contenant des références mémoire, par exemple des instructions avec opérandes ou des pointeurs contenant des adresses, et qui doivent donc être modifiés en fonction de l'adresse de chargement, et d'autre part les mots contenant des constantes ou des instructions ne faisant pas appel à la mémoire et qui sont donc indépendants de l'adresse de chargement. Pour ce faire, l'assembleur « marque » chaque mot du programme différemment, selon qu'il devra ou non être modifié au chargement. Le chargeur ne modifie alors que les mots concernés.

Au moment du chargement, le chargeur occupe lui-même une partie de la mémoire. Il est donc impossible qu'un programme soit chargé à cet endroit, cependant on peut généralement utiliser cette place, par exemple pour stocker des données qui seront lues par le programme, le chargeur étant alors « écrasé ».

On se trouve apparemment dans un cercle vicieux : pour écrire et charger un programme, il faut disposer d'autres programmes. Ces programmes, comment les écrire et les charger ? Remarquons d'abord qu'il suffit d'obtenir au moins une fois ces deux programmes en binaire. On peut ensuite en faire autant de copies que l'on désire. Pour cette raison, ces programmes sont géné-

ralement réalisés par le constructeur de la machine et vendus en même temps. Le problème se réduit donc, pour le constructeur, à faire un assembleur et un chargeur, lorsqu'il fabrique un nouveau modèle. En général, on utilise pour cela un autre calculateur, avec un programme qui « simule » un assembleur, et qui produit les programmes binaires, par exemple sur ruban perforé.

Utilisation d'un calculateur

Le problème pratique qui se pose à l'utilisateur est la mise en œuvre du calculateur. Celle-ci dépend de la configuration physique de l'ensemble, en particulier des périphériques disponibles et de la capacité mémoire. Pour exécuter un programme, les opérations successives sont :

— Rédaction du programme et préparation du programme source (ruban perforé par exemple).

— Chargement et exécution de l'assembleur pour traduire le programme en binaire.

— Chargement et exécution du programme proprement dit.

Les opérations concernant directement le calculateur sont donc essentiellement le chargement et le démarrage des programmes. Elles peuvent être réalisées manuellement, en introduisant en mémoire, à l'aide des clés de la console un programme de chargement. En général, il s'agit d'un programme très court, destiné à lire un chargeur plus performant. Le démarrage s'effectue en chargeant de la même façon l'adresse de départ du programme. Ces opérations doivent être répétées pour chaque programme, il y a donc intérêt à les rendre automatiques.

Notion de système d'exploitation

L'adjonction au calculateur d'une mémoire de masse périphérique (par exemple une unité de disque magnétique) et l'utilisation de certains programmes *ad hoc* permettent de simplifier la tâche de l'utilisateur.

Pour cela, on réserve une partie de la mémoire centrale pour un programme appelé *moniteur* ou *superviseur;* ce programme est destiné à gérer l'ensemble des tâches en faisant tout ce qui ne nécessite pas une intervention particulière de l'utilisateur. Une partie du disque est également réservée au moniteur pour ses besoins propres, une autre partie comporte les programmes évoqués ci-dessus; le reste de la place est à la disposition des utilisateurs.

Le moniteur comporte plusieurs parties, assurant chacune certaines fonctions :

— communications avec les utilisateurs, par exemple par l'intermédiaire d'un télétype;

— décodage des informations fournies par l'opérateur;

— échanges entre unité centrale et périphériques.

Les informations enregistrées sur le disque sont groupées en fichiers. Un fichier est un ensemble structuré d'enregistrements, repéré par un *nom* grâce auquel le moniteur peut le localiser et l'utiliser. Certaines parties du moniteur sont résidentes, c'est-à-dire toujours présentes en mémoire centrale; les autres parties sont chargées uniquement en cas de besoin, et les parties de la mémoire utilisées sont de nouveau disponibles après. Ce procédé permet de ne réserver qu'une petite partie de la mémoire centrale au moniteur, le reste étant à la disposition des utilisateurs.

L'utilisateur dispose alors de commandes ou instructions de contrôle pour indiquer au moniteur les tâches à exécuter. Ces commandes sont passées soit par le clavier, soit encore par des cartes perforées, comportant un code spécial les identifiant comme cartes de contrôle.

Le démarrage proprement dit du calculateur consiste à charger manuellement un programme court (appelé *boostrap*) destiné à lire un programme d'initialisation. Ce programme charge la partie résidente du moniteur et lui passe le contrôle. Le moniteur est alors prêt à recevoir des commandes. Après cela il n'y a, en principe, plus d'opération à effectuer manuellement à la console, tout se déroulant sous le contrôle du moniteur.

A titre d'exemple, voici, de façon pratique, comment se déroule un travail sur un gros calculateur.

— On écrit le programme. Très souvent on utilise un langage de programmation plus évolué que le langage d'assemblage (voir plus loin).

— On perfore le programme sur cartes.

— On ajoute les cartes de contrôle donnant au moniteur toutes les indications concernant le travail (langage utilisé, exécution ou seulement traduction en langage machine, etc.).

— On place le tout dans le lecteur de cartes.

Le reste des opérations jusqu'à la sortie des résultats s'effectue sans autre intervention de l'utilisateur. Le moniteur et les autres programmes utilisés pour la réalisation d'un programme d'utilisateur constituent le *système d'exploitation*.

L'utilisation d'un système d'exploitation est nécessaire, car l'automatisation de beaucoup d'opérations, d'une part, réduit considérablement les risques d'erreurs, d'autre part, accélère le rendement de la machine par la suppression des interventions humaines, très lentes en comparaison de la vitesse du calculateur. Par ailleurs, elle facilite le travail des utilisateurs en les déchargeant de nombreuses opérations répétitives et fastidieuses.

Les gros calculateurs sont généralement dotés de systèmes puissants, permettant de gérer en même temps les travaux de plusieurs utilisateurs. Pour ces machines, il importe que le système soit performant, car il utilise lui-même une partie des ressources de l'ensemble (place en mémoire, temps d'unité centrale) et le coût d'exploitation de ces calculateurs est très élevé. On peut définir des critères de qualité, par exemple :

Rt = Rendement en temps d'unité centrale
Rm = Rendement en ressources mémoire

$$Rt = \frac{\text{Temps d'exécution des travaux d'utilisateur}}{\text{Temps total de travail}}$$

$$Rm = \frac{\text{Place mémoire disponible pour l'utilisateur}}{\text{Place mémoire totale disponible}}$$

Un bon système d'exploitation doit offrir beaucoup de facilités aux utilisateurs, tout en ayant le meilleur rendement possible.

Il faut remarquer un point important : pour le calculateur, les programmes du système d'exploitation sont des programmes comme les autres. Le fonctionnement physique du calculateur ne dépend pas du programme en cours d'exécution. Par contre, pour l'utilisateur, ces programmes sont « transparents » car il les utilise en permanence, sans avoir à les connaître en détail. Le calculateur et le système

```
/********* PROGRAMME "MAX"                      PAL8-V9B  NO/DA/TE  PAGE 1

            /********* PROGRAMME "MAX"
            /          ***************
            /
            /CE PROGRAMME CHERCHE L'ADRESSE ET LA VALEUR DU PLUS GRAND
            /NOMBRE CONTENU DANS UNE TABLE DE 64 MOTS MEMOIRE, SITUEE
            /A PARTIR DE L'ADRESSE: TAB . LES NOMBRES SONT DES ENTIERS
            /POSITIFS.
            /LA VALEUR DU MAXIMUM EST RANGEE A L'ADRESSE : MAX
            /L'ADRESSE DU MAXIMUM EST RANGEE A L'ADRESSE : ADMAX
            /EN FIN DE TRAITEMENT LE PROGRAMME S'ARRETE
            /
      0200  *200
00200 7300          CLA CLL
00201 1227          TAD INPTR
00202 3230          DCA PTR
00203 7001          IAC
00204 3231          DCA MAX
00205 3232          DCA ADMAX
00206 1233          TAD LONG
00207 3234          DCA CNTR
00210 7100  ENCORE, CLL
00211 1231          TAD MAX
00212 7041          CIA
00213 1630          TAD I PTR
00214 7630          SZL CLA
00215 5222          JMP UPDATE
00216 2230  INCR,   ISZ PTR
00217 2234          ISZ CNTR
00220 5210          JMP ENCORE
00221 7402          HLT
00222 1230  UPDATE, TAD PTR
00223 3232          DCA ADMAX
00224 1630          TAD I PTR
00225 3231          DCA MAX
00226 5216          JMP INCR
00227 0235  INPTR,  TAB
00230 0000  PTR,    0
00231 0000  MAX,    0
00232 0000  ADMAX,  0
00233 7700  LONG,   -100
00234 0000  CNTR,0
00235 0000  TAB,    ZBLOCK 100
            $
```

▲ ***Exemple de programme assemblé. Ce programme a été écrit pour un calculateur PDP 8/E de Digital Equipment, et assemblé avec l'assembleur PAL 8. La liste du programme est imprimée par l'assembleur. Elle comporte cinq colonnes : 1. les adresses (en octal); 2. le contenu des mots mémoire correspondants (en octal); 3. les définitions d'adresses symboliques (par exemple, MAX représente l'adresse 231); 4. le code opération symbolique ou le contenu du mot; 5. l'adresse de l'opérande pour les instructions contenant une référence à une adresse. Tout ce qui est précédé du signe / constitue des commentaires et n'est pas pris en compte au cours de l'assemblage.***

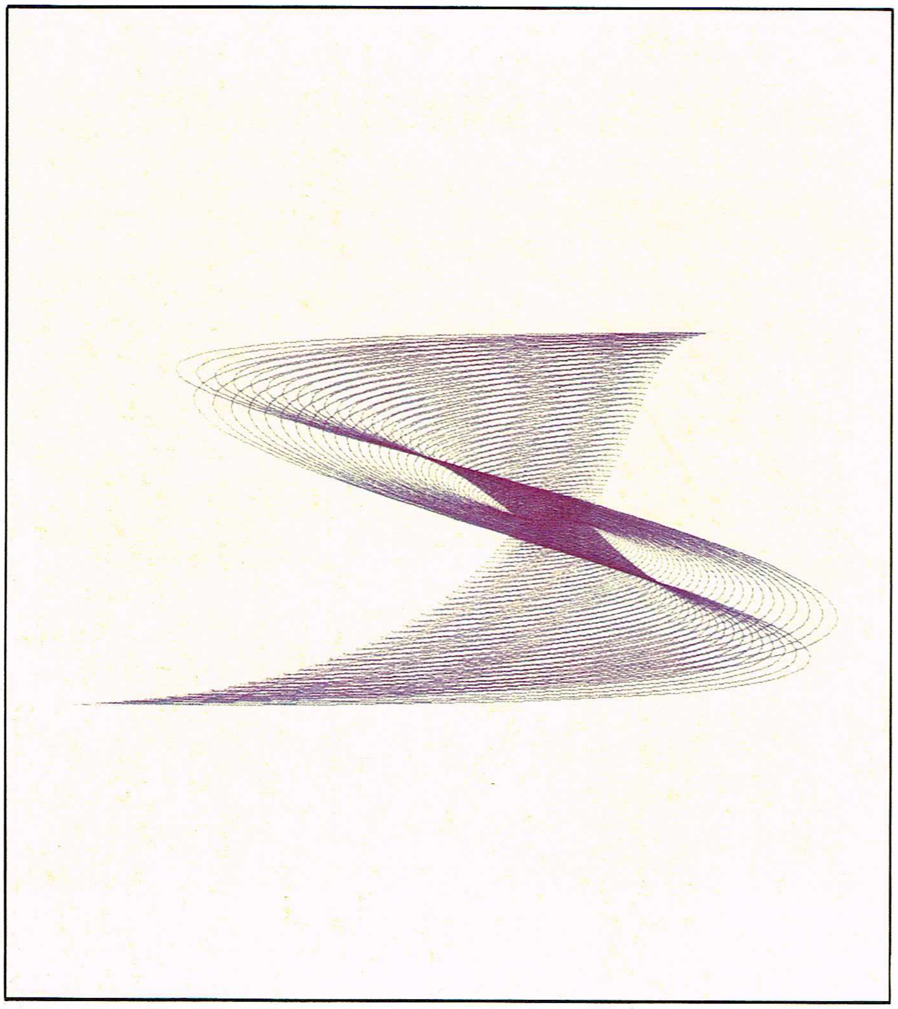

▲ *Le graphisme par ordinateur offre des possibilités multiples : ici, tracé obtenu par intégration numérique d'un système d'équations différentielles.*

d'exploitation constituent un ensemble de ressources que l'utilisateur emploie pour ses besoins propres, à savoir l'exécution de ses programmes.

Les langages évolués

Nous avons vu que la programmation en langage machine, même symbolique, était affaire de spécialiste, car elle demande une bonne connaissance de la structure et du fonctionnement détaillé de la machine. De plus, un programme écrit pour un modèle de calculateur est inutilisable sur un autre modèle. Pour ces raisons, on a créé des langages de programmation plus évolués, ayant un formalisme plus en rapport avec les problèmes traités, et surtout indépendants dans leur syntaxe du type de machine utilisée, mettant ainsi la programmation à la portée de beaucoup plus de gens et d'une façon relativement facile.

Le premier langage évolué a été créé en 1956. Il s'agit de **FORTRAN** (FORmula TRANslator). Ce langage utilise des notations très semblables aux notations mathématiques habituelles. Il est très utilisé dans les disciplines scientifiques, car il est surtout orienté vers les calculs.

ALGOL : plus évolué que Fortran, donc plus performant, il est cependant peu utilisé avec les calculateurs. Il est utilisé comme moyen de communication entre mathématiciens pour décrire des algorithmes.

COBOL : langage orienté vers les travaux de gestion, il n'est pas destiné à faire des calculs très compliqués, mais est très développé du point de vue des entrées-sorties et de la gestion de fichiers de données.

PL1 : langage universel, permettant aussi bien les calculs importants que la gestion. Créé en 1970, il est encore moins utilisé que Fortran ou Cobol.

Un langage évolué utilise des symboles et des opérateurs. Ces opérateurs représentent des opérations abstraites, et non les opérations qu'il faut faire exécuter concrètement au calculateur. Ainsi, par exemple, l'instruction WRITE en Fortran est une instruction de sortie, mais demande en réalité des centaines d'instructions machine.

Pour chaque langage et chaque type de calculateur, il faut un procédé de traduction en langage machine. La traduction est faite par un programme spécifique au calculateur utilisé ; ce programme est appelé compilateur, son travail comporte deux parties.

— Pour chaque instruction du langage considéré, décomposer l'opération en une suite d'opérations élémentaires exécutables par la machine. C'est une tâche comparable à ce que fait un programmeur qui prépare un programme en langage machine symbolique.

— Générer le code binaire correspondant aux séquences ainsi créées. Il s'agit en fait d'assembler le programme. Il se trouve souvent que l'assembleur utilisé sur un calculateur soit une partie d'un compilateur.

Chaque langage possède des règles d'écritures pour que chaque instruction puisse être analysée correctement et conformément au désir du programmeur. Le résultat de cette analyse par le compilateur doit d'une part représenter l'instruction initiale, d'autre part correspondre à la réalité physique du calculateur. En d'autres termes, l'analyse doit aboutir à une description finale du programme uniquement à l'aide d'éléments du langage machine.

Emploi des ordinateurs

Comme moyen de calcul

L'emploi des ordinateurs comme moyen de calcul permet d'aborder et de résoudre des problèmes, en particulier dans les disciplines scientifiques, qui seraient quasiment impossibles à traiter autrement. En effet certains problèmes n'ont pas de solution analytique connue et ne peuvent être traités que par des méthodes d'approximation numérique. D'autre part, la solution analytique de certains problèmes, connue sur le plan théorique, demanderait le travail de plusieurs générations de mathématiciens à cause de la complexité des calculs, de leur longueur ou de la masse de données à traiter.

Gestion

En général, les problèmes de gestion ne demandent pas des calculs d'une grande complexité mathématique. Cependant, ils portent sur de grandes quantités de données. Les ordinateurs permettent de tenir à jour et d'exploiter efficacement et rapidement des masses énormes de données (gestion de stocks, comptabilité, banques de données, etc.).

Temps réel

Dans les applications précédentes, le calculateur est employé de façon isolée. Il peut aussi être intégré à un ensemble plus vaste. Il s'agit des applications dites « en temps réel ». Le calculateur est connecté à des organes de mesure ou de surveillance pour acquérir des données, les trier, les stocker, en traiter une partie en temps réel, c'est-à-dire au rythme des phénomènes physiques étudiés. Il peut, en fonction des résultats trouvés, agir sur des organes de commande. Un exemple d'application est la conduite automatique de processus industriel, où le calculateur pilote et surveille une installation de production sans intervention humaine directe, sauf situation exceptionnelle (panne, entretien, modifications de la production).

BIBLIOGRAPHIE

CORGE C., *Éléments d'informatique. Informatique et démarche de l'esprit,* Larousse. - CROCUS, *Systèmes d'exploitation des ordinateurs. Principes de conception,* Dunod. - DEBRAINE P., *Machines de traitement de l'information. Circuits et programmes,* Masson. - DONDOUX J., MARANO P.-H., MERLIN J.-C., *Introduction à l'informatique. Structure et programmation des ordinateurs,* Armand Colin. - DREYFUS, *Fortran IV,* Dunod. - LABORDE J., *Cours pratique de langage Algol,* Dunod. - LAURENT A., *Principes de programmation des ordinateurs,* Masson. - MEINADIER J.-P., *Structure et fonctionnement des ordinateurs,* Larousse. - DE PALMA R., *Cours moderne de calcul automatique,* Albin Michel. - DU ROSCOÄT J., *Conception de la programmation des ordinateurs,* Masson. - SIMON J.-C., *Introduction au fonctionnement des ordinateurs,* Masson.

▲ *Le marché monétaire est le marché de l'argent au jour le jour. Les investisseurs institutionnels (grandes banques, compagnies d'assurances, S.N.C.F., etc...) y interviennent pour équilibrer leur trésorerie. La Banque de France y joue un rôle prépondérant par des transactions journalières importantes qui assurent l'équilibre de la balance des paiements du pays et le soutien de la monnaie nationale.*

MATHÉMATIQUES FINANCIÈRES

Le système monétaire est né le jour où les hommes ont privilégié un bien particulier (l'or ou n'importe quel métal précieux) dont les propriétés (rareté, sécabilité, brillance, etc.) étaient telles qu'il constituait un instrument universellement admis pour mesurer la valeur des autres biens et régler alors les échanges commerciaux. La monnaie était ainsi un bien semblable aux autres biens mais dont la *valeur d'usage* était augmentée d'une *valeur d'échange* reflétant la facilité offerte à son détenteur d'acquérir d'autres biens. Avec le développement des échanges commerciaux à partir du Moyen Age, on a vu cette valeur d'échange prendre une importance croissante au détriment de la valeur d'usage. Cette évolution s'est très nettement accentuée depuis la révolution industrielle du XIX[e] siècle qui a suscité l'organisation du système du crédit et l'apparition de structures bancaires et financières très puissantes. La monnaie est dès lors devenue l'objet de transactions sans que celles-ci soient liées à la contrepartie en or qui la définissait originellement : elles sont liées désormais à sa valeur d'échange, c'est-à-dire aux possibilités de consommation et d'investissement qu'elle permet.

Ces transactions s'établissent entre des prêteurs (banques, compagnies d'assurances, État, particuliers) et des emprunteurs (entreprises, banques, particuliers, etc.). Le prêteur est rémunéré selon des modalités admises par tous les intervenants. Ces modalités sont fixées par des règles de calcul très précises dont nous verrons qu'elles reflètent exactement la loi de l'offre et de la demande sur le marché des capitaux.

En rétribution du service rendu, l'emprunteur verse donc au prêteur une certaine somme, appelée *intérêt* et qui n'est autre que le loyer de l'argent prêté. L'intérêt est bien sûr proportionnel au montant du prêt. Mais son calcul est différent suivant sa durée. A cet égard nous distinguerons les opérations financières à court terme *(intérêt simple)* des opérations à long terme *(intérêt composé)*.

Opérations financières à court terme - Intérêt simple

On appelle opérations à court terme les prêts et les emprunts dont la durée n'excède pas l'année.

Le **taux d'intérêt** est l'intérêt qui rémunère le prêt de 1 F pendant un an ; il s'agit donc d'un taux annuel que l'on notera i. Il est le plus souvent représenté par un pourcentage (10,33 %, 13 %, etc.).

Considérons un prêt caractérisé par les éléments suivants :

— *montant du prêt :* C,
— *durée du prêt :* n jours ($n \leqslant 360$),
— *taux annuel :* i.

L'intérêt I que l'emprunteur devra verser au prêteur au terme de la durée du prêt est proportionnel à ces trois grandeurs. Il est donné par la formule :

$$\text{(1)} \qquad \mathrm{I} = \mathrm{C}\,\frac{i \cdot n}{360}$$

A l'échéance, l'emprunteur devra rembourser la somme de $\mathrm{C}\left(1 + \frac{i \cdot n}{360}\right)$.

Exemple : $\mathrm{C} = 250\,000$ F $\quad i = 12$ % $\quad n = 90$ jours

$$\mathrm{I} = \frac{250\,000 \times 12 \times 90}{360} = 7\,500 \text{ F}$$

La formule **(1)** exprime bien la proportionnalité de I au nombre de jours de la durée du prêt. Ceci est remarquable, compte tenu des opérations financières au jour le jour auxquelles se livrent les grands organismes économiques et financiers, notamment sur le marché monétaire. Ces opérations portent sur des montants considérables et le report d'un jour ou deux de l'échéance d'un prêt

▶ *Page ci-contre, figure 2 : représentation schématique du principe d'équivalence. Figure 3 : l'évaluation d'une suite d'annuités dépend du taux d'évaluation, du montant de chaque annuité et du nombre de ces annuités.*

▼▶ *Ci-dessous, tableau I : valeur acquise d'un capital de 1 F au bout de* n *années. En bas, tableau II : valeur actuelle de 1 F disponible dans* n *années. Ci-contre, figure 1 : voir développement dans le texte.*

donne lieu à des coûts financiers que le gestionnaire ou le banquier ne néglige pas. D'où l'importance des délais de paiement dans les opérations commerciales puisque tout retard ou toute avance dans les paiements a des conséquences sur la rentabilité de l'entreprise. C'est tout le problème de la gestion optimale de la trésorerie des firmes qui se trouve posé au travers de la formule **(1)**.

Notons que l'intérêt se paie à l'échéance du prêt, au moment du remboursement, et non avant. C'est ainsi que les opérations d'**escompte** sont pratiquées à l'encontre de cette règle puisque le banquier fait payer l'intérêt au début du prêt (en le déduisant du montant demandé). Il s'ensuit un coût financier plus élevé pour l'emprunteur. Autrement dit, le taux d'intérêt annoncé dans les opérations d'escompte (e) est inférieur au taux réellement pratiqué (t) :

Soit C le capital prêté à un terme de n jours. Le taux d'escompte annoncé par le banquier est e. Au moment du versement des fonds, celui-ci va verser au client non pas C mais $\left(C - \frac{ne}{360} C\right)$. Au bout des n jours, le client remboursera C. Le taux réellement pratiqué t est donné par la formule :

$$\left(C - \frac{ne}{360} C\right)\left(1 + \frac{nt}{360}\right) = C$$

soit $t = \dfrac{e}{1 - \dfrac{ne}{360}}$; on a donc $e < t$.

Opérations à long terme - Intérêts composés

Considérons un prêt durant plusieurs années (5, 10, 20 ans par exemple). Il est légitime d'admettre que l'intérêt produit au titre d'une année est ajouté au capital emprunté pour former un nouveau capital portant intérêt pendant les années suivantes. Tel est le principe de la règle des intérêts composés.

Valeur acquise par un capital au bout de n années

Soit D le montant du prêt et i le taux (annuel) auquel est rémunéré le prêt. Le prêteur cherche à connaître le montant A_n qui lui reviendra lorsque le prêt lui sera remboursé, en une seule fois, à l'échéance. A_n est appelée la *valeur acquise du capital D*.

A la fin de la première année, le prêt a produit un intérêt s'élevant à $i \cdot D$; la valeur acquise A_1 est égale à $D\ (1 + i)$. L'intérêt est alors ajouté au capital ; il devient alors productif d'intérêt pour l'année suivante. A la fin de la deuxième année, le prêt a produit un intérêt s'élevant à $i \cdot A_1$. C'est-à-dire que la valeur acquise au bout de deux ans est égale à $A_1\ (1 + i)$, soit $D\ (1 + i)^2$. En raisonnant de la sorte pour les années suivantes, on montre que la valeur acquise A_n est donnée par :

(2) $$A_n = A_{n-1}\ (1 + i) = D\ (1 + i)^n$$

Il ressort de la formule **(2)** que A_n croît « très vite » avec le nombre d'années n *(croissance* dite *« exponentielle »)*.

Exemple : 1 F placé en 1926 au taux de 7 % deviendrait aujourd'hui (en 1976) 29,45 F (tableau I). C'est-à-dire qu'un capital placé dans ces conditions aurait été multiplié par 30 ! (les effets des dévaluations successives de la monnaie depuis cette époque ont bien sûr largement corrigé cette progression...).

Valeur actuelle d'une somme disponible dans n années

La valeur actuelle d'une somme A payable dans n années est la somme D_n qui, placée à intérêts composés pendant ces n années au taux i, aurait pour valeur acquise A (*fig.* 1 et *tableau* II).

Tableau I - Valeur acquise d'un capital de 1 F au bout de n années en fonction du taux d'intérêt i

n \ i	9,25 %	9,50 %	9,75 %	10 %
1	1,092 500	1,095 000	1,097 500	1,100 000
2	1,193 556	1,199 025	1,204 506	1,210 000
3	1,303 960	1,312 932	1,321 946	1,464 100
4	1,424 577	1,437 661	1,592 292	1,610 510
10	2,422 225	2,478 228	2,535 393	2,593 742
50	83,381 991	93,477 253	104,767 463	117,390 850

Tableau II
Valeur actuelle de 1 F disponible dans n années

n \ i	9,25 %	9,50 %	9,75 %	10 %
1	0,915 332	0,913 242	0,911 162	0,909 091
2	0,837 832	0,834 011	0,830 216	0,826 446
3	0,766 895	0,761 654	0,756 461	0,751 315
4	0,701 963	0,695 574	0,689 258	0,683 013
10	0,412 844	0,403 514	0,394 416	0,385 543
50	0,011 993	0,010 698	0,009 545	0,008 519

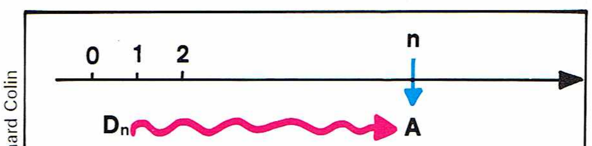

fig. 1

Richard Colin

D'après ce que nous venons de voir au paragraphe précédent, nous avons :

$$D_n = \frac{A}{(1 + i)^n} = A\ (1 + i)^{-n}$$

Cette formule est d'une importance tout à fait essentielle dans le calcul économique et financier car elle permet de comparer et donc d'ajouter des sommes disponibles à des époques différentes.

Exemple : supposons une personne placée devant l'alternative suivante : recevoir 950 F dans 2 ans, ou recevoir 1 300 F dans 5 ans. Que va-t-elle choisir, sachant que le taux d'intérêt en vigueur sur le marché est de 10 % ? Pour répondre à la question, il faut calculer les valeurs actuelles de ces deux sommes : la valeur actuelle de 950 F est $\frac{950}{(1 + 0{,}10)^2}$ celle de 1 300 est de $\frac{1\,300}{(1 + 0{,}10)^5}$ soit respectivement 813,50 F et 807,17 F. Le meilleur choix est donc le premier.

On aurait tout aussi bien pu comparer les valeurs acquises pour ces deux sommes au moment de la 5e année, ce qui revient à comparer $950\ (1 + 0{,}10)^3$ et 1 300. Le résultat aurait été le même.

Ainsi donc, d'une manière générale, pour comparer deux capitaux disponibles à des dates différentes, il suffit de comparer leurs valeurs (actuelles ou acquises) à une *date identique.*

Équivalence

Deux capitaux ou deux ensembles de capitaux sont équivalents à une date donnée et à un taux donné si, à cette date, leurs valeurs exprimées en fonction de ce taux sont égales. Il s'agira de valeurs acquises ou actuelles suivant que la date d'évaluation est antérieure ou postérieure aux dates auxquelles sont disponibles les deux capitaux.

Il peut en effet arriver que, pour des raisons commerciales ou financières, il soit nécessaire de remplacer un capital ou un ensemble de capitaux par un autre capital ou un autre ensemble de capitaux. Pour que l'échange ne soit contesté par aucune des parties en présence (débiteur et créancier), il faut qu'il se fasse entre des capitaux équivalents de manière à ce que le *temps* ne soit point négligé.

Exemple : un commerçant a contracté deux dettes auprès d'un même créancier : la première en 1972 d'un montant de 80 000 F à 8 % devant échoir en 1979, la seconde en 1974 d'un montant de 100 000 F à 9 % devant échoir en 1981. Ces deux dettes sont remboursables en une seule fois à échéance. Le commerçant se met d'accord aujourd'hui (1976) avec son créancier pour remplacer ces deux paiements par un paiement unique à échéance en 1980 au taux de 10 %. Quel doit être le montant de cette nouvelle dette (*fig.* 2) ?

En 1979, la première dette vaudra 80 000 $(1 + 0{,}08)^7$, la deuxième en 1981 vaudra 100 000 $(1 + 0{,}09)^7$. Les valeurs actuelles en 1976 de ces deux sommes, évaluées au taux de 0,10 %, sont respectivement de :

$$\frac{80\,000\,(1 + 0{,}08)^7}{(1 + 0{,}10)^3} \quad \text{et} \quad \frac{100\,000\,(1 + 0{,}09)^7}{(1 + 0{,}10)^5}.$$

Le montant X cherché est égal à la somme de ces deux nombres : X = 96 965 + 113 336 = 201 301 F.

Les annuités

On appelle *annuités* des versements dont les échéances sont séparées par des intervalles égaux (en général d'une année). Elles sont constamment utilisées en finance, soit dans le remboursement d'une dette, soit dans la constitution d'un capital ; il importe donc de pouvoir évaluer une suite d'annuités. Cette évaluation va dépendre du taux d'évaluation, du montant de chaque annuité et du nombre de ces annuités.

Considérons donc une séquence de n annuités d'un montant $a_1, a_2, ..., a_k, ..., a_n$. Par convention, on posera que l'annuité a_k échoit à la fin de l'année k (*fig.* 3).

L'évaluation d'une telle suite est une application du principe d'équivalence que nous avons présenté. A la date 0, la valeur V_0 de cette suite est égale à la somme des valeurs actuelles des annuités a_k (on parle de *somme actualisée*).

$$V_0 = a_1\,(1 + i)^{-1} + a_2\,(1 + i)^{-2} + ... + a_k\,(1 + i)^{-k} + ... + a_n\,(1 + i)^{-n}.$$

Le cas que l'on rencontre le plus fréquemment est celui où les annuités sont égales : $a_k = a$ $(k = 1, ..., n)$; V_0 s'écrit alors

$$V_0 = a\,[(1 + i)^{-1} + ... + (1 + i)^{-k} + ... + (1 + i)^{-n}]$$

Le second membre de cette expression est la somme d'une progression géométrique de premier terme $a\,(1 + i)^{-1}$ et de raison $(1 + i)^{-1}$. A l'aide d'une formule bien connue, on écrit :

(3) $$V_0 = a\,\frac{1 - (1 + i)^{-n}}{i} \qquad (\textit{tableau III})$$

Si l'on connaît V_0 et si l'on cherche la valeur de l'annuité a, on obtient :

(4) $$a = \frac{V_0 \cdot i}{1 - (1 + i)^{-n}} \qquad (\textit{tableau IV})$$

Il peut être également intéressant de connaître la valeur acquise V_n de la suite d'annuités au moment du dernier versement : elle est égale à la somme des valeurs acquises par les différentes annuités :

$$V_n = a_1\,(1 + i)^{n-1} + a_2\,(1 + i)^{n-2} + ... + a_n$$

soit : $V_n = V_0\,(1 + i)^n$.

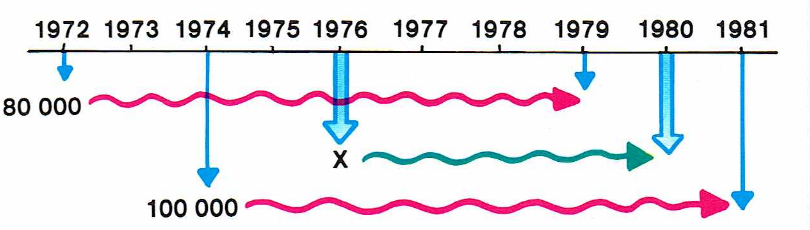

fig. 2

Richard Colin

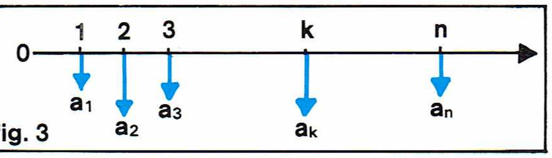

fig. 3

Richard Colin

▼ *Tableau III : valeur actuelle d'une suite d'annuités de 1 F versées pendant* n *années. Tableau IV : valeur des annuités constantes qui amortissent en* n *années un capital de 1 F.*

Tableau III - Valeur actuelle d'une suite d'annuités de 1 F versées pendant n années (cf. formule 3)

n \ i	9,25 %	9,50 %	9,75 %	10 %
1	0,915 332	0,913 242	0,911 162	0,909 091
2	1,753 164	1,747 253	1,741 377	1,735 537
3	2,520 059	2,508 907	2,497 838	2,486 852
4	3,222 022	3,204 481	3,187 096	3,169 866
10	6,347 637	6,278 798	6,211 116	6,144 567
50	10,681 157	10,413 708	10,158 513	9,914 815

Tableau IV - Valeur des annuités constantes a qui amortissent en n années un capital de 1 F (cf. formule 4)

n \ i	9,25 %	9,50 %	9,75 %	10 %
1	1,092 500	1,095 000	1,097 500	1,100 000
2	0,570 397	0,572 327	0,574 258	0,576 190
3	0,396 816	0,398 580	0,400 346	0,402 115
4	0,310 364	0,312 063	0,313 765	0,315 471
5				0,263 797
10	0,157 539	0,159 266	0,161 002	0,162 745
50	0,093 623	0,096 027	0,098 440	0,100 859

Autrement dit, la valeur acquise de la suite d'annuités est égale à la valeur acquise de sa valeur actuelle.

Lorsque les annuités sont constantes, on obtient la formule :

$$V_n = a\,\frac{(1+i)^n - 1}{i}$$

Application aux emprunts

Emprunt indivis

Un emprunt indivis est une opération financière qui met en lice *un* emprunteur et *un* créancier : le créancier prête un capital K à son débiteur, lequel lui rembourse ce capital augmenté des intérêts sous forme d'annuités (que nous supposerons constantes pour la commodité du calcul). Comment fixe-t-on le montant de l'annuité, connaissant le taux i auquel est rémunéré le prêt ? Celui-ci est calculé de telle façon que la *valeur actuelle de la suite des versements soit égale au montant du prêt :* grâce à la formule **(4)** on écrit :

$$a = \frac{Ki}{1-(1+i)^{-n}} \qquad \textbf{(5)}$$

Ce mode de calcul est cohérent par rapport aux règles données plus haut. Cependant pour bien le comprendre, il est nécessaire de raisonner en *valeur acquise*.

Supposons que le créancier comme le débiteur aient tous deux la possibilité d'emprunter et de prêter de l'argent au taux i. Quels sont alors les comportements du créancier et du débiteur ?

— Le *créancier* a le choix entre deux possibilités :

* ne pas prêter le capital K à l'emprunteur en question et préférer le placer sur le marché pendant n années au taux i avec un remboursement en une seule fois au terme de ces n années ; il récolterait alors $K(1+i)^n$;

* accepter la proposition de l'emprunteur, ce qui lui rapporte chaque année une annuité a, soit au bout de n années $V_n = a(1+i)^{n-1} + a(1+i)^{n-2} + ... + a_n$, c'est-à-dire la valeur acquise de la suite d'annuités.

Il n'acceptera cette proposition que si $V_n \geqslant K(1+i)^n$.

— Le *débiteur* a lui aussi le choix entre deux possibilités :

* accepter la proposition du prêteur d'un prêt remboursable en n annuités ;

* préférer emprunter le capital K sur le marché et rembourser en une seule fois $K(1+i)^n$ au bout des n années ; mais il aurait alors la possibilité, sans que cela le gêne plus que dans la première possibilité, d'en consacrer chaque année une partie a à un placement au taux i, placement pouvant durer jusqu'à la n-ième année !

Il se livrera à cette double opération (emprunter d'une part pour replacer de l'autre) si $V_n \geqslant K(1+i)^n$. Par conséquent il n'acceptera la proposition du créancier que dans le cas où $V_n \leqslant K(1+i)^n$.

La loi de l'offre et de la demande conduit donc débiteur et créancier à se mettre d'accord sur l'égalité :

$$V_n = K(1+i)^n = V_0(1+i)^n \text{ soit } K = V_0$$

d'où la justification de la formule **(5)**.

L'annuité est ainsi déterminée par deux éléments : le remboursement du capital et le paiement des intérêts sur le capital non encore remboursé (l'*amortissement* et l'*intérêt*).

Dans la pratique, il importe de distinguer ces deux éléments. Du point de vue de l'entreprise, ils ne sont pas assujettis au même régime fiscal, les intérêts étant déductibles de la base imposable (ils entrent dans la catégorie des frais financiers) et le remboursement du capital étant pris en compte au niveau des amortissements.

Soit donc A_k l'amortissement inclus dans la k-ième annuité, D_k la somme restant due (en capital) immédiatement après le versement de la k-ième annuité. Le débiteur emprunte donc une somme $K = D_0$ qui lui est versée au début de la première année. A la fin de la première année, il paie à son créancier une première annuité a_1, celle-ci comprend l'intérêt produit par le placement du capital D_0 pendant une année au taux i, soit $D_0 i$; la différence $a_1 - iD_0$ représente la part du capital A_1 remboursée à la fin de la première année.

Le capital restant dû pendant la deuxième année est donc $D_1 = D_0 - A_1$; c'est donc sur D_1 que sera calculé l'intérêt compris dans la deuxième année. D'où $a_2 = iD_1 + A_2$ et ainsi de suite... jusqu'à la n-ième année.

On représente cette suite de calculs dans un tableau (*tableau* V).

A l'issue de la n-ième année, le capital est intégralement remboursé et donc $D_n = 0$. Ainsi donc $A_n\ (1+i)$.

Remarques :

— le taux d'intérêt est supposé constant pendant toute la durée de l'emprunt ;

— les intérêts dus *au titre de l'année écoulée* sont obligatoirement versés puisqu'ils sont compris dans l'annuité ; ils ne donnent donc pas lieu à capitalisation.

Grâce aux relations entre a_k, D_k et A_k dans le *tableau* V, il est possible d'écrire une relation entre deux annuités consécutives et les amortissements qui y figurent. Nous avons :

$$a_k = D_{k-1}\,i + A_k ; \qquad D_k = D_{k-1} - A_k ;$$

$$a_{k+1} = D_k\,i + A_{k+1} ;$$

d'où l'on tire $a_k - a_{k+1} = (D_{k-1} - D_k)\,i + A_k - A_{k+1}$

$$a_k - a_{k+1} = A_k(1+i) - A_{k+1} \qquad \textbf{(6)}$$

Emprunt à annuités constantes

Lorsque $a = a_k$, la formule **(6)** permet d'écrire : $A_{k+1} = A_k(1+i)$. Ainsi donc, la suite des amortissements est une progression géométrique de raison $(1+i)$ et dont le premier terme est $A_1 = a - iD_0$. Sachant que $a = \frac{D_0 i}{1-(1+i)^{-n}}$ il est facile de vérifier que la somme des amortissements $\sum_{i=1}^{n} Ai$ est égale au capital prêté D_0.

Ces quelques règles suffisent pour établir le *tableau d'amortissement d'un prêt* (*tableau* VI) : il s'agit d'un tableau qui, année par année, indique l'intérêt payé, la part de capital remboursé ainsi que la somme restant due (dette non encore éteinte).

Soit, par exemple, un emprunt de 200 000 F sur 5 ans à 10 %. A l'aide du *tableau* VI, on détermine le montant de l'annuité : $a = 200\,000 \times 0{,}263\,797 = 52\,759{,}40$ F.

▼ ***Ci-dessous, tableau V : calculs permettant de fixer le montant des annuités jusqu'au remboursement intégral du capital. En bas, tableau VI : tableau d'amortissement d'un prêt de 200 000 F sur 5 ans à 10 %.***

Tableau V

0		
1	$a_1 = D_0 i + A_1$	$D_1 = D_0 - A_1$
2	$a_2 = D_1 i + A_2$	$D_2 = D_1 - A_2$
3		
k	$a_k = D_{k-1} i + A_k$	$D_k = D_{k-1} - A_k$
n	$a_n = D_{n-1} i + A_n$	$D_n = D_{n-1} - A_n = 0$

Tableau VI
Amortissement d'un prêt de 200 000 F sur 5 ans

Années	Somme restant due	Intérêt	Amortissement	Annuités a
1	200 000,00	20 000,00	32 759,40	52 759,40
2	167 240,60	16 724,00	96 035,40	52 759,40
3	131 205,20	13 120,52	39 638,88	52 759,40
4	91 566,32	9 156,63	43 602,77	52 759,40
5	47 963,55	4 796,85	47 963,55	52 759,40
			200 000,00	

Emprunt - Obligations

Une entreprise (ou une administration) est souvent amenée à emprunter une somme importante pour procéder à de nouveaux investissements. Pour cela il est fréquent qu'elle fasse appel non pas à un seul prêteur mais à plusieurs. L'emprunt est alors divisé en *obligations* (nominales ou au porteur). La détention de celles-ci donne droit au versement d'un intérêt annuel contre remise d'un coupon. Chaque année, un certain nombre d'obligations sont remboursées, en général par tirage au sort. Ce nombre est déterminé par le tableau d'amortissement (*tableau* VII).

Exemple : considérons une entreprise qui émet un emprunt obligataire de C = 200 000 000 F réparti en 200 000 obligations de 1 000 F, à un taux de 10 % sur 5 ans en annuités constantes. Au terme de la k-ième année, l'annuité comprend une part d'intérêt et une part de remboursement A_k du capital. Cet amortissement est réparti en obligations qui sont alors remboursées. Le nombre N_k de titres remboursés est égal à $\frac{A_k}{C}$.

Il arrive parfois que le prix d'émission (E) des obligations soit inférieur à leur valeur nominale (C) et que le prix de remboursement (R) lui soit supérieur. Dans ce cas, le taux réellement pratiqué est plus élevé que le taux annoncé. Le principe de calcul des N_k reste sensiblement le même.

Application à la mesure de la rentabilité des investissements

Dans l'entreprise, l'investissement recouvre un grand nombre d'activités et de préoccupations : acquérir un nouvel outillage, organiser la formation de telle ou telle catégorie du personnel, développer un réseau commercial, acquérir une participation dans le capital d'une autre entreprise sont des activités que l'on appelle des investissements. Malgré leur diversité, elles partagent en commun le fait qu'elles produisent leurs effets sur plusieurs années aussi bien dans les charges dont elles grèveront les finances de l'entreprise que dans les recettes qu'elles occasionneront.

L'appréciation d'un investissement suppose que l'on ait à sa disposition une procédure d'arbitrage entre le présent et le futur de manière à comparer des entrées ou des sorties d'argent à des dates différentes. A côté des méthodes classiques permettant de mesurer la rentabilité d'un investissement, qui procèdent de techniques comptables (calculs de *ratios*) et qui donc ne font guère intervenir le temps, il existe plusieurs méthodes fondées sur l'actualisation ; il s'agit principalement de la *méthode de la valeur actuelle nette (V.A.N.)* et de celle du *taux de rendement interne (T.R.I.)*.

On suppose que la firme qui étudie un projet d'investissement connaît avec certitude le nombre n d'années de durée de l'investissement, les dépenses D_k et les recettes R_k occasionnées par l'investissement lors de la k-ième année, $0 \leqslant k \leqslant n$.

On appelle *cash-flow* de la k-ième année la différence (algébrique) $C_k = R_k - D_k$; on convient, dans ce type d'analyse, de ne prendre en compte que les encaissements et décaissements effectivement réalisés (on ne prend en compte ni l'amortissement du matériel ni les provisions de toutes sortes) ; C_k peut être positif ou négatif suivant les années. Le plus souvent la suite des cash-flows est négative pour les premières années puis positive pour les suivantes (on parlera alors d'investissement conventionnel).

La méthode de la valeur actuelle nette

La valeur actuelle nette d'un investissement est la somme (algébrique) des valeurs actuelles de tous les cash-flows, calculées avec un taux i dit *taux d'actualisation,* dûment choisi :

$$\text{V.A.N.} = \sum_{k=0}^{n} C_k (1 + i)^{-k} \qquad (7)$$

Exemple : soit l'investissement caractérisé par la suite des cash-flows : $C_0 = -14\,000$; $C_1 = +4\,000$; $C_2 = +6\,000$; $C_3 = +8\,000$. Sa valeur actuelle nette à 10 % est (voir *tableau* II) :

$$\text{V.A.N.} = -14\,000 + 4\,000 \times 0{,}909\,0 + 6\,000 \times 0{,}826\,7 + 8\,000 \times 0{,}751\,3 = +595{,}2 \text{ F.}$$

Tableau VII - Amortissement d'un emprunt de 200 000 obligations sur 5 ans

Années	Somme restant due	Amortissement	Nombre de titres remboursés
1	200 000 000	32 759 400	32 760
2	167 240 600	36 035 400	36 035
3	131 205 200	39 638 880	39 639
4	91 566 320	43 602 770	43 602
5	47 963 050	47 963 550	47 964
			200 000 titres

Dans cet exemple, on suppose que le coût de l'investissement (14 000 F) est intégralement supporté avant la première année.

La méthode de la V.A.N. consiste donc à classer les projets d'investissement dans l'ordre décroissant de leurs valeurs nettes. Le projet correspondant à la plus élevée sera réputé le meilleur.

Le choix du taux d'actualisation pose de multiples problèmes. Il peut dépendre de la structure financière de la firme (il pourra être égal à ce que les financiers appellent le « coût du capital »), des taux en vigueur sur le marché au moment de l'élaboration du projet ou d'autres éléments

▲ *Tableau VII :* ***tableau d'amortissement d'un emprunt obligataire donnant lieu, chaque année, au remboursement d'un certain nombre d'obligations.***
▼ ***L'obligation peut être nominale ou au porteur; sa détention donne droit au versement d'un intérêt annuel contre remise d'un coupon.***

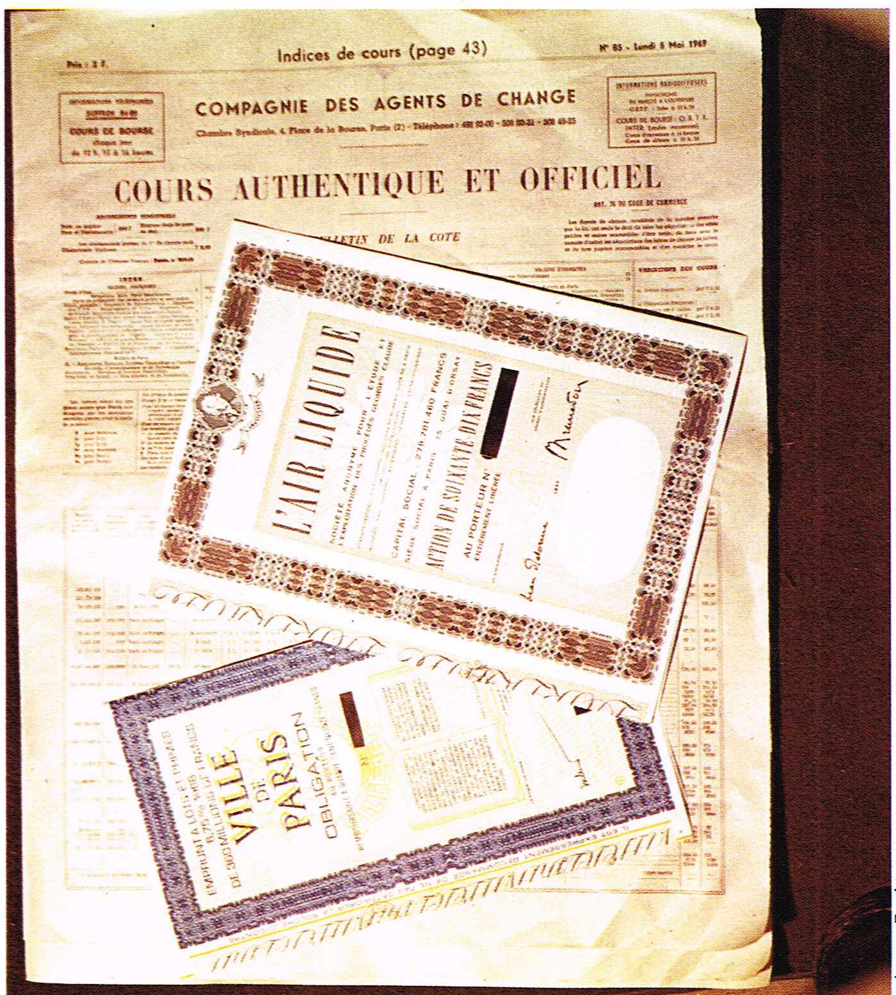

Ciccione - Rapho

▲ *La monnaie est l'objet de transactions s'établissant entre des prêteurs (banques, État, particuliers) et des emprunteurs (entreprises, banques, particuliers), moyennant un intérêt proportionnel au montant du prêt et à sa durée.*

F. Hidalgo - TOP

plus spécifiques. Ce choix relève de l'analyse financière proprement dite.

Taux de rendement interne

La valeur nette d'un investissement est une fonction V.A.N. (i) du taux d'actualisation. La formule **(7)** indique même qu'il s'agit d'un polynôme de degré n en $(1 + i)^{-1}$.

D'autre part V.A.N. (0) $= \sum_{k=0}^{n} C_k$ est positif (sinon l'investissement serait totalement improductif) ; lorsque $i \to +\infty$ V.A.N. (i) $\to C_0$ qui est négatif si l'on a affaire à un investissement conventionnel. Dans un tel cas, on montre que la fonction V.A.N. (i) est une fonction décroissante de i (pour $i \geqslant 0$). Prenant des valeurs positives et des valeurs négatives, il est clair qu'elle s'annule pour une certaine valeur (unique) i_0 du taux d'actualisation (*fig.* 4).

Le taux i_0 est appelé *taux de rendement interne de l'investissement*. Plus ce taux est élevé, plus l'on dira que l'investissement est rentable. On classera donc des projets par ordre croissant de taux de rendement interne.

La détermination de cette valeur i_0 pose quelques problèmes de résolution dans la mesure où V.A.N. (i) est un polynôme de degré n et que la recherche d'une racine ne peut se résoudre que par approximations successives (pour $n \geqslant 3$).

Comparaison des deux méthodes

La méthode du T.R.I. ne tient pas compte de la dimension de l'investissement : en effet si un investissement est caractérisé par une suite de cash-flows $\{C_k\}$, l'investissement ayant une suite de cash-flows $\{10\ C_k\}$ ou $\{1\ 000\ C_k\}$ aura le même taux de rendement interne. La méthode de la V.A.N., sur ce point, permet de prendre en compte la dimension de l'investissement.

Cependant la méthode du T.R.I. fournit un *critère objectif* de rentabilité alors que la méthode de la V.A.N. suppose la connaissance d'un taux d'actualisation dont la définition, ainsi que nous l'avons dit, n'est pas exempte d'arbitraire et de subjectivité.

Enfin la méthode de la V.A.N. permet de tenir compte de l'éventualité d'une variation de taux et donc de mesurer la rentabilité d'un investissement en fonction de diverses situations économiques possibles.

BIBLIOGRAPHIE

COLASSE B., *la Rentabilité, Analyse, Prévision et Contrôle,* coll. Entreprise, Dunod, 1973. - DUBRULLE L. et MAZERAN J., *Actualisation et Équivalence,* Masson, 1974. - PASCAL-FALGUIÈRES M., *Nouvelles Tables financières,* Foucher, 1970.

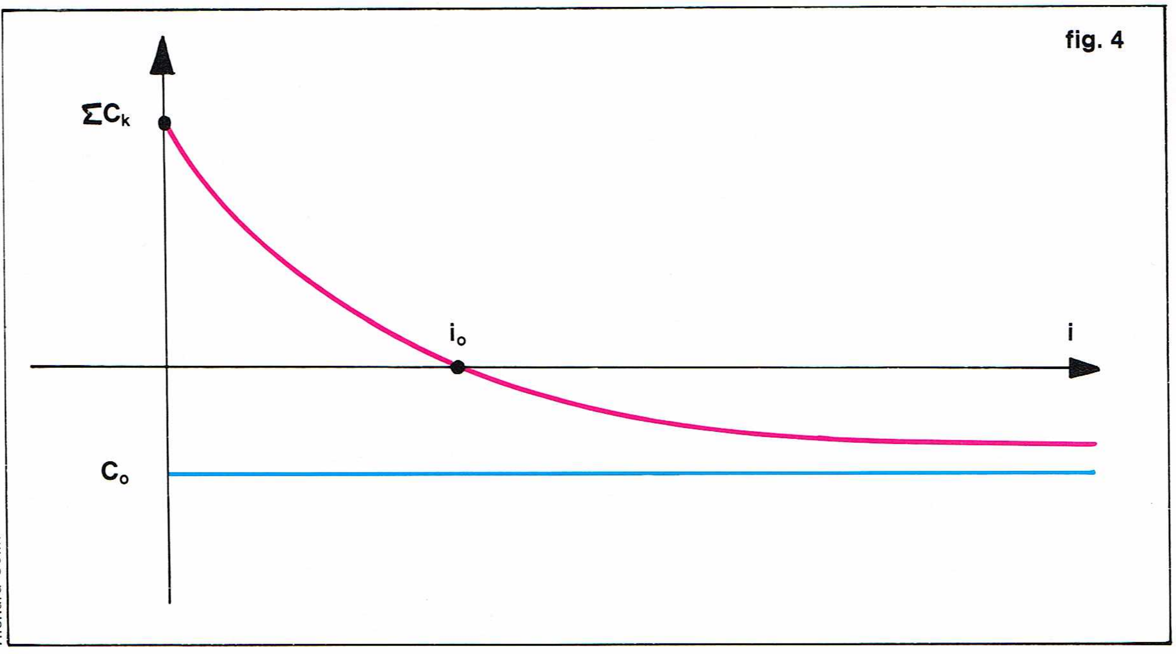

▶ *Figure 4 : la valeur actuelle nette d'un investissement est une fonction V.A.N. (i) du taux d'actualisation.*

Richard Colin

MATHÉMATIQUES ET SCIENCE ÉCONOMIQUE

La science économique est une science récente. A proprement parler, elle n'a guère que 150 ans; cela est bien peu à côté de la physique d'Archimède, de la médecine d'Hippocrate... Cependant, les hommes n'ont pas attendu la deuxième moitié du XIX^e siècle pour exercer leur intelligence à la compréhension de la réalité économique. L'économie politique est donc plus ancienne : littéraire et volontiers rhétorique, elle est avant tout de l'ordre du discours. Mais, au fil des siècles, elle s'est révélée peu apte à rendre compte de phénomènes économiques dont la complexité évoque celle des phénomènes physiques et par là même appelle une démarche scientifique et rigoureuse, c'est-à-dire l'élaboration de modèles.

Un **modèle** est une représentation abstraite et schématique du système économique que l'on veut analyser. Ce système comporte un grand nombre d'éléments sujets à des interactions, à des influences que l'économiste, *a priori*, connaît peu ou mal. Se fiant à son expérience ou à son intuition, il va privilégier les éléments du système qui lui semblent les plus essentiels à son fonctionnement. Ils sont alors *réduits à l'état d'objets mathématiques* (nombre, vecteur, ensemble, fonction, variable aléatoire, etc.). Quant aux liaisons de causalité et de dépendance qui existent entre eux et qui ont pu être mises en évidence, elles sont traduites en *relations mathématiques* (équations algébriques ou différentielles, inéquations, etc.).

Le modèle appelle alors une résolution mathématique (résolution de systèmes d'équations, problème d'optimisation, etc.). Le résultat est ensuite confronté avec le système. Au cours de cette réduction du réel, certains éléments ont été privilégiés, certaines hypothèses de comportement ont été posées. En outre, l'existence de solutions du modèle exige parfois que certaines hypothèses mathématiques soient introduites. Tout cela conditionne le résultat acquis. L'étude du modèle consiste donc également à voir dans quelle mesure ce résultat dépend de toutes ces hypothèses. Dès lors, il s'agit de mettre en évidence les *hypothèses critiques*, celles dont l'absence ou la modification perturbe le résultat.

On distingue deux types de modèles économiques : les modèles quantitatifs et les modèles qualitatifs.

Dans les *modèles quantitatifs* on s'attache à étudier les phénomènes mesurables, pour lesquels on dispose de *données*, recueillies, triées et interprétées à l'aide de méthodes statistiques (tests, sondages, analyse factorielle, etc.). Il s'agit de *modèles* dits *économétriques*.

Les *modèles qualitatifs* ont une tournure beaucoup plus théorique puisqu'ils traitent de phénomènes que l'on ne peut guère mesurer. Ces modèles sont plus justement appelés *modèles axiomatiques*. Bien qu'ils ne puissent pas faire l'objet de vérifications expérimentales, ils gardent une valeur descriptive et scientifique. La réalité (surtout en sciences humaines) n'est point seulement ce qui est mesuré ou mesurable.

Un modèle est donc, en tout état de cause, une représentation simplifiée, figée, voire caricaturale du système économique. Une contradiction apparaît ainsi inexorablement entre le modèle et la réalité qu'il prétend décrire. De l'approfondissement de cette contradiction émerge un nouveau modèle plus complet, prenant en compte un plus grand nombre d'éléments, établissant d'autres liaisons ou confortant les premières. L'étude de ce modèle fait apparaître à son tour une contradiction avec la réalité d'où émerge alors un nouveau modèle et ainsi de suite...

Les mathématiques sont ainsi d'une aide précieuse pour l'économiste puisque, par nature, elles le poussent à ne pas se satisfaire de son modèle, mais à définir de nouveaux objets, à établir de nouvelles liaisons plus générales. Elles suggèrent des voies de recherche qui dans de nombreux cas se sont révélées fécondes. Les mathématiques interviennent donc en économie avant tout en tant que démarche organisatrice de toute méthode scientifique et non point seulement comme un arsenal de recettes de calcul et de techniques dites quantitatives. Réduites à ce dernier rôle, les mathématiques restent d'un apport contestable en économie; elles justifient dès lors un certain ésotérisme de bon aloi et participent d'un scientisme mystificateur. Par contre, restaurées en une démarche axiomatique, elles se révèlent être un instrument d'analyse et de synthèse étonnamment puissant parce que conscient de ses propres limites, c'est-à-dire apte, dans un mouvement dialectique, à les dépasser par une confrontation critique avec le réel.

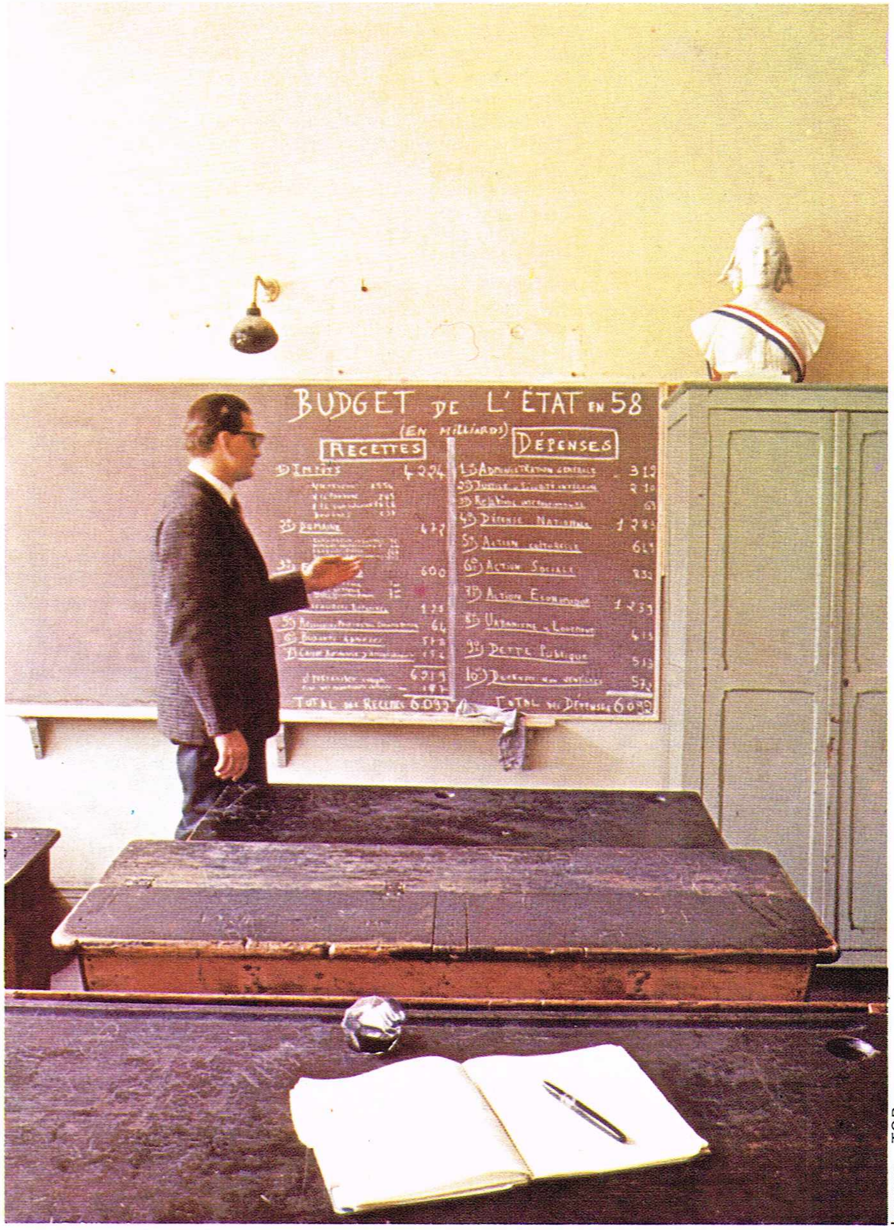

Ionesco - TOP

▲ *Les mathématiques interviennent en économie comme démarche organisatrice de toute méthode scientifique, et pas seulement en tant qu'arsenal de recettes de calcul et de techniques quantitatives.*

Deux thèmes vont nous permettre d'illustrer le rôle joué par les mathématiques dans l'élaboration et dans la résolution de modèles axiomatiques : le problème de l'allocation optimale de ressources rares d'une part, et l'étude de la concurrence et des conflits de l'autre; le premier sera éclairé par le formalisme de la programmation linéaire, le second par celui de la théorie des jeux.

Allocation optimale des ressources rares - Programmation linéaire

Position du problème - Exemple

L'entreprise Buchmoll et frères fabrique deux composés azotés : le chlorure d'ammonium (NH_4Cl) et le gaz ammoniac (NH_3) à partir de l'azote (N), de l'hydrogène (H) et du chlore (Cl). La fabrication d'une unité de chlorure d'ammonium nécessite donc une unité d'azote, quatre d'hydrogène et une de chlore, celle de gaz ammoniac, une d'azote et trois d'hydrogène.

L'entreprise dispose de 50 unités d'azote, 180 d'hydrogène et de 70 de chlore. Elle vend sur le marché le chlorure d'ammonium et le gaz ammoniac respectivement aux prix de 5 et 4 francs l'unité.

L'entreprise cherche à connaître le plan de production optimal, c'est-à-dire les quantités de NH_4Cl et de NH_3 qu'elle peut techniquement fabriquer compte tenu des ressources en matières premières (N, H, Cl) dont elle dispose et qui lui assurent le meilleur profit.

Appelons x_1 et x_2 les quantités produites de NH_4Cl et de NH_3. Cette production nécessite donc la transformation de $x_1 + x_2$ unités d'azote, de $4\,x_1 + 3\,x_2$ unités d'hydrogène et enfin de x_1 unités de chlore.

Compte tenu des disponibilités en ressources existantes, le problème que doit résoudre l'entreprise Buchmoll et frères se met sous la forme d'un problème d'optimisation :

$$\text{Max } z = 5\,x_1 + 4\,x_2$$

$$\textbf{(1)} \quad \text{sous les contraintes :} \quad \left| \begin{array}{l} x_1 + x_2 \leqslant 50 \\ 4\,x_1 + 3\,x_2 \leqslant 180 \\ x_1 \leqslant 40 \\ x_1 \geqslant 0, \quad x_2 \geqslant 0 \end{array} \right.$$

Ce problème se résout graphiquement dans le plan $\mathbb{R}^2$ (*fig.* 1). L'ensemble des plans de productions techniquement réalisables $\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$ est représenté par le domaine P hachuré. Les droites d'équations $5\,x_1 + 4\,x_2 =$ cte sont parallèles. Le point C, intersection des droites d'équation $x_1 + x_2 = 50$ et $4\,x_1 + 3\,x_2 = 180$, est celui pour lequel la fonction $z = 5\,x_1 + 4\,x_2$ prend la plus grande valeur :

$$x_1^* = 30 \qquad x_2^* = 20 \qquad z^* = 230$$

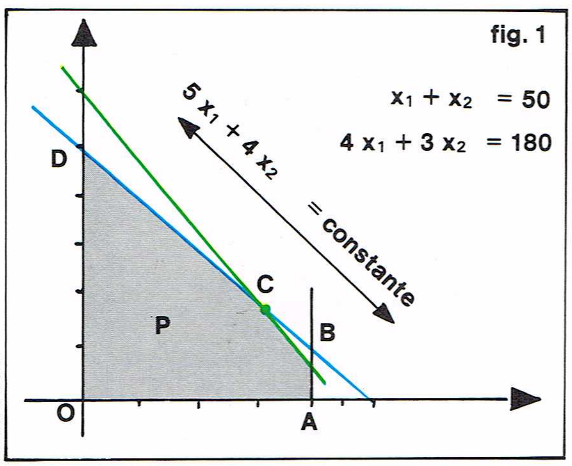

▶ ***Figure 1 : résolution graphique du problème d'optimisation de l'entreprise Buchmoll et frères.***

Forme générale d'un programme linéaire

Le problème d'allocation optimale des ressources se présente de la façon suivante : l'entreprise dispose de p ressources rares (matières premières, équipements, main-d'œuvre, etc.) en quantités limitées $(b_1, \dots, b_p)$, d'où le qualificatif « rares ». A l'aide de celles-ci, elle peut fabriquer n produits différents dont les prix unitaires de vente sont fixés au préalable et égaux à $c_1, c_2, \dots, c_n$. Dans ces conditions, quelles quantités $x_1, \dots, x_n$ de ces n produits l'entreprise doit-elle fabriquer de manière à maximiser son gain ?

On suppose que pour fabriquer *une unité* du bien j, il faut a_{ij} unités de la ressource i ($a_{ij} = 0$ signifie que la ressource i n'entre pas dans la fabrication du bien j). On suppose en outre que la fabrication de x_j unités du bien j nécessite alors l'emploi de $x_j \cdot a_{ij}$ unités de la ressource i (hypothèse de rendements constants et de complémentarité stricte des facteurs de production). Enfin on suppose que l'entreprise ne produit pas de quantités négatives $[x_j \geqslant 0 \quad j = 1, \dots, n]$.

Un **plan de production** est donc un vecteur $\vec{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$ de $\mathbb{R}^n$ que l'on dira *réalisable* et dès lors qu'il satisfera au système d'inéquations :

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leqslant b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leqslant b_2 \\ \vdots \\ a_{p1}x_1 + a_{p2}x_2 + \dots + a_{pn}x_n \leqslant b_p \\ x_1 \geqslant 0 \qquad x_2 \geqslant 0 \dots x_n \geqslant 0 \end{array} \right.$$

Soit matriciellement, en posant

$$A = [a_{ij}]_{\substack{i = 1, \dots, p \\ j = 1, \dots, n}} \qquad \vec{b} = \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_p \end{bmatrix} :$$

$$\left[\begin{array}{l} A\vec{x} \leqslant \vec{b} \\ \vec{x} \geqslant \vec{0} \end{array} \right.$$

le signe $\leqslant$ signifie en l'occurrence que l'inégalité a lieu pour toutes les composantes.

Parmi les plans de production réalisables, l'entreprise choisira celui qui maximise son profit représenté par la forme linéaire :

$$\langle c, \vec{x} \rangle = [c_1, \dots, c_n] \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^{n} c_j x_j$$

Un programme linéaire s'écrit sous la forme générale :

$$\textbf{(2)} \qquad \begin{array}{l} \text{Max } \langle c, \vec{x} \rangle \\ A\vec{x} \leqslant \vec{b} \\ \vec{x} \geqslant 0 \end{array}$$

La fonction $\mathbb{R}^n \to \mathbb{R}\ \vec{x} \to \langle c, \vec{x} \rangle$ s'appelle la *fonction objectif* du programme linéaire.

Réécrivons le programme **(2)** en introduisant p variables supplémentaires y_i, appelées *variables d'écart*. La variable y_i est associée à la i-ième contrainte de la manière suivante : l'inéquation $a_{i1}x_1 + \dots + a_{in}x_n \leqslant b_i$ est équivalente au système :

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{i1}x_1 + \dots + a_{in}x_n + y_i = b_i \\ y_i \geqslant 0 \end{array} \right.$$

On définit ainsi un vecteur $\vec{y}$ de $\mathbb{R}^n$ et le programme **(2)** s'écrit :

$$\textbf{(3)} \qquad \begin{array}{l} \text{Max } \langle c, \vec{x} \rangle + \langle \mathbf{O}, \vec{y} \rangle \\ A\vec{x} + \vec{y} = \vec{b} \\ \vec{x} \geqslant 0 \qquad \vec{y} \geqslant 0 \end{array}$$

avec $\mathbf{O} = (0, \dots 0)$

Le programme linéaire est dit alors mis « sous forme canonique ».

Résolution d'un programme linéaire - Principe de la méthode du simplexe

On démontre mathématiquement que la solution optimale $\vec{x}^*$ du programme **(3)** n'appartient jamais à « l'intérieur » du domaine réalisable mais toujours à sa frontière, c'est-à-dire au simplexe défini par les contraintes linéaires (c'est-à-dire dans l'exemple de la *figure* 1 : au pentagone OABCD). La méthode du simplexe est une méthode itérative d'exploration des sommets du simplexe : à partir d'un plan de production réalisable (par exemple $x_1 = x_2 = \dots = x_n = 0$; $y_i = b_i$ $i = 1, \dots, p$ si le vecteur $\vec{b}$ a toutes ses composantes positives), on détermine un autre plan de production, pour lequel la fonction objectif prend une valeur plus grande. Le passage d'un plan à l'autre s'opère par des transformations matricielles (portant à la fois sur la matrice A et sur le covecteur c) fondées sur la *méthode du pivot* (voir *Calcul numérique*). La procédure d'exploration s'arrête lorsque l'on ne peut plus améliorer la fonction objectif.

Programme dual

Revenons à l'exemple de l'entreprise Buchmoll : supposons qu'une autre entreprise, l'entreprise Dugommier et fils, veuille acheter les stocks d'azote, d'hydrogène et de chlore détenus par Buchmoll. Elle cherche alors à évaluer de manière optimale les prix u_1, u_2, u_3 auxquels elle devra acquérir ces stocks. L'entreprise Buchmoll n'acceptera de se livrer à cette transaction que si elle n'est pas déficitaire : autrement dit, si elle ne peut pas gagner plus en produisant le chlorure d'ammonium et le gaz ammoniac et en les vendant aux prix de 5 et 4 F ; c'est-à-dire si la *valeur* des matières premières nécessaires pour fabriquer une unité de NH_4Cl est supérieure à 5 F :

$$u_1 + 4\,u_2 + u_3 \geqslant 5$$

de même, pour NH_3, si elle est supérieure à 4 F :

$$u_1 + 3\,u_2 \geqslant 4$$

L'entreprise Dugommier, dans ces conditions, cherche à minimiser le coût de la transaction, c'est-à-dire à résoudre le programme linéaire suivant :

$$\begin{aligned} \text{Min } w &= 50\, u_1 + 180\, u_2 + 40\, u_3 \\ u_1 + 4\, u_2 + u_3 &\geqslant 5 \\ u_1 + 3\, u_2 &\geqslant 4 \\ u_1 \geqslant 0 \quad & u_2 \geqslant 0 \end{aligned}$$

Ce programme est appelé *programme dual* du programme **(1)** ; les variables u_1, u_2, u_3 sont les *variables duales* (et, partant, x_1, x_2 les *variables primales*).

La résolution graphique d'un tel programme est plus délicate (dans $\mathbb{R}^3$!) ; néanmoins, on montre que, à l'optimum $u_3 = 0$, la solution optimale est alors :

$$u_1^* = 1 \qquad u_2^* = 1 \qquad u_3^* = 0 \qquad w^* = 230$$

On remarque alors que $w^* = z^* = 230$; autrement dit, le coût minimal de la transaction subi par Dugommier est égal au bénéfice maximal que peut réaliser Buchmoll. Ceci est un résultat plus général et caractéristique des programmes linéaires.

Reprenons le programme linéaire **(2)** ; on lui associe de semblable façon son programme dual :

Primal	*Dual*
$\text{Max } z \langle \vec{c}, \vec{x} \rangle$	$\text{Min } w \langle \vec{b}, \vec{u} \rangle$
$A\vec{x} \leqslant b$	$\vec{u}A \geqslant \vec{C}$
$\vec{x} \geqslant 0$	$\vec{u} \geqslant 0$

On montre que, à l'optimum, on a l'égalité :

$$w^* = z^* \tag{4}$$

Cette égalité nous permet d'interpréter les variables duales $(u_1^*, u_2^*, ..., u_p^*)$, l'égalité **(4)** s'écrit :

$$\sum_{j=1}^{n} c_j x_j^* = \sum_{i=1}^{p} b_i u_i^* \quad \text{soit} \quad \frac{\partial z^*}{\partial b_i} = u_i^*$$

autrement dit, la variable duale u_i^* représente l'augmentation de bénéfice réalisée par l'accroissement d'une unité du stock de la ressource i ; u_i^* constitue donc une évaluation (interne à l'entreprise) de la ressource i ; l'intérêt économique de cette valeur est alors le suivant : soit π_i $i = 1, ..., p$, le *prix du marché* de la ressource i. Il est clair que l'entreprise aura intérêt à en acheter pour augmenter son stock tant que $u_i^* \geqslant \pi_i$. Lorsque u_i^* est nul, cela signifie que la contrainte correspondante du programme primal n'est pas saturée, c'est-à-dire que l'entreprise n'utilise pas la totalité de son stock. Toute augmentation de ce stock n'entraînerait aucun bénéfice supplémentaire.

Rôle de la programmation linéaire en économie

Les applications de la programmation linéaire sont de plus en plus nombreuses dans le domaine de l'entreprise. La programmation linéaire permet à un secteur de production de rationaliser son action en évitant le sous-emploi des ressources disponibles. Mais elle s'avère être plus qu'une technique mathématique de recherche opérationnelle : elle est avant tout un cadre conceptuel cohérent et rigoureux, très riche d'un point de vue micro-économique : l'interprétation des variables duales à l'optimum donne à la théorie marginaliste un contenu plus pertinent. En outre elle contribue à éclairer certains points de l'analyse marxiste (valeurs et prix de productions).

Concurrence et conflits - Les jeux

Dans les salons du XVII[e] siècle et dans les ruelles des grandes dames de cette époque, les jeux de société étaient fort prisés, et philosophes et mathématiciens s'essayaient à résoudre certains petits problèmes jugés fort divertissants : ainsi en témoignent les correspondances de qualité qu'échangeaient le chevalier de Méré et Pascal (1654). Mais il faudra attendre les travaux d'Émile Borel (1921) pour que ces questions reçoivent une formalisation mathématique satisfaisante. En 1928 le mathématicien allemand Johann von Neumann démontra le *théorème fondamental* ou *théorème de minimax* et joignit ses efforts à ceux de l'économiste viennois O. Morgenstern pour étudier l'application de la théorie des jeux à l'économie. Cette collaboration déboucha en 1944 sur la publication d'un ouvrage : *Theory of Games and Economic Behavior*. La théorie des jeux quittait alors les antichambres feutrées et les boudoirs fleuris pour devenir le formalisme mathématique propre à décrire les situations de conflits et de concurrence.

Présentation - Exemple d'un jeu à deux joueurs et à somme nulle

On appelle jeu toute « situation » dans laquelle plusieurs individus (deux ou plus) sont confrontés et doivent prendre des décisions dont dépendent des résultats. Ainsi en est-il du bridge, des échecs, du duel au pistolet, de la guerre, d'une transaction commerciale, etc. Il est clair que le résultat (ou gain) d'un joueur va dépendre non seulement de sa propre décision mais aussi de celles prises par ses protagonistes.

Exemple : deux joueurs sont face à face ; le joueur A dispose de trois jetons, deux ronds et un carré, le carré et l'un des deux ronds sont blancs, l'autre rond est noir (○ ● □) ; le joueur B ne dispose que de deux jetons, un noir rond et un blanc carré (● □). Le joueur A met un jeton sur la table sans le montrer à son adversaire qui en fait alors autant ; les jetons sont ensuite découverts. Si les deux jetons ont la même *couleur*, A donne 1 F à B, sinon c'est B qui donne 1 F à A. Si les deux jetons sont de même forme, A donne 2 F à B ; sinon c'est B qui donne 2 F à A.

Un tel jeu se représente de deux manières : une forme dite développée et une forme dite normale.

— *Forme développée.* On représente le jeu par un graphe (*fig.* 2) dont les sommets sont les points d'intervention des joueurs et les arcs les coups possibles.

Pour chaque éventualité, on calcule le résultat du jeu : le premier nombre entre parenthèses indique le gain du joueur A, le second celui du joueur B.

fig. 2

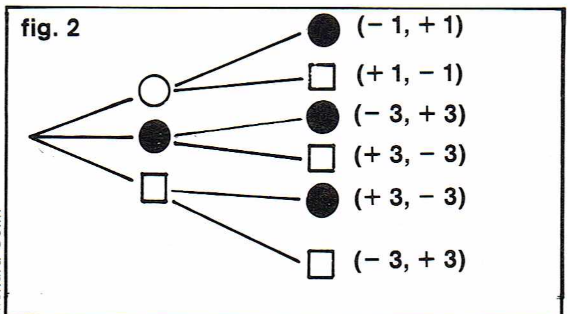

◀ ***Figure 2 :*** ***représentation graphique du jeu (forme développée).***

— *Forme normale.* Un jeu ne se déroulant pas de manière instantanée, il y a en général plusieurs coups lorsque chaque joueur joue à son tour. En fait, on montre que tout jeu est équivalent à un jeu instantané (les joueurs ne jouent qu'une fois chacun) dans lequel une décision est un ensemble de décisions, appelé *tactique* : « Choisir une tactique revient pour un joueur à prendre globalement, avant de se mettre à jouer, toutes les décisions élémentaires qu'il peut être amené à prendre au cours du jeu » (J. Bouzitat). On représente le jeu sous la forme d'un tableau (ci-dessous) : les tactiques du joueur A correspondent aux lignes, celles de B aux colonnes. A la croisée de la ligne i et de la colonne j, on note le résultat du jeu lorsque A choisit la i-ième tactique et b la j-ième. S'agissant d'un jeu à somme nulle (ce qui est gagné par l'un est perdu par l'autre), on mentionne uniquement le gain du joueur A.

Tableau I

A \ B	●	□
○	− 1	+ 1
●	− 3	+ 3
□	+ 3	− 3

Richard Colin

Quelles tactiques vont choisir A et B ? Le choix qu'ils vont faire est commandé par la prudence : tous deux cherchent à minimiser leurs pertes. Si le joueur A joue ○, il ne peut récolter moins que « — 1 », s'il joue ● moins que « — 3 », s'il joue □ moins que « — 3 ». Il jouera donc ○. Le joueur B, quant à lui, qu'il joue ● ou □, ne peut pas perdre plus de 3. Il jouera donc, de manière équivalente, soit □, soit ●.

Le joueur A choisit donc la tactique correspondant au maximum du minimum des lignes *(maximin)*; B celle correspondant au minimum du maximum des colonnes *(minimax)*. Le maximin est égal à — 1, le minimax à + 3.

Ces valeurs sont différentes; on dit que le jeu n'a pas d'équilibre : ceci signifie que tout supplément d'information concernant les intentions d'un joueur modifiera les comportements de son adversaire : si, par exemple, B se dit « A a joué ○ », il en conclut : « je vais jouer □ ». Le joueur A, à son tour, va se dire : « je vais faire croire à B que je joue ○, ainsi celui-ci jouera □; en réalité j'aurai joué ●, ce qui me rapportera 3 F. Mais B se dira : « je devine toutes les supputations qu'échafaude A, je vais donc jouer ● et celui-ci perdra 3 F » et ainsi de suite...

Ce *jeu* est dit à *information imparfaite :* le joueur B ne connaît pas précisément ce que A a joué. Il sait seulement que le choix de A appartient à un certain ensemble = {○, ●, □}.

On peut envisager des *jeux* à *information parfaite :* à chaque coup, le joueur sait exactement ce que vient de jouer son adversaire; les échecs et les dames sont des jeux de ce type. Un théorème fondamental, le **théorème de Zermelo-von Neumann-Kuhn,** montre que tout jeu fini à information parfaite admet un équilibre. C'est dire qu'au jeu d'échecs il existe une tactique qui assure la victoire ou le match nul contre toute défense. Il serait possible de la trouver si l'on savait mettre le jeu d'échecs sous forme normale, c'est-à-dire dresser l'inventaire de toutes les tactiques possibles en fonction de toutes les éventualités envisageables par l'adversaire. Ceci dépasse largement les capacités d'énumération des ordinateurs les plus perfectionnés !

Reprenons l'exemple donné en le modifiant : le joueur A ne cache plus son jeu mais le joueur B a les yeux bandés et il peut toucher le jeton joué par A. Ce dernier est donc en mesure de distinguer deux ensembles d'information {○, ●} et {□}. Il sait si le jeton appartient au premier ensemble ou au second. Ce surcroît d'information augmente le nombre de tactiques qu'il peut envisager. Elles sont au nombre de 4 :

t_1 jouera ● si le jeton de A est rond, ● s'il est carré,
t_2 jouera ● si le jeton de A est rond, □ s'il est carré,
t_3 jouera □ si le jeton de A est rond, □ s'il est carré,
t_4 jouera □ si le jeton de A est rond, ● s'il est carré.

Sous forme normale, le jeu est représenté par un tableau à 3 lignes et 4 colonnes (ci-dessous) :

Tableau II

A \ B	t_1	t_2	t_3	t_4
○	− 1	(− 1)	+ 1	+ 1
●	− 3	− 3	+ 3	+ 3
□	+ 3	− 3	− 3	+ 3

Richard Colin

Il est clair que B va jouer t_2, car elle lui assure la perte minimale (il ne peut pas gagner moins de 1 F). Il est non moins clair que A jouera la tactique ○, correspondant à la perte minimale pour lui (il ne peut pas perdre plus de 1 F). Ici, le minimax est égal au maximin (= — 1). Les deux joueurs n'ont aucun intérêt à jouer d'autres tactiques que celles-là.

Tout supplément d'information sur les intentions d'un joueur ne modifie pas la décision de son adversaire : le joueur B ne gagnerait rien à connaître aussi la couleur du jeton de A...

Stratégies dans un jeu à deux joueurs

Un jeu à deux joueurs et à somme nulle sous forme normale est représenté par une matrice

$$A = \{a_{ij}\}\ (j = 1, ..., m\,;\ i = 1, ..., n)$$

à m lignes et n colonnes. Les lignes correspondent aux n tactiques du joueur (A), les colonnes aux m tactiques de B. a_{ij} est donc le gain réalisé par le joueur A lorsque celui-ci adopte la tactique i et son adversaire la tactique j. En général un tel jeu n'admet pas d'équilibre, autrement dit :

$$\underset{i=1,\dots n}{\text{Min}}\ \underset{j=1,\dots m}{\text{Max}}\ a_{ij} \neq \underset{j=1,\dots m}{\text{Max}}\ \text{Min}\ a_{ij}$$

On montre que l'on a toujours l'inégalité

$$\text{Max Min} \leqslant \text{Min Max}.$$

Il convient donc de donner à ce concept d'équilibre une acception plus générale : on élargit la notion de tactique en définissant celle de *stratégie :* on considère alors que les joueurs A et B ont la possibilité de jouer leurs tactiques selon une certaine loi de probabilité. A chaque loi de probabilité choisie par B correspond un gain que A pourra espérer s'il choisit une tactique donnée. Ce gain espéré est défini comme la valeur moyenne des gains pour chaque tactique de B et pour la tactique donnée de A, cette moyenne étant calculée à l'aide des pondérations obtenues dans la loi de probabilité choisie par B.

Plus précisément, on appelle stratégie du joueur A une distribution de probabilité $x_1, x_2, ..., x_m$ définie sur ses m tactiques. Une telle stratégie sera notée X (vecteur ligne) avec $x_j \geqslant 0 \ \sum_{j=1}^{m} x_j = 1.$

De la même façon une stratégie du joueur B est une distribution de probabilité $y_1, ..., y_n$ sur ses n tactiques, notée Y (vecteur colonne) avec $y_i \geqslant 0\,;\ \sum_{i}^{n} y_i = 1.$

Lorsque A joue X et B joue Y, l'espérance de gain réalisée par A est donnée par :

$$\sum_{j=1}^{m} \sum_{i=1}^{n} x_j y_i a_{ij} = XAY$$

La stratégie X* optimale pour A est celle correspondant au gain maximal, une fois que B a choisi la stratégie qui défavorise le plus A :

$$X^* \text{ tel que } \underset{X}{\text{Max}}\ \underset{Y}{\text{Min}}\ XAY.$$

De même la stratégie Y* optimale pour B :

$$Y^* \text{ tel que } \underset{Y}{\text{Min}}\ \underset{X}{\text{Max}}\ XAY.$$

Le **théorème de von Neumann,** dit **théorème de minimax** (1928), montre que dans une telle situation l'on obtient toujours un équilibre (en termes de stratégie cette fois et non plus de tactique). Autrement dit :

$$X^*AY^* = \underset{X}{\text{Max}}\ \underset{Y}{\text{Min}}\ XAY = \underset{Y}{\text{Min}}\ \underset{X}{\text{Max}}\ XAY.$$

Ce résultat s'établit en remarquant que les stratégies X et Y des joueurs A et B sont respectivement solutions des deux programmes linéaires :

I	II
Max u	Min w
$XA \geqslant uJ$	$AY \leqslant wI$
$X \geqslant 0$	$Y \geqslant 0$

où $I = \left.\begin{pmatrix}1\\1\\\vdots\\1\end{pmatrix}\right\}m \qquad J = \underbrace{[1, ..., 1]}_{n}$

Ces deux programmes sont en dualité. Si X^* est solution de I, Y^* solution de II, on a :

$$\text{Max } u = \text{Min } w = X^*AY^*.$$

Jeux à *n* joueurs

Un jeu à *n* joueurs se représente tout aussi bien sous forme extensive que sous forme normale. Sous cette dernière, on admet que les joueurs jouent de manière instantanée des tactiques $\sigma_1, \sigma_2, ..., \sigma_n$ (ou des stratégies). Chaque joueur reçoit alors un gain qui dépend de son propre choix et de celui de ses protagonistes. Mathématiquement, le joueur *i* choisit une stratégie σ_i, considérée comme appartenant à un certain ensemble Σ_i, il reçoit alors un gain $G_i(\sigma_1, \sigma_2, ..., \sigma_i, ..., \sigma_n)$. Un *n*-uplet de stratégies $\overline{\sigma}_1, \overline{\sigma}_2, ..., \overline{\sigma}_n$ sera dit en équilibre si :

$$\forall i = 1, ..., n \; \forall \sigma_i \in \Sigma_i \quad G_i(\overline{\sigma}_1, \overline{\sigma}_2, ..., \overline{\sigma}_i, \overline{\sigma}_{i+1}, ..., \overline{\sigma}_n) \leqslant G_i(\overline{\sigma}_1, \overline{\sigma}_2, ..., \overline{\sigma}_i, ..., \overline{\sigma}_n)$$

Si un tel équilibre est réalisé, aucun joueur *seul* n'a intérêt à changer de stratégie. L'existence d'un tel équilibre est assurée par certaines hypothèses mathématiques sur les ensembles Σ_i et sur les fonctions G_i **(théorème de Nash).**

Les jeux à *n* joueurs sont intéressants en ce qu'ils donnent la possibilité à certains d'entre eux de s'unir, c'est-à-dire de former des *coalitions.* Soit $N = \{0, 1, ..., n\}$ l'ensemble de tous les joueurs ; on appellera coalition toute partie S de N. Un jeu sera dit coopératif si sa règle n'interdit aucune coalition.

Considérons un jeu à somme constante :

$$\sum_{i=1}^{n} G_i(\sigma_1, ..., \sigma_n) = K \; \forall \sigma_i \in \Sigma_i$$

Supposons, pour une meilleure interprétation, que K représente un certain capital. Les joueurs appartenant à une coalition S donnée ont la possibilité d'opérer des transferts d'argent entre eux. Sous cette hypothèse, on est désormais en présence d'un duel qui oppose deux coalitions : la coalition S et la coalition N-S. Ce duel admet une solution (d'après le théorème de minimax si celui-ci est fini). Soit V (S) le gain total réalisé par la coalition S. C'est la valeur du jeu pour S : cette coalition est sûre, en se formant, de gagner au moins V (S), quoi que fassent les autres joueurs. Il est clair que l'on a l'égalité :

$$K = V(N) = V(S) + V(N - S).$$

Ainsi définit-on une application $V : P(N) \rightarrow \mathbb{R}$ que l'on appellera *fonction caractéristique* du jeu. Elle possède les deux propriétés suivantes :

(a) $V(\varnothing) = 0$

(b) $V(S \cup T) \geqslant V(S) + V(T)$ lorsque $S \cap T = \varnothing$ (l'union fait la force).

Un jeu sera dit *inessentiel* si on a l'égalité en **(b)** et *essentiel* dans le cas contraire. Dans les jeux inessentiels, les joueurs ne gagnent rien à constituer des coalitions. Seuls ceux qui sont essentiels sont dignes d'intérêt.

Une *imputation* est le résultat du jeu après redistribution des gains au sein des coalitions. Dans un jeu à somme constante il s'agit donc d'un vecteur $\vec{u} = (u_1, ..., u_n)$ tel que :

$$\sum_{i=1}^{n} u_i = V(N)$$

$V\{i\} \leqslant u_i \quad \forall i$, où $\{i\}$ représente la coalition réduite au seul joueur *i*.

Cette dernière condition stipule qu'une imputation est admissible par tous les joueurs pour autant qu'elle assure à chacun au moins ce qu'il aurait gagné à jouer seul contre tous les autres.

Résoudre un tel jeu, c'est déterminer la ou les imputations correspondant à des situations d'équilibre, c'est-à-dire qu'aucun joueur n'a intérêt à refuser. On cherche à éliminer toutes les imputations qui ne pourront raisonnablement être choisies.

On dira qu'une coalition S ($\neq \varnothing$) *bloque* une imputation $\vec{u}$ si $\sum_{i \in S} u_i < V(S)$.

Quoi qu'il advienne, la coalition S refusera l'imputation *u* puisqu'elle peut gagner plus en se formant contre les autres. On en vient à définir ainsi le concept de *cœur.*

Loucel - Fotogram

▲ ***On appelle jeu toute « situation » dans laquelle plusieurs individus (deux ou plus) sont confrontés et doivent prendre des décisions dont dépendent des résultats.***

Le *cœur* d'un jeu est l'ensemble des imputations qui ne sont bloquées par aucune coalition. Il est clair que le choix d'une imputation prise en dehors du cœur conduira derechef à la formation d'une coalition qui, s'estimant lésée dans le partage, provoquera le conflit au terme duquel elle est sûre de parvenir à une position plus favorable.

Malheureusement, le cœur d'un jeu est parfois vide : on montre ainsi qu'un jeu essentiel à somme constante a un cœur vide. Ce résultat est bien troublant dans la mesure où il établit que le cœur d'un jeu coopératif à somme constante n'existe que si aucune coalition n'a intérêt à se former ! En fait les jeux à somme constante ne sont pas les plus généraux que l'on puisse imaginer (notamment dans les modèles économiques). En outre il est peu vraisemblable de supposer que toutes les coalitions ont la possibilité de se former.

BIBLIOGRAPHIE

ATTALI J., *Analyse économique de la vie politique,* P.U.F., 1972. - DESPLAS M., *Mathématique de la décision économique,* Dunod. - MUNIER B., *Jeux et Marchés,* P.U.F., 1973. - ROURE F., FRITZ G. et CHARLES A.-M., *Mathématiques pour les sciences sociales,* tome 5, P.U.F., 1973. - VAJDA S., *Théorie des jeux et Programmation linéaire,* Dunod, 1968. - ZIONTS S., *Linear and Integer Programming,* Prentice Hall, 1974.

▼ ***Le jeu de dames est dit à information parfaite.***

Keystone

MATHÉMATIQUES ET SOCIÉTÉ

Nous recourons aux mathématiques pour connaître et dominer les divers phénomènes naturels, mais aussi pour organiser toutes les informations que nous recueillons de quelque manière, encore que nous sachions que l'approche mathématique laisse échapper ou écarte délibérément maintes circonstances de ce que nous observons. Or cette approche n'a pas toujours existé et n'est pas une disposition naturelle à toute société. Cela impose une première constatation : nous vivons dans une société à laquelle l'élément mathématique est, sous une forme ou sous une autre, intimement incorporé. Non qu'il n'y ait pas eu de mathématiques ailleurs, mais c'est dans la société actuelle que leurs applications se sont étendues, que leur développement est systématiquement encouragé, que leur existence s'est vraiment institutionnalisée, bref qu'elles jouissent d'un véritable privilège social.

Cette impression peut être confirmée non seulement par des observations courantes, mais encore par une analyse historico-sociale du développement des mathématiques depuis la fin du XIX^e^ siècle. Certes, pendant tout le XVIII^e^ siècle et au début du siècle suivant, les mathématiques « régnaient dans les Académies », en vertu du fait, universellement reconnu, que leur discipline avait valeur instrumentale, qu'elle était indispensable aux sciences de la nature ; mais cette prééminence était tout de même loin de s'affirmer aussi amplement qu'aujourd'hui, c'est-à-dire au point, comme on l'a écrit, de « diriger notre monde au nom de sa logique inexorable ». Au contraire, ainsi que l'a remarqué Pierre Samuel, « pendant fort longtemps, il allait presque de soi qu'un élève destiné à de longues études et à de hautes fonctions sociales, devait faire du latin et même, si possible, du grec ». Ce fait vaut d'être souligné, car il a une signification sociale ; et il est même l'indicateur principal du rôle actuellement dominant des mathématiques dans la société.

Étant donné son caractère relativement récent, cette prééminence des mathématiques doit pouvoir s'expliquer. Elle n'est sans doute pas due à une subite sensibilité collective aux charmes de cette discipline on ne peut plus abstraite, et personne aujourd'hui n'irait justifier la vogue mathématicienne, s'il y succombe, par l'attrait que cette science exerce en vertu des rapports « d'ordre, de proportion et d'harmonie » qui s'y manifestent, ou de la beauté et de la symétrie des théorèmes qui y sont établis. D'une part, personne n'est mathématicien né, et nous ne sommes plus à l'époque de Pythagore, d'autre part, les mathématiques connaissent aujourd'hui bien des phénomènes discordants, et ne s'intéressent pas aux seules propriétés où se manifestent ordre et beauté. Du reste, la tendance actuelle est plutôt, par exemple, à la préférence de l'algèbre à la géométrie, de la mémoire à l'imagination, si l'on nous permet d'employer ce langage désuet. Or, et nous citerons de nouveau un mathématicien, « l'éviction de la géométrie serait essentiellement un problème sociologique ». Il y a donc quelque chose, dans les mathématiques, qui concerne la société et se trouve concerné par elle.

La question des rapports entre les mathématiques et la société se pose donc naturellement aujourd'hui. Mais où trouver les éléments d'une réponse, sinon dans une théorie sociologique de la connaissance mathématique ? Et d'abord, y a-t-il déjà des théories sociologiques de la connaissance mathématique susceptibles de nous mettre sur la bonne voie ?

Pour étayer les remarques par lesquelles nous avons commencé, nous devrions disposer d'une théorie du savoir mathématique qui nous explique les aspects de son développement et les faits qui échappent à la contrainte strictement mathématique. Or une telle théorie n'existe pas. Bien que la sociologie de la connaissance soit née avec la sociologie même, les doctrines sociologiques n'ont manifesté aucun intérêt spécifique aux mathématiques. C'est donc par le biais d'une sociologie générale de la connaissance que, pour le moment, nous aborderons le problème.

Mais ce recours ne saurait nous satisfaire entièrement, car il peut arriver qu'une théorie sociologique décrive assez exactement des faits ou des phénomènes vrais pour certains types de connaissance, mais non vrais pour la connaissance mathématique et n'offrant rien que la communauté mathématicienne puisse reconnaître comme essentiel à son intérêt le plus proche. On peut apporter des preuves certaines d'une « collusion », ou d'une « complicité » ou d'une « correspondance » entre une société donnée et telle « philosophie », « idéologie », « théorie sociale » ou « théorie politique ». Mais le genre de parallèle qui donne généralement lieu à un rapprochement entre les produits « idéologiques » d'une société et certains de ses aspects infrastructurels — c'est-à-dire non mentaux — est peu convaincant lorsqu'il s'agit de sciences, et de mathématiques en particulier.

En effet, s'il est aisé de montrer que toute science exacte institutionnalisée véhicule un ensemble d'idées et de représentations qu'elle n'implique pas logiquement, il est quasi impossible de découvrir une homologie qui ne soit ni arbitraire ni triviale entre le statut des disciplines mathématiques d'un côté, et de l'autre les caractères par lesquels on décrit, par exemple, l'entrepreneur capitaliste ou l'idéologie technocratique. Par ailleurs, il est certain que « l'influence sociale », la mainmise de la société sur les mathématiques, se fait par le truchement d'autres disciplines, les sciences physiques le plus souvent, la philosophie parfois ; pour ce qui est des mathématiques elles-mêmes, on est en présence de structures abstraites auxquelles il est impossible de faire correspondre des segments de réalité sociale vivante, ou des segments d'idéologie. En effet, l'étalonnage socio-idéologique des formes de la mathématique permettrait de rapporter à sa place idéologique et sociale toute forme historique ou géographique de la mathématique. Ce qui ne saurait se faire sans une identification et une distinction des formes de la mathématique. Or, cette tâche, discutable dans son principe, est difficile à réaliser dans la pratique, car on ne peut faire correspondre univoquement à une formation sociale donnée une forme mathématique déterminée.

Les théories sociologiques

On n'en doit pas moins reconnaître que, malgré leur insuffisance à suivre les axes de la pensée scientifique actuelle, malgré leur vieillissement, et malgré leur défaut, d'une étude précise des mathématiques en particulier, distinctes des autres secteurs scientifiques, les théories sociologiques de la connaissance ont eu le mérite incontestable d'introduire la *problématique sociale* du savoir. Or, pour que cette problématique apparaisse, il fallait que l'élément social cessât d'être quelque chose d'accessoire et de complémentaire, imaginé par la nature pour parvenir à ses fins, comme le croyait Kant, par exemple, lorsqu'il écrivait que « toute culture, tout art formant une parure de l'humanité, ainsi que l'ordre social le plus beau, sont les fruits de l'insociabilité, qui est forcée par elle-même de se discipliner, et d'épanouir de ce fait complètement, en s'imposant un tel artifice, les germes de la nature ». Il fallait prendre au sérieux les relations de fait et de principe qui existent entre les développements du savoir et les formes de la culture, dont le savoir porte l'empreinte et dont il n'est jamais qu'une province. Il fallait substituer à l'analyse, conçue dans le style du XVIII^e^ siècle, des propriétés et des formes de la représentation qui permettaient la connaissance en général, la nécessité de mettre au jour les conditions de la connaissance à partir des contenus empiriques qui sont donnés en elle. Aussi est-ce chez Auguste Comte que l'on trouve une théorie du savoir qui veut en être la sociologie, et une sociologie où les mathématiques sont analysées, avec, pour l'époque, tout l'intérêt qu'elles méritent.

Le point de vue de Comte ouvre effectivement une perspective à l'étude sociale de la connaissance, parce qu'il se propose la fondation d'une science de la société, susceptible de fournir les bases d'une philosophie de la connaissance. Aux yeux de Comte, il n'y a pas de connaissance qui ne s'explique par la nature sociale des hommes et qui cesse un seul instant d'être enfermée dans quelque société.

La théorie de Saint-Simon

D'aucuns objecteraient que c'est là un type de démarche antérieur au positivisme ; que Saint-Simon, par exemple, est allé plus loin qu'Auguste Comte, dans cette voie, par sa critique vigoureuse de Condorcet qui affirmait la primauté du progrès de la connaissance sur le progrès social.

Saint-Simon fut, en effet, le premier à avancer aussi clairement l'existence d'une correspondance constante, en tous les temps, chez tous les peuples, entre les institutions sociales et les connaissances, correspondance que Condorcet saisissait globalement dans l'association naturelle, en un seul mouvement, de tous les types de progrès, dans les sciences aussi bien que dans les mœurs. D'autre part, Saint-Simon rend, certes, possible une réflexion sociale sur le savoir lui-même, dans la mesure où il marque une tendance profonde au panthéisme, laquelle permet de traiter les réalités intellectuelles et les réalités concrètes comme des émanations d'une seule nature et de considérer, ce qui est nouveau sous des mots anciens, que la « science de l'homme » étudie aussi bien « la production des biens matériels par le travail sous différentes formes » que « la production des manières de connaître ». Certes encore, tous les types de travail et toutes les manières de produire ne sont susceptibles d'une étude que parce qu'il existe « une science, bien plus importante pour la société que les connaissances physiques et mathématiques », et cette science, c'est celle qui étudie les fondements de la société elle-même. Or, cette science révèle le potentiel de la collectivité humaine dominée par l'avènement de la classe industrielle, avènement qui fait penser que « le paradis n'est pas en arrière de nous ou dans la vie céleste, mais dans notre vie future, sur terre ». Certes, enfin, tout cela ne va pas sans privilèges pour les mathématiques. Car, si « le parti industriel » est investi d'un tel espoir, c'est précisément parce que « ce parti possède la force du raisonnement », « ceux qui cultivent les sciences positives (qui sont les meilleurs raisonneurs) étant de son côté », et devenant de plus en plus nombreux.

Les transformations sociales ont, en effet, entraîné une nouvelle hiérarchie du savoir, où les sciences positives occupent la première place. « Au XV^e siècle, écrit Saint-Simon dans le *Mémoire de la science de l'homme* (1813), l'enseignement public était presque entièrement théologique. Depuis la réforme de Luther jusqu'à la brillante époque du siècle de Louis XIV, l'étude des auteurs profanes, grecs et latins, s'est introduite par degrés dans l'instruction publique... de manière que la science dite sacrée a été reléguée dans des écoles spéciales, auxquelles on a donné le nom de Séminaires... Sous le règne de Louis XV, les sciences physiques et mathématiques ont commencé à faire partie de l'instruction publique ; sous le règne de Louis XVI, elles y ont joué un rôle important ; enfin, les choses sont arrivées au point qu'elles forment aujourd'hui la partie essentielle de l'enseignement... Telle est la différence, à cet égard, entre l'ancien ordre et le nouveau... que pour s'informer... si une personne avait reçu une éducation distinguée, on demandait : Possède-t-elle bien ses auteurs grecs et latins ? et qu'on demande aujourd'hui : Est-elle forte en mathématiques ? »

On pourra méditer ce texte, que nous avons cité pour son actualité. Et pourtant on ne peut véritablement parler, chez Saint-Simon, d'une sociologie dont les mathématiques constitueraient une préoccupation explicite. Saint-Simon, loin de nous fournir, fût-ce les rudiments sinon les principes d'une interrogation sur les mathématiques du point de vue de la société, ne nous livre qu'un témoignage sur la conscience que le début du XIX^e siècle avait du rapport entre l'enseignement des sciences positives, des mathématiques en particulier, et l'essor industriel à ses débuts. De fait, c'est à Auguste Comte que revient la priorité dans la considération des types du savoir, en tant que constitutif de l'organisation sociale, pour autant que celle-ci est chaque fois l'expression du rapport d'un collectif humain à l'univers qui l'entoure.

Le point de vue d'A. Comte

Point remarquable, A. Comte a vu et établi que la condition nécessaire et suffisante à la constitution d'une science sociale, c'est-à-dire à l'accès de la société au statut d'objet de connaissance, consiste à prendre acte du fait qu'il est devenu impossible « de méconnaître la destination finale de l'intelligence humaine pour les études positives ». Autrement dit, tout phénomène, quelles que soient sa nature et sa complexité, comporte un aspect par lequel il est accessible à une connaissance positive. Mais, simultanément, il faut prendre acte du fait que « la philosophie positive », telle qu'on peut l'appréhender à travers la constitution du savoir astronomique, physico-mathématique, chimique, etc., n'embrasse pas tous les

Giraudon

◀ *Le philosophe français* **Auguste Comte** *(1798-1857) ; c'est à lui que revient la priorité dans la considération des types du savoir, en tant que constitutif de l'organisation sociale.*

ordres de phénomènes. Bref, il faut encore exécuter « une grande opération scientifique » pour donner son statut au savoir dont l'objet serait la sphère des phénomènes sociaux. Ce qui ne peut se faire par simple extension du domaine de positivité déjà constitué. Entendons qu'il ne saurait y avoir de science sociale par simple transport de méthodes déjà établies ; en un mot, il ne suffit pas d'appliquer des procédés numériques aux phénomènes sociaux pour constituer une science sociale. La société, étant le lieu même où tout savoir se produit, n'est pas accessible à l'un des savoirs qu'elle constitue. C'est pourquoi toute la philosophie positive ne vise enfin, à travers la classification des sciences qu'elle a promue au niveau d'un problème philosophique fondamental, qu'à établir « la prééminence philosophique de l'esprit sociologique sur l'esprit mathématique », car « la liaison mathématique entre les phénomènes ne saurait être que précaire et stérile, en même temps que forcée et insuffisante », si l'on se contente de la fonder sur de « vagues et chimériques hypothèses ». La société, comme objet de science, est irréductible aux autres phénomènes, plus élémentaires.

Il en résulterait normalement que toute manifestation particulière du savoir se trouverait en liaison fondamentale, d'abord de manière générale avec les conditions organiques dont elle dépend, ensuite, et en particulier, avec la forme de société où elle se développe. La loi historique des trois états exprime cette relativisation des connaissances, chaque branche passant par trois étapes successives : l'*état théologique* ou *fictif*, où l'on distingue encore trois âges essentiels, ceux du fétichisme, du polythéisme et du monothéisme ; l'*état métaphysique* ou *abstrait ;* enfin, l'*état scientifique* ou *positif*.

Cette progression en trois degrés se voit d'abord dans la façon dont se transmettent les mathématiques. On peut penser, par exemple, qu'à l'âge théologique, l'enseignement consiste à communiquer des recettes techniques. Qu'à l'âge métaphysique, s'effectue quelque chose comme une dispersion des mathématiques parmi des calculs exacts mais partiels. Qu'à l'âge positif, enfin, il y aurait une organisation du savoir mathématique conscient désormais de son rôle et de son potentiel.

La perspective d'A. Comte n'est heureusement pas aussi simple. A. Comte remarque d'abord qu'alors qu'un géomètre de l'Antiquité se formait par l'étude successive d'un très petit nombre de traités originaux, essentiellement les écrits d'Archimède et d'Apollonius, « un géomètre moderne a communément terminé son éducation, sans avoir lu un seul ouvrage original, excepté relative-

ment aux découvertes les plus récentes, qu'on ne peut connaître que par ce moyen ». Ce qui veut dire qu'une sociologie moderne des mathématiques est obligatoirement, pour une part au moins, une sociologie des *manuels* plutôt que des *mémoires originaux* de mathématiques. Le manuel s'est désormais imposé comme intermédiaire indispensable entre la société et les mathématiques. Ensuite, Comte saisit clairement que la révolution cartésienne, qui rendit possible la géométrie analytique, implique que l'organisation vers l'objet mathématique se soit elle-même modifiée; la révolution cartésienne est une véritable libération des forces intellectuelles, qu'elle dirige vers des *questions plus générales,* à l'aide de notions nouvelles, qu'on n'aurait jamais pu introduire « en ajoutant quelques nouvelles courbes » au petit nombre de celles qu'on avait déjà étudiées par l'ancienne méthode. Si celles-ci n'intéressent plus le mathématicien, cela tient à ce que la révolution philosophique opérée en géométrie par Descartes « a dû singulièrement diminuer l'importance de semblables recherches ».

Ne relevons pas davantage de remarques de détail, bien qu'elles soient, chez A. Comte, plus importantes que ce qu'on lit dans les développements consacrés explicitement aux mathématiques, lesquels véhiculaient les idées courantes dans le milieu de l'École polytechnique, au temps où notre auteur en était l'élève. En multipliant et en rassemblant des notations du genre de celles dont nous avons reproduit l'essentiel au paragraphe précédent, on s'apercevrait qu'elles tendent à une certaine unité et qu'elles résistent encore aujourd'hui à la critique.

Maints sociologues du savoir ne font actuellement qu'énoncer doctement des faits qui constituaient des évidences pour A. Comte, bien qu'en raison de l'idéalisme alors dominant ils ne fussent pas immédiatement intelligibles à son époque : par exemple, l'idée que l' « élément scientifique » entretient des relations, non seulement plus ou moins directes, mais encore absolument organiques, avec certaines demandes militaires. Jusqu'alors, dit Comte, la science avait reçu des encouragements facultatifs; à présent la protection des sciences devient systématique, et, « pour tous les gouvernements occidentaux, un véritable devoir », en vertu de la liaison étroite des sciences exactes avec les procédés militaires et avec l'essor industriel. Or, ce dernier est, à son tour, conditionné « spécialement par l'institution des armées soldées ». D'autres institutions, au dessein non moins militaire, semblent, d'après un mathématicien contemporain, René Thom, à l'origine de l'engouement actuel pour les mathématiques; le lancement des satellites aurait joué le rôle de l'aimant attirant l'attention du public sur les techniques mathématiques.

Il va sans dire que Comte n'a pas systématisé cette théorie des rapports entre les mathématiques et l'organisation sociale; elle reste pour une grande part implicite et ne reçoit pas toute la précision voulue. Mais justement, cette esquisse qu'il nous a laissée est d'autant plus précieuse qu'elle n'a été ni reprise ni complétée après lui. C'est qu'en fait les choses sont délicates. Comte, comme tous les philosophes traditionnels, n'a pas manqué de souligner l'originalité des mathématiques, leur autonomie (relative) à l'égard du social. Ce qui s'explique, selon lui, de deux façons. D'une part, l'esprit positif se manifeste dès l'origine, bien qu'il soit encore dominé par les croyances non positives. Le germe de la philosophie positive est tout aussi primitif que celui de la philosophie théologique, bien qu'il n'ait pu se développer que plus tardivement. D'autre part, et plus particulièrement, les rudiments de positivité sont d'autant plus anciens qu'ils sont plus simples, d'autant plus résistants à la théologie qu'ils ont un caractère de généralité et d'abstraction plus grandes. Chacun reconnaîtra ici que ce sont les idées mathématiques qui sont appelées à former le berceau de la positivité.

Bien plus, leur présence, dans la mesure où il s'agit pour Comte de mathématiques essentiellement appliquées, constituant ainsi, dans le cas de la géométrie surtout, le mode le plus simple de l'existence inorganique, marque l'introduction d'un modificateur graduel de la philosophie primitive, d'un principe de dissolution pour les croyances théologiques ou métaphysiques, sûr, efficace, mais dont l'action est, pour ainsi dire, plutôt intermittente que continue, justement parce qu'il n'est pas toujours accordé aux conditions sociales qui l'entourent.

Avec Thalès, Pythagore, Hipparque et Archimède — Archimède surtout, dont l'intérêt pour les applications pratiques préfigure l'idée des immenses services que la science devait rendre un jour à l'industrie — l'esprit scientifique s'était développé avec une telle plénitude qu'il suscite pour la philosophie de l'histoire une question caractéristique : comment expliquer que les dispositions éveillées n'aient pas été immédiatement mises à profit et qu'un intervalle de quinze siècles sépare l'élaboration astronomique d'Hipparque des découvertes de Kepler, pour ne prendre que cet exemple ? Ni les situations historiques, ni les mérites personnels ne renferment l'explication. La recherche de celle-ci nous renvoie à la théorie complexe des facteurs dominants, celle de la présidence, de la souveraineté, de l'ascendant de certains caractères sociaux. L'évolution scientifique dépend de tout l'essor mental, et celui-ci peut comporter des éléments incompatibles entre eux qui obscurcissent l'horizon de la science. Un horizon jamais disponible à l'état pur, multiplement connexe, multiplement compact, suffisamment mobile pour ruiner toute prétention à l'absolu, sans jamais assujettir ce qui est scientifiquement établi à une histoire purement arbitraire. Car le progrès est toujours maturité et développement de l'expérience, habité dès l'origine par des lois logiques, essentiellement invariables, communes à tous les temps et tous les lieux, et même aux sujets quelconques.

L'apport des sociologies de la connaissance

Les travaux des sociologues classiques qui se sont intéressés aux formes de la connaissance restent, pour ce qui concerne les mathématiques, bien en deçà de la profondeur des vues de Comte. Ainsi, le philosophe Jérusalem, qui a créé l'expression « sociologie du savoir » et plaidé pour une étroite dépendance du social et du pensable, n'a fait que traduire en termes sociologiques le langage transcendantal.

Le grand Durkheim lui-même est, à certains égards, en retrait par rapport à Comte; en effet, il fait dériver la connaissance de la religion, perspective hasardeuse et en tout cas moins prudente que celle de Comte qui montre une présence simultanée, dès l'origine, d'éléments positifs et d'éléments antagonistes provisoirement dominants, évitant par là l'écueil d'avoir à dériver le savoir du social ou d'un de ses aspects. Par ailleurs, Durkheim, en suggérant la relation des catégories d'espace et de temps avec la structure sociale où elles sont produites, veut assigner une origine sociale à l'ensemble des catégories de l'entendement, c'est-à-dire aux concepts de genre, de nombre, de cause, de substance, par quoi il se rend tributaire de la théorie de la connaissance de Hamelin. Aussi sa sociologie véhicule-t-elle, quand elle se passe d'enquête empirique, les préjugés typiques d'une *théorie de la connaissance* bien datée. Enfin, et surtout, les mathématiques n'intéressent ni directement ni explicitement Durkheim, car cela n'avance à rien de dire que l'idée de nombre correspond aux propriétés les plus universelles de l'être.

On pourrait attendre mieux de Lucien Lévy-Bruhl. Celui-ci, en effet, était plus sensible à la pluralité des genres de connaissance, et, dans sa dernière œuvre, à la diversité de leurs rôles dans différents types de société. On sait qu'il a d'abord soutenu la thèse de la loi de « participation mystique » comme substitut, dans les sociétés archaïques, des principes logiques ayant cours dans les sociétés « civilisées ». Par la suite, il a évolué vers l'idée d'une logique primitive spécifique, opposée à la logique développée sous la contrainte de la rationalité. Mais nulle part notre problème n'est envisagé pour lui-même, ni ne bénéficie des résultats recueillis. C'est pourquoi les autres efforts peuvent paraître également décevants. Une exception cependant : les analyses de Max Scheler (1874-1928).

La contribution de Max Scheler

La connaissance mathématique est traitée sous la rubrique générale de la connaissance scientifique; Scheler prend, le premier, ses distances à l'égard de la philosophie de la connaissance traditionnelle. Très proche du perspectivisme de Husserl, il considère, par exemple, que la table des catégories de Kant correspond simplement à la configuration conceptuelle qui a dominé l'Europe occidentale à un certain moment de son histoire. Il relativise tous les *a priori* subjectifs, c'est-à-dire tous les « sujets

collectifs » qu'on imaginait au principe de la connaissance, échappant ainsi à la tentation de sociologiser le *cogito*, c'est-à-dire de substituer au sujet cartésien sur lequel se fonde le rationalisme classique un sujet collectif, le groupe et l'époque. L'intérêt principal de sa sociologie est l'analyse explicite de ce qu'il considère comme déterminant l'essence de la science positive, laquelle doit son origine à la jonction de deux couches sociales séparées au départ mais condamnées à collaborer de plus en plus rationnellement : celle des contemplatifs libres et celle des hommes de métier et d'expérience. C'est la première qui garantit à la seconde le fondement méthodique, logique et mathématique; la seconde procure le rapport à la technique, à la mesure, à une expérimentation d'un type nouveau, échappant au hasard, impliquant une manipulation des corps et des forces naturelles familière en premier lieu aux cultures patriarcales expansives, à des sociétés organisées différemment des sociétés matriarcales, introverties.

L'attitude de Scheler consiste donc à refuser à la fois le pragmatisme, la conception de la science positive ou des mathématiques en particulier, qui en fait une science totalement issue de la technique, et la conception intellectualiste qui n'entend la relier qu'à la philosophie. Partout où il y eut science positive, c'est donc sur la base de l'association de la philosophie avec l'expérience du travail. Les formes des techniques de production et du travail humain correspondent aux formes de la pensée scientifique et positive sans que les unes soient les causes ou les effets des autres. La technique n'est pas la simple application d'une science pure qui la précède; car la volonté de puissance dirigée sur tel ou tel domaine détermine à l'avance les méthodes de pensée et d'intuition aussi bien que les buts de l'activité scientifique, mais elle les détermine de manière inaccessible à la conscience des individus, hors du champ de visibilité immédiate du chercheur ou du savant.

Il y aurait donc lieu d'établir une typologie générale des systèmes de pensée qui se succèdent en reprenant chacun (et chacun à sa façon) des problèmes principaux qui se posent. Mais par là Scheler tend à se rapprocher de la théorie des visions du monde, chère à Dilthey, et trop compacte pour nous apprendre quelque chose de précis sur notre sujet.

En effet, dire avec Scheler que la « volonté de puissance » habite la profondeur invisible du projet scientifique rend la mathématique elle-même, si pure qu'elle soit, à la réalité sociale où elle se forme : l' « idéologie » habite fondamentalement le savoir. Mais c'est là une vérité qui ne nous apparaît qu'à travers des analyses conceptuelles parfois trop abstraites pour être concrétisées, ou trop engagées dans la philosophie pour garder toute leur signification sociale. C'est sans doute la raison pour laquelle on ne trouve, en fin de compte, aucune analyse concrète des rapports entre mathématiques et société dans les travaux de Scheler, ni, non plus, dans ceux de Karl Mannheim, celui qui fut lesociologue de la connaissance par excellence.

L'analyse de Karl Mannheim

En effet, Karl Mannheim, parti d'une réflexion sur l'interprétation des œuvres culturelles, sur l'analyse structurale de la théorie de la connaissance et sur la problématique d'une logique de la philosophie, a développé sa théorie de la connaissance d'abord dans le cadre des problèmes inhérents à l'interprétation sociologique des œuvres, avec le souci de voir si l'examen peut mettre en lumière dans l'œuvre quelque chose qui échappe à l'ensemble des conditions sociales. Mannheim aperçoit la distance qui sépare l'individu de l'œuvre objective, qu'elle soit artistique ou scientifique. En France, L. Goldmann et même J.-P. Sartre retrouvent la même réflexion sur la notion d'œuvre, mais ne considèrent guère plus que Mannheim les mathématiques en particulier, peut-être parce que là, plus qu'ailleurs, apparaît la fragilité de cette notion d'œuvre. Par ailleurs, Mannheim s'en tient à des questions de nature trop existentielle : Où sommes-nous? Qu'est-ce qu'interpréter? Quelles sont les différentes formes de l'interprétation? ou trop générale : Que veut dire « connaître »? Où en sommes-nous du devenir historique? De quel lieu envisageons-nous notre univers intellectuel? questions que leur résonance pathétique situe à leur tour tout à fait historiquement et socialement.

L'analyse marxiste

La philosophie marxiste, de Marx à ses interprètes récents, est restée plus fidèle à l'inspiration concrète, à l'analyse du procès de la connaissance réelle, non seulement en tant que fonction d'un ensemble de conditions historiques dont on définit la nature et les articulations, mais encore et surtout en tant que travail actuel élaboré sur la base des résultats de travaux effectivement disponibles. Or, par ce biais, le marxisme tendait plutôt à élaborer une épistémologie concrète des mathématiques : la dialectique interne d'un mouvement singulier en tant qu'il est révélé, strictement parlant, par ce mouvement même. Une certaine autonomie du secteur mathématique s'affirme par là, et contredit la thèse générale d'Engels, pour qui la science est l'une des régions idéologiques supérieures, le besoin économique ayant été et n'ayant cessé de devenir davantage le « principal ressort du progrès de la connaissance de la nature »; les scientifiques s'imaginent seulement « qu'ils travaillent sur un terrain indépendant »; en réalité, tout en constituant un groupe autonome au sein de la division sociale du travail, tout en exerçant, en retour, une certaine influence sur le développement social, voire le développement économique, ils n'en sont pas moins sous l'influence dominante de ce dernier. Cependant, toute la difficulté consiste à interpréter, conceptualiser l'idée de cette « influence » qui, pour éviter toute connotation mystique, devra être dissociée en la possibilité de l'intervention des résultats scientifiques dans tel domaine économique et social, et, d'autre part, en pratique relativement autonome, avec une structure et une histoire propres.

Telles sont les théories qui envisagent plus ou moins implicitement le problème des rapports entre les mathématiques et la société. Nous n'avons point considéré celles qui n'en traitent que de manière fort indirecte : celle de Max Weber, par exemple, sous la forme de la rationalité occidentale comme effet, au même titre que le capitalisme moderne, de l'éthique protestante. Et nous avons rencontré un certain nombre de questions qui auraient pu donner lieu à des enquêtes intéressantes sur les rapports des mathématiques et de la société aujourd'hui, mais toutes les théories dont nous avons parlé restent épistémologiquement en retard sur les mathématiques. Les indications que nous avons recueillies constituent donc les cases vides d'un programme inaccompli.

L'impact mathématique sur le social

Une réflexion plus actuelle s'avère donc indispensable. Aujourd'hui, en effet, la mathématique semble être devenue une préoccupation éminemment sociale, et de plusieurs manières :

— en tant qu'elle est devenue un outil indispensable, bien qu'insuffisant, à toute science sociale ;

— en tant que mode de savoir dominant de la société technologique;

— en tant, enfin, qu'elle s'est imposée comme constituant essentiel d'une nouvelle culture de base.

Tout d'abord, la mathématique a conquis, il est vrai, le domaine social. La sociologie, par exemple, ne recourt pas seulement aux méthodes quantitatives pour l'analyse des données, mais à une foule d'outils mathématiques plus perfectionnés.

Elle a ses origines propres. Elle ne semble pas résulter de la simple extension au social des méthodes qui ont fait leurs preuves dans les domaines de la nature. C'est pourquoi l'on ne trouvera pas à l'origine du projet d'une science sociale le souci de construire un *concept abstrait* de la « société ». Autrement dit, si c'est la sociologie empirique qui s'est le plus ouverte, et le plus utilement, aux mathématiques, le projet de cette sociologie empirique existe tel quel dès l'apparition des premiers efforts pour comprendre les divers phénomènes aujourd'hui rangés sous la rubrique des sciences sociales.

Histoire et valorisation idéologique de la mathématisation du social

Les premiers essais pour introduire la quantification dans les sujets d'ordre social coïncident avec la naissance de la science moderne du mouvement. Le même siècle a enfanté deux disciplines aussi différentes que la mécanique et la sociologie quantitative. Certes, c'est, ici et là, le même besoin de maîtriser l'apparence désordonnée

en fondant une approche méthodique et réfléchie, d'une part, des phénomènes naturels, de l'autre, des phénomènes sociaux. Mais chacune de ces deux entreprises, qui n'eurent d'ailleurs pas un égal succès, mettait en œuvre une rationalité manifestement hétérogène à celle de l'autre. L'outil de la physique mathématique n'est pas celui qui sert à déterminer si un ensemble de données numériques, recueillies d'une certaine façon, permet de dégager une certaine régularité, sinon d'établir une nouvelle espèce de loi.

La coïncidence historique de ces préoccupations d'orientation opposée décèle une intention de rationalité, qu'il serait peut-être imprudent de rapporter, comme à leur cause commune, à l'esprit du rationalisme montant. Il se peut bien que cette rencontre ne fût pas l'œuvre d'un pur hasard mais, actuellement, aucune recherche ne permet d'en établir la nécessité de manière convaincante.

Cependant, quelques faits bien établis révèlent certaines dépendances entre les préoccupations de rationalité économique et sociale et certaines exigences mercantilistes : la création des systèmes d'assurances, l'organisation du crédit public, le recours aux dénombrements démographiques, etc., toutes choses rendant indispensable un fondement numérique sûr et permettant d'établir un ordre financier rigoureux, de limiter le gaspillage, de réduire le parasitisme social favorisé par les modes de vie plus anciens, de valoriser, enfin, le travail en y soumettant les princes eux-mêmes dont les fonctions devaient désormais être liées à des objectifs économiques précis.

La nouvelle dimension des États et leur inféodation à la conquête des premières richesses exigeaient donc une meilleure connaissance de leur situation démographique et financière, et ont, par conséquent, directement commandé le développement de la *statistique,* comme science de l'État (Staatskunde), ainsi que le suggère le mot lui-même, introduit en 1749 par Achenwall, professeur à Göttingen. Certes, en tant que simple désignation de l'activité qui consiste à recueillir des données permettant de connaître la situation des États, les statistiques trouvent un ancêtre dans « la science des listes » si développée par les Sumériens qui ne négligeaient jamais de répartir par séries et par catégories les données de l'expérience, et plus encore, dans le recensement des productions agricoles qui remontent, en Égypte, à plus de 2 000 ans avant Jésus-Christ : les pharaons cherchaient, en effet, le moyen infaillible d'obliger tous les chefs de famille à payer les taxes individuelles et personnelles ; plus récemment, le capitalisme des grands marchands de drap de Venise se dota d'une organisation rationnelle et d'une structure bureaucratique, qui a pu fournir un modèle aux Pays-Bas du XVII^e siècle, où la renaissance du commerce s'est accompagnée d'un renouveau de l'enquête statistique attesté par les quelque soixante volumes des *Respublica alzeviriana,* où l'on trouve des informations sur l'économie des États.

C'est bien au XVII^e siècle que l'on peut trouver l'ancêtre direct de la statistique actuelle. Car c'est au XVII^e siècle que s'accuse le plus nettement le rapport profond entre la société et l'État. La définition de la statistique que retient Cournot, dans sa *Théorie des chances et des probabilités,* nous montre rétrospectivement la conscience qu'on avait de ce rapport : « On entend principalement, nous dit-il, par statistique, comme l'indique l'étymologie, le recueil des faits auxquels donne lieu l'agglomération des hommes en sociétés politiques... en tant que ces faits sont susceptibles de dénombrement et d'évaluation numérique. »

C'est Colbert, en France, qui avait ordonné des enquêtes fournissant toutes ces statistiques dont regorgent les mémoires des intendants. Le procédé devient systématique, et comme un moyen de gouvernement. Et graduellement, la perception du socio-politique devient aussi peu commune et immédiate que celle des phénomènes naturels. Si bien qu'on peut bientôt dire des phénomènes socio-culturels ce que Newton disait des phénomènes naturels : « Le moindre fait qui s'offre à nos yeux est tel qu'on ne peut sans une extrême adresse démêler tout ce qui y entre, ni même sans une sagacité extrême soupçonner tout ce qui y peut entrer. »

Mais si le lieu d'application originaire de la statistique est le domaine socio-politique, c'est d'avoir fonctionné comme *lieu d'application de la théorie des probabilités* qu'elle a eu un destin tout autre que celui des divers recueils de données sur la situation des États.

Dans cette perspective, où les statistiques sont liées à des considérations probabilistes, on notera que, dès 1570, Cardan s'était intéressé aux statistiques relatives à la durée de la vie humaine ; en 1693, l'astronome anglais Halley n'a pas dédaigné de publier une *Breslau Table of Mortality,* première tentative d'établir une table des mortalités sur des données concrètes. Ces tables de mortalité furent un des premiers résultats à répandre le culte des déterminations numériques dans l'ordre socio-politique, comme le montre l'œuvre de Süssmilch (1707-1767) sur *l'Ordre divin prouvé par la natalité, la mortalité et la fertilité du genre humain.* L'engouement devient bientôt général : y participent non seulement les théologiens mais aussi les hommes de lettres et de sciences, et Buffon, par exemple, le justifie en alléguant que « de toutes les probabilités morales possibles, celle qui affecte le plus l'homme en général, c'est la crainte de la mort ». En fait, il est la marque du succès des premières statistiques médicales, commencées dès l'œuvre de Graunt (*Natural and Political Observations Mentioned in a Following Index and Made upon the Bills of Mortality,* 1662), et se poursuivant tout au long du XVIII^e siècle, où apparaît justement dans la littérature la nouvelle rhétorique toute logique et toute rationnelle, fortement imprégnée du prestige des chiffres.

Qu'on en juge par ce discours de Voltaire sur la prophylaxie de la variole : « Il y a quelques gens qui prétendent que les Circassiens prirent autrefois cette coutume des Arabes ; mais nous laissons ce point d'histoire à éclaircir par quelque savant Bénédictin, qui ne manquera pas de composer là-dessus plusieurs volumes *in-folio* avec les preuves. Tout ce que j'ai à dire sur cette matière, c'est que, dans le commencement du règne de Georges I^er, M^me de Wortley-Montaigu... avec son mari en ambassade à Constantinople, s'avisa de donner sans scrupule la petite vérole à un enfant dont elle était accouchée en ce pays... Cette dame, de retour à Londres, fit part de son expérience à la princesse de Galles, qui est aujourd'hui reine... Dès qu'elle [la reine] eut entendu parler de l'inoculation ou insertion de la petite vérole, elle en fit faire l'épreuve sur quatre criminels condamnés à mort... »

Suit l'argument fondamental aux yeux de Voltaire : « Sur cent personnes dans le monde, soixante au moins ont la petite vérole ; de ces soixante, vingt en meurent dans les années les plus favorables et vingt en conservent pour toujours de fâcheux restes : voilà donc la cinquième partie des hommes que cette maladie tue ou enlaidit sûrement. »

La leçon à en tirer est qu' « une nation commerçante est toujours fort alerte sur ses intérêts, et ne néglige rien des connaissances qui peuvent être utiles à son négoce » *(cf. la onzième lettre philosophique, sur l'insertion de la petite vérole).*

Voilà pourquoi Diderot, de son côté, déplore qu'on ait donné trop d'importance dans les écoles à l'étude des mots, alors que le spectacle de l'industrie humaine est en lui-même grand et satisfaisant pour développer « l'instinct de la précision », pour faire sentir, dans les cas de *probabilité,* l'écart plus ou moins grand par rapport au vrai, pour faire apprécier les incertitudes, « calculer les chances », faire sa part au sort ; bref, c'est en ce sens, conclut Diderot, que les mathématiques deviennent une science usuelle, une règle de la vie, une balance universelle.

Le talent littéraire s'est donc lui-même mêlé de cette valorisation du nombre, de la quantité et de la statistique : d'où cet engouement, caractéristique du XVIII^e siècle, bien exprimé par Voltaire, ambitieux de réunir le titre de géomètre à celui de poète et d'historien ; d'où l'admiration de tous pour Buffon, qui communique aux sciences, y compris l'arithmétique morale ou politique, le charme dont les lettres avaient eu jusque-là l'exclusivité. Il en résulte une certaine popularité des sciences en général, assez profonde en France où les meilleurs ouvrages sont écrits dans un style à la fois accessible et modèle, lors même que les ouvrages de Gauss ou de Newton demeuraient écrits en latin.

Cette pénétration de la littérature elle-même par la science et par ses applications marqua le point de départ d'une période qui vient à peine de s'achever, et dont la fin est saluée par les mathématiciens contemporains qui

D. Ribas

◀ *Le penseur prisonnier des algorithmes (vu par D. Ribas).*

se félicitent que les mathématiques puissent aujourd'hui s'exposer avec une rigueur telle qu'elle exclut le genre d'« exposé décoratif » qui permettait à certains de briguer à la fois l'Académie des sciences et l'Académie française ! C'est que ce prestige des mathématiques s'illustrait, en effet, plus par une précision excessive à laquelle se joignait la passion du pittoresque, que par un souci d'objectivité et de rigueur. La mathématique offrait un arsenal de métaphores et de modèles pour concrétiser telle ou telle idée. Même Rousseau n'échappe pas à cette façon de faire, qui expose dans le *Contrat social* une théorie du gouvernement sur le modèle d'une théorie des proportions.

Le désir d'étendre les mathématiques aux domaines appartenant à la société plutôt qu'à la nature existe donc réellement, surtout chez les premiers statisticiens. Mais ces efforts précurseurs ne dépassent pas le stade préscientifique : les enquêtes statistiques de ce temps respectent rarement les normes de l'enquête empirique telles qu'elles seront dressées plus tard, et suppléent le vide de l'information par l'audace des déductions. C'est pourquoi l'histoire de la *quantification* du social ne doit pas négliger les oppositions à la statistique. Celles-ci ont été exprimées au cœur du XIXe siècle par A. Comte et réitérées par Claude Bernard, qui est sans doute allé plus loin dans la critique et la mise en valeur du ridicule des statistiques aveuglément appliquées, par exemple, dans le cas où l'on recueille l'urine d'un homme pendant vingt-quatre heures et qu'on mélange tous les échantillons pour avoir l'analyse de « l'urine moyenne » (on aura en effet l'analyse d'une urine qui n'existe pas). Ce qui a rendu la statistique inacceptable aux esprits les plus positifs, c'est précisément sa tendance à chiffrer n'importe comment, à quantifier sans méthode, si bien que Cournot, auteur du premier effort sérieux de mathématiser la théorie des richesses, pensait qu'un statisticien ou un financier ne peuvent guère être considérés comme des mathématiciens, et que nombres et mesures n'étaient pas forcément des mathématiques. C'est dire que *le besoin de gestion ou d'administration ne peut tenir lieu de fondement scientifique, ni de concept, ni de théorie, ni de légitimation philosophique, et si l'application des statistiques au social a peu à peu balayé les scrupules, c'est que le perfectionnement de la science a induit un raffinement de l'analyse des faits considérés.*

Amélioration des méthodes statistiques et utilisation de méthodes mathématiques non statistiques

L'engouement pour les statistiques ne fera plus sourire à partir du moment où elles seront fondées sur le calcul des probabilités. Or, Adolphe Quételet (1796-1874) fut, à coup sûr, le premier à voir tout le parti que pouvait tirer une « physique sociale » des travaux de Fourier et de Laplace sur la probabilité mathématique. D'abord intéressé par des moyennes et des taux pour des propriétés généralement d'ordre démographique, il étendit bientôt ses investigations, vers 1840, à la *distribution* de ces propriétés, en se laissant guider par l'analogie qu'il remarquait entre la distribution de la taille et du poids des êtres humains et celle, mieux connue, des erreurs d'observation. C'est là une application anthropologique qui inspire encore aujourd'hui l'histoire quantitative lorsqu'elle étudie, par exemple, les archives de recrutement militaire.

Mais l'œuvre de Quételet restant dans l'ensemble assez confuse, et encore implicite quant à ses principes, suscitera des critiques, dont les plus célèbres sont celles que lui adressa M. Halbwachs dans *la Théorie de l'homme moyen* (1912). Lazarsfeld remarque à juste titre qu'en réalité c'est seulement après plusieurs décennies, avec le développement des « processus stochastiques », que le mouvement inauguré par Quételet fut repris et que fut démontrée l'applicabilité du calcul des probabilités à ce que Halbwachs appelait le domaine de « l'interaction sociale ».

Par exemple, la distribution binominale exprime la situation d'un bal où les hommes et les femmes, celles-ci étant en plus grand nombre, ne se connaissent pas : à l'ouverture du bal, chaque cavalier choisit une cavalière au hasard en tirant son nom au sort, et au bout de dix danses on peut ainsi classer les noms des danseuses selon le nombre de fois où elles ont été invitées. Or, si les cavalières choisies la première fois bénéficient de la croyance d'être les plus désirables, elles auront plus de chances d'être choisies, si bien que tout se passe comme si, dès la seconde danse, les noms des cavalières choisies la première fois étaient mis deux fois dans le chapeau. Si l'on répète l'expérience, le nombre des danseuses ayant eu le plus ou le moins de cavaliers croît sensiblement, tandis que le nombre moyen de succès demeure le même. Ainsi rien n'empêche le développement de processus stochastiques où les probabilités des choix individuels à l'instant $t + 1$ dépendent de la distribution totale de la probabilité à l'instant t. On ne peut en conclure, comme le fait Lazarsfeld, que Quételet avait raison contre Durkheim ; l'acquis positif de chacun des deux points de vue semble aujourd'hui conservé, car il n'est pas dit que l'explicitation de la méthode de Durkheim dans son étude sur le suicide ne mène pas au même résultat que la systématisation des remarques de Quételet postulant qu'on peut mesurer l'inobservable si l'on suppose des relations mathématiques entre caractères observables et variables non observables, ou notant qu'on peut substituer une seule observation dans le temps portant sur une grande quantité de gens à des observations répétées sur une même personne.

Il a fallu attendre le début de ce siècle pour disposer d'une bonne méthodologie statistique, c'est-à-dire de la théorie qui permet, grâce à un concept convenable de l'*inférence statistique,* de passer des données observables à des conclusions sur les lois de probabilité qui régissent ces données. Autrement dit, il a fallu le développement de la statistique mathématique pour que le langage des sciences sociales lui-même puisse être remis en chantier, être passé au crible d'une conceptualisation critique et d'une redéfinition de ses notions opératoires. Ce dont témoigne bien la nécessité, vivement ressentie par Lazarsfeld, d'analyser et de délimiter les objets empiriques, de clarifier et d'expliquer les termes, tâche de nature bien peu empirique, bien qu'elle soit inscrite dans le cadre d'une élucidation aussi précise que possible de l'enquête empirique. Celle-ci ne veut plus rester aveugle sur la jonction qu'elle effectue entre le langage dans lequel elle s'exprime, sur ses objets et les moyens qui permettent l'expression quantifiée. Tentative d'homogénéiser l'objet de l'enquête et son appréhension scientifique, de fixer les conditions de l'applicabilité des concepts retenus à certains ensembles d'éléments observables. Le caractère empirique des recherches de Lazarsfeld vient de la seule nécessité de repenser pour chaque cas une épistémologie locale. De fait, l'ensemble des objets sociologiques est considéré comme une *combinaison de propriétés élémentaires de variables ;* un peu comme les corps sont réduits par Descartes à un espace homogène. Les relations entre variables sont une manière de monnayer, de développer les idées les plus complexes. *Variable* est, par exemple, la taille d'une ville, l'état financier d'une entreprise, le quotient intellectuel d'une personne, bref, tout ce qui se laisse mesurer d'une certaine façon. Il va sans dire que tout ne se traduit pas en « variable », avec toute la précision voulue. Mais cela permet des distinctions entre catégories de concepts, c'est-à-dire critères de classification donnés. Ainsi comprise, cette conceptualisation conforme pour ainsi dire les données des sciences du comportement, et donc des sciences sociales, aux exigences de la statistique mathématique.

La construction de modèles statistiques, qui permettent une analyse de type causal, n'est pourtant pas l'unique voie empruntée par la mathématisation du social. Bien des situations réelles relèvent de modèles mathématiques plus complexes, par exemple les *modèles stochastiques,* plus propres à rendre compte des *évolutions* d'une grandeur dans le temps, le hasard intervenant à chaque instant. Mais, dans l'état actuel du calcul des probabilités, les applications de la théorie des processus stochastiques au social restent assez limitées : l'analyse d'un modèle stochastique devient, en effet, très complexe, dès que les hypothèses qu'il exprime dépassent un niveau simple ; en particulier dès que le nombre de variables intervenant dans le modèle dépasse un certain ordre, assez petit.

Bien que les statistiques aient permis de traiter mathématiquement des notions que d'aucuns croyaient réfractaires par nature, elles ne constituent certes pas le seul traitement mathématique possible des phénomènes sociaux. On connaît ainsi un exemple d'application des probabilités ayant un fondement étranger à toute préoccupation statistique. Condorcet a créé, en effet, une science sociale mathématique sur la base d'une philosophie sociale contractualiste, fondée sur les notions de volonté et d'intérêt généraux. Cette idée, qui est aussi celle de Locke, de Rousseau, de Diderot, implique une conception de la conduite humaine en termes de décision et de choix : toute forme de décision collective, tout suffrage peuvent être considérés comme l'agrégation de volontés et d'intérêts particuliers. Le suffrage, qui est ainsi fondamental, implique que le vote est un pari. Se pose alors une question : comment éviter au parieur les inconséquences possibles de son choix ? Ce que les sociologues nomment l'*effet Condorcet* montre que l'agrégation de jugements raisonnables donne naissance à des jugements déraisonnables et que la notion de volonté générale n'est pas si claire qu'on le croit à première vue. Le traitement mathématique de cette difficulté débouche sur deux catégories hétérogènes de problèmes : la définition d'une mesure d'utilité par une mesure de probabilité, et la construction d'un modèle d'homme rationnel dont on retrouverait le comportement dans les comportements spontanés.

En outre, chacun sait aujourd'hui que mathématiser n'est pas nécessairement quantifier, ce qui signifie ici que la capacité des mathématiques à servir d'instrument aux sciences humaines n'est pas toute concentrée dans la théorie des probabilités, avec ou sans l'auxiliaire des statistiques.

L'analyse des structures algébriques a eu une fortune qui a largement dépassé le domaine de l'algèbre ; de Cl. Lévi-Strauss à Piaget, en passant par une multitude de travaux de linguistique et de sociologie, c'est le langage commun d'une mathématique de la structure qui domine, au point qu'on n'est pas loin d'espérer que les sciences de l'homme deviennent une branche des mathématiques appliquées. L'algèbre des structures fournit pour le moins des *modèles,* c'est-à-dire des représentations schématiques permettant l'étude d'un ensemble de questions, même si, comme c'est le plus souvent le cas, elles n'entretiennent pas de lien de signification naturel avec ces questions. La meilleure illustration de ce procédé est certainement fournie par l'étude des systèmes de parenté dans les sociétés archaïques : on se reportera, bien entendu, à la fameuse contribution, dans les *Structures élémentaires de la parenté* de Cl. Lévi-Strauss, d'André Weil, qui montre comment la théorie des groupes de substitution facilite la classification des lois du mariage dans la société Murngin (*cf.* chapitre XIV). L'analyse structurale des relations de parenté est fructueuse, précisément parce que la relation de parenté est éminemment sociale, mettant en jeu non pas deux ou trois individus isolés mais tout un ensemble plus ou moins grand d'individus, et à travers lui tout le groupe, c'est-à-dire toute l'organisation, toute la structure sociale.

La maternité, par exemple, est une relation non seulement d'une mère à ses enfants mais aussi de cette femme à tous les membres du groupe, pour qui elle est épouse, sœur, cousine, etc. Elle définit un ensemble de droits et de devoirs, et, comme le remarque si justement Lévi-Strauss, son absence ne définit pas rien, mais elle définit l'hostilité. Le mariage n'est pas « un processus discontinu, qui tire de lui-même, dans chaque cas individuel, ses propres limites et ses possibilités » ; les règles qui le régissent expriment la façon dont un groupe donné organise l'échange et la circulation des femmes entre les différents segments de la société.

Ce qu'il y a de plus social dans la société est donc susceptible d'être mathématisé. Non que l'on trouve dans la société l'équivalent de véritables quantités théoriques : dans le meilleur des cas, en économie par exemple, la quantification statistique n'atteint que des mélanges ; mais elle permet, néanmoins, de poser des questions dont le langage ordinaire ne permet pas une formulation précise. Par ailleurs, le recours de plus en plus courant aux modèles permet une exploration qui tient lieu, pour ainsi dire, d'expérimentation.

Mathématique et technologie

Il faut rappeler que cet accès progressif des phénomènes sociaux au traitement mathématique s'est fait dans une société qui se transformait parallèlement jusqu'à se muer en support d'une pensée essentiellement technologique, expression ultime de l'exigence de rationalité. Le terme *technologica* a d'abord désigné une doctrine de la division des disciplines, de leur classification ; des acceptions proches du sens moderne apparaissent à la fin du XVII^e siècle ; par exemple, chez C. Wolf, il désigne déjà une science des métiers et de leurs produits.

Le premier représentant moderne de cette exigence, Descartes, concevait à la fois le monde comme un monde mathématique (qui ne contient qu'étendue et mouvement) et la science comme le moyen de s'en rendre maître. Désormais, l'expérience ne sera plus, comme dans l'Antiquité, aux antipodes de la spéculation ; ayant elle-même changé de nature, son statut s'est modifié : conduite à l'aide d'instruments qui sont, selon une formule connue, des « théories matérialisées », elle s'est de plus en plus pénétrée de théorie. Cette tendance s'est accentuée à partir de la Révolution française : la perception humaine a définitivement troqué les sens pour les instruments. Dès 1794, Lakanal proclamait que sans mathématiques l'architecture civile et militaire n'a plus de règle et les sciences de l'artillerie et des fortifications plus de fondement. Et Monge de préciser qu'il faut orienter l'éducation nationale vers la connaissance des objets qui exigent de l'exactitude, vers les théories qui permettent des

applications précises. C'est le développement d'un nouveau modèle du savoir (les sciences appliquées), et l'exigence de nouvelles écoles (École centrale des travaux publics [1797]), où s'enseignent les mathématiques et la physique en vue de la diversité de leurs applications. Cournot remarquait que l'homme a fini par préférer à la machine naturelle, le cheval avec les images poétiques qu'il éveille, le cheval-vapeur de l'industrie moderne, qu'il a pu construire sur un plan plus simple, dont il peut mieux régler le service et contrôler la dépense. Dans ce but, il s'est fié de plus en plus aux mathématiques.

Cette technologie s'est étendue aujourd'hui sans cesser de nourrir un rapport profond aux sciences de la précision, c'est-à-dire plus ou moins directement aux mathématiques. Elle est l'application systématique des sciences, et fonde la possibilité de concrétiser le savoir sur une stratégie de la division et de la spécialisation extrêmes des tâches, caractéristiques qui sont, à leur tour, marquées par la durée des processus de fabrication exigeant une multitude de compétences généralement séparées. D'où le rôle, dans la civilisation technologique, de la *recherche* et de la *planification*. On n'en est plus à savoir calculer un certain nombre de forces physiques de l'Univers, mais à vouloir décupler, et défier en même temps ces forces ; la concurrence internationale contraint à cet effort gigantesque si l'on prétend maitriser l'espace, évaluer les matériaux disponibles, contrôler le savoir qui permet de transformer toutes ces données en autant de ressources.

Non seulement les mathématiques se sont imposées dans plusieurs disciplines longtemps réputées réfractaires, non seulement elles constituent un élément de base dans la société technologique industrielle d'aujourd'hui, mais encore, elles prétendent à une place de choix *dans la culture* actuelle. On est loin de l'époque où A. Comte se plaignait de la domination des Académies par les géomètres. On est loin de la mise en garde de Cournot contre la confusion du règne des chiffres, des nombres et des mesures avec celui des mathématiques. Il est désormais entendu que toute recherche sérieuse recourt d'une façon ou d'une autre aux mathématiques. La vieille bataille entre le latin (et le grec) et les mathématiques dans la formation des élèves n'a plus de raison d'être, car elle a été définitivement gagnée. Les mathématiques apparaissent comme le lieu où l'on peut disposer de toutes les formes possibles de discours, des discours fondamentaux qui sont à la racine de la mécanique, de la physique, de la biologie (il faut un baccalauréat de la série C pour des études de médecine), de la psychologie, de la sociologie, de la linguistique, etc. On apprend ainsi à raisonner sur tout en toute rigueur, à se méfier des idées sans expression immédiatement claire, à couler sa pensée dans le moule du raisonnement mathématique. Et surtout, celui qui est formé par l'activité mathématique laisse plus spontanément les généralités aux spécialistes de la politique pour accepter la sécurité intellectuelle que procure une discipline reconnue. Or, cette attitude est plus rentable pour une société technologique, qui divise et décompose tout problème en segments multiples dont chacun constitue le domaine d'intervention d'un expert. Les contraintes de l'industrie et, en dernier ressort, le marché du travail renforcent la préférence pour la culture mathématique. Mais cette préférence est une préférence dictée ; c'est le résultat de la contrainte sociale, d'un fait social au sens plein du terme, qui impose, comme eût dit E. Durkheim, « des manières d'agir, de penser et de sentir extérieures à l'individu, et qui sont douées d'un pouvoir de coercition en vertu duquel elles s'imposent à lui », sans avoir ni la nécessité des faits logiques ni le caractère naturel de ce qui s'enracine dans l'organique, ni le caractère personnel propre aux représentations psychologiques.

L'existence de ce fait social légitime l'effort de faire une véritable sociologie des mathématiques, que nous ne prétendons pas développer entièrement mais en vue de laquelle nous voulons faire les remarques, à caractère programmatique, qui suivent.

Réflexions pour une sociologie des mathématiques

Une sociologie des mathématiques ne saurait être considérée comme un appendice à la sociologie de la connaissance générale, qui est l'étude des formes de connaissance propres à chaque société ou à chaque groupe, et qui repose sur une notion trop générale pour être opérante dans une enquête restreinte. Mais on ne saurait non plus l'assimiler à une sociologie de la science, d'une part parce que les rudiments déjà disponibles de cette sociologie ne considèrent pas les mathématiques comme un secteur particulier digne d'une recherche de ce genre, d'autre part parce que sous la rubrique « sociologie des sciences », qui recouvre un vaste domaine, depuis une sociologie de la sociologie elle-même à une sociologie de la communauté savante, on ne considère généralement que les sciences où l'impact social est facile à déceler, en raison des services multiples qu'elles rendent directement à la société industrielle. Or les mathématiques pures restent un peu à part, du fait qu'elles ont une autonomie relative par rapport à la société, et nous allons préciser en quel sens pour éviter tout malentendu.

Rapports des mathématiques aux formes sociales

La préhistoire et l'Antiquité

En mathématiques, l'investigation peut être comprise sans qu'il soit nécessaire de recourir à un point de départ empirique. Ni l'observation des faits, qu'ils soient fortuits ou produits, ni l'émission d'une idée ou d'une hypothèse ne constituent des considérations propres à éclairer l'activité de recherche du mathématicien. L'opinion qui place l'empirisme, c'est-à-dire l'observation ou l'expérience fortuite, à l'origine de toutes les sciences, se rencontre encore aujourd'hui, sous une forme raffinée certes, et s'exprimant par des moyens on ne peut moins empiriques il est vrai, comme le montrent les travaux de certaines tendances de l'école analytique des dernières décennies. L'empirisme le plus intégral ne peut, cependant, méconnaître le statut du formel : aussi la mathématique, ne pouvant procéder de l'expérience, se voit-elle reléguée dans une sphère de pur formalisme, après quoi se pose évidemment la question de la fécondité d'une science purement formelle !

Une sociologie des mathématiques ne peut avoir pour but de fonder les mathématiques ou d'en donner une explication ultime. Il ne peut être question pour elle d'assumer ce projet philosophique au moment où les mathématiques ne s'embarrassent plus d'aucune vue systématique ni d'aucune philosophie ! Par ailleurs, une fondation sociale de cette science pourrait tout simplement balancer dans la contradiction ou le paradoxe une activité dont le premier but est de s'en garder. En mathématiques, le sociologisme est aussi peu à sa place que le psychologisme ; il n'y a pas de genèse sociale, pas plus qu'il n'y a de genèse psychologique de la mathématique.

L'histoire des mathématiques montre qu'à tel moment donné, tous les résultats ne connaissent pas une égale fortune : certains restent en friche, tandis que d'autres, favorisés par une vive curiosité ou un grand intérêt social, sont aussitôt exploités. Par ses encouragements, la société peut ainsi jouer un rôle moteur, susciter le développement ou favoriser le plein épanouissement d'une science dont la facture interne ne reflète pas immédiatement les besoins et les passions sociales.

Examinons les choses d'un peu plus près. L'archéologie nous apprend qu'il n'y a probablement pas eu, avant l'Age du bronze, de pratique mathématique diversifiée, bien que l'on ait connu dès la fin du Néolithique des rudiments de calendrier et certaines figures géométriques. Remarque dont il faut souligner le caractère approximatif, en rappelant l'absence d'une histoire unique pour toutes les aires culturelles, et le fait que ce qui est découvert ici vers 3500 avant J.-C. n'apparaît ailleurs que vers 500. L'Age du bronze produit donc un calendrier plus précis, des rudiments d'arithmétique, de géométrie, d'astronomie, mais c'est aussi l'âge où apparaissent la propriété privée, la société de classes, et surtout une classe distincte de celle des paysans et des artisans, la classe des scribes. L'époque suivante connaît l'alphabet, mais voit également apparaître la classe des commerçants et des formes politiques plus élaborées ; autrement dit, on assiste au développement du secteur de l'échange et de celui de l'administration ; l'alphabet consacre l'écriture, et l'écriture crée, dit-on, l'histoire.

Considérons le cas de l'Égypte : sa population apparaît dès le Néolithique ; ses outils sont en pierre polie, elle connaît la poterie, la vannerie, le tissage, le travail du cuir, du bois et de l'os ; elle a domestiqué le bœuf, le mouton,

la chèvre, et cultivé le blé et l'orge, d'où une première organisation sociale. Après le Néolithique, les céramiques témoignent d'un sens géométrique, telle cette céramique qui présente sur fond rouge poli un décor géométrique peint en blanc.

Ailleurs, en Abyssinie et en Mésopotamie, on remarque une évolution similaire, mais les spécialistes refusent de parler d'influence. Cette évolution, en tout cas, trahit un perfectionnement des techniques qui a transformé l'artisan en artiste : une première division du travail lui a sans doute permis de développer, en se consacrant exclusivement à son travail, un goût esthétique, un sens du parfait qui prévaut sur le sens de l'utile et approche l'idée d'objet d'art. A l'époque où existe une division technique du travail qui est, en raison de l'importance religieuse du calendrier, une division sociale du travail, apparaissent également des notions fragmentaires d'arithmétique et de géométrie. Entre les mains d'une caste, celle des scribes, l'art de calculer, d'abord lié à la métrologie habituelle (mesure des longueurs, des volumes, des poids, etc.), aux nécessités vitales de l'agriculture (prévision des crues du Nil, restitution des frontières des terrains détruits par l'inondation), enfin aux exigences de la vie administrative, tel l'établissement juste d'une assiette de l'impôt, s'est développé sans s'arracher aux préoccupations utilitaires et empiriques qui semblent l'avoir suscité. Les scribes, déjà au fait des techniques de rédaction, se chargent des techniques de calcul et de mesure, produit d'un travail appliqué mais autonome, déjà spécialisé, qu'il est difficile de remiser dans l'expérience au sens de l'empirisme traditionnel.

Le fait n'a pas échappé à Aristote qui, nonobstant le style archaïque, a su l'apercevoir, mieux que tous ceux qui, pour défendre l'originalité absolue du miracle grec, n'ont pas voulu accorder à l'Égypte ce que le grand philosophe grec lui reconnaissait volontiers : qu'elle a été « le berceau des arts mathématiques, car on y laissait de grands loisirs à la caste sacerdotale ». Les arts mathématiques sont donc nés dans les contrées « où régnait le loisir », c'est-à-dire où certains travailleurs pouvaient se consacrer à une activité qui ne répond pas immédiatement aux nécessités de la vie. La caste des scribes n'était directement soumise qu'à l'administration et à la religion !

Les techniques de calcul et de mesure ont donc un certain *caractère officiel*, que l'on retrouve, plus accusé encore, dans les remarquables réalisations chinoises, caractérisées, pour ce qui concerne les mathématiques, par la prédominance de la pensée algébrique. En Chine, plus qu'ailleurs, le développement d'une bureaucratie au service de l'appareil d'État, pour organiser l'ensemble de la production et diriger la main-d'œuvre dans les travaux agricoles et de construction, une bureaucratie bénéficiant d'un « charisme impérial » à la mesure de son efficacité dans l'organisation sociale, semble avoir joué un rôle décisif dans la formation de la pensée mathématique. La société chinoise ancienne n'est pas fondamentalement esclavagiste, et, à la différence de la société égyptienne, prompte à utiliser massivement la force humaine, utilise plutôt des moyens techniques, telle la voile pour la propulsion des bateaux. Mais l'autorité centrale ne s'exerce qu'avec le concours des savants qui se trouvent aux commandes et cherchent à tirer parti du cours naturel des choses en intervenant aussi peu que possible dans les affaires de la société. Cette conception *non interventionniste* dans le champ de l'activité humaine aurait dû favoriser le *développement des sciences de la nature*. Mais, et c'est là la limite de la science chinoise, la pérennité de la féodalité bureaucratique, qui se conserve sans changement, peut avoir constitué un obstacle à l'association des mathématiques avec l'observation empirique. La science chinoise n'accomplit pas le saut qualitatif qui s'accomplira dans la science occidentale, où l'expérimentation, exigeant l'intervention active du savant, scellera à partir de Galilée une association décisive avec les mathématiques.

On ne peut évidemment pas dégager ici toutes les corrélations possibles, pour chacune des grandes formes de vie collective, entre le développement d'une certaine mathématique et la présence de certains facteurs dans l'organisation sociale. Mais le peu que nous en avons dit montre la faiblesse des facteurs anthropo-physiques, raciaux ou intellectuels devant les *facteurs sociaux*. Malheureusement l'étude sociologique ne peut être menée qu'avec une extrême prudence et un sens très vif des nuances, et ses résultats auront difficilement la forme d'énoncés catégoriques, car rien ne serait plus hasardeux, comme nous l'avons déjà fait remarquer, qu'une mise en parallèle de la progression en mathématiques et des formes sociales qui impliquerait un découpage aussi dogmatique qu'intellectuellement fragile.

Que les sciences mathématiques les plus abstraites se soient épanouies dans la Grèce antique, c'est sans doute parce que le loisir des uns a permis de dégager l'activité mathématicienne des pratiques directement commandées par la vie religieuse, commerciale et technique. Ce qui explique, notamment, l'attribution aux mathématiques de qualités esthétiques indépendantes, d'un genre de beauté particulier, effet des rapports d'ordre, de proportion et d'harmonie qu'y découvre un Pythagore, capable de voter une hécatombe le jour où il aperçoit, sans le secours d'aucun arpenteur, la relation qui lie les trois côtés d'un triangle rectangle. Ce caractère répond à des facteurs d'ordre sociologique, dont une fiction pourra indirectement montrer l'importance : imaginons Monge, par exemple, expliquant ses procédés de géométrie descriptive à quelque architecte des temples d'Agrigente ou de Sybaris, contemporain de Pythagore, qui n'aurait vu dans cette géométrie, si décisive pour le XIX^e siècle européen, qu'un artifice ingénieux, trop particulier à l'homme, à son industrie, aux instruments matériels dont il dispose.

Le tournant du XVII^e siècle

On voit, par contraste, le caractère éminemment social des mathématiques d'aujourd'hui, héritières de celles qu'un certain état de l'Europe à la fin du Moyen Age a rendues possibles : une liaison spécifique entre les mathématiques et l'expérience, plus précisément une mathématisation des hypothèses de l'expérience qui a mis celle-ci sous le contrôle de celles-là, a permis de lier le sort des mathématiques à celui de la physique et de les transformer

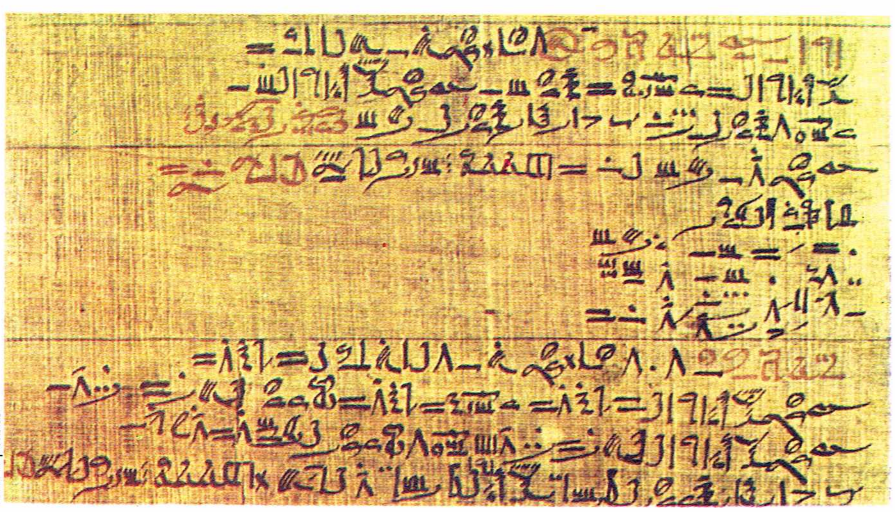

Nat's photo

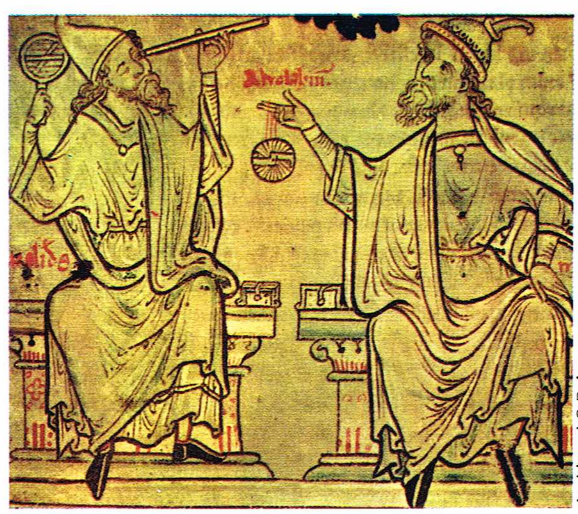

Archives I.G.D.A.

▼ ***A gauche, détail d'un papyrus égyptien indiquant la méthode de calcul du volume d'un réservoir cylindrique à blé, connaissant le diamètre et la hauteur. A droite, dans les*** **Éléments** ***d'Euclide (représenté en une double figuration dans ce manuscrit médiéval), la géométrie prend un aspect d'une beauté toute particulière et d'un enchaînement logique.***

en magasin d'outils anticipatoires exigés par les différents laboratoires techniques. Si l'on veut éprouver la teneur de cette thèse, le concept de « formation du capitalisme moderne » se présentera naturellement à l'examen, et dans l'acception étendue que l'expression a invinciblement acquise depuis le début de ce siècle, à savoir celle d'une rationalité moderne, dont les causes multiples et variables ont été diversement commentées. Ce qui est certain, c'est que les mathématiques pures d'aujourd'hui résultent d'un effort de rigueur et de précision soutenu tout au long du XIX[e] siècle, centré sur l'analyse, qui est née de l'inspiration physique et mécanique présente depuis la coupure galiléenne. Engels avait raison de dire qu' « en introduisant les grandeurs variables et en étendant leur variabilité jusqu'à l'infiniment petit et à l'infiniment grand, les mathématiques aux mœurs si austères ont commis le péché », si l'on entend par là qu'elles se sont ouvertes à une histoire.

Après quoi la validité de leurs démonstrations sera à revoir; un nouveau système sera nécessaire pour donner aux nouvelles notions un statut logique indépendant du sens qu'elles ont en naissant. Mais du point de vue d'une sociologie historique, la période caractéristique des mathématiques est bien ce siècle qui, en étant celui de Galilée et de Descartes, fut celui de la navigation outre-mer, du négoce entreprenant, des sciences physiques, des premières statistiques importantes, celui du début de la mécanisation de l'industrie et des principaux phénomènes spécifiques de la civilisation industrielle.

Le scientisme actuel

Aussi est-ce avec raison que mathématiciens et non-mathématiciens à la fois insistent sur les succès spectaculaires de la méthode expérimentale pour expliquer l'impact des mathématiques sur la vie sociale et quotidienne. Si bien que quiconque veut être de la société moderne, ou moderne tout court, qu'il soit homme d'affaires, politicien, ou linguiste, doit disposer d'un bagage mathématique suffisant pour être à l'aise dans la langue des chiffres. Ce phénomène, né dans une société donnée, est entretenu par la publicité faite aux mathématiques par une idéologie propre : le scientisme, nouvelle religion servie par les prêtres respectés que sont les scientifiques, les technocrates, les experts, unanimes à réagir à « toute attaque contre cette religion, ou l'un de ses dogmes, ou l'un de ses produits, avec toute la violence émotionnelle d'une élite régnante aux privilèges menacés ».

Cette élite, remarque encore A. Grothendieck que nous venons de citer, s'identifie intimement aux pouvoirs en place qui s'appuient fortement, en retour, sur ses compétences technologiques et technocratiques. C'est elle qui porte et propage l'ensemble des mythes qui forment le credo scientiste : que seule la connaissance scientifique est véritable, réelle, objective, universellement valide; que tout ce qui peut être exprimé sous forme quantifiée et produit dans des conditions expérimentales déterminées, est objet de connaissance scientifique; que toute la réalité doit se laisser exprimer par des modèles mécaniques ou formels, analytiques en tout cas; que la connaissance doit être pulvérisée en districts spécialisés où seuls interviennent et jugent ceux qui en sont les spécialistes et les experts; que science et technologie sont capables de résoudre les problèmes de l'homme; enfin, que les experts seuls sont en mesure et méritent d'appartenir aux instances de décision.

Ainsi la mathématique n'est pas seulement descendue dans l'arène sociale, elle remplit directement une fonction sociale. Et d'abord par le biais de la technologie, ce qui se traduit dans le rôle de l'ingénieur et du technocrate dans notre société. Personnages issus probablement des bâtisseurs de cathédrales, qui semblent bien avoir été les premiers à réunir connaissance scientifique et connaissance technique, qui ont, les premiers, permis aux patrons de ne plus conduire personnellement leurs travaux et qui ont scandalisé, dès cette première apparition, Nicolas de Biard écrivant en plein XIII[e] siècle : « Dans les grands édifices, il y a un maître principal qui les ordonne seulement par la parole, mais n'y met que rarement ou jamais la main, et cependant il reçoit des salaires plus considérables que les autres... Les maîtres des maçons ayant en main la baguette et les gants disent aux autres *Par ci me taille,* mais, eux, ils ne travaillent et cependant ils reçoivent une plus grande récompense. » Ou plutôt ils travaillent autrement et constituent les premiers spécialistes auxquels on fait appel, parfois de fort loin.

Cette situation d'imbrication mutuelle entre des exigences nées dans des domaines aussi hétérogènes que celui de la mathématique et celui de la vie sociale est propre à expliquer la nature psycho-sociale des *paradigmes* que Thomas Kuhn présente dans son essai *Structure des révolutions scientifiques :* à tel moment tel secteur scientifique s'impose comme sommet et guide des recherches poursuivies sous l'effet des contraintes qu'impose la société. Ce qui n'est possible que parce que le scientifique, fût-il pur mathématicien, est d'emblée, à sa naissance, mêlé, voué au service social, ainsi que l'exprime le souhait des classiques, de Descartes entre autres, lorsqu'il déclare : « Pour ce qui est des expériences qui peuvent y servir, un homme seul ne saurait y suffire à les faire toutes; mais il ne saurait aussi employer utilement d'autres mains que les siennes, sinon celles des artisans, ou telles gens qu'il pourrait payer, et à qui l'espérance du gain, qui est un moyen très efficace, ferait faire exactement toutes les choses qu'il leur prescrirait » (*Discours de la méthode,* VI[e] Partie).

L'impact de l'État

Or, le lien de la mathématique à la société est aujourd'hui plus profond que jamais, le savant dépendant lui-même d'une instance de décision qui lui commande de travailler dans le sens d'une mathématique significative, c'est-à-dire utile à la société industrielle. C'est dans ce sens assurément que se fait l'évolution, comme le montrent les informations les plus récentes :

Nous apprenons qu'à l'occasion du 20[e] anniversaire de l'Académie, L. Brejnev a déclaré aux savants russes : « Nous n'avons pas l'intention de vous dicter les détails des thèmes scientifiques, les voies et les méthodes de la recherche. C'est l'affaire des savants eux-mêmes. Mais quant aux orientations essentielles du développement de la science, quant aux tâches principales rendues nécessaires par les réalités, nous les déterminerons ensemble. » Autrement dit, les experts doivent réaliser des programmes dont ils ne décident qu'à titre, au plus, de conseillers.

La situation n'est guère différente ailleurs. En France, le gouvernement a décidé une série de réformes de structure visant la coordination technico-scientifique; désormais « les laboratoires élaboreront des programmes, mais c'est le gouvernement qui disposera, en s'aidant de comités consultatifs et de la Délégation générale à la recherche scientifique et technique ».

L'inféodation à l'État-Patron et aux sociétés industrielles « intègre » la vie scientifique à la vie économique. Elle consacre une dépendance étroite des sciences, et en premier lieu des mathématiques, envers la société. C'est ainsi que les mathématiques dites « modernes » ne sont pas dénuées d'attaches idéologiques spécifiques; René Thom a souligné, par exemple, que l'esprit bourbakiste, essentiellement algébriste, tend à faire passer dans l'enseignement les structures algébriques qui s'étaient révélées utiles dans les mathématiques récentes, en vue d'une formation mathématique accessible à des hommes ordinaires, qu'on informe minutieusement, et qu'on mène, au moyen d'un enseignement approprié, à faire en sorte que leurs connaissances se combinent avec celles de spécialistes d'autres branches, également ordinaires, pour produire l'immense littérature fabriquée dans les départements de mathématiques, équivalents sobres des laboratoires de physique.

Les mathématiques n'ont donc pas servi seulement à rationaliser l'étude des secteurs sociaux. Par le biais de la technologie et des exigences de la société industrielle avancée, elles se trouvent au principe même de la société. Au point que celle-ci, pour en produire, se dispense des génies, et se suffit des hommes ordinaires, convenablement formés ! Qu'est-ce à dire sinon que la mathématique n'est pas le produit d'idiosyncrasies individuelles — et l'a-t-elle jamais été ? Programmes, groupes de recherches, autant d'expressions qui nous rappellent que la mathématique est tombée dans la perspective sociale. Les programmes impliquent des paradigmes qui définissent les problèmes à résoudre, et ces paradigmes définissent comme une tradition horizontale, où l'on n'imite point ses pères, mais les directeurs de programmes et de recherches, dépositaires des ultimes suggestions réalisables parmi toutes les suggestions scientifiquement possibles.

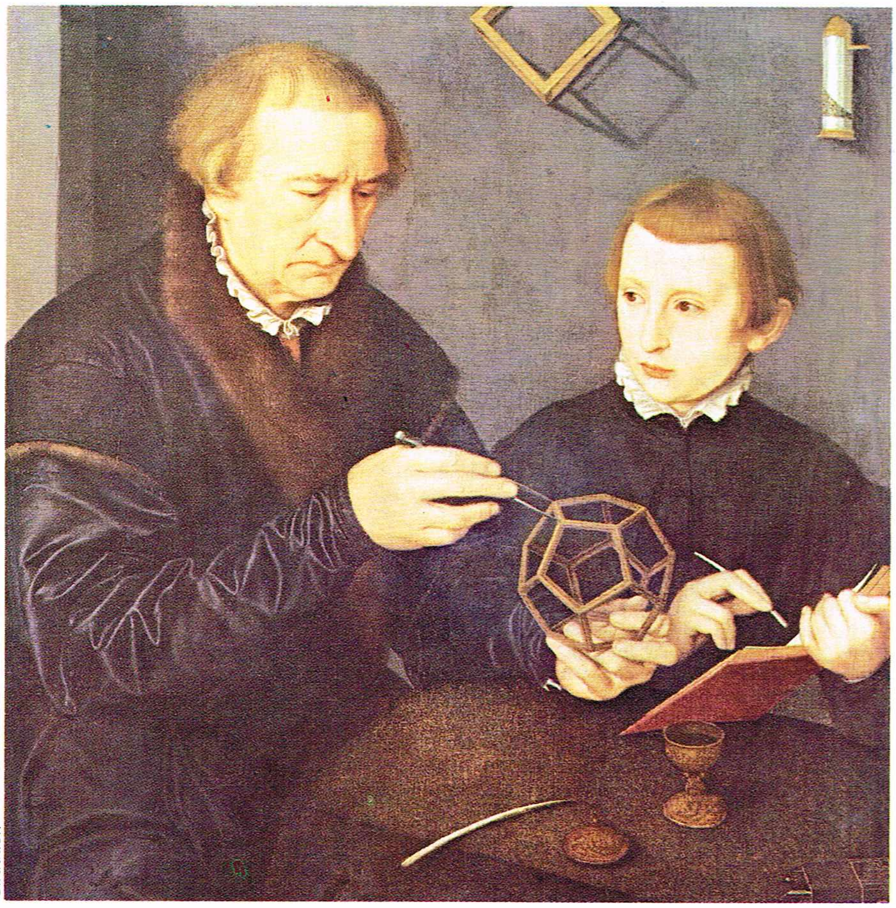

Giraudon

▲ *Le mathématicien Johann Neudörffer et son fils (portrait dû au peintre flamand Nicolaas Neufchâtel).*

MATHÉMATIQUES ET PÉDAGOGIE

L'éducation mathématique se place aujourd'hui au premier rang des fins que se propose l'enseignement. Seul l'enseignement de certaines langues vivantes pourrait concourir avec celui des mathématiques, mais comme ce dernier est plus délicat à concevoir, plus difficile à dispenser, il tient, semble-t-il, la première place dans les préoccupations de la pédagogie moderne. On pourrait même dire qu'en France, la pensée pédagogique a connu un certain renouvellement grâce aux problèmes posés par l'enseignement des mathématiques, tandis que, dans d'autres pays, la pédagogie possède un statut institutionnel régulier et permanent, comme c'est par exemple le cas dans les universités allemandes.

La relance de cette réflexion est profondément enracinée dans les exigences de la société actuelle; nous avons souligné dans le chapitre *Mathématiques et société* que la connaissance de notions élémentaires de mathématiques est exigée de tous, ou si l'on veut, de tous les cadres de la société. L'élite, de plus en plus, est appelée à apprécier le point de vue numérique et à être préparée de manière à savoir prendre des décisions techniquement, c'est-à-dire quantitativement, fondées. En particulier, on exige des chercheurs et des ingénieurs des connaissances mathématiques plus solides, en raison des nouvelles applications de la mathématique à divers secteurs de l'activité économique.

Mais quels sont les faits qui sont impliqués dans cette réflexion pédagogique?

— Il faut remarquer, tout d'abord, que nous vivons encore dans la postérité d'une découverte qui constitue l'événement de la pédagogie moderne : la découverte de l'enfant. La découverte d'un être qui n'impose pas seulement une réflexion sur le contenu des programmes mathématiques, mais aussi une élaboration des techniques de transmission du savoir; l'enseignement des mathématiques pose, au niveau élémentaire, des problèmes psychologiques qu'il faudrait formuler correctement et, si possible, résoudre.

— Sur ces problèmes généraux, se greffe un problème interne aux mathématiques qui ont leur querelle des anciens et des modernes. Il ne s'agit pas seulement d'enseigner les mathématiques dans le dessein de faciliter l'insertion sociale, mais aussi de savoir quelle mathématique enseigner, dans quel style, avec quelle conception de la rigueur. Et faut-il préparer dès le début l'enfant à la matière qu'il devra connaître s'il se spécialise plus tard en mathématiques, ou faut-il seulement l'exercer à penser mathématiquement, à assimiler moins les notions qu'un art de penser?

— Enfin, l'évolution de l'École, qui s'impose aujourd'hui à un plus grand nombre d'enfants qu'auparavant, a engendré l'exigence que tous soient également pris en charge par l'enseignement et que personne ne soit — en principe — « laissé pour compte ».

Il va de soi que ces problèmes ont entre eux certains rapports : la formation des professeurs dépend étroitement de la question de savoir quelles mathématiques enseigner; le problème de savoir comment introduire les mathématiques a une relation directe avec celui que posent les sujets auxquels s'adresse l'enseignement; et surtout, on ne trouvera de réponse claire à aucune question si on ne résout celle des buts à atteindre par cet enseignement.

La naissance du concept d'enfant

Le problème purement pédagogique que posent les mathématiques se situe au niveau de leur enseignement aux plus jeunes enfants. La première difficulté est de savoir comment articuler, sans une trop grande distorsion, un entendement mathématique (c'est-à-dire l'aptitude à exercer une activité intellectuelle qui prépare à une pratique ultérieure des mathématiques) sur les possibilités qui sont propres à l'enfant.

Poser cette question suppose qu'on s'est heurté à des échecs fréquents, et à travers eux, à la réalité spécifique de l'enfant, que la pédagogie mathématique, longtemps réduite à une simple didactique, c'est-à-dire à une technique détachée de toute contexte psychologique, historique et social, ne peut plus ignorer aujourd'hui.

Traditionnellement, on oscillait entre deux voies : le psittacisme qui fait appel à la mémoire répétitive de l'enfant pour fixer les règles de calcul, dont l'origine remonte au Moyen Age et à sa prédilection pour la versification mnémotechnique, et dont l'apprentissage des tables de multiplication a retenu la leçon d'efficacité; et la maïeutique, immortalisée par le dialogue entre Socrate et Ménon. Celle-ci est à l'origine d'une conception, non disparue aujourd'hui, d'une mathématique éternelle et indépendante. La maïeutique tient tout entière dans le mot fameux : « C'est toi qui le diras »; mais on remarquera qu'il s'agit, en fait, d'une méthode fondée sur le déploiement d'un doute, c'est-à-dire sur le rejet systématique des « préjugés » liés à la langue naturelle : Ménon, qui a pourtant mille fois parlé de la vertu, se trouve, après un premier entretien avec Socrate, totalement désorienté et ne sait plus que penser. C'est le moment que choisit

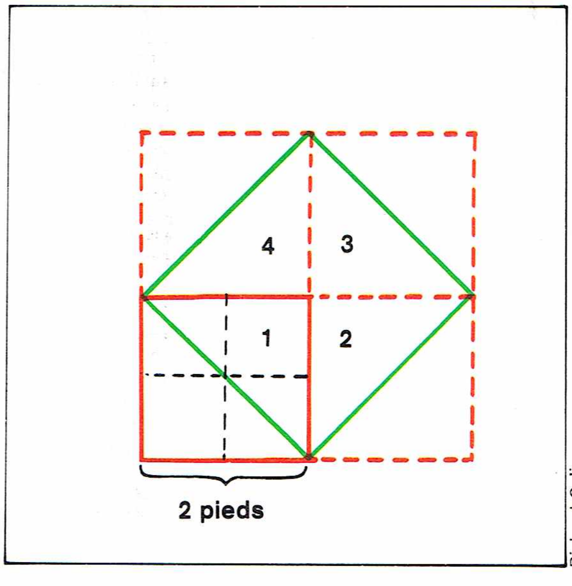

Richard Colin

▶ *Le problème du carré soumis à l'esclave de Ménon par Socrate.*

Socrate pour affirmer qu'apprendre, c'est se ressouvenir, et le montrer pour ainsi dire expérimentalement, en faisant appel à un des esclaves de la nombreuse suite de Ménon. Celui-ci, de qui on n'exige qu'une chose, entendre le grec, se montre capable de trouver comment obtenir un carré dont la surface est double de celle d'un carré donné de deux pieds. Socrate n'apporte pas du dehors la science à son nouveau disciple, mais l'aide à se représenter visuellement la figure à construire qui sera sans doute un carré de côté plus grand que celui du carré donné mais plus petit que celui du carré de quatre pieds de côté, auquel a d'abord songé l'esclave. Peut-être, pense alors l'esclave, la solution consiste-t-elle à prendre un côté de trois pieds, mais il est vite détrompé. Devant la difficulté, force est de revenir à la première hypothèse et de regarder comment se présente le carré de quatre pieds de côté; sa surface vaut quatre fois celle du carré donné au départ : le dessin montre les quatre carrés égaux au premier carré; mais si on divise chacun de ces quatre carrés en deux triangles égaux, en traçant les diagonales convenables, on voit que les diagonales forment à leur tour un carré qui répond à la question. L'esprit de l'esclave a cheminé progressivement vers cette vérité sans que Socrate ait auparavant exigé de lui autre chose qu'une communauté de langue permettant le dialogue.

Si nous avons rappelé cette méthode, c'est qu'elle contient tous les problèmes posés par l'enseignement des mathématiques. Que l'usage du dessin, de la figure, ou, si l'on veut, de l'intuition, n'explicite pas ses règles est un problème de didactique que nous examinerons plus loin; mais la façon dont intervient la notion de diagonale pose le problème de l'introduction d'une notion accessoire : la façon dont on le résout implique une définition de la science, laquelle apparaît effectivement plus loin dans le *Ménon*, dans le sort qui est fait à l'idée d'*hypothèse :* quand on demande au géomètre à propos d'une surface, par exemple, si tel triangle peut s'inscrire dans tel cercle, il répondra : « Je ne sais pas encore si cette surface s'y prête; mais je crois à propos, pour le déterminer, de raisonner par hypothèse de la manière suivante : si cette surface est telle que le parallélogramme de même surface appliqué à une droite donnée est défaillant de telle surface, le résultat sera ceci; sinon il sera cela. »

La mise en forme de la conception sous-jacente à cette pédagogie a donné les *Éléments d'Euclide,* chef-d'œuvre de logique sans pédagogie, fondé sur l'idée que pour les mathématiques il n'y a point de voie royale, ni de voie enfantine.

Rousseau fut sans doute le premier à en dénoncer explicitement et systématiquement le caractère abstrait. Non seulement il déclare, dans les *Confessions,* ne point goûter personnellement la méthode d'Euclide qui cherche plutôt la chaîne des démonstrations que la liaison des idées, non plus que celle de l'algèbre « abstraite », mais encore, dans l'*Émile,* il dénonce la tentation de suggérer ou de dicter des démonstrations sous le couvert d'un apprentissage de la découverte. Nul n'a trouvé avant lui de formule aussi nette pour souligner la nécessité d'élaborer une pédagogie réelle : « Nous ne sentons pas, écrit-il, que leur méthode [celle des enfants] n'est pas la nôtre, et que ce qui devient pour nous l'art de raisonner ne doit être pour eux que l'art de voir. Au lieu de leur donner notre méthode, nous ferions mieux de prendre la leur. » Il ne s'agit de rien moins que de l'effacement de l'éducateur devant l'enfant et de la mise en question du fait que l'éducation est généralement moins une formation du jugement que la stratégie de reproduction d'une mentalité adulte donnée.

Un véritable *concept de l'enfant* est créé; l'éducation y sera subordonnée dans la mesure où l'enfant n'a pas à apprendre quelque chose mais à apprendre à apprendre. D'où la critique acerbe de « la manie enseignante et pédantesque », confinée dans la transmission des sciences qui sont le moins utiles à l'enfant, alors que par une véritable providence les facultés ne se développent qu'avec les occasions d'être exercées, en sorte qu'elles ne sont jamais « ni superflues ni à charge dans le temps, ni tardives et inutiles au besoin ». Les facultés humaines sont donc, selon Rousseau, d'abord des facultés virtuelles, et le développement de la raison est à son tour lié à celui de la sociabilité. D'où la nécessité de respecter « l'enfance » qui n'est encore capable ni de jugement, ni de raison, ni de mémoire; et donc point d'initiation directe aux mathématiques. « En m'objectant qu'ils apprennent quelques éléments de géométrie, on croit bien prouver contre moi; et tout au contraire, c'est pour moi qu'on prouve : on montre que, loin de savoir raisonner d'eux-mêmes, ils ne savent pas même retenir les raisonnements d'autrui; car suivez ces petits géomètres dans leur méthode, vous voyez aussitôt qu'ils n'ont retenu que l'exacte impression de la figure et des termes de la démonstration. A la moindre objection nouvelle, ils n'y sont plus. Renversez la figure, ils n'y sont plus! Tout leur savoir est dans la sensation, rien n'a passé jusqu'à l'entendement » *(Émile, livre II)*.

Par là, Rousseau est certainement le premier pédagogue : il crée une préoccupation visant l'enfant en tant que tel, non sans rester lui-même prisonnier de l'idéologie de son siècle, celle de Condillac surtout, qui le conduit à comparer l'enfant à une « table rase », apte à recevoir des connaissances « contingentées », illustrées et adaptées aux besoins de chaque étape d'un développement dont toute l'histoire baignait encore dans le mystère. Mais, désormais, la nécessité est posée qu'éduquer l'enfant implique d'abord de le connaître. A vrai dire, ce principe ne fut mis en œuvre que dans les dernières décennies du XIXe siècle, où les nouvelles exigences politiques et démographiques ont conduit à ce qu'É. Claparède (1873-1940) considérait comme une révolution copernicienne : le fait de centrer l'école sur l'élève au lieu de mettre l'élève au service de l'école. En réalité, il s'agit de la première « institutionnalisation des droits de l'enfant » également proclamés par la Révolution (lois des 16 et 24 août 1790 et décrets de 1792 et 1793).

L'intérêt pour l'enfance dépasse alors de loin le plan conceptuel et idéologique auquel étaient restés Rousseau et les déclarations révolutionnaires; il se concrétise dans l'étude « scientifique » de l'enfant. W. T. Preyer ouvre la voie par une étude consacrée à l'esprit de l'enfant (1881), bientôt suivie (1891) aux États-Unis par l'initiative décisive de G. S. Hall qui fonde un périodique spécialisé, puis le « National Association for the Study of Children ». Des institutions analogues se créent un peu partout en Europe, et en Russie. En France, F. Buisson et A. Binet animent la « Société libre pour l'étude psychologique de l'enfant »; à Genève, l'« Institut Jean-Jacques Rousseau » reprend, dès 1912, le travail commencé dans le séminaire de Claparède créé en 1906.

Mais le renouvellement de la conception de l'enfance ne sera total qu'avec les révélations de la psychanalyse, qui voit en l'éducation la répression organisée des instincts, répression rarement réussie, et toujours « au profit d'un petit nombre d'hommes privilégiés dont il n'a pas été requis qu'ils réprimassent leurs instincts ». L'éducateur ne peut plus ignorer les difficultés d'une voie à chercher entre « le Scylla du laisser-faire et le Charybde de l'interdiction ».

Ainsi, on ne peut éduquer un enfant en dépit de son « affectivité »; d'autre part, toute « nourriture intellectuelle » n'est pas bonne indifféremment à tous les âges; il faut tenir compte des intérêts et des besoins de chaque période.

L'enseignement doit donc s'adapter; et l'enseignement des mathématiques ne peut faire exception. Mais l'adaptation est d'autant plus juste que l'on a su détecter les aptitudes ou les incapacités. C'est A. Binet qui consacre l'approche métrologique de l'écolier par l'évaluation de son intelligence et l'élaboration d'échelles, de calcul et de lecture notamment. Cela conduit à *l'échelle métrique de l'intelligence,* de l'inintelligence diront d'autres! qui a été reprise par R. Zazzo en 1949 et en 1966, et qui s'est imposée par l'intermédiaire des notions aujourd'hui consacrées d'*âge mental* et de *quotient intellectuel*.

Pour ce qui concerne les mathématiques, ce qui est au centre de la réflexion pédagogique, c'est le problème que constitue l'incompréhension des enfants; les mathématiques seraient pour certains élèves des activités « chargées d'angoisse » (voir Stella Baruk, *Échec et Maths,* Seuil, 1973), ce qui se comprend aisément quand on voit « dans quelles aventures les entraînent l'échec scolaire d'une manière générale, et l'échec en maths en particulier. De bilan en test et de test en dossier, de dossier scolaire en dossier psycho-scolaire, de dossier psycho-scolaire en consultation de psychologue, et de consultation en rééducation, le chemin est jalonné d'épreuves, de contre-épreuves, de diagnostics et de contre-diagnostics convergents ou contradictoires, qui ont cependant en commun

le superbe non-sens : expliquer l'échec par sa justification ». C'est dire la déconvenue de tous les recours de la pédagogie à la psychologie, qui vont généralement dans le sens de cette justification, et qui marquent, sur le plan historique, certains moments forts : les crises manifestées par l'échec de l'institution scolaire dans ses projets de transformation du système éducatif. D'abord, la faillite de « l'illusion pédagogique » de la démocratie scolaire a conduit à la création de l'arsenal conceptuel qui préside à l'usage idéologique de la notion de « débilité » ; la découverte, après l'augmentation du nombre des élèves exigée par l'avancement de la société industrielle, du rapport entre réussite scolaire et origine sociale a motivé les études sur la sociologie de l'éducation, d'abord aux États-Unis (Skelles et Fillmore dès avant la Seconde Guerre mondiale), puis en France (R. Zazzo et Dabout ont fait en 1954 une publication sur la progression scolaire et l'inégalité des enfants devant l'école). Ensuite, l'idée que toute pédagogie dépend, en dernier ressort, d'un choix idéologique et politique, qu'elle vise chaque fois, et non seulement dans des cas limites, à réduire le *désir* de l'enfant au *besoin*, en lui substituant des automatismes qu'elle considère comme autant de garde-fous, autrement dit, la rencontre dans leurs ultimes exigences des critiques d'origine marxiste et psychanalytique, a conduit souvent à un syncrétisme décevant, mais parfois aussi à une meilleure analyse des raisons de l'échec des conseillers d'orientation scolaire et professionnelle, institués après la dernière guerre, et de tout le système d'éducation qui produit l'échec scolaire. Au total, l'école apparaît comme un appareil idéologique au service de l'État, qui ne fait que reproduire les rapports sociaux existants. Comme on l'a dit, c'est dans les fonctions sociales qu'on trouvera les raisons de la structure de l'école.

L'échec mathématique ne peut échapper à la force d'analyses de ce type ; elles nous disent que l'échec de l'enfant est un mythe, surtout lorsqu'il s'agit de mathématiques, où l'on s'ingénie à faire croire que l'enfant peut en faire la découverte personnellement et par lui-même, quand le moindre concept a coûté des années de travail à un ou plusieurs auteurs ! Comment servir à un enfant le concentré de recherches millénaires ? Cette question, en tant qu'elle manifeste le souci de l'enfant, pose des problèmes de didactique mathématique que nous allons examiner maintenant.

▼ Cette mosaïque pompéienne du IIᵉ siècle avant J.-C. représente Platon enseignant la géométrie, témoignage éloquent de l'importance attribuée à cette science par le monde grec.

Giraudon

La didactique mathématique

La maïeutique platonicienne

On a enseigné les mathématiques bien avant l'institution de l'école (au sens moderne), et réfléchi sur les difficultés de cet enseignement bien avant que n'apparaisse le souci de savoir s'il était ou non structurellement conforme à la mentalité de « nos enfants ». Aussi n'est-il peut-être pas étonnant qu'une approche pédagogique et didactique retrouve un problème qui, chez Platon, est rapporté aux fondements des mathématiques : au lieu d'escamoter le rapport entre un fait de langage tel que « 2 et 2 font 4 » et un fait mathématique tel que « $2 + 2 = 4$ », Platon s'acharne, pour ainsi dire, à élaborer cette difficulté. Socrate dit dans le *Phédon* être fort loin d'avoir compris l'addition et de pouvoir dire, lorsqu'à une unité on ajoute une unité, « si c'est l'unité à laquelle cette dernière a été ajoutée qui est devenue 2, ou si c'est l'unité ajoutée et celle qui a reçu cette adjonction qui, du fait même de cette adjonction de l'une à l'autre, sont devenues 2 ! » C'est, en effet, pour Socrate, un sujet d'étonnement « que, lorsqu'elles étaient, chacune, à part l'une de l'autre, chacune des deux visiblement unité et qu'alors il n'y eût pas de 2 ; et que, une fois qu'elles se sont rapprochées, il n'a fallu, paraît-il, pour faire qu'elles devinssent deux, d'autre cause que leur réunion par voie de mutuelle juxtaposition ». Voilà un étonnement qui ne serait plus de mise aujourd'hui dans un enseignement élaboré, mais tout à fait à sa place dans une véritable initiation, qui néglige forcément le détour de la méthode axiomatique abstraite.

C'est pourquoi la didactique des mathématiques est également, de manière à la fois spontanée et nécessaire, une réflexion sur la rigueur indispensable dans cet enseignement. — Du reste, répondant aux besoins de la société, l'enseignement des mathématiques s'est, à partir de la Révolution (et avec la création des « Écoles centrales », notamment), généralisé jusqu'à constituer aujourd'hui le centre de gravité de tout enseignement. Si, depuis le Moyen Age, on a successivement accordé de l'importance à la grammaire dans la mesure où elle semblait constituer le vestibule de la logique, puis à la langue en général et aux humanités parce qu'elles formaient le bon sens, il devient progressivement de plus en plus évident que la prépondérance doit être accordée aux mathématiques pour les mêmes raisons, les mathématiques n'étant dans leur partie abstraite, comme l'avait très bien exprimé A. Comte (*Cours de philosophie positive,* Hermann, 1975, p. 64), qu'une « immense extension admirable de la Logique naturelle à un certain ordre de déductions ».

L'importance du manuel au siècle des lumières

A vrai dire, le désir d'exposer rigoureusement les mathématiques fut d'abord, partiellement, un besoin didactique. C'est l'enthousiasme pédagogique du siècle des lumières qui engendre ces traités de mathématiques élémentaires, suscités par la création de nouvelles universités et de nouvelles chaires de mathématiques. Ce sont les auteurs de ces manuels, tant ridiculisés par un grand génie comme Gauss sous le nom de « Compendien-Schreiber », qui expriment d'abord cette volonté de rigueur. Parmi ces faiseurs de manuels, le plus fameux, A. G. Kästner, illustre admirablement la fonction de l'enseignement et de son organe essentiel, le *manuel,* très commode pour propager un savoir qui serait autrement resté l'exclusivité des spécialistes ! L'exemple de Kästner nous explique le mystère de la longue alliance de la littérature et des mathématiques, de la géométrie et du talent d'écrivain ; ainsi qu'ironisait Gauss, Kästner était « mathématicien parmi les poètes et poète parmi les mathématiciens ». Et c'est sans doute là l'origine de ces « exposés décoratifs » (Godement) qui permettaient, il n'y a pas si longtemps, à certains d'être candidats à l'Académie des sciences et à l'Académie française ! Mais c'est aussi et surtout l'origine de la nécessité, alors très relative, d'écrire pour les débutants des exposés aussi explicites que possible, où l'on essaie de tout démontrer et de tout définir. Par ses manuels, Kästner a permis à tous ceux qui ne pouvaient écouter un maître d'apprendre cependant les mathématiques. Le savoir mathématique s'est mis à circuler à une échelle

Giraudon

Roger Viollet

▲ *A gauche,*
A. de Villeneuve
enseignant la géométrie à ses élèves arpenteurs.
A droite, un étudiant travaillant à son tableau dans sa chambre en 1891.

plus populaire, conformément à la demande du rationalisme des lumières, expansif, prosélyte et intellectuellement réformateur. La création de nouvelles universités aux XVII[e] et XVIII[e] siècles s'accompagne ainsi d'une diffusion nouvelle des instruments du savoir. L'esprit géométrique alors à la mode descend des cimes vers le public cultivé, grâce au cours de Joseph Sauveur (1653-1716) où, à Paris, les gens se pressent, et grâce aux universitaires, tel Kästner, à Göttingen, qu'écoutent aussi ceux qui voient dans la science le seul moyen d'ascension sociale à leur portée.

Dans une lettre à Maupertuis, Kästner reconnaît lucidement que, s'il est incapable « d'éclairer le monde comme les grands génies... il sait au moins profiter de leurs lumières et les communiquer à d'autres qui, sans cela, n'en auraient peut-être tiré aucun autre avantage ». Bref, on n'en est plus à commenter Euclide ; on réfléchit sur la façon d'exposer avec rigueur les mathématiques.

Bernard Bolzano (1781-1848) développe une *théorie de l'exposition,* réflexion critique et méthodique inspirée par l'apparition et la popularisation des manuels depuis Kästner. B. Bolzano a justement appris les mathématiques dans les livres de Kästner, qui n'a pas inventé grand-chose, mais s'est évertué à prouver des évidences et à justifier toutes ses démarches, « à démontrer ce que d'autres passent allègrement sous silence, c'est-à-dire... à éclairer le lecteur sur la raison qui sous-tend un de ses jugements », note Bolzano, qui avoue par ailleurs en avoir été assez impressionné pour se mettre aux mathématiques (B. Bolzano, *Lebensbeschreibung,* Sulzbach, 1836, p. 19). Mais dans son propre effort de rendre les mathématiques accessibles et absolument claires à tout débutant, Bolzano découvre qu'il faut faire la *théorie de leur langage* et *expliciter la logique* qu'elles véhiculent dans leurs raisonnements. C'est ainsi qu'il est amené à réfléchir sur la notion de « proposition », de « démonstration », sur la nécessité de soumettre l'usage des symboles à des règles à la fois précises et explicites, à vouloir que l'effort d'explicitation aille jusqu'à réaliser la maxime leibnizienne « qu'il est bon de chercher les démonstrations des axiomes eux-mêmes », contrairement à l' « intuitionnisme » naïf ambiant dont un Ladomus s'était fait le défenseur dans ses *Contributions à la méthodique de la mathématique pure,* reléguant dans une discipline *extérieure* aux mathématiques l'exigence de *fonder clairement* ce qu'on avance. En considérant, au contraire, que cette exigence doit être *interne* aux mathématiques, Bolzano est conduit à refuser la philosophie mathématique de son époque, celle de Kant, et à critiquer la notion de jugement mathématique, dont il souligne le caractère analytique, c'est-à-dire le fait qu'il n'est subordonné à aucune autre discipline sinon justement la logique mathématique.

Le lien au XIX[e] siècle entre le souci de l'exposition et les exigences de rigueur logique

La réflexion sur la méthodique mathématique est donc liée à l'exigence de didactique persuasive et de rigueur dans l'exposition (en France, c'est Develey qui s'était fait l'écho, dans ses *Essais de méthodologie* [Paris, 1831], de ces préoccupations) ; elle sera bientôt suivie d'une réflexion sur les fondements logiques des notions élémentaires des mathématiques, et le point remarquable pour notre propos, c'est que cette réflexion ne cesse d'être liée à un souci pédagogique.

En effet, lorsque Richard Dedekind réfléchit aux fondements de la théorie des nombres, ce n'est pas seulement parce que celle-ci s'était révélée comme la partie essentielle des mathématiques, mais aussi en vue de rendre possible un enseignement rigoureux. Cela impliquait de renverser la priorité cartésienne de l'évidence sur la certitude et de satisfaire la nécessité de « convaincre » avant celle d' « éclairer » : d'abolir, donc, le recours à l'intuition géométrique dans la démonstration de théorèmes d'analyse. Tout cela, Dedekind en a fait l'expérience dans son enseignement, quand il était professeur à Zürich : il lui fallait, alors, expliciter les bases d'un savoir qui, pour être compris de tous, ne devait appartenir à personne, devait donc être dépouillé de tout arbitraire ; en abordant sans préjugés les problèmes qui se posent à la base, Dedekind élargit l'élucidation acquise aux sommets.

Mais l'arithmétique, science élémentaire, était aussi du ressort de l'enseignement secondaire. Les manuels de ce niveau attirent l'attention de G. Frege, l'initiateur de la logique mathématique moderne, qui, avant sa fameuse *Idéographie* (1879), ne dédaigne pas la tâche de les examiner. Il critique sévèrement le manuel de H. Seeger, *Die Elemente der Arithmetik,* où l'écolier n'est supposé mettre en œuvre que sa mémoire pour retenir les lois de l'arithmétique. Frege avait, du reste, été appelé à remplacer Karl Snell, dont il a retenu, comme il l'écrira plus tard, « le principe... qu'en mathématiques tout devrait être aussi clair que $2 + 2 = 4$ », *à condition que* « $2 + 2 = 4$ » *soit clair!* Méditant cet avertissement, Frege s'aperçoit que la « rigueur logique » n'est pas naturelle, qu'elle est le couronnement d'un travail mathématique qui se révèle peu susceptible, en tant que tel, d'être assimilé par des têtes mathématiquement vierges.

Bien sûr, les problèmes posés par l'enseignement des mathématiques n'ont pas, seuls, déterminé l'évolution de la réflexion sur les fondements des mathématiques. Mais ils sont ancrés dans le devenir des mathématiques du XIX[e] siècle, souvent de manière indirecte, dans les réformes consécutives à de nouvelles perspectives socio-économiques, et parfois de manière directe, puisque l'exposition doit être de nature à éviter tout obstacle à la

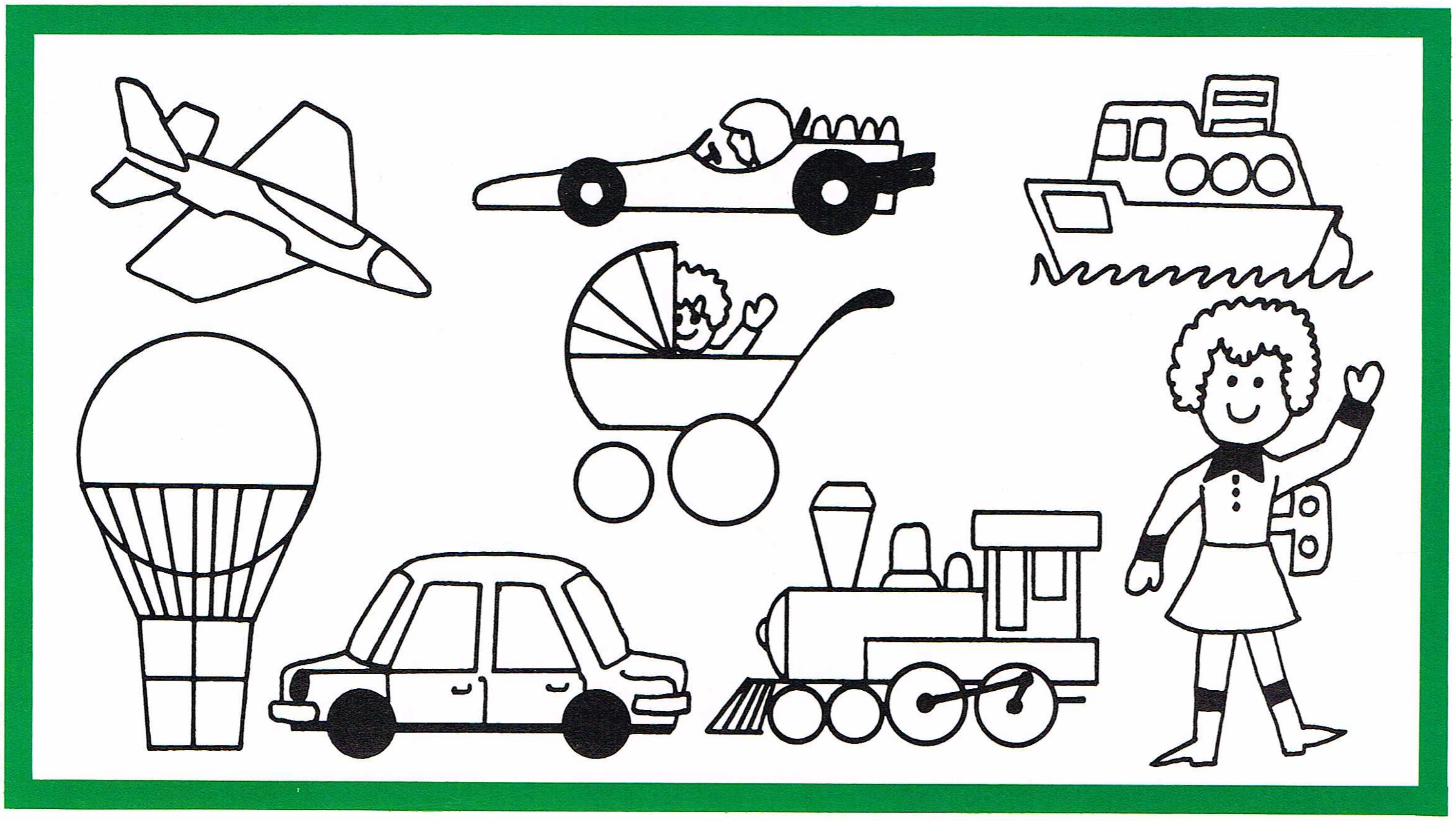

Richard Colin

▲ ***Colorier parmi ces jouets ceux qui roulent : exemple simple d'un exercice mal posé (repris du livre de Stella Baruk,*** **Échec et Maths*).***

compréhension d'une discipline en principe intelligible sans recours extérieur ni antérieur. Ce n'est donc pas un hasard si l'on distingue aujourd'hui entre l'analyste ou l'algébriste, qui peut tout ignorer de la logique mathématique, et l'enseignant qui a besoin au contraire d'une formation logique assez poussée (voir Daniel Lacombe, *Didactique des disciplines,* bulletin n° 2, janvier 1974, p. 4).

Pour l'enseignant soucieux de logique, la première nécessité est de prendre au sérieux le caractère logique des mathématiques ; on ne saurait trop recommander aujourd'hui, où on initie de petits enfants à la théorie des ensembles, de se méfier des intuitions, des illustrations hasardeuses, des idées courantes sur de prétendus rapports entre les opérations concrètes effectuées par les petits de l'homme et les raisonnements mathématiques, qui en exprimeraient d'une certaine façon l'intériorisation. Outre les difficultés propres à cette métaphore de l'assimilation, de la digestion et de l'ingestion, on ne voit pas comment interpréter en termes de *manipulation* des propositions de logique, ni comment un travail, souvent considérable, d'élaboration logique peut se réduire à l'explicitation d'actes intériorisés ! On ne saurait trop recommander aussi d'éviter le recours aux « devinettes ». Bolzano déjà faisait une remarque qu'on aurait mille occasions de répéter aujourd'hui ; il observait que si on ne lui indique pas d'avance l'énoncé qu'on veut lui faire démontrer, l'apprenti mathématicien ne voit pas le but pour lequel telle construction ou tel chemin démonstratif s'impose. Par exemple, dans la démonstration traditionnelle du théorème de Pythagore, qui peut donner au débutant des raisons acceptables pour justifier le tracé de telles lignes, celles-ci plutôt que d'autres, si on ne lui a pas préalablement indiqué qu'il est utile de considérer le rapport entre les aires des carrés formés sur les côtés du triangle ? Sans doute, au lieu de désigner brutalement la voie à suivre, on pourra traiter des problèmes analogues et plus simples qui serviront de repères à l'élève.

Voici l'exemple simple d'un exercice mal posé, où l'on demandait aux enfants de colorier, parmi les jouets, *ceux qui roulent,* et qui déchaîna un drame à cause de l'avion dont on ne voit, sur le dessin, que les ailes et le fuselage, ce qui n'empêcha pas certains enfants de penser qu'il avait besoin de roues pour décoller !

La question est, en fait, posée de manière à renforcer les interférences, que les enfants n'ont de toute façon que trop tendance à laisser s'installer, entre les objets dessinés et ceux qu'ils utilisent réellement dans leurs jeux, ce qui ne leur facilite pas la tâche de saisir le caractère abstrait du *schéma* et la nécessité de l'observer pour lui-même. La représentation des jouets n'a de sens que par rapport à l'intention dans laquelle elle a été faite : qu'on colorie seulement les dessins d'objets où figurent des roues ; « si c'est ça qu'il [le maître] veut, il n'a qu'à le dire », remarquent les enfants auxquels on explique après coup cette intention !

Le dire ? Ce n'est pas toujours facile, comme le savait bien Socrate, qui, après avoir vainement tenté de mettre l'esclave de Ménon sur la voie de la solution de la duplication du carré, lui dit enfin : « Essaie de nous répondre avec exactitude. Et si tu ne peux pas nous dire le nombre, *montre-le nous* » ; où un lecteur averti comprend que le côté du carré cherché ne peut être exprimé par un nombre ; il est « inexprimable », irrationnel, indication qui devrait suffire à faire penser à la diagonale du carré donné au départ. Il faut pour ainsi dire s'être déjà heurté à l'incompréhension des élèves pour chercher une formulation plus précise pour l'énoncé du problème posé – voir les remarques de Pierre Samuel sur « l'apparente objectivité de la sélection » par les examens dans *Pourquoi la mathématique ?* 10/18, pp. 158-170.

Mais si certains éléments implicites ne demandent qu'à être dits pour que tout s'éclaire, il en est que seule une connaissance de la *logique mathématique* permet d'éviter. Celle-ci est née justement, *avant* la découverte des fameux paradoxes de la théorie des ensembles, de la nécessité d'expliciter les principes du raisonnement mathématique et de formuler précisément certains faits d'analyse que l'ignorance de l'usage des quantificateurs laissait dans une grande confusion. On sait, par exemple, l'importance de la place des quantificateurs successifs qui interviennent dans les définitions de la continuité et de la convergence, et qui offrent un moyen à la fois simple et sûr de distinguer la continuité ou la convergence uniforme de la continuité ou de la convergence simple. D'où la nécessité d'introduire aussi tôt qu'on le peut des notions de logique et d'éviter de sous-entendre les quantificateurs à une époque où nul n'enseigne plus le « carré logique » aristotélicien, grâce auquel on pouvait éviter les confusions entre le contraire d'un énoncé et sa négation.

Cependant, la mise au point d'une didactique « honnête » maintient toujours l'enseignement mathématique dans l'ornière de la méthode, de l'intelligence de l'acquis, donc de l'apprentissage et du « dressage ». Il n'échappe pas au risque de réduire l'enseignement au montage correct d'automatismes efficaces. Cela pose deux problèmes :

d'une part, que convient-il d'exiger de l'apprenti mathématicien ? Un apprentissage effectif, qui fait donc plus ou moins appel à sa mémoire, ou une capacité d'imaginer des médiations, c'est-à-dire une intelligence générale indépendante de l'apprentissage ? D'autre part, on peut se demander si un véritable enseignement des mathématiques ne serait pas plutôt une initiation à la découverte, découverte mathématique et non découverte des mathématiques. Or la solution de ce dernier problème dépend de la conception qu'on a des mathématiques ; discipline spéculative, où il vaudrait donc mieux apprendre à créer, un peu comme en philosophie on apprend — en principe — à philosopher plutôt que le contenu des doctrines philosophiques ; ou discipline utile, soit que l'on croie y résoudre les questions significatives par leurs applications, soit qu'on prétende s'inscrire dans une tradition de problèmes prestigieux. Quelles que soient les réponses à ces questions, on voit ce qu'elles mettent en jeu : comment, c'est-à-dire quelles mathématiques enseigner ?

Le contenu de l'enseignement - Des programmes scolaires

La question du contenu de l'enseignement des mathématiques se pose dans la mesure où les nouveaux développements des mathématiques ont exigé un changement de structure de l'enseignement primaire et secondaire, qui en harmonise les programmes avec ceux de l'enseignement supérieur.

Certains auront entendu la fameuse déclaration de ce professeur d'université qui commençait l'année par ces mots : « Il y a une seule façon de comprendre le cours que je vais vous faire, c'est d'essayer d'oublier tout ce que vous avez appris au lycée » ! Derrière l'incohérence ou la discontinuité que dénonce cette boutade, se cache un problème philosophique : celui que Frege désignait comme celui des « définitions par morceaux », dont il dénonçait l'usage courant, surtout depuis les extensions successives des nombres. Concepts et opérations sont ainsi définis pour un domaine restreint, celui des nombres entiers positifs, par exemple ; puis, avec l'introduction d'éléments nouveaux, les nombres négatifs, fractionnaires, irrationnels, etc., on redéfinit exprès ce qu'on avait déjà défini, mais de façon à englober les opérations et les concepts propres à régir les éléments nouveaux. Ainsi les symboles n'ont pas de signification « définitive », et les concepts paraissent incohérents, puisqu'on demande à l'élève d' « oublier » dans le secondaire qu'il était interdit d'écrire « $3 - 5$ », et à l'Université qu'il le fut de poser $\sqrt{-5}$. Logiquement, cela signifie que la valeur de vérité d'un énoncé d'un langage dépend des structures qui constituent les réalisations de ce langage (voir la définition des concepts de « réalisation » et de « modèle » d'un langage formel dans le chapitre *Logique*).

Rigoureusement, il faudrait donc disposer du concept d'un anneau quelconque K, et expliciter la quantification sous-jacente, afin qu'on voie que « y est un carré dans K » signifie « il existe x dans K et le carré de x est égal à y ». Autrement dit, un enseignement homogène d'une mathématique sans ruptures se fonde sur la méthode axiomatique, qu'on suppose aussi familière que les principes élémentaires de la déduction aux étudiants entrant à l'Université. C'est pour que cette supposition corresponde à une réalité qu'ont été introduites les mathématiques « modernes » dans l'enseignement primaire et secondaire. Cette innovation correspond à l'exigence de limiter la prédominance de la géométrie et, par là, du recours facile à l' « intuition » ou visualisation concrète et singulière d'objets susceptibles d'une définition plus abstraite et plus générale. La pensée abstraite doit, certes, au niveau de l'enseignement secondaire, laisser sa place à une certaine visualisation, par exemple dans l'étude et la représentation graphique des fonctions par leurs courbes ; mais il importe que celle-ci se déploie dans les limites clairement déterminées par un cadre logique et axiomatique.

C'est ainsi que M. Dieudonné avait, il y a plus de quinze ans (en 1959, à l'occasion d'une session d'études consacrée à la réforme de l'enseignement des mathématiques par la Direction des affaires scientifiques), conçu un programme *moderne* d'enseignement des mathématiques, dont voici les grandes lignes :

— Avant 14 ans, on se bornerait à un travail pour ainsi dire expérimental sur l'algèbre et la géométrie plane,

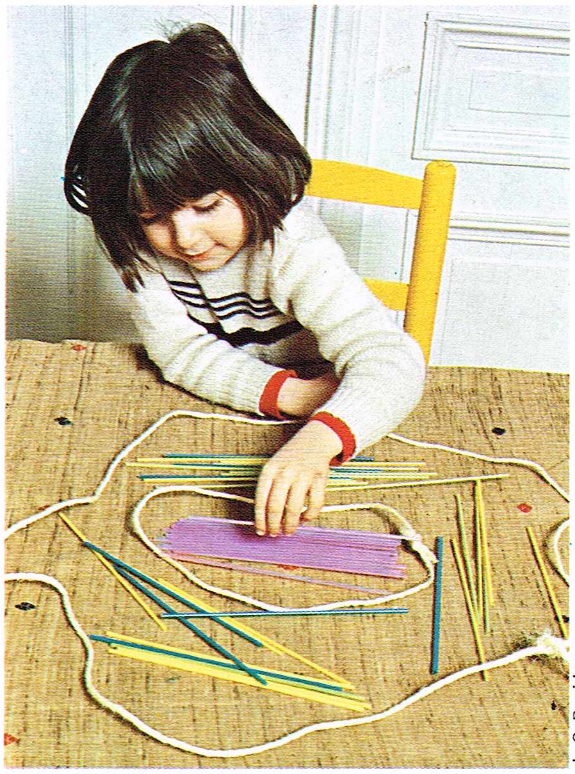

J.-C. David

◀ ***Faire comprendre les concepts d'ensemble et de nombre en s'appuyant sur des schémas, mais sans mutiler totalement ces notions de leur caractère d'entités abstraites.***

en ne soulignant les déductions logiques qu'aux endroits où c'est possible. La part du lion est faite à l'algèbre, dans la mesure où la géométrie elle-même s'organise autour des notions fondamentales de symétrie, translations, produit de transformations, etc. On n'omettrait pas d'introduire le langage adéquat, c'est-à-dire le langage commun à toutes les branches des mathématiques actuelles, et si possible, de développer les règles ordinaires de l'arithmétique à partir des axiomes de Peano, dont l'enseignant aura montré la nécessité aux élèves en les faisant réfléchir sur notre acceptation de la validité des lois de l'arithmétique pour des nombres inaccessibles à notre intuition.

— A 14 ans, on introduirait la notion de courbe représentative d'une fonction et différentes méthodes d'approximation. On peut aussi présenter, non pas une *définition*, mais une *étude axiomatique* des nombres réels, et donner, comme résultats, ultérieurement démontrables, l'existence du maximum, et le théorème de Bolzano sur l'existence des racines.

— A 15 ans, il est possible de formuler les axiomes exprimant que, pour l'addition, un espace vectoriel est un groupe commutatif, en prenant soin de développer les conséquences logiques tant du point de vue algébrique que du point de vue géométrique, c'est-à-dire en donnant les conséquences avec les deux interprétations possibles, ce qui fournit l'occasion d'entrevoir le concept de *modèle*.

— A 16 ans, le décollage axiomatique ayant déjà eu lieu, on approfondirait l'étude des groupes de la géométrie plane, en définissant la notion de mesure des angles comme homomorphisme du groupe des nombres réels sur le groupe des rotations, et en introduisant les nombres complexes avec leur interprétation géométrique. L'aspect technique consisterait dans l'étude de la notion de fonction primitive et de la notion d'aire pour des domaines simples, avec des exemples élémentaires.

— A 17 ans, la géométrie à trois dimensions doit être présentée axiomatiquement, avec emploi des matrices et des déterminants d'ordre 3. Du point de vue technique, on montrerait l'utilisation des fonctions primitives pour calculer les volumes simples, et l'on introduirait les coordonnées polaires et la méthode de construction d'une courbe donnée par une équation en coordonnées polaires. On peut, encore, étudier les fonctions logarithme et exponentielle, sans démonstration d'existence mais en insistant sur le fait qu'il s'agit d'homomorphisme de groupes.

Voilà pour le secondaire. Mais comment y préparer les enfants plus jeunes ? Les problèmes les plus délicats

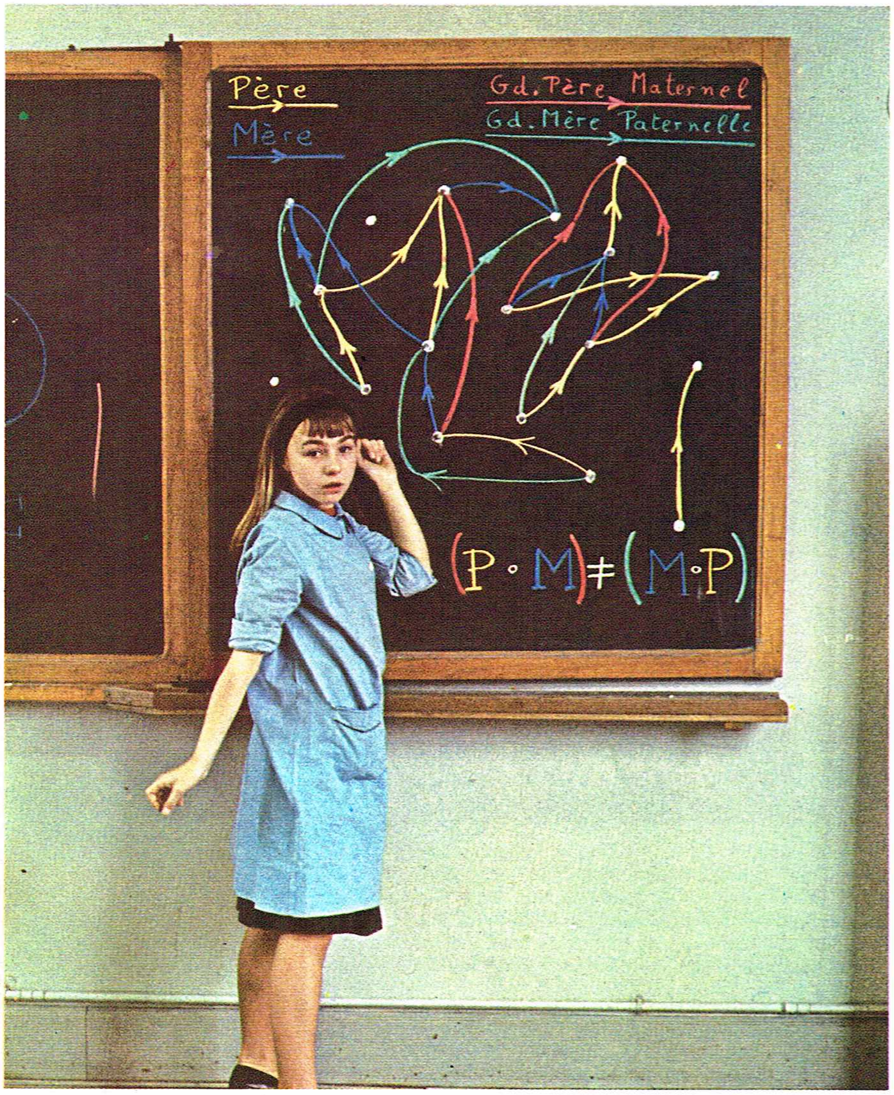

J.-Ph. Charbonnier - TOP

▲ *Selon la méthode préconisée par Georges Papy, une application des graphes au jeu des relations familiales. Si d'un point part une flèche bleue vers un second point et que de celui-ci soit issue une flèche jaune vers un troisième point, ce dernier est le grand-père maternel du premier; de l'un à l'autre, traçons directement une flèche rouge qui représente le produit de la relation* M *(comme mère) par la relation* P *(comme père). De même, une flèche jaune suivie d'une flèche bleue désigne la grand-mère paternelle, c'est-à-dire le produit* P *par* M *que nous désignons directement par une flèche verte. Comme le grand-père maternel est différent de la grand-mère paternelle, les enfants écrivent au tableau l'équation* (P · M) ≠ (M · P) [*noter la couleur différente des parenthèses*].

se posent là, car on ne peut être rigoureux qu'au risque d'être inaccessible, quand on s'adresse à de petits enfants. Il s'agit alors moins de respecter les réquisitoires de la rigueur déductive que d'expliciter le mieux qu'on peut, sans fermer les portes à l'imagination et à l'initiative, et sans perdre de vue le but qui est d'arriver à ce que les mathématiques soient saisies comme une activité créatrice. Des essais intéressants ont été tentés dans cette perspective, parmi lesquels il faut citer d'abord la *Mathématique moderne* de Papy, dont l'ambition est de faire participer le débutant à la construction active de l'édifice mathématique à partir de situations simples, et de l'initier — dès l'âge de douze ans — aux éléments de la théorie des ensembles.

Moins connu en France, sans doute, est le bel effort de Patrick Suppes, grand mathématicien américain qui a consacré à la théorie abstraite des ensembles un traité fameux, mais qui a aussi conçu un programme destiné aux enfants des maternelles auxquels il s'agit essentiellement de faire comprendre les *concepts d'ensemble* et de *nombre,* en s'appuyant, certes, sur des schémas, mais sans mutiler totalement ces notions de leur caractère d'entités abstraites. Partant du concept d'un ensemble de choses comme *famille de choses* semblables entre elles (les oiseaux d'un même nid), ou différentes (une banane et un livre), nombreuses (les feuilles d'un arbre), moins nombreuses, réduites à une seule chose ou même à *rien,* il introduit le concept de nombre comme propriété d'un ensemble, en distinguant soigneusement dans la notation un ensemble, par exemple {crayon, balle} de son nombre N {crayon, balle}. Cette première initiation comporte les notions de plus grand, plus petit, plus long, plus court, plus haut, la notion d'égalité et la reconnaissance des formes géométriques semblables quoique de dimensions différentes, enfin l'apprentissage des nombres, de 0 à 3 dans un premier temps, puis jusqu'à 5. Le tout présenté sous forme de jeux dirigés pour susciter l'initiative dynamique et faciliter l'assimilation ultérieure des notions et des méthodes.

On retiendra de ces exemples qu'un bon enseignement des notions élémentaires repose sur une *analyse logique* de ces notions et du contenu mathématique (compter, ajouter, retrancher, etc.) qui s'ensuit, d'où l'exigence pour les futurs enseignants du primaire et du secondaire de se former aux principaux concepts de la logique mathématique.

Les programmes se concrétisent naturellement dans des manuels, et les bons manuels sont rares, si bien qu'ils apparaissent souvent comme l'expression d'une mathématique figée ou d'un enseignement dissocié de la recherche qui devrait pourtant le nourrir. Les pédagogues les ont, depuis un moment, tant critiqués qu'ils ont pratiquement disparu de l'enseignement au profit des *fiches,* fiches de notions et fiches d'exercices pour appliquer ces notions.

Ainsi, dès 1929, Freinet condamnait le manuel comme trop étriqué et trop scolastique et lui préférait le fichier, permettant un enseignement plus souple et faisant davantage appel à l'initiative tant du professeur que des élèves. Un ami de Freinet, R. Dutheil, a également attiré l'attention, dans un article de *l'École libératrice* (9 et 30 janvier 1932), sur l'arithmétique programmée de Winnetka, et les efforts suscités par ce genre de préoccupations aboutissent aux *bandes enseignantes,* autocorrectrices et complétées généralement par un test.

L'avantage des fiches est qu'elles permettent de réindividualiser la vie pédagogique, ce qui constitue le but de l'*enseignement programmé.* On a ainsi tenté une programmation de l'algèbre élémentaire, et il existe également une arithmétique programmée présentée sous forme de fiches d'information et d'exercices de contrôle. Bien qu'il ait favorisé l'étude de tous les chaînons utiles dans un apprentissage, l'enseignement programmé ne semble pas avoir tenu toutes ses promesses; en particulier, il n'évite pas l'écueil de la présentation collective, par exemple, devant une classe d'enfants dont la maturité ou la rapidité d'assimilation n'est pas nécessairement uniforme, ni n'élimine vraiment l'idée de « l'écolier moyen » dont le profil détermine la constitution des fiches.

Diversité des idées pédagogiques, multiplicité des méthodes, il y a de quoi rendre perplexes ceux dont la tâche est de former les futurs formateurs. « Comment concilier l'effort de l'éducateur sur lui-même pour s'ajuster à son rôle, et l'effort pour ajuster ses interventions à l'enfant et à son contexte social ? » se demandait J. Ferry. Plus on approfondit les problèmes pédagogiques, plus on s'aperçoit que, théoriquement, leur solution pose des exigences draconiennes dont les institutions actuelles ne permettent pas la réalisation harmonieuse. La situation est bien résumée dans cette remarque de R. Thom que nous citons : « Pour s'assurer que l'élève participe pleinement à la recherche en cours, il est nécessaire que le maître tienne compte à tout moment de ses réactions, afin de guider sa propre démarche et celle de son pupille. Ceci n'est guère possible, sous forme idéale, qu'en tête-à-tête... Dès qu'un maître a simultanément plusieurs élèves, il ne peut tenir compte des réactions souvent diverses de tous ses élèves, et il est amené à en négliger quelques-uns. Encore un pas de plus, et le souci d'efficacité le conduira à adopter une attitude de guide, et bientôt à revenir à l'enseignement *ex cathedra.* Aussi les efforts vers une pédagogie plus libre sont-ils nécessairement coûteux : ils demandent plus de maîtres et des maîtres mieux formés, à personnalité originale : la société ne pourra qu'imposer à ces efforts les bornes inéluctables du budget. »

Au total, la pédagogie des mathématiques est-elle pour le moment autre chose que le bilan des difficultés inhérentes à la notion même d'éducation ? autre chose que le constat du désarroi de l'éducateur qui, en principe, ne peut se contenter de tout organiser en fonction d'un système scolaire conventionnel, en négligeant les virtualités de ses élèves et les potentialités de changement de la société actuelle ? L'enseignant, pris en tenailles entre des exigences peu compatibles, est la victime d'une situation de crise, provoquée par l'effondrement des idéaux humanistes et religieux, et qu'on n'a pas encore surmontée.

Chaffey

▲ *Les plus anciens documents mathématiques de la civilisation égyptienne remontent à une époque très lointaine ; ces peintures murales ornant un tombeau royal, à Louxor, datant du XIIIᵉ siècle avant J.-C., représentent des agriculteurs au travail dans un champ de blé et, en bas, des scribes effectuant des calculs.*

HISTOIRE DES MATHÉMATIQUES

L'historien des mathématiques se heurte aux difficultés de tout historien, du fait qu'il n'y a pas trace de tout ce qui s'est passé, que l'écrit lui-même n'est pas indélébile, que bien des éléments utiles à la connaissance historique ne furent consignés qu'après coup, après avoir traversé le flou du rapport oral, que les perspectives particulières, ou même les passions, ont souvent contribué à former une image plus conforme à la situation dans laquelle l'histoire était écrite qu'à la vérité, introuvable ou fragile. Tout se complique encore si l'on essaie de définir le sens de l'histoire des mathématiques du point de vue des mathématiques actuelles. Car, ou bien on discerne un lien entre les contenus actuels et passés, et on évite mal le risque d'appauvrir un contenu d'autant plus fuyant qu'il est dissocié de son contexte, ou bien on n'en discerne pas, et l'on se trouve face à des fragments auxquels il est malaisé de donner un sens en les rapportant à un contexte composé d'éléments hétérogènes. Un philosophe rigoureux pourrait trouver dans l'entreprise même de tenter une histoire des mathématiques un vice fondamental, celui d'être un intolérable mélange des genres. Aussi n'avons-nous pas la prétention d'écrire, dans l'espace qui nous est imparti, une histoire qui aura surmonté toutes ces difficultés; mais ce sera assez de les circonscrire. Bien entendu, nous nous limiterons aux faits les plus prégnants, dans le cadre actuel de connaissances qui ne cessent de s'augmenter et de s'améliorer.

Les mathématiques orientales

Nous nous garderons de parler de « mathématiques préhelléniques » et laisserons entière la question de savoir dans quelle mesure la Grèce fut l'héritière de l'Égypte et de Babylone. Car rien ne démontre là cette continuité qu'on est tenté de supposer, sur le témoignage des Grecs eux-mêmes (Aristote ou Hérodote). On ne peut, en effet, étendre à toutes les périodes ce que Hilbert disait de la mathématique moderne, dont chaque moment pose des problèmes que l'époque suivante résout ou néglige comme stériles en leur en substituant d'autres. Mais, même si, avant elle, les méthodes primitives du compter et les nombreuses techniques ornementales qui utilisent des formes géométriques usuelles : points, lignes, carrés et losanges, cercles et spirales, portent la trace d'une pensée mathématique, c'est sans conteste aux antiques civilisations de l'Orient que revient le droit d'avoir inauguré cette science.

L'Égypte

Les sources dont nous disposons pour la connaissance des mathématiques égyptiennes ne sont pas très riches; elles se limitent aux papyrus fragmentaires du Moyen Empire (1900-1800 avant J.-C.) : papyrus de Kahoum et de Berlin, aux textes des fameux papyrus Rhind et de Moscou, à un court manuscrit du British Museum, aux deux tablettes sur bois du musée du Caire, enfin, aux scènes de la vie égyptienne qui nous montrent l'importance des scribes, lorsqu'il s'agit par exemple de faire des mesures ou d'évaluer des récoltes.

Le plus important de ces documents est le papyrus Rhind (du nom du Britannique qui l'a acheté en 1858 à Louxor et légué au British Museum). Comme presque tous les autres documents mathématiques qui nous sont parvenus, il date de la période des Iksos, rois d'origine asiatique implantés dans le delta du Nil au XVIIIᵉ siècle avant notre ère. Composé par le scribe Ahmès, ce papyrus

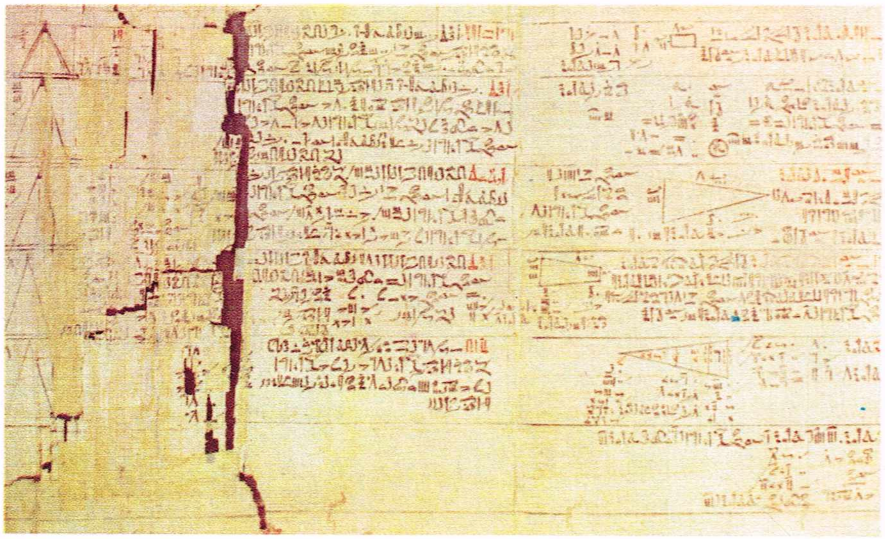

British Museum - Archives Edena

▲ ***Le papyrus Rhind,** d'après un traité égyptien de la XII^e dynastie. On y reconnaît des problèmes de fractions et des calculs de volumes et de surfaces (British Museum).*

se présente comme une sorte de manuel. Le début du texte, prometteur, annonce qu'on va dévoiler l'essence de toutes choses. Mais, en fait, il s'agissait plutôt d'initier à un enseignement déjà codifié les scribes, devenus une sorte de caste indispensable à l'administration pharaonique ; or, prescriptions utilitaires et recettes techniques suffisent à ce but, et c'est précisément la forme qu'ont les problèmes (au nombre de 84, et de complexité croissante) du papyrus Rhind, ainsi que ceux (au nombre de 25) du papyrus de Moscou. Les énoncés arithmétiques ou géométriques qu'on y trouve appartiennent donc à des *disciplines auxiliaires* et *utiles*.

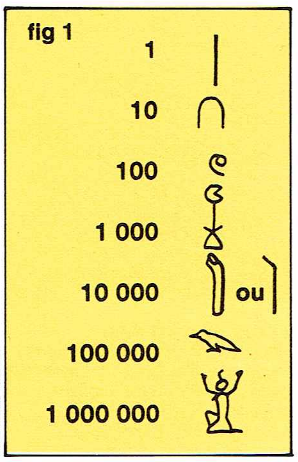

Richard Colin

L'arithmétique égyptienne

Les nombres s'écrivaient (sous forme de hiéroglyphes) dans un système décimal, avec des signes spéciaux pour les unités, les dizaines, les centaines, les milliers, les dizaines de mille, les centaines de mille et les millions. En revanche, il n'y avait pas de signe pour zéro, bien qu'il soit pour ainsi dire indiqué par une place vide (*fig.* 1).

Chacun de ces signes est répété autant de fois qu'il est nécessaire pour exprimer le nombre désiré d'unités, de dizaines, de centaines, etc., les chiffres les plus élevés étant écrits avant les autres (*fig.* 2).

L'addition est une opération simple dans ce système ; mais il n'en va pas de même pour la multiplication et la division qui ne se font directement que par 2. Le problème n° 32 du papyrus Rhind conduit ainsi la multiplication de 12 par 12 (*fig.* 3).

Le résultat final est donc la somme de 4 × 12 et de 8 × 12 (= 144), les résultats à additionner ayant été cochés pour être distingués de ceux qui restent accessoires.

La division est une multiplication inversée. Le n° 69 du Rhind demande : « Additionne, en commençant par 80, jusqu'à ce que tu obtiennes 1 120 », ce qui veut dire qu'on cherche combien de fois 80 est contenu dans 1 120. L'opération 1 120 : 80 = 14 va être conduite comme une multiplication :

	1	80
/	10	800
	2	160
/	4	320
	14	1 120

On additionne les résultats cochés.

Quand le dividende n'était pas exactement divisible par le diviseur, on recourait aux fractions. Des fractions comme $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}$ qui ont l'unité pour numérateur, sont usuelles et s'expriment par le signe ⊂⊃ qui signifie « part de », par exemple :

$$= \frac{1}{12} \qquad = \frac{1}{30};$$

mais $\frac{2}{3}$ a (seule) un signe spécial :

Les fractions n'ayant pas l'unité au numérateur sont décomposées ; par exemple :

$$\frac{2}{7} = \frac{1}{4} + \frac{1}{28} \quad \text{ou} \quad \frac{2}{5} = \frac{1}{3} + \frac{1}{15}$$

Sur les fractions, le calcul se fait comme sur les nombres entiers, par le *procédé de la duplication*, mais on suppose parfois connues certaines relations immédiates, telles que :

$$\frac{1}{6} + \frac{1}{6} = \frac{1}{3} \qquad \frac{2}{3} + \frac{1}{2} = 1 + \frac{1}{6} \qquad \frac{1}{3} = \frac{1}{4} + \frac{1}{12}$$

qui sont utilisées comme des règles dans le calcul des fractions les plus courantes (1/2, 1/3, 1/6).

Pour faciliter certains calculs, le papyrus Rhind donne une table de décomposition des fractions du type $2/n$, pour n allant de 3 à 101, mais les techniques employées ne semblent pas se ramener à une méthode unique ; cela constitue toutefois un des éléments les plus importants du contenu de ce papyrus.

En bref, ces calculs contiennent beaucoup de problèmes qui sont pour nous du ressort des équations linéaires.

Par exemple, l'expression $x + \frac{x}{7} = 19$ semble avoir un intérêt purement théorique et suggère la question de savoir si les Égyptiens ont, comme les Babyloniens à la même époque, utilisé le calcul algébrique. Mais on se trouve là

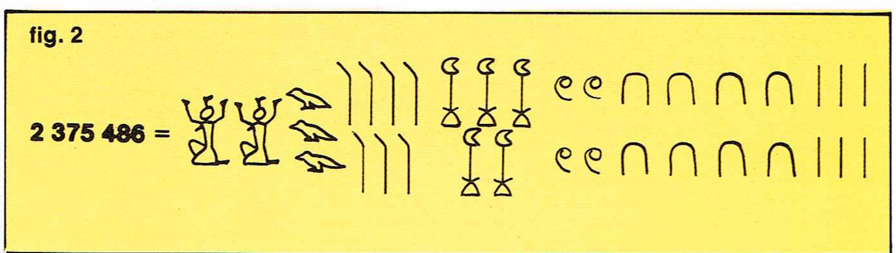

Richard Colin

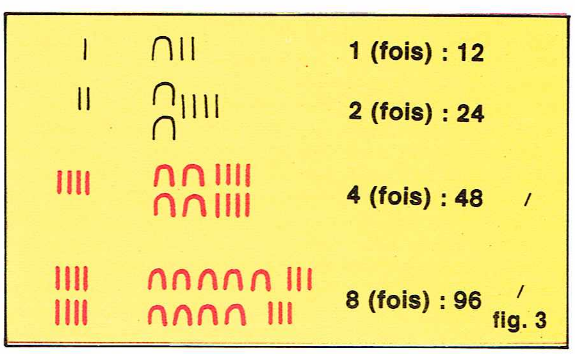

Richard Colin

▲ *Dans l'arithmétique égyptienne, les nombres s'écrivaient (sous forme de hiéroglyphes) avec des signes spéciaux pour les unités, les dizaines... (fig. 1). Chacun de ces signes est répété autant de fois qu'il est nécessaire, pour exprimer le nombre désiré d'unités (fig. 2).*

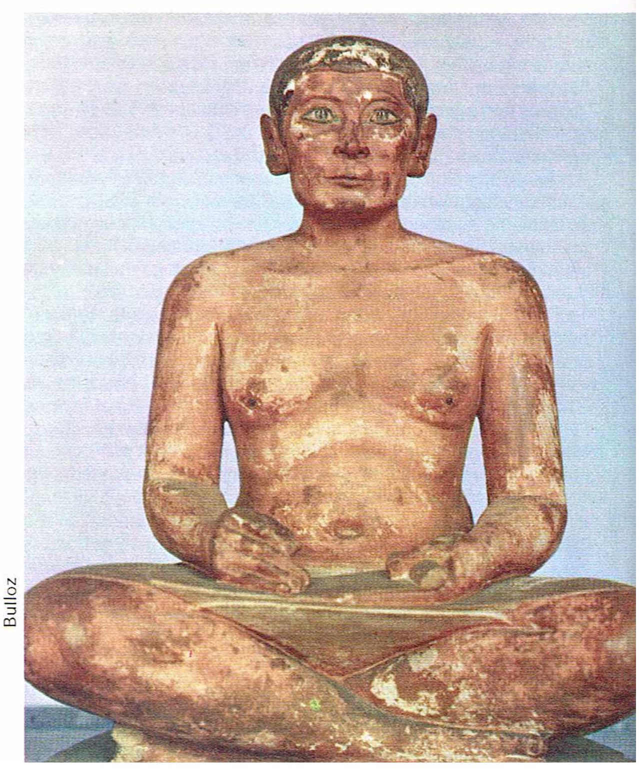

Bulloz

devant une interrogation à laquelle on ne peut répondre.

Le n° 40 du Rhind mérite aussi d'être cité, car il revient à partager 100 pains entre 5 hommes de façon que les parts forment une progression arithmétique ; l'idée de progression arithmétique reste, bien entendu, très implicite dans les essais successifs qui aboutissent à la solution. Celle de progression géométrique est également à l'œuvre dans le problème n° 79 qui demande la somme de ce que contient un domaine composé de 7 maisons, possédant chacune 7 chats, chacun des chats tuant 7 souris dont chacune mangeait 7 grains d'orge, alors que chaque grain aurait produit 7 boisseaux. Dans tous les cas, l'apparence pragmatique évidente fait ressortir ce qu'on pourrait appeler la profondeur mathématique implicitement enfouie dans les outils utilisés.

La géométrie égyptienne

Pour les Grecs, l'Égypte était le berceau de la géométrie, qui leur semblait une science assez ancienne pour que Platon fît dire à l'Égyptien du *Timée* (s'adressant à Solon) : « Vous autres Grecs, vous êtes toujours des enfants, vous n'avez aucune science blanchie par le temps. » Sans doute, la géométrie égyptienne n'est pas une science, au sens où les Grecs entendaient ce terme, mais plutôt un calcul appliqué, une pratique de l'évaluation des surfaces. C'est d'Hérodote que nous tenons l'idée que cette évaluation était indispensable à l'établissement de l'impôt. Mais nous pouvons constater directement l'origine empirique de cette géométrie dans certains problèmes du Rhind, par exemple dans celui (n° 51) où l'on demande de calculer la surface d'un triangle de 10 verges de hauteur et 4 verges de base en prenant la moitié de 4 pour en faire un rectangle et en multipliant 10 par 2. C'est donc en prenant la surface du rectangle construit sur la moitié de la base du triangle (et ayant comme longueur la hauteur du triangle) qu'on a la solution cherchée. Tout semble indiquer, justement, que le rectangle est la figure de base à partir de laquelle on calcule l'aire du triangle rectangle, puis du triangle isocèle, enfin celle du trapèze (*fig.* 4).

Le papyrus Rhind nous donne une approximation de l'aire du cercle, qui est considérée égale au carré des $\frac{8}{9}$ du diamètre, ce qui revient à l'évaluation suivante pour π :

$$\pi \cong 4\left(\frac{8}{9}\right)^2 = 3{,}160\,49...$$

Ce calcul étonnant de π est à l'origine de nombreuses spéculations. Gaston Milhaud l'attribuait ainsi à l'efficacité d'un procédé qui ne nous serait pas parvenu, ce qui implique l'idée, parfois défendue, d'une science égyptienne vivante, par rapport à laquelle les recueils de problèmes que nous connaissons ne représenteraient que des formes cristallisées, figées et comme pétrifiées. Cette impression se renforce quand on remarque que le papyrus de Moscou livre la formule exacte pour calculer le volume du tronc de pyramide : $V = \frac{h}{3}(a^2 + ab + b^2)$, laquelle, comme le note Wan der Waerden, ne peut être calculée de manière purement empirique et résulte probablement de quelque considération théorique (*fig.* 5).

Malheureusement, on en est réduit à des conjectures, bien que l'on puisse imaginer des *constructions* rendant compte des formules sans induire des hypothèses dont le niveau dépasse celui qui nous apparaît aujourd'hui : rien ne permet de définir la réelle profondeur des formes condensées dans lesquelles nous sont parvenues les solutions des problèmes de la mathématique égyptienne. On retiendra donc que cette mathématique nous est parvenue à travers une collection d'*exemples* de problèmes, sans qu'il y soit jamais question de *démonstration*. En outre, il ne semble pas qu'elle ait connu une *évolution* ou un *progrès* quelconque durant tout ce temps où elle fut principalement l'outil des architectes, des arpenteurs et des maîtres calculateurs. Mais ni le calcul, ni l'arpentage ne suffisent, dit-on, à créer une véritable « science ».

La Mésopotamie

Le pays qui s'étend entre le Tigre et l'Euphrate développait, depuis des millénaires également, une civilisation agricole et urbaine. Mais, avec l'arrivée des Sumériens, peuple aux origines inconnues, venu du golfe Persique, s'épanouit une culture originale qui va durer jusqu'à l'aube de l'ère chrétienne. Vers 2200 avant J.-C., les Babyloniens, venus du nord du pays, soumettent les Sumériens et étendent leur empire jusqu'à la Méditerranée. Ils fondent la dynastie akkadienne, avec Babylone pour capitale, mais les « vaincus ayant conquis les vainqueurs », la culture sumérienne continue de s'épanouir. Elle atteint son acmé durant la dynastie de l'illustre législateur : Hammourabi (vers 1780 avant J.-C.).

Un peu plus tard, se développe en Assyrie une autre civilisation remarquable, tributaire des Sumériens et des Akkadiens, mais douée également d'une puissante originalité. C'est elle qui dominera, en fin de compte, la région, car elle saura mieux se défendre contre les envahisseurs, contre les rivaux politiques de Babylone, et atteindra son apogée au VII^e siècle. Aussi avons-nous de cette culture des traces relativement tardives, proches du début de l'ère chrétienne, bien qu'elle ne survive plus à ce moment que dans les temples où les textes cunéiformes résistent à l'invasion de la langue du Perse vainqueur.

La notation numérique

Ce degré d'abstraction atteint par la science suméro-akkadienne est attesté avant tout par l'apparition de l'*écriture cunéiforme*, qui implique les notions d'idéo-

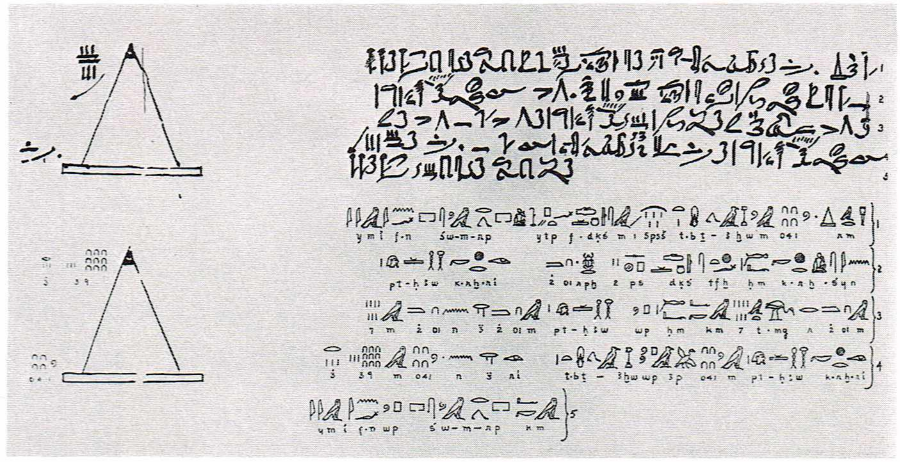

Roger Viollet

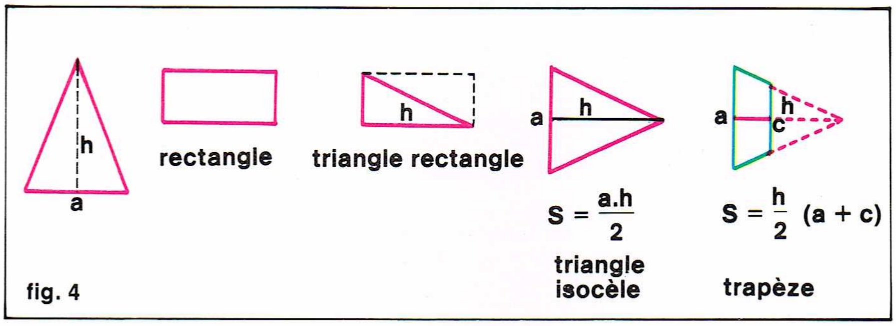

Richard Colin

▲ ***En haut, problème de géométrie égyptien, antique, et sa traduction en caractères dénotiques. Ci-dessus, figure 4 : calcul des aires du triangle rectangle, du triangle isocèle et du trapèze à partir du rectangle, expliquant un problème du Rhind.***

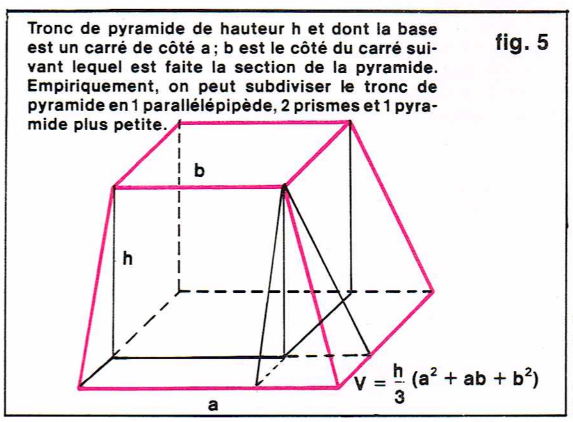

Tronc de pyramide de hauteur h et dont la base est un carré de côté a ; b est le côté du carré suivant lequel est faite la section de la pyramide. Empiriquement, on peut subdiviser le tronc de pyramide en 1 parallélépipède, 2 prismes et 1 pyramide plus petite.

Richard Colin

◀ ***Figure 5 : schéma dû à O. Neugebauer pour expliquer le calcul du volume du tronc de pyramide du papyrus de Moscou.***

◀ ***Page ci-contre, à gauche, figure 3 : la multiplication de 12 par 12 telle qu'elle est conduite dans le papyrus Rhind. A droite, Le scribe accroupi (musée du Louvre, Paris).***

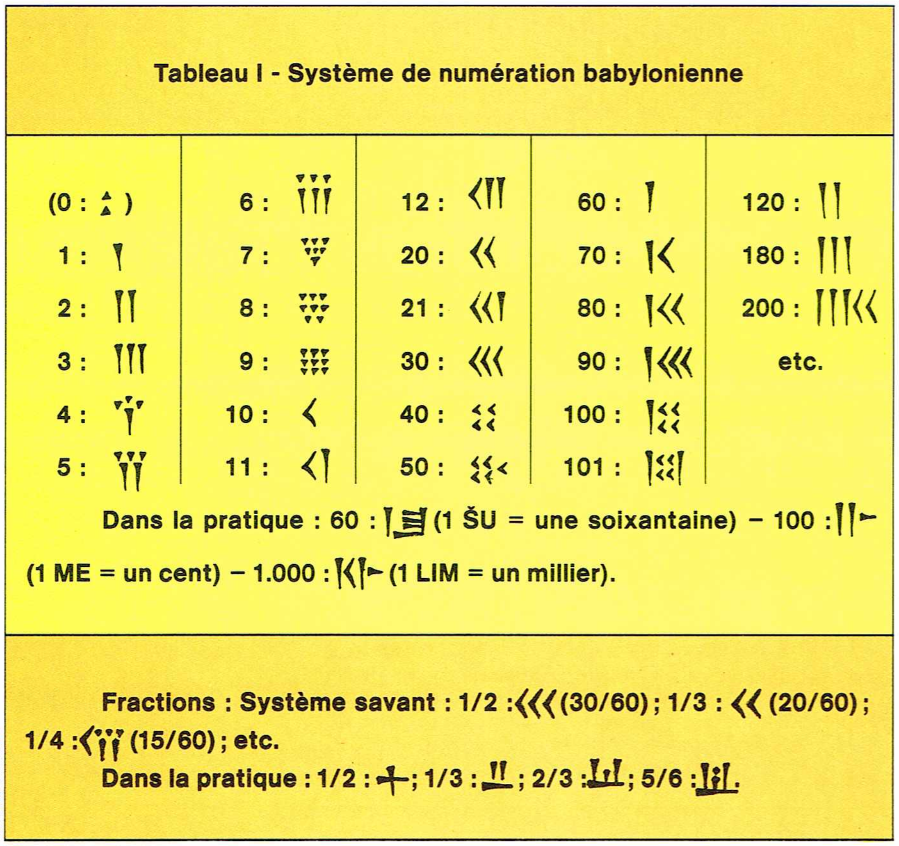

▲ *Tableau I : la numération babylonienne.*

gramme et de valeur syllabique, et, en ce qui concerne les mathématiques, par une connaissance théorique des principes justifiant les solutions admises, bien que cette connaissance ne soit pas développée dans les textes qui en constituent l'application, et qui ont été découverts pour partie dès 1854 par Senkereh, pour partie en 1894.

La numération babylonienne est doublement originale : c'est une *numération de position,* et sa *base est sexagésimale*. La notation positionnelle fait dépendre la valeur d'un signe numérique de la *place* qu'il occupe dans le nombre et se différencie ainsi de la notation juxtapositionnelle, généralement répandue dans l'Antiquité, en particulier chez les Romains. Par exemple, dans 444, le 4 signifie selon sa place aussi bien 4 unités que 4 dizaines ou 4 centaines. Ce système permet l'expression aisée de nombres très grands ou très petits et facilite les opérations. Cette numération sexagésimale repose sur deux symboles particuliers :

= 1 = 10

mais l'unité peut aussi bien signifier 1 que 60, ce dont seul le contexte permet de décider (*tableau* I).

De même peut aussi bien désigner 10 · 60. Autrement dit, le besoin de disposer d'une notation pour le zéro se fait sentir, mais cette lacune n'est pas comblée.

Il semble que ce soient les Sumériens qui, après un essai de notation ternaire, aient inventé ce système sexagésimal qu'on retrouve dans leur métrologie et dont l'origine pourrait apparaître dans l'échange, l'orge, puis certains métaux servant de base aux transactions. Nous avons conservé aujourd'hui ce système dans notre partition de l'heure en soixante minutes, de la minute en soixante secondes, et dans notre mesure en degrés des angles. A cet égard, l'adjonction du zéro achève ce système et le rend propre aux applications astronomiques auxquelles procédait Ptolémée.

Les opérations arithmétiques

Les fractions ne jouent pas ici le rôle qu'elles avaient dans l'arithmétique égyptienne, la base sexagésimale permettant de se limiter souvent à des nombres entiers ; mais elles ne sont pas totalement absentes, et l'on trouve même dans deux tablettes une tentative de noter les fractions par « numérateur » et « dénominateur ».

L'addition est exprimée par la juxtaposition des symboles (*fig.* 6). Mais la soustraction est signifiée par un symbole particulier (*fig.* 7).

La multiplication possède également un signe assez complexe (*fig.* 8).

La multiplication utilise d'abord des *tables* qui contiennent les produits par un nombre, *a*, des vingt premiers nombres et de 30, 40 et 50, ce qui suffit à donner le résultat du produit par *a* d'un nombre quelconque compris entre 1 et 60. Mais, pour multiplier par 37, par exemple, on multiplie par 30, puis par 7, et l'on additionne les résultats.

Pour diviser *b* par *a*, on cherche d'abord $1/a$, puis on multiplie cet inverse par *b*. C'est pourquoi aux tables de multiplication sont souvent associées des tables pour les inverses.

Les documents nous ont légué encore des tables de carrés, de racines carrées, de cubes et de racines cubiques, indiquant, s'il y a lieu, la valeur exacte d'une racine, ou, à défaut, une approximation. On a ainsi une excellente approximation de $\sqrt{2} = 1{,}414\,213...$ Les tablettes contiennent aussi des séries arithmétiques et géométriques finies, des relations exponentielles et logarithmiques. La somme d'une série géométrique de raison 2 et ayant 10 termes est calculée ainsi :

$$1 + 2 + 4 + ... + 2^9 = 2^9 + (2^9 - 1) = 2^{10} - 1,$$

résultat qui est celui de la formule connue $S = a\dfrac{q^n - 1}{q - 1}$, pour $q = 2$, $a = 1$ et $n = 10$.

Naturellement, nous avons renoncé, pour des raisons de place, à exposer l'histoire interne de la numération et de l'arithmétique telles qu'elles se sont développées dans les différentes civilisations mésopotamiennes, et à souligner les efforts locaux qui en ont marqué les différentes étapes.

L'algèbre

Il s'agit essentiellement de l'apparition, sinon de la théorie, des équations linéaires, quadratiques, voire biquadratiques et cubiques, du moins de ces équations elles-mêmes sous une forme si scientifique qu'elle semble l'application directe d'une théorie. La préoccupation pratique semble bornée à un rôle somme toute secondaire : elle est soit le support d'un exercice ou d'une application, soit l'auxiliaire gardant le privilège de l'illustration et de l'exemple. Lorsque, sur une tablette, on demande de trouver le côté d'un carré dont la surface « additionnée six fois et le côté trois fois et demie » vaut 906, l'indication qu'il s'agit de « mon champ » montre qu'il s'agit, non pas d'un problème pratique, mais d'un exercice théorique sur un thème mathématique donné.

▼ *Figures 6, 7, 8 : exemples d'opérations arithmétiques babyloniennes.*

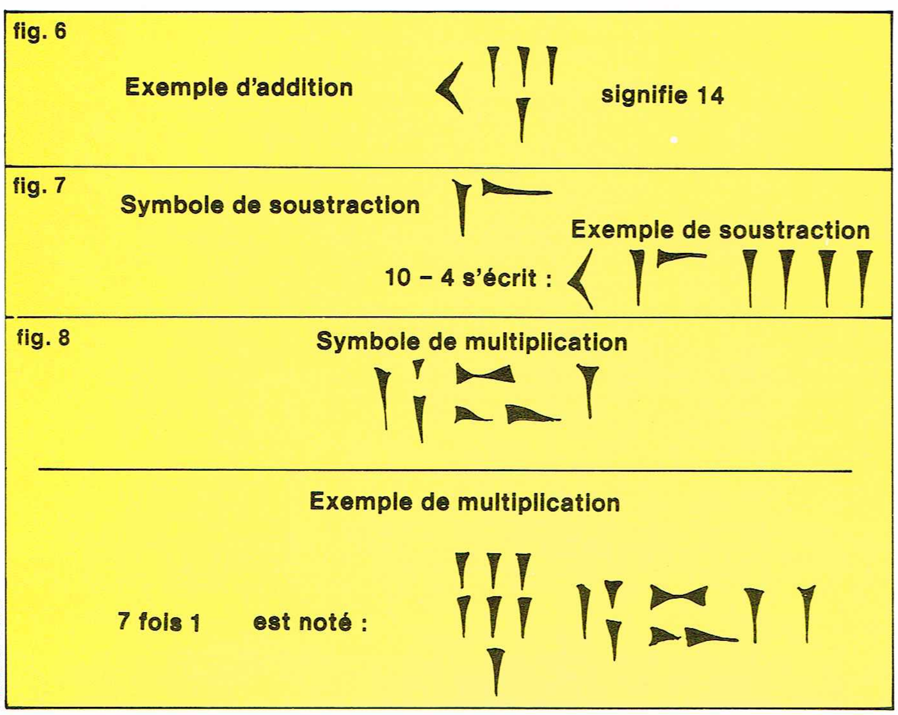

Giraudon

Giraudon

▲ ***A gauche, une tablette cunéiforme, vestige de la civilisation mésopotamienne (Bagdad, Musée irakien). A droite, tablette cunéiforme, d'origine babylonienne, contenant un texte mathématique et un dessin géométrique (Bagdad, Musée irakien).***

Nous donnerons un exemple de résolution d'une équation du second degré (problème 7, tablette BM 13901), tel qu'il est exposé par Labat et Bruins dans *la Science antique et médiévale* (P. U. F., 1966, p. 113) : « J'ai ajouté sept fois le côté de mon carré et onze fois la surface : cela fait 6,15. Pose 7 et 11. » Ce qui veut dire : posons

$$11\,x^2 + 7\,x = 6{,}15.$$

Le texte babylonien prescrit les démarches suivantes : « Multiplie 11 par 6,15 : 1 · 8,45 (1 · 8,45 = 68,75 en notation décimale). Prends la moitié de 7, 3,30 (ou 3,50 en notation décimale). Multiplie 3,30 par lui-même : 12,15 (= 12,25 en notation décimale). Ajoute 12,15 à 18,45 : 1 · 21 (= 81 en notation décimale). La racine de 1 · 21 est 9. Ote 0,30 que tu as multiplié de 9 : 5,30. L'inverse de 11 n'est pas dans les tables. Par quoi faut-il multiplier 11 pour avoir 5,30 ? par 0,30 (= 0,50 en notation décimale). 0,30 est le côté de mon carré. »

Cela revient à considérer l'équation de la forme

$$ax^2 + bx + c' = 0$$

suivante : $11\,x^2 + 7\,x - 6{,}15 = 0$, et les opérations suivantes :

$$11 \times 6{,}15 = 1 \cdot 8{,}45 \quad \text{qui correspond à } a \cdot c'$$

$$7{,}2 = 3{,}30 \quad \text{qui correspond à } \frac{b}{2}$$

$$\frac{7}{2} \cdot \frac{7}{2} = 12{,}15 \quad \text{qui correspond à } \left(\frac{b}{2}\right)^2$$

$$12{,}15 + 18{,}45 = 1 \cdot 21 \quad \text{qui correspond à } \frac{b^2 + 4\,ac'}{4}$$

$$1{,}21 = 9 \quad \text{qui correspond à } \frac{\sqrt{b^2 + 4\,ac'}}{2}$$

$$9 - 3{,}30 = 5{,}30 \quad \text{qui correspond à } \frac{\sqrt{b^2 + 4\,ac'}}{2} - \frac{7}{2}$$

Les Babyloniens avaient également une certaine idée de la notion de fonction, qui est généralement et à juste titre considérée comme la notion la plus caractéristique des mathématiques modernes. Pour la résolution de l'équation cubique $x^3 + x^2 = 0$, une tablette donne ainsi la liste des nombres correspondants, pour chaque valeur de n, à $n^3 + n^2$.

La géométrie

L'exposé en est également fait par schémas de solutions plutôt que par voie démonstrative au sens où nous l'entendons depuis les Grecs. Elle est dominée par une tendance algébriste, dans la mesure où ne sont mobilisés que les résultats susceptibles de conduire à des relations métriques ; les notions d'angle et de parallèle, une relation comme $a/b = c/d$ n'ont pas de termes pour les exprimer, tandis que la relation « de Pythagore » qui exprime un rapport métrique entre les côtés d'un triangle et sa diagonale est déjà connue (mais c'est Pythagore qui la démontrera). D'où la conclusion de Bruins : « A mon avis, il ne faut pas attribuer aux mathématiciens babyloniens la connaissance de la théorie géométrique des proportions, bien qu'ils montrent des relations numériques qui correspondent aux théorèmes de cette théorie. »

Parmi les problèmes où est impliquée la relation de Pythagore, citons un exemple. On donne les relations :

$$L + l + d = 40 \quad \text{et} \quad L \cdot l = 2 \cdot 0$$

(= 120 en système décimal) entre la longueur L, la largeur l et la diagonale d d'un rectangle ; le scribe résout le système des 2 équations sans indiquer qu'il suppose également donnée : $d^2 = L^2 + l^2$.

Lorsque l'application de la relation de Pythagore n'est pas possible, la valeur de la diagonale étant irrationnelle, les scribes tentent de trouver une approximation, en utilisant la formule :

$$\sqrt{x} = \sqrt{a^2 + 2} \cong a + \frac{2}{2\,a} = \frac{1}{2}\left(a + \frac{x}{a}\right)$$

On trouve évidemment dans les tablettes des problèmes portant sur des surfaces telles que des carrés, des rectangles, des trapèzes, etc., et sur des volumes tels que des cubes, des parallélépipèdes et des polyèdres. Il s'agit toujours d'une théorie essentiellement numérique. Ainsi un calcul, appliquant la formule

$$V = h\left[\frac{(a+2)^2}{2} + \frac{1}{3}\,\frac{(a-b)^2}{2}\right]$$

donne le volume du tronc de pyramide.

De manière générale, l'évaluation des surfaces n'est pas très scrupuleuse, sauf dans les formules concernant des carrés, des rectangles et des triangles rectangles. Bref, les Babyloniens ont connu une théorie numérique

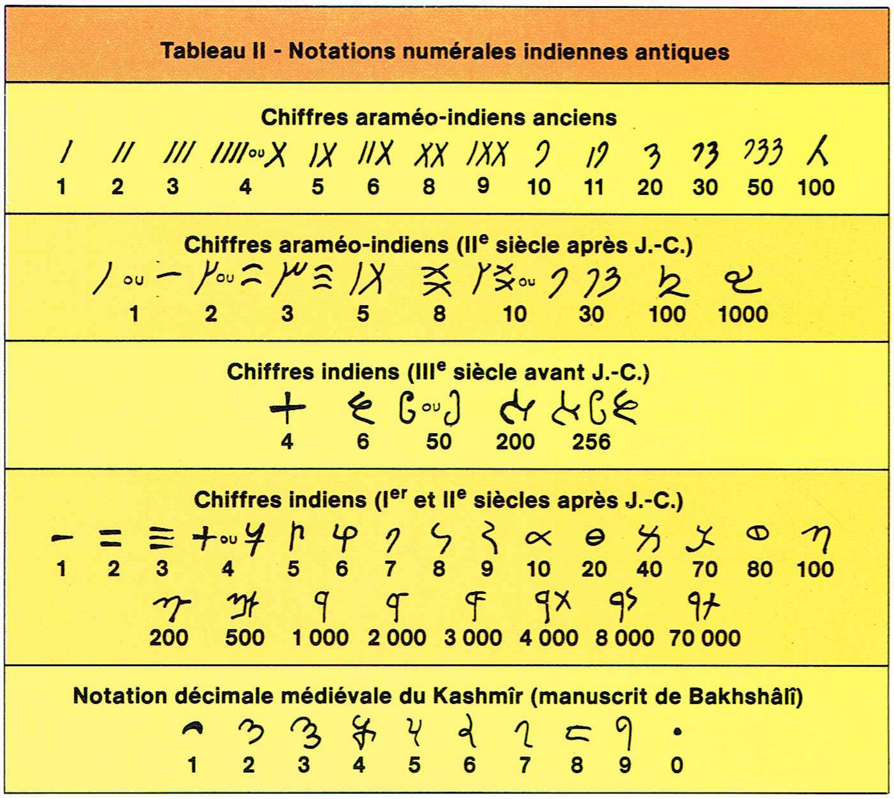

▲ *Tableau II : principales notations numérales indiennes antiques.*

des polygones réguliers ; ils étaient familiarisés avec les concepts de centre et de rayon d'un cercle ; ils n'ont pas de théorèmes sur des figures semblables, mais utilisent des méthodes qui procèdent, selon Bruins, « de l'application de la propriété de l'équidistance des droites parallèles et de l'additivité des aires ».

Par rapport à la mathématique égyptienne, une « avance » certaine : perfectionnement du calcul, apparition de procédés algébriques, usage de méthodes d'approximation et utilisation d'une géométrie à vocation essentiellement numérique, algébrique.

La mathématique indienne

En Inde, l'activité scientifique, qui a un caractère sacré, commence dès le milieu du second millénaire avant J.-C. Bien que nous ne possédions aucun traité spécial de mathématiques qui remonte aux périodes les plus anciennes (c'est-à-dire surtout védique et brahmanique), la langue védique apparaît déjà familiarisée avec le maniement des grands nombres : puissances de 10 jusqu'à 10^{23}. Les indications que nous possédons concernent la géométrie, science indispensable pour la construction des autels védiques. Les Çulva-sûtra, ou « aphorismes sur les cordeaux », sont spécialement consacrés aux règles de construction de ces autels ; ils remontent à 700 avant J.-C., mais ne nous sont connus que d'après des rédactions ultérieures, qui se situent aux alentours de l'an 300 de l'ère chrétienne. Là aussi, nous avons affaire à une géométrie numérique. La relation de Pythagore y intervient souvent sous la forme : « La corde transversale d'un rectangle produit (par construction sur elle d'un carré) ce que produisent séparément la longueur et la largeur. »

La *numération décimale* et le *zéro*, propagés par les Arabes, n'apparaissent pas en Inde avant le Moyen Age. Le *tableau* II donnera une idée de l'évolution de la notation numérique indienne ; on en retiendra essentiellement que c'est l'Inde qui a inventé le système de numération à 9 chiffres et zéro, qui est devenu universel.

C'est très tôt, au contraire, que la mathématique indienne connaît les approximations, trait qu'elle partage avec la mathématique babylonienne ; ainsi $\sqrt{2}$ s'évalue de la façon suivante : $1 + \frac{1}{3} + \frac{1}{3 \cdot 4} - \frac{1}{3 \cdot 4 \cdot 34} = 1{,}414\ 2$

On trouve aussi : $\pi \simeq \frac{62\ 832}{20\ 000} = 3{,}141\ 6$, exprimé sous la forme : « Soixante-deux mille huit cent trente-deux est approximativement la circonférence dont le diamètre est vingt mille. »

▶ *Tableau III : la numération chinoise de 1 à 10 établie à partir de documents datant de 1400 avant J.-C.*

La constitution d'une mathématique classique, impliquée dans des applications astronomiques, atteste, en algèbre, la capacité de résoudre par les fractions continues deux équations simultanées indéterminées du premier degré ; mais ce résultat, consigné dans l'*Aryabhatiyam* d'Aryabhata (mathématicien et astronome vivant vers 476 après J.-C.), est largement dépassé par l'astronome du VIIe siècle Brahmagupta, qui parvient à une méthode pour trouver les solutions entières d'une équation indéterminée du second degré.

La mathématique chinoise

Les textes de la Chine ancienne qui nous ont été conservés, gravés sur des os, sont souvent d'inspiration divinatoire. Des nombres y sont notés, mais on ne trouve pas de liste exhaustive pour les chiffres utilisés, non plus que l'indication d'opérations sur ces nombres. Certes, il s'agit de documents anciens, remontant jusqu'à 1400 avant J.-C. Leur étude permet cependant d'établir le *tableau* III qui donne les nombres de 1 à 10.

Mais on ne possède pas pour les époques anciennes de notation systématique, et nous ne savons pas comment étaient notés effectivement des nombres comme 16, 17, 18 ou 19. En revanche, on a une notation pour les dizaines et pour les centaines.

Il s'agit donc d'une numération qui ne groupe pas toujours unités simples et puissances de la base 10, et qui ne s'est pas bien libérée de la numération parlée, qu'elle ne fait souvent que transcrire.

Si l'usage des nombres en Chine remonte à la préhistoire, des opérations sur les nombres nous ne savons pas grand-chose avant le IIIe siècle de l'ère chrétienne. Addition et soustraction se font alors directement grâce à une représentation des nombres par de petits bâtonnets ou *jonchets* qui remplissent le même rôle que les *calculi* (petits cailloux) latins ; on les ajoute ou retranche colonne par colonne.

L'utilisation des jonchets sur une table permettait de figurer un nombre, rapporté comme on l'a indiqué à une base décimale, par une numération de position analogue à celle que nous employons actuellement avec nos chiffres arabes (*tableau* IV).

Pour multiplier, on posait le multiplicateur en haut et le multiplicande en bas de la tablette ; les produits partiels posés sur la ligne intermédiaire étaient additionnés au fur et à mesure de leur obtention. De façon analogue, la division était conduite en posant le diviseur tout en bas, le dividende sur la ligne moyenne, et le quotient en haut.

La géométrie ancienne chinoise ne nous est connue que par les écrits de l'école de Mo Ti, qui définissent le point et la droite. Ailleurs, on ne se préoccupe que du calcul des

Tableau III - Système de numération chinoise ancienne

Ecriture courante en chiffres arabes	Nombres cardinaux		
	Ecriture	Prononciation	
		ancienne	moderne
1	一	?iět	yi
2	二	ni'	eul
3	三	sâm	san
4	四	si'	sseu
5	五	'ngo	wou
6	六	liuk	liu
7	七	ts'iět	ts'i
8	八	pat	pa
9	九	'kiŏu	kieou
10	十	žiŏp	che

surfaces. Toutefois, des exemples simples de nombres pythagoriques (3, 4, 5, la somme des carrés de 3 et de 4 étant égale au carré de 5) apparaissent, de même qu'une grossière évaluation de π (= 3).

A l'époque des Han (de 202 avant J.-C. à 220 de l'ère chrétienne), apparaissent des traités de calcul, avec une arithmétique concrète des nombres rationnels et irrationnels approchés, des équations linéaires à coefficients numériques, et le plus remarquable des systèmes de n équations linéaires à n inconnues, constituées en calcul algébrique sur l'échiquier, et dont voici un exemple pour le cas $n = 3$:

$$\begin{aligned} x + 2y + 3z &= 26 \\ 2x + 3y + z &= 34 \\ 3x + 2y + z &= 39 \end{aligned}$$

Cet exemple est représenté matriciellement par la *figure* 9.

La résolution était donc faite par manipulation de jonchets, avec des jonchets de couleur pour les nombres positifs (« corrects ») et des jonchets noirs pour les nombres négatifs (« trompeurs »).

La mathématique maya

La civilisation maya a connu un système de numération positionnelle, de base 20. Les unités de 1 à 4 étaient notées par des points, ainsi que les vingtaines, et certains autres nombres comme 400 (20 × 20), 8 000 (400 × 20), etc. ; cinq et ses multiples étaient notés par des barres. Les nombres 560 (28 × 20) et 7 200 (360 × 20) sont remarquables parce qu'ils sont au principe de la partition de l'année maya en 18 mois de 20 jours, auxquels on ajoutait un complément annuel de 5 jours.

Conclusion

Le caractère général de toutes les mathématiques que nous venons de considérer rapidement, chacune replacée dans son aire culturelle spécifique, est double : il s'agit d'une mathématique toujours à la fois *utilitaire* et *sacrée*. La géométrie des Égyptiens est ainsi née entre les mains des harpédonaptes, de ceux qui « attachent le cordeau », c'est-à-dire les arpenteurs.

Mais ces arpenteurs étaient surtout préoccupés par le problème de l'*orientation* des temples, en relation étroite avec la religion égyptienne. L'arpentage lui-même est, en fin de compte, l'œuvre des prêtres ; pratique rituelle et pratique manuelle ou concrète sont intimement associées. De manière générale, dans chacune de ces civilisations anciennes, la pensée mathématique était conçue, et c'est peut-être tout à leur honneur, de façon à s'inscrire strictement dans l'horizon propre de leur culture, de leur vision du monde, de l'idée qu'elles se font des rapports de l'homme et du monde, avec tout ce que cela comporte d'imbrications mutuelles entre le rite, la pratique et cet outil qu'est le calcul.

Tableau IV

Ecriture courante en chiffres arabes	Chiffres en jonchets	Troncs célestes (ordinaux)		
		Ecriture	Prononciation	
			ancienne	moderne
1	I	甲	kap	kia
2	II	乙	?iět	yi
3	III	丙	püAng	ping
4	IIII	丁	tieng	ting
5	X	戊	mŏu'	meou
6	T	己	'ki	ki
7	$\overline{\text{II}}$	庚	kɛng	keng
8	$\overline{\text{III}}$	辛	siĕn	sin
9	$\overline{\text{IIII}}$	壬	'ñiĕn	jen
10	—	癸	'kwi	kouei

◄ *Tableau IV :* ***la représentation des nombres se faisait au moyen de petits bâtonnets ou jonchets.***

La mathématique grecque

Il est admis qu'avec la mathématique grecque, c'est l'idée d'une science autonome qui s'affirme, une science vivant de sa vie propre, *dégagée des techniques et des rites,* capable de se définir, de se distinguer, de se concevoir, au sens propre d'une *théorie*.

Mais cette mathématique ne s'est pas constituée telle quelle d'un seul coup.

Les commencements de la mathématique

Ils remontent à la fondation, généralement attribuée à Thalès, de l'**école de Milet.** Thalès aurait vécu à la fin du VII^e siècle et au début du VI^e, environ de 639 à 546 av. J.-C. On raconte qu'il avait prédit une éclipse solaire, indiqué, le premier, la cause des éclipses, esquissé une première explication rationnelle de l'Univers en le réduisant à un élément unique : l'eau, génératrice des autres éléments. Si l'on en croit la tradition, Thalès aurait rapporté les premières connaissances mathématiques de ses voyages en Égypte. Proclus rapporte que « Thalès, le premier, ayant été en Égypte, en rapporta cette théorie [la géométrie] dans l'Hellade ; lui-même fit plusieurs découvertes et mit ses successeurs sur la voie de plusieurs autres, par ses tentatives, tantôt plus générales, tantôt plus restreintes au concret ».

Une autre tradition, qui remonte à Eudème mais est souvent reprise après lui, lui attribue la solution des problèmes géodésiques suivants : calcul de la distance d'un navire à la côte et calcul de la hauteur d'une pyramide d'après l'ombre portée.

Ce qui est certain, c'est qu'à l'époque de Thalès, on devait disposer du *concept d'angle,* élaboré probablement en Grèce. L'attribution à Thalès des propositions d'après lesquelles le diamètre partage le cercle en deux parties égales, les angles à la base d'un triangle isocèle sont égaux, les angles opposés par le sommet égaux et l'angle inscrit dans le demi-cercle droit, est très plausible. Ces propositions correspondent respectivement à la définition 17 et aux propositions 5, 15 et 31 du premier livre d'Euclide.

Ainsi, Thalès s'est occupé avant tout des propriétés des angles, et la rupture qu'il a opérée avec la tradition égyptienne consiste essentiellement en ce qu'il a créé ce qu'on pourrait appeler une *géométrie de la ligne,* par opposition à la géométrie égyptienne, si absorbée par le calcul des aires. « Thalès, écrit Diogène, développe tout ce qui touche à la considération des lignes », ou, comme dira Apulée, des « petites lignes », c'est-à-dire que Thalès développe une étude géométrique sur figures, et non plus sur le terrain, centrée sur le *concept de similitude,* dont Bruins nous dit qu'on peut vainement le chercher dans une mathématique aussi développée que celle des Babyloniens.

Quoi qu'il en soit, le nom de Thalès reste attaché à la première mathématique qui avait pris son essor sous l'égide philosophique de la fameuse école de Milet.

Celle-ci fut suivie par l'**école des Ioniens,** aux destinées de laquelle présidait Pythagore. D'après Proclus, qui s'autorisait du témoignage d'Eudème, c'est Pythagore qui transforma la géométrie par un « enseignement libéral », et rechercha les théorèmes abstraitement et par l'intelligence pure. Pythagore est resté célèbre par sa doctrine qui enseignait que « toutes choses sont nombres », principe en lequel se résume le pythagorisme, et qui traduit toute son ambition : exprimer en formules arithmétiques tous les phénomènes. Nonobstant les aberrantes exagérations auxquelles elle a donné lieu, cette ambition valut à l'arithmétique pythagoricienne de s'élever au rang privilégié d'une science à *caractère spéculatif.* En effet, avant de dire que les choses s'expriment par des nombres, le pythagorisme avait commencé par considérer les nombres eux-mêmes comme des réalités tangibles et intelligibles. Nous verrons comment les pythagoriciens figuraient les nombres, après que nous aurons dit un mot de la numération grecque.

La numération grecque

La numération grecque a procédé de deux systèmes.

● Le *système hérodien,* attesté dès 554 avant J.-C., ressemble au système romain que nous connaissons et présente les mêmes inconvénients que lui : il ne se prête pas à l'expression d'une arithmétique un peu avancée.

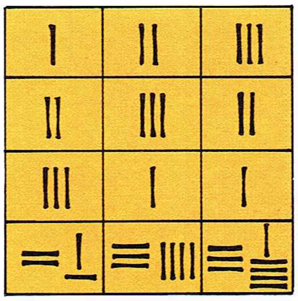

Richard Colin

▲ ***Figure 9 : représentation matricielle d'un système de 3 équations à 3 inconnues, dont la résolution se faisait par manipulation de jonchets.***

Snark International

▲ ***L'école de Pythagore, à Croton, d'après une gravure du XIX^e^ siècle.***

1 = I	10 = Δ	50 = Π (Δ)
2 = II	100 = H	5 000 = Π (X)
3 = III	1 000 = X	
5 = Π	10 000 = M	

● Le *système milésien,* né vers le milieu du V^e^ siècle, est plus propre à l'usage savant. Il emploie l'alphabet grec, augmenté, pour les besoins de la cause, de trois lettres auxiliaires anciennes : ϛ ϟ et ϡ.

1 = α̅	10 = ι̅	100 = ρ̅
2 = β̅	20 = κ̅	200 = σ̅
3 = γ̅	30 = λ̅	300 = τ̅
4 = δ̅	40 = μ̅	400 = υ̅
5 = ε̅	50 = ν̅	500 = φ̅
6 = ϛ	60 = ξ̅	600 = χ̅
7 = ζ̅	70 = ο̅	700 = ψ̅
8 = η̅	80 = π̅	800 = ω̅
9 = θ̅	90 = ϟ	900 = ϡ

Ce système a subi des modifications qui lui ont permis d'exprimer de très grands nombres : dans *l'Arénaire* d'Archimède, on considère, par exemple, le nombre $10^8 \cdot 10^8$. Pourtant, ce n'est pas par l'amélioration de l'écriture numérique que les Grecs ont marqué l'arithmétique : ils ne sont parvenus ni à un système positionnel pur, ni à l'adoption systématique et fructueuse du zéro. Leur originalité est ailleurs, et s'affirme, précisément, dès Pythagore.

L'arithmo-géométrie des pythagoriciens

L'école pythagoricienne était située à Croton, en Italie du Sud (580-501 avant J.-C.). L'enseignement, réservé aux « initiés », était oral et n'a pas laissé de trace écrite. Nous connaissons l'œuvre des pythagoriciens par des écrits postérieurs, de Platon et d'Hérodote notamment.

Les découvertes attribuées à cette école convergent pour établir que c'est là qu'est née l'idée de remonter aux principes supérieurs et de démontrer abstraitement, c'est-à-dire en usant de procédés purement discursifs.

La distinction entre nombres pairs et impairs s'effectue alors, ainsi que le classement des nombres d'après des propriétés *arithmo-géométriques,* c'est-à-dire d'après une architecture discontinue des unités-points. La reconnaissance des *nombres parfaits* manifeste ainsi la structure interne des nombres par l'observation des propriétés des figures qui les représentent, et s'accompagne de l'indication explicite de procédés opératoires permettant de composer les nombres entiers selon une *loi.* Les nombres, points ou cailloux sur le sable, sont ainsi *classés* selon l'arrangement des points ou cailloux. On distingue ainsi plusieurs types.

● Les *nombres triangulaires,* qui sont les exemples les plus simples de séries arithmétiques finies. 1, 3, 6, 10, par exemple, sont des nombres triangulaires :

1 3 6 10

On connaît les cas particuliers simples de la loi que nous exprimons aujourd'hui par :

$$1 + 2 + 3 + ... + n = \frac{n\,(n+1)}{2}$$

● Les *nombres carrés,* tels 1, 4, 9, 16, etc.

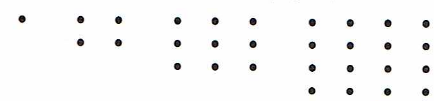

1 4 9 16

Les carrés sont des sommes de nombres impairs, par exemple : $9 = 1 + 3 + 5$; $16 = 1 + 3 + 5 + 7$; bref, on connaît des cas particuliers de la loi :

$$1 + 3 + 5 + ... + (2n - 1) = n^2$$

On voit aussi que tout nombre impair est l'expression de la différence entre deux carrés ayant respectivement pour côtés deux entiers consécutifs :

$$5 = 3^2 - 2^2,\ \ 7 = 4^2 - 3^2, \text{ etc.}$$

Le passage d'un carré au suivant s'effectuait concrètement chez les pythagoriciens à l'aide du *gnomon* (dont le terme est emprunté aux Babyloniens), et que l'on peut représenter par la figure formée par les points supplémentaires sur le schéma ci-dessous :

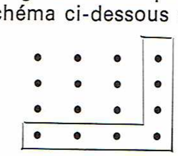

● Les *nombres hétéromèques* ou *rectangulaires :* deux nombres sont dits hétéromèques quand leur différence est égale à 1.

On sait que la somme des nombres pairs consécutifs est le produit de deux nombres hétéromèques, c'est-à-dire qu'on connaît des expressions particulières de la loi :

$$2 + 4 + 6 + ... + 2n = n\,(n - 1) ;$$

pour $n = 3$, on a la représentation suivante :

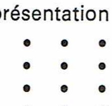

● Les *nombres polygonaux :* pentagonaux, hexagonaux, etc.

Nombres pentagonaux : 1, 5, 12, 22, ... le n-ième étant $\frac{3n^2 - n}{2}$:

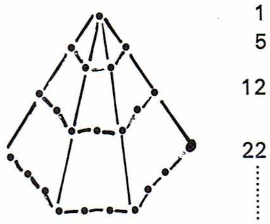

Nombres hexagonaux : 1, 6, 15, 28, ... le n-ième étant $2n^2 - n$:

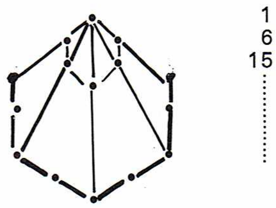

● Les *nombres parfaits* sont ceux qui sont égaux à la somme de leurs diviseurs ; par exemple :

$$6 = 1 + 2 + 3; \quad 28 = 1 + 2 + 4 + 7 + 14$$

Les nombres composés (= non premiers) et non parfaits sont dits *oblongs*.

● Le *concept de moyenne harmonique* qu'Archytas définissait comme « la *médiété* (on appelle médiété une progression de trois termes tels que deux d'entre eux et deux de leurs différences soient dans le même rapport) dont les trois termes sont tels que, quelle que soit la partie de lui-même dont le premier dépasse le second, le second surpasse le troisième de la même partie de ce troisième ». Autrement dit, si la différence du moyen au petit terme est une fraction donnée du petit terme, il faut que la différence du moyen au grand soit égale à la même fraction du grand terme ; par exemple, 6, 4 et 3 forment une médiété harmonique, puisque 4 surpasse 3 du tiers de 3 et est surpassé par 6 du tiers de 6.

Plus généralement, pour trois nombres a, b, c tels que $a > b > c$, on a une médiété harmonique si :

$$\frac{1}{c} - \frac{1}{b} = \frac{1}{b} - \frac{1}{a}$$

L'origine de la dénomination « harmonique » est musicale. C'est un témoin des anciennes expériences pythagoriciennes sur l'instrument de musique dénommé « monocorde », qui ont conduit l'école pythagoricienne à établir une correspondance entre les nombres et les sons, c'est-à-dire à établir les lois numériques de la musique. Sont également connus les concepts de moyenne arithmétique et de moyenne géométrique.

● Le *théorème de Pythagore* appartient au fonds le plus ancien de la mathématique démonstrative, et c'est le chef-d'œuvre, précisément, de l'école pythagoricienne que d'en avoir donné une démonstration, qu'il est peut-être hasardeux d'identifier avec celle d'Euclide (*Éléments*, livre I, propos. 47). Or, pour démontrer que « dans les triangles rectangles le carré du côté qui soutient l'angle droit est égal au carré des côtés comprenant l'angle droit », on se heurte au problème de la *duplication du carré*, et, par là, aux irrationnels.

● En effet, le cas particulier du triangle rectangle isocèle, moitié du carré considéré, et qui donne la solution de la duplication, fait découvrir l'*incommensurabilité de la diagonale du carré* à son côté. Sans doute les pythagoriciens ont-ils aussi été mis sur la voie par leur manipulation de triplets de nombres tels que (3, 4, 5), ou plus généralement tels que $\left(m, \frac{m^2 - 1}{2}, \frac{m^2 + 1}{2}\right)$, avec m impair, qui ont la propriété remarquable de vérifier le théorème de Pythagore : le carré du troisième nombre est égal à la somme des carrés des deux premiers. C'est un des plus beaux événements de la mathématique de toujours que le changement d'orientation induit par cette découverte : au lieu de calculer une valeur approchée de la mesure de la diagonale, on en a *démontré* l'incommensurabilité par rapport au côté. La démonstration procède, selon Aristote, par une réduction à l'absurde, en s'appuyant essentiellement sur la partition des nombres en pairs et impairs. « Ils prouvent, dit Aristote, que le diamètre du carré est incommensurable au côté, en montrant que s'il lui était commensurable, un nombre impair serait égal à un nombre pair. » Notons que cette preuve ne se trouve que dans les *versions tardives* du texte d'Euclide (livre X, propos. 117), et soulignons aussi que cette preuve indirecte, ou apagogique, qui n'est pas l'unique façon de démontrer l'irrationalité de la racine carrée de 2 (mesure de la diagonale du carré de côté 1), constitue un type de raisonnement employé pour la première fois par les philosophes éléates, Zénon et Parménide. (Sur les rapports de la philosophie éléatique et des mathématiques grecques, voir *Mathématiques et philosophie*.)

La géométrie des pythagoriciens est moins riche que leur arithmétique ; ils ont élaboré un segment de la théorie de la similitude, et on leur attribue également le théorème sur la somme des angles d'un triangle et certaines propositions sur les polygones réguliers (livres II et VI d'Euclide).

Les trois grands problèmes

L'école pythagoricienne fut suivie par d'autres écoles : en particulier celle des sophistes, première école athénienne, l'Académie de Platon (Ve siècle avant J.-C.) et celle d'Eudoxe.

Au Ve siècle, la mathématique grecque est d'abord dominée par ce qu'on a coutume d'appeler les *trois grands problèmes*, dont une solution satisfaisante ne pourra être donnée avant le XIXe siècle.

● Le premier problème est celui de la *quadrature du cercle*. La tradition veut que ce soit Anaxagore de Clazomènes qui aurait, dans la solitude de sa prison (il avait été accusé d'impiété), réfléchi au rapport entre l'aire du cercle et celle du carré, inscrit ou circonscrit. Après lui, Antiphon le Sophiste considère des polygones inscrits dans le cercle, Brison, des polygones inscrits et circonscrits, si bien que leur tentative de résoudre le problème de la quadrature du cercle aboutit à assimiler le cercle à un polygone régulier ayant un nombre infini de côtés : c'est la première porte ouverte aux considérations infinitésimales. Mais le problème ne se précise qu'avec les grands maîtres : Hippocrate de Chios, Eudoxe et Archimède.

● Le deuxième problème est celui de la *duplication du cube*, où l'on demande de construire un cube dont le volume est double de celui d'un volume donné, ou plus généralement un cube de même volume qu'un parallélépipède donné. L'oracle de Délos, dit la légende, ayant ordonné aux habitants de doubler l'autel du dieu, ceux-ci se seraient adressés aux géomètres. Hippocrate de Chios, si connu pour son traité sur les lunules, fut le premier à s'apercevoir que la solution revenait à trouver deux moyennes proportionnelles, en proportion continue entre deux lignes droites, dont la plus grande est le double de la plus petite, « en sorte que l'embarras fut changé en un autre » ! Autrement dit, à la recherche d'une grandeur inconnue x telle que $x^3 = abc$ (longueur, largeur et hauteur du parallélépipède), Hippocrate substitue la recherche de deux grandeurs inconnues x et y telles que :

$$\frac{a}{x} = \frac{x}{y} = \frac{y}{b}$$

Archytas donne une solution géométrique (dans l'espace à 3 dimensions) de ce problème et Ménechme, disciple d'Eudoxe, le résout par la méthode des intersections de coniques, en utilisant les paraboles :

$$x^2 = ay, \; y^2 = bx,$$

et l'hyperbole $xy = ab$.

● La *trisection de l'angle* constitue le dernier de ces problèmes classiques. La trisection, à la règle et au compas, de l'angle droit ne fait pas difficulté (*Euclide*, I, 1) ; celle d'un angle obtus, décomposable en un droit et un aigu, est possible à condition de savoir faire celle d'un angle aigu ; et c'est là qu'est le problème. Hippias d'Élis en donna une solution, en inventant la *quadratrice*, qui est une courbe transcendante, non constructible à la règle et au compas (*fig.* 10).

Soit le carré ABCD, de côté a, BD l'arc de cercle de rayon a. Si AD, animé d'un mouvement uniforme autour de A, balaie l'angle droit $\widehat{DAB}$, alors que DC, en restant parallèle à sa direction, se déplace uniformément vers AB, une courbe DQ est engendrée, dont le point M est tel que :

▼ ***Figure 10 :* *représentation schématique du problème de la* trisection de l'angle.**

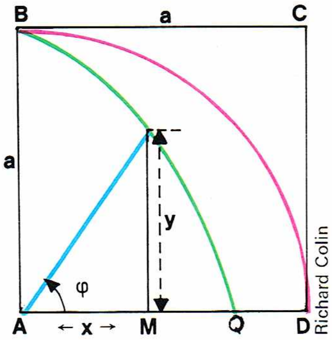

▲ ***Euclide présentant ses* Éléments *à Ptolémée Ier, d'après une gravure du XIXe siècle.***

$$\text{cotg}\ \varphi = \frac{x}{y}.$$

Comme $\frac{y}{a} = \varphi \Big/ \frac{\pi}{2}$ $\quad \frac{\varphi_1}{\varphi_2} = \frac{y_1}{y_2}$. Si bien qu'à la division de l'ordonnée $y =$ PM en n parties égales correspond celle de l'angle φ en autant de parties égales. [L'équation de cette transcendante est $x = y \cdot \text{cotg}\ \frac{(\pi y)}{2a}$].

Outre ces fameux problèmes, les Grecs ont créé l'étude des *sections coniques*. Ménechme les avait utilisées pour le problème de Délos ; mais c'est Éristée (350 avant J.-C.) qui sut engendrer l'ellipse, l'hyperbole et la parabole, et qui a inspiré directement Euclide. Apollonios de Perga (fin du IIIe siècle) a introduit les termes d'hyperbole, de parabole, et d'ellipse, tandis qu'Aristée et Archimède parlent de section du cône à angle aigu (ellipse), section du cône à angle droit (parabole), et section du cône à angle obtus (hyperbole). Aristée a écrit un ouvrage sur les coniques dont Pappus nous a gardé la mémoire, tandis qu'un traité d'Euclide sur le même sujet est perdu ; mais les travaux d'Archimède et d'Apollonios (8 livres sur les *Coniques*) généralisent et systématisent les résultats de leurs prédécesseurs ; en particulier, le 5e livre des *Coniques* est, avec le livre V des *Éléments* d'Euclide, la lettre sur la *Méthode* et le traité *Des spirales* d'Archimède, un des principaux chefs-d'œuvre de la géométrie grecque.

Cependant, avec ces grands noms, nous abordons la période hellénistique.

La mathématique hellénistique

On n'aurait pu mesurer à sa juste valeur tout le travail qui s'est accompli durant cette première période dont nous venons de parler, s'il n'avait abouti à ce monument euclidien qui résume aussi bien l'œuvre technique de découverte que l'œuvre méthodique d'enchaînement et de démonstration entreprises de Thalès à Eudoxe.

● *Euclide*

On sait peu de chose sur sa vie qui se situerait à Alexandrie de 365 à 300 avant J.-C. Le néo-platonicien Proclus, qui a écrit un important commentaire des *Éléments*, nous rapporte qu'Euclide avait répondu à Ptolémée Ier, qui lui avait demandé s'il n'y avait pas vers la géométrie de route plus courte que celle des *Éléments :* « Il n'y a pas de voie royale en géométrie. » Proclus nous assure aussi qu'Euclide avait ordonné et rendu cohérente une matière mathématique prête depuis Eudoxe, en complétant, entre autres, les trouvailles de Théétète et en donnant des preuves inattaquables pour nombre de propositions sans rigueur avant lui.

Les *Éléments* achèvent donc le travail fondateur des premiers mathématiciens grecs, dont les noms ne sont jamais rappelés dans cet édifice à caractère plus théorique qu'historique, au style rigoureusement démonstratif, à la portée essentiellement méthodique, à l'ambition fondatrice. Toutefois, sous l'habillage logique transparaît la *variété de l'inspiration :* les *Éléments* véhiculent, en effet, des traces de l'ancien pythagorisme et trahissent les états des discussions sur les concepts des mathématiques, et sans doute aussi sur l'idée de démonstration.

Les premiers livres (I, II, III et IV), d'inspiration pythagoricienne, traitent de la géométrie du plan. Le premier, qui étudie les triangles, les droites parallèles, les aires des parallélogrammes et des triangles, contient la démonstration du fameux *théorème de Pythagore* (propos. 47 et 48) ; les trois autres contiennent respectivement des énoncés d'arithmétique algébrique appliqués à des figures géométriques, la géométrie du cercle et l'étude des polygones à 3, 4, 5, 6 et 15 côtés.

La *notion de similitude* n'apparaît qu'au livre V, qui traite de la *théorie des proportions*. Il s'agit alors d'une mathématique issue de la réforme d'Eudoxe, et donc décalée d'environ deux siècles par rapport à celle des quatre premiers livres. La fameuse définition 5 de ce livre V signifie qu'après les entiers (ἀριθμοί) et les fractions (λόγοι) les irrationnels acquièrent droit de cité numérique sous forme de grandeurs (μόγετοι). Voici, retranscrite en langage moderne, cette définition : $\frac{a}{b} = \frac{c}{d}$ si et seulement si pour tout couple (m, n) d'entiers quelconques

$$ma > nb \rightarrow mc > nd$$
$$ma = nb \rightarrow mc = nd$$
$$ma < nb \rightarrow mc < nd$$

Il faut aussi mentionner que la définition 4 énonce l'*axiome d'Eudoxe*, plus connu sous le nom d'*axiome d'Archimède*, qui postule que deux grandeurs sont toujours comparables. Ce livre V, dont le contenu n'a été vraiment assimilé dans toute sa généralité et dépassé que depuis un siècle à peine, restera un des sommets de la pensée mathématique de tous les temps.

Le livre VI est important mais plus élémentaire ; c'est une application du livre V à des problèmes géométriques ; il contient notamment le *théorème de similitude*, improprement appelé *théorème de Thalès*.

Avec le livre VII, commence la 3e partie des *Éléments*, la partie arithmétique qui se prolonge jusqu'au livre X et constitue le premier traité, le plus rigoureux jusqu'à Gauss, de théorie des nombres. Le livre VII applique la théorie des proportions aux nombres entiers, et utilise, pour la première fois, le procédé appelé « algorithme d'Euclide » pour trouver la plus grande commune mesure de deux nombres. S'y trouvent aussi des propositions sur les nombres premiers entre eux et sur le plus petit commun multiple de deux nombres.

Le livre VIII établit une théorie des puissances entières des fractions.

Le livre IX contient, à côté de propositions sur le pair et l'impair, le théorème remarquable qui établit qu'il y a une infinité de nombres premiers.

Le livre X, célèbre, est consacré à la théorie des irrationnels ; c'est partiellement un héritage de Théétète et

fig. 11

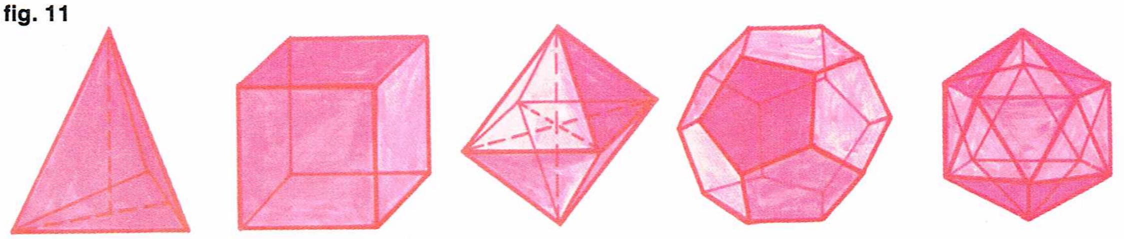

Richard Colin

◀ *Figure 11 : les cinq polyèdres réguliers, dont traite le dernier livre des* Éléments.

d'Eudoxe, et qui les dépasse pour ce qui est de la minutie et de la rigueur. La première proposition fonde la méthode d'exhaustion, puis, après quelques applications de l'algorithme d'Euclide, est exposée une théorie des expressions de la forme $\sqrt{\sqrt{a} + \sqrt{b}}$. Cette proposition a un rapport étroit à l'axiome de mesurabilité (ou axiome d'Archimède). La voici dans sa formulation euclidienne : « Deux grandeurs inégales étant données, si on retranche de la plus grande une partie plus grande que sa moitié, si l'on retranche du reste une partie plus grande que sa moitié, et si l'on fait toujours la même chose, il restera une certaine grandeur, qui sera plus petite que la plus petite des grandeurs proposées. » C'est-à-dire en langage moderne : pour 2 réels a et b tels que $a > b > 0$ et pour une suite a_i, $i = 1, 2, ..., n$ et $a_i \leqslant \frac{1}{2}$ pour tout i, il existe k tel que :

$$a \cdot a_i \cdot ... \cdot a_{ik} < b.$$

Les trois derniers livres sont consacrés à la stéréométrie, ou géométrie de l'espace ; on y trouve les définitions du cône, de la sphère, du cylindre, données cinématiquement, alors que les livres de géométrie plane excluaient tout recours au mouvement. On y trouve encore l'étude, par des procédés infinitésimaux, qui, selon Archimède, remontent à Eudoxe, des aires de cercles, des volumes de pyramides, cônes, cylindres ou sphères. La technique de démonstration est la méthode d'exhaustion. Enfin, le dernier livre traite des cinq polyèdres réguliers (*fig.* 11).

Avec les *Éléments* apparaît la *méthode axiomatique*. Celle-ci, longtemps attribuée à l'influence de la théorie aristotélicienne de la démonstration (*Analytiques* II), semble plutôt répondre à la nécessité de « fermer » le discours mathématique, par des stipulations qui, soit répondent aux défis des dialecticiens, soit limitent l'investigation aux seuls domaines maîtrisés et où les êtres mathématiques aient un sens précis. Ainsi l'axiome : « Le tout est plus grand que la partie », aurait pour fonction d'exclure les spéculations dialectiques sur l'infini dans la mesure ou le nombre, tandis que le fameux axiome géométrique dit des parallèles permet la considération (abstraite) d'un espace infini.

● *Archimède de Syracuse*

L'œuvre de ce mathématicien, tué en 212 par un soldat romain, lors du sac de Syracuse, se distingue, dans la mathématique ancienne, par les considérations qui la rapprochent du calcul infinitésimal des modernes. Voici, dans l'ordre chronologique, la liste des ouvrages d'Archimède qui nous sont parvenus :

— *De l'équilibre des plans* (premier livre).
— *La Quadrature de la parabole.*
— *De l'équilibre des plans* (second livre).
— *De la sphère et du cylindre* (deux livres).
— *Des spirales.*
— *Sur les conoïdes et les sphéroïdes.*
— *Sur les corps flottants* (deux livres).
— *La Mesure du cercle.*
— *L'Arénaire.*
— *De la méthode* (lettre à Ératosthène découverte au début de ce siècle).

Deux traits principaux caractérisent le génie d'Archimède : son attention à la technique dont il sait tirer un parti théorique (la statique, par exemple, lui inspire certaines découvertes géométriques), et sa conception du continu comme somme d'une infinité d'indivisibles : une aire est une somme de segments rectilignes très petits, un volume une somme de sections planes.

Dans *la Quadrature de la parabole,* il montre ainsi que le segment de parabole, encadré par deux séries de trapèzes respectivement inscrits et circonscrits, n'est ni supérieur ni inférieur aux 4/3 du triangle ABC, et donc leur est égal (*fig.* 12).

Dans *De la sphère et du cylindre,* il établit que la surface latérale d'un cône ou d'un cylindre droit doit être supérieure à celle d'une pyramide ou d'un prisme circonscrit, et s'attaque (dans le livre II) à des problèmes comme de trouver une sphère de même volume qu'un cône ou qu'un cylindre donné. Il y parvient en ramenant la question à l'insertion de deux moyennes proportionnelles entre deux longueurs données, méthode sans doute courante à l'époque, quoiqu'elle ne s'inscrive pas dans le cadre des constructions possibles à la règle et au compas.

Il faut souligner qu'Archimède fait précéder ses résultats de l'énoncé d'*axiomes,* dont le célèbre *postulat d'Archimède* ou *axiome de mesurabilité* et la définition de la droite comme le plus court chemin entre deux points.

L'axiome de mesurabilité, qui pose que, pour deux grandeurs quelconques a et b, il existe un entier positif n tel que, multipliée par ce nombre, la plus petite des grandeurs dépasse la plus grande, est utilisé dans le *Traité des conoïdes et sphéroïdes,* où apparaissent trois nouveaux corps de révolution : sphéroïde engendré par la rotation d'une ellipse autour d'un de ses axes, conoïde obtusangle engendré par la rotation d'une branche de l'hyperbole autour de son axe transversal et conoïde rectangle engendré par la rotation d'une parabole autour de son axe. C'est dans cet ouvrage que l'application de la méthode d'exhaustion semble le plus proche du concept d'intégrale définie qui demeure implicite dans la variété des problèmes géométriques résolus.

fig. 12

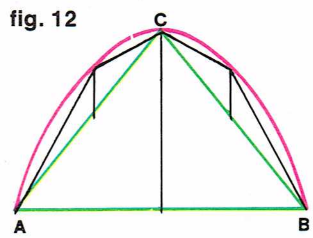

Richard Colin

▲ *Figure 12 : le problème de la* quadrature de la parabole *fait l'objet d'un des ouvrages d'Archimède qui nous sont parvenus.*

Le traité *Des spirales,* qui est l'étude d'une courbe définie cinématiquement, la spirale d'Archimède, contient une méthode remarquable pour la détermination de la tangente en un point à la courbe, qui en fait le plus ancien traité de calcul différentiel.

Dans *la Mesure du cercle,* on trouve la première approximation de π par un encadrement entre des bornes rationnelles :

$$3 \cdot \frac{10}{71} < \pi < 3 \cdot \frac{10}{70} \cong 3{,}14.$$

Enfin, dans *l'Arénaire,* se trouve un système de numération qui permet l'expression des très grands nombres, par exemple l'unité suivie de 800 millions de zéros, illustrée par le calcul d'un nombre supérieur à celui des grains de sable contenus dans la sphère des fixes.

● *Apollonios de Perga*

Apollonios (fin du III^e^ siècle-début du II^e^) est surtout connu par son fameux traité sur les *Coniques* (dont il a déjà été question ici), partiellement conservé en grec et partiellement en arabe. D'autres travaux, fort nombreux, ne nous sont connus que par le commentaire de Pappus. Apollonios a systématisé et unifié l'étude des coniques, considérées comme sections d'un cône de révolution par un plan perpendiculaire à une de ses génératrices. Le livre V est un des principaux chefs-d'œuvre de la mathématique ancienne ; on y construit la normale en un point à une courbe, non pas comme perpendiculaire à la tangente en ce point, mais indépendamment d'elle, comme la distance la plus courte d'un point donné à la courbe. Il y a là un style d'inspiration si profonde que, pour la dépasser, il n'a pas suffi, comme on le croit trop souvent, de la géométrie cartésienne ; il y a fallu encore les notions, plus tardives, de transformation et d'éléments idéaux.

● *Diophante*

Au début du II^e^ siècle de l'ère chrétienne, les préoccupations calculatoires connurent un nouvel essor avec Nicomaque de Gérase (vers l'an 100), le très élémentaire

▶ *Page extraite d'un manuscrit persan du XV[e] siècle : la géométrie d'Euclide commentée par At-Tūsī (bibliothèque Millet, Istanbul).*

Théon de Smyrne, et surtout le grand Diophante (milieu du III[e] siècle), dont les *Arithmétiques* viennent tout juste de s'enrichir d'un manuscrit arabe contenant certains livres qu'on croyait perdus. On ne dispose pas à ce jour d'une édition scientifique de son œuvre connue. On dit que celle-ci résulte de la renaissance pythagoricienne du II[e] siècle, et on y voit aussi la continuation de la tradition des logisticiens pour qui le mot « nombre » avait un sens large, englobant l'inconnue des problèmes algébriques dont la solution peut être entière, fractionnaire, voire même irrationnelle. Mais, ce faisant, on suppose sur l'histoire de l'algèbre bien des choses qui sont loin d'être établies.

Il n'y a pas de doute, néanmoins, que Diophante résout des problèmes « indéterminés » du type : $x^3 + y^3 = x + y$. Bien que l'on appelle aujourd'hui équations diophantiennes des équations aux solutions entières : $ax + by = c$, on ne trouve chez lui que des équations de la forme : $x^2 - ay^2 = 1$ (appelées *équations de Pell*). La méthode de Diophante consiste à chercher des solutions particulières, en usant d'artifices qui n'ont jamais le caractère général des vraies méthodes algébriques, et qui souffrent du manque patent d'une notation adéquate, ce qui n'avait pas empêché leur auteur de s'attaquer à des problèmes vraiment difficiles.

● *Pappus*

Après Diophante, c'est Pappus (vers 320 de l'ère chrétienne) qui achève la période vraiment créatrice de la mathématique hellénistique, et grecque en général. On trouve notamment dans la *Collection mathématique* une généralisation du théorème de Pythagore, les théorèmes dits aujourd'hui de Guldin sur la relation entre les centres de gravité et les aires ou les volumes des corps de révolution, et le théorème dit de Pappus-Pascal. Puis vient la période des commentateurs : Proclus, qui a commenté Euclide, Eutocius, qui a commenté Archimède et Apollonios.

Conclusion

Quand on veut caractériser globalement la mathématique grecque, on dit que l'essentiel en est l'usage d'un raisonnement hypothético-déductif et des démonstrations. C'est dire qu'elle a inauguré une démarche qui, après avoir accepté un point de départ plus ou moins justifié, parcourt par ordre une série d'étapes, dont chacune doit être, de manière vérifiable, compatible avec le point de départ, et où tout nouvel apport de l'intuition est exclu. Méthode maintes et maintes fois évoquée dans les *Dialogues* de Platon, mais rarement de façon aussi précise que dans ce passage du *Phédon*, où Socrate nous dit que sa découverte essentielle consiste dans l'extension de cette méthode selon laquelle « après avoir dans chaque cas pris pour base une notion, celle qu'éventuellement je juge la plus forte, tout ce qui, selon moi, a consonance avec elle, je le pose comme étant vrai... tandis que si la consonance fait défaut, je pose que ce n'est point vrai » (*Phédon*, 100 b).

On a reproché pourtant à cette mathématique d'avoir insuffisamment élucidé les notions primitives, de ligne droite, par exemple, de surface, de rapports de grandeurs. Et on y a vu aussi une étude qualitative de la quantité, par opposition à l'esprit de la science classique, qui est une étude quantitative de la qualité.

La mathématique médiévale

La mathématique arabe

La civilisation brillante qui se développe, à la fin du VIII[e] siècle et au début du IX[e], sous l'impulsion unifiante de l'Islam, a fondu ensemble des courants de culture de toute origine, et d'abord des traditions mathématiques divergentes dont on n'aurait point auparavant imaginé la rencontre possible. Non seulement on rassemble avec enthousiasme l'héritage de l'Hellade, mais encore on l'enrichit du contenu de textes mathématiques néo-persans ou sanscrits. Une nuée de traducteurs donne en version arabe Euclide, Archimède, Ménélaus, Pappus, Ptolémée, si bien que l'on dispose souvent aujourd'hui de manuscrits arabes plus anciens que les textes grecs retrouvés, et que, si ceux-ci semblent irrémédiablement perdus, c'est aux traductions arabes que l'on s'adresse pour compléter ce que l'on sait de la mathématique grecque.

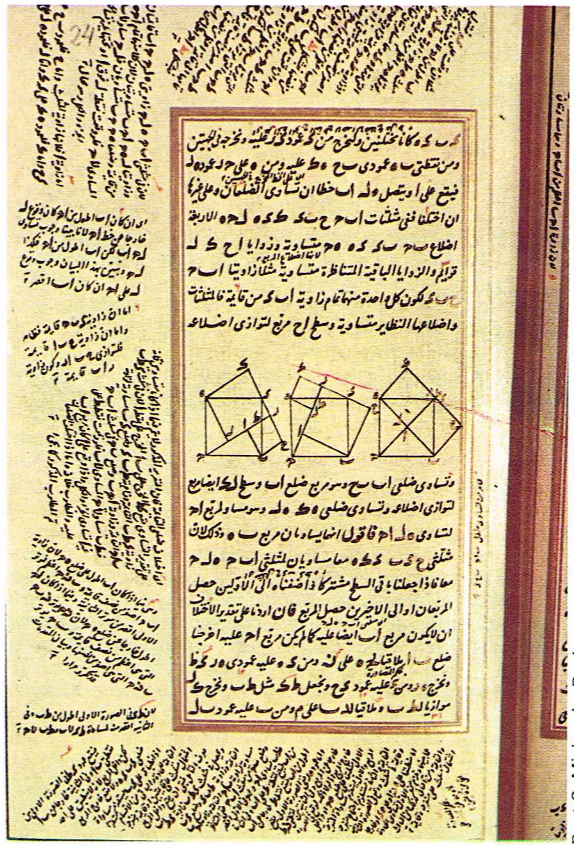

R. et S. Michaud - Rapho

Certes, bien des problèmes posés par ces faits sont de nature plutôt philologique. L'histoire des mathématiques arabes se réduirait à des questions de philologie si elle n'était que l'histoire de la transmission du savoir grec. Or, l'œuvre d'Al-Khawārizmi, par exemple, est si originale que les sources indiennes et grecques ne peuvent expliquer la nouveauté d'un horizon dont elles ne forment que des éléments, repensés et, pour ainsi dire, recréés.

Il est cependant trop tôt pour présenter un exposé de la mathématique arabe, dont l'étude se limite encore, la plupart du temps, à établir des listes de noms et de titres et à exploiter l'ample matière léguée par les polygraphes. Nous ne disposons pas encore d'une synthèse valable. Celle d'A. P. Juskewitsch (*Geschichte der Mathematik im Mittelalter* ou *Histoire de la mathématique au Moyen Age*, Leipzig, 1964) reste la meilleure, bien que les détails en soient souvent à revoir. Nous centrerons nos indications uniquement sur les points suivants :

— le commencement de l'algèbre ;
— les généralisations ;
— la naissance de la géométrie algébrique.

Le commencement de l'algèbre

Les débuts de la mathématique arabe sont liés au nom de Mohammed Ibn Moussa Al-Khawārizmi dont le manuel d'arithmétique (de 830 environ) nous est connu par une traduction latine du XII[e] siècle. C'est le premier manuel clairement fondé sur le principe de position. Il débute par une description du système de numération dite indienne, au moyen des symboles : 1, 2, 3, 4, 5, 6, ... 9, et du « petit cercle » qui sert à noter le zéro. Suit l'exposition des opérations arithmétiques sur les nombres entiers. Notons, sans entrer dans les détails, que ce manuel a joué un très grand rôle dans le développement de l'arithmétique.

Mais Al-Khawārizmi est surtout l'auteur du premier traité d'*Algèbre*. Immortalisé une première fois par son nom même qui, défiguré, sert à désigner un des concepts les plus anciens et les plus actuels de la mathématique : le concept d' « algorithme », il l'a été aussi une deuxième fois par le titre de son second ouvrage : *Al-jabr wal muqābala*, ce qui signifie « disposition et contraposition » en entendant par le premier mot le fait qu'une équation ne contient que des termes positifs et par le second le fait de soustraire des quantités égales de chaque côté du

R. et S. Michaud - Rapho

◀ ***Page extraite d'une traduction latine du XII^e siècle du* Traité d'algèbre d'Al-Khawārizmi *(Bibliothèque nationale, Vienne).***

signe =. La dénomination « algèbre » apparaît donc dans le titre et semble avoir été choisie pour désigner la branche des mathématiques où l'on calcule avec des lettres. L'ouvrage a exercé une grande influence sur les mathématiciens du Moyen Age. Malgré l'absence d'un symbolisme adéquat dont la fonction est remplie par les mots de la langue, Al-Khawārizmi atteint ici un degré de systématisation sans précédent ; toute équation du premier ou du second degré est ramenée à l'un des 6 types suivants :

1) $ax^2 = bx$	4) $ax^2 + bx = c$
2) $ax^2 = c$	5) $ax^2 + c = bx$
3) $bx = c$	6) $bx + c = ax^2$

La réduction à ces formes canoniques se faisait par l'*opération al-jabr* qui consiste à transporter dans l'un des membres de l'équation, sous forme de termes à additionner, les termes qui sont à soustraire dans l'autre membre, et par l'*opération al-muqābala* qui consiste à retrancher aux deux membres les termes égaux. Al-Khawārizmi indique les conditions d'existence des racines : les règles sont énoncées sur des exemples mais sous une forme générale ; certaines sont démontrées à l'aide de transformations géométriques. Cependant, il n'est question que des racines positives. L'ensemble tend vers la constitution d'un véritable calcul algébrique.

L'algèbre des équations du second degré fut, ensuite, développée par Abū Kāmil. Le traité de celui-ci ne contient déjà plus les applications géométriques que l'on trouvait dans celui d'Al-Khawārizmi. Mais le moment le plus important est celui où cette algèbre devient un objet mathématique propre, c'est-à-dire celui où les démonstrations ne recourent plus aux constructions géométriques ; c'est alors que se dessine un second mouvement dans l'histoire de l'algèbre arabe : une arithmétisation permettant d'opérer sur les inconnues par tous les moyens de l'arithmétique opérant sur les connues, selon le vœu de l'algébriste marocain As-Samaw' al.

Les généralisations

Cette généralisation est, en fait, précédée par l'œuvre du fameux Omar Khayyām, chez lequel l'idée de l'algèbre comme discipline autonome devient particulièrement manifeste. « L'algèbre, écrivait-il dans son ouvrage (1074), est un art scientifique. Son objet est : le nombre absolu et les grandeurs mesurables, étant inconnus, mais rapportés à quelque chose de connu de manière à pouvoir être déterminés ; cette chose connue est une quantité ou un rapport individuellement déterminé, ainsi qu'on le reconnaît en l'examinant attentivement ; ce qu'on cherche dans cet art, ce sont les relations qui joignent les données des problèmes à l'inconnue, qui de la manière susdite forme l'objet de l'algèbre. » Un objet conçu, comme on le voit, sans recours ni à la géométrie ni à l'arithmétique ; l'algèbre apparaît désormais comme une théorie des équations.

C'est pourquoi l'essentiel du travail d'Omar Khayyām consiste dans une classification des équations. Comme on doit distinguer des grandeurs numériques et des grandeurs continues, l'algèbre exige une solution numérique et une construction géométrique correspondant à l'équation. Khayyām montre ainsi qu'il y a une relation entre la solution par radicaux des équations du deuxième degré et la construction géométrique ; cela le conduit à s'apercevoir que la solution par radicaux des équations cubiques ne peut être trouvée, lacune qu'« un autre qui nous succédera comblera » ! Il expose alors la théorie géométrique des équations du troisième degré, puis dénombre 19 types d'équations canoniques à racines positives : 5 se réduisent à des équations quadratiques ou linéaires, 6 sont des trinômes, 7 des quadrinômes, et une correspond à l'équation binomiale $x^3 = a$. Il explique, en outre (pour la première fois, notent Juskewitsch et Rosenfeld), que les équations du troisième degré ne peuvent pas être résolues à l'aide des « propriétés du cercle », c'est-à-dire par des radicaux quadratiques. Dans ce domaine, la preuve, nous dit Khayyām, ne peut être fournie que par les propriétés des sections coniques. Descartes le répétera en 1637, et en 1837 c'est Wantzel qui le montrera.

L'extension du calcul algébrique, qui fut l'œuvre d'Al-Karaji et d'As-Samaw'al, donna enfin à la science algébrique toute sa spécificité. La théorie des équations se constitua par l'application progressive des différentes opérations de l'arithmétique aux termes et expressions algébriques. C'est ce que montre l'édition par M. M. Salah Ahmed et Roshdi Rashed (Damas, 1972) d'un manuscrit intitulé *Al-Bahir en algèbre*, dû à As-Samaw' al ; il en ressort que :

— Les algébristes arabes ont parfaitement défini les exposants négatifs et nuls, avant Chuquet et Stifel, et ont donc fait la première étude systématique des exposants algébriques. As-Samaw' al va plus loin que ses prédécesseurs, car il définit par induction $x^n = x^{n-1}x$, pour $n = 1, 2, 3, ...$; il étend la notion de puissance algébrique d'une quantité à son inverse, énonce la règle de multiplication et de division des puissances algébriques dans sa généralité, dégage explicitement l'idée d'addition algébrique des puissances, en exploitant, par la méthode des tableaux, l'isomorphisme de groupes entre $(\mathbb{Z}, +)$ et $(\{x^h ; x \in \mathbb{Z}\}, x)$.

— C'est sur cette base que peut s'édifier une théorie générale de la divisibilité des expressions algébriques, de l'approximation des fractions entières, de l'extraction de la racine des polynômes à coefficients rationnels, et de l'extension du calcul algébrique aux quantités irrationnelles algébriques. La question de savoir comment utiliser les instruments arithmétiques dans les quantités irrationnelles s'est même posée explicitement.

Naissance de la géométrie algébrique

Les problèmes posés par les équations du troisième et du quatrième degré ont sans doute orienté l'intérêt vers une géométrie algébrique. Les Arabes ont ainsi retrouvé la solution d'Archimède du problème que constitue la détermination de l'intersection d'une sphère par un plan, de sorte que le rapport des volumes des deux segments sphériques obtenus égale un rapport préalablement donné. On cite généralement Al-Mahānī pour avoir ramené ce problème à la résolution d'une équation du type :

$$x^3 + 2 = px^2,$$

et Ibn Al-Haytham pour l'avoir résolu par une construction géométrique représentant la grandeur x par l'abscisse du point d'intersection de deux sections coniques convenablement choisies.

C'est dans un traité réservé à la théorie des équations que Saraf-ed-Din At-Tūsī, persévérant dans cette voie, ébauche une géométrie algébrique par l'usage d'une méthode qui s'apparente à celle de Viète. At-Tūsī applique sa méthode des tableaux à la solution de l'équation

▶ *A gauche, page extraite d'un manuscrit de géométrie arabe datant du XIII[e] siècle (Bibliothèque universelle, Istanbul). A droite, page d'un livre de* Boèce *sur l'arithmétique et la géométrie, imprimé à Augsbourg en 1488.*

R. Michaud - Rapho

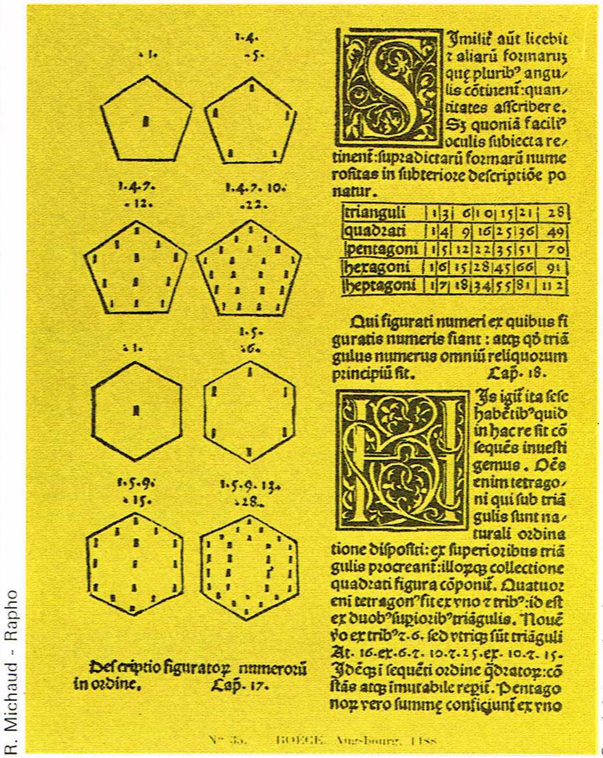

Similiter autem licebit et aliarum formarum que pluribus angulis cõtinentur: quantitates ascribere. Sed quoniam facilius oculis subiecta retinentur: supradictarum formarum numerositas in subteriore descriptiõe ponatur.

trianguli	1	3	6	10	15	21	28
quadrati	1	4	9	16	25	36	49
pentagoni	1	5	12	22	35	51	70
hexagoni	1	6	15	28	45	66	91
heptagoni	1	7	18	34	55	81	112

Qui figurati numeri ex quibus figuratis numeris fiant: atque quod triangulus numerus omnium reliquorum principium sit. Cap. 18.

His igitur ita sese habentibus quid in hac re sit cõsequens investigemus. Oẽs enim tetragoni qui sub triangulis sunt naturali ordinatione dispositi: ex superioribus triangulis procreantur: illorumque collectione quadrati figura cõponitur. Quatuor enim tetragonus fit ex uno et tribus: id est ex duobus superioribus triangulis. Novem vero ex tribus et 6. sed utrique sunt trianguli At. 16. ex. 6. et. 10. et. 25. ex. 10. et. 15. Idemque in sequenti ordine quadratorum cõstans atque immutabile reperitur. Pentagonorum vero summe consignuntur ex uno

Descriptio figuratorum numerorum in ordine. Cap. 17.

Snark International

$x^2 + a_1x = N$ (avec $a_1 \in Z$), et l'étend aux équations cubiques. L'exemple de la solution de l'équation : $x^3 - a_1x - a_2x - c = 0$ montre qu'en fait cette méthode s'applique à une fonction polynôme à coefficients rationnels (dans Z), et, par ailleurs, qu'elle véhicule implicitement la notion importante de dérivée. At-Tūsī, en effet, utilise systématiquement pour diviseurs des expressions qui correspondent algébriquement à la dérivée première; dès lors, la détermination de la racine entière positive d'une équation numérique par une méthode d'approximation véhicule aussi la notion de fonction. Du reste, dans la discussion de l'*existence des racines* des équations algébriques, la notion de dérivée apparaît nettement; At-Tūsī, en classant les équations, isole celles qui n'ont de racines que sous certaines conditions; pour les résoudre, il est conduit à étudier la valeur maximale des expressions algébriques, à prendre leur dérivée première, à l'annuler, puis à montrer que la racine de l'équation obtenue, substituée dans l'expression algébrique, donne le maximum cherché. Tout cela le met sur la voie des notions de « limite », de borne supérieure et borne inférieure des racines d'une équation, et, par suite, sur la voie d'une étude algébrique des courbes, de la découverte de la formule de Cardan, de la corrélation entre transformation affine, divisibilité et dérivée dans la solution d'une équation. D'où l'usage des équations des courbes dans la démonstration, par exemple, de l'intersection de la parabole et de l'hyperbole.

Ainsi, c'est chez les Arabes que l'arithmétique et l'algèbre se sont émancipées de la tutelle géométrique. Et c'est dans le cadre de cette émancipation qu'est née une algébrisation de la géométrie, c'est-à-dire une préfiguration de la géométrie algébrique. On peut aussi bien ajouter que la trigonométrie ne s'est développée comme discipline autonome qu'entre les mains des Arabes : c'est Al-Khawārizmi qui donne les premières tables de sinus, qui furent traduites en latin dès 1126, et le traité de At-Tūsi (*Traité du quadrilatère complet,* 1260) a exercé une influence considérable sur le développement de la trigonométrie.

Parmi bien d'autres prouesses de calcul sur lesquelles nous ne pouvons nous arrêter ici, nous ne retiendrons qu'une remarquable approximation de

$$\pi = 3{,}141\ 592\ 653\ 589\ 793\ 25,$$

un calcul original de la quadrature du segment de parabole, équivalent au calcul de l'intégrale $\int_0^a \sqrt{x}\, dx$, le calcul du volume de certains nouveaux corps de révolution obtenus par la rotation du segment de parabole limité par une corde et par le diamètre conjugué, autour de cette dernière droite, équivalent à l'intégration : $\int_0^a x^4\, dx$.

L'Occident médiéval

On ne trouvera rien d'aussi vivant dans la mathématique de l'Occident médiéval. Ou plutôt presque rien avant la constitution de la scolastique, c'est-à-dire avant la fondation des universités de Paris, de Bologne et d'Oxford. Dans le Haut Moyen Age, rares sont ceux qui, comme Boethius, se préoccupent de sauver et transmettre l'héritage ancien. La recrudescence de l'anarchie limite le développement scientifique, mais favorise l'application non scientifique des nombres aux textes sacrés, l'assimilation des distances entre les astres à une gamme musicale.

Il faut attendre les premiers contacts avec l'Islam pour retrouver des faits dignes d'attention. Gerbert (945-1003), archevêque de Reims, de Ravenne et pape en 999, sous le nom de Sylvestre II, a séjourné en Espagne de 967 à 969; c'est lui qui a diffusé en Europe les chiffres arabes, et il fut le premier, au témoignage de Guillaume de Malmesbury, à prendre l'abaque aux Sarrasins. De fait, le développement du commerce ne cesse de poser des problèmes, de la tenue des livres au calcul des monnaies, si bien que l'abaque lui-même cède bientôt la place à l'*algorisme* et que des simplifications des procédés de calcul se développent jusqu'à livrer l'outillage intellectuel qui permettra la révolution de pensée qui caractérise la science classique.

Après la prise de Tolède (1085) commence une nouvelle circulation du savoir sur le pourtour de la Méditerranée. Puis, au XII[e] siècle, se développe le mouvement des traductions de textes arabes. Un moine, Walcher de Malvern, se fait enseigner comment les Arabes calculent le cours du Soleil et de la Lune, et conçoit, dans sa fameuse *Disciplina claricalis,* une nouvelle classification des branches du savoir qui favorise les sciences exactes, avec, aux premières places, la logique, l'arithmétique, la géométrie et la médecine, sans négliger, cependant, la musique, l'astronomie et, en dernier lieu, la philosophie ou grammaire.

D'un autre côté, Léonard de Pise (Leonardo Fibonacci, mort vers 1250) s'est initié directement, par des séjours en Afrique du Nord et au Moyen-Orient, aux pratiques du calcul. A son retour à Pise, il compose le célèbre *Liber abaci* (1202), qui familiarise l'Europe avec les chiffres

arabes ; dans ses calculs, il utilise le zéro et la suite dite de Fibonacci. Cet ouvrage, remanié et réédité en 1228, contient des connaissances mathématiques précieuses qui font de Léonard l'ancêtre de l'école algébrique italienne.

Plus tard, les préoccupations scientifiques gagnent le nord de l'Europe. A Paris, dès avant Nicolas Oresme († 1382), Johannes Campanus et Jordanus Nemorarius étudient la mathématique antique ; à Oxford, Thomas Bradwardine († 1349) s'intéresse à des notions infinitésimales dans son *De continuo*, qui rappelle les grandes discussions de Zénon et d'Aristote sur l'infini. Le trait le plus original se trouve certainement dans l'ouvrage d'Oresme, appelé *Tractatus de latitudinibus formarum*, qui présente le premier système de coordonnées, en montrant la nécessité d'exprimer les nombreuses variations des phénomènes par le recours au concept de figure géométrique. On se trouve sur la voie d'une description graphique des phénomènes naturels, donc d'une *mathématisation de la physique*. C'est le commencement d'un essor intellectuel dont l'ampleur apparaîtra dans la période suivante, période décisive qui est celle de la Renaissance et de la mathématique classique.

La Renaissance et la préparation de la mathématique classique

On insiste souvent sur le caractère révolutionnaire de l'orientation scientifique du XVII[e] siècle, et le fait est qu'est en jeu une transformation intellectuelle qui rend la mathématique organiquement liée au souci d'agir efficacement sur le monde, de suivre et d'informer l'expérience, de la géométriser. Il ne faudrait cependant pas oublier que la science classique est l'aboutissement d'efforts propres à la Renaissance, laquelle prolongeait le mouvement d'appropriation du savoir arabe et grec commencé au Moyen Age.

Au réveil des études mathématiques semble présider Nicolas de Cues (1401-1463), qui naquit sur les bords de la Moselle et fut une sommité intellectuelle de son temps. Ses ouvrages strictement mathématiques n'ont pas fait époque, tandis que ses considérations métamathématiques sur la notion d'infini et sur l'idée que seules les mathématiques permettent à l'homme de comprendre l'Univers semblent avoir eu une grande influence sur des penseurs aussi importants que Léonard de Vinci, Giordano Bruno, Copernic et Kepler.

Pour noter quelques aspects de l'essor préparatoire de la Renaissance, il convient d'évoquer l'œuvre de Georg Peurbach (1423-1461), dont l'effort consista essentiellement dans l'assimilation de l'héritage gréco-arabe, dans la diffusion du calcul, et surtout dans la rationalisation de l'astronomie. Profitant des travaux arabes, surtout ceux d'Arzachel, il a écrit l'un des premiers traités de trigonométrie européens, accompagné d'une table des sinus d'une grande précision pour l'époque.

Regiomontanus (1436-1476), son brillant disciple, Johannes Müller de son vrai nom, a travaillé directement sur les écrits de Ptolémée, a édité et commenté des textes scientifiques grecs ; son œuvre personnelle est contenue dans le *De triangulis omnimodis libri quinque* (imprimé seulement en 1533) où, à la suite de Nasir ad Din At-Tusi, il veut constituer la trigonométrie comme science autonome, tout à fait indépendante de l'astronomie. A. Koyré a souligné que Regiomontanus connaissait très bien ses prédécesseurs juifs et arabes auxquels il emprunte beaucoup de ce que l'on lui a attribué, mais son œuvre eut, en tant que somme systématique, une influence méritée. Les deux premiers livres du *De triangulis* sont consacrés à la trigonométrie plane, les autres à la trigonométrie sphérique ; on y trouve le théorème fondamental, déjà connu de Levi-ben Gerson, sur la proportionnalité des côtés du triangle aux sinus des angles correspondants.

Pedicini

▲ *Portrait de* **Luca Pacioli,** *mathématicien italien (1445-1510) dont le principal ouvrage,* **Summa de arithmetica, geometria, proportioni et proportionalita,** *résume la somme des connaissances mathématiques de son temps.*

Giraudon

◄ *La « Géométrie », dans une miniature du traité de Cassiodore sur les arts libéraux (Paris, Bibliothèque nationale).*

L'œuvre de Luca Pacioli, la *Summa de arithmetica, geometria, proportioni et proportionalita* (1494), moins originale que le *Triparty* de Chuquet (1484), a cependant ce caractère de synthèse à la fois méthodique et savante qui lui assure une large diffusion et en fait une transition vers le XVI[e] siècle : elle contient un système d'appellations qui préfigure l'effort de codification du langage mathématique et emploie des signes pour noter certaines opérations (*p* et *m* pour + et —, par exemple).

Léonard de Vinci (1452-1519), ami de Pacioli, et, en Allemagne, Albrecht Dürer (1471-1528), sont de ces génies, artistes et amateurs de géométrie, sachant jeter un pont entre la théorie pure et les techniciens, artisans, peintres, architectes, dans le but, en définitive, d'intégrer l'art lui-même à la science. Léonard de Vinci, formé dans l'atelier de Verrocchio, atelier de peinture en même temps qu'école de tous arts et métiers, s'intéresse à une géométrie dont il aperçoit la continuité avec la mécanique. D'où la force de son intuition qui lui fait découvrir le centre de gravité de la pyramide, et la solution mécanique du problème d'optique dit problème d'Al-Hazen, dont Huygens seulement donnera la solution géométrique.

L'autre témoin de cette nouvelle sensibilité à la réalité géométrique spatiale, Albrecht Dürer, accorde un intérêt tout particulier à l'étude des figures de l'espace dans son célèbre *Underweysung der messung mit dem Zirckel und richtscheyt* (1525). Il fonde les applications esthétiques sur les règles qui permettent de construire les courbes, les surfaces et les solides utiles à cette fin ; cela le conduit à une élaboration des méthodes de perspective, en même temps qu'à une première conception des procédés de géométrie descriptive élémentaire.

Synthétique, tournée vers une vue géométrique des objets et des mécanismes, à vocation pragmatiste et de masse, la mathématique en gestation à la fin du XV[e] et au début du XVI[e] siècle se trouve favorisée par l'impression des œuvres nouvelles et des œuvres de l'héritage ancien, et surtout par la conscience du besoin d'un enseignement de mathématiques pures : une chaire de mathématiques

est créée à Bologne en 1496, puis à Vienne, à Paris, à Heidelberg, à Coimbra. Le langage mathématique est forcé d'évoluer : à côté des abréviations mathématiques déjà employées par Diophante, on recourt à de nouvelles notations; la voie de l'*algèbre symbolique* se dessine dès Chuquet, comme nous l'avons dit, et s'affirme avec Stifel, qui emploie les signes + et —, le signe $\sqrt{}$ pour la racine d'un nombre, les lettres A, B, C répétées en nombre de fois égal au degré, pour désigner les inconnues. Chuquet et Stifel mettent en parallèle progression arithmétique et progression géométrique, ce qui mènera plus tard à l'invention des logarithmes.

Le pas le plus décisif s'accomplit dans l'école italienne, avec une pléiade de mathématiciens remarquables, tels Scipio del Ferro, Tartaglia, Cardan, Ferrari, Bombelli, qui ont donné la solution de l'équation du troisième degré par le moyen des radicaux cubiques, ce qui constitue une avance incontestable mais n'a pas l'originalité absolue que les historiens lui avaient reconnue. C'est d'abord Ferro, puis Tartaglia qui redécouvrent la solution de l'équation de la forme $x^3 + ax = b$, mais sans rien publier; Cardan intervient publiquement en 1539, par sa *Practica arithmeticae generalis,* où, avec un incontestable talent d'algébriste, il montre une capacité à concrétiser les problèmes, à choisir l'inconnue, à utiliser toutes les astuces de calcul et à introduire des grandeurs auxiliaires et des changements de variable. L'*Ars magna* énumère toutes les formes possibles de ces équations du troisième degré et les traite par des méthodes numériques souvent très proches des nôtres.

Le mouvement est couronné par les travaux de Raphaël Bombelli. Ce mathématicien ingénieur admit l'existence des imaginaires et éclaira ainsi le cas irréductible des équations du troisième degré. Les règles de calcul pour ces êtres mathématiques nouveaux correspondent à celles que nous suivons aujourd'hui. Vers la fin du XVIᵉ siècle, l'Italie ne compte plus de mathématicien d'aussi grande envergure, et la tradition s'enracine dans le Nord.

Simon Stevin (1548-1620), ingénieur militaire et inspecteur des digues dans les États de Hollande, enseigne en 1600 les mathématiques à Leyde (dans la langue flamande). Tourné vers la pratique, le concret, il publie des tables d'intérêt, traite des méthodes de comptabilité, mais révèle des talents de théoricien dans ses *Problèmes géométriques* (1583), où il perce l'analogie entre le continu et le discontinu; son *Arithmétique* occupe une place importante dans l'histoire des mathématiques, car elle réalise une systématisation et une simplification de l'arithmétique et de l'algèbre, et apporte deux innovations importantes : l'introduction systématique des fractions décimales et une nouvelle conception du nombre qui admet les incommensurables au même titre que les entiers et les fractions, car « l'incommensurance ne cause pas absurdité », et s'élève contre la qualification de nombres tels $\sqrt{2}$ ou $\sqrt{8}$, comme « absurdes, irrationnels, irréguliers, inexplicables ou sourds ». Cette unification est d'importance pour le développement de l'algèbre et de la géométrie analytique.

Ainsi se sont élaborées une pratique et des techniques de calcul que l'époque suivante n'aura qu'à examiner pour en formuler les principes implicites.

La science classique

Si tout est préparé par la Renaissance, si une essentielle conquête du réel s'y accomplit qui met les mathématiques au service d'un essor artistique sans précédent, d'une investigation de l'Univers démystifié et ouvert à la navigation transocéanique, aux échanges désormais mondiaux, et, plus généralement, au service d'une éducation au concret qui entraîne une réorganisation du temps et de l'espace, c'est seulement au XVIIᵉ siècle qu'a lieu l'initiation à la modernité et que s'imposent les traits essentiels de la science classique.

Il faut d'abord souligner à quel point la mathématique est, désormais, imbriquée dans les préoccupations spécifiques aux sciences de la nature et combien elle est étroitement liée à la mécanique, à l'optique et à l'astronomie. Son rapport à l'expérience est indiscutable, quoique de nature complexe. Elle devient une *science utile,* porteuse du grand rêve cartésien : « parvenir à des connaissances qui soient fort utiles à la vie » et « au lieu de cette philosophie spéculative qu'on enseigne dans les écoles... en trouver une pratique, par laquelle, connaissant la force et les actions du feu, de l'eau, de l'air, des astres, des cieux et de tous les autres corps qui nous environnent, nous les pourrions employer aussi distinctement que nous connaissons les divers métiers de nos artisans, nous les pourrions employer en même façon à tous les usages auxquels ils sont propres, et ainsi nous rendre *maîtres et possesseurs de la nature* ». (Ce texte si célèbre se trouve dans le *Discours de la méthode,* sixième partie, intitulée : *Choses requises pour aller plus avant en la recherche de la nature.*)

C'est donc de manière artificielle que nous n'évoquerons pas ici le développement de la physique, renvoyant le lecteur à l'histoire de sa mathématisation. Dans le domaine strictement mathématique, nous nous limiterons, par ailleurs, à l'essentiel, c'est-à-dire à ce qui a fait époque, soit en renouvelant complètement une tradition ancienne soit en en créant une tout à fait nouvelle.

L'algèbre : Viète et la « logistique spécieuse »

Il faut alors, en premier lieu, rappeler le rôle essentiel qu'a joué le perfectionnement de l'outil algébrique. Une lente et progressive habituation au calcul, à l'algorithme qui développe le caractère opératoire de l'algèbre, conduit à isoler la notion d'opération.

Avec Viète (1540-1603) devient usuel le calcul sur des *symboles,* ainsi que l'idée de transformation algébrique qui conduit à celle d'une algèbre toute en formules, d'une méthode opératoire sur les *espèces* et *formes* des choses ou « logistique spécieuse ». C'est certainement en cela que consiste le progrès décisif de l'algèbre au XVIIᵉ siècle, devenir une méthode sous les lois de laquelle se rangent tous les procédés médiévaux et italiens. Viète mit en évidence l'isomorphisme fondamental entre le domaine de l'algèbre numérique de Diophante, dont on venait de découvrir les travaux, de Cardan, de Tartaglia, de Bombelli, de Stifel, et celui de l'analyse géométrique sous-jacente aux exposés synthétiques d'Euclide, d'Archimède et d'Apollonios dont les œuvres récemment retrouvées de Pappus donnent une idée plus précise. Il subdivise l'analyse en trois parties : la première, la zététique ou art de chercher, consiste à adopter un symbolisme permettant de noter tant les grandeurs inconnues que les grandeurs connues, à exprimer les liens qui les unissent, à en dégager l'équation qui résume, de façon abstraite, le problème posé. La deuxième partie étudie, transforme et discute cette équation, et la troisième résout l'équation, soit par des constructions s'il s'agit de géométrie, soit par des calculs numériques s'il s'agit d'arithmétique. On y reconnaîtra les principes mêmes des méthodes modernes.

La théorie des équations est la première discipline à profiter des notations introduites par Viète et améliorées par Harriot (1560-1621). C'est Albert Girard (1595-1633) qui établit cette théorie sur les relations, mises en évidence par les méthodes de Viète, entre les coefficients et les racines, et dégage le principe qu'une équation a un nombre de racines égal à son degré. Descartes, de son côté, publie en 1637, en annexe au *Discours de la méthode,* sa *Géométrie,* dont le livre III expose la théorie des équations algébriques. Descartes fait la synthèse des résultats obtenus par ses contemporains et le bilan des progrès de l'algèbre en exposant, de façon théorique, la manière moderne de trouver les racines rationnelles d'une équation polynomiale. Mais c'est Newton qui reprendra la méthode effective de Viète pour la résolution numérique approchée.

Naissance de la géométrie analytique

En second lieu, c'est un fait justement célébré que la naissance de la géométrie analytique entre les mains de Descartes et Fermat, vers la même époque, et indépendamment l'un de l'autre. Elle a consisté en l'application de la nouvelle logistique spécieuse à l'analyse des lieux géométriques, en particulier des coniques, telle qu'elle apparaît chez Apollonios et Pappus. Mais Descartes s'est constitué son propre langage et sa propre notation, indépendamment de la tradition directe de Viète. « Tous les problèmes de géométrie se peuvent facilement réduire à tels termes, qu'il n'est besoin, écrit Descartes, que de connaître la longueur de quelques lignes droites, pour les construire. » Toute l'arithmétique repose, précise-t-il, sur les opérations arithmétiques usuelles, qu'il suffit d'introduire en géométrie; on peut ajouter une ligne *a*

S.E.F.

◀ **Descartes** ***est considéré, notamment, comme le fondateur de la géométrie analytique (Portrait de F. Hals, Paris, Louvre).***

à une ligne *b* et écrire $a + b$, ôter les lignes *a* et *b* l'une de l'autre et écrire $a — b$, etc. Descartes algébrise ainsi les opérations géométriques, et inversement, ce qui est encore plus important, donne une méthode pour interpréter géométriquement des expressions algébriques, si bien qu'à tout nombre correspond un segment, à toute opération un calcul segmentaire. C'est pourquoi il s'agit d'une invention éclatante, qui, selon l'expression de l'historien H. Zeuthen, fait passer la géométrie du stade de l'artisanat à celui de la grande industrie. Du fait que les concepts géométriques s'expriment algébriquement et les expressions algébriques s'interprètent géométriquement, les deux disciplines acquièrent une vitalité nouvelle. Mais cette « quantification » de la géométrie se fonde sur la priorité logique accordée à l'algèbre. Pourquoi ? Parce que, nous dit le cartésien Érasme Bartholin, si « dans les commencements il a été utile et nécessaire de donner des auxiliaires à notre faculté de spéculation pure : ce pourquoi les géomètres ont eu recours aux figures... », il est possible désormais de raisonner directement sur des lettres représentant des quantités abstraites. L'algèbre est donc une méthode ; c'est une *méthode de combinaison* qui permet, à partir des objets les plus simples, de progresser peu à peu dans la connaissance des objets les plus complexes. Tandis que la découverte par Fermat des coordonnées cartésiennes s'est limitée à une *répétition algébrique* de la mathématique grecque, Descartes fait de sa découverte une méthode d'invention d'une puissance et d'une universalité jusqu'alors inconnues en mathématiques : la mathématique grecque est définitivement dépassée. Il s'agit donc de la première rupture épistémologique dans l'histoire des mathématiques depuis l'invention hellène de la démonstration. Et au fond de cette rupture, il y a le *concept de fonction*.

L'apparition du concept de fonction

Si Descartes a énoncé clairement le principe de base de la géométrie analytique lorsqu'il résout le problème de Pappus, s'il a trouvé la définition précise des courbes géométriques, et montré que chaque point de celles-ci peut se construire, quelle que soit son abscisse, par une suite d'équations de degré de plus en plus grand, il a aussi banni de sa *Géométrie* toutes les courbes non susceptibles d'une définition analytique précise, en restreignant, en outre, les moyens de cette définition aux seules opérations algébriques. C'est pourquoi la géométrie analytique exclut de son domaine les courbes que Descartes appelle « mécaniques ». Si bien que, comme le souligne Bourbaki, Descartes reste en deçà de l'idée claire et féconde que Barrow (1630-1677) avait déjà du concept de fonction. A propos de la courbe définie par $x =$ cte, $y = f(t)$, avec l'hypothèse que $\frac{dy}{dt}$ soit croissante, Barrow dit expressément qu' « il n'importe en rien » que $\frac{dy}{dt}$ croisse « régulièrement suivant une loi quelconque, ou bien irrégulièrement », c'est-à-dire soit susceptible ou non d'une définition analytique. Il a fallu attendre le XIX^e siècle pour que cette idée de Barrow soit précisée.

Car le disciple de Barrow, le grand Newton, a adopté le point de vue « algébrique » de Descartes. Leibniz lui-même, qui l'élargit, se contente de l'adjonction explicite des courbes exclues par Descartes et de la considération implicite des opérations analytiques alors usuelles. C'est le « saut » leibnizien dans l'analyse qui explique partiellement la polémique contre Descartes et son école. « J'ai montré, écrit Leibniz, combien la géométrie de Descartes est bornée, combien les problèmes les plus importants ne dépendent point des équations auxquelles cette géométrie se réduit, qu'il est ridicule de croire, comme Malebranche, que l'algèbre est la plus grande et la plus sublime des sciences. » En fait, Leibniz consacre une grande partie de ses efforts à méditer sur les séries. Autrement dit, il a une idée de la notion de convergence, et ce grâce à J. Gregory (1638-1675), qui fut le premier à en avoir conçu la nécessité.

Le calcul infinitésimal

C'est pourquoi, à l'exception des incursions de Fermat (1601-1665) dans la théorie des nombres (établissement de la méthode de descente infinie, du « petit » théorème de Fermat : $a^p = a$ (modulo p) pour p premier, et du « grand » théorème de Fermat : l'équation $x^n + y^n = z^n$ n'a pas de solutions rationnelles pour n entier supérieur à 2), à l'exception aussi des incursions de Desargues dans la géométrie projective (qui nous donnent le concept de point à l'infini sur une droite et le « théorème de Desargues »), les progrès essentiels en cette période concernent des notions étroitement liées à l'analyse. Les figures les plus marquantes restent, bien sûr, Newton et Leibniz. Tous deux héritent d'une tradition déjà suffisamment établie : celle de Galilée, de Cavalieri, puis Barrow, Wallis, puis Fermat, Roberval, etc., qui leur permet une synthèse où le calcul infinitésimal acquiert presque sa forme classique.

Newton (1643-1727) est d'abord l'élève de Barrow, auquel il succède comme professeur à Cambridge, en 1696. Sa formation doit par ailleurs à Descartes, dont il étudie la géométrie, à Wallis, à Mercator (1620-1687), familiers des calculs liés à des séries de puissances. Son apport à la mathématique ne se limite pas à son œuvre mathématique proprement dite. Sa physique ou *Philosophiae naturalis principia mathematica* résume tout le progrès géométrique des siècles passés. L'*Arithmetica universalis* (1707) et le *Tractatus de quadratura curvarum* développent amplement les techniques de la géométrie analytique ; le *Methodus fluxionum et serierum infinitarum*, paru en 1736, après sa mort, systématise des idées dont les premières remontent à 1665.

Le calcul infinitésimal de Newton est lié à l'étude mécanique du mouvement d'un point, et, plus précisément, à la détermination de la vitesse à un temps *t* donné, quand la longueur du segment parcouru est donnée, ou de la distance parcourue, à un temps *t*, quand c'est la vitesse qui est donnée. Le temps apparaît donc comme une variable indépendante : il s'agit non du temps physique, mais d'une *grandeur* dont la croissance uniforme représente et mesure le temps. Newton se sert des notions et des notations algébriques de Barrow : la distance parcourue est la « fluente » de la vitesse : $s = v$; et, inversement, la vitesse *v* est la « fluxion » de la distance *s* : $v = s$ (la « fluxion » est ce que Leibniz appelle le « quotient différentiel » d'une fonction ; la « fluente » l' « intégrale » d'une fonction). Bientôt (1676), Newton s'aperçoit qu'on peut réitérer le procédé qui lie la fluente à la fluxion, de façon à obtenir une suite de grandeurs dont chacune est la fluxion de celle qui la précède et la fluente de celle qui la suit ; la méthode algébrique s'applique ainsi à des relations fonctionnelles, d'une généralité plus grande que les grandeurs auxquelles la limitait Descartes.

▶ ***Figure 13 :** représentation schématique du problème du* **triangle caractéristique** *pour lequel Leibniz inventa son calcul des différences.*

Illustrons par un exemple la méthode des fluxions. Soit à calculer la fluxion de l'équation : $z^3 - zy^2 + a^2x - b^3 = 0$, où x, y et z dépendent de t et où a et b sont des constantes. On calcule successivement les fluxions de z, de y et de x :

(1) Pour $z^3 - zy^2$ on a : $3z^2\dot{z} - \dot{z}y^2$

(2) Pour $-zy^2$ on a : $-2zy\dot{y}$

(3) Pour a^2x on a : $a^2\dot{x}$

(4) Pour $-b^3$ on a : 0 d'où l'équation :

(5) $3z^2\dot{z} - \dot{z}y^2 - 2zy\dot{y} + a^2\dot{x} = 0$

En désignant par $\underline{0}$ une quantité très petite, différente de zéro, $\underline{0}\dot{z}$, $\underline{0}\dot{y}$ et $\underline{0}\dot{x}$ seront les *moments* des fluentes z, y et x. Les fluentes s'accroissent de leurs moments quand t s'accroît de $\underline{0}$; d'où :

$$(z + \underline{0}\dot{z})^3 - (z + \underline{0}\dot{z})\,(y + \underline{0}\dot{y})^2 + a^2\,(x + \underline{0}\dot{x}) - b^3 = 0.$$

De cette dernière équation, on soustrait l'équation donnée, puis on divise par $\underline{0}$ qui est différent de 0 ; on obtient :

$$3z^2\dot{z} + 3\underline{0}z\dot{z}^2 + \underline{0}^2\dot{z}^3 - \dot{z}y^2 - 2zy\dot{y} - 2\underline{0}\dot{z}y\dot{y} - \underline{0}z\dot{y}^2 - \underline{0}^2\dot{z}\dot{y}^2 + a^2\dot{x} = 0.$$

En faisant tendre $\underline{0}$ vers 0, il vient :

$$3z^2\dot{z} - \dot{z}y^2 - 2zy\dot{y} + a^2\dot{x} = 0.$$

On y reconnaîtra la définition de la dérivée d'une fonction :

$$\lim_{\substack{h \to 0 \\ h \neq 0}} \frac{f(z+h) - f(z)}{h}.$$

Ciccione

▲ ***Le philosophe et mathématicien allemand*** **G. Leibniz** ***(1646-1716) ; il publia, en 1684, une*** **Nouvelle Méthode pour la détermination des maxima et des minima,** ***qui contient les principales lignes du calcul infinitésimal.***

Ainsi Newton évite dans sa technique de démonstration aussi bien les anciennes démonstrations par l'absurde que la méthode de Cavalieri qui repose sur les indivisibles ; il introduit les « quantités évanouissantes », de manière à pouvoir assigner les *limites* assignables à des sommes et à des rapports de quantités déterminées prises à leur état de naissance ou d'évanouissement. Les quantités mises en relation dans l'expression de ces limites sont des éléments infinitésimaux de quantités finies, des *moments,* qui n'interviennent dans le calcul que par leur première proportion à la naissance.

De son côté, Leibniz, homme de système comme Descartes, conçoit, à la même époque que Newton, son *Calculus differentialis* et son *Calculus summatorius* pour résoudre deux problèmes distincts et, pour lui, inverses l'un de l'autre : celui des tangentes et celui des sommations (c'est-à-dire de l'intégration). Ses conceptions sont exposées dans deux mémoires publiés dans les *Acta eruditorum* (1684 et 1686) et dans la correspondance qu'il entretint avec les savants de son époque.

Dans un système de coordonnées cartésiennes, toute courbe s'exprime par une équation. On peut donc, premièrement, se demander quelle direction doit suivre une droite pour que, passant par un point de la courbe, elle y soit tangente : ce problème revient, selon Leibniz, à calculer les différences infinitésimales, puisqu'il est nécessaire de comparer différentiellement un point de la courbe avec le *point immédiatement précédent.* La comparaison des deux points immédiatement voisins donne la « loi » du changement de direction de la tangente (en supposant que le parcours de la courbe est continu et conforme à une loi). Inversement, si on connaît une formule exprimant la variation de direction de la tangente à une courbe, il doit être possible d'établir l'équation inconnue de cette courbe, sa « fonction primitive ». La découverte géniale de Leibniz est d'avoir vu que ce deuxième problème revient à une rectification ou mesure d'un arc de courbe. Déterminant pour cette découverte fut le séjour de Leibniz à Paris, comme on peut l'apprendre par une lettre de l'auteur à Jacques Bernoulli : « Lorsque je vins à Paris, en 1672, j'étais un géomètre autodidacte, mais peu expérimenté, n'ayant pas la patience de parcourir la longue série des démonstrations... C'est alors aussi que Huygens, qui me croyait, je présume, plus capable que je l'étais, m'apporta un exemplaire nouvellement édité du *Pendule.* Ce fut pour moi le commencement ou l'occasion d'une étude géométrique plus approfondie. Pendant que nous nous entretînmes, il me fit voir que je n'avais pas une notion assez exacte des centres de gravité... en ajoutant que Dettonville (Pascal) avait très bien traité cette question... Sans aucun retard, j'étudiais ces produits, ces onglets

▶ ***Figure 14 :** voir démonstration dans le texte page* **299.**

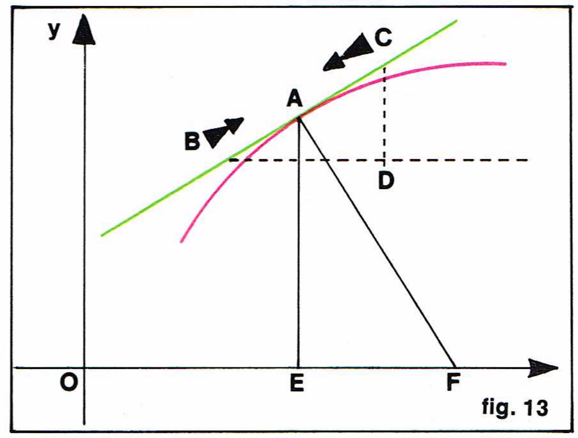

Richard Colin

inventés par Vincent et perfectionnés par Pascal. Je voyais avec plaisir ces sommes, et les sommes de ces sommes, les solides qui en naissaient et leurs démonstrations. Tout cela me donnait plus de plaisir que de travail. J'en étais là lorsque, par hasard, je tombai sur une démonstration de Dettonville, très facile de son espèce... Mais quel fut mon étonnement de voir que Pascal avait eu les yeux fermés comme par un sort : car je vis aussitôt que le théorème pouvait s'appliquer généralement à toutes les courbes, bien que les perpendiculaires ne se rencontrassent pas dans un même centre... Je m'en vais aussitôt chez Huygens... et je lui exposai mon théorème général sur la rectification des courbes. Il fut saisi d'étonnement et me dit que c'était là le théorème sur lequel s'appuyaient ses constructions pour trouver les aires des conoïdes parabolique, elliptique et hyperbolique. » (Cité dans le tome II de *l'Histoire générale des sciences et des techniques,* P. U. F., pp. 235-236.)

Ainsi l'impulsion de Huygens et ses conseils, la lecture de Pascal *(Traité des sinus du quart de cercle)*, l'étude des géomètres contemporains ont conduit Leibniz à voir dans l'étude du *triangle caractéristique* l'outil essentiel pour résoudre le problème des tangentes pour des courbes quelconques, puis à concevoir la rectification des courbes comme un problème inverse du premier. Il introduit la notation encore usitée de nos jours, soit, pour l'intégrale : $\int y\,dy$, et pour la différentielle : dx, $\int$ désignant une somme, tandis que d représente une différence.

Voyons sur un exemple comment raisonnait Leibniz (*fig.* 13). Considérons une droite tangente à une courbe en un point A, qui s'écarte de cette courbe aux points B et C ; B et C peuvent être les extrémités de l'hypothénuse du triangle rectangle dont les côtés de l'angle droit sont parallèles aux axes de coordonnées. Ce triangle est semblable au triangle formé par la normale à la courbe au point A, la parallèle à l'axe des ordonnées passant par A et le segment déterminé sur l'axe des abscisses par les points d'intersection de ces deux dernières droites avec lui. Si B et C se meuvent vers A, le triangle BDC deviendra de plus en plus petit, tout en gardant les mêmes proportions à cause de la continuité des lignes, et restera donc semblable au triangle AEF ; celui-ci, reproduction très

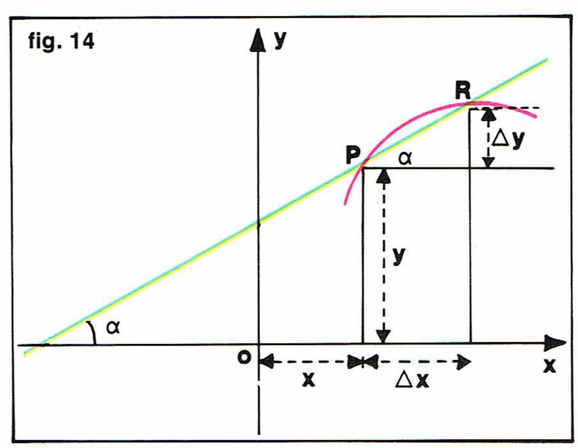

Richard Colin

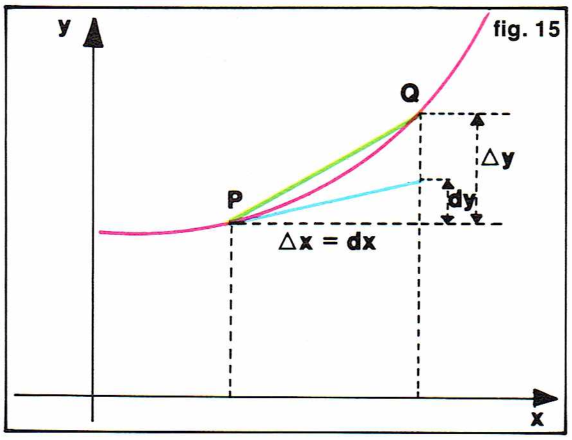

Richard Colin

◀ *Figure 15 : représentation schématique illustrant la distinction entre une différence et une différentielle.*

grande du triangle BDC, est le triangle « caractéristique » ; la loi des tangentes pourra être exprimée par un rapport entre les côtés du triangle caractéristique, par une *fonction* de l'angle d'inclinaison de la tangente sur l'un des axes de coordonnées. D'où la nécessité d'établir l'équation de cette fonction et son rapport avec l'équation de la courbe, ce pour quoi Leibniz invente son calcul des différences et, par passage à la limite, le calcul différentiel.

Pour un accroissement Δx de la valeur de l'abscisse, l'ordonnée y s'accroît de Δy (*fig.* 14). Dans le cas d'un accroissement fini, on considère l'angle α que fait la sécante à la courbe passant par les points P et R, avec l'axe des abscisses, et on obtient la tangente de α comme quotient de Δy par Δx. Mais si $y = f(x)$,

$$\Delta y = f(x + \Delta x) - f(x),$$

d'où
$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x}.$$

Ce rapport donne donc la tangente trigonométrique de l'angle α. Et comme on s'intéresse surtout à la tangente au point P, l'accroissement de la variable x doit avoir une valeur infiniment petite dx, à laquelle correspond un accroissement dy de y ; on procède comme dans le cas des différences finies, en écrivant le rapport :

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg} \alpha = \frac{f(x + dx) - f(x)}{dx}.$$

Le passage du cas fini au cas des accroissements infiniment petits s'exprimerait aujourd'hui par l'équation :

$$\frac{dy}{dx} = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

Leibniz ne distinguait pas par l'écriture Δy de dy, bien qu'il fît parfaitement la distinction entre une différence et une différentielle, distinction que le lecteur saisira aisément en se reportant à la *figure* 15.

Telle est l'allure de l'invention leibnizienne qui couronne, avec celle de Newton, les découvertes successives du XVIIe siècle. L'aboutissement en est la création de l'analyse du XVIIIe siècle dans sa double relation aux problèmes de physique mathématique d'une part, et d'autre part, à travers les développements donnés par les frères Bernoulli au calcul leibnizien, à la résolution des équations différentielles.

Le XVIIIe siècle

La richesse de la grande invention du XVIIe siècle apparaît au siècle suivant dans ses applications à la physique et à la géométrie. Le siècle des lumières foisonne en découvertes ; les premières sont dues à de Moivre, Taylor et Stirling, pour ne citer que les noms les plus illustres de l'école britannique, et aux frères Bernoulli sur le continent ; puis le siècle culmine avec l'œuvre de Leonhard Euler avant de s'achever par la publication des grands traités de l'École de Paris par Lagrange, Laplace, Monge, Legendre et Lacroix.

Les Bernoulli

Jacques Bernoulli (1654-1705) s'initia au calcul de Leibniz dont il défendit et propagea les méthodes à la fois dans son œuvre et dans son enseignement à l'université de Bâle. Il est resté célèbre par l'introduction, à l'occasion de la sommation des puissances p-ièmes des premiers entiers, des nombres dits « de Bernoulli », par une théorie des probabilités contenue dans son *Ars conjectandi*, par le recours au raisonnement par récurrence, etc. Dans ses travaux sur les séries, il établit la divergence de la série harmonique ; il résolut le problème de la ligne isochrone, posa celui de la chaînette, résolu par Huygens, Leibniz et Jean Bernoulli. Il étudia les courbes élastiques et s'attaqua à de nombreuses autres questions, dont certaines ont conduit à une problématique de géométrie infinitésimale, d'autres, comme celle des isopérimètres, à l'ébauche du calcul des variations.

Jean Bernoulli (1667-1748), nommé d'abord professeur à Groningen, succéda à son frère Daniel à Bâle, en 1705. On lui doit les premiers manuels de *Calcul différentiel et intégral,* qui consignent ses cours de l'année 1691-1692. Par ailleurs, il étudia l'exponentielle $y = x^x = e^{x \operatorname{Log} x}$, $(x > 0)$, la série « de Bernoulli » :

$$\int_0^x y dx = xy - \frac{1}{2!} x^2 y' + \frac{1}{3!} x^3 y'' + \ldots,$$

la chaînette, les lignes isochrone et brachistochrone, et la cycloïde ; il fit le premier emploi des coordonnées polaires et une étude systématique des équations différentielles du premier ordre, en recourant notamment aux méthodes de séparation des variables et de variation des constantes. Enfin, il contribua à la formation de Leonhard Euler. On sait, d'autre part, que le marquis de L'Hôpital doit à Jean Bernoulli le contenu de son livre sur l'*Analyse des infiniment petits*.

Outre Daniel Bernoulli (1700-1782), le fils de Jean, il faut aussi mentionner A. Claude Clairaut, qui appliqua l'analyse à des problèmes géométriques et prit part à l'étude des équations différentielles.

L'école anglaise

Les noms de Taylor (1685-1731) et de Maclaurin (1698-1746) sont indissolublement liés à la théorie des séries. La célèbre formule de Taylor se trouve dans sa *Methodus incrementorum directa et inversa* (1715) :

$$f(x + h) = f(x) + h \cdot f'(x) + \frac{h^2}{2!} f''(x) + \ldots ;$$

tandis que celle de Maclaurin en explicite un cas particulier, celui où $x = 0$ et $h = x$.

Stirling (1692-1770) est surtout connu pour sa formule d'approximation de $n!$ (pour n entier très grand) :

$$n! \cong n^n \cdot e^{-n} \sqrt{2 \pi n}.$$

Abraham de Moivre (1667-1754) se signale par la série :

$$\operatorname{Log} n! = \operatorname{Log} \sqrt{2 \pi n} + n \cdot \operatorname{Log} n - n + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{B_{2k} \cdot n^{1-2k}}{2k(2k-1)},$$

Palais de la Découverte - Paris

◀ *Le mathématicien Abraham de Moivre (1667-1754) introduisit la trigonométrie des quantités imaginaires et donna dans ce domaine, en 1730, la formule qui porte son nom.*

où les coefficients B_{2k} sont les nombres de Bernoulli, tandis que la formule à laquelle il a laissé son nom :

$$(\cos x + i \sin x)^n = \cos nx + i \sin nx$$

est en réalité due (sous sa forme connue) à Euler.

Les travaux d'Euler

Leonhard Euler (1707-1783) est un des mathématiciens les plus féconds et les plus profonds de tous les temps. Fils d'un pasteur de Bâle, il étudie d'abord la théologie et se découvre une vocation de mathématicien en écoutant les cours de Jean Bernoulli. On le trouve en 1727 à l'Académie de Saint-Pétersbourg, où il est professeur de physique en 1730 et de mathématiques en 1733. Appelé en 1741 à l'Académie de Berlin, il y dirige en 1745 le département de mathématiques; il rencontre là Maupertuis et d'Alembert. Euler est important à la fois par son génie créateur et par ses manuels, qui exercèrent une grande influence; l'*Introductio in analysin infinitorum* (1748) est le plus célèbre de ses ouvrages, et le premier traité classique d'analyse. Euler y fait une étude systématique des fonctions élémentaires, qu'il classe suivant leur mode de formation. Une fonction est définie comme une expression analytique formée d'une manière quelconque à partir d'une quantité variable et de constantes; les expressions polynomiales, les séries entières, les expressions logarithmiques ou trigonométriques sont permises, ce qui autorise la considération de fonctions de plusieurs variables. Il distingue (comme Jean Bernoulli) les fonctions algébriques et les fonctions transcendantes, ces dernières pouvant être engendrées par des séries infinies, puis les fonctions explicites et les fonctions implicites, enfin les fonctions uniformes et les fonctions multiformes. En 1749, à propos de l'équation aux dérivées partielles des cordes vibrantes, Euler est conduit à élargir sa définition du concept de fonction de manière à ne plus exclure les courbes tracées au hasard sur le plan. Sa classification a le mérite d'avoir mis au centre de l'organisation de l'édifice analytique ce concept de fonction, en facilitant ainsi le travail critique qui s'appliquera ultérieurement à redéfinir les notions fondamentales de l'analyse.

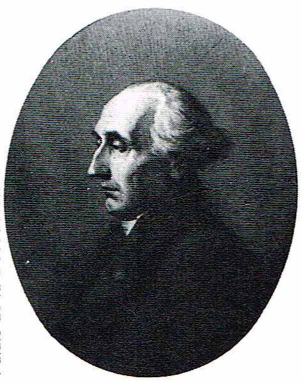

Palais de la Découverte - Paris

▲ ***Le mathématicien*** **L. de Lagrange *(1736-1813).***

Les *Institutiones calculi differentialis* (1755) montrent un égal souci de rigueur. Contrairement à Maclaurin, par exemple, qui tenta d'asseoir le calcul infinitésimal sur la géométrie, et en particulier sur la méthode d'exhaustion telle qu'elle est utilisée par Archimède, Euler se tourne plutôt vers la manipulation formelle des expressions algébriques, ce qui le conduit à identifier les quantités infiniment petites ou évanouissantes à de simples zéros; les différentielles dx et dy sont considérées comme nulles, puisqu'elles n'ont pas de *grandeur assignable*, et le problème se pose d'expliquer que le rapport $\frac{dy}{dx}$, qui a la forme indéterminée $\frac{0}{0}$, puisse égaler une quantité déterminée. Euler pense que, puisque $n \cdot 0 = 0$ pour tout nombre n, on peut avoir $n = \frac{0}{0}$, et le calcul de la dérivée de la fonction considérée sert à déterminer précisément ce rapport. $(dx)^2$ s'évanouit *avant dx*, en sorte que le rapport de $dx + (dx)^2$ à dx est égal à 1. Euler est donc conduit à distinguer différents *ordres d'infini*, bien qu'on ne disposât alors que de l'unique symbole ∞ : $\frac{a}{0}$ est un infini de premier ordre, tandis que $\frac{a}{(dx)^2}$ est un infini de second ordre, etc.

Les *Institutiones calculi integralis* (1768) constituent, avec l'ouvrage précédent, une somme de résultats et une référence irremplaçable avant la publication par Lacroix des deux volumes de son *Traité de calcul différentiel et intégral* (Paris, 1797-1800). Euler y étudie l'intégration des fonctions rationnelles, irrationnelles et transcendantes élémentaires (l'intégration étant considérée comme l'opération inverse de la dérivation); les équations différentielles sont intégrées par la technique de séparation des variables ou par le biais des développements en série; des indications sont données sur l'intégrale elliptique et le calcul des variations. Souvent indécis sur les concepts fondamentaux de l'analyse, les manuels d'Euler fourmillent de trouvailles, dont il nous faut citer les plus importantes pour faire le point.

— Euler s'est intéressé à l'équation diophantienne $x^2 - py^2 = 1$ en en cherchant les solutions entières (1733, 1759); plus tard, il donna une démonstration élégante du théorème de Wilson :

$$(p-1)! = -1 \pmod p.$$

— Il a donné au petit théorème de Fermat une expression plus générale grâce à l'emploi de la fonction dite d'Euler : $\varphi(n)$ étant le nombre des entiers inférieurs à n et premiers avec lui.

— Il a montré l'irrationalité des nombres e et e^2; c'est, du reste, à lui que nous devons cette notation e, ainsi que la vulgarisation des symboles i et π.

— Il a établi la divergence de la série $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{p^n}$ (p premier) et donné une valeur pour la fameuse *constante d'Euler* :

$$C = \lim_{n \to \infty} \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n} - \operatorname{Log} n\right) = 0{,}577\,2$$

— Il a établi la formule : $e^{ix} = \cos x + i \sin x$.

— Les intégrales d'Euler :

$$\int_0^1 x^p (1-x)^q \, dx \quad \text{et} \quad \int_0^1 x^p \cdot e^{-x} \, dx$$

(p et q entiers positifs) sont bien connues aujourd'hui sous les noms de fonction β et fonction Γ.

— Euler, enfin, ouvre un nouveau chapitre dans l'arithmétique, en étendant la notion de divisibilité aux entiers d'une extension quadratique quelconque.

L'école française

L'œuvre immense d'Euler, parachèvement de celle de Leibniz, fut décisive dans la préparation du courant critique qui se développe déjà dans la réflexion de D'Alembert et les doutes qu'il exprime sur l'usage des séries non convergentes. D'Alembert, en effet, s'est efforcé, dans les articles *Différentiel* et *Limite* de l'*Encyclopédie* et dans les *Éclaircissements sur les éléments de philosophie* (1767), d'exposer les propriétés des infiniment petits d'une manière systématique et claire et de montrer que toute la « métaphysique » du calcul infinitésimal se réduit aux concepts de dérivée et de limite.

L. de Lagrange (Turin, 1736 - Paris, 1813) exerça une influence décisive sur la tradition analytique française qu'il contribua à créer par son enseignement, d'abord à l'École normale de l'an III, puis à l'École polytechnique (Lagrange, d'abord professeur à l'école d'artillerie de Turin, avait succédé à Euler à l'Académie de Berlin; c'est en 1787 qu'il se fixe à Paris). De cet enseignement il a tiré la matière de ses ouvrages essentiels : la *Mécanique analytique* (1788), la *Théorie des fonctions analytiques* (1797) et les *Leçons sur le calcul des fonctions* (1799). Ayant traité de domaines variés qu'il a souvent renouvelés, tels que les équations différentielles, le calcul des variations, etc., il s'est également illustré par ses mémoires algébriques qui inaugurent une période décisive pour la théorie des équations algébriques. Dans le mémoire de 1771 *(Réflexions sur la résolution algébrique des équations)*, il écrit : « Je me propose d'examiner les différentes méthodes que l'on a trouvées jusqu'à présent pour la résolution algébrique des équations, de les réduire à des principes généraux et de faire voir *a priori* pourquoi ces méthodes réussissent pour le troisième et le quatrième degré, et sont en défaut pour les degrés ultérieurs. » Lagrange s'intéresse ainsi aux méthodes plus qu'aux équations elles-mêmes, d'une manière *a priori*, expliquant réussites et échecs des tentatives antérieures pour établir des formules de résolution. Bref, comme l'a écrit Bourbaki, Lagrange procède à « une analyse systématique des problèmes posés et des méthodes susceptibles de les résoudre, analyse qui, en soixante ans, conduira aux résultats définitifs de Galois ».

Pierre-Simon de Laplace (1749-1827) applique les procédés de l'analyse aux probabilités, ce qui le conduit à étudier l'intégrale $\int_0^\infty e^{-u^2} du$. La *Théorie analytique des probabilités* (1812) donne une synthèse de toute l'œuvre du siècle en ce domaine. Laplace s'est également intéressé aux équations aux dérivées partielles, en donnant

Giraudon

son nom à l'équation $\sum_{i=1}^{2} \frac{d^2\varphi}{dx_i^2} = \Delta\varphi = 0$, qui jouera un rôle important dans la théorie des fonctions, et surtout à la *Mécanique céleste,* à laquelle il a consacré un traité monumental en cinq volumes (1799-1825) qui couronne les travaux de Newton, Clairaut, d'Alembert, Euler et Lagrange sur le système des planètes, la forme de la Terre, la gravitation et le problème des trois corps.

Le dernier des trois grands analystes français, Adrien-Marie Le Gendre (1752-1833), appartient déjà au début du XIXe siècle par ses traités sur la géométrie (1794), sur la théorie des nombres (1798), sur les fonctions elliptiques et sur les intégrales eulériennes (1825-1832), ainsi que par ses exercices de calcul intégral. Ses premiers travaux, qui datent d'avant la coupure de 1789, concernaient le calcul des variations, les équations aux dérivées partielles et la géodésie.

En cette fin du XVIIIe siècle, outre la percée algébrique de Lagrange dont nous avons parlé plus haut, le phénomène le plus important est sans doute l'application par Gaspard Monge (1746-1818) de l'analyse à la géométrie et à la mécanique. Monge crée la *Géométrie descriptive* (1794-1795), ouvre la voie, avec son élève Poncelet, à la géométrie projective complexe. Aussi Bourbaki reconnaît-il « sous le nom de "principe des relations contingentes" chez Monge, ou de "principe de continuité" chez Poncelet, le premier germe de l'idée de "spécialisation" de la géométrie algébrique moderne ». Notons aussi que les *Feuilles d'analyse appliquée à la géométrie* (1795) de Monge préparent à la naissance, au siècle suivant, de la géométrie différentielle.

Nous n'avons pu évoquer ici tous les travaux mathématiques, non plus que tous les mathématiciens du XVIIIe siècle : nous n'avons rien dit, par exemple, d'A. de Vandermonde, de Lambert (1728-1777), de Waring (1734-1793), des autres membres de la dynastie des Bernoulli. C'est que, faute de pouvoir retenir tous les détails, nous avons voulu surtout souligner la percée des mathématiques vers des formes inédites : vers une réflexion sur ses concepts fondamentaux que le XIXe siècle développera pour mettre de l'ordre dans le foisonnement des découvertes accumulées.

Giraudon

◀ *Le mathématicien français* **Gaspard Monge** *(1746-1818), dont les ouvrages et l'enseignement oral eurent une influence considérable sur tous les mathématiciens du XIXe siècle.*

Le XIXe siècle

Le XIXe siècle mathématique nous montre une discipline en plein essor : multiplication des travaux, extension et diversification des recherches. Trois traits cependant dominent cette période :

— le renouvellement profond de disciplines bien connues, consécutif au souci de rigueur logique et à l'esprit d'abstraction qui avaient commencé à poindre au siècle précédent : ainsi en est-il de l'algèbre avec Gauss et Galois, de l'analyse avec Cauchy, Bolzano et Weierstrass, et de l'arithmétique, à la fin du siècle ;

— la conquête de domaines absolument nouveaux par des disciplines inédites : théorie des groupes, théorie des fonctions ou théorie des ensembles (nous ne dirons rien de l'histoire de cette discipline, devenue le centre des mathématiques contemporaines ; on se reportera au chapitre qui lui est consacré) ;

— le rapide développement de la physique mathématique qui profite de l'outil mathématique, mais pose, en retour, des problèmes féconds dont l'étude oriente l'évolution de certaines branches.

Des facteurs politiques et socio-économiques commandent cette éclosion. Par sa réforme de l'enseignement supérieur scientifique et technique, la Révolution française accorde aux mathématiques une place bien plus grande que par le passé dans les programmes scolaires et dans la société (voir *Mathématiques et société*). On sait le rôle joué par l'École polytechnique d'abord, l'École normale supérieure ensuite, dans la formation de mathématiciens de premier ordre. Des revues spécialisées voient le jour : *Journal de l'École polytechnique* (1795), *Annales de mathématiques* de J.-D. Gergonne (1811-1832), *Journal de mathématiques pures et appliquées* de J. Liouville (1837), etc. ; et les *Comptes rendus de l'Académie des sciences,* fondés en 1835, assurent la diffusion rapide des résultats nouveaux. A la faveur des nationalismes politiques et des progrès de l'industrie, ce mouvement s'étend à d'autres pays d'Europe ou d'Occident : en Allemagne, où les universités de Göttingen, de Berlin, de Königsberg, Bonn, Halle, etc., disputent rapidement à Paris le privilège de centre de recherche et de rayonnement, et où est édité, à partir de 1826, le célèbre *Journal de Crelle (Journal für die reine und angewandte Mathematik) ;* en Angleterre, en Italie, en Russie même. Un peu partout sont fondées des sociétés mathématiques : *London Mathematical Society* (1865), *Société mathématique de France* (1872), *Circolo matematico di Palermo* (1884), *American Mathematical Society* (1888), etc.

Le premier congrès international de mathématiques eut lieu à Zürich en 1897.

La richesse et la diversité des acquis sont telles que nous commençons l'histoire de ce siècle par un tableau (*tableau* V) qui ne prétend pas à l'exhaustivité, mais où le lecteur trouvera les repères indispensables.

Le renouveau de l'algèbre

Théorie des équations et théorie des groupes

En algèbre, comme en de nombreux autres secteurs, le siècle est dominé, à son début, par le génie et la puissance de Carl Friedrich Gauss (1777-1855). C'est lui qui donne, dès sa thèse (1799), la preuve du théorème fondamental de l'algèbre, selon lequel tout polynôme de degré n a exactement n racines. Ce théorème avait été énoncé pour la première fois en 1629 par Girard, puis démontré, mais de façon imparfaite (en 1746), par D'Alembert et Euler. La démonstration de Gauss, qui utilise des résultats d'analyse alors connus, présuppose l'existence des nombres complexes.

Mais au début de ce XIXe siècle, le problème principal demeure celui de la résolubilité des équations de degré supérieur à 4. Sa solution, amorcée dans les travaux de Lagrange et de Vandermonde, interviendra avec le développement de la théorie des groupes et de la théorie des corps. C'est dans cette perspective que s'inscrivent l'effort de Gauss relatif à la résolution de l'équation $x^n - 1 = 0$, qui lui fait pressentir la notion de groupe cyclique, et l'étude de Paolo Ruffini (1765-1822) du comportement des fonctions rationnelles des racines lors des permutations de celles-ci, par laquelle il tente de prouver l'impossibilité de la résolution de l'équation générale du 5e degré.

Tableau V	
Avant 1800	**Après 1800**
On connaît les différentes sortes d'opérations et de nombres.	**On a le concept de nombre réel, la théorie des nombres complexes et hypercomplexes, le calcul vectoriel.**
On a une théorie élémentaire des nombres.	**On dispose de formes quadratiques, de la théorie des nombres algébriques, et d'une théorie analytique des nombres.**
L'algèbre est surtout développée comme théorie des équations.	**L'algèbre gagne en généralité; les théories des groupes et des invariants font leur apparition.**
Éléments d'analyse avec des applications à la géométrie et à la physique.	**L'analyse classique se constitue et s'organise autour de concepts précisément définis. Théorie des fonctions et géométrie différentielle se développent comme des branches autonomes.**
Manipulation des séries dans le calcul différentiel et intégral, surtout des séries entières.	**Théorie rigoureuse de la convergence. Invention des séries de Fourier.**
Géométrie analytique.	**Algèbre linéaire.**
Géométrie descriptive.	**Géométrie projective, topologie, théorie des ensembles, logique mathématique, telles sont les dernières créations du siècle.**

▲ ***Tableau V : les grands moments mathématiques du XIXe siècle.***

Après Abel (1802-1829), qui montre plus rigoureusement que Ruffini l'impossibilité de résoudre par radicaux l'équation générale du 5e degré, et recherche les critères caractérisant les équations résolubles par radicaux, c'est Évariste Galois (1811-1832) qui présente à l'Académie des sciences un mémoire sur ce sujet (1831). A la base de la théorie de Galois, qui ne fut vraiment connue qu'après que Liouville eut publié, en 1846, les œuvres de ce génie tué à 21 ans dans un duel, on trouve les notions de corps, esquissées par Gauss en 1801, d'adjonction et de polynôme irréductible sur un corps donné, qui seront développées par Riemann et Dedekind. On y trouve aussi les principes de la théorie des groupes de substitution.

L'idée fondamentale de la théorie de Galois est qu'une équation algébrique est résoluble par radicaux si et seulement si un certain groupe, le groupe de Galois de l'équation, possède la propriété d'être « résoluble ». Or, le groupe de Galois d'une équation est isomorphe à un groupe de permutations de ses racines, si bien qu'on découvrira les propriétés d'une équation à coefficients sur un corps K en étudiant l'ensemble des permutations de certains éléments du plus petit sur-corps de K, L, obtenu à partir de K par adjonction des racines de l'équation.

La théorie de Galois permet, en particulier, de résoudre les problèmes, posés depuis l'Antiquité, de construction à la règle et au compas : ni la trisection de l'angle, ni la duplication du cube, ni la quadrature du cercle ne sont possibles à la règle et au compas.

A. Cayley appliqua la théorie des groupes aux quaternions (1854), et Hamilton étudia les groupes de symétrie des polyèdres réguliers; mais ce n'est qu'après le *Traité des substitutions* de Camille Jordan (1838-1922) que l'importance des idées de Galois apparut en plein jour et que la théorie des groupes intervint dans les secteurs les plus divers (de la géométrie aux équations différentielles). C'est par le biais de la notion de groupe qui révèle ainsi, sous la diversité des représentations et des langages, l'identité des lois et des opérations, que l'idée de structure abstraite fit sa première entrée dans les mathématiques modernes. Après 1870, Sophus Lie et Felix Klein profiteront de ce nouvel outil pour faire ressortir, dans la diversité des théories, l'unité structurelle de la géométrie.

L'algèbre linéaire - Les algèbres

Un des traits caractéristiques du XIXe siècle mathématique est le relief de plus en plus marqué que prennent les *problèmes linéaires :* étude des déterminants, introduction des matrices, étude des formes algébriques et des invariants, théorie des quaternions et des nombres hypercomplexes, introduction de nouveaux types d'algèbres. L'algèbre linéaire proprement dite, d'abord limitée à l'étude des systèmes d'équations algébriques du premier degré, s'étend aux systèmes d'équations différentielles et aux dérivées partielles, et sa force d'explication trouve une heureuse application en géométrie.

Nous devons à Cauchy l'introduction du terme « déterminant », dans son sens moderne, à Cayley notre notation actuelle, mais ce sont les travaux de Jacobi (1795-1855) qui posent les principes de la théorie générale des déterminants et contribuent à la diffusion de ce nouvel algorithme.

Extensions du concept de déterminant, les matrices apparaissent dans les études sur la composition homographique de Cayley, dès 1843, et sont précisément définies par lui en 1858. Entre-temps, Hamilton les a également introduites dans ses *Lectures on Quaternions* (1853), et le calcul géométrique de Grassmann les utilise implicitement. Le succès du calcul matriciel est remarquable à la fin du siècle, dans l'école anglaise, avec Clifford et Sylvester, puis en Amérique, avec Benjamin Peirce qui l'utilise dans sa théorie des algèbres linéaires associatives.

Le *concept d'invariant* est tout aussi important et tout aussi distinctif que celui de groupe; lui aussi permet l'unification de questions algébriques et géométriques. Il s'impose dans l'étude des formes algébriques, c'est-à-dire des fonctions homogènes à plusieurs variables. Dans un système de coordonnées homogènes, l'équation d'une courbe plane, ou d'une surface, se ramène à l'annulation d'une forme binaire, ou ternaire, et les changements de coordonnées reviennent à des substitutions. L'étude des propriétés de figures équivaut donc analytiquement à celle des propriétés des formes et conduit à leur réduction à leur forme canonique et à la recherche de leurs invariants et covariants, c'est-à-dire aux fonctions de leurs coefficients qui ne sont pas affectées par certaines transformations. Le concept d'invariant, sous-jacent à divers travaux de Lagrange, de Gauss, Cauchy, Jacobi, Eisenstein, est explicite, en 1841, chez Boole; le terme apparaît chez Sylvester (1814-1897) qui est, avec Cayley (1821-1895), l'auteur des fondements de la théorie des formes algébriques et des invariants. Signalons que Sylvester transmit le patrimoine mathématique européen aux États-Unis, où il fut professeur et fonda l'*American Journal of Mathematics*.

La théorie des formes algébriques et des invariants, qui avait reçu une impulsion de l'étude analytique des propriétés projectives des courbes et des surfaces algébriques, lui fournit en retour un langage commode et une méthode analytique de découverte. Alfred Clebsch (1833-1872), fondateur (avec Carl Gottfried Neumann) des *Mathematische Annalen* (1868), créa, avec Siegfried Aronhold (1819-1884), une symbolique nouvelle qui conduisit à l'algèbre tensorielle. Clebsch applique la théorie des invariants à des questions de géométrie projective. Son utilité fut grande, également, en théorie des nombres, des équations différentielles et aux dérivées partielles; Lie et Klein en firent ressortir les liens avec la théorie des groupes. Hilbert, enfin, dans l'un de ses premiers travaux (1890), réussit à en dégager les lois fondamentales d'une façon particulièrement concise et élégante, en étendant le théorème de finitude aux formes algébriques à n variables.

Quaternions et vecteurs

Après que Gauss eut justifié l'existence des nombres complexes en en donnant une interprétation géométrique, on tenta de définir des nombres complexes de type $ai + bj + ck$, mais on s'aperçut qu'on ne pouvait définir de façon univoque une multiplication pour de telles

sommes de trois facteurs. W. R. Hamilton (1805-1865) et H. Grassmann (1809-1877) inventèrent, le premier les « quaternions », le second les « grandeurs extensives » dont le rôle fut décisif dans le développement du calcul vectoriel et du calcul tensoriel.

Hamilton publia en 1835 sa *Theory of Algebraic Couples* qui contient une représentation algébrique des nombres complexes comme couples (ordonnés) de nombres réels :

$$z = a + bi = (a, b).$$

La multiplication, ainsi définie :
$(a, b) \cdot (c, d) = (ac - bd, ad + bc)$, redonne l'égalité $i^2 = -1$, quand on donne à a et à c la valeur 0, et à b et à d la valeur 1. Les « quaternions », que Hamilton découvre dès 1843, apparaissent dans les *Lectures on Quaternions* (1853) et dans les *Elements of Quaternions* (ouvrage posthume), sous la forme : $t + ix + jy + zk$, où t est la partie scalaire, et $ix + jy + zk$ la partie vectorielle. Les quaternions sont avec les nombres complexes les seuls systèmes de nombres à coefficients réels sur lesquels la multiplication est associative et la division possible.

En 1844, H. Grassmann publia *Die lineale Ausdehnungslehre, ein neuer Zweig der Mathematik*, où il introduisit ses « grandeurs extensives » d'une façon plus générale que n'avait fait Hamilton pour les quaternions; en effet, il se place d'emblée dans un espace à n dimensions en définissant un vecteur par la formule : $V = \sum_{i=1}^{n} x_i n_i$ et distingue le produit scalaire (intérieur) du produit vectoriel (extérieur), ce dernier n'étant pas commutatif. L'ouvrage de Grassmann, d'un abord difficile, ne suscita de l'intérêt que lorsque W. G. Hankel (1867) et Schlegel (1872-75) en eurent donné une présentation plus claire.

Quaternions de Hamilton et « grandeurs extensives » de Grassmann correspondent à des extensions du concept de nombre et entraînent un élargissement de la notion d'algèbre, qui devient, pour une part, l'étude abstraite des lois de composition régissant les éléments d'un système de nombres. La notion générale de loi de composition s'était dégagée de travaux de Gauss sur certaines formes quadratiques, de la théorie des groupes de substitution, et des travaux d'algèbre abstraite et de logique symbolique de l'école anglaise. (Nous laissons de côté la contribution de la logique au développement des mathématiques au XIXe siècle; pour l'histoire de la logique, voir le chapitre qui lui est consacré en particulier. Nous profitons de cette occasion pour dire que nous laisserons également de côté l'histoire du calcul des probabilités et des statistiques qui est évoquée dans le chapitre *Mathématiques et société*). La découverte du calcul matriciel, du calcul géométrique de Grassmann, celle des notions de corps de nombres et d'idéal exigeaient une refonte des conceptions de base et l'étude des divers types d'algèbres. C'est l'Américain B. Peirce (1809-1880) qui amorce cette refonte. Les travaux de B. Peirce, *Linear Associative Algebra* (1881), furent poursuivis par Cayley, Sylvester, C. S. Peirce (1839-1914), Dedekind, Study, Cartan, etc.

Les géométries

Au début du XIXe siècle, sous l'influence de Monge, une partie de l'école mathématique française s'appliqua à l'étude des diverses branches de la géométrie. De France, ce renouveau gagna les autres pays d'Europe, prenant des formes variées et réagissant diversement au développement parallèle de l'algèbre et de l'analyse.

La géométrie synthétique

Essor rapide de la géométrie projective, introduction des transformations géométriques marquent le développement très brillant de la géométrie synthétique ou pure dans la première moitié du XIXe siècle. La *Géométrie descriptive* de Monge a un rôle initiateur dans ce développement, et les *Annales* de Gergonne constituent un intéressant organe de liaison.

Jean-Victor Poncelet (1788-1867), ancien élève de l'École polytechnique, définit, dans son *Traité des propriétés projectives des figures,* la géométrie projective comme l'étude des propriétés invariantes par projection centrale ou perspective. Ses méthodes sont l'emploi généralisé de la perspective et des sections planes, l'introduction systématique des éléments impropres ou idéaux que Lazare Carnot avait déjà utilisés dans sa *Géométrie de position* (1803) pour définir le plan projectif à partir du plan affine par adjonction des éléments idéaux (à l'infini). La transformation par polaires réciproques, ou polaire, que Poncelet introduit est généralisée sous le nom de corrélation; la symétrie entre point et droite qui y apparaît trouve une forme plus générale dans le principe de « dualité », dont Poncelet, Gergonne, Chasles, Möbius, Plücker précisent la signification, et dont l'origine se trouve dans le théorème de Desargues selon lequel les droites prolongeant les côtés de deux triangles placés en perspective dans le même plan se coupent sur la même droite (*fig.* 16).

L'emploi que fit Poncelet des transformations géométriques : projection cylindrique ou centrale, homologie, polarité, dans le but de réduire certaines propriétés à des cas plus simples, par exemple réduire les propriétés des coniques à celles du cercle, stimula l'étude des diverses sortes de transformations.

Dans sa *Systematische Entwicklung* (1832), Steiner définit dans l'espace projectif 6 formes fondamentales classées en 3 espèces et montre que l'on peut passer d'une forme à l'autre de la même espèce, pourvu qu'une condition « de projectivité », dont C. von Staudt (1847) donnera la forme générale, soit remplie. A partir de ces formes, Steiner systématise les méthodes de génération projective des figures déjà antérieurement employées dans des cas particuliers.

Chasles (1793-1880), qui devança Steiner sur certains points, contribua à la diffusion de ces méthodes. Outre de nombreux mémoires, on lui doit l'*Aperçu historique sur l'origine et le développement des méthodes géométriques* (1837), remarquable tableau de l'histoire de la géométrie, et deux traités sur les principes de la géométrie projective : *Traité de géométrie supérieure* et *Traité des sections coniques* (1852).

Staudt (1798-1867) réussit une axiomatisation de la géométrie projective, qui la débarrassa des défauts qui l'empêchaient d'être une discipline entièrement autonome : usage de notions métriques dans la définition d'éléments projectifs, justification insuffisante des éléments imaginaires, recours déguisé à la méthode des coordonnées, lourdeur de certaines démonstrations. Staudt s'efforça, en effet, de reconstituer l'ensemble de la discipline indépendamment des notions métriques d'angle et de distance, à l'aide des seuls axiomes concernant l'ordre et la position des éléments fondamentaux. Se limitant au domaine réel dans sa *Geometrie der Lage* (1847), il définit dans ses *Beiträge zur Geometrie*

Roger Viollet

▲ **Lazare Carnot** ***(1753-1823) ; dans sa*** **Géométrie de position** ***(1803), il est, avec Monge, l'un des créateurs de la géométrie moderne.***

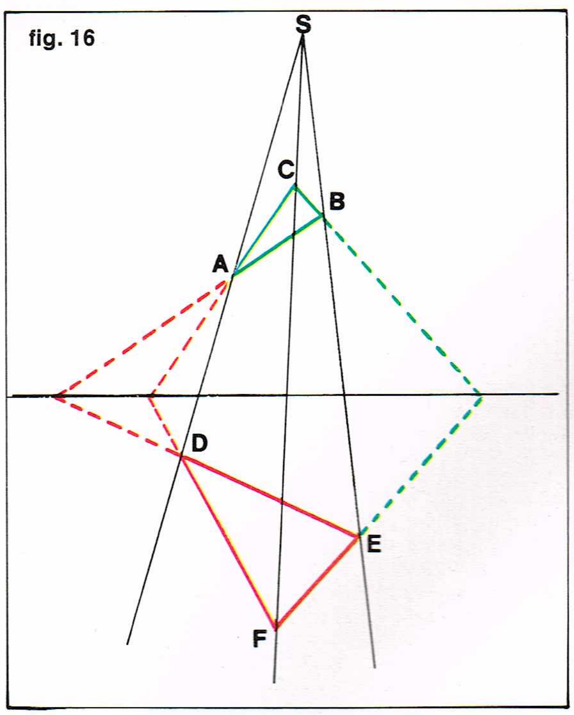

Richard Colin

Boyer - Viollet

▼ ***A gauche, figure 16 : application du théorème de Desargues. A droite, le mathématicien et géomètre français*** **Michel Chasles** ***(1793-1880).***

Palais de la Découverte - Paris

▲ *Le géomètre italien* **Luigi Cremona** *(1830-1903).*

der Lage (1856-1860) les éléments imaginaires comme éléments doubles d'involutions elliptiques et montre qu'ils satisfont aux axiomes fondamentaux.

Vers 1870, Klein montre la nécessité d'adjoindre aux axiomes celui de continuité; il prouve l'indépendance de la géométrie projective par rapport à l'axiome des parallèles, constate l'indémontrabilité du théorème des triangles homologiques de Desargues et du théorème de l'hexagramme de Pascal, étend la géométrie projective aux espaces à *n* dimensions.

La fin du siècle apporte le déclin de la géométrie synthétique au profit de sa rivale, la géométrie analytique, qui avait tiré parti des progrès de l'algèbre linéaire. De nombreux géomètres abandonnèrent le point de vue exclusif d'une géométrie pure, totalement autonome, sans craindre de profiter des ressources de l'algèbre et de l'analyse.

Les géométries non euclidiennes - Les fondements de la géométrie

Les efforts de Saccheri et de Lambert, au XVIII^{e} siècle, pour approfondir la signification du fameux postulat des parallèles avaient montré trois voies possibles : la voie classique fondée sur l'acceptation du postulat ou d'un équivalent; les deux autres fondées, de manières opposées, sur son rejet. Saccheri avait finalement conclu à l'absurdité de ces dernières hypothèses, tandis que Lambert, plus prudent, avait montré qu'elles se vérifient pour les figures placées sur une sphère. Dès 1792, Gauss réfléchit au problème posé par le 5^{e} postulat, et continue de s'y intéresser toute sa vie sans rien publier. En 1799, il affirme posséder les principes d'une géométrie nouvelle, fondée sur l'existence d'une infinité de parallèles pouvant être menées par un point extérieur à une droite; il apprécie favorablement les idées de F. K. Schweikart (1819) et de Taurinus (1825-1826) qui vont dans le sens d'une géométrie non euclidienne.

Nicolas I. Lobatchevski (1792-1856), de l'université de Kazan, et János Bolyai (1802-1860), de Vienne, découvrent également, et indépendamment l'un de l'autre, la *géométrie hyperbolique* dont Gauss avait eu l'idée. Le 5^{e} postulat est remplacé par la possibilité de mener, par un point extérieur à une droite, plusieurs parallèles à cette droite, si bien que la somme des angles d'un triangle rectiligne est inférieure à deux droits. L'originalité de Lobatchevski ne fut pas reconnue de son vivant; Gauss, qui pouvait apprécier les exposés que l'auteur fit de ses travaux, dans le *Journal de Crelle* d'abord *(Géométrie imaginaire)*, puis dans une publication berlinoise (*Geometrische Untersuchungen zur Theorie der Parallellinien* - 1840), n'exprima pas publiquement son approbation. De même, à Bolyai qui lui avait fait adresser son travail par l'intermédiaire de son père, disciple du grand mathématicien, Gauss marqua son intérêt en signalant qu'il avait lui-même depuis longtemps rencontré les mêmes idées. Bolyai, découragé, garda désormais le silence. Ce qui explique que cette géométrie resta inconnue dans ce premier temps.

Mais, en 1868, Bernhard Riemann (1826-1868) publie la thèse qu'il avait soutenue en 1854 : c'est le fameux mémoire intitulé : *Über die Hypothesen, welche der Geometrie zu Grunde liegen,* où il introduit des espaces très généraux par la donnée du carré de l'élément linéaire ds^2 et évoque le second type de géométrie non euclidienne, la géométrie « elliptique », qui nie l'infinitude de la droite et affirme que par un point extérieur à une droite il ne passe aucune parallèle à cette droite : le plan projectif ou la surface d'une sphère donnent des « modèles » de cette géométrie qui acquerra une grande importance en physique, avec la théorie de la relativité.

Les développements des géométries non euclidiennes furent ensuite fonction des travaux sur les espaces abstraits, des progrès de la théorie des groupes et de la naissance de la topologie. En 1871, Klein utilise la métrique définie par Cayley pour faire ressortir la structure d'ensemble des disciplines géométriques et interpréter la tripartition en géométrie parabolique (euclidienne), hyperbolique et elliptique. La connaissance qu'il avait de la théorie des invariants et de la théorie des groupes conduisit Klein à une belle synthèse. Dans sa célèbre dissertation de 1872, connue sous le nom de *Programme d'Erlangen,* il caractérise les différents théorèmes de géométrie et les diverses directions de recherches par les groupes de transformations qui leur correspondent. Chaque géométrie étant la théorie des invariants d'un groupe de transformations donné, les deux courants « synthétique » et « analytique » se révèlent identiques malgré la différence des langages; la géométrie euclidienne est l'étude des invariants du *groupe métrique,* la géométrie projective celle des invariants du *groupe linéaire,* la topologie celle des invariants du *groupe des transformations ponctuelles continues.* Le Programme d'Erlangen eut un grand succès et influa sur les différents domaines de la géométrie.

La diffusion des géométries non euclidiennes vint renforcer, durant la seconde moitié du XIX^{e} siècle, l'effet produit par l'examen critique des fondements de l'analyse et les préoccupations axiomatiques en arithmétique (que nous évoquerons plus loin). Il se développa une analyse critique des principes de la géométrie classique; on explicita certains postulats implicitement admis : postulat d'Archimède mis en évidence par Stolz (et d'une certaine façon aussi par Bolzano dans des écrits qui voient le jour seulement en 1975), postulat de la continuité énoncé par Cantor et Dedekind, postulats d'ordre signalés par Gauss, Grassmann et Pasch, lequel mit l'accent sur les concepts primitifs qui permettent l'énoncé des propositions fondamentales *(postulats)* à partir desquelles se démontrent les autres propositions *(théorèmes).*

En 1899, David Hilbert présenta une remarquable synthèse des travaux antérieurs et de ses propres recherches sur les fondements de la géométrie. Évitant le recours aux images concrètes, les *Grundlagen der Geometrie,* qui connurent rapidement plusieurs éditions (1899, 1903, 1909, etc.), introduisent trois systèmes de choses appelés *points, droites* et *plans.* Ces objets, dont la nature n'est pas précisée, entretiennent certaines relations, exprimées par 21 axiomes, classés en 5 groupes : axiomes d'appartenance, axiomes d'ordre, axiomes d'égalité ou de congruence, axiomes des parallèles et axiomes de continuité. Attentif à l'indépendance et à la non-contradiction de ces axiomes, Hilbert pense qu'ils constituent le minimum suffisant pour reconstruire tout l'édifice géométrique, à l'aide des seules règles de la logique et de l'arithmétique. Les *Grundlagen* marquent le point de départ des travaux axiomatiques dont l'importance sera un des traits essentiels de la mathématique du XX^{e} siècle.

Le renouveau de la géométrie analytique

Il est marqué successivement par la prépondérance de l'école française de Monge, le rôle de Plücker, l'intervention de l'algèbre linéaire, l'introduction de la géométrie des droites et des espaces à *n* dimensions, l'essor parallèle de la géométrie algébrique et de la géométrie différentielle.

L'expression « géométrie analytique », introduite par Lacroix en 1797, fut utilisée pour la première fois dans le titre d'un ouvrage de Lefrançois en 1804. L'inscription de cette discipline dans les programmes de l'École polytechnique suscita un certain nombre de publications. Mais c'est l'école allemande qui se distingue particulièrement. Plücker dans ses *Analytisch-geometrische Entwicklungen* (2 tomes, Essen, 1828 et 1831) montre que, par l'emploi de la notation abrégée et des nouveaux systèmes de coordonnées, la géométrie analytique écarte les difficultés des calculs d'élimination et aboutit aux mêmes résultats que la géométrie pure. C'est ainsi que Plücker aboutit analytiquement au principe de dualité, précise les concepts d'équation et de coordonnées tangentielles, celui de classe d'une courbe, introduits par Möbius et Poncelet. Son *System der analytischen Geometrie* reprend l'étude et la classification des courbes algébriques, délaissées depuis le XVIII^{e} siècle; c'est dans cette étude qu'il introduit un principe nouveau : l'énumération des constantes, qui repose sur les célèbres formules de Plücker reliant l'ordre, la classe et les nombres des différents types de singularités (points doubles, de rebroussement, tangentes d'inflexion, tangentes stationnaires) d'une courbe de type donné.

O. Hesse (1811-1874) utilisa les déterminants et appliqua la théorie des formes algébriques et des invariants pour une présentation simple et élégante des résultats de Plücker; il établit l'équivalence entre la théorie des équations algébriques et celle des courbes

et des surfaces, donne sa forme définitive à la notation des coordonnées homogènes et introduit l'emploi du « hessien ».

En Angleterre, Cayley utilisa très largement l'algèbre linéaire dans ses études sur les transformations de coordonnées, sur les quadriques et les surfaces du 4[e] ordre; il généralisa les résultats de Plücker aux courbes algébriques de l'espace et aux surfaces algébriques.

L'étude des transformations projectives et des divers systèmes de coordonnées ponctuelles ou tangentielles dans l'espace à trois dimensions montra, en même temps que la symétrie des rôles joués par les points et les droites (ou les plans), la nécessité de considérer une droite tantôt comme *rayon* décrit par un point, tantôt comme *axe* autour duquel tourne un plan. Aucun des systèmes de coordonnées connus ne convenant à cette conception dualiste, Plücker conçut (en 1865) le système des coordonnées « plückériennes » (six coordonnées homogènes, l, m, n, λ, μ, ν, liées entre elles par la relation bilinéaire $l\lambda + m\mu + n\nu = 0$) pour caractériser une droite. L'originalité de cette nouvelle notation invita de nombreux mathématiciens à poursuivre l'étude de la géométrie des droites, ou géométrie réglée, et à la mettre en rapport avec celle de certaines équations aux dérivées partielles, de l'optique géométrique et de l'analyse vectorielle.

Les débuts de la géométrie algébrique

La convergence des divers travaux de géométrie renouvela, dans la seconde moitié du XIX[e] siècle, l'étude des courbes et des surfaces algébriques, et déboucha sur la création d'une nouvelle discipline : la géométrie algébrique, liée à la fois à la géométrie synthétique et analytique, à l'algèbre linéaire et générale et à la théorie des fonctions.

Au XVIII[e] siècle, Maclaurin avait dégagé la notion de *courbe unicursale*, c'est-à-dire courbe telle que les coordonnées de son point courant sont exprimables en fonctions rationnelles d'un paramètre. Une courbe unicursale est une courbe algébrique plane qui possède le nombre maximal $N = (n-1)(n-2)/2$ de points doubles compatible avec son degré n : conique, cubique à un point double, quartique à 3 points doubles, etc.

Le théorème d'Abel (1829) sur les intégrales abéliennes éclaira cette notion en associant à chaque courbe algébrique un nombre entier $p = N - N'$, N' étant le nombre effectif de points doubles; les courbes unicursales ont donc un nombre $= 0$, ou sont de genre 0. Riemann renouvela la question en 1851 en introduisant la *surface*, dite de *Riemann*, associée à toute courbe algébrique plane. Clebsch et Poincaré complétèrent les résultats de Riemann.

Après la redécouverte de l'inversion (par Möbius, en particulier) et l'étude des transformations quadratiques (par Magnus, 1832), Jonquières donne (en 1858) le premier exemple de transformation birationnelle d'ordre quelconque, dont la théorie est édifiée par le géomètre italien Cremona (en 1863). Après quoi, on pourra concevoir les transformations birationnelles comme correspondances bijectives entre deux variétés algébriques plongées dans un espace projectif à un nombre quelconque de dimensions. La théorie des groupes permit de voir que les transformations birationnelles constituent le groupe principal de la géométrie algébrique.

L'étude des branches d'une courbe algébrique au voisinage d'un point singulier, qui constitue le centre de la géométrie algébrique, reprise par Puiseux (1850) et développée à la lumière des travaux de Riemann et de Cremona, par Noether en particulier, reçut un fondement avec le mémoire de Brill et M. Noether : *Über die algebraischen Funktionen und ihre Anwendung in der Geometrie,* publié dans les *Mathematische Annalen,* en 1874.

La géométrie infinitésimale et différentielle

La géométrie infinitésimale classique se transforme, au cours de ce siècle, en géométrie différentielle. Trois grands mathématiciens œuvrent à cette transformation : Monge, Gauss et Riemann.

En France, au début du siècle, Monge est le maître de l'école de géométrie infinitésimale, et son influence persistera, à travers ses élèves de l'École polytechnique, jusqu'à la fin du siècle, marquant encore des géomètres aussi importants que Klein, Lie ou Darboux. Le principal disciple de Monge, en cette matière, est Charles Dupin (1784-1873) qui publie *Développements de géométrie* (1813), puis *Applications de géométrie et de mécanique* (1822). Dupin introduit notamment l'indicatrice qui permet de représenter simplement la variation des rayons de courbure des sections normales en un point à une surface.

Préoccupé par divers problèmes théoriques d'astronomie, de géodésie et de cartographie (par exemple, celui de la représentation conforme d'une surface sur une autre), Gauss publie, en 1827, ses *Disquisitiones circa generales superficies curvas,* qui marquent un pas en avant par rapport à l'œuvre de Monge. Gauss introduit les coordonnées curvilignes u et v sur une surface S et donne une expression différentielle au carré de l'élément linéaire : $ds^2 = E\,du^2 + 2F\,du\,dv + G\,dv^2$ où E, F et G sont des fonctions de u et de v. Il montre que les propriétés locales de S ne dépendent pas du fait qu'elle est placée dans l'espace euclidien, mais seulement de l'élément linéaire ds. En particulier, la courbure totale en un point dépend uniquement de E, F et G, et de leurs dérivées, et demeure invariante dans les déformations des surfaces flexibles et inextensibles : c'est le « *theorema egregium* ».

Sous la triple influence de Monge, Gauss et Jacobi, d'importants travaux voient le jour, à partir de 1840, dans le *Journal de mathématiques pures et appliquées* de Liouville. C'est alors que Riemann renouvelle considérablement les principes de la discipline. Dans sa fameuse dissertation de 1854, il aborde l'étude des variétés topologiques à un nombre quelconque de dimensions, et définit par une forme quadratique positive la distance de deux points infiniment voisins : $\sum_{i,k} a_{ik}\,dx_i\,dx_k$.

▼ **Charles Dupin** ***(1784-1873), économiste et mathématicien français, fut le principal disciple de Monge (reproduction d'un cliché de Nadar).***

Archives photographiques - Paris

Riemann s'intéresse spécialement aux surfaces à courbure constante et montre comment elles permettent d'interpréter la géométrie non euclidienne plane. L'étude des géométries riemanniennes exigeait une théorie des formes différentielles quadratiques, dont Riemann lui-même amorça l'étude dans un mémoire posthume.

Entre 1864 et 1868, le géomètre italien Beltrami montra, grâce à la théorie des invariants différentiels, les liens qui unissaient les conceptions de Gauss et de Lamé et celle de Riemann. Les recherches dans cette voie aboutirent à l'analyse vectorielle et au calcul différentiel absolu.

Après 1870, les progrès de la géométrie différentielle sont marqués, d'une part, par le rôle des premières considérations topologiques, comme dans les mémoires de H. Poincaré *Sur les courbes définies par une équation différentielle* (1881-1886), qui étudient, sans intégration préalable, les propriétés des courbes intégrales d'équations différentielles, et, d'autre part, par la théorie des groupes, comme dans les œuvres de Sophus Lie : *Theorie der Transformationsgruppen* (1888-1893), *Differentialgleichungen* (1891), *Kontinuerliche Gruppen* (1893), *Berührungstransformationen* (1896).

Darboux, dans les 4 volumes de ses *Leçons sur la théorie générale des surfaces* (1887-1896), fait une remarquable synthèse de tout l'apport du siècle.

L'apparition de la topologie

Préfigurée par l'*Analysis situs* de Leibniz, cette discipline s'annonça par des problèmes célèbres, celui « des ponts de Saint-Pétersbourg » (Euler), celui des nœuds (Gauss, Listing), celui du coloriage (Möbius, de Morgan, Cayley, Tait), celui de la relation de Descartes-Euler entre les nombres de faces, d'arêtes et de sommets d'un polyèdre, avant de se préciser à travers les œuvres de Cayley, de Listing, de Möbius auquel on doit le premier exemple de surface unilatère (la bande de Möbius, 1858). C'est Riemann qui fonda cette science comme étude des propriétés invariantes par transformations bijectives continues. Les « surfaces de Riemann » font intervenir la topologie dans la théorie des fonctions de variables complexes et dans toute l'analyse (1857). Influencés par la création de la théorie des ensembles, la théorie des nombres réels et la théorie des fonctions de variables réelles, les travaux suivants portent sur les ensembles de points, sur les concepts de courbe et de domaine (Cantor, Jordan) et sur les ensembles de courbes et de fonctions.

L'analyse classique

Le développement de la physique mathématique

Il est marqué par le travail déterminant de Joseph Fourier (1768-1830). Dans ses études sur la propagation de la chaleur, commencées en 1807, présentées à l'Académie des sciences en 1811 et publiées en 1822 dans la *Théorie analytique de la chaleur,* il exprime la loi de propagation par l'équation aux dérivées partielles :

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = a^2 \frac{\partial V}{\partial t}$$

C'est en cherchant à intégrer cette équation que Fourier représente une fonction arbitraire par la série trigonométrique qui porte, depuis, son nom :

$$f(x) = a_0 + \sum_{m=1}^{\infty} (a_m \cos m x + b_m \sin m x)$$

Fourier donne les formules qui déterminent les coefficients a_m et b_m : $a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\alpha)\, d\alpha$

$$a_m = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\alpha) \cos m\alpha\, d\alpha,$$

$$b_m = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\alpha) \sin m\alpha\, d\alpha,$$

posant ainsi les bases de la théorie que développera Dirichlet, et jouant un rôle décisif dans l'approfondissement des concepts fondamentaux de l'analyse.

Le renouveau de l'analyse

Bernard Bolzano, philosophe et mathématicien (1781-1848), eut une claire conscience de la nécessité de repenser avec rigueur les concepts et les définitions de base et de reconsidérer soigneusement les démonstrations pour asseoir l'analyse sur des principes irréprochables. Dès 1817, dans un mémoire consacré à la démonstration « purement analytique » d'un théorème important d'analyse (le titre complet est le suivant : *Démonstration purement analytique du théorème : entre deux valeurs quelconques qui donnent deux résultats de signes opposés se trouve au moins une racine réelle de l'équation;* ce mémoire, assez connu en Allemagne, fut traduit en français en 1964), il prend le soin de donner une définition correcte de la notion de continuité (identique, à peu de chose près, à celle que nous avons héritée de Weierstrass, et plus rigoureuse, dans l'expression, que celle de Cauchy), en regrettant que tant de mathématiciens, « même réputés », n'aient encore à ce sujet que des concepts fort « indistincts ». Bolzano eut nombre d'idées très originales, comme celle d'avoir construit une fonction continue en tout point de son intervalle de définition, et cependant nulle part dérivable (cet exemple se trouve dans la *Funksionenlehre* éditée en 1930), mais le caractère purement logique et abstrait de son style de travail annonce plutôt les considérations qui prévaudront à la fin du siècle (avec Frege ou Weierstrass notamment), et son isolement qui l'écarte des grands courants de recherches de son époque le prive du rayonnement qui lui eût permis de faire école.

Le devant de la scène est donc tout entier occupé par A. Cauchy (1789-1857), élève (d'Ampère et de Poisson en particulier) et, plus tard, professeur à l'École polytechnique; en 1821, Cauchy publie le *Cours d'analyse* qu'il a fait à l'École, inaugurant une tradition à laquelle nous devons, ensuite, les traités de Camille Jordan (1882-1887), d'Émile Picard (1891-1896), d'Édouard Goursat (1902-1905). Les travaux de Cauchy portent sur l'analyse réelle et complexe; à côté de découvertes originales, notamment sur l'intégrale définie, ils contiennent beaucoup de résultats connus que Cauchy reformule plus rigoureusement, dans le cadre d'un exposé systématique. C'est par leur caractère de synthèse d'ensemble que les œuvres de Cauchy connurent une si large diffusion et infléchirent le cours de l'histoire.

Dès ses premiers travaux sur les intégrales définies multiples, Cauchy remarque que l'ordre d'intégration n'est pas indifférent lorsque la fonction à intégrer devient infinie en des points intérieurs au domaine d'intégration et s'oriente vers un retour à l'ancienne définition de l'intégrale comme somme d'infiniment petits, définition dominante au XVII^e siècle et antérieure à la contribution leibnizienne qui mit en avant, au XVIII^e siècle, *l'intégrale indéfinie.* Dans le cours de 1821, il commence par élargir le concept de fonction numérique, en n'exigeant plus que la fonction soit définie par une expression algébrique *unique,* sans en donner toutefois un énoncé purement analytique. Mais la définition de la continuité d'une fonction contenue dans ce cours reste fortement imprégnée de géométrie.

C'est dans le résumé des *Leçons sur le calcul infinitésimal* (1823) que Cauchy donne sa nouvelle définition de l'intégrale $\int_a^b f(x)\, dx$ comme limite de la somme $\sum_{i=0}^{n-1} (x_{i+1} - x_i) f(x_i)$, avec $x_0 = a$, $x_n = b$ lorsque les intervalles $(x_{i+1} - x_i)$ tendent vers zéro. Cette définition, étendue et généralisée par Riemann dans son mémoire de 1854 : *Über die Darstellbarkeit einer Funktion durch eine trigonometrische Reihe,* est identifiée aujourd'hui sous le nom d' « intégrale de Riemann », bien qu'elle n'acquière son aspect définitif qu'avec l'exposé de Darboux (1875). Stieltjes (1894) et Henri Lebesgue (1902) donnèrent à cette notion d'intégrale définie une nouvelle extension.

Cauchy est resté également célèbre pour avoir donné plus de précision et de rigueur au *concept de convergence* d'une série; comme il s'en explique dans la *Préface du Cours de* 1821 en des termes exemplaires, il détermina avec soin, « avant d'effectuer la sommation d'aucune série », les conditions générales de convergence des

séries, en établissant des critères dont le plus important est le fameux « critère de Cauchy » (en réalité également énoncé par Bolzano en 1817). A la suite de Cauchy, Abel et Raabe (1832), Duhamel (1839), Morgan et J. Bertrand (1842), O. Bonnet (1843), Kummer (1835), Dini (1867), enfin P. du Bois-Reymond (1873) définissent des critères de convergence de plus en plus fins. Pour les séries à termes de signes quelconques, Cauchy montre que, si une série est absolument convergente, alors elle est convergente et, complète Dirichlet en 1837, sa somme est indépendante de l'ordre de ses termes; Riemann, Abel, Dedekind, Kronecker, Weierstrass étudient également les séries non absolument convergentes. Il faut noter cependant que Cauchy ne fait pas encore la distinction entre « convergence simple » et « convergence uniforme », dont Stockes et Dirichlet auront une idée vers 1840.

Cauchy est, enfin et surtout, l'un des créateurs de la *théorie des fonctions de variable complexe*. Tandis qu'en 1821, le nombre complexe n'est pour lui qu'une « expression symbolique », il adopte, en 1825, dans son mémoire *Sur les intégrales définies prises entre des limites imaginaires*, la représentation de Gauss qui fait correspondre un point du plan à tout nombre complexe, puis, en 1849, il se rallie au point de vue de Wessel, d'Argand, de Warren, et légitime les opérations sur les complexes en les ramenant à des transformations du plan : déplacements et similitudes.

Malgré une bonne connaissance des fonctions logarithmique et exponentielle, le XVIII^e siècle n'avait pas fait d'étude systématique des fonctions de variable complexe. En 1825, Cauchy découvre que, pour une fonction définie et continue, l'intégrale $\int_a^b f(z)\, dz$ ne dépend pas du chemin le long duquel se fait l'intégration, et que, le long d'une courbe fermée sans point singulier, l'intégrale est nulle; s'il y a à l'intérieur du contour un point singulier, elle est égale à $2\pi i R$, R étant le résidu en ce point.

Parallèlement se perfectionne la théorie des fonctions elliptiques, principalement avec Le Gendre (*Traité des fonctions elliptiques et des intégrales eulériennes*, 3 volumes de 1825 à 1832), Gauss qui ne publie rien, Abel et Jacobi qui s'aperçoivent de la nécessité de travailler dans tout le domaine de la variable complexe et d'inverser le problème en s'intéressant, non à l'intégrale elle-même, mais à la fonction inverse, de même qu'il est plus commode d'étudier la fonction *tg x* au lieu de l'intégrale $\int_o^x \frac{dx}{1+x^2}$. Abel découvre par ailleurs (en 1828) la propriété fondamentale des intégrales dites « abéliennes ». Jacobi rassemble ses résultats dans les *Fundamenta nova theoriae functionum ellipticarum* (1829) qui imposent un vocabulaire repris par Hermite et Poincaré.

Le XVIII^e siècle avait inauguré l'étude des équations différentielles et aux dérivées partielles. Cauchy établit le premier théorème d'existence d'une solution pour une équation différentielle donnée, par une méthode encore en usage aujourd'hui : elle consiste à remplacer l'équation différentielle par une équation aux différences finies, dont on fait tendre ensuite les « pas » vers zéro. En 1868, Lipschitz retrouve cette méthode en en précisant les conditions d'application, dites conditions « lipschitziennes ». Une seconde méthode, également due à Cauchy, et retrouvée dans toute sa généralité par E. Picard en 1890, est celle des « fonctions majorantes », qui repose sur le développement en série des fonctions analytiques; Cauchy a démontré la convergence des séries entières exprimant les solutions d'un système d'équations différentielles, ce que Darboux et Sophia Kowalevskaïa retrouvent plus tard par une voie plus élégante. Quant aux méthodes d'intégration de ces équations, c'est le géomètre Sophus Lie qui met de l'ordre dans la profusion des résultats obtenus par Cauchy, Jacobi, Clebsch, Liouville, grâce à sa théorie des groupes continus de transformations qui permet et d'unifier sous un seul principe les méthodes classiques, et de déduire de la nature du groupe supposé connu des résultats précis sur la nature des systèmes auxiliaires intervenant dans l'intégration.

Les travaux de Riemann et de Weierstrass

Ces deux noms dominent toute la seconde moitié du XIX^e siècle et, par des méthodes différentes et complémentaires, impriment à la *théorie des fonctions analytiques* sa forme classique.

Bernhard Riemann (1826-1866), un des mathématiciens les plus profonds, fut l'élève de Gauss à Göttingen, puis de Jacobi et de Dirichlet à Berlin. En 1859, il succède à Dirichlet dans la chaire de Gauss à Göttingen, après avoir soutenu sa thèse en 1851. Celle-ci, *Grundlagen für eine allgemeine Theorie der Funktionen einer veränderlichen komplexen Grösse*, est fondamentale. Tout à fait indépendante des idées de Cauchy, elle s'inspire de la physique mathématique et de la géométrie et nous montre Riemann en disciple de Gauss, dont l'œuvre plus soignée que celle de Cauchy et cependant moins connue du grand public mathématique fut déterminante pour le progrès ultérieur de la physique et des mathématiques.

La théorie du potentiel, commencée au XVIII^e siècle, est surtout développée au XIX^e siècle; l'expression même est introduite par Green qui montre, en 1843, l'invariance de l'équation de Laplace par rapport à son inversion. Riemann s'intéresse à cette théorie, guidé probablement par l'enseignement de Gauss qui avait beaucoup travaillé la question. Riemann résout le problème dit « de Dirichlet » : déterminer une intégrale par ses valeurs sur un contour fermé, en appliquant le « principe de Dirichlet », qu'avaient utilisé aussi bien Gauss que Jacobi. Après une objection de Weierstrass et les recherches de Schwarz, C. G. Neumann et Poincaré, Hilbert démontre en 1900 qu'on peut apporter la rigueur voulue à la démonstration de Riemann.

Le caractère topologique des méthodes de Riemann se marque davantage dans sa *Theorie der Abelschen Funktionen* (1857), qui fonde véritablement la théorie des fonctions algébriques, en introduisant les « surfaces de Riemann », formées de plans superposés, en nombre égal au degré d'une équation algébrique et reliés par des lignes de passage joignant les points critiques. L'influence de Riemann fut grande et immédiate, en Allemagne aussi bien qu'en France et en Italie.

Karl Weierstrass (1815-1897) fut initié aux fonctions elliptiques par Gudermann qui l'incita à se fonder sur les développements en séries entières. Après de longues années passées dans l'enseignement secondaire, on le retrouve en 1856 professeur à l'université de Berlin, où ses cours connurent beaucoup de succès. Comme il publiait peu, ses idées sont répandues par les notes de ses élèves. Ses méthodes eurent une influence si profonde et si durable que son nom évoque une coupure, le tournant décisif par lequel l'analyse classique a gagné son équilibre définitif contre les ambiguïtés de l'ancien calcul infinitésimal et que nous désignons, après F. Klein, par l'expression « arithmétisation de l'analyse ». Nul ne l'a reconnu peut-être de façon aussi complète que David Hilbert dans son très fameux article *Sur l'infini* : « En élucidant entre autres les notions de minimum, de fonction, de dérivée, il a écarté les objections que soulevait encore le calcul infinitésimal, il a nettoyé celui-ci de toutes les idées confuses sur l'infiniment grand et l'infiniment petit... Si aujourd'hui, grâce aux méthodes qui reposent sur la notion de nombre irrationnel, ou plus généralement sur celle de limite, il règne en analyse une harmonie et une certitude parfaites; et si, dans les questions les plus compliquées de la théorie des équations différentielles et intégrales, malgré les combinaisons les plus hardies et les plus diverses de toutes les formes de passage à la limite, tous les résultats se trouvent en accord, nous le devons essentiellement à l'activité scientifique de Weierstrass. »

Faisons brièvement le point des apports de Weierstrass. En analyse réelle, il a donc définitivement dissocié les concepts de continuité et de dérivabilité, en construisant un exemple fameux d'une fonction continue sur un segment et cependant dérivable en aucun des points du segment; l'exemple que Bolzano avait construit bien avant ne commence lui-même à être connu que vers cette époque précisément; il dissocie de même les concepts de convergence simple et de convergence uniforme, définit et utilise comme nous le faisons encore aujourd'hui la valeur absolue d'un nombre. Mais par-dessus tout, sa théorie purement arithmétique des

Palais de la Découverte - Paris

▲ ***Le mathématicien* Charles Hermite *(1822-1901) s'illustra notamment par un mémoire célèbre,* Sur la fonction exponentielle, *dans lequel il démontra la transcendance du nombre* e.**

nombres irrationnels lui permet de donner une définition rigoureuse de la continuité d'une fonction, celle que l'on enseigne encore aujourd'hui, et d'obtenir ainsi que l'arithmétique supplante définitivement la géométrie en analyse, ce que voulait précisément dire Klein en parlant d' « arithmétisation de l'analyse ».

Dans le domaine de l'analyse complexe, Weierstrass et, indépendamment de lui, Méray définissent la fonction par un développement en série entière au voisinage d'un point, et la déterminent ensuite de proche en proche, par un *prolongement analytique ;* les « fonctions transcendantes entières » correspondent aux séries convergentes dans tout le plan, tandis qu'au voisinage d'un point singulier, une fonction uniforme peut s'approcher de n'importe quelle valeur fixée à l'avance.

La théorie des fonctions elliptiques atteint, avec Weierstrass, son point culminant ; elle est aussitôt adoptée par Schwarz, successeur de Weierstrass à Berlin, Halphen dans son *Traité des fonctions elliptiques* (1886-1891), et par C. Jordan dans son *Cours d'analyse ;* la théorie des fonctions automorphes de Klein et de Poincaré et la solution du problème d'uniformisation lui doivent beaucoup.

La théorie des nombres

Au début du XIX^e siècle, Adrien-Marie Le Gendre et surtout Gauss déterminent l'orientation des recherches en théorie des nombres. Le Gendre, dans les versions successives d'un *Essai sur la théorie des nombres,* s'appuie essentiellement sur la théorie des fractions continues dont Lagrange avait montré la fécondité. Plus fondamentales sont les *Disquisitiones arithmeticae* (1801) de Gauss, œuvre de jeunesse mais dont la rigueur est telle que, jusque vers le milieu du siècle, rien de comparable ne sera fait ni en théorie des fonctions ni en géométrie. Avec l'algèbre pure, cette théorie des nombres inaugure les mathématiques modernes telles que les conçoit le XX^e siècle.

Gauss introduit la *notion* capitale *de congruence,* extension de la notion d'égalité et premier exemple des classes d'équivalence dont on sait le rôle si important aujourd'hui. « Si un nombre *a* divise la différence des nombres *b* et *c, b* et *c* sont dits *congrus* suivant *a,* sinon *incongrus. a* s'appellera le module » ; tels sont les termes propres de Gauss, qui poursuit : « Chacun des nombres *b* et *c* est dit *résidu* de l'autre dans le premier cas, et non résidu dans le second. » Gauss démontre rigoureusement la loi de réciprocité des résidus quadratiques, étudiée par Euler et Le Gendre.

Gauss complète les recherches de Lagrange et de Le Gendre sur les formes quadratiques : $(a, b, c) = ax^2 + bxy + cy^2$; il cherche à déterminer les nombres k représentables par une forme de ce type quand x et y sont premiers entre eux ; toutes les formes d'un déterminant donné $b^2 - 4ac$ se distribuent par classes. Les méthodes de réduction des formes sont simplifiées par Dirichlet, tandis qu'en 1851, Hermite développe une autre méthode, celle de « réduction continue ».

Fermat avait affirmé dans ses notes l'impossibilité de l'équation en nombres entiers $x^n + y^n = z^n$ pour $n \geqslant 3$ et donnait la démonstration pour les cas $n = 3$, 4. Le Gendre et Dirichlet parviennent à le démontrer pour $n = 5$ (1825) et Lamé pour $n = 7$ (1840). Or, Gauss, dans un travail de 1832, sur les résidus biquadratiques, montre que les lois élémentaires de l'arithmétique s'étendent aux entiers complexes de la forme $a + bi$, les « entiers de Gauss ». Kummer considère, plus généralement, des entiers : $a_0 + a_1r + a_2r^2 + ... + a_{n-1}\,r^{n-1}$, où les a_i sont des entiers relatifs et r une racine primitive de l'équation $r^n = 1$. Kummer arrive alors à démontrer le « grand théorème de Fermat » mais en ayant, à tort, généralisé la théorie classique de la décomposition en facteurs premiers à ses nouveaux nombres. Averti de son erreur par Dirichlet, il amende sa démonstration en inventant ses « nombres idéaux » qui donneront à Dedekind l'idée de sa théorie des idéaux, concept central dans l'étude des corps de nombres algébriques.

Si le grand théorème de Fermat a orienté la théorie des nombres vers l'extension de la notion de nombre entier, en la mettant en rapport avec l'algèbre, d'autres problèmes la tournent vers la théorie des fonctions analytiques ; ainsi le problème de la partition des nombres posé par Euler (qui fait appel aux séries entières), le problème de la répartition asymptotique des nombres premiers étudié par Le Gendre, le problème de Waring : déterminer le nombre de représentations d'un nombre n comme somme de puissances k-ièmes positives, qui fait appel à la théorie des formes, etc. Ces problèmes font intervenir un certain type de fonctions analytiques dont la plus célèbre est la *fonction zéta* de Riemann.

Pour achever, rappelons que c'est au XIX^e siècle que se fit une dissociation précise entre nombres algébriques et nombres transcendants, c'est-à-dire qui ne peuvent être racines d'aucune équation algébrique à coefficients rationnels. En 1844, Liouville prouva de manière générale l'existence de nombres non algébriques ; Hermite démontra la transcendance du nombre e en 1872, et Lindemann celle du nombre π en 1882.

Conclusion

Ainsi, le XIX^e siècle est avant tout le siècle où les mathématiques explosent en multiples branches diversifiées et spécialisées. Gauss, Poincaré ou Hilbert sont les derniers génies universels, tandis que commence à croître la race des experts et la nécessité pour chacun de travailler sur un ensemble de problèmes souvent restreint et impliquant un appareillage technique tel qu'il n'est que rarement accessible aux autres mathématiciens non spécialistes. Cependant, en 1893, F. Klein pensait que les concepts de groupe, de transformation linéaire et d'invariant permettaient de compenser l'extrême division des disciplines mathématiques par l'accès à un point de vue beaucoup plus général et abstrait d'où l'on aperçoit ce que Bourbaki nommera plus tard, dans son article bien connu, « l'architecture des mathématiques ».

Le XIX^e siècle est, ensuite, le grand siècle de la *rigueur,* le XVIII^e ayant été sans doute celui de l'ingéniosité. En s'attachant à chercher des démonstrations même pour les résultats bien connus et en soumettant le concept de démonstration lui-même à l'examen, les mathématiciens du XIX^e siècle retrouvent pour ainsi dire l'inspiration euclidienne.

Nous avons essayé de montrer que ce phénomène a surgi au confluent d'efforts aussi divers que ceux de Bolzano, Cauchy, ou Hamilton dont les quaternions, en ne vérifiant pas la loi de commutativité, ont remis en question le caractère « naturel » ou « évident » des lois de l'arithmétique en général, et au croisement de concepts aussi significatifs que ceux de *géométrie non* euclidienne, de géométrie à *n* dimensions, de corps *quelconque* de nombres (complexes, hypercomplexes...), de fonctions *pathologiques,* qui conduisent à repenser à neuf l'idée de *vérité* des mathématiques. Du point de vue technique, peut-être est-ce la théorie des fonctions de variable complexe qui fut la création la plus féconde. Mais du point de vue théorique, la découverte des géométries non euclidiennes apporta un changement capital et décisif dans la conception qu'on se faisait de la nature des mathématiques. Si l'on rappelle encore une fois que c'est au XIX^e siècle que les concepts de nombre irrationnel d'abord, de continuité d'une fonction, de dérivée, d'intégrale ont reçu une définition rigoureuse, on reconnaîtra la composante principale de cette conception de la rigueur selon laquelle il fallait reconstruire toutes les mathématiques sur la base d'une construction rigoureuse des *nombres.* Ce qui a conduit certains (Frege ou Hilbert, par exemple) à réfléchir sur les *fondements logiques* des mathématiques, et nous avons là la deuxième composante qui s'épanouira dans une discipline alors naissante : la logique mathématique. Si la méthode axiomatique n'a pas encore imposé son point de vue sur la nature des concepts mathématiques, il n'est plus question pour le mathématicien, en tout cas, de « lire dans le grand livre de la Nature » : on a cessé de croire que les constructions mathématiques ont nécessairement un homologue dans la réalité. Nous n'en donnerons pour confirmation que ce texte de Gauss, le premier mathématicien du siècle, et un des plus grands, qui écrivait dès 1811, dans une lettre à Bessel (du 21 novembre), qu' « on ne devrait jamais oublier que les fonctions, comme toutes les autres constructions mathématiques, ne sont que notre propre création, et que, lorsque la définition qu'on commence par donner cesse d'avoir un sens, on devrait non pas s'interroger sur ce qu'elle est, mais chercher ce qu'il est convenable d'admettre pour qu'elle garde son sens ».

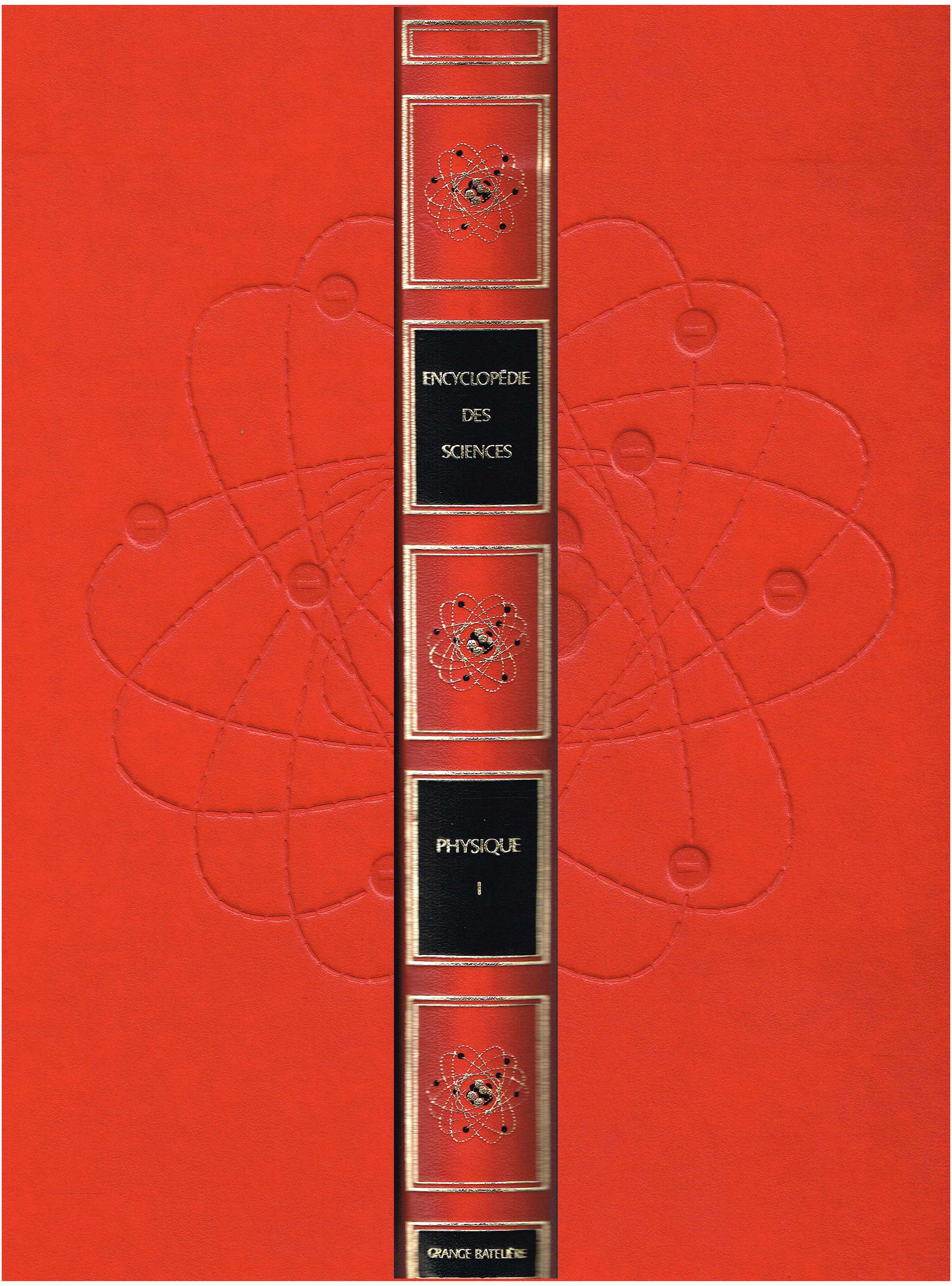
ENCYCLOPÉDIE
DES
SCIENCES
PHYSIQUE
I
GRANGE BATELIÈRE

GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

PHYSIQUE

I

GRANGE BATELIÈRE, ÉDITIONS ATLAS, PARIS - ÉDITIONS KISTER, GENÈVE
ÉDITIONS ÉRASME, BRUXELLES-ANVERS

Publiée sous le haut patronage de :
Messieurs les professeurs :
Jean DORST, membre de l'Institut,
Charles FEHRENBACH, membre de l'Institut,
Roger HEIM, membre de l'Institut
Monsieur l'amiral André JUBELIN,
Messieurs les professeurs :
Pierre LÉPINE, membre de l'Institut,
Louis LEPRINCE-RINGUET, de l'Académie française,
Jean-François LEROY, professeur au Muséum national d'histoire naturelle,
Henri NORMANT, membre de l'Institut,
Monsieur Jacques PICCARD, docteur ès sciences h.c.

Ont collaboré à ce volume :

F. AKOUM pour histoire de la physique, méthode expérimentale
et concepts fondamentaux de la physique.
G. DREYFUS pour la mécanique.
P. FLAUD, D. GEIGER, C. ODDOU pour l'aérostatique et l'aérodynamique;
l'hydrostatique et l'hydrodynamique.
C. KLAPISZ pour la thermodynamique.
W. LE GOAN pour électricité et magnétisme.
J. et C. LEWINER pour l'acoustique.
P. MINÉ pour l'optique.

Les schémas portant la référence Richard Colin
ont été réalisés d'après des croquis fournis par les auteurs.

Réalisation	IDÉES ET ÉDITIONS 16, avenue de Friedland, 75008 Paris
Comité de direction	Simone DEVAUX, Uberto TOSCO.
Rédaction	Françoise MENU, Monique LIONS-GENTIL, Vanina DORÉ, Marie-Noëlle PAILLETTE.
Recherche de l'illustration	Mathilde RIEUSSEC.
Mise en pages	Tito TOPIN et Serge BROCHE.
Illustrations techniques	Richard COLIN.
Coordinateur des dessins	Mario LOGLI.
Fabrication	Sylvia COLIN, Jocelyne TÉPÉNIER.
Directeur de la publication	G. BORDES.

S.E.F.

Dans ce volume :

LA PHYSIQUE (I)

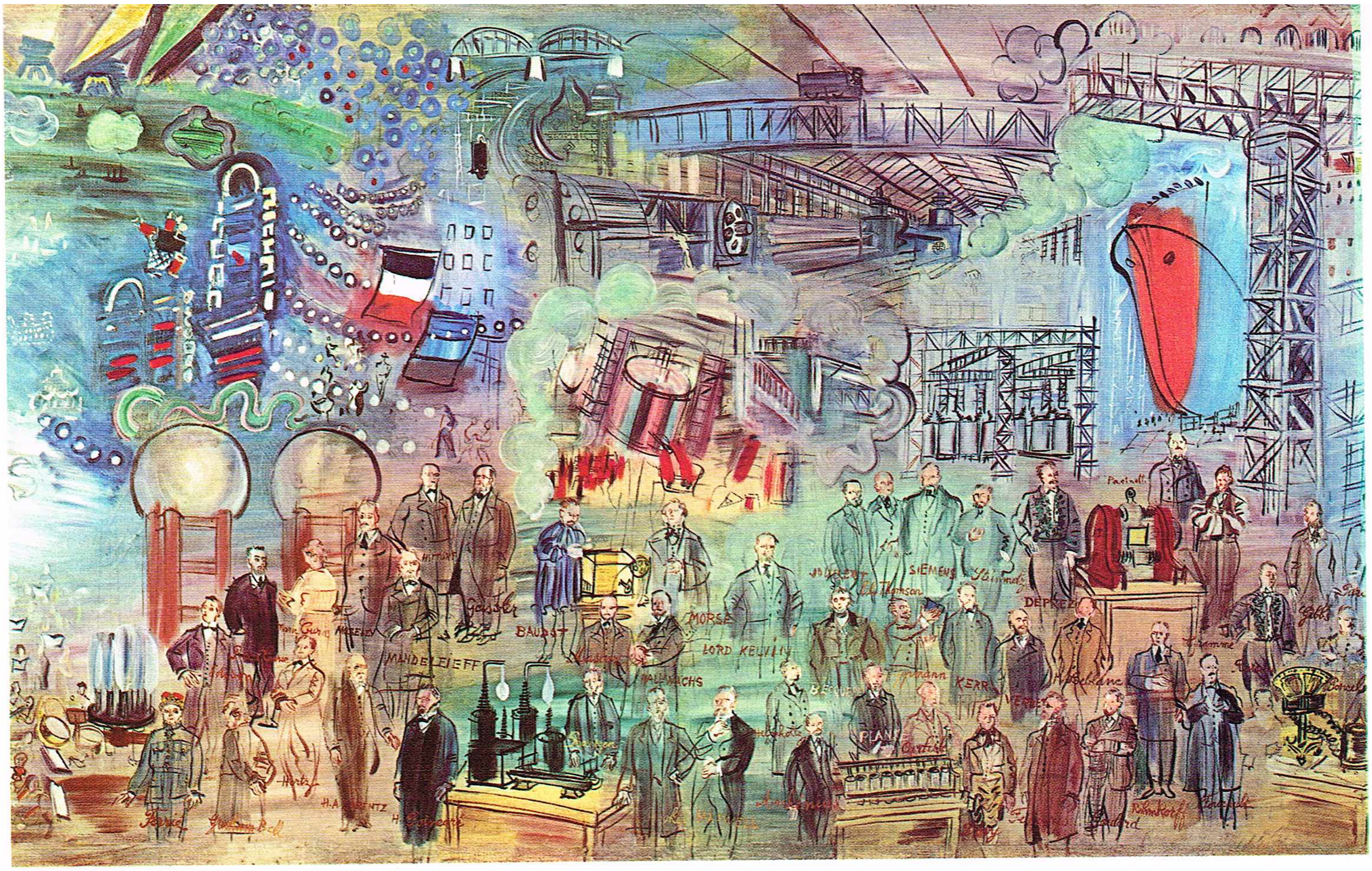

Bulloz

LA PHYSIQUE

HISTORIQUE

▲ **La Fée Électricité, *détail de l'esquisse de Dufy (musée d'Art moderne, Paris)* [Spadem, 1976].**

Les recherches portant sur l'origine de la physique sont d'emblée hypothétiques et provisoires ; et, bien souvent, à une information concrète et vérifiée vient suppléer un ensemble de spéculations « philosophiques » pleines de présupposés. Il est donc largement aléatoire de déclarer que l'activité scientifique s'est révélée être une nécessité et que seule l'observation a permis aux premiers hommes de réaliser le premier catalogue de problèmes. Une antique tradition venue de Grèce fait remonter les premières recherches mathématiques et physiques aux Babyloniens et aux Égyptiens. Aristote rapporte que la naissance de la géométrie est due aux arpenteurs de la vallée du Nil. Cependant l'essentiel de nos connaissances ne permet que d'insister sur les découvertes technologiques attribuées aux Égyptiens et aux Babyloniens. Par exemple, on doit mentionner les travaux de métallurgie (martelage, fonte et alliage), les travaux de tissage, ainsi que ceux de poterie, pratiqués couramment plus de 3 000 ans avant J.-C. L'ensemble de ces travaux suppose acquise la connaissance du principe du tour de potier, de la roue, etc. On date la naissance de l'écriture vers 4 000 avant J.-C. ; moyen essentiel de stockage des connaissances, elle semble alors avoir été réservée à des fins religieuses. Aux Égyptiens on doit aussi la mise au point du premier calendrier, ce qui suppose là aussi une longue suite d'observations et une bonne conservation de celles-ci. Cela suppose également une technique de numération ; la plus connue est celle des Babyloniens, qui utilisaient un système numérique à base 60. Cela montre qu'ils avaient acquis une maîtrise de l'arithmétique qui leur a permis simultanément de procéder aux premières enquêtes astronomiques.

Jusqu'à l'époque de la Renaissance, les civilisations asiatiques ont développé une science et une technologie au moins égales à celles de l'Europe. C'est en particulier le cas pour l'Inde et la Chine. Ainsi fut inventé au III^e siècle avant J.-C. ce qu'on nomme aujourd'hui la numération arabe. Les mathématiques chinoises comportaient une algèbre développée, et leur fusion avec les sciences de la nature était assez avancée. Parmi les nombreuses inventions chinoises, citons le papier, l'imprimerie, la poudre à canon, la boussole magnétique, l'art du forage et la roue hydraulique. Le caractère bureaucratique de la société chinoise semble ensuite avoir inhibé le développement scientifique. Peut-être est-ce ce qui explique que la vision organique du monde qui était celle des Chinois n'a pas entraîné l'apparition d'une véritable physique, comme cela a été le cas en Europe avec le règne du quantitatif. On ne saurait oublier cependant que le savoir chinois, par l'intermédiaire de la culture arabe, a pénétré l'Occident chrétien durant de nombreux siècles.

Si les sources extra-européennes du savoir scientifique restent pour une large part méconnues, on peut néanmoins situer un moment décisif de son apparition dans l'explosion culturelle de la péninsule méditerranéenne à partir du VI^e siècle avant J.-C.

RECHERCHES SUR L'ORIGINE DE LA MATIÈRE

École ionienne : Thalès, Anaximandre, Anaximène

École pythagoricienne

Les atomistes : Leucippe, Démocrite

ASTRONOMIE

388-313 : Héraclide du Pont : rotation de la terre

370 : Eudoxe : mouvement épicycloïdal des planètes

281 : Aristarque de Samos : héliocentrisme

161-126 : Hipparque : théorie des excentriques

130-150 : Ptolémée

DYNAMIQUE

384-322 : Aristote

STATIQUE

287-212 : Archimède

GÉOMÉTRIE

300 : Euclide : "les éléments"

ASTRONOMIE

1473-1543 : Copernic

1572 : Tycho Brahé : observations astronomiques

1609 : Kepler : lois du mouvement des planètes

1610 : Galilée : découverte des satellites de Jupiter

1632 : Galilée impose l'héliocentrisme

MÉCANIQUE

1564-1642 : Galilée

1589 : Galilée : isochronisme des oscillations du pendule

1629-1695 : Huygens : conservation de la force vive

1643-1727 : Newton

1670 : Leibniz : "théorie du mouvement"

1687 : Newton : lois de l'attraction universelle

OPTIQUE

1619 : Snell : lois de la réfraction

1657 : principe de Fermat

1672 : Newton : analyse de la lumière

1694 : Huygens : "traité de la lumière"

1704 : Newton : "traité d'optique"

1810 : Malus : polarisation de la lumière

1822 : Fresnel : théorie ondulatoire de la lumière

1849 : Fizeau : mesure de la vitesse de la lumière

1864 : Maxwell : équations du champ électromagnétique

1887 : expérience de Morley et Michelson

LES GAZ

1644 : Torricelli : tube barométrique

1647 : Pascal : expérience sur le vide

1661 : Boyle : combustion des gaz

1679 : Mariotte : compressibilité des gaz

CHALEUR

1690 : Denis Papin : "mémoire sur l'emploi de la vapeur"

1703 : Stahl : théorie du phlogistique

1730 : Réaumur : échelle thermométrique

1774 : Lavoisier : théorie du calorique

1780 : Lavoisier et Laplace : calorimétrie

1807 : Fourier : "théorie analytique de la chaleur"

1824 : Carnot : "réflexions sur la puissance motrice du feu"

MÉCANIQUE ANALYTIQUE

1743 : D'Alembert : "traité de dynamique"

1747 : Maupertuis : principe de moindre action

1788 : Lagrange : "Mécanique analytique"

ÉLECTRICITÉ

1733 : Dufay : découverte des deux sortes d'électricité

1785 : Coulomb : "mémoire sur l'électrodynamique"

1800 : Volta : pile électrique

1820 : Ampère : lois de l'électromagnétisme

1827 : Ohm : loi du courant électrique

1833 : Faraday : l'électrolyse

1834 : Lenz : loi sur les courants induits

1879 : Crookes : décharges électriques dans les gaz

1897 : Thomson : mesure de la charge de l'électron

THERMODYNAMIQUE

1841 : Meyer et Joule : équivalent mécanique de la calorie

1850 : Kelvin : "mémoire sur la chaleur"

1854 : Clausius : l'entropie

1872 : Boltzmann : théorie cinétique des gaz

1879 : Stefan : loi du rayonnement thermique

PHYSIQUE ATOMIQUE ET NUCLÉAIRE

1895 : Roentgen : rayons X

1896 : Becquerel : observation sur la radio-activité

1898 : P. et M. Curie : radium

1900 : Planck : théorie des quanta

1905 : Einstein : effet photo-électrique

1905 : Einstein : relativité restreinte

1911 : Bohr : théorie quantique de l'atome

1916 : Einstein : relativité générale

1918 : Rutherford : décintégration de l'atome

1923 : De Broglie : mécanique ondulatoire

1925 : Heisenberg : mécanique quantique

1925 : Pauli : principe d'exclusion

1934 : Chadwick : découverte du neutron

1945 : explosion de la première bombe atomique

1947 : observation du méson π

1956 : non-conservation de la parité

1964 : modèle des quarks

La physique grecque

En premier lieu, il faut rappeler que la dénomination « physique » ne correspond pas chez les Grecs à ce que nous sommes susceptibles de mettre sous ce terme actuellement. Pour les Grecs la physique est « une recherche sur les causes » ; elle est donc apparentée à la médecine (ou biologie) et à l'astronomie ; elle est avant tout une enquête, une recherche. Ce n'est que rétrospectivement que l'on peut parler de « physique grecque ».

La physique n'a pas encore d'objet propre ; on ne peut la considérer que solidaire d'un ensemble plus vaste, celui des cosmogonies où s'ordonne une pluralité de sens. Réfléchissant à leur place dans le monde, les premiers physiciens sont pour nous poètes, prêtres, gardiens d'une certaine tradition religieuse. Les premières œuvres des physiciens de l'école de Milet (la physique ionienne) traduisent, en un autre vocabulaire, la tradition cosmologique religieuse présente chez Homère et Hésiode. Mais cette traduction fait s'affirmer une fonction de connaissance dégagée des cadres antérieurs de la religion. Une première rationalisation émerge sur le fond d'une vieille tradition ; celle-ci n'en est pas pour autant complètement dégagée d'un ensemble d'autres préoccupations. La nouveauté réside, semble-t-il, plus dans un nouveau mode de savoir ; celui-ci accueille la discussion critique, l'argumentation, et d'autre part il récuse l'explication de la nature qui ferait appel à des forces surnaturelles, tout en conservant une place pour « les dieux », place extérieure à cette doctrine.

L'école de Milet

Ce qu'on appelle la physique ionienne regroupe les travaux de trois personnages : Thalès, Anaximandre et Anaximène. Leurs conceptions restent bien mal connues et ne le sont que par ce qu'Aristote et autres « doxographes » en ont rapporté. On ne peut donc s'appuyer que sur une très mince documentation pour essayer d'en tracer les grandes lignes. On attribue à ces trois philosophes l'idée de la nécessité d'une recherche de l'origine de la matière. Quelle est pour celle-ci l'élément originaire ? Il semble que la renommée de ces personnages soit due aussi, pour une grande part, à leur pratique d'« ingénieur » avant la lettre. Ils auraient été capables d'effectuer les premiers calculs de distances, et on attribue même à Thalès la prévision d'une éclipse.

*Enquêtant sur « ce qui est au commencement de tout », Thalès posa que l'élément recherché était l'*eau*. On doit supposer que la question de savoir comment l'eau pouvait persister dans l'ensemble de tous les autres objets matériels ne se posa qu'ensuite. Aristote rapporte que Thalès aurait déclaré que « la terre est sur l'eau ». C'est donc au sens où Thalès rapporte en dernier ressort l'ensemble des éléments matériels à l'eau qu'il faut entendre cette phrase. Mais l'essentiel tient surtout à la question posée plus qu'à la réponse. Ce qu'inaugure Thalès c'est l'idée d'une recherche tout à fait spécifique : la recherche d'un principe originel de la génération, qui est l'élément ou la matière impérissable de toutes choses.*

C'est Anaximandre qui succéda à Thalès dans l'école de Milet ; il conserve la question de Thalès, mais lui apporte une nouvelle réponse : le principe recherché n'est pas l'eau mais l'« illimité ». Aristote rapporte que cette modification n'a surgi qu'en raison de la difficulté à rendre compte de l'existence du feu, quand on admet comme Thalès que l'eau est l'élément originel de toutes choses. Une autre source indique qu'Anaximandre conçoit un modèle de développement du monde. Celui-ci serait né d'une semence de chaud et froid, et en conséquence une sphère de feu se serait développée tout autour de l'air entourant la Terre, comme l'écorce autour d'un arbre. Le fait nouveau tient ici à la tentative de rationaliser le développement du monde.

*Le troisième penseur de l'école de Milet fut Anaximène. Profitant des leçons de ses maîtres, il chercha à parer aux écueils où celles-ci conduisaient. Reprenant à son tour la question de Thalès, il se mit en quête d'un élément qui, par ailleurs, participerait à l'illimité d'Anaximandre : il posa donc l'*air*, dont la diffusion était infinie pour lui. Il établit d'autre part une solidarité entre l'âme et le souffle ; le* pneuma *signifie aussi bien l'unité de l'âme que l'air dans lequel les objets matériels s'établissent. L'air, comme élément, était pensé comme origine des changements qui ne pouvaient se produire que par condensation ou raréfaction de celui-ci. La valeur de toutes ces recherches tient, on l'a vu, plus à la fécondité des questions posées qu'à leur réponse spécifique.*

Les pythagoriciens

Après l'école de Milet, deux groupes sont à retenir de notre étude. Celui des pythagoriciens, et celui des atomistes.

Les pythagoriciens, groupés dans une secte autour de Pythagore, avancent l'idée que les choses sont constituées de nombres, que l'Univers est identifiable à une gamme musicale tandis que l'âme l'est à une lyre. Leur contribution à l'histoire des idées peut être résumée en indiquant la part décisive qu'ils ont prise au développement des méthodes de déduction en mathématique, ainsi qu'à l'introduction d'une idée d'harmonie qui serait présente dans le mécanisme du monde. Nous leur devons de plus la découverte des nombres irrationnels, ainsi que de multiples études obscures sur l'acoustique et l'astronomie.

De 500 à 420 avant J.-C., le problème central qui divise les philosophes est celui du changement. Il engage tout le développement virtuel de la physique. D'Héraclite pour qui « toutes choses s'écoulent », à Parménide pour qui nul changement n'est pensable, cette question est reprise en main par ceux qu'on appelle les « physiciens » : Empédocle et Anaxagore. Mais la question du changement est posée dans son étendue la plus large et ne se réduit pas à un problème de « philosophie naturelle » ; elle rebondit et sera reprise dans les œuvres des deux penseurs les plus connus de la Grèce : Platon et Aristote.

Empédocle

Auparavant, il faut mentionner l'apport d'Empédocle : celui-ci introduit la notion de « racines » élémentaires desquelles proviennent tous les objets matériels (terre, air, eau et feu). En second lieu, il développe une problématique de la proportion entre ces éléments, destinée à rendre compte de la diversité du sensible.

Anaxagore, quant à lui, s'attaquant au problème de la génération, produisait l'hypothèse

◄ *Page ci-contre, les grandes dates des sciences physiques.*

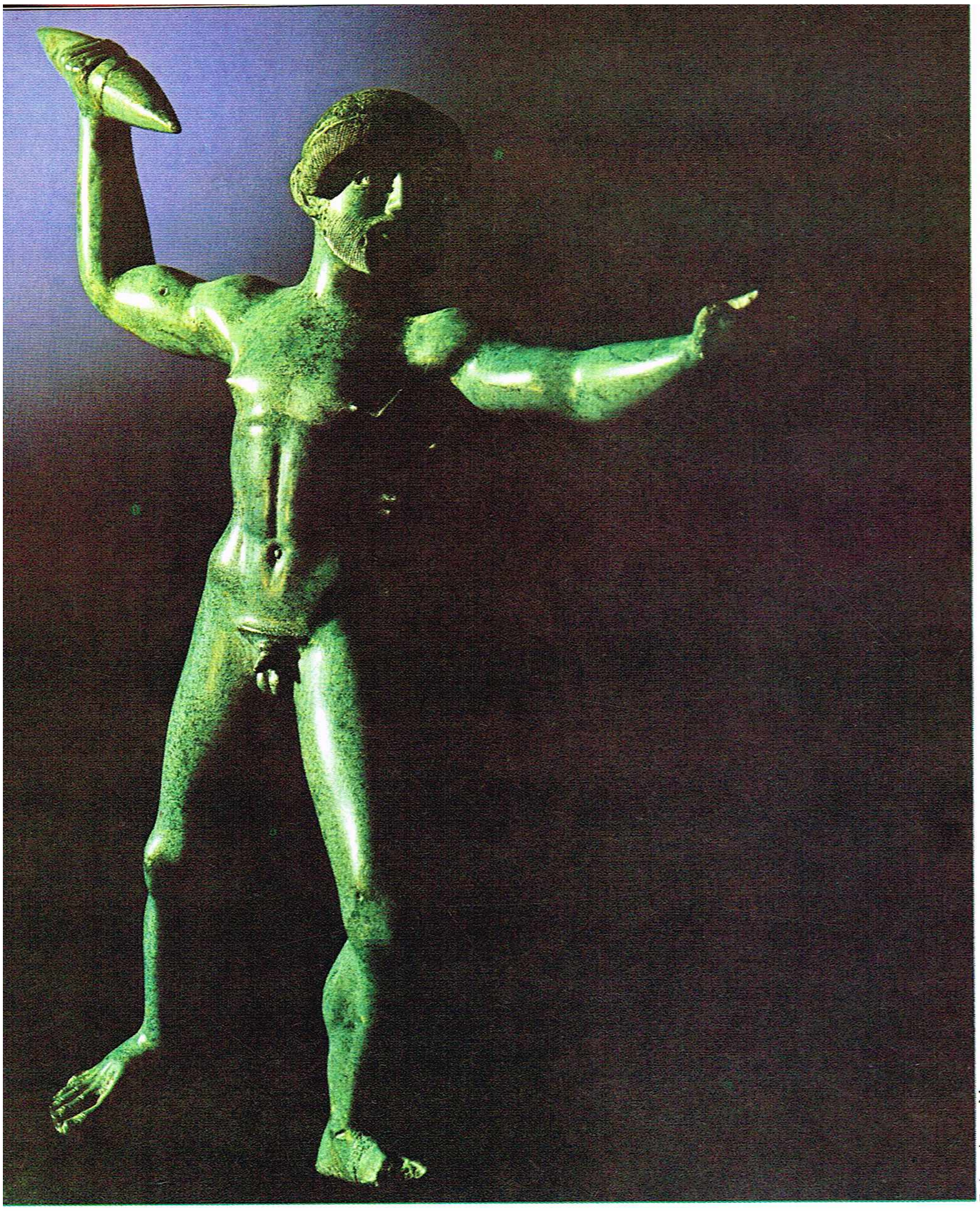

E. Lessing - Magnum

▲ **Zeus, dieu de la foudre, statuette retrouvée à Dodone (Grèce).**
▼ **Aristote (384-322 av. J.-C.), dont la pensée, codifiée et fixée, continuera à être tenue pour une vérité indépassable jusqu'à la fin du Moyen Age (musée du Louvre, Paris).**

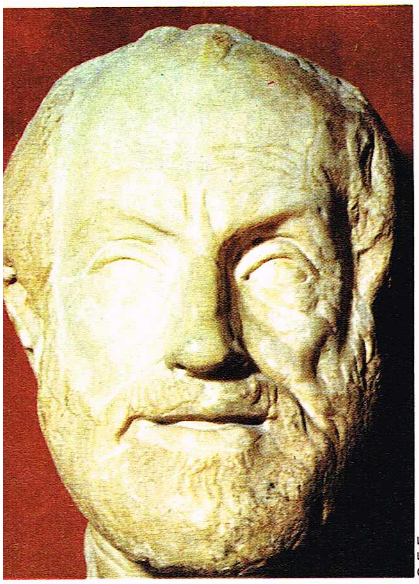

S.E.F.

selon laquelle « en toute chose il y a une portion de toute chose ». Il ouvrait le champ à une spéculation sur l'origine de la matière qui n'était plus hypothéquée par le dénombrement précis des éléments originaires.

Leucippe de Milet et Démocrite

Leucippe de Milet et Démocrite, affrontant les mêmes questions, attribuèrent aux seuls atomes *et au* vide *la réalité. La diversité du sensible ne pouvait être expliquée que par des modifications dans l'arrangement de ces atomes (atome veut dire en grec insécable). La physique est donc alors l'étude des combinaisons possibles d'atomes qui ne sont pas tous de même nature. Le monde s'explique alors par une nécessité mécanique; ainsi, l'ensemble desp ropriétés des corps tient à la plus ou moins grande densité en « pores », par où les atomes passent et se combinent.*

L'ensemble de ces doctrines, sommairement résumé, a été longtemps considéré comme des balbutiements dont l'incidence sur l'histoire de la physique a été, somme toute, négligeable.

Il n'en va pas de même pour Platon et Aristote. La pensée du second a été codifiée et fixée et continuera à être tenue pour une vérité indépassable jusqu'à la fin du Moyen Age. Quant à Platon, Galilée s'en recommandera pour tenter de rompre avec la physique d'Aristote encore dominante à son époque. Il faut donc réserver à ces deux penseurs une place privilégiée.

Platon

Platon résume et présente l'essentiel de sa doctrine physique dans le Timée. *Il la présente comme « vraisemblable », puisque intégrée à un mythe. Le monde ne peut être pour lui le fruit d'un hasard : une intelligence l'a produit. Ce que l'homme peut faire, c'est essayer de conjecturer sur les éléments dont a usé cette intelligence, ainsi que sur la manière de l'arrangement de ceux-ci. Le point décisif tient au choix de ces éléments : ce sont pour Platon des figures géométriques (triangles, polyèdres réguliers et cercles). La Terre est sphérique (Platon tire cette idée de Pythagore), immobile ainsi que placée au centre du monde. Reprenant à son compte les préoccupations des astronomes grecs, Platon tente d'expliquer les apparences irrégulières que présente le ciel (surtout le mouvement des planètes). Platon les rapporte à une combinaison de mouvements circulaires et uniformes. D'autre part, les phénomènes physiques, sensations, pathologies, sont eux aussi rapportés à des considérations de géométrie. Un tel privilège tient à toute la philosophie de Platon; le monde conçu par Platon est assimilé à un tout autosuffisant, qui ne peut être que sphérique, forme la plus parfaite pour les Grecs. Et c'est bien parce qu'il y a un ordre dans la nature que celle-ci vaut la peine d'être étudiée; cet ordre manifeste une téléologie (c'est-à-dire une finalité) dans la conception platonicienne.*

Aristote

Avec Aristote, la physique se constitue réellement comme telle; un domaine d'objet lui est prescrit, une méthodologie se constitue, et un ensemble de concepts émerge, codifiés et assurant la mise en forme intellectuelle de la nature. Esprit encyclopédique, Aristote, dont l'influence fut décisive en Occident, systématise et généralise une multiplicité d'intuitions des penseurs qui lui étaient antérieurs. Sa physique n'a rien d'une physique expérimentale, articulée à la mesure et à la mathématisation; elle est une physique des qualités. L'ensemble des modifications de la nature ne se comprend que par la diversité des rapports qu'entretiennent entre eux le chaud et le froid et le sec et l'humide. Les qualités réagissent entre elles de façon à entremêler leurs déterminations; elles forment la matière de tout objet naturel. Tout objet, se composant d'une matière et d'une forme, se laisse placer dans une hiérarchie, selon la plus ou moins grande perfection de sa forme. La nature, dans laquelle rien ne se produit en vain, est comparée, quant à son fonctionnement, à la pratique artisanale; elle se trouve pensée, de ce fait, comme produite, donc comme pourvue d'une finalité. Cette assimilation engage une conception de la nature, régulière, constante et continue : la nature ne fait pas de sauts brusques.

Le problème central de la physique d'Aristote consiste à distinguer les mouvements entre eux (altération, génération, déplacement). Il faut s'arrêter à sa conception du déplacement local, c'est-à-dire à sa théorie des lieux naturels. Dans la nature, tout objet se trouve non seulement déterminé dans la hiérarchie des êtres, par sa matière et par sa forme, mais aussi par sa place et par son lieu d'élection. En ce sens, Aristote privilégie le repos, qui est la règle pour chaque objet, sur le mouvement. Toute tentative de déloger l'objet est pensée comme mou-

vement violent, et par nature l'objet lourd (le grave) vise à revenir à sa place. C'est cette théorie qui rend compte de la chute des corps.

L'historien de la physique A. Koyré dit de la physique d'Aristote qu'elle attribue « une place pour chaque chose et chaque chose à une place ». Cette théorie du lieu naturel contraint Aristote à nier l'existence du vide ; le monde étant réglé par un ordre cosmique très strict, toute hypothèse introduisant le vide viendrait introduire un dérèglement de cet ordre. Ainsi, la dynamique d'Aristote soutenait que tout corps inanimé (le javelot par exemple) ne se mouvait qu'autant qu'un moteur exerçait constamment son action sur lui.

Pour l'astronomie, Aristote, prenant à son compte la tradition issue de Platon et d'Eudoxe, décrète que l'Univers est fini et qu'il se compose de deux sphères homocentriques. Mais il innove en distinguant absolument deux parties dans l'Univers : la sphère sublunaire, qui comprend la Terre et tout ce qui se trouve sous la Lune, et le supralunaire, lieu d'élection des étoiles. La sphère sublunaire se trouve remplie par une multitude d'éléments périssables et corruptibles. Au contraire, le supralunaire se compose d'un milieu, l'éther (cinquième élément), dans lequel il n'y a de place que pour des objets incorruptibles et donc éternels. Cette distinction très tranchée fut plus tard intégrée dans une perspective théologique par saint Thomas d'Aquin, pour qui le « haut » était divin et le « bas » déchu.

Mais une série de difficultés était encore présente ; d'Aristote à Copernic, la partie de la physique qui suscita les argumentations les plus vives a été l'astronomie. Toute une lignée de savants (Platon, Aristote, mais aussi Hipparque et Ptolémée) vont tenter d'assurer et de perfectionner la théorie de l'Univers à deux sphères homocentriques qu'avait proposée Eudoxe comme première base. Le problème central consistait à rendre adéquate cette théorie avec les observations qu'il était possible de faire. En particulier, il s'agissait, sans changer les hypothèses de travail, de justifier les irrégularités de mouvement, non des étoiles fixes, mais des planètes.

La première brèche ouverte dans la théorie de l'Univers à deux sphères homocentriques le fut par Hipparque : il montra que le centre réel autour duquel tournait le Soleil ne pouvait s'identifier avec la Terre.

Une théorie convergente fut prônée par Ptolémée : c'est le système dit des épicycles. Il consiste à penser que les planètes se meuvent toujours sur une orbite circulaire, dont le centre lui-même suit le tracé d'un autre cercle ; le mouvement irrégulier des planètes s'explique alors par la superposition de deux mouvements circulaires réguliers. Cette théorie, géniale, douée d'une grande souplesse, pouvait ainsi justifier de toute irrégularité en couplant à l'infini divers mouvements uniformes qui se résolvaient en un mouvement irrégulier.

Passé la révolution copernicienne, on a pu s'intéresser rétrospectivement aux cosmologies antiques qui attribuaient un mouvement à la Terre. Les plus célèbres furent celles d'Héraclide du Pont, et surtout d'Aristarque de Samos. Le premier suggéra que le mouvement du Ciel était dû à la rotation journalière de la Terre sur elle-même plutôt qu'à un mouvement de rotation de la sphère des étoiles. Le second avança que le Soleil était au centre d'une sphère des étoiles de grande dimension. Mais ces conceptions restèrent minoritaires ; d'autre part, elles semblent avoir été beaucoup plus intuitives, donc moins cohérentes que celle de Ptolémée.

Archimède

Mais d'autres champs entiers de notre future physique furent défrichés avec le travail d'Archimède. Archimède est reconnu comme un des esprits les plus inventifs aussi bien en physique qu'en mathématiques. Il semble avoir profité de sa connaissance de la mathématique d'Euclide. Sa contribution essentielle à la physique tient à sa promotion d'une partie de la mécanique : la statique. Il fixa la loi d'équilibre du levier, en développant une théorie du centre de gravité, que pourtant il ne définira pas. Il lança aussi les premiers éléments de l'hydrostatique en découvrant une possibilité de mesure des masses volumiques de chaque métal.

Jusqu'à la Renaissance et ses rares précurseurs, il faut surtout considérer que la physique ne s'approfondit que dans les cadres de la science grecque ; une armée de moines compile, commente et intègre le système d'Aristote à l'exégèse des textes bibliques. Cette conciliation qui prend des formes diverses aboutit à la mise au clair d'une doctrine à prétention de complétude et extrêmement cohérente. Mais sur ce fond se produiront certains remaniements qui, cependant, n'altéreront pas la physionomie générale des instruments dont dispose l'humanité pour penser son appropriation de la nature.

La physique classique

On peut considérer que la rupture avec la science grecque, avec le cadre cosmologique dans lequel celle-ci s'était constituée, s'est faite avec Copernic, Kepler et Galilée. Mais leurs travaux n'ont été rendus possibles que par un long cheminement de la pensée, une transformation des techniques instrumentales, et surtout par la mise en œuvre d'un nouveau mode de questionnement. Dans le courant de cette vaste période qu'on appelle le Moyen Age, il faudrait mentionner un nombre considérable de personnages.

La physique, quant à elle, comporte trois branches : la mécanique terrestre, l'astronomie et

▼ Archimède et l'hydrostatique (gravure de la fin du XVI[e] siècle).

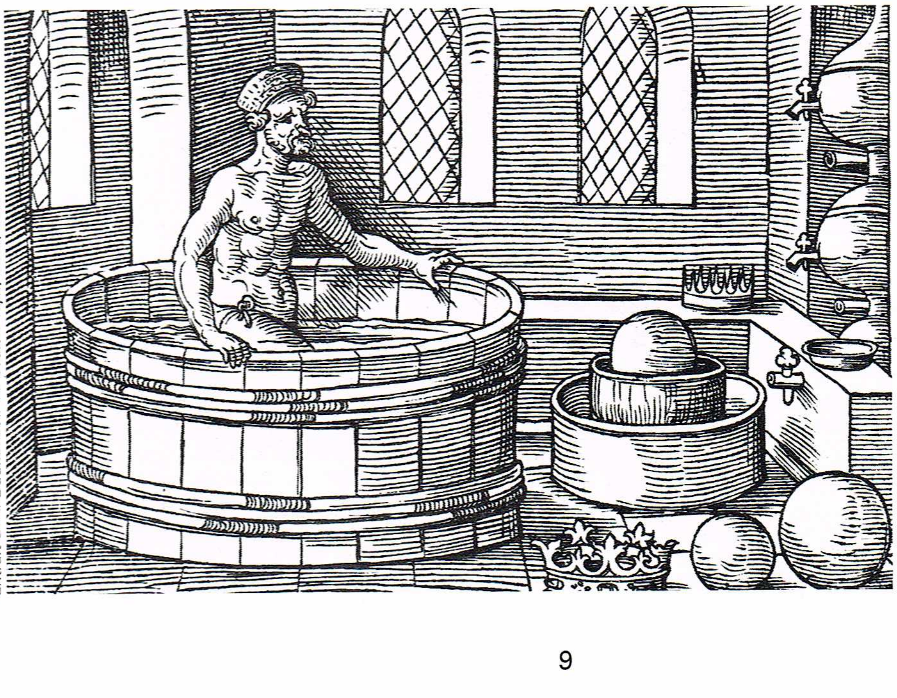

Extrait du « Baukunst » de Walter Ryff, Bâle, 1582

▶ *A gauche, enluminure extraite du* Traité de la sphère *de* Nicolas Oresme. *A droite,* Christian Huygens, *physicien, mathématicien et astronome hollandais.*

Rapho

Gemeentemuseum

l'optique. Il faudra attendre Newton pour que les deux premières soient réunifiées sous des règles générales. Chronologiquement, c'est la théorie astronomique qui sera la première assaillie. Déjà Nicolas de Cues (1401-1464) est considéré comme l'un des premiers à rejeter la structure hiérarchisée de l'Univers. Mais il faut rappeler une des suites de cette contestation de l'idée d'un monde fini, si bien décrite par A. Koyré : « La bulle du monde a commencé par enfler et s'élargir avant d'éclater. » La physique classique, en attendant d'avoir les moyens conceptuels de penser le monde comme infini, doit d'abord l'élargir. D'autre part, toute une lignée de praticiens, d'ingénieurs en construction repose sur de nouvelles bases les conceptions aristotéliciennes du mouvement ; la physique parisienne (avec Buridan et G. Benedetti) mais aussi Albert de Saxe, Nicolas Oresme et Léonard de Vinci s'opposent à Aristote. Pour eux un objet lancé, séparé de ce qui l'a mis en mouvement, persiste à se mouvoir.

Mais pour marquer, du point de vue de la méthode, les traits constitutifs de cette nouvelle physique, il faut mentionner trois principes :

— le cosmos antique va être détruit, et y sera substituée la géométrisation de l'espace ;

— la physique va être mathématisée ; on passe d'une physique des qualités à une science de l'ordre et de la mesure ;

— il y aura mise en œuvre de techniques expérimentales nouvelles et même fictives : des instruments perfectionnés seront mis au point, des expérimentations systématiques avec comparaison des résultats, établissement de correspondances, seront effectuées quotidiennement.

Cela aboutira à briser les cadres de l'ancienne science pour leur en substituer de nouveaux. Tout ceci ne se fera que grâce à la diffusion des résultats d'expériences, à la création progressive de réseaux de correspondances entre savants. Puis, plus tard, des institutions viendront relayer ces diffusions encore hasardeuses ; elles auront la charge du stockage des informations, des hypothèses, etc. Les Académies, les sociétés savantes se mettront en étroites relations et par ce biais se constitueront des centres collectifs de travail.

La physique au XVII^e^ siècle

La mécanique

La mécanique se réduisait dans ses acquis positifs à la statique d'Archimède ; mais, par contre, elle se soutenait encore de la différence entre mouvement naturel *et* mouvement violent, *issue d'Aristote. On doit sa constitution à Galilée (1564-1642). Pour Galilée, la science de la nature doit élucider le problème central, celui de la chute des corps. Il faut en découvrir la loi générale. Galilée est un très habile expérimentateur. Pour réaliser ses expériences, il met au point un plan incliné, sur lequel il fait rouler des billes. La physique de Galilée est une physique de la pesanteur. Sans arriver à la formulation correcte de la loi de la chute des corps (qui correspond à un mouvement uniformément accéléré), il l'approche. Pour ce faire, Galilée doit débusquer certains présupposés de l'ancienne physique. En particulier, il doit considérer que tous les corps sont graves, donc susceptibles de chute ; il doit affirmer que le repos, comme le mouvement, est à expliquer, à la différence d'Aristote qui considérait le repos comme l'état normal de tout corps. Par là même, Galilée met fin à la théorie des lieux naturels qui faisait obstacle à toute compréhension mathématisée de la chute des corps. Il établit que, dans le vide, tous les corps sont lourds et tombent à la même vitesse. En s'intéressant à la* vitesse *du corps, comprise comme rapport de la distance parcourue au temps écoulé, Galilée mettra au jour la notion d'*accélération. *Dès lors, le mouvement est compris comme une notion générale, indépendante de la présence d'un corps singulier ;*

l'espace est géométrisé en tant que la différence qualitative haut/bas ne tient plus ; aucune direction n'est privilégiée. Le mouvement n'est plus un processus, mais un état.

La seconde loi de la physique classique est ici approchée, mais c'est à Descartes (1596-1650) que nous en devons la formulation exacte : « Tout corps abandonné à lui-même persiste dans son état d'immobilité ou de mouvement aussi longtemps que quelque chose ne vient pas le modifier. » Descartes constitue une physique mécanistique (tous les objets naturels et en particulier les animaux peuvent être réduits à des machines ou à des automates). Pour cette raison, ce qui retient son attention est la figure *du contact. Il s'intéresse dès lors à la transmission du mouvement. Formulant les lois du choc, Descartes use d'une loi sous-jacente à leur écriture : après le choc, on doit retrouver la même quantité de mouvement que celle qu'on avait antérieurement. Or cette loi, qui stipule l'équivalence entre quantité de matière et quantité de mouvement, apparaîtra erronée.*

Il faudra attendre les travaux du Hollandais Christian Huygens (1629-1695), qui, expérimentant sur les horloges, découvrira l'erreur de Descartes et montrera que c'est la force vive qui se conserve. De Descartes à Huygens, on passera de la mécanique statique dont Descartes (mais aussi Roberval [1602-1675], dont l'œuvre avait assimilé la chute des corps à un simple problème d'équilibre des masses) s'était fait le promoteur, à la dynamique qui engage une problématique de la force, ou de la quantité d'action motrice.

Leibniz (1646-1716), esprit encyclopédique, contribuera à son développement de façon décisive. La querelle concernant la détermination de ce qui se conserve dans le mouvement mécanique occupa la première place pendant une cinquantaine d'années ; pour résoudre ce problème, il fallait distinguer entre elles les variables, les considérer comme réductibles à des grandeurs géométriques, et présupposer que ni la matière, ni l'ordre, ni surtout le mouvement ne sauraient naître spontanément. Trois étapes se dessinent : Galilée détermine la chute des corps, Descartes conçoit le mouvement uniforme et rectiligne, Huygens et Leibniz, refusant d'identifier la matière à l'étendue spatiale, peuvent introduire la notion de force.

Mais c'est surtout Newton (1643-1727) qui unifiera la mécanique en lui donnant sa loi fondamentale *: la force est le produit de la masse par l'accélération. Une nouvelle notion est introduite, celle de* masse, *notion purement physique, qui ne peut plus se confondre avec le poids, notion impure et issue d'une expérience sensible. Le concept de* force, *lui aussi, est dégagé d'une interprétation sensible et est soumis à la mesure.*

Tout le XVIII^e siècle considérait le mécanisme comme seul susceptible de rendre compte du monde terrestre ; Mersenne (1588-1648), qui fut le correspondant inlassable de Descartes, Thomas Hobbes (1588-1679), l'auteur du Léviathan, *en furent les protagonistes les plus actifs.*

L'astronomie

Mais la physique classique s'est surtout constituée par le biais de l'astronomie. Une suite de découvertes et de travaux mathématiques va aboutir au renversement du système de Ptolémée.

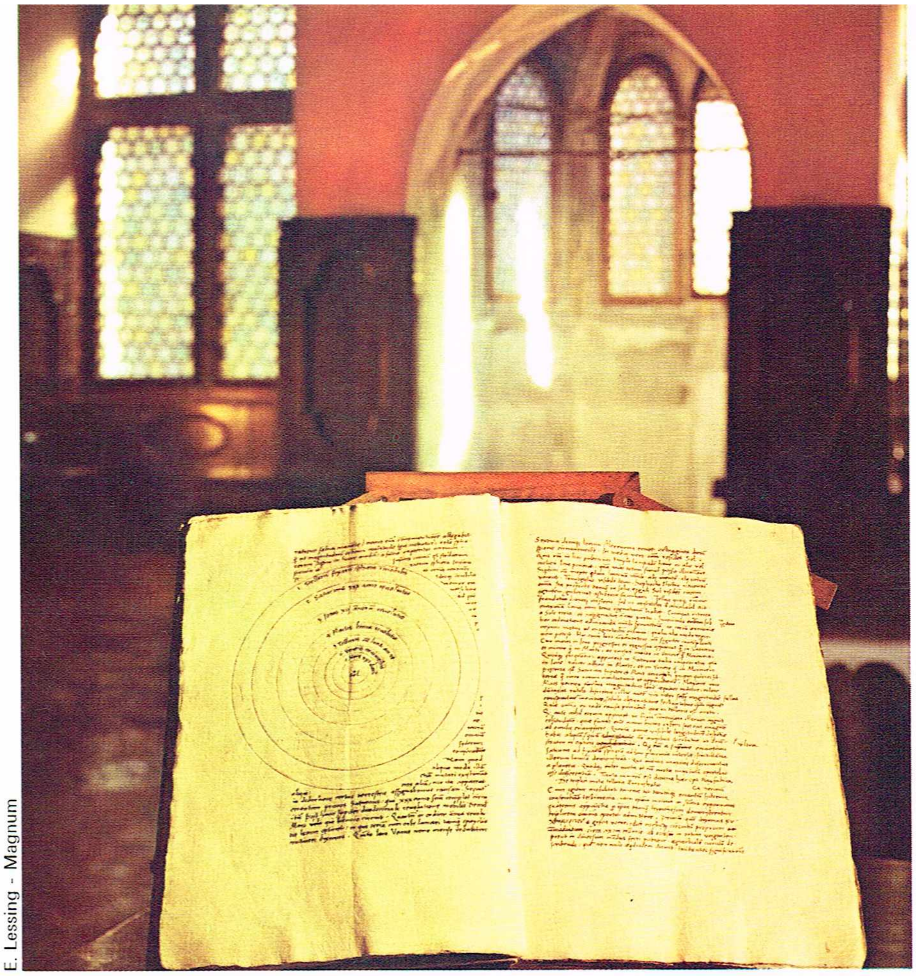

E. Lessing - Magnum

▲ ***L'original du* De revolutionibus orbium celestium *de* Copernic, *exposé à Cracovie (Pologne).***

Initialement, Copernic (1473-1543) porta le coup décisif qui conduisit à mettre en doute le géocentrisme. Copernic est tenu par l'histoire comme celui qui substitua l'héliocentrisme au géocentrisme. Il se réclame de la tradition pythagoricienne, mais, il faut bien le noter, malgré cette référence, il conservera l'idée d'un mouvement circulaire pour la Terre. Dans son livre capital, publié en 1543, le De revolutionibus orbium celestium, *Copernic met en œuvre des techniques mathématiques nouvelles qui assureront la société scientifique d'alors de sa compétence ; son travail n'était plus intuitif mais coordonné à un renouvellement des anciens appareils d'exposition de l'astronomie. Mais Copernic, bien que délogeant la Terre de sa place*

▼ ***Gravure extraite de* Conjoncture sur le cours de la pesanteur, *ouvrage du XVII^e siècle dû au mathématicien Pierre Varignon.***

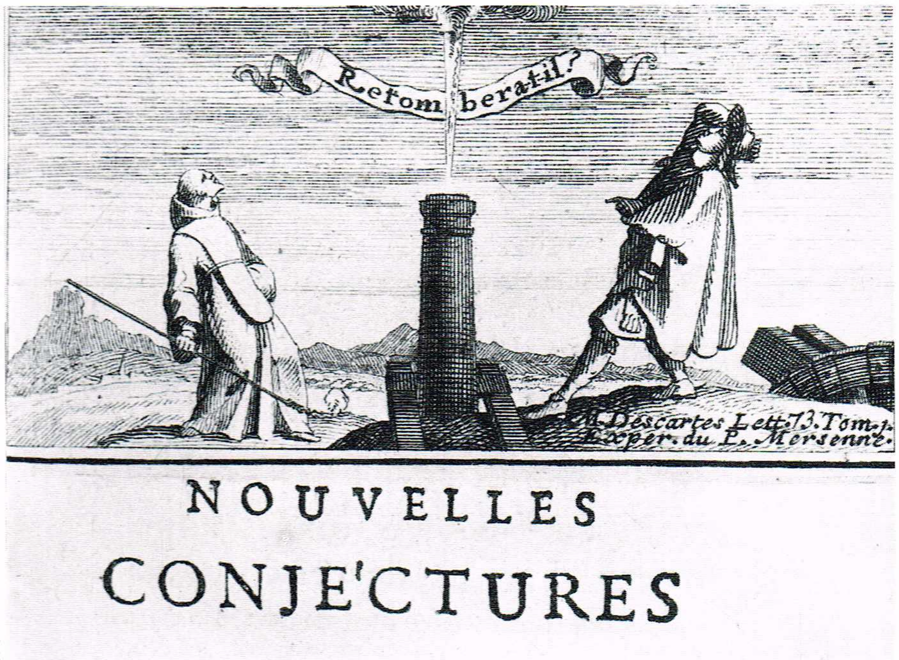

Snark International

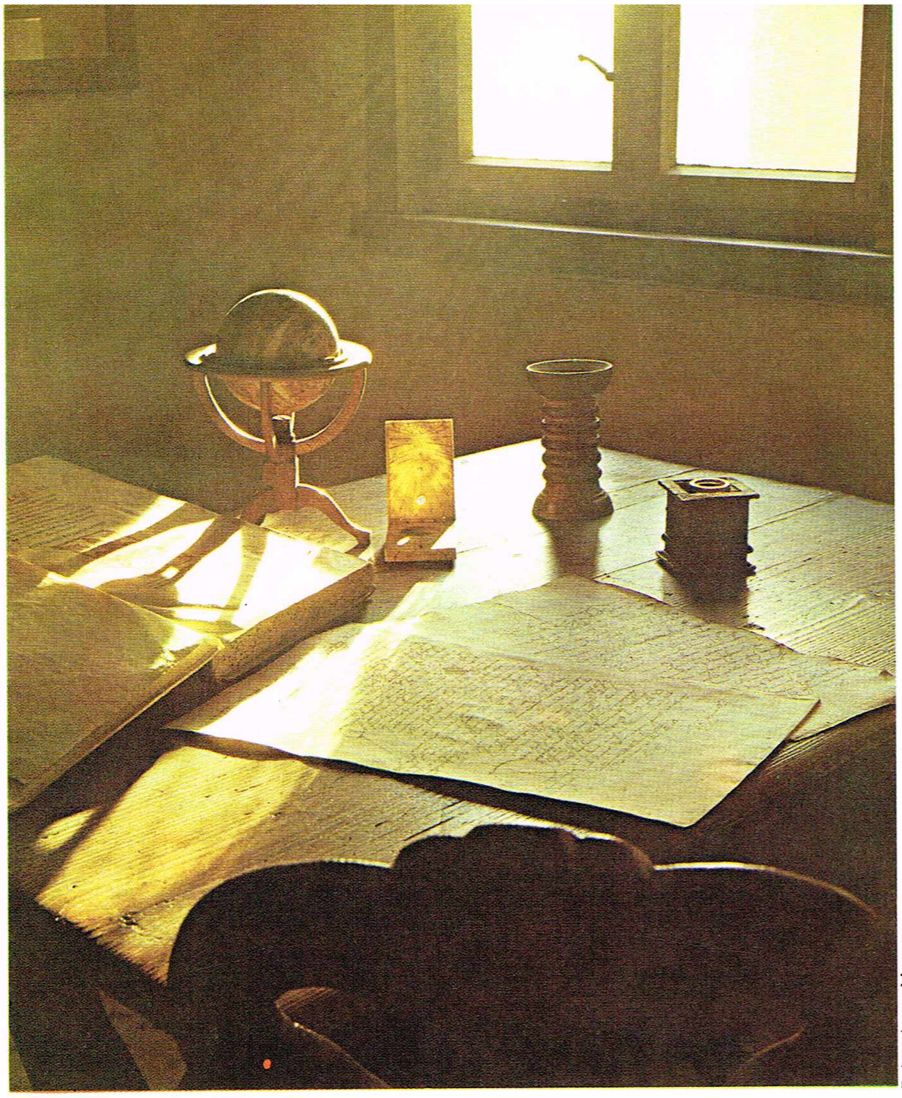

E. Lessing - Magnum

▲ **Le bureau de Kepler reconstitué au musée Kepler de Weil der Stadt (Allemagne) et réunissant la première édition de l'Almageste de Claude Ptolémée, des instruments d'astronomie, une lettre écrite à sa femme et une autre à l'empereur Rudolf.**

▼ **Galilée devant le Saint-Office au Vatican (1847, tableau de R. Fleury; musée du Louvre, Paris).**

centrale, en mettant à cette place le Soleil, conserve l'idée d'un monde sphérique et fini; son monde reste limité par la sphère des étoiles fixes, sphère elle-même soustraite au mouvement. L'hypothèse de Copernic permettait de limiter le recours aux épicycles ptolémiens, mais non pas de faire disparaître cette théorie. Pour tenir cette hypothèse, il fut d'ailleurs contraint de s'inscrire en faux contre l'ancienne mesure du monde; pour lui, le diamètre du monde est 2 000 fois plus grand que celui du monde médiéval.

Le système de Copernic ne parvint pas à s'imposer immédiatement aux yeux des autres astronomes qui lui étaient contemporains. La diffusion même de cette hypothèse ne se fit pas sans à-coups.

Tycho Brahé (1546-1601), astronome éminent, remet à jour un ensemble de données vieillies depuis longtemps; il fait aussi se réaliser de multiples progrès techniques. Mais il fut surtout celui qui tenta de négocier le compromis entre le système de Ptolémée et celui de Copernic. Il refusait le principe de la mobilité de la Terre, mais conservait toutes les harmonies mathématiques issues de Copernic; son travail visait aussi à concilier les nouvelles méthodes avec les exégèses traditionnelles de l'Écriture sainte. Bien que ne souscrivant pas à l'innovation révolutionnaire de Copernic (l'héliocentrisme), il fit beaucoup pour familiariser les astronomes avec les appareils mathématiques de Copernic.

Il faut mentionner Thomas Digges et surtout Giordano Bruno qui, les premiers, affirmèrent l'infinité du monde. Bruno (1548-1600), dans une œuvre complexe, opère une transformation radicale de l'image traditionnelle du monde; il affirme l'infinité de l'Univers, la géométrisation de l'espace et la relativité du mouvement. Mais il paya très cher son audace; il fut brûlé en 1600 comme sorcier.

Kepler (1571-1630), disciple de Brahé, fit franchir un pas décisif à la nouvelle astronomie. Partisan de l'héliocentrisme, il se riva à un travail difficile (déterminer le mouvement de Mars) qui l'amena à rompre avec une vieille idée d'origine grecque, à savoir que le mouvement des planètes ne pouvait qu'être un cercle. En 1609, il formula une loi : les orbites des planètes ne sont pas des cercles mais des ellipses dont le Soleil n'est qu'un des foyers. Ainsi la théorie des épicycles ne put que tomber en désuétude.

Mais c'est à Galilée (1564-1642) que doit revenir le mérite d'avoir su imposer l'hypothèse de Copernic. Il eut à affronter l'Église, et celle-ci ne le laissa pas en paix avant qu'il se rétractât publiquement. Mais il fit plus que de diffuser l'hypothèse de Copernic; il lui donna des assises et, ce faisant, la vérifia, donc la confirma. Pour cela, il eut recours à son invention : la lunette astronomique. *Les progrès techniques de l'optique ont donc conditionné l'affermissement de la nouvelle astronomie. Galilée, par le moyen de la lunette, trouve un nombre élevé d'étoiles qui étaient encore méconnues; par contre, il n'a pas tranché la question de l'infinité du monde. Il le déclare indéterminé.*

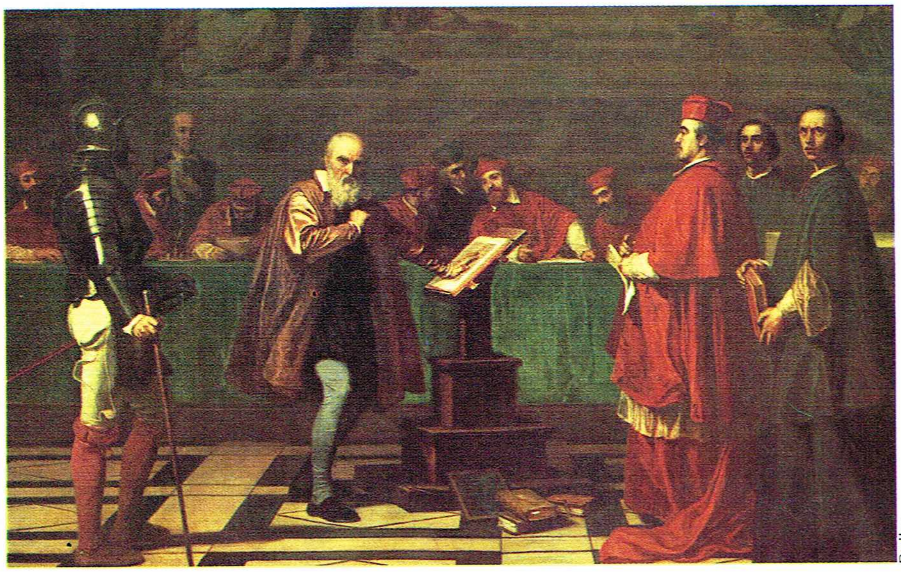

Bulloz

L'optique

Une troisième branche de la physique se développa avec force : ce fut l'optique. Ses progrès, on l'a vu avec Galilée, conditionnèrent le développement de l'astronomie. Les mêmes noms vont apparaître que ceux mentionnés pour la mécanique, ce qui témoigne à la fois de la polyvalence des scientifiques du XVII^e^ siècle et de l'unité de leur horizon de recherches.

Jusqu'au XVII^e^ siècle, la théorie de la vision qui prévalait supposait que les objets émettent des images qui, voltigeant, viennent frapper l'œil et le pénètrent. Léonard de Vinci avait émis l'hypothèse selon laquelle l'œil lui aussi émettait un rayon qui s'appropriait les objets extérieurs. Les Italiens Mandico et Porta expérimentent les premiers sur le rayon lumineux en utilisant un prisme. Il fallut surtout attendre des progrès techniques décisifs dans le polissage des verres pour que l'optique acquît ses premiers titres de scientificité.

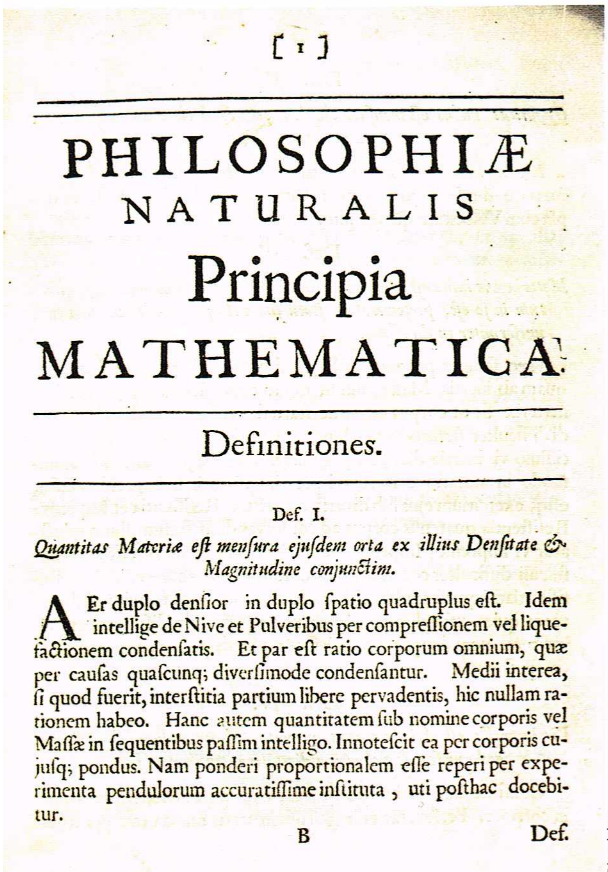

[1]

PHILOSOPHIÆ NATURALIS Principia MATHEMATICA.

Definitiones.

Def. I.

Quantitas Materiæ est mensura ejusdem orta ex illius Densitate & Magnitudine conjunctim.

Aer duplo densior in duplo spatio quadruplus est. Idem intellige de Nive et Pulveribus per compressionem vel liquefactionem condensatis. Et par est ratio corporum omnium, quæ per causas quascunq; diversimode condensantur. Medii interea, si quod fuerit, interstitia partium libere pervadentis, hic nullam rationem habeo. Hanc autem quantitatem sub nomine corporis vel Massæ in sequentibus passim intelligo. Innotescit ea per corporis cujusq; pondus. Nam ponderi proportionalem esse reperi per experimenta pendulorum accuratissime instituta, uti posthac docebitur.

B Def.

Pineider

Kepler fut le premier à donner la première théorie rationnelle des lentilles. Galilée, quant à lui, construisit le télescope qui lui permit de corroborer l'hypothèse de Copernic. Mais c'est surtout Descartes qui, dans sa dioptrique, fixa définitivement la loi de réfraction des rayons lumineux. Fermat, Canalieri et F. M. Grimaldi contribuèrent grandement au développement de l'optique en donnant respectivement la loi de propagation de la lumière, celle de la distance focale des lentilles pour les parallèles, ainsi que la mise en évidence du phénomène de la diffraction. Mais surtout Huygens assimila la lumière à une onde, un transport d'énergie. Cette onde se déplace dans un milieu transparent, pénétrant tout l'Univers, l'éther.

Cependant, la synthèse la plus magistrale se trouve dans l'œuvre de Newton et en particulier dans les Philosophiae naturalis principia mathematica *publiés en 1687. Newton tire parti de deux traditions antagonistes : la philosophie mathématique (Descartes, Galilée), et la philosophie corpusculaire qui se réclame non pas de Platon mais de Démocrite (Gassendi, Roberval, Boyle, Mooke). Nous lui devons la formulation exacte des lois du mouvement; par ce biais, il put réconcilier les mécaniques terrestres et célestes, ayant pu démontrer l'identité des gravitations terrestre et céleste et découvrir la loi fondamentale d'attraction qui les lie. L'assimilation du calcul différentiel, qui est aussi l'œuvre de Newton, aboutit à considérer les êtres mathématiques comme un flux. Newton, pour asseoir sa théorie de l'attraction, fut contraint d'introduire le vide et l'action à travers le vide.*

◀ ***Page du* Philosophiae naturalis principia mathematica*, l'œuvre magistrale de Newton, publiée en 1687, sur l'application du calcul mathématique à l'étude des phénomènes naturels.***

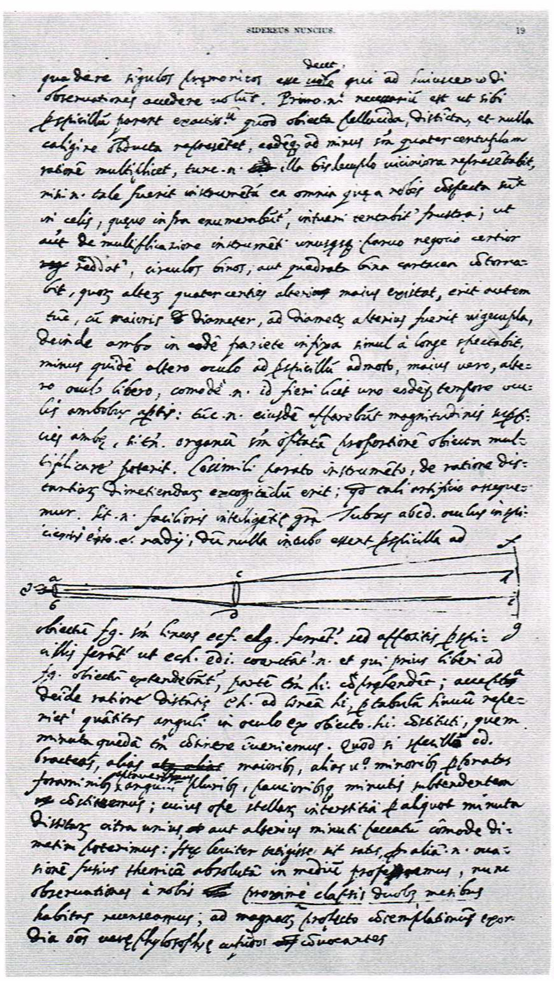

Biblioteca Ambrosiana

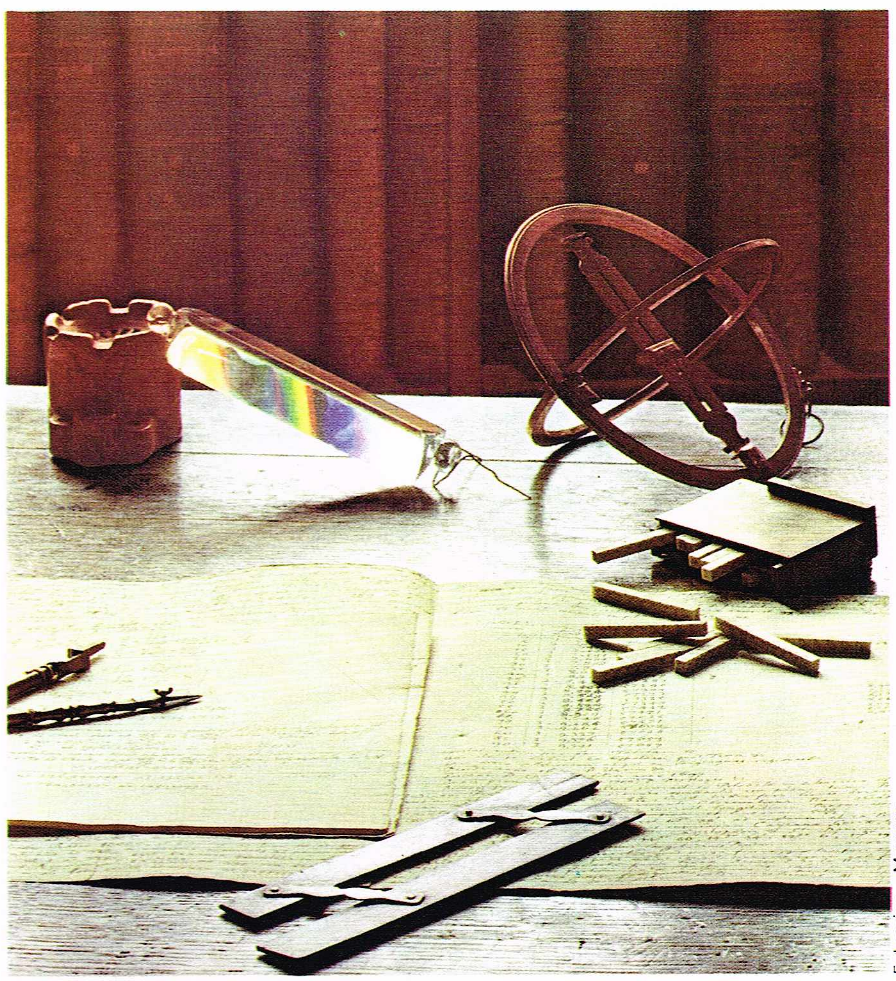

E. Lessing - Magnum

▼ ***A gauche, page manuscrite du* Sidereus nuncius *(1610) de Galilée, dans lequel celui-ci décrit le fonctionnement de sa lunette astronomique. A droite, le bureau de Newton, dans sa chambre du Trinity College, sur lequel on a réuni son manuscrit sur l'aberration de la lumière et les réglettes de Neper utilisées pour le calcul des logarithmes.***

▶ *Gravures illustrant la célèbre expérience de Magdebourg (1654) par laquelle* Otto de Guericke *mit en évidence la pression atmosphérique.*

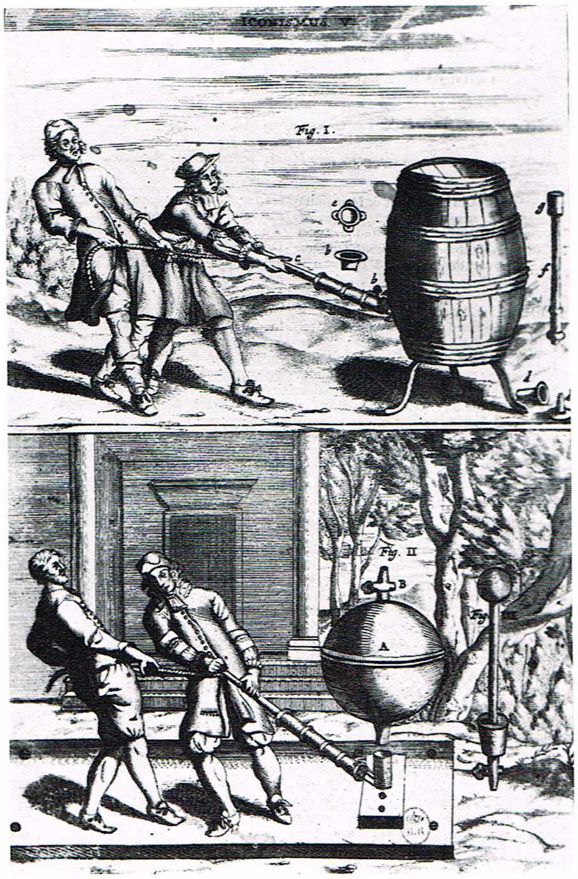

Snark International

Il faut mentionner aussi ses travaux d'optique; il réussit à décomposer de la lumière et à fixer la première théorie scientifique des couleurs du spectre. Il mit au point une théorie « corpusculaire » de la lumière. Celle-ci était sensée se décomposer en particules très fines appartenant aux différentes couleurs, mais séparées dans le spectre. Cette théorie fut suffisamment puissante pour occulter la théorie de Huygens qui ne trouvera sa confirmation qu'avec Fresnel.

La pression atmosphérique

Il faut aussi mentionner, dus au développement du mécanisme, les travaux concernant la pression atmosphérique. *E. Torricelli (1608-1647) et B. Pascal (1623-1662) démontrent son existence en réalisant la fameuse expérience du puy de Dôme. Ainsi s'écroula le vieil adage, « la nature a horreur du vide ». C'est en ce sens que l'ancienne notion d'un monde plein et achevé rejoignit le tissu d'erreurs tenaces que la physique avait eu à combattre.*

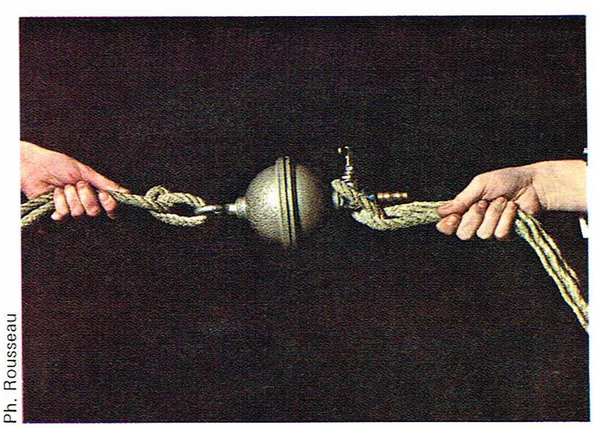

Ph. Rousseau

▶ *L'expérience de Magdebourg dans une démonstration actuelle.*

Un Allemand, Otto de Guericke (1602-1686), tenta de vérifier les résultats de l'expérience de Pascal; pour les besoins de cette vérification, il construisit un appareil qui se révéla être le premier modèle de pompe pneumatique. Par le moyen de cet appareil, les premières notions sur l'élasticité et la masse de l'air furent acquises. C'est à Otto de Guericke que nous devons aussi l'invention du baromètre.

L'Anglais Robert Boyle (1626-1691) et le Français Edme Mariotte (1620-1684) développèrent les travaux issus de Guericke et parvinrent, chacun de son côté, à formuler la loi selon laquelle volume et pression de l'air sont inversement proportionnels entre eux.

On peut ainsi terminer la description des découvertes du XVII^e siècle, période décisive de rupture avec l'Antiquité. On l'a vu, cette révolution a affecté aussi bien la méthode d'appréhension de la nature que les techniques mises en œuvre à cette fin. Pour les hommes du XVIIe siècle, les cadres définitifs à travers lesquels nous percevons les phénomènes naturels sont désormais fixés.

L'espace et le temps sont devenus des notions absolues, préexistantes à toute mesure possible; le XVIIe siècle tiendra pour vérité cette conception et s'emploiera donc à développer, préciser, améliorer ce qui a été déjà mis au jour; mais il faudra attendre encore longtemps pour qu'un doute soit avancé à propos du caractère définitif du mode d'appréhension des phénomènes.

La physique au XVIIIe siècle

*Le XVIIIe siècle est saisi plus par la fièvre de l'inventaire que par celle de l'invention. Diderot et d'Alembert publieront l'*Encyclopédie*, somme de connaissances de toute nature, où les connaissances techniques ne seront pas négligées. Ils reprennent à leur compte les projets d'inventaire que Leibniz avait prônés au début de ce siècle.*

Les salons s'intéressent à la physique et les expériences « d'électricité amusante » défrayent alors la chronique mondaine.

Celle-ci n'était que la traduction joyeuse d'un travail bien plus complexe qu'avaient entrepris certains physiciens. Avant le XVIIIe siècle, si l'électricité n'était pas connue, il n'en allait pas de même pour ce qui se révélera être son voisin, à savoir le magnétisme. William Gilbert (1544-1603) avait écrit en 1600 un traité qui inventoriait toutes les formes d'aimantation. Mais ce fut l'Anglais Francis Hawksbee qui le premier mit en évidence les phénomènes électrostatiques issus du frottement du verre. A S. Gray (1670-1736) et C. F. Dufay (1698-1739) nous devons la découverte respectivement de la conductibilité électrique (des métaux par exemple) ainsi que de la différence permanente entre deux sortes d'électricité. Von Kleist et Petrus Van Musschenbroek (1692-1761) tentèrent d'électriser toute l'eau contenue dans une bouteille, en y plongeant une tige métallique liée à une machine débitant de l'électricité. Recevant une décharge électrique, au moment d'écarter la tige, Musschenbroek exploita son expérience; ce dispositif fut appelé « bouteille de Leyde », ancêtre des premiers condensateurs. Franklin considéra ce phénomène comme analogue, à l'échelle macroscopique, à la foudre accompagnée d'éclairs. T. F. Dalibard (1703-

1799) vérifia son hypothèse en obtenant un jour d'orage, après avoir dressé des tiges de fer, des étincelles. Ce dispositif, lui, était l'ancêtre du paratonnerre.

Mais le temps des expériences spectaculaires prit fin avec Coulomb (1736-1806) ; usant d'un dispositif expérimental, la balance de torsion, il put mesurer les forces d'attraction et de répulsion électrique. Galvani (1738-1798) assimila le fluide nerveux à l'électricité en réalisant des expériences célèbres sur des grenouilles ; mais, malgré son succès, ses conceptions furent combattues par son élève Volta (1745-1827) qui mit un terme à l'électrostatique en introduisant ce qui sera plus tard qualifié de pile.

L'optique

L'optique ne se développa, au XVIII^e siècle, que sur les fondations que lui avait fournies Newton. John Dollond (1706-1761), cependant, par sa construction d'une lentille achromatique (qui ne dispersait pas la lumière), rendit caduque l'idée de Newton selon laquelle une telle construction était impossible à réaliser. Une telle mise au point fit se développer la technique optique, et du même coup un grand nombre de découvertes annexes furent réalisées (lunettes astronomiques, microscope, etc.). Deux disciplines se développèrent alors : la photométrie et la spectroscopie. Pierre Bouguer (1698-1758) parvint à mesurer l'intensité des sources lumineuses. Herschel, Wollaston et von Fraunhofer entreprirent l'analyse détaillée du spectre lumineux. Plus tard, poursuivant ce travail, Becquerel, en 1842, démontrera la continuité entre les rayons ultraviolets, les infrarouges et la lumière.

Mais là n'est pas l'essentiel ; l'interrogation qui subsistait portait encore sur la nature de la lumière. Deux séries d'expériences parvinrent à détrôner la théorie de Newton. D'une part, l'Anglais Thomas Young (1773-1829) met au jour le phénomène *dit* des interférences *(observation d'une frange de raies lumineuses à la rencontre de deux rayons de lumière). Il note qu'il faut revenir, pour expliquer ce phénomène, à la conception ondulatoire de la lumière. Il parvint à mesurer les distances qui séparent les raies et à les attribuer aux longueurs d'onde. D'autre part E.L. Malus (1775-1812) découvrit que la lumière pouvait être polarisée par réflexion ; F. Arago (1786-1853), reprenant les travaux de ce dernier, découvre la polarisation chromatique, et J.-B. Biot (1774-1862) la polarisation rotatoire.*

Ces mises en évidence n'avaient pas trouvé leur théoricien ; elles étaient à intégrer dans une conceptualisation théorique. C'est à Fresnel qu'on doit l'assimilation théorique de ces expériences. Fresnel (1788-1827) transforme l'ancienne théorie ondulatoire en soutenant que les ondes lumineuses sont transversales,

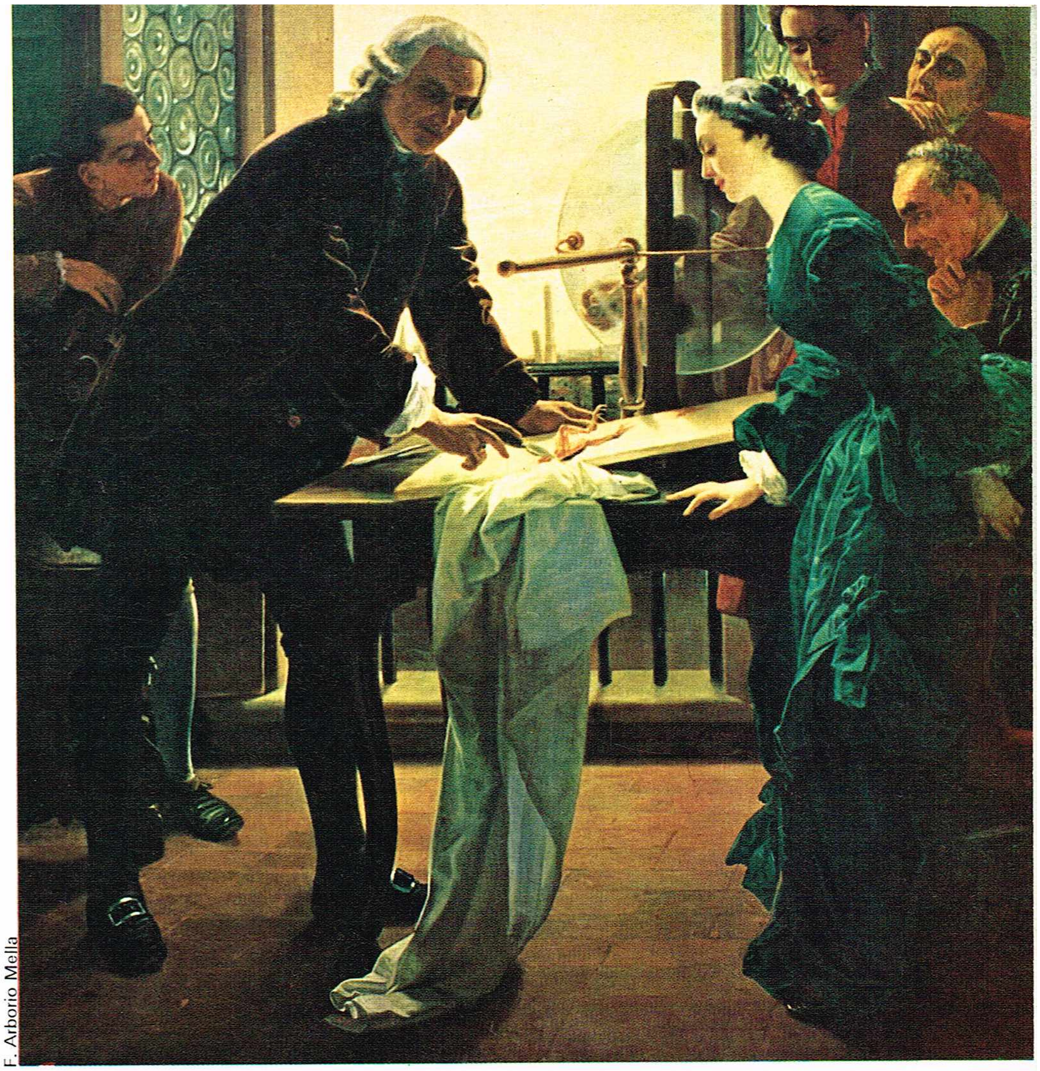

F. Arborio Mella

▲ ***L'expérience de*** **Galvani** ***sur l'électricité animale (Antonio Muzzi, université de Bologne).***

▼ ***A gauche,*** **Expérience sur l'électricité naturelle,** ***gravure ancienne du XVIII^e siècle.***
A droite, divers types **de bouteilles de Leyde :**
A, un modèle du XVIII^e siècle, ancêtre des premiers condensateurs ;
B, une bouteille anglaise ;
C, un modèle plus récent.

Bulloz

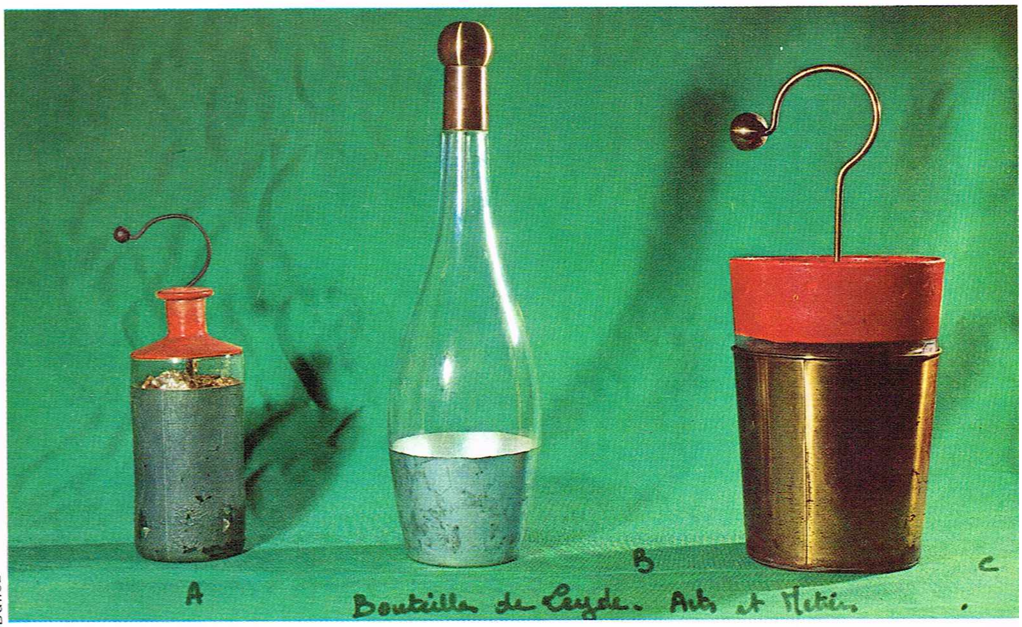

Bulloz

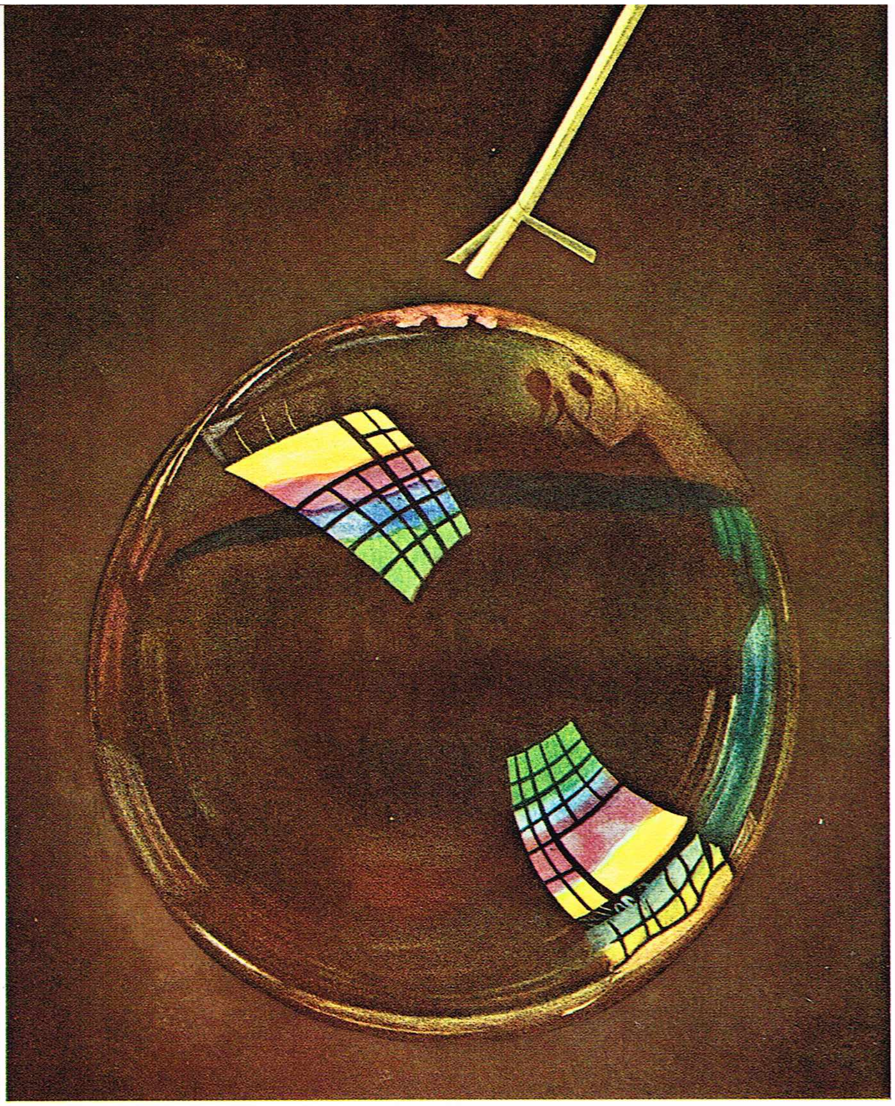

Snark International

▲ « La bulle de savon » : *la coloration des bulles est un phénomène dû aux interférences de la lumière sur des lames minces.*

▼ *Gravure du XVIIIe siècle représentant une loupe géante qui servit à l'expérience des verres ardents (Arts décoratifs, Paris).*

perpendiculairement à la direction du faisceau. Or cette transformation suffit à réhabiliter la théorie ondulatoire, qui désormais était susceptible de rendre compte de toutes les expériences récentes. La théorie corpusculaire semble alors définitivement fausse, et Fresnel a reconquis l'unité d'explication des phénomènes lumineux.

Le physicien L. Foucault (1819-1868), en prouvant que la lumière se propage plus vite dans l'air que dans l'eau, confirme en 1850 la théorie de Fresnel, car, d'après Newton, le contraire devait en être le résultat. La lumière étant tenue pour une série d'ondes transversales, on put rapporter la lumière non plus à

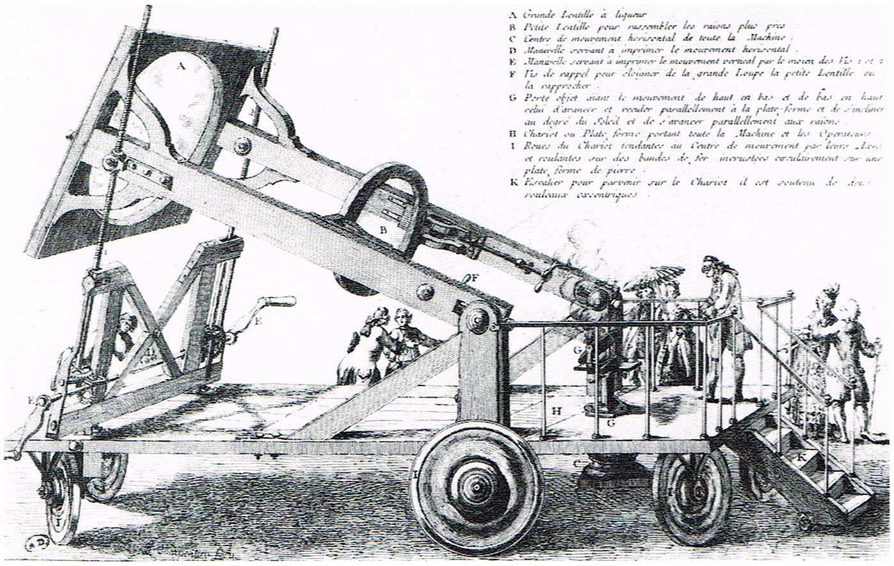

Bulloz

une couleur mais à une donnée physique précise, la longueur d'onde. *Combinée aux résultats de la spectroscopie, la théorie ondulatoire permet à G. R. Kirchhoff (1824-1887) d'interpréter les raies obscures du spectre solaire. D'autres physiciens, dont Bunsen et Angström, observèrent que des métaux portés à l'incandescence émettaient des radiations spécifiques.*

Dans le même temps, d'après Newton, mécanique céleste et physique se développèrent rapidement, au fur et à mesure des progrès techniques et de l'enrichissement de l'appareil mathématique. Les mathématiciens Clairault, d'Alembert et Euler, puis plus tard Gauss et Cauchy tentèrent de résoudre le problème dit des trois corps (déterminer l'orbite d'une planète, compte tenu de l'attraction qui la lie à au moins deux autres corps). D'Alembert et Lagrange règlent mathématiquement la mécanique ; Laplace s'essaie à déterminer la question de l'origine de l'Univers. Auparavant, les Bernoulli avaient fixé vers 1738 les bases de la mécanique des fluides.

L'acoustique

L'acoustique, depuis la résolution du problème des cordes vibrantes par le père Mersenne, laissait indéterminée la question de la vitesse du son. Newton avait certes calculé une vitesse, mais elle se révéla n'être pas la bonne ; ce fut Laplace qui trouva la solution en faisant remarquer qu'il y a une multitude de paramètres concourant à l'établissement d'une vitesse déterminée. J. Sauveur (1653-1716) fit une étude remarquée de l'ensemble des questions attenant à la nature de la vibration sonore.

La calorimétrie

L'étude de la chaleur connut aussi d'importants développements dans la physique classique. Pour les alchimistes, tel Paracelse, la combustibilité de la matière était due à un principe associé au soufre. Jusqu'au XVIIIe siècle, les théories se multiplièrent dans la recherche d'une substance responsable de la chaleur, sans distinguer entre celle-ci et la température. En 1718, Stahl nomme phlogistique *la « terre inflammable » perdue ou reçue par la matière au cours d'une combustion. En 1760, J. Black (1765-1834) pose l'équation de la calorimétrie et précise bientôt la notion de chaleur spécifique ainsi que celle de chaleur latente. En 1775, Lavoisier explique la combustion des métaux par la fixation de l'oxygène. Il définit ensuite un nouveau fluide, le calorique, alors que Laplace pense au contraire la chaleur comme mouvement de particules élémentaires de la matière. Ces deux hypothèses vont subsister jusqu'à ce que la seconde l'emporte au cours du XIXe siècle. Mais dès 1798, Rumford (1753-1814) avait montré à propos du forage des canons que la chaleur produite paraissait inépuisable, et ne pouvait donc être une substance mais plutôt un mouvement.*

C'est toutefois en 1824 que Sadi Carnot (1796-1832) pose les bases de la thermodynamique en étudiant les machines à vapeur inventées par Watt. En 1840, Joule (1818-1889) montre l'équivalence de la chaleur et du travail, et le principe de Mayer-Joule concernant la conservation de l'énergie s'impose bientôt. Dans le même temps, Clausius (1822-1888) introduit la notion d'entropie et montre à la

suite de Carnot qu'elle augmente irréversiblement au cours de l'évolution d'un système isolé. Au milieu du XIXe siècle, la thermodynamique a donc ses fondements, complétés par les recherches de Fourier sur la propagation de la chaleur.

Le développement de la théorie cinétique des gaz s'effectua ensuite à partir de l'hypothèse du « chaos moléculaire » et s'édifia grâce à Clausius, Maxwell, Boltzmann, Gibbs et Nernst en particulier. Usant du calcul des probabilités, cette théorie relie la description microscopique et l'étude des propriétés macroscopiques. Elle permet de retrouver la loi de Mariotte, celle de Gay-Lussac sur la dilatation des gaz, conduit à de nouvelles interprétations mathématiques des propriétés des gaz et de celles des phénomènes thermiques. Ainsi, l'augmentation de l'entropie est désormais associée à l'évolution vers le désordre comme état le plus probable pour un système clos. Ces recherches ont ouvert la voie à la mécanique statistique moderne qui s'est encore développée au XXe siècle à partir des travaux d'Einstein, Ehrenfest et Uhlenbeck.

La physique au XIXe siècle

L'électromagnétisme

Avec la thermodynamique, ce que le XIXe siècle va considérablement développer sera l'électromagnétisme. Une fois la pile inventée par Volta, une génération de physiciens s'employèrent à la perfectionner : Becquerel, Daniell, Seebeck, puis Melloni et Nobili en furent les principaux acteurs. Les effets chimiques du courant électrique furent mis en évidence dans l'expérience de l'électrolyse (Carlisle et Nicholson en 1800, puis Davy). Or, peu après, en 1820, le Danois Œrsted (1777-1851) démontre l'effet magnétique de l'électricité. Mais c'est Ampère (1775-1836) qui assimila la nature du magnétisme à celle de l'électricité, fit la distinction entre tension et courant électrique et attribua un sens au courant électrique. Biot et Savart, dans le même temps, mesuraient la force électromagnétique. L'Anglais Faraday (1791-1867) compléta les énoncés d'Ampère en formulant le principe d'induction en 1831. Selon celui-ci, le courant n'est pas créé par le champ magnétique en tant que tel mais il l'est par les variations du champ, et Henry et Lenz mirent le point final aux recherches portant sur l'induction en mettant au jour le phénomène de self-induction. Faraday prit en charge d'autres questions; il réussit à montrer que lumière et électricité sont de même nature. L'Allemand G. S. Ohm (1789-1854) dégagea la correspondance entre l'intensité d'un courant et la résistance du conducteur.

Mais le travail de synthèse entre tous ces éléments sera effectué par J. C. Maxwell (1831-1879). Reprenant les travaux de Faraday sur la polarisation magnétique, Maxwell systématise deux expériences, celle d'Œrsted et celle de Faraday : un champ magnétique qui varie est accompagné d'un champ électrique, mais l'inverse est aussi vrai. Le champ est alors assimilé à un réservoir d'énergie. Les équations dites de Maxwell décrivent alors la structure du champ électromagnétique. Les lois de Maxwell, alors, sont d'une autre nature que celles de la théorie mécanique classique. Ces lois ne servent pas à la coordination des phénomènes entre eux; elles permettent de prévoir un futur, une fois qu'est établie notre connaissance du présent. L'ensemble de ces considérations permet à Maxwell de supposer comme effet d'un champ électromagnétique une onde électromagnétique. En effectuant la synthèse entre la théorie de la lumière, du magnétisme et de l'électricité, Maxwell accomplit un travail qui semble définitif. La physique semble alors ne consister qu'en deux branches, la mécanique et l'électromagnétisme.

Les rayonnements

Avant la révolution einsteinienne, quelques nouveautés émergent. En étudiant les effets d'une décharge électrique dans un tube à gaz raréfié, Crookes et Goldstein décèlent un rayonnement issu de la cathode qu'ils qualifient de « rayons cathodiques ». Il faut donc déterminer sa composition et sa nature. Une divergence sur cette nature (ondulatoire ou corpusculaire) se produisit entre Goldstein et Thomson. Un physicien français, Jean Perrin (1870-1942), montra que dans le dispositif expérimental étudié, le rayonnement se composait d'une multitude de petits grains chargés d'électricité négative, qu'il appela « électrons ». Ce bouleversement (Maxwell supposait que l'électricité était un fluide continu) se confirma quand il fallut interpréter certains effets : en particulier, l'effet photo-électrique et les lois de l'électrolyse. Lorentz et Zeeman confirmèrent cette vue en proposant d'associer la vitesse des électrons et la nature de l'onde électromagnétique pour expliquer la diversité du rayonnement. Ils purent même ainsi rendre compte de la découverte de Roentgen qui avait mis en évidence un rayonnement particulier qui traversait tous les volumes, à condition que ceux-ci ne soient ni os, ni métal (ce sont les rayons X). Un grand nombre de travaux tente de réaliser une synthèse de ces découvertes. J. Thomson et Aston inventèrent un appareil décisif : le spectrographe de masse, qui permit d'étudier le spectre de la masse des « ions ».

Tentant de découvrir si les rayons X sont émis par des cristaux, Henri Becquerel (1852-1908) montre que ceci n'est vrai que pour le sel d'uranium. Pierre et Marie Curie s'attaquent au problème de l'origine de ses rayons radioactifs. Ils montrent que le thorium en émet aussi; ils découvrent de nouvelles substances, le

▼ L'Inventeur James Watt dans son laboratoire ***(tableau de J. Reynolds, Institution of British Engineers).***

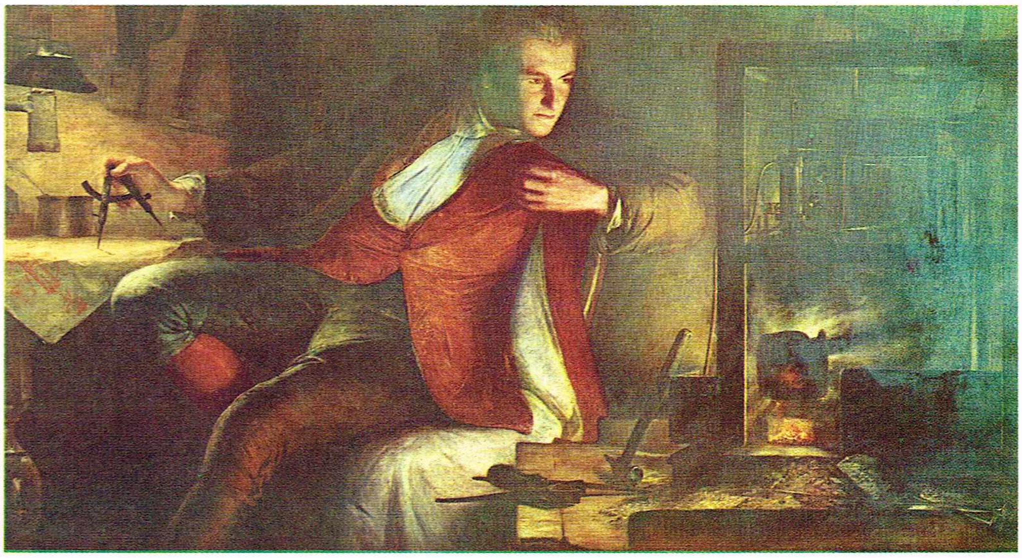

Snark International

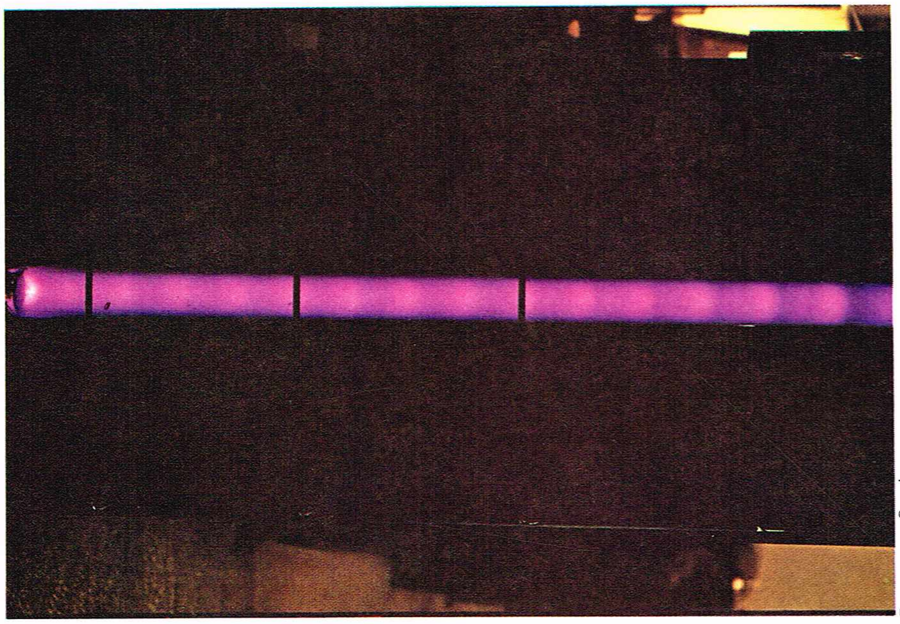

▲ *A la fin du XIXe siècle, en Angleterre, Crookes et Goldstein, étudiant les effets d'une décharge électrique dans un tube à gaz raréfié, décèlent un rayonnement issu de la cathode qu'ils qualifient* de rayons cathodiques.

polonium et le radium, qui émettent ce rayonnement. Ce fut Rutherford, qui, ayant d'abord distingué trois genres de rayonnements radioactifs, réussit à assimiler les rayons α (alpha) à des atomes d'hélium ionisés. Découverte qui fut tout à fait déroutante pour les physiciens : ce fut une des failles irréductibles qui atteignirent l'édifice de la physique classique.

La physique moderne

Depuis Newton, l'ensemble des lois de la mécanique répondait au principe galiléen de la relativité. Ces lois valaient pour tout système en translation rectiligne et uniforme par rapport à un système de référence. En même temps, cela interdisait d'observer la translation d'un quelconque de ces systèmes, de la mesurer par des expériences mécaniques. Il n'en était cependant pas de même du côté de l'optique, et les équations de l'électromagnétisme ne satisfaisaient pas au principe galiléen de relativité. La vitesse de la lumière y intervenait en effet comme une constante, ce qui permettait de tenter la mise en évidence de la translation de la Terre par rapport à cet étalon. Comme on supposait l'existence d'un « éther » en repos et propageant la lumière, cette mesure aurait révélé le mouvement terrestre par rapport à l'espace absolu. Tel était le projet qui avait animé les expériences de Michelson et Morley au cours des années 1880. Mais ces tentatives se soldèrent par un échec répété. Il se confirmait cependant que la lumière se propageait avec une vitesse constante, mais celle-ci était identique dans toutes les directions, indépendamment des mouvements relatifs de la source lumineuse et de l'observateur. Contre toute attente, la loi mécanique de la composition des vitesses était mise en défaut. Plusieurs hypothèses avaient alors été avancées, en particulier celle de Fitzgerald et Lorentz concernant l'existence d'une contraction de la matière en fonction de la direction du mouvement. Mais c'est en 1905 qu'intervint une théorie conforme aux résultats de l'expérience comme aux lois de l'électromagnétisme. Elle fut élaborée par un jeune ingénieur du Bureau des brevets de Berne, Albert Einstein.

La théorie de la relativité

La théorie de la relativité restreinte *d'Albert Einstein rendait compatibles le principe de relativité galiléen et l'invariance de* c, *vitesse de la lumière dans le vide. Il n'était désormais plus question d'éther. S'appuyant sur ces bases, Einstein utilisait les formules de Lorentz qui rendaient les équations de l'électromagnétisme invariantes dans les transformations galiléennes. Mais ceci n'était possible qu'en rompant avec les conceptions antérieures sur l'espace et le temps absolus. Désormais le temps de l'observateur est relatif et dépend du mouvement du système. Ainsi, deux événements simultanés pour un observateur peuvent être successifs dans un autre système de référence. Mais la distance est également relative, puisqu'elle ne peut plus comme auparavant être fondée sur des mesures simultanées. Ainsi l'existence d'une vitesse limite absolue,* c, *a des conséquences qui bouleversent tout le cadre de la physique classique.*

Cela amène tout d'abord une révision des lois de la mécanique permettant de les rendre valables pour des vitesses proches de c *(299 792 km/s). Un autre effet en est la connexion établie entre la masse et l'énergie, la formule* $E = mc^2$ *démontrant leur équivalence, leur capacité de se transformer l'une en l'autre. La masse, quant à elle, apparaît d'ailleurs variable et augmente avec la vitesse, tendant vers l'infini lorsqu'un mobile approche la vitesse de la lumière. Tout cela heurtait le bon sens et souleva de vives polémiques. Mais l'expérience confirma bientôt la conception de la relativité, par l'étude des électrons cathodiques, du rayonnement des étoiles, des phénomènes atomiques, etc. D'autre part, à la suite de Minkowski, Einstein accentua l'amalgame entre les grandeurs que sont le temps et l'espace. Celles-ci sont en effet associées et rendues permutables dans une structure quadridimensionnelle. Aux trois coordonnées de l'espace s'ajoute une variable de temps* ($\tau = \sqrt{-1}\,ct$) *l'ensemble constituant l'*espace-temps *ou* continuum. *Un nouvel invariant est substitué aux précédents absolus : il s'agit de l' « intervalle » où les mesures de temps et de longueur sont combinées.*

Cependant, si le continuum peut être considéré comme euclidien dans la relativité restreinte, il n'en est plus de même après l'introduction par Einstein en 1916 de la relativité généralisée. *Celle-ci ne concerne plus seulement les systèmes en mouvement uniforme, mais aussi ceux en mouvement accéléré, et formule des lois valables dans tous les cas. L'identité de la masse d'inertie et de la masse pesante, vérifiée par L. Eötvös, amène à concevoir l'équivalence de l'inertie de la matière et de la gravitation. Cette dernière traduit le caractère accéléré du système de référence, correspond à une déformation de l'espace-temps au voisinage de la matière, à une courbure locale du continuum. Cela conduit à avancer une nouvelle loi de la gravitation, celle de Newton n'en constituant qu'une approximation. Pour cela, Einstein fit appel aux géométries non euclidiennes, au calcul tensoriel, cependant que l'expérience confirmait sa théorie en vérifiant la déviation de la lumière au voisinage du Soleil, l'avance du périhélie de Mercure due à l'attraction des autres planètes, le freinage de la propagation des ondes hertziennes passant près du Soleil*

et le « rougissement » de la lumière des étoiles lointaines. Jusqu'à la fin de sa vie, Einstein s'efforça de développer une théorie unitaire après avoir proposé un modèle d'Univers courbe, fini mais non limité. D'autres recherches furent également menées à ce niveau, en particulier par Lemaître, Langevin, Eddington, de Sitter, Brans et Dicke, etc., sans que l'expérience ait encore permis de trancher entre leurs diverses conclusions. Quoi qu'il en soit, la théorie de la relativité générale ne peut plus aujourd'hui être considérée comme une spéculation mais s'intègre au champ de l'expérience.

L'effet photo-électrique

Le nom d'Einstein s'associe également à l'étude de l'effet photo-électrique, publiée en 1905 et qui lui valut le prix Nobel. Elle faisait suite à l'introduction en 1900 par Max Planck des quanta, c'est-à-dire d'une structure granulaire de l'énergie. Celui-ci y avait été amené par l'étude du rayonnement du corps noir où théorie et expérience apparaissaient brutalement contradictoires. Rejetant l'idée d'une continuité fondée sur l'oscillation de l'électron, Planck avait posé que le rayonnement correspondait à de l'énergie émise par la matière de manière discontinue, en quantités finies. Celles-ci, les quanta, étaient considérées comme proportionnelles à la fréquence de l'émission et égalisées au produit de cette fréquence par une constante universelle, h, dont toutes les mesures ultérieures ont confirmé la valeur.

Cette théorie permit à Einstein d'envisager une nature corpusculaire de la lumière et d'introduire la notion de photon, c'est-à-dire de quantum de lumière. Dès lors, l'effet photo-électrique s'expliquait par l'impact de ces photons sur le métal, l'extraction d'électrons croissant en fonction de la fréquence de la lumière, puisque celle-ci faisait varier l'énergie des quanta. Cependant cette théorie heurtait de front les conceptions acquises faisant de la lumière un phénomène ondulatoire et continu. De plus, si le point de vue corpusculaire était nécessaire pour expliquer les interactions de la lumière et de la matière, l'interprétation ondulatoire apparaissait elle aussi irremplaçable pour rendre compte des phénomènes de propagation, des interférences, de la diffraction, etc.

La structure atomique

Mais l'introduction des quanta allait aussi bouleverser l'étude de la structure atomique. Celle-ci s'était jusque-là développée à travers les expériences de Jean Perrin sur le mouvement brownien et l'analyse de la radio-activité par Rutherford. Thomson avait envisagé un premier modèle de l'atome où les électrons étaient englobés dans la masse positive. Puis, en 1911, Rutherford le conçut comme un système solaire en miniature ayant pour centre un noyau minuscule, lourd, chargé positivement, autour duquel gravitaient les électrons négatifs. Or, selon la théorie de Maxwell, ces électrons auraient dû émettre un rayonnement continu sur toutes les fréquences, alors que le spectre réel d'un tel rayonnement est fait de raies caractéristiques classables grâce aux nombres entiers.

C'est pourquoi, en 1913, Niels Bohr établit une théorie quantique de l'atome supposant que l'électron ne pouvait tourner que sur certaines trajectoires caractérisées par des nombres quantiques. De plus, Bohr considérait qu'un électron

Société Max Planck

▲ Max Planck *(portrait de F. Reusing; Gottingen, société Max Planck).*

▼ *L'éclat violet d'un réacteur atomique et l'équation de la relativité d'Einstein, $E = mc^2$, qui énonce une équivalence entre la matière et l'énergie.*

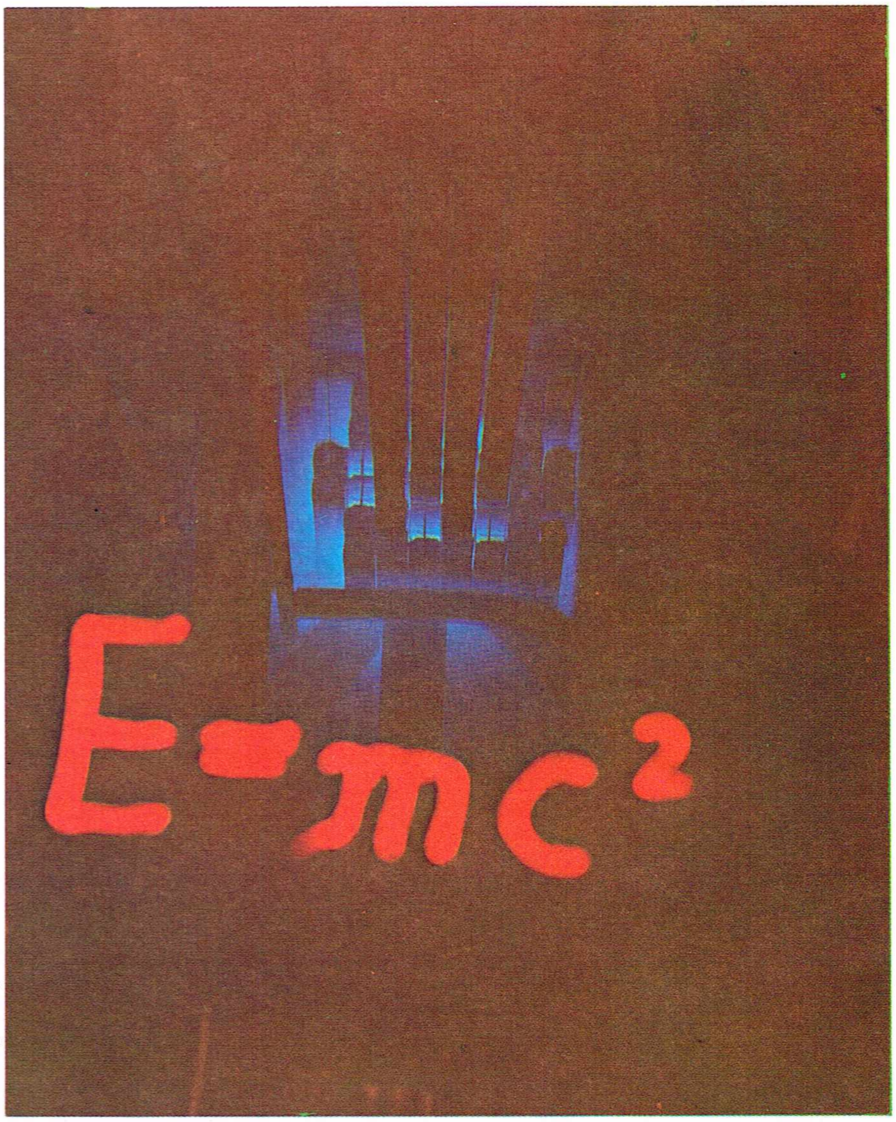

E. Lessing - Magnum

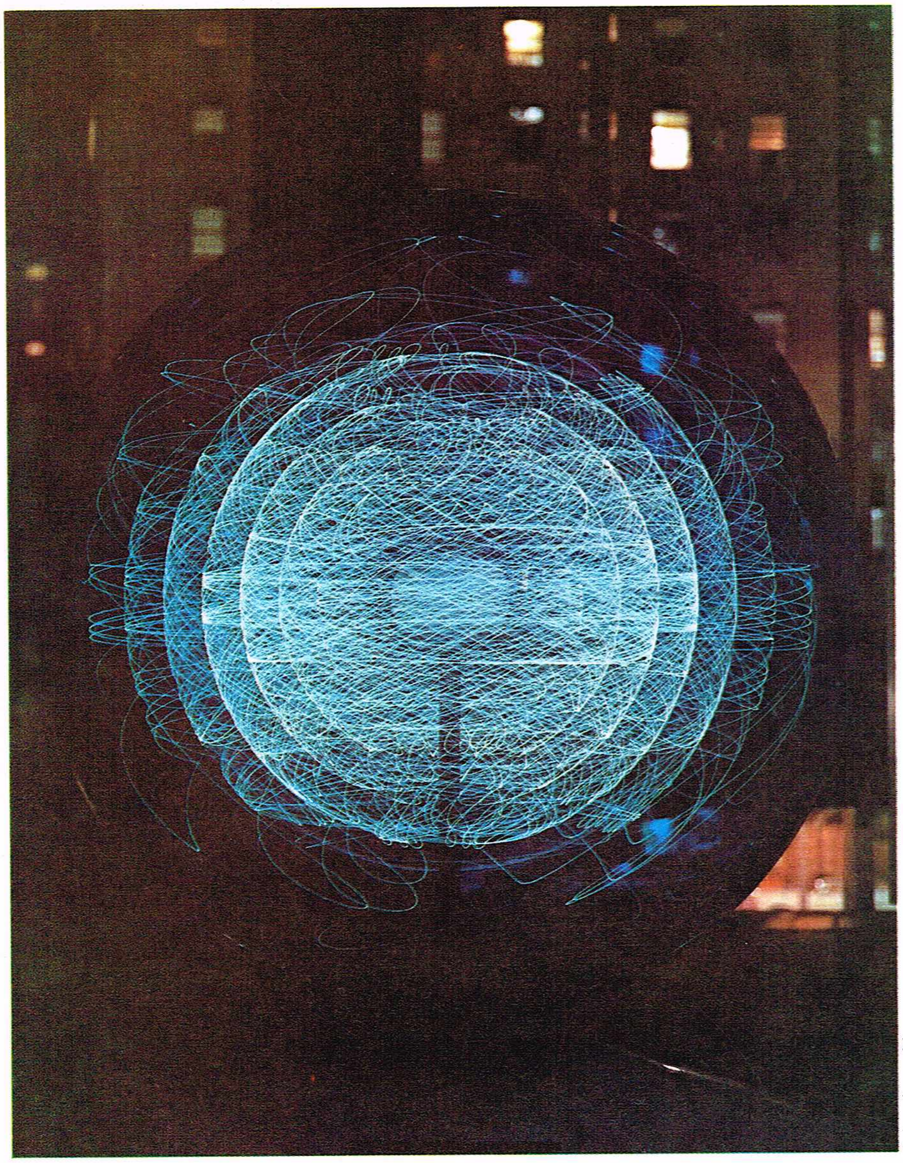

E. Lessing - Magnum

▲ **L'uranium est un élément radio-actif, et c'est sur lui que Becquerel a découvert la radio-activité ; ici, un atome de l'isotope 235.**

pouvait sauter d'une orbite à une autre en émettant ou en absorbant alors de l'énergie, ce qui lui permit d'expliquer les spectres de rayonnement. Cette théorie fut développée par Sommerfeld qui considéra des trajectoires elliptiques et non pas seulement circulaires, et qui utilisa la théorie de la relativité pour expliquer la « structure fine » des raies de l'hydrogène. Cependant la théorie restait incomplète et ne permettait pas un calcul exact des intensités relatives des raies spectrales. D'autre part, Bohr avait été amené à faire appel à des notions jusque-là inconciliables comme celles d'ondes et de corpuscules en affirmant leur complémentarité. Or ce problème ne concernait pas seulement la lumière, mais aussi les rayons X, dont von Laue avait précisé l'aspect ondulatoire, et plus généralement l'ensemble des radiations électromagnétiques.

C'est en 1923 qu'intervient une refonte avec la mécanique ondulatoire de Louis de Broglie. Celle-ci associe l'onde et le corpuscule, ce dernier ne correspondant bientôt plus qu'à la densité d'une probabilité de présence, à l'intensité d'une fonction d'onde. La mécanique classique n'allait plus tarder à n'être considérée que comme une approximation de cette nouvelle théorie qui fut confirmée en 1927 par Davisson et Germer lorsqu'ils mirent en évidence la diffraction de l'électron, montrant ainsi que même ce corpuscule manifestait des caractères ondulatoires. Un nouveau développement fut l'équation de Schrödinger, qui permet de prévoir les niveaux quantifiés d'énergie à partir de la forme initiale d'une fonction d'onde.

Ainsi, Born put déterminer grâce à elle les probabilités de présence concernant l'énergie et précisa le caractère de la grandeur ψ (fonction d'onde liée aux vibrations de l'électron), montrant que ψ mesurait la probabilité que l'électron fût en un endroit donné. Ainsi un corpuscule n'était plus considéré comme un grain de matière strictement limité, mais comme un nuage localisable en un certain intervalle où la fonction d'onde est d'amplitude non nulle. Mais la conception de Max Born n'amène qu'à une évaluation statistique de la présence de la particule, la répétition d'une expérience dans les mêmes conditions aboutissant d'ailleurs à trouver celle-ci en plusieurs endroits. Aussi la théorie ne permet-elle que de prévoir la probabilité que le système se trouve en tel ou tel état. Quant aux mesures effectuées, elles dépendent des conditions de l'observation, car celles-ci sont en interaction avec le système étudié.

Sur ces bases naissait la mécanique quantique fondée par Heisenberg en 1925. Celui-ci démontra peu après, au moyen des relations d'incertitude, qu'il est impossible de mesurer en même temps la position et la vitesse d'un corpuscule avec une précision sans limites. En effet, l'incertitude sur la position et celle sur la quantité du mouvement sont liées, leur produit étant égal à une constante. C'est dire que plus l'une est petite, plus l'autre est grande, ce qui limite l'exactitude possible des prévisions et se trouve confirmé par l'expérience. Ainsi l'indétermination rencontrée dans l'observation des phénomènes microphysiques devient dorénavant irréductible. On ne peut préciser simultanément les deux variables dynamiques que sont la position et la vitesse, et par conséquent seul le vecteur d'état ψ peut servir à décrire un état, la probabilité de trouver la valeur d'une mesure future dépendant de la fonction d'onde.

Dès lors, décrire un état ultérieur s'effectue à l'aide d'un vecteur unitaire, c'est-à-dire consiste à faire la somme des états possibles. Cela aboutit, d'après l'école de Copenhague, à nier la vérité physique de l'onde associée à la particule et à affirmer l'indéterminisme essentiel de la nature. D'autres physiciens, en particulier Louis de Broglie, se sont depuis élevés contre cette interprétation, réactivant le souci d'une représentation concrète en microphysique et supposant l'existence de variables cachées. Ce débat sur la réalité de la fonction d'onde ne peut être dissocié de l'impossibilité actuelle de séparer le dispositif expérimental du phénomène physique étudié, d'isoler un réel microphysique pur et indépendant des effets de nos manipulations.

Les effets de la révolution quantique se sont multipliés depuis 1925. Ainsi Dirac réinterpréta le nombre quantique, réussit à expliquer avec exactitude la structure du spectre de l'hélium et parvint à intégrer la théorie des interactions de la lumière et de la matière dans la nouvelle physique.

A partir de là s'élabora la statistique de Fermi-Dirac, valable pour un grand nombre d'électrons soumis au principe de Pauli, principe avancé en 1925 et selon lequel deux électrons ne peuvent

avoir le même état quantique. La théorie de Dirac était aussi une première tentative pour unifier divers langages mathématiques, pour construire une mécanique quantique et relativiste. D'autres essais ont eu lieu depuis, en particulier ceux de Tomonaga et Schwinger utilisant la notion de superquantification, et, plus récemment, la synthèse mathématique tentée par Lichnenowicz. Dirac avait également prévu dans sa théorie l'existence d'un anti-électron; celui-ci, le positon, *fut découvert peu après par Anderson dans le rayonnement cosmique. Quant à l'existence d'*anti-particules *correspondant à chacune des particules connues, elle ne fut mise en évidence que plus tard, à partir de 1955, quand l'utilisation d'un accélérateur de particules suffisamment puissant permit de manifester l'*anti-proton. *Cependant la durée d'observation en reste très brève, car, dès qu'une particule rencontre son anti-particule, celles-ci s'annihilent en se transformant en énergie. Les recherches de Dirac avaient aussi amené à préciser le caractère d'un nouveau nombre quantique, le* spin. *Celui-ci avait été découvert dès 1925 par Uhlenbeck et Goudsmit et correspond au mouvement angulaire propre d'une particule.*

La physique moderne s'est aussi développée à partir des recherches sur les éléments radio-actifs. Dès 1903, Soddy avait introduit la notion d'isotopie à propos de variétés d'un même élément qui avaient le même numéro atomique, mais non la même masse. Cette notion fut ensuite étendue aux éléments stables par les travaux de Thomson et Aston. Les premières transmutations artificielles, réalisées par Rutherford en 1919, furent interprétées en 1933 par Irène et Frédéric Joliot-Curie qui montrèrent que certains éléments légers bombardés par des particules α devenaient radio-actifs et émettaient des électrons positifs. D'autres particules n'allaient ensuite pas cesser d'être découvertes, et plusieurs dizaines sont connues à ce jour. Citons en particulier le deutéron *présent dans l'« eau lourde » mis en évidence par Urey, le* neutron *découvert par Chadwick, particule électriquement neutre et constituant du noyau atomique avec le proton, et aussi le* neutrino, *électriquement neutre et de même masse que l'électron. Cependant, pour interpréter la cohésion de la matière nucléaire, Yukawa supposa l'existence du* méson, *particule présente dans les échanges d'énergie entre neutrons et protons et qui, après une vie très brève, devait se diviser entre un électron et un neutrino. Cela amenait à considérer d'autres interactions (dites fortes) que celles envisagées dans la gravitation et l'électromagnétisme. Cette théorie fut confirmée par la découverte expérimentale, en particulier celle du* méson *π par Lattes, Occhialini et C. F. Powell en 1947. Cependant, peu à peu, le grand nombre de particules élémentaires a entraîné des recherches visant à ordonner cette multitude. Ainsi Gellmann et Zweig ont proposé en 1964 un modèle où les* quarks, *qui auraient une charge électrique fractionnaire, seraient les constituants fondamentaux des particules à interactions fortes. Ils n'ont cependant pas été mis en évidence expérimentalement. Il en est d'ailleurs de même pour d'autres particules. Citons par exemple les* tachyons, *dont la vitesse serait supérieure à celle de la lumière et dont la masse serait un nombre imaginaire.*

On connaît aussi aujourd'hui un autre type d'interaction : l'interaction faible, responsable du rayonnement β, dont la théorie est due à Fermi. C'est l'étude de telles interactions qui amena en 1956 Lee et Yang à affirmer que pour elles la loi de conservation de la parité était violée. Une expérience organisée par Mme C. S. Wu leur donna raison, montrant ainsi l'importance de la « chiralité », c'est-à-dire de la distinction entre la gauche et la droite, dans les phénomènes naturels. D'autre part, une expérience réalisée en 1964 au Brookhaven National Laboratory a montré que les interactions faibles violent aussi l'invariance par « inversion du temps ». Jusque-là, le fléchage du temps ne pouvait être établi qu'au niveau de systèmes macroscopiques où des lois statistiques étaient applicables. Ainsi, on peut repérer en fonction de l'entropie l'ordre dans lequel ont été prises deux photos d'un système macroscopique isolé évoluant spontanément. Ce n'était au contraire pas possible dans le cas d'un microsystème, car la réaction pouvait avoir eu lieu dans les deux sens. L'expérience de Brookhaven montrerait cependant que l'irréversibilité du temps se manifeste aussi au niveau de certaines réactions élémentaires.

La physique et la technologie

On ne saurait conclure ce récit historique sans rappeler que la physique se développe en liaison étroite avec de nombreuses inventions techniques. Il en est ainsi en notre siècle pour la T. S. F. et la télévision, pour l'éclairage par luminescence, pour les ultra-sons, le radar, le laser, etc.

Mais les plus marquantes sont dues à la physique atomique. Les recherches sur les produits résultant de l'action de neutrons lents sur l'uranium, commencées par Fermi en 1934, aboutirent en effet à la découverte du phénomène de fission qui fut précisé par Hahn et Strassmann. Ce phénomène libère une grande quantité d'énergie rayonnante et thermique; l'étude des réactions en chaîne par Francis Perrin amena à découvrir qu'en introduisant une masse critique, la réaction devient explosive. En 1942, la première pile atomique, où le dégagement d'énergie est lent, fut construite à Chicago sous la direction de Fermi. Enfin, en 1945, explosait la première bombe atomique obtenue par suite des travaux d'une équipe de physiciens réunie aux États-Unis et animée par Oppenheimer. Peu après, les bombes lancées sur Hiroshima et Nagasaki annonçaient à l'humanité les débuts de l'« ère atomique », plaçant celle-ci sous le signe d'une puissance destructive depuis lors largement accrue, notamment avec l'invention des bombes H. Quant à l'usage quotidien de l'énergie atomique, il ne cesse de croître avec la multiplication des centrales nucléaires, l'utilisation de réacteurs, etc.

Ainsi le visage de la physique moderne s'est modelé rapidement à partir des révolutions relativiste et quantique. Outre les tentatives d'unification entre ces deux dernières, les domaines de recherche sont aujourd'hui multiples : physique nucléaire, physique des plasmas, astrophysique, électronique, superconductivité, physique de l'espace, etc. L'étude des états extrêmes y apparaît décisive : très hautes ou très basses températures... Mais la figure de la physique ne peut être dissociée de celle de la technologie, et son développement soulève des interrogations à la mesure des conflits qui nous agitent.

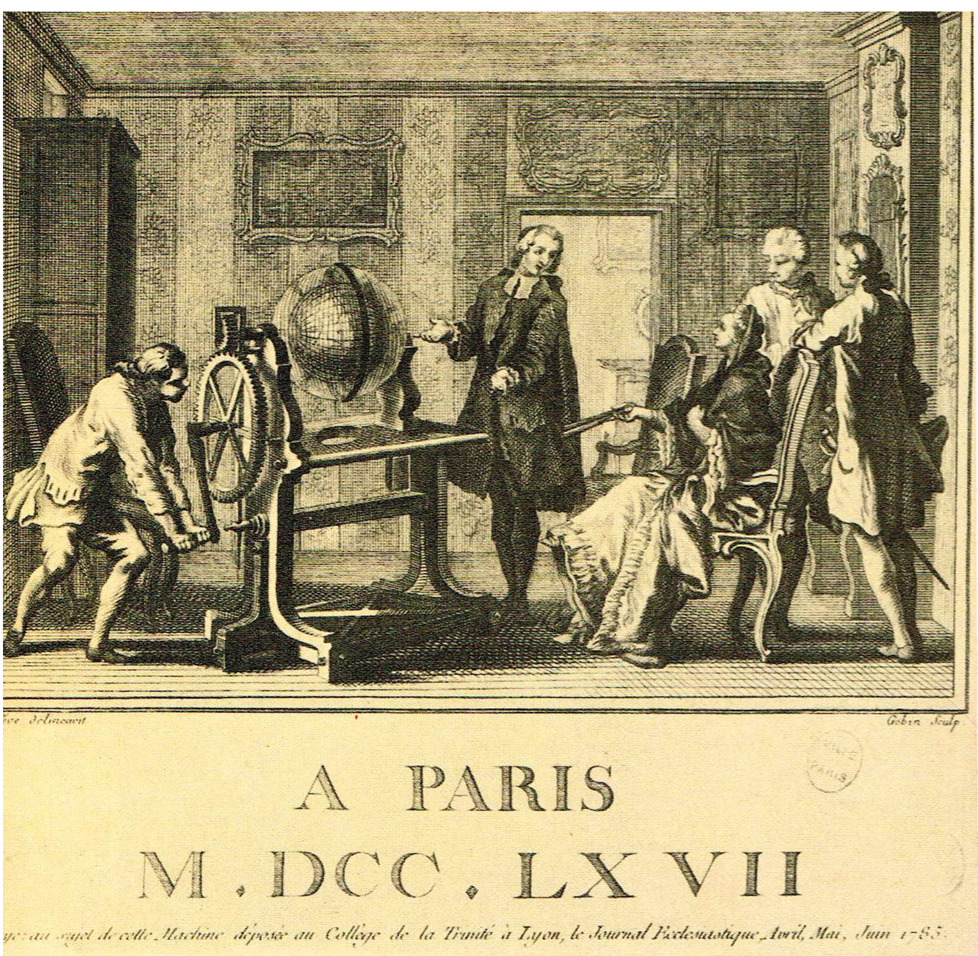

Bulloz

▲ *Gravure du XVIIIe siècle retraçant l'Expérience physique servant à expliquer les causes du déluge.*

LA MÉTHODE EXPÉRIMENTALE

Dès l'avènement de la physique classique avec Galilée, la méthode expérimentale est tenue pour la caractéristique principale de la physique. Mais on ne peut l'approcher qu'en sachant qu'une telle expression est le foyer, le nœud d'une série de questions. Il faut justifier son singulier et signaler son organisation, mais auparavant il nous faut saisir dans quels jeux d'oppositions cette expression s'inscrit.

Un fait d'expérience ne possède pas en lui-même une vérité assurée. La notion d'expérience renvoie à la généralité la plus grande ; tout objet se saisit, se tient « dans » une expérience ; celle-ci n'a pas à être délimitée, elle est d'emblée plurivalente... Bien avant la mise au jour de la loi de la chute des corps par Galilée, les corps lourds et inanimés tombaient ; c'était là un fait d'expérience, absolument compact. Mais tant que ce fait n'était pas pris en charge par une théorie, il subsistait un doute sur la possibilité de sa répétition. La prise en charge théorique assure donc que la coordination de deux phénomènes n'est pas provisoire, mais au contraire qu'ils sont unis par un lien de nécessité. Il faut donc distinguer deux notions : celle d'**expérience** et celle d'**expérimentation.**

L'expérience alors, en elle-même, ne serait guère autre chose qu'une réserve, un cadre dans lequel se tiendrait une multiplicité confuse, aléatoire et désordonnée de « phénomènes ». Le sens du rappel à l'expérience est donc en physique, dès qu'il dépasse la valeur polémique qu'on peut lui accorder, profondément ambigu. L'expérience qu'on suppose vérifiée ne parle pas d'elle-même. C'est en ce sens qu'on peut soutenir que l'observation n'est pas non plus une notion simple. Elle suppose, pour avoir droit à des titres de légitimité, un ensemble d'hypothèses à vérifier, un privilège de droit accordé à certains effets ; ne nous frappent que les faits susceptibles de retenir notre attention. Or, celle-ci n'est pas, en l'absence d'appareils qui la relayent (instruments de mesure...), rigoureusement égale et uniformément dirigée. La notion de fait d'expérience est donc à critiquer au moins sous deux de ses conséquences. Quand Aristote tenait pour un fait d'expérience, pour une loi, le fait que « pour les animaux à qui la nature a fait un corps trop velu, la queue se trouve diminuée, comme c'est le cas chez les ours », on peut faire la critique d'un tel propos, en remarquant que la généralisation s'est établie sur des bases qui ne sont ni assez larges, ni assez claires. L'observation, qui s'en tient donc à la perception commune du sensible, ne peut donner matière à l'établissement d'une loi. Le rapport naïf, spontané et sensible qu'entretient l'homme avec le monde joue, pour l'activité scientifique, un rôle d'obstacle ; G. Bachelard mais aussi bien d'autres épistémologues ont reconnu qu'entre la connaissance sensible (celle de l'expérience quotidienne) et la connaissance scientifique, il y a une rupture, un fossé. La connaissance sensible abolit les différences et fait passer pour homogènes, identiques ou comparables les différents objets matériels. Une telle position tient à ce qu'on a pu appeler le « réalisme naïf ». Les Grecs avaient déjà percé une brèche dans ce réalisme, en considérant que les sens humains sont trompeurs. Mais il s'agit de beaucoup plus quand on en vient à considérer les expérimentations et simulations que les physiciens d'aujourd'hui effectuent.

L'expérimentation dès lors est un travail ; en tant que telle, elle use d'instruments singuliers, dont les puissances sont connues, elle met en corrélation un objet avec un dispositif (pensons au plan incliné de Galilée), et elle établit des échelles de mesure. Un tel travail vise donc à réduire au minimum les inconnues, les présupposés naïfs et va jusqu'à réfléchir tous les éléments nécessaires à l'accomplissement de l'expérience. Là où l'expérience laisse impensées les conditions qui la rendent possible, au contraire l'expérimentation tend à intégrer à son propre développement la réflexion et la critique de ces conditions. Bachelard disait : « La physique n'est plus une science des faits, mais une technique d'effets (effets Zeeman, Clark, etc.). » Une telle formule vise à rappeler que l'activité scientifique n'a que peu à voir avec celle du collectionneur qui se contente de classer ce qu'il trouve, mais au contraire, qu'elle met en œuvre des moyens, des instruments techniques destinés à mettre en évidence quelque effet caché.

Pendant tout le XVIIe et le XVIIIe siècle, les savants font appel à des expériences fictives, dont ils n'ont pas les moyens de réalisation, pour confirmer ce que d'autres expériences réalisées avaient pu mettre en évidence. Il ne s'agit pas là d'un recours à l'imagination tout à fait arbitraire, mais bien de l'embryon d'une nouvelle pratique qui sera amplifiée dans la physique moderne : elle consiste en « une sorte de coup d'État théorique », par lequel ce qui n'est qu'une intuition vient forcer les anciens cadres pour imposer une nouvelle problématique. Ces expériences fictives sont donc en elles-mêmes un tissu d'hypothèses provisoires ; la fiction qu'introduisit Galilée, à savoir le principe d'inertie (qui, en l'état de la science de son époque, n'était pas démontrable et déductible), ne dépendait pas directement du nombre de phénomènes invoqués pour le justifier. La question que Galilée s'est posée est du type : « Que se passerait-il si les corps tombaient sans que rien ne vînt interférer dans leur chute (c'est-à-dire la résistance de l'air, les frottements, etc.) ? » A. Koyré a montré que l'expérimentation à laquelle Galilée recourt n'a pas le sens univoque d'un appel à l'observation, mais au contraire qu'elle privilégie la déduction ; à tel point qu'en une formule paradoxale on peut soutenir que la physique se fait indépendamment de toute expérience.

La première conclusion à laquelle nous aboutissons permet de formuler la prévalence de la théorie sur l'expérience. En d'autres termes, Bachelard signalait qu'en physique le construit l'emportait sur le donné. Quand il voulait qualifier le type de dispositif qu'utilise la physique contemporaine, il avançait la notion d'artefact. La pile de Volta, qui est un empilement de disques de métal séparés par du feutre imbibé d'acide sulfurique, ne relaie ni ne correspond à un objet naturel. Aucun objet naturel n'a pu être découvert dont la pile ne serait qu'une amplification du point de vue de ses effets. La pile de Volta fournit un courant continu électrique. Cette pile est un pur artefact, un artifice expérimental.

La physique contemporaine, eu égard à son degré de complexité, ne peut plus promouvoir des « expériences pour voir » ; il s'agit toujours de tenter de vérifier une hypothèse. Or l'hypothèse n'est pas plus arbitraire qu'évidente ; elle est toujours une synthèse intégrant plusieurs hypothèses partielles. Certaines de celles-ci, à défaut d'être définitivement assurées, sont tenues conventionnellement comme inaltérables ; tout le travail du physicien consiste donc à rapporter la variation des résultats à la diversité des conditions de l'expérience. La mise en évidence des paramètres réellement importants constitue alors le travail

central et décisif. Mais ceci ne peut se faire qu'en multipliant les dispositifs, de manière à accuser et privilégier la puissance d'un paramètre supposé. Tout un travail de vérification, puis de rectification nécessaire, est constitutif de l'expérimentation; les différences d'éclairage du phénomène à observer doivent servir à démultiplier les relevés de mesure. L'ensemble des résultats doit ensuite être discuté dans le cadre des théories existantes. Mais cette discussion reste provisoire et approchée, tant qu'on n'est pas assuré de ne pas avoir négligé un paramètre essentiel, nécessaire à la compréhension du phénomène étudié. Et cela d'autant plus que le dispositif de l'expérience n'est pas pur et transparent, et que donc un effet parasite accompagnant tel ou tel appareil peut venir brouiller le champ de l'expérience.

Si l'objectif d'une telle pratique consiste en l'établissement de lois, il faut néanmoins noter que la notion de loi n'est pas unitaire (voir *Physique et mathématique*). Toute loi néanmoins ne subsiste pas indépendamment des autres lois : elles se répondent entre elles, organisant un réseau serré de connaissances; elles se solidarisent dans des théories et s'accompagnent de concepts scientifiques. Par exemple, Bachelard décrit le *concept de capacité électrique* en se rappelant que la notion de capacité ne doit pas être comprise dans son acception usuelle. Au contraire, ce concept doit lui-même être compris comme solidaire d'un corps de concepts indiqué par la formule algébrique de la condensation électrique. La loi, en tant que telle, assure la cohésion mathématisée de ce corps de concepts.

Le procédé par lequel la loi est établie est l'*induction* (au sens de la logique), terme qui qualifie un mouvement de « montée » où la diversité de relations répétables entre des grandeurs est ramenée à un principe. Mais on ne produit pas une loi en découvrant une relation cachée entre des phénomènes et en amassant des connaissances. La loi n'est pas une traduction mathématique et synthétique de faits empiriques. Elle est rigoureusement inventée. L'induction consiste donc bien à remonter du particulier au général (sens classique du terme), de façon que la généralité atteinte (la loi) permette de prévoir toutes les spécifications particulières, mais pas seulement. Ceci n'est vrai que pour les lois physiques élémentaires (par exemple la chute des corps dans le monde, à l'échelle humaine). Mais dans tous les cas, l'hypothèse est l'élément essentiel de tout procédé inductif. Pour les lois complexes de la physique quantique, leur compréhension doit être plus cherchée vers le « haut » (la *théorie* dont la loi n'est qu'un élément) que vers le « bas » (les *données empiriques* dont elles rendent compte). La loi qui, à l'âge classique, visait à montrer le caractère nécessaire d'une cause pour expliquer un phénomène répétable, était aussi comprise comme une forme sous laquelle la cause originaire de toutes choses (théologique) avait prescrit l'arrangement des choses dans le monde. Il s'agissait alors de les découvrir, comme si un voile les dissimulait aux yeux de l'humanité.

La physique moderne a brisé cette représentation et introduit l'idée que la loi était plus à inventer qu'à découvrir. Toujours approchée, la connaissance que l'on peut avoir du monde est désormais contrainte de voir dans ses propres théories et hypothèses plus de réalité que dans les données empiriques initiales. Il serait possible de conclure en précisant la hiérarchie des moments de la méthode expérimentale. Cette hiérarchie est double; elle est d'abord *temporelle* au sens où des priorités s'instaurent, où un enchaînement nécessaire d'opérations se trouve requis. Mais elle est aussi *épistémologique,* au sens où, par exemple, l'observation se trouve toujours, bien que première chronologiquement, équivoque épistémologiquement. L'observation initiale est singulière et chargée d'effets parasites. Par puissance d'invention, ingéniosité, une première conjecture est proposée (par exemple l'idée d'inertie des corps pour Galilée). C'est à ce moment-là que le travail de l'induction (généralisation) est effectué. Les deux phases sont souvent chronologiquement aussi bien que logiquement inséparables. Le produit de ces deux phases consiste en l'établissement d'une loi qu'on peut qualifier de supposée. Elle est provisoire et demande à être vérifiée.

Cette vérification ne se fait qu'en pratiquant le mouvement inverse de l'induction, la *déduction*. Il s'agit là d'un mouvement de « descente », visant à prévoir un cas singulier, homogène et analogue au phénomène étudié dans l'observation initiale. L'expérimentation, c'est-à-dire le dispositif technique destiné à prévoir ce cas singulier, trouve ici sa place (le plan incliné pour Galilée). L'observation finale étant obtenue, quel que soit son résultat, il faut recommencer. Mais ce recommencement se fait toujours en variant les conditions sensibles de l'expérience, de façon à multiplier les mesures et donc, par là même, à tenter de déceler l'existence d'un nouveau paramètre, encore indécelable.

Les physiciens recommencent indéfiniment ce cycle, de manière à diminuer au maximum les effets de brouillage, en augmentant ainsi les chances d'épuiser la diversité du phénomène. Mais cette description reste trop rigide, affaiblissant la tension réelle présente dans le travail des physiciens. La partie la plus obscure de ce cycle reste le moment dit de l'*invention,* de l'ingéniosité. D'autre part, la théorie n'est pas singulière, et, provenant des données empiriques, elle s'oppose aux théories qui l'ont précédée, au corps constitué des concepts antérieurement présents. A tel point que l'on peut soutenir que les théories ne procèdent jamais des faits, parce que ceux-ci ne se manifestent que déjà transformés dans la théorie précédente (la chute des corps, dont la loi qui a été mise au jour par Galilée avait été l'objet d'élaborations multiples).

Citons l'épistémologue de la biologie Georges Canguilhem : « Il n'y pas à proprement parler de méthode inductive. Ce qui est déduction, c'est-à-dire invention d'hypothèses dans la science expérimentale, est le signe le plus net de l'insuffisance de la méthode à expliquer le progrès du savoir. » Tout compte fait, la méthode expérimentale n'existe pas, au sens où des principes de méthode, c'est-à-dire d'un mécanisme de savoir-faire codifiable, suffiraient à eux seuls à énoncer des lois en physique.

On ne peut pas pour autant considérer la physique comme une affaire de mots. Elle n'est pas seulement une construction logique établie par convention. Ce n'est pas la psychologie qui permet de rendre compte de l'objectivité scientifique. La cohérence interne ne suffit pas à valider un ensemble d'énoncés et par conséquent les preuves de la justesse d'une théorie ne sont concluantes que si un passage par l'expérimentation a eu lieu. C'est dire que l'expérience n'est pas simplement l'application de la théorie mais surtout la mise à l'épreuve des concepts. Cependant ces derniers ne sont jamais définitivement prouvés et aucune vérification n'a une portée absolue. De ce fait, une certitude scientifique n'a de valeur qu'aussi longtemps qu'elle résiste à l'épreuve des faits, et l'expérience ne vérifie la théorie que dans la mesure où elle ne la contredit pas. Selon Karl Popper, « un système faisant partie de la science empirique doit pouvoir être réfuté par l'expérience ». Toute preuve n'est donc que temporaire et toute théorie est susceptible d'être contredite : tel est le sens du critère de « falsifiabilité » avancé par Popper. Le « degré de crédibilité » (Watanabe) d'une théorie semble en définitive dépendre d'un réseau complexe de preuves qui n'est jamais achevé ou définitif.

▼ **Volta *devant le Premier consul.***

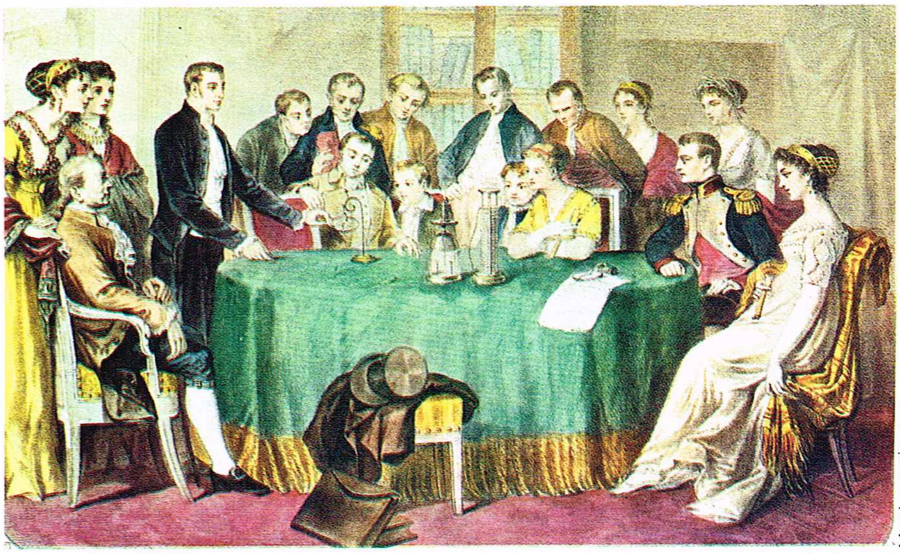

Musées nationaux

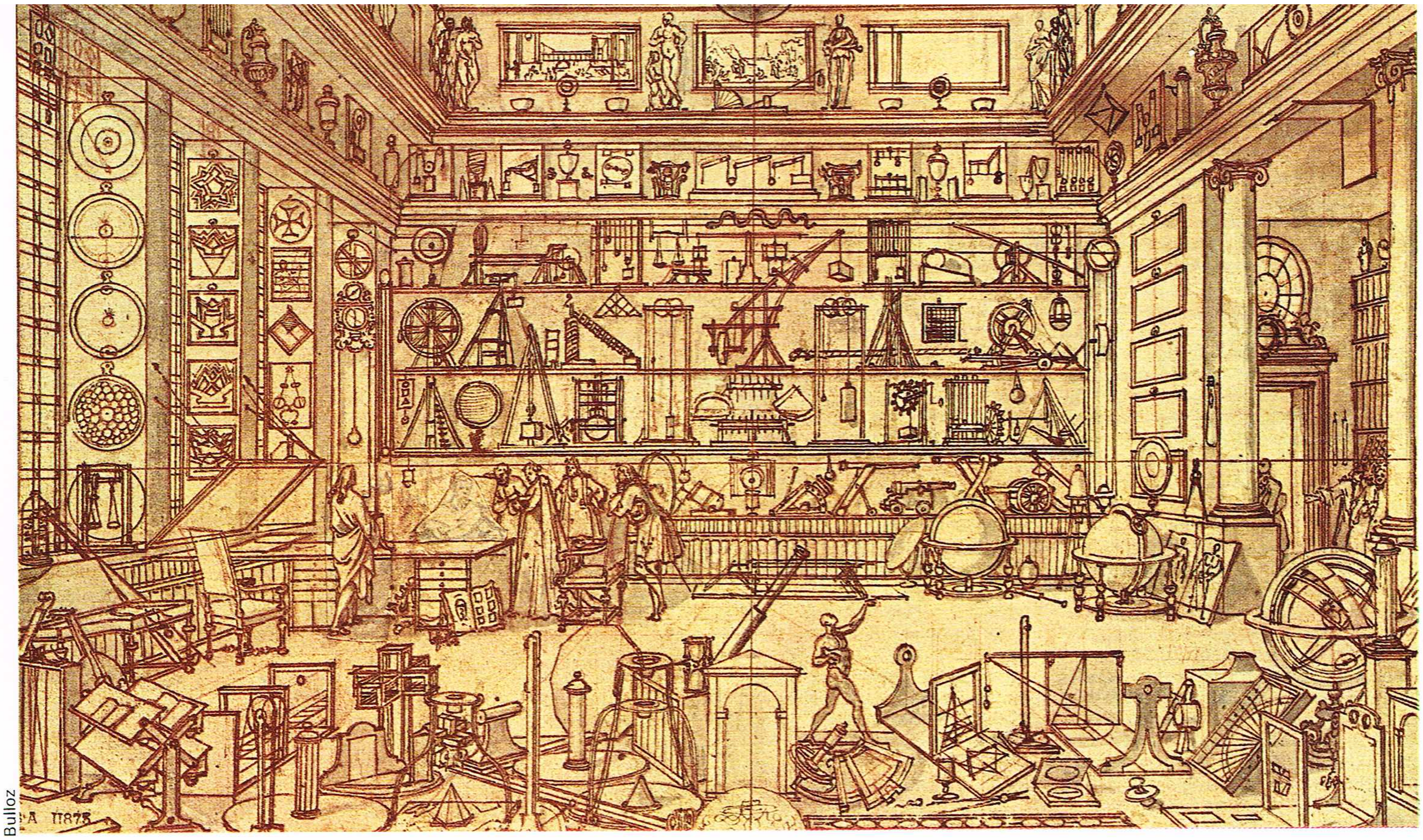

Bulloz

▲ *Le* **Cabinet de physique,** *dessin de Sébastien Leclerc (École des beaux-arts, Paris).*

LES CONCEPTS FONDAMENTAUX DE LA PHYSIQUE

L'histoire de la physique montre qu'une science ne se développe pas de façon linéaire, selon le modèle d'une généralisation continue et sans heurts. La validité d'une théorie ne s'établit que si elle est capable de rendre compte des erreurs dont elle se sépare. Ainsi aucun concept physique n'est déterminé une fois pour toutes, mais il donne toujours lieu à des remaniements et à des refontes. Le savoir ne s'accumule pas selon une addition de couches successives, ses limites ne se déplacent qu'en fonction des mutations qui scandent son devenir. C'est pourquoi, à la suite de Bachelard, on nomme « rupture épistémologique » le moment de naissance ou de renouvellement où s'institue une science. Cette dernière n'est pas pour autant pure de toute erreur, et sa mise en question reste toujours possible. Ce qui distingue une science parmi tous les autres savoirs, c'est la rigueur de sa mise en forme et son souci de la preuve, mais non le fait qu'elle permettrait de connaître le réel tout entier ou d'atteindre un quelconque absolu. La physique ne doit donc pas être considérée comme un savoir mort mais comme une activité qui perdrait son ressort si elle perdait toute dimension pratique. Ainsi l'étude de ses concepts va nous montrer que ceux-ci ne sont pas restés uniformes mais ont été l'objet de multiples rectifications et restent en chantier.

Physique et mathématique

Du point de vue de l'histoire, les rapports qu'ont entretenus physique et mathématique comme disciplines peuvent être distribués sommairement en trois périodes.

Le premier temps fut celui de l'exclusion réciproque : ainsi Aristote précisait que les figures sur lesquelles travaillent les mathématiciens sont des figures idéales dont le monde réel ne donne que des exemples. La physique par contre a à faire avec des objets matériels dont la configuration présente toujours des défauts ; la physique est donc, à ce moment, plus apparentée à la zoologie, à l'astronomie qu'à la mathématique. Mais cette partition ne résistera pas à l'avènement de la physique classique, qui substitue à une physique des qualités une science de la mesure et de l'expérimentation.

Le travail de Galilée représente la seconde référence à laquelle nous devons nous arrêter. Il paraît être la figure la plus inventive dans l'incorporation de la mathématique à la physique. Galilée déclare : « La nature est écrite en langage mathématique dont les lettres et les syllabes sont triangles et cercles. » Galilée se réfère à Platon et à Archimède, son entreprise consciente tient dans la volonté de mathématiser la physique. Il faut ici traduire des réalités physiques en grandeurs géométriques ; ainsi pour le temps et la vitesse dans la détermination du mouvement. Précisément Galilée détermine mathématiquement des faits déjà connus ; sa puissance créatrice tient à son usage de la méthode hypothético-déductive traditionnellement réservée à la géométrie, dans la science de la nature. Galilée, et à sa suite Descartes, ramènera des différences qualitatives à des différences de quantité. La science classique de type galiléen introduit la loi physique comme rapport où une grandeur varie en fonction d'une autre grandeur. Perfectionnée par Newton, la mathématisation de la physique, après Galilée, s'étend ; en particulier, on n'en reste plus à une géométrisation, on y intègre d'autres champs de la mathématique, surtout le calcul différentiel. L'idéal de la science newtonienne consiste dans la volonté de mettre au jour une loi fonctionnelle ; l'équation centrale de la physique newtonienne, $F = m\gamma$ (la force est égale au produit de la masse par l'accélération), exprime un rapport mathématique où le lien entre les trois variables est devenu un lien de nécessité logique, indépendant de toute considération qui privilégierait l'un des trois termes. La formule devient le nœud qui lie trois grandeurs ; et elle est première, instigatrice de toute recherche visant à déterminer une des variables. Mais cette formule reste simple, et au fur et à mesure que la physique affirmera ses recherches, elle empruntera aux mathématiques des schémas, des notions de plus en plus complexes. Ainsi les lois physiques jusqu'au début du XX^e siècle n'useront comme appareil mathématique que des proportions, des équations différentielles et d'autres à dérivées partielles. Elles sont en général destinées à établir un lien causal entre deux états d'un objet dans le monde, dont le second succède au premier. Cette progression dans l'incorporation des différentes structures formelles mathématiques conduit à la démultiplication des unités de mesure, à leur précision (la distinction entre le poids et la masse).

L'établissement de correspondances (le sens de la formule mathématique classique) conduit donc à un double travail : l'écriture du rapport mathématique lui-même ainsi que la mise au jour de variables fécondes et spécifiées. L'idéal de la science classique consiste alors aussi, une fois posée la relation initiale entre diverses grandeurs, à retrouver, en développant et en combinant cette relation avec quelques autres, l'établissement d'une loi plus restreinte ; le progrès de la science procède alors par enveloppement.

Le troisième temps à considérer, où un nouveau rapport, irréductible au précédent, se cristallisera, tient dans la révolution introduite par Einstein. Le travail d'Einstein ne visera pas d'abord la mise au jour d'un rapport entre grandeurs physiques, mais introduira une hypothèse concernant les conditions de possibilité de toute mesure physique et de connexion mathématique de ces mesures. C'est donc à un appareil mathématique très raffiné, le calcul tensoriel, que devra faire appel Einstein.

Les problèmes épistémologiques afférents au rapport physique/mathématique sont nombreux et loin d'être réglés.

L'usage d'appareils mathématiques dans la physique est permanent et irremplaçable. En premier lieu parce qu'il s'agit de mesurer et d'ordonner entre eux les phénomènes. Mais ce n'est là qu'une remarque minime. Les concepts mathématiques sont au cœur des théories physiques. Sans le concept d'équations à dérivées partielles, la théorie de l'électromagnétisme de Maxwell n'aurait pu voir le jour. La théorie physique emprunte à la mathématique aussi bien sa structure formulée (disposition des énoncés, axiomatisation des principes, rythme hypothético-déductif) que la production de ses concepts.

Une fois remarqué que les « hypothèses physiques se formulent mathématiquement » (Gaston Bachelard), il faut tenter de déterminer la nature de ce rapport.

Pour Galilée, mais aussi pour un grand nombre de scientifiques ultérieurs, tel Poincaré, la mathématique ne joue que le rôle d'un langage pour la physique : Poincaré par exemple décèle la nécessité de faire intervenir les mathématiques pour les lois physiques, dans la mesure où celles-ci coordonnent des grandeurs de manière que cette relation soit répétable. Il insiste sur l'importance des conventions (pas arbitraires) bien choisies, dont l'usage permet de fixer des unités et des échelles de mesure. D'autre part, pour tenir cette position, il faut pouvoir aussi assimiler la mathématique à un langage, c'est-à-dire à un système d'énoncés pourvus de règles (lexicales, de formation de proposition et de déduction logique). Un tel langage est ici considéré d'un point de vue logique, comme langage bien fait. Mais le problème subsiste ; à supposer que la mathématique soit un langage, il faut s'interroger sur le privilège qu'il revêt pour la physique. Est-ce de façon miraculeuse et incompréhensible que la physique ne pose ses questions que mathématiquement ? Est-ce qu'un autre langage serait susceptible de se substituer aux mathématiques, tout aussi efficace et opérationnel pour la physique ? On peut considérer que la physique contemporaine nous contraint à récuser ce genre de questions. G. Bachelard, qui s'éleva avec force contre l'idée que les mathématiques n'étaient qu'un langage, pense la théorie physique comme issue d'un dialogue entre deux travaux : l'expérimentation et la mathématisation.

Mais physique et mathématique diffèrent entre elles, en tant que seule la mathématique peut se développer sans emprunt. Il ne faut pas croire pour autant que les recherches mathématiques fonctionnent comme un jeu gratuit, développant des théories, des modèles, des opérateurs présentés pour eux-mêmes, que le physicien aurait loisir d'incorporer aux expérimentations qu'il effectue.

Les mathématiques ne sont pas à strictement parler une réserve dans laquelle chacun serait susceptible de puiser à sa convenance pour élaborer le cadre théorique dont il fera usage. L'opérateur mathématique n'est pas plus un squelette auquel s'accrocherait la « chair » de la constitution de l'expérience, qu'il n'est qu'un vêtement susceptible d'être changé. On peut donc admettre que l'adéquation mathématique/physique ne doit rien avoir d'incompréhensible ; « tout symbole physique a une signification mathématique » (M. Bunge). Il faut donc considérer que, si les mathématiques ne sont pas, comme le pensait Galilée, le langage par lequel la nature parle, elles sont néanmoins pour la physique les conditions de possibilité de son développement. En effet, les mathématiques constituent, non seulement la forme de la rationalité physique, mais aussi le mode de traduction des effets de l'expérience ; elles donnent, par là même, accès au réel qu'elles démontrent.

Mouvement et vitesse

Dans la pensée antique, le problème du mouvement est un problème très général ; la notion de mouvement est apparentée au changement. Aristote conçoit quatre modes de changement ou de mouvement : la *génération*, l'*altération* (changement qualitatif), l'*accroissement* ou *décroissement*, et le *déplacement*. Le mouvement est pensé comme le contraire du repos, et à eux deux ils sont les constituants d'un genre, celui de la mobilité. Le mouvement est une catégorie essentielle, en tant que tout être, dès qu'il se meut, peut être divisé en deux ; ce qui demeure permanent et inamovible en lui (l'essence), et ce qui est susceptible d'être remplacé, enlevé de son être (l'accident). Mais Aristote accorde un privilège au permanent, tout comme il privilégie le repos sur le mouvement. Le repos pour les corps inanimés est la règle, à tel point que le mouvement est qualifié, pour ces corps, de violent quand il n'est pas dans la nature du corps en question d'avoir un mouvement naturel (la flamme va vers le haut). D'autre part, Aristote suppose que, pour ce qui est du déplacement des objets, quand ce déplacement est violent (le javelot), une force constante est nécessaire pour maintenir une vitesse constante. Il doit donc supposer que le mouvement se transmet par l'éther présent dans l'atmosphère. A proprement parler, Aristote ne possède pas les concepts de force et de vitesse.

C'est à Galilée et à Newton que nous devons la critique de cette conception (qui avait été d'ailleurs réélaborée par les physiciens de « l'impetus ») et la promulgation de la mécanique classique. La conception classique pense le mouvement comme un état et non plus comme un moment antérieur au repos qui serait la norme. Le mouvement est donc étudié pour lui-même. La grande nouveauté tient au fait que « le mouvement et le repos n'existent plus dans les corps eux-mêmes » (A. Koyré). Le mouvement dont traite la physique classique n'est pas le mouvement réel, quotidiennement observé. Il se rapporte à une mathématisation de la nature et par là même n'a plus rien à voir avec le changement. Il est interprété géométriquement, et devient donc un concept mathématique. Mais si Galilée réussit à briser l'ancien cadre théorique, il n'en arrive cependant pas à dégager la notion d'accélération. Il pense que la chute d'un corps se fait à une vitesse constante. Non que Galilée nie l'accélération de la chute des corps, mais elle n'a lieu pour lui qu'au début. L'erreur de Galilée tient à ce qu'il pense la vitesse du corps qui tombe comme proportionnelle à l'espace parcouru et non pas au temps écoulé.

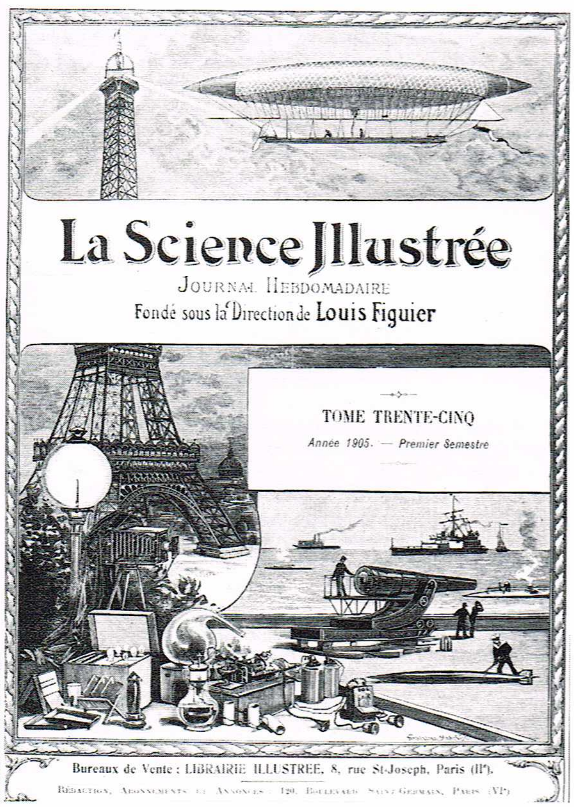

Snark International

◀ ***Frontispice de* la Science illustrée *(1905).***

Newton, qui s'opposa plus tard à Descartes, plus qu'à Galilée, put dégager la notion d'accélération. Pour cela, il dut substituer à la conception relativiste du mouvement, à laquelle Descartes était attaché, l'idée d'un *mouvement absolu*. Descartes refusait l'idée d'un point fixe de référence, en fonction duquel on pouvait décrire un mouvement. Il donne l'exemple du voyageur qui, sur le pont d'un navire, peut simultanément considérer qu'il se meut par rapport à la terre, mais aussi qu'il ne se meut point par rapport au vaisseau. Newton pense ce raisonnement comme caduc, dans la mesure où le mouvement vraiment physique et absolu ne peut consister en un changement de lieu par rapport à d'autres corps, mais en un déplacement par rapport à un espace absolu. De plus, Newton montre que l'action sur un corps (la projection) donne comme produit un changement de vitesse, qu'il nommera l'accélération; l'accélération désigne aussi bien la diminution continue que l'augmentation de la vitesse. Mise sous forme mathématique, on peut fixer en mécanique classique la *vitesse* comme la dérivée première de la distance parcourue et l'*accélération* comme la dérivée seconde.

Les développements de la mécanique ont montré l'indissociabilité des notions de matière et de mouvement. On crut longtemps qu'elle constituait les bases inaliénables d'une physique unifiée. La thermodynamique elle-même utilisa comme hypothèse dominante l'identification de la chaleur au mouvement des molécules. En même temps, elle affirma l'impossibilité du mouvement perpétuel en donnant une signification physique à l'irréversibilité. Les théories classiques durent ensuite être remises en cause. Ainsi l'expérience de Michelson et Morley montra l'inexistence de l'éther, ce qui impliquait qu'aucune référence fixe et définitive ne permettait de caractériser un mouvement absolu. La vitesse de la lumière fut alors établie comme invariante, indépendante du mouvement de la source et de l'observateur. Cela rendait inapplicable sur ce point la loi de composition des vitesses. Celle-ci veut dire, par exemple, qu'un observateur marchant dans un train va à une vitesse égale à la somme de la vitesse du train par rapport à la Terre et de celle qu'il a par rapport au train. Cela impliquerait donc qu'un rayon lumineux émis dans un train aurait une vitesse supérieure à celle d'un rayon émis depuis un point immobile par rapport à la Terre. Or l'expérience nous apprend que les vitesses sont identiques dans les deux cas. Leur invariance aboutit à l'élaboration de la théorie de la relativité et à une révision des lois de la mécanique. De plus, alors que la théorie newtonienne supposait la masse invariable, la physique moderne montre qu'elle augmente avec la vitesse.

Espace et temps

Longtemps dominant en Europe, le point de vue d'Aristote fondait l'image d'un monde clos et hiérarchisé. Le Cosmos était alors conçu comme une totalité bien ordonnée où chaque chose était située en un « lieu naturel » précis. Limité par la sphère des étoiles, le monde ne comportait ni trou, ni vide, et rien n'existait hors de lui. C'est ce dogme qui fut brisé par la révolution astronomique des XVIe et XVIIe siècles, puis éliminé par la mécanique classique. Les travaux de Copernic commencèrent par déloger la Terre de sa position centrale dans l'Univers et par en faire une planète en mouvement, non privilégiée. Cependant, même s'il ne pensait pas que le monde était mesurable, Copernic le croyait limité par la sphère des étoiles fixes et organisé harmonieusement autour du Soleil. Kepler, quant à lui, élabora une dynamique céleste où les planètes suivaient des orbites elliptiques et non circulaires : la notion de centre unique disparaissait, cédant la place à celle de foyers doubles. Galilée enfin, grâce à l'usage d'un télescope perfectionné, put révéler l'existence de nombreuses étoiles invisibles à l'œil nu et confirmer l'hypothèse copernicienne.

Dès lors les limites d'un monde élargi s'éloignaient jusqu'à devenir indéterminées. Descartes, par exemple, reconnut que le monde était « indéfini », réservant toutefois l'infinité à Dieu. D'autres philosophes, tels Henry More (1614-1687) et Spinoza (1632-1677), affirmèrent plus nettement l'infinité de l'Univers. Mais ce fut à partir des travaux de Newton que se dégagea la conception d'un **espace** vide et infini. Pour lui, l'espace constituait un réceptacle de la matière, tout en étant distinct de celle-ci, et ses parties étaient extérieures les unes aux autres. Dans cet espace, les corps étaient reliés entre eux par l'attraction universelle qui réglait aussi leurs mouvements. Ainsi s'imposa l'idée d'un espace neutre formant un substrat inerte des corps. L'Univers infini était substitué à l'image d'un monde circulaire et fermé.

« L'espace absolu... demeure toujours semblable à lui-même et immuable », écrivit Newton. Tel est en effet le cadre de la mécanique classique. L'Univers y apparaît comme un mécanisme dont les parties sont distinctes. Tout objet peut y être localisé et y décrit une trajectoire avec une vitesse définie. On peut donc suivre ses états successifs et les expliquer en fonction de lois mathématiques précises. C'est, en effet, au sein d'un espace uniforme qu'interviennent des changements d'états locaux au cours du temps. L'espace géométrique est ici identifié à l'espace réel. Il est euclidien et comporte trois dimensions. Il est isotrope, c'est-à-dire qu'aucune direction n'y est privilégiée. Il est homogène et continu, ne comportant ni région valorisée, ni brisure. Cet espace où se meuvent les corps permet des mesures exactes, des localisations précises, puisque les lois physiques y sont partout identiques. Mais il est aussi inaltérable et éternel, constituant par là une référence absolue et universelle.

L'édifice classique s'appuie toutefois sur un second pilier stable : le **temps.** Lui aussi constitue pour Newton un cadre absolu indépendant des événements. Il coule uniformément, formant un flux orienté et continu. Il est homogène et unilinéaire, permettant d'y situer des successions et fondant ainsi la causalité reliant les phénomènes entre eux. C'est pourquoi Kant posait l'espace et le temps comme conditions *a priori* de toute connaissance humaine, de l'intuition pure et de la raison. Un tel temps peut être figuré par une ligne droite, et il permet une stricte distinction entre l'avant et l'après. Il est universel, identique à lui-même en tout point de l'espace et par conséquent mesurable avec exactitude. On crut pendant longtemps pouvoir assurer la précision de cette mesure en la fondant sur le *jour sidéral*, c'est-à-dire, en fait, sur la rotation de la Terre. Mais il est apparu au XXe siècle que celle-ci est soumise à des irrégularités qui impliquent diverses corrections, en particulier en fonction du mouvement propre du Soleil. Aussi est-ce aujourd'hui le *temps atomique*, correspondant aux périodes de radiation émise, qui est l'étalon de base grâce auquel la précision atteint le milliardième de seconde.

Le caractère irréversible du *temps physique* l'oppose aux mythes d'un *temps cyclique* qui n'entame pas l'identité d'un monde conforme à son origine. Cette irréversibilité n'est cependant intégrée à la physique qu'au cours du XIXe siècle. C'est que tous les phénomènes envisagés jusque-là par la mécanique sont réversibles. Ainsi tout déplacement d'objet peut être suivi d'un retour à l'état initial. Au contraire, en thermodynamique, le principe de Carnot-Clausius pose que, dans tout système clos, la chaleur s'écoule des corps chauds vers les corps froids jusqu'à l'équilibre thermique. Ainsi s'introduit l'irréversibilité des phénomènes, correspondant à une « dégradation » d'énergie, à une dissipation de celle-ci en chaleur irrécupérable. Ce principe d'augmentation de l'entropie a ensuite été interprété à partir de la mécanique statistique. Boltzmann en particulier s'appuie sur la théorie ramenant la chaleur au « chaos moléculaire », à l'agitation désordonnée des particules. Il évalue d'autre part la probabilité d'atteindre un état macroscopique futur et établit une formule où l'entropie est proportionnelle au logarithme de la probabilité. Dès lors, l'évolution vers l'état le plus probable d'un système clos est associée à la croissance de l'entropie, c'est-à-dire à l'augmentation de la puissance de désordre, à la désorganisation. En fait, l'irréversibilité dont il s'agit ici n'existe que pour les phénomènes macroscopiques et les systèmes clos. De plus, elle est d'ordre statistique, et un processus contraire de diminution de l'entropie n'est pas impossible théoriquement. Elle ne concerne d'ailleurs que les ensembles organisés puisque, au niveau microscopique, « il y a bien là des événements, donc du temps, mais pas de flèche du temps » (Blanché).

Cette théorie statistique a été remise en cause plusieurs fois, en particulier par P. et T. Ehrenfest qui l'ont appliquée à la prévision d'états passés et non plus futurs. Or un tel point de vue amène à accorder une grande probabilité à une entropie plus importante pour les états passés que

pour celui correspondant à l'instant de la mesure. Le résultat d'une telle inversion semble donc rendre insuffisante la considération de l'entropie pour caractériser la direction du temps. Beaucoup plus récemment, des simulations sur ordinateur ont été effectuées. Supposant connues la position et la vitesse de chacune des particules d'un système clos, elles consistent à inverser toutes les vitesses au bout d'un temps donné d'évolution, ce qui équivaut à un retour en arrière. On constate alors une diminution pendant un temps égal au premier, puis de nouveau une augmentation de l'entropie. Une pareille expérience implique néanmoins une intervention de l'observateur, un apport d'information. Il semble donc que le changement d'entropie caractérise un temps écoulé, quel que soit le sens du fléchage de celui-ci.

D'autres travaux récents cherchent plutôt à unifier les diverses évolutions statistiques en y dégageant une même flèche de temps. Ainsi Reichenbach, Grünbaum, O. Costa de Beauregard se sont pour cela appuyés sur le principe de retardation des ondes, les deux derniers l'associant au principe de Carnot pour affirmer l'unicité du principe d'irréversibilité. Cependant de telles tentatives ne concernent plus seulement des systèmes clos, comme c'était le cas en thermodynamique, ou supposent peut-être que l'Univers est une totalité finie. Il apparaît en définitive que l'irréversibilité est avant tout un fait d'expérience et reste un principe non démontré, un postulat. En ce sens, affirmer l'irréversibilité au niveau macroscopique revient à reconnaître l'existence d'une causalité liée à un ordre de succession temporel.

On peut envisager à partir d'un état initial d'un système de calculer la probabilité d'un autre état de ce système dans le passé ou dans le futur. Dans les deux cas, on établit un lien de causalité entre le premier et le second. De plus, le premier est connu (au niveau macroscopique) alors que le second n'est que probable. La détermination statistique s'appuie donc sur un lien causal et implique un écoulement du temps. Cela montre que l'irréversibilité tient aux conditions de l'expérience et n'est pas absolue. Certains physiciens ont d'ailleurs pu envisager des changements dans la direction du temps, voire l'existence de particules remontant le cours de celui-ci.

La conception classique de l'espace et du temps absolus a en fait été détrônée de sa position fondatrice par la théorie de la relativité dont l'impact a bouleversé l'Univers. En reconnaissant l'invariance de la lumière dans le vide, Einstein est en effet amené à refuser l'existence de vitesses infinies et par conséquent à nier la possibilité de propagations instantanées. Cela le conduit à rejeter la notion de simultanéité à distance qui n'a de sens que si le temps est absolu, c'est-à-dire si des observateurs différents sont informés en même temps d'un fait, et ceci quels que soient leurs mouvements.

Or cela n'est plus concevable si la vitesse de la lumière constitue une limite, car alors la durée de transmission des informations importe. Ainsi, deux événements simultanés pour un observateur seront successifs pour un autre puisqu'il en sera informé différemment. C'est ce que montre l'exemple de deux observateurs dont l'un est placé à mi-distance de deux points A et B sur une voie ferrée et dont l'autre est au milieu d'un train. Si deux signaux lumineux sont émis au moment où la tête du train est en A et sa queue en B, ils apparaîtront simultanés à l'observateur situé sur la voie. Mais celui qui est dans le train se sera déplacé pendant le temps de transmission des signaux, et il les recevra à des moments différents, ne pouvant donc les considérer comme simultanés. Deux événements distants ne peuvent donc être simultanés pour deux observateurs situés dans des systèmes de référence en mouvement relatif l'un par rapport à l'autre. Il suffit d'ailleurs d'imaginer que le train se déplace à la vitesse de la lumière pour découvrir que l'observateur qui s'y trouve ne serait jamais atteint par l'un des signaux lumineux et n'en prendrait pas connaissance. On pourrait cependant espérer qu'il existe un repère fixe, l'*espace absolu*, par rapport auquel seraient appréciés les différents mouvements. Or l'expérience de Michelson démontre tout le contraire puisqu'elle prouve que la vitesse de la lumière est invariante dans toutes les directions et qu'elle ne dépend pas des mouvements relatifs de la source lumineuse et de l'observateur. Cela veut dire que l'espace n'est pas empli d'éther et qu'aucun mouvement absolu ne peut y être défini, donc que les notions de distance et de durée n'ont de sens que relativement à un observateur donné. Un seul espace et un seul temps impliqueraient en effet plusieurs vitesses pour la lumière, alors que le fait qu'elle soit unique entraîne que ce sont l'espace et le temps qui sont relatifs. C'est ce que conclut Einstein en maintenant le principe de relativité galiléen selon lequel les lois mécaniques sont les mêmes dans tous les systèmes en translation rectiligne et uniforme les uns par rapport aux autres. Aussi les formules de transformation de Lorentz prennent-elles dès lors une signification physique et remplacent-elles les formules de la mécanique classique, même si ces dernières en constituent une approximation pour des vitesses négligeables par rapport à celle de la lumière.

Désormais, il y a une pluralité de mesures de temps et d'espace dépendant des mouvements relatifs des observateurs, ce qui conduit à admettre que ceux-ci ont chacun un espace et un temps propres. Ainsi, étant donné deux observateurs en mouvement relatif, chacun d'eux trouve que l'horloge de l'autre retarde et que le mètre tenu par l'autre est plus court que le sien. C'est que, pour chacun d'eux, il y a contraction du temps propre et que les distances de l'un se raccourcissent pour l'autre (et récipro-

E. Lessing - Magnum

▲ ***Le temps est relatif, seule est absolue la vitesse de la lumière.***

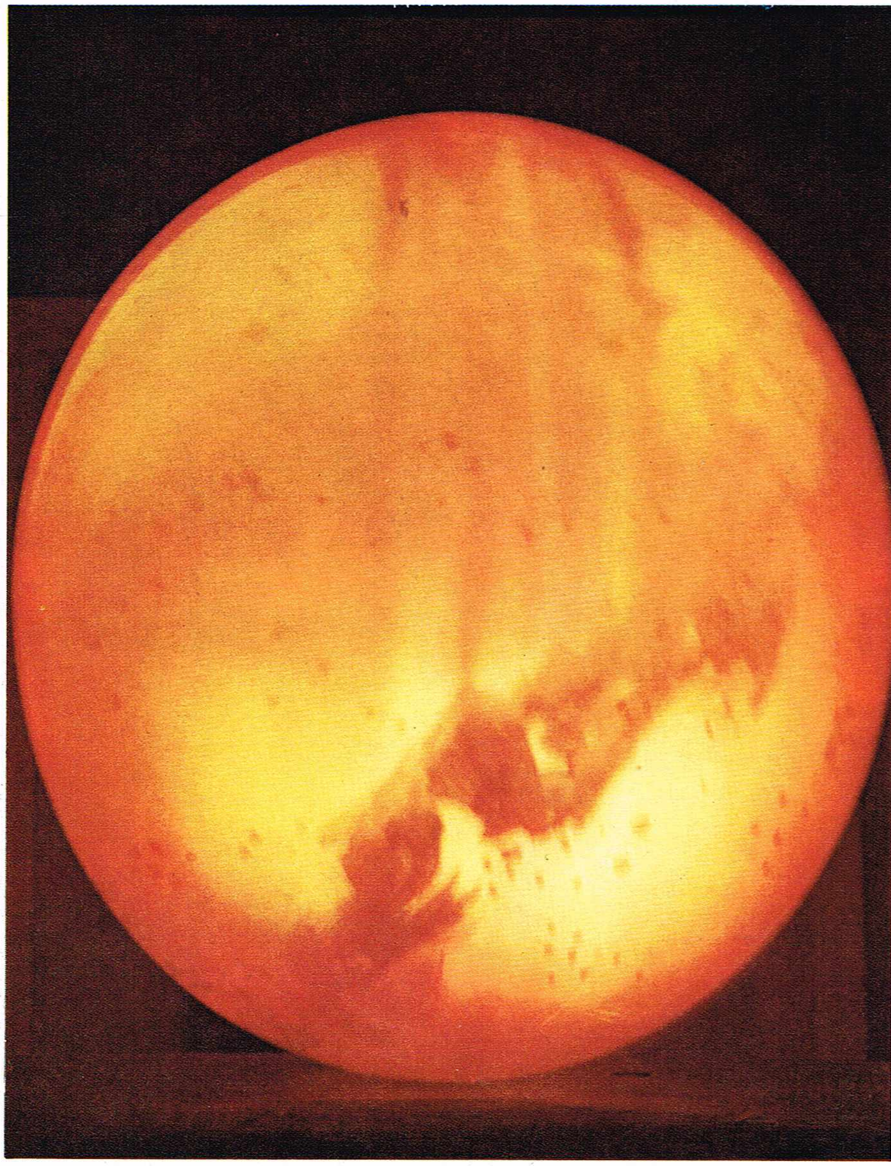

E. Lessing - Magnum

▲ *Un modèle de l'***expansion de l'Univers.**

quement). On voit donc que la mécanique relativiste fait abandonner les anciens repères absolus et montre qu'espace et temps sont liés dans la dépendance à l'égard du système de référence où s'effectuent les mesures. Signalons que l'expérience a confirmé cette théorie et rappelons celle accomplie en 1971 avec des horloges atomiques placées à bord d'avions qui ont fait le tour de la Terre, ce qui a permis de mesurer pour de grandes vitesses le décalage de temps par rapport à des horloges restées au sol. Cette expérience illustre le « paradoxe de Langevin » selon lequel, par exemple, un voyageur faisant un voyage aller-retour de deux ans à une vitesse inférieure de 1/20 000 à celle de la lumière, retrouverait à son retour une Terre plus vieille de deux siècles.

L'équivalence entre l'espace et le temps en tant que grandeurs physiques a été précisée par Minkowski avec la présentation d'une *géométrie quadri-dimensionnelle* où une variable de temps est associée aux variables d'espace. Précisons que ce n'est pas le temps lui-même qui est introduit ici, mais une variable calculée à partir de lui, le nombre imaginaire « *i* » intervenant dans ce calcul. Cette combinaison où s'enchevêtrent quatre variables est donc nouvelle et constitue l'**espace-temps** ou **continuum,** celui-ci dépendant de quatre paramètres permutables entre eux, sans que le temps perde pour autant toute spécificité. Cet amalgame donne naissance à un nouvel invariant, l' « *intervalle* » *spatio-temporel,* qui constitue une valeur objective et contrôlable par des mesures. Cela implique que le présent n'est pas le même dans tous les systèmes de référence puisque l'ordre de succession de deux événements peut se renverser d'un observateur à l'autre. Mais il existe un passé et un futur absolus auxquels s'ajoute « un ailleurs » dû au fait que la vitesse de propagation des actions et des informations ne peut dépasser la vitesse de la lumière. Aussi nul observateur ne peut-il revenir à un événement passé pour lui ou précéder un événement dans le futur. De ce fait, l'ordre causal est maintenu, et avec lui, le déterminisme.

L'usage d'une théorie non euclidienne de l'espace a été déterminante pour la relativité généralisée. Les effets de la gravitation et l'inertie y sont considérés comme équivalents et ne sont plus attribués à l'action de forces, mais à la modification des propriétés de l'espace au voisinage de toute matière. Une théorie mathématique complexe permet ici une simplification des lois physiques concernant les rayons lumineux et les corps en mouvement, y compris lorsque celui-ci est accéléré et dans les cas de rotation. Les « *courbures* » *de l'espace-temps* sont liées à la quantité de matière en chaque point-événement décrit par quatre variables combinées. Chaque objet décrit une ligne d'Univers suivant les géodésiques, c'est-à-dire les parcours où l'intervalle est le plus court. Un événement n'est donc dû qu'aux effets d'un voisinage et non à l'action à distance d'une force. Ainsi, l'incorporation par la physique du continu de la structure non euclidienne de l'espace-temps permet une refonte unificatrice des lois de la mécanique. A partir de là, Einstein conçut une courbure à l'échelle de l'Univers, faisant du continuum une sorte de sphère au rayon immense, à la fois fini et sans limites.

D'autres modèles ont été ensuite proposés à partir de la relativité, mais le débat est aujourd'hui centré sur la question de l'*expansion de l'Univers.* Nous savons en effet, depuis que Hubble l'a établi en 1928, que les galaxies lointaines s'éloignent de nous avec une vitesse de fuite proportionnelle à la distance qui nous sépare d'elles. Cela a conduit à proposer des modèles non statiques de l'Univers, fondés en particulier sur la théorie du « big bang ». Selon celle-ci, la matière aurait d'abord été concentrée en un espace très restreint puis une gigantesque explosion l'aurait projetée dans toutes les directions il y a plus de dix milliards d'années. Cette hypothèse a toutefois été remise en question avec la découverte de radiosources stellaires, les *quasars.* Ceux-ci, situés par les premiers calculs à des distances de l'ordre de plusieurs milliards d'années-lumière, émettent une énergie considérablement supérieure à celle des objets célestes connus, et cela alors que leurs dimensions semblent très faibles. Aussi a-t-on été amené à supposer que les quasars pouvaient être plus proches qu'on ne le pensait, d'autant que de récents travaux montrent que les galaxies jeunes se comportent comme eux. C'est pourquoi les modèles d'Univers quasi statiques sont aujourd'hui réactivés.

Évoquons en particulier la théorie de Hoyle qui implique une « création continue » de la matière et abandonne donc le principe de conservation de l'énergie. Quant à attribuer les phénomènes observés avec les quasars aux effets de la gravitation, cela exige, d'après Hoyle et Narlikar, de renoncer à l'invariance des constantes de couplage de la physique et conduit donc à définir en chaque point des variations de celles-ci, dues aux effets locaux de l'ensemble de l'Univers matériel. On voit que les recherches en ce domaine aboutiront peut-être à une transformation radicale de la physique, même si aujourd'hui elles ne permettent pas de conclure et de choisir entre divers modèles, que ceux-ci portent sur l'expansion continue ou au contraire sur un état quasi stationnaire de l'Univers.

Quoi qu'il en soit, la révolution relativiste a désormais changé de fond en comble notre conception de l'Univers. Espace et temps ne peuvent plus être considérés comme les formes *a priori* de l'intuition sensible dont parlait Kant. L'espace en soi, le temps absolu, n'ont plus de sens, et il n'existe pas de réceptacle indépendant de la matière et des événements. Quant à la construction physique de l'espace-temps, elle est indissociable des objets qui lui impriment ses caractéristiques.

Ainsi nous faut-il renoncer à croire en un moule absolu de notre savoir, en un cadre fixe de l'Univers, en une référence immuable. Aucun point de vue universel ne garantit une identité entre tous les observateurs possibles, aucun centre n'est privilégié, aucune demeure n'abrite les galaxies.

Énergie

Suggérée par Thomas Young, l'introduction du terme d'énergie (force en acte chez les Grecs) devint déterminante avec la constitution de la thermodynamique. Rappelons que les bases de celle-ci furent posées en 1824 par Carnot à partir de l'étude du rendement des machines à vapeur. Plus tard, Mayer et Joule établirent l'équivalence de la chaleur et du travail, la possibilité d'une conversion réciproque. Dès lors, Helmholtz put généraliser le principe de conservation de la force et ramener chaleur, optique et électricité à des effets des phénomènes mécaniques. Selon lui, « les phénomènes de la nature se réduisent à des mouvements de la matière causés par des forces motrices constantes qui ne dépendent que des rapports de position dans l'espace ». Ainsi, pour le mécanisme, la connaissance de la nature était fondée sur des bases inaltérables : la *matière*, la *force* et le *mouvement*. C'est ce qui fut contesté par Rankine et, à sa suite, par les théoriciens de l'énergétique : Mach, Ostwald et Duhem. Refusant toute réalité à la catégorie de la matière, ils s'opposèrent à la réduction de l'énergie à sa forme mécanique.

Le second principe de la thermodynamique réélaboré par Clausius permettait de plus d'affirmer l'irréversibilité de l'évolution d'un système isolé, alors que les équations de la mécanique ne concernaient que des phénomènes réversibles. Les tentatives pour unifier la physique autour de la mécanique étaient de ce fait ébranlées et les énergétistes pouvaient tirer argument de cet échec. D'après eux, l'état de crise de la science prouvait ses limites, son impuissance à expliquer la nature, montrait qu'elle n'était qu'un ensemble formel associé à des lois expérimentales. La physique n'apparaissait donc de ce point de vue que comme une théorie abstraite fondée sur un nombre réduit de principes, servant à décrire certains phénomènes sans avoir prise sur la question de la réalité. Mais cela même fit que les énergétistes s'opposèrent aux développements de l'atomisme qui leur étaient contemporains. Si l'importance de l'électromagnétisme et l'abandon de la notion d'éther ont donc semblé leur donner raison, la découverte de la structure granulaire de l'énergie a montré que leur théorie générale était elle-même peu stimulante et aveugle à l'égard de certaines recherches. Ainsi leur critique du dogme mécaniste s'est révélée insuffisante : en tenant « à ce que ses symboles ne contiennent rien de plus, rien de moins que les faits à représenter », l'énergétique s'était peut-être condamnée à être peu inventive. Quant au mécanisme, si ses prétentions totalisantes n'ont pas résisté, il put cependant féconder la théorie cinétique des gaz, Boltzmann s'étant appuyé sur l'hypothèse ramenant la chaleur aux mouvements moléculaires.

Qu'en est-il aujourd'hui, après qu'Einstein a démontré l'équivalence de la masse et de l'énergie ? Si ceci conduit à une énergétique, ce n'est que pour autant qu'elle est indissociable de l'affirmation de la matérialité de l'énergie. En ce sens, matière et énergie apparaissent comme des notions assouplies et non exclusives puisque susceptibles de se traduire l'une en l'autre.

Le terme d'**énergie** appartient maintenant au langage commun. Il a été l'enjeu d'oppositions philosophiques, et certains ont pu lui accorder une signification divine. Mais, en physique, l'introduction de l'énergie a avant tout correspondu à une rupture avec le substantialisme. Celui-ci consiste à supposer l'existence d'une substance permanente, d'un substrat immuable par-delà les divers phénomènes observés. Une telle croyance a constitué par exemple le soubassement de la plupart des théories de la chaleur jusqu'au milieu du XIXe siècle. Identifiée au feu élémentaire, au soufre de l'alchimie, au phlogistique de G. E. Stahl, la chaleur restait un support caché, toujours présent même s'il ne se manifestait pas. Lavoisier, quant à lui, définissait le calorique comme un fluide sans masse pouvant circuler entre les pores de la matière, perceptible ou latent selon les combinaisons entre ce fluide et d'autres substances. Aussi affirmait-il : « Le fluide calorique ne peut être ni détruit ni créé. » Une telle théorie devint vite insoutenable après qu'eut été prouvée l'équivalence entre la chaleur et le travail mécanique, et l'hypothèse dominante devint celle qui faisait de la chaleur un effet de l'agitation moléculaire. Mais la découverte de multiples formes d'énergie a interdit de privilégier sa forme mécanique aux dépens de l'énergie électrique, de l'énergie rayonnante, de l'énergie nucléaire, etc. Si ces multiples formes peuvent se transformer l'une en l'autre, cela ne signifie pas que se maintient une substance indestructible, un contenu intérieur indépendant des formes de manifestations de l'énergie.

On a pu croire un temps avoir atteint une physique complète lorsque au *principe de conservation des forces vives* s'ajouta celui de la *conservation de la masse*, ce qui laissait penser qu'un fond immuable était atteint. Mais cette belle assurance a ensuite volé en éclats, et la conservation de la masse dut être abandonnée lorsque la mécanique relativiste montra que la masse augmentait en fonction de la vitesse.

Que veut donc dire le *principe de conservation de l'énergie ?* Il ne correspond à rien d'autre qu'à l'usage d'une constante numérique dans les transformations énergétiques, c'est-à-dire à la conservation d'une quantité et non d'une substance. L'énergie en général ne peut être définie, puisque n'existent que des formes concrètes de celle-ci. Mais la mathématisation de l'énergie permet de calculer un nombre et de s'assurer de son invariance à travers les transformations de l'énergie interne du système envisagé. Il s'agit donc là d'une équivalence quantitative, sans que pour autant ce qui se conserve soit représentable. L'énergie n'est pas identique à elle-même puisqu'elle se rencontre sous des formes différentes ; seule sa quantité peut être dite constante, car elle est chiffrée. C'est par le nombre que s'atteint l'objectivité du réel désignée par les notions de matière et d'énergie.

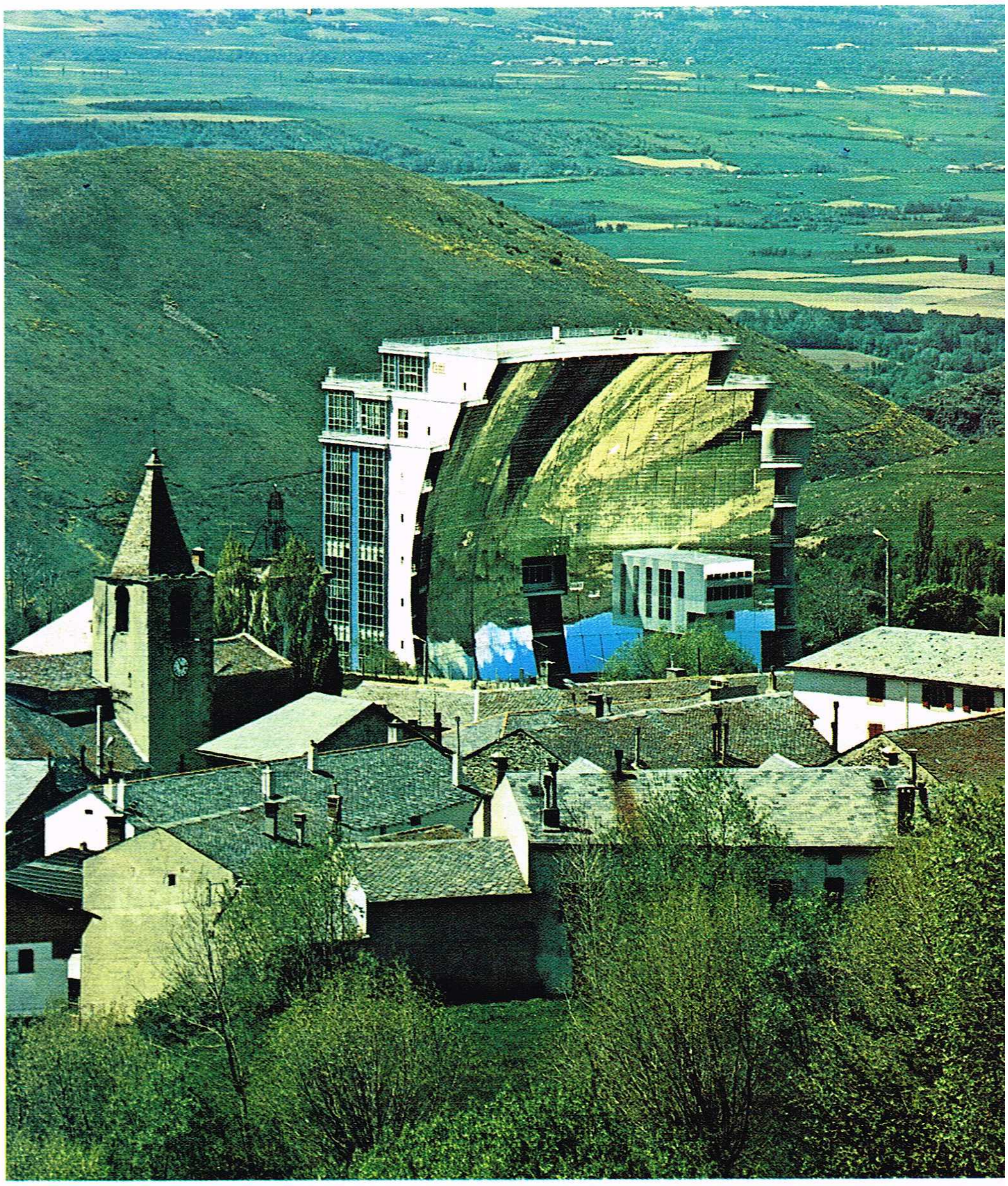

▲ ***L'énergie se rencontre sous des formes différentes ; ainsi, l'énergie thermique du Soleil est captée dans des fours solaires (ici, celui de Mont-Louis), grâce auxquels on peut réaliser des réactions chimiques et des fusions impossibles jusqu'alors.***

Si l'énergie interne d'un système isolé reste constante, elle ne subsiste pas pour autant dans une identité qualitative au cours de l'évolution spontanée de ce système. Le second principe de la thermodynamique permet au contraire d'affirmer l'irréversibilité de la transformation puisque la déperdition de chaleur est inéluctable. Ainsi une partie de l'énergie dissipée sous forme thermique ne peut être réutilisée, reconstituée sous une autre forme. L'évolution d'un système clos vers l'état le plus probable aboutit à l'égalisation des températures, à l'homogénéité thermique. Cette perte qualitative correspond à une désorganisation du système, c'est-à-dire à une augmentation de l'entropie, de la puissance de désordre. L'entropie dépendant du logarithme de la probabilité, elle peut être chiffrée à une constante près, ce qui instaure ici aussi le règne du quantitatif. On voit donc que la dégradation de l'énergie conduit à abandonner l'idée d'une conservation substantielle et à effectuer un calcul de la perte subie au cours des transformations. Certains ont voulu étendre ce principe à l'Univers en tant qu'ensemble, prédisant à celui-ci une « mort thermique » inéluctable, due à une complète homogénéité, à une totale désorganisation. Mais cela suppose de considérer l'Univers comme un système clos alors que, par ailleurs, on ne lui reconnaît pas de limites. Une telle généralisation apparaît donc spéculative et incontrôlable, même si elle ne peut être exclue.

L'étude des systèmes non isolés, des êtres vivants en particulier, a conduit à envisager plus précisément les phénomènes où l'entropie est décroissante. En utilisant comme modèle le calcul de l'entropie, on a quantifié l'information en montrant qu'elle était aussi calculable à partir du logarithme de la probabilité d'un état envisagé. Ainsi, plus un état est probable, plus l'information est grande, c'est-à-dire que la précision d'une prévision est associée à la quantité d'information. Cette dernière est donc une entropie négative, une *néguentropie ;* elle correspond, non pas au désordre, mais à l'organisation croissante. La résistance à l'augmentation du désordre est donc liée à l'information et à ses transferts, dans la mesure où ils échappent à l'évolution vers l'homogénéité. L'analyse de tels processus est déterminante en cybernétique et en biologie.

La notion d'énergie est indissociable de la physique moderne. Si son usage ne correspond pas à la dissolution de la matière que certains ont pu y lire, il indique pourtant la désubstantialisation de l'objet physique. La mathématisation est ici décisive puisque à la permanence d'une substance s'est substituée l'invariance d'une quantité calculable. Mais la microphysique et la notion de quantum d'action ont montré que la répartition et la transmission d'énergie étaient discontinues. La physique des quanta a par conséquent introduit la temporalité dans l'objet et établi la discontinuité du réel. Ainsi, la structure de l'énergie est devenue décisive dans l'expérimentation et la recherche.

Onde et corpuscules

« Il faut plutôt les inventer que les découvrir. » En parlant ainsi des corpuscules, Bachelard affirme nettement que la physique est réalisation et non pas seulement description d'un donné préalable. L'exemple des corpuscules en effet est particulièrement probant. Leur image est issue de la mécanique, de l'examen du mouvement des projectiles. Elle est liée à une conception de la matière qui est celle d'une substance solide, palpable, faite d'unités insécables. Mais le point de vue corpusculaire appliqué à la lumière, celui de Newton par exemple, a été relayé par la théorie ondulatoire. Celle-ci, conforme aux observations de phénomènes lumineux tels que les interférences et la diffraction, est liée à l'idée d'une propagation continue. Mais l'étude de l'*effet photo-électrique* a réactivé la conception corpusculaire, le *photon* étant défini comme corpuscule sans masse, atteignant une vitesse limite. De fait, chacune des deux théories trouve sa confirmation expérimentale, mais aucune d'elles ne peut prétendre expliquer à elle seule l'ensemble des phénomènes concernés. C'est cette difficulté qui a suscité la notion de « complémentarité » et conduit L. de Broglie à associer **onde** et **corpuscule** dans une *mécanique ondulatoire* généralisée à l'ensemble des corpuscules matériels. De ce point de vue, le corpuscule peut être localisé dans son onde, en un petit intervalle où celle-ci a une amplitude non nulle. La mécanique quantique s'est ensuite développée à partir de l'*équation de Schrödinger* où la fonction d'onde ψ est régie par un opérateur (hamiltonien). Si pour Schrödinger lui-même l'onde est réelle et le corpuscule constitue donc une singularité de l'onde, il n'en est pas de même pour Born et l'école de Copenhague. Ceux-ci ont interprété le vecteur d'état ψ comme une amplitude de probabilité sans réalité physique. Cette conception probabiliste aboutit à ne considérer l'onde que comme le moyen de déterminer la probabilité de présence de la particule. Mais cela implique que cette dernière n'est pas localisée précisément, puisqu'elle peut apparaître en divers endroits, ceci étant indissociable des conditions d'observation.

Si la doctrine de Copenhague refuse d'identifier le *vecteur d'état* à une onde mécanique et de lui accorder une signification physique, c'est qu'il intervient dans la théorie comme un artifice mathématique, ainsi que le montre le grand rôle joué dans les calculs par les nombres complexes où intervient le symbole $i = \sqrt{-1}$. Ainsi les équations d'ondes de la microphysique se distinguent des théories classiques où n'interviennent pas de valeurs complexes. Une traduction est cependant possible dans les lois de la mécanique classique, bien qu'on ne puisse pas associer une onde à chaque particule. Dans le cas d'un collectif de particules en interaction, on n'envisage en effet qu'une seule fonction d'onde associée au système dans son ensemble. La propagation de cette fonction d'onde s'effectue dans un « espace de configuration » qui comporte 3 *n* dimensions, *n* étant le nombre de particules. On voit que le vecteur d'état constitue donc une construction mathématique, ce qui fait qu'on le définit comme une amplitude de probabilité puisqu'il permet le calcul de prévisions. C'est une fonction d'onde unique qui rend compte des diverses probabilités d'obtenir telle ou telle valeur, c'est-à-dire de faire se manifester les particules en tel ou tel point. Le vecteur d'état nous renseigne donc sur les potentialités d'existence des corpuscules. Mais ceux-ci ne peuvent plus être considérés comme de petits corps au volume bien délimité et dont on pourrait suivre toutes les trajectoires. Ils ne constituent pas une substance faite d'éléments isolables, porteurs de qualités et repérables à tout instant. Ils ne sont pas de petites choses impénétrables dont les dimensions, la forme et la place pourraient être toujours précisées et seraient strictement prévisibles. Ils ne sont individualisés que dans la mesure où ils se trouvent dans des états différents, car c'est seulement alors qu'ils sont discernables. De plus, ils peuvent être produits et s'annihiler, certaines particules n'ayant d'ailleurs qu'une très brève durée de vie. De ce fait, le réel physique est désubstantialisé, ne comporte plus de substrat inerte, d'identité permanente. Cela amène à abandonner toute représentation imagée pour y substituer un *système d'équations*. La construction théorique s'effectue à partir d'un arrachement par rapport aux imageries et aux sources premières, l'objet étant situé par ses effets et expliqué par sa structure. « Partout où le point agit, il existe », dit Bachelard, c'est-à-dire que l'objet est construit à partir de la formule et donne lieu à une réalisation où il est manifesté par ses actions. La mathématisation de l'expérience se fait donc en rupture avec le réalisme naïf.

L'espace-temps est lui-même atteint par la microphysique. En effet, la discontinuité peut aussi y être introduite, car on ne peut prévoir avec une totale exactitude la trajectoire d'une particule. La propagation du vecteur d'état s'effectue quant à elle dans un espace fictif. Mais surtout les transitions d'un état stationnaire à un autre ont pu être considérées par Bohr comme instantanées, ce qui a fait penser que le cadre de l'espace-temps était alors transcendé. Certains chercheurs américains ont d'ailleurs depuis caractérisé la fonction d'onde de l'Univers comme transcendante. D'autres physiciens sont allés jusqu'à supposer une structure granulaire à l'espace et au temps eux-mêmes. Cependant, l'abstraction croissante de ces conceptions a conduit L. de Broglie à rechercher une nouvelle représentation concrète en microphysique, à réaffirmer le caractère mécanique de l'onde, à tenter de décrire les phénomènes corpusculaires en termes d'espace et de temps. De ce point de vue, les transitions quantiques « seraient simplement des processus très rapides de réadaptation à un nouvel état stable », et le

mouvement de chaque corpuscule serait guidé par une onde concrète.

Doit-on encore aujourd'hui parler d'une dualité onde-corpuscule, même si celle-ci est compensée par la complémentarité ? Ce que montre l'expérience, c'est que des propriétés ondulatoires ou corpusculaires des microsystèmes se manifestent selon le dispositif utilisé. Mais ce dernier est précisément macroscopique, et seule l'amplification des effets des phénomènes microphysiques nous permet une observation. L'usage des termes d'onde et de corpuscule n'a donc peut-être, comme l'indique M. Bunge, qu'une portée analogique correspondant à une traduction en termes de macrophysique. Considérer le corpuscule comme un « paquet d'ondes » ou l'onde comme une apparence due à un effet de masse des corpuscules, c'est toujours réduire à l'un de ses aspects les manifestations d'un microsystème. Mais si ces notions perdent leur sens premier et si l'on rompt avec le « chosisme », alors elles apparaissent inadéquates ou ne peuvent continuer à être utilisées qu'en étant considérablement transformées, ainsi qu'on l'a déjà vu.

L'objet de la microphysique est nouveau ; il échappe aux théories classiques et à leurs catégories. Le *vecteur d'état*, propriété d'un microsystème dans son ensemble, n'est pas une onde mécanique. Le corpuscule, quant à lui, est sans substance. La matière ne peut plus être imagée et son hétérogénéité doit être reconnue. Ce sont les structures mathématisées qui organisent l'expérience, rendent compte de ses effets, permettent les prévisions et donnent accès aux déterminations du réel. Quant aux processus microphysiques, leur appréhension dépend des interactions avec le dispositif expérimental : aussi l'observation n'est-elle pas neutre et constitue-t-elle un mixte, un composé réel de sujet et d'objet, une production d'effets.

Causalité et déterminisme

Afin de rendre compte de la réalité, la physique s'appuie sur le *principe de causalité*, selon lequel tout phénomène a une cause, les mêmes causes produisant les mêmes effets. A ce premier principe est associé le *principe de raison suffisante*, qui pose que tout être ou tout événement a une raison qui l'explique et permet de préciser pourquoi il en est ainsi et non autrement. Cela implique traditionnellement que tout objet a une justification rationnelle et que causes et effets s'enchaînent linéairement.

Mais l'énoncé de lois en physique a de plus amené à utiliser la *notion de légalité*, la répétition des phénomènes observables et l'existence de régularités rendant possible d'accéder aux lois naturelles régissant l'Univers. Si ce dernier est considéré comme une gigantesque machine, cela permet de déterminer toutes les lois fondamentales qui le régissent et d'expliquer son évolution. C'est ce qu'affirme Laplace, selon qui la connaissance exacte de la situation de l'Univers à un instant donné permettrait de prévoir avec exactitude ses états ultérieurs. Pour lui, l'état présent de l'Univers est la cause de ce qui va suivre, et la prévision s'effectue grâce à la connaissance des lois de la mécanique. Dès lors, la science serait en quelque sorte la reproduction de la nature ; elle rendrait présents à nos yeux passé et avenir et exprimerait l'existence d'un déterminisme strict. Concrètement, cela correspond à l'étude et à la mesure précise des *conditions initiales* du système étudié, ou encore des *conditions aux limites* dans le cas où il faut envisager des données extérieures au système. Ainsi peut-on dégager la cause déterminante d'un phénomène, prévoir ses conséquences, fixer une loi générale. La mécanique comme la thermodynamique à ses débuts répondaient en effet à de tels critères et montraient l'efficacité de ce postulat de méthode. De fait, le principe de causalité classique était la marque de la rationalité scientifique, de l'emprise sur le réel, de la capacité d'explication d'un Univers ordonné.

L'introduction de la *causalité statistique* a transformé cette conception. Fondé sur le dénombrement, le calcul des probabilités permet d'établir des lois pour les grands nombres, car les valeurs moyennes sont alors les plus probables. On ne peut donc extraire des règles de l'étude de systèmes comportant un grand nombre d'éléments, même si chacun de ceux-ci ne peut être connu avec exactitude ou si le détail des interactions ne peut être suivi. C'est ce qui a lieu dans la mécanique statistique lorsqu'elle étudie l'évolution des systèmes macroscopiques à partir de la définition des états les plus probables. Le lien entre l'état initial d'un système et un état ultérieur ne peut donc plus être considéré comme une détermination absolument stricte. La prévision n'est possible qu'en termes de probabilité, et plusieurs types d'évolution sont possibles, théoriquement du moins.

Cependant, calculer la probabilité pour qu'un événement se produise n'est pas le livrer à un aléatoire pur, puisqu'une règle apparaît au niveau de la répétition ou à l'échelle d'un ensemble. Aussi peut-on parler de *déterminisme statistique* dans la mesure où certaines régularités se manifestent. Les probabilités physiques traduisent donc des propriétés objectives des systèmes ou des processus étudiés et ne peuvent être rapportées à l'irréel. Il faut cependant distinguer la causalité statistique qui intervient à l'échelle d'une collectivité et la probabilité pour qu'un événement singulier ait lieu. Dans le premier cas, c'est la *fréquence statistique* qui se manifeste, sans pour autant que la mesure nous soit épargnée. Dans le second cas, la probabilité traduit une *potentialité* qui n'exclut pas toutefois l'existence d'un hasard objectif puisque la régularité n'est pas ici concernée.

Définir le hasard comme étant la mesure de notre ignorance paraît insuffisant même si l'on prend en considération l'existence de « lois de hasard » relatives à des collectifs. Cela permet seulement de concevoir que le caractère mathématique des probabilités interdit de les projeter telles quelles dans le réel, de croire qu'elles constituent elles-mêmes une cause explicative. Cournot a pu, quant à lui, définir le *hasard* comme rencontre de deux séries causales indépendantes, c'est-à-dire comme un entrecroisement provoquant un effet de surprise. En traduisant ainsi l'expérience commune, il laisse inchangée la *notion de cause*. En fait, celle-ci n'est pas une évidence expérimentale, car elle implique de séparer nettement cause et effet et, en même temps, de les relier dans un rapport logique. Ainsi la cause peut-elle être comprise comme le passé d'un événement aussi bien que comme le principe par lequel on s'assure qu'il s'insère dans un ordre rationnel. Mais la mathématisation de la physique moderne a fait abandonner cette représentation de la cause. Il ne s'agit plus de rapporter un phénomène à un autre mais de mettre en rapport des grandeurs physiques. On n'envisage plus de causes cachées, de principes transcendants, d'intentions animant le monde des choses. Ce n'est pas dire que le réel est opaque et qu'aucune causalité n'est envisagée. Mais cause et effet ne sont plus strictement séparables, et la théorie ne recherche pas des causes mais des lois, des formules. C'est l'appareil mathématique, partie prenante de l'expérimentation, qui permet de prévoir et d'expliciter des effets, sans que cela suppose une cause substantielle et sans que la raison soit pour autant identifiable à la réalité des phénomènes. La causalité n'apparaît donc plus comme l'œuvre d'un législateur, n'exprime pas une nécessité intime du monde, ne fait pas découvrir une finalité des processus ou une raison éternelle ; bref, la physique n'explique pas le *pourquoi* mais le *comment* des phénomènes.

La causalité probabilitaire renouvelle en ce sens le *déterminisme*, tout en excluant le fatalisme ainsi que le rêve d'un savoir absolu. Ce sont en quelque sorte des effets sans cause qui sont envisagés, puisque les déterminations repérées ont un caractère mathématique. Mais de plus, on ne peut dire que les phénomènes obéissent à la théorie ou que celle-ci leur prescrive une loi, puisque les régularités objectives ne se manifestent qu'à l'échelle des grands nombres. Le concept n'est donc pas le réel lui-même, pas plus que son reflet direct. Pourtant la probabilité traduit une détermination effective se manifestant concrètement. Mais le déterminisme ainsi objectivé n'est ni strict ni absolu. Il ne rend pas compte de l'Univers considéré comme un ensemble, ne permet pas une connaissance totale du réel, ne garantit pas l'invariabilité des phénomènes naturels. Il ne fait que traduire le caractère répétable des expériences physiques, la capacité de prévision de nos théories, l'existence de lois et de régularités. De ce fait, rien ne permet de trancher scientifiquement à propos de la nature du hasard. Un événement singulier apparaît en effet aléatoire, et il est impossible d'y repérer une nécessité inéluctable. Cela exclut de ramener le monde à un ordre prédéterminé ou d'en prévoir avec une complète exactitude les états futurs.

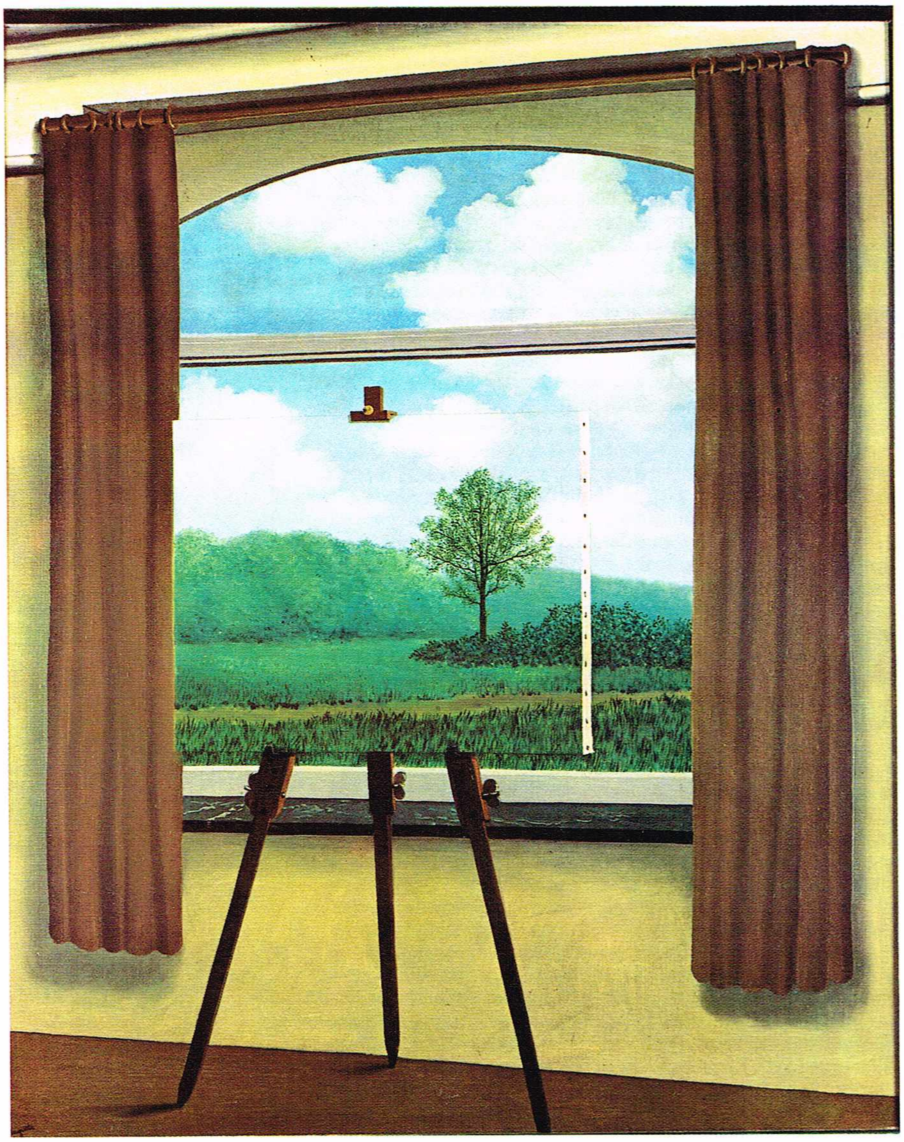

P. Willi - TOP

▲ *La notion kantienne d'espace et de temps n'a plus cours. C'est l'occasion pour les surréalistes de faire éclater les formes trop étroites a priori de la sensibilité. La dimension du rêve appartiendrait-elle à une autre dimension? (la Condition humaine, peinture de Magritte; collection Claude Spaak) (A.D.A.G.P., 1976.)*

Nous ne sommes pas plus les maîtres de l'avenir que nous ne pouvons suspendre le temps. Ainsi que le démontre L. Brillouin, la connaissance exacte de l'état de l'Univers à un moment donné coûterait une quantité infinie d'informations, c'est-à-dire de néguentropie. Autrement dit, cela exigerait un temps infini, et ce alors même qu'une précision totale est impossible. La démonstration pratique d'un déterminisme complet n'a donc pas de sens scientifique, et toute théorie rencontre le hasard comme limite. L'ordre repéré dans les phénomènes ne peut englober tout le réel, le déterminisme n'a pas une portée infinie, et la science ne peut se clore en un savoir achevé. Nos certitudes ne suffisent pas à éliminer l'aléatoire et à exclure le désordre; la rationalité n'est pas exhaustive. C'est pourquoi M. Serres peut paradoxalement affirmer : « Le réel est et n'est pas rationnel. »

L'avènement de la mécanique quantique a montré que le phénomène microphysique ne peut être atteint dans toutes ses déterminations réelles. Rappelons que les relations d'incertitude de Heisenberg montrent que, si l'on cherche à préciser deux variables conjuguées telles que position et vitesse, on ne peut le faire en même temps. Affiner la détermination de l'une d'entre elles ne peut s'effectuer qu'au prix d'une incertitude concernant l'autre. Ainsi la précision des mesures rencontre une limite objective qui est due à l'impossibilité de manifester un phénomène microphysique sans tenir compte de l'intervention de l'observateur. C'est que la mesure s'effectue au niveau macroscopique et qu'on ne peut ici dissocier l'objet du dispositif expérimental. Les effets de l'expérience sont dus aux interactions de ces derniers, et les résultats concernent donc des blocs de sujet-objet, des ensembles microsystème-instruments d'observation. De plus, la représentation de l'état ne permet que de déterminer les probabilités d'apparition du corpuscule. Aussi la physique quantique a-t-elle donné lieu à des interprétations indéterministes. Selon celles-ci, l'indétermination rencontrée ne traduit pas seulement les limites de nos connaissances et de nos possibilités de mesure, mais concerne le réel physique lui-même, celui-ci correspondant à ce qui est observable. C'est dire que les propriétés mises en évidence dépendent des rapports entre l'observateur et l'objet. Certains, en particulier L. de Broglie, ont toutefois envisagé l'existence de *variables cachées* dont l'explicitation permettrait une interprétation plus rigoureuse des résultats expérimentaux. Quoi qu'il en soit, la non-séparabilité entre systèmes ayant interagi confirme à la fois l'objectivité de l'expérience et l'interdépendance entre instruments et objets au cours de celle-ci. L'observation confirme néanmoins la distribution probabilitaire établie par le vecteur d'état et indique donc la justesse des prévisions quantiques et leur portée concrète, au moins pour les états stationnaires. A moins de réduire la physique quantique à une théorie psychophysique, il semble donc que celle-ci ne justifie pas un indéterminisme radical puisqu'elle peut être testée empiriquement, même si elle ne concerne pas des substances. On peut noter à cet égard l'ambiguïté de la *notion d'observateur* dans la mesure où elle se rapporte à un dispositif instrumental et non à une représentation spirituelle. L'enseignement de la physique quantique concerne en ce sens le processus de connaissance, car celui-ci n'est pas une confrontation entre sujet et objet mais implique des interactions entre eux, leur mise en rapport. Cela nous met en garde contre les tentatives faites pour identifier théorie et réel, que ce soit pour affirmer l'absolu du déterminisme ou l'indéterminisme des choses mêmes. Nos théories ne font pas parler la matière et ne nous exposent pas les causes des phénomènes. Elles constituent des constructions réglées et mettent en jeu la causalité dans la mesure où elles permettent d'effectuer des prévisions. Leur validité ne signifie pas l'atteinte d'une vérité absolue ou la révélation d'un destin universel. La physique ne récite pas un savoir déjà établi et qui se dévoilerait peu à peu; elle construit et expérimente. Mais elle ne garantit en rien l'unité de l'Univers et l'accès à un savoir complet. Ne se fermant pas en une totalité, elle laisse ouverte la voie de l'invention, celle de la trouvaille, du nouveau.

Pour conclure, il faut rappeler que la physique est non seulement un savoir mais aussi une pratique sociale. Indissociable de la technologie, elle traverse de part en part la vie moderne. Elle est de plus assujettie à des prises de décisions qui commandent son développement. L'épistémologie, discours sur les sciences, ne peut donc ignorer que celles-ci sont tributaires des objectifs des pouvoirs. La science n'est pas toujours le partenaire d'une rencontre heureuse, surtout lorsqu'elle se dessine sous les traits de moyens de terreur. Elle n'est ni une sagesse, ni une garantie de la liberté humaine. Devenir un gai savoir est peut-être pour elle l'issue : alors elle serait jouvence.

FRANÇOISE AKOUM

BIBLIOGRAPHIE

BACHELARD G., *le Nouvel esprit scientifique,* P. U. F.; *l'Activité rationaliste de la physique contemporaine,* P. U. F.; *le Matérialisme rationnel,* P. U. F. - BLANCHE R., *la Science actuelle et le Rationalisme,* P. U. F. - BUNGE M., *Philosophie de la physique,* Seuil. - CARNAP R., *les Fondements philosophiques de la physique,* A. Colin. - EINSTEIN A. et INFELD L., *l'Évolution des idées en physique,* Payot. - HOFFMAN B., *l'Étrange histoire des quanta,* Seuil. - KOYRE A., *Du monde clos à l'univers infini,* Gallimard; *Études galiléennes,* Hermann; *Études newtoniennes,* Gallimard. - KUHN T. S., *la Révolution copernicienne,* Fayard. - LECOURT D., *Une crise et son enjeu,* Maspero. - LLOYD G., *les Débuts de la science grecque,* Maspero. - MARCH A., *la Physique moderne et ses théories,* Gallimard. - MERLEAU-PONTY J., *Leçons sur la genèse des théories physiques, Galilée, Ampère, Einstein,* Vrin. - PLANCK M., *l'Image du monde dans la physique contemporaine,* Gonthier. - SERRES M., *l'Interférence; la Traduction,* Minuit. - ULLMO J., *la Pensée scientifique moderne,* Flammarion.

MÉCANIQUE

La **mécanique** est sans doute l'une des plus anciennes branches de la physique ; elle s'est en effet développée dès l'Antiquité, en liaison avec les problèmes posés par la construction des bâtiments : utilisation des poulies, des palans, et surtout stabilité des édifices ; les premiers éléments de statique apparaissent chez Héron et Archimède.

La **dynamique,** branche de la mécanique qui étudie le mouvement des corps, n'apparaît que beaucoup plus tard, et encore est-elle, comme toutes les autres sciences à cette époque, entachée de bien des imprécisions et de considérations philosophiques ou théologiques qui ne contribuent que médiocrement à clarifier les problèmes. Signalons toutefois que, reprenant une notion introduite par Aristote et développée par Avicenne, Jean Buridan et son élève Nicolas Oresme tentent d'expliquer le mouvement des astres et l'accélération d'un corps en chute libre par la *théorie de l'impetus,* sorte de « force motrice » qui se conserve lorsque le corps n'est soumis à aucune résistance. On peut voir là une idée qui préfigure un peu le principe d'inertie énoncé par Newton.

C'est avec Galilée que la mécanique commence à acquérir une certaine rigueur et surtout une base expérimentale réelle. Né à Pise en 1564, Galileo Galilei se distingue essentiellement de ses contemporains et de ses devanciers par son habileté et son goût pour les expériences menées rigoureusement. Connu d'abord pour un traité sur l'hydrostatique, il effectue à Pise une série d'expériences par lesquelles il montre que, contrairement à ce que l'on croyait depuis l'Antiquité, dans le vide, des corps de même forme, mais de masses inégales, lâchés au même instant d'un point élevé, atteignent le sol au même instant. Reprenant les idées de Buridan, il affirme que le mouvement d'un projectile est dû à une quantité, l'*impetus,* qui se conserve et est proportionnelle au carré de la vitesse initiale ; il baptisera cette quantité du nom de *force vive*. Plus tard, Galilée effectue de très belles expériences en utilisant le déplacement d'un corps sur un plan incliné, et montre expérimentalement que la distance parcourue varie comme le carré du temps, établissant ainsi pour la première fois la loi du mouvement uniformément accéléré.

Mais c'est avec Newton que la mécanique va recevoir ses bases. Esprit véritablement universel, il contribue au développement de nombre de branches de la physique et des mathématiques. Son plus grand titre de gloire reste bien cependant la découverte de la *loi de la gravitation universelle :* après le célèbre — et peut-être véridique — épisode de la pomme, Newton a l'idée que la chute des corps et le mouvement des planètes autour du Soleil ne sont que deux aspects du même phénomène : l'attraction gravitationnelle entre deux corps, dont l'intensité varie comme l'inverse du carré de la distance entre les deux corps en attraction mutuelle. C'est Newton également qui énonce les lois fondamentales de la dynamique, et les expose dans ses *Principia,* parus en 1687 sur les instances de son ami Halley, celui-là même qui prédit le passage de la comète portant son nom.

Après Newton, la *mécanique rationnelle* connaît un immense développement. Un grand nombre de scientifiques s'engouffrent dans la voie ouverte par Newton. La mécanique newtonienne remporte d'éclatants succès : la mécanique céleste, en particulier, explique le comportement des planètes et prédit même l'existence d'astres qui ne seront découverts que plus tard ; c'est ainsi que Le Verrier montre que les anomalies de l'orbite d'Uranus peuvent s'expliquer par l'existence d'une planète inconnue jusqu'alors : Neptune.

A la fin du XVIII^e siècle et pendant le siècle suivant, la mécanique continue son développement tout en prenant une forme de plus en plus abstraite qui en fait peu à peu une branche des mathématiques : Lagrange, avec sa *mécanique analytique,* cherche à vider complètement la mécanique de son contenu physique pour élaborer une théorie entièrement algébrique ; son ouvrage ne contient d'ailleurs pas une seule figure. La dynamique des solides est développée par Monge, Mach et surtout Poinsot. Bernoulli, Euler, Chasles et Coriolis contribuent au développement de la cinématique.

A la fin du XIX^e siècle, la mécanique rationnelle a acquis une place privilégiée, par la perfection de son formalisme et l'étendue de ses succès. Elle se trouve à la base de

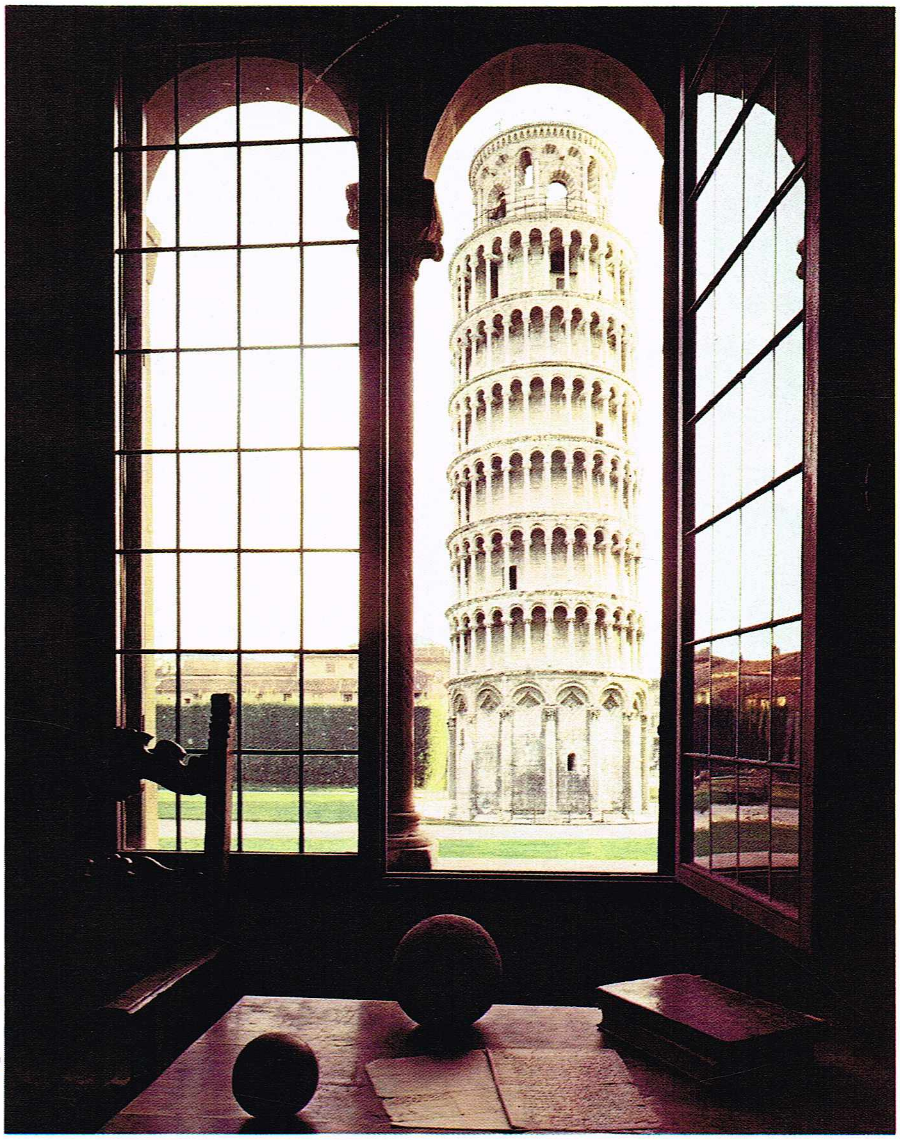

E. Lessing - Magnum

▲ *Reconstitution du cadre dans lequel Galilée effectua ses expériences sur la chute libre (sans doute de la Tour de Pise). Sont réunis sur cette table d'une maison ouvrant sur la Tour un manuscrit de ses expériences et deux sphères en pierre, approximativement de la même taille que celles dont il se servit.*

B.N. - Cl. Lalance

30 DELLA SCIENZA

uato, la cui altezza sia misurata dalla perpendicolare CB, un mobile posto sopra il piano AC, & ad esso legata la corda EDF, e posta in F una forza, ò un peso, il quale alla grauità del peso E abbia la medesima proportione che la linea BC alla CA, per quello, che si è dimostrato, il peso F calerà al basso tirando sopra il piano eleuato, il mobile E nè maggiore spatio misurerà il mobile E quando aurà passata tutta la linea AC di quello, che misura detto graue F nel calare al basso; Mà qui però si deue auuertire che se bene il mobile E aurà passata tutta la linea AC, nel tempo medesimo che l'altro graue F si sarà per egual internallo abbassato; nientedimeno il graue E non si sarà discostato dal centro comune delle cose graui più di quello, che sia la perpendicolare CB, mà però il graue F descendendo à perpendicolo si sarà abassato per ispatio eguale à tutta la linea AC, & perche i corpi graui non fanno resistenza a i moti trasuersali, se non in quanto essi vengono à discostarsi dal centro della terra, però non si essendo il mobile E in tutto il moto AC alzato più che sia la linea CB, mà l'altro F abassato à perpendicolo quanto è tutta la linea AC, però potremo meritamente dire il viaggio della forza E mantere quella istessa proportione, che hà la linea AC alla CB, cioè il peso E al peso F. Molto dunque importa il considerare per quali linee si facciano i moti, e massime ne i graui inanimati, de' quali i momenti hanno il loro total vigore, & la intera resistenza nella linea perpendicolare all' orizonte, e nell'altre trasuersalmente eleuate, ò inchinate sentono quel più, ò meno vigore, impeto, ò resistenza secondo che più, ò meno le dette inclinationi s'auuicinano alla perpendicolare inclinatione.

Della Coclea d'Archimede, per leuar l'Acqua.

Non mi pare che in questo luogo sia da passar con silentio l'inuentione d'Archimede, d'alzar l'acqua con la vite, la quale non solo

◀ **La Science mécanique** *de Galilée, ouvrage consacré aux principes de la dynamique.*

toutes les autres branches de la physique, mais au fond, assez peu de physiciens s'occupent de mécanique, car l'optique, la thermodynamique, l'électromagnétisme en plein essor retiennent toute leur attention. C'est alors que la mécanique rationnelle reçoit un coup très dur : remettant en cause les fondements mêmes de la mécanique newtonienne, Einstein propose en 1905 la *théorie de la relativité restreinte,* dans laquelle la notion de temps, qui était absolue, devient relative; la notion de masse elle-même perd son sens traditionnel puisqu'elle dépend du référentiel dans lequel on effectue la mesure. La dynamique newtonienne ne devient qu'un cas particulier de la dynamique relativiste, cas extrêmement usuel au demeurant puisque c'est celui des vitesses très inférieures à la vitesse de la lumière.

Dans le domaine microscopique, la mécanique classique échoue également : les physiciens élaborent une nouvelle mécanique, dite *mécanique quantique,* fondée sur l'idée que les échanges d'énergie entre matière et rayonnement ne peuvent se faire que de manière discontinue. Elle régit le monde des atomes et des particules élémentaires dans lequel la vitesse et la position d'une particule ne peuvent être connues simultanément avec précision.

De nos jours, la mécanique rationnelle a perdu beaucoup de son lustre passé, mais elle a toujours une immense importance pratique puisqu'elle décrit parfaitement tous les mouvements de corps macroscopiques se déplaçant à des vitesses suffisamment petites par rapport à la vitesse de la lumière : elle est devenue par excellence la science de l'ingénieur.

Les principes de la mécanique

Nous commencerons notre approche de la mécanique par un exposé des principes de base de cette branche de la physique. Nous examinerons tout d'abord le cas d'une particule (que l'on appelle encore un « point matériel »), puis nous étendrons les résultats au cas d'un ensemble de points matériels.

Mécanique d'une particule

Loi fondamentale de la dynamique

Rappelons que la dynamique est la science qui permet de trouver le mouvement d'un point ou d'un système de points matériels lorsque l'on connaît les forces auxquelles ils sont soumis. La loi fondamentale de la dynamique, pour une particule, doit donc nécessairement relier la force appliquée à une grandeur représentative du mouvement du point. Cette grandeur est l'impulsion $\vec{p}$ de la particule.

Considérons en effet (*fig.* 1) une particule P, de masse m, qui, soumise à une force $\vec{F}$, décrit une certaine trajectoire S. La position de ce point par rapport à l'origine O est repérée par le rayon vecteur $\vec{r}$. La vitesse de la particule, qui est tangente à sa trajectoire, est :

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$$

L'impulsion de la particule est définie par la relation $\vec{p} = m\vec{v}$, où m est la masse du point matériel.

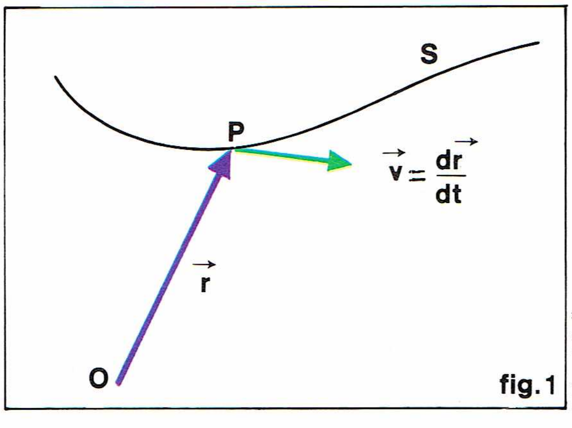

Figure 1 : position et vitesse d'un point matériel P sur une trajectoire S.

Richard Colin

La **loi fondamentale de la dynamique** est la suivante :

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} \quad \textbf{(1)}$$

Lorsque la masse de la particule est constante (ce qui est le cas le plus usuel), cette équation s'écrit :

$$F = m\frac{d\vec{v}}{dt}$$

soit encore :

$$\vec{F} = m\frac{d^2\vec{r}}{dt^2}$$

La force est donc le produit de la masse de la particule par son accélération.

Cette équation permet, en principe, de résoudre tous les problèmes de dynamique relatifs à un point matériel. On peut toutefois en déduire des lois, dites *lois de conservation,* qui expriment le fait que, lors du mouvement, un certain nombre de grandeurs physiques restent constantes. Ces lois, outre qu'elles permettent de résoudre très aisément un certain nombre de problèmes, ont l'intérêt de se retrouver dans des domaines autres que ceux de la mécanique classique.

Lois de conservation

- *Loi de conservation de l'impulsion*

Lorsque la force totale $\vec{F}$ agissant sur la particule est nulle, l'impulsion de la particule reste constante au cours du mouvement. En effet, l'équation **(1)** s'écrit :

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = 0$$

Le vecteur $\vec{p}$ reste donc constant.

- *Loi de conservation du moment cinétique*

Lorsque le moment $\vec{M}$ de la force totale agissant sur la particule est nul, le moment cinétique de la particule reste constant au cours du mouvement.

Le moment de la force par rapport au point O est par définition :

$$\vec{M} = \vec{r} \wedge \vec{F}$$

Appliquons l'équation fondamentale de la dynamique : nous remplaçons $\vec{F}$ par $\frac{d\vec{p}}{dt}$, ce qui donne : $\vec{M} = \vec{r} \wedge \frac{d\vec{p}}{dt}$

Or $$\frac{d}{dt}(\vec{r} \wedge \vec{p}) = \frac{d\vec{r}}{dt} \wedge \vec{p} + \vec{r} \wedge \frac{d\vec{p}}{dt}$$

Comme $\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v}$ est colinéaire à $\vec{p}$, il en résulte que

$$\vec{M} = \frac{d}{dt}(\vec{r} \wedge \vec{p}) \quad \textbf{(2)}$$

Cette relation est très semblable à la relation fondamentale de la dynamique : $\vec{F} = \frac{d}{dt}(\vec{p})$.

La force $\vec{F}$ y est remplacée par le moment $\vec{M}$ de la force par rapport à O et l'impulsion $\vec{p}$ y est remplacée par le moment de l'impulsion par rapport à O.

Le moment de l'impulsion par rapport à O est appelé *moment cinétique* $\vec{L}$ de la particule; la relation **(2)** peut donc s'écrire :

$$\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt}$$

Cette dernière relation constitue le **théorème du moment cinétique.**

La loi de conservation du moment cinétique se déduit du théorème du moment cinétique exactement de la même façon que la loi de conservation de l'impulsion se déduit de la loi fondamentale de la dynamique.

- *Loi de conservation de l'énergie*

Lorsque la force totale agissant sur une particule est conservative, l'énergie totale de la particule reste constante au cours du mouvement.

Précisons tout d'abord ce qu'est une *force conservative :* c'est une force qui, lorsque le point matériel auquel elle s'applique effectue un circuit fermé, effectue un travail nul. Un exemple familier de force conservative est

celui de la force de pesanteur. En effet, lorsqu'une particule tombe en chute libre, d'une certaine hauteur, les forces de pesanteur effectuent un travail que l'on peut utiliser par exemple pour faire tourner une roue ou une turbine; si l'on désire en revanche faire remonter la particule à son point de départ, il faut lui fournir une énergie exactement égale au travail qu'elle a effectué au cours de sa descente, de sorte qu'au total le travail effectué par la force de pesanteur est nul. Ce qui précède n'est vrai qu'en l'absence de forces de frottement; ces dernières, en effet, sont le type même des forces non conservatives. Lorsqu'un point matériel parcourt un circuit fermé, les forces de frottement ne fournissent jamais de travail. Il faut au contraire lutter en permanence contre ces forces pour qu'il y ait mouvement; ce sont des *forces dissipatives*.

Nous revenons maintenant aux forces conservatives. Considérons une particule allant, sous l'action d'une force F, d'un point 1 à un point 2 par un chemin A (*fig.* 2). Notons W_{12} (A) le travail ainsi effectué. Appelons W_{12} (B) le travail effectué pour aller de 1 à 2 par le chemin B. Nous allons montrer que le travail pour aller de 1 à 2 est le même quel que soit le chemin utilisé.

Considérons en effet le circuit consistant à aller de 1 à 2 par le chemin A et à revenir à 1 par le chemin B. Par définition de la force conservative, on a :

$$W_{12}\,(A) + W_{21}\,(B) = 0$$

De plus, et pour la même raison :

$$W_{21}\,(B) + W_{12}\,(B) = 0$$

Nous pouvons donc écrire :

$$W_{12}\,(A) - W_{12}\,(B) = 0$$

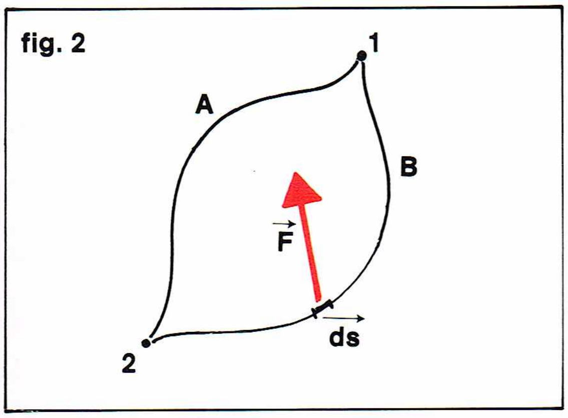

Richard Colin

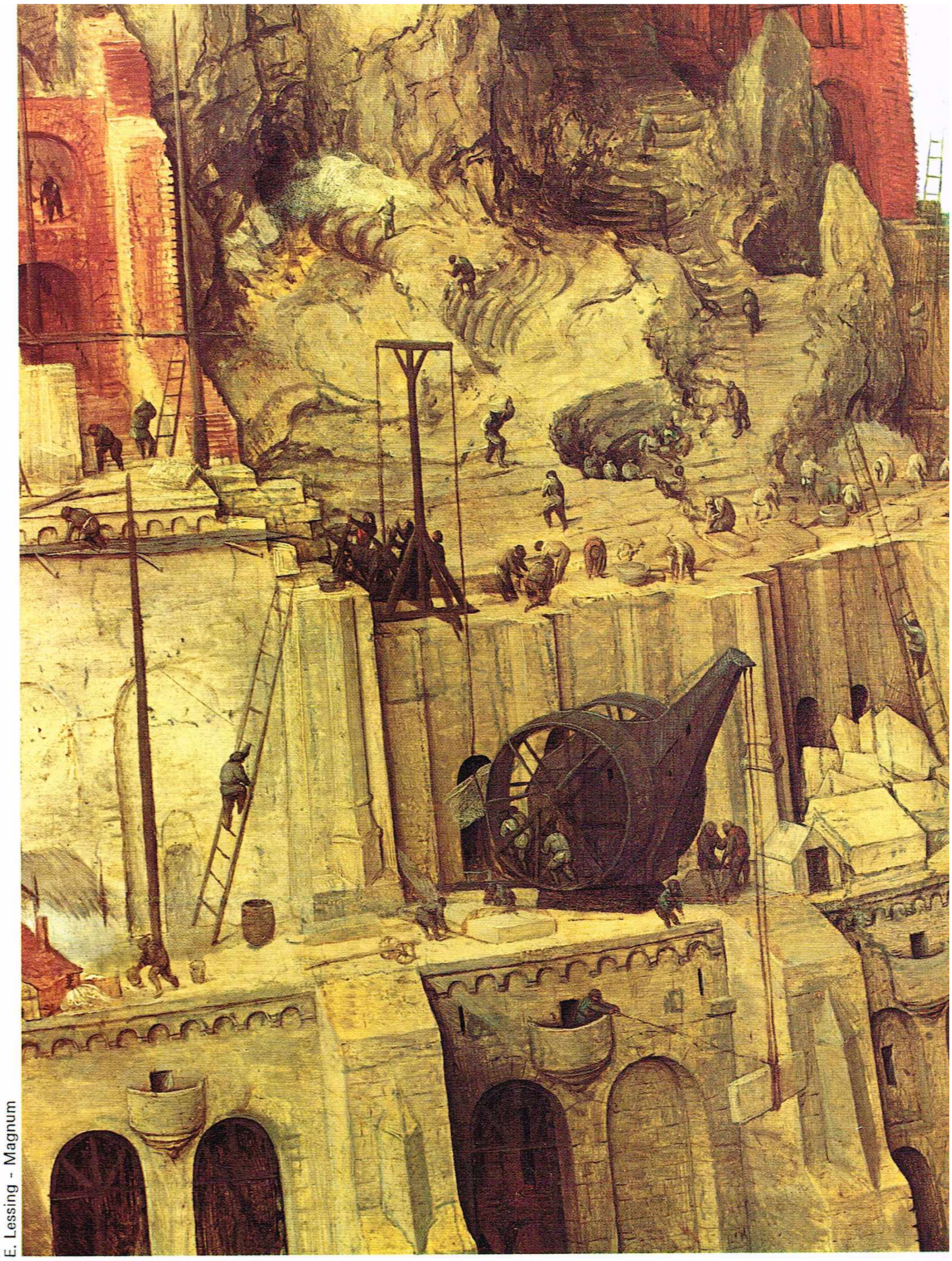

E. Lessing - Magnum

H. Donnezan - Rapho

soit encore

$$W_{12}\,(A) = W_{12}\,(B)$$

Le travail pour aller de 1 à 2 ne dépend donc pas du chemin utilisé, mais uniquement du point de départ et du point d'arrivée. Nous avons donc le droit de l'écrire sous la forme :

$$W_{12} = V_1 - V_2 \qquad (3)$$

où **V** est une fonction dépendant uniquement du point considéré et où V_1 et V_2 sont les valeurs de cette fonction aux points 1 et 2 respectivement. Si les points 1 et 2 sont infiniment proches, et ne sont séparés que par un petit élément de trajectoire $\overrightarrow{ds}$, la variation de **V** est une variation infinitésimale *d*V et le travail de la force est un travail infinitésimal $\vec{F}\,\overrightarrow{ds}$, de sorte que la relation **(3)** peut s'écrire :

$$\vec{F}\,\overrightarrow{ds} = -\,dV$$

soit encore : $\vec{F} = -\,\overrightarrow{\text{grad}}\,V$ par définition de la fonction gradient.

La fonction **V** est appelée *énergie potentielle* ou *potentiel*. Une force conservative est donc une force qui dérive d'un potentiel. Nous en verrons plus loin des exemples.

Nous avons maintenant les connaissances nécessaires pour démontrer la *loi de conservation de l'énergie*. Nous avons vu que, si une masse est soumise à une force conservative, le travail pour aller d'un point 1 à un point 2 est :

$$W_{12} = V_1 - V_2$$

▲ ***A gauche, figure 2 : pour aller de 1 à 2, les chemins A et B sont équivalents si les forces sont conservatives. Ci-dessus,* la Tour de Babel, *tableau de Bruegel l'Ancien (XVI^e siècle). On y reconnaît divers procédés d'application des principes de mécanique à la construction (échelles, poulies, etc.) [Kunsthistorisches Museum, Vienne].***

◀ ***Le mouvement d'une roue à aubes, exemple d'utilisation des forces de pesanteur pour effectuer un travail.***

mais par ailleurs nous savons que ce travail vaut, par définition :

$$W_{12} = \int_1^2 \vec{F}\,\vec{ds}$$

or la loi fondamentale de la dynamique indique que la force est le produit de la masse par l'accélération :

$$\vec{F} = m\frac{d\vec{v}}{dt}$$

le travail s'écrit donc :

$$W_{12} = m\int_1^2 \frac{d\vec{v}}{dt}\vec{v}dt$$

$$= \frac{1}{2}m\,(v_2^2 - v_1^2)$$

où $\vec{v_1}$ et $\vec{v_2}$ sont les vitesses du mobile aux points 1 et 2 respectivement. Nous pouvons donc écrire :

(4) $$W_{12} = T_2 - T_1$$

où T est une fonction appelée *énergie cinétique :*

$$T = \frac{1}{2}mv^2.$$

En combinant les relations **(3)** et **(4)**, nous obtenons donc :

$$T_1 + V_1 = T_2 + V_2.$$

Cette dernière relation prouve bien que l'énergie totale de la particule, qui est la somme de son énergie cinétique T et de son énergie potentielle **V**, est constante lors du mouvement : l'énergie potentielle augmente lorsque l'énergie cinétique diminue, et inversement.

Considérons l'exemple du champ de pesanteur ; l'énergie potentielle de ce champ est :

$$V = mgz$$

où m est la masse de la particule, g l'accélération de la pesanteur et z la cote du point au-dessus du niveau pris comme origine. La composante de la force suivant l'axe des z est $F = -\frac{dV}{dz} = -mg$: elle est bien constante et dirigée vers le bas. L'énergie potentielle augmente donc lorsque l'objet s'élève.

Nous observons bien, lorsqu'on lance un objet en l'air, que sa vitesse (donc son énergie cinétique) diminue lorsque l'objet s'élève, tandis que son énergie potentielle augmente. Il atteint le point où son énergie cinétique s'annule et où son énergie potentielle est maximale, c'est-à-dire le sommet de sa trajectoire. Son énergie potentielle se met alors à décroître, c'est-à-dire que l'objet retombe, tandis que son énergie cinétique augmente, la somme de ces deux énergies restant constante.

Mécanique d'un système de points matériels

Nous allons maintenant voir ce que deviennent les lois que nous avons énoncées lorsque l'on se trouve en présence, non d'une particule isolée, mais d'un système de n particules qui sont soumises, d'une part, à des forces dues à des corps étrangers au système de points matériels considéré, et, d'autre part, aux forces que les particules exercent les unes sur les autres.

Loi fondamentale de la dynamique - Notion de centre de gravité

Considérons une particule i ; elle est soumise à une force extérieure $\vec{F_i}$ et aux forces $\vec{F_{ij}}$ exercées sur elle par toutes les particules j. Le théorème fondamental de la dynamique s'écrit donc pour cette particule :

(5) $$\vec{F_i} + \sum_{i \neq j} \vec{F_{ij}} = \frac{d\vec{p_i}}{dt} = m_i\frac{d^2\vec{r_i}}{dt^2}$$

où $\vec{p_i}$ est l'impulsion de la particule i.

Il va de soi que les forces $\vec{F_{ij}}$ obéissent à la loi de l'action et de la réaction, c'est-à-dire que la force $\vec{F_{ij}}$ exercée par la particule j sur la particule i est l'opposée de la force $\vec{F_{ji}}$ exercée par la particule i sur la particule j : $\vec{F_{ij}} = -\vec{F_{ji}}$.

La relation **(5)** permet en principe de déterminer le mouvement de chaque particule d'un ensemble de points matériels lorsque l'on connaît la force externe s'exerçant sur cette particule, ce qui est relativement fréquent, et que l'on connaît toutes les forces internes, ce qui est beaucoup plus rare. Considérons par exemple un corps solide indéformable, qui est un système particulier de points matériels, dans lequel ceux-ci sont assujettis à rester à des distances constantes les uns des autres. Il est bien clair que l'on ne connaît jamais toutes les forces internes à un solide. On peut pourtant décrire son mouvement sans ambiguïté ; cela prouve qu'il doit exister un moyen de représenter le mouvement d'un ensemble de points matériels sans rien connaître des forces internes.

Pour éliminer ces forces internes, reprenons la relation **(5)** et faisons la somme pour toutes les particules :

$$\sum_i \vec{F_i} + \sum_i \sum_{j \neq i} \vec{F_{ji}} = \sum_i m_i \frac{d^2\vec{r_i}}{dt^2}$$

En vertu du principe de l'action et de la réaction, le deuxième terme du premier membre est nul. Le premier terme n'est autre que la force totale $\vec{F}$ agissant sur le solide ; on a donc :

(6) $$\vec{F} = M\frac{d^2\vec{R}}{dt^2}$$

où M est la masse totale du solide ($M = \sum_i m_i$) et où $\vec{R}$ vaut :

$$\vec{R} = \frac{\sum_i m_i\vec{r_i}}{\sum_i m_i}$$

Le point dont la position est ainsi définie est appelé centre de gravité de l'ensemble de points matériels considéré.

L'équation **(6)** montre donc que le mouvement du centre de gravité d'un ensemble de points matériels est le même que celui d'un point matériel unique qui serait soumis à la résultante des forces extérieures et dont la masse serait égale à la somme des masses de chacun des points matériels. Le mouvement du centre de gravité est donc complètement indépendant des forces internes à l'ensemble de particules.

La relation **(6)** permet également d'énoncer le **théorème de la conservation de l'impulsion** pour un ensemble de particules : *lorsque la force extérieure totale agissant sur un ensemble de points matériels est nulle, l'impulsion totale de cet ensemble de points matériels reste constante au cours du mouvement.*

Lois de conservation

- *Loi de conservation du moment cinétique*

Dans le paragraphe précédent, nous avons défini l'impulsion totale du système comme la somme des impulsions de chaque point matériel du système. Nous définissons le *moment cinétique total* comme la somme des moments cinétiques de chaque particule par rapport à O :

(7) $$\vec{L} = \sum_i \vec{r_i} \wedge \vec{p_i}$$

Nous avons vu le rôle très particulier joué par le centre de gravité, dont le mouvement ne dépend que des forces extérieures au système, et dont on peut dire qu'il définit le mouvement d'ensemble du système.

Pour évaluer commodément $\vec{L}$, nous allons repérer les positions des points du système, non par rapport à O, mais par rapport au centre de gravité G (*fig.* 3) ; la position d'un point est repérée par $\vec{R_i}$, sa vitesse par $\vec{V_i}$:

$$\vec{r_i} = \vec{R_i} + \vec{R}$$

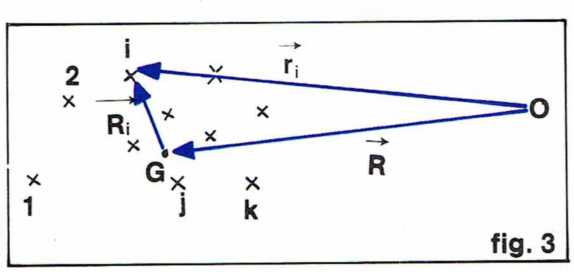

Richard Colin

▶ *Figure 3 : les particules 1, 2, i, j, ..., peuvent être repérées soit par leur position $\vec{r_i}$ par rapport à l'origine, soit par leur position $\vec{R_i}$ par rapport au centre de gravité G.*

En dérivant cette relation par rapport au temps, nous obtenons :

$$\vec{v_i} = \vec{V_i} + \frac{d\vec{R}}{dt}$$

L'impulsion de la particule i, dans ce nouveau repère, est alors :

$$\vec{P_i} = m_i \vec{V_i}$$

On démontre alors aisément à partir de la relation **(7)** que le moment cinétique total a pour valeur :

$$\vec{L} = \vec{R} \wedge M\vec{v} + \sum_i \vec{R_i} \wedge \vec{P_i}$$

Le moment cinétique total par rapport à O est donc la somme du moment cinétique qu'aurait une particule unique dont la masse serait égale à la masse totale du système et qui serait confondue avec le centre de gravité du système, et du moment cinétique total par rapport au centre de gravité. Le mouvement d'un système de particules peut donc toujours être décomposé en deux parties : le mouvement du centre de gravité et le mouvement par rapport au centre de gravité.

Le **théorème de conservation du moment cinétique** s'énonce alors de la façon suivante : *lorsque le moment extérieur total s'exerçant sur un ensemble de points matériels est nul, le moment cinétique total de cet ensemble reste constant au cours du mouvement.*

- *Loi de conservation de l'énergie*

Pour calculer l'énergie totale mise en jeu pour passer d'un état 1 à un état 2, nous distinguons comme précédemment les forces extérieures $\vec{E_i}$ et les forces intérieures $\vec{F_{ij}}$:

$$\textbf{(8)} \qquad W_{12} = \sum_i \int_1^2 \vec{F_i}\, d\vec{s_i} + \sum_{j \neq i} \int_1^2 \vec{F_{ji}}\, d\vec{s_i}$$

Nous pouvons appliquer l'équation fondamentale de la dynamique à chaque particule :

$$W_{12} = \sum_i \int_1^2 m_i \frac{d\vec{v_i}}{dt} \vec{v_i}\, dt$$

$$W_{12} = \sum_i \frac{1}{2} \left(m_i v_{i2}^2 - m_i v_{i1}^2 \right)$$

où v_{i1} et v_{i2} sont les vitesses de la particule i lorsque le système est dans les états 1 et 2 respectivement.

Le travail W_{12} est donc égal à la variation de l'énergie cinétique totale de toutes les particules :

$$T = \frac{1}{2} \sum_i m_i v_i^2$$

entre les états 1 et 2.

Les vitesses qui interviennent dans cette expression de l'énergie cinétique sont les vitesses des points matériels par rapport au point O. Si l'on exprime ces vitesses par rapport au centre de gravité en utilisant la relation

$$\vec{v_i} = \vec{V_i} + \frac{d\vec{R}}{dt}$$

l'énergie cinétique prend la forme suivante :

$$T = \frac{1}{2} Mv^2 + \frac{1}{2} \sum_i m_i V_i^2$$

L'énergie cinétique est donc la somme de l'énergie cinétique qu'aurait une particule unique dont la masse serait la masse totale du système et qui serait confondue avec le centre de gravité du système, et de l'énergie cinétique due au mouvement des particules par rapport au centre de gravité.

Comme dans le cas d'une particule unique, nous allons supposer que les forces extérieures sont conservatives, c'est-à-dire qu'elles dérivent d'un potentiel. Le travail des forces extérieures peut alors s'écrire :

$$\sum_i \int_1^2 \vec{F_i} d s_i = \sum_i V_{i1} - V_{i2}$$

où V_{i1} et V_{i2} sont les valeurs du potentiel aux points où se trouve la particule i lorsque le système est dans l'état 1 et lorsque le système est dans l'état 2 respectivement.

Supposons maintenant que les forces intérieures dérivent elles aussi d'un potentiel : la force $\vec{F_{ij}}$ par exemple, qui est la force exercée par la particule j sur la particule i, dépendra du potentiel V_{ij} par la relation :

$$\vec{F_{ij}} = - \overrightarrow{\text{grad}_i}\, V_{ij}$$

Or la loi de l'action et de la réaction entraîne nécessairement que le potentiel V_{ij} ne dépende que de la distance $(\vec{r_i} - \vec{r_j})$ entre les deux particules. Nous pouvons donc écrire la relation suivante :

$$\textbf{(9)} \qquad \int_1^2 (\vec{F_i} ds_i + \vec{F_j} ds_j) =$$

$$- \int_1^2 (\overrightarrow{\text{grad}_i}\, V_{ij} d\vec{s_i} + \overrightarrow{\text{grad}_j}\, V_{ij} d\vec{s_j})$$

Cette relation correspond à deux termes de la somme :

$$\sum_{j \neq i} \int_1^2 \vec{F_{ji}} d\vec{s_i}$$

intervenant dans la relation **(8)**.

Désignons par $\overrightarrow{\text{grad}_{ij}}\, V_{ij}$ la dérivation de V_{ij} par rapport aux composantes du vecteur

$$\vec{r_{ij}} = \vec{r_j} - \vec{r_i}$$

On a alors : $\overrightarrow{\text{grad}_{ij}}\, V_{ij} = \overrightarrow{\text{grad}_i}\, V_{ij} = - \overrightarrow{\text{grad}_j}\, V_{ij}$ puisque V_{ij} ne dépend que de $|\vec{r_{ij}}|$.

La relation **(9)** peut donc s'écrire :

$$- \int_1^2 \overrightarrow{\text{grad}_{ij}}\, V_{ij}\, dr_{ij}$$

Pour revenir à la relation **(8)**, il suffit de faire la somme sur tous les i et de diviser le résultat par 2 car chaque paire intervient deux fois dans la sommation :

$$\sum_{j \neq i} \int_1^2 \vec{F_{ji}}\, d\vec{s_i} = \frac{1}{2} \sum_{i,j} \int_1^2 - \overrightarrow{\text{grad}_{ij}}\, V_{ij}\, dr_{ij}$$

$$= \frac{1}{2} \sum_{i,j} (V_{ij1} - V_{ij2})$$

où V_{ij1} et V_{ij2} désignent le potentiel d'interaction entre les particules i et j dans l'état 1 et dans l'état 2 respectivement.

Nous pouvons maintenant effectuer la somme du travail des forces externes et du travail des forces internes : si toutes ces forces sont conservatives, on peut définir un potentiel V par la relation :

$$V = \sum_i V_i + \frac{1}{2} \sum_{i,j} V_{ij}$$

et le **théorème de la conservation de l'énergie** s'énonce ainsi : *si les forces internes et externes dérivent d'un potentiel, l'énergie totale T + V d'un système de particules reste constante pendant le mouvement.*

Le principe de Hamilton et les équations de Lagrange

Tout ce qui précède contient, exposés très succinctement, les fondements de la mécanique tels qu'ils ont été énoncés par Newton ; ces fondements, sont, d'une part, le théorème fondamental de la dynamique $\left(\vec{F} = m \frac{d^2 r}{dt^2}\right)$ et, d'autre part, le principe de l'action et de la réaction. Cette approche fournit l'essentiel des outils de la mécanique et permet de résoudre un très grand nombre de problèmes qui peuvent se poser à l'ingénieur ou au physicien.

Nous allons maintenant examiner une approche plus abstraite de la mécanique, fondée sur un principe appelé principe de Hamilton. Nous déduirons de ce principe une nouvelle forme des équations de la mécanique qui peut, bien entendu, se ramener aux équations de Newton, mais qui est plus générale et fournit une solution élégante à de très nombreux problèmes dont la résolution serait possible, mais très lourde, à partir des équations de Newton.

Avant d'énoncer le principe de Hamilton, nous allons examiner la notion de coordonnées généralisées.

▶ *A gauche, figure 4 : un hélicoptère — que nous assimilons pour simplifier à son centre de gravité G — peut se diriger dans les trois directions de l'espace ; il possède trois degrés de liberté. A droite, figure 5 : un avion de manège forain reste à une distance constante de l'origine ; seuls les angles φ et θ peuvent varier : l'avion a deux degrés de liberté. Les angles φ et θ sont les coordonnées généralisées de l'avion.*

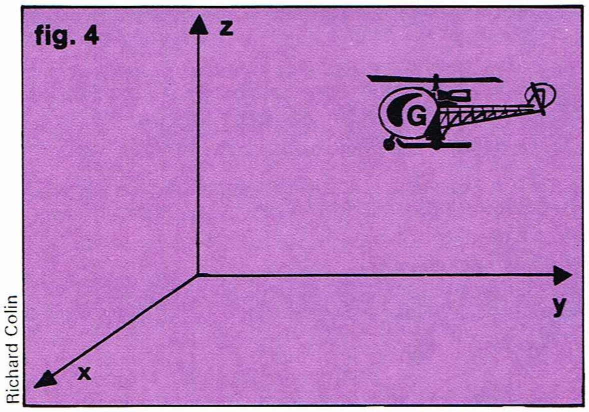

Richard Colin

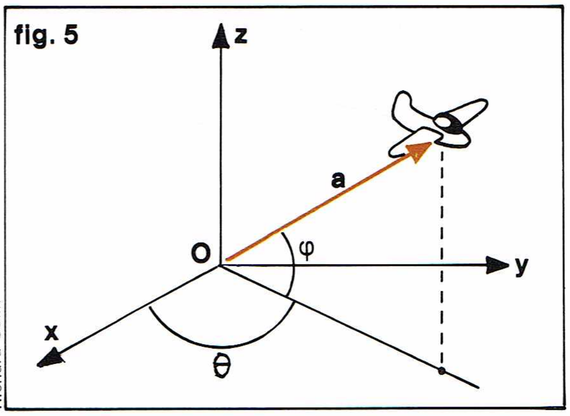

Richard Colin

Coordonnées généralisées - Forces généralisées

Nous avons toujours exprimé jusqu'ici les équations décrivant l'évolution d'un point matériel ou d'un système de points matériels en fonction des coordonnées $\vec{r}_i\ (t)$ des divers éléments du système. Ces coordonnées ne sont cependant pas toujours les mieux adaptées à la résolution des problèmes de mécanique, en raison des contraintes liées à la nature physique du système. Par ailleurs, ces contraintes ont généralement pour effet de réduire le nombre de variables indépendantes.

Prenons un exemple : un hélicoptère en vol normal peut monter ou descendre, ou changer de cap (il peut également tourner autour d'un axe vertical, mais nous négligeons pour l'instant cette possibilité). Il peut se diriger dans les 3 directions de l'espace : nous dirons qu'il possède 3 degrés de liberté (*fig.* 4). Sa position est repérée par les 3 coordonnées *x, y, z* de son centre de gravité, et chacune de ces coordonnées peut varier indépendamment des deux autres.

Considérons maintenant un « avion » d'un manège de fête foraine (*fig.* 5). Il peut monter ou descendre, mais il est fixé à l'extrémité d'une barre rigide de longueur *a*, de telle sorte que sa distance au point O est constante ; ceci s'exprime par la relation $|\vec{r}| - a = 0$ ou encore $\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - a = 0$ à tout instant.

On voit tout de suite que les coordonnées cartésiennes *x, y, z* sont peu commodes dans ce cas. De fait, on peut beaucoup plus simplement caractériser la position de l'avion par l'angle φ que fait la barre avec l'horizontale et par l'angle θ qu'elle fait avec un axe, par exemple l'axe O*x*. Comme ces deux grandeurs caractérisent la position de l'avion de la même façon que *x, y, z* caractérisaient la position de l'hélicoptère, nous les appellerons les *coordonnées généralisées* de l'avion.

Nous voyons donc que, dans ce cas, les coordonnées généralisées ont deux particularités ; d'une part, ce ne sont pas des longueurs, mais des *angles*, et, d'autre part, elles sont au nombre de deux. Le fait d'avoir appliqué une contrainte $|\vec{r}| - a = 0$ à tout instant réduit d'une unité le nombre de coordonnées indépendantes (donc de degrés de liberté).

De façon générale, un système de N particules libres présente 3N degrés de liberté. Si on lui applique *n* contraintes qui s'expriment par une équation de la forme

(9 bis) $$f\ (\vec{r}_1, \vec{r}_2, ..., t) = 0$$

le nombre de degrés de liberté (donc de coordonnées indépendantes) devient $3N - n$.

L'état de ce système pourra donc être décrit par $3N - n$ coordonnées généralisées $q_1, q_2, ..., q_{3N-n}$. Les coordonnées $\vec{r}_1, \vec{r}_2, ..., \vec{r}_N$ peuvent être exprimées en fonction des $3N - n$ coordonnées généralisées. Par exemple, dans le cas du manège, il n'y a qu'un seul vecteur $\vec{r}$, dont les composantes (*x, y, z*) s'expriment en fonction des coordonnées généralisées θ et φ par :

$$x = a \cos \varphi \cos \theta$$
$$y = a \cos \varphi \sin \theta$$
$$z = a \sin \varphi$$

Il existe cependant des contraintes supplémentaires que nous avons passées sous silence. Par exemple, dans le cas de l'hélicoptère, il faut que celui-ci soit au-dessus du sol, ce qui s'exprime par la relation : $z \geqslant 0$ à tout instant.

De même, dans le cas du manège, il existe certainement une hauteur maximale z_0 due au mécanisme d'entraînement du manège ; on aura donc deux contraintes supplémentaires :

$$z \geqslant 0 \quad \forall t$$
$$z \leqslant z_0 \quad \forall t$$

Ces contraintes ne sont pas du même type que les précédentes, car elles ne s'expriment pas par des relations du genre de la relation **(9 bis)** : $f\ (\vec{r}_1, \vec{r}_2, ... t) = 0$ mais par des inégalités.

Contrairement aux précédentes, ces contraintes n'ont pas pour effet de réduire le nombre de degrés de liberté, donc de coordonnées généralisées, du système.

Les coordonnées généralisées sont donc des grandeurs (longueurs, angles, énergies, etc.) qui, pour être utilisables dans la résolution d'un problème, doivent être pratiques pour décrire le système, compte tenu de sa configuration physique, être en nombre égal au nombre de degrés de liberté du système, et être bien entendu indépendantes les unes des autres.

Nous avons vu que, lorsque des forces sont conservatives, elles dérivent d'un potentiel :

$$\vec{F} = - \overrightarrow{\text{grad}}\ V$$

Cette relation signifie que les 3 composantes F_x, F_y, F_z de la force sont les dérivées de la fonction **V** (*x, y, z*) par rapport aux coordonnées *x, y, z,* respectivement :

(10) soit par exemple $$F_x = - \frac{\partial V}{\partial x}$$

Nous savons maintenant que les coordonnées *x, y, z* peuvent s'exprimer en fonction des coordonnées généralisées q_i ; le potentiel **V** peut donc être considéré comme une fonction des coordonnées généralisées **V** $(q_1, q_2, ... t)$. Par analogie avec la relation **(10)**, nous définirons des forces généralisées :

$$Q_i = - \frac{\partial V}{\partial q_i}$$

Cette dernière relation n'est évidemment valable que pour un système conservatif.

La définition générale de la *force généralisée,* qui est correcte même pour des systèmes non conservatifs, est la suivante :

(11) $$Q_i = \sum_j F_j \frac{\partial r_j}{\partial q_i}$$

Comme les q_i ne sont pas nécessairement des longueurs, les forces généralisées ne sont pas nécessairement homogènes à des forces. Ce qui est indispensable, et qui apparaît clairement dans la relation **(11)**, c'est que le produit $Q_i \delta q_i$ soit homogène à une énergie.

Principe de Hamilton

On a l'habitude de définir la trajectoire d'un point matériel dans l'espace comme la suite des points de l'espace occupés au cours du temps par le point matériel, ces points étant définis par leurs coordonnées *x, y, z*. Puisqu'un système peut être entièrement décrit par ses coordonnées généralisées, nous pouvons donc définir de

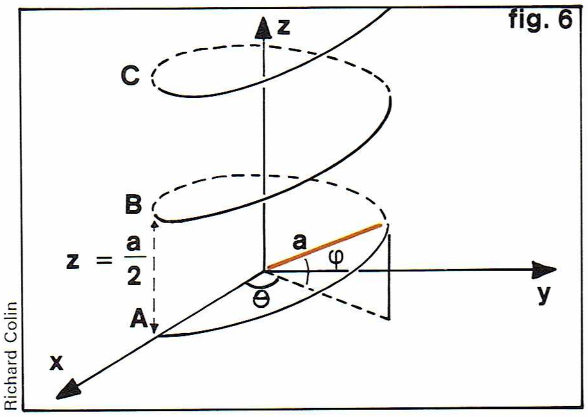

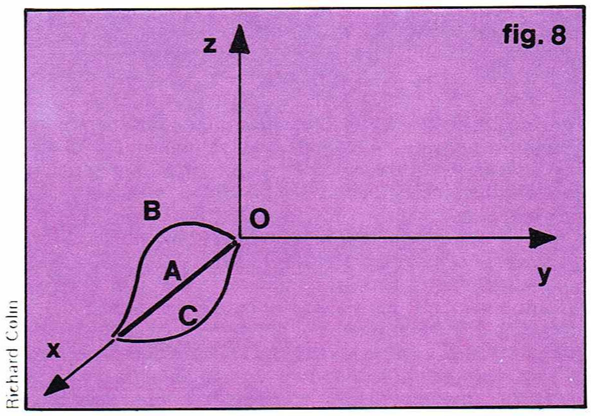

◀ *A gauche, figure 6 : trajectoire de l'avion de manège, représentée dans l'espace réel : une hélice. A droite, figure 8 : divers chemins possibles pour aller de l'origine en un point de l'axe Ox; le principe de Hamilton indique que, parmi ces chemins, un point matériel empruntera celui pour lequel l'intégrale I est extremum.*

façon analogue la trajectoire du point matériel dans l'espace des coordonnées généralisées, appelé espace de configuration. Pour un système possédant 3N — *n* degrés de liberté, l'espace de configuration est donc un espace à 3N — *n* dimensions.

Revenons à l'exemple de notre manège. Nous avons vu que la position de l'avion peut être décrite par 2 coordonnées généralisées; son espace de configuration est donc un espace à 2 dimensions. Supposons que l'avion quitte le niveau du sol, monte régulièrement pendant deux tours du manège de sorte qu'il ait atteint une hauteur $z = \frac{a}{2}$ au bout d'un tour; sa trajectoire réelle est représentée sur la *figure* 6 ; c'est une portion d'hélice. Considérons maintenant sa trajectoire dans l'espace de configuration (*fig.* 7) : c'est une droite passant par l'origine, par le point B ($\varphi = 30°$, $\theta = 360°$) au bout d'un tour et par le point C ($\varphi = 60°$, $\theta = 720°$) au bout de deux tours.

Dans cet exemple, nous avons un système très simple comprenant un point matériel soumis à une contrainte, donc la trajectoire dans l'espace de configuration est une *courbe plane;* dans le cas très particulier d'une vitesse de montée constante, c'est une *droite*. De façon générale, pour un système à 3N — *n* degrés de liberté, la trajectoire du point représentatif du système, dans l'espace de configuration, est une courbe appartenant à un espace à 3N — *n* dimensions. Chacune des N particules aura sa trajectoire propre dans l'espace réel, alors que l'évolution du système tout entier sera représentée par une trajectoire unique dans l'espace de configuration.

Cela posé, le *principe de Hamilton* s'exprime de la façon suivante : le mouvement d'un système entre deux instants t_1 et t_2 est tel que l'intégrale curviligne

$$I = \int_{t_1}^{t_2} (T - V)\, dt$$

soit extrémale pour la trajectoire du mouvement dans l'espace de configuration.

La fonction L = T — V est appelée le *lagrangien* du système.

Prenons tout de suite un exemple d'application de ce principe : un point matériel libre, de masse *m*, passe à l'origine à l'instant t_1, sa vitesse étant dirigée selon l'axe des *x*; à l'instant t_2, il se trouve en un point de coordonnées (X, 0, 0). Cherchons quel a été son mouvement entre t_1 et t_2.

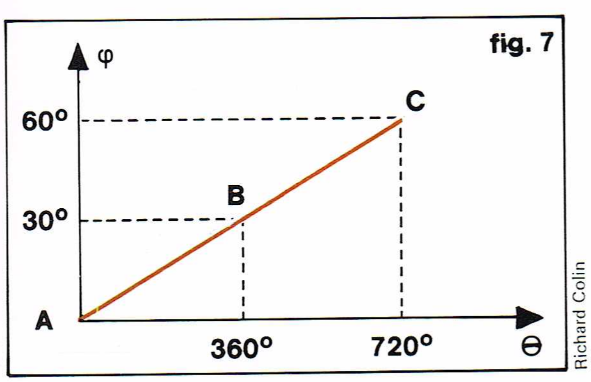

Dans ce cas, il est commode d'utiliser comme coordonnées généralisées les coordonnées cartésiennes; l'espace de configuration est donc l'espace habituel à 3 dimensions. La *figure* 8 montre diverses trajectoires possibles, A, B, C, dans cet espace de configuration. Le point matériel étant libre, son lagrangien L se réduit à l'énergie cinétique $T = \frac{1}{2} mv^2$. Nous devons donc chercher la trajectoire qui rend extrémale la quantité.

$$\textbf{(12)} \qquad I = \frac{1}{2}\, m \int_{t_1}^{t_2} (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)\, dx$$

Nous savons en outre que

$$\textbf{(13)} \qquad \int_{t_1}^{t_2} v_x dt = X$$

$$\textbf{(14)} \qquad \int_{t_1}^{t_2} v_y dt = 0 = \int_{t_1}^{t_2} v_z dt$$

L'intégrale I est la somme de trois intégrales; si chacune d'elles est extrémale, leur somme I le sera. Considérons tout d'abord les intégrales

$$\int_{t_1}^{t_2} v_y^2 dt \quad \text{et} \quad \int_{t_1}^{t_2} v_z^2 dt$$

Elles sont positives ou nulles; elles seront donc minimales si elles sont nulles, c'est-à-dire si $v_y(t) = v_z(t) = 0$; cette solution satisfait bien aux conditions **(14)**. Nous avons donc un premier résultat : pour que I soit extrémale, il faut que le point matériel se déplace en ligne droite en conservant sa direction initiale qui est la direction de l'axe O*x*.

Il nous reste à trouver comment la vitesse du point matériel varie au cours du mouvement. Pour cela, nous devons rendre extrémale l'intégrale $\int_{t_1}^{t_2} v_x^2 dt$.

Celle-ci est positive ou nulle; elle ne peut être nulle, car cela exigerait que v_x soit constamment nulle, ce qui est en contradiction avec la relation **(13)**. Calculons la quantité $A = \int_{t_1}^{t_2} \left(v_x - \frac{X}{t_2 - t_1}\right)^2 dt$.

Cette quantité est positive ou nulle.

Développons cette expression :

$$\begin{aligned} A &= \int_{t_1}^{t_2} v_x^2 dt - 2 \int_{t_1}^{t_2} v_x \frac{X}{t_2 - t_1} dt + \frac{X^2}{t_2 - t_1} \\ &= \int_{t_1}^{t_2} v_x^2 dt - 2 \frac{X}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} v_x dt + \frac{X^2}{t_2 - t_1} \\ &= \int_{t_1}^{t_2} v_x^2 dt - \frac{X^2}{t_2 - t_1} \geqslant 0 \end{aligned}$$

donc $$\int_{t_1}^{t_2} v_x^2 dt \geqslant \frac{X^2}{t_2 - t_1}$$

La valeur minimale de l'intégrale $\int_{t_1}^{t_2} v_x^2 dt$ est donc $\frac{X^2}{t_2 - t_1}$; il est facile de vérifier que c'est la valeur que l'on obtient si $v_x(t) = \frac{X}{t_2 - t_1}$; de plus, cette valeur de $v_x(t)$ est compatible avec la relation **(13)**.

◀ *Figure 7 : trajectoire de l'avion de manège au cours du même mouvement, représentée dans l'espace de configuration : une droite.*

Nous avons donc trouvé les valeurs de $v_x(t)$, $v_y(t)$, $v_z(t)$ qui satisfont au principe de Hamilton :

$$v_x(t) = \frac{X}{t_2 - t_1}; \quad v_y(t) = v_z(t) = 0$$

Nous avons ainsi, à titre d'exemple très simple, démontré à partir du principe de Hamilton qu'un point matériel qui n'est soumis à aucune force et qui possède une certaine vitesse initiale se déplace en ligne droite en gardant sa vitesse initiale.

Il va de soi que le procédé que nous venons d'utiliser, qui consiste à chercher la valeur minimale (ou maximale) de l'intégrale I et à essayer de trouver la forme analytique du lagrangien qui rend cette intégrale extrémale, n'est applicable que dans de rares cas extrêmement simples qui, en tout état de cause, trouvent une solution plus rapide en utilisant directement le théorème fondamental de la dynamique ou l'une des lois qui en découlent. Pour résoudre des problèmes plus complexes, on a été amené à chercher des conditions portant sur le lagrangien qui soient équivalentes au principe de Hamilton, c'est-à-dire des équations (portant sur la fonction L) qui rendent extrémale l'intégrale I : ce sont les équations de Lagrange.

Équations de Lagrange

Nous devons exprimer le fait que l'intégrale

$$I = \int_{t_1}^{t_2} L \, dt \quad \text{est extrémale ;}$$

L est le lagrangien défini par la relation $L = T - V$. Le lagrangien est une fonction des coordonnées généralisées $(q_1, q_2, \dots q_n)$, de leurs dérivées par rapport au temps $(\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots \dot{q}_n)$ et du temps (t) lui-même :

$$L = L(q_1, q_2, \dots, q_n, \dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n, t)$$

Pour simplifier les notations, nous allons supposer que le système ne possède qu'un degré de liberté :

$$L = L(q, \dot{q}, t)$$

Rappelons que ce processus de minimisation de l'intégrale I a pour but final de trouver la fonction $q(t)$ ou $\dot{q}(t)$, c'est-à-dire la loi de mouvement. C'est ce que nous avons fait dans l'exemple précédent, où nous avons trouvé $\dot{q}(t) = \frac{X}{t_2 - t_1}$.

Nous cherchons donc quelle est la fonction $q(t)$ qui, par l'intermédiaire du lagrangien, rend I extrémale. Cela signifie que, si $q(t)$ est remplacée par une fonction voisine $q(t) + \delta q(t)$, la variation δI correspondante sera nulle, par définition d'un extremum.

Il faut noter que la variation $\delta q(t)$ est quelconque, mais doit être telle que :

$$\delta q(t_1) = \delta q(t_2) = 0$$

puisque les coordonnées généralisées du système aux instants t_1 et t_2 sont imposées.

Puisque la fonction $q(t)$ subit une variation $\delta q(t)$, sa dérivée $\dot{q}(t)$ subit également une variation $\delta \dot{q}(t)$. La variation de I est donc donnée par l'expression :

$$\delta I = \int_{t_1}^{t_2} L(q + \delta q_1, \dot{q} + \delta \dot{q}, t) \, dt - \int_{t_1}^{t_2} L(q, \dot{q}, t) \, dt$$

soit :

$$\delta I = \int_{t_1}^{t_2} \delta L \, dt$$

Or

$$\delta L = \frac{\partial L}{\partial q} \delta q + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \delta \dot{q}$$

La condition d'extremum s'écrit donc :

$$\int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{\partial L}{\partial q} \delta q + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \delta \dot{q} \right) dt = 0$$

Or $\delta \dot{q} = \frac{d}{dt}(\delta q)$. Nous pouvons donc intégrer cette expression par parties :

$$\delta I = \left| \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \delta q \right|_{t_1}^{t_2} + \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{\partial L}{\partial q} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) \delta q \, dt = 0$$

Le premier terme de cette expression est nul puisque $\delta q(t_1) = \delta q(t_2) = 0$; le second terme doit être nul quel que soit δq, ce qui exige que la relation suivante soit satisfaite :

$$\frac{\partial L}{\partial q} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} = 0$$

Pour un système à n degrés de liberté, on obtient un système de n équations du même type :

$$\frac{\partial L}{\partial q_i} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} = 0$$

Ces équations sont les *équations de Lagrange ;* elles sont équivalentes au principe de Hamilton et constituent un système d'équations différentielles dont les solutions $q(t)$ décrivent l'évolution d'un système mécanique. A partir du moment où l'on est capable d'écrire le lagrangien du système, on peut, en appliquant les équations de Lagrange, en trouver le mouvement.

Nous avons donc vu jusqu'à présent trois manières d'aborder les problèmes de mécanique : la loi fondamentale de la dynamique, le principe de Hamilton et les équations de Lagrange. Nous venons de démontrer que ces deux dernières approches étaient équivalentes ; il nous reste à montrer que la loi fondamentale de la dynamique peut se déduire des équations de Lagrange.

Considérons en effet un point matériel de masse m, soumis à une force conservative F dérivant d'un potentiel **V** ; nous choisissons pour coordonnées généralisées les coordonnées cartésiennes (x, y, z). Son énergie cinétique vaut :

$$T = \frac{1}{2} m (\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2)$$

et son énergie potentielle vaut **V** ; son lagrangien est donc :

$$L = \frac{1}{2} m (\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) - V(x, y, z)$$

Écrivons les équations de Lagrange :

(15)
$$\frac{\partial L}{\partial x} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} = 0$$
$$\frac{\partial L}{\partial y} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{y}} = 0$$
$$\frac{\partial L}{\partial z} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{z}} = 0$$

Or $\frac{\partial L}{\partial x} = -\frac{\partial V}{\partial x} = F_x$ par définition de **V**, et $\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} = m\dot{x} = p_x$.

L'équation **(15)** s'écrit donc :

$$F_x - \frac{d}{dt}(m\dot{x}) = 0$$

De même
$$F_y - \frac{d}{dt}(m\dot{y}) = 0$$

et
$$F_z - \frac{d}{dt}(m\dot{z}) = 0$$

On reconnaît là la relation fondamentale de la dynamique appliquée à un point matériel :

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

Notons que $\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} = p_x$. Par analogie, nous définirons le moment conjugué p_i de la coordonnée généralisée q_i par la relation $p_i = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}$.

Conclusion

Nous avons abordé dans cette partie les principes de base de la mécanique, en commençant par leur forme mathématique la plus simple, celle qui fut donnée par Newton : le théorème fondamental de la dynamique et les lois de conservation du moment, du moment cinétique et de l'énergie. Nous sommes ensuite remonté à un premier principe, dit principe de Hamilton, dont nous avons déduit les équations de Lagrange. Pourquoi ces formulations diverses ?

Remarquons tout d'abord que la formulation newtonienne met en jeu des quantités vectorielles, ce qui pose le problème du référentiel dans lequel on se place, car les composantes des vecteurs changent lorsque l'on change de référentiel : ce problème sera l'objet de la partie suivante.

La formulation par le principe de Hamilton ou les équations de Lagrange ne fait intervenir que des quantités

scalaires, donc indépendantes du système de référence. Ceci est une première différence. En outre, la formulation par le principe de Hamilton s'avère extrêmement générale ; elle se retrouve particulièrement en électromagnétisme et en mécanique quantique, de telle sorte que les résultats obtenus dans un domaine de la physique peuvent, sinon être transposés, du moins servir de guide dans un domaine complètement différent.

Par ailleurs, il est des domaines où l'analogie avec les équations de la mécanique est tellement forte que les équations sont transposables terme à terme ; c'est ainsi que des analogies électriques ont permis l'étude de systèmes mécaniques complexes, en particulier dans le domaine de l'acoustique et celui des ultrasons. Cette analogie dans la formulation mathématique est également très précieuse dans les problèmes où les grandeurs électriques et mécaniques sont couplées ; c'est le cas par exemple pour l'étude du déplacement dans un champ électrique de solides porteurs de charges électriques.

Le principe de relativité

Lorsque nous avons considéré les diverses manières d'envisager les principes de la mécanique, nous avons eu affaire soit à des *vecteurs* tels que la force ou l'accélération — c'était le cas lorsque nous avons énoncé le principe fondamental de la dynamique —, soit à des *scalaires* tels que l'énergie cinétique ou l'énergie potentielle — c'était le cas pour les équations de Lagrange, par exemple. Nous avons déjà noté qu'une grande différence entre ces deux formulations réside dans le fait que les quantités vectorielles dépendent du *repère* (on dit aussi du « *référentiel* ») dans lequel on se place, tandis que les quantités scalaires n'en dépendent pas. La question que nous allons nous poser dans ce qui suit est donc essentiellement : dans quels référentiels les lois de type vectoriel (théorème fondamental de la dynamique, loi de l'action et de la réaction) sont-elles valables ?

Notion de référentiel d'inertie

Définition

La loi fondamentale de la dynamique a comme conséquence immédiate le fait qu'un corps qui n'est soumis à aucune force garde sa vitesse initiale ; en particulier, s'il est immobile, il reste immobile. Cette observation est en accord avec notre expérience quotidienne, et l'on pourrait en conclure que, du moins sous ce rapport, un référentiel lié à la Terre est un référentiel dans lequel la loi fondamentale de la dynamique s'applique, la Terre serait ce que l'on appelle un *référentiel d'inertie*, ou *repère inertiel*, ou *repère galiléen*.

Supposons maintenant qu'un observateur se trouve assis dans un train parfaitement bien suspendu et insonorisé, dépourvu de fenêtre. Il a à côté de lui une tablette horizontale parfaitement lisse, sur laquelle est placé un objet également lisse, pouvant se déplacer sans frottement sur cette tablette. Supposons que le train soit initialement immobile le long du quai d'une gare. L'objet est posé, immobile, sur la tablette. Lorsque le train va démarrer, l'observateur va constater d'étranges phénomènes : l'objet va glisser sur la tablette en direction de l'arrière du train, tandis que l'observateur lui-même subira une poussée de la part de son siège (*fig.* 9). Il constate donc qu'un objet initialement immobile acquiert une certaine vitesse alors qu'aucune force n'est exercée sur lui ; c'est que, dans le référentiel dans lequel il se trouve — c'est-à-dire le référentiel lié au train — la loi fondamentale de la dynamique ne s'applique plus : le train en mouvement accéléré ne constitue pas un référentiel d'inertie.

En revanche, une fois que le train aura atteint sa vitesse de croisière et roulera à vitesse constante, tout rentrera dans l'ordre : si l'observateur pose l'objet sur la tablette, celui-ci restera immobile.

Principe de relativité

Supposons que l'observateur ait disposé dans le train du matériel afin de réaliser des expériences de physique autres que celle de l'objet lisse sur la tablette ; nous avons vu que cet objet se comporte, lorsque le train roule à vitesse constante, comme si celui-ci était immobile. L'observateur peut être tenté de faire d'autres expériences de physique pour essayer de savoir si le train est ou non en mouvement : il constatera que toutes les expériences, qu'elles soient de mécanique, d'électricité, d'optique, etc., lui fourniront les mêmes résultats que ceux qu'obtiendrait un observateur effectuant les mêmes expériences sur le quai de la gare ; s'il est parfaitement isolé du monde extérieur, il n'a aucun moyen de savoir s'il est ou non en mouvement, aussi longtemps que le train roule à vitesse constante en ligne droite.

Ceci est la conséquence d'un principe fondamental de la physique qui est le **principe de relativité** : *les lois de la physique sont les mêmes pour deux observateurs animés d'un mouvement rectiligne et uniforme l'un par rapport à l'autre*.

Pour en revenir à la mécanique, cela signifie que, si nous connaissons un référentiel d'inertie, c'est-à-dire un référentiel où la loi fondamentale de la dynamique s'applique, nous savons que tout référentiel en translation rectiligne et uniforme par rapport à celui-ci est aussi un référentiel d'inertie. Tout le problème est donc de trouver un référentiel dans lequel la loi fondamentale de la dynamique s'applique rigoureusement, ou tout au moins dans lequel il n'y a pas de différence mesurable entre les résultats prévus par la loi fondamentale de la dynamique et les résultats expérimentaux.

Nous avons vu que la Terre paraissait pouvoir constituer un référentiel d'inertie ; mais des expériences plus fines que nos expériences quotidiennes prouvent aisément le contraire. On a été ainsi amené à considérer comme référentiel d'inertie tout repère en translation par rapport à un repère défini par les directions de trois étoiles dites fixes. Nous ne savons pas, en réalité, si ces étoiles sont réellement fixes ; peut-être sont-elles en mouvement accéléré par rapport à la Galaxie ; mais ce que nous

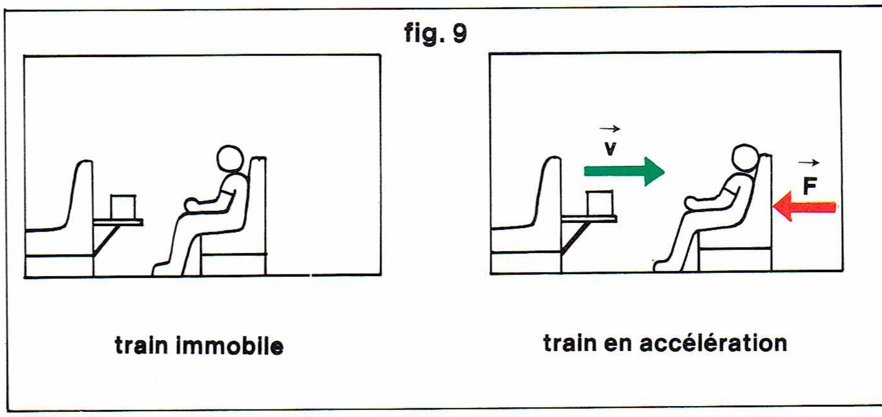

▲ ***Figure 9** : lorsque le train est immobile, ou en mouvement rectiligne à vitesse constante, l'objet sur la tablette et l'observateur sur son siège sont immobiles par rapport au train ; lorsque le train accélère, l'objet se dirige vers l'arrière du train, et l'observateur est plaqué sur son siège.*

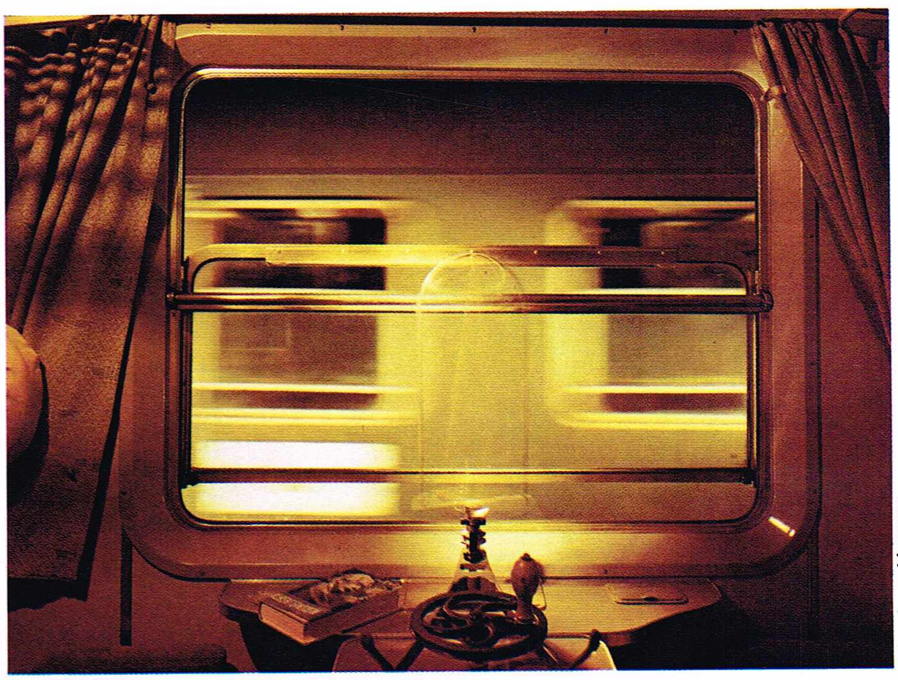

E. Lessing - Magnum

▼ ***Suivant le principe de relativité, le mouvement d'un pendule reste le même, qu'il soit placé dans un train à l'arrêt ou dans un train roulant en ligne droite à vitesse constante.***

Snark International

▲ *Le trottoir roulant de l'Exposition universelle de 1900 : une application du mouvement uniforme ... et ses conséquences !*

cherchons, c'est un référentiel dans lequel la loi fondamentale de la dynamique s'applique, à la précision de nos instruments de mesure près.

En résumé, nous avons vu que la loi fondamentale de la dynamique s'applique dans un référentiel lié à trois étoiles fixes, et dans tout référentiel en translation rectiligne uniforme par rapport à celui-ci. En revanche, dans tout référentiel en mouvement accéléré, cette loi ne s'applique pas. Nous allons donc chercher maintenant, premièrement, comment se transforme la loi fondamentale de la dynamique lorsque l'on passe d'un référentiel galiléen à un autre, et deuxièmement, quelle loi la remplace lorsque l'on passe d'un référentiel galiléen à un référentiel non galiléen.

Transformation de Galilée

Considérons deux référentiels inertiels ou en translation rectiligne uniforme l'un par rapport à l'autre (*fig.* 10). Nous supposons que cette translation se fait parallèlement à l'axe O*x*, le point O′ ayant une vitesse $\vec{V}$ par rapport au point O.

Soit un point M de coordonnées (x, y, z) dans le repère O*xyz*, et de coordonnées (x', y', z') dans le repère O′*x′y′z′*. On voit aisément que ces coordonnées sont liées par les relations :

$$\textbf{(16)} \qquad \begin{cases} x' = x + \overline{OO'} \\ y' = y \\ z' = z \end{cases}$$

Supposons que les points O et O′ coïncident à l'instant initial ; à l'instant t, la distance $\overline{OO'}$ vaut : $\overline{OO'} = Vt$. Nous pouvons donc écrire les relations **(16)** sous la forme

$$\begin{cases} x' = x + Vt \\ y' = y \\ z' = z \end{cases}$$

Vectoriellement, nous pouvons écrire ces relations de transformation de la façon suivante :

$$\vec{r}' = \vec{r} + \vec{V}t$$

C'est la *relation de transformation de Galilée*.

Pour connaître la relation de transformation des vitesses, il suffit de dériver la relation précédente par rapport au temps, en se rappelant que $\vec{V}$ est indépendant du temps puisque la translation est uniforme.

$$\frac{d\vec{r}'}{dt} = \frac{d\vec{r}}{dt} + \vec{V}$$

Soit $\vec{v}' = \vec{v} + \vec{V}$.

Nous pouvons enfin connaître la loi de transformation des accélérations en dérivant à nouveau par rapport au temps :

$$\frac{d^2\vec{r}'}{dt^2} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2}$$

L'accélération d'un point matériel est donc la même dans tous les référentiels inertiels : nous comprenons alors que la loi fondamentale de la dynamique soit la même dans tous les référentiels galiléens : supposons que le point matériel M, de masse m, soit soumis à une force $\vec{F}$ dans le référentiel O*xyz* ; il subira alors une accélération :

$$\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = \frac{\vec{F}}{m}$$

Dans le référentiel O*x′y′z′* l'accélération est la même ; comme la masse m ne dépend pas du référentiel, il est clair que la force sera la même.

Référentiels non inertiels

● *Composition des vitesses et des accélérations*

Nous considérons maintenant deux référentiels quelconques O*xyz* et O′*x′y′z′* (*fig.* 11) ; le point O′ a une certaine vitesse $\vec{V}(t)$ par rapport à O, et la rotation du référentiel O*x′y′z′* est représentée par un vecteur instantané de rotation $\vec{\Omega}(t)$, ce qui signifie qu'un point M, fixe par rapport à O′*x′y′z′*, a pour vitesse :

$$\vec{v} = \vec{\Omega} \wedge \overrightarrow{O'M} + \vec{V}$$

Supposons maintenant que le point matériel M, dont la position est repérée par $\vec{r}$ dans le référentiel O*xyz* et $\vec{r}'$ dans le référentiel O′*x′y′z′*, soit mobile dans le référentiel mobile :

$$\vec{r} = \vec{r}' + \overrightarrow{OO'}$$

Désignons par $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ les vecteurs unitaires sur les axes O*x*, O*y*, O*z* et $\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}$, les vecteurs unitaires sur les axes O′*x′*, O′*y′*, O′*z′*. La relation précédente s'écrit :

$$x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k} = x'\vec{u} + y'\vec{v} + z'\vec{w} + \overrightarrow{OO'}.$$

Pour trouver la relation de transformation des vitesses, nous dérivons par rapport au temps :

$$\frac{dx}{dt}\vec{i} + \frac{dy}{dt}\vec{j} + \frac{dz}{dt}\vec{k} = \frac{dx'}{dt}\vec{u} + \frac{dy'}{dt}\vec{v} + \frac{dz'}{dt}\vec{w} + x'\frac{d\vec{u}}{dt} + y'\frac{d\vec{v}}{dt} + z'\frac{d\vec{w}}{dt} + \frac{d\overrightarrow{OO'}}{dt}$$

Dans cette dérivation, nous avons considéré que le référentiel O*xyz* est fixe et que le référentiel O′*x′y′z′* est mobile. Le membre de gauche de la relation précédente est l'expression de la vitesse $\vec{v}$ du point M dans le référentiel O*xyz*. Les trois premiers termes du membre de droite

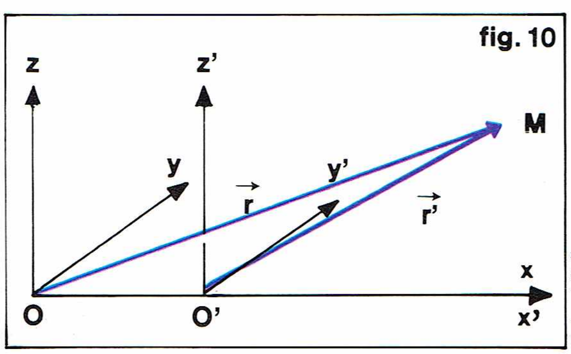

Richard Colin

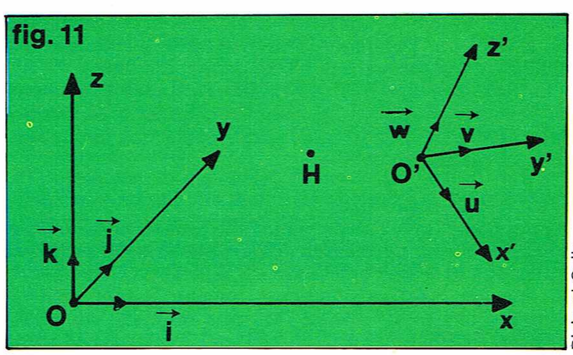

Richard Colin

▶ *A gauche, figure 10 : le point M est repéré par $\vec{r}$ par rapport au point fixe O et par $\vec{r}'$ par rapport au point mobile O′ qui se déplace à vitesse $\vec{V}$ constante le long de l'axe Ox. Les vecteurs $\vec{r}$ et $\vec{r}'$ sont liés par la relation de transformation de Galilée. A droite, figure 11 : le repère O′x′y′z′ est animé d'un mouvement de translation et d'un mouvement de rotation par rapport au repère fixe Oxyz : le repère Ox′y′z′ n'est pas un référentiel d'inertie.*

constituent l'expression de la vitesse du point M dans le repère $O'x'y'z'$. Les quatre derniers termes du membre de droite ne sont pas autre chose que la vitesse qu'aurait le point M s'il était fixe dans le repère $O'x'y'z'$: c'est ce que l'on appelle la *vitesse d'entraînement* $\vec{v_e}$; la relation de transformation des vitesses s'écrit donc :

$$\vec{v} = \vec{v'} + \vec{v_e}$$

La vitesse absolue (c'est-à-dire par rapport à $Oxyz$) est égale à la somme de la vitesse relative (c'est-à-dire par rapport à $O'x'y'z'$) et de la vitesse d'entraînement.

La vitesse d'entraînement étant celle qu'aurait un point lié au référentiel $O'x'y'z'$, elle a pour expression :

$$\vec{v_e} = \vec{V} + \vec{\Omega} \wedge \overrightarrow{O'M},$$

par définition de $\vec{\Omega}$.

Par conséquent, la relation de transformation des vitesses pour deux repères non galiléens est la suivante :

(17) $$\vec{v} = \vec{v'} + \vec{V} + \vec{\Omega} \wedge \overrightarrow{O'M}$$

Remarquons que cette relation est très générale : soit un vecteur $\vec{U}$ et un vecteur $\vec{U'}$, liés par la relation

$$\vec{U} = \vec{U'} + \overrightarrow{OO'}$$

Nous aurons, de façon tout à fait analogue à la relation **(17)** :

(18) $$\frac{d\vec{U}}{dt} = \frac{d\vec{U'}}{dt} + \vec{V} + \vec{\Omega} \wedge \vec{U'}$$

Cherchons maintenant la loi de composition des accélérations : elle s'obtient en dérivant la relation **(17)** par rapport au temps et en appliquant la relation **(18)** aux vecteurs vitesses; la loi de transformation des accélérations est alors la suivante :

(19) $$\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = \frac{d^2\vec{r'}}{dt^2} + \frac{d^2\overrightarrow{OO'}}{dt^2} + \frac{d\vec{\Omega}}{dt} \wedge \vec{r'} + \vec{\Omega} \wedge (\vec{\Omega} \wedge \vec{r'}) + 2\left(\vec{\Omega} \wedge \frac{d\vec{r'}}{dt}\right)$$

Le premier terme du membre de droite est l'accélération du point M dans le repère $O'x'y'z'$; la somme des trois termes suivants est l'accélération qu'aurait, dans le repère $Oxyz$, un point fixe du repère $O'x'y'z'$ (c'est-à-dire un point tel que $\frac{d\vec{r}}{dt} = 0$) qui coïnciderait avec M à l'instant considéré : c'est l'*accélération d'entraînement.*

Le dernier terme est appelé *accélération de Coriolis;* il n'existe que si le point matériel est en mouvement dans le repère non galiléen $\left(\frac{d\vec{r'}}{dr} \neq 0\right)$.

• *Forces d'inertie*

Revenons à notre propos initial, qui était de voir la forme que prenait la loi fondamentale de la dynamique dans un repère non inertiel.

Dans le repère $Oxyz$, que nous avons supposé inertiel, la loi fondamentale de la dynamique s'écrit, pour un point matériel de masse m : $\vec{F} = m\frac{d^2\vec{r}}{dt^2}$.

L'accélération dans le repère inertiel peut s'exprimer en fonction de l'accélération dans le repère non inertiel par l'expression **(19)** :

$$\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = \frac{d^2\vec{r'}}{dt^2} + \vec{\gamma_e} + 2\left(\vec{\Omega} \wedge \frac{d\vec{r'}}{dt}\right)$$

en désignant par γ_e l'accélération d'entraînement :

$$\vec{\gamma_e} = \frac{d^2\overrightarrow{OO'}}{dt^2} + \frac{d\vec{\Omega}}{dt} \wedge \vec{r'} + \vec{\Omega} \wedge (\vec{\Omega} \wedge \vec{r'})$$

Nous pouvons donc écrire la loi fondamentale de la dynamique sous la forme :

(20) $$\vec{F} = m\frac{d^2\vec{r'}}{dt^2} + m\vec{\gamma_e} + 2\,m\left(\vec{\Omega} \wedge \frac{d\vec{r'}}{dt}\right)$$

L'observateur qui se trouve dans le repère non inertiel observe que le point M a pour accélération $\frac{d^2\vec{r'}}{dt^2}$; tout se passe pour lui comme si l'objet M était soumis à la force :

$$\vec{F} - m\vec{\gamma_e} - 2\,m\left(\vec{\Omega} \wedge \frac{d\vec{r'}}{dt}\right) = m\frac{d^2\vec{r'}}{dt^2}$$

Un observateur situé dans un repère non galiléen doit donc, s'il veut appliquer la loi fondamentale de la dynamique, ajouter à la force réelle $\vec{F}$ deux forces « fictives » ou « forces d'inertie » $-\,m\vec{\gamma_e}$ et $-\,2\,m\left(\vec{\Omega} \wedge \frac{d\vec{r'}}{dt}\right)$.

Nous pouvons maintenant comprendre ce qu'observait notre voyageur isolé dans son train au démarrage de celui-ci. L'objet posé sur la tablette était initialement au repos : $\vec{F} = 0$. Lorsque le train accélère, le repère qui lui est lié est en translation ($\vec{\Omega} = 0$) non uniforme : l'accélération de Coriolis est nulle, et l'accélération d'entraînement est simplement

$$\vec{\gamma_e} = \frac{d^2\overrightarrow{OO'}}{dt^2}$$

c'est-à-dire l'accélération du train par rapport au quai de gare. L'observateur lié au train observe donc que l'objet est soumis à une force d'inertie :

$$\vec{F_e} = m\vec{\gamma_e}$$

Il en résulte que l'objet prend une accélération opposée à l'accélération du train, donc se dirige vers l'arrière de celui-ci. L'observateur lui-même serait projeté en arrière s'il n'était pas retenu par le dossier de son siège.

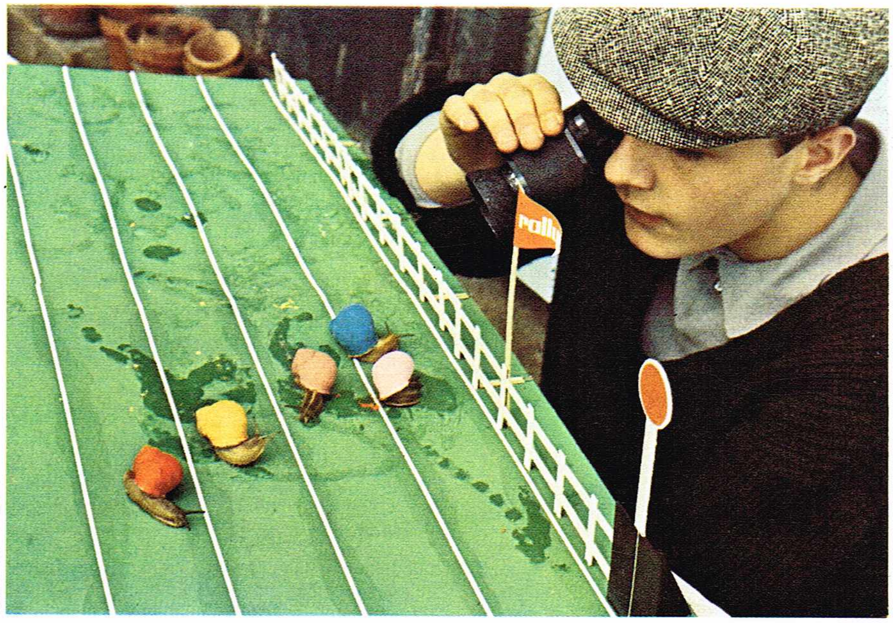

Simonet - Rapho

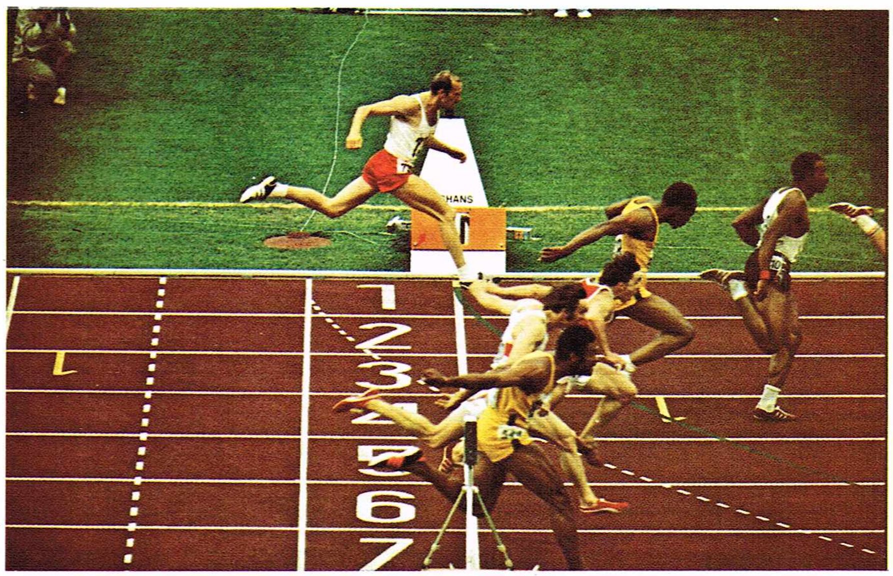

R. Deparden - Gamma

▲ *Pour gagner la course, ce n'est pas la vitesse absolue qui compte...*

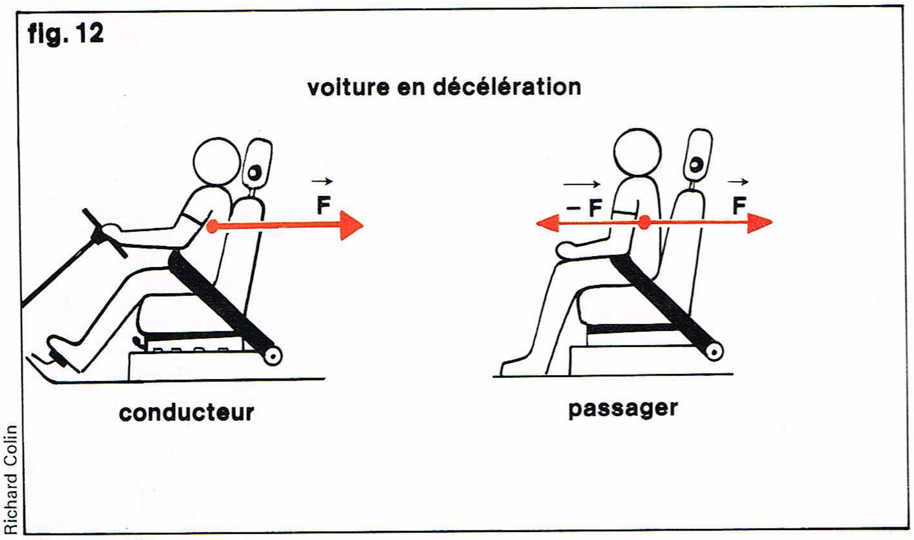

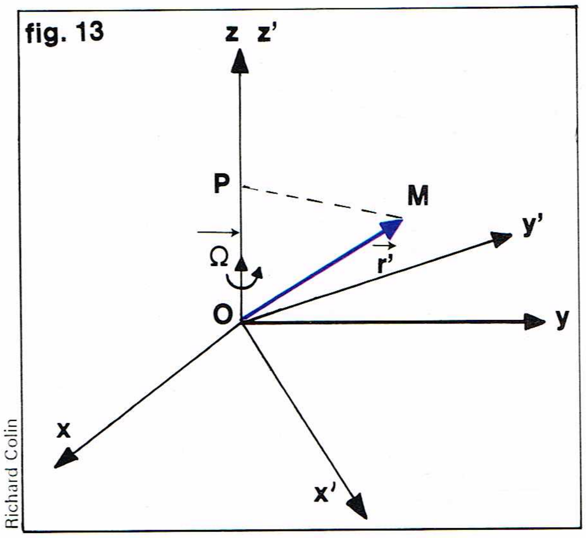

▲ *A gauche, figure 12 : dans une voiture en décélération le conducteur et le passager subissent les mêmes phénomènes, mais les décrivent de façon différente selon qu'ils se considèrent dans un repère inertiel ou non inertiel. A droite, figure 13 : le repère Ox'y'z' est en rotation autour de l'axe Oz' par rapport au référentiel Oxyz.*

La raison pour laquelle ces forces sont appelées forces d'inertie est très apparente ici : c'est en effet que l'objet qui se trouve sur la tablette possède une certaine inertie, autrement dit qu'il n'a aucunement « envie » de suivre le train dans son mouvement ; conformément à la loi fondamentale de la dynamique, il reste immobile par rapport au quai de gare ; comme l'observateur, lié au train, se déplace par rapport au quai, il voit l'objet se déplacer vers l'arrière. Celui-ci ne suivra le mouvement du train que si le rebord de la tablette par exemple exerce sur lui une force suffisante pour que l'objet acquière la même vitesse que le train. Lorsque le train aura atteint sa vitesse de croisière, l'accélération d'entraînement s'annulera, donc la force d'inertie s'annulera également : la loi fondamentale de la dynamique pourra à nouveau s'appliquer sous sa forme habituelle.

La raison pour laquelle les forces d'inertie sont parfois appelées forces fictives est la suivante : ces forces sont des abstractions que l'on introduit lorsqu'il est commode de raisonner en se plaçant dans un référentiel non inertiel. Mais on pourrait très bien se passer d'introduire ces forces si l'on s'astreignait à raisonner toujours dans un référentiel galiléen. Il s'agit donc uniquement de quantités commodes pour résoudre les problèmes de mécanique.

Prenons un autre exemple pour illustrer ce point : supposons que, dans une automobile, parfaitement bien suspendue et insonorisée, se trouvent le conducteur et un passager, ce dernier ayant les yeux bandés (*fig.* 12). Le conducteur, qui roulait initialement à 100 km/h sur une route parfaitement lisse et rectiligne, freine brutalement, de sorte que la voiture subit une décélération γ. Comment raisonnent le conducteur et son passager ?

Le *conducteur* dira : la voiture a subi une décélération γ ; comme j'ai été retenu sur mon siège par ma ceinture de sécurité, je suis resté solidaire de ma voiture ; j'ai donc subi exactement la même décélération γ. Pour que cela soit possible, il a fallu que je sois soumis à une force $\vec{F} = m\vec{\gamma}$ où m est ma propre masse. Cette force, dirigée vers l'arrière de mon véhicule, a été exercée sur moi par ma ceinture de sécurité.

Le *passager* dira : j'étais assis sur mon siège, immobile par rapport à la voiture (je n'avais d'ailleurs aucun moyen de savoir si la voiture était elle-même immobile ou si elle était en translation rectiligne uniforme). J'ai soudain senti une force me pousser vers l'avant, et en même temps ma ceinture de sécurité exerçait sur moi une force exactement opposée, de sorte que je suis resté immobile (c'est-à-dire que mon accélération est restée constamment nulle).

Ces deux personnes décrivent exactement le même phénomène — la décélération de la voiture — sous deux angles différents. Le conducteur considère qu'il était en mouvement et que sa vitesse a diminué à cause de la force exercée par sa ceinture de sécurité. Le passager considère qu'il est resté parfaitement immobile durant toute l'expérience : avant la décélération, il n'était soumis à aucune force ; pendant la décélération, il a été soumis à deux forces exactement opposées : celle qu'exerçait sa ceinture et celle « qui le poussait en avant » : la force d'inertie. L'un et l'autre ont raison, et l'on peut adopter indifféremment l'un ou l'autre point de vue.

Pour être tout à fait précis, il faut quand même noter que, avant comme pendant la décélération, les deux observateurs sont évidemment soumis en permanence à deux forces verticales : la *pesanteur* et la *réaction du siège*. Comme nous avons supposé que la route était parfaitement plane, ces deux forces sont constamment opposées.

Référentiels non inertiels particuliers - Les référentiels en rotation uniforme

Nous avons vu deux exemples de ce qui se passe dans des référentiels en translation rectiligne non uniforme. Nous allons maintenant considérer un autre exemple de référentiels non galiléens qui sont d'une grande importance : les *repères en rotation uniforme.*

Considérons deux repères $Oxyz$ et $Ox'y'z'$ en rotation l'un par rapport à l'autre autour de l'axe Oz (*fig.* 13) ; la rotation de $Ox'y'z'$ par rapport à $Oxyz$ est caractérisée par un vecteur $\vec{\Omega}$, colinéaire à Oz, indépendant du temps puisque la rotation est uniforme ; nous appellerons ω la *vitesse angulaire,* c'est-à-dire le module du vecteur $\vec{\Omega}$.

Examinons les divers termes de la relation **(20)**, l'accélération d'entraînement est donnée par :

$$\vec{\gamma}_e = \frac{d^2\overrightarrow{OO'}}{dt^2} + \frac{d\vec{\Omega}}{dt} \wedge \vec{r}' + \vec{\Omega} \wedge (\vec{\Omega} \wedge \vec{r}')$$

L'accélération de O' par rapport à O est nulle, puisque O est confondu avec O' : $\frac{d^2\overrightarrow{OO'}}{dt^2} = 0$. La dérivée de $\vec{\Omega}$ par rapport à t est nulle, puisque la rotation est uniforme ; il ne subsiste donc de l'expression de $\vec{\gamma}_e$ que le dernier terme. Appelons x', y', z' les coordonnées de $\vec{r}'$; $\vec{\Omega}$ étant porté par Oz, $\vec{\Omega} \wedge \vec{r}'$ a pour composantes $(-y'\omega, x'\omega, 0)$. Le vecteur $\vec{\Omega} \wedge (\vec{\Omega} \wedge \vec{r}')$ a donc pour composantes $(-\omega^2 x', \omega^2 y', 0)$. Appelons P la projection de M sur Oz ; nous pouvons écrire :

$$\vec{\gamma}_e = -\omega^2\,\overrightarrow{PM}$$

L'accélération d'entraînement est donc toujours dirigée de M vers P ; la force d'inertie, qui vaut $-m\vec{\gamma}_e$, est donc toujours dirigée de P vers M, c'est-à-dire de l'axe de rotation vers l'extérieur : elle est appelée *force centrifuge ;* la force d'entraînement, elle, est la *force centripète.*

Examinons maintenant l'accélération de Coriolis ; elle dépend du mouvement du point M par rapport au repère $Ox'y'z'$, mais elle est en tout cas certainement perpendiculaire à l'axe de rotation puisqu'elle a pour expression $\vec{\Omega} \wedge \frac{d\vec{r}'}{dt}$: l'accélération de Coriolis est nulle pour un corps immobile dans le repère en rotation.

La Terre constitue un exemple de référentiel non inertiel en rotation uniforme. Le fait est démontré par une expé-

rience célèbre réalisée à Paris en 1851 par le physicien Foucault ; celui-ci suspendit un pendule sous le dôme du Panthéon, et constata que le plan dans lequel se balance le pendule tourne au cours du temps à cause de la rotation de la Terre.

Considérons en effet (*fig.* 14) le pendule se balançant au-dessus du pôle Nord ; le plan du pendule reste fixe dans l'espace, tandis que la Terre tourne. Pour un observateur lié à la Terre, et qui tourne avec celle-ci, le plan d'oscillation du pendule tourne en 24 heures. Si le pendule n'est pas au pôle Nord, la situation est un peu plus compliquée, mais le phénomène reste essentiellement le même, à ceci près que le plan d'oscillation du pendule tourne de plus en plus lentement au fur et à mesure que l'on s'approche de l'équateur. A l'équateur même, le phénomène disparaît.

La rotation de la Terre a également pour conséquence le fait qu'une force de Coriolis s'exerce sur les corps en mouvement : nous l'avons complètement négligée dans l'exemple du pendule de Foucault, car celui-ci se déplace très lentement. Par contre, supposons que l'on laisse tomber sans vitesse initiale un caillou dans un puits à la latitude de l'équateur. Faisons le bilan des forces qui s'exercent sur cet objet (*fig.* 15) :

— la *force de pesanteur,* dirigée vers le centre de la Terre, et qui vaut (nous le verrons dans un chapitre ultérieur)

$$F_p = \frac{\mathcal{G}Mm}{r^2}$$

où $\mathcal{G}$ est une constante qui vaut

$$6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \mathrm{N \cdot m^2/kg^2}$$

M est la masse de la Terre, *m* celle du caillou, *r* la distance du caillou au centre de la Terre. Le puits étant à la surface de la Terre, *r* vaudra initialement 6 400 km environ ; si le puits a 100 m de profondeur, nous voyons que *r* variera d'une quantité négligeable au cours de l'expérience : nous pouvons le considérer comme constant. La force F_p sera donc constante.

$$F_p = -mg \quad \text{avec } g = 9{,}81\ \mathrm{m/s^2}$$

— la *force d'entraînement* est centrifuge et vaut

$$F_e = -m\omega^2 r$$

Comme précédemment, nous pouvons considérer que *r* est constant au cours de l'expérience. Nous savons de plus que la Terre fait un tour en 24 h (soit $8{,}6 \cdot 10^4$ secondes), donc

$$\omega = \frac{8\pi}{8{,}6 \cdot 10^4} \simeq 0{,}7 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{rad/s}$$

— la *force de Coriolis* vaut

$$2\,\omega\,\frac{dx}{dt}$$

Compte tenu du sens de rotation de la Terre, cette force va être dirigée vers l'est. Cette force est initialement nulle, et augmente au fur et à mesure que le corps prend de la vitesse. Il en résulte que le caillou ne tombe pas en ligne droite, mais subit une déviation vers l'est. Pour une chute de 100 m, l'écart par rapport à la verticale (repérée à l'aide d'un fil à plomb qui, étant immobile par rapport à la Terre, n'est pas soumis à la force de Coriolis) est de 3 cm environ. C'est donc un effet faible, mais qui n'est pas négligeable et dont on doit tenir compte dans les calculs de balistique précis relatifs à des corps en mouvement rapide.

Les forces de Coriolis dues à la rotation de la Terre ont également un effet sur le climat, par l'intermédiaire des mouvements des nuages et des courants marins. En effet, les différences de température entre le pôle et l'équateur font qu'il existe un gradient de pression dirigé du nord vers le sud ; les vents auraient donc tendance à avoir une direction dominante nord-sud, mais, à cause de la force de Coriolis due à la rotation de la Terre, ils acquièrent une composante est-ouest. Lorsqu'il existe une haute pression localisée dans l'hémisphère Nord, les vents tendent donc à tourner dans le sens des aiguilles d'une montre ; il en résulte que les masses nuageuses prennent des allures de tourbillons que les photos des satellites météorologiques nous ont rendues familières.

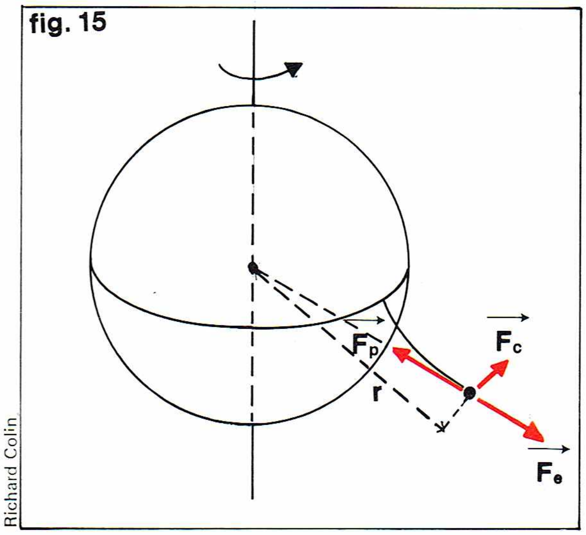

Richard Colin

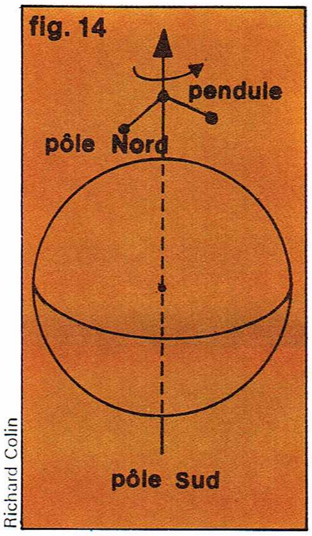

Richard Colin

▲ A gauche, figure 15 : un corps en chute libre subit une déviation due à la rotation de la Terre (forces de Coriolis). A droite, figure 14 : représentation du pendule de Foucault placé au pôle Nord.

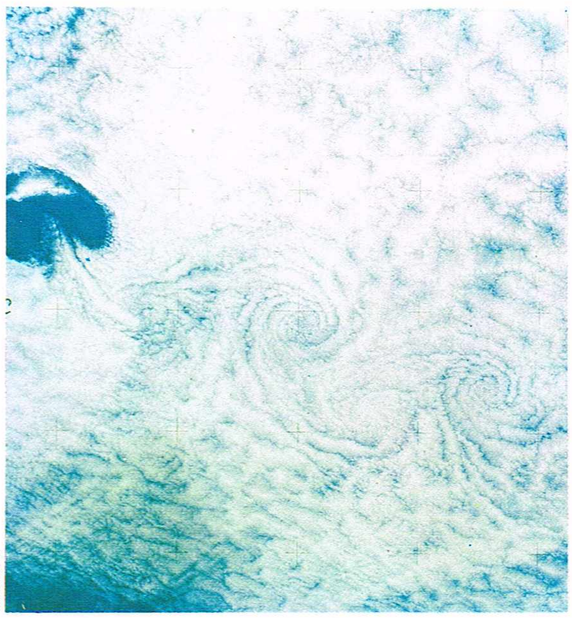

U.S.I.S.

◀ Masses nuageuses en tourbillon photographiées par un satellite météorologique.

▼ Le pendule de Foucault (Milan, musée des Sciences et des Techniques).

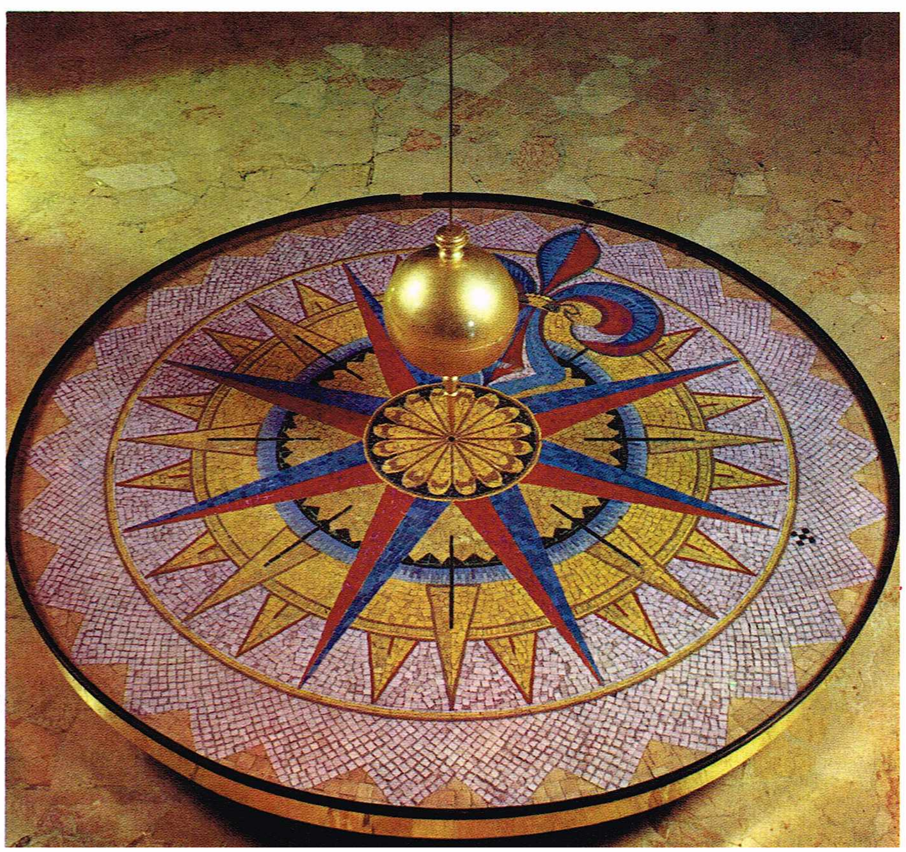

A. Rizzi

▶ *Figure 17 — un exemple de mouvement d'un corps dont la masse est variable : une fusée.*

Quantité de mouvement et moment cinétique

La loi fondamentale de la dynamique pour un ensemble de points matériels a pour conséquences, nous l'avons vu, deux relations concernant, l'une, la quantité de mouvement et, l'autre, le moment cinétique des particules du système.

La première relation, appelée **théorème de la quantité de mouvement,** est la suivante :

$$\vec{F} = \frac{d}{dt} \sum_i \vec{p_i}$$

La résultante $\vec{F}$ des forces extérieures appliquées au système est égale à la dérivée de la somme des impulsions de chaque particule.

La deuxième relation, appelée **théorème du moment cinétique,** est la suivante :

$$\vec{M} = \frac{d}{dt} \sum_i \vec{r_i} \wedge \vec{p_i}$$

Le moment M des forces extérieures appliquées au système est égal à la dérivée de la somme des moments cinétiques de chaque particule.

Nous allons maintenant envisager quelques-unes des conséquences de ces théorèmes.

Théorème de la quantité de mouvement

Dans les exemples que nous allons envisager, nous utiliserons essentiellement la propriété de la conservation de la quantité de mouvement pour un corps qui n'est soumis à aucune force extérieure.

Chocs

Considérons deux boules de masses m_1 et m_2 se dirigeant l'une vers l'autre avec des vitesses v_1 et v_2 respectivement (*fig.* 16). Le choc a lieu au point O ; ces deux boules n'étant soumises à aucune force extérieure, la quantité de mouvement totale doit être la même avant le choc (vitesses $\vec{v_1}$ et $\vec{v_2}$) qu'après (vitesses $\vec{v'_1}$ et $\vec{v'_2}$) :

$$m_1\vec{v_1} + m_2\vec{v_2} = m_1\vec{v'_1} + m_2\vec{v'_2}$$

Si $\vec{v_1}$ et $\vec{v_2}$ sont connues, cette relation à elle seule ne permet pas de déterminer $\vec{v'_1}$ et $\vec{v'_2}$; il faut connaître une relation supplémentaire. Si le choc est parfaitement élastique, cette relation supplémentaire sera la relation de conservation de l'énergie. Nous reviendrons plus loin sur les chocs (voir *Collisions entre deux particules*).

Corps de masse variable : mouvement d'une fusée

Jusqu'ici nous avons toujours considéré que les corps en mouvement ont une masse constante. Tel n'est pas le cas cependant pour les fusées qui, consommant de grandes quantités de carburant, s'allègent rapidement. Comme la dimension de la fusée est petite devant la distance qu'elle parcourt, nous pouvons l'assimiler à un point matériel, de masse m variable.

Pendant un court instant dt, une certaine quantité de produits de combustion dm est éjectée avec une vitesse $\vec{u}$ par rapport à la fusée. Comme, à l'instant précédent, ces produits avaient une vitesse nulle par rapport à la fusée, c'est donc que la quantité de mouvement de ces produits a varié d'une quantité $\vec{u}dm$. La fusée, elle, a vu sa vitesse varier de $d\vec{v}$, sa quantité de mouvement a donc varié de $md\vec{v}$. La quantité de mouvement de l'ensemble a donc subi une variation $d\vec{p} = \vec{u}dm + md\vec{v}$.

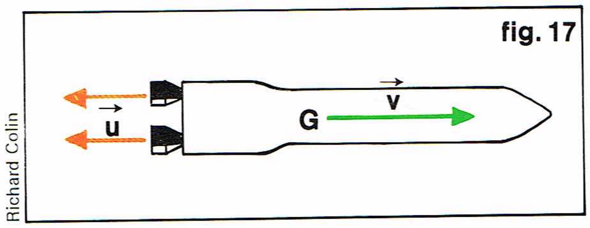

On voit aisément sur la *figure* 17 que $\vec{u}$ et $\vec{v}$ sont colinéaires et de signe opposé; nous pouvons donc écrire la relation précédente sous la forme :

$$dp = mdv + udm$$

Si la fusée se déplace dans le vide et n'est soumise à aucune force, nous pouvons appliquer le théorème de conservation de l'impulsion :

$$0 = mdv + udm$$

$$dv = -u\frac{dm}{m}$$

Si la vitesse d'éjection des gaz est constante, cette relation s'intègre pour donner la relation suivante :

$$v = v_0 + u \text{ Log } \frac{m_0}{m}$$

où v_0 et m_0 sont les vitesses et la masse à l'instant initial. Si nous appelons m_f la masse de la fusée proprement dite et m_c la masse de carburant au départ, la vitesse atteinte lorsque tout le carburant sera dépensé est :

$$v = v_0 + u \text{ Log } \left(1 + \frac{m_c}{m_f}\right)$$

Dans les fusées utilisées en recherche spatiale, le rapport $\frac{m_c}{m_f}$ est de l'ordre de 4 à 5, et la vitesse d'éjection est de l'ordre de 2 000 à 3 000 m/s. L'utilisation de fusées à plusieurs étages permet d'augmenter v en allégeant la fusée de ses réservoirs vides.

Recul des armes à feu

Considérons (*fig.* 18) qu'une arme à feu de masse M tire un projectile de masse m qui a, à la sortie du canon, une vitesse u. Le poids de l'arme étant équilibré par la réaction de l'affût, la projection des forces appliquées sur l'axe vertical est nulle. A l'instant initial, le projectile et l'arme sont au repos : l'impulsion est nulle. Lorsque le projectile a atteint la vitesse u, il a une impulsion mu, l'arme doit donc nécessairement prendre une vitesse v telle que :

$$Mv + mu = 0$$

$$v = -\frac{m}{M}u$$

L'arme a donc tendance à reculer brutalement au moment du départ du projectile : c'est le phénomène du *recul de l'arme*.

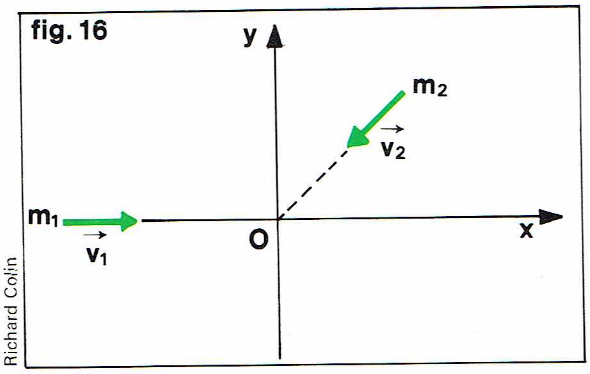

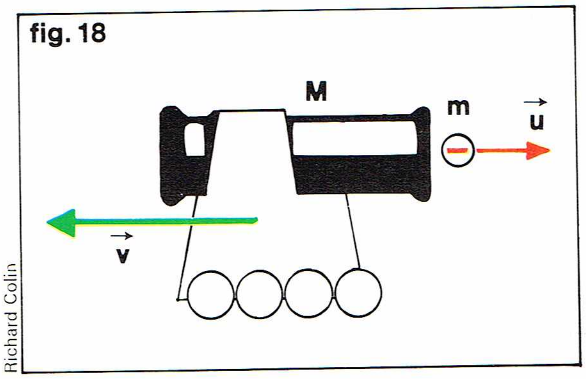

▶ *A gauche, figure 16 : choc de deux points matériels de masses m_1 et m_2. A droite, figure 18 : recul d'une arme à feu.*

Photo Research International

▲ *L'utilisation de fusées à plusieurs étages permet d'augmenter V en allégeant la fusée de ses réservoirs vides ; ici, séparation du deuxième étage de* **Saturne V** *lors du lancement d'***Apollo XI.**

Théorème du moment cinétique
Point matériel soumis à une force centrale

On appelle *force centrale* une force qui, en tout point, est portée par la ligne joignant le point considéré à un point particulier de l'espace. La force exercée par une particule chargée sur une autre particule chargée, la force exercée par une masse sur une autre masse sont des forces centrales. Par exemple, la Terre subit de la part du Soleil une force d'attraction qui est en permanence dirigée du centre de la Terre vers le centre du Soleil, quelle que soit la position de la Terre sur son orbite.

Nous considérons donc (*fig.* 19) une particule soumise à une force centrale $\vec{F}$; le moment de cette force par rapport à O est nul puisque $\vec{M} = \vec{r} \wedge \vec{F}$ et que $\vec{r}$ et $\vec{F}$ sont colinéaires. Le moment total étant nul, le moment cinétique reste donc constant au cours du mouvement. Or le moment cinétique vaut :

$$L = \vec{r} \wedge \vec{p} = \vec{r} \wedge m\vec{v}$$

Il est donc perpendiculaire au plan déterminé par les vecteurs $\vec{r}$ et $\vec{v}$. Puisque sa direction est toujours la même, c'est que le plan déterminé par $\vec{r}$ et $\vec{v}$ est toujours le même : cela signifie donc que la trajectoire est plane.

Un corps soumis à une force centrale a donc toujours une trajectoire plane. C'est le cas en particulier des planètes du système solaire. Toutefois, les planètes ne sont pas soumises uniquement à l'attraction du Soleil ; chacune d'entre elles subit également l'influence des autres planètes, de sorte que la résultante des forces n'est plus exactement une force centrale. Cette correction reste cependant très petite pour les planètes du système solaire. Nous reviendrons plus en détail sur le problème des planètes dans un chapitre ultérieur.

fig. 19

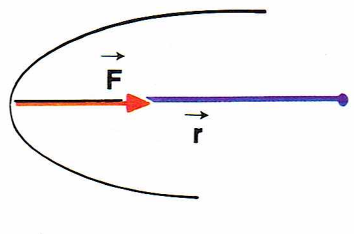

Richard Colin

◀ *Figure 19 : point matériel soumis à une force centrale.*

Particule possédant un moment magnétique, soumise à un champ magnétique

Nous avons vu que le moment cinétique d'une particule soumise à une force centrale reste constant pendant le mouvement. Nous allons voir maintenant comment évolue le moment cinétique $\vec{J}$ d'une particule (un électron par exemple) possédant un moment magnétique $\vec{\mu}$, placée dans un champ magnétique uniforme $\vec{B}$ (*fig.* 20). Ce problème est d'une très grande importance en physique, en chimie et en biologie.

Nous supposons que le moment magnétique $\vec{\mu}$ est proportionnel au moment cinétique :

$$\vec{\mu} = \gamma \vec{J}$$

γ étant le *rapport gyromagnétique*.

Le moment magnétique étant placé dans un champ magnétique, il est soumis à un couple de moment $\vec{M} = \vec{\mu} \wedge \vec{B}$.

On a donc, d'après le théorème du moment cinétique :

$$\frac{d\vec{J}}{dt} = \vec{\mu} \wedge \vec{B}$$

soit encore :

$$(21) \qquad \frac{d\vec{J}}{dt} = \gamma (J \wedge \vec{B})$$

Multiplions scalairement les deux membres de cette relation par $\vec{J}$:

$$\vec{J} \cdot \frac{d\vec{J}}{dt} = 0$$

soit

$$\frac{1}{2} J^2 = Cte$$

Le moment cinétique garde donc un module constant. Sa direction, elle, ne reste pas constante. Multiplions en effet les deux membres de la relation **(21)** par $\vec{B}$:

$$\vec{B} \cdot \frac{d\vec{J}}{dt} = 0$$

soit

$$\frac{d}{dt} (\vec{B} \cdot \vec{J}) = 0$$

soit encore $|\vec{B}|\,|\vec{J}| \cos \theta = Cte$

Puisque $|\vec{B}|$ et $|\vec{J}|$ sont constants, le moment cinétique fait un angle constant avec la direction de $\vec{B}$: il décrit un cône de demi-angle au sommet θ (*fig.* 20).

Projetons maintenant la relation **(21)** sur les axes Ox et Oy :

$$\frac{dJ_x}{dt} = \gamma J_y B$$

$$\frac{dJ_y}{dt} = -\gamma J_x B$$

Il en résulte que :

$$\frac{d^2 J_x}{dt^2} + (\gamma B)^2 J_x = 0$$

Cette équation a pour solution :

$$J_x = A \cos (\omega t + \varphi) \quad \text{avec } \omega = \gamma B\,;$$

la projection sur l'axe Ox de l'extrémité M du vecteur J est donc animée d'un mouvement sinusoïdal de pulsation $\omega = \gamma B$. Comme nous savons par ailleurs que le module de $\vec{J}$ est constant, nous savons que A décrit un cercle. Par conséquent, A est animé d'un mouvement circulaire uniforme.

Nous voyons donc que, lorsqu'une particule possédant un moment magnétique est plongée dans un champ magnétique uniforme, son moment cinétique tourne autour de la direction du champ magnétique à vitesse constante. Ce phénomène, connu sous le nom de *précession de Larmor*, est très utilisé. Nous le retrouverons dans le chapitre consacré aux phénomènes de résonance.

Nous avons présenté ici quelques applications simples du théorème de conservation de l'impulsion et du théorème du moment cinétique. Il va de soi que ce ne sont là que des exemples. Nous en trouverons d'autres lorsque nous étudierons d'autres phénomènes.

La conservation de l'énergie

Nous avons vu que le **théorème de conservation de l'énergie** pour un système de points matériels s'énonce de la façon suivante : *si les forces internes et externes dérivent d'un potentiel, l'énergie totale du système, somme de l'énergie potentielle et de l'énergie cinétique, reste constante au cours du mouvement.*

Nous allons voir dans ce chapitre quelques applications de ce théorème extrêmement important ; nous étudierons en particulier le problème de l'interaction de deux particules, qui se pose constamment dans tout le domaine de la physique nucléaire.

Collision entre deux particules

Dans ce qui suit, nous allons considérer que les deux particules n'entrent en interaction que pendant la durée du choc, au moment où elles sont en contact ; c'est le cas de deux boules de billard par exemple.

Chocs élastiques entre deux particules

- *Étude des chocs élastiques*

Par définition, on appelle *choc élastique* un choc dans lequel l'énergie cinétique totale est conservée. L'énergie potentielle, elle, est nulle, puisque nous avons supposé que les particules ne sont en interaction que pendant la durée du choc.

Soit donc (*fig.* 21) deux particules de masses m_1 et m_2, de vitesses $\vec{v_1}$ et $\vec{v_2}$; après le choc, elles ont pour vitesses respectivement $\vec{v_1'}$ et $\vec{v_2'}$. Le choc étant élastique, nous pouvons écrire :

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2$$

soit encore

$$\frac{p_1^2}{2\,m_1} + \frac{p_2^2}{2\,m_2} = \frac{p_1'^2}{2\,m_1} + \frac{p_2'^2}{2\,m_2}$$

p_1, p_2, p_1' et p_2' étant les impulsions avant et après le choc. Les vitesses initiales étant connues, cette équation ne nous permet pas de déterminer de façon unique les impulsions (ou les vitesses) après le choc.

Nous ne pouvons espérer le faire que si nous utilisons le théorème de conservation de l'impulsion ainsi que nous l'avons vu au paragraphe sur les *chocs :* le système étant isolé, l'impulsion, comme l'énergie cinétique, doit être la même avant et après le choc :

$$\vec{p_1} + \vec{p_2} = \vec{p_1'} + \vec{p_2'}$$

soit encore $m_1\vec{v_1} + m_2\vec{v_2} = m_1\vec{v_1'} + m_2\vec{v_2'}$.

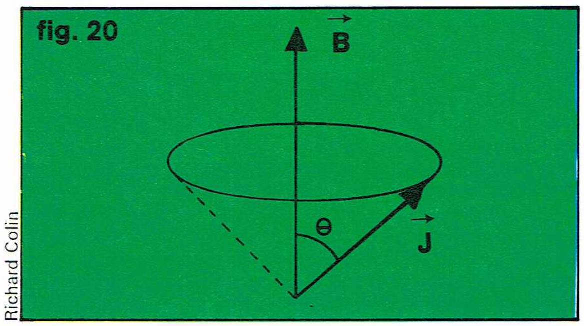

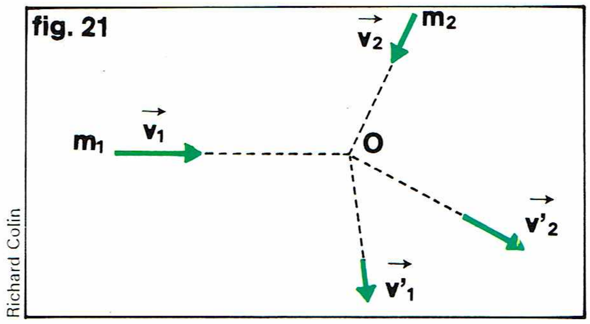

▶ *A gauche, figure 20 : précession du moment cinétique d'une particule autour du champ magnétique. A droite, figure 21 : deux particules de masses m_1 et m_2, de vitesses initiales $\vec{v_1}$ et $\vec{v_2}$, possèdent des vitesses $\vec{v_1'}$ et $\vec{v_2'}$ après le choc.*

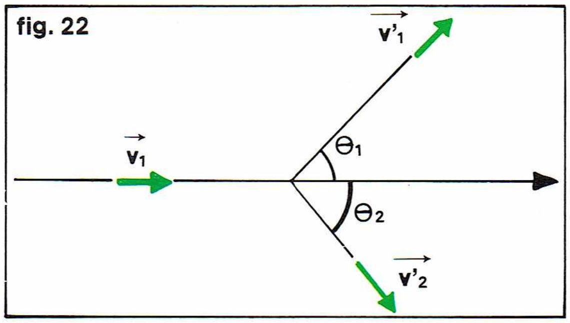

Richard Colin

◀ *Figure 22 : choc sur une cible immobile.*

Considérons par exemple le cas où la cible est immobile : $\vec{p}_2 = 0$ (*fig.* 22). Nous appelons θ_1 l'angle que fait, avec sa direction initiale, l'impulsion de la particule projectile après le choc, θ_2 l'angle que fait avec $\vec{p}_1$ l'impulsion de la cible après le choc. La relation de conservation de la quantité de mouvement s'écrit, en projection sur les axes :

$$p_1 = p'_1 \cos\theta_1 + p'_2 \cos\theta_2$$
$$0 = p'_1 \sin\theta_1 + p'_2 \sin\theta_2$$

La conservation de l'énergie s'écrit : $\dfrac{p_1^2}{2\,m_1} = \dfrac{p_1'^2}{2\,m_1} + \dfrac{p_2'^2}{2\,m_2}$

Ces trois équations ne suffisent pas à déterminer les quatre inconnues que sont p'_1, p'_2, θ_1 et θ_2 ; il nous manque un renseignement concernant la nature du choc.

— *Cas d'un choc de plein fouet.* Si nous savons par exemple que le choc est un choc de plein fouet, c'est-à-dire que les vitesses avant et après le choc sont colinéaires, nous pouvons écrire $\theta_1 = \theta_2 = 0$:

$$p_1 = p'_1 + p'_2$$
$$\frac{p_1^2}{2\,m_1} = \frac{p_1'^2}{2\,m_1} + \frac{p_2'^2}{2\,m_2}$$

Ce système a pour solution :

$$p'_1 = p_1 \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2}$$
$$p'_2 = 2\,p_1 \frac{m_2}{m_1 + m_2}$$

Supposons que les deux particules soient de même masse : $m_1 = m_2$; il en résulte $p'_1 = 0$ et $p'_2 = p_1$: la particule initialement mobile est complètement arrêtée et la particule cible, initialement immobile, a acquis la vitesse qu'avait la particule projectile avant le choc.

Calculons les vitesses des particules :

$$v'_1 = v_1 \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2}$$
$$v'_2 = 2\,v_1 \frac{m_1}{m_1 + m_2}$$

Supposons que la cible ait une masse beaucoup plus grande que le projectile : $m_2 \gg m_1$. Alors nous obtenons :

$$v'_1 \simeq -v_1$$
$$v'_2 \simeq 0$$

La particule rebondit sur la cible, qui reste immobile.

— *Cas où la nature du choc n'est pas connue.* Revenons maintenant au cas où l'on ne connaît pas la nature exacte du choc, de sorte que les quatre variables p'_1, p'_2, θ_1, θ_2 ne sont pas toutes déterminées exactement. Pour étudier commodément ce cas, il est pratique de se placer dans le *référentiel barycentrique*, c'est-à-dire dans le référentiel dont l'origine est le centre de gravité des deux particules. Ce référentiel est animé d'une vitesse de translation uniforme puisque les deux particules constituent un système isolé.

Dans ce référentiel, les vitesses des deux particules *avant le choc* ont pour expressions :

$$\vec{V}_1 = -\frac{m_2}{m_1 + m_2}\,\vec{v}$$
$$\vec{V}_2 = \frac{m_1}{m_1 + m_2}\,\vec{v}$$

où $\vec{v}$ est la vitesse relative des deux particules avant le choc, qui est indépendante du référentiel galiléen choisi.

Après le choc, les vitesses $\vec{V}'_1$, $\vec{V}'_2$ et $\vec{v}'$ sont liées par les mêmes relations.

Toujours dans le référentiel barycentrique, les impulsions $\vec{P}_1 = m_1\vec{V}_1$ et $\vec{P}_2 = m_2\vec{V}_2$ sont égales en valeur absolue, et de signe contraire ; il en va de même des impulsions $\vec{P}'_1$ et $\vec{P}'_2$ après le choc. Quant à l'énergie cinétique, elle vaut :

$$\frac{1}{2}m_1\vec{V}_1^2 + \frac{1}{2}m_2\vec{V}_2^2 = \frac{1}{2}\,\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}\,\vec{v}^2$$

▼ *La collision entre deux boules de billard est un exemple de choc élastique.*

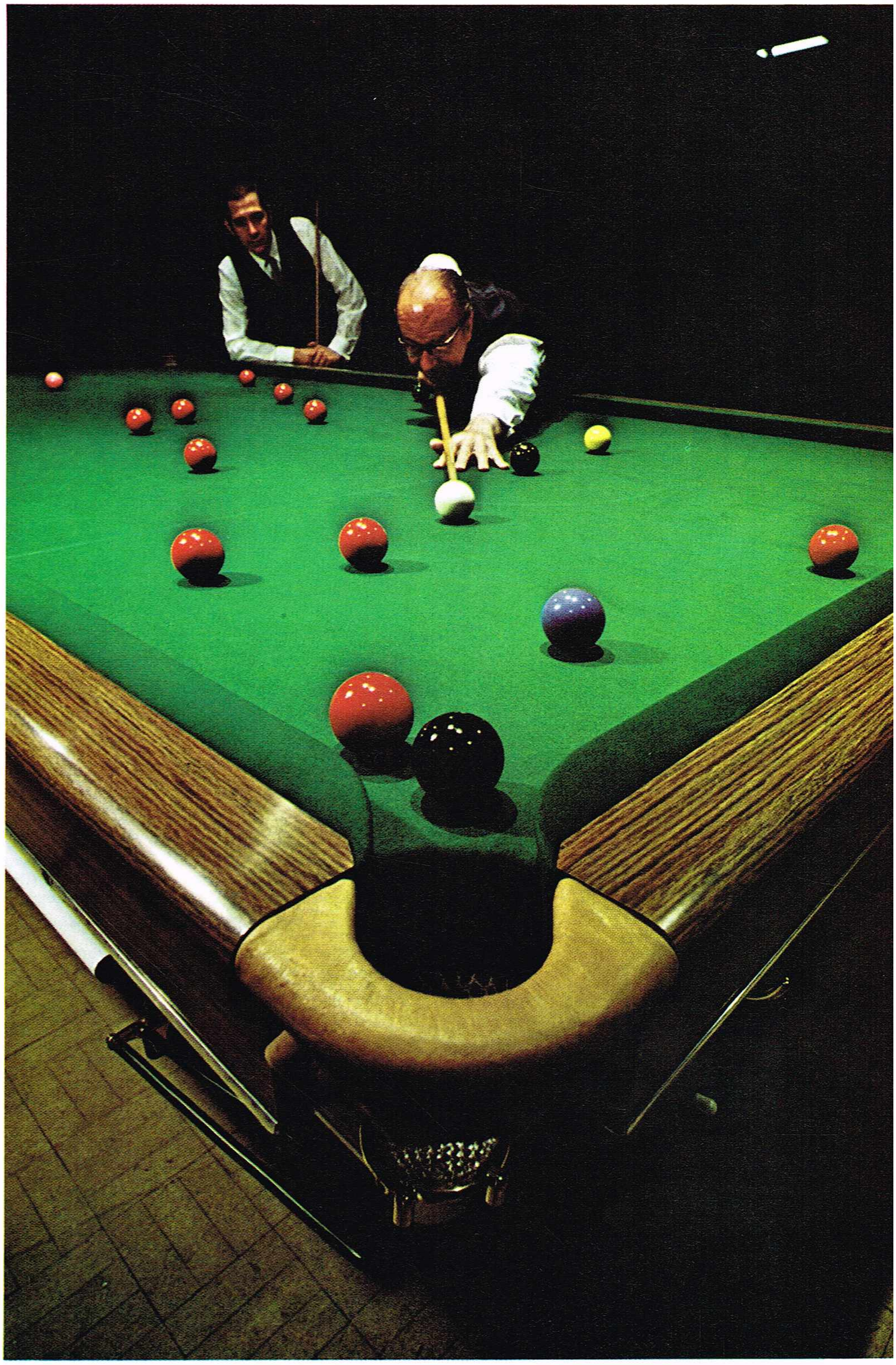

G. Cranham - Rapho

▶ *A gauche, figure 23 : construction graphique des vecteurs vitesses. A droite, figure 24 : construction vectorielle déterminant l'angle de déflexion dans le repère barycentrique.*

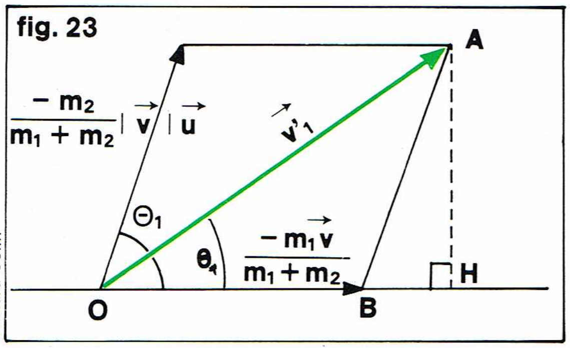

Richard Colin

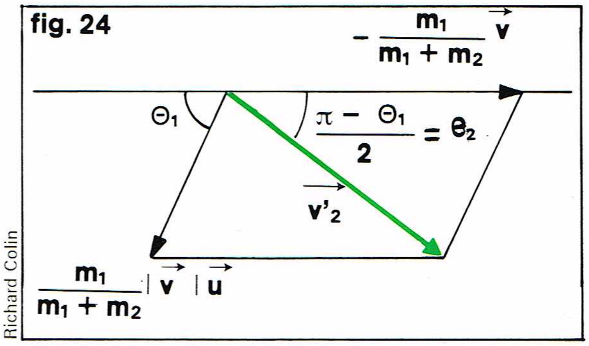

Richard Colin

Dans une collision élastique, le module de la vitesse relative reste le même avant et après le choc, puisque l'énergie cinétique est conservée. Il en résulte que la valeur absolue de l'impulsion de chaque particule reste également constante, puisque

$$|\vec{P_1}| = |\vec{P_2}| = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}\,|\vec{v}|$$

Nous voyons donc que, pour décrire l'évolution du système après le choc, il faut connaître la direction de $\vec{v}$ après le choc; comme nous l'avons déjà indiqué, cela nécessite de connaître la nature du choc. Soit donc $\vec{v}'$ la vitesse relative des deux particules après le choc; rappelons que $|\vec{v}'| = |\vec{v}|$. Nous désignons par $\vec{u}$ le vecteur unitaire dans la direction de $\vec{v}'$: $\vec{v}' = \vec{u}\,|\vec{v}|$. Les vitesses après le choc sont donc :

$$\vec{V}'_1 = -\frac{m_2}{m_1 + m_2}\,|\vec{v}|\,\vec{u}$$

$$\vec{V}'_2 = \frac{m_1}{m_1 + m_2}\,|\vec{v}|\,\vec{u}$$

Si nous revenons dans le référentiel lié à la Terre, nous obtenons :

$$\vec{v}'_1 = -\frac{m_2}{m_1 + m_2}\,|\vec{v}|\,\vec{u} + \frac{m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2}{m_1 + m_2}$$

$$\vec{v}'_2 = \frac{m_1}{m_1 + m_2}\,|\vec{v}|\,\vec{u} + \frac{m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2}{m_1 + m_2}$$

Supposons que la particule cible soit initialement immobile dans le référentiel lié à la Terre ($\vec{v}_2 = 0$) :

$$\vec{v}'_1 = -\frac{m_2}{m_1 + m_2}\,|\vec{v}|\,\vec{u} - \frac{m_1}{m_1 + m_2}\,\vec{v}$$

$$\vec{v}'_2 = \frac{m_1}{m_1 + m_2}\,|\vec{v}|\,\vec{u} - \frac{m_1}{m_1 + m_2}\,\vec{v}$$

puisque $\vec{v} = -\vec{v}_1$.

Le vecteur $\vec{v}'_1$, vitesse de la particule projectile avant le choc dans le référentiel lié à la Terre, est donc la somme de deux vecteurs, le premier étant colinéaire au vecteur $\vec{u}$, le second au vecteur $\vec{v}$: l'angle de ces deux vecteurs est donc la déviation Θ_1 de la particule dans le référentiel barycentrique. Dans le référentiel lié à la Terre, la déviation est donnée par l'angle θ_1 de $\vec{v}'_1$ et de $\vec{v}$; la construction de ces vecteurs est représentée graphiquement sur la *figure* 23.

Nous pouvons exprimer θ_1 par l'intermédiaire de tg θ_1 : en effet, $\text{tg}\,\theta_1 = \frac{\text{AH}}{\text{OB} + \text{BH}}$

soit :

$$\text{tg}\,\theta_1 = \frac{\sin\Theta_1}{\frac{m_1}{m_2} + \cos\Theta_1}$$

Le vecteur $\vec{v}'_2$, lui, est la somme de deux vecteurs de même module, colinéaires aux vecteurs $\vec{u}$ et $\vec{v}$ respectivement (*fig.* 24) ; il est donc porté par la bissectrice de ces deux vecteurs :

$$\theta_2 = \frac{1}{2}(\pi - \Theta_1)$$

Si les deux masses m_1 et m_2 sont identiques, on a :

$$\theta_1 = \frac{\Theta_1}{2}$$

$$\theta_2 = \frac{1}{2}(\pi - 2\,\theta_1)$$

On voit que $\theta_1 + \theta_2 = \frac{\pi}{2}$: les deux particules s'éloignent l'une de l'autre à angle droit dans le référentiel lié à la Terre. La *figure* 25 montre le choc vu dans le référentiel barycentrique et dans le référentiel lié à la Terre (« référentiel du laboratoire »).

Revenons au cas de deux particules de masses différentes : on peut aisément calculer les modules des vitesses après le choc dans le référentiel du laboratoire : on obtient

$$(22) \qquad |\vec{v}'_1| = \frac{\sqrt{m_1^2 + m_2^2 + 2\,m_1 m_2\cos\Theta_1}}{m_1 + m_2}\,|\vec{v}_1|$$

$$|\vec{v}'_2| = \frac{2\,m_1}{m_1 + m_2}\,|\vec{v}_1|\,\sin\frac{\Theta_1}{2}$$

Si les deux particules sont de même masse, ces relations se réduisent à :

$$|\vec{v}'_1| = |\vec{v}_1|\cos\Theta_1$$

$$|\vec{v}'_2| = |\vec{v}_1|\sin\Theta_1$$

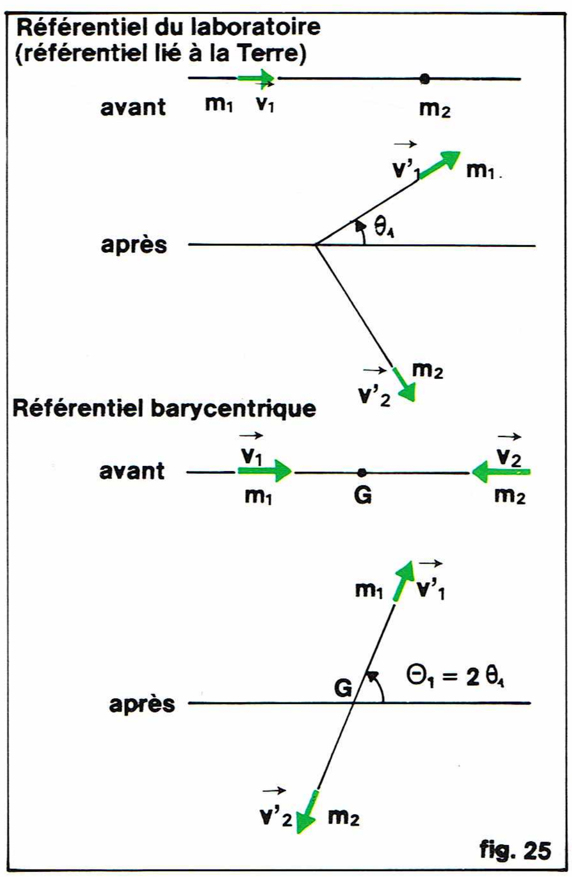

Richard Colin

▶ *Figure 25 : choc entre deux particules de même masse vu du référentiel du laboratoire et du référentiel barycentrique.*

• *Application au ralentissement des neutrons*

Dans un réacteur nucléaire, la fission de l'uranium 235 est produite par des *neutrons*. Un neutron provoque la fission d'un atome d'uranium 235, fission qui crée elle-même plusieurs neutrons, entraînant ainsi une *réaction en chaîne*. Les neutrons produits par la fission ont une très grande énergie, de l'ordre d'un kilo-électron-volt (voir *Champ de pesanteur - Champ électrostatique* pour la définition de l'électron-volt). Afin d'augmenter la probabilité pour qu'un de ces neutrons provoque à son tour un phénomène de fission, il faut préalablement le ralentir, jusqu'à ce que son énergie cinétique ne soit plus que de l'ordre de $\frac{1}{40}$ eV (électron-volt). Ce ralentissement est produit par la collision de ces neutrons sur des noyaux d'atomes tels que l'hydrogène, le deutérium, etc. Nous allons supposer que ces noyaux sont immobiles dans le référentiel du laboratoire, ce qui est une approximation assez grossière.

Désignons par m la masse du neutron; la masse du noyau est approximativement A × m, où A est le *nombre de masse* du noyau considéré. Nous cherchons à déterminer l'énergie cinétique moyenne E d'un neutron après une collision élastique avec un de ces noyaux; le rapport de E à l'énergie cinétique initiale E_0 vaut

$$\frac{E}{E_0} = \frac{\frac{1}{2} m v'^2_1}{\frac{1}{2} m v^2_1} = \frac{v'^2_1}{v^2_1}$$

Or, d'après la relation **(22)**, nous avons

$$|\vec{v}'_1| = \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{m_2}{m_1}\right)^2 + 2\frac{m_2}{m_1}\cos\Theta_1}}{1 + \frac{m_2}{m_1}} |\vec{v}_1|$$

Par conséquent :

$$\frac{E}{E_0} = \frac{1 + A^2 + 2A\cos\Theta_1}{(1 + A)^2}$$

La perte d'énergie dépend donc de l'angle Θ_1, qui peut prendre n'importe quelle valeur; il faut donc effectuer une moyenne sur toutes les valeurs possibles de Θ_1 : on trouve alors

$$E = E_0 \frac{A^2 + 1}{(A + 1)^2}$$

où E est l'énergie moyenne d'un neutron après une collision. Pour l'hydrogène (A = 1), on voit que $E = \frac{E_0}{2}$: un neutron perd la moitié de son énergie en une collision. Il faut donc un grand nombre de collisions pour arriver à une énergie de l'ordre de $\frac{1}{40}$ eV à partir d'une énergie de quelques milliers d'électrons-volts.

Chocs inélastiques entre deux particules

Dans un choc inélastique, l'énergie cinétique totale n'est pas conservée, mais une partie de l'énergie cinétique initiale est absorbée dans le choc, soit sous forme de chaleur, soit sous forme d'énergie de déformation, de façon irréversible. L'impulsion, en revanche, se conserve. On a donc le système d'équations :

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 v'^2_1 + \frac{1}{2} m_2 v'^2_2 + Q$$

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_1 = m_1 \vec{v}'_1 + m_1 \vec{v}'_2$$

où Q est l'énergie dissipée au cours du choc.

Dans le référentiel barycentrique, la conservation de l'énergie s'écrit maintenant :

$$\frac{1}{2}\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} v^2 = \frac{1}{2}\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} v'^2 + Q$$

La valeur de la vitesse relative varie donc à la suite du choc. Le rapport $\frac{v'}{v}$ est appelé *coefficient de restitution k* : il vaut 1 dans un choc parfaitement élastique, et 0 dans un choc parfaitement mou (dans ce dernier cas, les particules restent collées l'une à l'autre). L'énergie absorbée pendant le choc s'exprime alors en fonction de k par :

$$Q = \frac{1}{2}\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}(v'^2 - v^2) = \frac{1}{2}\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}(1 - k^2)\, v^2$$

La réaction de fusion de deux noyaux est un exemple de choc parfaitement mou. Un autre exemple de choc mou est donné par la collision de deux voitures, dans laquelle l'énergie cinétique initiale est dissipée en chaleur et en énergie de déformation des tôles.

Interaction entre deux particules

Dans le paragraphe précédent, nous avons vu que les lois de conservation de l'impulsion et de l'énergie ne suffisent pas à déterminer l'état du système après le choc, mais qu'il faut en plus connaître la nature de l'interaction entre les particules ou points matériels considérés. Nous allons donc supposer maintenant qu'il existe un certain *potentiel d'interaction* U (r) entre les deux particules, potentiel qui permet de prédire l'angle de diffusion.

En d'autres termes, nous avons jusqu'à présent considéré ce qui se passe avant le choc, c'est-à-dire avant que les particules soient en interaction, puis après le choc, c'est-à-dire une fois que l'interaction a cessé. Nous allons maintenant considérer ce qui se passe pendant la durée de l'interaction.

Dans le référentiel barycentrique, l'énergie totale est la somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle :

$$E = \frac{1}{2}\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} v^2 + U(\vec{r})$$

où $\vec{r}$ est le vecteur joignant les deux particules et $\vec{v}$ leur vitesse relative. Le système étant isolé, l'énergie E reste constante.

Par ailleurs, le théorème de conservation du moment cinétique montre, ainsi que nous l'avons vu, que la trajectoire est plane (voir *Point matériel soumis à une force centrale*). Écrivons ce théorème dans le référentiel barycentrique :

$$\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \vec{r} \wedge \vec{v} = \vec{L}$$

où $\vec{L}$ est un vecteur constant. Pour simplifier l'écriture, nous désignerons par μ la quantité $\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$; μ est appelée la masse réduite des deux particules. Par souci de commodité, nous nous plaçons en coordonnées polaires, comme indiqué sur la *figure* 26. Le théorème de conservation du moment cinétique s'écrit alors :

$$\mu \vec{r} \wedge \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{L}$$

soit encore

$$\mu r^2 \frac{d\theta}{dt} = L$$

puisque le vecteur $d\vec{r}$ a pour composantes dr le long du vecteur $\vec{r}$ et $rd\theta$ perpendiculairement à ce vecteur.

Toujours en coordonnées polaires, le théorème de conservation de l'énergie s'écrit :

$$\frac{1}{2}\mu\left[\left(r\frac{d\theta}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dr}{dt}\right)^2\right] + U(r) = E$$

Or
$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{L}{\mu r^2}$$

par conséquent $E = \frac{1}{2}\mu\left[\frac{L^2}{\mu^2 r^2} + \left(\frac{dr}{dt}\right)^2\right] + U(r)$

fig. 26

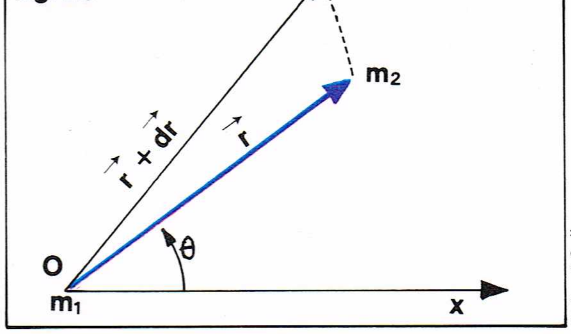

◄ ***Figure 26 : coordonnées polaires.***

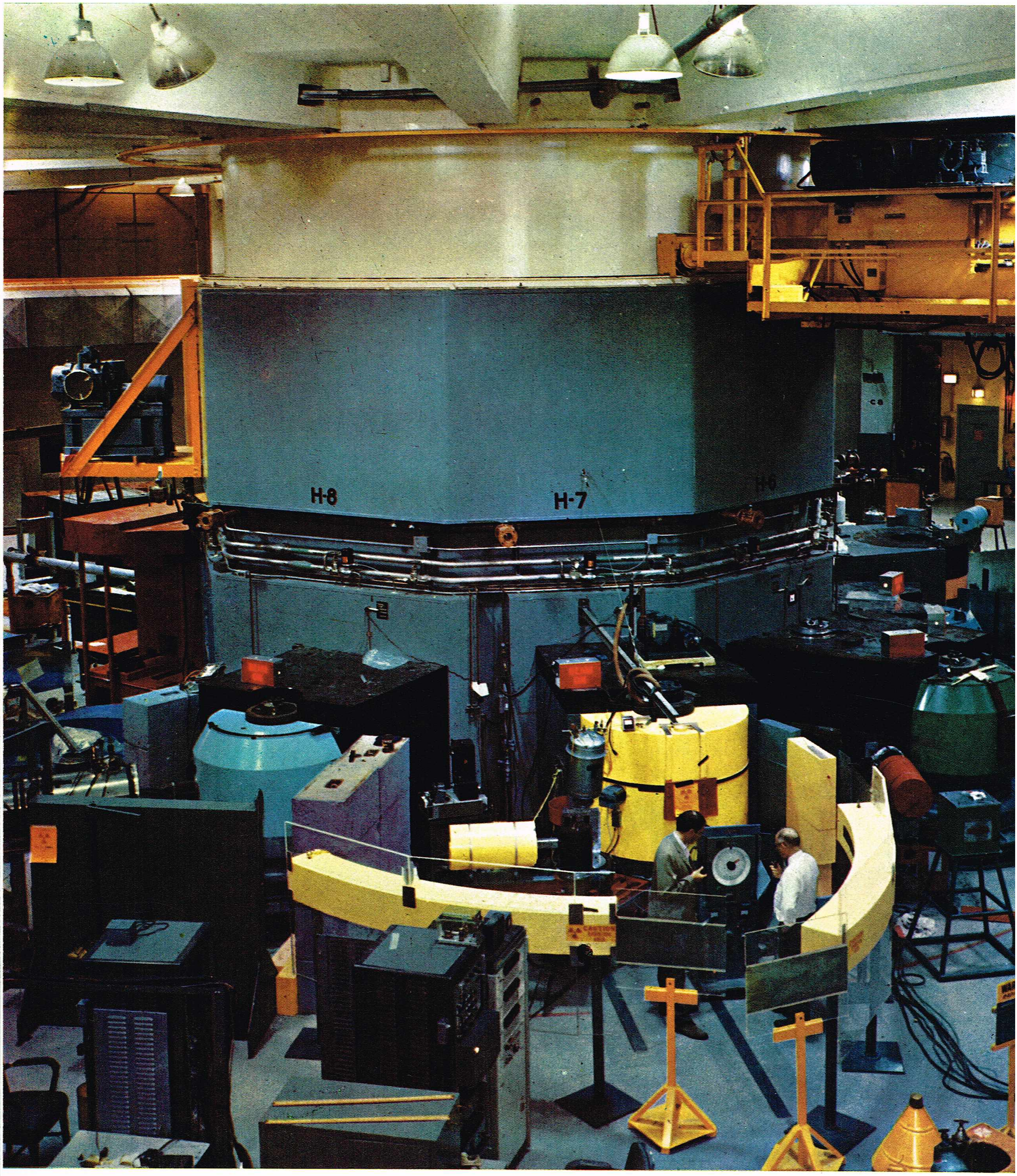
H-8
H-7

Nous pouvons donc exprimer $\frac{dr}{dt}$ en fonction de r :

$$(23) \qquad \frac{dr}{dt} = \sqrt{\frac{2}{\mu}\,[E - U\,(r)] - \frac{L^2}{\mu^2 r^2}}$$

Nous avons maintenant tout ce qu'il faut pour écrire l'équation de la trajectoire, c'est-à-dire pour exprimer θ en fonction de r (ou r en fonction de θ). Écrivons en effet la loi de conservation du moment cinétique :

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{L}{\mu r^2}$$

Remplaçons dt par son expression en fonction de dr, d'après la relation **(23)** :

$$dt = \frac{dr}{\sqrt{\frac{2}{\mu}\,[E - U\,(r)] - \frac{L^2}{\mu^2 r^2}}}$$

Nous avons alors $d\theta = \frac{L}{\mu r^2} \cdot \frac{dr}{\sqrt{\frac{2}{\mu}\,[E - U\,(r)] - \frac{L^2}{\mu^2 r^2}}}$

soit encore

$$(24) \qquad \theta = \int \frac{L}{\mu r^2 \sqrt{\frac{2}{\mu}\,[E - U\,(r)] - \frac{L^2}{\mu^2 r^2}}}\,dr + K$$

K étant une constante déterminée par les conditions initiales.

La relation **(24)** est donc l'équation de la trajectoire en coordonnées polaires; elle dépend évidemment de la nature de l'interaction, donc de la forme de la fonction $U\,(r)$. Nous verrons dans un prochain chapitre que, dans le cas d'une interaction en $\frac{1}{r^2}$ (interaction électrostatique ou gravitationnelle), les trajectoires obtenues sont des coniques (parabole, ellipse ou hyperbole).

Considérons maintenant le cas d'une collision : la particule projectile, à distance suffisamment grande, n'est pratiquement pas soumise à l'interaction $U\,(r)$, de sorte que sa trajectoire est rectiligne avant et après l'interaction. Considérons la *figure* 27 ; la particule venant de gauche ($\theta_0 = \pi$) avec une vitesse $\vec{v}_0$ subit l'interaction et s'éloigne dans une direction déterminée par l'angle θ_1 ; son énergie cinétique initiale est $E = \frac{1}{2}\mu v_0^2$; son moment cinétique est $L = \mu b v_0$, où b est le *paramètre d'impact*, c'est-à-dire la distance de O à la droite support de $\vec{v}_0$. La particule s'approche jusqu'à une distance minimale $OH = r_m$ correspondant à un angle θ_m. Si le potentiel d'interaction est à symétrie sphérique, OH est la bissectrice de l'angle $\pi - \theta_m$; l'angle de déviation θ_1 vaut donc

$$\theta_1 = \pi - 2\,(\pi - \theta_m) = 2\,\theta_m - \pi$$

Or θ_m est lié à r_m par la relation **(24)** :

$$\theta_m = \int_{-\infty}^{r_m} \frac{L}{\mu r^2 \sqrt{\frac{2}{\mu}\,[E - U\,(r)] - \frac{L^2}{\mu^2 r^2}}}\,dr$$

La déviation est donc :

$$\theta_1 = 2 \int_{-\infty}^{r_m} \frac{b v_0 dr}{r^2 \sqrt{\frac{2}{\mu}\left[\frac{1}{2}\mu v_0^2 - U\,(r)\right] - \frac{b^2 v_0}{r^2}}} - \pi$$

soit encore :

$$(25) \qquad \theta_1 = 2 \int_{-\infty}^{r_m} \frac{b\,\frac{dr}{r^2}}{\sqrt{1 - \frac{U\,(r)}{\frac{1}{2}\mu v_0^2} - \frac{b^2}{r^2}}} - \pi$$

Cette relation nous fournit donc l'angle θ_1 de déviation qui nous manquait pour résoudre complètement le problème de la collision de deux particules tel que nous l'avons envisagé au paragraphe *Étude des chocs élastiques.* Il faut noter que nous avions alors fait l'hypothèse que les particules n'entrent en interaction qu'au moment du choc, considéré comme instantané; cela signifie que nous ne pourrons appliquer la relation **(25)** au cas des collisions instantanées que si le potentiel d'interaction $U\,(r)$ est à très courte portée, c'est-à-dire si la durée de l'interaction est très petite à l'échelle macroscopique.

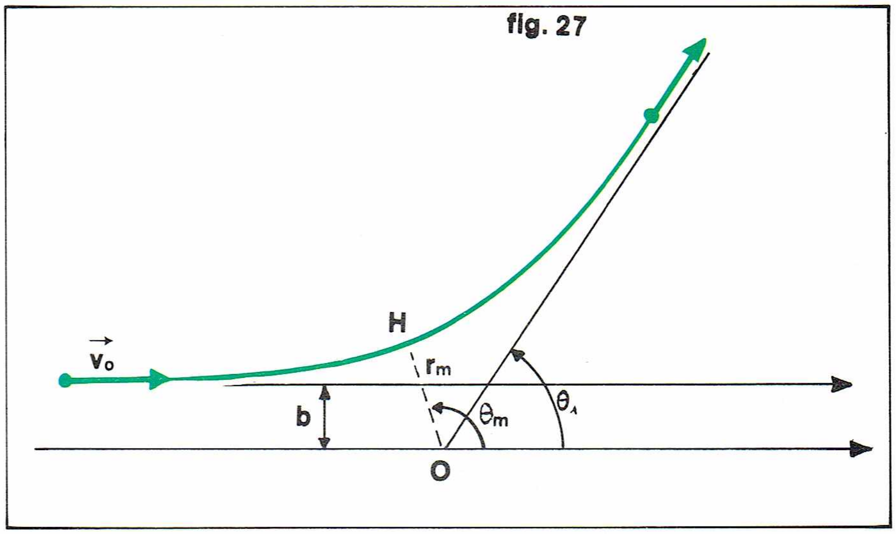

Richard Colin

▲ ***Figure 27 : interaction à distance entre deux particules.***

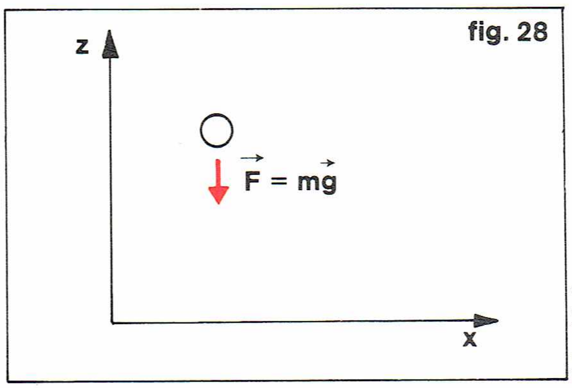

Richard Colin

◀ ***Figure 28 : point matériel en chute libre.***

Autres exemples d'applications de la conservation de l'énergie

Champ de pesanteur - Champ électrostatique

Nous avons déjà utilisé l'exemple physique du champ de pesanteur au paragraphe *Loi de conservation de l'énergie.* Un objet de masse m dans le champ de pesanteur terrestre est soumis à une force $\vec{F} = m\vec{g}$, dirigée vers le bas, où $\vec{g}$ est l'*accélération de la pesanteur* (*fig.* 28) ; $\vec{g}$ varie un peu avec l'altitude et la latitude, mais vaut en moyenne 9,81 m/s². Cette force dérive du potentiel $U\,(z) = + mgz$, où g est le module du vecteur $\vec{g}$; en effet

$$F_x = -\frac{dU}{dx} = 0, \quad F_y = -\frac{dU}{dy} = 0, \quad F_z = -\frac{dU}{dz} = -mg.$$

La force est donc bien dirigée vers le bas, si l'axe Oz est dirigé vers le haut.

Supposons qu'un objet de masse m soit lancé vers le haut, à partir d'une altitude z_0, à une vitesse v_0. Quelle altitude atteindra-t-il ? Nous devons nous rappeler que son énergie totale doit rester constante. Initialement, son énergie cinétique est $\frac{1}{2}mv_0^2$, et son énergie potentielle est mgz_0 ; son énergie totale est donc :

$$E = \frac{1}{2}mv_0^2 + mgz_0$$

Lorsqu'il atteindra son altitude maximale z_1, sa vitesse sera nulle; son énergie cinétique le sera donc aussi, de sorte que son énergie totale sera égale à son énergie potentielle mgz. Nous pouvons donc écrire :

$$\frac{1}{2}mv_0^2 + mgz_0 = mgz_1$$

◀ ***Page ci-contre, vue du réacteur à haut flux (Hight Flux Beam Research Flux Beam Research Reactor) du laboratoire de Brookhaven.***

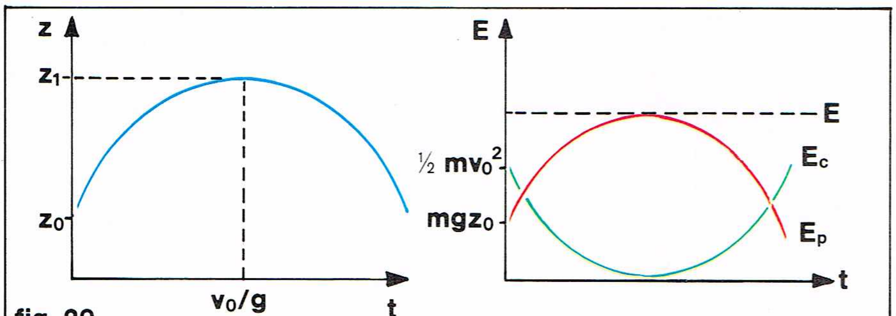

fig. 29

Richard Colin

▲ ***Figure 29 : évolution de l'altitude, de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle pour un point matériel lancé verticalement dans le champ de pesanteur.***

soit encore $z_1 = z_0 + \frac{1}{2}\frac{v_0^2}{z}$. Sur la *figure* 29, on voit l'évolution de z, de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle au cours du mouvement.

Tout cela n'est valable que si l'on reste au voisinage de la Terre, dans une région où g est constant. Si tel n'est pas le cas, l'énergie potentielle est une énergie gravitationnelle, qui est donc de la forme :

$$U = -\frac{\mathcal{G}Mm}{r}$$

où m est la masse de l'objet, M celle de la Terre, r la distance de l'objet au centre de la Terre, et $\mathcal{G}$ la constante de gravitation ($\mathcal{G} = 6{,}67 \cdot 10^{-11}$ N · m²/kg²). Nous avons déjà rencontré la force de gravitation (voir *Référentiels non inertiels particuliers*). Supposons que nous lancions un objet de la surface de la Terre et cherchons quelle vitesse initiale minimale nous devons lui imprimer pour qu'il échappe à l'attraction terrestre, c'est-à-dire pour qu'il puisse atteindre une distance infinie; la vitesse minimale avec laquelle il atteint cette distance infinie est une vitesse nulle. A l'infini, l'énergie potentielle U (r) est aussi nulle; l'énergie totale, somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle, doit donc être nulle. Or, au départ, cette énergie vaut

$$E = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{\mathcal{G}Mm}{R}$$

où R est le rayon de la Terre. Le théorème de conservation de l'énergie implique donc :

$$0 = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{\mathcal{G}Mm}{R}$$

La vitesse de libération vaut donc :

$$v_l = \sqrt{2\frac{\mathcal{G}M}{R}} \simeq 11 \text{ km/s}$$

Il faut noter que la vitesse de libération est indépendante de la masse de l'objet.

Si la vitesse initiale v_0 imprimée à l'objet est inférieure à la vitesse de libération, l'objet atteindra une certaine altitude z et retombera; cette altitude est donnée par l'équation :

$$\frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{\mathcal{G}Mm}{R} = -\frac{\mathcal{G}Mm}{R+z}$$

soit

$$z = \frac{R}{\frac{2\,\mathcal{G}M}{v_0^2 R} - 1}$$

On vérifie que z devient infini si $v_0 = v_l$.

Si l'on cherche à libérer un objet de la pesanteur terrestre en le lançant d'une altitude z, on peut très facilement démontrer que la vitesse de libération devient :

$$v_l = \sqrt{2\frac{\mathcal{G}M}{R+z}}$$

Cela signifie que, si le lancer s'effectue d'une altitude $z = 3$ R (soit 18 000 km), la vitesse de libération sera deux fois plus faible que si le lancer s'effectuait à la surface de la Terre; quant à l'énergie à fournir, c'est-à-dire l'énergie cinétique, elle est quatre fois plus faible, car elle est proportionnelle au carré de la vitesse. C'est la raison pour laquelle, lors des vols lunaires, les vaisseaux spatiaux sont tout d'abord mis sur orbite autour de la Terre, au lieu d'être envoyés directement vers la Lune; l'économie d'énergie ainsi réalisée est considérable.

Le champ électrostatique obéit aux mêmes équations que le champ de pesanteur. L'énergie potentielle d'une masse m dans le champ d'une masse M est, nous l'avons vu :

$$U(r) = -\frac{\mathcal{G}Mm}{r}$$

L'énergie potentielle d'une charge électrique q dans le champ d'une charge électrique Q est :

$$U(r) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Qq}{r} = qV(r)$$

où V (r) est le *potentiel électrostatique* créé par la charge Q.

La constante $\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$ vaut $9 \cdot 10^9$. La différence de signe vient de ce que deux masses (qui sont toujours de même signe) s'attirent, tandis que deux charges de même signe se repoussent.

Supposons qu'un électron, initialement au repos en un point où V = 0, atteigne sous l'effet du champ électrique un point où V = 1 000 volts, et cherchons la vitesse v qu'il a acquise : initialement, son énergie totale est nulle; lorsqu'il atteint le point où V = 1 000 volts, son énergie totale est :

$$E = \frac{1}{2}mv^2 + eV$$

où m est la masse de l'électron ($m = 10^{-30}$ g) et e sa charge ($e = -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ coulomb).

La conservation de l'énergie s'écrit :

$$0 = \frac{1}{2}mv^2 + eV$$

soit

$$v = \sqrt{-\frac{2\,eV}{m}} \simeq 6 \cdot 10^5 \text{ m/s}$$

La quantité $e \times V$, énergie potentielle d'un électron dans un potentiel V, est très souvent utilisée; l'unité d'énergie la plus usuelle en physique atomique et nucléaire est l'*électron-volt* (symbole : eV), qui est l'énergie potentielle d'un électron dans un potentiel de 1 volt (1 V) ; 1 eV vaut donc $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ joule.

Force de rappel linéaire

Considérons un ressort de longueur au repos l_0; si nous lui faisons subir une élongation x, il exerce une force de rappel F = — Cx, où C est la constante d'élasticité du ressort. Cherchons à exprimer l'énergie potentielle élastique. Lorsque l'on va d'une élongation x_1 à une élongation x_2, la force de rappel exerce un travail :

$$W_{12} = \int_{x_1}^{x_2} F dx$$

$$= \int_{x_1}^{x_2} - Cx dx = -\frac{C}{2}(x_2^2 - x_1^2)$$

Or, par définition, $W_{12} = U(x_1) - U(x_2)$; par conséquent l'énergie potentielle élastique est

$$U(x) = +\frac{C}{2}x^2$$

L'énergie potentielle est proportionnelle à x^2, donc elle est la même, que le ressort soit comprimé ($x < 0$) ou étiré ($x > 0$). Supposons que nous donnions au ressort une élongation $x_0 > 0$ et que nous le lâchions sans vitesse initiale; nous aurons à tout instant :

$$\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}Cx^2 = \frac{1}{2}Cx_0^2$$

La vitesse va donc s'accroître tandis que x va diminuer; la vitesse sera maximale au moment où l'on passera par la position d'équilibre ($x = 0$) :

$$v_{max} = x_0\sqrt{\frac{C}{m}}$$

La vitesse va alors diminuer à nouveau tandis que le ressort se comprimera; elle s'annulera pour $x = x_0$, puis croîtra à nouveau : on assistera à des oscillations autour de la position d'équilibre. Les phénomènes oscillatoires sont d'ailleurs caractéristiques des systèmes où l'énergie potentielle est proportionnelle au carré d'une variable.

Le champ en r^{-2}

Dans ce chapitre, nous étudierons l'interaction entre deux particules sans dimensions exerçant l'une sur l'autre une force $\vec{F}$ proportionnelle à l'inverse du carré de leur distance r, et portée par la droite joignant les deux particules (*fig.* 30) :

$$\vec{F} = Kr^{-2}\vec{u}$$

Si $K > 0$, l'*interaction est attractive ;* c'est le cas de l'interaction gravitationnelle ou de l'interaction électrostatique entre deux charges de signes contraires.

Si $K < 0$, l'*interaction est répulsive ;* c'est le cas de l'interaction électrostatique entre deux charges de même signe.

L'interaction gravitationnelle ou newtonienne s'exprime, nous l'avons vu, sous la forme

$$\vec{F}_g = \frac{\mathcal{G}\, m_1 m_2}{r^2}\vec{u}$$

où m_1 et m_2 sont les masses des deux particules, et $\mathcal{G}$ la constante de gravitation. Cette loi est la **loi de Newton.**

L'interaction électrostatique ou coulombienne s'exprime sous la forme

$$\vec{F}_c = -\frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{q_1 q_2}{r^2}\vec{u}$$

où q_1 et q_2 sont les charges des deux particules, et où ε est la permittivité du milieu. Dans le vide :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 = \frac{1}{36\,\pi}\,10^{-9} \text{ u SI (unité du Système international)}$$

Cette loi est la **loi de Coulomb.**

Pour avoir une idée des ordres de grandeur respectifs des forces de Coulomb et de Newton, on peut examiner grossièrement les forces qui entrent en jeu dans l'atome d'hydrogène.

Cet atome est constitué d'un proton et d'un électron. Tous deux portent des charges de signes contraires, mais de même valeur absolue. La charge de l'électron vaut $-1{,}6 \cdot 10^{-19}$ coulomb. La masse de l'électron est environ 2 000 fois plus petite que celle du proton qui vaut à peu près $0{,}16 \cdot 10^{-26}$ kg. Le rapport de la force de gravitation à la force électrostatique est donc de l'ordre de 10^{-40}. La force de gravitation est une force extrêmement faible ; elle ne devient sensible que pour les corps de masse énorme, et parce que la matière dans son ensemble est toujours électriquement neutre.

On peut examiner le problème de l'interaction entre deux corps sous deux aspects : soit en faisant intervenir les forces existant entre ces deux corps à l'aide des expressions données ci-dessus, soit en utilisant l'énergie potentielle du système des deux corps. La seconde approche possède l'avantage de faire intervenir des quantités scalaires et non pas vectorielles. C'est celle que nous allons utiliser.

L'énergie potentielle, d'où dérivent les forces électriques et de gravitation, peut se mettre sous la forme

$$U = \frac{-K}{r} + \text{Cte}$$

On choisit généralement $U(r) = 0$ pour $r \to \infty$, ce qui revient à annuler la constante d'intégration.

Dans le cas de l'*interaction gravitationnelle :*

$$U(r) = -\frac{\mathcal{G}\, m_1 m_2}{r}$$

Dans le cas de l'*interaction électrostatique :*

$$U(r) = +\frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{q_1 q_2}{r}$$

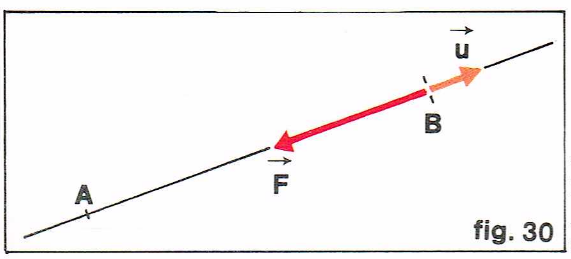

fig. 30

Richard Colin

◀ *Figure 30 : interaction entre deux particules A et B.*

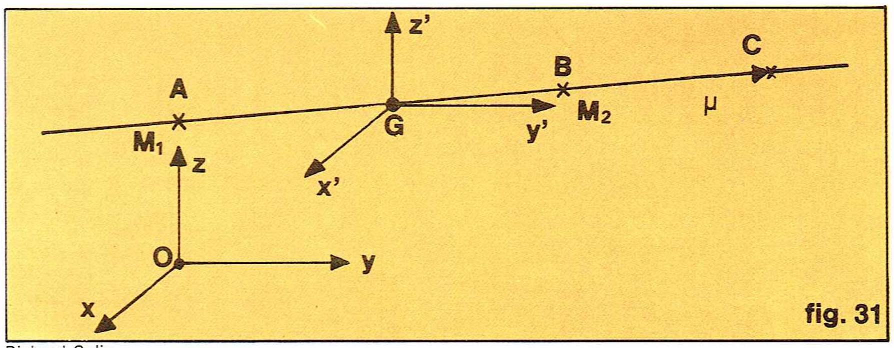

fig. 31

Richard Colin

▲ *Figure 31 : interaction entre deux corps et référentiel barycentrique.*

Mouvement de deux particules en interaction newtonienne

Les forces d'interaction en r^{-2} interviennent très souvent dans la nature et il peut sembler *a priori* arbitraire de se restreindre, comme nous l'avons spécifié, au cas de deux particules sans dimensions. Il est évident que l'interaction entre trois ou plusieurs corps se rencontre fréquemment (par exemple un système de plusieurs étoiles en interaction newtonienne), mais le problème de leurs mouvements respectifs devient alors très compliqué.

D'autre part, en appliquant le théorème de Gauss, on peut montrer simplement que le champ gravitationnel créé par une sphère pleine en un point quelconque extérieur à la sphère est le même que celui créé par un point matériel situé au centre de la sphère et ayant la même masse qu'elle. Cela nous permet de nous restreindre au cas de points matériels.

Nous allons maintenant réduire le problème de l'interaction entre deux particules isolées à un problème à un seul corps, en faisant intervenir le repère barycentrique de ces deux particules. Selon le cas envisagé, le barycentre est le centre de gravité ou le centre de charges. Nous allons étudier maintenant plus spécifiquement l'interaction newtonienne, mais les calculs peuvent se transposer au cas des interactions coulombiennes.

Soit donc deux points A et B, de masses respectives M_1 et M_2 (*fig.* 31) ; soit $Oxyz$ le référentiel du laboratoire supposé galiléen, et $Gx'y'z'$ le référentiel barycentrique d'axes parallèles aux axes du laboratoire.

$$\overrightarrow{OG} = \frac{M_1\overrightarrow{OA} + M_2\overrightarrow{OB}}{M_1 + M_2}$$

On a $\vec{F}_{AB} = M_1\dfrac{d^2\overrightarrow{AO}}{dt^2} = \dfrac{\mathcal{G}M_1M_2}{AB^2}\vec{u}$

$$\vec{F}_{BA} = M_2\frac{d^2\overrightarrow{BO}}{dt^2} = -\frac{\mathcal{G}M_1M_2}{AB^2}\vec{u}$$

D'où $\dfrac{d^2\overrightarrow{AO}}{dt^2} - \dfrac{d^2\overrightarrow{BO}}{dt^2} = \dfrac{d^2\overrightarrow{AB}}{dt^2} = \dfrac{\mathcal{G}M_1M_2}{AB^2}\vec{u}\left(\dfrac{1}{M_1} + \dfrac{1}{M_2}\right)$

Posons $\mu = \dfrac{M_1M_2}{M_1 + M_2}$: μ est appelée la *masse réduite* du système.

On obtient alors :

$$\mu\frac{d^2\overrightarrow{AB}}{dt^2} = \frac{\mathcal{G}\,M_1M_2}{AB^2}\vec{u}$$

Posons $\overrightarrow{GC} = \overrightarrow{AB}$. Le problème se réduit alors à l'étude du mouvement du point C de masse μ autour du centre de gravité G et tel que $GC = AB = r$. Par une simple homothétie, on pourra ensuite, connaissant le mouvement du point C, retrouver les mouvements des points A et B. Dans le repère barycentrique, la force agissant sur le point C est une force centrale, c'est-à-dire qu'elle passe par le point fixe G. Il y a donc conservation du moment cinétique. La direction du moment cinétique reste constamment perpendiculaire au vecteur $\overrightarrow{GC} = \vec{r}$ et à la vitesse $\vec{v} = \dfrac{d\overrightarrow{GC}}{dt}$, donc la trajectoire est plane et peut être représentée dans son plan par des coordonnées polaires (*fig.* 32).

On a $\vec{r} \wedge \mu\vec{v} = C$.

▶ *Figure 32 — loi des aires : la planète se déplace de telle sorte que pendant des intervalles de temps égaux Δt, le rayon vecteur balaye des aires égales.*

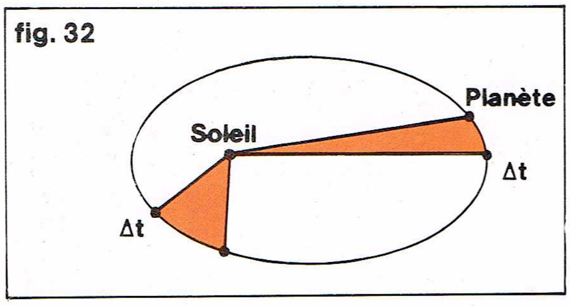

Richard Colin

Cette équation devient en coordonnées polaires :

(26) $r^2 d\theta = \frac{C}{\mu}\, dt$; $\frac{C}{\mu}$ est la *constante des aires.*

Cette équation ne contient que des dérivées premières par rapport au temps.

Le système est isolé. L'énergie mécanique E du système se conserve donc :

$$E = E_c + U(r)$$

$$E = \frac{1}{2}\mu v^2 + U(r)$$

où E_c est l'énergie cinétique.

En coordonnées polaires, cette équation devient :

$$\textbf{(27)} \qquad E = \frac{1}{2}\mu\left[\left(\frac{dr}{dt}\right)^2 + r^2\left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2\right] + U(r)$$

Cette deuxième équation ne contient, elle aussi, que des dérivées premières par rapport au temps. Les équations **(26)** et **(27)** constituent un système que nous allons résoudre.

$$\begin{cases} r^2 \dfrac{d\theta}{dt} = \dfrac{C}{\mu} \\ \dfrac{1}{2}\mu\left[\left(\dfrac{dr}{dt}\right)^2 + r^2\left(\dfrac{d\theta}{dt}\right)^2\right] - \dfrac{\mathcal{G}\, M_1M_2}{r} = E \end{cases}$$

Éliminons le temps grâce à la première équation :

$$\frac{dr}{dt} = \frac{dr}{d\theta} \times \frac{d\theta}{dt} = \frac{C}{\mu r^2}\frac{dr}{d\theta}$$

Si on fait le changement de variable $u = \frac{1}{r}$, on obtient :

$$\frac{dr}{dt} = \frac{C}{\mu r^2}\frac{dr}{d\theta} = -\frac{C}{\mu}\frac{du}{d\theta}$$

et

$$r^2\left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2 = \frac{C^2}{\mu^2 r^2} = \frac{C^2 u^2}{\mu^2}$$

Donc $\frac{C^2}{2\mu}\left[\left(\frac{du}{d\theta}\right)^2 + u^2\right] - \mathcal{G}M_1M_2 u = E$;

en dérivant par rapport à θ, cela donne

$$0 = \frac{du}{d\theta}\left[-\mathcal{G}\, M_1M_2 + \frac{C^2}{\mu}\left(\frac{d^2u}{d\theta^2} + u\right)\right]$$

La *première solution* $\frac{du}{d\theta} = 0$ conduit à des trajectoires circulaires.

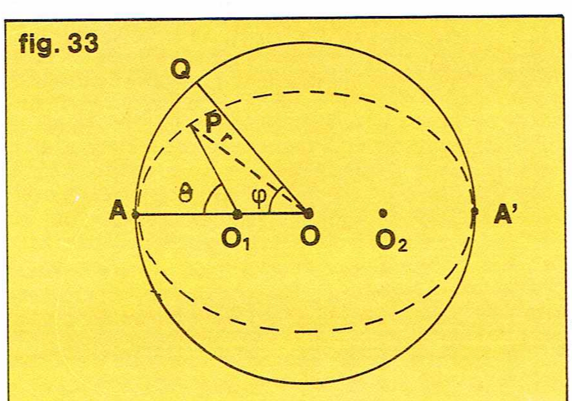

▶ *Figure 33 : construction de l'orbite elliptique de foyers O_1 et O_2.*

Richard Colin

La *deuxième solution* est celle de l'équation différentielle

$$\frac{d^2u}{d\theta^2} + u = \frac{\mathcal{G}\, M_1M_2\mu}{C^2}$$

La *solution générale* de cette équation est

$$\textbf{(28)} \qquad \frac{1}{r} = u = \frac{\mathcal{G}\, M_1M_2\mu}{C^2} + \sqrt{\frac{(\mathcal{G}\, M_1M_2\mu)^2}{C^4} + \frac{2\,E}{\mu\, C^2}}\ \cos(\theta - \theta_0)$$

On peut faire en sorte, par le choix des axes, de prendre $\theta_0 = 0$. La solution **(28)** est donc de la forme générale :

$$r = \frac{p}{1 + C\cos\theta}$$

C'est une *conique* de foyer G, de paramètre $p = \frac{C^2}{\mathcal{G}M_1M_2\mu}$ fixé par les conditions initiales et d'excentricité :

$$e = \sqrt{1 + \frac{2\,EC^2}{\mu^3\mathcal{G}^2M_1^2M_2^2}}$$

Le genre de la conique s'obtient en comparant e à 1 :

si $e < 1$, donc si $E < 0$, c'est une *ellipse ;*
si $e = 1$, et si $E = 0$, c'est une *parabole ;*
si $e > 1$, et si $E > 0$, c'est une *hyperbole.*

On voit aisément que la condition sur E donne également une condition sur la vitesse initiale. En effet, l'énergie totale E peut s'écrire :

$$E = \frac{1}{2}\mu v_0^2 - \frac{\mathcal{G}M_1M_2}{r}$$

Suivant qu'un point matériel aura une vitesse initiale inférieure, égale, ou supérieure à la vitesse critique $v' = \sqrt{\frac{2\,\mathcal{G}M_1M_2}{r\mu}}$, il décrira une ellipse, une parabole ou une hyperbole.

On peut maintenant revenir aux deux corps considérés initialement, A et B. Les trajectoires de A et B sont données par :

$$GA = -\frac{p}{1 + e\cos\theta}\cdot\frac{M_2}{M_1 + M_2}$$

$$GB = \frac{p}{1 + e\cos\theta}\cdot\frac{M_1}{M_1 + M_2}$$

Orbites elliptiques des planètes

Pour l'étude d'une orbite elliptique, on introduit souvent, au lieu du paramètre p, le demi-grand axe a. On a $p = a(1 - e^2)$, a et e étant les *constantes géométriques* de l'ellipse. Les équations que nous avons vues nous permettent de déterminer la forme et la grandeur de l'orbite elliptique d'une planète mais non sa position dans l'espace. Nous allons maintenant, l'orbite étant connue (a et e données), préciser les coordonnées de la planète en fonction du temps.

Soit l'orbite de foyers O_1 et O_2, de centre O, de périhélie A et d'aphélie A' (*fig.* 33). On trace le cercle de centre O, tangent à l'ellipse en A. L'ellipse s'en déduit en faisant une contraction des ordonnées dans le rapport $\sqrt{1 - e^2}$. Dans la contraction, au point Q du cercle correspond le point P de l'ellipse. L'angle $\widehat{AOQ} = \varphi$ est *l'anomalie excentrique* du point P, l'angle $\widehat{AO_1P} = \theta$ est *l'anomalie vraie.*

Soit T la période et t le temps. On peut démontrer l'équation suivante, appelée *équation de Kepler :*

$$\varphi - e\sin\varphi = \frac{2\pi t}{T}$$

Cette équation transcendante peut être résolue numériquement si l'on connaît t. A partir de φ, on peut déduire l'angle θ et la distance $OP = r$ grâce aux expressions suivantes :

$$r = a - e\cos\varphi$$

$$\cos\theta = \frac{\cos\varphi - e}{1 - e\cos\varphi}$$

◀ ***La comète Ikeya-Seki, photographiée en 1965 (Lick Observatory).***

Lick Observatory

Mouvement des astres. Lois de Kepler

Mouvement des planètes

Les trois **lois de Kepler** s'énoncent de la façon suivante :

— les centres des planètes décrivent des ellipses relativement au centre du Soleil. Le centre du Soleil occupe l'un des foyers de ces ellipses ;

— les aires balayées par un rayon joignant le centre du Soleil à la planète en des temps égaux sont égales ;

— le carré de la période est proportionnel au cube du demi-grand axe de l'ellipse.

La *première loi* a déjà été démontrée : dans le référentiel barycentrique, le Soleil et la planète effectuent tous deux des trajectoires elliptiques. Or le centre de gravité du système Soleil + planète est très proche du centre du Soleil. Pratiquement, le centre de gravité du système Soleil + planète et le centre du Soleil sont confondus, et la Terre décrit une ellipse autour du Soleil.

La *deuxième loi* découle directement de la conservation du moment cinétique. On a vu que

$$r^2 d\theta = \frac{C}{\mu}\, dt\,;$$

la quantité $r^2 d\theta$ représente le double de l'aire dA balayée par le vecteur $\overrightarrow{CA} = r$ pendant le temps dt. Donc

$$\frac{dA}{dt} = \frac{C}{2\,\mu}$$

$\frac{dA}{dt}$ est appelée *vitesse aréolaire :* elle représente l'aire balayée par le vecteur $\overrightarrow{OA}$ par unité de temps. On voit que cette vitesse est constante : les aires balayées en des temps égaux sont donc égales.

La *troisième loi* se déduit aisément de la deuxième et de la première. La vitesse aréolaire est constante :

$$\frac{dA}{dt} = \frac{C}{2\,\mu}$$

Elle vaut de plus : $\frac{dA}{dt} = \frac{\pi ab}{T}$

où a et b sont respectivement le demi-grand axe et le demi-petit axe de l'orbite, et où T est la période. πab est la surface de l'ellipse, d'où $T = \frac{2\,\pi ab\mu}{C}$.

En remplaçant C par sa valeur, on obtient

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{\mathcal{G} M_S}{4\,\pi^2} \text{ (où } M_S \text{ est la masse du Soleil)}$$

à condition de se placer dans le cas où la masse de la planète est petite devant celle du Soleil.

Les satellites des planètes obéissent aux mêmes lois de Kepler, l'un des foyers de la trajectoire étant occupé par la planète centrale. Ils présentent un grand intérêt en mécanique céleste. En effet, la simple observation astronomique de leur orbite permet de calculer la masse de la planète.

Mouvement des comètes

Les comètes décrivent par rapport au Soleil des trajectoires elliptiques, paraboliques, ou faiblement hyperboliques. Les comètes dont la trajectoire est elliptique sont dites périodiques, le Soleil occupant l'un des foyers de l'ellipse. La plus connue des comètes périodiques est celle de Halley dont la période est de 76 ans. Elle est signalée pour la première fois en 467 avant J.-C., et est passée à son périhélie en l'an 1066 (elle est représentée sur la tapisserie de Bayeux) ; elle doit revenir en 1986.

Satellites artificiels

• *Vitesse de libération*

Un satellite lancé de la Terre n'a une trajectoire elliptique que dans le cas où sa vitesse est inférieure à une vitesse limitée v_0, dite *vitesse de libération* et telle que :

$$v_0 = \sqrt{\frac{2\,\mathcal{G}\,(M_1 + M_2)}{r_0}} = \sqrt{2\, r_0 g_0}$$

r_0 étant le rayon de la Terre, et g_0 l'intensité de la pesanteur au sol.

Si la vitesse du satellite est supérieure ou égale à v_0, la trajectoire est parabolique, et le satellite échappe à l'attraction terrestre.

A la surface de la Terre, $v_0 = 11$ km/s.

A la surface de la Lune, $v_0 = 2{,}4$ km/s.

• *Énergie nécessaire pour mettre un satellite sur orbite*

On l'obtient facilement en faisant la différence de l'énergie mécanique totale du satellite sur orbite et de l'énergie mécanique du satellite sur la Terre.

Supposons la trajectoire circulaire. Lorsque le satellite subit des frottements, l'énergie mécanique totale E dimi-

▶ **Isaac Newton** ***concevant sa célèbre théorie. Dessin de Gotlib (extrait de*** **la Rubrique-à-brac, 1970, Dargaud éditeur*).***

nue. Appelons r le rayon de la trajectoire, et M_T et M_S respectivement la masse de la Terre et celle du satellite. L'énergie mécanique totale est reliée à r par l'expression $E = -\frac{\mathcal{G}M_TM_S}{2r}$. Donc, à une diminution de l'énergie mécanique totale correspond une diminution du rayon de la trajectoire.

La vitesse du satellite augmente corrélativement puisque la vitesse varie avec la racine carrée de l'inverse du rayon. On constate donc que le freinage du satellite a pour effet d'augmenter sa vitesse, c'est-à-dire d'augmenter son énergie cinétique, et de diminuer le rayon de l'orbite, c'est-à-dire de diminuer son énergie potentielle. Le bilan énergétique total correspond naturellement à une perte d'énergie mécanique.

- *Satellite géostationnaire*

Ces satellites sont utilisés dans les télécommunications. Leur trajectoire est circulaire et leur période vaut évidemment 24 heures, ce qui permet de calculer l'altitude h qui vaut 35 770 km.

Interaction répulsive

Nous avons vu en introduction que l'interaction pouvait être répulsive. Cela peut s'observer dans le cas de l'interaction coulombienne entre deux particules chargées de signes opposés.

Une particule de masse m, de charge q, lancée à la vitesse $\vec{v_0}$ le long d'une droite passant à la distance b d'une cible O de charge Q, de signe opposé à q, et au repos, est déviée lorsqu'elle arrive au voisinage de la charge Q. Sa trajectoire est une hyperbole (*cf. fig.* 27), et l'angle de déviation θ, qui est l'angle formé par les deux asymptotes de l'hyperbole, est donné par :

$$\cot g \frac{\theta}{2} = \frac{4\pi\varepsilon_0 m v_0^2 b}{qQ}$$

Cette formule est appelée **formule de Rutherford** et est utilisée notamment en physique nucléaire.

Le champ de pesanteur terrestre

Identité de la masse gravitationnelle et de la masse inerte

Si l'on évalue la masse d'un corps en mesurant l'accélération γ que produit sur le corps une force connue F, la masse $M_i = \frac{F}{\gamma}$ est appelée *masse d'inertie*.

On peut également évaluer la masse d'un corps en mesurant l'attraction gravitationnelle F qu'exerce sur lui un autre corps, la Terre par exemple : la masse M_g ainsi définie vaut : $M_g = \frac{Fr^2}{M_T\mathcal{G}}$ où $\mathcal{G}$ est la constante de gravitation, M_T la masse de la Terre et r la distance du corps au centre de la Terre. Cette masse M_g est la *masse gravitationnelle*.

Expérimentalement, on trouve toujours, à la précision des mesures près, que masse d'inertie et masse gravitationnelle sont proportionnelles quel que soit le lieu et pour tous les corps. En prenant une valeur convenable pour $\mathcal{G}$, on rend le facteur de proportionnalité égal à 1. Il y a donc identité entre masse inerte et masse gravitationnelle. Cette identité a été vérifiée expérimentalement, à l'aide d'une balance de torsion, par Newton, puis par Eötvös, avec une précision de 10^{-8}.

Il est même possible expérimentalement de montrer l'équivalence entre la masse inerte et la masse gravitationnelle du photon.

A un photon d'énergie $h\nu$, on peut attribuer une masse inerte $m_i = \frac{h\nu}{c^2}$ (sa masse au repos est, bien sûr, nulle). Si le photon « tombe » dans un champ gravitationnel, il prend une petite quantité d'énergie

$$\Delta\ (h\nu) = m_g g L$$

où L est la longueur de chute, g l'intensité du champ de gravitation et m_g la masse gravitationnelle du photon. On doit donc observer un léger déplacement de fréquence vers l'extrémité haute fréquence du spectre, déplacement qui, s'il y a identité entre masse inerte et masse gravitationnelle, est donné par :

$$\Delta\nu = \frac{\nu g L}{c^2}$$

Ceci a été effectivement observé par Pound et Rebka en 1960, en utilisant une source de rayons gamma. D'une façon analogue, un photon, dans la partie bleue du spectre visible qui quitte une étoile, perd une partie de son énergie, et sa fréquence sera déplacée du côté rouge du spectre. Cet effet est appelé déplacement gravitationnel vers le rouge ; il sera d'autant plus accentué que le rapport de la masse de l'étoile à son rayon est plus grand, et donc particulièrement important dans le cas d'une naine blanche. Il ne faut pas confondre ce déplacement vers le rouge avec celui que l'on peut observer dans le spectre lumineux émis par des galaxies lointaines. On pense que celles-ci s'éloignent de la Terre à très grande vitesse, et que le déplacement vers le rouge est dû à l'effet Doppler-Fizeau, analogue optique de l'effet Doppler acoustique.

L'ensemble des résultats expérimentaux suggère donc l'identité des masses inertes et gravitationnelles. C'est à partir de cette constatation qu'Einstein a construit la théorie de la relativité généralisée.

Champ de pesanteur terrestre

L'attraction que la Terre exerce sur un corps de masse m est donnée par

$$F = \frac{\mathcal{G}M_T m}{r^2}$$

On voit que l'intensité de la force $\vec{F}$ est proportionnelle à la masse m, par l'intermédiaire d'un coefficient $g = \frac{\mathcal{G}M_T}{r^2}$ appelé *intensité* ou *accélération de la pesanteur*.

A la surface de la Terre, l'intensité de la pesanteur est à peu près égale à 9,80 m/s²; elle varie légèrement suivant le lieu où l'on se trouve sur la Terre, et suivant l'altitude.

Variation de g avec l'altitude

Soit un corps de masse m à l'altitude h. A cette altitude, l'intensité de la pesanteur sera

$$g = \frac{\mathcal{G}M_T}{(R+h)^2} \text{ où R est le rayon de la Terre.}$$

Déplaçons le corps de masse m sur la verticale de façon à le placer sur la surface terrestre. Alors l'intensité de la pesanteur est

$$g_0 = \frac{\mathcal{G}M_T}{R^2} \qquad \text{donc} \qquad g = \frac{g_0}{(1 + h/R)^2}$$

L'intensité de la pesanteur diminue lorsque l'altitude augmente. Cette expression peut, pour des altitudes faibles, se mettre sous la forme $g = g_0\,(1 - 2\,h/R)$. La démonstration n'est valable que s'il n'existe pas, à une altitude supérieure au niveau de la mer, de masse susceptible d'attirer une masse m. Nous avons donc implicitement supposé qu'il n'y avait pas de relief à la surface de la Terre. On peut tenir compte des masses attirantes situées au-dessus du niveau de la mer, ce qui introduit des termes correctifs dans le calcul de g.

Si maintenant, en tenant compte de la distance au centre de la Terre et de la répartition des masses attirantes au-dessus du niveau de la mer, on fait, en chaque lieu, la carte des intensités de la pesanteur rapportées au niveau de la mer, on doit retrouver, pour une même latitude, la même valeur de g_0. Ce n'est pas le cas, et il semble que les masses attirantes situées au-dessus du niveau de la mer exercent une attraction moins importante que le calcul ne le suggère.

On admet à présent qu'il y a répartition isostatique des masses au-dessus d'une surface située à 120 km environ sous le niveau de la Terre : au-dessus de cette surface des colonnes verticales de même section contiennent la même quantité de matière. En quelque sorte, la croûte terrestre, constituée de matières relativement légères, puisque la densité moyenne est de 2,7, flotte sur un magma plus dense en obéissant aux lois de l'hydrostatique. Il en résulte une nouvelle correction sur les valeurs de g rapportées au niveau de la mer. On voit alors qu'à la même latitude, g a la même valeur, abstraction faite toutefois de certaines anomalies locales. Ces anomalies locales correspondent à des anomalies dans la répartition de masses à l'intérieur de l'écorce terrestre ; il s'agit par exemple des gisements métalliques ou des couches poreuses susceptibles de contenir des hydrocarbures. On conçoit donc que l'étude de ces anomalies locales soit utilisée comme méthode de prospection.

Variation de g avec la latitude

Il apparaît expérimentalement que l'intensité de la pesanteur augmente régulièrement avec la latitude. La valeur de g rapportée au niveau de la mer passe de 9,78 m/s^2 à l'équateur à 9,83 m/s^2 au pôle. Cet effet est dû à la rotation de la Terre.

Supposons que la Terre soit une sphère parfaite, et plaçons-nous dans un référentiel lié à la Terre (donc suivant son mouvement de rotation sur elle-même). Soit un corps immobile à la surface de la Terre. Le poids du corps est la résultante des forces qui lui sont appliquées. Il y a la force gravitationnelle créée par la Terre, qui est la plus importante et qui est la seule considérée en première approximation. Mais il y a également les forces d'inertie d'entraînement dues au mouvement de la Terre par rapport à un repère galiléen. Il n'y a pas de forces de Coriolis puisque le corps est en équilibre dans le repère fixé à la Terre.

Définissons la direction du poids par rapport au rayon terrestre passant par le corps M de masse m (*fig.* 34). L'axe Oz est pris suivant le rayon terrestre, Mx est pris perpendiculaire à Oz dans le plan défini par le rayon OM et le diamètre pôle Nord-pôle Sud, My est le troisième axe.

La *force de gravitation* s'écrit suivant les trois axes :

$$F_x = 0 \quad F_y = 0 \quad F_z = -\frac{\mathcal{G} M_T m}{R^2}$$

La *force d'inertie* d'entraînement s'écrit :

$$F_{ex} = m\omega^2 R \sin\theta \cos\theta$$
$$F_{ey} = 0$$
$$F_{ez} = m\omega^2 R \cos^2\theta$$

La résultante des deux forces, qui est donc le poids $\vec{P}$, n'est pas colinéaire à la force gravitationnelle $\vec{F}$ mais forme avec elle un petit angle α tel que

$$\operatorname{tg} \alpha \simeq \frac{\omega^2 R^3 \sin\theta \cos\theta}{g M_T}$$

La direction du vecteur $\vec{g}$ n'est donc pas rigoureusement celle du rayon terrestre. En ce qui concerne son intensité, il est aisé de calculer la valeur de g :

$$g \simeq -\omega^2 R \cos^2 \lambda + \frac{\mathcal{G} M_T}{R^2}$$

En particulier, au pôle, g vaut : $g_p = \dfrac{\mathcal{G} M_T}{R^2}$

et à l'équateur : $g_E = \dfrac{\mathcal{G} M_T}{R^2} - \omega^2 R$

On trouve une différence qui vaut 0,035 m/s^2. Or, expérimentalement, $g_p - g_E = 0{,}05$ m/s^2. Le calcul que nous avons fait est encore approché. Il convient, si l'on désire interpréter la variation de g avec la latitude, de tenir compte de l'aplatissement de la Terre, aplatissement qui est dû à l'existence des forces d'inertie d'entraînement. Les effets, sur la valeur de la constante g, de l'aplatissement de la Terre et des forces d'inertie d'entraînement ne peuvent être séparés. Grâce à la variation de g avec la latitude, que l'on connaît expérimentalement, on peut obtenir la forme moyenne de la Terre, appelée *géoïde*. Ce géoïde coïncide pratiquement avec un *ellipsoïde de révolution* aplati aux pôles et d'excentricité 1/297.

Marées

Dans le paragraphe précédent, nous avons négligé deux forces que nous allons maintenant envisager : la résultante $\vec{F'}$ des forces d'attraction exercées par les autres astres (essentiellement le Soleil et la Lune), et la force d'inertie d'entraînement due au mouvement de la Terre autour du Soleil : $\vec{F'_e}$. La *résultante* de toutes les forces appliquées au point M de masse m est :

$$\vec{R} = \vec{F} + \vec{F_e} + \vec{F'} + \vec{F'_e} = m\vec{g} + \vec{F'} - m\vec{\gamma}.$$

$m\vec{g}$ est un terme ne dépendant que de la Terre, $\vec{\gamma}$ est l'accélération du centre de gravité de la Terre, $m\vec{\gamma}$ est

▼ *A gauche, figure 34 : le champ de pesanteur terrestre résulte de la composition du champ de gravitation et de la force centrifuge due à la rotation de la Terre. A droite, une marée basse dans le Cotentin.*

fig. 34

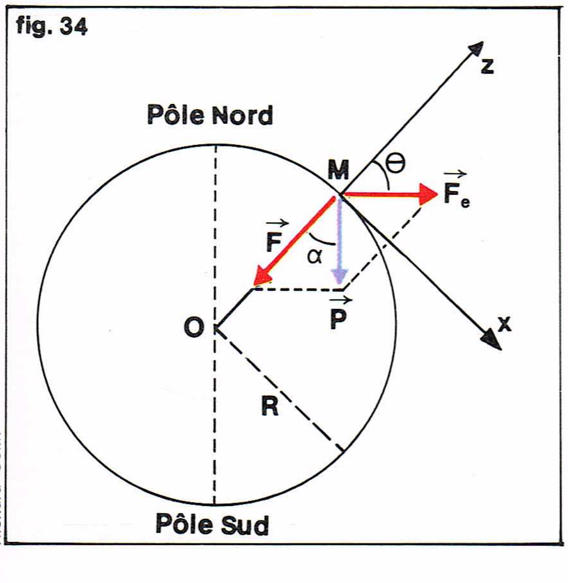

Richard Colin

P.M. Tatopoulos - Explorer

▶ ***Figure 35 : trajectoire parabolique d'un projectile dans le champ de pesanteur, en négligeant la résistance de l'air. Page ci-contre, à gauche, figure 36 ; trajectoire d'un projectile dans l'air : la portée est considérablement diminuée.***

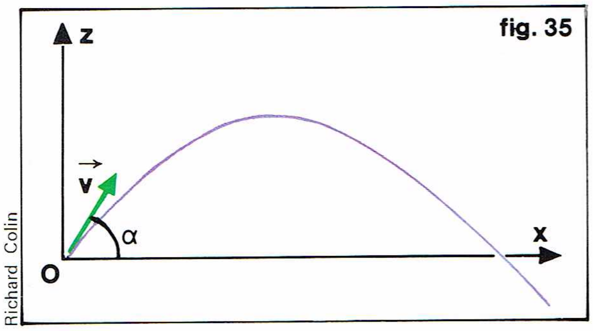

Richard Colin

pratiquement l'attraction gravitationnelle que les autres astres exercent au centre de gravité de la Terre.

Le terme $\vec{F'} - m\vec{\gamma}$ représente donc la variation de champ gravitationnel entre le centre et la surface de la Terre. Si l'attraction gravitationnelle est celle de la Lune, elle vaut à peu près $\frac{g}{9} \cdot 10^{-6}$; si l'attraction est due au Soleil, sa valeur est de $\frac{g}{19} \cdot 10^{-6}$. Les deux variations sont très faibles devant g et ne peuvent pas être mises en évidence lors de mesures de l'intensité de g. Cependant, lorsque l'action s'effectue sur des masses considérables comme celles des mers, la contribution du terme $\vec{F'} - m\vec{\gamma}$ devient très importante :

si $\vec{g}$ et $(\vec{F'} - m\vec{\gamma})$ ont même direction, l'action des astres ne modifie que l'intensité totale de la pesanteur ;

si $\vec{g}$ et $(\vec{F'} - m\vec{\gamma})$ ont des directions différentes, la surface de la mer ne reste pas perpendiculaire à $\vec{g}$ mais se modifie de façon à être perpendiculaire à la résultante $\vec{R}$.

C'est le phénomène des *marées*, qui est d'autant plus important que la masse d'eau est plus forte. Les marées sont très faibles dans les mers fermées. Elles peuvent atteindre une dizaine de mètres d'amplitude suivant la forme de la côte et du plateau continental (par exemple 12,6 m au Mont-Saint-Michel).

Il est à remarquer que la variation de direction de $\vec{g}$ peut être à la fois calculée et mesurée en laboratoire. On constate que cette variation n'est pas aussi grande que prévue. En effet, l'écorce terrestre n'est pas rigide et subit également l'action du Soleil et de la Lune : ce sont les marées de l'écorce terrestre. Le sol, par rapport auquel les expériences sont réalisées, n'est pas fixe dans le repère lié à la Terre où l'on s'est initialement placé.

Chute des corps

Étudions le mouvement d'un corps de masse m dans le champ terrestre. Si l'espace considéré n'est pas trop grand, on peut considérer le champ terrestre comme uniforme. Négligeons pour le moment la résistance de l'air, ainsi que la force de Coriolis.

Mouvement vertical

Dans un repère lié à la Terre, l'équation de mouvement du centre de gravité de l'objet est :

$$z = \frac{1}{2} gt^2 + v_0 t + z_0$$

Si la vitesse initiale est nulle, on peut choisir convenablement l'origine de façon que $z = \frac{1}{2} gt^2$.

Le mouvement dans le vide est indépendant de la masse du corps.

Trajectoire d'un projectile

Soit un projectile lancé en O, origine d'un repère Oxyz, avec une vitesse $\vec{v}$ dans le plan Oxz et faisant l'angle α avec l'axe Ox (*fig.* 35). Donc :

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{d^2y}{dt^2} = 0 ; \quad \frac{d^2z}{dt^2} = g$$

Par deux intégrations successives, on obtient (g, accélération de la pesanteur, est négatif dans le repère choisi) :

$$\begin{cases} z = + \frac{1}{2} gt^2 + v_0 t \sin \alpha \\ x = v_0 t \cos \alpha \end{cases}$$

L'équation de la trajectoire est :

$$z = \frac{1}{2} \frac{g}{v_0^2 \cos \alpha} x^2 + x \operatorname{tg} \alpha$$

La trajectoire est *parabolique*.

On peut calculer l'ensemble des points que le projectile lancé à la vitesse $\vec{v}$ peut atteindre lorsque l'angle α varie. Cet ensemble est situé à l'intérieur d'une parabole appelée *parabole de sûreté*.

Résistance de l'air

Nous avons négligé la résistance de l'air dans les expressions précédentes. On peut tenir compte de ce facteur en introduisant dans les équations du mouvement un terme de frottement dépendant de la vitesse. La forme de la trajectoire est alors très différente, et la portée peut se trouver considérablement diminuée (*fig.* 36).

▼ ***Le bombardement de Dunkerque en 1695 ; une peinture de l'École française du XVIIe siècle.***

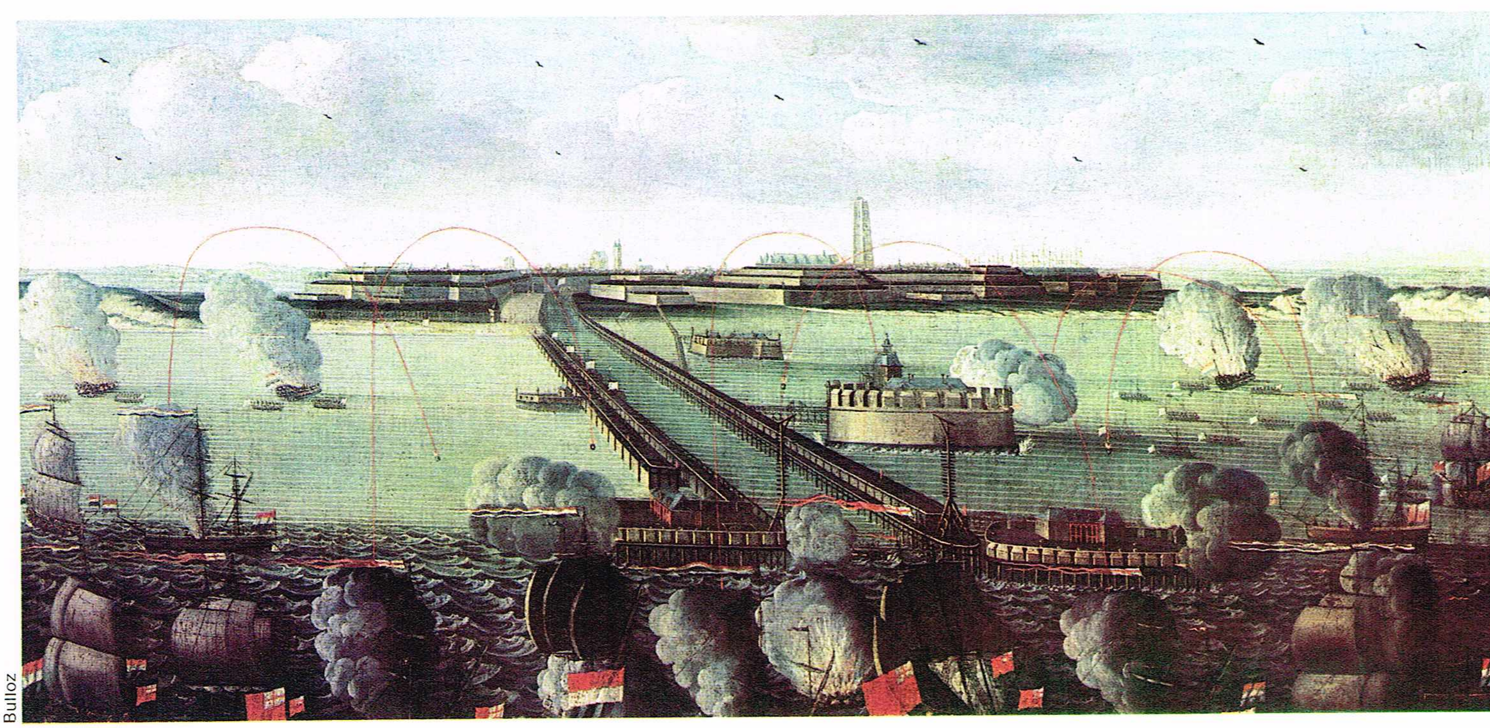

Bulloz

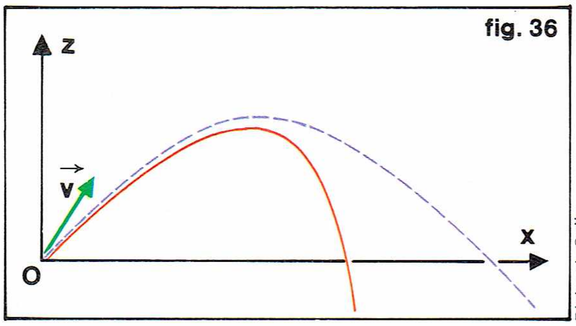

Richard Colin

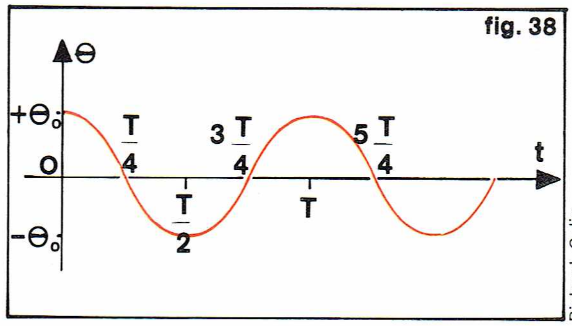

Richard Colin

◀ *A droite, figure 38 ; variation en fonction du temps de l'angle du pendule avec la verticale : mouvement sinusoïdal.*

Les oscillateurs

Nous abordons maintenant un sujet très important par ses applications dans tous les domaines de la physique ; en effet, bien des phénomènes que nous allons décrire ont des analogues extrêmement fidèles dans les domaines de l'électricité, de l'acoustique, de la physique moléculaire, etc. Les lois que nous allons établir sont donc extrêmement générales et aisément transposables.

La raison pour laquelle ces lois sont très générales est la suivante : les phénomènes d'oscillation apparaissent chaque fois que la réponse d'un système à une sollicitation est proportionnelle à celle-ci et en sens opposé, c'est-à-dire chaque fois que les phénomènes sont linéaires. Or c'est presque toujours le cas en physique lorsque la sollicitation n'éloigne pas trop le système de son état d'équilibre : par exemple, lorsqu'on tire sur un ressort suffisamment peu pour que celui-ci ne se déforme pas irréversiblement.

Exemple élémentaire d'oscillateur : le pendule simple

Considérons le pendule simple représenté sur la *figure* 37 ; c'est une masse ponctuelle m suspendue à un point fixe P par un fil de masse négligeable, de longueur l. En gardant le fil tendu, nous faisons dévier la masse m d'un angle θ par rapport à la verticale : la masse s'élève donc d'une quantité :

$$h = l - l\cos\theta = l\,(1 - \cos\theta)$$

Rappelons-nous que nous devons rester près de la position d'équilibre pour que le système reste linéaire : l'angle θ doit être petit, de sorte que $\cos\theta \simeq 1 - \frac{\theta^2}{2}$ et par conséquent : $h \simeq \frac{1}{2} l\theta^2$.

Écrivons la loi de conservation de l'énergie : la masse m s'étant élevée de h, son *énergie potentielle* a varié de la quantité :

$$U = mgh = \frac{1}{2} mgl\theta^2$$

Si nous lâchons le pendule sans vitesse initiale à partir d'une position θ_0, il acquiert une vitesse v : $v = l\frac{d\theta}{dt}$.

Son *énergie cinétique* est donc :

$$E_c = \frac{1}{2} ml^2 \left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2$$

L'*énergie totale* est donc :

$$E = \frac{1}{2} mgl\theta^2 + \frac{1}{2} ml^2 \left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2$$

L'énergie totale restant constante, elle est égale à l'énergie initiale :

$$\frac{1}{2} mgl\theta_0^2 = \frac{1}{2} mgl\theta^2 + \frac{1}{2} ml^2 \left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2$$

Écrivons maintenant la conservation du moment cinétique : la force extérieure appliquée est le poids, dirigé verticalement vers le bas, donc le moment appliqué est :

$$M = lmg\sin\theta$$

soit encore :

$$M \simeq lmg\theta \text{ puisque } \theta \text{ est petit.}$$

Le moment cinétique, lui, vaut :

$$\vec{J} = \vec{r} \wedge m\vec{v}$$

soit : $J = -ml^2 \frac{d\theta}{dt}$

Écrivons le théorème du moment cinétique :

$$M = \frac{dJ}{dt}$$

soit ici : $lmg\theta = -ml^2 \frac{d^2\theta}{dt^2}$

ou encore $\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{g}{l}\theta = 0$

Cette dernière équation est l'*équation du mouvement ;* c'est une équation différentielle linéaire du second ordre dont on vérifie facilement que la solution est :

$$\theta = \theta_0 \cos(\omega t + \varphi)$$

où ω, appelé *pulsation du mouvement*, vaut : $\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$

ω est lié à la fréquence f par la relation : $\omega = 2\pi f$

et à la période T par la relation : $\omega = \frac{2\pi}{T}$.

L'angle de phase, φ, dépend des conditions initiales ; on voit par exemple que si $\theta = \theta_0$ à l'instant $t = 0$, on a $\varphi = 0$.

Vérifions qu'une telle solution sinusoïdale, dont l'allure est indiquée sur la *figure* 38, satisfait bien à la loi de conservation de l'énergie :

$$\frac{1}{2} mgl\theta_0^2 = \frac{1}{2} mgl\theta^2 + \frac{1}{2} ml^2 \left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2$$

Divisons les deux membres par ml :

$$\frac{1}{2} g\theta_0^2 = \frac{1}{2} g\theta^2 + \frac{1}{2} l \left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2$$

Richard Colin

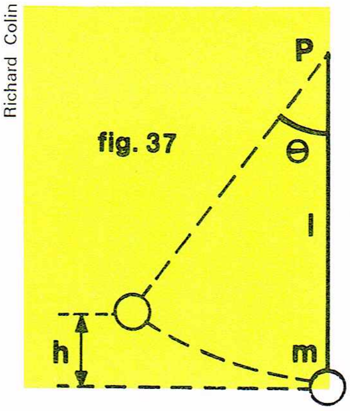

▲ *Figure 37 : représentation graphique du pendule simple.*

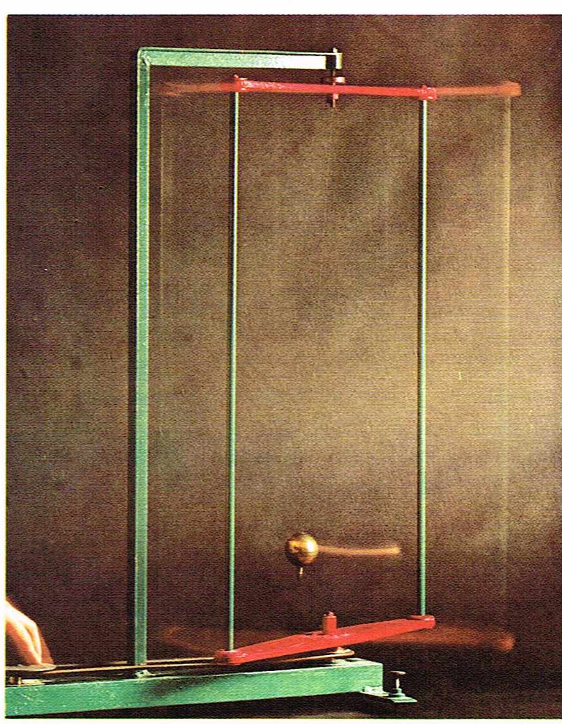
Snark International

◀ *On réserve généralement le nom de pendule à un solide pouvant tourner autour d'un axe horizontal et soumis uniquement à la pesanteur.*

▶ A gauche, figure 39 ; élongation d'un ressort en fonction du temps : c'est un mouvement sinusoïdal autour de la valeur mg/C, qui est l'élongation de l'équilibre. A droite, figure 40 : un circuit électrique oscillant est constitué d'une inductance L *et d'une capacité* C.

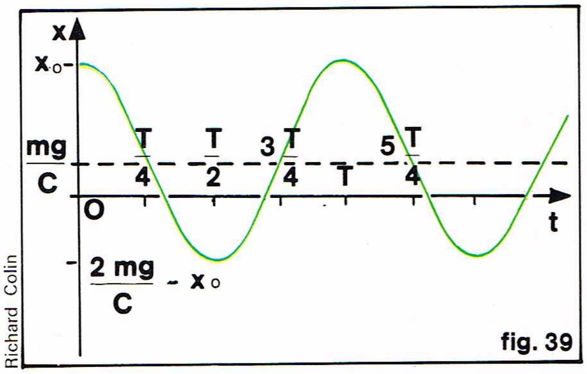

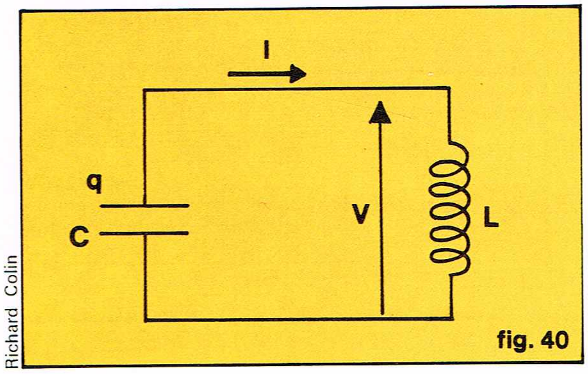

Remplaçons θ par sa valeur $\theta_0 \cos \omega t$:

on a alors $\frac{d\theta}{dt} = - \omega\theta_0 \sin \omega t$, et par conséquent :

$$\frac{1}{2} g\theta_0^2 = \frac{1}{2} g\theta_0^2 \cos^2 \omega t + \frac{1}{2} l\omega^2\theta_0^2 \sin^2 \omega t$$

Le premier membre est indépendant du temps ; le second membre doit l'être aussi, ce qui exige que $g = \omega^2 l$.

On retrouve donc bien la relation $\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$

Nous trouvons sur cet exemple les caractéristiques d'un *mouvement oscillatoire :* énergie potentielle proportionnelle au carré de l'écart par rapport à l'équilibre, et équation du mouvement du type :

$$\frac{d^2y}{dt^2} + \omega^2 y = 0,$$

dont les solutions sont de la forme :

$$y = A \cos (\omega t + \varphi)$$

Ce mouvement est périodique et se reproduit donc indéfiniment semblable à lui-même. Ceci n'est manifestement pas plausible physiquement, car chacun sait que, à cause de divers frottements, un pendule finit toujours par cesser d'osciller.

Système masse-ressort-Oscillateur amorti

Système masse-ressort

Considérons maintenant le système constitué par un ressort de constante de rappel C auquel est accrochée une masse *m*. A l'équilibre, le ressort a une longueur l_0 ; étirons-le d'une quantité *x*. La masse *m* est soumise à deux forces : la force de pesanteur *mg*, dirigée vers le bas, et la force de rappel — C*x* ; la force totale agissant sur le point matériel *m* est donc : F = *mg* — C*x*.

Appliquons la loi fondamentale de la dynamique :

$$mg - Cx = m \frac{d^2x}{dt^2}$$

soit **(29)**

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{C}{m} x = g$$

Cette équation différentielle est différente de la précédente en ce sens que le second membre de l'équation n'est pas nul. On sait que, dans un tel cas, la solution est la somme de la solution générale de l'équation sans second membre (c'est-à-dire l'équation que l'on aurait si *g* était nul) et d'une solution particulière de l'équation complète. Cette dernière solution est évidente : on voit que $x = \frac{m}{C} g$ satisfait à l'équation complète. Quant à l'équation sans second membre, nous avons vu que sa solution est de la forme :

$$x = A \cos (\omega t + \varphi) \quad \text{avec} \quad \omega = \sqrt{\frac{C}{m}}$$

La solution de l'équation **(29)** est donc :

$$x(t) = A \cos (\omega t + \varphi) + \frac{m}{C} g$$

et la vitesse est donnée par :

$$v(t) = - A\omega \sin (\omega t + \varphi)$$

Supposons que l'on ait lâché la masse *m* sans vitesse initiale, d'une position $x = x_0$; nous pouvons donc écrire les deux conditions :

$$x(0) = x_0 = A \cos \varphi + \frac{m}{C} g$$

$$v(0) = 0 = - A\omega \sin \varphi$$

La dernière condition exige $\varphi = 0$, car A est nécessairement différent de zéro (sinon, il n'y aurait pas de mouvement). La première condition s'écrit donc :

$$x_0 = A + \frac{m}{C} g, \quad \text{ou} \quad A = x_0 - \frac{m}{C} g$$

Par conséquent, la loi du mouvement peut s'écrire :

(30) $$x(t) = \left(x_0 - \frac{m}{C} g\right) \cos \omega t + \frac{m}{C} g$$

La *figure* 39 représente l'élongation *x* (*t*) en fonction du temps. La différence entre la courbe *x* (*t*) et la courbe précédente θ (*t*) réside dans le fait que, pour $x = \frac{T}{4}$, l'élongation ne s'annule pas puisqu'elle vaut $\frac{mg}{C}$: elle est égale à l'élongation qu'aurait le ressort à l'équilibre, en l'absence de mouvement. Si l'on excepte cette différence, ces deux courbes sont très analogues : dans les deux cas, la force est proportionnelle à l'écart par rapport à la position d'équilibre (c'est-à-dire à θ ou à *x*) ; dans les deux cas, l'énergie potentielle comprend un terme proportionnel au carré de l'écart par rapport à la position d'équilibre.

Ces conditions sont très générales et sont caractéristiques des *oscillateurs harmoniques sans frottement ;* sur la *figure* 40 est représenté un circuit électrique comprenant une inductance L et une capacité C : c'est aussi un oscillateur harmonique. En effet, à l'équilibre, la charge *q* portée par le condensateur est nulle ; supposons que l'on fasse apparaître une charge *q* sur les armatures : cela entraînera l'apparition d'un courant $q = \frac{dI}{dt}$, donc d'une différence de potentiel (électrique) :

$$V = L \frac{dI}{dt} = L \frac{d^2q}{dt^2},$$

équation qui est analogue à $F = m \frac{d^2x}{dt^2}$.

De plus, V est lié à *q* par $V = \frac{q}{C}$, qui est très semblable à la relation F = C*x* dans le cas du ressort. Nous voyons que le potentiel électrique V joue le rôle de la force, et

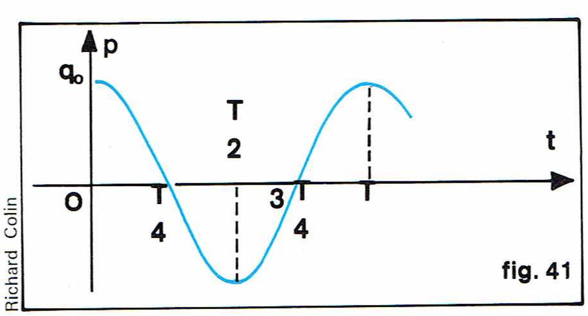

▶ Figure 41 : variation, en fonction du temps, de la charge q du condensateur.

la charge q celui de l'élongation : le système constitue un oscillateur harmonique de pulsation :

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

La *figure* 41 montre la variation de q en fonction du temps en supposant $q = q_0$ et $I = 0$ à l'instant initial. Dans tous ces exemples, nous avons supposé qu'il n'y a aucun frottement susceptible de gêner l'oscillation. Ce n'est jamais le cas : dans le circuit LC, par exemple, les fils ont certainement une résistance dans laquelle se dissipe de l'énergie par effet Joule.

Oscillateur harmonique à frottement solide

Supposons, comme indiqué sur la *figure* 42, que l'on ait un ressort auquel est accrochée une masse qui repose sur un plan horizontal. La force exercée par le ressort est horizontale, le poids est vertical, mais compensé par la réaction du plan ; il n'intervient donc pas dans l'équation du mouvement, qui est simplement notre équation :

$$m\frac{d^2x}{dt^2} + Cx = 0,$$

si l'on considère qu'il n'y a pas de frottement.

Si, au contraire, on suppose que, par suite du frottement, il s'exerce sur la masse m une force de frottement F constante, qui s'oppose en permanence au mouvement, quel que soit son sens, l'équation devient :

$$m\frac{d^2x}{dt^2} + Cx = \lambda F$$

où $\lambda = 1$ si $\frac{dx}{dt} < 0$ et $\lambda = -1$ si $\frac{dx}{dt} > 0$

Comme dans les cas précédents, nous supposons que nous soumettons le ressort à une élongation x_0, et que nous lâchons la masse m sans vitesse initiale. Deux cas sont possibles : si le module de la force de rappel $|Cx_0|$ est inférieur au module de la force de frottement $|F|$, le solide restera immobile ; si, au contraire, la force de frottement est inférieure à la force de rappel, le solide aura tendance à revenir vers sa position d'équilibre.

Supposons que nous soyons dans ce deuxième cas :

$$|Cx_0| > |F|$$

soit encore $x_0 > \frac{F}{C}$

ou $x_0 < -\frac{F}{C}$

Reprenons notre équation :

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{C}{m}x = \frac{\lambda}{m}F$$

Comme l'équation **(29)**, cette équation a un second membre et a donc une solution de la forme :

$$x = A\cos(\omega t + \varphi) + \frac{\lambda}{C}F \qquad \textbf{(31)}$$

avec ici $\omega = \sqrt{\frac{C}{m}}$, $\varphi = 0$ et $A = x_0 - \frac{\lambda}{C}F$

La différence entre cette expression de $x(t)$ et celle qui est donnée par la relation **(30)** réside dans le fait que A dépend de $\frac{dx}{dt}$ puisque λ en dépend. Si l'on a initialement allongé le ressort, x_0 est positif ; la masse m va avoir tendance à revenir vers sa position d'équilibre, donc sa vitesse est négative : $\frac{dx}{dt} < 0$

et par conséquent $\lambda = 1$.

Exprimons $\frac{dx}{dt}$:

$$\frac{dx}{dt} = -\left(x_0 - \frac{\lambda}{C}F\right)\omega\sin\omega t$$

Dans la phase initiale du mouvement, nous avons vu que $\lambda = 1$:

$$\frac{dx}{dt} = -\left(x_0 - \frac{F}{C}\right)\omega\sin\omega t$$

La vitesse s'annulera pour la première fois lorsque ωt vaudra π, soit $t = \frac{T}{2}$. La position de la masse sera alors, d'après **(31)** :

$$x = -x_0 + \frac{2F}{C}$$

Deux cas se présenteront alors :

— Si $\left|-x_0 + \frac{2F}{C}\right| < \frac{F}{C}$, le module de la force de rappel du ressort $\left|C\left(-x_0 + \frac{2F}{C}\right)\right|$ sera inférieur au module F de la force de frottement : le mouvement s'arrêtera là. Cela se produira si $\frac{F}{C} < x_0 < \frac{3F}{C}$.

On remarque en particulier que, si

$$\frac{F}{C} < x_0 < \frac{2F}{C}$$

la position à laquelle le mouvement s'arrêtera sera positive, donc le mobile ne reviendra même pas jusqu'à sa position d'équilibre en l'absence de frottement ($x = 0$) ; si, au contraire, $\frac{2F}{C} < x_0 < \frac{3F}{C}$, le solide atteindra une élongation négative et s'arrêtera.

— Si $\left|-x_0 + \frac{2F}{C}\right| > \frac{F}{C}$, le module de la force de rappel sera supérieur au module de la force de frottement, donc le mobile reprendra son mouvement en sens inverse.

Dans ce dernier cas, la force de frottement deviendra négative ($\lambda = -1$), et l'équation du mouvement deviendra :

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{C}{m}x = -\frac{F}{m}$$

Cette équation, comme l'équation **(31)**, admet une solution du type :

$$x = A'\cos(\omega t + \varphi) - \frac{F}{C}$$

avec $\omega = \sqrt{\frac{C}{m}}$. La différence réside dans la nouvelle condition initiale : nous prenons comme nouvelle origine du temps l'instant où la vitesse du solide s'est annulée ; à cet instant, l'élongation valait $x = -x_0 + \frac{2F}{C}$, donc la nouvelle loi de mouvement est :

$$x = \left(-x_0 + \frac{3F}{C}\right)\cos\omega t - F$$

donc $\frac{dx}{dt} = \left(x_0 - \frac{3F}{C}\right)\omega\sin\omega t.$

La vitesse s'annule donc à nouveau au point :

$$x = x_0 - \frac{4F}{C}$$

Une discussion analogue à la précédente montre que :

— si $\frac{3F}{C} < x_0 < \frac{5F}{C}$, le mobile s'arrête ;

— si $x_0 > \frac{5F}{C}$, le mobile repart en sens inverse.

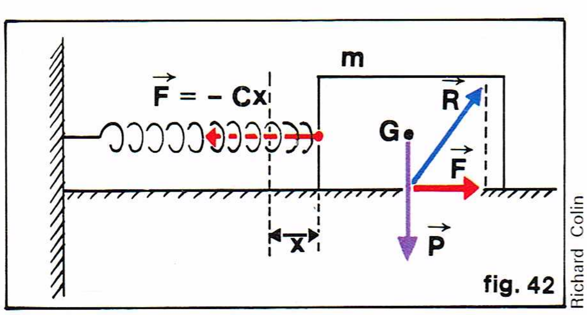

◀ ***Figure 42 ; exemple d'oscillateur harmonique amorti : le corps de masse m repose sur un plan horizontal qui exerce sur lui des forces de frottement.***

▶ Page ci-contre, en haut à gauche, figure 44 ; élongation du ressort en fonction du temps, en présence d'un frottement visqueux : régime pseudo-périodique.

Dans ce dernier cas, l'annulation suivante de la vitesse se produit pour $x = -x_0 + \frac{6\,F}{C}$; si le mobile repart à nouveau, il s'arrêtera pour $x = x_0 - \frac{8\,F}{C}$, et ainsi de suite.

La *figure* 43 montre la loi du mouvement $x\,(t)$ pour divers cas possibles. On constate que les maximums successifs sont sur une droite de pente $-\frac{4\,F}{TC}$ et les minimums successifs sur une droite de pente $+\frac{4\,F}{TC}$. On peut ainsi mesurer F. Le fait que les maximums et les minimums soient alignés est caractéristique des frottements solides.

Oscillateurs harmoniques à frottement visqueux

Nous allons maintenant étudier le cas d'un oscillateur qui subit un frottement de la part d'un liquide ou d'un gaz. L'expérience montre que, dans un tel cas, la force de frottement F est proportionnelle à la vitesse du mobile et de sens opposé à celle-ci : $F = -k\frac{dx}{dt}$.

Le principe fondamental de la dynamique s'écrit maintenant :

$$-Cx - k\frac{dx}{dt} = m\frac{d^2x}{dt^2}$$

(32) soit
$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m}\frac{dx}{dt} + \frac{C}{m}x = 0$$

Les solutions de cette équation dépendent des solutions de l'équation :

(33)
$$\alpha^2 + \frac{k}{m}\alpha + \frac{C}{m} = 0$$

- *Le discriminant de l'équation* **(33)** *est négatif.*

$$\Delta = \left(\frac{k}{m}\right)^2 - \frac{4\,C}{m} < 0$$

soit
$$\left|\frac{k}{m}\right| < \sqrt{\frac{4\,C}{m}}$$

L'équation admet deux solutions complexes :

$$\alpha_1 = -\frac{k}{2\,m} + j\sqrt{\frac{C}{m} - \left(\frac{k}{2\,m}\right)^2}$$

$$\alpha_2 = -\frac{k}{2\,m} - j\sqrt{\frac{C}{m} - \left(\frac{k}{2\,m}\right)^2}$$

Si l'on pose :

$$\frac{1}{\tau} = \frac{k}{2\,m} \quad \text{et} \quad \omega = \sqrt{\left(\frac{k}{2\,m}\right)^2 - \frac{C}{m}}$$

▼ Figure 43 : élongation du ressort en fonction du temps, en présence d'un frottement solide.

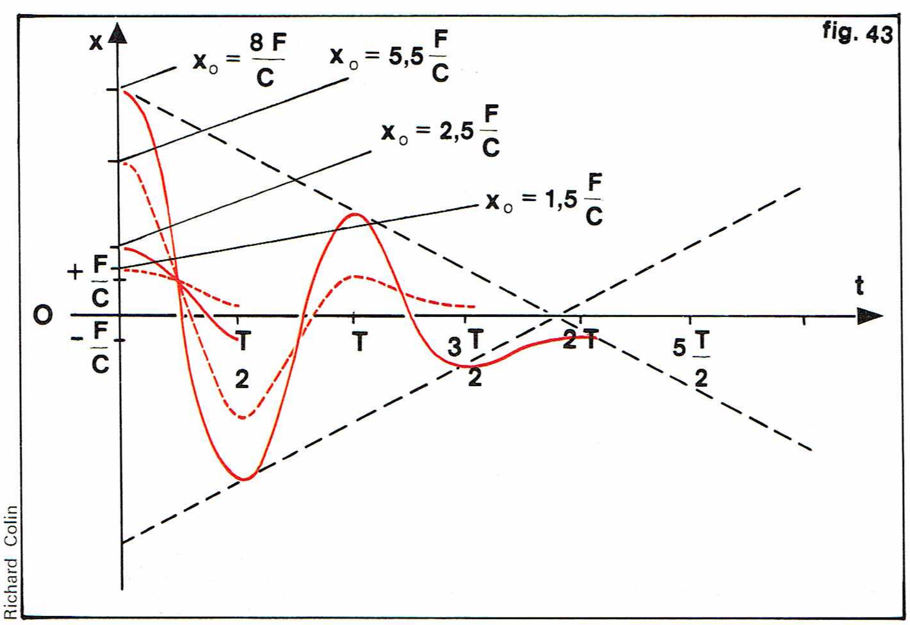

fig. 43

Richard Colin

la loi du mouvement est du type :

$$x = Ae^{-\frac{t}{\tau}}\cos(\omega t + \varphi),$$

A et ω étant déterminés par les conditions initiales. τ est appelée *constante de temps* ou *constante de relaxation* du système.

La vitesse a pour expression :

$$\frac{dx}{dt} = A\left[-\frac{1}{\tau}e^{-t/\tau}\cos(\omega t + \varphi) - e^{-t/\tau}\,\omega\,sin\,(\omega t + \varphi)\right]$$

soit

$$\frac{dx}{dt} = -Ae^{-t/\tau}\left[\frac{1}{\tau}\cos(\omega t + \varphi) + \omega\sin(\omega t + \varphi)\right]$$

Supposons que le mobile soit lâché sans vitesse initiale avec une élongation x_0 ; cela s'exprime par :

$$x_0 = A\cos\varphi$$

$$0 = \frac{1}{\tau}\cos\varphi + \omega\sin\varphi$$

De la seconde équation, on tire : $\operatorname{tg}\varphi = -\frac{1}{\omega\tau}$

Comme $\cos\varphi = \sqrt{\frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2\varphi}}$, il en résulte :

$$A = x_0\sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2\tau^2}}$$

Cherchons les autres instants t_0 où la vitesse s'annule, c'est-à-dire les maximums et les minimums de x ; d'après la relation **(33)**, ils correspondent à :

$$\operatorname{tg}(\omega t_0 + \varphi) = -\frac{1}{\omega\tau} = \operatorname{tg}\varphi$$

soit $\omega t_0 + \varphi = \varphi + n\pi$ ou encore $t_0 = n\frac{\pi}{\omega} = n\frac{T}{2}$

où n est un nombre entier ; la vitesse s'annule donc au bout de chaque demi-période (T est parfois aussi appelée *pseudo-période*).

Considérons maintenant les instants t_1 tels que :

$$\cos(\omega t_1 + \varphi) = 1$$

on a alors : $x\,(t_1) = Ae^{-\frac{t_1}{\tau}}$

Comme $\sin(\omega t_1 + \varphi) = 0$, il en résulte que, pour $t = t_1$

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{A}{\tau}e^{-\frac{t_1}{\tau}}$$

Nous voyons donc que, en ces points $t = t_1$, la fonction $x\,(t)$ a la même valeur et la même dérivée que la fonction $y\,(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau}}$: les courbes représentatives de ces deux fonctions sont tangentes.

Considérons maintenant deux instants t et $t + T$, séparés par une période ; la fonction $\cos(\omega t + \varphi)$ a la même valeur en ces deux instants, de sorte que :

$$\frac{x\,(t + T)}{x\,(t)} = \frac{e^{-\lambda(t+T)}}{e^{-\lambda t}} = e^{-\lambda T}$$

La quantité λ est appelée le *décrément logarithmique*.

La *figure* 44 représente la variation de l'élongation en fonction du temps. Une telle variation est caractéristique de ce que l'on appelle un *régime pseudo-périodique*.

- *Le discriminant de l'équation* **(33)** *est nul.*

On a donc une racine double réelle :

$$\alpha = -\frac{k}{2\,m}$$

La solution de l'équation différentielle est alors :

$$x = (At + B)\,e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{où } \tau = \frac{1}{\alpha} = \frac{2\,m}{k} = \sqrt{\frac{m}{C}}$$

A et B sont déterminés par les conditions initiales : si $x = x_0$ et $\frac{dx}{dt} = 0$, à $t = 0$ on a :

$$x = x_0\left(1 + \frac{t}{\tau}\right)e^{-\frac{t}{\tau}}$$

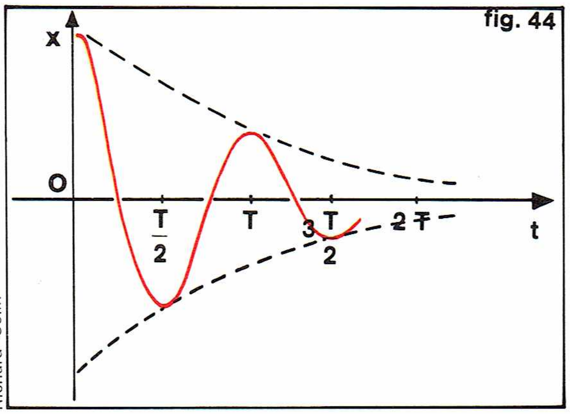

Cette fois, il n'y a pas d'oscillations : le mobile revient directement à sa position d'équilibre ; sa vitesse est maximale pour : $t = \frac{1}{\alpha} = \sqrt{\frac{m}{C}} = \frac{T_0}{2\pi}$ où T_0 est la période des oscillations qu'aurait le système en l'absence de frottement. La *figure* 45 montre l'évolution de x en fonction de t. Un tel *régime* est dit *critique*.

- *Le discriminant de l'équation* **(33)** *est positif.*

L'équation admet deux racines réelles négatives :

$$\alpha_1 = -\frac{k}{2m} + \sqrt{\left(\frac{k}{2m}\right)^2 - \frac{C}{m}}$$

$$\alpha_2 = -\frac{k}{2m} - \sqrt{\left(\frac{k}{2m}\right)^2 - \frac{C}{m}}$$

L'élongation a alors la forme :

$$x = Ae^{-\frac{t}{\tau_1}} + Be^{-\frac{t}{\tau_2}}$$

avec $\tau_1 = -\frac{1}{\alpha_1}$ et $\tau_2 = -\frac{1}{\alpha_2}$

Si, pour $t = 0$, on a $x = x_0$ et $\frac{dx}{dt} = 0$, il vient :

$$x = x_0 \left[\frac{e^{-\frac{t}{\tau_1}}}{1 - \frac{\tau_2}{\tau_1}} + \frac{e^{-\frac{t}{\tau_2}}}{1 - \frac{\tau_1}{\tau_2}} \right]$$

Le mobile revient vers sa position d'équilibre d'autant plus vite que ses temps de relaxation sont courts. Un tel régime est dit *régime apériodique*.

Les trois sortes d'équations que nous venons de voir (régime pseudo-périodique, régime critique et régime apériodique) sont caractéristiques des oscillations avec frottement visqueux et sont extrêmement générales. Elles interviennent évidemment en mécanique : les amortisseurs de voiture, par exemple, ont précisément pour rôle d'éviter que les ressorts de la suspension ne fassent subir aux passagers des oscillations pseudo-périodiques désagréables. Elles interviennent aussi en électricité : nous avons vu au paragraphe consacré au *Système masse-ressort* que, dans un circuit comportant une inductance et une capacité (circuit LC), la tension aux bornes du condensateur joue le rôle de la force et la charge du condensateur celui de l'élongation x. Si nous ajoutons maintenant, en série avec l'inductance et la capacité, une résistance R (*fig.* 46), il apparaît aux bornes du condensateur une tension supplémentaire $R_I = R\frac{dq}{dt}$; cette tension joue le rôle de force de frottement proportionnelle à $\frac{dq}{dt}$, qui est analogue à la vitesse. Les équations donnant q en fonction de t sont donc exactement les mêmes que celles donnant x en fonction de t.

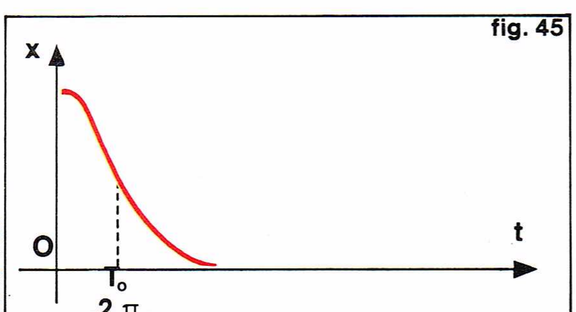

◄ ***Figure 45 ; élongation du ressort en fonction du temps, en présence d'un frottement visqueux : régime critique.***

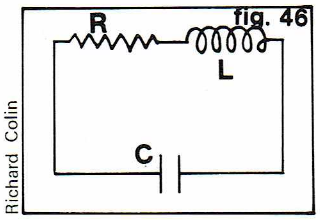

▲ ***Figure 46 : un circuit électrique oscillant amorti comprend une inductance* L, *une capacité* C *et une résistance* R.**

Oscillations forcées - Résonance

Les phénomènes que nous allons étudier maintenant sont d'une importance fondamentale dans tous les domaines de la physique : mécanique, électricité, optique, électronique, physique quantique, physique nucléaire, physique du solide, etc. Ils se résument essentiellement dans le fait que, lorsque l'on soumet un système à une force alternative de fréquence ω et que le système présente une fréquence propre ω_0, il se passe des phénomènes très particuliers si ω est égal à ω_0 ou en est voisin.

Oscillations forcées

Reprenons l'équation **(32)** décrivant le mouvement d'un système oscillant avec un amortissement visqueux. Nous pouvons l'écrire sous la forme :

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{1}{\tau}\frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0$$

où ω_0 est la pulsation propre du système en l'absence de frottement, et où τ est le temps de relaxation du système.

Nous allons maintenant supposer que, au lieu de laisser le système évoluer de lui-même, on lui applique une force :

$$F(t) = F_0 \cos \omega t$$

L'équation du mouvement devient alors :

$$\textbf{(34)} \qquad \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{1}{\tau}\frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = \frac{F_0}{m}\cos \omega t$$

Comme nous l'avons déjà indiqué au paragraphe *Système masse-ressort*, la solution générale est la somme d'une solution particulière de l'équation complète et de la solution générale de l'équation sans second membre. Or, les solutions de cette dernière, ainsi que nous l'avons vu au paragraphe précédent, décroissent dans le temps et sont pratiquement nulles dès que t est très supérieur au temps de relaxation ; seule la solution particulière de l'équation complète subsistera.

Montrons qu'une solution de cette équation complète est de la forme :

$$x = A\cos(\omega t + \varphi)$$

On a en effet $\frac{dx}{dt} = -A\omega \sin(\omega t + \varphi)$

et $$\frac{d^2x}{dt^2} = -A\omega^2 \cos(\omega t + \varphi)$$

En reportant ces valeurs dans l'équation **(34)**, nous obtenons :

$$A(\omega_0^2 - \omega^2)\cos(\omega t + \varphi) - A\frac{\omega}{\tau}\sin(\omega t + \varphi) = \frac{F_0}{m}\cos \omega t$$

Or, nous savons que :

$$\cos(\omega t + \varphi) = \cos \omega t \cos \varphi - \sin \omega t \sin \varphi$$

et $$\sin(\omega t + \varphi) = \sin \omega t \cos \varphi + \cos \omega t \sin \varphi$$

Par conséquent, nous obtenons :

$$\left[(\omega_0^2 - \omega^2)\cos\varphi - A\frac{\omega}{\tau}\sin\varphi\right]\cos\omega t - \left[(\omega_0^2 - \omega^2) A \sin\varphi + A\frac{\omega}{\tau}\cos\varphi\right]\sin\omega t = \frac{F_0}{m}\cos\omega t$$

Il en résulte que :

$$A\left[(\omega_0^2 - \omega^2)\cos\varphi - \frac{\omega}{\tau}\sin\varphi\right] = \frac{F_0}{m}$$

et $$(\omega_0^2 - \omega^2)\sin\varphi + \frac{\omega}{\tau}\cos\varphi = 0$$

pour que les coefficients de $\cos \omega t$ soient égaux et que celui de $\sin \omega t$ soit nul.

▶ *Figure 47 : variation de l'amplitude de la réponse d'un système oscillant en fonction de la fréquence : il y a résonance au voisinage de la fréquence de vibration propre du système.*

Il résulte de cette deuxième condition que :

$$\operatorname{tg} \varphi = -\frac{\omega/\tau}{\omega_0^2 - \omega^2}$$

Par conséquent $\cos \varphi = \dfrac{\omega_0^2 - \omega^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\omega/\tau)^2}}$

et $\sin \varphi = \dfrac{-\omega/\tau}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\omega/\tau)^2}}$

Ces deux dernières expressions nous permettent de calculer la valeur de l'amplitude A du mouvement :

$$A = \frac{F_0/m}{(\omega_0^2 - \omega^2)\cos \varphi - \frac{\omega}{\tau}\sin \varphi} = \frac{F_0/m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\omega/\tau)^2}}$$

Nous voyons qu'il existe une très grande différence entre les oscillations propres d'un système que l'on laisse revenir à son état d'équilibre (oscillations de relaxation) et les oscillations forcées de ce même système : d'une part, les oscillations forcées se font à la fréquence ω de l'excitation et non à la fréquence propre ω_0 ; d'autre part, les grandeurs A et φ, amplitude et phase du mouvement des oscillations forcées, ne dépendent pas des conditions initiales, mais dépendent de la fréquence d'excitation. En particulier, φ a maintenant une signification bien précise ; en effet, nous avons pris l'excitation sous la forme :

$$F = F_0 \cos \omega t$$

et la réponse sous la forme :

$$x = A \cos (\omega t + \varphi)$$

De façon précise, φ est donc le *déphasage* (c'est-à-dire le retard ou l'avance), entre l'excitation F et la réponse x.

Résonance

Nous allons maintenant regarder comment varient, en fonction de la pulsation ω, l'amplitude A de la réponse et le déphasage φ entre l'excitation et la réponse.

Nous supposons tout d'abord que le système est peu amorti, c'est-à-dire que $T_0 \ll \tau$: si le système était laissé à lui-même, il ferait beaucoup d'oscillations avant d'être amorti. Cela peut aussi s'écrire : $\omega_0\tau \gg 1$.

Dans cette hypothèse, supposons tout d'abord que nous excitons le système à une fréquence faible devant sa fréquence de résonance : $\omega \ll \omega_0$; nous voyons alors que

$$A \simeq \frac{F_0}{m\omega_0^2} = \frac{F_0}{C}$$

et que $\cos \varphi \simeq 1$ et $\sin \varphi \simeq 0$, donc $\varphi \simeq 0$.

Seule intervient la constante de rappel du ressort, et non la masse ; d'autre part, la réponse est en phase avec l'excitation. Ces deux faits montrent que, aux basses fréquences, la réponse suit parfaitement l'excitation et que l'inertie (donc la masse) ne joue aucun rôle.

Supposons maintenant que l'excitation soit à une fréquence très élevée par rapport à la fréquence propre du système ; on a alors :

$$A \simeq \frac{F_0}{m\omega^2}$$

$$\cos \varphi \simeq -1, \quad \text{et} \quad \sin \varphi \simeq 0,$$

donc $\varphi \simeq \pi.$

Cette fois seule la masse intervient dans l'expression de A, et non la raideur du ressort ; d'autre part, la réponse est en retard d'une demi-période sur l'excitation : l'inertie de l'objet se fait fortement sentir à ces fréquences élevées, et le système a du mal à suivre l'excitation.

Plaçons-nous maintenant au voisinage de la fréquence propre : $\omega = \omega_0$; l'amplitude vaut alors :

$$A = \frac{F_0\tau}{m\omega_0}$$

Si l'amortissement est très faible, donc si τ est très grand, A devient très grand également : à la résonance, c'est l'amortissement qui détermine la réponse du système ; il est courant que la réponse à la résonance soit 10^3 à 10^4 fois plus forte que la réponse à basse fréquence. Il est à noter cependant que le maximum ne se produit pas pour $\omega = \omega_0$, mais pour une pulsation ω telle que : $\omega^2 = \omega_0^2 - \dfrac{1}{2\tau^2}$.

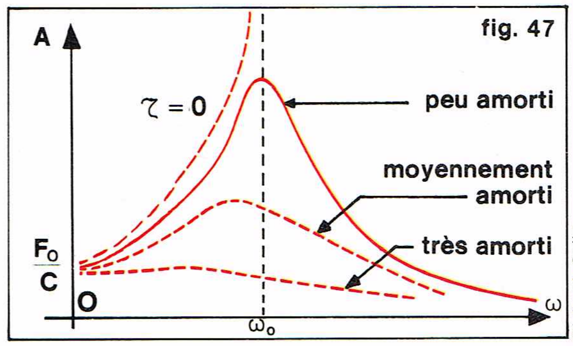

Plus l'oscillateur sera amorti, plus le décalage entre ω et ω_0 sera accentué, et plus A sera faible.

Toujours pour $\omega = \omega_0$, on voit que $\cos \varphi \simeq 0$ et $\sin \varphi \simeq -1$, de sorte que $\varphi \simeq -\dfrac{\pi}{2}$: la réponse est en *quadrature retard* par rapport à l'excitation, c'est-à-dire qu'elle est en retard d'un quart de période. Cela signifie qu'elle est nulle lorsque l'élongation est maximale, et qu'elle est maximale lorsque l'élongation est nulle, ce qui fait que le système, qui aurait tendance à s'immobiliser à sa position d'équilibre, est relancé à chaque demi-période au bon moment.

Les *figures* 47 et 48 montrent l'allure de la variation de A et φ en fonction de la fréquence : l'amplitude présente un maximum, plus ou moins pointu, au voisinage de $\omega - \omega_0$, tandis que la phase varie rapidement de $-\pi$ à 0. Pour une force excitatrice F_0 donnée, on peut donc avoir une réponse très faible si l'on est loin de la résonance, ou une réponse extrêmement forte pour ω voisin de ω_0. Cette propriété est extrêmement importante, tant par les avantages qu'elle peut présenter que par les inconvénients qu'elle peut avoir.

Par exemple, il est très important, dans toutes les machines tournantes, que la fréquence de rotation soit très différente de la fréquence propre du système mécanique : si tel n'était pas le cas, le phénomène de résonance produirait des vibrations de grande amplitude pouvant entraîner la destruction de la machine. C'est pour une raison analogue qu'il est interdit aux troupes de soldats de franchir un pont suspendu en marchant au pas : de graves accidents se sont produits parce que la fréquence du pas des soldats était voisine de la fréquence propre de vibration du pont.

Dans le domaine de l'électronique, le phénomène de résonance dans un circuit comprenant une inductance et une capacité est très utilisé. Par exemple, une antenne de poste de radio capte les ondes électromagnétiques d'un grand nombre d'émetteurs, donc de nombreuses fréquences différentes. Le signal provenant de l'antenne sert de signal d'excitation à un circuit oscillant. Lorsque la fréquence propre du circuit oscillant est identique à celle d'un poste émetteur, il en résulte une réponse très importante au voisinage de cette fréquence, tandis que toutes les émissions effectuées à d'autres fréquences ne donnent que des réponses très faibles : on sélectionne ainsi l'émetteur de son choix. Pour capter un autre émetteur, il suffit de changer la fréquence du circuit oscillant du

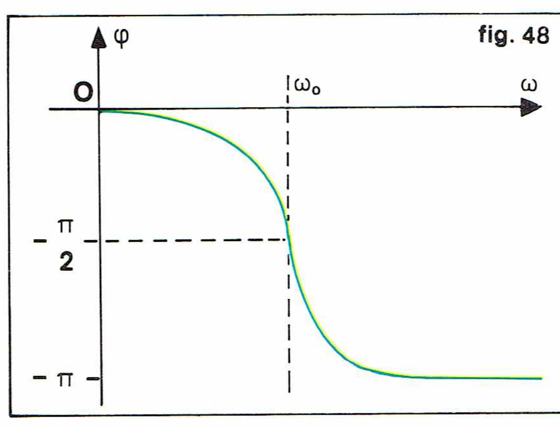

▶ *Figure 48 : variation du déphasage entre l'excitation et la réponse, en fonction de la fréquence.*

poste de radio; comme cette fréquence est $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ il suffit de faire varier la valeur de L ou de C; en pratique, c'est toujours la capacité que l'on fait varier : le bouton de sélection des stations est relié à un condensateur de capacité variable. Il est clair qu'un récepteur sera d'autant plus sélectif que son pic de résonance sera aigu.

Dans le domaine de la physique du solide, la résonance magnétique joue un rôle extrêmement important comme outil d'étude des propriétés des solides : nous avons vu que, si une particule possède un moment magnétique et qu'elle est soumise à un champ magnétique B, son moment cinétique est soumis à un phénomène de précession, c'est-à-dire qu'il tourne autour de la direction du champ magnétique à une fréquence propre $\omega_0 = \gamma B$ (voir *Particule possédant un moment magnétique, soumise à un champ magnétique*).

Si l'on soumet cette particule à un champ magnétique alternatif perpendiculaire à B et de fréquence ω_0, il se produit un phénomène de résonance qui se traduit par une absorption de puissance électromagnétique. La première application est évidemment la détermination du rapport gyromagnétique γ.

Puissance absorbée - Coefficient de qualité

La force appliquée F produit un travail $dW = F dx$.

La puissance est donc $P = \frac{dW}{dt} = F\frac{dx}{dt}$

or, F et v varient de façon cyclique avec une pulsation ω, donc la puissance moyenne au cours d'une période est :

$$\langle F \cdot v \rangle = -\frac{\frac{\omega F_0^2}{m}}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \left(\frac{\omega}{\tau}\right)^2}} \langle \cos \omega t \sin (\omega t + \varphi) \rangle$$

or

$$\langle \cos \omega t \sin (\omega t + \varphi) \rangle = \frac{1}{T}\int_0^T \cos \omega t \sin (\omega t + \varphi)\, dt = \frac{1}{2} \sin \varphi$$

Par conséquent

$$\langle P \rangle = -\frac{\frac{\omega F_0^2}{m}}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \left(\frac{\omega}{\tau}\right)^2}} \frac{1}{2} \frac{-\frac{\omega}{\tau}}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \left(\frac{\omega}{\tau}\right)^2}}$$

soit $$\langle P \rangle = \frac{F_0^2 \omega^2}{2\tau m \left[(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \left(\frac{\omega}{\tau}\right)^2\right]}$$

Ce résultat est extrêmement général. L'allure de la puissance absorbée en fonction de ω est indiquée sur la *figure* 49. Pour $\omega = \omega_0$, la puissance absorbée est :

$$\langle P \rangle = \frac{1}{2}\frac{F_0^2 \tau}{m}$$

Lorsque $(\omega_0^2 - \omega^2)^2 = \left(\frac{\omega}{\tau}\right)^2$, la puissance est la moitié de la puissance maximale; les fréquences correspondantes sont séparées par un intervalle :

$$2\,\Delta\omega \simeq \frac{1}{\tau}$$

Le pic d'absorption est donc d'autant plus étroit que l'amortissement est faible. On caractérise généralement la qualité de la résonance par la quantité :

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} \simeq \omega_0 \tau$$

Q est appelé *coefficient de qualité* du système résonnant (en électronique, on l'appelle aussi *coefficient de surtension*); il est proportionnel au rapport de l'énergie emmagasinée à la perte d'énergie par période. Un ordre de grandeur typique du coefficient de qualité en électronique est 100 à 1 000. Une cavité résonnante en hyperfréquence peut avoir un coefficient de qualité de 10^4.

La forme de la courbe de la *figure* 49, appelée *courbe lorentzienne*, est très caractéristique des phénomènes de résonance. Par exemple, on peut assimiler une molécule

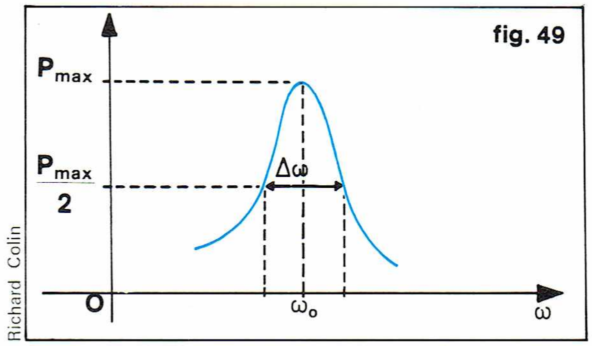

◄ *Figure 49 ; variation de la puissance absorbée par le résonateur en fonction de la fréquence : courbe lorentzienne caractéristique des phénomènes de résonance.*

diatomique (C=O par exemple) à un oscillateur harmonique; si cette molécule est composée de deux atomes différents, elle présente un léger moment dipolaire, qui peut être excité par un champ électrique alternatif; il y aura donc résonance lorsque la fréquence de ce champ électrique sera égale à la fréquence de vibration de la molécule. Cette fréquence est de l'ordre de 10^{13} hertz, ce qui fait que le champ excitateur peut être le champ d'une onde électromagnétique du domaine infrarouge. Ainsi, lorsque l'on fait passer un faisceau infrarouge (*fig.* 50) à travers, par exemple, une enceinte contenant de l'oxyde de carbone et que l'on mesure la puissance recueillie après passage du faisceau, on obtient une courbe qui ressemble à celle de la *figure* 49, à ceci près qu'elle est inversée, puisque la *figure* 49 représente la différence entre la puissance absorbée et la puissance incidente.

Oscillateurs couplés

Nous allons maintenant envisager la situation, très importante en pratique, dans laquelle deux ou plusieurs oscillateurs sont couplés entre eux. Nous prendrons comme exemple très simple le cas schématisé sur la *figure* 51, dans lequel deux masses m_1 et m_2 sont reliées entre elles par un ressort de raideur C_3 et à deux points fixés par deux ressorts de raideurs C_1 et C_2. Nous négligeons cette fois tous les phénomènes d'amortissement. Soit x_1 et x_2 les déplacements des masses m_1 et m_2 par rapport à leur position d'équilibre. La loi fondamentale de la dynamique appliquée à ces deux masses donne les équations suivantes :

$$m_1 \frac{d^2x_1}{dt^2} + (C_1 + C_3)x_1 - C_3 x_2 = 0$$

$$m_2 \frac{d^2x_2}{dt^2} + (C_2 + C_3)\,x_2 - C_3 x_1 = 0$$

Cherchons des solutions de la forme :

$$x_1 = A \cos \omega t$$
$$x_2 = B \cos \omega t$$

Si nous reportons ces expressions dans les équations du mouvement, nous trouvons :

$$\begin{cases} A\,(-m_1\omega^2 + C_1 + C_3) - BC_3 = 0 & (35) \\ -AC_3 + B\,(-m_2\omega^2 + C_2 + C_3) = 0 & (36) \end{cases}$$

Ce système d'équations, où A et B sont les inconnues, n'admet de solution non triviale (c'est-à-dire avec $A \neq 0$

▼ *Figure 50 ; un phénomène de résonance en physique moléculaire : absorption du rayonnement infrarouge par des molécules.*

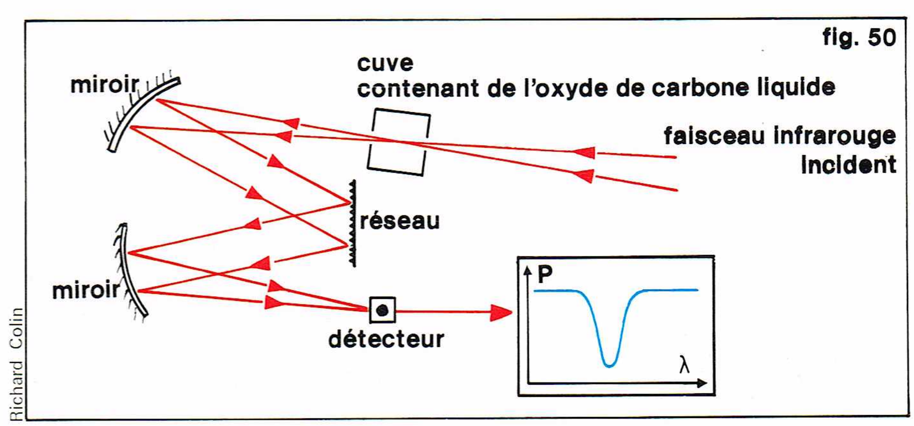

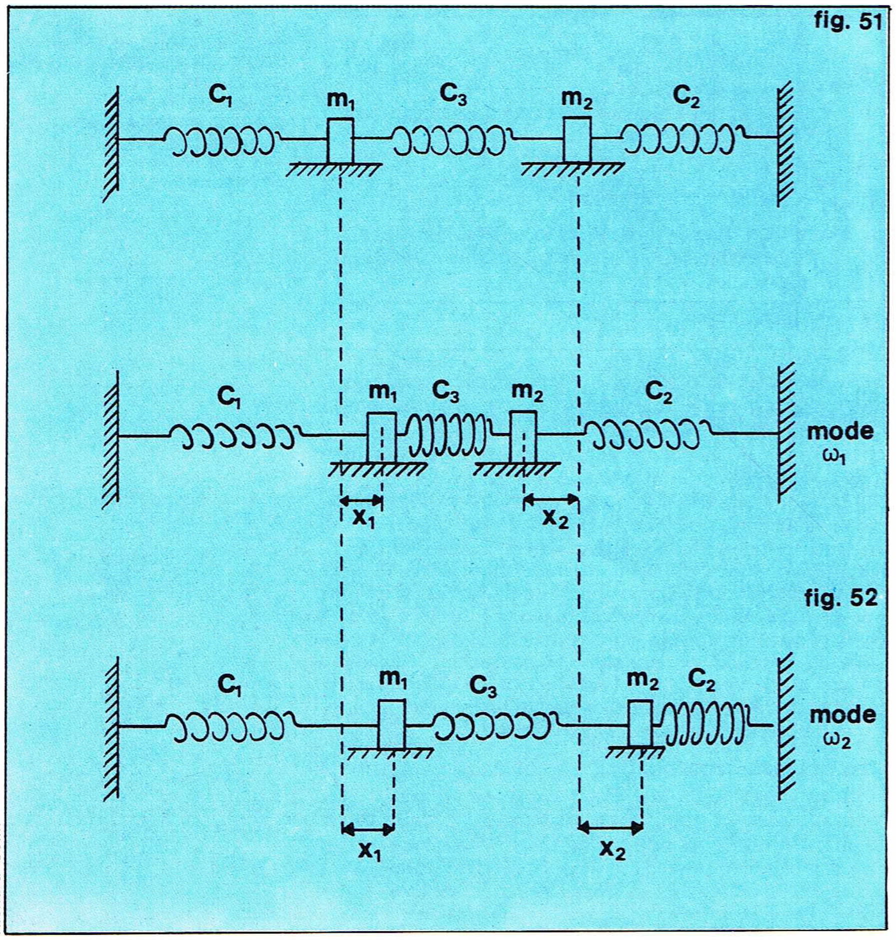

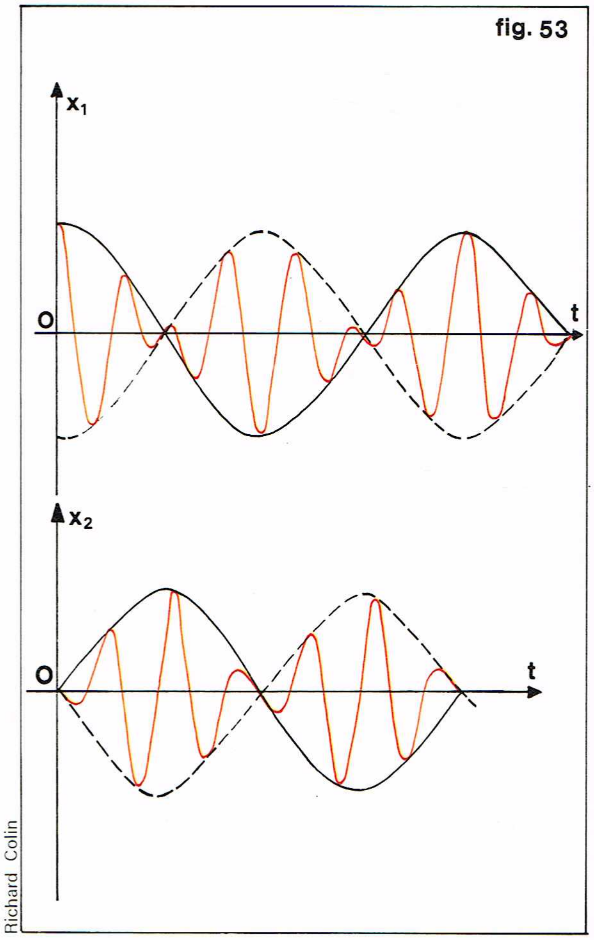

▲ *A gauche, en haut, figure 51 : couplage de plusieurs oscillateurs; en bas, figure 52 : les deux modes fondamentaux de vibration de deux oscillateurs identiques couplés. A droite, figure 53 : variations des élongations des deux ressorts.*

et B $\neq$ 0) que si son déterminant est nul, c'est-à-dire si la pulsation ω est solution de l'équation :

$$m_1 m_2 \omega^4 - \omega^2 [m_1 (C_2 + C_3) + m_2 (C_1 + C_3)] + (C_1 + C_3)(C_2 + C_3) - C_3^2 = 0$$

Considérons pour simplifier le cas particulier très important où les deux oscillations sont identiques : $m_1 = m_2$ et $C_1 = C_2$; désignons par m la masse commune et par C la raideur commune; ω est alors déterminé par l'équation :

$$m^2\omega^4 - 2\,\omega^2 m\,(C + C_3) + (C + C_3)^2 = C_3^2$$

soit encore : $[m\omega^2 - (C + C_3)]^2 = C_3^2$

Les deux solutions sont donc :

$$\omega_1^2 = \frac{C + 2\,C_3}{m} \quad \text{et} \quad \omega_2^2 = \frac{C}{m}$$

Or la fréquence propre de chacun des deux oscillateurs (composé d'une masse m, d'un ressort C et d'un ressort C_3) est $\omega_0^2 = \dfrac{C + C_3}{m}$.

Nous voyons donc que le couplage entre ces deux oscillateurs introduit deux fréquences propres qui valent respectivement :

$$\omega_1^2 = \omega_0^2 + \frac{C_3}{m} \quad \text{et} \quad \omega_2^2 = \omega_0^2 - \frac{C_3}{m}$$

et sont donc situées de part et d'autre de la fréquence propre commune; c'est d'ailleurs un phénomène extrêmement général que l'écartement des fréquences propres par couplage entre deux oscillateurs.

Revenons aux équations **(35)** et **(36)**, et cherchons les amplitudes A et B des mouvements; on trouve :

$$A = -B \quad \text{pour} \quad \omega = \omega_1$$

et

$$A = B \quad \text{pour} \quad \omega = \omega_2$$

Pour $\omega = \omega_1$ nous voyons donc que, à chaque instant, les deux masses ont des élongations opposées : elles vibrent en *opposition de phase;* pour $\omega = \omega_2$, elles vibrent au contraire *en phase* et avec la même élongation, de sorte que leur distance reste constante; le ressort C_3 n'est ni comprimé, ni étendu, ce qui explique qu'il n'intervienne pas dans l'expression de ω_2 (*fig.* 52). Si l'on excite initialement un de ces modes (c'est-à-dire si l'on fait initialement $x_{01} = -x_{02}$ ou $x_{01} = x_{02}$), celui-ci se poursuivra indéfiniment (puisque nous négligeons ici les frottements). En revanche, si l'on excite initialement d'une façon quelconque, le mouvement obtenu sera une combinaison linéaire de ces deux modes et évoluera dans le temps. Les équations seront de la forme :

$$x_1 = A \cos \omega_1 t + B \cos \omega_2 t$$

$$x_2 = A \cos \omega_1 t - B \cos \omega_2 t$$

Supposons par exemple que, à l'instant $t = 0$, nous maintenions m_2 immobile et déplacions m_1 d'une quantité x_0; nous aurons alors :

$$x_1 = \frac{a}{2} \cos \omega_1 t + \frac{a}{2} \cos \omega_2 t$$

$$x_2 = \frac{a}{2} \cos \omega_1 t - \frac{a}{2} \cos \omega_2 t$$

soit encore :

$$x_1 = a \cos \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t \cos \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t$$

$$x_2 = -a \sin \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t \sin \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t$$

Les variations de x_1 et x_2 sont représentées sur la *figure* 53 : il s'agit d'un mouvement compliqué qui résulte des battements de deux mouvements de fréquences ω_1 et ω_2.

Lorsque, au lieu de 2 oscillateurs identiques couplés, on a affaire à N oscillateurs couplés, on obtient N équations différentielles couplées qui conduisent à un système de N équations homogènes où les N inconnues sont les élongations de chacune des N masses. On a donc à annuler un déterminant de dimension N, ce qui fournit N valeurs de ω qui correspondent à N modes de vibration. Une telle chaîne d'oscillateurs sert en physique du solide comme modèle pour les vibrations d'un réseau cristallin *(phonons)*.

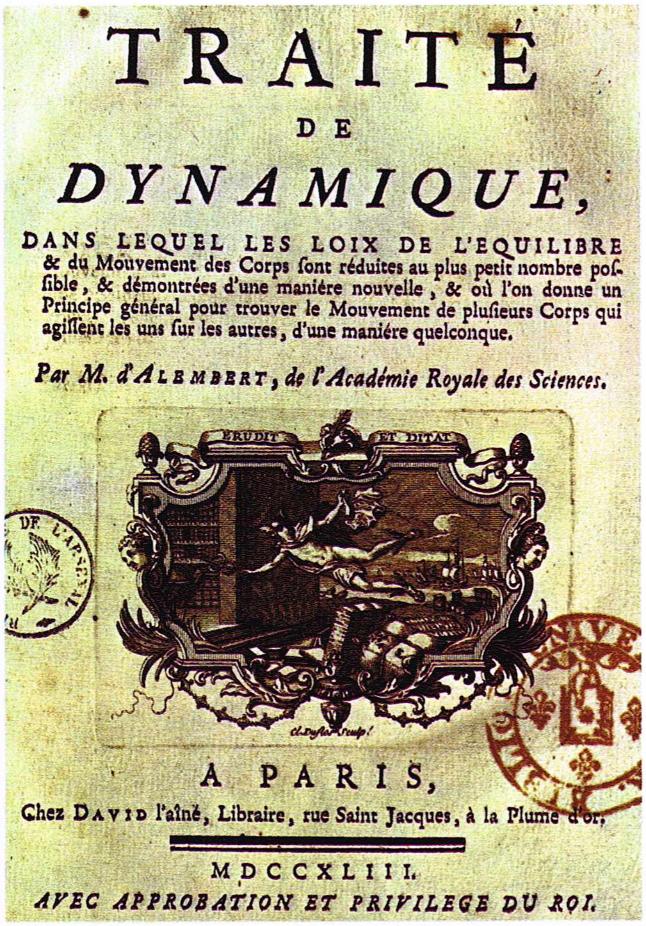
TRAITÉ
DE
DYNAMIQUE,
DANS LEQUEL LES LOIX DE L'EQUILIBRE & du Mouvement des Corps sont réduites au plus petit nombre possible, & démontrées d'une maniére nouvelle, & où l'on donne un Principe général pour trouver le Mouvement de plusieurs Corps qui agissent les uns sur les autres, d'une maniére quelconque.
Par M. d'ALEMBERT, de l'Académie Royale des Sciences.
A PARIS,
Chez DAVID l'aîné, Libraire, rue Saint Jacques, à la Plume d'or.
MDCCXLIII.
AVEC APPROBATION ET PRIVILEGE DU ROI.

Giraudon

Bulloz

▲ *A gauche, frontispice du* **Traité de dynamique** *de J. d'Alembert, édition de 1743. A droite, d'Alembert, portrait peint par Quentin de La Tour (musée du Louvre).*

Dynamique des solides

Nous abordons maintenant l'étude du mouvement des solides indéformables, c'est-à-dire d'ensembles de points matériels contraints par des forces de cohésion à rester à des distances fixes les uns des autres. Ce problème est évidemment d'une énorme importance pratique, et présente dans certains cas une grande complexité. La théorie du gyroscope, par exemple, occupe à elle seule un ouvrage en quatre volumes !

Équations du mouvement d'un solide en rotation

Moment cinétique d'un solide

Nous avons vu dans le chapitre *Mécanique d'un système de points matériels* que l'équation fondamentale de la dynamique a pour conséquence que le moment des forces appliquées à un système de particules est égal à la dérivée du moment cinétique $\vec{L}$; $\vec{L}$ est donné par :

$$\vec{L} = \sum_i \vec{r_i} \wedge m_i \vec{v_i}$$

Supposons que ce corps ne soit soumis à aucune force extérieure ; il existe alors un référentiel d'inertie lié au centre de gravité du solide. Celui-ci est donc soumis à un mouvement de rotation caractérisé par un certain vecteur $\vec{\Omega}$ (t). Chaque particule du solide est donc animée d'une vitesse :

$$\vec{v_i} = \vec{\Omega} \wedge \vec{r_i}$$

Cela est vrai également si le corps est soumis à une ou plusieurs forces, mais possède un point fixe par rapport à un repère inertiel ; on prend alors comme axes de référence un système fixe par rapport au repère inertiel et dont l'origine est le point fixe. La vitesse garde de toute façon la même expression que précédemment. Le moment cinétique par rapport à l'origine est alors :

$$\vec{L} = \sum_i m_i \vec{r_i} \wedge (\vec{\Omega} \wedge \vec{r_i})$$

Or $\vec{r_i} \wedge (\vec{\Omega} \wedge \vec{r_i}) = \vec{\Omega} r_i^2 - \vec{r_i}\,(\vec{r_i} \cdot \vec{\Omega})$

Ce qui donne :

$$\vec{L} = \sum_i m_i [r_i^2 \vec{\Omega} - \vec{r_i}\,(\vec{r_i} \cdot \vec{\Omega})]$$

Appelons Ω_x, Ω_y, Ω_z les composantes de $\vec{\Omega}$ et x_i, y_i, z_i celles de $\vec{r_i}$. L'expression de $\vec{L}$ devient alors :

$$\vec{L} = \sum_i m_i [r_i^2 \vec{\Omega} - \vec{r_i}\,(\Omega_x x_i + \Omega_y y_i + \Omega_z z_i)]$$

Écrivons la composante de $\vec{L}$ selon l'axe Ox :

$$L_x = \sum_i m_i [(r_i^2 - x_i^2)\,\Omega_x - x_i y_i \Omega_y - x_i z_i \Omega_z]$$

On obtient des expressions semblables pour les composantes du moment cinétique selon Oy et Oz :

$$L_y = \sum_i m_i [(r_i^2 - y_i^2)\,\Omega_y - y_i x_i \Omega_x - y_i z_i \Omega_z]$$

$$L_z = \sum_i m_i [(r_i^2 - z_i^2)\,\Omega_z - z_i x_i \Omega_x - z_i y_i \Omega_y]$$

Nous voyons que ces trois expressions font intervenir les quantités :

$$\sum_i m_i\,(r_i^2 - x_i^2), \quad -\sum_i m_i x_i y_i, \quad -\sum_i m_i x_i z_i,$$

et leurs analogues. En général, ces quantités dépendent du temps puisque nous avons supposé que les axes étaient fixes. Elles sont appelées *moments d'inertie* du solide ; elles forment une matrice symétrique dont les éléments sont :

$$I_{xx} = \sum_i m_i\,(r_i^2 - x_i^2)\,; \qquad I_{xy} = -\sum_i m_i x_i y_i\,;$$

$$I_{xz} = -\sum_i m_i x_i z_i$$

$$I_{yx} = I_{xy}\,; \quad I_{yy} = -\sum_i m_i\,(r_i^2 - y_i^2)\,; \quad I_{yz} = -\sum_i m_i y_i z_i$$

$$I_{zx} = I_{xz}\,; \qquad I_{zy} = I_{yz}\,; \qquad I_{zz} = \sum_i m_i\,(r_i^2 - z_i^2)$$

▶ *La stroboscopie permet de décomposer le mouvement; cette photo, qui date de 1890, montre bien les phases successives : vitesse de plus en plus grande du marteau, rebondissement sur l'enclume (musée Marey; Beaune).*

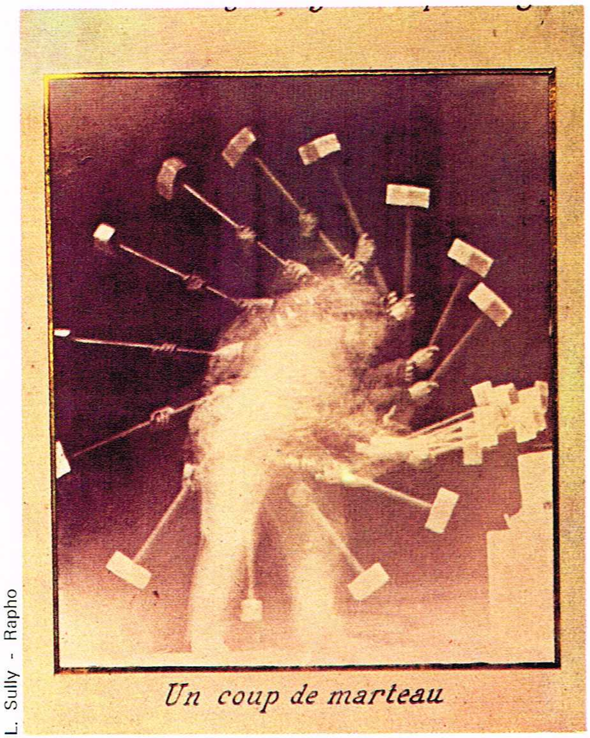

L. Sully - Rapho

Le moment cinétique $\vec{L}$ est donc relié au vecteur instantané de rotation $\vec{\Omega}$ par : $\vec{L} = \overline{\overline{\mathfrak{J}}}\vec{\Omega}$ où $\overline{\overline{\mathfrak{J}}}$ désigne la *matrice d'inertie* du solide considéré.

Nous pouvons donner une autre expression de la matrice d'inertie : en effet, un solide n'est généralement pas constitué de petits points matériels liés entre eux, mais il se présente, du point de vue macroscopique, comme une distribution continue de matière de densité $\rho\ (x, y, z)$. Les sommes qui interviennent dans l'expression des moments d'inertie doivent donc être transformées en intégrales. On a alors les expressions suivantes :

$$I_{xx} = \iiint (r^2 - x^2)\ \rho\ dv,$$
$$I_{xy} = -\iiint xy\rho\ dv,$$
$$I_{xz} = -\iiint xz\rho\ dv,$$

et ainsi de suite pour les autres coefficients. Les intégrales sont étendues à tout le volume du solide. On peut remarquer que la somme des éléments diagonaux de la matrice est indépendante du choix des axes, alors que chacun des éléments de la matrice dépend des axes choisis :

$$I_{xx} + I_{yy} + I_{zz} = 2 \iiint \rho\ (x, y, z)\ r^2 dv$$

où $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$.

Rappelons à nouveau que les coefficients de la matrice d'inertie dépendent du système d'axes choisis. Il est souvent très commode et, du moins pour les corps de forme régulière, facile, de trouver des axes tels que tous les éléments non diagonaux de la matrice d'inertie soient nuls. Ces axes sont appelés axes principaux d'inertie du corps considéré.

Revenons à l'expression des termes diagonaux; par exemple $I_{xx} = \iiint \rho\ (y^2 + z^2)\ dv$. Dans cette expression intervient le carré de la distance $(y^2 + z^2)$ de chaque point du solide à l'axe Ox. Pour cette raison, I_{xx} est appelé *moment d'inertie* du solide par rapport à Ox; de même, I_{yy} et I_{zz} sont les moments d'inertie par rapport à Oy et Oz. Cherchons l'expression du moment d'inertie par rapport à un axe quelconque Δ passant par l'origine. Soit (α, β, γ) les composantes du vecteur unitaire $\vec{n}$ de l'axe considéré; on a donc :

$$\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 = 1.$$

La distance δ du point M, de coordonnées (x, y, z), à cette droite est donnée par :

$$\delta^2 = (\gamma^2 + \beta^2)\ x^2 + (\alpha^2 + \gamma^2)\ y^2 + (\alpha^2 + \beta^2)\ z^2 - 2\ \alpha\beta xy - 2\ \alpha\gamma xz - 2\ \beta\gamma yz,$$

Le moment d'inertie par rapport à cette droite est donc :

$$I_\Delta = \iiint \rho\delta^2 dv$$

soit encore

$$I_\Delta = \iiint \rho\alpha^2\ (y^2 + z^2)\ dv + \iiint \rho\beta^2\ (x^2 + z^2)\ dv + \iiint \rho\gamma^2\ (x^2 + y^2)\ dv - 2\ \alpha\beta \iiint \rho xydv - 2\alpha\gamma \iiint \rho xzdv - 2\ \beta\gamma \iiint \rho yzdv.$$

On voit apparaître dans cette dernière expression les éléments de la matrice d'inertie :

$$I_\Delta = \alpha^2 I_{xx} + \beta^2 I_{yy} + \gamma^2 I_{zz} - 2\ \alpha\beta I_{xy} - 2\ \alpha\gamma I_{xz} - 2\ \beta\gamma I_{yz}. \quad \textbf{(37)}$$

Supposons que nous portions sur l'axe Δ une longueur égale à $\frac{1}{I_\Delta}$ à partir de l'origine O ; l'autre extrémité M de ce vecteur $\vec{\xi}$ a pour coordonnées

$$\left(X = \frac{\alpha}{\sqrt{I_\Delta}},\ Y = \frac{\beta}{\sqrt{I_\Delta}},\ Z = \frac{\gamma}{\sqrt{I_\Delta}}\right).$$

Reportant les valeurs $\alpha = X\sqrt{I_\Delta}$, $\beta = Y\sqrt{I_\Delta}$, $\gamma = Z\sqrt{I_\Delta}$ ainsi définies dans l'expression **(37)**, nous voyons que le point M est sur une surface dont l'équation est :

$$I_{xx}X^2 + I_{yy}Y^2 + I_{zz}Z^2 - 2\ I_{xy}XY - 2\ I_{yz}YZ - 2\ I_{xz}XZ = 1$$

Cette équation est celle d'un ellipsoïde que l'on appelle *ellipsoïde d'inertie* (*fig.* 54).

Si les axes Ox, Oy et Oz sont tels que les éléments non diagonaux de la matrice d'inertie sont nuls, l'équation précédente se réduit à :

$$I_{xx}X^2 + I_{yy}Y^2 + I_{zz}Z^2 = 1$$

Cela signifie que Ox, Oy, Oz sont les axes de symétrie de l'ellipsoïde d'inertie. Par conséquent, les axes principaux d'un solide ne sont pas autre chose que les axes de symétrie de l'ellipsoïde d'inertie.

Si les axes principaux d'inertie d'un corps sont souvent très pratiques pour étudier le mouvement d'un solide, il arrive également qu'il soit utile de prendre comme système de référence des axes dont l'origine soit au centre de gravité G du solide. Nous allons voir comment se

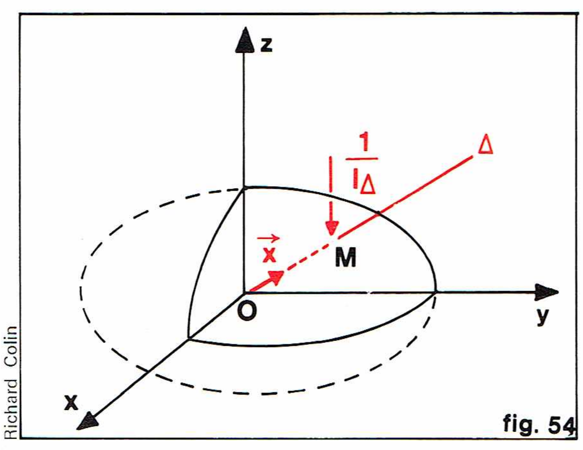

Richard Colin

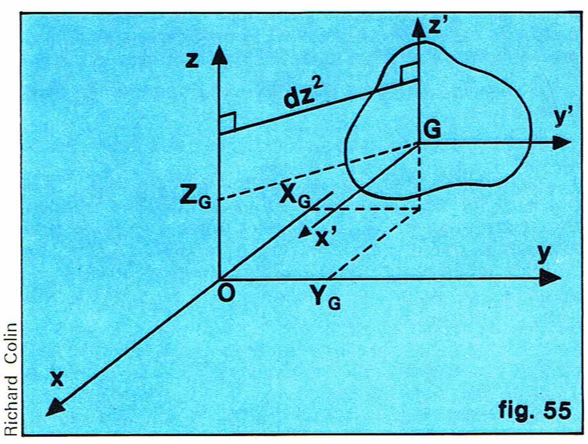

Richard Colin

▶ *A gauche, figure 54 : ellipsoïde d'inertie d'un corps solide. A droite, figure 55 : passage d'un repère quelconque au repère barycentrique : théorème de Huygens.*

transforme l'expression des moments d'inertie par rapport à un axe lorsque l'on passe d'un système $Oxyz$ à un système $Gx'y'z'$ (avec $Ox \,//\, Gx'$, $Oy \,//\, Gy'$, $Oz \,//\, Oz'$). Soit X_G, Y_G, Z_G les coordonnées de G dans le repère $Oxyz$ (*fig.* 55) ; les formules de changement de repère sont les suivantes :

$$x = x' + X_G$$
$$y = y' + Y_G$$
$$z = z' + Z_G$$

avec $X_G = \dfrac{\iiint \rho x dv}{\iiint \rho dv}$; $\quad Y_G = \dfrac{\iiint \rho y dv}{\iiint \rho dv}$; $\quad Z_G = \dfrac{\iiint \rho z dv}{\iiint \rho dv}$

Cherchons l'expression de I_{xy}. Nous avons :

$$xy = x'y' + x'Y_G + y'X_G + X_GY_G$$

Par conséquent :

$$I_{xy} = I_{x'y'} + Y_G \iiint x'\rho dv + X_G \iiint y'\rho dv + X_GY_G \iiint \rho dv$$

Or, $\iiint x'\rho dv = \iiint y'\rho dv = 0$ puisque le centre de gravité est l'origine des axes $Gx'y'z'$; par conséquent :

$$I_{xy} = I_{x'y'} + MX_GY_G$$

où $M = \iiint \rho dv$ est la masse totale du solide.

De même : $\quad I_{yz} = I_{y'z'} + MY_GZ_G$
$\qquad\qquad\quad I_{zx} = I_{z'x'} + MZ_GX_G.$

Pour les termes diagonaux, on obtient :

$$I_{xx} = I_{x'x'} + M\,(Z_G^2 + Y_G^2)$$

Or $Z_G^2 + Y_G^2$ n'est autre que le carré de la distance d_x entre les axes Ox et Gx'.

$$I_{xx} = I_{x'x'} + Md_x^2$$
De même $\quad I_{yy} = I_{y'y'} + Md_y^2$
$$I_{zz} = I_{z'z'} + Md_z^2$$

Le moment d'inertie par rapport à un axe Ox est donc égal à la somme du moment d'inertie du solide par rapport à l'axe Gx' parallèle à Ox et du moment d'inertie par rapport à O qu'aurait un point matériel de masse M placé au centre de gravité. Ce théorème est connu sous le nom de **théorème de Huygens.**

Énergie cinétique de rotation

L'énergie cinétique de rotation est l'énergie cinétique mesurée par rapport à un système d'axes lié au centre de gravité. Elle vaut :

$$T = \frac{1}{2}\sum_i m_i v_i^2 = \frac{1}{2}\sum_i m_i\,(\vec{\Omega} \wedge \vec{r}_i)^2$$

soit encore, pour un corps continu :

$$T = \frac{1}{2}\iiint \rho\,(\vec{\Omega} \wedge \vec{r})^2\,dv$$

Nous pouvons aussi écrire l'énergie cinétique de rotation sous la forme :

$$T = \frac{1}{2}\iiint \rho\,(\vec{\Omega} \wedge \vec{r})\,\frac{d\vec{r}}{dt}\,dv = \frac{1}{2}\vec{\Omega}\iiint \rho\left(\vec{r} \wedge \frac{d\vec{r}}{dt}\right) dv$$

Soit encore $T = \dfrac{1}{2}\vec{\Omega}\,\overline{\overline{\mathcal{J}}}\,\vec{\Omega}$

car $\iiint \rho\left(\vec{r} \wedge \dfrac{d\vec{r}}{dt}\right) dv = \vec{L}$ et $\vec{L} = \overline{\overline{\mathcal{J}}}\vec{\Omega}.$

Cette expression un peu compliquée de l'énergie cinétique se simplifie si l'on cherche à l'exprimer dans le système d'axes principaux d'inertie du solide ; en effet, on a alors :

$$T = \frac{1}{2}\,(I_{xx}\Omega_x^2 + I_{yy}\Omega_y^2 + I_{zz}\Omega_z^2)$$

Cette expression de l'énergie cinétique, rappelons-le, est celle que l'on trouve si l'on se place dans un référentiel lié au centre de gravité du solide ; c'est donc l'énergie due au mouvement du solide par rapport à son centre de gravité. Comme nous l'avons vu au paragraphe *Principe de Hamilton*, il faut, pour obtenir l'énergie cinétique totale, ajouter à ce terme l'énergie cinétique qu'aurait un point matériel confondu avec le centre de gravité du solide et dont la masse serait égale à la masse totale du solide considéré.

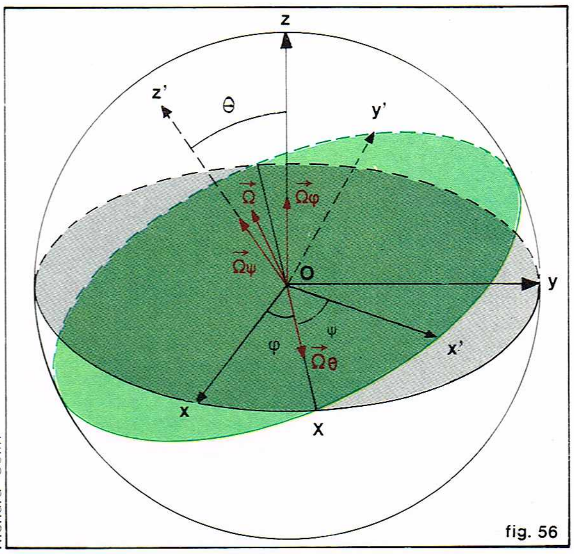

Richard Colin

◀ ***Figure 56 : définition des angles d'Euler.***

Équations du mouvement

Pour établir les équations du mouvement d'un solide, nous allons utiliser les *équations de Lagrange*. Rappelons que ces équations sont des équations différentielles portant sur les dérivées du lagrangien : $L = T - V$, par rapport aux coordonnées généralisées. Un solide possédant six degrés de liberté (trois degrés de translation et trois de rotation), nous devons trouver six *coordonnées généralisées*. Celles qui décrivent le mouvement de translation sont évidentes : ce sont les trois coordonnées X_G, Y_G, Z_G du centre de gravité. Pour décrire la rotation, on utilise trois angles appelés *angles d'Euler*, qui apparaissent sur la *figure* 56 : ce sont les angles φ, θ et ψ qui définissent la position du repère $Ox'y'z'$ par rapport au repère fixe $Oxyz$. La droite OX est l'intersection du plan $x'Oy'$ avec xOy ; elle est appelée *ligne des nœuds*.

On passe alors des coordonnées (x, y, z) dans le repère $Oxyz$ aux coordonnées (x', y', z') dans le repère $Ox'y'z'$ par les relations suivantes :

$$x' = (\cos\psi\cos\varphi - \cos\theta\sin\varphi\sin\psi)\,x - (\sin\psi\cos\varphi - \cos\theta\sin\varphi\cos\psi)\,y + z\sin\theta\sin\varphi$$

$$y' = (\cos\psi\sin\varphi + \cos\theta\cos\varphi\sin\psi)\,x - (\sin\psi\sin\varphi + \cos\theta\cos\varphi\cos\psi)\,y - z\sin\theta\cos\varphi$$

$$z' = (\sin\theta\sin\psi)\,x + (\sin\theta\cos\psi)\,y + z\cos\theta$$

Ayant défini les coordonnées généralisées, on doit définir les *forces généralisées :* dans le cas de la translation, il s'agit évidemment des forces habituelles, et pour la rotation, il s'agit du moment des forces.

Puisque nous savons que nous pouvons traiter de façon indépendante la translation et la rotation, nous pouvons écrire le lagrangien concernant uniquement le mouvement de rotation du solide :

$$L = \frac{1}{2}\vec{\Omega}\,\overline{\overline{\mathcal{J}}}\,\vec{\Omega} - V\,(\varphi, \theta, \psi)$$

Supposons, pour simplifier, que les axes liés au solide soient les axes principaux :

$$L = \frac{1}{2}\,(I_{x'x'}\Omega_{x'}^2 + I_{y'y'}\Omega_{y'}^2 + I_{z'z'}\Omega_{z'}^2) - V\,(\varphi, \theta, \psi)$$

Il faut maintenant exprimer $\Omega_{x'}$, $\Omega_{y'}$, $\Omega_{z'}$ en fonction de φ, θ, ψ. Or la rotation du solide peut se décomposer en trois mouvements : variation de l'angle φ, qui correspond à un vecteur $\vec{\Omega}_\varphi$ porté par Oz, de module $\dfrac{d\varphi}{dt}$, variation de l'angle θ, qui correspond à un vecteur $\vec{\Omega}_\theta$ porté par la ligne des nœuds et de module $\dfrac{d\theta}{dt}$, variation de l'angle ψ, qui correspond à un vecteur $\vec{\Omega}_\psi$ porté par Oz' et de module $\dfrac{d\psi}{dt}$; le vecteur $\vec{\Omega}$ est alors la somme :

$$\vec{\Omega} = \vec{\Omega}_\varphi + \vec{\Omega}_\theta + \vec{\Omega}_\psi$$

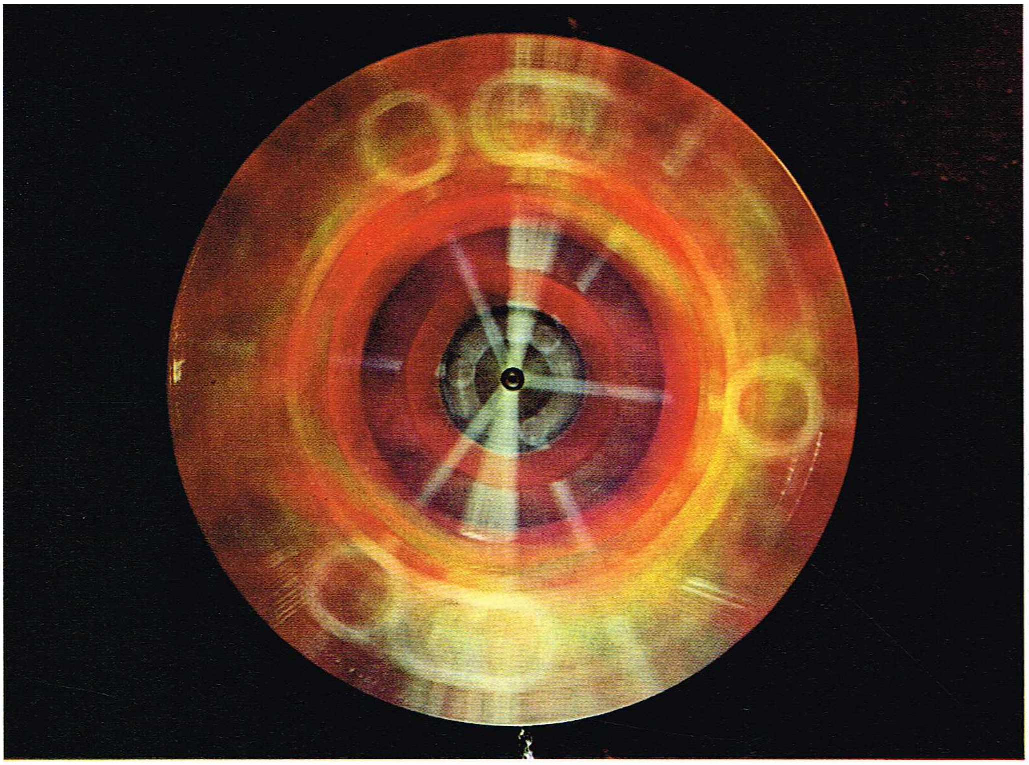

E. Rousseau - Snark International

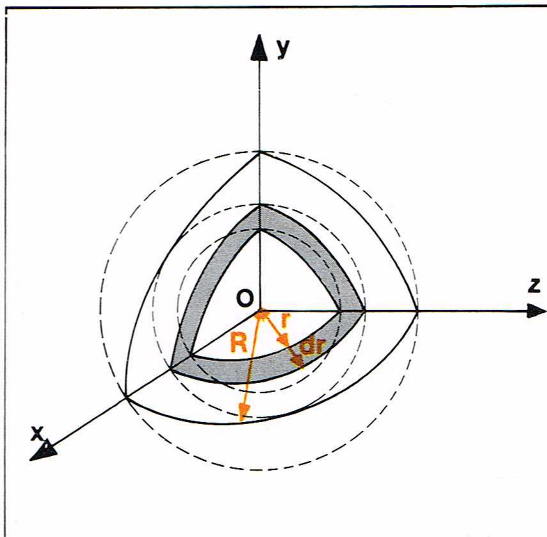

fig. 57

Richard Colin

▲ A gauche, observation d'un disque de rotation à l'aide d'un stroboscope électronique de fréquence variable. A droite, figure 57 : moment d'inertie d'une sphère.

Pour connaître $\Omega_{x'}$, $\Omega_{y'}$, $\Omega_{z'}$ il suffit donc de connaître les composantes de $\vec{\Omega}_\varphi$, $\vec{\Omega}_\theta$, $\vec{\Omega}_\psi$ selon Ox', Oy' et Oz'. On trouve aisément, en utilisant les formules de passage de Oxyz à Ox'y'z', que l'on a les relations suivantes :

$$\Omega_{x'} = \frac{d\varphi}{dt}\sin\theta\sin\psi + \frac{d\theta}{dt}\cos\psi$$

$$\Omega_{y'} = \frac{d\varphi}{dt}\sin\theta\cos\psi - \frac{d\theta}{dt}\sin\psi$$

$$\Omega_{z'} = \frac{d\varphi}{dt}\cos\theta + \frac{d\psi}{dt}$$

Nous pouvons maintenant appliquer les équations de Lagrange. Prenons, par exemple, celle qui est relative à la coordonnée généralisée ψ :

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial\dot{\psi}}\right) - \frac{\partial L}{\partial\psi} = 0$$

$\dot{\psi}$ n'intervient que dans $\Omega_{z'}$: $\dfrac{d\Omega z'}{d\dot{\psi}} = 1$

par conséquent : $\dfrac{d}{dt}\left(\dfrac{\partial L}{\partial\dot{\psi}}\right) = \dfrac{d}{dt}(I_{z'z'}\Omega_{z'}) = I_{z'z'}\dfrac{d\Omega_{z'}}{dt}$.

ψ intervient dans **V** et dans T :

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial\psi} = -M_{z'}$$

où $M_{z'}$ est la composante selon Oz' du moment résultant des forces appliquées.

D'autre part
$$\frac{\partial\Omega_{x'}}{\partial\psi} = \Omega_{y'}$$

$$\frac{\partial\Omega_{y'}}{\partial\psi} = -\Omega_{x'}$$

L'équation de Lagrange relative à ψ s'écrit donc :

$$I_{z'z'}\frac{d\Omega_{z'}}{dt} - (I_{x'x'} - I_{y'y'})\,\Omega_{x'}\Omega_{y'} = M_{z'}$$

On trouve de même pour θ et φ :

$$I_{x'x'}\frac{d\Omega_{x'}}{dt} - (I_{y'y'} - I_{z'z'})\,\Omega_{y'}\Omega_{z'} = M_{x'}$$

$$I_{y'y'}\frac{d\Omega_{y'}}{dt} - (I_{z'z'} - I_{x'x'})\,\Omega_{x'}\Omega_{z'} = M_{y'}$$

Ces équations sont appelées *équations d'Euler*.

Nous pouvons retrouver ces équations à partir du théorème du moment cinétique :

$$\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt}$$

Ce théorème ne s'applique que dans un référentiel d'inertie Oxyz, mais il est pratique d'exprimer L dans un référentiel Ox'y'z' lié au solide, et en particulier dans le référentiel constitué par les axes principaux, car l'expression de la matrice d'inertie est alors très simple, et indépendante du temps. Nous devons donc chercher la relation entre $\left(\dfrac{d\vec{L}}{dt}\right)_{Oxyz}$ et $\left(\dfrac{d\vec{L}}{dt}\right)_{Ox'y'z'}$; nous avons déjà effectué une telle opération au paragraphe *Référentiels non inertiels*:

$$\left(\frac{d\vec{L}}{dt}\right)_{Oxyz} = \left(\frac{d\vec{L}}{dt}\right)_{Ox'y'z'} + \vec{\Omega}\wedge\vec{L}$$

$\vec{\Omega}$ est le vecteur caractérisant la rotation de Ox'y'z' par rapport à Ox; comme Ox'y'z' est lié au solide, $\vec{\Omega}$ n'est autre que le vecteur de rotation du solide. Nous pouvons donc écrire le théorème du moment cinétique, par exemple en projection sur l'axe Oz' (supposé être axe principal du solide) :

$$M_{z'} = \left(\frac{d}{dt}\bar{\bar{J}}\vec{\Omega}\right)_{z'} + \Omega_{x'}L_{y'} - \Omega_{y'}L_{x'}$$

soit encore :

$$M_{z'} = I_{z'z'}\frac{d\Omega_{z'}}{dt} - (I_{x'x'} - I_{y'y'})\,\Omega_{x'}\Omega_{y'}$$

Cette relation est bien identique à l'une des équations d'Euler trouvées précédemment. Ces équations constituent les équations du mouvement de rotation du solide. Avant de les appliquer à quelques cas particuliers, nous allons calculer les moments d'inertie de quelques solides simples.

Moments d'inertie de solides simples

● *Cas de la sphère homogène*

La sphère étant parfaitement symétrique, les axes Ox, Oy et Oz jouent le même rôle ; on aura donc :

$$I_{xx} = I_{yy} = I_{zz}$$

Pour la même raison, les éléments diagonaux de la matrice d'inertie sont forcément nuls :

$$I_{xy} = I_{yz} = I_{zx} = 0$$

Nous avons vu, de plus, que :

$$I_{xx} + I_{yy} + I_{zz} = 2\iiint \rho r^2 dv$$

Donc : $I_{xx} = \dfrac{1}{3}(I_{xx} + I_{yy} + I_{zz}) = \dfrac{2}{3}\iiint \rho r^2 dv$.

Prenons comme élément de volume une coquille sphérique d'épaisseur dr (*fig.* 57) :

$$dv = 4\,\pi r^2 dr$$

Donc : $I_{xx} = \dfrac{2}{3}\rho\displaystyle\int_0^R 4\,\pi r^4 dr = \dfrac{8}{15}\pi\rho R^5$

Or, la masse totale de la sphère est $M = \dfrac{4}{3}\pi R^3\rho$

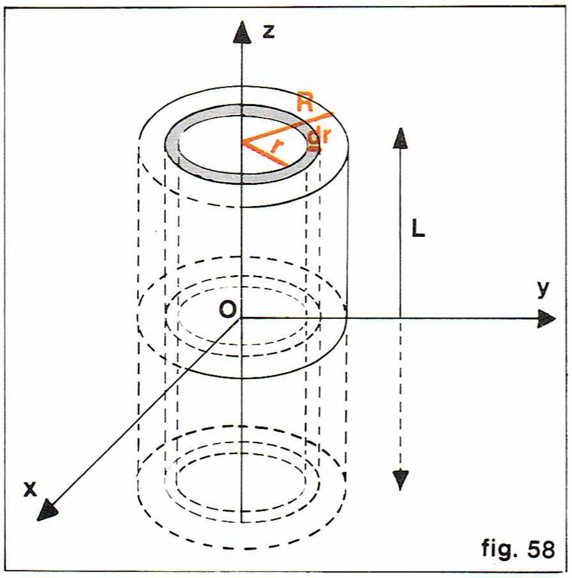

fig. 58

Richard Colin

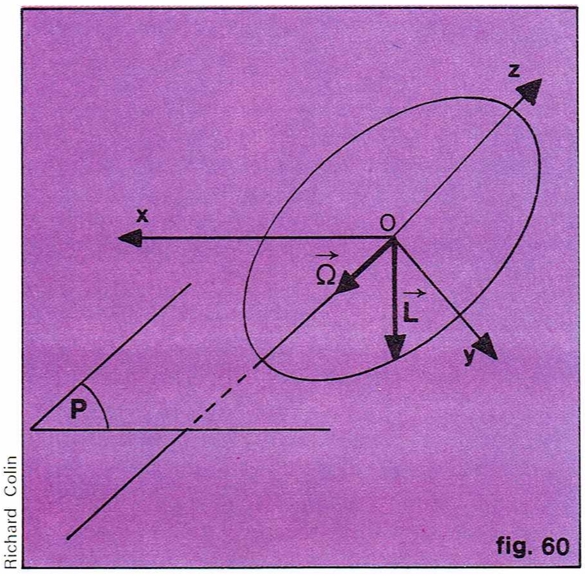

fig. 60

Richard Colin

◀ *A gauche, figure 58 : moment d'inertie d'un cylindre. A droite, figure 60 ; théorème de Poinsot : la distance du centre de l'ellipse au plan* P *est constante.*

Par conséquent : $I_{xx} = I_{yy} = I_{zz} = \frac{2}{5} MR^2$.

Notons que, pour une sphère, la relation $\vec{L} = \bar{\bar{J}}\vec{\Omega}$ se réduit à :

$\vec{L} = \frac{2}{5} MR^2\vec{\Omega}$; le moment cinétique d'une sphère est toujours parallèle à son vecteur instantané de rotation.

● *Cas du cylindre homogène*

Supposons que l'axe O*z* soit l'axe du cylindre (*fig.* 58). Les axes O*x* et O*y*, perpendiculaires à l'axe, jouent certainement le même rôle ; on doit avoir : $I_{xx} = I_{yy}$.

Calculons $I_{zz} = \iiint \rho\, (x^2 + y^2)\, dv$.

Nous prenons comme élément de volume une couche cylindrique d'épaisseur *dr* :

$$dv = 2\pi rL dr \quad \text{avec } r^2 = x^2 + y^2.$$

Nous avons alors :

$$I_{zz} = \rho \int_0^R r^2\, 2\pi L r dr$$

$$= \frac{1}{2}\pi\rho LR^4$$

or, la masse totale du cylindre est :

$$M = \rho\pi R^2 L$$

donc : $I_{zz} = \frac{1}{2} MR^2$

par conséquent :

$$I_{xx} = I_{yy} = \frac{1}{2}\left[2\iiint \rho\, (r^2 + z^2)\, dv - I_{zz}\right]$$

$$= M\left(\frac{R^2}{4} + \frac{L^2}{12}\right)$$

Pour une baguette très fine (R ≪ L), cette formule se réduit à : $I_{xx} = M\frac{L^2}{12}$.

Cherchons maintenant les éléments diagonaux :

$$I_{xy} = -\iiint \rho xy dv$$

A tout point de coordonnées (*x*, *y*) correspond un point de coordonnées (*x*, — *y*) : les contributions de ces deux points à l'intégrale s'annulent ; par conséquent $I_{xy} = 0$. Pour la même raison, on a : $I_{yz} = I_{zx} = 0$.

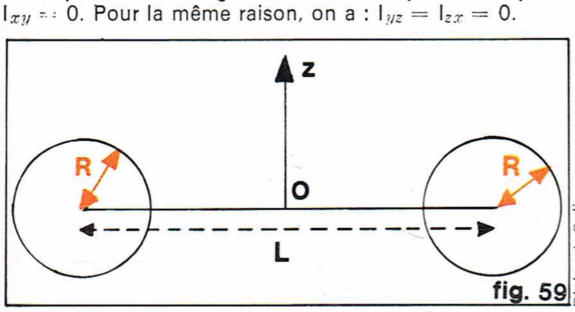

fig. 59

Richard Colin

◀ *Figure 59 : moment d'inertie d'un haltère.*

Les axes O*xyz* que nous avons choisis constituent donc les axes principaux d'inertie du cylindre.

● *Cas d'un haltère*

Nous supposons que deux sphères homogènes de rayon R sont fixées sur une tige de masse négligeable, de longueur L. Cherchons le moment d'inertie par rapport à un axe passant par le milieu de la tige et perpendiculaire à celle-ci (*fig.* 59). Nous savons que chacune des sphères a pour moment d'inertie $I_0 = \frac{2}{5} MR^2$ par rapport à un axe passant par son centre ; pour connaître le moment d'inertie situé à une distance $\frac{L}{2}$ du centre, nous utilisons le théorème de Huygens :

$$I = I_0 + M\frac{L^2}{4} \text{ soit : } I = \frac{2}{5} MR^2 + M\frac{L^2}{4}$$

Le moment d'inertie total est donc :

$$I_1 = \frac{4}{5} MR^2 + M\frac{L^2}{2}$$

Quant au moment d'inertie par rapport à l'axe passant par les centres des deux sphères, il est simplement :

$$I_2 = \frac{4}{5} MR^2$$

Mouvement d'un solide en l'absence de forces

Nous allons maintenant considérer le cas d'un solide en l'absence de forces (ou de couples). Les équations d'Euler se réduisent alors à :

$$I_{x'x'}\frac{d\Omega_{x'}}{dt} = \Omega_{y'}\Omega_{z'}\,(I_{y'y'} - I_{z'z'})$$

et les deux analogues.

Nous savons que, dans ce cas, l'énergie cinétique et le moment cinétique doivent rester constants au cours du mouvement, ce qui permet d'intégrer les équations du mouvement. Nous allons donner ici une description géométrique du mouvement.

Solide quelconque

Reprenons le vecteur $\vec{\rho}$ que nous avons défini au paragraphe *Moment cinétique d'un solide*, et dont l'extrémité a pour coordonnées (X, Y, Z) ; nous définissons la fonction F (X, Y, Z) par la relation :

$$F(X, Y, Z) = I_{x'x'}X^2 + I_{y'y'}Y^2 + I_{z'z'}Z^2$$

La surface définie par F (X, Y, Z) = I est l'*ellipsoïde d'inertie*. La normale à cette surface est proportionnelle à $\overrightarrow{\text{grad}}$ F : sa direction est donc définie par le vecteur unitaire de composantes ($2\, I_{x'x'}X$, $2\, I_{y'y'}Y$, $2\, I_{z'z'}Z$), ou par tout vecteur dont les composantes sont proportionnelles à celui-ci ; en particulier, si l'on considère le vecteur $\vec{\rho}$ parallèle à $\vec{\Omega}$, ces trois composantes deviennent :

▶ *Figure 61 ; toupie symétrique ayant un point fixe : gyroscope.*

$$2\, I_{x'x'}\Omega_{x'} = 2\, L_{x'}$$
$$2\, I_{y'y'}\Omega_{y'} = 2\, L_{y'}$$
$$2\, I_{z'z'}\Omega_{z'} = 2\, L_{z'}$$

Par conséquent, le vecteur $\vec{\Omega}$ sera tel que le vecteur $\vec{L}$ soit parallèle à la normale à l'ellipsoïde d'inertie au point où la direction de $\vec{\Omega}$ coupe cet ellipsoïde (*fig.* 60). Puisque aucun couple n'est appliqué, la direction de $\vec{L}$ est fixe dans l'espace, et l'ellipsoïde d'inertie (qui est lié au solide) doit donc se déplacer en restant tangent à un plan fixe perpendiculaire à $\vec{L}$.

La distance D de l'origine O au plan fixe est égale à la projection de $\vec{\rho}$ sur la direction de $\vec{L}$:

$$D = \frac{\vec{\rho}\vec{L}}{|\vec{L}|}$$

Rappelons que $\vec{\rho}$ est dans la direction de $\vec{\Omega}$: $\vec{\rho} = \lambda\vec{\Omega}$ et que les coordonnées (X, Y, Z) de $\vec{\rho}$ vérifient la relation :

$$F\,(X, Y, Z) = 1$$

Remplaçons X, Y, Z par $\lambda\Omega_{x'}$, $\lambda\Omega_{y'}$, $\lambda\Omega_{z'}$.

$$1 = \lambda^2\,(I_{x'x'}\Omega^2_{x'} + I_{y'y'}\Omega^2_{y'} + I_{z'z'}\Omega^2_{z'})$$

soit encore : $1 = 2\,T\lambda^2$

où T est l'énergie cinétique définie au paragraphe *Énergie cinétique de rotation*.

Nous savons donc maintenant que :

$$\vec{\rho} = \frac{1}{\sqrt{2\,T}}\vec{\Omega}$$

Nous pouvons donc écrire :

$$D = \frac{\vec{\rho}\vec{L}}{|\vec{L}|} = \frac{1}{\sqrt{2\,T}}\,\frac{\vec{\Omega}\vec{L}}{|\vec{L}|}$$

Or : $\vec{L} = \bar{\bar{J}}\vec{\Omega}$, donc :

$$\vec{\Omega}\cdot\vec{L} = \vec{\Omega}\,\bar{\bar{J}}\,\vec{\Omega} = I_{x'x'}\Omega^2_{x'} + I_{y'y'}\Omega^2_{y'} + I_{z'z'}\Omega^2_{z'}$$

soit : $\vec{\Omega}\cdot\vec{L} = 2\,T$

Donc : $$D = \frac{\sqrt{2\,T}}{|\vec{L}|}$$

Le solide étant isolé, T et $|\vec{L}|$ sont constants, donc D est constante.

Le mouvement du solide sera donc un mouvement de précession tel que l'ellipsoïde d'inertie roulera sans glisser sur le plan fixe, la distance du centre de l'ellipsoïde à ce plan restant constante **(théorème de Poinsot).**

Solide symétrique

Dans le cas où le solide est symétrique, on peut facilement retrouver directement le résultat du théorème de Poinsot. Supposons que l'axe *Oz* soit l'axe de symétrie (dans ce paragraphe, le système d'axes lié au solide *Ox'y'z'* est le seul à intervenir, donc aucune confusion n'est possible avec le système d'axes fixes; pour cette raison, nous désignerons dorénavant ces axes par *Ox*, *Oy*, *Oz* au lieu de *Ox'*, *Oy'*, *Oz'*). Les deux moments d'inertie I_{xx} et I_{yy} sont donc égaux. Les équations d'Euler s'écrivent alors :

$$I_{xx}\frac{d\Omega_x}{dt} = (I_{xx} - I_{zz})\,\Omega_z\Omega_y$$

$$I_{xx}\frac{d\Omega_y}{dt} = -\,(I_{xx} - I_{zz})\,\Omega_z\Omega_x$$

$$I_{zz}\frac{d\Omega_z}{dt} = 0$$

La dernière équation montre que Ω_z est constant. Pour résoudre les deux autres, nous pouvons par exemple déduire $\frac{d\Omega_y}{dt}$ de la seconde équation et l'introduire dans la première équation après avoir dérivé celle-ci :

$$\frac{d^2\Omega_x}{dt^2} = -\left(\frac{I_{xx} - I_{zz}}{I_{xx}}\,\Omega_z\right)^2\Omega_x$$

Nous reconnaissons là une équation caractéristique d'un mouvement harmonique, indiquant que Ω_x varie sinusoïdalement dans le temps :

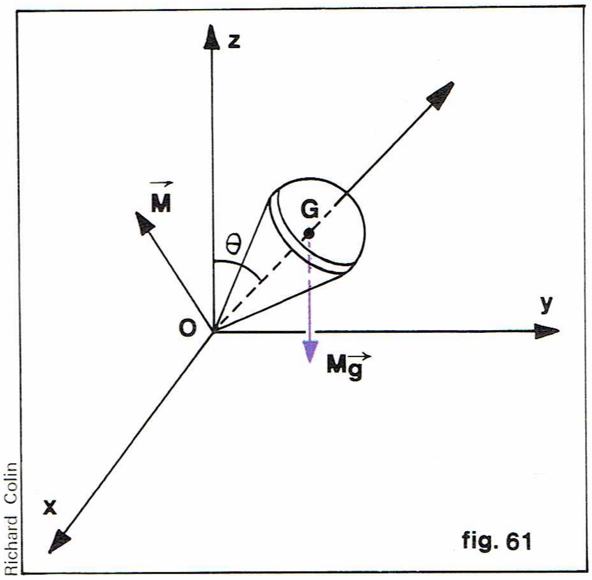

Richard Colin

fig. 61

$$\Omega_x = A\sin\omega t \quad \text{où}\quad \omega = \frac{I_{xx} - I_{zz}}{I_{xx}}\,\Omega_z$$

On démontre de même que : $\Omega_y = A\cos\omega t$, ce qui signifie que le vecteur $\vec{\Omega}$ a une amplitude constante et tourne avec une vitesse angulaire constante ω autour de *Oz*. Il faut se rappeler que *Oz* n'est pas nécessairement lui-même fixe dans l'espace, puisque *Oxyz* est un système d'axes lié au solide. Ce phénomène de précession n'apparaît pas pour une sphère parfaite, et son amplitude est d'autant plus grande que I_{xx} et I_{zz} sont plus différentes.

Un phénomène de ce genre a été observé pour la Terre, qui présente un léger renflement à l'équateur, de sorte que le rapport $\frac{I_{xx} - I_{zz}}{I_{xx}}$ est de l'ordre de 0,003; la fréquence de précession ω est donc de l'ordre de $0{,}003\,\Omega_z \simeq \frac{\Omega_z}{300}$, ce qui donne donc une période de 300 jours environ. Un observateur placé au pôle Nord devrait donc voir l'axe de rotation de la Terre tracer un cercle de quelques mètres de diamètre autour du pôle. La période effectivement observée est de 426 jours, et la courbe décrite par l'extrémité de $\vec{\Omega}$ est fort irrégulière. On interprète ces fluctuations comme dues à des phénomènes atmosphériques et à une déformation de la Terre consécutive aux variations de $\vec{\Omega}$; ce phénomène donne une idée de la rigidité de la Terre.

Il est très important de noter également que si, initialement, $\Omega_y = 0$, alors $\Omega_x = 0$ et le solide continue à tourner indéfiniment dans la direction fixe *Oz*.

Richard Colin

▶ *La toupie : un jeu d'enfant bâti sur un principe simple de mécanique.*

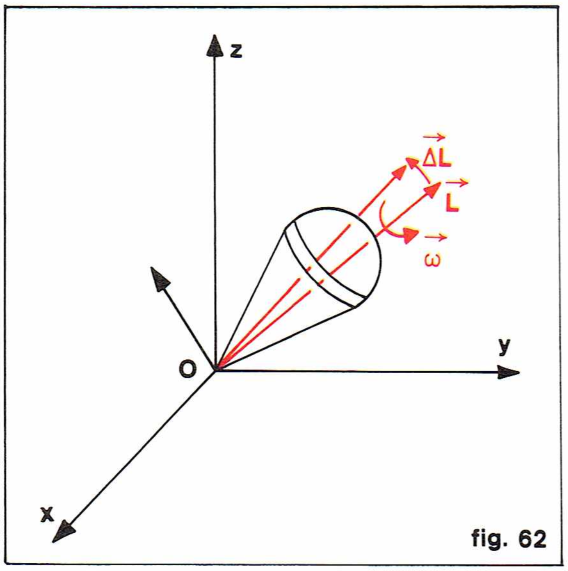

Richard Colin

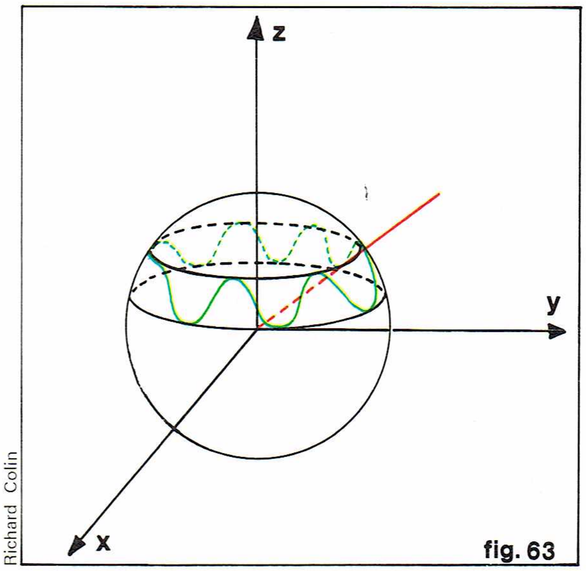

Richard Colin

◀ *A gauche, figure 62 : sous l'action de la pesanteur, la toupie tend à basculer, ce qui lui confère un mouvement cinétique supplémentaire $\Delta\vec{L}$. A droite, figure 63 : mouvement de précession et de nutation d'un gyroscope.*

Mouvement d'un solide symétrique possédant un point fixe : effet gyroscopique

Nous considérons maintenant une toupie symétrique de masse M ayant un point fixe O (*fig.* 61), soumise à son propre poids. La résultante des forces extérieures est une force Mg verticale passant par son centre de gravité. Le solide est donc soumis à un moment M horizontal, perpendiculaire à l'axe de la toupie. L'équation du mouvement est donc :

$$\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt}$$

Supposons que ce solide soit lâché sans vitesse initiale : il a donc à l'instant $t = 0$ un moment cinétique nul. A l'instant Δt, il aura un moment cinétique $\Delta\vec{L} = \vec{M}\Delta t$, parallèle à $\vec{M}$, donc horizontal. Il acquerra donc un vecteur de rotation qui, parce que la toupie est symétrique et que $\vec{M}$ est perpendiculaire à l'axe de la toupie, sera parallèle à $\vec{M}$. Autrement dit, on aura un phénomène très évident : la toupie va basculer autour du point O avec une vitesse angulaire $\vec{\Omega}$ qui dépendra du temps puisque $\vec{M}$ dépend de l'angle θ.

Supposons maintenant que, avant de lâcher la toupie, on l'ait mise en rotation très rapide $\vec{\omega}$ autour de son axe Oz (*fig.* 62). Elle possède donc initialement un moment cinétique $\vec{L}_0$ porté par Oz; l'effet de la force de pesanteur sera de lui ajouter un petit vecteur $\Delta\vec{L}$ donné par :

$$\Delta\vec{L} = \vec{M}\Delta t$$

Comme $\Delta\vec{L}$ est très petit devant $\vec{L}_0$, et si nous admettons que la vitesse de rotation est suffisamment rapide pour que l'axe de rotation reste toujours aligné sur la direction de $\vec{L}$, nous en déduisons que l'axe du gyroscope va se mettre à tourner autour de l'axe vertical. Au bout d'un temps t, le gyroscope aura tourné d'un angle :

$$\Delta\varphi \simeq \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{|\vec{M}|\ \Delta t}{L_0}$$

Soit $\mathcal{J}$ le moment d'inertie de la toupie par rapport à son axe de rotation Oz; nous pouvons exprimer le moment cinétique initial :

$$L_0 = \mathcal{J}\omega$$

La vitesse angulaire de précession est donc :

$$\Omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{|\vec{M}|}{\mathcal{J}\omega}$$

Par conséquent, nous constatons que la rotation du solide a pour effet de mettre en mouvement son centre de gravité dans un sens perpendiculaire aux forces qui s'exercent sur celui-ci. Ce paradoxe apparent est dû au fait que la démonstration que nous avons donnée est excessivement simplifiée. En fait, le solide commence bien par basculer comme s'il n'était pas en rotation, et ce n'est qu'ensuite que la précession va commencer. Le véritable mouvement du corps est indiqué sur la *figure* 63 : au mouvement de précession vient s'ajouter un petit mouvement appelé mouvement de nutation. L'amplitude de ce mouvement est inversement proportionnelle à ω^2, de sorte que, pour des vitesses de rotation suffisantes, le mouvement de nutation est imperceptible.

Ce comportement d'un solide tournant à grande vitesse et ayant un point fixe est appelé *effet gyroscopique*. Il en existe de nombreux exemples dans la vie courante.

▼ *Un gyroscope en mouvement.*

E. Rousseau - Snark International

Par exemple, un motocycliste s'incline pour prendre un virage : il exerce un couple dirigé vers l'arrière, s'il s'incline à gauche ; les roues, qui constituent des gyroscopes, sont alors soumises à un mouvement de précession qui les fait tourner à gauche, ce qui est le but recherché.

Si le corps en rotation est monté de telle sorte que son point fixe soit son centre de gravité, il n'y a plus de couple appliqué. On peut alors le monter dans une armature à la Cardan (*fig.* 64), de telle sorte qu'il pointera en permanence dans une direction fixe de l'espace. Cette propriété extrêmement importante est utilisée dans tous les systèmes de guidage par inertie, gyrocompas, indicateurs d'horizon, etc.

Ph. Michel - Explorer

▲ *Un exemple d'effet gyroscopique : le motocycliste.*

▼ *A gauche, figure 65 : solide en rotation autour de l'axe fixe x'x. A droite, figure 64 : suspension à la Cardan permettant à l'axe du gyroscope de garder une direction fixe dans l'espace.*

Solide en rotation autour d'un axe fixe

Équations du mouvement

Nous considérons maintenant un solide tournant autour d'un axe *x'x* défini par deux points fixes O et O' (*fig.* 65). Ce solide est soumis à des forces extérieures dont la résultante est $\vec{F}$ et le moment résultant $\vec{M}$ par rapport à O ; nous désignons par $\vec{R}$ et $\vec{R}'$ les réactions des paliers supportant l'axe O et O' et par $\vec{M}'$ le moment de la réaction en O' par rapport à O (le moment de la réaction $\vec{R}$ est évidemment nul). Le théorème du moment cinétique s'écrit donc :

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M} + \vec{M}'$$

$\vec{L}$ est défini par la relation :

$$\vec{L} = \bar{\bar{\mathcal{J}}}\vec{\Omega}$$

où la seule composante non nulle de $\vec{\Omega}$ est $\Omega_x = |\vec{\Omega}|$:

$$L_x = I_{xx}\Omega_x$$

Comme R' passe par l'axe *x'x*, la composante de $\vec{M}'$ le long de cet axe est nulle. L'équation du mouvement, en projection sur *x'x*, s'écrit donc simplement :

$$I_{xx}\frac{d\Omega_x}{dt} = M_x$$

car I_{xx} reste constant pendant la rotation autour de *x'Ox*.

Réactions de l'axe

Il est très important, dans la pratique, de savoir à quelles forces l'axe va se trouver soumis, donc de connaître les réactions R et R' en O et O'. Nous allons calculer ces réactions en supposant que l'on se trouve en régime permanent, c'est-à-dire que la vitesse angulaire Ω est constante. Le moment cinétique $\vec{L}$ a alors une longueur constante. Comme sa projection L_x est elle-même constante si $\frac{d\Omega_x}{dt} = 0$, il en résulte que l'extrémité de $\vec{L}$ décrit un cône de demi-angle au sommet θ ; le vecteur $\frac{d\vec{L}}{dt}$ est donc tangent au cercle décrit par l'extrémité de $\vec{L}$, et son module est $I_{xx}\Omega_x^2$ tg θ. Le théorème du moment cinétique s'écrit :

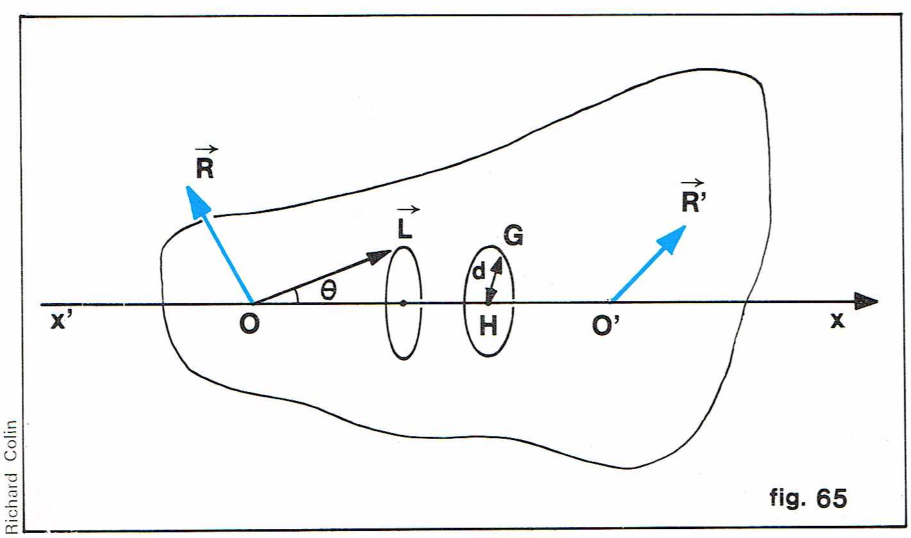

Richard Colin

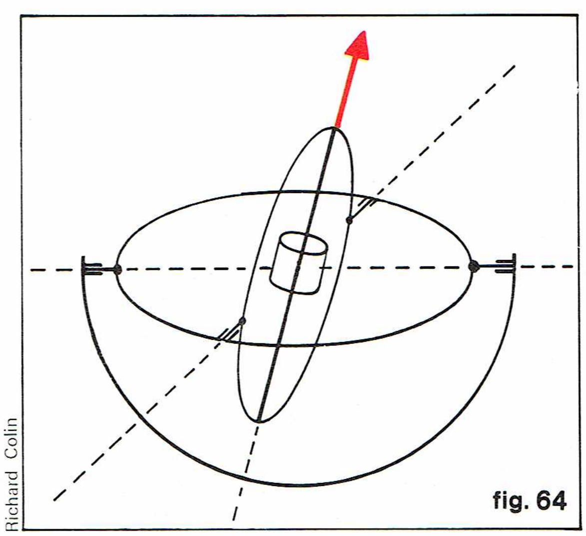

Richard Colin

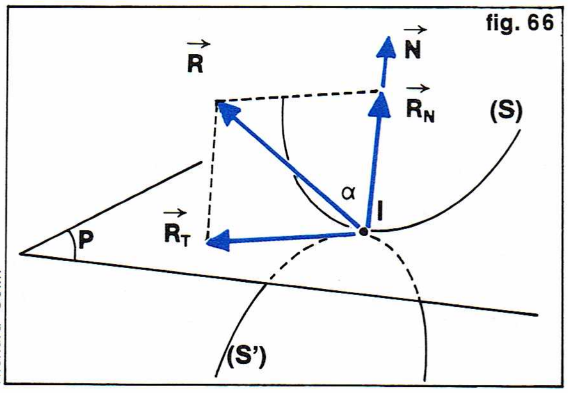

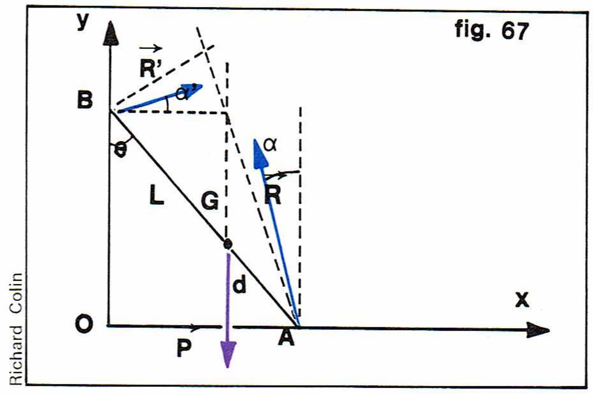

◀ *A gauche, figure 66 : force de frottement entre deux solides (S) et (S'). A droite, figure 67 : à quelle condition l'échelle AB est-elle en équilibre ?*

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M} + \overrightarrow{OO'} \wedge \vec{R}'$$

Il faut compléter cette équation par l'équation du mouvement du centre de gravité G ; celui-ci est animé d'un mouvement circulaire uniforme de rayon HG = d ; l'équation du mouvement s'écrit donc :

$$\vec{F} + \vec{R} + \vec{R}' = - M\Omega_x^2\overrightarrow{HG}$$

Ces deux équations déterminent les réactions que les paliers exercent sur les axes.

On voit que, si, d'une part, l'axe de rotation est un axe principal d'inertie, et si, d'autre part, le centre de gravité du solide est sur l'axe de rotation, les réactions sont les mêmes que si le solide était immobile.

Si l'une ou l'autre de ces conditions n'est pas réalisée, les réactions possèdent des composantes variables avec le temps et qui sont proportionnelles au carré de la vitesse de rotation. Ces composantes peuvent devenir extrêmement grandes et entraîner la rupture de l'arbre. Il est donc très important pour les machines tournant à grande vitesse de réaliser l'équilibrage statique (amener G sur $x'x$) et l'équilibrage dynamique (amener $\vec{L}$ parallèle à $x'x$). Cet équilibrage est souvent réalisé par des balourds, petites masses que l'on fixe sur le solide en des points déterminés ; c'est en particulier le cas des roues d'automobiles sur les jantes desquelles on observe très fréquemment un balourd.

Statique des solides

Nous avons considéré jusqu'ici les équations du mouvement de points matériels ou d'ensembles de points matériels. Nous allons maintenant envisager les équations régissant l'équilibre statique de solides indéformables, ce qui présente évidemment un intérêt considérable pour toutes les constructions.

L'équation fondamentale de la dynamique s'écrit, pour un solide immobile :

$$\sum_i F_i = 0$$

Quant au théorème du moment cinétique, il s'écrit :

$$\sum_i M_i = 0$$

Un solide est donc en équilibre lorsque la résultante des forces appliquées et la résultante des moments de ces forces sont nulles. En écrivant ces deux relations en projection sur les trois axes, on obtient six équations qui déterminent l'équilibre du solide.

Frottements

Les frottements jouent un rôle particulièrement important dans l'équilibre des solides, comme on peut le constater chaque jour : par exemple, une échelle appuyée contre un mur n'est en équilibre que grâce aux frottements contre le sol et le mur.

Frottement de glissement

Supposons que deux solides (S) et (S') soient en contact en un point I (*fig.* 66). Le solide (S') exerce sur (S) une réaction $\vec{R}$, passant par I. En l'absence de frottement, la réaction $\vec{R}$ est normale au plan tangent aux deux solides en I, de sorte que, si l'on exerce sur (S) une force, aussi minime soit-elle, présentant une composante parallèle au plan (P), le solide (S) glissera sur le solide (S').

Si, en revanche, il y a frottement, la réaction $\vec{R}$ n'est pas nécessairement perpendiculaire au plan tangent, mais fait avec la normale $\vec{N}$ un angle α. Cet angle est tel que la composante tangentielle R_T de la réaction équilibre la composante tangentielle de la force appliquée : le glissement est empêché et les deux solides restent en équilibre.

Il est évident que, si l'on augmente la force appliquée, cette situation ne peut se prolonger indéfiniment : il vient un moment où les frottements ne peuvent plus s'opposer au déplacement. La loi, purement expérimentale, qui détermine ce moment est la suivante : les deux solides resteront en équilibre tant que la réaction $\vec{R}$ restera à l'intérieur d'un cône de demi-angle au sommet φ_0, la valeur de φ_0 dépendant uniquement de la nature des deux surfaces en contact.

On appelle coefficient de frottement de glissement statique la quantité $f_0 = \text{tg}\,\varphi_0$. On a donc :

$$|R_T| \leqslant f_0\,|R_N|$$

pour qu'il n'y ait pas de glissement.

Lorsque le contact est sans frottement, la réaction est normale au plan tangent, donc $\varphi_0 = 0$. Le coefficient de frottement est donc nul.

Lorsque deux corps sont en mouvement l'un par rapport à l'autre, il y a toujours un frottement ; la composante tangentielle de la réaction est alors colinéaire à la vitesse de glissement, de sens opposé, et son module est tel que l'on ait :

$$|R_T| = f\,|R_N| = |R_N|\,\text{tg}\,\varphi$$

Contrairement au cas du frottement statique, le frottement cinétique se traduit par une égalité et non par une inégalité.

Frottement de pivotement

Supposons maintenant que, au lieu d'une force tendant à faire glisser (S) sur (S'), on applique au solide (S) un couple C tendant à le faire pivoter autour du point I. Là encore, on constate que, au-delà d'une certaine valeur de couple, les forces de frottement deviennent incapables de s'opposer au mouvement. La loi, purement expérimentale, est la suivante :

$$|C_N| \leqslant K_0\,|R_N|$$

où $|C_N|$ désigne la composante normale du couple, et $|R_N|$ la composante normale de la réaction. Le coefficient K_0, appelé coefficient de frottement de pivotement, ne dépend que de la nature des surfaces en contact.

Exemple : problème de l'échelle

Nous considérons (*fig.* 67) une échelle AB, de longueur L, appuyée contre un mur, portant une charge, et nous cherchons quel est l'angle limite θ que peut faire l'échelle pour ne pas glisser. Nous appelons f et f' les coefficients de frottement sur le sol et le mur respectivement. Soit $\vec{P}$ le poids total de l'échelle et de la charge, appliqué au centre de gravité G qui se trouve à une distance d = AG de l'extrémité inférieure de l'échelle.

Les forces appliquées sont : le poids $\vec{P}$ appliqué en G, la réaction $\vec{R}$ appliquée en A, faisant un angle α avec la verticale, la réaction $\vec{R}'$, appliquée en B, faisant un angle α' avec l'horizontale.

Écrivons que la résultante des forces est nulle, en projection sur Ox et Oy :

$$R \sin \alpha - R' \cos \alpha' = 0$$
$$R \cos \alpha + R' \sin \alpha' - P = 0$$

Écrivons que le moment des forces par rapport à A est nul :

$$Pd \sin \theta - R'L \cos (\theta - \alpha') = 0$$

Si l'angle θ est fixe, les quantités R, R', α, et α' sont inconnues. Or nous n'avons que trois équations : nous ne pouvons donc déterminer les quatre inconnues ; on dit que le *système* est *hyperstatique*.

L'équilibre limite est atteint lorsque $\alpha = \varphi$ et $\alpha' = \varphi'$. Nous cherchons maintenant à calculer R, R' et surtout l'inclinaison limite θ_l : nous pouvons trouver ces trois inconnues puisque nous avons trois équations. Les deux premières donnent :

$$R = P \frac{\cos \varphi'}{\cos (\varphi' - \varphi)} \quad \text{et} \quad R' = P \frac{\sin \varphi}{\cos (\varphi' - \varphi)}$$

Nous déduisons alors θ_l de la troisième équation :

$$Pd \sin \theta_l - PL \frac{\sin \varphi}{\cos (\varphi' - \varphi)} \cos (\theta_l - \varphi') = 0$$

$$d \sin \theta_l - L \frac{\sin \varphi}{\cos (\varphi' - \varphi)} (\cos \theta_l \cos \varphi' + \sin \theta_l \sin \varphi') = 0$$

soit :

$$\operatorname{cotg} \theta_l = \frac{d}{L} (\operatorname{cotg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi') - \operatorname{tg} \varphi'$$

Si le mur et le sol sont de la même matière, on a $\varphi = \varphi'$; l'angle limite est alors :

$$\operatorname{cotg} \theta_l = \frac{d}{L} (\operatorname{cotg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi) - \operatorname{tg} \varphi$$

▼ ***Figure 68 :*** ***angle que peut faire l'échelle avec la verticale, en fonction de l'angle de frottement*** φ, ***pour diverses valeurs de*** $\frac{d}{L}$.

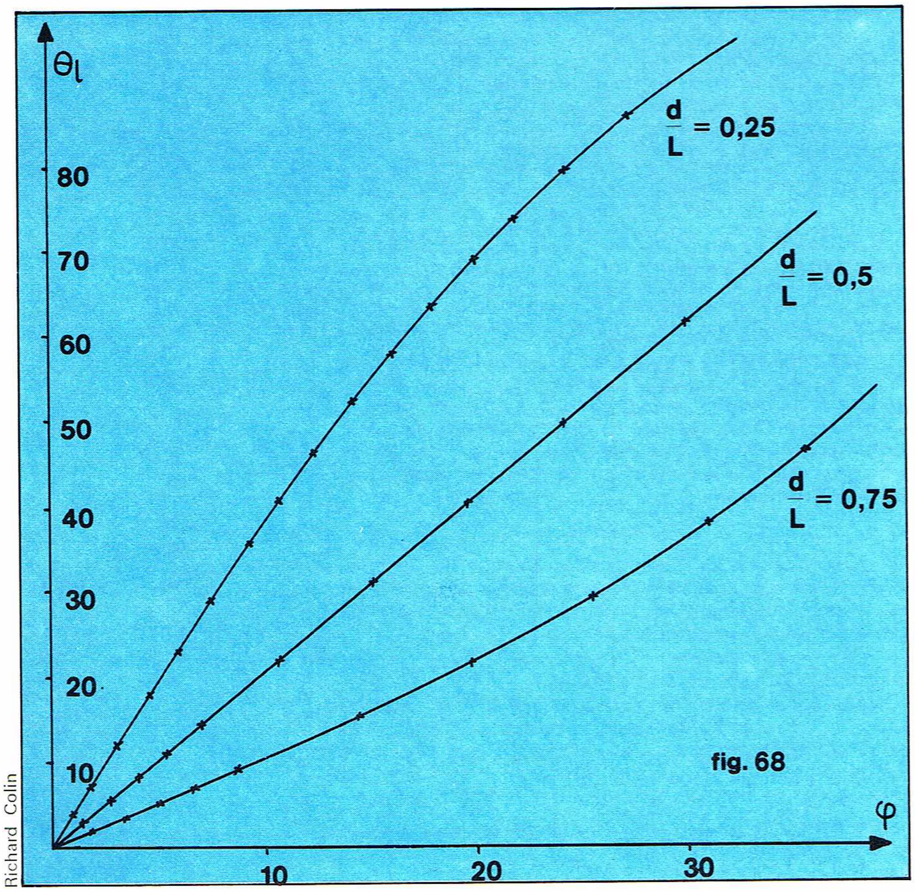

L'allure de θ_l en fonction de φ est représentée sur la *figure* 68. On voit que, évidemment, plus le frottement est fort, plus l'angle limite est grand : pour un frottement très faible, l'échelle doit être quasi verticale. D'autre part, pour un frottement donné et un angle θ donné, on sera d'autant plus en sécurité que l'on sera bas sur l'échelle : par exemple, pour $\varphi = 20°$ et $\theta = 40°$, on est en sécurité pour $\frac{d}{L} = 0{,}25$, puisque $\theta < \theta_l$, et on arrive à la limite du glissement pour $\frac{d}{L} = 0{,}50$.

Principe des travaux virtuels

L'équilibre d'un système statique peut, nous l'avons vu dans l'exemple précédent, être déterminé en écrivant que la résultante des forces et le moment résultant sont nuls. Il existe cependant une autre méthode, fondée sur le calcul du travail des forces.

Nous savons en effet que, lorsqu'un corps est soumis à des forces conservatives, c'est-à-dire dérivant d'un potentiel **V**, on peut exprimer les forces comme dérivées de **V** par rapport aux variables d'espace (x, y, z) et les moments comme dérivées de **V** par rapport aux variables angulaires (ψ, θ, φ).

Supposons que l'on ait un système de solides indéformables à l'équilibre, et imaginons que l'on effectue un petit déplacement de chacun de ces solides, en respectant les liaisons : nous appelons une telle opération un *déplacement virtuel compatible avec les liaisons*.

Supposons que les contacts entre les solides se fassent sans frottement : les réactions sont perpendiculaires au plan tangent commun aux deux surfaces en contact ; or, pour qu'un déplacement soit compatible avec la liaison, il doit nécessairement se faire dans le plan tangent : dans un tel déplacement, le travail de la réaction est donc nul, puisque celle-ci est perpendiculaire au déplacement. Or, chaque solide, étant à l'équilibre, est soumis à des forces dont la résultante est nulle. Le travail effectué par l'ensemble de ces forces est donc nul. Or, le travail des forces de contact est nul, comme nous venons de le voir. Il en résulte que le travail de toutes les forces autres que les forces de contact est nul dans un déplacement virtuel compatible avec les liaisons.

Ce théorème, il faut le noter, n'apporte rien aux lois fondamentales de la statique ; il est simplement un outil commode pour résoudre les problèmes de statique.

Statique graphique

Outre les méthodes que nous venons de citer, un certain nombre de méthodes purement graphiques sont utilisées pour résoudre les problèmes de constructions mécaniques, lorsque l'on a un système de forces disposées dans un plan. Ces méthodes (polygone dynamique, polygone funiculaire) permettent d'obtenir rapidement et simplement, mais de façon relativement peu précise, les valeurs numériques des réactions aux appuis et des forces appliquées en divers points.

La formulation hamiltonienne de la mécanique

Jusqu'ici, nous avons vu les principes de la mécanique sous leurs formes lagrangienne et newtonienne, puis nous avons considéré un certain nombre d'applications de ces principes à divers aspects de la dynamique et de la statique. Nous allons maintenant revenir aux premiers principes pour donner de la mécanique une autre formulation dite *formulation hamiltonienne*, qui est d'une très grande généralité — et qui est par conséquent assez abstraite. Cette voie nous conduira jusqu'aux premiers principes de la mécanique quantique.

Définition de l'hamiltonien

Rappelons tout d'abord les **équations de Lagrange.**

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0$$

La fonction L, appelée lagrangien, est L = T — **V** où T est l'énergie cinétique et **V** l'énergie potentielle ; q_i est une coordonnée généralisée de la i-ième particule du système et $\dot{q}_i$ est la dérivée de q_i par rapport au temps.

Nous avons également vu que, pour un système conser-

Harlingue - Roger Viollet

◀ *Le mathématicien* **Hamilton** *(1805-1865).*

vatif, l'énergie totale est conservée. Supposons que le système considéré soit conservatif et que, de plus, les contraintes soient indépendantes du temps. La fonction L ne dépend alors pas explicitement du temps, de telle sorte que l'on peut écrire :

$$\frac{dL}{dt} = \sum_i \frac{\partial L}{\partial q_i}\frac{dq_i}{dt} + \sum_i \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\frac{d\dot{q}_i}{dt}$$

Nous pouvons remplacer $\frac{\partial L}{\partial q_i}$ par sa valeur obtenue d'après l'équation de Lagrange :

$$\frac{\partial L}{\partial q_i} = \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right)$$

de sorte que nous obtenons :

$$\frac{dL}{dt} = \sum_i \frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\dot{q}_i + \sum_i \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\frac{d\dot{q}_i}{dt}$$

ce qui peut encore s'écrire :

$$\textbf{(38)} \qquad \frac{d}{dt}\left[L - \sum_i \left(\dot{q}_i \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right)\right] = 0$$

Nous définissons l'**hamiltonien** par la relation :

$$H = \sum_i \dot{q}_i \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - L$$

soit encore :

$$H = \sum_i \dot{q}_i p_i - L$$

La relation **(38)** montre donc que l'hamiltonien est une constante du mouvement : nous allons voir que H n'est autre que l'énergie totale du système.

Pour un système conservatif dans lequel V est indépendant de la vitesse, on a :

$$p_i = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} = \frac{\partial}{\partial \dot{q}_i}(T - V) = \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i}$$

Nous pouvons donc écrire l'hamiltonien sous la forme :

$$H = \sum_i \dot{q}_i \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} - L$$

Or, l'énergie cinétique T est une fonction quadratique homogène des vitesses ; on peut alors facilement démontrer que :

$$\sum_i \dot{q}_i \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} = 2\,T$$

Par conséquent : $H = 2\,T - L = 2\,T - (T - V)$

ou encore : $H = T + V$

H est donc l'*énergie totale* du système, et, d'après la relation **(38)**, H est constant : nous retrouvons bien ainsi le théorème de conservation de l'énergie.

Équations du mouvement de Hamilton

Les équations de Lagrange permettent d'obtenir les coordonnées généralisées $q_i\,(t)$ et les vitesses généralisées $\dot{q}_i\,(t)$ à partir du moment où l'on connaît les coordonnées et les vitesses à l'instant initial, puisque les équations différentielles sont du second ordre ; le lagrangien lui-même est fonction des q_i, des $\dot{q}_i$ et du temps. L'hamiltonien, lui, est fonction des q_i, des p_i et de t ; il doit donc nous permettre de calculer les q_i et les p_i en fonction du temps. Considérons en effet l'hamiltonien :

$$H = \sum_i \dot{q}_i p_i - L$$

La différentielle de H est :

$$\textbf{(39)} \qquad dH = \sum_i \frac{\partial H}{\partial q_i} dq_i + \sum_i \frac{\partial H}{\partial p_i} dp_i + \frac{\partial H}{\partial t} dt$$

Mais d'autre part, d'après la définition de H :

$$dH = \sum_i \dot{q}_i dp_i + \sum_i p_i d\dot{q}_i - \sum_i \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} d\dot{q}_i - \sum_i \frac{\partial L}{\partial q_i} dq_i - \frac{\partial L}{\partial t} dt$$

Or, $\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} = p_i$ par définition des moments généralisés, et, de plus, $\frac{\partial L}{\partial q_i} = \frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} = \dot{p}_i$ en vertu de l'équation de Lagrange.

Par conséquent, la différentielle dH devient :

$$dH = \sum_i \dot{q}_i dp_i - \sum_i \dot{p}_i dq_i - \frac{\partial L}{\partial t} dt$$

Si nous identifions cette expression à la relation **(39)**, nous obtenons :

$$\textbf{(40)} \qquad \left|\begin{array}{l} \dfrac{\partial H}{\partial q_i} = -\dot{p}_i \\ \dfrac{\partial H}{\partial p_i} = \dot{q}_i \\ \dfrac{\partial H}{\partial t} = -\dfrac{\partial L}{\partial t} \end{array}\right.$$

Les équations **(40)** sont les **équations de Hamilton ;** elles sont au nombre de $2\,n$, où n est le nombre de degrés de liberté du système, et elles sont équivalentes aux équations de Lagrange. La procédure à suivre, pour résoudre un problème par les équations de Hamilton, consiste donc à calculer le lagrangien $L = T - V$, puis à former l'hamiltonien $H = \sum_i p_i\dot{q}_i - L$, et, enfin, à appliquer les équations de Hamilton pour trouver les quantités $\dot{q}_i$ et $\dot{p}_i$; on obtient alors q_i et p_i à l'aide d'une intégration. Rappelons que l'hamiltonien ne doit être fonction que des q_i, des p_i et du temps.

Prenons l'exemple très simple d'un solide de masse m en chute libre dans le champ de pesanteur. L'énergie potentielle est $V = -mgz$, donc le lagrangien vaut :

$$L = \frac{1}{2} m\dot{z}^2 - mgz$$

La coordonnée généralisée étant z, le moment conjugué est :

$$p_z = \frac{\partial L}{\partial \dot{z}} = m\dot{z}$$

Nous pouvons donc exprimer la vitesse en fonction du moment : $\dot{z} = \frac{p_z}{m}$.

Formons l'hamiltonien : $H = p_z\dot{z} - L$.

L'hamiltonien n'est fonction que des coordonnées et des moments, non des vitesses ; nous devons donc utiliser l'expression de z en fonction de p_z, ce qui donne :

$$H = \frac{p_z^2}{2\,m} + mgz$$

L'hamiltonien étant formé, nous appliquons les équations du mouvement :

$$\dot{z} = \frac{\partial H}{\partial p_z} = \frac{p_z}{m}$$

$$-\,\dot{p}_z = \frac{\partial H}{\partial z} = mg$$

De la seconde équation, nous tirons :

$$p_z = -\,mgt + K$$

où K est une constante dépendant de la vitesse initiale. Reportant dans la première équation de Hamilton, nous obtenons après intégration :

$$z = -\frac{1}{2}\,gt^2 + Kt + K'$$

On trouve un mouvement uniformément accéléré. On pourrait évidemment aussi bien obtenir ce résultat en appliquant la loi fondamentale de la dynamique. Ce qui est important, c'est que les variables z et p_z jouent le rôle de deux variables indépendantes, alors que, dans la formulation de Lagrange, c'est z et $\dot{z}$ qui sont les deux variables.

Le principe de moindre action

Nous avons vu que l'on peut déduire les équations de Lagrange du principe de Hamilton qui est le suivant : si un système est caractérisé par des coordonnées généralisées q_i à un instant t_1 et des coordonnées généralisées q'_i à l'instant t_2, le chemin suivi pour aller d'un état à l'autre est tel que l'intégrale :

$$I = \int_{t_1}^{t_2} L\,dt \qquad \text{soit extrémum.}$$

L est le lagrangien, qui est exprimé en fonction des coordonnées et des vitesses généralisées.

Puisque nous savons que nous pouvons prendre comme variables les coordonnées généralisées et les impulsions généralisées, nous pouvons énoncer un nouveau principe, dit **principe de moindre action ;** dans un système pour lequel l'hamiltonien est conservé, l'intégrale :

$$A = \int_{t_1}^{t_2} \sum_i p_i \dot{q}_i\,dt \quad \text{doit être extrémum.}$$

La différence entre les deux principes est la suivante :

– dans le cas du *principe de Hamilton*, les points de départ et d'arrivée ainsi que t_1 et t_2 sont fixés ;

– dans le cas du *principe de moindre action*, les points de départ et d'arrivée sont fixés, mais les instants t_1 et t_2 ne le sont pas ; en revanche, les chemins envisagés doivent être tels que l'hamiltonien soit conservé.

Reprenons l'exemple déjà considéré au paragraphe *Principe de Hamilton* d'un point matériel libre de masse m, qui passe à l'origine à l'instant t_1 et qui aboutit au point (X, 0, 0) à l'instant t_2. Cherchons quel est son mouvement entre t_1 et t_2. L'hamiltonien est :

$$H = T + V = \frac{1}{2}\,m\,(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)$$

La trajectoire doit être telle que l'intégrale

$$A = \int_{t_1}^{t_2} m\,(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)\,dt$$

soit minimum puisque $p_x = mv_x$, $p_y = mv_y$, $p_z = mv_z$. De plus, l'hamiltonien doit être conservé :

$$v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 = v_0^2 = \text{constante}$$

L'intégrale s'écrit donc :

$$A = mv_0^2\,(t_2 - t_1)$$

Puisque v_0 est imposé par les conditions initiales, c'est $t_2 - t_1$ qui doit être minimal. Or, par définition :

$$t_2 - t_1 = \int_0^X \frac{dx}{v_x}$$

Or, v_x vaut au minimum v_0 ; la durée du trajet sera donc minimum si $v_x = v_0$ pendant tout le trajet ; on aura alors :

$$t_2 = t_1 + \frac{X}{v_0}$$

L'intégrale d'action sera donc minimum si le point se déplace en ligne droite à vitesse constante. On retrouve, bien sûr, le résultat obtenu à partir du principe de Hamilton, mais de façon très différente : nous avons été amené ici à minimiser la durée du trajet, alors que celle-ci est fixée dans le cas du principe de Hamilton.

Sous cette forme, le principe de moindre action s'apparente beaucoup au principe de Fermat qui régit l'optique géométrique : le chemin optique de la lumière entre deux points de l'espace est celui pour lequel la durée du trajet du rayon lumineux est minimum.

Les transformations canoniques et la théorie de Hamilton-Jacobi

Nous avons déjà indiqué que l'originalité de la formulation de Hamilton est qu'elle donne aux coordonnées et aux moments conjugués des rôles symétriques de variables indépendantes. Le choix de ces variables, pour résoudre un problème de mécanique, est très important, car un choix astucieux peut faciliter la résolution alors qu'un choix maladroit peut entraîner d'inextricables calculs. Par exemple, dans certains cas, on peut avoir intérêt à choisir comme coordonnées les coordonnées cartésiennes x et y, et dans un autre cas, les coordonnées polaires r et θ : aucun des deux choix n'aboutit à des solutions inexactes, mais l'un peut permettre de trouver la solution plus rapidement que l'autre. Il apparaît alors intéressant de savoir par quelles transformations on peut passer d'un système de coordonnées à un autre : ce sont les transformations ponctuelles, bien connues, et que nous avons utilisées à plusieurs reprises. Mais, par ailleurs, nous savons que l'hamiltonien dépend, non seulement des coordonnées q_i, mais aussi des moments p_i : il faut donc savoir également comment se transforment les moments dans un tel changement de variables. Nous nous trouvons donc devant le problème suivant : un système mécanique est décrit par des coordonnées généralisées $q_1, q_2, ..., q_i, ..., q_n$, par des moments généralisés $p_1, p_2, ..., p_i, ..., p_n$ et par un hamiltonien H dépendant de ces variables ; les équations du mouvement sont :

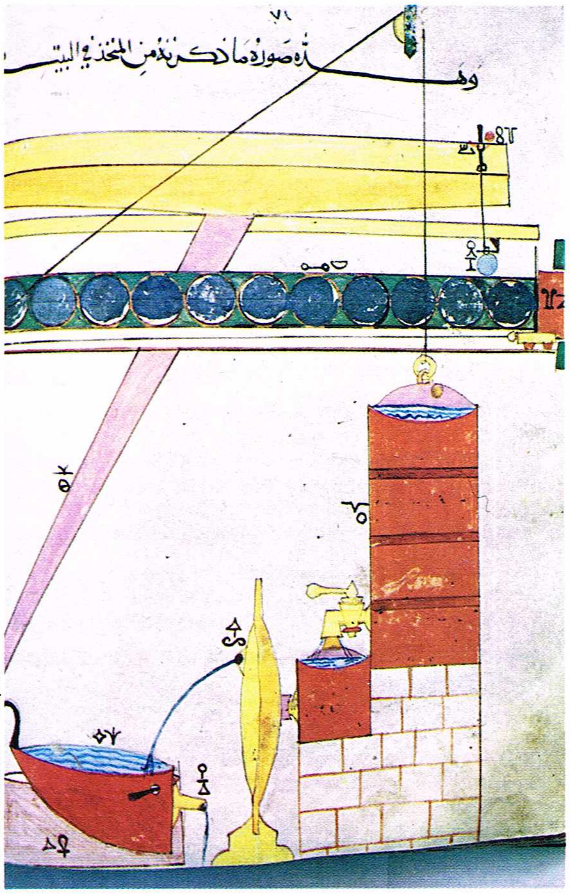

▶ ***Deux pages extraites** du* **Livre des devis mécaniques** ***(XIIIe siècle) [musée Topkapi ; Turquie].***

R. et S. Michaud - Rapho

$$\dot{q}_i = \frac{\partial H}{\partial p_i}$$

$$\dot{p}_i = -\frac{\partial H}{\partial q_i}$$

et nous effectuons un changement de variables défini par les équations :

$$Q_i = Q_i\,(q_1, q_2, \ldots, q_n, p_1, p_2, \ldots, p_n, t)$$
$$P_i = P_i\,(q_1, q_2, \ldots, q_n, p_1, p_2, \ldots, p_n, t)$$

où les Q_i et les P_i sont les nouvelles coordonnées et les nouveaux moments. Il est évident que ces transformations sont intéressantes uniquement si elles nous permettent de rester dans la formulation de Hamilton, c'est-à-dire si l'on peut trouver un nouvel hamiltonien H′ tel que :

$$\text{(41)} \qquad \begin{cases} \dot{Q}_i = \dfrac{\partial H'}{\partial P_i} \\ \dot{P}_i = -\dfrac{\partial H'}{\partial Q_i} \end{cases}$$

Si un tel hamiltonien existe, on dit que l'on a effectué une transformation canonique.

Prenons un exemple extrêmement simple : supposons que les équations de transformation soient simplement :

$$\text{(42)} \qquad \begin{cases} Q_i = p_i \\ P_i = -q_i \end{cases}$$

Écrivons les équations de Hamilton avec les anciennes variables :

$$\text{(43)} \qquad \begin{cases} \dot{q}_i = \dfrac{\partial H}{\partial p_i} \\ \dot{p}_i = -\dfrac{\partial H}{\partial q_i} \end{cases}$$

Utilisons nos équations de transformation :

$$\dot{q}_i = -\dot{P}_i\,; \quad \dot{p}_i = \dot{Q}_i$$

$$\frac{\partial H}{\partial p_i} = \frac{\partial H}{\partial Q_i}\frac{dQ_i}{dp_i} = \frac{\partial H}{\partial Q_i}$$

$$\frac{\partial H}{\partial q_i} = \frac{\partial H}{\partial P_i}\frac{dP_i}{dq_i} = -\frac{\partial H}{\partial P_i}$$

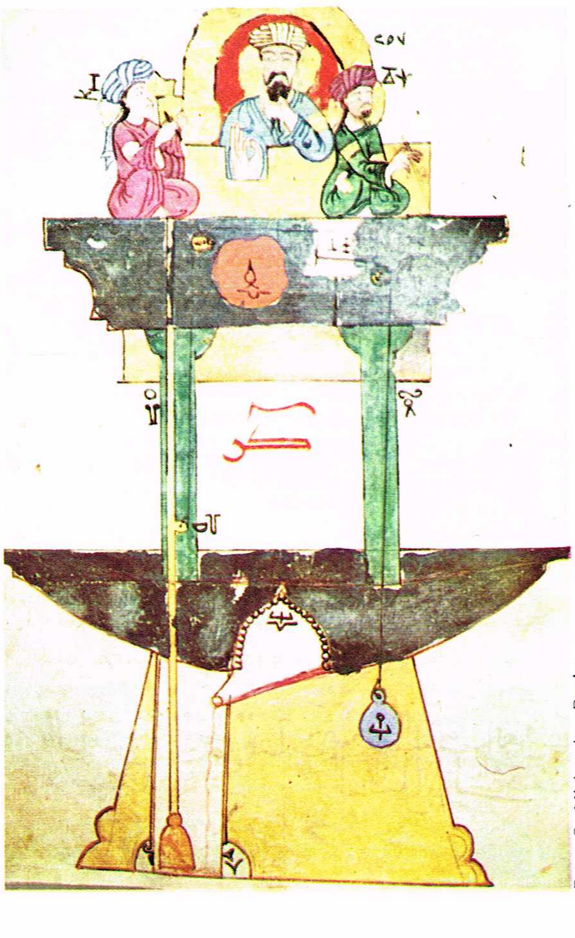

R. et S. Michaud - Rapho

Nous pouvons alors écrire les équations **(43)** sous la forme :

$$-\dot{P}_i = \frac{\partial H}{\partial Q_i}$$

$$\dot{Q}_i = \frac{\partial H}{\partial P_i}$$

Si nous comparons ces équations aux équations **(41)**, nous voyons que le nouvel hamiltonien H′ est simplement identique à l'ancien hamiltonien H ; nous avons donc montré que les équations de transformation très simples **(42)** que nous nous sommes données forment une transformation canonique, et par la même occasion, nous avons trouvé l'expression du nouvel hamiltonien H′.

Revenons maintenant au cas général : le problème qui se pose, et que nous avons résolu dans un cas très particulier, est de savoir si une transformation donnée est une transformation canonique, et, dans l'affirmative, de trouver le nouvel hamiltonien H′.

Pour résoudre ce problème, utilisons le principe de Hamilton et la définition de l'hamiltonien ; pour les anciennes et les nouvelles variables :

$$I' = \int_{t_1}^{t_2} \left(\sum_i P_i \dot{Q}_i - H' \right) dt \quad \text{minimum}$$

$$I = \int_{t_1}^{t_2} \left(\sum_i p_i \dot{q}_i - H \right) dt \quad \text{minimum}$$

On peut démontrer que, si ces deux conditions sont simultanément satisfaites, c'est que la différence entre les fonctions à intégrer est égale à la dérivée d'une fonction F arbitraire :

$$\text{(44)} \qquad \sum_i p_i \dot{q}_i - H - \sum_i P_i \dot{Q}_i + H' = \frac{dF}{dt}$$

Cette fonction F est évidemment fonction du temps, mais elle dépend aussi des P_i, des $\dot{Q}_i$, des p_i, et des $\dot{q}_i$, soit $4n$ variables ; mais les anciennes et les nouvelles variables ne sont pas indépendantes puisqu'elles sont liées par les relations de transformation : F ne dépend donc en fait que de $2\,n$ variables que l'on est libre de choisir en fonction de leur commodité : on peut prendre comme variables, outre le temps, les q_i et les Q_i, ou bien les q_i et les P_i, ou bien les Q_i et les p_i, ou encore les P_i et les p_i.

Prenons par exemple les q_i et les P_i comme variables ; on peut alors exprimer $\frac{dF}{dt}$ par :

$$\frac{dF}{dt} = \sum_i \frac{\partial F}{\partial q_i}\dot{q}_i + \sum_i \frac{\partial F}{\partial P_i}\dot{P}_i + \frac{\partial F}{\partial t}$$

L'équation **(44)** s'écrit alors :

$$\sum_i P_i \dot{Q}_i - H' - \sum_i p_i \dot{q}_i + H = \sum_i \frac{\partial F}{\partial q_i}\dot{q}_i + \frac{\partial F}{\partial P_i}\dot{P}_i + \frac{\partial F}{\partial t}$$

Si nous remarquons que $P_i \dot{Q}_i = \frac{d}{dt}(P_i Q_i) - Q_i \dot{P}_i$, nous trouvons, en identifiant terme à terme les deux membres de l'équation **(44)** :

$$p_i = \frac{\partial G}{\partial q_i}$$

$$Q_i = \frac{\partial G}{\partial p_i}$$

$$H' = H + \frac{\partial G}{\partial t}$$

où la fonction G est définie par :

$$G = F - \sum_i P_i Q_i$$

Nous voyons donc que, dès que nous nous sommes fixé la fonction G, nous connaissons les nouvelles variables et le nouvel hamiltonien. G est appelée *fonction génératrice de la transformation canonique.*

Prenons un exemple de fonction génératrice :

$$G = \sum_i q_i P_i$$

Rapho

M. Gritscher - Rapho

▲ *Jeux d'enfants, jeux d'adultes, les vitesses sont différentes mais le principe est le même.*

Les équations de transformation sont alors :

$$p_i = \frac{\partial G}{\partial q_i} = P_i$$

$$Q_i = \frac{\partial G}{\partial p_i} = q_i$$

Les nouvelles variables sont identiques aux anciennes : la fonction génératrice choisie engendre la transformation identique.

Maintenant que nous savons effectuer un changement de variables respectant la forme hamiltonienne des équations de la mécanique, nous pouvons faire la remarque suivante, qui est d'une importance fondamentale : résoudre un problème de mécanique, c'est chercher à exprimer les coordonnées et les moments à un instant t en fonction des coordonnées et des moments à l'instant 0. En d'autres termes, nous cherchons à effectuer une transformation canonique qui transforme les coordonnées et les moments à un instant t en des quantités constantes qui seront les coordonnées et les moments à l'instant initial. La relation entre les nouvelles variables et les anciennes sera :

$$q = q\ (Q_0, P_0, t)$$
$$p = p\ (Q_0, P_0, t)$$

Ces relations sont très exactement les solutions de tout problème de mécanique, puisqu'elles donnent l'expression des coordonnées en fonction du temps et des conditions initiales.

Dans le système des nouvelles variables qui, rappelons-le, sont des constantes indépendantes du temps, les équations de Hamilton s'écrivent :

$$\frac{\partial H'}{\partial p_i} = \dot{Q}_i = 0$$

$$\frac{\partial H'}{\partial q_i} = -\dot{P}_i = 0$$

Le nouvel hamiltonien est relié à l'ancien par l'intermédiaire de la fonction génératrice :

$$H' = H + \frac{\partial G}{\partial t}$$

où G est fonction des anciennes coordonnées q_i, des nouveaux moments P_i et du temps ; nous savons donc que :

$$p_i = \frac{\partial G}{\partial q_i}$$

Cherchons la fonction génératrice qui rend H′ nul, ce qui assurera que $\frac{\partial H'}{\partial p_i} = \frac{\partial H'}{\partial q_i} = 0$. Cette fonction sera telle que :

$$H\ (q_1, q_2, ..., q_n, p_1, p_2, ..., p_n, t) + \frac{\partial G}{\partial t} = 0$$

ou encore :

$$H\left(q_1, q_2, ..., q_n, \frac{\partial G}{\partial q_1}, \frac{\partial G}{\partial q_2}, ..., \frac{\partial G}{\partial q_n}, t\right) + \frac{\partial G}{\partial t} = 0$$

Cette dernière équation n'est pas autre chose qu'une équation aux dérivées partielles où G est la fonction inconnue. C'est elle qui fournira la solution au problème de mécanique considéré et, en ce sens, elle remplace à elle seule les $2n$ équations de Hamilton. Cette équation est appelée **équation de Hamilton-Jacobi.**

C'est une équation aux dérivées partielles, du premier ordre, où les $n + 1$ variables sont le temps t et les n coordonnées q_i. La solution S $(q_1, q_2, ..., q_n, t)$ de cette équation n'apparaît pas dans cette équation : seules ses dérivées premières apparaissent ; S ne sera donc définie qu'à une constante additive près. Par ailleurs, puisqu'il y a $n + 1$ variables, S doit dépendre de $n + 1$ constantes d'intégration k_i. Comme une de ces constantes est additive, il reste n constantes non additives $k_1, k_2, ..., k_n$ dans S :

$$S = S\ (q_1, q_2, ..., q_n, k_1, k_2, ..., k_n, t)$$

Ces constantes sont arbitraires ; par souci de commodité, nous prendrons pour ces constantes les n nouveaux moments $P_i : k_i = P_i$. Les nouvelles coordonnées Q_i sont alors données par la relation :

$$Q_i = \frac{\partial S}{\partial P_i}$$

qui donne donc Q_i en fonction des p_i, q_i et t. Notre but initial était d'exprimer les q_i et p_i en fonction des coor-

données initiales Q_i et P_i et du temps : ce but sera atteint si nous pouvons inverser les relations précédentes.

Prenons l'exemple de l'oscillateur harmonique : un ressort de constante de rappel C portant une masse m. Nous avons vu que l'énergie potentielle est $\frac{1}{2}Cx^2$. Le *lagrangien* vaut :

$$L = T - V = \frac{1}{2}m\dot{x}^2 - \frac{1}{2}Cx^2$$

Le moment conjugué de la variable x est :

$$p = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} = m\dot{x}$$

L'*hamiltonien* vaut :

$$H = p\dot{x} - L = \frac{1}{2}m\dot{x}^2 + \frac{1}{2}Cx^2$$

soit encore :

$$H = \frac{p^2}{2m} + \frac{Cx^2}{2}$$

L'équation de Hamilton-Jacobi est obtenue en remplaçant p par $\frac{\partial S}{\partial x}$ dans l'hamiltonien et en écrivant :

$$H + \frac{\partial S}{\partial t} = 0$$

Nous obtenons donc ici :

$$\frac{1}{2m}\left(\frac{\partial S}{\partial x}\right)^2 + \frac{Cx^2}{2} + \frac{\partial S}{\partial t} = 0$$

Cherchons une solution de la forme :

$$S(x, k, t) = W(x) - kt$$

Remplaçant S par cette valeur dans l'expression de Hamilton-Jacobi, nous obtenons :

$$\frac{1}{2m}\left(\frac{\partial W}{\partial x}\right)^2 + \frac{Cq^2}{2} = k$$

ce qui donne par intégration :

$$W = \sqrt{mC}\int\sqrt{\frac{2k}{C} - q^2}\,dq$$

d'où

$$S = \sqrt{mC}\int\sqrt{\frac{2k}{C} - q^2}\,dq - kt$$

Ce qui nous intéresse, c'est de connaître Q :

$$Q = \frac{\partial S}{\partial k} = \sqrt{\frac{m}{C}}\int\frac{dq}{\sqrt{\frac{2k}{C} - q^2}} - t$$

Cette expression s'intègre sous la forme :

$$Q = -\sqrt{\frac{m}{C}}\,\text{Arc cos}\sqrt{\frac{C}{2k}}\,x - t$$

Nous pouvons maintenant inverser cette équation pour obtenir la solution de notre problème, c'est-à-dire x en fonction de Q et de t :

$$x = \sqrt{\frac{2k}{C}}\cos\omega\,(t + Q)$$

avec $\omega = \sqrt{\frac{C}{m}}$: nous obtenons bien le mouvement habituel d'un oscillateur harmonique. Il suffit de tenir compte des conditions initiales pour déterminer Q et k : si à $t = 0$ on lâche la masse en $x = x_0$ avec une vitesse initiale nulle, nous trouvons :

$$k = \frac{Cx_0^2}{2}$$

Nous remarquons que k n'est autre que l'énergie totale du système, ce qui n'a rien de surprenant, puisque, par définition :

$$k = -\frac{\partial S}{\partial t}$$

et que l'équation de Hamilton-Jacobi s'écrit :

$$H + \frac{\partial S}{\partial t} = H - k = 0$$

Nous avons donc vu, dans cet exemple simple, comment l'équation de Hamilton-Jacobi fournit la solution d'un problème de mécanique. Dans cet exemple, l'hamiltonien ne dépend pas explicitement du temps, ce qui nous a permis de séparer t des autres variables, en cherchant une solution de la forme :

$$S(q_1, q_2, ..., q_n, k_1, k_2, ..., k_n, t) = W(q_1, ..., k_1, ...) - kt$$

ce qui ramène l'équation à l'expression :

$$H\left(q_1, ..., q_n, \frac{\partial W}{\partial q_1}, ..., \frac{\partial W}{\partial q_n}\right) = k$$

où le temps n'apparaît plus.

Si, comme dans l'exemple précédent, l'hamiltonien est identique à l'énergie totale $E = T + V$, alors S se met sous la forme :

$$S = W - Et$$

Les premiers pas vers la mécanique quantique

Restons dans l'hypothèse où l'hamiltonien est une constante du mouvement, et s'identifie à l'énergie totale du système. S est alors fonction des q_i, des P_i et de t, tandis que W n'est fonction que des q_i et des P_i (ces derniers, rappelons-le, étant des constantes). Nous pouvons donc, dans l'espace de configuration — c'est-à-dire dans l'espace des q_i — définir des surfaces sur lesquelles W est constante et des surfaces sur lesquelles S est constante : les premières sont fixes dans l'espace, tandis que les secondes se déplacent. Par exemple, supposons qu'à un instant t la surface constituée des points pour lesquels S a une certaine valeur S_0 coïncide avec la surface constituée des points pour lesquels $W = S_0$. A l'instant $t + dt$, la surface $W = S_0$ est la même qu'à l'instant t, tandis que la surface $S = S_0$ coïncide maintenant avec la surface $W = S_0 + E\,dt$: les surfaces à S constante se déplacent un peu comme le ferait un front d'onde acoustique ou lumineuse, avec une certaine vitesse de propagation.

Considérons pour simplifier le problème le système formé par un seul point matériel : les coordonnées généralisées sont simplement trois coordonnées (x, y, z) du point matériel considéré; considérons (*fig.* 69) deux surfaces voisines $W = S_0$ et $W = S_0 + E\,dt$; elles sont distantes de ds, de sorte que la vitesse de propagation est : $u = \frac{ds}{dt}$.

Or, ds est lié au gradient de W par la relation :

$$|\overrightarrow{\text{grad}}\,W| = \frac{dW}{ds}$$

Par ailleurs, nous venons de voir que $dW = E\,dt$.

Il en résulte que :

$$\frac{ds}{dt} = \frac{E}{|\overrightarrow{\text{grad}}\,W|}$$

Or, l'équation de Hamilton-Jacobi, pour une particule libre, a la forme :

$$\frac{1}{2m}\left(\left(\frac{\partial W}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial z}\right)^2\right) + V = E$$

Ceci nous donne directement le module de $\overrightarrow{\text{grad}}\,W$:

$$|\overrightarrow{\text{grad}}\,W| = \sqrt{2m(E - V)}$$

et, par conséquent, la vitesse de propagation du front d'onde s'écrit :

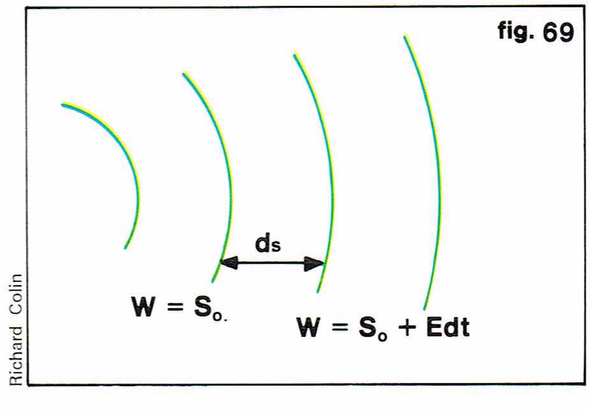

◀ ***Figure 69 :** deux surfaces voisines pour lesquelles la fonction W est constante.*

Guillard - Réalités

▲ ***Une application du principe de l'équilibre des forces : les mobiles de Calder (copyright A.D.A.G.P., 1976).***

$$\frac{ds}{dt} = \frac{E}{\sqrt{2\,m\,(E - V)}} = \frac{E}{\sqrt{2\,mT}}$$

Or, $T = \frac{1}{2}\,mv^2$; il en résulte donc que :

$$\frac{ds}{dt} = \frac{E}{mv}$$

La vitesse de propagation de la surface est donc inversement proportionnelle à la vitesse de déplacement de la particule elle-même. Cherchons maintenant la relation entre la trajectoire de la particule et la forme de la surface à W constante : par définition de W, on a $p_i = \frac{\partial W}{\partial q_i}$; dans le cas de notre particule, cela s'écrit $\vec{p} = \overrightarrow{\text{grad}}\ W$: cela signifie que $\vec{p}$ (donc $\vec{v}$) est normale aux surfaces à S constante. La trajectoire du point matériel est donc normale aux surfaces à S constante. Lorsque le système n'est pas restreint à un point matériel unique, ces résultats restent valables.

Notons que la propriété que nous venons d'établir montre qu'il existe un lien, au moins formel, entre l'optique et la mécanique classique : en optique, les rayons lumineux sont orthogonaux aux surfaces d'onde ; de la même manière, la trajectoire d'un point matériel est orthogonale aux surfaces à S constante.

Le principe de moindre action indique que, pour une particule, l'intégrale

$$\int \sqrt{2\,mT}\,ds$$

doit être minimum ; or $\sqrt{2\,mT}$ est inversement proportionnel à la vitesse de propagation de l'onde ; de plus, l'indice optique est $n = \frac{c}{\left(\frac{ds}{dt}\right)}$ où c est la vitesse de la lumière dans le vide. Le principe de moindre action s'écrit donc :

$$\int n\,ds \text{ minimum}$$

Sous cette forme, le principe de moindre action s'identifie au principe de Fermat, qui indique que le chemin optique doit être minimum.

Pour en revenir au déplacement d'une particule, nous avons vu que tout se passe comme si une certaine onde, dont les surfaces d'onde sont les surfaces à S constante, accompagnait la particule dans son déplacement, mais nous n'avons rien dit quant à la nature ou la fréquence de cette onde. L'équation de propagation d'une onde est :

$$\Delta\varphi - \frac{1}{u^2}\frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2} = 0$$

où u est la vitesse de propagation de l'onde et où :

$$\Delta\varphi = \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}$$

si nous nous restreignons à une dimension, la fonction φ est de la forme :

$$\varphi = A\cos\left(\frac{2\,\pi x}{\lambda} - 2\,\pi\nu t + \Phi\right)$$

où λ est la longueur d'onde, ν la fréquence et Φ une constante, λ et ν étant liés par : $\lambda\nu = u$.

Puisque les surfaces où S est constante sont des surfaces d'onde, c'est donc que S doit être proportionnelle à la phase :

$$S = W - Et = K\left(\frac{2\,\pi x}{\lambda} - 2\,\pi\nu t\right)$$

d'où il résulte que l'énergie E doit être proportionnelle à la fréquence ν :

$$E = h\nu$$

h est une constante universelle appelée *constante de Planck* ($h = 6{,}6 \cdot 10^{-34}$ joule · seconde).

Comme $\lambda\nu = u$ et que $u = \frac{E}{p}$ on en déduit aisément que la longueur d'onde est liée à l'impulsion par la relation :

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Nous aboutissons donc au résultat suivant : pour décrire le mouvement d'une particule, nous pouvons soit user de l'image classique, soit considérer une onde, dont la fréquence est liée à l'énergie de la particule par :

$$E = h\nu$$

et dont la longueur d'onde est liée à l'impulsion par $\lambda = \frac{h}{p}$, la trajectoire de la particule étant orthogonale aux surfaces d'onde.

En tenant compte de ces dernières relations, l'équation de propagation de l'onde peut s'écrire :

$$-\frac{\hbar^2}{2\,m}\Delta\psi + V\psi = E\psi$$

où $\hbar = \frac{h}{2\,\pi}$

Cette dernière équation n'est autre que l'*équation de Schrödinger*, qui est à la base de la mécanique quantique. La signification physique de l'onde ψ ne sera pas développée ici, car elle sort complètement du cadre de la mécanique classique. De fait, tout ce que nous avons décrit dans cet exposé de la mécanique classique correspond à l'approximation dans laquelle la constante de Planck h est nulle, approximation qui est satisfaite tant que l'on étudie des phénomènes macroscopiques. Dès que l'on étudie des phénomènes microscopiques, à l'échelle atomique par exemple, les notions classiques de vitesse et de position disparaissent, et seule la fonction d'onde permet de décrire correctement les phénomènes.

BIBLIOGRAPHIE

GIÉ H., *Dynamique*, J.-B. Baillière ; *Statique des solides et des fluides*, J.-B. Baillière. - GOLDSTEIN H., *Classical Mechanics*, Addison-Wesley. - LANDAU L. et LIFCHIFZ E., *Mécanique*, éditions Mir. - SOUTIF M., *Vibrations, Propagation, Diffusion*, Dunod Université. - TARG S., *Éléments de mécanique rationnelle*, éditions Mir.

ONERA

◀ *Visualisation du gradient de masse volumique dans une colonne d'air chaud.*

MÉCANIQUE DES FLUIDES

AÉROSTATIQUE ET AÉRODYNAMIQUE

L'*aérostatique* et l'*aérodynamique* font partie de la science appelée *mécanique des fluides;* elles étudient respectivement les forces qui agissent au sein d'un gaz en l'absence de mouvement et les phénomènes complexes qui entrent en jeu lors des mouvements des gaz.

Du point de vue historique, l'aérodynamique a trouvé ses bases théoriques dans les études de D. Bernoulli (1700-1782), d'Euler (1707-1783) et de Lagrange (1736-1813). A ces noms, il convient d'ajouter ceux de nombreux mathématiciens et expérimentateurs tels que Newton (1642-1727), Borelli (1608-1678), Viviani (1622-1703), Boyle (1627-1691), Laplace (1749-1827), Venturi (1746-1822), Riemann (1826-1866), Mach (1838-1916), Reynolds (1842-1912), Prandtl (1875-1953), von Karman (1881-1963), etc.

Les propriétés des fluides

L'état fluide est physiquement caractérisé par la relative mobilité des molécules, qui ne conservent pas, au sein de la masse, une position fixe. Parmi les paramètres dont la connaissance revêt une particulière importance, nous allons définir la masse volumique, la viscosité et la compressibilité.

La **masse volumique** ρ est définie comme la masse de l'unité de volume. Pour un gaz parfait, celle-ci s'obtient à partir de l'équation d'état qui lie le volume spécifique V_s, la masse moléculaire $\mathcal{M}$, la pression P et la température absolue T, selon l'expression : $\rho = \frac{1}{V_s} = \frac{P\mathcal{M}}{RT}$ où R est la constante des gaz parfaits.

Pour une pression et une température normales ($1{,}013 \cdot 10^5$ Pa, 288,16 °K), la masse volumique de l'air est égale à 1,225 kg/m^3.

Coefficient de viscosité. Plaçons-nous dans le cas d'un écoulement uniforme d'un fluide dans un canal très large (écoulement bidimensionnel) et cherchons à exprimer la force de frottement exercée par la partie supérieure du fluide sur la partie inférieure par l'intermédiaire de la surface $dS = dx \cdot dz$ (elle lui sera donc proportionnelle) [*fig.* 1].

La grandeur qui interviendra pour exprimer la force de frottement ff sera en fait la variation la vitesse par unité de hauteur, c'est-à-dire le rapport $\frac{\Delta u}{\Delta y}$ pour deux couches

▶ *A gauche, figure 1 : définition du coefficient de viscosité* μ.
A droite, figure 4 : forces agissant sur le fluide contenu dans une pyramide en l'absence de mouvement.

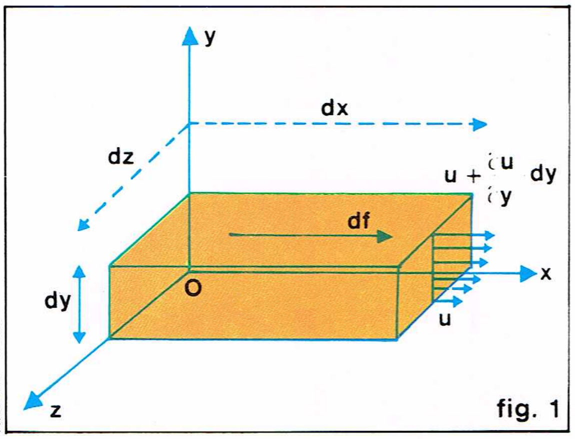

fig. 1

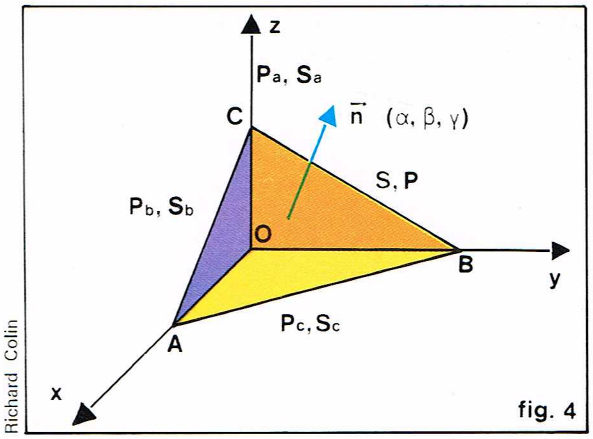

fig. 4

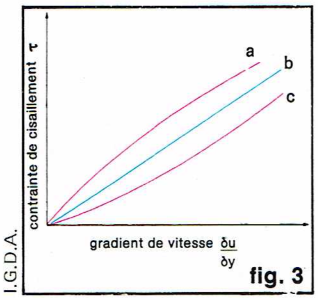

fig. 3

▲ *Figure 3 ; classification des fluides réels selon les variations de la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de vitesse :* a, *fluides pseudo-plastiques ;* b, *fluides newtoniens ;* c, *fluides dilatants.*

séparées par la distance Δy, et, pour des couches infiniment voisines, $\frac{du}{dy}$.

Dans le cas où cette dépendance est linéaire, c'est-à-dire lorsque l'on peut poser partout

$$df = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right) \cdot dxdz$$

on dira que le fluide est newtonien. Cette relation est appelée loi de Newton, et le coefficient de proportionnalité est appelé coefficient de viscosité.

Le rapport : $\tau = \frac{df}{dxdz}$ est appelé contrainte de cisaillement, et $\frac{\partial u}{\partial y}$ est le gradient de vitesse, ou vitesse de cisaillement. Dans le système M. K. S., la viscosité s'exprime en newtons-secondes/mètre carré (N-s/m^2), et en système C. G. S. (le plus utilisé dans la littérature relative à ce sujet), il s'exprime en poises, c'est-à-dire en dynes-secondes/centimètre carré (dyn-s/cm^2). Dans les conditions normales, la viscosité de l'air est de $1{,}79 \cdot 10^{-4}$ poise et celle de l'eau de $1{,}145 \cdot 10^{-2}$ poise.

La variation du coefficient de viscosité des fluides en fonction de la température obéit à des lois différentes selon les fluides considérés : pour des gaz, c'est une fonction croissante, et pour des liquides, une fonction décroissante (*fig.* 2). Cette différence de comportement est expliquée par la différence de la nature des forces d'interaction entre les molécules dans ces deux cas.

La viscosité est une des caractéristiques les plus importantes d'un fluide, puisque la grandeur des contraintes de cisaillement dépend de sa valeur. Dans le cas des fluides newtoniens, ces contraintes sont nulles uniquement si le gradient de vitesse $\frac{\partial u}{\partial y}$ est nul, c'est-à-dire si le fluide est à l'état de repos ou s'écoule sans se déformer. Malgré cela, dans la résolution de nombreux problèmes de dynamique des fluides ou d'aérodynamique, il est nécessaire de négliger l'action des forces de cisaillement en supposant nulle la viscosité (fluide parfait). Cette approximation est souvent justifiée quand la couche de fluide immédiatement au contact des solides, et où les phénomènes liés à la viscosité sont prépondérants (couche limite), est suffisamment petite. On a vu que les fluides newtoniens étaient définis par une dépendance linéaire de la contrainte de cisaillement avec le gradient de vitesse. Il existe des fluides pour lesquels cette dépendance n'est plus linéaire, ce qui revient à dire que μ n'est plus constant mais dépend de $\frac{\partial u}{\partial y}$. C'est le cas, par exemple, des plastiques, des suspensions, du sang, et de nombreux corps organiques. Ces fluides, appelés fluides non newtoniens, sont classés, selon la dépendance de τ en fonction du gradient de vitesse, en pseudo-plastiques (leur viscosité apparente, c'est-à-dire la pente de τ fonction de $\frac{\partial u}{\partial y}$, est une fonction décroissante de $\frac{\partial u}{\partial y}$) ; dilatants (viscosité apparente fonction croissante de $\frac{\partial u}{\partial y}$), etc. (*fig.* 3).

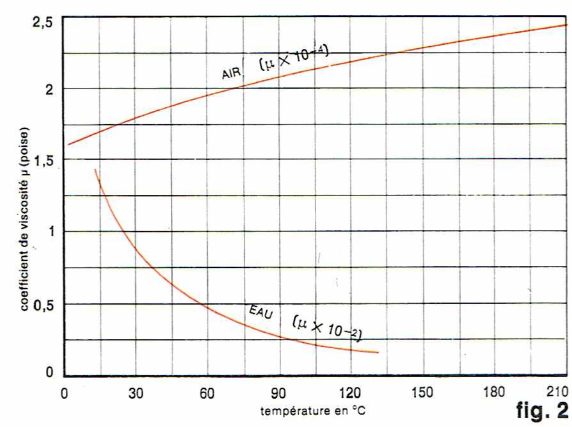

fig. 2

▶ *Figure 2 : variation du coefficient de viscosité pour l'eau et pour l'air en fonction de la température, dans des conditions normales de pression.*

La **compressibilité** relie la variation de volume dV du fluide à la variation dP de la pression agissant sur lui selon la loi :

$$dP = - K \frac{dV}{V}$$

Cette définition du *coefficient de compressibilité* K est indépendante de l'état de la matière, aussi s'applique-t-elle aussi bien aux fluides qu'aux solides. La compressibilité des fluides revêt une importance croissante à mesure que croît la vitesse, et ses effets sont négligeables uniquement pour les vitesses très inférieures à celle du son.

Statique des fluides

Un des principaux problèmes de l'aérostatique (ou de l'hydrostatique) concerne la détermination des forces qui, au repos, agissent sur la surface d'un corps plongé dans un fluide ou sur les surfaces qui le délimitent.

Considérons un élément du corps de surface dS et décomposons la force élémentaire $\vec{df}$ agissant sur celui-ci en sa composante normale $\vec{df}_n$ et en sa composante tangentielle $\vec{df}_t$; ces dernières sont reliées respectivement à la pression P et à la contrainte de cisaillement τ agissant sur dS. Puisque le fluide est à l'état de repos et que le cisaillement est nul, la force élémentaire $\vec{df}$ se réduit à $\vec{df} = P\vec{n}dS$ où $\vec{n}$ est le vecteur unitaire normal à la surface dS. La force $\vec{F}$ exercée par le fluide sur le corps est donc donnée par la résultante des actions élémentaires $P\vec{n}dS$:

$$\text{(1)} \qquad \vec{F} = \int_S P\vec{n}dS$$

Pour la déterminer, il est nécessaire de connaître la loi de variation des forces élémentaires $P\vec{n}dS$.

Considérons (*fig.* 4) les forces s'exerçant, en l'absence de mouvement, sur le tétraèdre élémentaire OABC de volume V. On peut toujours choisir un volume suffisamment petit pour que la pression s'exerçant sur chacune des faces du tétraèdre soit uniforme. Soit P_a, P_b, P_c, P ces pressions s'exerçant respectivement sur les faces OBC, OCA, OAB, ABC de surfaces S_a, S_b, S_c et S. Si

α, β, γ sont les composantes du vecteur unitaire $\vec{n}$ normal à la surface ABC, écrire que le système est en équilibre revient à dire que la résultante $\vec{R}$ des forces qui s'exercent sur lui est nulle :

$$R_x = P_a S_a - PS\alpha = 0$$
$$R_y = P_b S_b - PS\beta = 0$$
$$R_z = P_c S_c - PS\gamma - \rho V g$$
$$= P_c S_c - PS\gamma - \frac{1}{3}\rho S_c OC g = 0$$

En effet, $\rho V g$ représente le poids du tétraèdre élémentaire et $V = \frac{1}{3} S_c OC$.

De plus, $S_a = \alpha S$, $S_b = \beta S$, $S_c = \gamma S$,

donc : $P - P_a = 0$

$$P - P_b = 0 \quad \text{et} \quad P - P_c + \frac{1}{3}\rho OC g = 0$$

Le volume choisi ayant été pris arbitrairement petit, OC l'est également, et l'on peut toujours, dans ce cas, négliger le terme $\rho OC\, g$. On obtient donc la relation

$$P = P_a = P_b = P_c$$

qui, $\vec{n}$ étant arbitrairement choisi, montre que la pression en un point du fluide est indépendante de la direction de la normale à la surface élémentaire sur laquelle elle s'exerce.

Considérons maintenant la composante verticale des forces s'exerçant sur un cylindre élémentaire de section transversale dS et de hauteur dz (*fig.* 5). Ces forces verticales se réduisent aux forces de pression agissant sur les surfaces A et B, et à la force de pesanteur

$$dF_z = -g dm = -\rho g dV = -\rho g dS dz.$$

Au total, l'écriture de l'équilibre donne l'équation :

$$-\rho g dS dz = (P + dP)\, dS - P dS$$

soit :

(2) $$dP = -\rho g dz$$

Si on avait considéré la composante horizontale de la résultante des forces s'exerçant sur un cylindre élémentaire horizontal de section transversale dS et de longueur dl, les forces de pesanteur ne seraient pas intervenues, et le même raisonnement aurait conduit à $dP = 0$, de telle sorte que l'on aurait pu énoncer la *loi de Pascal :* la pression existant en un point M d'un fluide en équilibre est constante sur toute la surface horizontale S passant par M.

Pour un fluide incompressible (ρ = constante), l'intégration de l'équation $dP = -\rho g dz$ entre deux niveaux z_a et z_b donne :

$$P_a - P_b = -\rho g\,(z_a - z_b)$$

ce qui signifie que la variation de pression entre deux niveaux est proportionnelle à la différence de hauteur entre ces mêmes niveaux *(loi de Stevino).*

Partant des équations **(1)** et **(2)**, il est possible d'obtenir l'expression mathématique du *principe d'Archimède :* la résultante des forces de pression agissant sur un corps immergé dans un fluide est une force égale et opposée au poids du volume de fluide déplacé, appliquée au centre de gravité de ce dernier.

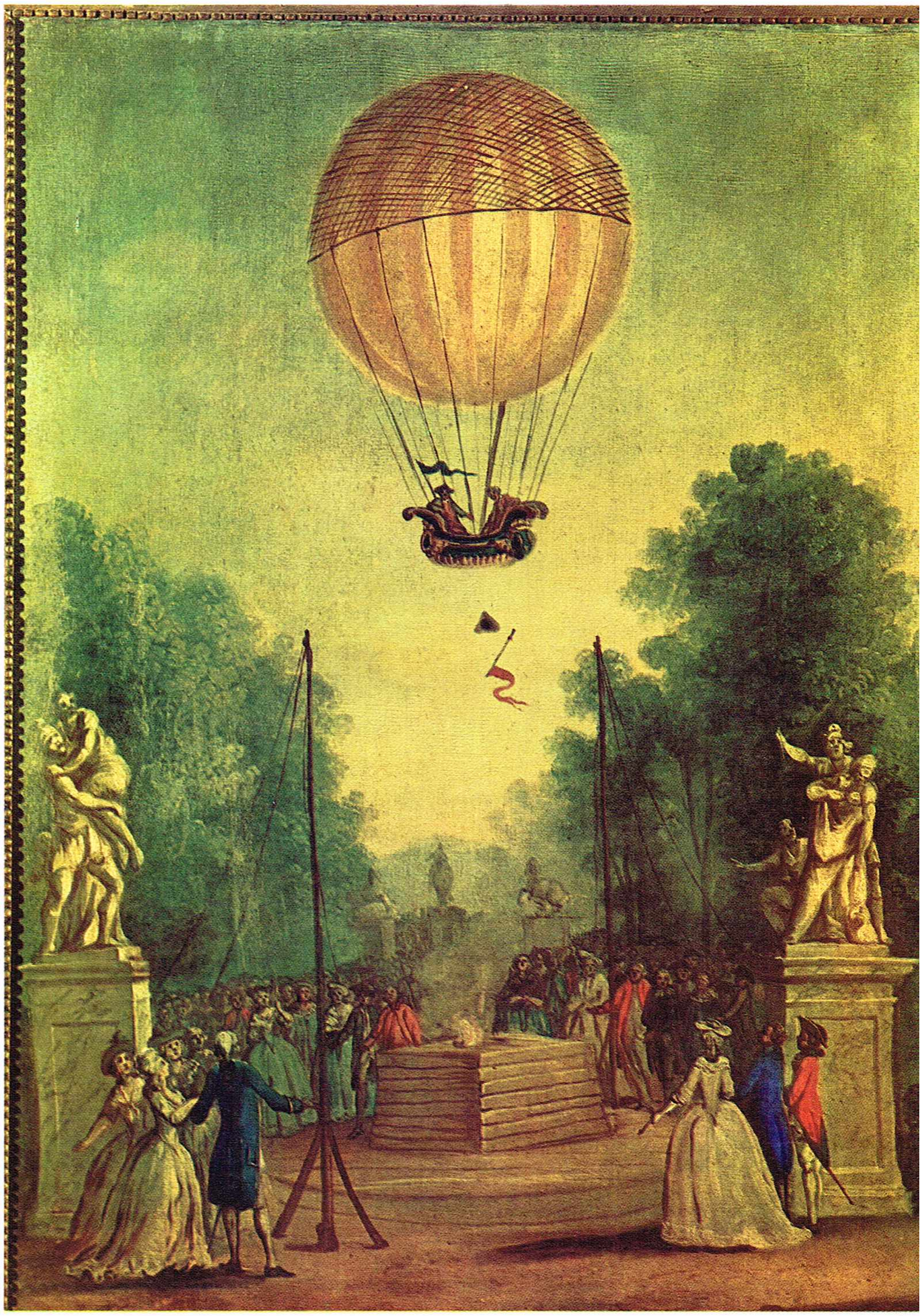

Bulloz

▲ ***La théorie des aérostats est fondée sur le principe d'Archimède ; ici,*** **Enlèvement d'une montgolfière** ***(École française du XVIIIe siècle).***

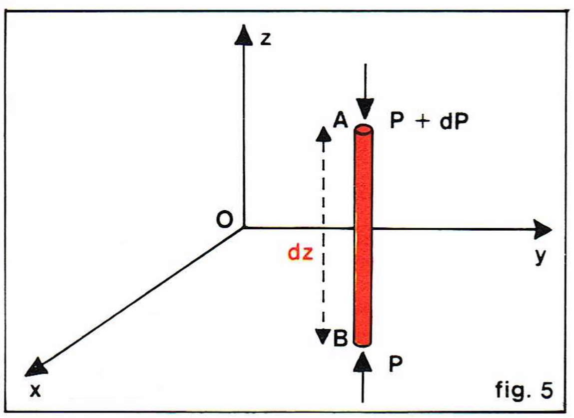

Richard Colin

◀ ***Figure 5 : forces agissant sur le fluide contenu dans un cylindre élémentaire.***

En effet, en appliquant l'équation **(1)** à un corps (que nous supposerons cylindrique pour simplifier) plongé dans le fluide, on obtient, pour la résultante des forces F, l'expression :

$$F = \rho g S h = \rho g V$$

où S est la section transversale du cylindre, h sa hauteur et V le volume. Pour que les conditions d'équilibre du corps (de masse M) se réalisent, il faut que soit vérifiée l'égalité :

(3) $$Mg = \rho g V$$

L'équation **(3)** fournit la condition pour l'équilibre du corps mais non pour sa stabilité ; on peut facilement vérifier que cette dernière est satisfaite si le centre de gravité du corps est situé au-dessous du centre de gravité du volume de fluide déplacé ; si les deux points coïncident, le corps est en équilibre indifférent dans toutes les positions.

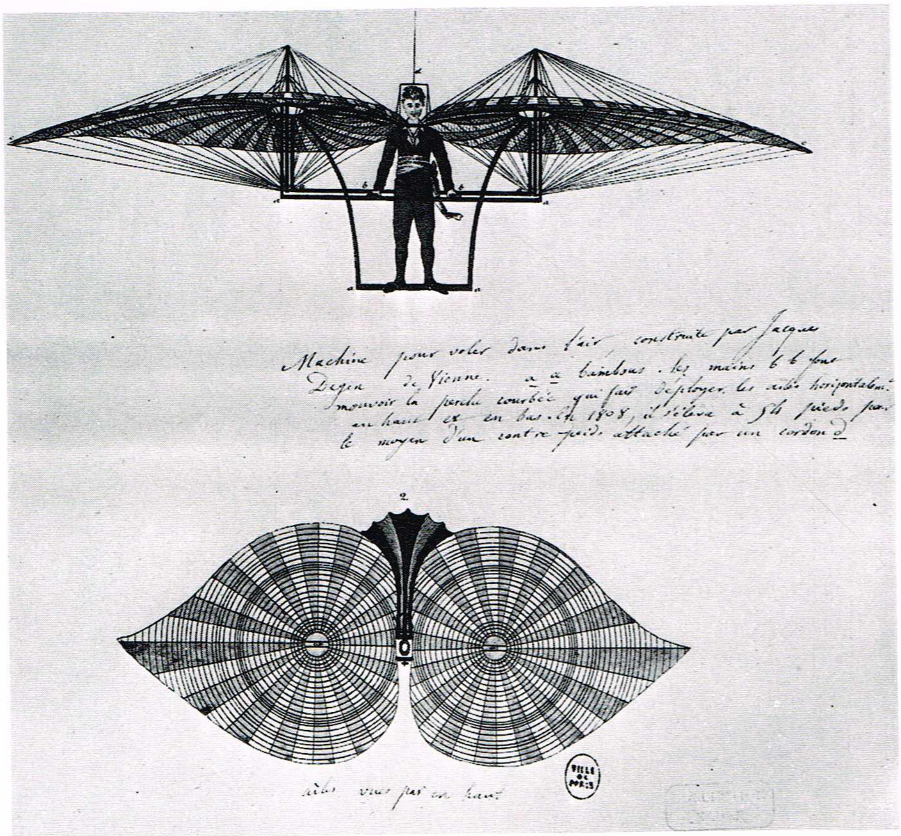

Bulloz

▲ ***Gravure de la « Machine à voler » de Jacques Degen (musée Carnavalet).***

Dynamique des milieux continus

Pour analyser le mouvement de la particule fluide, il est nécessaire d'établir les équations qui relient les paramètres permettant de décrire la dynamique du système, c'est-à-dire le temps, la vitesse, la pression et la masse volumique. Elles sont obtenues en appliquant à la particule fluide des lois physiques (par exemple l'équation fondamentale de la dynamique) ou des principes physiques fondamentaux tels que celui de la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie.

L'**équation de la continuité** représente, par exemple, l'application du principe de conservation de la masse. Considérons (*fig.* 6) un parallélépipède de côtés dx, dy, dz, traversé par un fluide s'écoulant parallèlement à l'axe Ox. Calculons le flux de masse à travers ce parallélépipède pendant le temps dt (on comptera positivement le flux rentrant et négativement le flux sortant). Si u et ρ indiquent respectivement la vitesse et la masse volumique du fluide au point x, ces mêmes grandeurs, calculées au point $x + dx$, seront :

$$u + \frac{\partial u}{\partial x} dx, \qquad \rho + \frac{\partial \rho}{\partial x} dx.$$

Le flux entrant pendant le temps dt à l'intérieur du petit volume examiné, dans la direction Ox, est donné par :

$$-\rho u \, dy \, dz \, dt$$

fig. 6

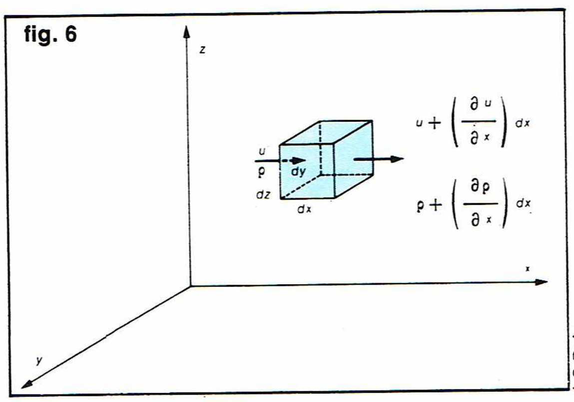

I.G.D.A.

▶ ***Figure 6 : variation suivant x, à travers le volume élémentaire dx dy dz, de la composante suivant x, u, de la vitesse et de la densité ρ.***

et le flux sortant par :

$$\left(\rho + \frac{\partial \rho}{\partial x} dx\right)\left(u + \frac{\partial u}{\partial x} dx\right) dy \, dz \, dt$$

En négligeant les termes en $(dx)^2$ et en effectuant la différence entre le flux entrant et le flux sortant, on obtient :

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial x} dx \, dy \, dz \, dt$$

D'après le principe de conservation de la masse, cette différence doit être égale à la variation, dans le temps dt, de la masse de fluide contenue dans le volume examiné :

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} dx \, dy \, dz \, dt$$

et dans ce cas on a : $\frac{\partial (\rho u)}{\partial x} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$

Si nous indiquons par u, v, et w les composantes de la vitesse $\vec{V}$ le long des trois axes, le flux total qui traverse le volume élémentaire dV sera donné par :

$$\textbf{(4)} \qquad \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

Or la quantité $\frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial z}$

représente par définition la divergence du vecteur $\rho\vec{V}$, notée div $(\rho\vec{V})$; on peut donc écrire :

$$\textbf{(5)} \qquad \text{div}\,(\rho\vec{V}) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

Or le gradient d'une fonction $f = f\,(x, y, z, t)$ est donné par :

$$\overrightarrow{\text{grad}}\, f = \frac{\partial f}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial f}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial f}{\partial z}\vec{k}$$

On peut définir d'autre part, la dérivée lagrangienne qui représente physiquement la variation temporelle de la grandeur $f\,(x, y, z, t)$ associée à une particule lors de son mouvement par :

$$\frac{df}{dt} = \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial x} u + \frac{\partial f}{\partial y} v + \frac{\partial f}{\partial z} w = \frac{\partial f}{\partial t} + \vec{V} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}\, f.$$

L'équation **(5)** peut alors s'écrire sous la forme :

$$\textbf{(6)} \qquad \frac{d\rho}{dt} + \rho \, \text{div}\, \vec{V} = 0$$

puisque l'on a aussi :

$$\text{div}\,(\rho\vec{V}) = \vec{V} \cdot \text{grad}\, \rho + \rho \, \text{div}\, \vec{V}$$

L'équation **(5)** [ou **(6)**] est appelée équation de continuité.

Si l'écoulement est stationnaire, **(5)** prend la forme :

$$\textbf{(7)} \qquad \text{div}\,(\rho\vec{V}) = 0$$

Si le fluide est incompressible (ρ = Cte) ou si les variations de densité sont suffisamment petites pour qu'on puisse le considérer comme tel, **(6)** s'écrit div $\vec{V} = 0$.

Une autre relation fondamentale est obtenue en appliquant l'équation fondamentale de la dynamique à une masse donnée de fluide. Considérons les forces agissant sur un cube élémentaire de fluide de volume dV (*fig.* 7). Nous avons :

a - Forces d'inertie F_I. Les composantes de la force d'inertie le long des axes de référence x, y, z sont données par le produit de la masse ρdV par les composantes de l'accélération, et leurs valeurs sont :

$$dF_{Ix} = \rho \frac{du}{dt} dV\,; \quad dF_{Iy} = \rho \frac{dv}{dt} dV\,; \quad dF_{Iz} = \rho \frac{dw}{dt} dV\,;$$

b - Forces conservatives. En indiquant par φ le potentiel d'un champ éventuel (qu'il soit gravitationnel, magnétique en dehors des sources ou électrique) agissant sur les particules de masse $\rho \cdot d$V, les composantes des forces exercées par le champ $\vec{G}$ le long des axes x, y, z sont données par :

$$dF_{Gx} = -\rho dV \frac{\partial \varphi}{\partial x}\,; \; dF_{Gy} = -\rho dV \frac{\partial \varphi}{\partial y}\,; \; dF_{Gz} = -\rho dV \frac{\partial \varphi}{\partial z}$$

c - Contraintes de pression et contraintes visqueuses. En indiquant (*fig.* 7) par P la contrainte normale de pression, par τ_i la contrainte visqueuse normale agissant dans la direction de l'axe *i* et par τ_{ij} la contrainte visqueuse tangentielle (parallèle à la direction *i* et agissant sur l'élément de surface perpendiculaire à la direction *j*), les composantes de la résultante des contraintes normales et tangentielles qui s'exercent le long des axes *x*, *y*, *z* sont exprimées par

$$
\textbf{(8)}\quad
\begin{aligned}
dR_x &= \left[-\frac{\partial P}{\partial x} + \left(\frac{\partial \tau xx}{\partial x} + \frac{\partial \tau yx}{\partial y} + \frac{\partial \tau zx}{\partial z}\right)\right] dV \\
dR_y &= \left[-\frac{\partial P}{\partial y} + \left(\frac{\partial \tau xy}{\partial x} + \frac{\partial \tau yy}{\partial y} + \frac{\partial \tau zy}{\partial z}\right)\right] dV \\
dR_z &= \left[-\frac{\partial P}{\partial z} + \left(\frac{\partial \tau xz}{\partial x} + \frac{\partial \tau yz}{\partial y} + \frac{\partial \tau zz}{\partial z}\right)\right] dV
\end{aligned}
$$

D'après la loi de Newton, l'égalité :

$$dF_{Ix} = dF_{Gx} + dR_x; \quad dF_{Iy} = dF_{Gy} + dR_y; \quad dF_{Iz} = dF_{Gz} + dR_z$$

doit se vérifier, et, de ce fait :

$$
\textbf{(9)}\quad
\begin{aligned}
\rho \frac{du}{dt} &= -\rho \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \left[-\frac{\partial P}{\partial x} + \left(\frac{\partial \tau xx}{\partial x} + \frac{\partial \tau yx}{\partial y} + \frac{\partial \tau zx}{\partial z}\right)\right] \\
\rho \frac{dv}{dt} &= -\rho \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \left[-\frac{\partial P}{\partial y} + \left(\frac{\partial \tau xy}{\partial x} + \frac{\partial \tau yy}{\partial y} + \frac{\partial \tau zy}{\partial z}\right)\right] \\
\rho \frac{dw}{dt} &= -\rho \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \left[-\frac{\partial P}{\partial z} + \left(\frac{\partial \tau xz}{\partial x} + \frac{\partial \tau yz}{\partial y} + \frac{\partial \tau zz}{\partial z}\right)\right]
\end{aligned}
$$

Dans le système d'équation **(8)**, on peut introduire, grâce aux relations qui relient les contraintes de cisaillement à la viscosité, les composantes *u*, *v*, *w* de la vitesse. En effet, de même que l'on a pu écrire dans un cas simple $\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$, on peut montrer, dans le cas qui nous intéresse, que l'on a :

$$
\textbf{(10)}\quad
\begin{aligned}
\tau xx &= 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \left(\mu' - \frac{2}{3}\mu\right) \operatorname{div} \vec{V}; \qquad \tau xy = \tau yx = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) \\
\tau yy &= 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \left(\mu' - \frac{2}{3}\mu\right) \operatorname{div} \vec{V}; \qquad \tau yz = \tau zy = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right) \\
\tau zz &= 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \left(\mu' - \frac{2}{3}\mu\right) \operatorname{div} \vec{V}; \qquad \tau zx = \tau xz = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}\right)
\end{aligned}
$$

où intervient un second coefficient de proportionnalité, μ', appelé *second coefficient de viscosité*, qui est relié à des effets de dilatation.

En substituant ces relations dans le système **(9)**, on obtient le système suivant :

$$
\textbf{(11)}\quad
\begin{aligned}
\rho \frac{du}{dt} &= -\rho \frac{\partial \varphi}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \left(\mu' - \frac{2}{3}\mu\right) \operatorname{div} \vec{V}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}\right)\right) \\
\rho \frac{dv}{dt} &= -\rho \frac{\partial \varphi}{\partial y} - \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y}\left(2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \left(\mu' - \frac{2}{3}\mu\right) \operatorname{div} \vec{V}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right)\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)\right) \\
\rho \frac{dw}{dt} &= -\rho \frac{\partial \varphi}{\partial z} - \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z}\left(2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \left(\mu' - \frac{2}{3}\mu\right) \operatorname{div} \vec{V}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}\right)\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right)\right)
\end{aligned}
$$

que l'on peut encore écrire en notations plus condensées

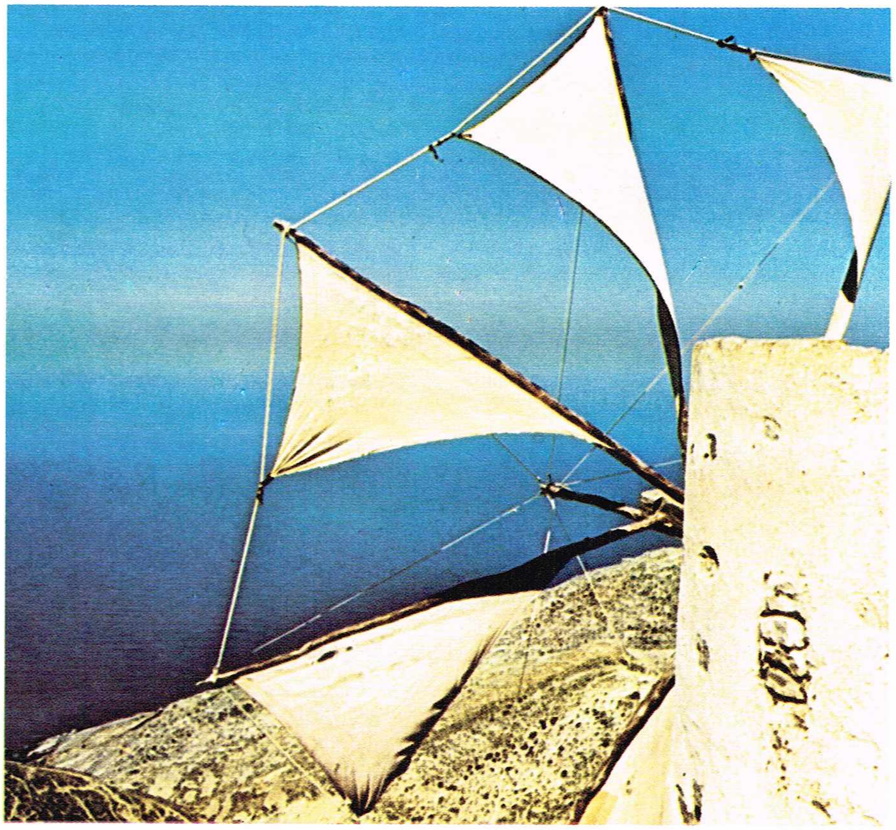

Constantine Manos-

▲ *L'aérodynamique, c'est aussi la poésie d'un moulin à Mikonos.*

$$
\textbf{(12)}\quad \rho \frac{d\vec{V}}{dt} = -\rho\, \overrightarrow{\text{grad}}\, \varphi - \overrightarrow{\text{grad}} \left(P - \left(\mu' + \frac{1}{3}\mu\right) \operatorname{div} \vec{V}\right) + \mu \nabla^2 \vec{V}
$$

où le symbole ∇^2 désigne l'opérateur laplacien :

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

L'équation **(12)** est appelée **équation de Navier-Stoke,** elle représente la base de la dynamique des fluides. Le problème posé par la recherche de sa solution exacte présente une difficulté mathématique exceptionnelle, due principalement à la non-linéarité du système.

Dans le cas d'un fluide incompressible et d'une viscosité constante (hypothèse valable dans le domaine des petites variations de température), les équations de Navier-Stokes se réduisent à :

$$
\textbf{(13)}\quad
\begin{aligned}
\rho \frac{du}{dt} &= -\rho \frac{\partial \varphi}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) \\
\rho \frac{dv}{dt} &= -\rho \frac{\partial \varphi}{\partial y} - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) \\
\rho \frac{dw}{dt} &= -\rho \frac{\partial \varphi}{\partial z} - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right)
\end{aligned}
$$

soit, en utilisant les notations vectorielles,

$$\textbf{(14)}\quad \rho \frac{d\vec{V}}{dt} = -\overrightarrow{\text{grad}}\, (P + \rho\varphi) + \mu \nabla^2 \vec{V}$$

Si la viscosité du fluide est faible, le terme $\mu \nabla^2 \vec{V}$ qui apparaît dans **(14)** peut être négligé, et l'équation de Navier-Stokes pour un fluide incompressible donne :

$$\textbf{(15)}\quad \frac{d\vec{V}}{dt} = -\overrightarrow{\text{grad}} \left(\frac{P}{\rho} + \varphi\right)$$

Si on néglige le champ de force $\vec{G} = -\overrightarrow{\text{grad}}\, (\rho\varphi)$, l'équation **(15)** se réduit à :

$$\textbf{(16)}\quad \rho \frac{d\vec{V}}{dt} = -\overrightarrow{\text{grad}}\, P$$

L'équation **(16)** est appelée **équation d'Euler.** Elle peut être également utilisée comme approximation, dans

▼ ***Figure 7 : forces, par unité de surface, agissant sur un cube élémentaire de volume dV = dx · dy · dz :***

1, $P_z + \tau_{zz} + \frac{\partial}{\partial z}(P_z + \tau_{zz})\, dz$

2, $\tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}\, dz$

3, $\tau_{zy} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z}\, dz$

4, $\tau_{xz} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x}\, dx$

5, $(P_x + \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial x}(P_x + \tau_{xx})\, dx$

6, $\tau_{xy} + \frac{\partial}{\partial x}\tau_{xy}\, dx$

7, $\tau_{yz} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y}\, dy$

8, $(P_y + \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial y}(P_y + \tau_{yy})\, dy$

9, $\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y}\, dy$

fig. 7

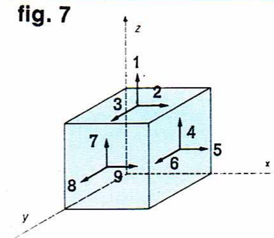

I.G.D.A.

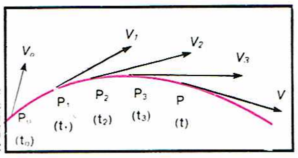

I.G.D.A.

▲ ***Figure 8 :* définition de la ligne de courant.**

l'étude du mouvement des fluides compressibles, tels que l'air, lorsque les vitesses sont petites devant la vitesse du son et que les termes relatifs à la viscosité sont négligeables.

Cherchons à exprimer maintenant le principe de conservation de la quantité de mouvement. Pour cela, évaluons les variations temporelles de la quantité $\rho\vec{V}$; calculons donc $\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{V})$. Cette quantité peut se mettre sous la forme

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{V}) = \rho\frac{\partial\vec{V}}{\partial t} + \vec{V}\frac{\partial\rho}{\partial t}.$$

On a vu que la dérivée lagrangienne d'une grandeur scalaire f (x, y, z, t) est définie par $\frac{df}{dt} = \frac{\partial f}{\partial t} + (\vec{V}\cdot\overrightarrow{\text{grad}})\,f.$

La même définition appliquée à une grandeur vectorielle, par exemple le champ de vitesse, permet d'écrire :

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{\partial\vec{V}}{\partial t} + (\vec{V}\cdot\overrightarrow{\text{grad}})\,\vec{V},$$

donc, d'après **(16)** :

$$\frac{\partial\vec{V}}{\partial t} = -(\vec{V}\cdot\overrightarrow{\text{grad}})\,\vec{V} - \frac{1}{\rho}\overrightarrow{\text{grad}}\,\text{P}$$

Puisque l'on a aussi, d'après **(5)** :

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} = -\,\text{div}\,(\rho\vec{V}),$$

on peut mettre $\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{V})$ sous la forme :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{V}) = -\overrightarrow{\text{grad}}\,\text{P} - \rho\,(\vec{V}\cdot\overrightarrow{\text{grad}})\,\vec{V} - \vec{V}\,\text{div}\,\rho\vec{V}$$

Si l'on intègre cette expression dans un volume V limité par la surface S, $\vec{n}$ étant le vecteur unitaire porté par la normale sortante à l'élément de surface dS, on peut montrer qu'elle se transforme en l'expression suivante :

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_{\text{V}}(\rho\vec{V})\,d\vec{V} = -\int_{\text{S}}\text{P}\vec{n}\,d\text{S} - \int_{\text{S}}\rho\vec{V}\,(\vec{V}\cdot\vec{n})\,d\text{S}$$

Dans le cas d'un écoulement permanent, elle se réduit à :

$$\textbf{(17)}\qquad \int_{\text{S}}\text{P}\vec{n}\,d\text{S} = -\int_{\text{S}}\rho\vec{V}\,(\vec{V}\cdot\vec{n})\,d\text{S}$$

qui exprime la conservation du flux de la quantité de mouvement, en régime permanent, à travers une surface fermée. Cette expression est très utilisée pour calculer les efforts dynamiques d'un fluide sur un obstacle ou des parois.

En appliquant au mouvement du fluide la loi de conservation de l'énergie, on obtient une nouvelle relation entre la vitesse, la pression et la densité. Considérons le travail accompli dans l'unité de temps par toutes les forces appliquées à un volume V. En négligeant le travail accompli par les forces liées à la viscosité et par les forces extérieures volumiques, et en supposant que le système ne reçoit pas de chaleur, le travail accompli dans l'unité de temps par les forces de pression devra être égal à la variation de l'énergie cinétique, proportionnelle à $\frac{\vec{V}^2}{2}$, et à la variation de l'énergie interne E. Compte tenu de ces hypothèses, la loi de conservation de l'énergie est exprimée par :

$$\textbf{(18)}\qquad -\int_{\text{S}}\text{P}\vec{V}\vec{n}\,d\text{S} = \int_{\text{V}}\rho\,\frac{d}{dt}\left(\frac{V^2}{2} + \text{E}\right)d\text{V}$$

où l'intégrale $\left(\int_{\text{S}}\text{P}\vec{V}\vec{n}\,d\text{S}\right)$ représente le travail accompli dans l'unité de temps par la pression agissant sur la surface S qui délimite le volume V.

En transformant l'intégrale de surface qui apparaît dans l'équation **(17)** en une intégrale de volume, celle-ci peut s'écrire sous la forme :

$$-\int_{\text{V}}\text{div}\,(\text{P}\vec{V})\,d\text{V} = \int_{\text{V}}\rho\,\frac{d}{dt}\left(\frac{V^2}{2} + \text{E}\right)d\text{V}$$

à partir de laquelle on obtient :

$$\textbf{(19)}\qquad -\,\text{div}\,(\text{P}\vec{V}) = \rho\,\frac{d}{dt}\left(\frac{V^2}{2} + \text{E}\right)$$

Or on a :

$$\text{div}\,(\text{P}\vec{V}) = \text{P}\,\text{div}\,\vec{V} + \vec{V}\,\overrightarrow{\text{grad}}\,\text{P}$$

$$\text{div}\,\vec{V} = -\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dt}$$

$$\vec{V}\,\overrightarrow{\text{grad}}\,\text{P} = \frac{d\text{P}}{dt} - \frac{\partial\text{P}}{\partial t}$$

L'équation **(19)** peut donc s'écrire sous la forme :

$$\textbf{(20)}\qquad \frac{1}{\rho}\frac{\partial\text{P}}{\partial t} = \frac{d}{dt}\left(\frac{V^2}{2} + \text{E} + \frac{\text{P}}{\rho}\right) = \frac{d}{dt}\left(\frac{V^2}{2} + h\right)$$

dans laquelle h indique l'enthalpie de l'unité de masse, $\text{E} + \frac{\text{P}}{\rho}$. Si l'écoulement est stationnaire, $\frac{\partial\text{P}}{\partial t} = 0$, et la relation **(20)** intégrée donne :

$$\textbf{(21)}\qquad \frac{V^2}{2} + h = \text{Cte},$$

le long de la trajectoire d'un élément de volume fluide (puisque la dérivée lagrangienne est associée à la trajectoire). Comme $\text{E} = c_{\text{V}}\text{T}$ et $h = c_{\text{P}}\text{T}$ (c_{V} = chaleur massique à volume constant ; c_{P} = chaleur massique à pression constante), on peut écrire :

$$\textbf{(22)}\qquad \frac{V^2}{2} + \frac{\text{P}}{\rho} + c_{\text{V}}\text{T} = \text{Cte}$$

et sachant que $c_{\text{P}} = c_{\text{V}} + \frac{\text{R}}{\mathcal{M}}$:

$$\textbf{(23)}\qquad \frac{V^2}{2} + c_{\text{P}}\text{T} = \text{Cte}$$

Lignes de courant et trajectoires. Équation de Bernoulli. Définition du tube de courant

Considérons la configuration du champ de vitesse $\vec{V}$ au temps t_0 (*fig.* 8) ; la ligne qui admet, en chacun de ses points, la direction de la vitesse comme tangente à ce point, est appelée *ligne de courant*.

Considérons maintenant une particule de fluide et supposons que, au temps t_0, celle-ci soit en $\mathbf{P_0}$; au temps t_1, elle se sera déplacée en $\mathbf{P_1}$, au temps t_2 en $\mathbf{P_2}$, et ainsi de suite. L'ensemble des points successivement occupés par la particule est appelé *trajectoire*.

Dans l'écoulement stationnaire, les vitesses n'étant fonction que des coordonnées spatiales, les particules en un point donné **P** du champ ont toujours la même vitesse et les lignes de courant coïncident avec les trajectoires. Si nous projetons l'équation **(16)** le long de la tangente à la trajectoire, on obtient :

$$\rho\,\frac{\partial\vec{V}}{\partial\text{S}}\,\vec{V} = -\frac{\partial\text{P}}{\partial\text{S}}$$

sachant que : $\frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{\partial\vec{V}}{\partial\text{S}}\frac{\partial\text{S}}{\partial t} + \frac{\partial\vec{V}}{\partial t}$, $\frac{\partial\text{S}}{\partial t} = \vec{V}$ et $\frac{\partial\vec{V}}{\partial t} = 0$

En intégrant le long de la ligne de courant, on a :

$$\textbf{(24)}\qquad \frac{1}{2}\rho V^2 + \text{P} = \text{Cte}$$

Cette équation est appelée *équation de Bernoulli*. Elle prend une signification particulière si l'on remarque que $\frac{1}{2}\rho V^2$ et P représentent respectivement l'énergie cinétique et l'énergie potentielle rapportées au volume unitaire de fluide.

Le long d'une même ligne de courant, on doit pouvoir vérifier la relation :

$$\frac{1}{2}\rho V_1^2 + \text{P}_1 = \frac{1}{2}\rho V_2^2 + \text{P}_2$$

Si le fluide est arrêté au point P_2, on aura naturellement $V_2 = 0$, et l'équation **(24)** devient :

$$\frac{1}{2}\rho V_1^2 + \text{P}_1 = \text{P}_2$$

La pression P_2 est appelée *pression d'arrêt* ou *pression totale*. Le terme $\frac{1}{2}\rho V^2$, qui a la dimension d'une pression, prend le nom de *pression dynamique*. Ainsi, le long d'une ligne de courant, la somme de la pression dynamique

$\frac{1}{2}\rho V^2$ et de la pression P se maintient constante et égale à la valeur de la pression totale.

Considérons maintenant, dans un champ de vitesse d'un écoulement stationnaire, une courbe fermée. Les lignes de courant qui prennent appui sur elle constituent un *tube de courant.*

La masse de fluide qui traverse dans le temps dt une section transversale dS du tube de courant est donnée par :

$$\left(\int_S \rho \vec{V}\vec{n}dS\right) dt$$

$\vec{n}$ étant le vecteur unitaire normal à l'élément de surface dS de la section transversale. Comme, à travers les parois du tube de courant, il n'y a aucun flux de fluide, la vitesse des particules étant tangente aux génératrices du tube de courant lui-même, le flux de masse à travers toute section du tube est constant et indépendant de la section considérée.

Le rotationnel de la vitesse. Théorème de Stokes

Étant donné le champ de vitesse $\vec{V}$, on appelle rotationnel de $\vec{V}$ (ou $\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{V}$) le vecteur dont les composantes sont données par :

$$(\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{V})\,x = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \quad (\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{V})\,y = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}$$

(25) $$(\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{V})\,z = \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right)$$

Si le rotationnel de la vitesse est nul en tous les points du champ, le mouvement est dit *irrotationnel.* Le **théorème de Stokes** permet de relier le vecteur $\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{V}$ à la circulation Γ de la vitesse. Rappelons que la circulation d'un vecteur le long d'une ligne fermée l est définie par :

$$\Gamma = \int_l \vec{V}\,d\vec{l}$$

Le théorème de Stokes établit que la circulation de la vitesse le long d'une ligne fermée l est égale au flux du vecteur $\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{V}$ à travers n'importe quelle surface S ayant l pour contour, c'est-à-dire :

$$\int_l \vec{V}\,d\vec{l} = \int_S \overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{V}\cdot\vec{n}\,dS$$

Théorème de Thompson (conservation de la circulation de la vitesse). Soit Γ la circulation de la vitesse calculée sur un contour fermé C. Considérons ce contour entraîné par le fluide, et calculons la variation temporelle de Γ lors du mouvement du contour, c'est-à-dire la quantité $\frac{d}{dt}\int \vec{V}\,d\vec{l}$.

On peut montrer que cette quantité vaut :

$$\frac{d}{dt}\int \vec{V}\,d\vec{l} = \int \left(\frac{d\vec{V}}{dt}\right) d\vec{l} + \int \vec{V}\,d\vec{V}$$

Sur un contour fermé $\int \vec{V}\,d\vec{V} = \int d\,(V)^2$ est nul. Quant à $\frac{d\vec{V}}{dt}$, on sait que, si l'on peut négliger les effets de viscosité et dans le cas de champ de force dérivant d'un potentiel, on peut écrire (voir équation **15** pour un fluide incompressible) :

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = -\,\overrightarrow{\text{grad}}\left(\frac{P}{\rho} + \varphi\right)$$

Dans ce cas, on peut appliquer la formule de Stokes :

$$\int_l -\overrightarrow{\text{grad}}\left(\frac{P}{\rho} + \varphi\right) d\vec{l} = \int_S \overrightarrow{\text{rot}}\left(-\overrightarrow{\text{grad}}\left(\frac{P}{\rho} + \varphi\right)\right)\vec{n}dS = 0$$

puisque le rotationnel d'un gradient est toujours nul.

On obtient donc :

$$\frac{d\Gamma}{dt} = 0, \quad \text{soit } \Gamma = \text{Cte},$$

qui permet d'établir le théorème de Thompson : la circulation de la vitesse le long d'un circuit fermé, constitué toujours par les mêmes particules de fluide, est constante dans le cas d'un fluide non visqueux et pour un champ de force dérivant d'un potentiel.

Écoulement irrotationnel

Supposons que l'écoulement d'un fluide soit stationnaire, et considérons une ligne de courant qui serait telle que $\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{V} = 0$ en un de ses points. Soit un contour fermé infinitésimal entourant ce point et la ligne de courant. La circulation de la vitesse est nulle sur ce contour, puisque $\int_l \vec{V}\,d\vec{l} = \int_S \overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{V}\,dS$ et que $\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{V} = 0$.

Au cours du temps, ce contour se déplace et la circulation reste nulle puisque $\Gamma = \text{Cte}$, donc $\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{V} = 0$ en tout point de la ligne d'écoulement considérée. En particulier, s'il existe une région de l'espace telle que $\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{V} = 0$, alors $\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{V} = 0$ pour toutes les lignes d'écoulement passant par cette région. Si cette région est une région par laquelle passent toutes les lignes d'écoulement (par exemple en amont où $\vec{V} = \text{Cte}$), alors on a partout $\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{V} = 0$: l'écoulement est dit *irrotationnel* ou encore *à potentiel*.

De même, si l'écoulement est à potentiel à un certain instant t_0, alors $\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{V} = 0$, et la circulation est nulle partout à cet instant, donc, étant constante, elle demeure nulle et l'écoulement reste à potentiel à tous les instants ultérieurs.

Potentiel de la vitesse

Supposons donc qu'un écoulement soit irrotationnel. On a donc $\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{V} = 0$. Or, on peut montrer que, si le champ de vitesse est tel que $\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{V} = 0$, c'est que nécessairement ce champ est un champ de gradient, c'est-à-dire qu'il existe une fonction $\Phi\ (x, y, z)$ telle que

$$\vec{V} = \overrightarrow{\text{grad}}\,\Phi.$$

La fonction $\Phi\ (x, y, z)$ prend le nom de *potentiel de la vitesse*. Les surfaces $\Phi\ (x, y, z) = \text{Cte}$ sont normales au vecteur $\vec{V}$ et sont appelées *surfaces équipotentielles*. En connaissant le potentiel de la vitesse, il est possible d'obtenir par de simples opérations de dérivations la vitesse en tout point du champ ; on a en effet :

(26) $$u = \frac{\partial\Phi}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial\Phi}{\partial y}, \quad w = \frac{\partial\Phi}{\partial z}$$

Équation de Laplace

Dans l'hypothèse où le fluide est incompressible et son mouvement stationnaire, l'équation de continuité s'écrit :

(27) $$\text{div}\,\vec{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

En outre, si le mouvement est irrotationnel, il existe un potentiel de la vitesse, tel que $\vec{V} = \overrightarrow{\text{grad}}\,\Phi$, et l'équation **(27)** peut s'écrire sous la forme :

(28) $$\frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\Phi}{\partial z^2} = 0$$

(28) est appelée *équation de Laplace*, et la fonction Φ qui la satisfait est dite fonction harmonique. Une conséquence importante résultant des propriétés des fonctions harmoniques est qu'il y a superposabilité des solutions qui satisfont aux mêmes conditions limites.

Sources, puits et doublets

Considérons un champ de vitesse radial où la vitesse n'est fonction que du rayon : $V_r = f\ (r)$. Le débit volumique à travers une sphère de surface S centrée en **P** est alors simplement donné par

$$Q = \int_S \vec{V}\vec{n}\,dS = 4\,\pi r^2 V_r\ (r) \qquad (\textit{fig. } 9)$$

La conservation du débit à travers deux sphères concentriques de rayons différents impose pour la vitesse une relation du type :

(29) $$V_r(r) = \pm\frac{m}{r^2} \qquad m > 0$$

La constante m, qui vaut donc également $\mp\frac{Q}{4\,\pi}$, est appelée intensité de la singularité ; cette singularité prend le nom de *source* lorsque les lignes de courant en sor-

▼ ***Figure 9 : la singularité représentée ici schématise l'émission de fluide en un point du champ et prend le nom de* source.**

fig. 9

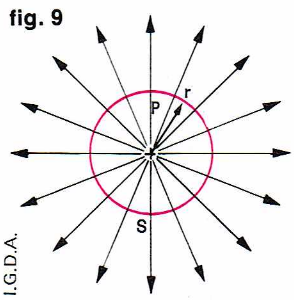

I.G.D.A.

▶ *Figure 10 : représentation schématique des lignes d'écoulement résultant de l'ensemble puits-source (doublet).*

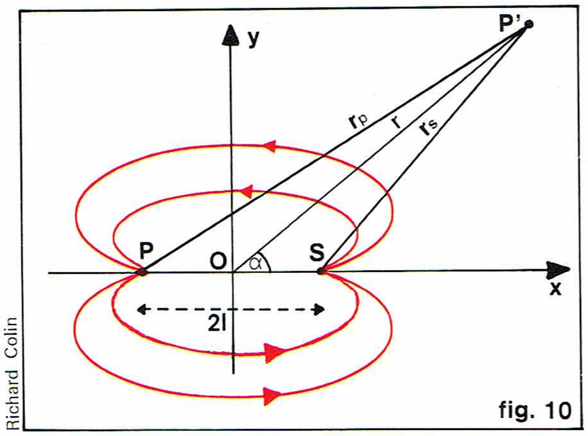

fig. 10

tent (champ de vitesse associé au signe +), et de *puits* lorsqu'elles y convergent (signe —).

Or, on sait que Φ est relié à la vitesse par la relation $\vec{V} = \overrightarrow{\text{grad}}\,\Phi$ qui se réduit, dans le cas qui nous intéresse, à la relation $V_r = \dfrac{d\Phi}{dr}$.

On peut donc calculer Φ :

$$\Phi = \mp \frac{m}{r}$$

Si l'on considère maintenant le champ résultant de l'ensemble source et puits de même intensité m, le potentiel en un point **P'** sera donné par :

$$\Phi = m\left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_s}\right) = m\,\frac{r_s - r_p}{r_s r_p}$$

où r_p et r_s indiquent la distance du point **P'** au puits et à la source.

Si l'on se place à grande distance de cet ensemble puits-source, auquel on donne alors le nom de doublet, cette expression se transforme en :

$$\textbf{(30)} \qquad \Phi = \frac{\text{M} \cos \alpha}{r^2}$$

où r est la distance de **P'** au centre O du doublet, M = 2 *lm* (2 *l* est la distance entre le puits et la source), et α l'angle de OP' avec l'axe du doublet (*fig.* 10).

▼ *Figure 11 : représentation du champ engendré par la superposition d'un écoulement uniforme et d'un doublet. La surface sphérique de rayon* **R** *n'est pas traversée par le fluide et peut donc être assimilée à un corps solide.*

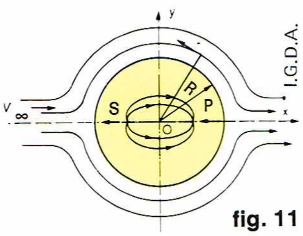

fig. 11

Superposition d'un écoulement uniforme et d'un doublet

En superposant un écoulement uniforme (s'écoulant dans le sens source-puits) à celui d'un doublet, on obtient (*fig.* 11) un champ résultant dont le potentiel est donné par :

$$\Phi = V_\infty x + \frac{\text{M} \cos \alpha}{r^2} = V_\infty r \cos \alpha + \frac{\text{M} \cos \alpha}{r^2} =$$

$$\cos \alpha \left(V_\infty r + \frac{\text{M}}{r^2}\right)$$

qui permet de calculer la vitesse, et en particulier la vitesse radiale V_r, puisque $V_r = \dfrac{\partial \Phi}{\partial r}$:

$$V_r = \cos \alpha \left(V_\infty - \frac{2\,\text{M}}{r^3}\right)$$

Cette relation montre que la composante radiale de la vitesse est nulle en tout point situé sur une sphère de centre O et de rayon $\text{R} = \left(\dfrac{2\,\text{M}}{V_\infty}\right)^{1/3}$. Il n'existe donc sur cette sphère que la composante tangentielle de la vitesse. La surface sphérique n'étant pas traversée par un fluide, elle peut être assimilée à un corps solide. Il s'ensuit que l'étude du champ de vitesse résultant de la superposition d'un écoulement uniforme et d'un doublet équivaut à l'étude du champ de vitesse résultant de la présence d'une sphère dans un écoulement uniforme.

▼ *Figure 12 : le débit volumique à travers la surface* **ABCD** *dépend uniquement de la valeur de la fonction de courant aux points* **A** *et* **B**. *Si les points* **A** *et* **B** *appartiennent à la même ligne de courant, le débit volumique à travers la surface est nul.*

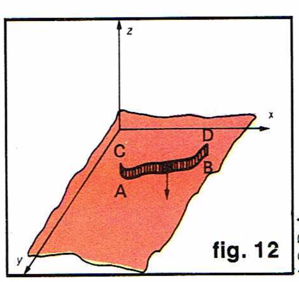

fig. 12

Paradoxe de D'Alembert

Dans l'écoulement qui vient d'être étudié, changer le sens de l'écoulement uniforme revient seulement à changer partout, à l'extérieur de la sphère, le sens de la vitesse. Cela signifie en particulier que, sur la sphère, la vitesse a la même valeur absolue quand on change x en $-x$ (et évidemment y en $-y$).

Une fois connue la valeur de la pression à l'infini, l'équation de Bernoulli permet d'obtenir la valeur des pressions agissant sur la sphère. Ces pressions sont donc également symétriques, ce qui signifie que la résultante des forces de pression agissant sur la sphère est nulle : le fluide n'exerce aucune force sur la sphère. Ce résultat, connu sous le nom de *paradoxe de D'Alembert*, est valable en l'absence d'éléments susceptibles de perturber la symétrie du champ aérodynamique. Par exemple, la viscosité détruit la symétrie des pressions par rapport à l'axe y et engendre une force qui s'oppose au mouvement du fluide.

Mouvements irrotationnels. Fonction courant

Lorsque les vitesses sont parallèles à un plan de référence fixe et que, en outre, toutes les grandeurs demeurent constantes le long de la direction normale à celui-ci, l'écoulement est dit *plan* ou *bidimensionnel*. Ces champs jouissent de propriétés particulières qui en permettent l'étude non seulement à l'aide du potentiel, mais aussi à l'aide de la fonction courant que l'on va définir.

Comme nous l'avons déjà vu, les composantes de la vitesse en un point sont définies par :

$$\textbf{(31)} \qquad u = \frac{dx}{dt}, \quad v = \frac{dy}{dt}, \quad w = \frac{dz}{dt}$$

qui permet d'écrire pour un écoulement plan :

$$\textbf{(32)} \qquad \frac{dx}{u} = \frac{dy}{v}$$

dx et dy étant les composantes d'un élément de la ligne de courant, **(32)** représente l'équation différentielle de cette ligne de courant.

En négligeant les variations de masse volumique, l'équation de continuité (div $\vec{V} = 0$) s'écrit, dans ce cas :

$$\textbf{(33)} \qquad \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{\partial v}{\partial y}$$

Or, cette relation est la condition nécessaire pour qu'il existe une fonction ψ telle que :

$$\textbf{(33')} \qquad u = \frac{\partial \psi}{\partial y} \qquad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$$

En écrivant l'équation de la ligne de courant en fonction de ψ, on obtient donc :

$$\frac{\partial \psi}{\partial x}\,dx + \frac{\partial \psi}{\partial y}\,dy = d\psi = 0$$

ce qui signifie que ψ est constant sur une ligne de courant.

La fonction $\psi\ (x, y)$ prend le nom de *fonction courant.*

La fonction ψ permet de calculer simplement le débit volumique à travers une surface cylindrique de hauteur unitaire et normale au plan du mouvement reposant sur une courbe quelconque du plan joignant deux points A et B, arbitrairement choisis. Pour le démontrer, calculons le flux à travers la surface ABCD (*fig.* 12). Celui-ci est donné par la valeur de l'intégrale $\int_S \vec{V}\vec{n}\,dS$ étendue à toute la surface considérée. Puisque le vecteur $\vec{n}\,dS$ peut s'écrire sous la forme :

$$\vec{n}\,dS = -\vec{i}\,dy + \vec{j}\,dx,$$

le flux élémentaire $\vec{V}\vec{n}\,dS$ est donné par :

$$\vec{V}\vec{n}\,dS = (\vec{i}u + \vec{j}v)\,(-\vec{i}\,dy + \vec{j}\,dx).$$

En effectuant l'intégration, on obtient pour le débit volumique Q à travers la surface ABCD :

$$\text{Q} = \psi\,(\text{B}) - \psi\,(\text{A})$$

Les lignes à $\psi\,(x, y) = \text{Cte}$ et $\Phi\,(x, y) = \text{Cte}$ constituent deux familles de courbes orthogonales ; en outre, les quadrilatères curvilignes compris entre deux éléments ds des lignes de courant et dn des lignes équipotentielles (*fig.* 13) sont semblables dans tout le champ. En particulier, si l'un d'eux est un carré, tout le réseau est formé de mailles quadrangulaires.

Potentiel complexe des vitesses

On a vu que l'on pouvait écrire :

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad v = \frac{\partial \Phi}{\partial y} \quad \text{et} \quad u = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$$

par conséquent :

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad v = \frac{\partial \Phi}{\partial y} = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$$

Ces conditions ne sont autres que les conditions de Cauchy-Riemann exprimant le fait que l'expression :

(34) $$W = \Phi + i\psi$$

est une fonction analytique de la variable complexe $z = x + iy$. W est appelé potentiel complexe des vitesses.

On peut considérer W comme fonction de x et de y par l'intermédiaire de z : $W\left((z\ (x, y)\right)$, et on peut écrire :

$$\frac{\partial W}{\partial x} = \frac{\partial W}{\partial z}\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{dW}{dz}$$

$$\frac{\partial W}{\partial y} = \frac{dW}{dz}\frac{\partial z}{\partial y} = i\frac{dW}{dz}$$

il vient donc :

(35) $$\frac{dW}{dz} = \frac{\partial \Phi}{\partial x} + i\frac{\partial \psi}{\partial x} = u - iv.$$

Cette dérivée représente la vitesse complexe dont le module et l'argument sont respectivement le module de la vitesse et l'angle $(\vec{V}, O\vec{x}) = -\theta$:

(36) $$\frac{dW}{dz} = u - iv = |\vec{V}| \exp(-i\theta)$$

Expressions en coordonnées polaires

Un changement de système de coordonnées permet de relier les composantes V_r et V_θ aux fonctions courant et au potentiel. On obtient :

$$V_r = \frac{\partial \Phi}{\partial r} = \frac{1}{r}\frac{\partial \psi}{\partial \theta}$$

$$V_\theta = \frac{1}{r}\frac{\partial \Phi}{\partial \theta} = -\frac{\partial \psi}{\partial r}$$

Écoulements singuliers à potentiel

Les fonctions analytiques reçoivent en aérodynamique des applications importantes. Elles permettent en effet de décrire simplement un certain nombre d'écoulements, par la recherche, en particulier, du potentiel des vitesses associé. Ainsi, un *écoulement uniforme* est décrit en cartésiennes par :

$$u = U, \quad v = 0,$$

d'où l'on déduit par intégration, puisque

$$u = U = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial y} :$$

(37) $$\Phi = Ux, \quad \psi = Uy, \quad W = Uz$$

Une source ponctuelle (linéaire, perpendiculaire au plan xOy) crée un écoulement où, par raison de symétrie, $V_\theta = 0$ et V_r n'est fonction que de r. Soit Q le débit volumique par unité de hauteur. On définit l'intensité de la source par la quantité $a = \frac{Q}{2\pi}$. En calculant le débit traversant un cercle de rayon r, il vient :

$$Q = \int_0^{2\pi} V_r\, r d\theta = 2\pi r V_r.$$

La conservation du débit imposant que cette quantité soit constante, on obtient :

$$2\pi r V_r = 2\pi a.$$

Par conséquent, $V_r = \frac{a}{r} = \frac{d\Phi}{dr} = \frac{1}{r}\frac{d\psi}{d\theta}$ et par intégration :

(38) $$\Phi = a \operatorname{Log} r \quad \psi = a\theta$$

(38) permet de déduire le potentiel des vitesses :

(39) $W = Q + i\psi = a \operatorname{Log}(r \exp i\theta) = a \operatorname{Log} z$

en changeant a en $-a$, on change le sens de l'écoulement, et l'on parle alors de puits.

Doublet

Si on considère à présent un ensemble source-puits de même intensité en valeur absolue, il suffit, pour trouver le potentiel des vitesses associé, de superposer le potentiel relatif à la source au potentiel relatif au puits. Si α est l'angle que fait l'ensemble source-puits avec l'axe des x, l'affixe de la source est $z_0 = \gamma \exp(i\alpha)$ et celle du puits $-z_0$. Le potentiel des vitesses associé à la source vaut donc $a \operatorname{Log}(z - z_0)$ et celui associé au puits $-a \operatorname{Log}(z + z_0)$. Le potentiel de l'ensemble s'écrit donc :

(40) $$W = a \operatorname{Log}\left(\frac{z - z_0}{z + z_0}\right)$$

Si l'on se place à grande distance de cet ensemble puits-source, qui, comme on l'a vu, prend alors le nom de doublet, cette expression s'écrit :

$$W = -2a\frac{z_0}{z}$$

soit, en posant $2a\gamma = \mu$,

(41) $$W = \frac{-\mu}{z}\exp(i\alpha)$$

Tourbillon

C'est par définition un écoulement du type :

$$V_r = 0, \quad V_\theta = V_\theta(r),$$

Il existe donc une symétrie de révolution. Dans le cas d'un écoulement irrotationnel, il est nécessaire de poser :

$$|\vec{\text{rot}}\, \vec{V}| = \left|\frac{V_\theta}{r} + \frac{\partial V_\theta}{\partial r}\right| = 0,$$

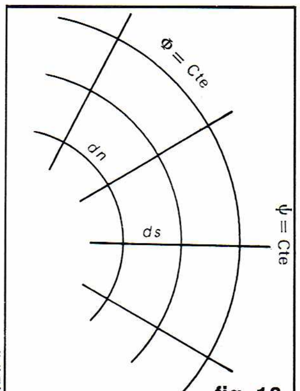

fig. 13

I.G.D.A.

▲ ***Figure 13 :*** ***les lignes à Ψ et Φ constants peuvent être représentées par deux familles de courbes point par point orthogonales. Cette propriété est utilisée pour tracer les lignes de courant dès que la fonction potentielle est connue et vice versa.***

▼ ***Écoulement à relativement basse vitesse : tourbillons alternés du sillage derrière une plaque mince sans incidence.***

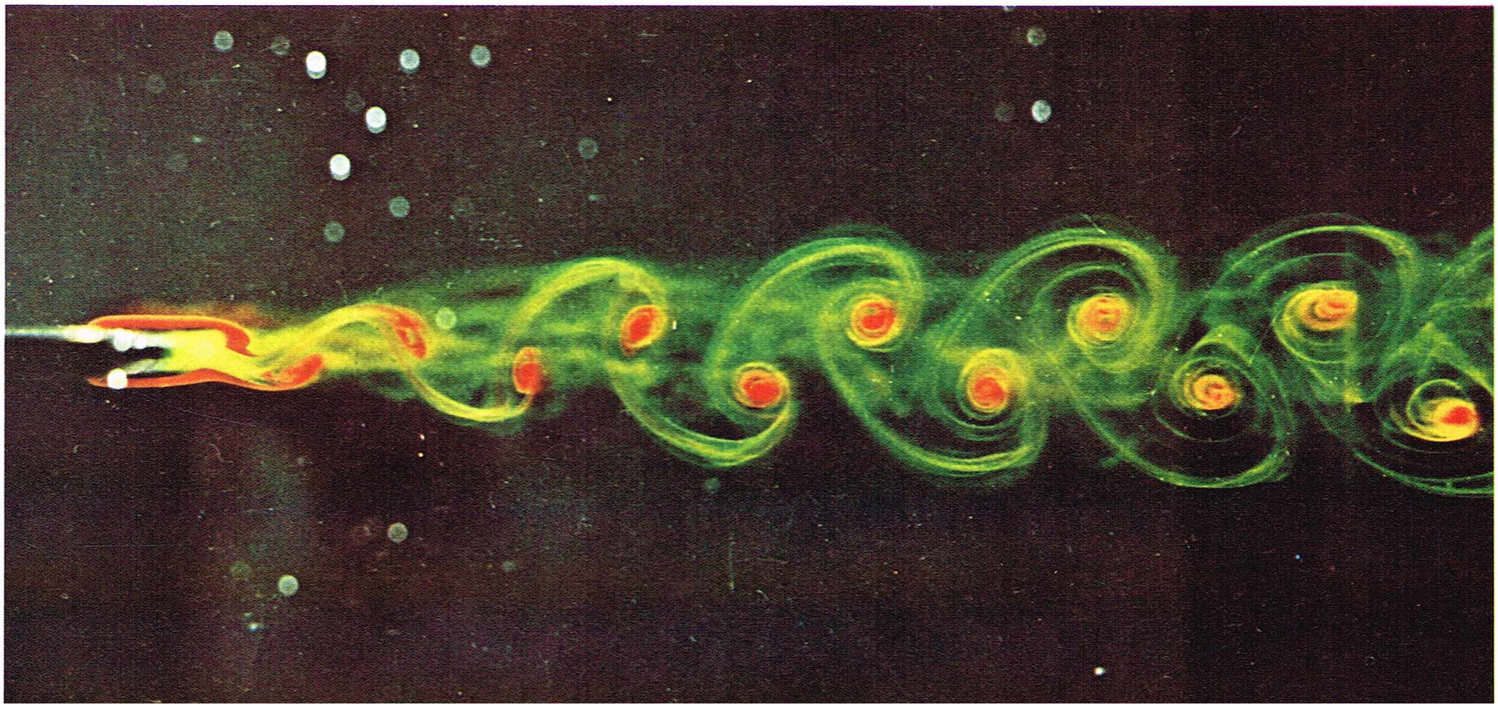

ONERA

▶ *Figure 15 : répartition des contraintes exercées par le fluide sur un cylindre indéfini. Les zones en + indiquent une surpression ($P > P_\infty$) et les zones en — une dépression ($P < P_\infty$).*

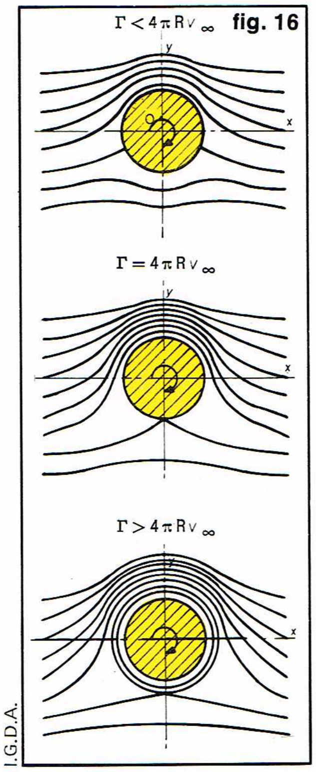

I.G.D.A.

▲ *Figure 16 : allure du champ engendré par la superposition du champ uniforme, d'un tourbillon d'intensité Γ et d'un doublet.*

▶ *Figure 14 : lignes d'écoulement associées au champ créé par la superposition d'un écoulement uniforme bidimensionnel à l'écoulement du doublet (influence d'un cylindre).*

▶ *Page ci-contre, en bas, figure 21 : schéma du champ de vitesse à la surface d'un corps placé dans un écoulement : a, couche limite turbulente ; b, couche limite laminaire ; c, couche adhérente.*

qui implique que

$$\frac{dV_\theta}{V_\theta} = -\frac{dr}{r} \quad \text{et que} \quad V_\theta = \frac{A}{r}$$

L'écoulement est alors irrotationnel partout, sauf à l'origine. De ce fait $\oint \vec{V}\,\vec{dl} = 0$ si C (contour de la circulation) n'entoure pas l'origine. Si C entoure l'origine :

$$\Gamma = \int_C \vec{V}\,\vec{dl} = \int_0^{2\pi} V_\theta r d\theta = 2\pi A$$

On peut alors déterminer le potentiel complexe associé :

$$\frac{\partial\Phi}{\partial r} = V_r = 0 \quad \frac{1}{r}\frac{d\Phi}{d\theta} = V_\theta = \frac{A}{r} \quad \text{donc} \quad \Phi = A\theta$$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial\psi}{\partial\theta} = V_r = 0 \quad -\frac{d\psi}{dr} = V_\theta = \frac{A}{r} \quad \text{donc} \quad \psi = -A \operatorname{Log} r$$

qui permet d'écrire :

$$W = A\theta - iA \operatorname{Log} r$$

soit :

(42) $$W = -\frac{i\Gamma}{2\pi} \operatorname{Log} z.$$

Doublet et écoulement uniforme

Si la source et le puits ont une intensité a et sont placés cette fois sur l'axe Ox, à la distance γ de l'origine ($\alpha = \pi$ et $z_0 = \gamma$), le potentiel complexe cherché est la somme du potentiel relatif à l'écoulement uniforme, $W = Uz$, et du potentiel source-puits :

$$W = a \operatorname{Log}\left(\frac{z+\gamma}{z-\gamma}\right)$$

On peut alors montrer qu'il existe une ligne d'écoulement fermée qui sépare le plan en deux régions, l'une ne contenant que le fluide provenant de l'écoulement principal, l'autre le fluide s'écoulant de la source vers le puits. Si les dimensions caractéristiques de cette dernière zone sont grandes devant γ, l'ensemble source-puits peut être considéré comme un doublet. Le potentiel complexe s'écrit alors, d'après **(37)** et **(41)** :

(43) $$W = U_\infty z + \frac{\mu}{z}$$

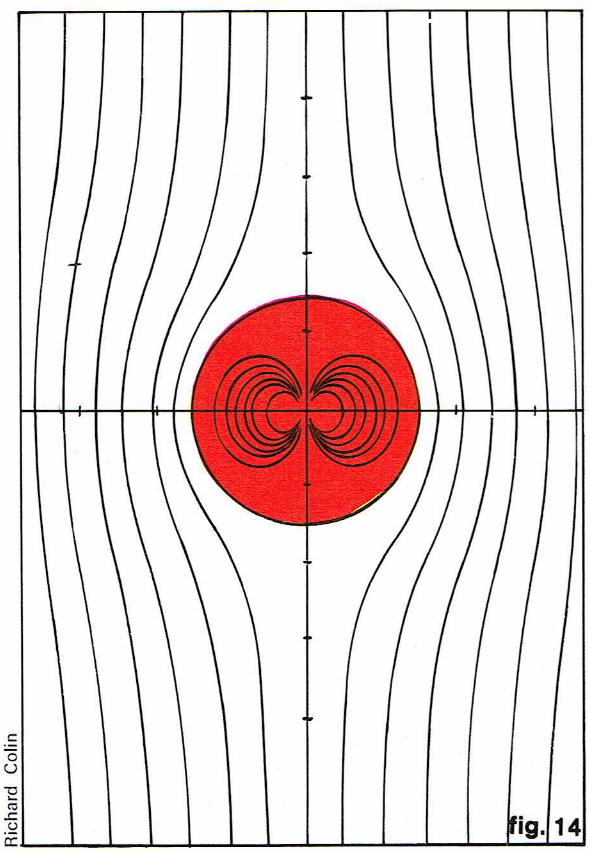

Richard Colin

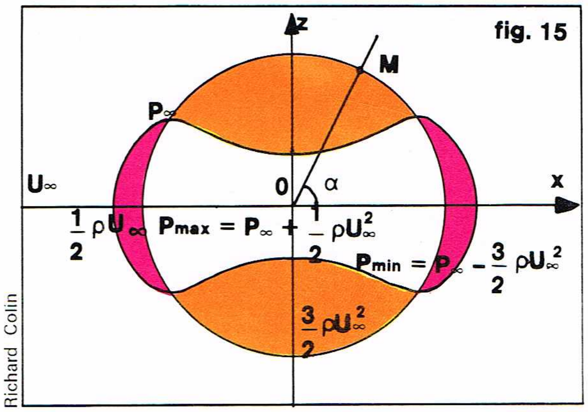

Richard Colin

On obtient donc :

$$W(x, y) = U_\infty (x + iy) + \mu \frac{x - iy}{x^2 + y^2} = \Phi + i\psi.$$

Comme l'équation des lignes de courant est donnée par $\psi = k$, il vient, après identification des parties imaginaires :

$$U_\infty y - \frac{\mu y}{x^2 + y^2} = k,$$

qui permet d'obtenir les lignes d'écoulement représentées (*fig.* 14). Remarquons que pour $k = 0$ on obtient $y = 0$ (axe Ox), et le cercle $x^2 + y^2 = \frac{\mu}{U}$ qui sépare l'écoulement principal de l'écoulement créé par le doublet. Sur ce cercle, la composante radiale de la vitesse est nulle. La composante tangente au cercle en un point M peut être donnée à partir de l'expression de Φ : on obtient $V_t = 2\,U_\infty \sin\alpha$ (où $\alpha = \vec{Ox}, \vec{OM}$).

En appliquant l'équation de Bernoulli, on obtient la répartition des pressions exercées par le courant fluide sur le cylindre :

$$P = P_\infty + \frac{1}{2}\rho U_\infty^2 (1 - 4\sin^2\alpha) \quad (fig.\ 15).$$

Du fait de la symétrie des vitesses et des pressions, le champ de vitesse n'exerce aucune action sur le cylindre (paradoxe de D'Alembert). En particulier, la traînée (force agissant dans la direction de l'axe Ox) et la portance (force agissant dans la direction de l'axe Oz) sont nulles.

Doublet, écoulement uniforme et tourbillon

Si l'on ajoute à l'écoulement précédent un tourbillon centré à l'origine, le potentiel complexe s'écrit (voir **42** et **43**) :

(44) $$W = U_\infty z + \frac{\mu}{z} - i\frac{\Gamma}{2\pi} \operatorname{Log}(z)$$

soit encore, en utilisant les coordonnées polaires :

$$W = U_\infty \rho (\cos\theta + i \sin\theta) + \frac{\mu}{\rho}(\cos\theta - i\sin\theta) + \frac{\Gamma\theta}{2\pi} - \frac{i\Gamma}{2\pi}\operatorname{Log}\rho$$

qui permet de déterminer :

$$\psi = U_\infty \rho \sin\theta - \frac{\mu \sin\theta}{\rho} - \frac{\Gamma}{2\pi}\operatorname{Log}\rho$$

et l'équation des lignes de courant est donnée par :

(45) $$U\rho \sin\theta - \frac{\mu\sin\theta}{\rho} - \frac{\Gamma}{2\pi}\operatorname{Log}\rho = k$$

Pour la valeur de $k = \frac{-\Gamma}{4\pi}\operatorname{Log}\frac{\mu}{\rho}$ on obtient $\rho^2 = \frac{\mu}{U}$ comme solution valable pour tout θ. Le cercle de rayon $\left(\frac{\mu}{U}\right)^{1/2}$ sépare encore l'écoulement en deux régions, mais la circulation de la vitesse autour du cercle n'est plus nulle.

On a représenté (*fig.* 16) la configuration des lignes de champ pour différentes valeurs de Γ. Il est à remarquer que, si la symétrie par rapport à Oy est conservée (pas de traînée), par contre la symétrie par rapport à Ox est détruite, et la portance n'est plus nécessairement nulle. Plus précisément, on peut, comme précédemment, calculer la répartition de pression, à savoir :

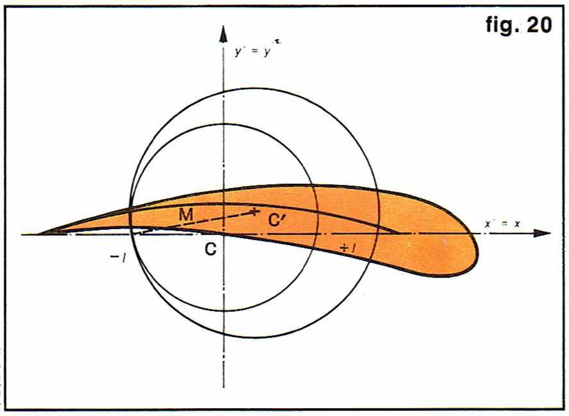

I.G.D.A.

$$P = P_\infty + \frac{1}{2}\rho$$

$$(46) \qquad \left[V_\infty^2\,(1 - 4\sin^2\alpha) - \frac{1}{4}\frac{\Gamma^2}{\pi^2 R^2} + \frac{2\,\Gamma V_\infty}{\pi R}\sin\alpha\right]$$

et l'on peut vérifier facilement que la force verticale résultante est donnée par

$$F_y = -\rho\Gamma V_\infty.$$

Si le sens de rotation du tourbillon est opposé, Γ change de signe, et F_y devient positif. La déviation de projectiles tournants (balles de tennis par exemple) dans l'air (effet Magnus) est une confirmation de ce théorème.

Représentation conforme

Contentons-nous ici de préciser quelques notions importantes : une transformation conforme fait correspondre à un point (x, y) du plan complexe d'affixe Z un autre point (x', y') d'affixe Z' par la relation $Z' = f(Z)$. Toute transformation analytique de la variable Z est telle que la transformation $Z' = f(Z)$ est conforme. Il en résulte un certain nombre de conséquences directement applicables à un écoulement plan irrotationnel : soit le potentiel complexe W (Z'), où W (Z') est une fonction analytique. La transformation $Z' = f(Z)$ conduit au potentiel complexe W (f (Z)) qui est toujours une fonction analytique de Z et qui correspond donc à un écoulement irrotationnel. Comme, d'autre part, la transformation conforme conserve les angles, les conditions limites sont respectées (dans le plan initial, $\vec{V}$ doit être parallèle aux obstacles au niveau de l'obstacle ; dans le plan transformé, $\vec{V'}$ sera parallèle à l'obstacle transformé). Les transformées d'équipotentielles et de lignes de courant seront encore des équipotentielles et des lignes de courant associées à la même constante.

Enfin, la circulation le long d'un contour C du plan complexe est égale à la circulation le long du contour transformé C' dans le plan transformé.

Les applications sont particulièrement importantes ; en effet certaines formes d'obstacles peuvent par transformation conforme être ramenées à des formes simples, pour lesquelles on sait calculer les lignes d'écoulement. On peut, en particulier par la transformation de Joukowski, définie par

$$(47) \qquad Z' = f(Z) = Z + \frac{l^2}{Z^2}$$

transformer un cercle centré à l'origine de rayon $r = r_0$ en une ellipse de foyers $-2\,l$ et $2\,l$. Si $r_0 = l$, l'ellipse dégénère en le segment $-2\,l, +2\,l$. Le cercle de rayon l est appelé fondamental de la transformation (*fig.* 17). De même, la circonférence C_1 de centre C et passant par le point d'affixe $-l$ se transforme en la courbe C'_1 (*fig.* 18). En effet, C_1 est tangent aux cercles C_0, cercle principal, et C_2, qui se transforment respectivement en le segment $-2\,l, +2\,l$ et l'ellipse C'_2. L'allure de la courbe C'_1 est déduite du fait qu'elle doit rester tangente aux courbes transformées C'_0 et C'_2.

Dans le cas de courbes correspondant à des cercles centrés sur l'axe imaginaire et passant par les points $\pm\,l$, on obtient un arc de cercle (*fig.* 19) passant par les points $\pm\,2\,l$, qui correspond à un profil de courbure constante et d'épaisseur nulle.

Enfin, si l'on transforme ce cercle de centre C' situé en dehors des axes et passant par le point $-l$, on obtient un profil d'épaisseur directement proportionnelle à la distance CC' (*fig.* 20).

Les exemples de transformation précédemment discutés montrent que tous les profils peuvent être obtenus comme des transformations de cercles. Les profils de Joukowski, toutefois, présentent deux inconvénients : un squelette à courbure constante et un bord de fuite en flèche. On peut porter remède à ces inconvénients en faisant varier l'exposant de la transformation. Un exemple nous est fourni par les profils de Karman et Trefftz qui éliminent les formes en flèche du bord de fuite et des profils de von Mises qui ont un squelette à courbure variable.

Action aérodynamique sur un profil

Nous avons vu que, grâce aux transformations conformes, on peut obtenir, à partir du cercle, des profils aérodynamiques, et que, connaissant les vitesses et le potentiel complexe autour d'un cylindre plongé dans un courant uniforme, on peut, par les transformations conformes, analyser le champ de vitesse autour du profil.

Dans l'étude du champ de vitesse, on se sert très utilement des deux **formules de Blasius** — données ici sans démonstration — qui permettent de déterminer, connaissant le potentiel complexe W (z), l'action aérodynamique exercée par le courant sur le profil :

$$(48) \qquad F = F_x - iF_y = \frac{i\rho}{2}\int_C \left(\frac{dW}{dz}\right)^2 dz$$

$$(49) \qquad \mathcal{M}/Oz = -\frac{\rho}{2}\,\mathcal{R}e\int_C z\left(\frac{dW}{dz}\right)^2 dz$$

où $\mathcal{R}e\displaystyle\int_C z\left(\frac{dW}{dz}\right)^2 dz$ désigne la partie réelle de

$$\int_C z\left(\frac{dW}{dz}\right)^2 dz.$$

La première formule de Blasius **(48)** fournit un nombre complexe dont le conjugué représente vectoriellement la force aérodynamique agissant sur le profil, tandis que la seconde formule de Blasius **(49)** donne le moment $\mathcal{M}$, par rapport à l'axe Oz exercé par la force aérodynamique.

La résistance aérodynamique. Résistance induite. Ailes de longueur finie.

La théorie de Joukowski explique l'origine de la portance, mais non celle de la résistance. Pour comprendre comment celle-ci est engendrée et comment il est possible de déterminer les lois qui la régissent, il faut considérer le champ des vitesses et des pressions sur la surface d'un corps placé dans un écoulement (*fig.* 21).

La couche de fluide qui se trouve immédiatement au contact de la surface du corps, contrairement à ce que l'on suppose lorsqu'on fait l'hypothèse des fluides parfaits, a une vitesse nulle *(condition de non-glissement)*. En dehors de cette couche, la vitesse du fluide croît rapidement, tout en se maintenant sensiblement parallèle à la surface du corps *(couche limite laminaire)*. Dans cette couche laminaire (qui est de très faible épaisseur), le mouvement du fluide est entièrement dominé par les effets de la viscosité.

Si on s'éloigne davantage de la surface du corps, le mouvement du fluide devient turbulent avec apparition de fluctuations de vitesses. A une distance encore plus grande, le mouvement du fluide prend un caractère régulier : on peut considérer que le fluide est parfait et que son mouvement n'est pas influencé par l'action des forces visqueuses. La zone de fluide intéressée par les phénomènes que nous venons de décrire prend le nom de *couche limite turbulente*.

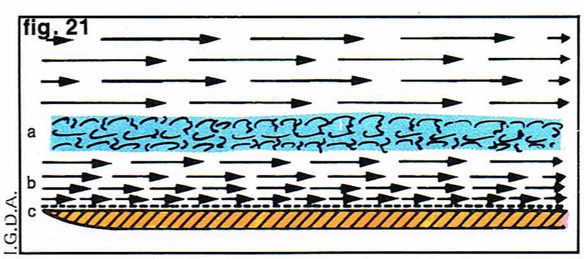

I.G.D.A.

◀ ***Figure 20 : transformations de cercles non centrés sur les axes et passant par le point — l.***

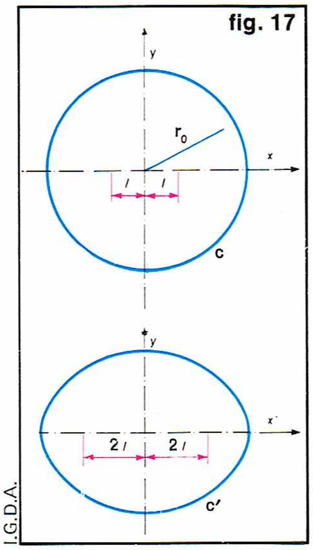

I.G.D.A.

▲ ***Figure 17 : transformation de Joukowski d'une circonférence ayant pour centre l'origine et pour rayon r_0.***

▼ ***Figure 18 : transformation de Joukowski de la circonférence C_1 ayant son centre sur l'axe réel passant par le point $\xi_1 = -l$.***

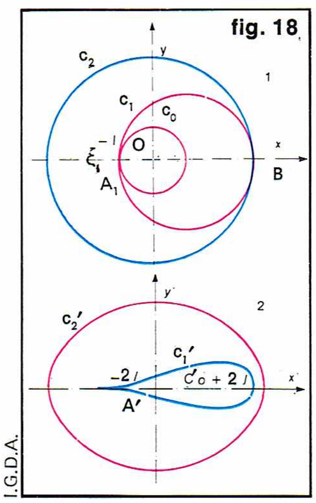

I.G.D.A.

▼ ***Figure 19 : transformations de cercles centrés sur l'axe imaginaire et passant par les points + l et — l.***

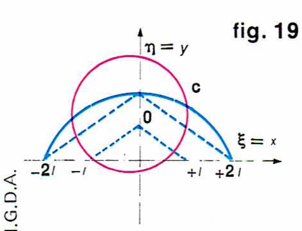

I.G.D.A.

▶ *A gauche, figure 22 : développement de la couche limite sur une surface plane placée dans un écoulement parallèle à la surface. Sur la figure, on a montré schématiquement l'allure des profils de la vitesse en quelques points de la surface ; au-dessus de la ligne pointillée, l'écoulement est uniforme (vitesse V_∞ qu'il possédait avant de rencontrer la surface). A droite, figure 24 : illustration schématique de la relation existant entre l'angle d'incidence géométrique et l'angle d'incidence effectif pour une aile d'allongement fini.*

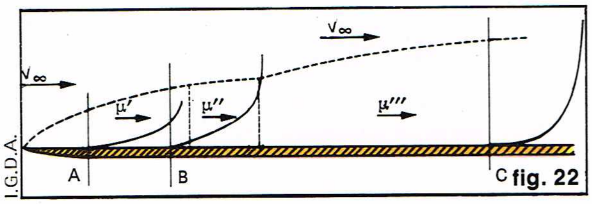

I.G.D.A.

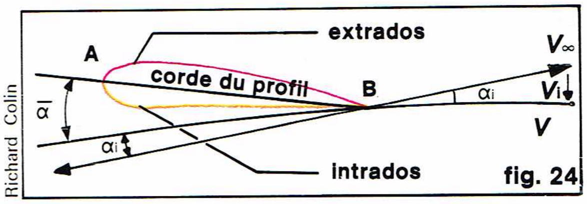

Richard Colin

On connaîtra mieux la structure de la couche limite en étudiant l'écoulement du fluide sur une surface plane parallèle à la direction de l'écoulement (*fig.* 22). La couche limite commence à se développer à partir du bord de la plaque, l'écoulement étant laminaire dans la zone immédiatement en aval de ce même bord. Au fur et à mesure que le fluide s'écoule, le long de la plaque, on commence à voir apparaître des oscillations dans la vitesse (zone de transition de la couche limite : AB). En aval de cette zone, les oscillations dégénèrent rapidement en une série de tourbillons, et la couche limite s'épaissit fortement en devenant turbulente. Expérimentalement, on a observé que la couche limite laminaire devient turbulente lorsque le nombre de Reynolds : $\mathcal{R}e = \rho \frac{VL}{\mu}$ (où L est la longueur de la plaque au point examiné) dépasse la valeur de $5 \cdot 10^5$.

La présence d'un gradient de pression agissant dans le sens opposé à la direction d'écoulement du fluide peut gêner le développement de la couche limite laminaire, engendrant le phénomène appelé *décollement de la couche limite*. En effet, cette augmentation de pression ralentit davantage l'écoulement au voisinage de la surface, allant jusqu'à inverser le sens de cet écoulement et provoquer le décollement de cette couche. La *figure* 23, représentant les profils des vitesses dans la couche limite dans le cas d'une surface plane, illustre ce que nous venons de dire.

Nous avons précédemment considéré le fluide comme un fluide parfait (voir par exemple le cas du cylindre dans un écoulement uniforme), et nous avons négligé l'action de la viscosité. Cependant, dans un fluide réel, la viscosité ralentit le fluide qui contourne le corps. Il se forme, en aval de ce dernier, un décollement de la veine fluide qui, instable, engendre un sillage tourbillonnaire.

Les ailes, en plus de la résistance engendrée par le frottement et de celle engendrée par la diminution de la pression amont-aval (résistance de forme), provoquée par le décollement des filets fluides, rencontrent un troisième type de résistance, appelée *résistance induite*, qui naît du fait que l'aile a une ouverture finie. Dans une aile portante, il se crée une différence de pression entre le ventre et le dos : puisque l'aile est finie, l'air passe de la partie inférieure à la partie supérieure en contournant les extrémités et en donnant naissance à des tourbillons marginaux. En outre, la pression atteint une valeur minimale dans la partie centrale du dos de l'aile et une valeur maximale dans la partie centrale du ventre ; cela provoque des courants transversaux qui, se rejoignant en aval de l'aile, engendrent également un système de tourbillons.

Si l'on tient compte de ces effets, on peut montrer, en s'appuyant sur une théorie développée essentiellement par Lanchester et Prandtl, que l'aile finie se comporte (en ce qui concerne les effets de portance) comme une aile infinie qui serait placée dans un écoulement sous un angle incident $\bar{\alpha}$ au lieu de α (*fig.* 24) avec

$$\bar{\alpha} = \alpha - \text{Arctg}\,\frac{V_i}{V_\infty} \qquad (50)$$

(où V_i représente la vitesse induite par les tourbillons marginaux).

▶ *Figure 23 : développement de la couche limite sur une surface plane en présence d'un gradient de pression agissant en sens opposé à la direction d'écoulement. Sur la figure, on a représenté l'allure de la vitesse en quelques points de la surface et la zone de décollement de la couche.*

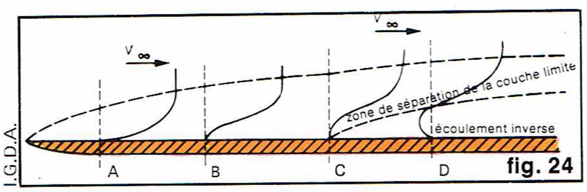

I.G.D.A.

▶ *Visualisation, au tunnel hydrodynamique de l'ONERA, de l'écoulement à basse vitesse autour d'une maquette de Concorde en configuration d'atterrissage (vue d'extrados).*

ONERA

Effet de la compressibilité

Dans les différents écoulements considérés jusqu'ici ou dans les théories développées, nous avons supposé que la masse volumique du fluide demeure constante en tout point de l'écoulement. Pour les gaz, cette hypothèse n'est valable que sous certaines conditions. Pour illustrer de quelle manière les effets de la compressibilité influencent le mouvement du fluide, considérons un tube de courant de section variable. Si nous indiquons par A_1 et A_2 deux sections transversales de celui-ci, l'équation de continuité : $\rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2$ appliquée entre les deux sections examinées montre qu'à une variation de surface correspond une variation, en sens opposé, du produit ρV. En particulier, si le fluide est incompressible, à une diminution de surface correspond une augmentation de vitesse, et *vice versa*. Pour un gaz, il peut arriver, à cause des variations importantes de masse volumique, qu'à une augmentation de section corresponde une augmentation de vitesse.

Pour établir un critère nous permettant de calculer jusqu'à quel point le fluide peut être considéré comme incompressible, comparons l'équation de Bernoulli **(24)**, que nous avons calculée dans le cas des fluides incompressibles, avec l'équation de l'énergie écrite sous la forme **(22)**.

On note tout de suite que les deux équations sont identiques si le terme $c_V T$ est constant ou varie de manière négligeable le long de la ligne de courant. Supposons maintenant qu'il existe un point d'arrêt ($V = 0$). L'équation de l'énergie, appliquée entre une section quelconque du tube de flux et la section d'arrêt du fluide, donne :

$$\frac{V^2}{2} + c_P T = 0 + c_P T_0$$

c'est-à-dire :

$$\Delta T = T_0 - T = \frac{V^2}{2\,c_P} \quad \text{et}$$

$$\textbf{(51)} \qquad \frac{\Delta T}{T} = \frac{V^2}{2\,c_P T}$$

Puisque, comme nous l'apprend la thermodynamique, $\frac{R}{\mathcal{M}} = c_P - c_V$ et $\gamma = \frac{c_P}{c_V}$, **(51)** peut être écrite sous la forme :

$$\textbf{(52)} \qquad \frac{\Delta T}{T} = \frac{V^2}{2\,T}\,\frac{(\gamma - 1)\,\mathcal{M}}{\gamma R}$$

En posant $M^2 = \frac{V^2 \mathcal{M}}{\gamma R T}$, **(52)** devient :

$$\textbf{(53)} \qquad \frac{\Delta T}{T} = M^2 \cdot \frac{\gamma - 1}{2}$$

D'après **(53)**, les variations de température sont de l'ordre de 5 % pour M = 0,5 et descendent à moins de 1 ‰ pour M = 0,2. Donc, tant que le paramètre M demeure inférieur ou égal à 0,2, les gaz peuvent être considérés comme incompressibles, les variations de densité pouvant être négligées. Mais au fur et à mesure que M augmente, les variations de température et de pression ne peuvent plus être négligées puisqu'elles changent les caractéristiques du mouvement du fluide. Dans des conditions normales (T = 288 °K), la vitesse correspondant à M = 0,2 est d'environ 68 m/s.

Le paramètre M, qui est un nombre adimensionnel, prend le nom de *nombre de Mach*. Sa signification physique devient évidente si l'on remarque que le terme $\left(\frac{\gamma R T}{\mathcal{M}}\right)^{1/2}$ est égal à la vitesse **c** à laquelle se propage une faible variation de pression, ou onde sonore, au sein de la masse fluide : le nombre de Mach représente donc le rapport entre la vitesse du fluide et la vitesse du son.

Illustrons le comportement de l'écoulement dans le cas où $V <$ **c** *(écoulement subsonique)* et $V >$ **c** *(écoulement supersonique)*. Considérons, à l'instant t_0, un corps se déplaçant à la vitesse uniforme V au sein d'une masse fluide. Le corps engendre dans le fluide des perturbations de pression qui se propagent au sein du fluide par l'intermédiaire d'ondes sphériques (*fig.* 25), dont le rayon croît dans le temps avec la vitesse **c** et dont le centre se déplace à la vitesse V (vitesse relative du corps par rapport au fluide). Lorsque l'onde s'éloigne du corps, les masses de fluide mises en mouvement sont de plus en plus grandes, et la variation de pression qui se propage devient de plus en plus faible.

Si le fluide s'écoule à une vitesse supersonique (M > 1), donc supérieure à celle à laquelle avance la perturbation de pression, il arrive sur l'obstacle sans subir de perturbation. Le champ est ainsi divisé en deux régions : une antérieure au corps, dans laquelle la perturbation ne se fait pas sentir, et une postérieure au corps, où se propage la perturbation. On vérifie facilement que les deux régions sont séparées par une surface conique, enveloppe des surfaces d'ondes, ayant une semi-ouverture donnée par l'expression :

$$\textbf{(54)} \qquad \sin\mu = \frac{\mathbf{c}}{V} = \frac{1}{M}$$

L'angle μ prend le nom d'*angle de Mach*, et les génératrices du cône celui de *lignes de Mach*. Lorsque les effets de la compressibilité ne peuvent plus être négligés, l'équation de Laplace $\nabla^2\Phi = 0$ perd son caractère linéaire : on a toujours une équation différentielle du second ordre, mais beaucoup plus complexe. Prandtl et Glauert, dans le cas de petites perturbations, ont linéarisé l'équation du mouvement et aboutissent à l'expression suivante (mouvement bidimensionnel) :

$$\textbf{(55)} \qquad \frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2}\,(1 - M^2) + \frac{\partial^2\Phi}{\partial y^2} = 0$$

où la fonction Φ représente le potentiel associé à la perturbation.

L'équation de Prandtl et Glauert est valable tant pour l'écoulement subsonique que pour l'écoulement supersonique : entre ces deux cas, il existe cependant une différence considérable. En effet, si nous appliquons **(55)** à un mouvement subsonique, le terme $1 - M^2$ est positif, et les deux dérivées sont de même signe ; par contre, si le régime est supersonique, $1 - M^2$ sera négatif, et les dérivées de signe opposé. L'équation résultante est, dans ce dernier cas, de type hyperbolique et coïncide avec l'équation de propagation d'ondes. La résolution de cette équation montre que les lignes le long desquelles se propage la perturbation sont inclinées d'un angle égal à l'angle de Mach ; elles sont donc parallèles aux lignes de Mach.

Considérons le champ de vitesse le long d'une paroi (*fig.* 26) comportant un angle de faible valeur. L'arête de la

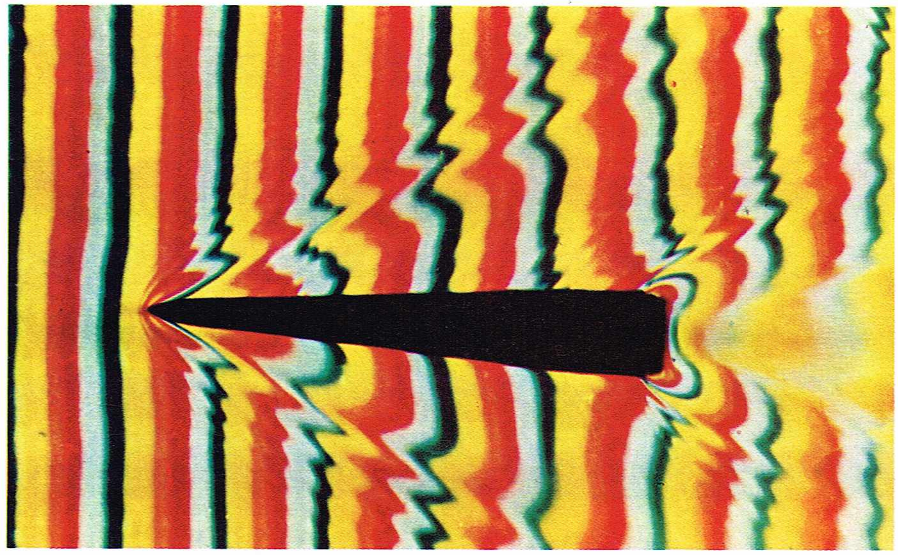

ONERA

▲ *Écoulement à Mach 2 ; ondes de choc et de détente attachées à un dièdre sans incidence.*

▼ *Figure 25 : perturbations créées par une particule se déplaçant à la vitesse V respectivement inférieure (1) et supérieure (2) à la vitesse du son.*

fig. 25

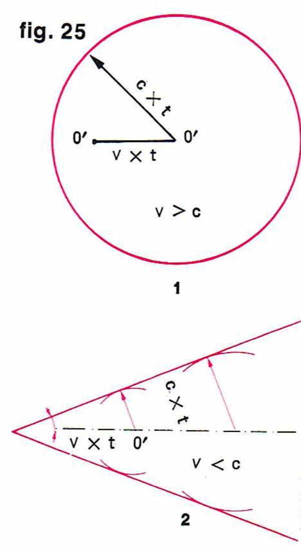

I.G.D.A.

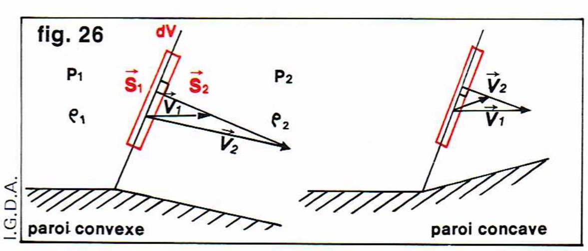

I.G.D.A.

◀ *Figure 26 : variation de vitesse associée à une perturbation de pression. Ces perturbations sont supposées provoquées par une très petite inclinaison de la paroi sur laquelle s'écoule le fluide.*

Bulloz

▶ *A gauche,* *le* Premier Voyage de l'Ariel *(musée Carnavalet).* *A droite,* *le bombardier supersonique* *Convair B-58,* *à* ailes delta.

paroi produit une perturbation qui se propage en aval (à partir de l'arête), le long des lignes de Mach, et le fluide, rencontrant ces lignes, est dévié et se maintient ensuite parallèle à la nouvelle direction de la paroi, avec une vitesse, une pression et une densité différentes de celles qu'il avait en amont.

Considérons le volume élémentaire parallélépipédique dV, délimité par la surface fermée constituée par les deux surfaces parallèles et infiniment voisines, S_1 (dans la zone amont de la surface de discontinuité) et S_2 (dans la zone aval).

Soit $\vec{n}_1$ et $\vec{n}_2$ les normales sortantes associées à ces deux surfaces, et $P_1\vec{V}_1$, $P_2\vec{V}_2$ les valeurs de la pression et de la vitesse dans les zones amont et aval. On notera par V_n et V_t les composantes normales et tangentielles de la vitesse.

Si l'on écrit le principe de conservation de la masse, on aura à exprimer que le flux de masse à travers la surface délimitant dV est nul, c'est-à-dire :

$$(\rho_1\vec{V}_1)\,\vec{n}_1 S_1 + (\rho_2\vec{V}_2)\,\vec{n}_2 S_2 = 0$$

Soit, puisque $S_1 = S_2$: $\rho_1 V_{1n} = \rho_2 V_{2n}$

En exprimant maintenant la conservation du flux de la quantité de mouvement, il vient, d'après **(17)** :

$$P_1\vec{n}_1 S_1 + P_2\vec{n}_2 S_2 = -\rho\vec{V}_1\,V_{1n}\,S_1 - \rho\vec{V}_2\,V_{2n}\,S_2$$

et, en projetant sur la surface de discontinuité :

$$\rho_1 V_{1t}\,V_{1n} = \rho_2 V_{2t}\,V_{2n}$$

qui se réduit, puisque

$$\rho_1 V_{1n} = \rho_2 V_{2n}, \text{ à } V_{1t} = V_{2t},$$

et qui exprime la continuité des composantes de la vitesse parallèles à la surface de discontinuité.

De ce fait, si la paroi est concave, la vitesse en aval de la ligne de Mach est inférieure à la vitesse en amont, et le fluide, en la traversant, est ralenti et comprimé. Si, en revanche, la paroi est convexe, le fluide est accéléré et dilaté. Entre les deux cas, il existe des différences considérables que nous allons bientôt illustrer.

Notons que le comportement de l'écoulement supersonique diffère fondamentalement de l'écoulement subsonique. En effet, dans ce dernier cas, la perturbation introduite par l'arête se propagerait aussi en amont, de telle sorte que les lignes de courant s'incurveraient progressivement et, en cas d'expansion, se décolleraient de la paroi. Pour l'écoulement supersonique, et si d'autres déviations existent en aval de la première, les perturbations ne pouvant se propager en amont, le courant ne sera dévié qu'au niveau des lignes de Mach passant par les différentes arêtes, et, puisque le nombre de Mach varie en traversant chaque ligne, les lignes de courant seront diversement inclinées à chaque arête successive, leur inclinaison dépendant des nombres de Mach en aval de chacune des lignes précédentes. En particulier, pour un profil polygonal convexe, les lignes de Mach divergeront, tandis qu'elles convergeront si le profil polygonal est concave.

La théorie de Prandtl et Glauert s'applique pour de petites perturbations. Si elles sont importantes, comme cela peut arriver, par exemple dans le cas où le bord d'attaque d'une aile est placé dans un écoulement supersonique, l'expansion et la compression ne se font plus progressivement. Mais, tandis que, dans le cas de l'expansion, la brusque déviation entraîne seulement l'incurvation des filets de courant, dans le cas de la compression, puisque les lignes de Mach sont convergentes, on a une accumulation des effets et une compression brusque équivalant à une discontinuité *(onde de choc)*. On doit alors développer une théorie, basée sur l'application des équations fondamentales de la dynamique des fluides, qui permet d'obtenir, pour des conditions initiales données, les caractéristiques de l'écoulement et en particulier les relations entre les grandeurs amont et aval de l'onde de choc (indices respectifs 1 et 2) [*fig.* 27].

▼ *Figure 27 : notations indiquant les grandeurs en amont et en aval d'une onde de choc oblique.*

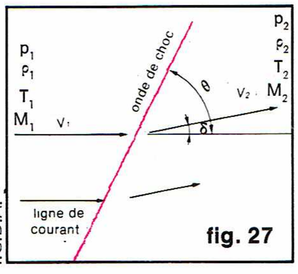

fig. 27

I.G.D.A.

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{2\gamma}{\gamma+1}\left(M_1^2 \sin^2\theta - \frac{\gamma-1}{2\gamma}\right)$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{(\gamma+1)\,(M_1^2\sin^2\theta)}{(\gamma-1)\,M_1^2\sin^2\theta + 2}$$

$$\frac{V_2^2}{V_1^2} = 1 - 4\,\frac{(M_1^2\sin^2\theta - 1)\,(\gamma M_1^2\sin^2\theta + 1)}{(\gamma+1)^2\,M_1^4\sin^4\theta}$$

$$\frac{1}{\operatorname{tg}\delta} = \operatorname{tg}\theta\left(\frac{\gamma+1}{2}\,\frac{M_1^2}{(M_1^2\sin^2\theta - 1)} - 1\right)$$

On peut déduire de ces équations trois conclusions importantes :

a - Le choc est d'autant plus intense que l'angle θ est important, l'intensité maximale étant obtenue quand $\theta = \frac{\pi}{2}$ (on parle alors de choc normal). Dans ce cas, les lignes d'écoulement ne sont pas déviées, la vitesse de l'écoulement est normale à l'onde de choc, et la vitesse passe d'une valeur supersonique à une valeur subsonique lors de la traversée de l'onde.

b - L'angle de déviation δ admet une valeur maximale au-delà de laquelle l'onde de choc se décolle de l'obstacle (onde de choc détachée), c'est-à-dire qu'elle prend naissance en un point situé légèrement en amont du sommet de l'angle. Elle s'incurve alors avec une courbure d'autant plus importante que le nombre de Mach M_1 est faible.

c - A la traversée de l'onde de choc, la pression augmente brutalement et la vitesse diminue. Dans le cas d'un choc très intense, la vitesse devient subsonique (onde de choc forte). La forte compression, indépendamment de la viscosité, engendre une forme supplémentaire de résistance, qui prend le nom de *résistance d'onde*. Si la vitesse reste supersonique, l'intensité du choc est moindre, et l'on parle d'onde de choc faible.

Influence de la forme des ailes

Que l'on se trouve dans une situation subsonique ou supersonique, la forme de l'aile a une grande influence

Archives I.G.D.A.

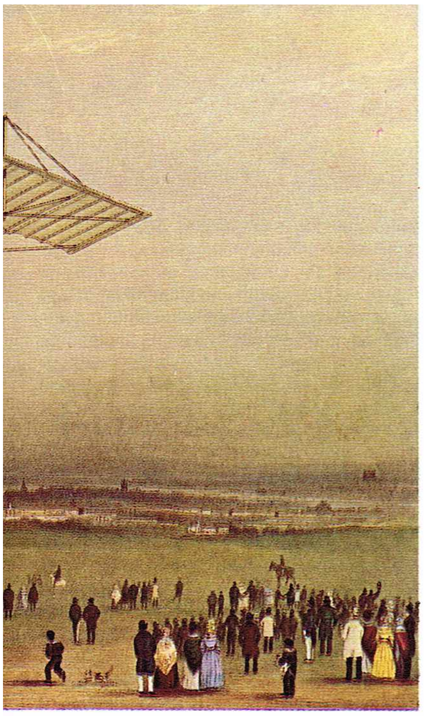

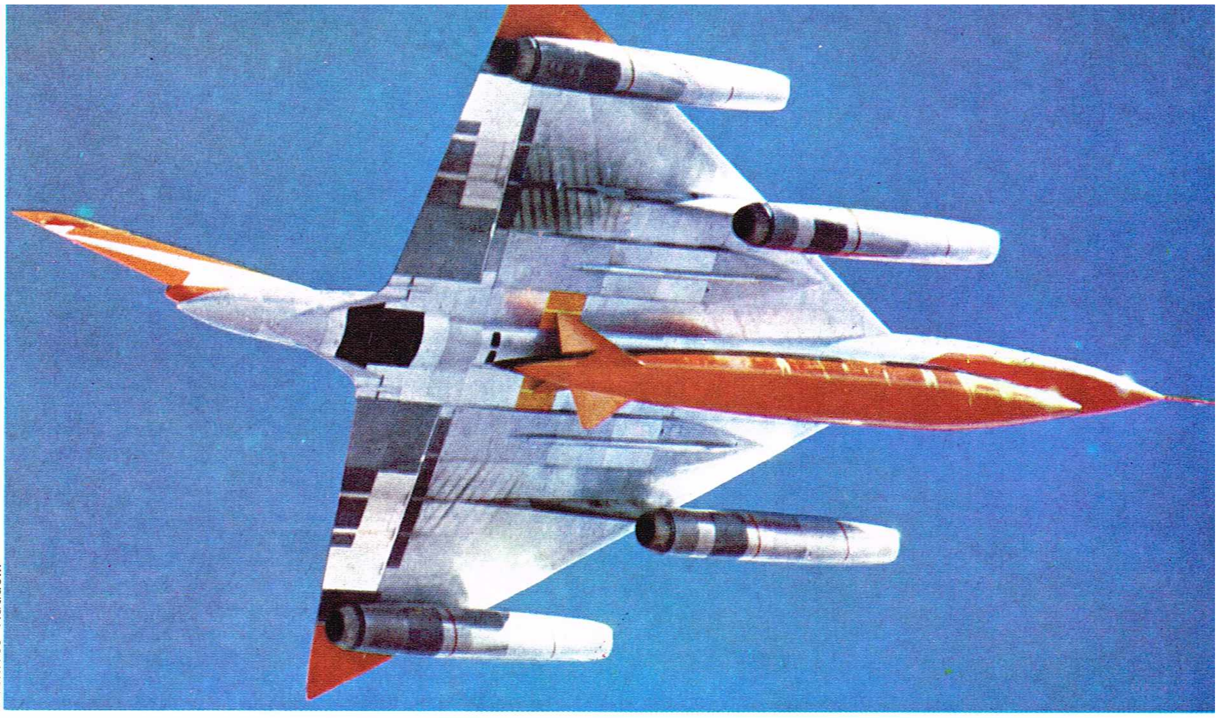

Archives Radaelli

sur ses caractéristiques aérodynamiques. Une aile en flèche, par exemple, présente une résistance d'onde moindre qu'une aile rectangulaire, parce que les forces qui agissent sur elle dépendent de la composante de la vitesse normale au bord d'attaque. Si l'angle de flèche est suffisamment grand, la composante normale devient subsonique, et la résistance d'onde disparaît. Cependant, pour les faibles nombres de Mach (vitesses de décollage et d'atterrissage), l'aile en flèche possède une valeur relativement basse de sa portance maximale ainsi que de mauvaises qualités du point de vue de la manœuvrabilité.

Une solution originale a été apportée par l'emploi de l'aile à flèche variable : chaque demi-voilure est articulée autour d'un pivot situé près de l'emplanture. En configuration aile déployée, la portance est augmentée, ce qui permet des vitesses de décollage et d'atterrissage plus faibles, donc des longueurs de piste très courtes. A vitesse élevée, les ailes sont repliées et la réduction de la traînée améliore les performances.

Le premier appareil de ce type a été le *Bell X*5, puis on a vu apparaître le *General Dynamics F III*, opérationnel depuis 1970. En France, les avions Dassault ont créé le *Mirage G*8 (flèche variant de 20 à 70°).

Une autre possibilité *(Convair 7002)* fait appel à une forme d'aile nouvelle, l'aile delta. Dans ce type d'aile, trois facteurs interviennent : la présence de la flèche, l'allongement et l'épaisseur relative, qui reculent le nombre de Mach critique (nombre de Mach de l'écoulement aval à partir duquel la vitesse atteint la vitesse du son en un point du profil) et diminuent la traînée *(Mirage III, IV, Convair F 107, North American B 70...)*.

Il existe une forme d'aile proche de l'aile delta : c'est l'aile gothique dont le *Concorde* est équipé. La flèche en est très fortement augmentée aux extrémités. L'aile delta et l'aile gothique ont l'inconvénient d'avoir de faibles portances aux basses vitesses, c'est pour cette raison que l'atterrissage des avions équipés de ces ailes doit être très cabré et effectué à vitesse relativement importante. En revanche, la stabilité est très intéressante, et le déplacement du centre de poussée au cours du franchissement de la zone transsonique est faible.

Il faut remarquer que pour étudier les caractéristiques de telles ailes, les calculs théoriques sont toujours fondés sur un certain nombre d'approximations, et, de ce fait, les résultats obtenus ne sont pas en parfait accord avec les données expérimentales. Il est donc toujours nécessaire d'effectuer en soufflerie l'étude expérimentale des modèles à l'échelle soit de l'aile, soit de l'avion tout entier, afin de pouvoir déterminer lequel des nombreux types de projets est le plus efficace du point de vue aérodynamique.

Applications de l'aérodynamique

Souffleries aérodynamiques

Pour étudier les forces qui s'exercent sur un corps en mouvement dans l'air, un bon moyen d'investigation consiste à placer une maquette immobile dans une veine d'air en mouvement, dans une soufflerie aérodynamique.

▼ ***A gauche, le*** **General Dynamics F 111,** ***avion de chasse caractérisé par des*** **ailes à flèche variable.** ***A droite,*** **l'aile gothique** ***du*** **Concorde.**

Rémy Poinot - TOP

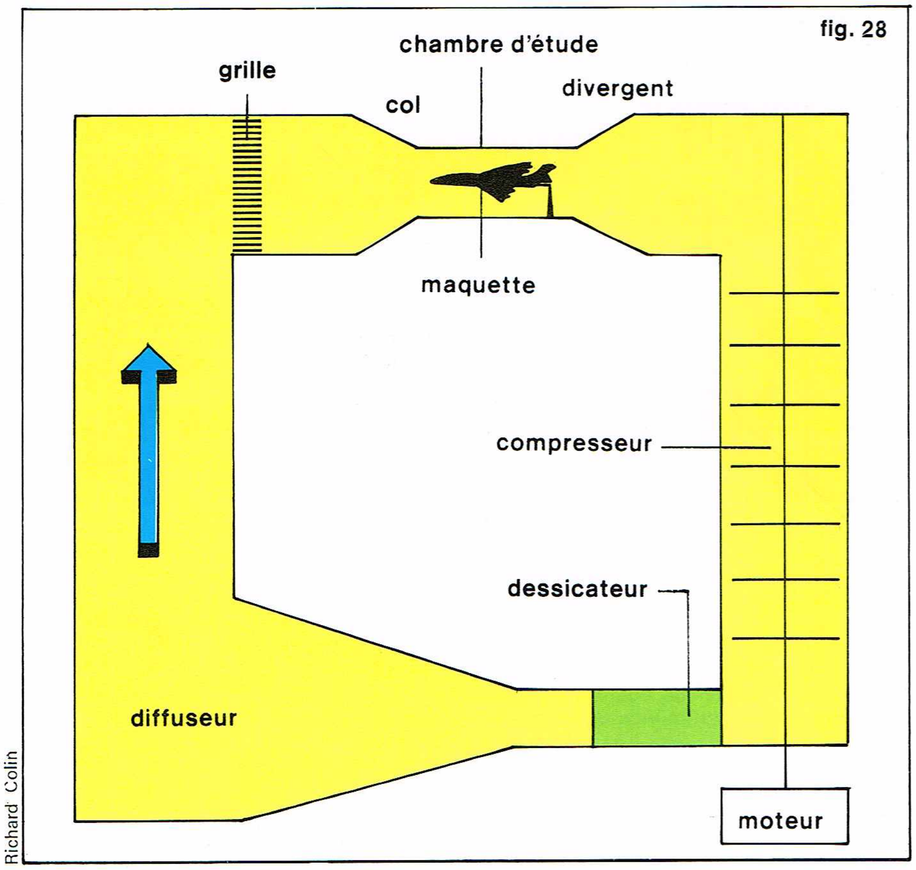

▲ *Figure 28 : soufflerie à fonctionnement en continu en cycle fermé.*

▼ *Essai d'une maquette au 1/8,6 du* **Mirage G8.02** *dans la soufflerie S1 du centre de l'ONERA à Modane.*

Le principe général d'une soufflerie est le suivant : on réalise une veine d'air dans laquelle, tant en direction que dans le temps, la vitesse est constante. Dans cette veine, on place, si les dimensions le permettent, l'objet à étudier (cas de voitures, petits avions aux vitesses inférieures à celle du son, têtes de fusées...), ou sinon une maquette à échelle réduite, en respectant certaines règles de similitude (même nombre de Reynolds, etc., pour l'écoulement).

Les premières souffleries sont apparues peu avant la Première Guerre mondiale, et se sont principalement développées sous l'influence de l'industrie aéronautique. Entre 1920 et 1940, cette méthode d'étude s'est généralisée chez les constructeurs d'avions, et les souffleries subsoniques (vitesse de la veine d'air inférieure à la vitesse du son) ont eu un essor important. Depuis 1950, le développement d'avions de plus en plus rapides, et ensuite les grands programmes spatiaux, ont entraîné la construction de souffleries de plus en plus puissantes, possédant une vitesse transsonique (nombre de Mach variant de 0,9 à 1,2 environ). Dans la décennie suivante, les souffleries, fonctionnant alors sur un autre principe, ont été construites pour obtenir des nombres de Mach variant de 5 à 25 environ.

Selon leur principe de fonctionnement et les vitesses atteintes, on peut distinguer plusieurs types de souffleries :

les *souffleries continues* où la vitesse de l'air est constante pendant un temps important (minutes, heures) ;

les *souffleries par rafales* où l'air est envoyé pendant quelques secondes, voire quelques dizaines de millisecondes.

— Dans les souffleries continues (*fig.* 28), l'air est mis en mouvement par un moteur auquel l'énergie est fournie soit par voie électrique (ONERA à Chalais-Meudon, par exemple) soit par voie hydraulique (ONERA à Modane-Avrieux), et il est accéléré au niveau du col par effet Venturi. Dans ce cas, la vitesse de l'air est approximativement proportionnelle à la vitesse de rotation du moteur, et elle ne dépasse pas, en général, la vitesse du son.

Ces souffleries peuvent fonctionner selon deux techniques : ou bien l'air est emprunté à l'atmosphère, accéléré et restitué à l'atmosphère à la sortie de la chambre d'étude, ou bien on utilise en circuit fermé soit de l'air atmosphérique desséché, pour éviter la condensation de la vapeur d'eau lors de la détente, soit de l'azote, soit même, dans de plus petites souffleries, de l'hélium. Les puissances mises en jeu sont de 10 à 200 mégawatts et les chambres d'études peuvent atteindre 8 m de diamètre.

Sur ce principe des souffleries continues, on peut atteindre des vitesses de l'ordre de Mach 3 (régime supersonique) si la géométrie de la chambre de détente et du col est particulièrement bien étudiée ou si l'on utilise des parois perméables : la perte d'air à travers ces dernières réduit les réflexions des ondes de chocs qui prennent naissance sur la maquette et qui pourraient modifier l'écoulement. Dans de telles souffleries, la chambre de mesure a des dimensions de l'ordre du mètre.

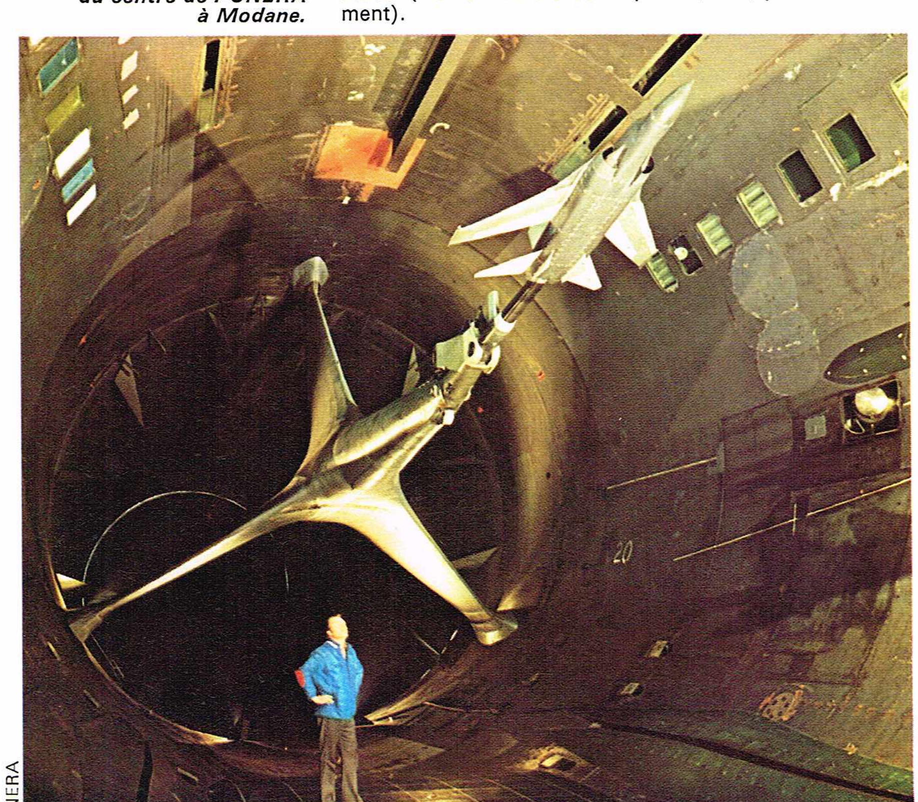

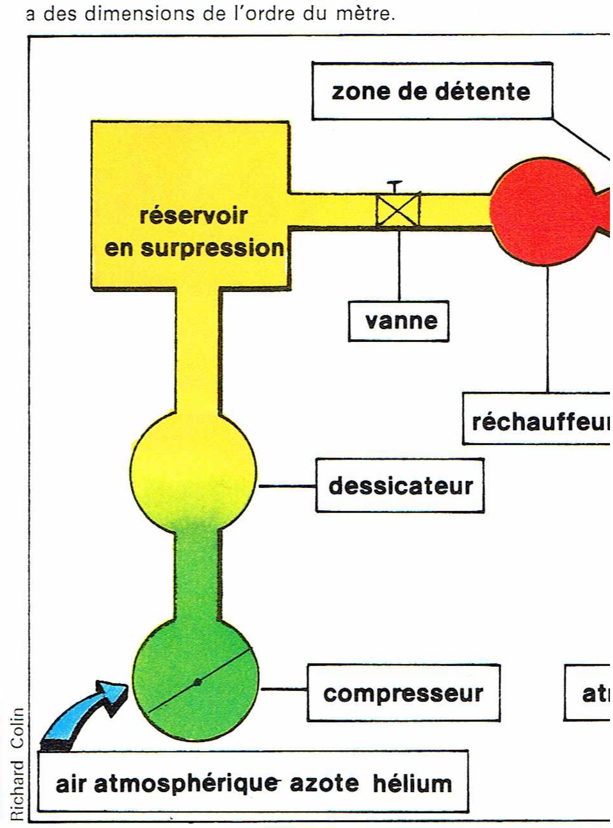

— Pour passer au régime hypersonique, correspondant à des vitesses dont le nombre de Mach est supérieur à 5, on utilise des souffleries à rafales (*fig.* 29) : l'énergie y est fournie par la détente d'un gaz comprimé accumulé dans un réservoir ; ce gaz est brutalement libéré, traverse la chambre de mesure, et est aspiré à l'autre extrémité par un « réservoir » maintenu en dépression par des pompes à grand débit. Au-delà de Mach 5, l'abaissement de la température dû à la détente, qui se fait de manière isentropique, est tel qu'une liquéfaction de l'air peut se produire. Pour éviter cet inconvénient, un réchauffage préalable est nécessaire ; à titre d'exemple, l'air est porté à 1 000 °K pour des vitesses correspondant à Mach 10, et à 2 500 °K pour Mach 25. Ce réchauffage se fait à l'aide de tôles ou de billes métalliques chaudes sur lesquelles l'air passe avant la détente. Les rafales obtenues ont une durée de 0,1 à 10 secondes, et les énergies mises en jeu sont de 10 à 50 mégajoules.

En soufflerie, les mesures qui sont faites sont des mesures de forces ou de moments qui s'exercent soit sur la maquette complète (portance, traînée à des incidences variables dans le cas d'un avion...), soit sur des parties de la maquette (ailes, empennage). Les autres mesures sont des mesures de pression et de température et sont effectuées au moyen soit de jauges, soit, par exemple, de peintures dont la couleur varie avec la température.

Les techniques de visualisation sont également très utilisées : émission, par une série de trous percés dans la maquette, de filets de fumée colorée ; méthodes interférométriques visualisant les lignes d'égal chemin optique ; observation en lumière blanche polarisée permettant la visualisation des zones d'égale biréfringence.

Les principales difficultés rencontrées sont les suivantes : d'une part, les dimensions limitées de la veine utile induisent sur les parois de la soufflerie des effets de couche limite modifiant l'écoulement, et obligent à utiliser des maquettes à échelle réduite ; d'autre part, on ne peut réaliser certaines conditions d'écoulement, par exemple celles que peut rencontrer un avion en vol ou un étage de fusée (température et pression), ce qui impose l'utilisation de similitudes généralement très imparfaites ; enfin, il est difficile d'obtenir entre la maquette étudiée et la paroi de la soufflerie une vitesse relative qui mette en évidence l'effet de sol (avion au décollage ou à l'atterrissage, voiture roulant sur une route, soumise ou non à un vent latéral).

Néanmoins, ce moyen d'investigation complète de façon très utile les calculs théoriques que l'on peut effectuer.

Fluidique

La fluidique est une technique récente d'automatismes et d'asservissements utilisant, dans des composants, l'action, entre eux ou avec des parois fixes ou mobiles, de jets fluides (gaz, ou plus rarement liquides). Parmi les fonctions qui sont actuellement commercialisées, on rencontre certaines fonctions logiques (et, ou ...) ainsi que des fonctions analogiques d'amplification.

Les principaux effets utilisés dans des composants fluidiques sont les transitions d'écoulements du régime laminaire au régime turbulent, l'effet de paroi ou effet Coanda, le décollement et le recollement de couches limites dans des géométries perturbées par des jets d'air secondaires, les déviations d'un jet par un autre jet.

Nous allons prendre comme exemple l'*amplificateur proportionnel à déviation de jet*, l'*amplificateur à turbulence* et l'*amplificateur bistable à effet de paroi*.

— L'amplificateur à déviation de jet est présenté sommairement sur la *figure 30-1 ;* il se compose d'un jet principal A, traversant la tuyère d'alimentation a qui débouche dans la chambre b ; le jet obtenu est un jet turbulent. Ce jet peut être dévié par les deux jets de commande C_1 et C_2. Si la pression est la même dans le jet C_1 et dans le jet C_2, le jet A n'est pas dévié, et il est reçu par la sortie S. Si la pression dans C_1 est supérieure à la pression dans C_2 (*fig.* 30-2), le jet va être dévié vers la sortie S_2, et le rapport des débits qui s'échappent de S et de S_2 est une fonction de la différence de pression entre C_1 et C_2. L'effet s'inverse quand la différence de pression entre C_1 et C_2 s'inverse. La pression et le débit des jets C_1 et C_2 peuvent être plus faibles que la pression et le débit du jet principal A. On réalise ainsi des amplificateurs proportionnels différentiels, ayant un gain de 10 à 30 environ, entre le jet de commande et le jet principal.

— Dans l'amplificateur à turbulence représenté sur les *figures 30-3 et 30-4* le jet principal d'alimentation A, amené par la tuyère a, pénètre dans la chambre b ; en l'absence de perturbation, ce jet reste laminaire et il est

▼ *Au centre, figure 29 : représentation schématique d'une soufflerie à rafales. Ci-dessous, figure 30 : représentation schématique de quelques amplificateurs.*

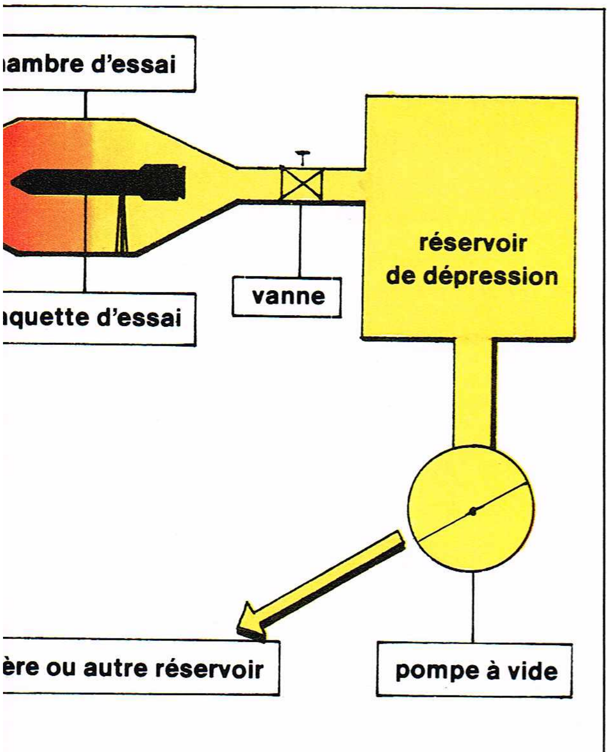

fig. 29

Richard Colin

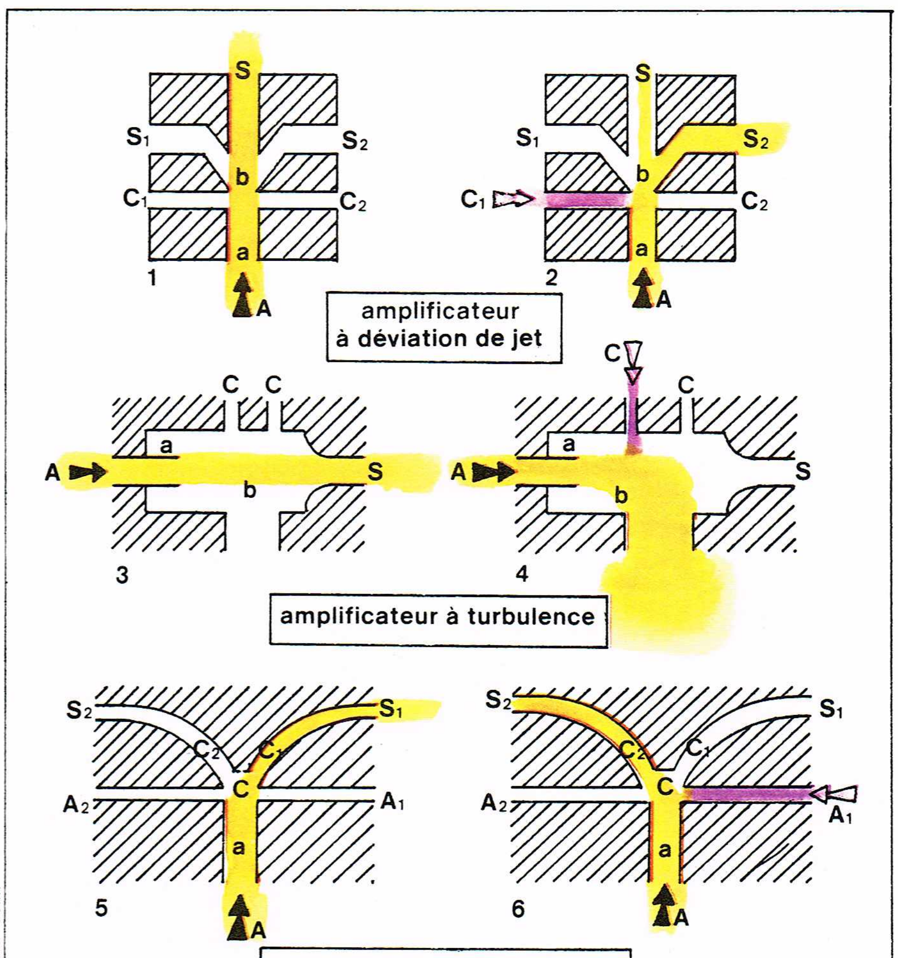

fig. 30

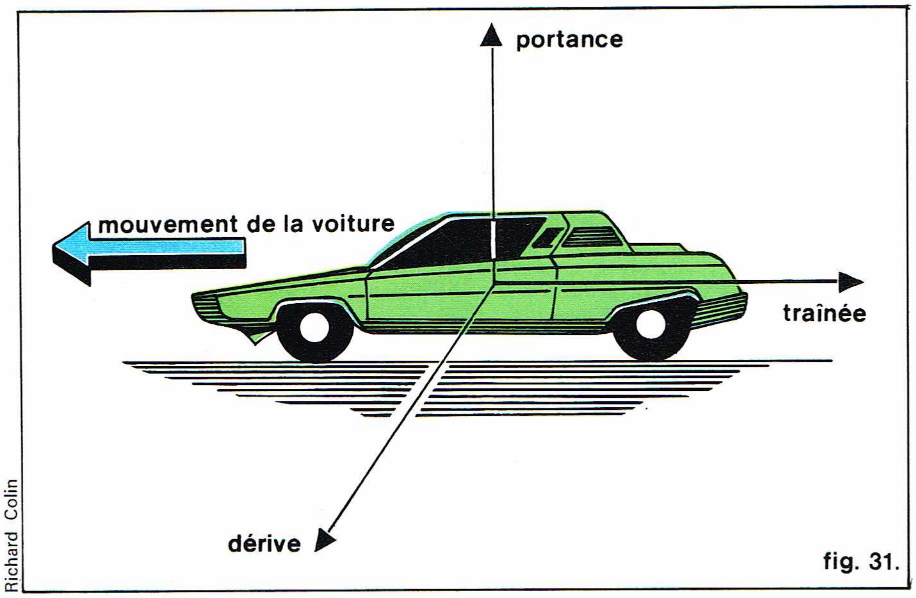

Richard Colin

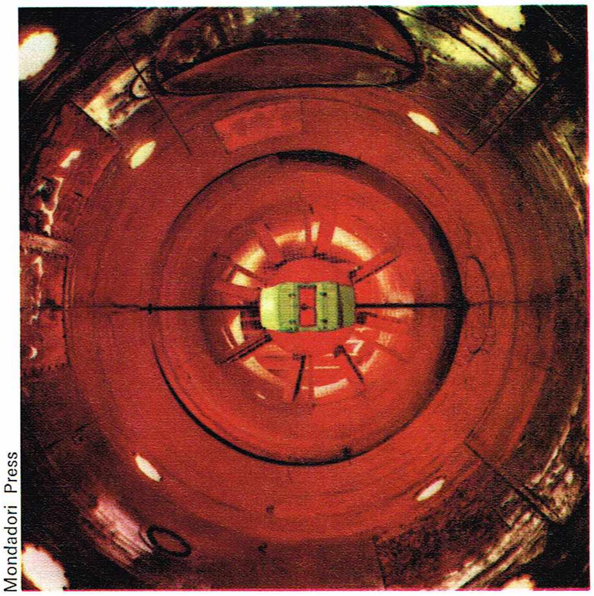
Mondadori Press

▲ *A gauche, figure 31 : les trois forces induites par l'écoulement résultant de l'action du vent sur le véhicule. A droite, maquette d'une* **Fiat 850** *testée dans une veine d'air à la soufflerie de l'École polytechnique de Turin.*

reçu par la sortie *S*. Si un autre jet de faible puissance, passant par une des tuyères *C*, vient frapper le jet principal *A*, celui-ci devient turbulent et la pression en *S* devient pratiquement nulle. La fonction réalisée par ce composant est la fonction logique OU.

— Dans l'amplificateur à effet de paroi représenté sur la *figure* 30-5, le jet principal *A* pénètre par une tuyère *a* dans la chambre d'interaction *C* et, par effet de paroi, s'attache soit à la paroi C_1, soit à la paroi C_2 et est dirigé vers les sorties S_1 ou S_2. Supposons que le jet se soit attaché à la paroi C_1. Si (*fig.* 30-6) nous envoyons ensuite par l'entrée A_1 un jet transversal de commande, il va dévier le jet *A*, qui s'attache à la paroi C_2 et qui sort en S_2. Le jet A_1 est maintenant sans aucune action sur le jet *A* et seul un jet A_2 pourra changer l'état du système. Nous avons ainsi réalisé un élément bistable à mémoire.

Les quelques exemples cités ne sont absolument pas limitatifs, et pratiquement tous les composants nécessaires aux asservissements de machines-outils conventionnelles à commande pneumatique ont pu être réalisés.

On rencontre encore la fluidique dans les éléments de commande de turboréacteur, dans des systèmes de stabilisation de plates-formes en mouvement, dans des chaînes de comptage et d'automatismes industriels. Pour tous ces problèmes, la fluidique, utilisée seule ou avec des composants électroniques ou électromécaniques, se révèle être un organe très souple et très fiable dans beaucoup de problèmes de commande et d'asservissements.

▼ *La portance négative, souvent recherchée sur les véhicules de compétition, est destinée à « plaquer » la voiture au sol et à augmenter l'adhérence des roues motrices.*

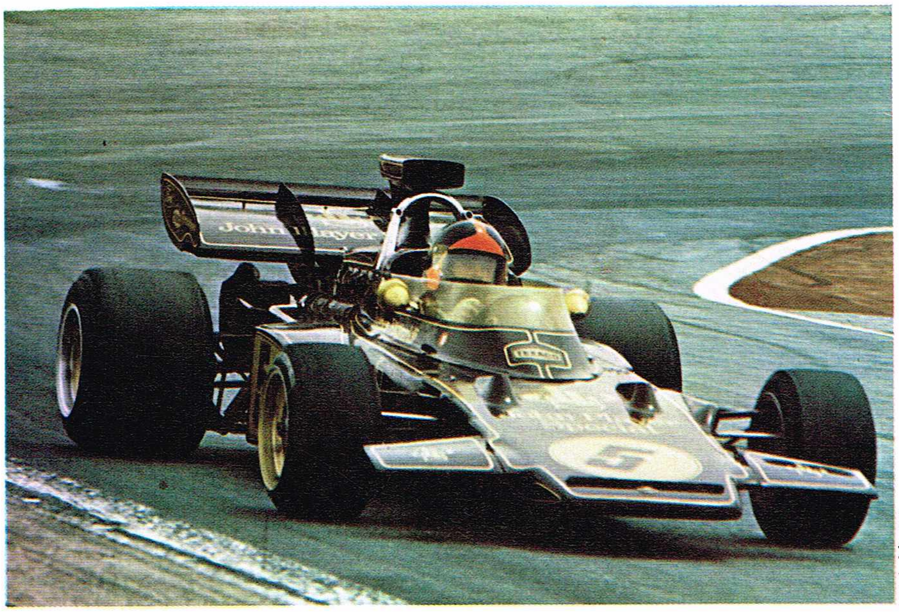
Fred Mayer

Aérodynamique de l'automobile

Les souffleries, dont nous avons parlé précédemment et dont l'usage le plus important est fait par l'industrie aérospatiale, sont également utilisées pour effectuer des mesures sur des maquettes de projets architecturaux (répartition des vents au sol en présence d'immeubles, efforts sur une structure...), sur des maquettes de chemins de fer (importance de la forme de la locomotive et des wagons) et d'automobiles. Dans ces deux derniers cas, ce que l'on recherche est la plus importante diminution possible de la résistance à l'avancement du véhicule, ou traînée, tout en conservant une stabilité maximale, en particulier à un vent de travers.

Étudions maintenant les problèmes spécifiques posés par l'aérodynamique de l'automobile.

L'écoulement résultant de l'action du vent sur le véhicule induit des forces qui peuvent se décomposer en *portance* (axe vertical), *traînée* (axe parallèle au mouvement) et *dérive* (axe complétant le trièdre trirectangle) [*fig.* 31].

La portance doit toujours être très inférieure au poids du véhicule, pour éviter toute tendance au décollage. Un effet contraire (portance négative, dirigée vers le sol) est souvent même recherché, principalement sur les véhicules de compétition, la portance négative étant destinée à « plaquer » le véhicule au sol et à augmenter l'adhérence des roues motrices.

La dérive, quant à elle, est pratiquement toujours négligeable, sauf en cas d'un vent de travers violent. En tout état de cause, les impératifs d'habitabilité de la voiture sont tels qu'il n'est pas possible de la profiler parfaitement.

La force sur laquelle on peut agir le plus facilement est la traînée, en jouant sur la forme générale du véhicule pour éviter au maximum les décollements de la couche limite. Le profil le plus approprié, quoique peu réalisable, semble être une forme en « goutte d'eau ». Or ce profil est modifié par les roues, les phares, les entrées d'air nécessaires au refroidissement du moteur, les accessoires divers qu'il est donc souhaitable d'intégrer le plus possible à la ligne générale du véhicule pour éviter toute arête vive ou toute protubérance favorisant le décollement de la couche limite ou l'apparition de turbulences.

Un autre effet augmentant énormément la traînée est l'écoulement de l'air entre le plancher de la voiture et le sol; pour qu'il puisse s'effectuer avec le maximum de rendement, il faut que le plancher de la voiture soit le plus lisse possible et forme avec le sol une tuyère lentement convergente, puis divergente.

Pour faire les études en soufflerie, deux techniques peuvent être utilisées. Dans la *technique du « tapis roulant »*, la voiture est posée sur un tapis se déplaçant avec une vitesse égale à la vitesse relative du vent (*fig.* 32). La réalisation de ce dispositif posant quelques difficultés, on lui préfère généralement la *technique des images :* une seconde maquette, identique, est disposée, roue contre roue, sous la maquette d'étude (*fig.* 33) ; l'écoulement

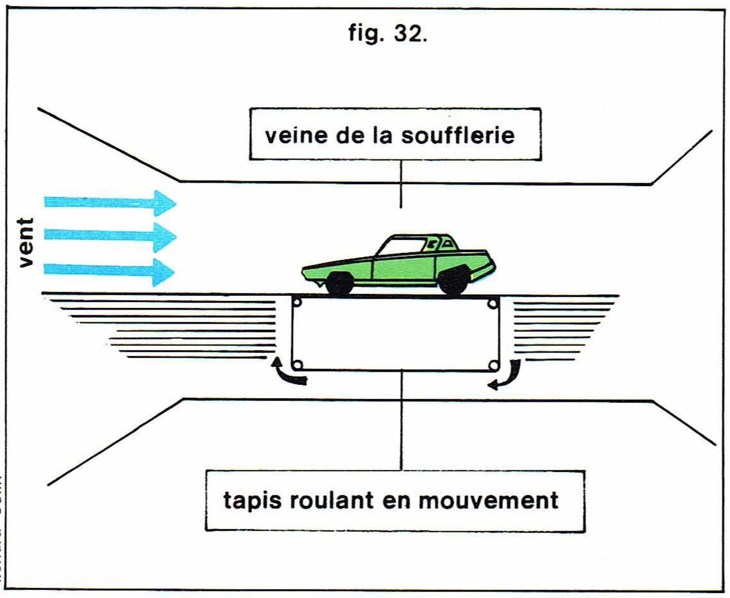

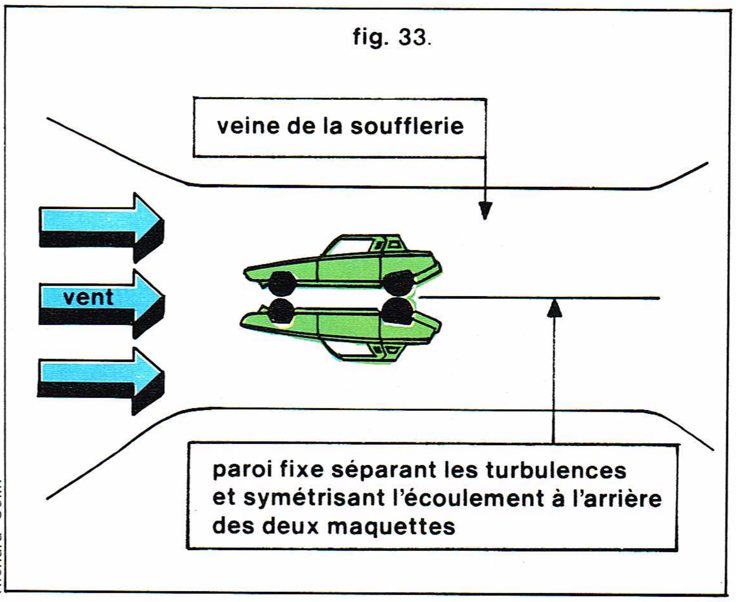

étant alors symétrique, aucun filet d'air ne peut traverser le plan imaginaire figurant la route. Le problème réel est toutefois rendu plus complexe par l'apparition de turbulences.

Aéroglisseur

Une autre application importante de l'aérodynamique réside en la recherche de la sustentation des mobiles en utilisant le phénomène appelé *effet de sol*.

Il est bien connu, en aérodynamique, qu'un avion voit sa portance modifiée lors de l'atterrissage du fait de la proximité du sol : le système ne peut plus être considéré comme étant placé dans un milieu infini. La proximité du sol introduit des conditions aux limites supplémentaires, qui modifient la géométrie des lignes d'écoulement et augmentent la portance.

On a pensé très tôt à utiliser cet effet pour sustenter des systèmes mobiles ou immobiles. Dans ce cas, l'écoulement fluide est engendré par le système lui-même, et la présence du sol crée des répartitions de pressions suffisantes pour maintenir le système en équilibre.

Dès 1854, un hydraulicien, le Français L. Girard, pensait à utiliser ce principe pour sustenter un train, et un modèle était présenté à l'exposition de 1889 d'un train glissant sur l'eau. Vers 1956, l'Anglais Cockerell mettait au point un dispositif (*fig.* 34) dit à cloche, où l'écoulement du fluide se fait de telle sorte qu'une masse d'air (coussin d'air) est maintenue sous le système à une pression P_C suffisante pour équilibrer le poids du système. Cette pression peut être reliée aux paramètres fixant la géométrie du système par l'équation :

$$P_C = K\left(\frac{\rho V_j^2}{2g}\right)\left(\frac{t}{n}\right)(1 + \sin\theta)$$

où V_j représente la vitesse d'éjection du fluide à la sortie de la cloche. La première maquette réalisée en France par Bertin reposait sur le principe de la fente périphérique (*fig.* 35), sans chambre intermédiaire, d'une simplicité plus grande, mais ne permettant pas une hauteur de sustentation très importante. Le problème du franchissement d'obstacle devenait donc critique. La solution devait être apportée par l'adjonction d'une jupe souple qui continuait la chambre et qui pouvait se déformer lors du passage de l'obstacle. Quant à la stabilité, elle était assurée par la présence de chambres multiples.

De tels systèmes sont actuellement couramment utilisés : il suffit de penser au naviplane, au terraplane, et, pour des systèmes guidés, à l'aérotrain. Leur propulsion peut se faire à l'aide d'hélice, de réacteur, de moteur électrique linéaire (cas des systèmes guidés). Leurs principaux avantages sont les suivants : d'une part, du fait de la faible résistance aux déplacements, de grandes vitesses peuvent être atteintes, d'autre part, la pression exercée sur le sol est faible, de l'ordre de 0,1 à 0,5 atmosphère (à comparer avec 2 à 8 atmosphères pour des voitures ou des camions), enfin on peut réaliser ainsi des appareils amphibies tout terrain.

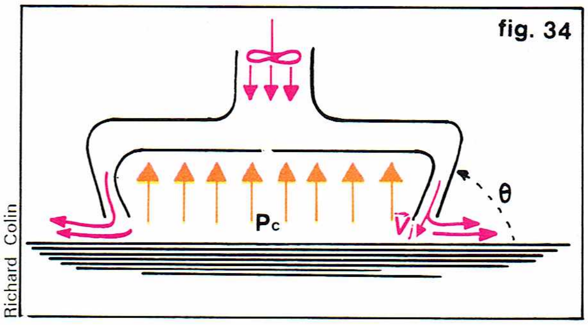

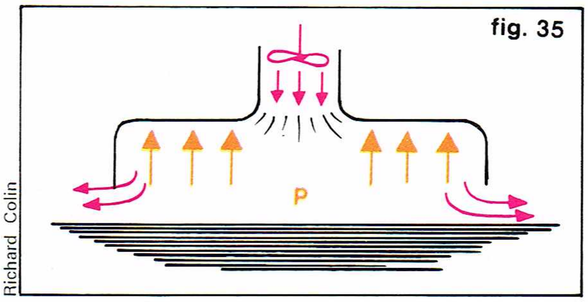

▲ *A gauche, figure 32 : représentation schématique de la* technique du « tapis roulant ». *A droite, figure 33 : représentation schématique de la* technique des images.

◀ *Figure 34 : représentation* du dispositif à cloche *mis au point par Cockerell et permettant de sustenter un mobile en utilisant le phénomène* d'effet de sol.

◀ *Figure 35 : représentation schématique de la première maquette d'aéroglisseur réalisée en France par Bertin.*

▼ *Un véhicule à coussin d'air : l'hovercraft.*

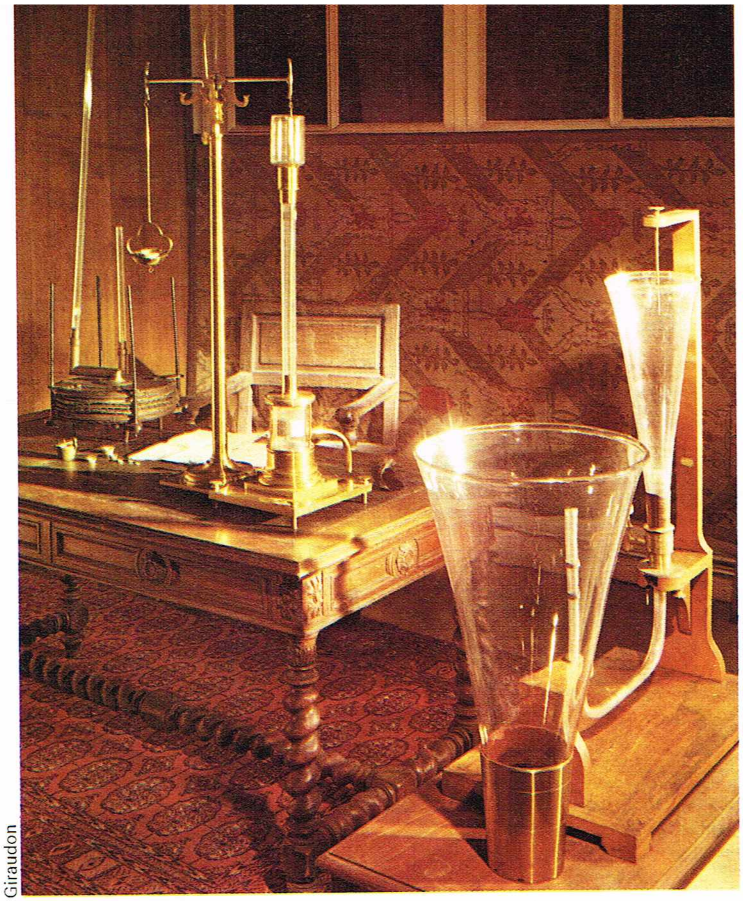

Giraudon

E. Lessing-Magnum

▲ *A gauche, reconstitution du bureau de travail de Pascal (à droite) réunissant quelques instruments utilisés pour ses expériences d'hydrostatique.*

▼ *Figure 3 : surfaces isobares de grande (1) et de petite (2) extension.*

fig. 3

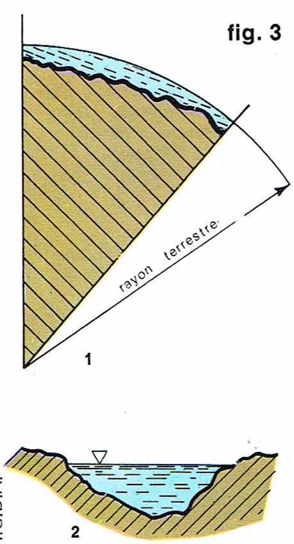

I.G.D.A.

▶ *Figure 1 : la pression* P *dans un liquide au repos varie linéairement avec la cote entre les deux plans séparés par la distance h : on a :* $P_2 - P_1 = \rho gh$.
Figure 2 : développement de la pression dans un récipient contenant des liquides de masses volumiques différentes et non miscibles entre eux.

HYDROSTATIQUE ET HYDRODYNAMIQUE

Hydrostatique

Comme nous l'avons fait pour l'aérostatique et l'aérodynamique, nous pouvons distinguer l'hydrostatique et l'hydrodynamique, qui étudient, respectivement, le comportement des liquides au repos et en mouvement. En ce qui concerne la plupart des théorèmes et des lois dont nous allons maintenant parler, nous pourrons faire l'approximation de fluides incompressibles, sauf mention contraire.

L'état d'un liquide au repos peut être parfaitement déterminé si l'on connaît la pression en tout point du volume qu'il occupe. En utilisant les mêmes raisonnements qu'en aérostatique, il est possible de retrouver, pour un liquide, la loi de Stévino donnant la répartition de la pression P en fonction de la distance *h* à la surface libre, pour un liquide de masse volumique ρ, soumis à la seule accélération de la pesanteur. En effet, pour une variation élémentaire *dh* d'altitude, la variation de pression *d*P correspondante est :

$$dP = \rho g dh$$

et, si l'on suppose que la masse volumique et l'accélération de la pesanteur sont des constantes dans tout le milieu, on obtient, par intégration :

$$P - P_0 = \rho g\,(h - h_0)$$

P_0 étant la pression de référence à l'altitude h_0. De cette loi, on peut déduire la loi de Pascal (la pression est une constante en tout point d'une même surface horizontale dans un liquide au repos) dont un corollaire affirme que toute surface libre d'un liquide ou toute surface de séparation entre deux liquides est horizontale (*fig.* 1 et 2).

fig 1

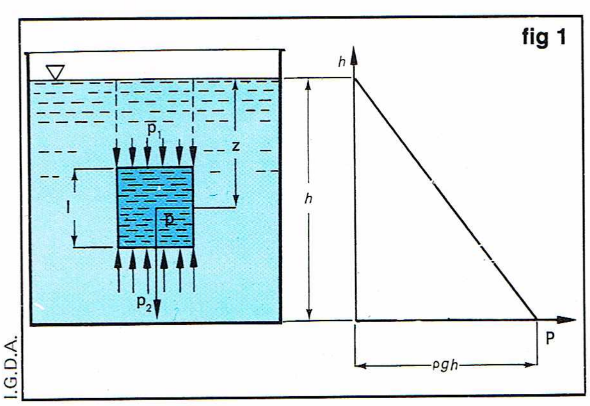

I.G.D.A.

Cela n'est toutefois vrai que pour des surfaces de faible étendue.

Pour de grandes surfaces (mers, lacs), la surface libre est en tout point normale au vecteur accélération du champ de pesanteur terrestre, donc, en première approximation, une sphère de rayon égal au rayon terrestre (*fig.* 3-1 et 3-2).

La presse hydraulique, d'un usage courant dans l'industrie, est un exemple d'application de ces lois. Dans le schéma de la *figure* 4, le piston S_1 est actionné par le levier ayant son pivot en O ; la force F′, conformément au principe bien connu du levier, est donnée par :

fig. 2

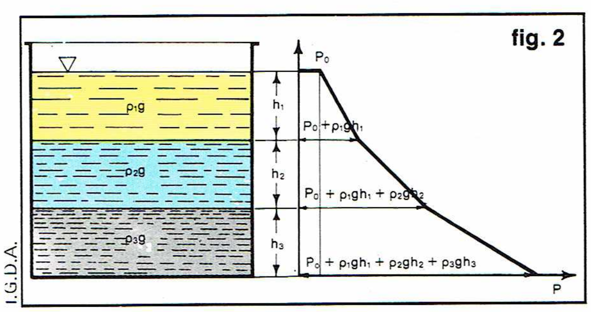

I.G.D.A.

$$F' = F\frac{l}{a}$$

Cette dernière déplace le piston S_1 de surface A_1 d'une certaine hauteur z_1, obligeant un volume de liquide A_1z_1 à passer à travers la soupape V_{1-2} qui s'ouvre automatiquement. La soupape V_{1-2} reste ouverte tant que les pressions en (1) et (2) ne sont pas devenues égales [ce qui se produit lorsque le piston (1) est arrivé à fond de course]. Le liquide étant supposé incompressible, le cylindre S_2 de section A_2 doit s'élever d'une hauteur z_2, telle que le volume du liquide déplacé en (2) soit :

$$z_2A_2 = z_1A_1$$

La pression en (1) est donnée par :

$$P = \frac{F'}{A_1}$$

La force agissant sur le cylindre S_2 est donc donnée par :

$$F_2 = PA_2 = F' \cdot \frac{A_2}{A_1}.$$

Au cours de son ascension, il peut soulever un poids $P = F' \frac{A_2}{A_1}$ qui peut donc être très grand devant F′.

Partant des lois de Stévino et de Pascal, nous pouvons retrouver également le principe d'Archimède : « Tout corps plongé dans un liquide reçoit de la part de celui-ci une force égale au poids du volume de liquide déplacé et appliquée au centre de gravité de ce dernier. » Les principales applications de ce principe ont trait à l'équilibre des corps immergés et des corps flottants (*fig.* 5).

Considérons un corps immergé de volume V, de masse M, en équilibre dans un liquide de masse volumique ρ_l. L'application du principe d'Archimède permet d'écrire :

$$Mg = \rho_l g V$$

Cette relation est utilisée dans la balance hydrostatique (*fig.* 6) qui sert à déterminer la masse volumique de solides homogènes plus denses que l'eau. La balance hydrostatique permet de déterminer, tout d'abord, le poids $P = \rho_S g V$ du solide seul, puis le poids apparent :

$$P' = (\rho_S - \rho_l)\, gV$$

quand il est plongé dans le liquide. On en déduit alors la masse volumique cherchée :

$$\rho_S = \frac{P}{P - P'}\, \rho_l$$

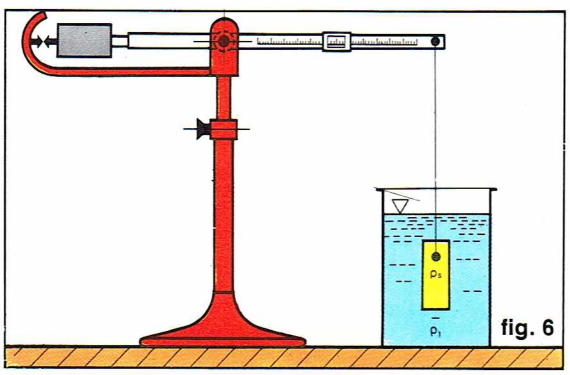

I.G.D.A.

Dans le cas d'un corps homogène flottant, de volume V, de masse volumique ρ_S, il y aura équilibre quand le volume immergé V′ sera tel que l'on ait :

$$\rho_S g V = \rho_l g V'$$

Ainsi, pour une plaque de glace, de masse volumique ρ_S = 900 kg/m³, flottant sur de l'eau ($\rho_l = 10^3$ kg/m³), le volume qui émerge est le dixième du volume total (*fig.* 7).

Un autre exemple, intéressant à étudier en détail, est celui d'un flotteur qu'une force extérieure déplace de sa position d'équilibre. Dans ce déplacement, apparaissent des forces qui, lorsque l'action perturbatrice cesse, peuvent ramener le flotteur dans la position primitive ou l'en éloigner encore davantage. Dans le premier cas, on dit que l'équilibre est stable, dans le second instable. La réalisation de la première condition intéresse particulièrement la technique navale ; c'est pourquoi il est important d'étudier quelles sont les conditions qui assurent la stabilité de l'équilibre d'un bateau.

En nous reportant à la *figure* 8 qui montre une section transversale d'un bateau, considérons, pour simplifier, le problème de la stabilité de l'équilibre au mouvement de roulis. Dans la position d'équilibre, le poids *P* appliqué au centre de gravité G du bateau et la poussée hydrostatique S appliquée au centre de poussée C s'équilibrent, c'est-à-

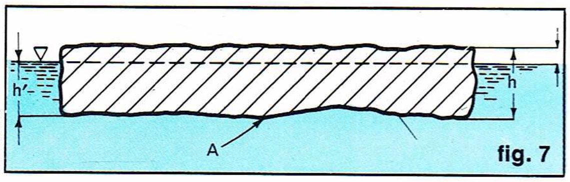

I.G.D.A.

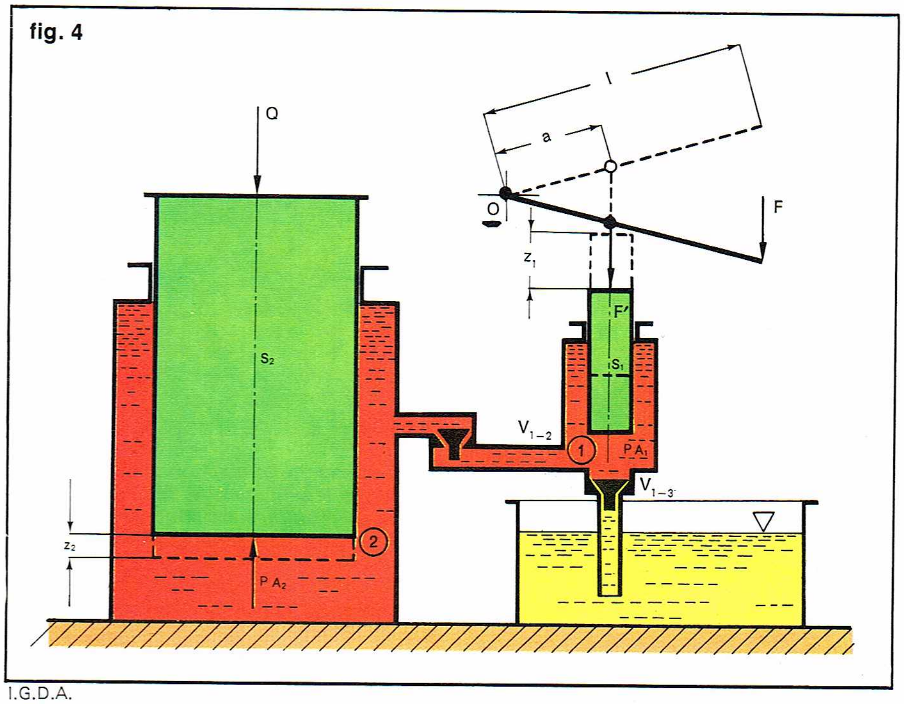

I.G.D.A.

▲ *Figure 4 : représentation schématique du fonctionnement de la presse hydraulique.*

◀ *Figure 6 : représentation schématique de la balance d'Archimède.*

▼ *Figure 5 : équilibre d'un corps solide immergé dans un liquide de masse volumique ρ_l pour diverses valeurs de sa masse volumique ρ_s.*

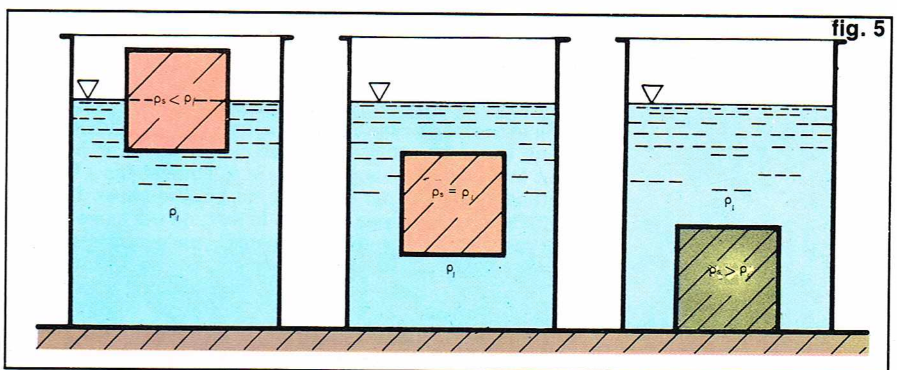

I.G.D.A.

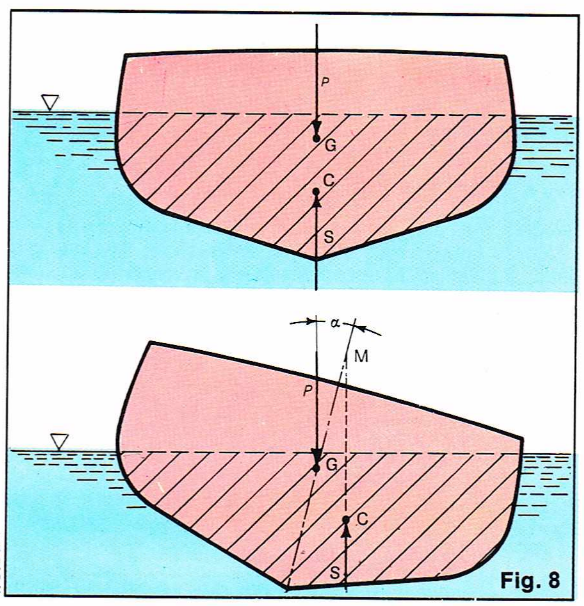

I.G.D.A.

◀ *Figure 8 : en haut, le bateau est en position d'équilibre : le poids P et la poussée d'Archimède S s'équilibrent, et agissent sur la même droite avec des intensités égales et opposées ; en bas, le bateau s'éloigne de sa position d'équilibre : la poussée S et le poids P génèrent un couple dont le moment tend à ramener le bateau dans sa position d'équilibre.*

◀ *Figure 7 : une plaque de glace immergée dans l'eau émerge d'un volume égal au 1/10 de son volume.*

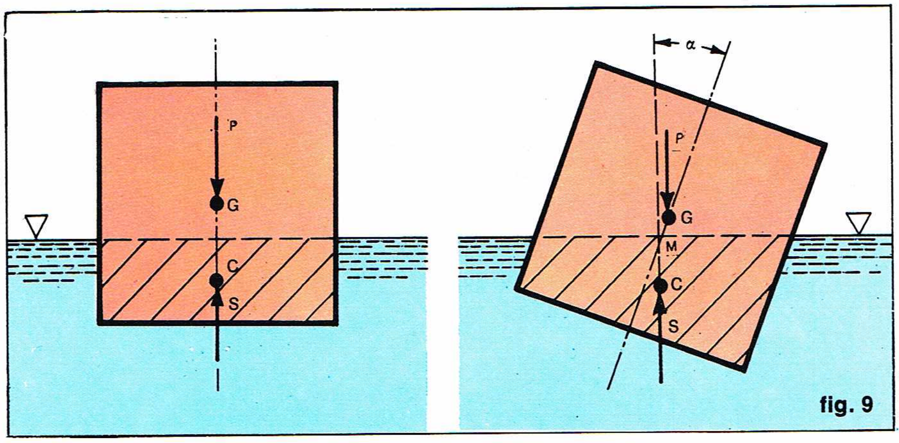

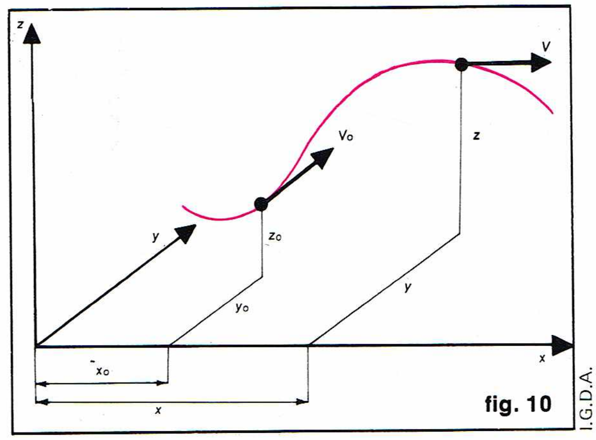

▲ ***A gauche, figure 9 ; un corps flottant en équilibre instable (à gauche) : le couple généré par S et P entraîne une augmentation de l'angle de roulis jusqu'au chavirement de l'objet (à droite). A droite, figure 10 ; interprétation graphique de la* méthode de Lagrange *: la vitesse et les coordonnées d'une particule de fluide sont fonction de la vitesse et des coordonnées à l'instant initial.***

dire agissent sur la même droite d'action avec des intensités égales et opposées (principe d'Archimède). L'intersection de la coque par la surface libre du liquide prend le nom de ligne de flottaison, et la partie immergée celui de carène.

Si l'on modifie l'équilibre du bateau en le faisant tourner autour de son axe longitudinal d'un angle α, la rotation n'entraîne qu'un changement de forme du volume immergé, le poids du bateau étant constant. En revanche, la position du centre de poussée auquel est appliquée la poussée hydrostatique S varie, tandis que le point d'application du poids est toujours le centre de gravité G du bateau. Il s'ensuit que les deux forces S et *P*, tout en demeurant égales et opposées, n'ont plus la même droite d'action et constituent un couple de moment $\mathcal{M}$:

$$\mathcal{M} = S\ (GM) \sin \alpha$$

Si $\mathcal{M}$ est tel qu'il tend à ramener le bateau dans la position primitive, l'équilibre est stable, et le moment est dit moment de rappel ; dans le cas contraire, ce moment a pour effet d'éloigner le bateau de la position d'équilibre, et l'équilibre est instable. Le moment de rappel dépend de la valeur de l'angle α et, en général, augmente avec celui-ci.

En faisant toujours l'hypothèse simplificatrice supposant que le centre de poussée et le centre de gravité demeurent dans la même section transversale du navire quelle que soit la valeur de l'angle de roulis α, l'intersection M de la verticale passant par le centre de poussée avec l'axe de symétrie du bateau se déplace le long de cet axe en fonction des variables de α, et sa distance au centre de gravité diminue lorsque α augmente. La position limite prise par M, correspondant à sa distance maximale de G, est atteinte lorsque α est égal à 0 ; elle prend le nom de *métacentre*. Dans les bateaux ordinaires, M ne s'éloigne pas sensiblement du métacentre si l'angle de roulis ne dépasse pas 14-15°, et on peut démontrer que sa position dépend uniquement des caractéristiques géométriques du bateau. Pour en augmenter la stabilité, il faut le construire de sorte que GM soit maximal. De plus, il est évident que le métacentre doit toujours se trouver à une cote supérieure à celle du centre de gravité, faute de quoi le moment $\mathcal{M}$ (*fig.* 9) deviendrait tel qu'il entraînerait une augmentation de l'angle de roulis jusqu'au chavirement du bateau.

Hydrodynamique

A l'inverse de l'hydrostatique, l'hydrodynamique ne peut ignorer la distinction entre liquides réels et liquides parfaits, puisque les phénomènes liés à la viscosité, ou frottement entre les « particules » de fluide, ne se manifestent justement que lorsque ces particules sont animées d'un mouvement relatif.

De ce fait, les études théoriques des phénomènes de l'hydrodynamique, menées en supposant les liquides parfaits, conduisent à des résultats qui, dans la plupart des cas, sont sensiblement éloignés des observations expérimentales (faites, naturellement, à l'aide de liquides réels). Si, d'un côté, l'étude théorique est indispensable pour cerner les différents phénomènes, de l'autre, la partie appliquée de l'hydrodynamique est d'une très grande importance.

Une autre distinction importante tient compte du type de mouvement auquel le liquide est soumis ; en effet, d'après les observations expérimentales, on a établi qu'il existe un *seuil* de vitesse au-delà duquel le mouvement des particules de liquide présente des composantes fluctuantes. En fait, ce seuil de vitesse détermine une limite au-delà de laquelle les effets d'inertie ne sont plus négligeables vis-à-vis des effets de viscosité. On dit qu'au-dessous de la valeur seuil (ou valeur critique), le mouvement du liquide est *laminaire* (régime laminaire), tandis qu'au-dessus de ce seuil, il est *turbulent* (régime turbulent). Naturellement, il existe un petit domaine de vitesses, autour de la valeur critique, dans lequel il n'est pas possible d'établir une distinction nette entre les deux régimes : on l'appelle *régime de transition*.

Aussi bien l'écoulement laminaire que l'écoulement turbulent sont dits *écoulements stationnaires* lorsque la vitesse moyenne du fluide, en tout point, demeure constante dans le temps, en grandeur, sens et direction ; si, en revanche, elle varie dans le temps selon une loi quelconque, on dit que l'écoulement est *instationnaire*.

Pour décrire un système hydrodynamique, deux représentations sont possibles.

La première, appelée représentation *lagrangienne*, consiste à déterminer comment varie dans le temps la position d'une particule de fluide, une fois connue la position qu'elle occupe à un moment donné (en général à l'instant initial) [*fig.* 10]. Les coordonnées x, y, z de la particule, dans l'espace à trois dimensions et à un instant quelconque, seront données en fonction du temps t, par trois relations du type :

$$x = f\ (x_0, y_0, z_0, t)$$
$$y = g\ (x_0, y_0, z_0, t)$$
$$z = h\ (x_0, y_0, z_0, t)$$

$\vec{r}$ désignant le vecteur position de la particule, la trajectoire pourra encore être définie par : $\vec{r} = \vec{r}\ (\vec{r_0}, t)$.

La deuxième représentation, dite *eulérienne*, décrit dans le temps l'évolution de scalaires ou de vecteurs [pression P (x, y, z, t), masse volumique $\rho\ (x, y, z, t)$, vitesse $\vec{V}\ (x, y, z, t)$...].

Nous allons maintenant montrer l'équivalence de ces deux descriptions.

Si l'on dispose de la description lagrangienne, c'est-à-dire de la donnée de $\vec{r}\ (\vec{r_0}, t)$, on peut obtenir la vitesse de l'élément fluide considéré, par simple dérivation par rapport au temps :

$$\vec{V}\ (\vec{r_0}, t) = \frac{d}{dt} \vec{r}\ (\vec{r_0}, t)$$

Par élimination de $\vec{r_0}$ entre $\vec{V}\ (\vec{r_0}, t)$ et $\vec{r}\ (\vec{r_0}, t)$, on obtient la donnée de

$$v_x\ (x, y, z, t), \quad v_y\ (x, y, z, t), \quad v_z\ (x, y, z, t)$$

c'est-à-dire le champ de vitesse $\vec{V}\ (\vec{r}, t)$ de la description eulérienne (*fig.* 11). Réciproquement, si l'on connaît ce champ de vitesse, on peut écrire :

$$v_x = \frac{dx}{dt}, \quad v_y = \frac{dy}{dt}, \quad v_z = \frac{dz}{dt}$$

et en déduire par intégration (sachant que $\vec{r} = \vec{r_0}$ à $t = t_0$)

$$x\ (\vec{r_0}, t)\ ; \quad y\ (\vec{r_0}, t)\ ; \quad z\ (\vec{r_0}, t)$$

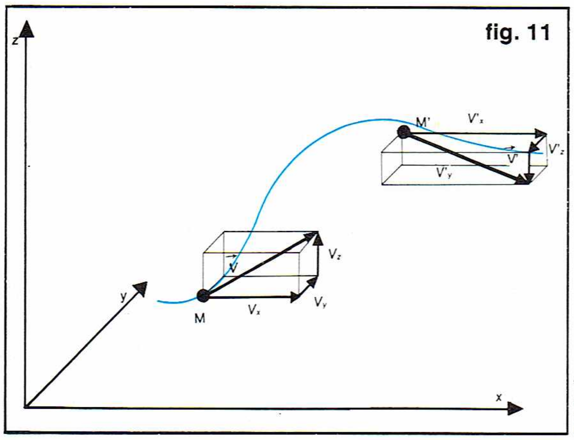

I.G.D.A.

◀ *Figure 11 : interprétation graphique de la* **méthode d'Euler :** *les composants de la vitesse d'une particule sont fonction des coordonnées de l'espace et du temps.*

Remarquons que, dans la représentation eulérienne, $\vec{V}$ est fonction de x, y, z et de t. La variation $d\vec{V}$ pourra donc être considérée comme la somme de deux variations : une variation spatiale et une variation temporelle

$$d\vec{V} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial x} dx + \frac{\partial \vec{v}}{\partial y} dy + \frac{\partial \vec{v}}{\partial z} dz + \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} dt$$

et l'on peut écrire :

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial x} v_x + \frac{\partial \vec{v}}{\partial y} v_y + \frac{\partial \vec{v}}{\partial z} v_z + \frac{\partial \vec{v}}{\partial t}$$

soit encore : $$\frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V}\ (\overrightarrow{\text{grad}} \cdot \vec{V})$$

On note souvent $\frac{D\vec{V}}{Dt}$ au lieu de $\frac{d\vec{V}}{dt}$ (notation de Stokes) ; cette dérivée s'appelle dérivée en suivant le mouvement, parce qu'elle est associée, non pas à la variation dans le temps d'un champ de vitesse, mais à la variation de vitesse d'un élément de volume fluide, pendant son mouvement.

Fluides parfaits

C'est en général à l'aide de la représentation eulérienne que l'on cherchera à obtenir les équations fondamentales de la dynamique des fluides. On assimilera donc le fluide à un milieu continu, et l'on raisonnera sur un élément de volume dV, de dimensions très inférieures à celles du système considéré et très supérieures à la distance entre les molécules. Le liquide considéré est supposé parfait, c'est-à-dire que l'on considère un milieu pour lequel les processus de thermoconduction et de viscosité sont négligeables.

Introduisons quelques notions relatives à un écoulement.

— *Ligne de courant :* ce sont les lignes du champ de vitesse à l'instant $t = t_0$. On parle encore de ligne d'écoulement ; leur équation est définie par :

$$\frac{dx}{v_x\ (x, y, z, t_0)} = \frac{dy}{v_y\ (x, y, z, t_0)} = \frac{dz}{v_z\ (x, y, z, t_0)}$$

— *Trajectoires :* elles sont relatives à un élément de volume fluide, et l'on a vu comment, à partir de la description eulérienne, on pouvait obtenir la description lagrangienne et, par conséquent, l'équation de ces trajectoires.

— *Ligne d'émission* ou *filet fluide :* il est constitué, à l'instant $t = t_0$, par l'ensemble des éléments de volume fluide qui sont passés en un point donné aux instants antérieurs à t_0.

Les trois dernières notions sont identiques pour un écoulement permanent. Elles ne le sont pas, en général, pour un écoulement non stationnaire.

Nous allons maintenant établir les conditions aux limites et les équations fondamentales du mouvement valables pour un fluide parfait, et voir ensuite quelles sont les modifications à y apporter pour rendre compte du comportement des fluides réels.

Conditions aux limites

A la limite entre un liquide et une paroi solide imperméable, les vitesses normales sont égales.

A la limite entre deux fluides, les vitesses normales à la surface de séparation sont égales (conservation du flux).

Équation de continuité

Soit un volume V_0 fixé dans le fluide. Le flux de masse par unité de temps à travers la surface S délimitant ce volume s'écrit (flux rentrant), d'après le théorème de Green :

$$-\int_S \rho\vec{V} \cdot \vec{n}\ dS = -\int_{V0} \text{div}\ (\rho\vec{V})\ d\tau$$

La conservation de la masse impose que ce flux soit égal à la variation de masse :

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_{V0} \rho d\tau = -\int_{V0} \text{div}\ (\rho\vec{V})\ d\tau$$

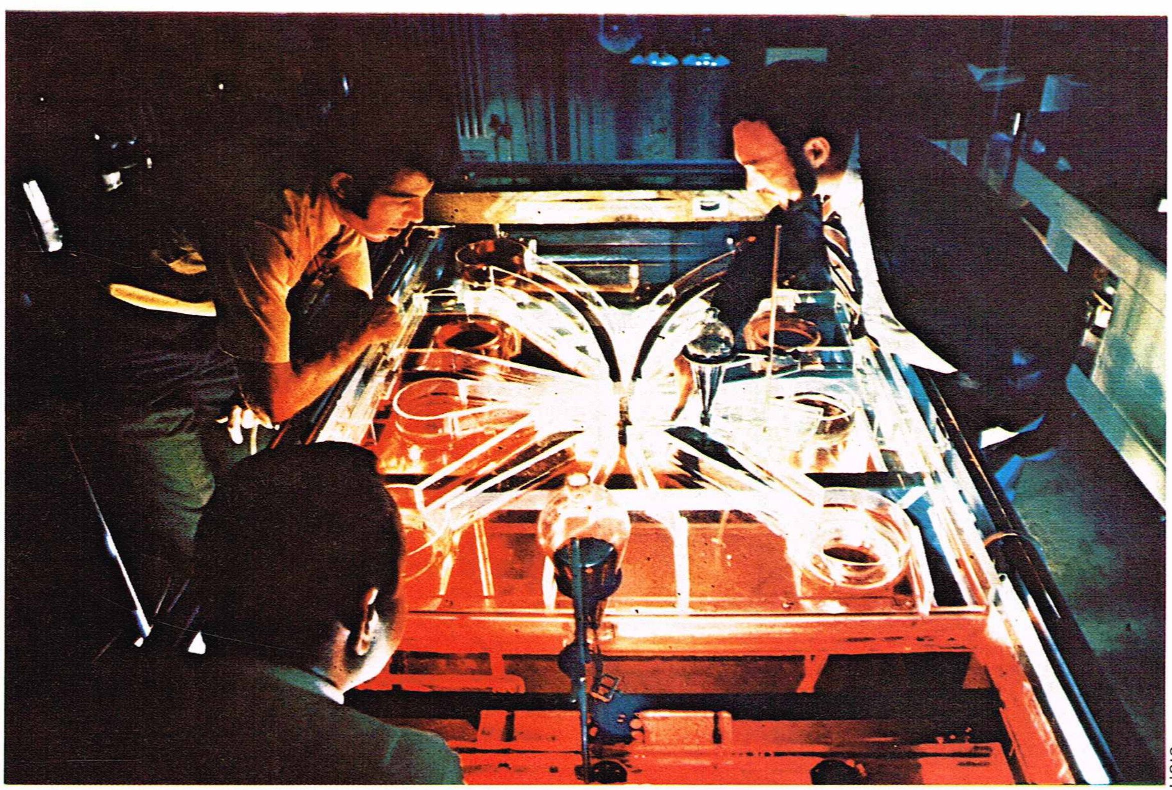

USIS

◀ *Expérimentation sur une table à eau : les chercheurs, en introduisant des teintures au travers de ce dispositif, cherchent à obtenir de nouvelles données sur les phénomènes d'écoulement des fluides.*

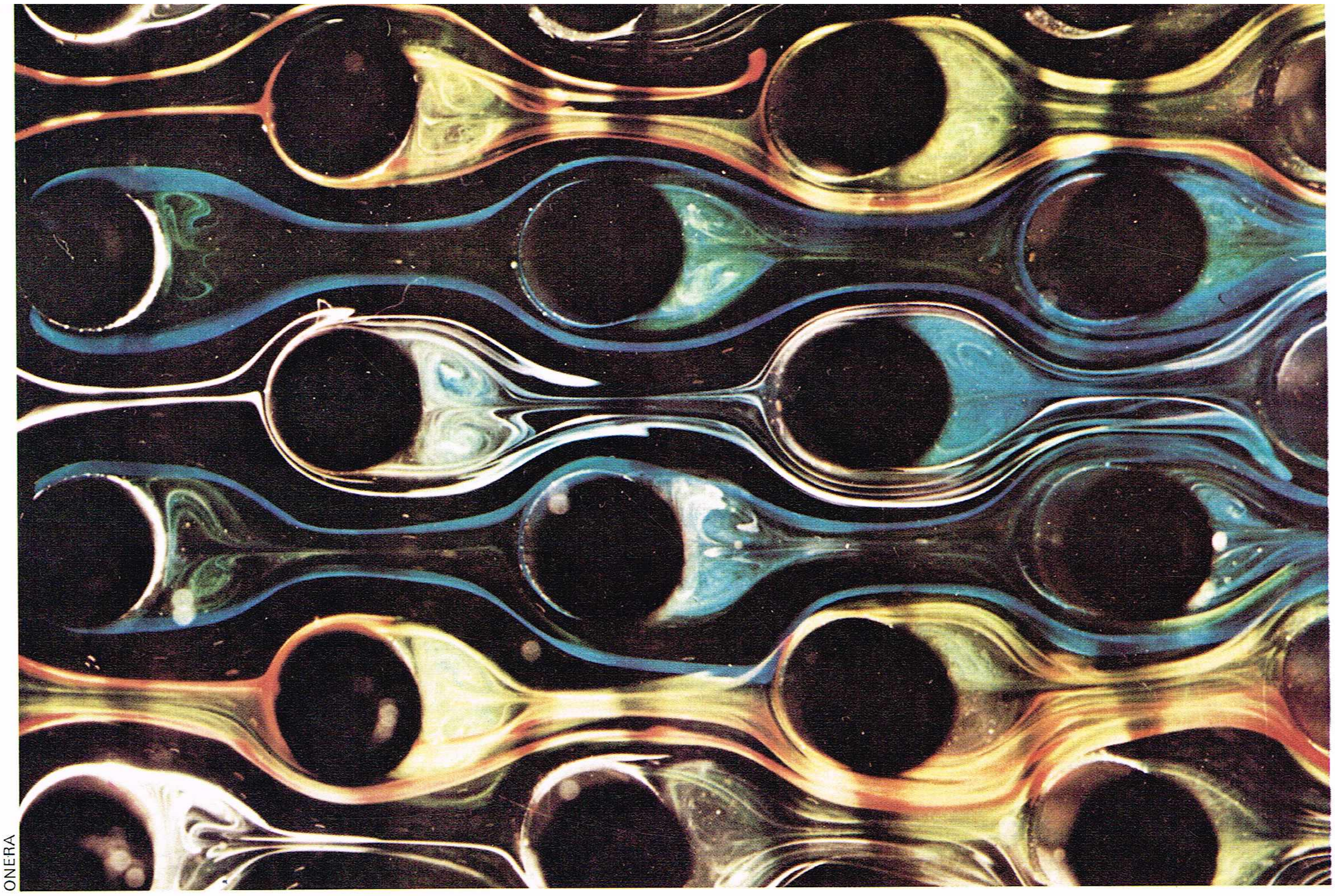

ONERA

▲ *Écoulement à basse vitesse : sillage derrière des cylindres régulièrement disposés.*

quel que soit le volume V_0 choisi. Par conséquent :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}\, \rho\vec{V} = 0$$

soit encore :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho\, \text{div}\, \vec{V} + \vec{V}\, \overrightarrow{\text{grad}}\, \rho = 0$$

C'est l'équation de continuité.

Pour un fluide incompressible, la masse volumique est constante en suivant le mouvement $\left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{V}\, \overrightarrow{\text{grad}}\, \rho = 0\right)$, la divergence de la vitesse est donc nulle : $\text{div}\, \vec{V} = 0$.

Équation d'Euler

Soit un volume de fluide, quelconque, V_1. La force totale qui s'exerce sur ce volume, du fait de la pression, s'écrit :

$$\vec{F} = -\iint_S P\vec{n}\, dS$$

or :
$$-\iint_S P\vec{n}\, dS = -\iiint_{V1} \overrightarrow{\text{grad}}\, P d\tau$$

cela signifie que, sur l'élément de volume $d\tau$, s'exerce la force $\overrightarrow{\text{grad}}\, P d\tau$. S'il existe un champ de force extérieur, on définira la force par unité de volume $\vec{F}$, et l'on pourra écrire, pour l'élément de volume de fluide $d\tau$, l'équation fondamentale de *la dynamique sous la forme* :

$$\vec{F}\, d\tau - \overrightarrow{\text{grad}}\, P d\tau = dm\, \frac{d\vec{V}}{dt}$$

avec $\rho = \frac{dm}{d\tau}$, il vient donc $\rho\frac{d\vec{V}}{dt} = -\overrightarrow{\text{grad}}\, P + \vec{F}$

C'est l'équation d'Euler.

▼ **Daniel Bernoulli** *(1700-1782) : il étudia l'écoulement de l'eau dans les conduites et publia en 1738 un* **Traité d'hydrodynamique.**

Palais de la Découverte, Paris

Autres formes de l'équation d'Euler

— *Cas du mouvement adiabatique*

En l'absence de phénomènes de conduction thermique, la définition du fluide parfait inclut l'absence d'échanges de chaleur. L'entropie d'un élément de volume $d\tau$ qui se déplace reste donc constante. L'entropie par unité de masse S l'est donc également, et l'on peut écrire :

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\partial S}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \overrightarrow{\text{grad}})\, S = 0;$$

or, $\text{div}\, (\rho\vec{V}S) = S\, \text{div}\, (\rho\vec{V}) + \rho\vec{V} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}\, S$

Comme $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}\, (\partial\vec{V}) = 0$, il vient :

$$\frac{\partial\, (\rho S)}{\partial t} + \text{div}\, (\rho S\vec{V}) = 0$$

— *Cas du mouvement isentropique*

Si, à un instant t_0, l'entropie est la même en tout point, elle restera la même en tout point quel que soit le temps. L'entropie est donc constante, et le mouvement est isentropique. On se limitera désormais à cette hypothèse. Or, la variation de l'enthalpie H par unité de masse est reliée aux variations dP et dS par l'équation :

$$dH = T dS + \frac{dP}{\rho}$$

Pour le mouvement isentropique, il reste $dH = \frac{dP}{\rho}$, soit encore $\overrightarrow{\text{grad}}\, H = \frac{\overrightarrow{\text{grad}}\, P}{\rho}$, et l'on peut écrire l'équation d'Euler sous la forme :

$$\frac{\partial\vec{V}}{\partial t} + (\vec{V}\, \overrightarrow{\text{grad}}) \cdot \vec{V} = -\overrightarrow{\text{grad}}\, H + \frac{\vec{F}}{\rho}$$

— *Forces extérieures dérivant d'un potentiel*

S'il existe une fonction potentiel, Φ, dont dérivent les forces extérieures par unité de masse, c'est-à-dire si l'on peut poser $\frac{\vec{F}}{\rho} = -\overrightarrow{\text{grad}}\, \Phi$, on obtient alors l'équation :

$$\frac{\partial\vec{V}}{\partial t} + (\vec{V}\, \overrightarrow{\text{grad}}) \cdot \vec{V} = -\overrightarrow{\text{grad}}\, (H + \Phi)$$

qui peut se mettre sous la forme :

$$\frac{\partial\vec{V}}{\partial t} - \vec{V} \wedge (\overrightarrow{\text{rot}}\, \vec{V}) = -\overrightarrow{\text{grad}}\left(H + \Phi + \frac{1}{2}V^2\right)$$

En introduisant le vecteur $\vec{\omega} = \overrightarrow{\text{rot}}\, \vec{V}$, et en prenant le rotationnel de l'équation précédente, il vient :

$$\frac{\partial\vec{\omega}}{\partial t} - \overrightarrow{\text{rot}}\, (\vec{V} \wedge \vec{\omega}) = 0$$

Équation de Bernoulli

A partir de l'équation d'Euler mise sous la forme :

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} - \vec{V} \wedge (\overrightarrow{\text{rot}}\, \vec{V}) = -\overrightarrow{\text{grad}}\left(H + \Phi + \frac{V^2}{2}\right)$$

et appliquée au cas d'un écoulement stationnaire $\left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = 0\right)$,

il vient $\vec{V} \wedge (\overrightarrow{\text{rot}}\, \vec{V}) = \overrightarrow{\text{grad}}\left(H + \Phi + \frac{V^2}{2}\right)$.

Soit $\vec{\tau}$ le vecteur unitaire tangent à une ligne d'écoulement (donc ici à la trajectoire). En effectuant le produit scalaire de l'équation précédente par $\vec{\tau}$, il vient [$\vec{V} \wedge (\overrightarrow{\text{rot}}\, \vec{V})$ étant perpendiculaire à $\vec{\tau}$] :

$$\vec{\tau} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}\left(H + \Phi + \frac{V^2}{2}\right) = 0$$

Or le gradient projeté sur une direction donne la dérivée selon cette direction, notée $\frac{\partial}{\partial l}$. De ce fait,

$$\frac{\partial}{\partial l}\left(\frac{V^2}{2} + H + \Phi\right) = 0$$

ce qui permet de conclure (équation de Bernoulli) que :

$$\frac{V^2}{2} + H + \Phi = \text{constante}$$

le long d'une ligne d'écoulement.

- Si les seules forces extérieures appliquées sont les forces de pesanteur, on obtient $\Phi = gz$, c'est-à-dire :

$$\frac{V^2}{2} + H + gz = \text{constante}$$

- Dans le cas du fluide incompressible, on peut écrire :

$$\overrightarrow{\text{grad}}\, H = \frac{\overrightarrow{\text{grad}}\, P}{\rho} = \overrightarrow{\text{grad}}\, \frac{P}{\rho}$$

et l'équation de Bernoulli se met sous la forme :

$$\frac{V^2}{2} + \frac{P}{\rho} + gz = \text{constante}$$

(la valeur de la constante dépendant de la ligne de courant considérée). Cette équation exprime en fait la conservation de l'énergie mécanique totale d'un élément de volume quelconque le long de la ligne de courant.

Applications du théorème de Bernoulli

— *Tube de Venturi*

Le tube de Venturi est essentiellement constitué d'un tube qui présente un resserrement progressif suivi d'un élargissement progressif le ramenant à sa section initiale (*fig.* 12). Appliquons le théorème de Bernoulli entre la section amont 1 d'aire A_1 et la section rétrécie 2 d'aire A_2. Si le tube est horizontal, c'est-à-dire si $z_1 = z_2 = z$, le théorème de Bernoulli donne :

$$z + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = z + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g}$$

c'est-à-dire : $P_1 - P_2 = \frac{\rho}{2}(V_2^2 - V_1^2)$.

En reprenant l'équation de la continuité : $V_2A_2 = V_1A_1$ et en substituant, on obtient :

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho}{2} V_1^2 \left(\frac{A_1^2}{A_2^2} - 1\right)$$

Le tube de Venturi est normalement utilisé comme moyen de mesure indirecte du débit. En effet, en déterminant la différence de pression $(P_1 - P_2)$ et en reportant sa valeur dans la relation précédente, résolue par rapport à V_1, on a :

$$V_1 = \left[\frac{2}{\rho} \cdot \frac{P_1 - P_2}{\frac{A_1^2}{A_2^2} - 1}\right]^{1/2}$$

Le débit volumétrique Q sera donc égal à :

$$Q = A_1V_1 = A_1\left[\frac{2}{\rho}\frac{P_1 - P_2}{\frac{A_1^2}{A_2^2} - 1}\right]^{1/2}$$

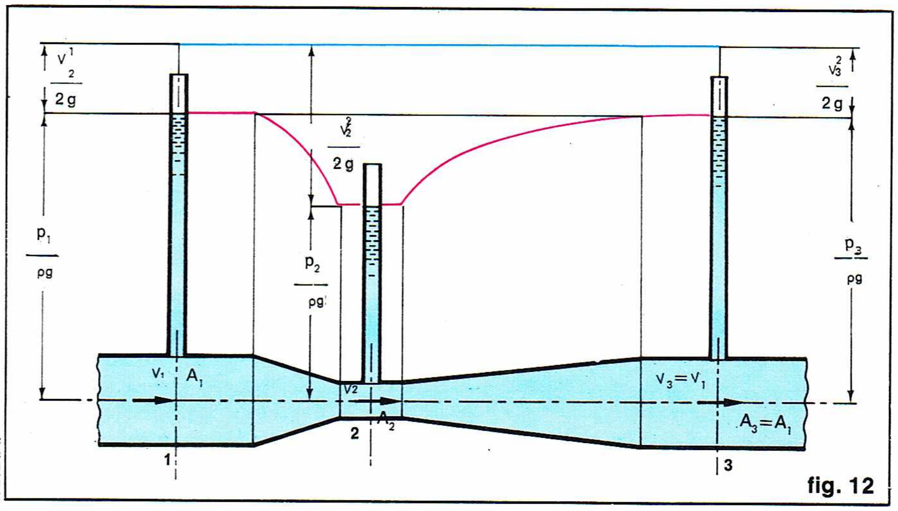

fig. 12

▲ ***Figure 12 : représentation schématique du tube de Venturi.***

— *Écoulement d'un liquide à partir d'un réservoir*

En supposant que le réservoir soit suffisamment grand pour que son niveau ne varie pas durant l'écoulement (*fig.* 13), ce qui revient à admettre que la section du trou d'écoulement est petite et négligeable par rapport à l'aire de la surface libre, le théorème de Bernoulli permet d'écrire

$$z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

puisque la pression, aussi bien sur le niveau libre que dans le jet d'écoulement, coïncide avec la pression atmosphérique et que la conservation du débit impose que V_1 soit négligeable devant V_2. En résolvant par rapport à V_2, on obtient l'expression :

$$V_2 = \sqrt{2g(z_1 - z_2)}$$

appelée formule de Torricelli. Elle pourrait être obtenue intuitivement, en observant qu'une particule de liquide sur la surface libre possède uniquement une énergie potentielle dans le champ de gravitation ($E = \rho g z_1$), tandis qu'une particule sortant par l'ouverture, en prenant la cote de l'ouverture comme plan de référence, possède uniquement une énergie cinétique $\left(E = \frac{1}{2}\rho V_2^2\right)$. Le fluide qui s'écoule du récipient a donc un débit donné par :

$$Q_2 = A_2V_2 = A_2\sqrt{2g(z_1 - z_2)}$$

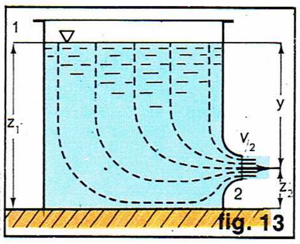

fig. 13

▲ ***Figure 13 : écoulement d'un liquide à partir d'un réservoir de grande capacité. Les lignes en pointillé indiquent les trajectoires des diverses particules.***

— *Tube de Pitot*

La relation :

$$P + \frac{1}{2}\rho V^2 + \rho g z = \text{constante}$$

peut être interprétée comme une condition d'invariabilité de la somme de trois termes qui ont tous les dimensions d'une pression. Le premier, qui n'est autre que la pression, prend souvent le nom de *pression statique* et peut être obtenu à partir des indications des piézomètres disposés perpendiculairement à la direction du mouvement dans la section 1 de la *figure* 14. En effet, le piézomètre mesure la

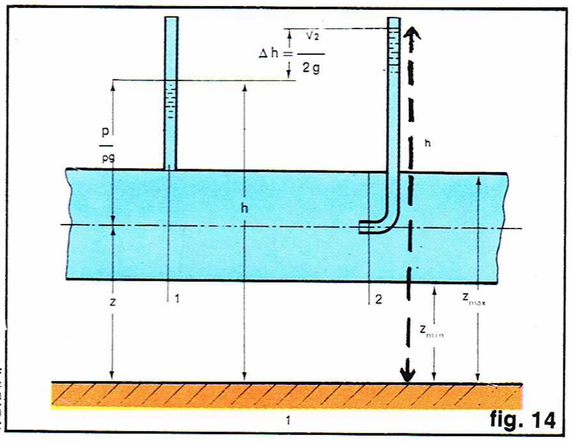

fig. 14

◀ ***Figure 14 : mesure de la cote piézométrique et de la densité volumique d'énergie cinétique du courant à partir de laquelle il est possible de déduire la pression totale.***

quantité $h = z + \frac{P}{\rho g}$ qui permet de déduire la valeur de la pression : $P = \rho g\ (h - z)$. La quantité h représente la cote piézométrique, c'est-à-dire la cote de la surface libre du piézomètre par rapport au plan de référence.

Le terme $\frac{1}{2}\rho V^2$ prend le nom de *pression dynamique* et représente la densité volumique d'énergie cinétique de l'écoulement.

En appliquant le théorème de Bernoulli entre une section quelconque du conduit de la *figure* 14 et l'entrée du tube installé dans la section 2, on écrit $P^* = P_1 + \frac{1}{2}\rho V^2$, puisque la vitesse à l'intérieur du tube est nulle. La hauteur de fluide h dans ce tube permet de calculer la vitesse du fluide :

$$V = \sqrt{2\ g\ (h^* - h)} = \sqrt{2\ g\Delta h}$$

La pression P^*, somme de la *pression statique p* et de la *pression dynamique* $\frac{1}{2}\rho V^2$, prend le nom de *pression totale*.

En examinant cette même figure, on pourrait objecter que les deux quantités ρgh^* et $\rho gh + \frac{1}{2}\rho V^2$ ne sont pas comparables, qu'elles n'ont pas été mesurées sur la même trajectoire (axe du conduit). Mais on peut démontrer que, dans un écoulement où les filets fluides qui le constituent sont parallèles et rectilignes, la pression dans un plan normal à la direction de la vitesse varie selon la loi bien connue en hydrostatique :

$$P = (h - z)\ \rho g$$

la quantité h mesurée par le piézomètre placé dans la section 1 est donc indépendante de la cote de sa section d'entrée.

Fluides réels newtoniens

Les fluides réels se caractérisent par l'existence de frottements internes et par des transferts de chaleur. Les frottements internes conduisent à une dissipation d'énergie, effet dont on peut tenir compte à l'échelon microscopique par des frottements entre diverses couches de fluide. Les forces qui entrent en jeu traduisent un effet dit de viscosité. Lorsqu'elles sont proportionnelles aux gradients de vitesse, le coefficient de proportionnalité est appelé coefficient de viscosité. Cet effet de viscosité traduit en fait des interactions moléculaires.

Les phénomènes de transfert de chaleur se divisent en deux catégories : les phénomènes de conduction (ou diffusion), par exemple le transfert de chaleur dans une barre de métal, et les phénomènes de convection (transfert de chaleur dû au moment du fluide). Nous nous contenterons de remarquer que l'hypothèse d'adiabaticité faite pour l'étude du fluide parfait n'est plus valable.

Dans cette étude des fluides réels newtoniens (à viscosité indépendante du gradient de vitesse), nous nous attacherons tout d'abord à déterminer les équations générales qui régissent l'écoulement du fluide, c'est-à-dire, notamment, l'équation de Navier Stokes, puis, après avoir introduit la notion de nombre de Reynolds, nous aborderons un problème fondamental en hydrodynamique, celui de la similitude des écoulements stationnaires de fluide visqueux. Nous terminerons enfin par l'étude de la turbulence.

▼ Figure 15 : profil de vitesse : dans le cas d'un liquide parfait (1), toutes les particules ont la même vitesse ; dans le cas d'un liquide réel (2), la vitesse est nulle au contact des parois et maximale sur l'axe.

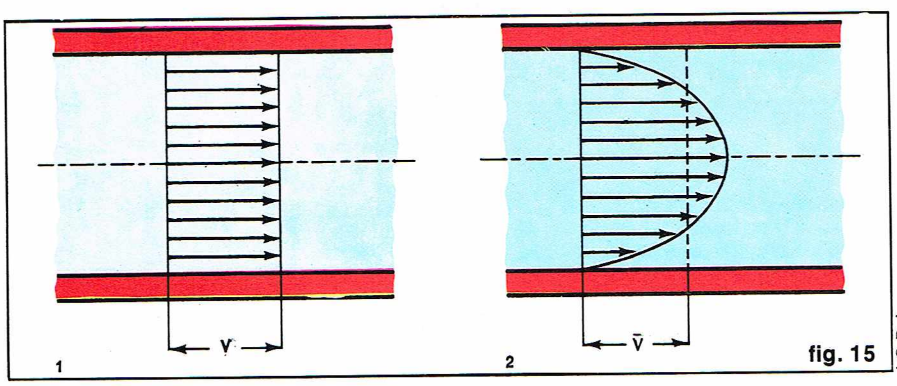

Écoulement laminaire

Conditions aux limites sur un obstacle

Au voisinage d'une paroi solide, il existe toujours des molécules de fluide qui sont maintenues sur cette paroi du fait des forces d'attraction dues aux molécules ou aux atomes du solide : c'est la couche adsorbée, où la vitesse du fluide est égale à la vitesse de la paroi. En s'éloignant de la paroi, cet effet se fera de moins en moins sentir, et la vitesse atteindra progressivement la valeur qu'elle aurait eue en l'absence de l'obstacle.

La couche de transition où la vitesse atteint progressivement sa valeur limite (ou du moins un pourcentage déterminé de celle-ci, par exemple 99 %) est appelée *couche limite*. Il reste à retenir qu'au voisinage d'un obstacle se déplaçant à la vitesse $\vec{u}$, la condition à respecter est $\vec{V} = \vec{u}$ sur l'obstacle, alors que l'on avait seulement, dans le cas d'un fluide parfait, la condition d'égalité des vitesses normales. Pour un obstacle au repos, il vient évidemment $\vec{V} = \vec{0}$ sur l'obstacle.

Profil de vitesse

Si l'on prend l'exemple d'un conduit à l'intérieur duquel s'écoule un fluide parfait, on observe que toutes les particules qui traversent une section A à un instant donné ont la même vitesse V (*fig.* 15/1) et que le débit volumique est égal à : $Q = \pi R^2 V$, où R est le rayon de la conduite. Si l'on considère, maintenant, le même conduit dans lequel un fluide réel s'écoule avec le même débit, les conditions aux limites impliquent que la vitesse des couches de fluide soit pratiquement nulle au voisinage immédiat de la paroi et croissante au fur et à mesure que l'on considère les couches plus proches de l'axe du conduit (*fig.* 15/2). L'ensemble des extrémités des vecteurs de vitesse des différentes particules qui traversent une section est une surface plane, dans le cas d'un fluide parfait, et courbe, dans le cas d'un fluide réel. L'intersection de ces surfaces avec un plan parallèle à la direction des vitesses prend le nom de *profil de vitesse ;* dans le cas, assez fréquent, où ces surfaces présentent un plan ou un axe de symétrie, ces profils sont eux aussi symétriques. Puisque, par hypothèse, les débits sont les mêmes dans les deux cas, on peut écrire (pour un écoulement à symétrie axiale) :

$$Q = \int_0^R 2\ \pi r V\ (r)\ dr = \pi R^2 V.$$

En définissant la vitesse moyenne d'un écoulement de débit Q comme la vitesse qui assurerait le même débit si elle était constante sur la section considérée, on voit que, dans le cas du fluide réel, cette vitesse moyenne $\bar{V}$ s'exprime simplement par :

$$\bar{V} = V = \frac{1}{\pi R^2}\int_0^R 2\ \pi r V\ (r)\ dr.$$

où $V\ (r)$ est la vitesse à la distance r de l'axe.

Coefficient de viscosité et loi de Newton

Des considérations identiques à celles qui sont utilisées en aérodynamique permettent de définir, dans un écoulement bidimensionnel, la relation entre la force dF qui s'exerce sur l'élément de surface élémentaire $dxdz$ en fonction du gradient de vitesse dans la direction y :

$$dF = \mu \left(\frac{\partial V_x}{\partial y}\right) dxdz$$

Cette relation est appelée loi de Newton, et le coefficient de proportionnalité μ est appelé *coefficient de viscosité.* Les fluides newtoniens (où la viscosité est indépendante du gradient de vitesse) sont courants (air, eau, mercure, miel, huile...). Mais il en existe pour lesquels la dépendance de dF en fonction du gradient de vitesse n'est pas linéaire ; c'est le cas, par exemple, des plastiques, des suspensions, du sang, et de nombreux corps organiques.

En système M. K. S., la viscosité s'exprime en newtons-secondes/m^2 ; et en système C. G. S. (le plus utilisé à ce sujet), il s'exprime en poises (dynes-secondes/cm^2) : 1 newton-seconde/m^2 = 10 poises ; un sous-multiple très utilisé est le cp (centipoise = 10^{-2} poise) ; dans les conditions normales, nous avons :

$$\mu\ (\text{eau}) = 10^{-3}\ \text{N.s/m}^2$$
$$\mu\ (\text{huile}) = 1\ \text{N.s/m}^2$$
$$\mu\ (\text{air}) = 2 \cdot 10^{-5}\ \text{N.s/m}^2$$

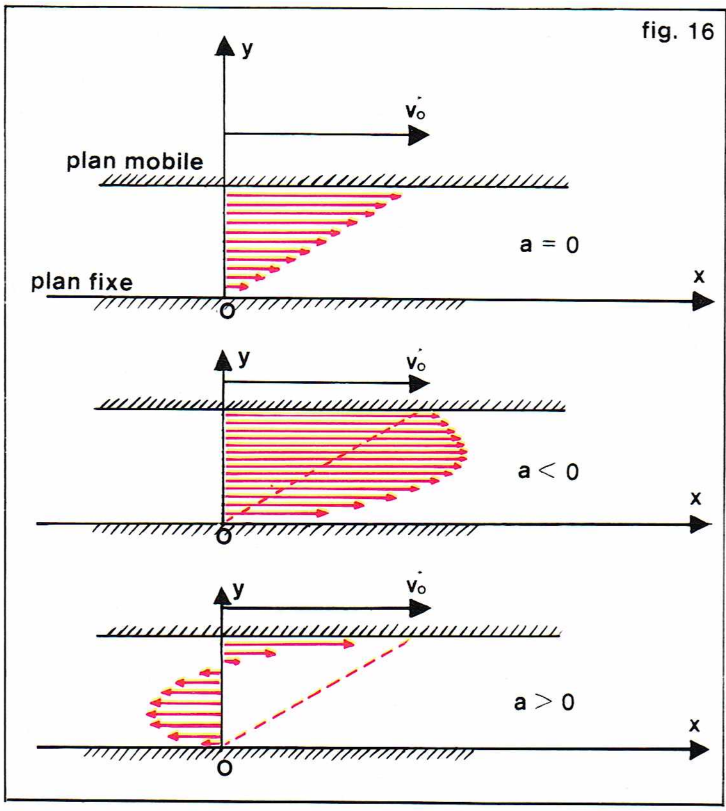

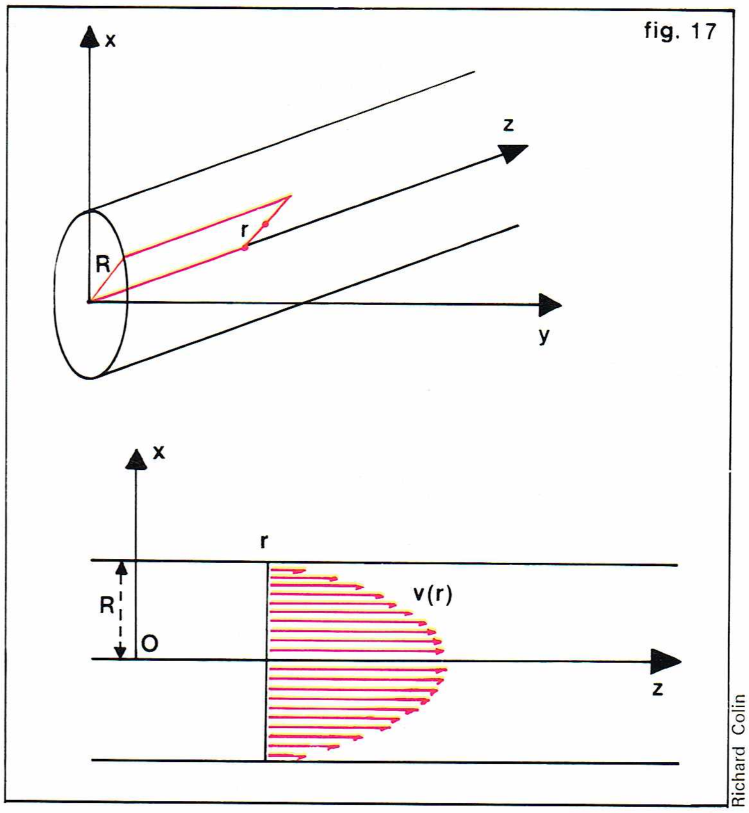

▲ *A gauche, figure 16 : écoulement de Couette entre un plan fixe et un plan mobile. A droite, figure 17 : écoulement de Poiseuille.*

Équation de continuité

La présence des forces de frottement ne modifie en rien l'établissement de l'équation de continuité ; on peut donc écrire, comme pour le fluide parfait :

$$\text{div} \cdot (\rho\vec{V}) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

Dans le cas de l'écoulement d'un liquide incompressible, seul cas étudié par la suite, cette équation se réduit à :

$$\text{div}\ (\vec{V}) = 0$$

Équation de Navier-Stokes

Pour décrire le mouvement de la masse d'un volume élémentaire $d\tau$, il est possible d'appliquer comme cela a été fait en aérodynamique le principe fondamental de la dynamique. Les forces en présence sont d'une part les forces d'inertie $\rho d\tau \frac{d\vec{V}}{dt}$, d'autre part les forces extérieures dérivant d'un potentiel Φ (champ de gravitation, électrique...) : $-\rho d\tau\ \overrightarrow{\text{grad}}\ \Phi$, et enfin les contraintes de pression et les contraintes visqueuses tangentielles dont on peut montrer qu'elles sont égales à $-\overrightarrow{\text{grad}}\ \text{P}d\tau + \mu\Delta\vec{V}d\tau$.

Si l'on effectue le bilan de toutes ces forces, l'équation obtenue est celle de Navier-Stokes :

$$\rho\frac{d\vec{V}}{dt} = -\overrightarrow{\text{grad}}\ (\text{P} + \rho\Phi) + \mu\Delta\vec{V}$$

Nous pouvons remarquer que, faisant $\mu = 0$ dans cette équation, on obtient simplement l'équation d'Euler, valable pour les fluides parfaits : $\frac{d\vec{V}}{dt} = -\overrightarrow{\text{grad}}\left(\frac{\text{P}}{\rho} + \Phi\right)$. La masse volumique ρ étant constante, il est courant d'introduire la viscosité cinématique $\nu = \mu/\rho$ et l'on récrit alors l'équation de Navier-Stokes sous la forme :

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = -\overrightarrow{\text{grad}}\left(\frac{\text{P}}{\rho} + \Phi\right) + \nu\Delta\vec{V}$$

Ce nouveau coefficient de viscosité ν est appelé viscosité cinématique. En système légal, ν s'exprime en m^2/s, et en système C. G. S. en cm^2/s, souvent et abusivement appelés poises par analogie avec la viscosité de l'eau, pour laquelle on a $\rho = 1\ g/cm^3$, ce qui entraîne $\nu = \mu$ en valeur numérique.

A titre indicatif, voici quelques valeurs de la viscosité cinématique exprimées en cm^2/s, dans des conditions normales : glycérine : 6,8 ; huile : 4,0 ; alcool : 0,022 ; eau : 0,010 ; mercure : 0,001 2 ; air : 0,150.

Applications de l'équation de Navier-Stokes

— *Écoulement de Couette* (*figure* 16).

Un fluide visqueux reposant sur un plan fixe horizontal est entraîné par un second plan animé d'une vitesse $\vec{V}_0$. Le mouvement est bidimensionnel, et la vitesse du fluide, qui n'a qu'une seule composante v_x, est fonction de la variable y. L'équation de Navier-Stokes se réduit alors à $\frac{\partial \text{P}}{\partial x} = -\mu\frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2}$ et $\frac{\partial \text{P}}{\partial y} = 0$; de la seconde de ces équations, on déduit que $\text{P} = \text{P}(x)$, ce qui impose que les deux membres de la 1^{re} équation, l'un fonction de x, l'autre de y, ne peuvent qu'être égaux à une constante a. Il vient alors :

$$\text{P} = \text{P}_0 + ax$$

si P_0 est la pression en $x = 0$,
et de même :

$$V = V_0\frac{y}{h} - \frac{h^2}{2\mu}a\frac{y}{h}\left(1 - \frac{y}{h}\right)$$

Les profils de vitesse ont été tracés dans les trois cas où l'on a :

— $a = 0$, c'est-à-dire une pression constante dans tout le fluide ;

— $a > 0$, pression qui augmente vers les x positifs ;

— $a < 0$, pression qui augmente vers les x négatifs.

— *Écoulement de Poiseuille ; perte de charge.*

Considérons l'écoulement d'un fluide visqueux dans une conduite de rayon R (*fig.* 17) ; si nous appliquons l'équation de Navier-Stokes à cet écoulement, il vient, compte tenu de l'incompressibilité du fluide et des symétries (translation, rotation) : $v_x = v_y = 0$ et $v_z = v_z(r)$, ainsi que : $\frac{\partial \text{P}}{\partial x} = \frac{\partial \text{P}}{\partial y} = 0$,

on obtient finalement :

$$\frac{d\text{P}}{dz} = \mu\left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2}\right) = \mu\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(r\frac{dV}{dr}\right) = \text{constante.}$$

Par intégration, si a est le gradient de pression, il vient : $\text{P} = \text{P}_0 - az$ qui permet de calculer la différence de pression entre deux sections séparées par la distance z,

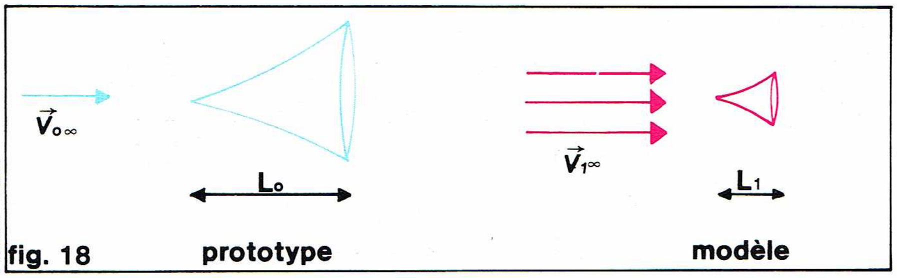

Richard Colin

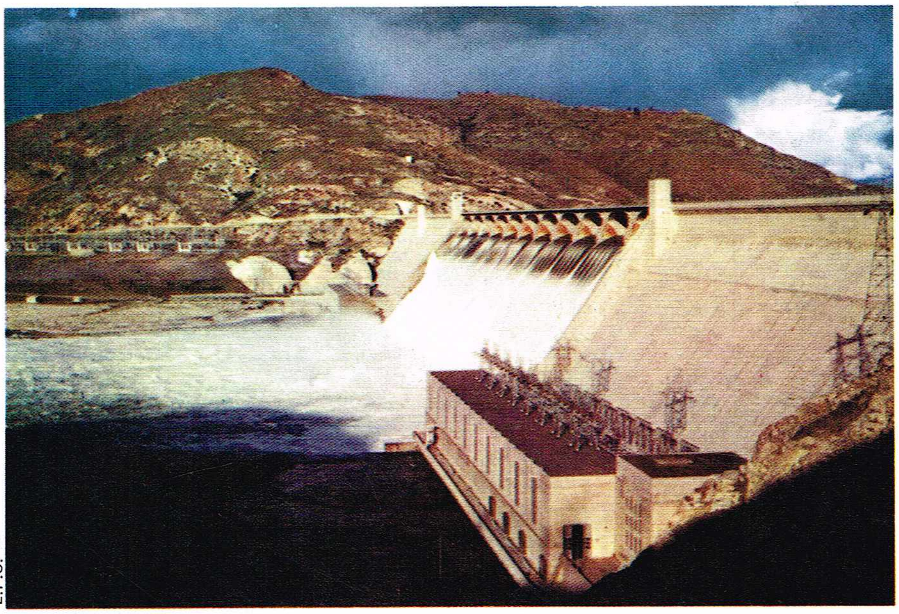

E.P.S.

▲ *En haut, figure 18 : écoulement permanent d'un fluide sur un obstacle. Ci-dessus : l'un des plus grands barrages du monde, le Grand Coulee sur le fleuve Columbia (Washington). C'est à partir de l'étude de maquette que l'on déduit le comportement hydrodynamique d'un tel système et, partant, sa réalisation.*

$\Delta P = -az$, et $V = \dfrac{a}{4\mu}(R^2 - r^2)$. Le profil des vitesses est donc un profil parabolique dont l'axe est confondu avec celui du tube. Pour calculer le débit, il faut intégrer la vitesse sur une section droite du tube, et l'on obtient : $Q = \int \rho \vec{V} d\vec{S} = 2\pi\rho \int_0^R Vr dr$, soit finalement : $Q = \dfrac{\pi}{8\nu} aR^4$ que l'on peut relier à la perte de charge ΔP : $Q = \dfrac{\pi}{8\nu} \dfrac{\Delta\rho R^4}{z}$.

D'une mesure de perte de charge, on peut donc déduire le débit, connaissant la viscosité et la géométrie du système.

Similitude en écoulement permanent

On a vu que l'écriture la plus générale de l'équation gouvernant l'écoulement d'un fluide newtonien est l'équation de Navier-Stokes :

$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} = -\overrightarrow{\text{grad}}\,(P + \rho\Phi) + \mu\Delta\vec{V}$$

Pour en obtenir les solutions, il s'agit de préciser les conditions aux limites : conditions aux limites dans l'espace qui font appel à la géométrie du système (conditions de non-glissement au niveau des obstacles...) et conditions aux limites dans le temps (conditions initiales...).

Il peut être intéressant de travailler sur une équation réduite, dont les variables sont des variables sans dimensions, obtenues en définissant des longueurs réduites, des vitesses réduites...

Deux systèmes hydrodynamiques pourront alors être caractérisés par la même équation réduite de Navier-Stokes. Si les variables réduites ont été convenablement choisies, et à condition de respecter certaines conditions sur la géométrie du système, les conditions aux limites seront identiques.

Les solutions seront les mêmes, et l'on voit que, de l'étude d'un système, on pourra déduire le comportement hydrodynamique d'un autre système : les deux systèmes sont dits semblables. C'est ce principe qui est appliqué lorsque l'on effectue des études sur maquettes (étude des profils aérodynamiques, en soufflerie, sur modèles réduits, étude de barrages...).

Cependant, l'étude sur modèle reste relativement onéreuse et ne peut se justifier que dans le cas où l'approche analytique est impossible.

Proposons-nous, par exemple, d'étudier l'écoulement permanent d'un fluide sur un obstacle (*fig.* 18).

Supposons la vitesse uniforme à l'infini (V_∞) ; soit L_0 une des dimensions caractéristiques de l'obstacle, et introduisons les variables sans dimensions :

$$V' = \frac{V}{V_\infty} \qquad \vec{r}' = \frac{\vec{r}}{L_0} \qquad P' = \frac{P}{\rho V_\infty^2}$$

Avec ces nouvelles variables, l'équation de Navier-Stokes :

$$(\vec{V}\cdot\overrightarrow{\text{grad}})\,\vec{V} = -\frac{\overrightarrow{\text{grad}}\,P}{\rho} + \mu\Delta\vec{V}$$

devient

$$\frac{V_\infty^2}{L_0}(\vec{V}'\cdot\overrightarrow{\text{grad}})\,\vec{V}' = -\frac{V_\infty^2}{L_0}\overrightarrow{\text{grad}}\,P' + \frac{\nu V_\infty^2}{L_0^2}\Delta'\vec{V}'$$

soit $(\vec{V}'\cdot\overrightarrow{\text{grad}})\cdot\vec{V}' = -\overrightarrow{\text{grad}}\,P + \left(\dfrac{\nu}{V_\infty L_0}\right)\Delta'\vec{V}'$

Le groupement $\dfrac{V_\infty L_0}{\nu}$ est appelé nombre de Reynolds, et l'on voit que deux systèmes qui auront les mêmes conditions aux limites réduites auront les mêmes solutions si le nombre de Reynolds qui intervient dans l'équation réduite de Navier-Stokes est le même. Si, dans l'exemple qui nous intéresse, le modèle et le prototype sont homothétiques (longueur caractéristique L_1), on aura à écrire que $V_1' = 0$ pour les mêmes valeurs des variables réduites d'espace : $\vec{r}_1' = \vec{r}_1/L_1$.

Si l'on prend pour vitesse caractéristique la vitesse à l'infini, on voit que la condition à l'infini est $V' = 1$. Il suffit donc maintenant d'avoir le même nombre de Reynolds, ce qui peut s'obtenir en modifiant la vitesse à l'infini, ou la viscosité du fluide.

Nombre de Reynolds, nombre de Froude, nombre de Strouhal

En fait, le groupement $\dfrac{V_\infty L_0}{\nu}$ qui est intervenu ici a été introduit historiquement pour étudier la transition entre le régime laminaire et le régime turbulent. Il avait été établi que, pour un écoulement dans un tuyau, ce groupement caractéristique a une valeur critique ($\sim$ 2 000) en dessous de laquelle le régime est toujours laminaire, et au-dessus de laquelle il devient turbulent (voir plus loin *Turbulence*).

Si l'on doit tenir compte des forces extérieures (en particulier des forces de pesanteur), on doit écrire :

$$(\vec{V}\,\overrightarrow{\text{grad}})\,\vec{V} = -\overrightarrow{\text{grad}}\,\frac{P}{\rho} + \vec{g} + \nu\Delta\vec{V}$$

soit :

$$\frac{V_\infty^2}{L_0}(\vec{V}'\,\overrightarrow{\text{grad}})\,\vec{V}' = \frac{V_\infty^2}{L_0}\overrightarrow{\text{grad}}\,\rho' + \vec{g} + \frac{\nu V_\infty}{L_0^2}\Delta'\vec{V}'$$

Il apparaît donc un second nombre caractéristique $\dfrac{V_\infty^2}{gL_0}$ qui est appelé nombre de Froude.

Enfin, pour des mouvements non stationnaires, il vient :

$$\frac{\partial\vec{V}}{\partial t} + (\vec{V}\,\overrightarrow{\text{grad}})\,\vec{V} = -\overrightarrow{\text{grad}}\,\frac{P}{\rho} + \nu\Delta\vec{V}$$

τ étant l'échelle caractéristique de variation dans le temps du phénomène, et t' le rapport $\dfrac{t}{\tau}$, on peut écrire :

$$\frac{V_\infty}{\tau}\frac{\partial\vec{V}'}{\partial t'} + \frac{V_\infty^2}{L_0}(\vec{V}'\,\overrightarrow{\text{grad}})\,\vec{V}' = -\frac{V_\infty^2}{L_0}\overrightarrow{\text{grad}}\,P' + \frac{\nu V_\infty}{L_0}\Delta'\vec{V}'$$

qui fait apparaître le nombre caractéristique $\dfrac{\tau V_\infty}{L_0}$, appelé nombre de Strouhal.

Dans le cas où interviennent, non seulement le nombre de Reynolds, mais aussi le nombre de Froude et de Strouhal, la similitude a lieu quand il y a égalité de ces nombres pour les deux systèmes. Une telle condition reste donc toujours à vérifier.

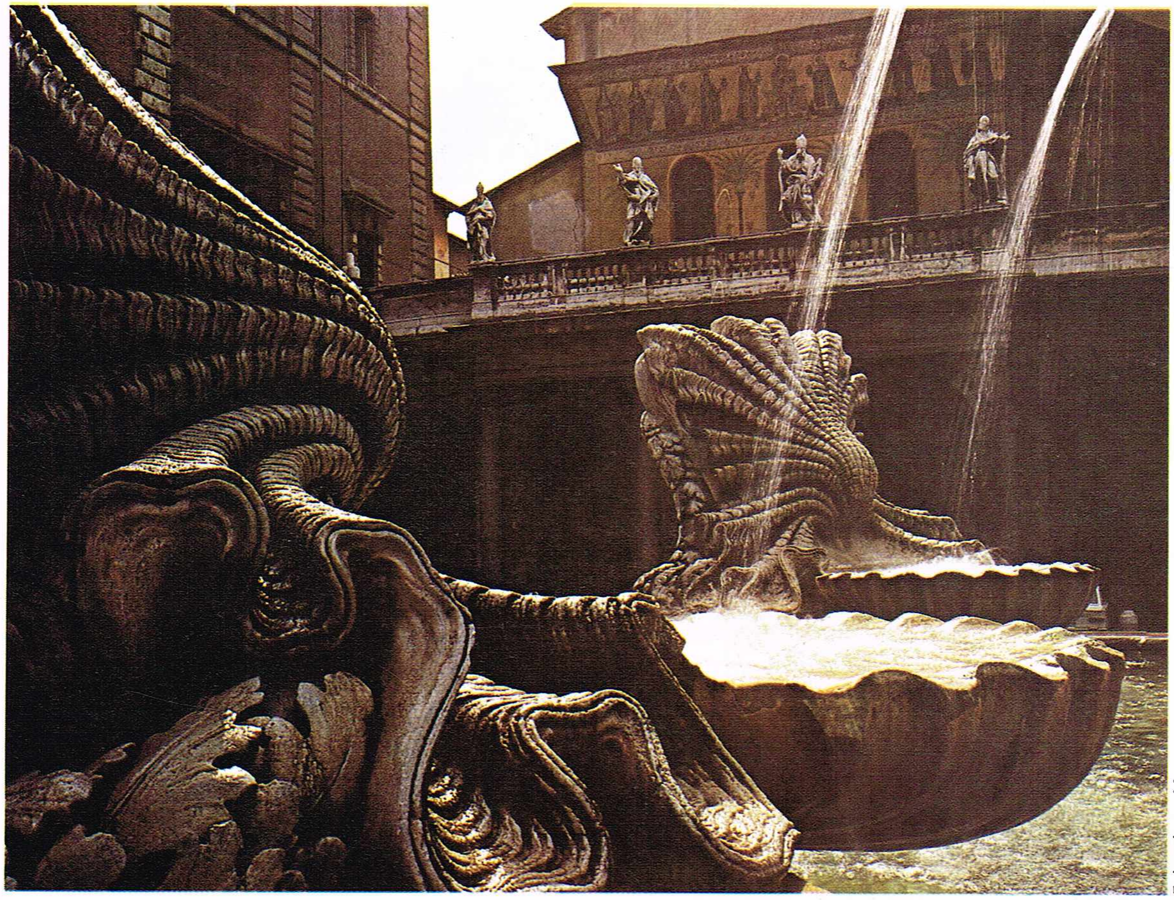

◀ *La fontaine de Sainte-Marie-du-Transtévère (Rome), un chef-d'œuvre baroque (1692) de l'architecte italien Carlo Fontana ; il est également l'auteur d'un* **Traité des eaux courantes.**

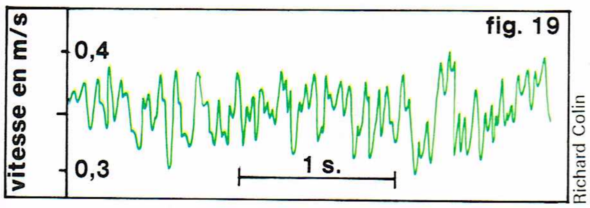

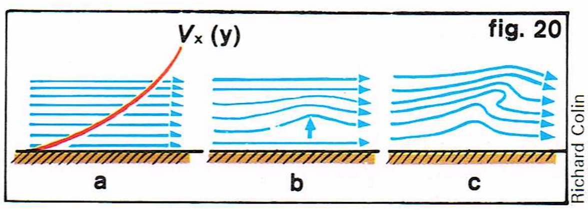

◀ *A gauche, figure 19 ; fluctuations des vitesses dans un écoulement d'eau en tube cylindrique, mesurées directement par vélocimétrie laser à effet Doppler (diamètre de l'écoulement 22,1 mm ; nombre de Reynolds $\mathcal{R}e$ = 6 500). A droite, figure 20 ; effet d'une perturbation sur un écoulement laminaire :* a, *l'écoulement est laminaire avec un profil parabolique $V_x(y)$;* b, *si une petite perturbation est créée au sein du fluide, elle tend à diffuser dans le sens de la flèche ;* c, *à plus grande vitesse, si une plus grande quantité de mouvement passe dans la perturbation, celle-ci tend à former un tourbillon.*

• *Écoulement turbulent*

Nombre de Reynolds critique

Si le débit volumique est augmenté considérablement, la structure de l'écoulement laminaire (dont les différentes couches « glissent » les unes sur les autres) n'est plus maintenue : l'écoulement devient fluctuant, le mouvement des particules de liquide étant désordonné. Ce mouvement s'effectue généralement à faible vitesse par rapport au mouvement d'ensemble du liquide, comme on peut le remarquer sur l'enregistrement des vitesses donné sur la *figure* 19. De tels déplacements d'une quelconque partie du fluide sont très complexes et ne peuvent être décrits qu'en terme de grandeurs moyennes. Ce type d'écoulement caractérise l'état d'écoulement turbulent.

Dans ces conditions, les transferts de quantité de mouvement entre domaines voisins du liquide sont très importants. Cela implique que le produit de la masse volumique ρ par la vitesse locale u joue un rôle fondamental. Plus précisément, lorsque le transfert de cette quantité de mouvement, caractérisé par le terme ρu^2, est important devant les effets visqueux représentés par le terme $\mu \frac{u}{l}$ (où μ est la viscosité dynamique et l une grandeur caractéristique de l'écoulement qui, en géométrie cylindrique, est généralement prise égale au diamètre D), le régime turbulent est atteint. Ce changement de régime est donc caractérisé par le rapport des effets d'inertie et de viscosité qui, en fonction des grandeurs moyennes, est appelé nombre de Reynolds de l'écoulement

$$\mathcal{R}e = \rho \frac{\overline{V}D}{\mu} = \frac{\overline{V}D}{\nu}$$

où $\overline{V}$ est la vitesse débitante et ν la viscosité cinématique. Tant que $\mathcal{R}e$ ne dépasse pas un nombre critique, $2 \cdot 10^3$ pour les tuyaux cylindriques à parois lisses, le mouvement laminaire sera stable, c'est-à-dire qu'il n'y aura pas de transfert important d'énergie, de l'écoulement de base vers la perturbation superposée, comme le montre la *figure* 20.

Si $\mathcal{R}e$ prend des valeurs comprises entre $2 \cdot 10^3$ et $4 \cdot 10^3$, région appelée *zone de transition*, il y a généralement passage progressif à l'état turbulent. Au-dessus de cette valeur du nombre de Reynolds, l'écoulement est complètement turbulent quelles que soient les conditions d'entrée (orifices rentrants, entrées à bords arrondis et polis ou à bords vifs), pour une distance de l'entrée supérieure à la *longueur d'établissement* du régime. Le diagramme schématique de l'écoulement est alors celui qui est représenté sur la *figure* 21. La zone TT' est d'autant plus proche de l'orifice que le degré de turbulence dans le

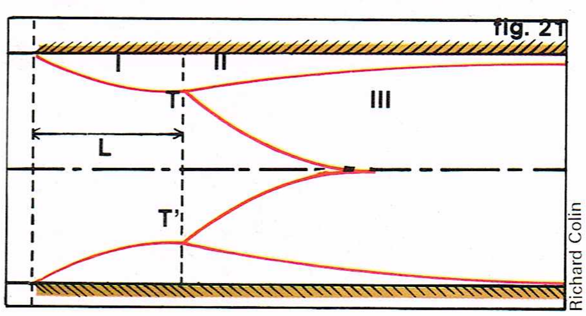

◀ *Figure 21 ; zone d'entrée dans un tube en régime turbulent :* I, *couche limite laminaire ;* II, *sous-couche limite laminaire ;* III, *cœur turbulent ;* L, *longueur d'entrée en régime turbulent.*

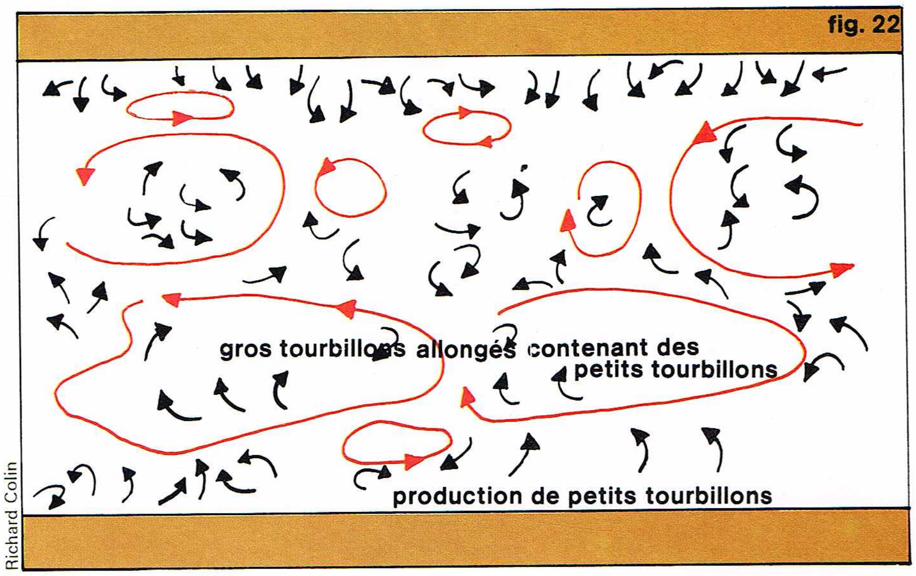

▲ *Figure 22 ; représentation schématique de la structure d'un écoulement cylindrique turbulent : les tourbillons sont superposés à un écoulement de base plus rapide ; l'observation est faite dans un système de référence lié à l'écoulement moyen ; les petits tourbillons, engendrés dans la zone des forts gradients de vitesse près des parois, diffusent dans le cœur de l'écoulement.*

réservoir est plus grand. En général, cette zone d'entrée où l'écoulement n'est pas complètement turbulent est de l'ordre d'une centaine de diamètres du tube.

Dynamique de la turbulence et distribution spectrale des fluctuations

Outre le caractère temporellement aléatoire du champ de vitesse turbulent et l'important transfert de quantité de mouvement relié aux effets d'inertie, une autre propriété de ce type d'écoulement est à noter : la turbulence est toujours associée à un caractère localement tourbillonnaire appelé encore champ aléatoire de vorticité $\vec{\omega}$ où :

$$\vec{\omega} = \overrightarrow{\text{rot}}\ \vec{u}$$

La *figure* 22 montre la turbulence dans un tube où l'écoulement tourbillonnaire est observé dans un système de référence se déplaçant à la vitesse moyenne de l'écoulement principal. Près des parois, le fort gradient des vitesses détruit les gros tourbillons qui se cassent en tourbillons de taille plus petite. Certains de ces derniers migrent vers l'axe où se trouvent les gros tourbillons.

En turbulence complètement développée, quand le nombre de Reynolds est très supérieur à la valeur critique, il y a tout un spectre de tailles des tourbillons. Les plus gros ont des dimensions comparables au diamètre du tube et contiennent la majeure partie de l'énergie cinétique du mouvement turbulent. Leur énergie n'est pas dissipée par effet de viscosité mais par interaction inertielle non linéaire et dégradation en des tourbillons de plus petite taille. Ceux-ci pouvant se dégrader à leur tour en tourbillons encore plus petits, il en résulte, pour le transfert de l'énergie cinétique de la turbulence, un *mécanisme de cascade* qui aboutit finalement à une perte d'énergie par dissipation visqueuse des tourbillons de très petites dimensions. De ce mécanisme de passage, par étape d'abord, de l'énergie de l'écoulement de base aux gros tourbillons, puis, par cascade, de ces derniers aux petits tourbillons et enfin sous forme de chaleur par dissipation par effets de viscosité, il résulte un spectre caractéristique de l'énergie des fluctuations turbulentes, dont il est donné un exemple sur la *figure* 23.

Dans la distribution spectrale d'énergie qui représente la densité des valeurs quadratiques $\sqrt{\langle u^2 \rangle}$ des fluctuations des vitesses dans l'espace des fréquences n, la valeur maximale de F (n) apparaît toujours aux basses fréquences. Pour les fréquences supérieures, on notera deux domaines différents : aux fréquences moyennes dans le *domaine inertiel isotrope*, la loi de distribution spectrale a pour équation :

$$F(n) \sim n^{-5/3}$$

aux fréquences supérieures, dans le *domaine dissipatif*, F (n) décroît plus vite du fait de l'action de la viscosité, et la relation prend la forme :

$$F(n) \sim n^{-7}$$

Tension de Reynolds

Dans un écoulement turbulent en tuyau cylindrique, la vitesse instantanée dans la direction de l'axe (x) est donnée par :

$$u_x = V + u'_x$$

où $V = \langle u_x \rangle$ est la vitesse moyenne sur une période de temps suffisamment longue pour intégrer un grand nombre de fluctuations, et u'_x la vitesse instantanée des fluctuations. Ce sont ces vitesses fluctuantes qui sont importantes pour les phénomènes de dissipation d'énergie, de transfert de masse et de chaleur dans la turbulence. L'*intensité de la turbulence* est mesurée par la valeur quadratique moyenne des fluctuations de vitesse :

$$u'_x = \sqrt{\langle u'^2_x \rangle}$$

De même, dans la direction y perpendiculaire à l'axe x, on peut décomposer la vitesse en sa partie moyenne qui est nulle, $\langle u_y \rangle = 0$, et la partie fluctuante u'_y.

Une grandeur fondamentale dans la théorie de la turbulence est le produit de corrélation des vitesses fluctuantes dans deux directions, par exemple $\langle u'_x u'_y \rangle$. Ce produit de corrélation est, en général, une quantité non négligeable du fait de la bonne corrélation des vitesses à l'intérieur d'un même tourbillon et traduit un échange intense de quantité de mouvement entre différents points du liquide. Plus précisément, les tensions équivalentes à ce transfert de quantité de mouvement, appelées *tensions de Reynolds* T_R, sont plus importantes que les tensions ayant pour origine la viscosité moléculaire. Leur expression mathématique prend la forme :

$$T_R = -\rho \langle u'_x u'_y \rangle$$

Certaines théories semi-empiriques, fondées sur la notion de longueur de mélange, permettent de relier ces tensions au gradient de vitesse moyenne, et ainsi de trouver le profil des vitesses moyennes dans l'écoulement.

Profil des vitesses moyennes

Ainsi, si l'on trace ce profil le long d'un diamètre du tube cylindrique à parois lisses (des caractéristiques similaires seraient obtenues dans le cas de conduits de section quelconque), on obtient la courbe de la *figure* 24. Ce profil peut être représenté par les expressions mathématiques suivantes. Si y désigne la distance à la paroi, on a, près des parois :

$$V = \dot{\gamma}_p y$$

où le gradient de vitesse $\dot{\gamma}_p$ est constant dans le domaine qui est appelé *sous-couche laminaire*. Dans le cœur de l'écoulement (noyau turbulent), on a :

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{y}{R}\right)^n$$

où V_0 est la vitesse sur l'axe.

La valeur de l'exposant n, voisine de 1/7, dépend du nombre de Reynolds $\mathcal{R}e$ caractéristique de l'écoulement et décroît alors que $\mathcal{R}e$ croît. Pour les forts nombres de Reynolds, on doit ainsi remplacer cette loi en puissance par la loi logarithmique :

$$V = A' + B' \operatorname{Ln} y$$

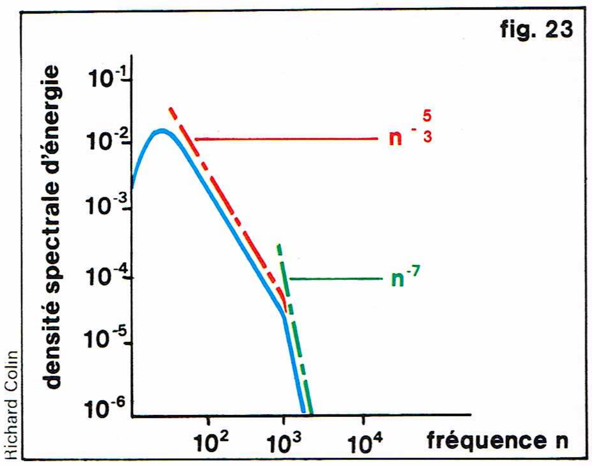

▶ *Figure 23 ; allure du spectre d'énergie des fluctuations dans un écoulement cylindrique turbulent.*

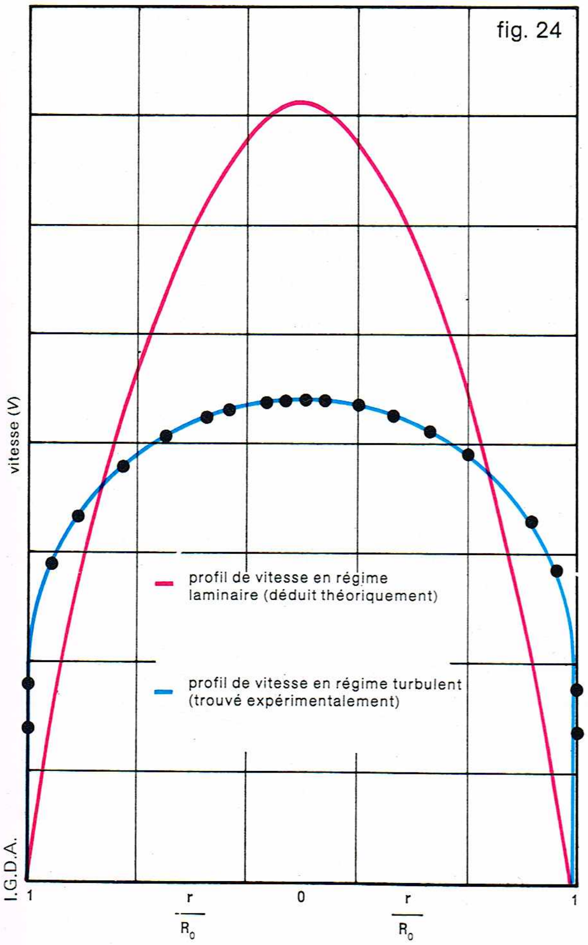

Cette loi est généralement présentée sous forme non dimensionnelle en introduisant ce que l'on appelle la *vitesse de frottement :*

$$V_f = \sqrt{\frac{\tau_p}{\rho}}$$

où τ_p est la contrainte tangentielle à la paroi. Si l'on pose :

$$y^* = \frac{yV_f}{\nu} \quad \text{et} \quad V^* = \frac{V}{V_f}$$

les deux lois précédentes s'écrivent alors, quel que soit l'écoulement turbulent en rayon cylindrique considéré :

— au voisinage de la paroi :

$$V^* = y^*$$

— dans le noyau turbulent : (1)

$$V^* = A + B\ \mathrm{Ln}\, y^*$$

où les valeurs des constantes A et B ont été déterminées expérimentalement :

$$A \simeq 5{,}5; \quad B \simeq 2{,}5$$

L'épaisseur δ_L de la sous-couche laminaire dans laquelle la vitesse est proportionnelle à la distance à la paroi est obtenue en cherchant la distance à la paroi pour laquelle les deux valeurs de V^* valables dans les différents domaines sont égales.

Dans le cas des tuyaux rugueux, si e est la hauteur des aspérités, on admet que le tuyau peut se comporter comme un tuyau lisse lorsque l'on a :

$$e < \delta_L$$

Au-delà, le tuyau est considéré comme étant rugueux, et ce d'autant plus que e est grand. Dans ces tuyaux, la loi de distribution des vitesses dépend de la hauteur caractéristique des aspérités :

$$\frac{V}{V_f} = 8{,}5 + 2{,}5\ \mathrm{Ln}\frac{y}{e}$$

Frottements et résistance à l'écoulement

Comme il a été vu précédemment, la relation entre le gradient de pression et le débit $Q = \frac{\pi D^2 \overline{V}}{4}$ ne peut être déterminée théoriquement que dans le cas d'écoulement laminaire où l'on observe un bon accord avec l'expérience. Dans le cas d'écoulement turbulent, une telle relation ne peut être qu'empirique. Cette loi, appelée *loi de frottement* ou *loi de résistance*, est généralement donnée en termes de variables non dimensionnelles en définissant le coefficient de résistance f par :

$$|\overrightarrow{\nabla} P| = \frac{f}{D}\frac{1}{2}\rho\overline{V}^2$$

Dans le cas d'un écoulement stationnaire dans un tuyau cylindrique, qu'il soit laminaire ou turbulent, le bilan des forces qui s'exercent sur un domaine compris entre deux sections, séparées d'une longueur unité, conduit à la relation suivante entre le gradient de pression $|\overrightarrow{\nabla} P|$ et la tension τ_p à la paroi :

$$\tau_p = |\overrightarrow{\nabla} P|\frac{D}{4}$$

On peut donc aussi définir le coefficient de résistance par la relation :

$$f = \frac{8\,\tau_p}{\rho\overline{V}^2}$$

◀ ***Figure 24 ; comparaison entre les profils de vitesse dans un tube : en régime laminaire (rouge), le rapport entre la vitesse maximale et la vitesse moyenne vaut 2, alors qu'en régime turbulent (bleu) ce rapport prend des valeurs considérablement plus basses, variables suivant la vitesse moyenne.***

▼ ***Écoulement à basse vitesse : les tourbillons se forment au-dessus d'une ogive inclinée sur le courant (coupe transversale à l'avant de l'ogive) [visualisation à l'aide de bulles d'air].***

▶ *Figure 25 ; diagramme de Moody pour la détermination du coefficient de frottement f dans les tubes à section circulaire. Les zones colorées correspondent à autant de types de mouvement.*

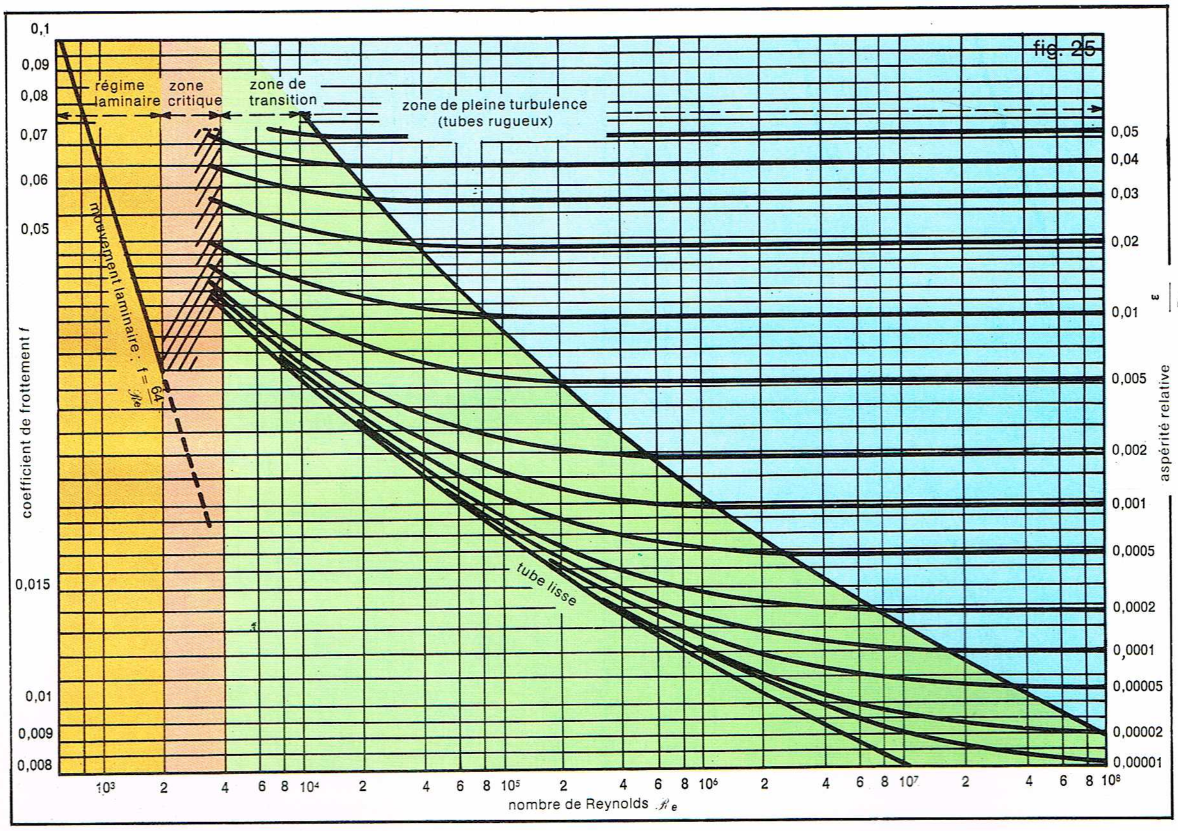

▶ *La réduction de la résistance à l'écoulement dans les lances d'incendie est une application de l'hydrodynamique où interviennent des écoulements turbulents.*

G. Peress - Magnum

qui, dans le cas de l'écoulement laminaire, conduit à :

$$f = \frac{64}{\mathcal{R}e}$$

Il est intéressant de donner ici la loi du frottement dans le cas d'écoulements turbulents qui se rencontrent dans de nombreuses applications pratiques (installations de chauffage, refroidissement des piles atomiques...). Pour les forts nombres de Reynolds, et dans le cas de tuyaux lisses, il y a une bonne concordance théorique et expérimentale entre la loi universelle des vitesses (1) et la loi de frottement suivante :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log_{10} (\mathcal{R}e \sqrt{f}) - 0{,}8$$

Dans le cas des tuyaux à parois rugueuses, le coefficient de frottement ne dépend pratiquement plus du nombre de Reynolds aux grandes valeurs de $\mathcal{R}e$, mais dépend fortement de la taille caractéristique des rugosités comme le montre la *figure* 25.

Récemment, il a été montré, expérimentalement, que des solutions aqueuses de polymères en très faibles proportions (quelques p. p. m.) peuvent donner lieu à une réduction du frottement qui peut aller jusqu'à 90 %. Cette réduction de traînée résulte de l'inhibition des pertes dues à la viscosité dans la sous-couche laminaire et à la résistance à l'étirement et au cisaillement, cette résistance étant accrue en présence des molécules à longues chaînes présentes dans les tourbillons. Déjà utilisé dans l'industrie pétrochimique, ce phénomène est d'un intérêt fondamental pour toutes les applications de l'hydrodynamique où interviennent des écoulements turbulents (réduction de traînée des sous-marins, de résistance à l'écoulement dans les lances d'incendie et dans les conduites à longues distances...).

Magnétohydrodynamique

La magnétohydrodynamique (M. H. D.) étudie les mouvements des fluides électriquement conducteurs en présence de champs magnétiques : l'écoulement d'un fluide conducteur dans un champ magnétique engendre un champ électrique d'induction et est donc le siège de courants. Ceux-ci modifient le champ magnétique initial et, par l'intermédiaire des forces magnétiques, modifient le mouvement du fluide. Ainsi apparaît un couplage des effets électromagnétiques et hydrodynamiques qui constitue le domaine de l'étude de la M. H. D. Cette interaction, par effets d'induction, est d'autant plus importante que la conductivité électrique du fluide, la vitesse et les dimensions de l'écoulement sont grandes. Ces derniers paramètres peuvent être regroupés dans un nombre sans dimension, le *nombre de Reynolds magnétique* $\mathcal{R}_M$, qui traduit l'importance du couplage; les pertes par effet Joule et par les phénomènes d'interaction sont généralement faibles ($\mathcal{R}_M < 1$) dans les métaux liquides et les gaz faiblement ionisés; par contre, les plasmas complètement ionisés sont parfaitement conducteurs et l'interaction est forte ($\mathcal{R}_M > 1$).

De nombreux phénomènes naturels, en particulier d'origines astrophysique (taches, éruptions et vents solaires) et géophysique (physique de la magnétosphère), sont interprétés en utilisant la M. H. D. : cela tient au fait que les dimensions, les vitesses et les conductivités électriques mises en jeu sont élevées, de sorte que le couplage champ-matière est important. Par contre, à l'échelle du laboratoire, les applications thermiques envisagées, tant avec les métaux liquides qu'avec les plasmas faiblement ionisés, se sont heurtées aux difficultés inhérentes à la faible conductivité et, par là même, au faible couplage. Ainsi, actuellement, les seuls développements industriels concernent-ils le pompage et le brassage électromagnétique de métaux liquides (réfrigérant sodium liquide dans les réacteurs nucléaires). Cependant, les applications de la M. H. D. aux plasmas fortement ionisés de forte conductivité, dans le domaine de l'obtention de nouvelles sources d'énergie ou de nouveaux moyens de conversion d'énergie, sont à un stade très avancé des recherches : fusion contrôlée, générateurs et moteurs M. H. D.

Hypothèses fondamentales et équations générales

La théorie de la M. H. D., régie par un système d'équations couplées obtenues à partir de la théorie de *Maxwell* et des équations de l'hydrodynamique, repose sur certaines hypothèses.

— Les phénomènes observés étant de basse fréquence, le courant de déplacement est négligeable devant le courant de conduction $\vec{J}$. La loi de Maxwell-Ampère s'écrira donc dans ce cas :

$$\overrightarrow{\mathrm{rot}}\, \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$$

— Le fluide est globalement neutre du point de vue électrique, ce qui permet de négliger la force électrique due à la charge d'espace devant la force magnétique.

— Le libre parcours moyen des porteurs de charges étant beaucoup plus petit que leur rayon de giration dans le champ magnétique, le fluide peut être considéré comme *isotrope* et, de ce fait, sa conductivité électrique comme une quantité *scalaire*.

Sous ces hypothèses, la combinaison des équations de l'électromagnétisme et de la loi d'Ohm relative à un conducteur en mouvement (vitesse $\vec{V}$) dans un champ magnétique conduit à une équation de diffusion-convection du champ magnétique :

$$(1) \qquad \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \mathrm{rot}\,(\vec{V} \times \vec{B}) + \lambda \Delta \vec{B}; \quad \mathrm{div}\, \vec{B} = 0$$

où le coefficient de diffusion λ est relié à la conductivité électrique par la relation :

$$\lambda = \frac{1}{\mu_0 \sigma}$$

(μ_0 constante magnétique du vide).

D'autre part, les équations générales de l'hydrodynamique, compte tenu de la force de Laplace, s'écrivent :

$$\frac{D\vec{V}}{Dt} = \frac{1}{\rho} \vec{J} \times \vec{B} - \frac{1}{\rho} \overrightarrow{\mathrm{grad}}\, P + \nu \Delta \vec{V}; \quad \mathrm{div}\, \vec{V} = 0$$

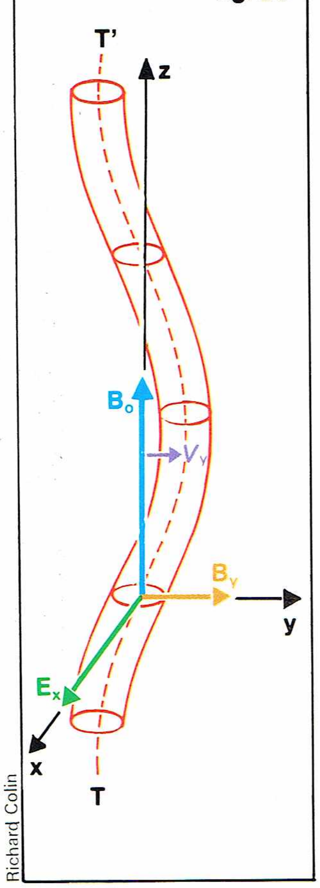

fig. 28

▲ *Ci-dessus, figure 28 ; onde d'Alfven se propageant parallèlement à un champ statique uniforme $\vec{B}_0$; TT', tube de champ déformé par l'onde ; Ex, By, Vy, perturbations des champs électrique, magnétique et vitesse dues à l'onde. A droite, figure 29 ; écoulement plan parallèle de Hartmann.*

(ρ et ν sont respectivement la masse volumique et la viscosité cinématique du fluide).

Il est intéressant de noter ici qu'il y a une importante analogie entre l'équation **(1)** de transport de $\vec{B}$ et l'équation qui décrit l'évolution de la vorticité $\vec{\omega} = \text{rot}\,\vec{V}$ dans un fluide incompressible non conducteur. En effet, en prenant le rotationnel de l'équation de Navier-Stokes, on obtient :

$$\textbf{(2)} \qquad \frac{\partial \omega}{\partial t} = \text{rot}\,(\vec{V} \times \vec{\omega}) + \nu \Delta \vec{\omega}\,; \quad \text{div}\,\vec{\omega} = 0$$

Convection et diffusion du champ magnétique

Les deux termes qui figurent aux membres de droite des équations **(1)** et **(2)** décrivent deux mécanismes différents qui font évoluer $\vec{B}$ ou $\vec{\omega}$: le premier dépend de la vitesse du fluide, le deuxième est proportionnel aux paramètres caractéristiques des pertes par frottements (viscosité ν, résistivité $1/\sigma$). Ils sont respectivement appelés :

$$\text{termes de convection} \quad \left\{ \begin{array}{c} \text{rot}\,(\vec{V} \times \vec{B}) \\ \text{ou} \\ \text{rot}\,(\vec{V} \times \vec{\omega}) \end{array} \right.$$

$$\text{termes de diffusion} \quad \left\{ \begin{array}{c} \lambda \Delta \vec{B} \\ \text{ou} \\ \lambda \Delta \vec{\omega} \end{array} \right.$$

Dans le cas où les pertes d'énergie sont faibles, les termes de diffusion sont négligeables devant les termes de convection, et l'on aboutit ainsi à la propriété caractéristique de « champ gelé » dans la matière (champ de vorticité dans le cas des fluides parfaits non conducteurs, champ magnétique dans le cas des fluides très conducteurs), comme le montre la *figure* 26. Par contre, dans le cas limite opposé où le deuxième mécanisme d'évolution est prépondérant, l'équation d'évolution de $\vec{B}$ (ou $\vec{\omega}$) est une équation classique de diffusion. Les phénomènes de diffusion tendent à atténuer une perturbation selon la loi décrite sur la *figure* 27. En un temps de l'ordre de t, la distance de diffusion est de l'ordre de $(\lambda t)^{1/2}$. Il en résulte que la pénétration d'un champ magnétique alternatif de pulsation ω se produit sur une épaisseur $\left(\frac{\lambda}{\omega}\right)^{1/2}$ (effet de peau).

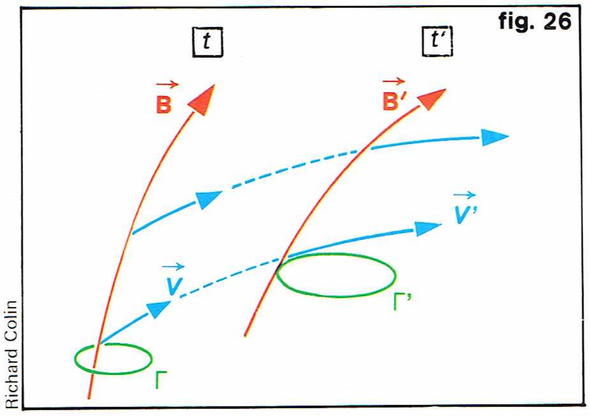

fig. 26

▶ *Figure 26 ; convection du champ magnétique « gelé » dans un fluide infiniment conducteur (il suffit de remplacer $\vec{B}$ par $\vec{\omega}$ dans le cas du fluide parfait non conducteur).*

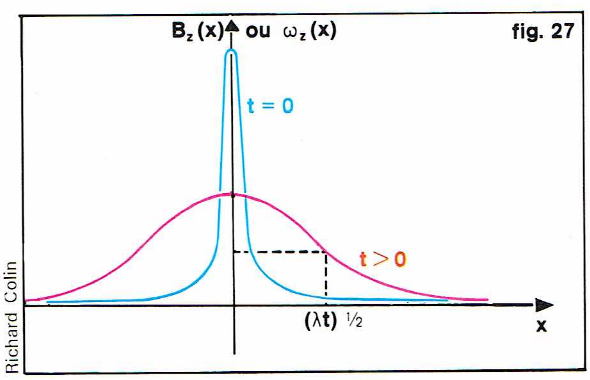

fig. 27

▶ *Figure 27 ; diffusion du champ magnétique (ou de la vorticité) dans un fluide faiblement conducteur (ou visqueux).*

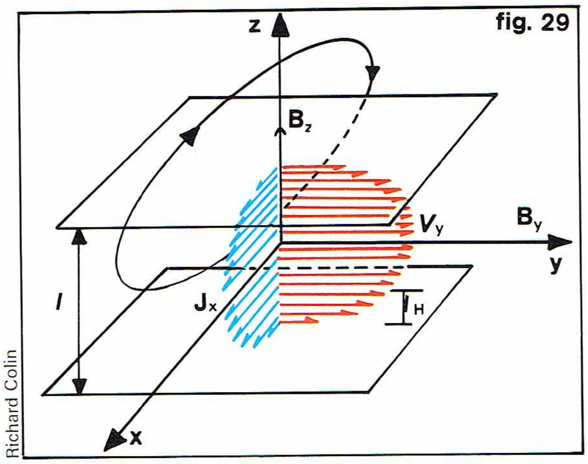

fig. 29

Il est intéressant de remarquer ici qu'une analyse dimensionnelle des équations **(1)** et **(2)** conduit à introduire des nombres de Reynolds sous forme de rapport des effets de convection et de diffusion. En effet, alors que l'on avait

$$\mathcal{R}e = \frac{Vl}{\nu} \sim \frac{\text{convection de } \vec{\omega}}{\text{diffusion de } \vec{\omega}}$$

on obtient ici :

$$\mathcal{R}_M = \frac{Vl}{\lambda} = \mu_0 \sigma V l \sim \frac{\text{convection de } \vec{B}}{\text{diffusion de } \vec{B}}$$

Ondes d'Alfven

Dans le cas des milieux fortement conducteurs, une perturbation de champ magnétique peut se propager sous forme d'ondes électromagnétiques de basse fréquence (ondes hydromagnétiques) avec entraînement, par convection, de la matière. Le cas le plus simple est celui d'ondes planes sinusoïdales à polarisation transversale et de direction de propagation parallèle au champ magnétique statique $\vec{B}_0$. La structure de telles ondes, appelées ondes d'Alfven, est décrite sur la *figure* 28. Elle résulte d'un comportement des tubes de force du champ magnétique analogue au comportement des cordes vibrantes (masse spécifique ρ, tension longitudinale magnétique $T_M = \frac{B_0^2}{\mu_0}$). On a donc, pour ces ondes, une vitesse de propagation :

$$V_A = \sqrt{\frac{T_M}{\rho}} = \frac{B_0}{\sqrt{\mu_0 \rho}}$$

indépendante de la fréquence. Pour que ces ondes se propagent sans dispersion ni atténuation, il est nécessaire que la fréquence soit suffisamment basse et que le champ magnétique ainsi que la conductivité σ soient assez élevés.

Écoulements de Hartmann

Ce sont des écoulements plans stationnaires et laminaires de fluides conducteurs ayant la structure schématisée sur la *figure* 29. On remarquera que le champ magnétique principal B_z, le courant induit J_x et la vitesse de l'écoulement V_y forment un trièdre direct ; compte tenu de la viscosité finie du fluide et des conditions aux limites, un tel écoulement possède une vorticité ω_x dont la répartition résulte de deux effets antagonistes ; la viscosité tend à faire diffuser la vorticité vers l'intérieur du fluide alors que le champ magnétique s'oppose à sa pénétration. Il en résulte une zone de confinement de la vorticité dans deux couches limites voisines des parois et dont l'épaisseur est de l'ordre de :

$$l_H = \frac{1}{B_z} \left(\frac{\rho \nu}{\sigma}\right)^{1/2}$$

Si l est la largeur caractéristique de l'écoulement, le rapport $\frac{l}{l_H} = H$ est appelé *nombre de Hartmann*. Ce type d'écoulement est utilisé dans les pompes électromagnétiques à sodium fondu de l'industrie nucléaire.

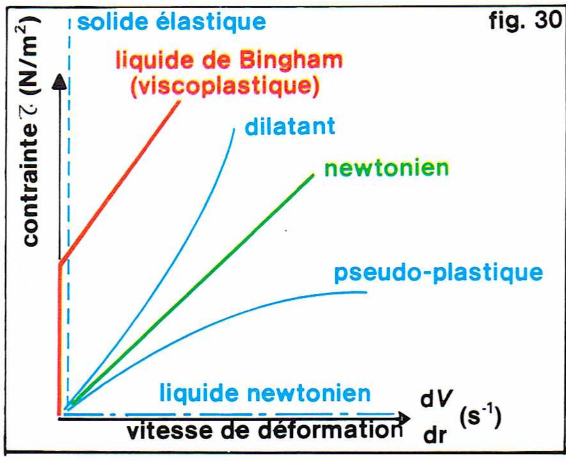

Richard Colin

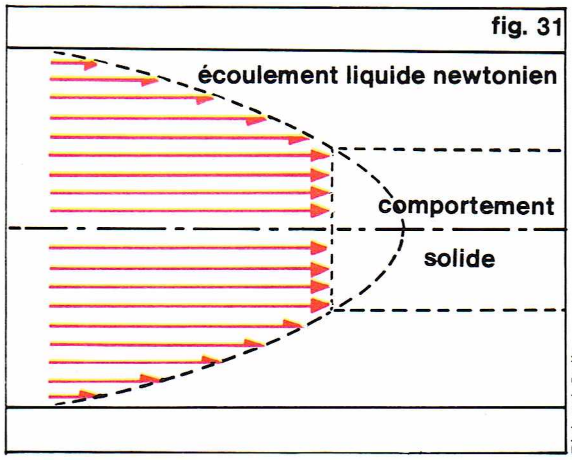

Richard Colin

◀ *A gauche, figure 30 ; lois de comportement de divers types de liquides réels. A droite, figure 31 ; profil des vitesses de l'écoulement d'un liquide de Bingham ; on remarquera que le cœur de l'écoulement pourrait être remplacé par un corps solide en mouvement de translation à vitesse uniforme.*

Applications de l'hydrodynamique

Écoulements des liquides non newtoniens et rhéologie des suspensions

La rhéologie, d'un point de vue très général, consiste à étudier la déformation de la matière. Elle s'applique, le plus souvent, aux milieux continus intermédiaires entre les liquides non visqueux et les solides indéformables. Elle a notamment pour objectif la connaissance des relations contraintes-déformations (et vitesse de déformation) des milieux à plusieurs phases, telles des solutions de polymères. Pour atteindre cet objectif, on étudie l'écoulement laminaire de tels liquides dans des géométries bien déterminées (écoulement de Couette, écoulements cylindriques...).

La loi de comportement $\left(\tau = \mu \dfrac{dV}{dr}\right)$, écrite précédemment dans l'étude du mouvement laminaire des liquides newtoniens, était utilisée en supposant la viscosité dynamique μ constante, indépendante du champ d'écoulement. En fait, cette hypothèse n'est applicable que dans le cas d'un nombre restreint de liquides (eau, glycérine...). La plupart des liquides à structure moléculaire complexe ont un comportement non newtonien.

En effet, dans le cadre général de cette loi élémentaire (où τ est la contrainte dans la direction de la vitesse $\vec{V}$ et $\dfrac{dV}{dr}$ le taux de cisaillement), il y a lieu de considérer la viscosité dynamique comme une fonction du taux de cisaillement. La *figure* 30 récapitule sur un diagramme la contrainte (τ), la vitesse de déformation $\left(\dfrac{dV}{dr}\right)$, et le comportement des principaux types de liquides (sauf les fluides appelés visco-élastiques ou thixotropes dont la viscosité dynamique dépend du temps).

Suivant la nature des interactions moléculaires (tendance à l'orientation des molécules dans le sens de l'écoulement pour les pseudo-plastiques, présence d'une contrainte seuil au-delà de laquelle disparaît une structure fortement rigide pour les viscoplastiques) ou suivant la structure des particules en suspension (effets de frottements solides des particules fortement concentrées dans le cas des dilatants), la viscosité varie en fonction de la vitesse de cisaillement. Il est à noter aussi que certains liquides de nature complexe (sang par exemple) présentent simultanément un comportement pseudo-plastique, viscoplastique et thixotrope.

La loi la plus simple rencontrée dans le cas des liquides viscoplastiques est celle du fluide de Bingham dont le comportement est newtonien (viscosité μ_0) au-delà d'une contrainte seuil τ_0, de telle sorte que la relation de comportement s'écrit :

$$\tau = \tau_0 + \mu_0 \frac{dV}{dr}$$

La *figure* 31 montre que, pour l'écoulement laminaire dans une conduite cylindrique d'un tel liquide, la vitesse est constante au cœur de l'écoulement (pour $r < r_0$, $\tau < \tau_0$, d'où $\dfrac{dV}{dr} = 0$) et présente un profil parabolique (caractéristique d'un fluide newtonien) à l'extérieur de cette zone.

En première approximation, on pourra écrire la loi du comportement des autres fluides non newtoniens sous la forme :

$$\tau = K \left(\frac{dV}{dr}\right)^n$$

où K et l'indice du comportement fluide n sont des constantes qui ne sont fonction que de l'état thermodynamique du liquide. La *figure* 32 donne l'allure des profils de

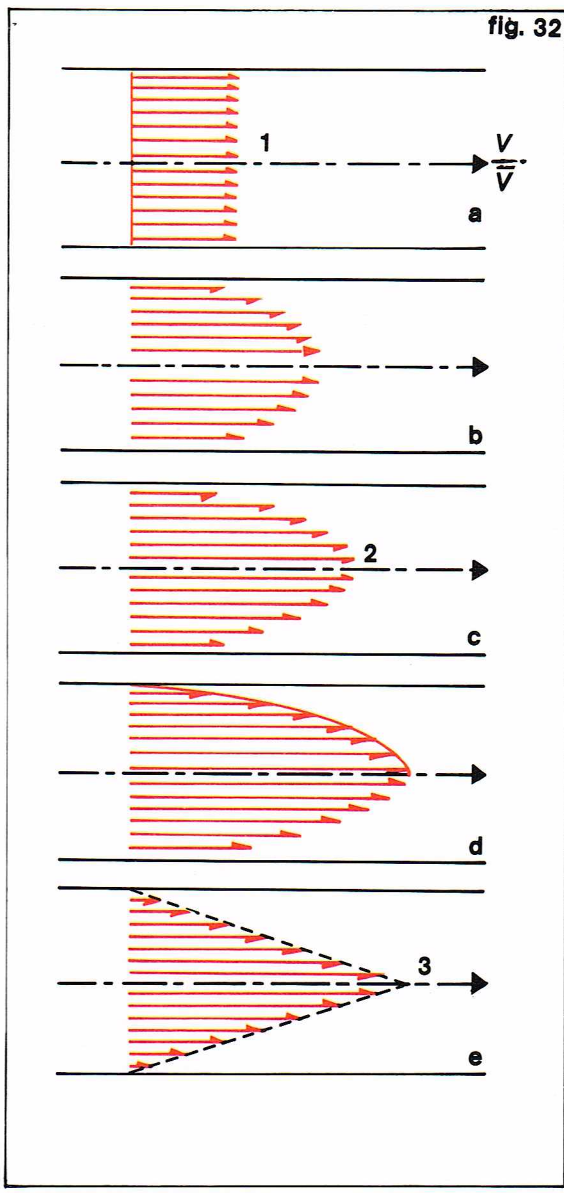

Richard Colin

◀ ***Figure 32 ; profil des vitesses d'écoulements laminaires des fluides non newtoniens en conduite cylindrique*** $\tau = K\left(\dfrac{dV}{dr}\right)^n$ **:**
a, K = 0 non visqueux ;
b, n < 1 pseudo-
c, n = 1 newtonien ;
d, n > 1 dilatant ;
e, n = ∞ cas limite du dilatant.

▶ *A gauche, figure 33 ; film de lubrifiant séparant le patin de la glissière : quand cette mince couche est poussée dans l'interface par le mouvement de la surface de la glissière, la résistance du fluide à l'écoulement a pour effet le développement d'une haute pression dans le fluide qui contrebalance la pression due à la force transmise par le support. A droite, figure 34 ; écoulement dans un coin d'huile : a, répartition des lignes de courant et des vitesses ; b, répartition des pressions.*

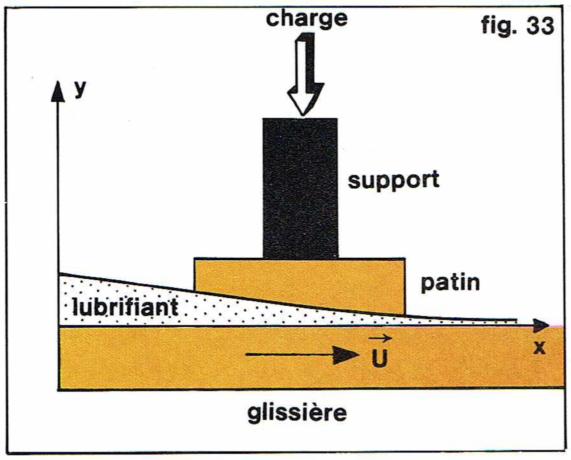

Richard Colin

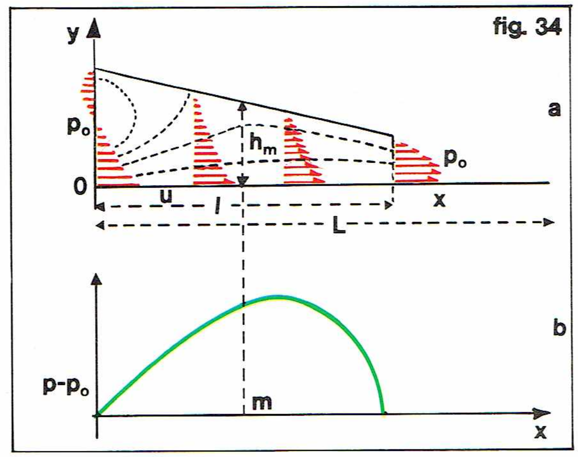

Richard Colin

vitesses obtenus pour différentes lois de comportement. On remarquera que, pour le liquide newtonien, la vitesse maximale V_{max} est égale au double de la vitesse débitante $\overline{V}$, alors que, dans le cas des pseudo-plastiques et des dilatants, les vitesses maximales sont respectivement inférieures et supérieures à celle du liquide newtonien.

Lubrification hydrodynamique

La réalisation de grandes unités mécaniques modernes, telles que les grandes turbines à axe vertical, n'a été rendue possible que grâce au graissage hydrodynamique, les solutions classiques utilisant des roulements à billes ou à aiguilles ne pouvant convenir dès que la charge est trop forte.

Dans les roulements les plus anciens et encore les plus répandus, qui utilisent ce type de graissage, un arbre tourne dans un coussinet. Le faible frottement entre ces deux pièces en mouvement relatif l'une par rapport à l'autre est assuré par l'écoulement d'un liquide visqueux (huile, graisse) entre les deux parois quasi parallèles.

En fait, la forte pression régnant à l'intérieur du lubrifiant, et que l'on observe dès que l'arbre est en mouvement, est engendrée par le mouvement du liquide lui-même. Elle est due au fait que ce liquide visqueux est forcé de passer par l'étroit passage entre l'arbre et le coussinet. Ce phénomène apparaît aussi dans le mouvement du fluide assurant le fonctionnement d'un patin sur glissière (*fig.* 33). Dans ce cas, la pression est la même aux deux extrémités du patin, et est égale, par exemple, à la pression atmosphérique P_0.

L'étude d'un tel phénomène est due à Reynolds, pionnier de l'hydrodynamique, qui remarqua que, dans ce type d'écoulement quasi rectiligne, les forces d'inertie peuvent être négligées. La distribution de la vitesse et de la pression résultantes est alors le résultat du bilan des seules forces de viscosité et de pression à l'intérieur de l'écoulement. En supposant la dimension des plaques dans la direction perpendiculaire au plan de la figure suffisamment grande, et l'angle du dièdre qu'elles forment suffisamment petit, on peut admettre que l'écoulement est longitudinal plan, parallèle à $\vec{u}$ dans la direction $\vec{x}$. L'équation fondamentale de la dynamique des fluides, dans ces conditions, se réduit à :

$$\frac{dP}{dx} = \mu \frac{d^2u}{dx^2}$$

Si nous nous déplaçons le long de *x*, nous devons tenir compte d'une variation possible du gradient de pression $\frac{dP}{dx}$, due à la variation d'épaisseur *h* du film. Toutefois, le débit total du fluide reste constant d'un bout à l'autre du patin. En tenant compte de cette dernière relation et des conditions aux limites sur la pression et les vitesses, énoncées précédemment, on obtient les distributions de pression et de vitesse schématisées sur la *figure* 34.

Un ordre de grandeur de la pression maximale P_m calculée au centre du patin (épaisseur h_m) est :

$$P_m \simeq P_0 + \frac{3}{2} \mu u \frac{l^2}{h_m^2 \ (2\,L - l)}$$

Le rapport $\frac{l}{h_m}$ pouvant être considérable, cette dernière formule montre qu'on peut atteindre de fortes pressions.

Le même raisonnement peut s'appliquer au cas de l'arbre cylindrique qui tourne à l'intérieur d'un coussinet cylindrique de diamètre légèrement plus grand, l'espace intermédiaire étant rempli d'huile. Pour que le graissage s'effectue correctement, il faut que les deux cylindres ne soient pas coaxiaux et qu'on puisse considérer qu'il existe un film d'huile important. Lors de la mise en mouvement, le frottement résulte du contact des matériaux constituant l'arbre et le coussinet, bien qu'une petite quantité de lubrifiant puisse rester dans l'interface. C'est ce qui explique les grands efforts qu'il faut parfois mettre en jeu pour faire démarrer certains mécanismes.

La lubrification hydrodynamique n'apparaît que lorsqu'un film entier s'est développé et sépare complètement les surfaces en mouvement relatif. Au début du mouvement, par l'intermédiaire du coin d'huile entraîné, une pression croissante s'exerce sur la surface du coussinet. Dans cette phase transitoire, l'axe de rotation de l'arbre se déplace, ainsi que la position du minimum d'épaisseur, sur la circonférence du coussinet (*fig.* 35).

Bien que les principes de fonctionnement de tels paliers soient connus depuis un siècle, leur technologie évolue encore par la recherche de matériaux plus résistants et de lubrifiants moins dégradables.

Hydrodynamique des superfluides

La physique des basses températures doit son existence à l'hélium liquide, réfrigérant qui permet l'étude des phénomènes apparaissant à des températures de quelques °K. En particulier, si la température de l'hélium liquide est abaissée au-dessous de 2,17 °K, ses propriétés physiques telles que densité et chaleur spécifique changent radicalement, comme le montre la *figure* 36.

De même, au-dessous de cette température critique (appelée point λ d'après l'allure de la courbe chaleur spécifique fonction de la température), les propriétés dynamiques du liquide changent brutalement. Le fluide, appelé alors hélium II, peut s'écouler à travers des pores très étroits (inférieurs à 10^{-4} cm), pratiquement sans opposer

▼ *Figure 35 ; déplacement du film de lubrifiant pendant le démarrage d'un arbre dans son coussinet.*

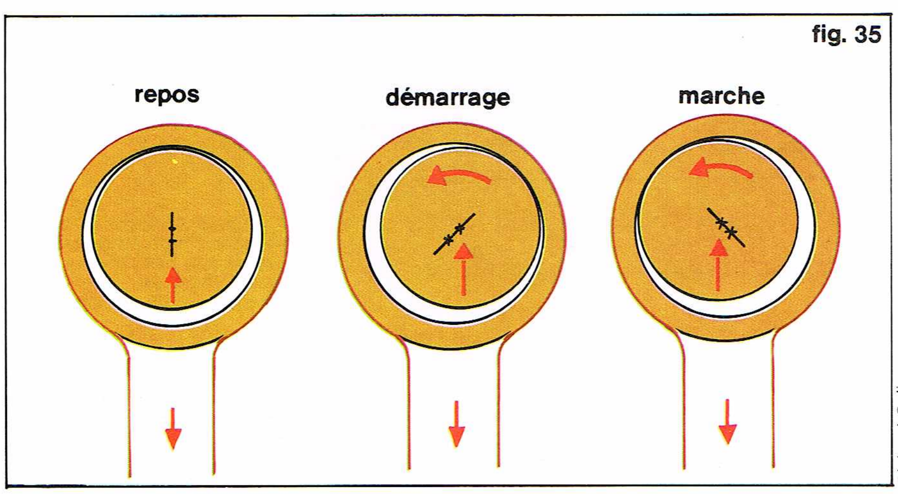

Richard Colin

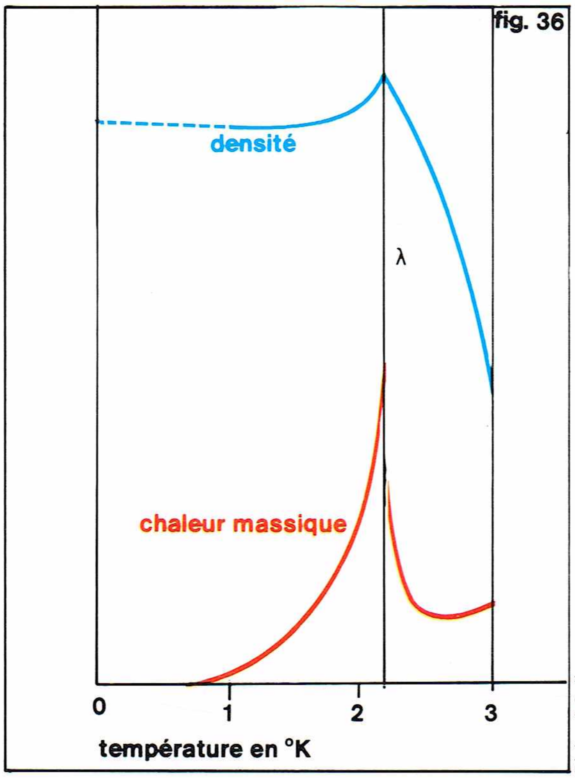

Richard Colin

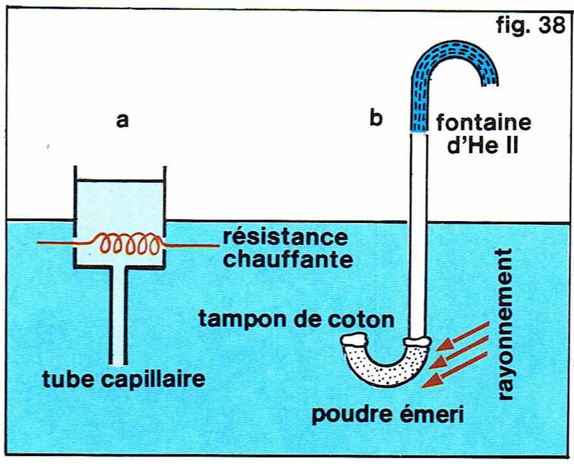

Richard Colin

◀ *A gauche, figure 36 ; la densité et la chaleur massique de l'hélium liquide présentent un maximum au point λ. A droite, figure 38 a et b : « effet fontaine » dans l'hélium II.*

de résistance. De plus, au-dessous du point λ, l'hélium liquide possède la propriété particulièrement gênante de s'échapper du récipient qui le contient par les fuites les plus petites ou par écoulement pelliculaire le long des bords internes, puis externes d'un vase dewar (*fig.* 37). D'où la qualification « superfluide » appliquée à l'He II dans cette zone de température où ce liquide se comporte comme un fluide parfait. Cependant, un phénomène contradictoire apparaît si l'on regarde le comportement d'un disque oscillant immergé dans l'hélium II : l'amortissement du mouvement conduit à conclure que sa viscosité a une valeur finie.

Ce comportement anormal se manifeste également si l'on examine les flux de masse et de chaleur qui s'effectuent dans des directions opposées. On peut l'observer, par exemple, dans l' « effet fontaine » obtenu à l'aide d'un tube capillaire dont l'extrémité supérieure est reliée à la base d'un petit récipient. L'ensemble est partiellement plongé dans un bain d'He liquide (*fig.* 38a). Si, par l'intermédiaire d'une résistance chauffante, on fournit de l'énergie à l'hélium contenu dans le petit récipient, son niveau s'élève beaucoup plus haut que l'on ne pourrait le prévoir en faisant appel à de simples effets de dilatation.

Un phénomène encore plus spectaculaire est obtenu dans le cas d'une microfuite chauffée par rayonnement et constituée par un tube rempli de poudre émeri maintenue à chaque extrémité par un tampon de coton (*fig.* 38b). On peut faire l'expérience inverse : un petit dewar dont l'extrémité inférieure ouverte est bouchée par un tampon de coton surmonté de poudre émeri est plongé dans un bain d'He II (*fig.* 39). Lorsqu'on plonge le dewar, l'hélium pénètre à l'intérieur à travers le tampon, et on observe une baisse de température ; si l'on soulève le dewar, l'hélium s'écoule, et l'on observe, au contraire, une hausse de température.

Ces expériences ont été interprétées en termes d'une théorie phénoménologique fondée sur le concept d'hydrodynamique à deux fluides : l'hélium II serait constitué d'un mélange de deux liquides, le superfluide et le fluide normal qui se meuvent à des vitesses différentes et sans interactions mutuelles. La proportion relative des deux composants dépend de la température, comme le montre la *figure* 40. Le superfluide s'écoule sans frottements et ne transporte aucune entropie ; le fluide normal est soumis à des tensions visqueuses et, par conséquent, se comporte comme un liquide ordinaire. On peut ainsi interpréter les expériences mentionnées ci-dessus en postulant que seul passe à travers les pores de faibles diamètres le superfluide.

D'un point de vue microscopique, l'hélium superfluide est un liquide quantique, c'est-à-dire qu'il est nécessaire pour décrire son mouvement à l'échelle atomique d'utiliser l'équation de Schrödinger (et non pas la loi classique de Newton). Il en résulte pour le comportement macroscopique du fluide, et en particulier pour le champ de vitesse $\vec{V}_s$ associé à son mouvement, une propriété importante :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{V}_s = 0$$

à laquelle il faut associer une quantification de la circulation de la vitesse :

$$\oint \vec{V}_s \cdot d\vec{l} = n \frac{h}{m}$$

où m est la masse de l'atome d'hélium et h la constante de Planck.

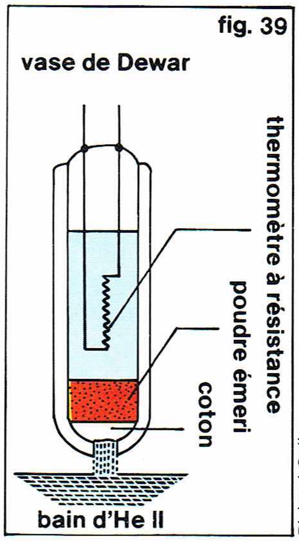

Richard Colin

▲ *Figure 39 ; phénomène mécano-thermique inverse de l'effet fontaine.*

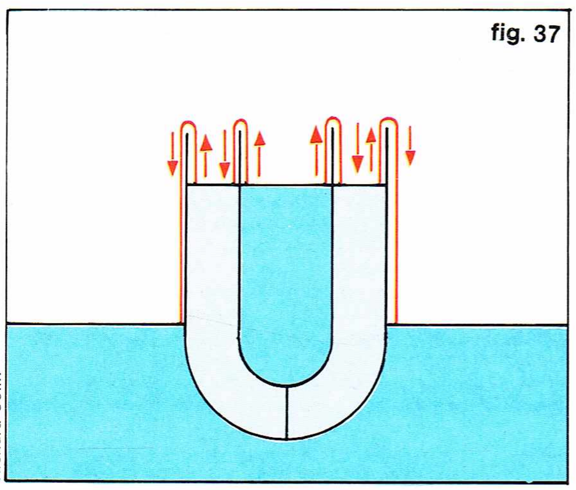

Richard Colin

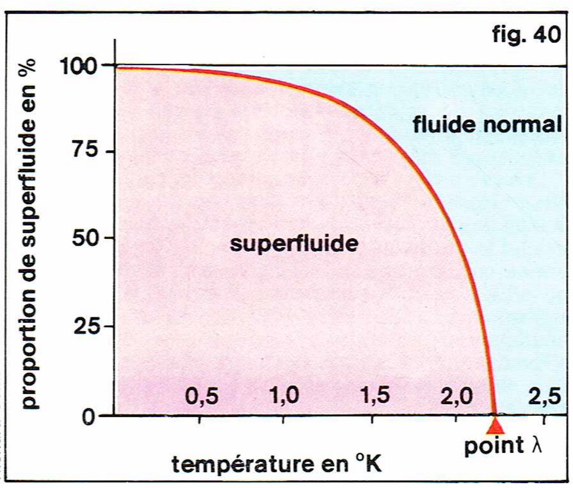

Richard Colin

◀ *A gauche, figure 37 ; transfert pelliculaire sans frottement dans l'hélium II. A droite, figure 40 ; modèle des deux fluides.*

Michelangelo Durazzo - Magnum

▲ ***Visualisation d'un vortex ou tourbillon, qui prend naissance à la surface libre d'un fluide en écoulement sous l'action de la gravité. Un tel écoulement est irrotationnel dans tout l'espace, sauf en quelques points singuliers formant des tubes tourbillons verticaux distincts.***

Différentes expériences ont été faites pour mettre en évidence cette propriété du champ de vitesse ainsi que la persistance des écoulements du liquide superfluide analogue aux courants électriques dans un supraconducteur. Cette quantification de la circulation a été observée en mesurant la force qui s'exerce sur un fil vibrant dans le liquide superfluide, fil autour duquel une circulation du liquide est établie. La force de Magnus qui s'exerce sur le fil en mouvement se traduit par un changement du plan de vibration du fil, variation mesurée par l'induction électrique induite dans ce fil qui balaye une zone de champ magnétique intense. La valeur de la circulation de vitesse trouvée par cette méthode est quantifiée, et l'on observe des valeurs de n comprises entre — 3 et + 3.

Une autre méthode consiste en la mesure de l'énergie et de la vitesse d'ions chargés d'He II. Le résultat obtenu semble paradoxal en ce sens que, plus l'énergie est grande, moins la vitesse est élevée. Ce comportement inhabituel est exactement celui qui est imposé par la dynamique d'un anneau de tourbillons. Si l'on suppose que les ions sont piégés dans les anneaux de vorticité, les résultats montrent que l'intensité de ces anneaux (circulation de la vitesse qu'ils engendrent) est h/m.

Lorsqu'un vase cylindrique contenant de l'He II est mis en rotation, le mouvement de la partie superfluide du liquide doit être différent du mouvement d'un fluide ordinaire. En effet, le fluide tend vers un mouvement qui maximalise son moment cinétique et satisfait la restriction quantique sur la circulation de la vitesse. On peut alors montrer que le mouvement résultant est celui que créent des lignes de vortex parallèles à l'axe du cylindre, qui s'étendent du fond jusqu'au sommet du vase. Ces lignes sont en nombre fini, et ce nombre est d'autant plus élevé que la vitesse de rotation du vase est grande. On peut montrer aussi qu'au-dessous d'une vitesse angulaire critique, il n'y a pas de ligne de vortex, et qu'ainsi le superfluide est immobile. Cette transition de phase quantique a été observée en mesurant le courant d'électrons capturé par les lignes de vorticité.

BIBLIOGRAPHIE

BINDER, C., *Fluids Mechanics,* Prentice Hall Inc. - BRUN, MARTINOT, LAGARDE et MATHIEU, *Mécanique des fluides,* t. I, II, III, Dunod, 1968. - CHIRGWIN B. H. and PLUMPTON C., *Elementary Classical Hydrodynamics,* The Commonwealth and International Library. - COMOLET R., *Mécanique expérimentale des fluides,* t. I : *Statique et dynamique des fluides non visqueux,* t. II : *Dynamique des fluides réels, Turbomachines,* t. III (avec BONNIN J.) : *Recueil de problèmes,* Masson, 1969. - DAUGHERLY and FRANZINI, *Fluid Mechanics with Engineering Applications,* International Student Edition, Mc Graw Hill. - DOWDELL R. B., *Flow, Its Measurements and Control in Science and Industry,* vol.1, part 1, 2, 3, Instrument Society of America. - GERMAIN P., *Mécanique des milieux continus,* Masson, 1962. - LACHNITT J., *la Mécanique des fluides,* Que sais-je ? P.U.F. n° 1054. - *L'Aérodynamique,* Que sais-je ? P.U.F. n° 752. - LAMB Sir Horace, *Hydrodynamics,* Cambridge University Press. - LANDAU L. et LIFSCHITZ E., *Mécanique des fluides,* Éditions de Moscou. - PRANDTL and TIENTJENS, t. I : *Fundamentals of Hydro- and Aeromechanics,* t. II : *Applied Hydro- and Aeromechanics,* Dover Publications Inc., New York. - TENNEKES and LUMLEY J. L., *A First Course in Turbulence,* The Mit Press. - VENNARD J. K., *Elementary Fluid Mechanics,* John Willey ans Sons Inc., 4th edition. - VON MISES R., FRIEDRICHS K. O., *Applied Mathematical Sciences,* t. V : *Fluid Dynamics,* Springer-Verlag, New York Inc. - ENCYCLOPÆDIA UNIVERSALIS. - ENCYCLOPÉDIE INTERNATIONALE des SCIENCES et des TECHNIQUES, Groupe des Presses de la Cité.

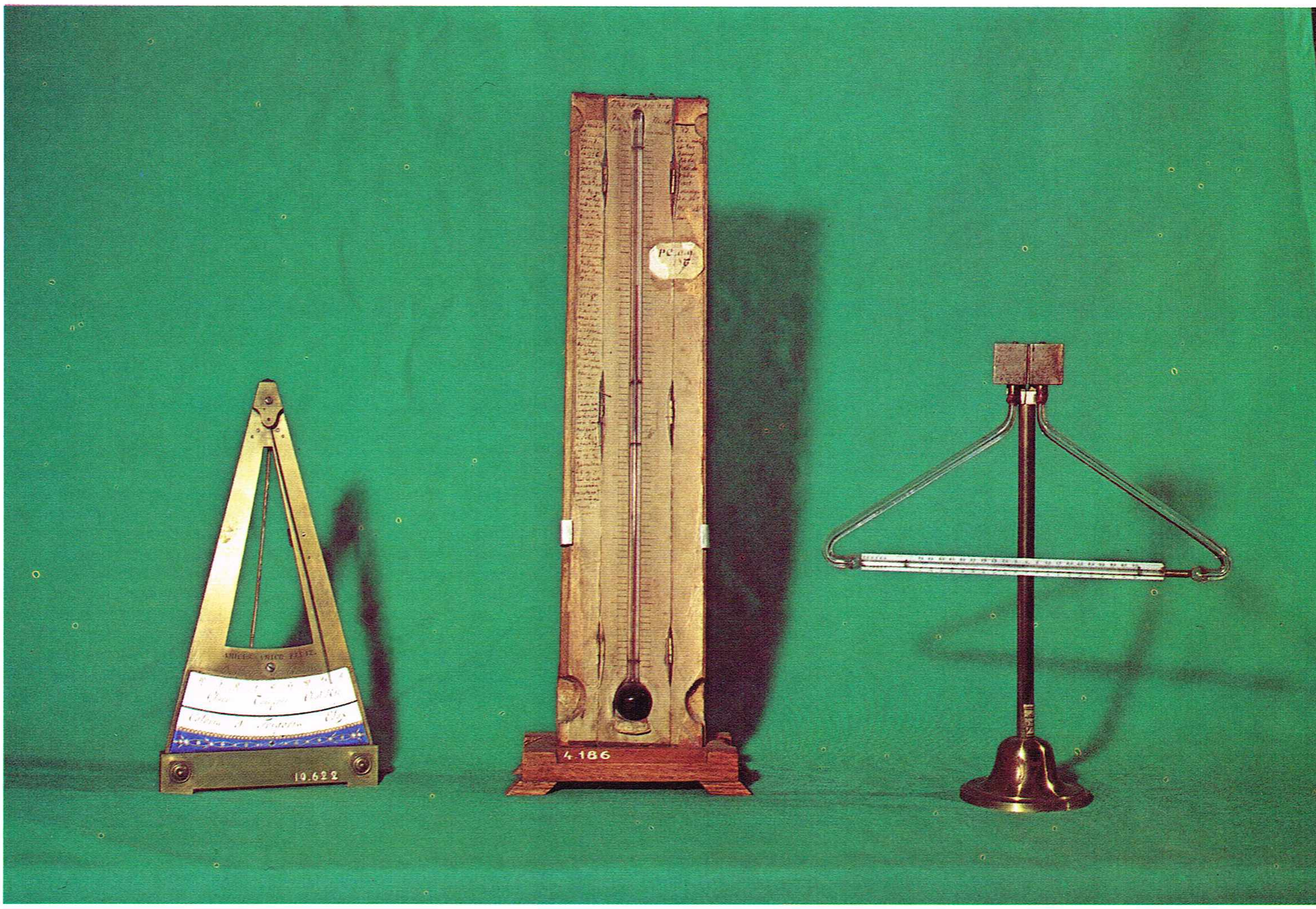

Bulloz

THERMOMÉTRIE ET THERMODYNAMIQUE

▲ ***Quelques types de thermomètres anciens; de gauche à droite : un thermomètre bimétallique; un thermomètre à alcool; un thermomètre différentiel (dû au physicien écossais J. Leslie).***

THERMOMÉTRIE

Transformations thermiques

Les transformations thermiques mettent en jeu des variations de température ou des échanges de chaleur. Leur étude fait intervenir, en plus de connaissances acquises en mécanique, des notions fondamentales que nous allons chercher à expliciter.

Température et équilibre thermique

Une première notion de température nous est donnée par le sens du toucher qui permet d'apprécier, jusqu'à un certain point, si un corps est plus chaud ou plus froid qu'un autre. Mais cette sensation physiologique est grossière et peut conduire à des erreurs : la même eau tiède paraît chaude à la main qui sort de l'eau froide et froide à la main qui sort de l'eau chaude.

Nous savons cependant ce qui se passe quand on place un corps au-dessus d'un foyer. Pendant que le corps s'échauffe, ses propriétés varient : son volume en particulier augmente, sauf rares exceptions. Lorsqu'on éloigne le corps du foyer, il se refroidit et son volume diminue. Nous pourrons donc repérer toute température du corps en la caractérisant par le nombre qui mesure son volume.

D'autre part, l'expérience montre que des corps enfermés dans une enceinte et protégés des actions thermiques extérieures finissent toujours, qu'ils se touchent ou non, par atteindre un état d'*équilibre thermique,* dans lequel leur volume ne varie plus du tout; par définition, ils sont à la même température. Si l'un d'eux sert à repérer les températures par les valeurs que prend son volume, c'est un thermomètre.

Repérage des températures et échelles thermométriques

La température attribuée à un corps à un instant donné ne doit pas dépendre du thermomètre utilisé. Repérer cette température par le volume d'un corps arbitrairement choisi n'est pas satisfaisant. Mais l'expérience montre qu'un certain nombre de phénomènes physiques, notamment la fusion et l'ébullition d'un corps pur sous une pression donnée, se produisent toujours à une température invariable : l'indication d'un thermomètre est toujours la même lorsqu'il est en équilibre thermique avec un mélange quelconque d'eau pure et de glace, par exemple.

On dispose ainsi de *points fixes* ou *repères thermométriques* dont on peut conventionnellement numéroter les températures en degrés. Le thermomètre se présente alors comme un instrument de comparaison des divers points fixes, permettant en outre d'évaluer par « interpolation » les températures intermédiaires entre celles des points fixes et éventuellement, par « extrapolation », les températures plus basses ou plus élevées.

L'échelle thermométrique normale ou Celsius, légale en France, est basée sur l'emploi de deux points fixes fondamentaux : le point de fusion de la glace et le point d'ébullition de l'eau, sous la pression atmosphérique normale, points dont les températures sont appelées respectivement 0 °C et 100 °C. La grandeur thermométrique utilisée est la pression d'une masse de gaz parfait maintenue à volume constant. (Le gaz parfait est un gaz idéal sur les propriétés duquel nous reviendrons.) La détermination des variations de pression d'un gaz à volume constant est plus facile que celle des variations de volume à pression constante, ce qui explique le choix de la grandeur thermométrique.

Si P_0, P_{100} et P sont les valeurs de cette pression à 0°, 100° et t°, l'équation thermométrique est donc :

$$\frac{t}{100} = \frac{P - P_0}{P_{100} - P_0}$$

ou $$P = P_0 (1 + \beta t)$$

et la température est donnée par : $t = \frac{P - P_0}{\beta P_0}$, le coefficient thermométrique étant : $\beta = \frac{P_{100} - P_0}{100\ P_0}$

Sa valeur, pour un gaz parfait, est $\beta = \frac{1}{273{,}16}$

Le thermomètre à hydrogène fournit des indications très légèrement différentes (sauf naturellement à 0 °C et à 100 °C) de celles que donnerait un gaz parfait ; mais il est possible de déduire d'une étude des propriétés de l'hydrogène la correction qu'il faut ajouter à ces indications pour obtenir la température normale. Cette correction est très faible aux températures usuelles (— 0,003 °C au maximum entre 0 et 100 °C ; + 0,016 °C à 200 °C).

L'emploi du thermomètre à gaz pour la définition de l'échelle normale est justifié par la possibilité de reproduire celle-ci avec certitude (moyennant les corrections dont nous venons de parler) et surtout par la facilité de passage de la température « Celsius » t à la température « thermodynamique » de lord Kelvin, qui a l'intérêt de ne pas dépendre du choix arbitraire d'un corps thermométrique. Cette dernière température est identique à la température absolue.

$$T = t + \frac{1}{\beta} = t + 273{,}16,$$

déduite de la température Celsius par un simple changement d'origine.

Pour éviter toute confusion, on est convenu de faire suivre l'indication d'une température du symbole °C (initiale de Celsius) ou °K (initiale de Kelvin), selon qu'elle est exprimée dans l'échelle normale ordinaire ou dans l'échelle thermodynamique ; le point d'ébullition de l'eau sous la pression atmosphérique normale, par exemple, s'écrit donc : t = 100 °C ou T = 373,16 °K.

On utilise encore, en Grande-Bretagne et aux États-Unis, l'échelle Fahrenheit, dans laquelle le point de fusion de la glace est numéroté 32 ° et le point d'ébullition normal de l'eau 212 °.

D'où entre les valeurs t (échelle Celsius) et t_F (échelle Fahrenheit) d'une même température, la relation :

$$\frac{t_F - 32}{t} = \frac{212 - 32}{100} \quad \text{d'où : } t_F = 32 + 1{,}8\,t$$

$$\text{et } t = \frac{t_F - 32}{1{,}8}$$

Quant à l'échelle Réaumur, correspondant à des températures $t_R = 0{,}8\ t$, elle est complètement abandonnée.

Thermomètres usuels

Le thermomètre normal à gaz est encombrant et ne se prête pas à des mesures faciles. Aussi utilise-t-on habituellement des thermomètres beaucoup plus commodes, la grandeur mesurée x pouvant être, selon le cas : le volume (apparent) d'un liquide (mercure, alcool...) dans une enveloppe transparente, la déformation d'une enveloppe solide pleine d'un liquide convenable, la longueur d'un solide, la pression d'une vapeur saturante, la résistance électrique d'un fil métallique, la force électromotrice d'un « couple » de deux conducteurs, la lumière émise par un corps incandescent, etc.

Une relation empirique ou reposant sur des bases théoriques peut être utilisée pour définir, en fonction de x, une température apparente t' (ou T') indiquée par le thermomètre considéré. Cette relation peut être linéaire (cas du thermomètre à mercure), ou plus compliquée ; elle est choisie telle qu'aux deux points fixes fondamentaux, et parfois en outre à certains autres, t' (ou T') se confonde avec la température normale t (ou avec la température thermodynamique T).

Une comparaison directe ou indirecte avec un thermomètre normal permet d'effectuer, au besoin, les corrections $t - t'$ ou T — T' à apporter aux indications du thermomètre employé.

Ce n'est qu'après avoir étudié la *dilatation des solides, des liquides et des gaz* que nous pourrons décrire en détail les thermomètres à dilatation, et surtout discuter leurs conditions d'emploi ; cette étude préliminaire nécessite elle-même un thermomètre, mais il n'y a pas là de cercle vicieux : la définition des températures donnée ci-dessus permet en effet de les déterminer, d'abord assez grossièrement, puis en se fondant sur les résultats des premières études, avec une précision de plus en plus satisfaisante.

Dilatation thermique des corps

Dilatation linéaire des solides

Sauf dans des cas exceptionnels, les solides augmentent de dimensions linéaires lorsqu'on les chauffe. Cette dilatation relativement petite s'observe mieux en l'amplifiant. Prenons l'exemple d'une tige métallique chauffée par un bec Bunsen : l'une des extrémités est fixe, l'autre s'appuie sur le plus petit bras d'un levier. Quand on chauffe la tige, l'extrémité du grand bras se déplace d'une quantité très appréciable, l'amplification obtenue pouvant atteindre facilement 50.

Donnons un autre exemple : une tige de verre se brise quand on la chauffe sans précaution dans une flamme ou quand, l'ayant chauffée sans la briser, on la refroidit brusquement en la trempant dans de l'eau froide. Cela tient au fait que le verre, mauvais conducteur de la chaleur, subit des dilatations ou des contractions locales irrégulières, d'où résultent des tensions internes provoquant la rupture.

Un tube de quartz traité de la même façon ne se brise pas, car il se dilate beaucoup moins que le verre et conduit mieux la chaleur.

▼ ***Observation de la dilatation linéaire d'un solide.***

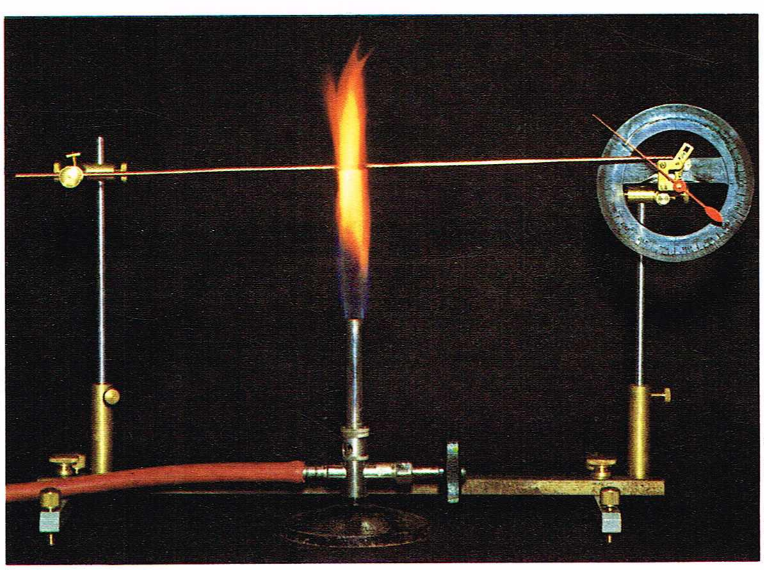

I.G.D.A. - Bevilacqua

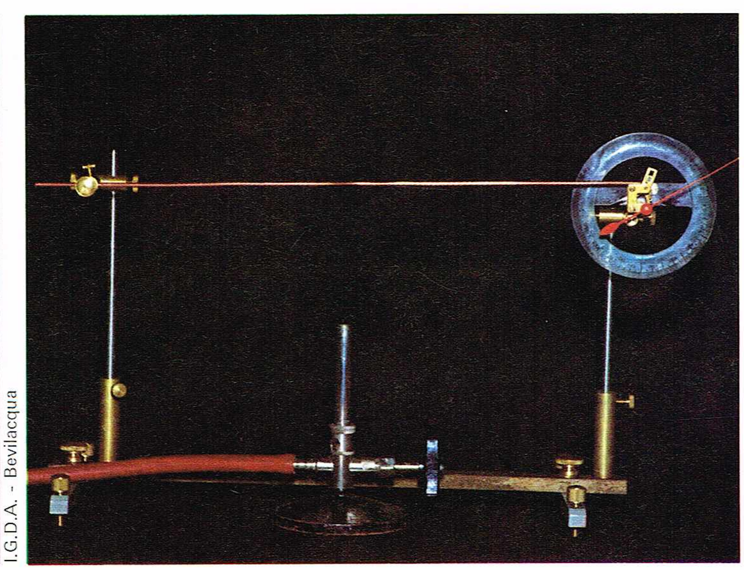

I.G.D.A. - Bevilacqua

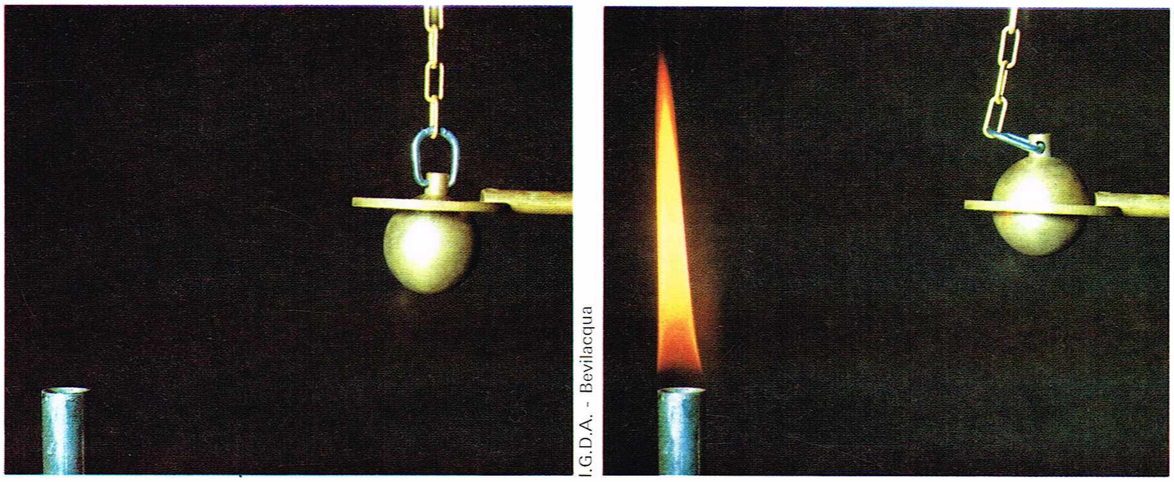

I.G.D.A. - Bevilacqua

I.G.D.A. - Bevilacqua

◄ *Observation de la dilatation cubique d'un solide.*

▼ *Conséquence de la dilatation des solides : il faut rendre possibles les variations de longueur des rails de chemin de fer.*

P. Guis - Rapho

L'allongement relatif d'une barre est proportionnel à la variation de température et au coefficient de dilatation linéaire λ, ce qu'on représente par la formule :

$$L_t = L_0\,(1 + \lambda t)$$

L_0 et L_t étant respectivement les longueurs aux températures 0 °C et t °C. Les coefficients de dilatation ne sont pas des constantes mais varient avec la température. Ils diminuent quand elle s'abaisse et s'annulent tous au zéro absolu.

— *Dilatation en volume*

Le volume d'un corps à t °C s'exprime en fonction du volume V_0 à la température 0 °C et du *coefficient de dilatation cubique* α par la formule :

$$V = V_0\,(1 + \alpha t)$$

Un solide isotrope, c'est-à-dire ayant les mêmes propriétés dans toutes les directions, se dilate en restant semblable à lui-même si sa température est uniforme. La sphère de cuivre passe librement à la température ordinaire dans l'anneau de cuivre. Quand la sphère a été chauffée seule, elle ne passe plus à travers l'anneau, mais, si on échauffe simultanément et également la sphère et l'anneau, le passage s'effectue comme à froid. Cela prouve qu'un solide creux se dilate de la même façon qu'un solide plein de même volume et de même nature.

Le volume V d'un corps isotrope étant proportionnel au cube d'une quelconque de ses dimensions linéaires l, on a :

$$1 + \alpha t = \frac{V}{V_0} = \left(\frac{l}{l_0}\right)^3 =$$

$$(1 + \lambda t)^3 = 1 + 3\,\lambda t + 3\,\lambda^2 t^2 + \lambda^3 t^3$$

Pour $t = 100°$, par exemple, λt est de l'ordre du millième, et les termes en $\lambda^2 t^2$ et $\lambda^3 t^3$ sont négligeables vis-à-vis du terme en λt.

Le coefficient de dilatation cubique est donc très sensiblement le triple du coefficient de dilatation linéaire :

$$\alpha \simeq 3\,\lambda$$

D'autre part, la *masse volumique* $\rho = \frac{m}{V}$ ainsi que le *poids volumique* $p = \frac{P}{V}$ varient pour un même corps (de masse m et poids P) en raison inverse de V.

Soit ρ_0 et p_0 leurs valeurs à 0°, ρ et p leurs valeurs à t, on a, d'après ce qui précède :

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \alpha t} \qquad\qquad p = \frac{p_0}{1 + \alpha t}$$

— *Dilatation en surface*

Un raisonnement analogue au précédent montre que la surface (ou une section) S d'un corps isotrope se dilate suivant la loi :

$$S = S_0\,(1 + 2\,\lambda t)$$

— *Conséquences de la dilatation des solides*

Nous n'en rappellerons que quelques-unes. Il faut rendre possibles les variations de longueur des rails de chemin de fer, des ouvrages métalliques (ponts), des canalisations

fig. 1

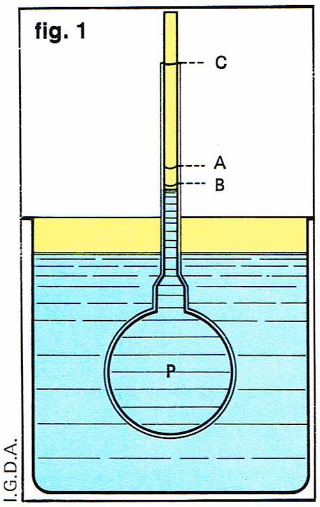

▲ *Figure 1 ; représentation schématique de l'expérience sur la dilatation d'un liquide contenu dans un ballon de verre.*

de chauffage, etc., pour éviter les ruptures quand la température varie. (Les forces nécessaires pour s'opposer aux dilatations thermiques seraient en effet considérables : 2 400 kg environ par cm^2 de section pour une tige de fer.)

Inversement, en procédant à chaud au cerclage des roues, on assure à la bande métallique refroidie une forte adhérence avec le pourtour de la roue ; le *rivetage* se fait également à chaud pour les mêmes raisons.

Pour réaliser des *soudures métal-verre* dont l'adhérence ne soit pas détruite par les variations de température ultérieures, il faut que les deux corps aient des coefficients de dilatation assez voisins : c'est ce qui arrive notamment pour le verre ordinaire et le platine ou la platinite — ou pour le verre Pyrex et le tungstène.

Les *ampèremètres thermiques* font intervenir la dilatation d'un fil fin, parcouru par le courant ou par une fraction connue du courant à mesurer ; cette dilatation, convenablement amplifiée, est transmise à une aiguille se déplaçant devant un cadran.

Notons enfin que, dans les mesures de précision, on a besoin de connaître le coefficient de dilatation d'une règle divisée pour *corriger les lectures* que l'on fait avec elle. Supposons que la règle ait été graduée en cm à 0 °C et que nous lisions qu'une certaine longueur, mesurée à la température *t*, est égale à *n* divisions ; si λ est le coefficient de dilatation de la règle, la longueur mesurée a en réalité pour valeur, en cm : $n\ (1 + \lambda t)$.

Dilatation des liquides

Un ballon plein d'un liquide est plongé dans l'eau chaude (voir la *figure* 1). Le niveau du liquide baisse d'abord un peu dans le tube, puis il remonte rapidement et s'établit au-dessus du niveau primitif.

La contraction apparente AB du début est due à la dilatation du ballon lui-même, qui précède celle du liquide, car le ballon est le premier chauffé par l'eau ; la dilatation du liquide qui se produit ensuite est plus grande que celle du ballon, puisque le niveau monte au total de A en C.

Le volume V d'un liquide à *t* °C s'exprime en fonction du volume V_0 à 0 °C par la formule :

$$V = V_0\ (1 + \alpha t)$$

α est un coefficient de dilatation *vrai*, somme du coefficient de dilatation *apparent* et du coefficient de dilatation cubique de l'enveloppe.

Alors que, pour les solides, α dépasse rarement 10^{-5}/degré, pour les liquides, habituellement beaucoup plus dilatables, α est de l'ordre de 10^{-3}/degré. L'eau présente un cas particulier, celui de se dilater d'une façon anormale : de 0 à 4 °C, son volume spécifique diminue, et au-dessus de 4 °C, il augmente. Le volume spécifique passe donc par un minimum à 4 °C, et, par suite, l'eau présente à cette température un maximum de densité.

L'éprouvette de Hope (*fig.* 2) est entourée d'un manchon dans sa partie moyenne, et les thermomètres T_1 et T_2 donnent la température de l'eau contenue dans l'éprouvette au-dessus et au-dessous du manchon. On met dans le manchon un mélange réfrigérant (M) fait avec de la glace et du chlorure de sodium. Le thermomètre T_1 reste d'abord presque invariable tandis que T_2 baisse rapidement jusqu'à 4 °C et s'arrête à cette température ; à partir de ce moment, le thermomètre T_1 baisse rapidement à son tour. Quand il atteint 4 °C, toute l'eau est à cette température, puis T_1 continue à descendre beaucoup plus vite que T_2. Au début, l'eau, refroidie par M, mais qui n'est pas encore descendue jusqu'à 4 °C, tombe au fond et refroidit T_2, puis l'eau refroidie au-dessous de 4 °C, plus légère, gagne la partie supérieure de l'éprouvette et refroidit T_1.

Un phénomène analogue se produit en hiver dans les lacs profonds : la congélation de l'eau se trouve ainsi retardée. En outre, quand de la glace se forme à la surface, les couches inférieures peuvent rester longtemps à 4 °C.

Parmi les conséquences de la dilatation des liquides et des solides, citons à titre d'exemple les corrections à effectuer dans l'usage des baromètres et manomètres à mercure ; une hauteur *h* mesurée à *t* °C correspondrait à 0 °C à une hauteur :

$$h_0 = \frac{h}{1 + \alpha t}$$

Si, d'autre part, la lecture de *h* est faite avec une règle métallique de coefficient de dilatation linéaire λ, la hauteur *h* correspond à une lecture

$$h_1 = \frac{h}{1 + \lambda t}$$

D'où :

$$h_0 = h_1 \frac{1 + \lambda t}{1 + \alpha t} \simeq h_1\ [1 - (\alpha - \lambda)\ t]$$

A une température de 20 °C et à la pression atmosphérique normale, $\alpha = 18 \cdot 10^{-5}$/degré pour le mercure et $\lambda = 2 \cdot 10^{-5}$/degré pour le laiton, d'où :

$$h_1 = h_0\ (1 - 3 \cdot 10^{-3})$$

La correction est de l'ordre de 3 millièmes.

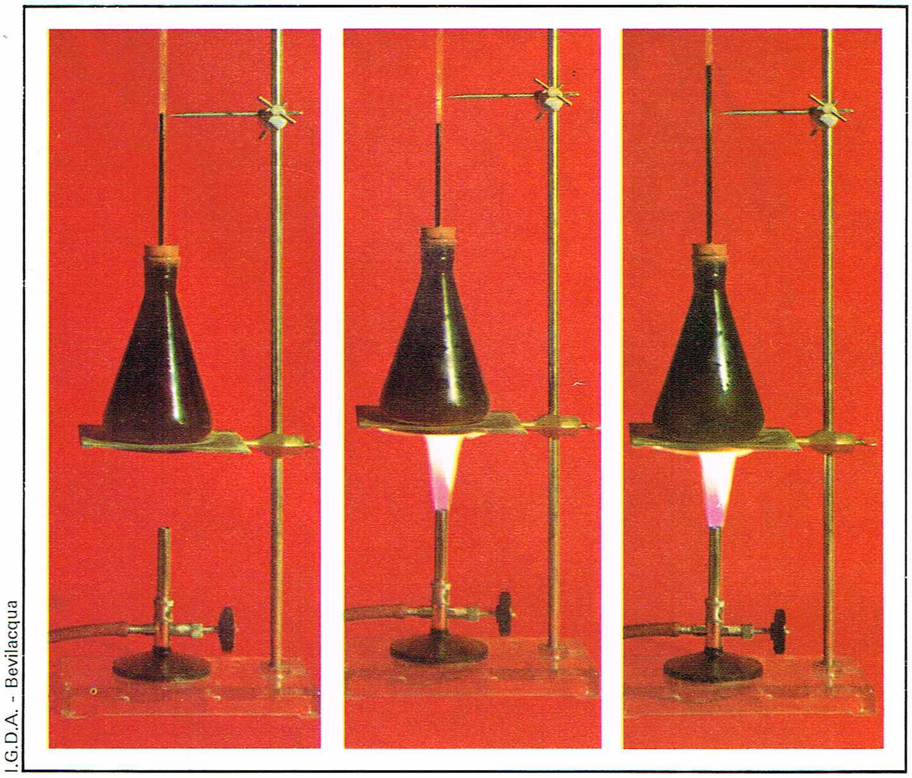

▼ *A gauche, dilatation d'un liquide : au début, l'enveloppe de verre se dilate plus que le liquide, le niveau baisse dans le tube (au centre), puis remonte (à droite) et s'établit au-dessus du niveau primitif. A droite, figure 2 ; schéma de l'éprouvette de Hope qui permet de montrer que l'eau se dilate de façon anormale.*

fig. 2

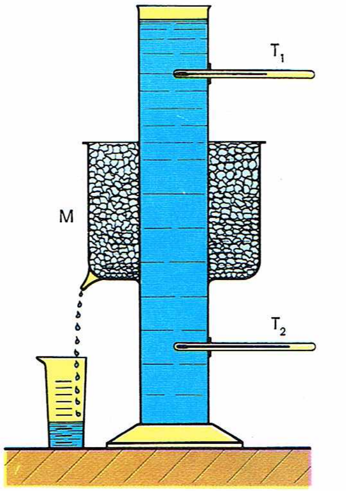

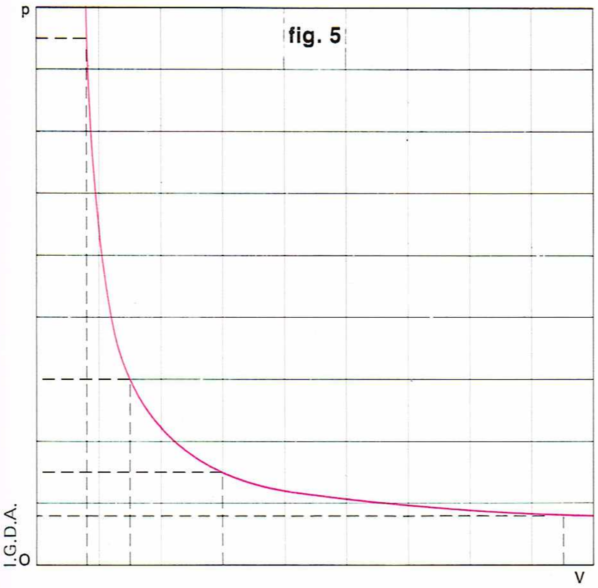

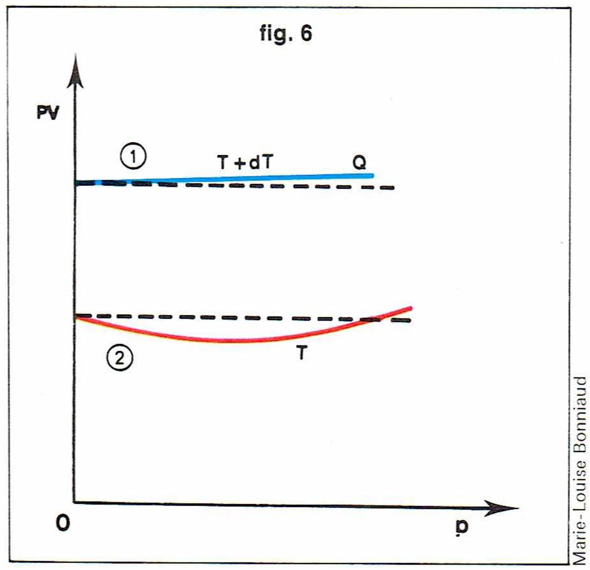

◀ *A gauche, figure 5 ; isotherme d'un gaz parfait ; d'après la loi de Mariotte, c'est une hyperbole équilatère.*
A droite, figure 6 ; isothermes d'Amagat : en pointillé, gaz parfait ; (1), gaz plus compressible qu'un gaz parfait ; (2), gaz moins compressible qu'un gaz parfait.

Dilatation des gaz

Les dilatations des solides et des liquides dont nous avons parlé précédemment étaient implicitement supposées produites à *pression constante* par une élévation de température. Les liquides et les gaz étant peu compressibles, une faible variation de pression n'entraîne d'ailleurs que des variations négligeables. En ce qui concerne les gaz, il en est tout autrement, et il est indispensable de préciser les conditions de l'échauffement. On considère ici deux cas simples : échauffement soit à pression constante, soit à volume constant.

Premier cas. L'air du ballon de la *figure* 3 placé à la température ambiante est séparé de l'air atmosphérique par l'index I qui coulisse dans le tube. Quand on pose la main sur le ballon, l'index se déplace vers la droite. Le volume augmente, mais pas la pression, qui est toujours égale à la pression atmosphérique. Les volumes d'air V et V_0 aux températures t °C et 0 °C, respectivement, sont liés par la relation :

$$V = V_0\ (1 + \alpha t)$$

Pour beaucoup de gaz, le coefficient de dilatation est indépendant de la température et vaut comme l'a indiqué Gay-Lussac, en 1802, environ $\frac{1}{273,15}\ d^{\circ -1}$.

Second cas. Prenons maintenant l'exemple d'une variation de pression à volume constant (*fig.* 4) : dans le ballon, l'air est d'abord à la pression atmosphérique, et, dans le tube qui a la forme d'un U, les niveaux en A et B sont d'abord dans le même plan horizontal. Quand on met la main sur le ballon, on fait monter le liquide de B en B' tandis que le niveau A descend très peu, en raison de la plus grande section du tube en ce point. La pression a donc augmenté sans variation notable du volume. Les pressions P et P_0 à t °C et 0 °C, respectivement, sont liées par la relation :

$$P = P_0\ (1 + \beta t)$$

β étant le coefficient de variation de pression à volume constant. Pour la plupart des gaz, β vaut environ $\frac{1}{273}$.

— *Gaz parfaits*

On appelle gaz parfaits ceux qui obéissent à toute température à la loi de Boyle-Mariotte (ou loi de Mariotte tout court) :

Le produit de la pression d'une masse donnée d'un gaz parfait par son volume ne dépend que de la température.

Supposons alors qu'un gaz parfait occupe à 0 °C, sous la pression P_0, le volume V_0 ; à t °C, il occupera le volume $V_0\ (1 + \alpha t)$ à la pression P_0 ou bien le volume V_0 à la pression $P_0\ (1 + \beta t)$.

Les produits de la pression par le volume dans les deux cas sont égaux :

$$P_0V_0\ (1 + \alpha t) = P_0V_0\ (1 + \beta t)$$

Donc $\alpha = \beta$. D'une manière générale, P et V étant la pression et le volume à la température t °C d'une mole de gaz :

$$PV = P_0V_0\ (1 + \beta t) = P_0V_0\beta \left(t + \frac{1}{\beta}\right)$$

En posant :

$$R = P_0V_0\beta$$

et

$$T = t + 273,15$$

où R est la *constante des gaz parfaits* et T la *température absolue*, l'*équation caractéristique* des gaz parfaits s'écrit alors :

$$PV = RT$$

La *figure* 5 illustre la loi de Mariotte. On a porté en abscisse le volume d'une masse de gaz, en ordonnée la pression; pour une température donnée, la courbe, appelée isotherme de Clapeyron, a l'allure d'une hyperbole.

— *Gaz réels*

Aucun gaz n'est parfait, et les expériences qui établirent qu'aucun gaz ne suit exactement la loi de Mariotte sont dues à Reynault (1874). Elles montrèrent qu'à la température ordinaire et pour des pressions comprises entre 1 et 15 atmosphères, tous les gaz sont plus compressibles que ne l'indique la loi de Mariotte, sauf l'hydrogène. Cependant, aux faibles pressions, jusqu'à 1 atmosphère environ, les écarts à la loi de Mariotte sont faibles, et on assimile souvent les *gaz réels* aux gaz parfaits.

Les résultats de l'étude « thermométrique » d'un gaz peuvent être traduits par des réseaux de courbes *isothermes*, correspondant chacune à une température déterminée. Les isothermes de Clapeyron représentent comme on vient de le voir les variations de la pression en fonction du volume : ce seraient des hyperboles équilatères pour un gaz parfait. Il est souvent plus avantageux de considérer les isothermes d'Amagat, représentant les variations du produit PV en fonction de la pression P : ce seraient des droites d'ordonnées constantes $PV = nRT$ pour un gaz parfait. Elles sont en réalité incurvées, comme l'indique la *figure* 6 : quand la température est assez basse, le produit PV diminue lorsque la pression augmente à partir d'une valeur faible. Le gaz est alors « plus compressible que le gaz parfait », les écarts relatifs étant, lorsqu'on passe de 1 à 2 atmosphères, de l'ordre du millième pour les gaz difficiles à liquéfier, et pouvant dépasser le centième pour les autres.

Toutes ces notions sur la dilatation thermique vont nous être utiles maintenant que nous allons aborder l'étude des principaux types de thermomètres.

Principaux types de thermomètres

Le tableau ci-après (Tab. I) fournit la liste de quelques-uns des thermomètres le plus souvent utilisés, ainsi que les domaines d'utilisation. Il existe des thermomètres très divers convenant chacun plus ou moins bien à tel ou tel usage. Les températures extrêmes mesurables à l'aide d'un type donné d'appareil résultent des propriétés des matériaux utilisés et des lois de variation de la grandeur thermométrique ; les valeurs mises entre parenthèses cor-

▼ *Figure 3 ; dilatation d'un gaz à pression constante.*

fig. 3

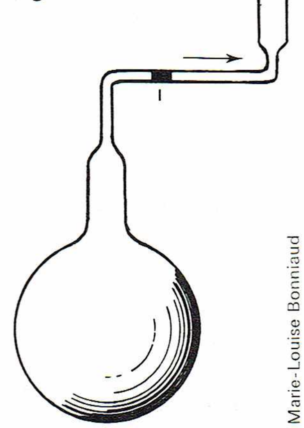

▼ *Figure 4 ; variation de la pression d'un gaz à volume constant.*

fig. 4

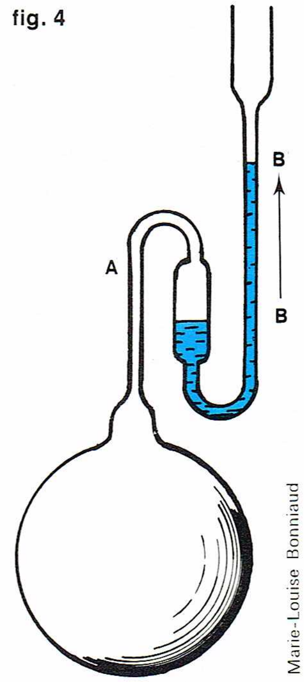

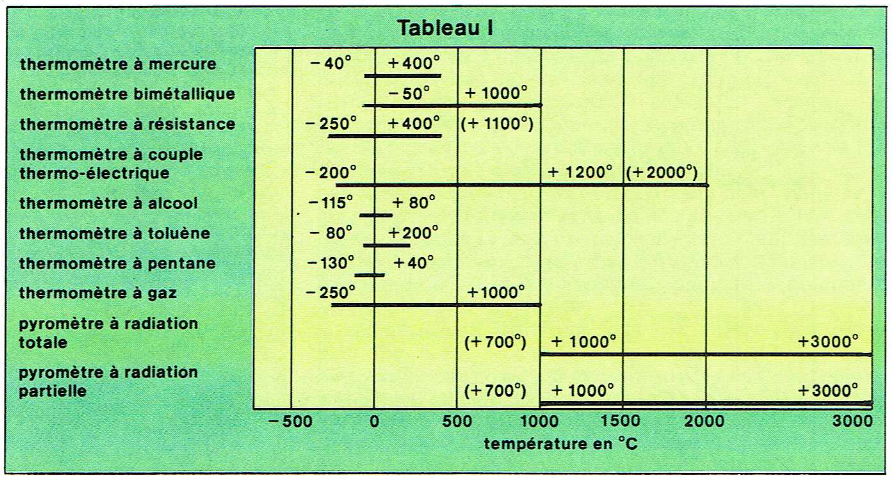

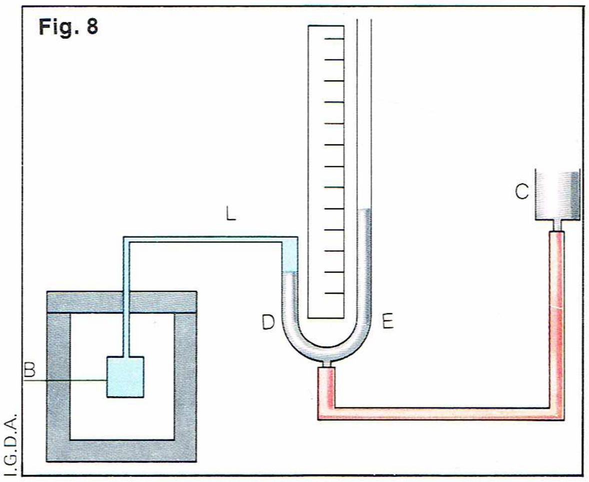

▲ *A gauche, tableau I; ce tableau indique les domaines d'utilisation des thermomètres les plus courants. A droite, figure 8; représentation schématique du thermomètre « normal ».*

respondent à des cas exceptionnels. Bien entendu, les limites d'emploi d'un instrument déterminé peuvent être réduites, de façon à augmenter la *sensibilité* de lecture.

Celle-ci peut se définir d'après la variation d'indication observée pour une augmentation donnée de la température, un degré par exemple. Mais l'exactitude des résultats n'est pas conditionnée seulement par la sensibilité; il faut encore que le thermomètre soit assez *fidèle*, c'est-à-dire que les lectures ne soient pas faussées d'une façon excessive par des facteurs fortuits, tels que les échauffements subis antérieurement par l'instrument : nous verrons combien fâcheuse est parfois l'influence des « résidus de dilatation » des solides.

Nous indiquerons plus loin quelques-unes des corrections qu'il faut apporter aux résultats bruts pour tenir compte de certaines causes d'erreur et, en particulier, *rattacher à l'échelle normale* les températures mesurées. Une grave incertitude tient parfois à ce qu'une partie du thermomètre n'est pas située dans l'enceinte dont on veut mesurer la température, ou encore à ce que cette température est modifiée par la présence même de l'instrument, d'où résulte un transfert de chaleur. Il est souvent nécessaire que le thermomètre ait une faible « capacité calorifique » et fournisse rapidement son indication définitive. Enfin, la commodité d'emploi, l'encombrement, la fragilité et le prix des appareils sont des facteurs dont il faut bien tenir compte.

Comme on l'a déjà indiqué, la détermination des températures normales est fondée sur l'emploi des deux *points fixes fondamentaux* 0 et 100 °C (*fig.* 7).

Le *point zéro* est la température d'équilibre entre la glace pure et l'eau pure saturée d'air, sous la pression atmosphérique (les variations courantes de cette dernière sont sans influence appréciable). Si l'on opère soigneusement, dans un vase bien isolé avec de la glace finement divisée, cette température est reproductible à quelques dix-millièmes de degré près.

Le *point cent* est la température d'équilibre entre l'eau liquide pure et sa vapeur, sous la pression atmosphérique normale. Cette température dépend en effet de la pression.

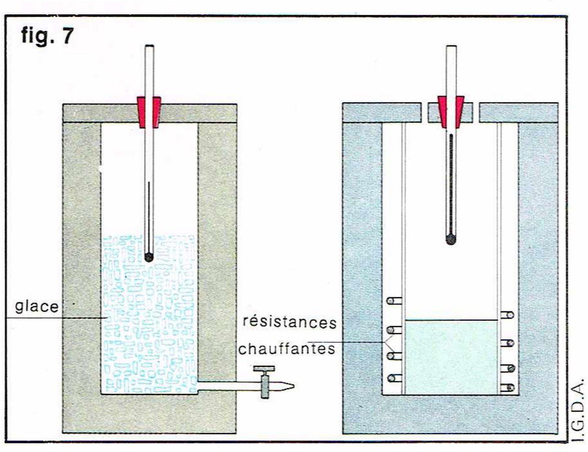

▶ *Figure 7; prise du point « zéro » et du point « cent ».*

Il existe un certain nombre d'autres repères correspondant à des changements d'état d'un certain nombre de corps purs sélectionnés. Tous ces changements d'état doivent se faire sous pression atmosphérique normale.

Thermomètres à dilatation

— *Thermomètre à gaz*

Il existe deux types de thermomètres à gaz : ceux qui sont fondés sur la variation de volume à pression constante dont l'échelle est définie par la relation linéaire $V = V_0\,(1 + \alpha t)$, et ceux qui utilisent la variation de pression à volume constant et dont l'échelle est définie par $P = P_0\,(1 + \beta t)$.

On décrira ici le fonctionnement du thermomètre « normal », dans lequel on mesure la variation de pression d'un gaz maintenu à volume constant (*fig.* 8).

Le réservoir B contient quelques centaines de cm^3 d'un gaz. Il est réuni par un tube capillaire L au manomètre à mercure DE qui donne la pression P dans B. Le réservoir de mercure C qu'on peut monter ou descendre sert à maintenir constant le volume de gaz de B. De la relation entre la pression et la température ci-dessus, on tire :

$$T\ (°K) = 273{,}15\ \frac{P}{P_0}$$

Le thermomètre normal, utilisable entre — 250 °C et 1 000 °C, d'emploi difficile, n'est utilisé que dans quelques laboratoires. Il sert essentiellement à la détermination de repères thermométriques et à l'étalonnage de thermomètres plus commcdes par comparaison des indications des deux appareils dans des enceintes à température uniforme.

— *Thermomètre à mercure*

Ces instruments très connus indiquent la température d'après le volume *apparent* V d'une certaine masse de mercure dans une enveloppe de verre; ils ressemblent à des dilatomètres à liquides. L'enveloppe comporte un réservoir, dont le volume est de l'ordre du cm^3, raccordé à un tube capillaire, appelé tige du thermomètre, dont la section interne a un diamètre de quelques dixièmes de millimètre (*fig.* 9).

La tige et le réservoir sont en verre; le réservoir est à parois minces pour faciliter la mise en équilibre thermique. Le remplissage se fait avec du mercure bien pur et de façon à éviter d'emprisonner de l'air dans l'instrument; la partie de la tige opposée au réservoir est scellée après expulsion de l'air. Elle comporte souvent une petite ampoule permettant la dilatation du mercure au-delà de la température maximale prévue.

La masse du mercure et la longueur de la tige peuvent être telles qu'à 0 et 100 °C le niveau du liquide se trouve dans le capillaire en deux points que l'on marque 0 et 100 sur la tige. Cet intervalle 0-100 est divisé en 100 parties égales et éventuellement prolongé en deçà du point 0 et au-delà du point 100. Cette division en parties d'égale longueur équivaut, si la section du tube est partout la même, à une division en parties d'égal volume. Le coefficient k de dilatation apparente du mercure dans le verre, quelque peu variable selon le verre employé, est voisin de $\frac{1}{6\,400}$, c'est-à-dire que l'augmentation du volume V cor-

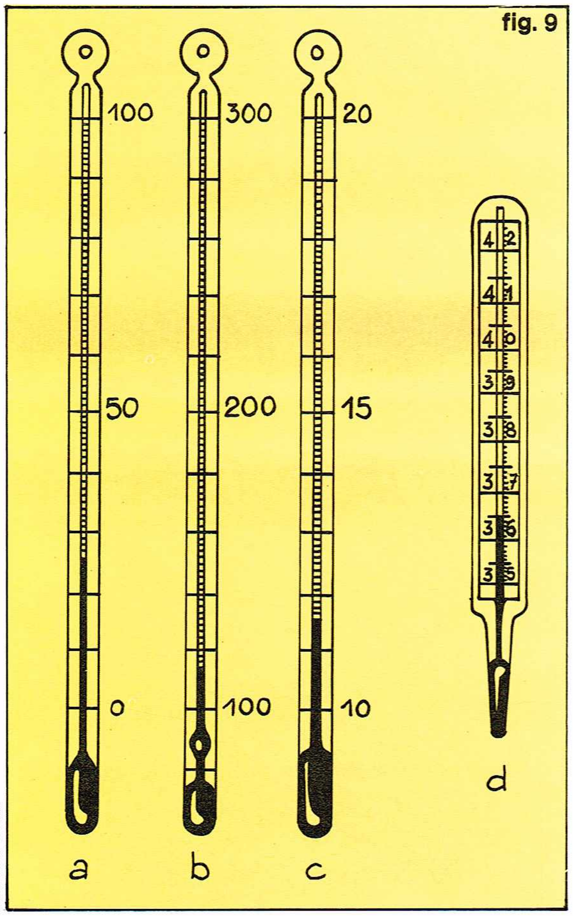

Richard Colin

respondant à un échauffement de 1° est 6 400 fois plus petite que le volume apparent V_0 du mercure à 0°.

La graduation étant tracée sur la partie externe de la tige, les lectures doivent être faites de façon que le rayon visuel soit normal à l'axe du thermomètre, pour éviter les « erreurs de parallaxe » ; on s'aide au besoin d'une loupe ou d'un viseur (grossissement 5 à 10). L'écart entre deux traits de la graduation est habituellement de l'ordre du millimètre ou du demi-millimètre, ce qui peut correspondre, selon les instruments, à un ou plusieurs degrés, dixièmes ou centièmes de degré. La longueur totale de la tige, généralement comprise entre 10 et 20 cm, détermine un domaine de mesures d'autant plus réduit que la longueur du degré est plus grande.

Si l'on ne désire pas que ce domaine de mesures comprenne les points 0 et 100 °C (cas des thermomètres pour la météorologie, la calorimétrie, la cryoscopie...), l'instrument est gradué par comparaison avec un autre, étalonné aux points fondamentaux. On peut aussi introduire dans la tige de petits réservoirs auxiliaires de volume convenable, connu en fonction de celui qui correspond à un degré, de façon à permettre les lectures à 0 et à 100 °C, ainsi que dans le domaine d'emploi désiré.

On ne peut naturellement pas dépasser le point de ramollissement du verre (500 °C, jusqu'à 600 pour certains verres). D'ailleurs, en ce qui concerne les thermomètres destinés à mesurer des températures dépassant 300 °C, on doit éviter la distillation du mercure vers les parties froides de la tige ; on emprisonne à cet effet dans la partie de la tige habituellement vide un gaz n'agissant pas sur le mercure (azote).

La limite inférieure d'emploi des thermomètres à mercure est le point de congélation de ce métal : — 38 °C.

Un autre cas où l'échelle est très réduite est celui des *thermomètres médicaux,* gradués en dixièmes de degré (*fig.* 9d), sur quelques degrés de part et d'autre de 37 °C. Ce sont des thermomètres *à maximum :* leur tube capillaire est rétréci et contourné un peu au-dessus du réservoir, ce qui empêche le mercure de redescendre de lui-même après qu'il a atteint le niveau le plus élevé : la colonne liquide se brise au refroidissement. Il faut secouer l'appareil pour ramener tout le mercure dans le réservoir.

— *Autres thermomètres à dilatation de liquide*

Par raison d'économie, ou encore pour mesurer des températures inférieures à — 38 °C, on utilise des thermomètres constitués comme les précédents, mais avec un autre liquide : alcool (jusqu'à — 80 °C ; on y dissout généralement un colorant), toluène (jusqu'à — 95 °C), pentane (jusqu'à — 200 °C).

Les coefficients de dilatation de ces liquides varient plus en fonction de t que celui du mercure : si les thermomètres sont gradués en parties d'égal volume, la correction de rattachement à l'échelle normale peut être très importante.

En outre, ces liquides mouillent le verre (ce que ne fait pas le mercure), et sont très visqueux aux basses températures, ce qui les fait adhérer aux parois. Lorsque le thermomètre vient d'être refroidi, son indication est par suite trop faible (le liquide n'ayant pas pris son niveau définitif), pendant un temps parfois considérable.

Les thermomètres à liquide peuvent être disposés de façon à indiquer indéfiniment, si l'on n'intervient pas, la température la plus élevée ou la plus basse à laquelle ils ont été portés.

Le *thermomètre à maximum et à minimum* (*fig.* 10), le plus employé en météorologie, est un thermomètre à alcool dont la tige capillaire, en forme d'U, contient dans le bas une colonne de mercure AB, au-dessus de laquelle deux index peuvent glisser dans le tube ; ces index sont en fer émaillé et portent un petit fil de verre qui fait ressort contre la paroi du tube et les empêche de glisser sous l'action de leur poids seul. Quand la température augmente, l'index b est soulevé ; mais si le mercure revient en arrière, cet index reste immobile dans l'alcool ; il indique donc les maximums. Quand la température diminue, c'est l'index a qui est et reste soulevé ; il indique les minimums. On ramène les index au contact du mercure à l'aide d'un aimant.

— *Thermomètres bimétalliques*

On utilise le phénomène de dilatation des solides : une *bilame* est formée de deux lames étroites et minces de métaux de nature différente, soudées à plat l'une contre l'autre. Les métaux choisis ayant des coefficients de dilatation très différents, la bilame s'incurve sous l'effet des changements de température, et la déflexion constatée ne dépend que de cette dernière. Une bilame peut donc être utilisée comme organe sensible d'un thermomètre.

La bilame n'eut longtemps que des emplois limités, car, fabriquée avec des matériaux de dilatabilités peu différentes, comme le fer et le laiton, sa sensibilité était médiocre. Pour y remédier, on remplaçait le laiton par du zinc, mais la mollesse de ce métal engendrait un défaut grave : l'hystérésis. Les bilames sont devenues des appareils sensibles et fidèles avec la mise au point des ferronickels réversibles. Elles peuvent être utilisées de manière continue jusqu'à 450-500 °C. Un bon thermomètre à bilame métallique donne la température avec une précision d'environ ± 1,5 % du maximum de l'échelle.

Les bilames se présentent sous diverses formes : bilame droite encastrée à une extrémité, en U, en hélice, en spirale.

Les thermocouples

— *L'effet thermo-électrique*

Cet effet a été découvert, en 1821, par Seebeck. On peut le décrire de la manière suivante. Soit deux fils A et B, homogènes, de nature différente, soudés à leurs extrémités en S et S', t et t' étant les températures des soudures. Plaçons le conducteur A parallèlement à une aiguille aimantée N-S en équilibre sous l'action du champ magnétique terrestre. Pour cette expérience fondamentale, Seebeck utilisait une lame de bismuth et une lame d'antimoine. Prenons plus simplement un fil de cuivre associé à un fil de constantan (*fig.* 11). On constate le phénomène suivant :

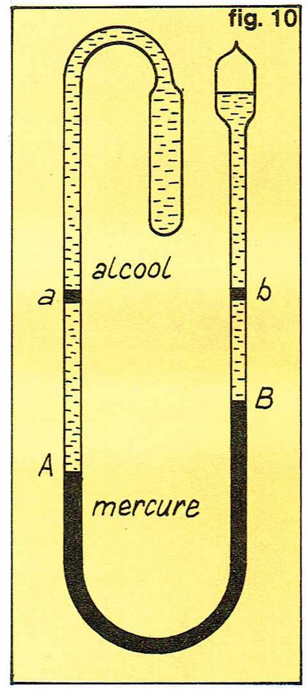

Richard Colin

▲ ***Figure 10 ; thermomètre à maximum et à minimum.***

◄ ***Figure 9 ; quelques thermomètres à mercure.***

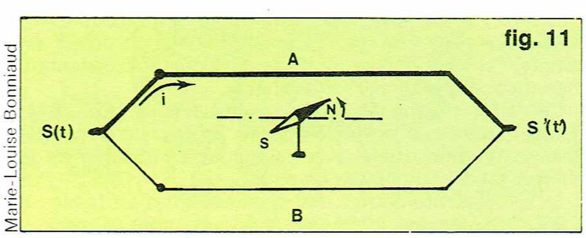

Marie-Louise Bonniaud

◄ ***Figure 11 ; expérience fondamentale de Seebeck.***

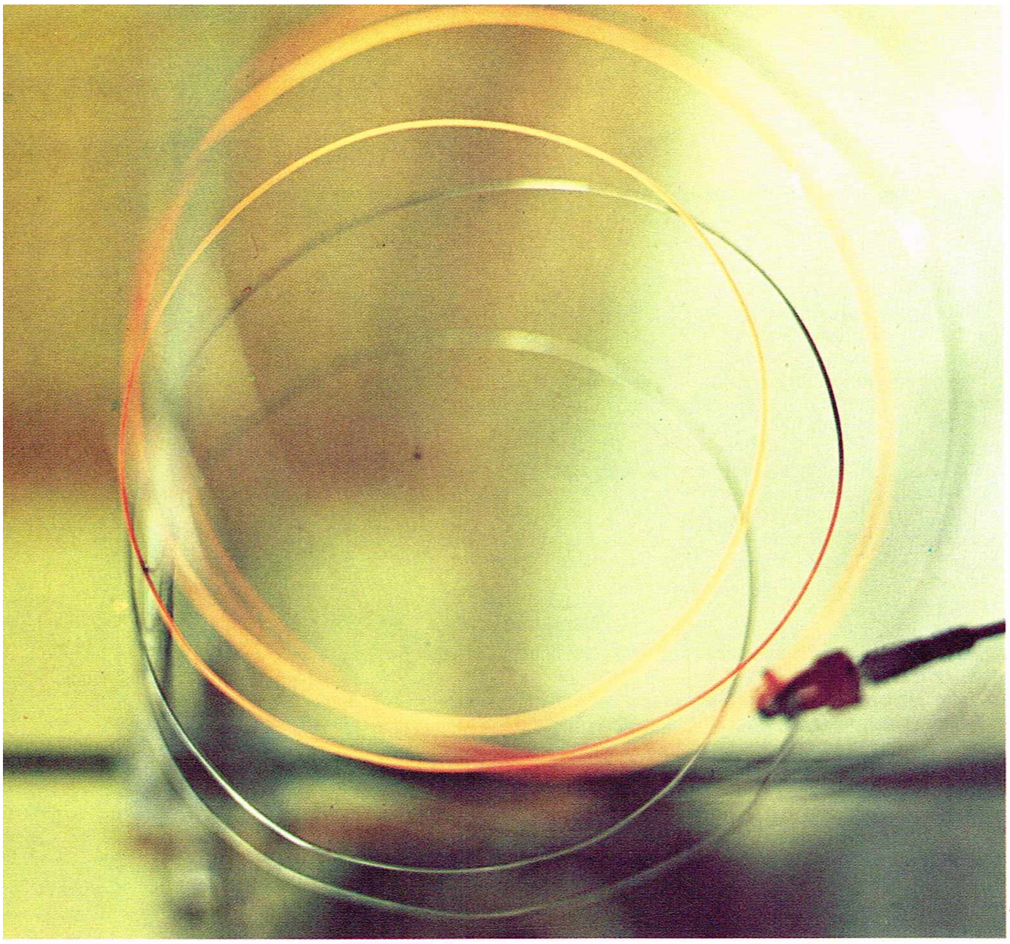
Parimage

▲ ***Couple thermo-électrique** ou* **thermocouple.**

▶ ***Page ci-contre, en haut à gauche, figure 14 : circuit thermo-électrique sans soudure froide; à droite, figure 13 : circuit thermo-électrique avec soudure froide.***

▶ ***Figure 12 ; mesure de la différence de potentiel à l'aide d'un galvanomètre placé dans le circuit.***

— si les soudures S et S′ sont portées à des températures différentes ($t \neq t'$), l'aiguille aimantée tend à se mettre en croix avec le conducteur A ; elle est donc soumise à un champ magnétique supplémentaire créé par un courant d'intensité (i) qui circule dans le circuit AS′BSA ;

— si les soudures S et S′ ont des températures égales, l'aiguille aimantée conserve sa position d'équilibre.

Un courant i circulant dans le circuit quand S et S′ sont à des températures différentes, il existe entre les deux soudures une différence de potentiel (e) qui dépend des températures t et t' ;

— si on recommence les expériences précédentes avec deux fils identiques (A par exemple), on ne décèle aucun courant dans le circuit ;

— si on chauffe A ou B en un point quelconque assez éloigné des soudures pour ne pas en modifier les températures, la déviation de l'aiguille reste constante.

Ces constatations peuvent se traduire par l'énoncé suivant : *Si les soudures S et S′ de deux métaux différents A et B sont à des températures différentes, il existe entre elles une différence de potentiel qui ne dépend que de la nature des fils et de la température des soudures.*

On peut écrire :

$$e = f\ (A, B, t, t')$$

f étant une fonction inconnue de A, B, t et t'. La valeur de e est indépendante des sections des conducteurs ainsi que des températures intermédiaires entre les deux soudures, à condition toutefois que chacun des conducteurs soit homogène sur toute sa longueur.

Il est facile de mesurer cette différence de potentiel avec un galvanomètre intercalé entre les deux soudures, comme le montre la *figure* 12.

Si R est la résistance totale du circuit et i l'intensité qui le traverse, on a l'égalité :

$$e = R \times i$$

Quand le courant apparaissant à la soudure froide circule de A vers B, on appelle l'ensemble : thermocouple AB, ce qui revient à nommer en premier l'élément positif du couple. Par exemple on dit : thermocouple fer-constantan, thermocouple platine rhodié-platine.

Cet effet thermo-électrique est réversible. En 1834, Peltier montra que, si l'on fait passer un courant électrique dans un thermocouple, une des soudures absorbe de la chaleur tandis que l'autre en émet.

La force électromotrice des thermocouples est faible : à 1 000 °C, elle est inférieure à 50 mV pour le couple chromel-alumel (chromel : alliage nickel chrome ; alumel : alliage aluminium nickel) qui est pourtant, parmi ceux qui sont utilisables à cette température, celui qui possède le plus fort *pouvoir thermo-électrique, c'est-à-dire celui pour lequel la variation de la force électromotrice est la plus grande pour une variation de température de* 1 *°C.*

— *Jonction de référence* ou *soudure froide*

Si l'on maintient la jonction S′ (t'), appelée « jonction de référence » ou « soudure froide » (quoique les éléments du couple n'y soient généralement pas soudés), à une température constante, $t' = 0$ par exemple, on pourra connaître la température de l'autre jonction, appelée jonction de mesure ou « soudure chaude », en mesurant la différence de potentiel qui existe entre les deux soudures ; des tables numériques fournissent pour un thermocouple donné la relation qui existe entre la force électromotrice développée dans ces conditions et la température de la soudure chaude. Le montage fondamental est celui de la *figure* 13 où la soudure froide est effectivement placée à 0 °C dans de la glace contenue dans un vase de Dewar ; il n'est pratiquement réalisé qu'en laboratoire. La force électromotrice mesurée par le galvanomètre ne dépend pas de l'endroit où il est inséré *tant que les deux bornes de raccordement P et P′ sont isothermes.*

Industriellement, on met souvent à profit cette propriété en faisant coïncider l'ouverture PP′ du circuit avec la soudure froide. Tout se passe comme si le galvanomètre (ou le potentiomètre) était la soudure froide, car une série de soudures isothermes se comporte comme une soudure directe des métaux extrêmes (*fig.* 14).

En général, la liaison entre le thermocouple et l'appareil de mesure est effectuée avec un câble de compensation bifilaire. Les conducteurs du câble doivent avoir les mêmes propriétés électriques que les fils du thermocouple qu'ils remplacent. L'avantage du câble de compensation est qu'il est moins onéreux que les fils du couple et qu'il existe sous différentes formes : câbles avec isolant plastique ou fibre de verre, ou dans une gaine de plomb, par exemple (*fig.* 15).

Mesures des forces électromotrices

Les f. e. m. d'origine thermo-électrique se mesurent par une méthode galvanométrique ou potentiométrique.

— *Méthode galvanométrique*

Le galvanomètre le plus couramment utilisé est constitué d'un cadre mobile autour d'un axe vertical (*fig.* 16). Sur ce cadre placé entre les pôles d'un aimant permanent est enroulé un fil fin, conducteur, traversé par le courant électrique à mesurer. Un noyau de fer doux est placé au centre du cadre pour donner aux lignes de force du champ magnétique une direction radiale. L'entrefer entre le noyau et les pôles de l'aimant est de quelques millimètres. Le courant est amené au cadre par deux ressorts spiraux qui servent aussi à le maintenir au repos quand le courant est nul. Quand un courant circule dans le cadre, celui-ci a tendance à tourner autour de son axe pour recevoir le flux maximal. Comme il est soumis à un couple antagoniste, dû aux ressorts spiraux, qui s'oppose à sa rotation, il prend une position d'équilibre telle que le couple moteur électromagnétique soit égal au couple résistant d'origine mécanique, l'angle de rotation du cadre étant proportionnel au courant i qui le traverse :

$$\alpha = ki$$

k étant une constante qui dépend de l'appareil utilisé.

Le galvanomètre est intercalé dans un circuit fermé de résistance R ; d'après la loi d'Ohm :

Marie-Louise Bonniaud

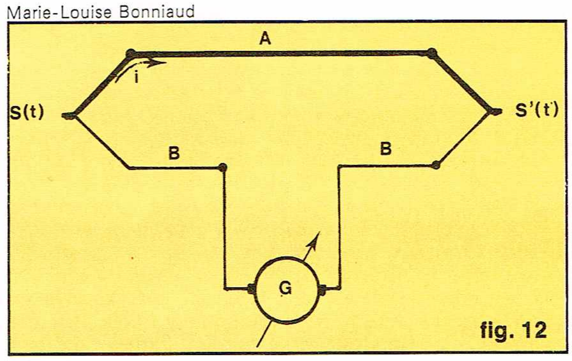

fig. 12

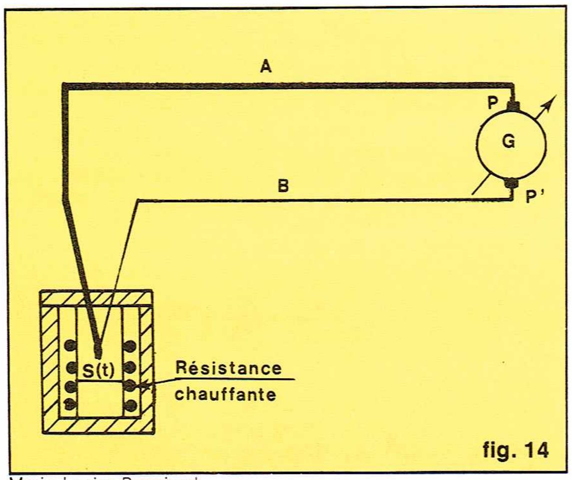

fig. 14

Marie-Louise Bonniaud

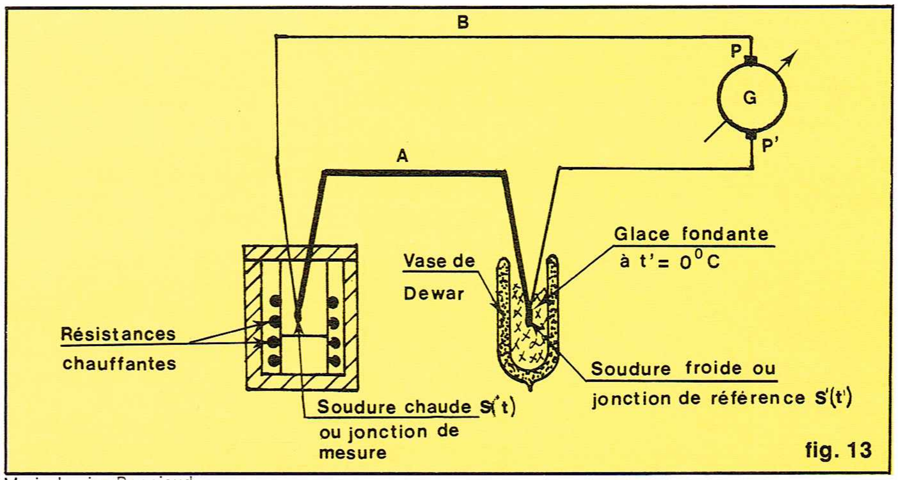

fig. 13

Marie-Louise Bonniaud

$$e = \mathrm{R}i = \mathrm{R}\,\frac{\alpha}{k}$$

R étant la résistance totale du circuit et e la f. e. m. thermoélectrique. De la connaissance de e on déduit, de graphiques donnant la température en fonction de e pour un couple donné, la différence de température entre la soudure chaude et la soudure froide. Les galvanomètres fournissent directement sur un cadran la f. e. m. ou même la différence de température. Les variations de température en fonction du temps peuvent aussi être enregistrées (*fig.* 17).

— *Méthode potentiométrique*

C'est une méthode d'opposition utilisée d'une manière générale pour la mesure précise des faibles forces électromotrices. On oppose à la f. e. m. développée dans le circuit thermo-électrique une différence de potentiel variable et connue jusqu'à ce qu'il y ait égalité entre les deux. Cette égalité est constatée par une absence de courant dans un galvanomètre sensible. C'est une *méthode de zéro* précise et fidèle.

Thermomètres à variation de résistance

La thermométrie à résistance est fondée sur la variation de la résistivité électrique de certains corps conducteurs ou semi-conducteurs en fonction de la température. Jusqu'à ces dernières années, on utilisait les métaux dont la résistance augmente avec la température. On utilise maintenant de plus en plus les corps appelés *thermistances* ou *résistances C. T. N.* (coefficient de température négatif) dont la résistance diminue quand la température s'élève.

— *Thermomètres à résistance métallique*

La résistance R d'un conducteur métallique de section s uniforme, de longueur l et de résistivité ρ, vaut :

$$\mathrm{R} = \rho\,\frac{l}{s}$$

La résistivité ρ étant une fonction croissante de la température, il en est de même pour la résistance. Celle-ci peut être calculée grâce à une expression de la forme :

$$\mathrm{R}\ (t) = \mathrm{R_0}\ (1 + \alpha t)$$

$\mathrm{R_0}$ étant la résistance à 0 °C et α le coefficient de température, qui vaut environ $4 \cdot 10^{-3}$/°C pour le platine par exemple.

Quand la variation de résistance n'est pas linéaire, on utilise une expression plus élaborée de la forme :

$$\mathrm{R}\ (t) = \mathrm{R_0}\ (1 + at + bt^2 + \ldots)$$

Pour fabriquer des thermomètres à résistance, appelés *sondes à résistance*, on prend des fils de faible section qu'on enroule sur des supports de diverses formes, cylindres, disques ou rectangles de dimensions analogues à celles d'un timbre-poste.

Les sondes à résistance ont un temps de réponse beaucoup plus long que celui des thermocouples, car la masse qui doit se mettre en équilibre thermique avec le système dont on veut mesurer la température est beaucoup plus grande.

Le temps de réponse, d'environ 1 seconde pour les thermocouples, peut atteindre 1 minute et même plus pour les sondes à résistance.

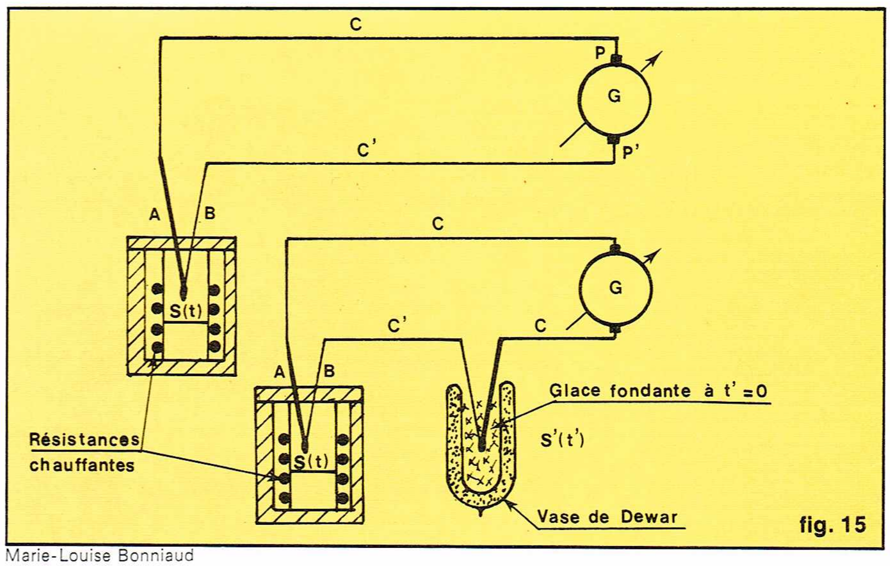

fig. 15

Marie-Louise Bonniaud

— *Thermomètres à thermistance*

Les thermistances sont constituées de matériaux semi-conducteurs dont la conductibilité d'origine électronique augmente avec la température. Le graphique de la *figure* 18 met en évidence, par comparaison avec le platine, la très grande variation de la résistivité des thermistances en fonction de la température. Leur emploi en thermométrie permet de réaliser des appareils d'une très grande sensibilité. Les thermistances qui se présentent sous des formes très diverses, plaques, cylindres, perles, etc., possèdent une résistance qui décroît avec la température :

$$\mathrm{R_T} = ae^{b/\mathrm{T}}$$

▲ ***Figure 15; circuits thermo-électriques avec câbles de compensation.***

▼ ***Figure 16; galvanomètre à cadre mobile utilisé pour la mesure des forces électromotrices d'origine thermo-électrique. Figure 17; enregistreur galvanométrique de température.***

Richard Colin

fig. 16

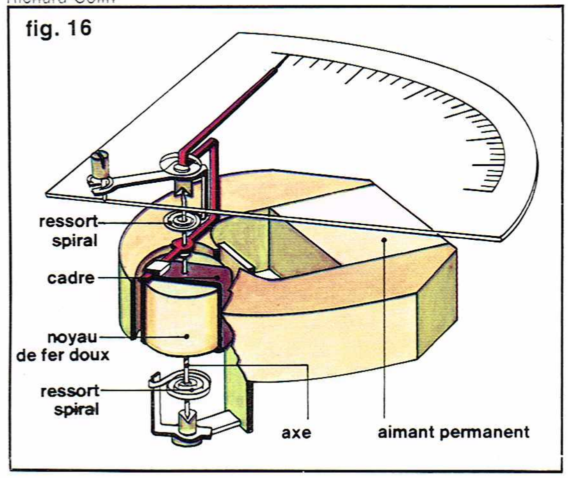

fig. 17

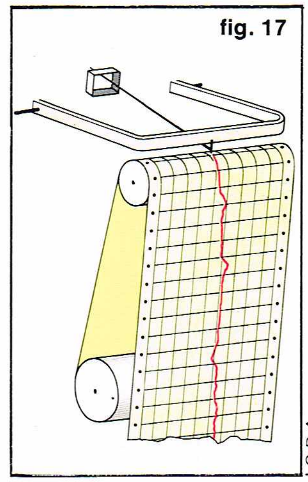

I.G.D.A.

▶ *Figure 18; la résistivité des thermistances* 1, 2, 3 *varie beaucoup plus rapidement en fonction de la température que celle du platine,*4.

fig. 18

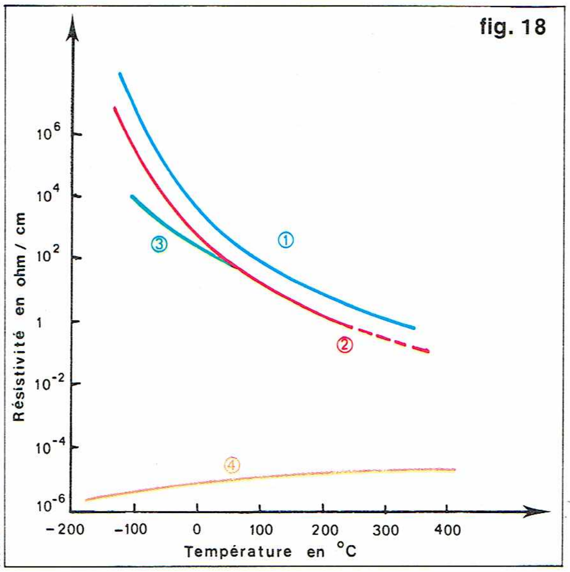

Marie-Louise Bonniaud

fig. 20

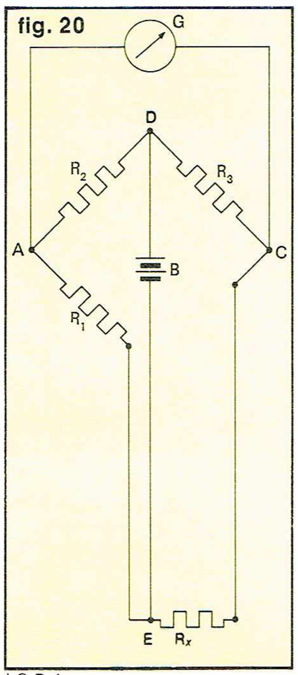

I.G.D.A.

▲ *Figure 20; représentation schématique d'un* pont de Wheatstone.

R_T est la résistance à la température absolue T; *a*, une constante caractéristique de la forme et de la dimension de la thermistance étudiée; *b*, une caractéristique du matériau constituant la thermistance; *e*, la base des logarithmes népériens ($e = 2{,}718$). R_0 étant la résistance à la température T_0, on peut éliminer le paramètre à :

$$R_T = R_0 e^{b\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0}\right)}$$

Mesure des résistances

Les résistances se mesurent par de nombreuses méthodes. Nous décrivons ici celles qui sont le plus utilisées.

— *Les galvanomètres à cadres croisés*

Ce galvanomètre à cadres mobiles et aimant permanent est d'un type particulier, puisqu'il fonctionne *sans couple de rappel d'origine mécanique* (*fig.* 19). Il possède deux enroulements qui font entre eux un angle de $\beta = 30°$ environ. Ces deux enroulements sont placés au centre des pôles d'un aimant permanent dont les épanouissements polaires ne sont pas concentriques au noyau central en fer doux. Avec cette disposition, le champ magnétique dans l'entrefer n'est pas constant. Son intensité est minimale sur l'axe des symétries des pôles. Le sens des enroulements est tel que les couples s'opposent et qu'ils ont tendance à faire tourner chacun des cadres supposé seul, l'un dans le sens des aiguilles d'une montre, l'autre dans l'autre sens. L'ensemble des deux enroulements prend une position d'équilibre quand les deux couples sont égaux, et on montre à l'aide de quelques calculs simples que l'angle pris par l'ensemble par rapport à l'équilibre est une fonction du rapport des deux courants i_1 et i_2 qui traversent les enroulements :

$$\alpha = \frac{1 + b\beta - \frac{i_1}{i_2}}{b\left(1 + \frac{i_1}{i_2}\right)}$$

où *b* est une constante.

En choisissant convenablement les rayons de courbure des surfaces qui délimitent les épanouissements polaires, on peut réaliser une variation plus ou moins importante du champ magnétique; il en résulte une diminution ou une augmentation de la sensibilité.

Les deux enroulements sont bobinés sur des cadres en aluminium qui servent également à amortir les oscillations de l'équipage. Le courant est amené par trois rubans minces, en or généralement, et dont le couple résultant mécanique est négligeable par rapport aux couples électromagnétiques agissant sur les cadres. Un des fils est commun aux deux enroulements.

Les variations de courant dues à des variations de résistance modifient bien entendu l'angle α.

— *Pont de Wheatstone*

Pour des mesures plus précises, on emploie un montage en pont dont la sonde R_x constitue l'une des branches (*fig.* 20). Les résistances R_2 et R_3 sont fixes. La résistance variable R_1 permet d'équilibrer le pont. Quand le galvanomètre est au zéro :

$$R_x \times R_2 = R_1 \times R_3$$

D'où

$$R_x = \frac{R_3}{R_2} R_1$$

Lorsqu'on effectue des mesures précises, il faut aussi tenir compte de la résistance des fils du pont, ce qui complique légèrement le calcul précédent.

On utilise aussi le montage en pont de Wheatstone déséquilibré. La résistance R_x fait partie d'un pont de Wheatstone que l'on équilibre pour une température t_0 de la sonde à résistance. Quand celle-ci est portée à une température *t*, sa résistance passe de R_0 à R_t. Le pont est déséquilibré, et un courant de déséquilibre circule dans le galvanomètre connecté aux bornes DE du pont. Il indique un courant *i* qui est fonction de R_t, donc de la température *t* de la sonde. On peut, grâce à un étalonnage, graduer directement le galvanomètre en °C.

fig. 19

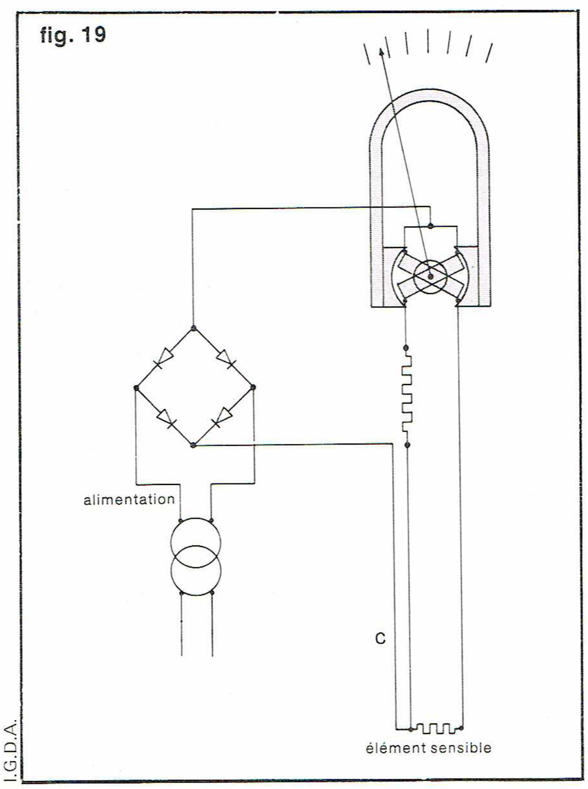

I.G.D.A.

▶ *Figure 19; schéma d'un galvanomètre à cadres croisés.*

Cas des hautes températures

La mesure des températures élevées, ou *pyrométrie*, présente des difficultés spéciales dues aux altérations subies par les thermomètres quand on les chauffe au-delà d'une certaine limite.

Comme on l'a vu, le thermomètre normal peut être utilisé (exceptionnellement) jusque vers 1 600 °C; mais la précision des mesures diminue rapidement quand on dépasse 1 200 à 1 400 °C. Ce sont là aussi les limites d'emploi pratique de pyromètres thermo-électriques, et les thermomètres à résistance, ainsi que les pyromètres à dilatation de solides, ont des limites d'emploi encore plus basses.

Il se trouve, fort heureusement, que le rayonnement des corps incandescents « noirs » (c'est-à-dire absorbant toutes les radiations qu'ils reçoivent) varie en fonction de leur température suivant des lois relativement simples, dans l'échelle thermodynamique. Ces lois sont établies théoriquement, contrôlées jusque vers 1 800 °K à l'aide des thermomètres dont nous avons déjà parlé. Il paraît entièrement légitime de les appliquer à des températures plus élevées, et de déterminer celles-ci d'après des mesures de rayonnement. C'est ce qu'on fait à l'aide des *pyromètres optiques* (dont certains peuvent aussi être employés à des températures moyennes : 800 ou 1 000 °C par exemple). Nous en indiquerons le principe après avoir étudié le rayonnement thermique.

THERMODYNAMIQUE

Généralités

Notions de physique macroscopique

Les systèmes macroscopiques comportent un très grand nombre d'atomes ou de molécules. Une pièce de cuivre de quelques grammes ou un litre d'air à la pression atmosphérique et à la température ambiante sont des exemples de systèmes macroscopiques. En général, le nombre de particules de tels systèmes est de l'ordre du nombre d'Avogadro $\mathcal{N} = 6 \times 10^{23}$. Même si l'on connaît les lois d'interaction entre les particules, l'importance numérique du nombre d'Avogadro ne nous permet pas de traiter un système macroscopique comme on le fait avec un système simple, par exemple, le mouvement des planètes par la mécanique classique ou la molécule d'hydrogène par la mécanique quantique.

Bien qu'on ne puisse étudier les systèmes macroscopiques en s'intéressant à chacune des particules qui les constituent, c'est-à-dire d'un point de vue *microscopique*, on sait par expérience que ces systèmes obéissent à un certain nombre de lois : l'eau à la pression atmosphérique bout toujours à la même température (100 °C, par définition, comme on l'a déjà vu) ; la pression exercée par un gaz dilué sur les parois du récipient est donnée par la loi des gaz parfaits.

Quand on met en contact thermique un corps chaud et un corps froid, leurs températures s'égalisent. Ces exemples montrent que la pression et la température peuvent se mesurer sans description microscopique (on n'a pas besoin de connaître la position de chaque molécule à chaque instant).

Il y a deux manières d'aborder l'étude de la physique macroscopique lorsque l'énergie intervient sous forme de chaleur.

La plus ancienne, développée surtout dans la première moitié du XIXe siècle par des hommes comme Carnot, Clausius, William Thomson (devenu plus tard lord Kelvin), Robert Mayer et Joule, est celle de la *thermodynamique classique*. Elle est basée sur des *principes* et des *lois* qui sont des déductions et des généralisations d'un grand nombre d'expériences effectuées sur des systèmes macroscopiques.

Quand on utilise ces principes et ces lois, il n'apparaît pas de considérations microscopiques mais uniquement des variables macroscopiques comme la pression, le volume, la température, qui servent à décrire les propriétés des systèmes. Par exemple, l'équation d'état des gaz parfaits PV = RT qui relie les variables macroscopiques dont on vient de parler est déduite de l'expérience. Il est bien des cas où des considérations microscopiques sont sans importance et où la thermodynamique classique permet de faire des déductions d'une grande généralité.

La seconde manière est celle de la *thermodynamique statistique*. On part de considérations microscopiques pour déduire, à partir des propriétés atomiques de la matière, des lois portant sur les systèmes macroscopiques. Les premiers travaux dans ce domaine portent sur la théorie cinétique des gaz due à Maxwell, et que Boltzmann et Gibbs ont poursuivie ensuite dans cette voie. Pour reprendre l'exemple de l'équation d'état des gaz parfaits, la thermodynamique statistique permet, en effectuant des *moyennes* sur des coordonnées microscopiques, d'obtenir des coordonnées macroscopiques comme le volume d'un corps, ainsi que les autres variables, la pression et la température.

La séparation qu'on trouve le plus souvent dans la littérature entre *thermodynamique classique* et *thermodynamique statistique* est essentiellement d'ordre historique. Ici au contraire, on liera étroitement les deux aspects, et on montrera comment on peut passer de l'un à l'autre.

Quelques concepts thermodynamiques

Quelques-unes des variables dont on vient de parler ont un sens en mécanique. On peut mesurer le volume d'un récipient et la pression du gaz qu'il contient (à l'aide d'un manomètre à mercure par exemple). Il en est tout autrement de la température dont on a déjà parlé longuement et dont l'importance est fondamentale en thermodynamique. Reprenons l'exemple du corps chaud et du corps froid en contact thermique : le corps chaud se refroidit et le corps froid se réchauffe jusqu'à ce qu'ils soient tous deux à la même température. L'égalisation est due à un *flux d'énergie* du corps chaud au corps froid. Quand ce flux, appelé *flux de chaleur*, cesse, les deux corps sont en équilibre thermique. Ce fait peut être constaté expérimentalement en utilisant un troisième corps.

Quand deux corps sont en équilibre thermique avec un troisième corps, ils sont en équilibre thermique entre eux.

Cet énoncé est appelé parfois le *principe zéro de la thermodynamique*.

Prenons maintenant le cas plus général d'un *système isolé*. Dans ce système, la température, la pression, la densité peuvent ne pas être les mêmes en tout point. En fonction du temps, ce système évolue jusqu'à ce qu'on n'observe plus de différence entre les trois grandeurs. On dit alors qu'il est dans un *état d'équilibre*. Bien entendu, il n'est pas dans un équilibre statique, puisqu'il règne à l'intérieur une agitation permanente à l'échelle microscopique. Le temps que met un système pour atteindre l'équilibre dépend de plusieurs mécanismes dont chacun possède un *temps de relaxation propre*. Après un temps long par rapport aux temps de relaxation, le système est en équilibre. Le calcul du temps que met un système isolé pour atteindre l'équilibre est un problème extrêmement complexe. Il en est de même de la manière dont il atteint l'équilibre. Dans cet exposé, nous nous limiterons au cas des systèmes en équilibre sans nous préoccuper de la manière dont ils ont atteint cet équilibre. Mais nous avons bien entendu besoin d'un critère pour définir l'état d'équilibre. C'est le *second principe de la thermodynamique* qui nous le fournira.

L'état d'équilibre d'un système est défini à partir de quelques variables macroscopiques qui définissent toutes les autres propriétés macroscopiques du système. Ces variables, qui dépendent uniquement de l'état du système, sont appelées *fonctions d'état*. Par exemple, l'état d'un fluide homogène est entièrement déterminé par sa masse M, son volume V et sa pression P. Sa température T est une fonction d'état :

$$T = f(P, V, M) \qquad (1)$$

On aurait pu, bien entendu, choisir d'autres variables indépendantes pour caractériser l'état du fluide, par exemple M, V et T, et trouver P.

Reprenons l'équation d'état des gaz parfaits :

$$PV = RT \qquad (2)$$

La constante R vaut dans le système M. K. S.

$$R = 8{,}31 \text{ joules/mole} \cdot \text{degré}$$

A partir du nombre d'Avogadro :

$$\mathcal{N} = 6 \times 10^{23} \text{ molécules/mole}$$

on peut calculer la constante de Boltzmann k

$$k = R/\mathcal{N} = 1{,}38 \times 10^{-23} \text{ joule/degré}$$

L'équation d'état pour un gaz contenant N molécules s'écrit :

$$PV = NkT \qquad (3)$$

L'intérêt d'écrire l'équation d'état sous cette forme est de faire apparaître la quantité kT qui a les dimensions d'une énergie. A la température ordinaire (T = 300 °K), kT vaut environ $4 \cdot 10^{-21}$ joule. En introduisant comme unité d'énergie l'électron-volt :

$$1 \text{ eV} = 1{,}6 \times 10^{-19} \text{ joule}$$

kT vaut environ 1/40 eV. C'est l'ordre de grandeur de l'énergie d'une molécule d'un système macroscopique à la température ordinaire.

Principes et lois de la thermodynamique - Fonctions d'état

Le premier principe

Nous allons maintenant exposer quelques applications du **principe de conservation de l'énergie,** appelé **premier principe.**

Considérons tout d'abord un système limité par des parois imperméables à la chaleur. Ces parois sont dites

Boyer - Viollet

▲ *Le physicien anglais* **James Prescott Joule** *(1818-1889).*

adiabatiques, et le système *thermiquement isolé.* (Comme on n'envisage pas pour l'instant d'échange de matière avec l'extérieur, on dira que le système est isolé en omettant de préciser à chaque fois thermiquement.) On fait passer un tel système d'un état 1 à un état 2 en lui fournissant un travail W, quels que soient la forme du travail fourni et les états intermédiaires.

Les premiers travaux sur les changements d'états des systèmes isolés sont dus à Joule (1843). Il fournit à un système isolé une quantité de chaleur en produisant différentes formes de travail. D'une part en agitant vigoureusement un liquide par un système de pales mues par des poids, d'autre part en dépensant un travail électrique en faisant passer un courant dans une résistance plongée dans le liquide (*fig.* 21ab). Le travail fourni au système, mesuré dans le premier cas par le mouvement des poids et dans le second par le courant traversant la résistance et la différence de potentiel aux bornes, est le même et fournit au système une même variation d'*une fonction d'état,* l'énergie *interne* E.

(4) $$W = \Delta E = E_2 - E_1$$

Considérons maintenant un système qui n'est plus isolé : on l'appelle *système fermé.* On peut comme précédemment faire passer le système de l'état 1 à l'état 2, mais en général le travail fourni W n'est pas égal à l'augmentation d'énergie interne ΔE. La différence :

(5) $$Q = \Delta E - W$$

est la quantité de chaleur fournie au système. Il faut bien remarquer que la chaleur est une forme d'énergie et s'exprime en joules comme les énergies.

L'équation ci-dessus, qu'on écrit plus généralement :

(6) $$\Delta E = Q + W$$

est l'expression du premier principe. L'énergie interne est due à l'énergie cinétique des molécules en mouvement et à l'énergie d'interaction entre ces mêmes molécules. Dans un cristal, par exemple, l'énergie interne est due aux énergies cinétique et potentielle des atomes qui vibrent autour de leur position d'équilibre. On verra plus loin que la température d'un système est une mesure de son énergie interne.

L'énergie interne d'un système est une fonction d'état. Pour un fluide, on peut écrire $E = E(P, T)$ ou $E = E(V, T)$ selon les variables indépendantes qu'on choisit pour définir l'état du fluide. (On a supprimé la dépendance en la masse, car on raisonne généralement à masse constante.) Quand on passe de l'état 1 à l'état 2, ΔE est la différence de deux énergies E_1 et E_2 et ne dépend pas de la manière dont on est passé de l'état 1 à l'état 2. Par contre, Q et W ne sont pas des fonctions d'état. Il n'y a pas de fonction d'état « chaleur du système » telle qu'il y ait une « chaleur » dans l'état 1 et une autre dans l'état 2 avec Q différence de ces « chaleurs ». De même, il n'y a pas de fonction d'état « travail du système » telle qu'il y ait un travail défini dans l'état 1 et un travail défini dans l'état 2 avec W différence de ces « travaux ». Il en résulte qu'il n'y a pas de conservation de la chaleur ni de conservation du travail, mais uniquement une conservation de l'énergie. *Le travail et le flux de chaleur sont différentes formes de transfert d'énergie.*

Du point de vue physique, le travail est un transfert d'énergie qui s'observe macroscopiquement, tandis que le flux de chaleur se conçoit à partir de considérations microscopiques. Pour bien montrer la différence entre ces deux transferts d'énergie, considérons un gaz dans un cylindre isolé dont l'une des extrémités est un piston (*fig.* 22). Quand on comprime le gaz, le travail fourni s'observe macroscopiquement en considérant la variation de volume. Pendant la compression, le gaz se réchauffe, les molécules subissent des chocs élastiques sur les parois du piston mobile, gagnent de l'énergie et redistribuent cette énergie au cours des chocs avec les autres molécules.

L'équation **(6)** exprime le principe de la conservation de l'énergie dans le cas de *transformations finies.* Pour des variations infiniment petites, on écrira :

(7) $$dE = dQ + dW$$

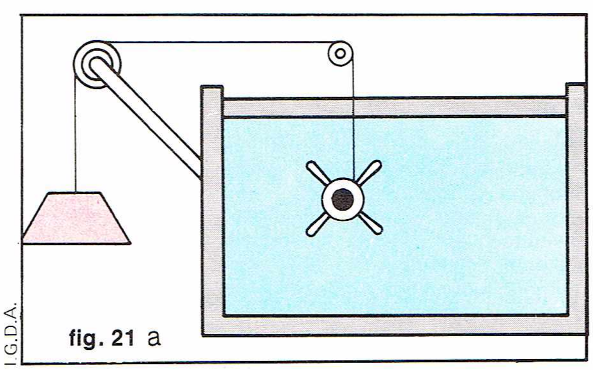

fig. 21 a

I.G.D.A.

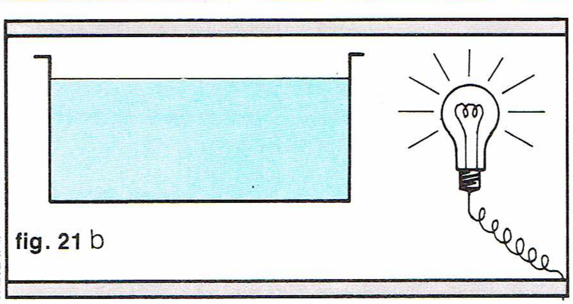

fig. 21 b

I.G.D.A.

▶ *Figure 21*a *; schéma de l'expérience de Joule : le liquide du calorimètre reçoit un travail mécanique. Figure 21*b *: le liquide du calorimètre reçoit un travail électrique.*

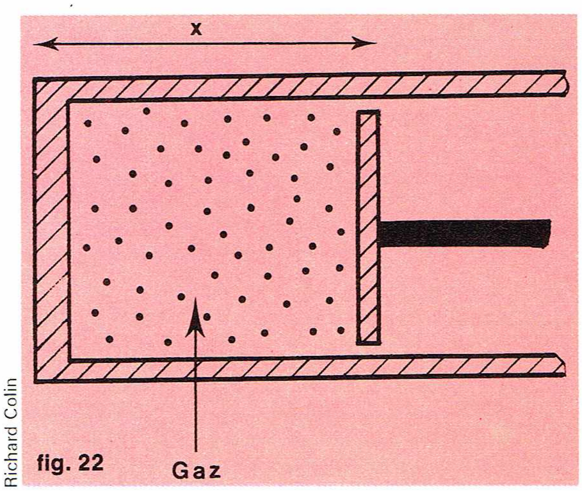

fig. 22

Richard Colin

▶ *A droite, figure 22 ; compression d'un gaz dans un cylindre isolé.*

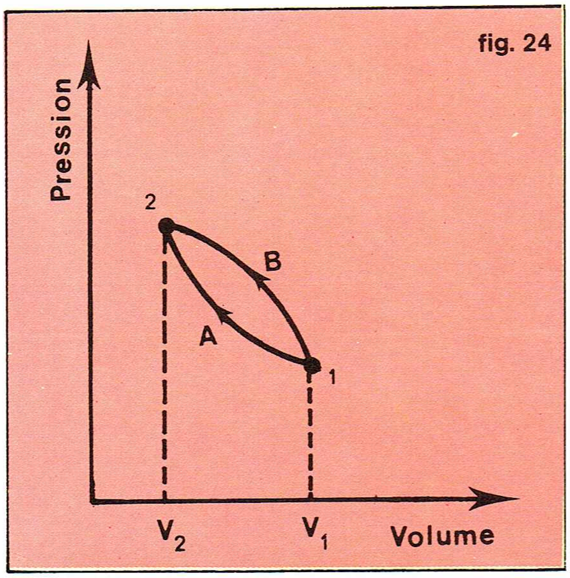

Marie-Louise Bonniaud

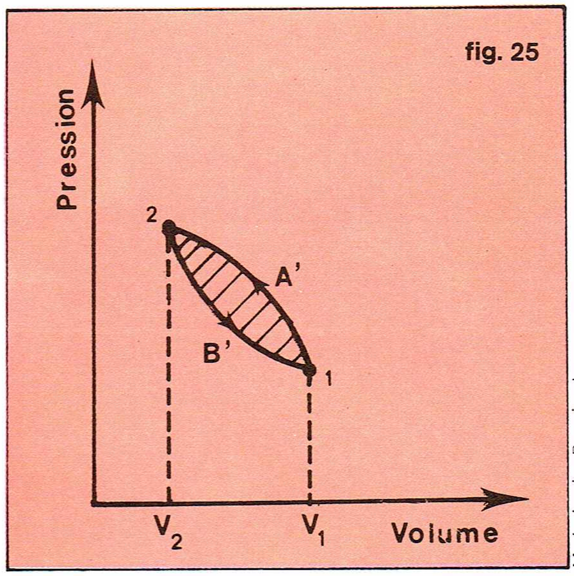

Marie-Louise Bonniaud

◀ *A gauche, figure 24; le travail pour aller de 1 en 2 n'est pas le même suivant que l'on suit le chemin A ou le chemin B. A droite, figure 25; l'aire hachurée représente le travail reçu au cours d'un cycle.*

où dE est une variation infiniment petite de l'énergie du système due à un apport de travail $đW$ et de chaleur $đQ$ infiniment petits. On a écrit $đQ$ et $đW$ (et non pas dQ et dW) pour ne pas oublier que Q et W ne sont pas des fonctions d'état. Quand on passe d'un état 1 à un état 2, la variation d'énergie interne ΔE est définie, et il en est de même de la somme $(Q + W)$. Par contre, Q et W ne sont pas définis séparément et dépendent de la manière dont on passe de 1 à 2, c'est-à-dire du *chemin suivi* (la même remarque s'applique aux transformations infiniment petites). Il existe cependant des exceptions : dans une transformation adiabatique $(Q = 0)$, le travail est défini par l'état initial et l'état final, $W = E_2 - E_1$; dans une transformation qui ne met en jeu aucun travail $(W = 0)$, la quantité de chaleur Q est définie par $Q = E_2 - E_1$.

Transformations réversibles

Un système évolue de manière *réversible* quand une modification infiniment petite suffit à le faire évoluer dans l'autre sens. Une condition nécessaire pour qu'un système évolue de manière réversible est qu'il passe par une suite continue d'états d'équilibre infiniment voisins. Un tel processus est dit *quasi statique*.

Prenons à nouveau l'exemple d'un gaz enfermé dans un cylindre fermé par un piston. Supposons que le piston s'enfonce. Pour que le système évolue dans l'autre sens, il faut que la vitesse du piston change de signe. Pour que le processus soit réversible, il est nécessaire que la vitesse soit infiniment petite. Le gaz passe alors par une suite d'états d'équilibre : la transformation est *quasi statique*.

Système hors d'équilibre

Si un système, par exemple une masse de gaz, n'est pas en équilibre, on ne peut parler ni de sa température ni de sa pression parce que ces grandeurs n'auront pas la même valeur en différents points du système. Ainsi, si l'on passe brusquement ou de manière *irréversible* d'un état d'équilibre à un autre, on pourra bien connaître la variation d'énergie interne du gaz qui ne dépend que de l'état initial et de l'état final, mais on ne pourra calculer ni le travail, ni la chaleur reçue par le gaz dans la transformation, faute de données sur la transformation elle-même.

Ce travail reçu lorsqu'une force $\vec{F}$ s'exerce sur le piston de surface S et déplace le piston d'une longueur $d\vec{l}$ a pour valeur :

(8) $$dW = \vec{F}\,d\vec{l} = -PSdx = -PdV$$

où P est la pression $\left(P = \frac{F}{S}\right)$ et V le volume du cylindre (*fig.* 23). Lorsque le piston s'enfonce dans le cylindre, le volume diminue $(dV < 0)$, et le travail reçu par le gaz est positif. On notera qu'en thermodynamique, on compte positivement le travail et la quantité de chaleur reçus par un système. Le travail reçu quand on passe du volume V_1 au volume V_2 :

(9) $$W = -\int_{V_1}^{V_2} PdV$$

ne pourra être calculé que si l'on connaît la pression à chaque instant de la transformation, c'est-à-dire si celle-ci est *quasi statique*.

Il peut arriver que, dans une transformation irréversible, bien que la forme $W = -\int PdV$ ne soit pas applicable, on connaisse le travail fourni par l'extérieur et donc reçu par le gaz.

Transformations isothermes

Au cours d'une transformation isotherme, la température reste constante. En conséquence, la température n'étant définie que dans une transformation quasi statique, *une transformation isotherme est nécessairement quasi statique*.

Calculons le travail reçu par un gaz parfait dans une compression isotherme : une certaine masse de gaz parfait passe à température constante d'un état (P_1V_1) à un état (P_2V_2), le produit PV étant constant d'après la loi de Mariotte :

(10) $$PV = P_1V_1 = P_2V_2 = \text{Cte}$$

D'où

(11) $$P = \frac{P_1V_1}{V}$$

On peut calculer le travail W :

(12) $$W = -\int_{V_1}^{V_2} PdV = -P_1V_1 \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = P_1V_1 \operatorname{Log} \frac{V_1}{V_2}$$

Dans une compression $(V_2 < V_1)$, le travail reçu par le système est positif $\left(\operatorname{Log} \frac{V_1}{V_2} > 0\right)$.

Notion de cycle

Le travail reçu par le système dans le passage de l'état 1 à l'état 2 dépend du chemin suivi. Dans l'exemple ci-dessus, on a parcouru l'isotherme $P = \frac{P_1V_1}{V}$ (*fig.* 24, chemin A). En suivant le chemin B, le résultat obtenu serait différent.

Supposons maintenant qu'on passe de l'état 1 à l'état 2 en suivant le chemin A', puis qu'on revienne en 1 en suivant le chemin B' (*fig.* 25). Le travail reçu par le système au cours de ce *cycle* est représenté par l'aire hachurée :

(13) $$W_A - W_B = -\oint PdV \neq 0$$

La variation de l'énergie interne, au contraire, ne dépend pas du chemin suivi :

(14) $$\oint dE = 0$$

C'est ce qui caractérise une *fonction d'état*. Au cours du cycle, on est parti du point 1 où l'énergie interne avait la valeur E_1 pour revenir au point 1 où elle retrouvait la même valeur E_1.

Richard Colin

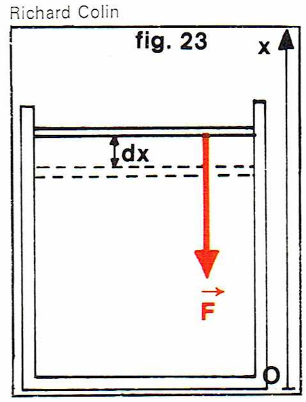

▲ *Figure 23; calcul du travail reçu par un système.*

Marie-Louise Bonniaud

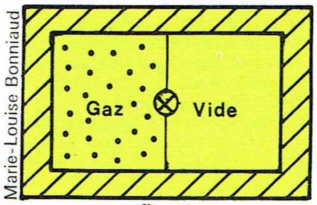

fig. 26

▲ *Figure 26 ; expérience de Joule sur l'énergie interne des gaz parfaits.*

Énergie interne des gaz parfaits

L'énergie interne des gaz parfaits ne dépend que de la température.

Cette loi a été déduite par Joule de l'expérience suivante. Deux récipients isolés de l'extérieur peuvent être mis en communication par l'ouverture d'un robinet (*fig.* 26) ; l'un contient un gaz comprimé, l'autre est vide. Quand on ouvre le robinet, le gaz se détend ; on constate que sa température ne varie pas. Comme il n'y a pas eu d'échange de chaleur ($Q = 0$) et qu'il n'y a pas eu de travail ($W = 0$), la variation d'énergie interne est nulle ($\Delta E = 0$).

Pour un gaz réel, la baisse de température est faible et due au travail dépensé pour vaincre les forces de cohésion entre les molécules du gaz. A basse pression, cependant, les variations de température sont négligeables.

On peut maintenant définir un gaz parfait de la manière suivante :

— il obéit à l'équation d'état $PV = RT$ (pour une mole) ;

— son énergie interne ne dépend que de la température.

Chaleur spécifique des gaz parfaits

Pour un solide ou un liquide, la chaleur spécifique est la chaleur qu'il faut fournir à l'unité de masse du corps pour élever sa température de 1°.

Pour un gaz, nous savons qu'il existe une infinité de manières de passer d'un état à un autre, et que la chaleur reçue dépend du chemin suivi. Il y a donc autant de « chaleurs spécifiques » d'un gaz que de manières d'augmenter sa température. On a retenu deux types d'opération : *à volume constant,* ou *à pression constante.*

On définira par exemple la chaleur spécifique à volume constant comme la quantité de chaleur qu'il faut fournir à l'unité de masse du gaz pour augmenter, à volume constant, sa température de 1°.

De plus, on prend habituellement comme unité de masse la masse molaire du gaz, et on parle alors de chaleurs spécifiques molaires. La chaleur spécifique *molaire* à volume constant se note C_V, la chaleur spécifique molaire à pression constante se note C_P.

Il existe entre C_P et C_V une relation. Si nous élevons de dT la température d'une mole de gaz parfait, à partir d'un état donné, son augmentation d'énergie interne dE ne dépendra pas du chemin suivi (premier principe), ni des variations dV et dP entre les deux états, mais seulement de dT (définition des gaz parfaits).

A volume constant, le travail reçu est nul ; on a alors :

$$dE = \bar{d}Q = C_V dT$$

A pression constante, on aura le même dE :

$$dE = \bar{d}Q + dW = C_P dT - P dV$$

égalons les deux valeurs de dE :

$$(C_P - C_V)\, dT = P dV$$

Or, si nous différentions l'équation d'état pour une mole, et si nous faisons $dP = 0$ (pression constante), il vient :

$$P dV = R dT$$

En rapprochant les deux équations, on trouve :

$$C_P - C_V = R$$

Transformations adiabatiques réversibles

Rappelons qu'une transformation est adiabatique quand le système n'échange pas de chaleur avec l'extérieur. Cette définition n'impose rien quant à la réversibilité du processus. On pourra avoir des transformations adiabatiques soit réversibles, soit irréversibles. Nous allons traiter ici le cas d'une transformation adiabatique réversible que subit une mole de gaz parfait.

Une mole de gaz parfait prise dans les conditions (P, V, T) subit une transformation adiabatique infiniment petite qui l'amène à l'état ($P + dP$, $V + dV$, $T + dT$). La variation d'énergie interne $dE = C_V dT$ est égale au travail reçu (la transformation étant adiabatique, $\bar{d}Q = 0$) :

(15) $$C_V dT = - P dV$$

En différentiant l'équation d'état des gaz parfaits $PV = RT$:

(16) $$R dT = P dV + V dP$$

On ajoute membre à membre les équations **(15)** et **(16)**, on obtient :

(17) $$(R + C_V)\, dT = V dP$$

Comme $$R + C_V = C_P$$

(18) $$C_P dT = V dP$$

Tirons dT de l'équation **(15)** et reportons cette valeur dans l'équation **(18)** ; nous obtenons :

(19) $$\frac{C_P}{C_V} \cdot \frac{dV}{V} + \frac{dP}{P} = 0$$

En intégrant cette relation, on obtient :

$$\gamma \log V + \log P = \text{Cte}$$

soit

(20) $$PV^{\gamma} = \text{Cte}$$

où γ est le rapport des chaleurs spécifiques C_P/C_V.

La relation $PV^{\gamma} = \text{Cte}$ caractérise les transformations adiabatiques réversibles des gaz parfaits. En combinant cette relation avec l'équation $\frac{PV}{T} = \text{Cte}$, on obtient des relations entre P et T d'une part, V et T d'autre part, valables pour les transformations adiabatiques réversibles des gaz parfaits :

(21) $$V^{\gamma-1}T = \text{Cte} \quad \text{et} \quad P^{\gamma-1}T^{-\gamma} = \text{Cte}$$

Les relations **(21)** nous permettent de remarquer que, si la température était constante dans la transformation, il en serait de même du volume et de la pression ; il ne se passerait rien du tout. Une transformation réversible d'un gaz parfait comporte obligatoirement une variation de température. *Il ne faut surtout pas confondre échange de chaleur et variation de température.*

Remarquons enfin que la relation $V^{\gamma-1}T = \text{Cte}$ montre qu'une détente adiabatique (volume croissant) s'accompagne d'un abaissement de la température.

Le second principe

Énoncé du second principe

Pour pouvoir prédire les relations entre phénomènes mécaniques et phénomènes calorifiques, le principe de l'équivalence est un guide très précieux, mais c'est un guide insuffisant. Il ne nous donne pas d'indication sur le *sens* dans lequel se déroulent les phénomènes naturels.

Nous avons vu qu'il faut distinguer les *transformations réversibles* et les transformations *irréversibles.* Les transformations réversibles peuvent être considérées comme une suite continue d'états d'équilibre. En changeant infiniment peu les facteurs de l'équilibre, on peut les réaliser dans un sens ou dans le sens opposé, par exemple la détente ou la compression isotherme d'un gaz, la vaporisation d'un liquide ou la condensation d'une vapeur saturée.

Mais il existe dans la nature des transformations *irréversibles* qui se font toujours à *sens unique :* lorsque nous mettons en présence un corps chaud et un corps froid, leurs températures s'égalisent : 1 kg d'eau à 20 °C au contact de 1 kg d'eau à 10 °C donne 2 kg d'eau à 15 °C. La chaleur passe toujours du corps chaud au corps froid.

Si, après avoir mis en contact 1 kg d'eau à 20 °C et 1 kg d'eau à 10 °C, nous constations que nous obtenons au bout d'un certain temps 1 kg d'eau à 25 °C et 1 kg d'eau à 5 °C, cette évolution ne serait pas contraire au principe de conservation de l'énergie ; pourtant *une telle évolution n'a jamais été observée.*

Prenons un autre exemple : nous faisons communiquer 2 ballons contenant des gaz différents : l'un de l'hydrogène léger, l'autre du deutérium. Au bout d'un certain temps, les deux gaz se sont intimement mélangés. *Évolution à sens unique,* car nous n'observons jamais une séparation spontanée de ces deux gaz à température constante.

Ces exemples montrent la nécessité d'admettre un principe distinct du principe d'équivalence, principe qui permet de prévoir le sens des transformations irréversibles.

Ce principe est le **second principe de la thermodynamique** ou **principe de Carnot.**

Nous allons en donner deux énoncés distincts mais équivalents.

1er énoncé (de Clausius) : *Le passage de la chaleur d'un corps froid à un corps chaud n'a jamais lieu « spontanément » ou n'a jamais lieu « sans compensation ».*

▼ *Portrait de* **Sadi Carnot** *(1796-1832), auteur des* **Réflexions sur la puissance motrice du feu** *(1824) où se trouve énoncé* **le principe** *dit* **de Carnot** *(d'après le portrait gravé par Boilly).*

Boyer - Viollet

« Spontanément » ou « sans compensation » veut dire qu'une telle transformation n'est possible que si elle est liée à une modification qui a lieu en même temps dans le milieu extérieur.

2^e *énoncé* (de lord Kelvin) : *A l'aide d'un système qui décrit un cycle et qui n'est en contact qu'avec une source de chaleur, il est impossible de recueillir du travail.*

Lorsqu'un système n'est en contact qu'avec une source de chaleur à *température constante*, on dit que les transformations de ce système sont *monothermes*.

D'après l'énoncé de lord Kelvin, pour convertir de l'énergie calorifique en travail mécanique, il faut *disposer d'une chute de température*. De même que, pour actionner une machine hydraulique, il faut une différence de niveaux, de même, pour faire fonctionner une machine thermique, il faut une différence de température, il faut disposer de deux sources de chaleur.

Il faut bien voir que les deux principes, celui de l'équivalence et celui de Carnot, sont distincts et indépendants. Historiquement, le principe de Carnot a précédé le principe de l'équivalence. Carnot, dans son livre publié en 1824 et intitulé *Réflexion sur la puissance motrice du feu*, croyait encore à la conservation du calorique. Il croyait que la quantité de chaleur fournie à la machine à vapeur par la chaudière se retrouve intégralement dans le condenseur.

Équivalence des deux énoncés

Nous allons montrer l'équivalence des deux énoncés.

— Si le premier énoncé était faux, si la chaleur passait spontanément d'un corps froid à un corps chaud, on pourrait ainsi accentuer des écarts de température, et on pourrait en particulier obtenir à partir d'une source monotherme un ensemble de sources à températures différentes. Le second énoncé serait sans intérêt, il deviendrait faux également.

— Si le second énoncé était faux, s'il était possible de créer du travail à l'aide d'une source à température unique (en lui enlevant de la chaleur d'après le principe de l'équivalence), on pourrait par le frottement convertir ce travail en chaleur à une température supérieure à celle de la source, et ainsi on aurait, en définitive, transporté de la chaleur d'une température inférieure à une température supérieure sans autre modification. Le premier énoncé serait inexact.

Une machine thermique qui produirait du travail à l'aide d'une source de chaleur à température uniforme serait très avantageuse : elle permettrait, par exemple, de produire du travail en transformant de l'eau froide en glace. Ce serait conforme au principe de l'équivalence. Il y aurait ainsi double profit : on vendrait le travail, on vendrait la glace.

Une telle machine, dont le principe de Carnot nie la possibilité de réalisation, est connue sous le nom de *moteur perpétuel de deuxième espèce*.

Cycles monothermes

D'après le second énoncé du principe de Carnot, un système qui subit un cycle monotherme ne peut fournir de travail, c'est-à-dire que W ne peut être négatif : $W > 0$. Comme dans un cycle, d'après le premier principe :

$$\Delta E = W + Q = 0$$

il en résulte : $Q < 0$.

Examinons le cas particulier d'un cycle monotherme *réversible :* on doit avoir aussi bien $W > 0$ que $W < 0$. Or, comme il est impossible que le travail soit négatif, il ne reste que la possibilité $W = 0$. D'après le premier, si $W = 0$, on a aussi $Q = 0$.

Si un système décrit un cycle monotherme réversible, on a séparément $W = 0$ *et* $Q = 0$.

Quand un système décrit un cycle monotherme irréversible, on a $W > 0$ et $Q < 0$.

Cycle ditherme

Un cycle est appelé *ditherme* lorsque le système qui le décrit se trouve, au cours du cycle, successivement en contact thermique avec deux sources de chaleur, une *source chaude* à la température T_1 et une *source froide* à une température plus basse T_2 ($T_2 < T_1$).

Un tel cycle comporte donc deux transformations monothermes au cours desquelles le système échange de la chaleur avec les sources correspondantes. Comme par hypothèse le cycle ne doit pas comporter d'autres sources, le transfert du contact thermique de l'une des sources à l'autre nécessite l'isolement thermique du système, c'est-à-dire l'existence de deux opérations adiabatiques intermédiaires, une opération adiabatique qui réalise le passage du contact thermique de la source chaude à la source froide et une autre opération adiabatique réalisant le passage du contact thermique de la source froide à la source chaude. Dans l'ordre chronologique, un cycle ditherme comporte donc quatre opérations successives et distinctes :

— une opération monotherme à la température T_1 au cours de laquelle le système échange une certaine quantité de chaleur Q_1 avec la source de chaleur chaude ;

— une opération adiabatique qui interrompt le contact thermique avec la source chaude et qui amène le système au contact thermique avec la source froide ;

— une opération monotherme à la température T_2 au cours de laquelle le système échange une certaine quantité de chaleur Q_2 avec la source froide ;

— enfin une opération adiabatique qui interrompt le contact thermique avec la source froide et qui ramène le système au contact thermique avec la source chaude dans des conditions telles que l'état initial du système soit rétabli.

Lorsque les quatre opérations qui constituent le cycle ditherme sont *réversibles*, le cycle porte le nom de *cycle de Carnot*.

Cycle de Carnot : un exemple classique de Carnot est le cycle suivant, décrit par un gaz et représenté dans le diagramme P, V de la *figure* 28.

Le gaz est supposé enfermé dans un cylindre, surmonté d'un piston (*fig.* 27). Toutes les parois sont supposées adiabatiques, sauf le fond du corps de pompe qui est supposé perméable à la chaleur et qui peut être soit mis en contact avec une source de chaleur, soit entouré d'une paroi adiabatique.

L'état initial du gaz à la température T_1 est représenté par le point figuratif A (volume V_A, pression P_A) [*fig.* 28].

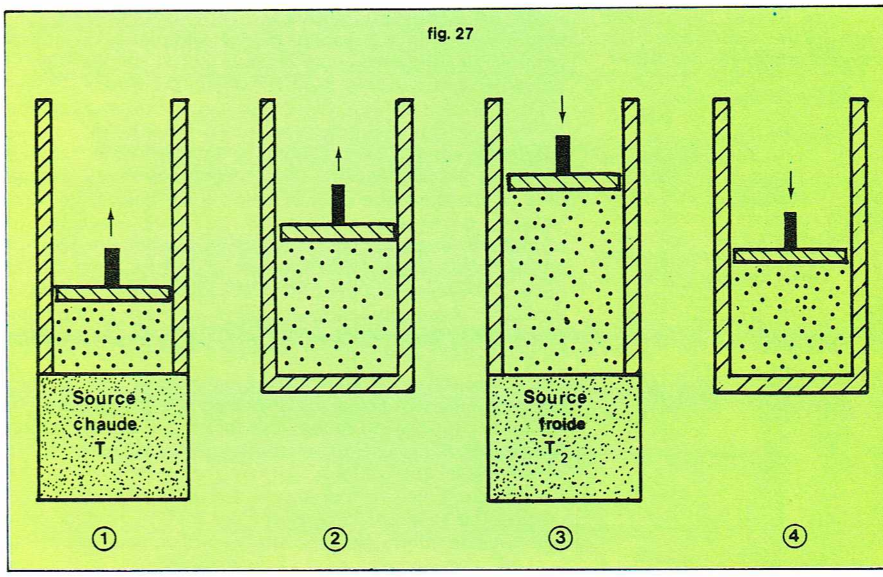

Marie-Louise Bonniaud

▲ ***Figure 27 ; les quatre opérations du cycle de Carnot.***

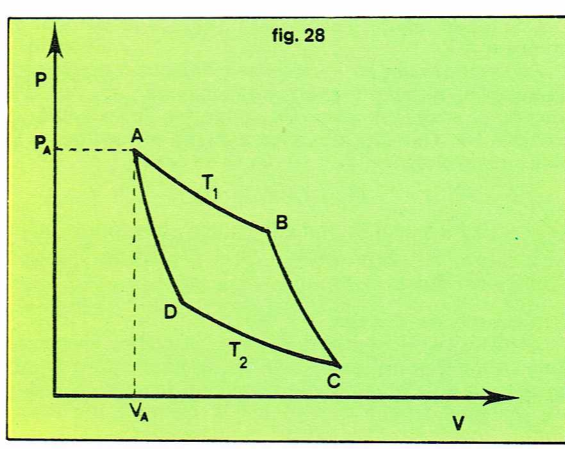

Marie-Louise Bonniaud

◄ ***Figure 28 ; cycle de Carnot représenté dans un diagramme P, V.***

▶ *Figure 29 ; schéma de fonctionnement d'une machine thermique.*

▶ *Page ci-contre, en haut, figure 30 ; fonctionnement d'une machine thermique en réfrigérateur. Figure 31 ; machines thermiques réversible et irréversible fonctionnant entre les mêmes températures* T_1 *et* T_2.

Le gaz est d'abord soumis à une détente isotherme pendant laquelle le fond est au contact thermique de la source chaude qui fournit au gaz la quantité de chaleur Q_1. Le point figuratif décrit le segment d'isotherme AB.

En B le contact thermique avec la source est supprimé, le fond est thermiquement isolé. La détente se poursuit adiabatiquement, la température baisse d'une manière continue, et la pression décroît en fonction du volume plus rapidement que pour la détente isotherme. Le point figuratif décrit une succession d'états d'équilibre qui forment le segment de « courbe adiabatique » BC. On arrête cette détente adiabatique lorsque la température du gaz a atteint la valeur T_2. On établit alors le contact thermique avec une source de température T_2, et on comprime le gaz isothermiquement au contact de cette source. Le gaz échange avec la source une quantité de chaleur Q_2 qui est négative (chaleur cédée par le gaz à la source). On arrête la compression isotherme en un point D tel qu'après suppression du contact thermique avec la source froide une compression adiabatique qui échauffe le gaz le ramène à l'état initial A. Au cours d'un tel cycle, le gaz fournit au milieu extérieur un travail représenté sur le diagramme P, V par l'aire du cyle ABCD. Ce cycle, étant composé de quatre opérations réversibles, peut être décrit en sens inverse, de façon lente et réversible également. Il permet alors d'enlever une certaine quantité de chaleur $Q'_2 = -Q_2$ à la source froide et de déverser une quantité de chaleur $-Q'_1 = Q_1$ dans la source chaude, au prix d'un certain travail W fourni par le milieu extérieur.

Le cycle décrit dans le sens direct ABCD est producteur de travail et peut servir de modèle simple à une « machine thermique ».

Le cycle décrit dans le sens inverse ADCB consomme du travail et permet d'enlever de la chaleur à la source froide. Il peut servir de modèle à une « machine frigorifique » ou à une « pompe de chaleur ».

Les machines réelles ne sont jamais parfaitement réversibles. Mais, dans tous les cas, le principe de l'équivalence doit être satisfait. Pour un cycle ditherme, la relation d'équivalence prend la forme :

$$W + Q_1 + Q_2 = 0$$

Nous dirons qu'un cycle ditherme joue le rôle d'une **machine thermique** lorsque le système qui est le siège des transformations cycliques fournit du travail au milieu extérieur, c'est-à-dire lorsque $W < 0$.

Le principe d'équivalence exige donc que, pour une machine thermique ditherme :

$$Q_1 + Q_2 > 0$$

Rendement des machines thermiques

La *figure* 29 schématise le fonctionnement d'une machine thermique : la machine reçoit pendant un temps donné une quantité de chaleur Q_1 de la source chaude, restitue la quantité plus petite $-Q_2$ à la source froide et fournit un travail $-W$.

Par définition, on appelle rendement de la machine :

$$R = \frac{-W}{Q_1}$$

D'après le premier principe : $-W = Q_1 + Q_2$

$$\textbf{(22)} \qquad R = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} = 1 + \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}$$

Comme le montre l'expression **(22)**, le rendement est inférieur à 1.

Fonctionnement en réfrigérateur. Faisons fonctionner à l'envers la machine thermique précédente (*fig.* 30). Elle reçoit le travail W ($W > 0$), emprunte la quantité de chaleur Q_2 ($Q_2 > 0$) à la source froide et restitue $-Q_1$ à la source chaude ($Q_1 < 0$). Dans ce cas :

$$Q_1 = -W - Q_2$$

la pompe à chaleur fournit à la source chaude une quantité de chaleur supérieure à celle qu'elle reçoit de la source froide.

Théorème de Carnot

Énoncé. Les rendements de deux machines réversibles fonctionnant entre les mêmes températures sont égaux, quelle que soit la nature des machines, et sont supérieurs au rendement de n'importe quelle machine irréversible fonctionnant entre les mêmes températures.

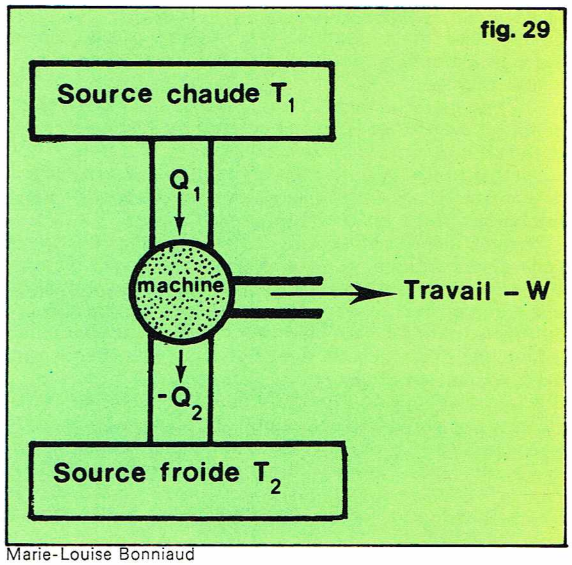

Marie-Louise Bonniaud

Démonstration. Soit une machine M réversible et une machine M′ irréversible fonctionnant entre les mêmes températures T_1 et T_2. Soit Q_1 et Q_2 d'une part, Q'_1 et Q'_2 d'autre part les quantités de chaleur échangées avec les deux sources pour que les machines fournissent le même travail W (*fig.* 31).

Les rendements sont :

$$R = \frac{-W}{Q_1} \qquad R' = \frac{-W'}{Q'_1} \qquad (W = -W')$$

Faisons maintenant fonctionner M en sens inverse, en utilisant le travail W fourni par M′. Le schéma est maintenant celui de la *figure* 32, c'est-à-dire que l'ensemble est équivalent à une machine qui recevrait de la source chaude une quantité de chaleur $(Q'_1 + Q_1)$ et fournirait à la source froide $(Q'_2 + Q_2)$ *sans échanger aucun travail avec l'extérieur.*

Or, pour une telle machine, le sens des échanges de chaleur est celui des flèches indiquées sur le schéma (*fig.* 33) ; sinon la machine serait un réfrigérateur parfait, en opposition avec le second principe. On doit donc avoir

$$Q'_1 + Q_1 \geqslant 0 \qquad \text{soit} \qquad Q'_1 \geqslant -Q_1$$

or

$$R = -\frac{W}{Q_1} \quad \text{et} \quad R' = -\frac{W'}{Q'_1} \quad \text{d'où} \quad R \geqslant R'$$

Nous avons démontré une partie du théorème de Carnot : une machine réversible fonctionnant entre T_1 et T_2 a un rendement plus grand qu'une machine irréversible fonctionnant entre T_1 et T_2.

La seconde partie est évidente.

Si nous supposons maintenant que M′ est aussi réversible, le même raisonnement nous donne :

$$R' \geqslant R$$

En rapprochant les deux résultats, il vient :

$$R = R'$$

Nous avons démontré que deux machines réversibles quelconques fonctionnant entre les mêmes températures ont le même rendement. Il nous suffit de connaître le rendement d'une machine réversible particulière pour connaître le rendement de toute machine réversible fonctionnant entre les mêmes températures.

Cycle de Carnot d'une machine réversible

Étudions le cycle de Carnot d'une mole de gaz parfait (voir *fig.* 28). AB est une détente isotherme à la température T_1. Le travail reçu est :

$$\textbf{(23)} \qquad W_1 = -\int_A^B P\,dV = -RT_1 \int_A^B \frac{dV}{V} = RT_1 \operatorname{Log} \frac{V_A}{V_B}$$

Comme la transformation AB est isotherme, l'énergie interne du gaz reste constante ($\Delta E = 0$) et la quantité de chaleur reçue Q_1 est $Q_1 = -W_1$.

La transformation BC étant adiabatique, on a d'après les relations **(21)** :

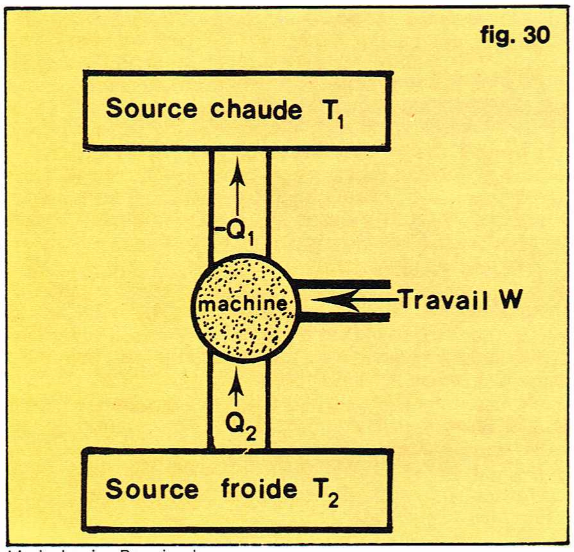

Marie-Louise Bonniaud

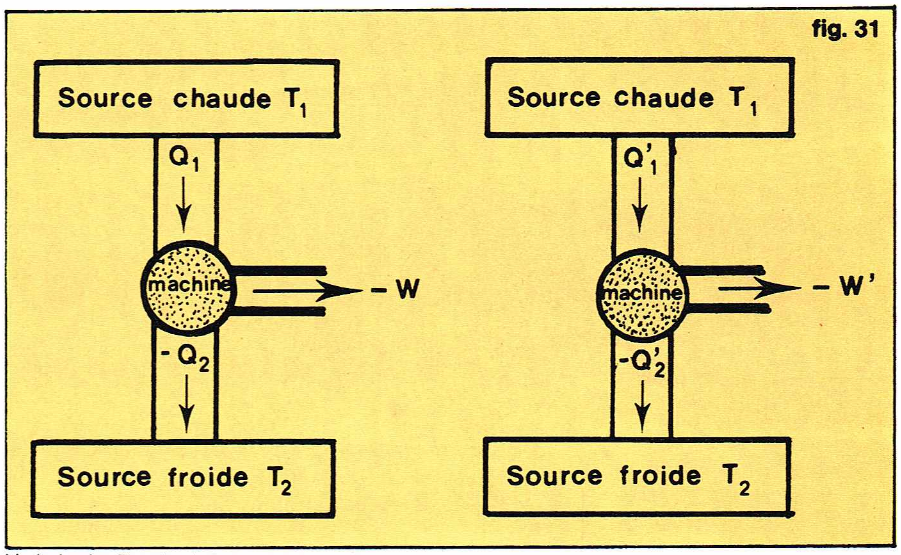

Marie-Louise Bonniaud

(24) $$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_C}{V_B}\right)^{\gamma-1}$$

Dans la compression isotherme CD, on calcule comme précédemment Q_2 et W_2 :

(25) $$W_2 = - Q_2 = RT_2 \text{ Log } \frac{V_C}{V_D}$$

et enfin on revient à l'état initial A par une compression adiabatique DA où

(26) $$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_D}{V_A}\right)^{\gamma-1}$$

En comparant **(24)** et **(26)**

(27) $$\frac{V_A}{V_B} = \frac{V_D}{V_C}$$

D'où

(28) $$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2} \frac{\text{Log } \frac{V_A}{V_B}}{\text{Log } \frac{V_C}{V_D}} = -\frac{T_1}{T_2}$$

Le rendement de la machine réversible est, d'après la relation **(22)** :

(29) $$R = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

D'après le théorème de Carnot, ce rendement est donc celui de toutes les machines réversibles fonctionnant entre les températures T_1 et T_2. Le rendement de Carnot constitue une limite supérieure théorique du rendement d'une machine.

La relation **(28)** nous permet d'écrire *l'égalité de Clausius* pour un cycle ditherme réversible :

(30) $$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$$

Lorsque le cycle ditherme est irréversible, le rendement est inférieur à la limite théorique **(29)** :

(31) $$\frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} < \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

On a alors

(32) $$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} < 0$$

Nombre quelconque de sources

Les résultats précédents s'étendent au cas d'un système en relation avec plus de deux sources de chaleur. Soit $T_1, T_2, ..., T_n$ les températures de *n* sources avec lesquelles le système échange les quantités de chaleur $Q_1, Q_2, ..., Q_n$.

Pour un cycle réversible, on a une égalité analogue à **(30)** :

(33) $$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} + ... + \frac{Q_n}{T_n} = \sum_1^n \frac{Q_i}{T_i} = 0$$

et, pour un cycle irréversible, on a une inégalité analogue à **(32)** :

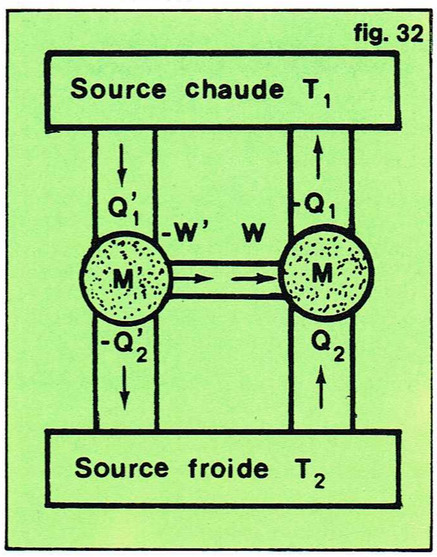

Marie-Louise Bonniaud

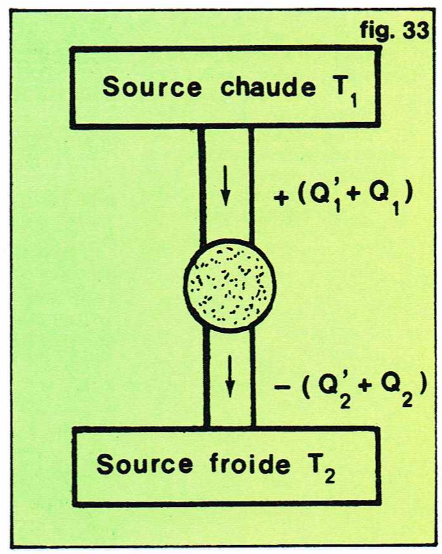

Marie-Louise Bonniaud

▲ ***Figure 32 ; l'ensemble de la figure 31 est équivalent à une machine unique.***
Figure 33 ; l'ensemble de la figure 32 ne fournit pas de travail à l'extérieur.

(34) $$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} + ... + \frac{Q_n}{T_n} = \sum_1^n \frac{Q_i}{T_i} < 0$$

En supposant un nombre infini de sources, dont les températures varient d'une quantité infiniment petite de l'une à l'autre et qui échangent avec le système des quantités de chaleur infiniment petites, et en remplaçant les sommes **(33)** et **(34)** par des intégrales, on peut écrire :

$$\oint \frac{đQ}{T} \leqslant 0$$

l'égalité et l'inégalité correspondant à des cycles réversible et irréversible respectivement. Dans le cadre d'un cycle irréversible, l'inégalité s'appelle *inégalité de Clausius.*

L'entropie

Définition

Nous avons montré que, pour une suite de transformations réversibles d'un système thermodynamique formant un cycle, nous pouvons écrire la relation

$$\oint \frac{đQ}{T} = 0$$

Considérons maintenant un système qui peut passer d'un état initial A à un autre état final B par plusieurs voies différentes qui sont supposées toutes réversibles. L'intégrale

$$\oint_A^B \frac{đQ}{T} \text{ ne dépend pas du chemin suivi.}$$

En effet, considérons par exemple trois chemins différents que peut emprunter le système pour passer de l'état A à l'état B (*fig.* 34).

▶ *Figure 34; la variation d'entropie, quand on passe de A en B, ne dépend pas du chemin suivi.*

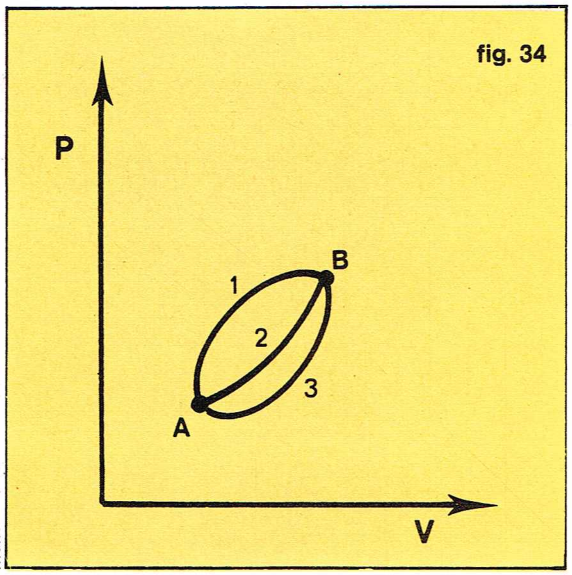

Marie-Louise Bonniaud

Le chemin (1) dans le sens A vers B associé au chemin (3) dans le sens B vers A forme un cycle réversible pour lequel nous pouvons écrire :

$$\int_A^B \frac{đQ_1}{T} + \int_B^A \frac{đQ_2}{T} = 0$$

Il en résulte que $\int_A^B \frac{đQ_1}{T} = \int_A^B \frac{đQ_2}{T}$

L'intégrale a la même valeur, qu'elle soit évaluée le long du chemin (1) ou le long du chemin (2) ou le long de tout autre chemin *réversible.*

Cela étant posé, nous pouvons définir une fonction d'état S des variables indépendantes telles que

$$S(B) - S(A) = \int_A^B \frac{đQ}{T}$$

Cette fonction S appelée **entropie** a été introduite par Clausius en 1865. Sa différentielle est $dS = \frac{đQ}{T}$.

La fonction S n'est définie qu'à une constante arbitraire près, mais sa variation ΔS entre deux états donnés a toujours une valeur parfaitement déterminée.

Nous devons noter que l'intégrale $\int_A^B \frac{đQ}{T}$ qui permet d'évaluer cette variation entre deux états donnés doit toujours être calculée *en choisissant une voie réversible* qui mène de l'état A à l'état B. L'intégrale $\int_A^B \frac{đQ}{T}$ calculée le long d'une voie irréversible (notée par la lettre *i*) n'est pas égale à ΔS.

En appliquant l'inégalité de Clausius :

$$\int_A^B \frac{đQ_i}{T} < S(B) - S(A)$$

Lorsqu'un système thermodynamique évolue *irréversiblement* entre deux états successifs A et B, la somme $\int_A^B \frac{đQ_i}{T}$ le long de cette voie irréversible est plus petite que la variation d'entropie S (B) — S (A).

Transformation adiabatique réversible

Une transformation adiabatique est par définition une transformation sans échange de chaleur entre le système et le milieu extérieur; donc telle que, pour toutes ses parties infinitésimales, $dQ = 0$.

Lorsqu'elle est *réversible,* on a également $dS = \frac{đQ}{T} = 0$.

On en conclut qu'*une transformation adiabatique réversible est une transformation isentropique : S = constante.*

Transformation adiabatique irréversible

Pour toute transformation irréversible, on a :

$$\int_A^B \frac{đQ_i}{T} < S(B) - S(A)$$

Si la transformation réelle est adiabatique, on a par définition $đQ = 0$.

Donc $S(B) > S(A)$

A étant un état initial et B un état final, postérieur dans le temps à l'état A, nous pouvons affirmer :

Lorsqu'un système thermiquement isolé évolue irréversiblement, son entropie augmente en fonction du temps.

Il en est de même pour un système complètement isolé qui évolue irréversiblement : *L'entropie d'un système isolé augmente en fonction du temps.*

Exemples de calcul de variation d'entropie

Une mole de gaz à la température constante T_1 se détend d'une manière réversible d'un volume V_A à un volume V_B. Calculons la variation d'entropie. La quantité de chaleur reçue est $Q_1 = \mathbf{R}T_1 \text{ Log } V_B/V_A$ (voir le calcul effectué dans la description du cycle de Carnot) :

$$S(B) - S(A) = \int_A^B \frac{đQ}{T} = \frac{1}{T_1}\int_A^B đQ = \mathbf{R} \text{ Log } \frac{V_B}{V_A}$$

Prenons un autre exemple : 1 000 g d'eau sont chauffés de 20 °C à 80 °C. La chaleur spécifique massique de l'eau est **c** = 4,2 J/g/degré. On calcule la variation d'entropie en faisant le raisonnement suivant : le chauffage se fait d'une manière réversible en mettant l'eau en contact avec une infinité de sources de chaleur dans le sens des températures croissantes. La variation d'entropie s'écrit :

$$\Delta S = \int_{T_1}^{T_2} \frac{M\mathbf{c}dT}{T} = M\mathbf{c} \text{ Log } \frac{T_2}{T_1} = 782 \text{ J/degré}$$

M est la masse d'eau (M = 1 000 g). Il faut bien remarquer que les températures qu'on a utilisées sont exprimées en degrés Kelvin (la température de l'eau varie de 293 °K à 353 °K).

Examinons maintenant le cas de transformations irréversibles. Une masse M d'eau, de chaleur spécifique **c**, est prise à la température T_1 et mise en contact avec une source de chaleur à la température T_2 (ce qu'on appelle un thermostat). L'ensemble forme un système isolé, et la température de la masse M augmente irréversiblement jusqu'à T_2. Au cours de cette opération, le thermostat cède au corps la quantité de chaleur $Q = M\mathbf{c}(T_2 - T_1)$, et son entropie varie de :

$$\Delta S_T = \int \frac{đQ}{T} = \frac{1}{T_2}\int đQ = \frac{-M\mathbf{c}(T_2 - T_1)}{T_2}$$

La variation d'entropie de la masse M est, d'après ce qui précède :

$$\Delta S_M = M\mathbf{c} \text{ Log } \frac{T_2}{T_1}$$

On remarque que, même si la masse est amenée de la température T_1 à la température T_2, irréversiblement, la variation d'entropie doit être calculée suivant un chemin réversible. La variation d'entropie totale est :

$$\Delta S = \Delta S_T + \Delta S_M = M\mathbf{c}\left(\frac{T_1 - T_2}{T_2} + \text{Log } \frac{T_2}{T_1}\right)$$

En posant $x = \frac{T_1 - T_2}{T_2}$, ΔS s'écrit :

$$\Delta S = M\mathbf{c}\,[x - \text{Log }(1 + x)]$$

Un calcul simple montre que la quantité entre crochets est toujours positive. On retrouve un résultat déjà obtenu : l'entropie du système isolé augmente en fonction du temps.

Entropie de l'Univers

On parle souvent d'entropie de l'Univers. En thermodynamique, ce qu'on appelle l'Univers, c'est l'ensemble du système et de la partie du milieu extérieur qui échangent de l'énergie. L'ensemble formant un système isolé, on peut dire que :

— l'entropie de l'Univers ne peut jamais diminuer en fonction du temps;

— si l'Univers est le siège d'une transformation réversible, son entropie reste constante;

— s'il est le siège d'une transformation irréversible, son entropie augmente en fonction du temps.

Notons enfin que, puisque dans les transformations irréversibles des systèmes isolés l'entropie augmente, on peut dire qu'au cours de ces transformations, il y a *création d'entropie.*

Description statistique d'un système

L'entropie à l'échelle microscopique

Dans ses derniers travaux en 1865, Clausius introduisit, comme on l'a vu, la notion d'*entropie*, qui fournissait un critère quantitatif sur le sens de l'évolution d'un processus et sur l'équilibre d'un système.

C'est Boltzmann qui, en 1870, eut l'idée de relier l'entropie, qui est un concept macroscopique, aux propriétés moléculaires d'un système. La description de l'état macroscopique d'un système ne permet pas de rendre compte du très grand nombre d'états microscopiques dans lequel il se trouve. De plus, ces états microscopiques (ou micro-états) varient continuellement en fonction du temps (dans un gaz, par exemple, ces variations sont dues aux collisions entre les molécules).

Prenons l'exemple d'un gaz contenu dans un récipient [*fig.* 35 (a)], le nombre de molécules étant de l'ordre de 10^{20}. A l'équilibre, la densité est uniforme ; en particulier, chaque partie du récipient A et B contient la moitié des molécules. Bien entendu, ce n'est pas exactement la moitié, car il y a de petites fluctuations (quand le nombre de molécules est de l'ordre de 10^{20}, les fluctuations sont de l'ordre de 10^{10}). Il est très improbable qu'à un instant donné, par suite de fluctuations, toutes les molécules se trouvent dans la partie A [*fig.* 35 (b)]. Cela peut arriver si on les repousse à l'aide d'un piston [*fig.* 35 (c)].

En ôtant très rapidement le piston, le gaz est tout d'abord dans l'état décrit par la *fig.* 35(b), mais il occupera très rapidement tout l'espace [*fig.* 35(a)] avec une densité uniforme, aux petites fluctuations près. Il faudrait attendre un temps considérablement long par rapport à l'âge de l'Univers pour que les fluctuations soient observables à l'échelle macroscopique ; de plus, elles seraient très brèves. C'est pourquoi nous négligerons ces fluctuations.

La détente d'un gaz dans le vide est un exemple typique de processus *irréversible*. Abandonné à lui-même, un gaz initialement dans l'état (b) [*fig.* 35], va évoluer vers l'état (a), mais l'inverse ne se produira pas.

La différence entre l'état initial et l'état final est la suivante : dans l'état final, on a une moins bonne connaissance du système, car on ne sait pas si une molécule est dans le compartiment A ou le compartiment B, alors qu'on est sûr qu'elle est dans le compartiment A à l'état initial. On peut dire que, dans l'état final, le système est moins *ordonné* que dans l'état initial.

L'entropie d'un système est une mesure du degré de *désordre* de ce système. Plus le désordre d'un système est grand, plus son entropie est grande.

Prenons l'exemple d'un cristal monoatomique sublimé en vapeur. Dans l'état initial, le cristal se présente sous la forme d'un solide, et les atomes vibrent autour de leur position d'équilibre, tout en restant régulièrement espacés. Dans l'état final au contraire, les atomes se déplacent dans tout l'espace occupé par la vapeur.

Rappelons que l'entropie est une fonction d'état, elle ne dépend pas de la manière dont on est passé de l'état initial à l'état final.

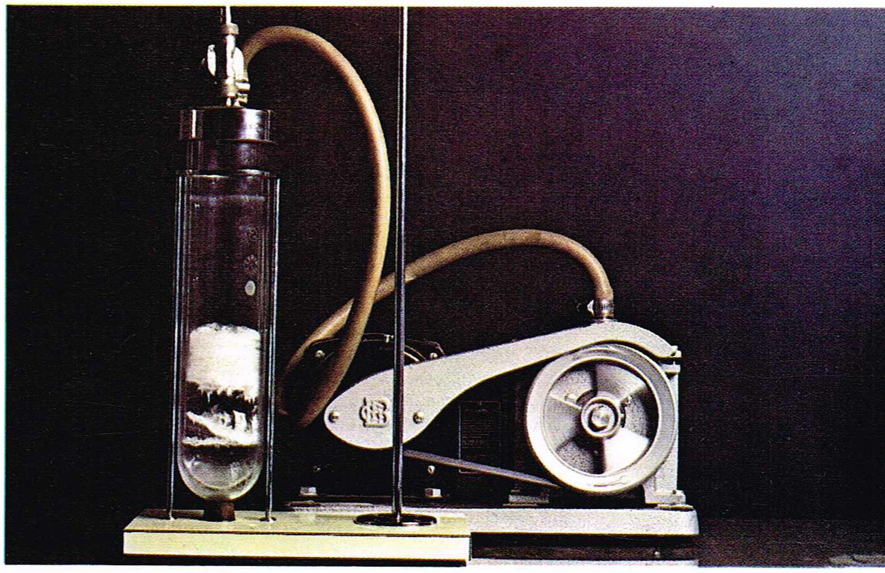

E. Rousseau - Snark International

▲ ***Appareillage servant à l'expérience sur la solidification de l'azote liquide par dépression afin de passer par le*** **point triple** ***de l'azote (— 210 °C) ; à ce point, le corps se présente sous les trois phases liquide, solide et gazeuse en même temps.***

fig. 35.

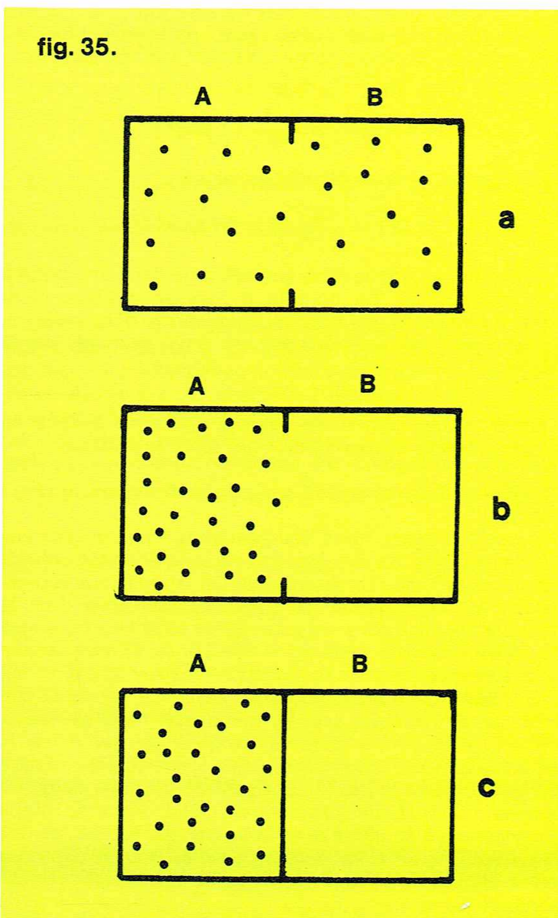

Marie-Louise Bonniaud

◀ ***Figure 35*** **a, b, c :** ***schéma du comportement des molécules de gaz dans un récipient.***

Les états accessibles

Soit un système comportant N molécules que nous prendrons, pour simplifier, toutes identiques. L'état macroscopique de ce système peut être défini de différentes manières qui dépendent des contraintes qu'il subit : le volume d'un gaz dans un récipient dont les parois sont rigides est constant ; si l'une des parois du récipient est un piston mobile avec la pression extérieure constante, la pression du gaz à l'intérieur du récipient est maintenue constante. Il peut exister aussi une contrainte de température. Nous allons traiter pour commencer le cas de systèmes isolés, ou *systèmes microcanoniques*.

A l'équilibre, un système isolé se trouve dans un état macroscopique déterminé par l'énergie E, le volume V et le nombre N de particules, c'est-à-dire par l'ensemble (E, V, N). Hors d'équilibre, il faut utiliser, en plus, d'autres variables macroscopiques. Par exemple, dans le cas d'un gaz parfait, on doit préciser la densité de particules n : (nombre de particules par unité de volume) $[x, y, z, t]$, en chaque point de coordonnées (x, y, z), à chaque instant t, ou plutôt la densité *moyenne* dans des intervalles finis de volume et de temps. A l'équilibre, ces variables supplémentaires ont des valeurs bien définies ; pour un gaz en équilibre, la densité de particules est donnée par $n = \frac{N}{V}$.

Généralement, on appelle les variables supplémentaires α_1, α_2, ... et un état macroscopique est déterminé pour simplifier l'écriture, par (E, V, N, α).

Comme on l'a déjà dit, la description d'un micro-état est très compliquée, en raison du grand nombre de particules d'un système. Heureusement, on n'a pas besoin de connaître les micro-états, mais uniquement de savoir comment ils correspondent à l'état macroscopique d'énergie E avec la précision δE. La conservation de l'énergie impose que l'énergie totale du système soit comprise entre E et E + δE. On appelle *états accessibles* du système les états tels que l'énergie soit comprise entre ces limites.

fig. 36

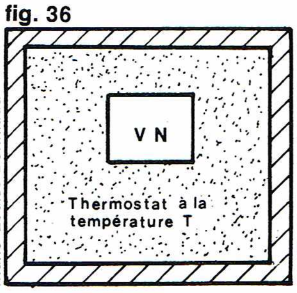

Marie-Louise Bonniaud

▲ ***Figure 36 :** le système de **N** particules et de volume **V** est en contact avec un thermostat à la température **T**.*

Postulat fondamental

Un système dans un état macroscopique donné peut se trouver dans l'un ou l'autre de ces états accessibles. Si le système a, à un instant donné, des probabilités égales de se trouver dans chacun de ses états accessibles, on peut admettre qu'il en sera de même à des instants ultérieurs. On dit qu'un tel système garde un *ensemble statistique invariable dans le temps* et qu'il est en équilibre. Cette propriété constitue le postulat fondamental de la thermodynamique statistique et peut s'énoncer ainsi :

Un système isolé est en équilibre s'il a des probabilités égales de se trouver dans chacun de ses états accessibles et réciproquement.

Calcul de probabilité

Le postulat fondamental de l'équiprobabilité permet le calcul statistique de toutes les propriétés indépendantes du temps d'un système en équilibre. En principe, ces calculs sont très simples. Considérons ainsi un système en équilibre, et notons Ω le nombre total d'états accessibles. Suivant notre postulat, la probabilité de trouver le système dans chacun de ses états accessibles est alors la même et, par conséquent, simplement égale à $1/\Omega$. (La probabilité de trouver le système dans un état qui n'est pas accessible est évidemment zéro.) Supposons maintenant que nous nous intéressions à un certain paramètre y du système ; par exemple, y pourrait être le moment magnétique du système ou sa pression. Quand le système est dans un état particulier, le paramètre y prend une certaine valeur bien définie. Énumérons les différentes valeurs possibles de y et notons-les $y_1, y_2, ..., y_n$. Parmi les états accessibles au système, il y aura alors quelques états pour lesquels le paramètre prend la valeur particulière y_i. La probabilité $\mathbf{P}_i$ pour que le paramètre prenne la valeur y_i est alors simplement égale à la probabilité pour que le système se trouve parmi les Ω_i états caractérisés par cette valeur y_i. Par conséquent, on obtient $\mathbf{P}_i$ en sommant $1/\Omega$ (la probabilité de trouver le système dans l'un quelconque de ses états accessibles) sur les Ω_i états où y prend la valeur y_i, c'est-à-dire que $\mathbf{P}_i$ est essentiellement Ω_i fois plus grand que $1/\Omega$ probabilités de trouver le système dans chacun de ses états accessibles. On a donc :

$$\mathbf{P}_i = \frac{\Omega_i}{\Omega}$$

La valeur moyenne du paramètre y est alors, par définition, donnée par :

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^{n} \mathbf{P}_i y_i = \frac{1}{\Omega} \sum_{i=1}^{n} \Omega_i y_i$$

où la sommation porte sur toutes les valeurs possibles de y. La dispersion de y (ou écart type) peut être calculée de façon analogue. Tous les calculs statistiques sont ainsi essentiellement aussi simples que ceux qui interviennent dans le problème du jeu de pile ou face.

Nombre d'états accessibles d'un système macroscopique

Considérons un système macroscopique avec des paramètres extérieurs donnés, ainsi que ses niveaux d'énergie. Nous noterons l'énergie totale du système E. Pour faciliter le comptage des états, nous grouperons ces états par énergie en divisant l'échelle d'énergie en petits intervalles de même largeur δE. δE est supposé très petit à l'échelle macroscopique (c'est-à-dire très petit devant l'énergie totale du système et petit devant la précision de n'importe quelle mesure macroscopique de son énergie). D'un autre côté, δE est supposé très grand à l'échelle microscopique (c'est-à-dire beaucoup plus grand que l'énergie d'une seule particule du système et aussi, par conséquent, beaucoup plus grand que la séparation de deux niveaux d'énergie adjacents du système). Un intervalle quelconque δE contient ainsi un très grand nombre d'états possibles du système. Nous introduirons la notation :

Ω (E) : nombre d'états d'énergies comprises entre E et E + δE

Le nombre d'états Ω (E) dépend de la largeur δE de l'intervalle élémentaire choisi. Puisque E est macroscopiquement très petit, Ω (E) doit être simplement proportionnel à δ (E), c'est-à-dire que nous pouvons écrire :

$$\Omega(\mathrm{E}) = \mathbf{d}(\mathrm{E})\,\delta\mathrm{E}$$

où **d** (E) est indépendant de la largeur δE. (La quantité **d** (E) est appelée *densité d'états* parce qu'elle est égale au nombre d'états par unité d'énergie pour une énergie donnée E.) Puisque l'intervalle δE contient un grand nombre d'états, Ω (E) change assez peu quand on passe d'un intervalle d'énergie à l'intervalle adjacent. Par conséquent, Ω (E) peut être considéré comme une fonction variant continûment de l'énergie E. Nous examinerons plus spécialement la variation de Ω (E) avec l'énergie E pour un système macroscopique.

Remarquons, en passant, qu'il est possible d'obtenir Ω (E) si l'on connaît la quantité

Φ (E) : nombre total d'états ayant une énergie *inférieure* à E.

Le nombre Ω (E) d'états ayant une énergie comprise entre E et E + δE est alors simplement donné par :

(35) $$\Omega(\mathrm{E}) = \Phi(\mathrm{E} + \delta\mathrm{E}) - \Phi(\mathrm{E}) = \frac{d\Phi}{d\mathrm{E}}\,\delta\mathrm{E}$$

Particule dans une boîte à une dimension

Montrons sur un exemple très simple comment on peut compter le nombre d'états.

Considérons une particule unique de masse m libre de se déplacer dans une boîte à une dimension de longueur L. Les niveaux d'énergie possibles de ce système sont alors :

(36) $$\mathrm{E} = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2\,m\mathrm{L}^2}\,\mathbf{n}^2$$

où **n** = 1, 2, 3, 4, ... comme on le montre en mécanique quantique, m la masse de la particule et $\hbar$ la constante de Planck divisée par 2 π. Le coefficient de $\mathbf{n}^2$ est très petit si L est de dimension macroscopique. Le nombre quantique **n** est alors très grand pour les énergies rencontrées dans les cas intéressants. D'après **(36)**, la valeur **n** pour une énergie E donnée est :

$$\mathbf{n} = \frac{\mathrm{L}}{\pi\hbar}\,(2\,m\mathrm{E})^{1/2}$$

Puisque des états quantiques successifs correspondent à des valeurs de **n** différentes de une unité, le nombre total Φ (E) d'états quantiques ayant une énergie inférieure à E, ou un nombre quantique inférieur à **n**, est alors simplement égal à (**n**/1) = **n**. Soit :

$$\Phi(\mathrm{E}) = \mathbf{n} = \frac{\mathrm{L}}{\pi\hbar}\,(2\,m\mathrm{E})^{1/2}$$

(35) conduit alors au résultat suivant :

$$\Omega(\mathrm{E}) = \frac{\mathrm{L}}{2\,\pi\hbar}\,(2\,m)^{1/2}\,\mathrm{E}^{-1/2}\,\delta\mathrm{E}$$

Un calcul analogue peut être effectué dans une boîte à trois dimensions. Le nombre d'états accessibles étant comme l'entropie une mesure du désordre d'un système, Boltzmann a eu l'idée de relier ces deux quantités par la relation :

$$\mathrm{S} = k \operatorname{Log} \Omega$$

Cette relation permet de calculer l'entropie à partir de la connaissance microscopique des états du système.

Équilibre d'un système en contact avec un thermostat

Jusqu'à présent, nous nous sommes limité au cas des systèmes isolés. Le système qui nous intéresse à présent est en contact avec un thermostat. On rappelle que le thermostat est un réservoir de grandes dimensions dont la température reste constante, quels que soient les échanges de chaleur avec le système. A l'équilibre, la température du système est celle du thermostat, mais son énergie n'est plus fixée (on appelle *système fermé* un système qui échange de l'énergie avec le thermostat mais pas de la matière, c'est-à-dire dont le nombre de particules N reste constant). L'ensemble système fermé plus thermostat est isolé comme le montre la *figure* 36 et forme ce qu'on appelle un *système canonique*. L'état macroscopique du système en équilibre avec le thermostat est fixé par les variables T, V et N. Le système peut se trouver dans des micro-états qu'on numérote 1, 2, ... r, auxquels correspondent les énergies E_1, E_2, ... E_r. En général, l'énergie n'est pas suffisante pour préciser un micro-état. De nom-

breux micro-états peuvent posséder la même énergie et différer par d'autres caractéristiques.

Choisissons un intervalle δE plus petit que l'intervalle minimal entre deux niveaux E_i et E_{i+1}. Un tel intervalle contiendra au plus un seul niveau d'énergie, mais il correspondra à plusieurs états différents du système. Reprenons les résultats obtenus dans le cas d'un système isolé.

La probabilité P_r pour que le système soit dans l'état r avec l'énergie E_r est proportionnelle au nombre d'états accessibles du thermostat avec bien entendu l'énergie totale du système plus le thermostat constante et égale à E_0. Le thermostat a une énergie comprise entre $E_0 - E_r$ et $E_0 - E_r + \delta E$. Il y a $\Omega_2 (E_0 - E_r)$ états accessibles au thermostat :

$$P_r = C^{te} \cdot \Omega_2 (E_0 - E_r)$$

Dans la parenthèse, nous avons omis V et N qui sont des constantes. La somme des probabilités étant égale à 1, l'inverse de la constante vaut $\sum_r \Omega_2 (E_0 - E_r)$:

D'où
$$P_r = \frac{\Omega_2 (E_0 - E_r)}{\sum_r \Omega_2 (E_0 - E_r)}$$

En utilisant la relation $S = k \text{ Log } \Omega$, l'expression peut s'écrire :

$$P_r = C^{te} \cdot \exp [S_2 (E_0 - E_r)/k]$$

L'énergie du thermostat est grande par rapport aux valeurs E_r, donc $E_0 \gg E_r$.

En faisant un développement limité du premier ordre, on écrit :

$$\frac{1}{k} S_2 (E_0 - E_r) = \frac{1}{k} S_2 (E_0) - \frac{1}{k} \frac{\partial S_2 (E_0)}{\partial E_0} E_r$$

Par définition, on appelle *paramètre de température* :

$$\beta = \frac{1}{k} \frac{\partial S_2 (E_0)}{\partial E_0}$$

β vaut $1/kT$ où T est la *température absolue* exprimée en degrés Kelvin. On obtient alors :

$$\frac{1}{k} S_2 (E_0 - E_r) = \frac{1}{k} S_2 (E_0) - \beta E_r$$

Le premier terme du membre de droite étant une constante, P_r s'écrit :

$$P_r = C^{te} \cdot e^{-\beta E_r}$$

L'inverse de la constante vaut $Z = \sum_r e^{-\beta E_r}$. Z est appelé *fonction de partition* du système.

$$P_r = \frac{1}{Z} e^{-\beta E_r} \qquad (37)$$

L'équation **(37)** est le résultat final, on l'appelle *distribution de Boltzmann*. Elle donne *la probabilité pour qu'un système en contact avec un thermostat à la température* T *(c'est-à-dire avec le paramètre de température $\beta = 1/kT$) soit dans l'état d'énergie* E_r. La fonction de partition Z est d'une importance fondamentale dans l'étude des systèmes à température constante. Par exemple, on peut relier l'énergie moyenne du système $\bar{E}$ à la fonction de partition Z

$$\bar{E} = \sum_r P_r E_r = \frac{\sum_r E_r e^{-\beta E_r}}{\sum_r e^{-\beta E_r}} = -\frac{\partial \text{ Log } Z}{\partial \beta} \qquad (38)$$

Pour obtenir la dernière égalité de l'équation **(38)**, on remarque que le numérateur de la troisième est la dérivée changée de signe du dénominateur par rapport à β (la dérivée de Log x vaut $1/x$).

La dérivée partielle par rapport à β se fait en maintenant E_r constant. En effet, les niveaux d'énergie E_r ne dépendent pas de la température qui est un *paramètre externe*.

L'énergie libre

On montre en thermodynamique statistique qu'on peut relier l'entropie aux probabilités P_r par la relation :

$$S = -k \sum_r P_r \text{ Log } P_r \qquad (39)$$

Montrons d'abord qu'on retrouve dans le cas d'un système isolé un résultat déjà obtenu. Soit Ω (E, V, N) le nombre d'états accessibles d'énergie entre E et $E + \delta E$; la probabilité P_r de trouver le système dans l'un de ces états accessibles est $P_r = 1/\Omega$. La probabilité de trouver le système dans un état hors de l'intervalle δE est nulle. La somme $\sum_r$ conduit au résultat qu'on connaît déjà :

$$S = -k \frac{1}{\Omega} \sum_r \text{Log } \frac{1}{\Omega} = + k \text{ Log } \Omega$$

(on a effectué Ω fois la somme $- \text{Log } \frac{1}{\Omega}$).

Prenons maintenant le cas du système canonique : en portant $P_r = e^{-\beta E_r}/Z$ dans **(39)**, on obtient :

$$S = k \text{ Log } Z + E/T$$

En introduisant une nouvelle fonction d'état, l'*énergie libre de Helmholtz* $F = E - TS$, on obtient la relation :

$$F = -kT \text{ Log } Z$$

La relation entre l'énergie libre F et la fonction de partition Z est aussi importante dans les systèmes canoniques que la relation $S = k \text{ Log } \Omega$ dans les systèmes microcanoniques.

On a voulu montrer dans ce qui précède qu'on pouvait aussi bien définir des fonctions d'état entropie, énergie interne, énergie libre, et des variables comme la température absolue en thermodynamique classique qu'en thermodynamique statistique ; on verra bientôt qu'il en est de même pour la pression.

Théorie cinétique des gaz parfaits

On a déjà parlé des gaz parfaits en thermométrie. Nous allons reprendre en détail les propriétés de ces gaz en utilisant les notions de thermodynamique statistique qui viennent d'être exposées.

Les gaz parfaits sont constitués de molécules animées d'un mouvement désordonné, chacun de ces mouvements obéissant aux lois de la mécanique classique. Le volume occupé par le grand nombre de molécules est faible par rapport au récipient qui les contient. On suppose aussi que les *collisions* entre les molécules sont élastiques et de durée négligeable, et qu'entre deux collisions les molécules se déplacent suivant un mouvement rectiligne et uniforme.

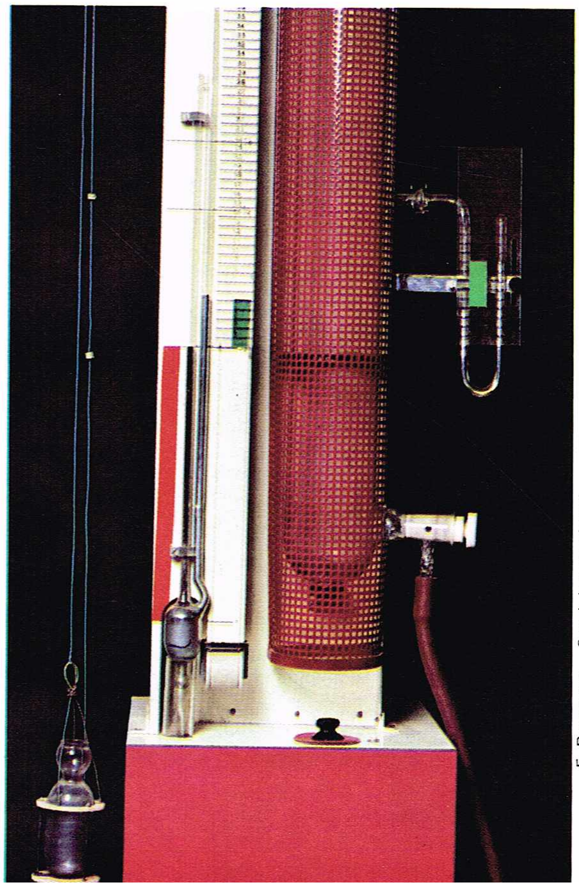

E. Rousseau - Snark International

◄ ***Les gaz parfaits : appareillage pour la vérification expérimentale de la loi de Mariotte.***

▶ *Figure 37 : la boîte contient un gaz parfait dont l'une des molécules dans l'état r exerce sur la paroi P_1 une force F_r parallèle à l'axe Ox.*

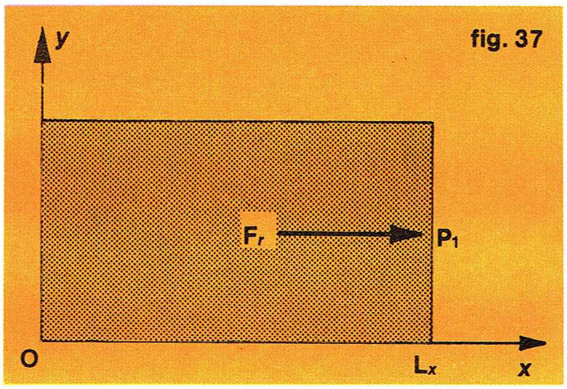

Richard Colin

Pression moyenne d'un gaz parfait

Nous allons calculer la pression qu'exerce un gaz parfait sur les parois du récipient qui le contient, d'une part en fonction de la température absolue T, d'autre part en fonction de la vitesse des molécules, ce qui nous permettra ensuite, en comparant les deux résultats, de déduire une relation entre la vitesse des molécules et la température absolue du récipient.

Relation entre la pression et la température

Calculons d'abord la pression en utilisant la distribution canonique.

Il est très facile de mesurer expérimentalement la pression moyenne (c'est-à-dire la force moyenne par unité de surface) exercée par un gaz sur les parois du récipient qui le contient. Il est donc particulièrement intéressant de calculer la pression moyenne exercée par un gaz parfait. Soit F la force dans la direction x exercée par une molécule sur la paroi P_1 (c'est-à-dire la paroi définie par $x = L_x$) du récipient contenant le gaz (*fig.* 37). Notons F_r la valeur de cette force quand la molécule est dans un état quantique r d'énergie ε_r. La force F_r peut être reliée facilement à l'énergie ε_r. En fait, supposons que la paroi P_1 du récipient soit déplacée très lentement vers la droite d'une quantité dL_x. Au cours de ce processus, la molécule exercera sur la paroi une quantité de travail $F_r dL_x$ qui doit être égale à la diminution $-d\varepsilon_r$ de l'énergie de la molécule. Ainsi

$$F_r dL_x = -d\varepsilon_r$$

ou **(40)**
$$F_r = -\frac{\partial \varepsilon_r}{\partial L_x}$$

Nous avons écrit ici une dérivée partielle pour indiquer que les autres dimensions L_y et L_z sont maintenues constantes.

La force *moyenne* $\bar{F}$ exercée par une molécule sur la paroi est alors donnée par le calcul de la moyenne de la force F_r pour tous les états possibles r de la molécule. Ainsi

(41)
$$\bar{F} = \sum_r P_r F_r = \frac{\sum_r e^{-\beta\varepsilon_r}\left(-\frac{\partial \varepsilon_r}{\partial L_x}\right)}{\sum_r e^{-\beta\varepsilon_r}}$$

où nous avons utilisé l'expression $e^{-\beta\varepsilon_r}/Z$ pour la probabilité P_r de trouver la molécule dans un état r. La relation **(41)** peut être simplifiée en remarquant que le numérateur est la dérivée divisée par $-\beta$ de la fonction de partition Z :

(42)
$$\bar{F} = \frac{1}{\beta Z}\frac{\partial Z}{\partial L_x} = \frac{1}{\beta}\frac{\partial \text{Log } Z}{\partial L_x}$$

Cette relation générale peut maintenant être appliquée au résultat obtenu pour Log Z dans le cas d'une molécule monoatomique. Dans ce cas, un calcul assez complexe donne :

$$\text{Log } Z = \text{Log } V - \frac{3}{2}\text{Log } \beta + 3 \text{ Log } b$$

où b est une constante qui dépend de la molécule. Comme $V = L_x L_y L_z$, une dérivation partielle donne

(43)
$$\bar{F} = \frac{1}{\beta}\frac{\partial \text{Log } Z}{\partial L_x} = \frac{1}{\beta}\frac{\partial \text{Log } V}{\partial L_x} = \frac{1}{\beta}\frac{1}{L_x}$$

Puisque le gaz est parfait, les molécules se déplacent sans s'influencer sensiblement les unes les autres. Par conséquent, la force normale *totale* moyenne (c'est-à-dire la force dans la direction x) exercée sur la paroi P_1 par toutes les molécules du gaz est obtenue en multipliant la force moyenne $\bar{F}$ exercée par une molécule par le nombre total N de molécules dans le gaz. En divisant ce résultat par la surface $L_y L_z$ de la paroi, on obtient alors la pression moyenne P exercée par le gaz sur la paroi. La relation **(43)** conduit ainsi au résultat :

(44)
$$\bar{P} = \frac{N\bar{F}}{L_y L_z} = \frac{N}{L_y L_z}\frac{kT}{L_x} = \frac{N}{V}kT$$

Ainsi

(45)
$$\bar{P}V = NkT$$

où $V = L_x L_y L_z$ est le volume du récipient.

Si N est égal au nombre d'Avogadro, V est alors le volume molaire et **(45)** s'écrit PV = RT.

Relation entre la pression et la vitesse moyenne

Soit une boîte cubique d'arête l, contenant une molécule (*fig.* 38). Soit P_1 et P_2 ses faces perpendiculaires à Ox, et soit à un instant donné V_x la composante suivant Ox de la vitesse de la molécule, qui vient frapper la face P_1 (*fig.* 39).

Le choc étant parfaitement élastique (la molécule va rebondir avec une composante de vitesse suivant Ox égale à $-V_x$, les autres composantes étant inchangées), la quantité de mouvement cédée à la paroi dans le choc est donc : $2\,mV_x$. La molécule met un temps $\frac{2l}{V_x}$ pour faire l'aller-retour (puisque les collisions ont une durée négligeable). Donc elle frappe P_1, $\frac{V_x}{2l}$ fois par seconde. Par seconde, la molécule cède à P_1 une quantité de mouvement

$$2\,mV_x \cdot \frac{V_x}{2l} = m\frac{V_x^2}{l}$$

Si la boîte contient N molécules identiques, et si nous négligeons d'abord les collisions entre elles, la quantité de mouvement cédée à la paroi par seconde, c'est-à-dire la force exercée par le gaz sur la paroi, sera :

$$F = \frac{m}{l}(V_{1x}^2 + V_{2x}^2 + V_{3x}^2 + \ldots + V_{Nx}^2)$$

$\vec{V}_1$, $\vec{V}_2$, ..., $\vec{V}_N$ étant les vitesses des N molécules et V_{1x}, V_{2x}, ..., V_{Nx} leurs composantes suivant Ox.

La pression P sera donc :

$$P = \frac{F}{S} = \frac{F}{l^2} = \frac{m}{l^3}(V_{1x}^2 + \ldots + V_{Nx}^2)$$

Soit n le nombre de molécules par unité de volume : on a donc $N = l^3 n$, c'est-à-dire $l^3 = \frac{N}{n}$. Reportons dans l'expression de P :

$$P = mn\left(\frac{V_{1x}^2 + \ldots + V_{Nx}^2}{N}\right)$$

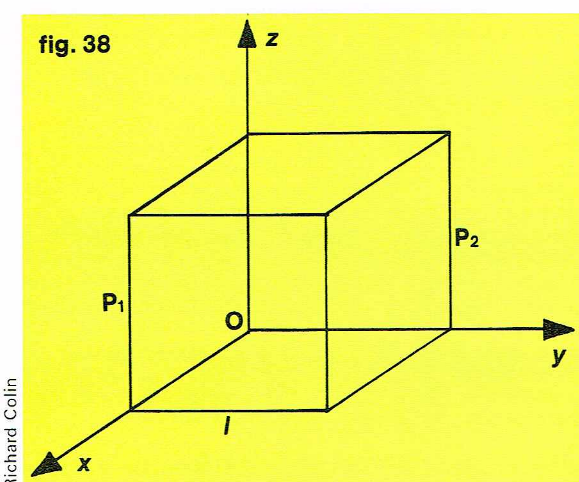

Richard Colin

▶ *Figure 38 : la boîte cubique d'arête l contient une molécule.*

L'expression $\frac{V_{1x}^2 + ... + V_{Nx}^2}{N}$ est la moyenne de V_x^2 pour toutes les molécules : notons-la $\overline{V_x^2}$.

Nous avons donc : $P = mn\overline{V_x^2}$.

Si nous voulons avoir une idée de la vitesse moyenne des molécules, la première méthode qui se présente est de faire la somme de toutes ces vitesses et de la diviser par N. Seulement cette somme sera toujours nulle en raison du mouvement désordonné des molécules et ne nous donnera donc aucune information sur les valeurs absolues des vitesses.

Aussi est-on amené à faire la moyenne des carrés des modules des vitesses, qu'on note $\overline{V^2}$:

$$\overline{V^2} = \frac{V_1^2 + V_2^2 + ... + V_N^2}{N}$$

On décide alors de poser que cette moyenne est égale à V_q^2, V_q ayant donc les dimensions d'une vitesse : V_q est appelée « *vitesse quadratique moyenne* » des molécules, et on a :

$$V_q = \sqrt{\frac{V_1^2 + V_2^2 + ... + V_N^2}{N}} = \sqrt{\overline{V^2}}$$

Il ne faut pas confondre $\overline{V^2}$ et $(\overline{V})^2$, cette dernière quantité étant nulle.

Pour une molécule quelconque, on a : $V^2 = V_x^2 + V_y^2 + V_z^2$

Donc, en moyenne, on aura : $\overline{V^2} = \overline{V_x^2} + \overline{V_y^2} + \overline{V_z^2}$, mais le caractère désordonné du mouvement impose que toutes les directions sont équivalentes.

On a donc : $\overline{V_x^2} = \overline{V_y^2} = \overline{V_z^2} = \frac{\overline{V^2}}{3}$

reportons dans l'expression trouvée pour P, il vient :

$$P = \frac{1}{3} nm\overline{V^2}$$

Nous avons négligé les collisions entre les molécules, mais cela ne modifie pas le résultat. En effet, ces collisions sont élastiques, le moment linéaire et l'énergie cinétique totale des deux molécules sont conservés, et le résultat trouvé reste valable.

D'autre part, la pression calculée sur la face P_1 est évidemment la même en tous les points de la boîte (en négligeant le poids du gaz) et serait la même dans une boîte de forme quelconque.

Considérons maintenant une mole de gaz, c'est-à-dire $\mathcal{N}$ molécules ($\mathcal{N}$ étant le nombre d'Avogadro). Si cette mole de gaz occupe un volume V, le nombre n de molécules par unité de volume sera $n = \mathcal{N}/V$, ce qui donne :

$$P = \frac{1}{3}\frac{\mathcal{N}}{V} m\overline{V^2}$$

ou

$$PV = \frac{1}{3} \mathcal{N} m\overline{V^2}$$

Or, d'après l'équation d'état des gaz parfaits (PV = RT pour une mole) :

$$RT = \frac{1}{3} \mathcal{N} m\overline{V^2}$$

On peut faire apparaître ainsi une relation entre l'énergie cinétique moyenne de translation d'une molécule et la température T en degrés Kelvin :

$$\frac{1}{2} m\overline{V^2} = \frac{3}{2} kT$$

il en résulte la conséquence importante suivante : à la même température, toutes les molécules ont la même énergie cinétique moyenne de translation, même si elles ont des masses différentes, c'est-à-dire indépendamment de la nature du gaz. En d'autres termes, *l'énergie interne d'un gaz parfait* ne dépend que de la température. Dans un mélange de deux gaz (les masses des molécules étant respectivement m_1 et m_2), les vitesses quadratiques moyennes des molécules seront donc telles que :

$$\frac{1}{2} m_1 V_{q_1}^2 = \frac{1}{2} m_2 V_{q_2}^2$$

soit :

$$\frac{V_{q_2}}{V_{q_1}} = \sqrt{\frac{m_1}{m_2}}$$

Énergie interne d'un gaz parfait

On vient de voir que l'énergie cinétique moyenne de translation d'une molécule vaut $\frac{3}{2} kT$.

C'est jusqu'à présent la seule forme d'énergie permise par notre modèle. L'énergie interne d'une mole ($\mathcal{N}$ molécules) de gaz vaut donc, d'après ce modèle :

$$\bar{E} = \frac{3}{2} \mathcal{N} kT = \frac{3}{2} RT$$

Or, nous savons que la chaleur spécifique molaire à volume constant C_V est telle que :

$$d\bar{E} = C_V dT$$

Nous en déduisons donc que : $C_V = \frac{3}{2} R$.

Ce résultat se révèle exact expérimentalement pour les gaz monoatomiques, et faux pour les autres gaz. On peut l'expliquer ainsi : ce qui est égal à $\frac{3}{2}$ RT, c'est l'énergie cinétique de translation. Or celle-ci n'est égale à l'énergie interne que pour un gaz dont les molécules ne possèdent pas d'autre moyen d'emmagasiner de l'énergie. C'est le cas pour les molécules ponctuelles de notre modèle. C'est aussi le cas pour les molécules d'un gaz monoatomique. Mais pour les autres, il va falloir tenir compte de toutes les manières d'emmagasiner de l'énergie.

fig. 39

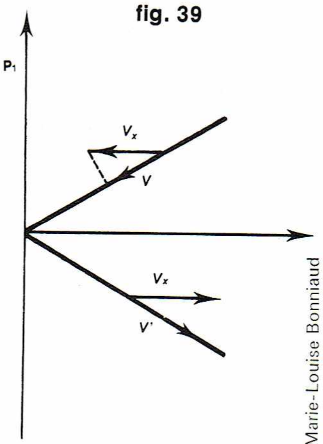

▲ *Figure 39 : la molécule contenue dans la boîte de la figure 38 subit un choc sur la paroi* P_1.

Équipartition de l'énergie

Les molécules ponctuelles rigides de la théorie cinétique ne peuvent avoir que de l'énergie cinétique de translation. Mais si nous considérons des molécules formées de plusieurs atomes, nous pourrons les faire tourner, et emmagasiner de l'énergie cinétique de rotation. Nous pouvons aussi cesser de nous borner aux molécules rigides, et faire vibrer les atomes.

Ainsi, l'énergie mécanique totale d'une telle molécule contiendra plusieurs termes résumés dans le tableau II et qui, bien qu'ayant des origines différentes, ont la même valeur moyenne qui ne dépend que de la température.

Degrés de liberté

On appelle *degré de liberté* une manière d'emmagasiner de l'énergie cinétique. Par exemple, une molécule monoatomique a trois degrés de liberté (translation suivant Ox, Oy et Oz). Une molécule diatomique en a cinq (les trois de translation, plus deux correspondant à des rotations autour d'axes parallèles à Oy et Oz, si la molécule est parallèle à Ox). Une molécule rigide ayant un nombre d'atomes supérieur à 2 aura six degrés de liberté.

▼ *Tableau II : l'énergie mécanique totale d'une molécule est la somme de plusieurs énergies.*

Tableau II
L'énergie mécanique totale d'une molécule est la somme de plusieurs énergies

Énergie	Valeur
de translation suivant l'axe Ox	$\frac{1}{2} m V_x^2$
de rotation autour d'un axe parallèle à Ox	$\frac{1}{2} I \omega_x^2$
de vibration de deux atomes	$\frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} V^2$
potentielle de vibration des atomes	$\frac{1}{2} \alpha x^2$

Tableau III Chaleur spécifique des gaz			
Gaz	**Monoatomique**	**Diatomique**	**Polyatomique**
Nombre de degrés de liberté	3	5	6
C_V	$\frac{3}{2}R$	$\frac{5}{2}R$	$\frac{6}{2}R = 3R$
$C_P = C_V + R$	$\frac{5}{2}R$	$\frac{7}{2}R$	$\frac{8}{2}R = 4R$
$\gamma = \frac{C_P}{C_V}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{7}{5} = 1{,}4$	$\frac{4}{3}$

▲ ***Tableau III : chaleur spécifique des gaz.***

Le nombre de degrés de liberté est égal au nombre de variables nécessaires pour déterminer la position de la molécule ; ainsi, une molécule monoatomique est bien définie par ses coordonnées x, y, z : 3 degrés de liberté. Une molécule diatomique sera définie par les coordonnées x_1, y_1, z_1 d'un atome, et deux des coordonnées de l'autre (x_2, y_2), car la connaissance de la distance des deux atomes permet de calculer z_2 : 5 degrés de liberté.

Nous avons vu précédemment que chaque degré de liberté doit avoir, à une température donnée, une énergie cinétique moyenne invariable. Comme l'énergie cinétique moyenne de translation (3 degrés de liberté) vaut :

$$\frac{1}{2}mV^2 = \frac{3}{2}kT$$

il correspond à chaque degré de liberté le tiers de cette énergie :

$$e = \frac{1}{2}kT$$

Une molécule ayant f degrés de liberté aura donc une énergie interne $\bar{e} = \frac{f}{2}kT$.

Une mole d'un gaz (dont chaque molécule a f degrés de liberté) aura donc une énergie interne $\bar{E} = \mathcal{N}\left(\frac{f}{2}kT\right)$,

soit : $$E = \frac{f}{2}RT \quad \text{et} \quad C_V = \frac{f}{2}R$$

Chaleurs spécifiques des gaz parfaits

Les résultats pour les molécules rigides sont résumés dans le tableau III.

Si f est le nombre de degrés de liberté, l'énergie cinétique de la mole sera $\frac{f}{2}RT$, donc :

$$C_V = \frac{f}{2}R \quad C_P = \frac{f}{2}R + R = \frac{f+2}{2}R$$

Dans le cas de molécules non rigides, il faut tenir compte des degrés de liberté de vibration. Mais l'expérience montre qu'une molécule ne vibre qu'à partir d'une certaine température : le nombre de degrés de liberté dépend donc de la température, ce qui est en contradiction avec la théorie cinétique. Cela provient de ce que la théorie cinétique est fondée sur les lois de Newton, et que nous arrivons ici à une de leurs limites de validité : celle des petites dimensions.

La distribution des vitesses de Maxwell

Prenons plus particulièrement une molécule d'un gaz en contact thermique avec un thermostat à la température T. La distribution canonique est applicable à cette molécule qu'on supposera monoatomique. L'énergie de cette molécule est, en négligeant l'action du champ de pesanteur :

$$\varepsilon = \frac{1}{2}mV^2 = \frac{1}{2}\frac{\vec{p}^2}{m}$$

$\vec{p}$ étant la quantité de mouvement $\vec{p} = m\vec{V}$ de la molécule de masse m.

L'état de la molécule est décrit par les trois coordonnées de position x, y, z et les trois coordonnées de quantité de mouvement p_x, p_y et p_z. Cherchons la probabilité pour que la molécule ait des coordonnées comprises entre x et $x + dx$, y et $y + dy$, z et $z + dz$, p_x et $p_x + dp_x$, p_y et $p_y + dp_y$, p_z et $p_z + dp_z$. Ces intervalles pour les variables de position et de quantité de mouvement définissent dans ce qu'on appelle l'espace des phases un volume qu'on appellera $d^6\nu$ et qui vaut

$$d^6\nu = dx\,dy\,dz\,dp_x\,dp_y\,dp_z$$

En utilisant la distribution canonique, la probabilité pour que la molécule se trouve dans le volume $d^6\nu$ est proportionnelle à :

$$e^{-1/2\beta mV^2}\,d^6\nu$$

On peut exprimer la probabilité précédente en utilisant la vitesse au lieu de la quantité de mouvement :

$$V^2 = p^2/m^2\,;$$

le volume défini est $d\nu' = dx\,dy\,dz\,dV_x\,dV_y\,dV_z$ et la probabilité est proportionnelle à $e^{-1/2\beta mV^2}\,d^6\nu'$.

A partir de cette probabilité, on peut déduire un certain nombre de résultats intéressants. En particulier, on peut chercher parmi les N molécules du gaz parfait le nombre de molécules ayant une vitesse comprise entre V et $V + dV$, c'est-à-dire la quantité $f(V)\,d^3V$. On l'obtient en multipliant $e^{-1/2\beta mV^2}\,d^6\nu'$ par le nombre total N et en divisant cette quantité par $dx\,dz\,dy$:

$$\textbf{(46)} \qquad dN = f(V)\,d^3V = Ce^{-1/2\beta mV^2}\,d^3V$$

La relation **(46)** est appelée *distribution des vitesses de Maxwell*. On remarquera qu'elle ne dépend pas de la position (x, y, z) des molécules, mais uniquement de leur vitesse. La constante C se détermine par une condition de normalisation : la somme de toutes les expressions précédentes doit être égale à N,

soit avec $$V^2 = V_x^2 + V_y^2 + V_z^2$$

$$N = C\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-1/2\,\beta mV_x^2}\,dV_x \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-1/2\,\beta mV_y^2}\,dV_y \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-1/2\,\beta mV_z^2}\,dV_z$$

On trouve

$$C = N\left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2}$$

Dans l'expression dN ci-dessus, l'extrémité du vecteur vitesse $\vec{V}$ peut se trouver n'importe où à l'intérieur du volume $4\pi V^2 dV$ limité par deux sphères de rayon V et $V + dV$. Finalement, la *distribution maxwellienne du module des vitesses* s'écrit :

$$dN = \frac{N}{2\sqrt{\pi}}\left(\frac{2m}{kT}\right)^{3/2} e^{-1/2\,\beta mV^2}\,V^2 dV$$

L'expression dN/dV présente un maximum : quand V croît, le facteur exponentiel décroît, mais V^2 croît. La vitesse pour laquelle dN/dV est maximal est appelée *vitesse la plus probable* et s'obtient en annulant la dérivée de (dN/dV) [*fig.* 40]. Elle a pour valeur :

$$\tilde{V} = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$$

Quant à la vitesse quadratique moyenne, rappelons qu'elle vaut :

$$V_q = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

Il ne faut pas confondre V_q avec la vitesse moyenne qui est nulle et la valeur moyenne de la vitesse qui vaut :

$$V_m = \sqrt{\frac{8kT}{m\pi}}$$

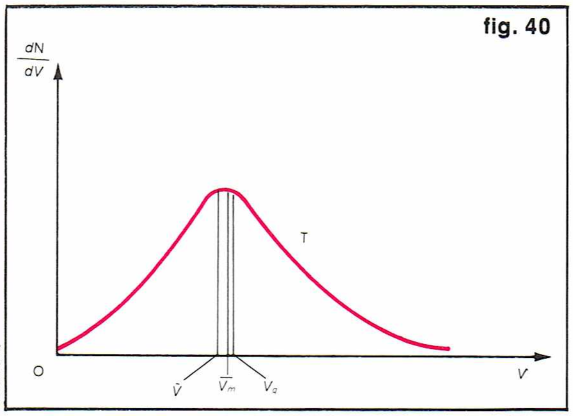

I.G.D.A.

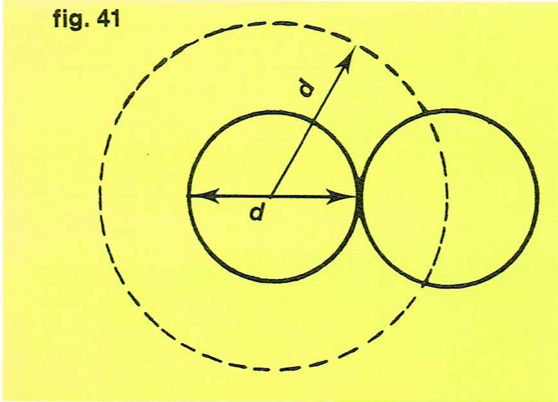

Marie-Louise Bonniaud

◀ *A gauche, figure 40 : distribution maxwellienne des vitesses. A droite, figure 41 : sphère de protection des molécules.*

On remarque que les expressions de V, V_q et V_m sont toutes trois proportionnelles à $(kT/m)^{1/2}$. Les vitesses augmentent avec la température, et, pour une température donnée, elles diminuent quand la masse moléculaire augmente. Calculons à titre d'exemple la vitesse quadratique moyenne de molécule d'azote dont la masse molaire vaut 28 g. A la température ordinaire T = 300 °K, V_q vaut environ 500 m/s.

Ce nombre est de l'ordre de grandeur de la vitesse du son dans l'azote.

Chaleur spécifique des solides

Il peut sembler étonnant qu'on parle maintenant de la chaleur spécifique des solides alors qu'on est en train de traiter des propriétés des gaz parfaits. Cependant, comme nous allons le voir, on peut utiliser ici le théorème de l'équipartition de l'énergie à condition que la température T soit suffisamment élevée. Soit un corps solide simple constitué de N atomes. Chaque atome a dans le solide une position d'équilibre stable, l'ensemble formant un réseau cristallin. Chacun des atomes peut cependant se déplacer légèrement autour de sa position d'équilibre. La force de rappel (due aux atomes voisins et nulle à l'équilibre) est proportionnelle en première approximation au déplacement. Le mouvement de l'atome est celui d'un oscillateur harmonique à trois dimensions. Son énergie suivant la direction x, par exemple, s'écrit :

$$\varepsilon_x = \frac{1}{2}\frac{p^2}{m}x + \frac{1}{2}\alpha x^2$$

où m est la masse de l'atome et α la constante de rappel. En moyenne, chacun des degrés de liberté a l'énergie $\frac{1}{2}k$.

Soit, pour $\bar{\varepsilon}_x$, deux fois $\frac{1}{2}kT$. De même, $\bar{\varepsilon}_y = \bar{\varepsilon}_z = kT$.

L'énergie moyenne d'un atome est alors :

$$\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}_x + \bar{\varepsilon}_y + \bar{\varepsilon}_z = 3\,kT$$

Pour une mole de solide contenant $\mathcal{N}$ (nombre d'Avogadro) atomes, l'énergie est :

$$\bar{E} = 3\,\mathcal{N}kT = 3\,RT$$

Rappelons que la chaleur spécifique molaire vaut par définition :

$$C_V = \left(\frac{\partial \bar{E}}{\partial T}\right)_V$$

Soit ici : $C_V = 3$ R. Remarquons que ce résultat est très général, puisqu'il ne dépend ni de la masse atomique, ni de la constante de rappel, ni de la température. Il est connu sous le nom de loi de Dulong et Petit et s'énonce ainsi : *La chaleur spécifique molaire des solides est indépendante de la température et égale à* 3 R *à condition que la température soit suffisamment élevée.*

Une théorie due à Einstein montre que la loi de Dulong et Petit est valable pour des températures T > θ ou $\theta = \frac{\hbar\omega}{k}$; $\hbar$ est la constante de Planck divisée par 2 π et ω la pulsation de l'atome.

Pour le cuivre, par exemple, θ = 230 °K. Cette température θ est appelée *température d'Einstein*. Lorsque T est inférieure à θ, et décroît, Einstein a montré que C_V décroît également. A la limite, C_V tend vers zéro quand T tend vers zéro.

Les gaz réels

Libre parcours moyen

La loi de Boyle-Mariotte (PV = RT) conduit, lorsque la pression n'est plus très faible, à des conséquences absurdes : lorsque la pression P croît, le volume V décroît et à la limite tend vers zéro, à température constante. En fait, lorsque la pression n'est plus très faible, on ne peut plus considérer que les molécules sont ponctuelles. Dans le cas de molécules monoatomiques, imaginons qu'on puisse les comparer à de petites sphères solides de diamètre d. Un choc entre deux molécules se produit quand la distance entre leurs centres est égale à d. Une molécule ne laisse pas pénétrer une autre molécule à l'intérieur d'une *sphère de protection* de rayon d (*fig.* 41). Bien entendu, la réalité est beaucoup moins simple, même pour des molécules monoatomiques, cependant en dessous d'une certaine distance entre les centres, r_0, les forces répulsives deviennent rapidement croissantes, et r_0 est de l'ordre de ce qui permet d'utiliser le modèle ci-dessus. Pour les molécules polyatomiques, on peut aussi définir une sphère de protection.

Les molécules subissent entre elles des collisions supposées élastiques. Une molécule qui vient de subir une collision change de vitesse et de direction et se propage en ligne droite jusqu'à ce qu'elle subisse une nouvelle collision. Le segment de trajectoire parcouru entre deux collisions s'appelle *libre parcours moyen*.

Pour calculer le libre parcours moyen, faisons le raisonnement suivant. Considérons une molécule A qui, en se déplaçant, rencontrera les molécules qui ne sont pas entièrement à l'extérieur du cylindre de base πd^2 (*fig.* 42). Dans un cylindre de longueur L, il y a, si N est le nombre de molécules dans le volume total V, $\frac{N}{V}\cdot\pi d^2 L$. Si L est égale au libre parcours moyen l, la molécule subira un seul choc, c'est-à-dire qu'il n'y a dans le cylindre qu'une seule autre molécule :

$$1 = \frac{N}{V}\cdot\pi d^2 l$$

D'où la valeur du libre parcours moyen :

$$l = \frac{V}{N\pi d^2}$$

En fait, ce calcul est simplifié puisqu'on a supposé la molécule B immobile, ce qui n'est pas le cas. Un calcul plus rigoureux donne :

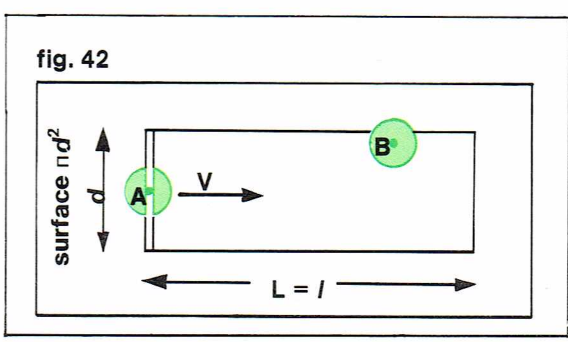

Richard Colin

◀ *Figure 42 : la molécule A va heurter la molécule B dont le centre est à l'intérieur d'un volume de section πd^2.*

Tableau IV Coefficients *a* et *b* de Van der Waals (rapportés à une kilomole)								
Gaz	He	Hg	H_2	O_2	N_2	CO_2	HCl	H_2O
10^{-4} *a* en $N.m^4$	0,34	29	2,5	14	13	36	37	54
10^3 *b* en m^3	23	55	26	32	38	43	41	31

▲ *Tableau IV : coefficients a et b de Van der Waals (rapportés à une kilomole).*

$$l = \frac{V}{4/3\,\pi d^2}$$

ce qui ne change pas l'ordre de grandeur de l. On remarque que le libre parcours moyen diminue quand le volume des molécules augmente ainsi que leur dimension, ce qui se comprend facilement puisque, dans ce cas, les chocs sont plus nombreux. Donnons un ordre de grandeur de l : à la pression atmosphérique et à la température ordinaire, le libre parcours moyen est d'environ 10^{-7} m pour des molécules d'un rayon de 3 Å ; à une pression de 10^{-6} atm, il vaut environ 10 cm.

Équation d'état de Van der Waals

Dans le cas de gaz réels, il faut tenir compte du volume des molécules et des forces exercées par les molécules les unes sur les autres. Ce qui amène à introduire la notion de *pression interne* a/V^2 et de *covolume* b. L'équation suivante a été proposée il y a un siècle par Van der Waals :

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT$$

a et b sont des constantes qui varient suivant les gaz et sont déterminées expérimentalement. On remarque, en comparant les valeurs fournies par le tableau IV que, pour l'hélium et l'azote, le covolume b est du même ordre; par contre, la pression interne est quarante fois plus faible pour l'hélium, dont les molécules sont sphériques et dépourvues d'affinité chimique, que pour l'azote.

Essayons de tracer les isothermes $P = f(V)$ comme on l'a déjà fait pour les gaz parfaits. Il y a deux formes d'isothermes (*fig.* 43) séparées par une isotherme qui possède un *point d'inflexion à tangente parallèle à l'axe des abscisses*. Pour déterminer les coordonnées du point d'inflexion (P_c, V_c) ainsi que la température de l'isotherme T_c, il faut écrire que la dérivée première et la dérivée seconde de

$$P = \frac{RT}{V - b} - \frac{a}{V^2}$$

sont nulles, c'est-à-dire :

$$\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T = -\frac{RT}{(V-b)^2} + \frac{2a}{V^3} = 0$$

$$\left(\frac{\partial^2 P}{\partial V^2}\right)_T = \frac{2\,RT}{(V-b)^3} - \frac{6a}{V^4} = 0$$

On tire des trois équations précédentes les coordonnées du point d'inflexion et la température critique :

$$V_c = 3\,b \qquad T_c = \frac{8\,a}{27\,bR} \qquad P_c = \frac{a}{27\,b^2}$$

En introduisant les notations

$$V_r = \frac{V}{V_c} \qquad T_r = \frac{T}{T_c} \qquad P_r = \frac{P}{P_c}$$

où P_r, V_r et T_r sont respectivement la pression, la température et le volume *réduits*, l'équation de Van der Waals prend la forme *réduite* :

$$\left(P_r + \frac{3}{V_r^2}\right)(3\,V_r - 1) = 8\,T_r$$

Cette équation d'état réduite ne dépend plus de la nature du gaz. Nous aurons l'occasion de reparler de l'équation de Van der Waals dans l'étude des changements de phase.

Changements de phase

Généralités

Tout corps peut exister sous différentes formes qu'on appelle *phases* et qui correspondent à des types différents d'assemblage de molécules. Une substance peut exister sous trois phases, *solide, liquide* ou *gazeuse* (la phase gazeuse est parfois appelée vapeur). L'eau, par exemple, peut exister sous forme de glace, de liquide ou de vapeur. La phase solide est la plus complexe, car il en existe plusieurs formes correspondant à des structures cristallines différentes. Selon la *température* et la *pression* auxquelles il est soumis, un corps apparaîtra dans l'une ou l'autre de ses phases. Quand on fait varier la pression ou la température, une phase peut se transformer en une autre phase (*fig.* 44). Ainsi, en fondant, un solide donne un liquide; ce même liquide donne en se vaporisant une vapeur.

Il peut arriver que deux phases coexistent, on dit alors qu'elles sont en *équilibre*. Prenons l'exemple d'une masse d'étain qu'on fait fondre dans un creuset, puis qu'on laisse refroidir. La température mesurée en plongeant la soudure chaude d'un thermocouple dans le creuset est initialement de 300 °C environ, elle décroît, puis se stabilise aux environs de 230 °C dès que la phase solide apparaît. Le palier de la *figure* 45 correspond à la coexistence de la phase

fig. 43

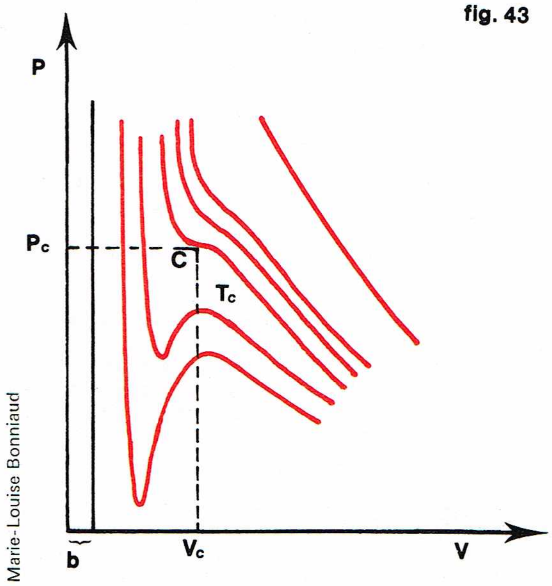

fig. 44

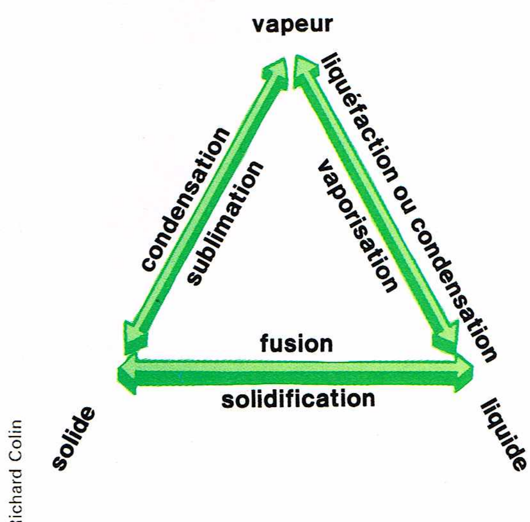

▶ *A gauche, figure 43 : isothermes de Van der Waals. A droite, figure 44 : les différents changements de phase.*

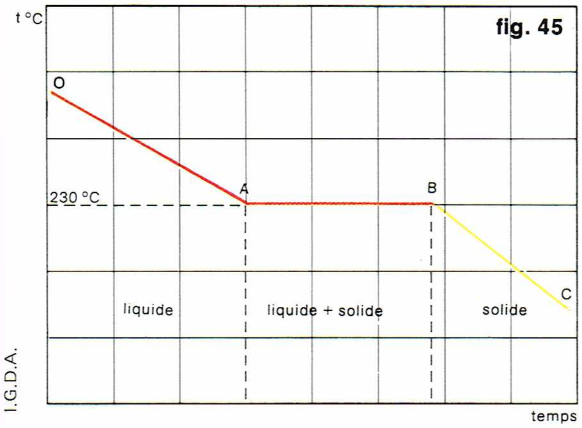

I.G.D.A.

◀ *Figure 45 : courbe de refroidissement de l'étain fondu.*

solide et de la phase liquide. Quand tout l'étain est devenu solide, la température décroît à nouveau.

Prenons l'exemple plus général d'un corps pur qui peut exister sous deux phases 1 et 2, N_1 molécules étant dans la phase 1 et N_2 dans la phase 2 ($N_1 + N_2 = C^{te}$). Pour une température et une pression données, on peut se demander si la phase 1 existe seule ($N_2 = 0$) ou si la phase 2 existe seule ($N_1 = 0$) ou bien encore si les deux phases existent ($N_1 \neq 0$, $N_2 \neq 0$). Pour répondre à cette question, il faut d'abord introduire des critères d'équilibre des systèmes à température et à pression constantes.

Équilibre d'un système en contact avec un thermostat

Soit un système A en contact avec un thermostat A′ dont la température T′ et la pression P′ sont constantes. L'ensemble $A^* = A + A'$ forme un système isolé d'énergie E^* (*fig.* 46). Le nombre d'états accessibles Ω^* du système complet est le produit du nombre d'états accessibles Ω et Ω' des systèmes A et A′ respectivement : $\Omega^* = \Omega\Omega'$. D'après la relation entre l'entropie et le nombre d'états accessibles $S = k \operatorname{Log} \Omega$:

(47) $$S^* = k \operatorname{Log} \Omega^* = k \operatorname{Log} \Omega + k \operatorname{Log} \Omega' = S + S'$$

Supposons que le thermostat A′ reçoive (du système A) la quantité de chaleur Q′. Sa variation d'entropie est, puisque T′ est constante :

$$\Delta S' = \frac{Q'}{T'}$$

L'énergie moyenne de A′ varie de $\Delta E'$ et, d'après le premier principe :

$$Q' = \Delta E' - W'$$

Le travail W′ reçu par le thermostat A′ est dû à la variation de volume ΔV de A, donc pour A′ la variation de volume est $-\Delta V'$ et

$$W' = -P'(-\Delta V) = P'\Delta V$$

D'autre part, l'énergie totale $E + E'$ étant constante, on a $\Delta E' = -\Delta E$. Finalement, en différentiant la relation **(47)**

$$\Delta S^* = \Delta S + \Delta S' = \Delta S - \frac{(\Delta E + P'\Delta V)}{T'} =$$

$$= \frac{-T'\Delta S + \Delta E + P'\Delta V}{T'}$$

Introduisons pour simplifier une nouvelle fonction

(47bis) $$G = E - T'S_1 + P'V_1$$

La fonction G est appelée *énergie libre de Gibbs* ou *enthalpie libre* du système A à pression P′ et température T′ constante. ΔG a pour valeur :

$$\Delta G = \Delta E - T'\Delta S + P'\Delta V$$

D'où la relation entre la variation d'entropie ΔS^* du système total isolé A et la variation d'enthalpie libre ΔG du système A

$$\Delta S^* = -\frac{\Delta G}{T'}$$

Entropie d'un système isolé à l'équilibre

Calculons le nombre d'états accessibles de A tels que l'énergie de A soit comprise entre E et $E + \delta E$. A étant à l'équilibre, tous les états ont la même probabilité. On cherche donc, parmi tous les états Ω, les états Ω (E) tels que A ait une énergie comprise entre E et $E + \delta E$. A′ a alors l'énergie $E' = E - \delta E$ et un nombre d'états accessibles $\Omega'(E^* - E)$. Le nombre d'états accessibles du système est alors :

(48) $$\Omega^*(E) = \Omega(E)\,\Omega'(E^* - E)$$

La probabilité pour A d'avoir une énergie comprise entre E et $E + \delta E$ est

(49) $$\mathbf{P}(E) = \frac{\Omega^*(E)}{\Omega^*_{total}}$$

ou Ω^*_{total} est constant et représente le nombre d'états accessibles total.

Calculons le maximum de **P** (E) ou plutôt, parce que c'est plus commode, de Log **P** (E). Ce maximum a lieu pour

$$\frac{\partial \operatorname{Log} \mathbf{P}(E)}{\partial E} = 0$$

Soit [d'après les relations **(48)** et **(49)**] :

(50) $$\frac{\partial \operatorname{Log} \Omega(E)}{\partial E} - \frac{\partial \operatorname{Log} \Omega'(E^* - E)}{\partial E'} = 0$$

Or, d'après la relation entre le paramètre de température et l'entropie :

$$\frac{1}{kT} = \frac{1}{k}\frac{\partial S}{\partial E} = \frac{\partial \operatorname{Log} \Omega(E)}{\partial E}$$

et de même :

$$\frac{1}{kT'} = \frac{\partial \operatorname{Log} \Omega'(E^* - E)}{\partial E'}$$

On déduit de ces relations la propriété très importante suivante : lorsque les systèmes A et A′ sont en équilibre thermique, leurs températures T et T′ sont égales et, dans ce cas, la relation **(50)** est vérifiée, c'est-à-dire que **P** (E) est maximal. Il en est de même de Ω^* (E) puisque Ω^*_{total} est une constante. En utilisant de plus la relation $S^* = k \operatorname{Log} \Omega^*(E)$, on arrive au résultat :

A l'équilibre, l'entropie d'un système isolé est maximale.

Enthalpie libre

Revenons maintenant à la relation $\Delta S^* = -\Delta G/T'$ qui montre que l'entropie S^* du système A^* croît quand l'enthalpie libre G du sous-système A décroît. L'*entropie maximale* S^* de A^* correspond donc à une valeur *minimale* de l'enthalpie libre G. On arrive à cette conclusion :

Quand un système est en équilibre à température et pression constantes, sa fonction enthalpie libre est minimale.

Un calcul analogue montre que, lorsqu'on impose uniquement une température constante, un système est en équilibre lorsque la fonction énergie libre F est minimale ($F = E - TS$).

Équilibre entre phases

Considérons un système constitué de deux phases distinctes séparées dans l'espace, et une substance constituée d'un seul type de molécules. Par exemple, ces phases pourraient être un solide et un liquide, ou un liquide et un gaz. En général, nous les noterons phase 1 et phase 2, respectivement. Nous examinerons ce système à une température constante quelconque T et une pression P imposées par le contact avec une source ayant les valeurs correspondantes de température et de pression. A l'exception de petites fluctuations (qui ne nous intéressent pas pour le moment), les deux phases de la substance en équilibre sont toujours à une température T et à une pression P. Nous noterons N_1 le nombre de molécules de la substance sous la forme de phase 1 et N_2 le nombre de molécules sous la forme de phase 2. D'après la conservation de la matière, le nombre total N de molécules doit, naturellement, rester constant, quelle que soit la manière dont les molécules se distribuent entre les deux phases. Nous avons donc :

(50bis) $$N_1 + N_2 = C^{te}$$

Les questions intéressantes, comme nous l'avons vu, sont alors les suivantes : à l'équilibre, à une température donnée T et à une pression P, la phase 1 sera-t-elle seule présente, ou la phase 2, ou les deux simultanément ?

fig. 46

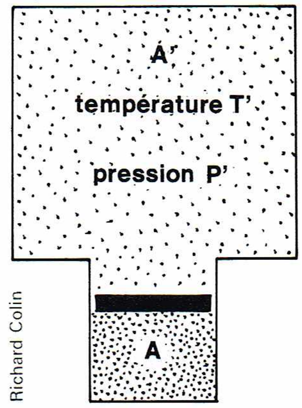

Richard Colin

▲ *Figure 46 : le système* A *est en contact avec un thermostat* A′ *à la température* T′ *et à la pression* P′ *constantes.*

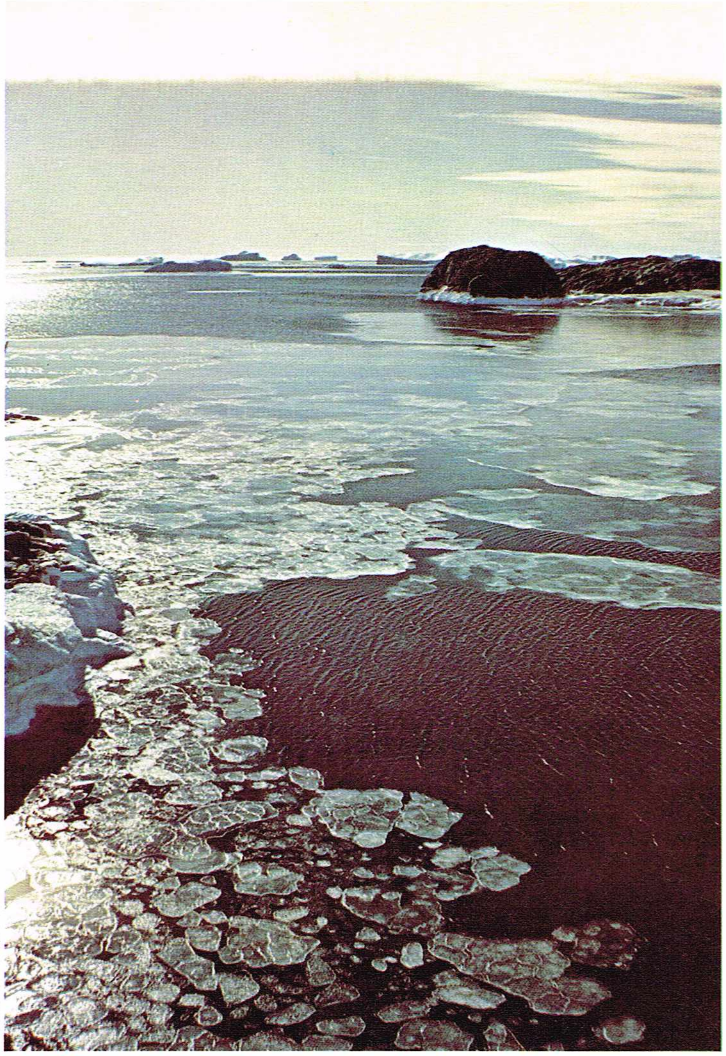

Leclercq - Rapho

Paolo Koch - Rapho

▲ ***Équilibre entre phases : à gauche, début de gel de la mer en terre Adélie ; à droite, éruption du Grand Geyser à Yellowstone Park (U. S. A.) ; cette éruption se produit lorsque la colonne d'eau, soulevée par les vapeurs chaudes profondes, entre en ébullition.***

Puisque la température T et la pression P sont maintenues constantes, toutes ces questions peuvent se réduire à l'étude de l'enthalpie libre G du système. Cette enthalpie libre peut être considérée comme une fonction de N_1 et de N_2. Notre formulation générale des conditions d'équilibre affirme alors que les paramètres N_1 et N_2 doivent prendre des valeurs telles que G soit minimal, où G est défini par la relation **(47bis)**. Nous avons donc :

(51) $$G = \bar{E} - TS + PV = \text{minimum}$$

L'énergie moyenne totale $\bar{E}$ du système est ici simplement égale à la somme des énergies moyennes des deux phases, l'entropie totale S du système est égale à la somme des entropies des deux phases et le volume total V du système est égal à la somme des volumes des deux phases. Il en résulte donc que :

$$G = G_1 + G_2$$

où G_1 est l'enthalpie libre de la phase 1 et G_2 celle de la phase 2.

Mais à une température et à une pression données, l'énergie moyenne, l'entropie et le volume d'une phase particulière sont simplement proportionnels à la quantité de phase présente. On peut donc écrire $G_1 = N_1 g_1$ et $G_2 = N_2 g_2$; g_i (T, P) est l'enthalpie libre par molécule de phase i à la température T et à la pression P données et caractérise les propriétés intrinsèques de la i-ième phase, quelle que soit la quantité présente. G s'écrit donc :

$$G = N_1 g_1 + N_2 g_2$$

où g_1 et g_2 dépendent de T et de P, mais ne dépendent pas des nombres N_1 ou N_2.

Si les deux phases coexistent en équilibre, N_1 et N_2 doivent être tels que G soit minimal en accord avec **(51)**. G doit donc rester constant pour des variations infinitésimales de N_1 et N_2, c'est-à-dire :

$$dG = g_1 dN_1 + g_2 dN_2 = 0$$

ou $$(g_1 - g_2)\, dN_1 = 0$$

puisque la conservation de la matière exprimée par **(47bis)** entraîne $dN_2 = dN_1$. Nous obtenons donc comme condition nécessaire pour la coexistence des deux phases en équilibre la condition suivante :

(52) $$g_1 = g_2$$

Quand cette condition est satisfaite, le transfert d'une molécule d'une phase à l'autre ne change pas la valeur de G qui a bien l'extrémum désiré.

Revenons maintenant à l'enthalpie libre G plus en détail. L'enthalpie libre par molécule g_i (T, P) de chaque phase étant une fonction bien définie caractérisant la phase particulière i à la température et à la pression données, nous pouvons alors énoncer les résultats suivants :

Si T et P sont tels que $g_1 < g_2$, alors la valeur minimale de G est obtenue si toutes les N molécules de la substance se transforment en phase 1 pour $G = Ng_1$. Seule la phase 1 peut alors exister en équilibre stable.

Si T et P sont tels que $g_1 > g_2$, alors la valeur minimale de G est obtenue si toutes les N molécules de la substance se transforment en phase 2 pour $G = Ng_2$. Seule la phase 2 peut alors exister en équilibre stable.

Si T et P sont tels que $g_1 = g_2$, les deux phases coexistent. La valeur G reste alors constante quand N_1 varie. Le lieu des points où T et P sont tels que la condition **(52)** est vérifiée représente alors la *courbe d'équilibre des phases* le long de laquelle les deux phases peuvent coexister en équilibre. Cette courbe, sur laquelle $g_1 = g_2$, divise le plan (PT) en deux régions : dans l'une $g_1 < g_2$ et la phase 1 est la seule stable, et dans l'autre $g_1 > g_2$ et la phase 2 est la seule stable.

Il est possible de caractériser la courbe d'équilibre des phases par une équation différentielle. Dans la *figure* 47,

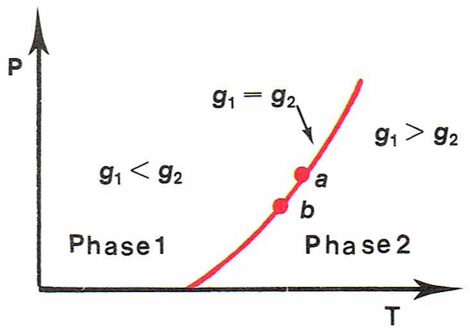

◀ ***Figure 47 :*** ***sur la courbe d'équilibre ($g_1 = g_2$) tracée dans le diagramme P, T, les deux phases coexistent.***

Marie-Louise Bonniaud

considérons un point quelconque, *a* par exemple, situé sur la courbe d'équilibre des phases et correspondant à une température T et à une pression P. La condition **(52)** entraîne alors :

(53) $$g_1\ (T, P) = g_2\ (T, P)$$

Équation de Clausius-Clapeyron

Considérons maintenant un point voisin, tel que *b*, situé aussi sur la courbe d'équilibre des phases et correspondant à une température T + *d*T et à une pression P + *d*P. La condition entraîne alors :

(54) $$g_1\ (T + dT, P + dP) = g_2\ (T + dT, P + dP)$$

En retranchant **(53)** de **(54)**, nous obtenons donc la condition :

(55) $$dg_1 = dg_2$$

où dg_i est la variation d'enthalpie libre par molécule de phase *i* si cette phase passe d'une température T et d'une pression P au point *a* à une température T + *d*T et à une pression P + *d*P au point *b*.

Mais d'après la définition de G, l'enthalpie libre par molécule de phase *i* est simplement :

$$g_i = \frac{G_i}{N_i} = \frac{E_i - TS_i + PV_i}{N_i}$$

ou

$$g_i = \bar{\varepsilon}_i - Ts_i + Pv_i$$

où $\bar{\varepsilon}_i = E_i/N_i$ est l'énergie moyenne, $s_i = S_i/N_i$ est l'entropie, et $v_i = V_i/N_i$ est le volume par molécule de phase *i*. Par conséquent :

(56) $$dg_i = d\bar{\varepsilon}_i - Tds_i - s_i dT + Pdv_i + v_i dP$$

Mais l'expression du premier principe nous permet de relier la variation d'entropie ds_i à la quantité de chaleur absorbée par la phase dans cette transformation, c'est-à-dire :

$$Tds_i = d\bar{\varepsilon}_i + Pdv_i$$

Nous obtenons donc simplement :

$$dg_i = -s_i dT + v_i dP$$

En appliquant ce résultat à chaque phase, **(56)** devient :

$$-s_1 dT + v_1 dP = -s_2 dT + v_2 dP$$
$$(s_2 - s_1)\ dT = (v_2 - v_1)\ dP$$

ou

(57) $$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta s}{\Delta v}$$

où $\Delta s = s_2 - s_1$ et $\Delta v = v_2 - v_1$

La relation **(57)** est appelée *équation de Clausius-Clapeyron.*

Considérons un point quelconque de la courbe d'équilibre des phases à une température T et à la pression correspondante P. L'équation **(57)** relie alors la pente d'équilibre des phases en ce point à la variation d'entropie Δs, par molécule, quand la courbe est traversée en ce point, c'est-à-dire quand un changement de phase se produit à cette température et à cette pression. Notons que, si l'on considère une quantité *arbitraire* de N molécules de la substance, les variations d'entropie et de volume sont simplement données par $\Delta S = N\Delta s$, $\Delta V = N\Delta v$. **(57)** peut donc se mettre également sous la forme :

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta S}{\Delta V}$$

Puisqu'il y a une variation d'entropie associée à un changement de phase, une certaine quantité de chaleur doit être absorbée. La *chaleur latente de transformation* L_{12} est définie comme la quantité de chaleur absorbée quand une quantité donnée de phase 1 est transformée en phase 2 lorsque les phases coexistent en équilibre. Puisque la transformation se produit à la température constante T, la variation correspondante d'entropie est reliée à L_{12} par

$$\Delta S = \frac{L_{12}}{T}$$

où L_{12} est la chaleur latente à cette température. L'équation de Clausius-Clapeyron peut encore se mettre sous la forme :

(58) $$\frac{dP}{dT} = \frac{L_{12}}{T\Delta V}$$

Si V est le volume molaire, alors L_{12} est la chaleur latente molaire.

Si V est le volume par gramme, alors L_{12} est la chaleur latente par gramme.

Changement de phase d'un corps simple

Nous avons déjà remarqué que les corps simples peuvent exister sous trois phases différentes : solide, liquide et gaz. (Il peut aussi exister plusieurs phases solides avec différentes structures cristallines.) Les courbes d'équilibre entre ces trois phases peuvent être représentées sur un diagramme, pression-température, de la manière générale indiquée sur la *figure* 48. Ces courbes définissent sur le diagramme les régions correspondant au solide, au liquide, et au gaz. Puisque les trois courbes ne peuvent diviser le plan qu'en trois régions distinctes, elles doivent se couper en un point commun, appelé *point triple.* A cette température et à cette pression uniques, des quantités arbitraires des trois phases peuvent donc coexister en équilibre. (C'est la propriété qui rend le point triple de l'eau si commode pour définir une température standard reproductible.) Au point C, appelé *point critique*, la courbe d'équilibre liquide-gaz s'arrête. La variation de volume ΔV entre une quantité donnée de liquide et de gaz tend alors vers zéro. Au-delà du point C il n'y a plus de changement de phase, puisqu'il n'existe alors qu'une seule phase « fluide ». (La pression est devenue alors si grande que le gaz dense ne peut être distingué du liquide.)

Quand une substance passe de sa forme solide (*s*) à sa forme liquide (*l*), son entropie (degré de désordre) s'accroît presque toujours (sauf dans le cas de l'hélium ^{3}He solide à très basse température). Par conséquent, la chaleur latente L_{sl} correspondante est positive, et une quantité de chaleur est absorbée par la transformation. Dans la plupart des cas, le solide augmente de volume au cours de la fusion, c'est-à-dire $\Delta V > 0$. Dans ce cas, l'équation de Clausius-Clapeyron montre que la pente de la courbe d'équilibre solide-liquide (c'est-à-dire la courbe de fusion) est positive. Il y a quelques substances, comme l'eau, qui

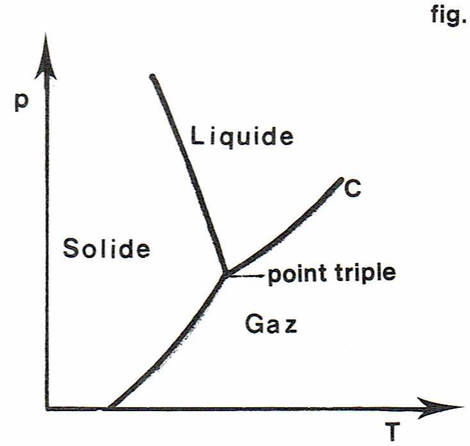

Marie-Louise Bonniaud

◀ ***Figure 48 :*** ***diagramme des courbes de changement de phase d'un corps pur ; au point C, appelé point critique, la courbe d'équilibre liquide-gaz s'arrête.***

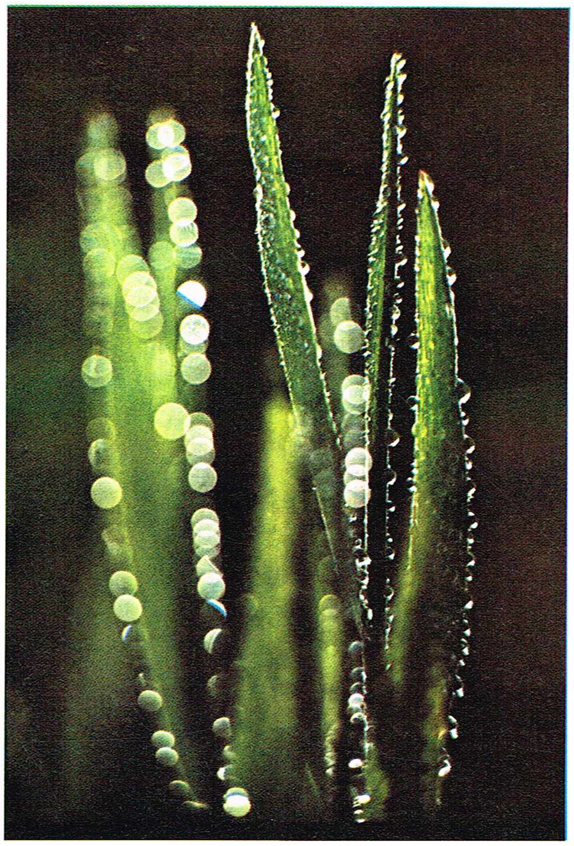

J.N. Reichel - TOP

▶ ***La rosée est une vapeur qui, à la fraîcheur du matin, perle en gouttelettes très fines sur les végétaux.***

se contractent lors de la fusion, c'est-à-dire $\Delta V < 0$. Pour celles-ci, la pente de la courbe de fusion doit donc être négative (comme sur la *fig.* 48).

Calcul approché de la pression de vapeur

L'équation de Clausius-Clapeyron peut être utilisée pour obtenir une expression approchée de la pression de vapeur en équilibre avec un liquide (ou un solide) à la température T. Cette pression est appelée *pression de vapeur* du liquide (ou du solide) à cette température. L'équation **(58)** appliquée à une mole de la substance donne :

$$\frac{dP}{dT} = \frac{L}{T\Delta V} \qquad \textbf{(59)}$$

où $L = L_{12}$ est la chaleur latente de vaporisation par mole et V le volume molaire. Soit 1 l'indice de la phase liquide (ou solide) et 2 celui de la vapeur. Nous avons alors :

$$\Delta V = V_2 - V_1 \approx V_2$$

puisque la vapeur est beaucoup moins dense que le liquide (ou le solide) : $V_2 \gg V_1$. Supposons également que la vapeur puisse être considérée comme un gaz parfait, c'est-à-dire que son équation d'état pour une mole soit simplement :

$$PV_2 = RT$$

alors :

$$\Delta V \approx V_2 = \frac{RT}{P}$$

Avec ces approximations, **(59)** devient :

$$\frac{1}{P}\frac{dP}{dT} \approx \frac{L}{RT^2} \qquad \textbf{(60)}$$

Généralement, L est approximativement indépendant de la température. **(60)** peut alors être intégré immédiatement, ce qui donne :

$$\text{Log } P = -\frac{L}{RT} + C^{te}$$

ou :

$$P \approx P_0\, e^{-L/RT} \qquad \textbf{(61)}$$

où P_0 est une certaine constante.

Nous voyons ainsi que la variation de la pression de vapeur en fonction de la température est déterminée par la valeur de la chaleur latente. Cette chaleur latente est approximativement l'énergie nécessaire pour dissocier une mole de liquide (ou de solide) en molécule individuelle largement séparée. Elle doit donc être plus grande que l'énergie thermique RT par mole si le liquide (ou le solide) doit être une phase non dissociée. Puisque $L \gg RT$, la pression de vapeur donnée par **(61)** est donc une fonction très rapidement croissante de la température T.

Notons qu'il serait possible de calculer la pression de vapeur à partir du premier et du second principe. En fait, la connaissance de la constitution microscopique de chaque phase nous permet de calculer le nombre d'états accessibles à cette phase. Son entropie comme son énergie moyenne peuvent donc être déterminées pour calculer l'enthalpie libre par mole en fonction de T et de P. La condition d'équilibre fondamentale :

$$g_1\,(T, P) = g_2\,(T, P)$$

donne alors une équation qui permet de tirer P en fonction de T. On peut donc trouver une expression qui relie la pression de vapeur à la température sans faire intervenir de constante de proportionnalité inconnue (telle que P_0). Des calculs microscopiques de cette sorte ont effectivement été réalisés dans ces cas simples.

Application de l'équation de Van der Waals

L'équation de Van der Waals dont on a déjà parlé représente assez correctement les isothermes des gaz réels. La « continuité » des états gazeux et liquide conduit à chercher si la même équation d'état est applicable au liquide.

Pour des températures supérieures à la température critique, les isothermes de Van der Waals ont une pente toujours négative $(\partial P/\partial V)_T < 0$ et une forme qui se rapproche des isothermes expérimentales. Par contre, pour des températures inférieures à la température critique, les

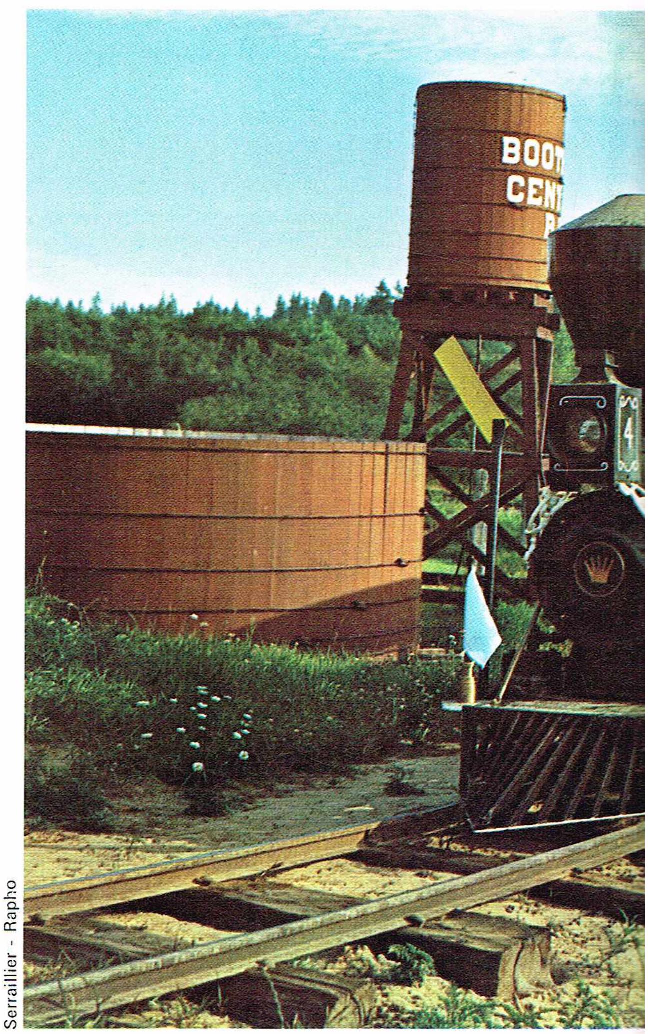

Serraillier - Rapho

▶ ***La locomotive à vapeur, une application des lois de la thermodynamique.***

isothermes de Van der Waals ne fournissent pas le palier de vaporisation LG de la *figure* 49. La portion AC de l'isotherme de Van der Waals est inobservable. Elle correspondrait à un domaine où la pression et le volume augmenteraient en même temps $[(\partial P/\partial V)_T > 0]$, ce qui est irréalisable. En revanche, les débuts des portions LA et GC de l'isotherme sont observables comme états *métastables*. Le palier de vaporisation LG coupe l'isotherme théorique de façon que les deux aires hachurées soient égales. On peut l'expliquer de la façon suivante : imaginons que le fluide décrive le cycle isotherme réversible LAECGL. D'après le second principe, le travail doit être nul. Or, ce travail est représenté par la différence des aires hachurées de la *figure* 49.

fig. 49

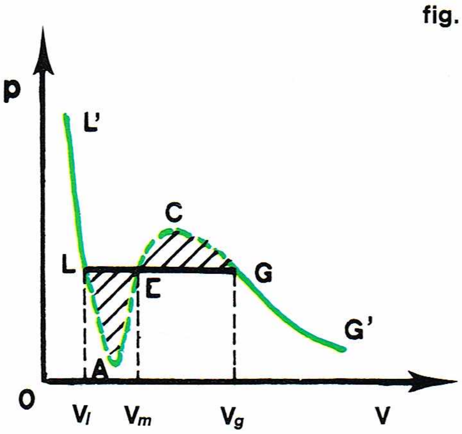

Marie-Louise Bonniaud

Rapho

▲ ***A gauche, figure 49 : isotherme de Van der Waals et palier de liquéfaction. Ci-dessus, les gouttelettes visibles sur ce verre de boisson fraîche proviennent de la condensation de la vapeur d'eau sur les parois froides.***

Les statistiques quantiques

Formulation du problème statistique

Il existe trois statistiques : celle de *Fermi-Dirac*, que suivent en particulier les électrons, celle de *Bose-Einstein*, qui s'applique notamment aux *photons*, et celle de *Maxwell-Boltzmann*, qui ne correspond à aucun système physique mais qui constitue la limite commune des deux autres statistiques et peut s'appliquer à des systèmes de particules à des températures pas trop basses.

Considérons un gaz constitué de N particules identiques contenues dans un volume V à la température T. Nous allons utiliser les notations suivantes : les états d'énergie d'une particule seront numérotés avec l'indice r ou s, et l'énergie d'une particule dans un état r sera appelée ε_r, n_r sera le nombre de particules dans l'état r. Les états d'énergie de tout le gaz seront notés par l'indice R. Avec ces notations, en négligeant les interactions entre particules, l'énergie du système quand il est dans l'état R avec n_1 particules dans l'état $r = 1$, n_2 dans l'état $r = 2$... s'écrit :

$$E_R = n_1\varepsilon_1 + n_2\varepsilon_2 + ... = \sum_r n_r\varepsilon_r \quad (62)$$

On a, d'autre part, la relation entre les n_r et N :

$$n_1 + n_2 + n_3 + ... = \sum_r n_r = N \quad (63)$$

Exprimons maintenant la fonction de partition du gaz.

$$Z = \sum_R e^{-\beta E_R} = \sum_R e^{-\beta(n_1\varepsilon_1 + n_2\varepsilon_2 + ...)} \quad (64)$$

La somme ci-dessus se fait sur toutes les valeurs de R, c'est-à-dire sur toutes les valeurs des nombres n_1, n_2, n_3. Puisque $\exp[-\beta(n_1\varepsilon_1 + n_2\varepsilon_2 + ...)]$ est la probabilité relative de trouver le gaz dans un état particulier où n_1 particules sont dans l'état 1, n_2 particules dans l'état 2..., on peut écrire le nombre moyen de particules $\bar{n}_s$ dans l'état s :

$$\bar{n}_s = \frac{\sum_R n_s \exp[-\beta(n_1\varepsilon_1 + n_2\varepsilon_2 + ... + n_s\varepsilon_s + ...)]}{\sum_R \exp[-\beta(n_1\varepsilon_1 + n_2\varepsilon_2 + ...)]} \quad (65)$$

En remarquant que le numérateur est la dérivée multipliée par $-\beta$ de Z par rapport à ε_s, on obtient :

$$\bar{n}_s = -\frac{1}{\beta}\frac{1}{Z}\frac{\partial Z}{\partial \varepsilon_s} = -\frac{1}{\beta}\frac{\partial \operatorname{Log} Z}{\partial \varepsilon_s} \quad (66)$$

Ainsi, le nombre moyen de particules $\bar{n}_s$ ayant l'énergie ε_s peut s'exprimer en fonction de Z comme la plupart des grandeurs thermodynamiques.

Statistiques de Maxwell-Boltzmann, Bose-Einstein et Fermi-Dirac

Statistique de Maxwell-Boltzmann

On considère dans ce cas que les particules sont *discernables :* une permutation entre deux particules ayant des énergies différentes fournit un nouvel état du gaz, même si les nombres $(n_1, n_2, n_3, ...)$ sont inchangés. Dans cette statistique, il ne suffit pas de savoir *combien* de particules sont dans un état r mais aussi *quelles* particules sont dans cet état. n_r peut prendre les valeurs $n_r = 1, 2, 3, ...$ à condition que la somme satisfasse la condition :

$$\sum_r n_r = \mathrm{N} \quad (67)$$

Statistique de Fermi-Dirac

Les particules qui suivent cette statistique s'appellent des *fermions*. Elles sont *indiscernables*, et il suffit de connaître la distribution $(n_1, n_2, ...)$ sans se préoccuper de savoir quelles sont les particules qui se trouvent dans tel ou tel état r. La condition **(63)** doit être satisfaite, mais le nombre de particules n_r est égal à zéro ou à un :

$$n_r = 0,\ 1$$

Statistique de Bose-Einstein

Les particules qui suivent cette statistique sont appelées *bosons* et sont également *indiscernables*. Il suffit alors de connaître la distribution $(n_1, n_2, n_3, ...)$, n_r peut varier de 1 à N, mais la condition **(63)** doit être satisfaite.

Nous allons étudier maintenant un cas particulier de la statistique de Bose-Einstein qui permet de comprendre le rayonnement thermique.

Statistique des photons

Énergie des photons

Un rayonnement électromagnétique qui se propage dans le vide peut être constitué par des *photons* se déplaçant à la vitesse $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. Chacun de ces photons transporte une énergie $\mathrm{E} = h\nu$ où h est la constante de Planck. La masse d'un photon au repos est nulle. Par suite de son mouvement, le photon doit être affecté d'une masse relativiste donnée par la formule d'Einstein $\mathrm{E} = mc^2$

où
$$m = \frac{\mathrm{E}}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2}$$

D'autre part, le photon est considéré comme porteur d'une quantité de mouvement :

$$\mathbf{p} = mc = \frac{\mathrm{E}}{c} = \frac{h\nu}{c}$$

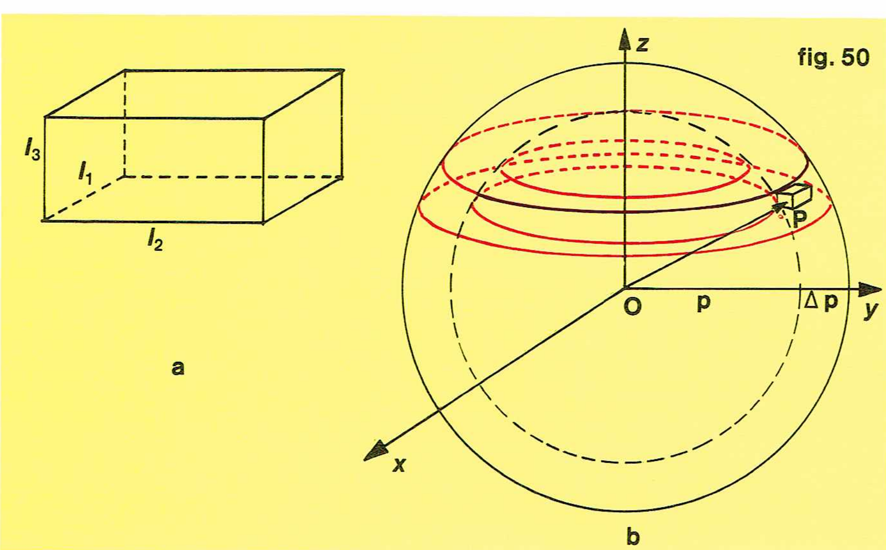

▼ ***Figure 50 : le photon est enfermé dans un parallélépipède de volume $l_1\, l_2\, l_3$ (a), sa quantité de mouvement est comprise entre p et p + Δp (b).***

Richard Colin

Au cours d'un choc avec une surface, il y a variation de la quantité de mouvement, soit par modification de la trajectoire, soit par absorption du photon, et, par conséquent, création d'une *pression de radiation.*

Distribution de Planck

Dans le cas des photons, le nombre total de particules d'un système n'est pas fixé. En effet, les parois du récipient peuvent émettre ou absorber des photons, et la contrainte **(63)** n'est plus valable. Calculons le nombre moyen $\bar{n}_s$ en utilisant la formule :

$$\bar{n}_s = -\frac{1}{\beta}\frac{\partial \operatorname{Log} Z}{\partial \varepsilon_s} = -\frac{1}{\beta}\frac{\partial}{\partial \varepsilon_s}$$

$$\operatorname{Log}\left[\sum_{n_1=0}^{\infty} e^{-\beta n_1 \varepsilon_1} \sum_{n_2=0}^{\infty} e^{-\beta n_2 \varepsilon_2} \ldots \sum_{n_s=0}^{\infty} e^{-\beta n_s \varepsilon_s}\right]$$

$$= -\frac{1}{\beta}\frac{\partial}{\partial \varepsilon_s} \operatorname{Log}\left[\sum_{n_s=0}^{\infty} e^{-\beta n_s \varepsilon_s}\right]$$

On remarque que la somme qui apparaît dans le Log est une série géométrique infinie dont le premier terme vaut 1 et dont la raison est $e^{-\beta\varepsilon_s}$. On peut donc calculer $\sum_{n_s=0}^{\infty} e^{-\beta n_s \varepsilon_s}$:

$$\sum_{n_s=0}^{\infty} e^{-\beta n_s \varepsilon_s} = 1 + e^{-\beta\varepsilon_s} + e^{-2\beta\varepsilon_s} + \ldots = \frac{1}{1 - e^{-\beta\varepsilon_s}}$$

D'où : $\bar{n}_s = \dfrac{1}{\beta}\dfrac{\partial}{\partial \varepsilon_s}\left[\operatorname{Log}\left(1 - e^{-\beta\varepsilon_s}\right)\right] = \dfrac{e^{-\beta\varepsilon_s}}{1 - e^{-\beta\varepsilon_s}}$

En divisant le numérateur et le dénominateur par $e^{-\beta\varepsilon_s}$, on obtient la *distribution de Planck :* $n_s = \dfrac{1}{e^{\beta\varepsilon_s} - 1}$

Densité d'énergie des photons

Considérons une enceinte parallélépipédique, de dimensions l_1, l_2, l_3 (*fig.* 50a) et maintenue à température T. Soit Δn le nombre de photons de fréquence comprise entre ν et $\nu + \Delta\nu$. Calculons le nombre g de leurs états de mouvement possibles. Pour cela, le plus simple est d'utiliser le principe d'indétermination d'Heisenberg qu'on peut résumer ainsi : une des conséquences de la mécanique quantique est l'impossibilité de connaître exactement à un même instant la position et la quantité de mouvement d'une particule. D'où le principe d'indétermination d'Heisenberg : si x est l'abscisse d'une particule, $\mathbf{p}_x$ la projection de sa quantité de mouvement sur l'axe Ox, ces deux grandeurs sont affectées, dans une mesure simultanée, des incertitudes δ_x et $\delta\mathbf{p}_x$ dont le produit est de l'ordre de la constante de Planck h :

$$\delta_x \cdot \delta\mathbf{p}_x = h$$

Choisissons trois axes de coordonnées parallèles aux trois arêtes de l'enceinte. Un photon de fréquence comprise entre $\vec{\nu}$ et $\vec{\nu} + d\vec{\nu}$ a une quantité de mouvement comprise entre $\vec{\mathbf{p}}$ et $\vec{\mathbf{p}} + d\vec{\mathbf{p}}$ dont la grandeur est déterminée par la relation $\mathbf{p} = \dfrac{h\nu}{c}$; l'extrémité P du vecteur représentatif est située entre les deux sphères de rayon $\mathbf{p}$ et $\mathbf{p} + \Delta\mathbf{p}$ (*fig.* 50b), donc à l'intérieur d'un volume égal à $4\pi\mathbf{p}^2\Delta\mathbf{p}$.

Par ailleurs, dire que ce photon est enfermé dans un parallélépipède, revient à imposer aux trois coordonnées de sa position les incertitudes :

$$\delta_x = l_1 \qquad \delta_y = l_2 \qquad \delta_z = l_3$$

et, par conséquent, les coordonnées de sa quantité de mouvement sont affectées des incertitudes :

$$\delta\mathbf{p}_x = h/l_1 \qquad \delta\mathbf{p}_y = h/l_2 \qquad \delta\mathbf{p}_z = h/l_3$$

Au total, il est impossible de distinguer entre eux des états dont les quantités de mouvement sont telles que les extrémités P des vecteurs représentatifs sont situées à l'intérieur d'un volume égal à :

$$\delta\mathbf{p}_x\, \delta\mathbf{p}_y\, \delta\mathbf{p}_z = \frac{h^3}{l_1\, l_2\, l_3} = \frac{h^3}{\mathrm{V}}$$

V, volume de l'enceinte.

Comme il existe pour l'onde électromagnétique deux vibrations distinctes à plan de polarisation rectangulaire, le nombre d'états réellement distincts les uns des autres pour un photon de quantité de mouvement comprise entre **p** et **p** $+ \Delta$**p** est donc égal à :

$$g = 2\,\frac{4\,\pi \mathbf{p}^2 \Delta \mathbf{p}}{h^3/V} = \frac{8\,\pi V}{h^3}\,\mathbf{p}^2 \Delta \mathbf{p} \tag{68}$$

et, en remplaçant **p** par sa valeur $\left(\frac{h\nu}{c}\right)$:

$$g = \frac{8\,\pi V}{c^3}\,\nu^2 \Delta \nu \tag{69}$$

La formule **(69)** a été établie dans le cas d'une enceinte parallélépipédique. On a pu démontrer qu'elle est valable pour une enceinte de forme quelconque, sous réserve de certaines conditions aux limites (en particulier, pas d'anfractuosités dont les dimensions soient de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde).

Par ailleurs, les photons suivant la statistique de Bose-Einstein, la probabilité pour qu'un photon ait l'énergie $h\nu$ est égale à $1/(e^{h\nu/kT} - 1)$. Donc :

$$\Delta n = \frac{g}{e^{h\nu/kT} - 1} = \frac{8\,\pi V}{c^3}\,\frac{\nu^2 \;\Delta\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} \tag{70}$$

où h est la constante de Planck, déjà définie, et où k est la constante de Boltzmann.

Chaque photon possédant une énergie $h\nu$, la densité d'énergie rayonnante dans la bande de fréquence (ν, $\nu + \Delta\nu$) est alors :

$$U_\nu \Delta\nu = h\nu\,\frac{\Delta n}{V} = \frac{8\,\pi h \nu^3 \Delta\nu}{c^3\,(e^{h\nu/kT} - 1)} \tag{71}$$

Si l'on repère les rayonnements par leur longueur d'onde λ au lieu de leur fréquence ν, il vient en remarquant que $\nu = \frac{c}{\lambda}$ et que $\Delta\nu = - c\,\frac{\Delta\lambda}{\lambda^2}$ et en posant $U_\nu \Delta\nu = U_\lambda \Delta\lambda$ l'expression de la densité d'énergie :

$$U_\lambda = \frac{8\,\pi h c \lambda^{-5}}{(e^{hc/k\lambda T} - 1)} \tag{72}$$

Le rayonnement thermique

Définition

On appelle rayonnement ou, plus généralement, radiation une propagation d'énergie ne nécessitant pas l'intervention d'un milieu matériel. Cette propagation peut donc s'effectuer dans le vide ainsi que dans certains milieux matériels dits « transparents » aux types de rayonnements considérés. Certaines radiations sont de nature corpusculaire (électrons, neutrons, ions, etc.), d'autres, de nature électromagnétique (photons). C'est uniquement dans le cadre de l'interaction de ces derniers avec la matière que nous nous plaçons. Un corps qui reçoit ou qui émet un rayonnement donné est un transformateur d'énergie.

— Dans le cas de la source, si l'énergie émise est empruntée uniquement à l'énergie calorifique, on dit que *le rayonnement est thermique* ou qu'il s'effectue par *incandescence*. Mais il est des cas où l'énergie rayonnée est empruntée à des sources autres que thermiques : fluorescence, chimioluminescence, électroluminescence, triboluminescence, etc.

— De même, le récepteur peut transformer l'énergie reçue en chaleur mais aussi, en partie, en d'autres formes d'énergie : chimique (photochimie), électromagnétique (fluorescence), émission d'électrons (effet photo-électrique), etc.

Aussi bien du côté source que du côté récepteur, nous ne considérerons ici que les échanges de chaleur par l'intermédiaire du rayonnement thermique. Ce sont d'ailleurs ceux qui, sur le plan industriel, sont les plus importants.

Mécanisme de transfert de chaleur par rayonnement

Le mécanisme du transfert de chaleur par rayonnement fait donc intervenir dans le cas général : une source matérielle S qui transforme une partie de son énergie calorifique en émettant un rayonnement électromagnétique; un milieu M où se transmet tout ou partie de ce rayonnement; un récepteur *matériel* R qui absorbe tout ou partie du rayonnement qui l'atteint et le convertit en chaleur.

Nous insistons sur le terme « matériel » : la chaleur est une catégorie d'énergie liée à la matière. Il n'y a pas de chaleur en dehors de la matière; à l'inverse, le milieu M où se transmet l'énergie de rayonnement peut être le vide.

Il convient de noter que, dans le cas des rayonnements purement thermiques, source et récepteur ne jouent pas des rôles foncièrement différents. Le récepteur émet également vers la source, et celle-ci absorbe plus ou moins l'énergie qui lui parvient. Il s'établit donc un bilan énergétique faisant intervenir ces deux transformations d'énergie, émission et absorption : la source S dont la température est plus élevée que celle du récepteur R perd finalement sous forme de rayonnement une énergie supérieure à celle qu'elle absorbe; le récepteur, au contraire, absorbe plus d'énergie qu'il n'en émet. Si l'ensemble S-R est, par ailleurs, énergétiquement isolé, S se refroidit progressivement, alors que R se réchauffe. Lorsque les températures se sont égalisées, l'échange de chaleur ne cesse pas pour autant, mais il y a égalité entre ce que chacun des deux corps envoie sur l'autre et en reçoit; l'équilibre thermique se maintient par compensation.

Par ailleurs, l'émission et l'absorption sont des phénomènes complètement indépendants l'un de l'autre. S émet de l'énergie qui peut être absorbée par R, mais son émission est entièrement indépendante de la présence de R; elle resterait identiquement la même si on enlevait R. L'émission de S peut être modifiée par R mais seulement de façon indirecte : absorbant une partie de l'énergie de rayonnement émise par R, le corps S se refroidit moins vite; à chaque instant, sa température moyenne est plus élevée qu'elle n'aurait été en l'absence de R; S émet donc plus que s'il avait été seul. Mais une même élévation de température, quelle qu'en eût été la cause, aurait conduit au même résultat.

Enfin, l'émission et l'absorption sont des phénomènes produits à l'échelle moléculaire ; atomes, molécules, convenablement excités, émettent des photons, perdant ainsi une partie de leur énergie, ou en absorbent, parvenant alors à un niveau d'énergie plus élevé. Toute substance étant absorbante pour le rayonnement qu'elle émet, les photons issus des régions intérieures d'un corps n'auront la possibilité d'en sortir que pour une matière peu compacte : un gaz, par exemple, dont les molécules sont éloignées les unes des autres. Dans les états condensés, solides ou liquides, un photon émis par un atome aura toutes les chances de rencontrer un autre atome qui l'absorbera, à moins que l'émission n'ait eu lieu au voisinage immédiat de la surface. Le rayonnement qui sort d'un corps compact prend effectivement naissance dans une couche superficielle très mince : on schématise en admettant que c'est la surface qui émet. Dans ce cas, l'absorption est, elle aussi, un phénomène superficiel. Pour les gaz et dans quelques cas particuliers, celui de certaines flammes par exemple, il faut introduire une émission et une absorption en volume.

Le corps noir

Lorsqu'un flux d'énergie tombe sur un corps, une partie est absorbée, le reste étant soit réfléchi, soit transmis. Appelons F_i le flux incident et F_a le flux absorbé, et définissons le *facteur d'absorption* $\alpha = F_a/F_i$. α dépend de la nature du corps, de l'état de sa surface, de sa température et de la direction du flux incident. Le facteur d'absorption dépend aussi de la composition spectrale du rayonnement. Si celui-ci est monochromatique, de longueur d'onde λ, on définit un *facteur d'absorption monochromatique* α_λ pour la longueur d'onde λ.

α (ou α_λ) est un nombre sans dimension au plus égal à l'unité. Pour les corps très transparents ou très réfléchissants, il est voisin de zéro. Par contre, si le corps absorbe intégralement toutes les radiations qu'il reçoit, le facteur d'absorption est égal à un, et le corps est appelé *corps noir*.

Formule de Planck

Il est commode dans l'étude du rayonnement d'utiliser l'*angle solide* autour d'un point, qui vaut 4 π stéradians pour tout l'espace, et d'autre part la vitesse de la lumière, ce qui nous amène à relier la densité d'énergie U_λ à une nouvelle grandeur, la luminance L_λ :

$$U_\lambda = \frac{4\,\pi L_\lambda}{c}$$

A l'aide de la relation **(72)**, on peut écrire la *formule de Planck :*

$$\textbf{(73)} \qquad L_\lambda = \frac{2\,hc^2\lambda^{-5}}{e^{hc/\lambda T} - 1} = \frac{C_1\lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1}$$

Les valeurs numériques de C_1 et C_2 sont :

$$C_1 = 12 \cdot 10^{-17}\ \mathrm{W \cdot m^2}$$
$$C_2 = 1{,}4 \cdot 10^{-12}\ \mathrm{m \cdot {}^\circ K}$$

et la luminance L_λ s'exprime en $\mathrm{W/m^3 \cdot st}$.

Formule de Rayleigh et de Wien

Lorsque le produit λT tend vers l'infini, on peut développer l'exponentielle de **(73)** en série :

$$e^{C_2/\lambda T} = 1 + C_2/\lambda T + \frac{1}{2}(C_2/\lambda T)^2$$

On trouve alors la formule de Rayleigh :

$$L_\lambda = \frac{C_1}{C_2}\frac{T}{\lambda^4}\left(1 - \frac{1}{2}C_2/\lambda T\right)$$

soit à la limite :

$$L_\lambda = \frac{C_1}{C_2}\lambda^{-4}T$$

Examinons maintenant le cas où la longueur d'onde tend vers zéro, l'exponentielle $e^{C_2/\lambda T}$ croît, et on peut négliger 1 au dénominateur. La formule de Planck donne alors un résultat obtenu expérimentalement par Wien :

$$L_\lambda = C_1\lambda^{-5}\,e^{-C_2/\lambda T}$$

Loi de Stefan-Boltzmann

Dans le cas du corps noir (repéré avec l'indice ^{0}), on a :

$$L^0 = \int_0^\infty L^0_\lambda d\lambda$$

Le calcul peut se faire sans difficultés. Soit :

$$L^0 = C_1 \int_0^\infty \frac{\lambda^{-5} d\lambda}{e^{C_2/\lambda T} - 1}$$

le résultat de l'intégrale peut se trouver dans les tables numériques, et on obtient sans difficultés :

$$L^0 = \frac{\pi^4}{15}\frac{C_1}{C_2^4}T^4$$

La luminance L^0 et donc la densité d'énergie U varient comme la *puissance quatrième de la température*. C'est la *loi de Stefan-Boltzmann*.

Application : les pyromètres optiques

Les définitions de l'échelle centigrade normale et de l'échelle thermodynamique de Kelvin, qui s'y rattache comme nous le savons, sont valables quelle que soit la température ; mais la mesure de cette dernière à l'aide d'un des thermomètres que nous avons étudiés n'est possible, nous l'avons vu, que si elle n'est pas trop élevée.

Les lois du rayonnement du corps noir ont été vérifiées expérimentalement jusqu'à 1 200 ou 1 500 °C : il paraît légitime de les extrapoler, du côté des très hautes températures, ces lois ayant des bases théoriques bien établies. On peut donc, d'après des mesures faites sur le rayonnement d'un « corps noir » incandescent, évaluer sa température, et cela d'autant plus aisément que les lois de ce rayonnement ont, en fonction de la température *absolue* T, des expressions relativement simples.

▼ ***Figure 51 : pyromètre à filament disparaissant.***

fig. 51

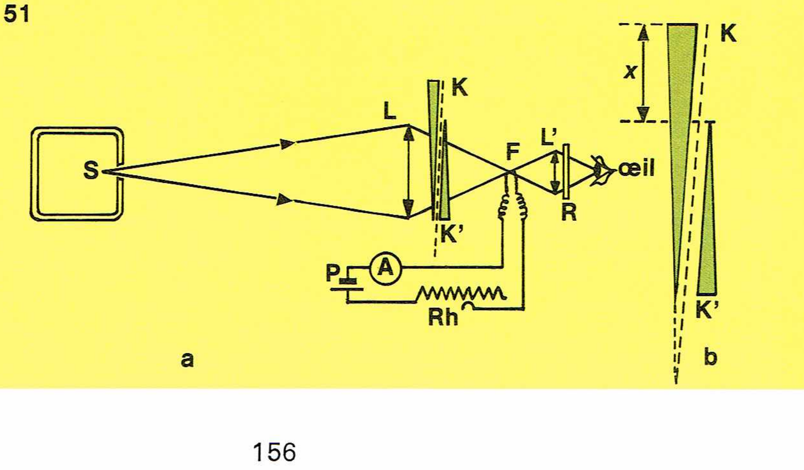

Richard Colin

Les appareils servant à ces mesures sont appelés *pyromètres optiques;* on peut les classer en trois groupes.

— *Pyromètres à filament disparaissant.* Ils font intervenir une mesure visuelle au voisinage d'une longueur d'onde connue.

La *figure* 51a représente schématiquement l'un des types d'appareils les plus répandus, dit « à filament disparaissant » ; la lentille L forme, de la surface rayonnante du corps noir S, une image S' dans le plan d'un filament de lampe à incandescence F ; en agissant sur le rhéostat Rh et en observant l'ampèremètre A, on maintient constant le courant d'alimentation, et par suite la luminance. L'œil observe à travers l'oculaire L' et un verre rouge R, laissant passer (compte tenu de la sensibilité spectrale de l'œil) une bande spectrale étroite, de longueur d'onde « effective » λ.

Le filament F, masquant en partie l'image S', apparaît, selon les cas, plus sombre ou plus clair que cette image, et semble disparaître (d'où le nom de l'instrument) lorsque sa luminance, pour la longueur d'onde λ, est justement égale à celle de S'. Cette dernière a pour valeur le produit de la luminance de S par le *facteur de transmission* τ de l'optique interposée (τ est par définition le rapport, inférieur à 1, du flux transmis au flux incident).

τ est lui-même le produit d'une constante de l'instrument par un facteur connu, réglable à volonté entre certaines limites, selon la position relative de deux prismes (coins) de verre fumé K et K' (*fig.* 51b). L'ensemble de ces coins équivaut en effet à une lame à faces parallèles, dont la transmission est d'autant plus faible qu'elle est plus épaisse.

L'instrument permet donc, par pointés successifs sur des corps noirs aux températures T_0, et T inconnue, de déterminer le rapport $\frac{L}{L_0}$ des luminances correspondantes, pour la longueur d'onde λ.

De la formule de Wien, on déduit :

$$\frac{L}{L_0} = \exp\frac{C_2}{\lambda}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)$$

D'où

$$\mathrm{Log}\,\frac{L}{L_0} = \frac{C_2}{\lambda}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)$$

et

$$\textbf{(74)} \qquad \frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} - \frac{\lambda}{C_2 \log e}\log\frac{L}{L_0}$$

en faisant apparaître le logarithme décimal

$$\log(L/L_0) = \mathrm{Log}(L/L_0) \cdot \log e$$

On choisit généralement pour T_0 la température de solidification de l'or (1 336 °K) ; λ est, par exemple, égal à 665 millimicrons et nous avons vu qu'on attribue à C_2 la valeur $1{,}4 \cdot 10^{-12}$ m · °K.

Si la lumière est bien monochromatique, son absorption par le système KK' se fait de telle façon que des épaisseurs successives égales absorbent la même fraction du flux reçu : le facteur de transmission est donc fonction exponentielle décroissante de l'épaisseur, qui est elle-même fonction linéaire du déplacement relatif de K par rapport à K', compté perpendiculairement à l'arête des deux coins (*fig.* 51b). On en déduit sans peine que, si x est la valeur lue pour ce déplacement lorsque le filament F « disparaît », la relation **(74)** peut s'écrire sous la forme simple :

$$\frac{1}{T} = a + bx$$

a et b étant deux constantes de l'instrument.

La précision des mesures au pyromètre à filament disparaissant peut atteindre, au voisinage de 1 800 °K (par exemple), 5° dans l'industrie, et jusqu'à 0,2° pour les mesures de haute précision. L'incertitude sur le rattachement à l'échelle normale résulte de l'incertitude sur la valeur de C_2 et sur les pointés faits à T_0 : elle ne semble pas supérieure à 2° vers 1 800 °K.

— *Pyromètres à rayonnement total.* Si l'on concentre, à l'aide d'une lentille ou d'un miroir convenable, tout le rayonnement émis par un corps noir à T °K, sur un récepteur thermique R, celui-ci s'échauffe jusqu'à ce que la chaleur qu'il perd compense exactement celle qu'il gagne par absorption du rayonnement. L'échauffement de R,

qui est, par exemple, un thermocouple très sensible, recouvert d'une mince plaquette noircie, augmente avec la température T, et peut servir à la mesurer.

La loi de Stefan n'est pas applicable au rayonnement absorbé par R, car la transmission par la lentille ou le miroir ainsi que le facteur d'absorption du récepteur varient avec la longueur d'onde, donc avec la composition spectrale du rayonnement, et par suite avec T. Les pyromètres dits « à rayonnement total » doivent donc être étalonnés par pointés directs sur des corps noirs à température connue, ou par comparaison avec un pyromètre monochromatique auquel est applicable la formule **(74)**.

Ces appareils présentent, pour certaines applications, un risque d'erreur important, tenant à l'absorption des radiations infrarouges par le gaz carbonique et la vapeur d'eau qui peuvent être présents en plus ou moins grande quantité dans l'atmosphère, entre la source et le récepteur. Leur précision est nettement inférieure à celle des pyromètres monochromatiques. Ils ont en revanche l'intérêt de ne pas exiger un « équilibrage photométrique » assez difficile (tel que le contrôle de la disparition d'un filament) ; ils peuvent même être rendus enregistreurs, d'où leur emploi fréquent dans l'industrie.

La *figure* 52 représente une *lunette pyrométrique* de Fery ; la lentille A est en fluorine ou en verre aussi transparent que possible à l'infrarouge. (Lorsqu'on la remplace par un miroir, l'instrument devient un *télescope pyrométrique*.) Le récepteur R est une plaquette d'argent noircie collée sur une soudure d'un couple fer-constantan. En faisant varier l'orientation du pyromètre et, au moyen d'une crémaillère, la distance AR, on amène l'image de la source étudiée à être exactement dans le plan de R, et à déborder de tous côtés la plaquette, ce dont on s'assure à l'aide de l'oculaire B. De cette façon, la distance de la source n'intervient pas (pourvu qu'elle ne soit pas trop grande). Le millivoltmètre *m*V, indicateur ou enregistreur, est gradué directement en températures.

— *Pyromètres à coloration*. Des ouvriers très exercés peuvent parfois apprécier la température d'un four « à la vue », à moins de 100 degrés près, l'élément d'appréciation étant, plutôt que la luminance, la couleur du rayonnement émis : à 700 °C, le rayonnement émis est rouge sombre ; à 1 300 °C, il est orange, et, à 1 500 °C, blanc éblouissant.

Cette variation de couleur est due à la déformation progressive des isothermes, dont le maximum se déplace vers les courtes longueurs d'onde quand T augmente.

On a cherché à rendre ces évaluations plus sûres en éclairant l'une des plages d'un photomètre par la lumière d'un corps noir à T^0, l'autre par celle d'une lampe à incandescence parcourue par un courant électrique dont on règle l'intensité *i* de façon à obtenir la même couleur sur les deux plages. Le contrôle d'identité de couleur n'est d'ailleurs précis que si l'on réalise en même temps une égalité de luminance. La relation $i = f$ (T), établie empiriquement à l'aide de températures connues, permet ensuite de déterminer une température inconnue.

On peut aussi déterminer le rapport des flux émis par le corps noir dans des bandes spectrales déterminées, l'une rouge et l'autre bleue par exemple : ce « rapport rouge-bleu » est une fonction décroissante de T. Ces méthodes, fondées sur la variation de la répartition spectrale du rayonnement, ont surtout servi jusqu'ici à caractériser le régime de fonctionnement des lampes électriques.

Louis Courteville - TOP

▲ *La couleur du rayonnement émis est un élément d'appréciation de la température ; le métal est porté au rouge, puis au blanc.*

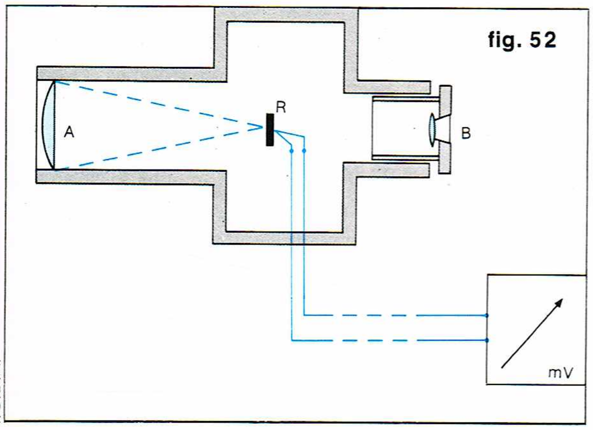

I.G.D.A.

◀ *Figure 52 : schéma d'un pyromètre à radiation totale.*

Thermodynamique des phénomènes irréversibles

Jusqu'à présent, nous nous sommes intéressé uniquement aux systèmes en équilibre. Nous allons maintenant donner quelques notions de thermodynamique des phénomènes irréversibles. Il s'agit d'une branche de la thermodynamique qui s'applique à des systèmes qui ne peuvent atteindre l'équilibre, car ils sont soumis à des contraintes qui les en empêchent.

Comme on l'a vu, le premier principe de la thermodynamique affirme la conservation de l'énergie : l'accroissement de l'énergie d'un système est égal à l'énergie qu'il a reçue. Le second principe indique qu'un système isolé évolue vers un état d'équilibre qui correspond à l'entropie maximale, c'est-à-dire au plus grand désordre.

Contrairement à l'énergie, l'entropie ne se conserve pas ; son accroissement *d*S est la somme de deux termes :

(75) $$dS = d_eS + d_iS$$

La quantité d_eS représente la contribution du milieu extérieur sous la forme d'un échange d'entropie (pour un système isolé, $d_eS = 0$) ; d_iS désigne l'entropie créée au sein du système. D'après le second principe, d_iS n'est jamais négatif :

$d_iS = 0$ Transformations réversibles

$d_iS > 0$ Transformations irréversibles

Toute la thermodynamique des phénomènes irréversibles est fondée sur le *bilan d'entropie* associé à $d_iS > 0$.

Bilan entropique

Nous allons nous intéresser maintenant à la variation de l'entropie d'un système au cours du temps. Ce qu'on appelle le *taux de production d'entropie* $\frac{dS}{dt}$ est d'après la relation **(75)** le résultat d'un bilan entropique contenant deux termes, un terme d'échange $\frac{d_eS}{dt}$ qui exprime le *flux d'entropie* de l'extérieur vers le système et un terme $\frac{d_iS}{dt}$ qui exprime la production d'entropie à l'intérieur du système :

(76) $$\frac{dS}{dt} = \frac{d_eS}{dt} + \frac{d_iS}{dt}$$

La relation ci-dessus est absolument générale, et le second principe de la thermodynamique ne concerne que le deuxième terme qui satisfait la condition :

(77) $$\frac{d_iS}{dt} \geqslant 0$$

où l'égalité correspond à des transformations réversibles. A *l'état d'équilibre*, la production d'entropie est nulle $\left(\frac{d_iS}{dt} = 0\right)$.

Il ne faut surtout pas confondre états d'équilibre et états stationnaires. Un état stationnaire est caractérisé par le fait que les variables qui le caractérisent ne varient plus dans le temps, leurs dérivées par rapport au temps sont donc nulles.

Ainsi, à l'état stationnaire, $\frac{dS}{dt} = 0$. Un état stationnaire de non-équilibre est défini par $\frac{dS}{dt} = 0$ et $\frac{d_iS}{dt} > 0$. On a alors $\frac{d_eS}{dt} < 0$. Si, en valeur absolue, d_eS/dt est plus grand que d_iS/dt, on a alors $dS/dt < 0$: un système peut ainsi avoir une entropie décroissante au cours du temps sans violer pour autant le second principe. Cela peut s'appliquer aux organismes vivants en développement : la diminution d'entropie qui accompagne leur développement, c'est-à-dire leur organisation croissante, n'est pas contradictoire avec le second principe, l'ensemble organisme vivant et environnement constitue un système isolé que nous avons appelé Univers et dont l'entropie augmente. Tandis que l'entropie de l'organisme vivant diminue, celle de l'environnement qui se dégrade augmente.

Relation entre flux et forces

Un système hors d'équilibre est soumis à des contraintes. Ces contraintes, qu'on appelle *forces* thermodynamiques, sont par exemple un gradient de température, un gradient de concentration, une affinité chimique. A ces forces sont associés des flux : flux de chaleur, de matière et vitesse de réaction chimique respectivement. On montre que la production d'entropie par unité de temps d'un système $\mathcal{P}$ (S) est liée aux flux J_α et aux forces X_α par la relation suivante :

(78) $$\mathcal{P}(S) = \frac{d_iS}{dt} = \int_V \sum_\alpha J_\alpha X_\alpha dV \geqslant 0$$

On utilise souvent la production d'entropie par unité de temps et de volume σ (S).

(79) $$\mathcal{P}(S) = \int_V \sigma(S)\, dV \qquad \sigma(S) = \sum_\alpha J_\alpha X_\alpha$$

A l'équilibre, un système n'est soumis à aucune force et à aucun flux $J_\alpha = 0$ et $X_\alpha = 0$, et aussi σ (S) = 0. Le fait qu'à l'équilibre les flux et les forces soient simultanément nuls nous permet d'écrire des *relations linéaires* entre eux :

(80) $$J_\alpha = \sum_\beta L_{\alpha\beta} X_\beta$$

les quantités $L_{\alpha\beta}$ sont appelées coefficients phénoménologiques et sont liées par les *relations d'Onsager :*

(81) $$L_{\alpha\beta} = L_{\beta\alpha} \qquad (\alpha \neq \beta)$$

Minimum de production d'entropie

Quand un système est soumis à des contraintes extérieures, il ne peut atteindre un état d'équilibre. Prenons par exemple un système qui est le siège de deux phénomènes irréversibles caractérisés l'un par un flux de matière J_m associé à une force X_m (gradient de concentration), l'autre par un flux de chaleur J_{th} associé à une force X_{th} (gradient de température). La production d'entropie d'un tel système s'écrit :

(82) $$\mathcal{P}(S) = \frac{d_iS}{dt} = J_{th}X_{th} + J_mX_m \geqslant 0$$

Au voisinage de l'équilibre, on peut écrire des relations du type **(80)** :

(83) $$J_{th} = L_{11}X_{th} + L_{12}X_m$$
$$J_m = L_{21}X_{th} + L_{22}X_m$$

Les coefficients L_{11} et L_{22} situés sur la diagonale principale de la matrice des coefficients sont liés à la conductivité thermique et à la diffusion respectivement. Les autres sont liés aux coefficients Dufour et de thermodiffusion. A l'état stationnaire de non-équilibre, le flux de matière est nul :

(84) $$J_m = L_{21}X_{th} + L_{22}X_m = 0$$

Quant à la production d'entropie, elle s'écrit en fonction des forces X_{th} et X_m :

(85) $$\mathcal{P} = \frac{d_iS}{dt} = L_{11}X_{th}^2 + 2\,L_{12}X_{th}X_m + L_{22}X_m^2 \geqslant 0$$

En dérivant partiellement **(86)** par rapport à X_m, il vient :

(86) $$\left(\frac{\partial \mathcal{P}}{\partial X_m}\right)_{X_{th}} = 2\,L_{12}X_{th} + 2\,L_{22}X_m = 2\,J_m$$

La production d'entropie étant une quantité positive, cette quantité passe par un minimum à l'état stationnaire. Dans cet état, comme $J_m = 0$:

$$\left(\frac{\partial \mathcal{P}}{\partial X_m}\right)_{X_{th}} = 0$$

Le théorème suivant, dû à Prigogine, et valable au voisinage de l'équilibre, peut s'énoncer ainsi :

A l'état stationnaire de non-équilibre, la production d'entropie est minimale.

Domaine non linéaire

Le théorème du minimum de la production d'entropie n'est valable qu'au voisinage de l'équilibre. Cette région est appelée *domaine linéaire* parce qu'on peut utiliser les relations linéaires **(80)**. Loin de l'équilibre, les relations **(80)** ne sont plus valables, on dit alors qu'on est dans le *domaine non linéaire*. Dans cette région, il peut apparaître des *instabilités* dans les états stationnaires qui s'accompagnent de structures appelées *structures dissipatives*.

BIBLIOGRAPHIE

BRUHAT G., *Thermodynamique,* Masson, 1968. - FLEURY P. et MATHIEU J.-P., *Chaleur, Thermodynamique, États de la matière,* Eyrolles, 1954. - GLANSDORFF P. et PRIGOGINE I., *Structure, Stabilité et Fluctuations,* Masson, 1971. - MANDL F., *Statistical Physics,* John Wileyand Sons Ldt., 1971. - REIF, F., *Physique statistique,* Armand Colin, 1972. - TERNY M., *la Mesure des températures au laboratoire et dans l'industrie,* Dunod, 1962.

ACOUSTIQUE

Le son résulte de la propagation d'une perturbation dans un milieu matériel. Pendant très longtemps, l'histoire des phénomènes sonores a été associée à celle de la musique, un art qui remonte aux tout débuts de l'évolution humaine et qui était déjà pratiqué par les Hindous, les Égyptiens et les Chinois plus de 4 000 ans avant l'ère chrétienne. C'est Pythagore, mathématicien de l'Antiquité grecque (VIe siècle avant J.-C.), qui est responsable des premières études « scientifiques » qui soient parvenues jusqu'à nous. Utilisant un appareillage très simple constitué d'une corde soumise à une tension mécanique constante dont la longueur pouvait être fixée en déplaçant deux pièces de bois, il constata que la hauteur (ou fréquence) des sons produits dépendait de la longueur de la corde de manière surprenante. En effet, le rapport des longueurs des deux cordes soumises à la même tension mécanique et qui produisait un son fondamental et son octave était exactement de deux. Curieusement, cette observation ouvrit la voie à une longue période de tentatives d'interprétations semi-mystiques du caractère arithmétique de la musique.

Ce n'est qu'au début du XVIIe siècle que le père Mersenne établit un pont entre l'acoustique et l'art musical en définissant les hauteurs des sons constituant une gamme. Il prolongea pour cela les expériences de Pythagore en considérant l'influence de la tension mécanique de la corde sur la fréquence des sons émis. Cette étude est à la base du développement du piano moderne qui peut couvrir 7 octaves 1/4. En utilisant des cordes soumises à des tensions mécaniques égales, la corde la plus longue devrait être environ 150 fois plus longue que la corde la plus courte, ce qui, bien sûr, poserait quelques problèmes pratiques.

Environ deux siècles après Pythagore, le philosophe grec Aristote (IVe siècle avant J.-C.) proposa, dans une série d'études sur le son et la perception du son, une interprétation de la propagation du son dans l'air : « Tous les sons sont produits par la rencontre de corps avec d'autres corps ou de l'air avec des corps ; non pas que l'air prenne certaines formes comme d'aucuns le croient, mais parce qu'il est mis en mouvement d'une manière par laquelle, dans d'autres cas, les corps sont déplacés, soit par contraction, dilatation ou compression, soit encore quand il s'entrechoque avec le souffle ou avec la corde des instruments de musique. Car, quand sa partie la plus proche est frappée par le souffle qui vient à son contact, l'air est immédiatement mis en mouvement et pousse, de la même manière, l'air qui lui est adjacent, de sorte que le son se propage, sans perte de qualité, aussi loin que la perturbation de l'air est susceptible d'aller. En effet, bien que la perturbation prenne naissance en un point particulier, sa force s'étend sur une grande surface, comme font les vents qui soufflent des rivières ou de la terre... » (Aristote, *Sur l'âme,* II, 8).

Un élève d'Aristote, Aristoxène, écrivit plusieurs livres sur la musique et l'harmonie *(Éléments harmoniques ; Sur le rythme)*. Cependant, la seule approche vraiment scientifique, de la période comprise entre celle de Pythagore et celle du père Mersenne et de Galilée (XVIe siècle), qui soit parvenue jusqu'à nous, est due à Marcus Vitruvius Pollio, communément appelé Vitruve, architecte romain du Ier siècle avant J.-C. Il écrivit un long traité d'architecture *(De architectura)* et s'intéressa particulièrement à l'acoustique architecturale. Il signala les effets de renforcement ou de diminution des sons en divers points des théâtres. Ses travaux nous montrent en fait que ces derniers n'étaient pas aussi bons qu'on l'admet généralement ; Vitruve proposa même, afin d'en améliorer l'acoustique, de placer des vases en divers points des théâtres, afin de renforcer certains sons. Il proposa également d'incorporer des porte-voix au masque des acteurs.

Après Vitruve, suit une longue période d'obscurité. On édifie d'une part les cathédrales immenses ayant des temps de réverbération très longs qui, rendant inintelligibles les sons parlés, conduisent au rituel chanté, et d'autre part des palais somptueux aux tapisseries et tapis profonds qui produisent des temps de réverbération très courts et amènent les compositeurs à créer la musique de chambre.

Bulloz

▲ ***Pendant très longtemps, l'histoire des phénomènes sonores a été associée à celle de la musique ; ici, une stèle dédiée à Han Akhiti par le chanteur d'Amon (musée du Louvre).***

Au XVIIe siècle, le père Mersenne (1588-1648) ainsi que Galilée (Galileo Galilei, 1564-1642) réabordèrent les études acoustiques de manière scientifique. Ainsi, Mersenne mesura la vitesse de propagation d'un son dans l'air en lisant le temps écoulé entre l'instant où un coup de fusil était tiré et l'instant où la détonation parvenait à l'expérimentateur.

Pierre Gassendi (1592-1655) reprit les expériences de Mersenne et les développa : il étudia l'influence de la taille du fusil ou du canon sur la vitesse de propagation du son. Il arriva ainsi à la conclusion que, contrairement aux idées d'Aristote, un son aigu ne se propage pas plus vite qu'un son grave.

Quelques années plus tard, William Derham (1657-1735) avait l'idée d'utiliser la vitesse de propagation du son pour déterminer la position d'un orage : on mesure le temps qui s'écoule entre la vision de l'éclair et l'audition du tonnerre ; en multipliant ce temps par la vitesse du son, on obtient la distance de l'orage.

E. Lessing - Magnum

▲ *Beaucoup de théâtres antiques, comme ce théâtre grec bâti près du temple d'Apollon à Athènes, sont des exemples de réalisations d'acoustique architecturale.*

▼ *A gauche, figure 1 - a, dispositif de Young : le stylet marqueur inscrit sur la face extérieure du cylindre en rotation l'image des vibrations ; b, dans le phonautographe de Scott de Martinville, la source de vibrations est constituée d'un cornet terminé par une membrane. A droite, le disque de Savart.*

C'est aux environs de 1740 que Bianconi et La Condamine rapportèrent, indépendamment l'un de l'autre, l'influence de la température de l'air sur la vitesse de propagation du son. Le premier eut l'idée de mesurer cette vitesse au même endroit en été et en hiver. Le second opéra à la même époque de l'année, mais en deux endroits de température très différente.

En ce qui concerne les mesures de fréquences, on peut mentionner John Shore, trompettiste au service du roi George Ier d'Angleterre, qui, en 1711, inventa le diapason. En fait, un standard de fréquence variable avait été imaginé par Stancari en 1706, lui-même directement inspiré par un dispositif réalisé par Robert Hooke en 1681. Une lame flexible venait s'appuyer sur une roue dentée animée d'un mouvement de rotation. Stancari montra que la fréquence du son émis pouvait être déduite du nombre de dents de la roue et de sa vitesse de rotation. Savart utilisa plus tard une telle roue pour déterminer la fréquence des sons.

Sur le plan expérimental, les progrès furent lents au XVIIIe siècle. En 1738, une commission de l'Académie des sciences remesura la vitesse du son. Sur le plan théorique, par contre, des progrès considérables furent réalisés en utilisant les théories mathématiques et les techniques de calcul développées par I. Newton (1642-1727) et G. Leibniz (1646-1716). Toute une série de mathématiciens très fameux, tels Euler (1707-1783), Lagrange (1736-1813), Poisson (1781-1840), d'Alembert (1717-1783), Bernoulli (1700-1782), appliquèrent les méthodes nouvelles de calcul aux problèmes d'acoustique. Il faut attendre cependant le XIXe siècle pour voir le grand développement de l'acoustique.

En 1802, Ersnt Chladni (1756-1827) étudie la vibration de plaques, il localise les nœuds (minimum) et les ventres (maximum) de vibration à l'aide de sable fin. Il effectue également une étude approfondie des vibrations de tiges et de cordes.

En 1807, Thomas Young, médecin et physicien anglais (1773-1829), auteur de très nombreux travaux sur la vision, les phénomènes d'interférence et les vibrations, met au point un appareil qui permet de mesurer avec précision la fréquence des vibrations. Un cylindre noirci sur sa face extérieure tourne autour de son axe (*fig.* 1a). Un stylet, relié au corps animé des vibrations à mesurer,

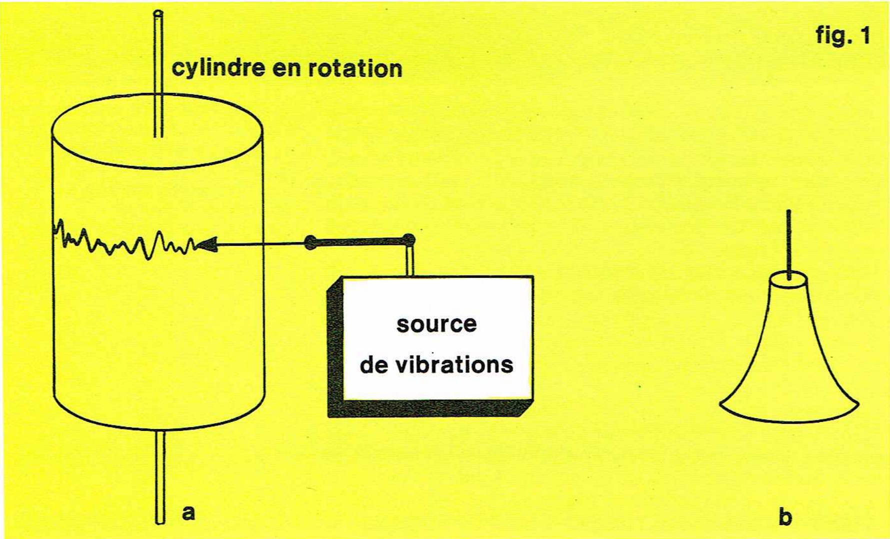

Richard Colin

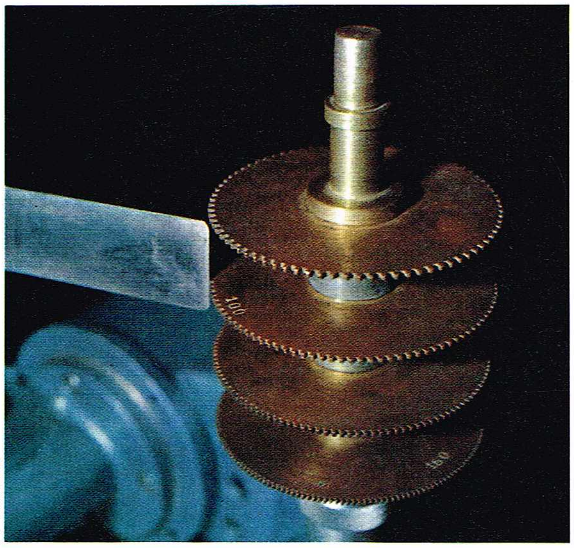

P. Castano

inscrit sur le cylindre une trace à partir de laquelle il est facile de déterminer la fréquence des vibrations, si la vitesse de rotation du cylindre est connue. Cette méthode inspire E. Scott de Martinville qui, en 1857, l'applique à la mesure des vibrations de l'air. Pour cela, il utilise un cornet terminé par un diaphragme (*fig.* 1b). C'est ce diaphragme qui sert de transformateur des vibrations de l'air en vibrations d'un stylet marqueur. Le « phonautographe », car tel était le nom de cet appareil, utilisait pour la première fois un diaphragme pour enregistrer un son. Inutile de dire que, depuis, les diaphragmes ont joué un rôle considérable dans les mesures acoustiques.

A la même époque, J. Leconte découvre qu'on peut utiliser une flamme pour déterminer l'intensité d'un son : la flamme d'un bec de gaz alimenté très faiblement est en effet très sensible aux déplacements de l'air produit par une onde sonore. Une variation de l'intensité de l'onde produit une modification très nette de la forme de la flamme.

De 1858 à 1862, K. R. Kœnig (1839-1901) développe le phonautographe de Scott et présente divers enregistrements à l'exposition de Londres de 1862. Il est intéressant de noter à ce propos que le phonographe d'Edison (1877) était probablement inspiré par le phonautographe de Scott. En 1909, D. C. Miller modifie le phonautographe en remplaçant le stylet marqueur et le cylindre noirci par un miroir tournant qui réfléchit un faisceau lumineux et le projette sur un film en translation rapide (*fig.* 2).

En partant d'une idée assez différente, Wheatstone invente le kaléidophone. Cet appareil comprend deux lames métalliques allongées flexibles montées l'une dans le prolongement de l'autre, mais dans des plans perpendiculaires. L'extrémité libre d'une des lames est fixée à un support rigide. Sur l'extrémité libre de l'autre lame, qui a la possibilité de se déplacer dans les directions perpendiculaires aux deux lames, est fixée une perle. Si cette perle est déplacée de sa position d'équilibre et est libérée, elle décrit un mouvement qui est la combinaison de deux mouvements périodiques. En éclairant fortement la perle, il est possible de projeter ce mouvement sur un écran. Cette méthode est développée par Lissajous qui publie en 1857 son célèbre *Mémoire sur l'étude optique des mouvements vibratoires*, dans lequel il décrit la manière de déterminer la différence de phase qui peut exister entre deux mouvements vibratoires.

Mais le XIX^e siècle a vu et voit encore bien des développements. En 1819, Cagniard de La Tour invente la sirène. Seebeck la développe, puis plus tard Kœnig. En 1820, Biot met au point une méthode optique permettant de déterminer l'intensité d'une onde acoustique. Cette méthode est ensuite développée par Kundt et Mach. Elle utilise le fait qu'une lumière polarisée, transmise à travers un résonateur acoustique et observée à travers un second polariseur (analyseur), change d'intensité selon que l'on se trouve à un minimum ou à un maximum d'amplitude de vibration. Une autre méthode, développée par Tœpler et Boltzmann en 1870, utilise deux rayons lumineux issus d'une même source que l'on fait interférer sur un écran. Le premier rayon suit à travers de l'air normal un trajet réglable, et le second passe par un nœud de vibration d'une colonne d'air en vibration. Concernant les méthodes optiques, il faut signaler qu'en 1836, Plateau avait utilisé pour la première fois une méthode stroboscopique pour observer des mouvements très rapides. Tœpler généralisa la méthode dans un article célèbre.

Mais le XIX^e siècle est très fortement marqué par les deux hommes qui vont donner à l'acoustique ses lettres de noblesse : Hermann von Helmholtz (1821-1894) et lord Rayleigh (1842-1919).

Helmholtz occupe successivement les chaires de physiologie (Königsberg, 1848), anatomie (Bonn, 1855), physiologie (Heidelberg, 1858) et physique (Berlin, 1871). Ses contributions à l'optique et à l'acoustique relèvent surtout du domaine physiologique. Helmholtz exposa en particulier, dans un ouvrage célèbre *Sur les sensations des sons* (1862), la théorie de la sommation et de la différenciation des sons, la théorie des résonateurs, notamment des résonateurs sphériques qui portent son nom.

Il faut remarquer à ce propos que, jusqu'à la mise en évidence par Helmholtz du rôle des résonateurs en acoustique, l'oreille était le principal instrument d'analyse des sons complexes. Cela explique pourquoi les instruments de musique évoluaient principalement en s'appuyant sur des critères empiriques, en particulier celui du plaisir à l'écoute (ce qui, pour un instrument de musique, n'est pas nécessairement un défaut). Après Helmholtz, les fabricants d'instruments de musique ont adopté une approche plus scientifique, préfigurée par la collaboration qui existait entre Helmholtz et un fabricant de pianos.

Kœnig, dont nous avons déjà parlé, et qui avait étudié avec Helmholtz à Königsberg, construisit un grand nombre d'instruments d'étude et de mesure, en particulier un sonomètre susceptible de fonctionner dans une gamme de fréquences s'étendant de 16 à 90 000 cycles par seconde, qu'il termina en 1897. C'est en utilisant cet instrument en source sonore qu'il conclut que la perception des sons par l'oreille humaine dépend de leur intensité et se trouve dans la région 13-17 500 cycles par seconde. Helmholtz montra alors que, pour un son de très basse fréquence, le fondamental peut être inaudible alors que les harmoniques sont audibles. Le maître et son élève restèrent cependant en désaccord en ce qui concerne la perception simultanée de deux sons par l'oreille. Pour Helmholtz, le timbre d'un son dépend seulement du nombre et de l'intensité relative des harmoniques qui accompagnent le fondamental, et ne dépend pas des différences de phase qui peuvent exister entre ces composantes. Kœnig, au contraire, affirme : « Les différences de phase entre les diverses composantes du son jouent un rôle très important sur le timbre des sons. »

Ces problèmes de la perception des sons et des impressions qu'ils sont susceptibles de procurer ont été, depuis, longuement étudiés. Ils constituent une part importante de l'acoustique, à savoir l'acoustique physiologique.

Bulloz

▲ ***Acteur romain portant un masque ; Vitruve avait proposé, afin d'améliorer l'acoustique, d'y incorporer un porte-voix.***

▼ ***A gauche, la sirène de Seebeck. A droite, figure 2 ; dispositif de Miller : le faisceau lumineux, réfléchi sur le miroir tournant relié à la source de vibrations, inscrit une trace sur le film en translation rapide.***

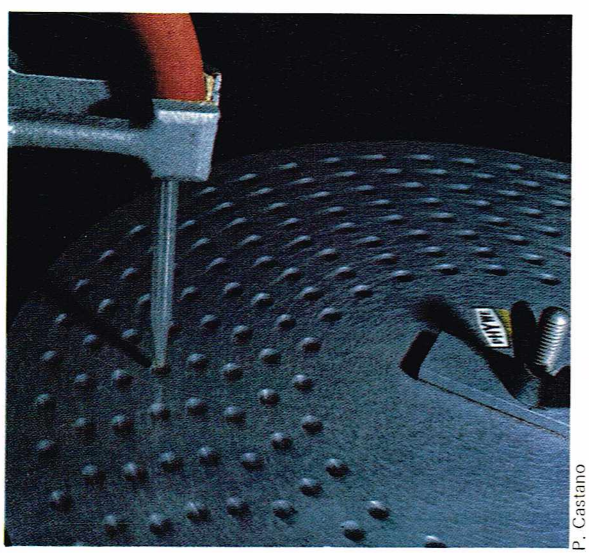

P. Castano

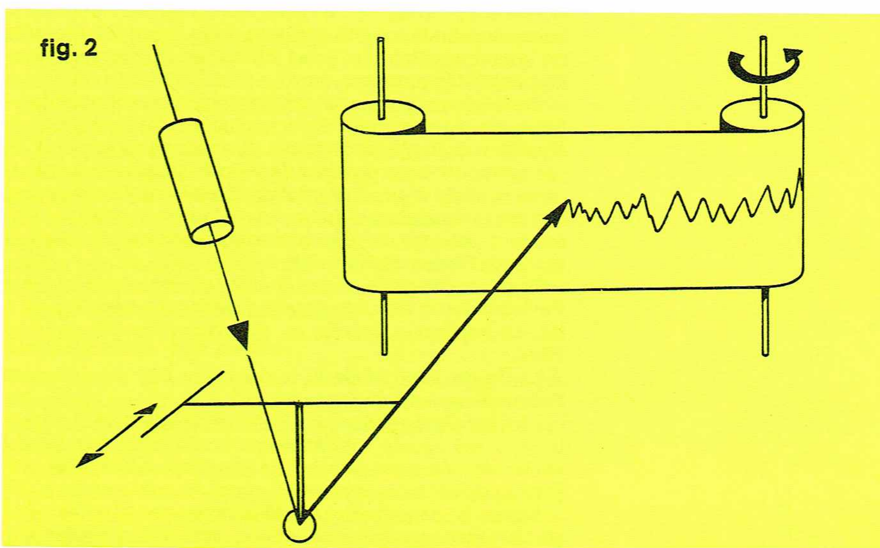

Richard Colin

▶ **Charles Cros** *(1842-1888), inventeur du paléophone qui précéda le phonographe d'Edison.*

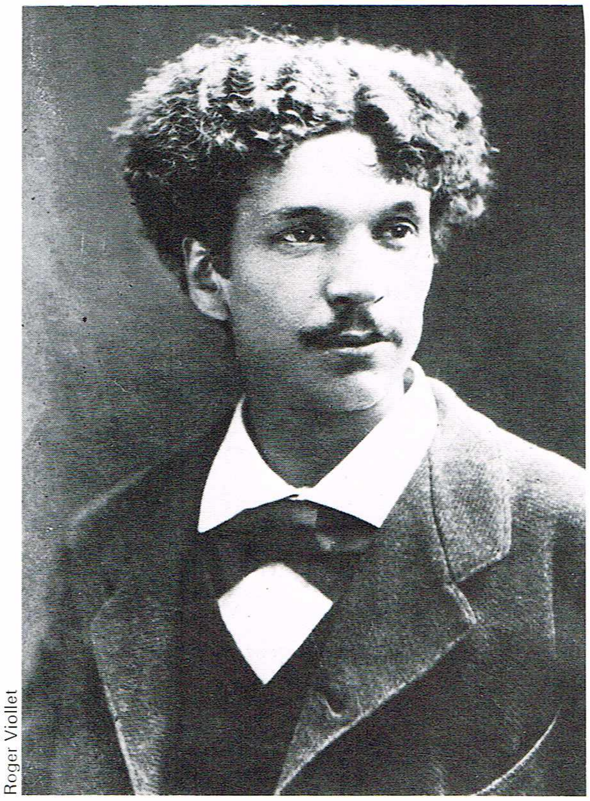

Roger Viollet

Lord Rayleigh, né John William Strutt, était le fils aîné du second baron Rayleigh de Terling Place, dans le comté d'Essex en Angleterre. Après des études secondaires normales, il entra, à 20 ans, au Trinity College de Cambridge où il devint un élève d'E. J. Routh, fameux mathématicien appliqué. En 1868, après un voyage aux États-Unis d'Amérique, Rayleigh s'équipa en matériel scientifique. Il débuta ses recherches par des expériences sur l'électricité et les courants alternatifs. Son premier travail en acoustique, probablement inspiré par le livre de Helmholtz *Sur les sensations des sons*, concernait l'étude des fréquences de résonateurs. En 1871, Rayleigh épousa Evelyn Balfour, sœur d'Arthur James Balfour qui devait devenir célèbre comme penseur et comme chef de gouvernement. Après quelques ennuis médicaux, Rayleigh se rendit en Égypte en convalescence et c'est pendant un voyage en bateau sur le Nil, en 1872, que son ouvrage *Theory of Sound* vit le jour. Il est intéressant de remarquer que, durant la rédaction de la première partie de ce monumental ouvrage, Rayleigh ne pouvait avoir accès, pour des raisons évidentes, à une bibliothèque scientifique importante. Ce n'est qu'en 1877 que les deux volumes de la *Theory of Sound* furent publiés. Cet ouvrage faisait non seulement le point de l'état des connaissances en acoustique au moment de sa parution, mais il ouvrait en outre un grand nombre de voies nouvelles qui furent développées ultérieurement.

Rayleigh a eu une approche essentiellement mathématique de l'acoustique. Principalement intéressé par la physique et la physico-chimie, il a manifesté, en plus de ses extraordinaires qualités de théoricien, une exceptionnelle habileté d'expérimentateur. Nous retrouverons plus loin un instrument qui fut pendant longtemps le seul instrument de mesure des intensités sonores absolues, à savoir le disque de Rayleigh.

Pour la quantité et la qualité de ses travaux, lord Rayleigh reçut les plus grands honneurs scientifiques. Il fut, en particulier, lauréat du prix Nobel de physique en 1904.

La fin du XIX^e^ siècle et le début du XX^e^ siècle voient l'épanouissement de l'acoustique.

Charles Cros, poète et inventeur (1842-1888), décrit un appareil appelé « paléophone », qui, peut-être inspiré également du phonautographe de Scott, précède la réalisation du phonographe par Thomas Alva Edison en 1877.

Après la découverte du téléphone par Graham Bell en 1876, les problèmes de mesure acoustique deviennent très importants. Diverses techniques sont alors faites pour mettre au point un instrument de mesure des intensités sonores absolues. Pendant longtemps cependant, le disque de Rayleigh n'eut pas de concurrent sérieux. En 1917, E. C. Wente met au point, aux États-Unis, dans les laboratoires de l'American Telephone and Telegraph (ATT) and Western Electric Company, le microphone à condensateur. Il est important de réaliser que ce microphone est encore le plus employé comme microphone de référence, de mesure ou d'enregistrement professionnel. Il a donné naissance au microphone électrostatique à électret, qui, bénéficiant d'un grand nombre des qualités du microphone à condensateur et de peu de ses défauts, connaît actuellement une très grande vogue.

La même année, H. D. Arnold et I. D. Crandall, également des laboratoires de l'American Telephone and Telegraph Company, imaginent le thermophone qui peut être utilisé comme standard de pression sonore.

Ainsi, les deux premiers instruments de mesure de l'acoustique moderne sont nés.

En ce qui concerne les sources acoustiques, l'année 1920 voit la sortie, dans les laboratoires de la Bell Telephone aux États-Unis, d'écouteurs « de qualité », présentant une réponse assez régulière jusqu'à environ 4 000 cycles par seconde. Ces systèmes sont bientôt couplés à des cornets acoustiques : les haut-parleurs sont là.

Au début du XX^e^ siècle renaît un domaine particulier de l'acoustique, l'acoustique architecturale. W. C. Sabine anime pratiquement tout seul ce domaine jusqu'au début de la Première Guerre mondiale. Il réalise les premières études scientifiques de sonorisation des auditoriums. Il développe tout un ensemble de méthodes de mesure de l'absorption et de la réflexion des sons sur les murs des pièces. Au cours des années qui suivent, le développement des instruments de mesure (microphones à condensateur par exemple) et des sources sonores (haut-parleurs) donne véritablement à l'acoustique architecturale les instruments qui lui manquent pour en faire une branche à part entière de l'acoustique.

Aux environs de la Première Guerre mondiale, l'intérêt se porte sur les vibrations de fréquence plus élevée (au-dessus de 20 000 cycles par seconde), essentiellement en vue de la détection des sous-marins. Réalisant une idée de l'ingénieur russe Constantin Chilowski, Paul Langevin met en évidence, en 1915, au laboratoire d'électricité générale de l'École supérieure de physique et de chimie de la ville de Paris, la propagation d'ondes ultrasonores dans l'eau, en utilisant comme émetteur un transducteur électrostatique (condensateur chantant) et comme détecteur un pendule de torsion. L'année suivante, il a l'idée d'utiliser le phénomène de piézo-électricité découvert quelques années plus tôt par les frères Curie.

Dans les années qui suivent, de très nombreux dispositifs à ultrasons voient le jour dans le monde entier. En 1932, R. Lucas et P. Biquard en France, Sears et Debye aux États-Unis mettent en évidence, indépendamment, le phénomène de diffraction de la lumière par les ultrasons. Les recherches et applications s'accélèrent. Vers les basses fréquences, des systèmes capables de détecter des vibrations de fréquence inférieure à un dix-millième de cycle par seconde sont mis au point ; vers les hautes fréquences, après la première mise en évidence par E. H. Jacobsen, en 1966, d'émission et de détection d'ultrasons à des fréquences supérieures à 100 milliards de cycles par seconde, des phénomènes de plus en plus complexes sont mis en œuvre pour émettre et détecter ces ondes.

Les domaines d'application des ondes ultrasonores ne cessent de s'ouvrir, par exemple en navigation (détection sous-marine et communication sous-marine), en recherche pétrolière (sondage des sols, sismique), en contrôle industriel (visualisation des défauts, imagerie acoustique), en nettoyage industriel, en optique et en électronique (modulation des ondes lumineuses, traitement du signal), en recherche scientifique (comme outil d'étude de la matière) et en médecine (imagerie acoustique et chirurgie).

On peut avoir une idée du développement étonnant que connaissent actuellement dans le monde ces divers domaines de l'acoustique en regardant le nombre de chercheurs et de techniciens, de centres de recherche, de journaux scientifiques et techniques et de centres industriels qui leur sont consacrés.

fig. 3

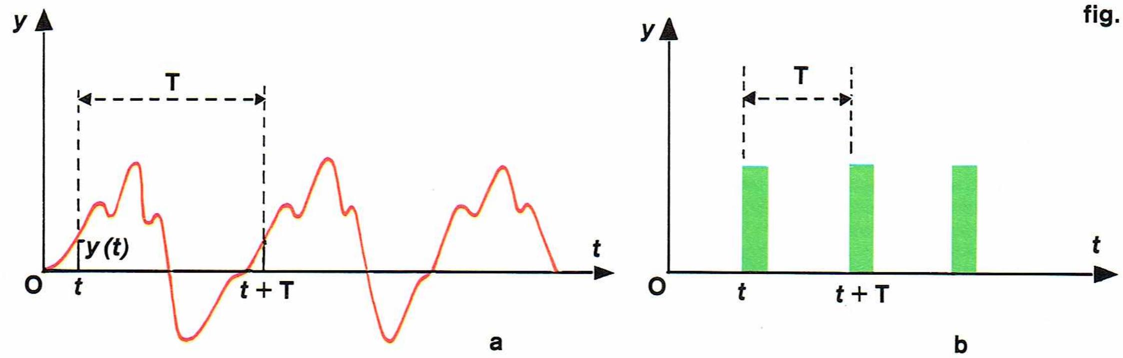

◀ ***Figure 3 ; mouvements périodiques :*** **a, *continu ;*** **b, *en impulsions ;*** **T *est la période du mouvement.***

Richard Colin

Théorie des ondes sonores

Les mouvements périodiques

Nous dirons de façon tout à fait générale que le mouvement d'un point est *périodique* quand il se répète à intervalles de temps égaux ; le mouvement de ce point peut être continu (*fig.* 3a) ou être formé d'une série d'impulsions discrètes (*fig.* 3b). Dans les deux cas, le point subit périodiquement le même déplacement y à partir de sa position d'équilibre ; nous pouvons exprimer la périodicité du mouvement en écrivant la relation mathématique simple :

$$y\ (t) = y\ (t + \mathrm{T})$$

où $y\ (t)$ est le déplacement du point à l'instant t, et $y\ (t + \mathrm{T})$ le déplacement après qu'un laps de temps T s'est écoulé. T est appelé période du mouvement et représente la durée d'une oscillation entière ; on la mesure en secondes. La fréquence f du mouvement est le nombre d'oscillations par unité de temps. Elle est reliée à la période T par la relation $f = \frac{1}{\mathrm{T}}$. La fréquence est mesurée en cycles par seconde ou hertz (Hz). Quand les vibrations sont atténuées par l'existence de phénomènes de frottements, le déplacement du point depuis sa position d'équilibre diminue de plus en plus au fur et à mesure que le temps s'écoule, et le mouvement est dit *périodique amorti* (*fig.* 4).

Propagation des ondes

Quand un point est soumis à une perturbation qui provoque une force de rappel ayant tendance à le ramener à sa position d'équilibre (force élastique), il oscille autour de cette position. Lorsque ce point matériel fait partie d'un milieu continu, il transmet cette perturbation dans le milieu aux autres points voisins qui se mettent à osciller à leur tour. En bref, tous les points du milieu atteints par cette perturbation ont un mouvement oscillant, on dit qu'il y a propagation d'une onde.

Les propriétés que doit posséder un milieu pour qu'il puisse y avoir propagation d'une onde de ce type sont des *propriétés mécaniques :* l'inertie et l'élasticité. Un milieu est inertiel (ou matériel) lorsque ses différents points possèdent une masse non nulle qui leur permet d'avoir un mouvement oscillatoire. L'élasticité est une propriété fondamentale qui fait qu'un milieu, après avoir subi une compression ou une dilatation, revient à sa configuration d'équilibre. Le paramètre qui représente l'inertie d'un milieu est la masse volumique ρ, alors que celui qui en décrit l'élasticité est la compressibilité χ.

La propagation d'une onde est caractérisée par le transport d'énergie et par l'absence de transport de matière. En fait les points du milieu changent d'énergie mais n'avancent pas avec l'onde, se contentant d'osciller autour de leur position d'équilibre.

Ainsi, les vagues de la mer ne transportent pas de matière, et si un objet atteint le rivage, c'est sous l'effet du vent et non pas sous l'effet des oscillations. Une confirmation de ce fait peut s'obtenir par l'expérience très simple suivante : on jette un morceau de liège sur l'eau calme d'un lac, puis on laisse tomber une pierre dans l'eau ; autour du point de chute des ondes concentriques se forment, qui rejoignent et dépassent le fragment de liège sans le déplacer horizontalement (*fig.* 5).

Toutefois, dans certains cas, la propagation d'une onde peut donner lieu à un véritable transport de matière. Cela

fig. 4

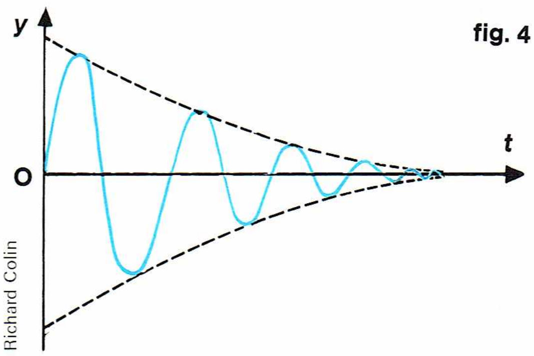

Richard Colin

◀ ***Figure 4 : mouvement périodique amorti.***

fig. 5

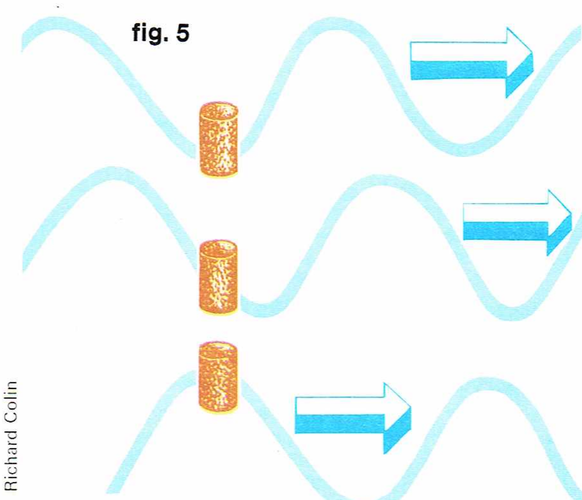

Richard Colin

◀ ***Figure 5 : le bouchon de liège oscille au gré des vagues autour de sa position d'équilibre.***

se produit lorsque la perturbation du milieu matériel est tellement violente que les limites d'élasticité de ce milieu sont dépassées : c'est-à-dire lorsque la *loi de Hooke* n'est plus applicable. Cette loi implique que chaque point subit, vers sa position d'équilibre, une force de rappel proportionnelle à son déplacement x par rapport à cette position ($\mathrm{F} = kx$). La constante de rappel k est appelée constante élastique du milieu. Si le déplacement est trop grand, les points du milieu s'éloignent définitivement de leur position d'équilibre, donnant lieu à un véritable transport de matière. C'est ce qui se produit après l'explosion d'une bombe : on observe un véritable déplacement d'air. Dans ce cas, la sensation sonore produite n'est plus le résultat d'un mouvement périodique du milieu.

Classification des ondes

Les ondes sonores et, en général, toutes les ondes mécaniques sont classées selon leur forme ; nous définirons ici seulement les ondes sphériques et les ondes planes.

Considérons une source ponctuelle émettant une perturbation sonore dans l'espace environnant : si l'onde avance avec la vitesse v, après un laps de temps t elle a parcouru la distance $d = vt$. Si le milieu est homogène (de même

fig. 6

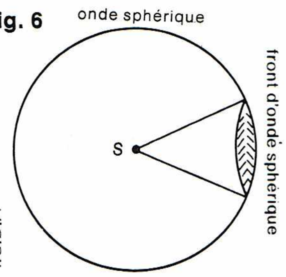

fig. 7

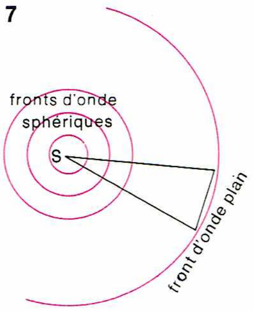

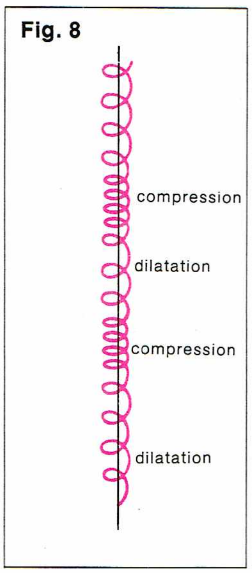

fig. 9

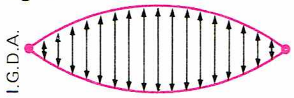

fig. 10

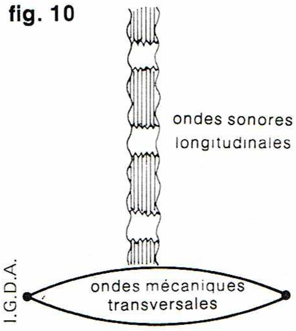

densité en tous ses points) et isotrope (mêmes propriétés élastiques dans toutes les directions), l'onde rejoint au même instant t tous les points situés à la distance d de la source. Le lieu des points atteints en même temps par l'onde s'appelle *surface d'onde*, et, dans le cas considéré, cette surface est une sphère centrée sur la source ponctuelle et de rayon d. Nous appellerons *rayon* toute droite issue de la source et perpendiculaire à la surface d'onde, et le *front d'onde* sera défini comme le profil d'une portion limitée de surface d'onde (*fig.* 6). En un point situé à une distance très grande de la source, on peut considérer, avec une bonne approximation, un front d'onde sphérique comme plan (*fig.* 7). On dira alors qu'on a une onde plane. Les ondes planes peuvent donc s'obtenir à partir d'ondes sphériques à grande distance de la source.

Si la source sonore est constituée de plusieurs sources ponctuelles, chacune émet une onde sphérique, et l'onde reçue par un observateur à une certaine distance de la source est la superposition des ondes sphériques émises par chaque point source; c'est pour cela que la surface d'onde apparaît déformée. Le même phénomène peut se rencontrer avec une source ponctuelle, mais lorsque le milieu de propagation n'est ni homogène ni isotrope; en effet, même si, au voisinage de la source, l'onde est sphérique, elle se déforme durant la propagation.

Ondes longitudinales et ondes transversales

On dit qu'une onde est *longitudinale* quand les particules du milieu dans lequel elle se propage vibrent dans la même direction que la direction dans laquelle l'onde avance (direction de propagation). Un exemple typique est fourni par les ondes sonores qui sont constituées par les dilatations et compressions alternées du milieu et sont donc toujours longitudinales. Un autre exemple se rencontre dans le cas d'un ressort suspendu verticalement; celui-ci oscille sous l'effet de son poids et de la force de rappel élastique. L'onde qui se propage est longitudinale (*fig.* 8).

En revanche, on dit qu'une onde est *transversale* quand la direction de vibration des particules du milieu est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde. C'est le cas d'une corde vibrante, tendue entre deux points fixes, que l'on a pincée (*fig.* 9). On peut noter à ce propos un fait curieux : dans la corde d'une guitare, les vibrations sont transversales, mais elles transmettent à l'air environnant des ondes longitudinales qui produisent des sensations sonores (*fig.* 10).

Dans les solides, les ondes mécaniques peuvent être soit longitudinales, soit transversales, alors que, dans les fluides, elles sont longitudinales.

Propagation par ondes planes d'un ébranlement acoustique dans un fluide

Nous nous proposons de rechercher, pour les ondes planes longitudinales, une équation qui exprime, en fonction du temps et de la position, le déplacement des particules du milieu atteintes par une perturbation périodique. Nous voulons, de plus, mettre en évidence le rôle joué par l'inertie du milieu et par son élasticité dans le processus de propagation.

État d'un fluide

L'état d'un fluide (lorsqu'on néglige les phénomènes de viscosité) est entièrement défini par trois grandeurs : sa pression p, son volume V (ou sa densité) et sa température T.

En général, on connaît l'équation d'état du fluide, c'est-à-dire la relation qui existe entre la pression, le volume et la température; il suffit alors de connaître deux des grandeurs précédentes, la troisième se déduisant de l'équation d'état.

L'étude des propagations dans les solides est plus complexe, car les grandeurs définissant l'état mécanique (contraintes) sont au nombre de six, alors que, dans les fluides, la pression seule suffit.

Définissons à présent la *compressibilité*. Soit une certaine masse de fluide occupant un volume V sous une pression p. Lors d'un accroissement (positif) Δp de la pression, le fluide subira un accroissement ΔV (négatif) de volume. On désigne par compressibilité la quantité :

(1) $$\chi = -\frac{1}{V}\frac{\Delta V}{\Delta p}$$

Cette quantité est positive. Pour l'instant, nous n'avons pas précisé les conditions de la transformation Δp, ΔV. Elle peut, par exemple, s'effectuer à température constante (isotherme) ou sans échange de chaleur avec le reste du fluide (adiabatique).

Équation de D'Alembert

Considérons un tube rectiligne infini (pour pouvoir négliger les effets de réflexion des ondes à l'extrémité du tube) rempli d'un fluide homogène, par exemple l'air. A une extrémité de ce tube, un piston se meut alternativement vers l'avant et vers l'arrière, provoquant successivement des compressions et des dilatations du fluide. Dans l'approximation de l'onde plane, tous les points d'une même section transversale sont atteints en même temps par l'onde.

Pour calculer le déplacement des molécules d'air des différentes sections transversales du tube, considérons deux sections S_1 et S_2 séparées par la distance infinitésimale dx (agrandie par commodité dans le dessin de la *figure* 11). Soit Ox un axe parallèle à l'axe du tube, et soit x l'abscisse de S_1 et $x + dx$ celle de S_2. Quand, après avoir poussé le piston, la perturbation atteint les sections considérées, les molécules qui étaient immobiles en tous les points S_1 subissent un déplacement ξ sous l'effet de la perturbation, alors que celles de S_2 subissent le déplacement $\xi + d\xi$. Le volume dV_i compris initialement entre les deux sections est donné par :

(2) $$dV_i = S dx$$

(où S est la surface de la section), alors que le volume final après le déplacement a pour valeur :

$$dV_f = S\,(x + dx + \xi + d\xi - x - \xi) = S\,(dx + d\xi)$$

La variation infinitésimale du volume dV_i est donnée par :

$$\Delta\,(dV_i) = dV_f - dV_i = S d\xi$$

Cependant, $d\xi$ peut s'écrire aussi comme :

$$d\xi = \frac{\partial\xi}{\partial x}\,dx$$

alors :

(3) $$\Delta\,(dV_i) = S\,\frac{\partial\xi}{\partial x}\,dx$$

Appliquons la définition de la compressibilité au volume dV_i :

(4) $$\chi = -\frac{1}{dV_i}\frac{\Delta\,(dV_i)}{\Delta p}$$

où Δp est la variation de pression produisant la variation de volume $\Delta\,(dV_i)$. En substituant les équations **(2)** et **(3)** dans **(4)**, on obtient :

$$S\,\frac{\partial\xi}{\partial x}\,dx = -\chi\Delta p S dx$$

d'où

(5) $$\Delta p = -\frac{1}{\chi}\frac{\partial\xi}{\partial x}$$

Or la force infinitésimale agissant sur le volume dV_i de fluide sous l'effet d'une variation infinitésimale de pression est :

$$dF = S\,(\Delta p_1 - \Delta p_2)$$

Et, en utilisant la relation **(5)** :

(6) $$\Delta p_1 - \Delta p_2 = -\frac{1}{\chi}\left[\left(\frac{\partial\xi}{\partial x}\right)_1 - \left(\frac{\partial\xi}{\partial x}\right)_2\right]$$

Nous savons que les valeurs d'une fonction en deux points voisins x_1 et x_2 de la variable sont liées au premier ordre par la relation :

$$f\,(x_2) = f\,(x_1) + (x_2 - x_1)\,\frac{\partial f}{\partial x}$$

qui, appliquée à **(6)**, la transforme en

$$\Delta p_1 - \Delta p_2 = -\frac{1}{\chi}\left[\frac{\partial\xi}{\partial x} - \frac{\partial\xi}{\partial x} + \frac{\partial^2\xi}{\partial x^2}\,(-dx)\right] = \frac{1}{\chi}\frac{\partial^2\xi}{\partial x^2}\,dx$$

où nous avons choisi pour fonction $f\,(x)$ la fonction $\frac{\partial\xi}{\partial x}$.

La force infinitésimale résultante est donc donnée par :

(7) $$dF = \frac{1}{\chi}\,S\,\frac{\partial^2\xi}{\partial x^2}\,dx$$

D'après la loi fondamentale de la dynamique, la force appliquée à l'élément de fluide considéré est : $dF = dma$, où a est l'accélération de cet élément et dm sa masse. Celle-ci est reliée au volume dV_i et à la masse volumique du fluide ρ par $\rho = \frac{dm}{dV_i}$. En remarquant que $a = \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}$ on obtient

$$dF = \rho dV_i \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \rho S dx \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \tag{8}$$

En égalant **(7)** et **(8)** on obtient :

$$\frac{1}{\chi} S \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} dx = \rho S \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} dx$$

d'où l'on tire :

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \chi \rho \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \tag{9}$$

L'équation **(9)** constitue la fameuse *équation de D'Alembert* qui relie le déplacement ξ d'un point du milieu à la position x et au temps t. On peut noter que, dans cette équation, apparaissent les deux paramètres caractéristiques de l'inertie ρ et de l'élasticité χ du milieu ; en particulier, le terme $\frac{1}{\chi \rho}$ a les dimensions du carré d'une vitesse, car les autres membres au dénominateur de **(9)** sont respectivement un déplacement et un temps au carré. On peut alors écrire :

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \tag{10}$$

où l'on a posé $\quad v = \sqrt{\frac{1}{\rho \chi}}$

Comme nous le verrons plus loin, v est la vitesse de propagation des ondes sonores dans le fluide, et elle est indépendante de la fréquence de l'onde : toutes les ondes, quelle que soit leur fréquence, se propagent dans le milieu à la même vitesse. La solution la plus générale de l'équation **(10)** est : $\xi(x, t) = f_1(x - vt) + f_2(x + vt)$ où f_1 et f_2 sont deux fonctions, éventuellement différentes, des variables $x - vt$ et $x + vt$ respectivement. La première représente une onde dite progressive, qui avance selon le sens positif de l'axe des x, et la seconde une onde régressive qui avance dans le sens négatif de l'axe des x. Une onde sonore est donc la superposition d'une onde progressive et d'une onde régressive. On notera que dans la solution de l'équation **(10)**, x et t doivent toujours apparaître liés par une relation du type $x \pm vt$, par exemple $\text{Log}\,(x - vt)$, $(x + vt)^2$, $\frac{1}{x - vt}$ sont solutions de **(10)**, mais $x^2 + v^2t^2$, xvt, $\frac{x}{vt}$ ne le sont pas.

Vitesse de propagation de l'onde sonore

Nous nous proposons de démontrer à présent que v représente exactement la vitesse de propagation de l'onde, résultat que nous avons obtenu jusqu'à présent par de simples considérations dimensionnelles.

Considérons une onde dont le profil dans le plan (ξ, x) est à un instant t celui représenté sur la *figure* 12. Pour simplifier, supposons qu'il s'agit d'une onde progressive d'équation : $\xi(x, t) = f_1(x - vt)$. Le déplacement d'un point d'abscisse x, à l'instant t, est donné par :

$$\xi_1 = f_1(x_1 - vt)$$

après un intervalle de temps Δt, l'onde a avancé vers la droite, et le point qui se trouvait d'abord en x_1 se trouve en x_1'. Si le milieu est homogène et isotrope, et donc tel que l'onde avance sans subir de déformation de son profil, le déplacement en x_1' est :

$$\xi_1' = f_1[x_1' - v(t + \Delta t)]$$

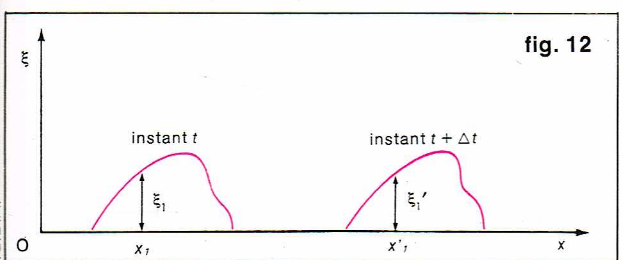

fig. 12

où v est resté inchangé, car il ne dépend que des propriétés du milieu. Mais si l'onde n'a pas changé de profil, on doit avoir :

$$\xi_1 = \xi_1'$$

et donc $\quad x_1 - vt = x_1' - v(t + \Delta t)$

soit $\quad x_1' - x_1 = v\Delta t$

Donc v représente la vitesse d'avancement de l'onde dans le sens positif de l'axe x. On peut arriver au même résultat par un raisonnement physique simple : quelle devrait être la vitesse d'un observateur se déplaçant le long de l'axe des x pour voir le signal inchangé. Nous avons vu que la déformation était une fonction de $(x - vt)$. Il suffit donc que l'observateur se déplace à $(x - vt)$ constant, c'est-à-dire à la vitesse v. Cette vitesse est appelée *vitesse de phase de l'onde*. Il est facile de vérifier par un raisonnement analogue que v représente aussi la vitesse d'avancement de l'onde régressive.

Dans le cas où le milieu dans lequel l'onde se propage est un gaz parfait, on peut calculer le coefficient de compressibilité χ à partir de l'équation d'état du gaz et en déduire la vitesse du son.

Si l'on suppose que les ébranlements sont isothermes, la condition pV = constante de la loi de Mariotte donne :

$$\frac{\Delta p}{p} + \frac{\Delta V}{V} = 0 \quad \text{d'où}$$

$$\chi_T = -\frac{1}{V}\frac{\Delta V}{\Delta p} = \frac{1}{p}$$

et la vitesse de propagation est :

$$v_T = \frac{1}{\sqrt{\rho \chi_T}} = \sqrt{\frac{p}{\rho}} \tag{11}$$

Dans le cas de l'air pris dans les conditions normales (0 °C et pression de 760 mm de mercure), on en déduit :

$$v_T = 270 \text{ m/s}$$

Les expériences montrent que le son se propage dans l'air à une vitesse plus grande. On peut donc imaginer que l'ébranlement acoustique se propage de manière adiabatique et non pas isotherme.

Si l'on remarque que, par diminution de volume $(-\Delta V)$ effectuée rapidement, il y a élévation de température (échauffement adiabatique), l'accroissement Δp de la pression est plus élevé que par une compression isotherme. La compressibilité adiabatique χ_Q est donc plus petite que la compressibilité isotherme χ_T. On montre en thermodynamique que les deux compressibilités sont reliées par la relation suivante :

$$\chi_Q = \frac{1}{\gamma}\chi_T$$

où γ est le rapport des chaleurs spécifiques à pression constante et à volume constant. Ce rapport est toujours supérieur à l'unité.

La vitesse du son doit donc être, pour un ébranlement adiabatique :

$$v_Q = \sqrt{\frac{p\gamma}{\rho}} \tag{12}$$

Dans le cas de l'air, $\gamma = 1{,}4$, et la nouvelle valeur calculée est en rapport satisfaisant avec l'expérience. La mesure de la vitesse du son est probablement la méthode la plus précise pour connaître le rapport γ des chaleurs spécifiques.

Historiquement, c'est Newton qui, le premier, trouva l'expression **(11)** donnant la vitesse du son. La démonstration de cette formule fut publiée dans le livre II des *Principia* en 1687, et, par une substitution convenable, Newton calcula que la vitesse du son dans l'air était de 968 pieds/s. Ce qui était beaucoup plus faible que la valeur trouvée expérimentalement. Quelque soixante-dix ans plus tard, Lagrange fit remarquer que l'analyse mathématique de Newton ne tenait pas convenablement compte des changements de compressibilité de l'air dus aux changements de température provoqués par la propagation des ondes sonores. En effet, c'est la compressibilité adiabatique et non isotherme qu'il faut utiliser, car les compressions et les dilatations dues à l'onde ont lieu trop rapidement pour que les conditions isothermes soient

fig. 11

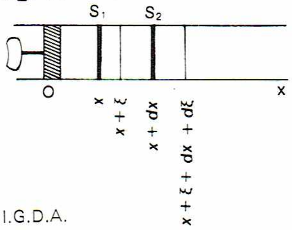

I.G.D.A.

▲ ***Figure 11 : propagation d'une onde sonore plane dans un fluide homogène.***

◀ ***Page ci-contre, de haut en bas. Figure 6 : surface et front d'onde sphériques. Figure 7 : fronts d'onde plan et sphérique. Figure 8 : ondes longitudinales dans un ressort. Figure 9 : ondes transversales dans une corde vibrante. Figure 10 : ondes transversales dans une corde vibrante ; les vibrations de la corde transmettent à l'air environnant des ondes sonores longitudinales.***

◀ ***Figure 12 : une onde avance avec une vitesse v dans le sens de l'axe Ox, sans subir de déformation de son profil ; les deux courbes représentent les positions des deux profils aux instants t et t + Δt.***

▶ *Figure 13 : composition de la vitesse du vent $\vec{v_a}$ et de la vitesse $\vec{v}$ du son.*

réalisées. En fait, ce fut seulement une centaine d'années plus tard que le mathématicien français Pierre Laplace modifia les équations de Newton sur la base de l'argumentation de Lagrange (*Annales de chimie*, 1816) et aboutit à l'expression correcte **(12)**, qui était en accord avec les valeurs expérimentales usuelles.

Dans un gaz à des pressions moyennes ou faibles, il n'y a que de faibles interactions entre molécules en dehors des chocs moléculaires. On doit donc s'attendre à trouver que la vitesse de propagation du son est du même ordre de grandeur que la vitesse des molécules. De l'équation **(12)** on déduit, en introduisant le volume V_M de la molécule-gramme, que :

$$v_Q = \sqrt{\frac{pV_M\gamma}{\rho V_M}}$$

Or, d'après l'équation d'état des gaz parfaits, $pV_M = RT$ (R est la constante des gaz parfaits et T la température absolue). La quantité ρV_M représente la masse moléculaire du gaz. On aura donc :

$$v_Q = \sqrt{\frac{RT\gamma}{M}} \qquad \textbf{(13)}$$

D'autre part, la vitesse quadratique moyenne avec laquelle les molécules d'un gaz parfait se meuvent par agitation thermique, a pour valeur, d'après la théorie cinétique des gaz :

$$v = \sqrt{\frac{3\,RT}{M}}$$

Or γ varie entre 1,66 (gaz monoatomiques) et 1,3 (gaz polyatomiques) ; la vitesse du son coïncide donc pratiquement avec la vitesse quadratique moyenne du gaz dans lequel il se propage, et cela permet d'interpréter le processus de propagation comme un transport d'énergie de la part des molécules du milieu.

L'absence de milieu matériel rend impossible la propagation d'une onde sonore : ce résultat peut se vérifier en mettant une sonnerie sous une cloche de verre et en faisant le vide dans celle-ci à l'aide d'une pompe ; au fur et à mesure que le vide devient plus poussé, le son de la sonnerie s'atténue, puis cesse complètement.

▼ *Le laboratoire artisanal de Violle et Vautier pour leurs expériences relatives à la vitesse du son : à gauche, soufflerie et grande flûte d'orgue ; au centre, un enregistreur graphique des vibrations d'un diapason.*

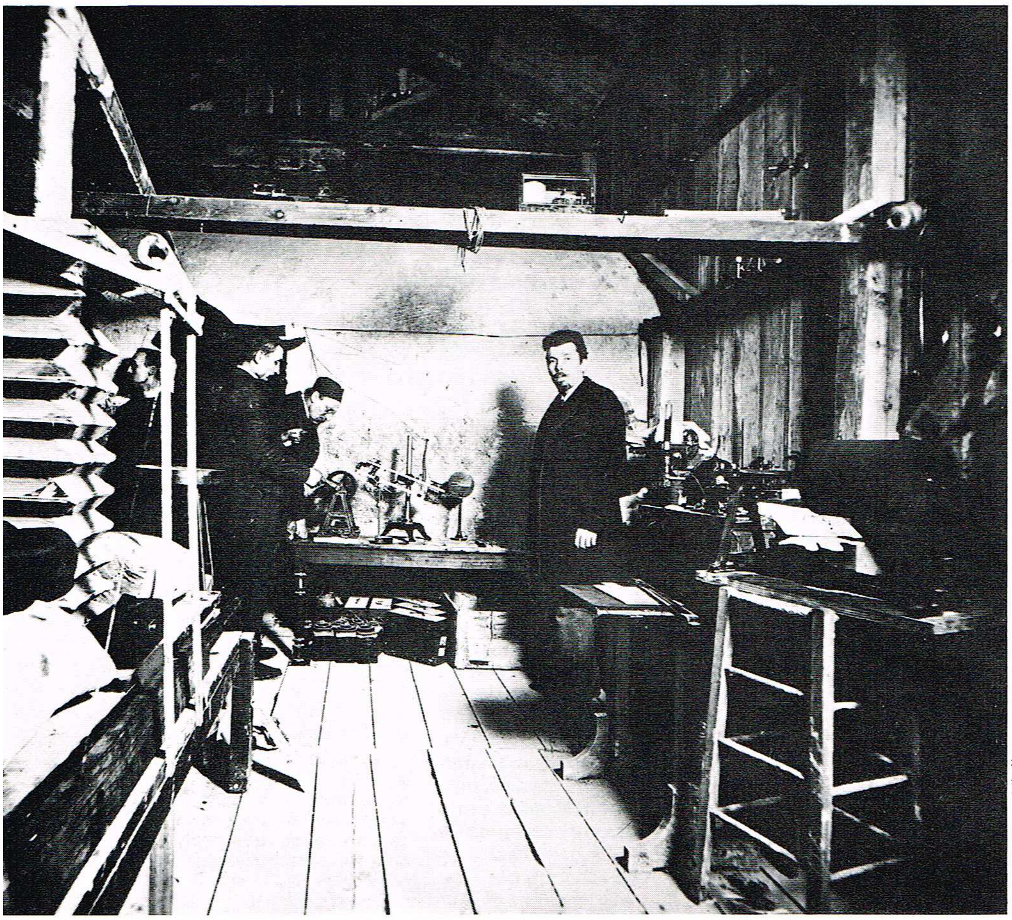

Boyer - Roger Viollet

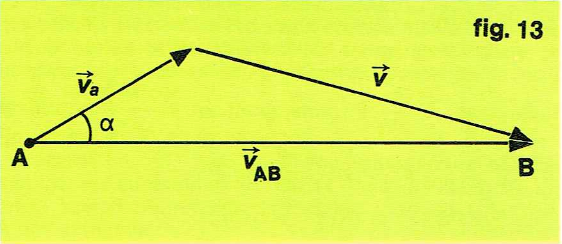

Richard Colin

Mesures de la vitesse du son

Mesures faites à l'air libre

Dans ces méthodes (les plus anciennes), on mesure le temps nécessaire à une onde sonore pour se propager entre deux points A et B. Il est indispensable de tenir compte des différentes causes d'erreurs dues aux courants aériens, au rôle d'une température non uniforme des couches d'air, etc.

— Supposons qu'il existe un vent horizontal, régulier, de vitesse v_a formant un angle α avec la base de mesure AB (*fig.* 13). Aux points A et B sont placés des observateurs qui vont échanger des signaux sonores croisés. Soit v_{AB} la vitesse du son selon AB ; elle est due à la composition vectorielle de la vitesse v du son et de la vitesse v_a de l'air :

$$\vec{v}_{AB} = \vec{v} + \vec{v}_a$$

Soit t_1 le temps nécessaire à l'onde sonore pour franchir la distance AB ; nous avons :

$$v_{AB} = \frac{AB}{t_1}$$

Compte tenu des relations entre côtés du triangle de la *figure* 13, on a :

$$v^2 = v_a^2 + v_{AB}^2 - 2\,v_{AB}\,v_a \cos\alpha$$

En général, la vitesse du vent est très petite vis-à-vis de la vitesse du son (la vitesse du son est de l'ordre de 1 200 km/h alors que, pour un vent très violent, la vitesse est de l'ordre de 120 km/h). On peut donc écrire :

$$v^2 = v_{AB}^2\left[1 - 2\frac{v_a}{v_{AB}}\cos\alpha + \frac{v_a^2}{v_{AB}^2}\right]$$

et calculer v en faisant un développement limité en $\frac{v_a}{v_{AB}}$

On trouve : $v = v_{AB}\left[1 - \frac{v_a}{v_{AB}}\cos\alpha\right]$

soit $v = v_{AB} - v_a \cos\alpha$.

De même, si le signal acoustique était émis de B et se propageait à la vitesse v_{BA}, on aurait :

$$v = v_{BA} + v_a \cos\alpha$$

La vitesse du son est donnée par la moyenne des deux mesures :

$$v = \frac{v_{AB} + v_{BA}}{2}$$

Donc, dans la mesure où le vent est régulier et permanent, son influence peut être éliminée par la méthode des signaux croisés.

— La vitesse du son dépend de la température ; celle-ci présente souvent de grandes variations dans les différentes couches d'air traversées par le son. Un phénomène d'incurvation des trajectoires (mirage acoustique) prend alors naissance. Le rayon de courbure de la trajectoire (qui est le rayon du cercle tangent à la trajectoire) dépend de la variation de la température par unité de longueur : $\frac{dT}{dl}$ et de la température absolue T suivant la loi :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{2\,T}\frac{dT}{dl}$$

où R est positif pour des trajectoires courbées vers le bas et négatif dans le cas contraire.

Pour une variation de température de 1 °C par mètre et pour une température de 27 °C (température absolue de 300 °K), le rayon de courbure des trajectoires est d'environ 600 mètres.

En règle générale, la température décroît quand l'altitude augmente, les trajectoires acoustiques sont donc

relevées vers le haut ; même pour des trajets peu importants, on peut observer une déviation sensible des trajectoires. Par exemple, pour un trajet de longueur $x = 100$ m et un rayon de courbure R = 600 m, on observe une déviation verticale de la trajectoire $h \simeq 8$ m (*fig.* 14).

Il est courant d'observer que les sons lointains sont mieux perçus au sommet d'une tour qu'à son pied, ce qui est une conséquence du mirage acoustique. Pour les mêmes raisons, il est avantageux de surélever les sources sonores (cloche ou haut-parleur) que l'on veut faire entendre à grande distance.

Pour éviter d'être gêné par les effets de mirage acoustique lors de la mesure du son en plein air, on a intérêt à choisir un temps couvert qui s'accompagne d'un faible gradient de température.

Résultats des mesures faites à l'air libre

Dès 1738, des expériences furent effectuées par l'Académie des sciences en utilisant comme bases d'émission et de réception les observatoires de Paris, Fontenay et Montlhéry et en employant la méthode des signaux croisés.

fig. 14

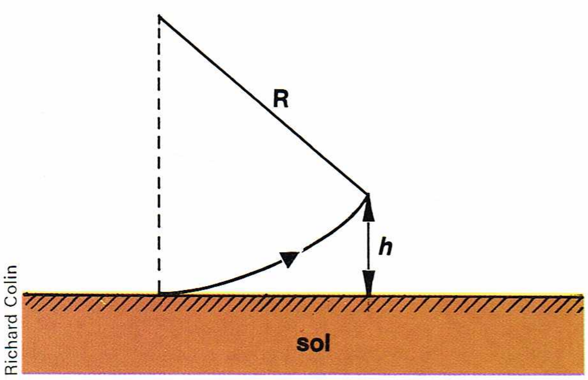

Richard Colin

◀ ***Figure 14 : le phénomène du mirage acoustique.***

De ces expériences, on put tirer comme conclusion que la vitesse du son était indépendante de la pression atmosphérique [comme le montre la relation **(13)**] et qu'elle était quasi indépendante du degré d'humidité de l'air.

Ces mesures permirent aussi de vérifier que la vitesse du son augmentait avec la température [voir **(13)**] et mirent en évidence l'influence du vent (augmentation ou diminution de la vitesse apparente suivant le sens du vent). La valeur trouvée, exprimée en unités actuelles, était de 330 m/s à 0 °C.

En 1822, à la demande de Laplace, les expériences furent reprises entre Villejuif et Montlhéry (18 600 m) en évitant la portion urbaine située entre l'observatoire de Paris et Fontenay. Comme dans les expériences précédentes, la source sonore était réalisée par un coup de canon. On notait l'intervalle de temps qui séparait la perception de la lueur de celle du son. On trouva ainsi 340,8 m/s à 16 °C, soit 330 m/s à 0 °C.

Vers la même époque (1827), Colladon et Sturm déterminèrent sur le lac de Genève la vitesse du son dans l'eau et trouvèrent 1 435 m/s.

En 1864, Regnault reprit les mesures de vitesse du son en plein air (polygone de Satory) en utilisant des méthodes d'enregistrement électrique évitant les erreurs personnelles. La valeur trouvée était de 330,7 m/s à 0 °C.

Mesures faites dans des tuyaux

Dans le cas des tuyaux de large section, on peut admettre que la vitesse du son est la même qu'en milieu infini. L'état du fluide contenu dans le tuyau est mieux déterminé et les mesures plus précises. Le rôle du diamètre du tuyau est faible lorsque sa valeur est supérieure à plusieurs centimètres. Pour des tuyaux de très petits diamètres, l'influence du diamètre sur la vitesse devient notable à cause des phénomènes de viscosité et d'échanges thermiques entre les parois et l'air. La vitesse peut atteindre des valeurs aussi faibles que 220 m/s.

Les méthodes modernes de détermination de la vitesse du son dans des solides ou des liquides utilisent les ondes ultrasonores. Elles seront décrites plus loin.

Ondes sinusoïdales planes

Un cas très intéressant et très courant d'onde sonore est le cas des *ondes sinusoïdales* pour lesquelles le déplacement ξ des particules à partir de leur position d'équilibre peut être décrit par :

$$\xi\,(x, t) = A \sin \frac{2\pi}{\lambda}\,(x - vt) \qquad \textbf{(14)}$$

pour une onde progressive se propageant vers les x positifs. A représente l'amplitude des oscillations, c'est-à-dire la valeur maximale du déplacement, et λ représente, comme nous allons immédiatement le démontrer, la périodicité spatiale de l'onde.

En remplaçant, dans l'équation **(14)**, x par $x + \lambda$, nous calculons le déplacement des particules atteintes par l'onde ayant parcouru la distance λ dans le sens des x positifs. Nous obtenons :

$$\xi\,(x + \lambda, t) = A \sin \frac{2\pi}{\lambda}\,(x + \lambda - vt)$$

Ce qui peut s'écrire :

$$\xi\,(x + \lambda, t) = A \sin \left[\frac{2\pi}{\lambda}\,(x - vt) + 2\pi\right] =$$

$$A \sin \frac{2\pi}{\lambda}\,(x - vt) = \xi\,(x, t)$$

Nous démontrons ainsi qu'après avoir parcouru une distance égale à λ, l'onde a retrouvé la même configuration. λ représente la distance parcourue par l'onde au cours d'une oscillation et s'appelle la *longueur d'onde*. Elle est reliée à la période T et à la fréquence f de l'onde par les relations suivantes :

$$\textbf{(15a)} \quad \lambda = vT \qquad\qquad \textbf{(15b)} \quad \lambda = \frac{v}{f}$$

Montrons, à présent, qu'une onde de la forme **(14)** a une périodicité temporelle de période T. Si nous remplaçons, dans **(14)**, λ par sa valeur **(15a)**, nous obtenons :

$$\xi\,(x, t) = A \sin \frac{2\pi}{vT}\,(x - vt)$$

▼ ***Il est avantageux de surélever les sources sonores (ici, une cloche dominant les toits de Venise) que l'on veut faire entendre à grande distance.***

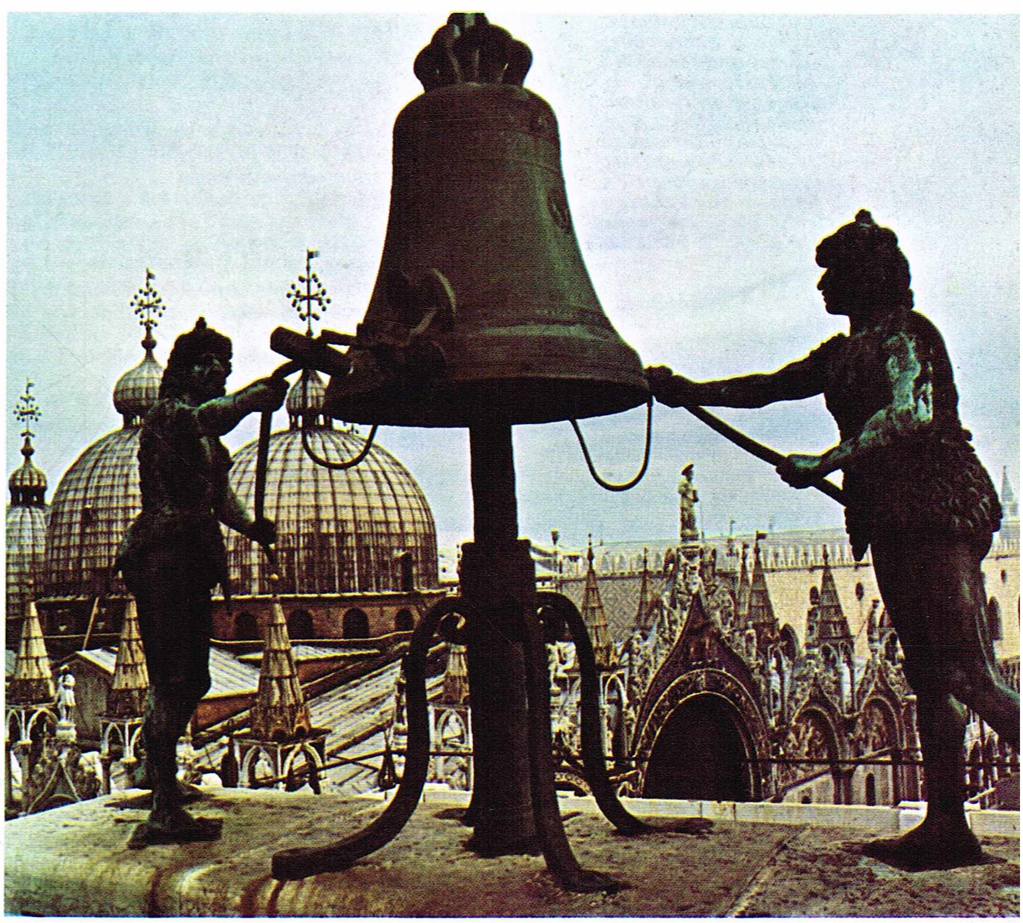

B. Barbey - Magnum

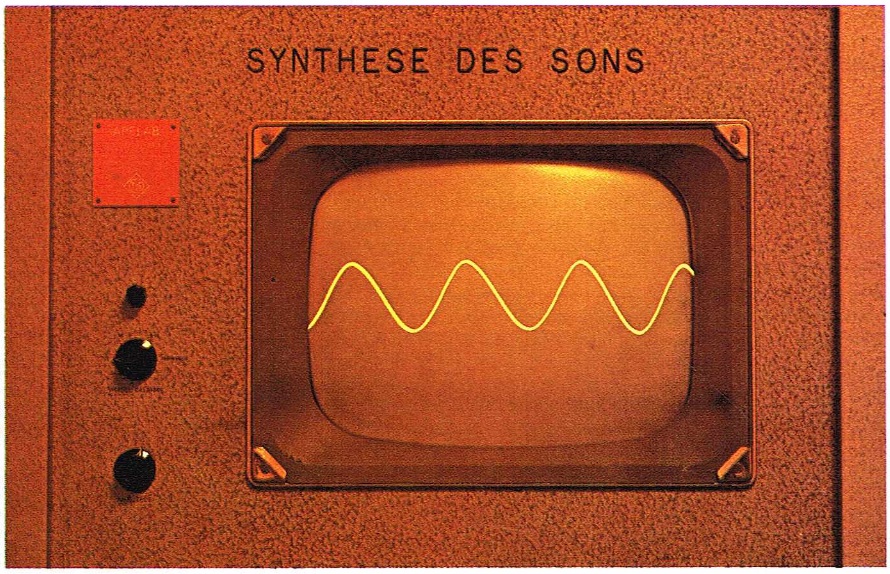

E. Rousseau - Snark International

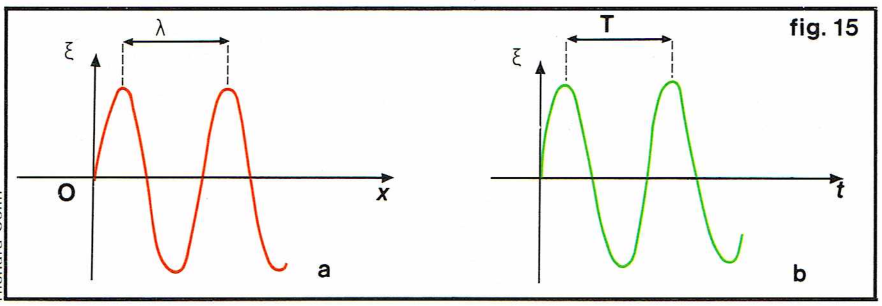

Richard Colin

▲ *En haut, visualisation d'une onde sinusoïdale. Ci-dessus, figure 15; la double périodicité, spatiale et temporelle, d'une onde sonore : a, le déplacement ξ est représenté en fonction de la position x à un certain instant t; b, le déplacement ξ est représenté en fonction du temps à une position fixe de x; λ, longueur d'onde; T, période.*

▼ *Figure 16 : l'onde* (3) *peut être obtenue par composition de deux ondes sinusoïdales de fréquences f* (1) *et 2 f* (2).

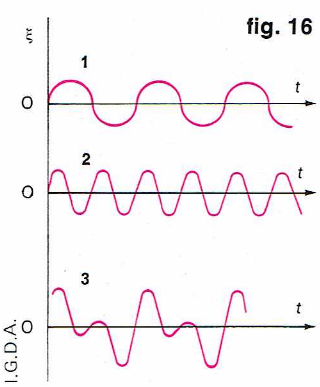

I.G.D.A.

Calculons le déplacement à l'instant $t + T$, c'est-à-dire après un intervalle de temps T, nous trouvons :

$$\xi\ (x, t + T) = A \sin \frac{2\pi}{vT} [x - v\ (t + T)]$$

$$= A \sin \left[\frac{2\pi}{vT} (x - vt) + 2\pi\right] = A \sin \frac{2\pi}{vT} (x - vt) = \xi\ (x, t)$$

Cela prouve qu'après un intervalle de temps T, l'onde a la configuration qu'elle avait à l'instant t : T représente donc la *période (temporelle) de l'onde*.

Une onde sonore a donc une double périodicité, spatiale et temporelle : pendant que l'onde avance d'une longueur λ, il s'écoule un intervalle de temps T au bout duquel l'onde, en plus d'avoir retrouvé la même configuration spatiale, a repris la même configuration temporelle. On rencontre très souvent l'équation d'une onde sinusoïdale sous des formes équivalentes à **(14)**. Introduisons le nombre d'onde k et la pulsation ω de l'oscillation définie par $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ et $\omega = \frac{2\pi}{T}$; l'équation **(14)** peut se mettre sous l'une des deux formes :

$$\xi\ (x, t) = A \sin 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T}\right)$$

(16) $$\xi\ (x, t) = A \sin\ (kx - \omega t)$$

La forme **(16)** est la plus utilisée. Le fait que les ondes aient une double périodicité permet de les représenter graphiquement de deux façons équivalentes. Dans la *figure* 15a, on a représenté le déplacement ξ en fonction de la position x à un certain instant t alors que sur la *figure* 15b le déplacement ξ est représenté en fonction du temps à une position fixe x : dans les deux figures sont aussi indiquées la longueur d'onde λ et la période T. Les représentations graphiques des *figures* 15a et 15b supposent respectivement que, pour $x = 0$ et pour $t = 0$, le déplacement ξ est nul. Cela est un cas particulier; en général, le déplacement initial n'est pas nul, et on doit en tenir compte en introduisant dans l'argument de **(16)** une constante φ qui s'appelle constante de phase à l'origine et qui permet d'évaluer pour l'onde étudiée le déplacement initial à partir de la position d'équilibre.

L'équation du déplacement s'écrit donc dans le cas général :

(17) $$\xi = A \sin\ (kx - \omega t + \varphi)$$

Nous venons d'étudier les ondes sinusoïdales qui constituent un cas très intéressant; malheureusement, en général, un son ne peut pas se représenter par un déplacement du type **(17)**. Si, par exemple, nous représentions graphiquement l'onde sonore d'un instrument de musique, nous trouverions un schéma du type de celui de la *figure* 16, périodique mais de forme irrégulière. Cependant, grâce à un théorème dû à J. Fourier, on peut démontrer que toute perturbation ondulatoire de forme complexe peut se décomposer en une somme d'un grand nombre d'ondes sinusoïdales, convenablement déphasées les unes par rapport aux autres. Ainsi, le déplacement de l'onde complexe peut être écrit sous la forme :

$$\xi\ (t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin\ (\omega_n t + \varphi_n)$$

où les diverses pulsations ω_n des ondes sinusoïdales sont commensurables entre elles. Par exemple :

$$\omega_2 = 2\ \omega, \quad \omega_3 = 3\ \omega, \quad \ldots, \quad \omega_n = n\omega.$$

La somme ci-dessus ne contient pas toujours un nombre infini de termes; dans certains cas, une onde complexe peut se décomposer en 3 ou 4 ondes sinusoïdales, comme dans le cas illustré dans la *figure* 16, car on peut négliger la contribution de toutes les ondes dont l'amplitude A_n est très petite.

Principe de superposition de Bernoulli

Considérons un point P d'un milieu élastique. S'il est atteint par une perturbation sonore S_1, il commence à vibrer autour de sa position d'équilibre, et nous notons son déplacement (vectoriel) par $\vec{\xi}_1$. Supposons qu'au même instant arrive en P une deuxième perturbation provenant d'une source sonore S_2, caractérisée par un déplacement $\vec{\xi}_2$. Le point P, sous l'effet des deux perturbations reçues, vibre comme si elles arrivaient en P indépendamment l'une de l'autre. La perturbation résultante provoque sur le point P un déplacement qui est la somme vectorielle de $\vec{\xi}_1$ et de $\vec{\xi}_2$. Comme, en général, la direction de propagation des deux ondes est différente, il faut considérer à la fois le module et la direction des déplacements. Dans le cas de n perturbations de déplacements $\vec{\xi}_1, \vec{\xi}_2, \ldots \vec{\xi}_n$, on peut écrire le déplacement résultant sous la forme :

$$\vec{\xi} = \vec{\xi}_1 + \vec{\xi}_2 + \ldots + \vec{\xi}_n$$

Ce résultat est le *principe de superposition de Bernoulli*, qui s'énonce ainsi : si plusieurs perturbations émises par des sources différentes arrivent en même temps en un point d'un milieu, le point se déplace sous leur action comme si elles arrivaient indépendamment les unes des autres.

Le principe de Bernoulli a un fondement théorique et un fondement expérimental. Nous avons vu que l'équation de D'Alembert **(9)**, dans le cas d'ondes planes, admet comme solution une somme de fonctions du type :

$$\xi = f_1\ (x - vt) + f_2\ (x + vt)$$

on peut ainsi démontrer qu'en prenant différentes fonctions des variables $x \pm vt$ et en les ajoutant, la somme obtenue est aussi solution de l'équation d'onde. Cela veut dire que les ondes se propageant dans un certain milieu se composent linéairement, et cela est une conséquence du fait que l'équation de D'Alembert est une équation différentielle linéaire.

Le principe de Bernoulli a cependant une limite de validité provenant des limites d'élasticité du milieu. Il est valable tant que l'équation d'onde est correcte, c'est-à-dire tant que l'on peut écrire une relation linéaire entre les variations de pression et de volume du fluide dans lequel les ondes se propagent. Pour comprendre la grande importance du principe de superposition, il suffit de penser à tous les effets fâcheux auxquels on se trouverait confronté, chaque fois que deux personnes parlent simultanément, si les ondes sonores émises se déformaient sous l'effet de leur interaction mutuelle.

Constantine Manos - Magnum

▲ *Le violoncelle appartient à la famille des instruments à cordes à notes variables, c'est-à-dire dont il est possible de faire varier la fréquence du son émis en modifiant la longueur ou la tension des cordes.*

Amplitude de pression et de déplacement, nœuds et ventres

Avant de passer à l'étude des tuyaux sonores, nous devons revenir sur la relation **(5)** qui relie la variation de pression dans un fluide au déplacement des particules du fluide par rapport à leur position d'équilibre :

$$\Delta p = -\frac{1}{\chi}\frac{\partial \xi}{\partial x}$$

où ξ est le déplacement, Δp la variation de pression et χ la compressibilité du fluide.

Nous avons vu que la solution sinusoïdale de l'équation de D'Alembert pour une onde progressive se propageant dans le sens des x positifs se mettait sous la forme :

$$\xi = A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}(x - vt)\right)$$

Sa dérivée par rapport à x s'écrit :

$$\textbf{(18)} \qquad \frac{\partial \xi}{\partial x} = A\frac{2\pi}{\lambda} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}(x - vt)\right)$$

En substituant l'équation **(18)** dans l'équation **(5)** on obtient :

$$\textbf{(19)} \qquad \Delta p = -\frac{2\pi A}{\chi\lambda} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}(x - vt)\right)$$

Si nous représentons sur le même graphique la dépendance temporelle de ξ et celle de la variation de pression Δp, on remarque qu'elles diffèrent par les faits suivants : les amplitudes sont différentes et, alors que la première est une fonction en sinus, la seconde est une fonction en cosinus ; elles sont déphasées d'un quart de période. Cela veut dire que, chaque fois que le déplacement est maximal ou minimal, la variation de pression est nulle, alors que, lorsque la variation de pression est maximale ou minimale, le déplacement des particules du milieu sera nul. Nous appellerons *ventres de pression* les points pour lesquels la variation de pression est maximale, et *nœuds de pression* les points pour lesquels la variation de pression est nulle. Il est alors évident que, lors de la propagation d'une onde sonore dans un milieu, les nœuds de pression seront toujours les ventres de déplacement, et *vice versa*.

D'après l'équation **(19)**, nous voyons que l'amplitude de pression, que nous appellerons P, s'écrit :

$$P = \frac{2\pi A}{\chi\lambda}$$

soit, en tenant compte des relations :

$$v = \sqrt{\frac{1}{\rho\chi}} \qquad \text{et} \qquad \lambda = \frac{v}{f}$$

$$\textbf{(20)} \qquad P = 2\pi A v f \rho$$

La relation **(20)** est très importante, car elle met en évidence le lien qui existe entre l'amplitude de la pression P et celle du déplacement A produit par une onde sonore de fréquence f qui se propage avec la vitesse v dans un milieu homogène de masse volumique ρ. Par exemple, dans l'air, dans les conditions normales où l'amplitude de pression produite par la voix est environ 0,01 N/m², l'amplitude de déplacement correspondante est environ 4×10^{-6} mm, ce qui donne l'ordre de grandeur des vibrations de la membrane du tympan de l'oreille humaine.

Réflexion des ondes acoustiques

Réflexion sur une paroi rigide

Soit une onde acoustique rencontrant une surface plane rigide. On constate expérimentalement qu'il se produit une réflexion et qu'il se forme un écho. Soit ξ_i le déplacement de chaque point du fluide pour l'onde incidente se propageant dans le sens des x négatifs.

$$\xi_i = f_1\,(x + vt)$$

Sur la *figure* 17, nous avons représenté graphiquement l'ébranlement en portant en ordonnées le déplacement ξ_i (qui s'effectue en réalité suivant Ox). Supposons qu'à l'origine des coordonnées se trouve une surface plane rigide. L'onde réfléchie (se propageant dans le sens des x positifs sera représentée par :

$$\xi_r = f_2\,(x - vt)$$

Au niveau du plan rigide ($x = 0$), les particules de fluide ne peuvent pas se déplacer. Quelle que soit la valeur du temps t, on a la relation :

$$\xi_i + \xi_r = 0 = f_1\,(t) + f_2\,(t)$$

Les fonctions f_1 et f_2 sont donc opposées et :

$$\xi_r = -f_1\left(t - \frac{x}{v}\right)$$

La paroi rigide a pour effet d'ajouter à l'onde sonore initiale une onde symétrique par rapport à l'origine (d'amplitude égale mais de signe contraire, se propageant en sens opposé de la première). Naturellement, lors du passage à l'origine (sur la paroi), les déplacements dus aux deux ondes se détruisent.

Réflexion sur l'extrémité ouverte d'un tuyau

Si l'on envoie une onde sonore dans un tuyau dont l'extrémité est ouverte, on observe expérimentalement que cette onde se réfléchit à l'extrémité du tuyau. En effet, dans le plan de section droite en B (*fig.* 18), la pression

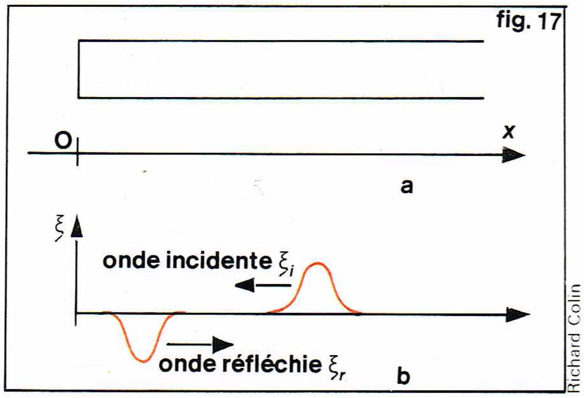

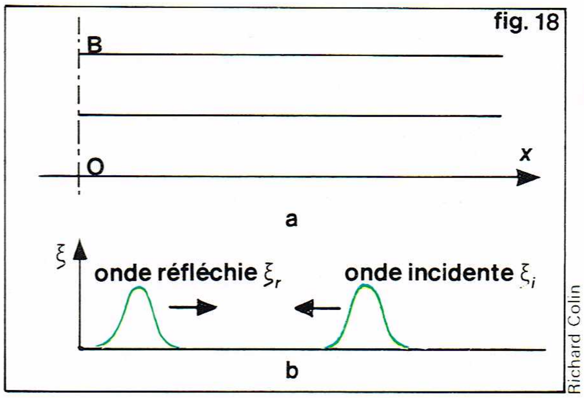

◀ *A gauche, figure 17 : réflexion d'une onde à l'extrémité d'un tuyau fermé. L'onde incidente se propage de la droite vers la gauche : a, le tuyau est fermé en x = 0 ; b, forme des ébranlements incident et réfléchi. A droite, figure 18 : réflexion d'une onde à l'extrémité d'un tuyau ouvert. L'onde incidente se propage de la droite vers la gauche : a, le tuyau est ouvert en x = 0 ; b, forme des ébranlements incident et réfléchi.*

dans le tuyau reste égale à celle de l'extérieur qui ne diffère guère de la pression du fluide au repos.

Soit $\xi_i = f_1\left(t + \frac{x}{v}\right)$ l'onde incidente se propageant dans le sens des x négatifs, et $\xi_r = f_2\left(t - \frac{x}{v}\right)$ l'onde réfléchie se propageant dans le sens des x positifs.

Au point B ($x = 0$), la variation de pression du fluide reste pratiquement nulle, soit :

$$\Delta p = \Delta p_i + \Delta p_r = 0$$

On obtient, en utilisant l'équation **(5)** :

$$\frac{\partial \xi_i}{\partial x} + \frac{\partial \xi_r}{\partial x} = 0 \quad \text{soit :}$$

$$\frac{1}{v} f'_1\left(t + \frac{x}{v}\right) - \frac{1}{v} f'_2\left(t - \frac{x}{v}\right) \quad \text{pour } x = 0$$

d'où $f'_1 = f'_2$ ce qui entraîne que les fonctions f_1 et f_2 ont même forme.

A l'onde incidente $\xi_i = f\left(t + \frac{x}{v}\right)$ correspond dans ce cas l'onde réfléchie : $\xi_r = f\left(t - \frac{x}{v}\right)$

Nous donnons la représentation graphique de ξ_i et ξ_r en fonction de x sur la *figure* 18.

Réflexion sur la surface de séparation de deux milieux fluides indéfinis

Considérons une onde se propageant d'un milieu 1 de masse volumique ρ_1 et de vitesse de propagation v_1 vers un milieu 2 (ρ_2, v_2). Les deux milieux sont séparés par le plan $x = 0$ (*fig.* 19). A cette surface de séparation, l'onde incidente va être réfléchie partiellement et transmise partiellement. Soit $\xi_i = f_1\left(t + \frac{x}{v_1}\right)$ l'onde incidente se propageant dans le milieu 1 vers les x négatifs ; l'onde réfléchie se propage dans le milieu 1 vers les x positifs. Elle s'écrit donc :

$$\xi_r = f_2\left(t - \frac{x}{v_1}\right)$$

L'onde transmise se propage vers les x négatifs dans le milieu 2, elle s'écrit donc :

$$\xi_t = f_3\left(t + \frac{x}{v_2}\right)$$

Nous nous proposons de calculer ξ_r et ξ_t en fonction de ξ_i. Pour cela, nous devons exprimer les deux conditions suivantes :

— L'égalité des déplacements des molécules des fluides de part et d'autre de la surface de séparation (et au voisinage immédiat de celle-ci) ; c'est la condition de *continuité des déplacements*.

— L'égalité des pressions acoustiques de fluides de part et d'autre de la surface (et à son voisinage immédiat) ; c'est la condition de *continuité des pressions*. En effet, si cette condition n'était pas satisfaite, il s'exercerait une force sur un petit élément de volume dont les faces seraient dans les milieux 1 et 2 (volume hachuré sur la *figure* 19) ; celui-ci, étant de masse infiniment petite, subirait une accélération infiniment grande.

La première condition s'écrit :

$$\textbf{(21)} \qquad f_1 + f_2 = f_3$$

La seconde s'écrit d'après **(5)** :

$$\frac{1}{\chi_1 v_1}(f'_1 - f'_2) = \frac{1}{\chi_2 v_2} f'_3$$

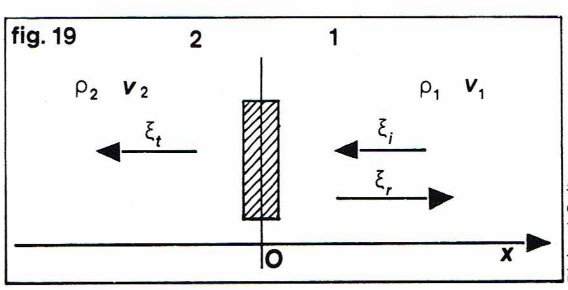

▶ *Figure 19 : transmission d'une onde à l'interface de deux milieux caractérisés par des masses volumiques* ρ_1 *et* ρ_2 *et des vitesses du son* v_1 *et* v_2. ξ_i *représente l'amplitude de l'onde incidente,* ξ_r *et* ξ_t *les amplitudes des ondes réfléchie et transmise.*

En intégrant cette relation et en tenant compte du fait que $v^2 = \frac{1}{\chi\rho}$, on a :

$$\textbf{(22)} \qquad f_1 - f_2 = \frac{\rho_2 v_2}{\rho_1 v_1} f_3$$

En combinant les équations **(21)** et **(22)**, on obtient :

$$\textbf{(23)} \qquad f_2 = \frac{\rho_1 v_1 - \rho_2 v_2}{\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2} f_1 \quad \text{et} \quad f_3 = \frac{2\rho_1 v_1}{\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2} f_1$$

Ces relations montrent que, au signe près, les formes des ondes réfléchie et transmise sont les mêmes que celles de l'onde incidente. En particulier, si l'onde incidente est une onde sinusoïdale de pulsation ω, les ondes réfléchie et transmise sont sinusoïdales de même pulsation. Plus précisément, si :

$$\xi_i = A_i \sin\omega\left(t + \frac{x}{v_1}\right)$$

on a : $\xi_r = A_r \sin\omega\left(t - \frac{x}{v_1}\right)$

et $\xi_t = A_t \sin\omega\left(t + \frac{x}{v_2}\right)$

Les amplitudes A_r et A_t se calculent en fonction de A_i, v_1 et v_2 d'après **(23)**.

$$A_r = \frac{\rho_1 v_1 - \rho_2 v_2}{\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2} A_i$$

$$A_t = \frac{2\rho_1 v_1}{\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2} A_i$$

On voit que les paramètres caractéristiques des milieux sont $\rho_1 v_1$ et $\rho_2 v_2$. Posons

$$\textbf{(24)} \qquad Z_1 = \rho_1 v_1 \quad \text{et} \quad Z_2 = \rho_2 v_2$$

On a alors :

$$\textbf{(25)} \qquad A_r = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} A_i$$

$$A_t = \frac{2 Z_1}{Z_1 + Z_2} A_i$$

On retrouve les mêmes relations que dans le cas de la propagation d'ondes électromagnétiques, Z_1 et Z_2 jouant le même rôle que les impédances électriques. C'est pour cette raison que Z_1 s'appelle *l'impédance acoustique du milieu*.

Sur le *tableau* I sont indiquées les valeurs de l'impédance acoustique pour différents milieux.

On voit, d'après les relations **(25)**, que, dans le cas de deux milieux de même impédance acoustique, il n'y a pas d'onde réfléchie. L'amplitude de l'onde transmise est égale à celle de l'onde incidente.

En revanche, dans le premier cas envisagé de réflexion sur une paroi rigide, Z_2 est beaucoup plus grand que Z_1 (par exemple, pour l'aluminium, $Z_2 = 17{,}2 \cdot 10^6$ kg/m² · s et, pour l'air, $Z_1 = 427$ kg/m² · s. On peut alors négliger Z_1 devant Z_2 dans **(25)**, et on constate que l'amplitude de l'onde transmise est pratiquement nulle, alors que l'amplitude de l'onde réfléchie est égale et opposée à celle de l'onde incidente, ce qui est en accord avec les résultats précédents.

Nous avons considéré ici les déplacements, mais il est clair qu'en utilisant la relation **(5)**, on peut obtenir avec des notations évidentes :

$$\frac{P_r}{P_i} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} = \beta \quad \text{et} \quad \frac{P_t}{P_i} = \frac{2 Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

Le taux d'ondes stationnaires τ (en abrégé : T. O. S.) est le rapport de l'amplitude de pression maximale à l'amplitude de pression minimale, soit :

$$\tau = \frac{|P_i| + |P_r|}{|P_i| - |P_r|} = \frac{1 + |\beta|}{1 - |\beta|}$$

Si les deux milieux ont des impédances égales, $\beta = 0$, et le T. O. S. vaut 1 ; si Z_1 et Z_2 sont très différents, $\beta \simeq 1$ et le T. O. S. tend vers l'infini. On voit ainsi que le T. O. S. caractérise la qualité de la transmission ; il a pour valeur l'unité en cas de transmission parfaite, et il est très grand pour une mauvaise transmission. Il est alors très clair qu'on aura une bonne transmission du son entre deux milieux s'ils ont des impédances voisines. Lorsque, pour des raisons intrinsèques, ce n'est pas le cas, il sera nécessaire de recourir à des artifices afin d'optimiser

Milieu	Masse volumique en kg/m³	Vitesse des ondes sonores longitudinales en m/s	Vitesse des ondes sonores transversales en m/s	Impédance acoustique pour les ondes longitudinales (unités M.K.S.A.)
Air (0 °C)	1,29	331		427
Hélium	0,178	965		171
Hydrogène	0,0899	1 284		115
Eau pure (25 °C)	$0{,}998 \cdot 10^3$	1 498		$1{,}5 \cdot 10^6$
Eau de mer (25 °C)	$1{,}025 \cdot 10^3$	1 531		1,57
Mercure	$13{,}5 \cdot 10^3$	1 450		19,6
Aluminium	$2{,}7 \cdot 10^3$	6 420	3 040	17,2
Argent	$10{,}4 \cdot 10^3$	3 650	1 610	37,4
Duralumin	$2{,}79 \cdot 10^3$	6 320	3 130	17,6
Fer	$7{,}9 \cdot 10^3$	5 950	3 240	46,6
Plomb	$11{,}4 \cdot 10^3$	2 000	700	22,8
Nickel	$8{,}9 \cdot 10^3$	6 040	3 000	54
Or	$19{,}7 \cdot 10^3$	3 240	1 200	63
Verre	$2{,}2 \cdot 10^3$	5 968	3 764	13,2
Nylon	$1{,}1 \cdot 10^3$	2 620	1 070	2,9
Polyéthylène	$0{,}9 \cdot 10^3$	1 950	540	1,7
Caoutchouc	$1 \cdot 10^3$	1 550		1,5

Tableau I

◄ *Tableau I : valeurs de l'impédance acoustique pour différents milieux.*

la transmission de l'onde. Le porte-voix ou cornet acoustique réalise ainsi l'adaptation de l'impédance de la bouche à celle de l'air ambiant. Dans d'autres cas, on interpose entre les deux milieux une couche dont l'impédance ou l'épaisseur est choisie de manière à assurer une bonne adaptation.

Le pavillon exponentiel

Un cornet acoustique est un dispositif permettant d'adapter les impédances et en particulier la relativement grande impédance d'un petit diaphragme métallique à la faible impédance de l'air ambiant dans lequel le son se propage. En fait, le cornet est un transformateur acoustique, et ses performances dépendent de sa forme. La meilleure forme est celle du pavillon exponentiel dont la section droite S varie exponentiellement avec la longueur.

Choisissons comme axe des x l'axe de symétrie du cornet (*fig.* 20). La section droite à l'abscisse x, S (x) s'écrit :

(26) $$S(x) = S_0 e^{+\gamma x}$$

Considérons une tranche d'air d'épaisseur dx subissant le déplacement ξ suivant Ox, et soit dF_x la somme des forces suivant Ox s'exerçant sur elle. L'équation fondamentale de la dynamique s'écrit :

(27) $$\rho \, S dx \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = dF_x$$

(ρ est la masse volumique de l'air).

La force dF_x comprend deux termes : l'un est dû aux surpressions Δp qui s'exercent sur les faces S et S', et a pour valeur $dF_x^1 = -\dfrac{\partial (S \Delta p)}{\partial x} dx$,
l'autre est dû à la projection suivant Ox de la force agissant sur la paroi latérale de surface $d\Sigma$.
dF_x^2 = projection sur Ox de $\Delta p \, d\Sigma = \Delta p \, d\Sigma \cos \alpha$.
Dans cette expression, α est l'angle que fait la normale à la surface $d\Sigma$ avec l'axe Ox. C'est le même que l'angle entre $d\Sigma$ et la normale à Ox, donc : $d\Sigma \cos \alpha = \dfrac{\partial S}{\partial x} dx$.

La relation **(27)** s'écrit alors :

$$\rho S dx \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = -\frac{\partial (S \Delta p)}{\partial x} dx + \Delta p \frac{\partial S}{\partial x} dx$$

soit :

(28) $$\rho \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = -\frac{\partial \Delta p}{\partial x}$$

Relions p à ξ par l'intermédiaire de la dilatation du volume élémentaire $dV = S dx$, sous l'effet de l'onde sonore :

$$\frac{\Delta dV}{dV} = \frac{\left(S + \frac{\partial S}{\partial x} \xi\right)\left(dx + \frac{\partial \xi}{\partial x} dx\right) - S dx}{S dx}$$

ou :

$$\frac{\Delta dV}{dV} = \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\xi}{S} \frac{\partial S}{\partial x}$$

D'après **(26)** $$\frac{1}{S} \frac{\partial S}{\partial x} = \gamma$$

et, d'après **(1)** $$\chi = -\frac{1}{dV} \frac{\Delta dV}{\Delta p}$$

soit : $$-\chi \Delta p = \frac{\partial \xi}{\partial x} + \gamma \xi$$

▼ *Figure 20 : le pavillon exponentiel.*

fig. 20

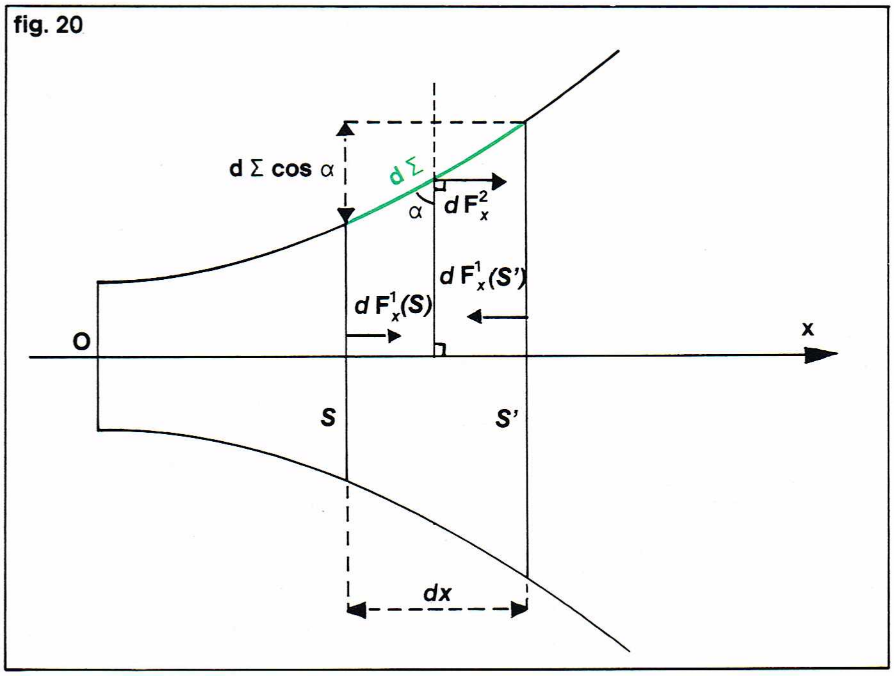

Richard Colin

Snark International

▲ ***Quelques cornets acoustiques datant du XIXᵉ siècle.***

En introduisant cette expression dans la relation **(28)**, on obtient :

$$\textbf{(29)} \qquad \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \gamma \frac{\partial \xi}{\partial x}$$

où $v = \frac{1}{\sqrt{\chi \rho}}$ est la vitesse du son.

On peut montrer que **(29)** admet deux types de solution différents suivant la valeur de la pulsation ω.

Pour ω supérieur à une *pulsation critique* $\omega_c = \gamma \frac{v}{2}$ la solution de **(29)** se présente sous la forme d'une onde progressive amortie se propageant à la vitesse :

$$v' = \frac{v}{\sqrt{1 - \frac{\omega_c^2}{\omega^2}}}$$

dont l'amplitude diminue avec la distance x à la source comme $e^{-\frac{\gamma x}{2}}$. Cette solution s'écrit :

$$\xi = Ae^{-\frac{\gamma x}{2}} \cos \omega \left(t - \frac{x}{v'}\right)$$

Si, au contraire, ω est inférieur à ω_c, la solution de **(29)** n'est plus une onde progressive, le caractère de propagation a disparu.

On peut en tirer l'importante conclusion suivante : dans le pavillon, seules peuvent se propager des ondes dont la pulsation ω est supérieure à ω_c ou, ce qui est équivalent, dont la fréquence f est supérieure à la fréquence $f_c = \frac{\omega_c}{2\pi}$. C'est pour cette raison que f_c est appelée *fréquence de coupure*. En d'autres termes, le pavillon exponentiel se comporte comme un filtre acoustique passe-haut. Pratiquement, on s'arrange pour que la fréquence de coupure soit assez grave (de l'ordre de 50 à 100 Hz).

▼ ***La** Loggia dei Mercanti **à Milan, un exemple fameux du phénomène de l'écho.***

P. Castano

Le phénomène de l'écho sonore

La réflexion a des applications nombreuses et parfois très curieuses. Le phénomène de l'*écho* est produit par la réflexion d'ondes sonores sur une grande paroi. Pour que l'onde sonore réfléchie puisse être perçue distinctement de l'onde incidente, il faut qu'elle parvienne à l'oreille de l'observateur au moins 1/10 de seconde après qu'a cessé l'émission de l'onde incidente, à cause de la persistance de la sensation sonore sur l'oreille humaine qui est de 1/10 de seconde. Comme la vitesse du son dans l'air est d'environ 330 m/s, l'onde doit parcourir au moins 33 m, et donc la paroi réfléchissante doit se trouver au moins à 16,5 m de l'observateur. Dans ce cas, la dernière syllabe est répétée clairement; on dit que l'écho est monosyllabe. Si la distance de la paroi est d'au moins 33 m, les deux dernières syllabes sont répétées distinctement, et l'écho est bisyllabe. S'il y a plusieurs parois réfléchissantes, on a un écho multiple, c'est ce qu'on observe par exemple dans la Villa Simonetta, près de Milan, où un coup de pistolet peut être entendu 25 fois.

Quand la distance entre la paroi réfléchissante et l'observateur est inférieure à 16,5 m (comme cela se produit dans certains théâtres ou certaines églises), l'onde réfléchie se superpose partiellement à l'onde incidente, empêchant

ainsi une audition nette. On parle de réverbération ou de queue sonore. Cet inconvénient peut être éliminé en mettant dans le local des tentures ou des meubles qui absorbent le son. Il est souhaitable toutefois que cette absorption ne soit pas excessive, car alors l'écho est totalement absent et le local est sourd.

La réflexion des ondes sonores a d'autres applications importantes. Lorsque des ondes sonores de vitesses de propagation parallèles arrivent sur une paroi en forme de sphère ou de paraboloïde d'axe parallèle à la direction des ondes, cette surface joue pour les ondes acoustiques le même rôle qu'un réflecteur pour les ondes lumineuses. Elle concentre les ondes sonores en un point dit foyer. On peut vérifier cet effet en plaçant la membrane d'une capsule manométrique en ce point; la pression y est notablement plus grande qu'ailleurs. On rencontre parfois des illustrations de ce curieux phénomène. Ainsi, à Milan, dans la « Loggia dei Mercanti » (voir photo), les voûtes sont construites de telle manière que, lorsqu'une personne parle à voix basse à proximité d'une colonne, elle peut être entendue très clairement par quelqu'un se trouvant à côté de la colonne placée en face, alors qu'elle n'est pas entendue par une personne plus proche se trouvant au milieu du portique.

En Grande-Bretagne, la célèbre galerie des murmures de la cathédrale Saint-Paul (voir photo) est le siège du même phénomène. Sans aller chercher si loin, on rencontre cet effet dans les stations du métro parisien, dans lesquelles une conversation murmurée peut être établie d'un quai à l'autre (*fig.* 21).

A Syracuse, dans le théâtre grec, on trouve une énorme cave en forme d'oreille humaine creusée dans la roche (voir photo). La légende dit que le tyran Denys l'Ancien se cachait souvent dans la partie supérieure de cette cavité (appelée pour cela oreille de Denys) pour écouter les conversations des prisonniers enfermés dans la partie inférieure.

Ondes stationnaires

Soit un tuyau de longueur L fermé à son origine O. Provoquons à son extrémité ouverte I une onde sonore sinusoïdale se propageant dans la direction des x négatifs vers O. En un point P d'abscisse x, on aura donc superposition des déplacements ξ_i et ξ_r associés aux ondes qui se propagent vers les x négatifs et vers les x positifs (ondes incidente et réfléchie).

Comme $\xi_i = \text{A} \sin \omega \left(t + \frac{\overline{\text{IP}}}{v}\right) = \text{A} \sin \omega \left(t - \frac{\text{L} - x}{v}\right)$

et $\xi_r = -\text{A} \sin \omega \left(t - \frac{\text{L} + x}{v}\right)$,

le déplacement total subi par les molécules de fluide en P s'écrit :

$$\xi = \xi_i + \xi_r = \text{A}\left[\sin \omega \left(t - \frac{\text{L} - x}{v}\right) - \sin \omega \left(t - \frac{\text{L} + x}{v}\right)\right]$$

soit :

$$\xi = 2\,\text{A} \sin \frac{\omega x}{v} \cos \omega \left(t - \frac{\text{L}}{v}\right) \qquad \textbf{(30)}$$

L'équation **(30)** ne représente plus une onde progressive, car il n'apparaît plus dans l'argument du sinus l'expression $x \pm vt$. ξ se présente comme le produit d'une fonction sinusoïdale des coordonnées d'espace par une fonction sinusoïdale du temps. Cette dépendance en coordonnées d'espace et de temps représente un *mouvement vibratoire stationnaire*. Ce mouvement est tel que le déplacement correspondant est le produit d'une fonction du temps par une fonction de l'espace. ξ est nul en un point d'abscisse x telle que $\sin \frac{\omega x}{v} = 0$, soit : $\frac{\omega x}{v} = k\pi$ d'où $x = \frac{k\lambda}{2}$ où λ est la longueur d'onde et k un entier positif. On aura donc un nœud de vibration en des points d'abscisses multiples de $\frac{\lambda}{2}$; deux nœuds successifs sont distants d'une demi-longueur d'onde.

Les maximums de vibrations (ventres de vibrations) sont équidistants de deux minimums (nœuds) successifs; ils sont situés en des points d'abscisses $x = \frac{\lambda}{4} + k\frac{\lambda}{2}$.

Etrusko

◄ *L'*Oreille de Denys l'Ancien *à* Syracuse, *une énorme cave en forme d'oreille humaine creusée dans la roche du théâtre grec.*

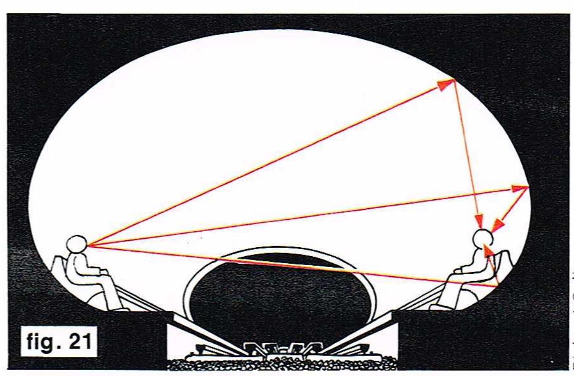

Richard Colin

◄ *Figure 21 : transmission du son dans le métro parisien.*

En ce qui concerne la pression, nous avons vu qu'à un nœud de déplacement correspond un ventre de pression, et réciproquement. En particulier, les nœuds de pression seront situés en des points d'abscisse

$$x = \frac{\lambda}{4} + k\frac{\lambda}{2}$$

A l'extrémité ouverte du tuyau ($x = \text{L}$), nous devons avoir un nœud de pression, donc :

$$\text{L} = \frac{\lambda}{4} + k\frac{\lambda}{2} \qquad \textbf{(31)}$$

La situation particulière dans laquelle une telle relation entre la longueur d'onde de la vibration et la longueur du tuyau est satisfaite, correspond au phénomène de résonance. Autrement dit, un système d'ondes stationnaires ne pourra s'établir dans le tuyau que pour certaines fréquences d'excitation; les fréquences de résonance sont telles que :

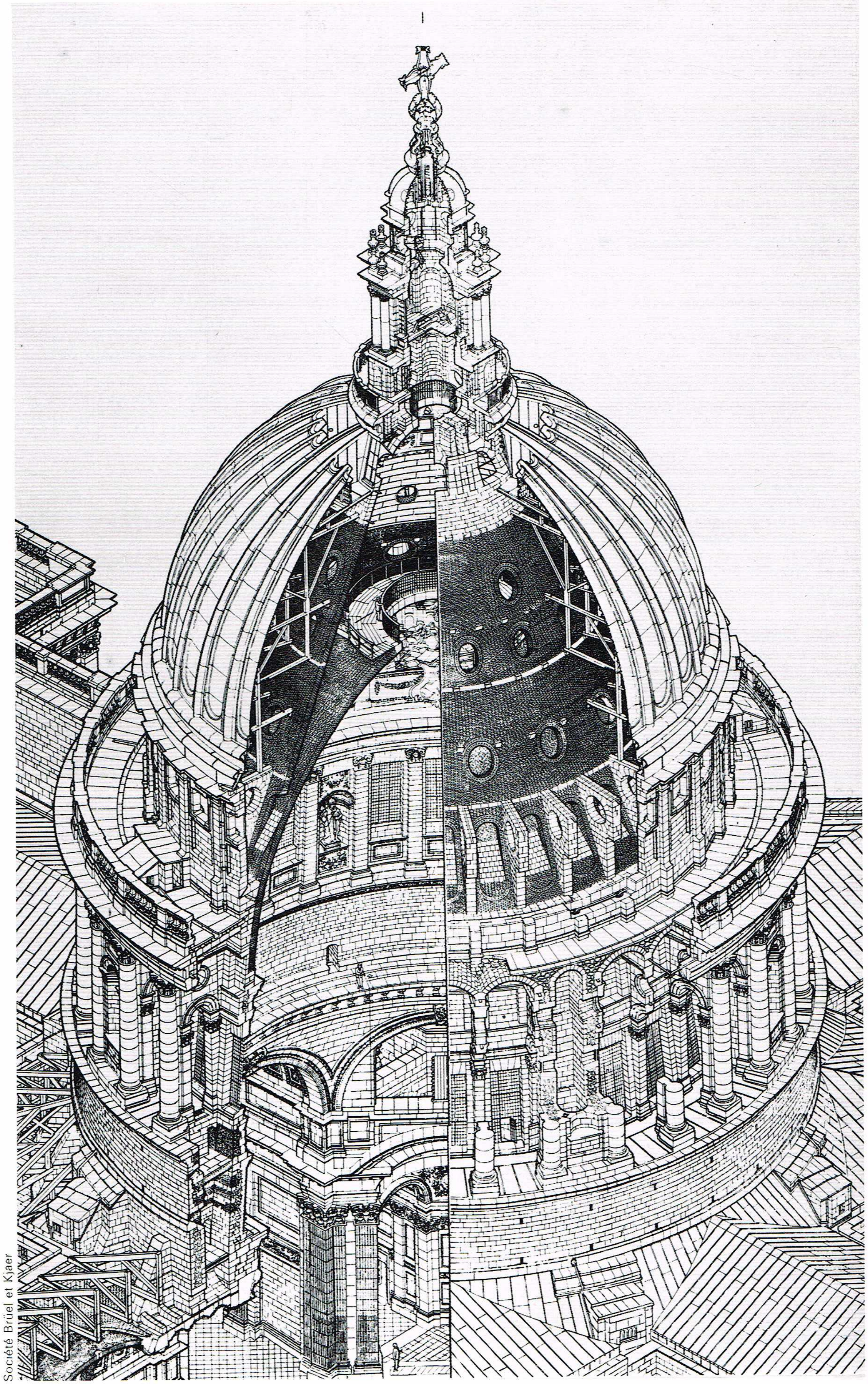

▶ *La galerie des murmures de la cathédrale Saint-Paul à Londres, au bord de laquelle se trouve le personnage du centre de la photographie, possède des propriétés acoustiques remarquables : en tournant le visage vers le mur circulaire au niveau de la base de la coupole, on peut communiquer en chuchotant avec une personne se tenant à l'opposé, à 35 m de là, l'oreille près du mur. Certains croient que les réflexions sur la coupole sont à l'origine de ce phénomène, mais une étude géométrique simple en exclut la possibilité. Lord Rayleigh décrivit le phénomène dès 1878 dans son célèbre ouvrage « Théorie du son » et suggéra que le son se propageait le long de la surface du mur. En 1910, il donnait l'explication mathématique du phénomène. Dans la galerie des murmures, le mur concave, conducteur du son, est fait de pierres tout à fait lisses qui, outre qu'elles ont été assemblées avec une grande précision, ont été gorgées d'huile et polies, de sorte que l'absorption est absolument négligeable (Courtoisie de Brüel et Kjaer).*

Société Brüel et Kjaer

$f = \frac{v}{4L}(2k-1)$ où k est toujours un entier positif.

A différentes valeurs de k correspondent différents *modes de vibration* du système.

En remplaçant v par sa valeur dans l'équation précédente, on obtient :

$$f = \frac{(2k+1)}{4L\sqrt{\chi\rho}}$$

On constate ainsi que la fréquence de résonance du tuyau est fonction de sa longueur, de la densité et du coefficient de compressibilité de l'air.

Résonance sonore dans les tuyaux

Le phénomène de résonance apparait dans tous les domaines de la physique, et on parle dans les différents cas de résonance mécanique, optique, nucléaire, etc. Ce phénomène très important en physique se rencontre chaque fois qu'un système reçoit une perturbation périodique de fréquence égale à la fréquence propre du système. Il se traduit par une augmentation notable de l'amplitude des oscillations du système par rapport au cas où la perturbation périodique externe est absente. Le mouvement du système est un *mouvement périodique forcé* et le rôle de la perturbation externe est principalement d'empêcher l'amortissement des oscillations du système qui aurait inévitablement lieu à cause des frottements.

Une structure mécanique telle qu'un pont, un édifice, un circuit électrique, un atome, est toujours caractérisée par une fréquence propre, à savoir la fréquence à laquelle le système peut vibrer ; de même, en acoustique, un tube sonore est caractérisé par une fréquence propre. En général (et c'est ce qui rend particulièrement utile le phénomène de résonance sonore), les systèmes acoustiques possèdent un grand nombre de fréquences propres.

Nous allons à présent généraliser la condition de résonance obtenue précédemment pour un tuyau dont l'une des extrémités était fermée et l'autre ouverte, et préciser la notation de fréquence propre du tuyau. Nous devons d'abord distinguer trois types de tuyaux sonores : le type étudié précédemment, que nous appellerons ouvert-fermé (OF), celui ouvert aux deux extrémités, appelé ouvert-ouvert (OO), et celui fermé aux deux extrémités, appelé fermé-fermé (FF). Dans ce dernier type de tuyaux, le son pénètre à travers une très petite ouverture (*fig.* 22).

Comme précédemment, les fréquences de résonance (ou fréquences propres) s'obtiennent à partir de la condition de formation d'ondes stationnaires. Nous avons déjà obtenu ces fréquences dans le tuyau OF :

(32) $$f_{OF} = \frac{(2k+1)\,v}{4\,L_{OF}}$$

Pour un tuyau OO ou FF, elles s'obtiennent en imposant que la longueur du tuyau soit égale respectivement à la distance entre deux nœuds de pression ou entre deux nœuds de déplacement. Dans les deux cas, cette distance correspond à un nombre entier de demi-longueurs d'onde, la condition de résonance s'écrira donc :

$$L_{OO} = L_{FF} = k\frac{\lambda}{2}$$

La fréquence de résonance (ou fréquence propre) est donnée par :

$$f_{OO} = f_{FF} = \frac{kv}{2\,L_{FF}}$$

Sur la *figure* 22 sont représentées les ondes stationnaires qui se forment dans des tubes OO et FF pour $k = 1$, et dans un tube OF pour $k = 0$.

Nous dirons qu'un tuyau est en résonance lorsqu'il est excité par un son dont la fréquence coïncide avec une des nombreuses fréquences propres du tuyau. Remarquons que les tuyaux OO ou FF ont des fréquences propres successives qui sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale $\frac{v}{2\,L_{FF}}$; on obtient :

$$f_1 = \frac{v}{2\,L_{FF}},\quad f_2 = \frac{2v}{2\,L_{FF}} = 2f_1,\quad f_3 = \frac{3v}{2\,L_{FF}} = 3f_1$$

Les tuyaux de type OF ont, en revanche, pour fréquence fondamentale : $f_0 = \frac{v}{4\,L_{OF}}$

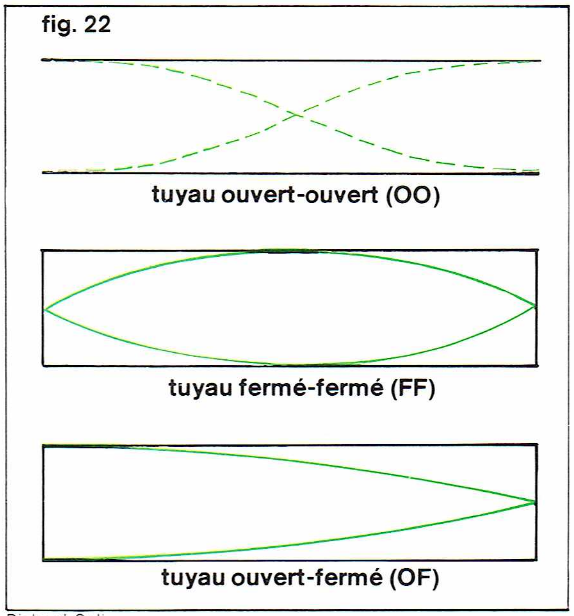

Richard Colin

◀ *Figure 22 : les résonances dans les tuyaux sonores.*

Rapho

▼ *Orgue de Charles Quint dans la cathédrale de Tolède ; l'injection d'air dans une embouchure d'un tuyau de longueur donnée met en vibration la colonne d'air située à l'intérieur du tuyau.*

▶ *Figure 25 : représentation schématique du* **résonateur de Helmholtz.**

▼ *Figure 23 : dispositif à membrane de Savart.*

fig. 23

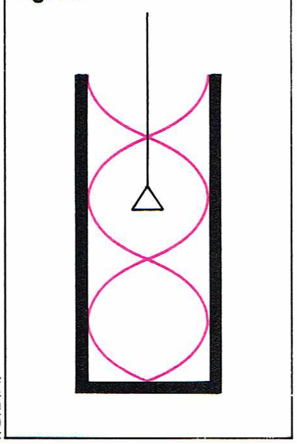

I.G.D.A.

▼ *Figure 24 : dispositif simple de mesure de la longueur d'onde d'un son.*

fig. 24

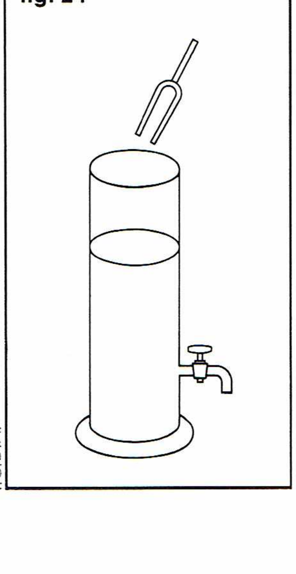

I.G.D.A.

et pour harmoniques supérieures, dans l'ordre :

$$f_1 = \frac{3\,v}{4\,L_{OF}} = 3\,f_0,\quad f_2 = \frac{5\,v}{4\,L_{OF}} = 5\,f_0,\ \ldots$$

Ainsi, avec un tuyau ouvert-ouvert ou fermé-fermé, on peut obtenir les multiples entiers d'une fréquence fondamentale donnée, alors qu'avec un tuyau ouvert-fermé on ne peut obtenir que les multiples impairs d'une fréquence donnée.

Applications expérimentales des tuyaux sonores

Nous allons décrire deux dispositifs expérimentaux de mesure de longueurs d'onde.

Le premier est le révélateur à membrane de Savart (*fig.* 23), qui permet de mettre en évidence un système d'ondes stationnaires. Il consiste en un tuyau fermé à une extrémité dans lequel on fait vibrer un diapason à l'extrémité ouverte du tuyau. Si la fréquence de vibration du diapason coïncide avec une fréquence propre du tuyau donnée par l'équation **(32)**, un système d'ondes stationnaires s'établit. Pour les mettre en évidence, on introduit dans le tuyau une membrane recouverte d'une poudre très légère. En faisant descendre cette membrane dans le tuyau, on observe des points pour lesquels la poudre est immobile et d'autres où elle est en vibration. Les premiers points correspondent à des nœuds de déplacement, les seconds à des ventres de déplacement. Sachant que deux ventres successifs sont distants d'une demi-longueur d'onde, on peut déterminer la longueur d'onde λ de la vibration. Si l'on connaît la fréquence f de la vibration, on peut en déduire la vitesse de propagation de l'onde à partir de la relation $v = \lambda f$.

Remarquons que ce dispositif est beaucoup plus sensible aux ventres de déplacement, car il est beaucoup plus facile de repérer les vibrations de la poudre que l'état de repos de cette dernière.

Le deuxième dispositif de mesure de la longueur d'onde d'un son est représenté sur la *figure* 24. Un cylindre est rempli d'eau jusqu'au bord et est muni d'un robinet qui permet d'évacuer l'eau et donc de changer la longueur de la colonne d'air susceptible de rentrer en résonance. A l'extrémité ouverte du tuyau, on fait vibrer la source dont on veut déterminer la longueur d'onde ; lorsqu'on ouvre le robinet, la colonne d'air contenue dans le cylindre au-dessus de l'eau résonne plus particulièrement lorsque sa longueur est égale à un quart de longueur d'onde [voir **(31)**] du son produit. Pour cela, il suffit de mesurer la hauteur de la colonne d'air correspondant au premier maximum d'intensité sonore pour déterminer immédiatement la longueur d'onde du son et sa fréquence, connaissant sa vitesse. La même méthode peut être utilisée pour déterminer la vitesse du son lorsqu'on connaît sa fréquence. Pour avoir une meilleure précision, on préfère souvent mesurer la distance entre deux maximums d'intensité plutôt qu'entre le premier maximum et le haut du récipient.

Supposons que l'on fasse basculer le tuyau précédent de façon à l'amener en position inclinée ; ce faisant, on change la forme de la colonne d'air mais pas son volume. On constate que la résonance n'est pas changée, elle a toujours lieu pour la même quantité d'eau dans le tuyau. A présent, recouvrons partiellement l'embouchure du tuyau avec un morceau de verre ou de toute autre substance dure, et cherchons de nouveau la résonance : on constate que la fréquence de résonance est diminuée ; pour retrouver la situation précédente, il faut ajouter de l'eau, ce qui fait diminuer la longueur de la colonne d'air.

Cavités résonnantes - Résonateur de Helmholtz

Les expériences montrent que la fréquence propre d'une cavité augmente avec la surface de l'embouchure, diminue quand le volume d'air augmente et ne dépend pas de la forme de la cavité.

Les cavités résonnantes, ou résonateurs, sont très utilisées dans l'analyse des sons, et on en construit qui entrent en résonance à des fréquences choisies. Nous allons étudier un résonateur d'un type très particulier, tel que celui représenté sur la *figure* 25 : il est constitué par un corps solide sphérique présentant une ouverture principale O_1 (goulot), et une ouverture plus petite O_2 permettant de relier l'air enfermé dans la cavité à l'oreille de l'observateur. Cette forme de résonateur est appelée *résonateur de Helmholtz*. En effet, c'est à l'aide de sphères

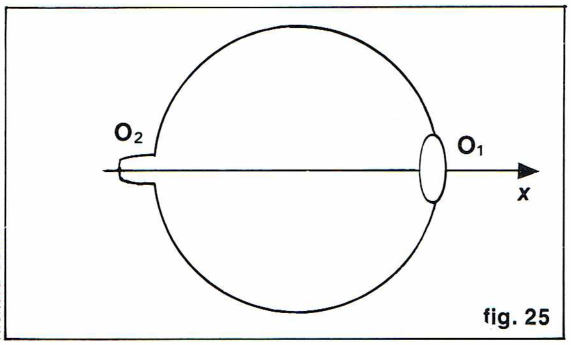

fig. 25

Richard Colin

creuses de laiton de différentes dimensions que Helmholtz développa ses travaux de pionnier sur l'analyse des sons complexes.

Si l'on interpose le résonateur entre une source sonore harmonique (sinusoïdale) dont on fait progressivement varier la fréquence et l'oreille, on constate en général que la perception du son est diminuée, sauf pour une certaine valeur de la fréquence de la source. Un son très faible ayant cette fréquence et normalement à peu près inaudible devient très nettement perceptible lorsqu'on interpose le résonateur entre l'oreille et la source. Cette fréquence de résonance est la fréquence la plus faible (la plus grave) des fréquences propres de la cavité, et l'onde sonore correspondante a une longueur d'onde très grande devant les dimensions du résonateur.

On étudie ici un état vibratoire bien différent de celui des tuyaux sonores. On peut, en effet, admettre, si les dimensions du résonateur sont petites vis-à-vis de la longueur d'onde, que la pression de l'air à l'intérieur du résonateur a partout la même valeur à un instant donné. L'air enfermé dans le résonateur va se comporter comme un ressort vis-à-vis de la tranche d'air au voisinage du goulot O_1 qui jouera le rôle d'un piston.

Soit S la surface de l'ouverture O_1 et soit Ω le volume du matelas d'air mobile. Soit x le déplacement, supposé petit, du « piston » à partir de sa position de repos, et ρ la masse volumique du gaz. La masse de gaz déplacée est donc $\rho\Omega$ et la force d'inertie correspondante $\rho\Omega\,\frac{d^2x}{dt^2}$.

Pour avoir l'écart Δp entre la pression intérieure instantanée et la pression au repos, nous pouvons remarquer qu'au déplacement x correspond la variation de volume $\Delta V = Sx$.

D'après la définition de la compressibilité **(1)**, Δp s'écrit :

$$\Delta p = -\frac{Sx}{\chi V}\quad \text{où V est le volume du résonateur.}$$

La force de rappel agissant sur le « piston » a donc pour expression : $S\Delta p = -\frac{S^2x}{\chi V}$.

L'équation du mouvement de la tranche d'air s'écrit alors :

$$\rho\Omega\,\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{S^2x}{\chi V}$$

C'est l'équation du mouvement pendulaire. Elle admet comme solution :

$$x = A \sin\,(\omega_0 t + \varphi)$$

d'où l'on tire :

$$\omega_0^2 = \frac{S^2}{\Omega V \rho \chi}$$

En introduisant la vitesse du son v, on obtient :

$$\omega_0^2 = \frac{S^2 v^2}{\Omega V}$$

La fréquence propre cherchée est :

$$f_0 = \frac{1}{2\,\pi}\,\frac{Sv}{\sqrt{\Omega V}}$$

La valeur du volume Ω de la tranche d'air dépend de la forme du goulot de l'ouverture O_1. Il est possible de la relier à la surface S de cette ouverture. Par exemple, pour une ouverture percée dans une paroi mince, Ω ne dépend que de la surface de l'orifice et a pour valeur :

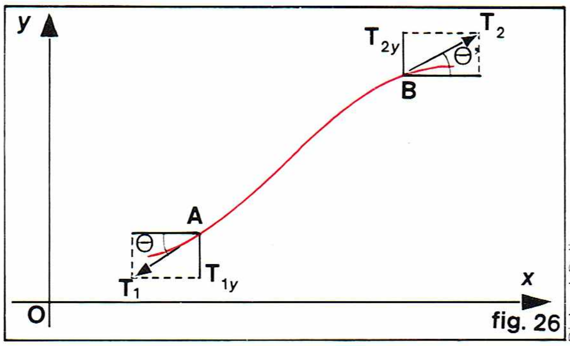

◀ ***Figure 26 :* analyse des forces agissant sur un élément de corde.**

$$\Omega = k\,(S)^{\frac{3}{2}}$$

où k est un coefficient numérique. Une théorie plus complète conduit à $k = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$, d'où l'on tire : $f_0 = \frac{v\,(S)^{\frac{1}{4}}}{\sqrt{2}\,\pi^{\frac{5}{4}}\,\sqrt{V}}$.

En prenant par exemple le cas d'une sphère de 13 cm de diamètre avec une ouverture O_1 de 3 cm de diamètre, la vitesse du son étant $v = 340$ m/s, on trouve $f_0 = 260$ Hz. Or, la longueur d'onde du son à cette fréquence est de 126 cm, c'est-à-dire environ 10 fois le diamètre du résonateur. Nos hypothèses initiales sont donc bien vérifiées.

Amortissement du résonateur

On peut montrer expérimentalement que les oscillations précédentes s'amortissent lorsque le système est abandonné à lui-même. A l'aide d'un résonateur de verre, il est possible de photographier une particule de magnésie de très petites dimensions située dans le plan d'ouverture. Cela permet de suivre le mouvement de cette particule, et donc celui du fluide. On constate ainsi que le mouvement de la particule s'amortit. Les causes d'amortissement sont diverses. Lorsque l'air enfermé dans le résonateur se dilate ou se comprime, il y subit une variation de température ; il se produit donc un échange de chaleur entre l'air et le solide constituant le résonateur, et une partie de l'énergie acoustique est ainsi perdue. En outre, le gaz enfermé dans le résonateur constitue une source d'ondes sonores qui peut rayonner vers l'extérieur à travers le goulot O_1. Enfin, l'air contenu dans le goulot à proximité des parois subit des frottements visqueux.

Équation des cordes vibrantes

Nous avons dit précédemment que les ondes sonores sont longitudinales, cependant, il est bien connu que de nombreux instruments de musique produisent des ondes sonores à partir de cordes vibrantes tendues, dans lesquelles les ondes produites sont des ondes mécaniques transversales. Les vibrations transversales d'une corde produisent à leur tour, dans l'air ambiant, des vibrations longitudinales qui se traduisent par la production de sons. C'est pour cela que l'étude des cordes vibrantes est importante en acoustique.

Soit une corde en vibration uniforme, parfaitement flexible, et considérons plus particulièrement un morceau infinitésimal de corde AB (*fig.* 26). Initialement, la corde est confondue avec l'axe Ox, puis, lorsqu'elle est pincée, tous ses points se déplacent transversalement d'une quantité y et la portion AB à un instant donné a la configuration de la figure. En négligeant le poids de la corde, les seules forces agissant sur l'élément AB sont les deux tensions T_1 et T_2, qui, pour une corde inextensible, sont égales en module alors que leurs directions sont tangentes à la corde en A et en B. Nous cherchons à évaluer le déplacement y des différents points de la corde en fonction du temps et de l'abscisse x et, pour cela, nous écrivons l'équation fondamentale de la dynamique $\vec{F} = m\vec{\gamma}$ ($\vec{\gamma}$ = accélération) projetée sur l'axe y. Pour l'élément infinitésimal de masse dm, cette équation s'écrit :

(33) $$dF_y = dm\,\frac{d^2y}{dt^2}$$

où dF_y est la projection sur l'axe des y de la force élémentaire agissant sur l'élément AB.

Si μ est la masse par unité de longueur de la corde, on a : $dm = \mu dx$. Comme dF_y est donné par la différence $T_{2y} - T_{1y}$ on a :

$$T_{2y} - T_{1y} = \mu dx\,\frac{d^2y}{dt^2}$$

Or, d'après la figure : $T_{2y} = T_2 \sin\theta'$

et $T_{1y} = T_1 \sin\theta$

Comme les angles θ et θ' sont extrêmement petits, on peut confondre leur sinus et leur tangente, et nous écrirons, en notant par T la valeur commune de T_1 et de T_2 :

(34) $$dF_y = T\,(\text{tg}\,\theta' - \text{tg}\,\theta)$$

En utilisant les relations :

$$\text{tg}\,\theta' = \left(\frac{dy}{dx}\right)_2 \quad \text{et} \quad \text{tg}\,\theta = \left(\frac{dy}{dx}\right)_1$$

(où les indices externes aux parenthèses indiquent que les dérivées doivent être calculées au point B et au point A respectivement) et la relation $\left(\frac{dy}{dx}\right)_2 = \left(\frac{dy}{dx}\right)_1 + \frac{d^2y}{dx^2}\,dx$ (développements en série), on peut réécrire l'équation **(34)** sous la forme :

$$dF_y = T\,\frac{d^2y}{dx^2}\,dx$$

et en comparant avec **(33)** :

$$\mu dx\,\frac{d^2y}{dt^2} = T\,\frac{d^2y}{dx^2}\,dx$$

soit $$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{\mu}{T}\,\frac{d^2y}{dt^2}$$

Cette équation est connue comme l'*équation de D'Alembert des cordes vibrantes*, et est l'analogue de l'équation trouvée dans le cas d'ondes sonores planes et longitudinales. En reprenant la même démarche que précédemment, il est aisé de montrer que, dans ce cas aussi, l'expression $v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$ représente la vitesse de propagation de l'onde dans le sens des x. L'unique différence consiste dans le fait que, puisque le milieu de propagation est la corde, la vitesse est fonction des caractéristiques de celle-ci, son élasticité est représentée par la tension T et son inertie par la densité linéaire μ. Dans ce cas aussi, la solution la plus générale de l'équation de D'Alembert est du type :

$$y\,(x, t) = f_1\,(x - vt) + f_2\,(x + vt)$$

Le premier terme correspond à une onde se propageant dans le sens positif de l'axe x, le deuxième à une onde se propageant dans le sens négatif. Un cas particulièrement important est celui de l'onde sinusoïdale :

$$y\,(x, t) = A \sin\,(kx - \omega t) \quad \text{(onde progressive)}$$

ou $$y\,(x, t) = A \sin\,(kx + \omega t) \quad \text{(onde régressive)}$$

On remarquera que nous avons volontairement changé la notation du déplacement de ξ en y pour rappeler que nous sommes passé d'une onde longitudinale à une onde transverse.

Nous pouvons transposer les raisonnements précédents sur les ondes stationnaires sonores aux ondes stationnaires sur une corde vibrante. Supposons que la corde soit le siège d'une onde stationnaire :

$$y\,(x, t) = A \sin kx \cos \omega t$$

Cherchons la *condition de résonance* dans le cas d'une corde attachée aux deux extrémités, ce qui impose un déplacement nul en $x = 0$ et en $x = L$, soit $y\,(0, t) = 0$ et $y\,(L, t) = 0$.

La première condition est automatiquement vérifiée, la seconde impose :

$$\sin kL = 0, \quad \text{soit} \sin \frac{2\,\pi L}{\lambda} = 0$$

Les seules longueurs d'onde λ qui peuvent satisfaire cette condition aux limites sont celles pour lesquelles on a :

$$\frac{2\,L}{\lambda} = n\pi \quad \text{où } n \text{ est un entier positif}$$

$\left(\text{soit } \frac{2\,L}{\lambda} = \pi, 2\,\pi, 3\,\pi, 4\,\pi, \ldots\right)$.

Cet ensemble de manières possibles de satisfaire les conditions aux limites correspond à tous les modes possibles de vibration de la corde. Les fréquences

▶ *Figure 27 : graphe de l'intensité de l'onde en fonction de la distance.*

▼ *Conductibilité du son par les corps solides ; une expérience intéressante de physique sans appareils : on attache une cuillère en métal à un fil, on enfonce les deux extrémités de ce fil dans chaque oreille, puis l'on imprime un mouvement de balancement à la cuillère afin qu'elle touche le bord d'une table ; la transmission est si intense que l'on croirait entendre résonner un bourdon de cathédrale.*

correspondant aux différents modes se trouvent en remarquant que $f = \frac{v}{\lambda}$, les fréquences de résonance sont :

$$f_1 = \frac{v}{2\,L},\quad f_2 = 2\,f_1,\quad f_3 = 3\,f_1,\quad \dots$$

Les fréquences $2\,f_1$, $3\,f_1$, ..., sont appelées deuxième, troisième, etc., harmonique de la fréquence fondamentale f_1. Celle-ci est une fonction de la longueur L de la corde, et à travers v, de sa tension T et de sa densité linéaire μ. Le fait que les fréquences de résonance f_2, f_3, ..., forment une séquence d'harmoniques de la fréquence la plus basse f_1 résulte de l'hypothèse que la corde est parfaitement flexible et uniforme. Des systèmes physiques réels ont des fréquences de résonance qui ne sont pas exactement des multiples d'une même fréquence. Par exemple, les fréquences de résonance d'une corde de densité non uniforme ne forment pas une suite d'harmoniques de la fréquence fondamentale ; en fait, on peut avoir, par exemple, $f_2 = 2{,}65\,f_1$, $f_3 = 4{,}25\,f_1$, etc.

Pour une corde à piano ou de violon, les fréquences de résonance forment approximativement mais non exactement une suite harmonique ; cela est dû au fait qu'elles ne sont pas parfaitement flexibles.

Intensité d'une onde sonore

Considérons une onde sonore sphérique émise par une source ponctuelle dans un milieu homogène isotrope et infini. On définit l'*intensité de l'onde* comme la quantité d'énergie E qui arrive perpendiculairement à une *surface unité* pendant l'unité de temps, soit :

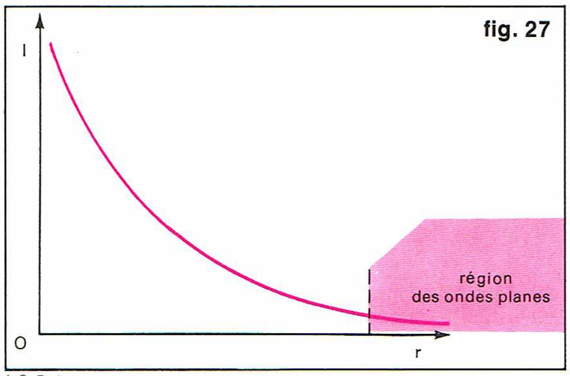

I.G.D.A.

(35) $$I = \frac{d^2E}{dS\,dt}$$

En revanche, la *puissance transportée par l'onde* est la quantité d'énergie qui arrive perpendiculairement *à une surface donnée* pendant l'unité de temps, soit :

$$W = \frac{dE}{dt}.\ \text{On voit alors que}\ I = \frac{dW}{dS}.$$

Dans le cas où le milieu est homogène et isotrope, et la source **S** ponctuelle, la puissance transportée par l'onde est la même en tout point d'une sphère de centre **S**. L'expression précédente devient :

(36) $$I = \frac{W}{S}$$

En négligeant les pertes éventuelles d'énergie de l'onde dans le milieu, on peut considérer que la puissance sur les diverses surfaces d'onde sphériques atteintes par l'onde à des instants successifs est constante. Soit I_1 l'intensité de l'onde à la distance r_1 de la source **S** et I_2 l'intensité à la distance r_2, on en déduit, en utilisant **(36)**, que :

$$\frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2$$

Ainsi, l'intensité de l'onde est inversement proportionnelle au carré de la distance à la source. Si l'on représente graphiquement l'intensité en fonction de la distance à la source, on obtient la courbe de la *figure* 27, sur laquelle on voit clairement qu'à partir d'une certaine distance, l'intensité reste pratiquement constante ; on a alors une onde plane.

Nous nous proposons maintenant de donner l'expression de l'intensité d'une telle onde. Reprenons l'expression **(35)** et calculons l'énergie arrivant perpendiculairement à une surface élémentaire donnée. Elle est la somme de deux énergies : l'énergie cinétique d'un élément de fluide de masse $dm = \rho dV$ et l'énergie potentielle due à l'élasticité du milieu. Le premier terme peut s'écrire :

$$dE_c = \frac{1}{2}\rho dV\left(\frac{\partial\xi}{\partial t}\right)^2$$

où $\xi = A \sin \omega \left(t - \frac{x}{v}\right)$ est le déplacement induit par l'onde et $\frac{\partial\xi}{\partial t}$ la vitesse de ce déplacement.

L'énergie potentielle s'obtient en calculant le travail de la force de rappel s'exerçant sur les particules du fluide et qui est due à la pression du milieu. Cette force est donnée par l'équation **(7)** :

$$dF = \frac{1}{\chi}\,dV\,\frac{\partial^2\xi}{\partial x^2}$$

Le travail infinitésimal lors du déplacement $d\xi$ des particules est :

$$\frac{1}{\chi}\,dV\,\frac{\partial^2\xi}{\partial x^2}\,d\xi = \frac{1}{\chi}\,dV\,\frac{\partial^2\xi}{\partial x^2}\,\frac{\partial\xi}{\partial x}\,dx$$

L'énergie potentielle s'obtient en intégrant cette expression :

$$dE_p = \frac{1}{2\chi}\,dV\left(\frac{\partial\xi}{\partial x}\right)^2$$

or, $$\frac{\partial\xi}{\partial x} = -\frac{1}{v}\,\frac{\partial\xi}{\partial t}$$

Archives M.R.

En remplaçant v par sa valeur $v = \frac{1}{\sqrt{\chi\rho}}$, on obtient :

$$dE_p = \frac{1}{2}\rho dV \left(\frac{\partial\xi}{\partial t}\right)^2$$

On constate donc que l'énergie cinétique est égale à l'énergie potentielle. L'énergie totale est donc :

$$dE = \rho dV \left(\frac{\partial\xi}{\partial t}\right)^2$$

Mais, comme $\frac{\partial\xi}{\partial t} = -A\omega \cos \omega \left(t - \frac{x}{v}\right)$, on a finalement :

$$dE = \rho dVA^2\omega^2 \cos^2 \left[\omega \left(t - \frac{x}{v}\right)\right]$$

Cette expression varie dans le temps ; évaluons sa valeur moyenne sur un intervalle de temps d'une période T :

$$\overline{dE} = \frac{1}{T}\int_0^T dE\, dt = \frac{1}{2}\rho dVA^2\omega^2$$

En reportant cette valeur dans la relation **(35)** et en se rappelant que $dV = dS\, dx$, on peut écrire, pour une onde qui se propage le long de l'axe des x :

$$I = \rho \frac{A^2}{2} \omega^2 \frac{dx}{dt}$$

Or $\frac{dx}{dt}$ est la vitesse de propagation de l'onde, c'est-à-dire v ; on peut donc écrire :

$$I = \frac{1}{2} A^2\omega^2\rho v$$

On voit dans cette expression que l'intensité d'une onde sonore est proportionnelle au carré de l'amplitude de la vibration et au carré de la fréquence, grandeurs qui sont des caractéristiques de la source, alors qu'elle est simplement proportionnelle à la masse volumique ρ et à la vitesse de propagation v, qui sont des grandeurs caractéristiques du milieu.

En introduisant l'impédance $Z = \rho v$, I s'écrit :

$$I = \frac{1}{2} A^2\omega^2 Z$$

Nous pouvons écrire I sous une forme différente en faisant intervenir l'amplitude de la pression acoustique P. D'après la relation **(5)**, $\Delta p = -\frac{1}{\chi}\frac{\partial\xi}{\partial x} = \frac{A\omega}{\chi v} \cos \omega \left(t - \frac{x}{v}\right)$, soit :

$$P = \frac{A\omega}{\chi v}$$

on en déduit :

$$I = \frac{P^2}{2Z}$$

expression dans laquelle la pulsation de l'onde n'intervient plus. On peut également comprendre sur cette expression pourquoi la pression acoustique, associée à une onde d'intensité donnée, est beaucoup plus grande dans l'eau que dans l'air.

Pouvoir réflecteur acoustique

Nous allons maintenant considérer ce qui se passe lorsqu'une onde de pulsation ω arrive à l'interface de deux milieux d'impédances acoustiques Z_1 et Z_2. Nous allons tout d'abord vérifier que les relations obtenues précédemment pour la réflexion satisfont au principe de conservation de l'énergie. Soit A_i l'amplitude de l'onde incidente, A_r et A_t celles de l'onde réfléchie et de l'onde transmise. En utilisant les relations **(25)**, il est aisé de montrer que :

$$\frac{1}{2} Z_1\omega^2 (A_i^2 - A_r^2) = \frac{1}{2} Z_2\omega^2 A_t^2$$

Cette expression montre bien que l'intensité acoustique dans le milieu 2 est la différence entre l'intensité incidente et l'intensité réfléchie dans le milieu 1. Cette condition exprime bien la conservation de l'énergie acoustique.

On appelle *pouvoir réflecteur* R de la surface de séparation le quotient des intensités réfléchie et incidente :

$$R = \frac{1/2\, Z_1 A_r^2\omega^2}{1/2\, Z_1 A_i^2\omega^2}$$

En utilisant les relations **(25)**, on trouve que :

$$R = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}\right)^2$$

De même qu'en optique, lors de la réflexion vitreuse de la lumière sous incidence normale, le pouvoir réflecteur ne dépend pas de l'ordre de succession des milieux. Il sera voisin de l'unité pour des milieux d'impédances très différentes ; dans ce cas, l'onde sera presque complètement réfléchie dans le milieu d'origine et la partie transmise sera très faible. En revanche, si les milieux ont des impédances voisines, le pouvoir réflecteur sera faible.

De très nombreux exemples s'expliquent par ce comportement du pouvoir réflecteur. Dans le cas de la surface de séparation de l'air et de l'eau, R est très voisin de l'unité ; ainsi, une explosion très violente dans l'eau ne provoquera que de faibles remous dans l'air.

La qualité acoustique d'une salle dépend de la manière dont elle « résonne ». Ainsi, une salle vide aux murs lisses résonne beaucoup, car l'intensité des ondes acoustiques réfléchie par les murs est grande : l'impédance des murs étant de beaucoup supérieure à celle de l'air, le pouvoir réflecteur est grand. On peut diminuer cette résonance en mettant aux murs des tentures qui ont une impédance comprise entre celle de l'air et celle des murs, et donc un pouvoir réflecteur plus faible.

La détection sous-marine utilise les ultrasons qui sont des ondes sonores de haute fréquence, qui, en se réfléchissant sur des obstacles, permettent de les localiser. Il suffit, en effet, de mesurer l'intervalle de temps entre une impulsion de courte durée et son écho et de connaître la vitesse du son dans l'eau pour en déduire la distance de l'obstacle. Ce principe, utilisable pour détecter les icebergs, a été difficile à mettre en œuvre, car l'eau et la glace ont des impédances acoustiques voisines ; le pouvoir réflecteur est faible, et donc l'écho également. Nous pouvons en donner une estimation, sachant que le rapport $\frac{Z_{\text{glace}}}{Z_{\text{eau}}} \sim \frac{3}{4}$.

On en déduit : $R = \left(\frac{3/4 - 1}{3/4 + 1}\right)^2 \sim 0{,}02$

Cette estimation est un peu faible ; en effet, les icebergs contiennent de l'eau et de la terre qui augmentent la réflexion des ondes sonores. De plus, les progrès réalisés dans les domaines des systèmes d'émission et de détection des ondes acoustiques, et de l'électronique d'exploitation du signal, permettent maintenant de détecter ces échos assez aisément.

Production d'intensités acoustiques très élevées

Le problème se pose de manière différente suivant qu'il s'agit de milieux gazeux ou de milieux liquides.

Dans le cas de milieux gazeux, l'impédance Z est faible, et, si l'on veut que $I = \frac{1}{2} ZA^2\omega^2$ atteigne une valeur notable, il faudra (aux fréquences moyennes) donner de grandes valeurs à l'amplitude A des vibrations de la surface de la source. Ce qui est assez difficile dans le cas de surfaces solides. Il sera alors préférable d'avoir un volume gazeux en vibration, c'est ce qui est réalisé avec les tuyaux d'orgues, les sirènes, etc. Par exemple, dans le cas d'une source placée dans l'air, de fréquence $f = 1\,000$ Hz, d'amplitude $A = 1/10$ mm, on obtient, en se souvenant que l'impédance de l'air est $Z_{\text{air}} = 427$ kg/m^2 · s (voir tableau I), $I \simeq 100$ watts/m^2.

Or, dans une salle de dimensions moyennes (300 personnes), 2 à 3 watts acoustiques suffisent largement pour assurer une bonne audition. Dans les conditions de l'exemple ci-dessus, il suffirait donc d'une source ayant une surface émissive de 2 à 3 dm^2 pour l'atteindre.

Dans le cas de milieux liquides, l'impédance est grande, et avec de faibles amplitudes de vibration, il sera possible d'avoir des intensités importantes. Par exemple, en employant comme source des lames de quartz piézoélectriques, on obtient aisément des fréquences vibratoires de l'ordre de 100 000 Hz (ultrasons). Pour une amplitude de l'ordre de 10^{-4} mm, et dans le cas où la source est placée dans l'eau, on obtient, sachant que l'impédance de l'eau est $1{,}5 \times 10^6$ kg/m^2 · s, une intensité

$$I = 3\,000 \text{ watts/m}^2$$

valeur beaucoup plus grande que précédemment.

▶ *Figure 28; interférences de deux ondes : a, en phase ; b, en opposition de phase.*

L'intensité acoustique est limitée par le phénomène de *cavitation*. En effet, un liquide parcouru par une onde a une pression qui varie entre $p_0 - P$ et $p_0 + P$, où p_0 est la pression en l'absence d'onde et P l'amplitude de pression acoustique. Il ne faut pas que $p_0 - P$ atteigne la pression de vapeur saturante du liquide, car alors celui-ci se vaporiserait. Autrement dit, P a pour valeur limite P_{max} une pression de l'ordre de la pression atmosphérique, soit :

$$P_{max} \sim 10^5 \text{ pascals}$$

L'intensité limite associée à cette pression est :

$$I_{max} \sim \frac{(P_{max})^2}{2Z} = \frac{(10^5)^2}{2 \times 1{,}5 \cdot 10^6} \sim 3\,000 \text{ watts/m}^2$$

Si l'on veut dépasser cette valeur, il faut augmenter la valeur de la pression p_0 sous peine de voir apparaître des bulles de vapeur par cavitation. En utilisant des huiles de très basse pression de vapeur saturante, il est possible de réaliser des intensités acoustiques de quelque 10^4 watts/m² (quelques watts par cm²).

Caractères distinctifs des sons

Les différents sons peuvent se distinguer les uns des autres par trois caractères distinctifs : la hauteur, l'intensité et le timbre.

La **hauteur** d'un son est caractérisée par la fréquence de celui-ci ; on dit qu'un son est plus haut qu'un autre (ou plus aigu) lorsque sa fréquence est supérieure, alors qu'on dit qu'il est plus bas (ou plus grave) quand sa fréquence est inférieure.

L'**intensité** d'un son est caractérisée, comme nous venons de le voir, par le carré de l'amplitude de la vibration. Deux sons peuvent avoir la même fréquence, et donc la même hauteur mais des intensités différentes, s'ils ont des amplitudes différentes.

Le **timbre** est caractérisé par l'ensemble des fréquences qui accompagnent la fréquence fondamentale, c'est-à-dire par le « cortège harmonique ». En effet, il est connu qu'à peu près aucun instrument ne peut émettre de note pure. On peut donc décomposer le son émis, grâce au théorème de Fourier, en un nombre infini d'ondes sinusoïdales de fréquences commensurables entre elles. La première fréquence s'appelle fondamentale, les suivantes sont respectivement le premier harmonique, le second harmonique, etc. Ainsi, la même note musicale jouée par deux instruments différents arrive à notre oreille avec un timbre différent, car en général les cortèges harmoniques accompagnant la note fondamentale sont différents.

Interférences des ondes sonores

Le phénomène d'interférence est un phénomène caractéristique de toutes les formes de transport d'énergie par ondes. Il consiste en une altération de la distribution d'intensité de deux ondes quand elles se rencontrent dans une région donnée de l'espace. Par souci de simplicité, considérons deux ondes planes sinusoïdales qui se déplacent simultanément dans la direction des x positifs ; ces ondes ont la même fréquence et la même amplitude. Les déplacements provoqués par chacune d'elles sont parallèles et s'écrivent :

$$\xi_1 = A \sin (kx - \omega t)$$

$$\xi_2 = A \sin (kx - \omega t + \varphi)$$

où φ est la différence de phase entre les deux ondes. L'onde résultante, d'après le principe de superposition de Bernoulli, provoquera un déplacement :

$$\xi = \xi_1 + \xi_2$$

soit : $\xi = A \sin (kx - \omega t) + A \sin (kx - \omega t + \varphi)$

En appliquant les formules de combinaison des sinus et cosinus, on trouve que :

$$\xi = 2A \sin \left(kx - \omega t + \frac{\varphi}{2}\right) \cos \frac{\varphi}{2}$$

En posant $B = 2A \cos \frac{\varphi}{2}$, le déplacement précédent devient : $\xi = B \sin \left(kx - \omega t + \frac{\varphi}{2}\right)$

qui représente une onde progressive dans le sens des x positifs de même fréquence que les ondes initiales, mais

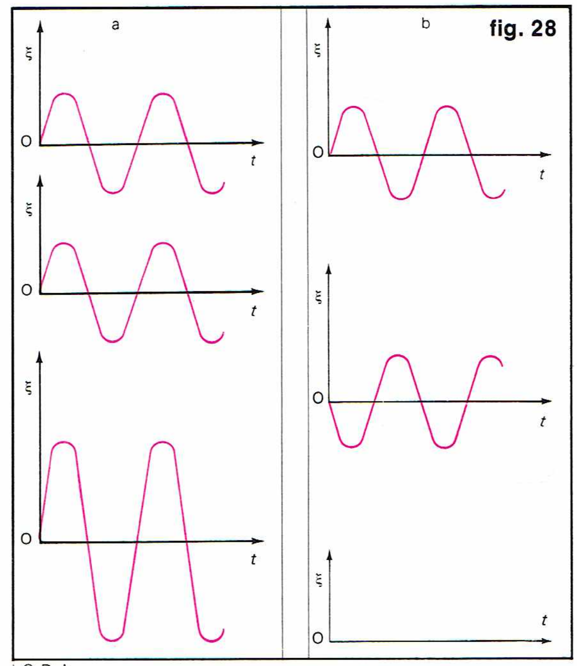

I.G.D.A.

dont l'amplitude n'est plus constante et varie avec le déphasage φ. Dans le cas où $\frac{\varphi}{2} = 0, \pi, 2\pi, \ldots, n\pi$ (avec $n = 0, 1, 2, \ldots$), soit $\varphi = 2n\pi$, $\cos \frac{\varphi}{2}$ a pour valeur absolue 1 et l'amplitude de l'onde résultante est 2 A ; dans le cas où $\frac{\varphi}{2} = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2}, \ldots, (2n+1)\frac{\pi}{2}$, soit $\varphi = (2n+1)\pi$, $\cos \frac{\varphi}{2}$ est nul, c'est-à-dire que l'amplitude de l'onde résultante est nulle. Sur la *figure* 28a, on a représenté l'onde résultant de la superposition de deux ondes de même fréquence, de même amplitude et de différence de phase nulle (on dit qu'elles sont *en phase*). Sur la *figure* 28b, les deux ondes sont déphasées de π (on dit qu'elles sont en *opposition de phase*).

On aboutit au résultat suivant : dans la région où les deux ondes se superposent, on rencontre des points où l'amplitude résultante est maximale et d'autres où elle est nulle pour $\varphi = 2n\pi$ ou $\varphi = (2n+1)\pi$, c'est-à-dire pour φ égal respectivement à un nombre pair ou à un nombre impair de fois π.

On obtient un résultat plus intéressant si l'on raisonne en termes d'intensité plutôt que d'amplitude. Comme l'intensité de l'onde est proportionnelle au carré de l'amplitude, si la première onde a une intensité proportionnelle à A², et donc la seconde une intensité aussi proportionnelle à A², aux points d'amplitude maximale, l'onde résultante n'aura pas une intensité proportionnelle à 2A² comme on pourrait le croire, mais à 4A², c'est-à-dire à (2A)². Cet effet produit en certains points une amplification du son, et l'on parle d'*interférence positive ou constructive*, en d'autres points un silence total, et l'on parle d'*interférence négative* ou *destructive*. On peut remarquer que nous avons supposé que les deux ondes incidentes avaient la même amplitude seulement pour la commodité de l'exposé. Le phénomène d'interférence existe même si les deux ondes ont des amplitudes différentes A_1 et A_2 ; dans ce cas, il est aisé de montrer que l'amplitude de l'onde résultante est :

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \varphi}$$

Quand $\varphi = 2n\pi$, on a :

$A = A_1 + A_2$ (interférence positive)

alors que, quand $\varphi = (2n+1)\pi$, on a :

$A = A_1 - A_2$ (interférence négative)

Ainsi, lorsque les amplitudes de deux ondes qui interfèrent ne sont pas égales, l'amplitude de l'onde résultante est toujours différente de 0 et, par conséquent, on n'a jamais une extinction complète du son. Comme la distri-

bution des maximums et des minimums d'interférence reste stable dans le temps, il est nécessaire que la différence de phase φ des deux ondes le soit.

Essayons à présent de décrire le même concept, non plus en termes de différence de phase, ce qui peut paraître plutôt abstrait, mais en différence de chemin sonore entre les deux ondes. Reprenons l'expression du déplacement ξ_2 et écrivons-la sous la forme équivalente :

$$\xi_2 = A \sin \left[k \left(x + \frac{\varphi}{k} \right) - \omega t \right]$$

La différence existant entre la première et la deuxième onde est maintenant seulement due à la différence de distances parcourues depuis la source : la première onde a parcouru au temps t une distance x, la seconde une distance $x + \frac{\varphi}{k}$. Ainsi, dire que les deux ondes ont une différence de phase de φ équivaut à dire qu'il existe une différence de chemin sonore parcouru : $\Delta = \frac{\varphi}{k}$ ou, puisque $k = \frac{2\pi}{\lambda}$: $\Delta = \frac{\varphi\lambda}{2\pi}$.

En substituant dans cette équation les valeurs de φ correspondant respectivement aux conditions d'interférence positive ou négative, on obtient les résultats suivants :

(37) Pour $\Delta = n\lambda$ interférence positive,

(38) Pour $\Delta = (2n + 1)\frac{\lambda}{2}$ interférence négative.

Quand la différence de chemin entre les deux ondes est un nombre entier de longueurs d'onde, on a une amplification du son, alors que quand cette différence est justement un nombre impair de fois la demi-longueur d'onde, on a diminution de l'intensité sonore, ou même extinction complète si les deux ondes ont la même amplitude.

On remarquera qu'il est absolument indispensable que les faisceaux d'ondes interférant aient la même fréquence et donc la même longueur d'onde ; en fait, si leurs longueurs d'onde étaient différentes, à une condition de maximum pour une longueur d'onde donnée pourrait correspondre une condition de minimum pour une autre longueur d'onde, et la distribution d'interférences en serait altérée.

Nous avons traité jusqu'à présent le cas de deux ondes sonores se propageant dans la même direction afin de simplifier les calculs. Cependant, on peut aisément généraliser les résultats précédents au cas d'ondes incidentes se propageant dans des directions différentes et constater que, qualitativement, le phénomène d'interférences décrit reste le même.

Le problème qui nous intéresse à présent est de savoir quelle est la probabilité pour que deux ondes maintiennent une différence de phase constante. Nous pouvons dire tout de suite qu'une telle probabilité est pratiquement nulle : en effet, la différence de phase des ondes sonores émises par deux sources données varie aléatoirement dans le temps (de façon chaotique), ce qui veut dire qu'en pratique il est extrêmement improbable, pour ne pas dire impossible, d'obtenir des effets d'interférence avec deux sources sonores quelconques. Pour obtenir des interférences acoustiques, on utilise alors le stratagème suivant : on fait parcourir des chemins différents à des ondes émises par une même source, et on les fait se rencontrer dans une région de l'espace où l'on souhaite obtenir des effets d'interférence. Dans d'autres cas, ces effets sont involontaires ; ainsi, lorsque des haut-parleurs sont alimentés par le même signal électrique, des interférences se produisent dans les régions atteintes par les ondes sonores émises par les divers haut-parleurs. Cet effet peut être gênant et peut nuire à l'ambiance sonore créée. Nous devons préciser une autre condition concernant la source ; si elle est étendue, les ondes issues des divers points de cette source peuvent elles-mêmes produire des interférences. Le son créé par une telle source n'est donc pas le même en tous les points de l'espace situés à égale distance de la source. On a alors une source directive. Avec une source ponctuelle (petite devant la longueur d'onde du son émis) les amplitudes sonores sont les mêmes pour tous les points de l'espace situés à une même distance de la source.

Nous pouvons à présent récapituler les conditions pour lesquelles il est possible d'avoir des interférences entre ondes sonores : la condition fondamentale est que la différence de phase entre les deux ondes reste rigoureusement constante dans le temps ; ceci est connu sous le nom de *cohérence* des ondes. Une telle condition peut s'expliciter en imposant la monochromaticité des ondes, c'est-à-dire l'égalité de leurs fréquences et l'usage d'une source ponctuelle. La première condition s'appelle *cohérence temporelle*, la seconde *cohérence spatiale*.

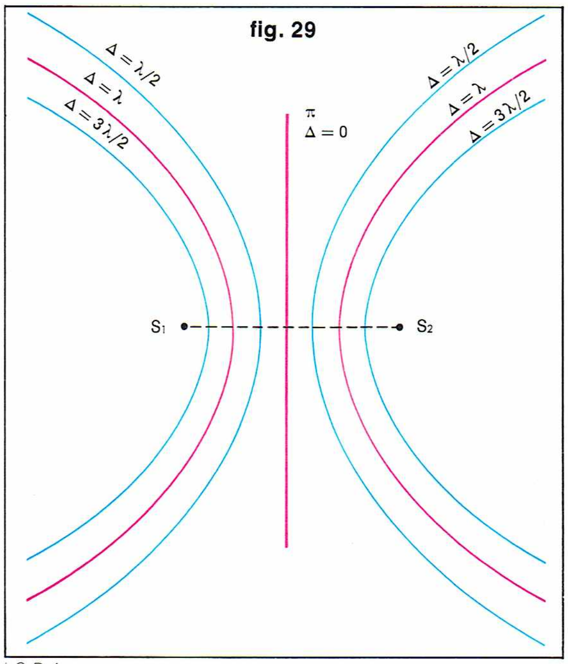

I.G.D.A.

◀ *Figure 29 : alternance d'hyperboloïdes de révolution correspondant aux régions d'extinction (bleu) et de renforcement (rouge) des sons. Le plan π est perpendiculaire à la droite qui relie les sources S_1 et S_2 et est situé entre ces sources.*

Si nous appelons à présent x_1 la distance parcourue par la première onde entre la source et le point d'interférence et x_2 celle parcourue par la seconde onde, les conditions d'amplification ou de diminution du son s'écrivent, conformément aux relations **(37)** et **(38)**, respectivement :

$$x_1 - x_2 = n\lambda$$

et

$$x_1 - x_2 = (2n + 1)\frac{\lambda}{2}$$

Ces égalités représentent dans l'espace les équations de deux hyperboloïdes de rotation à deux nappes dont les foyers coïncident avec les sources sonores. Ainsi, les lieux des points d'amplification ou d'extinction sont des hyperboloïdes de ce type. Suivant les valeurs de n, on aura alternativement un hyperboloïde d'amplification et un de silence. En fait, pour $n = 0$, on a une amplification pour $x_1 - x_2 = 0$, et un silence pour $x_1 - x_2 = \frac{\lambda}{2}$; pour $n = 1$, l'amplification se produit pour $x_1 - x_2 = \lambda$ et le silence pour $x_1 - x_2 = \frac{3\lambda}{2}$. On voit ainsi que les deux familles d'hyperboloïdes sont alternées dans l'espace comme le montre la *figure* 29. Ces hyperboloïdes s'appellent *nappes d'interférence*, alors que leurs intersections avec un plan s'appellent *franges d'interférence*. Ces franges sont des hyperboles si le plan d'intersection contient les deux sources ; ce sont des cercles si le plan est parallèle au plan π de la *figure* 29, et ce sont des ellipses si le plan est légèrement incliné par rapport au plan π.

Expériences d'interférence

Une expérience d'interférence simple peut être réalisée en utilisant comme source sonore un diapason dont les deux branches représentent en pratique les deux sources nécessaires. (En fait, les deux branches d'un diapason vibrent en opposition de phase.) Ainsi, si nous mettons un diapason au centre d'un cercle, et que nous nous déplacions le long de la circonférence, nous trouvons alternativement des zones d'amplification sonore et de silence, car la différence de chemin sonore entre les deux ondes émises par les deux branches varie continûment d'un point à un autre. Les points de la circonférence diamétralement opposés et situés sur l'axe du diapason

▶ *Figure 30 : interférences produites par les deux branches d'un diapason.*

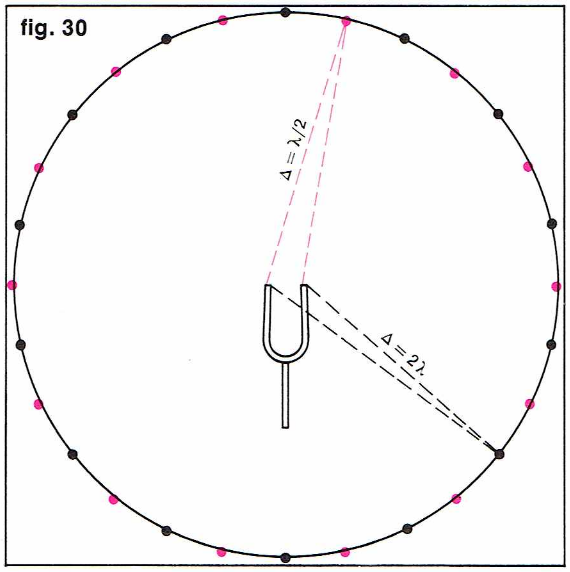

▶ *Figure 31 : le* tube de Quincke *pour réaliser des expériences d'interférence.*

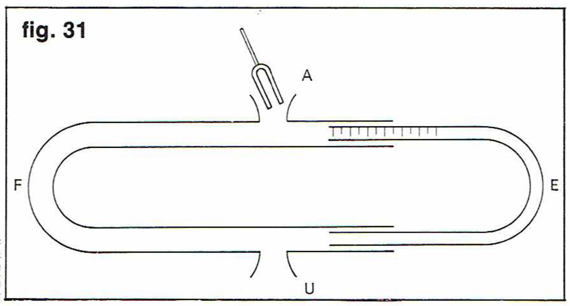

fig. 32

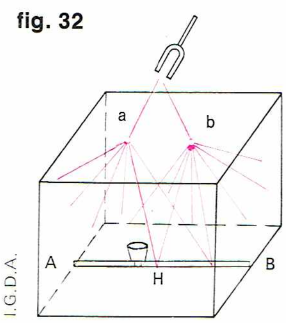

▲ *Figure 32 : l'expérience de Desprετz.*

sont donc des points de silence, car, ainsi que nous l'avons dit, les deux branches du diapason vibrent en opposition de phase, et, pour elles, les conditions **(37)** et **(38)** doivent être inversées (*fig.* 30).

Une autre expérience classique d'interférence dans laquelle on a recours à une source unique dédoublant le parcours de l'onde est celle du *tube de Quincke*, représenté sur la *figure* 31. La partie E du tube peut coulisser dans la partie fixe F, et ainsi le tube a une longueur variable. Quand on met à l'entrée A du tube un diapason en vibration, les ondes sonores se propagent le long des chemins différents AF et AE et se rencontrent à la sortie U. En déplaçant la partie E du tube, on peut obtenir une différence de chemin des deux ondes qui soit un nombre entier de longueurs d'onde — et dans ces conditions le son du diapason est notablement renforcé — ou qui soit un nombre impair de demi-longueurs d'onde — on a alors silence complet. Le tube de Quincke peut être utilisé pour trouver la longueur d'onde d'un son déterminé en commençant avec les deux parties de tube E et F de longueur égale et en lisant directement sur une échelle graduée gravée sur le tube mobile E la différence de chemin correspondant au premier silence. Si cette différence est, par exemple, 40 cm, cela veut dire que la longueur d'onde du son est 80 cm. Comme la vitesse du son dans l'air à une température donnée est bien connue, on peut en déduire la fréquence du son à l'aide de la relation : $f = \frac{v}{\lambda}$.

Nous allons enfin décrire l'*expérience de Desprετz* qui répète sur des ondes acoustiques la célèbre expérience de Young d'interférence d'ondes lumineuses (*fig.* 32).

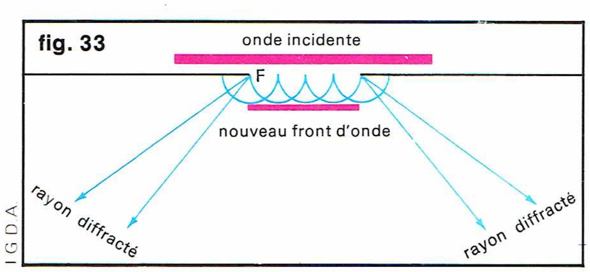

▶ *Figure 33 : diffraction d'une onde sonore par une fente percée sur un écran.*

On perce deux trous *a* et *b* sur une boîte parallélépipédique. On dispose un détecteur de vibrations, susceptible d'être déplacé sur un guide AB parallèle au segment *ab*. A l'extérieur de la boîte, on tient un diapason qui vibre : quand le diapason est proche du trou *a* (*b* fermé) et qu'on déplace le récepteur entre A et B, on ne remarque aucune différence d'intensité dans les diverses positions ; de même, quand il est proche du trou *b* (*a* fermé). Mais lorsque les deux trous sont ouverts, le détecteur se déplaçant entre A et B indique alternativement la présence de maximums et de minimums d'intensité, avec un maximum très prononcé pour la position H. Cette expérience prouve l'existence des franges d'interférences produites par la superposition de deux ondes acoustiques cohérentes (car issues d'une même source : le diapason). Elle est en fait également utilisée pour prouver l'existence d'un autre phénomène caractéristique de la propagation des ondes, à savoir le phénomène de diffraction.

Diffraction des ondes sonores

Si l'on observe la *figure* 32, on remarque un comportement curieux du faisceau sonore : les rayons émis par le diapason ne continuent pas en ligne droite au-delà du trou mais paraissent s'éparpiller dans toutes les directions. Cet effet très important dans tous les phénomènes ondulatoires s'appelle *diffraction* et peut s'expliquer à partir du *principe d'Huygens*. Quand une onde sonore est interceptée par un obstacle (par exemple un trou, une fente ou le bord d'un objet), tous les points de l'obstacle touchés par la perturbation deviennent à leur tour des sources qui émettent des ondes sphériques cohérentes, et le nouveau front d'onde au-delà de l'obstacle est l'enveloppe des différentes ondes élémentaires. Le faisceau diffracté qui est émis à partir de l'obstacle dans toutes les directions a un maximum d'intensité dans la direction perpendiculaire au plan du trou ; son intensité décroît jusqu'à s'annuler dans la direction rasante à ce plan. Sur la *figure* 33 est représentée schématiquement la diffraction d'une onde sonore qui arrive perpendiculairement sur un écran où est percée une fente F.

Le phénomène de diffraction est particulièrement important lorsque les dimensions des obstacles ou des trous sont du même ordre de grandeur que la longueur d'onde du son. Comme les ondes sonores sont caractérisées par des longueurs d'onde de l'ordre de quelques dizaines de centimètres, le phénomène de diffraction est très courant, car, dans la nature, il existe un grand nombre d'obstacles dans cet ordre de grandeur.

Cet effet a des applications curieuses. Il permet par exemple d'entendre la voix d'une personne derrière l'angle d'une maison, ce qui ne serait pas possible si le son se propageait toujours et seulement en ligne droite. Dans le cas de l'expérience de Desprετz (*fig.* 32), les rayons émis par le diapason sont diffractés en traversant les trous *a* et *b*, et donc changent de direction et donnent lieu à des interférences en leurs points de rencontre, et en particulier au fond de la boîte.

Les battements sonores

Nous avons vu que la monochromaticité était l'une des conditions nécessaires pour avoir des interférences entre deux ondes. Nous nous proposons, à présent, d'examiner ce qui se produit quand on superpose spatialement deux ondes de fréquences légèrement différentes. Pour simplifier les calculs, considérons deux ondes planes progressives se propageant toutes deux dans la direction de l'axe x ; soit ω_1 et ω_2 les deux pulsations, et k_1 et k_2 les vecteurs d'onde correspondants. Les deux déplacements sont donc :

$$\xi_1 = A \sin (k_1 x - \omega_1 t)$$
$$\xi_2 = A \sin (k_2 x - \omega_2 t)$$

et le déplacement résultant est :

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 = 2 A \sin \frac{1}{2} [(k_1 + k_2)\, x - (\omega_1 + \omega_2)\, t] \cdot \cos \frac{1}{2} [(k_1 - k_2)\, x - (\omega_1 - \omega_2)\, t]$$

soit, en posant $\omega_m = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$, $k_m = \frac{k_1 + k_2}{2}$, $\omega_B = \frac{\omega_1 - \omega_2}{2}$

et $k_B = \frac{k_1 - k_2}{2}$

$$(39) \qquad \xi = 2\,A \sin\,(k_m x - \omega_m t)\,\cos\,(k_B x - \omega_B t)$$

L'équation **(39)** représente une onde sonore qui se propage dans le sens des x positifs avec la pulsation ω_m, moyenne arithmétique des deux pulsations, et avec le vecteur d'onde k_m, moyenne arithmétique des deux vecteurs d'onde. Le terme $2\,A \cos\,(k_B x - \omega_B t)$ représente l'amplitude de l'onde.

Plaçons-nous d'abord en un point d'abscisse x donné ; nous constatons que l'amplitude est une fonction sinusoïdale du temps, de pulsation égale à la demi-différence des pulsations des ondes initiales. La représentation graphique de l'équation **(39)** en fonction du temps est faite sur la *figure* 34, où sont portées la période de l'onde progressive (T_m) et celle de la modulation d'amplitude (T_B). Cette variation périodique de l'amplitude de l'onde est connue sous le nom de phénomène de *battements*.

Puisqu'en une période, l'amplitude effectue deux oscillations entières, la période des battements est en pratique $\frac{T_B}{2}$ et non T_B et la fréquence des battements est donc :

$$f_B = 2\,\frac{f_1 - f_2}{2} = f_1 - f_2$$

Quand un auditeur perçoit les battements, il entend un son de fréquence $f_m = \left(\frac{\omega_m}{2\,\pi}\right)$ et également, périodiquement, des maximums d'intensité qui donnent au son un aspect modulé. Comme la fréquence des battements est faible, car elle est égale à la différence entre deux fréquences très voisines, la période des battements est grande. On peut se demander quelle est la fréquence maximale des battements que l'oreille humaine peut percevoir. Comme la persistance d'un son dans l'oreille humaine normale est d'environ 1/10 de seconde, pour pouvoir distinguer deux sons consécutifs, il est nécessaire qu'ils soient espacés d'au moins 1/10 de seconde, ou bien, s'ils sont périodiques, qu'ils se répètent avec une fréquence inférieure à 10 Hz. Ainsi, l'oreille humaine peut distinguer deux battements consécutifs seulement si la fréquence est inférieure à environ 7-8 battements/s.

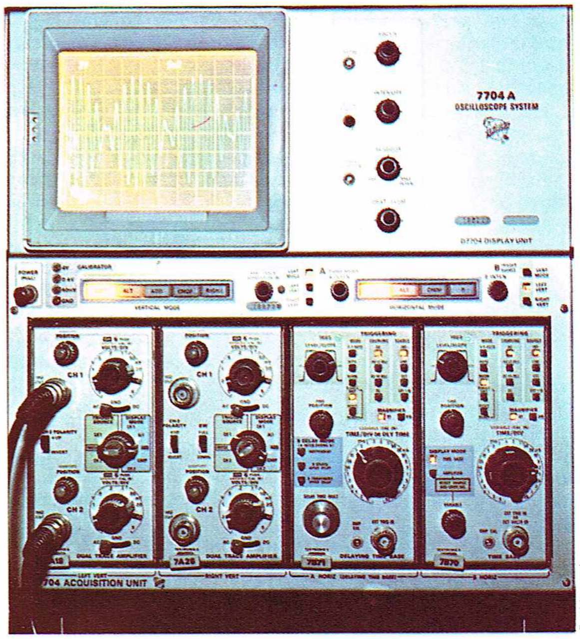

C. Hennion

◀ *Exemple de battements visualisés sur un oscilloscope.*

Pour clarifier le phénomène de battements, considérons deux diapasons parfaitement identiques et donc capables d'émettre des sons de même fréquence, et fixons sur l'une des branches d'un des diapasons une petite masse supplémentaire que l'on peut déplacer le long de la branche. La fréquence de ce diapason est alors légèrement différente de celle du premier, et si nous les faisons vibrer ensemble, nous entendrons une variation périodique de l'intensité du son avec une alternance de maximums et de minimums. Supposons, par exemple, que le premier diapason ait une fréquence de 56 Hz, et le second de 64 Hz. A un instant donné, les deux ondes sonores, en se superposant, produisent un renforcement du son : 1/16 de seconde après cet instant, le premier diapason a effectué 3,5 oscillations, alors que le second en a effectué 4 ; ainsi, à cet instant, les deux ondes sont en opposition de phase, et nous avons un minimum d'intensité sonore. Après un autre intervalle de 1/16 de seconde, c'est-à-dire après 1/8 de seconde de l'instant initial, le premier diapason a accompli 7 vibrations complètes et le second 8, produisant ainsi deux ondes sonores qui sont en phases et se superposent en produisant un renforcement du son. Alors, la période des maximums de sons, c'est-à-dire des battements, est 1/8 de seconde ; donc la fréquence est de 8 Hz, ce qui est exactement égal à (64-56) Hz. La superposition des ondes décrites est illustrée sur la *figure* 35.

Ces phénomènes de battements peuvent être utilisés commodément pour la mesure de la fréquence sonore d'une source, lorsqu'on dispose d'une seconde source sonore étalon de fréquence f_2 réglable ; on procède en superposant les ondes produites par les deux sources sonores et en faisant varier la fréquence f_2 de la source-étalon ; on part d'une fréquence f_2 inférieure à la fréquence inconnue f_1 et on fait croître f_2 jusqu'à percevoir des battements, c'est-à-dire jusqu'à atteindre une fréquence de battements f_B inférieure à 10 Hz ; f_2 est alors inférieure de moins de 10 Hz à f_1. Lorsque f_2 continue d'augmenter, cette fréquence de battements diminue (c'est-à-dire que la période entre deux maximums consécutifs augmente), et on arrive au battement zéro ($f_B = 0 ; f_1 = f_2$). En dépassant ce point, on constate que les battements réapparais-

fig. 34

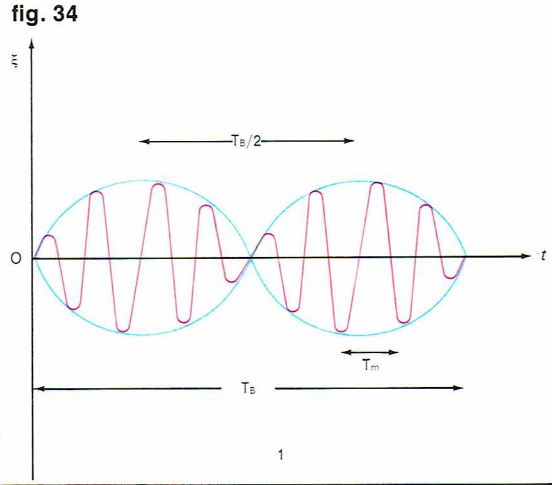

fig. 35

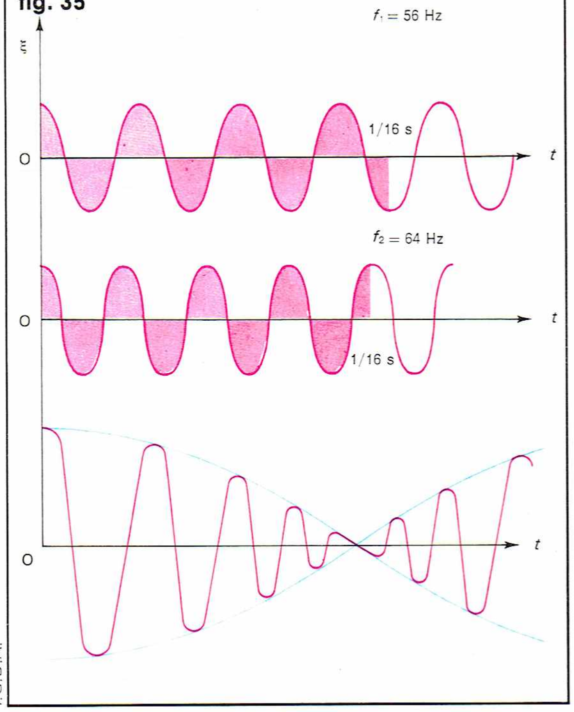

I.G.D.A.

◀ *En haut, figure 34 : dépendance en temps de l'onde résultant de la superposition de deux ondes de fréquences et de vecteurs d'onde différents. En bas, figure 35 : superposition d'ondes dans le phénomène de battements.*

▶ *Figure 37 : transmission d'informations (en rouge) à l'aide d'une onde porteuse. Si la fréquence de cette onde est trop faible (telle que f_1), l'information ne peut être transmise. Au contraire la modulation de l'onde de fréquence f_2 produit le signal bleu.*

sent avec une fréquence $f_B = f_2 - f_1$, qui augmente jusqu'à ce que les battements deviennent inaudibles. Pour mesurer f_1, il suffit alors de choisir une fréquence $f_2 > f_1$ par exemple, de mesurer f_B et d'en déduire $f_1 = f_2 - f_B$.

Les phénomènes de battements sonores se rencontrent souvent dans la vie courante ; ainsi, lorsqu'on assiste à un concert, on constate que les musiciens accordent leurs instruments avant le début du spectacle : cela pour jouer les notes à la même fréquence. En effet, si les fréquences étaient légèrement différentes, on entendrait, durant la représentation musicale, des battements, c'est-à-dire des maximums et des minimums d'intensités sonores non voulus par le compositeur.

Modulation d'amplitude

Revenons à l'équation **(39)** ; elle représente une onde progressive dont l'amplitude

$$2\,A\cos(k_B x - \omega_B t) = A\,(x, t)$$

passe par des maximums et des minimums nuls : c'est une onde modulée en amplitude. Dans le cas général, les minimums de l'amplitude ne sont pas nuls, et l'onde représentée en fonction du temps a l'allure de la *figure* 36.

Les ondes modulées en amplitude peuvent être créées autrement que par battements d'ondes acoustiques, en particulier, l'onde émise par un générateur (haut-parleur) peut être directement modulée en amplitude. Il est essentiel de réaliser que seule la modulation d'une onde permet de transmettre une information. Une onde de fréquence donnée et d'amplitude constante ne transmet en effet pas d'information. Une première manière très simple de coder cette onde est de la moduler par tout ou rien. D'autres manières peuvent être élaborées : modulation d'amplitude, modulation de fréquence, etc.

L'onde modulée est dite l'onde porteuse (elle porte la modulation). Plus on désire transmettre d'informations, et plus la fréquence de la porteuse doit être élevée. Cela est clair sur les schémas de la *figure* 37. Supposons en effet que l'information à transmettre corresponde à la modulation représentée en rouge. Si cette modulation est appliquée à la porteuse de fréquence f_1 il est bien clair qu'elle ne sera pas transmise. En effet, autant on peut imaginer que le premier pic d'information qui correspond à un maximum de l'amplitude de l'onde f_1 pourra être perçu, autant le second pic ne correspondra pas à un phénomène perceptible. Le troisième pic sera perceptible, et ainsi de suite. L'information transmise sera donc une information déformée dans laquelle un pic sur deux sera transmis. Si la même modulation est appliquée à l'onde de fréquence f_2 il est bien clair que l'information sera transmise dans des conditions très favorables. Dans ce cas, l'onde modulée aura la forme représentée sur le quatrième schéma.

Vitesse de groupe

Nous venons de voir que, pour transmettre une information, on pouvait moduler l'amplitude d'une onde. Nous allons maintenant examiner la question suivante : à quelle vitesse se propage l'information, ou, plus exactement, à quelle vitesse se propage la modulation ? Autrement dit, à quelle vitesse se propage le maximum de l'amplitude, c'est-à-dire l'endroit où

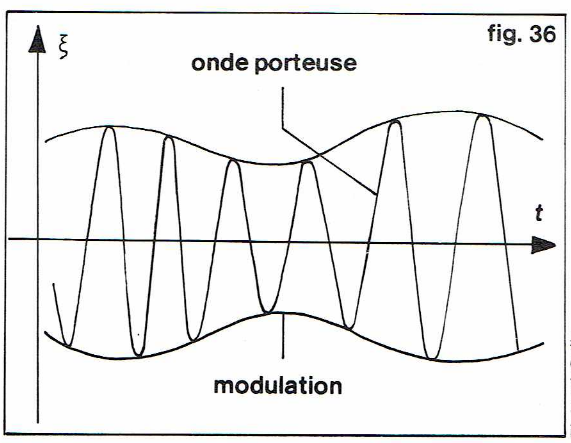

Richard Colin

▶ *Figure 36 : onde modulée en amplitude.*

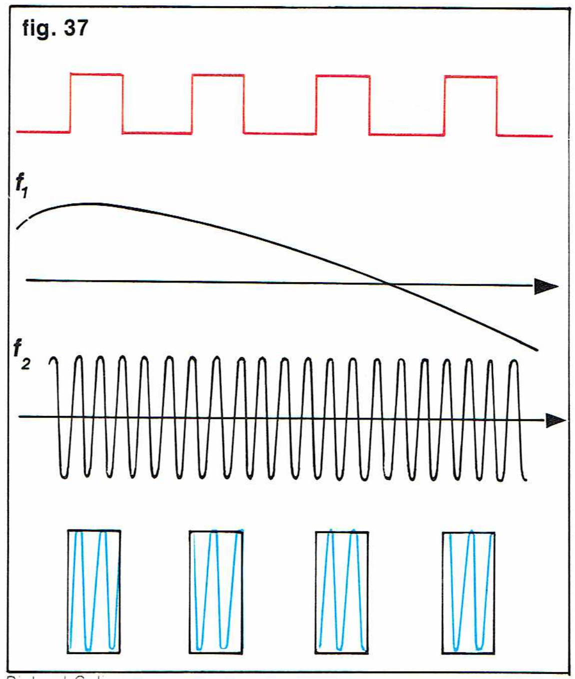

Richard Colin

$$A\,(x, t) = 2\,A\cos(k_B x - \omega_B t) = \text{constante}$$

Nous voyons que, pour suivre une valeur constante de la modulation d'amplitude, nous devons maintenir une valeur constante à son argument :

$$k_B x - \omega_B t$$

Ainsi, lorsque t augmente de dt, x doit augmenter de dx, de façon que l'augmentation de l'argument reste nulle, soit :

$$k_B dx - \omega_B dt = 0$$

Pour satisfaire cela, nous devons nous déplacer à la *vitesse de modulation :*

$$\frac{dx}{dt} = v_{mod} = \frac{\omega_B}{k_B} = \frac{\omega_1 - \omega_2}{k_1 - k_2}$$

Or, nous avons vu que k était lié à ω par :

$$k = \frac{\omega}{v}$$

v étant la vitesse de propagation de l'onde, ou *vitesse de phase*. Dans le cas général, cette vitesse de propagation sera une fonction de k ; on pourra donc dire que ω est une fonction de k :

$$\omega = \omega\,(k)$$

Cette relation est appelée *relation de dispersion*.

La vitesse de modulation s'écrit donc :

$$v_{mod} = \frac{\omega\,(k_1) - \omega\,(k_2)}{k_1 - k_2}$$

Dans le cas qui nous intéresse, k_1 et k_2 sont très voisins, et on peut écrire :

$$v_{mod} = \frac{d\omega}{dk}$$

Cette quantité $\frac{d\omega}{dk}$ est appelée *vitesse de groupe :*

$$v_g = \frac{d\omega}{dk}$$

Ainsi, nous voyons que le signal que constitue l'amplitude modulée A (x, t) ne se propage pas à la vitesse de phase $v = \frac{\omega}{k}$ mais à la vitesse de groupe $v_g = \frac{d\omega}{dk}$.

Exemples :

— Dans le cas d'une onde plane d'amplitude constante, la vitesse de phase est constante par rapport à k (ou ω) et $\omega = vk$. On tire $v_g = v$. Ici, vitesse de phase et vitesse de groupe se confondent.

— Dans le cas des ondes planes dans un pavillon exponentiel, la vitesse de phase a pour valeur :

$$v' = \frac{v}{\sqrt{1 - \frac{\omega_c^2}{\omega^2}}} \qquad (\omega_c \text{ pulsation critique})$$

$$\text{donc } \omega = kv' = \frac{kv}{\sqrt{1 - \frac{\omega_c^2}{\omega^2}}}$$

Il est aisé d'en tirer l'expression explicite de ω en fonction de k et de montrer que :

$$v_g = v\sqrt{1 - \frac{\omega_c^2}{\omega^2}}$$

Ici, la vitesse de groupe v_g est différente de la vitesse de phase v'; elle lui est d'ailleurs inférieure. On remarque qu'entre les vitesses de phase et de groupe, il existe la relation simple :

$$v_g v' = v^2$$

Effet Doppler

Cet effet apparaît sous forme d'une altération de la fréquence sonore lorsque la source et l'observateur sont en mouvement relatif. Fizeau a étendu ce phénomène aux ondes lumineuses. Plusieurs cas sont à envisager : 1° la source est fixe et l'observateur est mobile ; 2° la source est mobile et l'observateur est fixe.

Pour simplifier l'exposé, nous allons supposer que le mouvement de la source et celui de l'observateur ont la même direction que celle de la propagation du son.

1° Source S fixe et observateur O mobile avec la vitesse v_0. Supposons que l'observateur se déplace le long de l'axe x (*fig.* 38) vers la source S immobile qui, supposée ponctuelle, émet dans le milieu environnant des ondes sphériques se propageant à la vitesse v. Ainsi, à l'instant $t = 0$, elle émet une onde qui arrive à l'observateur à l'instant t_1 lorsqu'il occupe la position O_1 :

$$t_1 = \frac{SO_1}{v}$$

Au bout d'une période, c'est-à-dire à l'instant $t = T$, la source émet une deuxième onde qui parvient à l'observateur à l'instant t_2 lorsqu'il est en O_2 ; on a donc :

$$t_2 = T + \frac{SO_2}{v}$$

Pour l'observateur, la période des oscillations est :

$$T' = t_2 - t_1 = T - \frac{O_1O_2}{v}$$

or, O_1O_2 est la distance parcourue par l'observateur pendant le temps T' à la vitesse v_0 :

$$O_1O_2 = v_0 T'$$

Donc : $$T' = T - \frac{v_0}{v}T'$$

soit : $$T' = \frac{T}{1 + \frac{v_0}{v}}$$

et la fréquence $$f' = f\left(1 + \frac{v_0}{v}\right)$$

La fréquence f' du son est plus élevée que la fréquence f, autrement dit, l'observateur entend un son plus aigu que s'il était au repos.

Dans le cas où l'observateur s'éloigne de la source, on peut montrer de même que :

$$f' = f\left(1 - \frac{v_0}{v}\right)$$

Un observateur qui s'éloigne de la source entend un son plus grave que s'il était au repos. Si la vitesse de l'observateur est égale à celle du son ($v_0 = v$), alors $f' = 0$, c'est-à-dire que l'observateur ne reçoit aucun son, comme il était facile de le prévoir.

2° Source mobile avec la vitesse v_S et observateur immobile. Supposons que la source se déplace le long de l'axe x en s'approchant de l'observateur avec la vitesse v_S (*fig.* 39). A l'instant $t = 0$, la source est en S et émet une onde qui arrive à l'observateur à l'instant

$$t_1 = \frac{SO}{v}$$

A l'instant $t = T$, la source est en S_1 et elle émet une deuxième onde qui arrive à l'observateur à l'instant $t_2 = \frac{S_1O}{v} + T$.

Pour l'observateur, la période des oscillations est :

$$T' = t_2 - t_1 = T - \frac{S_1S}{v}$$

Or, S_1S est la distance parcourue par la source pendant le temps T, donc :

$$S_1S = v_S T \quad \text{et}$$

$$T' = T\left(1 - \frac{v_S}{v}\right) \quad \text{soit finalement :}$$

$$f' = \frac{f}{1 - \frac{v_S}{v}}$$

On peut montrer de même que, si la source s'éloigne de l'observateur, la fréquence f' perçue par celui-ci est :

$$f' = \frac{f}{1 + \frac{v_S}{v}}$$

Lorsque la source se rapproche de l'observateur, le son perçu par celui-ci est plus aigu, et, lorsqu'elle s'éloigne, le son perçu est plus grave. Cela peut être noté lorsqu'un observateur immobile sur une route entend passer une voiture qui klaxonne. Il perçoit d'abord un son aigu tant que la voiture s'approche, puis un son grave quand la voiture l'a dépassé et s'éloigne de lui.

L'effet Doppler, que nous venons de voir appliqué aux ondes acoustiques, a également de nombreuses applications en optique et en électromagnétisme (effet Doppler-Fizeau). Il a également une grande importance théorique, car c'est l'un des phénomènes qui mettent en cause la théorie de la mécanique classique, rendant indispensable l'élaboration d'une théorie nouvelle : la théorie de la relativité d'Einstein.

Une remarque très importante a trait à la validité des formules de l'effet Doppler. Comme on le voit facilement, elles cessent d'être valables si la vitesse de l'observateur v_0 ou celle de la source v_S sont supérieures à la vitesse du son, car il en résulterait des fréquences négatives.

Ondes de choc

Dans le cas où la vitesse de la source dépasse la vitesse du son, on n'a plus d'effet Doppler, mais la création d'une *onde de choc* dont la surface d'onde a la forme caractéristique d'un V.

C'est en 1742 qu'un Belge nommé Robens observa durant des essais de tir utilisant des balles sphériques que l'air offrait une résistance anormalement grande aux corps se déplaçant plus vite que la vitesse du son. Ce n'est que 150 ans plus tard que cet accroissement de la résistance a été attribué à la formation d'ondes de compression intenses dans l'air près du corps.

fig. 38

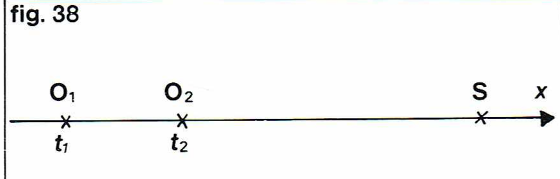

Richard Colin

fig. 39

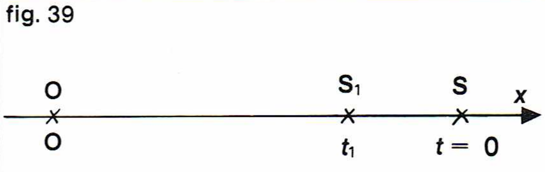

Richard Colin

◀ ***Effet Doppler ; à gauche, figure 38 : la source S est fixe, et l'observateur O est mobile ; à droite, figure 39 : la source S est mobile, et l'observateur O est fixe.***

▶ Concorde, *le seul avion supersonique français non militaire ; c'est lors du changement de régime subsonique-supersonique que se crée l'onde de choc et qu'a lieu le « bang » caractéristique.*

En fait, ce fut E. Mach qui détecta expérimentalement le front d'onde de l'air comprimé, et il découvrit qu'il était dû non pas à un mouvement de masse mais à un mouvement ondulatoire.

Le sujet fut parfaitement discuté par Rayleigh en 1910, et depuis, le mécanisme de la production d'ondes de choc par des projectiles rapides et par des explosions est parfaitement connu. Dans les années qui suivirent, la recherche s'accentua dans ce domaine, compte tenu de l'importance des ondes de choc dans l'aérodynamique des avions et des missiles, et dans les problèmes de détonation. Les progrès réalisés dans la connaissance de ces problèmes furent rapides. Par exemple, le premier vol supersonique dans un avion piloté eut lieu en 1947, quarante-quatre ans seulement après que les frères Wright eurent réalisé leur premier vol dans une « machine plus lourde que l'air » ; le comportement réel de l'avion suivit de près les prédictions faites d'après des expériences de laboratoire.

Les ondes de choc se comportent différemment d'autres ondes telles que les ondes acoustiques ou optiques. Par exemple, dans une expérience d'interférence d'ondes acoustiques, la surpression Δp est additive, alors que, lors de l'interaction des ondes de choc, il peut se produire des surpressions bien supérieures à la simple somme des surpressions composantes. Cette différence de comportement est due à la non-linéarité des équations régissant la formation et la propagation des ondes de choc, ce qui en rend l'analyse mathématique assez compliquée. En fait, pour la plupart des problèmes pratiques concernant les ondes de choc, il suffit de les considérer comme des discontinuités dans les caractéristiques d'un fluide idéal (non visqueux). Dans un fluide réel, visqueux comme l'air, on n'a pas de réelle discontinuité de la surpression, par exemple, mais simplement une très grande variation lorsque la vitesse de l'objet devient supérieure à la vitesse du son.

Les ondes engendrées par la proue d'un navire, l'onde produite par un projectile qui entre dans un milieu avec une vitesse supérieure à la vitesse du son dans ce milieu, l'onde lumineuse caractéristique de l'effet Cerenkov en optique sont toutes des ondes de choc.

Nous allons expliquer à présent le mécanisme de formation du front d'onde de l'onde de choc. Considérons une source sonore qui se déplace avec une vitesse v_S supérieure à la vitesse du son v (*fig.* 40). Soit S la position de la source sonore à l'instant 0 et S′ sa position à l'instant t. Pendant que la source se déplaçait ainsi de S à S′, elle émettait des ondes tout au long de son parcours : si la première onde est émise à l'instant initial, lorsque S est arrivé en S′, elle a parcouru une distance vt, c'est-à-dire que la surface d'onde est une sphère de rayon vt. Les fronts d'onde émis par la source entre S et S′ sont des sphères de rayon de plus en plus petit, et d'après le principe d'Huygens, le front d'onde, lorsque la source est en S′, est l'enveloppe de ces différentes surfaces d'onde.

Le résultat est, comme on le voit sur la *figure* 40, une onde dont le profil est un V. Si le profil de l'onde forme un angle β avec la direction du mouvement de la source, on a :

$$vt = v_S t \sin \beta$$

soit :

$$v = v_S \sin \beta$$

On voit d'après l'équation précédente que ce profil en V n'existe que si $v_S > v$.

Quand un avion à réaction en vol atteint et dépasse la vitesse du son, il se crée ce type d'onde de choc qui est une onde de pression, et qui donne lieu, à cet instant, à un « bang » caractéristique. Quand le même avion à réaction passe de la vitesse supersonique à une vitesse subsonique, l'onde de choc disparait, et l'on entend un autre « bang ».

Compte tenu de l'affaiblissement du « bang » avec la distance, cet effet peut ne pas être gênant pour des avions qui volent à haute altitude ou qui changent de régime (subsonique-supersonique, ou réciproquement) au-dessus des mers ou des océans.

fig. 40

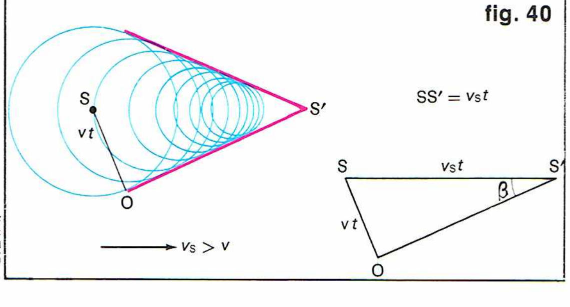

I.G.D.A.

▶ *Figure 40 : formation d'une onde de choc en V.*

Acoustique physiologique

L'oreille humaine

Avant d'aborder les problèmes de mesure et de reproduction de signaux acoustiques, nous allons examiner un certain nombre de facteurs physiologiques et, en particulier, les propriétés de l'oreille humaine. Il est bien clair, en effet, que ces facteurs déterminent les liens que l'on doit établir entre les mesures physiques et les conséquences qu'on peut en tirer pour résoudre des problèmes tels que la définition des grandeurs qui concernent le bruit, la manière de lutter contre les bruits parasites, la façon de concevoir les systèmes d'enregistrement et de reproduction sonore, et bien d'autres encore.

L'oreille humaine est en effet le juge ultime de la qualité ou de l'intensité d'une musique ou d'un bruit. Elle est constituée de trois parties principales, qui sont l'*oreille externe*, l'*oreille moyenne* et l'*oreille interne* (*fig.* 41). Les vibrations propagées dans l'air sont reçues par l'oreille externe, transmises à l'oreille moyenne où elles deviennent vibrations de solides (os), puis à l'oreille interne où elles deviennent vibrations de liquide.

L'**oreille externe** est constituée d'un tube de quelques centimètres de longueur appelé le *méat*, ouvert sur le monde extérieur par un pavillon appelé la *conque* et fermé du côté de l'oreille moyenne par une membrane, le *tympan*. Nous avons vu précédemment que, pour qu'une onde acoustique se transmette sans être trop réfléchie à l'interface de deux milieux, il était nécessaire qu'une adaptation des impédances acoustiques de ces deux milieux fût réalisée. La conque évite justement la réflexion des sons qui arrivent sur l'oreille, au moins des sons de fréquence moyenne, qui peuvent ainsi pénétrer le méat. Ce dernier, qui possède certaines fréquences propres de résonance, transmet l'énergie acoustique au tympan qui entre en vibration. Un nouveau problème d'adaptation d'impédance se pose alors : nous avons en effet vu que dans l'oreille interne le milieu de propagation est liquide, alors que dans l'oreille externe il est gazeux. En terme d'impédance, on se trouve côté air avec un milieu de faible impédance acoustique, et l'on doit transmettre les vibrations à un milieu de forte impédance acoustique. C'est l'oreille moyenne qui joue ce rôle d'adaptateur.

L'**oreille moyenne** est une poche d'air comprise entre le tympan et la membrane de séparation avec l'oreille interne. Elle est reliée à la cavité nasale par un conduit d'environ 4 cm, la *trompe d'Eustache*, qui a une fonction acoustique bien précise : elle permet l'égalisation des pressions statiques entre le milieu extérieur et l'oreille moyenne. Supposons, en effet, que ce canal soit bouché et que les pressions dans l'oreille moyenne et à l'extérieur de l'oreille soient les mêmes ; le tympan occupe alors sa position d'équilibre moyen, légèrement bombé vers l'intérieur. En cas d'augmentation de la pression statique extérieure, la pression sur la face externe du tympan étant supérieure à la pression sur la face interne, ce dernier se déformerait vers l'intérieur. A la limite, en cas de surpression forte, il pourrait se déchirer. La trompe d'Eustache évite cet inconvénient. Il est remarquable de noter que ce système d'égalisation des pressions statiques est suffisamment fin pour ne pas permettre l'égalisation des pressions alternatives. Si cette condition n'était pas réalisée, c'est la sensibilité de l'oreille qui serait diminuée. Ne nous émerveillons pas trop de ces raffinements techniques, car la description de l'oreille moyenne et de l'oreille interne va nous apporter bien d'autres causes d'étonnement.

Nous avons donc vu que l'oreille moyenne était terminée à ses deux extrémités par des membranes qu'il s'agissait de coupler mécaniquement. Un extraordinaire mécanisme composé de trois petits os assure ce couplage : le premier os, le *marteau*, est fixe à l'une de ses extrémités sur le tympan ; le second osselet, l'*enclume*, assure la liaison avec le troisième osselet ; l'*étrier*, lui-même fixé à la membrane de séparation des oreilles moyenne et interne. Du fait des effets de levier qu'exercent ces trois osselets, la force exercée sur la membrane interne est trois fois supérieure à celle exercée par le tympan. Mais si l'on tient compte en plus du rapport des surfaces de ces deux membranes, alors on constate que la pression sur la membrane interne est près de vingt fois supérieure à celle qui est exercée sur le tympan. Les osselets jouent donc le rôle d'un *transformateur élévateur de pression*. On pourrait alors se poser les questions suivantes : pourquoi trois osselets, et pas un seul ? pourquoi un système aussi compliqué (certains oiseaux possèdent effectivement un couplage à un seul osselet) ? On peut trouver trois avantages à cette configuration à trois osselets :

— Le marteau et l'enclume étant assez massifs et placés symétriquement par rapport à leur axe de rotation, la transmission des vibrations directement par les osselets eux-mêmes est minimale.

— Un seul osselet, qui ne bénéficie pas des effets de levier obtenus par plusieurs osselets, est soumis à des vibrations d'amplitude extrêmement variables et éventuellement grandes. A une telle situation seraient associés des effets non linéaires importants.

— Le système à trois osselets permet le fonctionnement d'un dispositif de sécurité très étonnant : lorsque l'intensité acoustique correspond à des pressions qui dépassent 200 N/m^2, l'ensemble des trois osselets change de mode d'oscillation, et ce faisant ne transmet plus ces vibrations qui pourraient être fatales à l'oreille interne.

En ce qui concerne l'oreille moyenne, il est encore intéressant de noter qu'elle est équipée d'un second dispositif de sécurité pour réduire le risque de dommages sous fortes pressions acoustiques : deux petits muscles entraînent le tympan vers l'intérieur et le cavalier vers l'extérieur lorsque la pression acoustique dépasse 0,16 N/m^2 pour des vibrations de fréquences basse et moyenne. La réduction de sensibilité due à ce système est telle que le signal semble avoir une intensité sonore diminuée d'un facteur 1 000. Enfin on peut remarquer qu'à des fréquences inférieures à 1,5 kHz, le tympan vibre comme un diaphragme rigide. Au-delà, par contre, il vibre par éléments. Cette modification de la structure des vibrations se traduit par le fait que l'oreille répond en dessous de cette fréquence comme un capteur de pression, au-delà comme un capteur de vitesse de déplacement.

L'**oreille interne** comprend deux parties : l'une transforme les vibrations mécaniques reçues en signaux transmissibles au cerveau, l'autre, qui est sensible aux accélérations angulaires, permet de maintenir l'équilibre des individus. La partie acoustique de l'oreille interne, la cochlée, reçoit les vibrations par la membrane commandée par l'étrier. Un ensemble d'environ 24 000 fibres semble constituer le détecteur final : les fibres sont connectées aux nerfs qui vont au cerveau. Diverses hypothèses ont été émises pour interpréter le rôle de ces fibres. Chaque fibre, du fait de sa longueur et de sa tension mécanique, a une fréquence de résonance propre. Il semblerait qu'à l'arrivée d'une vibration complexe, chaque fibre transmette au cerveau un signal corres-

▼ *Figure 41 : représentation schématique de l'anatomie de l'oreille constituée de trois parties principales qui sont* **l'oreille externe, l'oreille moyenne** *et* **l'oreille interne**.

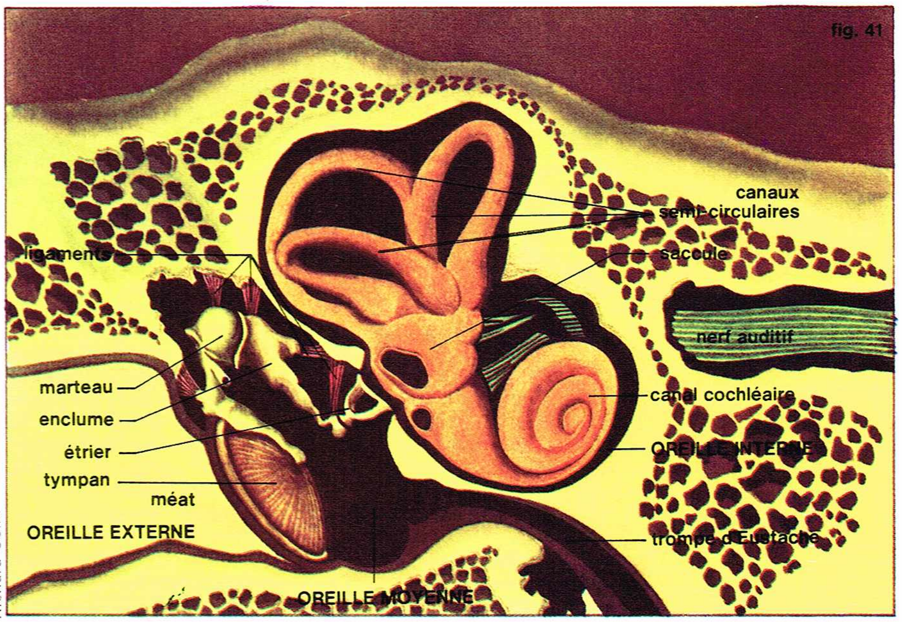

Richard Colin

▶ *Tableau II : correspondance entre pression sonore vraie, niveau de pression exprimé en décibels, déplacements des particules d'air à 20 °C et 1 000 Hz, et les conditions d'environnement associées.*

Tableau II

Pression sonore en N/m^2	Niveau de pression sonore (NPS) en db par rapport à $2 \cdot 10^{-5}$ N/m^2	Déplacements des particules d'air à 20 °C à 1000 Hz en cm	Conditions d'environnement	
$200 \cdot 10^3$	200	7,6	décollage d'une fusée Saturne à 100 m	bruits très violents
2000	160	$76 \cdot 10^{-3}$		
200	140	$7{,}6 \cdot 10^{-3}$	réacteur d'avion à 25 m *seuil de la douleur*	
20	120	$760 \cdot 10^{-6}$	avion à 100 m	bruits très forts
6,3	110	$240 \cdot 10^{-6}$	orchestre pop	
2	100	$76 \cdot 10^{-6}$	marteau pneumatique	
0,63	90	$24 \cdot 10^{-6}$	camions lourds	bruits forts
$2 \cdot 10^{-1}$	80	$7{,}6 \cdot 10^{-6}$	circulation moyenne	
$2 \cdot 10^{-2}$	60	$760 \cdot 10^{-9}$	bureau, rue	bruits modérés
$2 \cdot 10^{-3}$	40	$76 \cdot 10^{-9}$	pièce calme	
$6{,}3 \cdot 10^{-4}$	30	$24 \cdot 10^{-9}$	bibliothèque	
$2 \cdot 10^{-4}$	20	$7{,}6 \cdot 10^{-9}$	forêt calme	
$6{,}3 \cdot 10^{-5}$	10	$2{,}4 \cdot 10^{-9}$		calme
$2 \cdot 10^{-5}$	0	$0{,}76 \cdot 10^{-9}$	*seuil d'audition*	

pondant à la composante de Fourier de la vibration à sa fréquence de résonance propre. Chaque fibre agirait donc comme un détecteur monochromatique de vibrations. L'auteur de cette théorie de la perception des sons, Helmholtz, avait supposé que toutes les fibres étaient soumises à la même tension mécanique. Cela conduirait à une gamme de fréquences perceptibles très inférieure à la gamme réellement perçue. L'introduction d'une tension variable élimine cette objection. De plus, à l'appui de cette théorie, on peut remarquer que, lorsque des individus sont soumis, pendant de longues périodes, à des bruits intenses à une fréquence donnée, par exemple du fait de leur activité professionnelle, une surdité sélective à cette fréquence se développe. Cela peut être interprété par le fait que les fibres correspondantes se sont dégradées.

Nous allons maintenant examiner quelques-unes des performances de ce système de réception des vibrations qu'est le système auditif. Il est assez remarquable de noter que l'oreille est capable de détecter un bruit dont l'amplitude de pression est de l'ordre de $2 \cdot 10^{-5}$ N/m^2. Cela correspond, pour une fréquence de 1 000 Hz, à un déplacement de l'air au voisinage de l'oreille de $0{,}7 \cdot 10^{-9}$ cm, soit 0,076 angström. Remarquons, par comparaison, que pour l'atome d'hydrogène (le plus petit des atomes), la distance entre le noyau et l'électron est de 0,53 angström, soit près de 10 fois plus ! On peut s'émerveiller d'une telle sensibilité, mais on pourrait s'étonner : serait-il possible d'entendre le son correspondant à un déplacement de quelque 10^{-9} cm sans être gêné par les mouvements de l'air, d'amplitude considérablement plus grande, dus par exemple au vent ou aux courants d'air ? La différence essentielle entre les deux types de déplacement de l'air réside dans le fait que les premiers se reproduisent régulièrement, alors que les seconds sont aléatoires.

Mais notre étonnement sur les qualités de détecteur de l'oreille n'est pas terminé, car cet organe capable de détecter des sons associés à des pressions de quelque $2 \cdot 10^{-5}$ N/m^2 supporte (avec quelques douleurs parfois) des pressions voisines de 200 N/m^2. Ces deux limites extrêmes correspondent sensiblement à ce qu'on appelle le *seuil d'audition* et le *seuil de la douleur*. Afin de pouvoir décrire une gamme aussi vaste, il a été nécessaire de recourir à une échelle logarithmique : quand l'intensité acoustique (proportionnelle au carré de la pression) augmente d'un facteur 10, on dit qu'elle a augmenté de 1 *bel*. On utilise très fréquemment, pour comparer des intensités ou des pressions, le dixième de bel, appelé le *décibel* (db). Compte tenu de ce que nous venons de voir, l'oreille humaine a une dynamique voisine de 140 décibels. De plus, elle est capable de détecter une variation d'intensité de 1 décibel.

La description d'une intensité ou d'une pression sonore en décibels n'a de sens que si l'on se fixe un niveau de référence. En acoustique, des conventions internationales ont été établies pour définir les grandeurs de référence. Elles sont :

— pour la *pression sonore :* $2 \cdot 10^{-5}$ N/m^2,
— pour l'*intensité sonore :* 10^{-12} $watt/m^2$,
— pour la *puissance acoustique :* 10^{-12} watt.

A partir de ces valeurs, on définit le *niveau de pression sonore* (NPS), le *niveau de puissance sonore* (NWS) et le *niveau d'intensité sonore* (NIS), par les relations :

$$NPS = 20 \log_{10} \frac{P}{2 \cdot 10^{-5}}$$

où P est la *pression* mesurée en N/m^2.

$$NIS = 10 \log_{10} \frac{I}{10^{-12}}$$

où I est l'*intensité sonore* mesurée en W/m^2.

$$NWS = 10 \log_{10} \frac{W}{10^{-12}}$$

où W est la *puissance acoustique* mesurée en watts.

Avant de poursuivre, mentionnons qu'en acoustique on utilise très fréquemment une autre unité de pression : le *bar* (B), unité de pression atmosphérique qui a sensiblement pour valeur 10 N/cm^2, soit 10^5 N/m^2. Cette unité correspond à une pression élevée, et en général on lui préfère le *microbar* (μB) :

$$1\ \mu B = 10^{-6}\ B = 10^{-1}\ N/m^2$$
$$1\ N/m^2 = 10\ \mu B$$

Sur le *tableau* II, on a indiqué l'échelle en décibels qui exprime la pression sonore par rapport à une pression de $2 \cdot 10^{-5}$ N/m^2, les déplacements des particules d'air à 20 °C associés à cette pression, à la fréquence de 1 000 Hz, et les conditions d'environnement associées.

En fait, la sensibilité de l'oreille n'est pas la même pour des sons de diverses fréquences, les limites n'étant pas les mêmes pour tous les individus. Des déterminations faites sur un grand nombre de sujets ont permis d'établir une courbe moyenne de sensibilité de l'oreille humaine. La *figure* 42 montre la courbe obtenue aux États-Unis par Fletcher et Munson. La courbe supérieure permet de suivre l'évolution de la limite du seuil de la douleur en fonction de la fréquence. On constate que le maximum de sensibilité et la gamme dynamique la plus grande se situent autour de 2 000 Hz.

Compte tenu de cette dépendance de la sensibilité en fonction de la fréquence, il est clair que l'audition de deux sons de même intensité absolue mais de fréquences différentes ne produit pas la même impression. Cela a conduit à introduire une échelle de pression ou d'intensités acoustiques physiologiques. Les valeurs relatives de ces intensités sont exprimées en *phones :* le niveau d'intensité d'un son en phones est le niveau de pression sonore en décibels d'un son pur de fréquence 1 000 Hz ayant la même intensité sonore apparente que le son considéré.

La *figure* 43 montre les courbes permettant de déterminer le nombre de phones associés à un son de fréquence donnée et de pression sonore absolue exprimée en décibels par rapport à la pression de $2 \cdot 10^{-5}$ N/m^2.

En fait, afin de caractériser de façon plus précise l'impression physiologique créée par les sons, diverses échelles (phones par exemple) ou ensembles de courbes (courbes N de Beranek) ont été créés ; nous ne les décrirons pas ici.

Les descriptions que nous venons de voir concernant la sensibilité de l'oreille humaine sont relatives à des sons de fréquence donnée. Lorsque plusieurs fréquences existent simultanément, on peut mettre en évidence un effet connu sous le nom d'*effet de masque :* un son pur de fréquence et d'intensité données masque les sons de fréquence voisine et d'intensités inférieures à un niveau qui a pu être déterminé expérimentalement.

Par exemple, sur la *figure* 44, on voit l'effet d'un son pur de 500 Hz et d'un niveau de puissance acoustique de 80 db. Si un individu est soumis à un tel son, on constate qu'il n'entend plus les sons de fréquence supérieure, sauf si ceux-ci ont une puissance acoustique suffisante. Par exemple, il n'entendra un son de fréquence double (soit de 1 000 Hz) que si celui-ci a une puissance acoustique de 60 db au-dessus du seuil normal d'audition.

Une telle situation est illustrée sur la *figure* 45 où l'on voit l'influence sur la courbe de sensibilité de l'oreille d'un son pur de 80 db à 2 200 Hz. Toute la région colorée en gris est devenue inaudible. Cela explique pourquoi la sonorité d'un instrument de musique est différente selon que l'instrument est seul ou dans un orchestre.

Après avoir ainsi décrit les caractéristiques de l'oreille humaine, nous allons examiner le système de production des sons et la voix humaine.

La voix

Quand une personne parle, l'air au voisinage de ses lèvres est soumis à une succession de compressions et de décompressions. Cette fluctuation locale de la pression de l'air engendre une *onde acoustique*, susceptible de se propager dans l'air. Nous avons vu qu'une onde sphérique voit son amplitude divisée par deux chaque fois que la distance de propagation est doublée. En l'absence de surface réfléchissante (murs d'une pièce, ou d'un auditorium), le son issu de la bouche obéit donc à cette loi.

L'ensemble du système de fabrication de sons par la bouche comprend les poumons, le larynx et les cavités de la gorge, de la bouche et du nez. La cavité à l'arrière de la bouche qui communique avec le nez est le pharynx.

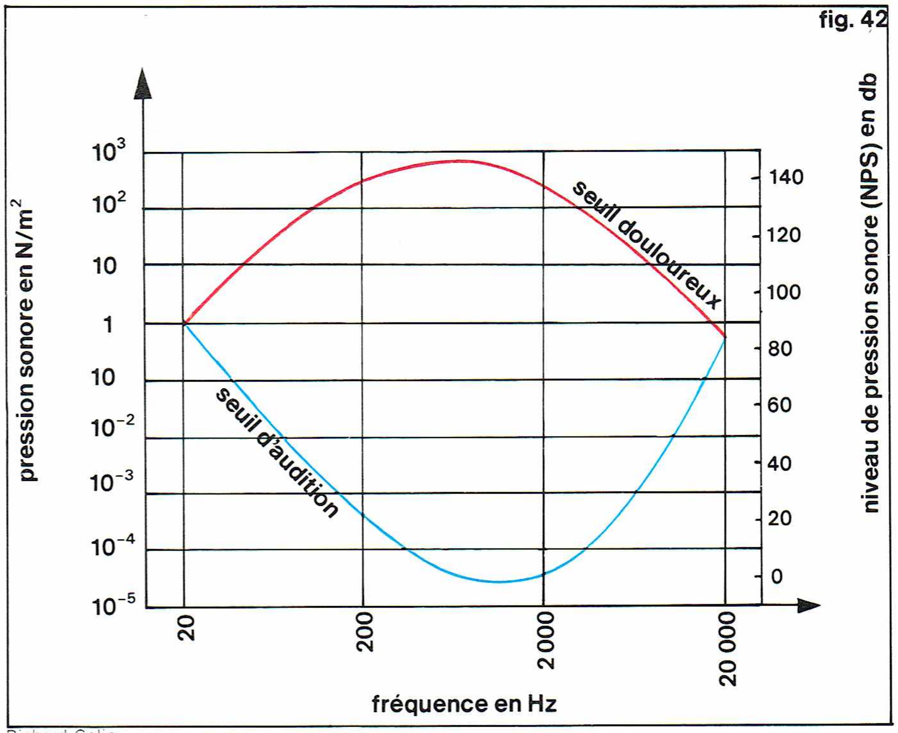

Richard Colin

▲ *Figure 42 : en bleu, courbe de sensibilité moyenne de l'oreille ; en rouge, seuil de la douleur.*

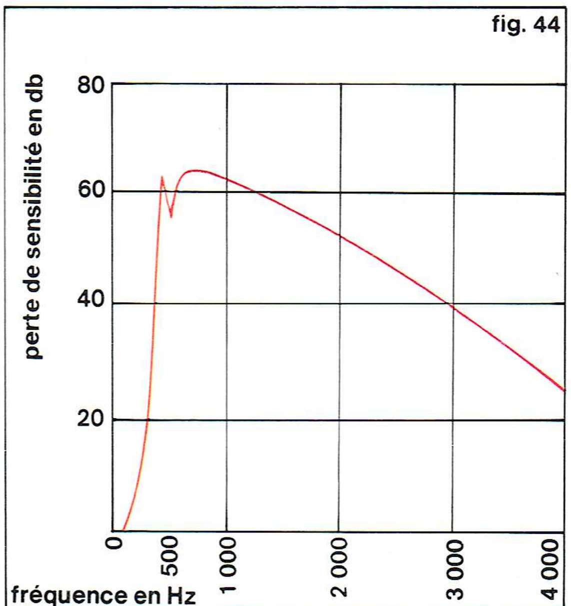

Richard Colin

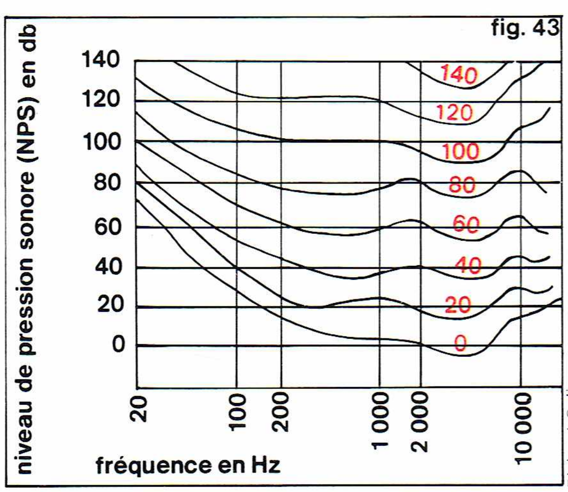

Richard Colin

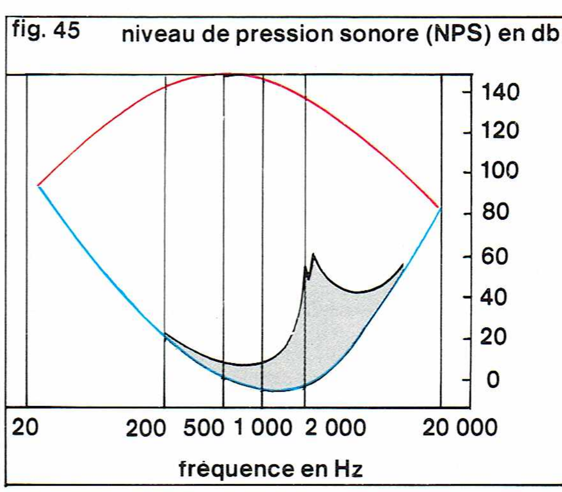

Richard Colin

◄▲ *Ci-dessus, figure 44 : effet de masque produit par un son pur à 500 Hz et de niveau d'intensité acoustique égal à 80 db. Ci-contre, à droite, figure 45 : effet sur la courbe de sensibilité de l'oreille d'un son pur à 2 200 Hz et d'intensité acoustique égale à 80 db ; la courbe bleue représente la sensibilité aux sons purs. A gauche, figure 43 : échelle physiologique des pressions en phones (en rouge).*

Le larynx contient les « cordes vocales » qui sont des éléments de chair de forme triangulaire. Il y a deux paires de cordes vocales : la paire inférieure, qui est la plus proche des poumons, située à la sortie de la trachée, et la paire supérieure, plus proche de la bouche (fausses cordes vocales). Ces deux paires sont séparées par la glotte.

Lorsque les cordes vocales se tendent pour émettre un son, leur distance est de l'ordre de quelques dixièmes de millimètre.

La fréquence du son émis dépend de la longueur et de la tension des cordes vocales. Cela explique pourquoi, en moyenne, le ton d'une femme est plus élevé que celui d'un homme : les cordes vocales des femmes et des enfants sont plus minces et plus courtes (d'un tiers environ) que celles des hommes. Lorsqu'un garçon a la voix qui mue, la fréquence des sons qu'il émet tombe très rapidement d'une octave par suite de la croissance rapide de son larynx pendant l'adolescence.

Le domaine des fréquences fondamentales émises par la voix humaine s'étend d'environ 100 cycles par seconde à 1 000 cycles par seconde, soit un peu plus de 3 octaves. Il est intéressant de noter que le son émis par les cordes vocales serait peu mélodieux sans les effets de modulation apportés par les résonateurs que constituent les diverses cavités de la bouche et du nez. En particulier, très peu d'animaux sont capables d'effectuer une telle modulation, même si, comme le perroquet, ils sont capables d'imiter la parole. Il faut enfin noter que, dans certains cas, un son peut être émis avec les cordes vocales détendues. C'est alors la forme et la dimension des diverses cavités qui définissent la fréquence du son émis. Le mécanisme est utilisé pour siffler ou murmurer. D'une certaine manière, l'appareil d'émission des sons chez l'homme est assez semblable à celui de certains instruments de musique. La variation continue de la tension ou de la longueur des cordes vocales et des dimensions des cavités fait penser au trombone à coulisse. Cependant, les parois du système humain sont plus souples et molles que celles de l'instrument. Le son y est nettement plus absorbé, et ainsi les résonances de la voix sont beaucoup plus larges que celles des instruments. Nous avons vu qu'en déformant les cavités buccales, nasales, de la gorge et du pharynx, le son pouvait être modulé. Si la bouche est maintenue presque fermée en parlant, le rôle du pharynx est fortement accru (ventriloquisme). Au contraire, un chanteur utilise beaucoup les cavités buccales et se sert peu du pharynx.

Les mécanismes d'émission du son chez les Insectes

Certains Insectes sont susceptibles d'émettre des sons en utilisant des mécanismes très différents de ceux que nous venons de décrire. On peut les diviser en trois grandes catégories.

— Les **mécanismes à friction**, dans lesquels des éléments assez rigides sont frottés les uns sur les autres. Chez les criquets, par exemple, chaque aile comporte un élément rigide appelé *archet*, ainsi qu'un élément strié. Lorsque l'archet d'une aile est utilisé pour frotter l'élément strié de l'autre aile, cette dernière entre en vibration et produit ainsi la stridulation caractéristique du criquet. Chez certaines espèces de sauterelles, l'archet est situé sur le fémur des pattes postérieures.

— Les **mécanismes à membranes**, dans lesquels une membrane est mise en vibration sous l'action des muscles. Chez la cigale, par exemple, une membrane située sous l'abdomen (la *timbale*) peut être déformée par action musculaire en produisant un bruit caractéristique. Lorsque la membrane reprend sa position, elle émet à nouveau un bruit. La répétition de cette séquence produit une stridulation très caractéristique. La fréquence du son émis peut atteindre 500 cycles par seconde.

— Les **mécanismes à colonne d'air**, dans lesquels une colonne d'air est mise en vibration. Par exemple, le moustique femelle émet en battant des ailes une note qui est détectable par les antennes du mâle, qui peut alors voler vers la femelle. Cela a permis de réaliser des pièges à moustiques mâles dans lesquels un haut-parleur émet un son de fréquence comparable à celui qui est émis par la femelle. Les mâles se dirigent vers la source de bruit et sont détruits par une grille électrifiée qui entoure le haut-parleur.

La musique

Les échelles musicales, les gammes

Un son musical est en général la superposition de sons de fréquences différentes appelés *notes de musique*. Toutes les fréquences audibles n'ont cependant pas été utilisées jusqu'à présent pour produire des notes, car la sensation sonore n'est pas toujours agréable pour des notes de fréquences trop élevées ou trop basses. En pratique, les fréquences musicales utilisées sont comprises entre 24 et 4 500 Hz. Compte tenu du fait que l'oreille humaine est moins sensible à la différence des fréquences entre deux sons qu'au rapport de leurs fréquences, les gammes ont été construites sur ces bases (rappelons que c'est cette observation qui conduisit Pythagore, puis de très nombreux auteurs, à interpréter de manière mystique le caractère arithmétique de la musique, et ce jusqu'aux travaux du père Mersenne au XVIIe siècle).

Une série de notes dont les fréquences obéissent à la série

$$f_0,\ \frac{27}{24}f_0,\ \frac{30}{24}f_0,\ \frac{32}{24}f_0,\ \frac{36}{24}f_0,\ \frac{40}{24}f_0,\ \frac{45}{24}f_0,\ \frac{48}{24}f_0$$

est dite *gamme diatonique majeure*. Les notes correspondantes constituent une octave et prennent dans l'ordre les noms *do, ré, mi, fa, sol, la, si, do*$_2$. La note *do*$_2$ a une fréquence double du *do*, et on peut reconstruire une gamme débutant par *do*$_2$ dont toutes les notes ont pour fréquence le double des fréquences indiquées précédemment. Cela montre que les notes de fréquence élevée de la gamme sont accrues d'une plus grande quantité que les notes de fréquence basse. Ainsi, si $f_0 = 24$, la fréquence du *do*, qui est de 24, devient 48 pour le *do*$_2$. Elle n'a été augmentée que de 24, alors que celle du *la* est augmentée de 40.

Cependant, il est essentiel de constater que, par cette méthode de génération des gammes, les rapports des fréquences entre notes restent conservés. Le rapport de deux notes est appelé l'*intervalle*.

Sur le *tableau* III, on a porté la gamme diatonique majeure avec les fréquences correspondantes, les intervalles entre notes consécutives et les intervalles à partir de la clef (le *do* dans ce cas).

On peut remarquer que tous les intervalles ne sont pas égaux et sont égaux à $\frac{9}{8}$, $\frac{10}{9}$ ou $\frac{16}{15}$. Les deux premiers sont dits *ton majeur* et *ton mineur*, alors que le dernier est dit *demi-ton*. La gamme est donc une succession de ton, ton, demi-ton, ton, ton, ton, demi-ton. Les tons peuvent être divisés en utilisant les *dièses* et les *bémols*, respectivement représentés par les symboles ♯ et ♭ placés immédiatement au pied droit des notes. Dans ces conditions, on obtient la *gamme naturelle* (Zarlino, 1558) qui comprend dans une octave 17 notes : 7 principales, 5 dièses et 5 bémols : *do, do♯, ré♭, ré, ré♯, mi♭, mi, fa, fa♯, sol♭, sol, sol♯, la♭, la, la♯, si♭, si*. Les fréquences associées ont pour valeurs :

$$f,\ \frac{25}{24}f,\ \frac{27}{25}f,\ \frac{27}{24}f,\ \frac{75}{64}f,\ \frac{30}{25}f,\ \frac{30}{24}f,\ \frac{32}{24}f,\ \frac{25}{18}f,$$

$$\frac{36}{25}f,\ \frac{36}{24}f,\ \frac{75}{48}f,\ \frac{40}{25}f,\ \frac{40}{24}f,\ \frac{125}{72}f,\ \frac{45}{25}f,\ \frac{45}{24}f.$$

Comme les intervalles entre les notes consécutives ne sont pas les mêmes, il n'est pas possible d'interpréter une partition musicale en référençant les gammes par rapport à une note quelconque de l'octave. C'est pour cette raison que les compositeurs indiquent le ton dans lequel leur œuvre doit être jouée.

Parmi les divers instruments de musique qui existent, certains (violon, trombone) peuvent produire tous les tons par simple modification de la longueur de la partie vibrante (corde ou colonne d'air), alors que, dans d'autres (piano, harpe, orgue), les notes sont fixées. Dans ces instruments, le grand nombre d'intervalles qui divisent les sons de la gamme naturelle peut être un handicap sérieux. Reprenant une idée déjà avancée par Aristoxène au IVe siècle avant J.-C., A. Werckmeister, au XVIIe siècle, proposa une gamme dans laquelle tous les tons et demi-tons sont également espacés. Dans cette gamme, dite *gamme tempérée*, le dièse de chaque note coïncide avec le bémol de la note suivante. La gamme est alors séparée en 12 tons, et l'intervalle qui les sépare est

donc de $\sqrt[12]{2}$, c'est-à-dire 1,059 46. Cet intervalle est dit *demi-ton tempéré*. Il faut noter que c'est J.-S. Bach qui, avec sa série de préludes et fugues dans chacune des 24 clefs majeures et mineures du clavier bien tempéré, a ouvert royalement la voie aux compositeurs de musique classique.

La construction des gammes musicales, comme celle des échelles scientifiques, nécessite l'adoption d'une *fréquence de référence*. Au cours de l'histoire, une note, le *la*, fut utilisée à cette fin. La fréquence correspondante fluctuait selon les orchestres de 426 Hz à 467 Hz. C'est en 1939, lors d'une conférence internationale qui se tenait à Londres, que la fréquence de 440 Hz fut adoptée comme fréquence de référence pour le la_3. Un diapason qui vibre à cette fréquence est conservé au Bureau international des poids et mesures à Sèvres. Cette fréquence de référence est également radiodiffusée régulièrement, en particulier par le Bureau des standards américain et la B. B. C.

Les fréquences fondamentales des sons utilisés en musique couvrent en général 7 octaves (de 27 à 4 500 Hz). Nous avons vu que la note de référence, le *la*, avait une fréquence de 440 Hz. Le la_{-1} correspond à la plus basse fréquence utilisée couramment. La fréquence est très exactement de 27,500 Hz. Le $ré_7$ correspond à la plus haute fréquence généralement utilisée ; sa fréquence est de 4 698,000 Hz. Sur le *tableau* IV sont indiquées les fréquences de toutes les notes de l'octave — 1 de la gamme tempérée à partir de laquelle il est possible de retrouver les fréquences de toutes les octaves.

Consonance, dissonance, accord

Quand deux sons arrivent simultanément sur l'oreille, ils sont susceptibles de produire un sentiment de plaisir ou, au contraire, un sentiment désagréable. Dans le premier cas, on dit qu'on a *consonance*, dans le second cas, *dissonance*. En général, il y a consonance quand l'intervalle musical qui sépare les deux sons s'exprime par le rapport de nombres simples (par exemple 1/2, 3/2, 4/3, 5/6...), et dissonance quand il s'agit du rapport de deux nombres élevés (par exemple 71/59, 37/23...). Les rapports les plus importants qui produisent les consonances sonores sont :

- l'*unisson* 1/1
- l'*octave* 2/1
- la *quinte* 3/2
- la *quarte* 4/3
- la *tierce majeure* 5/4
- la *tierce mineure* 6/5

Il est intéressant de remarquer que, dans un chant simultané entre un homme et une femme, l'homme est fréquemment à l'octave inférieure.

Lorsqu'il y a simultanément plus de deux sons, l'accord consonant est l'*accord parfait majeur* produit par rapport à une note par les notes de fréquences les plus basses, de la tierce majeure (5/4) ou de la quinte (3/2) par rapport à cette note. Cela revient à dire qu'il y a consonance entre les harmoniques d'ordre 4, 5 et 6 de ces trois sons. L'*accord parfait mineur* est composé des sons de fréquences les plus basses de la tierce mineure (6/5) et de la quinte (3/2), c'est-à-dire tel que les harmoniques 10, 12 et 15 soient à l'unisson.

Accorder un instrument revient à le régler de telle sorte qu'il puisse émettre un la_3 de même fréquence que le la_3 de référence. Lorsque les musiciens d'un orchestre accordent leurs instruments avant un concert, d'une part ils accordent les fréquences de leurs instruments afin d'éviter le phénomène de battement perceptible lorsque des sons de fréquences voisines sont émis simultanément, d'autre part ils échauffent les instruments, évitant ainsi une dérive de fréquence de ces instruments due à la variation de température.

Les instruments de musique

Les instruments de musique peuvent être classés en trois catégories :

— les *instruments à percussion* qui peuvent être non accordés (cloche, triangle) ou accordés (grosse caisse),

— les *instruments à cordes*,

— les *instruments à vent*.

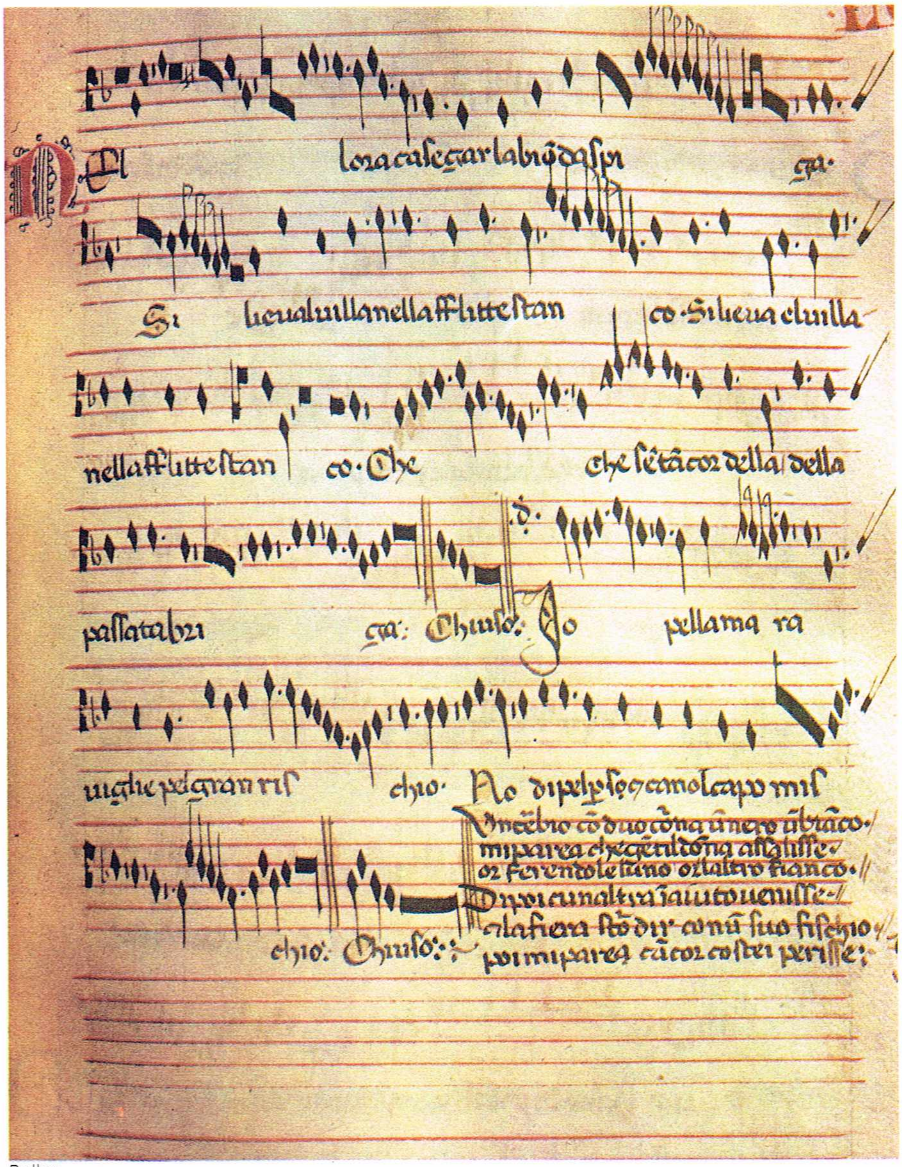

Bulloz

▲ *Un son musical est en général la superposition de sons de fréquences différentes appelés* notes de musique. *Ici, une partition ancienne d'un compositeur italien, Paolo da Firenze (Bibliothèque nationale).*

Tableau III

do	ré	mi	fa	sol	la	si	do
24	27	30	32	36	40	45	48
	9/8	10/9	16/15	9/8	10/9	9/8	16/15
1	27/24	30/24	32/24	36/24	40/24	45/24	2

◀ *Tableau III : la gamme diatonique majeure.*

Tableau IV

Note	Fréquence en Hz	Note	Fréquence en Hz
do$_{-1}$	16,350	fa$_{-1}$#	23,120
do$_{-1}$#	17,320	sol$_{-1}$	24,500
ré$_{-1}$	18,350	sol$_{-1}$#	25,960
ré$_{-1}$#	19,450	la$_{-1}$	27,500
mi$_{-1}$	20,600	la$_{-1}$#	29,140
fa$_{-1}$	21,830	si$_{-1}$	30,870

◀ *Tableau IV : les fréquences de toutes les notes de l'octave — 1 de la gamme tempérée.*

Belzeaux - Rapho

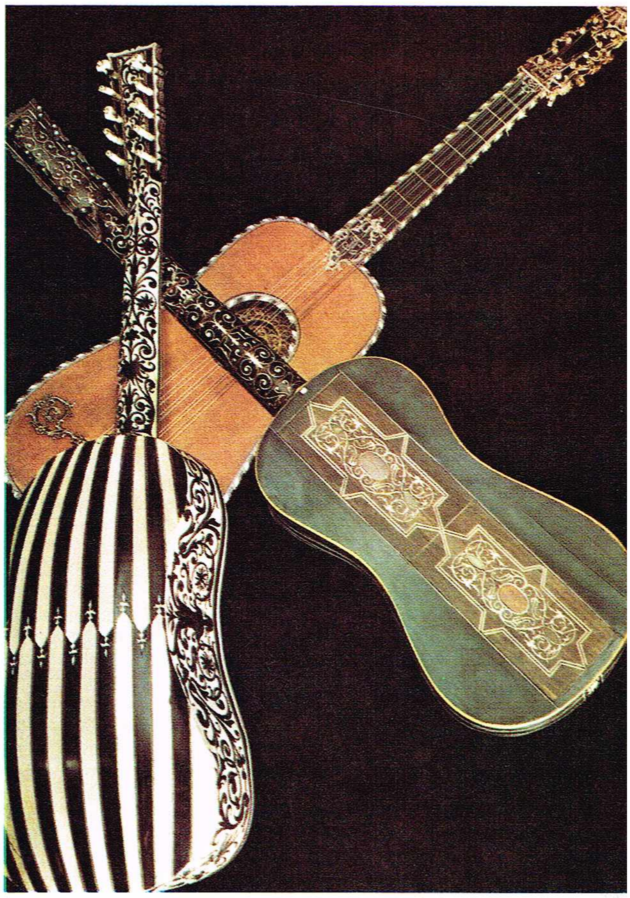

P. Hinous - Connaissance des arts

Burt Glinn - Magnum

Les instruments à cordes

Lors de la description des phénomènes de résonance dans les cordes vibrantes, nous avons vu que la fréquence de résonance d'une corde tendue dépend essentiellement de trois facteurs : sa *longueur*, sa *tension mécanique* et sa *masse par unité de longueur*. Il est donc possible de faire varier la fréquence du son émis en modifiant la longueur ou la tension de la corde.

Les *instruments à notes fixes*, parmi lesquels on trouve le piano et la harpe, comportent des cordes de fréquence de résonance prédéterminée. Dans le piano, le pianiste frappe les touches du clavier qui sont reliées à des marteaux qui viennent frapper les cordes. Les touches blanches du piano correspondent aux 7 notes principales, les touches noires aux 5 notes intermédiaires. Dans la harpe, on trouve seulement les cordes correspondant aux 7 notes principales ; afin d'obtenir les 5 notes intermédiaires, il est nécessaire d'actionner une pédale qui vient raccourcir la longueur libre des cordes.

Dans les *instruments à notes variables*, il est possible, en jouant continûment sur la longueur des cordes de tension mécanique fixée, de faire varier continûment la fréquence de résonance de ces cordes. On trouve dans cette famille le violon, la viole, le violoncelle, la contrebasse, la guitare, la mandoline, le banjo, la balalaïka, etc.

Les instruments à vent

Nous avons vu que la fréquence de résonance d'un tuyau sonore dépendait essentiellement de la *longueur* de la colonne d'air qui peut être en vibration, de la *densité* et du *module de compressibilité* de l'air. Il est clair que le seul paramètre sur lequel il soit possible de jouer est le premier des trois. Nous sommes de nouveau conduit à effectuer une distinction entre les instruments à notes fixes et les instruments à notes variables.

Dans les *instruments à notes fixes*, tels que l'orgue, l'injection d'air dans une embouchure d'un tuyau de longueur donnée met en vibration la colonne d'air située à l'intérieur de ce tuyau, la transmission entre l'organiste et l'appareil se faisant par l'intermédiaire d'un mécanisme de commande.

Dans les *instruments à notes variables*, le musicien peut soit modifier de manière discontinue la longueur de la colonne d'air en vibration comme dans le hautbois, la clarinette, la flûte, le cornet, la trompette, etc., soit modifier continûment la longueur du tuyau sonore, et donc la fréquence de la note émise. C'est, par exemple, le cas du trombone à coulisse.

Les mesures en acoustique

Avant d'analyser les méthodes et les instruments de mesure de l'acoustique, il est bon de rappeler quelques concepts de base. Nous avons vu en effet que les sons peuvent être créés de nombreuses manières, par exemple en faisant vibrer une corde tendue ou en frappant une lame métallique avec un marteau. Nous avons également vu comment les vibrations ainsi créées sont susceptibles de se propager (en particulier dans l'air), puis d'être détectées ; par exemple, on peut transformer des vibrations de l'air en vibrations d'un diaphragme relié mécaniquement soit à un stylet marqueur, soit à un miroir susceptible d'osciller qui fait dévier un rayon lumineux.

Cette remarque nous conduit à définir trois catégories de systèmes : les générateurs, les systèmes de transmission, et les détecteurs. Nous considérerons tout d'abord quelques systèmes de détection qui ont joué, jusqu'à une date relativement récente, un rôle important : le disque de Rayleigh, l'anémomètre à fil chaud et le pendule de torsion. Le paragraphe suivant sera consacré aux transducteurs électro-acoustiques, dispositifs susceptibles de transformer l'énergie électrique de vibration en énergie mécanique (haut-parleurs, écouteurs) ou l'énergie mécanique en énergie électrique (microphones). Nous décrirons alors quelques méthodes utilisées pour effectuer des mesures. C'est dans le chapitre consacré à l'acoustique architecturale que seront données les caractéristiques acoustiques de quelques milieux de transmission sonore.

Les systèmes de détection « historiques »

Dans ce chapitre, nous allons décrire quelques instruments de mesure des sons qui, bien que n'étant pratiquement plus utilisés, ont eu une grande importance dans le développement de l'acoustique.

Le disque de Rayleigh

Ce dispositif a été très employé pour la mesure des intensités sonores. Il utilise les actions mécaniques hydrodynamiques qui s'exercent sur un volume plongé dans un fluide. Si l'on place un ellipsoïde dans un fluide animé d'une certaine vitesse, l'ellipsoïde tend à orienter son axe de symétrie le plus élevé dans le sens du courant. Nous considérons un cas particulier où l'ellipsoïde se réduit à un disque plat de rayon a, suspendu de telle sorte que son plan soit vertical et que la normale au plan du disque fasse un angle θ avec la direction de déplacement du fluide. Si le fluide, de *masse volumique* ρ, a une vitesse v, les lignes d'écoulement autour du disque sont perturbées comme sur la *figure* 46.

Les points A et B correspondent à des régions de pression maximale. Un couple se développe donc qui tend à faire tourner le disque afin de rendre la direction normale au plan du disque, parallèle à la direction de l'écoulement. La valeur C de ce couple a été calculée par König. Elle est donnée par :

$$C = \frac{4}{3}\rho a^3 v^2 \sin 2\theta$$

On constate sur cette expression que le couple est quadratique en vitesse. Cela implique que, dans le cas d'un écoulement périodique de la forme $v = v_m \sin \omega t$, le couple comprend deux termes : un terme indépendant du temps qui s'exerce toujours dans la même direction et un couple de fréquence 2ω.

$$C = \frac{4}{3}\rho a^3 v^2 \sin 2\theta = \frac{4}{3}\rho a^3 v_m^2 \sin 2\theta \sin^2 \omega t$$

$$= \frac{4}{3}\rho a^3 v_m^2 \sin 2\theta \left(\frac{1 - \cos 2\omega t}{2}\right)$$

$$= \frac{4}{3}\rho a^3 \frac{v_m^2}{2} \sin 2\theta - \frac{4}{3}\rho a^3 \frac{v_m^2}{2} \cos 2\omega t$$

Compte tenu de l'inertie mécanique du disque, sa réponse à une fréquence 2ω peut être négligée (sauf pour de très basses fréquences). Le terme indépendant du temps donne par contre une mesure directe de $\frac{v_m^2}{2}$ et donc de $\overline{v}$ (valeur quadratique moyenne de la vitesse du déplacement). Il est à noter que la sensibilité du système, proportionnelle à $\sin 2\theta$, est maximale lorsque $\theta = 45°$. De plus, pour que le résultat indiqué soit valable, le diamètre du disque doit être négligeable devant la longueur d'onde de l'onde à mesurer afin que tous les points du disque voient la même vitesse d'écoulement.

En pratique, le disque de Rayleigh est fréquemment constitué d'une mince lame de mica, métallisée et suspendue à un fil de torsion en fibre de quartz de très petit diamètre. Il est possible de renforcer les actions mécaniques en plaçant le disque de Rayleigh dans le tube de jonction de deux résonateurs de Helmholtz accordés. La mesure de la rotation du disque peut être effectuée en utilisant la déflexion d'un faisceau lumineux réfléchi sur la face métallisée du disque de mica.

fig. 46

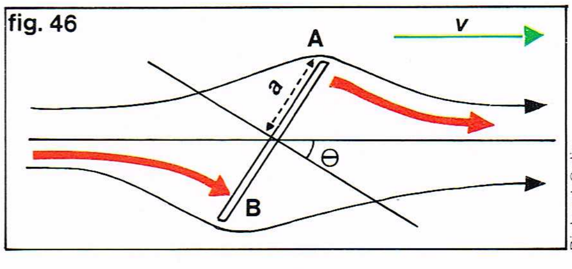

◀ *Figure 46 : le disque de Rayleigh, bien adapté pour les mesures d'ondes de fréquences basses.*

L'anémomètre à fil chaud

Ce dispositif, mis au point durant la Première Guerre mondiale, comprend un fil très fin en platine, chauffé par passage d'un courant électrique. Ce fil est placé au voisinage du goulot d'un résonateur de Helmholtz. La température du fil dépend du refroidissement produit par les molécules d'air en déplacement. La variation de température ainsi produite se traduit par une variation de

◀ *Page ci-contre, en haut, des instruments à cordes. A gauche, le piano à queue (cordes croisées), instrument à notes fixes : le pianiste frappe les touches du clavier qui sont reliées à des marteaux qui viennent frapper les cordes. A droite, la guitare, instrument à notes variables : en jouant sur la longueur des cordes, il est possible d'en faire varier la fréquence de résonance.*

◀ *Page ci-contre, en bas, des instruments à vent : à gauche, le trombone à coulisse, dont on modifie continûment la fréquence de la note émise en modifiant la longueur du tuyau sonore ; à droite, la trompette, dont on peut modifier de manière discontinue la longueur de la colonne d'air en vibration.*

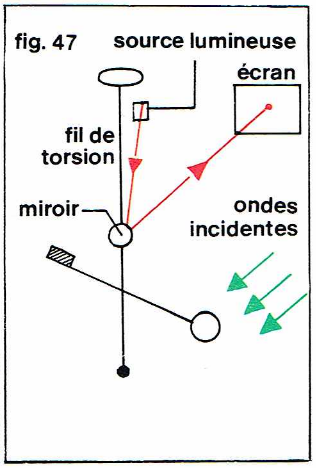

Richard Colin

▲▶ *Ci-dessus, figure 47 : principe du* **pendule de torsion** *adapté plus particulièrement aux ondes de fréquences élevées. Ci-contre, figure 48 : branchement d'un* **microphone à charbon.** *L'alimentation continue fournit le courant* I *de polarisation.*

la résistance électrique du fil. Deux méthodes ont été couramment utilisées pour détecter cette variation de résistance :

— on fait circuler un courant constant dans le fil, et on mesure la variation de tension qui apparaît à ses bornes ;

— on place le fil dans un pont de mesure de résistances (pont de Wheatstone, par exemple).

Le pendule de torsion

Ce pendule utilise le fait que, lorsqu'un rayonnement arrive sur une surface réfléchissante, cette dernière est soumise à une pression statique dite *pression de radiation*. Un tel pendule peut être suspendu à un fil de torsion (*fig.* 47). On peut mesurer la rotation du balancier à l'aide d'un faisceau lumineux réfléchi sur un miroir, et ainsi déterminer la pression de radiation. Soulignons que cette méthode est particulièrement bien adaptée aux ondes de fréquences élevées (la surface doit être réfléchissante), contrairement à la méthode du disque de Rayleigh, mieux adaptée pour les fréquences basses.

Les détecteurs sonores électro-acoustiques (microphones)

Ces dispositifs sont destinés à transformer une information acoustique en information électrique. Nous avons déjà vu un exemple de tels transducteurs, à savoir l'anémomètre à fil chaud. Nous allons maintenant décrire un certain nombre de systèmes couramment utilisés actuellement. Auparavant, nous devons définir un certain nombre de paramètres caractéristiques des microphones.

● *La bande passante*

Un microphone transforme une pression alternative en vibration électrique de même fréquence. Soit V (ω) la réponse électrique du microphone à une pression alternative *p* (ω) de fréquence ω. On peut définir la *sensibilité* $S(\omega) = \frac{V(\omega)}{p(\omega)}$. Elle est exprimée en millivolts par pascal (mV/Pa) ou en millivolts par microbar (mV/μbar). Très fréquemment, on exprime les sensibilités à l'aide d'une échelle logarithmique ; pour cela, la sensibilité est donnée soit en décibels par rapport à la tension de 1 volt produite par une pression efficace de 1 pascal, soit en décibels par rapport à 1 volt pour une pression de 1 μbar. Ainsi une sensibilité de 1 mV/Pa correspond à — 60 dB (référencés à 1 V/Pa) ou à — 80 db (référencés à 1 V/μbar).

La *bande passante* du microphone est la variation de la sensibilité S (ω) en fonction de la fréquence. Elle est en général décrite par un enregistrement sur lequel

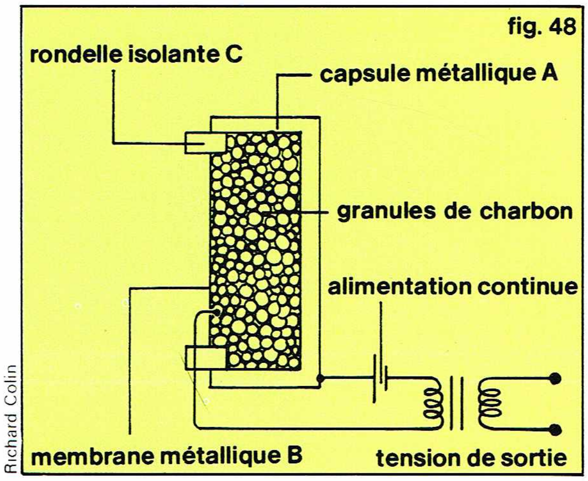

Richard Colin

on porte en ordonnée le logarithme de la tension fournie par le microphone pour un niveau de pression acoustique donné, et en abscisse le logarithme de la fréquence de l'onde.

● *La directivité*

La *directivité* caractérise la dépendance angulaire de la sensibilité, par rapport à l'axe du microphone. On peut définir l'angle θ entre l'axe du microphone et la direction d'où arrive le son. Un microphone sera dit *omnidirectionnel* si S (ω) est constant en fonction de θ. Un microphone qui sera plus sensible à un signal acoustique venant de l'avant (θ ~ 0°) qu'à un signal acoustique venant de l'arrière (θ ~ 180°) sera dit *unidirectif.*

● *Le niveau équivalent de bruit*

Lorsqu'on doit mesurer des signaux de très petite amplitude, on est conduit à introduire un paramètre supplémentaire : le *niveau équivalent de bruit,* qui indique la pression acoustique en dessous de laquelle le signal électrique utile issu du microphone est noyé dans le bruit.

● *La gamme dynamique*

On définit également la *gamme dynamique* D comme l'intervalle de pressions dans lequel le microphone opère correctement. Cet intervalle est en général exprimé en décibels par comparaison des pressions maximales et minimales admissibles par le microphone

$$D = 20 \log \frac{p_{max}}{p_{mini}}$$

● *L'impédance*

Du point de vue des impédances, on définit trois gammes :

— la *basse impédance :* de 15 à 70 Ω approximativement ;

— la *moyenne impédance :* de 100 à 1 000 Ω avec des valeurs standards à 200, 300 et 600 Ω ;

— la *haute impédance :* au-dessus de 2 000 Ω. En général, les microphones dont les impédances de sortie se situent dans cette gamme alimentent directement un préamplificateur adaptateur d'impédance à transistor à effet de champ.

● *Autres paramètres*

Pour certaines applications, d'autres paramètres doivent être spécifiés, par exemple la *reproductibilité des mesures,* la *tenue en température,* la *dépendance en champ magnétique,* l'*influence de l'humidité,* la *stabilité à long terme,* l'*influence des vibrations,* etc.

Le microphone à charbon

Nous commençons cette description par le microphone à charbon, qui, bien qu'étant sur le plan des caractéristiques l'un des plus mauvais, est également l'un des plus utilisés, en particulier dans le domaine des télécommunications. Ce paradoxe apparent est levé si l'on tient compte du fait que ce microphone a été pendant très longtemps le plus économique à fabriquer.

Considérons le système de la *figure* 48 dans lequel une capsule métallique A contient des granules de charbon pressés les uns contre les autres par une membrane métallique B, isolée électriquement de la capsule A par une rondelle isolante C. Ce dispositif est alimenté

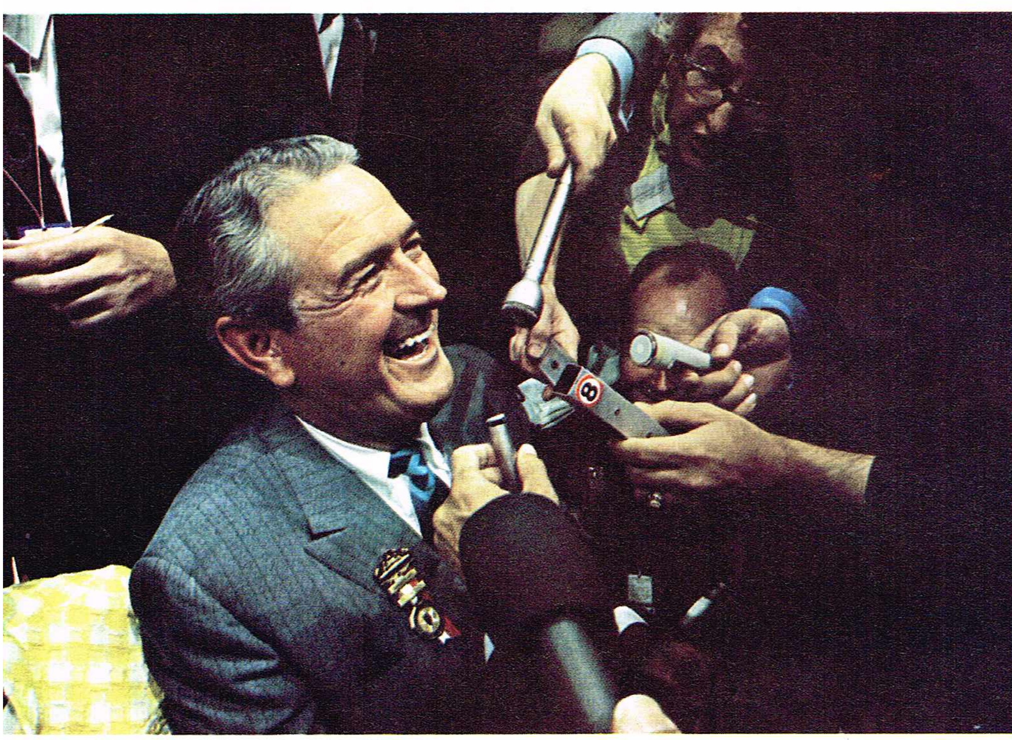

Burt Glinn - Magnum

▼ *Les détecteurs sonores électro-acoustiques, plus communément appelés* « micros », *sont destinés à transformer une information acoustique en information électrique.*

en courant constant I. Soit R la résistance du microphone ; la tension qui se développe à ses bornes est V = RI. Lorsque la membrane est soumise à une variation de pression, elle modifie l'écrasement des grains de charbon les uns contre les autres. Cela modifie la résistance R et donc la tension mesurée. Ce microphone fonctionne avec un courant compris entre 10 et 100 mA. Il fournit une tension importante et ne nécessite donc pas d'amplification électronique sophistiquée ; outre son prix de revient très faible, c'est une des raisons pour lesquelles plusieurs centaines de millions de microphones à charbon ont été fabriqués dans le monde. Pratiquement tous les systèmes téléphoniques l'ont utilisé. Ce microphone a une bande passante assez réduite qui est cependant suffisante pour les applications téléphoniques. De très nombreux perfectionnements sont venus, tout au long de sa vie, améliorer ses performances : la membrane n'est plus utilisée comme électrode ; les deux électrodes sont situées dans la poche contenant les granules de charbon ; la forme de la capsule a été étudiée pour améliorer la courbe de réponse, etc. En pratique, ces microphones, qui ont une bande passante limitée à environ 5 000 Hz, qui consomment beaucoup d'énergie et qui ont des performances acoustiques assez limitées, devraient progressivement céder la place aux microphones électrodynamiques, puis aux microphones à électrets.

Les microphones électrodynamiques

● *Principe de fonctionnement*

Les microphones électrodynamiques utilisent le fait que, si l'on déplace une ou plusieurs spires (bobine) de fil conducteur dans une induction magnétique, il apparaît aux bornes de la bobine une force électromotrice *e*, proportionnelle à la variation de flux coupé par la bobine. Diverses réalisations techniques permettent de transformer les vibrations de l'air en déplacement relatif d'un conducteur ou d'une bobine conductrice et d'un aimant permanent.

● *Le microphone à ruban*

Ce microphone schématisé sur la *figure* 49 est constitué d'une bande très mince de métal plié en accordéon (ruban) placé entre les pôles d'un aimant permanent. Lorsqu'une onde acoustique arrive sur le ruban, ce dernier se déplace dans l'entrefer de l'aimant permanent, et une différence de potentiel apparaît entre les bornes A et B. On remarque qu'un tel microphone n'est pas sensible aux ondes qui se propagent dans le plan du ruban. En effet, ces ondes produisent en avant et en arrière des pressions identiques dont la somme des effets s'annule sur le ruban. Aux basses fréquences, une onde incidente venant de l'avant peut parvenir aussi sur la face arrière du ruban (si celui-ci n'est pas protégé). Dans ce cas, le ruban est sensible au gradient de pression qui existe entre l'avant et l'arrière du ruban. On a donc un microphone essentiellement sensible à la vitesse de déplacement des particules d'air.

A haute fréquence au contraire, comme les longueurs d'onde sonore sont du même ordre de grandeur que les dimensions du microphone, on peut considérer que ce dernier isole l'arrière du ruban, et le microphone se comporte comme un microphone sensible à la pression.

Les microphones à rubans ont pendant longtemps été considérés comme les meilleurs, compte tenu de la faible inertie de l'élément mobile : le ruban peut être extrêmement mince et léger. Ce microphone est particulièrement adapté aux enregistrements en intérieur, car il est très sensible aux déplacements d'air qui peuvent se produire dans des prises de son en extérieur. De plus, il faut très soigneusement l'isoler des vibrations mécaniques induites par le support. En effet, ces dernières entrainent des vibrations parasites dans le ruban. Il en résulte un bruit de basse fréquence qui peut être très important. Néanmoins, en studio, ces microphones peuvent présenter des courbes de réponse en fréquences régulières de 50 à 15 000 Hz.

● *Le microphone à aimant mobile*

Dans ce microphone, les vibrations de l'air sont transférées par un diaphragme à un élément mobile A d'un circuit magnétique qui peut éventuellement être le diaphragme lui-même. La *figure* 50 montre diverses réalisations possibles d'un tel système. Sur la *figure* 50 a, on voit que, lorsque l'élément A est mis en vibration, le flux qui traverse le circuit magnétique est modifié, et une différence de potentiel apparaît aux bornes de la bobine. Sur la *figure* 50 b, on a un système équivalent mais rendu symétrique. Le système représenté sur la *figure* 50 c bénéficie de la symétrie de révolution : lorsque la membrane est entraînée par les vibrations de l'air, elle déplace l'armature annulaire C qui modifie le flux dans le circuit magnétique refermé par la pièce annulaire D ; une différence de potentiel est alors induite aux bornes de la bobine E.

Ces microphones, qui sont très supérieurs aux microphones à charbon, ont été très utilisés dans les systèmes de télécommunications, lorsque le développement des systèmes électroniques à bon marché (amplificateurs et adaptateurs d'impédance) a réduit cet avantage qu'avait le microphone à charbon d'avoir un niveau de sortie très élevé. Ces systèmes utilisent des membranes très rigides qui les rendent peu fragiles. Leur bande passante est en

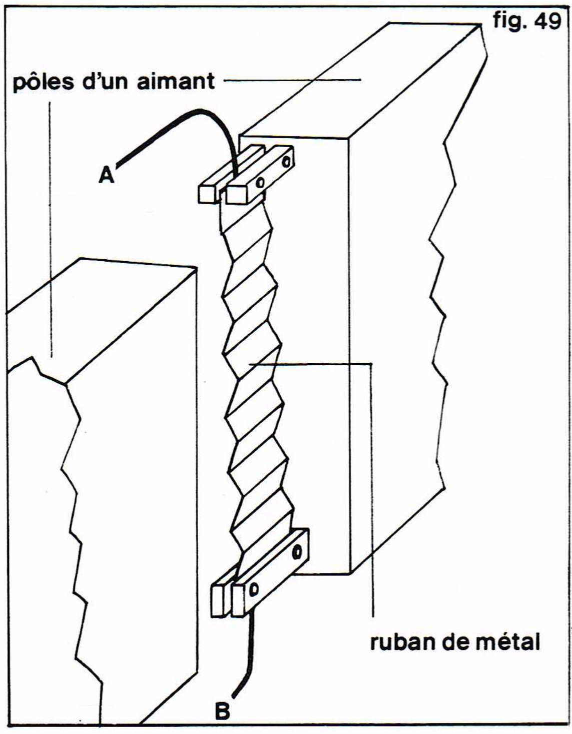

◀ *Le microphone à ruban (à droite), dont le principe de fonctionnement est schématisé (à gauche) dans la figure 49.*

▶ *Figure 50 : trois réalisations* (a, b, c) *possibles d'un* microphone à aimant mobile. *Les pôles sud et nord des aimants sont représentés par les lettres* S *et* N.

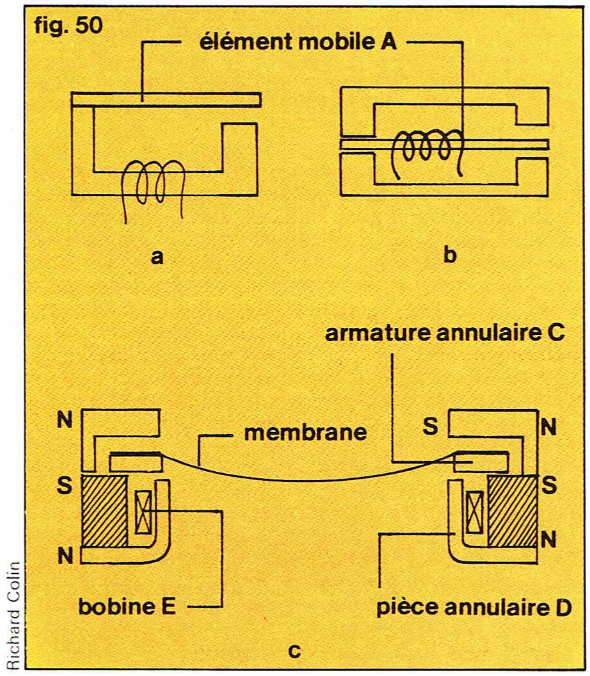

contrepartie limitée, en général de 300 à 3 000 Hz, ainsi que leur domaine de linéarité. Ces microphones présentent néanmoins, outre leur robustesse, l'avantage de pouvoir être utilisés comme écouteurs ou petits haut-parleurs, et trouvent ainsi des applications particulières (machines à dicter par exemple).

● *Le microphone à bobine mobile*

Ce microphone, fréquemment appelé « dynamique », est très répandu. Un aimant permanent produit un champ magnétique radial assez intense entre une pièce polaire centrale et une pièce polaire annulaire externe. Une petite bobine fixée à un diaphragme est susceptible de se déplacer dans ce champ et ainsi d'induire à ses bornes une différence de potentiel (*fig.* 51). L'élément mobile peut donc être plus léger que dans le cas de l'aimant mobile. Les déplacements peuvent aussi être plus grands, permettant une bonne linéarité dans une assez grande gamme dynamique. De plus, ces transducteurs sont réversibles et peuvent être utilisés comme écouteurs ou haut-parleurs.

Les microphones à semi-conducteur (piézotransistors)

Ces microphones relativement récents ont été l'objet d'un gros effort de recherche ces dernières années. Une membrane qui détecte les vibrations de l'air transmet ces vibrations à une jonction de transistor dont la résistance est modifiée par la contrainte exercée. En polarisant cet élément par un courant constant, on recueille à ses bornes une tension $V = RI$. Lorsque la résistance est modulée, la tension de sortie l'est également. Ce système présente en théorie plusieurs des avantages du microphone à charbon (fort niveau de sortie, basse impédance). Ces microphones en sont encore au stade des études.

Les microphones piézo-électriques

La piézo-électricité a été découverte par les frères Curie en 1880. C'est la propriété que possèdent certains corps de se charger électriquement lorsqu'ils sont soumis à une contrainte mécanique. Ce comportement spontané, dans un certain nombre de cristaux naturels ou synthétiques, est dû à la structure cristalline : une action mécanique provoque un déplacement relatif des centres des charges positives ou négatives du matériau. Une polarisation électrique apparaît alors : c'est l'*effet piézo-électrique direct*. Inversement, si l'on applique un champ électrique au matériau, ce dernier se déforme mécaniquement. Il est donc clair que l'effet piézo-électrique direct permet de concevoir des transformateurs d'énergie mécanique en énergie électrique (microphones, capteurs de contraintes, de déformations), alors que l'*effet piézo-électrique inverse* permet de concevoir des transformateurs d'énergie électrique en énergie mécanique (excitateurs de déplacements statiques ou de vibrations, écouteurs, haut-parleurs, émetteurs ultrasonores).

Nous allons maintenant nous intéresser particulièrement aux microphones piézo-électriques. Nous retrouverons les corps piézo-électriques lorsque nous décrirons les ondes ultrasonores, pour lesquelles ils représentent un outil de première importance.

Un microphone piézo-électrique est composé d'un diaphragme qui reçoit les vibrations de l'air et les transmet à un élément piézo-électrique. Sur la *figure* 52, on a schématisé un microphone typique de ce genre. On peut immédiatement remarquer que le montage des divers éléments est assez délicat, en particulier la liaison entre le diaphragme et l'élément piézo-électrique est très critique. Sur le plan du fonctionnement, les microphones piézo-électriques se comportent comme des sources électriques purement capacitives. L'impédance du circuit et des câbles, sur lesquels le microphone débite, peut donc modifier considérablement les performances du système. La capacité parasite des câbles, mise en parallèle sur la capacité de l'élément piézo-électrique, tend à diminuer le signal de sortie, indépendamment de la fréquence. Par contre, si la résistance d'entrée de l'amplificateur utilisé est comparable à l'impédance du microphone, les composantes basse fréquence des signaux seront fortement affaiblies. Cela implique l'utilisation, à proximité du microphone, d'un amplificateur adaptateur d'impédance. Les transistors à effet de champ conviennent parfaitement à cet usage.

Les microphones piézo-électriques ont des courbes de réponse en fréquence qui peuvent aisément être régulières jusqu'à des fréquences de 10 000 Hz. Leur gamme dynamique est très bonne, et ils possèdent un certain nombre de qualités (bonne réponse en basse fréquence lorsqu'ils sont associés à un préamplificateur d'adaptation d'impédance, faible sensibilité à l'humidité, à la température, etc.).

Jusqu'à une date récente, l'élément piézo-électrique de ces microphones était un cristal ou une céramique reliés mécaniquement au diaphragme récepteur des vibrations de l'air. De nouveaux matériaux piézo-électriques sont apparus ces dernières années : les polymères (avec lesquels on fabrique la plupart des matières plastiques). Un grand avantage des polymères piézo-électriques réside dans le fait qu'ils peuvent être obtenus en films minces et sont donc susceptibles d'être utilisés directement comme membrane vibrante. Ces dispositifs commencent seulement à voir le jour.

▶ *A gauche, figure 51 : principe de fonctionnement d'un* microphone à bobine mobile. *A droite, figure 52 : représentation d'un* microphone piézo-électrique.

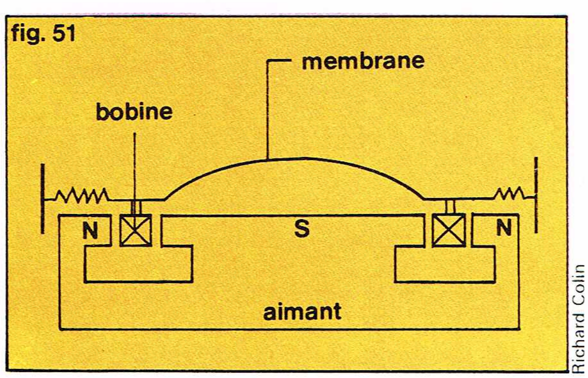

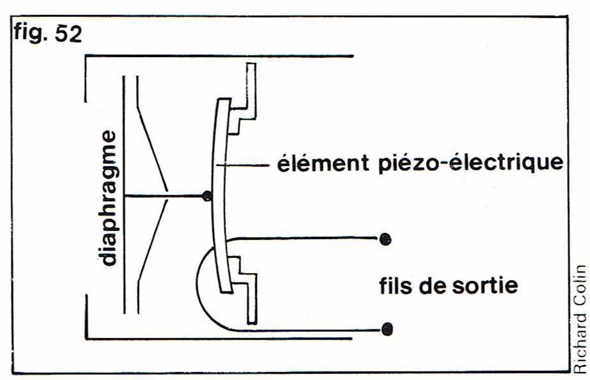

Les microphones à condensateur

● *Principe de fonctionnement*

Découvert par Wente en 1917, le microphone à condensateur, schématisé sur la *figure* 53, a rapidement acquis ses lettres de noblesse en ouvrant le domaine des mesures acoustiques de précision. Il consiste essentiellement en un condensateur dont l'une des électrodes est fixe et dont l'autre électrode est une membrane très mince tendue à proximité de l'électrode fixe. Si le condensateur ainsi formé est chargé électriquement, toute variation de son épaisseur, et donc de sa capacité, sous l'influence d'une pression, se traduit par l'apparition à ses bornes d'une tension proportionnelle à la variation de capacité. La résistance de charge du condensateur doit donc être élevée pour que la charge reste constante. Sinon, à basse fréquence, la sensibilité diminue.

Le fonctionnement du microphone à condensateur peut être décrit par le schéma électrique de la *figure* 54 dans lequel C représente la valeur au repos du condensateur de mesure, ΔC la variation de capacité due à la surpression sur la membrane, V la tension fournie par une alimentation qui sert à charger la capacité C, et R_s la résistance de cette alimentation. C_e est la somme des capacités parasites des câbles de liaison et de la capacité d'entrée de l'amplificateur, et R_e est la résistance d'entrée de l'amplificateur. On voit sur ce schéma qu'une variation ΔC de la capacité du microphone se traduit par une variation Δv de la tension entre les points A et B. On a :

$$\Delta v = \frac{\Delta C}{C + C_e} V \frac{j\omega RC}{1 - j\omega R\,(C + C_e)}$$

où $j = \sqrt{-1}$ et R est la résistance équivalente aux résistances R_e et R_s montées en parallèle :

$$R = \frac{R_s R_e}{R_s + R_e}$$

En examinant cette relation, on constate que Δv est d'autant plus grand que V est grand, C_e est petit et ωRC est plus grand que l'unité. Comment optimiser ces trois paramètres :

(a) Pour V, on est limité par la tension que peut supporter le condensateur C sans être l'objet de claquages électriques. En pratique, les tensions de polarisation sont d'environ 300 volts.

(b) Pour C_e, afin de minimiser les capacités parasites des câbles de liaison, on place un préamplificateur à proximité immédiate de la capsule microphonique elle-même, et la capacité d'entrée de ce préamplificateur doit être la plus faible possible.

(c) Pour satisfaire la condition $\omega RC \gg 1$, il est nécessaire d'avoir un préamplificateur d'impédance d'entrée très grande (supérieure à 100 MΩ). De plus, de par la construction très soignée qu'ils exigent, les microphones à condensateur sont en général d'un prix assez élevé. Ces divers éléments expliquent pourquoi malgré leurs très nombreuses qualités (bande passante considérable, du continu à 100 000 Hz dans certains cas, facilité de les rendre unidirectionnels, etc.), les microphones à condensateur ont été relativement peu utilisés, mis à part les applications professionnelles (studios d'enregistrement, radiodiffusion, mesures).

Deux éléments nouveaux sont intervenus qui modifient cette situation : depuis quelques années, le développement des semi-conducteurs et de l'électronique intégrée permet de réaliser des préamplificateurs de prix assez peu élevé, à haute impédance d'entrée, faible capacité parasite, et petite dimension, qui peuvent être très facilement intégrés dans le boîtier du microphone. Les points **(b)** et **(c)** des conditions précédentes peuvent ainsi être satisfaits.

Très récemment a été mise au point une technique de fabrication de matières plastiques électriquement chargées (électrets).

Ces matériaux révolutionnent le domaine du microphone, car nous allons voir comment ils permettent d'obtenir des performances très élevées pour un coût qui n'est plus prohibitif. Et surtout, ils suppriment le besoin d'une tension de polarisation externe, objet du point **(a)** exposé ci-contre.

● *Les microphones à électret*

Nous avons déjà rencontré un type d'électrets lorsque nous avons vu les microphones piézo-électriques. En fait, un électret est l'équivalent électrique d'un aimant permanent : c'est un matériau qui possède une polarisation électrique permanente ou quasi permanente.

Les électrets ont été découverts voici près d'un demi-siècle, mais ce n'est que très récemment qu'ils sont revenus au premier plan des recherches et des applications. En effet, le développement de nouveaux matériaux (polymères) et de techniques d'élaboration bien contrôlées a permis de réaliser des électrets en films minces de polymères. C'est en utilisant de tels produits que Sessler et West réalisèrent en 1962, dans les laboratoires de la Bell Telephone, le premier microphone à électret en polymère.

Depuis, de nombreux progrès ont été réalisés, et ces microphones sont commercialisés en grand nombre. Leurs courbes de réponse peuvent être adaptées en fonction des besoins.

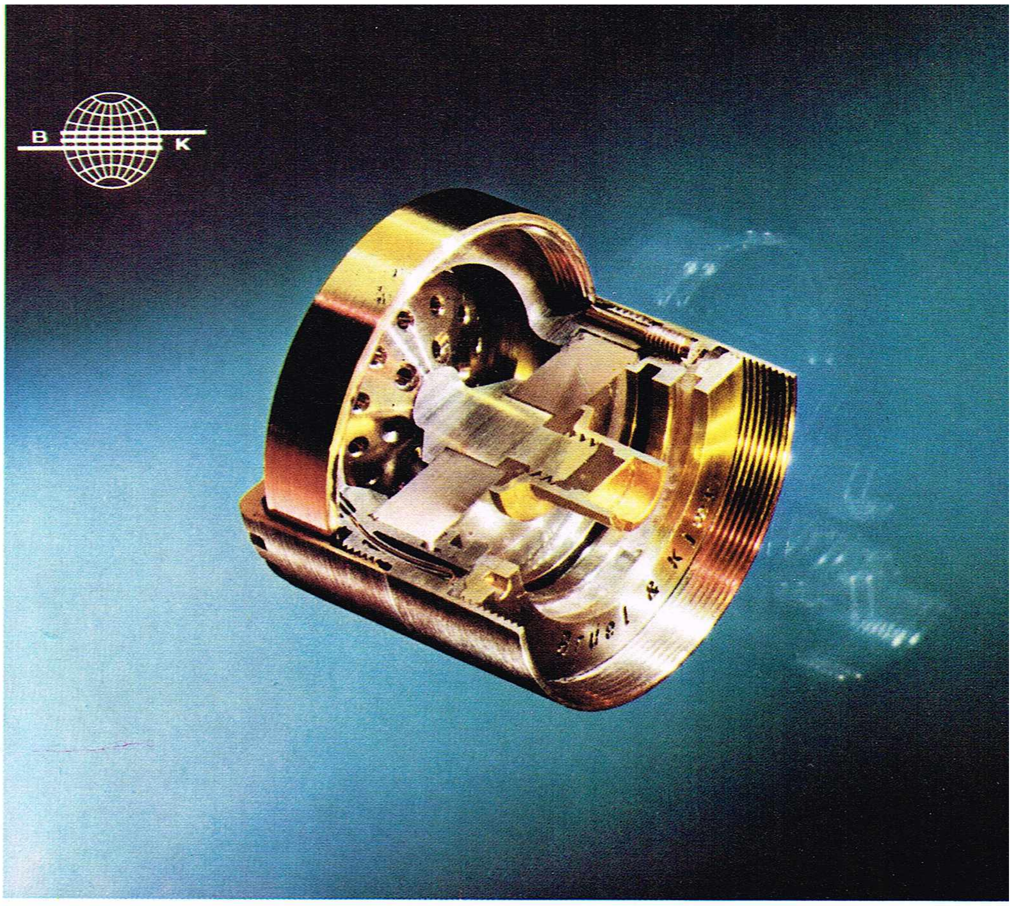

Société Brüel et Kjær

▲ *Microphone de mesures à condensateur de Brüel et Kjær. On aperçoit la contre-électrode percée de trous, la bague en quartz qui maintient la contre-électrode et l'isole du capot, et un trou partiellement rempli par un mince fil qui sert d'orifice d'égalisation de pression statique afin d'éviter des forces statiques importantes sur la membrane.*

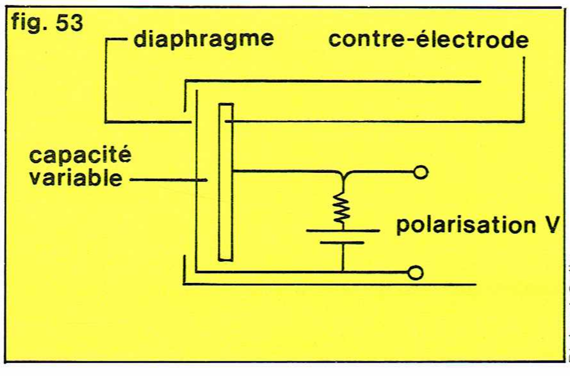

Richard Colin

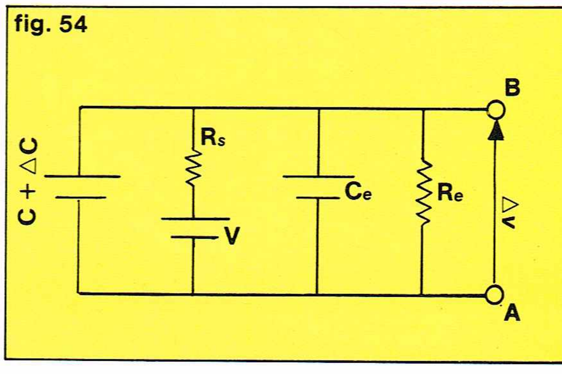

Richard Colin

◀ *A gauche, figure 53 : schéma d'un microphone à condensateur.*
A droite, figure 54 : schéma électrique du microphone à condensateur.

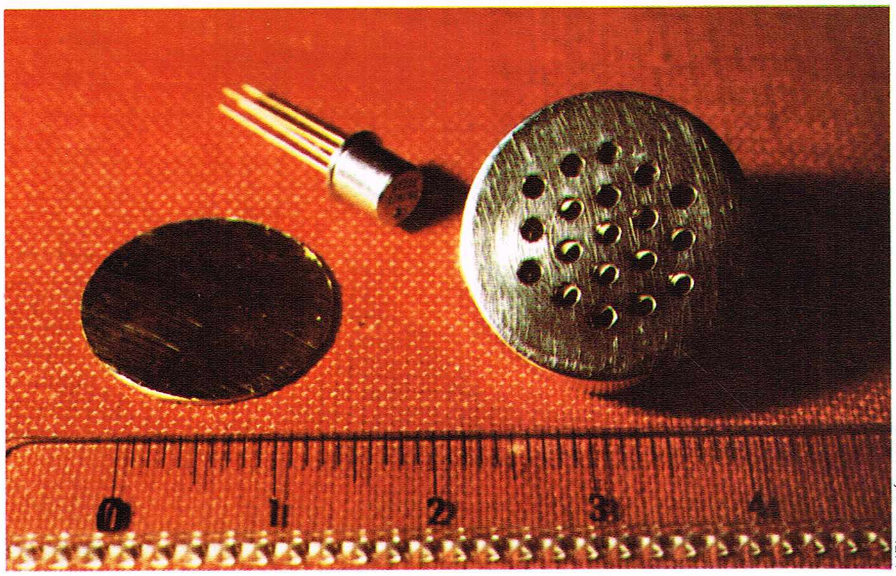

▲ *Capsule de microphone électrostatique à électret. On distingue à gauche un électret, et à l'arrière-plan l'adaptateur d'impédance à effet de champ.*

La courbe de réponse d'une capsule de microphone de sonorisation est indiquée sur la *figure* 55. Les microphones à électret sont des microphones à condensateur autopolarisé. En général, la membrane vibrante est une feuille de plastique, métallisée sur une face et porteuse de charges électriques de surface et de volume. Ces charges, qu'on sait maintenant réaliser avec des durées de vie extrêmement longues (supérieures à plusieurs décennies), produisent un champ électrique statique à l'intérieur du condensateur constitué par l'électret métallisé et une contre-électrode. Lorsque la membrane est mise en vibration, la variation de capacité du condensateur induit une variation du champ électrique régnant dans le condensateur. Cette variation temporelle du champ est l'équivalent d'un courant électrique. Il suffit de détecter ce courant dans le circuit extérieur pour se retrouver dans les conditions d'emploi du microphone à condensateur classique. En jouant sur la forme de la contre-électrode, il est possible de modifier très fortement la courbe de réponse du microphone mais également le diagramme de directivité. Ainsi, sur la *figure* 56, on a porté, en coordonnées polaires, la sensibilité du microphone en fonction de l'angle d'incidence de l'onde sonore.

● *Utilisation en micro-émetteur*

Il est possible d'utiliser les microphones à condensateur de manière complètement différente de celles qui viennent d'être décrites. En effet, en incorporant la capacité du microphone dans le circuit d'accord en fréquence d'un circuit oscillant de haute fréquence, il est possible de moduler cette haute fréquence par un signal basse fréquence, correspondant aux variations de capacité du microphone condensateur dues aux variations de pression acoustique.

Ce dispositif est particulièrement bien adapté aux micro-émetteurs (microphones sans fil) dans lesquels le signal haute fréquence est transmis par l'intermédiaire d'une petite antenne.

fig. 56

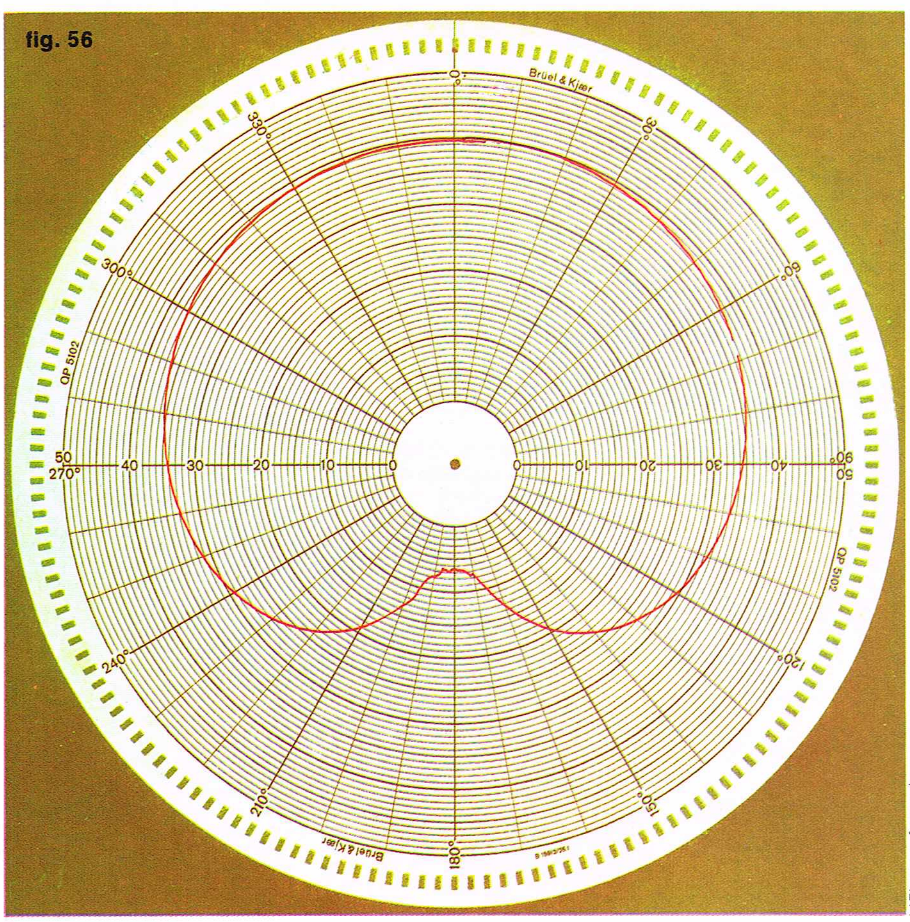

Les émetteurs sonores

Les émetteurs sonores sont des dispositifs susceptibles d'engendrer des vibrations sonores. Dans la vie courante, nous rencontrons en général plus d'émetteurs de sons que nous ne le souhaiterions : voitures, camions, postes de radio, voisins, etc. Ces quelques exemples nous montrent que les émetteurs de sons peuvent être extrêmement variés. Nous avons déjà rencontré dans ce texte divers émetteurs : la sirène de Cagniard, le disque de Seebeck, les cordes et barres vibrantes, la voix. Nous allons nous intéresser particulièrement aux systèmes qui transforment une vibration électrique en vibration mécanique et qu'on appelle *transducteurs électro-acoustiques*. Ils englobent les écouteurs et les haut-parleurs. Comme pour les microphones, divers principes sont utilisés pour effectuer cette conversion d'énergie. Nous décrirons plus particulièrement quatre d'entre eux. Auparavant, et comme pour les microphones, on peut définir plusieurs paramètres caractéristiques : la *bande passante*, le *diagramme de directivité de rayonnement*, la *sensibilité*. Cette dernière s'exprime couramment pour les écouteurs en pascals par volt ou encore en décibels par rapport à 1 pascal par volt. Dans certains cas, afin de faire intervenir la puissance électrique, on utilise l'échelle des décibels par rapport à 1 $\text{Pa}/\sqrt{\text{puissance en mW}}$.

Les systèmes électrodynamiques

Les systèmes électrodynamiques mettent en œuvre les forces magnétiques qui s'exercent entre une bobine parcourue par un courant et un milieu aimanté. Ce principe peut être utilisé pour réaliser des écouteurs avec la même distinction que celle que nous avons rencontrée à propos des microphones entre systèmes à bobine mobile et systèmes à aimant mobile. En pratique, les bandes passantes et caractéristiques physiques sont les mêmes que pour les microphones, et nous ne les décrirons pas. Rappelons néanmoins qu'ils constituent des systèmes réversibles pouvant être utilisés soit pour transformer des vibrations électriques en vibrations mécaniques, soit pour réaliser la transformation inverse.

Les haut-parleurs utilisent, bien sûr, le même principe. En général, une bobine entraîne un piston qui déplace les couches d'air voisines. Afin d'adapter les impédances acoustiques, on utilise très souvent un *cornet acoustique* (cône). Dans certains cas, pour améliorer la bande passante, on équipe certains haut-parleurs de deux cônes, un pour les fréquences basses (graves) de grand diamètre et un pour les fréquences élevées (aiguës) de diamètre plus petit (*fig.* 57). De très nombreuses variantes de ce dispositif ont été réalisées.

Les systèmes électrostatiques

Considérons un condensateur constitué d'une membrane conductrice tendue à la distance d d'une contre-électrode fixe (*fig.* 58). Si l'on applique aux deux bornes du condensateur une tension continue V_0 et une tension alternative $v \sin \omega t$, le champ électrique à l'intérieur du condensateur est de la forme :

$$E = E_0 + e \sin \omega t \quad \text{avec} \quad E_0 = \frac{V_0}{d} \quad \text{et} \quad e = \frac{v}{d}$$

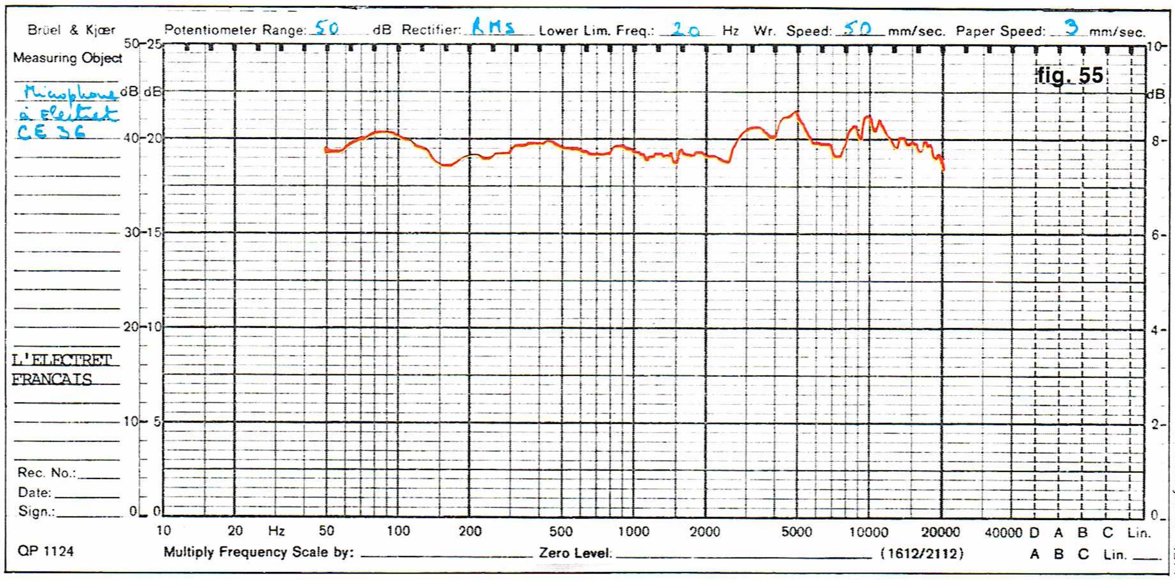

◀ *Figure 55 : courbe de réponse en fréquence du microphone à électret (photographié page ci-contre). L'enregistrement est gradué de 0 à 50 db. On constate que la sensibilité est constante à ± 3 db, de 50 Hz à 20 000 Hz.*

La pression électrostatique qui s'exerce sur les électrodes est : $p = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2} - \frac{\varepsilon_0}{2}\left[E_0^2 + 2\, eE_0 \sin \omega t - e^2 \sin^2 \omega t\right]$

où ε_0 est la *permittivité du vide* ; $\varepsilon_0 = (4\pi \times 9 \cdot 10^9)^{-1}$

Soit $p = \frac{\varepsilon_0}{2}\left[\left(E_0^2 + \frac{e^2}{2}\right) + 2\, e\, E \sin \omega t - \frac{e^2}{2} \cos 2\, \omega t\right]$

Finalement,

$$p = \frac{\varepsilon_0}{2\, d^2}\left(V_0^2 + \frac{v^2}{2}\right) + \frac{\varepsilon_0}{d^2}\, v\, V_0 \sin \omega t - \frac{\varepsilon_0}{4\, d^2}\, v^2 \cos 2\, \omega t$$

On constate que cette pression comprend trois composantes : une composante de pression statique, une composante à la fréquence ω, d'amplitude proportionnelle à v et à V_0, et une composante de fréquence $2\,\omega$, proportionnelle à v^2. Si l'on suppose que v est petit devant V_0, alors le terme dominant, dépendant du temps, est le terme à la fréquence ω. Cette pression périodique est susceptible d'engendrer une vibration de la membrane à la même fréquence. Du fait que la pression agit uniformément sur la membrane, cette dernière peut être très mince, et on retrouve ainsi quelques-uns des avantages déjà rencontrés à propos des microphones électrostatiques.

Nous avons vu que ces transducteurs, purement capacitifs, présentaient une impédance très élevée, particulièrement à basse fréquence. Cela impose, ici encore, de réaliser une adaptation. Elle est cependant assez délicate dans le cas de haut-parleurs, car les puissances mises en œuvre sont beaucoup plus importantes que dans le cas du microphone. Néanmoins, ce problème résolu, ces transducteurs offrent d'excellentes performances.

Les grandes dimensions des panneaux radiants ainsi réalisés peuvent parfois se traduire par des diagrammes de directivité assez étroits aux fréquences élevées. Pour les écouteurs, le problème de puissance se pose en des termes moins draconiens, et les systèmes électrostatiques devraient connaître un développement assez important.

De plus, le handicap d'avoir à polariser le condensateur avec une tension élevée peut être évité par le même biais que celui qui est utilisé dans les microphones, en se servant d'une membrane électret.

Les systèmes piézo-électriques

Nous avons déjà vu à propos des microphones piézo-électriques les propriétés intéressantes des corps piézo-électriques. Nous ne décrirons pas en détail le fonctionnement de générateurs sonores à effet piézo-électrique : ils mettent à profit l'effet piézo-électrique inverse : en soumettant à un champ électrique un corps piézo-électrique, ce dernier se déforme mécaniquement. C'est probablement les polymères piézo-électriques qui feront déboucher ce type de systèmes vers des applications pour le grand public.

L'ionophone

Ce système unique a été mis au point par S. Klein

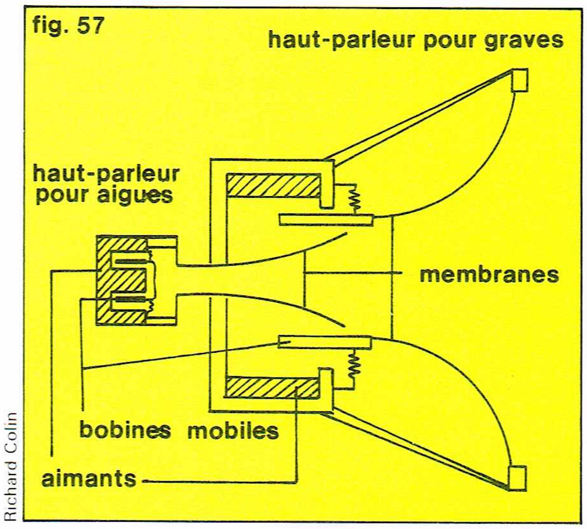

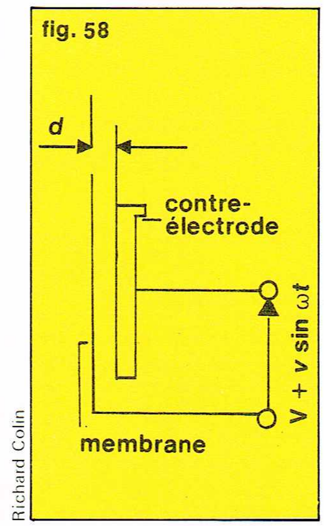

▼ *A gauche, figure 57 : représentation schématique d'un haut-parleur électrodynamique.*

▲ *Ci-dessus, figure 58 : schéma de principe d'un générateur sonore électrostatique.*

en 1952. Il est fondé sur l'idée que, dans un haut-parleur, des problèmes apparaissent du fait que l'énergie électrique agit sur un système mécanique et que ce système mécanique doit être couplé à l'air. De là à chercher une solution pour faire agir directement la commande électrique sur l'air, il n'y avait qu'un pas que S. Klein a franchi.

Une cellule de quartz située à la base d'un cornet acoustique est soumise à un rayonnement haute tension et haute fréquence (27 MHz) de telle sorte que, dans cette cellule, l'air s'ionise. En modulant l'amplitude de cette tension par le signal à reproduire, on provoque des variations pratiquement instantanées de la température et de la pression dans la cellule de quartz. Les variations de pression se transmettent à travers le cornet acoustique dans l'air ambiant. Il est remarquable de noter que ce dispositif ne comprend aucune pièce mobile. La réponse est donc quasi parfaite, seulement limitée par les caractéristiques du cornet acoustique. Le domaine de fréquences couvertes est compris entre 2 500 Hz et des fréquences qui dépassent la limite de l'audibilité. L'extension du procédé vers les basses fréquences pose néanmoins de sérieux problèmes, compte tenu du volume que devrait alors avoir le cornet acoustique.

Il est également à noter que ce système émet des rayonnements électromagnétiques à 27 MHz modulés en amplitude. Ce peut être là une source sérieuse de parasites pour les communications hertziennes et les ondes radio et télévision. Pour éviter ces effets, il suffit de réaliser un blindage électrique.

Un système fondé sur une idée voisine a été proposé par D. M. Tombes. Il s'agit du **haut-parleur à ions.** Une tension continue, appliquée entre deux électrodes, produit une décharge électrique dans l'air. A cette décharge est

◀ *Page ci-contre, en bas, figure 56 : diagramme de directivité du microphone à électret. L'enregistrement a été fait à 650 Hz, en utilisant une échelle logarithmique. Le rayon est gradué de 0 à 50 db. On constate que la sensibilité du microphone pour une onde venant de l'arrière (180°) est inférieure de 33 db à la sensibilité pour une onde venant de l'avant (0°). Si une échelle linéaire avait été utilisée, le signal enregistré pour 180° serait pratiquement nul.*

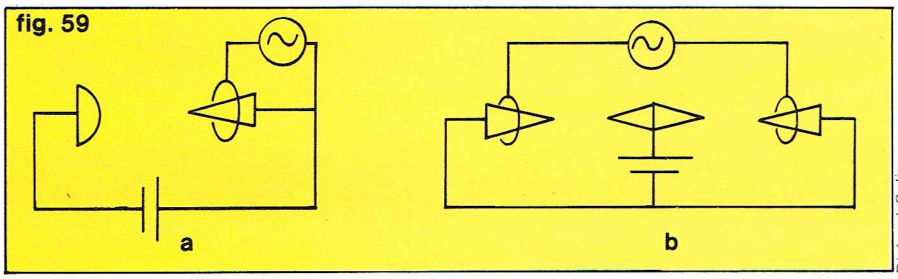

▲ *Figure 59 ; représentation schématique d'un* haut-parleur à ions : a, *simple ;* b, *symétrique.*

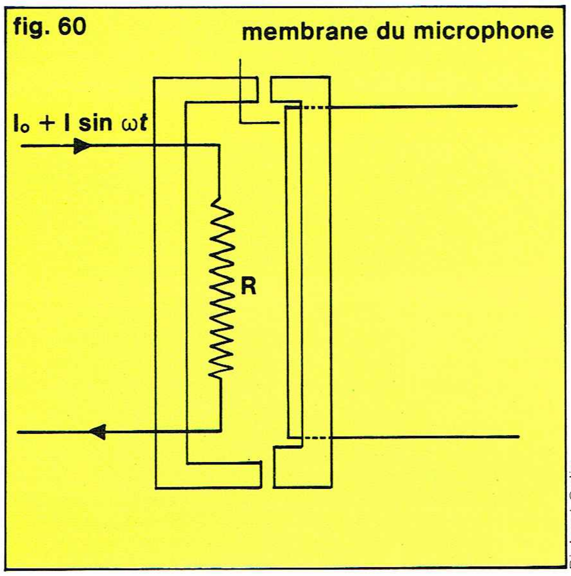

▶ *Figure 60 : principe du* thermophone *de* Wente.

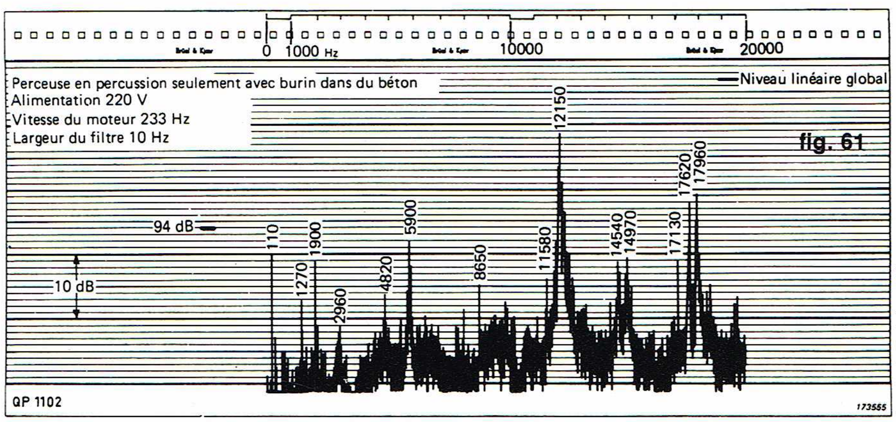

▲ *Figure 61 : spectre en fréquence du bruit d'une perceuse à percussion dont le fleuret est dans du béton.*

associé un déplacement de molécules d'air : le « vent » de la décharge. On ajoute une troisième électrode portée au même potentiel moyen que l'une des deux précédentes mais à un potentiel instantané proportionnel à l'information à transmettre. Cette tension module la décharge électrique et produit une modulation de la pression de l'air. On a ainsi un haut-parleur (*fig.* 59a). Afin de symétriser les effets, il est possible de doubler le montage afin de réaliser un dispositif du type « Push Pull » (*fig.* 59b). Actuellement, la puissance acoustique produite est assez faible, mais la courbe de réponse est très plate, et ce jusqu'à des fréquences qui dépassent la limite d'audibilité.

Les méthodes de mesure en acoustique

Nous avons déjà vu comment l'invention du microphone à condensateur par Wente avait ouvert la voie aux mesures acoustiques. Le microphone à condensateur était en effet un instrument de mesure précis, calibrable, reproductible, qui présentait de très nombreux avantages par rapport au disque de Rayleigh.

Le premier problème qui se pose lorsqu'on veut utiliser un microphone pour effectuer des mesures est celui de l'étalonnage. Pour cela, diverses méthodes ont été et sont utilisées, toutes fondées sur l'idée qu'on exerce sur la membrane du microphone une pression connue. On mesure la réponse électrique correspondante à cette pression et on effectue cette opération pour diverses fréquences.

Un des premiers dispositifs utilisés pour étalonner les microphones de mesure a été le **thermophone**, également inventé par Wente. Un petit volume fermé (*fig.* 60) renferme la surface sensible du microphone. Dans ce volume, se trouve un conducteur de résistance R traversé par un courant électrique comprenant un terme constant I_0 et un terme alternatif $I \sin \omega t$. Le flux de chaleur dégagée est :

$$R\,(I_0 + I \sin \omega t)^2 = R\left(I_0^2 + \frac{I^2}{2}\right) + 2\,RI_0\,I \sin \omega t - RI^2 \cos 2\,\omega t$$

Le premier terme correspond à un flux de chaleur constant. Si de plus $I \ll 2\,I_0$, le gaz enfermé dans la cavité subit une variation de pression périodique qu'on peut analytiquement calculer en fonction des paramètres physiques du système.

En fait, une autre méthode a été très vite adoptée. Elle consiste à exercer sur la membrane du microphone une pression électrostatique connue. On peut reprendre pour cela les expressions calculées dans le paragraphe consacré aux haut-parleurs électrostatiques.

La membrane est soumise à une pression de fréquence ω qui a pour valeur :

$$p_\omega = \frac{\varepsilon_0 V v}{d^2} \sin \omega t$$

Si $V = 1\,000$ volts, $d = 1$ mm, $v = 10$ volts, on trouve :

$$p_\omega = 0{,}088 \sin \omega t, \text{ exprimé en pascals.}$$

En faisant varier la fréquence du générateur de tension, fournissant v, on peut faire l'étalonnage de la sensibilité du microphone aux diverses fréquences et l'utiliser ensuite pour les mesures de pressions acoustiques.

De nombreux raffinements des méthodes d'étalonnage ont été apportés au cours des années. Nous mentionnerons sans la décrire la *méthode de réciprocité* qui utilise trois microphones tour à tour comme détecteurs et émetteurs sonores.

A partir du moment où l'on dispose d'un instrument calibré en pression, de nombreuses mesures peuvent être effectuées. Tout d'abord des mesures de bruit ou d'intensité. Pour cela, on se fixe le domaine de fréquence à analyser, par exemple le domaine sensible de l'oreille humaine, et l'on mesure l'intensité ou la pression sonore dans cette bande de fréquence. On peut améliorer la mesure en tenant compte, d'une part des courbes de sensibilité de l'oreille humaine en fonction de la fréquence, d'autre part des effets de masque. Enfin on peut faire une analyse très complète en déterminant le spectre du bruit à étudier. Cette information est la plus riche.

Sur la *figure* 61, on voit le spectre en fréquence d'une perceuse à percussion en pleine action dans le béton. On constate sur cet exemple des maximums de bruit à 12 150 Hz, 17 620 Hz et 17 960 Hz.

Dans un autre type de mesure, on désire caractériser soit des microphones, soit des haut-parleurs. On se place alors dans une chambre isolée des bruits extérieurs par des parois très absorbantes. Une telle chambre est appelée *chambre sourde* ou *chambre anéchoïde*.

Caractérisation d'un microphone

Pour déterminer la *réponse en fréquence* d'un microphone, on réalise le montage décrit sur la *figure* 62. Un oscillateur balayé en fréquence synchronise le déroulement du papier d'un enregistreur. Le signal issu de l'oscillateur est amplifié et alimente un haut-parleur situé dans la chambre sourde. Le microphone à tester est placé dans l'axe du haut-parleur et est relié à un amplificateur de mesure. La tension de sortie de cet amplificateur est enregistrée. Afin d'éliminer les défauts du haut-parleur ou d'autres éléments du système, un microphone de mesure (microphone de référence) est placé à proximité immédiate du microphone à tester. Il est relié à un second amplificateur de mesure dont la tension de sortie devrait être constante (si la pression acoustique au niveau des microphones était constante). Au cas où cette tension varierait en fonction de la fréquence, un système d'asservissement modifie le gain de l'amplificateur de puissance qui ali-

mente le haut-parleur, afin de ramener la tension issue du microphone de référence à la valeur préétablie correspondant à la pression à laquelle on désire faire la mesure. C'est en utilisant de tels systèmes que les courbes présentées au chapitre sur les microphones ont été réalisées.

Pour mesurer les *caractéristiques de directivité* des microphones, on utilise un montage similaire, mais au lieu de balayer la fréquence de l'oscillateur, on fixe cette dernière à une valeur déterminée, et l'on fait tourner de 360° le support du microphone à étudier. Cette rotation est synchronisée avec la rotation d'un disque de papier sur l'enregistreur.

De très nombreuses autres mesures peuvent être effectuées, par exemple, l'absorption acoustique de matières diverses en fonction de la fréquence, etc. Nous ne les citerons pas.

Le domaine des mesures en acoustique, bien qu'il soit déjà ancien, est en ouverture permanente. L'amélioration des conditions d'enregistrement et de reproduction des sons, et de la musique en particulier, la prise de conscience des problèmes de pollution par le bruit, voici simplement deux facteurs qui feront que les mesures acoustiques seront sans doute l'objet, dans les années qui viennent, d'un développement important.

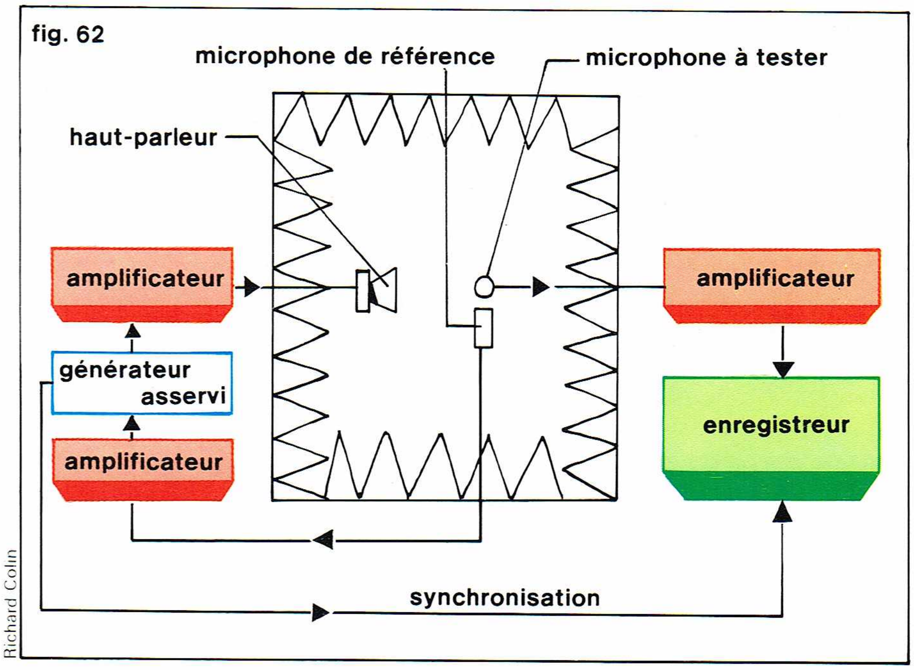

Richard Colin

▲ ***Figure 62 : schéma d'un dispositif de mesure de la réponse en fréquence d'un microphone.***

Acoustique architecturale

Nous avons déjà vu qu'au Ier siècle avant J.-C., Marcus Vitruvius Pollio avait écrit un long traité d'architecture dans lequel il s'intéressait particulièrement à l'acoustique architecturale. Ce n'est en fait qu'au début du XXe siècle que W. C. Sabine donna à cette branche de l'acoustique ses lettres de noblesse. Il mit au point un ensemble de méthodes de mesure de l'absorption et de la réflexion des sons et définit un certain nombre de critères permettant de caractériser les qualités acoustiques d'un local.

De manière pratique, les techniciens de l'acoustique sont amenés à étudier, lors de la construction d'édifices, les deux problèmes importants qui sont :

— de réaliser un bon isolement acoustique entre un local et un local voisin ou entre un local et l'extérieur ;

— d'assurer (en particulier pour certains locaux comme les salles de conférences, les amphithéâtres, les auditoriums, les salles de théâtre et de cinéma) une diffusion uniforme du son en tous les points du local.

Problème de l'isolement acoustique

Ce premier problème devrait être facilement résolu si les constructeurs avaient toujours présentes à l'esprit quelques lois élémentaires de l'acoustique, en particulier que, l'atténuation du son étant faible dans un milieu élastique de faible épaisseur (cloison mince par exemple), il est souhaitable d'interposer entre des matériaux durs qui transmettent bien le son (indispensables à la rigidité du local) des matériaux qui absorbent fortement le son comme le feutre ou le polystyrène expansé.

C'est le principe de la *dalle flottante :* pour isoler acoustiquement un local du local situé au-dessus de lui, on peut procéder de la manière suivante : au-dessus du plafond en béton, on met une couche de feutre ou de polystyrène expansé qui arrête les vibrations (cette technique n'est toutefois réellement efficace que si les tuyaux qui passent à travers cette couche sont également isolés de façon à les empêcher de transmettre les vibrations). Au-dessus de cette couche absorbante se trouve une dalle de béton dite pour cette raison dalle flottante, qui constitue la base du local supérieur.

En ce qui concerne les parois divisant un local, elles devraient être construites en briques pleines ou perforées dans les fentes desquelles on aurait placé un matériau fortement absorbant pour empêcher la propagation du son. On peut aussi obtenir un bon isolement avec des tapisseries et plus particulièrement avec des tentures en tissu non directement posées sur les murs. On peut également fixer aux parois des dalles de matériaux spéciaux (fibreux ou poreux) de quelques millimètres d'épaisseur. Dans certaines habitations luxueuses, les parois de séparation sont doubles, et, dans les vides de quelques centimètres d'épaisseur, on verse des substances granuleuses peu élastiques comme du sable. Dans d'autres cas, les parois sont doublées avec du cuir ou des déchets de laine et de coton, comme on le voit dans des cabines téléphoniques ou sur les portes de salles de cinéma ou de théâtre. Récemment, les progrès de la chimie ont permis la production de résines particulières dotées d'un fort pouvoir d'absorption du son.

Problème de la diffusion uniforme du son

Ce problème est bien plus délicat et demande une étude approfondie des différents facteurs entrant en jeu. Les propriétés acoustiques d'un local sont en fait déterminées par les réflexions des ondes sonores sur les murs, le plafond, le plancher, les meubles et les spectateurs présents dans le local. La diffusion uniforme du son demande en premier lieu que le local ait une forme opportune. Le paramètre dont dépend la sonorité d'un local est le *temps de réverbération* τ défini comme l'intervalle de temps nécessaire pour qu'un son de fréquence donnée voie son intensité réduite de 60 db après diverses réflexions. Si dans le local l'absorption est grande, τ est très petit, le son est perçu avec difficulté, et on parle de *local sourd ou anéchoïde ;* si l'absorption est faible, τ est très grand, et on a le pénible phénomène de réverbération. Une formule empirique pour l'évaluation de τ en fonction des paramètres du local est :

$$\tau = \frac{0{,}161\ V}{(S\alpha + 4\ mV)}$$

où V est le volume du local en m^3, S la surface totale exposée au son en m^2 et m et α respectivement les coefficients moyens d'absorption du son par l'air et par les matériaux

▼ ***Gravure ancienne de l'expérience permettant d'établir les lois de l'acoustique dans les grandes pièces (Bibliothèque nationale).***

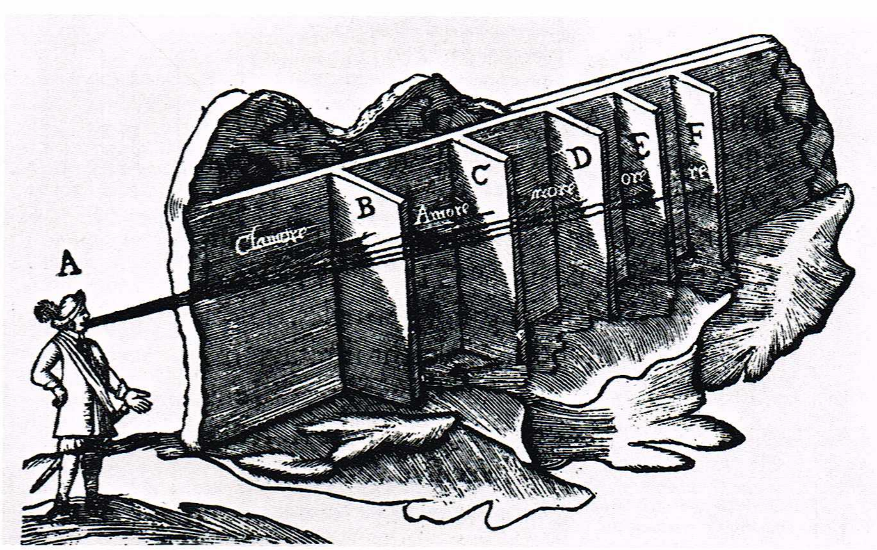

Snark International

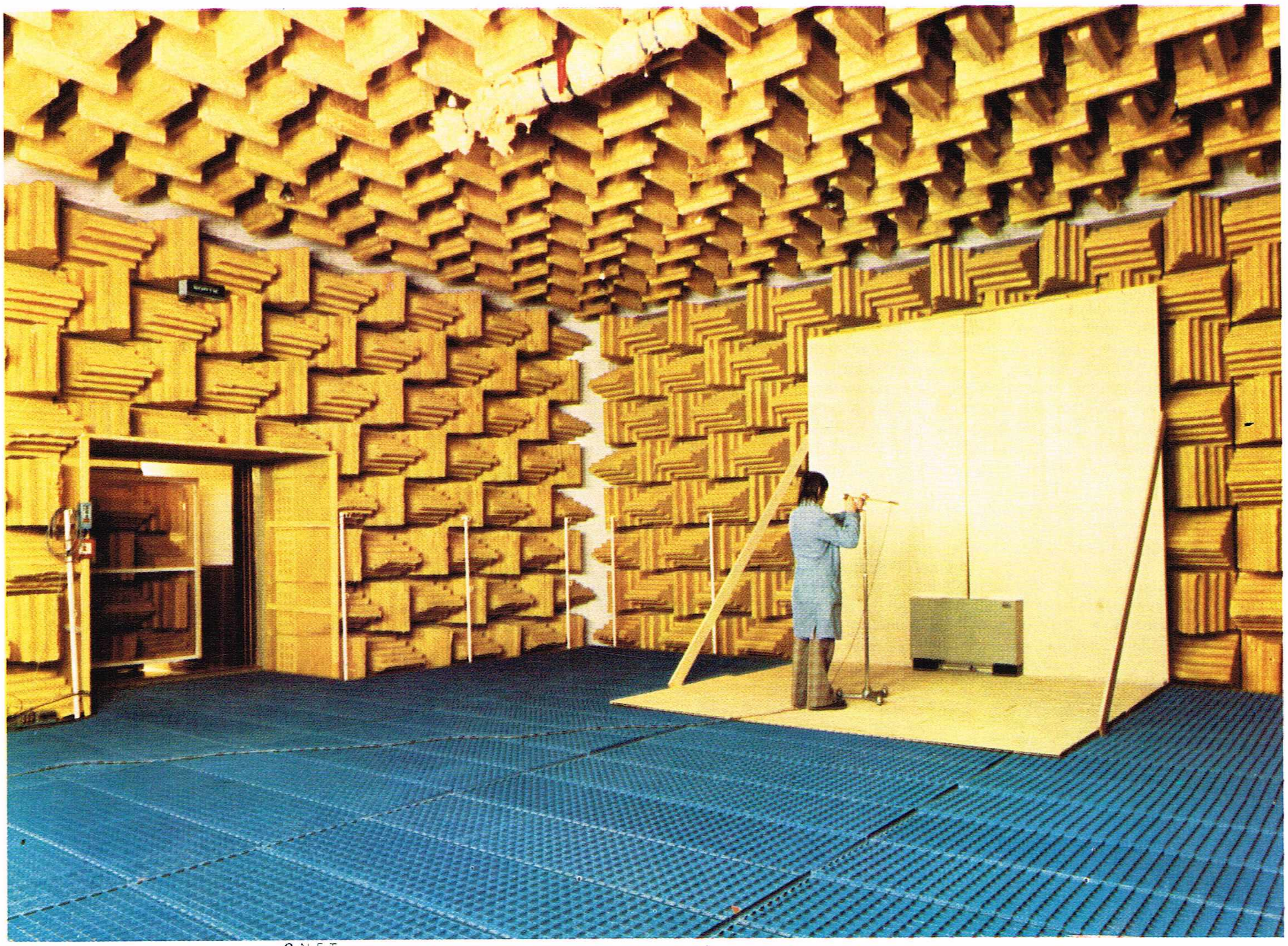

C.N.E.T.

▲ *Chambre anéchoïde du Centre national d'étude des télécommunications à Lannion.*

Matériaux	Coefficient α à					
	128 Hz	256 Hz	512 Hz	1 024 Hz	2 048 Hz	4 096 Hz
Linoléum sur béton	0,02		0,03		0,04	
Moquette de 8 mm sur feutre de 3 mm	0,11	0,14	0,37	0,43	0,27	0,25
Moquette caoutchoutée de 5 mm sur béton	0,04	0,04	0,08	0,12	0,03	0,10
Draperies de velours	0,05	0,12	0,35	0,45	0,38	0,36
Mêmes draperies sur surface moitié	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65
Dalles de liège de 20 mm	0,08	0,02	0,08	0,19	0,21	0,22
Les mêmes dalles, cirées et polies	0,04	0,03	0,05	0,11	0,07	0,02
Mur de brique de 45 cm	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07
Le même mur, peint	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Verre	0,03		0,03		0,03	
Marbre	0,01		0,01		0,01	
Sable sec sur 10 cm	0,15	0,35	0,40	0,50	0,55	0,80
Eau	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Bois de pin sur 20 mm	0,10	0,11	0,10	0,08	0,08	0,11
Laine de verre sur 25 mm	0,25	0,40	0,70	0,90	0,80	

Tableau V — Coefficient d'absorption du son pour quelques matériaux

▶ *Tableau V : coefficient d'absorption du son pour quelques matériaux.*

présents, coefficients définis comme le rapport entre l'énergie sonore absorbée et celle reçue. τ est exprimé en secondes. Pour des locaux de dimensions moyennes (jusqu'à 10 000 m^3) et pour des fréquences inférieures à 2 000 Hz, le terme en *m* est négligeable, et la formule précédente devient :

$$\tau = \frac{0{,}161\ V}{S\alpha}$$

Pour avoir une idée de l'ordre de grandeur des coefficients d'absorption de différents matériaux à diverses fréquences, on peut consulter le *tableau* V.

Comme on peut le voir d'après ce tableau, le coefficient d'absorption dépend sensiblement de la fréquence du son et augmente avec elle pour presque tous les matériaux, et donc le temps de réverbération τ diminue lorsque la fréquence augmente. Comme, durant une conférence ou un concert symphonique, les fréquences en jeu sont nombreuses, il est pratique de donner les valeurs de α et donc de τ à une fréquence moyenne choisie habituellement autour de 2 000 Hz. Pour obtenir une bonne audition, il est souhaitable que τ soit compris entre 1 et 3 s. En général, le temps de réverbération d'un local est naturellement trop grand, ce qui produit de désagréables queues sonores, qu'on peut diminuer en dotant le local de tapis, draps et tentures, et en escomptant aussi le pouvoir absorbant du public.

Compte tenu des grandes différences de valeurs de α pour différents matériaux, la relation qui donne τ devient très imprécise lorsqu'il y a plusieurs matériaux d'absorption acoustique différente dans le local. C'est pour cela qu'on préfère calculer le produit $S\alpha$ pour chaque matériau, faire la somme des différents produits, et donc écrire :

$$\tau = \frac{0{,}161\ V}{\Sigma_i S_i \alpha_i}$$

où S_i est la surface exposée au son du matériau ayant pour coefficient d'absorption α_i. La somme est étendue aux *n* types de matériaux présents dans la salle.

Enregistrement et reproduction des sons

Nous avons vu qu'un phénomène sonore résulte de la propagation, sous forme d'ondes longitudinales, d'une altération (pression acoustique) de la pression préexistante. L'enregistrement du son est la technique grâce à laquelle la variation de la pression acoustique en fonction du temps est transcrite sur un support. Par exemple, la pression acoustique peut être transformée en une « trace », mécanique ou magnétique dans les deux types d'enregistrement les plus importants, alors que le temps est transformé en une dimension caractéristique du support mobile, longueur du sillon du disque ou longueur du ruban magnétique.

Dans la reproduction, le son est émis par lecture du support porteur de l'information. La coordonnée d'espace du support le long de laquelle est distribué l'enregistrement redevient coordonnée de temps du phénomène sonore.

Enregistrement mécanique

Nous avons déjà vu comment le phonautographe de Scott, puis, en 1877, le phonographe d'Edison utilisaient un diaphragme pour assurer l'adaptation des impédances entre l'air en vibration et un stylet enregistreur ou lecteur. Dans le phonographe d'Edison, un système d'horlogerie maintenait en mouvement de rotation uniforme un tambour cylindrique recouvert de cire sur laquelle l'extrémité en saphir du stylet enregistreur s'enfonçait plus ou moins selon que le diaphragme était soumis à une surpression ou à une sous-pression. Le mouvement se traduisait ainsi par un sillon profond et large pour les surpressions. Un tel dispositif transforme la modulation de la pression de l'air en une modulation de profondeur et de largeur du sillon. Pour la reproduction, on fait tourner le cylindre dans le même sens, et c'est le diaphragme qui est entraîné par la pointe de saphir et qui, ainsi, réémet le son.

Après Edison, les progrès sont rapides ; d'abord l'utilisation d'un cornet acoustique permet d'améliorer le couplage entre l'air et le diaphragme et d'augmenter l'intensité du son, puis en 1897, avec Berliner, on passe du tambour cylindrique au disque avec un sillon en spirale modulé en profondeur ; on peut ainsi reproduire des disques par un procédé galvanoplastique dont le principe est le même que celui utilisé actuellement.

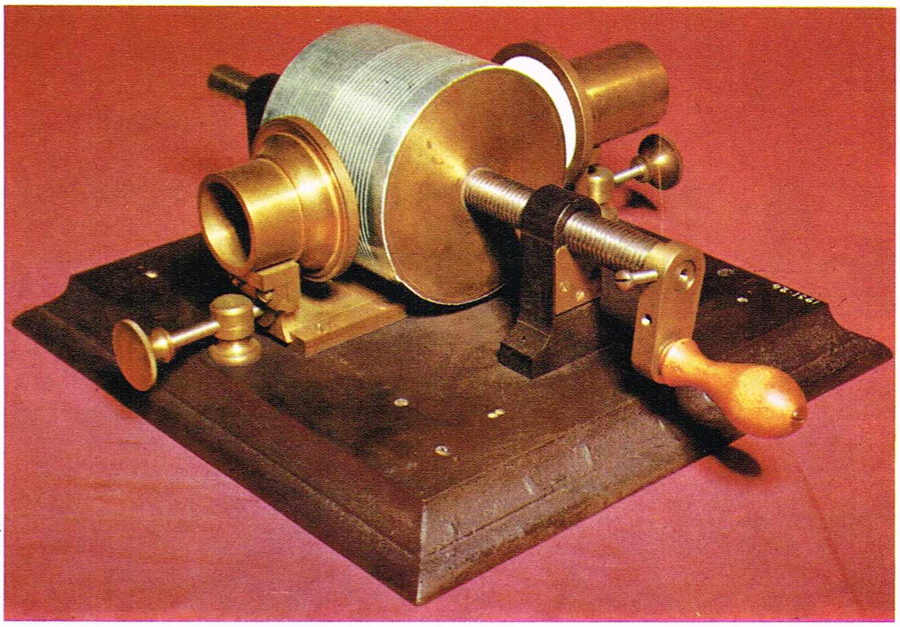

C. Bevilacqua

▲ ***Le phonographe d'Edison (Musée britannique des sciences, Londres).***

Après la Première Guerre mondiale, le développement de l'électronique permet de découpler la fonction prise de son de la fonction gravure, en interposant entre les deux une chaîne d'amplification électronique. Cela permet d'optimiser la prise de son en utilisant des microphones de haute performance (microphones à condensateur) et d'optimiser la fonction gravure par des dispositifs électromécaniques appropriés. Vers 1920, la forme du sillon évolue : d'une modulation en profondeur on passe à une modulation en largeur. En ce qui concerne la reproduction du son, l'électrophone apparaît : il est composé d'une table de lecture, sur laquelle tourne le disque, d'une tête de lecture (qui transforme la modulation de dimension du sillon en modulation d'une tension électrique), d'une chaîne d'amplification électronique et de haut-parleurs.

Dans les techniques actuelles d'enregistrement, on utilise en général des enregistrements intermédiaires, magnétiques. La gravure sur le disque ne se fait qu'après dosage des divers signaux fournis par l'enregistrement sur bande magnétique. Cela permet de contrôler l'enregistrement, et éventuellement de le corriger.

Le dispositif fondamental pour la reproduction est la tête de lecture constituée d'une pointe (de saphir ou de diamant) reliée à un transducteur, qui transforme la vibration mécanique de la pointe en variation d'un signal électrique. Les transducteurs utilisent les mêmes principes que ceux décrits pour les microphones ; les plus utilisés sont de type *piézo-électrique* (cristal ou céramique), à *bobine mobile*, à *fer mobile* et à *électret*. La tension électrique ou le courant fourni par la tête de lecture est amplifié par un préamplificateur, puis par un amplificateur de puissance qui alimente le haut-parleur.

Afin d'améliorer les caractéristiques des sons produits, on doit satisfaire les critères de réponse en fréquence déjà considérés lors de l'étude des transducteurs.

Il est également nécessaire que les distorsions (non-linéarités) soient très faibles, car elles peuvent se traduire par une altération du timbre (production de parasites). Le bruit de fond d'origine électrique ou mécanique doit aussi être minimisé ; c'est cette considération qui a conduit à la recherche de matériaux très peu granuleux pour la fabrication des disques. Cela a permis de passer d'une vitesse de rotation de 75 tours par minute à des vitesses plus lentes de 33 tours 1/3 ou 16 tours 2/3 par minute avec une augmentation correspondante de la durée de l'enregistrement.

Bien que les améliorations techniques diverses aient permis d'atteindre des vitesses de rotation de disques aussi basses que 16 tours 2/3 par minute, on conserve les vitesses de rotation de 45 et 33 tours par minute pour la haute fidélité.

Kerdiles - Rapho

▲ *Pupitre de commande d'un studio d'enregistrement de Radio Monte-Carlo.*

▼ *Un acousticien du début du siècle recueillant les cris d'une marchande d'asperges dans un phonographe muni d'un cornet acoustique.*

Boyer - Viollet

La fabrication actuelle des disques commerciaux s'effectue à partir du disque original, en aluminium recouvert de matière plastique, obtenu à partir de l'enregistrement magnétique, par un procédé galvanoplastique. On obtient une deuxième copie métallique positive de ce disque (c'est-à-dire telle que les reliefs sont transformés en creux) à partir de laquelle sont fabriquées les matrices définitives utilisées pour l'impression des disques commerciaux.

Enregistrement magnétique

La technique d'enregistrement magnétique prit naissance, en 1892, avec les travaux de W. Poulsen, mais c'est seulement en 1930 que l'Allemand Stille donna à l'enregistrement sa conception actuelle ; le support mobile était un ruban d'acier qui se déroulait à partir d'une bobine débitrice et qui se réenroulait sur une bobine réceptrice passant, lors de la partie rectiligne du trajet, à proximité de trois têtes (d'effacement, d'enregistrement et de reproduction). En 1931, on passa au ruban de cellulose (F. Pfeumer) ; en 1941, on introduisit le principe de l'effacement et de la préaimantation (ou polarisation) haute fréquence (M. Camras et D. E. Woobridge).

Actuellement, on utilise fréquemment comme support mobile un ruban de téréphtalate de polyéthylène (mylar) recouvert sur une face de matériau magnétique.

Pour clarifier les problèmes relatifs à l'enregistrement magnétique, considérons le cas du *son pur* et donc d'un courant sinusoïdal susceptible de créer une aimantation le long du ruban. Au cours de l'enregistrement, on a une aimantation qui suit la même loi que le courant, c'est-à-dire qui change de sens chaque fois que le courant s'annule ; on obtient ainsi une succession de régions assimilables à des aimants élémentaires de sens alternés avec une périodicité égale à $v\ f$ (v est la vitesse du ruban, f la fréquence du son) et une aimantation, fonction croissante du courant. Au cours de la reproduction du son, la variation d'aimantation crée une variation du flux dans le circuit magnétique de la tête de reproduction, donc une force électromotrice induite et une tension aux bornes de la bobine. Ce signal, convenablement amplifié, peut être envoyé sur un haut-parleur qui reproduit le son pur d'origine. Si le son d'origine n'est pas un son pur, le phénomène est analogue et résulte de la superposition de sons purs.

Le fait que la longueur des aimants élémentaires augmente avec la vitesse et diminue avec la fréquence fait que la fidélité de l'enregistrement croît avec la vitesse, mis à part quelques phénomènes de distorsion ; les vitesses normalement utilisées sont : 4,75, 9,5, 19 et 38 pouces/mn (cette unité pratique, pouce/mn, est couramment utilisée).

Dans l'enregistrement magnétique, le problème de la fidélité est rendu difficile, du fait que le processus décrit est non linéaire : l'aimantation résiduelle des grains d'oxyde de fer n'est pas proportionnelle au courant d'aimantation. La solution adoptée pour résoudre ce problème est celle de la *polarisation* ou *préaimantation*. Au courant correspondant au signal à enregistrer, on ajoute soit le courant haute fréquence utilisé pour l'effacement, soit un courant continu de façon que l'aimantation soit déplacée vers la zone centrale de la courbe d'aimantation où la linéarité est bien meilleure ; on réduit ainsi de beaucoup la distorsion harmonique.

Le magnétophone

De ce qui vient d'être dit, on peut prévoir quels seront les éléments principaux d'un magnétophone. On trouve tout d'abord deux bobines : la *bobine débitrice* qui contient le ruban à enregistrer ou à écouter et la *bobine réceptrice* qui contient le ruban enregistré ou écouté.

Pendant l'enregistrement ou l'écoute, le ruban se déroule devant trois têtes successives (qui sont parfois rassemblées). La première sert à effacer ce qui était éventuellement enregistré et parfois à polariser la bande, la seconde est la tête d'enregistrement et la troisième la tête de lecture. La vitesse de déroulement doit être très régulière pour éviter de créer des modulations parasites de fréquence. Un régime de déroulement rapide est utilisé pour le rembobinage. Dans ce régime, le ruban est écarté des têtes précédemment décrites.

Un magnétophone comprend en outre un oscillateur de fréquence ultrasonore qui fournit le courant d'effacement ou celui de préaimantation, un préamplificateur d'enre-

gistrement qui sert à adapter les impédances électriques entre les dispositifs fournissant le signal à enregistrer et les têtes d'enregistrement, un indicateur électronique de niveau qui sert à contrôler les niveaux d'enregistrement et de reproduction afin de les maintenir entre des limites données. Des préamplificateurs de lecture sont incorporés à l'appareil qui comprend parfois en outre des amplificateurs de puissance et des haut-parleurs.

Stéréophonie

La stéréophonie est une technique de reproduction ou de diffusion des sons qui a pour but de donner à l'auditeur la sensation que produiraient les sources sonores d'origine.

Il faudrait théoriquement un grand nombre de microphones distribués dans l'espace à proximité des sources, reliés à des appareils d'enregistrement et de reproduction connectés chacun à des haut-parleurs dont les positions correspondraient à celles des microphones. En pratique, une reproduction très améliorée est produite avec seulement deux canaux. Deux microphones recueillent les sons provenant principalement pour l'un de la zone gauche de l'ensemble des sources, et pour l'autre de la zone droite. Lors de la reproduction, les signaux électriques alimentent deux haut-parleurs situés à distance convenable (de 2 à 4 m) dans les deux parties différentes de la salle d'écoute, et parfois un troisième haut-parleur central pour les fréquences jusqu'à 300 Hz.

Selon ce critère, il serait suffisant de n'utiliser que deux micros pour la prise de son, mais on obtient des résultats meilleurs, du point de vue musical, en effectuant la prise de son avec davantage de micros et en répartissant entre les canaux les signaux électriques issus de chaque micro, de façon à optimiser l'impression à l'écoute. Pour avoir une reproduction fidèle, il faut que les deux canaux soient les plus semblables possible avec la même courbe de réponse. L'insertion des deux canaux d'enregistrement a posé des problèmes plus difficiles à résoudre dans le cas de l'enregistrement sur disque que dans le cas de l'enregistrement magnétique.

Dans le cas du disque, il s'agit en fait de recueillir les signaux provenant des deux canaux avec une parfaite simultanéité, ce qui revient à enregistrer en même temps les deux signaux sur un disque unique. Les premiers disques stéréophoniques avaient deux sillons indépendants juxtaposés qu'il fallait utiliser avec deux pointes juxtaposées. On était ensuite passé à un sillon unique avec deux gravures à 90°, une en profondeur et l'autre latérale correspondant chacune à un canal. La pointe recevait ainsi des sollicitations mécaniques dans les deux directions et se déplaçait donc selon la résultante des deux ; la tête de lecture possédait des organes sensibles aux composantes du mouvement selon les deux directions. Comme on ne réussissait pas à rendre identiques les caractéristiques des deux canaux à cause de la différence des systèmes mécaniques, on est passé actuellement au système dit 45/45 ; chacun des deux canaux est gravé par déviation latérale à 45° de part et d'autre des deux parois du sillon de façon que le sillon présente ses deux parois ondulées de façon différente.

Dans le mode d'enregistrement magnétique, la stéréophonie pose des problèmes plus faciles à résoudre. Les magnétophones stéréophoniques sont en fait à deux pistes parallèles avec un seul ruban magnétique ; les deux pistes sont enregistrées et reproduites simultanément mais séparément, chacune ayant son propre appareil d'enregistrement et de reproduction indépendant.

Les techniques d'enregistrement et de reproduction des sons sont en constante progression. Outre les progrès de l'électronique et de la mécanique, un nombre plus grand de canaux est parfois utilisé (quadriphonie).

Les infrasons

Les ondes infrasoniques sont les ondes de fréquences plus faibles que la limite inférieure d'audibilité, c'est-à-dire d'environ 20 Hz. Ces ondes sont susceptibles de se propager à des distances considérables de leur point de formation (milliers de kilomètres dans l'atmosphère). La vitesse de ces ondes est la même que celle des ondes acoustiques, mais, compte tenu de leur fréquence très basse, on les décrit en général par leur longueur d'onde ; ainsi une onde de 0,1 Hz a une longueur d'onde dans l'air de 3 400 m. Il est intéressant de noter que la modulation de pression associée à ces ondes dans l'atmosphère est en général nettement plus faible que les variations de pression purement climatiques dues aux vents et turbulences de l'air. Néanmoins, le caractère périodique et régulier des infrasons les rend faciles à reconnaître : il suffit pour cela d'avoir plusieurs détecteurs suffisamment éloignés les uns des autres pour ne pas être soumis aux mêmes turbulences accidentelles. En correlant les signaux issus de ces divers détecteurs, on annule les fluctuations indépendantes les unes des autres alors que les signaux dus à l'onde infrasonique s'ajoutent. Des ondes infrasoniques naturelles existent, produites par des phénomènes géophysiques. Il est intéressant de noter que la couche d'atmosphère comprise entre le sol et une altitude d'environ 50 km où existent des couches chaudes réfléchissantes constitue un véritable piège dans lequel les ondes infrasoniques peuvent se propager. Un certain nombre d'études sont poursuivies actuellement pour essayer de mieux connaître les phénomènes qui leur sont associés.

Les ultrasons

Les ondes ultrasonores sont les ondes de fréquences supérieures à celles du domaine audible. En pratique, elles débutent à environ 20 kHz. La limite supérieure en fréquence de ces ondes est, comme nous le verrons plus loin, constamment repoussée. En pratique, on peut distinguer les ondes de faible amplitude des ondes de forte amplitude dans la mesure où elles conduisent à des applications fondamentalement différentes.

Les *ondes de faible amplitude* sont propagées dans des milieux dans lesquels on cherche une information qui peut être une distance, une information scientifique, technique, médicale, etc. Elles ne modifient pas substantiellement les caractéristiques propres du milieu dans lequel elles se propagent.

Les *ondes de forte amplitude*, au contraire, sont utilisées pour produire des modifications de la matière en exploitant l'énergie importante qui leur est associée. Les applications sont par exemple le soudage, le nettoyage ou le forage par ultrasons. Ce peut être aussi l'accélération de processus chimiques, etc.

C'est Galton qui, en 1883, après avoir mis au point un sifflet (qui porte son nom) capable de produire dans l'air des vibrations de fréquence élevée, utilisa le premier ces ondes pour étudier la réponse en fréquence de l'oreille humaine.

La véritable naissance des ultrasons se situe néanmoins en 1915. Cette année-là, un projet de détection par ultrasons des sous-marins était présenté au ministre de la Marine par un ingénieur russe, Constantin Chilowski. Peu après, Paul Langevin, alors directeur des études de l'École supérieure de physique et de chimie de la ville de Paris, réalise, au laboratoire d'électricité générale de l'École, la première mise en évidence de propagation d'ondes ultrasonores à la fréquence de 40 000 Hz. Assisté de Chilowski et de deux de ses anciens élèves, M. Tournier et F. Holweck, il utilise comme émetteur un transducteur électrostatique (condensateur chantant) et comme détecteur un pendule de torsion.

Peu après, des essais eurent lieu dans la Seine, au pont National. Un an plus tard, Langevin mettait en application l'effet piézo-électrique découvert en 1880 par les frères Pierre et Jacques Curie.

A partir de ces travaux, les recherches et applications dans le domaine des ultrasons devaient connaître un essor irrésistible. En 1925, Pierce met au point un interféromètre à ultrasons utilisant un transducteur en quartz piézo-électrique. Les travaux de Pierce, suivis en 1928 par ceux de Herzfeld et Rice, montrent que l'interaction des ondes ultrasonores et de la matière permet des études des propriétés physiques des matériaux.

En 1932, Lucas et Biquard, en France, et Debye et Sears, aux États-Unis, découvrent simultanément le phénomène de diffraction des ondes lumineuses par le réseau périodique que constitue la succession des nœuds et des ventres de pression associés à une onde stationnaire ultrasonore.

En 1934, Sokolov met au point un dispositif de visualisation à ultrasons et ouvre ainsi le domaine du contrôle non destructif et de l'imagerie acoustique.

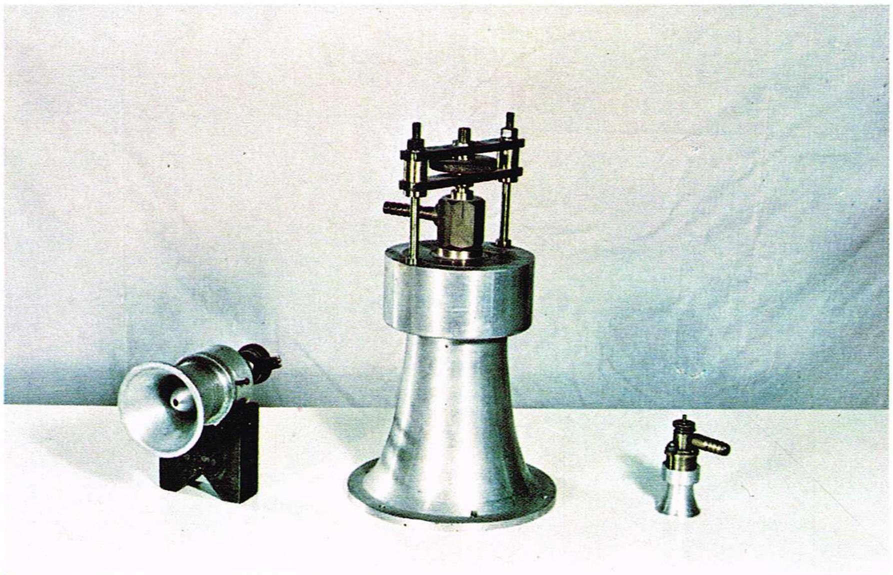

Centre national de la recherche scientifique - Laboratoire de mécanique et d'acoustique de Marseille

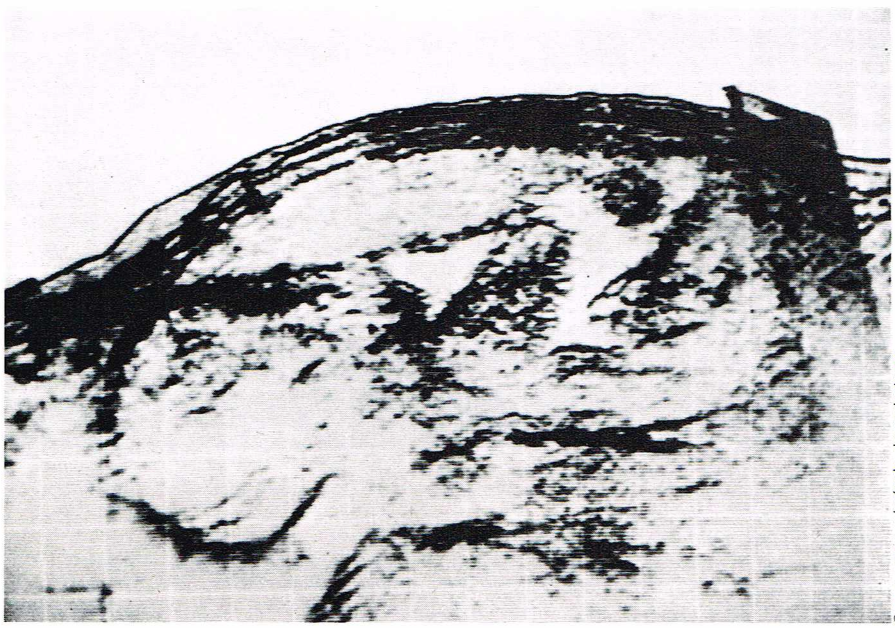

Compagnie générale de radiologie

▲ *En haut, sifflets Levavasseur, générateurs d'ultrasons. En bas, image d'un fœtus dans le ventre de sa mère réalisée avec un appareillage de visualisations à ultrasons par échographie; on distingue, outre le fœtus, le placenta, en haut.*

Après la Seconde Guerre mondiale, s'inspirant des techniques d'impulsions utilisées en radar, de nombreux chercheurs font évoluer rapidement les domaines d'application des ultrasons. Parallèlement, les fréquences utilisées ne cessent de s'élever.

Actuellement, les ondes ultrasonores sont utilisées dans un très grand nombre de domaines. En recherche fondamentale, afin d'étudier les propriétés de la matière, on la perturbe périodiquement à l'aide d'une onde ultrasonore. Outre les propriétés mécaniques des matériaux étudiés, on peut également obtenir des renseignements sur les propriétés électroniques. C'est ainsi que, grâce à l'utilisation d'ondes ultrasonores, un grand nombre de propriétés électroniques de métaux ont été déterminées (surfaces de Fermi, masses effectives, propriétés supraconductrices). Les ondes ultrasonores permettent également d'obtenir des informations très intéressantes sur les propriétés d'impuretés magnétiques distribuées dans des diélectriques. Dans un système caractérisé par une distribution discrète des énergies, il est possible de modifier les populations relatives des divers niveaux énergétiques par absorption ou émission de quanta d'énergie de vibration, c'est-à-dire de *phonons*. De même, les propriétés thermiques des matériaux, qui sont directement liées à l'existence dans les matériaux de phonons, peuvent être déterminées en étudiant la propagation d'ondes ultrasonores.

En visualisation, les ondes ultrasonores sont très utilisées : supposons que l'on envoie dans un milieu 1 une impulsion ultrasonore courte. Cette impulsion se propage dans le milieu jusqu'à la surface de séparation avec un autre milieu 2. Si les deux milieux ont des impédances acoustiques non égales, une partie de l'énergie est réfléchie et une partie est transmise. On peut donc recueillir un écho ultrasonore dont le retard τ par rapport à l'impulsion d'émission est directement lié à la distance de la surface réfléchissante d et à la vitesse v du son dans le milieu 1 : $\tau = 2\,d/v$.

Cette technique très utilisée permet, par exemple, de détecter des icebergs ou des poissons dans la mer; elle permet de détecter des défauts dans des pièces métalliques; elle permet également de visualiser les surfaces de discontinuité des impédances acoustiques dans le corps humain. Toute une instrumentation a été développée, pour assister les diagnostics médicaux.

Des appareillages d'échographie sont utilisés pour la recherche des kystes et des tumeurs.

De nombreuses techniques de visualisation par ondes ultrasonores sont en cours de développement, utilisant non plus le temps de propagation mais la *phase des ondes (holographie)*.

De nouveaux systèmes apparaîtront certainement au cours des prochaines années, en particulier consécutifs à la mise au point de transducteurs nouveaux (électrets).

Dans l'industrie, les ondes ultrasonores sont très utilisées, pour le soudage, le travail de pièces mécaniques, le nettoyage, l'accélération des réactions chimiques, etc. Nombreux sont les champs auxquels ces techniques peuvent être appliquées, et nombreux seront les développements de ces systèmes dans le futur.

Conclusion

Comme nous avons pu le voir tout au long de ce texte, l'acoustique apparaît comme une discipline à caractère très pluridisciplinaire. Quelle distance sépare l'étude des propriétés électroniques des métaux de la visualisation du fœtus dans le ventre de sa mère ! Quelle distance sépare la construction d'une bonne salle d'écoute de la mise au point d'un dispositif de détection sous-marine ! Quelle distance entre un appareil de soudage par ultrasons et un dispositif d'affaiblissement des sons ambiants pour l'amélioration de la qualité de la vie ! Et pourtant ce sont toujours les mêmes lois fondamentales qui sont utilisées : les règles qui régissent la propagation de perturbations périodiques, l'application de conditions aux limites particulières aux interfaces, les phénomènes d'interférence, d'adaptation d'impédances, etc.

L'acoustique est probablement l'une des sciences les plus anciennes que nous connaissions; c'est également l'une de celles qui ont actuellement une vie très active. Il suffit pour s'en convaincre de voir le nombre de centres de recherches, le nombre de publications, le nombre d'industries qui lui sont consacrés dans le monde.

BIBLIOGRAPHIE

BERANEK L. L., *Acoustic Measurements,* John Wiley and Sons Inc., New York. - BIQUARD P., *Paul Langevin scientifique, éducateur, citoyen,* éditions Seghers, Paris. — BLITZ J., *Fundamentals of Ultrasonics,* Butterworths, London. — CADY W. G., *Piezoelectricity,* Mc. Graw Hill, New York. — CRAWFORD F. S. Jr., *Berkeley Physics Course,* Mc. Graw Hill Book Company, New York. — DIEULESAINT E. et ROYER D., *Ondes élastiques dans les solides (applications au traitement du signal),* Masson, Paris. — GAYFORD M. L., *Electroacoustics,* Newnes-Butterworths, London. — HUNT F. V., *Electroacoustics,* Wiley, New York. — LEHMANN R., *les Transducteurs électro et électromécaniques, haut-parleurs et microphones,* éditions Chiron, Paris. — LEIPP E., *Acoustique et musique,* Masson, Paris. — LINDSAY R. B., *Acoustics, Historical and Philosophical Development,* Dowden, Hutchinson and Ross Inc., Straudsburg PA. — LUCAS R., *Acoustique,* éditions scientifiques Claude Bernard, Paris. — MASON W. P., *Physical Acoustics,* Van Nostrand, New York. — OLSON H. F., *Acoustical Engineering,* Van Nostrand, New York. — RAYLEIGH lord, *Theory of Sound,* Dover Publications, New York. — SABINE W. C., *Collected Papers on Acoustics,* Harvard University Press. — STEPHENS R. W. B. et BATES A. E., *Acoustics and Vibrational Physics,* Edward Arnold Publishers Ltd., London.

R.G. Everts - Rapho

▲ ***Météore en forme d'arc présentant les couleurs du spectre, l'arc-en-ciel résulte de la réfraction et de la réflexion des rayons du Soleil dans les gouttes d'eau.***

OPTIQUE

L'optique est la partie de la physique qui étudie la lumière. Ses résultats s'appliquent en fait à l'ensemble des radiations électromagnétiques. On distingue traditionnellement l'optique géométrique, qui concerne la propagation, la réflexion et la réfraction de la lumière, et l'optique physique, qui concerne les phénomènes d'interférence, de diffraction et de polarisation. Il faut y ajouter l'étude des interactions rayonnement-matière et les résultats modernes d'optique cohérente et d'émission stimulée. La théorie de la relativité, qui est fondée sur le fait que la vitesse de la lumière dans le vide est une constante universelle, est quelquefois rattachée à l'optique.

Nature de la lumière

Les idées des philosophes grecs anciens et arabes furent mises en forme pour la première fois par *Descartes* dans son traité *Dioptrique* en 1637. Il supposait que tout corps lumineux envoyait dans toutes les directions une multitude de corpuscules extrêmement petits et animés d'une très grande vitesse. Ceux-ci se propageaient en ligne droite et rebondissaient sur les obstacles qu'ils rencontraient. On expliquait ainsi la réflexion de la lumière par un processus de choc mécanique, ce qui rendait bien compte des faits expérimentaux. Pour expliquer la réfraction, Descartes était obligé d'admettre que les corpuscules, en pénétrant dans un milieu transparent d'indice plus élevé que celui qu'ils quittaient, voyaient leur vitesse augmenter. Cette idée pouvait se justifier si les milieux d'indice élevé, c'est-à-dire en général les milieux denses, exerçaient une attraction sur les grains lumineux. La théorie corpusculaire fut soutenue par Newton, qui dut la compliquer pour expliquer les phénomènes nouvellement découverts de dispersion et de coloration des lames minces.

Parallèlement à cette théorie, une autre école élaborait l'hypothèse de la nature ondulatoire de la lumière. On savait depuis l'Antiquité que le son était produit par la vibration de milieux matériels. Par analogie avec l'acoustique, on pouvait supposer que la lumière était un mouvement oscillatoire d'un milieu matériel. Cette hypothèse fut énoncée pour la première fois par *Grimaldi,* qui découvrit la diffraction ; la théorie fut reprise par *Huygens,* dans son *Traité de la lumière* (1690).

Elle fut complétée par *Bernoulli* et *Euler* qui supposèrent que la fréquence de la vibration était liée à la couleur : cela expliquait la dispersion. La théorie était capable d'expliquer à la fois les phénomènes purement ondulatoires comme la diffraction et les interférences, et les lois de l'optique géométrique, réflexion et réfraction. Pour cette dernière, il suffit d'admettre que la vitesse de la lumière dans un milieu est inversement proportionnelle à l'indice (*fig.* 1). Huygens, par analogie avec la

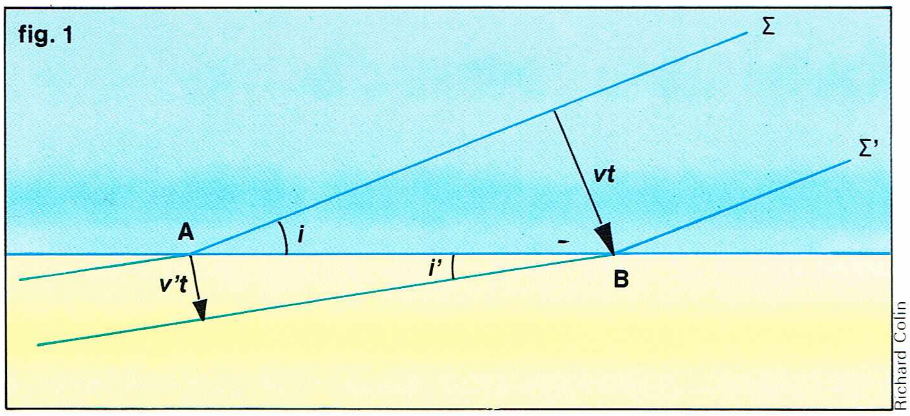

▲ *Figure 1 ; une onde plane rencontre la surface de séparation AB de deux milieux : dans le premier, la vitesse de la lumière est v, dans le second, v'. La surface d'onde Σ arrive au bout du temps t en Σ' ; elle a parcouru dans les deux milieux, respectivement, les distances vt et v't. On en déduit la relation entre les angles* sin i = n sin i', *qui n'est autre que la loi de la réfraction, qui définit l'indice* $n = \frac{v}{v'}$ *du deuxième milieu par rapport au premier.*

propagation du son dans les gaz, avait supposé que la lumière était une vibration longitudinale d'un milieu hypothétique, appelé éther.

Fresnel apporta une modification en montrant que la vibration était transversale, ce qui impliquait qu'on pût la polariser. La lumière naturelle n'étant pas polarisée, le phénomène était resté inaperçu avant sa découverte par *Malus*. La plus grande difficulté restait le support lui-même, c'est-à-dire ce mystérieux éther, dont les propriétés étaient passablement contradictoires : il devait remplir le vide (puisque la lumière se propage dans le vide) et n'opposer aucune résistance au mouvement des corps matériels ; il devait être cependant très élastique, puisque la vitesse de la lumière est très élevée.

La solution fut trouvée par *Maxwell*, qui synthétisa dans ses équations (1865) toutes les découvertes d'électromagnétisme du XIX^e siècle. La lumière est bien un phénomène vibratoire, mais aucun milieu matériel n'est nécessaire à sa propagation ; c'est une action électrique et magnétique qui se déplace dans le vide à une vitesse c, fixée par la théorie de l'électromagnétisme. Les champs électrique et magnétique varient sinusoïdalement avec une fréquence ν. Ils sont dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation et perpendiculaires entre eux. On définit, comme pour toute vibration, une période T et une longueur d'onde λ, la fréquence, la période et la longueur d'onde étant respectivement le nombre d'oscillations par seconde, la durée d'une oscillation et la distance parcourue pendant celle-ci. On a alors les relations suivantes $T = 1/\nu$ et $\lambda = cT$. Les longueurs d'ondes lumineuses sont comprises entre $4\,000 \cdot 10^{-8}$ et $7\,500 \cdot 10^{-8}$ cm (10^{-8} cm = 1 angström). Notre œil peut discerner les diverses fréquences qui lui apparaissent comme différentes couleurs. L'ordre des longueurs d'onde décroissantes est rouge, orange, jaune, vert, bleu, violet. Les radiations infrarouge et ultraviolette ne présentent pas de différence fondamentale, sinon que notre vue ne les perçoit pas.

Ces premières vérifications expérimentales de la théorie de Maxwell furent faites par *Hertz*, qui découvrit ainsi les ondes hertziennes ; il vérifia qu'elles avaient toutes les propriétés optiques des ondes lumineuses, tout en prouvant qu'il s'agissait d'ondes électromagnétiques. Leur longueur d'onde est supérieure à celle des infrarouges et peut aller jusqu'à plusieurs kilomètres.

De nouvelles découvertes allaient enrichir le tableau des ondes électromagnétiques pour aboutir au spectre représenté *figure* 2. *Roentgen* découvrit les rayons X en bombardant un métal par des électrons de haute énergie, puis les Curie isolaient les rayons γ parmi tous les types de rayonnements produits par la radio-activité. On voit sur la *figure* 2 que le spectre de la lumière visible représente une bande très étroite dans l'ensemble des radiations électromagnétiques. Au XX^e siècle, l'étude des propriétés du corps noir, puis de l'interaction matière-rayonnement, a révolutionné les idées sur la lumière, comme sur l'ensemble de la physique d'ailleurs. La mécanique quantique nous a appris qu'à toute particule est associée une onde dont l'intensité est égale à la probabilité de présence de cette particule. En optique, apparaît une nouvelle notion, celle de photon, introduite par *Einstein* (1906). Le photon est un corpuscule de lumière, un peu au sens de Descartes, possédant une énergie $E = h\nu$ et une quantité de mouvement $P = E/c$ (h est la constante de Planck). La mécanique quantique conserve le caractère ondulatoire de la lumière, et la théorie de Maxwell reste utilisable, sauf lorsque l'on considère des échanges d'énergie entre matière et rayonnement. Pour traiter correctement ce problème, il faut faire intervenir à la fois la mécanique quantique et la relativité, c'est-à-dire la théorie quantique des champs. Sur le plan expérimental, c'est l'effet photo-électrique qui a été à l'origine de l'idée de photon. Le phénomène d'émission stimulée, prédit théoriquement par Einstein, a permis la réalisation du maser, puis du laser. La découverte du laser a fait énormément progresser l'optique ces dernières années, une des applications les plus intéressantes étant l'holographie.

▼ *Figure 2 ; spectre des ondes électromagnétiques : en abscisse est portée la longueur d'onde en échelle logarithmique.*

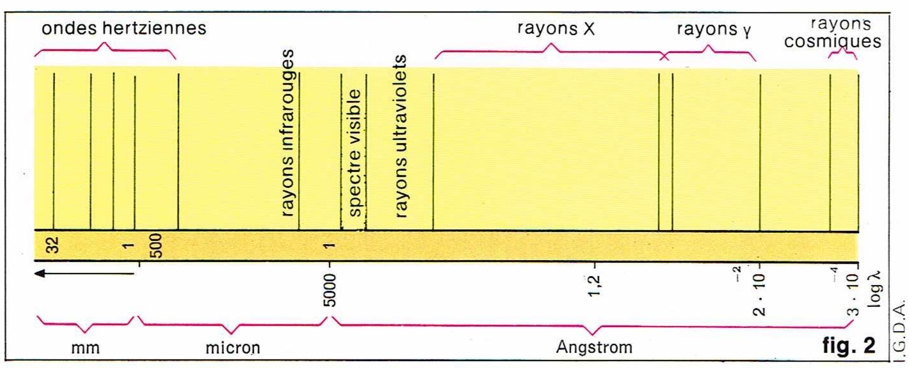

Vitesse de la lumière

La vitesse de la lumière est une des constantes fondamentales de la nature. C'est la vitesse avec laquelle se propagent toutes les radiations électromagnétiques, quelle que soit leur fréquence ; les équations de Maxwell relient la constante c aux constantes des interactions électrique et magnétique ; aucun signal ne peut être transmis à une vitesse supérieure à c ; enfin la vitesse de la lumière est la même pour tout observateur galiléen, c'est-à-dire non soumis à une accélération. Ces deux dernières propriétés sont en contradiction avec la mécanique classique et sont à la base de la théorie de la relativité. C'est dire que la mesure de la vitesse de la lumière est d'une grande importance, à la fois théorique et expérimentale. Bien entendu, dans tout ce qui suit, nous parlerons de la vitesse de la lumière dans le vide ; la vitesse de la lumière dans un milieu matériel est toujours plus petite que c et égale à c/n, où n est l'indice de réfraction. En particulier, les mesures de c faites dans l'air doivent être corrigées. La valeur numérique la plus récente est c = 299 793 km/s.

Cette vitesse très élevée a fait croire pendant longtemps que la lumière se propageait instantanément. *Galilée* avait tenté de la mesurer en plaçant deux observateurs à quelques kilomètres de distance, munis de lanternes. L'un agitait sa lampe au signal de l'autre, qui notait le temps de réponse. Le résultat montrait que c était plus grand que tout ce qui était mesurable. La première preuve expérimentale que la vitesse de la lumière n'est pas infinie fut donnée en 1676 par *Rœmer*. Il observa que le mouvement d'Io, le satellite le plus proche de la planète Jupiter, ne suivait pas un horaire régulier. Il y avait une variation dans les périodes des éclipses d'Io par Jupiter. En fait, les périodes réelles sont toutes égales à 42 h 29 mn, mais la lumière met un certain temps pour aller de Jupiter à la Terre. Comme le trajet est variable suivant les positions des deux planètes autour du Soleil, c'est-à-dire suivant la date de la mesure, il en résulte un changement apparent dans les résultats des mesures terrestres. Le retard accumulé dans une demi-année est égal à 20 mn, ce qui correspond à la différence de trajet lumineux entre les positions J_1T_1 et J_2T_2 (*fig.* 3). Connaissant le diamètre de l'orbite terrestre, Rœmer en déduisit une première mesure, assez peu précise, de la vitesse de la lumière.

Une autre méthode astronomique est fondée sur le phénomène de l'aberration des étoiles. En 1725, *Bradley* commença une série d'observations précises sur la variation saisonnière apparente de la position des étoiles. Il observa qu'une étoile au zénith (c'est-à-dire vue en regardant verticalement) semblait décrire un cercle, au

cours d'une année, avec un diamètre angulaire de 45,5° d'arc. Il l'expliqua en faisant intervenir la vitesse v de la Terre autour du Soleil, égale à 30 km/s (*fig.* 4). Lorsque la lumière parcourt la distance MC pour parvenir à l'observateur, la Terre parcourt la distance AC; la direction réelle de l'étoile est S, sa direction apparente est S′. On a la relation :

$$\frac{MC}{AC} = \frac{c}{v}$$

et l'aberration est égale à :

$$\alpha = \frac{v}{c} \sin \omega$$

où ω est l'angle sous lequel est vue l'étoile.

D'autres mesures ont été faites, cette fois en utilisant un laboratoire terrestre. L'appareillage de Fizeau (1848) est représenté sur la *figure* 5. L'organe principal est une

fig. 3

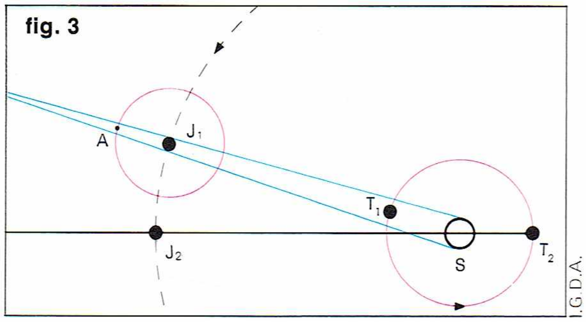

I.G.D.A.

fig. 5

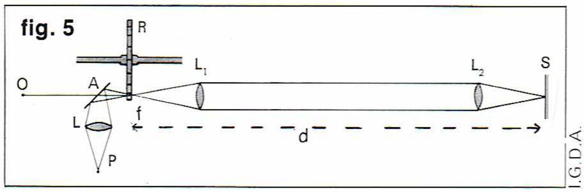

I.G.D.A.

roue dentée R, tournant à grande vitesse, qui intercepte ou laisse passer alternativement la lumière au point *f*, selon qu'à cet endroit se présente une dent, puis un intervalle entre deux dents. La lumière d'une source O traverse une lame semi-transparente A, et passe à travers l'ouverture *f* lorsque celle-ci n'est pas obturée par une dent. Les lentilles L_1 et L_2 servent à former un faisceau parallèle. La lumière effectue un aller et retour entre le point *f* et le miroir S, lesquels sont séparés par une distance *d*. Elle est enfin réfléchie par la lame A et concentrée au point P par la lentille L. Pour observer une image en P, il faut donc que la roue n'intercepte la lumière ni à l'aller, ni au retour, c'est-à-dire que le temps *t* du trajet 2 *d* soit égal au temps que met un intervalle de la roue R pour remplacer l'intervalle précédent au point *f*. On connait le nombre de dents de la roue R, ainsi que sa vitesse de rotation, ce qui donne la valeur de *t*. On en déduit la vitesse de la lumière : $c = 2\,d/t$.

Le dispositif de Foucault (1850) a l'avantage d'être plus lumineux et plus précis. Il est représenté sur la *figure* 6. Une source lumineuse S envoie de la lumière à travers une lame semi-transparente P. Une lentille L donnerait une image S″ de la source S, mais un miroir *m* envoie cette image en S′. Le miroir M renvoie la lumière dans la direction opposée, et on obtient finalement l'image S‴. Mais *m* est un miroir tournant à grande vitesse, qui, pendant que la lumière a fait l'aller et retour de longueur 2 D, a tourné lui-même de l'angle α. L'image de S′ vient donc en T″, puis en T‴. Si l'on appelle Δ la distance S‴T‴, et ω la vitesse angulaire de rotation, on en déduit : $c = 4\,dD\omega/\Delta$. La théorie exacte du phénomène, qui tient compte de la loi de la réflexion sur un objet en mouvement, ne modifie pas le résultat physique.

Les méthodes modernes utilisent souvent des ondes électromagnétiques de fréquence plus faible que la lumière. On peut mesurer le temps nécessaire à une onde radar pour effectuer le trajet aller-retour entre un émetteur et un réflecteur situés à 100 km de distance l'un de l'autre. Un intervalle de temps de l'ordre de 10^{-9} s

fig. 6

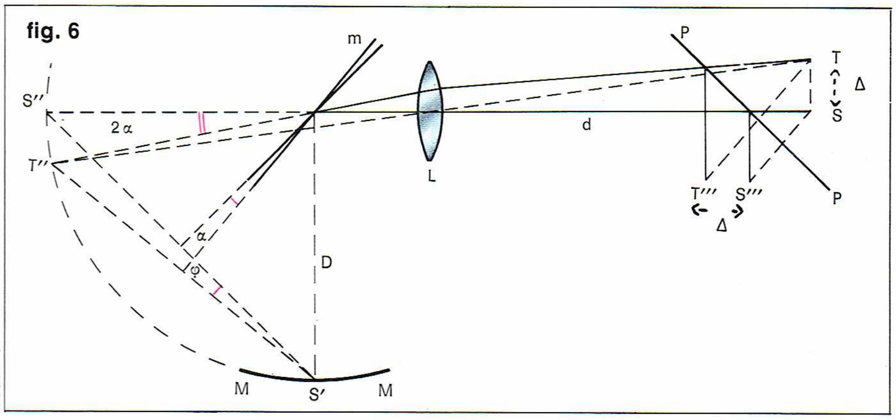

I.G.D.A.

peut être mesuré avec une horloge à quartz. Une autre méthode consiste à mesurer séparément la longueur d'onde λ et la fréquence ν. On en déduit alors la vitesse de la lumière : $c = \lambda\nu$. Une onde électromagnétique est introduite dans une cavité résonnante; celle-ci ne fonctionne que si une demi-longueur d'onde est contenue un nombre entier de fois dans les dimensions de la cavité. Quant à la fréquence, elle est mesurée par des techniques électroniques usuelles. Des dizaines d'autres méthodes ont été utilisées depuis un siècle. Toutes donnent des résultats compatibles entre eux, quelle que soit la fréquence.

Optique géométrique

La lumière qui atteint notre œil peut provenir de sources lumineuses ou de corps éclairés qui renvoient vers l'observateur une partie de la lumière qu'ils reçoivent. Lorsqu'ils reçoivent la lumière incidente, les corps peuvent se subdiviser en corps transparents et opaques. Les premiers laissent passer toute la lumière reçue, alors que les seconds en absorbent la majeure partie, cette absorption dépendant en général de la couleur, c'est-à-dire de la fréquence de la radiation. Un corps noir absorbe tout, un corps blanc renvoie tout.

La distinction entre opaque et transparent n'est pas toujours nette. La transparence est fonction de la matière, mais aussi de conditions expérimentales particulières. Par exemple, l'or est opaque, comme tous les métaux, mais, si l'on prépare une feuille très mince, celle-ci est transparente. Les corps transparents peuvent être diaphanes ou translucides : tous les deux laissent passer la lumière, mais les premiers permettent d'observer les objets au travers, tandis que les seconds ne le permettent pas, sauf si l'objet est placé tout contre eux. La lumière traversant un corps translucide ressort après avoir été diffusée dans toutes les directions. Une plaque de verre, de l'eau propre, sont des exemples de corps diaphanes; un verre dépoli ou un papier huilé sont des corps translucides.

La notion de *propagation rectiligne* de la lumière est facile à comprendre intuitivement. L'expérience quotidienne prouve que, si, sur le segment de droite joignant notre œil au point que nous observons, on interpose un objet opaque, la vision du point disparaît. On en déduit la notion de rayon lumineux : c'est une droite le long de laquelle se propage la lumière. Il s'agit d'une idéalisation théorique, car il est impossible, expérimentalement, d'isoler un rayon seul. On peut réaliser un faisceau très étroit qui prend le nom de *pinceau lumineux* : on peut définir alors un rayon comme la limite d'un pinceau infiniment étroit.

La conséquence la plus immédiate de la propagation rectiligne est l'existence de l'ombre. Lorsqu'une source lumineuse éclaire un objet opaque, on observe au-delà de celui-ci une zone sombre, le *cône d'ombre*. Si on coupe le cône d'ombre par un écran, on voit se découper la silhouette de l'objet; elle est obtenue géométriquement en traçant tous les rayons issus de la source et tangents à l'objet. Si la source n'est pas ponctuelle, le phénomène est un peu plus compliqué, car il existe des points qui sont éclairés par une partie seulement de la source. On distingue dans ce cas l'ombre et la pénombre, et il n'existe pas de discontinuité d'éclairement sur l'écran

▲ ***Figure 6 : dispositif de Foucault pour la mesure de la vitesse de la lumière.***

◀ ***Figure 3 : les éclipses du satellite (A) de Jupiter (J) sont observées depuis la Terre (T); la distance parcourue par la lumière varie suivant la date.***

◀ ***Figure 5 : dispositif de Fizeau servant à mesurer la vitesse de la lumière (la roue dentée est vue par la tranche).***

fig. 4

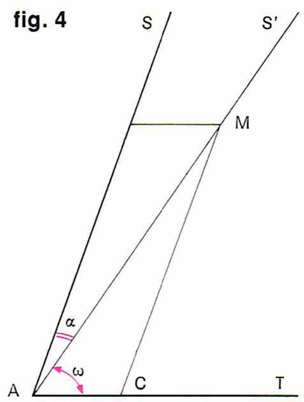

I.G.D.A.

▲ ***Figure 4 : graphique illustrant le phénomène d'aberration des étoiles.***

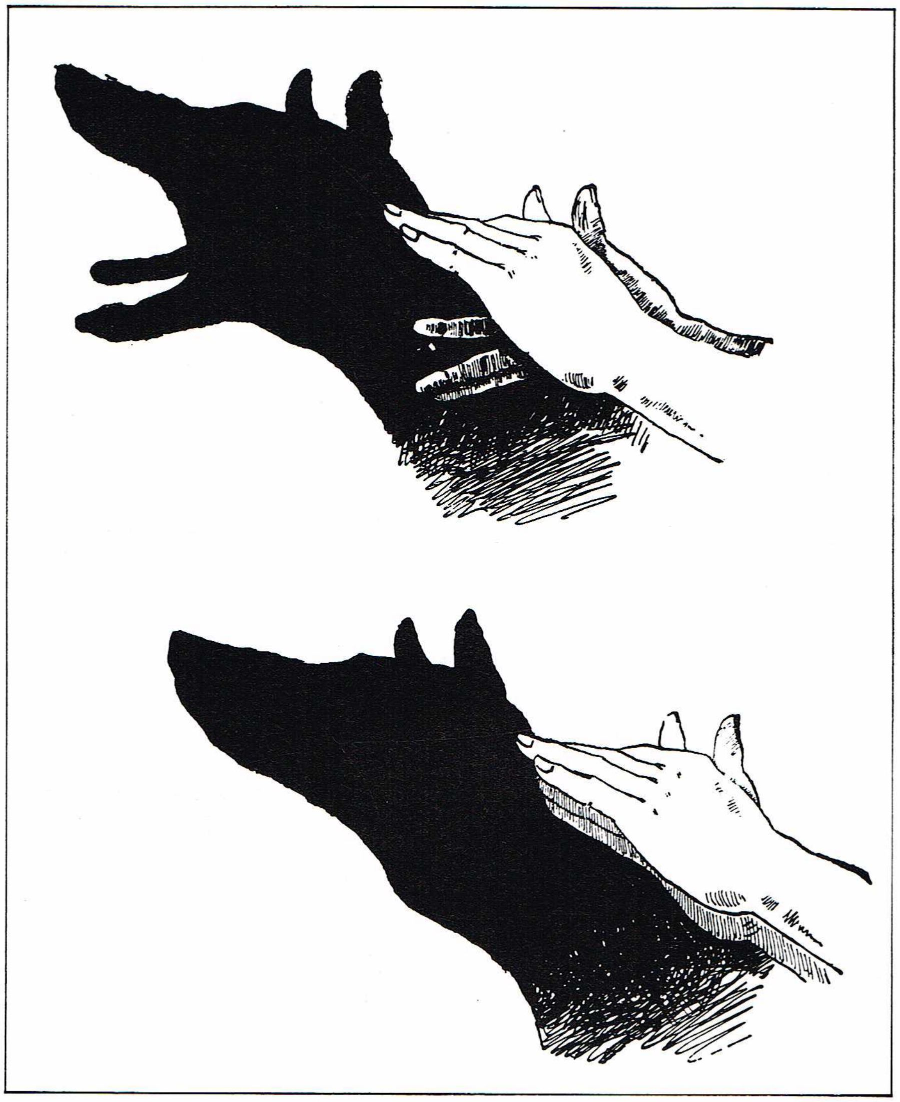

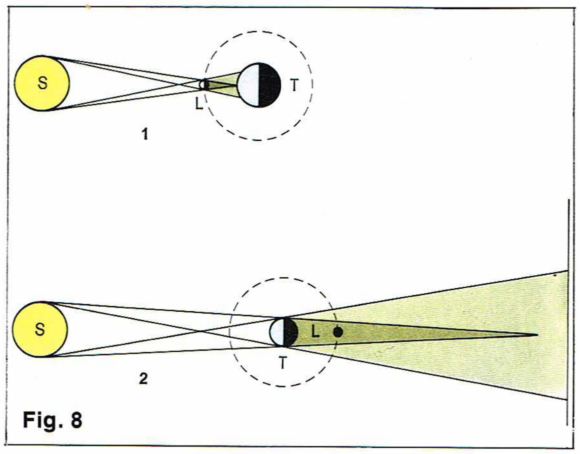

▲ *Ci-dessus, la conséquence la plus immédiate de la propagation rectiligne de la lumière : l'existence de l'ombre. Une application simple et amusante : deux mains interposées entre un écran ou un mur et une lumière suffisent à reproduire des silhouettes de personnages ou d'animaux... A droite, figure 8 - éclipse de Soleil (1) : l'éclipse est totale lorsque l'observateur est dans le cône d'ombre, partielle lorsqu'il est dans la pénombre; éclipse de Lune (2) : l'éclipse est totale lorsque la Lune passe dans le cône d'ombre de la Terre, partielle lorsqu'elle passe dans la pénombre.*

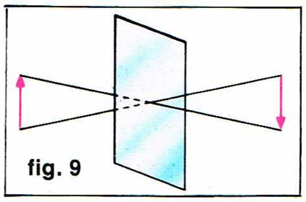

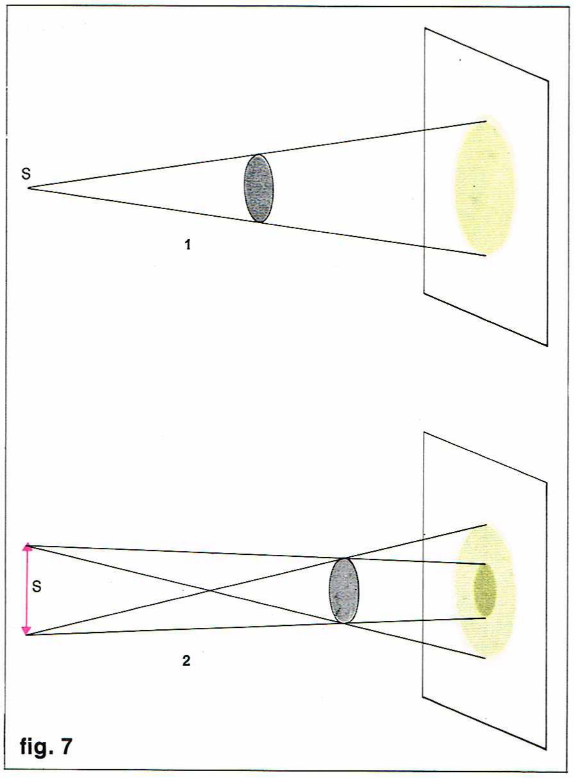

(*fig.* 7). Les éclipses du Soleil et de la Lune s'expliquent par ces propriétés. La *figure* 8 en donne la représentation (les dimensions des astres ne sont pas respectées).

Une autre conséquence de la propagation rectiligne de la lumière est la formation de l'image dans une chambre noire. Si l'on perce un trou très fin avec une aiguille dans une feuille de carton et que l'on place un écran parallèle à une dizaine de centimètres, on observe une image renversée du paysage. Chaque point lumineux d'un objet envoie des rayons qui, pour atteindre l'écran, ne peuvent passer que par le trou. Chaque point de l'écran n'est donc éclairé que par un seul point de l'objet, ce qui explique qu'il y ait formation d'une image (*fig.* 9). Si l'on augmente la dimension du trou, la luminosité augmente, mais l'image devient floue. En effet, chaque point de l'écran est illuminé par plusieurs points à la fois. A la limite, si le trou (qu'on appelle un diaphragme) est largement ouvert, on n'observe plus qu'un éclairement uniforme.

Le principe de la propagation rectiligne de la lumière, fondement de l'optique géométrique, n'est vérifié que si toutes les dimensions considérées dans les appareillages sont grandes par rapport à la longueur d'onde de la lumière. Cette dernière étant inférieure au micron, l'approximation est largement valable dans les montages courants; la mise en évidence du phénomène de la diffraction nécessite des techniques expérimentales un peu plus fines.

On appelle *principe d'indépendance des rayons lumineux* le fait qu'un faisceau de lumière rencontrant sur son chemin un autre faisceau n'est perturbé en aucune manière par celui-ci.

Un rayon lumineux atteignant la surface d'un corps peut être *diffusé*, c'est-à-dire dispersé dans toutes les directions, ou *absorbé*. Il peut aussi être *réfléchi*, c'est-à-dire renvoyé à l'extérieur, ou encore *réfracté*, c'est-à-dire qu'il pénètre à l'intérieur du corps transparent.

Réflexion

La réflexion se produit si la surface est lisse : les aspérités sont petites par rapport à la longueur d'onde de la lumière. C'est le cas pour tous les métaux, les corps vitreux, lorsqu'ils sont polis, et la surface des liquides. La réflexion peut être totale (métaux) ou partielle (eau, verre). On ne récupère cependant jamais exactement l'intensité incidente, et on définit un pouvoir réflecteur (inférieur à l'unité) comme le rapport des intensités réfléchie et incidente. La meilleure valeur est obtenue pour l'argent, qui est utilisé pour cette raison dans la fabrication des miroirs.

Les lois de la réflexion (*fig.* 10) sont les suivantes :

— *le rayon réfléchi est situé dans le plan défini par le rayon incident et la normale à la surface;*

— *l'angle du rayon réfléchi et de la normale est égal à l'angle du rayon incident et de la normale.*

Connaissant ces lois, on peut construire l'image que donne d'une source ponctuelle un miroir plan. La *figure* 11 montre que tous les rayons issus de S convergent en un point S', symétrique de S par rapport au plan. Une telle image est appelée *virtuelle*, car elle est formée par le prolongement des rayons et non par les rayons eux-mêmes. L'œil peut l'observer, mais elle ne peut pas apparaître sur un écran, contrairement à une image réelle.

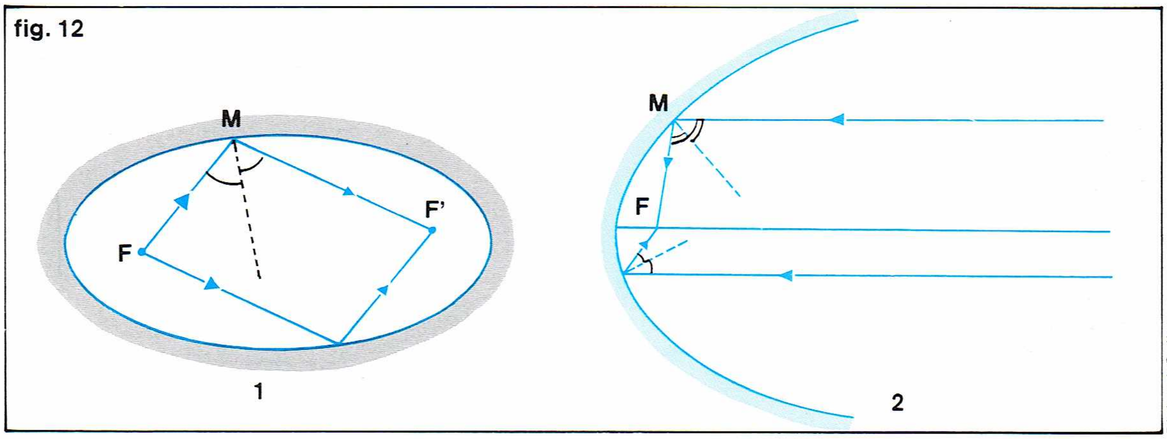

Richard Colin

◄ ***Figure 12** : marche des rayons dans un miroir elliptique* (1) *et un miroir parabolique* (2).

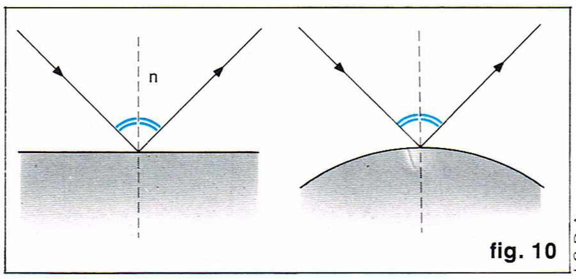

I.G.D.A.

◄ ***Figure 10** : réflexion d'un rayon lumineux sur une surface plane, et sur une surface courbe.*

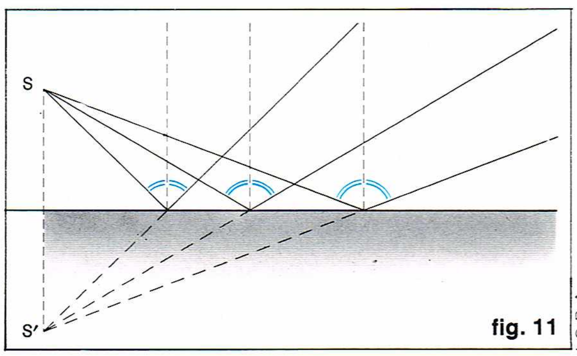

I.G.D.A.

◄ ***Figure 11** : formation de l'image d'un point* S *dans un miroir plan.*

Considérons un ellipsoïde de révolution dont la surface interne est réfléchissante, et une source ponctuelle placée à l'un des foyers (*fig.* 12). On démontre, en géométrie élémentaire, que la normale en un point M d'une ellipse est bissectrice de l'angle formé par les segments joignant le point aux deux foyers. Donc, tous les rayons issus de F convergent au point F', qui est ainsi l'image réelle de F. Cette propriété est utilisée lorsque l'on veut concentrer en un point la totalité de l'énergie lumineuse issue d'une source ponctuelle. Si, au lieu d'avoir une source proche, on a une source à l'infini (c'est-à-dire à une distance grande par rapport aux dimensions des appareils), on utilise un miroir parabolique. Celui-ci est constitué d'un paraboloïde de révolution, dont l'axe est parallèle à la direction de la source. Ce montage est utilisé notamment comme miroir principal des télescopes astronomiques. L'image de l'étoile est obtenue au foyer F.

On appelle *miroir sphérique* une calotte sphérique réfléchissante ; le miroir est concave ou convexe, selon que l'on utilise la partie interne ou externe de la sphère. L'angle d'ouverture α est l'angle sous lequel on voit la calotte depuis le centre ; l'axe optique est la droite issue du centre, bissectrice de cet angle. On constate que les objets à l'infini donnent une image située dans un plan perpendiculaire à l'axe optique : le plan focal. Cette propriété est en fait une approximation, car seul un miroir parabolique peut donner une image d'un objet à l'infini. Cependant, si l'on satisfait aux conditions de Gauss, c'est-à-dire :

— si l'angle d'ouverture est faible,

— si les rayons lumineux ne forment jamais un angle très grand avec l'axe optique,

— si les objets sont sensiblement plans et perpendiculaires à l'axe optique,

on constate que tout objet, quelle que soit sa position dans l'espace, donne toujours une image. Celle-ci peut être réelle ou virtuelle ; sa dimension diffère en général de celle de l'objet, mais les proportions sont toujours respectées. On appelle optique paraxiale l'étude des propriétés des systèmes qui satisfont à ces conditions de Gauss. Lorsqu'on s'éloigne un peu de ces conditions, apparaissent des phénomènes perturbateurs, les aberrations, qui détruisent la netteté des images. Le but de l'optique paraxiale est de trouver la position et la dimension de l'image, connaissant celles de l'objet et, bien entendu, les caractéristiques du système optique. Pour un miroir sphérique, il y a une seule quantité qui puisse intervenir : c'est le rayon R de la sphère. On appelle distance focale la quantité $f = R/2$; c'est la distance du centre au foyer, point d'intersection du plan focal et de l'axe optique. La *figure* 13 représente différents cas possibles de formation de l'image, pour un miroir concave. Les constructions géométriques se font en utilisant les propriétés suivantes : les rayons parallèles à l'axe sont réfléchis en passant par le foyer ; les rayons passant par le centre C ne sont pas déviés. Si l'on appelle respectivement p et q les distances entre le miroir et l'objet, et le miroir et l'image, comptées parallèlement à l'axe optique, on a la formule :

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \qquad (0)$$

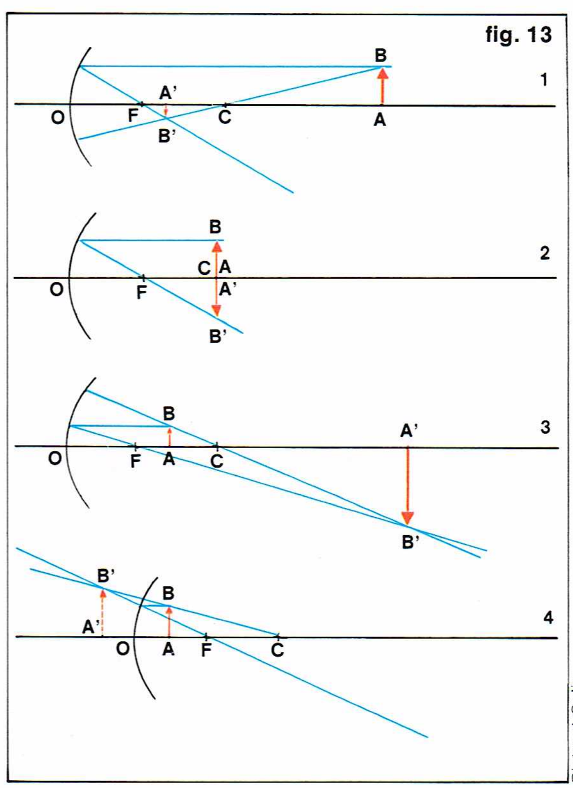

Richard Colin

◄ ***Figure 13** : différents cas possibles de formation de l'image pour un miroir concave.*

◄ ***Page ci-contre, en bas, figure 9** ; une conséquence de la propagation rectiligne : la formation d'une image renversée des objets par un diaphragme dans une chambre noire. **Figure 7** : ombre et pénombre, avec une source ponctuelle* (1), *et une source étendue* (2).

fig. 15

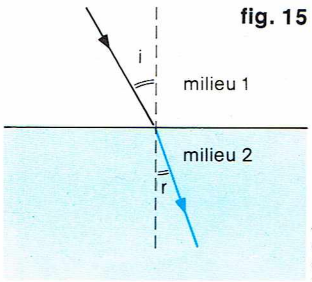

I.G.D.A.

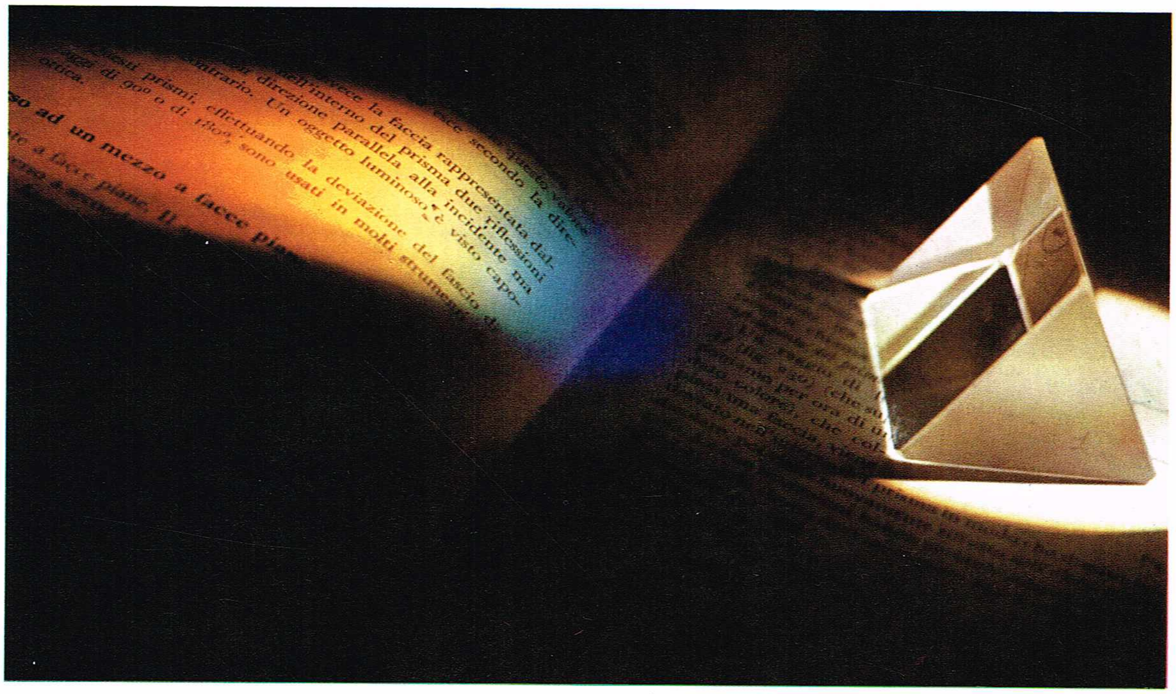

P. Castano

▲ *Figure 15 : réfraction d'un rayon lumineux; les angles incident et réfracté sont notés i et r.*
▶ *Décomposition de la lumière blanche par un prisme; le faisceau incident arrive par la droite.*
▼ *A gauche, la réfraction : un rayon lumineux atteignant un corps transparent est en partie réfléchi et en partie réfracté. A droite, figure 14; formation de l'image A'B' dans un miroir convexe.*

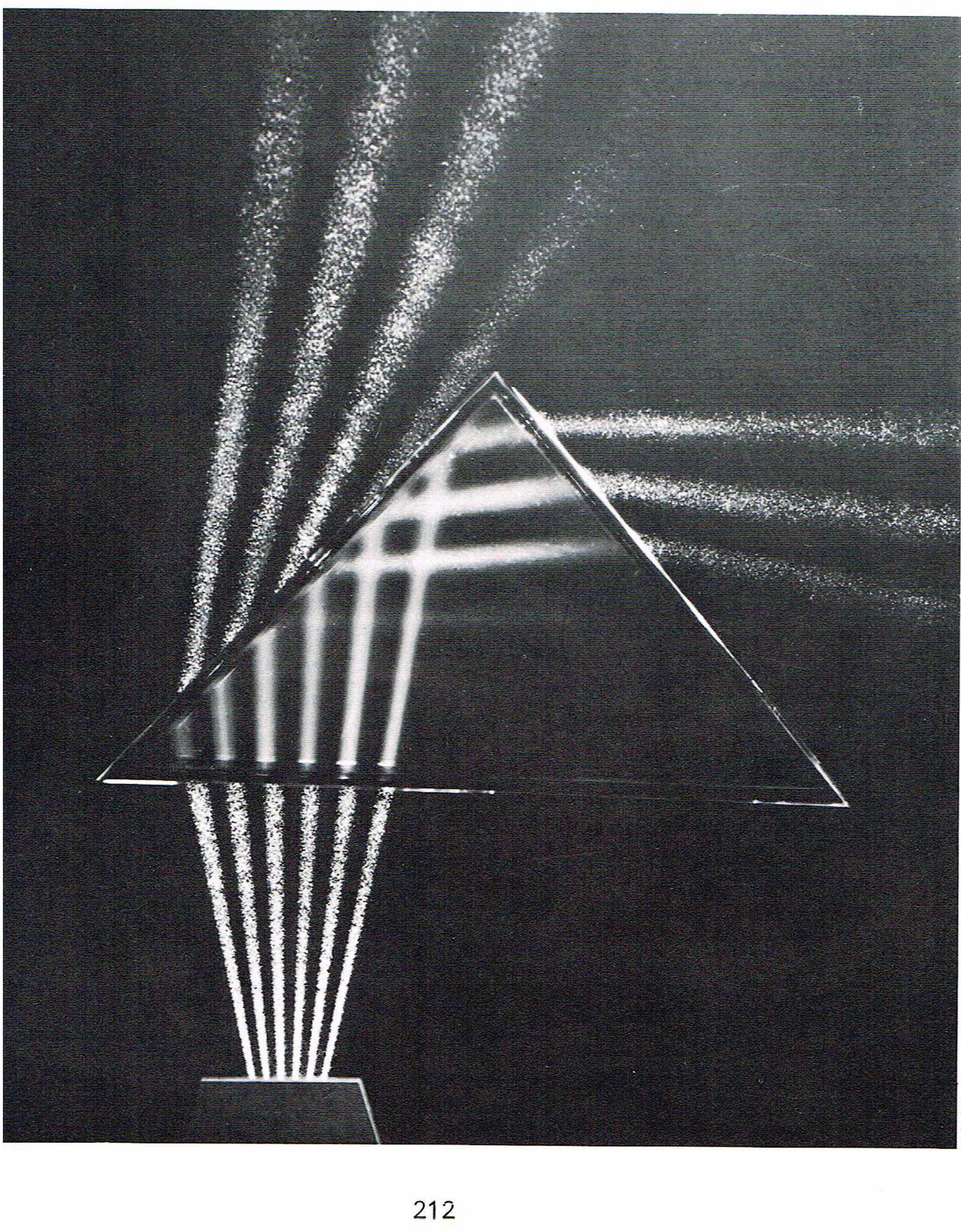

USIS

Elle est valable dans tous les cas, à la condition de prendre pour p ou q des quantités négatives, quand on a affaire à un objet ou une image virtuels. Les dimensions relatives sont données par la formule :

$$\frac{A'B'}{AB} \quad \frac{A'C}{AC}$$

On constate que l'image et l'objet jouent des rôles complètement symétriques, ce qui est une conséquence du principe de retour inverse de la lumière. La *figure* 14 représente différents cas d'utilisation d'un miroir convexe. Le plan focal étant situé derrière le miroir, on obtient toujours une image virtuelle avec un objet réel. Il faut, dans la formule **(0)**, compter négativement la distance focale.

Réfraction

Un rayon lumineux atteignant un corps transparent est en partie réfléchi et en partie réfracté.

Les lois de la réfraction, ou lois de Descartes, sont les suivantes :

— *le rayon réfracté est situé dans le plan défini par le rayon incident et la normale à la surface;*

— *l'angle r formé par le rayon réfracté avec la normale est relié à l'angle d'incidence i par la relation :*

I.G.D.A.

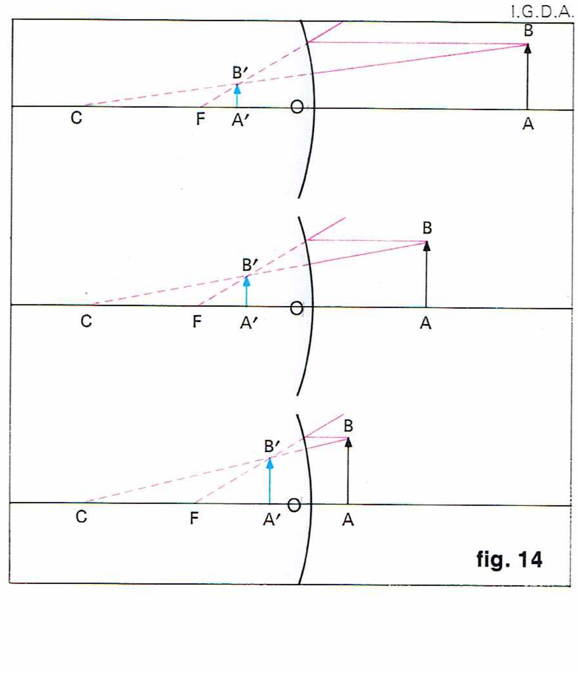

fig. 14

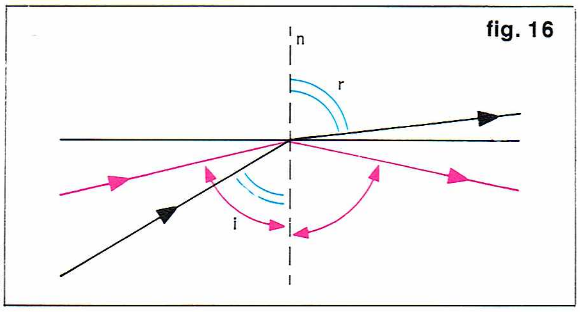

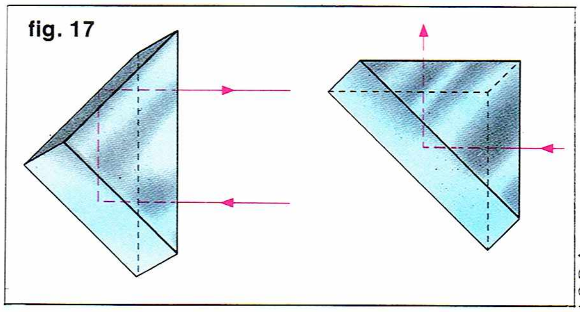

◀ *A gauche, figure 16 ; passage de la lumière d'un milieu plus réfringent à un milieu moins réfringent : réfraction (en noir) et réflexion totale (en rouge). A droite, figure 17 : prismes à réflexion totale.*

$$n_2 \sin r = n_1 \sin i$$

Les angles i et r sont représentés sur la *figure* 15. On appelle indice de réfraction des milieux 1 et 2 la quantité n_1 ou n_2. Cette quantité, posée conventionnellement égale à 1 pour le vide, est supérieure à l'unité pour tous les matériaux. Elle varie avec la longueur d'onde de la lumière utilisée : dans un verre ordinaire, elle est égale à 1,538 pour le violet et 1,511 pour le rouge. Le phénomène, appelé *dispersion,* est à l'origine de l'*aberration chromatique* dans les instruments d'optique : les images produites par les radiations de différentes couleurs ne sont pas superposées. La lumière blanche, qui est formée de l'addition de l'ensemble des couleurs du spectre, est ainsi décomposée. Cela est utilisé pour fabriquer certains types de spectrographes.

Le tableau suivant donne l'indice de réfraction pour quelques matériaux communs, avec la lumière jaune d'une lampe au sodium ($\lambda = 5\,893$ Å) :

Matériau	Indice
Air	1,000 292 6
Eau (20 °C)	1,33
Verre au zinc crown	1,52
Verre au plomb lourd	1,90
Diamant	2,4

Dans la plupart des applications pratiques, on admet que l'indice de l'air est égal à 1. On a vu que l'indice n'était autre que le rapport des vitesses de la lumière dans le vide et dans le milieu.

Lorsqu'un rayon lumineux entre dans un milieu plus réfringent, il se rapproche de la normale. Il existe un angle d'incidence, appelé *angle limite,* correspondant à un angle réfracté égal à 90°. Au-delà de l'angle limite, on observe le phénomène de réflexion totale (*fig.* 16). La surface de séparation se comporte comme un miroir, et le rayon réfléchi a une intensité égale à celle du rayon incident. Ce phénomène est utilisé quand on a besoin de changer la direction d'un faisceau lumineux, sans qu'il y ait atténuation de lumière comme dans la réflexion ordinaire. L'indice du verre ordinaire est égal à 1,50, ce qui donne un angle limite de 42°. Un prisme de verre permet de réaliser la déviation d'un faisceau lumineux de 90° ou 180° (*fig.* 17).

Une autre application intéressante de la réflexion totale est la fabrication des fibres optiques. Il s'agit d'un tube plein, de verre ou de plastique, dont la courbure est faible. Un rayon entrant dans l'axe subit une série de réflexions totales qui le conduisent à l'autre extrémité (*fig.* 18). Il n'y a pas d'autre atténuation que celle qui résulte d'une transparence imparfaite du milieu. On réalise ainsi la transmission d'une information lumineuse à l'aide d'un système optique très simple et robuste. Il est possible également de transmettre une image décomposée par points, par un faisceau de fibres parallèles.

Dioptres

On appelle dioptre plan le système optique que forment deux milieux transparents séparés par une surface plane. Tout objet donne une image, pourvu que les rayons ne soient pas trop inclinés par rapport à la direction de la normale, c'est-à-dire que $\sin i \simeq i$. L'image est virtuelle et apparaît rapprochée, quand elle est observée depuis le milieu le moins réfringent (*fig.* 19). L'expérience nous montre ainsi qu'un bâton plongé dans l'eau apparaît brisé et que le fond d'une rivière paraît plus proche qu'il n'est en réalité.

Une *lame à faces parallèles,* une plaque de verre par exemple, ne modifie pas la direction des rayons lumineux, puisque ceux-ci subissent deux réfractions successives. L'image a la même dimension que l'objet, mais elle est légèrement rapprochée, d'une distance inférieure à l'épaisseur de la lame : une vitre bien faite ne modifie pas la vision des objets.

La variation de densité des *différentes couches de l'atmosphère* entraîne une variation de l'indice de réfraction de l'air en fonction de l'altitude. On a affaire à une série continue de dioptres plans, et la propagation de la lumière n'est plus rectiligne. Le cas se produit les jours de grande chaleur, lorsque le sol et les couches d'air en contact avec lui sont surchauffés. Un rayon lumineux issu d'un point élevé et se dirigeant vers le sol s'incurve vers le haut, atteint l'angle limite, et est réfléchi vers l'œil de l'observateur. Celui-ci observe au sol une image du ciel ou d'objets lointains, ce qui fait croire à l'existence d'une nappe d'eau (*fig.* 20). C'est le phénomène de mirage.

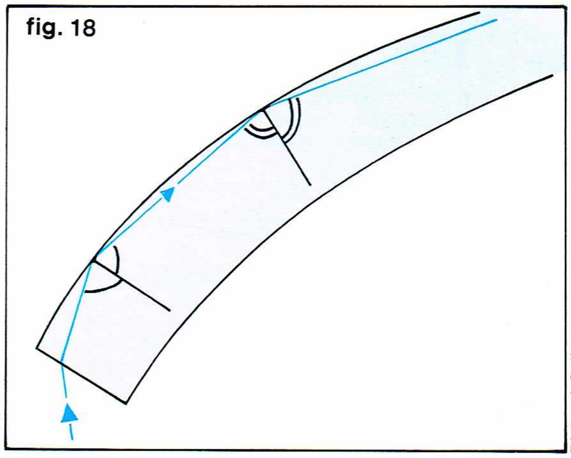

◀ *Figure 18 : une fibre optique conduit la lumière par une série de réflexions totales.*

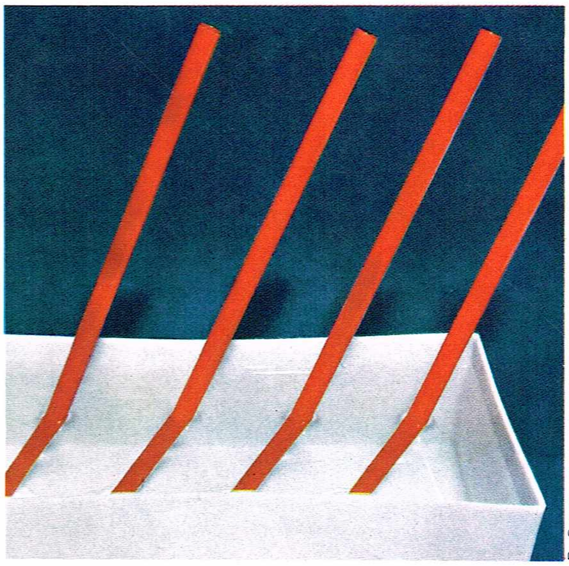

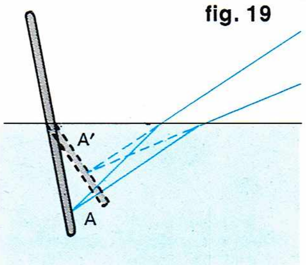

◀▼ *A gauche, un bâton immergé obliquement dans l'eau apparaît brisé ; ci-dessous, figure 19 : formation d'une image par un dioptre plan.*

I.G.D.A. — I.G.D.A. — Richard Colin — P. Castano

N Cirani

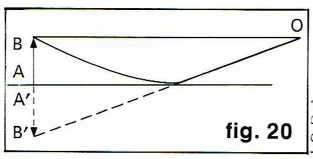

fig. 20

I.G.D.A.

▲ *En haut, phénomène de mirage dans le désert de Nubie. En bas, figure 20 : marche des rayons lumineux dans le phénomène de mirage.*

▶ *Figure 22 : rayon réfracté par un dioptre sphérique.*

Le prisme

Le prisme est un système optique formé par deux dioptres plans faisant entre eux un angle A. Un rayon lumineux pénétrant avec l'incidence i_1 est réfracté suivant r_1, puis atteint l'autre face avec l'incidence r_2, enfin ressort suivant i_2 (*fig.* 21). Appelant D la déviation totale, on a l'ensemble des quatre formules :

$$\sin i_1 = n \sin r_1 \qquad A = r_1 + r_2$$
$$\sin i_2 = n \sin r_2 \qquad D = i_1 + i_2 - A$$

n étant l'indice du milieu externe par rapport au milieu interne. Connaissant i_1, on peut calculer toutes les autres quantités. La déviation minimale est obtenue lorsque $i_1 = i_2$.

On montre que l'on a alors la relation :

$$n \sin \frac{A}{2} = \sin \frac{D + A}{2}$$

En général, un prisme ne donne pas d'image; cependant, si l'angle A est petit et si l'angle d'incidence des rayons est faible, il en existe une. Elle est virtuelle si l'objet est réel, a même dimension, et sa position est obtenue à partir de celle de l'objet en faisant une rotation d'angle D autour de l'arête du prisme. Dans ce cas, les formules se simplifient et donnent : $D = (n - 1)$ A. La déviation est alors indépendante de l'angle d'incidence.

Dioptres sphériques

Lorsque la surface de séparation de deux milieux a la forme d'une sphère, on a un dioptre sphérique. Définissons, comme pour un miroir sphérique, un axe optique. Les conditions d'obtention d'une image sont les mêmes que dans le cas précédent : ce sont les conditions de Gauss. Appelons R le rayon de courbure de la calotte sphérique, n_1 et n_2 les indices de réfraction des deux

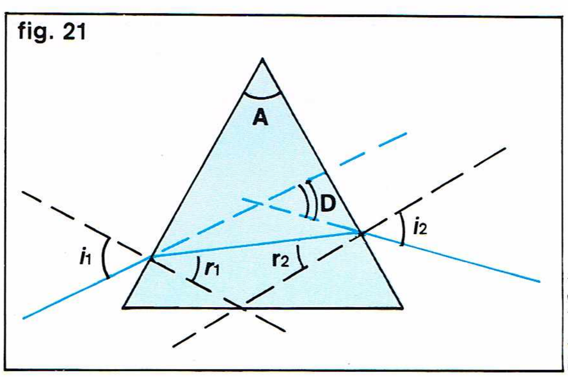

fig. 21

Richard Colin

▶ *Figure 21 : déviation d'un rayon lumineux dans un prisme.*

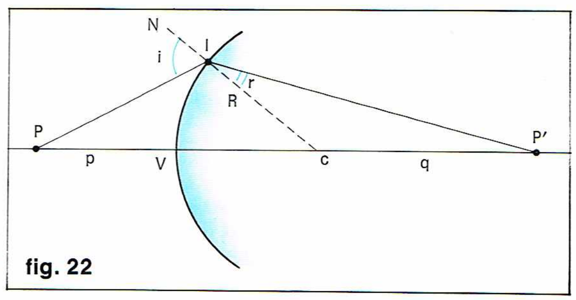

fig. 22

I.G.D.A.

milieux ($n_2 > n_1$) ; les points P et P′ sont des points conjugués, points d'intersection d'un rayon avec l'axe optique (*fig.* 22). Les distances de ces points à la surface du dioptre sont : $p = PV$, $q = P'V$. Nous utilisons toujours la même convention : si P ou P′ est situé sur une partie de rayon virtuelle, la distance correspondante est comptée négativement. On a alors la formule :

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

Elle donne la position et la nature de l'image, connaissant celle de l'objet. Remarquons que la distinction entre P et P′ se rapporte au milieu dans lequel ils se trouvent et non au fait que l'un correspond à l'image, l'autre à l'objet. On retrouve donc la symétrie de retour inverse de la lumière qui avait été observée pour les miroirs sphériques. Il existe deux points pour lesquels les conditions de Gauss sont inutiles, c'est-à-dire que tous les rayons issus de P convergent en P′, quelle que soit l'ouverture du dioptre. Ce sont les points d'Young (ou de Weierstrass) situés en :

$$p = -\frac{n_1 + n_2}{n_1} R, \qquad q = \frac{n_1 + n_2}{n_2} R$$

Lentilles épaisses

Une lentille épaisse est formée par deux dioptres sphériques limitant un milieu d'indice n par rapport à l'air. Un exemple simple est fourni par la sphère représentée sur la *figure* 23.

En optique paraxiale, on définit toujours le foyer comme étant le point où convergent les rayons issus de l'infini. Le calcul montre que la distance du foyer à la sphère est :

$$f' = \frac{R\,(2 - n)}{2\,(n - 1)}$$

Si l'on utilise un verre très dense ($n \simeq 2$), le foyer est pratiquement situé sur la surface du deuxième dioptre. Il suffit alors de recouvrir ce dernier d'une couche d'argent pour renvoyer la lumière dans la direction d'où elle est

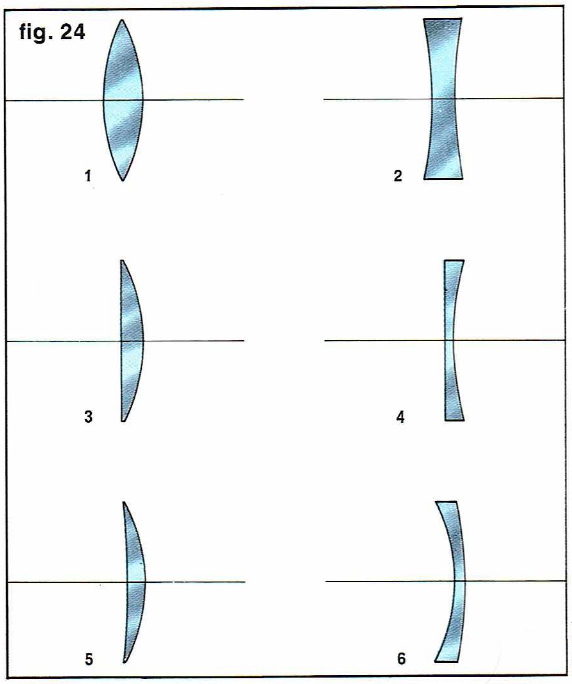

I.G.D.A.

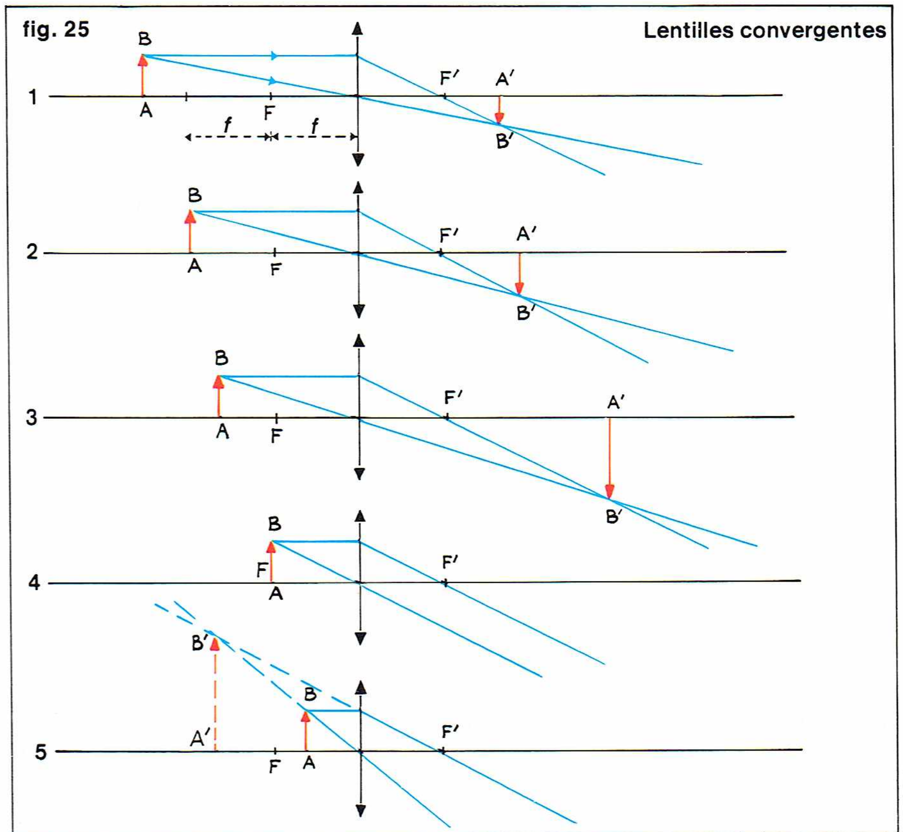

Distance D de la lentille à l'objet	1	2	3	4	5
	$2f < D < \infty$	$D = 2f$	$f < D < 2f$	$D = f$	$0 < D < f$
Image	réelle, renversée, plus petite que l'objet	réelle, renversée, égale à l'objet	réelle, renversée, plus grande que l'objet	répétée à l'infini	virtuelle, droite, plus grande que l'objet

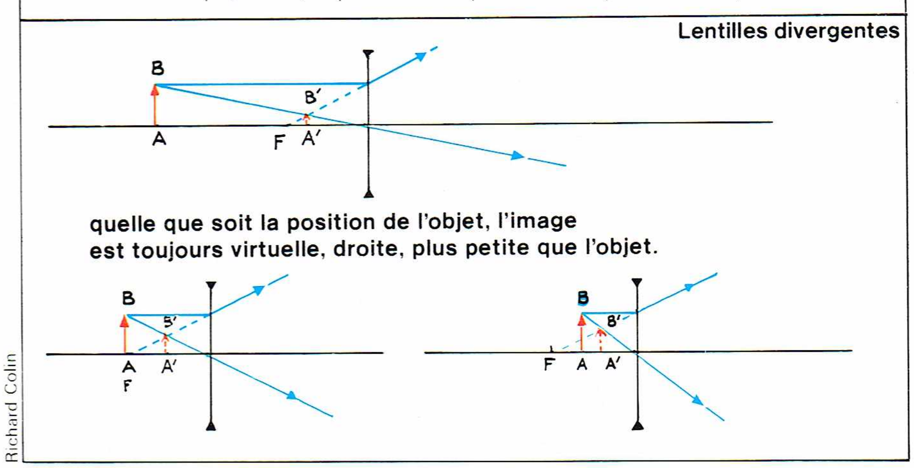

Richard Colin

venue. Un système optique appelé Scotchlite utilise cette propriété. En pratique, on colle un grand nombre de sphères de verre très petites sur un support quelconque. On réalise ainsi des catadioptres d'automobiles et des écrans de cinéma à haute luminosité.

Lentilles minces

Une lentille est dite mince lorsque son épaisseur est faible devant les rayons de courbure de ses deux faces. Il en résulte immédiatement que l'ouverture est petite ; d'ailleurs, une lentille est toujours utilisée en optique paraxiale. La *figure* 24 représente différents types de lentilles vues en coupe, dans l'ordre des numéros croissants : biconvexe, biconcave, plan convexe, plan concave, ménisques (ou concavo-convexe) convergent et divergent. On appelle centre optique l'intersection de l'axe optique avec le bloc de verre : c'est un point, puisque l'on néglige l'épaisseur. Les rayons passant par le centre optique ne sont pas déviés. R et R′ étant les rayons de courbure des deux faces, la formule du dioptre sphérique permet d'écrire :

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = (n-1)\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right)$$

Les distances sont comptées à partir du centre optique. On voit qu'une seule quantité suffit à caractériser les propriétés de la lentille, c'est la distance focale *f* :

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right)$$

Il existe deux foyers, situés de part et d'autre de la lentille, à la distance *f*. Tout rayon, parallèle à l'axe optique, est réfracté en passant par l'un d'eux. Cette propriété, ainsi que celle du centre optique, permet de construire facilement les images (*fig.* 25).

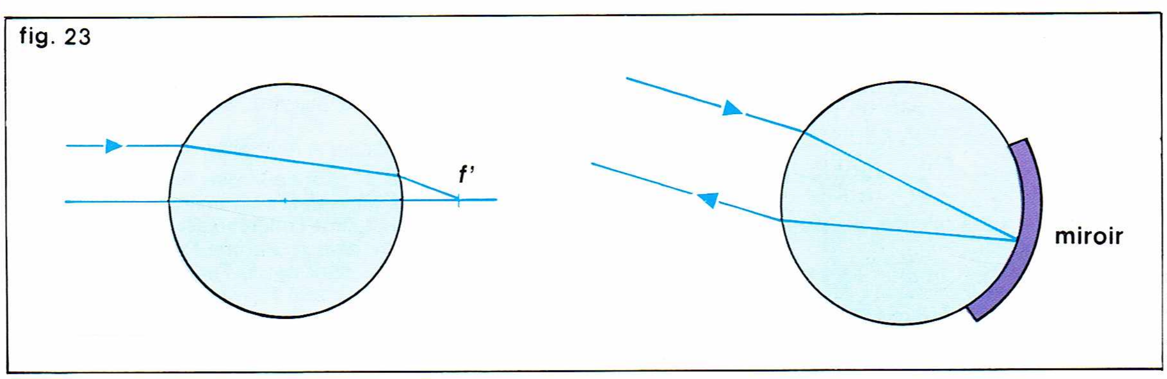

Richard Colin

▲ *A gauche, figure 24 : les différents types de lentilles.*
Ci-dessus, figure 25 : constructions des images d'un objet données par des lentilles convergentes et divergentes.

◀ *Figure 23 : foyer d'une lentille sphérique et principe du Scotchlite.*

▶ *A gauche, figure 26 : schéma d'un système centré, avec les plans principaux HH', les foyers FF', les points nodaux NN'. A droite, figure 27 : déduction de la loi de la réflexion par le principe de Fermat : des exemples de chemins possibles sont AMB, AM'B, AM''B, AB. AB est le minimum absolu, AMB, le minimum relatif : ce sont donc des trajets empruntés effectivement par des rayons lumineux.*

fig. 26

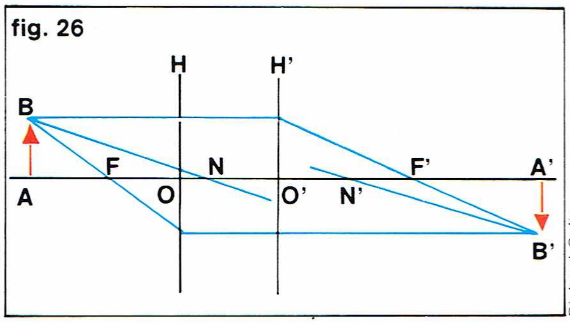

fig. 27

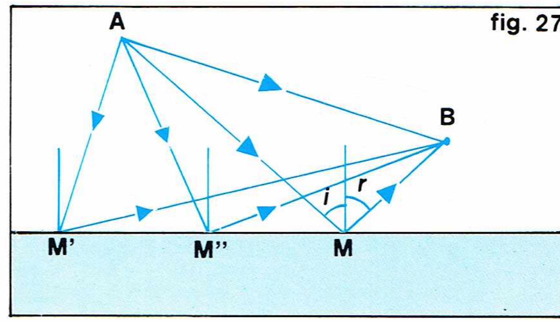

Une lentille convergente donne d'un objet réel une image réelle, sauf lorsque la distance objet-lentille est inférieure à la distance focale. Pour une lentille divergente, la distance focale est négative et les foyers sont virtuels. Un objet réel donne toujours une image virtuelle plus petite que lui. Les dimensions relatives sont données par la formule : $\frac{A'B'}{AB} = \frac{p}{q}$.

L'image est renversée à chaque fois qu'elle se trouve de l'autre côté de la lentille par rapport à l'objet ; ils sont alors ou tous les deux réels, ou tous les deux virtuels.

La *puissance* d'une lentille mince est mesurée en *dioptries*. Elle est égale à l'inverse de la distance focale, mesurée en mètres. On fabrique couramment des lentilles de 50 dioptries, c'est-à-dire une distance focale de 2 cm. C'est aussi l'ordre de grandeur de la puissance du cristallin de l'œil humain. La puissance est une quantité linéaire, au sens suivant : si l'on accole deux lentilles minces, la puissance totale est égale à la somme de celles des deux composants.

Systèmes centrés

On appelle système centré un système optique possédant une symétrie de révolution. On démontre qu'il doit être utilisé dans les conditions de Gauss pour donner une image quelle que soit la position de l'objet. Il existe cependant un cas de dégénérescence où l'on obtient toujours une image, mais celle-ci a alors même dimension que l'objet : cela se produit par exemple avec un miroir plan. Un système centré est composé de dioptres, éventuellement de miroirs sphériques, ayant tous même axe optique. Il est important d'en étudier les propriétés générales, car tous les instruments d'optique comportent des systèmes centrés, en particulier des combinaisons de plusieurs lentilles minces.

Il existe deux *foyers*, définis de façon usuelle : images des deux points à l'infini dans la direction de l'axe optique. On peut définir des *plans principaux* HH' qui sont les lieux des intersections des rayons incidents parallèles à l'axe avec les rayons émergents passant par le foyer correspondant (*fig.* 26). Dans ces plans, le grandissement est unitaire. On définit encore les *points nodaux* NN' qui sont des points conjugués tels qu'un rayon émergent passant par l'un soit parallèle au rayon incident passant par l'autre. La formule suivante permet de connaître la position de l'image en fonction de celle de l'objet :

$$\frac{n_2}{O'A'} - \frac{n_1}{OA} = \frac{n_2}{O'F'}$$

O et O' étant les intersections des plans principaux et de l'axe optique, n_1 et n_2 les indices des milieux extrêmes. Pour une lentille mince ou un miroir sphérique, les points O et O' sont confondus au centre de la lentille, ou à l'intersection du miroir et de l'axe optique. On retrouve la formule **(0)** avec cependant une condition de signe différente : les distances sont comptées algébriquement et non plus suivant la nature, réelle ou virtuelle, de l'objet et de l'image. Le grandissement est donné par la formule :

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{n_1}{n_2}\frac{O'A'}{OA}$$

Il existe une autre relation, en prenant cette fois l'origine aux foyers :

$$FA \cdot F'A' = FO \cdot F'O'$$

Si l'image d'un objet situé à l'infini est également rejetée à l'infini, comme c'est le cas dans les instruments astronomiques, on dit que le système est télescopique ou afocal (il ne possède pas de foyers). Le grandissement est alors constant, et le déplacement de l'image sur l'axe est proportionnel à celui de l'objet.

Principe de Fermat

Les lois fondamentales de l'optique géométrique, propagation rectiligne, réflexion, réfraction, peuvent être rassemblées sous une forme plus synthétique, qu'on appelle principe de Fermat.

Considérons deux points quelconques A et B, et cherchons quel est le trajet que doit suivre un rayon lumineux partant de A pour atteindre B. On suppose connue la vitesse de propagation de la lumière en tout point de l'espace dans la région qui nous intéresse. Parmi toutes les courbes AB possibles que l'on peut tracer, il y en a au moins une qui donne une durée de trajet minimale. Il peut y en avoir plusieurs, si le système optique comporte une symétrie géométrique, par exemple ; il peut aussi y avoir un minimum absolu et un minimum relatif. En toute généralité, le principe de Fermat énonce que la durée de propagation le long d'un rayon présente un extrémum (minimum, ou plus rarement maximum).

Dans un milieu homogène, la vitesse de la lumière est la même en tout point ; la droite étant le plus court chemin d'un point à un autre, on en déduit la loi de propagation rectiligne de la lumière. Dans le phénomène de la réflexion (*fig.* 27), le segment AB est le trajet de durée la plus courte, mais un calcul géométrique simple montre que, parmi tous les chemins AMB, AM'B, AM''B, etc., le trajet AMB, satisfaisant à la condition $i = r$, est un minimum relatif. On peut également retrouver la loi de la réfraction, l'indice optique d'un milieu étant défini comme le rapport des vitesses de la lumière dans le vide et dans la matière. On appelle *chemin optique* entre deux points la durée du trajet de la lumière, multiplié par *c*. Si un rayon traverse plusieurs milieux d'indice n_1, n_2, ..., sur des distances l_1, l_2, ..., le chemin optique est donc égal à :

$$D = n_1 l_1 + n_2 l_2 + ...$$

Le principe de Fermat peut être appliqué directement à la recherche des images. En effet, pour qu'il y ait une image B d'un point objet A, il faut que tous les rayons issus de A se recoupent en B. On dit que le système optique est stigmatique pour le couple AB. Une condition nécessaire et suffisante est que tous les chemins optiques réalisés entre A et B soient égaux. Cela peut s'appliquer directement aux ensembles que nous avons déjà rencontrés : stigmatisme rigoureux pour les foyers d'un miroir elliptique, l'infini et le foyer d'un miroir parabolique, ou les points de Young-Weierstrass d'un dioptre sphérique ; stigmatisme approché pour un prisme mince ou une lentille en optique paraxiale.

Il existe une condition générale pour un système de révolution. Supposons qu'il soit stigmatique pour un couple de points conjugués AA' situés sur son axe, on peut montrer qu'il l'est encore pour des points voisins BB', situés dans les plans de front passant par AA', moyennant la condition des sinus :

$$n \, AB \sin \alpha = n' \, A'B' \sin \alpha'$$

Les angles α et α' sont ceux que font, avec l'axe, les rayons conjugués en A et A'. Un instrument stigmatique satisfaisant de plus à cette condition est dit *aplanétique*.

Le **théorème de Malus** est une formation différente, mais équivalente du principe de Fermat, faisant appel à la notion de surface d'onde. Pour un ensemble de rayons lumineux tous issus d'un point source unique, il existe des surfaces normales à tous les rayons ; les distances entre deux surfaces quelconques, comptées le long des rayons,

sont toutes égales à une même valeur. Dans un milieu isotrope, les surfaces d'onde sont toutes les sphères ayant pour centre le point source. Le terme même de surface d'onde est directement issu de la théorie ondulatoire : il s'agit des surfaces de phase constante.

Le théorème de Malus est utile lorsque l'on veut simplifier le calcul des différences de chemins optiques au travers d'appareils plus ou moins complexes. En effet, si l'on connaît une surface d'onde, il est inutile de calculer les chemins optiques complets depuis la source ponctuelle, mais simplement depuis la surface d'onde. Cette propriété est très utile dans l'étude des interférences et de la diffraction.

Interférence et diffraction

Les interférences et la diffraction sont des phénomènes typiquement ondulatoires qui interviennent en optique lorsque la longueur d'onde n'est pas négligeable devant les dimensions de l'appareillage. Nous nous contenterons de rappeler les notions fondamentales, étudiées en mécanique et en acoustique.

Montages interférentiels simples

Il y a interférence lorsque deux ondes de même période arrivent au même point. Si a et a' sont les amplitudes des deux vibrations, φ la différence de phase, l'amplitude A de la vibration résultante est donnée par :

$$A^2 = a^2 + a'^2 + 2\,aa' \cos \varphi$$

Il y a interférence constructive si les ondes sont en phase ($\varphi = 0$), destructive si les ondes sont en opposition de phase ($\varphi = \pi$). Si de plus les amplitudes sont égales, il y a annulation pure et simple lorsque $\varphi = \pi$. Un problème particulier se pose en optique, du fait de la très grande fréquence des vibrations, de l'ordre de 10^{14} hertz. Dans la plupart des sources, l'émission est produite par des atomes excités dont les électrons retombent sur l'état fondamental. Pendant le temps d'observation nécessaire à la rétine ou à la plaque photographique, le processus se reproduit des milliards de fois, en différents points de la source. Lorsque l'on tente de faire des interférences avec des rayons provenant de points différents, on observe en fait un grand nombre d'émissions avec des différences de phase variées. De telles sources sont dites incohérentes ; pour produire des interférences avec elles, il faut utiliser deux rayons provenant du même point. Nous laisserons pour le moment de côté le cas des sources cohérentes, c'est-à-dire, pour le domaine optique, des lasers, et pour le domaine des radiofréquences, des masers et des émetteurs radio.

Les expériences simples d'interférence utilisent le dispositif général suivant (*fig.* 28) : par un procédé quelconque, on forme deux images S_1 et S_2 d'une source ponctuelle, séparées d'une distance d ; à une distance D, dans la zone de recouvrement des rayons, on place un écran E. Soit L_1 et L_2 les chemins optiques des deux ondes entre les deux sources secondaires S_1 et S_2 et un point M observé sur l'écran. La différence de phase est égale à :

$$\varphi = 2\pi \frac{L_1 - L_2}{\lambda}$$

λ étant la longueur d'onde de la lumière. Dans le plan médiateur de S_1S_2, les chemins optiques sont égaux, et on a donc en O sur l'écran une frange brillante. Pour un point situé à une distance h de cette frange, on a :

$$L_1 - L_2 = \frac{h}{D} d$$

dans l'approximation où h et d sont beaucoup plus petits que D. On a donc un système de franges parallèles équidistantes, alternativement noires et brillantes. L'interfrange correspond à un déphasage de 2π ; il est égal à :

$$i = \lambda \frac{D}{d} \qquad (1)$$

Pour des valeurs typiques de $\lambda = 0{,}5\,\mu$, D = 1 m, d = 1 mm, on a i = 0,5 mm ; on se trouve donc bien dans l'approximation citée plus haut.

Dans l'expérience des miroirs de Fresnel (*fig.* 29), les deux images sont formées par deux miroirs faisant entre eux un angle faible. Il existe d'autres systèmes optiques, comme les biprismes de Fresnel utilisant la déviation de deux prismes d'angle faible, ou les bilentilles de Billet, formées de deux demi-lentilles d'axe optique différent (*fig.* 30).

L'expérience des trous d'Young, de construction très simple, est en fait plus complexe, car elle fait appel au phénomène de diffraction (*fig.* 31). Deux trous très fins sont percés dans un écran : il n'y a plus alors propagation rectiligne de la lumière, S_1 et S_2 se comportent comme des sources secondaires et présentent une région d'interférence.

En pratique, il est impossible d'avoir une source strictement ponctuelle, au sens géométrique du terme. Supposons qu'elle ait une certaine hauteur h ; les points extrêmes de la source donneront des systèmes de franges déplacés l'un par rapport à l'autre sur l'écran d'une hauteur égale à h, en première approximation. Pour que les franges restent visibles, il suffit que les systèmes formés par différents points de la source se superposent sensiblement, c'est-à-dire que h soit plus petit que l'interfrange i. Si l'on considère maintenant la direction perpendiculaire à la figure et parallèle aux franges, il y a toujours superposition. Il est donc possible d'utiliser une fente au lieu d'une source ponctuelle, cet artifice permettant d'augmenter considérablement la luminosité. Dans le cas de l'expérience d'Young, les trous sont également des fentes. D'autre part, le fait d'observer sur un écran diffusant a l'inconvénient de donner lieu à un énorme gaspillage de lumière. Si on le supprime et que l'on regarde à l'œil nu, ou mieux avec une loupe, la position qu'il occupait, on continue à voir les franges.

Phénomènes en lumière blanche

Dans tous les dispositifs précédemment décrits, nous avons supposé que la lumière utilisée était monochromatique. Si ce n'est pas le cas, le phénomène se complique, car d'après la formule **(1)**, à chaque longueur d'onde correspond une valeur différente de l'interfrange i. On a donc plusieurs systèmes de franges de différentes couleurs qui se chevauchent. Au centre de l'écran, les chemins optiques sont égaux, la différence de marche est nulle, et toutes les radiations interfèrent additivement : la

fig. 29

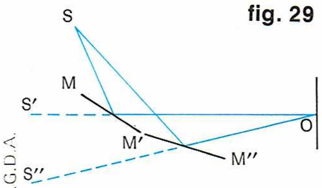

I.G.D.A.

▲ *Figure 29 ; dispositifs des miroirs de Fresnel : les miroirs MM' et M'M'' donnent de la source S deux images cohérentes S' et S'' qui interfèrent au point O.*

▼ *Figure 31 ; expérience d'Young : la source S donne en S_1 et S_2 des vibrations en phase ; par diffraction, les deux trous envoient des rayons dans toutes les directions, il y a donc une zone d'interférence sur l'écran O.*

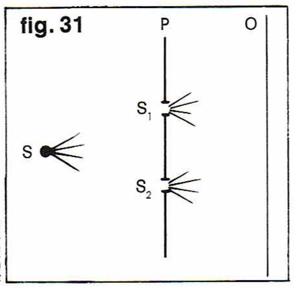

I.G.D.A.

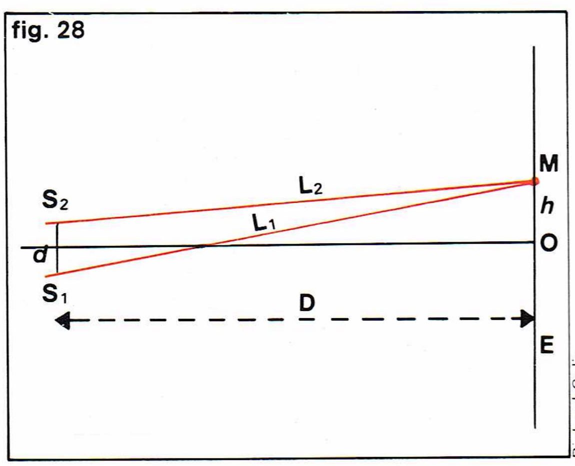

Richard Colin

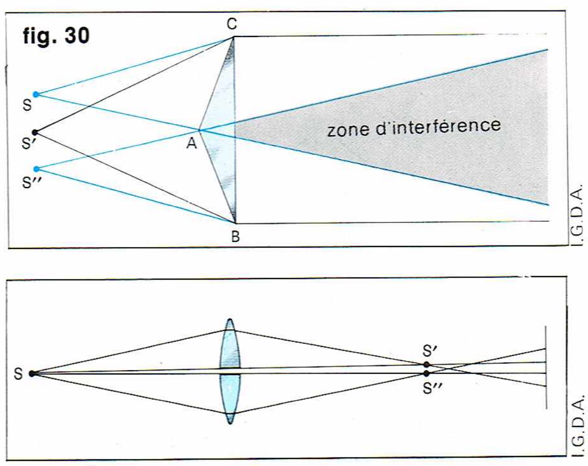

I.G.D.A.

◀ *A gauche, figure 28 : les sources S_1 et S_2, très rapprochées, sont les images d'une même source ponctuelle (non figurée) ; on observe des franges sur l'écran E.*
A droite, figure 30 : dispositifs des biprismes de Fresnel et des bilentilles de Billet.

▶ *Franges d'interférence en lumière blanche : teintes de Newton.*

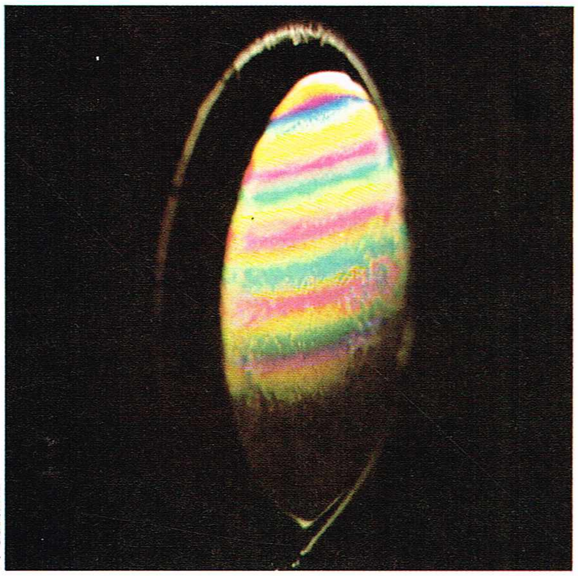

P. Castano

▼ *Anneaux de Newton en lumière blanche.*

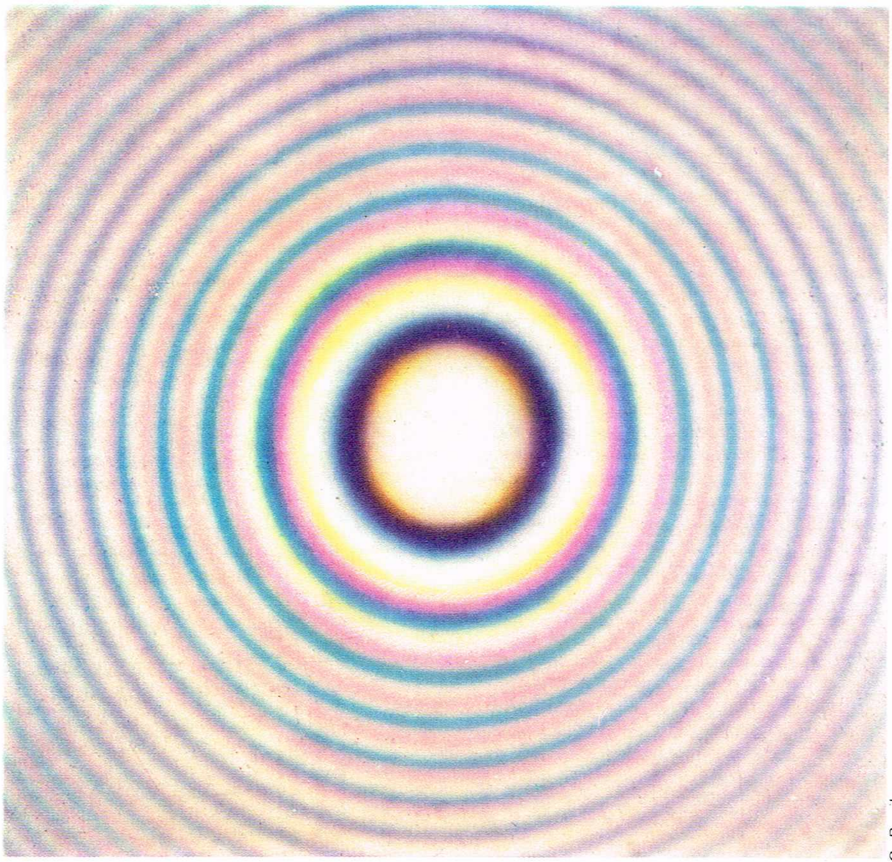

C. Bevilacqua

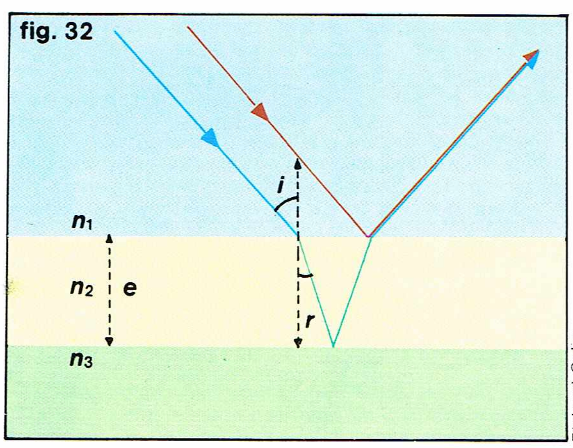

▶ *Figure 32 ; interférence par une lame mince : les deux rayons concernés sont dessinés en bleu et en rouge.*

Richard Colin

frange centrale est donc blanche. Lorsque l'on commence à s'écarter de celle-ci, la lumière de plus courte longueur d'onde présente une frange sombre. On observe donc un mélange de couleurs d'où le bleu est absent, c'est-à-dire un brun-rouge. En continuant, c'est le rouge qui disparaît, et il reste une teinte bleutée. Pour chaque valeur de la différence de chemin optique $\delta = L_1 - L_2$, il existe une teinte caractéristique, dont l'ensemble forme l'échelle des teintes de Newton. Lorsque δ dépasse 5μ, on a un mélange complexe qui, à l'œil, n'apparaît plus coloré : c'est un blanc d'ordre supérieur. L'analyse au spectroscope montre un spectre où les radiations telles que

$$\lambda = \delta / \left(k + \frac{1}{2}\right)$$

k étant un entier, sont absentes ; on dit que l'on a un spectre cannelé.

Il existe aussi une échelle des teintes de Newton à frange centrale noire, qui présente des colorations exactement complémentaires de l'échelle ordinaire. On l'observe lorsqu'une des deux ondes a subi un déphasage de π, par exemple à la suite d'une réflexion vitreuse supplémentaire.

Les montages interférentiels décrits permettent de mesurer de façon précise l'épaisseur e d'un objet transparent d'indice n. Il suffit d'interposer cet objet sur le trajet d'une des deux ondes, ce qui introduit une variation de chemin optique égale à $\delta = e\,(n - 1)$. Si l'objet est très mince, on voit en lumière blanche, au centre de l'écran, une teinte dont l'identification donne une évaluation de δ. Si l'objet est plus épais, des franges se forment au point d'observation, et il suffit alors de compter leur nombre. On ne peut pas mesurer des valeurs de δ très grandes, car on obtient rapidement un blanc d'ordre supérieur. Il faut alors compter les franges en lumière monochromatique, mais il existe de toute façon une limitation due au fait qu'une source n'est jamais strictement monochromatique et possède une certaine largeur de raie. Quoi qu'il en soit, les mesures de distances par une méthode interférentielle sont les plus précises qui existent ; ainsi la définition actuelle du mètre comme étalon de longueur est, depuis 1957 : 1 650 763,77 fois la longueur d'onde dans le vide de la radiation orangée de l'isotope 86 du krypton.

Interférences des lames minces

Trois milieux transparents d'indices n_1, n_2 et n_3 déterminent une lame d'épaisseur e qui peut, sur une région peu étendue, être assimilée à une lame à faces parallèles. Deux rayons provenant d'une source éloignée ressortent confondus et donnent des interférences, l'un étant réfléchi sur le premier dioptre, l'autre sur le deuxième (après réfraction sur le premier) [*fig.* 32]. La différence de marche est égale géométriquement à

$$\delta = 2\, n_2\, e \cos r \qquad (2)$$

Il faut tenir compte, de plus, d'un déphasage de π, à chaque fois que se produit une réflexion, lorsque le premier milieu est moins réfringent que le second. Aux deux rayons représentés sur la figure peuvent se superposer des rayons ayant subi des réflexions multiples sur deux surfaces. Cependant, dans les cas usuels, leur intensité est faible, compte tenu du facteur de réflexion, et on peut les négliger.

Si l'on opère avec un faisceau parallèle de lumière venant d'une source à l'infini, l'épaisseur de la lame étant strictement constante, la différence de marche est fixée, et l'on observe une intensité uniforme. Par contre, si l'épaisseur varie, il se produit des franges alternativement brillantes et obscures. L'expérience peut être faite en prenant la couche d'air comprise entre un plan de verre et la surface sphérique d'une lentille plan-convexe (*fig.* 33). On obtient des cercles appelés anneaux de Newton, centrés sur le point de contact du plan et de la sphère ; les rayons sont proportionnels aux racines carrées des premiers nombres entiers.

Interférences à ondes multiples

Considérons une lame à faces parallèles plongée dans l'air et dont le coefficient de réflexion est augmenté par un dépôt d'argent. Les différents rayons transmis ne sont plus d'intensité négligeable les uns par rapport aux autres (*fig.* 34), et chaque double réflexion supplémentaire introduit une différence de phase constante φ.

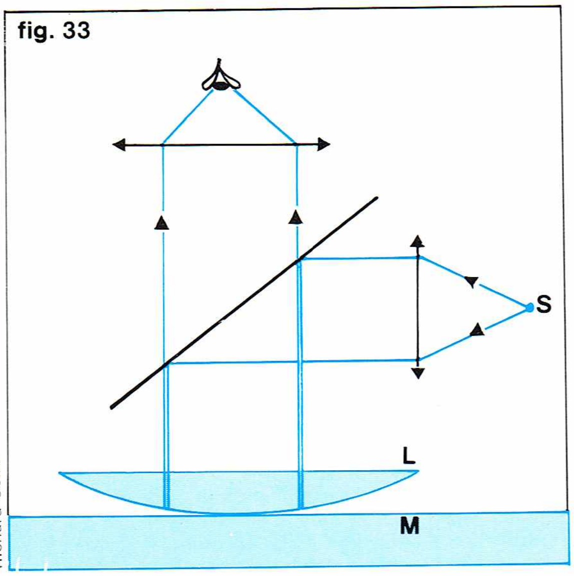

◀ ***Figure 33; montage permettant d'observer les anneaux de Newton : franges d'égale épaisseur entre la lentille* L *et le miroir* M.**

Appelons ρ le facteur de réflexion de chaque surface ; on peut calculer l'amplitude résultante comme la somme géométrique des amplitudes de tous les rayons. On trouve alors l'intensité :

$$I = \frac{(1-\rho)^2}{(1-\rho)^2 + 4\rho \sin^2 \frac{\varphi}{2}}$$

Les positions des franges sont les mêmes que dans le cas d'une interférence à deux ondes, mais, si ρ est voisin de 1, les maximums sont beaucoup plus pointus et les minimums beaucoup plus plats. Les franges ont l'aspect de raies brillantes et fines se détachant sur un fond noir très obscur. Cette propriété se révèle utile lorsque l'on veut faire des mesures précises.

En général, l'épaisseur est constante, et on observe des anneaux à l'infini. Si la source n'est pas monochromatique et présente un spectre de raies, celles-ci sont bien séparées, grâce à leur finesse.

L'interféromètre de Pérot-Fabry est formé de deux plaques de verres dont l'écartement est réglable, ce qui permet de limiter une lame mince d'air. Il est utilisé en spectroscopie pour la mesure précise des longueurs d'onde, ainsi que dans la réalisation des lasers, comme cavité résonnante. Un étalon interférentiel est un appareil semblable, mais dont l'écartement est fixe. Il sert à filtrer de façon très sélective les longueurs d'onde.

Principe de Huygens-Fresnel

Le phénomène de la diffraction se manifeste tout d'abord par un écart par rapport au principe de la propagation rectiligne de la lumière. Une ouverture très fine M, percée dans un écran éclairé par une source G (*fig.* 35), laisse passer des rayons qui forment un angle non nul avec la direction GM. Le point M se comporte comme une source secondaire qui émet dans toutes les directions, d'autant mieux que le trou est plus petit. Une autre expérience consiste à placer un objet opaque dans le faisceau d'une source ponctuelle et à observer l'ombre portée sur un écran (*fig.* 36). Si le principe de propagation rectiligne était vérifié, on devrait avoir une limite nette, sans pénombre. En fait, la lumière pénètre dans l'ombre géométrique, tandis qu'on aperçoit, à l'extérieur, une série de franges.

Le principe de Huygens fournit une première interprétation qualitative de la diffraction. Il affirme que, lorsque l'on connaît une surface d'onde S, on peut construire une des surfaces d'onde suivantes S′ en additionnant toutes les vibrations produites par des sources fictives conve-

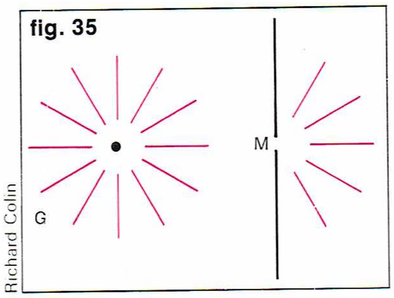

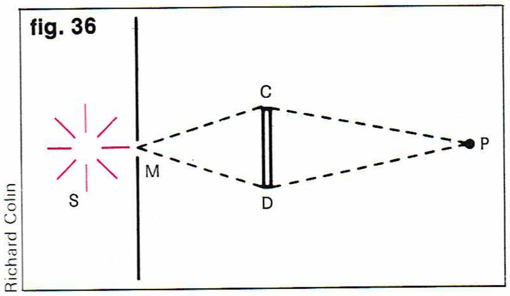

▲ ***Figure 35 : diffraction par une petite ouverture* M.**
Figure 36 : diffraction au voisinage d'un écran* CD *; on observe de la lumière au point* P*, contrairement aux lois de l'optique géométrique.

nablement réparties sur S. Autrement dit, tout point de l'espace touché par la lumière se comporte comme une nouvelle source secondaire. Toutes ces sources dérivées interfèrent, et l'onde résultante reproduit celle qui est observée réellement en un point plus éloigné. Il y a ainsi propagation de proche en proche, de surface d'onde en surface d'onde. Le principe de Huygens n'est qu'une traduction géométrique du théorème de Malus, la surface d'onde S′ étant l'enveloppe des ondes sphériques provenant des sources fictives. Pour faire des calculs complets, il est nécessaire de préciser cette hypothèse, ce qui est fait par le *postulat de Fresnel :* un point de la surface S peut être considéré comme une source dont l'amplitude et la phase sont précisément égales à celles de la vibration arrivant en ce point.

Il subsiste une difficulté d'ordre théorique lorsque l'on essaie d'appliquer sans précaution le principe de Huygens : chaque source fictive, si elle se comporte effectivement comme une source réelle, émet dans toutes les directions, en particulier dans le sens inverse de propagation des rayons lumineux.

Une théorie plus rigoureuse a été élaborée par *Helmholtz* et *Kirchhoff* à partir de l'équation générale des ondes. Le résultat est le suivant : l'onde produite par une source ponctuelle O en un point M peut être calculée comme la somme d'ondes produites par des sources fictives F réparties sur une surface fermée quelconque S contenant O et ne contenant pas M. Chaque source a pour phase la phase produite en F par le point O, additionnée de $\frac{\pi}{2}$. Son amplitude est une certaine fonction, donnée par la théorie, de l'amplitude en F. Sa distribution angulaire n'est pas isotrope, mais présente un maximum vers l'avant et est nulle dans la direction de la source O ; cette dernière propriété résout donc la difficulté de principe soulevée par le postulat de Fresnel.

En fait, si l'on ne s'intéresse pas à la phase de la vibration reconstruite et que l'on se limite au calcul des intensités dans un domaine angulaire pas trop grand, le principe de Huygens-Fresnel fournit le résultat correct, tel qu'il est observé expérimentalement. D'ailleurs, la formule de Kirchhoff n'est valable que pour des ondes scalaires ; la méthode, appliquée aux ondes électromagnétiques, qui sont des ondes vectorielles, ne donne de solution que dans un petit nombre de cas, et implique de grandes difficultés mathématiques.

Les problèmes de diffraction peuvent être résolus simplement à l'aide du principe de Huygens-Fresnel, à l'approximation suivante : considérons un écran quelconque ayant une ouverture qui laisse passer la lumière venant de la source ; on admet qu'en tout point de l'ouverture la vibration est la même que s'il n'y avait pas d'écran, et qu'en dehors de l'ouverture elle est strictement nulle. Autrement dit, la présence d'un corps opaque ne perturbe pas la propagation des ondes avant qu'elles arrivent sur lui ; d'autre part, le matériau dont il est fait

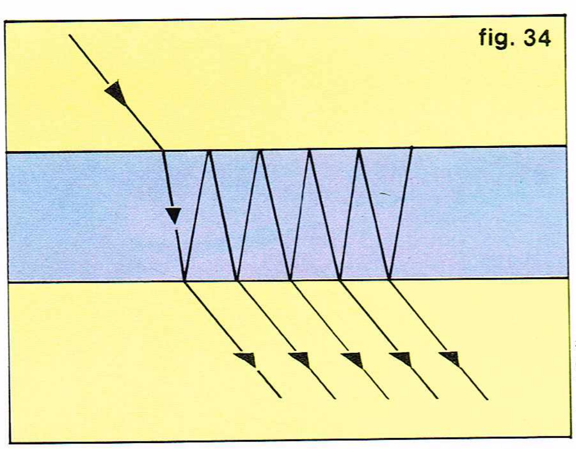

◀ ***Figure 34 : interférences à ondes multiples par une lame à faces parallèles.***

▶ *Figure 37 : diffraction de Fresnel.*

fig. 37

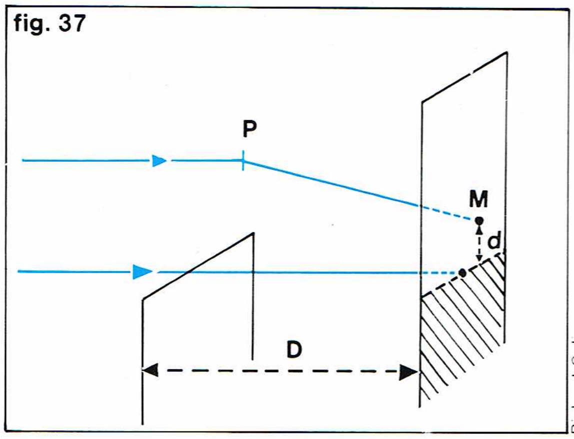

Richard Colin

ne joue aucun rôle. On peut montrer, dans les cas où la résolution exacte est possible, que cela n'est pas vrai pour les points se trouvant à une distance de l'écran inférieure à quelques longueurs d'onde.

Diffraction de Fresnel

On dit qu'il y a diffraction de Fresnel lorsque l'on observe sur un écran des franges au voisinage de l'ombre géométrique d'un obstacle. Considérons, pour fixer les idées, le cas d'un demi-plan opaque éclairé par une source à l'infini, et d'un écran placé à une distance D (*fig.* 37). Appelons A l'amplitude reçue par le point M, situé à une distance d de l'ombre géométrique. Elle est formée par l'interférence des ondes provenant de toutes les sources secondaires P couvrant le demi-plan non obturé. Leur amplitude est inversement proportionnelle à la distance PM, c'est-à-dire que seuls les points P proches contribuent à la sommation. Leur différence de phase par rapport à M est égale à :

$$\varphi = 2\pi \frac{PM}{\lambda}$$

Tous calculs faits, on trouve l'intensité I, égale au module carré de l'amplitude :

$$I = |A|^2 = \frac{1}{2}\left\{\left[\frac{1}{2} + C(V)\right]^2 + \left[\frac{1}{2} + S(V)\right]^2\right\}$$

où V est la variable sans dimension :

$$V = d\sqrt{\frac{2}{\lambda D}}$$

et C et S sont les intégrales de Fresnel :

$$C(x) = \int_0^x \cos\frac{\pi}{2}t^2 dt \qquad S(x) = \int_0^x \sin\frac{\pi}{2}t^2 dt$$

Les fonctions C et S sont calculables numériquement, et il en existe des tables. La *figure* 38 représente la variation de l'intensité I en fonction de V. S'il y avait propagation rectiligne, on aurait $I = 0$ pour $V < 0$ et $I = 1$ pour $V > 0$. La courbe montre qu'il y a un faible éclairement dans la zone d'ombre, au voisinage de la limite, et que, dans la zone éclairée, il y a des franges de minimum non nul et d'amplitude décroissante. La diffraction se manifeste dans une zone où $V \simeq 1$, ce qui donne, avec les valeurs numériques $D = 1$ m, $\lambda = 0{,}5\ \mu$: $d = 0{,}5$ mm. Comme dans le cas des interférences, l'utilisation d'une source étendue fait disparaître le phénomène, sauf dans le cas particulier d'une fente parallèle à l'arête de l'obstacle. De même, si l'on opère en lumière blanche, on observe des franges colorées, puisque la longueur d'onde intervient dans le résultat du calcul.

Diffraction de Fraunhofer

La diffraction de Fraunhofer est différente de la précédente : on observe à l'infini l'onde résultante après le passage d'un faisceau parallèle à travers une ouverture de dimension finie. Le faisceau perd son parallélisme, et il apparaît de la lumière progressant dans des directions différentes de la direction initiale. On peut traiter le problème en toute généralité, quelle que soit la forme de l'ouverture, en définissant la transparence $u(x, y)$ de l'écran : c'est la quantité par laquelle il faut multiplier l'amplitude incidente en chaque point M de coordonnées (x, y) pour avoir l'amplitude de la source fictive en ce point (*fig.* 39). Dans les parties opaques de l'écran, $u = 0$, et, dans les parties totalement transparentes, $u = 1$; la seule limitation sur cette fonction est qu'elle soit nulle au-delà d'une certaine valeur de x et de y, c'est-à-dire en fait que l'ouverture ne s'étende pas jusqu'à l'infini. Appelons k un vecteur d'onde, qui est défini comme suit :

— sa direction est celle des rayons lumineux, c'est donc la normale à une surface d'onde ;

— sa longueur est égale à : $k = \frac{1}{\lambda}$.

Lorsque l'on a une source à l'infini dans une direction perpendiculaire à l'écran, celui-ci reçoit des ondes planes qui lui sont parallèles. L'observateur étant à l'infini, il reçoit des ondes planes dont la direction est définie par la normale à celle de $\vec{k}$, comme c'est indiqué sur la figure. La différence de phase entre deux rayons parallèles, l'un issu de l'origine des coordonnées O, l'autre d'un point quelconque M, est égale à :

$$\varphi = 2\pi\vec{k}\cdot\vec{r}$$

où $\vec{r}$ est le vecteur $\overrightarrow{OM}$.

Il y a une infinité de vibrations qui s'additionnent, venant de tous les points de la surface de l'écran. Il faut donc calculer l'amplitude résultante $A(\vec{k})$, dans la direction $\vec{k}$ par l'intégrale :

$$\textbf{(3)} \qquad A(\vec{k}) = \iint e^{2i\pi\vec{k}\cdot\vec{r}}\, u(x, y)\, dx\, dy$$

Dans cette formule, on emploie la notation exponentielle des mouvements vibratoires qui permet de représenter à la fois l'amplitude $u(x, y)$ et la phase $2\pi\vec{k}\cdot\vec{r}$. L'intégrale est étendue à tous les points de l'écran, conformément au principe de Huygens-Fresnel. L'intensité recueillie par l'observateur dans la direction de $\vec{k}$ est égale au module du carré de l'amplitude. Elle dépend en fait de deux variables, qui sont les deux angles définissant la direction des rayons lumineux. Du point de vue mathématique, l'opération définie par la formule **(3)** qui fait correspondre à une fonction de plusieurs variables $u(x, y)$ une autre fonction du même nombre de variables $A(\vec{k})$ s'appelle une *transformation de Fourier*. On la retrouve de façon assez universelle en optique, ainsi que dans d'autres domaines de la physique. La diffraction de Fraunhofer permet d'avoir une méthode simple de détermination numérique d'une transformée de Fourier. Il suffit de cons-

fig. 38

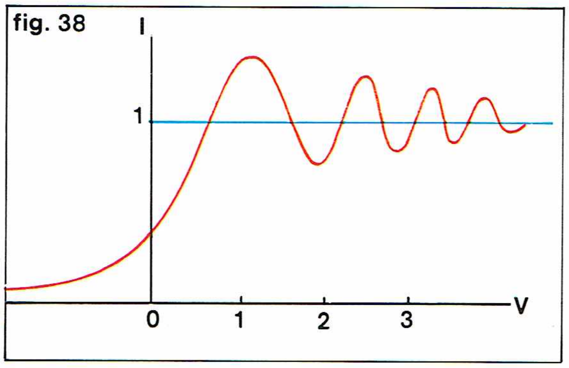

Richard Colin

fig. 39

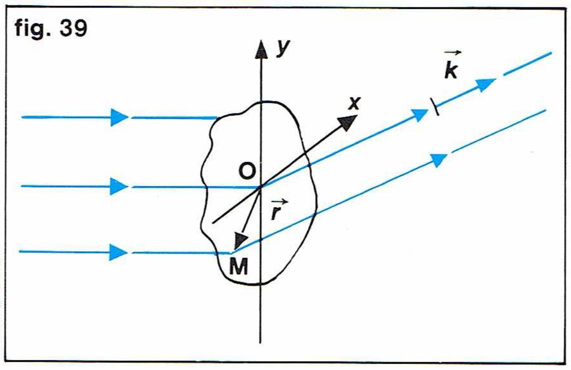

Richard Colin

▶ *A gauche, figure 38 : courbe représentant l'intensité lumineuse au voisinage de l'ombre géométrique dans la diffraction de Fresnel. A droite, figure 39 : diffraction de Fraunhofer.*

truire un écran ayant pour transparence la fonction $u\ (x, y)$ et de photographier la figure de diffraction obtenue. Dans le cas où l'onde incidente n'est pas parallèle à l'écran, mais fait avec lui l'angle θ, l'ensemble de la figure de diffraction subit une rotation d'angle θ.

Lorsque l'écran est percé par une fente de largeur d et de très grande longueur, la figure de diffraction obtenue comporte une frange centrale brillante et des franges alternativement claires et sombres, parallèles et régulièrement espacées. L'intensité des maximums décroît de façon inversement proportionnelle au carré de la distance du centre. L'angle séparant deux franges est égal à λ/d. Il est d'autant plus petit que la fente est plus large et, à la limite où la longueur d'onde devient négligeable devant la dimension d, on se trouve dans le cas de l'optique géométrique : aucun rayon lumineux n'a une direction différente de celle des rayons incidents. Si, au lieu d'une fente de grande longueur, l'ouverture est un rectangle de côtés d_1 et d_2, on observe un phénomène analogue aux franges, mais en deux dimensions. Il apparait des rectangles brillants séparés par des lignes sombres, l'intensité décroissant comme précédemment lorsque l'on s'éloigne du centre. Ils ont tous des dimensions égales, et les ouvertures angulaires de leurs côtés sont : λ/d_1 et λ/d_2.

Le cas le plus fréquent en pratique est celui d'une ouverture circulaire, un support de lentille mince par exemple. On démontre alors par la théorie des fonctions de Bessel que l'on a des franges circulaires à centre brillant, d'intensité décroissante. Elles ne sont pas régulièrement espacées, l'interfrange décroît au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre. Le calcul montre que la tache reçoit 84 % de l'énergie lumineuse et que l'angle du premier anneau noir est égal à $1{,}22\ \lambda/2\ R$, où R est le rayon de l'ouverture.

L'expérience d'interférence par les trous de Young fait appel à la diffraction en prenant, comme sources secondaires, les ouvertures de l'écran. Dans ce cas, si l'on appelle d la largeur des fentes et D leur distance, il y a, à l'intérieur des grandes franges de diffraction, d'interfrange λ/d, de petites franges d'interférence, d'interfrange λ/D. Il faut remarquer enfin que, dans tous ces phénomènes donnant lieu à la formation de franges, l'énergie lumineuse, c'est-à-dire l'intensité, est, comme il se doit, conservée. On peut calculer que ce qui manque dans une frange obscure est toujours exactement compensé par ce qui est en excès dans les franges brillantes ; il y a donc simplement déplacement spatial de l'énergie sur des distances de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de la lumière.

Diffraction dans les instruments d'optique

Pour qu'il y ait formation d'une image dans un instrument d'optique, il faut que tous les rayons provenant d'un point de l'objet convergent au point correspondant de l'image. Or les systèmes optiques ont tous des dimensions limitées et donnent donc lieu à des phénomènes de diffraction.

Dans une lunette astronomique, par exemple, toute la lumière reçue doit passer par la lentille qui se comporte ainsi comme une ouverture circulaire percée dans un écran. L'image d'une étoile n'est pas un point mais une tache appelée tache d'Airy. Lorsque deux étoiles de même éclat sont très rapprochées, leurs taches d'Airy se recouvrent partiellement, et il est impossible de distinguer si l'on a affaire à une ou deux images. On appelle *pouvoir séparateur* d'un instrument d'optique l'angle minimal que doivent présenter entre eux deux objets pour pouvoir être distingués. Pour l'augmenter, on a intérêt à avoir des surfaces optiques de très grandes dimensions. Mais cette condition est souvent contradictoire avec d'autres corrections (aberrations, défauts de construction).

La longueur d'onde de la lumière n'est pas du tout une limite inférieure de la dimension des objets qui restent visibles. Cela tient à ce que l'image d'un point n'étant pas un point mais une tache, l'image d'un objet étendu n'est pas identique à l'objet. Par exemple une ligne très mince donne, par diffraction, une bande assez large, relativement moins lumineuse que le reste de l'image. Mais l'œil est très sensible au contraste, et il est capable de percevoir une variation d'éclairement de l'ordre de 4 %. On s'explique ainsi que l'on puisse voir un fil très fin se détachant sur le ciel, bien que sa largeur angulaire soit très inférieure

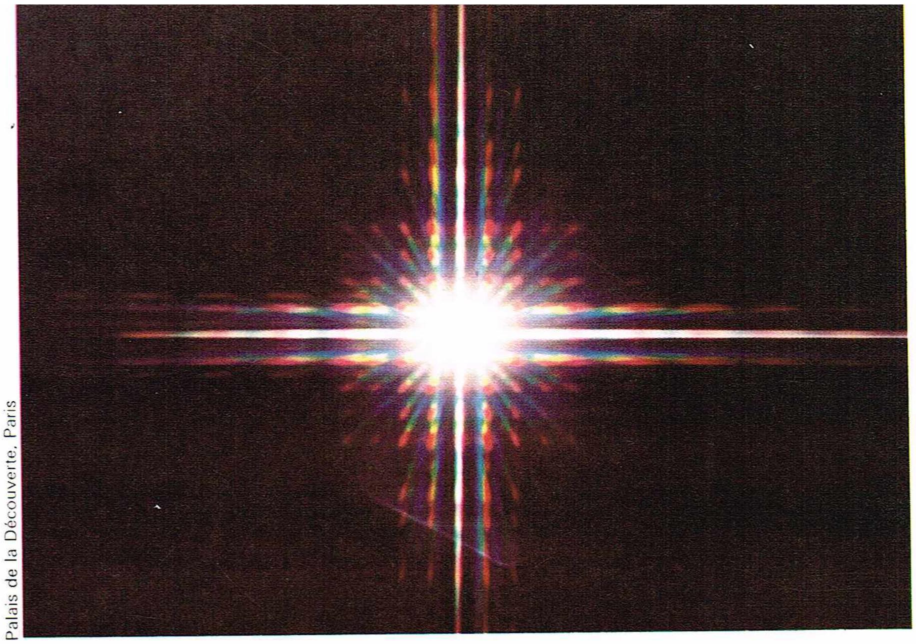

Palais de la Découverte, Paris

▲ *Figure de diffraction obtenue par observation d'une source ponctuelle de lumière blanche à travers une trame textile à 2 dimensions.*

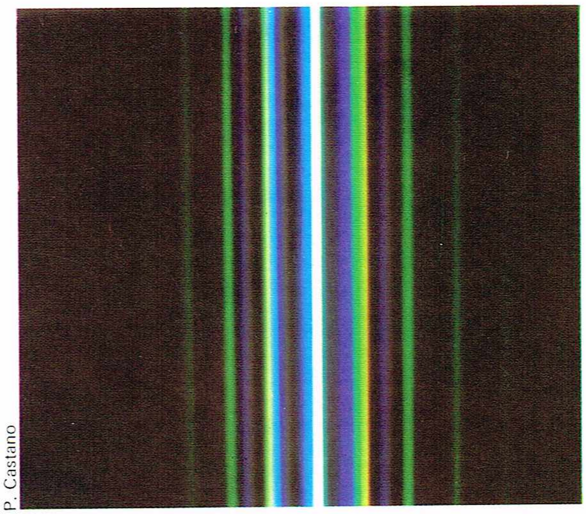

P. Castano

◄ *Figure de diffraction obtenue avec une lampe à mercure.*

▼ *Expérience de diffraction par une fente.*

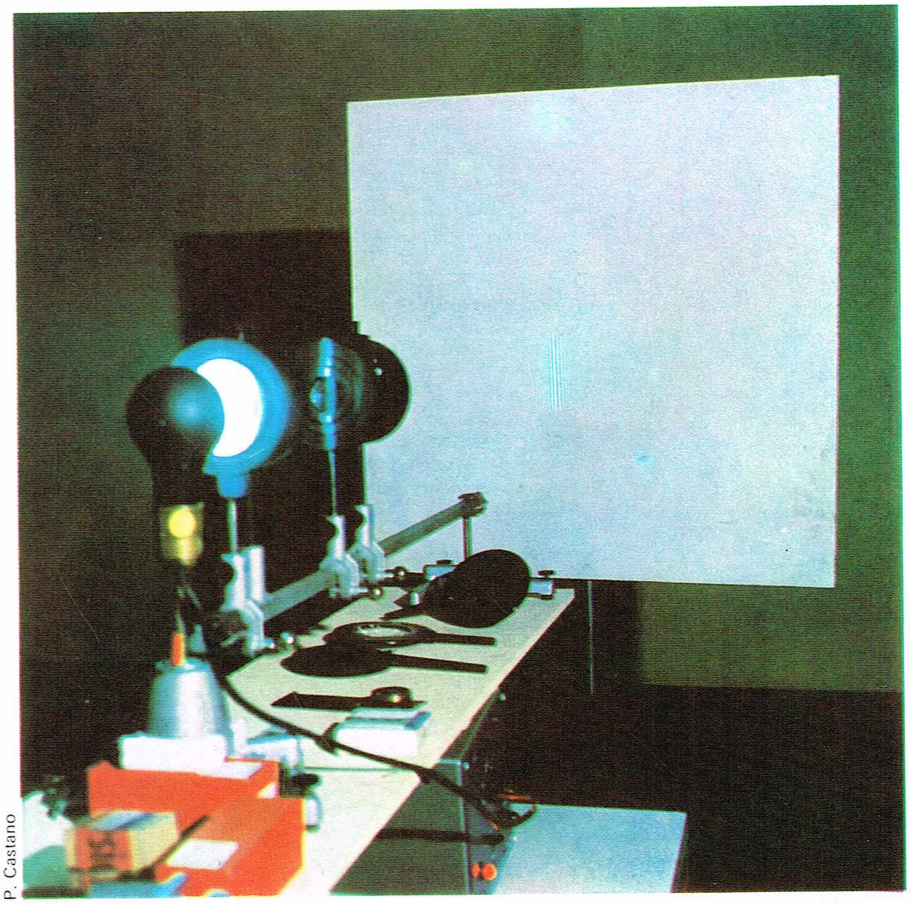

P. Castano

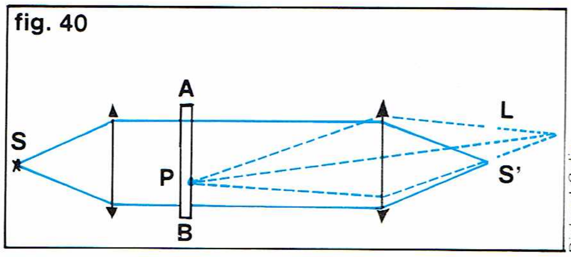

▶ *Figure 40 : observation en contraste de phase d'une lame AB présentant un défaut P. La lame L possède un dépôt de fluorure de magnésium en S'.*

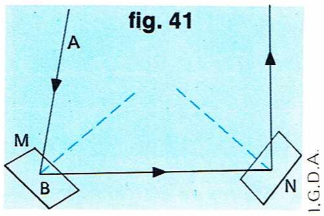

▲ *Figure 41 : schéma de l'expérience de Malus, mettant en évidence la polarisation de la lumière par réflexion sur une lame de verre.*

au pouvoir séparateur de l'œil. De même, des détails plus petits que 0,1 μ peuvent être mis en évidence au microscope s'ils sont isolés et éclairés latéralement, sur un fond noir : c'est le principe de l'ultramicroscope.

Contraste de phase

Le contraste de phase est une méthode due à *Zernike* et *Lyot*, permettant d'observer au microscope des objets transparents. Ces derniers ne modifient pas l'intensité de la lumière transmise et sont donc en principe indétectables à l'œil. Cependant ils introduisent un déphasage si leur indice de réfraction est différent de celui du milieu environnant. C'est le cas par exemple, en biologie, pour des détails cellulaires non colorables.

La *figure* 40 représente un montage de contraste de phase, où l'objet observé par transparence est noté AB. Il est éclairé par une source ponctuelle S, qui donne une image en S', laquelle n'est pas un point matériel mais une tache de diffraction. Un défaut situé sur AB introduit un faible déphasage, et tout se passe comme si l'on avait une petite composante de vibration, ayant une avance de phase de $\pi/2$. A cause de sa petite dimension, il diffracte la lumière bien au-dehors de la tache de diffraction S'. Si l'on introduit en S' une lame très mince donnant un déphasage de $\pi/2$, on modifie l'onde principale, mais non celle qui vient de P. On a donc addition en phase de l'onde principale et de la composante formée par P, ce qui provoque une variation d'intensité lumineuse, rendant l'objet visible. En pratique, une lame de verre est placée dans le plan focal de l'objectif, et la surépaisseur locale est obtenue par un dépôt de fluorure de magnésium.

Réseaux

Un réseau est constitué par une surface, en général plane, sur laquelle sont tracés une série de traits parallèles et équidistants. Un type usuel est formé d'une plaque de verre comportant 500 traits au millimètre, sur une longueur de quelques centimètres. On réalise ainsi une expérience d'Young à ondes multiples, chaque trait diffractant la lumière et se comportant comme une source secondaire. La largeur angulaire d'une frange d'interférence obtenue est : $\Delta\theta = \lambda/Ne$, où N est le nombre de traits et *e* la distance séparant deux traits.

D'autre part, l'angle séparant deux franges est égal à : $\theta = \lambda/e$; on voit que la finesse dépend directement de N et de *e*.

Lorsque l'on éclaire en lumière non monochromatique, la frange centrale ne présente pas de dispersion, mais les franges latérales montrent un spectre, puisque l'angle θ est fonction de la longueur d'onde. On a donc réalisé un spectrographe qui possède la propriété d'être linéaire en λ et d'en donner une mesure absolue. Les réseaux sont très utilisés, car ils permettent une dispersion et un pouvoir de résolution meilleurs que les prismes, malgré leur prix plus élevé. Il est possible également de fabriquer des réseaux métalliques employés par réflexion ; on évite ainsi, notamment dans l'ultraviolet, l'absorption liée à l'emploi de masses de verre.

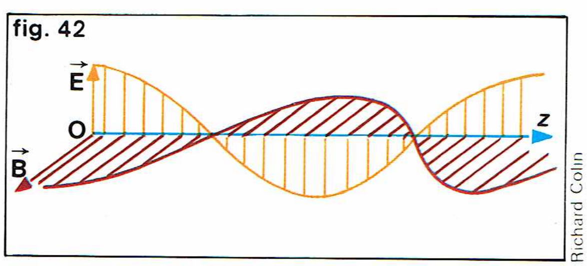

▶ *Figure 42 : onde électromagnétique plane, monochromatique, polarisée rectilignement ; $\vec{E}$ et $\vec{B}$ représentent les champs électrique et magnétique.*

Dans le domaine des ondes radio-électriques, un réseau peut être constitué en utilisant une série d'antennes identiques régulièrement espacées, traitant le même signal. L'intérêt est d'avoir, aussi bien en émission qu'en réception, une très grande directivité, l'ouverture angulaire étant donnée par la formule $\Delta\theta = \lambda/Ne$. Cette propriété est utilisée par exemple en radio-astronomie, pour mesurer la direction de sources célestes.

Polarisation

Lumière naturelle et lumière polarisée

La polarisation de la lumière a été observée pour la première fois par Huygens en 1690 sur des rayons ayant traversé un cristal de spath d'Islande. En 1810, Malus mit en évidence la polarisation par réflexion par l'expérience suivante : un pinceau lumineux AB frappe une lame de verre M sous un angle d'incidence égal à 57° ; on recueille le rayon réfléchi sur une lame identique N, sous le même angle (*figure* 41). En observant l'éclairement produit sur un écran, on constate que, si les deux plans de réflexion sont confondus, l'intensité est maximale, tandis que, si les deux plans sont perpendiculaires, la lumière est éteinte. Cela montre que la lumière ayant subi une réflexion vitreuse sous un angle de 57° ne possède plus la symétrie de révolution : elle possède une certaine orientation ; on dit qu'elle est polarisée. Le miroir M, qui produit de la lumière polarisée à partir de la lumière naturelle, s'appelle un *polariseur* ; le miroir N, qui permet de déterminer la direction de polarisation, s'appelle un *analyseur*. Ces deux définitions se rapportent à des différences de fonction et non à des différences de nature de l'appareillage. La figure formée par le polariseur M et les rayons incident et réfléchi possède un plan de symétrie qui n'est autre que le plan de réflexion. On peut convenir de définir l'orientation d'une lumière polarisée, produite par un moyen quelconque, par la direction de ce plan de polarisation. Tout polariseur, quel que soit son principe, possède lui aussi une direction privilégiée, qui est celle de la lumière polarisée qu'il produit. Lorsqu'une lumière polarisée traverse un analyseur, l'intensité transmise satisfait à la loi de Malus : elle est proportionnelle au carré du cosinus de l'angle des deux plans de polarisation.

Ces propriétés s'interprètent par le fait que la lumière est une onde électromagnétique formée par la propagation d'un champ électrique E et d'un champ magnétique B. La résolution des équations de Maxwell dans le vide conduit à une vibration se déplaçant à la vitesse *c* et ayant la structure suivante (*fig.* 42) :

— une direction de propagation suivant l'axe O*z* ;

— un champ électrique suivant O*x* : $E_x = f\left(t - \frac{z}{c}\right)$,

où *f* est une fonction quelconque ;

— un champ magnétique suivant O*y* : $B_y = f\left(t - \frac{z}{c}\right)$.

Si l'onde est monochromatique, la fonction *f* est sinusoïdale :

$$E_x = B_y = A \cos k\,(ct - z)$$

le coefficient A est l'amplitude de l'onde, son carré A^2 est l'intensité. Comme dans tout phénomène vibratoire, l'énergie transportée est proportionnelle à l'intensité. On appelle plan de polarisation le plan contenant la direction de propagation et le vecteur champ magnétique. L'autre plan de symétrie de la figure contenant le champ électrique est appelé plan de vibration.

Les lois de l'électromagnétisme étant linéaires, il est toujours possible de superposer une onde à celle que nous venons de décrire. Considérons en particulier le cas où la direction de propagation O*z* et la fréquence $\nu = kc/2\pi$ sont les mêmes mais où les composantes non nulles des champs sont E_y et B_x. Dans un plan fixe perpendiculaire à O*z*, l'extrémité du vecteur champ électrique décrit au cours du temps une courbe donnée par les équations :

$$E_x = A \cos k\,(ct - z)$$
$$E_y = B \cos [k\,(ct - z) + \varphi]$$

Si le déphasage φ est quelconque, la courbe est une ellipse, et l'on dit qu'on a une polarisation elliptique. C'est le cas le plus général pour une somme d'ondes

monochromatiques ayant une direction donnée, puisque tout vecteur E peut être décomposé en deux composantes E_x et E_y. Si le déphasage est nul ou égal à π, l'ellipse se réduit à un segment de droite, et l'on a affaire à une polarisation rectiligne. C'est le cas de la lumière produite par réflexion vitreuse dans l'expérience de Malus.

Enfin, si les amplitudes A et B sont égales et si $\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$, la polarisation est circulaire, droite ou gauche suivant qu'un observateur recevant l'onde voit le champ électrique tourner dans le sens des aiguilles d'une montre

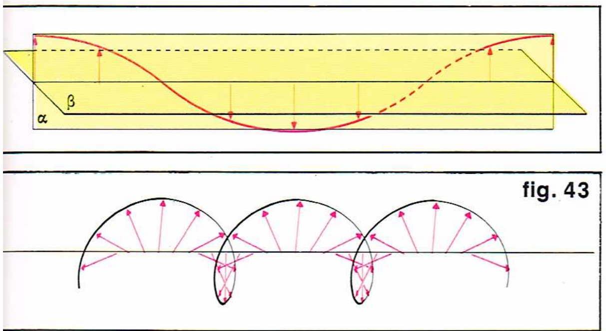

fig. 43

I.G.D.A.

◀ *Figure 43 : champ électrique dans une onde polarisée rectilignement (en haut) [α plan de polarisation, β plan de vibration] et circulairement (en bas).*

ou en sens inverse (*fig.* 43). Ces figures décrites par le champ magnétique sont exactement les mêmes, après rotation de $+\frac{\pi}{2}$ autour de l'axe Oz.

La théorie électromagnétique montre que toute lumière est polarisée, mais cela n'est pas en contradiction avec l'existence de la lumière naturelle. En effet, dans les sources lumineuses usuelles, l'émission est provoquée par un grand nombre d'atomes émettant chacun de façon désordonnée pendant un intervalle de temps très court. Pendant le temps nécessaire à toute perception visuelle ou photographique, on observe une moyenne d'un grand nombre de trains d'ondes polarisées. Si aucun polariseur n'intercepte le rayon lumineux, il n'y a aucun plan privilégié et donc une parfaite symétrie de révolution. Certains dispositifs laissent passer toutes les polarisations mais atténuent préférentiellement certaines directions. C'est le cas des miroirs de l'expérience de Malus, lorsque l'angle d'incidence n'est pas égal à 57°. La lumière qui en résulte est dite partiellement polarisée.

Lorsqu'une onde polarisée rectilignement atteint un analyseur, celui-ci ne laisse passer que la composante qui lui est parallèle. L'amplitude transmise est donc égale à l'amplitude incidente multipliée par $\cos \alpha$, α étant l'angle des deux plans de polarisation. L'intensité étant égale au carré de l'amplitude, on retrouve la loi de Malus. La polarisation de la lumière naturelle conserve la moitié de l'énergie incidente.

Réflexion et réfraction par un milieu transparent

La propagation des ondes électromagnétiques dans les milieux matériels peut être calculée à partir des équations de Maxwell. Un matériau est caractérisé par sa permittivité électrique ε, sa perméabilité magnétique μ et sa conductibilité γ. Il existe des corps anisotropes, comme les cristaux, pour lesquels ces coefficients ne sont pas les mêmes dans toutes les directions de l'espace ; leur étude est plus complexe et nécessitera un paragraphe spécial. Un type particulièrement simple de milieux est celui où la conductibilité γ est nulle. Dans ce cas en effet, il n'y a pas de perte d'énergie par effet Joule ; si de plus il n'y a pas de perte d'énergie par hystérésis diélectrique ou magnétique, le corps est parfaitement transparent. La solution trouvée pour la propagation dans le vide peut être appliquée avec les modifications :

$$\vec{E}' = \sqrt{\varepsilon}\,\vec{E} \qquad \vec{B}' = \frac{1}{\sqrt{\mu}}\,\vec{B}$$

Il n'y a plus d'égalité entre les amplitudes des vecteurs E' et B' et la phase se déplace à la vitesse $v = c/n$, où n est l'indice de réfraction :

$$n = \sqrt{\varepsilon\mu}$$

En pratique, on a toujours $\mu \simeq 1$ pour les isolants. La théorie précédente n'est qu'une approximation, car, lorsque l'on applique des champs de très haute fréquence à des atomes, l'inertie des charges électriques fait que la polarisation électrique ne suit pas instantanément les variations qui lui sont commandées : c'est le phénomène d'hystérésis. Il en résulte une absorption et, ε variant avec la fréquence, une dispersion. Il n'existe aucun corps qui soit complètement transparent pour l'ensemble du spectre des radiations électromagnétiques, cependant l'approximation reste valable dans un domaine de fréquence limite.

Lorsqu'une onde plane tombe sur la surface de séparation de deux milieux transparents d'indices n_1 et n_2, elle donne lieu à une onde réfléchie avec l'angle i et à une onde réfractée avec l'angle r. On peut toujours la décomposer en deux composantes polarisées rectilignement, l'une où le champ électrique est dans le plan d'incidence, l'autre dans le plan perpendiculaire, repérées respectivement par les symboles $A_\parallel$ et $A_\perp$. Pour trouver les rapports $R_\parallel$ et $R_\perp$ des amplitudes réfléchies sur les amplitudes incidentes, il suffit d'exprimer que les composantes tangentielles des champs électrique et magnétique sont continues à la surface de séparation, conformément aux lois générales de l'électromagnétisme. On a alors les formules de Fresnel :

$$R_\parallel = \frac{\sin (r - i)}{\sin (r + i)} \qquad R_\perp = \frac{\text{tg}\,(r - i)}{\text{tg}\,(r + i)}$$

Le champ électrique réfléchi est toujours soit en phase, soit en opposition de phase avec le champ incident ; dans ce dernier cas, R est négatif. La *figure* 44 représente la variation de R, pour $n_2 > n_1$, en fonction de i. On voit qu'il existe un angle d'incidence, appelé angle de Brewster, pour lequel $R_\perp = 0$. Il est tel que :

$$\text{tg}\, i = \frac{n_2}{n_1}$$

Pour le verre, $i = 57°$. C'est cette propriété qui permet de réaliser un polariseur à l'aide d'une lame de verre. Cependant un tel dispositif est peu lumineux, car le coefficient de réflexion est faible. La lumière réfléchie sur une nappe d'eau ou de neige, une vitre est toujours partiellement polarisée. Cette propriété est utilisée dans les lunettes polarisantes : des verres « Polaroïd » éliminent les reflets gênants et permettent, par exemple, à un pêcheur d'observer le fond d'une rivière sans être gêné par la réverbération.

Les formules de Fresnel donnent, par différence, l'amplitude de la lumière transmise. Il n'y a jamais qu'une polarisation partielle, mais, si l'on emploie un très grand nombre de surfaces successives, on obtient un bon polariseur. L'appareil, appelé « pile de glaces », est

fig. 44

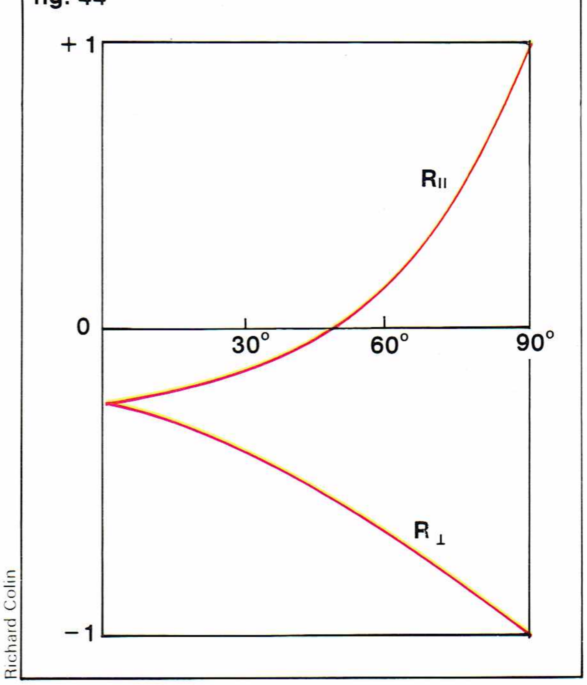

Richard Colin

◀ *Figure 44 : courbes représentatives de $R_\parallel$ et $R_\perp$ en fonction de l'angle d'incidence pour un dioptre air-verre ; remarquer l'annulation de R pour l'angle de Brewster.*

▶ *Figure 45 ; expérience des ondes stationnaires de Wiener : en traits pleins les ventres du champ électrique, en pointillé les nœuds.*

composé d'un certain nombre de plaques de verre placées sous incidence oblique. Il est très lumineux, et c'est le meilleur procédé pour les radiations infrarouges.

Réflexion totale et réflexion métallique

Dans le cas où $n_2 < n_1$ et $(n_1/n_2) \sin i > 1$, il y a réflexion totale, et toute l'énergie incidente est réfléchie. Les formules de Fresnel restent cependant applicables, à condition de considérer des rapports d'amplitudes R et $R_\perp$ complexes. L'introduction de ces quantités complexes signifie que les ondes ne sont plus en phase (ou en opposition de phase). Le déphasage obtenu par réflexion n'est pas le même pour les deux composantes, et il en résulte que, si l'onde incidente est polarisée rectilignement, l'onde réfléchie est polarisée en général elliptiquement.

La théorie indique également ce que devient l'onde réfractée lorsque l'angle d'incidence dépasse l'angle limite. La phase dans le second milieu est imaginaire, et l'onde décroît exponentiellement en fonction de la distance à la surface de séparation. Cette onde, appelée onde évanescente, ne transporte aucune énergie sur une distance supérieure à la longueur d'onde. On peut cependant l'observer, dans le cas des ondes hertziennes ayant une longueur d'onde de quelques centimètres, si l'on déplace un détecteur très proche du dioptre. Les équations de Maxwell donnent aussi une solution pour un milieu matériel parfaitement conducteur, un métal par exemple. Il existe à l'intérieur du métal une onde amortie ne transportant aucune énergie. L'onde réfléchie est en avance de phase sur l'onde incidente d'une valeur comprise entre $\pi/2$ et π. Dans le cas de la réflexion oblique, le déphasage n'est pas le même pour les deux composantes polarisées, de sorte que si l'onde incidente est polarisée rectilignement, l'onde réfléchie est polarisée elliptiquement.

Tous les déphasages calculés précédemment concernent le champ électrique. Cela se justifie, car c'est le champ électrique, et non le champ magnétique, qui provoque tous les effets lumineux, aussi bien les effets photochimiques sur la rétine ou sur une plaque photographique que l'excitation d'une substance fluorescente. Un moyen de le prouver expérimentalement est donné par l'expérience de Wiener (*fig.* 45). Un faisceau parallèle de lumière monochromatique tombe normalement sur un miroir métallique. Il y a interférence entre l'onde incidente et l'onde réfléchie avec formation d'ondes stationnaires. Le champ électrique est nul sur la surface du miroir et dans des plans équidistants de $\lambda/2$; il est maximal dans des plans décalés de $\lambda/4$ par rapport à ces plans nodaux. Par contre, le champ magnétique est maximal là où le champ électrique est nul, et réciproquement. Une plaque photographique P est disposée près du miroir, légèrement inclinée par rapport à lui. Elle montre après développement une impression à l'endroit des ventres de champ électrique. L'expérience, réalisée avec une pellicule fluorescente, donne le même résultat.

Le fait que le vecteur lumineux soit lié au champ électrique se comprend si l'on considère la force exercée par une onde électromagnétique sur une particule matérielle de charge e et de vitesse v :

$$\vec{f} = e\,(\vec{E} + \frac{\vec{v}}{c} \times \vec{B})$$

$\vec{E}$ et $\vec{B}$ étant égaux, la force est due essentiellement à $\vec{E}$, puisque la vitesse v est petite devant la vitesse de la lumière c. Par conséquent, bien que l'énergie lumineuse soit composée pour moitié d'énergie électrique et pour moitié d'énergie magnétique, on peut considérer que seul le champ électrique a une action sur la matière.

Optique cristalline

Dans un cristal, les atomes sont régulièrement disposés selon un réseau. Lorsqu'une onde électromagnétique de longueur d'onde comparable à celle des distances interatomiques frappe un cristal, il y a diffraction, comme pour un réseau ordinaire. Cela ne se produit qu'avec des rayons X. Pour les radiations optiques, le cristal se comporte comme un corps homogène. Par contre, il n'est pas en général isotrope, c'est-à-dire que ses propriétés ne sont pas les mêmes dans toutes les directions de l'espace. En particulier, sous l'action d'un champ électrique, le milieu acquiert une induction électrique qui est

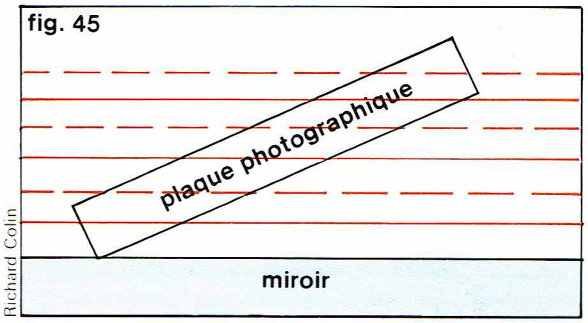

linéaire, mais dont la direction n'est pas parallèle à celle du champ. La résolution des équations de Maxwell montre alors que la direction de propagation de l'énergie, c'est-à-dire le rayon lumineux, n'est plus perpendiculaire au plan d'onde. C'est la vitesse de propagation des plans d'onde, appelée vitesse normale, qui est égale à $\frac{c}{n}$ (n étant l'indice de réfraction). En second lieu, étant donné une direction de plan d'onde, le plan de polarisation, contenant le champ magnétique, ne peut pas avoir une direction quelconque autour de la normale. Il existe deux directions privilégiées, perpendiculaires entre elles, suivant lesquelles la vibration se propage à deux vitesses différentes. Une onde de polarisation rectiligne quelconque se sépare en deux composantes polarisées portées par ces directions. Il s'introduit entre celles-ci une différence de phase qui augmente proportionnellement à la distance parcourue. On obtient ainsi une polarisation elliptique qui varie au fur et à mesure de la propagation.

Le comportement optique d'un milieu anisotrope peut être complètement représenté par une ellipsoïde des indices, les demi-axes ayant les longueurs n_1, n_2, n_3. Si l'on se donne un plan d'onde d'orientation quelconque, il est possible de déterminer les directions privilégiées de polarisation, et les indices n' et n'' correspondants. L'intersection de l'ellipsoïde et d'un plan d'onde passant par son centre est une ellipse : les axes de cette ellipse indiquent les deux directions perpendiculaires cherchées, et les longueurs des demi-axes sont égales à n' et n''.

L'ellipsoïde des indices permet également de construire les surfaces d'onde, c'est-à-dire les surfaces atteintes par la lumière issue d'une source ponctuelle, au bout d'un temps donné. Pour un milieu isotrope ce sont des sphères, pour un cristal ce sont des surfaces à deux nappes, puisque à chaque direction de plan d'onde correspondent deux vitesses de propagation différentes.

L'orientation des axes principaux de l'ellipsoïde dépend évidemment de la nature et des symétries du cristal. Ceux qui ont la symétrie la plus élevée ont leurs trois indices n_1, n_2 et n_3 égaux. Ils se comportent donc, du point de vue optique, comme des corps isotropes ; c'est le cas du sel gemme (NaCl) et de la fluorine (CaF_2). Le second groupe est formé des cristaux ayant deux indices égaux. Leur ellipsoïde possède un axe de révolution appelé axe optique. Ces cristaux uniaxes sont les plus employés pratiquement. Leur surface d'onde est formée par une sphère et un ellipsoïde de révolution tangents aux deux pôles.

Le tableau suivant en donne quelques exemples, avec la valeur de leur indice ordinaire et de leur indice extraordinaire (l'indice extraordinaire est celui qui correspond à l'axe de révolution) :

	n_o	n_e
Quartz (SiO_2)	1,544 2	1,553 3
Spath (CO_3Ca)	1,658 4	1,486 4
$NaNO_3$	1,585	1,336

Le spath est celui qui est le plus utilisé, car c'est lui qui présente la différence $n_o - n_e$ la plus importante, tout en étant facile à se procurer. Le troisième groupe, celui des cristaux biaxes, comprend ceux qui ont trois indices inégaux (mica, gypse, topaze).

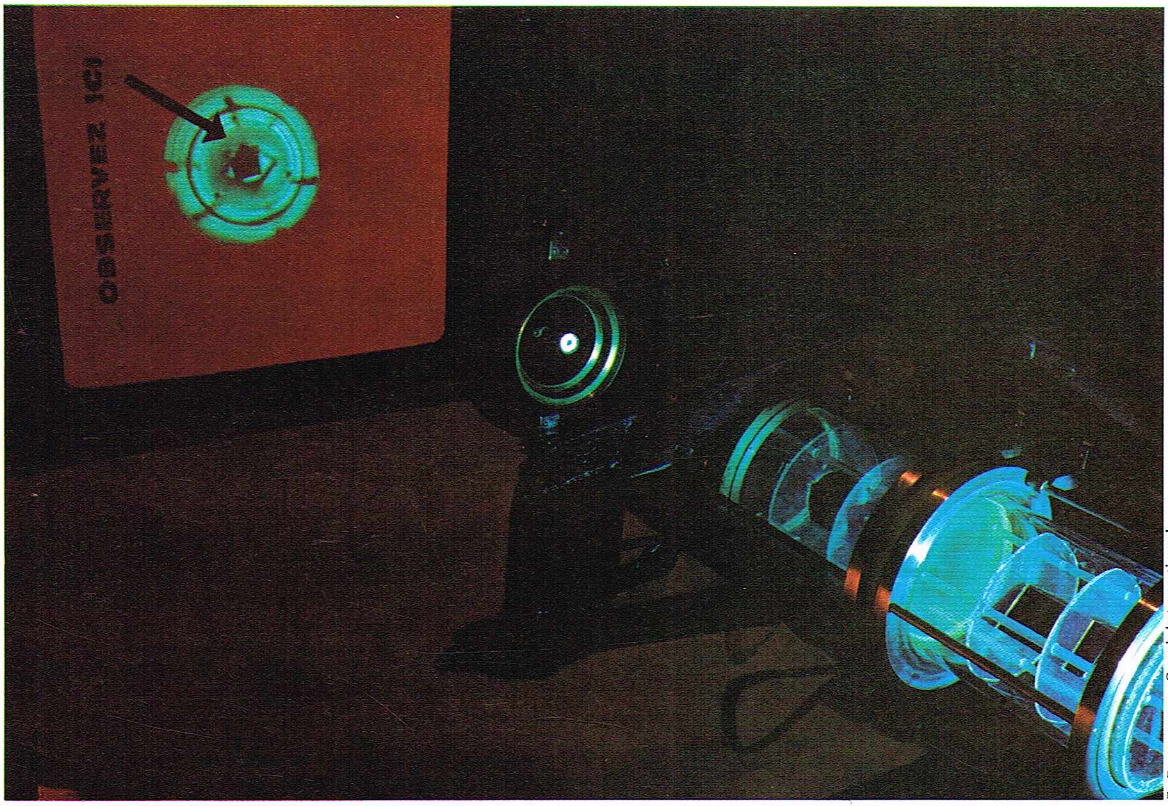

E. Rousseau - Snark International

◀ *Tout dispositif servant à produire de la lumière polarisée à partir de la lumière naturelle est appelé* polariseur : *il prend le nom d'*analyseur *lorsqu'il est utilisé pour polariser la lumière émergeant d'un appareillage. Ici, un ensemble polariseur-analyseur (Nicols).*

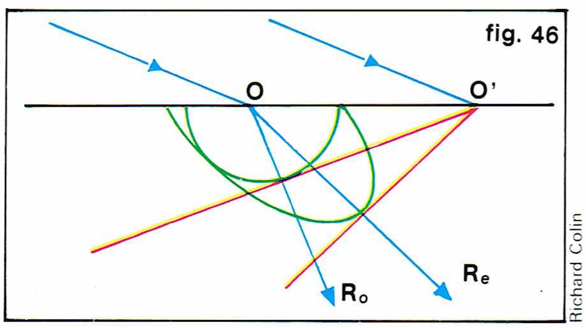

Richard Colin

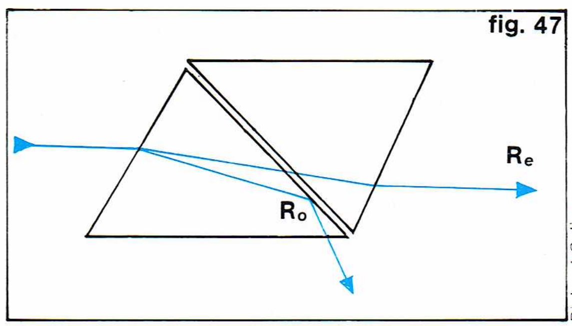

Richard Colin

◀ *A gauche, figure 46 : construction des deux rayons réfractés à la surface d'un dioptre air-spath. La surface d'onde, centrée en O, est composée d'une sphère donnant le rayon ordinaire* OR_o, *et d'un ellipsoïde de révolution donnant le rayon extraordinaire* OR_e. *A droite, figure 47 : un prisme de Nicol élimine le rayon ordinaire* R_o. *Avant l'invention des Polaroïds, c'était le polariseur le plus employé.*

Polariseurs

On appelle polariseur tout dispositif servant à produire de la lumière polarisée rectilignement, à partir de la lumière naturelle. Il est baptisé analyseur lorsqu'il est utilisé pour polariser la lumière émergeant d'un appareillage afin de déterminer sa direction de polarisation. Nous avons déjà décrit un premier type d'appareil utilisé pratiquement : la « pile de glaces ». Un autre procédé utilise un cristal de spath convenablement préparé : c'est le prisme de Nicol. Enfin certains corps ont la propriété d'absorber fortement une des composantes, et même de la supprimer si l'épaisseur est suffisante : on dit que de tels milieux sont dichroïques. C'est le cas de la tourmaline que l'on remplace maintenant par des lames appelées « Polaroïds ».

Considérons le dioptre plan formé par la surface de séparation d'un cristal de spath et l'air (*fig.* 46). Soit un rayon incident arrivant au point O, formé de lumière naturelle. Celle-ci doit être décomposée en deux composantes polarisées, correspondant aux deux directions privilégiées de propagation. La surface d'onde centrée en O permet de construire les deux rayons lumineux réfractés correspondants. Elle se compose d'une sphère et d'un ellipsoïde, puisque le milieu est uniaxe. Du point O', ayant même phase que la surface d'onde, menons les plans tangents à la sphère et à l'ellipsoïde : ce sont les deux plans d'onde cherchés. On en déduit les deux rayons réfractés : le rayon OR_o est le rayon ordinaire, qui suit les lois de Descartes; le rayon OR_e est le rayon extraordinaire, qui ne les suit pas, et qui, en particulier, n'est généralement pas dans le plan d'incidence. Cette double réfraction, ou *biréfringence,* fait qu'une lame à faces parallèles donne deux images d'un même objet. Le principe du prisme de Nicol est de supprimer un des deux rayons par une réflexion totale. Un cristal de spath est scié en diagonale et recollé avec du baume du Canada dont l'indice de réfraction est tel qu'il réfléchit totalement le rayon ordinaire et laisse passer le rayon extraordinaire. Ce dernier sort polarisé perpendiculairement au plan d'incidence (*fig.* 47).

Dans le cas des ondes hertziennes, un ensemble de fils conducteurs parallèles se comporte comme un polariseur. Lorsque le champ électrique est parallèle à la direction des fils, il excite les électrons du métal qui peuvent se mouvoir librement. L'énergie du rayonnement est donc transférée au conducteur. Par contre, si le champ est perpendiculaire et si le parcours moyen des électrons pendant une période est plus grand que l'épaisseur du fil, l'onde n'est pas absorbée. Cela se produit lorsque la longueur d'onde est grande par rapport à cette épaisseur. La *figure* 48 représente le schéma d'un polariseur et d'un analyseur pour des ondes radio. Le procédé a été étendu au domaine des ondes lumineuses par le « Polaroïd », inventé en 1938 par Land. Une feuille de plastique constituée de longues chaînes hydrocarbonées est fortement étirée suivant une dimension. Cela a pour effet d'aligner les molécules. La feuille est ensuite plongée dans une solution contenant de l'iode. Celui-ci se fixe sur les chaînes et apporte des électrons de conduction qui peuvent se déplacer librement tout le long de la chaîne. On obtient ainsi une grille de conducteurs parallèles dont l'épaisseur est très inférieure à la longueur d'onde de la lumière. Les Polaroïds sont des polariseurs peu coûteux mais ils ont l'inconvénient d'absorber une partie de la lumière.

▶ *A gauche, double image produite par un cristal de spath d'Islande. A droite, figure 49 : le montage standard pour l'étude de la biréfringence d'une lame cristalline* L *consiste à la placer entre polariseur* P *et analyseur* A, *dans un faisceau de lumière parallèle. Chaque élément peut tourner autour de l'axe.*

▶ *Page ci-contre, en haut, figure 50 : une masse de verre soumise à une force* F *développe une biréfringence variable en chaque point. Le montage de la figure 49 permet de rendre visibles les lignes d'égale tension.*

P. Castano

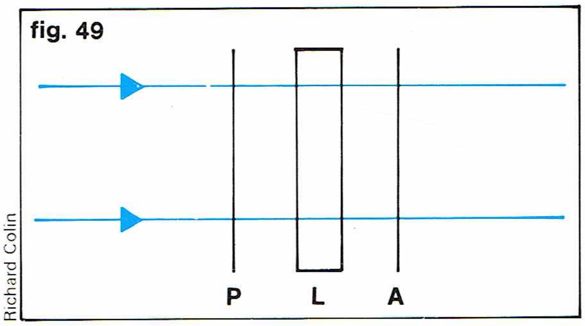

Richard Colin

Analyse d'une vibration lumineuse

Considérons une lame à faces parallèles, taillée dans un cristal biréfringent, éclairée par une onde plane polarisée rectilignement. On recueille à la sortie deux ondes polarisées selon les directions privilégiées de la lame, et présentant entre elles un déphasage. Celui-ci est égal à :

$$\varphi = \frac{2\pi\,(n' - n'')\,e}{\lambda}$$

où e est l'épaisseur de la lame, n' et n'' les deux indices, et λ la longueur d'onde. La lumière obtenue est donc polarisée elliptiquement. On appelle lame quart d'onde une lame telle que $\varphi = \pi/2$. Dans le cas particulier où la vibration incidente est à 45° des directions privilégiées, la lumière émergente est polarisée circulairement. L'ensemble composé d'un polariseur et d'une lame quart d'onde est appelé pour cette raison polariseur circulaire. Il en existe deux types, droit ou gauche, selon le sens de rotation du vecteur champ électrique.

Pour analyser la polarisation d'une vibration lumineuse donnée, il suffit de disposer d'un polariseur rectiligne et d'une lame quart d'onde. Si la lumière est polarisée rectilignement, on le constate immédiatement avec l'analyseur ; il y a extinction pour une certaine direction. Si la lumière est elliptique, la lame quart d'onde, convenablement orientée, la transforme en lumière rectiligne, ce que l'on contrôle avec l'analyseur. Si la lumière est circulaire, l'orientation de la lame est indifférente. Enfin la lumière naturelle se reconnaît au fait qu'il n'y a aucune variation de l'intensité transmise, quelle que soit l'orientation de chacun des éléments.

Une lame n'est réellement quart d'onde que pour une longueur d'onde déterminée. Le montage classique permettant d'étudier une lame biréfringente L est décrit sur la *figure* 49. La lame est placée entre un polariseur P et un analyseur A, dont les axes optiques sont croisés et placés à 45° des directions privilégiées de L. Si le déphasage est égal à 2π, pour une certaine couleur, il y a extinction. S'il est égal à π, il y a un maximum de lumière. Une lame quart d'onde donne une intensité diminuée de moitié, d'ailleurs indépendante de l'orientation de A. La lumière blanche est donc en général partiellement absorbée, et on observe un mélange de couleurs : c'est le phénomène de polarisation chromatique. Le microscope polarisant utilise ce principe : il permet d'observer des lames minces de cristaux, des polariseurs étant placés dans le condenseur et l'oculaire.

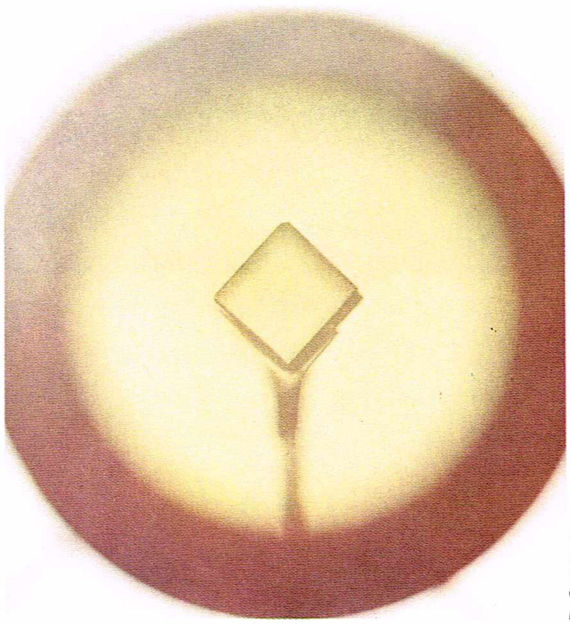

▶ *Prisme de Nicol vu de face dans un montage optique.*

P. Castano

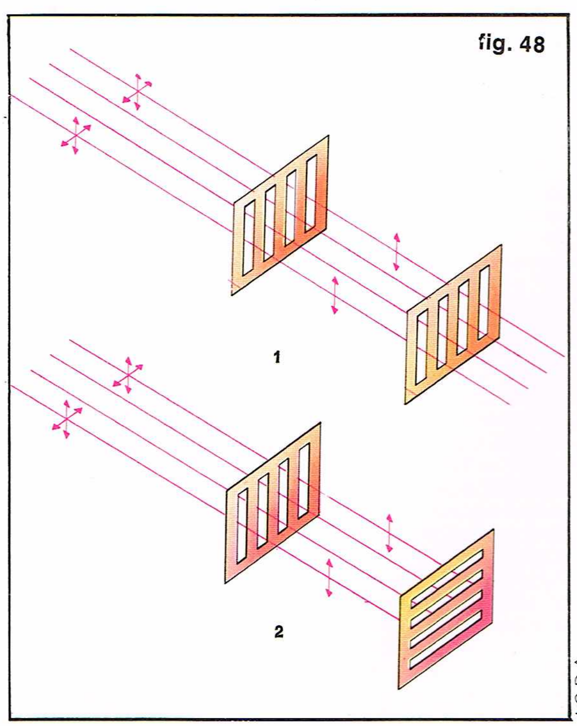

I.G.D.A.

▶ *Figure 48 ; action de deux trames de fils conducteurs sur un faisceau d'ondes hertziennes non polarisées naturellement :* (1) *polariseurs parallèles.* (2) *polariseurs croisés.*

Biréfringence accidentelle

Lorsqu'un corps isotrope est soumis à une perturbation extérieure suivant une certaine direction, il devient anisotrope, et par conséquent biréfringent. Un bloc de matière transparente, du verre par exemple, placé entre deux polariseurs croisés, éteint complètement un faisceau de lumière parallèle. Si cet échantillon est soumis à une force extérieure, la tension qui en résulte en chaque point y fait apparaître une biréfringence, la différence d'indice étant proportionnelle à la tension. Lorsque l'on observe le solide à travers l'analyseur, on voit que la lumière est éteinte en certains points et pas en d'autres, selon le déphasage. En lumière blanche, on observe des variations de couleurs. La *figure* 50 montre l'aspect d'un parallélépipède de verre placé sur deux cales et soumis à une force verticale. La *photo-élasticimétrie* est une méthode d'étude expérimentale des tensions développées dans les systèmes élastiques, fondée sur ce principe. On exécute des modèles réduits en matière trans-

fig. 50

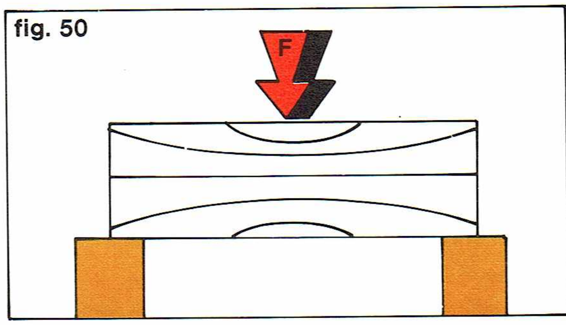

Richard Colin

parente de pièces de machine ou de constructions, et on les soumet à des efforts calculés en fonction des efforts réels par les lois de la similitude mécanique.

La perturbation exercée sur le milieu isotrope peut également être un champ électrique. Les molécules de sulfure de carbone présentent un moment électrique important et tendent à s'orienter dans la direction du champ. L'anisotropie qui en résulte peut être observée en plaçant une cuve contenant le liquide entre les deux armatures d'un condensateur. Sous l'épaisseur de 20 cm, il faut un champ de 60 000 V/cm pour transformer la cuve en lame quart d'onde. Ce phénomène, appelé « effet Kerr », permet de réaliser un obturateur de lumière beaucoup plus rapide que tout procédé mécanique. Il permet également de moduler une intensité lumineuse par un courant électrique, par exemple pour l'enregistrement sonore d'un film de cinéma.

Il existe un phénomène analogue avec le champ magnétique, mais son intensité est beaucoup plus faible, et il n'est pas utilisé pratiquement.

Polarisation rotatoire

Lorsque l'on place entre deux polariseurs croisés une lame d'un cristal uniaxe dont les faces sont perpendiculaires à l'axe optique, on doit s'attendre que l'extinction subsiste. En effet, les deux indices sont égaux, et une vibration polarisée rectilignement doit alors se propager sans altération, quelle que soit sa direction. Il en est tout autrement dans le cas du quartz : la lumière est rétablie ; mais l'on constate qu'en faisant tourner l'analyseur, on peut rétablir l'extinction. Cela montre que la lumière qui a traversé la lame a conservé une polarisation rectiligne, mais que le plan de polarisation a tourné d'un certain angle. La découverte du pouvoir rotatoire, appelé encore activité optique, a été faite par Arago en 1811. Il s'agit d'un phénomène important, puisque 1 mm de quartz occasionne une rotation de 22° pour la lumière jaune du sodium. Ces cristaux de quartz se divisent en deux catégories : ceux qui font tourner la polarisation dans le sens des aiguilles d'une montre, pour l'observateur, sont dits dextrogyres ; ils sont dits lévogyres dans le cas contraire. Les deux espèces peuvent d'ailleurs se distinguer par la forme extérieure des cristaux. Le pouvoir rotatoire appartient également à des substances isotropes, par exemple l'essence de térébenthine, ou encore des solutions dans l'eau de sucre ou d'acide tartrique.

Dans un milieu anisotrope, à une direction de plan d'onde correspondent en général deux vibrations susceptibles de se propager sans altération. Ce sont deux vibrations polarisées rectilignement, et perpendiculaires, qu'on appelle ondes propres. Dans le cas du quartz ayant son axe optique normal au plan d'onde, les ondes propres sont les deux vibrations circulaires droite et gauche : ce sont les seules qui possèdent la symétrie de révolution et qui ne soient pas modifiées par rotation. Les vitesses de propagation diffèrent pour ces deux ondes, et c'est ce qui provoque le phénomène de polarisation rotatoire. En effet, toute onde polarisée rectilignement peut être considérée comme la somme de deux ondes circulaires droite et gauche, d'amplitudes égales (*fig.* 51). Après la traversée d'une certaine épaisseur de matière, ces ondes sont déphasées d'un certain angle φ, et leur somme donne une polarisation rectiligne ayant tourné d'un angle $\varphi/2$. L'activité optique est donc simplement due à une biréfringence circulaire. La différence d'indice est extrêmement faible (0,000 071 pour le quartz), mais on peut cependant observer le phénomène de double réfraction pour un rayon lumineux.

On constate que le pouvoir rotatoire varie énormément avec la longueur d'onde utilisée : il est à peu près inversement proportionnel à son carré. Il est donc trois fois plus important pour le violet que pour le rouge.

Lorsque le plan d'onde n'est plus perpendiculaire à l'axe optique, les ondes propres deviennent elliptiques, puis se réduisent à des droites, comme dans le cas d'un cristal uniaxe ordinaire. Dans le cadre de la théorie électromagnétique, il est possible d'expliquer l'activité optique en supposant que le vecteur induction électrique dépend linéairement du champ, ainsi que ses dérivées premières d'espace. Mais indépendamment de toute théorie, des considérations de symétrie permettent de prévoir le phénomène. Des vibrations rectilignes subissent

▼ ***Ci-dessous, un arthropode observé avec un interféromètre à polarisation ; chaque couleur caractérise la déformation de la surface de l'eau au voisinage de l'Insecte.***

En bas, figure 51 : la somme de deux polarisations circulaires droite et gauche est une polarisation rectiligne.

Institut d'optique théorique et appliquée, associé au Centre national de la recherche scientifique

fig. 51

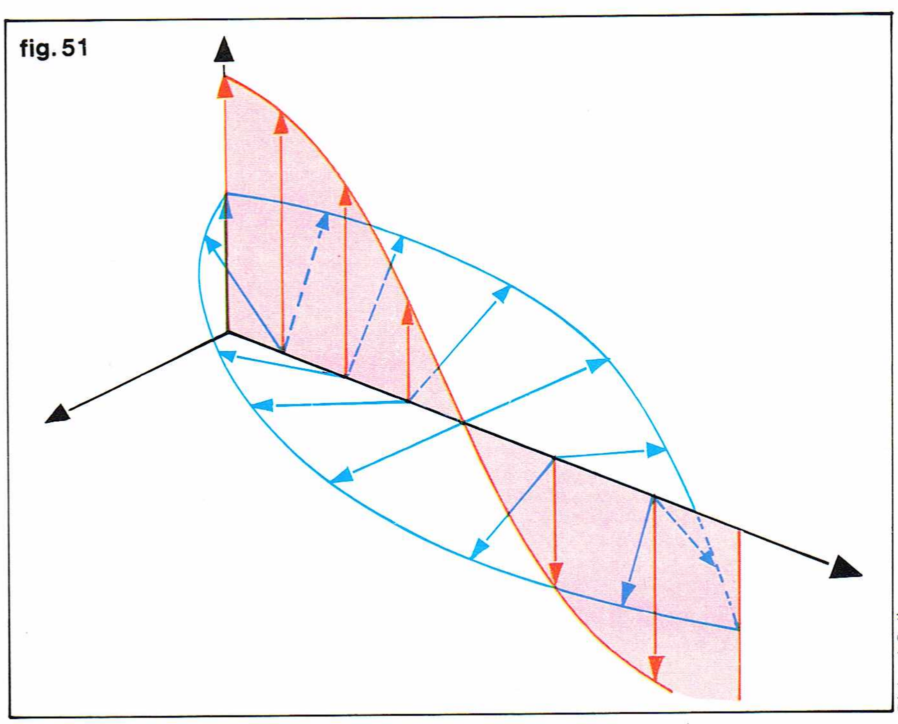

Richard Colin

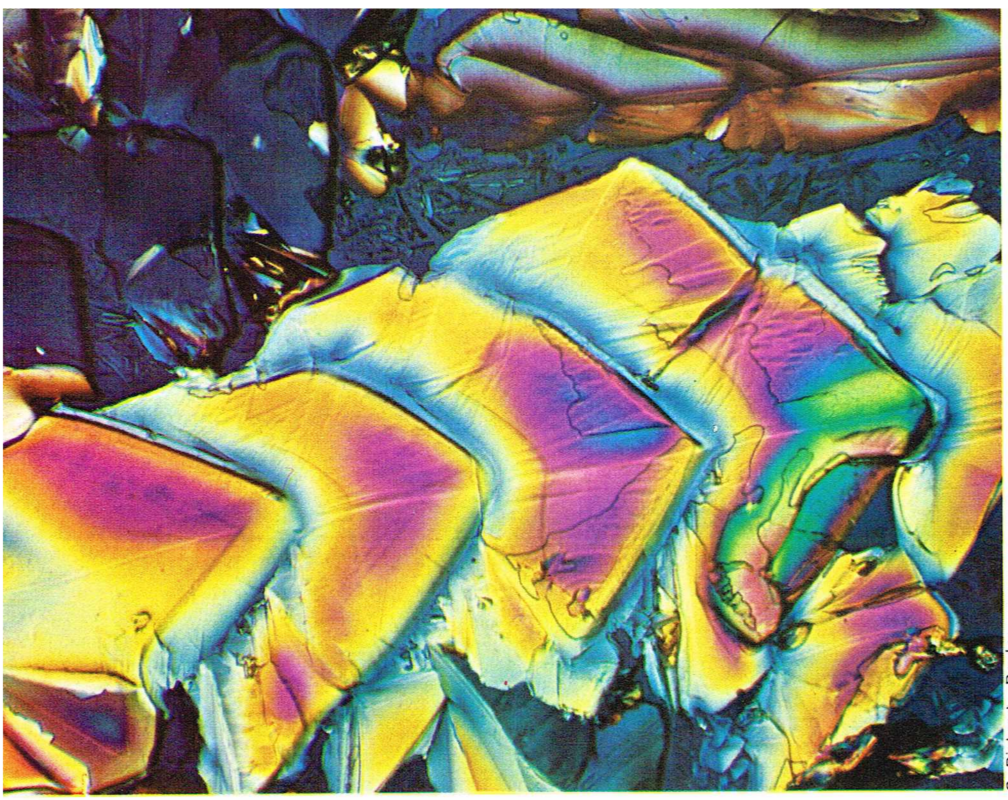

G. Richard - Rapho

▲ *Cristaux d'acide tartrique vus en lumière polarisée.*

des rotations de sens opposés, ce qui prouve que le milieu ne présente ni centre, ni plan de symétrie. Pasteur a montré que ces corps présentent une dissymétrie de structure : leurs molécules ne sont pas superposables à l'image dans une glace. C'est le cas des composés organiques possédant un carbone asymétrique, c'est-à-dire lié à quatre radicaux différents. L'acide tartrique, de formule :

$$CO_2H—CHOH—CHOH—CO_2H$$

répond à cette définition. Il en existe deux formes, respectivement droite et gauche, appelées isomères optiques. Elles cristallisent indépendamment, et les cristaux obtenus ont des formes symétriques l'une de l'autre. Dans le cas des cristaux inorganiques comme le quartz, c'est l'architecture cristalline qui provoque la dissymétrie : les molécules de SiO_2 sont disposées suivant des hélices circulaires dont le sens d'enroulement peut être à droite ou à gauche.

La mesure du pouvoir rotatoire est une opération très courante en chimie. Pour un corps inconnu, elle donne un renseignement précieux sur la structure de la molécule. Pour un composé connu, elle permet de le doser très rapidement lorsqu'il est en solution. Elle est très employée, par exemple, dans l'industrie du sucre. L'appareil le plus utilisé est le polarimètre de Biot : il se compose d'un polariseur fixe et d'un analyseur pouvant tourner, et dont on mesure l'angle. On éclaire par une lumière monochromatique et on règle à l'extinction. On introduit ensuite la solution dans une cuve située entre polariseur et analyseur, et on mesure la rotation nécessaire pour rétablir l'extinction.

L'action d'un champ magnétique sur un corps transparent isotrope provoque une polarisation rotatoire : un rayon lumineux se déplaçant parallèlement au champ voit sa polarisation tourner. Il y a une différence fondamentale avec la biréfringence circulaire des milieux actifs : le sens de rotation du vecteur lumineux ne dépend que du sens du courant magnétique, et non pas du sens de propagation de la lumière. Le corps est donc dextrogyre dans un sens, lévogyre dans l'autre.

Cohérence

La notion de cohérence intervient dans de nombreux problèmes d'optique physique. Il est impossible de mettre en évidence les phénomènes d'interférence, avec des sources incohérentes, sans précautions particulières. Le fait que la lumière naturelle ne soit pas polarisée est dû à ce qu'il y a addition d'un très grand nombre d'atomes émetteurs incohérents dont les polarisations sont aléatoires. D'autre part, les sources de lumière cohérente sont nécessaires pour l'holographie et le filtrage des fréquences spatiales. Il convient de distinguer cohérence temporelle et cohérence spatiale, qui peuvent se mesurer par l'extension du paquet d'ondes émis. C'est pourquoi nous décrirons tout d'abord les questions de modulation, paquet d'ondes et vitesse de groupe.

Vitesse de phase et vitesse de groupe

La distinction entre vitesse de phase et vitesse de groupe est générale pour tous les mouvements vibratoires qui se propagent, acoustiques, électromagnétiques ou autres. Lorsque l'on veut envoyer une information d'un point à un autre à l'aide d'une onde, il est impossible d'utiliser une onde monochromatique. En effet, celle-ci est sinusoïdale et se reproduit indéfiniment égale à elle-même dans le temps et dans l'espace. Une onde modulée possède donc un spectre de fréquences. Considérons, pour simplifier, le cas de l'addition de deux ondes monochromatiques :

$$D\ (t) = A \cos \omega_1 \left(t - \frac{x}{v_1}\right) + A \cos \omega_2 \left(t - \frac{x}{v_2}\right)$$

Les deux ondes, de pulsations ω_1 et ω_2, se propagent suivant l'axe Ox, avec les vitesses v_1 et v_2. On peut écrire :

$$D\ (t) = 2\ A \cos \frac{1}{2} \left[(\omega_1 - \omega_2)\ t - x \left(\frac{\omega_1}{v_1} - \frac{\omega_2}{v_2} \right) \right]$$
$$\cos \frac{1}{2} \left[(\omega_1 + \omega_2)\ t - x \left(\frac{\omega_1}{v_1} + \frac{\omega_2}{v_2} \right) \right]$$

La résultante est donc une vibration qui se propage avec une pulsation et une vitesse moyennes par rapport à celles des deux vibrations initiales. L'amplitude est modulée sinusoïdalement avec une pulsation $\omega_1 - \omega_2$: c'est le phénomène de battements (*fig.* 52). Quant à la vitesse de propagation des maximums de l'amplitude, elle est égale à :

$$(4) \qquad u = \frac{\Delta\omega}{\Delta\left(\frac{\omega}{v}\right)}$$

On peut démontrer que, pour un ensemble d'ondes ayant des fréquences voisines, la vitesse de propagation de l'information et de l'énergie n'est pas égale à une moyenne des vitesses v des différentes composantes sinusoïdales, mais à la vitesse de groupe u, donnée par la formule **(4)**. La vitesse v est appelée par opposition vitesse de phase ; c'est elle qui intervient dans toutes les questions d'interférence et de diffraction, mais elle n'est pas observable directement.

Lorsque v ne dépend pas de ω, la vitesse de groupe est simplement égale à la vitesse de phase, celle-ci étant commune à toutes les fréquences. Par contre, si le milieu est fortement dispersif, il peut y avoir une différence notable, qui avait été découverte par Foucault lorsqu'il tentait de mesurer la vitesse de la lumière dans les milieux matériels. On trouve dans tous les cas une valeur inférieure à la vitesse de phase, déterminée par ailleurs par la formule $v = \frac{c}{n}$, où n est l'indice de réfraction.

Milieu	Écart relatif
Air	$0{,}7 \cdot 10^{-5}$
Eau	0,015
Cinnamate d'éthyle	0,08

Modulation

Au lieu de considérer l'addition de deux ondes sinusoïdales de fréquences différentes, cherchons la figure formée par la composition d'une infinité d'ondes de fréquences repérées par l'indice entier n, égales à νn. Elle représente la fonction :

$$(5) \qquad F\ (t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos (n\omega t + \varphi_n)$$

▼ *Figure 52 : battements produits par l'addition de deux ondes de pulsations ω_1 et ω_2. Les courbes bleue et noire se déplacent respectivement aux vitesses u et v.*

fig. 52

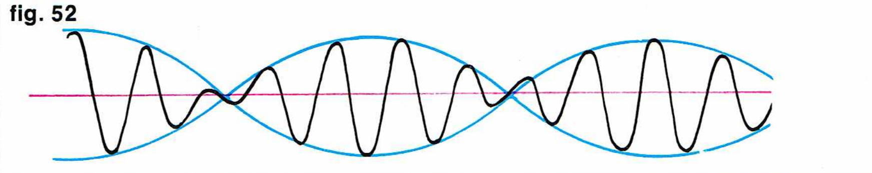

Richard Colin

A_n est l'amplitude de chaque onde ; ω est la pulsation fondamentale (on a, comme d'habitude, $\omega = 2\pi\nu$) ; les ondes de pulsation $n\omega$ sont les harmoniques. La somme infinie écrite dans la formule **(5)** n'a un sens que si A_n tend vers 0 lorsque n tend vers l'infini, si l'on veut que F (t) reste fini. On l'appelle une série de Fourier ; ses propriétés sont les suivantes, moyennant quelques précautions mathématiques :

— F (t) est périodique, sa période est égale à celle de l'onde fondamentale ;

— connaissant F (t), on peut calculer A_n par la formule :

$$A_n = \frac{\omega}{\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} F(t) \cos(n\omega t - \varphi_n)\, dt$$

L'énergie totale est égale à : $I = \Sigma A_n^2$.

Si ω est suffisamment petit, on peut considérer, pour tous les harmoniques où n est assez grand, que A_{n+1} diffère infiniment peu de A_n. La quantité $n\omega$ devient alors une variable continue, et la série de Fourier peut s'exprimer par une intégrale :

$$F(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} A(\omega)\, e^{i\omega t}\, d\omega$$

Dans cette formule, qui n'est autre qu'une transformation de Fourier faisant correspondre la fonction F (t) à la fonction A (ω), le déphasage a été inclus dans l'amplitude A (ω) sous la forme d'un facteur complexe. A (ω) représente la répartition spectrale de l'onde F (t), c'est-à-dire la densité d'ondes monochromatiques contenues dans un intervalle infiniment petit $d\omega$. On démontre que les propriétés de la série de Fourier, sauf la première, s'étendent à la transformation de Fourier.

Un important exemple d'onde non sinusoïdale est celui d'une impulsion très intense et de durée très brève Δt. Pour trouver sa distribution spectrale, sans passer par le formalisme de la transformation de Fourier, additionnons toutes les ondes de pulsations comprises entre ω et $\omega + \Delta\omega$, d'amplitudes égales A et ayant même phase à l'instant $t = 0$. Si l'on a N ondes dans cet intervalle, la valeur de F (t) pour $t = 0$ est égale à NA. La période T des battements entre les deux fréquences extrêmes est $2\pi/\Delta\omega$; par conséquent, pour $t \simeq T$, les phases sont uniformément distribuées, et la somme est à peu près nulle. Elle ne redevient égale à NA que pour un temps égal à la période de battement de deux fréquences voisines $2\pi N/\Delta\omega$.

Lorsque l'on fait tendre N vers l'infini, la valeur de F (t) tend vers l'infini pour $|t| < T$ et reste nulle tout le reste du temps. On a donc bien construit l'impulsion très brève et très intense cherchée, à l'aide d'une distribution continue et uniforme de fréquences entre ω et $\omega + \Delta\omega$, avec la relation : $\Delta t \simeq 2\pi/\Delta\omega$. On peut encore l'écrire :

(6) $$\Delta\nu \cdot \Delta t \simeq 1$$

Lorsque $\Delta\omega \to \infty$, la fonction F (t) devient infiniment étroite et tend vers ce que l'on appelle une distribution « δ ». Quant à la distribution spectrale, c'est tout simplement une constante. On peut montrer que, pour donner une distribution δ non nulle pour $t = t_0$, il faut une distribution spectrale sinusoïdale, égale à $\cos \omega t_0$.

Pour une onde sinusoïdale de pulsation ω_0, il est évident que la distribution spectrale est une distribution δ, non nulle pour $\omega = \omega_0$. Cela n'est qu'un cas particulier du théorème de réciprocité de Fourier : la transformée de Fourier d'une fonction F (t), elle-même transformée de Fourier de la fonction A (ω), est égale à la fonction A (ω). Ce théorème est une généralisation de la deuxième propriété des séries de Fourier. On peut encore appliquer la formule **(6)**, en passant à la limite, puisque le temps d'émission Δt est infini, mais que l'étalement en fréquence $\Delta\omega$ est nul.

Un autre exemple est celui d'un oscillateur harmonique qui est branché, puis atteint rapidement une amplitude maximale A, conserve une oscillation sinusoïdale de pulsation ω_0 pendant un temps t, puis est éteint et n'émet plus. L'onde n'est pas purement monochromatique, mais est certainement dominée par la pulsation ω_0. On peut montrer en effet que la distribution spectrale est représentée par une courbe présentant un maximum vers ω_0 et non nulle sur un intervalle Δt tel que

$$\Delta\omega \cdot \Delta t \simeq 2\pi$$

La formule **(6)** est donc tout à fait générale ; on peut l'appliquer par exemple pour calculer la largeur de bande nécessaire à la modulation de signaux radio-électriques. L'écran d'un récepteur de télévision reçoit tous les 1/30 s un ensemble de spots clairs ou sombres. Il y a 500 lignes à 500 spots chacunes, soit par seconde $8 \cdot 10^6$ éléments d'information. Chaque impulsion dure donc 10^{-7} seconde et la largeur de la bande de fréquence nécessaire à la transmission est égale à $\Delta\nu = 1/\Delta t$, soit 10 mégahertz. Cela permet de calculer le nombre d'émetteurs qui peuvent exister sans gêner à l'intérieur d'une gamme d'ondes donnée.

Cohérence temporelle

Dans les sources usuelles, la lumière est produite par transformation d'énergie thermique (flamme, lampe à incandescence, étoile) ou électrique (décharge gazeuse, tube fluorescent) en énergie électromagnétique. Chaque atome émetteur reçoit à un instant complètement aléatoire une énergie sous forme de choc ou d'ionisation, ce qui fait passer un ou plusieurs électrons du niveau fondamental à une couche supérieure. C'est en retombant sur la couche fondamentale que l'électron se comporte comme une minuscule antenne. Il émet un paquet d'ondes et non pas une onde monochromatique, puisque la durée est limitée. Il y a incohérence pour deux raisons : la première est que tous les atomes n'ont entre eux aucune relation de phase déterminée, la seconde est qu'un même atome émet différents trains d'ondes à des instants quelconques. C'est pourquoi l'on distingue cohérence spatiale et cohérence temporelle.

fig. 53

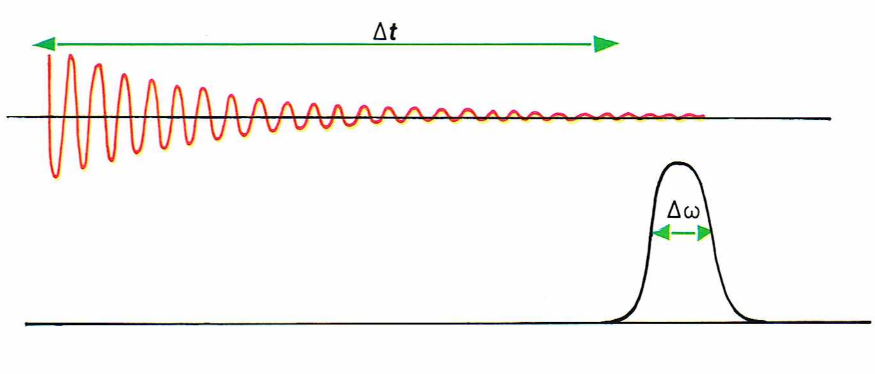

▲ ***Figure 53 :** aspect du train d'ondes émis par un atome isolé, et distribution spectrale correspondante.*

La durée Δt de chaque train d'ondes est une mesure de la cohérence temporelle d'une source. Pour déterminer expérimentalement celle-ci, une des méthodes les plus directes consiste à former dans le vide un pinceau d'atomes sortant d'un four contenant une vapeur. Ces atomes sont excités à un endroit de leur parcours, et on mesure l'intensité d'émission en fonction de la distance. On trouve des valeurs de 10^{-9} à 10^{-7} seconde.

A cette valeur de la cohérence temporelle Δt est associée une largeur spectrale par la formule **(6)**. Pour la lumière visible, la longueur d'onde présente une dispersion de l'ordre de $5 \cdot 10^{-5}$ Å (*fig.* 53). En fait, dans la plupart des cas, il est impossible d'observer cette largeur naturelle. Dans un gaz qui n'est pas au zéro absolu, les atomes qui émettent sont animés de vitesses désordonnées et élargissent donc la raie spectrale bien au-delà de la largeur naturelle. Pour un solide ou un liquide incandescent, il y a un couplage mécanique très important entre les atomes, d'une part, et une réabsorption avec réémission importante du rayonnement, d'autre part. Cela aboutit à un état d'équilibre thermique (qui est appelé en thermodynamique *rayonnement du corps noir*) correspondant à un spectre en fréquence continu ; on peut dire que c'est l'ensemble du corps qui émet et non chaque atome indépendamment.

Si les sources lumineuses naturelles possèdent un temps de cohérence de 10^{-7} seconde, il doit être possible d'observer un phénomène d'interférences avec deux sources distinctes, pourvu que le temps de mesure soit inférieur à 10^{-7} seconde. C'est ce qui est effectivement réalisé dans l'expérience de Brown et Twiss (1956).

Il existe des photomultiplicateurs permettant de transformer une intensité lumineuse en courant électrique, avec un temps de réponse inférieur à 10^{-7} seconde. Deux sources ponctuelles distinctes donnent des interférences matérialisées sur un plan P, comme dans les expériences usuelles, et les photomultiplicateurs sont placés en P, à une distance Δx l'un de l'autre correspondant à un déphasage φ. A φ s'ajoute bien entendu la différence de phase entre deux sources, mais cette différence est constante durant le temps de cohérence. Brown et Twiss mesurent le produit I_1I_2 des deux courants et, pour avoir un signal important, font la moyenne $\langle I_1I_2\rangle$ sur plusieurs minutes. Le résultat est comparé au produit $\langle I_1\rangle\langle I_2\rangle$ des intensités moyennes qui, lui, est indépendant de φ. On trouve expérimentalement, conformément au calcul :

$$\frac{\langle I_1I_2\rangle}{\langle I_1\rangle\langle I_2\rangle} = \frac{1}{2} + \cos^2\frac{\varphi}{2}$$

S'il n'y avait pas d'interférence observable, ce rapport serait égal à 1.

La limitation temporelle se manifeste également dans les expériences d'interférences « usuelles », où les deux sources cohérentes sont les images d'une source initiale, par le fait suivant : la différence de marche δ entre les deux faisceaux ne doit pas excéder la valeur $c/\Delta t$. En effet, au bout du temps Δt, le train d'ondes a disparu et a été remplacé par un autre, présentant avec le premier un déphasage quelconque. Pour $\Delta t = 10^{-8}$ s, on a $\delta = 3$ m. Une autre formulation équivalente consiste à dire que, pour $\delta = 3$ m, on obtient un blanc d'ordre supérieur, dû à la largeur naturelle de la source.

Dans les sources citées précédemment, la puissance fournie est dispersée soit sur tout le spectre, soit sur un grand nombre de fréquences. C'est une situation très différente de celle des ondes hertziennes émises par un circuit électrique : de tels générateurs permettent en effet de concentrer facilement 10^4 watts dans une bande plus étroite qu'un mégahertz. Comparons avec le rayonnement du Soleil : ce dernier émet pour toutes les longueurs d'onde 7 kW par cm^2 de surface solaire. Si l'on isolait une bande de 1 MHz dans le domaine visible, la portion de ces 7 kW serait égale à 10^{-5} W. Comparons également avec les lampes « monochromatiques » à décharge gazeuse pour lesquelles la puissance est concentrée dans un petit nombre de raies. La lampe à vapeur de mercure donne 100 W pour des largeurs en fréquence d'ordre de 10^4 MHz.

Cohérence spatiale

Soit un paquet d'ondes se propageant dans la direction de l'axe Ox et possédant une pulsation moyenne ω, et une faible dispersion $\Delta\omega$. La vibration en un point x donné s'écrit, pour l'onde centrale du paquet :

$$a = A\cos(\omega t - kx)$$

où k est le nombre d'onde ($k = \omega/v = 2\pi/\lambda$).

L'étalement $\Delta\omega$ entraîne une dispersion en nombre d'onde Δk :

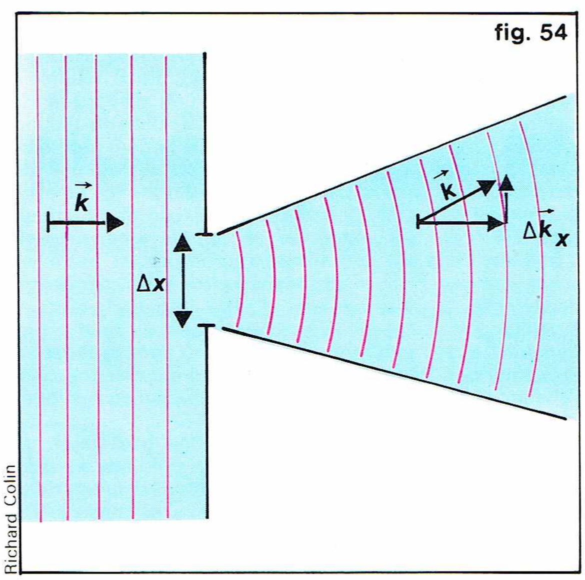

▶ *Figure 54 : dans une expérience de diffraction de Fraunhofer, une réduction de la dimension du paquet d'ondes à Δx entraîne un étalement Δk_x de la composante du vecteur d'onde.*

$$\Delta k = \frac{dk}{d\omega}\Delta\omega = \frac{\Delta\omega}{u}$$

u étant la vitesse de groupe définie dans la formule **(4)**.

Par ailleurs, la largeur du paquet d'ondes dans l'espace est égale à $\Delta x = u\,\Delta t$. On a donc :

(7) $$\Delta x \cdot \Delta k \simeq 2\pi$$

Cette formule, analogue à la formule **(6)**, peut se démontrer en toute généralité par la transformation de Fourier. On retrouve par ce moyen des résultats simples de diffraction, par exemple dans le cas de l'arrivée d'une onde plane sur un écran percé d'une ouverture (*fig.* 54). Avant l'arrivée sur l'obstacle, le vecteur d'onde est parfaitement défini ; ses trois composantes sont les nombres d'ondes correspondant aux directions Ox, Oy, Oz.

Si la direction Ox est dans le plan de l'écran, l'ouverture réduit le paquet d'ondes à une dimension Δx. Il apparaît donc une dispersion k_x sur la composante du vecteur d'onde. Celui-ci peut donc varier d'un angle $\theta = \frac{k_x}{k}$ autour de la direction initiale k. On retrouve ainsi l'ordre de grandeur de la largeur angulaire, trouvée en théorie de la diffraction :

$$\theta = \frac{\lambda}{\Delta x}$$

La formule donne donc une limite inférieure sur le degré de parallélisme que peut avoir un pinceau lumineux : l'ouverture angulaire est inversement proportionnelle à la dimension latérale du faisceau.

Pour la lumière visible de longueur d'onde 5 000 Å et un diamètre de 5 mm, on obtient : $\theta = 10^{-4}$ radian. On voit qu'il s'agit d'un faisceau très parallèle, et qu'il est impossible de le réaliser autrement qu'avec un laser. En effet, pour produire une onde plane avec une source ne possédant pas de cohérence spatiale, il faut utiliser une source quasi ponctuelle placée au foyer d'une lentille convergente. L'ouverture angulaire est alors égale à $\theta = d/f$, où d est la dimension de la source et f la distance focale. Pour $d = 1$ mm, $f = 10$ cm, on trouve $\theta = 10^{-2}$ radian, ce qui est très au-dessus de la limitation due à la diffraction.

Remarquons que, pour les sources habituelles, on peut définir une durée Δt en dessous de laquelle il y a cohérence temporelle. Par contre, pour ce qui est de la cohérence spatiale, il n'existe rien d'équivalent puisque, dès que l'on a deux atomes, leur déphasage est quelconque. Tout au plus peut-on dire que dans certains montages (interférences par une fente, par exemple), il existe une dimension de la source au-dessous de laquelle l'incohérence spatiale ne gêne pas l'observation.

Photons

Sans entrer dans le détail de la dualité onde-corpuscule, qui fait l'objet de la mécanique quantique et qui fait intervenir des domaines variés de la physique, il est nécessaire, en optique, de donner des notions sur les photons.

Lorsqu'il y a échange d'énergie entre deux systèmes, celui-ci se fait obligatoirement par des unités discrètes, indivisibles, appelées *quanta d'énergie*. Le quantum d'énergie électromagnétique reçoit le nom de photon. La quantité d'énergie correspondante est donnée, en fonction de la fréquence ν de la radiation, par la relation : $E = h\nu$. La constante universelle h (constante de Planck) est égale à $6{,}61 \cdot 10^{-34}$ joule-seconde. C'est une quantité microscopique, ce qui fait que le caractère discontinu ne se manifeste qu'au niveau atomique. Le photon étant indivisible, il se comporte comme une particule qui se déplace à la vitesse de la lumière avec une énergie E et une quantité de mouvement p :

$$E = h\nu \qquad p = \frac{h\nu}{c}$$

Quant à la masse qu'aurait le photon si l'on pouvait le mettre au repos, elle est nulle. La contradiction apparente entre les natures corpusculaire et ondulatoire de la lumière est levée par le fait que la mécanique qui gouverne le photon est probabiliste. La particule n'est pas localisée en général en un point précis, mais se trouve distribuée dans un certain volume. La probabilité de trouver le photon en un point est égale à l'intensité de l'onde lumi-

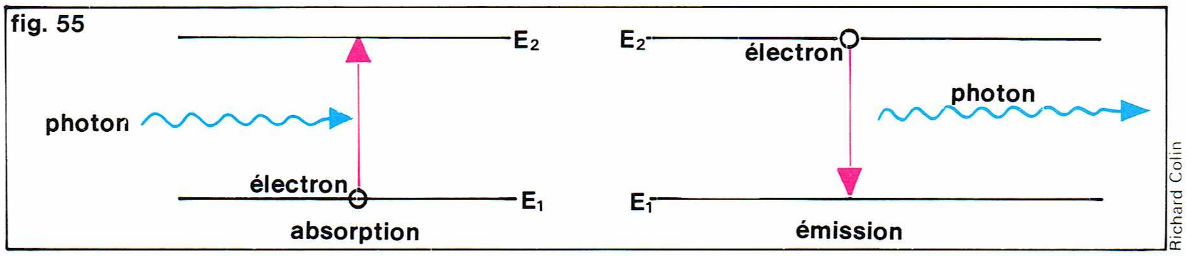

◀ *Figure 55 : absorption et émission spontanée d'un photon par un atome entre les deux niveaux d'énergie* E_1 *et* E_2.

neuse en ce point. D'autres quantités mécaniques peuvent aussi avoir simultanément plusieurs valeurs : ainsi la distribution des énergies E possibles est donnée par la répartition spectrale.

Des formules **(6)** et **(7)** on déduit les relations (dans lesquelles on note $\hbar = h/2\pi$) :

$$\Delta E \cdot \Delta t \simeq \hbar ; \qquad \Delta x \cdot \Delta p_x \simeq \hbar ;$$
$$\Delta y \cdot \Delta p_y \simeq \hbar ; \qquad \Delta z \cdot \Delta p_z \simeq \hbar$$

appelées relations d'incertitude de Heisenberg.

La mécanique quantique nous apprend que les électrons appartenant à des atomes ou à des molécules peuvent se trouver sur des orbites déterminées, groupées en couches ayant chacune une énergie. A l'énergie la plus basse correspond l'état fondamental dans lequel l'électron non soumis à une perturbation extérieure va rester. Il y a des transitions possibles entre les couches, moyennant l'émission ou l'absorption d'un photon. La durée du phénomène est précisément égale à celle du train d'ondes de la *figure* 53, c'est-à-dire au 10^{-8} seconde que dure la cohérence temporelle. L'émission spontanée résulte de la désexcitation spontanée d'un atome selon le schéma de la *figure* 55. La même figure représente l'absorption par excitation.

Émission stimulée

Le mécanisme d'émission stimulée (Einstein, 1917) peut être décrit facilement dans le cas idéalisé d'atomes à deux niveaux d'énergie, dont l'excitation est d'origine thermique. Appelons N_1 le nombre d'atomes dans l'état fondamental ayant l'énergie E_1 et N_2 le nombre dans l'état excité ayant l'énergie E_2. La fréquence des photons absorbés ou émis est donnée par : $h\nu = E_2 - E_1$.

Le nombre d'atomes se désexcitant spontanément par unité de temps est proportionnel à N_2, soit AN_2. A est un coefficient qui ne dépend que de l'espèce chimique à laquelle appartient l'atome. Le nombre d'atomes portés dans l'état excité par absorption est proportionnel à N_1 et au nombre n de photons de fréquence ν présents dans le milieu, soit nBN_1.

Si l'émission spontanée et l'absorption sont les seuls phénomènes en jeu, on doit avoir, par un système en équilibre, égalité entre les taux d'excitation et de désexcitation. Mais la mécanique statistique nous apprend que les nombres d'occupations des niveaux d'énergie obéissent à la loi de Boltzmann :

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-h\nu/kT}$$

où k est la constante de Boltzmann, T la température absolue du système. On en déduit :

$$n = \frac{A}{B} e^{-h\nu/kT}$$

ce qui est en contradiction avec une autre loi de la mécanique statistique, la loi de Planck, qui donne la densité de photons en fonction de la température :

$$n = C \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

C'est qu'en fait il existe un troisième processus, l'émission stimulée, dont le schéma est représenté *figure* 56. Le photon incident interagit avec l'état excité et provoque la retombée de l'électron dans l'état fondamental. Il y a donc deux photons émergents qui ont exactement les mêmes caractéristiques (énergie, direction) et qui sont en phase, puisque l'un est la cause directe de l'émission de l'autre. Le nombre d'émissions stimulées par unité de temps est égal à : BN_2n. Le coefficient B est le même que celui de l'absorption.

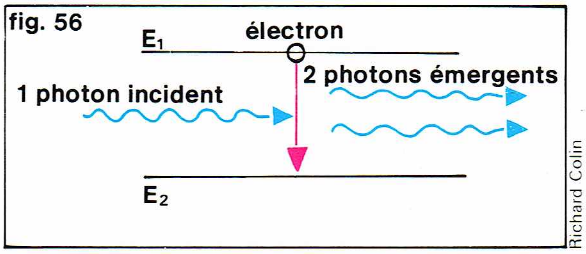

◀ *Figure 56 : représentation schématique de l'émission stimulée.*

Les avantages de l'émission stimulée sont évidents : on peut espérer, à partir d'un photon de départ, en produire un très grand nombre, ayant les mêmes caractéristiques. Cela permettrait d'avoir de la lumière cohérente. Or, malheureusement, dans les corps en équilibre thermique, l'absorption l'emporte toujours sur l'émission stimulée, car le niveau fondamental est toujours le plus peuplé. Pour réaliser l' « inversion de population », il faut « pomper » les atomes de l'état fondamental à l'état excité au moyen d'un dispositif extérieur. L'apport d'énergie ainsi réalisé maintient le corps hors d'équilibre ; il est en partie récupéré dans l'émission stimulée. Les premiers appareils qui ont fonctionné sur ce principe, dans le domaine des ondes centimétriques, sont les masers *(microwave amplification by stimulated emission of radiation)*.

Masers

Le premier maser est le maser à ammoniac, construit par Townes en 1954. Le principe de l'inversion de population consiste à séparer mécaniquement les molécules se trouvant dans l'état fondamental et dans l'état excité. Il existe dans la molécule d'ammoniac deux niveaux séparés par une énergie correspondant à des photons de transition ayant une longueur d'onde égale à 1,25 cm. Dans un champ électrique extérieur, les deux types de molécules sont soumis à des forces opposées en direction. Pour les séparer, il suffit donc de faire passer un jet moléculaire entre les armatures d'un condensateur et de recueillir dans une cavité placée sur le trajet les molécules de l'état excité. Cette cavité possède des dimensions telles qu'une onde électromagnétique de longueur d'onde 1,25 cm s'y trouve en résonance. Il se produit à l'intérieur une émission spontanée due à la création en chaîne de photons cohérents. L'amorçage de cette réaction peut être dû, soit à une onde incidente extérieure, auquel cas l'appareil se comporte comme un amplificateur, soit à la désexcitation spontanée d'une des molécules, auquel cas il se comporte comme un oscillateur. Le processus est entretenu par l'arrivée continue du jet moléculaire dans la cavité.

La réalisation de l'inversion de population par séparation mécanique est exceptionnelle, le procédé généralement employé étant celui du maser à trois niveaux (Basov et Prokhorov, 1955). Considérons un atome à trois niveaux

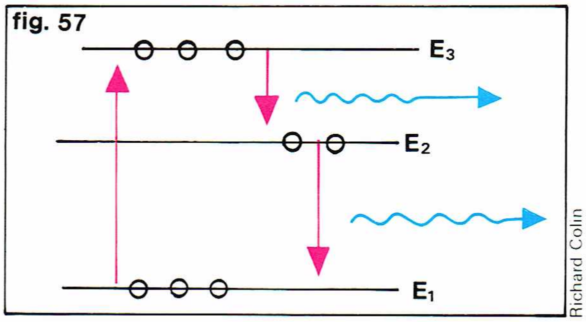

◀ *Figure 57 ; principe du maser à trois niveaux : l'arrivée d'énergie extérieure permet de peupler également les niveaux 1 et 3.*

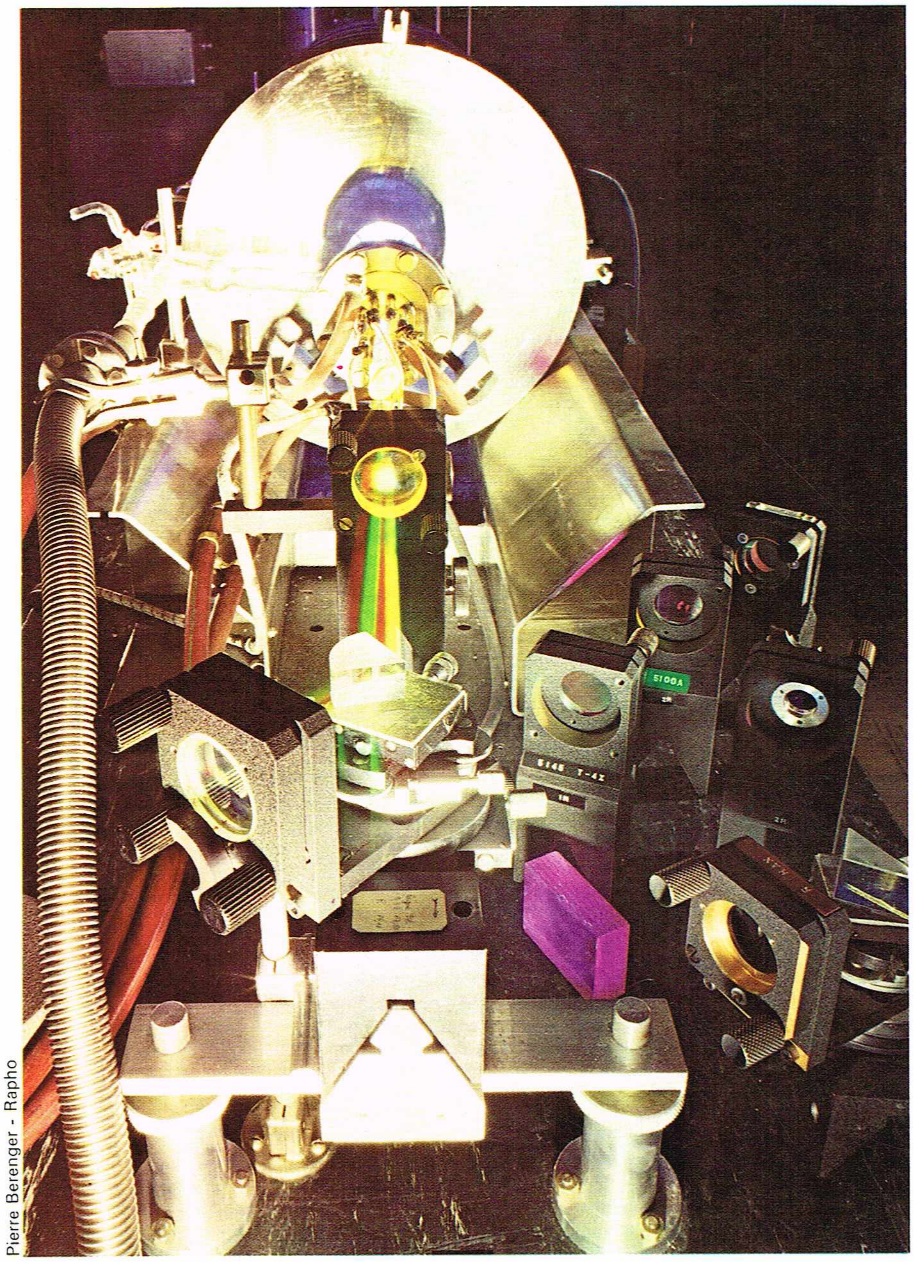

Pierre Berenger - Rapho

d'énergie E_1, E_2, E_3 et appelons ν_{12}, ν_{13}, ν_{23} les fréquences de transitions possibles entre ces trois niveaux (*fig.* 57). Supposons qu'on envoie sur le matériau une onde électromagnétique de fréquence ν_{13}, transportant une très grande énergie. Parmi les trois processus, émission spontanée, émission stimulée et absorption, seule l'émission spontanée ne dépend pas de la densité de photons reçue. Par conséquent, si cette dernière est suffisamment importante, la désexcitation spontanée est négligeable par rapport aux deux phénomènes. Or, ceux-ci ayant le même coefficient B, les nombres d'occupation N_1 et N_3 sont égaux. On a bien entendu un système de deux niveaux 1 et 3 très éloigné de l'équilibre thermique. Par contre, le nombre d'occupation N_2 reste le même que s'il n'y avait pas de perturbation extérieure. Le calcul montre alors que deux cas sont possibles :

— si $\nu_{12} > \nu_{31}/2$, il y a inversion de population entre les niveaux 1 et 2 : $N_2 > N_1$;

— si $\nu_{12} < \nu_{31}/2$, il y a inversion de population entre les niveaux 2 et 3 : $N_3 > N_2$.

Il est donc possible, dans le domaine hertzien, où l'on dispose de sources puissantes assez monochromatiques, mais non nécessairement cohérentes sur la fréquence ν_{13}, de fabriquer un maser.

Lasers

Pour fabriquer un laser *(light amplification by stimulated emission of radiation)* fonctionnant sur le principe des trois niveaux, il faut résoudre le problème suivant : dans le domaine optique, les sources puissantes usuelles ne donnent qu'une très faible partie de leur énergie si on les limite à une raie spectrale fine. Une première solution est fournie par le laser à cristal, dont l'exemple type est le rubis. Il s'agit d'un cristal d'alumine contenant quelques atomes de chrome (0,05 %), ce qui donne la couleur rose. Il possède à la fois un spectre de bandes et de raies (*fig.* 58). Le rendement du « pompage » est donc satisfaisant, puisque, pour passer d'un niveau de raie à un niveau de bande, les photons incidents n'ont pas à être monochromatiques. Les électrons retombent en 10^{-7} seconde sur le niveau 2. Celui-ci est métastable, sa durée de vie est de l'ordre de $5 \cdot 10^{-3}$ s : on peut donc ainsi y accumuler les électrons. La source lumineuse extérieure est une lampe flash, le rubis est placé à l'intérieur d'un interféromètre de Pérot-Fabry, réglé sur la fréquence ν_{12} (*fig.* 59). Le déclenchement de la lampe à décharge provoque l'inversion de population. Comme dans le cas du maser, il suffit d'une désexcitation spontanée pour provoquer la réaction en chaîne d'émission stimulée. Les photons de direction perpendiculaire aux miroirs passent un grand nombre de fois dans le milieu avant d'avoir une chance de traverser la lame de verre semi-réfléchissante de l'interféromètre et de participer au faisceau laser émis vers l'extérieur. Ce sont donc les seuls à se multiplier, et ils définissent la direction de l'émission. Le faisceau a une

▶ ***Figure 58** : le spectre des niveaux d'énergie d'un cristal de rubis comprend une partie continue (bande) et une partie discontinue (raies).*

▼ ***Figure 59** ; principe du laser à rubis : R, rubis ; M, miroir ; L, lampe flash avec son réflecteur Re.*

fig. 58

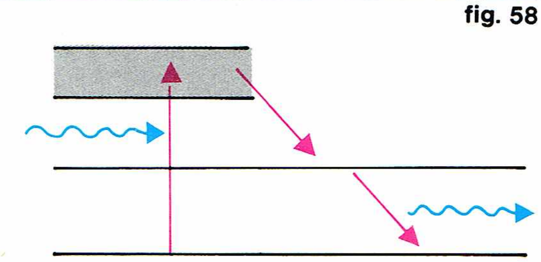

Richard Colin

fig. 59

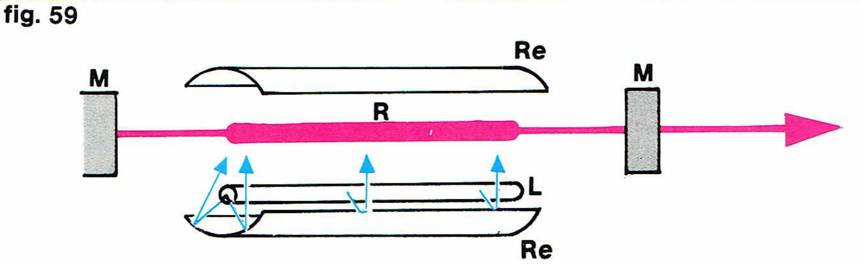

Richard Colin

Palais de la Découverte, Paris

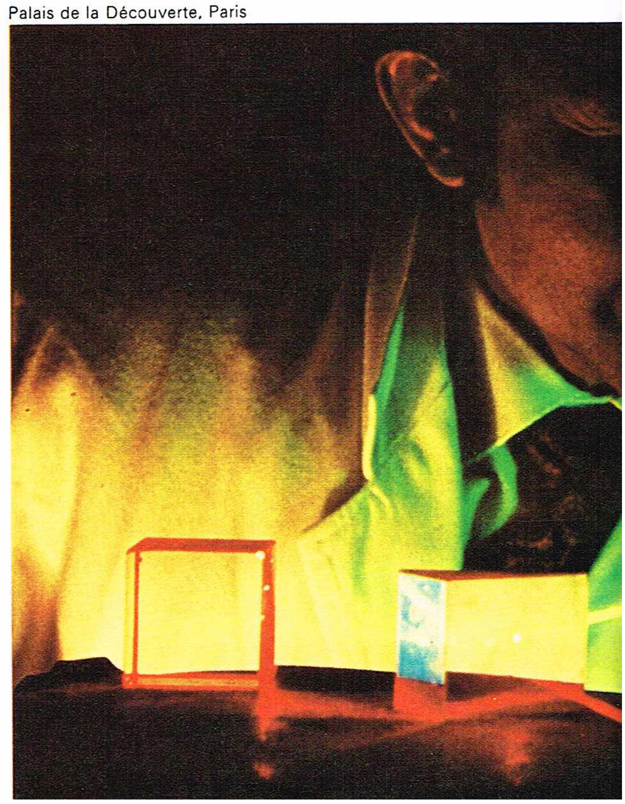

fig. 60

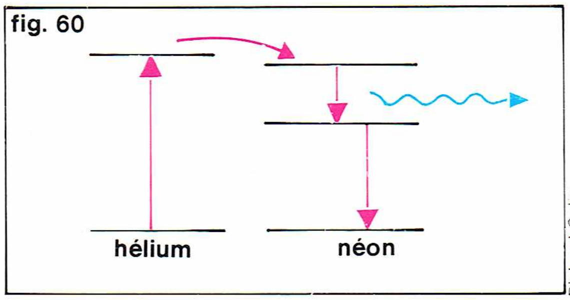

fig. 61

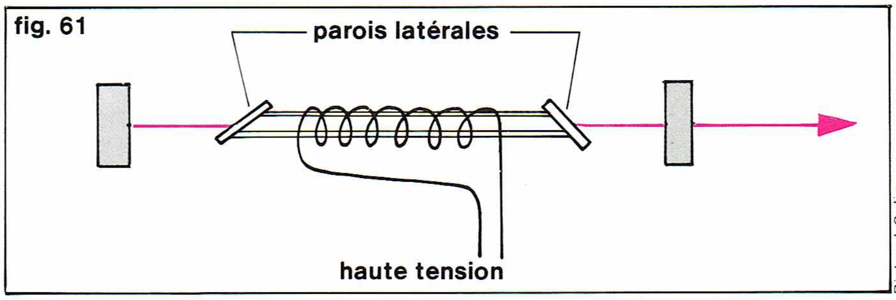

▲ *A gauche, figure 60 : niveaux électroniques d'un mélange hélium-néon. L'énergie se transmet d'un gaz à l'autre par les chocs atomiques. A droite, figure 61 : principe du laser à gaz ; remarquer les parois latérales inclinées sous l'incidence de Brewster.*

forme cylindrique, car sa dispersion angulaire n'est due qu'à la diffraction venant des limites géométriques du cristal. La cohérence spatiale et temporelle est assurée par l'onde de référence qui va et vient entre les miroirs. Ce type de laser concentre l'énergie dans un temps très court, ce qui permet d'atteindre de fortes puissances (plusieurs centaines de mégawatts), mais il ne fonctionne pas de façon continue. La *figure* 59 représente le schéma de construction.

Il existe également des lasers à gaz, dont le type est le laser à hélium-néon. Lorsqu'on soumet le mélange gazeux à une décharge électrique de haute fréquence, les atomes d'hélium sont excités. Ceux-ci transmettent par chocs leur excitation aux atomes de néon, qui ont un niveau d'énergie proche (*fig.* 60). La proportion d'hélium étant nettement plus grande que celle de néon, on peut réaliser une inversion de population. On a donc un système de maser à trois niveaux, mais à deux atomes différents. Outre leur prix peu élevé, les avantages des lasers à gaz sont les suivants : fonctionnement en continu et très bonne finesse de raie (1 à 100 kHz). Par contre, leur puissance est faible (1 watt). La lumière fournie est polarisée. En effet, pour supprimer les réflexions parasites aux extrémités du tube contenant le gaz, celles-ci sont inclinées sous l'incidence de Brewster ; la composante polarisée correspondante est ainsi transmise sans atténuation (*fig.* 61).

Il existe également des lasers chimiques, dans lesquels des gaz réactifs sont introduits de manière continue dans un tube, l'excitation du milieu étant produite par l'énergie chimique de la réaction.

Un troisième type est constitué par des diodes à semi-conducteurs telles que celles qu'on utilise comme redresseurs dans l'électronique. Contrairement aux atomes isolés d'un gaz, le cristal comprend non pas des raies d'énergie mais des bandes. Lorsqu'un courant les parcourt, les électrons passent dans la bande supérieure. Leur désexcitation fournit de l'énergie, soit sous forme calorifique, soit, pour les diodes électroluminescentes, sous forme optique. Pour des courants très intenses, on peut avoir inversion de population et émission stimulée. Ces lasers fonctionnent en continu, ils sont de faible puissance et peu monochromatiques. Ils sont cependant intéressants, car leur rendement est très élevé : ils réalisent une très bonne conversion d'énergie électrique en énergie lumineuse, ce qui peut être intéressant dans des dispositifs logiques et informatiques.

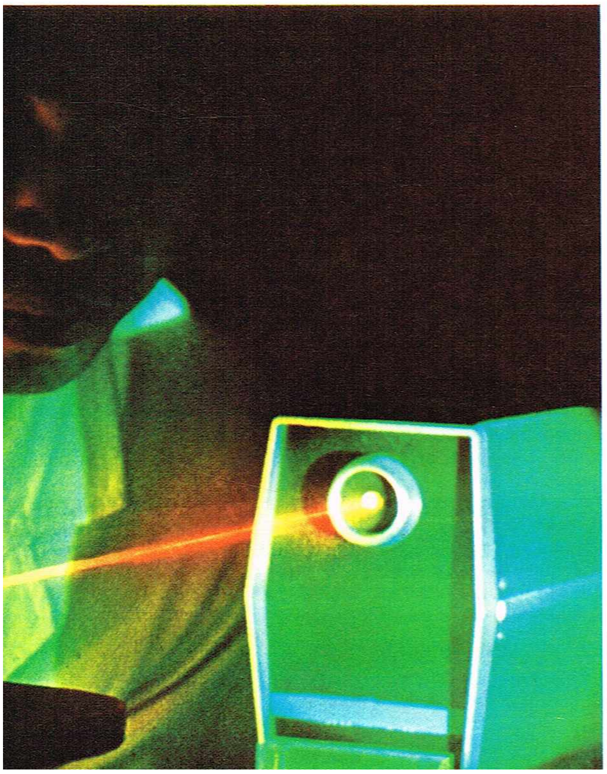

◀ *Le faisceau rouge, émis par le laser hélium-néon, se caractérise par une grande directivité et une haute tolérance. Ici, réflexion totale sur un jeu de prismes rectangles.*

Applications des lasers

On sait fabriquer actuellement des lasers de performances très variées, couvrant le spectre de l'ultraviolet à l'infrarouge lointain, et il est difficile de citer toutes les applications.

On peut cependant classer ces applications entre celles qui utilisent la puissance, celles qui utilisent la directivité du faisceau et celles qui utilisent la cohérence.

— La puissance des lasers à rubis est utilisée pour faire des soudures de précision, le faisceau étant focalisé à l'aide d'une lentille. La quantité d'énergie reste faible, mais la durée de l'impulsion étant de $3 \cdot 10^{-8}$ seconde, la chaleur accumulée dans la cible ne peut pas être évacuée, et la matière est vaporisée au point d'impact. On emploie également le laser en médecine pour cautériser une rétine décollée. Les milieux transparents de l'œil n'absorbent aucune énergie, contrairement à la rétine qui est opaque : cette méthode permet d'éviter la chirurgie. Pour des applications nécessitant de très grandes puissances, on emploie généralement sur le trajet du rayon lumineux sortant du laser un ou plusieurs amplificateurs. Ils sont constitués de matériau dans lequel a été réalisée l'inversion de population mais où l'oscillation n'a pas lieu tant qu'une onde extérieure ne les touche pas. L'amplitude du champ électrique de la lumière est alors suffisamment forte pour déformer les atomes de façon non linéaire. Ils réémettent alors, non seulement la lumière de fréquence égale à celle qui entre, mais également les harmoniques de fréquence multiple. On peut par exemple, avec une radiation de longueur d'onde 1,06 μ, fabriquer un faisceau cohérent de 0,53 μ. Si le champ électrique est plus intense que celui qui maintient les électrons autour du noyau atomique, la cible est transformée en un milieu ionisé (un plasma). Cette propriété est un des moyens actuellement mis en œuvre pour amorcer la fusion thermonucléaire contrôlée. Des résultats encourageants ont été obtenus en laboratoire.

— La directivité du faisceau laser permet de l'utiliser pour matérialiser une droite dans l'alignement des ouvrages de travaux publics ou de topographie. Il est possible également de mesurer des distances à l'aide de télémètres à lasers, qui sont en fait des radars optiques. Une impulsion est envoyée en direction du but à mesurer. Le temps d'aller et retour donne la valeur de la distance. Contrairement aux télémètres classiques, la précision ne dépend pas de la distance, et elle n'est limitée actuellement que parce que la vitesse de la lumière n'est pas connue avec assez d'exactitude. On peut mesurer la distance de satellites situés à 1 000 km avec une précision de 1 à 3 m. On peut également mesurer les distances terrestres en utilisant un satellite comme relais.

— La cohérence est évidemment la propriété la plus spécifique du laser. Toutes les expériences d'interférences appliquées peuvent être réalisées avec de meilleures performances : luminosité, cohérence temporelle de plusieurs minutes. La spectroscopie a besoin de sources très lumineuses et possédant une longueur d'onde réglable. La première condition est réalisée par un laser nu, mais la seconde nécessite un système nouveau pour rendre le laser « accordable ». Cela peut être obtenu en prenant comme milieu émetteur une solution dont on fait varier la concentration, ou encore en envoyant

◀ *Page ci-contre, en haut, l'apparition de la lumière laser a permis un grand nombre d'expériences nouvelles de physique fondamentale et appliquée.*

U.S.I.S.

le faisceau laser sur des molécules qui se désexcitent en un spectre élargi (effet Raman). Mais les applications les plus spectaculaires sont l'holographie et le filtrage des fréquences spatiales.

Holographie

Lorsqu'on photographie un objet, on enregistre l'intensité de la lumière en chaque point de la pellicule. En 1948, Gabor a proposé d'enregistrer également la phase de l'onde. Il a fallu attendre l'invention du laser pour réaliser ce projet, puisque les sources classiques ont un temps de cohérence très faible devant la durée d'une exposition photographique.

Le principe consiste à dédoubler la lumière et à faire interférer sur la plaque l'onde réfléchie par l'objet et l'onde non perturbée, dite onde de référence. La position des franges d'interférence donne la phase, et leur contraste donne la proportion de lumière réfléchie par l'objet. La *figure* 62 représente le montage utilisé ; on voit qu'aucune lentille n'est utilisée entre image et objet. Lorsque l'on regarde la plaque à l'œil nu, on ne voit qu'un réseau de franges complètement illisibles. Par contre, lorsqu'on l'éclaire par le faisceau de référence, dans les mêmes conditions que pour la prise de vue, on observe une image réelle à l'endroit où se trouvait l'objet. Il s'agit d'une reproduction fidèle à trois dimensions ; en se déplaçant, on voit des parties cachées par la perspective. Cette vision en relief est possible, car on a enregistré toute l'information de la surface d'onde réfléchie, amplitude et phase comprises. L'information relative à chaque point est d'ailleurs distribuée sur l'ensemble de la pellicule : si l'on brise la plaque, chaque morceau redonne l'image entière, avec simplement une netteté diminuée.

Il est possible d'apporter des améliorations et de trouver des applications à cet effet remarquable. Tout d'abord, si l'émulsion photographique n'est pas trop mince, il se forme dans l'épaisseur des franges qui, lorsque l'on éclaire par le faisceau de référence, se comportent comme un réseau. Il y a une sélection étroite de la lumière réémise, exactement dans la direction de l'objet initial. La restitution de l'hologramme peut se faire, non plus avec un laser, mais avec une simple lampe « monochromatique » à décharge gazeuse, la pellicule filtrant un faisceau suffisamment cohérent. Il est possible également d'enregistrer

▲ La cohérence temporelle du laser permet d'effectuer des interférences avec de grandes différences de marche. L'holographie bénéficie de cette propriété, et notamment pour la localisation des réserves minérales du sous-sol de la Terre.

► A gauche, figure 62 : enregistrement d'un hologramme ; le faisceau laser est séparé par la plaque L en un faisceau de référence et un faisceau éclairant l'objet, qui atteignent la plaque P.

A droite, figure 63 : courbe de réponse d'un instrument considéré comme filtre de fréquences spatiales ; en éclairage cohérent (courbe bleue) et incohérent (courbe rouge).

► A gauche, restitution d'un hologramme par une lampe à mercure.

A droite, figure 64 : schéma de principe du filtrage de fréquences spatiales ; a, objet de transparence uniforme ; b, des inhomogénéités diffractent la lumière et forment dans le plan focal un spectre de fréquences.

fig. 62

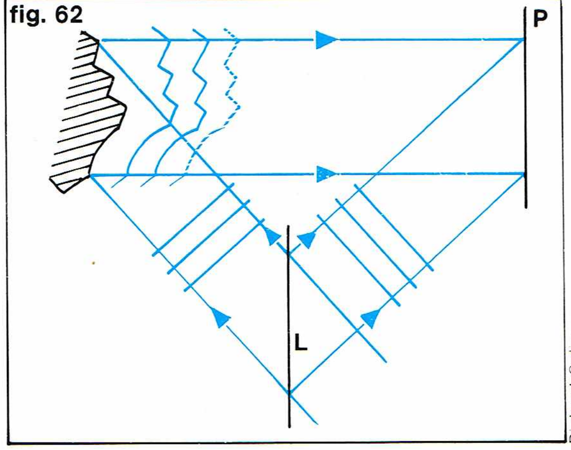

Richard Colin

fig. 63

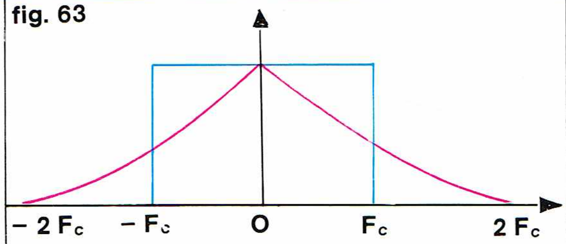

Richard Colin

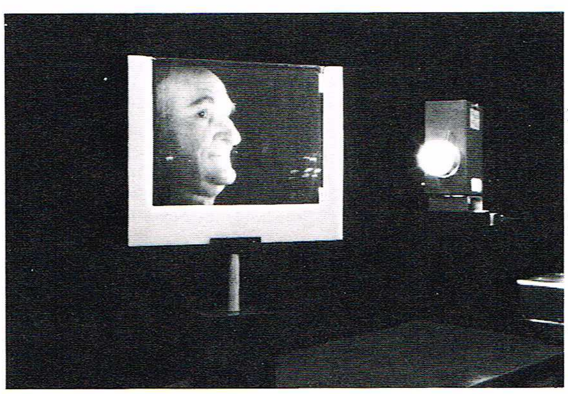

Cliché Thomson - C.S.F. - G. Robin

fig. 64

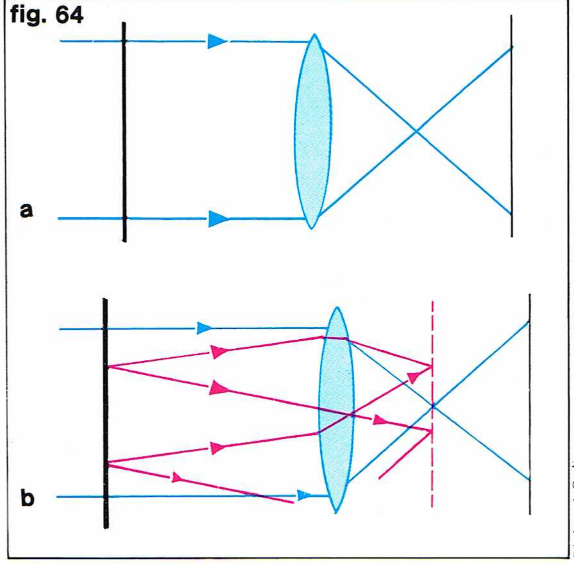

Richard Colin

sur une même plaque plusieurs images, à des angles différents. L'hologramme peut donc constituer une mémoire optique à très grande capacité. Une application importante concerne l'étude des très petites déformations des corps opaques. On enregistre deux images en relief superposées du corps, avant et après déformation. La très faible différence de dimension apparaît à l'examen sous forme de franges d'interférences.

Le principal progrès qui pourrait être fait en vue d'autres applications (cinéma en relief, par exemple) est la diminution du temps de pose pour la prise de vue.

Filtrage des fréquences spatiales

A toute fonction vibratoire étalée dans le temps, on peut faire correspondre son spectre de fréquences, qui est la transformée de Fourier de cette fonction. De la même façon, toute image peut être considérée comme l'addition de composantes sinusoïdales, c'est-à-dire d'une infinité de réseaux à deux dimensions. La fonction définissant l'amplitude et la phase de chacune des composantes s'appelle le spectre de fréquences spatiales. De la même façon qu'un appareil donné ne laisse passer que certaines couleurs et se comporte donc comme un filtre de fréquences temporelles, tout instrument d'optique ne transmet que certaines fréquences spatiales. Un objectif de microscope, par exemple, possède, à cause de la diffraction, un pouvoir séparateur, qui est la dimension en dessous de laquelle on ne peut pas distinguer deux points. Il laisse donc passer toutes les fréquences spatiales, jusqu'à une certaine valeur maximale, dite fréquence de coupure. La *figure* 63 représente la transparence en fréquences spatiales pour un tel instrument, en éclairage cohérent, ainsi qu'en éclairage incohérent où le calcul est plus complexe.

La *figure* 64 indique un schéma de principe pour la séparation des fréquences spatiales. L'image est une pellicule photographique éclairée en lumière cohérente par un faisceau parallèle. Elle se comporte comme un objet pour une lentille convergente, qui en donne une image à une distance double de la longueur focale. Si l'intensité de la pellicule était uniforme, ce qui correspondrait à une fréquence spatiale égale à zéro, on aurait concentration du faisceau au foyer. En fait, la pellicule peut être considérée comme composée d'une infinité de réseaux de pas différents, qui diffractent la lumière en dehors du faisceau, dans une direction qui dépend du pas du réseau. On trouve donc dans le plan focal une analyse spectrale de l'image initiale, qu'on peut modifier en plaçant un système de cache à l'endroit désiré.

Le filtrage des fréquences spatiales a été découvert avant le laser; on utilisait alors une source partiellement cohérente formée d'un trou de très faible diamètre éclairé par la raie verte d'une lampe au mercure. Des résultats intéressants avaient été obtenus, tels que la suppression d'une fréquence gênante dans une image, ou au contraire l'extraction d'un dessin périodique noyé dans un fond quelconque. A l'aide de filtres plus complexes, on peut corriger un défaut de mise au point survenu lors de la prise de la photographie. L'application la plus prometteuse semble être la reconnaissance automatique d'une forme donnée, parmi un très grand nombre de clichés (empreintes digitales, caractères imprimés).

Émission et réception de la lumière

Photométrie énergétique

La photométrie est la mesure des intensités lumineuses. Une onde n'étant jamais rigoureusement monochromatique, on doit s'intéresser dans un premier temps à l'énergie totale transformée par l'ensemble de toutes les fréquences : c'est la photométrie énergétique.

Par définition, le flux traversant une surface S limitée par une courbe fermée est la quantité d'énergie traversant S pendant l'unité de temps. Il est de même nature qu'une puissance et se mesure en watts. On appelle éclairement le flux rapporté à l'unité de surface; l'unité usuelle est le watt/m^2.

Considérons maintenant une source ponctuelle, au sens de l'optique géométrique, c'est-à-dire de dimension petite par rapport à la distance d'observation. La courbe limitant une petite surface dS définit avec la source O un cône. D'après le principe de propagation rectiligne, et si le milieu n'est pas absorbant, l'énergie émise dans le

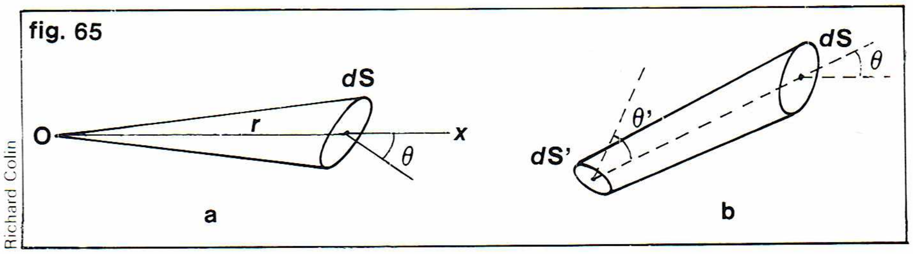

▲ *Figure 65 : définition des angles solides contenant le flux lumineux pour une source ponctuelle* (**a**) *et un élément* **dS'** *de source étendue* (**b**).

cône se conserve au cours de la propagation. Il en est de même de l'angle solide $d\Omega$, mesuré en stéradians, qui se calcule par la formule :

$$d\Omega = \frac{dS \cos\theta}{r^2}$$

θ étant l'angle de la normale à dS et de la direction Ox de la source, et r la distance d'observation (*fig.* 65*a*).

On peut donc définir le rapport du flux sur l'angle solide, qu'on appelle intensité dans la direction Ox; il ne dépend que de la source et de la direction Ox. On le mesure en watts par stéradian. Cette définition précise le terme d'intensité lumineuse que nous avions employé jusqu'ici pour parler de l'énergie d'une onde.

Considérons une source étendue, et isolons sur celle-ci un élément de surface dS', centré autour du point O (*fig.* 65*b*). Comme dans le cas d'une source ponctuelle le flux envoyé par la source dS' est proportionnel à l'élément d'angle solide $d\Omega$ sous lequel on observe :

$$d\varphi = \mathrm{I}\,d\Omega = \mathrm{I}\,\frac{dS \cos\theta}{r^2}$$

Il est également proportionnel à l'aire dS' et au cosinus de l'angle θ' que fait la normale à cette surface avec la direction d'observation Ox :

$$d\varphi = \mathrm{L}\,\frac{dS\, dS' \cos\theta \cos\theta'}{r^2} \qquad \textbf{(8)}$$

On voit apparaître une nouvelle quantité L que l'on appelle luminance énergétique de la source au point O, dans la direction Ox. La formule **(8)** est la formule de Lambert; elle permet de décomposer un flux lumineux en une partie relative à la source émettrice, la luminance, et une autre, qui ne dépend que des caractéristiques géométriques du montage, appelée étendue du faisceau. On dit qu'un corps suit la loi de Lambert lorsque sa luminance est identique dans toutes les directions. C'est le cas, par exemple, d'une surface mate et blanche éclairée et diffusant toute la lumière reçue. Ce n'est évidemment pas vrai pour un miroir obéissant aux lois de la réflexion, puisqu'il renvoie la lumière dans une seule direction.

On démontre en thermodynamique qu'un objet incandescent obéissant à la théorie du corps noir suit la loi de Lambert. Une sphère lumineuse apparait comme un disque uniformément brillant; c'est le cas du Soleil.

On définit encore l'émittance énergétique comme la puissance rayonnée par unité de surface de la source, dans toutes les directions. Si la loi de Lambert est satisfaite, l'émittance est donnée en fonction de la luminance par la relation : $E = \pi L$. Quand le Soleil est au zénith, et s'il n'y avait pas d'absorption par l'atmosphère terrestre, l'éclairement de la Terre serait de 1 390 W/m^2; on peut en déduire que l'émittance du Soleil est égale à :

$$560\ 000\ \mathrm{W/m^2}$$

Toutes les quantités définies se rapportent à l'énergie électromagnétique de la totalité du spectre. On peut aussi considérer les valeurs monochromatiques, correspondant à la longueur d'onde λ. Cela est nécessaire lorsque la sensibilité des récepteurs ou l'absorption des instruments d'optique varie avec λ. Le cas particulier le plus important est, bien entendu, celui de l'œil, qui ne voit que les radiations de 0,4 à 0,7 μ, avec un maximum de sensibilité à 0,553 μ. Pour éviter les confusions, on emploie souvent les termes de radiance et brillance au lieu d'émittance énergétique et luminance énergétique.

Photométrie visuelle

La photométrie visuelle est l'étude des sources lumineuses d'après leur perception par l'œil. Cette discipline ne donne donc pas des résultats strictement reproductibles,

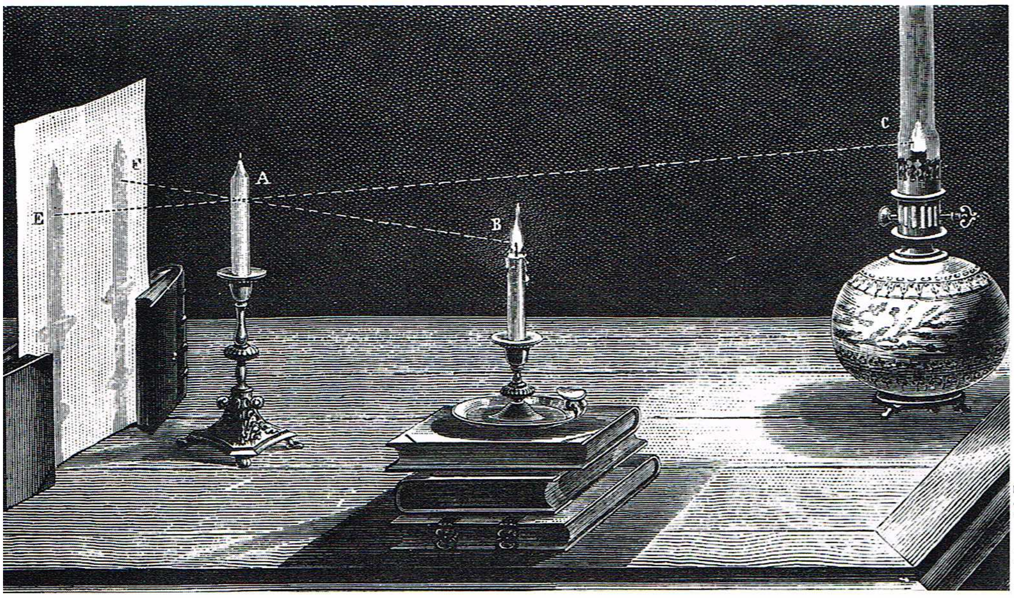

Archives M.R.

▲ Les Récréations scientifiques, *1888; photométrie élémentaire : « Allumant alors* B *et* C, *on produira deux ombres* E *et* F *auxquelles on arrivera facilement à donner exactement la même intensité en avançant ou reculant l'une des deux sources de lumière. Ceci obtenu, les intensités lumineuses seront inversement proportionnelles aux carrés des distances mesurées AB et AC.* [...] *La valeur lumineuse d'un bec se compte habituellement en bougies, et on prend pour type celles de 10 au kg.* [...]. *»*

compte tenu des variations individuelles. Cependant, à l'aide d'observations statistiques, et moyennant un certain nombre de conventions, il est possible de résoudre le problème de l'action de la lumière sur l'œil, son importance pratique étant fondamentale.

Avant l'apparition de détecteurs sensibles à l'énergie, les seules mesures possibles étaient visuelles. L'œil n'est pas capable de mesurer de façon absolue une grandeur lumineuse, par contre il est très sensible à l'égalité de luminance ou d'éclairement, lorsque les deux sources ou les deux écrans sont placés côte à côte. Si, par un dispositif approprié, on substitue l'un à l'autre sur une même plage les deux éléments à comparer, avec une cadence un peu rapide, il en résulte une sensation de papillotement qui disparaît lorsque l'égalité des luminances est réalisée. Cette égalité peut être obtenue en éloignant ou en rapprochant une des deux sources. Si l'on a une unité de référence, il est donc possible de mesurer n'importe quelle grandeur photométrique en utilisant les relations de définition. Dans le cas de deux sources n'ayant pas la même composition spectrale, la comparaison des éclairements est plus délicate et imprécise. On définit un facteur de sensibilité relative V (λ), valable pour l'observateur moyen, comme le rapport des éclairements énergétiques monochromatiques pour la longueur d'onde λ et pour une longueur d'onde de référence, qui donnent le même éclairement lumineux. Il mesure donc la sensibilité de l'œil aux différentes couleurs. La courbe représentative est tracée sur la *figure* 66.

fig. 66

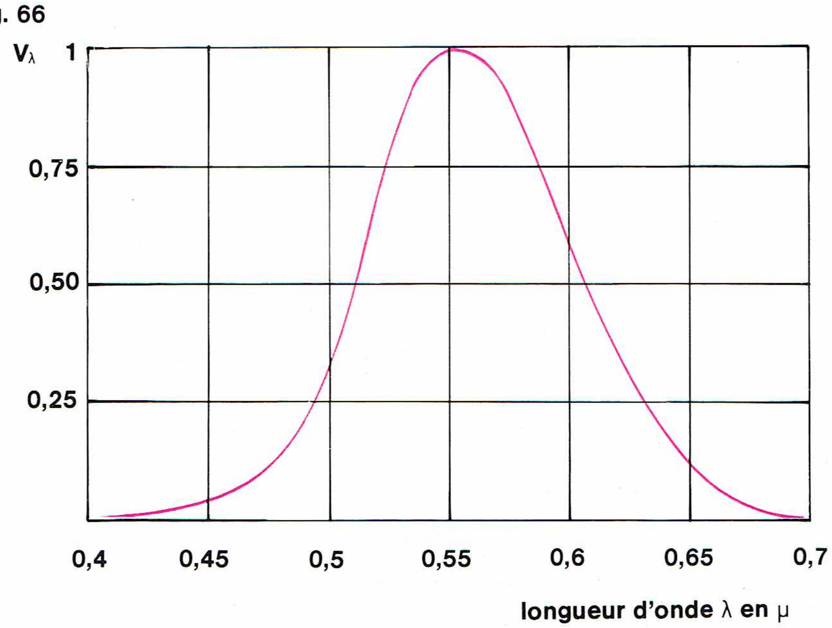

Richard Colin

L'unité photométrique fondamentale est l'unité d'intensité lumineuse, définie par le décret du 3 mai 1961 : c'est la candela (symbole cd). La candela est l'intensité lumineuse dans une direction déterminée d'une ouverture perpendiculaire à cette direction, ayant une aire de 1/60 de centimètre carré et rayonnant comme un radiateur intégral (corps noir) à la température de solidification du platine. La *figure* 67 représente l'étalon d'intensité : le corps rayonnant (thorine) est chauffé électriquement jusqu'à ce que le platine commence à se liquéfier ; une ouverture permet l'observation. Les unités dérivées sont les suivantes :

— flux lumineux : lumen (lm) [ou : une candela $\times$ un stéradian] ;

— émittance : lumen par mètre carré (lm/m^2) ;

— luminance : candela par mètre carré (cd/m^2) ;

— éclairement : lux (lx), un lumen par mètre carré.

On appelle efficacité lumineuse d'une source le flux lumineux en lumens correspondant à un flux énergétique de 1 watt. Elle est maximale si la source est monochromatique, toute l'énergie étant concentrée dans la longueur d'onde 0,553 μ. Elle est alors égale à 679 lumens/watt.

Le Soleil a une luminance d'environ $1{,}5 \cdot 10^9$ cd/m^2, une lampe à incandescence 10^7 cd/m^2 et une lampe fluorescente 10^4 cd/m^2. Les efficacités lumineuses respectives sont de 100, 12 et 40 lumens/watt. Pour éviter l'éblouissement, l'œil ne doit pas regarder de source dont la luminance excède 10^5 cd/m^2. Par contre, la nuit, il est capable de percevoir des objets jusqu'à 10^{-4} cd/m^2. On constate donc l'étendue considérable de la gamme utilisable.

Le tableau suivant indique les valeurs de quelques éclairements courants :

Éclairage solaire direct	100 000 lux
Salle d'opérations chirurgicales	10 000 lux
Travail de précision	1 000 lux
Travail normal d'atelier	200 lux
Éclairage de circulation	50 lux
Couloir de métropolitain	10 lux

Pour calculer la luminance de l'image formée par un instrument d'optique, on se sert du fait que l'étendue d'un faisceau est une quantité purement géométrique. Si l'on appelle U_1 et U_2 les étendues des faisceaux à l'entrée et à la sortie, et n_1 et n_2 les indices des milieux 1 et 2, on a la relation de Clausius :

$$n_1^2 U_1 = n_2^2 U_2$$

D'autre part, la conservation de l'énergie entraîne que le flux sortant est égal au flux entrant, multiplié par un coefficient de transmission T, dépendant de l'appareil. On a donc la relation entre les luminances :

$$L_2 = TL_1 \left(\frac{n_1^2}{n_2^2}\right)^2$$

Dispersion

On sait que, dans les milieux matériels, la lumière se propage à une vitesse variable suivant la fréquence : c'est le phénomène de la dispersion. Dans la théorie électromagnétique de Maxwell, un milieu est caractérisé par trois nombres : la perméabilité diélectrique ε, la perméabilité magnétique μ et la conductibilité γ. Sauf pour quelques exceptions (métaux ferromagnétiques), le coefficient μ est très voisin de 1. D'autre part, les corps isolants présentant de la dispersion, comme les corps faiblement conducteurs, ce n'est donc pas un phénomène lié intrinsèquement à la conductibilité, encore que celle-ci puisse intervenir comme effet secondaire. La dispersion est due au fait que la perméabilité diélectrique varie avec la fréquence selon un mécanisme microscopique que Maxwell lui-même a indiqué.

Les charges électriques présentes dans la matière (électrons, noyaux, ions) peuvent se déplacer sous l'action du champ électrique extérieur produit par l'onde électromagnétique. Mais dans un milieu isolant, ce déplacement est limité à une distance microscopique, car les charges sont liées : il y a une force de rappel qui tend à les faire

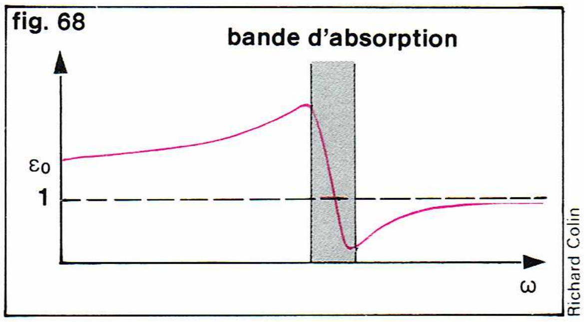

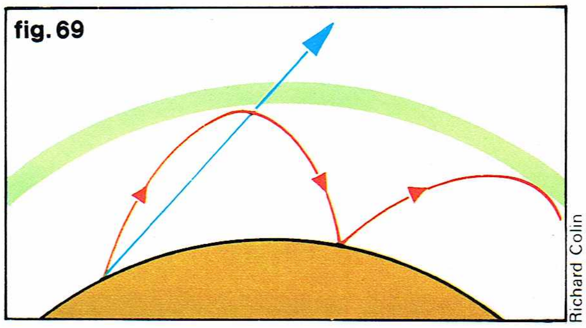

◀ *A gauche, figure 68 : variation du coefficient diélectrique ε en fonction de la pulsation ω, pour un corps possédant une seule bande d'absorption.*

A droite, figure 69 : action d'une couche ionisée sur la propagation des ondes radio-électriques à la surface de la Terre ; ondes longues (rouge) et ondes courtes (bleu).

revenir dans leur position d'équilibre. On peut considérer en première approximation que cette force est proportionnelle au déplacement, et la loi du mouvement est donc celle d'oscillateur harmonique. Appelons ω_0 la pulsation propre de l'oscillateur. Il existe également une force de freinage assez faible, due au fait qu'un corpuscule électrisé rayonne à son tour de l'énergie sous forme électromagnétique. On se trouve ramené à un problème classique de mécanique : un point matériel lié élastiquement, dont le mouvement est faiblement amorti, soumis à une force sinusoïdale de pulsation ω. La solution est parfaitement calculable, et il faut distinguer deux cas :

— si ω est très différent de ω_0, le déplacement est sensiblement en phase avec l'excitation extérieure, et le coefficient de proportionnalité est de la forme :

$$\frac{A}{(\omega^2 - \omega_0^2)}$$

— si ω est proche de ω_0, il y a résonance, l'amplitude du déplacement croît très rapidement, le déphasage passe par $\pm \pi/2$.

L'induction électrique est proportionnelle au déplacement, ce qui permet de calculer le coefficient diélectrique, dont la variation est représentée *figure* 68. Lorsque la fréquence est très basse, on a une valeur ε_0 qui est la valeur statique. Dans les régions de transparence, ε croît assez régulièrement. Lorsque ω tend vers l'infini, l'inertie des charges empêche celles-ci de suivre la variation rapide du champ électrique, et $\varepsilon = 1$, comme pour le vide. Enfin, près de la résonance, se produit le phénomène de « dispersion anormale » ; il y a une brusque variation de ε. Celle-ci est accompagnée d'une très forte absorption de l'énergie incidente, comme le prévoit le modèle mécanique de l'oscillateur harmonique. En dehors de cette raie d'absorption, le milieu est transparent, et l'indice de réfraction est donné par une formule du type :

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2}$$

Un corps transparent dans le visible possède généralement une ou plusieurs raies d'absorption dans l'ultraviolet. On remarque sur la *figure* 68 que $\varepsilon < 1$ pour une partie de la courbe correspondant aux très hautes fréquences. Cela laisse prévoir un indice de réfraction inférieur à l'unité pour le domaine des rayons X, ce qui est effectivement observé. La vitesse de phase se propage alors plus rapidement que la vitesse de la lumière dans le vide. Cela n'est pas en contradiction avec la relativité, car un signal est transmis avec la vitesse de groupe :

$$u = \frac{c}{\frac{d\,(n\omega)}{d\omega}}$$

et lorsque n est croissant en fonction de ω, on vérifie bien que $u < c$. Quant à la région de résonance, où n est décroissant, on peut montrer que la vitesse du signal, très déformé par l'absorption, reste inférieure à c.

Absorption par un milieu conducteur

Indépendamment du phénomène général d'absorption lié à la dispersion que nous venons d'étudier, il existe une absorption due à la conductibilité électrique. Pour un corps qui serait parfaitement conducteur, c'est-à-dire qui n'offrirait aucune résistance au mouvement des électrons, il n'est pas possible de donner lieu à un champ électrique, donc à une onde. En fait, il s'agit d'un cas idéal, et, lorsqu'une vibration électromagnétique de fréquence f frappe un conducteur, elle pénètre à l'intérieur, en décroissant de façon exponentielle suivant la profondeur. Cette loi est d'ailleurs la seule qui soit tout à fait générale dans les phénomènes d'absorption. En effet, dès que l'on cherche à déterminer le coefficient d'atténuation, il faut distinguer différents cas suivant la fréquence et la nature du matériau.

Pour un corps très conducteur, comme le cuivre, la profondeur de pénétration est donnée par la formule :

$$p = \frac{1}{2\pi\sqrt{\gamma\mu f}}$$

On voit qu'elle décroît quand la fréquence augmente. Pour 100 périodes par seconde, elle est de 0,64 cm ; pour 1 MHz, elle n'atteint plus que 64 microns. On peut donc considérer que les métaux sont toujours opaques.

Dans un matériau assez faiblement conducteur, la profondeur est à peu près constante à basse fréquence :

$$p = \frac{1}{2\pi\gamma c\sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}}}$$

Pour le sol sec, elle est de l'ordre du mètre, lorsque f = 100 MHz. C'est ainsi que l'eau de mer est fortement absorbante pour les ondes hertziennes et infrarouges, mais devient transparente pour les ondes visibles. Les courtes longueurs d'onde sont moins atténuées, ce qui donne une couleur bleue par transparence.

Un cas particulier, intéressant, est celui des gaz ionisés. Les particules électrisées sont libres comme dans tout conducteur, et la résistance est due aux chocs sur les molécules ou les ions du gaz. La quantité intéressante, caractéristique du milieu, est le nombre moyen de chocs a subis par un ion, dans l'unité de temps. La conductibilité est maximale pour $a = \omega$, elle s'annule pour $a = 0$ et pour $a = \infty$. Dans le premier cas, il n'y a pas de chocs, et donc pas d'énergie dissipée en chaleur, dans le second, les chocs sont trop fréquents pour que les ions acquièrent une vitesse notable, et la dissipation d'énergie cinétique est négligeable.

L'application la plus importante concerne la propagation des ondes hertziennes. Dans la haute atmosphère, il existe des couches d'air à différentes altitudes, qui sont ionisées par l'action du rayonnement solaire. La fréquence des ondes étant très supérieure à celle des chocs, il y a peu d'absorption. Il y a cependant une exception dans le cas des ondes kilométriques, pour lesquelles une couche située à la base de l'ionosphère, vers 70 km d'altitude, est fortement conductrice et se comporte comme un miroir métallique. Le calcul précis montre que l'indice de réfraction croît avec l'altitude, ce qui provoque un phénomène de mirage exactement analogue à celui des ondes lumineuses. Les ondes longues sont réfléchies vers le sol, qui peut à son tour les renvoyer vers la haute atmosphère (*fig.* 69). Les communications sont donc possibles entre deux points quelconques du globe. Pour les ondes de plus courte longueur (ondes courtes de radio, télévision), ce phénomène n'existe pas, et l'énergie se propage en ligne droite en direction de l'espace. Les couches ionisées étant formées par l'action du rayonnement solaire sur l'air, elles sont profondément modifiées durant la nuit : on sait que de nuit les réceptions radio sont favorisées.

Il est possible d'étudier les propriétés de la haute atmosphère par la méthode des sondages verticaux. Un signal radio envoyé verticalement permet, par son écho, d'étudier la hauteur et les propriétés des différentes couches de l'atmosphère. Cette méthode complète les observations faites par fusées et satellites.

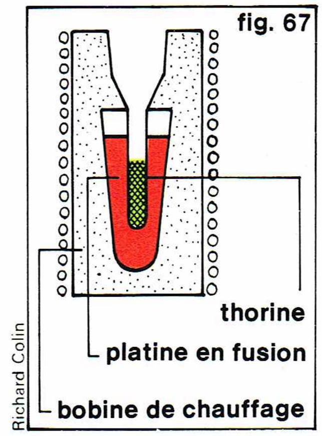

▲ *Figure 67 : étalon photométrique d'intensité lumineuse. Au centre, la thorine, autour le platine en fusion à 1 773 °C (en rouge), à l'extérieur, la bobine de chauffage.*

◀ *Page ci-contre en bas, figure 66 : courbe représentative du facteur de sensibilité V_λ en fonction de la longueur d'onde λ. Pour établir cette courbe, on a pris pour longueur d'onde de référence celle qui correspond au maximum de sensibilité, soit 0,550 µ. V_λ est donc égal à 1 pour cette valeur de λ.*

Paskall - Cedri

▲ *Un paysage de la côte polynésienne en infrarouge.*

Diffusion

Lorsqu'un milieu transparent contient des particules de petite dimension en suspension, il est possible d'observer celles-ci au microscope. Lorsque la taille est de l'ordre du millième de micron, on ne peut pas distinguer leur forme, mais, si les objets sont suffisamment espacés, la lumière qu'ils diffractent permet de les voir individuellement : c'est le principe de l'ultramicroscope. Si la concentration est importante, le procédé est inapplicable, par contre le flux lumineux total diffracté devient assez intense pour être perçu à l'œil nu. On dit que le milieu est trouble et diffuse la lumière ; ainsi, un rayon lumineux traversant une fumée de tabac est visible latéralement. Dans le cas où les particules sont petites par rapport à la longueur d'onde de la lumière, on montre que l'intensité diffusée est inversement proportionnelle à la quatrième puissance de la longueur d'onde (Rayleigh, 1871). La couleur ne dépend donc absolument pas de la nature du corps en suspension. Si la lumière est blanche, la lumière diffusée est bleue et la lumière transmise est, par différence, rouge-orangé ; c'est ce qu'on constate très facilement sur la fumée du tabac.

Tout le monde sait que la lumière qui nous éclaire ne vient pas totalement du Soleil. Le ciel est lumineux par lui-même, par temps très pur, et sa couleur est bleue. Cela est dû à la diffusion des rayons solaires dans toutes les directions, et l'air étant d'autant plus lumineux qu'il est plus pur, on doit admettre que la diffusion est due aux molécules de l'air elles-mêmes et non aux poussières en suspension. Les vibrations des électrons qui provoquent cette diffusion sont donc exactement les mêmes que celles dont nous avons parlé dans l'étude de la dispersion. A l'inverse, on constate qu'en très haute altitude le ciel devient de plus en plus sombre, jusqu'à être complètement obscur dans l'espace interplanétaire.

La lumière diffusée présente toujours une polarisation ; celle-ci est totale lorsque la direction d'observation est perpendiculaire à la direction de la lumière incidente. Cette propriété peut être utilisée pratiquement pour connaître la direction du Soleil, même lorsque le temps est couvert : les Vikings utilisaient pour orienter leur navigation des cristaux biréfringents ; certains insectes ont des yeux naturellement polarisants et retrouvent ainsi leur chemin.

Récepteurs lumineux

Nous allons énoncer rapidement quelques propriétés et conditions d'utilisation des récepteurs de lumière, utilisés en photométrie et en spectroscopie. On demande à ces dispositifs une bonne sensibilité, et pour l'étude des spectres, une bonne sélectivité en fréquence.

Le **récepteur thermométrique** est un appareil qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme en chaleur. Il est par définition sensible à toutes les radiations et constitue l'instrument de base pour la photométrie énergétique. C'est aussi le seul qui soit utilisable pour les radiations infrarouges de longueur d'onde supérieure à 3 μ. C'est d'ailleurs en plaçant un thermomètre au-delà de l'extrémité rouge du spectre visible que Herschel découvrit l'existence de l'infrarouge en 1800. Le rayonnement à déceler tombe sur une surface noircie et prend une température d'équilibre fonction de la puissance absorbée.

Un **bolomètre** est constitué d'un ruban de platine très mince dont on mesure la variation de résistance avec la température. On peut déceler ainsi un écart plus faible que le millionième de degré. On emploie de préférence maintenant un couple thermo-électrique constitué de fils très fins d'argent et de bismuth. La lumière est envoyée sur des soudures entre les métaux, ce qui provoque l'échauffement et l'apparition d'un courant mesurable. On arrive ainsi à détecter un flux de 10^{-9} watt, ce qui est une performance médiocre. L'œil, lui, est sensible à 10^{-15} watt et constitue donc un détecteur remarquable. Il est, bien entendu, limité aux radiations du spectre visible (0,4 à 0,7 μ). Enfin, il ne permet pas de mesurer de façon absolue : il est nécessaire d'opérer par comparaison avec une source de référence.

La **plaque photographique** est l'instrument de choix pour la spectroscopie. La couche sensible est constituée par des cristaux microscopiques de bromure d'argent répartis en émulsion dans de la gélatine. Ce support peut être une plaque de verre, de plastique ou d'autre matériau. Sous l'action de la lumière, l'argent est réduit et se dépose en donnant un dépôt noir. La technique photographique est un chapitre important de l'optique appliquée. Les plaques ordinaires sont sensibles entre 0,5 et 0,2 μ, avec un maximum vers 0,43 μ. Elles retrouvent ensuite

toute leur sensibilité dans le domaine des rayons X et γ au-dessus de 10 Å. Dans l'ultraviolet, c'est l'absorption par la gélatine qui empêche l'impression des grains de bromure d'argent. On y remédie en employant des plaques de Schumann, pauvres en gélatine et riches en bromure d'argent. La sensibilité est alors annulée pour des longueurs d'onde supérieures à 0,3 μ. Un autre procédé consiste à recouvrir la plaque d'une couche très mince d'huile : celle-ci est rendue fluorescente par les ultraviolets et impressionne la plaque par de la lumière de plus grande longueur d'onde. Du côté de l'infrarouge, la diminution de sensibilité est due au fait qu'il n'y a pas assez d'absorption par les grains de bromure d'argent. On peut alors incorporer à l'émulsion un colorant tel que l'érythrosine, qui a pour but d'absorber les radiations. Ces plaques sont commercialisées sous le nom d'isochromatiques ou orthochromatiques ; celles qui sont sensibilisées au pinacyanol sont appelées panchromatiques. On peut ainsi détecter le proche infrarouge, jusqu'à 1 μ.

L'utilisation du **phénomène de photoluminescence** est également très utile : certains corps ont la propriété d'émettre, après avoir reçu un rayonnement, des radiations de longueur d'onde plus grande. Un écran tel qu'un verre d'urane sert à la détection visuelle des radiations ultraviolettes. Mais c'est surtout dans le domaine des rayons X que l'on emploie pour l'observation visuelle des écrans fluorescents au platino-cyanure de baryum et au tungstate de cadmium.

Pour les mesures d'intensité, il est possible d'utiliser la **conversion directe d'énergie rayonnante en énergie électrique.** Lorsqu'un photon frappe un atome, il peut communiquer à un électron toute son énergie $E = h\nu$. Dans les détecteurs thermométriques, cet électron retombe sur son niveau fondamental, et l'énergie finale est calorifique. Pour l'œil et les émulsions photographiques, l'énergie est utilisée pour une réaction chimique. Mais il est possible que l'électron soit projeté dans le vide et récupéré par une électrode positive. On recueille alors un courant proportionnel à l'intensité lumineuse, c'est l'effet photo-électrique. Dans un cristal semi-conducteur, l'électron ainsi libéré peut servir simplement à augmenter le nombre de porteurs de charges, c'est-à-dire la conductibilité. On fabrique ainsi des cellules photorésistantes au sélénium ou au sulfure de cadmium. Enfin, pour les radiations de très haute fréquence, c'est-à-dire formées de photons très énergétiques (rayons γ, rayons X, ultraviolet lointain), l'ionisation d'un gaz traversé par le faisceau est suffisamment importante pour être mesurable. Tous ces phénomènes, relativement peu utilisés en optique, seront étudiés en détail en *Électricité*.

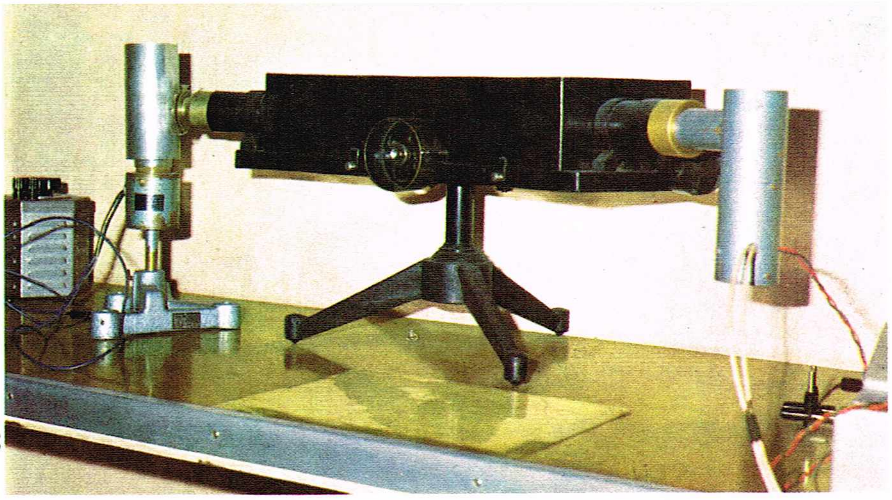

T. Poggio

▲ *Un spectroscope à prisme.*

Spectroscopes et spectrographes

Tout appareil destiné à analyser un rayonnement complexe en ses composantes monochromatiques comprend deux parties :

— un système dispersif ;

— un détecteur qui peut être soit photographique, dans le cas des spectrographes, soit visuel ou thermométrique, dans le cas des spectroscopes.

On représente généralement un spectre comme une courbe d'intensité en fonction de la longueur d'onde λ. Le pouvoir de résolution est par définition le rapport $\lambda/\Delta\lambda$, où $\Delta\lambda$ est le plus petit écart sensible en longueur d'onde.

Les appareils à prisme utilisent la variation d'indice de réfraction d'un corps transparent. Le faisceau incident provenant d'une fente ayant la direction de l'arête du prisme est rendu parallèle par un collimateur et aboutit soit à une lunette, soit à une chambre photographique (*fig.* 70). La dispersion du verre est bien représentée par la formule :

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2}$$

Il en résulte que $\frac{dD}{d\lambda}$ (où D est la déviation) est proportionnel à λ^{-3} et que le violet est beaucoup plus étalé que le rouge. Le pouvoir de résolution est limité naturellement par la largeur de la fente : si celle-ci est grande, les images de différentes couleurs se recouvrent ; si elle est petite, la diffraction intervient. Avec un spectrographe à un seul prisme, on obtient un pouvoir de résolution de l'ordre de 5 000.

Pour l'ultraviolet, il convient d'utiliser comme milieu transparent le quartz, car le verre est opaque pour ce rayon-

fig. 70

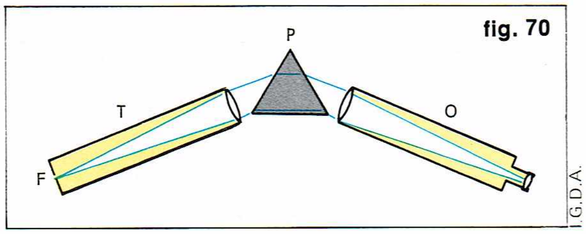

I.G.D.A.

◄ *Figure 70 : schéma d'un spectroscope à prisme* (P) *dans lequel on observe à l'œil, à travers la lunette* O, *l'image de la fente* F (T, *collimateur).*

fig. 71

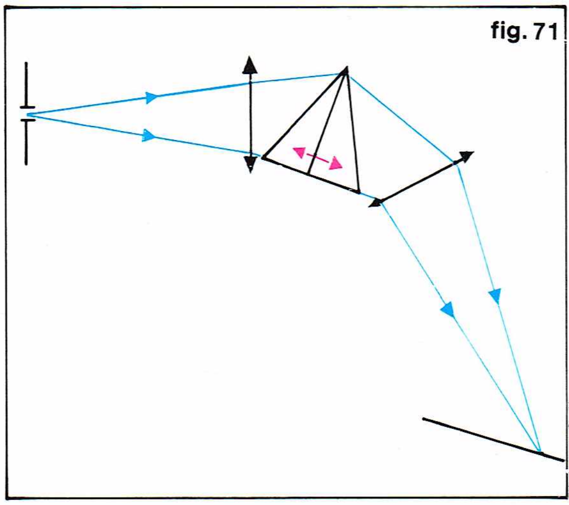

fig. 72

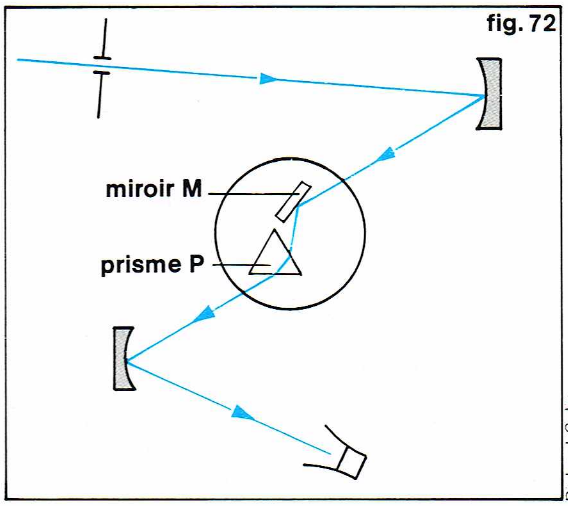

Richard Colin

◄ *A gauche, figure 71 : spectroscope pour ultraviolet. Il y a deux demi-prismes de quartz pour annuler la biréfringence circulaire. A droite, figure 72 : spectroscope pour infrarouge. Le détecteur est thermométrique.*

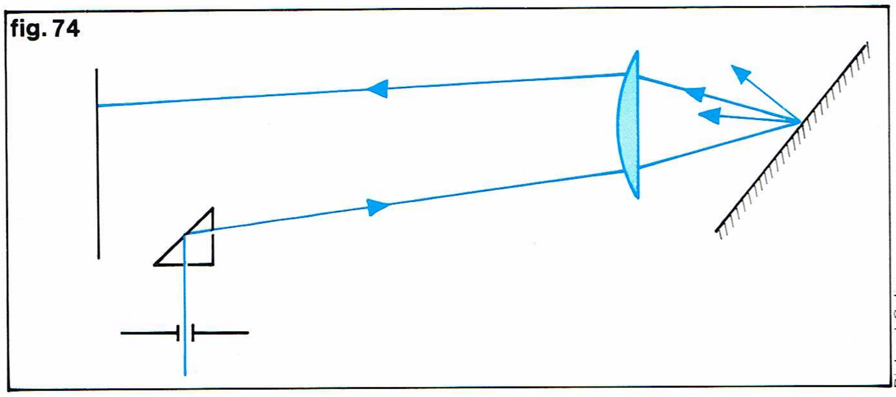

Richard Colin

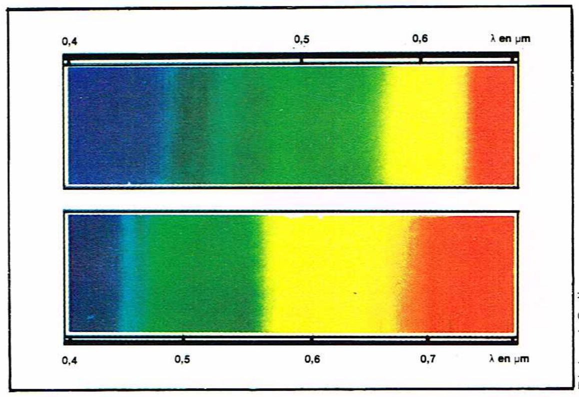

Richard Colin

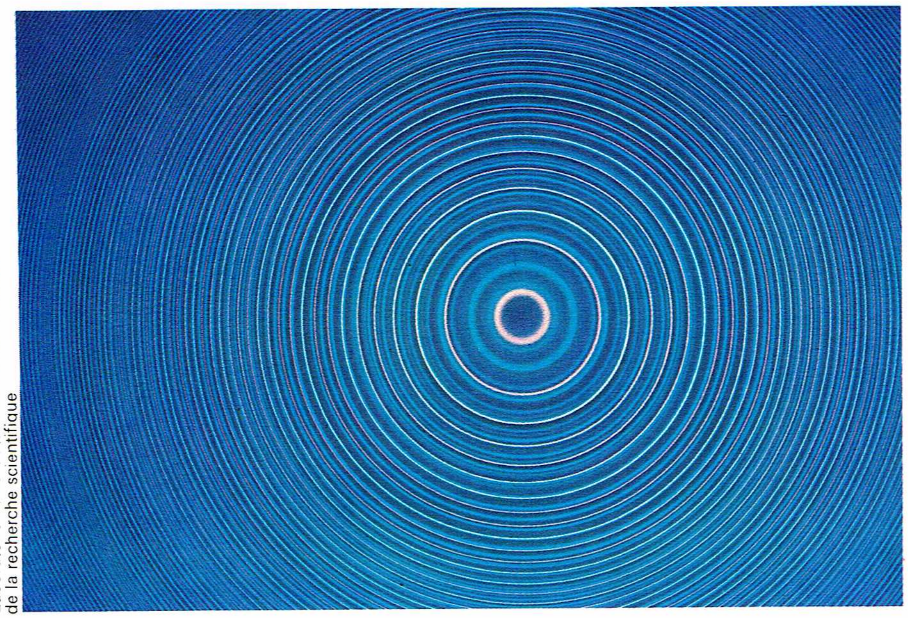

Laboratoire Aimé Cotton du Centre national de la recherche scientifique

▲ *En haut, à gauche, figure 74 : spectrographe à réseau ; à droite, figure 73 : comparaison des spectres de la lumière visible donnés par un prisme (en haut) et un réseau (en bas). Ci-dessus, anneaux d'interférence fournis par l'interféromètre de Pérot-Fabry.*

▼ *Figure 75 : spectroscopie par transformation de Fourier, à l'aide d'un interféromètre de Michelson.*

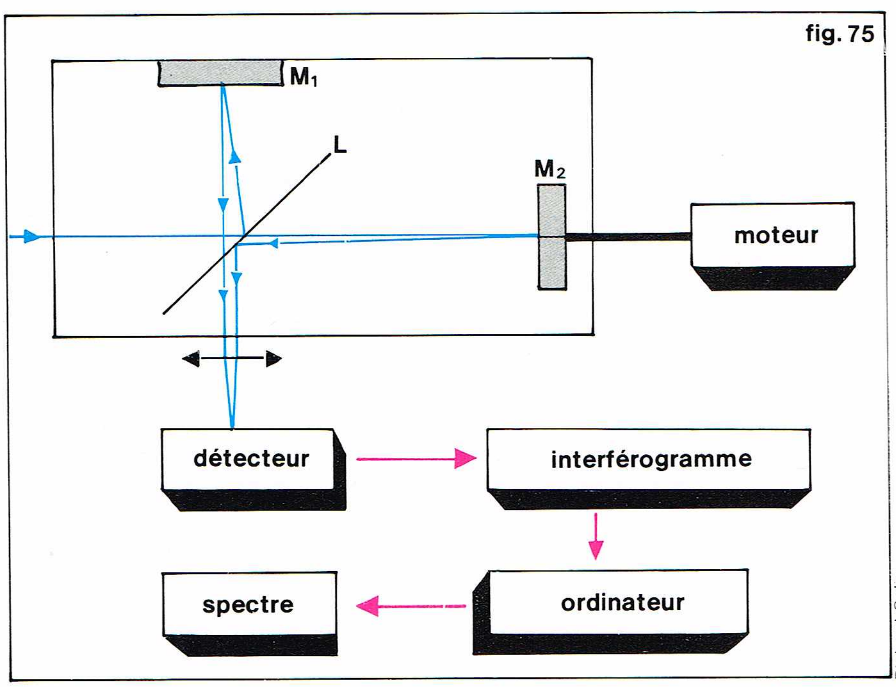

Richard Colin

nement. Mais le quartz est biréfringent, aussi, pour éviter que le prisme et les lentilles ne dédoublent les images, faut-il tailler les surfaces de façon que l'axe optique soit parallèle aux rayons. On évite la double réfraction circulaire en constituant deux demi-prismes, l'un droit et l'autre gauche (*fig.* 71).

Un problème analogue se pose dans l'infrarouge : au-dessus de 2 µ le verre devient absorbant ; au-dessus de 3 µ, c'est le tour du quartz. De 2,5 à 8 µ, on peut employer des prismes de sel gemme (NaCl), et jusqu'à 23 µ, de sylvine (KCl). Les lentilles sont remplacées par des miroirs concaves métalliques. La *figure* 72 représente le schéma d'un tel appareil, fonctionnant sur le principe de la déviation constante : le prisme P est solidaire d'un miroir M, et c'est l'ensemble qui est mobile, ce qui permet d'être toujours au minimum de déviation.

Les appareils à réseaux sont plus coûteux, mais ils permettent d'avoir un pouvoir de résolution de 100 000. De plus, le spectre est normal ; la déviation est proportionnelle à la longueur d'onde (*fig.* 73). Pour obtenir l'étalement maximal, on a intérêt à placer le plus loin possible la plaque photographique (*fig.* 74). Pour l'ultraviolet de longueur d'onde inférieure à 0,13 µ, on ne connaît aucun matériau utilisable qui ne soit pas absorbant. Il est même nécessaire de faire le vide, car l'air n'est plus transparent. La seule solution consiste à employer un réseau métallique, fonctionnant par réflexion. Il est en forme de miroir concave, avec une longueur focale de plusieurs mètres, pour pouvoir donner de la fente une image réelle sur la plaque.

Spectroscopie interférentielle

Les appareils interférentiels tels que l'*interféromètre de Pérot-Fabry* sont des appareils très dispersifs. En fait, leur pouvoir de résolution peut être accru indéfiniment, en augmentant la valeur de la différence de marche. Il n'est limité que par la largeur des raies à étudier. L'inconvénient réside dans la superposition des différents ordres d'interférence lorsque l'on analyse un domaine spectral large. Ces appareils sont utilisés essentiellement pour étudier de façon précise des raies ou groupes de raies isolées. Leur luminosité est supérieure à celle des spectroscopes conventionnels, grâce à la grande étendue des faisceaux entrant.

A la différence du précédent, l'*interféromètre de Michelson* est un appareil à deux ondes. Il est à la base d'une méthode qui a connu un énorme développement ces dernières années : la spectroscopie par transformation de Fourier. L'onde plane incidente est divisée en deux par une lame semi-transparente L, et chaque moitié est renvoyée par les miroirs M_1 et M_2 (*fig.* 75). Elles interfèrent à la sortie de l'appareil. On appelle δ la différence de marche, égale à deux fois la différence des distances LM_1 et LM_2. Soit B (k) la distribution spectrale de la source, en fonction du nombre d'onde k. Le courant recueilli par une cellule photo-électrique est égal à :

$$I(\delta) = \int_0^\infty B(k) \cos 2\pi k\delta \cdot dk$$

Un moteur est chargé de déplacer M_2 régulièrement au cours du temps de façon à obtenir un enregistrement de la fonction I (δ), appelé interférogramme. On reconnaît dans la formule précédente la transformation de Fourier de B (k) en I (δ). La formule de réciprocité permet alors de calculer B (k) :

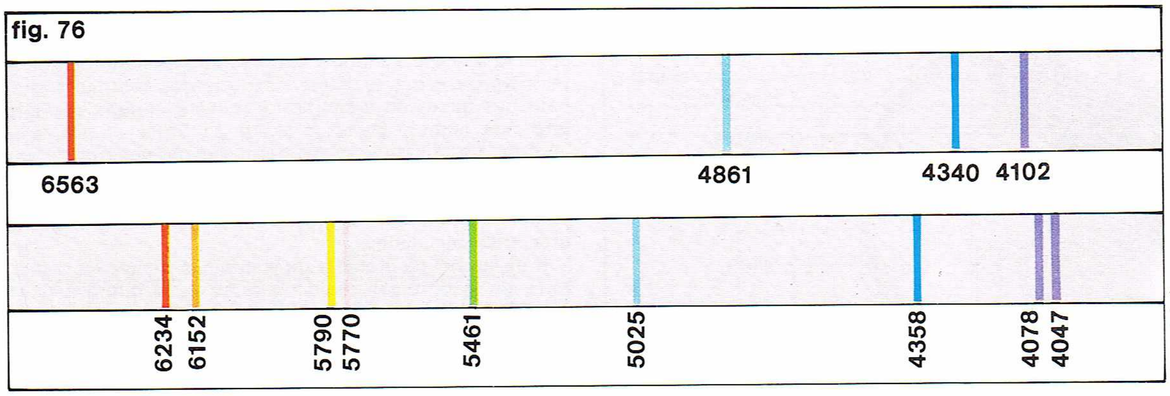

◀ *Figure 76 : spectres de raies de l'hydrogène (H_1^1) et du mercure (Hg_{80}^{200}) [les longueurs d'onde sont en angströms].*

Richard Colin

▼ *Spectres de diverses sources lumineuses : électriques, gazeuses, métalliques, stellaire et solaire.*

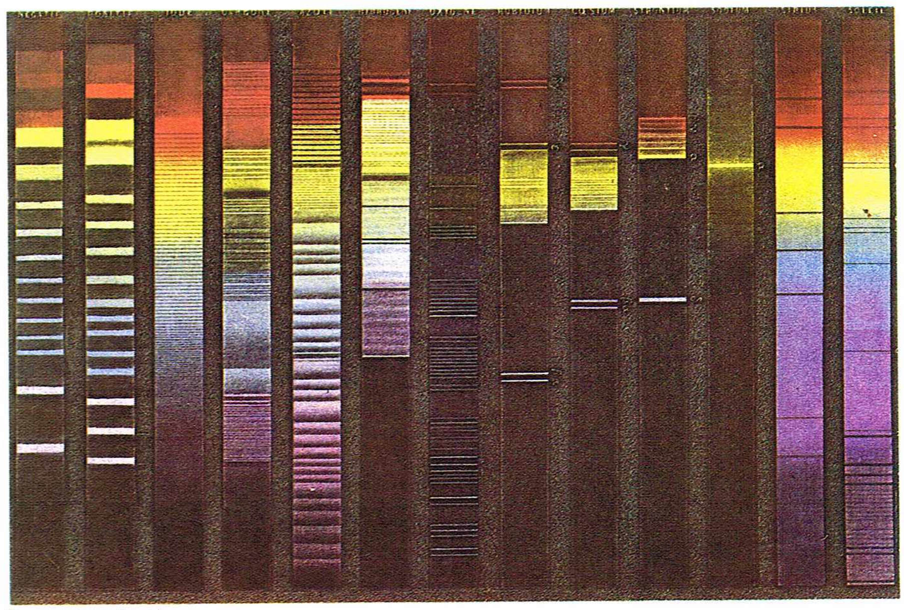

Snark International

$$B(k) = \int_0^\infty I(\delta) \cos 2\pi k\delta \cdot d\delta$$

L'opération est effectuée par un ordinateur qui fournit le spectre à partir de l'interférogramme. En pratique, δ n'atteint pas l'infini mais une valeur maximale δ_m, ce qui limite le pouvoir de résolution à la valeur δ_m/λ.

L'intérêt du procédé est d'utiliser toute l'énergie reçue pendant un temps de mesure qui peut être aussi long qu'on le désire. L'information ressort donc beaucoup mieux au-dessus du bruit de fond, surtout dans l'infrarouge où ce dernier est gênant. Cette méthode obtient des résultats tout à fait spectaculaires pour des sources très faibles. En astronomie, par exemple, on a pu ainsi avoir des renseignements sur la composition chimique de l'atmosphère des planètes en étudiant leur spectre.

Différents types de spectres

La première distinction entre les différents types de spectres est la distinction continu-discontinu. Les gaz excités émettent des spectres discontinus formés de raies possédant une largeur faible par rapport à leurs distances les unes des autres (*fig.* 76). Il n'y a pas de régularité apparente dans la longueur d'onde et l'intensité de chaque raie. Par contre, le phénomène est parfaitement reproductible et caractéristique d'un atome ou d'une molécule. D'ailleurs, la spectroscopie est une technique déjà ancienne en tant que méthode d'analyse chimique. Il a fallu attendre les années 1925 et l'avènement de la mécanique quantique pour commencer à comprendre et à prévoir la répartition des raies. La *figure* 77 donne l'exemple le plus simple, celui de l'atome d'hydrogène.

Une première méthode, qui s'applique aux métaux alcalins, est de placer dans une flamme non éclairante (bec Bunsen) une poudre à étudier. C'est ainsi que le sodium, ou le sel marin (NaCl), produit une lueur jaune intense caractéristique. Avec un spectroscope un peu dispersif, la « raie » D se dédouble en deux composantes (5 890 Å et 5 896 Å de longueur d'onde). La décharge électrique dans un gaz à basse pression est utilisable pour à peu près tous les corps gazeux à température ordinaire. Le tube de Geissler contient de l'hydrogène et donne dans le visible quatre raies ($H\alpha$ = 6 563 Å, $H\beta$ = 4 861 Å, $H\gamma$ = 4 340 Å, $H\delta$ = 4 102 Å). La lampe à vapeur de mercure est une source puissante couramment utilisée aussi bien dans le visible que dans l'ultraviolet.

Pour les corps métalliques, on emploie une étincelle, qui rend lumineux à la fois les gaz de l'air et la vapeur du métal des électrodes. On peut également former l'étincelle à partir de deux gouttes de solution de sel métallique, placées à l'extrémité de tubes de quartz fondu. Les atomes sont souvent fortement ionisés, ce qui permet d'obtenir des raies peu visibles par un autre procédé.

Lorsque deux électrodes placées dans l'air sont assez rapprochées, il se produit un arc électrique : émission très intense de lumière, courant de plusieurs ampères et ionisation du gaz intermédiaire. On utilise soit directement des électrodes métalliques, soit des électrodes au charbon contenant la substance à étudier. Dans ce procédé, les atomes ne sont pas ionisés ; on appelle pour cette raison spectre d'arc un spectre contenant les raies de l'atome neutre.

Les molécules forment en général un spectre de bande lorsqu'elles ne sont pas dissociées : le spectre est discontinu, mais les plages colorées sont très larges. En fait, l'utilisation d'un spectrographe dispersif montre toujours que les bandes sont en réalité formées de raies très serrées. Elles correspondent à l'existence de niveaux électroniques très rapprochés. On les relie en physique atomique à la possibilité de vibration et de rotation des noyaux dans la molécule.

Les liquides et les solides incandescents émettent des spectres continus. Chaque atome ne peut plus être considéré comme une source indépendante, et c'est l'ensemble du corps tout entier qui doit être considéré comme un émetteur. Il y a un équilibre entre le rayonnement et la matière, décrit en thermodynamique par la théorie du corps noir. Pour un corps noir parfait, la distribution spectrale ne dépend que de la température. Elle est donnée par la formule de Planck :

$$\frac{dn}{d\lambda} = \frac{2\pi h\lambda^{-5}}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

Il existe une autre méthode spectroscopique : celle des spectres d'absorption. Si l'on envoie dans une ampoule contenant de la vapeur de sodium le rayonnement provenant d'une lampe à arc, on constate dans un spectroscope que les raies D sont absorbées : on observe des raies noires sur le fond continu brillant de l'arc. On remarque d'autre part une émission par l'ampoule de la lumière jaune caractéristique, dans toutes les directions. D'une façon générale, un corps n'est capable d'émettre que les radiations qu'il est capable d'absorber dans les mêmes conditions (règle de Kirchhoff). Cette loi n'est mise en défaut que dans le cas des rayons X, à cause de leur mécanisme particulier d'émission. Elle se justifie facilement dans le cadre du modèle mécanique d'oscillateur harmonique : si l'absorption correspond à un phénomène de résonance, c'est la même fréquence ω_0 qui détermine absorption et émission. Dans la théorie quantique exacte,

▼ *Figure 77 : les niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène ont la forme :* $= -\frac{1}{h\,n^2}$ *(R : constante de Rydberg ; n : entier quelconque). On en déduit la fréquence du photon émis lors du passage d'un électron de la couche m à la couche n :*

$$E = R\left[\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right]$$

Cette formule avait été trouvée expérimentalement par Balmer et vérifiée avec une grande précision.

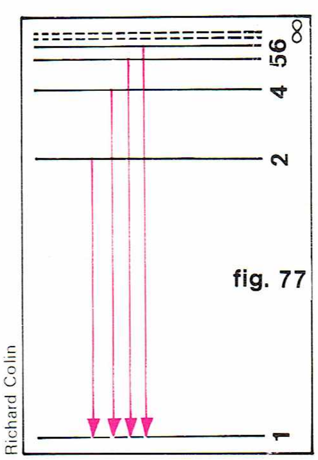

fig. 77

Richard Colin

▶ *Figure 78 : la fluorescence est due à l'excitation par la lumière des électrons d'une molécule, et à leur retombée hors du niveau fondamental.*

fig. 78

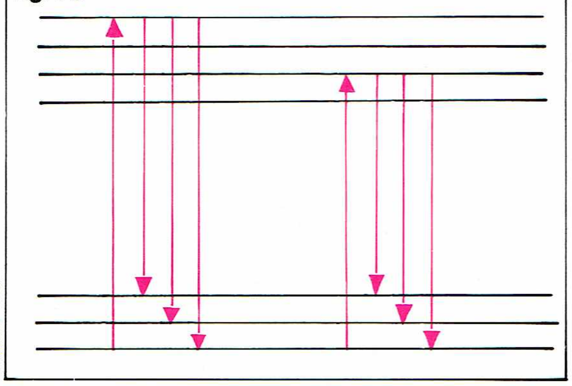

Richard Colin

on sait qu'à chaque intervalle entre deux niveaux d'énergie d'électron correspond une fréquence de photon, par la relation :

$$h\nu = E_2 - E_1$$

Il y a à chaque fois trois mécanismes possibles : émission spontanée, absorption, émission stimulée. La méthode des spectres d'absorption est utilisée pour les vapeurs froides lorsqu'elles sont illuminées par le spectre continu d'un corps incandescent. On observe des raies noires à l'endroit où devraient se trouver les raies brillantes du gaz en émission. C'est ainsi qu'on peut déterminer la composition chimique de l'atmosphère du Soleil ou des étoiles.

Fluorescence et phosphorescence

Certaines substances ont la propriété, lorsqu'elles sont soumises à un rayonnement lumineux, d'émettre dans toutes les directions des radiations dont la longueur d'onde est différente de celle de la radiation excitatrice. Parmi les corps ayant cette propriété, appelée photoluminescence, on distingue fluorescence et phosphorescence. Il existe également une chimiluminescence, provoquée par une réaction chimique, oxydation du phosphore par exemple, et une triboluminescence, provoquée par les chocs.

Le type de la fluorescence est représenté par une solution alcaline de fluorescéine, qui, éclairée par de la lumière bleue, émet de la lumière verte. Cette émission se produit uniquement pendant la durée de l'excitation et est indépendante de la température. La longueur d'onde est toujours plus grande que celle de la radiation initiale (loi de Stockes). Les photons émis sont donc de plus faible énergie. La *figure* 78, qui représente les niveaux électroniques de la molécule, fournit l'explication du phénomène : les électrons excités ne retombent pas tous dans le niveau fondamental. On peut considérer que l'absorption avec désexcitation à la même fréquence (résonance) constitue un cas particulier de fluorescence. L'éclairage domestique ou industriel utilise des tubes fluorescents, qui sont des lampes à vapeur de mercure. Les rayons ultraviolets émis sont transformés en lumière blanche par la substance recouvrant la paroi intérieure des tubes.

La phosphorescence possède des propriétés particulières. Elle continue à exister pendant un certain temps après la fin de l'excitation, la durée augmentant lorsque la température diminue. C'est ainsi que des sulfures contenant des traces de métal lourd peuvent émettre pendant plusieurs heures. Quant à la loi de Stockes, elle reste vérifiée. Le fait que les conditions extérieures aient une influence sur les propriétés de la phosphorescence montre qu'il ne s'agit pas d'un phénomène localisé au niveau moléculaire ; les théories actuelles font intervenir les bandes d'énergie cristallines.

Il existe un phénomène présentant à la fois les caractères de la diffusion moléculaire et de la fluorescence : c'est l'effet Raman. Il est utilisé couramment en chimie pour aider à la détermination des structures moléculaires.

Rayons X

En 1895, Roentgen découvrit un nouveau rayonnement, dont la nature lui échappait, et qu'il nomma pour cette raison « rayons X ». On reconnut très tôt qu'il était de nature électromagnétique et non pas constitué de particules électrisées. Les rayons X ont cependant un comportement inhabituel : ils ne donnent pas lieu aux phénomènes de réflexion, réfraction et interférences usuels en optique. La totalité des corps leur sont transparents, même les métaux jusqu'à une épaisseur notable. Il faut 2 à 3 cm de plomb pour les arrêter. Toutes ces propriétés faisaient penser qu'il s'agissait de radiations de longueur d'onde très faible. Cela devait être confirmé par la découverte de la diffraction par les cristaux (von Laue, 1912), qui permet de mesurer les longueurs d'onde.

On obtient des rayons X par le tube de Coolidge (*fig.* 79). C'est une ampoule dans laquelle est réalisé un vide aussi poussé que possible. Un filament chauffé émet des électrons qui sont accélérés par une haute tension électrique de plusieurs centaines de kilovolts. Ils viennent frapper une anticathode de tungstène, portée par un bloc de cuivre. Il est nécessaire d'évacuer la chaleur, car sous les chocs, l'anticathode est portée au rouge. On décèle l'existence des rayons X émis par leur action sur une plaque photographique ou leur fluorescence sur des écrans au platino-cyanure de baryum ou au tungstate de cadmium. On mesure également l'ionisation qu'ils provoquent dans les gaz qu'ils traversent. Chaque photon X est émis par le choc d'un électron sur un atome du métal. Son énergie $h\nu$ ne peut évidemment pas dépasser celle de l'électron incident, laquelle est égale à eV, e étant la charge de l'électron, V le potentiel accélérateur. La longueur d'onde $\lambda = c/\nu$ a donc une limite inférieure :

$$\lambda > \frac{hc}{eV}$$

Pour V = 40 000 volts, on trouve une valeur de 0,3 Å. Avec des tensions faibles, on obtient des rayons X très mous, de 100 Å, arrêtés par quelques centimètres d'air. Avec des tensions fortes, on obtient des rayons X très durs, inférieurs à 0,1 Å, traversant plusieurs centimètres de plomb.

Lorsque l'on examine le spectre émis, on constate qu'il se compose d'une partie continue, à laquelle se superpo-

▼ *A gauche, figure 79 : représentation schématique du tube de Coolidge pour la production des rayons X : F, filament ; A, anticathode ; HT, haute tension. A droite, la totalité des corps étant transparents aux rayons X, ceux-ci sont susceptibles d'applications très diverses dans des domaines très variés : radiologie médicale, radiographie industrielle, spectrochimie, etc. ; ici, un poisson vu aux rayons X.*

fig. 79

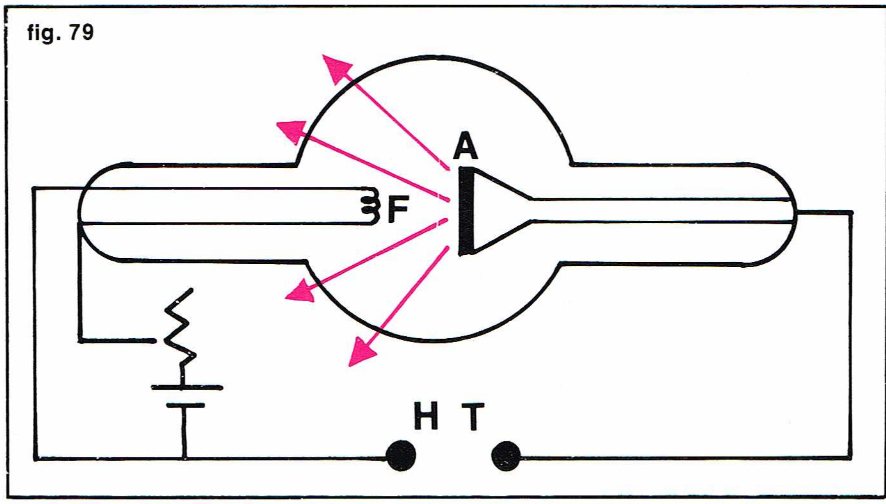

Richard Colin

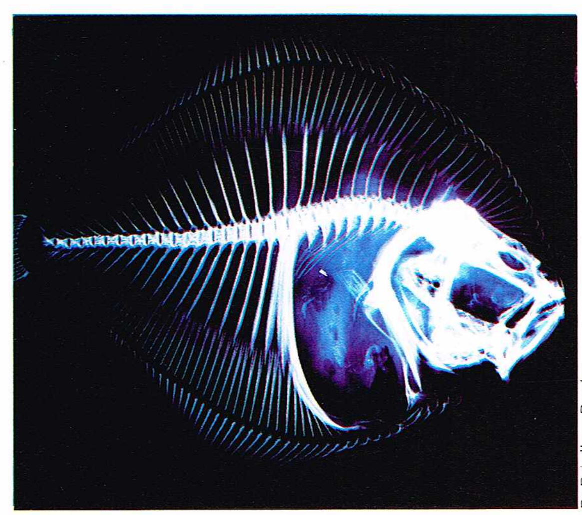

P. Briolle - Rapho

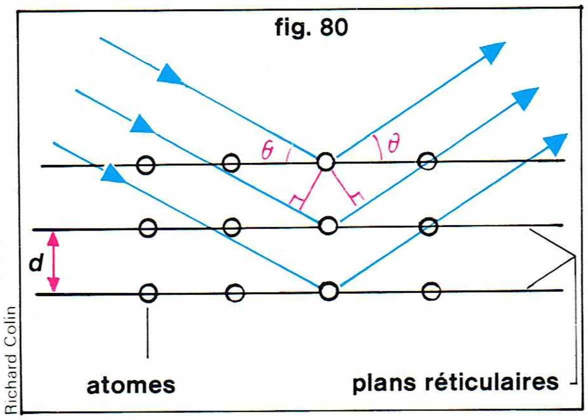

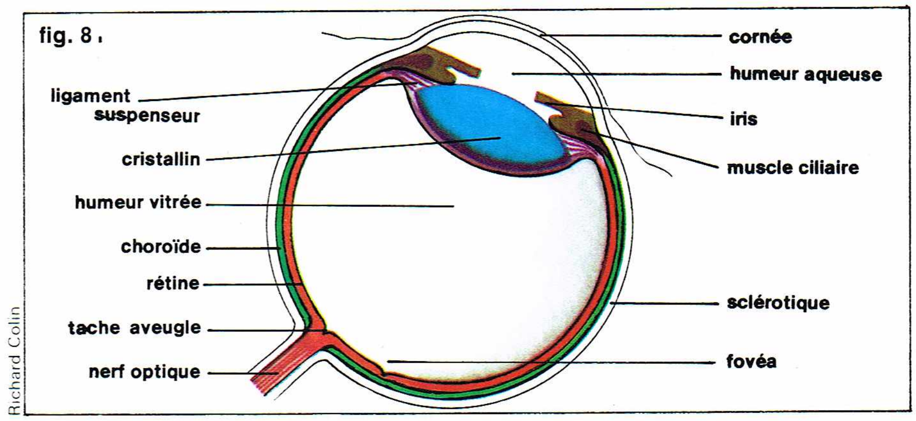

▲ *A gauche, figure 80 : diffraction d'un faisceau parallèle de rayons X par les plans réticulaires d'un cristal. A droite, figure 81 : coupe schématique d'un œil humain.*

sent des raies. La partie continue est due à la perte d'énergie des électrons lorsqu'ils sont freinés brutalement en passant très près d'un noyau atomique. Ce mécanisme de rayonnement par freinage ne se rencontre pas dans les sources optiques usuelles. Quant au spectre de raies, il est spécifique du métal qui constitue l'anticathode. Il est produit de la façon habituelle par excitation d'électrons atomiques qui retombent dans leur état fondamental.

Lorsque des rayons X traversent la matière, on observe trois effets.

— Il peut y avoir diffusion dans le cas où l'électron cible emprunte une énergie notable au photon X incident ; ce dernier est renvoyé avec une longueur d'onde plus grande (effet Compton).

— Il peut y avoir effet photo-électrique avec absorption du photon incident ; les électrons ainsi émis sont responsables de la quasi-totalité de l'ionisation produite par les rayons X.

— Les électrons excités peuvent retomber dans l'état fondamental de l'atome, en émettant des rayons secondaires ; on obtient, comme dans le cas de l'émission d'anticathode, un spectre de raies caractéristique du milieu. C'est donc un phénomène analogue à la fluorescence.

Diffraction des rayons X par les cristaux

Les cristaux sont constitués d'atomes ou de molécules régulièrement disposés dans l'espace. Le plus petit élément nécessaire pour reproduire, par simple translation, l'ensemble du cristal s'appelle une maille. L'ensemble de toutes les mailles constitue le réseau ; chaque position d'atome est appelée un nœud. Trois nœuds, pris au hasard, définissent un plan qui en contient une infinité. Il y a une infinité de tels plans parallèles, appelés plans réticulaires. Un plan réticulaire est d'autant plus intéressant que la densité de la matière, c'est-à-dire de nœuds du réseau, y est plus importante. Les distances entre atomes dans un cristal sont de l'ordre de quelques Å, et donc comparables à la longueur d'onde des rayons X. On peut alors s'attendre à observer des phénomènes de diffraction dans les trois dimensions du cristal, analogues à ceux que produit un réseau à deux dimensions pour les ondes lumineuses.

Considérons des plans réticulaires, séparés par une distance d, et frappés par une onde plane faisant avec eux un angle θ (*fig.* 80). Pour qu'il y ait addition en phase de tous les rayons atteignant tous les nœuds des différents plans réticulaires, il faut que l'angle d'émergence soit égal à θ. Il faut également que la différence de marche soit égale à un multiple de la longueur d'onde, c'est-à-dire :

$$2\,d \sin \theta = p\lambda$$

C'est la condition de Bragg, dans laquelle p est un nombre entier quelconque. Lorsque l'on fait tomber un faisceau de rayons X sur un cristal, on observe donc sur une plaque photographique une série de taches espacées dans différentes directions. A chaque système de plans réticulaires et à chaque ordre de diffraction p, correspond un angle θ. La figure est assez complexe, mais on arrive toujours à la débrouiller. On en déduit alors les caractéristiques géométriques et la dimension de la maille. Inversement, lorsque l'on possède un cristal parfaitement connu, NaCl par exemple, on peut mesurer la longueur d'onde des rayons X de façon absolue, avec une précision de l'ordre du cent-millième. La diffraction des rayons X est un moyen d'étude extrêmement développé en cristallographie et en chimie.

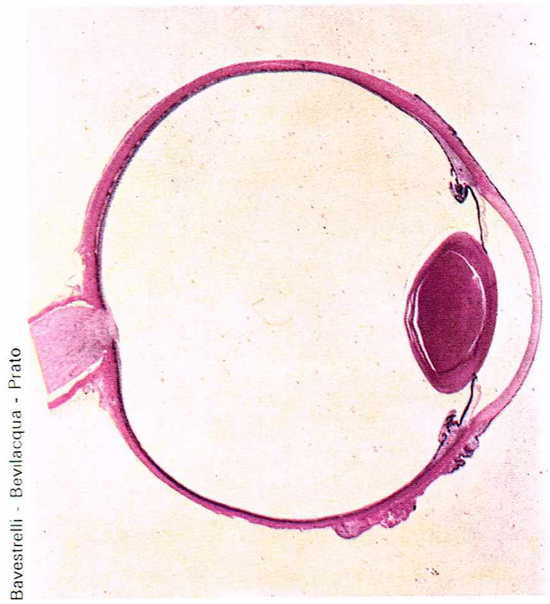

◀ *Microphotographie d'un œil humain en coupe horizontale (× 3).*

Optique instrumentale

La vue est notre sens le plus important ; c'est lui qui nous donne l'image la plus précise du monde extérieur. On conçoit que, depuis le début des sciences expérimentales, l'homme se soit employé avec ardeur à augmenter les possibilités de sa vision, par la réalisation d'instruments d'optique. Il a développé également les moyens d'enregistrement de l'image, qui est un moyen privilégié de transmission de l'information. Au XX^e siècle, l'électronique a ouvert un champ de découvertes nouvelles : télévision, amplification de la lumière, microscope électronique. Nous nous limiterons à l'exposé des applications directes des chapitres précédents d'optique théorique, en étudiant l'œil et les instruments d'optique.

L'œil et la vision

Le premier instrument d'optique est l'œil. Sans entrer dans des détails de physiologie et de médecine qui n'auraient pas leur place ici, il est nécessaire d'en connaître le fonctionnement, les performances et les limites, car les autres instruments d'optique sont conçus en définitive pour donner des images utilisables par l'œil.

Constitution de l'œil

L'œil humain se présente sous la forme d'un globe limité par une peau blanche, la sclérotique. Celle-ci devient transparente à l'avant pour laisser entrer la lumière, et forme la cornée (*fig.* 81). Les rayons lumineux traversent successivement plusieurs milieux transparents : humeur aqueuse, cristallin, humeur vitrée, avant d'atteindre la couche sensible, la rétine.

Le cristallin a la forme d'une lentille convergente biconvexe et agit effectivement comme tel, grâce à son pouvoir de réfraction élevé. Il est maintenu en place par

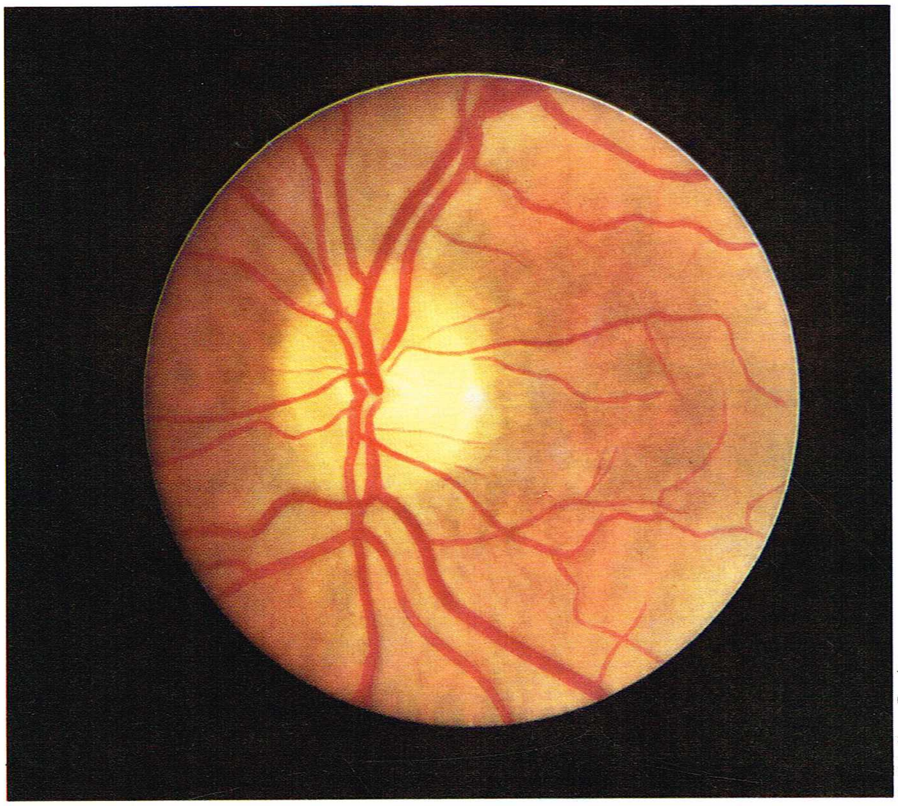

P. Briolle - Rapho

▲ *Photographie du fond d'un œil normal.*

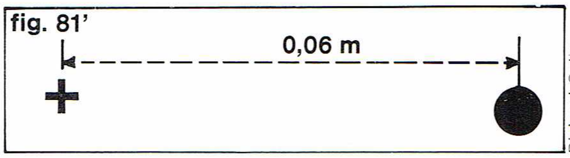

Richard Colin

les ligaments suspenseurs et par des muscles ciliaires. Ceux-ci peuvent se contracter sous l'action d'un influx nerveux réflexe et tirer sur la périphérie du cristallin. Le noyau central étant plus dur, la courbure des faces augmente. Il y a ainsi adaptation de la convergence du cristallin suivant la distance de l'objet à observer, de façon que l'image soit toujours nette sur la rétine. Pour un œil normal, l'absence de contraction correspond à la vision à l'infini. Le rapprochement de l'objet provoque inconsciemment le processus d'accommodation, qui, s'il est prolongé, peut devenir pénible.

En avant du cristallin se trouve une membrane, appelée iris, dont la couleur varie suivant les individus. Elle est percée d'une ouverture destinée à laisser passer la lumière : la pupille. Le diamètre de la pupille est variable de 2,5 à 7,5 mm ; il est réglé suivant l'éclairement, de façon réflexe.

La partie la plus délicate et la plus importante de l'œil est la rétine. Elle a sensiblement la forme d'une demi-sphère tapissant le fond de l'œil, collée à une membrane nourricière, la choroïde. Les propriétés de la rétine ne sont pas uniformes sur l'ensemble de sa surface.

Il existe un point, la fovéa, situé à peu près au centre du champ de vision, où l'acuité visuelle est maximale. Lorsque nous désirons observer soigneusement un objet, nous nous plaçons de façon que son image se forme sur la fovéa. Il y a un autre point remarquable au niveau de l'endroit où le nerf optique se forme et part en direction du cerveau ; cette région n'est pas sensible, on l'appelle le *point aveugle* (*fig.* 81').

La *figure* 82 représente une vue microscopique de la rétine, en différents points de celle-ci. On y voit des cellules nerveuses très différenciées, toutes reliées entre elles par des axones et des dendrites. La lumière doit traverser l'épaisseur de la rétine pour atteindre les cellules sensibles. Celles-ci sont de deux sortes, les bâtonnets, les plus nombreux, et les cônes. Plus on s'approche de la fovéa, plus la proportion de cônes devient importante. Dans la fovéa proprement dite, il n'y a plus que des cônes, et ceux-ci deviennent plus serrés et plus petits. La conduction de l'influx nerveux jusqu'au nerf optique n'est pas simple et fait appel à quatre types de cellules. Chaque bâtonnet ou cône n'est pas relié directement par une fibre unique au nerf optique. Il est connecté à plusieurs autres cellules, elles-mêmes connectées entre elles, horizontalement et verticalement. Il y a donc une certaine transformation de l'information au niveau de la rétine : certaines fonctions cérébrales sont déjà effectuées dans l'œil même.

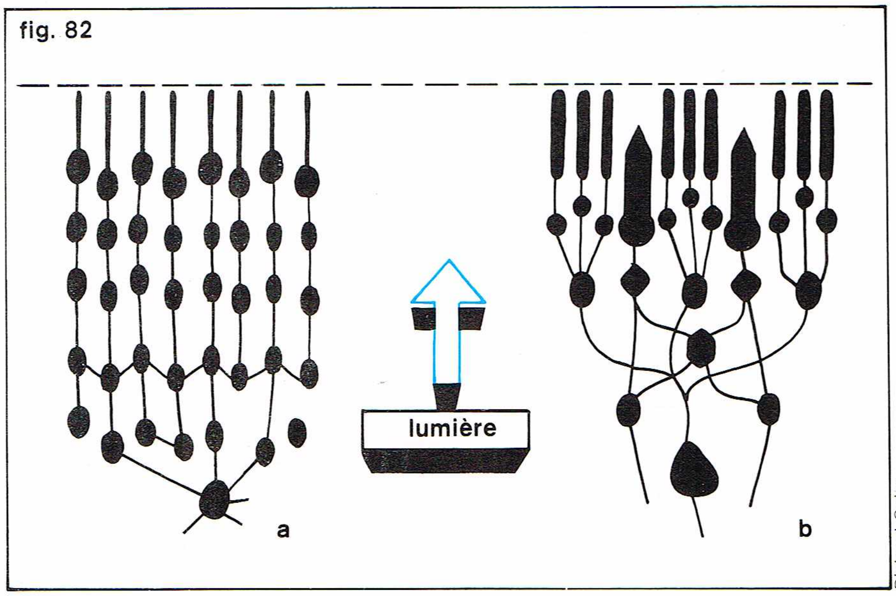

Richard Colin

▲ *Figure 82 : vue microscopique de la rétine, au niveau de la fovéa* (a) *et de la périphérie* (b). *Remarquer les cônes fins et serrés de la fovéa, et la complexité des connexions entre cellules.*
▶ *Figure 83 : représentation schématique d'yeux normal, myope et hypermétrope.*

Défauts optiques de l'œil

Il est clair qu'il y a une limite à la déformation du cristallin par les muscles ciliaires.

L'*œil normal* peut voir nettement entre l'infini et un point appelé *punctum proximum* correspondant à la distance minimale d'accommodation. Le punctum proximum d'un homme d'une quarantaine d'années est situé à 20 cm environ. Pour les enfants, le cristallin est plus mou et permet de voir nettement à une dizaine de centimètres. Pour les personnes âgées au contraire, le cristallin devient de moins en moins déformable, et le punctum proximum s'éloigne inexorablement : c'est la presbytie. On y remédie en utilisant, pour la lecture et pour l'observation rapprochée, des lunettes munies de verres convergents.

Les yeux *myopes* ou *hypermétropes* sont les uns trop convergents, les autres pas assez. Les myopes ne peuvent pas voir à grande distance ; par contre, leur punctum proximum est rapproché. Ils sont capables de voir de près des objets très petits que ne peuvent pas distinguer des yeux normaux. C'est ainsi que de jeunes myopes ont pu, antérieurement à l'apparition de la loupe, effectuer des travaux d'orfèvrerie très fins. L'œil hypermétrope,

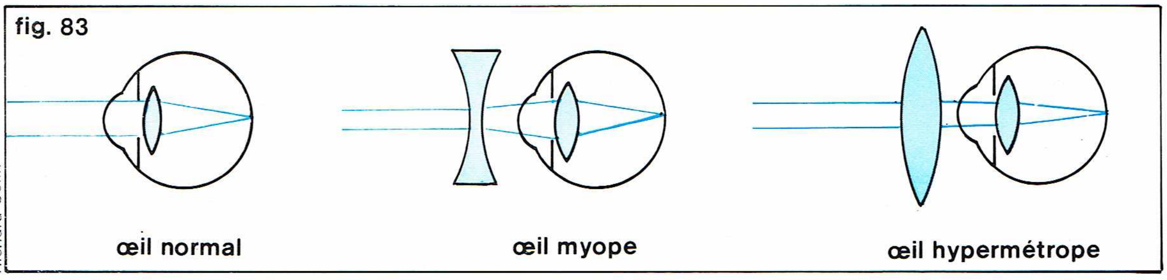

Richard Colin

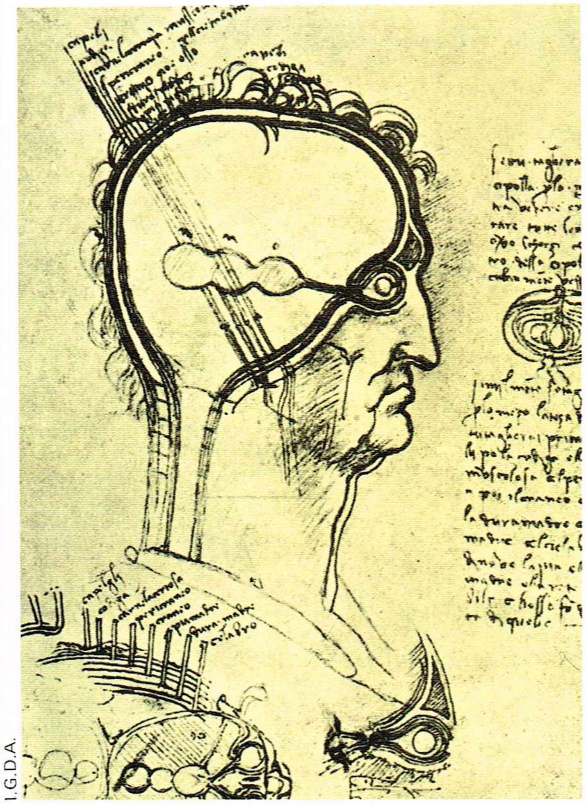

I.G.D.A.

lui, ne voit pas à courte distance, ce qui fait quelquefois confondre ce défaut avec la presbytie. Lorsqu'un sujet myope ou hypermétrope est muni de verres de lunettes divergents ou convergents, sa vision est parfaitement corrigée (*fig.* 83).

La puissance des lentilles, exprimée en dioptries, sert à mesurer l'importance du défaut de vue. Si, de plus, le sujet, âgé, est atteint de presbytie, il lui est nécessaire d'avoir une correction à la fois pour la vision proche et pour la vision éloignée. Pour éviter d'avoir deux paires de lunettes, on taille sur le même verre deux surfaces sphériques différentes et décentrées (lunettes à double foyer).

L'*astigmatisme* est dû à un défaut de sphéricité du cristallin ; la convergence dans une direction n'est pas égale à la convergence dans la direction perpendiculaire. On y remédie par des verres possédant deux rayons de courbure différents : ils sont taillés dans un tore et non dans une sphère.

Pouvoir séparateur

On appelle pouvoir séparateur de l'œil l'angle minimal sous lequel doivent être vus deux points pour pouvoir être distingués. Sa valeur est égale à une minute d'angle, soit $3 \cdot 10^{-4}$ radian. Pour que deux points puissent être séparés, il est nécessaire qu'ils donnent des images sur deux cellules distinctes de la rétine. La distance de deux cellules contiguës sur la fovéa, là où elles sont le plus serrées, est de l'ordre de 10 μ, ce qui donne bien l'angle indiqué, pour une longueur focale de 3 cm. Un œil normal, ayant son punctum proximum à 25 cm, peut donc distinguer des détails de dimension égale à 0,075 mm. Un myope ou un enfant est avantagé de ce point de vue puisque, lorsque le punctum proximum est à 8 cm, la séparation minimale est ramenée à 0,025 mm.

Ce pouvoir séparateur est la valeur optimale, car, en fait, il dépend des conditions d'observation.

Le premier facteur est la luminance de l'objet. Le pouvoir séparateur est à peu près conservé jusqu'à 1 candela par mètre carré, qui correspond à un papier blanc éclairé par une bougie placée à 60 cm. Au-delà de cette valeur, il décroît régulièrement jusqu'à être 100 fois plus mauvais sous la lumière des étoiles d'une nuit sans lune.

Le second facteur est le contraste, calculable par le rapport, compris entre 0 et 1, des luminances des deux objets à distinguer. Le noir et le blanc juxtaposés donnent la plus grande valeur, égale à 1. Le plus faible contraste

fig. 84

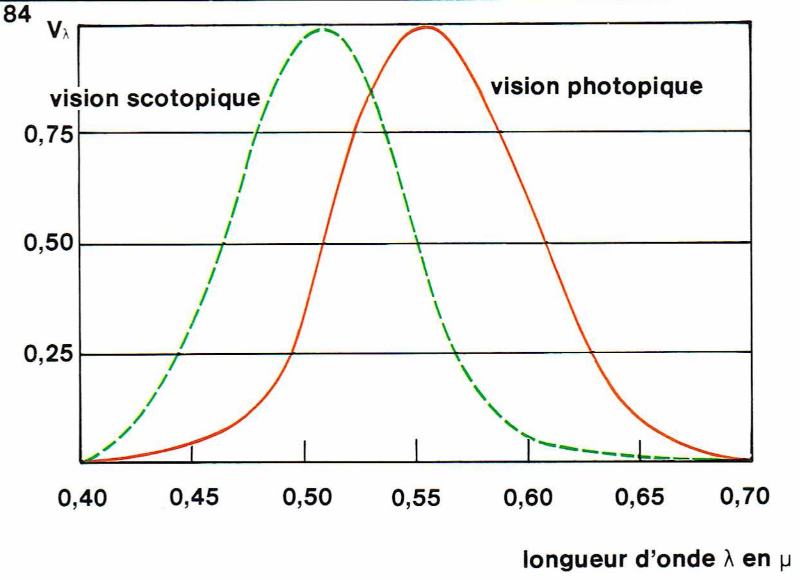

Richard Colin

◀▲ *A gauche, reproduction d'un manuscrit de Léonard de Vinci relatif à la démonstration du phénomène de l'irradiation due à l'œil. A droite, figure 84 : sensibilité spectrale de l'œil en fonction de la longueur d'onde. Vision nocturne, ou scotopique, due aux bâtonnets (en pointillé), et vision diurne, ou photopique, due aux cônes (en trait plein). En vision scotopique, le maximum de sensibilité se situe dans le bleu-vert, et la sensibilité au rouge est à peu près nulle.*

perceptible sous un bon éclairage est de 1 %. A la même distance, on ne distingue pas deux traits tracés à la peinture pâle, alors qu'on peut distinguer deux traits à la peinture foncée. Lorsque le contraste passe de 1 à 0,1, puis à 0,02, le pouvoir séparateur est multiplié par 3,5 et 8.

Une troisième limitation est due à la diffraction, car la dimension du pinceau lumineux entrant dans l'œil est limitée. Sous une vive lumière, la pupille de l'œil se contracte naturellement, sans que le diamètre devienne inférieur à 2,5 mm. Cette valeur correspond à une divergence de faisceau de $2 \cdot 10^{-4}$ radian, ce qui est juste au-dessous du pouvoir séparateur maximal. Le rétrécissement de la pupille n'est donc jamais un phénomène gênant. Il n'en est pas de même si un instrument d'optique diaphragme les faisceaux à un diamètre inférieur à 2,5 mm : on perd le bénéfice du grossissement. On voit apparaître ainsi une contrainte importante dont il faut tenir compte dans la fabrication des appareils.

Vision des couleurs

Le phénomène le plus remarquable dans la vision est l'adaptation de l'œil à l'obscurité. Lorsque nous entrons dans une pièce obscure, nous ne distinguons rien tout d'abord, puis, au bout de quelques dizaines de minutes, nous voyons les objets, mais ils apparaissent en « noir et blanc ». C'est ainsi que les étoiles semblent toutes blanches, alors que la photographie ou la spectrographie montrent qu'elles peuvent présenter toutes les couleurs du spectre. Les deux types de cellules de la rétine ont une fonction différente : les bâtonnets donnent la vision à faible intensité, tandis que les cônes sont sensibles aux couleurs, sous forte lumière. D'ailleurs, la vision nocturne est meilleure lorsque l'objet est observé de côté, son image ne se formant pas sur la fovéa, qui ne contient que des cônes. La courbe de sensibilité spectrale, mesurée par les méthodes de la photométrie visuelle, n'est pas la même pour les cônes et les bâtonnets (*fig.* 84) : le rouge est moins visible dans l'obscurité (effet Purkinje).

Toute radiation possède une distribution spectrale, qui définit sans ambiguïté la quantité de chaque onde monochromatique qu'elle contient. Mais elle a aussi une couleur, sensation visuelle globale, à la fois plus complexe et moins précise qu'une courbe mathématique. La recherche de la corrélation entre ces deux caractéristiques n'est pas uniquement un problème de physiologie. Elle est indispensable pour des applications pratiques très importantes : photographie et télévision en couleurs. Une même sensation colorée peut être produite par différentes distributions spectrales. Pour faire les expériences, on procède de la façon suivante : des projecteurs blancs, d'intensité réglable, munis de filtres de différentes couleurs, envoient leur faisceau sur un écran, de façon qu'ils aient une partie commune. Pour comparer les couleurs, on juxtapose les deux taches lumineuses, et on voit si la

◀ *Page ci-contre, figure 81' : fermez votre œil gauche en appliquant la main gauche sur la paupière ; prenez de la main droite le présent volume, et présentez devant votre œil droit ouvert la figure 81' que vous tiendrez à l'extrémité du bras tendu. Regardez la petite croix noire, seulement, et rapprochez peu à peu le dessin de votre visage : il arrivera un moment où votre œil cessera de voir le rond noir. Rapprochez encore la figure, et les deux images, croix et rond, apparaîtront de nouveau. Il faut que l'œil qui regarde soit maintenu à la perpendiculaire élevée au milieu de la croix. Cette expérience prouve qu'il y a dans la rétine un petit espace qui n'est pas sensible à la lumière, c'est le punctum caecum, ou tache aveugle, départ du nerf optique.*

▶ *Figure 85 : trajet des nerfs optiques, de la rétine vers le cortex cérébral, en passant par le chiasma.*

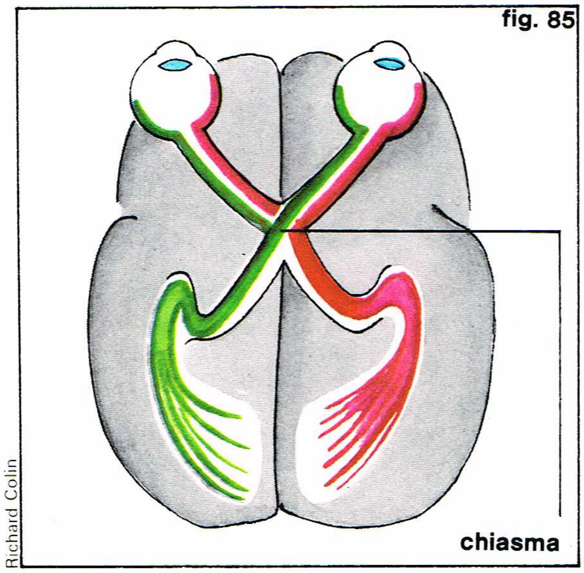

limite disparaît, comme en photométrie. On constate par exemple que l'addition de lumières rouge et verte, d'intensités relatives réglables, peut être identifiée à n'importe quelle lumière jaune. Les études conduisent aux lois expérimentales suivantes :

— si deux couleurs sont égales, l'addition d'une même troisième donne de nouveaux mélanges égaux ;

— généralement, une couleur peut être formée de l'addition de trois couleurs différentes A, B et C quelconques appelées primaires :

$$c = xA + yB + zC$$

x, y et z étant la proportion de chaque primaire.

Il n'existe pas d'ensemble de trois primaires qui reproduisent *toutes* les teintes. L'affirmation courante selon laquelle les couleurs primaires sont le rouge, le bleu et le vert signifie simplement qu'à partir de ces trois composantes on peut reconstituer une gamme maximale de couleurs.

L'étape suivante serait la réponse à la question : quel mécanisme provoque la vision des couleurs ? La théorie de Young et Helmholtz suppose que les cônes peuvent contenir trois sortes de pigments différents. Chacun d'eux absorbe la lumière suivant son spectre propre, et la cellule nerveuse restitue une sensation dépendant de cette absorption. Les bâtonnets aussi contiennent un pigment, le pourpre rétinien, qu'on a pu isoler et qui présente un spectre d'absorption reproduisant exactement la courbe de sensibilité de l'œil à faible luminosité. On peut en déduire que la somme des spectres d'absorption des trois pigments des cônes est une courbe identique à celle de la sensibilité de l'œil à haute luminosité. Il est plus difficile de trouver le spectre individuel de chaque pigment. Or il existe des sujets ne percevant pas toutes les couleurs, les daltoniens. Leur maladie est probablement due à l'absence d'un pigment ; des expériences effectuées avec eux permettent donc de déterminer les spectres cherchés.

Vision du relief

Lorsque l'on suit le trajet des fibres nerveuses jusqu'au cerveau, on constate que les deux nerfs optiques se croisent et se mélangent en un point appelé chiasma. Le lobe postérieur de chaque hémisphère cérébral reçoit des influx provenant des deux yeux à la fois : l'hémisphère gauche, par exemple, reçoit les fibres provenant des moitiés gauches de chaque rétine (*fig.* 85). Il y a donc une intégration des impressions venant des deux yeux : c'est la vision binoculaire. D'ailleurs, les mouvements des globes oculaires commandés par des muscles externes sont parfaitement synchronisés pour que les deux images coïncident, sauf en cas de maladie (strabisme). Pour un objet éloigné, les deux axes optiques sont parallèles ; pour un objet proche, ils sont un peu convergents, à cause de l'écartement des yeux. Cette accoutumance à la distance d'observation est un réflexe ; au niveau cérébral, elle se traduit par la sensation du relief.

Il existe différents procédés pour restituer le relief à partir de la surface plane d'une photographie. Dans tous les cas, on prend deux images du paysage avec deux objectifs séparés par une distance égale à l'écartement des yeux (prise de vue stéréoscopique). On observe ensuite le couple avec un système de deux oculaires. On peut également projeter les deux images sur un écran avec deux objectifs contenant deux polariseurs croisés. Le spectateur porte des lunettes ayant également deux polariseurs croisés : chaque œil ne reçoit ainsi que l'image qui lui est destinée. Un principe un peu analogue est de colorer une image en bleu, l'autre en rouge, de les imprimer l'une sur l'autre, et d'observer avec des lunettes comprenant un verre rouge et un verre bleu (anaglyphes). Un autre procédé permet de se passer de lunettes : le couple stéréoscopique est imprimé alternativement, chaque image étant divisée en bandes très fines ; le tout est couvert d'une couche de plastique ondulée qui, tenue à distance convenable, ne laisse passer vers chaque œil que l'image qui lui est destinée (*fig.* 86).

Instruments d'optique

Dans l'Antiquité, les Égyptiens, puis les Grecs et les Romains savaient tailler et polir le cristal de roche. Mais les méthodes étaient celles des lapidaires et non celles, beaucoup plus précises, des opticiens. Les images vues à travers ces lentilles primitives sont grossies, mais moins nettes. Les anciens savaient également fondre le verre et le souffler pour fabriquer des loupes permettant de concentrer la lumière solaire.

L'invention des lunettes est attribuée soit à Salvano d'Aramento degli Amati (mort en 1317), soit à Alessandro

▼ *A gauche, figure 86 : vision binoculaire d'une photographie « en relief ». En rouge et bleu, les images destinées à l'œil gauche et à l'œil droit. A droite, un microscope du début du XIXe siècle avec ses divers objectifs.*

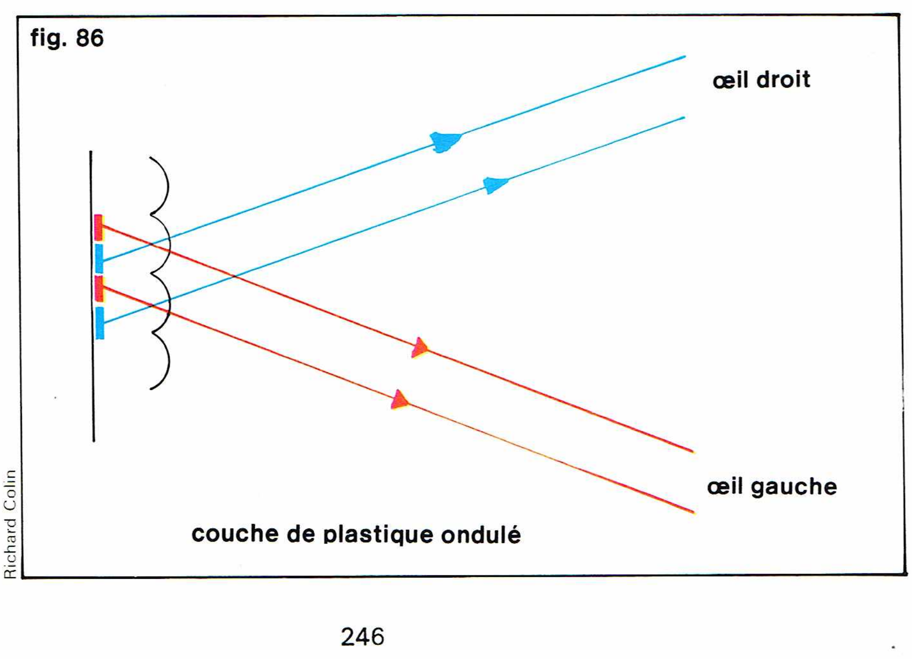

della Spina (mort en 1313). L'usage s'en est répandu en Europe lentement, peu de personnes sachant lire à l'époque. Cela prouve qu'on avait déjà découvert une méthode de travail des surfaces optiques.

Il a fallu cependant attendre le milieu du XVIe siècle pour que l'on envisageât systématiquement l'utilisation de lentilles pour observer des objets éloignés ou très petits. En effet, ce n'est qu'à ce moment que les lois de l'optique commencèrent à être connues. La lunette de Galilée, instrument très simple composé de deux lentilles, permit à celui-ci de découvrir, après 1609, les satellites de Jupiter et les phases de Vénus.

Ce fut le premier appareil composé, comprenant les deux éléments usuels, objectif, côté objet, et oculaire, côté œil. La loupe et le microscope firent leur apparition presque simultanément, mais leur mauvaise qualité empêcha au début de faire des observations poussées. On ne savait pas polir des lentilles de courte distance focale.

C'est au XVIIe siècle que l'on apprit à faire fondre l'extrémité d'un fil de verre dans une flamme pour former par capillarité une sphère presque parfaite. En taillant une face pour obtenir une lentille plan-convexe, Leeuwenhoek fabriquait des loupes de distance focale 2 mm. Avec cet appareil rudimentaire au champ très limité, il découvrit les bactéries, les protozoaires, les spermatozoïdes et les globules du sang. Au milieu du XIXe siècle, les progrès dans la construction des objectifs permirent au microscope de supplanter définitivement la loupe de Leeuwenhoek.

L'histoire de l'amélioration du microscope est alors une lente recherche de la correction de toutes les aberrations. L'utilisation de deux verres différents permet d'atténuer l'aberration chromatique (Dollond, 1753). Lister, puis Amici parvinrent ensuite à corriger l'aberration de sphéricité. L'amélioration des verres d'optique, grâce aux techniques de fabrication, de fusion et de recuit, a été également un facteur important de progrès. Actuellement, le degré de perfection ne peut plus être dépassé, car la limite physique imposée par la diffraction est atteinte. Les possibilités récentes concernent les techniques nouvelles d'observation : contraste de phase, ultramicroscopie, polarisation.

Mais le microscope optique est actuellement dépassé par le microscope électronique. Le tableau suivant représente l'échelle des pouvoirs séparateurs atteints :

Œil normal	75 μ
Œil myope	15 μ
Loupe simple (XVIIe siècle)	2 μ
Microscope (fin du XIXe siècle)	0,2 μ
Microscope électronique (milieu du XXe siècle)	0,04 μ

Du côté des instruments astronomiques, c'est l augmentation des dimensions qui a entraîné les premiers progrès. Dans la lunette astronomique, l'objectif et l'oculaire sont des lentilles. Dans le télescope, l'objectif est un miroir parabolique. Ce dernier est constitué par un bloc de verre poli et argenté ; il y a une seule surface optique à réaliser, et l'homogénéité interne du verre est sans importance. Le premier télescope a été construit par Zucchi en 1616 ; il a bénéficié des améliorations de Newton, Gregory et Cassegrain. Un pas important a été franchi par Schmidt en 1930, qui réussit à augmenter le champ de la façon suivante : le miroir parabolique est remplacé par un miroir sphérique, et il y a une lame de verre compensatrice d'épaisseur non uniforme qui corrige l'aberration de sphéricité. Il faut noter qu'actuellement l'augmentation des dimensions ne sert qu'à permettre la détection d'objets de moins en moins lumineux. En effet, le pouvoir séparateur est beaucoup plus limité par la turbulence atmosphérique entraînant des fluctuations d'indice de réfraction de l'air que par la diffraction. C'est ainsi que de meilleures photographies de planètes sont obtenues avec la lunette du pic du Midi (diamètre 60 cm) qu'avec le télescope du mont Palomar (diamètre 5 m). On tend à placer les observatoires à une altitude aussi élevée que possible, et même à bord de satellites artificiels.

L'astronomie s'oriente également vers l'exploration des longueurs d'onde non visibles. Profitant de la technique des radars développée pendant la dernière guerre, on a

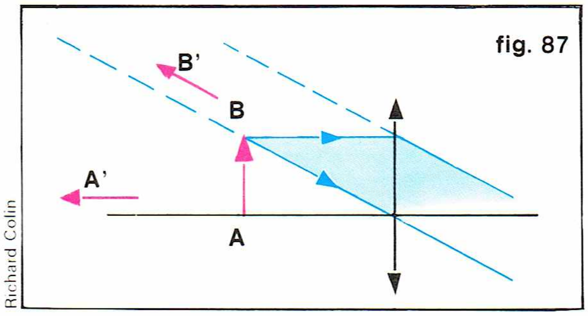

◀ *Figure 87 : image d'un objet AB donné par une loupe.*

construit des radiotélescopes qui ont permis d'importantes découvertes (fond continu à 3 °K, quasars, pulsars). Les satellites artificiels permettent également d'observer des radiations normalement absorbées par l'atmosphère terrestre ; c'est le cas du satellite *Uhuru*, sensible aux rayons X.

Les progrès actuels de l'optique instrumentale sont dus à l'augmentation de la liste des matériaux utilisables et surtout à l'utilisation des ordinateurs. On peut calculer rapidement des combinaisons optiques de plus en plus compliquées et envisager le polissage automatique des surfaces non sphériques ; cela, toujours dans le dessein d'une correction de plus en plus précise des aberrations.

La loupe

Une loupe est une lentille convergente utilisée pour observer des objets rapprochés. Sa puissance P, inverse de la distance focale f exprimée en mètres, est mesurée en dioptries. En utilisation normale, l'objet est placé au foyer, ce qui donne une image virtuelle à l'infini et évite ainsi la fatigue de l'accommodation (*fig.* 87). Le grandissement, rapport de la dimension de l'image à celle de l'objet, est infini. Mais ce n'est pas cette quantité qui est intéressante dans les instruments d'optique : une image dix fois plus grande mais dix fois plus éloignée n'apporte rien. Le gain en pouvoir séparateur est donné par le grossissement : rapport des angles entre deux points de l'image et les mêmes points de l'objet vu à l'œil nu. Pour un punctum proximum de 25 cm, il est égal à :

$$G = \frac{0,25}{f} = 0,25\ P \qquad (9)$$

On ne fabrique guère de loupe plus puissante que 100 dioptries, ce qui donne un grossissement de 25.

Une autre quantité intéressante dans les instruments optiques est le champ, c'est-à-dire l'angle à l'intérieur duquel un objet est visible. Il est déterminé par le faisceau qui peut passer à la fois par la lentille et par la pupille (*fig.* 88). On a intérêt à mettre la loupe très près de l'œil pour augmenter le champ, et à trouver par tâtonnements la position adéquate de l'objet.

▼ *Figure 88 : le champ d'un instrument d'optique est la portion d'espace visible ; il dépend de la dimension de l'appareil et de la position de l'œil. Le champ d'un miroir plan est plus petit que celui d'un miroir convexe. Le champ d'une loupe est maximal lorsque celle-ci est placée près de l'œil.*

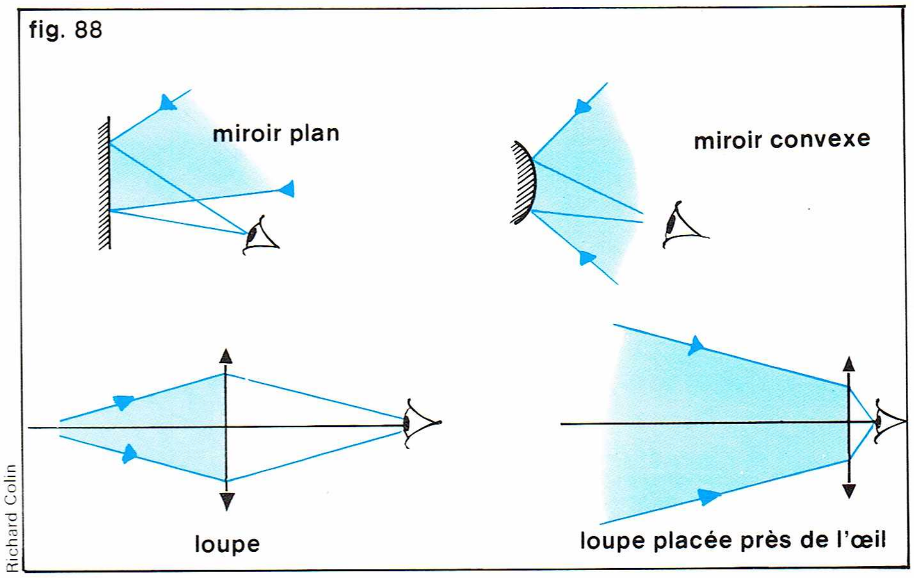

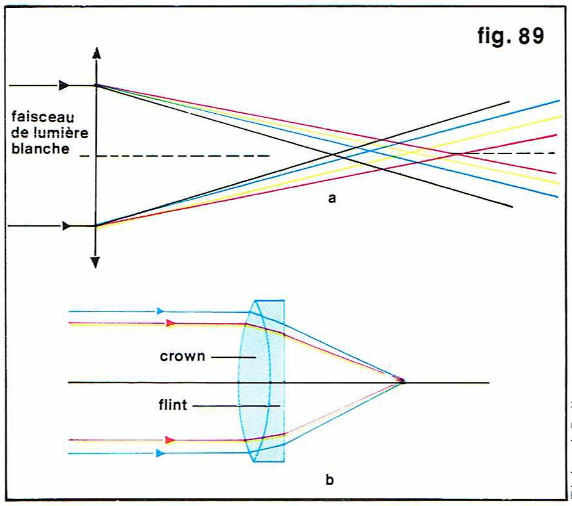

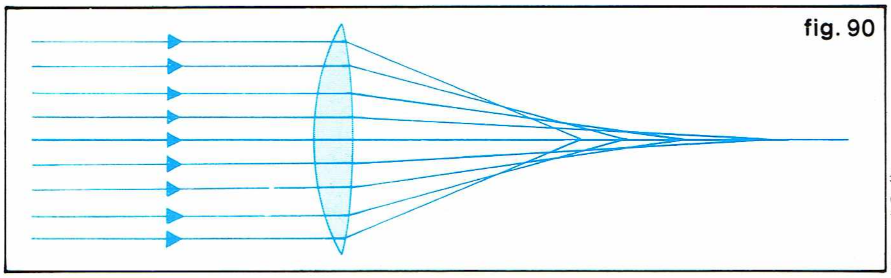

▲ *En haut, figure 89 : aberration chromatique* (a) *et sa correction par un doublet* (b). *Ci-dessus, figure 90 : aberration de sphéricité ; les rayons parallèles ne convergent pas, mais enveloppent une surface appelée caustique.*

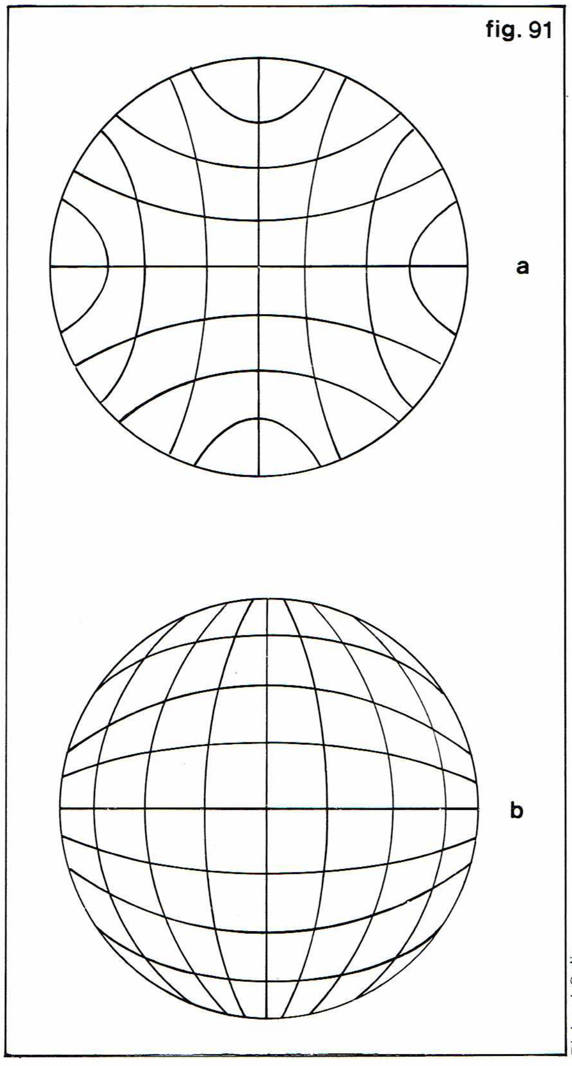

▶ *Figure 91 : image d'un quadrillage régulier donné par une loupe : distorsion en barillet* (a) *et en coussinet* (b).

Pour une loupe de moyenne puissance, la partie de l'image située au centre du champ apparaît nette. Ce n'est plus le cas sur les bords, où les conditions de Gauss ne s'appliquent plus. Il apparaît également une distorsion de l'image, ainsi que de l'aberration chromatique. Il faut donc réduire le diamètre de la lentille, ce qui a pour inconvénient de diminuer le champ. La loupe de Leeuwenhoek, de distance focale 2 mm, diaphragmée à 0,6 mm, atteint la limite permise par la diffraction. Elle n'a plus qu'un intérêt historique, n'importe quel petit microscope donnant la même performance avec un champ et une clarté bien meilleurs.

Aberrations

L'aberration chromatique est due à la dispersion de tout milieu transparent. Une lentille simple donne d'un point lumineux, en lumière blanche, situé sur l'axe une série continue d'images colorées (*fig.* 89). On remédie à ce défaut en adjoignant à une lentille convergente une lentille divergente moins puissante, de façon que l'ensemble reste convergent. La lentille divergente est taillée dans un verre plus dispersif (flint). Il est différent du verre ordinaire (crown), car il contient de l'oxyde de plomb. On obtient ainsi la même longueur focale pour *deux* radiations du spectre ; les autres sont moins bien corrigées. Au lieu de ce système appelé achromatique, on peut, avec trois lentilles, égaliser sur trois radiations (triplet apochromatique).

Les aberrations géométriques sont plus complexes. Elles se manifestent pour tout système centré, en particulier les combinaisons de lentilles dès que l'on quitte le domaine de l'approximation de Gauss. Il existe quatre types d'aberrations géométriques, totalement irréductibles les uns aux autres : la théorie montre qu'il est impossible de corriger un système optique simultanément pour tous les types. On n'y arrive qu'approximativement et, jusqu'à une époque récente, plus par tâtonnements que par le calcul.

L'aberration de sphéricité existe déjà lorsque le point est sur l'axe de l'instrument ; les rayons ne convergent pas en un foyer (*fig.* 90). On peut l'atténuer de la façon suivante : dans un doublet achromatique, la convergence des deux lentilles est fixée, mais non les rayons des surfaces sphériques. Une même puissance peut être obtenue pour n'importe quelle valeur d'un des deux rayons ; on peut donc jouer sur ce paramètre pour obtenir l'aberration minimale.

La coma est une aberration qui existe pour des points situés hors de l'axe, lorsqu'ils envoient des rayons obliques. Elle s'observe à l'état pur pour l'image d'une étoile dans le miroir d'un télescope. En effet, dans ce cas, l'aberration sphérique est déjà corrigée par l'utilisation d'un miroir parabolique. L'image d'un point apparaît comme une tache brillante prolongée vers l'extérieur par une tache diffuse, en forme de comète (d'où le nom). Une bonne correction est possible en jouant, comme précédemment, sur un paramètre libre du doublet. La formule des sinus d'Abbe, déjà citée en optique géométrique, est alors satisfaite :

(10) $$ny \sin \alpha = n'y' \sin \alpha'$$

L'objectif obtenu est achromatique et, approximativement, stigmatique et aplanétique.

Un autre type d'aberration est encore un terme qui n'apparaît que lorsque les deux conditions de Gauss ne sont satisfaites ni l'une ni l'autre. Il se manifeste par l'astigmatisme et la courbure de champ. Pour un pinceau lumineux quelconque, les rayons lumineux ne convergent pas en un foyer, mais sur un segment (astigmatisme). La meilleure image est obtenue à mi-chemin des deux focales extrêmes. Mais alors, pour la totalité de l'objet, les points images ne sont pas situés dans un plan : c'est la courbure de champ.

La distorsion est une aberration qui existe, même pour un système très diaphragmé, lorsque le point objet est éloigné de l'axe. L'image est déformée sur les bords du champ, en barillet ou en coussinet. On voit bien le phénomène avec un quadrillage régulier grossi par une loupe (*fig.* 91).

Comme il est impossible de corriger toutes les aberrations simultanément, on fabrique, suivant le but recherché, des combinaisons différentes. Dans un objectif de microscope, on recherche essentiellement le pouvoir séparateur,

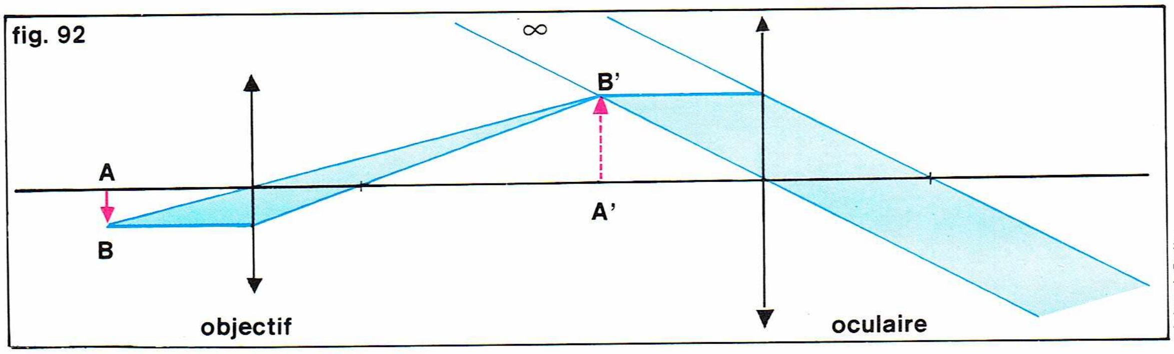

Richard Colin

◀ *Figure 92 : formation des images dans un microscope.*

▼ *Figure 93 : ouverture d'un objectif.*

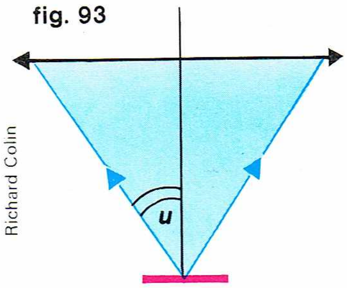

fig. 93

Richard Colin

et on néglige un peu la déformation de l'image due à la courbure de champ et à la distorsion. C'est évidemment le contraire pour un objectif photographique, où la qualité des images est le plus important '

Le microscope

L'idée du microscope est simple : puisque la loupe ne parvient pas à agrandir suffisamment un objet, observons à la loupe, non plus l'objet, mais une image agrandie de celui-ci. L'appareil se compose donc de deux parties, un objectif et un oculaire, montés aux extrémités d'un tube de longueur fixe (*fig.* 92). L'image intermédiaire est placée au foyer de l'oculaire pour être observée à l'infini, le grossissement de l'oculaire est de l'ordre de 10 à 20. La distance de l'image intermédiaire à l'objectif est alors fixée par la dimension du tube. Le grossissement du microscope est égal au produit du grandissement de l'objectif par le grossissement de l'oculaire. Il peut varier de 20 à 1 600 pour un même tube de 16 cm de long, lorsqu'on dispose d'une gamme interchangeable d'objectifs et d'oculaires.

Pour qu'un objectif donne un fort grandissement, il faut que la distance focale soit petite (par exemple 3 mm pour une valeur de 60). Les objectifs sont donc des systèmes complexes de lentilles, de faible ouverture. Comme ils possèdent une certaine épaisseur, l'objet doit être placé très près, environ à 0,3 mm. Cette distance doit être respectée à 0,3 μ près si l'on veut que la mise au point soit acceptable. La profondeur de champ est donc très faible, d'autant plus que le grossissement est plus important. Les objets doivent être spécialement préparés pour l'observation. Ils sont en général coupés en une lamelle très fine ; si ce n'est pas le cas, quand on observe une goutte liquide par exemple, on ne voit que les particules situées dans une tranche de 0,3 μ d'épaisseur. On a avantage, lorsque cela est possible, à employer un grossissement faible, ce qui, par ailleurs, augmente le champ latéralement. Contrairement à une loupe, qui peut être tenue à la main, un microscope doit être fixé à un socle très stable. Des crémaillères démultipliées permettent de déplacer le tube et éventuellement l'objet.

Le faisceau lumineux entrant dans l'objectif est limité latéralement par la dimension de celui-ci. Il y a donc un phénomène de diffraction qui limite le pouvoir séparateur. Une technique intéressante, l'immersion, consiste à interposer entre l'objet et la première lentille un liquide d'indice n élevé. Des rayons lumineux qui auraient été perdus sont ainsi réfractés et renvoyés dans l'objectif. On emploie généralement l'huile de cèdre (n = 1,52). Le calcul montre alors que la plus petite distance discernable entre deux points est :

$$0{,}61 \frac{\lambda}{n \sin u}$$

La quantité u est appelée ouverture ; c'est l'angle que font avec l'axe optique les rayons utiles les plus obliques (*fig.* 93). Compte tenu de la limitation des dimensions, nécessaire à la correction des aberrations, on atteint actuellement la valeur $n \sin u$ 1,3. Le pouvoir séparateur correspondant est de 0,25 μ.

Celui de l'œil nu étant égal à 75 μ, on voit qu'il est inutile de chercher un grossissement supérieur à 300. Des expériences ont montré cependant que, dans les conditions particulières où travaillait l'œil, c'est un grossissement de 1 200 qui permet la meilleure performance.

La première lentille d'un objectif est une demi-boule, ce qui semble absurde, étant donné la mauvaise qualité de cette lentille. On utilise en fait le stigmatisme rigoureux du dioptre sphérique, pour un point situé à une distance R/n du centre. L'indice n du liquide d'immersion est égal à celui du verre. On peut utiliser une deuxième fois cette propriété par un ménisque convergent (*fig.* 94). Aucune aberration de sphéricité ni de coma n'a été introduite jusqu'ici par les deux lentilles, qui forment le groupe antérieur. Par contre, il existe une très importante aberration chromatique. Celle-ci est corrigée par les lentilles suivantes, qui constituent le groupe postérieur. Ce sont des doublets, de convergence assez faible, qui, s'ils étaient seuls, formeraient un objectif d'ouverture 0,25. On obtient ainsi, grâce aux découvertes d'Amici et de Lister, l'objectif moderne de microscope. Le dernier progrès devait être la réalisation d'un objectif corrigé pour trois couleurs « apochromatique » (Abbe, 1886).

Contrairement aux objectifs, qui sont des systèmes optiques dont l'étude et la réalisation sont complexes, les oculaires sont simples et peu coûteux. En effet, le faisceau lumineux qui y entre est déjà très diaphragmé et peu incliné par rapport à l'axe. On se trouve donc plus près des conditions de Gauss, et les aberrations sont plus faibles et faciles à corriger. Les oculaires sont formés généralement de deux lentilles appelées verre de champ et verre d'œil. Pour l'aberration chromatique, il suffit de réaliser une correction apparente : les images de différentes couleurs sont vues sous le même angle, mais elles ne sont pas à la même distance de l'œil. La fabrication d'un objectif parfait étant difficile, on reporte quelquefois une partie des corrections à faire sur l'oculaire, calculé spécialement (oculaire compensateur).

Utilisation du microscope

Les qualités optiques du microscope ne sont pas les seuls points qui doivent être soignés pour obtenir une bonne observation. Il est nécessaire d'avoir un objet

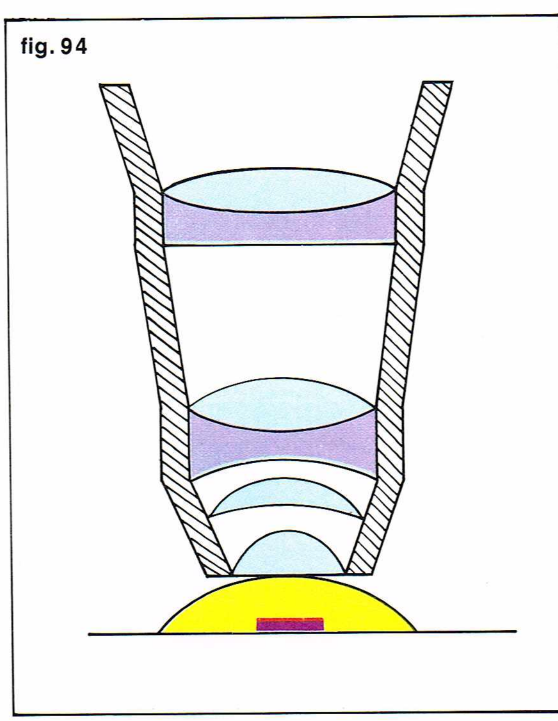

Richard Colin

◀ *Figure 94 : objectif achromatique de microscope avec immersion.*

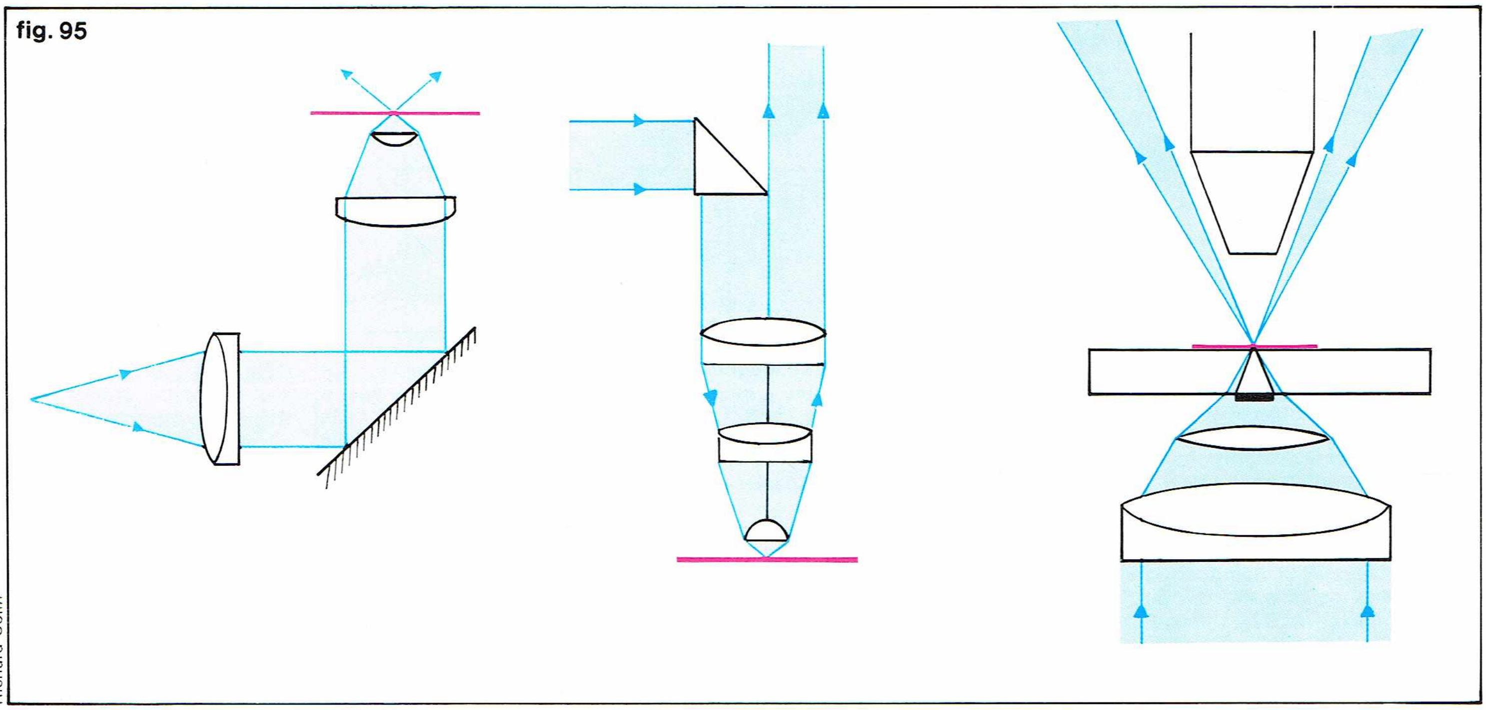

Richard Colin

▲ *Figure 95 : représentation schématique de l'éclairage par transparence, par réflexion et à fond noir.*

▼ *Coupe de racine de maïs, grossie 100 fois et photographiée en lumière polarisée.*

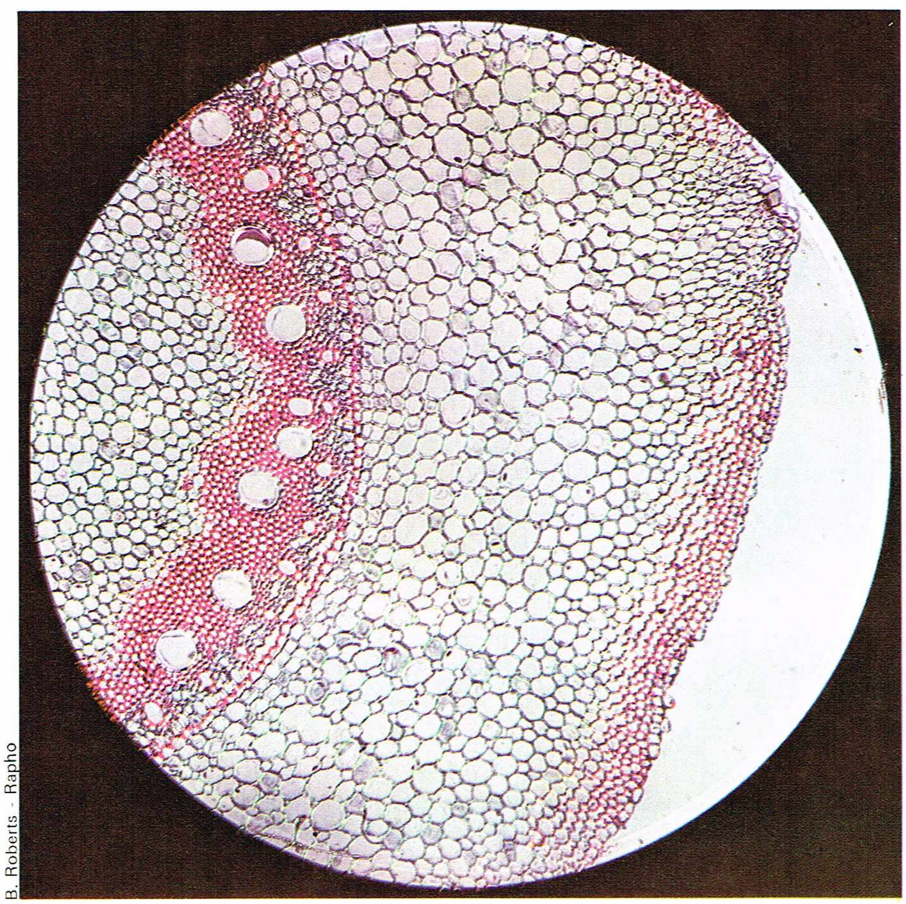

B. Roberts - Rapho

convenablement préparé et bien éclairé. L'éclairement doit être très intense, car la lumière envoyée par une toute petite surface se répartit après grossissement, suivant un grand angle. Cette lumière doit d'autre part être dirigée de façon à pénétrer au maximum dans l'objectif. Enfin seule la partie observée doit être éclairée si l'on veut éviter que des rayons parasites ne pénètrent à l'intérieur du tube et voilent l'image. Le problème est encore compliqué pratiquement par le fait que l'objet se trouve très près de la surface de la première lentille de l'objectif. On emploie une source lumineuse, placée latéralement, dont les rayons sont renvoyés suivant l'axe optique par un miroir plan. Dans le cas général où la préparation est transparente, l'éclairement se fait par-dessous à l'aide d'un système optique appelé condenseur. Celui-ci est un ensemble de lentilles, analogue à un objectif, mais fonctionnant à l'envers : l'image de la source est réduite et éclaire la surface à observer. Lorsque l'objet est opaque, il doit être éclairé par-dessus et observé par réflexion. C'est alors l'objectif lui-même qui sert de condenseur, et le miroir servant à amener la lumière suivant l'axe optique ne doit pas gêner l'observation : on utilise un miroir semi-transparent ou encore un miroir ne couvrant que la moitié de la section du tube. La *figure* 95 représente ces différents dispositifs d'éclairage ; on y voit également un montage permettant l'ultramicroscopie, par l'éclairage à fond noir. Cette méthode permet de révéler l'existence de détails de dimensions très inférieures au pouvoir séparateur, grâce à la lumière qu'ils diffractent. Ils doivent être isolés, et on ne distingue pas leur forme.

La préparation de l'objet à observer est une opération minutieuse, et les techniques sont presque aussi variées que les objets. Dans le cas où le grossissement est faible, il n'est pratiquement pas besoin de préparation et on emploie souvent un microscope binoculaire. Il est constitué par deux tubes jumelés, un pour chaque œil, et donne une vision de relief stéréoscopique. Un système de miroirs permet, comme dans les jumelles à prismes, de redresser l'image qui, ordinairement, est inversée. Il est possible alors d'opérer de petites manipulations et dissections sous le microscope. Pour des grossissements supérieurs à quelques dizaines, un tel instrument n'est plus utilisable : la profondeur de champ devient très faible, l'objectif est très proche de l'objet, et il est impossible de commander à la main des mouvements suffisamment précis.

En biologie, on observe par transparence des couches minces de tissus animaux ou végétaux. L'objet est plongé dans l'alcool, le xylène, puis la paraffine fondue. Après durcissement, le bloc de paraffine est découpé en tranches minces de quelques microns au moyen d'un appareil appelé microtome. La coupe est placée sur une plaque de verre et recouverte par une lamelle. Les lamelles couvre-objet ont une épaisseur de 0,15 mm, et les objectifs de microscopes biologiques sont corrigés pour tenir compte de leur présence. De très nombreux colorants peuvent être utilisés, suivant les détails à mettre en évidence. Certaines observations sont faites sur des cellules vivantes, plongées dans une goutte d'eau, entre lame et lamelle. Une manipulation est possible, à l'aide d'un appareil qui démultiplie les mouvements de la main (micromanipulateur de Fonbrune).

En dehors de la biologie, une des applications fondamentales du microscope est la métallurgie : étude des alliages et des minéraux. Dans ce cas, l'objet est opaque et doit être éclairé par réflexion. La préparation de la substance consiste tout d'abord à réaliser une surface aussi plane et polie que possible. On utilise des limes de plus en plus fines, puis des meules lubrifiées à l'albumine en suspension dans l'eau. On dépose ensuite des réactifs chimiques variés qui attaquent différemment les cristaux suivant leur nature et leur grosseur.

Différentes techniques annexes ont été imaginées pour augmenter les possibilités du microscope. En métallographie, la présence générale de cristaux anisotropes fournit un large champ d'applications à la lumière polarisée.

Le *microscope polarisant* le plus simple comprend un polariseur dans le condenseur et un analyseur au niveau du tube. Ce procédé permet de rendre visible l'orientation des cristaux, qui n'apparaît pas en lumière naturelle. Mais il existe aussi de très nombreux montages combinant les lames quart d'onde et les polariseurs. En biologie, on utilise le contraste de phase, décrit dans le chapitre *Diffraction*, pour l'observation de détails transparents. Ce procédé a l'avantage d'être simple et d'exiger une modification minime de l'appareillage. Mais pour les objets qui diffractent peu, on emploie la microscopie interférentielle. Son principe est de dédoubler l'onde lumineuse provenant de la source et d'envoyer les deux faisceaux dans l'objectif, un seul ayant éclairé l'objet. Il se produit une interférence, et des détails transparents normalement invisibles introduisent une différence de marche qui se traduit par une différence de luminosité. Il s'agit en quelque sorte d'un interféromètre suivi d'un microscope.

Des techniques spécialisées requièrent une refonte complète de l'appareil. Ainsi, pour corriger plus soigneusement les aberrations géométriques, peut-on abandonner complètement l'aberration chromatique. Cela est rendu possible par l'existence de lampes puissantes presque monochromatiques pouvant servir à éclairer l'objet. Le résultat est intéressant lorsque l'image, destinée à être photographiée en noir et blanc, doit être exempte de déformation sur les bords. On peut avoir besoin, pour observer certains objets, d'éclairer en lumière infrarouge ou ultraviolette. L'image est soit photographiée, soit rendue visible par un écran fluorescent. L'ultraviolet a également l'avantage de donner un gain en pouvoir séparateur, puisque la longueur d'onde est plus petite. Malheureusement, il n'est pas toujours possible de trouver des matériaux transparents à ces radiations et dans lesquels on puisse tailler des lentilles. La solution est alors le *microscope catadioptrique :* l'objectif est un miroir sphérique. Cet appareil, ancien dans sa conception, a connu un regain d'intérêt. Contrairement aux objectifs à lentilles, l'aberration de sphéricité n'est pas corrigée, et il est nécessaire d'avoir un oculaire compensateur. Par contre, l'aberration chromatique est complètement absente, puisque les lois de la réflexion sont indépendantes de la longueur d'onde. C'est pourquoi l'instrument peut être utilisé utilement pour la photographie en couleurs, avec la lumière visible.

Instruments terrestres

Lorsque l'on désire observer un objet éloigné, il n'existe pas de solution très simple, analogue à la loupe, constituée d'une seule lentille. En effet, pour être dans la situation la plus confortable, l'œil ne doit pas accommoder. Le système optique doit donc donner d'un objet à l'infini une image à l'infini : on dit qu'il est afocal. Il comporte toujours un objectif et un oculaire. On distingue les instruments terrestres, où l'image est droite, et les instruments astronomiques, où l'image est renversée par rapport à l'objet

La première réalisation est la *lunette de Galilée* (1609) constituée par une lentille convergente suivie d'une lentille divergente. L'objectif donne une image réelle à la distance F ; celle-ci se trouve au foyer de l'oculaire et lui sert d'objet virtuel (*fig.* 96). La distance focale f (en valeur absolue) de l'oculaire est plus petite que F, et le grossissement est égal à :

$$G = \frac{F}{f} \qquad (11)$$

La lunette de Galilée est encore utilisée de nos jours lorsque le grossissement demandé est faible, pour des jumelles de théâtre par exemple.

P. Martini

fig. 96

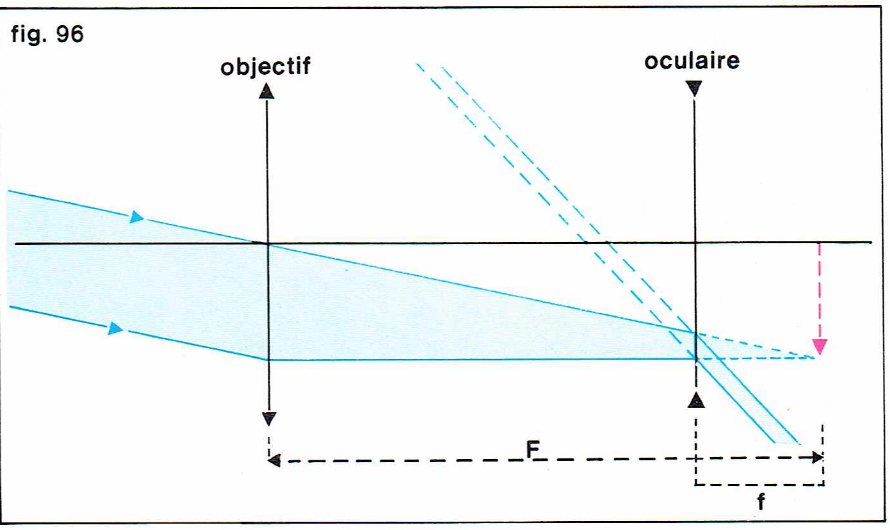

Richard Colin

fig. 97

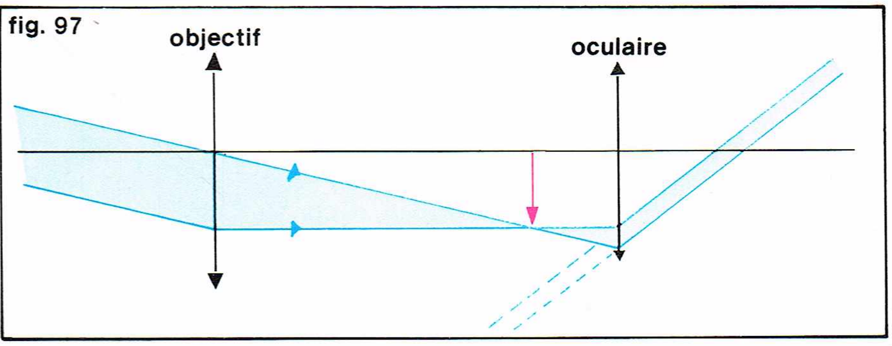

Richard Colin

Dans la *lunette astronomique*, l'oculaire est une lentille convergente qui joue donc le rôle d'une loupe pour agrandir l'image réelle donnée par l'objectif (*fig.* 97). La formule donnant le grossissement est la même que précédemment. Mais ici, l'image est inversée, et il est nécessaire de disposer entre objectif et oculaire un dispositif redresseur, pour transformer la lunette astronomique en *lunette terrestre*. On peut utiliser un système de lentille convergente, qui a l'inconvénient de rallonger le tube (longue-vue).

▲ En haut, un microscope optique utilisable pour les observations en fluorescence et en contraste de phases.

Formation de l'image dans la lunette de Galilée (figure 96) et dans la lunette astronomique (figure 97).

▶ *Figure 98 : trajet de la lumière dans la jumelle à prismes.*

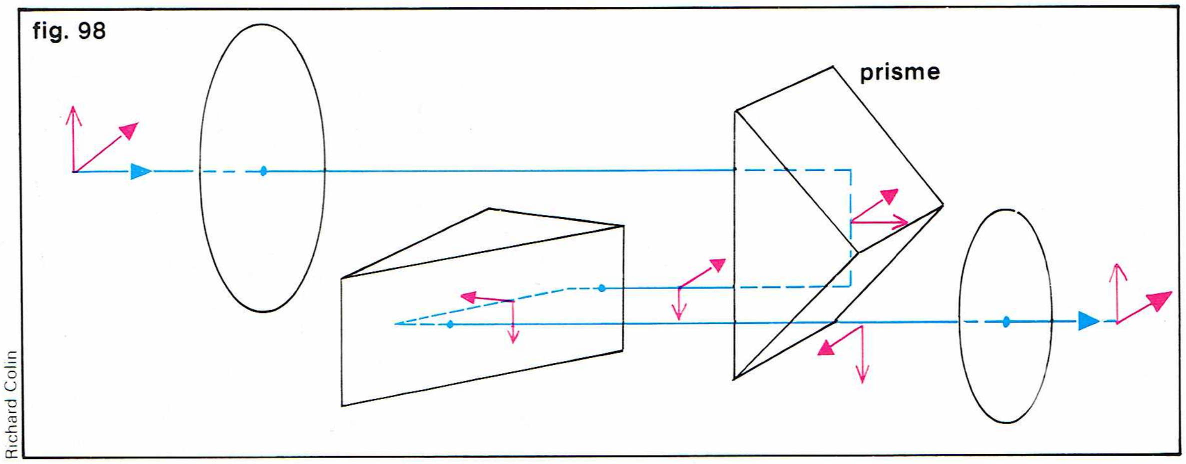

▶ *Figure 99 : champs comparés de la lunette de Galilée et de la lunette astronomique. Dans la première, il faut placer l'œil près de l'objectif ; dans la seconde, il faut le placer au niveau du cercle oculaire.*

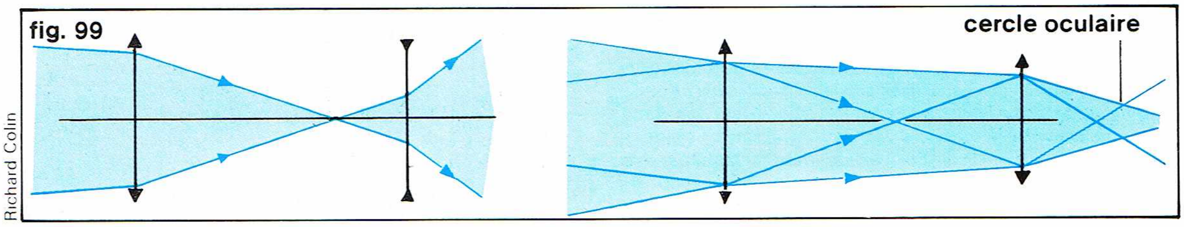

Dans les *jumelles à prismes*, le redressement est obtenu par des miroirs ; il est indispensable d'en avoir un nombre pair pour que l'image soit superposable à l'objet, et non symétrique de celui-ci. Des prismes à réflexion totale (*fig.* 98) permettent d'avoir une perte très faible de la luminosité. Pour former des jumelles, on associe deux lunettes, les objectifs étant plus écartés que les oculaires. On accentue ainsi l'effet de relief dû à la vision binoculaire.

▼ *A gauche, un astrotélémètre à laser. A droite, figure 100 : schéma optique d'un télémètre.*

Belzeaux - Rapho

Le redressement de l'image introduit une complication par rapport à la lunette de Galilée. Mais il y a un avantage : le champ est plus étendu. En effet, les rayons doivent passer par la pupille de l'œil, et un verre convergent les ramène vers l'axe, alors qu'un verre divergent les en éloigne. Avec une lunette astronomique, contrairement à une loupe, il faut placer l'œil non pas le plus près possible du verre, mais à une place précise appelée cercle oculaire (*fig.* 99). Il s'agit de l'image, donnée par l'oculaire, de l'objectif.

On ne fabrique pas d'instruments très puissants de grossissement supérieur à quelques dizaines. En effet, il faudrait augmenter la distance focale de l'objectif, donc la dimension du tube. Ce dernier devrait être fixé sur un support très stable et encombrant. D'ailleurs les turbulences et l'impureté de l'atmosphère représenteraient une limitation insurmontable. De très nombreux instruments de mesure (goniomètres, théodolites, sextants, etc.) utilisent une lunette terrestre, et il est impossible de citer toutes les techniques qui les emploient. On a souvent besoin de superposer à l'image un réticule (couple de deux fils perpendiculaires matérialisant un point) ou une échelle graduée, tracée sur une surface transparente. Il suffit de placer ces dispositifs dans le plan focal, là où se forme l'image réelle intermédiaire.

On appelle *télémètre* un instrument servant à mesurer les distances. Son principe est de capter les rayons lumineux provenant de l'objet par deux objectifs éloignés d'une distance *d*. Un système de miroirs les renvoie vers deux oculaires où les deux images sont observées simultanément (*fig.* 100). Si la distance de l'objet est D, les directions des rayons font entre elles l'angle : $\alpha = d/D$. Il est possible de faire coïncider les deux images en manœuvrant un prisme mince qui introduit sur les rayons la déviation α. L'incertitude est proportionnelle à D^2, et inversement proportionnelle à *d*. Des appareils de 2 m de long sont utilisés jusqu'à des distances de 10 km. Ce type d'instrument est cependant supplanté par les télémètres à laser, dont la précision est constante, quelle que soit la distance. Ce sont en fait des radars optiques qui mesurent la durée d'aller-retour d'un flash lumineux. Les télémètres à deux objectifs continuent néanmoins d'être utilisés, sur des appareils photographiques par exemple.

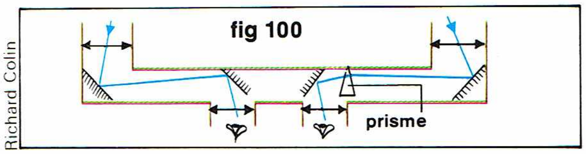

Lunette astronomique

Dès la fin du XVI^e siècle, les lunettes astronomiques ont été employées, et ont fait largement progresser la connaissance du ciel. Mais les physiciens se heurtaient au problème de la correction de l'aberration chromatique qui, d'après Newton, était insoluble. Ce défaut est cependant moins gênant si la distance focale est grande, et les astronomes construisirent des lunettes de 50 m de haut. Vers 1753, Dollond introduisit le doublet achromatique, mais il subsiste une aberration résiduelle qu'on appelle spectre secondaire et qu'on atténue comme avant, en augmentant la focale.

Le pouvoir séparateur est donné par la formule suivante :

(12) $$\varepsilon = \frac{0{,}6\ \lambda}{F \sin \alpha}$$

α étant le demi-angle d'ouverture. Ce dernier est égal à D/2F, où D est le diamètre de l'objectif et F sa distance focale.

On a donc la relation simplifiée :

$$\varepsilon = \frac{12''}{D}$$

D étant exprimé en centimètres. Mais, lorsque l'objectif est suffisamment grand pour séparer deux points, encore faut-il que l'œil soit capable de les distinguer. Il existe un pouvoir séparateur intrinsèque dû à la structure cellulaire de la rétine. On sait que ce dernier, dans les meilleures conditions, est égal à une minute d'arc. Pour profiter au maximum de la performance de l'instrument, il faut que $G\ \varepsilon > 1'$, soit :

$$\frac{F\ 12''}{f\ \ D} > 1'$$

L'oculaire doit donc avoir une puissance assez forte. Lorsqu'on forme l'image sur une plaque photographique, c'est la taille des grains d'argent contenus dans l'émulsion qui détermine la plus petite dimension observable d'un objet. Elle est de l'ordre de 0,02 mm, et l'on voit par conséquent qu'il faudrait une focale très longue pour que le pouvoir séparateur soit limité uniquement par la diffraction. La photographie utilise donc mal les instruments astronomiques, sauf ceux de petite dimension.

La supériorité de la photographie sur l'œil apparaît néanmoins si l'on considère la quantité minimale de lumière qui peut être détectée. L'œil repère instantanément un objet, mais une observation prolongée n'apporte rien. Par contre, une émulsion, qui, après une pose de cinq minutes, atteint la sensibilité de l'œil, peut être laissée à impressionner pendant plusieurs heures. D'autre part, pour de grands instruments très coûteux, auxquels ont accès de nombreux laboratoires, la photographie réduit le temps d'utilisation de chacun. Lorsqu'on observe des étoiles, on ne voit jamais de détail, quel que soit le grossissement, mais un cercle lumineux qui est la tache de diffraction. La totalité de la lumière passant dans l'objectif traverse l'oculaire et la pupille de l'œil. Le gain en luminosité, qui peut être énorme pour de grands instruments, peut être constaté avec de simples jumelles : on y voit beaucoup plus d'étoiles qu'à l'œil nu. Lorsque l'objet est étendu (planète), cet effet est compensé par un effet inverse : l'étalement de l'image, dû au grossissement.

Il existe un phénomène perturbateur qui nuit à tous les instruments astronomiques. C'est le fait que l'atmosphère est toujours agitée, et qu'il y a constamment des variations locales de densité de l'air. L'indice de réfraction subit des variations aléatoires dans le temps et dans l'espace. Le scintillement des étoiles vues à l'œil nu est dû à ce phénomène. La situation des observatoires modernes est toujours choisie en altitude pour cette raison. Une coupole métallique protège du vent, de l'humidité et des lumières parasites. Elle est hémisphérique, percée d'une ouverture pour l'observation, et peut tourner pour découvrir différentes régions du ciel.

La partie métallique d'un instrument, tube et support, est très importante. Toute déformation entraîne une perte de précision ; or l'axe optique doit être mobile pour être pointé sur n'importe quel point du ciel. Il faut avoir deux axes de rotation, non parallèles.

La monture la plus simple, dite azimutale, comprend un axe vertical et un autre horizontal.

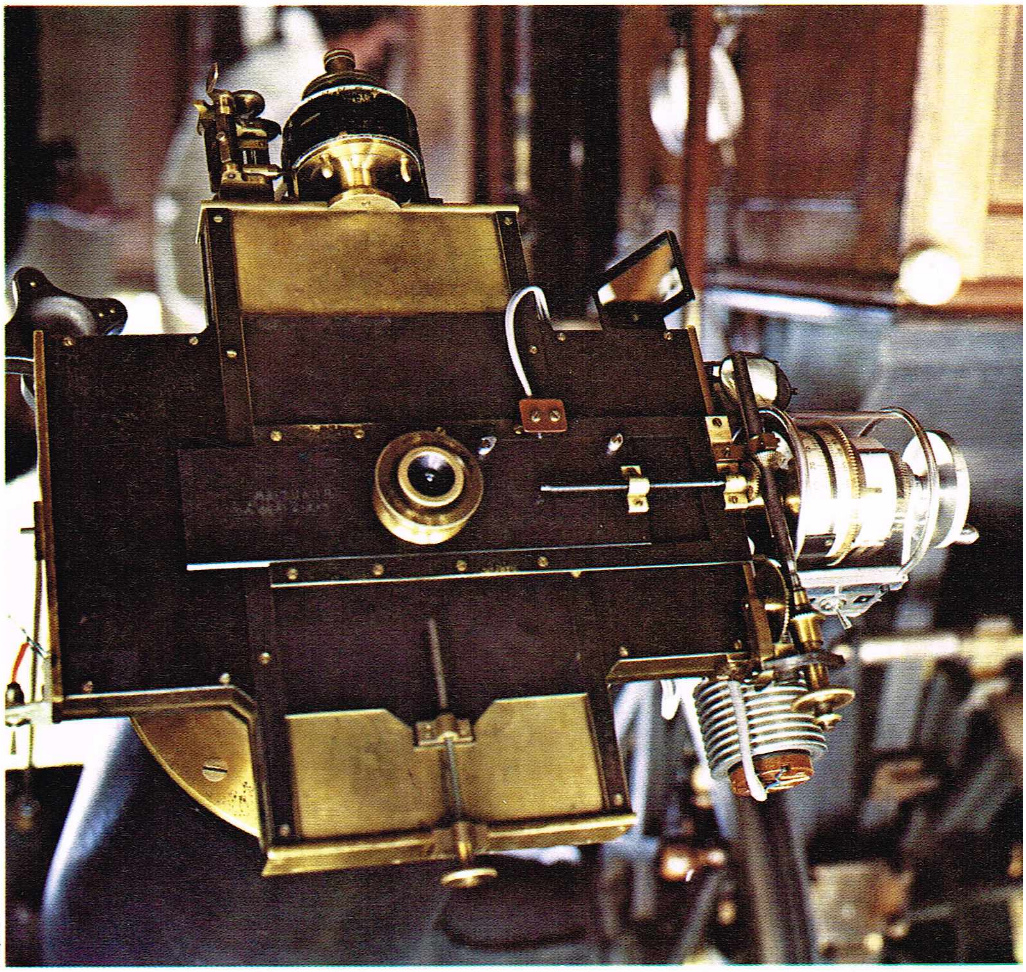

Rapho

▲ *Une* lunette astronomique *en service à l'observatoire de Besançon.*

On appelle monture équatoriale un système d'axes dont l'un est dirigé suivant la ligne des pôles (axe horaire) et l'autre suivant une direction perpendiculaire (axe équatorial). L'intérêt d'un tel montage est que, pendant que la Terre tourne, il suffit de faire tourner l'instrument en sens inverse autour de l'axe horaire pour rester toujours pointé sur le même astre. C'est la solution à peu près universellement adoptée pour tous les gros instruments.

L'amélioration du pouvoir séparateur et de la luminosité se réduit à une recherche du gigantisme.

Le tableau suivant énumère les principaux instruments mondiaux.

	Diamètre	Focale	Mise en service
Yerkes	1,02 m	19,3 m	1897
Lick	0,91 m	17,6 m	1888
Meudon	0,83 m	16,2 m	1896

Télescopes

Il paraît difficile de dépasser la taille de la lunette de Yerkes (Wisconsin). En effet, la lentille ne peut être soutenue que par sa périphérie, et son poids élevé entraîne des déformations impossibles à prévenir. On doit alors se tourner vers les objectifs à miroirs, qui, eux, peuvent reposer complètement sur une face. Taillés dans un bloc de verre et métallisés sur la surface, ils présentent d'importants avantages par rapport aux lentilles : une seule face à polir, qualité interne du verre indifférente. D'autre part, on n'est pas gêné par le spectre secondaire. Par contre, l'aberration de sphéricité ne peut pas être corrigée : c'est donc un miroir parabolique qu'il faut employer. En fait, on polit d'abord une surface sphérique, la seule que l'on sache réaliser correctement, et on retouche ensuite de quelques microns pour obtenir un parabolique.

▶ *L'observatoire du pic du Midi : une coupole métallique protège la lunette astronomique du vent, de l'humidité et des lumières parasites.*

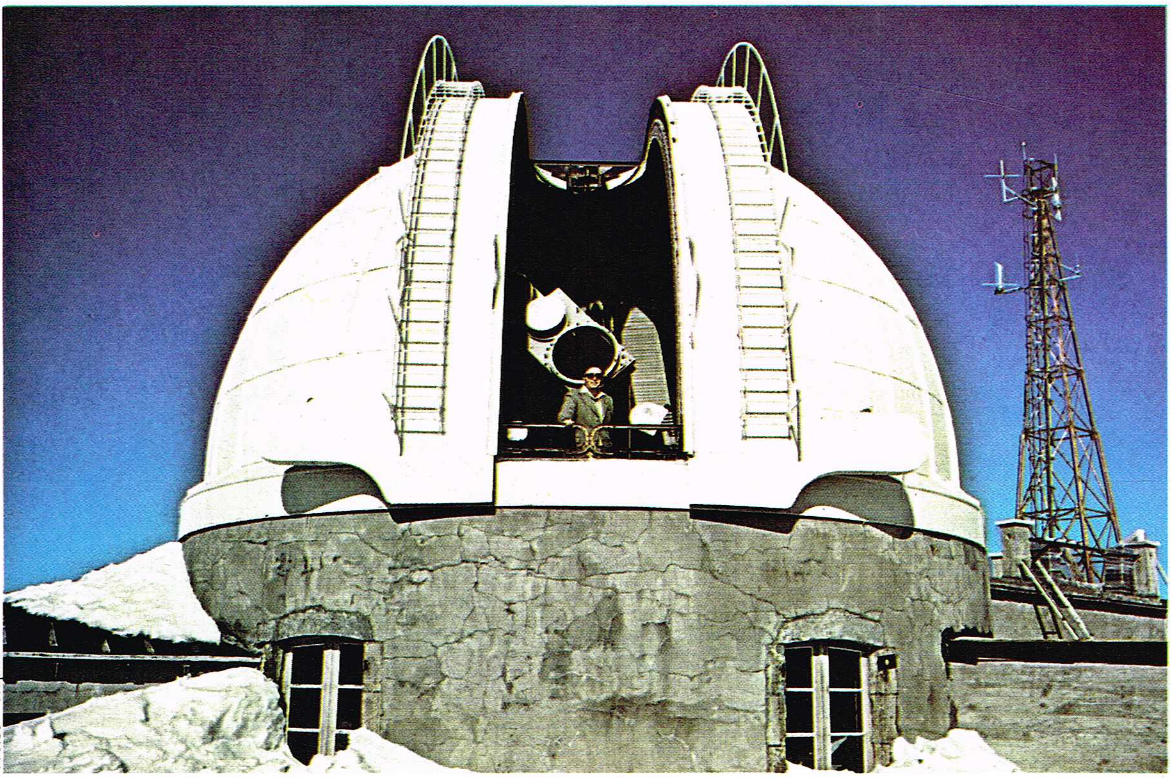

Weiss - Rapho

▼ *Figure 101 : différents systèmes de télescope.*

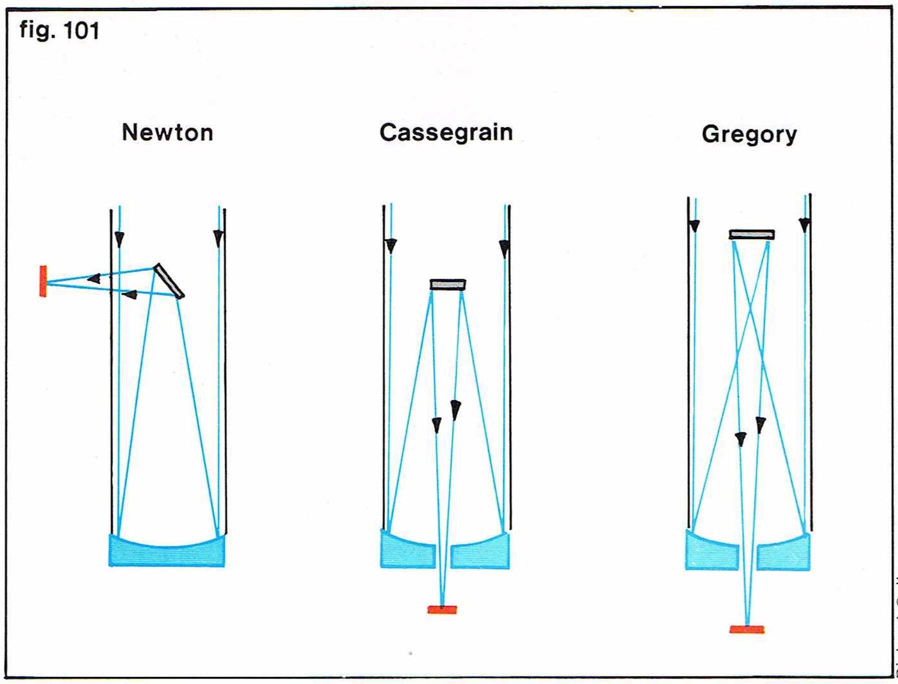

Richard Colin

Différents systèmes sont employés, pour que l'oculaire intercepte au minimum la lumière destinée à l'objectif : Newton, Cassegrain, Gregory (*fig.* 101). Tout ce qui a été dit au sujet des lunettes concernant le pouvoir séparateur, la luminosité et l'organisation des observatoires, peut être appliqué sans changement aux télescopes. Les dimensions atteintes sont simplement nettement plus grandes. Le miroir le plus grand se trouve en U. R. S. S. et mesure 6 m de diamètre. Celui du mont Palomar (Californie) mesure 5 m et pèse 14 t.

Un inconvénient du miroir parabolique est la très importante aberration de coma. Lorsqu'on s'éloigne de l'axe de quelques degrés, l'image est inutilisable; le champ est donc très réduit. En 1930, Schmidt a proposé une solution originale : il utilise un miroir sphérique, avec une lame de verre additionnelle, non plane (*fig.* 102). Celle-ci corrige l'aberration de sphéricité, tout en permettant un champ de 20 à 30°. Il subsiste un défaut : la courbure de champ. On est donc obligé d'utiliser des plaques photographiques courbées. Un télescope fonctionne sur ce principe au mont Palomar. D'autres opticiens ont trouvé des solutions prometteuses, utilisant plusieurs miroirs ou lames correctrices (Maktusov, Linfoot, Slevogt, Baker).

Le tableau suivant indique les principaux instruments mondiaux.

	Diamètre	Focale	Mise en service
Caucase	6 m	—	en cours
Mont Palomar	5 m	16,5 m	1948
Lick	3,05 m	15,25 m	1955
Mont Wilson	2,50 m	12,60 m	1917
Mac Donald	3,05 m	15,20 m	1959
Victoria	1,83 m	9,1 m	1919
Saint-Michel-de-Provence	1,93 m	9,6 m	1958
Palomar (Schmidt)	1,80 m	3 m	1948

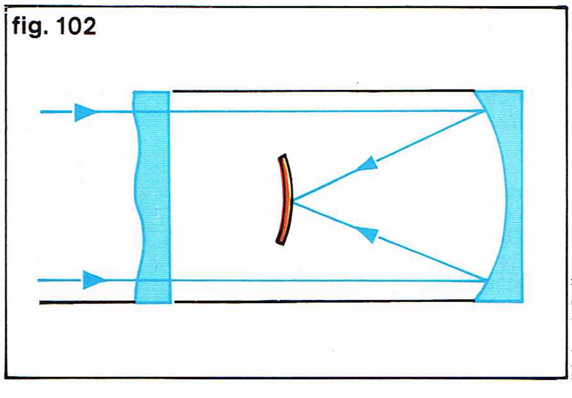

Richard Colin

▶ *Figure 102 ;* **principe du télescope de Schmidt :** *la lame correctrice, difficile à fabriquer, limite la dimension de l'appareil.*

Réalisation et contrôle des surfaces optiques

Les performances des instruments optiques, atteignant les limites permises par la diffraction, ne sont possibles que parce que les lentilles et les miroirs qui les composent sont d'excellente qualité. La condition est facile à énoncer : il faut que la distance entre la surface théorique

recherchée et la surface réalisée reste toujours inférieure à la longueur d'onde de la lumière. Les défauts d'une surface « qualité optique » doivent donc être de l'ordre du dixième de micron. On doit éviter également toute inhomogénéité dans l'épaisseur des surfaces transparentes. Les catalogues des verriers présentent actuellement plusieurs variétés de verres, ainsi que d'autres matières : fluorine, silice et même plastiques, pour les verres de lunettes.

Le poli est obtenu en interposant des abrasifs de plus en plus fins (rouge d'Angleterre). Les astronomes amateurs fabriquent ainsi leur miroir de télescope, en une centaine d'heures. La métallisation d'un miroir, pour le rendre réfléchissant, peut se faire soit par argenture chimique, soit par dépôt d'aluminium sous vide. Enfin, lorsqu'on veut limiter la réflexion parasite, en particulier dans les instruments terrestres, on dépose sur les lentilles une couche antireflet. Celle-ci est épaisse d'une fraction de micron, et élimine par interférence les réflexions multiples.

Lorsqu'on fabrique une pièce de grande dimension, comme un objectif de lunette ou de télescope, il est nécessaire de contrôler la qualité optique en cours d'exécution, pour apporter les retouches indispensables. La méthode la plus simple est celle de Foucault; la *figure* 103 en représente l'application pour un miroir concave. Une fente très fine est placée devant une source lumineuse, à proximité du centre de courbure. Il se forme une image réelle, elle aussi proche du centre. Si l'on place l'œil derrière cette image, il voit le miroir éclairé sur toute sa surface. Approchons lentement vers le haut une lame de couteau pour intercepter les rayons, au point où ils convergent : pour un miroir sphérique parfait, l'éclairement disparaît instantanément. Par contre, si certaines régions ont localement un rayon de courbure décalé, elles forment une image décalée. Certains rayons sont interceptés avant l'arrivée du couteau, d'autres après. Les plages défectueuses apparaissent donc plus ou moins lumineuses que l'ensemble, et peuvent être détectées.

Les défauts très petits sont gênants par la lumière qu'ils diffractent; mais cette propriété peut servir à les mettre en évidence. On emploie un dispositif analogue au contraste de phase utilisé en microscopie. Il a été mis au point par l'astronome Lyot pour contrôler ses objectifs de coronographe.

Autres instruments astronomiques

En astronomie, les objets observés sont très peu lumineux, et l'augmentation du flux reçu est la raison principale de la course aux grandes dimensions. On ne peut pas d'autre part augmenter énormément les temps de pose photographiques au-delà de quelques heures. Aussi la mise au point par Lallemand après 1950 d'une caméra électronique a-t-elle permis d'augmenter notablement les possibilités. Il s'agit d'un système utilisant la focalisation des électrons par des lentilles électroniques, comme dans le microscope électronique. Dans le plan focal du télescope est placée une couche sensible à la lumière qui émet des électrons lorsqu'elle est touchée par des photons. Une plaque photographique, placée après les lentilles, est impressionnée par les électrons, qui, après leur focalisation, reproduisent une image identique. L'ensemble est placé dans un vide poussé, et refroidi pour éviter les vapeurs parasites. Il n'y a aucune perte en pouvoir séparateur et un gain de temps de pose égal à 20 en moyenne.

fig. 103

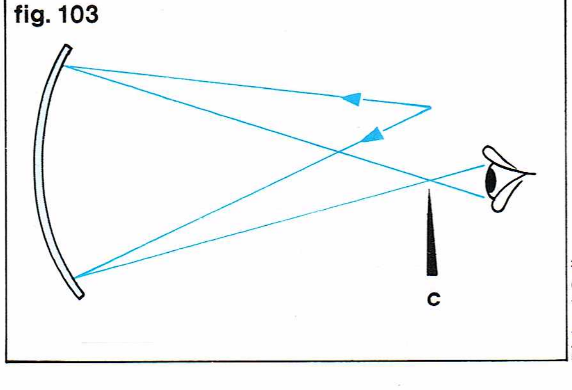

Richard Colin

◀ *Figure 103; méthode de Foucault appliquée au contrôle d'un miroir sphérique : c, lame de couteau.*

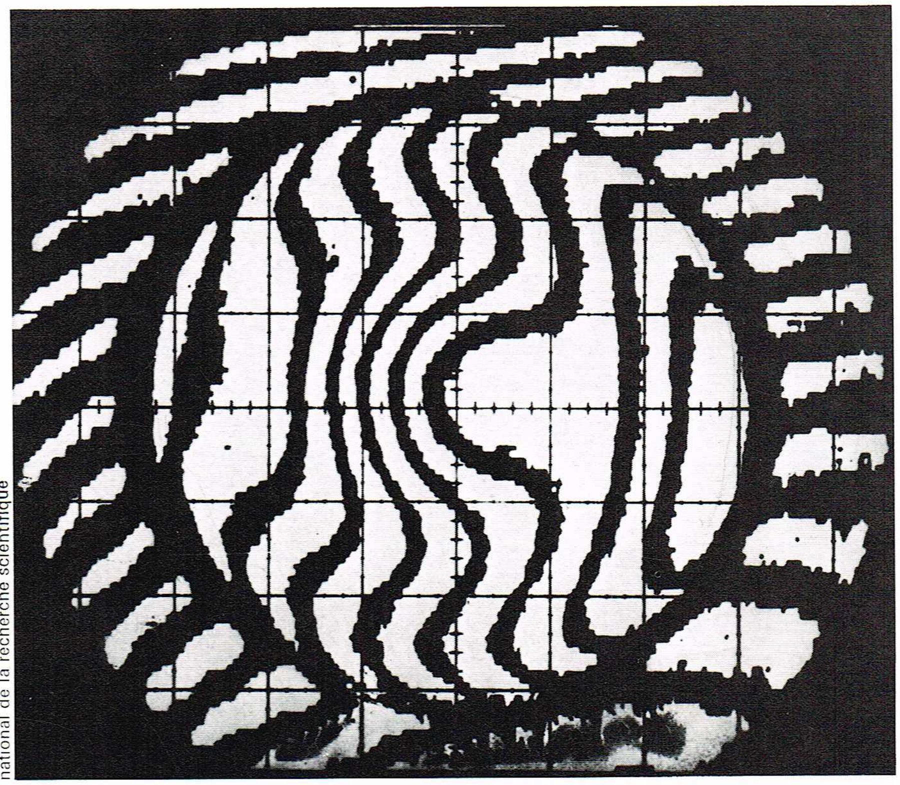

Institut d'optique du Centre national de la recherche scientifique

▲ *Interférogramme d'une lentille asphérique non traitée de 80 mm de focale ouverte à f/1. Le contrôle a été effectué sur l'axe pour le meilleur plan de mise au point. Le système de franges à la périphérie correspond à la monture métallique de la lentille qui se comporte comme un miroir dans cette région spectrale.*

La *spectroscopie* est une technique très employée en astronomie, car elle donne les seuls renseignements que l'on puisse obtenir sur la composition des objets célestes. Le montage le plus simple consiste à placer l'élément dispersif, prisme ou réseau, sur le trajet des rayons lumineux atteignant la plaque photographique. L'image circulaire de chaque étoile est remplacée par son spectre, sous forme d'une bande allongée. Si l'on désire une meilleure résolution, on procède comme pour les spectrographes terrestres : on interpose au niveau de l'image réelle une fente d'autant plus fine que la précision demandée est plus grande. Cela a l'inconvénient d'une perte de luminosité importante. Dans les observatoires modernes, une salle fixe est en général réservée au spectrographe. Les rayons lumineux y sont amenés par un système de miroirs plans, quelle que soit la direction du télescope. Le progrès le plus important depuis 1960 est l'utilisation de la spectroscopie par transformation de Fourier. C'est évidemment la méthode de choix, puisque les sources astronomiques sont très peu intenses. P. Connes a pu ainsi étudier les spectres des atmosphères de Vénus, Mars, Jupiter et Saturne.

Les instruments destinés à l'étude du Soleil forment un groupe un peu à part, bien que leur principe n'ait rien de spécifique. La source étant très lumineuse, il n'y a aucun inconvénient à utiliser plusieurs miroirs plans mobiles pour renvoyer les rayons dans une direction fixe; la construction du télescope est simplifiée, puisqu'il n'est pas orientable (cœlostat). Un exemple est la tour solaire de Meudon (1970), dont l'objectif a un diamètre de 60 cm et une distance focale de 45 m.

Le disque solaire n'est pas le seul objet digne d'intérêt. Il existe autour de lui une enveloppe gazeuse très ténue : la couronne. Sa brillance est un million de fois plus faible que celle du disque, et encore mille fois plus faible que celle de la lumière diffusée par l'atmosphère. Aussi n'était-elle observable que pendant les éclipses totales de Soleil, avant l'invention du *coronographe* de Lyot (1930). En effet, pendant ces instants privilégiés, la Lune forme, en dehors de l'atmosphère terrestre, un obstacle à la lumière du disque. Le coronographe est une lunette astronomique particulièrement soignée. Il est toujours situé en altitude pour diminuer la diffusion par l'air. L'objectif est construit de façon à éliminer tout défaut, source de diffraction, produisant une lumière parasite. Enfin, des écrans réfléchissants sont disposés pour intercepter l'image du disque solaire et l'image de la diffraction de Fraunhofer produite par la périphérie de l'objectif.

Jay Pasachoff - Rapho

On doit également à Lyot un *filtre monochromatique* qui, réglé sur une raie d'émission de la couronne, permet de rendre celle-ci visible, malgré la brillance du disque. Il utilise la propriété des lames biréfringentes placées entre deux polariseurs croisés, et dont les axes sont à 45° : seules certaines radiations, dont les longueurs d'onde sont régulièrement espacées, sont transmises. Une série de lames, dont l'épaisseur est chaque fois moitié de la précédente, est disposée entre polariseurs (*fig.* 104). Au total, une seule raie est transmise.

Radio-astronomie

La lumière visible n'est pas la seule radiation électromagnétique qui nous parvienne du ciel sans être absorbée par l'atmosphère terrestre. Il existe une autre « fenêtre » : celle des longueurs d'onde de l'ordre de 1 cm à 10 m. Le phénomène a été découvert sur certaines ondes de T. S. F. par l'ingénieur Jansky en 1931 : il y existe un bruit de fond, dû à la Voie lactée.

Le développement de la technologie des radars a ensuite permis la construction de radiotélescopes. Le principe est exactement le même que celui des télescopes optiques, mais il faut l'adapter à des longueurs d'onde beaucoup plus grandes. Pour obtenir une image, il faut atteindre des dimensions énormes. Par contre, la tolérance sur les défauts de la surface est augmentée d'autant. En pratique, les miroirs sont composés d'un tissu métallique, à mailles très larges, tendu sur une armature. Le radiotélescope parabolique orientable de Jodrell Bank en Angleterre a un diamètre de 75 m. Celui de Nançay en France possède un miroir sphérique fixe de dimension 300 $\times$ 35 m^2 et un miroir plan mobile de 200 $\times$ 40 m^2. En comparant ces dimensions avec la longueur d'onde, on voit que le pouvoir séparateur, limité par la diffraction, est très mauvais par rapport aux instruments optiques. Comme il est impossible d'augmenter la taille, on combine l'information provenant de plusieurs appareils éloignés. Ainsi, un grand nombre de petites antennes identiques alignées sur plusieurs kilomètres, et dont on additionne les signaux avec le déphasage correct, réalise une sorte de grand miroir très étroit et allongé : le pouvoir séparateur est augmenté, mais dans une seule direction. Allant plus loin encore et abandonnant complètement la notion d'image, on peut obtenir des renseignements sur une source céleste par une méthode interférométrique. Des signaux sont alors enregistrés simultanément par des récepteurs situés à plusieurs milliers de kilomètres de distance, et comparés. Une autre solution consiste à faire une mesure assez longue, et à tenir compte du déplacement dû à la rotation de la Terre dans le calcul. En l'absence d'image, il est nécessaire, pour interpréter les résultats, de faire des hypothèses sur la symétrie géométrique de la source.

Observatoires non terrestres

Les astronomes ont toujours souhaité supprimer l'atmosphère terrestre qui, sur l'ensemble du spectre des radiations électromagnétiques, ne laisse ouvertes que les deux fenêtres de la lumière visible et des ondes radio. C'est maintenant possible grâce aux ballons, aux fusées et aux satellites artificiels. Une des régions intéressantes est celle de l'ultraviolet, car la spectroscopie y donne de nombreux renseignements. Après un premier échec, les satellites américains *OAO2* et *OAO3* ont parfaitement fonctionné. Le plus perfectionné, *OAO3* (1973), contient un télescope de 82 cm de diamètre et de 3 m de long. Pour diriger l'instrument, certaines étoiles particulièrement brillantes sont repérées, et l'ensemble du satellite est alors pointé, par télécommande à partir du sol, à un dixième de seconde d'arc près.

Une nouvelle branche de l'astronomie est l'étude des sources de rayons X. Ce rayonnement a tendance à pénétrer à l'intérieur de la matière, quelle qu'elle soit. On a réussi cependant à construire des miroirs satisfaisant aux lois de l'optique géométrique, pourvu que l'incidence soit rasante. Les premiers résultats ont été obtenus avec des fusées faisant leurs observations au-dessus de l'atmosphère, pendant un temps très court. Une quarantaine de sources ont été ainsi découvertes.

En 1970, une fusée américaine lançait un satellite italien, *Uhuru*. Il était conçu pour détecter les longueurs d'onde entre 0,5 et 5 Å. Il a permis une moisson de découvertes nouvelles, probablement des étoiles à neutrons et des « trous noirs ».

BIBLIOGRAPHIE

BERKELEY PHYSICS COURSE III, Mac Graw Hill, 1965.- BERNARD M. Y., *Masers et Lasers,* P. U. F., 1964. - BORN M. et WOLF E., *Principles of Optics,* Pergamon Press, 1959. - BOUASSE, *Optique géométrique supérieure,* Delagrave, 1917. - BOUTRY G. A., *Optique instrumentale,* Masson, 1946. - BROTHERTON M., *Fonctionnement et utilisation des masers et lasers,* Dunod, 1970. - BRUHAT G. et KASTLER A., *Optique,* Masson, 1953. - BRUHAT G. et MARÉCHAL A., *Optique géométrique,* Masson, 1956. - CAUCHOIS Y., *Atomes, Spectres, Matière,* Albin Michel, 1952. - COUDERC A. et DANJON A., *Lunettes et Télescopes,* éd. *Revue d'optique,* 1935. - FEYNMANN R. P., *Lectures on Physics I,* Addison-Wesley, 1963. - FLEURY G. et MATHIEU J.-P., *Images optiques, Interférences,* Eyrolles, 1956. - FRANCON M., *Diffraction, cohérence en optique,* Gauthier-Villars, 1964 ; *le Contraste de phase,* éd. *Revue d'optique,* 1950 ; *Progress in Microscopy,* Pergamon Press, 1961 ; *Holographie,* Masson, 1969. - FRANCON M. et MARÉCHAL A., *Diffraction,* éd. *Revue d'optique,* 1951. - GLAFKIDES P., *Chimie et physique photographiques,* Paul Montel, 1966. - GOODMAN J. W., *Introduction à l'optique de Fourier et à l'holographie,* Masson, 1972. - HANDBUCH DER PHYSIK, volume XXIV, Springer, 1956. - JOUGUET M., *Ondes et Corpuscules,* Eyrolles, 1963. - MARÉCHAL A., *Imagerie géométrique,* éd. *Revue d'optique,* 1951. - MARÉCHAL A. et TERRIEN J., *Optique théorique,* P. U. F., 1971. - TERRIEN J., *la Microscopie,* P. U. F., 1968 ; *Optique astronomique,* P. U. F., 1972. - WRIGHT W. D., *la Vision des couleurs,* in *Atomes* n° 267, 1969.

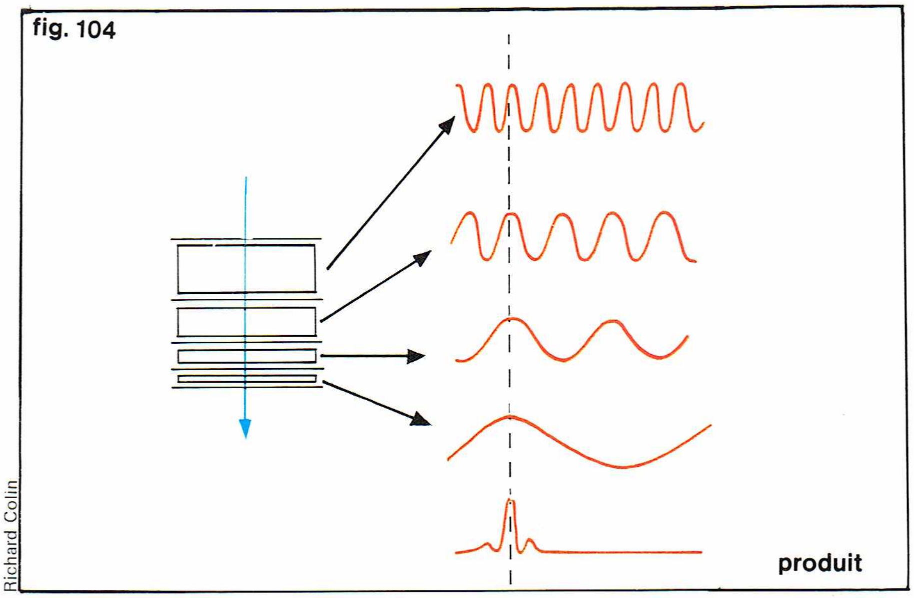

▲ *Figure 104 : filtre de Lyot et spectre des radiations transmises par les différentes lames.*

◀ *Page ci-contre, l'observatoire astronomique de Big Bear (États-Unis).*

▼ *Une des nombreuses installations de l'observatoire de radio-astronomie de Nançay (Sologne).*

De Sazo - Rapho

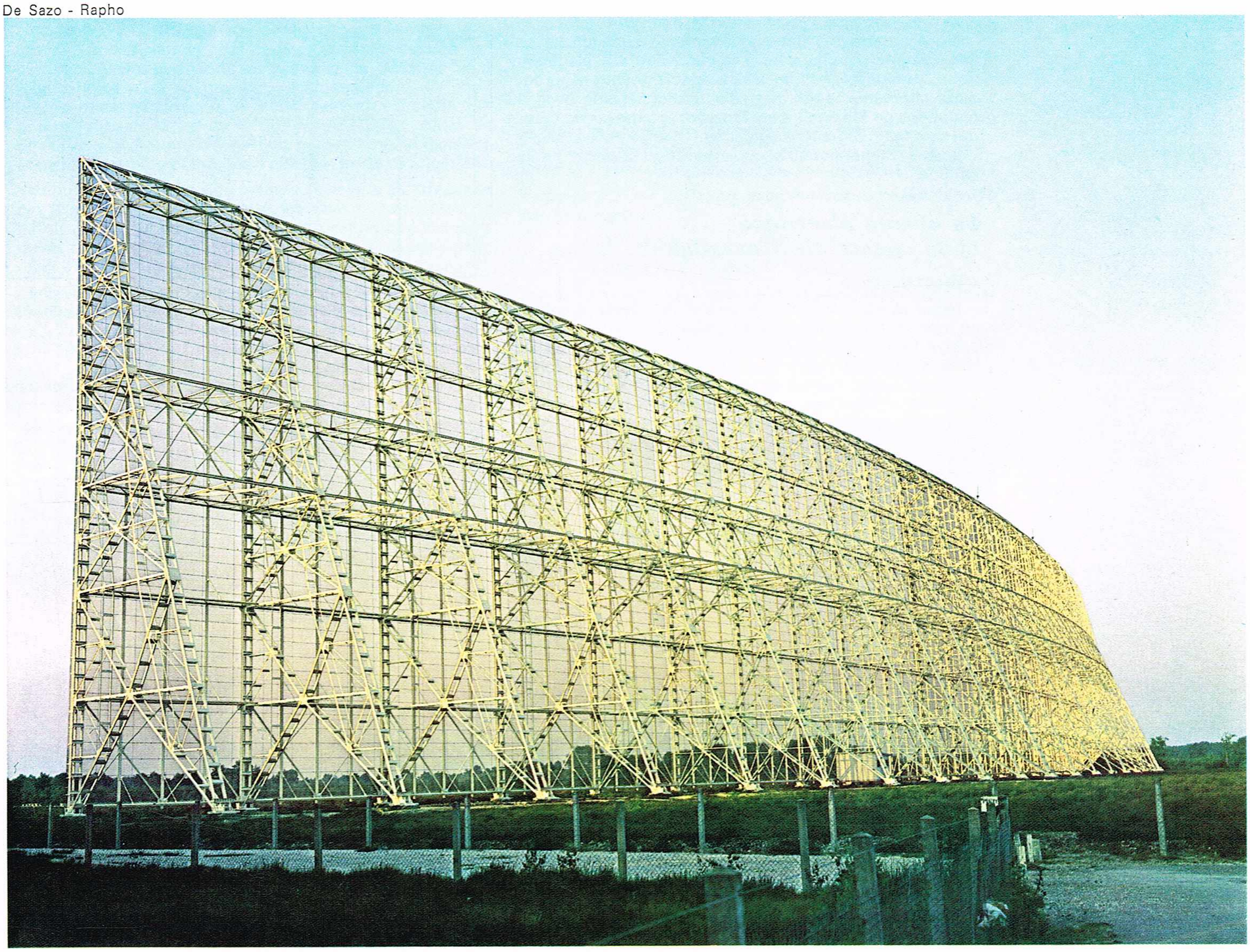

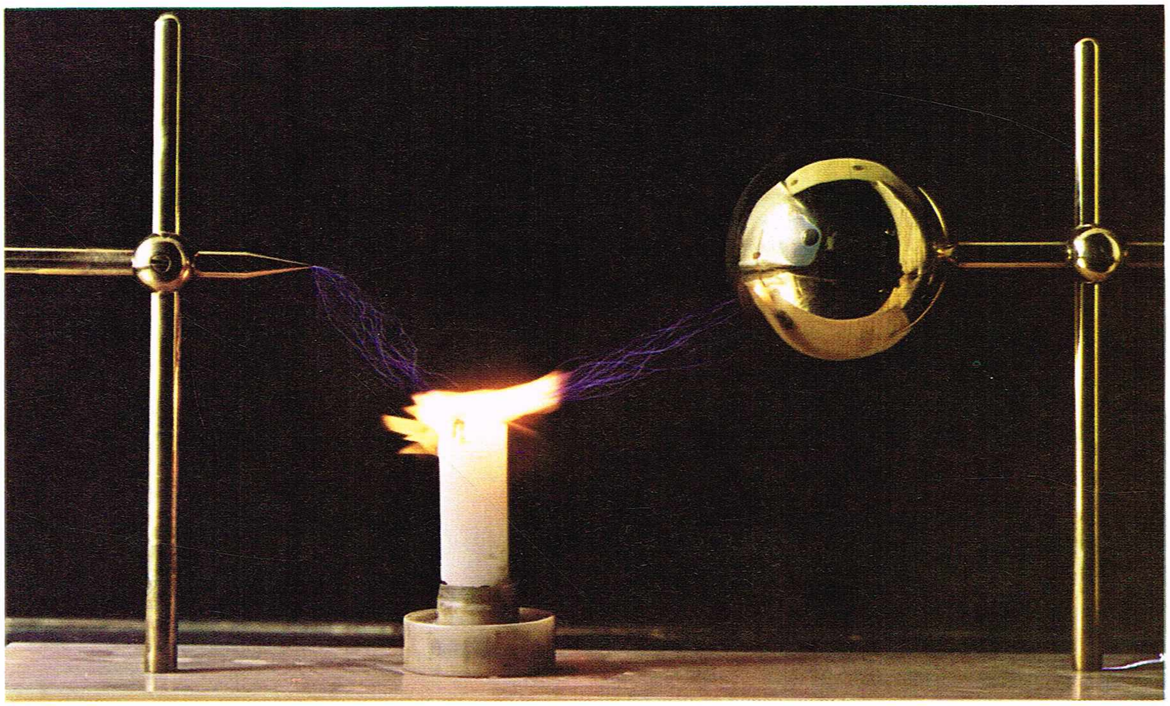

E. Rousseau - Snark International

▶ *Ionisation dans les flammes; ici, décharge d'un électroscope à travers la flamme d'une bougie.*

ÉLECTRICITÉ

Nous aborderons dans ce chapitre l'étude de ce que l'on désigne sous le nom d' « électricité ». L'électrostatique, la magnétostatique, les courants continus et les courants alternatifs, ainsi que l'électromagnétisme avec les équations de Maxwell, constitueront le canevas de l'étude qui sera faite. Signalons également que les milieux diélectriques et magnétiques occuperont aussi la place qui leur est due.

La charge électrique et le champ électrostatique

L'électrisation

Nous allons introduire la notion de *charge électrique* en montrant ce qu'est le *phénomène d'électrisation*. Pour cela, il faut distinguer deux catégories de corps : les isolants et les conducteurs. Certains corps frottés par exemple avec des tissus attirent des poussières; ces corps frottés sont dits « électrisés par frottement ». Ils acquièrent et conservent l' « électrisation »; ce sont les *isolants*. Les autres corps acquièrent ou n'acquièrent pas, mais ils ne conservent de toute manière pas l' « électrisation »; ce sont les *conducteurs*.

Il existe d'autres procédés d'électrisation. Un corps peut en effet devenir électrisé par contact avec un autre corps électrisé. Il devient alors capable d'attirer des poussières. L'électroscope permet de constater cette électrisation. Il en existe deux types : à feuilles et à aiguilles.

— L'*électroscope à feuilles* (*fig.* 1) est constitué d'une boule de métal et d'une tige également en métal, terminée par deux feuilles d'or très fines (de l'ordre de quelques microns). L'approche d'un corps électrisé fait écarter les feuilles d'or.

— L'*électroscope à aiguille* (*fig.* 2) comporte, quant à lui, une tige de métal et une aiguille métallique qui peut pivoter autour d'un axe O en faisant un certain angle avec la tige. Là encore, l'approche d'un objet électrisé fait s'écarter l'aiguille métallique de la tige.

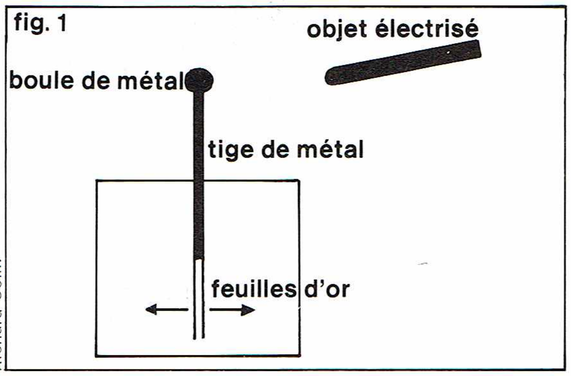

Richard Colin

▶ *Figure 1 : principe de l'électroscope à feuilles d'or.*

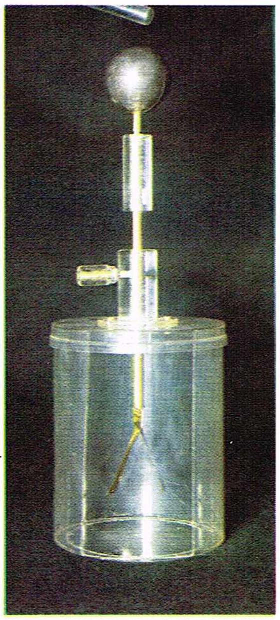

I.G.D.A. - Bevilacqua

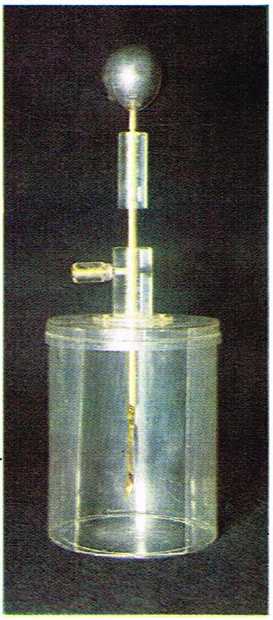

I.G.D.A. - Bevilacqua

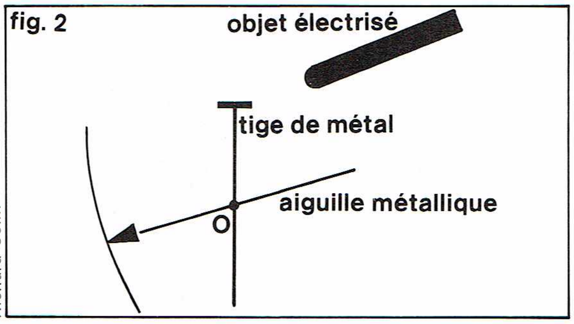

Richard Colin

▶ *A gauche, phénomène de l'électrisation sur un électroscope à feuilles utilisé en laboratoire. A droite, figure 2 : principe de l'électroscope à aiguille.*

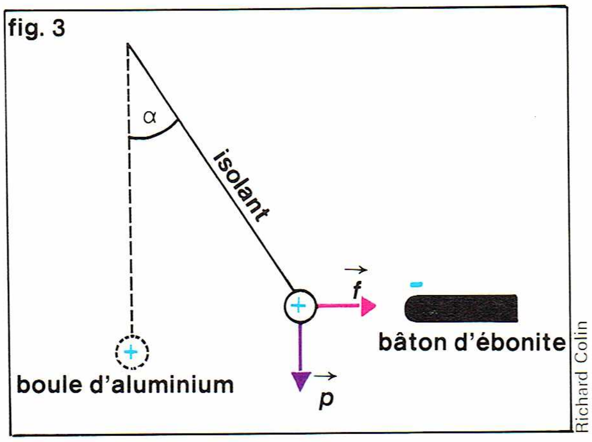

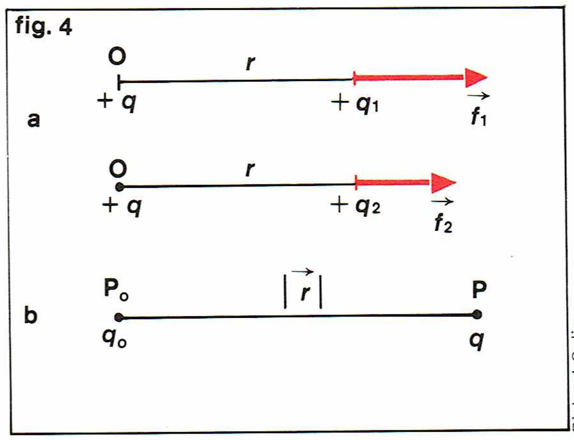

◀ *A gauche, figure 3 : la boule électrisée positivement est attirée par le bâton d'ébonite électrisé négativement.*

A droite, figure 4 : a, le rapport de la force sur la charge correspondante est constant : $\frac{\vec{f_1}}{q_1} = \frac{\vec{f_2}}{q_2}$; *b, force qui s'exerce entre 2 charges q et q_0 situées dans le vide à une distance $|\vec{r}|$ l'une de l'autre :* $\vec{f} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_0 q}{r^3}\vec{r}$.

Les charges électriques

La notion de charge électrique va à présent apparaître clairement si l'on considère l'expérience suivante (*fig.* 3) : soit une tige d'isolant terminée par une petite boule d'aluminium. Supposons que la boule soit électrisée positivement. L'approche d'un bâton d'ébonite électrisé négativement produit une attraction de la boule par ce bâton d'ébonite. La tige fait un angle α par rapport à sa position initiale. Si $\vec{p}$ est le poids de la boule, alors, la force d'attraction est donnée par $\vec{f} = \vec{p}$ tg α.

Si l'on diminue la distance entre le bâton d'ébonite et la boule, on constate que l'angle α croît, donc $\vec{f}$ croît ; $\vec{f}$ est une fonction décroissante de la distance.

Ainsi, la notion de charge ponctuelle est liée à la distance. Qualitativement, la charge apparaît comme un corpuscule électrisé dont les dimensions linéaires sont négligeables vis-à-vis des distances considérées.

Une autre expérience va nous permettre d'avoir une approche quantitative de la notion de charge. Ainsi, si, dans l'expérience précédente, on garde la même distance entre la boule et le bâton, mais que l'on frotte plus le bâton d'ébonite, on constate que la force $\vec{f}$ est plus grande, car α est plus grand. La notion de *quantité de charge* sur le bâton d'ébonite est liée à cette force. Supposons alors qu'en un point O on place une charge $+q$ ponctuelle (*fig.* 4a). Plaçons à une distance de O une charge ponctuelle $+q_1$; elle est repoussée avec une force $\vec{f_1}$. Recommençons l'expérience en remplaçant la charge $+q_1$ par une autre charge ponctuelle $+q_2$. On constate que, si $q_1 > q_2$, alors $\vec{f_1} > \vec{f_2}$, et en plus que $\frac{\vec{f_1}}{q_1} = \frac{\vec{f_2}}{q_2}$. De plus si $q_1 = nq_2$, alors $\vec{f_1} = n\vec{f_2}$, et à $q_1 + q_2$ correspond la force $\vec{f_1} + \vec{f_2}$. Donc la charge électrique est une grandeur mesurable.

La loi de Coulomb va permettre d'exprimer quantitativement la valeur de la force $\vec{f}$ qui s'exerce entre deux charges situées à une distance $|\vec{r}|$ l'une de l'autre (*fig.* 4b).

Soit deux charges q_0 et q situées à une distance $|\vec{r}|$ l'une de l'autre. Coulomb eut l'idée d'introduire une analogie de forme d'interaction entre les particules q_0 et q et l'interaction de gravitation entre deux masses matérielles $\left(\text{il s'agit d'une forme d'interaction coulombienne en } \frac{1}{r^2}\right)$.

Étant donné que l'on constate qu'il s'exerce entre q_0 et q une force $\vec{f}$, on peut alors écrire d'après cette analogie :

$$\vec{f} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_0 q}{r^3}\vec{r}$$

ε_0 étant la *permittivité diélectrique du vide.*

Cette loi est la **loi de Coulomb,** qui s'énonce ainsi : *deux charges électriques q et q_0, placées dans le vide à la distance $|\vec{r}|$ l'une de l'autre, exercent une force représentée par le vecteur :*

$$\vec{f} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_0 q}{r^3}\vec{r} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_0 q}{r^2}\vec{u} \quad (\vec{u} \text{ tel que } \vec{r} = r\vec{u})$$

répulsive ou attractive selon que les charges sont de même signe ou non.

Dans le système M. K. S. A. :

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi \cdot 10^9} \quad \text{et} \quad \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9 \cdot 10^9$$

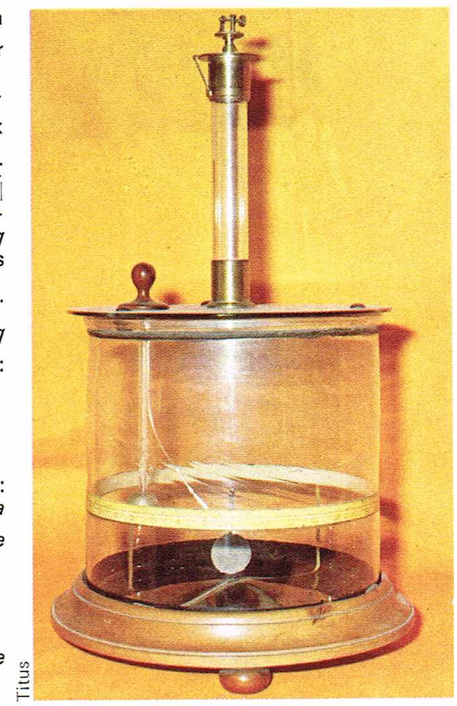

▲ *La balance de Coulomb.*

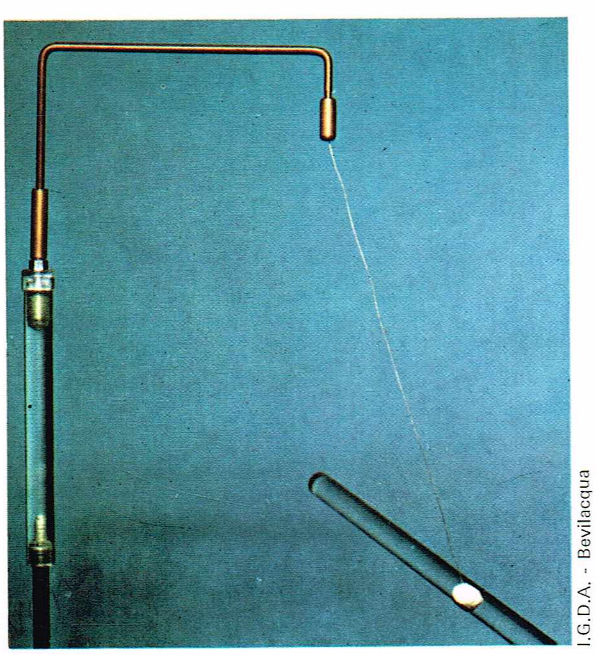

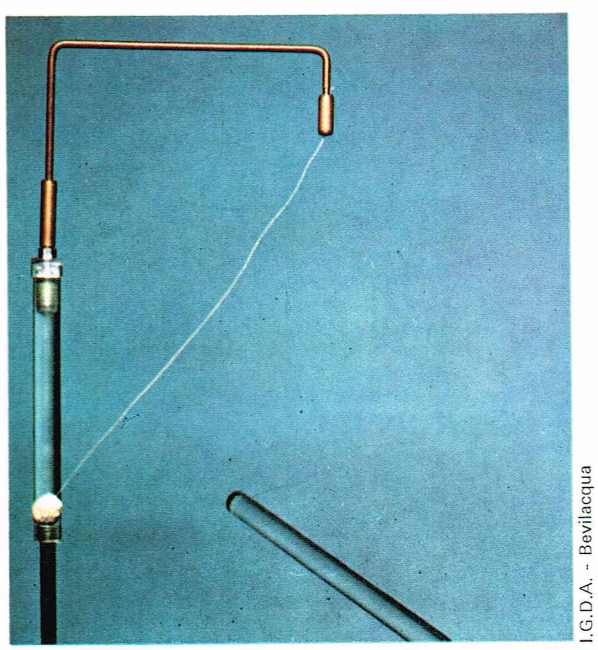

◀ *Pendule électrique : quand la petite boule parvient à toucher la baguette électrisée (photo de gauche), l'attraction se change en répulsion (photo de droite).*

▶ *Figure 5 : à tout point B de l'espace situé à une distance $|\vec{r}|$ de A correspond le vecteur champ électrique $\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q_0}{r^2} \vec{u}$.*

fig. 5

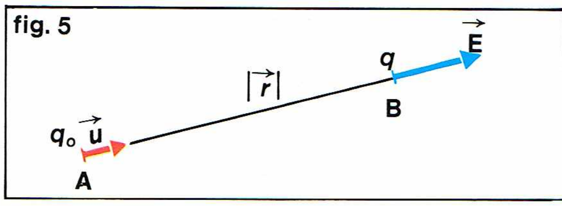

Le champ électrostatique

Nous allons définir ce qu'est le champ électrostatique créé par une charge unique, puis celui créé par un ensemble de charges.

Considérons donc, en premier lieu, une charge q_0 placée en un point A (*fig.* 5). En un point B, situé à une distance $|\vec{r}|$ de A, où l'on a mis une charge q, cette charge q_0 crée la force $\vec{f} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q_0 q}{r^2} \vec{u}$.

A tout point B de l'espace, différent de A, on fait correspondre un vecteur $\vec{E}$, appelé « vecteur champ électrique », défini par $\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q_0}{r^2} \vec{u}$.

Si q_0 est positif, par définition $\vec{E}$ est alors dirigé selon $\vec{u}$. Si en B on met une charge q, cette charge est soumise alors à la force $\vec{f} = q\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q_0 q}{r^2} \vec{u}$.

Au point de vue des dimensions, $\vec{E}$ a les dimensions du rapport d'une force par une charge, soit, en M. K. S. A. : newton/coulomb, ou encore volt/mètre.

Un ensemble de charges peut aussi créer un champ électrostatique en un point. Soit donc dans le vide q_i particules, i variant de 1 à n, situées respectivement à des distances $|\vec{r_i}|$ d'une particule q située en un point P. Chaque particule q_i exerce sur la charge q la force :

$$\vec{f_i} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q q_i}{r_i^2} \vec{u_i}$$

donc la particule q est soumise à la force totale :

$$\vec{f} = \sum_{i=1}^{i=n} \vec{f_i} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{q_i}{r_i^2} \vec{u_i}$$

$$\vec{f} = q \left[\sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q_i}{r_i^2} \vec{u_i} \right] = q\vec{E}_P$$

$\vec{E}_P$ désignant le champ total créé au point P par l'ensemble des charges q_i :

$$\vec{E}_P = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{q_i}{r_i^2} \vec{u_i}$$

Ce champ $\vec{E}_P$ est défini pour tous les points P différents des points P_i où sont situées les charges q_i.

fig. 6

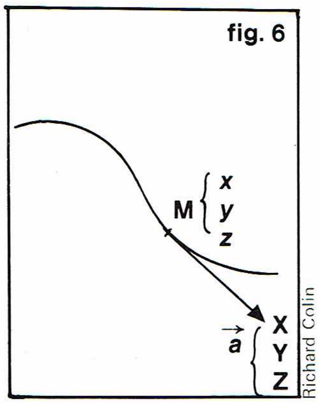

▲ *Figure 6 : définition d'une ligne de champ.*

Le potentiel électrostatique

Avant de définir le potentiel électrostatique, nous allons d'abord faire quelques rappels mathématiques.

Rappels mathématiques

Champ de vecteurs

Soit en un point de l'espace M (x, y, z) un vecteur $\vec{a}$ de composantes (X, Y, Z) qui sont des fonctions continues et dérivables de (x, y, z) sur un repère cartésien.

Une *ligne de champ* est une courbe telle qu'en chacun des points de cette courbe, le vecteur $\vec{a}$ soit porté par la tangente (*fig.* 6).

Un *tube de champ* est formé par l'ensemble des lignes de champ s'appuyant sur une courbe fermée. On définit de même la *circulation* d'un vecteur $\vec{a}$ le long d'une courbe Γ.

Soit en effet une courbe Γ quelconque et un point M en lequel le vecteur $\vec{a}$ est tangent à la courbe Γ (*fig.* 7). Si le point M se déplace sur Γ d'une quantité infinitésimale $\vec{MM'} = \vec{dl}$, on définit alors la circulation élémentaire de $\vec{a}$ par la formule $dC = \vec{a} \cdot \vec{dl}$.

Comme $\vec{a}$ a pour composantes X, Y, Z, et $\vec{dl}$ a pour composantes dx, dy, dz :

$$dC = X\,dx + Y\,dy + Z\,dz = \vec{a} \cdot \vec{dl}$$

La circulation de $\vec{a}$ le long d'un arc fini AB de Γ est :

$$C_A^B = \int_A^B dC = \int_A^B \vec{a} \cdot \vec{dl}$$

et le long d'une courbe fermée :

$$C_A^A = \oint dC = \oint \vec{a} \cdot \vec{dl}$$

Notion de potentiel scalaire

Supposons que $dC = \vec{a} \cdot \vec{dl}$ soit une différentielle totale exacte. Alors la circulation de $\vec{a}$ entre les points A et B ne dépend pas de la trajectoire suivie pour aller de A vers B.

fig. 7

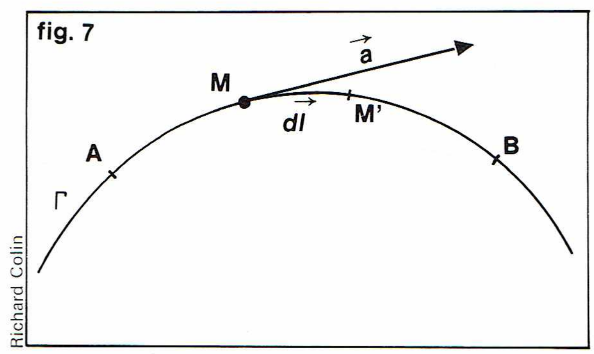

▶ *Figure 7 : si $\vec{dl}$ est un déplacement élémentaire sur le tronçon de courbe AB, la circulation élémentaire du vecteur $\vec{a}$ est $dC = \vec{a} \cdot \vec{dl}$.*

ABRÉVIATIONS UTILISÉES EN ÉLECTRICITÉ

- $\vec{B}$: champ magnétique
- C : circulation
- C : capacité
- $\vec{E}$: champ électrique $\vec{E} = \vec{E_e} + \vec{E_m}$
- $\vec{E_e}$: champ électrostatique
- $\vec{E_m}$: champ magnétique
- $\vec{E_i}$: champ électromoteur d'induction
- $\vec{E_t}$: champ total
- E : énergie fournie par un circuit à un générateur
- $\mathcal{E}$: f. é. m.
- $\mathcal{E}'$: f. c. é. m.
- e : force électromotrice d'induction
- e : distance entre les plaques d'un condensateur
- I : intensité
- j : $\sqrt{-1}$
- $\vec{J}$: vecteur intensité d'aimantation
- $\vec{J}$: vecteur densité de courant
- L : coefficient de self-induction
- M : coefficient d'induction mutuelle
- $\mathcal{M}$: moment
- m : masse magnétique
- $\vec{n}$: normale
- N : nombre de spires d'un solénoïde
- N : fréquence (courant alternatif)
- $\vec{p}$: moment électrique
- $\vec{dp}$: moment dipolaire
- $\vec{P}$: vecteur polarisation
- q : charge
- R : résistance
- T : période
- u (t) : potentiel aux bornes d'un condensateur
- V : potentiel
- V* : potentiel magnétique
- V : vitesse
- v : volume
- W : travail
- W : énergie électrostatique
- Z : impédance
- γ : conductivité
- Γ : courbe
- Γ : moment
- ε : constante diélectrique
- ε_0 : permittivité diélectrique du vide
- ε_r : permittivité relative du milieu
- Φ : flux élémentaire
- Φ_c : flux élémentaire coupé
- ρ : résistivité
- ρ : rayon de courbure
- ρ_v : densité volumique de charge
- ρ_p : distribution volumique de charges fictives
- σ : densité de charges surfaciques
- σ : densité superficielle de masse magnétique
- σ_p : densité superficielle de charges fictives
- χ_e : susceptibilité électrique du milieu
- Ω : angle solide

▶ *Tableau récapitulatif des noms et symboles correspondants, utilisés dans le texte d'Électricité.*

Elle ne dépend que de la position des points A et B. En ce cas, la circulation le long de toute ligne fermée est nulle.

On dit alors que le vecteur $\vec{a}$ dérive d'un potentiel qui est une fonction scalaire que l'on note, par exemple, V.

Ainsi $$\int_A^B \vec{a} \cdot d\vec{l} = \int_A^B dC = V_A - V_B$$

où $V_A - V_B$ est la diminution de potentiel. En ce cas, la relation de définition peut s'écrire :

$$dC = -dV = \vec{a} \cdot d\vec{l}$$

On voit ainsi que le potentiel n'est défini qu'à une constante près.

Or : $$-dV = -\frac{\partial V}{\partial x} dx - \frac{\partial V}{\partial y} dy - \frac{\partial V}{\partial z} dz$$

$$= X\, dx + Y\, dy + Z\, dz$$

donc $$X = -\frac{\partial V}{\partial x}$$

$$Y = -\frac{\partial V}{\partial y}$$

$$Z = -\frac{\partial V}{\partial z}$$

Ce que l'on peut traduire en disant que $\vec{a} = -\overrightarrow{\text{grad}}\, V$.

Donc les composantes de $\overrightarrow{\text{grad}}\, V$ sont $\frac{\partial V}{\partial x}\ \frac{\partial V}{\partial y}\ \frac{\partial V}{\partial z}$

Plus généralement, la relation $dV = -\vec{a} \cdot d\vec{l}$ permet de calculer la valeur de la composante a_e de $\vec{a}$ dans une direction quelconque :

$$a_e = -\frac{\partial V}{\partial e}$$

En coordonnées polaires (r, θ, φ), les déplacements élémentaires sont dr, $rd\theta$, $r \sin\theta\, d\varphi$ (nous le montrerons ultérieurement).

Ainsi $$a_r = -\frac{\partial V}{\partial r}$$

$$a_\theta = -\frac{1}{r}\frac{\partial V}{\partial \theta}$$

$$a_\varphi = -\frac{1}{r \sin\theta}\frac{\partial V}{\partial \varphi}$$

Travail des forces électrostatiques - Potentiel électrostatique

Le problème va être à présent de montrer que la circulation élémentaire du vecteur $\vec{E}$ est la différentielle totale exacte d'une fonction qui sera le *potentiel électrostatique*. Pour définir la circulation du vecteur $\vec{E}$, il faut d'abord définir le travail d'une force électrostatique.

Soit donc une charge q produisant en un point M un champ $\vec{E}_M$ (*fig.* 8). Plaçons en M une charge passive q_0, c'est-à-dire telle qu'elle ne modifie pas le champ $\vec{E}$. Le problème est de calculer le travail de la force que subit q_0.

Soit un déplacement de M vers M'; $\overrightarrow{MM'} = d\vec{l}$

$$dW = \vec{f} \cdot d\vec{l} = q_0 \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

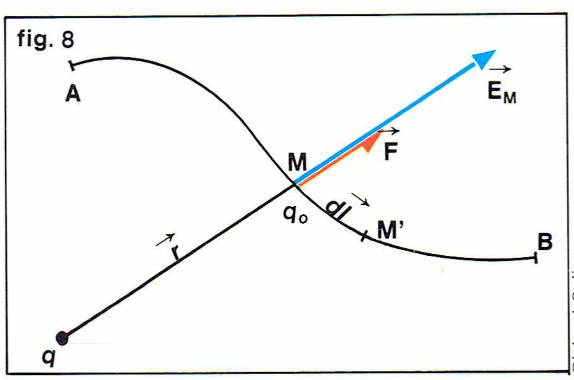

Richard Colin

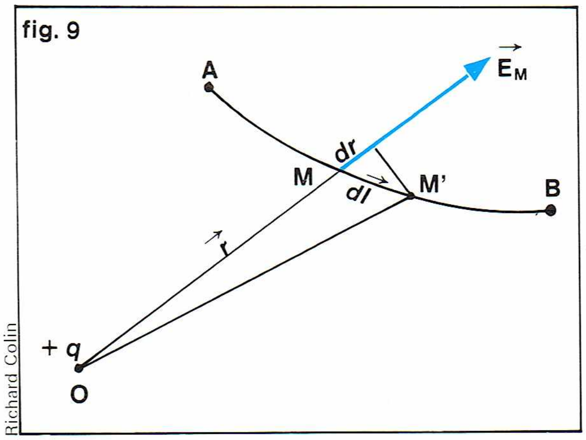

Richard Colin

◀ *Figure 9 : la circulation de $\vec{E}$ entre les points A et B ne dépend pas du chemin suivi pour aller de A en B.*

$$W_A^B = q_0 \int_A^B \vec{E}_M \cdot d\vec{l} = q_0 C_A^B$$

C_A^B étant la circulation du vecteur $\vec{E}$ le long de la courbe AB.

Donc, lorsqu'une charge électrique se déplace dans un champ électrostatique, le travail de la force qu'elle subit est égal au produit de cette charge par la circulation de ce champ électrique. Il est facile de calculer la valeur de cette circulation. En effet :

$$C_A^B = \int_A^B \vec{E}_M \cdot d\vec{l}$$

Or, d'après la *figure* 9, le champ $\vec{E}_M$ produit au point M par la charge q placée en O à la distance $\overrightarrow{OM} = \vec{r}$ de M est :

$$\vec{E}_M = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2}\vec{u}$$

$$\vec{E}_M \cdot d\vec{l} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2}\vec{u} \cdot d\vec{l} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2} dr$$

où dr est la projection de $d\vec{l}$ sur le vecteur $\overrightarrow{OM}$

donc $$\vec{E}_M \cdot d\vec{l} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2} dr$$

et $$dC = \vec{E} \cdot d\vec{l} = d\left(-\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r}\right) = -d\left(\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r}\right)$$

Nous voyons que la circulation élémentaire dC est une différentielle totale exacte; c'est la différentielle totale exacte d'une fonction V, donc $dC = -dV$. L'intégration s'en déduit facilement.

Soit $$\vec{r}_A = \overrightarrow{OA} \quad \vec{r}_B = \overrightarrow{OB}$$

On a : $$C_A^B = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B}\right)$$

Donc la circulation de $\vec{E}$ entre les points A et B ne dépend pas du chemin suivi pour aller de A en B.

Considérons à présent la circulation d'un champ électrique $\vec{E}$ produit par n charges. En un point M, le champ total est :

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^{i=n} \vec{E}_i$$

$$dC = \sum_i dC_i = \sum_i \vec{E}_i \cdot d\vec{l} =$$

$$-\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\sum_i d\left(\frac{q_i}{r_i}\right) = -d\left(\sum_i \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_i}{r_i}\right)$$

$$C_A^B = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\sum_i q_i\left(\frac{1}{r_{iA}} - \frac{1}{r_{iB}}\right) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\sum_i \frac{q_i}{r_{iA}} - \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\sum_i \frac{q_i}{r_{iB}}$$

Si les charges sont distribuées de façon continue, il faut remplacer le signe Σ par le signe $\int$.

Comme conclusion, on peut dire que, dans un champ électrostatique, la circulation élémentaire du vecteur champ est une différentielle totale exacte d'une fonction V; donc $dC = -dV$.

I.G.D.A. - Bevilacqua

▲ *L'électrophore de Volta : la plus simple des machines à induction électrostatique (Milan, musée des Sciences et des Techniques).*

◀ *Figure 8 : le travail de la force électrostatique $q_0 \vec{E}$ le long de la courbe est $W_A^B = q_0 C_A^B$.*

Palais de la Découverte, Paris

▲ ***A gauche, étincelles de 40 cm amorcées entre la terre et le corps isolé d'un visiteur porté à 300 000 volts négatifs. A droite, figure 10 : passage des coordonnées cartésiennes aux coordonnées cylindriques.***

Il s'ensuit donc que $\int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l}$ est indépendante de la trajectoire suivie pour aller de A à B et que

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$$

Le potentiel électrostatique peut être défini par l'une des deux formes :

$$dV = d\left(\sum_{i=1}^{i=n} \frac{q_i}{4\,\pi\varepsilon_0 r_i}\right)$$

ou
$$V = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{q_i}{4\,\pi\varepsilon_0 r_i} + V_0$$

où V_0 est une constante.

Si les charges sont réparties sur une surface S de densité de charge σ, ou dans un volume τ de densité volumique ρ_v, on remplace alors la formule donnant le potentiel par :

$$V = \frac{1}{4\,\pi\varepsilon_0} \iint_S \frac{\sigma dS}{r} + V_0$$

$$V = \frac{1}{4\,\pi\varepsilon_0} \iiint_\tau \frac{\rho_v d\tau}{r} + V_0$$

Comme $dC = -dV$, $C_A^B = V_A - V_B$. Donc la circulation du champ électrique entre deux points est égale à la baisse de potentiel entre ces deux points.

Nous allons à présent définir le potentiel V_0. Physiquement, ce qui est défini, c'est la différence de potentiel entre deux points A et B ou la différentielle dV. Par contre, la valeur du potentiel en un point d'un champ électrostatique dépend de la constante V_0 qui est arbitraire.

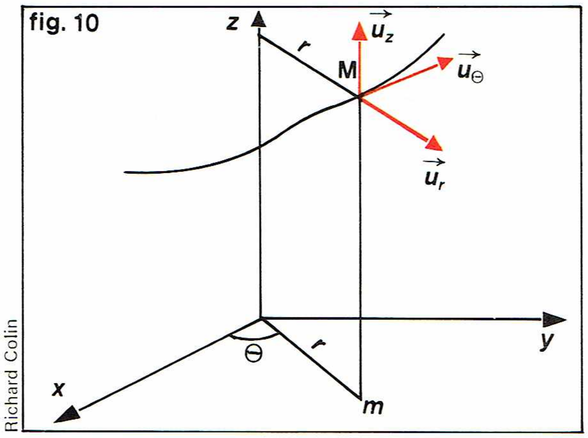

Richard Colin

Mathématiquement, on obtient l'expression la plus simple du potentiel $V = \frac{1}{4\,\pi\varepsilon_0} \sum_i \frac{q_i}{r_i}$, en choisissant $V_0 = 0$; cela revient à admettre que le potentiel est nul à l'infini, c'est-à-dire en tout point infiniment éloigné des charges créant un champ électrostatique.

Il existe une relation entre le champ et le potentiel. Puisque $\vec{E}$ dérive en effet du potentiel V, on a donc

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}\, V$$

Ainsi, dans un trièdre O, x, y, z :

$$E_x = -\frac{\partial V}{\partial x}; \quad E_y = -\frac{\partial V}{\partial y}; \quad E_z = -\frac{\partial V}{\partial z}$$

Le potentiel s'exprimant en *volts*, nous allons définir le volt à partir du travail d'une force électrostatique s'exerçant sur une charge q_0. Nous avons vu que

$$W_A^B = q_0 C_A^B = q_0\,(V_A - V_B)$$

Ainsi le volt est la différence de potentiel qui existe entre deux points soumis à un champ électrique, si le travail de la force qui s'exerce sur une charge de 1 coulomb est égal à 1 joule lorsque la charge se déplace d'un point à l'autre.

Expression du gradient en coordonnées cylindriques

S'il s'agit de passer des coordonnées cartésiennes (x, y, z) aux coordonnées cylindriques (r, θ, z) ; on a les égalités suivantes (*fig.* 10) :

$$x = r\cos\theta$$
$$y = r\sin\theta$$
$$z = z$$

Soit $\vec{u}_r$, $\vec{u}_\theta$, $\vec{u}_z$ les vecteurs unitaires dans le système de coordonnées cylindriques. Soit $\overrightarrow{MM'} = d\vec{S}$ un déplacement élémentaire du point M. Les composantes de $d\vec{S}$ sont :

$$d\vec{S} \begin{cases} dr\vec{u}_r \\ rd\theta\vec{u}_\theta \\ dz\vec{u}_z \end{cases}$$

Soit la fonction $u = u\,(r, \theta, z)$; posons que $\vec{A} = \overrightarrow{\text{grad}}\, u$. Les composantes de $\vec{A}$ sont :

$$\vec{A} \begin{cases} A_r\vec{u}_r \\ A_\theta\vec{u}_\theta \\ A_z\vec{u}_z \end{cases}$$

Or, par définition du gradient, on a l'égalité :

$$du = \overrightarrow{\text{grad}}\, u \cdot d\vec{S}$$

Soit :
$$du = A_r dr + A_\theta r d\theta + A_z dz$$

D'autre part : $du = \frac{\partial u}{\partial r} dr + \frac{\partial u}{\partial \theta} d\theta + \frac{\partial u}{\partial z} dz.$

Il s'ensuit que, dans le système de coordonnées cylindriques, les composantes de $\overrightarrow{\text{grad}}\, u$ sont :

$$A_r = \frac{\partial u}{\partial r}$$

$$A_\theta = \frac{1}{r}\frac{\partial u}{\partial \theta}$$

$$A_z = \frac{\partial u}{\partial z}$$

En coordonnées sphériques (r, θ, φ) [*fig.* 11],

$$x = r \sin\theta \cos\varphi$$
$$y = r \sin\theta \sin\varphi$$
$$z = r \cos\theta$$

$d\vec{S}$ est tel que :

$$d\vec{S} \begin{cases} dr\vec{u}_r \\ rd\theta\vec{u}_\theta \\ r \sin\theta d\varphi\vec{u}_\varphi \end{cases}$$

Soit $u = u\ (r, \theta, \varphi)$ et $\vec{A} = \overrightarrow{\text{grad}}\ u$; les composantes de A dans ce système sont : $\vec{A} \begin{cases} A_r\vec{u}_r \\ A_\theta\vec{u}_\theta \\ A_\varphi\vec{u}_\varphi \end{cases}$

$$du = A_r dr + A_\theta r d\theta + A_\varphi r \sin\theta\ d\varphi$$

D'autre part :

$$du = \frac{\partial u}{\partial r} dr + \frac{\partial u}{\partial \theta} d\theta + \frac{\partial u}{\partial \varphi} d\varphi$$

Ainsi les composantes du gradient sont :

$$A_r = \frac{\partial u}{\partial r}$$

$$A_\theta = \frac{1}{r}\frac{\partial u}{\partial \theta}$$

$$A_z = \frac{1}{r \sin\theta}\frac{\partial u}{\partial \varphi}$$

Si l'on applique ces résultats au champ électrostatique : $\vec{E}_e = -\overrightarrow{\text{grad}}\ V$, nous obtenons, par exemple en coordonnées cylindriques :

$$E_r = -\frac{\partial V}{\partial r}$$

$$E_\theta = -\frac{1}{r}\frac{\partial V}{\partial \theta}$$

$$E_z = -\frac{\partial V}{\partial z}$$

Si l'on considère le plan, la coordonnée z est supprimée. Il s'ensuit que :

$$\vec{E} = \vec{E}\ (r, \theta)\ ; \quad \text{donc } E_r = -\frac{\partial V}{\partial r}$$

$$E_\theta = -\frac{1}{r}\frac{\partial V}{\partial \theta}$$

Surfaces équipotentielles

Une surface équipotentielle est une surface où le potentiel a une valeur constante V_0. Donc $V\ (x, y, z) = V_0 =$ constante. Ainsi, en faisant varier le paramètre V_0, on a toute une famille d'équipotentielles.

Ces surfaces équipotentielles ont plusieurs propriétés.

La *première propriété* est que deux surfaces équipotentielles ne se coupent pas. En effet, aux points éventuels où ces surfaces se couperaient, on aurait deux valeurs du potentiel, ce qui est absurde.

La *deuxième propriété* est que, en tout point d'une surface équipotentielle, le vecteur champ électrique lui est normal ; on le voit de la manière suivante :

soit $$dC = -dV = \vec{E} \cdot \vec{dl}$$

Sur une équipotentielle V = constante, ce qui entraîne $dV = 0$. Donc $\vec{E}$ et $\vec{dl}$ sont perpendiculaires. Ainsi $\vec{E}$ est normal à l'équipotentielle et est dirigé vers les potentiels décroissants, puisque $\vec{E} \cdot \vec{dl} = -dV$.

Enfin la *troisième propriété* est que les lignes de champ sont les trajectoires orthogonales des surfaces équipotentielles.

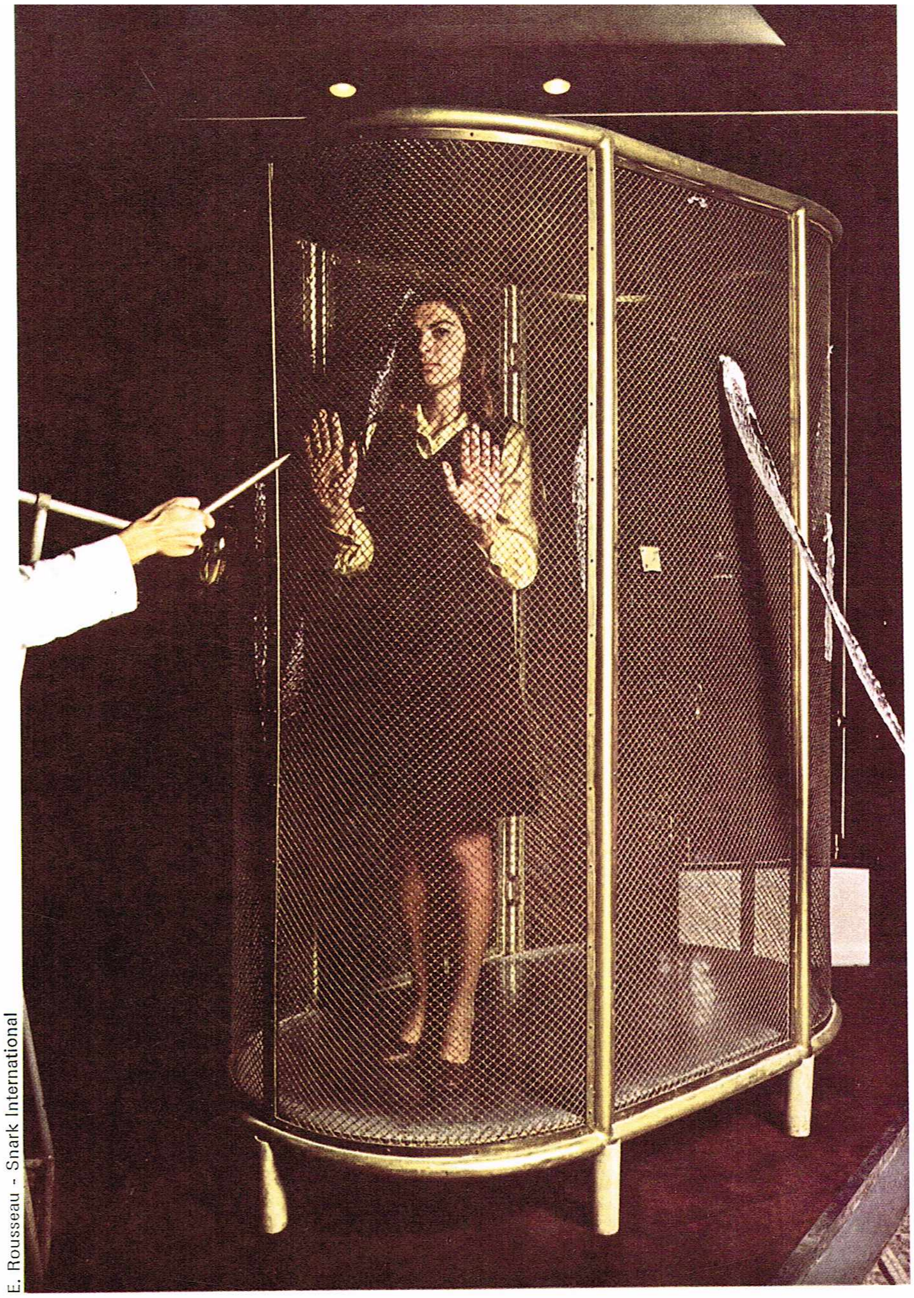

E. Rousseau - Snark International

▲ *Faraday donne, en 1843, la théorie de l'électrisation par influence et montre qu'un conducteur creux (cage de Faraday) forme écran pour les actions électriques.*

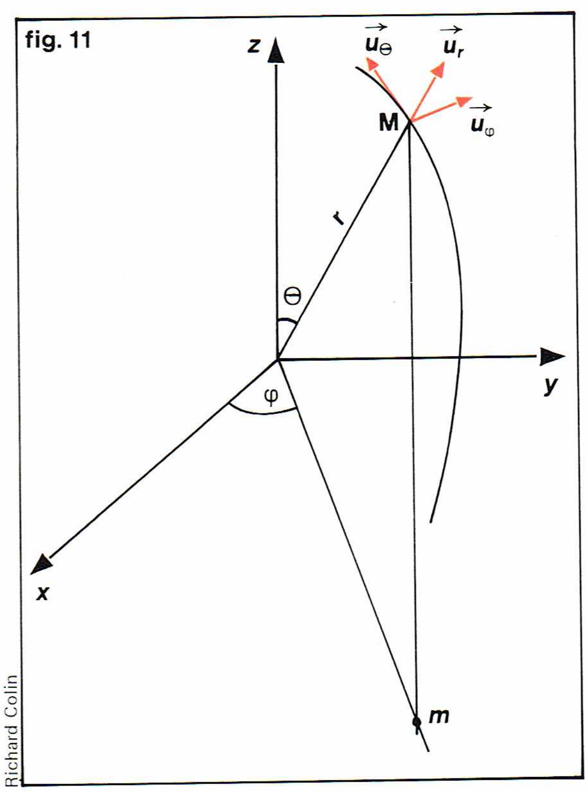

Richard Colin

◀ *Figure 11 : passage des coordonnées cartésiennes aux coordonnées sphériques.*

▶ *A gauche, figure 12 : potentiel créé par le dipôle électrique (— q, + q) en un point* M *situé à la distance* $|\vec{r}|$ *de ce dipôle. A droite, figure 13 : les « positions de Gauss » :* M *se trouve sur l'axe* AB *ou perpendiculairement à cet axe.*

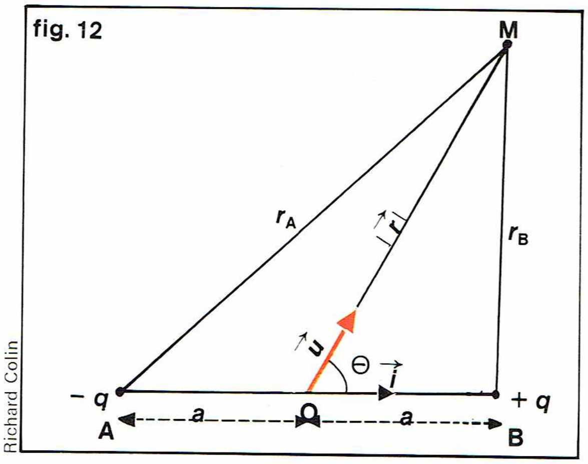

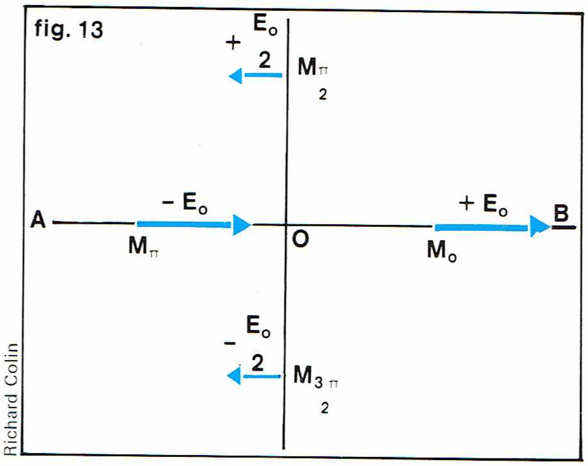

Le dipôle électrique

On appelle dipôle électrique l'ensemble de deux charges ponctuelles opposées $+q$ et $-q$ tel que leur distance $d = 2a$ soit petite par rapport aux distances où l'on étudie l'action de ce dipôle (*fig.* 12). Soit O le milieu de AB. En A se trouve la charge $-q$ et en B la charge $+q$. Calculons d'abord le potentiel créé par ce doublet au point M dans le vide.

Soit $\theta = (\vec{i}, \vec{u})$; $|\vec{r}_A| = |\overrightarrow{AM}|$ et $|\vec{r}_B| = |\overrightarrow{BM}|$

$$\overrightarrow{OM} = r\vec{u}$$

$$V_M = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\sum\frac{q_i}{r_i} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\, q\left(\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A}\right)$$

or
$$r_B^2 = r^2 + a^2 - 2\,a\,r\cos\theta$$
$$r_A^2 = r^2 + a^2 + 2\,a\,r\cos\theta$$

or, par définition, a est très petit devant r_A, r_B et r et

$$\frac{1}{r_B} = \left(r^2 + a^2 - 2\,a\,r\cos\theta\right)^{-\frac{1}{2}}$$

et
$$\frac{1}{r_A} = \left(r^2 + a^2 + 2\,a\,r\cos\theta\right)^{-\frac{1}{2}}$$

En faisant un développement limité au premier ordre, on obtient :

$$\frac{1}{r_B} = \frac{1}{r}\left(1 + \frac{a}{r}\cos\theta\right) \quad \text{et} \quad \frac{1}{r_A} = \frac{1}{r}\left(1 - \frac{a}{r}\cos\theta\right)$$

soit
$$\left(\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A}\right) = \frac{2\,a}{r^2}\cos\theta$$

Donc $V_M = \dfrac{q}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{2\,a}{r^2}\cos\theta = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{2\,aq\cos\theta}{r^2}$

or on appelle *moment électrique* la quantité

$$\vec{p} = 2\,aq\vec{i} = d\cdot q\vec{i}$$

d'autre part, $\cos\theta = \vec{u}\cdot\vec{i}$

donc $V_M = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{\vec{p}\cdot\vec{u}}{r^2} = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{p\cos\theta}{r^2}$ avec $|\vec{p}| = p$

Ce dipôle crée un champ électrique puisque

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}\,V$$

En coordonnées polaires, nous avons vu que $E_r = -\dfrac{\partial V}{\partial r}$

et $E_\theta = -\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial V}{\partial \theta}$

soit $E_r = \dfrac{2\,p}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{\cos\theta}{r^3}$ *(composante radiale)*

et $E_\theta = \dfrac{p}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{\sin\theta}{r^3}$ *(composante tangentielle)*

$\vec{E}$ a pour module : $|\vec{E}| = \sqrt{(E_r)^2 + (E_\theta)^2} =$

$$\frac{p}{4\pi\varepsilon_0 r^3}\sqrt{4\cos^2\theta + \sin^2\theta} = \frac{p}{4\pi\varepsilon_0 r^3}\sqrt{3\cos^2\theta + 1}$$

La direction de ce champ est donnée par l'angle α $\left(\text{tel que } \operatorname{tg}\alpha = \dfrac{E_\theta}{E_r} = \operatorname{tg}\dfrac{\theta}{2}\right)$.

Pour une même distance r de O, il existe deux positions de M qui sont intéressantes (*fig.* 13). Ce sont les *positions de Gauss.*

En premier lieu, lorsque M se trouve sur l'axe AB, donc $\theta = 0$ ou π :

si $\theta = 0$: $E_\theta = 0$ et $E_r = E_0$ avec $E_0 = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{2\,p}{r^3}$

si $\theta = \pi$: $E_r = -E_0$ et $E_\theta = 0$

En second lieu, lorsque M se trouve sur un plan perpendiculaire à O, donc $\theta = \dfrac{\pi}{2}$ ou $\dfrac{3\pi}{2}$:

si $\theta = \dfrac{\pi}{2}$: $E_r = 0$ et $E_\theta = \dfrac{E_0}{2}$

si $\theta = \dfrac{3\pi}{2}$: $E_r = 0$ et $E_\theta = -\dfrac{E_0}{2}$

Surfaces équipotentielles et lignes de champ du dipôle

Nous avons vu que, pour le dipôle :

$$V_M = V(r, \theta) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{p\cos\theta}{r^2}$$

une équipotentielle V_0 est telle que $V_M = V_0$, on a donc en coordonnées polaires :

$$r^2 = \frac{p}{4\pi\varepsilon_0 V_0}\cos\theta = B\cos\theta$$

où B est une constante.

Quant aux lignes de champ, nous avons également vu qu'une ligne de champ était une courbe telle qu'en chacun de ses points, le vecteur $\vec{E}$ devait être porté par la tangente. Considérons alors la *figure* 14 :

$\vec{E} = E_r\,\vec{u}_r + E_\theta\,\vec{u}_\theta$; d'autre part, la direction de la tangente

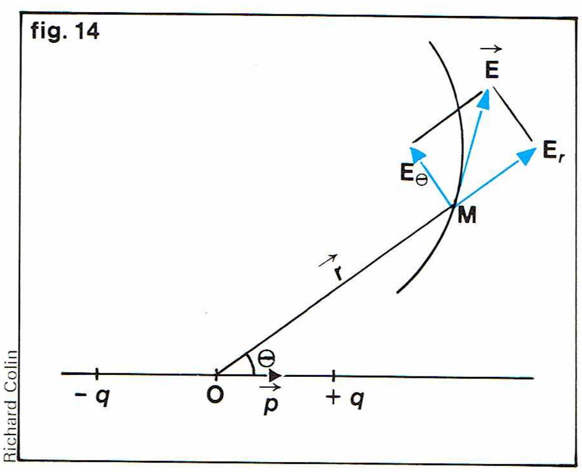

▶ *Figure 14 :* $\vec{E}$ *est tangent à la courbe r (θ) au point* M. *Ses composantes, en coordonnées polaires, sont* $\vec{E} = E_r\,\vec{u}_r + E_\theta\,\vec{u}_\theta$.

fig. 15

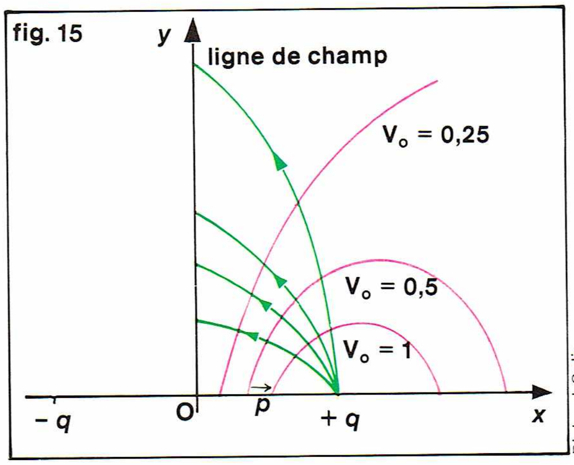

fig. 16

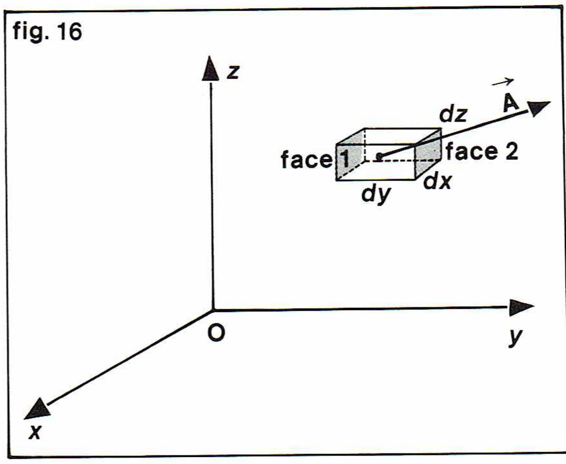

◀ *A gauche, figure 15 : l'équation des « lignes de champ » relatives à un dipôle est $r = r_0 \sin^2 \theta$. A droite, figure 16 ; flux élémentaire d'un vecteur $\vec{A}$ à travers le parallélépipède élémentaire dx, dy, dz :* $d\Phi_{total} = \text{div}\,\vec{A} \cdot d\tau$.

à la courbe r (θ) au point M est celle de $\dfrac{d\overrightarrow{OM}}{d\theta}$. Or $\overrightarrow{OM} = r\vec{u}_r$

donc $$\frac{d\overrightarrow{OM}}{d\theta} = r\frac{d\vec{u}_r}{d\theta} + \vec{u}_r\frac{dr}{d\theta}$$

mais $$\frac{d\vec{u}_r}{d\theta} = \vec{u}_\theta$$

il s'ensuit que $$\frac{d\overrightarrow{OM}}{d\theta} = \frac{dr}{d\theta}\vec{u}_r + r\vec{u}_\theta$$

Comme $\vec{E}$ et la tangente en M ont même direction, les coefficients directeurs sont égaux. Ainsi les équations donnant $\vec{E}$ et $\dfrac{d\overrightarrow{OM}}{d\theta}$ ont les mêmes coefficients directeurs.

Soit : $\dfrac{E_\theta}{E_r} = \dfrac{r}{\dfrac{dr}{d\theta}}$ ainsi $\dfrac{dr}{r} = d\theta\dfrac{E_r}{E_\theta}$

Or, dans le cas du dipôle :

$$E_r = \frac{2\,p}{4\,\pi\varepsilon_0}\frac{\cos\theta}{r^3} \quad \text{et} \quad E_\theta = \frac{p}{4\,\pi\varepsilon_0}\frac{\sin\theta}{r^3}$$

Soit $\dfrac{dr}{r} = 2\dfrac{\cos\theta}{\sin\theta}\,d\theta$; cette équation intégrée donne :

$$\text{Log}\,r = 2\,\text{Log}\sin\theta + \text{Cte} \quad \text{ou} \quad r = r_0\sin^2\theta$$

c'est l'équation de la courbe r (θ), c'est-à-dire l'équation des lignes de champ relatives à un dipôle. Nous voyons que, en coordonnées polaires, nous avons affaire à une famille de courbes qui dépendent de la valeur de r_0 (*fig.* 15).

Action d'un champ électrique sur un dipôle

On montre facilement que, dans le cas d'un champ uniforme, un dipôle électrique de moment $\vec{p}$ placé dans ce champ est soumis à un couple $\vec{C}$ qui tend à l'orienter de façon que ce moment ait la direction et le sens du champ :

$$\vec{C} = \vec{p} \wedge \vec{E}$$

Flux du champ électrostatique - Théorème de Gauss

Nous allons aborder la notion de flux en considérant la *figure* 16. Soit un élément de surface dS tel que le vecteur $d\vec{S} = \vec{n}dS$, $\vec{n}$ étant la normale à la surface, orientée positivement. Soit un vecteur $\vec{A}$ traversant la surface et faisant un angle α avec le vecteur $d\vec{S}$. On appelle *flux élémentaire du vecteur* $\vec{A}$ à travers la surface $d\vec{S}$ le produit scalaire $d\Phi = \vec{A} \cdot d\vec{S} = |\vec{A}| \cdot |d\vec{S}| \cdot \cos\alpha$.

$d\Phi > 0$ si α est aigu,

$d\Phi < 0$ si α est obtus,

$d\Phi = 0$ si $\vec{A}$ est parallèle à $d\vec{S}$.

Le flux total de $\vec{A}$ à travers une surface finie S est donc :

$$\Phi = \iint_S d\Phi = \iint_S \vec{A} \cdot d\vec{S}.$$

Pour une surface fermée, la normale $\vec{n}$ étant dirigée par définition vers l'extérieur, le flux Φ est sortant.

Notions sur la divergence d'un vecteur $\vec{A}$

Soit la *figure* 16. Considérons par ailleurs un vecteur $\vec{B}$ quelconque dont les composantes sont B_x, B_y, B_z. Par définition de la divergence, on a :

$$\text{div}\,\vec{B} = \frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z}$$

C'est un scalaire.

Sur la *figure* 16, nous considérons à présent le flux d'un vecteur $\vec{A}$ à travers le parallélépipède élémentaire dx, dy, dz défini sur trois axes orthonormés $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$. Considérons le flux élémentaire de $\vec{A}$ à travers les surfaces dx, dz parallèles au plan xOz.

Le flux à travers la face 1 est < 0 puisque $\vec{A}$ et $\vec{n}$ sont en sens inverse.

$$d\Phi_1 = \vec{A} \cdot d\vec{S}_1 = -A_y \cdot dx \cdot dz$$

Le flux à travers la face 2 est > 0. Or si le vecteur est $\vec{A}$ lorsqu'il traverse dS_1, il devient $A_y + \dfrac{\partial A_y}{\partial y}dy$ lorsqu'il traverse la surface dS_2.

Donc $$d\Phi_2 = \left(A_y + \frac{\partial A_y}{\partial y}dy\right) dx \cdot dz$$

donc $$d\Phi_1 + d\Phi_2 = \left(\frac{\partial A_y}{\partial y}\right) dx \cdot dy \cdot dz$$

Par permutation circulaire, les flux sortant par les faces parallèles aux deux autres plans sont :

$$d\Phi_{xOy} = \left(\frac{\partial A_z}{\partial z}\right) dy \cdot dz \cdot dx$$

et $$d\Phi_{yOz} = \left(\frac{\partial A_x}{\partial x}\right) dz \cdot dx \cdot dy$$

Donc

$$d\Phi_{total} = \left(\frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z}\right) dx \cdot dy \cdot dz = \text{div}\,\vec{A} \cdot d\tau$$

avec $d\tau = dx \cdot dy \cdot dz$ donc $\text{div}\,\vec{A} = \lim\limits_{d\tau \to 0} \dfrac{\vec{A} \cdot d\vec{S}}{d\tau}$

Si le flux Φ sortant de toute surface fermée est nul, on dit que le flux est conservatif.

$$\Phi = \iint_S d\Phi = \iiint_\tau \text{div}\,\vec{A} \cdot d\tau = 0$$

Cela entraîne que $\text{div}\,\vec{A} = 0$. Donc, si le flux de $\vec{A}$ est conservatif, $\text{div}\,\vec{A} = 0$.

On le retrouve en appliquant le **théorème de Green :**

$$\iiint_\tau \text{div}\,\vec{A} \cdot d\tau = \iint_S \vec{A} \cdot d\vec{S}$$

S étant la surface délimitant le volume τ.

▶ *Figure 17 : toutes les surfaces d'un tube de champ à flux conservatif sont traversées par le même flux.*

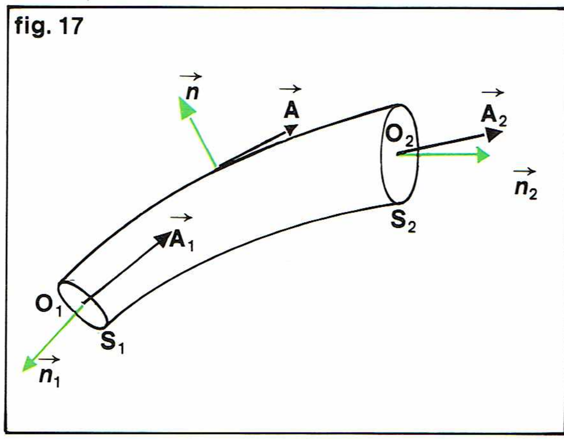

Richard Colin

Toutes les surfaces d'un tube de champ à flux conservatif sont traversées par le même flux. En effet : soit un tube de champ limité par deux surfaces quelconques S_1 et S_2 (*fig.* 17). Soit $\vec{n_1}$ et $\vec{n_2}$ les directions des normales à S_1 et S_2 dirigées respectivement vers l'extérieur de chaque surface. Le flux sortant latéralement est nul, puisque le vecteur $\vec{A}$ est tangent aux lignes de champ et que la normale en chaque point est perpendiculaire à ce vecteur.

Soit Φ_1 le flux à travers S_1 ; il est *entrant*. Soit Φ_2 le flux à travers S_2 ; il est *sortant*. Donc $-\Phi_1 + \Phi_2 = 0$; ce qui entraîne que $\Phi_1 = \Phi_2$. Donc le flux est conservatif à travers un tube de champ.

Soit alors un tube de champ élémentaire. Il est traversé par un flux $\Phi = \vec{A} \cdot \vec{S}$ constant. Nous voyons que, si $\vec{S}$ augmente, $\vec{A}$ diminue, donc le module du vecteur champ est inversement proportionnel à la surface qu'il traverse.

Flux du champ électrique $\vec{E}$

▶ *Figure 19 : par définition, l'angle solide d'un cône est la surface Ω qu'il découpe sur une sphère de rayon unité.*

Si l'on considère un élément de surface dS autour d'un point M, on définit une normale $\vec{n}$ dans le sens positif, telle que $d\vec{S} = \vec{n}dS$. Soit $\vec{E}$ le champ en M. Le flux élémentaire de $\vec{E}$ à travers la surface dS est donné par

$$d\Phi = \vec{E} \cdot \vec{n} \cdot dS$$

Si l'on considère à présent le flux de $\vec{E}$ à travers une surface quelconque S, l'expression du flux est :

$$\Phi = \iint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \iint_S \vec{E} \cdot \vec{n} \cdot dS$$

Si la surface est fermée et si la normale est dirigée vers l'extérieur, Φ est le flux sortant de la surface.

Flux produit par une charge ponctuelle

Nous envisagerons le cas d'une surface élémentaire. Soit en un point O une charge $+q$. Le problème est de calculer le flux du vecteur $\vec{E}$ produit par la charge q en un point M où se trouve placée une petite surface élémentaire dS (*fig.* 18).

$$d\Phi = \vec{E} \cdot d\vec{S} = \vec{E} \cdot \vec{n} \cdot dS$$

or
$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{r^2} \vec{u}$$

▼ *Figure 18 : flux élémentaire produit par une charge ponctuelle à travers une surface élémentaire dS :* $d\Phi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} q\, d\Omega$.

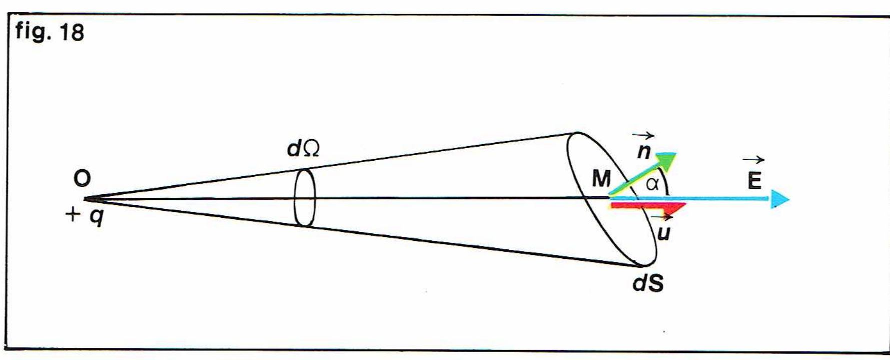

Richard Colin

donc
$$d\Phi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{r^2} \vec{u} \cdot \vec{n} \cdot dS = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{r^2} \cos\alpha\, dS$$

$$d\Phi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} q d\Omega \quad \text{avec} \quad d\Omega = \frac{dS\cos\alpha}{r^2} = \frac{\vec{u} \cdot d\vec{S}}{r^2}$$

L'utilisation de $d\Omega$ va nous permettre d'introduire la notion d'*angle solide*. Soit un cône de sommet O et de section quelconque (*fig.* 19). Par définition, l'angle solide de ce cône est la surface Ω qu'il découpe sur une sphère de rayon unité. L'unité d'angle solide est le stéradian. Si l'on considère une sphère de rayon R, la surface découpée par le cône est S. Or les surfaces Ω et S sont homothétiques, donc $\frac{\Omega}{1} = \frac{S}{R^2}$; ainsi $\Omega = \frac{S}{R^2}$.

Pour l'ensemble de l'espace autour de O (sphère),

$$\Omega = \frac{4\pi R^2}{R^2} = 4\pi$$

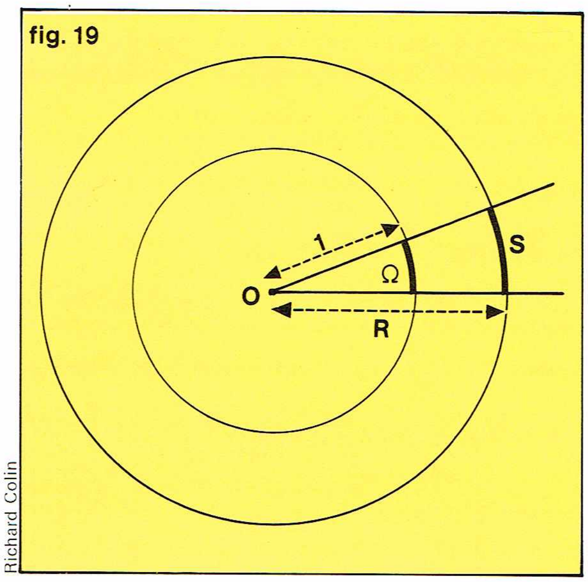

Richard Colin

Pour un cône de révolution de demi-angle au sommet θ,

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos\theta)$$

Pour θ petit, $\cos\theta \simeq 1 - \frac{\theta^2}{2}$ donc $\Omega \simeq 2\pi\frac{\theta^2}{2} \simeq \pi\theta^2$.

Soit, en un point M, une surface dS caractérisée par $d\vec{S} = \vec{n} \cdot dS$. Pour calculer l'angle solide sous lequel on voit, à partir du point O, l'élément de surface dS situé à la distance $|\vec{r}| = |\vec{OM}|$, il faut considérer la surface découpée par le cône sur la sphère de centre O et de rayon $|\vec{OM}|$. Cette surface est :

$$d\vec{S'} = d\vec{S}\cos\alpha \quad \text{avec} \quad \cos\alpha = (\vec{u} \cdot \vec{n})$$

or $d\Omega = \frac{dS'}{r^2}$, soit $d\Omega = \frac{dS\cos\alpha}{r^2}$

donc
$$d\Omega = dS \cdot \frac{\vec{n} \cdot \vec{u}}{r^2} = \frac{\vec{u} \cdot d\vec{S}}{r^2}$$

Quant à l'angle solide sous lequel on voit une surface fermée, il peut avoir une des trois valeurs suivantes :

— il est nul, si le point est à l'extérieur de la surface ;
— il vaut 4π, s'il est à l'intérieur de la surface ;
— il vaut 2π, s'il est sur la surface.

Dans le premier de ces trois cas, soit une surface fermée S et un point O extérieur à cette surface (*fig.* 20). Traçons à partir de O le cône découpant sur S les deux surfaces dS_1 et dS_2. α_1 est obtus et α_2 est aigu, or les angles solides découpés sur dS_1 et dS_2 ont la même valeur absolue (homothétie),

donc
$$d\Phi_1 = -d\Phi_2$$

On peut ainsi former des couples de surfaces élémentaires comme (dS_1, dS_2) de sorte que les flux élémentaires s'annulent respectivement. Aussi le flux total Φ est-il nul.

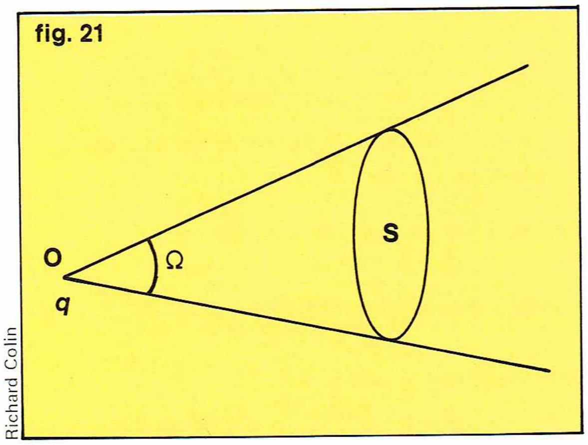

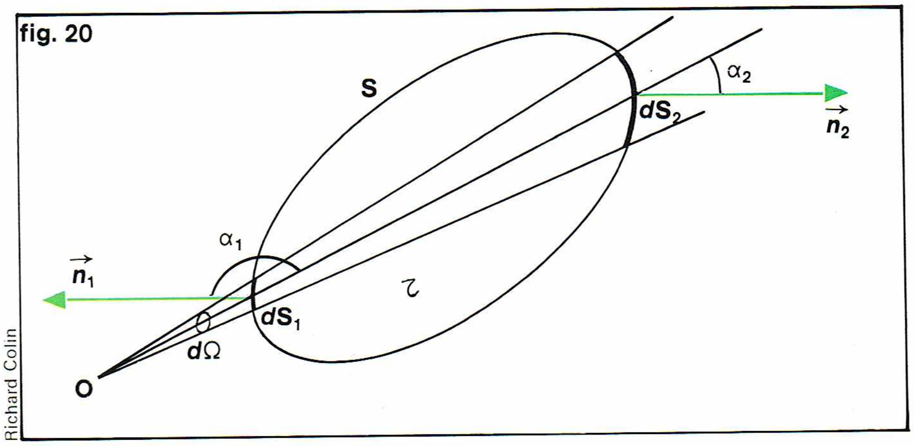

Les démonstrations pour les deux autres cas sont identiques. Le cas général est donné par la *figure* 21, où une surface S quelconque est vue d'un point O sous l'angle solide Ω :

$$\Phi = \iint_S d\Phi = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\Omega$$

On constate que le flux est conservatif dans un cône de champ (c'est-à-dire un cône dont les génératrices sont des lignes de champ).

Théorème de Gauss

Le théorème de Gauss s'énonce ainsi : *le flux du champ électrique sortant d'une surface fermée est égal (dans le vide) au quotient par* ε_0 *de la somme algébrique des charges électriques situées à l'intérieur de la surface.*

Soit en effet *une charge* q_i :

— si elle est située à l'extérieur de la surface, nous avons vu que $d\Phi = 0$, donc $\Phi_{\text{total}} = 0$;

— si elle est située à l'intérieur de la surface, $d\Phi = \frac{q_i}{4\pi\varepsilon_0} d\Omega$ pour une direction $\vec{B_i}$ donnée. Pour avoir le flux Φ_{total}, il faut considérer toutes les directions $\vec{B_i}$. Donc il faut étudier l'angle solide total 4π.

Ainsi :
$$\Phi = \frac{q_i}{4\pi\varepsilon_0} 4\pi = \frac{q_i}{\varepsilon_0}$$

Dans le cas où l'on a affaire à *plusieurs charges* $q_1, \ldots, q_n$ à l'intérieur de la surface :

$$\Phi = \frac{\Sigma q_i}{\varepsilon_0}$$

Équation de Poisson et de Laplace dans le vide

$\text{div}\, \vec{E} = \frac{\rho_v}{\varepsilon_0}$, or $\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}\, V$, ce qui nous donne :

$$-\text{div}\,(\overrightarrow{\text{grad}}\, V) = \frac{\rho_v}{\varepsilon_0}$$

Ainsi $\nabla^2 V + \frac{\rho_v}{\varepsilon_0} = 0$. C'est l'*équation de Poisson*, qui se réduit à l'*équation de Laplace* $\nabla^2 V = 0$ dans le cas où il n'y a pas de charges.

Capacité - Condensateurs

Dans le cadre de cet ouvrage, nous n'aborderons pas l'étude des conducteurs, ni l'influence électrostatique. Nous débuterons l'étude des condensateurs par la définition suivante : un condensateur est formé de deux conducteurs dont l'un est creux et contient l'autre. L'espace qui les sépare peut être rempli d'un diélectrique de constante diélectrique ε.

Le conducteur externe A est appelé *armature externe*, l'autre B est appelé *armature interne* (*fig.* 22). Si l'armature externe est portée au potentiel V_A et l'armature interne au potentiel V_B, on montre que les deux armatures se chargent respectivement des charges $+q$ et $-q$. Si l'on pose $(V_A - V_B) = V$, on établit que

$$q = CV$$

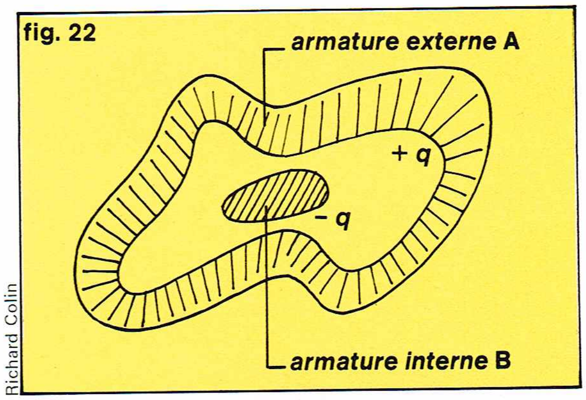

▲ *A gauche, figure 21 : S est la surface vue du point O sous l'angle solide Ω. A droite, figure 20 : démonstration de la valeur nulle de l'angle solide sous lequel on voit une surface fermée lorsque le point est à l'extérieur de cette surface.*
◄ *Figure 22 : un condensateur est formé de deux conducteurs dont l'un est creux et contient l'autre. Le premier est appelé « armature externe »* (A), *le second « armature interne »* (B).

Donc la charge du condensateur est proportionnelle à la différence de potentiel entre les deux armatures. Le coefficient de proportionnalité est appelé *capacité du condensateur*.

Condensateurs de forme géométrique simple

De manière générale, lorsque les condensateurs ont une forme géométrique simple, on procède de la manière suivante : on se donne q, on calcule $\vec{E}$ par application du théorème de Gauss, on en déduit V. Il est ensuite facile d'en déduire la capacité C du condensateur.

Condensateur sphérique

La forme de l'armature externe importe peu (*fig.* 23a). Elle porte la charge $-q$, tandis que l'armature interne

▼ *Figure 23; trois types de condensateurs de forme géométrique simple : a, condensateur sphérique; b, condensateur cylindrique; c, condensateur plan.*

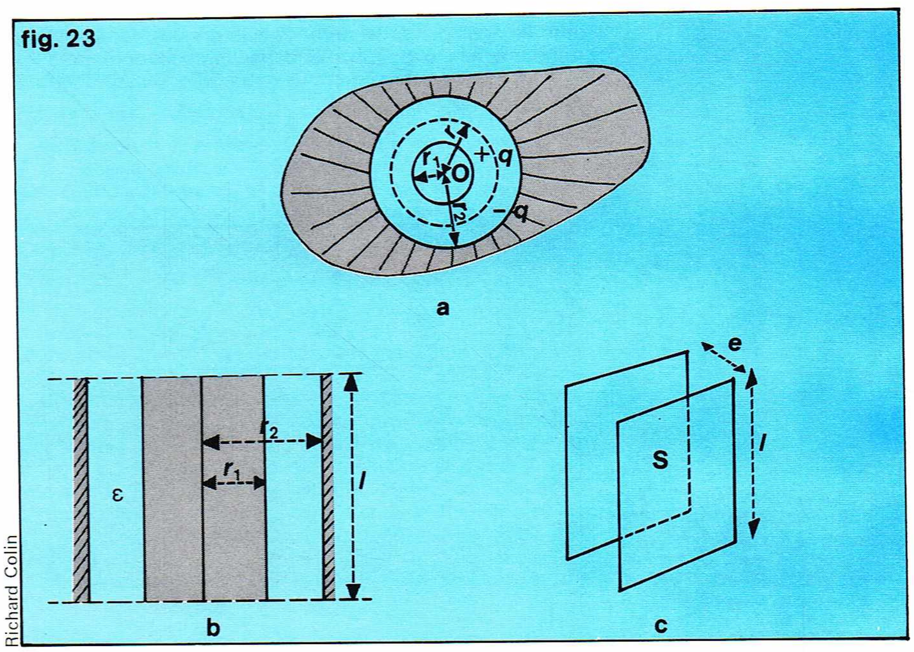

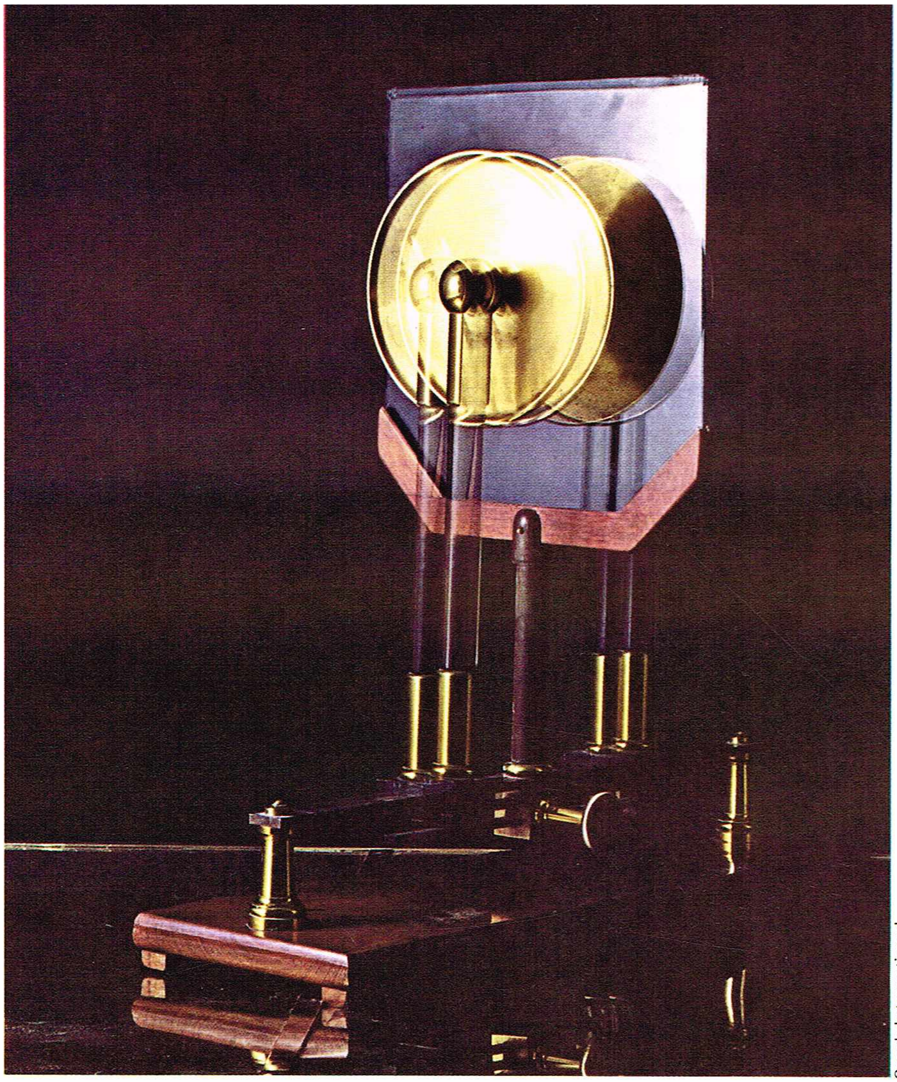

Snark International

▲ ***Un condensateur plan est tel que ses armatures ont des surfaces en regard planes et parallèles.***

porte la charge $+q$. Soit r_1 le rayon de l'armature interne et r_2 celui de la surface intérieure de l'armature externe.

A une distance r de O, $\vec{E}$ est donné par le théorème de Gauss dans un diélectrique de constante diélectrique ε :

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{q}{r^2}$$

$$V = \int_{r_1}^{r_2} E \cdot dr = \frac{q}{4\pi\varepsilon}\int_{r_1}^{r_2}\frac{dr}{r^2} = \frac{q}{4\pi\varepsilon}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$$

On en déduit que $C = 4\pi\varepsilon\,\frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1}$.

Condensateur cylindrique

Un condensateur cylindrique est tel que ses armatures sont limitées par deux surfaces cylindriques de révolution de même axe (*fig.* 23b). La capacité correspondant à un tronçon de longueur l compris entre deux sections droites est :

$$C = \frac{2\pi\varepsilon l}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

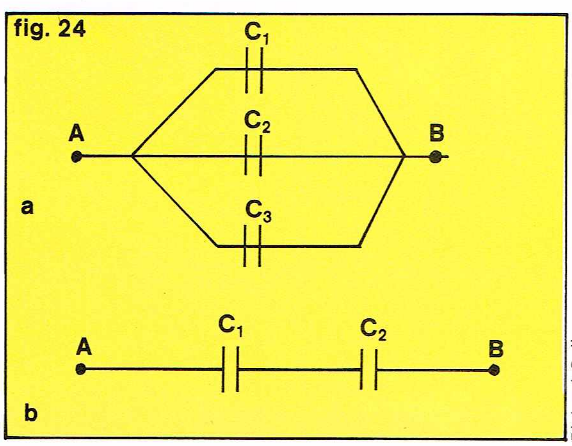

Richard Colin

▶ ***Figure 24 : a, condensateurs mis en parallèle :*** $C = C_1 + C_2 + C_3$. ***b, condensateurs groupés en série :*** $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$

Condensateur plan

Un condensateur plan est tel que ses armatures ont des surfaces en regard planes et parallèles. La distance e qui les sépare est appelée *épaisseur du condensateur* (*fig.* 23c).

Pour une surface S de l'armature, la capacité de ce condensateur est $C = \frac{\varepsilon S}{l}$.

Groupement des condensateurs

Nous pouvons grouper les condensateurs.

Condensateurs mis en parallèle

On remarque très facilement que la capacité totale de l'ensemble est égale à la somme des capacités de chacun des condensateurs (*fig.* 24a).

$$C = C_1 + C_2 + C_3$$

Condensateurs en série

Dans le cas où les condensateurs sont groupés en série (*fig.* 24b), la capacité totale de ce groupement est telle que :

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad \text{soit : } C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

L'énergie électrostatique

Nous avons vu qu'une charge placée dans un champ électrique possède de l'énergie. L'énergie W qu'il faut fournir à une charge q pour la faire passer du potentiel 0 au potentiel V est aussi l'énergie que cède cette charge lorsqu'elle repasse de V à 0.

Cette énergie est : $W = qV$.

Pour ce qui est des conducteurs chargés en équilibre, on montre que l'énergie de ce système est :

$$\textbf{(1)} \qquad W = \frac{1}{2}\sum_i q_i V_i$$

où q_i et V_i désignent respectivement la charge et le potentiel du i-ième conducteur. Appliquons cette relation à la détermination théorique de l'énergie d'un condensateur.

Soit un condensateur dont l'armature interne B, au potentiel V_B, porte la charge $-q$, et l'armature externe A, au potentiel V_A, porte la charge $+q$. La relation générale **(1)** donne :

$$W = \frac{1}{2} q\,(V_A - V_B)$$

Soit $V = V_A - V_B$, la tension entre ces deux armatures. Alors la formule précédente s'écrit :

$$W = \frac{1}{2} qV = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2}\frac{q^2}{C} \quad \text{car } q = CV$$

Localisation de l'énergie électrostatique

Nous allons montrer, à l'aide de l'exemple simple d'un condensateur plan, que, dans une région où règne un champ $\vec{E}$, il y a une densité d'énergie $W_0 = \frac{\varepsilon}{2}E^2$.

Soit en effet un condensateur plan indéfini, de constante diélectrique ε, dont les armatures sont séparées par la distance e. Soit une portion de surface S de ce conducteur ; son énergie est $W = \frac{1}{2}CV^2$. Comme $|\vec{E}| = \frac{V}{e}$, on obtient :

$$W = \frac{1}{2}\frac{\varepsilon S}{e}E^2 e^2 = \frac{1}{2}\varepsilon S E^2 e = \frac{1}{2}\varepsilon E^2 v$$

où v est le volume compris entre les deux armatures. Donc l'énergie du condensateur est proportionnelle au volume v ; aussi cette énergie est-elle localisée dans ce volume. L'énergie localisée par unité de volume est

$$\frac{W}{v} = W_0 = \frac{\varepsilon E^2}{2}$$

On peut généraliser ce résultat et dire que l'énergie d'un système de condensateurs chargés est localisée là où

fig. 26

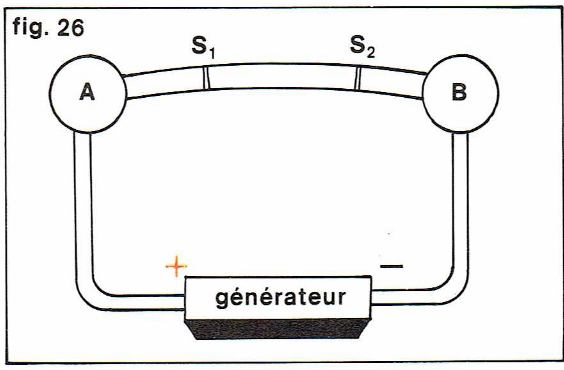

Richard Colin

fig. 28

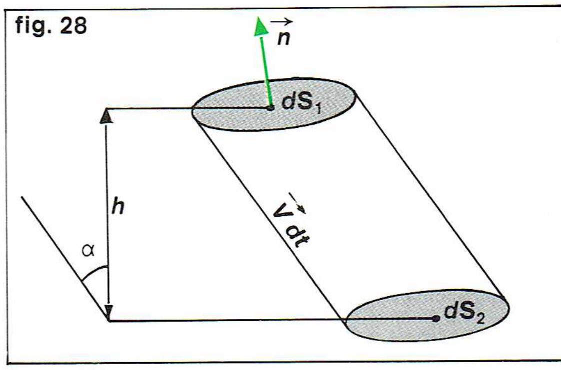

Richard Colin

◀ *A gauche, figure 26 : la quantité de charge dq traversant une section de fil est la même pour toute section. On a affaire à un régime « permanent » ou « stationnaire ». A droite, figure 28 : toutes les particules qui traversent la surface dS_2 entre les instants t et t + dt sont contenues dans un cylindre de base dS_1 (ou dS_2) et de génératrice $\vec{V}dt$.*

règne un champ électrique $\vec{E}$. La densité volumique y est : $W_0 = \frac{\varepsilon E^2}{2}$. Dans un autre ordre d'idée, considérons un dipôle électrique de moment électrique $\vec{p}$.

Plaçons-le dans un champ électrique $\vec{E}$; alors l'énergie de ce dipôle est : $W = -\vec{p} \cdot \vec{E}$.

Courant électrique - Résistance

Il existe des appareils qui peuvent maintenir entre deux conducteurs A et B une différence de potentiel constante au cours du temps, lorsque ces deux conducteurs sont eux-mêmes reliés à un fil également conducteur. Ces appareils sont appelés *générateurs* ou *électromoteurs* (piles, dynamos, accumulateurs, etc.). Ils possèdent deux pôles. L'un est appelé *pôle positif* et l'autre *pôle négatif*. Le schéma conventionnel est celui de la *figure* 25.

Supposons à présent que nous ayons le schéma suivant (*fig.* 26) où A et B sont les deux conducteurs en question. Puisque le pôle + du générateur est relié au conducteur A, on aura par définition $V_A > V_B$. Cette différence de potentiel étant toujours maintenue dans le temps, il en résulte un déplacement des charges identique à lui-même dans le temps. Il n'y a ni accumulation, ni déperdition de charges à travers le circuit. D'autre part, cela exige également que, pendant un laps de temps donné, la quantité de charges *dq* traversant une section du fil est la même pour toute section. On dit que le circuit est traversé par un *courant continu* ou que l'on a un *régime permanent* ou *stationnaire*.

Vecteur densité de courant - Intensité du courant

Nous allons à présent définir le **vecteur densité de courant** ainsi que l'**intensité du courant électrique**. Soit un conducteur de forme quelconque, homogène et isotrope. Ce peut être soit une masse métallique à conduction électronique, soit un électrolyte à conduction ionique. Prenons ce second cas, et considérons la *figure* 27. Le conducteur est constitué d'un ballon rempli de mercure dans lequel baignent deux pointes métalliques A et B, reliées aux bornes d'un générateur. Par convention, des charges + vont circuler de A vers B, à l'intérieur du ballon, en suivant des trajectoires bien déterminées que l'on appelle *lignes de courant*, qui sont orientées dans le sens de déplacement des charges +.

fig. 27

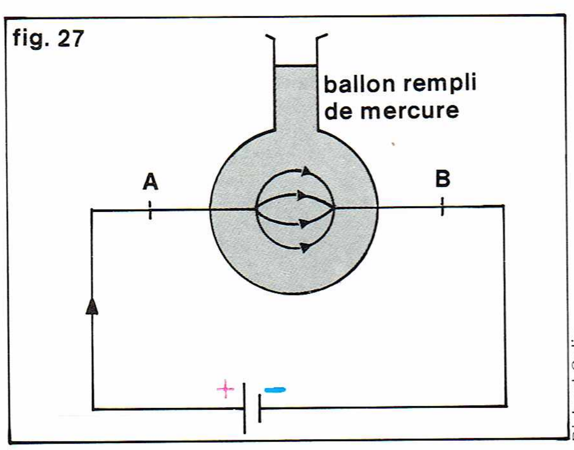

Richard Colin

Soit M un point du milieu conducteur considéré, et se trouvant sur une ligne de courant. Considérons un élément de surface *dS* autour du point M. On conçoit que la quantité de charges *dq* (notion de quantité d'électricité) traversant la surface *dS* pendant *dt* est liée à la densité volumique de charges ρ_v autour du point M et à la vitesse $\vec{V}$. En effet, nous voyons sur la *figure* 28 que toutes les particules qui traversent la surface dS_2 entre les instants *t* et *t* + *dt* sont contenues dans un cylindre de base dS_1 (ou dS_2) et de génératrice $\vec{V}dt$ (en effet, si, au temps *t*, elles se trouvent sur dS_1, au temps *t* + *dt*, elles atteindront la surface dS_2). Or le volume du cylindre est

$$dv = dS_1 \cdot h = dS_1 \cdot V \cdot dt \cos \alpha$$

$$dv = \vec{V} \cdot dt \cdot d\vec{S}_1$$

La charge élémentaire contenue dans ce volume est :

$$dq = \rho_v dv = \rho_v \vec{V} \cdot dt \cdot d\vec{S}_1$$

On pose par définition $\vec{J} = \rho_v \vec{V}$ qui est le vecteur densité de courant au point M.

$$dq = \vec{J} \cdot dt \cdot d\vec{S}_1 ; \quad \text{donc } \frac{dq}{dt} = \vec{J} \cdot d\vec{S}_1$$

Soit alors une surface quelconque S, et soit *dq* la charge traversant cette surface pendant le temps *dt*.

On a alors $\frac{dq}{dt} = \iint_S \vec{J} \cdot d\vec{S} = I$ qui est la définition de l'intensité. I représente donc le flux de $\vec{J}$ à travers la surface S.

Soit un conducteur *f* dans lequel les charges sont mises en mouvement sous l'action d'un champ électrostatique $\vec{E}_e$ (on applique par exemple une différence de potentiel à ce conducteur). La loi d'Ohm établit une loi de proportionnalité entre la densité de courant en un point du conducteur et le champ, en ce même point. Cette relation s'écrit :

$$\vec{J} = \gamma \vec{E}_e$$

γ étant la conductivité.

Résistance - Résistivité

Introduisons à présent la notion de **résistance** dans le cas d'un conducteur cylindrique, en régime permanent. En régime permanent, la quantité d'électricité traversant, pendant un temps donné, une section, est la même pour toutes les sections. Aussi le flux de $\vec{J}$ est conservatif ; cela se traduit par div $\vec{J} = 0$;

or $\vec{J} = \gamma \vec{E}_e$; donc div $\vec{E}_e = 0$, et comme $\vec{E}_e = -\overrightarrow{\text{grad}}\, V$, on obtient finalement la relation $\nabla^2 V = 0$.

Donc le potentiel à l'intérieur d'un tel conducteur obéit à l'équation de Laplace $\nabla^2 V = 0$.

Considérons donc un conducteur cylindrique, en régime permanent, de longueur *l* et de section droite S (*fig.* 29). On impose aux deux extrémités les potentiels constants V_A et V_B. Il circule alors dans le cylindre un courant permanent I. Les lignes de courant, donc les lignes de champ, sont, par symétrie, parallèles aux génératrices du cylindre : donc les surfaces équipotentielles sont des sections droites.

Cherchons la loi V = V (*x*). Or V obéit à l'équation de Laplace : $\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0.$

fig. 25

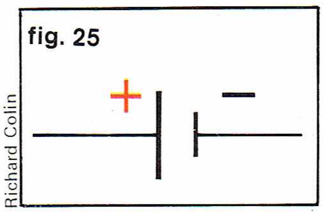

Richard Colin

▲ *Figure 25 : représentation conventionnelle d'un générateur.*

◀ *Figure 27 : matérialisation de lignes de courant dans le cas d'un conducteur constitué d'un ballon rempli de mercure dans lequel baignent deux pointes métalliques A et B reliées aux bornes d'un générateur.*

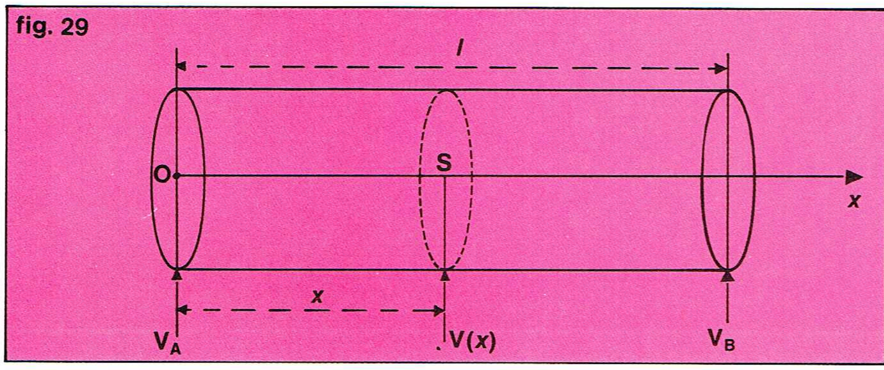

Richard Colin

▲ ***Figure 29;*** ***définition de la résistance à partir d'un conducteur cylindrique homogène, en régime permanent, de longueur*** l ***et de section droite S :*** $R = \rho \frac{l}{S}$.

Dans notre cas, nous avons affaire à la seule direction selon l'axe des x.

Aussi $\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = 0$. L'intégration donne $\frac{\partial V}{\partial x} = \text{Cte} = a$,

soit $V(x) = ax + b$. Les conditions aux limites sont telles qu'en $x = 0$, $V(o) = V_A$, et en $x = l$, $V(l) = V_B$; $V(x)$ s'écrit donc $V(x) = \frac{V_A - V_B}{l} x + V_A$.

Or $E = -\frac{\partial V}{\partial x} = $ Cte et est parallèle à Ox, donc $E = \frac{V_A - V_B}{l}$,

et $\vec{J}$ est également une constante parallèle à Ox, donc perpendiculaire à S. L'intensité I à travers une section droite est alors :

$$I = \iint \vec{J} \cdot \vec{ds} = JS = \gamma ES = \frac{\gamma S}{l} (V_A - V_B) = I$$

Ainsi
$$\frac{V_A - V_B}{I} = \frac{l/\gamma}{S}$$

Le second membre de cette équation ne dépend que des dimensions du conducteur et de sa nature. C'est par définition sa résistance :

$$R = \frac{V_A - V_B}{I} = \rho \frac{l}{S}$$

avec ρ qui est la **résistivité** du conducteur $\left(\rho = \frac{1}{\gamma}\right)$.

Dans le système M. K. S. A., l'unité de résistance est l'ohm (Ω).

Lois relatives aux résistances

La *figure* 30a montre la représentation conventionnelle d'une résistance.

Résistances mises en série (*fig.* 30b)

$$V_A - V_B = R_1 I$$
$$V_B - V_C = R_2 I$$
$$V_C - V_D = R_3 I$$

Soit $V_A - V_D = (R_1 + R_2 + R_3)$ I. Ainsi l'ensemble des résistances en série est équivalent à $R = R_1 + R_2 + R_3$.

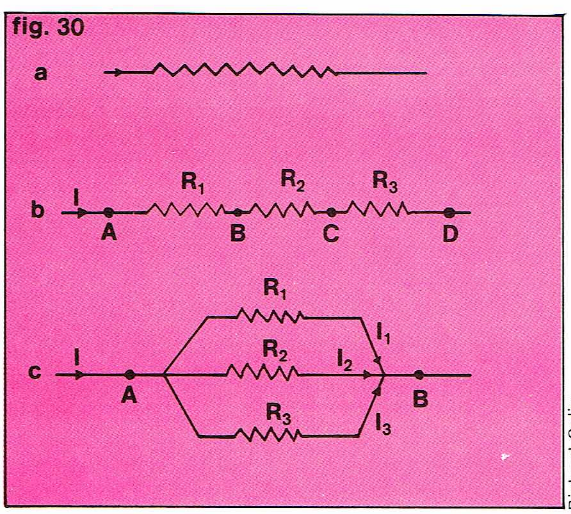

Richard Colin

▶ ***Figure 30 :*** ***a, représentation conventionnelle d'une résistance; b, mise en série de résistances*** $R = R_1 + R_2 + R_3$***; c, mise en parallèle de résistances*** $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$.

Résistances en parallèle ou en dérivation (*fig.* 30c)

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = \frac{V_A - V_B}{R_1} + \frac{(V_A - V_B)}{R_2} + \frac{(V_A - V_B)}{R_3}$$

$$I = V_A - V_B \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right)$$

$$V_A - V_B = \frac{I}{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right)}$$

or
$$V_A - V_B = RI = \frac{I}{\frac{1}{R}}$$

donc la résistance équivalente est telle que

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Cela constitue le **théorème des « conductances ».**

Application : shunt d'un appareil

Nous allons appliquer ce résultat au shunt d'un appareil. La *figure* 31 montre un appareil de résistance interne shunté. Un tel appareil est dit shunté lorsqu'on a placé un conducteur en parallèle sur lui de sorte qu'il ne reçoive qu'une fraction $\left(\frac{1}{10}, \frac{1}{100}, \frac{1}{1\,000}\right)$ du courant total I (on shunte un appareil afin de ne pas le détériorer par le passage d'un courant trop intense).

On a :

$$I = I_1 + I_2 = \left(\frac{V_A - V_B}{g}\right) + \left(\frac{V_A - V_B}{s}\right)$$
$$= (V_A - V_B)\left(\frac{1}{g} + \frac{1}{s}\right)$$

$$I = V\left(\frac{1}{g} + \frac{1}{s}\right)$$

Or $I_1 = \frac{V}{g}$; donc $\frac{I}{I_1} = g\left(\frac{1}{g} + \frac{1}{s}\right) = 1 + \frac{g}{s}$

Donc, si l'on veut que $\frac{I}{I_1}$ soit égal à 100, il faut que $\frac{g}{s} = 99$.

Notons que, de manière générale, dans le cas d'un shunt :

$$I_1 = \frac{I}{g + s} \cdot s.$$

En effet : $I_1 = \frac{V}{g} = \frac{I\,(s \cdot g)}{(s + g) \cdot g} = \frac{I}{s + g} \cdot s$

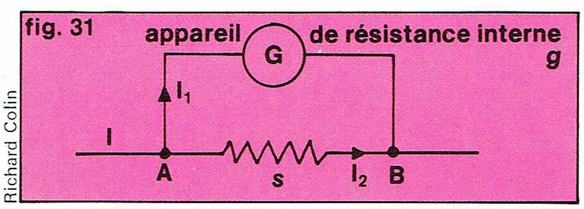

Richard Colin

▶ ***Figure 31 :*** ***l'appareil G de résistance interne*** g ***est shunté par la résistance*** s.

L'énergie électrique - Générateurs et récepteurs

Énergie électrique

Définissons d'abord l'énergie électrique en *courant continu*. Soit donc un circuit parcouru par un courant continu constant I (on est donc en *régime permanent*), et sur ce circuit considérons un tronçon de conducteur AB tel que le courant entre par A et sorte par B.

Soit
$$V = V_A - V_B$$

la différence de potentiel entre A et B avec $V_A > V_B$.

Nous avons vu que, pendant un temps t, une section quelconque de conducteur était traversée par la charge $q = It$. Nous avons vu également que toute charge q placée dans une différence de potentiel $V_A - V_B$ était soumise à une force dont le travail était $q\,(V_A - V_B)$, ce qui correspond à une baisse de potentiel. Ainsi la charge se déplaçant vers les potentiels décroissants subit une diminution d'énergie

$$W_e = q\,(V_A - V_B)$$

Ainsi $\frac{W_e}{V_A - V_B} = It$, ce qui entraîne que $W_e = VIt$ car $V = V_A - V_B$.

W_e constitue l'**énergie électrique** dépensée dans le tronçon AB.

Or $W_e = Pt$, P étant la puissance dissipée dans le tronçon AB. Donc $P = VI$. En unités M. K. S. A., la puissance s'exprime en watt.

Introduisons à présent l'*effet Joule*. Supposons pour cela qu'entre A et B n'apparaît aucune autre forme d'énergie que de l'énergie calorifique. Ainsi toute l'énergie électrique, soit $W_e = VIt$, s'est transformée en énergie calorifique (conservation de l'énergie) : donc $W_{calorifique} = W_{électrique}$.

Or $V_A - V_B = V = RI$ (R étant la résistance du tronçon) donc $W_{calorifique} = RI^2t$,

ce qui entraîne que $P_{calorifique} = RI^2 = VI$.

Si le courant n'est pas constant et est une fonction du temps, $I = I(t)$; alors, entre t et $t + dt$, $dW = RI^2(t)\,dt$.

$$W_{t_1}^{t_2}{}_{calorifique} = R\int_{t_1}^{t_2} I^2(t)dt$$

$W_{t_1}^{t_2}{}_{calorifique}$ étant l'énergie calorifique apparaissant entre les instants t_1 et t_2.

Notions de force électromotrice et de force contre-électromotrice

Générateurs

La *figure* 32 permet d'introduire la notion de force électromotrice d'un générateur. Il s'agit d'un générateur débitant dans un circuit ACB. D'après la figure, $V_A > V_B$ et les charges $+ q$ circulent dans le circuit extérieur ACB de A vers B ; elles se dirigent vers les potentiels décroissants, soumises au *champ électrostatique* E_e allant lui aussi vers les potentiels décroissants, car

$$V_A - V_B = \int_A^B \vec{E}_e \cdot d\vec{l}.$$

Or, à l'intérieur du générateur, ce champ électrostatique existe aussi, allant du pôle + (P) vers le pôle — (N), donc les charges $+ q$ arrivant en B auront tendance à être repoussées dans le circuit C sous l'action de ce champ. Mais elles traversent le générateur dans le sens de B vers A puisqu'elles circulent sans accumulation dans tout le circuit. Il existe donc une force $\vec{F}_m$ autre que celle due au champ électrostatique et qui permet le passage des charges dans le générateur. On pose alors par définition, et par analogie avec le champ électrostatique :

$\vec{E}_m = \frac{\vec{F}_m}{q}$; E_m est le *champ électromoteur* du générateur.

Ainsi, à l'intérieur du générateur, une charge $+ q$ est soumise à l'action des deux champs $\vec{E} = \vec{E}_e + \vec{E}_m$.

Soit alors une ligne de courant formant une trajectoire fermée Γ. La circulation de $\vec{E}$ le long de Γ est :

$$C_\Gamma = \oint_\Gamma \vec{E} \cdot d\vec{l} = \oint_\Gamma \vec{E}_e \cdot d\vec{l} + \oint_\Gamma \vec{E}_m \cdot d\vec{l}$$

or $\vec{E}_e$ dérive d'un potentiel, donc $\oint_\Gamma \vec{E}_e \cdot d\vec{l} = 0$

donc $C_\Gamma = \oint_\Gamma \vec{E}_m \cdot d\vec{l}$

Dans le cas que nous avons considéré, cette circulation est uniquement effectuée à l'intérieur du générateur, de N vers P, pour permettre aux charges de passer, puisque dans le reste du circuit E_m n'existe pas. C'est cette circulation du champ électromoteur que l'on appelle **force électromotrice du générateur** (f. é. m.) et que l'on peut noter $\mathcal{E}$. La circulation de $\vec{E}_m$,

$$\text{soit } C_N^P = V_P - V_N = \int \vec{E}_m \cdot d\vec{l} = \mathcal{E}.$$

$\mathcal{E}$ a les dimensions d'une différence de potentiel. Elle s'exprime donc en volts dans le système M. K. S. A.

Nous verrons en électromagnétisme un exemple de champ électromoteur. Citons aussi l'exemple d'un conducteur circulaire (spire) soumis à une variation de flux magnétique, qui peut être par exemple due à un aimant que l'on approche ou que l'on éloigne de la spire ; dans cette spire il se crée un courant dû au « champ électromoteur d'induction ».

Revenons au générateur précédent. Puisqu'il fournit un travail dû au champ électromoteur $\vec{E}_m$, c'est donc une source d'énergie électrique.

Or $C_N^P = \int \vec{E}_m \cdot d\vec{l} = \mathcal{E}$ (circulation du champ électromoteur) et une charge q placée dans le champ $\vec{E}_m$ est par définition soumise à la force $\vec{F}_m = q\vec{E}_m$.

Donc le travail de cette force $\vec{F}_m$ est :

$$W = \int q\vec{E}_m \cdot d\vec{l} = q\mathcal{E}$$

Comme il s'agit du travail de la force $\vec{F}_m$ due au produit de la charge par le champ électromoteur, c'est donc qu'un générateur traversé par une charge q fournit l'énergie électrique $W_e = q\mathcal{E}$.

$$P_{fournie} = \frac{q}{t}\mathcal{E} = I\mathcal{E}$$

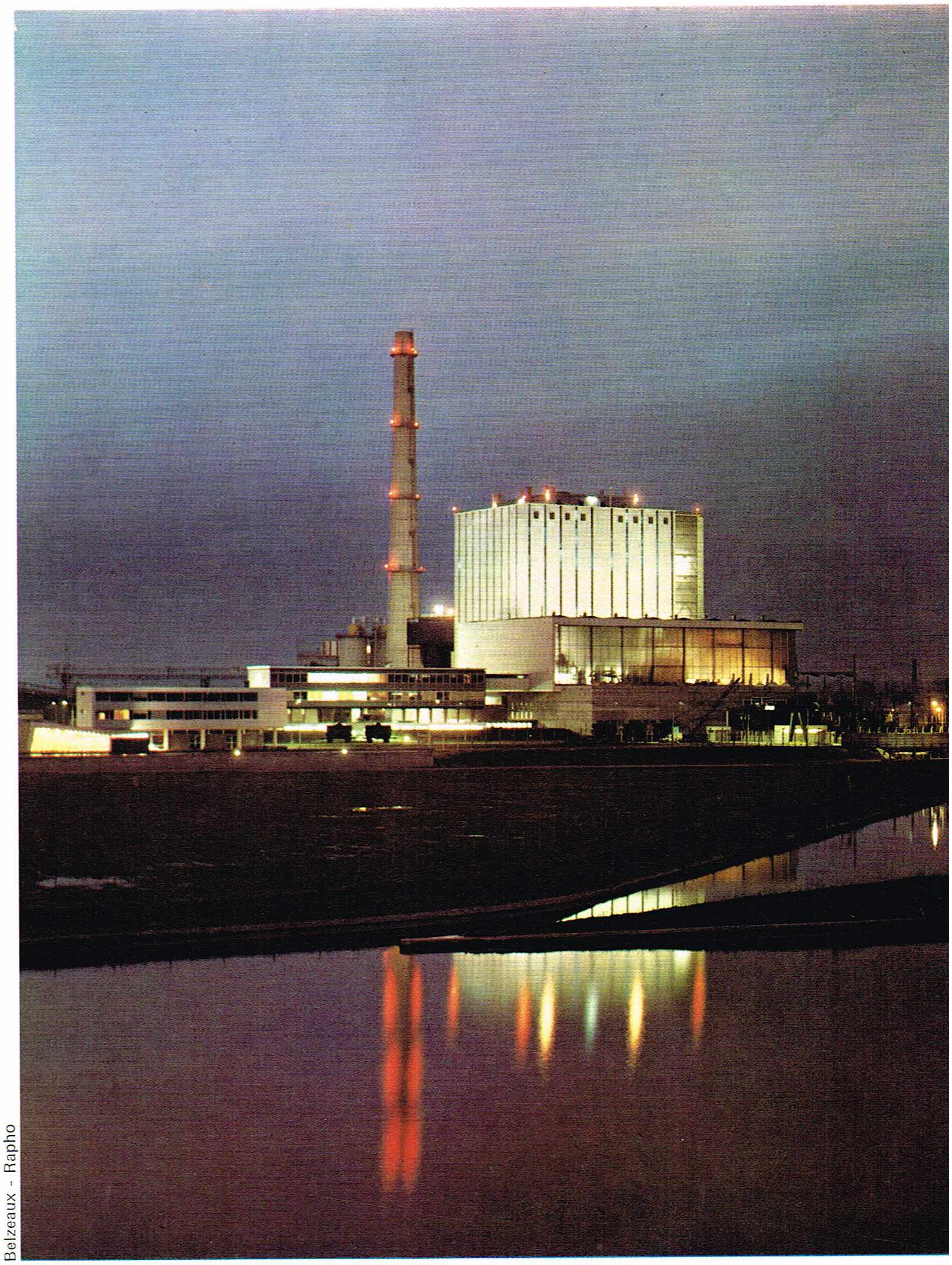

Belzeaux - Rapho

▲ ***La centrale électrique de Persan-Beaumont (France).***

▼ ***Figure 32 : notion de* force électromotrice d'un générateur ; *les charges* + *q circulent de* A *vers* B.**

fig. 32

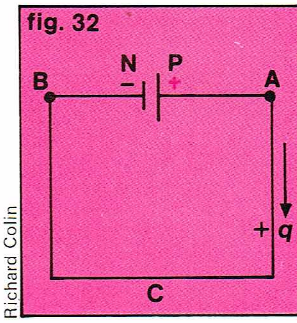

Richard Colin

F. Arborio Mella

▲ *Le physicien allemand* **Georg Simon Ohm** *(1789-1854).*

▶ *Page ci-contre, en bas, figure 37 :* a, *charge d'un condensateur à travers une résistance;* b, *la tension u(t) croît exponentiellement avec la constante de temps* RC.

▼ *A gauche, figure 33 :* a, *un courant constant est fourni par le générateur g; il entre par* A *dans le tronçon* AB *contenant le générateur* G. b, *un courant constant est fourni par le générateur g; il entre par* A *dans le tronçon* AB *contenant un récepteur. A droite, figure 34 : représentation d'un réseau comprenant des résistances, générateurs et récepteurs. Les lois de Kirchhoff permettent de calculer les paramètres d'un tel réseau.*

Récepteurs

Soit un appareil d'utilisation traversé par un courant I. S'il n'apparaît aucune forme d'énergie autre que l'énergie calorifique RI^2t, alors l'appareil se comporte comme une résistance morte. S'il apparaît une autre forme d'énergie, par exemple de l'énergie mécanique, alors l'appareil est un « récepteur ». Soit W_r cette autre forme d'énergie apparue pendant le temps t. Pendant ce même temps, le récepteur est traversé par la charge q. Par définition, on désigne par **force contre-électromotrice** (f. c. é. m.) du récepteur le rapport $\mathcal{E}' = \frac{W_r}{q}$ qui, comme la force électromotrice d'un générateur, a les dimensions d'une différence de potentiel. Elle s'exprime donc en volts dans le système M. K. S. A.

$$\mathcal{E}' = \frac{W_r}{It} = \frac{P_r}{I}$$

Donc $P_r = \mathcal{E}'I$ qui est la puissance apparue dans le récepteur, autre que la puissance calorifique.

Loi d'Ohm généralisée

Soit un tronçon quelconque AB du circuit parcouru par un courant I et dans lequel il y a des résistances, des générateurs de force électromotrice $\mathcal{E}$, des récepteurs de force contre-électromotrice $\mathcal{E}'$. La loi d'Ohm généralisée permet d'obtenir la d. d. p. (différence de potentiel) entre A et B, moyennant certaines conditions.

La loi d'Ohm généralisée est la suivante :

$$V_A - V_B = \Sigma RI - \Sigma \mathcal{E}$$

à condition que le courant entre par A et sorte par B. $\mathcal{E}$ désigne indifféremment la force électromotrice d'un générateur ou la force contre-électromotrice d'un récepteur; il suffit d'affecter à $\mathcal{E}$ le signe + si l'on rencontre en second lieu la borne + et le signe — si l'on rencontre en second lieu la borne —.

Si, par exemple, au départ, on sait qu'on a affaire à un récepteur dont les pôles sont connus à l'avance, il faut le disposer dans le circuit de telle manière que le pôle — figure en second lieu. La *loi de Pouillet* traduit le cas du circuit fermé. Dans la loi d'Ohm généralisée, V_A est alors égale à V_B. Ainsi $\Sigma \mathcal{E} = \Sigma RI$.

Analysons les deux exemples suivants.

— Dans le premier cas (*fig.* 33a), le courant I constant est fourni par le générateur g. Il entre par A dans le tronçon AB contenant un autre générateur G. Soit R la résistance du tronçon AB, y compris la résistance interne du générateur G. La loi d'Ohm s'écrit :

$$V_B - V_A = \mathcal{E} - RI$$

$\mathcal{E}$ étant la f. é. m. du générateur G.

— Le second cas (*fig.* 33b) est l'exemple d'un tronçon AB contenant un récepteur. R est la résistance du tronçon AB, y compris celle du récepteur. Dans ce cas, la loi d'Ohm s'écrit :

$$V_A - V_B = RI + \mathcal{E}'$$

$\mathcal{E}'$ étant la f. c. é. m. du récepteur.

Réseaux de conducteurs - Loi de Kirchhoff - Applications

Réseau de conducteurs

Un réseau de conducteurs est formé par une association, plus ou moins compliquée, de résistances, de générateurs et de récepteurs (*fig.* 34). Ce réseau est constitué par un certain nombre de « branches », telle la branche AB. Un « nœud » du réseau est un point commun à plusieurs branches. Une « maille » du réseau est constituée par tout circuit fermé formé par des branches, par exemple la maille ABC ou encore la maille CDE.

Le problème qui se pose est le suivant : l'étude d'un réseau de conducteurs consiste à déterminer le sens et la valeur des intensités des courants passant dans chaque branche, connaissant les valeurs des éléments du réseau, c'est-à-dire les valeurs des différentes résistances, forces électromotrices et forces contre-électromotrices figurant dans le réseau. Ce sont les *lois de Kirchhoff* qui permettent de résoudre ce problème.

Lois de Kirchhoff

Elles sont au nombre de deux : la « loi des nœuds » et la « loi des mailles ».

La **loi des nœuds** est la suivante : *la somme des intensités des courants qui partent d'un nœud est égale à la somme des intensités qui y arrivent.*

Cela se comprend, car, en régime stationnaire, il ne peut y avoir accumulation de charges en aucun point du réseau. On adopte les conventions suivantes : on affecte des signes + les courants arrivant sur le nœud et des signes — les courants partant du nœud. Avec ces conventions, la loi des nœuds s'écrit : $\Sigma I = 0$.

La **loi des mailles,** quant à elle, s'énonce ainsi : *si l'on parcourt une maille en partant et en revenant au même point (par exemple sur la figure le point A), la somme des d. d. p. des différentes branches constituant la maille est nulle.*

La loi d'Ohm généralisée s'écrit alors :

$$V_A - V_A = \Sigma RI - \Sigma \mathcal{E} = 0$$

Cela entraîne $\Sigma RI = \Sigma \mathcal{E}$.

Cette formule est valable à condition de respecter les conventions de signe suivantes qui découlent de celles faites dans la loi d'Ohm généralisée :

— on adopte un sens de parcours sur la maille; par exemple, dans la maille ABC, le sens A → B → C;

— on choisit arbitrairement, pour chaque branche, un sens du courant; si ce sens est celui du sens de parcours de la maille, alors I est choisi positif, sinon il est choisi négatif;

— on applique pour $\mathcal{E}$ les mêmes conventions que pour la loi d'Ohm généralisée;

— après résolution du système d'équations de Kirchhoff, on obtient des valeurs algébriques pour chacune des intensités; l'obtention d'une valeur négative pour une intensité, dans une branche, signifie que le sens réel du courant dans cette branche est le sens inverse de celui supposé au départ. Remarquons que, pour le signe de la f. é. m., seul compte le sens de parcours de la maille, le sens du courant ne comptant pas.

Théorème de superposition

Ce théorème découle immédiatement de la forme linéaire des lois de Kirchhoff par rapport aux intensités et aux f. é. m. : *le courant dans une branche quelconque est la somme algébrique des courants produits dans cette branche par chaque générateur supposé seul, les résistances gardant toujours la même valeur, et les autres générateurs étant remplacés par leur résistance interne.*

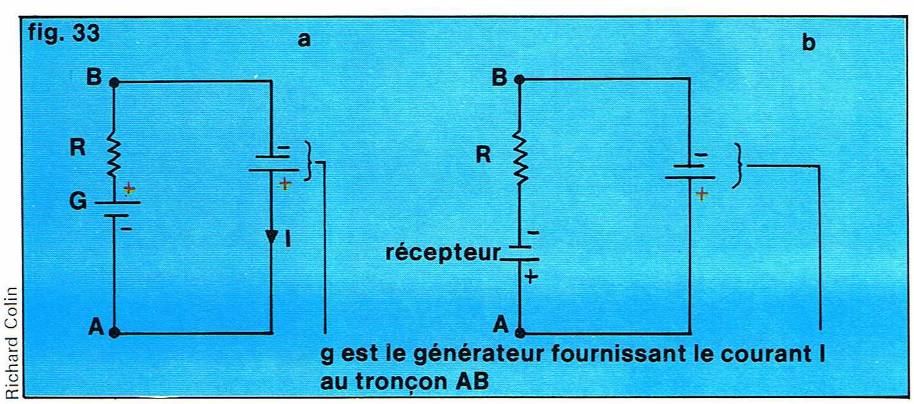

Richard Colin

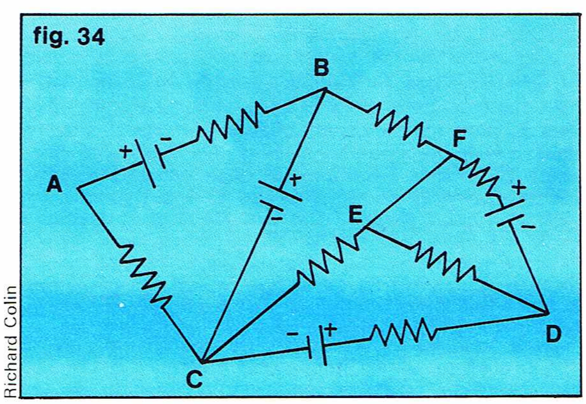

Richard Colin

Théorème de Thevenin

Le courant dans une impédance quelconque Z_r branchée entre les deux extrémités M et N d'un circuit est le même que celui que l'on aurait si Z_r était reliée à un générateur dont la f. é. m. serait la d. d. p. V_0 mesurée en circuit ouvert entre les deux bornes M et N (donc en enlevant Z_r) et dont la résistance interne serait celle que l'on mesurerait entre ces deux bornes, les générateurs du circuit étant remplacés par leur résistance interne.

Comment appliquer le théorème de Thevenin? Soit en effet le circuit complexe comprenant entre deux de ses bornes M et N, une impédance Z_r (*fig.* 35a). Le problème est de calculer le courant dans cette impédance. On procède pour cela de la manière suivante : on enlève d'abord Z_r. On calcule alors (c'est-à-dire à vide) la d. d. p., soit V_0, entre les bornes M et N ; on remplace les générateurs du circuit complexe par leurs impédances internes, et on calcule alors, vue des deux bornes M et N (Z_r étant déconnectée), l'impédance Z. On fait alors le schéma équivalent représenté par la *figure* 35b. On peut alors, en branchant Z_r, obtenir le courant I qui y passe par la formule :

$$I = \frac{V_0}{Z + Z_r}$$

Charge et décharge d'un condensateur

Nous allons à présent aborder l'étude de la charge et de la décharge d'un condensateur à travers une résistance R. Il s'agit de trouver la loi de variation de la tension aux bornes du condensateur en fonction du temps. Soit $u = u\ (t)$.

Cas de la décharge

Soit un condensateur C, chargé avec la charge q_0 (*fig.* 36a). Nous pouvons relier ses deux armatures à une résistance R en fermant l'interrupteur K. Avant de fermer K, la d. d. p. entre les deux armatures du condensateur est u_0. Fermons K et supposons que $u_A > u_B$. Le courant circule alors dans le sens indiqué sur la figure. Soit $t_0 = 0$ l'instant où l'on a fermé l'interrupteur. A l'instant t, la tension aux bornes de C est $u\ (t)$, et sa charge sera $dq = -I\ (t)\ dt$ (on observe en effet, à l'instant t, un courant I (t) fonction du temps, mais qui est positif). Le signe — affecté à dq vient du fait que la charge q diminue au cours du temps, puisque le condensateur se décharge. Or $q = Cu$ et $u = RI\ (t)$. On obtient ainsi l'équation différentielle $\frac{du}{u} = -\frac{1}{RC}\,dt$ qui, intégrée, donne la valeur de u à l'instant t : $\quad u\ (t) = u_0 e^{-\frac{t}{RC}}$

On pose $\theta = RC$ que l'on appelle *constante de temps* du circuit ; elle a les dimensions d'un temps. Au bout du temps θ, la tension a la valeur $\frac{u_0}{e}\left(\sim \frac{u_0}{3}\right)$. Cette constante caractérise donc la vitesse de décroissance de la tension (*fig.* 36b). En pratique, on considère qu'au bout du temps θ la décharge est pratiquement terminée. Par exemple, pour $t = 7\ \theta$, on a $u = \frac{u_0}{1\,000}$; ce qui est une tension très faible.

Quelle est l'*énergie dissipée* au cours de cette décharge ? Cette énergie est dissipée par effet Joule durant un temps théoriquement infini :

$$W = \int_0^\infty RI^2\ (t)\ dt$$

$$\text{avec } I\ (t) = \frac{u\ (t)}{R} = \frac{u_0}{R} e^{-\frac{t}{RC}} = \frac{q_0}{RC} e^{-\frac{t}{RC}}$$

$$W = \int_0^\infty R \frac{q_0^2}{R^2C^2} e^{-\frac{2t}{RC}}\,dt = \frac{q_0^2}{2\,C} = \frac{C^2u_0^2}{2\,C} = \frac{1}{2}\,Cu_0^2$$

Donc, pendant la décharge, toute l'énergie du condensateur est transformée en chaleur.

Cas de la charge

Le cas de la charge est représenté par la *figure* 37a. Dans ce circuit, on relie les armatures du condensateur par l'intermédiaire d'une résistance R à un générateur de f. é. m. $\mathcal{E}$. Soit $t_0 = 0$ l'instant où l'on ferme l'interrupteur. A l'instant t, l'armature A du condensateur a la charge q_0 qui augmente avec le temps : $q = q\ (t)$.

La *tension* entre ses armatures est alors $u = \frac{q}{C}$.

fig. 35

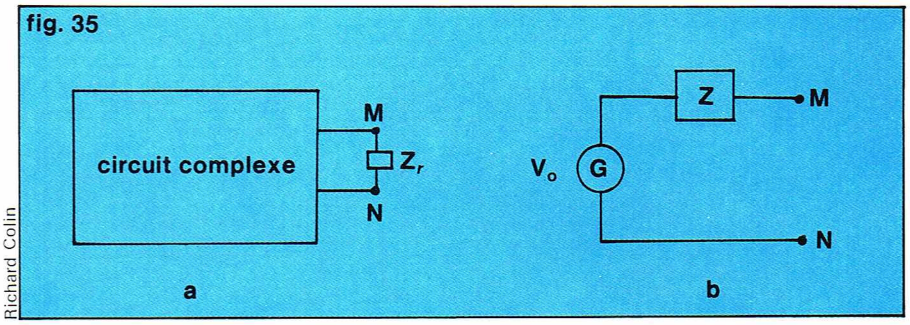

fig. 36

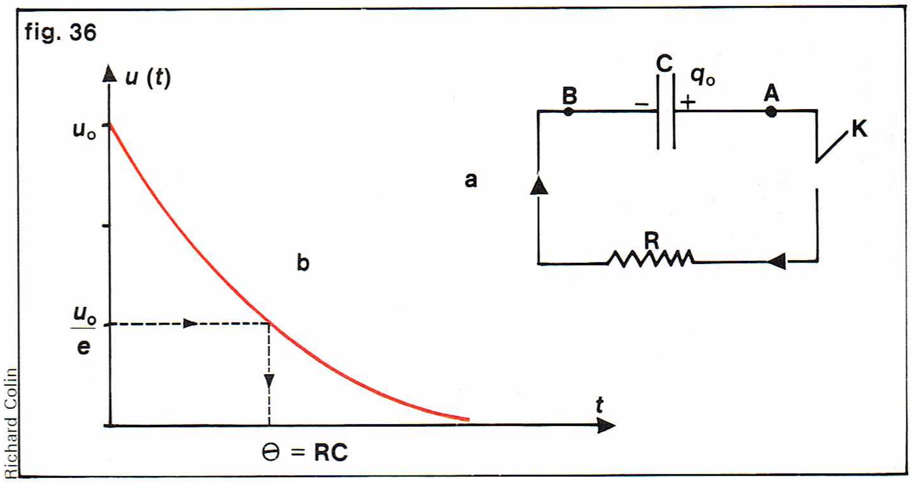

L'*intensité* du courant, variable avec le temps, est alors

$$I = \frac{dq}{dt} = C\frac{du}{dt} = \frac{u}{R}$$

En appliquant la loi d'Ohm au circuit : $\Sigma\,RI = \Sigma\,\mathcal{E}$, on obtient la loi concernant $u\ (t)$: $u\ (t) = \mathcal{E}\left(1 - e^{-\frac{t}{\theta}}\right)$.

Au bout du temps $\theta = RC$, $u = \mathcal{E}\left(1 - \frac{1}{e}\right) \sim \frac{2}{3}\,E$.

Au bout de quelques θ, la charge est considérée comme terminée (*fig.* 37b).

▲ *En haut, figure 35 : le théorème de Thevenin permet de remplacer le circuit 35a par le circuit équivalent 35b et ainsi de calculer le courant dans l'impédance Z_r. Ci-dessus, figure 36 : a, décharge d'un condensateur à travers une résistance ; b, la tension u(t) décroît exponentiellement avec la constante de temps* RC.

fig. 37

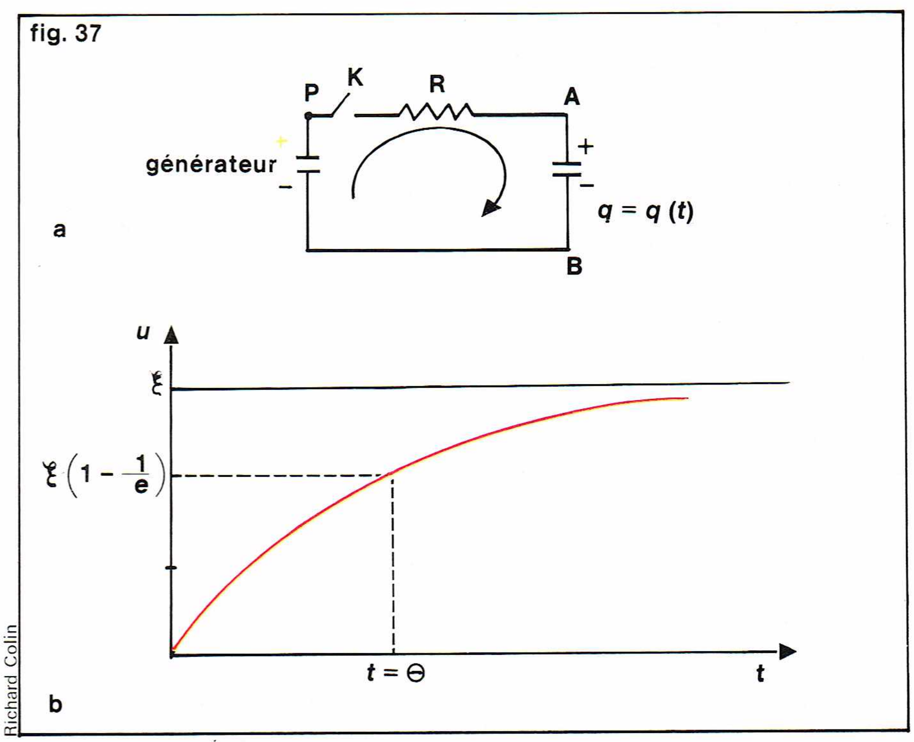

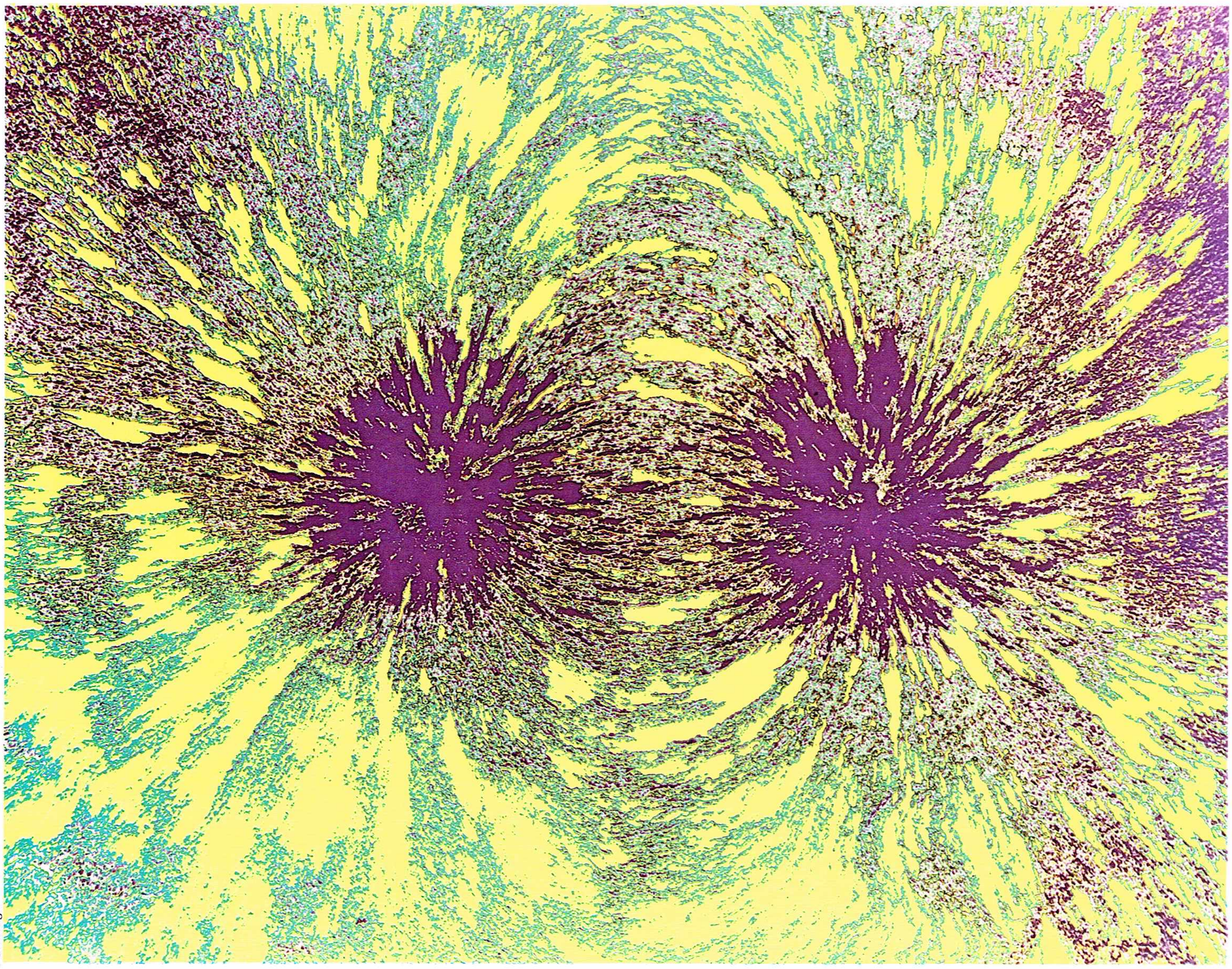

Parimage

▲ **Spectre magnétique.**

Électromagnétisme

Forces magnétiques

Nous allons d'abord montrer l'existence de forces magnétiques. Soit donc un ensemble de charges que l'on désignera par le terme de « charges agissantes ». En électrostatique, ces charges agissantes sont immobiles et créent en tout point M de l'espace un *champ électrostatique* $\vec{E}_e$. Si nous plaçons en M une charge q_0, elle est soumise à la force $\vec{F} = q_0\, \vec{E}_e$.

Supposons à présent que les charges agissantes soient en mouvement. Elles créent aussi en tout point M de l'espace un champ que l'on appelle *champ électrique* $\vec{E}$. Si l'on place en M une charge q_0 immobile, cette charge est soumise à la force $\vec{F} = q_0\vec{E}$. Si, toujours dans l'hypothèse des charges agissantes en mouvement, la charge q_0 est également en mouvement, alors cette charge se trouvant en M à l'instant t et ayant à cet instant la vitesse $\vec{V}$ est soumise à une force supplémentaire appelée *force magnétique* $\vec{F}_m$. Cette force magnétique est proportionnelle à q_0 et dépend de sa vitesse $\vec{V}$. Elle est également liée à une certaine déformation de l'espace créée par les charges agissantes en mouvement. Cette déformation de l'espace est caractérisée en tout point par un vecteur $\vec{B}$ appelé *vecteur induction magnétique*. Notons que ce vecteur n'existe en un point de l'espace que si les « charges agissantes » sont en mouvement. La force $\vec{F_m}$ à laquelle est soumise la charge q_0 est donnée par la relation fondamentale que l'on considère comme un postulat, car il a toujours été vérifié par l'expérience.

$$\vec{F_m} = kq_0\, \vec{V} \wedge \vec{B}$$

Dans le système M. K. S. A. : $k = 1$.

Aussi $\vec{F_m} = q_0 \cdot \vec{V} \wedge \vec{B}$.

Ainsi la force totale à laquelle est soumise la charge q_0 est :

(2) $$\vec{F}_t = q_0\,(\vec{E} + \vec{V} \wedge \vec{B})$$

Dans le système M. K. S. A., $\vec{F}_t$ s'exprime en coulombs (C), $\vec{B}$ en webers par mètre carré (Wb/m^2) ou teslas (T).

Cette force magnétique peut s'annuler dans trois cas : $\vec{V} = 0$ ou $\vec{B} = 0$, ou encore $\vec{V}$ et $\vec{B}$ sont colinéaires.

Le premier cas est obtenu quand la charge q_0 est immobile. Le second cas quand ce sont les charges agissantes qui sont immobiles. La relation **(2)** étant une loi fondamentale et générale, il faut à présent déterminer les relations précises qu'il y a entre les champs $\vec{E}$, $\vec{B}$ et les charges agissantes qui les ont créés. Si les charges agissantes sont animées d'un mouvement quelconque, le problème est très difficile à résoudre. C'est pourquoi nous traiterons le cas, important dans la pratique, de conducteurs immobiles parcourus par un courant I formé par les charges agissantes en mouvement. On supposera que ces conducteurs sont placés dans le vide (ou dans l'air). Dans le cas que nous considérons, $\vec{E}$ et $\vec{B}$ sont indépendants du temps.

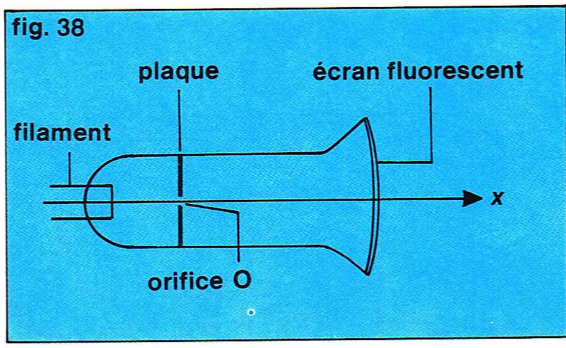

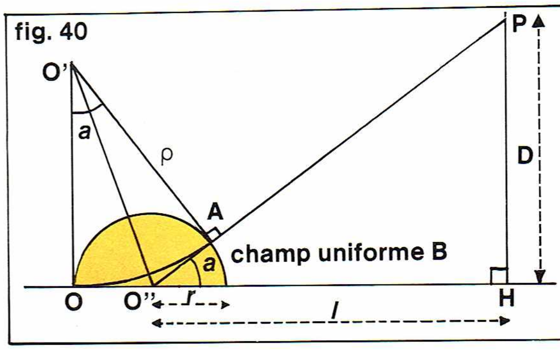

◄ *A gauche, figure 38 : représentation schématique d'un oscillographe cathodique.*
A droite, figure 40 : trajectoire suivie par l'électron dont le point d'impact sur l'écran fluorescent de l'oscilloscope cathodique est P.

On montre aussi que, parce que la vitesse des charges agissantes est faible, la force électrostatique $\vec{F_e}$ est négligeable devant $\vec{F_m}$. Donc seule subsistera la force $\vec{F_m} = q_0\vec{V} \wedge \vec{B}$.

Nous verrons dans un autre chapitre comment calculer $\vec{B}$ lorsque les conducteurs immobiles sont de forme simple. C'est le cas d'un fil rectiligne, d'une spire, d'un solénoïde, etc.

Action d'un champ magnétique sur le mouvement d'une particule - Vérification expérimentale de la relation fondamentale

Soit un oscilloscope cathodique. Succinctement, nous pouvons le décrire comme un tube ayant la forme présentée sur la *figure* 38 et dans lequel on a fait le vide. Un filament émet des électrons par effet thermo-électrique. Ces électrons sont attirés par une plaque munie d'un orifice O et portée à un potentiel positif par rapport au filament.

En l'absence de champ, les électrons poursuivent une trajectoire rectiligne, selon l'axe des x, et atteignent un écran fluorescent. Leur point d'impact peut donc être visibilisé.

Voyons à présent l'action d'un champ magnétique sur la trajectoire d'un électron.

Si l'on place la partie rectiligne du tube dans un solénoïde, on constate que la trajectoire de l'électron ne subit aucun changement. Cela s'exprime par le fait que $\vec{F_m} = q\vec{V} \wedge \vec{B} = 0$, car alors le champ $\vec{B}$ et la vitesse $\vec{V}$ de l'électron ont la même direction selon Ox.

Si l'on place à présent la partie rectiligne du tube dans un champ magnétique uniforme, perpendiculairement à Ox (on peut choisir ce champ magnétique perpendiculaire au plan de la feuille et allant, par exemple, d'arrière vers l'avant, et on emploie ainsi le signe suivant ⊙). On constate alors que la trajectoire de l'électron est déviée selon l'axe Oy. En effet, à l'instant $t = 0$, avant d'être dévié, l'électron est placé à l'origine des coordonnées O ; il a la vitesse V_0 selon l'axe des x (*fig.* 39).

A l'instant t, il est soumis à la force $\vec{F_m} = e\vec{V} \wedge \vec{B}$. Or $\vec{V}$ et $\vec{B}$ sont perpendiculaires ; avec l'hypothèse sur $\vec{B}$, on obtient $\vec{F_m}$ dirigée selon Oy et $F_m = -eVB$. Donc la trajectoire de l'électron restera toujours dans le plan Oxy. Or, $\vec{F_m}$ étant à tout instant perpendiculaire à $\vec{V}$, la composante tangentielle de F_m selon Ox, soit F_{mx}, est nulle :

$$F_{mx} = m\,\frac{dV_x}{dt} = 0$$

ce qui entraîne que $V_x = \text{Cte} = V_0$
donc la vitesse se conserve tout au long de la trajectoire de l'électron. Ainsi le module de la force $\vec{F_m}$ sera $|\vec{F_m}| = eV_0B$; d'autre part, puisque l'accélération tangentielle est nulle, l'accélération se confond avec l'accélération normale ;

donc $\gamma = \dfrac{V^2}{\rho} = \dfrac{V_0^2}{\rho}$,

ρ étant le rayon de courbure de la trajectoire de l'électron.

Si, d'autre part, nous désignons par m la masse de l'électron, nous obtenons : $F = m\gamma = F_m = eV_0B$.

Ce qui entraîne que $\rho = \dfrac{mV_0}{eB}$; ρ étant une constante, la trajectoire de l'électron est un *cercle*.

Considérons alors la *figure* 40. La trajectoire de l'électron se compose d'un arc de cercle OA dans la région où cet électron est soumis au champ uniforme et d'une droite AP, P étant le point d'impact sur l'écran fluorescent. Soit O' le centre du cercle de rayon ρ, et soit l'angle $\widehat{OO'A}$. Il est égal à l'angle $\widehat{PO''H}$ (O" étant le centre du cercle délimitant le champ uniforme $\vec{B}$. Son rayon est r.)

Appelons l la distance O"H et D la déviation PH repérable sur l'écran fluorescent.

$$D = l\ \text{tg}\ a\ ; \qquad \text{or tg}\ \frac{a}{2} = \frac{r}{\rho}$$

d'autre part
$$\text{tg}\ a = \frac{2\ \text{tg}\ \frac{a}{2}}{1 + \text{tg}^2\ \frac{a}{2}} = \frac{2\ \frac{r}{\rho}}{1 - \frac{r^2}{\rho^2}} = \frac{2\ \frac{r}{\rho}}{\frac{\rho^2 - r^2}{\rho^2}}$$

$\text{tg}\ a = \dfrac{2\ \rho r}{\rho^2 - r^2}$; or, en général, $r \ll \rho$.

Donc $\text{tg}\ a = \dfrac{2\ \rho r}{\rho^2} = \dfrac{2\ r}{\rho}$, ce qui entraîne que $D = \dfrac{2\ lr}{\rho}$;

$$D = \frac{2\ lreB}{mV_0}$$

Nous voyons que la déviation est inversement proportionnelle à la quantité de mouvement mV_0.

On peut aussi examiner cette déviation en fonction de la tension accélératrice des électrons v.

$$ev = \frac{1}{2}\,mV_0^2\ ; \quad \text{soit} : V_0 = \sqrt{\frac{2\ ev}{m}}$$

ce qui entraîne que $D = lrB\sqrt{\dfrac{e}{2\ mv}}$

Comme application, nous citerons le principe du cyclotron (Lawrence, 1932).

Forces magnétiques appliquées à un élément de circuit. Loi de Laplace

Soit un élément de courant dl (c'est un élément de circuit filiforme de longueur dl), immobile et parcouru par un courant constant I (*fig.* 41). Supposons que cet élément de courant soit soumis à un champ électrique $\vec{E}$ et à un champ magnétique B (créés par des « charges agissantes » extérieures en mouvement).

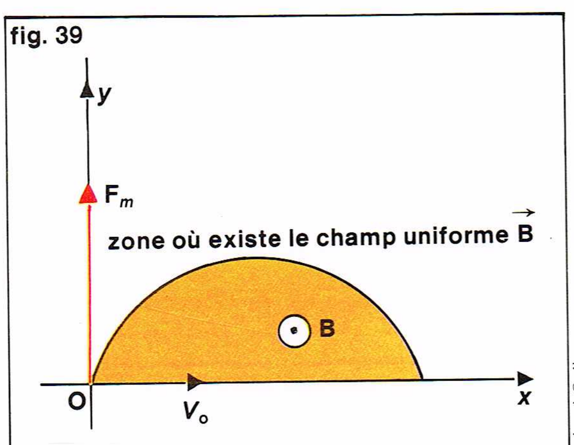

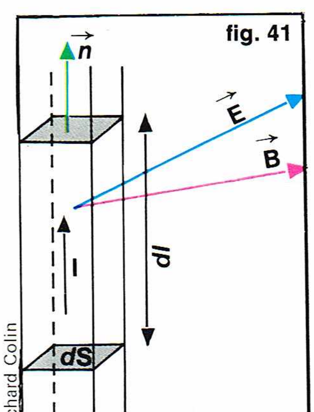

◄▼ *Figure 39 : si la partie rectiligne du tube cathodique est placée dans un champ magnétique $\vec{B}$, perpendiculairement au plan de la feuille, la trajectoire de l'électron est déviée selon l'axe Oy.*
Figure 41 ; l'élément de courant $\vec{dl}$ est soumis à la force de Laplace : $\vec{dF_m} = I\ \vec{dl} \wedge \vec{B}$.

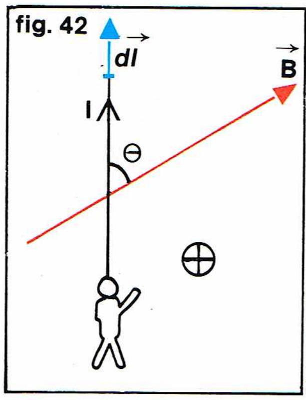

▲ *Figure 42 : la règle du bonhomme d'Ampère.*
▶ *Figure 44 : calcul du champ créé par un fil rectiligne indéfini.*

Richard Colin

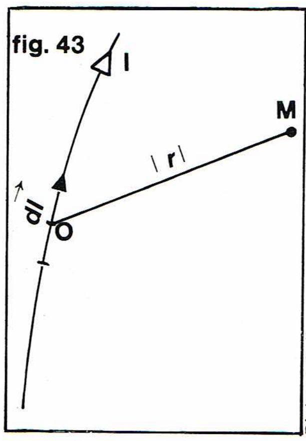

Richard Colin

▲ *Figure 43 : champ magnétique créé par un élément de courant $\vec{dl}$ en un point M situé à une distance $|\vec{r}|$ de $\vec{dl}$.*

▼ *Figure 45 : champ créé par un fil rectiligne de longueur finie.*

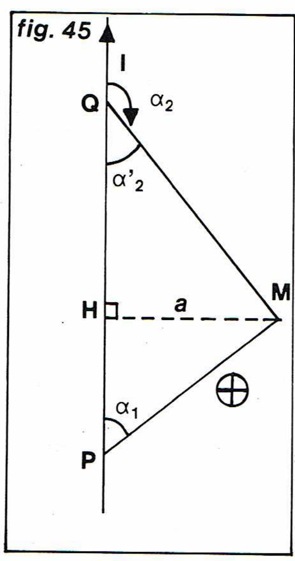

Richard Colin

L'action du champ électrique $\vec{E}$ sur l'élément dl est nulle. En effet, dans l'élément de courant, il y a autant de charges positives (ions + immobiles) que d'électrons mobiles, ce qui assure la neutralité du corps. Donc il y a création de deux forces égales et opposées qui s'annulent.

L'action du champ magnétique sur l'élément dl se traduit par une force magnétique $\vec{F_m}$ sur chaque charge q. $\vec{F_m} = q\vec{V} \wedge \vec{B}$ si $\vec{V}$ est la vitesse de la charge.

Calculons la résultante des forces magnétiques agissant sur les charges contenues dans l'élément dl. dl étant petit, on suppose que le champ est uniforme. La charge contenue dans l'élément dl, de surface de base dS, est : $dq = \rho_v \cdot dS \cdot dl$, ρ_v étant la *densité volumique de charges* :

$$d\vec{F_m} = \rho_v dS \cdot dl\, \vec{V} \wedge \vec{B}$$

$$d\vec{F_m} = dS \cdot dl \cdot \vec{J} \wedge \vec{B} \quad \text{avec } \vec{J} = \rho_v \vec{V}$$

Soit alors le vecteur unitaire $\vec{n}$, normal à la section dS.

$$d\vec{S} = \vec{n} \cdot dS \quad \text{et} \quad d\vec{l} = \vec{n} \cdot dl$$

Ainsi $dS \cdot dl = d\vec{S} \cdot d\vec{l}$

donc $d\vec{F_m} = d\vec{S} \cdot d\vec{l} \cdot \vec{J} \wedge \vec{B}$

Or $\vec{J} \cdot d\vec{S} = \mathrm{I}$ étant l'intensité du courant donc

$$d\vec{F_m} = \mathrm{I} \cdot d\vec{l} \wedge \vec{B}$$

Ainsi un élément immobile dl de courant, parcouru par un courant I et soumis à un champ magnétique $\vec{B}$, est soumis à la force de Laplace donnée par l'expression ci-dessus.

Si θ est l'angle que fait l'élément de courant avec le champ, l'expression précédente s'écrit :

$$|d\vec{F_m}| = \mathrm{I} \cdot dl \cdot \mathrm{B} \sin\theta$$

Si, comme sur la *figure* 42, $d\vec{l}$ et $\vec{B}$ sont dans le plan de la feuille, alors $d\vec{F_m}$ sera orienté de l'avant vers l'arrière de la feuille (notation ⊕).

Notons que, pour connaître le sens de $d\vec{F_m}$, on peut utiliser la **règle du bonhomme d'Ampère** : *le courant entre par les pieds et sort par la tête du bonhomme qui regarde dans la direction de $\vec{B}$. Le sens de $d\vec{F_m}$ est indiqué par le bras gauche tendu.*

Champ d'induction magnétique créé par les courants

Comme nous l'avons déjà dit dans un chapitre précédent, nous allons maintenant calculer le champ magnétique $\vec{B}$ créé par des circuits immobiles traversés par un courant continu I, et placés dans le vide.

C'est la **loi de Biot-Savart** qui va permettre de calculer le champ $\vec{B}$ créé par de tels circuits. Pour faire ce calcul, considérons donc un circuit filiforme (*fig.* 43) traversé par un courant I. On décompose ce circuit en « éléments de courant » $d\vec{l}$, vecteurs dont le sens est celui du courant I. Chaque élément de courant $d\vec{l}$ apporte en tout point M de l'espace une contribution $d\vec{B}$ au champ total $\vec{B}$. Le champ $\vec{B}$ est alors égal à la somme des contributions de tous les « éléments de courant » tels que $d\vec{l}$. La loi de Biot-Savart établit la relation entre $d\vec{l}$ et $d\vec{B}$ en un point M situé à la distance $|\vec{OM}| = |\vec{r}|$ de O, milieu de l'élément $d\vec{l}$. Soit $\vec{u}$ le vecteur unitaire porté par $\vec{OM}$ et α l'angle entre $d\vec{l}$ et $\vec{u}$. La relation vectorielle est la suivante :

$$d\vec{B} = k \frac{\mathrm{I}}{r^2} d\vec{l} \wedge \vec{u}$$

et, sous forme rationalisée (M. K. S. A.), $k = \dfrac{\mu_0}{4\pi}$

la formule devient :

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \mathrm{I}}{4\pi r^2} d\vec{l} \wedge \vec{u} = \frac{\mu_0 \mathrm{I}}{4\pi r^2} dl \sin\alpha$$

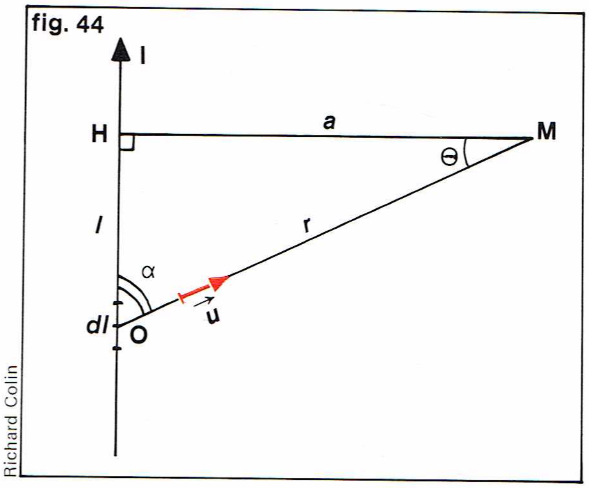

Richard Colin

Le vecteur $d\vec{B}$ est donc perpendiculaire au plan défini par les vecteurs $d\vec{l}$ et $\vec{u}$. Son sens est donné par la règle du produit vectoriel, ou encore par la règle du bonhomme d'Ampère. Sur la *figure* 43, le sens de $d\vec{B}$ est d'avant vers l'arrière (⊕).

Dans le système M. K. S. A., rappelons que $d\vec{B}$ s'exprime en weber par mètre carré ($\mathrm{Wb/m^2}$) ou encore en tesla (T). La valeur de μ_0 dans ce système est :

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$$

Ainsi : $d\vec{B} = \dfrac{10^{-7}}{r^2} \mathrm{I} \cdot d\vec{l} \wedge \vec{u}$

Calcul du champ d'induction créé par quelques circuits simples

Champ créé par un fil rectiligne (*fig.* 44)

Nous voyons sur cette figure que :

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \mathrm{I}}{4\pi r^2} d\vec{l} \wedge \vec{u}$$

$$= \frac{\mu_0 \mathrm{I}}{4\pi r^2} dl \sin\alpha$$

$$= \frac{\mu_0 \mathrm{I}}{4\pi r^2} dl \cos\theta$$

Exprimons dl et r en fonction de θ : $l = \mathrm{OH} = a \operatorname{tg}\theta$

comme $\quad l = \mathrm{OH} = a \operatorname{tg}\theta \quad$ et $\quad r = \dfrac{a}{\cos\theta}$

on obtient : $d\mathrm{B} = \dfrac{\mu_0 \mathrm{I}}{4\pi a} \cos\theta\, d\theta$

or $\quad \theta = \dfrac{\pi}{2} - \alpha \quad$ donc $\quad d\theta = -\,d\alpha$

aussi $d\mathrm{B} = -\dfrac{\mu_0 \mathrm{I}}{4\pi a} \sin\alpha\, d\alpha$, dont la valeur absolue est

$$d\mathrm{B} = +\frac{\mu_0 \mathrm{I}}{4\pi a} \sin\alpha\, d\alpha$$

Dans le cas d'un *fil de longueur finie* (*fig.* 45), il crée en M le champ B :

$$\mathrm{B} = \frac{\mu_0 \mathrm{I}}{4\pi a} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin\alpha\, d\alpha$$

α_1 et α_2 étant les limites d'intégration, soit :

$$\mathrm{B} = \frac{\mu_0 \mathrm{I}}{4\pi a} (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2)$$

Si l'on introduit l'angle α_2' qui est l'angle supplémentaire de α_2, on a : $\mathrm{B} = \dfrac{\mu_0 \mathrm{I}}{4\pi a} (\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2')$

Si le *fil est infiniment long*, on peut dire que le point M se rapproche infiniment du fil.

α_1 tend vers 0 et α_2 tend vers π,

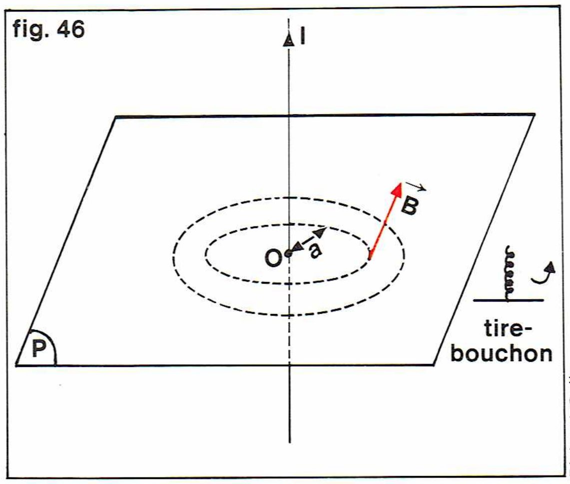

Richard Colin

ce qui entraîne que $|\vec{B}| = \dfrac{\mu_0 I}{4\pi a} \cdot 2 = \dfrac{\mu_0 I}{2\pi a}$

Remarque : dans le cas de la *figure* 45, le champ $\vec{B}$ perpendiculaire au plan de la feuille va de l'avant vers l'arrière (⊕).

Si nous prenons un fil vertical indéfini, parcouru par un courant I, et que nous le coupions par un plan horizontal (P), alors tous les points situés dans ce plan, à une distance *a* du point O (point de contact entre le fil et le plan), seront soumis au même vecteur d'induction

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}$$

Le lieu de ces points est donc un cercle de centre O et de rayon *a*. Le champ $\vec{B}$ est tangent à ce cercle que l'on appelle *ligne de champ* (*fig.* 46). L'ensemble des « lignes de champ » forme une famille de cercles concentriques. Le sens de $\vec{B}$ qui est également celui des lignes de champ est donné, par exemple, par la **règle du tire-bouchon :** *c'est le sens donné par la rotation d'un tire-bouchon allant dans le sens de I.*

Calcul du champ d'induction créé par une spire circulaire

Soit une spire circulaire parcourue par un courant I dans le sens inverse des aiguilles d'une montre (*fig.* 47).

Nous allons calculer le champ $\vec{B}$ créé par cette spire en un point M de l'axe O'z. Par raison de symétrie, le champ $\vec{B}$ sera porté par cet axe.

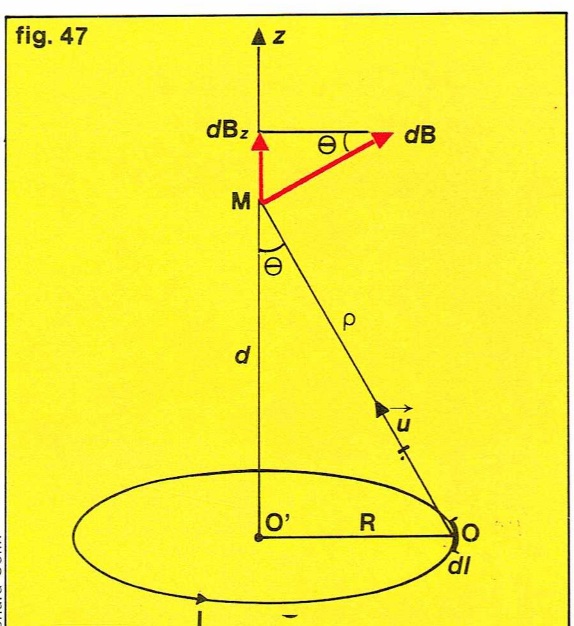

Richard Colin

Calculons la contribution dB d'un élément dl de centre O de cette spire :

soit $OM = \rho$; $O'M = d$ et $O'O = R$.

Soit $\vec{u}$ le vecteur unitaire porté par $\overrightarrow{OM}$ et θ l'angle $(\widehat{O'MO})$.

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi\rho^2}\, d\vec{l} \wedge \vec{u}$$

Or dl est perpendiculaire à $\vec{u}$, donc : $dB = \dfrac{\mu_0 I}{4\pi\rho^2}\, dl$

D'autre part, par définition du produit vectoriel, dB est perpendiculaire à OM. Donc $dB_z = dB \sin\theta$.

$$dB_z = \frac{\mu_0 I}{4\pi\rho^2}\, dl \sin\theta$$

Comme $\rho = \dfrac{R}{\sin\theta}$, on obtient $dB_z = \dfrac{\mu_0 I}{4\pi R^2} \sin^3\theta\, dl$

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} \sin^3\theta \int_0^{2\pi} dl = \frac{\mu_0 I}{2}\,\frac{\sin^3\theta}{R}$$

◀ *Figure 46 : l'ensemble des lignes de champ forme une famille de cercles concentriques. En chaque point, $\vec{B}$ est tangent à l'un de ces cercles.*

◀▼ *A gauche, figure 47 : champ magnétique créé par une spire en un point M de son axe O'z. A droite, champ d'induction magnétique d'un fil conducteur, visualisé à l'aide de limaille de fer.*

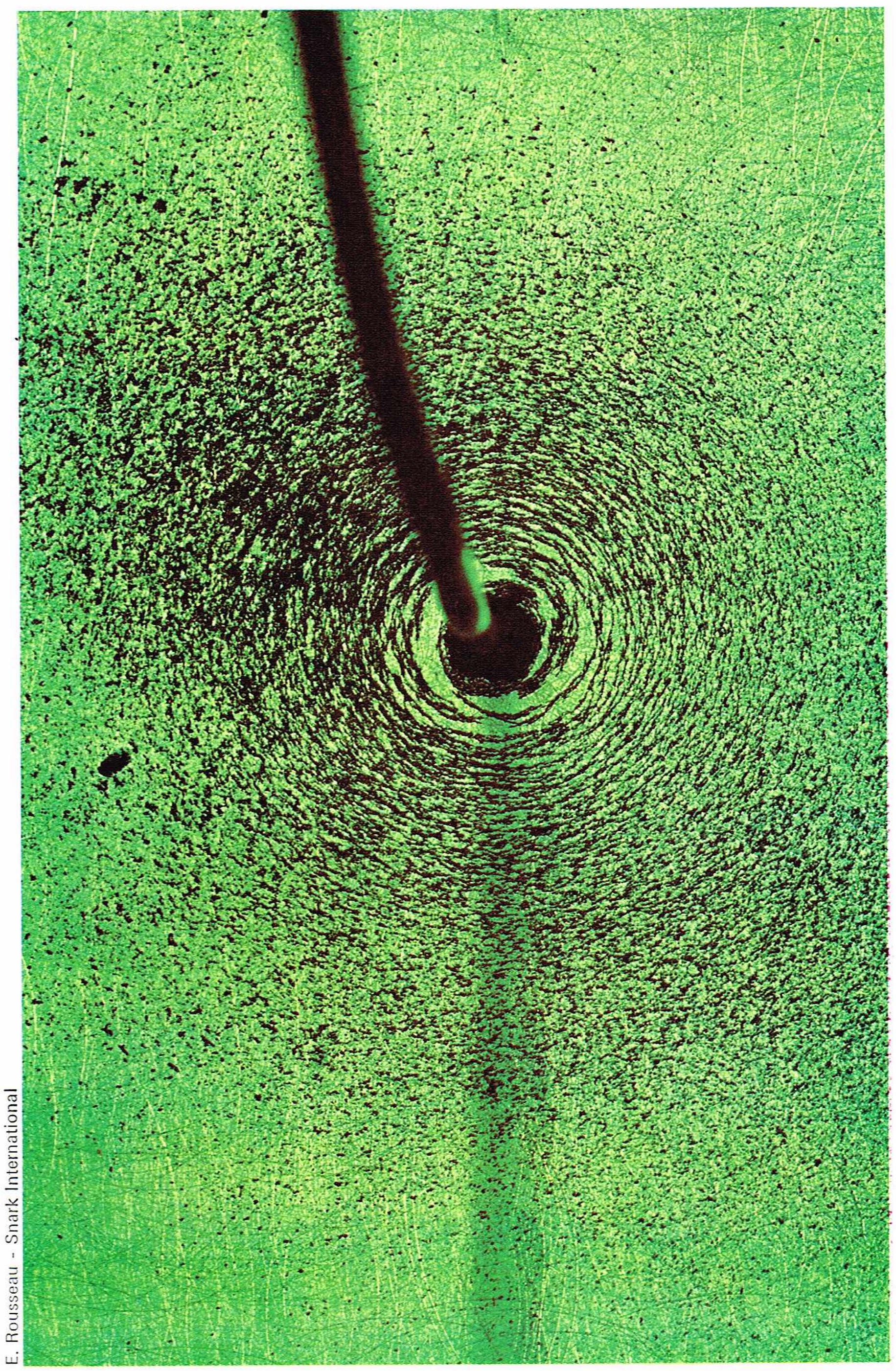

E. Rousseau - Snark International

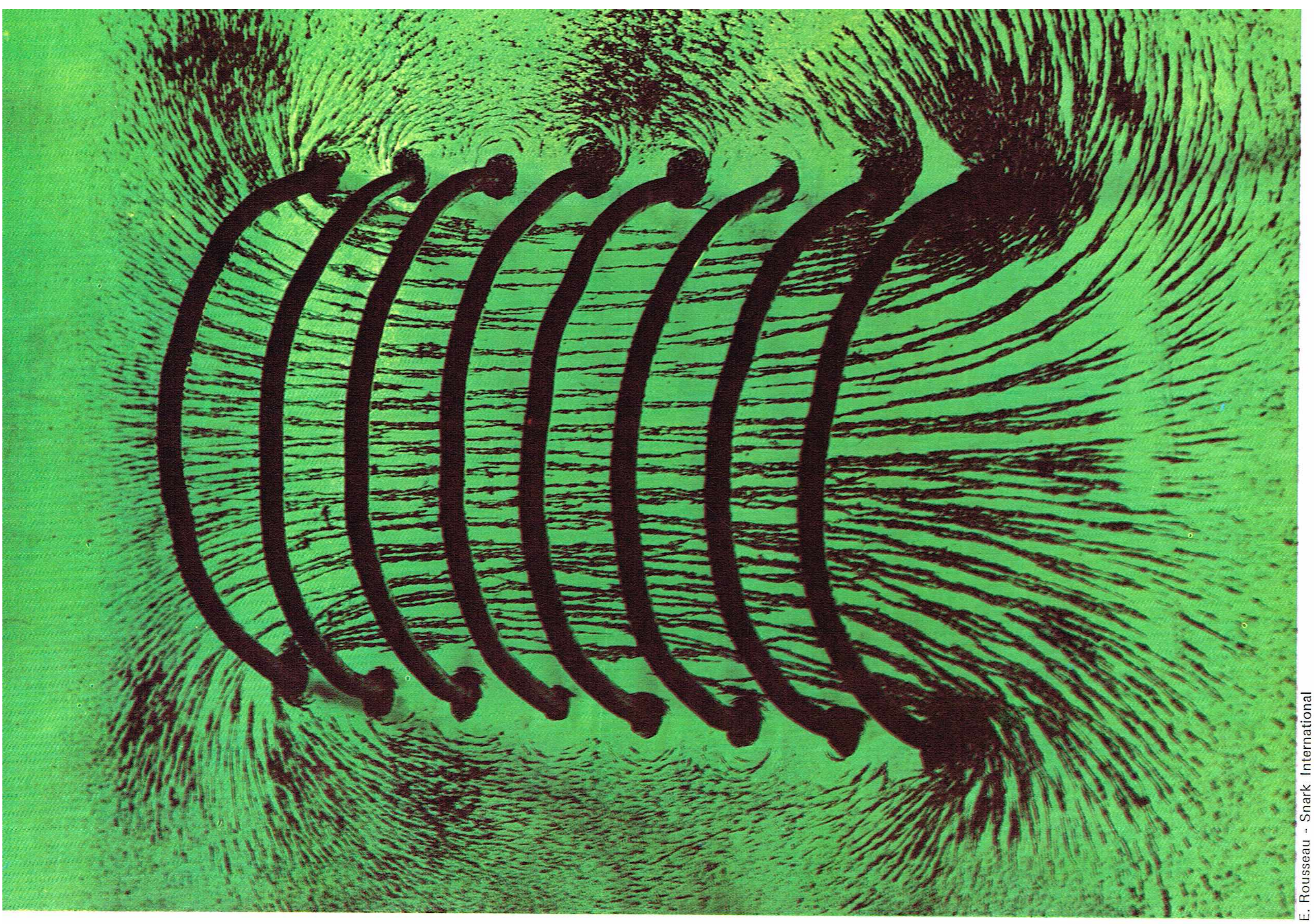

E. Rousseau - Snark International

▲ *Visualisation du champ magnétique créé par un solénoïde.*

$$\text{car} \int_0^{2\pi} dl = 2\,\pi R$$

On peut exprimer également B_z en fonction de données connues, c'est-à-dire R et *d*.

On a : $$\sin\theta = \frac{R}{\rho} = \frac{R}{(R^2 + d^2)^{\frac{1}{2}}}$$

$$B_z = \frac{\mu_0 I R^3}{2\,R\,(R^2 + d^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{\mu_0 I}{2}\,\frac{R^2}{(R^2 + d^2)^{\frac{3}{2}}}$$

Nous remarquons que B_z a le sens positif de O_z (règle du tire-bouchon). Nous remarquons aussi que, si le point M se rapproche du centre de la spire, cela correspond à θ tendant vers $\frac{\pi}{2}$.

Aussi, le champ créé par une spire en son centre O′ est :

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\,R}$$

Les lignes de champ créées par une spire circulaire parcourue par un courant I peuvent être matérialisées par de la limaille de fer. En effet, soit la *figure* 48, constituée par une spire circulaire coupée en son diamètre par un plan (π), sur lequel on a saupoudré de la limaille de fer. Lorsque le courant passe, par exemple de P vers Q, on constate que les lignes de champ sont « dessinées » par la limaille de fer. En chaque point de ces lignes, $\vec{B}$ est tangent. La face « sud » est la face par laquelle entrent les lignes de champ, et la face « nord » celle par laquelle elles sortent. Notons qu'il est possible d'obtenir un champ à peu près

fig. 48

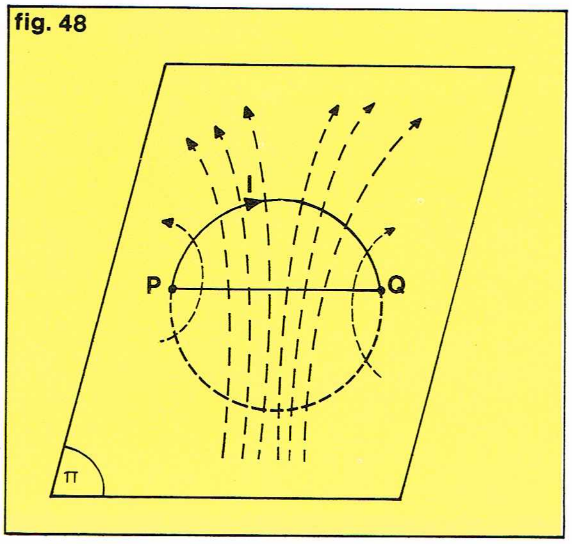

Richard Colin

fig. 49

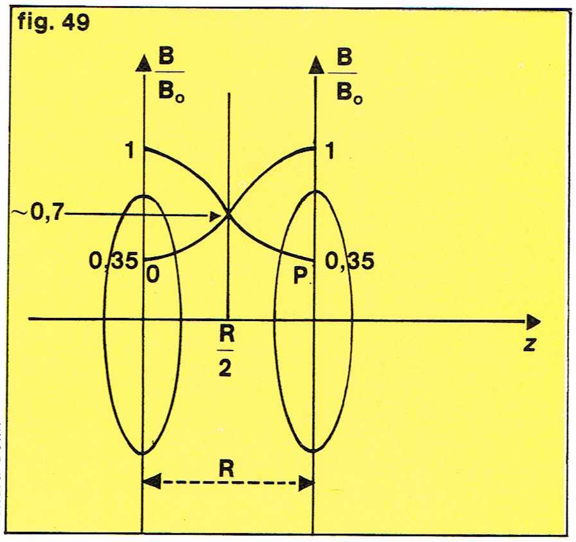

Richard Colin

▶ *A gauche, figure 48 : lignes de champ créées par une spire circulaire. A droite, figure 49 : rapport* $\frac{B}{B_0}$ *pour chaque spire en fonction de la distance des deux spires séparées par* R.

constant sur une certaine distance, entre deux spires de même rayon et parcourues par le même courant dans le même sens.

Considérons en effet la *figure* 49, constituée de deux spires séparées par la distance R. Un calcul simple montre qu'une spire circulaire crée en un point P situé sur son axe à une distance R de son centre un champ

$$B = 0{,}35\,\frac{\mu_0 I}{2\,R} = 0{,}35\ B_0$$

Donc, à une distance R de O, on a : $\frac{B}{B_0} = 0{,}35$.

Nous voyons aussi sur cette figure le rapport $\frac{B}{B_0}$ pour chaque spire, en fonction de la distance des deux spires séparées par R. Les champs créés en chaque point s'additionnent, puisque les spires sont parcourues par les courants, dans le même sens. Nous constatons que le rapport $\frac{B}{B_0}$ est à peu près constant sur une petite distance autour de $\frac{R}{2}$ (notons qu'à la distance $\frac{R}{2}$ de chaque spire le rapport $\frac{B}{B_0}$ est un peu différent de 0,7).

Calcul du champ d'induction créé par un solénoïde en un point de son axe

Un solénoïde est une bobine cylindrique dont les spires sont serrées et régulièrement espacées. Soit n le nombre de spires par unité de longueur. Soit également un axe Ox passant par le centre du solénoïde (*fig.* 50a) dont le rayon est R. Pour calculer le champ créé par ce solénoïde en un point M de cet axe, nous devons considérer deux cas, selon que M est à l'extérieur ou à l'intérieur du solénoïde.

Si nous prenons un élément de longueur dx de ce solénoïde, il contient $n\,dx$ spires.

Considérons d'abord le *point M à l'extérieur du solénoïde*.

La spire S crée en ce point le champ :

$$dB_\theta = \frac{\mu_0 I}{2}\,\frac{\sin^3\theta}{R}$$

θ étant l'angle sous lequel on voit du point M la spire S.

La contribution dB créée par les $n\ dx$ spires, au champ B, est :

$$dB_\theta = \frac{\mu_0 I}{2}\,\frac{\sin^3\theta}{R}\,n dx$$

Exprimons dx en fonction de $d\theta$:

$$\frac{R}{x} = \mathrm{tg}\,\theta\,;\ x = \frac{R}{\mathrm{tg}\,\theta}\,;\ \text{donc } dx = \frac{-R}{\mathrm{tg}^2\,\theta}\cdot\frac{d\theta}{\cos^2\theta} = -\frac{R\,d\theta}{\sin^2\theta}$$

ce qui entraîne la valeur de dB :

$$dB = \frac{-n\mu_0 I}{2}\sin\theta\,d\theta$$

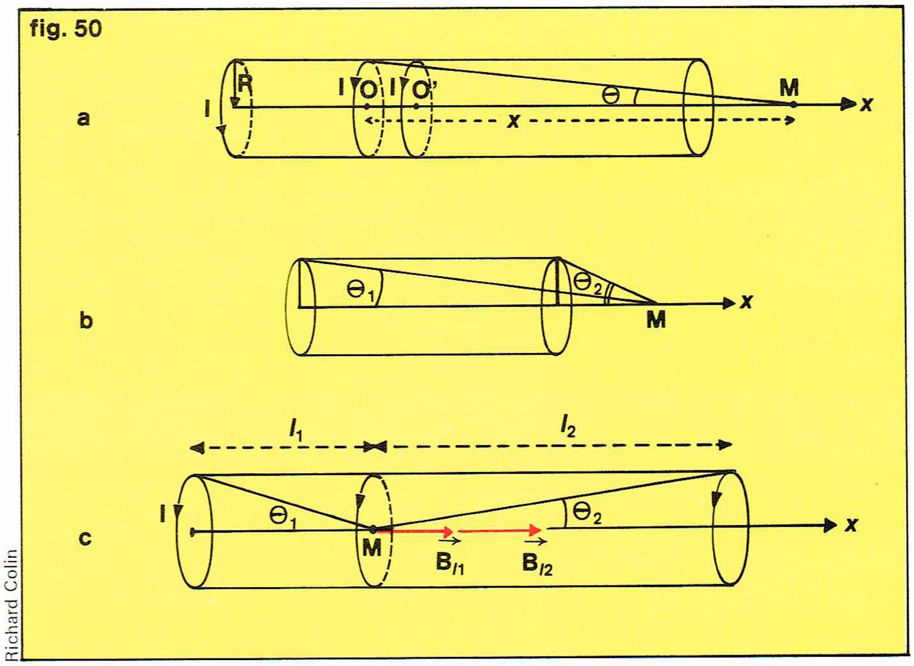

Richard Colin

▲ *Figure 50 : a, schéma d'un solénoïde (un élément dx de ce solénoïde contient ndx spires) ; b, champ créé par un solénoïde en un point* M *situé sur son axe et à l'extérieur du solénoïde ; c, champ créé par un solénoïde en un point* M *situé sur son axe et à l'intérieur du solénoïde.*

Physiquement, c'est la valeur absolue $+\frac{n\mu_0 I}{2}\sin\theta d\theta$ qui est valable. Si nous considérons alors les angles limites du solénoïde (angles sous lesquels on voit les deux extrémités du solénoïde), alors on peut intégrer dB et ainsi calculer le champ créé par tout le solénoïde en M (*fig.* 50b).

$$B = \frac{n\mu_0 I}{2}\int_{\theta_1}^{\theta_2}\sin\theta d\theta = \frac{n\mu_0 I}{2}(\cos\theta_1 - \cos\theta_2)$$

Si le point M se trouve sur la dernière spire du solénoïde, alors l'angle θ_2 tend vers $\frac{\pi}{2}$ et $\cos\theta_2$ tend vers 0.

Alors $B = \frac{n\mu_0 I}{2}\cos\theta_1 = B_l$

Le second cas envisageable est lorsque le *point M se trouve à l'intérieur du solénoïde* (*fig.* 50c). On peut alors considérer que l'on a affaire à deux solénoïdes l_1 et l_2 mis côte à côte. Le premier solénoïde de longueur l_1 crée en M le champ B_{l1} :

$$B_{l1} = \frac{n\mu_0 I}{2}\cos\theta_1$$

Le deuxième solénoïde de longueur l_2 crée en M le champ B_{l2} :

$$B_{l2} = \frac{n\mu_0 I}{2}\cos\theta_2$$

▼ *A gauche, champ magnétique créé par un solénoïde parcouru par un courant. A droite, champ magnétique créé par deux solénoïdes parcourus par un courant.*

Bevilacqua

Bevilacqua

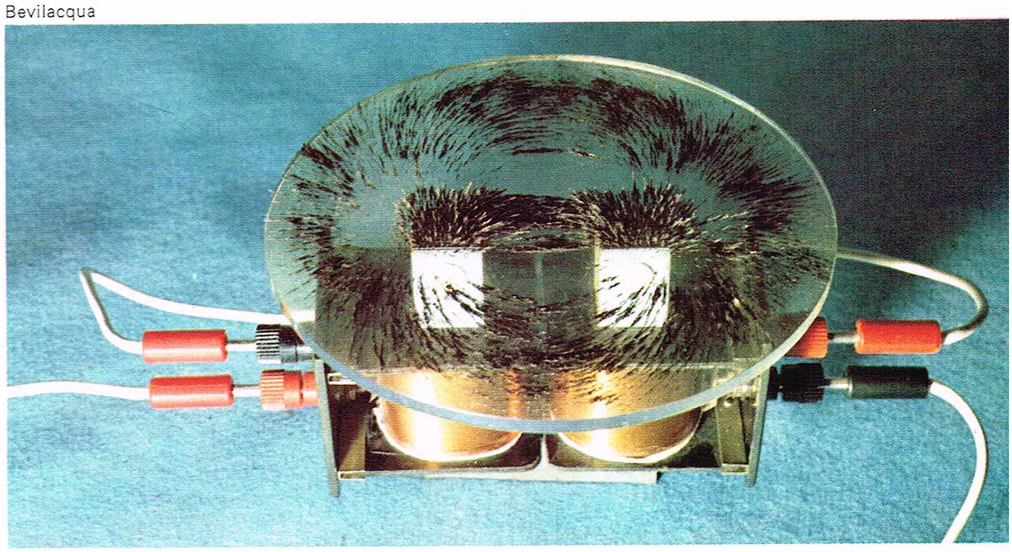

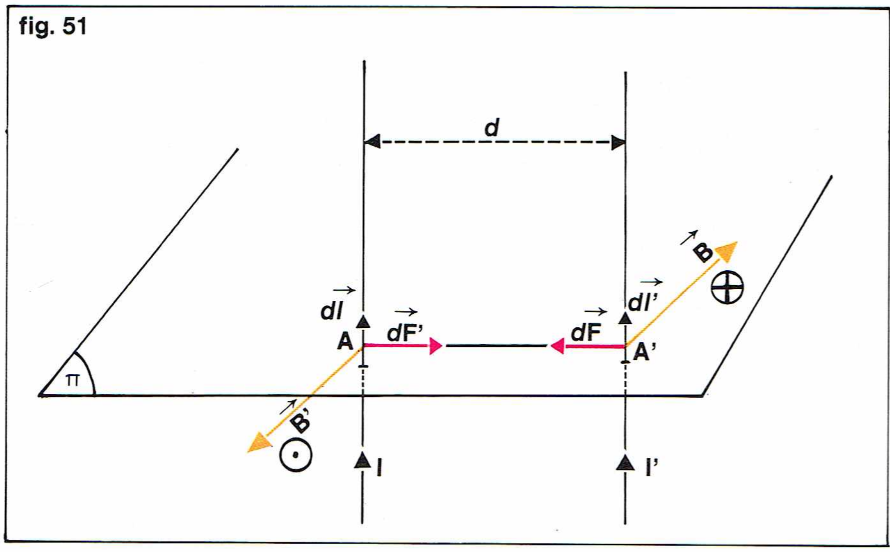

▲ *Figure 51 : interaction entre deux fils conducteurs parallèles.*

Ces deux champs sont dirigés dans le même sens, puisque le courant dans les spires a le même sens. D'autre part, d'après la *figure* 50c, $|\vec{B}_{l2}|$ est supérieur à $|\vec{B}_{l1}|$, puisque l_2 est plus long que l_1.

Le champ total en M est

$$B = B_{l2} + B_{l1} = \frac{n\mu_0 I}{2}(\cos\theta_1 + \cos\theta_2)$$

Si le solénoïde est très long, les angles θ_1 et θ_2 tendent chacun vers 0. Alors $B = \frac{n\mu_0 I}{2} \times 2 = n\mu_0 I$.

Ce champ est uniforme, comme on peut le constater.

Dans le système M. K. S. A., n s'exprime en nombre de spires par mètre et I en ampères.

Interaction entre deux fils conducteurs parallèles

Soit deux fils conducteurs parallèles distants de d et parcourus par du courant dans le même sens. Le premier est parcouru par le courant I et le second par le courant I' (*fig.* 51). Soit un plan (π) coupant perpendiculairement les deux fils respectivement en A et A'.

Le courant I crée dans le plan (π) en A' (à une distance d de A) le champ $\vec{B}$ dont le module est :

$$|\vec{B}| = \frac{\mu_0 I}{2\pi d}$$

et dont la direction est de l'avant vers l'arrière du plan de la feuille (notation ⊕). Donc l'élément de courant centré sur A' et de longueur dl' est soumis à la force de Laplace :

$$d\vec{F} = I'\vec{dl'} \wedge \vec{B} = \frac{\mu_0}{2\pi} II' \frac{\vec{dl'}}{d} = \frac{\mu_0}{2\pi} II' \frac{\vec{dl}}{d}$$

(car on peut choisir $\vec{dl'} = \vec{dl}$).

Cette force, dans le cas de la figure, est dirigée de A' vers A.

Intéressons-nous à présent au fil parcouru par le courant I'. Ce fil crée en A le champ $|\vec{B'}| = \frac{\mu_0 I'}{2\pi d}$

Ce champ est dirigé vers l'avant de la feuille (notation ⊙). A ce champ, il correspond la force de Laplace :

$$d\vec{F'} = I\vec{dl} \wedge \vec{B'}$$

$$d\vec{F'} = \frac{\mu_0}{2\pi} II' \frac{\vec{dl}}{d}$$

Nous constatons que les deux forces $d\vec{F}$ et $d\vec{F'}$ sont égales et de sens opposé, ce qui était prévisible d'après la loi générale en physique du principe de l'action et de la réaction. Nous voyons également que les deux forces sont attractives, car nous avons choisi les courants dans le même sens. Ces deux forces seraient de même répulsives si les courants avaient été choisis en sens inverse.

Définition de l'ampère

A partir d'une des deux relations précédentes, on peut donner la définition légale de l'ampère. *L'ampère est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu entre deux conducteurs parallèles, indéfinis et séparés par une distance de 1 mètre dans le vide, produit une force attractive ou répulsive égale à* $2 \cdot 10^{-7}$ *newton par mètre de longueur*; cela dans le système M. K. S. A. En effet, dans ce système :

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$$

En posant $\vec{dl} = 1$ m, $d = 1$ m, $I = I' = 1$ A,

on obtient bien $d\vec{F} = 4\frac{\pi 10^{-7}}{2\pi} = 2 \cdot 10^{-7}$ newton/mètre.

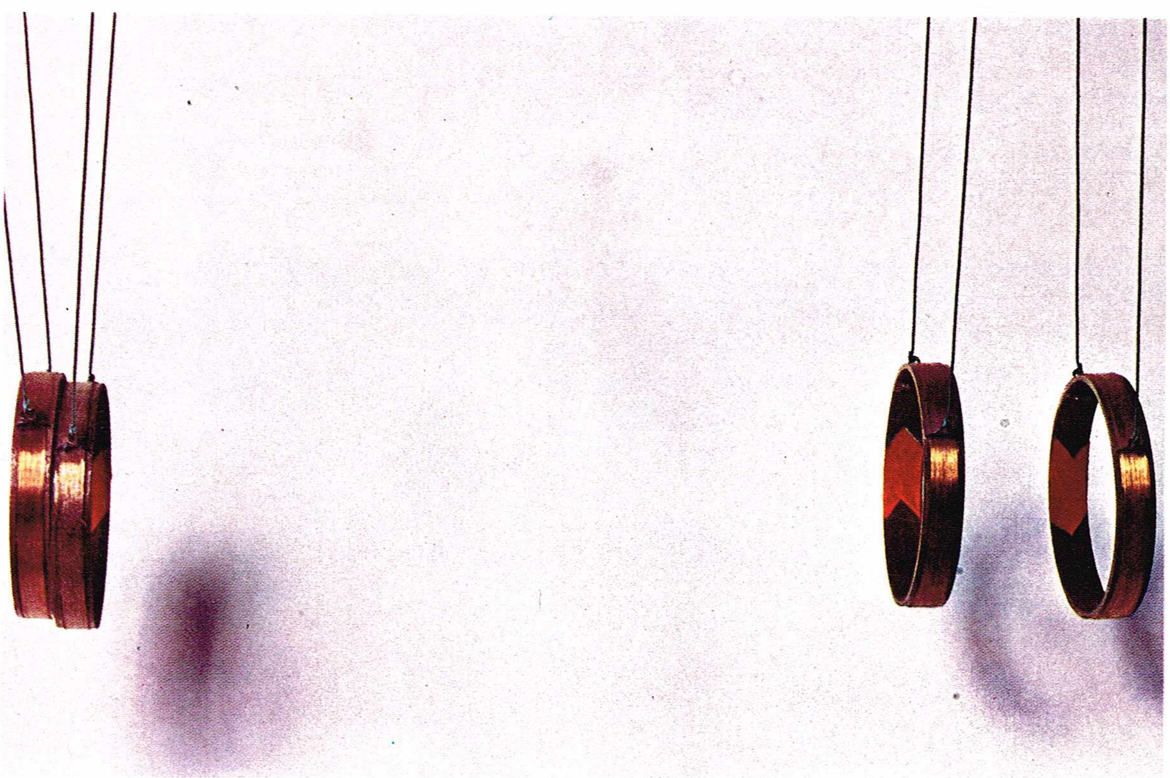

▶ *Bobines circulaires s'attirant ou se repoussant selon que les courants passent dans le même sens (les deux bobines de gauche) ou en sens inverse (les deux bobines de droite).*

Snark International

Théorème d'Ampère

Soit un fil rectiligne parcouru par un courant I, et soit un plan (π) coupant ce fil perpendiculairement (*fig.* 52). Considérons également un point M du plan (π). On peut définir ce point par ses coordonnées (r, θ). En ce point M, le fil parcouru par I crée le champ $\vec{B}$ qui se trouve donc dans le plan (π). Le module de $\vec{B}$ est donné par :

$$|\vec{B}| = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

Son sens est indiqué sur la *figure* 52. Les composantes de $\vec{B}$ selon θ et r sont telles que : $\vec{B} = B_r \vec{u}_r + B_\theta \vec{u}_\theta$.

Soit alors un déplacement de M dans le plan (π) (M vient en M′).

Les composantes de $\overrightarrow{MM'} = d\vec{M}$ sont telles que :

$$d\vec{M} = dr\,\vec{u}_r + r\,d\theta\,\vec{u}_\theta$$

Le travail élémentaire de $\vec{B}$ lors de ce déplacement élémentaire est :

$$dW = \vec{B} \cdot d\vec{M} = B_r\,dr + B_\theta r\,d\theta$$

et dans le cas envisagé, la composante radiale de $\vec{B}$, soit B_r, est nulle, donc $dW = B_\theta r\,d\theta = |\vec{B}|\,r\,d\theta$.

Ainsi : $$dW = \frac{\mu_0 I}{2\pi}\,d\theta$$

Considérons alors une courbe plane Γ, située dans le plan (π). Le travail de $\vec{B}$ le long de cette courbe est donné par l'expression :

$$W = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \oint_\Gamma d\theta$$

Il faut à présent envisager les cas où la courbe enlace ou n'enlace pas le fil (*fig.* 53).

Dans le premier cas $\oint_\Gamma d\theta = 2\pi$

Dans le second cas $\oint_\Gamma d\theta = 0$

Dans le cas où la courbe enlace le fil : $W = \mu_0 I$

Comme $W = \oint_\Gamma dW = \oint_\Gamma \vec{B} \cdot \vec{dl}$

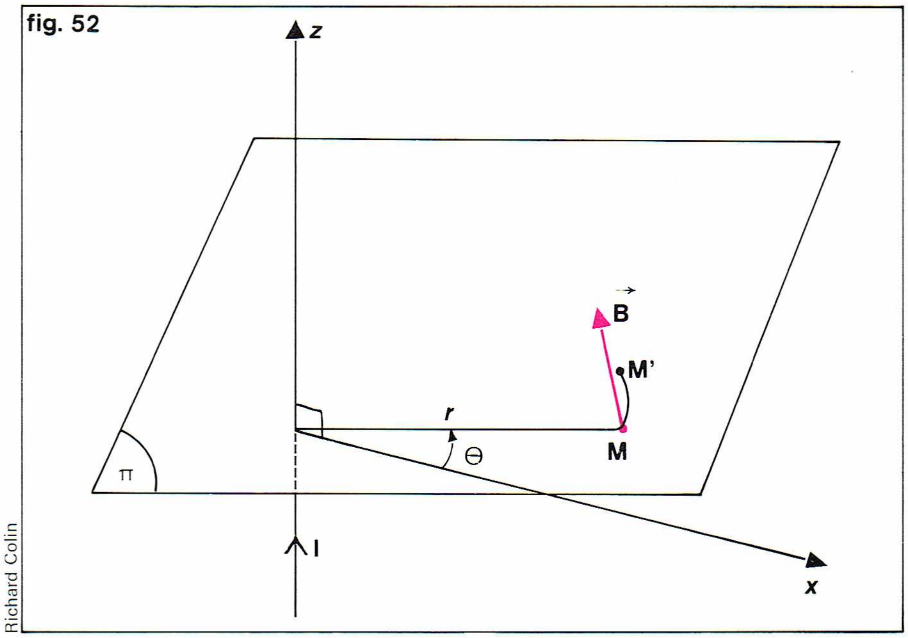

Richard Colin

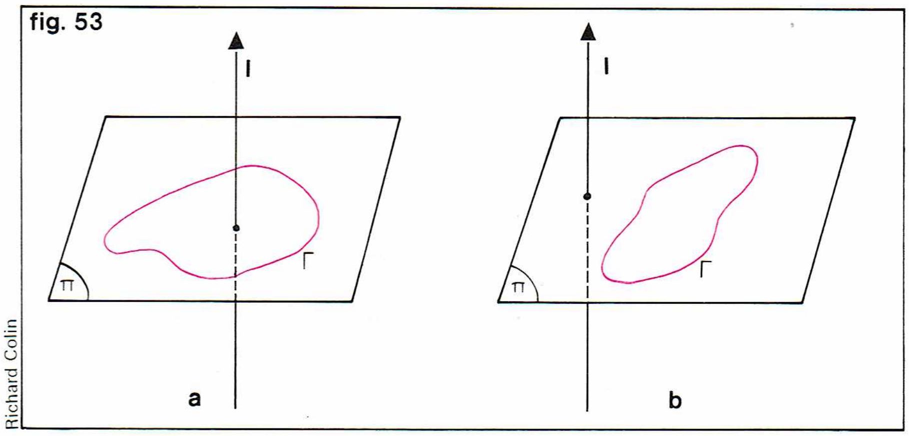

Richard Colin

▲ *En haut, figure 52 : travail élémentaire dW du champ $\vec{B}$ lors d'un déplacement élémentaire $d\vec{M} = \overrightarrow{MM'}$.*
Ci-dessus, figure 53 :
a, la courbe Γ enlace le fil où passe le courant I ;
b, la courbe Γ n'enlace pas le fil où passe le courant I.

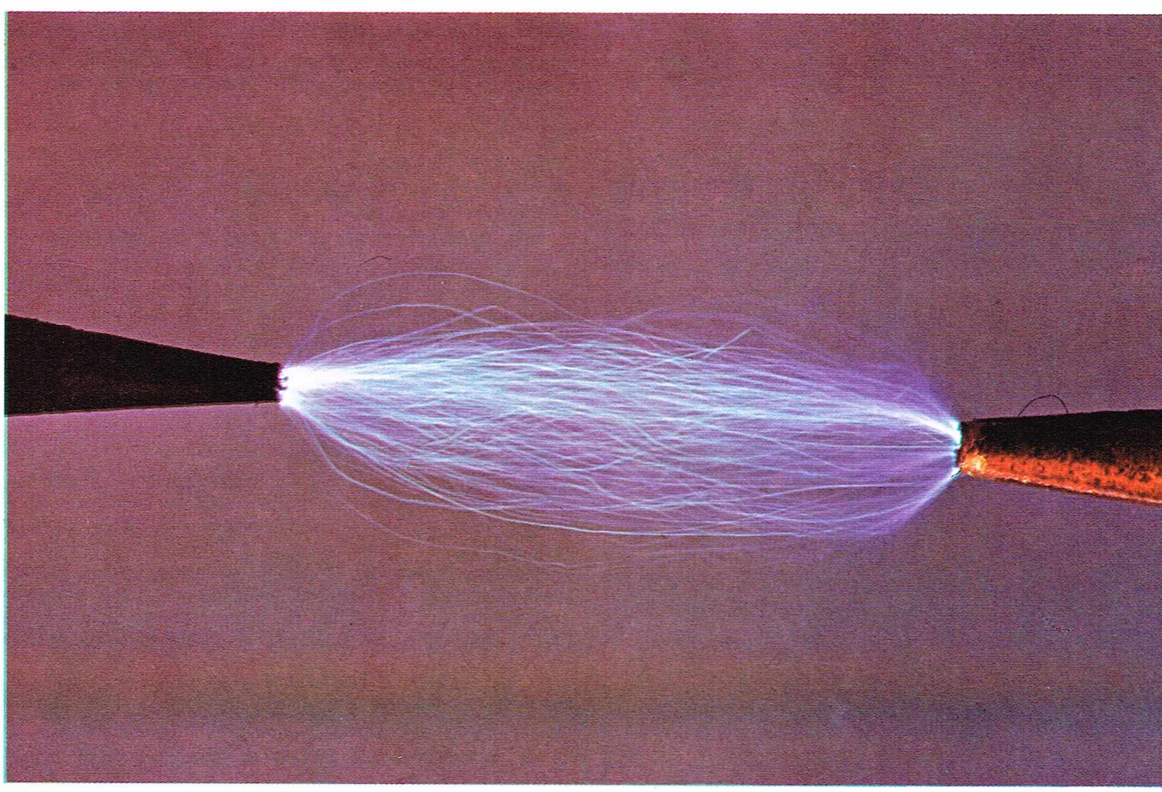

Kinne Researchers - Rapho

◀ *Arc électrique.*

▲ *Le physicien et mathématicien français André-Marie Ampère (1775-1836).*

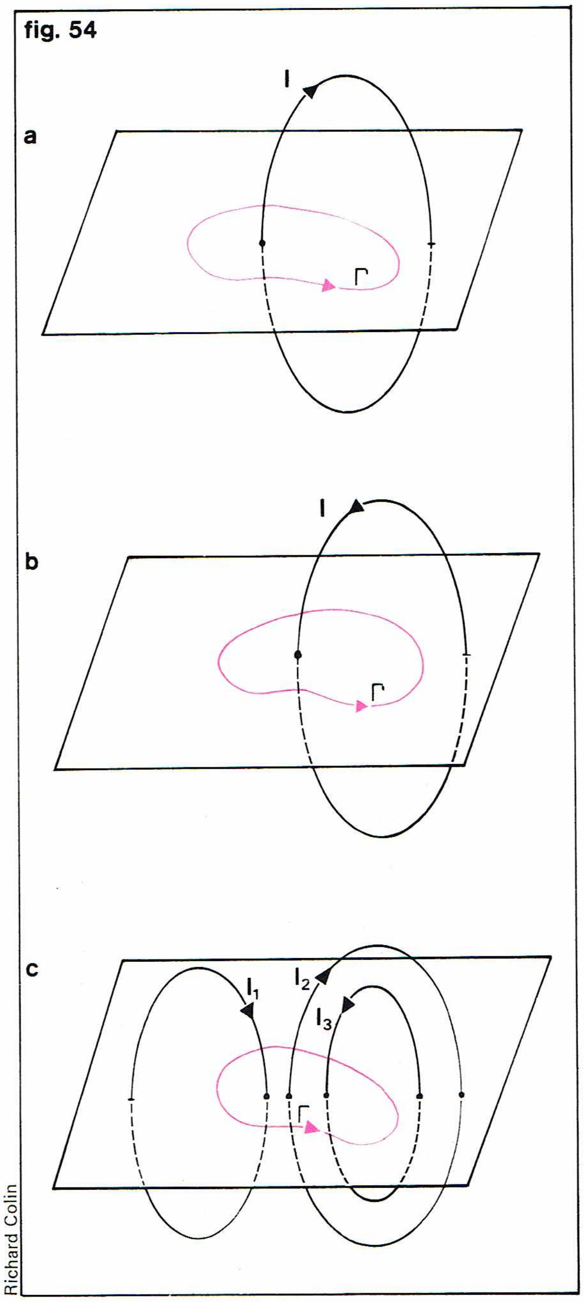

▶ ***Figure 54 :*** *a, lorsqu'on parcourt Γ, le sens du courant est celui de la progression d'un tire-bouchon ; b, lorsqu'on parcourt Γ, le sens du courant est celui de la progression inverse d'un tire-bouchon ; c, généralisation du théorème d'Ampère dans le cas où plusieurs courants enlacent la courbe Γ.*

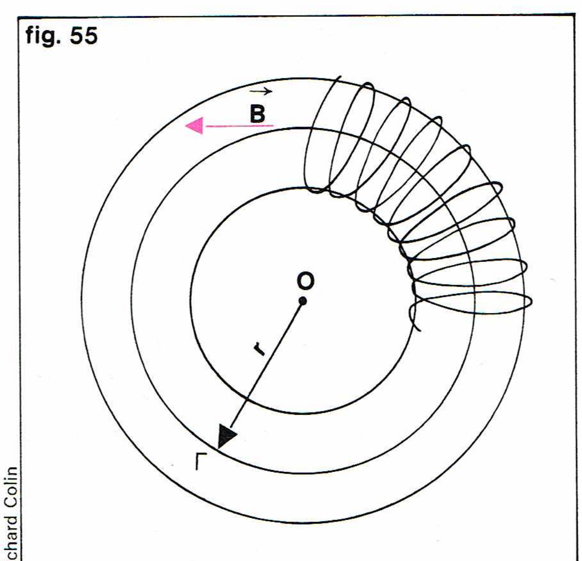

▶ ***Figure 55 :*** *calcul du champ $\vec{B}$ dans une bobine torique.*

on aboutit donc à l'égalité $\mu_0 I = \oint_\Gamma \vec{B} \cdot \vec{dl}$

Dans le cas où la courbe n'enlace pas le fil : W = 0.

La première expression $\mu_0 I = \oint_\Gamma \vec{B} \cdot \vec{dl}$ peut être simplifiée. En effet, nous verrons dans le chapitre concernant les milieux aimantés que l'on définit un vecteur $\vec{H}$ appelé *champ magnétique*. Dans ces milieux aimantés, $\vec{B}$ et $\vec{H}$ ne sont pas toujours proportionnels. Ils ne le sont que dans les substances linéaires, homogènes, isotropes (l. h. i.).

Par contre, dans le vide, ces deux vecteurs sont proportionnels et sont liés par la relation $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$.

Ainsi, dans le vide, le théorème d'Ampère se simplifie et s'écrit simplement : $\oint_\Gamma \vec{H} \cdot \vec{dl} = I$.

Cela pour un courant I enlacé par la courbe Γ.

Dans le cas où plusieurs courants enlacent la courbe (Γ), le théorème d'Ampère peut alors se généraliser à condition de compter positivement un courant tel que, si l'on parcourt la courbe, le sens du courant est celui de la progression d'un tire-bouchon.

Ainsi, dans le cas de la *figure* 54a, on obtient :

$$\oint_\Gamma \vec{H} \cdot \vec{dl} = I$$

Par contre, dans le cas de la *figure* 54b, on obtient :

$$\oint_\Gamma \vec{H} \cdot \vec{dl} = -I$$

Si plusieurs courants sont enlacés par la courbe Γ, alors le travail de $\vec{H}$ le long de la courbe Γ est égal à la somme algébrique de tous les courants enlacés par cette courbe. Par exemple, dans la *figure* 54c, on a :

$$\oint_\Gamma \vec{H} \cdot \vec{dl} = I_2 - I_1 - I_3$$

De même, une bobine plate formée de N spires et parcourue par un courant I est telle que $\oint_\Gamma \vec{H} \cdot \vec{dl} = NI$.

Application du théorème d'Ampère

Une application importante du théorème d'Ampère est celle qui permet le calcul de $\vec{B}$ dans une bobine torique contenant N spires. Soit donc cette bobine représentée par la *figure* 55. Elle est formée d'une couronne autour de laquelle est bobiné un fil. Par raison de symétrie, les lignes de champ sont des cercles concentriques de centre O. Calculons le champ $\vec{B}$ (dans le vide) situé à une distance *r* de O. Le théorème d'Ampère permet d'écrire :

$$\oint \vec{B} \cdot \vec{dl} = N\mu_0 I = 2\pi r|\vec{B}|$$

d'où
$$|\vec{B}| = \frac{N\mu_0 I}{2\pi r}$$

Si le rayon *r* de ce tore est grand devant son épaisseur, c'est-à-dire devant le rayon d'une spire, alors le champ $\vec{B}$ est pratiquement constant à l'intérieur du tore ; c'est-à-dire que, si nous effectuons une section droite de ce tore, le champ à l'intérieur de cette section droite est constant.

Dans ce cas, le rapport $\frac{N}{2\pi r}$ représente le nombre *n* de spires par unité de longueur de ce tore, et $\vec{B}$ devient :

$$\vec{B} = n\mu_0 \vec{I}$$

Nous remarquons que c'est le résultat trouvé pour un solénoïde indéfini que l'on peut considérer comme un tore dont le rayon *r* est infini, donc qui répond bien à l'hypothèse que *r* est grand devant le rayon des spires.

Remarquons que le théorème d'Ampère permet également de retrouver facilement le champ créé à une distance donnée par un fil indéfini parcouru par un courant I. A une distance *a* de O, le champ B est constant par raison de symétrie.

Ainsi $\oint_{cercle} \vec{B} \cdot \vec{dl} = \mu_0 I$

$B \cdot 2\pi a = \mu_0 I$, ce qui entraîne $|\vec{B}| = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}$

Relation de Maxwell-Ampère

Soit $\vec{J}$ la *densité de courant* en un point quelconque de l'espace. Soit (C) une courbe quelconque et (S) une surface quelconque s'appuyant sur (C). Le courant I traversant (S) est :

$$I = \iint_S \vec{J} \cdot d\vec{S}$$

Or, d'après le théorème d'Ampère, on a la relation :

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = I = \iint_S \vec{J} \cdot d\vec{S}$$

d'autre part $\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \iint_S \overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{H} \cdot d\vec{S} = \iint_S \vec{J} \cdot d\vec{S}$

Cette dernière relation entraîne que

(3) $$\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{H} = \vec{J}$$

Elle montre que $\vec{H}$ ne dérive pas d'un potentiel, sinon son rotationnel serait nul. Cette relation est celle de Maxwell-Ampère.

Expression du potentiel vecteur $\vec{A}$

On peut voir sur des exemples simples, comme celui d'un courant rectiligne, que le flux du vecteur $\vec{B}$ est conservatif (le flux de $\vec{B}$ à travers toute surface fermée est nul).

Cela se traduit mathématiquement par l'expression :

(4) $$\text{div}\,\vec{B} = 0$$

Cette expression se généralise pour le champ $\vec{B}$ créé par des courants quelconques. Son flux est conservatif. Or dire que $\text{div}\,\vec{B} = 0$ revient à dire que, à la traversée de deux milieux d'indices 1 et 2, la composante normale de $\vec{B}$ se conserve, c'est-à-dire que

(5) $$BN_1 = BN_2$$

Si l'on considère à présent un vecteur $\vec{C}$ quelconque, il satisfait à chacune des conditions mathématiques suivantes :

$$\text{div}\,(\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{C}) = 0$$

et $\overrightarrow{\text{rot}}\,(\overrightarrow{\text{grad}}\,m) = 0$ (m étant un scalaire)

Donc, en ce qui nous concerne : $\text{div}\,\vec{B} = 0$ entraîne que

(6) $$\vec{B} = \overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{A}$$

$\vec{A}$ est appelé « potentiel vecteur ». Comme il est défini à un gradient près, on peut imposer une condition sur $\vec{A}$. Cette condition est :

(7) $$\text{div}\,\vec{A} = 0$$

Or la relation **(3)** de Maxwell-Ampère, $\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{H} = \vec{J}$, s'écrit dans le vide :

$$\frac{1}{\mu_0}\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{B} = \vec{J}$$

Soit $\frac{1}{\mu_0}\overrightarrow{\text{rot}}\,(\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{A}) = \vec{J}$ donc : $\overrightarrow{\text{rot}}\,(\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{A}) = \mu_0\vec{J}$

Or $\overrightarrow{\text{rot}}\,(\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{A}) = \overrightarrow{\text{grad}}\,(\text{div}\,\vec{A}) - \nabla^2\vec{A}$

$\nabla^2\vec{A}$ se lit *laplacien de A*

donc $\overrightarrow{\text{rot}}\,(\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{A}) = -\nabla^2\vec{A}$

Soit $\mu_0\vec{J} = -\nabla^2\vec{A}$, ce qui s'écrit :

(8) $$\nabla^2\vec{A} + \mu_0\vec{J} = 0$$

Or, en électrostatique, l'équation de Poisson s'écrit dans le vide $\nabla^2 V + \frac{\rho}{\varepsilon_0} = 0$. Elle correspond au potentiel :

$$V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\iiint_\tau \frac{\rho\,d\tau}{r}$$

Considérons à présent les projections de l'équation **(8)** sur trois axes Ox, Oy, Oz.

Par exemple sur l'axe Ox, elle s'écrit :

$$\nabla^2 A_x + \mu_0 J_x = 0$$

Par analogie avec l'équation de Poisson, la composante A_x de $\vec{A}$ s'écrit :

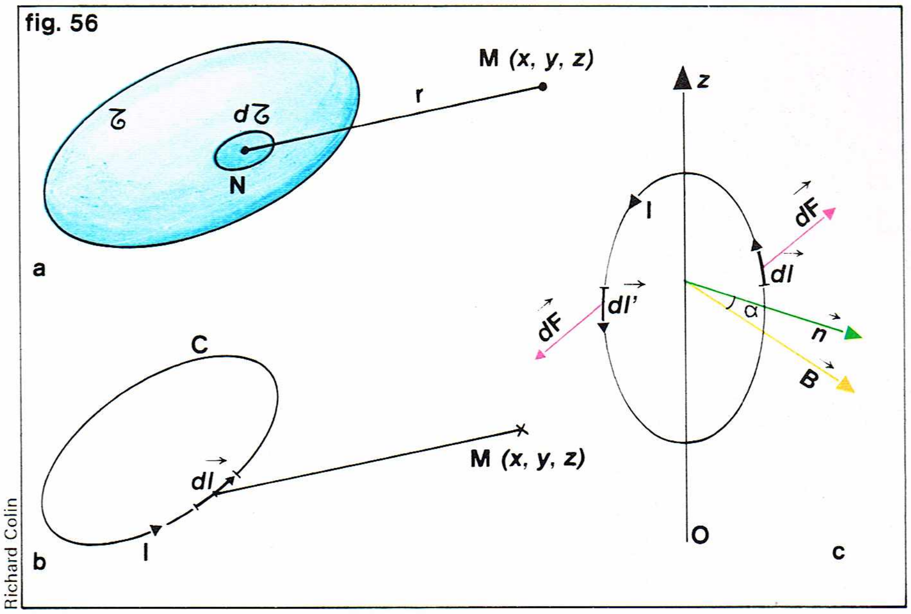

Richard Colin

▲ ***Figure 56 :*** ***a, calcul du potentiel vecteur $\vec{A}$ en un point M situé à l'extérieur d'un volume τ parcouru par des courants ; b, cas d'un circuit filiforme C ; c, dipôle magnétique.***

$$A_x = \frac{\mu_0}{4\pi}\iiint_\tau \frac{J_x d\tau}{r}$$

Les deux autres composantes ont la même force. Ce qui correspond à la forme vectorielle suivante de $\vec{A}$:

(9) $$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi}\iiint_\tau \frac{\vec{J} d\tau}{r}$$

τ étant le volume occupé par les courants et r étant la distance d'un élément de volume $d\tau$ au point M où l'on calcule le potentiel vecteur $\vec{A}$ (*fig.* 56a).

Rappelons que la formule **(9)** n'est valable que dans le cas où la div $\vec{A}$ est nulle au point considéré où l'on calcule $\vec{A}$. On le vérifie aisément.

Considérons à présent un circuit filiforme C (*fig.* 56b). L'élément $d\tau$ s'écrit $d\tau = dS \cdot dl$, dS étant la surface de la section du fil et dl l'élément de courant.

D'autre part : $\vec{J}\,d\tau = \vec{J}\,dS\,d\vec{l}$

$\vec{J}\,d\tau = I\,d\vec{l}$

Donc $\vec{A}$ s'écrit :

$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi}\iiint_\tau \frac{\vec{J} d\tau}{r}$$

(10) $$\vec{A} = \frac{\mu_0 I}{4\pi}\int_C \frac{d\vec{l}}{r}$$

$\vec{A}$ peut aussi s'exprimer en fonction du moment magnétique que nous allons définir. $\vec{A}$ est donné par la formule **(10)**. Sa composante suivant un axe unitaire $\vec{u}$ est :

$$\vec{A} \cdot \vec{u} = \frac{\mu_0 I}{4\pi}\int_C \frac{d\vec{l} \cdot \vec{u}}{r} = \frac{\mu_0 I}{4\pi}\int_C \left(\frac{\vec{u}}{r}\right) \cdot d\vec{l}$$

Si l'on considère alors une surface quelconque Σ s'appuyant sur le contour (C), le théorème de Stockes fournit l'équation

$$\int_C \left(\frac{\vec{u}}{r}\right) d\vec{l} = \iint_S \overrightarrow{\text{rot}}_N \left(\frac{\vec{u}}{r}\right) \cdot d\vec{S} =$$

$$\iint_S \frac{1}{r}(\overrightarrow{\text{rot}}_N\,\vec{u}) \cdot d\vec{S} + \iint_S \left[\overrightarrow{\text{grad}}_N \left(\frac{1}{r}\right) \wedge \vec{u}\right] d\vec{S}$$

où l'indice N signifie que l'on prend le gradient ou le rotationnel par rapport au point N.

$\vec{u}$ étant un vecteur unitaire, la première intégrale s'annule, et il reste :

$$\vec{A} \cdot \vec{u} = \frac{\mu_0 I}{4\pi}\iint_\Sigma \left[\overrightarrow{\text{grad}}_N \left(\frac{1}{r}\right) \wedge \vec{u}\right] d\vec{S} =$$

$$\frac{\mu_0 I}{4\pi}\vec{u}\iint_\Sigma d\vec{S} \wedge \overrightarrow{\text{grad}}_N \left(\frac{1}{r}\right)$$

Desjardins - TOP

Le vecteur $\vec{u}$ étant quelconque, on en déduit que :

$$\vec{A} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \iint_\Sigma d\vec{S} \wedge \overrightarrow{\text{grad}}_N \left(\frac{1}{r}\right)$$

Si la distance r est grande, comparée aux dimensions du circuit, le $\overrightarrow{\text{grad}}_N \left(\frac{1}{r}\right)$ a pratiquement la même valeur en tout point N de Σ. C'est donc une constante.

Si, alors, nous introduisons le moment magnétique défini par l'expression :

$$\vec{\mathcal{M}} = I \iint_\Sigma d\vec{S}$$

$\vec{A}$ s'écrit :

$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \vec{\mathcal{M}} \wedge \overrightarrow{\text{grad}}_N \left(\frac{1}{r}\right)$$

$$\vec{A} = \overrightarrow{\text{rot}}_N \left(\frac{\mu_0 \vec{\mathcal{M}}}{4\pi r}\right)$$

Cas d'une spire plane

Dans le cas d'une spire plane, le moment magnétique est : $\vec{\mathcal{M}} = I\vec{S}$, de module IS et orienté perpendiculairement à la spire dans le sens correspondant à un sens positif du courant dans la spire.

Dipôle magnétique

Soit une spire plane pouvant tourner autour d'un axe Oz (*fig.* 56c). Supposons que cette spire soit petite, de sorte que, placée dans un champ magnétique $\vec{B}$, ce champ puisse être considéré comme constant. Supposons aussi que le courant parcourt la spire dans le sens indiqué sur la figure. Alors, on peut définir une normale positive $\vec{n}$. Deux éléments symétriques $d\vec{l}$ et $d\vec{l'}$ sont soumis à deux forces égales et opposées données par la force de Laplace, si bien que la spire est soumise à un couple Γ.

Or $$\Gamma = I \frac{d\Phi}{d\alpha}$$

avec $$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = BS \cos \alpha$$

$$\Gamma = - IBS \sin \alpha$$

soit, vectoriellement : $\Gamma = I\vec{S} \wedge \vec{B}$

$$\Gamma = \vec{\mathcal{M}} \wedge \vec{B}$$

Donc la spire est soumise à un couple donné par l'expression précédente.

Travail des forces électromagnétiques - Loi de Maxwell

Travail des forces électromagnétiques

Soit un élément de courant $d\vec{l}$ parcouru par un courant constant I et placé dans un champ magnétique $\vec{B}$. Imaginons que l'on fasse subir à cet élément de courant un déplacement élémentaire $d\vec{M}$ (*fig.* 57). L'élément $d\vec{l}$ placé dans un champ $\vec{B}$ et parcouru par le courant I est soumis à la force de Laplace :

$$d\vec{F} = I d\vec{l} \wedge \vec{B}$$

d'autre part, au cours du déplacement $d\vec{M}$, le travail de cette force est :

fig. 57

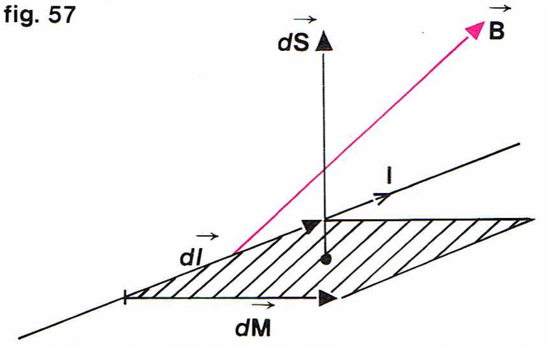

Richard Colin

$$dW = d\vec{F} \cdot d\vec{M}$$

soit : $$dW = I\,(d\vec{l} \wedge \vec{B}) \cdot d\vec{M}$$

que l'on peut écrire en vertu des règles de permutation du produit mixte : $dW = I\,(d\vec{M} \wedge d\vec{l}) \cdot \vec{B}$.

Le vecteur $(d\vec{M} \wedge d\vec{l})$ est un vecteur dont le module $(d\vec{S})$ représente l'aire du parallélogramme construit sur $d\vec{l}$ et $d\vec{M}$. Sa direction est perpendiculaire à $d\vec{l}$ et $d\vec{M}$ et son sens est donné par le sens du produit vectoriel. Ainsi dW s'écrit : $dW = I d\vec{S} \cdot \vec{B}$.

Or $d\vec{S} \cdot \vec{B}$ représente le flux $d\Phi_c$ coupé par l'élément de courant lors de son déplacement. On peut donc écrire $dW = I d\Phi_c$.

Si l'on a affaire non pas à un élément de circuit mais à un circuit qui se déplace, cette formule reste toujours valable : $dW = I d\Phi_c$, dans laquelle $d\Phi_c$ représente le *flux élémentaire coupé* par le circuit entier. Si le déplacement du circuit est fini, passant d'une position *i* à une position *f*, le travail est alors donné par la somme des travaux élémentaires :

$$W = \int_i^f dW = I \int_i^f d\Phi_c = I\Delta\Phi_c = W$$

Donc le travail est donné par le produit du courant par la variation du flux coupé par l'ensemble du circuit.

Nous allons maintenant donner une relation équivalente où va intervenir non pas le flux coupé mais la *variation de flux* lorsque le circuit passe d'une position *i* à une position *f*. Pour cela, il faut se souvenir de la convention que nous avions adoptée à propos de l'orientation de la normale à un circuit. Dans le cas d'un circuit magnétique, le sens positif de la normale est celui qui va de la face sud vers la face nord. C'est également le sens d'un tire-bouchon qui tourne dans le sens du courant. D'autre part, le flux du vecteur $\vec{B}$ est conservatif. Cela se traduit mathématiquement par l'expression $\text{div}\,\vec{B} = 0$ et physiquement par le fait que le flux de $\vec{B}$ à travers toute surface fermée est nul.

Considérons à présent la *figure* 58 qui est une surface fermée. Elle est formée de la surface Σ_c qui a la forme d'un tube coupé en ses deux extrémités par les surfaces Σ_i et Σ_f. Nous allons considérer les *flux sortants* (un flux sortant étant affecté du signe positif lorsque la normale est orientée vers l'extérieur de la surface). Soit Φ_i le flux sortant à travers Σ_i. Il est affecté du signe — puisque la normale est dirigée vers l'intérieur.

Prenons à présent une position intermédiaire du circuit (position S). Lorsque ce circuit se déplace de $d\vec{M}$ et occupe la position S', la normale à $d\vec{M} \cdot d\vec{l}$ est dirigée vers l'intérieur de la surface Σ_c. Donc le flux à travers Σ_c, c'est-à-dire le flux coupé, est aussi affecté du signe — $(-\Phi_c)$. Par contre, le flux sortant de Σ_f est positif $(+\Phi_f)$. Comme le flux de $\vec{B}$ est conservatif, cela entraîne que le flux total à travers toute la surface est nul.

Soit $$-\Phi_i - \Phi_c + \Phi_f = 0$$

d'où $$\Phi_f - \Phi_i = \Phi_c$$

le travail $W = I\Phi_c$ s'écrit également :

$$W = I\,(\Phi_f - \Phi_i)$$

Ainsi, lorsqu'un circuit parcouru par un courant I et placé dans un champ $\vec{B}$ passe d'une position initiale *i* à une position finale *f*, le travail des forces électromagnétiques est égal au produit du courant I par la variation de flux. Or les forces magnétiques tendent à fournir au circuit un travail W positif. Cela signifie que Φ_f est plus grand que Φ_i, donc que le circuit tend à embrasser un flux final plus grand que celui de départ. Plus précisément, lorsque ce flux sera maximal, le circuit occupera une position d'équilibre stable. Les expériences suivantes illustreront ce phénomène.

— *Première expérience* (*fig.* 59a et b) : soit un cadre rigide ABCD parcouru par un courant I. Ce cadre peut tourner autour d'un axe MN placé en son milieu. Il est placé dans un champ magnétique $\vec{B}$, perpendiculaire à l'axe MN. La position du cadre est repérée par l'angle θ fait par le champ $\vec{B}$ et la demi-normale positive $\vec{n}$. Ce cadre, parcouru par le courant I, est soumis à deux forces égales et opposées s'exerçant sur les milieux des côtés AD et BC et tendant à faire tourner le cadre autour de son axe MN (les côtés AB et DC sont soumis à des forces dont les moments par rapport à l'axe sont nuls). On pose :

$$AB = DC = l \quad \text{et} \quad AD = BC = L$$

Les deux forces forment un couple dont le moment est :

$$\vec{\Gamma} = \vec{f} \wedge \vec{l}$$

soit $$|\vec{\Gamma}| = |\vec{f}| \cdot |\vec{l}| \sin\theta$$

comme $$|\vec{f}| = ILB \qquad |\vec{\Gamma}| = ILB/\sin\theta = ISB\sin\theta$$

On voit que l'équilibre est stable si $|\vec{\Gamma}|$ est nul, c'est-à-dire si $\theta = 0$. Donc le cadre se place de telle sorte qu'il soit soumis au flux maximal de $\vec{B}$. Ce cadre est alors normal au champ $\vec{B}$.

— *Deuxième expérience* (*fig.* 60) : soit un solénoïde parcouru par un courant I et une spire parcourue par un courant I'. Si le sens des courants est le même, la spire va s'approcher du solénoïde et se placer au milieu de celui-ci. Cela correspond au flux maximal. Si l'on change

Richard Colin

fig. 58

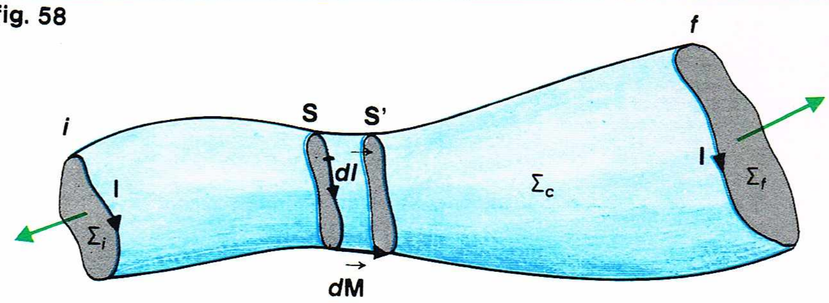

Richard Colin

fig. 59

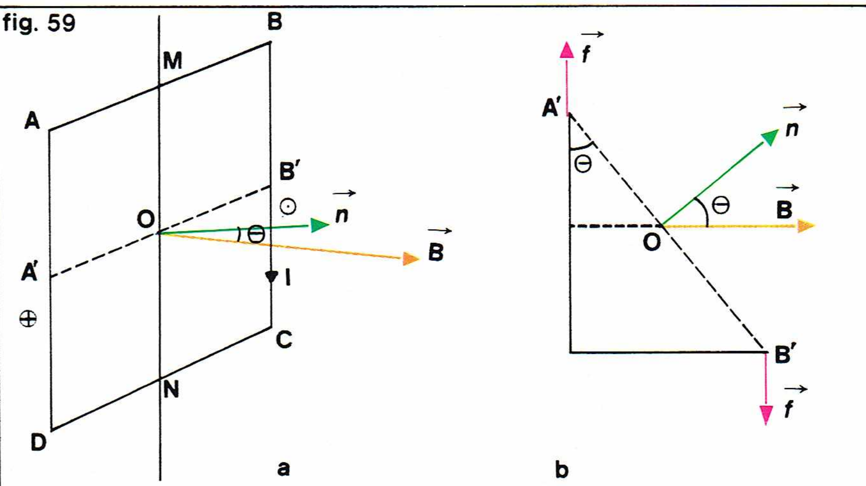

Richard Colin

fig. 60

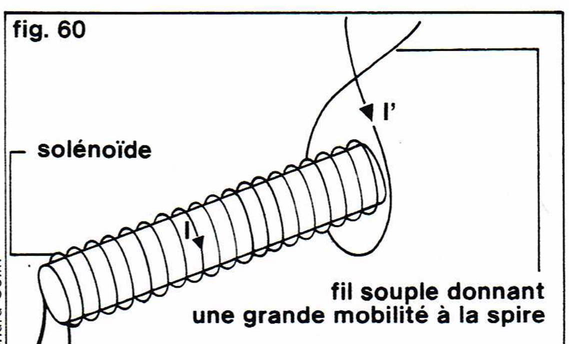

▲ En haut, figure 58 ; lorsque le circuit se déplace de la position i à la position f, le travail total W est : $W = I\,(\Phi_f - \Phi_i)$. ***Ci-dessus, figure 59 : le cadre ABCD parcouru par le courant I et placé dans le champ magnétique*** $\vec{B}$ ***est soumis au couple*** $\vec{\Gamma} = \vec{f} \wedge \vec{l}$.

◄ Page ci-contre, à gauche : un orage accompagné de phénomènes électriques. A droite, figure 57 : l'élément de courant $d\vec{l}$ ***parcouru par le courant I et placé dans le champ magnétique*** $\vec{B}$ ***est soumis à la force de Laplace*** $d\vec{F} = I\,d\vec{l} \wedge \vec{B}$.

◄ Figure 60 : le solénoïde étant parcouru par le courant I et la spire par le courant I', la spire va s'approcher du solénoïde et se mettre au milieu de celui-ci si I et I' sont dans le même sens.

▶ ***Figure 61 :*** ***calcul du coefficient d'induction mutuel* M *dans le cas simple où l'une des bobines contient l'autre et que leurs axes sont confondus.***

le sens de l'un des courants, par exemple I', la spire va d'abord s'éloigner du solénoïde, se retourner, puis s'embrocher dans le solénoïde.

Il nous faut à présent exprimer le flux magnétique selon des unités. En unités M. K. S. A., c'est le *weber* (Wb). Or le flux est homogène au produit de l'induction par une surface. Donc, en M. K. S. A., l'induction s'exprime en webers par mètre carré (Wb/m^2).

Actions mutuelles de deux circuits

Coefficients d'induction mutuelle et de self-induction

Nous nous bornerons à traiter le cas de deux circuits filiformes. Soit donc deux circuits filiformes (C) et (C') parcourus respectivement par les courants I et I'. On considérera que les dimensions de ces deux circuits sont négligeables par rapport à leur distance. Le circuit (C) parcouru par le courant I crée en tout point de l'espace un champ $\vec{B}$ proportionnel à I (d'après la loi de Biot-Savart). Donc le flux Φ' à travers toute surface Σ' s'appuyant sur le contour (C') est proportionnel à I. On peut ainsi écrire $\Phi' = \mathbf{M}I$, **M** désignant le coefficient de proportionnalité.

Donnons une forme plus explicite à ce coefficient :

$$\Phi' = \iint_{\Sigma'} \vec{B} \cdot d\vec{\Sigma'}$$

or $$\vec{B} = \overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{A}$$

donc $$\Phi' = \iint_{\Sigma'} \overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{A} \cdot d\vec{\Sigma'}$$

La formule de Stockes permet d'écrire :

$$\Phi' = \iint_{\Sigma'} \overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{A} \cdot d\vec{\Sigma'} = \int_{C'} \vec{A} \cdot d\vec{l'}$$

dl' étant un élément de courant de (C').

En introduisant l'expression du potentiel vecteur $\vec{A}$:

$$\vec{A} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_C \frac{d\vec{l}}{r}$$

on obtient la valeur de Φ' :

$$\Phi' = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_C \int_{C'} \frac{d\vec{l} \cdot d\vec{l'}}{r}$$

et l'on est conduit à poser :

$$\mathbf{M} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_C \int_{C'} \frac{d\vec{l} \cdot d\vec{l'}}{r}$$

avec $\Phi' = \mathbf{M}I$.

On appelle ce coefficient **M**, identique pour les deux circuits, le *coefficient d'induction mutuelle* des deux circuits.

Dans le système M. K. S. A., il est mesuré en henrys (H). On peut vérifier sans peine que si I et I' sont dans le même sens, les flux Φ et Φ' sont positifs. Cela entraîne que, dans ce cas, **M** est positif. Dans le cas où les deux courants sont en sens inverse, **M** est négatif.

Il est possible d'envisager le flux qu'un circuit parcouru par un courant I envoie à travers lui-même. Ce flux, comme dans le cas de deux circuits, est proportionnel à I.

Nous écrivons : $\Phi = LI$.

L est le *coefficient de self-induction* ou *self-inductance* du circuit. Puisque, dans un circuit, le courant le parcourt dans le même sens, il en résulte que Φ est toujours positif, donc également L, lequel s'exprime en henrys dans le système M. K. S. A.

On peut avoir à calculer le coefficient d'induction mutuelle de deux circuits. Le calcul par la formule

$$\mathbf{M} = \int_C \int_{C'} \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{d\vec{l} \cdot d\vec{l'}}{r}$$

est en général compliqué.

Il est plus simple de calculer le flux créé par un des circuits à travers l'autre et d'en déduire ainsi le coefficient **M**. Considérons ainsi le montage de la *figure* 61. Il est constitué de deux bobines. L'une, de surface S, de longueur *l*, comprend N spires; elle est parcourue par le courant I; l'autre, plus petite, de surface S', située à l'intérieur de la grande, est parcourue par un courant I' et comporte N' spires. On suppose, pour simplifier les calculs, que l'angle entre les axes des deux spires est nul.

fig. 61

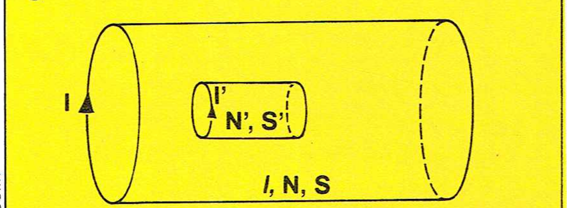

Richard Colin

La bobine S crée à travers la bobine S' le flux donné par la formule :

$$\Phi' = \vec{B}N'S' \quad \text{avec} \quad \vec{B} = \mu_0 \frac{N}{l} I$$

(le champ $\vec{B}$ peut en effet prendre cette forme, car on suppose que la bobine S est assez longue pour être assimilée à un solénoïde).

$$\Phi' = \mu_0 \frac{NN'}{l} S'I = \mathbf{M}I$$

donc $$\mathbf{M} = \frac{\mu_0 NN'S'}{l}$$

Calcul de la résultante et du moment résultant des forces électromagnétiques appliquées à un circuit

La relation $W = I\,(\Phi_f - \Phi_i)$ permet de calculer la résultante générale $\vec{R}$ des forces appliquées au circuit lors d'un déplacement $d\vec{M}$. Nous pouvons écrire les deux égalités :

$$dW = \vec{R} \cdot d\vec{M}$$

$$dW = I d\Phi$$

$d\Phi$ étant la variation élémentaire de flux, lors du déplacement élémentaire $d\vec{M}$.

Si les composantes de $d\vec{M}$ selon trois axes (O*x*, O*y*, O*z*) sont X, Y, Z, on obtient par exemple pour un déplacement selon O*x* :

$$Xdx = Id\Phi$$

c'est-à-dire : $$X = I\frac{d\Phi}{dx}$$

de même pour les deux autres composantes :

$$Y = I\frac{d\Phi}{dy} \quad \text{et} \quad Z = I\frac{d\Phi}{dz}$$

De la même manière, si l'on considère une rotation élémentaire $d\alpha$ autour d'un axe, le travail des forces électromagnétiques est :

$$\Gamma d\alpha = I d\Phi$$

où Γ est le moment des forces résultantes par rapport à cet axe. Si par exemple Γ_z est la composante de Γ selon l'axe O*z* et si l'on effectue une rotation autour de cet axe, on a :

$$\Gamma_z d\alpha = I d\Phi$$

soit : $$\Gamma_z = I\frac{d\Phi}{d\alpha}$$

Application : détermination de la force d'induction entre deux circuits

On a établi le coefficient d'induction mutuelle **M** entre deux circuits, en fonction des paramètres géométriques déterminant la position des deux circuits. On peut alors calculer la résultante des forces exercées sur l'un d'eux.

Considérons un circuit S parcouru par le courant I. Nous avons vu que la résultante des forces s'exerçant sur lui lors d'un déplacement élémentaire selon l'axe O*x* est :

$$X = I\frac{d\Phi}{dx}$$

Or $\Phi = \mathbf{M}I'$ où I' est le courant passant dans le circuit S' qui est en présence du circuit S,

donc $$\frac{d\Phi}{dx} = I'\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial x}$$

donc $$X = II' \frac{\partial M}{\partial x}$$

De manière identique, si l'on considère, par exemple, la composante Γ_x, sur l'axe Ox, du moment résultant $\vec{\Gamma}$, lors d'une rotation $d\alpha$ autour de cet axe :

$$\Gamma_x = I \frac{d\Phi}{d\alpha}$$

Or $$\Phi = MI' \quad \text{donc} \quad \frac{\partial \Phi}{\partial \alpha} = I' \frac{\partial M}{\partial \alpha}$$

Ainsi $$\Gamma_x = II' \frac{\partial M}{\partial \alpha}$$

L'induction électromagnétique

Le phénomène d'induction a été découvert par Faraday en 1838. Son importance est considérable, car de nombreuses machines produisent des courants par induction.

Expériences fondamentales mettant en évidence l'existence d'un courant induit

Première expérience (*fig.* 62) : le montage est constitué d'une bobine reliée à un galvanomètre G et d'un aimant que l'on peut approcher ou éloigner de la bobine. Si l'on approche l'aimant de la bobine, on constate que l'aiguille du galvanomètre bouge ; si l'on cesse d'approcher l'aimant, l'aiguille ne bouge plus ; si l'on enfile l'aimant dans la bobine, l'aiguille dévie plus ; si l'on éloigne l'aimant, l'aiguille dévie en sens inverse.

Dans tous les cas, puisque l'aiguille dévie, c'est qu'il y a passage d'un courant dans la bobine.

Deuxième expérience (*fig.* 63) : elle met en évidence ce courant appelé *courant induit*. L'appareillage comprend deux bobines ; une reliée à un galvanomètre G et l'autre à un générateur pouvant fournir un courant I. Un interrupteur K permet d'interrompre le courant. Les deux bobines étant immobiles, il y a création d'un courant induit lorsqu'on ferme l'interrupteur K. Ce courant cesse presque immédiatement. Si l'on maintient l'interrupteur K fermé et que l'on bouge l'une des bobines, on constate qu'il y a également une déviation de l'aiguille du galvanomètre, donc existence d'un courant induit.

Troisième expérience (*fig.* 64) : elle permet de confirmer l'existence de ce courant induit. Le montage comprend une bobine réunie à un galvanomètre et une bobine reliée à un générateur. On peut interrompre le courant dans cette dernière bobine, ou en modifier l'intensité à l'aide d'un rhéostat R. Les deux bobines étant immobiles, on constate l'apparition d'un courant induit lorsqu'on ouvre ou ferme l'interrupteur K, ou bien encore chaque fois que l'on modifie le courant I à l'aide du rhéostat.

Ces expériences permettent de conclure à l'existence d'un courant induit dans un circuit conducteur fermé, qui est lié à la variation de flux magnétique traversant le circuit. On désigne sous le nom de *circuit induit* le circuit qui est le siège du courant induit. Le *circuit inducteur* est celui (aimant ou bobine) qui crée le champ magnétique « inducteur » responsable de la création du courant induit.

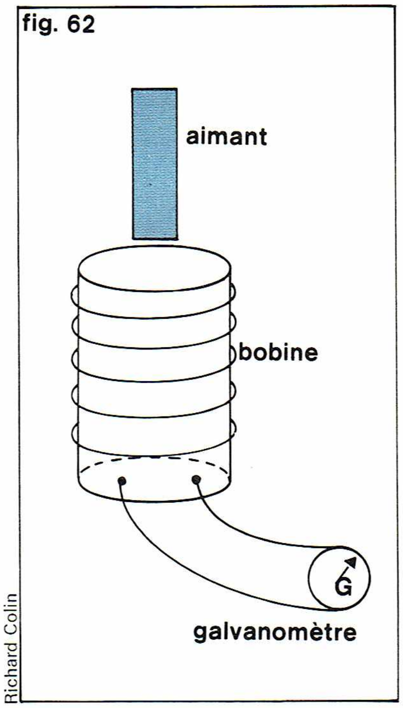

Richard Colin

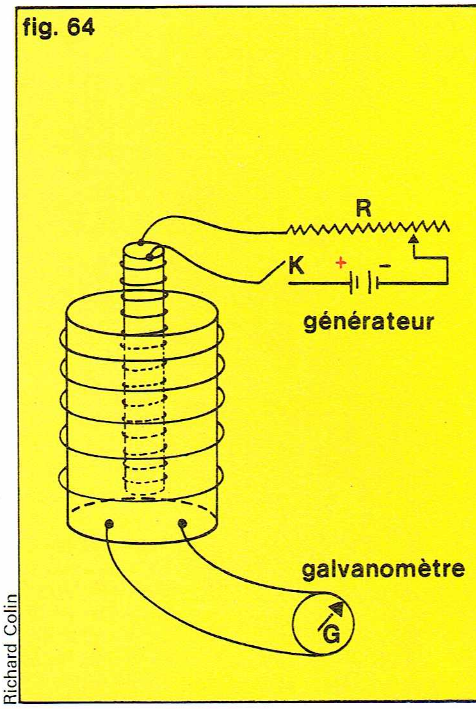

Richard Colin

▲ *A gauche, figure 62 : si l'on approche ou si l'on éloigne l'aimant de la bobine, l'aiguille du galvanomètre dévie, indiquant le passage d'un courant dans la bobine.*
A droite, figure 64 : l'aiguille du galvanomètre dévie lorsque, l'interrupteur **K** *étant fermé, on agit sur le rhéostat* **R**.

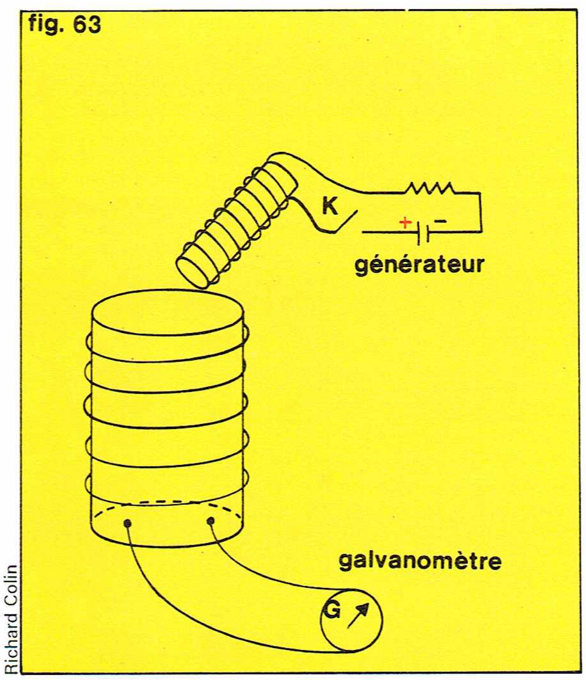

Richard Colin

◀ *Figure 63 : il y a passage d'un courant dans la grosse bobine lorsque l'on ouvre ou que l'on ferme l'interrupteur* **K**.

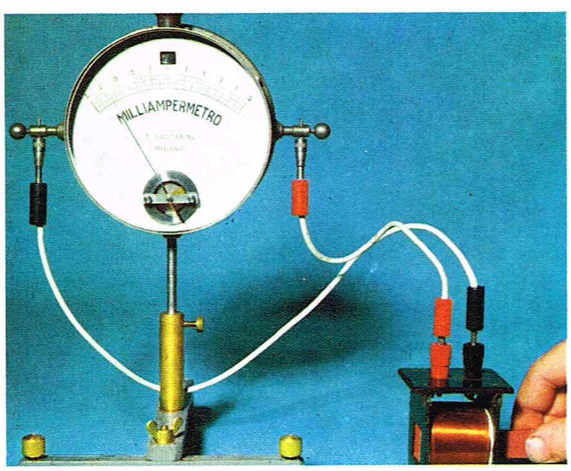

I.G.D.A. - Bevilacqua

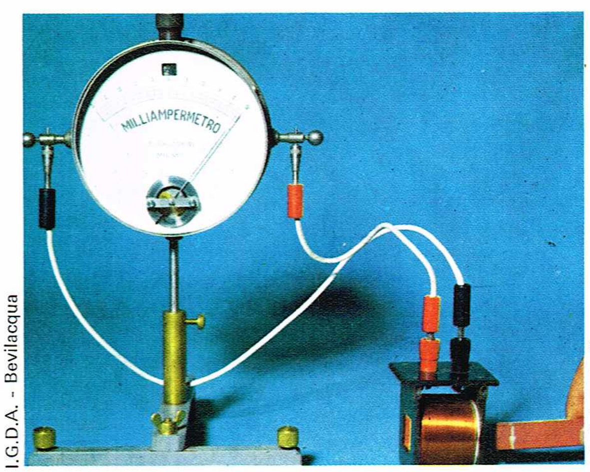

I.G.D.A. - Bevilacqua

◀ *La variation du flux traversant la bobine crée un courant induit.*

▶ ***Figure 65 :*** ***sens du champ induit et du courant induit selon le sens du champ inducteur incident.***

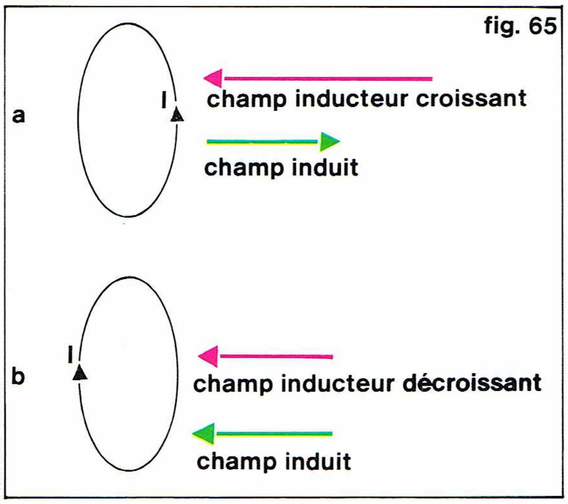

Richard Colin

La **loi de Lenz** (loi expérimentale) donne le sens du courant induit : *Le sens du courant induit est tel qu'il produit à travers le circuit un flux magnétique qui tend à s'opposer à la variation du flux qui lui donne naissance.*

On peut donc obtenir les deux cas de figures suivants (*fig.* 65a et b) selon que le champ inducteur est croissant ou décroissant :

— Dans le premier cas, le champ inducteur est croissant, le champ magnétique induit est en sens inverse du champ inducteur. Le courant a le sens indiqué sur la *figure* 65a.

— Dans le deuxième cas, le champ inducteur est décroissant, le champ induit est dans le même sens que le champ inducteur. Le sens du courant est indiqué sur la *figure* 65b.

Quelle est la forme de la force électromotrice d'induction et du courant induit ? Nous voyons expérimentalement que, si une spire S est soumise à un flux d'induction (soit que $\vec{B}$ varie et S reste fixe, soit que $\vec{B}$ ne varie pas et S se déplace) cette spire est le siège d'un courant induit. Il apparaît donc une *force électromotrice d'induction* qui est donnée par la formule empirique :

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Cette formule se conçoit physiquement d'une manière aisée. En effet, plus la variation de flux est importante et rapide, et plus la force électromotrice d'induction est importante. Si, de plus, la spire a une résistance R, alors le courant induit est : $I = \frac{e}{R} = -\frac{1}{R}\frac{d\Phi}{dt}$

Les expériences que nous avons décrites montrent que ces formules sont valables non seulement pour une spire, mais également pour un circuit quelconque, siège d'une variation de flux.

Champ électromoteur d'induction

Si le circuit n'est pas filiforme, pour connaître par exemple la répartition des courants, il ne suffit pas seulement de dire que globalement la force électromotrice d'induction est donnée par $e = -\frac{d\Phi}{dt}$, il faut en plus déterminer en chaque point du circuit la forme du champ électromoteur d'induction $\vec{E}_i$ tel que : $e = \int_{\text{contour du circuit}} \vec{E}_i \cdot \vec{dl}$

On a donc $e = \int_{\text{contour du circuit}} \vec{E}_i \cdot \vec{dl} = -\frac{d\Phi}{dt}$

Le terme $-\frac{d\Phi}{dt}$ désignant la *variation de flux* à travers tout le circuit.

Supposons que le circuit soit immobile. Alors

$$d\Phi = \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

Mais $\vec{B} = \overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{A}$

donc $e = \int_{\text{contour du circuit}} \vec{E}_i \cdot \vec{dl} = -\frac{d}{dt}\iint_{\Sigma} \overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{A} \cdot d\vec{S}$

où Σ représente la surface du circuit soumise à la variation de flux magnétique.

Or $\iint_{\Sigma} \overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{A} \cdot d\vec{S} = \int_{\text{contour du circuit}} \vec{A} \cdot \vec{dl}$

donc $e = \int_{\text{contour du circuit}} \vec{E}_i \cdot \vec{dl} = -\frac{d}{dt}\int_{\text{contour du circuit}} \vec{A} \cdot \vec{dl}$

qui peut encore s'écrire :

$$e = +\int_{\text{contour du circuit}} -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \cdot \vec{dl}$$

On en déduit que $\vec{E}_i$ est de la forme : $\vec{E}_i = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \overrightarrow{\text{grad}}\,k$, k étant une fonction arbitraire des coordonnées et du temps (car $\vec{E}_i$ est définie à un gradient près).

Le champ total $\vec{E}_t$, le seul accessible par l'expérience, est donc la somme du champ électrostatique $\vec{E}_e$ et du champ d'induction $\vec{E}_i$.

Donc $\vec{E}_t = \vec{E}_e + \vec{E}_i = -\overrightarrow{\text{grad}}\,V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \overrightarrow{\text{grad}}\,k$

k étant une fonction arbitraire, on peut la choisir nulle.

Il reste : $\vec{E}_t = -\overrightarrow{\text{grad}}\,V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$

Cette relation permet de voir que le champ électrique total $\vec{E}_t$ ne dérive pas d'un potentiel, ce qui explique la formation de courants induits, alors que le champ électrostatique, lui, dérive d'un potentiel et que

$$\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{E}_t = -\frac{\partial}{\partial t}\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{A}$$

Ainsi $\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{E}_t = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$

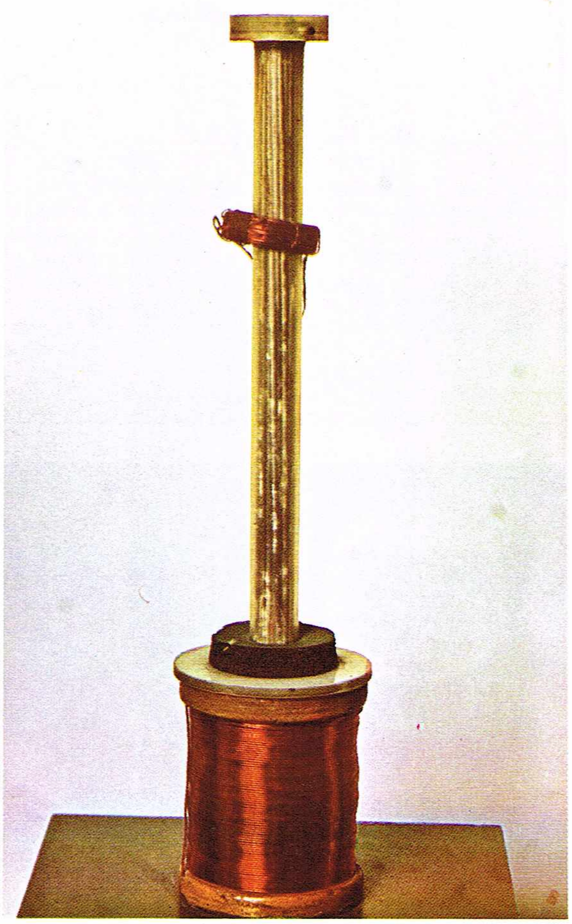

E. Rousseau - Snark International

▶ ***La spire de Thomson ; elle crée le champ magnétique « inducteur » responsable de la création du courant induit.***

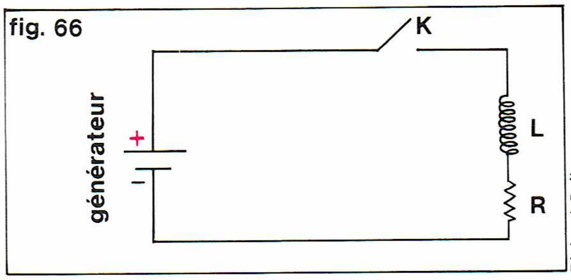

Richard Colin

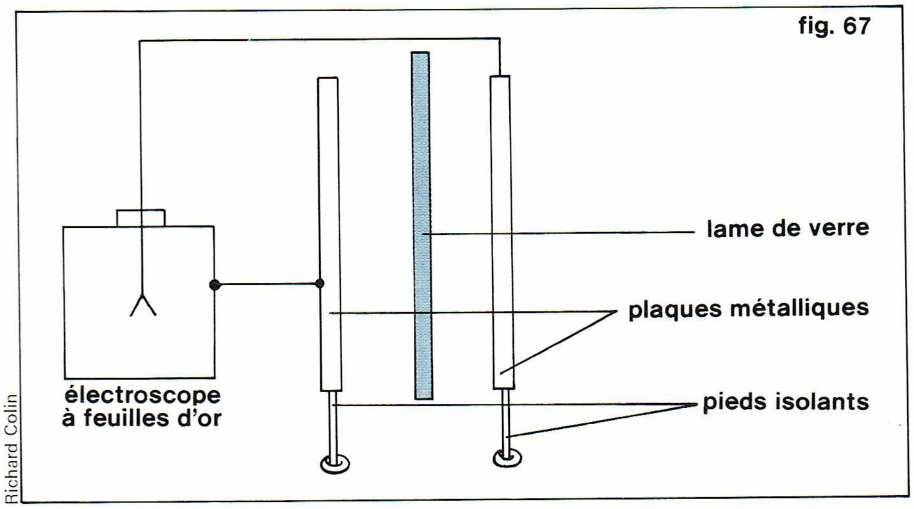

Richard Colin

▲ *A gauche, figure 66 : établissement de la valeur de l'énergie emmagasinée dans un circuit comprenant une self-inductance* **L** *et une résistance* **R.** *A droite, figure 67 : montage expérimental du* **condensateur d'Epinus.**

L'énergie magnétique

Calculons l'énergie magnétique emmagasinée dans un circuit comportant une self-inductance L et une résistance R, lors de l'établissement d'un courant (*fig.* 66).

Elle est représentée par l'équation $\mathbf{E} = L\frac{dI}{dt} + RI$

Soit : $\mathbf{E}Idt = LIdI + RI^2dt$

Le premier membre de cette équation représente l'énergie fournie au circuit par le générateur pendant le temps dt. Le terme RI^2dt représente l'énergie dissipée par effet Joule pendant ce même temps. Le terme $L\,I\,dI$ représente une énergie emmagasinée.

Ainsi, lorsque le courant passe de la valeur 0 à la valeur I, l'énergie emmagasinée par la self est :

$$W = \int_0^i LIdI = \frac{1}{2}LI^2$$

C'est l'*énergie magnétique* du circuit.

Cherchons à localiser cette énergie magnétique comme nous avons essayé de localiser l'énergie électrique. Envisageons pour cela le cas d'un solénoïde indéfini placé dans le vide, et dont la surface d'une spire est S. Considérons une certaine longueur l de ce solénoïde. Le volume ainsi délimité est $v = Sl$.

L'inductance propre de cette portion de circuit est :

$$L = \mu_0 n^2 lS = \mu_0 n^2 v$$

n étant le nombre de spires par unité de longueur.

Or $W = \frac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2}\mu_0\, n^2 v I^2$

mais $B = \mu_0\, nI$, cela entraîne que $I^2 = \frac{B^2}{n^2\mu_0{}^2}$

Soit $$W = \frac{B^2}{2\,\mu_0}v$$

Nous voyons que l'énergie magnétique est proportionnelle au volume v. Donc cette énergie est localisée dans ce volume. On peut donc en conclure que l'énergie magnétique est localisée là où existe un champ magnétique. La densité d'énergie emmagasinée est alors :

$$W_0 = \frac{W}{v} = \frac{B^2}{2\,\mu_0} = \frac{1}{2}\vec{B}\cdot\vec{H}$$

Les milieux matériels

Un diélectrique, sous l'action d'un champ électrique, peut être polarisé. C'est ce que nous montre l'expérience suivante, connue sous le nom d'*expérience du condensateur d'Epinus* (*fig.* 67). L'appareillage est formé de deux plaques métalliques montées sur deux pieds isolants. Ces deux plaques sont reliées à un électroscope à feuilles d'or. Les feuilles d'or sont d'autant plus écartées que la différence de potentiel que l'on maintient entre les deux plaques est plus grande.

Introduisons alors entre les plaques une lame de verre non chargée. On constate que l'écartement des feuilles d'or diminue. Si l'on enlève la plaque de verre, l'écartement revient à sa valeur initiale. Cette expérience peut être interprétée, comme nous l'avons dit, par le fait qu'un diélectrique soumis à un champ électrique se polarise, c'est-à-dire que tout élément de volume $d\tau$ de ce diélectrique acquiert un *moment dipolaire* $d\vec{p}$. On caractérise l'intensité de ce phénomène par un vecteur, le *vecteur polarisation* $\vec{P} = \frac{d\vec{p}}{d\tau}$

Ce phénomène a deux explications. La première concernant des corps comme les gaz rares (argon, néon, hélium, etc.) dont chaque molécule est telle que le centre de gravité des charges négatives coïncide avec celui des charges positives, lorsque aucun champ n'est appliqué. Sous l'action d'un champ électrique, la molécule se déforme, les deux centres de gravité ne se trouvent plus confondus, et sont alors distants de d. Si q représente la charge totale positive et $-q$ la charge totale négative, il apparaît donc un dipôle électrique qd.

D'autres corps tels que l'ammoniac (NH_3), l'acide chlorhydrique (HCl), sont composés de molécules dites « polaires », c'est-à-dire que, même en l'absence de champ, il existe une dissymétrie naturelle, en ce sens que les deux centres de gravité précédemment cités ne coïncident pas. Ces molécules ont donc un dipôle électrique permanent qui microscopiquement n'apparaît pas, à cause de l'agitation thermique des molécules. Cependant, sous l'action d'un champ électrique extérieur, ce dernier exerce sur les molécules un couple tendant à les orienter dans sa direction. Cela se traduit par l'apparition d'un moment dipolaire électrique moyen dans chaque élément de volume $d\tau$.

Nous allons à présent montrer qu'un diélectrique de vecteur polarisation $\vec{P}$ est équivalent à une *distribution volumique de charges fictives* $\rho_p = -\operatorname{div}\vec{P}$ et à une *densité superficielle de charges fictives* $\sigma_p = \vec{P}\cdot\vec{n}$.

En effet, soit un diélectrique de volume τ (*fig.* 68), soumis à un champ extérieur $\vec{E}_0$. Considérons également un élément de volume $d\tau$ de ce diélectrique. Ce dernier acquiert le moment $d\vec{p}$, auquel correspond le vecteur polarisation $\vec{P} = \frac{d\vec{p}}{d\tau}$

Supposons que ce diélectrique porte en plus une *densité de charge volumique* ρ_v et une *densité de charge surfacique* σ. Le potentiel créé en un point M extérieur au diélectrique et situé à une distance r du volume élémentaire $d\tau$ est :

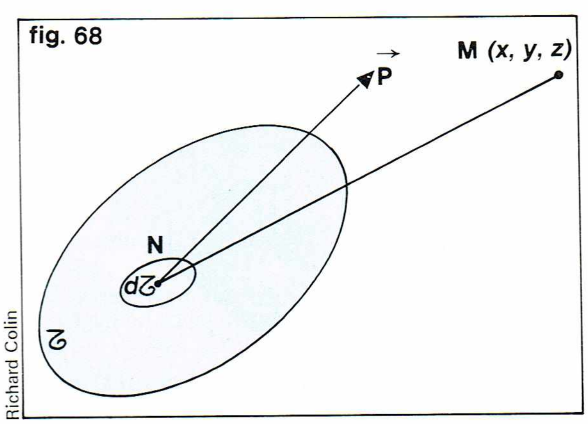

Richard Colin

◀ *Figure 68 : si un volume dτ acquiert un moment dipolaire $d\vec{p}$, il lui correspond le vecteur de polarisation $\vec{P} = \frac{d\vec{p}}{d\tau}$.*

$$V_M = \iiint_\tau \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left(\vec{P}\cdot\overrightarrow{\text{grad}}_N \frac{1}{r} + \frac{\rho_v}{r}\,d\tau\right) + \iint_\Sigma \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\sigma dS}{r}$$

Σ étant la surface délimitant le volume τ et $\overrightarrow{\text{grad}}_N$ signifiant que l'on prend le gradient par rapport au point N.

On peut transformer l'intégrale triple ; nous avons en effet :

$$\text{div}\,\frac{1}{r}\cdot\vec{P} = \vec{P}\,\overrightarrow{\text{grad}}_N\frac{1}{r} + \frac{1}{r}\,\text{div}\cdot\vec{P}$$

Nous obtenons :

$$V_M = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\iiint_\tau\left(\text{div}\,\frac{\vec{P}}{r} - \frac{1}{r}\,\text{div}\,\vec{P} + \frac{\rho_v}{r}\right)d\tau + \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\iint_\Sigma\frac{\sigma dS}{r}$$

Si $\vec{n}$ est la normale dirigée vers l'extérieur du diélectrique :

$$\iiint_\tau \text{div}\,\frac{\vec{P}}{r}\cdot d\tau = \iint_\Sigma \frac{\vec{P}\cdot\vec{n}}{r}\cdot dS$$

d'où : $V_M = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0 r}\iiint_\tau(\rho_v - \text{div}\,\vec{P})\,d\tau + \frac{1}{4\pi\varepsilon_0 r}\iint_\Sigma(\sigma + \vec{P}\cdot\vec{n})\,dS$

On peut ainsi définir autour d'un point quelconque du diélectrique un vecteur $\rho_0 = \rho_v - \text{div}\,\vec{P}$ et sur la surface Σ une densité superficielle de charges $\sigma_0 = \sigma + \vec{P}\cdot\vec{n}$.

Le problème est à présent de connaître le potentiel à l'intérieur du diélectrique. La formule donnant V_M, valable pour un point M situé à l'extérieur du diélectrique, reste finie, continue et dérivable, donc elle reste valable à l'intérieur du diélectrique, et nous pouvons alors dire que le potentiel à l'intérieur d'un diélectrique, en un point, est celui que produiraient dans le vide les charges vraies déjà existantes, c'est-à-dire ρ_v et σ, auxquelles on ajouterait des charges fictives $\rho_p = -\text{div}\,\vec{P}$ et $\sigma_p = \vec{P}\cdot\vec{n}$.

Le champ $\vec{E}$ à l'intérieur du diélectrique, en ce point, est celui qui dérive du potentiel alors calculé. Si V_N est ce potentiel, on obtient :

$$\vec{E}_N = -\overrightarrow{\text{grad}}\,V_N$$

Théorème de Gauss dans les diélectriques

Soit la *figure* 69. Elle est constituée d'un volume τ délimité par la surface Σ, dans lequel existe un diélectrique occupant un volume τ' délimité par une surface Σ'. τ_0 est le volume ne contenant pas le diélectrique et délimité par la surface Σ_0 ($\Sigma_0 = \Sigma - \Sigma'$).

S'il n'y avait pas de diélectrique dans le volume τ qui contient la charge q, le théorème de Gauss établirait que :

$$\iint_\Sigma \vec{E}\cdot d\vec{S} = \frac{q}{\varepsilon_0}$$

Si à présent un diélectrique occupe une partie du volume, comme c'est le cas dans l'exemple figuré ici, il faut alors considérer les charges fictives :

$$q_p = \iint_{\Sigma'}(\vec{P}\cdot\vec{n})\,dS - \iiint_{\tau'}(\text{div}\,\vec{P})\,d\tau$$

Dans l'expression du théorème de Gauss, il faut alors remplacer q par $q_{réel} + q_p$

(11) $\varepsilon_0 \iint_\Sigma \vec{E}\cdot\vec{n}dS = q_{réel} + \iiint_{\tau'}(-\text{div}\,\vec{P})\,d\tau + \iint_{\Sigma'}(\vec{P}\cdot\vec{n})\,dS$

or $\tau' = \tau - \tau_0$

donc $\iiint_{\tau'} = \iiint_\tau - \iiint_{\tau_0}$

Soit

(12) $\iiint_{\tau'}(-\text{div}\,\vec{P})\,d\tau = \iiint_\tau(-\text{div}\,\vec{P})\,d\tau - \iiint_{\tau_0}(-\text{div}\,\vec{P})\,d\tau$

En reportant **(12)** dans l'expression **(11)**, on obtient :

$$\varepsilon_0\iiint_\tau(\text{div}\,\vec{E})\,d\tau + \iiint_\tau(\text{div}\,\vec{P})\,d\tau = q_{réel} + \iiint_{\tau_0}(\text{div}\,\vec{P})\,d\tau + \iint_{\Sigma'}(\vec{P}\cdot\vec{n})\,dS$$

Soit

$$\iiint_\tau \text{div}\,(\varepsilon_0\vec{E} + \vec{P})\,d\tau = q_{réel} + \iiint_{\tau_0}(\text{div}\,\vec{P})\,d\tau + \iint_{\Sigma'}(\vec{P}\cdot\vec{n})\,dS$$

On pourrait *a priori* croire que l'intégrale

$$\iiint_{\tau_0}(\text{div}\,\vec{P})\,d\tau$$

est nulle. Cela est vrai, sauf sur la surface Σ' enveloppant le diélectrique.

Montrons à présent que

$$\iiint_{\tau_0}(\text{div}\,\vec{P})\,d\tau + \iint_{\Sigma'}(\vec{P}\cdot\vec{n})\,dS = 0$$

La première intégrale peut se transformer par le théorème de la divergence :

$$\iiint_{\tau_0}(\text{div}\,\vec{P})\,d\tau = \iint_{\Sigma_0}(\vec{P}\cdot\vec{n})\,dS$$

or $\Sigma_0 = \Sigma - \Sigma'$

ce qui donne :

$$\iint_{\Sigma_0}(\vec{P}\cdot\vec{n})\,dS + \iint_{\Sigma'}(\vec{P}\cdot\vec{n})\,dS = \iint_\Sigma(\vec{P}\cdot\vec{n})\,dS = 0$$

car l'intégrale $\iint_\Sigma(\vec{P}\cdot\vec{n})\,dS$ est nulle puisque $\vec{P}$ est nul partout où il n'y a pas de diélectrique, et en particulier sur la surface Σ.

On aboutit à :

$$\iiint_\tau \text{div}\,(\varepsilon_0\vec{E} + \vec{P})\,d\tau = q_{réel}$$

A condition de prendre comme définition du vecteur induction dans le vide

$$\vec{D} = \varepsilon_0\vec{E} + \vec{P}$$

on voit que $\iiint_\tau(\text{div}\,\vec{D})\,d\tau = \iiint_\tau \rho_{v\,réel}\,d\tau$

Donc $\text{div}\,\vec{D} = \rho_{v\,réel}$

Nous voyons ainsi que seule la densité volumique de charges réelles intervient dans cette équation. Par suite, on peut affirmer que le vecteur induction électrique est créé seulement par les charges réelles.

Le **théorème de Gauss** peut ainsi s'énoncer, qu'il y ait ou non un diélectrique : *le flux du vecteur induction $\vec{D}$, à travers une surface fermée quelconque, est égal à la somme des charges réelles situées à l'intérieur de cette surface.*

fig. 69

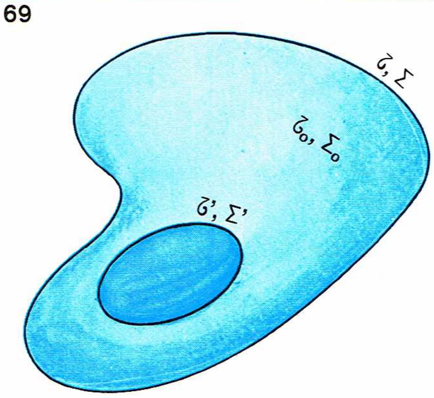

Richard Colin

► ***Figure 69 :*** *voir le chapitre* ***théorème de Gauss dans les diélectriques.***

fig. 70

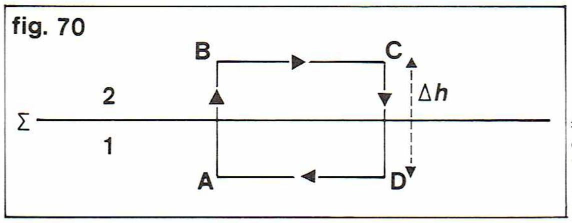

Richard Colin

Nous voyons que, dans le vide, $\vec{D} = \varepsilon_0\vec{E}$ puisque $\vec{P}$ est nul. Dans les diélectriques, les vecteurs $\vec{E}$ et $\vec{D}$ ont des propriétés différentes. C'est pourquoi nous allons voir comment se comportent ces vecteurs lors du passage d'un diélectrique à un autre, cet autre diélectrique pouvant être le vide.

Composante tangentielle de $\vec{E}$

Considérons d'abord le vecteur $\vec{E}$ à l'intérieur d'un diélectrique, et plus particulièrement sa composante tangentielle. En tout point, ce vecteur $\vec{E}$, dérivant d'un potentiel, est tel que $\overrightarrow{rot}\,\vec{E} = 0$. Cela équivaut mathématiquement au fait que la composante tangentielle de $\vec{E}$ se conserve quand on passe d'un milieu diélectrique 1 à un milieu diélectrique 2.

Donc $$E_{T1} = E_{T2}$$

On peut le démontrer également en considérant la *figure* 70 qui représente deux diélectriques d'indices 1 et 2, séparés par une surface de séparation Σ.

On choisit un parcours rectangulaire ABCD à cheval sur la surface de séparation Σ et tel que la largeur AB = CD = Δh est un infiniment petit d'ordre 2 par rapport à la longueur BC = DA de ce parcours rectangulaire.

Supposons qu'une charge-étalon suive le parcours fermé ABCD. Comme, même en présence d'un diélectrique, le champ $\vec{E}$ dérive d'un potentiel, on a :

$$\oint_{ABCD} \vec{E}\cdot d\vec{l} = 0$$

or, puisque Δh est un infiniment petit d'ordre 2 :

$$\int_{\Delta h} \vec{E}\cdot d\vec{l} = 0$$

donc $$\int_{BC} \vec{E}\cdot d\vec{l} + \int_{DA} \vec{E}\cdot d\vec{l} = 0$$

et comme les parcours BC et DA sont petits, $\vec{E}$ peut être considéré comme constant sur ces parcours.

D'autre part, comme $|BC| = |DA|$, on a donc bien :

$$E_{T1} = E_{T2}$$

Ainsi la composante tangentielle de $\vec{E}$ est continue à la traversée de la surface de séparation de deux milieux.

Composante normale de $\vec{D}$

Soit la *figure* 71 représentant la surface de séparation Σ entre deux milieux 1 et 2 et un petit cylindre de hauteur Δh, et de surface de base ΔS. Soit la normale $\vec{n}$ orientée du milieu 1 vers le milieu 2. Le flux du vecteur $\vec{D}$ à travers ce cylindre est :

$$\psi = (\vec{D}_2\cdot\vec{n} - \vec{D}_1\cdot\vec{n})\,dS$$

cela, car le flux à travers Δh est nul.

Or, d'après le théorème de Gauss, ce flux est aussi égal à la charge réelle contenue dans le petit cylindre : soit σdS.

Donc $$(\vec{D}_2 - \vec{D}_1)\,\vec{n} = \sigma_{réel}$$

que l'on peut écrire : $D_{N2} - D_{N1} = \sigma_{réel}$

Ainsi, la composante normale du vecteur induction $\vec{D}$ subit, à la traversée de la surface de séparation des deux milieux, une discontinuité égale à la densité de charges réelles sur cette surface. Remarquons que le comportement de la composante tangentielle de $\vec{D}$ dépend de la relation liant $\vec{E}$ et $\vec{D}$.

fig. 71

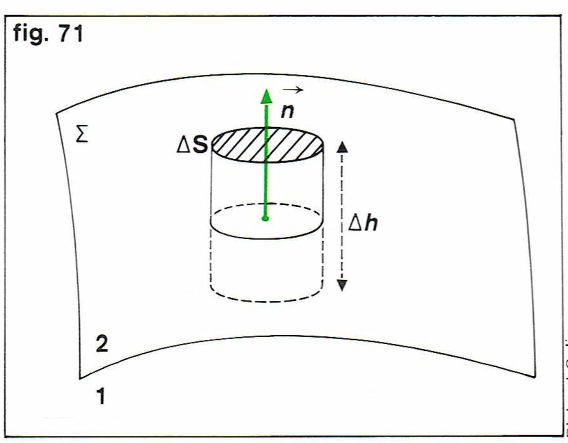

Richard Colin

fig. 72

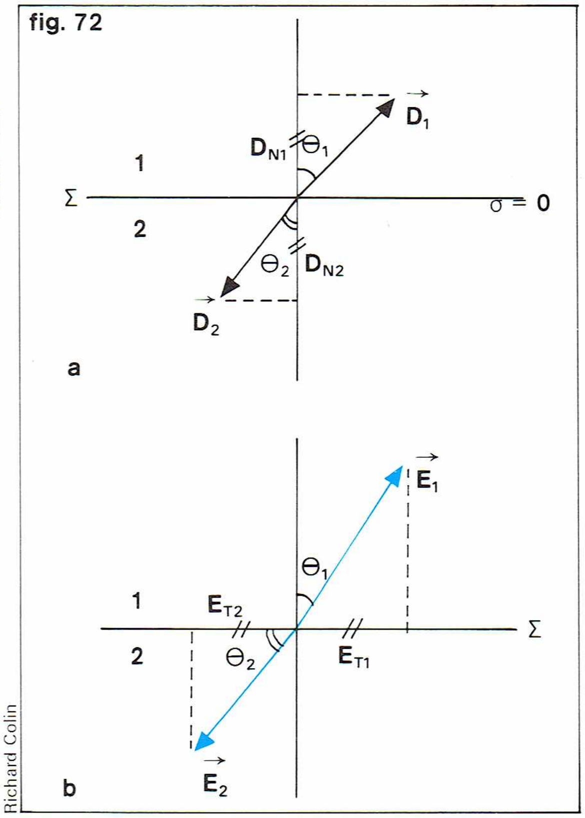

Richard Colin

◄ *A gauche, figure 70 : établissement de l'égalité de la composante tangentielle du vecteur* $\vec{E}$. *A droite, figure 72 : réfraction des lignes de champ en l'absence de charges superficielles.*

Réfraction des lignes de champ en l'absence de charges superficielles

Puisque la surface de séparation des milieux 1 et 2 n'est pas chargée, il y a donc conservation de la composante normale de $\vec{D}$. Donc $D_{N1} = D_{N2}$ (*fig.* 72a).

Soit encore : $\varepsilon_1 E_{N1} = \varepsilon_2 E_{N2}$

D'autre part, il y a conservation de la composante tangentielle de $\vec{E}$.

Soit $E_{T1} = E_{T2}$ (*fig.* 72b).

Ces deux égalités se traduisent par la relation :

$$\varepsilon_1 E_1 \cos\theta_1 = \varepsilon_2 E_2 \cos\theta_2$$

et $$E_1 \sin\theta_1 = E_2 \sin\theta_2$$

soit $$\frac{\text{tg}\,\theta_1}{\varepsilon_1} = \frac{\text{tg}\,\theta_2}{\varepsilon_2}$$

soit encore $$\frac{\text{tg}\,\theta_1}{\text{tg}\,\theta_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$$

Diélectriques linéaires, homogènes et isotropes (l. h. i.)

Un diélectrique est l. h. i. si le vecteur polarisation $\vec{P}$ est proportionnel au champ électrique, donc :

$$\vec{P} = \varepsilon_0\chi_e\vec{E}$$

χ_e étant la *susceptibilité électrique* du milieu :

or $$\vec{D} = \varepsilon_0\vec{E} + \vec{P} = \varepsilon_0(1 + \chi_e)\,\vec{E} = \varepsilon\vec{E} = \varepsilon_0\varepsilon_r\vec{E}$$

◄ *Figure 71 ; établissement de la formule :* $(\vec{D}_2 - \vec{D}_1)\,\vec{n} = \sigma_{réel}$.

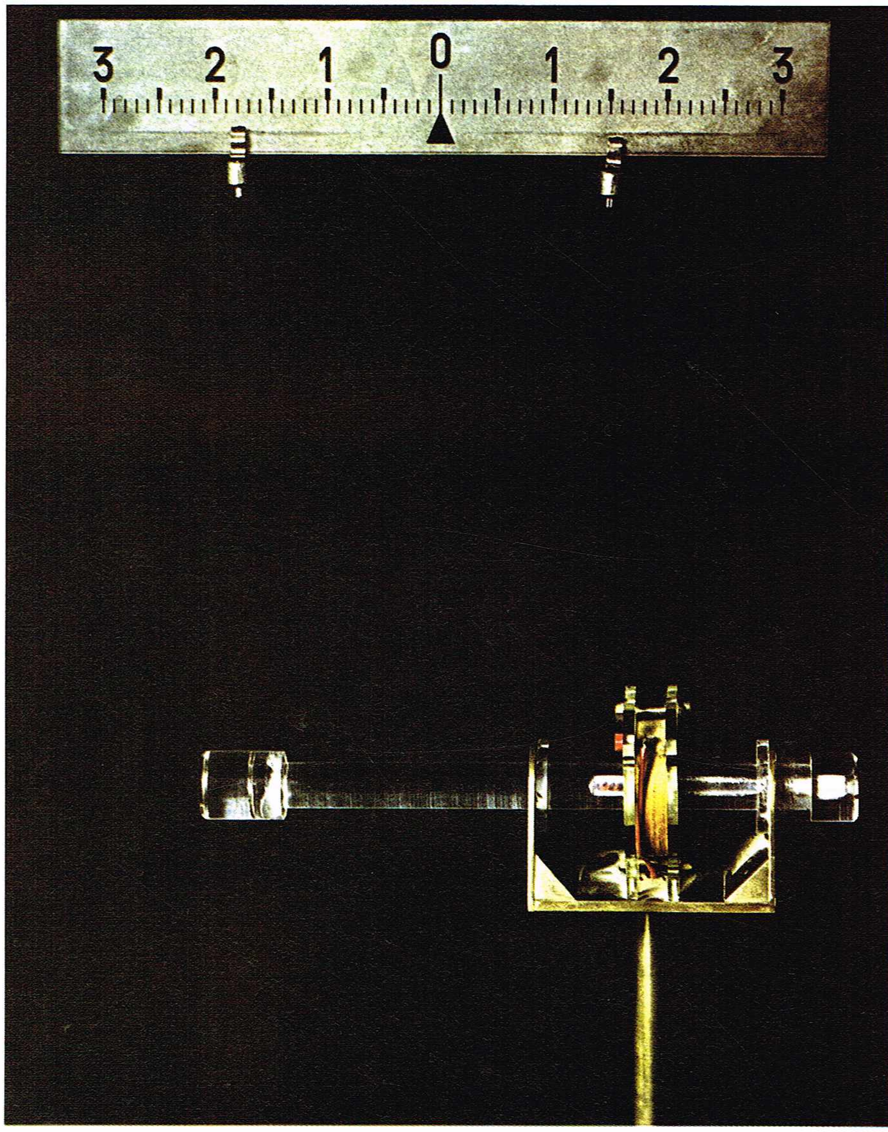

E. Rousseau - Snark International

▲ ***Aimant mobile par rapport à une bobine reliée à un galvanomètre.***

avec $\varepsilon = \varepsilon_0\,(1 + \chi_e)$ et $\varepsilon_r = \dfrac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$

ε_r s'appelle *permittivité relative* du milieu.

Comme $\operatorname{div} \vec{E} = \dfrac{\rho_v}{\varepsilon}$ et que $\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}\,V$, on obtient aussi l'équation de Poisson $\nabla^2 V + \dfrac{\rho_v}{\varepsilon} = 0$.

C'est donc la même relation que dans le vide, mais à la condition de remplacer ε_0 par ε.

Remarquons que, si le diélectrique ne contient pas de charges volumiques ($\rho_v = 0$), on a alors $\operatorname{div} \vec{E} = 0$.
Donc la charge totale $\rho_0 = \rho_p = -\operatorname{div} \vec{P} = -\operatorname{div}\,(\varepsilon_0 \chi_e \vec{E})$

$$\rho_0 = \rho_p = -\chi_e \varepsilon_0 \operatorname{div} \vec{E} = 0$$

Donc il n'y a pas du tout de charges volumiques; il ne reste que des charges superficielles $\sigma_0 = \sigma_{réelle} + \sigma_p$.

Une seconde remarque peut être faite pour les diélectriques (l. h. i.). En effet, comme $\vec{D} = \varepsilon\vec{E}$, la continuité de la composante tangentielle de $\vec{E}$ à la traversée de la surface de séparation entraîne la continuité de la composante tangentielle de $\vec{D}$.

Les milieux aimantés

Il existe sur terre certains corps, comme l'oxyde de fer Fe_3O_4, qui ont les mêmes propriétés magnétiques que celles des courants électriques : par exemple, tout comme un courant électrique, ils créent un champ magnétique $\vec{B}$ en leur voisinage.

D'autres corps, tel le fer, n'acquièrent la propriété de créer un champ en leur voisinage qu'après avoir été préalablement soumis au « champ excitateur » d'un solénoïde, par exemple. Deux cas peuvent alors se produire selon la nature de ces substances.

Certains corps, appelés *ferromagnétiques,* conservent la propriété lorsque le champ excitateur cesse. Le fer, le cobalt font partie de cette catégorie. C'est pourquoi ils peuvent servir à fabriquer des aimants permanents.

Chez d'autres corps cette propriété disparaît avec le champ excitateur. On a alors affaire à des *corps diamagnétiques.*

Analogie entre les aimants et les courants

Tout d'abord, rappelons qu'un élément de circuit $d\vec{l}$ parcouru par un courant I et placé dans un champ $\vec{B}$ est soumis à la force de Laplace $d\vec{F} = I d\vec{l} \wedge \vec{B}$.

Plusieurs expériences ont déjà été décrites lorsque le champ $\vec{B}$ est produit par un solénoïde, par exemple. L'élément $d\vec{l}$ est effectivement soumis à la force $d\vec{F}$.

Réalisons à présent l'expérience suivante (*fig.* 73) : une tige métallique qui peut se mouvoir librement autour d'un point O est placée dans l'entrefer d'un aimant et plonge dans une fente remplie de mercure. Un courant I peut y circuler, faisant contact avec le bout de la tige en C. Si le courant a le sens indiqué sur la figure, on constate la présence d'une force allant par exemple de droite à gauche, entraînant la tige dans la fente. C'est donc qu'il existe un champ $\vec{B}$, allant d'une extrémité de l'aimant vers l'autre; dans le cas de la *figure* 73, le pôle nord de l'aimant est situé vers l'avant de la feuille. Si l'on retourne l'aimant, ou si l'on change le sens du courant, on constate que le fil se déplace en sens inverse, donc que la force a changé de sens.

Une autre expérience célèbre est celle de la *roue de Barlow* (*fig.* 74) où l'on remplace le fil OC par une roue métallique pouvant tourner autour de son axe O. Si, comme dans l'expérience précédente, la roue est placée entre les

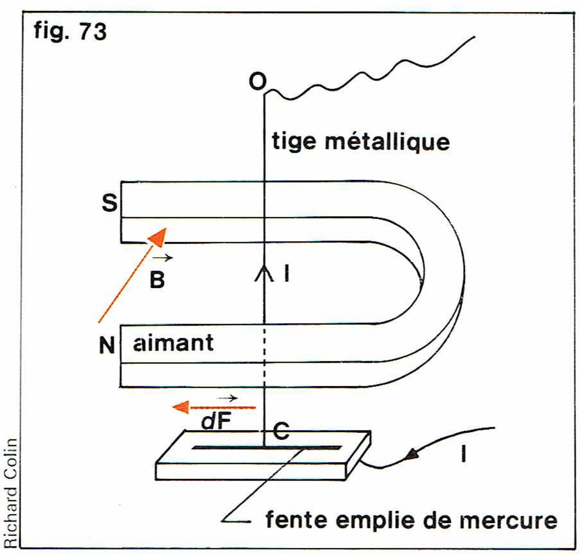

Richard Colin

▶ ***Figure 73 : la tige étant soumise à une force, c'est qu'il existe un champ magnétique $\vec{B}$ allant d'une extrémité de l'aimant vers l'autre.***

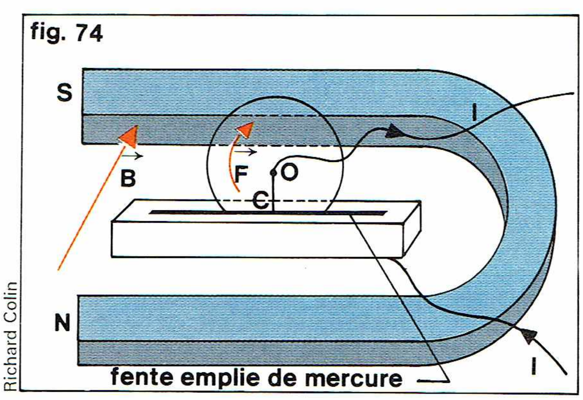

Richard Colin

▶ ***Figure 74 : expérience de la roue de Barlow.***

fig. 75

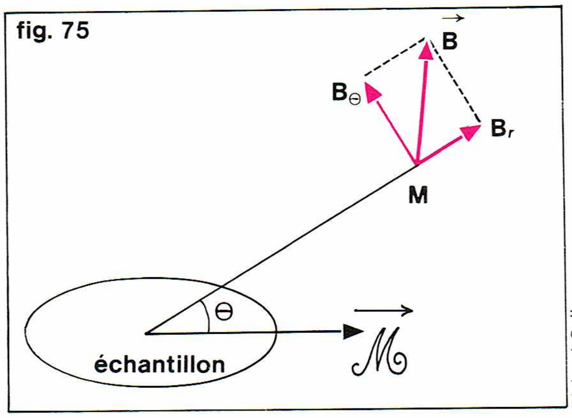

Richard Colin

◀ *Figure 75;* ***le dipôle magnétique que constitue la matière aimantée crée en un point M un champ magnétique $\vec{B}$ dont les composantes sont :***

$$B_r = \frac{2\,\mu_0\mathcal{M}}{4\,\pi}\cdot\frac{\cos\theta}{r^3} \quad \textit{et}$$

$$B_\theta = \frac{\mu_0\mathcal{M}}{4\,\pi}\cdot\frac{\sin\theta}{r^3}$$

deux pôles d'un aimant, on constate qu'elle tourne autour de son axe. Si l'aimant est placé comme sur la figure, la roue tourne dans le sens des aiguilles d'une montre. Dans le cas où l'on inverse le sens du courant ou si l'on retourne l'aimant, la roue tourne dans le sens opposé.

Ces deux expériences montrent donc l'analogie, sur le plan magnétique, entre un conducteur parcouru par un courant et un aimant.

C'est Ampère, qui, en 1825, interpréta cette analogie en faisant intervenir des « courants particulaires » au sein même de la matière. Cela rejoint effectivement les théories modernes de la matière selon lesquelles un électron tourne autour de son noyau, créant ainsi un courant et faisant ainsi une boucle équivalente à un moment magnétique.

Doublets ou dipôles magnétiques

L'expérience de Gauss montre qu'un petit échantillon de matière placé dans un champ magnétique uniforme se trouve soumis uniquement à un couple de moment $\vec{\Gamma}$ qui tend à l'orienter dans le sens de $\vec{B}$. Nous voyons une certaine analogie entre le comportement de cet échantillon et celui d'un dipôle électrique ou d'une spire plane parcourue par un courant. Ils subissent les mêmes effets d'orientation. Aussi, par analogie, on peut associer à cet échantillon de matière aimantée un moment magnétique $\vec{\Delta m}$ tel que, placé dans le champ $\vec{B}$, il soit soumis au couple $\vec{\Gamma} = \vec{\Delta m} \wedge \vec{B}$ (comme pour une spire parcourue par un courant I).

On dit ainsi que le morceau d'échantillon considéré est assimilable à un *doublet magnétique* ou *dipôle magnétique*, caractérisé par un moment $\vec{\Delta m}$. L'échantillon pris dans sa totalité est formé d'un ensemble de tels doublets magnétiques. Son moment $\vec{\mathcal{M}}$ est la somme des moments $\vec{\Delta m}$.

Ainsi $\quad \vec{\mathcal{M}} = \Sigma\vec{\Delta m} \quad$ et $\quad \vec{\Gamma} = \vec{\mathcal{M}} \wedge \vec{B}$

Le champ $\vec{B}$ a donc un effet d'orientation pour le couple qu'il crée.

Une aiguille magnétique placée dans un champ magnétique s'oriente dans la direction de ce champ. Elle sert ainsi à repérer la direction du champ. Nous avons dit que la substance aimantée était équivalente à un doublet magnétique de moment magnétique $\vec{\mathcal{M}}$. Nous pouvons poursuivre l'analogie avec le dipôle électrique de moment électrique $\vec{p}$. Nous savons qu'un tel dipôle crée en un point M un champ électrique dont les composantes, radiale et tangentielle, sont :

$$E_r = \frac{2\,p}{4\,\pi\varepsilon_0}\,\frac{\cos\theta}{r^3}$$

$$E_\theta = \frac{p}{4\,\pi\varepsilon_0}\,\frac{\sin\theta}{r^3}$$

Nous pouvons poursuivre l'analogie et dire que le dipôle magnétique que constitue la matière aimantée crée en un point M un champ magnétique (*fig.* 75) dont les composantes sont :

$$B_r = \frac{2\,\mu_0\mathcal{M}}{4\,\pi}\cdot\frac{\cos\theta}{r^3}$$

$$B_\theta = \frac{\mu_0\mathcal{M}}{4\,\pi}\cdot\frac{\sin\theta}{r^3}$$

Dans ces formules, on a remplacé simplement ε_0 par $\frac{1}{\mu_0}$.

Masses magnétiques - Loi de Coulomb

Le parallélisme entre doublet électrique et doublet magnétique nous permet d'introduire l'équivalent des charges électriques $+\,q$ et $-\,q$. Ce sont les *masses magnétiques* $-\,m$ et $+\,m$. On peut alors définir, comme en électrostatique, le moment magnétique $|\vec{\mathcal{M}}| = dm$ (avec d qui est la distance entre les deux masses magnétiques $+\,m$ et $-\,m$).

Ce moment magnétique est dirigé de la masse $-\,m$ vers la masse $+\,m$. Les masses magnétiques n'ont ici qu'un caractère fictif. Cependant, une masse magnétique m produirait à la distance r le *potentiel magnétique* $V^* = \frac{\mu_0 m}{4\,\pi r}$ l'astérisque signifie « magnétique ».

Ce potentiel dériverait de l'induction magnétique $\vec{B}$. $\vec{B} = -\,\vec{\text{grad}}\,V^*$. Sa valeur algébrique serait $\frac{\mu_0 m}{4\,\pi r^2}$. On voit qu'il y a analogie parfaite entre les grandeurs appliquées à un dipôle électrique et celles appliquées à un dipôle magnétique à condition de remplacer q par m et ε_0 par $\frac{1}{\mu_0}$ et le champ $\vec{E}$ par le champ $\vec{B}$. Le potentiel électrique créé par les charges dans $d\tau$ en un point M s'exprime par :

$$dV = \frac{1}{4\,\pi\varepsilon_0}\,\vec{\mathcal{M}}\cdot\vec{\text{grad}}_N\,\frac{1}{r}$$

tandis que le potentiel magnétique s'écrit :

$$dV^* = \frac{\mu_0}{4\,\pi}\,\vec{\mathcal{M}}\cdot\vec{\text{grad}}_N\,\frac{1}{r}$$

Il reste à présent à déterminer la force s'exerçant sur une masse magnétique m placée dans un champ uniforme $\vec{B}$ de sorte qu'on retrouve la valeur du moment magnétique $\vec{\Gamma} = \vec{\mathcal{M}} \wedge \vec{B}$. Cette force ne peut être que de la forme $\vec{F} = m\vec{B}$, de sorte que la force s'exerçant sur deux masses magnétiques m et m' séparées par la distance r soit :

$$|\vec{F}| = \frac{\mu_0}{4\,\pi}\,\frac{mm'}{r^2}$$

Cette expression, analogue à celle rencontrée en électrostatique, est appelée **loi de Coulomb.**

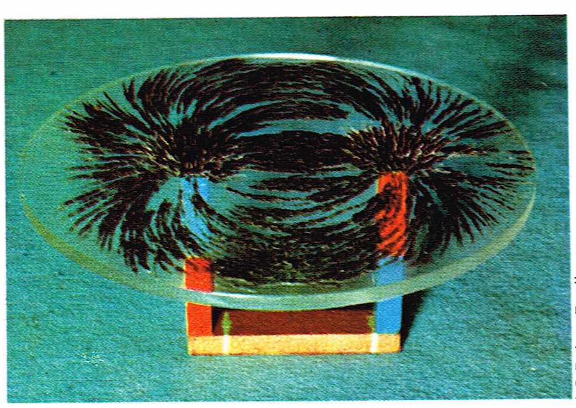

I.G.D.A. - Bevilacqua

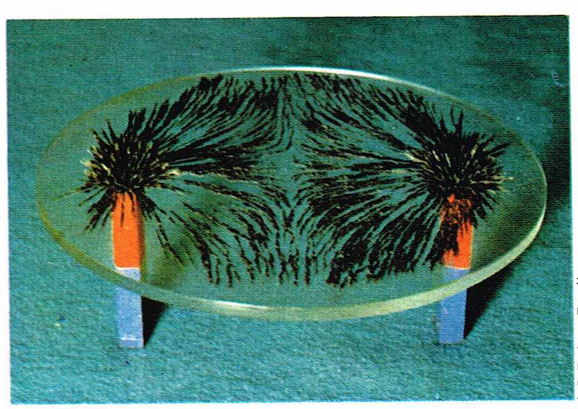

I.G.D.A. - Bevilacqua

◀ ***Répartition des lignes de force d'un champ magnétique : à gauche, configuration du champ généré par les deux pôles d'un aimant; à droite, configuration du champ généré par les pôles de même signe de deux aimants.***

fig. 76

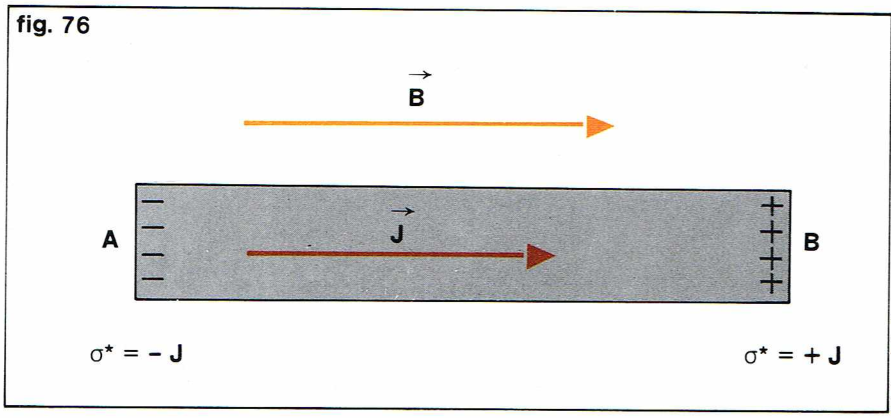

Richard Colin

▲ *Figure 76 : le barreau d'acier étant soumis au champ $\vec{B}$ parallèle à ses génératrices, il n'apparaît de masses magnétiques que sur les faces* A *et* B.

Analogies entre les milieux polarisés et les milieux aimantés

Soit un volume τ de matière aimantée. Nous avons dit qu'il était formé d'une assemblée de dipôles magnétiques. Soit un élément de volume $d\tau$ autour d'un point N et assimilable à un doublet magnétique $d\vec{\mathcal{M}}$. On définit alors le vecteur *intensité d'aimantation* par $\vec{J} = \frac{d\vec{\mathcal{M}}}{d\tau}$, variable en tout point de la substance aimantée. Cette intensité d'aimantation se mesure en ampères par mètre (A/m) dans le système M. K. S. A.

Nous avons vu que cette matière aimantée créait un champ magnétique en un point extérieur M et qu'il dérivait d'un potentiel V*. Par une analogie totale des calculs que nous avons faits sur les milieux électriques polarisés, nous trouvons :

$$V^* = \frac{\mu_0}{4\pi r} \iint_\Sigma (\vec{J} \cdot \vec{n})\, dS + \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint_\tau (-\operatorname{div} \vec{J})\, d\tau$$

Σ étant la surface de la matière aimantée et τ son volume. $\vec{J} \cdot \vec{n} = J_N$ désigne la composante normale extérieure de $\vec{J}$. Ainsi, en chaque point, la matière aimantée a une *densité superficielle de masses magnétiques* $\sigma = J \cos\theta$, θ étant l'angle entre $\vec{J}$ et la normale orientée vers l'extérieur, et une *densité volumique* $\rho_v = -\operatorname{div} \vec{J}$.

Ainsi un volume de matière aimantée produit en tout point extérieur la même induction magnétique qu'une assemblée de masses magnétiques réparties sur la surface délimitée par le volume avec la *densité superficielle* $\sigma^* = \vec{J} \cdot \vec{n}$ et la densité volumique $\rho_v^* = -\operatorname{div} \vec{J}$.

Dans le cas particulier de l'aimantation uniforme, c'est-à-dire $\vec{J}$ = constante, nous voyons que $\rho_v^* = 0$, donc que les masses magnétiques sont localisées sur la surface. C'est le cas d'un barreau d'acier (*fig.* 76) placé dans un champ magnétique constant $\vec{B}$, parallèle aux génératrices du barreau. Alors $\vec{J}$ est aussi constant.

Il n'apparaît de masses magnétiques que sur les faces A et B, puisque, sur les faces latérales, on a $\vec{J} \cdot \vec{n} = 0$ (les normales étant dirigées vers l'extérieur du barreau). Donc, sur la face A, il apparaît la densité superficielle de masses magnétiques $\vec{J} \cdot \vec{n} = -J$, tandis que sur la face B apparaît $+J$.

Courants ampériens équivalents

Nous avons vu que, lorsqu'une substance aimantée était soumise à un champ magnétique $\vec{B}$, il apparaissait un vecteur intensité d'aimantation $\vec{J}$. Nous allons à présent montrer que les dipôles magnétiques de cette substance sont équivalents à des courants ampériens volumiques $\vec{J}_\tau^*$ et surfaciques $\vec{J}_S^*$ tels que

$$\vec{J}_\tau^* = \overrightarrow{\text{rot}}\, \vec{J} \text{ et } \vec{J}_S^* = \vec{J} \wedge \vec{n}$$

En effet, nous avons vu que le potentiel vecteur $\vec{A}$ en un point M pouvait s'écrire :

$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \vec{\mathcal{M}} \wedge \overrightarrow{\text{grad}}_N \left(\frac{1}{r}\right)$$

Or, comme $\vec{J} = \frac{d\vec{\mathcal{M}}}{d\tau}$, $\vec{A}$ peut s'écrire (*fig.* 76) :

$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint_\tau \vec{J} \wedge \overrightarrow{\text{grad}}_N \left(\frac{1}{r}\right) d\tau$$

Or, si l'on considère un scalaire m et un vecteur $\vec{C}$, on a l'identité vectorielle : $\overrightarrow{\text{rot}}\,(m\vec{C}) = m\, \overrightarrow{\text{rot}}\, \vec{C} - \vec{C} \wedge \overrightarrow{\text{grad}}\, m$.

On peut dans notre cas écrire que :

$$\vec{J} \wedge \overrightarrow{\text{grad}}_N \left(\frac{1}{r}\right) = \frac{1}{r} \overrightarrow{\text{rot}}_N\, \vec{J} - \overrightarrow{\text{rot}}_N \left(\frac{\vec{J}}{r}\right)$$

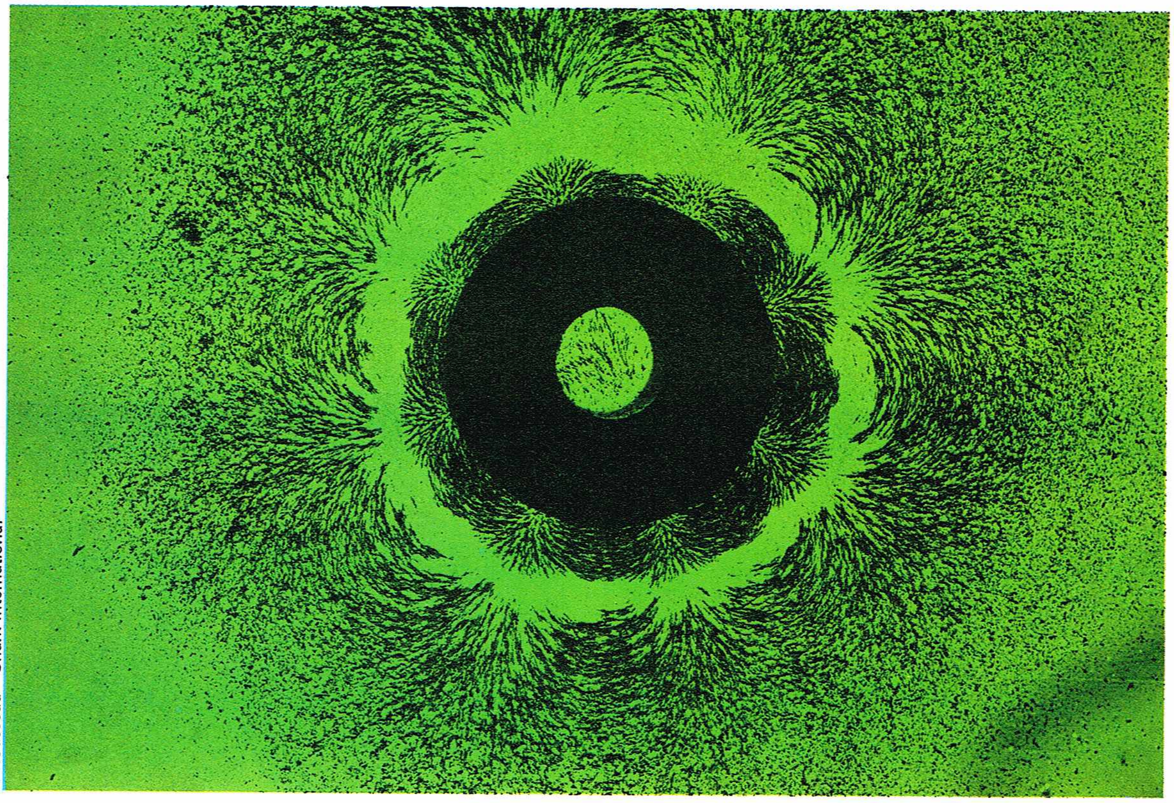

E. Rousseau - Snark International

▶ *Spectre magnétique engendré par un aimant multipolaire.*

soit :

$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi}\iiint_\tau \frac{1}{r}\cdot \overrightarrow{\mathrm{rot}}_N(\vec{J})\,d\tau - \frac{\mu_0}{4\pi}\iiint_\tau \overrightarrow{\mathrm{rot}}_N\left(\frac{\vec{J}}{r}\right)d\tau$$

La seconde intégrale peut être transformée par la *formule* dite *du rotationnel :*

$$\iiint_\tau \overrightarrow{\mathrm{rot}}\,\vec{C}\,d\tau = \iint_\Sigma d\vec{S}\wedge\vec{C}\,dS$$

Σ étant une surface sur laquelle s'appuie τ. Donc :

$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi}\iiint_\tau \frac{1}{r}\cdot \overrightarrow{\mathrm{rot}}_N(\vec{J})\,d\tau - \frac{\mu_0}{4\pi}\iint_\Sigma \frac{d\vec{S}\wedge\vec{J}}{r}$$

Or, si l'on considère un système de courants répartis dans un volume τ avec la densité volumique $\vec{J}_\tau$, on a vu que le potentiel vecteur $\vec{A}$ était de la forme :

$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi}\iiint_\tau \frac{\vec{J}_\tau\cdot d\tau}{r}$$

Il est facile alors de voir que la matière aimantée peut être assimilée à une densité de courant :

$$\vec{J}^*_\tau = \overrightarrow{\mathrm{rot}}_N(\vec{J})$$

l'astérisque signifie qu'il s'agit de courants équivalents. Il est de la même manière facile d'établir que cette matière aimantée peut être assimilée à une densité surfacique de courant :

$$\vec{J}^*_S = \vec{J}\wedge\vec{n}$$

$\vec{n}$ étant la normale orientée vers l'extérieur de la surface.

Nous allons à présent illustrer cette formule par un exemple. Soit un cylindre de révolution uniformément aimanté et placé dans un champ magnétique constant (*fig.* 77). Il apparaît un vecteur intensité d'aimantation $\vec{J}$ parallèlement aux génératrices du cylindre (dans la direction du champ « magnétisant »). $\vec{J}$ étant une constante :

$$\vec{J}^*_\tau = \overrightarrow{\mathrm{rot}}_N(\vec{J}) = 0$$

Donc il n'apparaît que des courants superficiels. Or, sur les faces O et O', $\vec{n}$ et $\vec{J}$ sont parallèles. Donc $\vec{J}^*_S$ y est nul. Par contre, sur la surface latérale du cylindre, J^*_S existe. En effet considérons sur la *figure* 77 une section droite. On voit que J^*_S est tangent à cette section droite et est normal à son axe.

Milieux magnétiques linéaires, homogènes et isotropes (l. h. i.)

Sont appelés l. h. i. les milieux dans lesquels $\vec{J}$ est proportionnel à $\vec{H}$, le coefficient de proportionnalité étant partout le même et indépendant de la direction de $\vec{H}$. Ainsi

$$\vec{J} = \chi_m\vec{H}$$

χ_m est appelée la *susceptibilité magnétique* du milieu

or $\vec{B} = \mu_0(\vec{H}+\vec{J}) = \mu_0(\vec{H}+\chi_m\vec{H}) = \mu_0\vec{H}(1+\chi_m)$

Donc $\vec{B} = \mu\vec{H}$ avec $\mu = \mu_0(1+\chi_m)$.

La perméabilité relative :

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = 1+\chi_m$$

Les milieux magnétiques parfaits sont constitués par les *substances para-* et *diamagnétiques*. Ce n'est pas le cas pour les substances *ferromagnétiques*.

Diamagnétisme et paramagnétisme

Pour les substances diamagnétiques, $\vec{J}$ et $\vec{H}$ sont proportionnels, mais ils sont antiparallèles. Aussi χ_m est négatif et toujours très faible, de l'ordre de 10^{-5} en moyenne. Par contre, pour les substances paramagnétiques, $\vec{J}$ et $\vec{H}$ sont parallèles. χ_m est donc positif et en moyenne plus grand que pour les diamagnétiques (de l'ordre de 10^{-3} en moyenne).

Ferromagnétisme

Les corps ferromagnétiques sont tels que les propriétés de l'aimantation sont très différentes de celles des substances dia- et paramagnétiques. Ces différences sont les suivantes ; le vecteur intensité d'aimantation $\vec{J}$ peut prendre des valeurs très grandes, même pour des champs excitateurs très faibles. Cette aimantation peut subsister même en l'absence de champ. Cela ne se produit qu'à des températures inférieures à une température T_C appelée « point de Curie », caractéristique de chaque corps ferromagnétique. Au-dessus de cette température, le corps devient paramagnétique. En outre, la loi de variation de la susceptibilité est $\chi_m = \dfrac{C}{T-T_C}$ où T_C est une constante qui caractérise la substance. Cette loi est la **loi de Weiss-Curie.**

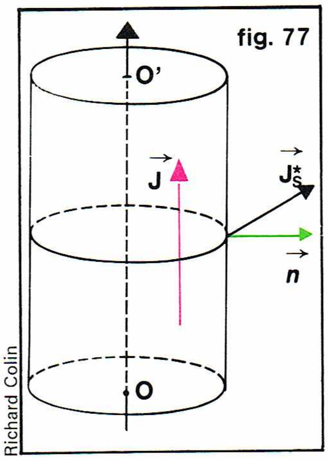

Richard Colin

▲ ***Figure 77 :* *le cylindre étant soumis au champ $\vec{B}$ constant, il n'apparaît que des courants superficiels $\vec{J}^*_S$.***

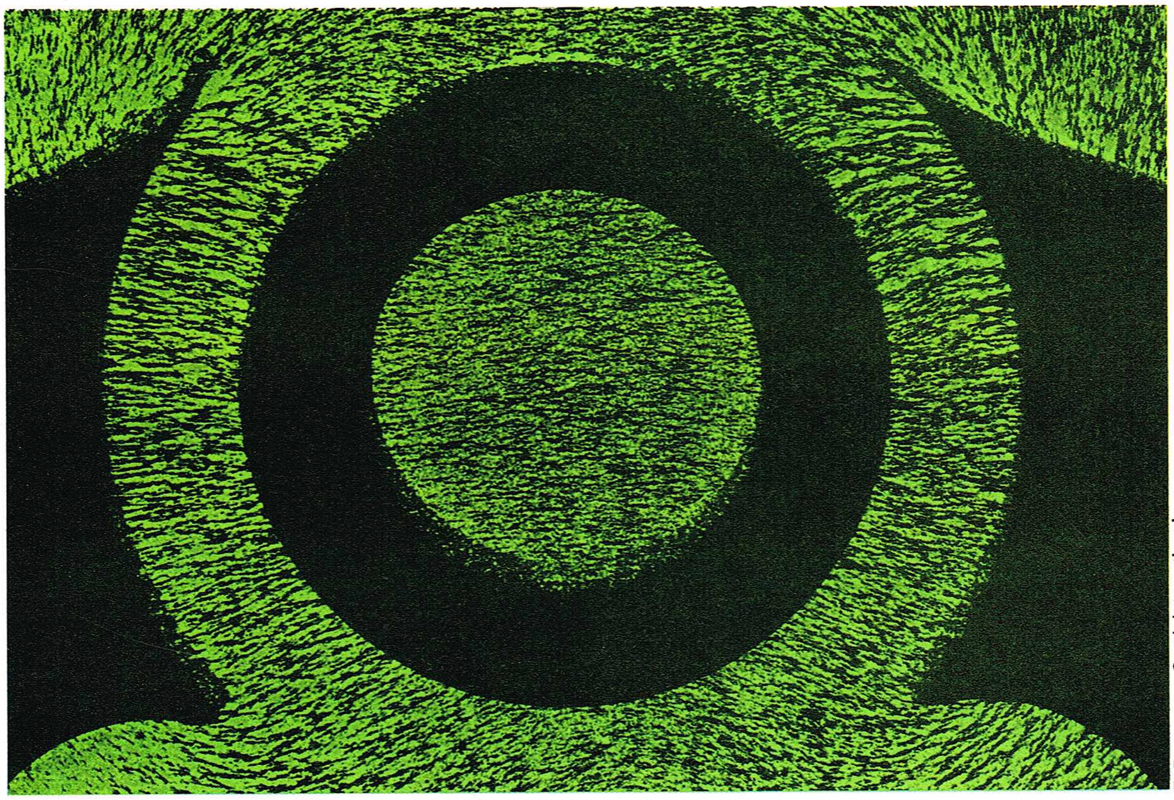

E. Rousseau - Snark International

◀ ***Champ magnétique radial engendré par un aimant circulaire.***

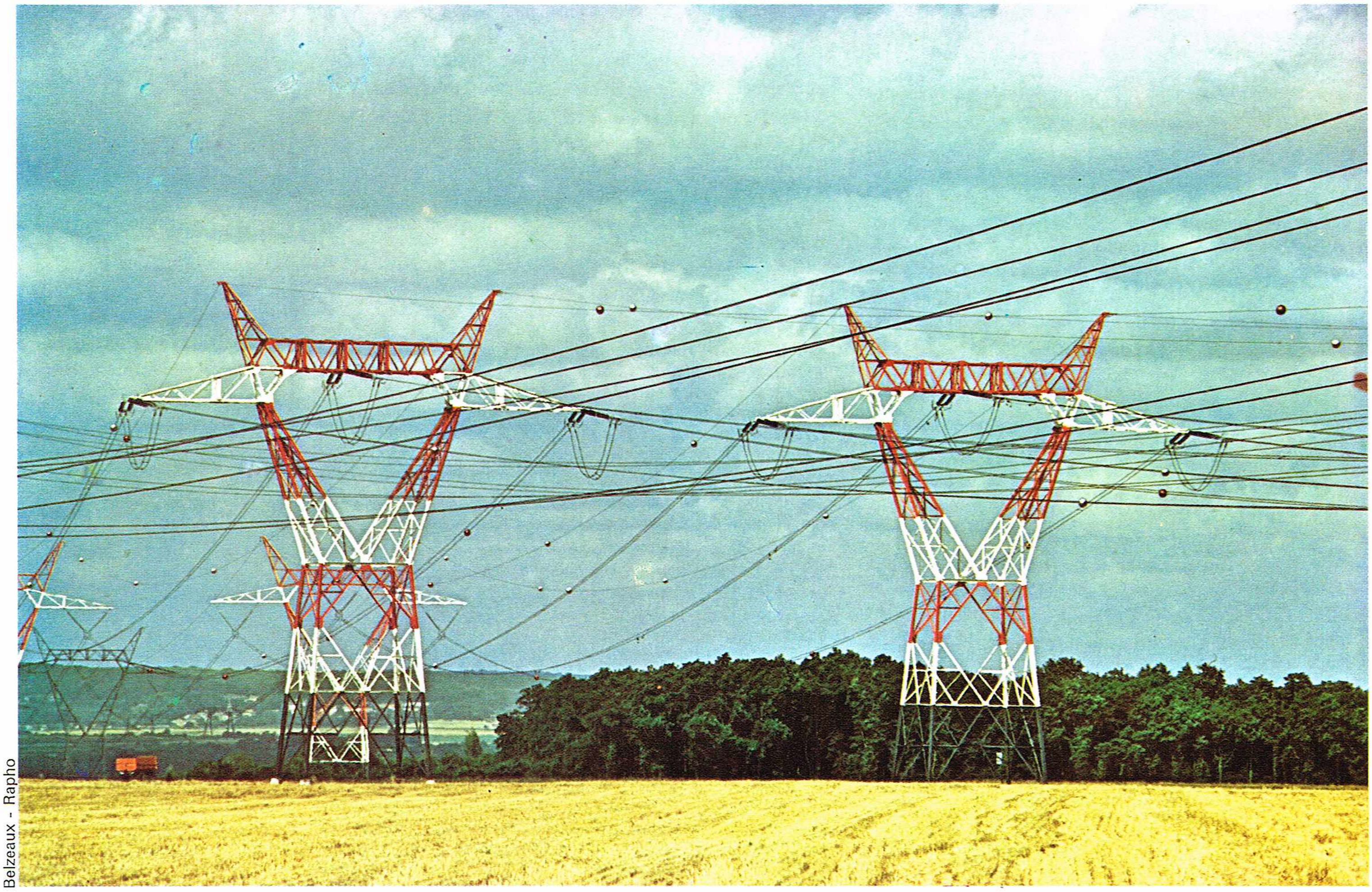

▲ ***Pylônes porteurs de câbles haute-tension.***

▼ ***Figure 78 : définition d'une fonction périodique.***

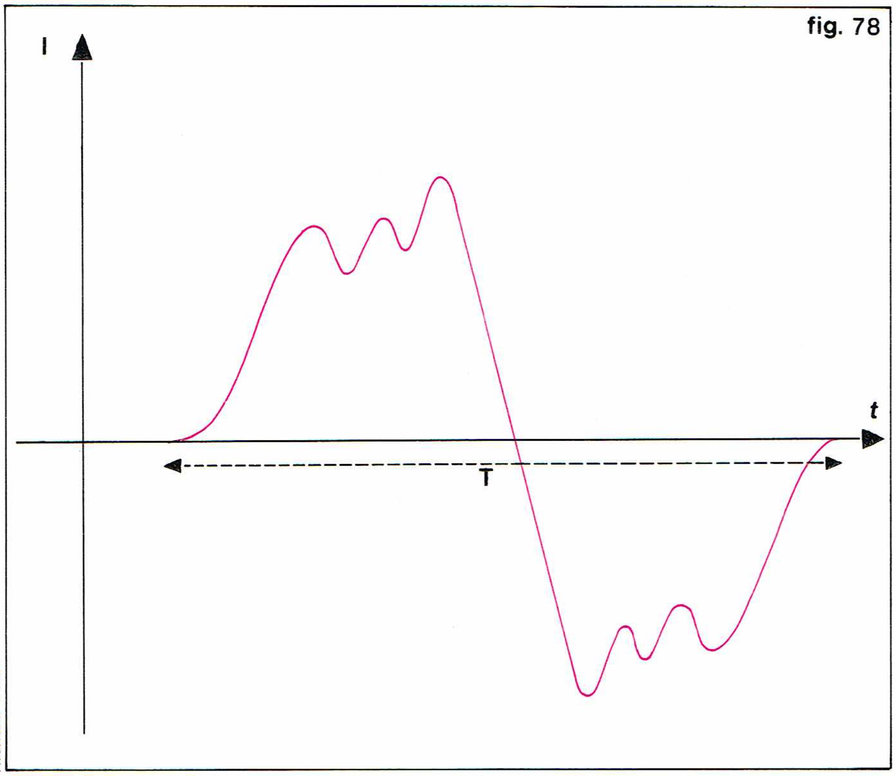

Le courant alternatif

Un courant d'intensité variable est *périodique* lorsqu'il reprend la même valeur en des instants séparés par le même intervalle de temps, appelé sa période T. Mathématiquement $i\ (t) = i\ (t + n\mathrm{T})$.

Ce courant périodique est dit *alternatif* lorsque sa valeur moyenne dans le temps est nulle. Cette valeur moyenne est aussi nulle sur une période (*fig.* 78).

Cela se traduit par :

$$\int_0^{\mathrm{T}} i\ (t)\ dt = 0$$

Si, de plus, le courant alternatif est sinusoïdal, il est une fonction sinusoïdale du temps. On peut alors le représenter, par exemple, par $i = \mathrm{I}_m \sin\ (\omega t)$ où I_m est l'intensité maximale, ω la pulsation liée à la période par la formule $\omega = \frac{2\ \pi}{\mathrm{T}} = 2\pi\mathrm{N}$.

Dans cette dernière égalité, N représente la fréquence. C'est l'inverse de la période : $\mathrm{N} = \frac{1}{\mathrm{T}}$

Remarquons que toute fonction alternative quelconque, non sinusoïdale, peut se décomposer en série de Fourier, de fréquences N, 2 N, 3 N, etc., que l'on appelle fréquence fondamentale, et ses différents harmoniques. C'est ainsi qu'un courant alternatif, non sinusoïdal, peut être décomposé en une somme de courants sinusoïdaux de fréquences N, 2 N, 3 N...

Ces divers harmoniques ont des comportements tout à fait différents, de sorte que l'étude d'un courant alternatif non sinusoïdal est généralement difficile. C'est pour cela que nous nous bornerons à l'étude de courants strictement sinusoïdaux, donc représentés par la formule

$$i = \mathrm{I}_m \sin\ (\omega t)$$

De manière grossière, notons que l'on peut classer les courants d'après leur fréquence. En Europe, et en France

en particulier, la fréquence du réseau de distribution est de 50 Hz. Les courants téléphoniques varient de 100 Hz à 10 kHz. Les courants haute fréquence sont compris entre 100 kHz et 10 GHz.

Lois générales sur les courants alternatifs

On peut dire que, en général, le comportement d'un courant alternatif se rapproche d'autant plus de celui d'un courant continu que sa fréquence est moins grande.

Dans l'étude que nous ferons ultérieurement, nous admettrons deux conditions concernant le courant i, conditions vérifiées à la fréquence du réseau (50 Hz).

La première condition est valable lorsque les dimensions du circuit sont négligeables vis-à-vis de la longueur d'onde de l'onde électromagnétique associée au courant i et ayant la même fréquence que ce courant i. Cette condition est la suivante : l'intensité a la même valeur en tous les points du circuit. On voit par exemple, à la fréquence du réseau qui est de 50 Hz, que

$$\lambda = \frac{c}{N} = \frac{300\,000}{50} = 6\,000 \text{ km},$$

ce qui satisfait à la condition ci-dessus énoncée.

La seconde condition est la répartition uniforme du courant dans une section droite, autrement dit une densité de courant uniforme. Cette condition se trouve aussi réalisée à la fréquence du réseau. Elle est d'autant moins réalisée que la fréquence augmente, car alors intervient l'*effet de peau*, qui tend à répartir le courant à la périphérie du conducteur, sur une certaine épaisseur dite *épaisseur de peau*. Dans le cas qui nous intéresse, à la fréquence du réseau, la résistance est :

$$R = \frac{\rho l}{s}$$

(où ρ est la résistivité, l la longueur et s la section du conducteur).

Comment produit-on des courants alternatifs? De tels courants sont produits par des alternateurs dont le principe est très simple. Supposons par exemple que l'on ait un cadre comprenant N spires, chaque spire ayant une surface S, et que ce cadre soit placé dans un champ magnétique $\vec{B}$ (*fig.* 79). Si l'on choisit un sens de parcours sur la spire, cela permet d'orienter une normale $\vec{n}$ positivement. La position du cadre est déterminée par l'angle θ que fait cette normale avec le champ $\vec{B}$. On suppose également que le cadre peut tourner autour d'un axe perpendiculairement au plan déterminé par $\vec{B}$ et $\vec{n}$.

En admettant que le cadre puisse tourner avec une vitesse angulaire constante ω, alors $\theta = \omega t$. Le flux à travers ce cadre est :

$$\Phi = N\vec{B} \cdot \vec{S} = NBS \cos\theta = NBS \cos \omega t$$

Or, la f. é. m. induite est donnée par la formule $e = \dfrac{-d\Phi}{dt}$

donc : $e = NBS\,\omega \sin \omega t$.

Si l'on peut relier ce cadre à un circuit extérieur, par des contacts mobiles, alors ce circuit extérieur est le siège d'un courant alternatif dont la pulsation est la même que celle du cadre mobile, c'est-à-dire ω.

Ce cadre tournant joue ainsi le rôle d'un générateur que l'on appelle *alternateur*.

Remarquons que le courant induit n'est en général pas en phase avec la f. é. m. qui l'a produit; c'est-à-dire que, si la f. é. m. est de la forme $e = E_m \sin \omega t$, le courant induit s'écrira $i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$, où φ est l'angle de phase. L'existence d'un déphasage signifie que le courant ne s'établit pas simultanément avec la f. é. m. Il s'établit avec une certaine avance ou un certain retard sur la f. é. m. Notons que ce type d'alternateur est à induit mobile.

Il existe un autre type d'alternateur, à induit fixe, où un aimant se déplaçant périodiquement devant une bobine y crée un courant alternatif.

A présent que nous avons défini un courant alternatif, il ne nous reste plus qu'à étudier ses propriétés. Nous pouvons dire à ce sujet que toutes les propriétés des courants continus s'appliquent aux courants alternatifs lorsqu'il s'agit de valeurs instantanées. En effet, cela s'explique par le fait que, pendant un petit intervalle de temps, l'intensité ne varie pratiquement pas.

Intensité efficace d'un courant alternatif

L'intensité efficace d'un courant alternatif est l'intensité du courant continu qui dégagerait dans la même résistance, et pendant le même temps, la même quantité de chaleur par effet Joule.

C'est l'ampèremètre thermique, dont l'inertie est grande, qui mesure l'intensité efficace d'un courant alternatif. Aussi l'intervalle de temps utilisé pour faire la mesure doit-il être grand devant une période.

Évaluons donc l'énergie moyenne dissipée par effet Joule et égalons-la à la puissance dissipée pendant le même temps (une période) par un courant continu. Pendant l'intervalle de temps dt, l'énergie dissipée est :

$$dW = Ri^2 dt$$

R étant la résistance dans laquelle passe le courant.

Posons $\quad i = I_m \sin \omega t$

Ainsi, $\quad dW = RI_m^2 \sin^2 \omega t$

Le travail sur une période est : $W = RI_m^2 \int_0^T \sin^2 \omega t dt$

$$W = \frac{RI_m^2}{2}\int_0^T (1 - \cos 2\,\omega t)\,dt = \frac{RI_m^2}{2}\left[t - \frac{\sin 2\,\omega t}{2\,\omega}\right]_0^T$$

Le deuxième terme de l'intégration s'annulant sur une période, il reste :

$$W = \frac{RI_m^2}{2} T$$

D'où la puissance moyenne dissipée par effet Joule :

$$P = \frac{W}{T} = \frac{RI_m^2}{2}$$

Or, par définition de l'intensité efficace qui est l'intensité du courant continu I_{eff} dépensant la même énergie calorifique dans la même résistance et pendant le même intervalle de temps, on a :

$$\frac{RI_m^2}{2} T = RI_{eff}^2 T$$

On en déduit que : $I_{eff} = \dfrac{I_m}{\sqrt{2}}$

Soit $\quad I_m = \sqrt{2}\, I_{eff}$

Valeur efficace d'une fonction

Mathématiquement, la valeur efficace d'une fonction périodique est la racine carrée de la valeur moyenne du carré de cette fonction. Si l'on désigne alors par $y(t)$ cette fonction, on a :

$$y_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T y^2(t)\,dt}$$

$y(t)$ peut être soit une différence de potentiel $u(t)$, soit une f. é. m., par exemple, $\mathcal{E}(t)$.

On trouve alors, en appliquant la formule de définition, que :

$$U_{eff} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad \text{et} \quad \mathcal{E}_{eff} = \frac{\mathcal{E}_m}{\sqrt{2}}$$

Loi d'Ohm en courant alternatif

Utilisation des nombres complexes

Pour étudier une fonction sinusoïdale de la forme

$$y = Y_m \cos(\omega t + \varphi)$$

il est commode de faire appel aux nombres complexes.

On sait qu'on peut écrire :

$$Y_m e^{j(\omega t+\varphi)} = Y_m [\cos(\omega t + \varphi) + j \sin(\omega t + \varphi)]$$

Re signifiant « partie réelle de », on vérifie que :

$$y = \text{Re}\,(Y_m e^{j(\omega t+\varphi)})$$

$$\int y dt = \text{Re}\left(-\frac{j}{\omega} Y_m e^{j(\omega t+\varphi)}\right) = \text{Re}\left(-\frac{j}{\omega} y\right)$$

$$\textbf{(13)} \qquad \frac{dy}{dt} = \text{Re}\,(j\omega Y_m e^{j(\omega t+\varphi)}) = \text{Re}\,(j\omega y)$$

$$\frac{d^2y}{dt_2} = \text{Re}\,(-\omega^2 Y_m e^{j(\omega t+\varphi)}) = \text{Re}\,(-\omega^2 y)$$

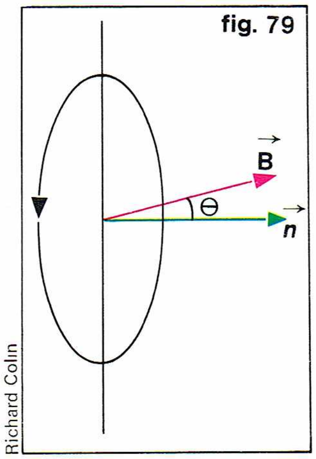

fig. 79

▲ ***Figure 79 voir développement dans texte ci-contre.***

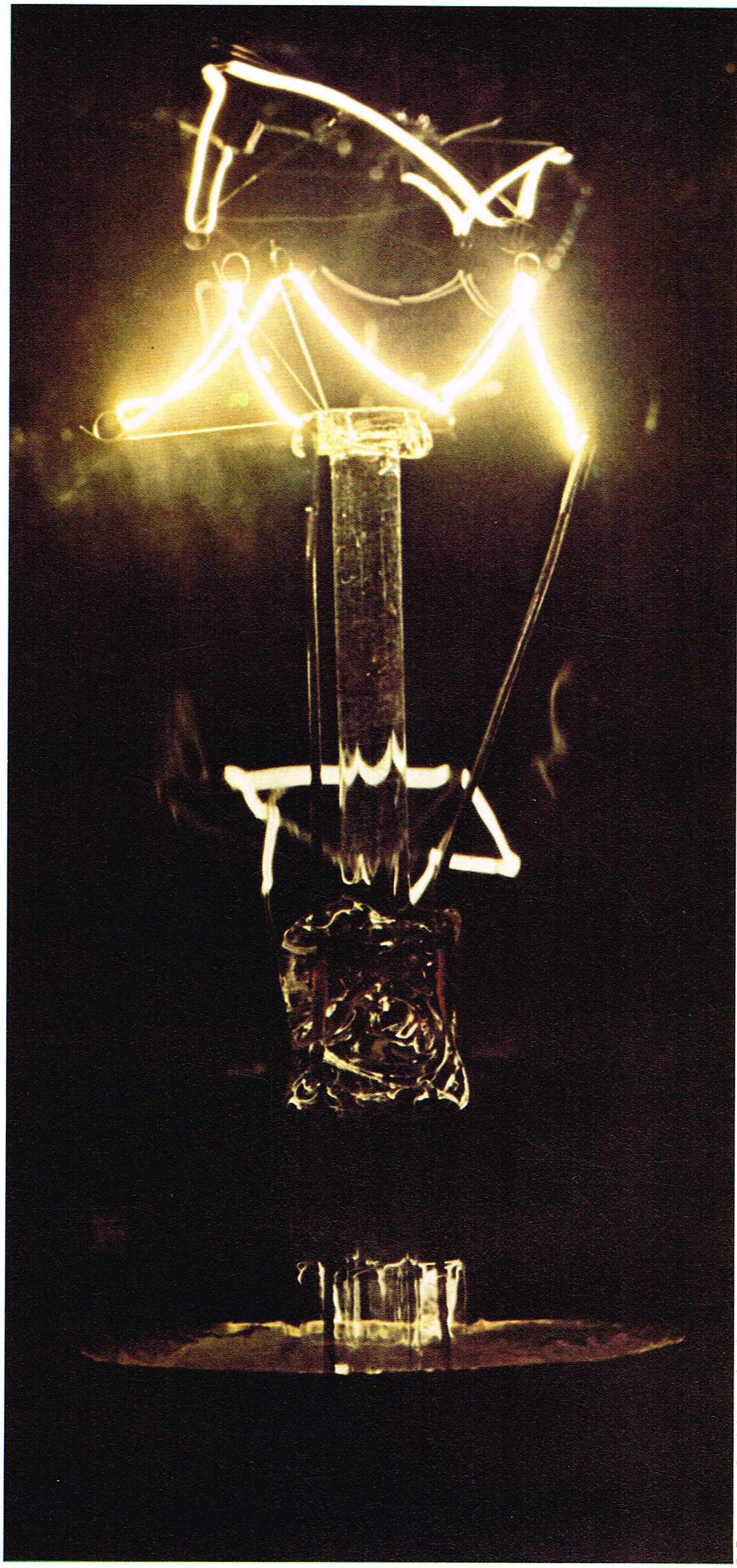

E. Rousseau - Snark International

Richard Colin

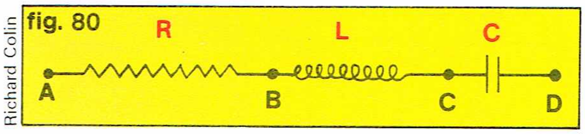

fig. 80

Soit un circuit comprenant en série une résistance pure R, une self pure L et une capacité C (*fig.* 80). Il s'agit de calculer l'intensité $i\ (t)$ qui circule dans la portion AD du circuit lorsqu'on impose une différence de potentiel

$$u = U_m \sin \omega t$$

entre les points A et D.

Calculons les d. d. p. aux bornes de AB, de BC et de CD. Supposons pour cela que, à un instant donné, le courant aille de A vers B. Nous avons alors :

entre A et B ; $u_R = Ri$

entre B et C ; $u_L = L\dfrac{di}{dt}$

entre C et D ; $u_C = \dfrac{q}{C}$ où q est la charge de la capacité

$$= \frac{1}{C}\int idt$$

Nous avons l'égalité :

(14) $$Ri + L\frac{di}{dt} + \frac{1}{C}\int idt = U_m \sin \omega t = u\ (t)$$

que l'on peut écrire :

(15) $$L\frac{d^2q}{dt^2} + R\frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = U_m \sin \omega t$$

Cette seconde égalité est une équation différentielle linéaire du second ordre avec second membre variable. La solution est formée de deux termes. Le premier terme, qui correspond à la solution générale de l'équation sans second membre, est de la forme $Ke^{-r_1 t}$. Ce terme est rapidement amorti et correspond à l'établissement du courant. L'autre terme est la solution particulière de l'équation **(15)** ou de l'équation **(14)** et représente le régime permanent, lequel est un régime sinusoïdal.

Résolvons l'équation **(14)** à l'aide des imaginaires. Supposons que le déphasage entre $i\ (t)$ et $u\ (t)$ soit φ et posons :

$$u = U_m e^{j\omega t}$$
$$i = I_m e^{j(\omega t - \varphi)}$$

D'après les équations **(13)**, l'équation **(14)** peut s'écrire :

$$Ri + Lj\omega i - \frac{j}{C\omega}\, i = u$$

(14') ou $$\left(R + Lj\omega - \frac{j}{C\omega}\right) i = u$$

En remplaçant i et u par leurs valeurs respectives, il vient :

$$\left(R + jL\omega - \frac{j}{C\omega}\right) I_m e^{j(\omega t - \varphi)} = U_m e^{j\omega t}$$

Soit :

$$\left[R - j\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)\right] I_m e^{-j\varphi} = U_m$$

$$\left[R - j\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)\right] I_m\ (\cos \varphi - j \sin \varphi) = U_m$$

En développant et en égalant partie réelle et partie imaginaire, on obtient les deux équations suivantes :

(16) $$RI_m \cos \varphi + I_m \sin \varphi \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right) = U_m$$

(17) $$- RI_m \sin \varphi + I_m \cos \varphi \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right) = 0$$

De ces deux équations, on tire la valeur du déphasage φ entre u et i :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{L\omega - \dfrac{1}{C\omega}}{R}$$

En élevant les équations **(16)** et **(17)** au carré et en les ajoutant, on obtient :

$$I_m^2 \left[R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2\right] = U_m^2$$

On obtient alors : $U_{eff} = I_{eff}\sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}$

Cette dernière formule montre que l'intensité efficace est proportionnelle à la tension efficace. Cela permet d'introduire la notion d'*impédance*. L'impédance d'une portion de circuit est le rapport entre la tension efficace à ses bornes et l'intensité efficace du courant y circulant.

Soit $|Z|$ l'impédance de cette portion de circuit. On a alors :

$$U_{eff} = |Z|\ I_{eff}$$

Dans l'exemple que nous venons d'étudier du circuit R, L, C en série, nous avons la valeur de $|Z|$:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}$$

L'impédance est une fonction, bien sûr, des éléments que comporte ce circuit ; c'est également une fonction de la pulsation ω, donc de la fréquence du courant. C'est pour cela que l'on parle d'impédance Z à une fréquence déterminée.

On ne peut cependant pas parler d'impédance pour un courant qui n'est pas sinusoïdal, car alors interviennent les différentes composantes de Fourier ; ou alors on parlera d'impédance de la portion de circuit pour le *n*-ième harmonique. Remarquons qu'une impédance s'exprime en ohms (Ω).

Notions d'impédance complexe

Reprenons l'équation **(14')** où intervient le nombre imaginaire j :

$$i\left[R + j\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)\right] = u$$

l'expression $Z = R + j\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)$ est appelée *impédance complexe*. C'est un nombre complexe dont le module est :

$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}$, formule que nous avions trouvée et dont l'argument φ, donné par $\text{tg}\,\varphi = \dfrac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R}$ avait été également trouvé.

Donc Z peut s'écrire :

$$Z = |Z|\ e^{j\varphi}$$

Pour une résistance pure, Z est un nombre réel : $Z_R = R$ (il n'y a pas de déphasage entre le courant et la tension). *Pour une self pure :* $Z_L = jL\omega$ (la tension est en avance sur le courant).

Pour une capacité : $Z_C = -\dfrac{j}{C\omega}$ (la tension est en retard sur le courant).

Si les appareils sont mis en série, l'impédance complexe du circuit est la somme des impédances complexes de chaque partie du circuit. Si l'on reprend le circuit de la *figure* 80, on obtient le diagramme suivant (*fig.* 81).

Toutes les lois que nous avions vues en courant continu restent valables en courant alternatif à condition de remplacer les résistances par des impédances complexes ; c'est-à-dire que, si un circuit comporte des résistances, des condensateurs, des selfs, les deux lois de Kirchhoff (loi des nœuds et loi des mailles) restent valables, en tenant compte des impédances complexes relatives à chaque maille (on assimile chaque élément à son impédance complexe Z).

Étude de la résonance

Voyons en premier lieu le cas de la résonance série, représentée par le circuit de la *figure* 82.

Nous avons vu que l'impédance complexe entre A et E était la somme des impédances complexes R, $jL\omega$ et $-\dfrac{j}{C\omega}$:

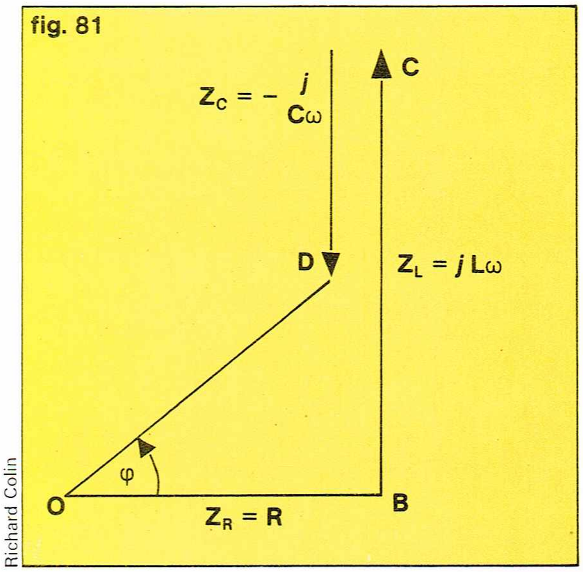

Richard Colin

◄ *Figure 81 : diagramme de Fresnel donnant* **|Z|** *et* φ *dans le cas du circuit série* **R, L, C.**

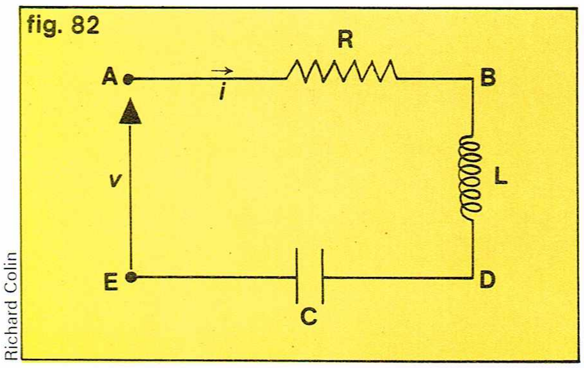

Richard Colin

◄ *Figure 82 : étude de la résonance série.*

$$Z = R + j\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)$$

d'où : $$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}$$

et $$\varphi = \text{Arg}\,Z = \text{Arctg}\,\frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R}$$

Il est intéressant d'étudier Z et φ en fonction de ω. On voit que $Z = R$ lorsque $L\omega_0 = \dfrac{1}{C\omega_0}$, c'est-à-dire pour une fréquence ω, imposée par le générateur, égale à la fréquence propre du circuit $\omega_0 = \dfrac{1}{\sqrt{LC}}$.

La période correspondante, $T_0 = 2\,\pi\,\sqrt{LC}$, est la *période propre* du circuit. Le déphasage φ entre i et u est nul pour cette valeur. De même, l'amplitude i du courant est maximale pour $\omega = \omega_0$. On dit qu'il y a résonance série (*fig.* 83).

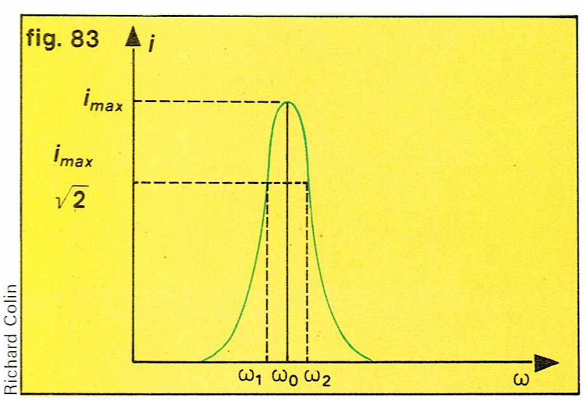

Richard Colin

◄ *Figure 83 : l'acuité de la résonance série est définie par le coefficient de surtension* $Q = \dfrac{\omega_0}{\omega_2 - \omega_1}$.

◄ *Page ci-contre, à gauche : filaments de lampe électrique. A droite, figure 80 : circuit série* **R, L, C.**

▶ *Figure 85 : cas de la résonance antiparallèle ou antirésonance.*

▶ *Page ci-contre : l'électricité à l'ère des tours (quartier de la Défense, Paris).*

Il est alors logique de définir l'acuité de la résonance du circuit. Pour cela, on cherche les valeurs ω_1 et ω_2, proches de ω_0, telles que $|Z| = \sqrt{2}\,R$ ou, ce qui revient au même,

$$i = \frac{i_{max}}{\sqrt{2}}$$

$|Z| = \sqrt{2}\,R$ s'écrit : $$\sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2} = \sqrt{2}\,R$$

Soit : $$\pm R = L\omega - \frac{1}{C\omega}$$

et $$\pm RC\omega = LC\omega^2 - 1$$

En introduisant $LC = \frac{1}{\omega_0^2}$ on obtient :

$$\pm \frac{R}{L\omega_0}\frac{\omega}{\omega_0} = \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 - 1\,; \quad \text{soit} \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 \pm \frac{\omega}{\omega_0}\frac{R}{L\omega_0} - 1 = 0$$

Cette dernière équation a deux racines positives ; la plus grande a pour valeur :

$$\frac{\omega_2}{\omega_0} = \sqrt{1 + \left(\frac{R}{2\,L\omega_0}\right)^2} + \frac{R}{2\,L\omega_0}$$

la plus petite :

$$\frac{\omega_1}{\omega_0} = \sqrt{1 + \left(\frac{R}{2\,L\omega_0}\right)^2} - \frac{R}{2\,L\omega_0}$$

Ainsi : $$\frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0} = \frac{R}{L\omega_0}$$

On caractérise ainsi l'acuité de la résonance du circuit par le coefficient :

$$Q = \frac{\omega_0}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{L\omega_0}{R} = \frac{1}{C\omega_0 R}$$

que l'on appelle *coefficient de surtension*. Plus Q est élevé, plus le pic de résonance est étroit.

Surtension pendant la résonance. Nous avons vu que la tension aux bornes de la self était $u_L = jL\omega i$. Aux bornes de la capacité $u_C = \frac{-j}{C\omega} i$.

Or, lors de la résonance, les valeurs algébriques de u_C et de u_L sont égales et de sens opposé, de sorte que la tension appliquée est uniquement celle appliquée à la résistance (*fig.* 84). $u_{appliquée} = Ri$.

Nous voyons donc que, à la résonance :

$$\left|\frac{u_L}{u_{app}}\right| = \frac{L\omega_0}{R} = Q$$

$$\left|\frac{u_C}{u_{app}}\right| = \frac{1}{C\omega_0 R} = Q$$

Ainsi, à la résonance, la tension aux bornes de la self et aux bornes de la capacité est égale à Q fois la tension appliquée. On dit qu'il y a surtension pendant la résonance. Q peut en général varier entre dix et plusieurs centaines.

Étudions à présent la résonance antiparallèle ou *antirésonance*. Une résistance et une self en série sont montées en parallèle aux bornes d'une capacité (*fig.* 85). On applique une tension *u* aux bornes A et B de ce circuit. Calculons l'impédance $\bar{Z}_{AB}$ aux bornes de AB.

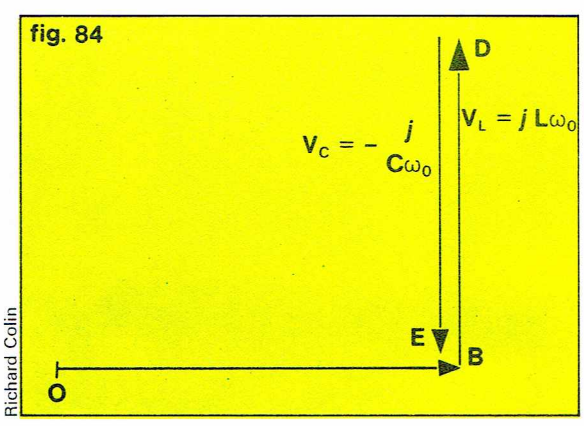

▶ *Figure 84 : diagramme de Fresnel au moment de la résonance.*

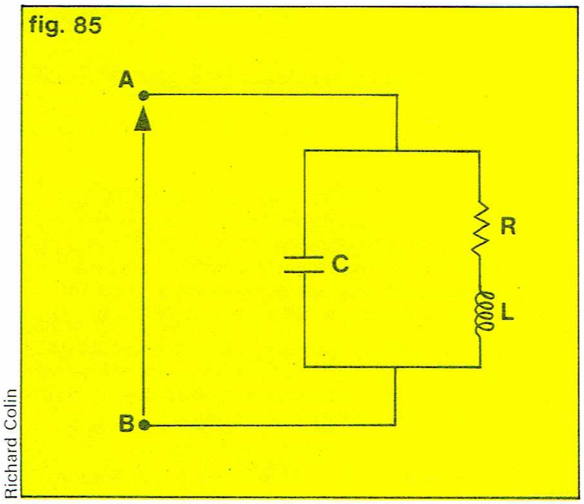

$$\bar{Z}_{AB} = \frac{Z_C\,(Z_R + Z_L)}{Z_C + Z_R + Z_L} \quad \text{avec } Z_R = R$$

$$Z_C = -\frac{j}{C\omega}$$

$$Z_L = jL\omega$$

$$\bar{Z}_{AB} = \frac{R + jL\omega}{1 - LC\omega^2 + jRC\omega}$$

En mettant $L\omega_0$ en facteur et en se rappelant que :

$$Q = \frac{L\omega_0}{R} = \frac{1}{RC\omega_0}$$

on obtient :

$$\bar{Z}_{AB} = L\omega_0 \frac{\frac{1}{Q} + j\frac{\omega}{\omega_0}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + \frac{j}{Q}\frac{\omega}{\omega_0}}$$

Lors de la résonance, $\bar{Z}_{AB}$ devient :

$$\bar{Z}_{AB} = L\omega_0 \frac{\frac{1}{Q} + j}{\frac{j}{Q}} = L\omega_0\,(Q - j)$$

Or le module de j peut être négligé devant Q.
On obtient donc, à la résonance :

$$\bar{Z}_{AB} = L\omega_0 Q = \frac{L^2\omega_0^2}{R} = Q^2 R$$

Donc, à la résonance, $\bar{Z}_{AB}$ est une résistance pure, très grande devant R.

Que se passe-t-il à la résonance en ce qui concerne les courants ? Le courant $i_C = \frac{u}{Z_C} = Vj C\omega_0$. Le courant $i_L = \frac{u}{Z_R + Z_L} = \frac{u}{R + jL\omega_0}$.

Or, nous avons vu que, à la résonance, $L\omega_0 = QR$. Donc, $L\omega_0$ est grand devant R et i_L est peu différent de $\frac{u}{jL\omega_0}$.

D'autre part, à la résonance, comme $Z_{AB} = L\omega_0 Q$, on a donc $i_{total} = \frac{u}{Z_{AB}} = \frac{u}{L\omega_0 Q}$.

Donc on obtient $$\left|\frac{i_L}{i_{total}}\right| = \frac{L\omega_0 Q}{L\omega_0} = Q$$

Ainsi, à la résonance, $|i_L| = Q\,|i_{total}|$. C'est-à-dire qu'il y a « surintensité ». Le courant qui circule par exemple dans la self est Q fois celui débité par le générateur.

Pont de Wheatstone en courant alternatif

Soit la *figure* 86. Elle est constituée par quatre impédances Z_1, Z_2, Z_3, Z_4. Soit un appareil de mesure des courants, permettant de déceler de faibles intensités. Lorsque le pont est en équilibre, aucun courant ne passe dans cet appareil. Cela signifie que les points D et B sont au même potentiel. Soit alors i_1 le courant passant dans la branche ADC et i_2 celui passant dans la branche ABC.

H. Gloaguen - Viva

▶ ***A gauche, figure 86 : pont de Wheatstone en courant alternatif. A droite, figure 88 : le pont de Maxwell.***

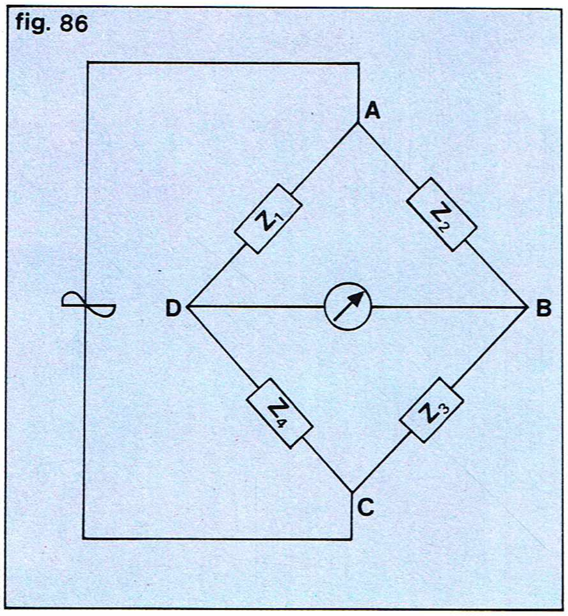

Richard Colin

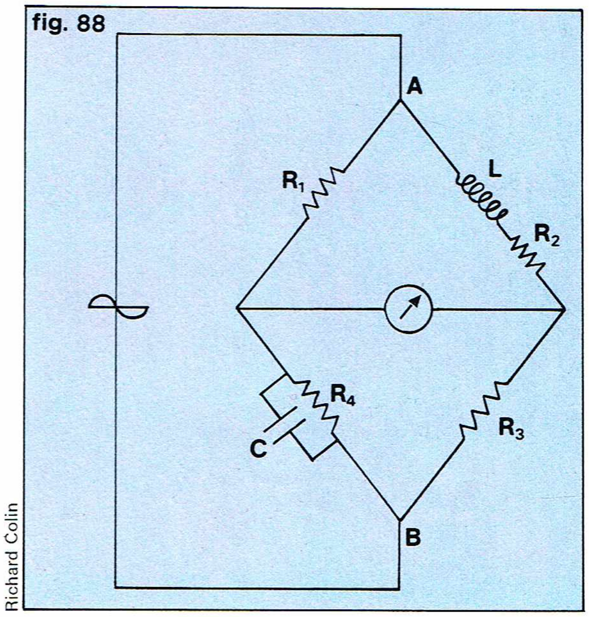

Richard Colin

Nous obtenons les équations suivantes :

$$V_A - V_D = Z_1 i_1 = V_A - V_B = Z_2 i_2$$

et $$V_D - V_C = Z_4 i_1 = V_B - V_C = Z_3 i_2$$

Donc $$Z_1 i_1 = Z_2 i_2$$

et $$Z_4 i_1 = Z_3 i_2$$

Soit : $$\frac{Z_1}{Z_4} = \frac{Z_2}{Z_3}$$

c'est-à-dire : $Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4$.

C'est la même formule que l'on trouverait pour les courants continus, mais les résistances sont ici remplacées par des impédances.

Une application de cette formule est la détermination de la valeur d'une self ou d'une capacité.

Considérons d'abord le cas d'une self. Soit le montage de la *figure* 87. R_1 et R_3 sont des résistances pures; Z_2 est une self pure et Z_4 une capacité pure.

$$R_1 R_3 = Z_2 Z_4 = (jL\omega)\left(-\frac{j}{C\omega}\right) = \frac{L}{C}$$

Donc, connaissant C, R_1,R_3, on peut en déduire la valeur de L. Cependant, ce schéma est assez simpliste, car, de manière générale, une self n'est jamais pure. Elle comprend une partie résistive. Aussi utilise-t-on le *pont de Maxwell* qui permet de déterminer la valeur de la self et de sa résistance. Le montage est celui de la *figure* 88.

$$R_1 R_3 = (R_2 + jL\omega)\left(\frac{-jR_4}{C\omega R_4 - j}\right)$$

$$R_1 R_3 = (R_2 + jL\omega)\left(\frac{R_4}{1 + jC\omega R_4}\right)$$

Soit : $$R_1 R_3 + jC\omega R_1 R_3 R_4 = R_2 R_4 + jL\omega R_4$$

En égalant partie réelle et partie imaginaire, on obtient $R_1 R_3 = R_2 R_4$; d'où l'on tire la valeur de R_2 connaissant celles de R_1, R_3, R_4.

On en déduit aussi celle de L :

$$L = CR_1 R_3$$

La mesure d'une capacité, fondée également sur l'équilibre du pont, peut s'effectuer à l'aide du *pont de Sauty* (*fig.* 89). Il comprend les résistances R_1 et R_2, ainsi que les capacités C_3 et C_4. Dans ce montage, l'une de ces capacités est connue, par exemple C_3, et C_4 est l'inconnue. L'équation de l'équilibre donne :

$$R_1\left(\frac{-j}{C_3\omega}\right) = R_2\left(\frac{-j}{C_4\omega}\right)$$

soit :

$$\frac{R_1}{C_3} = \frac{R_2}{C_4} \qquad \text{donc } C_4 = \frac{R_2}{R_1} C_3$$

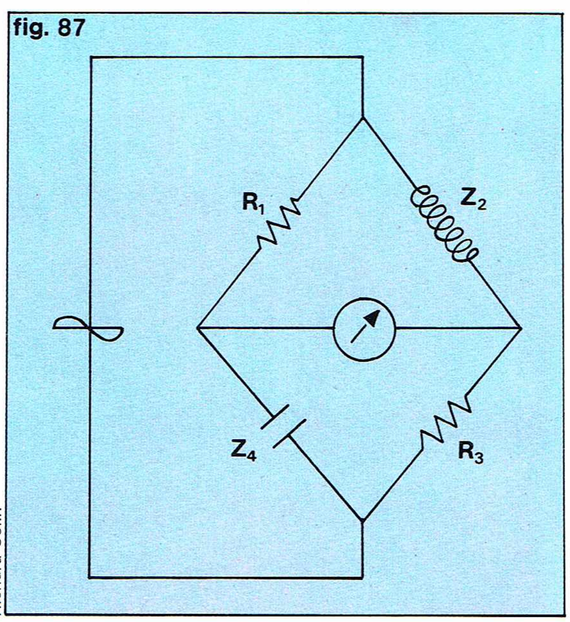

Richard Colin

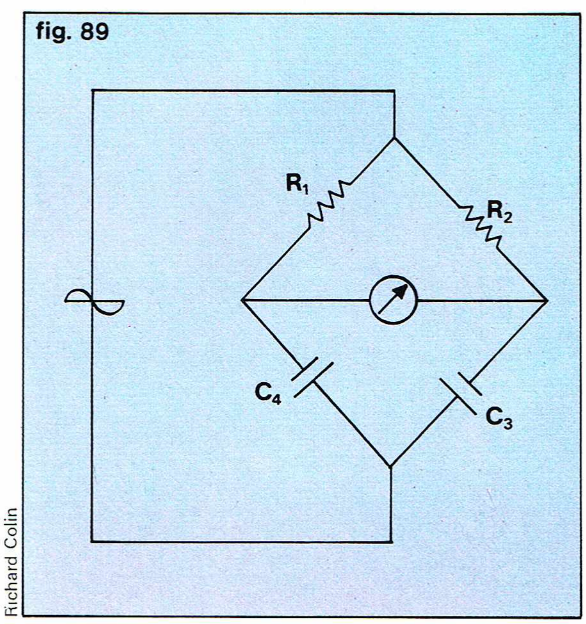

Richard Colin

▶ ***A gauche, figure 87 : calcul de l'impédance d'une self par la méthode du pont de Wheatstone. A droite, figure 89 : le pont de Sauty.***

Loi générale de l'électromagnétisme - Les équations de Maxwell

Rappel des équations dans le cas des régimes indépendants du temps

Nous allons d'abord rappeler les équations vues en électrostatique. Elles font intervenir trois vecteurs principaux $\vec{E}$, $\vec{D}$, $\vec{P}$, tels que $\vec{D} = \varepsilon_0\vec{E} + \vec{P}$. Ces vecteurs sont tels que :

$$\text{div}\,\vec{D} = \rho$$

$$\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{E} = 0$$

Si nous faisons intervenir les composantes tangentielles et les composantes normales, le passage d'un milieu d'indice 1 à un milieu d'indice 2 se traduit par les relations suivantes, la normale n_{12} étant orientée du milieu 1 vers le milieu 2 :

$$(\vec{D}_2 - \vec{D}_1)\,\vec{n}_{12} = \sigma$$

$$E_{T_2} = E_{T_1}$$

Nous avons vu aussi que seulement dans le cas d'un diélectrique parfait, isotrope, nous avions la relation entre $\vec{D}$ et $\vec{E}$:

$$\vec{D} = \varepsilon\vec{E}$$

Le champ $\vec{E}$ dérive d'un potentiel V, ce qui s'écrit :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}\,V$$

Dans un milieu où existe une densité de charges volumiques ρ_v, le potentiel V s'écrit, à une constante près :

$$V = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\iiint_\tau \frac{\rho_v d\tau}{\pi}$$

V obéit d'autre part à la relation de Poisson :

$$\nabla^2 V + \frac{\rho_v}{\varepsilon} = 0$$

Considérons à présent les phénomènes magnétiques indépendants du temps. Intervenaient les trois vecteurs principaux, $\vec{B}$, $\vec{H}$, et $\vec{J}$, liés entre eux par l'équation : $\vec{B} = \mu_0\vec{H} + \vec{J}$.

$\vec{B}$ et $\vec{H}$ sont tels que : $\text{div}\,\vec{B} = 0$

$$\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{H} = \vec{J}$$

Ce qui entraîne, en utilisant la même convention sur la normale qu'en électrostatique, les relations :

$$(\vec{B}_2 - \vec{B}_1)\,\vec{n}_{12} = 0$$

et
$$(H_{T_2} - H_{T_1}) = \vec{i_s} \wedge \vec{n}_{12}$$

où i_s est le courant en surface.

Si la substance magnétique est parfaite, isotrope, alors s'ajoute l'expression $\vec{B} = \mu\vec{H}$.

Une autre relation lie $\vec{B}$ au potentiel vecteur $\vec{A}$.

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi}\iiint \frac{\vec{J}d\tau}{r}$$

car
$$\vec{B} = \overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{A}$$

D'autre part, $\vec{A}$ vérifie l'équation :

$$\nabla^2\vec{A} + \mu\vec{J} = 0$$

Le rappel de ces formules concernant l'électrostatique et la magnétostatique nous fait ainsi apparaître de nombreuses analogies.

Enfin, dans le cas d'un conducteur où circule un courant continu de densité $\vec{J}$, ce courant obéit à la loi d'Ohm :

$$\vec{J} = \gamma\vec{E}$$

et la conservation de l'électricité s'exprime par :

$$\text{div}\,\vec{J} = 0$$

D'autre part, à la surface de séparation de deux milieux continus, on a également l'équation de continuité de la composante normale :

$$(\vec{J}_2 - \vec{J}_1)\,\vec{n}_{12} = 0$$

Rappel des résultats dans le cas où les phénomènes électromagnétiques dépendent du temps

On néglige les phénomènes de propagation dans le cas où la longueur d'onde est grande devant les dimensions du circuit. Alors, comme interviennent les phénomènes d'induction, le champ $\vec{E}$ ne dérive plus d'un potentiel, ce qui se traduit par :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \quad \text{et} \quad \vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}\,V - \frac{\partial\vec{A}}{\partial t}$$

Toutes les autres grandeurs apparues dans les équations indépendantes du temps restent inchangées.

Introduction du courant de déplacement - Les équations de Maxwell

Le théorème d'Ampère s'écrit :

$$\oint_\Gamma \vec{H}\cdot d\vec{l} = I$$

soit
$$\iint_\Sigma \overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{H}\cdot d\vec{S} = \iint_\Sigma \vec{J}\cdot d\vec{S}$$

Donc l'équation locale du théorème d'Ampère est : $\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{H} = \vec{J}$, ce qui équivaut à $\text{div}\,\vec{J} = 0$. Cette équation, qui est valable en courant continu, ne l'est plus dans les phénomènes dépendant du temps, puisque l'équation de conservation de l'électricité s'écrit :

$$\text{div}\,\vec{J} + \frac{\partial\rho_v}{\partial t} = 0$$

Comme $\text{div}\,\vec{D} = \rho_v$, cette équation s'écrit :

$$\text{div}\,\vec{J} + \frac{\partial}{\partial t}(\text{div}\,\vec{D}) = 0$$

Soit
$$\text{div}\left(\vec{J} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t}\right) = 0$$

Cela signifie que le vecteur densité de courant total $\vec{J}_t = \vec{J} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t}$ est à flux conservatif.

Si nous introduisons alors le vecteur densité de « courant de déplacement » $\vec{J}_D = \frac{\partial\vec{D}}{\partial t}$ et si nous appelons $\vec{J} = \vec{J}_C$, ce qui correspond au vecteur densité de « courant de conduction », alors nous obtenons l'expression $\vec{J}_t = \vec{J}_C + \vec{J}_D$. Dire que $\vec{J}_t$ est à flux conservatif, c'est dire que c'est la densité de courant $\vec{J}_D$ qui est la continuité de la densité de courant $\vec{J}_C$ dans le diélectrique.

C'est Maxwell qui a eu le génie d'attribuer à ce courant de déplacement les mêmes propriétés magnétiques que celles du courant de conduction.

L'équation locale du théorème d'Ampère devient :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{H} = \vec{J}_t = \vec{J}_C + \vec{J}_D = \vec{J}_C + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t}$$

Les relations de Maxwell sont alors les suivantes :

$$\text{div}\,\vec{D} = \rho_v$$

$$\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}$$

$$\text{div}\,\vec{B} = 0$$

$$\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{H} = \vec{J}_C + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t}$$

Ces relations doivent être complétées par les équations de continuité que nous avons vues dans les relations indépendantes du temps.

Dans le vide (il n'y a ni charges, ni courants), les équations de Maxwell s'écrivent :

$$\text{div}\,\vec{D} = 0$$

$$\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \quad \text{avec } \vec{D} = \varepsilon_0\vec{E}$$

$$\text{div}\,\vec{B} = 0 \quad \text{et } \vec{B} = \mu_0\vec{H}$$

$$\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{H} = \frac{\partial\vec{D}}{\partial t}$$

▶ *Les projecteurs, ou l'importance de l'électricité dans le succès de la « pop » musique.*

Homer Sykes - Viva

P. Popper

▶ *Le physicien écossais* **James Clerk Maxwell** *(1831-1879) dont le principal titre de gloire est sa théorie électromagnétique de la lumière (1865).*

Nous voyons, à partir de ces relations dans le vide, qu'une variation de $\vec{B}$ par rapport au temps crée un champ $\vec{E}$, et que, réciproquement, une variation de $\vec{E}$ par rapport au temps crée un champ magnétique $\vec{B}$.

On entrevoit alors le fait que la propagation d'une onde électromagnétique est liée à ces équations dont la résolution va nous permettre de calculer la vitesse de propagation de cette onde.

On peut étudier cette propagation à partir des potentiels. Pour cela, nous établissons ces potentiels dans le vide (mais où il y a des charges et des courants, c'est-à-dire $\rho \neq 0$ et $\vec{i} \neq 0$).

Partons des équations $\text{div}\,\vec{D} = 0$ et $\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{H} = \vec{J}_C + \dfrac{\partial \vec{D}}{\partial t}$.

Comme $\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E}$ et $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$, on peut écrire :

$$\text{div}\,(\varepsilon_0 \vec{E}) = \rho \qquad \text{et} \qquad \frac{1}{\mu_0}\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{B} = \vec{J} + \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Ainsi, $\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \dfrac{\partial \vec{E}}{\partial t}$

Comme $\vec{B} = \overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{A}$ on obtient :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\,(\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{A}) = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t}\left(-\overrightarrow{\text{grad}}\,V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right)$$

Or, $\overrightarrow{\text{rot}}\,(\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{A}) = \overrightarrow{\text{grad}}\,(\text{div}\,\vec{A}) - \nabla^2 \vec{A}$.

On obtient ainsi l'équation :

$$\nabla^2 \vec{A} - \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = \overrightarrow{\text{grad}}\left(\text{div}\,\vec{A} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial V}{\partial t}\right) - \mu_0 \vec{J}$$

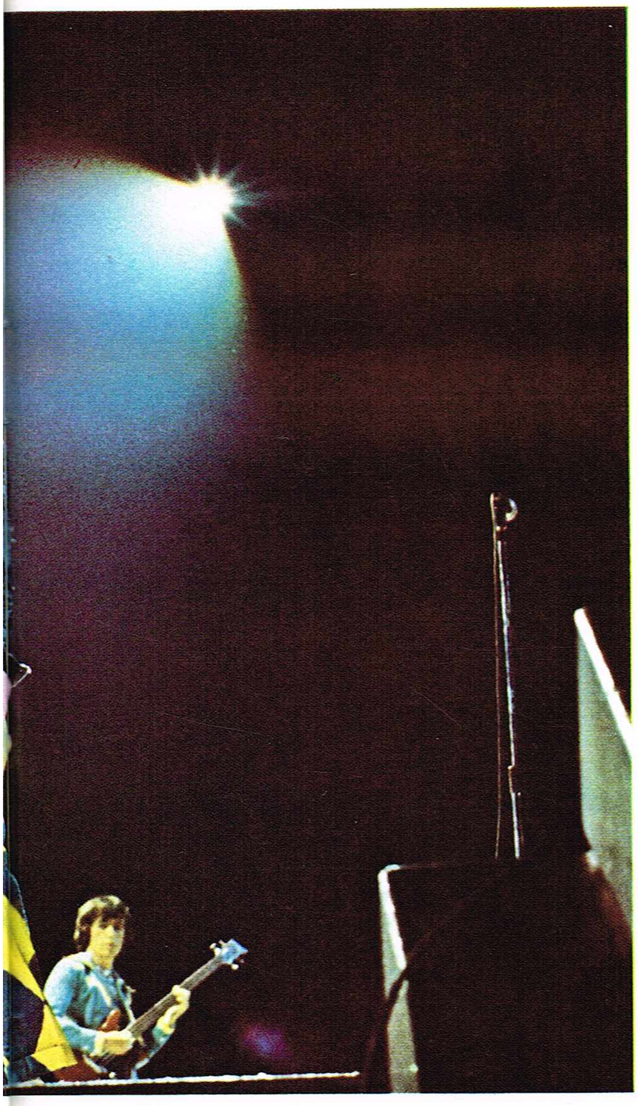

Par le même genre de calcul, on obtiendrait une relation analogue pour V :

$$\nabla^2 V - \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = -\frac{\partial}{\partial t}\left(\text{div}\,\vec{A} + \mu_0\varepsilon_0 \frac{\partial V}{\partial t}\right) - \frac{\rho_v}{\varepsilon_0}$$

Ces deux équations se simplifient en introduisant l'équation de Lorentz :

$$\text{div}\,\vec{A} + \mu_0\varepsilon_0 \frac{\partial V}{\partial t} = 0$$

et comme on se place dans un milieu linéaire, isotrope, homogène en posant :

$$\mu_0 \varepsilon_0 = \frac{1}{c^2}$$

on obtient ainsi :

$$\nabla^2 \vec{A} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = -\mu_0 \vec{J}$$

$$\nabla^2 V - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = -\frac{\rho_v}{\varepsilon_0}$$

et en introduisant l'opérateur d'alembertien

$$\square = \nabla^2 - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2},$$ ces équations s'écrivent :

$$\square \cdot \vec{A} = -\mu_0 \vec{J}$$

$$\square \cdot V = -\frac{\rho_v}{\varepsilon_0}$$

Ainsi, nous voyons que les équations satisfaites par $\vec{A}\,(r, t)$ et $V\,(r, t)$ sont :

$$\square \cdot \vec{A}\,(r \cdot t) = -\mu_0 \vec{J}\,(r, t)$$

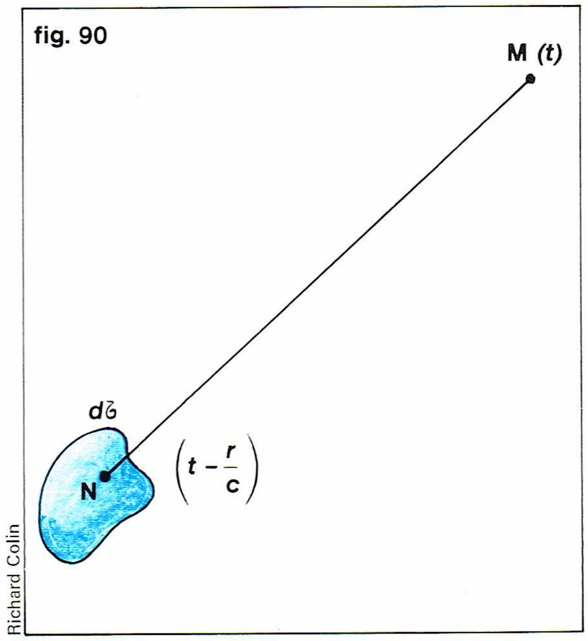

◀ *Figure 90 : les potentiels $\vec{A}$ et V à l'instant t en un point M sont produits par des charges et des courants qui, en un instant antérieur $t - \frac{r}{c}$ se trouvaient au point N.*

$$\square \cdot V\,(r, t) = -\frac{\rho_v}{\varepsilon_0}\,(r, t)$$

Alors que les équations satisfaites par $\vec{A}\,(r)$ et $\vec{V}\,(r)$ en régime permanent sont :

$$\Delta^2 \vec{A}\,(r) = -\mu_0 \vec{J}$$

et

$$\Delta^2 V\,(r) = -\frac{\rho_v}{\varepsilon_0}$$

De même, l'équation de propagation dans le vide, où il n'y a pas de charges ni de courant, est :

$$\square \cdot g\,(r, t) = 0$$

où $g\,(r, t)$ peut représenter $V\,(r, t)$ ou toute composante de $\vec{A}\,(r, t)$ ou de $\vec{B}\,(r, t)$ ou de $\vec{E}\,(r, t)$.

Les solutions des équations de propagation sont appelées *potentiels retardés*. Ces équations sont :

$$V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\iiint_\tau \frac{\rho_v\left(t - \frac{r}{c}\right)}{r}\,d\tau$$

et

$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi}\iiint_\tau \frac{\vec{J}\left(t - \frac{r}{c}\right)}{r}\,d\tau$$

Nous n'en ferons pas la démonstration dans le cadre de cet ouvrage. Nous dirons simplement que, si on les appelle potentiels retardés, c'est que, comme l'onde électromagnétique se propage avec la vitesse c, les potentiels V et $\vec{A}$ en un point M à l'instant t sont produits par des charges et des courants qui, en un instant antérieur $\left(t - \frac{r}{c}\right)$, se trouvaient au point N (*fig.* 90).

Étude directe de la propagation des champs

Les phénomènes de propagation peuvent être démontrés directement sans passer par l'intermédiaire des potentiels.

Plaçons-nous dans le vide et supposons qu'il n'y ait ni charges spatiales, ni courants. Les équations de Maxwell s'écrivent :

$$\text{div}\,\vec{E} = 0; \quad \overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\text{div}\,\vec{B} = 0 \quad \text{et} \quad \overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{B} = \varepsilon_0\mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

La dernière équation s'écrit : $\frac{\partial}{\partial t}(\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{B}) = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$

Soit : $-\overrightarrow{\text{rot}}\,(\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{E}) = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$

Soit encore $\overrightarrow{\text{rot}}\,(\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{E}) = \overrightarrow{\text{grad}}\,(\text{div}\,\vec{E}) - \nabla^2 \vec{E}$

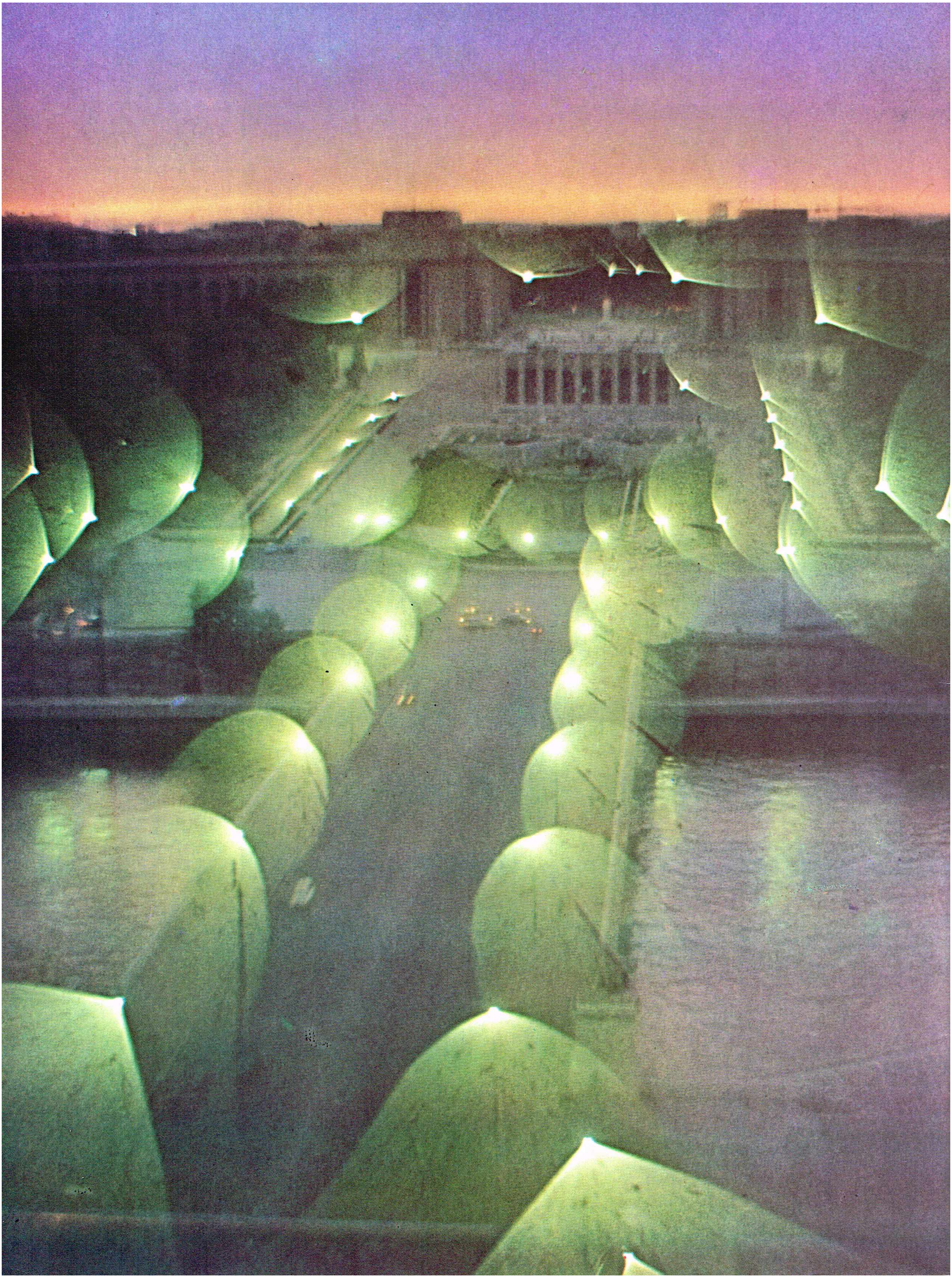

Comme $\overrightarrow{\text{grad}}\ (\text{div}\ \vec{E}) = 0$, on obtient l'équation finale de propagation de $\vec{E}$, ou d'une de ses composantes.

$$\nabla^2\vec{E} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

Dans un milieu linéaire, homogène, isotrope (ε, μ) on aurait trouvé l'équation :

$$\nabla^2\vec{E} - \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad \text{avec} \quad \frac{1}{v^2} = \varepsilon\mu$$

On trouverait de la même manière une équation identique pour $\vec{H}$. Dans le vide, on aurait :

$$\nabla^2\vec{H} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\vec{H}}{\partial t^2} = 0$$

Onde plane polarisée rectilignement dans un diélectrique

Le problème est le suivant. Est-il possible de trouver des ondes planes, perpendiculaires par exemple à Oz qui est la direction de propagation que l'on choisit pour ces ondes, et qui satisfassent à $\square \cdot \vec{E} = 0$ et $\square \cdot \vec{H} = 0$?
$\vec{E}$ et $\vec{H}$ ne sont alors fonction que de z : $\vec{E} = \vec{E}\,(z)$ et $\vec{H} = \vec{H}\,(z)$.

$$\square \cdot \vec{E} \text{ s'écrit } \frac{\partial^2\vec{E}}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

dont la solution (propagation de l'onde dans le sens des z positifs) est $\vec{E} = f\left(t - \frac{z}{v}\right)$, où f est une fonction quelconque.

Transversalité des ondes

Cherchons une solution harmonique à $\vec{E} = f\left(t - \frac{z}{v}\right)$, de la forme $\vec{E} = \vec{E}_0 \cos\omega\left(t - \frac{z}{v}\right)$, où $\vec{E}_0$ est un vecteur constant dont les composantes suivant Ox, Oy, Oz sont respectivement E_{0x}, E_{0y}, E_{0z}.
Les composantes de E peuvent alors s'écrire :

$$E_x = E_{0x} \cos\omega\left(t - \frac{z}{v}\right)$$

$$E_y = E_{0y} \cos\omega\left(t - \frac{z}{v}\right)$$

$$E_z = E_{0z} \cos\omega\left(t - \frac{z}{v}\right)$$

$$\text{or div}\ \vec{E} \text{ s'écrit : } \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = 0$$

Les deux premiers termes sont nuls :

$$\frac{\partial E_z}{\partial z} = E_{0z}\frac{\omega}{v}\sin\omega\left(t - \frac{z}{v}\right) = 0 \quad \text{donc} \quad E_{0z} = 0$$

Donc le vecteur $\vec{E}_0$ n'a pas de composante selon Oz. Il est perpendiculaire à cet axe. On dit qu'il est transversal. Pour simplifier, supposons que $\vec{E}_0$ soit porté par l'axe Ox. Alors $\vec{E}$ se propage selon Oz en restant en chaque point parallèle à Ox. Or $\vec{E}$ est nécessairement accompagné du vecteur $\vec{H}$ lors de la propagation d'une onde électromagnétique. Ce vecteur $\vec{H}$ obéit à l'équation de Maxwell :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\ \vec{E} = -\mu\frac{\partial\vec{H}}{\partial t}$$

Cette équation est équivalente à :

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{\partial H_z}{\partial t} = 0$$

et

$$-\mu\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{\partial E_z}{\partial x}$$

dont l'intégration donne :

$$H_y = \frac{E_{0z}}{\mu v}\cos\omega\left(t - \frac{z}{v}\right) + \text{constante}$$

fig. 91

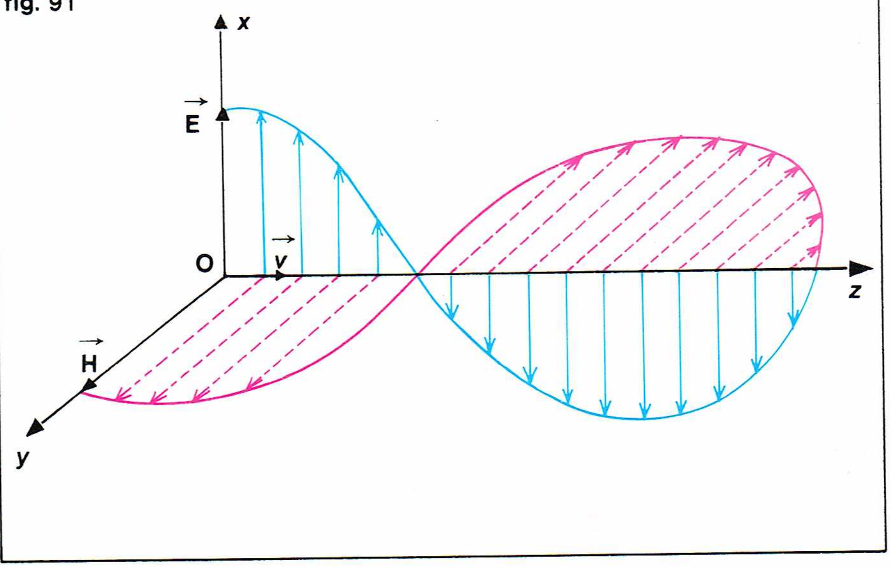

Richard Colin

▲ ***Figure 91 : schéma représentant les champs $\vec{E}$ et $\vec{H}$ à un instant donné.***

$$H_x = \text{constante}$$

$$H_y = \text{constante}$$

Si l'on choisit ces deux constantes nulles de façon à éliminer la composante continue du champ magnétique, on voit alors que $\vec{H}$ est également transversal. Il est porté par Oy. Nous voyons ainsi que $\vec{E}$ et $\vec{H}$ sont perpendiculaires dans le plan d'onde. Nous voyons également que $\vec{E}$ et $\vec{H}$ sont en phase en tout point de l'espace.

Cherchons le rapport de $\vec{E}/\vec{H}$.

$$\frac{\vec{E}}{\vec{H}} = \mu v = \frac{\mu}{\sqrt{\mu\varepsilon}} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$$

L'ensemble des deux vecteurs $\vec{E}$ et $\vec{H}$ représente une onde plane polarisée rectilignement. (Car, pour chacun des champs, la composante garde en chaque point une direction donnée.) Ces deux vecteurs forment avec le vecteur $\vec{v}$ un trièdre trirectangle direct $\vec{E}$, $\vec{H}$, $\vec{v}$.

La *figure* 91 représente les champs $\vec{E}$ et $\vec{H}$ à un instant donné.

Propagation de l'énergie électromagnétique

Dans un milieu dont les constantes sont ε, μ, nous pouvons écrire les deux équations de Maxwell suivantes :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\ \vec{E} = -\mu\frac{\partial\vec{H}}{\partial t} \qquad \overrightarrow{\text{rot}}\ \vec{H} = \vec{J} + \varepsilon\frac{\partial\vec{E}}{\partial t}$$

$$\text{D'autre part, div}\ (\vec{E} \wedge \vec{H}) = \vec{H} \cdot \overrightarrow{\text{rot}}\ \vec{E} - \vec{E} \cdot \overrightarrow{\text{rot}}\ \vec{H}$$

$$\text{div}\ (\vec{E} \wedge \vec{H}) = -\mu\vec{H} \cdot \frac{\partial\vec{H}}{\partial t} - \vec{J} \cdot \vec{E} - \varepsilon\vec{E} \cdot \frac{\partial\vec{E}}{\partial t}$$

que l'on peut également écrire en désignant par $\vec{\mathfrak{F}}$ le produit $\vec{E} \wedge \vec{H}$. $\vec{\mathfrak{F}}$ est le *vecteur de Poynting*.

$$\text{div}\ \vec{\mathfrak{F}} = -\vec{J} \cdot \vec{E} - \mu\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{H^2}{2}\right) - \varepsilon\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{E^2}{2}\right)$$

En intégrant, on obtient :

$$\iiint_\tau \text{div}\ \vec{\mathfrak{F}} \cdot d\tau = \iint_\Sigma \vec{\mathfrak{F}} \cdot \vec{n}dS =$$

$$-\iiint_\tau \vec{J}\vec{E}d\tau - \frac{\partial}{\partial t}\iiint_\tau \left(\frac{\mu H^2}{2} + \frac{\varepsilon E^2}{2}\right) d\tau$$

Il est impossible de donner une interprétation physique de cette équation sans utiliser la loi de force de Lorentz :

$$\vec{F}\,(r, t) = q\vec{E}\,(r, t) + \vec{v} \wedge \vec{B}\,(r, t)$$

Cherchons la valeur de $\iiint_\tau \vec{J}\vec{E}\,d\tau$

◀ ***Page ci-contre : la lumière, magicienne d'un crépuscule brumeux sur le Trocadéro (Paris).***

E. Hartmann - Magnum

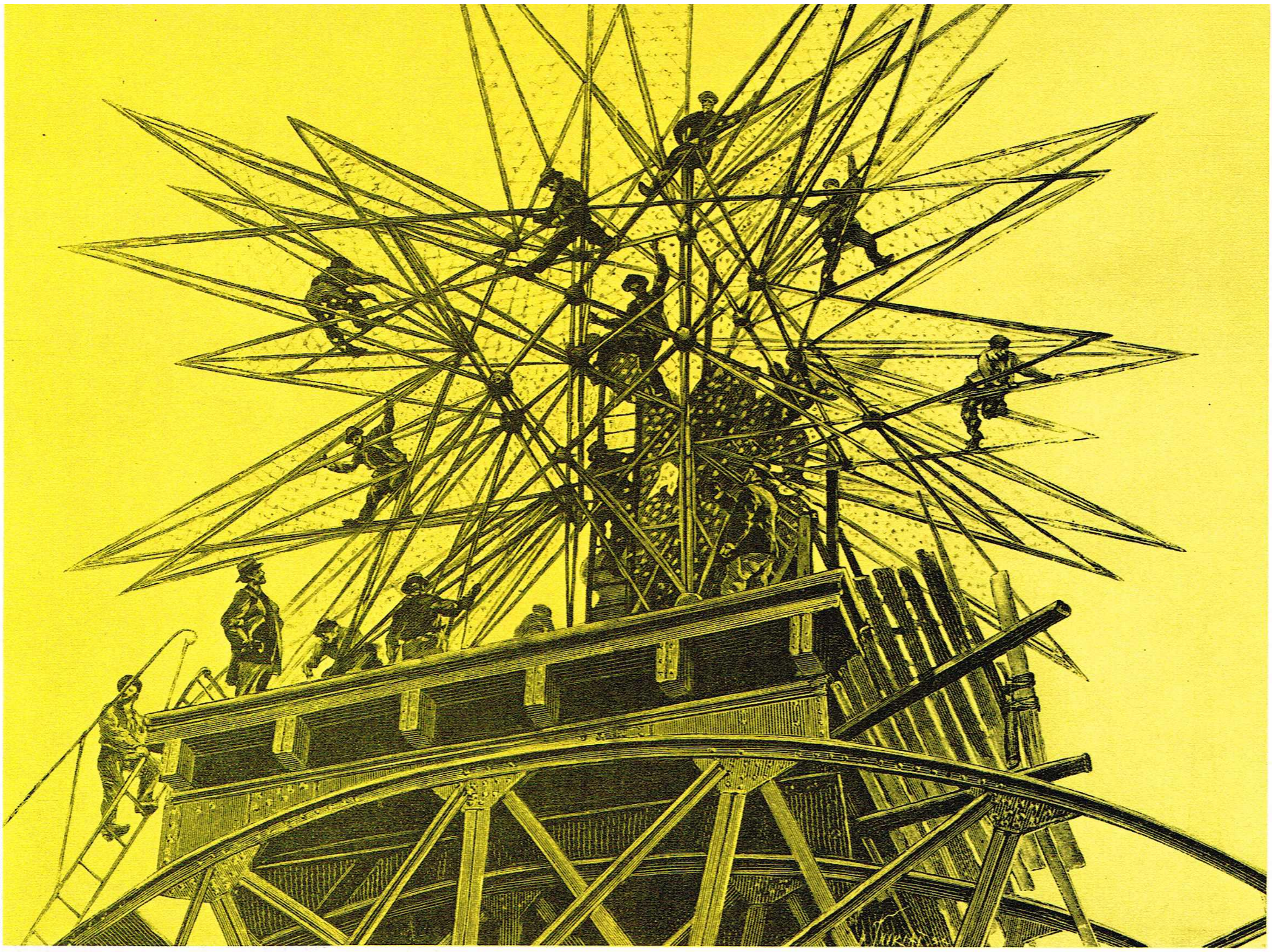

Snark International

▲ ***Construction de l'étoile qui surmontait le palais de l'Électricité à l'Exposition universelle de 1900 (Bibliothèque nationale).***

La puissance fournie à la charge q par les champs $\vec{E}$ et $\vec{B}$ est $P = \vec{F} \cdot \vec{v} = q\vec{E} \cdot \vec{v}$. Nous voyons en l'occurrence que $\vec{B}$ ne fournit aucun travail.

Supposons que le courant soit dû simplement à la charge q placée en r'. Alors, en utilisant la fonction delta de Dirac, on peut écrire que :

$$\vec{J} = \rho_v \vec{v} = q\vec{v}\,\delta(\vec{r} - \vec{r}')$$

car la charge q est nulle en tout point r différent de r'.

$$\text{Ainsi : } \iiint_\tau \vec{J}\vec{E}\,d\tau = \iiint_\tau q\vec{v}\vec{E}\,\delta(\vec{r} - \vec{r}')\,d\tau = \vec{F}\vec{v} = \frac{dW}{dt}$$

Par conséquent, si l'on désigne par u l'énergie électromagnétique $\frac{\mu H^2}{2} + \frac{\varepsilon E^2}{2}$ on obtient l'équation :

$$\frac{du}{dt} + \frac{dW}{dt} + \iint_\Sigma (\vec{\mathfrak{P}} \cdot \vec{n})\,dS = 0$$

C'est-à-dire que l'accroissement d'énergie électromagnétique plus l'accroissement de travail fourni par unité de temps à la charge q égale l'accroissement d'énergie s'écoulant dans le volume τ. Ainsi $\vec{\mathfrak{P}}$ peut-il être interprété comme un vecteur densité de flux d'énergie (énergie par unité de temps et de surface).

Cas des solutions transverses

Soit $\vec{n}$ le vecteur unitaire dans la direction de propagation de l'onde plane. Il est facile de montrer que la transversabilité de l'onde s'exprime par $v\vec{B} = \vec{n} \wedge \vec{E}$.

$$\vec{\mathfrak{P}} = \vec{E} \wedge \vec{H} = \frac{1}{\mu}(\vec{E} \wedge \vec{B}) = \frac{1}{\mu}\vec{E} \wedge \left(\frac{1}{v}\vec{n} \wedge \vec{E}\right)$$

$$\vec{\mathfrak{P}} = \frac{1}{v\mu}\{\vec{E} \wedge (\vec{n} \wedge \vec{E})\} = \frac{1}{v\mu}\{(\vec{E} \cdot \vec{E})\,\vec{n} - (\vec{E} \cdot \vec{n}) \cdot \vec{E})\}$$

$$\vec{\mathfrak{P}} = \frac{1}{v\mu} E^2\vec{n}, \quad \text{car } \vec{E} \cdot \vec{n} = 0.$$

Cela confirme que le vecteur $\vec{\mathfrak{P}}$ est perpendiculaire au plan de l'onde.

De même, l'équation $v\vec{B} = \vec{n} \wedge \vec{E}$ peut s'écrire :

$$\vec{E} = v\vec{B} \wedge \vec{n}$$

$$\text{Aussi } \vec{\mathfrak{P}} = \frac{1}{\mu}(\vec{E} \wedge \vec{B}) = \frac{1}{\mu}\{(v\vec{B} \wedge \vec{n}) \wedge \vec{B}\} = \frac{v}{\mu}B^2\vec{n} - (\vec{B} \cdot \vec{n})\,\vec{B}$$

$$\vec{\mathfrak{P}} = \frac{v}{\mu}B^2 \cdot \vec{n}$$

$$\text{Ainsi} \qquad \vec{\mathfrak{P}} = \frac{1}{v\mu}E^2\vec{n} = \frac{v}{\mu}B^2\vec{n}$$

On en déduit que :

$$\frac{\varepsilon E^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu}$$

Donc, pour les solutions transverses, la densité d'énergie associée au champ $\vec{E}$ est égale à celle associée au champ $\vec{B}$. Comme exemple d'application des équations de Maxwell, nous pouvons citer, entre autres, les équations de propagation dans les lignes sans perte.

BIBLIOGRAPHIE

ANNEQUIN et BOUTIGNY, *Électricité 1 : mathématiques supérieures,* Vuibert. - BRUHAT G., *Électricité,* 8e édition par G. Goudet, Masson et Cie. - LANDAU L. et LIFCHITZ E., éditions de Moscou. - LONCHAMP J.-P., professeur à la faculté des sciences de Strasbourg, fascicule 2, *Courant continu, courant alternatif,* Claude Hermant. - MAGNAN C., professeur à la faculté des sciences de Paris, fascicule édité par l'Association corporative des étudiants en sciences. - QUINET J. et PETITCLERC A., *Théorie et pratique des circuits de l'électronique et des amplificateurs,* t. I, Dunod. - ROUAULT M., avec la participation de MERGAULT P., *Électricité,* fascicule 2, Masson et Cie. - RUMEAU G. et GUINIER G., fascicules 1 et 2, librairie Delagrave.

ENCYCLOPÉDIE
DES
SCIENCES

PHYSIQUE
II

GRANGE BATELIÈRE

GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

PHYSIQUE II

GRANGE BATELIÈRE, ÉDITIONS ATLAS, PARIS - ÉDITIONS KISTER, GENÈVE
ÉDITIONS ÉRASME, BRUXELLES-ANVERS

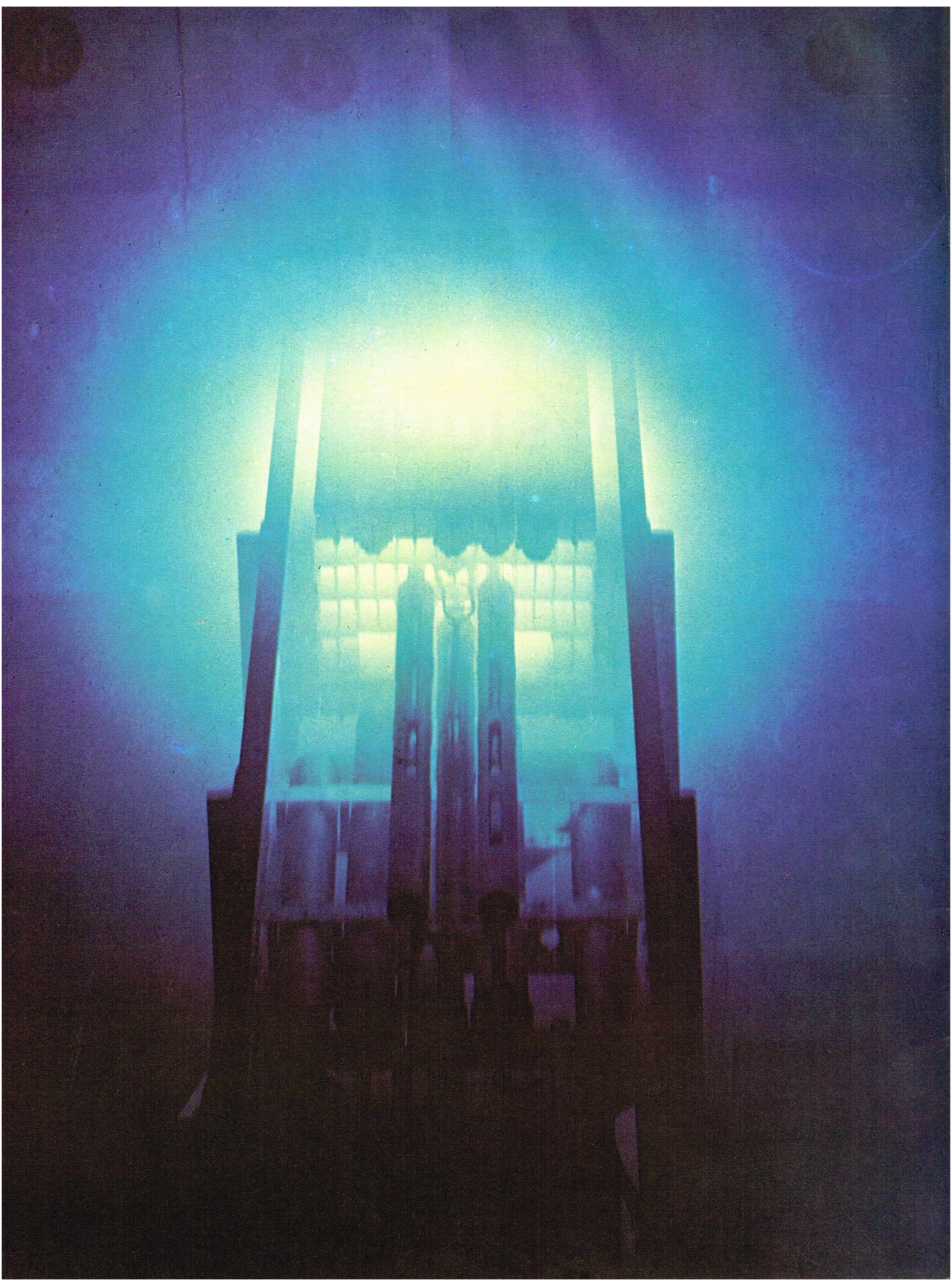

Publiée sous le haut patronage de :
Messieurs les professeurs :
Jean DORST, membre de l'Institut,
Charles FEHRENBACH, membre de l'Institut,
Roger HEIM, membre de l'Institut,
Monsieur l'amiral André JUBELIN,
Messieurs les professeurs :
Pierre LÉPINE, membre de l'Institut,
Louis LEPRINCE-RINGUET, de l'Académie française,
Jean-François LEROY, professeur au Muséum national d'histoire naturelle,
Henri NORMANT, membre de l'Institut,
Monsieur Jacques PICCARD, docteur ès sciences h.c.

Ont collaboré à ce volume :

G. et C. ALQUIÉ, pour la physique des solides.
J. AUVRAY, pour l'électronique.
R. BARBÉ, pour la physique atomique.
G. CHEVALLIER, pour l'électrotechnique.
H.-J. DOUCET, pour la physique des plasmas.
B. DUBUISSON, pour la cybernétique et l'automatique.
A. FOURRIER-LAMER, pour les hyperfréquences.
G. LE DENMAT, pour la relativité générale.
Y. LE GALLIC, pour les radionucléides.
C. LEWINER, pour la relativité restreinte.
J.-A. NASSER, pour la mécanique quantique.
J.-A. NASSER et N. BOCCARA, pour la symétrie en physique.
R. OMNÈS, pour les particules élémentaires.
G. RIPKA, pour la physique nucléaire.
P. SACHNINE, pour les réacteurs nucléaires.
H. SERGOLLE, pour l'instrumentation nucléaire.

Les schémas portant la référence Richard Colin
ont été réalisés d'après des croquis fournis par les auteurs.

Réalisation	IDÉES ET ÉDITIONS 16, avenue de Friedland, 75008 Paris.
Comité de direction	Simone DEVAUX, Uberto TOSCO.
Rédaction	Françoise MENU, Monique LIONS-GENTIL, Vanina DORÉ, Marie-Noëlle PAILLETTE.
Recherche de l'illustration	Mathilde RIEUSSEC.
Mise en pages	Tito TOPIN et Serge BROCHE.
Illustrations techniques	Richard COLIN.
Coordinateur des dessins	Mario LOGLI.
Fabrication	Sylvia COLIN, Jocelyne TÉPÉNIER.
Directeur de la publication	G. BORDES.

U.S.I.S.

Dans ce volume :

LA PHYSIQUE (II)

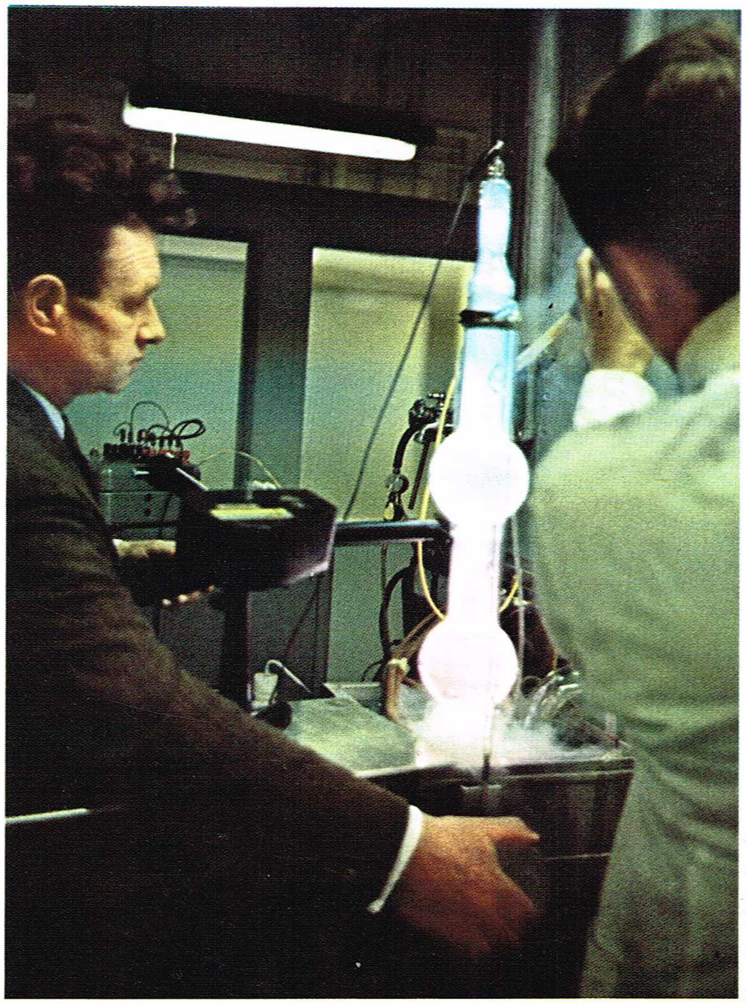

Van den Veen-Rapho

fig. 1

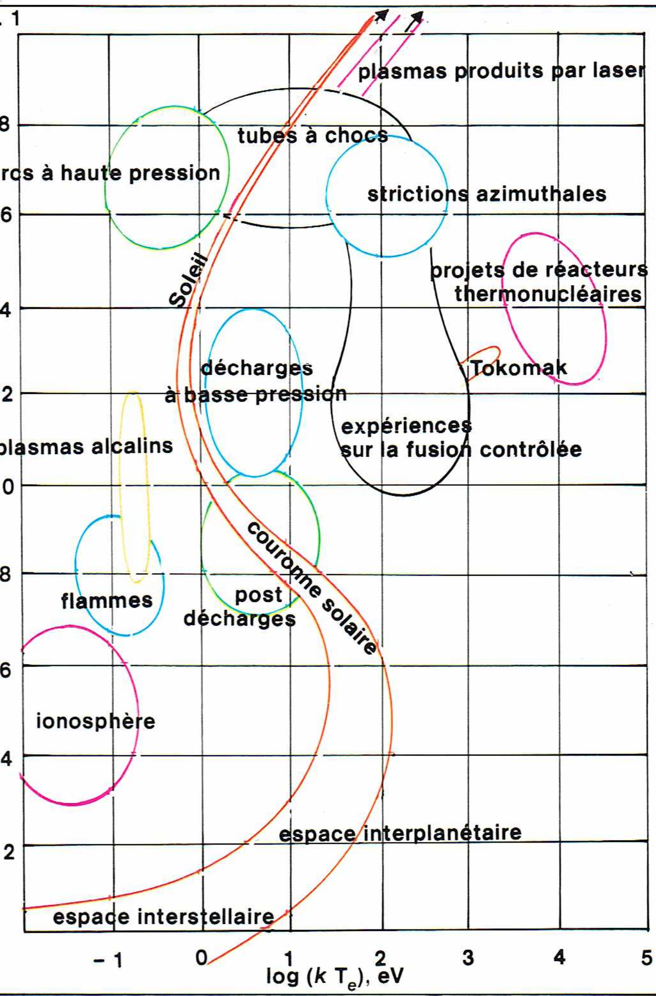

Richard Colin

PHYSIQUE DES PLASMAS

Le plasma est un état de la matière au même titre que le solide, le liquide ou le gaz. Un gaz porté à très haute température s'ionise partiellement, l'énergie des électrons devenant suffisante pour qu'ils se séparent des ions positifs. Le terme de plasma est en général réservé au cas des gaz très fortement ionisés dans lesquels les atomes et molécules neutres ne jouent qu'un rôle très faible. En particulier, nous n'examinerons pas ici le domaine de la physique atomique et moléculaire dans les gaz ionisés où les interactions des neutres avec les particules chargées jouent un rôle prédominant.

Les propriétés d'un plasma peuvent se classer en propriétés individuelles et collectives : propriétés individuelles parce que, composé de particules chargées, un plasma verra ses propriétés marquées par le comportement individuel de ces particules dans des champs électromagnétiques, et propriétés collectives parce que l'ensemble de ces particules réagira de façon différente des particules isolées.

Une première et importante propriété collective d'un plasma est d'être électriquement neutre : en effet, si un faible défaut de neutralité existait dans un plasma, par exemple de 1 % pour une densité moyenne de 10^{14} cm^{-3}, cela entrainerait par l'équation de Poisson div E $= \rho/\varepsilon_0$ des champs électriques de 200 mégavolts par cm qui expulsent les charges excédentaires et ramènent très rapidement la neutralité électrique.

Pour décrire le comportement individuel des plasmas, voyons tout d'abord le mouvement des particules chargées dans des champs électriques et magnétiques extérieurs. Ces champs pourront ensuite résulter de la répartition et du mouvement des charges elles-mêmes (champs self-consistants).

Mouvement d'une particule chargée dans des champs électriques et magnétiques

Une particule de charge électrique q dans un champ électrique $\vec{E}$ est soumise à une force électrique :

$$\vec{F} = q\vec{E} \qquad (1)$$

On voit que, dans un plasma constitué d'ions positifs et d'électrons, les forces électriques dues à un champ extérieur et appliquées aux deux types de particules sont opposées et tendraient à séparer les charges suivant leur signe. Nous verrons qu'en fait, le champ électrique pénétrera difficilement dans le plasma, précisément à cause de la charge d'espace induite par cette séparation de charges qui s'oppose au champ extérieur.

Dans un champ d'induction magnétique $\vec{B}$, une particule chargée est de plus soumise à la force de Laplace, si bien que la force appliquée totale devient :

$$m\frac{d\vec{v}}{dt} = q\,(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B}) \qquad (2)$$

où m et $\vec{v}$ désignent respectivement la masse et la vitesse de la particule.

Dans un champ magnétique uniforme

Une particule se déplace d'un mouvement rectiligne uniforme le long du champ magnétique et dans un plan perpendiculaire tourne à la fréquence angulaire :

$$\omega_c = \frac{qB}{m} \qquad (3)$$

dite fréquence angulaire cyclotronique ou girofréquence angulaire. Le rayon de giration ou rayon de Larmor est alors :

$$r_L = \frac{v_\perp}{\omega_c} = \frac{mv_\perp}{qB} \qquad (4)$$

où $v_\perp$ est la composante de la vitesse perpendiculaire au champ magnétique.

▲ *A gauche : expérience de laboratoire montrant des gaz portés à l'état de plasmas, c'est-à-dire dont une partie des atomes est ionisée. La lumière produite vient en fait essentiellement des molécules non ionisées, excitées par collisions contre les électrons libres du plasma.*
A droite, figure 1 : densités et températures des plasmas de laboratoire, plasmas solaire et d'environnement terrestre (1eV = 11 605 °K)
[*d'après* **Plasma Physics in Theory and application, Wulf B. Kunkel Editor, University of California - Berkeley - Mac Graw Hill Book Company**].

▶ A gauche, figure 2 ; dérive des particules chargées dans des champs électrique et magnétique croisés : l'ensemble du plasma, électrons et ions, subit une dérive perpendiculaire à la fois au champ électrique et au champ magnétique (v : vitesse moyenne des ions et des électrons = vitesse de dérive du plasma = vitesse du centre guide du mouvement des particules). A droite, figure 3 ; trajectoire d'une particule chargée dans un champ magnétique en miroir. A mesure que la particule pénètre dans une zone de champ magnétique d'induction croissante, elle transforme son énergie de translation en énergie de rotation et finit par être réfléchie.

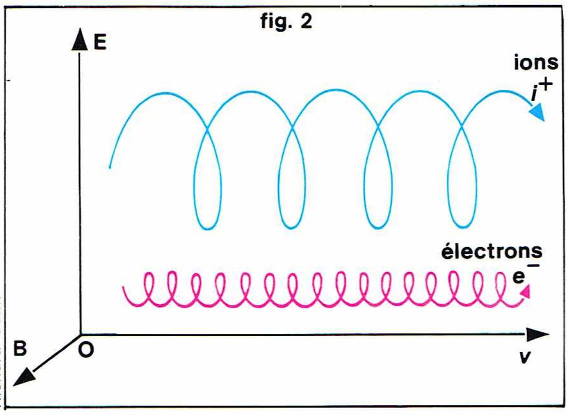

Richard Colin

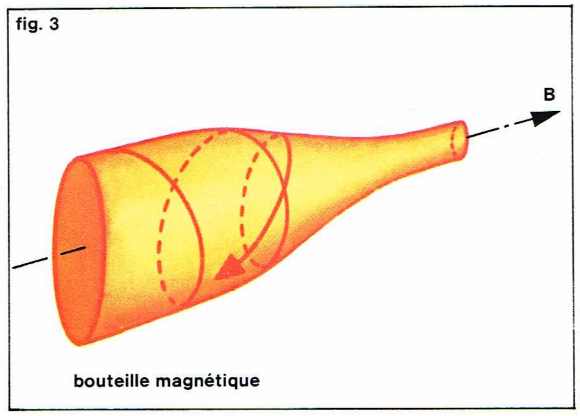

Richard Colin

Énergie d'une particule chargée

Examinons ce que devient l'énergie d'une particule dans des champs électrique et magnétique. Pour cela, multiplions l'équation **(2)** scalairement par $\vec{v}$:

$$m\vec{v}\cdot\frac{d\vec{v}}{dt} = q\vec{v}\cdot\vec{E} + \vec{v}\cdot\vec{v}\wedge\vec{B} \qquad (5)$$

Le premier terme est la variation d'énergie cinétique, le deuxième le travail du champ électrique, le troisième est nul à cause du produit mixte : un champ magnétique ne dépendant pas du temps ne change donc pas l'énergie des particules chargées. Par contre, le travail du champ électrique conduit à une variation de l'énergie cinétique liée à la variation du potentiel électrique V

$$\Delta\left(\frac{1}{2}mv^2\right) = -q\Delta V \qquad (6)$$

Dérive d'une particule

Dans un champ magnétique $\vec{B}$ et en présence d'une force additionnelle $\vec{F}$, une particule chargée subit une dérive, c'est-à-dire que son centre guide se déplace à la vitesse $\vec{v_d}$ perpendiculaire à la fois à la force F et au champ B :

$$\vec{v_d} = \frac{\vec{F}\wedge\vec{B}}{qB^2} \qquad (7)$$

On voit par exemple que, dans des champs électrique et magnétique croisés, où $\vec{F} = q\vec{E}$, la dérive des particules est la même pour les ions et les électrons, produisant une dérive de l'ensemble du plasma. Mais $\vec{F}$ peut tout aussi bien représenter une force de gravité $\vec{F} = m\vec{g}$.

Dans un gradient de champ magnétique, en l'absence de courant dans le plasma, on observe une dérive :

$$v_d = \frac{1}{\omega_c R}\left(\frac{1}{2}v_\perp^2 + v_{//}^2\right) \qquad (8)$$

où R est le rayon de courbure d'une ligne de force, les vitesses $v_\perp$ et $v_{//}$ étant repérées par rapport à la tangente à cette ligne au point où se trouve la particule.

Moment magnétique

Lorsque le champ magnétique B varie peu dans l'espace sur des dimensions de l'ordre du rayon de Larmor, et dans le temps sur des durées de l'ordre de la période de giration, le moment magnétique μ d'une particule chargée est un invariant adiabatique du mouvement.

Le moment magnétique μ d'une particule en rotation peut s'écrire comme celui d'un courant $I = qf_c = q\omega_c/2\pi$ circulant autour d'une surface $S = \pi r_L^2$:

$$\mu = IS = \frac{\frac{1}{2}mv_\perp^2}{B} \qquad (9)$$

Mouvement d'une particule dans un miroir magnétique

On appelle miroir magnétique une région du champ où les lignes de force se resserrent, correspondant à une augmentation de l'induction magnétique. Le mouvement adiabatique d'une particule dans un miroir magnétique peut se décrire à l'aide de deux invariants : le moment magnétique et l'énergie totale de la particule.

Si θ est l'angle que fait le vecteur vitesse de la particule avec la direction locale du champ magnétique, l'équation **(9)** peut s'écrire avec $v_\perp = v\sin\theta$:

$$\mu = \frac{1}{2}mv^2\frac{\sin^2\theta}{B} \qquad (10)$$

donc $\sin^2\theta/B$ est une constante du mouvement.

En pénétrant dans une zone de champ magnétique croissant, une particule transforme son énergie parallèle en énergie perpendiculaire jusqu'au point de champ B_m tel que :

$$\sin^2\theta/B = 1/B_m \qquad (11)$$

Alors la particule est réfléchie et retransforme son énergie purement perpendiculaire en énergie parallèle : d'où le nom de miroir magnétique ou de bouteille magnétique donné à cette configuration de champ.

L'équation **(11)** permet également de rendre compte de la réflexion d'une particule suivant l'orientation initiale de sa vitesse : toutes les particules dont les vecteurs vitesse forment un angle inférieur à θ avec la direction du champ magnétique sont capables de sortir de la bouteille ; au contraire, les autres y sont piégées. L'angle θ défini par **(11)** est appelé angle de perte du miroir.

Description statistique d'un système de particules chargées

Pour rendre compte des propriétés d'un plasma à partir du mouvement des N particules qui le composent, il faudrait décrire l'évolution en fonction du temps de 6 N grandeurs représentant, par exemple, les positions et les vitesses des particules, ce qui conduirait à la résolution d'un système de 3 N équations différentielles du second ordre couplées par les équations de Maxwell décrivant les champs électriques et magnétiques créés par ces particules. Cette description est donc beaucoup trop complexe pour permettre de préciser rapidement les propriétés collectives du milieu liées principalement aux champs des particules.

On utilise donc classiquement une description statistique qui peut être microscopique ou macroscopique suivant qu'elle porte sur la distribution des particules ou sur des grandeurs moyennes dans le plasma.

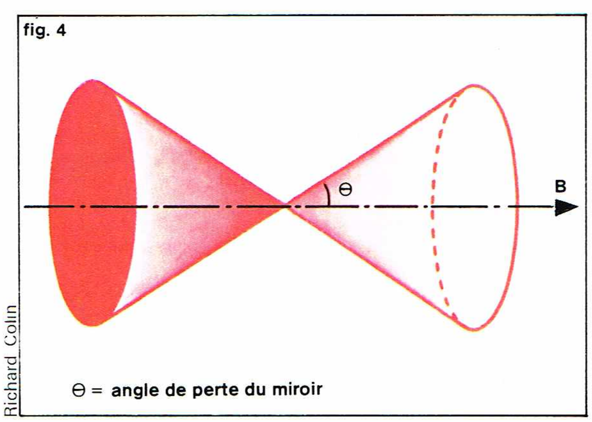

Richard Colin

▶ Figure 4 : cône de perte d'un miroir magnétique. Le cône de perte du miroir est un cône dont l'axe est la direction du champ et le demi-angle au sommet est défini par le rapport des inductions magnétiques dans le miroir [équation (11)]. Une particule est piégée dans le miroir si l'angle que fait son vecteur vitesse avec la direction locale du champ est supérieur à cet angle de perte.

Dans une représentation hamiltonienne, l'état dynamique d'un système sans liaisons à s degrés de liberté est entièrement déterminé à l'instant t par la donnée de s coordonnées de positions $q_1, q_2, ..., q_s$ et des s moments conjugués correspondants $p_1, p_2, ..., p_s$.

On peut représenter l'état dynamique de ce système par un point de coordonnées $\vec{p}\ (p_1, p_2, ..., p_s)$ et $\vec{q}\ (q_1, q_2, ..., q_s)$ dans un espace vectoriel de dimension 2 s : cet espace est l'*espace des phases*.

L'hamiltonien est :

$$\text{(12)} \qquad H\ (\vec{p}, \vec{q}, t) = \sum_1^s \dot{q}_i \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - L$$

où L $(\vec{p}, \vec{q}, t)$ est la fonction de Lagrange caractéristique du système considéré. Les équations du mouvement prennent alors la forme canonique :

$$\text{(13)} \qquad \dot{q}_i = \frac{\partial H}{\partial p_i} \qquad \dot{p}_i = -\frac{\partial H}{\partial q_i} \qquad i = (1, 2, ..., s)$$

équations différentielles du premier ordre.

La solution $\vec{p}\ (t), \vec{q}\ (t)$ est donc entièrement déterminée par la position et la vitesse du système à l'instant initial. Lorsque H ne dépend pas du temps, par tout point $(\vec{p}, \vec{q})$ de l'espace des phases passe une trajectoire et une seule. Si L est le plus souvent la différence entre l'énergie cinétique T, fonction quadratique homogène des $\dot{q}_i$, et l'énergie potentielle V, H = T + V est dans tous les cas l'énergie totale du système exprimé en fonction des p_i et des q_i.

Exemple. Pour une seule particule de charge e et de masse m, placée dans un champ électromagnétique dérivant d'un potentiel scalaire V (q, t) et d'un potentiel vecteur $\vec{A}\ (q, t)$ ne dépendant que de la position et du temps, l'hamiltonien s'écrit :

$$\text{(14)} \qquad H = \frac{1}{2\,m} [p - eA\ (q, t)]^2 + eV\ (q, t).$$

Extension en phase et théorème de Liouville à une particule

Pour un ensemble d'états d'un système représenté à chaque instant par un ensemble de points de l'espace des phases de dimension 2 s, l'extension en phase est le volume défini dans le domaine D par :

$$\Omega = \int_D d\Omega = \int_1 ... \int_D dq_1 ... dq_s dp_1 ... dp_s = \int_D d^s q d^s p$$

Le théorème de Liouville indique que, dans l'évolution du système au cours du temps, l'extension en phase est constante :

$$\text{(15)} \qquad \frac{d\Omega}{dt} = 0$$

Ce résultat de mécanique classique peut être étendu à un système de N particules dont chacune d'elles est définie par ses coordonnées de position et de vitesse. L'état instantané du système de N particules est représenté par un seul point de l'espace des phases. L'évolution du système est définie par la trajectoire de ce point dans l'espace des phases : deux trajectoires, représentant l'évolution de deux systèmes semblables de N particules, ne peuvent se croiser, car par un point de l'espace des phases passe une trajectoire et une seule.

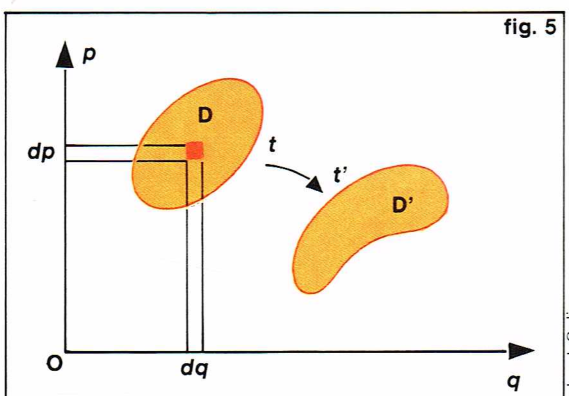

Richard Colin

◀ *Figure 5 : espace de phases. La fonction de distribution f(p, q, t) représente la densité des particules contenues dans le volume dpdq autour d'un point de l'espace des phases. Le théorème de Liouville exprime que les particules contenues à l'intérieur d'un domaine* D *à l'instant t se retrouvent à l'instant t' à l'intérieur d'un domaine* D' *de même volume.*

Représentation statistique

Pour un très grand nombre M de systèmes de N particules, l'hypothèse ergodique permet de remplacer la description statistique des états de M systèmes à un instant donné par celle des M états d'un même système à des instants différents.

On peut alors, à partir du nombre des états possibles dans un élément de volume de l'espace des phases $d\Omega = dpdq$ autour d'un point (p, q), définir la fonction de distribution $f\ (p, q, t)$ comme la probabilité de trouver une particule dans un état donné, les autres étant dans des états quelconques.

Les particules étant supposées sans corrélation, les interactions sont traduites uniquement par les champs électriques et magnétiques qui apparaissent dans l'hamiltonien du système. S'il n'y a pas de créations ou de pertes de particules, le théorème de Liouville appliqué au système de N particules conduit alors à l'équation dite de Vlasov ou équation de Boltzmann sans terme de collisions :

$$\text{(16)} \qquad \frac{df}{dt} = \frac{\partial f}{\partial t} + v \frac{\partial f}{\partial r} + \frac{X}{m} \frac{\partial f}{\partial v} = 0$$

Dans cette équation, X est la force de Lorentz, due uniquement aux champs extérieurs dans le cas de l'équation de Boltzmann, et au contraire contenant le champ créé par les particules dans le cas de l'équation de Vlasov.

Avec les hypothèses restrictives précisées ci-dessus, nous avons ramené la description du système de N particules à celui de l'évolution d'une seule fonction $f\ (\vec{r}, \vec{v}, t)$ de la position $\vec{r}$, de la vitesse $\vec{v}$, et du temps t. Cette description, microscopique puisqu'elle porte sur r et v, permet de décrire les interactions entre les particules et les champs self-consistants qu'elles produisent. Elle permettra également d'introduire une description macroscopique ne portant que sur des grandeurs moyennes dans le plasma.

Plasmas collisionnels et distribution à l'équilibre

Dans le cas où les collisions entre particules sont importantes, il n'est plus possible de négliger les corrélations entre particules. Par exemple, pour des collisions entre deux particules et à courte portée, comme c'est le cas des collisions dans un gaz neutre, on peut utiliser l'équation de Boltzmann :

$$\text{(17)} \qquad \frac{df}{dt} = \frac{\partial f}{\partial t}\text{collisions}$$

formellement analogue à l'équation **(16)**, mais contenant un terme d'interaction entre les particules de type 1 décrites par leur fonction de distribution f (1) et celles de type 2 décrites par f (2) :

$$\text{(18)} \qquad \frac{\partial f}{\partial t}\text{coll.} = \int [f\ (1')\ f\ (2') - f\ (1)\ f\ (2)]\ |v_1 - v_2|\ \sigma dv_2 d\Omega$$

où les indices supérieurs (primes) désignent les grandeurs après collisions, σ est la section efficace différentielle de collision et $d\Omega$ l'angle solide dans lequel diffusent les particules après collisions.

En présence de collisions, la fonction de distribution en l'absence de champs extérieurs est la fonction de distribution de Maxwell, qui n'est plus fonction que de la vitesse des particules :

$$\text{(19)} \qquad f_{\text{Max}}\ (v) = \left(\frac{m}{2\,KT}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{mv^2}{2\,KT}\right)$$

où K est la constante de Boltzmann et T la température du milieu à l'équilibre.

Si la distribution initiale n'est pas une distribution de Maxwell, elle relaxe et tend vers cette distribution d'équilibre avec un temps caractéristique dit temps de self-collisions déterminé par les collisions entre particules d'un même type s (collisions entre électrons ou collisions entre ions) :

$$\text{(20)} \qquad t_s = \frac{m_s^{1/2}\ (3\ KT_s)^{3/2}}{8 \times 0{,}714\ \pi n e^4 Z^4 \text{ Log } \Lambda} = \frac{11{,}4\ A^{1/2} T_s^{3/2}}{n Z^4 \text{ Log } \Lambda}\ \text{(s)}$$

où A est le numéro atomique des ions, T est en degrés Kelvin, et $m_s = Am_0$, m_0 étant la masse du proton ; on prendra A = 1/1 840 pour les électrons :

$$\text{(21)} \qquad \Lambda = \frac{3\ (KT_s)^{3/2}}{2\ Z^2 e^3\ (\pi n_e)^{1/2}}$$

si bien que Log Λ varie assez peu, et dans beaucoup de situations expérimentales Log $\Lambda \sim 10$.

Le rôle des collisions entre particules de type différent (électrons et ions par exemple) n'intervient que sur des échelles de temps plus longues à cause des différences de masse : les fonctions de distribution des électrons et des ions tendent d'abord vers deux distributions maxwelliennes de températures T_e et T_i souvent fort différentes. Ensuite, ces deux températures tendent vers une valeur d'équilibre commune T, température du plasma, avec un temps caractéristique t_{eq} dit temps d'équipartition tel que :

$$(22) \qquad \frac{dT_s}{dt} = \frac{T_e - T_i}{t_{eq}}$$

$$(23) \qquad t_{eq} = \frac{3\, m_e m_i K^{3/2}}{8\,(2\,\pi)^{1/2}\, n_e Z^2 e^4 \,\text{Log}\,\Lambda}\left(\frac{T_e}{m_e} + \frac{T_i}{m_i}\right)^{3/2}$$

En présence d'une force extérieure dérivant d'un potentiel scalaire U (r), la fonction de distribution à l'équilibre devient :

$$(24) \qquad f_{eq}\,(r, v) = f_{\text{Max}}\,(v) \exp\left(-\frac{U\,(r)}{KT}\right)$$

Distance de Debye

Potentiel créé par une particule test dans un plasma. Dans le vide, une charge Q produit un potentiel :

$$(25) \qquad V\,(r) = \frac{Q}{4\,\pi\varepsilon_0}\,\frac{1}{r}$$

Introduite dans un plasma homogène infini, de densité n et de température T, cette charge-test produit un potentiel scalaire $U\,(r) = e\,V(r)$ qui modifie l'équilibre initial et conduit à un nouvel équilibre décrit par **(24)**. On peut donc calculer les nouvelles répartitions spatiales de densités $n_e\,(r)$ et $n_i\,(r)$:

$$(26) \qquad n_i\,(r) = n_0 \exp\left(-\frac{Ze\,V(r)}{KT}\right)$$

$$n_e\,(r) = n_0 \exp\left(+\frac{e\,V(r)}{KT}\right)$$

Ces expressions des densités électronique et ionique portées dans :

$$(27) \qquad \text{div}\,E = \frac{1}{\varepsilon_0}\,(n_i Ze - n_e e) \qquad \text{(équation de Poisson)}$$

conduisent à une équation différentielle en V (r). Dans la mesure où l'introduction de la charge Q n'est qu'une faible perturbation, c'est-à-dire si $eV \ll KT$, cette équation différentielle peut être linéarisée et s'écrit :

$$(28) \qquad V\,(r) - \frac{1}{\lambda_d^2}\,V\,(r) = 0 \quad \text{où} \quad \lambda_d = \left(\frac{\varepsilon_0 KT}{n_0 e^2\,(Z+1)}\right)^{1/2}$$

est la distance de Debye initialement introduite dans la théorie des électrolytes. Le potentiel créé par la charge Q dans un plasma est la solution de l'équation **(28)** :

$$(29) \qquad V\,(r) = \frac{Q}{4\,\pi\varepsilon_0}\,\frac{1}{r}\,\exp\left(-\frac{r}{\lambda_d}\right)$$

C'est donc le potentiel créé dans le vide auquel s'ajoute un effet d'écran. A courte distance, c'est-à-dire à l'intérieur de la sphère centrée sur la charge et de rayon égal à la distance de Debye, le potentiel est pratiquement le même que dans le vide. Au contraire, à grande distance, le potentiel est réduit par un facteur exponentiel qui supprime pratiquement l'influence de la charge Q.

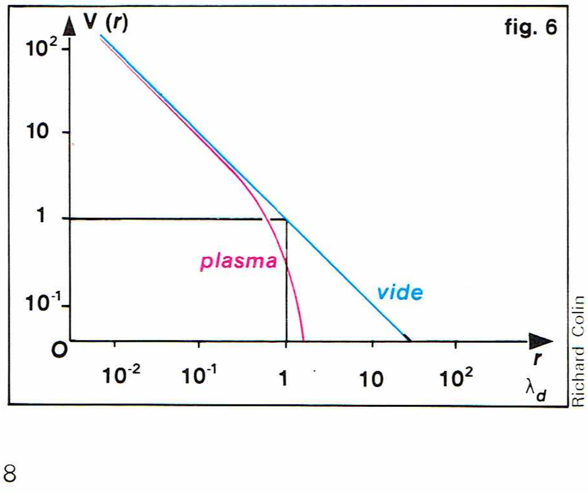

▶ *Figure 6; distance de Debye : potentiel électrique créé par une charge dans un plasma et dans le vide. A des distances faibles devant la distance de Debye, ces potentiels sont identiques; pour de grandes distances, au contraire, le plasma produit un effet d'écran qui diminue sensiblement l'effet de charge.*

Remarquons que la condition de faible perturbation $eV \ll KT$ entraîne que l'énergie potentielle créée par le défaut de neutralité électrique dans la sphère de Debye est petite devant l'énergie thermique des particules qui y sont contenues. La théorie cinétique que nous avons utilisée ci-dessus suppose justement que le nombre des particules dans la sphère de Debye est grand, ce qui exprime la même inégalité :

$$(30) \qquad n\lambda_d^3 \gg 1$$

Équations macroscopiques

La description statistique des plasmas à partir de grandeurs microscopiques, en particulier de la fonction de distribution en énergie des particules, est indispensable pour rendre compte des phénomènes d'interactions où les particules jouent des rôles distincts suivant leur vitesse, comme nous en verrons un exemple dans l'effet Landau. Par contre, de nombreuses propriétés des plasmas pourront être décrites à partir d'une représentation moins fine, dite macroscopique, ne mettant en jeu que des grandeurs moyennes dans le plasma.

Grandeurs macroscopiques

Ce sont les moments successifs de la fonction de distribution en vitesse des particules : densité n, vitesse moyenne $\bar{v}_0$, tenseur de pression $\bar{\bar{\psi}}$, tenseur flux de chaleur $\bar{\bar{\bar{Q}}}$, etc.

$$(31) \qquad n = \int f d^3v$$

$$(32) \qquad n\bar{v}_0 = \int \bar{v} f d^3v$$

$$(33) \qquad \bar{\bar{\psi}} = m \int \overline{(v - v_0)}\;\overline{(v - v_0)}\, f d^3v$$

où $\overline{(v - v_0)}\;\overline{(v - v_0)}$ représente un tenseur du second ordre.

$$(34) \qquad \bar{\bar{\bar{Q}}} = m \int \overline{(v - v_0)}\;\overline{(v - v_0)}\;\overline{(v - v_0)}\, f d^3v$$

tenseur du troisième ordre dont la composante Q_{xyz} s'écrit :

$$Q_{xyz} = m \int (v - v_0)_x\,(v - v_0)_y\,(v - v_0)_z\, f d^3v$$

etc.

Équations macroscopiques

Ce sont les équations d'évolution des moments d'ordre n. Ces équations se déduisent de l'équation d'évolution de la fonction de distribution par multiplication de chaque terme de celle-ci par v^n ou par le tenseur d'ordre n : $\overline{(v - v_0)}\;\overline{(v - v_0)} \ldots \overline{(v - v_0)}$, et en intégrant ensuite sur l'ensemble des vitesses.

Les premières équations obtenues sont ainsi :

— L'équation de transfert du nombre des particules :

$$(35) \qquad \frac{\partial n}{\partial t} + \text{div}\cdot n v_0 = 0$$

qui traduit l'absence de créations et de pertes de particules. Dans certains cas, on pourra introduire dans le second membre un terme de source, terme de production de plasma pour tenir compte d'un phénomène d'ionisation, par exemple. Ce terme de source pourra être un terme de pertes de particules en cas de recombinaison entre particules chargées, par exemple.

— La deuxième équation concerne la conservation de la quantité de mouvement :

$$(36) \qquad nm\left(\frac{\partial}{\partial t} + \bar{v}_0\cdot\nabla\right)\bar{v}_0 = n\,(\bar{X}_{\text{ext}} + \bar{X}_{\text{ch}}) - \nabla\bar{\bar{\psi}} + m\int v\,\frac{\partial f}{\partial t_{\text{coll}}}\,d^3v$$

les forces $\bar{X}_{\text{ext}}$ et $\bar{X}_{\text{ch}}$ étant le plus souvent réduites à la force de Lorentz appliquée à une particule chargée dans des champs extérieurs et de charge d'espace.

D'autres équations analogues décriront l'évolution de la pression cinétique, du flux de chaleur, etc., suivant les moments successifs de la fonction de distribution $f\,(v)$. Cette méthode conduit en fait à remplacer une équation d'évolution de la fonction de distribution par un ensemble infini d'équations d'évolution de ses moments successifs. Pratiquement, il faudra fermer le système d'équations,

c'est-à-dire le limiter à un nombre fini d'équations en négligeant les termes d'ordre supérieur à un ordre donné, dépendant de l'approximation choisie.

Plasmas froids

On néglige l'agitation thermique : $\bar{\bar{\psi}} = 0$. Cette approximation est, par exemple, utilisée pour décrire, comme nous le verrons, la propagation d'une onde de vitesse de phase bien supérieure à la vitesse thermique des particules. Le comportement du plasma est alors décrit à l'aide des seules équations **(35)** et **(36)**. Dans cette dernière équation, le membre de droite est réduit aux forces extérieures et de charges d'espace.

Écoulements adiabatiques

On suppose : $\nabla \cdot \bar{\bar{\bar{Q}}} = 0$

ce qui permet de se limiter aux trois premières équations. On peut encore simplifier cette hypothèse en supposant la pression scalaire,

(38) $$\nabla \cdot \bar{\bar{\psi}} = \gamma \frac{KT}{m} \nabla n$$

ou en représentant le tenseur de pression par un tenseur diagonal lié, par exemple, à une anisotropie en présence de champ magnétique.

Oscillations de plasma

Les équations ci-dessus permettent par exemple de décrire les oscillations de plasma de haute fréquence en l'absence de champ magnétique ou parallèlement à un champ magnétique. Les ions sont alors supposés immobiles en raison de leur masse élevée, et ils ne joueront qu'un rôle de neutralisation à l'ordre 0 par rapport à un infiniment petit du premier ordre du mouvement : amplitude d'une perturbation de densité électronique, de vitesse moyenne du fluide électronique, ou champ électrique associé à cette perturbation, par exemple. On ne retiendra alors des équations ci-dessus que l'équation de conservation du nombre des particules **(35)** et l'équation de transfert de la quantité de mouvement **(36)** avec l'hypothèse d'adiabaticité **(38)** où γ, coefficient de compression adiabatique, sera pris égal à 3, correspondant à un mouvement unidimensionnel.

Ces équations conduisent après linéarisation par rapport à la perturbation de densité électronique à :

(39) $$D(k, \omega) \cdot E(k, \omega) = 0$$

où $E(k, \omega)$ est la transformée de Fourier sur l'espace et dans le temps du champ électrique $E(x, t)$, k étant le nombre d'onde et ω la pulsation associés à cette transformation. L'équation **(39)** n'a de solution non triviale, c'est-à-dire :

(40) $$E(k, \omega) \neq 0, \text{ que si } D(k, \omega) = 0$$

(41) $$\text{avec } D(k, \omega) = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2 - k^2 V_e^2}$$

où $V_e = (\gamma KT/m)^{1/2}$ est la vitesse « thermique » des électrons, $\omega_{pe} = (ne^2/\varepsilon_0 m_e)^{1/2}$ est la pulsation plasma.

L'équation **(40)** est la relation de dispersion :

(42) $$\omega^2 = \omega_{pe}^2 + k^2 V_e^2$$

Cette relation apparait comme une condition de compatibilité des équations utilisées **(35)**, **(36)** et de l'équation de Poisson ; c'est donc la relation que doivent satisfaire ω et k pour obtenir une propagation. La valeur prise par $E(k, \omega)$ est alors quelconque, si bien que le champ électrique $E(x, t)$ s'écrit :

(43) $$E(x, t) = E_1 \exp i(kx - \omega t)$$

L'amplitude E_1 est quelconque, mais la perturbation de densité associée doit être beaucoup plus petite que la densité non perturbée pour satisfaire à la condition de linéarisation.

L'équation de dispersion **(42)** montre que, pour $\omega < \omega_{pe}$, $k^2 < 0$, c'est-à-dire qu'il n'existe pas de valeur réelle de k solution de l'équation de dispersion : l'onde est alors évanescente. Il n'y a donc pas propagation en dessous de la fréquence plasma.

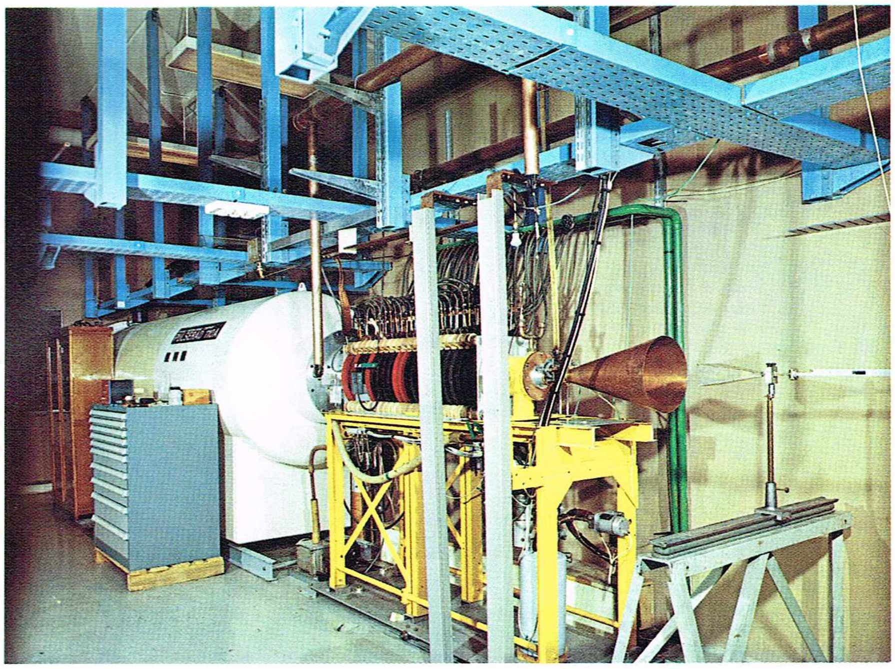

Pierre Joliclercq - École polytechnique

▲ *Laser à électrons utilisant le rayonnement d'électrons relativistes dans un champ magnétique. Ce type de laser produit des puissances de l'ordre du gigawatt (10^9 watts) en ondes centimétriques.*

En fait, la relation de dispersion **(42)** n'est valable que lorsque la vitesse de phase ω/k est très supérieure à la vitesse thermique V_e des particules et la propagation décrite ci-dessus n'existe que pour des fréquences supérieures mais voisines de la fréquence plasma. Pour des fréquences plus élevées, nous verrons qu'une interaction existe entre l'onde et certaines particules, ce qui amortit très rapidement les perturbations initiales.

Description macroscopique globale du plasma

Les équations ci-dessus portent sur des grandeurs moyennes associées à chaque type de particules. Dans un plasma composé de plusieurs types distincts de particules, on pourra introduire des grandeurs moyennes globales, tenant compte des densités partielles de chacun des types de particules, et on pourra déduire leurs équations d'évolutions à partir de combinaisons linéaires des équations d'évolutions des grandeurs associées à chaque type.

fig. 7

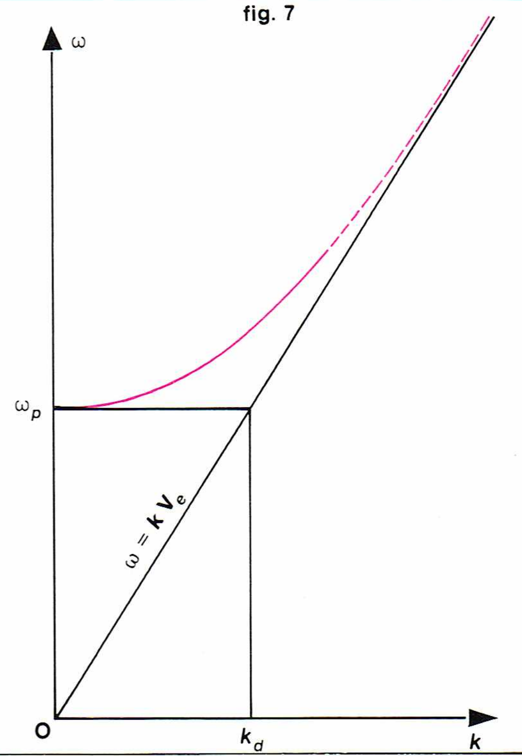

Richard Colin

◄ *Figure 7 : oscillations d'un plasma chaud. Une oscillation de charge d'espace peut se propager dans un plasma chaud infini pour des fréquences supérieures à la fréquence plasma. Pour des fréquences supérieures à quelques fréquences plasma, l'onde est amortie par effet Landau.*

▶ A gauche, figure 8 : équilibre d'un plasma dans un champ magnétique. Un plasma présentant un gradient de densité peut être confiné dans un champ magnétique par l'existence de courants de surface qui donnent une force de Laplace $\vec{j} \wedge \vec{B}$ qui équilibre le gradient de pression. L'existence de ce courant est liée au mouvement de rotation des charges dans le champ magnétique. En un point donné, il existe un courant résultant parce que les charges sont plus nombreuses du côté des fortes densités que de l'autre. A droite, figure 9 : diamagnétisme du plasma. La pression cinétique P_c du plasma est équilibrée par la pression magnétique P_m, la pression totale restant constante. A l'intérieur du plasma, l'induction magnétique est donc plus faible qu'à l'extérieur.

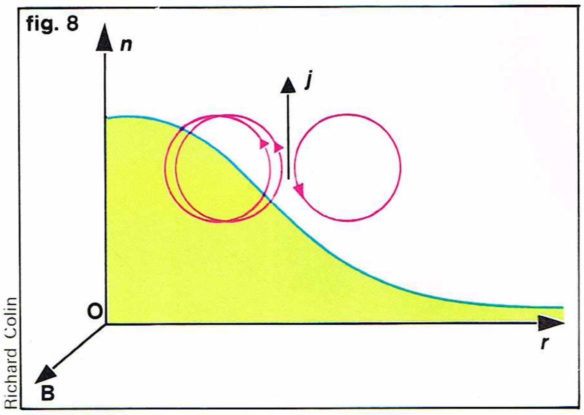

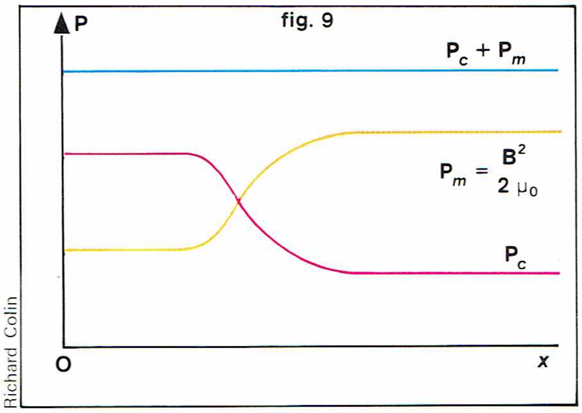

Grandeurs moyennes dans le plasma

On introduit ainsi les grandeurs moyennes suivantes :

(44) densité de masse $\rho = \Sigma_s n_s m_s$

(45) densité de charge $\sigma = \Sigma_s n_s q_s$

(46) densité de courant $\vec{j} = \Sigma_s n_s q_s \vec{v_s}$

(47) vitesse moyenne $\vec{v} = \Sigma_s n_s m_s \vec{v_s}/\rho = \vec{j}/\rho$

(48) pression cinétique totale $\overline{\overline{P}} = \Sigma_s \overline{\overline{\psi}}_s$

où les sommes sur s sont étendues à toutes les espèces de particules : électrons, ions positifs de diverses masses, ions négatifs éventuellement.

Équations macroscopiques globales dans le plasma

Les équations de conservation du nombre des particules conduisent alors à :

(49) $$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}\,(\rho\vec{v}) = 0$$

(50) $$\frac{\partial \sigma}{\partial t} + \text{div}\,\vec{j} = 0$$

qui expriment la conservation de la masse et de la charge.

Les équations de transfert de la quantité de mouvement conduisent, en négligeant les termes quadratiques en $\vec{v}$ et $\vec{j}$ ainsi que leurs dérivées, à :

(51) $$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \vec{j} \wedge \vec{B} - \vec{\nabla} P$$

où la pression cinétique totale P est supposée scalaire. C'est l'équation habituelle de l'hydrodynamique, ou plus précisément de la magnétohydrodynamique. On obtient de même :

(52) $$\frac{m_e}{q_e}\frac{\partial \vec{j}}{\partial t} = n_e q_e\,(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B} - \eta\vec{j}) + \vec{j} \wedge \vec{B} - \vec{\nabla} P_e$$

qui, dans le cas où l'on peut négliger $\partial j/\partial t$, B et ∇P_e, se réduit à :

(53) $$\vec{E} = \eta\vec{j}$$

η étant la résistivité du plasma, l'équation **(53)** est simplement la loi d'Ohm, si bien que l'équation **(52)** est la loi d'Ohm généralisée.

Diamagnétisme du plasma

Soit un plasma en équilibre dans un champ magnétique. Alors $\partial v/\partial t = 0$, et l'équation **(51)** conduit à :

(54) $$\vec{\nabla} P = \vec{j} \wedge \vec{B}$$

En exprimant j en fonction de B à l'aide des équations de Maxwell, cette équation conduit à :

(55) $$\vec{\nabla} P = \frac{1}{\mu_0}\vec{B} \cdot \nabla B - \vec{\nabla}\,(B^2/2\,\mu_0)$$

L'équilibre d'un plasma confiné dans un champ magnétique uniforme est alors décrit par :

(56) $$P + B^2/2\,\mu_0 = \text{constante}$$

Le terme $B^2/2\,\mu_0$ apparaît alors comme une pression magnétique qui s'ajoute à la pression cinétique du plasma, la pression totale restant constante à l'intérieur et à l'extérieur du plasma. En d'autres termes, c'est la différence des pressions magnétiques à l'extérieur et à l'intérieur du plasma qui équilibre la pression cinétique du plasma. Le plasma se comporte donc comme un corps diamagnétique, l'intensité du champ magnétique à l'intérieur du plasma étant inférieure à l'intensité de ce champ à l'extérieur.

Stabilité du confinement d'un plasma

On peut de la même façon utiliser les équations macroscopiques globales pour étudier la stabilité de l'équilibre d'un plasma dans un champ magnétique : les équations ci-dessus, qui traduisent le diamagnétisme du plasma, montrent que, placé dans un champ hétérogène, le plasma aura tendance à se déplacer vers les régions de champ magnétique minimal ou décroissant. Si le plasma est en équilibre dans une région où la pression magnétique est minimale, cet équilibre est stable. On peut s'en convaincre en observant que, dans un déplacement autour de cette position d'équilibre, le plasma rencontre une pression magnétique qui augmente, et qui tend donc à le ramener dans sa position d'équilibre. C'est le cas des géométries dites en « berlingot » ou en « balle de tennis », qui présentent des pressions magnétiques croissantes dans toutes les directions autour d'un point de l'espace. C'est aussi le cas des géométries toriques, où l'existence d'un courant sur des surfaces isobares assure une pression magnétique croissante à partir d'une ligne fermée appelée axe magnétique du système. Ces configurations sont mises à profit dans les machines destinées à confiner les plasmas en vue des recherches sur la fusion thermonucléaire contrôlée.

Toutes les géométries ne présentent pas cette stabilité dans le confinement d'un plasma; par exemple, on peut vérifier facilement que la pression magnétique diminue lorsqu'on s'éloigne du centre d'une bouteille magnétique dans un plan perpendiculaire à l'axe. L'instabilité prédite par la théorie magnétohydrodynamique ci-dessus s'observe effectivement dans cette géométrie.

Propagation des ondes dans les plasmas froids

La propagation des ondes dans les plasmas froids peut être décrite à partir des équations de Maxwell écrites dans le vide auquel on ajoute une densité de charge ρ et un vecteur densité de courant $\vec{j}$ ainsi que des charges et courants extérieurs possibles. Une autre présentation équivalente consiste à introduire un tenseur diélectrique qui

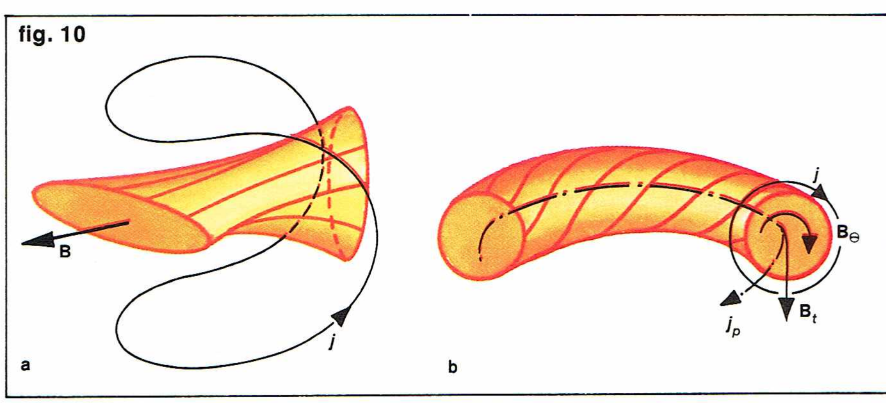

remplace la constante diélectrique du vide, conduisant à un nouveau vecteur déplacement $\bar{D}$ lié au champ électrique par :

$$\bar{D} = \bar{\bar{\varepsilon}}\,\bar{E} \qquad (57)$$

En fait, une description complète exigerait l'introduction d'une perméabilité magnétique μ distincte de celle du vide à cause du diamagnétisme du plasma. Cet effet est lié, comme nous l'avons vu, à la pression cinétique, et donc à l'énergie thermique des particules, si bien que nous le négligerons pour les plasmas froids.

Les équations de Maxwell s'écrivent donc comme dans un diélectrique :

$$\text{(58) (59)} \quad \overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad \text{div}\,\vec{D} = 0 + (\rho_{\text{ext}})$$

$$\text{(60) (61)} \quad \overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + (\vec{j}_{\text{ext}}) \qquad \text{div}\,\vec{B} = 0$$

avec les relations :

$$\text{(62)} \quad \vec{B} = \mu_0 \vec{H} \qquad \text{et (57).}$$

Le milieu diélectrique ainsi défini est caractérisé par son tenseur diélectrique obtenu à l'aide d'une loi d'Ohm généralisée dans le milieu, liant le vecteur densité de courant au champ électrique, comme nous l'avons vu au chapitre précédent. Nous nous limiterons dans la suite au cas simple où cette loi d'Ohm s'écrit :

$$\vec{j} = \bar{\bar{\sigma}}\vec{E} \qquad (63)$$

Cette équation est équivalente à l'équation **(53)** ; $\bar{\bar{\sigma}}$ est le tenseur de conductivité du milieu. Tenseurs diélectriques et de conductivité sont liés par la relation :

$$\bar{\bar{\chi}} = \frac{\bar{\bar{\varepsilon}}}{\varepsilon_0} = \bar{\bar{1}} - \frac{\bar{\bar{\sigma}}}{i\omega\varepsilon_0}$$

La résolution du système d'équations différentielles obtenu se fait simplement en observant la linéarité de ces équations et l'absence des coordonnées d'espace et de temps. On pourra donc utiliser des transformées de Fourier $A(k, \omega)$ sur l'espace et sur le temps des fonctions $A(r, t)$ qui apparaissent dans ces équations. Le vecteur d'onde k et la fréquence ω auront donc des coordonnées réelles. La résolution du système d'équations différentielles est ainsi ramenée à celle d'un système d'équations algébriques linéaires et homogènes de n équations à n inconnues. La condition de compatibilité entre ces équations fournira, comme nous l'avons vu pour les oscillations de plasma chaud, une relation entre k et ω appelée relation de dispersion.

En introduisant le vecteur indice optique N,

$$\vec{N} = c\vec{k}/\omega \qquad (64)$$

où

$$c = (\mu_0\varepsilon_0)^{-1/2} \qquad (65)$$

est la vitesse de la lumière dans le vide, cette relation devient :

$$D(k, \omega) = |N_\alpha N_\beta - N^2\delta_{\alpha\beta} + \chi_{\alpha\beta}| = 0 \qquad (66)$$

Si θ est l'angle que fait le vecteur d'onde k avec la direction du champ magnétique B, l'équation **(66)** donne la relation de dispersion explicite pour une propagation dans une direction déterminée dès que l'on a précisé le tenseur diélectrique réduit χ dans le modèle de plasma froid

$$\bar{\bar{\chi}} = \begin{pmatrix} \chi_1 & -i\chi_2 & 0 \\ i\chi_2 & \chi_1 & 0 \\ 0 & 0 & \chi_3 \end{pmatrix} \qquad (67)$$

où

$$\chi_1 = 1 + \Sigma_s \frac{\omega_{ps}{}^2}{\Omega_s^2 - \omega^2} \qquad (68)$$

$$\chi_2 = \Sigma_s \frac{\Omega_s \omega_{ps}{}^2}{\omega\,(\Omega_s^2 - \omega^2)}$$

$$\chi_3 = 1 - \Sigma_s \frac{\omega_{ps}{}^2}{\omega^2}$$

$s = e$, i pour les électrons et les ions respectivement, Ω_s est la fréquence cyclotron des particules de type s donnée par l'équation **(3)**, ω_{ps} est leur fréquence plasma :

$$\omega_{ps} = (n_s q_s^2/\varepsilon_0 m_s)^{1/2} \qquad (69)$$

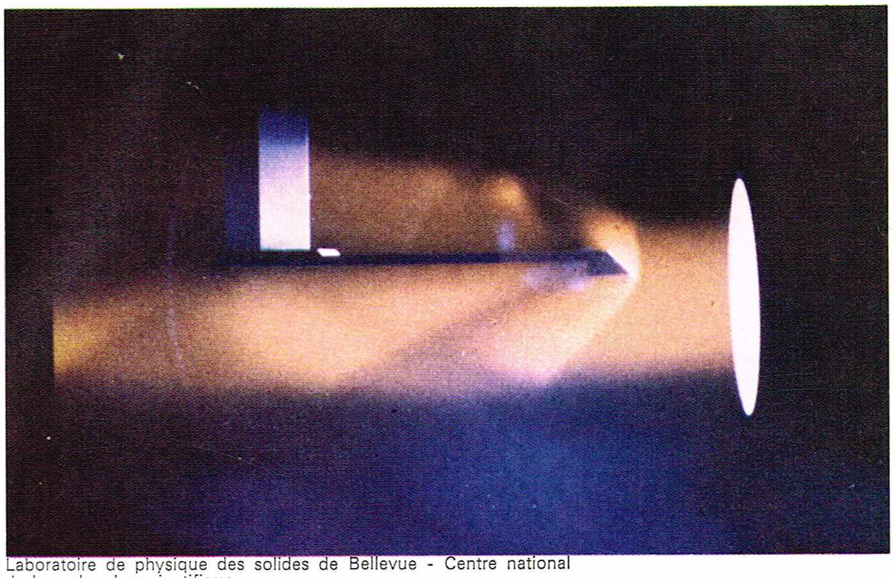

Laboratoire de physique des solides de Bellevue - Centre national de la recherche scientifique

▲ ***Jet de plasma d'azote sur une plaque plane métallique. Étude de la recombinaison catalytique de l'azote sur la paroi.***

Pour un angle de propagation θ quelconque, la relation de dispersion ci-dessus conduit à une équation du second degré en N^2 :

$$AN^4 - BN^2 + C = 0 \qquad (70)$$

où :

$$\text{(71)} \quad \begin{cases} A = \chi_1 \sin^2\theta + \chi_3 \cos^2\theta \\ B = (\chi_1^2 - \chi_2^2)\sin^2\theta + \chi_1\chi_3\,(1 + \cos^2\theta) \\ C = \chi_3\,(\chi_1^2 - \chi_2^2) \end{cases}$$

dont le discriminant D est toujours positif ou nul. Il y a donc toujours deux solutions en N^2 :

$$N^2 = (B \pm D^{1/2})/2\,A \qquad (72)$$

Pour un angle θ donné, il y a donc en général deux modes de propagation distincts. On remarquera que deux valeurs opposées de N correspondent à deux ondes se propageant dans la même direction, mais en sens inverse, si bien qu'elles ne sont pas distinctes en nature. On résout aussi très souvent la relation de dispersion en θ, ce qui conduit à la relation :

$$\text{tg}^2\,\theta = -\frac{\chi_3\,[(N^2 - \chi_1)^2 - \chi_2^2]}{(\chi_1 N^2 - \chi_1^2\chi_2^2)\;(N^2 - \chi_3)} \qquad (73)$$

Pour préciser les propriétés de propagation, nous allons examiner quelques cas particuliers importants.

Propagation parallèle au champ magnétique

Si l'on suppose $\theta = 0$ dans l'équation **(73)**, on peut avoir :

Oscillation de plasma

$\chi_3 = 0$ conduit à la relation de dispersion :

$$\omega^2 = \omega_{p0}^2 = \omega_{pi}^2 + \omega_{pe}^2$$

C'est l'oscillation de plasma que nous avons vue précédemment. Remarquons qu'ici l'hypothèse de plasma froid entraîne une oscillation à fréquence constante, la fréquence plasma, quel que soit le nombre d'onde k. En fait, l'approximation utilisée ici n'est valable que pour des nombres d'onde k inférieurs au nombre d'onde de Debye k_d inverse de la distance de Debye donnée par la relation **(28)**.

On remarquera en passant la relation :

$$\lambda_d \omega_p = V_{\text{th}} \qquad (74)$$

entre la distance de Debye, la fréquence plasma et la vitesse thermique des électrons.

Modes cyclotroniques

Pour une propagation parallèle au champ magnétique, on peut aussi avoir :

$$(N^2 - \chi_1)^2 = \chi_2^2 \qquad (75)$$

ce qui conduit à deux modes purement électromagnétiques polarisés circulairement. Pour l'un de ces modes, appelé *mode droit*, le champ électrique E tourne dans le même sens que les électrons dans le champ magnétique :

$$N_+^2 = 1 - \frac{\omega_{p0}^2}{(\omega - \omega_{ce})\,(\omega - \omega_{ci})} \qquad (76)$$

◀ ***Page ci-contre, figure 10 ; puits magnétique : région de l'espace où la pression magnétique passe par un minimum.*** (a) ***Minimum en un point isolé : le « berlingot ». Les lignes de champ magnétique ne sont pas de révolution mais s'appuient au contraire sur deux faces croisées. Ce champ peut être créé par une bobine dite « en balle de tennis ».*** (b) ***Minimum autour d'une ligne fermée : les lignes de forces du champ s'enroulent autour de tores concentriques autour d'un grand cercle. Cette configuration peut être produite par un bobinage qui produit le champ principal B_t, tangent à ce cercle et par un courant circulant le long de ce cercle, et produisant un champ poloïdal B_θ. C'est la géométrie utilisée dans les machines du type Tokomak pour les recherches concernant la fusion thermonucléaire contrôlée.***

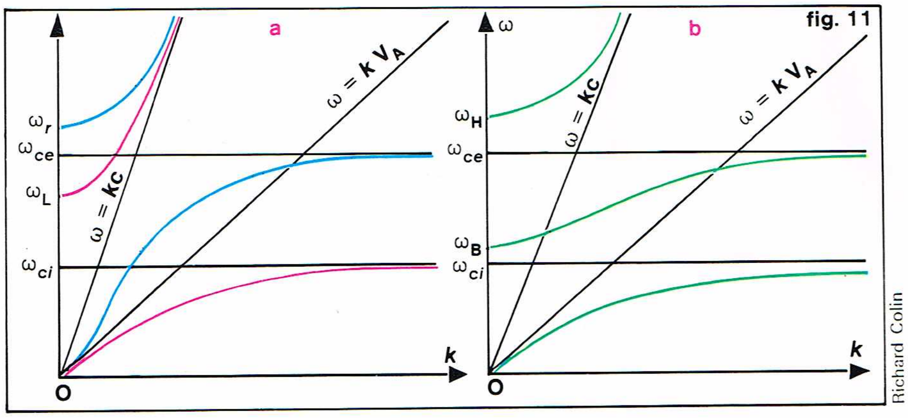

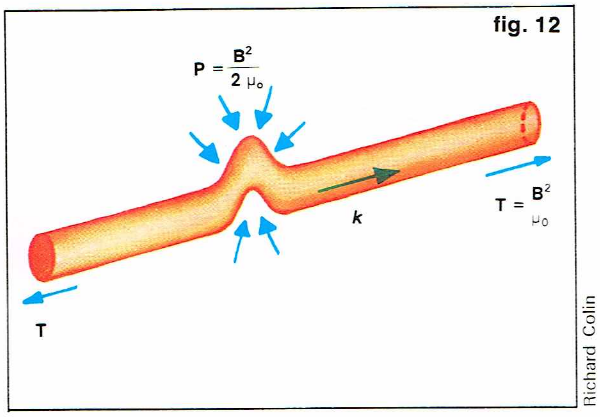

▲ *A gauche, figure 11 : courbes de dispersion des ondes dans un plasma froid infini.* (a) *Ondes cyclotroniques se propageant dans une direction parallèle au champ magnétique. Les deux modes dits droit (électronique) et gauche (ionique) présentent des résonances aux fréquences cyclotron respectives et une zone de coupure au-dessus de cette résonance. Ces deux modes s'identifient en basse fréquence avec l'onde d'Alfven.* (b) *Mode extraordinaire se propageant dans une direction perpendiculaire au champ magnétique. En plus du mode ordinaire qui présente une coupure à la fréquence plasma, le mode extraordinaire présente deux résonances aux fréquences cyclotron électronique et ionique, ainsi que deux bandes de coupure au-dessus de ces résonances. A droite, figure 12 : onde d'Alfven. En basse fréquence, cette onde s'apparente aux vibrations d'une corde de masse volumique $n\ m_i$ soumise à une tension B^2/μ_0. Le plasma est en quelque sorte gelé dans le champ magnétique et suit les déformations des lignes de champ. On retrouve ainsi l'image d'une corde vibrante.*

Ce mode présente une résonance quand la fréquence tend vers la fréquence cyclotronique des électrons. L'indice optique tend alors à devenir infini. Physiquement, cette résonance correspond au fait que, le champ électrique tournant dans le même sens que les électrons et à la même vitesse, les électrons sont soumis dans leur référentiel à un champ électrique constant qui les accélère : l'onde échange alors son énergie avec les électrons, et la description macroscopique utilisée ci-dessus est insuffisante ; c'est l'absorption cyclotron qui constitue un moyen efficace de chauffage d'un plasma.

Ce mode présente également une coupure, c'est-à-dire que l'indice optique s'annule pour la fréquence de coupure :

(77) $$\omega_r = (\sqrt{\omega_{ce}^2 + 4\ \omega_{pe}^2} + \omega_{ce})/2$$

Il existe un mode cyclotronique ionique ou mode gauche où le vecteur champ électrique E tourne dans le même sens que les ions. Ce mode est parfaitement semblable au précédent, il présente de même une résonance et une coupure, les rôles des ions et des électrons étant simplement inversés.

Caractères électrostatiques et électromagnétiques d'une onde

Les différents modes rencontrés ci-dessus sont en fait de natures très différentes : l'oscillation de plasma est un mode que l'on peut qualifier d'électrostatique pur. En effet, on peut le décrire en supposant dans les équations de Maxwell que le vecteur champ magnétique B associé à l'onde est nul. Les équations de Maxwell se réduisent alors aux deux équations portant sur le champ électrique et le vecteur déplacement :

(78) $$\overrightarrow{\text{rot}}\ \vec{E} = 0 \quad \text{et} \quad \text{div}\ \vec{D} = 0$$

Dans le vide, ces deux relations entraîneraient que le champ électrique est nul, et donc l'absence de tout mode possible de propagation. Dans un plasma, il n'en est pas de même à cause de la charge d'espace. L'équation $\overrightarrow{\text{rot}}\ \vec{E} = 0$ entraîne simplement que le champ électrique est parallèle au vecteur nombre d'onde *k*.

Au contraire, les modes cyclotroniques présentent un caractère électromagnétique pur, c'est-à-dire que l'on retrouve, comme pour l'onde électromagnétique classique dans le vide, des vecteurs nombre d'onde, champ électrique et champ magnétique formant un trièdre trirectangle.

En général, une onde se propageant dans un plasma n'aura pas un caractère purement électrostatique ou électromagnétique. Ce caractère variera suivant les modes et suivant les fréquences pour un mode donné. On pourra s'en faire une idée exacte en considérant le rapport des composantes du champ électrique dans les directions parallèles et perpendiculaires au nombre d'onde.

Onde d'Alfven

● Les deux modes cyclotroniques se propageant parallèlement au champ magnétique que nous avons décrits ci-dessus tendent à devenir un mode unique en basse fréquence, c'est-à-dire lorsque la fréquence de l'onde est négligeable devant la fréquence cyclotron des ions les plus lourds. La vitesse de phase devient indépendante de la fréquence :

(79) $$V_A = B/(\mu_0 n m_i)^{1/2}$$

Cette vitesse, appelée vitesse d'Alfven, correspond à la vitesse de phase d'une onde transversale dans un milieu matériel de masse volumique nm_i soumis à une tension B^2/μ_0 perpendiculaire à la direction du déplacement de matière. Cette onde est donc tout à fait analogue à celle qui se propage dans une corde de violon, par exemple. Les équations macroscopiques décrites précédemment montrent en effet que pour des déplacements lents des lignes de champ magnétique, le plasma contenu dans un tube de force du champ se déplace avec lui et constitue ainsi un véritable milieu matériel analogue à une corde vibrante, ce qui explique l'analogie ci-dessus.

Propagation perpendiculaire au champ magnétique

Les divers modes possibles sont obtenus en supposant $\theta = 90°$ dans l'équation **(73)**.

Mode ordinaire

Une première solution $N^2 = \chi_3$ conduit à la relation de dispersion :

(80) $$\omega^2 = \omega_{p0}^2 + k^2c^2$$

qui présente une coupure à la fréquence plasma. Ce mode ne dépend pas du champ magnétique. C'est un mode purement électromagnétique, polarisé linéairement. Pour des fréquences très supérieures à la fréquence plasma, on retrouve la propagation dans le vide. La coupure à la fréquence plasma est un phénomène qui nous est familier : c'est ce qui explique la réflexion d'une onde électromagnétique sur un conducteur. En effet, un solide conducteur métallique, par exemple, a une densité de l'ordre de quelque 10^{22} cm^{-3} correspondant à des fréquences plasma électroniques de quelque 10^{15} Hz. Les longueurs d'onde supérieures à quelques dixièmes de micron, et en particulier toute la lumière émise dans le spectre visible, seront réfléchies. C'est également cette coupure à la fréquence plasma qui produit la réflexion des ondes radioélectriques sur les couches ionisées de l'ionosphère autour de la Terre.

Mode extraordinaire

Une deuxième solution possible pour une propagation perpendiculaire au champ magnétique est le mode dit extraordinaire par analogie avec l'optique, et dont la relation de dispersion est :

(81) $$N^2 = (\chi_1^2 - \chi_2^2)/\chi_1$$

Ce mode présente également des résonances aux fréquences cyclotrons des ions et des électrons, ainsi que deux coupures à des fréquences supérieures aux deux fréquences cyclotroniques respectivement. Ce mode a une polarisation elliptique. En basse fréquence, ce mode se propage également avec une vitesse indépendante de la fréquence et égale à la vitesse d'Alfven.

Propagation oblique

Pour un angle θ quelconque, on trouvera en général deux modes de propagation qui se déduisent continûment des modes présentés ci-dessus en propagation parallèle ou perpendiculaire au champ magnétique. Ces modes présenteront des coupures possibles à des fréquences qui annulent le terme C de l'équation **(70)**, donc pour des valeurs indépendantes de l'angle θ de propagation, et qui sont donc les fréquences de coupure que nous avons rencontrées ci-dessus. Des résonances se produiront pour des fréquences qui annulent le terme A de l'équation **(70)**,

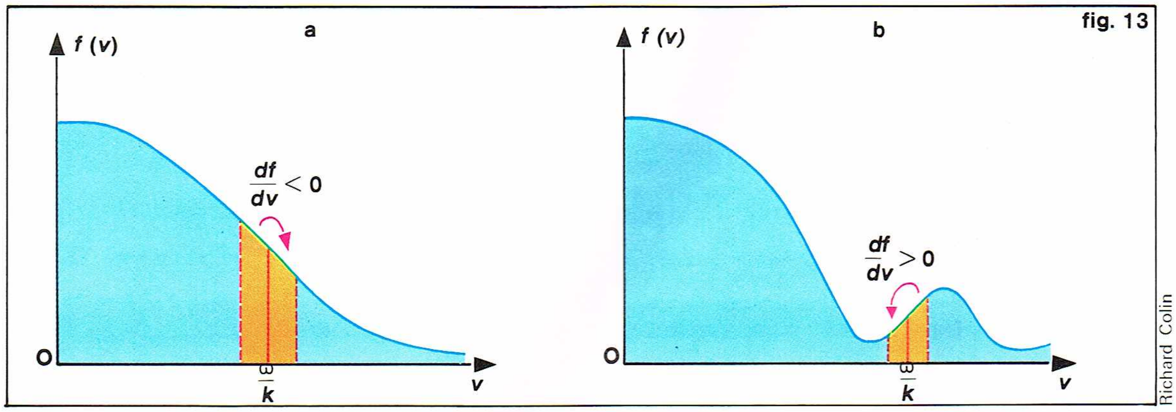

◀ *Figure 13 : effet Landau, amortissement sans collisions. Les particules résonnantes, dont les vitesses sont voisines de la vitesse de phase ω/k, échangent leur énergie avec l'onde. Comme il y a davantage de particules plus lentes que de particules résonnantes rapides, l'onde cède plus d'énergie aux particules lentes qu'elle n'en recueille des rapides, ce qui conduit à un amortissement de l'onde.* (a) *Si la pente de la fonction de distribution est négative pour la valeur de la vitesse de phase, on aboutit à un amortissement.* (b) *Si au contraire il existe localement une pente positive de la fonction de distribution, on aboutit à une instabilité, les particules cédant plus d'énergie à l'onde qu'elles n'en reçoivent.*

et les fréquences correspondantes dépendent cette fois de l'angle de propagation et satisfont :

(82) $$\operatorname{tg}^2 \theta = -\chi_3/\chi_1$$

qui, pour des angles pas trop proches de 90° et des fréquences plasma faibles devant les fréquences cyclotrons correspondantes, conduit à des résonances à $\omega_{ce} \cos\theta$ et $\omega_{ci} \cos\theta$ pour les deux modes associés respectivement à la résonance des électrons et à celle des ions.

La description ci-dessus ne tient compte ni d'effets dissipatifs, ni d'effets liés aux dimensions finies du plasma considéré. On aura donc des amortissements possibles, liés par exemple aux collisions entre particules. De plus, les effets de dimensions finies pourront être importants, en particulier quand les longueurs d'onde deviennent du même ordre de grandeur que les dimensions du plasma.

Enfin nous avons supposé, dans tout ce qui précède, que les particules étaient sans vitesse relative moyenne. Cette hypothèse est très importante, comme nous le verrons plus loin, le mouvement relatif des ions et des électrons entraînant en général une instabilité.

Interaction entre onde et particules : effet Landau

La méthode de résolution des équations différentielles qui régissent les ondes dans les plasmas, telle que nous venons de la décrire, suppose l'existence d'un nombre discret de couples de valeurs de k et de ω possibles, la compatibilité entre ces valeurs prises deux à deux étant la relation de dispersion du mode de propagation cherché. L'existence de ces couples de valeurs en nombre discret n'est pas toujours assurée, en particulier quand il existe dans le plasma des particules de vitesse proche des vitesses de phases des ondes. La description macroscopique ci-dessus, utilisant une fermeture brutale des équations d'évolutions des grandeurs moyennes du plasma, ne permet pas de rendre compte de ces phénomènes. Il faut alors revenir à l'équation d'évolution de la fonction de distribution des particules.

C'est en analysant les oscillations de plasmas que le physicien soviétique Landau a découvert, en 1946, un amortissement des ondes de plasmas électroniques sans collisions, qui joue un rôle primordial en physique des plasmas, et qui porte le nom d'*effet Landau*. Il a fallu ensuite une vingtaine d'années pour que des expériences précises viennent confirmer que ce phénomène, longtemps considéré comme un artifice mathématique sans implication physique sérieuse, était en réalité un phénomène ayant une réalité physique profonde et aujourd'hui bien comprise. L'amortissement très important observé quand la vitesse de phase de l'onde devient de l'ordre de grandeur de la vitesse thermique des particules peut être relié à deux aspects physiques distincts.

D'une part, à cause de la dispersion des vitesses des particules, même sans interaction entre onde et particules, l'onde subirait un amortissement très important par simple mélange de phase. Ainsi, dans des gaz neutres à basse pression où les collisions ne jouent qu'un rôle négligeable, une perturbation de fonction de distribution des particules, produite à un instant donné, ne conduit qu'à une relaxation de cette fonction de distribution et non à une véritable propagation, l'écoulement libre des particules produisant un mélange de phase qui « amortit » les perturbations sans modifier l'énergie moyenne qui y est associée.

Ce phénomène existe aussi dans un plasma, mais, d'autre part, l'onde échange de l'énergie avec les particules dites résonnantes qui ont des vitesses proches de celles de l'onde, accélérant les particules légèrement plus lentes que la vitesse de phase et ralentissant celles qui sont légèrement plus rapides que cette vitesse de phase. La valeur de l'amortissement de Landau rend compte de cet échange d'énergie. Les ondes de plasmas électroniques dans un plasma dont la fonction de distribution $f_0\,(v)$ est connue satisfont à la relation de dispersion :

(83) $$\mathrm{D}\,(k, \omega) = 1 + \frac{\omega_p^2}{k^2}\,\mathrm{P} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{df_0}{dv}\,\frac{dv}{\omega - kv}$$

où P représente la valeur principale de l'intégrale au sens de Cauchy.

Pour une distribution $f_0\,(v)$ quelconque et pour des fréquences supérieures mais voisines de la fréquence plasma, cette relation de dispersion peut s'exprimer par une relation analogue à celle que nous avons rencontrée en **(42)** :

(84) $$\omega^2 = \omega_p^2 + 3\,k^2\,\langle \mathrm{V}^2 \rangle$$

où $\langle \mathrm{V}^2 \rangle$ est la valeur moyenne du carré de la vitesse des particules dans la distribution $f_0\,(v)$. On retrouve donc bien ici cette relation de dispersion, mais la fréquence angulaire doit être considérée comme une valeur complexe dont la partie imaginaire représente le taux d'amortissement :

(85) $$\operatorname{Im} \omega = \frac{\pi}{2}\,\frac{\omega_p^2}{k^2}\left(1 - \frac{d\omega}{dk}\,\frac{k}{\omega}\right)\frac{d}{dv}\,f_0\left(\frac{\omega}{k}\right)$$

L'expression **(84)** montre que la partie imaginaire de la fréquence est proportionnelle à la pente de la fonction

▼ *Le professeur* Lev Landau, *recevant le prix Nobel de physique, en 1962, à Moscou.*

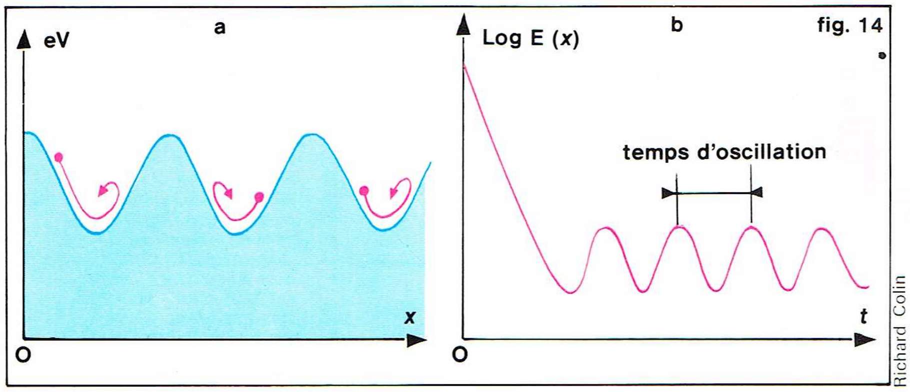

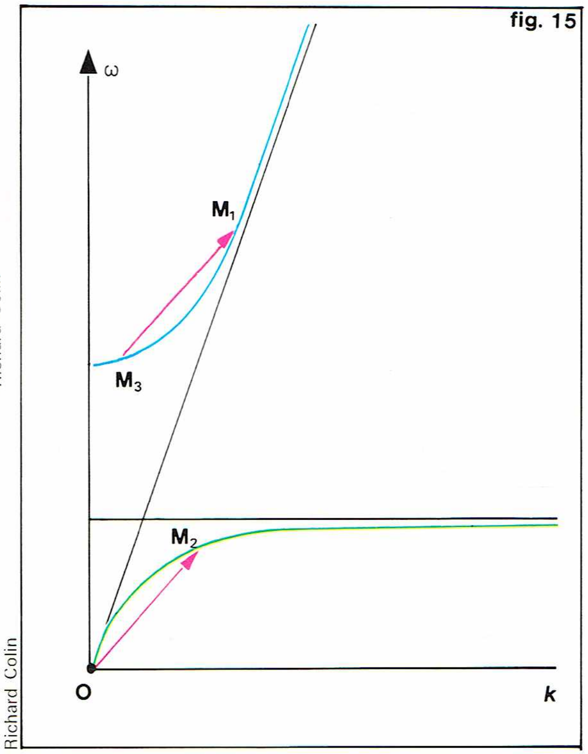

▲▶ Figure 14. (a) *Particules piégées. Dans un référentiel se déplaçant à la vitesse de phase, le potentiel de l'onde est stationnaire. Les particules de faible énergie cinétique dans ce référentiel peuvent être piégées dans le puits de potentiel de l'onde et osciller au fond de ce puits.* (b) *Onde de plasma électronique de grande amplitude. Une onde de plasma électronique subit d'abord un amortissement linéaire : l'effet Landau, mais l'échange d'énergie avec les particules piégées conduit à une oscillation de l'amplitude de l'onde à la fréquence d'oscillation des particules piégées dans le puits de potentiel de l'onde.* *Figure 15 : couplage non linéaire de trois ondes. Si une onde est représentée par un point* M (ω, k), *les règles de sélection conduisent à la relation vectorielle* $\overrightarrow{OM_1} = \overrightarrow{OM_2} + \overrightarrow{OM_3}$. *Un couplage à trois ondes est donc possible pour* $\overrightarrow{M_3M_1} = \overrightarrow{OM_2}$.

de distribution pour la valeur de la vitesse de phase. En particulier, si cette fonction de distribution a une forme voisine de celle d'une distribution de Maxwell, la pente est négative, si bien que l'onde est amortie. Au contraire, si la fonction de distribution des vitesses comporte localement une pente positive au voisinage de la vitesse de phase, par exemple produite par une bosse dans la queue de distribution, le signe de la partie imaginaire de ω est inversé, et l'on a affaire à une amplification de la perturbation initiale : c'est une situation instable.

Ce résultat est général et peut être étendu au cas des ondes dont la vitesse de phase peut être relativement voisine à la fois des vitesses des électrons et de celle des ions. On prendra alors pour fonction de distribution totale :

(86) $$f_0(v) = \Sigma_s\, m_s f_{0s}(v)$$

où $f_{0s}(v)$ est la fonction de distribution non normée des particules de type s, c'est-à-dire dont l'intégrale sur l'espace des vitesses donne la densité partielle dans le plasma. On voit par exemple qu'un plasma d'ions et d'électrons produit une situation instable si la vitesse relative des deux fonctions de distribution, supposées maxwelliennes, est supérieure à la vitesse thermique des électrons. C'est une situation très fréquente dans les machines à plasma dès que l'on induit des courants importants.

Effets non linéaires

Dans tout ce qui précède, nous avons supposé que les propriétés du plasma pouvaient être rendues par des équations linéarisées. Cette description a évidemment ses limites. En particulier, dans le cas de l'amortissement de Landau, l'interaction entre onde et particule modifie la fonction de distribution $f_0(v)$, et il sera nécessaire d'en tenir compte dans la description des propriétés du plasma sur des échelles de temps assez longues. Ainsi, en présence d'une instabilité, la situation évoluera au début sous la forme d'une croissance exponentielle des perturbations, mais très rapidement, des phénomènes nouveaux apparaîtront, conduisant d'une part à des mécanismes de saturation, d'autre part à des interactions entre les ondes générées dans le plasma instable, et l'on finira souvent sur un élargissement important du spectre des ondes instables, si bien que l'on aura affaire à une turbulence comportant un spectre continu d'ondes instables dont toutes les composantes sont en interaction.

Nous distinguerons donc, parmi les effets non linéaires, les effets d'ondes de grande amplitude, les couplages entre ondes, enfin les couplages non linéaires entre ondes et particules.

Onde de grande amplitude : piégeage de particules

Dans une onde de grande amplitude se déplaçant à la vitesse de phase ω/k, les particules de vitesse voisine de cette valeur vont interagir avec le potentiel de l'onde. Dans un référentiel se déplaçant à la vitesse de phase, ces particules n'ont que des vitesses très faibles et voient un potentiel périodique spatialement, constant dans le temps ou croissant lentement. L'énergie des particules résonnantes est donc faible, et dès que l'énergie de l'onde sera suffisante, ces particules auront une énergie insuffisante pour sortir du puits de potentiel représenté par les variations spatiales du potentiel de l'onde : les particules sont alors piégées et oscillent dans le puits avec la période T :

(87) $$T = \frac{2\pi}{k}\left(\frac{m}{eV_0}\right)^{1/2}$$

où V_0 est le potentiel du puits.

Les oscillations des particules piégées conduisent à des échanges importants d'énergie entre l'onde et les particules. On arrive en général à une situation de saturation, l'amplitude de l'onde oscillant dans le temps avec la période de piégeage des particules.

Couplage non linéaire à trois ondes

On pourrait imaginer *a priori* que la propagation des ondes dans un plasma, en tenant compte d'effets non linéaires, serait possible pour des modes très différents de ceux que l'on rencontre dans la description linéaire. En fait, il n'en est rien, et tout se passe comme si chaque onde représentait un oscillateur couplé à d'autres par des relations non linéaires. On montre alors que les oscillations compatibles avec le système sont celles qui ont déjà été décrites dans une représentation linéaire. Les ondes rencontrées dans une description non linéaire devront d'abord obéir aux relations de dispersion linéaires précédentes.

D'autre part, il va exister des relations entre les fréquences et les nombres d'onde des ondes couplées qui apparaissent comme des règles de sélection.

Pour trois ondes couplées, d'indices 1, 2 et 3, les fréquences et nombres d'onde satisfont aux deux relations :

(88) $$\omega_1 = \omega_2 + \omega_3$$
$$\vec{k_1} = \vec{k_2} + \vec{k_3}$$

En terme de quasi-particule, photons ou plasmons suivant qu'il s'agit d'ondes électromagnétiques ou d'ondes électrostatiques, ces relations expriment simplement la conservation de l'énergie et de l'impulsion. De très nombreux couplages sont possibles avec ces règles de sélection, compte tenu de la complexité des courbes de dispersion. Il est important de remarquer que le caractère électromagnétique ou électrostatique n'est pas conservé dans ces couplages. Par exemple, on peut observer la décomposition d'une onde électromagnétique en une autre onde électromagnétique de même nature et de fréquence plus faible et en une onde de plasma électronique :

$$\left(\text{photon} \begin{array}{l} \nearrow \text{photon} \\ \rightarrow \text{plasmon} \end{array}\right)$$

On peut voir également que les règles de sélection permettent des couplages entre des ondes de vitesses de phase très différentes. Si les ondes 2 et 3 sont deux ondes électro-

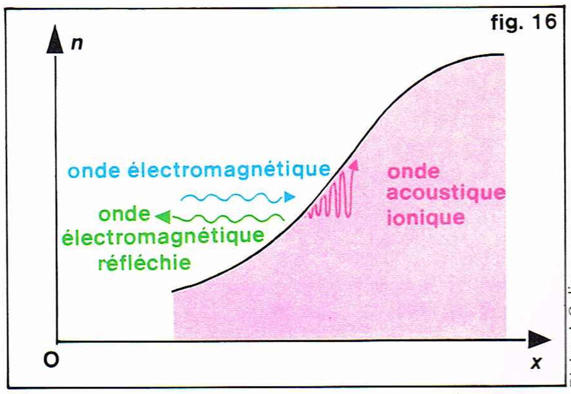

Richard Colin

◀ *Figure 16 : effet Brillouin stimulé. Un couplage non linéaire à trois ondes se produit lorsqu'une onde électromagnétique intense arrive sur un plasma de forte densité : une onde acoustique ionique est produite dans le plasma, et une onde électromagnétique de fréquence proche de l'onde incidente est produite dans la même direction, mais en sens inverse ; l'onde électromagnétique incidente est donc pratiquement réfléchie.*

magnétiques de fréquences très voisines mais se propageant dans la même direction en sens opposés, le nombre d'onde k_1 résultant de la différence des nombres d'ondes 2 et 3 sera très faible, ce qui conduit pour l'onde 1 à une vitesse de phase très élevée : l'onde 1 pourra être, par exemple, une onde au voisinage de la coupure. Ces couplages d'ondes sont ainsi très semblables aux couplages rencontrés dans d'autres milieux physiques, et en particulier en optique non linéaire. On aura ainsi dans un plasma un *effet Raman* correspondant à un couplage entre deux photons et un plasmon, un *effet Brillouin* stimulé correspondant à un couplage entre deux photons et un phonon qui, dans un plasma, correspond à une onde acoustique ionique. Dans ce dernier cas, on assiste à une véritable réflexion de la lumière par un plasma si l'onde électromagnétique incidente est une lumière visible, comme cela se rencontre dans l'interaction d'un laser de grande puissance avec un plasma.

Conclusions et applications

Les quelques propriétés des plasmas que nous avons décrites ne sont que des exemples qui montrent la richesse des phénomènes physiques rencontrés dans les plasmas. Nous avons passé sous silence de nombreux phénomènes importants en particulier sur les phénomènes non linéaires où les travaux de recherche actuels enrichissent tous les jours nos connaissances. Ces propriétés interviennent dans beaucoup de phénomènes naturels, dans les plasmas stellaires et d'environnement terrestre aussi bien que dans d'autres domaines des sciences physiques.

Les plasmas interviennent dans notre entourage journalier de façon de plus en plus fréquente : enseignes lumineuses, tubes fluorescents ; mais ils ont des applications bien plus importantes. Le plasma est le seul milieu dans lequel on puisse songer un jour à réaliser la fusion thermonucléaire contrôlée, ce qui constitue un enjeu extrêmement important pour l'avenir énergétique du monde. Mais les plasmas trouvent déjà de nombreuses applications pratiques, sans parler des implications dans de nombreux domaines de la connaissance : astrophysique, etc.

Les plasmas permettent de développer des techniques nouvelles : chalumeau à plasma, synthèse chimique à très haute température, ensemencement des gaz neutres pour en étudier les écoulements, propulsion ionique, etc. S'il est vain de chercher à développer des composants électroniques, comme certains l'avaient imaginé il y a quelques années, technique qui s'est le plus souvent révélée inefficace en raison du mauvais rapport signal sur bruit lié à la forte température du plasma, les plasmas sont par contre très utiles pour réaliser des milieux excités de grands volumes indispensables au développement des lasers à gaz de grande puissance. De nombreuses applications existent également en électrotechnique : interrupteurs de courants forts, etc.

BIBLIOGRAPHIE

BEKEFI G., *Radiation Processes in Plasma,* John Wiley, New York, 1966. - CHEN F.F., *Introduction to Plasma Physics,* Plenum Press, 1974. - DELCROIX J. L., *Physique des plasmas,* t. 1 et 2, Dunod, 1963-1966. - QUEMADA D., *Ondes dans les plasmas,* Coll. Méthodes, Hermann, Paris, 1968. - KRALL et TRIVELPIECE, *Principles of Plasma Physics,* Mac Graw Hill Book Company, 1973. - MONTGOMERY et TIDDMANN, *Plasma Kinetic Theory,* Mac Graw Hill Book Company, New York, 1964.

▼ *Les plasmas interviennent dans notre entourage journalier de façon de plus en plus fréquente, enseignes lumineuses, tubes fluorescents, etc.*

F. Hidalgo-TOP

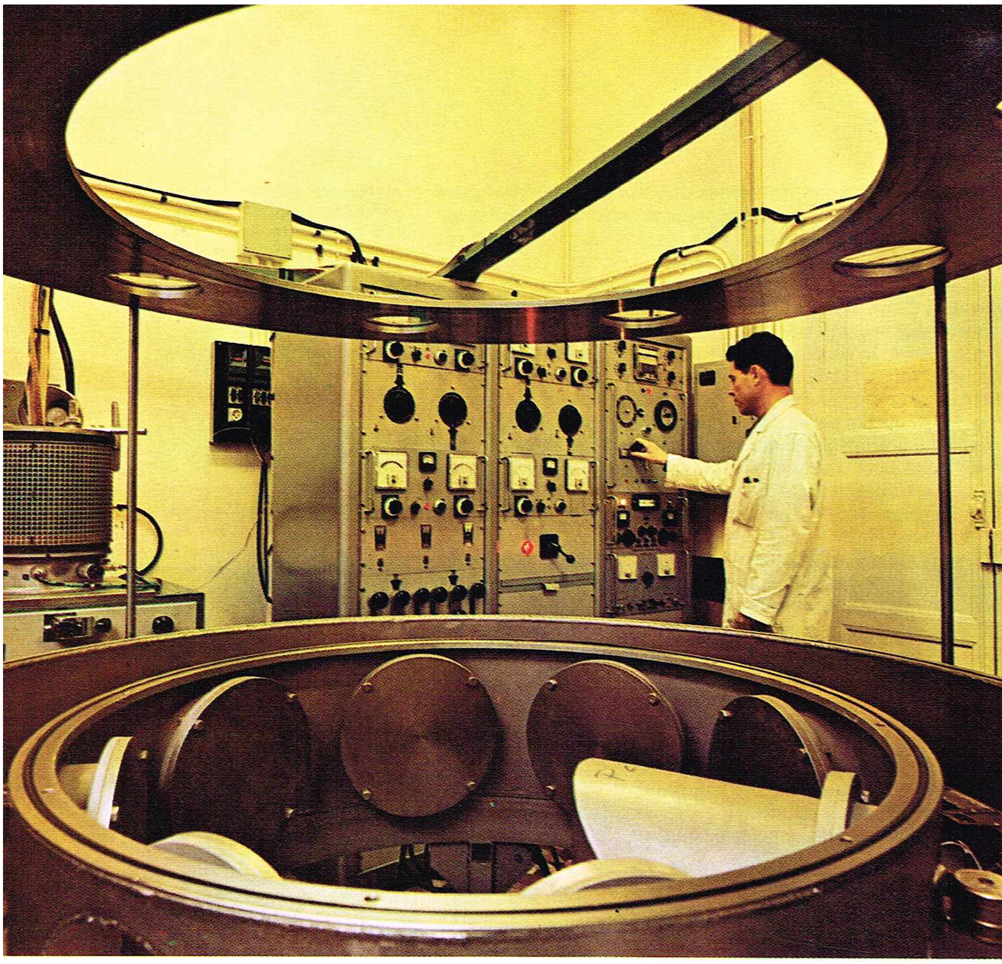

Parimage

▲ *Une des salles du laboratoire de physique des solides du C. N. R. S. (Meudon-Bellevue).*

▶ *Page ci-contre en haut, à gauche, image de la structure atomique d'un cristal de nickel-phtalocyanine, obtenue avec un photosommateur. A droite, recristallisation d'une couche mince amorphe de CuTe (vulcanite).*

PHYSIQUE DES SOLIDES

Depuis son origine, l'homme a progressivement pris conscience de la notion d'objet solide, issue de la sensation du toucher. Il a su mettre à profit la dureté des solides, leur résistance aux contraintes mécaniques, leur tendance à conserver une forme donnée, lors de la fabrication d'armes, d'outils, puis de demeures. Jusqu'au XIXe siècle, la connaissance et la classification des solides, limitées aux phénomènes macroscopiques, étaient essentiellement descriptives et empiriques.

Depuis très longtemps, leurs propriétés acoustiques, mécaniques et optiques (coloration des minéraux, transparence des verres, réflexion de la lumière par les métaux) ont été utilisées; plus tard, les propriétés de symétrie de certains solides, les cristaux, ont été reconnues et étudiées. Ce n'est que très récemment (au début du XIXe siècle) que l'étude des propriétés thermiques, électriques et magnétiques a pris un réel essor.

En tant que discipline scientifique, la physique des solides ne s'est réellement développée qu'au début du XXe siècle, lorsque l'architecture atomique de la matière a pu être déterminée. Le mérite en revient à M. von Laue (1912) et à W. H. et L. Bragg, qui, par la découverte de la diffraction des rayons X dans les cristaux, ont apporté la preuve expérimentale de la nature périodique de l'édifice cristallin à l'échelle atomique et favorisé les études structurales et microscopiques de l'état solide. L'introduction et l'amélioration de techniques expérimentales nouvelles ont permis aux physiciens du solide de progresser très vite (microscopie électronique, diffraction des neutrons, utilisation des très basses températures, synthèse et purification des cristaux). L'excellente compréhension théorique de l'état solide doit une très large part aux développements de la mécanique quantique et des statistiques quantiques de Fermi-Dirac et Bose-Einstein; ces formalismes semblent actuellement suffire aux physiciens malgré la difficulté de mener à bien (même à l'aide d'ordinateurs) certains calculs théoriques.

La connaissance des phénomènes physiques dans les solides a entraîné de multiples applications industrielles. C'est ainsi que les matériaux diélectriques, piézo-électriques, magnétiques sont couramment utilisés; grâce au progrès des techniques de purification, de dopage et d'élaboration de couches minces, l'utilisation des semi-conducteurs s'est très rapidement développée, favorisant ainsi l'essor de l'industrie des composants électroniques.

L'état solide

L'état solide se différencie à première vue des autres états de la matière (liquides, gaz, plasmas) par ses propriétés de dureté, de cohésion; soumis à des contraintes mécaniques, les solides présentent un comportement élastique.

Dans un solide, les atomes, constitués par un noyau chargé positivement entouré d'un nuage d'électrons, sont liés entre eux par des forces attractives qui assurent la cohésion de l'ensemble; ces interactions sont telles que ces atomes occupent dans l'espace des positions bien définies les unes par rapport aux autres : le réseau rigide ainsi formé occupe un volume bien défini à l'échelle macroscopique. Dans les liquides et les gaz, les interactions étant beaucoup plus faibles, les molécules (arrangement d'atomes) glissent les unes sur les autres et se déplacent librement sous l'effet de collisions.

En réalité, dans un corps solide, la fixité des atomes n'est pas absolue, car sous l'influence de la température ils peuvent vibrer légèrement autour de leur position d'équilibre; lorsque la température devient trop élevée, les liaisons atomiques peuvent se rompre, détruisant ainsi la rigidité du matériau : c'est la fusion (le solide se transforme en liquide) ou la sublimation (transformation en gaz).

On distingue en général deux catégories de solides.

— Les **solides amorphes,** dépourvus de formes géométriques caractéristiques, ne présentent aucune régularité dans l'arrangement spatial des atomes (verres, par exemple). Ils peuvent être considérés comme des liquides de viscosité très élevée.

— Les **solides cristallins :** l'examen de cristaux d'une même espèce montre que le milieu cristallin est homogène et anisotrope. Les monocristaux, naturels ou synthétiques, se présentent sous forme de polyèdres très particuliers; ils se caractérisent par une structure atomique périodique parfaite ou presque, ce qui rend leurs propriétés physiques plus faciles à expliquer théoriquement. On sait par exemple que leur température de fusion est très bien définie, alors qu'un verre passe très progressivement de l'état solide à l'état liquide.

A première vue, il ne semble pas qu'un barreau de cuivre possède une structure cristalline, car il a un comportement isotrope à l'échelle macroscopique; observé au microscope, il se présente comme un agglomérat de monocristaux microscopiques de différentes orientations séparés par des « joints de grains »; le diamètre de ces grains, compris entre quelques microns et quelques millimètres, dépend du traitement thermique (trempe, recuit) subi par l'échantillon. C'est sous cet aspect de *solides polycristallins* que se présentent les métaux et alliages usuels qui entrent dans la fabrication industrielle de pièces mécaniques.

Entre les liquides et les monocristaux se situent les *« cristaux liquides »*. Ce sont des substances organiques caractérisées par plusieurs phases suivant la température : en dessous d'une certaine température, toutes ces substances forment des solides cristallins normaux, et, au-dessus du dernier point de fusion, ce sont des liquides isotropes. Entre ces deux températures, ces substances présentent une phase intermédiaire, appelée phase mésomorphe, caractérisée par un ordre suivant une ou deux directions, et jouissant de propriétés en lumière polarisée invisibles pour les liquides ordinaires. Suivant l'arrangement des molécules entre elles, on distingue trois phases mésomorphes : la phase smectique (pour certains savons et détergents dans lesquels s'intercalent les molécules d'eau), la phase cholestérique, et la phase nématique (les molécules peuvent être orientées par des champs électriques ou magnétiques).

La structure cristalline

Le cristal parfait - Les systèmes cristallins

L'aspect extérieur des cristaux, la facilité avec laquelle on peut les cliver suivant des plans particuliers (le plus souvent parallèles à des faces naturelles) incitent à les classer d'après leurs éléments de symétrie.

Un *cristal parfait* se caractérise par la répétition triplement périodique dans l'espace d'un *motif* atomique ou moléculaire; le motif le plus simple est formé d'un atome unique. A chaque point du cristal correspond une infinité

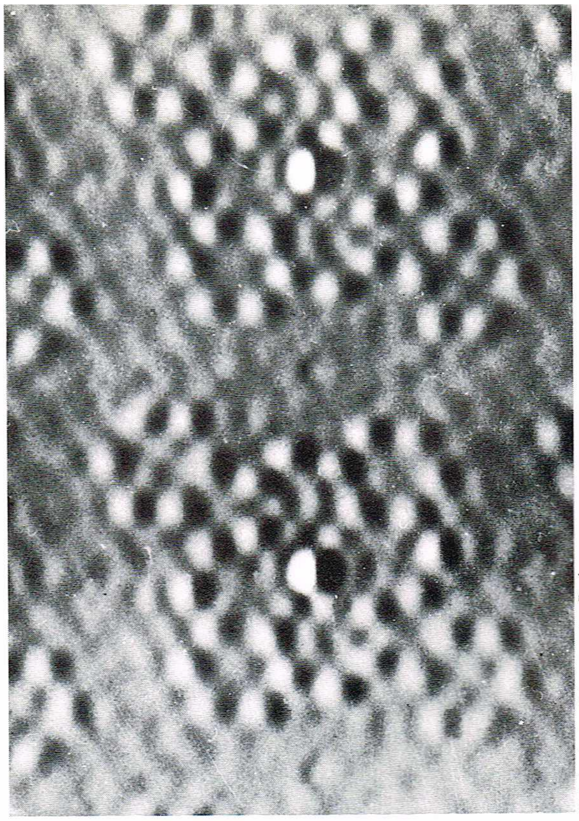

Palais de la Découverte, Paris

Laboratoire d'aérothermique de Meudon - Bellevue-Centre national de la recherche scientifique

de points homologues, de même environnement atomique, qui se déduisent les uns des autres par des translations élémentaires. On peut donc associer à ce cristal un *réseau* indéfini de *points*, appelés *nœuds*, représentant les motifs équivalents du cristal réel. Ce réseau, possédant la symétrie de translation du cristal, est défini par trois vecteurs indépendants $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$; un vecteur $\vec{L} = n_1\vec{a} + n_2\vec{b} + n_3\vec{c}$, avec n_1, n_2, n_3 entiers, relie entre eux deux nœuds du réseau et correspond à une translation dans le cristal. Ces vecteurs $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ définissent un parallélépipède appelé *maille*. On définit la *maille élémentaire* du réseau comme la maille de plus petit volume qui se reproduit identique à elle-même dans toute translation $\vec{L}$; les vecteurs qui la définissent sont appelés les *vecteurs fondamentaux*. Dans cette maille, qui n'est pas définie de façon unique, il y a un seul nœud à considérer (tous les sommets du parallélépipède s'obtiennent par diverses translations $\vec{L}$ et sont donc équivalents). La maille élémentaire correspondante du cristal réel possède donc un seul motif, c'est-à-dire le nombre minimal d'atomes nécessaire pour caractériser le cristal (*fig.* 1).

Dans les cristaux tridimensionnels à motif monoatomique, les seuls axes de rotation compatibles avec la périodicité du réseau sont des axes d'ordre 1, 2, 3, 4, 6 ; d'autres éléments de symétrie (symétries par rapport à un point ou par rapport à un plan) peuvent être définis. En dénombrant les différentes classes de symétrie ponctuelle des réseaux, on aboutit à une classification en *7 systèmes cristallins*. Toutefois, des cristaux d'un même système peuvent avoir des réseaux différents ; c'est le cas par exemple du système cubique, qui regroupe trois types de réseaux : le cubique simple, le cubique centré et le cubique à faces centrées. On obtient ainsi quatorze réseaux fondamentaux appelés *réseaux de Bravais*. L'adjonction d'un motif à plusieurs atomes autour de chaque nœud du réseau diminue la symétrie de l'édifice cristallin. En prenant en compte la nature des divers éléments de symétrie du motif, on montre que toutes les variétés cristallines se regroupent en 32 classes de symétrie ponctuelle.

Toutefois, la description complète des propriétés de symétrie du milieu cristallin, étudiée dans le cadre de la « théorie des groupes », nécessite l'introduction d'opérations de symétrie non ponctuelle et aboutit à une classification en 230 groupes distincts appelés groupes de recouvrement.

- *Directions cristallographiques*. Les nœuds d'un réseau sont disposés sur des familles de droites appelées rangées. Ces rangées définissent dans le cristal des directions cristallographiques que l'on note $[u\ v\ w]$; les nombres entiers u, v, w, premiers entre eux, représentent la projection sur les vecteurs fondamentaux d'un vecteur porté par la direction considérée (*fig.* 2).
- *Plans réticulaires*. On peut remarquer que tous les

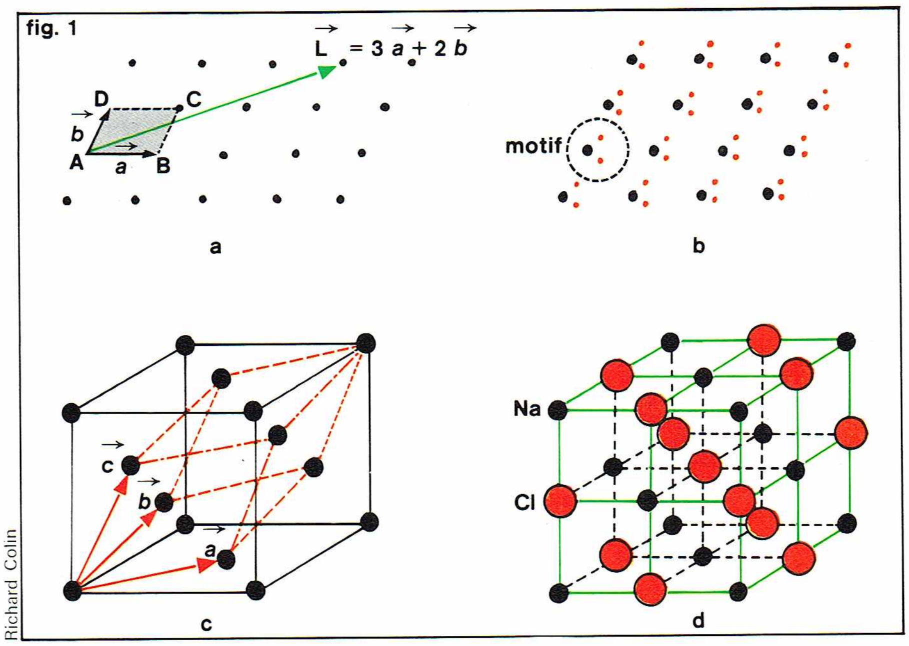

Richard Colin

▲ *Figure 1 : exemples de réseaux cristallins.* (a) *Cristal à deux dimensions à un atome par maille* (ABCD *est une maille élémentaire*). (b) *Cristal à deux dimensions avec un motif constitué de trois atomes.* (c) *Maille élémentaire du réseau cubique à faces centrées du cuivre* (a = 3,61 Å). (d) *Maille cubique du chlorure de sodium dont la structure résulte de deux sous-réseaux cubiques à faces centrées décalés de* $a/2$ (a = 5,63 Å).

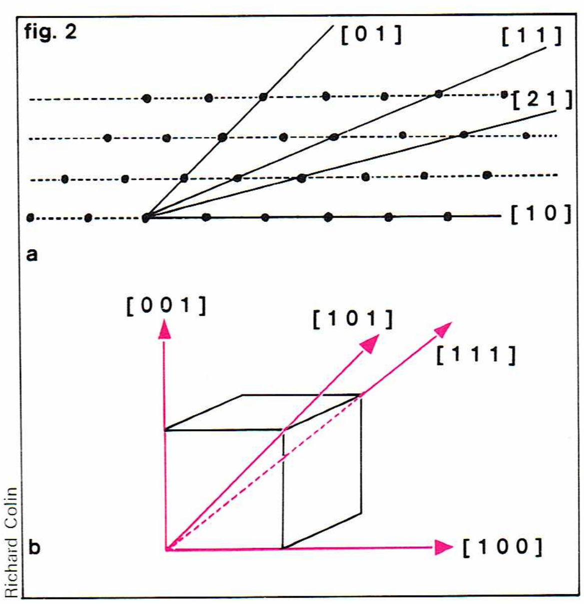

Richard Colin

◀ *Figure 2 : directions cristallographiques dans un réseau ;* (a) *à deux dimensions ;* (b) *à trois dimensions.*

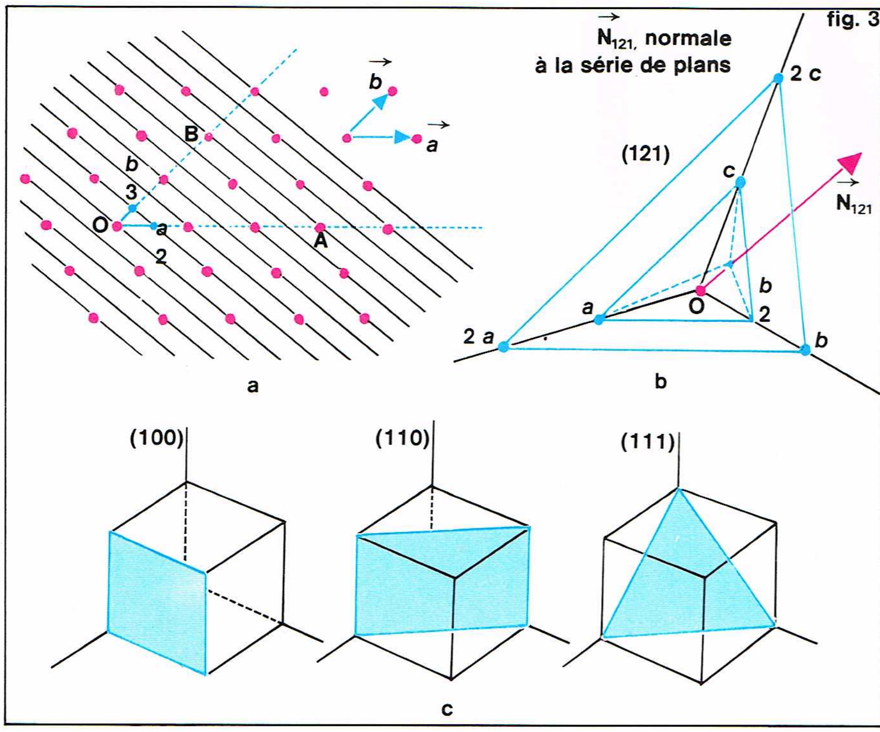

▲ *Figure 3; plans réticulaires : (a) dans un réseau à deux dimensions, d'indices de Miller (23); (b) dans un réseau à trois dimensions; (c) dans un réseau cubique.*

▼ *Figure 4 : (a) réseau cristallin à deux dimensions; (b) son réseau réciproque; (c) réseau réciproque et zones de Brillouin d'un réseau carré à deux dimensions.*

nœuds d'un réseau sont répartis sur une famille de plans équidistants, appelés plans réticulaires (*fig.* 3). Il existe une infinité de ces familles de plans; la notation utilisée pour les distinguer est due à Miller. A partir d'un nœud pris pour origine, on cherche un plan de la famille considérée coupant les trois axes cristallins suivant un nœud du réseau. Entre ce plan et l'origine, il s'intercale le plus souvent d'autres plans qui coupent les axes en segments équidistants a/h suivant $\vec{a}$, b/k suivant $\vec{b}$, et c/l suivant $\vec{c}$. Les nombres entiers h, k, l, *premiers entre eux*, sont les *indices de Miller*, notés $(h\,k\,l)$, de la famille de plans réticulaires considérée. Si cette famille de plans est perpendiculaire à l'un des vecteurs fondamentaux, l'indice de Miller correspondant est nul. L'intérêt d'une telle définition est d'exprimer de façon simple la direction normale à une famille de plans réticulaires. Partant de la maille

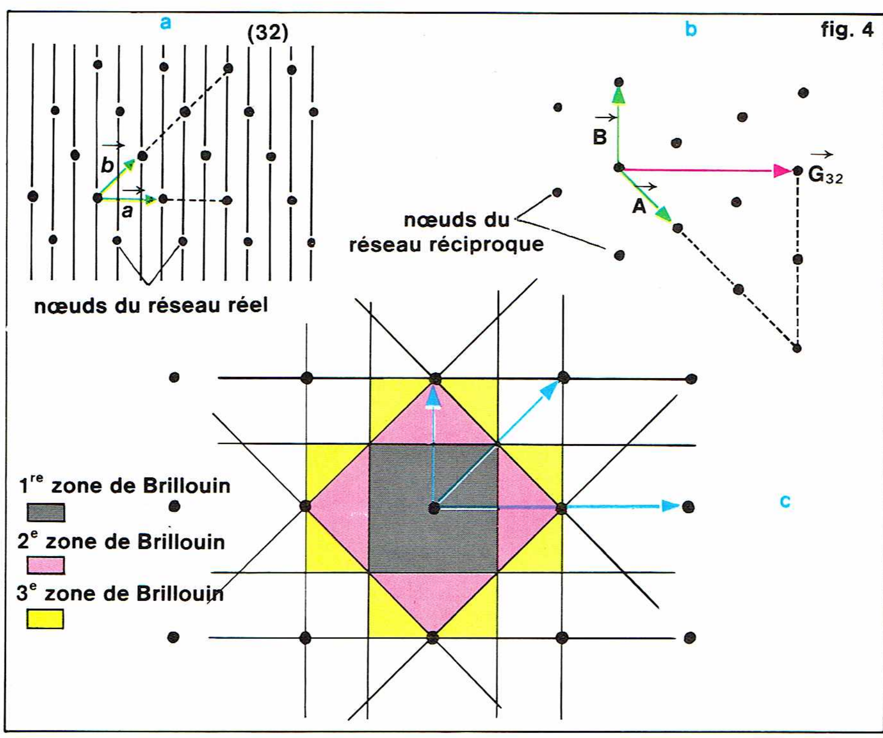

élémentaire définie par les vecteurs $\vec{a}$, $\vec{b}$, $\vec{c}$, définissons trois nouveaux vecteurs $\vec{A}$, $\vec{B}$, $\vec{C}$ tels que :

$$(1)\quad \begin{aligned} &\vec{a}\cdot\vec{A} = \vec{b}\cdot\vec{B} = \vec{c}\cdot\vec{C} = 2\pi \\ &\vec{a}\cdot\vec{B} = \vec{a}\cdot\vec{C} = \vec{b}\cdot\vec{A} = \vec{b}\cdot\vec{C} = \vec{c}\cdot\vec{A} = \vec{c}\cdot\vec{B} = 0 \end{aligned}$$

Ces relations expriment que le vecteur $\vec{A}$ est perpendiculaire au plan réticulaire (100) défini par $\vec{b}$ et $\vec{c}$, et qu'il a pour longueur $(2\pi/a)$. De même $\vec{B}$ et $\vec{C}$ sont respectivement perpendiculaires aux plans définis par $(\vec{a}, \vec{c})$ et $(\vec{a}, \vec{b})$. Considérons alors un vecteur

$$\vec{G}_{hkl} = h\vec{A} + k\vec{B} + l\vec{C} = G_{hkl}\vec{N}_{hkl}$$

$\vec{N}_{hkl}$ étant le vecteur unitaire suivant la direction $\vec{G}_{hkl}$. Ce vecteur vérifie les relations suivantes :

$$\begin{aligned} \vec{G}_{hkl}\cdot\vec{a} &= G_{hkl}\,(\vec{N}_{hkl}\cdot\vec{a}) = 2\pi h \\ \vec{G}_{hkl}\cdot\vec{b} &= G_{hkl}\,(\vec{N}_{hkl}\cdot\vec{b}) = 2\pi k \\ \vec{G}_{hkl}\cdot\vec{c} &= G_{hkl}\,(\vec{N}_{hkl}\cdot\vec{c}) = 2\pi l. \end{aligned}$$

Ce système se réduit à l'équation suivante :

$$(2)\quad \vec{N}_{hkl}\cdot\frac{\vec{a}}{h} = \vec{N}_{hkl}\cdot\frac{\vec{b}}{k} = \vec{N}_{hkl}\cdot\frac{\vec{c}}{l} = \frac{2\pi}{G_{hkl}}$$

Des arguments géométriques simples permettent, si l'on appelle $\vec{N}_{hkl}$ la normale aux plans d'indices $(h\,k\,l)$, d'exprimer la distance d_{hkl} entre plans consécutifs de cette famille :

$$(3)\quad d_{hkl} = \vec{N}_{hkl}\cdot\frac{\vec{a}}{h} = \vec{N}_{hkl}\cdot\frac{\vec{b}}{k} = \vec{N}_{hkl}\cdot\frac{\vec{c}}{l}$$

La comparaison des relations **(2)** et **(3)** permet de vérifier que le vecteur $\vec{G}_{hkl}$ est perpendiculaire aux plans réticulaires (hkl), la distance entre ces plans étant égale à :

$$(4)\quad d_{hkl} = \frac{2\pi}{G_{hkl}}$$

De façon générale, la structure microscopique particulière des cristaux se reflète aussi sur les propriétés macroscopiques. C'est ainsi que les faces naturelles et les plans de clivage sont parallèles aux plans réticulaires denses du réseau (loi de Haüy-Bravais).

Le réseau réciproque

Si l'on renonce à la condition h, k, l premiers entre eux, l'ensemble des vecteurs $\vec{G}_{hkl}$ définit un réseau de points dans un espace où les vecteurs $\vec{A}$, $\vec{B}$, $\vec{C}$ constituent une base et correspondent à des translations élémentaires. Bien qu'introduit de façon purement géométrique, ce réseau de points, appelé *réseau réciproque*, est d'un intérêt beaucoup plus général : il est en effet représenté dans l'espace dual *(espace réciproque)* associé à l'espace cristallin réel. Nous verrons par la suite que cet espace est d'usage constant, car il permet d'exprimer plus simplement les propriétés physiques (diffraction, dynamique des électrons, etc.). Notons aussi qu'à tout réseau réel est associé un réseau réciproque et un seul (*fig.* 4).

La maille élémentaire du réseau réciproque est définie par les vecteurs :

$$\vec{A} = 2\pi\frac{\vec{b}\times\vec{c}}{\vec{a}\cdot(\vec{b}\times\vec{c})}\quad \vec{B} = 2\pi\frac{\vec{c}\times\vec{a}}{\vec{b}\cdot(\vec{c}\times\vec{a})}\quad \vec{C} = 2\pi\frac{\vec{a}\times\vec{b}}{\vec{c}\cdot(\vec{a}\times\vec{b})}$$

Ces expressions traduisent sous forme vectorielle les relations **(1)** ; le volume de cette maille :

$$(5)\quad V_r = \vec{A}\cdot(\vec{B}\times\vec{C}) = \frac{(2\pi)^3}{\vec{a}\cdot(\vec{b}\times\vec{c})} = \frac{(2\pi)^3}{V_c}$$

est inversement proportionnel au volume V_c de la maille élémentaire du réseau spatial. Il faut aussi remarquer que tout vecteur défini dans l'espace réciproque a pour dimension l'inverse d'une longueur (en général le cm^{-1}). On utilise le plus souvent une maille élémentaire particulière, appelée *zone de Brillouin* (voir *fig.* 4), construite de façon symétrique autour d'un nœud du réseau réciproque pris comme origine : elle correspond au volume limité

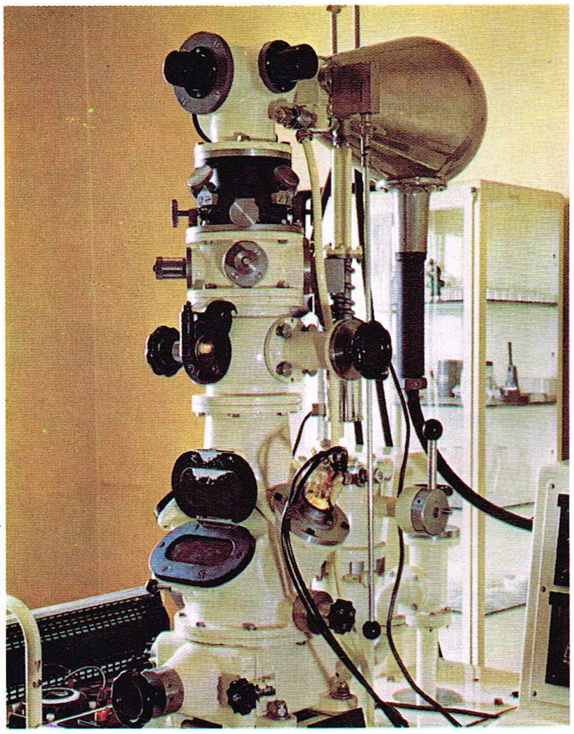

Laboratoire de physique des matériaux de Bellevue - Centre national de la recherche scientifique

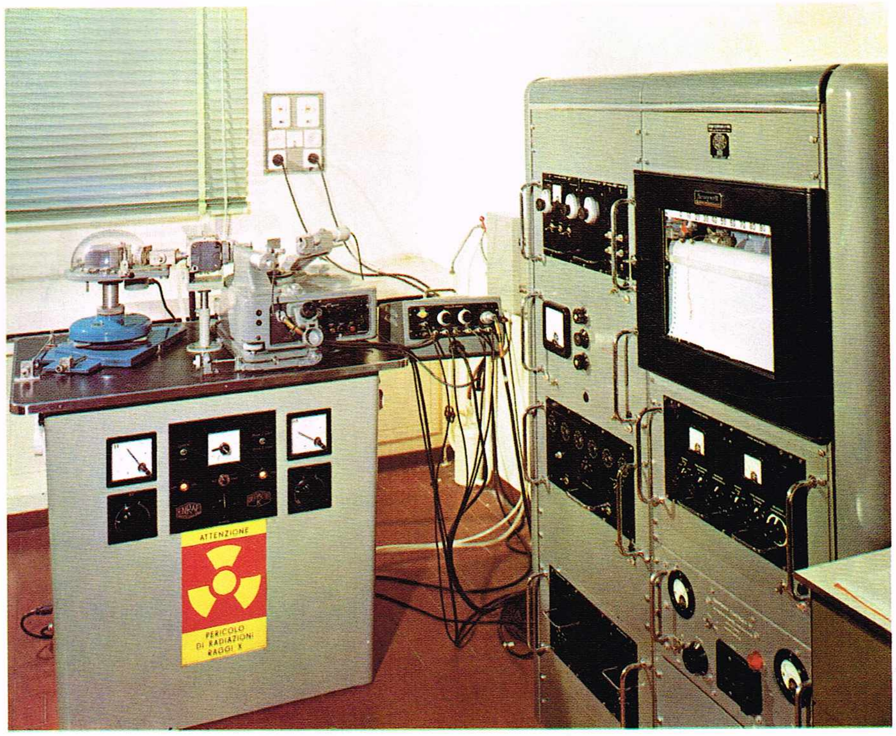

A. Rizzi

▲ *A gauche, un diffractomètre à rayons X ultra-moderne utilisé au laboratoire de physique des matériaux du C. N. R. S. La technique de la diffraction des rayons X est un des principaux instruments de recherche en physique des solides. A droite, un autre type de diffractomètre à rayons X et son appareillage de contrôle; ce modèle s'emploie pour l'enregistrement de diagrammes.*

par les plans médiateurs des vecteurs $\vec{G}$ reliant le nœud origine aux nœuds proches voisins.

Une relation importante relie le réseau réciproque au réseau spatial. Considérons le produit scalaire d'un vecteur du réseau réciproque $\vec{G}_{hkl}$ par un vecteur $\vec{L}$ du réseau direct :

$$\vec{G}_{hkl} \cdot \vec{L} = (h\vec{A} + k\vec{B} + l\vec{C}) \cdot (n_1\vec{a} + n_2\vec{b} + n_3\vec{c}) = 2\pi\,(hn_1 + kn_2 + ln_3).$$

Chacun des nombres étant un entier, le nombre

$$(hn_1 + kn_2 + ln_3)$$

peut prendre toutes les valeurs entières, et par suite :

$$\vec{G}_{hkl} \cdot \vec{L} = 2\pi m, \quad \text{soit } \exp\,(i\vec{G}_{hkl} \cdot \vec{L}) = 1$$

Cette relation constitue une généralisation des définitions des vecteurs $\vec{A}$, $\vec{B}$, $\vec{C}$, et une justification de l'introduction du coefficient 2π dans les définitions du réseau réciproque comme le veut l'usage en physique des solides (ce coefficient n'est pas introduit en cristallographie).

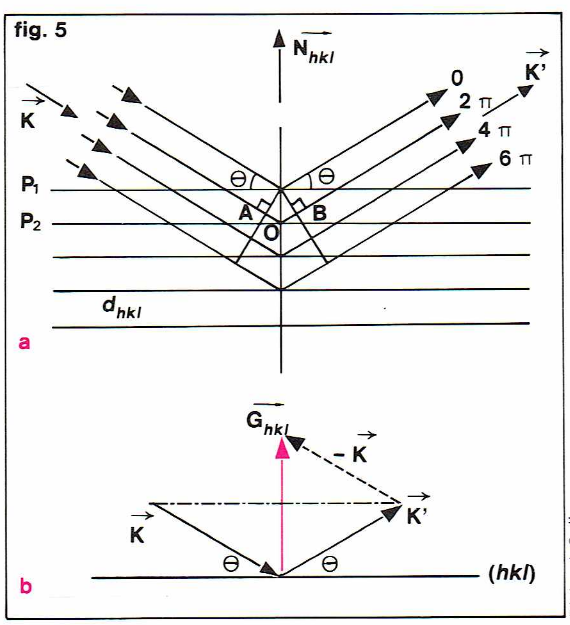

Richard Colin

◀ *Figure 5 : (a) réflexion de Bragg d'un faisceau de rayons X sur une série de plans réticulaires d'indice de Miller (hkl); (b) construction géométrique du vecteur d'onde du faisceau diffracté à partir du vecteur incident et de la normale aux plans (hkl).*

Diffraction des ondes par un cristal

Les rayons X (rayonnement émis par une plaque métallique bombardée par un faisceau d'électrons accélérés) sont des ondes électromagnétiques de même nature que les ondes lumineuses, mais de fréquences plus élevées (ou de longueur d'onde plus courte). Soumis à ce rayonnement, les électrons des couches profondes d'un atome voient leur mouvement perturbé et diffusent ces ondes de façon presque isotrope.

Si l'on soumet un cristal à un faisceau parallèle de rayons X, on constate que la direction et l'intensité des faisceaux diffractés dépendent de sa structure. Dans le cas d'un arrangement périodique d'atomes dans un plan, on montre que les ondes diffractées par chacun d'eux n'interfèrent de façon constructive que suivant une direction particulière, symétrique de celle du faisceau incident par rapport à la normale au plan : ce plan d'atomes se comporte donc comme un miroir qui réfléchit les ondes électromagnétiques. W. L. Bragg a alors admis que, dans un cristal, un faisceau monochromatique de rayons X est réfléchi par des plans réticulaires du réseau ; pour obtenir un faisceau diffracté correspondant à une direction incidente donnée, les faisceaux réfléchis par les plans réticulaires d'une même famille doivent être en phase afin que les ondes ne se détruisent pas. Considérons (*fig.* 5) deux plans consécutifs P_1 et P_2 ; si d_{hkl} est la distance entre eux, il faut que la différence de marche $D = OA + OB$ entre deux rayons faisant un angle θ avec les plans soit un multiple entier de la longueur d'onde : $D = n\lambda$. On obtient ainsi la *relation de Bragg :*

$$2\,d_{hkl} \sin\theta = n\lambda \tag{6}$$

où le nombre entier n, généralement petit (1, 2, ...), est l'ordre de diffraction. Si cette relation est vérifiée pour deux plans d'une même famille, elle l'est aussi pour tous les autres plans.

Comme $\sin\theta$ est plus petit que 1, on voit qu'une famille de plans ne donne un faisceau diffracté que si $\lambda \leqslant 2\,d_{hkl}$; pour cette raison, de telles interférences ne peuvent être observées avec la lumière visible dont la longueur d'onde est trop grande ($\simeq 5\,000$ Å) devant les distances interatomiques (quelques angströms ; $1\text{ Å} = 10^{-8}$ cm).

La relation de Bragg peut s'exprimer de façon plus élégante en utilisant le réseau réciproque. Rappelons tout d'abord qu'une onde plane est caractérisée par son vecteur d'onde $\vec{K}$ $\left(\text{de module } K = \dfrac{2\pi}{\lambda}\right)$ et sa pulsation ω : par exemple, son vecteur champ électrique peut s'écrire $\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 \exp i\,(\vec{K} \cdot \vec{r} - \omega t)$.

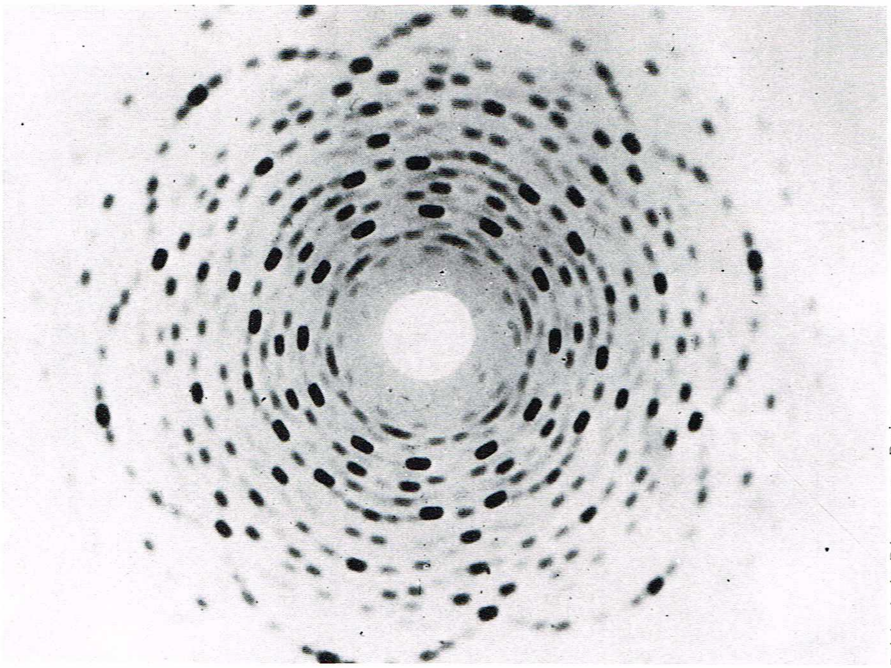

▲ *Diagramme du béryl, variété émeraude, obtenu par la méthode de Laue.*

Dans le vide, ω et K sont reliés par la relation $\omega = cK$ (c est la vitesse de la lumière). Soit $\vec{N}_{hkl}$ la normale à la famille de plans réticulaires ($h\ k\ l$). On peut alors écrire, en utilisant les relations **(4)** et **(6)** :

$$\vec{K} \cdot \vec{N}_{hkl} = K \sin\theta = \frac{nK\lambda}{2\, d_{hkl}} = \frac{n}{2} G_{hkl}$$

En multipliant les deux membres par G_{hkl}, on en déduit ($\vec{G}_{hkl}$ étant dirigé suivant la normale $\vec{N}_{hkl}$) :

$$\textbf{(7)} \qquad \vec{K} \cdot \left(\frac{1}{2}\vec{G}_{hkl}\right) = n\left(\frac{1}{2}G_{hkl}\right)^2$$

On obtient ainsi une relation géométrique simple dans l'espace réciproque permettant d'obtenir la condition de diffraction (les vecteurs d'onde $\vec{K}$ ont la même dimension que les vecteurs $\vec{G}$ et peuvent être représentés dans l'espace réciproque). Les extrémités des vecteurs $\vec{K}$ vérifiant la relation **(7)** sont sur les plans médiateurs des vecteurs $\vec{G}_{hkl}$: par définition, ces plans déterminent les frontières des zones de Brillouin.

Expérimentalement, θ ou λ peuvent varier; lorsque la condition de Bragg pour une série de plans réticulaires donnée est vérifiée, on observe des taches de diffraction claires.

— La *méthode de Laue :* le cristal est fixe et la longueur d'onde du rayonnement varie; certaines longueurs d'onde sélectionnent ainsi les familles de plans de façon à satisfaire à la condition de Bragg. Cette technique est le plus souvent utilisée pour préciser rapidement l'orientation et la symétrie d'un cristal.

— Une autre méthode consiste à garder la longueur d'onde fixe et à faire tourner le cristal; le faisceau passe ainsi par toutes les orientations possibles par rapport aux plans réticulaires. Cette méthode, dite *« méthode du cristal tournant »*, permet de déduire d'une mesure d'angle les distances interatomiques et d'obtenir la structure du cristal.

— Dans la *méthode de Debye-Scherrer* (1916), utilisée pour des échantillons polycristallins (ou des cristaux en poudre), le faisceau de rayons X est monochromatique; les divers cristallites présentent une distribution continue d'orientations autour du faisceau incident, et la condition de Bragg est alors vérifiée pour toutes les familles de plans réticulaires.

L'utilisation des rayons X a permis aux cristallographes de développer les études structurales des cristaux (formes, symétries, dimensions de leurs mailles élémentaires). Des études théoriques plus rigoureuses ont permis de montrer que la diffusion d'une onde électromagnétique par un atome dépendait de sa densité électronique; aussi l'analyse de l'intensité des taches de diffraction permet, pour des cristaux ayant des motifs complexes, de préciser la nature et la position des divers atomes, et d'avoir ainsi des informations sur les liaisons atomiques.

Actuellement, des renseignements complémentaires sur les cristaux sont fournis par la diffraction des électrons et des neutrons; ces particules, auxquelles on associe une onde en mécanique quantique, sont aussi diffractées par un réseau. Les électrons interagissent fortement avec les atomes, et par suite pénètrent peu dans les solides; la microscopie électronique permet d'observer les défauts de surface (dislocations, impuretés). La diffraction des neutrons, qui s'est développée grâce à l'apparition des réacteurs nucléaires, est utilisée pour déterminer la structure des cristaux magnétiques et permet d'observer les modes de vibration des atomes dans les solides non magnétiques.

Cohésion des cristaux

La structure d'un cristal est principalement déterminée par l'arrangement des différents atomes qui le constituent. La forme générale du potentiel d'interaction $V(\vec{r})$ entre deux atomes, représentée sur la *figure* 6, résulte d'une force attractive à grande distance (quand les atomes sont suffisamment rapprochés et la température assez basse) et répulsive à très courte distance (forces coulombiennes entre électrons et entre noyaux) ; pour une certaine distance entre ces atomes, ces forces se compensent : il en résulte un minimum de l'énergie potentielle $V(\vec{r})$. Dans un cristal, de tels puits de potentiel existent entre chaque atome, et à une température donnée, la structure la plus stable s'obtient lorsque l'énergie libre du système est minimale. Suivant les natures des liaisons mises en jeu, on peut distinguer quatre classes de solides.

Les métaux

Dans une liaison métallique, les électrons de valence des atomes (électrons de la couche externe incomplète) ont des fonctions d'onde de grande étendue spatiale (orbitales s) ; aux distances interatomiques concernées, le recouvrement de ces fonctions d'onde est tel que l'on ne peut plus associer un électron à un atome particulier : on dit que l'électron est délocalisé. On peut donc considérer un métal comme un ensemble de noyaux chargés positivement, immergés dans un gaz d'électrons. Ces électrons peuvent se déplacer avec une grande facilité dans le cristal, sous l'effet d'un champ électrique par exemple, d'où la grande conductivité électrique des métaux. De nombreux métaux cristallisent en des structures cubiques assez compactes; les liaisons n'ayant aucune direction privilégiée, chaque atome est entouré d'un nombre maximal de voisins.

Les cristaux covalents

Dans une liaison covalente, deux atomes voisins mettent en commun de façon égale des électrons de valence; les paires électroniques ainsi formées sont en général locali-

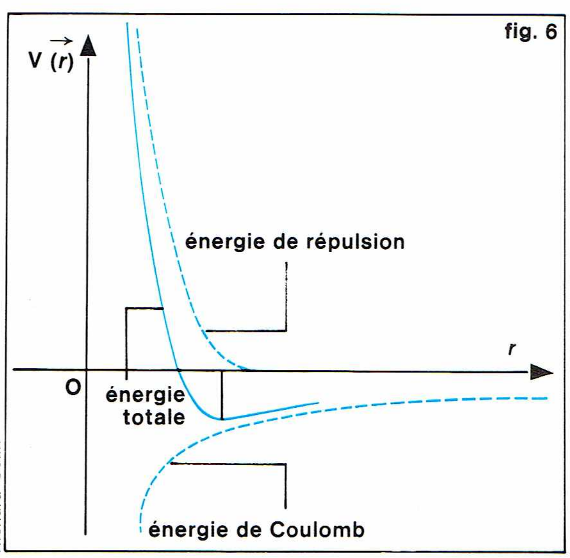

▶ *Figure 6 : potentiel d'interaction V (r) entre deux atomes.*

sées entre les deux atomes. C'est une telle liaison covalente qui assure la stabilité d'une molécule d'hydrogène (H_2). Dans ce modèle simple, chaque atome d'hydrogène fournit un électron 1 *s*; par suite du recouvrement des fonctions d'onde électroniques, il existe une interaction d'échange, d'origine purement quantique, qui ne dépend que de l'orientation relative des spins des deux électrons. On montre alors que l'on obtient une liaison stable lorsque les électrons ont des spins opposés, et qu'ils sont localisés de préférence entre les deux protons (*fig.* 7).

Les caractéristiques essentielles des cristaux covalents sont leur grande cohésion, leur dureté, et la nature directionnelle de leurs liaisons. A cette catégorie appartiennent des isolants (carbone sous la forme diamant), des semiconducteurs tels que les éléments du groupe IV (Si, Ge) et les composés binaires (AsGa, InSb, ZnS).

Les cristaux ioniques

Le cristal KCl est un exemple de ce type. L'atome de chlore Cl a une couche électronique externe où il ne manque qu'un seul électron de valence; l'atome de potassium K, n'ayant par contre qu'un seul électron sur sa couche externe, cède, lors de sa liaison avec l'atome de chlore pour former le cristal KCl, son électron externe de telle sorte que les deux atomes présentent la configuration des gaz rares (couche externe complète). Dans ce transport de charges, l'atome de potassium s'est chargé positivement alors que l'atome de chlore s'est chargé négativement, d'où la formation d'ions K^+ et Cl^-. Grâce à l'interaction électrostatique attractive entre ces ions, il y a une diminution de l'énergie du système qui est responsable de la cohésion du cristal. Les cristaux ioniques possèdent des énergies de cohésion assez grandes; ils sont souvent solubles dans des solvants polaires tels que l'eau, et transparents à la lumière visible. A cette catégorie appartiennent les halogénures alcalins (KCl, NaCl, LiF), beaucoup d'oxydes (Al_2O_3) qui cristallisent dans diverses structures cubiques.

Les cristaux moléculaires

La cohésion de ces cristaux provient des forces dipolaires entre les atomes ou les molécules du cristal. En l'absence de tout moment électrique moyen, un atome possède à tout instant un moment dû à la position instantanée des électrons autour de son noyau; ce dipôle crée un champ électrique sur un autre atome qui acquiert à son tour un moment dipolaire électrique induit. L'interaction entre ces deux dipôles est attractive

$$\left[V(r) \simeq -\frac{A}{r^6}\right]$$

Les forces mises en jeu, appelées *forces de Van der Waals*, sont faibles; ces cristaux qui cristallisent dans le système cubique ont de faibles énergies de liaison, des points de fusion et d'ébullition bas, une conductivité électrique faible (les électrons sont très liés aux atomes). Les gaz rares (He, Ne, Ar) ainsi que certains composés organiques appartiennent à cette catégorie de cristaux.

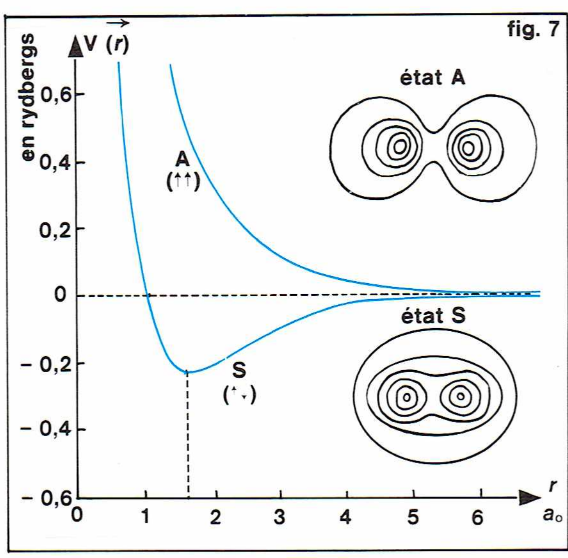

Richard Colin

◀ *Figure 7 : énergie de la molécule d'hydrogène en fonction de la séparation r entre les deux atomes (a_0 = 0,53 Å, rayon de Bohr). On a également représenté les densités électroniques autour des deux noyaux pour l'état S et l'état A.*

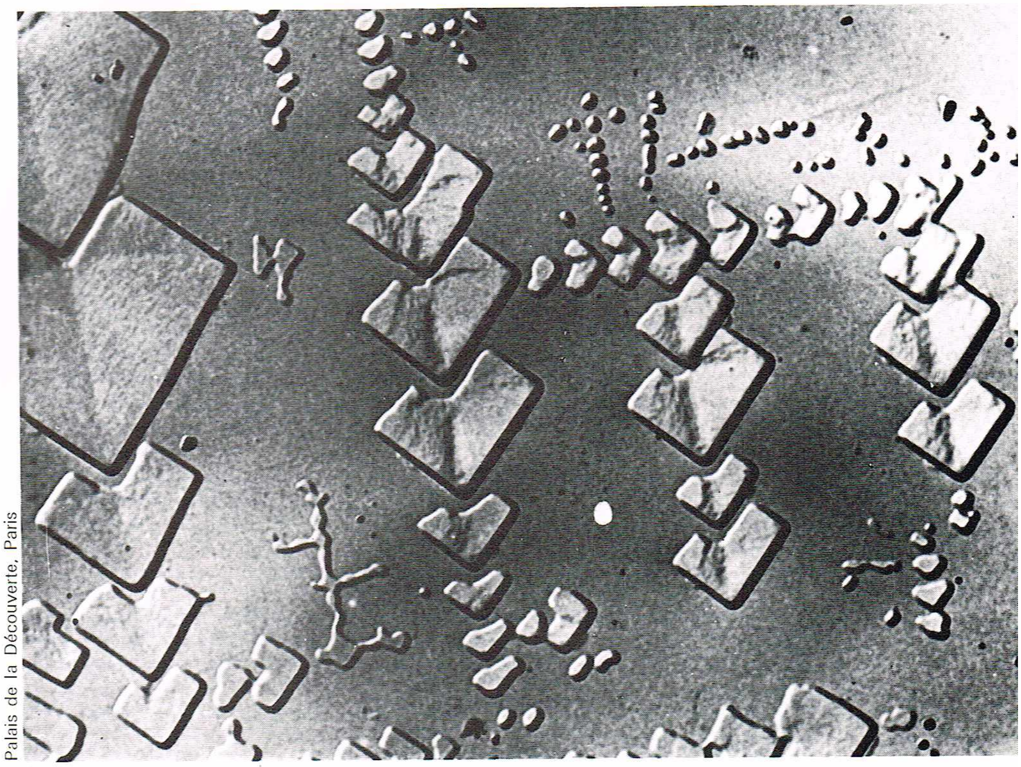

Palais de la Découverte, Paris

▲ *Petits cristaux orientés de NaCl vus au microscope électronique.*

Les cristaux réels - Les défauts dans les solides

Le cristal idéal suppose une structure périodique infinie dans toutes les directions. En réalité, les monocristaux, même synthétisés en laboratoire, sont loin d'être aussi parfaits, ne serait-ce qu'à cause de leurs dimensions finies qui rompent l'arrangement périodique des atomes en surface. Les propriétés des solides peuvent être fortement altérées par la présence de défauts; si leur étude complète se révèle très difficile, on peut toutefois distinguer deux catégories de défauts : les défauts de structure du réseau (dislocations et défauts ponctuels), et les impuretés (atomes de nature différente).

Dislocations

Lorsqu'on soumet un solide à une action extérieure (élongation, cisaillement), il présente tout d'abord une déformation élastique (donc réversible), c'est-à-dire qu'il retrouve sa forme initiale lorsque l'effort est supprimé; le coefficient de proportionnalité entre la contrainte (force par unité de surface) et la déformation est appelé le module d'élasticité. Au-dessus d'une certaine valeur de la force appliquée, il apparaît une déformation plastique (non réversible) qui subsiste lorsque la contrainte est supprimée; au-delà apparaît la rupture du matériau. Expérimentalement on constate que la plupart des monocristaux (surtout les métaux) sont ductiles, c'est-à-dire qu'ils présentent une zone de plasticité importante, exception faite pour les cristaux covalents (Ge et Si), qui sont cassants. Dans ces structures cristallines compactes, des plans cristallins de grande densité atomique peuvent glisser les uns sur les autres; la présence de dislocations dans ces cristaux facilite un tel glissement.

Sous l'effet d'une contrainte, ces dislocations se déplacent vers la surface du cristal : dans sa migration, une dislocation n'implique le déplacement que de quelques atomes à la fois par rapport à leur position d'équilibre, ces atomes étant situés au voisinage de la dislocation. Ce déplacement, que l'on peut comparer à celui d'un pli d'une extrémité d'un tapis à l'autre, est plus facile à réaliser que le déplacement d'un plan complet d'atomes, ce qui a pour effet de diminuer la limite élastique du cristal (environ 10^3 fois) par rapport à la valeur théorique. Ainsi, la déformation plastique résulte de la formation et du déplacement de telles dislocations (*fig.* 8).

Dans un métal polycristallin, préparé sans précautions spéciales, il existe de nombreuses discontinuités entre les grains, et par suite une densité de dislocations considérable. Lorsqu'on le déforme à une température assez basse, le déplacement des dislocations dans tout le cristal est

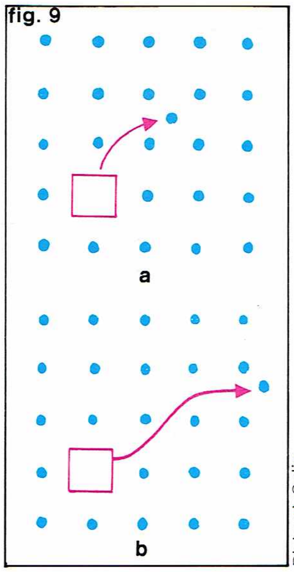

Richard Colin

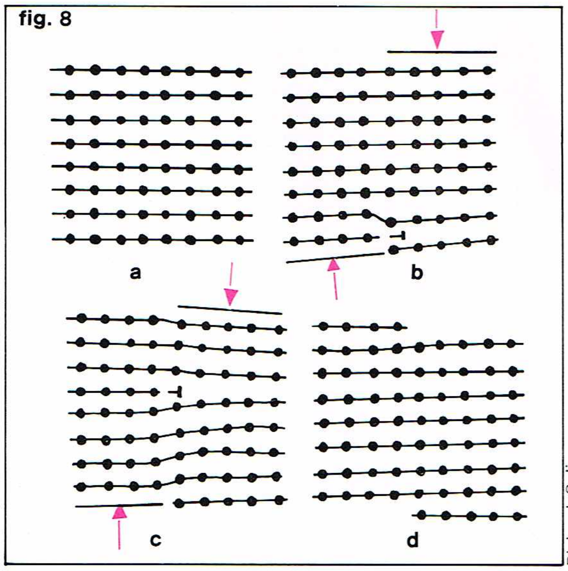

Richard Colin

▲ *A gauche, figure 9; défauts ponctuels : (a) défaut de Frenkel; (b) défaut de Schottky. A droite, figure 8 : mouvement d'une dislocation dans un cristal sous l'effet d'une force de cisaillement.*

▶▼ *En haut, figure 11 : déformation d'un fil rectiligne sous l'action d'une force* $\vec{F}$. *En bas, figure 12 : décomposition de la force agissant sur la surface* ΔA_2 *perpendiculaire à l'axe* x_2. *La contrainte* T_{12}, *par exemple, est égale à :*

$$T_{12} = \lim_{\Delta A_2 \to 0} \frac{\Delta F_1}{\Delta A_2}$$

▼ *Figure 10 : (a) impureté interstitielle; (b) impureté substitutionnelle.*

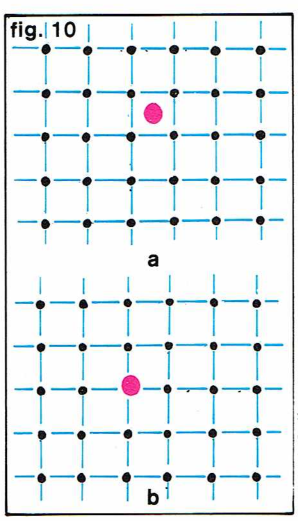

Richard Colin

freiné par ces discontinuités que sont les joints de grains. Ainsi, un polycristal présente une dureté plus grande que le monocristal correspondant, c'est-à-dire qu'il est moins déformable ; un recuit augmente la dimension des grains et favorise la ductilité du matériau, alors qu'un écrouissage augmente la densité des dislocations et le rend cassant. Outre leur influence sur les propriétés mécaniques des solides, les dislocations jouent un rôle important dans la croissance des cristaux.

Défauts ponctuels

On rencontre dans les cristaux des imperfections locales, les lacunes ; elles résultent de désordres thermiques qui apparaissent lorsqu'on approche du point de fusion du matériau. Ces lacunes se forment lorsqu'un atome quitte un nœud du réseau pour aller en un site de surface (défaut de Schottky), ou pour aller occuper une position interstitielle différente d'un nœud du réseau (défaut de Frenkel) (*fig.* 9). Ces lacunes facilitent les phénomènes de diffusion atomique dans les solides.

Impuretés

On peut introduire dans un cristal des atomes étrangers ayant approximativement la même dimension et la même valence que ceux du cristal hôte. Ces atomes peuvent remplacer un atome de la matrice (impureté substitutionnelle) ou se mettre en un endroit quelconque de la maille (impureté interstitielle) [*fig.* 10].

Dans un métal, peu d'atomes sont suffisamment petits pour se mettre dans un site interstitiel de sa structure compacte (hydrogène, bore, carbone, azote). Par contre, il est facile d'introduire en substitution des atomes d'impuretés métalliques : on forme ainsi un alliage qui constitue en fait une « solution solide cristalline » où les divers atomes sont intimement liés.

Suivant la température de l'alliage et sa concentration en impuretés, il apparaît plusieurs phases, c'est-à-dire plusieurs régions du système structuralement homogènes. Ainsi l'alliage Cu-Zn, à température ambiante, est dans la phase cubique à faces centrées (identique à la structure du cuivre) jusqu'à environ 40 % d'atomes de Zn (c'est le laiton), alors que, pour 50 % d'atomes de Zn, l'alliage précipite dans la phase cubique centrée. Dans les alliages dilués, les impuretés sont responsables de la résistivité résiduelle (à T = 0) proportionnelle à leur concentration, ou d'effets d'ordre magnétique.

Dans les semi-conducteurs (Si, Ge, Ga, As), l'introduction d'impuretés substitutionnelles pentavalentes (P) ou trivalentes (In) augmente de façon considérable la conductivité du matériau ; ces semi-conducteurs dopés (respectivement type *n* et *p*) sont les éléments de base qui ont révolutionné l'électronique.

Dans les isolants, les impuretés affectent essentiellement les propriétés optiques. La coloration des cristaux (alumine, quartz) ou les propriétés luminescentes du sulfure de zinc sont liées à leur dopage par des impuretés diverses.

Dynamique du réseau cristallin

Propriétés élastiques

La cohésion cristalline se manifeste tout d'abord dans les propriétés élastiques des solides. Bien que les atomes aient une position d'équilibre déterminée dans le cristal, ils peuvent se déplacer autour de cette position sous l'effet d'une force extérieure ou par agitation thermique. Dans le premier cas, si la longueur d'onde λ de l'excitation est grande devant la distance interatomique, on peut considérer le cristal comme un *milieu continu et homogène*, et non comme un arrangement périodique d'atomes. Ce modèle s'applique aux ondes élastiques de fréquence inférieure à 10^{10} Hz, c'est-à-dire de longueur d'onde supérieure à 10^{-5} cm.

Considérons tout d'abord (*fig.* 11) le cas simple d'un fil extensible, de longueur L, soumis à une force de traction $\vec{F}$; sous l'effet de cette force, le fil s'allonge de façon réversible. Deux points voisins M et N se déplacent de quantités différentes $u(x)$ et $u(x + \Delta x)$. La déformation S au point M est définie par

$$S = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{u(x + \Delta x) - u(x)}{\Delta x} = \frac{\partial u}{\partial x}$$

Ce rapport sans dimension dépend du point x où il est mesuré.

Dans cet exemple, tous les points se déplacent dans la même direction, et la déformation se réduit à l'allongement du fil. Par contre, dans un solide, des points voisins peuvent se déplacer dans des directions différentes, et la déformation élastique présente alors une variation angulaire. Dans un repère orthonormé d'origine O, les coordonnées de deux points voisins M et N du solide non déformé sont $\vec{x}_M$ et $\vec{x}_N = \vec{x}_M + \vec{\Delta x}$.

Sous l'action d'une force extérieure, ils se transforment en M′ et N′, de coordonnées

$$\vec{x}_{M'} = \vec{x}_M + \vec{u}_M \quad \text{et} \quad \vec{x}_{N'} = \vec{x}_N + \vec{u}_N = \vec{x}_{M'} + \vec{\Delta x'}.$$

La variation de distance entre deux points voisins $(\Delta x')^2 - (\Delta x)^2$ s'exprime en fonction du *tenseur des déformations* S_{ij} :

$$(\Delta x')^2 - (\Delta x)^2 = 2\, S_{ij} \Delta x_i \Delta x_j \quad \text{avec} \quad S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)$$

Des tensions mécaniques appelées contraintes apparaissent alors dans le solide déformé et tendent à le ramener dans son état d'équilibre. Ces contraintes se trans-

Richard Colin

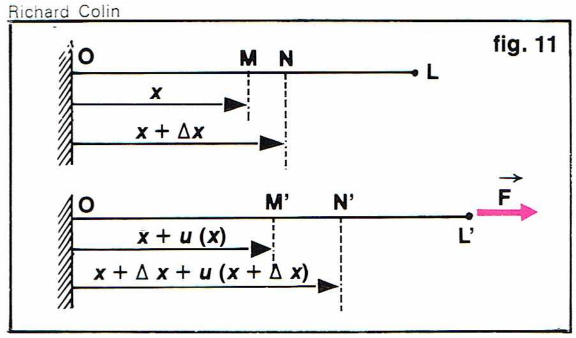

Richard Colin

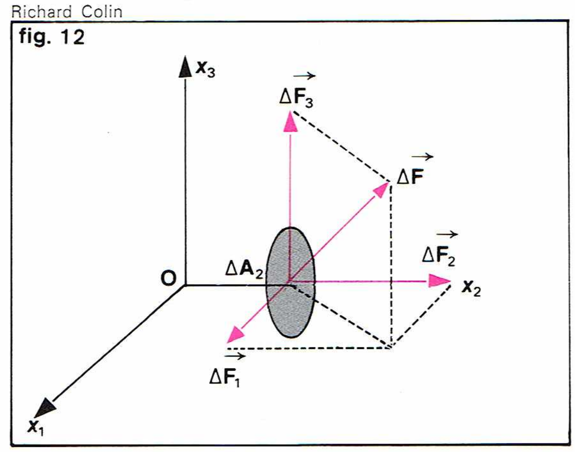

mettent de proche en proche par les forces de liaison entre atomes. Ainsi la matière entourant un volume quelconque agit sur celui-ci à travers la surface de séparation. Appelons ΔA_k une surface perpendiculaire à l'axe $\vec{k}$ du repère orthonormé et ΔF_i la composante de la force qui s'exerce sur cette surface dans la direction $\vec{i}$. La contrainte T_{ik} est définie par (*fig.* 12)

$$T_{ik} = \lim_{\Delta A_k \to 0} \frac{\Delta F_i}{\Delta A_k}$$

C'est une force par unité de surface. L'ensemble des neuf composantes T_{ik} constitue le *tenseur des contraintes*. Les tenseurs des contraintes et des déformations sont de rang deux; tous deux sont symétriques ($T_{ij} = T_{ji}$), ce qui réduit à six le nombre de composantes indépendantes de chacun.

Au repos, les contraintes et les déformations sont nulles. Lorsque les déformations sont suffisamment petites, on admet que les composantes du tenseur des contraintes sont proportionnelles à celles du tenseur des déformations (loi de Hooke) :

$$T_{ij} = \sum_{k,l} C_{ijkl} S_{kl}$$

Le tenseur de rang quatre de composantes C_{ijkl} est appelé *tenseur des rigidités élastiques*. La symétrie des tenseurs T_{ik} et S_{ij} ramène de 81 à 36 le nombre des constantes élastiques indépendantes. Ce nombre peut encore être réduit, compte tenu de la symétrie du solide étudié.

Les expériences de propagation d'ondes ultrasonores dans un cristal permettent de déterminer ses diverses constantes élastiques. En effet, si l'on applique par contact mécanique une vibration sinusoïdale à la surface d'un solide, cette vibration se propage dans le cristal. Considérons par exemple un déplacement $u(x)$, suivant la direction Ox, de la forme :

(8) $$u(x, t) = u_0 \exp i (qx - \omega t)$$

où $q = \frac{2\pi}{\lambda}$ est le vecteur d'onde et ω la pulsation. L'équation de propagation obtenue par un traitement classique impose une relation entre ω et q, appelée relation de dispersion $\omega = q \left(\frac{c}{\rho}\right)^{1/2}$, d'où l'on déduit la vitesse de propagation ou *vitesse du son* dans le cristal $V_S = \sqrt{\frac{c}{\rho}}$. Dans ces expressions, c est la constante de rigidité relative à la direction Ox et ρ la masse volumique du solide. Cette vitesse, grandeur aisément mesurable, est généralement comprise entre 10^3 et 10^4 m/s, et, pour un solide de masse volumique $\rho = 5 \cdot 10^3$ kg/m³, la rigidité c est de l'ordre de 10^{11} N/m².

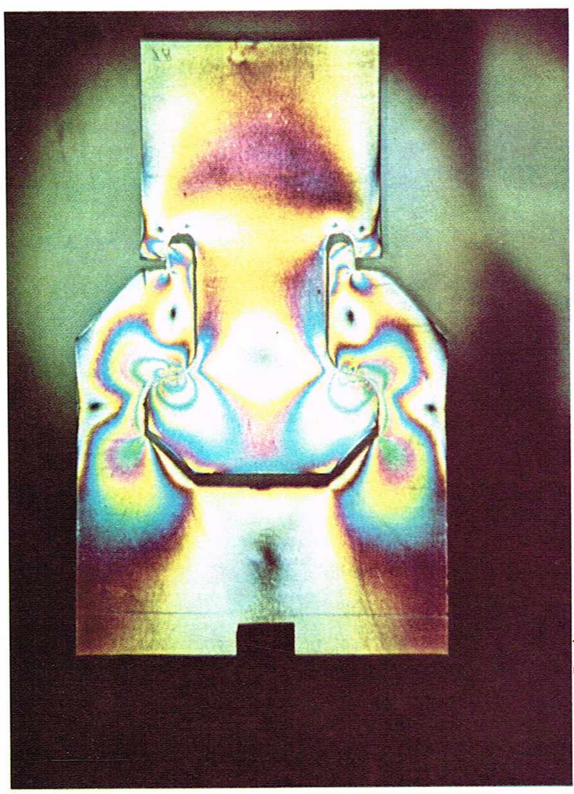

J. Launois - Rapho

◀ *Photographie en lumière polarisée mettant en évidence les lignes de force entre deux pièces de métal soumises à une forte pression.*

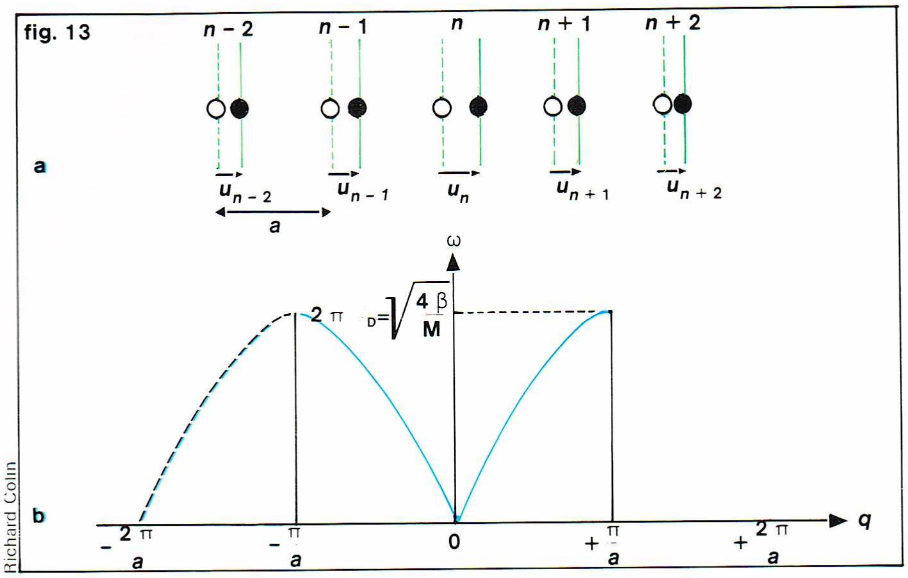

Richard Colin

▲ *Figure 13; vibration d'une chaîne linéaire d'atomes identiques :* (a) *déplacement des atomes par rapport à leur position de repos;* (b) *relation de dispersion ω (q), représentée dans la première zone de Brillouin.*

Vibrations atomiques

Dans un cristal, les atomes sont constitués d'un noyau positif entouré d'électrons qui lui sont rigidement liés, exception faite de quelques électrons par atome, les « électrons de valence » qui interviennent dans la cohésion du cristal et jouent un grand rôle dans la conductivité électrique. Noyau et électrons liés constituent ainsi un ensemble rigide, appelé « ion », dont la masse est très sensiblement celle de l'atome. A moins d'être à une température voisine du zéro absolu, ces ions vibrent autour de leur position d'équilibre, l'amplitude de ces vibrations étant faible devant la distance interatomique. De plus, comme les longueurs d'onde mises en jeu sont de l'ordre des distances interatomiques, on conçoit que la structure périodique du réseau joue un rôle déterminant dans ce phénomène.

Examinons tout d'abord l'exemple simple d'une chaîne de N atomes identiques séparés par la distance a au repos (*fig.* 13a). Si l'on déplace un atome quelconque dans le sens de la chaîne, tous les atomes vont de proche en proche se mettre en mouvement par suite des forces de liaison : une telle vibration longitudinale crée un mouvement d'ensemble des atomes de ce cristal linéaire. On peut représenter les interactions entre ions par des ressorts parfaits liant ces ions entre eux; les forces de rappel sont alors proportionnelles à la différence des déplacements de deux ions voisins (hypothèse du potentiel d'interaction harmonique). L'équation de mouvement du n-ième ion, de masse M, s'écrit d'après la loi de la mécanique classique :

(9) $$F_{appl} = M \frac{d^2 u_n}{dt^2} = \beta (u_{n+1} - u_n) + \beta (u_{n-1} - u_n)$$

u_n, u_{n+1}, u_{n-1} étant les déplacements des atomes n, $n+1$ et $n-1$.

Dans le cas d'un milieu discontinu, le déplacement u_n de l'ion situé au point $x = na$ peut s'écrire par analogie avec la relation **(8)** :

(10) $$u_n = u_0 \exp i (qna - \omega t)$$

Les équations **(9)** et **(10)** permettent d'obtenir la relation de dispersion :

$$\omega = \left(\frac{4\beta}{M}\right)^{1/2} \left|\sin \frac{qa}{2}\right|$$

L'espace réciproque où sont représentés les vecteurs d'ondes $\vec{q}$ est ici à une dimension, et le réseau réciproque est défini par le vecteur $A = \frac{2\pi}{a}$. La périodicité de la relation de dispersion $\omega(q)$ permet d'obtenir toutes les solu-

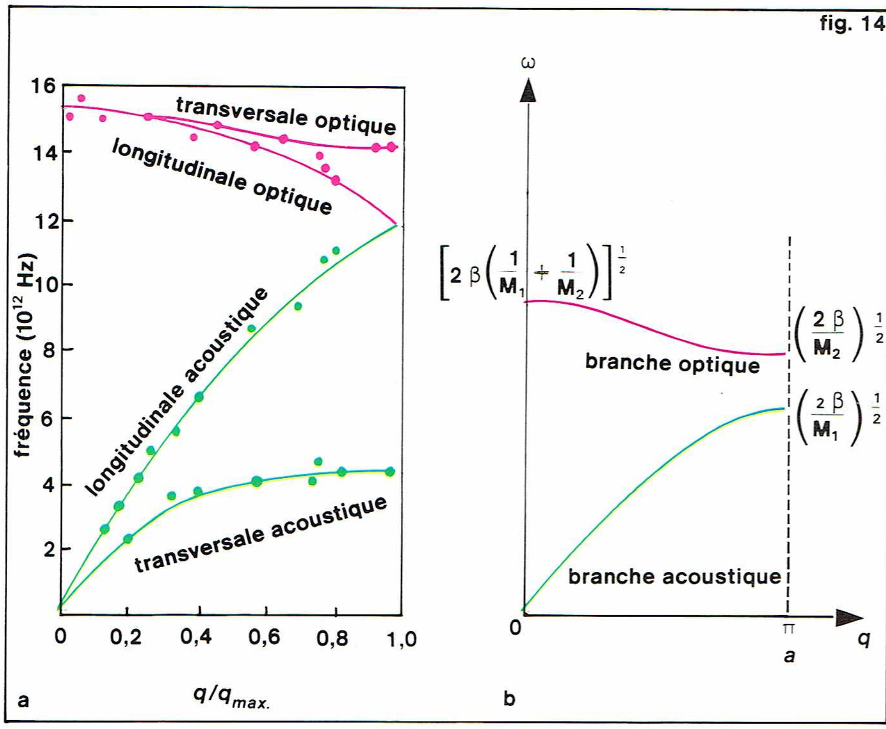

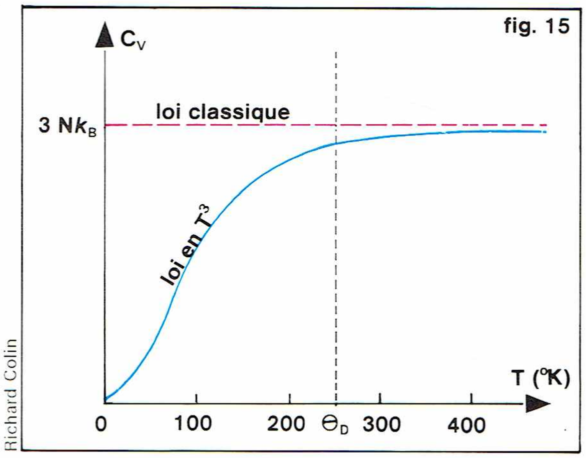

▲ *A gauche, figure 14 :* (a) *détermination expérimentale de la relation de dispersion d'ondes se propageant dans la direction [100] dans le silicium. L'existence des modes optiques est due au fait qu'il y a deux atomes par maille dans le réseau cubique à faces centrées du silicium.* (b) *Relation de dispersion dans un cristal à une dimension, de pas a, contenant deux atomes par maille de masses* M_1 *et* M_2. *A droite, figure 15 : variation de la chaleur spécifique en fonction de la température dans un solide ayant une température de Debye de l'ordre de 250 °K.*

tions indépendantes dans l'intervalle $-\frac{\pi}{a} \leqslant q \leqslant \frac{\pi}{a}$ qui constitue la 1re zone de Brillouin du réseau réciproque.

Pour des longueurs d'onde λ grandes devant a $\left(q \ll \frac{\pi}{a}\right)$, on remarque que $\omega = V_S q$; la grandeur $V_S = \left(\frac{\beta a^2}{M}\right)^{1/2}$ est la vitesse de groupe de ces ondes, égale à la vitesse de propagation des sons dans ce cristal : cette courbe de dispersion est appelée la branche acoustique (*fig.* 13b).

On remarque également l'existence d'une fréquence maximale $\nu_D = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{4\beta}{M}\right)^{1/2}$ appelée fréquence de Debye, de valeur comprise en général entre 10^{12} et 10^{13} hertz. Le nombre de modes de vibration, de fréquence ω, n'est pas infini ; on peut montrer que les dimensions finies du réseau font que les seules valeurs de q possibles sont $q = n\frac{2\pi}{Na} = \frac{n}{N}$A pour une chaîne de N atomes. Ainsi, le nombre total de modes indépendants est égal au nombre d'atomes de la chaîne.

Pour une chaîne linéaire ayant deux atomes de masse différente par maille élémentaire, on peut démontrer l'existence de deux relations de dispersion, c'est-à-dire qu'à chaque valeur de q correspondent deux modes de vibration possibles (*fig.* 14). On retrouve aux basses fréquences la branche acoustique, caractérisée par le fait que deux atomes voisins vibrent en phase ; le centre de masse de la molécule qu'ils constituent subit une translation. L'autre relation, correspondant à des fréquences très élevées, est appelée la branche optique : pour $q \simeq 0$, deux atomes voisins vibrent en opposition de phase avec des amplitudes telles que le centre de masse reste immobile. Dans les cristaux ioniques, où les deux types d'ions ont des charges opposées, il en résulte un moment dipolaire électrique oscillant qui peut interagir avec un rayonnement électromagnétique de même fréquence (domaine infrarouge).

La généralisation aux cristaux tridimensionnels des résultats précédents est simple. Soit un cristal constitué de N mailles, chacune contenant p atomes ; chaque atome possédant trois degrés de liberté, on a en tout 3 pN *modes normaux de vibration.*

Le déplacement $\vec{u}\ (\vec{r}, t)$ d'un atome situé au point $\vec{r}$ du réseau, correspondant à un mode de vibration donné, s'écrit :

$$\vec{u}\ (\vec{r}, t) = \vec{u}_0 \exp i\ (\vec{q} \cdot \vec{r} - \omega t)$$

où $\vec{u}_0$ est l'amplitude du déplacement. La polarisation de l'onde est définie par la direction de $\vec{u}_0$ par rapport au vecteur d'onde $\vec{q}$: l'onde est longitudinale si $\vec{u}_0$ et $\vec{q}$ sont parallèles, et transversale s'ils sont orthogonaux. On obtient ainsi 3 branches acoustiques (3N modes), une longitudinale et deux transversales, et (3 p — 3) branches optiques ([3 p — 3] N modes).

Chaleur spécifique et conductibilité thermique des isolants

Dans les isolants, les transferts de chaleur se font par l'intermédiaire des vibrations élastiques du réseau atomique. Sous l'effet de l'agitation thermique, chaque atome d'un cristal vibre dans son puits de potentiel indépendamment des autres : on peut le considérer comme un oscillateur harmonique à trois dimensions, et par suite un cristal ayant N atomes se comporte comme un ensemble de 3 N oscillateurs harmoniques indépendants. En théorie classique, le nombre d'oscillateurs f (ε) dans le même état d'énergie ε étant donné par la statistique de Maxwell-Boltzmann $f(\varepsilon) = A \exp(-\varepsilon/k_B T)$, on peut calculer l'énergie de l'ensemble : $U = 3\ Nk_B T$ (k_B est la constante de Boltzmann). On en déduit la chaleur spécifique $C_V = \frac{dU}{dT} = 3\ Nk_B$, qui est constante. Cette loi, appelée loi de Dulong et Petit, est bien vérifiée au voisinage de la température ambiante, mais est en contradiction avec l'expérience aux basses températures. Ce n'est qu'en faisant appel à la statistique quantique que l'on peut interpréter ces résultats. A chaque mode de vibration, de pulsation ω, on associe un quantum d'énergie $\hbar\omega$, appelé *phonon*, qui présente à la fois un caractère corpusculaire et ondulatoire. Ces phonons, qui sont des particules indiscernables, obéissent à la *statistique de Bose-Einstein*, c'est-à-dire que le nombre de phonons de pulsation ω existant dans un cristal à la température T est donné par

$$N\ (\omega, T) = \frac{1}{\exp\ (\hbar\omega/k_B T) - 1}$$

L'énergie de vibration d'un oscillateur harmonique quantique, de pulsation ω, s'écrit alors

$$E\ (\omega, T) = \hbar\omega\left[\frac{1}{2} + N\ (\omega, T)\right]$$

En intégrant sur tous les modes de vibration possibles, on peut déterminer l'énergie U et, par suite, en déduire la chaleur spécifique en fonction de la température (*fig.* 15) :

$$\text{si}\quad T \ll \theta_D,\quad C_V = 234\ Nk_B\left(\frac{T}{\theta_D}\right)^3$$

$$\text{si}\quad T \gg \theta_D,\quad C_V = 3\ Nk_B$$

θ_D est la température de Debye définie par $k_B\theta_D = \hbar\omega_D$.

Cette loi en T^3, due à Debye, est en bon accord avec les résultats expérimentaux.

Si l'on établit un gradient de température dT/dx le long d'un solide, on observe un transfert de chaleur de l'extrémité chaude vers la froide ; on définit la conductivité thermique $\varkappa$ par l'équation $\frac{dQ}{dt} = \varkappa\frac{dT}{dx}$, où $\frac{dQ}{dt}$ représente l'énergie transmise par unité de temps à travers une section de 1 cm^2 du solide. Dans un modèle simple, dérivé de la

théorie cinétique des gaz, Debye a montré que $\varkappa = \frac{1}{3} C_V V l$, C_V étant la chaleur spécifique, V la vitesse des phonons et l leur libre parcours moyen, c'est-à-dire la distance moyenne qu'ils parcourent entre deux collisions, surtout avec d'autres phonons. L'origine de telles collisions entre phonons est due à l'anharmonicité du potentiel d'interaction V (r).

Aux hautes températures ($T > \theta_D$), le nombre de phonons N (ω, T) peut s'approximer par $k_B T/\hbar\omega$, d'où un libre parcours moyen l (T) $\simeq$ 1/T. A basse température, de telles collisions deviennent très rares, et le libre parcours moyen n'est plus limité que par les dimensions finies du cristal ou par ses imperfections. Ainsi les variations de l (T) jointes à celles de C_V (T) permettent d'interpréter les courbes $\varkappa$ (T).

Les rayons X et les neutrons (par leur interaction avec les noyaux atomiques) peuvent être diffusés de façon inélastique par un cristal ; ils sont ainsi sensibles aux vibrations des atomes, c'est-à-dire qu'ils peuvent créer ou absorber un ou plusieurs phonons. De telles expériences permettent de déterminer les relations de dispersion des phonons et sont la meilleure preuve de leur existence.

Propriétés électroniques des solides

On doit à P. Drude (1900) et à H. A. Lorentz (1909) d'avoir démontré de façon tout à fait convaincante que les propriétés spécifiquement métalliques sont dues à la présence d'électrons, libres de se déplacer dans le réseau. Ces électrons se comportent comme un gaz de particules chargées qui, à l'équilibre thermique, obéissent à la statistique classique de Maxwell-Boltzmann. Si le succès de cette théorie fut d'interpréter les conductibilités électrique et thermique élevées des métaux et leur réflectivité dans le domaine optique, la contribution des électrons à la chaleur spécifique ainsi que leur susceptibilité magnétique restèrent incomprises : ces dernières propriétés ont été expliquées grâce à la première théorie quantique proposée par A. Sommerfeld (1923).

Dans un métal, les états d'énergie des électrons doivent conserver d'importantes ressemblances avec ceux des atomes isolés, car les interactions entre atomes voisins ne peuvent détruire complètement leur structure électronique spécifique ; il en est ainsi pour les électrons des couches profondes qui sont fortement liés aux noyaux. Par contre, ces interactions sont assez fortes pour que les niveaux énergétiques des électrons des couches externes (électrons de valence) soient modifiés. Ces niveaux s'élargissent alors en bandes d'énergie presque continues : elles sont à l'origine de nouvelles propriétés du cristal que ne possèdent pas ses atomes constituants. Ainsi, dans les métaux, ces électrons de valence deviennent les conducteurs de l'électricité : on les appelle électrons de conduction.

Les électrons libres dans les métaux

Le modèle simple proposé par Sommerfeld revient à considérer le métal comme un gaz d'électrons de conduction, sans interaction mutuelle, qui se déplacent dans le potentiel moyen constant du cristal : cette hypothèse se justifie par le fait que l'énergie cinétique des électrons est si grande qu'ils ne sont pas sensibles aux variations de potentiel au voisinage des ions.

En mécanique quantique, à chaque électron de masse m est associée une onde ; la recherche de ses états d'énergie possibles revient à déterminer les solutions de l'équation de Schrödinger stationnaire :

$$\frac{\hbar^2}{2m} \Delta\Psi(\vec{r}) + [\varepsilon - V(\vec{r})]\,\Psi(\vec{r}) = 0 \quad (11)$$

où $\hbar$ est la constante de Planck divisée par 2 π. Pour un électron libre, l'énergie potentielle V ($\vec{r}$) est une constante V_0. La fonction d'onde $\Psi(\vec{r}) = A \exp(i\vec{k}\cdot\vec{r})$, qui correspond, pour la solution dépendant du temps, à une onde plane de vecteur d'onde $\vec{k}$

$$\Psi(\vec{r}, t) = A \exp i\left(\vec{k}\cdot\vec{r} - \frac{\varepsilon}{\hbar} t\right)$$

est solution de cette équation et conduit à la relation de dispersion :

$$\varepsilon(\vec{k}) = V_0 + \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$$

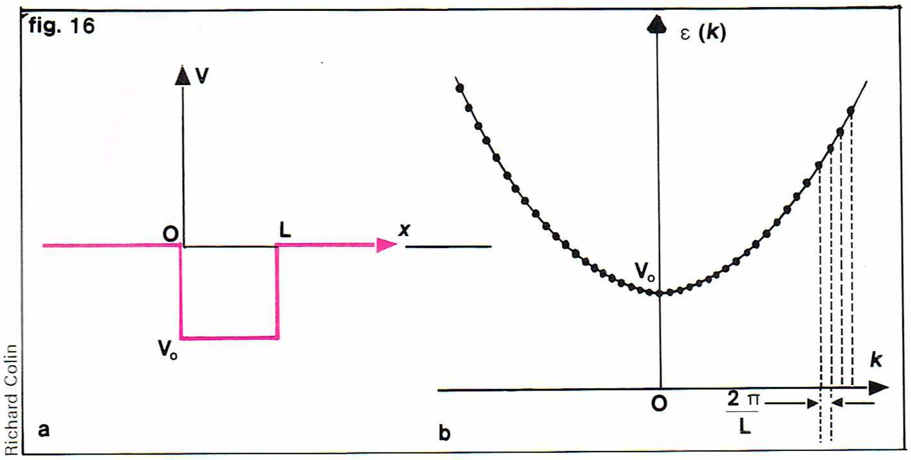

▲ *Figure 16 : états d'énergie d'un électron dans un potentiel constant V_0.* (a) *Énergie potentielle de l'électron dans un cristal unidimensionnel de longueur finie* L. (b) *Quantification des états d'énergie correspondants. La densité des vecteurs d'onde permis est* $\frac{L}{2\pi}$.

La détermination de la fonction d'onde n'est complète que si l'on a précisé les conditions aux limites à la surface du cristal ; on préfère remplacer les conditions réelles par les conditions périodiques de Born-von Karman qui permettent de dénombrer les états sans être influencé par les phénomènes physiques en surface (*fig.* 16). On obtient ainsi un ensemble discret de valeurs des vecteurs $\vec{k}$ permises, qui, dans l'espace réciproque, définissent un réseau de points, de densité uniforme $D_k = V/(2\pi)^3$ d'autant plus grande que le volume V du cristal est grand. Représentées dans cet espace, les surfaces d'énergie constante $\varepsilon = \varepsilon(\vec{k})$ sont des sphères. Il est alors commode d'introduire la densité des états électroniques n (ε), c'est-à-dire le nombre d'états disponibles d'énergie comprise entre ε et $\varepsilon + d\varepsilon$:

$$n(\varepsilon) = (V/4\pi^2)\,(2m/\hbar^2)^{3/2}\,(\varepsilon - V_0)^{1/2}$$

A l'équilibre thermodynamique, comment doit-on répartir les électrons dans ces états d'énergie disponibles ? Comme pour les phonons, il faut introduire une statistique. Les électrons possédant un moment cinétique de spin demi-entier doivent obéir au principe d'exclusion de Pauli : dans un état quantique défini par un vecteur d'onde $\vec{k}$, il ne peut y avoir que deux électrons avec des spins opposés. La probabilité d'occupation d'un niveau d'énergie ε à une température T est donnée par la distribution de Fermi-Dirac (*fig.* 17) :

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{1 + \exp[(\varepsilon - \varepsilon_F)/k_B T]}$$

Le paramètre ε_F est appelé « énergie de Fermi » ; dans un métal, il varie assez peu avec la température. L'énergie de Fermi est fixée par le nombre d'électrons de conduction N présents dans le cristal :

▼ *Figure 17 :* (a) *fonction de distribution de Fermi-Dirac, représentant la probabilité d'occupation d'un niveau d'énergie ε, en fonction de ε, à une température* T *donnée.* (b) N (ε) f (ε), *densité des états d'énergie occupés en fonction de ε, pour trois températures : T = 0 °K et $T_2 > T_1 > 0$ °K. La courbe en pointillé représente* N (ε) *en fonction de ε.*

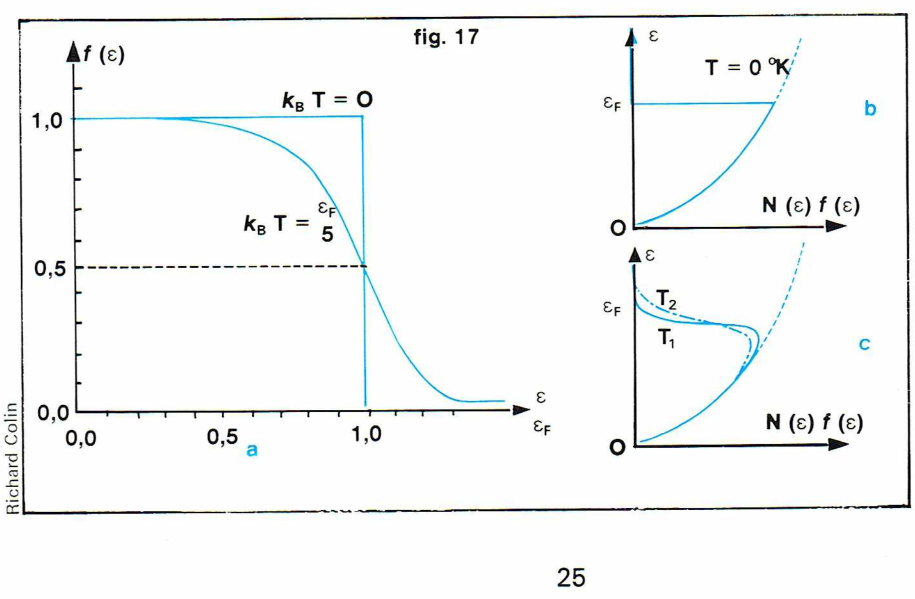

▶ *Figure 19 : bandes d'énergie du carbone (diamant), obtenues à partir de l'approximation des liaisons fortes ; a est la distance interatomique à l'équilibre.*

$$N = \int_0^\infty N(\varepsilon) f(\varepsilon) d\varepsilon, \quad \text{où} \quad N(\varepsilon) = 2n(\varepsilon)$$

est la densité des états avec les deux orientations de spin possibles et $f(\varepsilon)$ leur probabilité d'occupation. La distribution $f(\varepsilon)$ a une forme particulière à $T = 0$ °K, si bien qu'un calcul très simple nous permet d'obtenir l'énergie de Fermi :

$$\varepsilon_F = \frac{\hbar^2 k_F}{2m} = \frac{\hbar^2}{2m} [3\pi^2 N/V]^{2/3}$$

Dans l'espace réciproque, la surface correspondant à cette énergie est appelée la *surface de Fermi*. Elle est caractérisée par une densité d'état $N(\varepsilon_F) = 3N/2\varepsilon_F$. Dans les métaux simples (alcalins) ou les métaux nobles (Cu, Ag, Au), les valeurs de ε_F sont d'environ 5 eV.

Électrons dans un potentiel périodique - Théorie des bandes

Si la théorie des électrons libres interprète de façon satisfaisante de nombreuses propriétés métalliques, elle est incapable d'expliquer pour quelle raison certains cristaux sont des isolants et d'autres de très bons conducteurs. L'hypothèse du potentiel constant faite dans ce modèle n'est pas satisfaisante, car elle néglige l'influence de la périodicité du potentiel cristallin sur le mouvement des électrons ; la longueur d'onde associée à un électron au niveau de Fermi $\left(\lambda_F = \frac{2\pi}{k_F} \simeq a\right)$ étant comparable aux distances interatomiques, les électrons pourront être diffractés par le réseau.

▼ *Figure 18 : électrons dans un potentiel périodique — bandes d'énergie.* (a) *Bandes d'énergie du sodium : quand des atomes sont rapprochés pour constituer le cristal, les électrons de valence interagissent avec le potentiel V(r), d'où l'apparition d'une bande pour les électrons 3s.* (b) *Courbe ε (k) pour un électron dans un potentiel périodique, à une dimension, de pas a.*

Le problème à résoudre est celui d'un ensemble d'électrons dans un solide cristallin ; c'est un problème « à N corps », impossible à résoudre rigoureusement, car il nécessite la connaissance des fonctions d'onde et des énergies de tous les électrons. La méthode pratique consiste à le réduire à un problème à un électron : on suppose que les électrons se déplacent indépendamment les uns des autres dans un potentiel moyen ayant la périodicité du réseau cristallin, dû à la fois aux interactions avec les ions fixes et les autres électrons. Il faut ainsi résoudre l'équation de Schrödinger **(11)** : $\vec{L}$ étant un vecteur du réseau, l'énergie potentielle vérifie la relation $V(\vec{r} + \vec{L}) = V(\vec{r})$. On remarque que si $\Psi(\vec{r})$ est une solution du problème correspondant à l'énergie ε

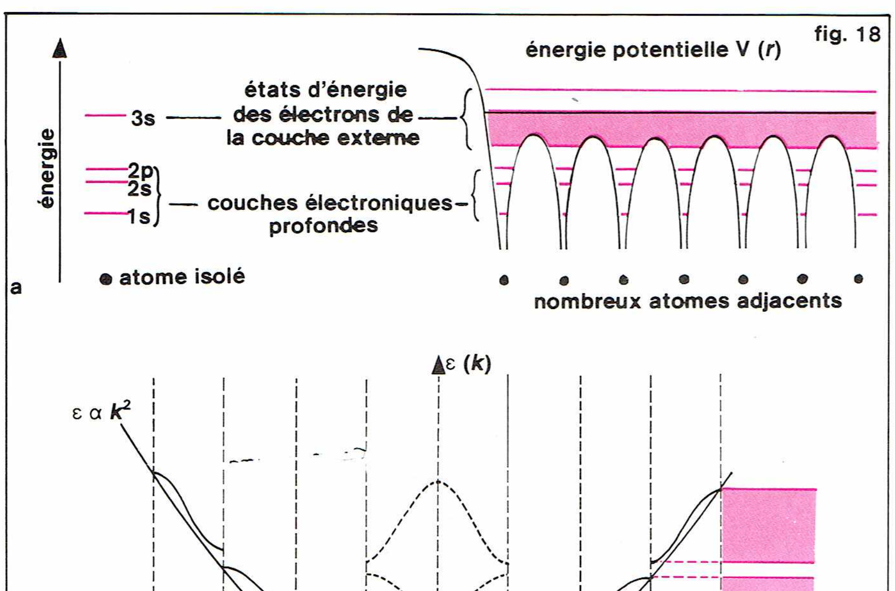

Richard Colin

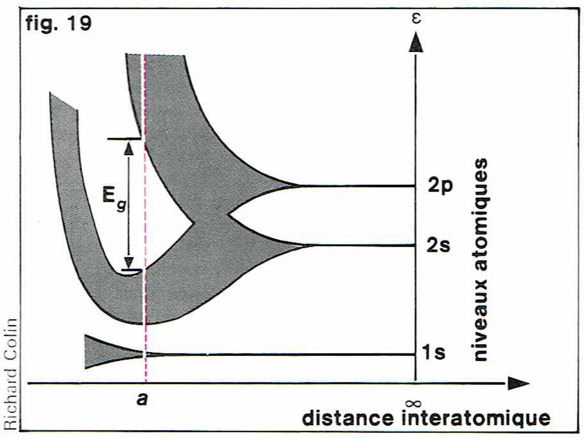

Richard Colin

$\Psi(\vec{r} + \vec{L})$ en est une aussi, ce qui permet de l'écrire sous la forme :

$$\Psi_{\vec{k}}(\vec{r}) = e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}}\, U_{\vec{k}}(\vec{r}) \quad \text{où} \quad U_{\vec{k}}(\vec{r}) = U_{\vec{k}}(\vec{r} + \vec{L})$$

Une telle solution, appelée *fonction de Bloch*, correspond à une onde plane modulée par une fonction ayant la périodicité du réseau. Les valeurs de $\vec{k}$ permises, déterminées par la taille du cristal $\vec{L}_1 = N_1\vec{a}$, $\vec{L}_2 = N_2\vec{b}$, $\vec{L}_3 = N_3\vec{c}$, s'écrivent :

$$\textbf{(12)} \quad \vec{k} = (n_1/N_1)\vec{A} + (n_2/N_2)\vec{B} + (n_3/N_3)\vec{C}$$

où n_1, n_2, n_3 sont des entiers ($0, \pm 1, \pm 2, \ldots$).

On démontre de même que l'énergie est une fonction périodique de $\vec{k}$: $\varepsilon(\vec{k} + \vec{G}) = \varepsilon(\vec{k})$, où $\vec{G}$ est un vecteur du réseau réciproque. Cette propriété permet de restreindre la recherche des solutions $\varepsilon(\vec{k})$ indépendantes dans le volume élémentaire de l'espace réciproque, c'est-à-dire dans la zone de Brillouin, qui, d'après la relation **(12)**, possède autant de valeurs de $\vec{k}$ que de mailles dans le cristal.

Lorsqu'on introduit le potentiel $V(\vec{r})$ comme une perturbation (approximation des *électrons presque libres*), son effet n'est important que sur des états dont les vecteurs $\vec{k}$ sont dans une région où la condition de diffraction de Bragg est vérifiée : $\vec{G}^2 + 2\vec{k}\cdot\vec{G} = 0$. Comme pour les rayons X, l'onde réfléchie interfère avec l'onde incidente : les fonctions d'onde ne sont alors plus progressives, mais stationnaires, et correspondent à deux valeurs distinctes de l'énergie. Il apparaît ainsi des bandes d'énergie interdite aux frontières des zones de Brillouin (*fig.* 18).

L'allure des courbes $\varepsilon(\vec{k})$, ramenées dans la 1re zone de Brillouin, est représentée sur la *figure* 18. On constate que l'énergie a une forme quadratique en k au voisinage des limites des bandes permises, dont la plus simple s'écrit :

$$\varepsilon(k) = \varepsilon_c + \frac{\hbar^2(\vec{k} - \vec{k}_0)^2}{2m^*}$$

Cette masse m^*, appelée *masse effective*, qui reflète l'influence du réseau sur le mouvement des électrons, peut être très différente de la masse de l'électron libre (elle est d'ailleurs négative en haut d'une bande permise).

Lorsque le recouvrement des fonctions d'onde atomiques n'est pas trop fort (couches 3d et 4d des éléments de transition tels que Fe et Pd), on construit des fonctions de Bloch à partir de combinaisons linéaires de fonctions d'onde atomiques ; cette approximation, dite des *liaisons fortes*, conduit à des structures de bandes analogues (*fig.* 19).

Métaux, isolants, semi-conducteurs

A une température donnée, les électrons vont se ranger dans les divers états d'énergie correspondant à des bandes permises conformément à la statistique de Fermi-Dirac.

Si un cristal possède N mailles, on a N vecteurs $\vec{k}$ indépendants dans la zone de Brillouin ; en tenant compte des deux directions de spin, chaque bande d'énergie contient 2 N états électroniques. S'il y a un atome par

maille fournissant un seul électron de valence, la bande sera à moitié remplie à T = 0 ; sous l'effet d'un champ électrique, des électrons au voisinage du niveau de Fermi pourront changer d'énergie à l'intérieur de la bande, puisqu'il reste des états disponibles : un tel solide, caractérisé par une conductibilité élevée, est un métal. Si le cristal possède un atome bivalent par maille, les 2 N électrons remplissent entièrement les états d'une bande. L'énergie d'excitation apportée par un champ électrique ou par la température est insuffisante pour faire passer des électrons de cette bande pleine (bande de valence) à la bande suivante vide (bande de conduction) ; le solide est un isolant et ne possède évidemment pas de surface de Fermi. En revanche, si la hauteur de bande interdite E_g est assez faible, des électrons de la bande de valence peuvent être excités thermiquement dans la bande de conduction ; la conductivité dépend alors fortement de la température : on dit que l'on a un semi-conducteur intrinsèque (*ex.* : Ge, Si) [*fig.* 20]. On peut encore définir une quatrième catégorie, les semi-métaux (*ex.* : As, Bi) ; ce sont des solides dont la dernière bande est presque entièrement remplie, mais, par suite d'un chevauchement de bandes, des électrons sont passés dans la bande supérieure ; ils présentent alors, même à T = 0, un état métallique.

Dynamique des électrons dans un cristal

A ce stade, nous n'avons étudié que la répartition énergétique des électrons d'un cristal à l'équilibre thermodynamique. Si l'on modifie cet équilibre par une action extérieure (telle une force due à un champ électrique appliqué, un gradient de température...), la fonction de distribution est modifiée ; il est alors important de déterminer les propriétés électroniques de transport.

La vitesse moyenne d'un électron, caractérisé par un paquet d'ondes centré autour du vecteur d'onde $\vec{k}$, est définie comme la vitesse de groupe de ce paquet d'ondes, à savoir :

$$\vec{v}\,(\vec{k}) = \frac{1}{\hbar}\,\overrightarrow{\text{grad}_{\vec{k}}}\,\varepsilon.$$

Si, dans cette région de la bande d'énergie, la relation de dispersion $\varepsilon\,(\vec{k})$ peut s'écrire

$$\varepsilon\,(\vec{k}) = \varepsilon_c + \frac{\hbar^2 k^2}{2\,m^*}$$

on obtient :

$$\vec{v}\,(\vec{k}) = \frac{\hbar\vec{k}}{m^*}$$

En mécanique classique, une particule de masse *m*, de charge — *e* et de quantité de mouvement $\vec{p}$, a une vitesse $\vec{v} = \frac{\vec{p}}{m}$; soumise à un champ électrique $\vec{E}$ et magnétique $\vec{H}$, elle subit une force $\vec{F} = -e\,(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$, où $\vec{B} = \mu_0\vec{H}$, et son mouvement est régi par l'équation $\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}$. Par analogie avec cette équation classique, on peut attribuer à un électron une quasi-quantité de mouvement $\vec{p} = \hbar\vec{k}$, et définir son équation dynamique dans un cristal :

$$\vec{F} = \hbar\,\frac{d\vec{k}}{dt} = -e\,(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \qquad \textbf{(13)}$$

Une autre notion très importante, introduite par la théorie des bandes, est la notion de trou dans une bande de valence incomplètement remplie ; on peut démontrer qu'un état électronique inoccupé en haut d'une bande d'énergie se comporte au point de vue électrique comme une particule fictive, appelée « trou », de charge + *e* et de masse positive, égale en valeur absolue à la masse effective qu'aurait l'électron absent. Nous verrons, en étudiant les propriétés des semi-conducteurs, l'importance que revêt cette notion.

Les métaux

La surface de Fermi

Au zéro absolu, le niveau de Fermi ε_F, qui correspond au dernier état électronique occupé, est situé à l'intérieur de la bande de conduction du métal. Dans l'espace des $\vec{k}$, la surface d'énergie $\varepsilon = \varepsilon_F$ est appelée la surface de Fermi ; pour des électrons libres, nous avons vu que cette surface était une sphère. De façon générale, la surface de Fermi d'un métal dépend de ses propriétés structurales (zone de Brillouin) et électroniques (niveau de Fermi) ; elle possède toutes les symétries du réseau réciproque. Lorsque des recouvrements de bandes existent, sa forme, très complexe, résulte des contributions propres à chacune des bandes. Sous l'effet de forces extérieures, seuls les électrons au voisinage de la surface de Fermi vont se déplacer, car ils peuvent facilement changer d'énergie : d'où l'importance de cette surface. Il est possible, dans les métaux purs à basse température, de déterminer la forme de la surface de Fermi par des méthodes expérimentales faisant intervenir le mouvement des électrons dans un champ magnétique $\vec{H}$ (résonance cyclotron, magnétorésistance, diamagnétisme). L'extrémité du vecteur $\vec{k}$, qui évolue conformément à l'équation **(13)**, se déplace dans un plan perpendiculaire à $\vec{H}$ sur une surface d'énergie constante : on peut ainsi observer des orbites fermées extrémales sur la surface de Fermi, ou des orbites ouvertes si les courbes $\varepsilon\,(\vec{k})$ coupent les bords de la zone de Brillouin (*fig.* 21).

Conductibilité électrique

Dans un cristal, les collisions avec les défauts de périodicité du réseau (phonons, atomes d'impuretés) limitent le mouvement des électrons : ce sont elles qui assurent l'équilibre thermodynamique entre le gaz d'électrons et le réseau. Si l'on admet qu'après une collision la vitesse d'un électron est quelconque, la somme des vitesses de tous les électrons est nulle, et le métal n'est parcouru par aucun courant (*fig.* 22). Sous l'action d'un champ électrique $\vec{E}$, un électron acquiert de l'énergie, et son vecteur $\vec{k}$ évolue suivant la relation : $\frac{d\vec{k}}{dt} = -\frac{e\vec{E}}{\hbar}$. Au bout d'un temps Δt, toute la sphère de Fermi s'est déplacée suivant la direction de $\vec{E}$ d'une quantité $\Delta\vec{k} = -\frac{e\vec{E}}{\hbar}\,\Delta t$. Ce déplacement est limité par les collisions avec les phonons au bout d'un temps τ, et il s'établit un équilibre correspondant à un déplacement moyen de la sphère de Fermi de

fig. 20

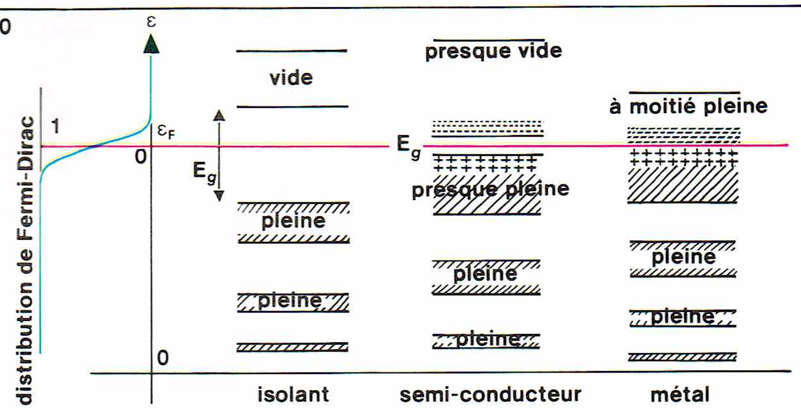

▲ ***Figure 20 : occupation des niveaux d'énergie, à une température T ≠ 0 °K, dans un isolant, un semi-conducteur et un métal.***

▼ ***Figure 23 : variation de la chaleur spécifique à très basse température pour un métal pur. On remarquera la contribution électronique ($C_{el} = \gamma T$) et celle des phonons ($C_{ph} = AT^3$).***

fig. 23

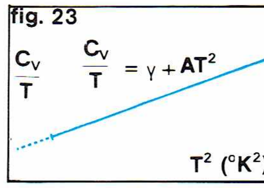

▼ ***Figure 21 : surface de Fermi du cuivre et première zone de Brillouin. Les orbites a et b sont des orbites extrémales fermées, c est une orbite ouverte.***

fig. 21

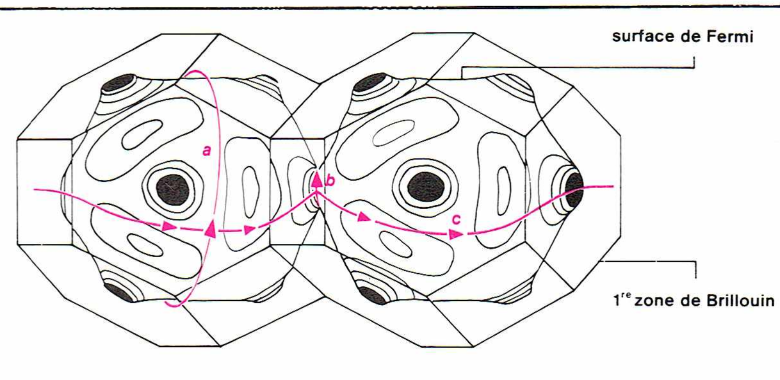

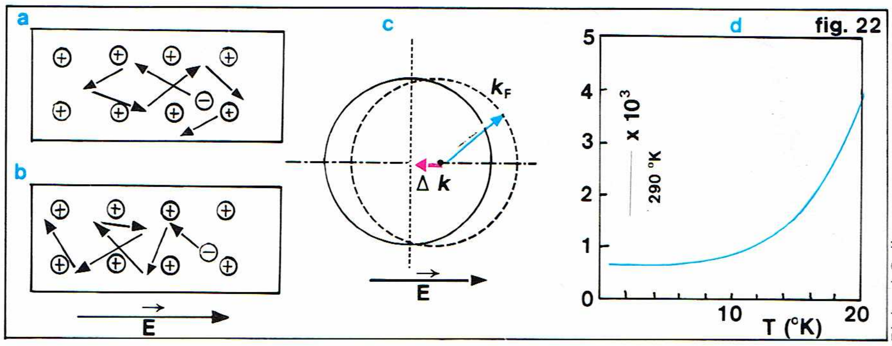

Richard Colin

▲ *Figure 22.* (a) *Mouvement d'un électron dans un cristal sous l'effet de l'agitation thermique; le déplacement moyen est nul.* (b) *Mouvement d'un électron en présence d'un champ électrique; l'électron se déplace en sens inverse du champ.* (c) *Déplacement de la sphère de Fermi limité par les collisions.* (d) *Variation expérimentale de la résistivité du sodium.*

$\Delta\vec{k} = -\frac{eE}{\hbar}\tau$. Il en résulte une vitesse d'entraînement $\vec{v}$ pour des électrons de masse effective m^*

$$\vec{v} = -\frac{e\tau}{m^*}\vec{E} = -\mu\vec{E}$$

μ est la mobilité des électrons. La densité de courant, ou courant électrique traversant une unité de surface, s'obtient alors : $\vec{J} = -ne\vec{v} = \frac{ne^2\tau}{m^*}\vec{E}$, où n est la concentration en électrons dans le cristal. Cette relation $\vec{J} = \sigma\vec{E}$ (loi d'Ohm) définit la conductivité σ du métal :

$$\sigma = ne\mu = \frac{ne^2\tau}{m^*}$$

L'expérience montre que la résistivité $\rho = 1/\sigma$ peut se mettre sous la forme $\rho = \rho_i + \rho_L$, ρ_i étant la résistivité due aux atomes d'impuretés et ρ_L celle qui est due aux collisions avec les phonons. La résistivité résiduelle, ou résistivité extrapolée au zéro absolu, dépend de la pureté du métal; elle est égale à ρ_i, car ρ_L s'annule à T = 0. Le libre parcours moyen l des électrons est défini par $l = v_F\tau$, où v_F est la vitesse de Fermi ($v_F \simeq 10^8$ cm/s), car les collisions ne font intervenir que les électrons voisins de la surface de Fermi. A haute température, l est inversement proportionnel au nombre de phonons et varie donc en 1/T; dans un métal tel que le cuivre, la valeur de τ à la température ambiante est de 10^{-14} s et peut atteindre 10^{-9} s à basse température.

Conductibilité thermique et chaleur spécifique

Il est bien connu qu'à la température ambiante les métaux conduisent mieux la chaleur que les isolants électriques : cela tient au fait que, dans les métaux, les électrons participent en plus des phonons au flux de chaleur. Les conductibilités électrique σ et thermique $\varkappa$ des électrons sont reliées par la loi de Wiedemann-Franz $\varkappa/\sigma = \mathfrak{L}T$, où $\mathfrak{L}$ est le nombre de Lorentz.

Par contre, contrairement aux prévisions de la statistique classique, les électrons ne participent pratiquement pas à la chaleur spécifique des métaux, alors qu'ils interviennent dans la conductibilité thermique comme des particules libres : chaque électron devrait apporter une contribution $\frac{3}{2}k_BT$ à la chaleur spécifique, en plus des $3k_BT$ dus à chaque atome du réseau.

La statistique de Fermi-Dirac a permis de résoudre ce dilemme, en montrant que la chaleur spécifique des électrons

$$C_{el} = \frac{\pi^2}{3}N(\varepsilon_F)k_B^2T = \gamma T$$

est surtout importante à basse température, car la contribution des phonons est faible; on a ainsi une détermination possible de la densité d'états N (ε_F) au niveau de Fermi (*fig.* 23).

▼ *Figure 24.* (a) *Résistance d'un échantillon de mercure en fonction de la température (expérience originale de Kamerlingh Onnes).* (b) *Chaleur spécifique du gallium montrant sa transition supraconductrice; l'état normal est restauré par la présence d'un champ magnétique de 200 G.*

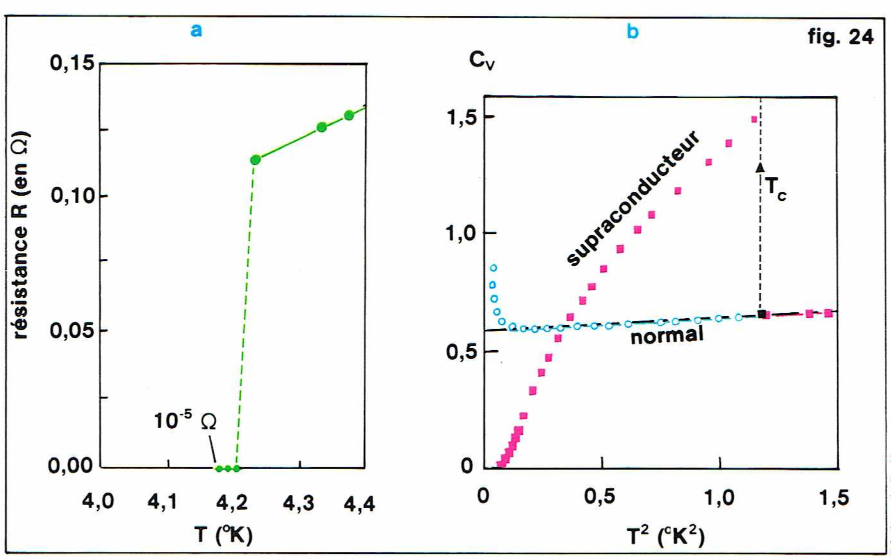

Richard Colin

La supraconductivité

Trois ans seulement après la première liquéfaction de l'hélium, H. Kamerlingh Onnes découvre la supraconductivité (1911) [*fig.* 24] : la résistivité électrique du mercure devient pratiquement nulle en dessous d'une température critique T_c = 4,2 °K (c'est-à-dire — 268,8 °C), et cela dans un intervalle de température de quelques centièmes de degré. Depuis, ce changement de phase de l'état normal à l'état supraconducteur a été mis en évidence dans de nombreux métaux purs et alliages :

Pb (T_c = 7,2 °K), Nb (T_c = 9,1 °K), Nb_3Sn (T_c = 18 °K)

La résistivité en courant continu est tellement voisine de zéro qu'expérimentalement on a pu faire circuler un courant dans un anneau supraconducteur pendant plusieurs années sans observer la moindre décroissance. Par contre, la présence d'impuretés paramagnétiques peut considérablement abaisser la température de transition. D'autres phénomènes se produisent avec l'apparition de la supraconductivité : le flux magnétique est exclu d'un matériau supraconducteur soumis à un champ magnétique faible (effet Meissner); si ce champ est suffisamment élevé, le matériau revient dans son état normal. D'autre part, la faible variation de chaleur spécifique observée lors de la transition indique que peu d'électrons sont affectés, et sa variation exponentielle peut s'expliquer par l'apparition d'une bande interdite liée au gaz d'électrons. Enfin, la variation de la température critique pour les différents isotopes du mercure suivant la loi $M^{1/2}T_c$ = constante suggère que les phonons jouent un rôle important dans l'état supraconducteur (leur fréquence varie en $M^{-1/2}$).

Dans la première théorie microscopique, due à J. Bardeen, L. N. Cooper et J. R. Schrieffer (1957), l'origine de cette transition est due aux interactions électron-électron *via* les phonons : un électron qui se déplace dans le cristal interagit avec le réseau et le déforme; cette région déformée exerce une force attractive capable d'attirer un autre électron, qui se trouve couplé au premier. Les électrons se groupent ainsi par paires, de moment cinétique et magnétique nul. Si l'on envoie un courant dans un supraconducteur, toutes les paires prennent la même quantité de mouvement, et il devient difficile d'arrêter un tel courant, car il faut soit briser les paires, soit les freiner de façon identique. Cette théorie explique l'effet Meissner et l'effet isotopique; elle prévoit l'existence d'une bande interdite de largeur de l'ordre de k_BT_c, ainsi qu'une quantification du flux magnétique dans un anneau supraconducteur en unités de $\Phi_0 = \hbar/2e = 2\cdot10^{-7}$ gauss · cm².

A travers une jonction entre deux supraconducteurs séparés par une mince couche isolante, il peut circuler un courant lié au passage par effet tunnel de paires d'électrons supraconducteurs : c'est l'effet Josephson (1962); si l'on applique une tension continue V aux bornes de la jonction, il apparaît dans le courant une composante alternative à la fréquence $\omega = 2\,eV/\hbar$. On peut mettre à profit ce phénomène pour relier des étalons de tension et de fréquence (1 μV correspond à une fréquence de 483,6 MHz), pour détecter les rayonnements électromagnétiques, ou pour mesurer des champs magnétiques faibles.

On peut distinguer deux catégories de matériaux supraconducteurs, suivant que l'effet Meissner complet existe jusqu'à des champs critiques de l'ordre de 10^2 à 10^3 G (type I), ou qu'un effet incomplet existe jusqu'à des champs très élevés (type II). Ces derniers sont utilisés pour la réalisation de bobinages permettant d'atteindre des champs magnétiques d'environ 100 kG.

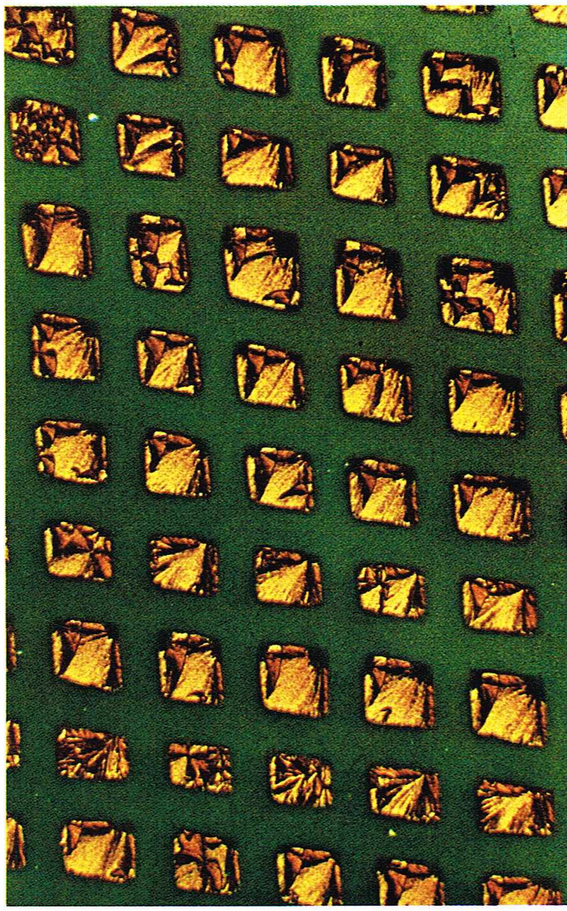

Laboratoire de physique du solide de Bellevue du Centre national de la recherche scientifique

fig. 25

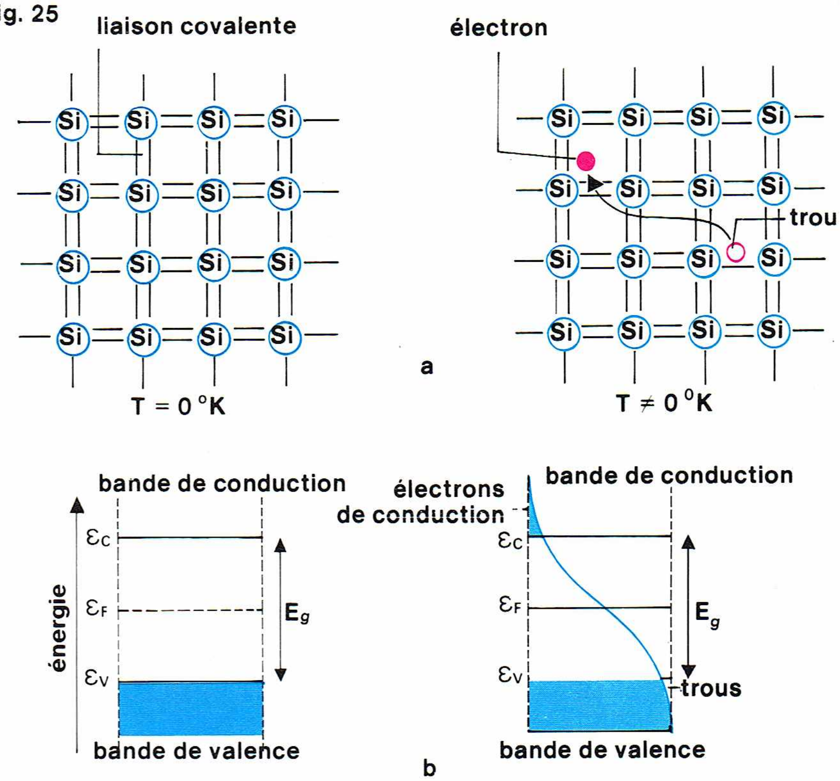

a) création de paires électron-trou dans un semi-conducteur intrinsèque, sous l'effet de l'excitation thermique;
b) occupation des états d'énergie, d'après la statistique de Fermi-Dirac.

Richard Colin

▲ *A gauche, mosaïque de couches minces de tellurure d'argent AgTe évaporées à travers une grille; le tellurure dopé à l'argent est un semi-conducteur. A droite, figure 25 : voir texte ci-contre.*

Les semi-conducteurs

Les semi-conducteurs sont des cristaux covalents dont la conductibilité augmente rapidement avec la température. L'expérience montre que la présence d'impuretés, même en petit nombre, modifie de façon considérable leurs propriétés électriques, ce qui a nécessité des développements considérables dans les techniques de purification des cristaux. Les semi-conducteurs les plus utilisés sont le germanium, le silicium et l'arséniure de gallium.

Les semi-conducteurs intrinsèques

Un semi-conducteur de très grande pureté présente une conductibilité intrinsèque. Au zéro absolu, c'est un isolant; les électrons occupent entièrement tous les états de la bande de valence, et la bande de conduction est vide : l'énergie de Fermi est située au milieu de la bande interdite. Sous l'effet de l'agitation thermique, des liaisons covalentes sont rompues, libérant des électrons qui peuvent se déplacer dans le cristal. En d'autres termes, des électrons (en nombre n) de la bande de valence sont excités et passent dans la bande de conduction; les états vacants (en nombre p) qui apparaissent en haut de la bande de valence sont assimilés à des particules de charge et de masse positives, les trous : on dit alors qu'il y a création d'une « paire électron-trou » (*fig.* 25). D'après ce mécanisme, on a $n = p = n_i$, appelée concentration intrinsèque; cette concentration, déterminée par les caractéristiques des bandes du semi-conducteur et par la distribution de Fermi-Dirac (qui peut s'approximer par celle de Maxwell-Boltzmann), dépend de la température suivant la loi

$$n_i = AT^{3/2} \exp\left[-E_g/2\,k_B T\right]$$

Sous l'effet d'un champ électrique $\vec{E}$, un électron de la bande de conduction acquiert une vitesse $\vec{v}_n = -\mu_n \vec{E}$, μ_n étant sa mobilité; par contre, le trou (ou défaut d'électron) se déplace en sens inverse des électrons, et si l'on appelle μ_p sa mobilité, il acquiert une vitesse $\vec{v}_p = \mu_p \vec{E}$. Électrons et trous participent ensemble au courant de conduction, ce qui permet d'écrire la densité de courant correspondante :

$$\vec{J} = -ne\vec{v}_n + pe\vec{v}_p = n_i e\,(\mu_n + \mu_p)\,\vec{E}$$

Ainsi, tant que le champ électrique est faible, le solide suit la loi d'ohm $\vec{J} = \sigma\vec{E}$; les variations thermiques de la conductivité intrinsèque $\sigma = en_i\,(\mu_n + \mu_p)$ dépendent essentiellement de celles de la concentration n_i, et donc de la hauteur E_g de la bande interdite. A température ambiante (T = 300 °K), $n_i = 10^{10}$ cm^{-3} dans le silicium et 10^{13} cm^{-3} dans le germanium, valeurs extrêmement faibles en comparaison des 10^{22} cm^{-3} atomes du cristal.

Les semi-conducteurs extrinsèques

L'introduction d'impuretés en substitution dans le réseau d'un semi-conducteur modifie son comportement électrique. Si l'atome d'impureté est pentavalent (As, P), quatre de ses électrons de valence assurent les liaisons de covalence avec quatre atomes voisins du réseau, et

Laboratoire de physique des rayonnements et d'électronique nucléaire de Strasbourg du Centre national de la recherche scientifique

▼ *Mesure de la durée de vie dans les matériaux semi-conducteurs par la méthode optique du laser.*

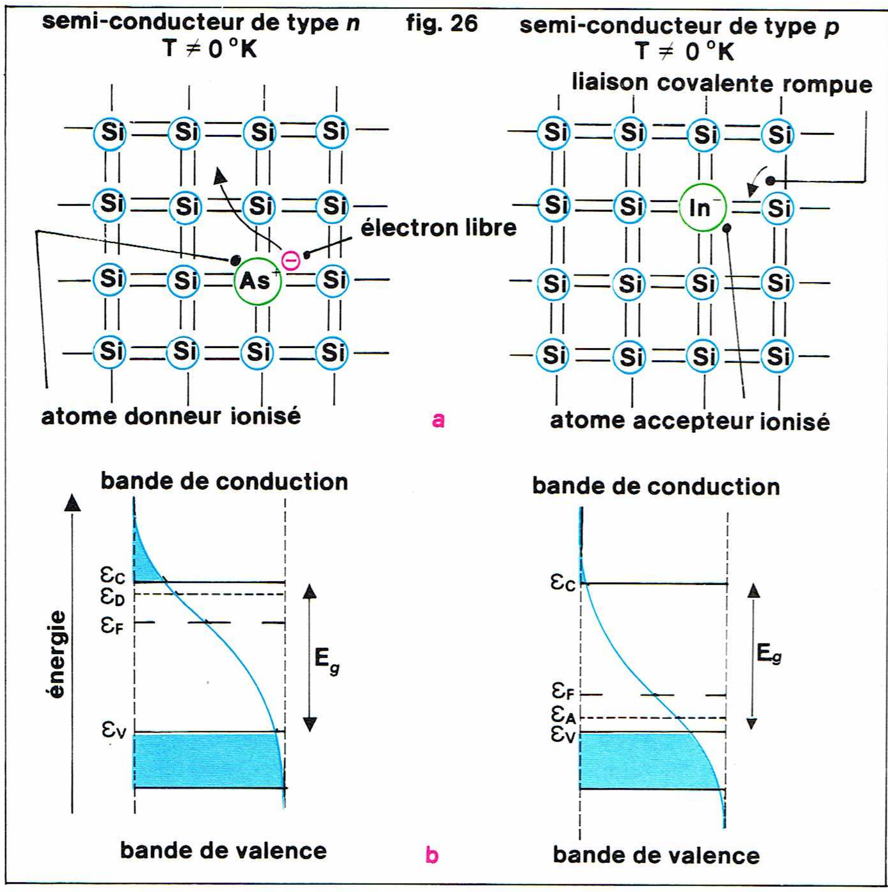

▲ *Figure 26 :* **(a)** *création d'électrons (type n) et de trous (type p) par ionisation des impuretés dans un semi-conducteur extrinsèque;* **(b)** *occupation des états d'énergie, à T ≠ 0 °K.*

▼ *Figure 27 : jonction p-n après contact.* **(a)** *Jonction à l'équilibre thermique.* **(b)** *Jonction polarisée dans le sens direct; le courant J est dû au passage des porteurs majoritaires à travers la jonction.*

l'électron en excès se déplace dans le potentiel coulombien de l'impureté. L'énergie d'ionisation, c'est-à-dire l'énergie nécessaire pour que cet électron soit arraché à l'atome d'impureté et devienne un électron libre dans le cristal, est d'environ 0,01 eV; cela revient à dire qu'il se trouve sur un niveau d'énergie situé à 0,01 eV en dessous du bas de la bande de conduction. Sous l'effet de l'agitation thermique, les impuretés peuvent facilement s'ioniser ($k_B T = 0{,}025$ eV à T = 300 °K), et par suite la concentration des électrons n dans la bande de conduction est augmentée. A température ambiante, presque toutes les impuretés sont ionisées, et l'on a $p \ll n_i \ll n$ et $n \simeq N_D$ si N_D est la concentration en atomes d'impuretés. On dit que l'on a un semi-conducteur extrinsèque de type n, et l'impureté est un atome donneur. Si l'atome d'impureté est trivalent (In, Al), il lui manque un électron pour assurer toutes les liaisons de covalence : un électron d'une liaison voisine est piégé par cette impureté qui s'ionise négativement, laissant ainsi un trou dans la bande de valence. Lorsque toutes les impuretés sont ionisées, on a : $n \ll n_i \ll p$, avec $p \simeq N_A$ si N_A est la concentration en atomes d'impuretés (atomes accepteurs). On a

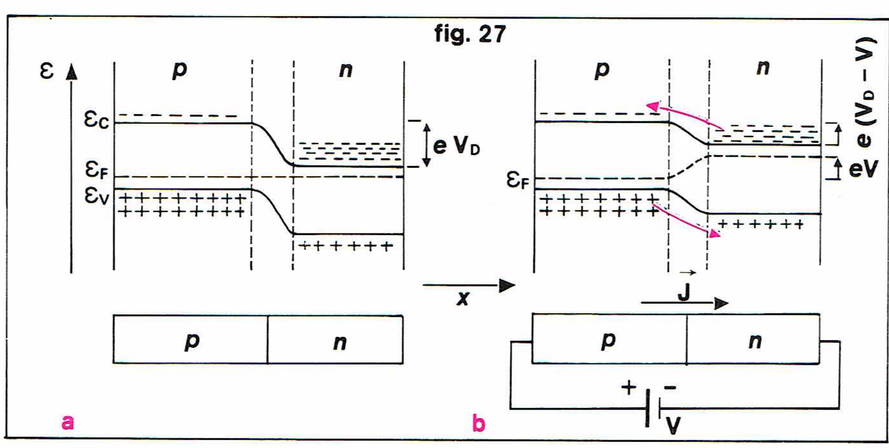

ainsi un semi-conducteur extrinsèque de type p (*fig.* 26). Dans les semi-conducteurs, des paires « électron-trou » sont créées en permanence par agitation thermique et sous l'effet d'actions extérieures (excitation optique); lorsque l'excitation cesse, les concentrations de porteurs reviennent à leurs valeurs d'équilibre en un temps caractéristique de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-7} s. L'un des processus de recombinaison est le mécanisme inverse de l'excitation, c'est-à-dire la recombinaison directe d'une paire électron-trou avec émission d'un photon (recombinaison radiative) ou transfert de l'énergie à un autre porteur libre (recombinaison Auger). D'autres processus font intervenir des défauts ou des impuretés du cristal, dont les niveaux d'énergie sont situés dans la bande interdite; il peut alors y avoir émission de phonons et de photons.

Les semi-conducteurs dopés avec des impuretés sont les matériaux de base des composants à état solide en électronique. L'application sans doute la plus importante est la jonction entre deux semi-conducteurs, l'un de type p et l'autre de type n.

Une telle jonction p-n polarisée dans le sens direct est conductrice, et le courant qui la traverse varie de façon non linéaire avec la tension appliquée; polarisée en inverse, elle présente une résistance très grande (*fig.* 27). Grâce à cet effet redresseur, elle a remplacé les diodes à vide dans la plupart des applications, son intérêt résidant dans les faibles polarisations mises en jeu. L'élément actif à semi-conducteur le plus connu est le transistor, découvert en 1948 par J. Bardeen, W. Brattain et W. Shockley; il est constitué de deux jonctions en série, c'est-à-dire que sa structure est soit n-p-n, soit p-n-p. Convenablement polarisé, ce dispositif est un amplificateur.

L'évolution des techniques de fabrication et de miniaturisation de tels dispositifs permet d'intégrer plusieurs milliers de transistors, diodes et résistances sur des pastilles de silicium de quelques millimètres carrés : grâce à leurs performances dues à la complexité des circuits, leur fiabilité et leur faible prix de revient, les « circuits intégrés » remplacent de plus en plus les composants discrets dans les systèmes. Les semi-conducteurs (surtout Ga As) sont aussi très utilisés dans des amplificateurs ou des générateurs à état solide (diode Gunn) dans le domaine des hyperfréquences.

Les diélectriques

Dans un diélectrique, il n'existe pas de charges libres capables de conduire l'électricité : c'est un isolant. Cependant, l'application d'un champ électrique $\vec{E}$ peut produire de petits déplacements de charges positives et négatives des atomes constituants; les centres de gravité des deux types de charges ne coïncidant plus, il apparaît un moment dipolaire $\vec{P} = \Sigma_n q_n \vec{r}_n$ où $\vec{r}_n$ est le vecteur position de la charge q_n. La polarisabilité α de l'atome ou de la molécule considéré est alors définie en fonction du champ électrique local $\vec{E}_{loc}$ par $\vec{P} = \alpha \vec{E}_{loc}$.

Il existe trois contributions principales à la polarisabilité. La polarisabilité électronique provient du déplacement des électrons d'un atome par rapport au noyau. Dans un cristal ionique, une polarisabilité ionique apparaît du fait du déplacement relatif des ions voisins. Enfin, si le solide est composé de molécules polaires dotées d'un moment dipolaire permanent, un champ électrique oriente partiellement ces dipôles, d'où l'apparition d'un moment dipolaire moyen.

Alors que la polarisabilité caractérise les propriétés atomiques, la constante diélectrique ε_r ou permittivité relative est une grandeur macroscopique qui tient compte de l'arrangement des atomes dans le solide. Elle est définie à partir de la polarisation $\vec{P}$, moment dipolaire moyen par unité de volume, par la relation $\vec{P} = \varepsilon_0 (\varepsilon_r - 1) \vec{E}$. En haute fréquence, la constante diélectrique est complexe; elle est reliée à l'indice de réfraction n par la relation $n^2 = \varepsilon_r$, et peut s'exprimer en fonction des différentes polarisabilités, dont l'importance relative varie avec la fréquence (*fig.* 28).

Les cristaux ferro-électriques - Électrets

Certaines substances, les cristaux ferro-électriques, possèdent naturellement une polarisation permanente qui disparaît au-dessus d'une température critique (température de Curie), au-delà de laquelle le cristal se comporte

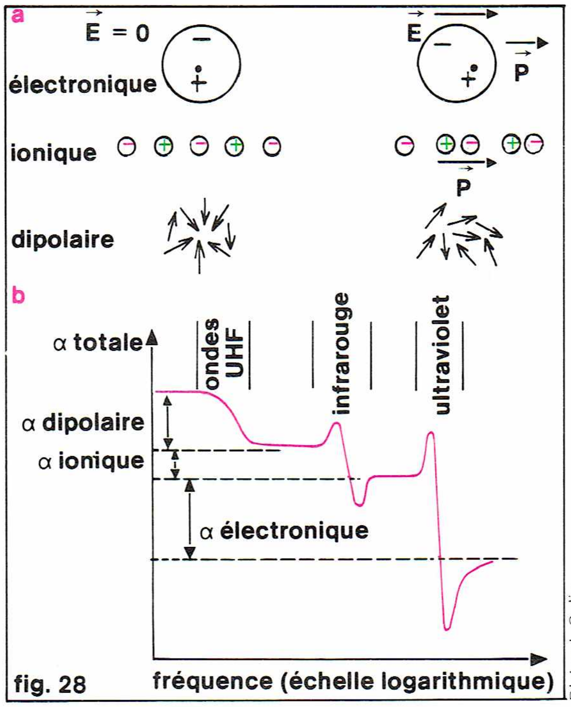

fig. 28

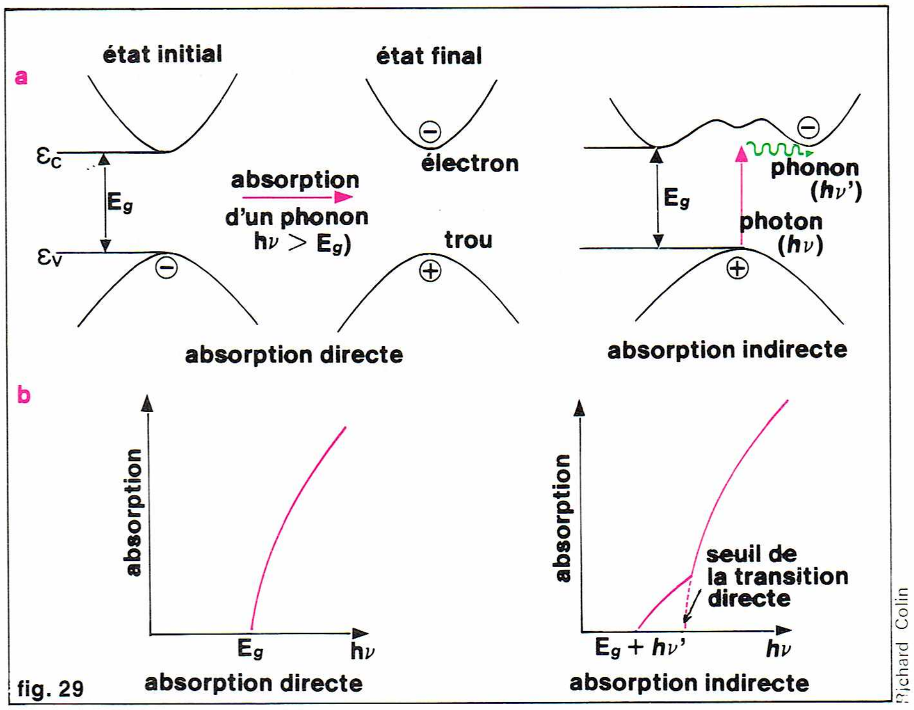

fig. 29

▲ *A gauche, figure 28 :* (a) *diverses contributions à la polarisabilité ;* (b) *variation de la polarisabilité totale en fonction de la fréquence.* *A droite, figure 29 :* (a) *processus d'absorption de lumière dans un semi-conducteur ;* (b) *variation de l'absorption, en fonction de la fréquence, au voisinage du seuil d'absorption $h\nu = E_g$.*

▼ *Les isolants électriques dans lesquels la bande interdite est généralement large sont très souvent transparents, comme le diamant pur caractérisé par $E_g = 7$ eV.*

comme un diélectrique normal de forte permittivité. L'origine de cette polarisation permanente est une dissymétrie dans la maille élémentaire. Si la maille est déformée par une action extérieure, la polarisation est modifiée, et il apparaît un champ électrique externe. Un tel effet peut être obtenu par dilatation thermique (c'est la pyroélectricité) ou par l'application d'une tension mécanique ; ce dernier effet est appelé piézo-électricité.

Des propriétés analogues existent dans les électrets, qui ont acquis une polarisation permanente à la suite d'un traitement électrique et thermique. Actuellement, l'utilisation de ces propriétés intéressantes dans les films minces de polymère (tels que le fluorure de polyvinylidène), qui sont d'excellents diélectriques, connaît un grand développement, par exemple dans les microphones à électrets.

Piézo-électricité

La piézo-électricité, découverte en 1880 par P. et J. Curie, existe dans tous les ferro-électriques, mais aussi dans des cristaux ioniques dissymétriques tels que le quartz (SiO_2) ou le sulfure de cadmium CdS. Un matériau piézo-électrique, soumis à une tension mécanique, se polarise électriquement : c'est l'effet piézo-électrique direct. Soumis à un champ électrique, il se déforme : c'est l'effet inverse. Ce couplage entre les propriétés électriques et mécaniques a donné lieu à de nombreuses applications. Les transducteurs, dispositifs convertissant l'énergie mécanique en énergie électrique, et réciproquement, sont généralement des matériaux piézo-électriques. L'acuité de la résonance mécanique de dispositifs piézo-électriques se répercute sur ses propriétés électriques et peut ainsi être utilisée en électronique dans le filtrage des signaux.

Propriétés optiques des isolants

Deux mécanismes jouent un rôle essentiel dans l'absorption et l'émission de lumière par les solides non métalliques.

Dans les isolants, les propriétés optiques sont très liées à l'existence d'impuretés ionisées dans le cristal. Par contre, dans les semi-conducteurs, les effets les plus importants s'expliquent par la structure de bande des niveaux d'énergie électronique (*fig.* 29).

Lorsqu'un photon d'énergie $h\nu$ pénètre dans un cristal, il peut être absorbé et créer une paire électron-trou si son énergie est supérieure à la hauteur de bande interdite E_g. Dans le cas le plus simple, l'électron et le trou ont même vecteur d'onde $\vec{k}$: la transition est directe. Par contre, si les extrémums des bandes de valence et de

J. L. Swiners - Réalités

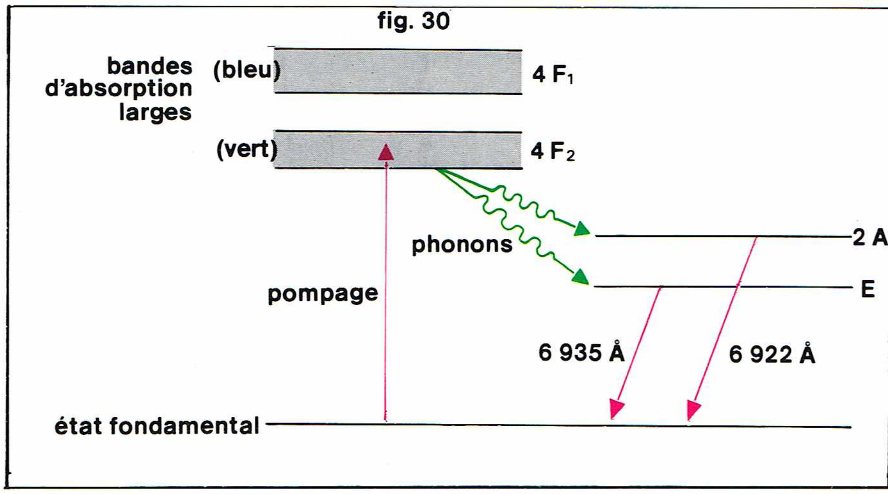

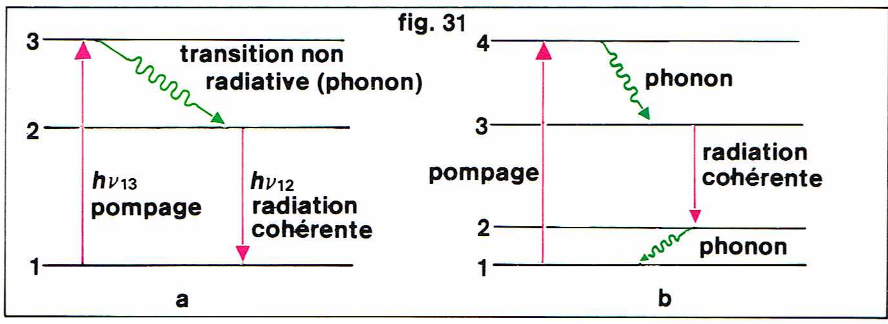

▲ *En haut, figure 30 : absorption et fluorescence de l'ion* Cr^{3+} *dans l'alumine. Ci-dessus, figure 31.* (a) *Laser solide à trois niveaux : le laser à rubis; les bandes d'absorption larges symbolisées par le niveau 3 sont peuplées par les flashes d'une lampe au xénon.* (b) *Laser solide à quatre niveaux : le laser à verre au néodyme; il est fait d'un verre de tungstate de calcium dopé avec des ions* Nd^{3+}.

▼ *Figure 32 : laser à jonction semi-conductrice; la zone hachurée est celle où sont produits les photons cohérents.*

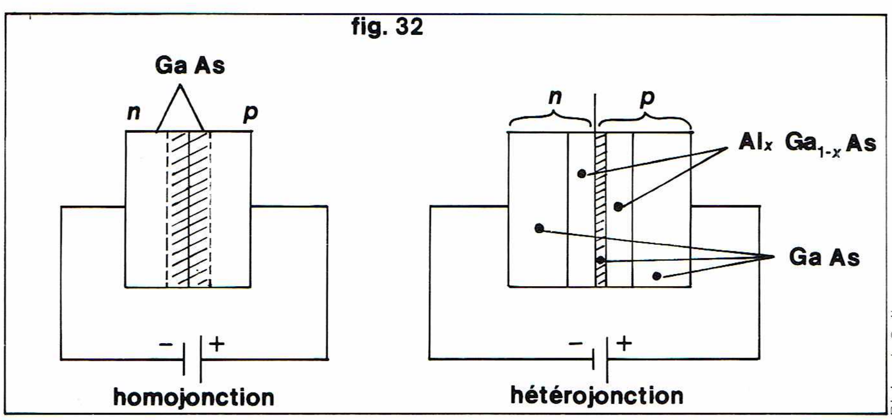

conduction se produisent à des valeurs de $\vec{k}$ différentes, on peut montrer que la conservation du vecteur d'onde implique l'intervention d'un phonon : la transition est indirecte. Dans les deux cas, il existe un seuil d'absorption optique, facilement mesurable, qui permet de déterminer la hauteur de la bande interdite. Si E_g est inférieur à 3,5 eV, l'absorption se fait dans le domaine visible (7 400 à 3 600 Å correspondant respectivement à des énergies de 1,7 à 3,5 eV). Ainsi, dans le sulfure de cadmium (CdS), caractérisé par $E_g = 2,42$ eV, la région bleue du spectre d'énergie supérieure à 2,42 eV est absorbée par le cristal qui a la couleur jaune-orangé de la lumière transmise. Certains semi-conducteurs, tels que le silicium, absorbent toutes les longueurs d'onde du spectre visible, ce qui leur confère un aspect métallique. Par contre, les isolants électriques dans lesquels la bande interdite est généralement plus large sont très souvent transparents; le diamant pur, caractérisé par $E_g = 7$ eV, est transparent et incolore.

Photoconductibilité

Lorsque des électrons et des trous libres sont créés par absorption d'une onde lumineuse, ils peuvent participer à la conduction électrique dans le solide et augmenter sa conductivité électrique. Cet effet, appelé photoconductibilité, est fortement influencé par des impuretés présentes dans le matériau qui constituent des centres de piégeage des porteurs, et qui peuvent soit modifier la mobilité d'un type de porteurs, soit favoriser les recombinaisons.

L'effet photoconducteur a trouvé de nombreuses applications dans les dispositifs convertissant l'énergie lumineuse en énergie électrique, en particulier dans les cellules photo-électriques et les batteries solaires. Citons encore les détecteurs infrarouges, dans lesquels l'antimoniure d'indium InSb, de faible bande interdite $E_g = 0,23$ eV, est très utilisé.

Luminescence

Lorsque la recombinaison d'une paire électron-trou s'accompagne de l'émission d'un rayonnement lumineux, on dit que le matériau est luminescent. Plus généralement, la luminescence est l'absorption d'énergie par la matière et sa réémission sous forme de lumière visible ou proche du visible. Lorsque le retour à l'état de plus basse énergie a lieu pendant l'excitation du matériau, le phénomène est appelé fluorescence, alors que, si le retour à l'équilibre est retardé, on a un effet de phosphorescence.

De nombreux photoconducteurs sont luminescents. Une autre catégorie importante de substances luminescentes non photoconductrices est utilisée dans les tubes fluorescents : ce sont des isolants dopés avec des impuretés ionisées appelées « activateurs »; l'excitation est due au rayonnement ultraviolet produit par décharge électrique dans de la vapeur de mercure sous faible pression.

Les impuretés ionisées

Comment expliquer les différences de couleur, donc d'absorption optique, de cristaux aussi voisins que l'alumine pure, le saphir et le rubis? Tous trois sont constitués d'un même réseau cristallin de base, celui de l'alumine; seules diffèrent les impuretés qu'ils contiennent. L'alumine pure est incolore; dopée avec des ions de chrome Cr^{3+}, elle prend la couleur rouge caractéristique du rubis, tandis que le saphir, de couleur bleue, contient des ions de titane Ti^{3+}.

Nous illustrerons les propriétés des impuretés ionisées dans les isolants par l'exemple de l'ion Cr^{3+} dans l'alumine (Al_2O_3) [*fig.* 30]. Parmi les états excités de cet ion se trouvent deux bandes larges que l'on peut peupler par absorption optique. Les atomes excités dans les bandes 4 F_1 et 4 F_2 retombent sur les deux niveaux $\bar{E}$ et $\overline{2A}$ en émettant des phonons. Le retour à l'état fondamental se fait assez lentement, dans un temps de l'ordre de 10^{-3} seconde, avec émission de photons. Les ions Cr^{3+} absorbent donc une partie du spectre visible, et par fluorescence ils réémettent un rayonnement de longueur d'onde différente.

Les lasers solides

C'est dans le rubis que le premier effet laser a été découvert par T. H. Maiman en 1960. Rappelons que les lasers sont des sources de lumière cohérente, de grande luminance, dont les puissances émises sont de l'ordre du watt en régime continu et du gigawatt (10^9 W) en régime pulsé.

Le principe en est illustré sur la *figure* 31. En présence de rayonnement de fréquence ν_{12}, des processus d'absorption (1 → 2) et d'émission induite (2 → 1) peuvent se produire avec la même probabilité de transition. La puissance nette émise par le système sous forme de rayonnement de fréquence ν_{12} est alors proportionnelle à la différence de population des deux niveaux ($n_2 - n_1$). A l'équilibre thermique, n_2 est inférieur à n_1; il n'y a donc pas d'émission. Par contre, si l'on inverse les populations entre ces niveaux, c'est-à-dire si $n_2 > n_1$, il se produit une émission qui est stimulée par la présence du rayonnement émis par lui-même (fonctionnement en oscillateur) et qui cesse quand $n_2 = n_1$. L'inversion de population est réalisée par le pompage d'une autre transition, qui permet d'égaliser les populations des niveaux correspondants.

Parmi les lasers à état solide utilisant des ions paramagnétiques, les plus répandus sont le laser à rubis et le laser à verre au néodyme Nd^{3+}. Leur rendement, rapport entre l'énergie électrique fournie et l'énergie lumineuse recueillie, est de l'ordre de 0,1 % à 1 %.

Depuis 1962, les lasers à jonction semi-conductrice (en particulier le laser à arséniure de gallium qui émet dans le proche infrarouge à 8 383 Å) ont pris un grand essor; l'émission est ici produite par la recombinaison d'électrons

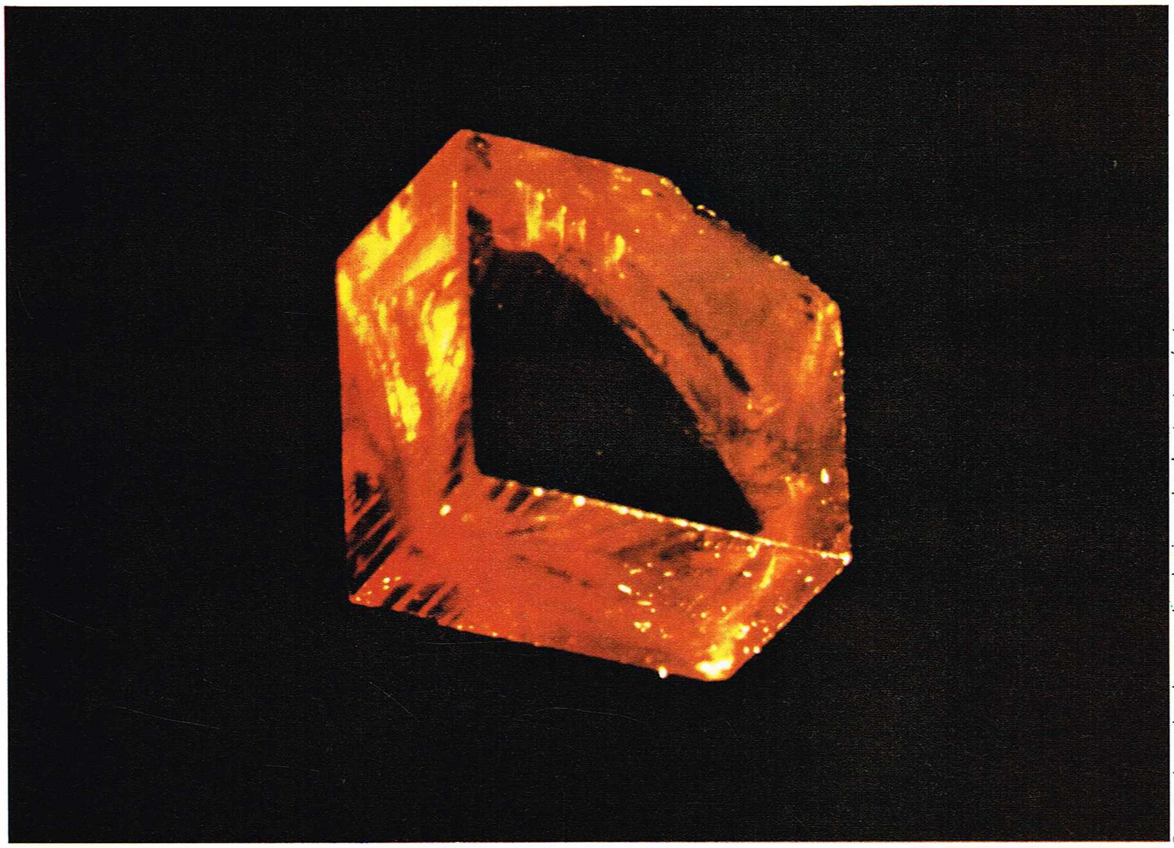

◀ *Le laser à verre au néodyme est l'un des plus répandus parmi les lasers à état solide ; ici, un cristal d'aluminate de néodyme.*

Centre de recherches sur la physique des hautes températures - Orléans-La Source - Centre national de la recherche scientifique

et de trous au niveau d'une jonction *p-n* (*fig.* 32). Leur rendement, de l'ordre de 10 à 50 %, est bien supérieur à celui des précédents ; malheureusement, le pompage nécessite l'emploi de très fortes densités de courant qui rendent difficile leur fonctionnement en régime continu à température ordinaire. Actuellement, ce problème semble presque résolu, grâce aux lasers à hétérojonction qui ne sont pas encore produits industriellement, mais qui constituent certainement une solution de grand avenir.

Propriétés magnétiques des solides

Tous les milieux solides sont affectés par la présence d'un champ magnétique, en ce sens qu'ils acquièrent un moment magnétique, ou dipôle magnétique. Certains matériaux sont attirés par un champ magnétique, d'autres sont repoussés ; d'autres solides, tels que le fer, le nickel, le cobalt, présentent un type de magnétisme permanent, appelé ferromagnétisme. Les effets magnétiques au sein de la matière ne peuvent s'expliquer correctement qu'à l'aide de la mécanique quantique, car il ne peut y avoir de moment magnétique induit dans un système classique en équilibre thermique.

L'expérience montre que, dans un matériau soumis à un champ magnétique $\vec{H}$, apparaissent des moments magnétiques ; l'aimantation $\vec{M}$, c'est-à-dire le moment magnétique par unité de volume, est proportionnelle à $\vec{H}$: $\vec{M} = \chi\vec{H}$; le coefficient χ, sans dimension, est appelé « susceptibilité magnétique ». L'origine principale des moments magnétiques provient des mouvements orbitaux des électrons dans les atomes, ainsi que de leur moment cinétique de spin correspondant à une rotation autour de leur axe. Beaucoup de noyaux atomiques peuvent avoir un moment magnétique, environ mille fois plus faible que celui des électrons : leur contribution à la susceptibilité magnétique est négligeable, mais on peut les mettre en évidence en résonance magnétique nucléaire.

Diamagnétisme

Le diamagnétisme est une propriété tout à fait générale de la matière qui ne peut être détectée que lorsque les autres effets magnétiques sont absents, c'est-à-dire lorsque les atomes du matériau ne possèdent pas de moment magnétique permanent. Soumis à un champ magnétique

fig. 33

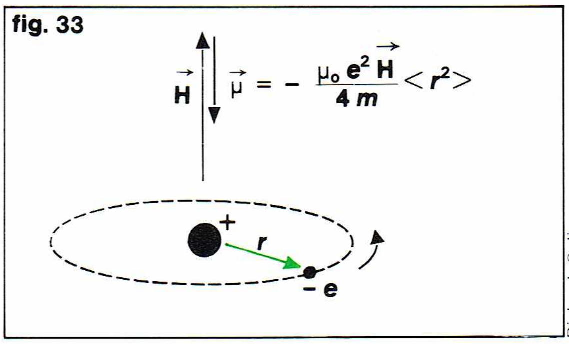

Richard Colin

◀ *Figure 33 ; apparition d'un moment magnétique induit $\vec{\mu}$ pour un atome : effet diamagnétique.*

(*fig.* 33), les électrons d'un atome subissent des forces qui modifient leur mouvement orbital ; il apparaît ainsi un courant induit de sens tel que, en vertu de la loi d'induction de Lenz, il s'oppose à la variation de flux. Les moments magnétiques induits sont ainsi directement opposés au champ magnétique ; la susceptibilité diamagnétique, négative, est indépendante de la température et très faible en valeur absolue ($\chi \simeq -10^{-5}$). Ce résultat, dû initialement à P. Langevin, est en très bon accord avec des mesures faites dans des matériaux diélectriques.

Paramagnétisme

Le paramagnétisme est une propriété de certains matériaux ou de molécules qui possèdent un moment magnétique permanent ; il se traduit par une contribution positive à la susceptibilité magnétique. L'apparition du moment magnétique d'un atome est essentiellement liée à sa distribution électronique. Les électrons ayant un moment cinétique de spin $\hbar\vec{S}$, on leur associe un moment magnétique de spin $\vec{\mu}_S = -g_S\mu_B\vec{S}$ ($g_S = 2$, et $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m}$ est le magnéton de Bohr) ; de plus, dans leur mouvement autour du noyau, ils possèdent un moment cinétique orbital $\hbar\vec{L}$, d'où un moment magnétique orbital

$$\vec{\mu}_{orb} = -\mu_B\vec{L}$$

Lorsque plusieurs électrons sont localisés sur une même couche électronique, le moment résultant s'obtient en

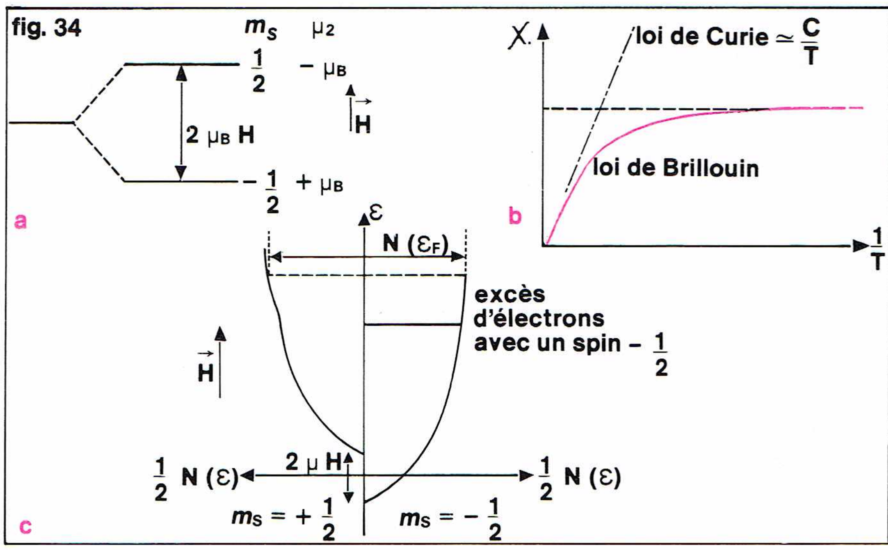

Richard Colin

▲ *Figure 34.*
(a) Décomposition des niveaux d'énergie d'un électron de spin $S = \frac{1}{2}$ *dans un champ magnétique. Le moment magnétique est opposé au spin* $\vec{S}$*; dans l'état d'énergie minimale, le moment magnétique est parallèle à* $\vec{H}$*.*
(b) Représentation de la susceptibilité paramagnétique en fonction de la température.
(c) Paramagnétisme de Pauli à 0 °K d'un métal.

▼ *Figure 35 : voir développement dans le texte ci-contre.*

ajoutant tous les moments orbitaux et de spin suivant la règle de Hund. Lorsqu'une couche est complète, tous les électrons sont appariés avec des spins antiparallèles, et on démontre que le moment résultant est nul : une telle couche ne contribue qu'au diamagnétisme sous-jacent du matériau. Par contre, lorsqu'un atome ou un ion possède une couche interne incomplète, son moment magnétique résultant n'est pas nul ; ainsi, les ions des éléments de transition (groupe du fer et du palladium) et des terres rares sont paramagnétiques. Le paramagnétisme se rencontre également dans des atomes à l'état libre ou des molécules possédant un nombre impair d'électrons ; dans ce cas, le spin total de l'atome n'est pas nul.

En l'absence de champ magnétique, les moments sont orientés de façon aléatoire et l'aimantation résultante est nulle. Placé dans un champ, chaque moment acquiert une énergie $-\vec{\mu}\cdot\vec{H}$; il en résulte une réorientation des moments magnétiques limitée par l'agitation thermique. Statistiquement, il y a plus de moments alignés suivant $\vec{H}$ (correspondant à l'état de plus basse énergie) qu'en sens inverse, d'où apparition d'une aimantation. A haute température, la susceptibilité paramagnétique suit la loi de Curie $\chi = \frac{N\mu^2}{3\,k_BT} = \frac{C}{T}$, où N est le nombre de moments.

Les valeurs de χ déterminées expérimentalement sont de l'ordre de 10^{-3}.

Dans les métaux non ferromagnétiques (alcalins, cuivre...), on observe que la susceptibilité est faible (10^{-6}) et sensiblement indépendante de la température. En effet, seule une fraction des électrons libres au voisinage de la surface de Fermi contribue à la susceptibilité, appelée *susceptibilité de Pauli :* $\chi = \mu_B^2 N\,(\varepsilon_F)$.

Cet effet est parfois masqué par le diamagnétisme des atomes, car les contributions sont du même ordre de grandeur (*fig.* 34).

Ferromagnétisme et antiferromagnétisme

Certains matériaux présentent une aimantation spontanée, c'est-à-dire qu'ils possèdent des moments magnétiques permanents de même sens en l'absence de champ appliqué ; leur susceptibilité χ positive peut atteindre 10^3 ou plus. Cette propriété, appelée ferromagnétisme, ne peut être expliquée par le seul modèle des bandes ; il faut faire intervenir les interactions entre électrons pour obtenir une description de ce phénomène. Afin d'expliquer le comportement macroscopique de ces substances, P. Weiss, en 1907, a supposé l'existence d'un champ moléculaire dont l'effet est d'orienter les moments magnétiques dans certaines régions du cristal, appelées domaines. A l'état de repos, ces domaines s'orientent les uns par rapport aux autres de façon à minimiser l'énergie de l'ensemble, d'où l'origine de l'aimantation spontanée. Cette aimantation subsiste tant que le champ moléculaire reste compétitif devant le désordre thermique ; au-dessus d'une certaine température T_C, appelée température de Curie, l'ordre ferromagnétique disparaît et le matériau devient paramagnétique. En présence d'un champ magnétique, ces domaines tendent à basculer pour s'orienter parallèlement au champ, ce qui est l'équivalent d'un « paramagnétisme géant » (*fig.* 35).

Le champ moléculaire trouve son origine dans les interactions entre les moments magnétiques d'atomes voisins qui favorisent leur alignement. Cette interaction purement quantique, appelée interaction d'échange, résulte du recouvrement des fonctions d'onde électroniques et dépend de l'orientation relative des moments de spin $\vec{S}_i$ et $\vec{S}_j$, $U = -J\vec{S}_i\cdot\vec{S}_j$; J est l'intégrale d'échange.

Lorsque les spins électroniques proviennent d'ions différents, les valeurs de J sont négatives, ce qui favorise un alignement antiparallèle des spins. Si les spins sont ordonnés de façon que le moment résultant soit nul aux températures inférieures à une température critique (température de Néel), le matériau est *antiferromagnétique* (Mn O). Si le moment résultant est différent de zéro, on a un cristal *ferrimagnétique* (magnétite Fe_3O_4, grenat de fer $Y_3Fe_5O_{12}$ appelé YIG) ; ces substances, appelées ferrites, sont des isolants électriques utilisés dans certains dispositifs hyperfréquences (circulateurs).

Par contre, dans les métaux (Fe, Co, Ni), les valeurs de J sont positives, et les spins s'alignent parallèlement : ils sont *ferromagnétiques*. Dans ce cas, ce sont les électrons des bandes d'énergie 3 *d* qui interagissent en faveur d'une telle orientation. Les aimants permanents et les noyaux d'électro-aimants, aux performances très diversifiées, sont les applications les plus importantes des matériaux ferromagnétiques.

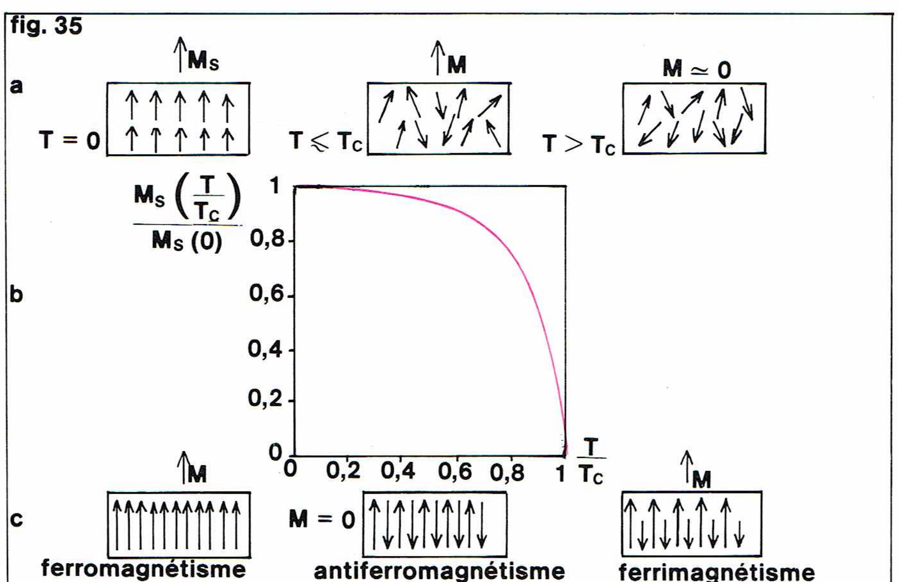

a) arrangement des spins dans un ferromagnétique en fonction de la température ;
b) aimantation relative en fonction de la température pour un ferromagnétique ;
c) comparaison à T = 0 °K des divers ordres magnétiques.

Richard Colin

BIBLIOGRAPHIE

BEAM W. R., *Electronics of solids,* Mac Graw Hill, 1965. - BOULESTEIX C., BRUNEAUX M., *Électrons de conduction et surface de Fermi des métaux,* Monographies Dunod. - BURGER J. P., *la Supraconductivité des métaux, des alliages et des films minces,* Monographies de physique Masson, 1974. - de GENNES P. G., *Superconductivity of Metals and Alloys,* Benjamin, 1966. - KITTEL C., *Introduction à la physique de l'état solide,* 4e édition, Dunod, 1972. - MAC KELVEY J. P., *Solid State and Semi-conductor Physics,* Harper International, 1969. - MERCOUROFF W., *la Surface de Fermi des métaux,* Monographies de physique, Masson. - PISTOULET B., SAVELLI M., *Physique des dispositifs électroniques,* Dunod Université, 1969. - VAN DER ZIEL A., *Solid State Physical Electronics,* Prentice Hall, 1968. - ZIMAN Z. M., *Principles of the Theory of Solids,* Cambridge, 1964.

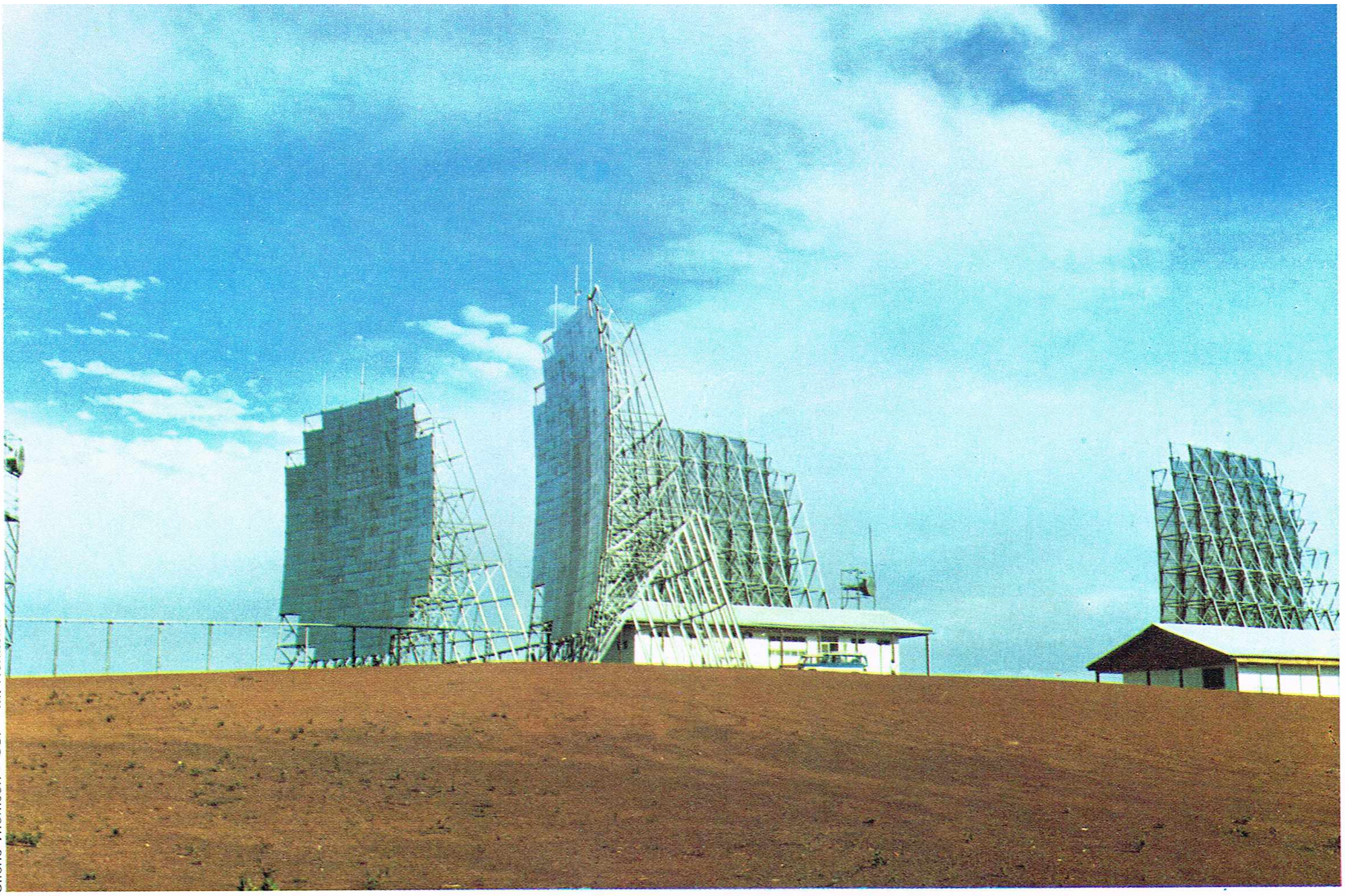

Cliché Thomson - CSF - M. Hermelin

LES HYPERFRÉQUENCES

En 1977, les télécommunications (relais hertziens, communications par satellites, contrôle des circulations routière, ferroviaire, aérienne et maritime), la recherche physique fondamentale (spectrométrie des solides, des liquides et des gaz, études des tissus biologiques, accélérateurs de particules) et certaines applications industrielles (fours) utilisent des sources émettant des ondes électromagnétiques de fréquences de plus en plus élevées et les circuits correspondants.

On démontre, en effet, que, pour transmettre un grand nombre d'informations, rapidement et avec un bon rapport signal sur bruit en puissance (1), il faut utiliser une large bande passante, donc travailler à fréquence élevée. Dans un système à porteuse, cela justifie l'adoption de fréquences très élevées où l'information est superposée comme une modulation (2). D'autre part, la montée en fréquence permet d'obtenir des renseignements de plus en plus riches dans l'étude de la matière.

(Les chiffres entre parenthèses notés en indice au cours de cet article se réfèrent à la bibliographie placée en fin de texte.)

Rappelons qu'une onde qui se propage dans un milieu infini qui est le vide, à la vitesse de la lumière c, à la fréquence f, présente une longueur d'onde $\lambda = \frac{c}{f}$. Les systèmes montrés sur les photographies de la *figure* 1 en a), b), c), d), e) mettent en œuvre des fréquences allant de 860 MHz à 10^6 GHz (GHz signifiant gigahertz, soit 10^9 hertz).

L'échelle de la *figure* 2 montre le spectre des fréquences concerné par le domaine dit des *hyperfréquences*. Il va de la centaine de mégahertz (1 MHz = 10^6 Hz) à 10^{15} Hz, c'est-à-dire la gamme des fréquences optiques.

Si de grands progrès ont été réalisés depuis la dernière guerre mondiale, tant sur la puissance d'émission des sources, sur la directivité des antennes que sur l'intégration des circuits passifs et actifs, la théorie et les expériences fondamentales sur la propagation des ondes hertziennes avaient été effectuées dès la fin du XIXe siècle. Le schéma de la *figure* 3 évoque dans l'ordre chronologique les principaux travaux théoriques et expérimentaux menés à bien par leurs auteurs depuis la parution du *Grand Traité d'électricité et de magnétisme* de Maxwell, en 1873, jusque vers 1940.

longueur d'onde		
	1873 :	MAXWELL J.C., *Grand Traité d'Electricité et de Magnétisme*, 1873.
	1876 :	HEAVISIDE O., *Phil. Mag.*, Aug. 1876.
3 m → 66 cm	1887 :	HERTZ H., *Sitz. KP, Akad Wiss Berlin*, t. L, 1888, traduit dans *J. Phys.*, 8, 1889.
	1891 :	LECHER, *Wied Ann.*, t. XLII, 1891.
	1892 :	BIRKELAND Kr., *Wied Ann.*, t. XLVII, 1892, traduit dans *J. Phys.*, 3, 1894.
10 cm → 3 cm	1897 :	RIGHI A., *Mém. Rac. Sci. Inst. Bologna*, 516, 1897.
3 cm	1898 :	BOSE J.C., *Roy. Soc. Proc.*, 42, 1898.
	1899 :	POINCARÉ H., *Ecl. Elect.*, 28, 1899.
240 → 104 cm 43 cm; 10 cm	1919 :	BARKHAUSEN H., KURZ K., *Phys. Zeits.*, 21 Janv. 1920.
7 → 0,22 mm 8,2 µ et 40 mm	1923 :	NICHOLS E.F., TEAR J.D., *Nat. Acad. Sci. Proc.*, 9, June 1923.
	1924 :	*GLAGOLEWA A., ARKADIEWA, Zeits f., Physiks*, 24, 1924.
	1936 :	SCHELKUNOFF S.A., *Bell Syst. Techn. J.*, 15, Jan. 1936.
	1936 :	CARSON J.R., *Bell Syst. Techn. J.*, 15 April 1936.
	1939 :	VARIAN R.H. et S.F., *J. of. Applied Physics*, 10 May 1939.

fig. 3

▲ *Figure 1a : station-relais du réseau hertzien à diffusion troposphérique (3 600 km en 14 bonds, dont 2 de près de 500 km). Fréquence : 830-960 MHz. Capacité de transmission : 120 voies téléphoniques. Fonctionnement en diversité 4 : c'est-à-dire en diversité d'espace et de fréquence (4 antennes) [Brésil, État du Mato Grosso, Urucum près de Corumbá (grande ville proche)].*

◀ *Figure 3 ; tableau des grands travaux théoriques et expérimentaux menés à bien par les auteurs, de 1873 jusqu'en 1940 : sont notés, à côté du nom de l'auteur, le titre de l'article original publié à cette occasion, et pour les expériences la longueur d'onde correspondante.*

▼ *Figure 2 : le spectre des fréquences concerné par le domaine dit des hyperfréquences.*

fig. 2

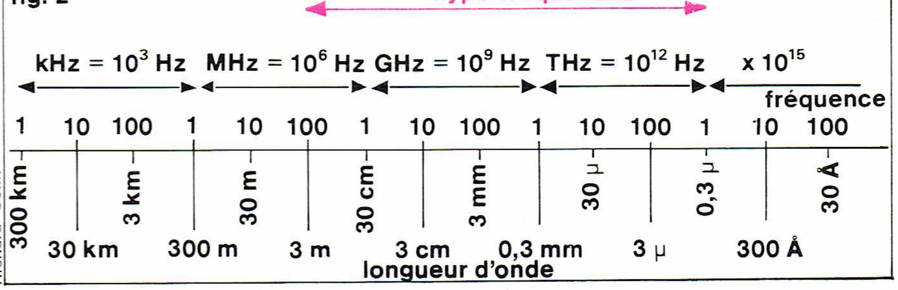

Richard Colin

J. Guilloreau - Fotogram

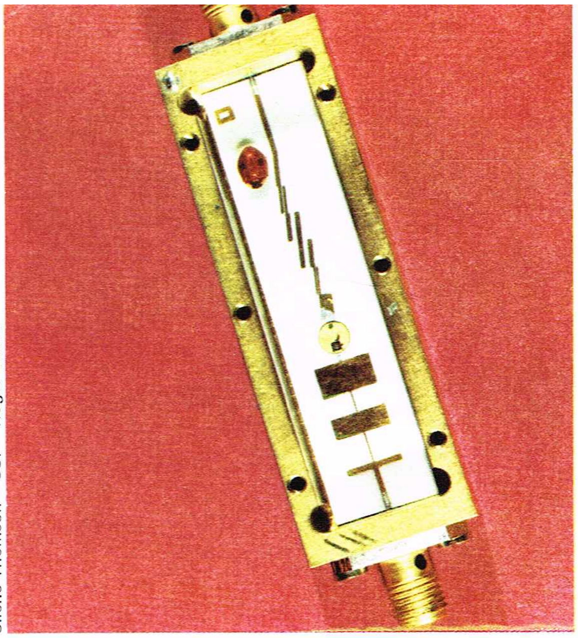

Cliché Thomson - CSF - Roger Violet

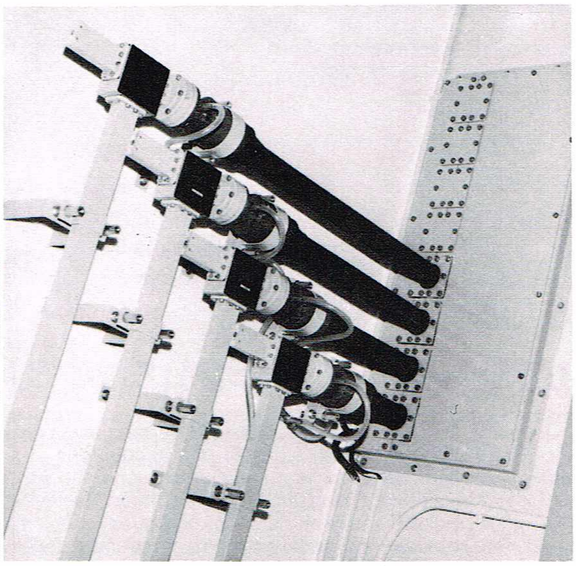

Cliché Thomson - CSF - Gilbert Warin

▲▶ Ci-dessus, figure 1b : tour hertzienne principale des P. et T. françaises à Meudon (f = 6 GHz). A droite en haut, figure 1d ; multiplicateur de fréquence réalisé en microbande : sortie bande X (f ≃ 10 GHz). En bas, figure 1c ; guides à l'intérieur d'une tour : sortie étanche des guides elliptiques, raccordement aux guides rectangulaires et guides rectangulaires.

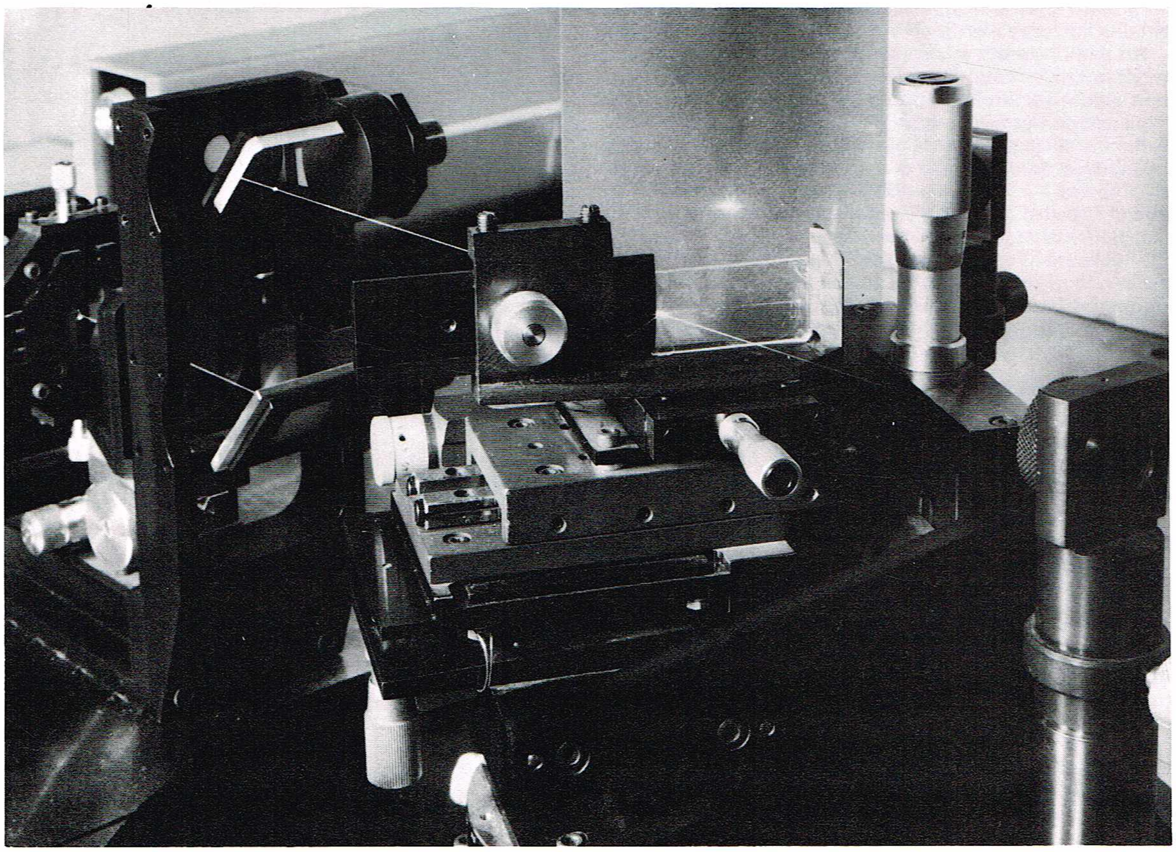

Cliché Thomson - CSF

▶ Figure 1e : propagation dans un guide d'onde optique avec couplage par réseau (f ≃ 10^6 GHz).

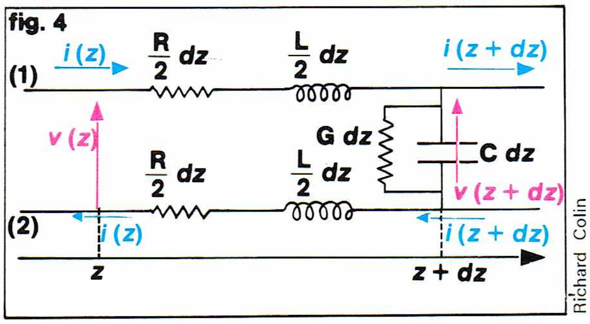

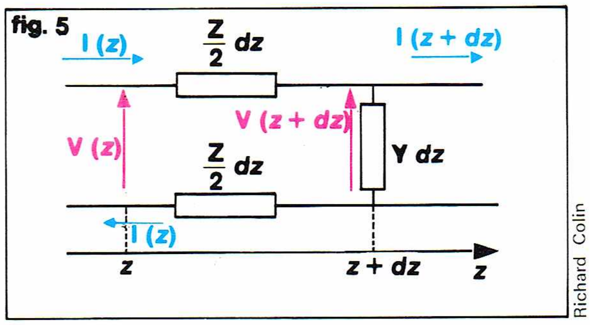

◀ A gauche, figure 4 : représentation schématique d'une ligne de transmission constituée de deux conducteurs plongés dans un matériau diélectrique. A droite, figure 5 : représentation schématique d'une ligne dans le cas où la source applique à l'entrée de la ligne en z = 0 une tension sinusoïdale E_g.

La propagation d'un phénomène sinusoïdal se traduit par la relation $A = a \cos(\omega t - \beta z + \Phi)$ avec $\omega = 2\pi f$, $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$.

Supposons que A soit la tension ou le courant en un point donné d'abscisse z à l'instant t.

— Si toutes les distances considérées z sont beaucoup plus petites que λ, on voit que A ne dépend que du temps t : *c'est l'approximation des états quasi stationnaires.*

Exemple : $f = 50$ Hz, $\lambda = 6\,000$ km : A a la même valeur en tous les points d'une ville ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s) ; on parle alors de circuits à *constantes localisées.*

— Si z n'est plus négligeable devant λ, alors, à un instant t donné, A dépend de z. Dans ce cas, le circuit considéré est à *constantes réparties* ou *distribuées.*

Exemple : $f = 10^{10}$ Hz, $\lambda = 3$ cm. Si f croît, λ diminue, et les dimensions du circuit deviennent importantes devant λ. C'est dans ce dernier cas que nous nous plaçons désormais.

Les lignes de transmission en hyperfréquence

Pour aborder l'étude des lignes de transmission et des circuits en hyperfréquence, il faut utiliser et la *théorie des circuits,* et la *théorie de l'électromagnétisme,* parfois séparément, parfois simultanément.

La théorie des circuits envisage des tensions V et des courants I dans des dispositifs constitués d'éléments idéalisés, chacun d'entre eux étant caractérisé par une relation du type $V = f(I)$ à ses bornes.

La théorie des circuits ne tient donc pas compte de la *géométrie* du dispositif réel, sauf en ce qui concerne la façon dont sont connectés les éléments entre eux. C'est en cela que résident la force et les limitations de la théorie des circuits. Par exemple, une bobine conductrice peut être une résistance, une inductance, un résonateur, une antenne de télévision, l'hélice d'un tube à onde progressive ou un ressort de lit ! [17] [18]. Cette description montre qu'il n'y a pas une correspondance unique entre l'apparence physique d'un objet et sa fonction, même si le dispositif en question est connu pour produire un champ électromagnétique, s'il est parcouru par un courant. Les caractéristiques du champ électromagnétique créé dans l'environnement de la bobine dépendent pour une large part de la fréquence d'excitation. En conséquence, les *propriétés du champ* déterminent les *fonctions* que le dispositif peut avoir dans un montage donné. Nous envisageons donc successivement la propagation le long d'une ligne en termes de tension et courant puis en termes de champs électrique et magnétique.

Description des lignes à l'aide de la théorie des circuits [19]

Équation des télégraphistes et des radio-électriciens en régime quelconque

Une ligne de transmission constituée de deux conducteurs plongés dans un matériau diélectrique — deux fils parallèles ou deux plans parallèles, ou deux conducteurs coaxiaux noyés dans un diélectrique — peut être symbolisée par le schéma de la *figure* 4 où est représenté un petit élément de ligne de longueur dz. Le circuit est défini par des éléments distribués tels que L, C, R, G, qui sont respectivement le coefficient d'auto-induction, la capacité, la résistance et la conductance par unité de longueur. Au courant $i(z)$ qui se propage dans le brin (1) correspond un courant $i(z)$ dans le brin (2), de même amplitude dans un même plan transversal, mais de sens opposé. Entre les deux brins, il existe une tension $v(z)$. R caractérise les pertes par unité de longueur (ohm/mètre) dans les fils conducteurs de coefficient d'auto-induction L (henry/mètre), G caractérise les pertes par unité de longueur (mho/mètre) dans le diélectrique de capacité C (farad/mètre).

Dans le plan d'abscisse z, on définit un courant $i(z)$ et une tension $v(z)$. La loi de Kirchhoff et la loi des mailles [20] appliquées au circuit de la *figure* 4 conduisent à :

$$-\frac{\partial v}{\partial z} = Ri + L\frac{\partial i}{\partial t} \quad \text{et} \quad -\frac{\partial i}{\partial z} = Gv + C\frac{\partial v}{\partial t}$$

La dérivation par rapport à z de ces deux équations donne l'équation des télégraphistes en régime quelconque :

$$\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = RGv + (RC + LG)\frac{\partial v}{\partial t} + LC\frac{\partial^2 v}{\partial t^2}$$

Dans le cas où la ligne ne présente pas de pertes, $R = G = 0$. Cette équation s'écrit sous la forme

$$\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = LC\frac{\partial^2 v}{\partial t^2}$$

équation dite des radio-électriciens.

Heaviside a établi l'équation des télégraphistes en 1876 à partir des concepts de tension et de courant et des lois de Kirchhoff. Vers 1900, Henri Poincaré retrouve cette équation à partir des équations de Maxwell.

L'équation des radio-électriciens admet comme solution générale $v = f_1(z - ut) + f_2(z + ut)$ où u est une constante arbitraire choisie telle que $LCu^2 = 1$: u n'est autre que la vitesse de phase de l'onde. A $v_1 = f_1(z - ut)$ correspond une onde se propageant vers les z positifs, à $v_2 = f_2(z + ut)$ correspond une onde se propageant vers les z négatifs.

Équation des télégraphistes en régime sinusoïdal

Le régime sinusoïdal est très important, car tout régime périodique en fonction du temps peut être décomposé en sommes de fonctions sinusoïdales grâce au développement en série de Fourier, et s'il n'est pas périodique, en intégrales de Fourier.

Dans le cas où la source applique à l'entrée de la ligne, en $z = 0$, une tension sinusoïdale E_g, un petit élément dz de ligne peut être représenté par le schéma de la *figure* 5, où $Z = R + j\omega L$ et $Y = G + j\omega C$. Dans ce cas, l'équation des télégraphistes s'écrit $\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = ZYV$. De même, $\frac{\partial^2 I}{\partial z^2} = ZYI$. La solution de l'équation $\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = ZYV$ est $V = V_1 e^{-\gamma z} + V_2 e^{+\gamma z}$ où $\gamma = \sqrt{ZY}$ et où V_1 et V_2 sont des constantes complexes. Le courant I est alors donné par $I = \frac{1}{Z_0}(V_1 e^{-\gamma z} - V_2 e^{+\gamma z})$ avec $Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}}$. Z_0 est appelé *impédance caractéristique* de la ligne.

Dans le cas où la ligne est sans pertes, $Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$. Pour un câble coaxial de rayons a et b pour les conducteurs intérieurs et extérieurs :

$$C = \frac{2\pi\varepsilon}{\text{Log}\,\frac{b}{a}}, \quad L = \frac{\mu}{2\pi}\text{Log}\,\frac{b}{a}, \quad Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \cdot \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}}\frac{1}{2\pi}\text{Log}\,\frac{b}{a}$$

Exemple :

$\frac{b}{a} = 3{,}9 \quad C = 96$ pF/m $\quad L = 0{,}24\ \mu$H/m $\quad Z_0 = 50\ \Omega$

▶ *Figure 6 : la longueur d'onde λ est à un instant donné la plus petite longueur dont il faut se déplacer pour retrouver la même valeur du potentiel.*

▼ *Figure 7 : représentation schématique d'une ligne fermée par une impédance Z_t.*

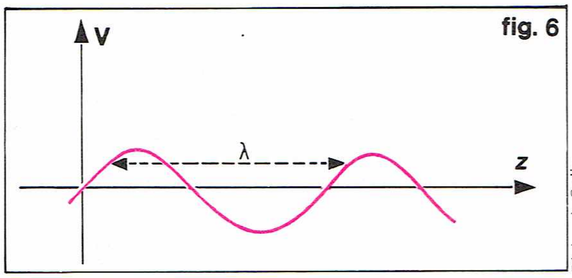

Richard Colin

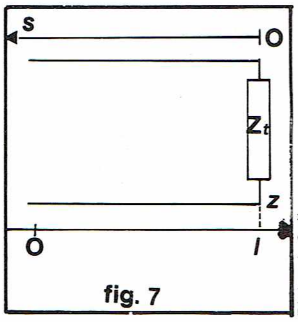

Richard Colin

▼ *Ci-dessous, figure 8 : (a) plan complexe en coordonnées rectangulaires auquel correspond, par transformation conforme, le plan complexe en coordonnées curvilignes (b). En bas, figure 9 : voir démonstration dans le texte.*

Les paramètres $\varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r$, $\mu = \mu_0\mu_r$ supposés indépendants de la fréquence sont définis de la façon suivante :

ε : permittivité diélectrique absolue du diélectrique (farad/m) ;

$\varepsilon_r = \dfrac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$: permittivité diélectrique relative du diélectrique ;

μ : perméabilité magnétique absolue du conducteur (henry/m) ;

$\mu_r = \dfrac{\mu}{\mu_0}$: perméabilité magnétique relative du conducteur ;

$\mu_0 = 4\,\pi\,10^{-7}$ (henry/m) par convention ;

$\varepsilon_0 = \dfrac{1}{36\,\pi\,10^9}$ (farad/m) est calculée grâce à la relation :

$\varepsilon_0\mu_0c^2 = 1$ où c, vitesse de la lumière, est mesurée (m/s).

Dans la plupart des cas, même pour des lignes à faibles pertes, on considère Z_0 comme réelle et égale à $\sqrt{\dfrac{L}{C}}$. Il n'en est pas de même pour la constante $\gamma = \alpha + j\beta$. α est le coefficient d'atténuation exprimé en nepers/m, et β la constante de propagation exprimée en m^{-1} ; α et β sont de même signe. Par conséquent, la présence de pertes atténue toujours l'onde dans son sens de propagation.

Exemple : prenons β positif, dans ce cas α aussi est positif. La tension V d'une onde se propageant vers les z positifs s'écrit $V = |V_1|\,e^{-\gamma z}\cos(\omega t - \beta z + \Phi)$. L'amplitude décroît au fur et à mesure que z croît.

Cas particulier :

a) pour une ligne sans pertes, $R = G = 0$, ce qui donne $\alpha = 0$, $\beta = \omega\sqrt{LC}$;

b) pour une ligne à faibles pertes

$$\alpha = \frac{R}{2\sqrt{\dfrac{L}{C}}} \qquad \beta = \omega\sqrt{LC}$$

Il reste à définir la vitesse de phase $u = \dfrac{\omega}{\beta}$. Dans le cas où la ligne bifilaire est plongée dans le vide, $u = \dfrac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}$.

La longueur d'onde λ est à un instant donné la plus petite longueur dont il faut se déplacer pour retrouver la même valeur du potentiel (et avec la même pente) [*fig.* 6] :

$$\omega t_1 - \beta\,(x + \lambda) + \Phi = \omega t_1 - \beta x + \Phi - 2\,k\pi$$

$$\text{Pour } k = 1, \qquad \beta = \frac{2\,\pi}{\lambda}$$

Impédance et coefficient de réflexion en un point d'une ligne

Plaçons une impédance Z_t à l'extrémité de la ligne en $z = l$, on dit que l'on a fermé la ligne par une impédance Z_t, c'est une condition aux limites de la ligne (*fig.* 7).

Dans le plan $z = l$, $V(l) = Z_t I(l)$, soit :

$$Z_t = \frac{V\,(l)}{I\,(l)} = Z_0\,\frac{V_1e^{-\gamma l} + V_2e^{+\gamma l}}{V_1e^{-\gamma l} - V_2e^{+\gamma l}}$$

On appelle impédance réduite ou normalisée $z_t = \dfrac{Z_t}{Z_0}$.

Il vient :

$$z_t = \frac{1 + \dfrac{V_2}{V_1}\,e^{+2\gamma l}}{1 - \dfrac{V_2}{V_1}\,e^{+2\gamma l}}$$

Le rapport $\dfrac{V_2}{V_1}\,e^{+2\gamma l}$ est égal au rapport du potentiel de l'onde réfléchie et du potentiel de l'onde incidente dans le plan $z = l$:

$$\text{on pose } \Gamma_0 = \frac{V_2}{V_1}\,e^{+2\gamma l}$$

$$\text{dans ce cas, } z_t = \frac{1 + \Gamma_0}{1 - \Gamma_0}$$

Cette relation est généralisable dans tout plan de la ligne où le coefficient de réflexion Γ et l'impédance Z sont liés par la même relation :

$$\Gamma\,(z) = \frac{V_2}{V_1}\,e^{+2\gamma z} \rightleftarrows Z = \frac{V\,(z)}{I\,(z)} = Z_0\,\frac{1 + \Gamma\,(z)}{1 - \Gamma\,(z)}$$

Si l'on prend comme origine des abscisses le plan $z = l$ (*fig.* 7) avec $s + z = l$, alors $\Gamma = \Gamma_0e^{-2\gamma s}$ et, pour une ligne sans pertes, $\Gamma = \Gamma_0e^{-2j\beta s}$. Si $\Gamma_0 = \rho_0e^{j\theta_0}$ et $\Gamma = \rho e^{j\theta}$

$$\rho = \rho_0e^{-2\alpha s} \quad \text{et} \quad \theta = \theta_0 - 2\,\beta s$$

Abaque de Smith

L'impédance réduite z_t et le coefficient de réflexion défini dans le même plan Γ_0 sont liés par la relation

$$\Gamma_0 = \frac{z_t - 1}{z_t + 1}$$

Connaissant Γ_0 en module et en phase, on peut en déduire z_t par la relation $z_t = \dfrac{1 + \Gamma_0}{1 - \Gamma_0}$ mais l'abaque de Smith permet le passage direct sans calcul.

Posons $z_t = r + jk$

il vient $\Gamma_0 = X + jY$

$$\text{avec} \quad X = \frac{r^2 - 1 + jk}{(r + 1)^2 + k^2} \quad \text{et} \quad Y = \frac{2\,k}{(r + 1)^2 + k^2}$$

Au plan complexe en coordonnées rectangulaires (*fig.* 8a) correspond, par transformation conforme, le plan complexe en coordonnées curvilignes (*fig.* 8b).

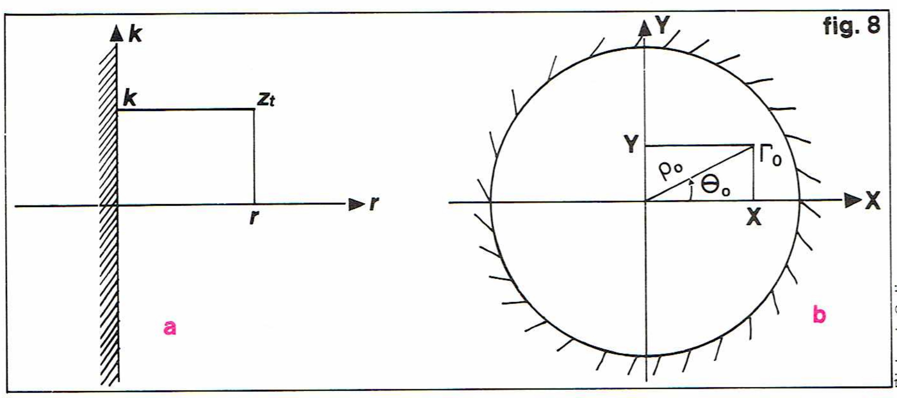

Richard Colin

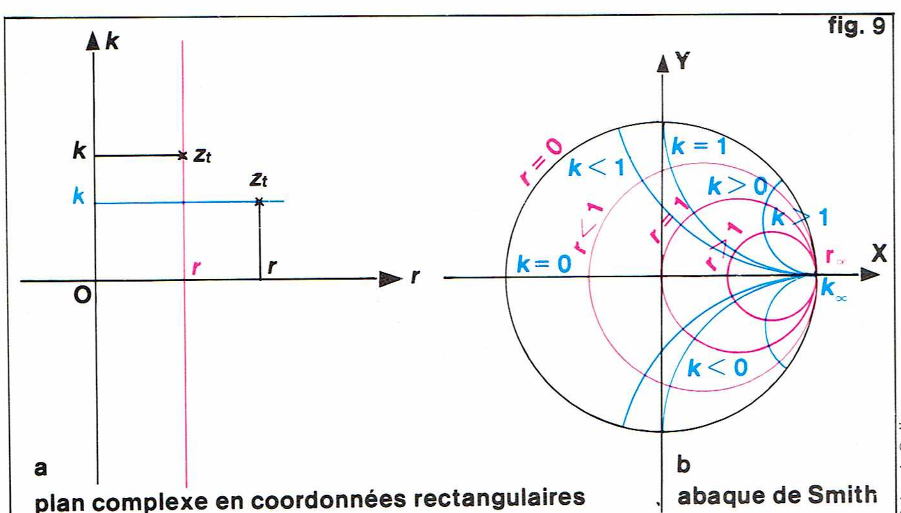

Richard Colin

fig. 10

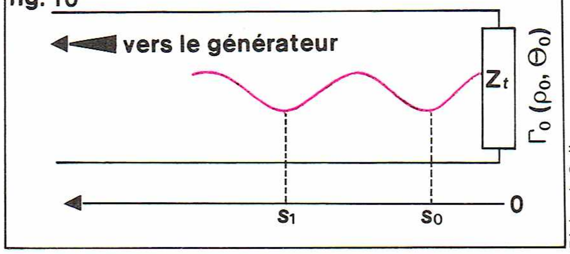

Richard Colin

a) Si $r =$ constante, k variant (*fig.* 9a), le lieu de l'affixe de $\vec{\Gamma_0}$ est une famille de cercles (*fig.* 9b) d'équation

$$\left(X - \frac{r}{r+1}\right)^2 + Y^2 = \left(\frac{1}{r+1}\right)^2$$

b) Si $k =$ constante, r variant (*fig.* 9a), le lieu de l'affixe de Γ_0 est une famille de cercles (*fig.* 9b) d'équation :

$$(X - 1)^2 + \left(Y - \frac{1}{k}\right)^2 = \frac{1}{k^2}$$

La donnée simultanée de r et k donne Γ_0 et inversement ; la donnée simultanée de ρ_0 et θ_0 donne z_t. Notons que le diagramme en impédance est le même que le diagramme en admittance.

Principe de toutes les mesures sur les lignes sans pertes ; lectures sur l'abaque de Smith

Z_t est déduit de la mesure de Γ_0.

a) *Détermination expérimentale de* $|\Gamma_0| = \rho_0$
L'onde incidente $V_1 e^{-j\beta z}$ et l'onde réfléchie $V_2 e^{+j\beta z}$ déterminent, le long de la ligne, des maximums V_M et des minimums V_m de potentiel tels que $|V_M| = |V_1|\ (1 + \rho)$ et $|V_m| = |V_1|\ (1 - \rho)$; on appelle taux d'ondes stationnaires S (en anglais, voltage standing waveratio) le rapport $\left|\frac{V_M}{V_m}\right|$. Puisque la ligne est sans pertes, $\rho = \rho_0$ et $S = \frac{1 + \rho_0}{1 - \rho_0}$, il suffit donc de mesurer S pour en déduire ρ_0.

b) *Détermination expérimentale de* Arg $\Gamma_0 = \theta_0$
On a vu que $\theta = \theta_0 - 2\ \beta s$. Notons s_0 l'abscisse du 1^er^ minimum à partir de la charge (*fig.* 10). En ce point, $\theta s_0 = \theta_0 - 2\ \beta s_0 = -\pi$ d'où $\theta_0 = -\pi + 2\ \beta s_0$. Il suffit donc pour déterminer θ_0 de mesurer la distance du 1^er^ minimum à la charge.

c) *Détermination expérimentale de* $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$

Notons s_1 l'abscisse du 2^e^ minimum (*fig.* 10). En ce point, $\theta s_1 = \theta_0 - 2\ \beta s_1 = -3\ \pi$. Compte tenu de l'expression de θs_0 précédemment trouvée, il vient $\beta = \frac{\pi}{s_0 - s_1}$ ce qui donne la valeur de λ.

Les mesures décrites ci-dessous s'effectuent point par point à l'aide d'une ligne de mesure à fente (*fig.* 11). On peut obtenir les mêmes résultats, mais de manière automatique, à l'aide d'un analyseur de réseaux (*fig.* 12).

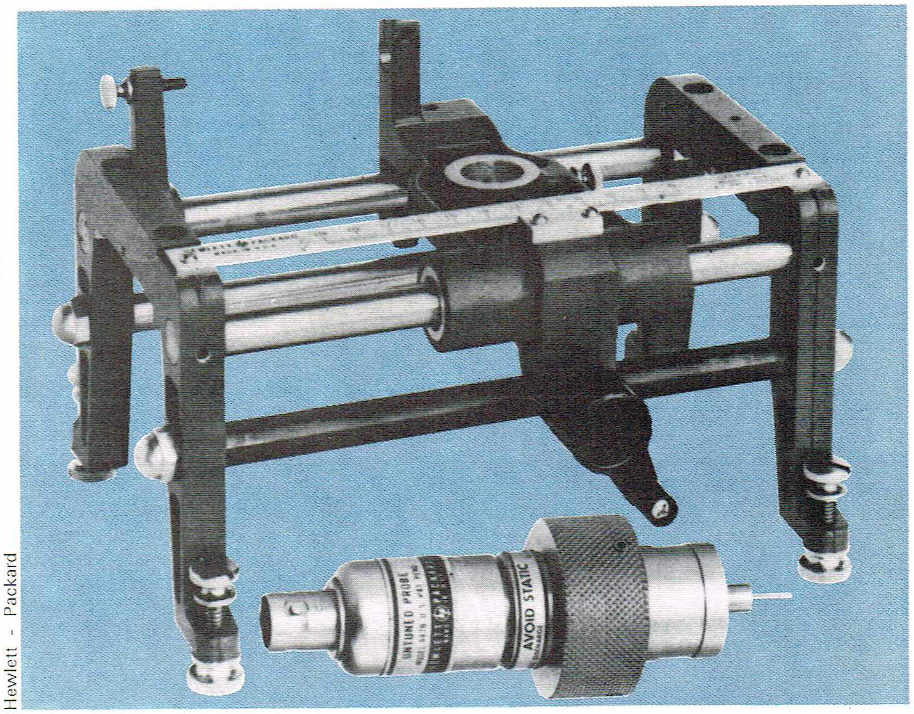

Hewlett - Packard

▲ *A gauche, figure 10 : détermination expérimentale de Arg Γ_0. A droite, figure 11 : ligne de mesure à fente et sa sonde.*

Transformation d'impédance par une ligne

Si l'on coupe une ligne terminée par une charge Z_t (*fig.* 13a), au point d'abscisse s, l'impédance Z que l'on doit mesurer à cet endroit (après avoir retiré Z_t et le tronçon de ligne), pour que la répartition du courant et du potentiel entre le générateur et le point s soit inchangée, est telle que

$$Z = Z_0 \frac{Z_t + \text{th}\ \gamma s}{Z_0 + Z_t\ \text{th}\ \gamma s}$$

Dans le cas d'une ligne sans perte :

$$Z = Z_0 \frac{Z_t + j\,\text{tg}\ \beta s}{Z_0 + jZ_t\ \text{tg}\ \beta s}$$

Remarque : on utilise la même expression pour le calcul des impédances élastiques dans l'étude de la propagation des ondes élastiques dans un solide [20].

Application : une ligne $\lambda/4$ d'impédance caractéristique égale à Z_0 adapte deux lignes d'impédance caractéristique Z_1 et Z_2 si $Z_0^2 = Z_1 Z_2$ (*fig.* 13b).

Puissance active

La puissance transmise du générateur à la charge (*fig.* 13a) s'écrit $P = \frac{1}{2}\ \text{Re}V\ (l) \cdot I^*\ (l)$

Hewlett - Packard

◀ *Figure 12 : un analyseur automatique de réseaux.*

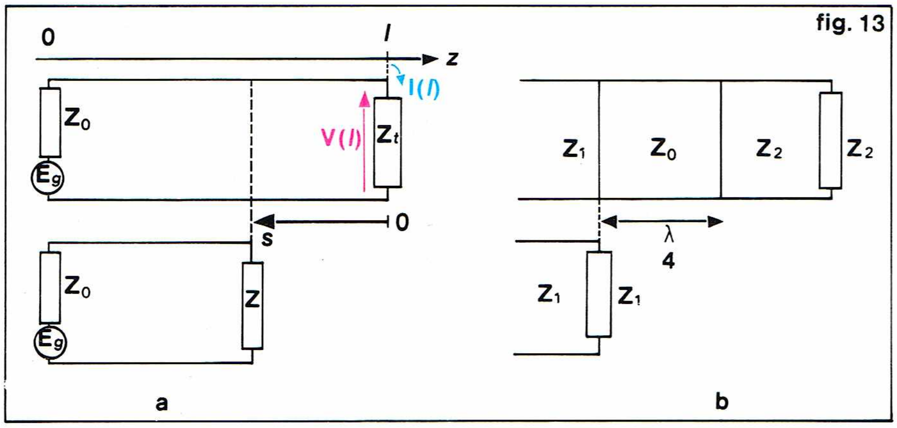

Richard Colin

Dans le cas d'une ligne à perte $P = \frac{1}{2}\frac{|V_1|^2}{Z_0} e^{-2\alpha l}(1 - \rho_0^2)$

On appelle puissance incidente la quantité

$$P_i = \frac{1}{2}\frac{|V_1|^2}{Z_0} e^{-2\alpha l}$$

$P_r = \rho_0^2 P_i$ est la puissance réfléchie et $P = P_i - P_r$ la puissance transmise. Cette dernière peut être dissipée, emmagasinée ou réfléchie.

Adaptation à stub à fréquence fixe

Le but est de transférer le maximum d'énergie à la charge. Pour ce faire, on rend l'impédance apparente à l'entrée de la ligne égale à Z_0 impédance caractéristique de cette ligne. On utilise des éléments non dissipatifs placés en parallèle ou en série sur la ligne. Une ligne court-circuitée de longueur *d*, appelée stub, de même impédance caractéristique Z_0, permet cette adaptation.

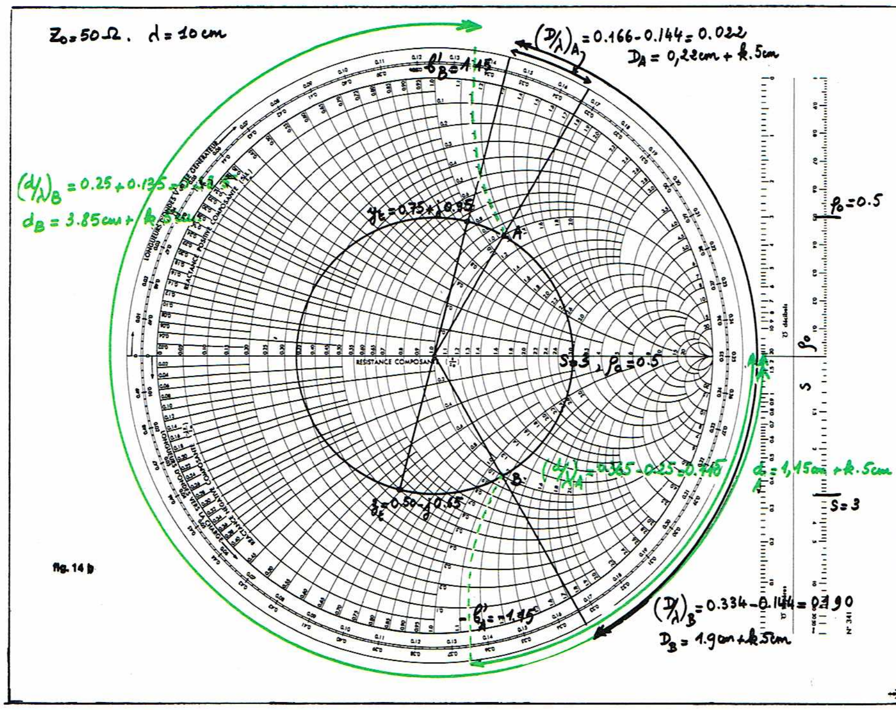

A. Fournier - Lamer

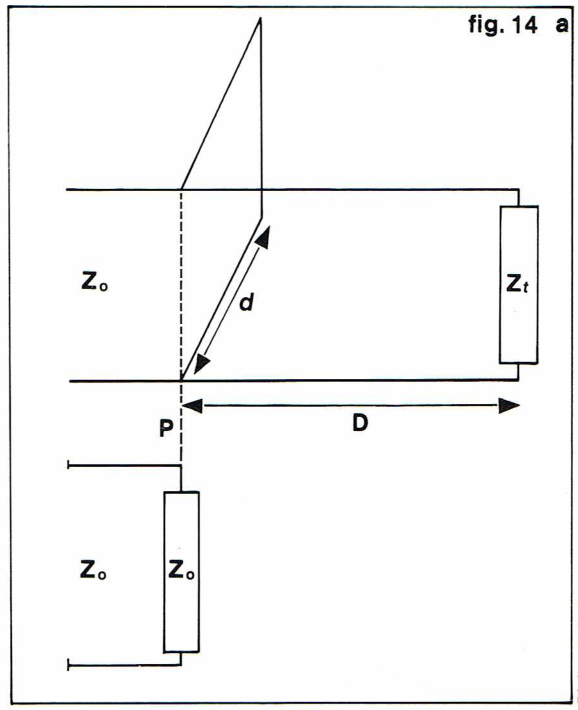

Richard Colin

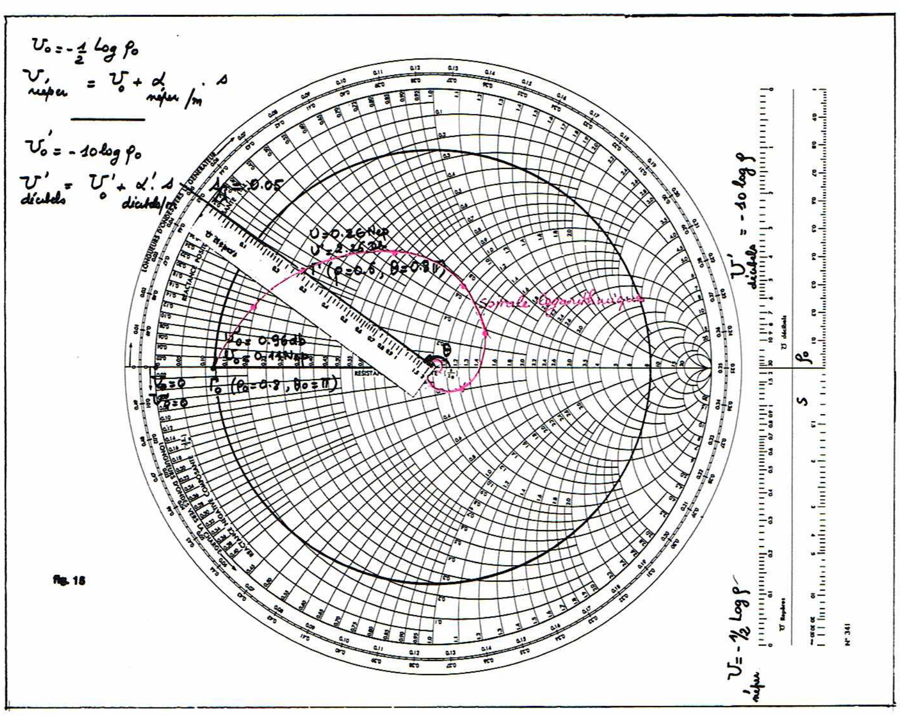

A. Fournier - Lamer

Exemple : adaptation à un stub en parallèle (*fig.* 14a) ; cette adaptation se fait en deux temps.

— Adaptation de la partie réelle qui fixe la distance du plan du stub à la charge, soit D ; $y_{enP} = 1 + jb'$.

— Annulation de la partie imaginaire grâce à un stub de susceptance — *jb'* qui fixe sa longueur *d*; ce problème se résout à l'aide de l'abaque. Il existe deux groupes de solutions — points A et B (*fig.* 14b).

Dans une situation où l'on ne peut déplacer le stub le long de la ligne, on envisage l'adaptation par deux stubs ou même trois stubs fixes.

Ligne avec pertes

Lorsqu'une ligne est sans pertes, l'affixe du coefficient de réflexion sur l'abaque de Smith se déplace sur un cercle de rayon ρ_0, lorsque *s* croît.

Lorsqu'une ligne présente des pertes, ce n'est plus le cas, en effet $\rho = \rho_0 e^{-2\alpha s}$. Or $\theta = \theta_0 - 2\beta s$, donc $\rho = \rho_0 e^{\frac{\alpha}{\beta}(\theta - \theta_0)}$ qui est l'équation polaire de l'affixe de $\vec{\Gamma}$ qui se déplace alors sur une spirale logarithmique (*fig.* 15). Comment varie le module du potentiel le long de la ligne ?

$V = V_1 e^{-\gamma z} + V_2 e^{+\gamma z}$ et $\Gamma = \frac{V_2}{V_1} e^{+2\gamma z}$ donnent

$$|V|^2 = |V^1|^2 e^{-2\alpha l} \cdot e^{+2\alpha s} [1 + 2\rho_0 e^{-2\alpha s}\cos(\theta_0 - 2\beta s) + \rho_0^2 e^{-4\alpha s}]$$

La notion de taux d'ondes stationnaires ne peut plus s'appliquer puisque α est différent de zéro.

fig. 16

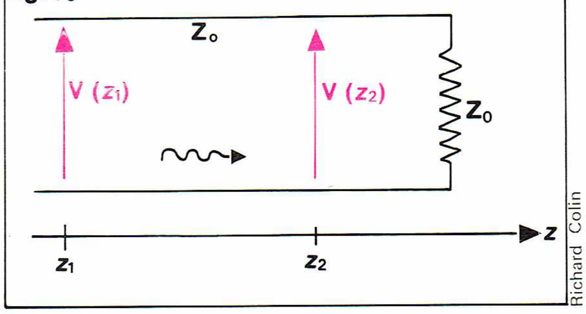

◀ *Figure 16 : représentation schématique d'une ligne terminée par son impédance caractéristique* Z_0 *et deux points d'abscisse* z_1 *et* z_2 *tels que :* $z_2 - z_1 = 1$ m.

Envisageons une ligne terminée par son impédance caractéristique Z_0 et deux points z_1 et z_2 tels que

$$z_2 - z_1 = 1 \text{ m} \qquad (\textit{fig. } 16)$$

On pose $\alpha = \text{Log}\dfrac{|V(z_1)|}{|V(z_2)|}$ (logarithme népérien). α s'exprime en nepers/mètre. On définit aussi un coefficient d'atténuation α' exprimé en décibels/mètre

$$\alpha' = 20 \log \frac{|V(z_1)|}{|V(z_2)|} \qquad \text{(logarithme décimal)}$$

et α neper/mètre $= 0{,}115\ \alpha'$ dB/mètre.

Pour un câble coaxial en cuivre et téflon, $\alpha \# 1$ dB/m à 10 GHz.

Exemple : sur l'abaque (*fig.* 15), deux réglets U neper et U'dB donnent l'atténuation en nepers et en dB respectivement.

Exemple : Γ_0 ($\rho_0 = 0{,}8, \theta_0 = \pi$) $\lambda = 1$ m, $\alpha = 3$ nep/m. Quelle est la valeur de Γ à 5 cm de la charge ? Réponse : Γ ($\rho = 0.6$, $\theta = 0{,}8\ \pi$) [*fig.* 15].

Description des lignes à l'aide de la théorie électromagnétique [21]

Équations de Maxwell - Théorème de Poynting - Équation de propagation - Conditions aux limites

Après nous être attaché à la description d'une ligne de transmission en termes de tension et de courant, et après avoir vu les limitations de la théorie des circuits qui ne permet pas de décrire les caractéristiques physiques d'une ligne, faisons appel aux concepts de *champ électromagnétique*.

Nous reviendrons ultérieurement sur les fondements qui permettent de décrire indifféremment l'interaction entre un circuit électrique et une onde en termes de tension et de courant ou en termes de champs électrique et magnétique.

En électromagnétisme, on utilise six variables liées entre elles, chacune étant fonction de deux variables indépendantes, le temps t et l'espace r :

1) la densité de charges libres ρ (r, t) [coulomb/m^3] ;

2) la densité de courant $\vec{J}$ (r, t) [ampère/m^2] ;

3) l'intensité de champ électrique $\vec{E}$ (r, t) [volt/m] ;

4) l'induction magnétique $\vec{B}$ (r, t) [weber/m^2] ou densité de flux magnétique ;

5) l'induction électrique $\vec{D}$ (r, t) [coulomb/m^2] ou densité de flux électrique ;

6) l'intensité de champ magnétique $\vec{H}$ (r, t) [ampère/m].

Les équations de Maxwell décrivent les lois suivantes :

a) la conservation des charges (loi de Gauss) $\text{div}\,\vec{D} = \rho$;

b) la loi de Faraday $\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{E} = -\dfrac{\partial \vec{B}}{\partial t}$;

c) le théorème d'Ampère $\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{H} = \vec{J} + \dfrac{\partial \vec{D}}{\partial t}$;

d) l'inexistence de charges magnétiques $\text{div}\,\vec{B} = 0$.

Dans le cas de champs *dépendant du temps*, elles prennent les formes écrites ci-dessus. En conséquence, les champs E (r, t) et H (r, t) sont couplés de façon bilatérale. Pour achever la détermination des six variables, on établit des relations du même type que celles qui existent dans la théorie des circuits entre V et I mais qui décrivent les propriétés du milieu au point considéré. Dans le cas d'un milieu isotrope, $\vec{D} = \varepsilon\vec{E}$ (e), $\vec{B} = \mu\vec{H}$ (f), $\vec{C} = \sigma\vec{E}$ (g) où ε est la permittivité électrique absolue (farad/m),
μ est la perméabilité magnétique absolue (henry/m),
σ est la conductibilité (mho/m),

$\vec{C}$ est la partie de la densité de courant totale $\vec{J}$ qui varie avec les champs. Dans ce cas, $\vec{J} = \vec{C} + \vec{J_0}$ (h) où $\vec{J_0}$ est la densité de courant de *source* indépendante du champ.

Dans le cas de *champ indépendant du temps*, les équations de Maxwell s'écrivent :

$$\text{a}')\ \text{div}\,\vec{D} = \rho, \qquad \text{b}')\ \overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{E} = 0,$$

$$\text{c}')\ \overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{H} = \vec{J}\ (\sigma \neq 0), \qquad \text{d}')\ \text{div}\,\vec{B} = 0.$$

Pour la solution électrostatique,

$$\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{E} = 0 \rightarrow \vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}\,V$$

qui conduit à l'équation de Poisson $\Delta V = \dfrac{\rho}{\varepsilon}$, et dans le cas où $\rho = 0$ à l'équation de Laplace $\Delta V = 0$. On voit que les champs E et H ne sont plus couplés ($\sigma = 0$), ou du moins couplés de façon unilatérale ($\sigma \neq 0$).

A partir des éléments exposés, peut-on mettre en évidence que la transmission d'énergie à travers l'espace est possible ? Oui, c'est le théorème de Poynting qui le montre. Considérons une surface S fermée délimitant un volume V (*fig.* 17). Les grandeurs introduites vérifient la relation :

$$-\int_V \vec{J_0} \cdot \vec{E} dv = \int_V \sigma\,|E|^2\,dv + \int_V \left(\vec{E}\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{H}\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\right) dv + \int_S \vec{n}\,(\vec{E} \wedge \vec{H})\,dS$$

$$P = Pd + \frac{\partial}{\partial t}(W_E + W_H) + Pr$$

P est la puissance fournie par les sources, Pd la puissance dissipée, $\dfrac{\partial}{\partial t}(W_E + W_H)$ la variation d'énergie moyenne emmagasinée dans V, et Pr la puissance qui quitte le volume V à travers S. Cette relation est un bilan énergétique. On pose $\vec{E} \wedge \vec{H} = \vec{R}$, c'est le vecteur de Poynting en *termes réels*. Dans le cas d'un régime sinusoïdal et en notation complexe, $\underset{\sim}{\vec{E}} = \vec{E_0}\,(x, y, z)\,e^{j(\omega t + \Phi)}$ et $\vec{E} = \text{Re}\underset{\sim}{\vec{E}}$

$$\text{soit } \underset{\sim}{\vec{E}} = [\vec{E}]\,e^{j\omega t} \text{ avec } [\vec{E}] = \vec{E_0}e^{j\Phi}$$

Les équations de Maxwell s'écrivent :

$$\text{div}\,[\vec{D}] = \rho,\ \text{rot}\,[\vec{E}] = -j\omega\,[\vec{B}],\ \text{rot}\,[\vec{H}] = [\vec{J}] + j\omega\,[\vec{D}]$$

$$\text{et}\ [\vec{D}] = \varepsilon\,[\vec{E}],\ [\vec{B}] = \mu\,[\vec{H}],\ [\vec{J}] = [\vec{J_0}] + \sigma\,[\vec{E}].$$

D'autre part $\underset{\sim}{\vec{R}} = \dfrac{1}{2}\underset{\sim}{\vec{E}} \wedge \underset{\sim}{\vec{H}}^*$ *en termes complexes.*

Le théorème de Poynting en termes complexes prend la forme suivante :

$$-\int_V \left(\frac{1}{2}\underset{\sim}{\vec{E}} \cdot \underset{\sim}{\vec{J_0}}^*\right) dv = \int_V \frac{1}{2}(\sigma \underset{\sim}{E}\underset{\sim}{E}^*)\,dv + 2j\omega \int_V \frac{1}{4}(\mu\,\underset{\sim}{\vec{H}}\underset{\sim}{\vec{H}}^* - \varepsilon\,\underset{\sim}{\vec{E}}\underset{\sim}{\vec{E}}^*)\,dv + \int_S \underset{\sim}{\vec{R}}\vec{n}\,ds$$

$$\underset{\sim}{P} = \overline{Pd} + 2j\omega\,(\overline{W_H} - \overline{W_E}) + \underset{\sim}{Pr}$$

$\underset{\sim}{P}$ est la puissance complexe produite par toutes les sources placées en V, $\overline{Pd}$ est la puissance moyenne dissipée dans V, $(\overline{W_H} - \overline{W_E})$ la différence entre les énergies moyennes électrique et magnétique emmagasinées dans V, et $\underset{\sim}{Pr}$ la puissance complexe qui passe à travers S. Dans le cas particulier où le volume ne renferme pas de source, on peut dire que la partie réelle du flux du vecteur de Poynting à travers S est égale à la puissance dissipée dans V.

Résoudre les équations de Maxwell conduit à établir *l'équation de propagation* du type $\Delta E + k^2 E = 0$ et $\Delta H + k^2 H = 0$ où la valeur de k dépend de la pulsation ω et du milieu.

Remarquons que, si toute solution vérifiant l'équation de Maxwell vérifie l'équation de propagation, la réciproque

▼ *Figure 17 : démonstration du théorème de* Poynting.

fig. 17

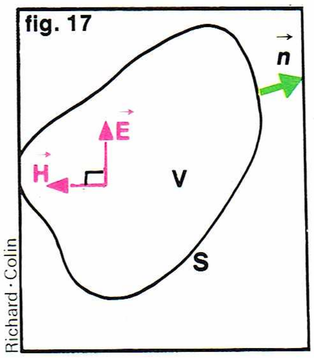

◀ *Page ci-contre. Figure 13a et b : transformation d'impédance par une ligne. Figure 14 : (a) adaptation à un stub en parallèle ; (b) résolution par l'abaque. Figure 15 : dans le cas d'une ligne avec pertes, l'affixe de* Γ *se déplace sur une spirale logarithmique.*

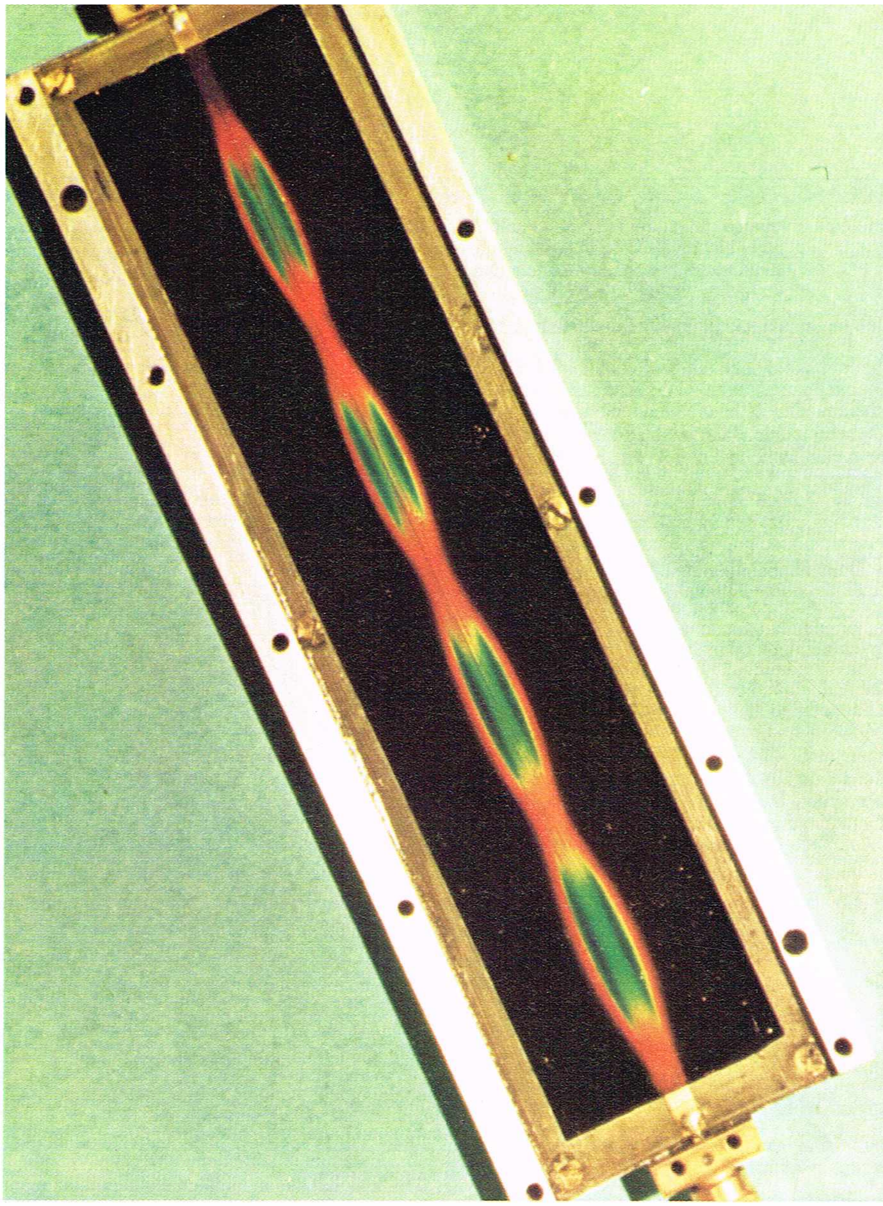

L.T.T. - Puyaubert

▲ ***Visualisation de l'onde électromagnétique à la surface d'une ligne microbande à l'aide de cristaux liquides.***

n'est pas vraie. Enfin, on précise la solution finale en prenant en considération la forme des circuits, ce qui est possible grâce à l'établissement des conditions aux limites.

Une surface S sépare deux milieux (1) et (2) de caractéristiques ε_1, μ_1, σ_1 fini, et ε_2, μ_2, σ_2 fini, respectivement (*fig.* 18). A la surface de séparation, les champs $\vec{E}_1$, $\vec{H}_1$ d'une part, $\vec{E}_2$, $\vec{H}_2$ d'autre part, sont liés par les relations suivantes, où $\vec{n}$ est le vecteur unité normal à S :

$$\vec{n} \cdot (\vec{E}_2 - \vec{E}_1) = 0, \quad \vec{n} \wedge (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) = 0,$$

$$\vec{n} \cdot (\vec{B}_2 - \vec{B}_1) = 0, \quad \vec{n} \cdot (\vec{D}_2 - \vec{D}_1) = \rho_S$$

ρ_S représente une densité de charges libres placées sur la surface S (coulomb/m²).

Si le milieu 1 est un conducteur parfait, σ_1 est infini, et il n'existe aucun champ dans ce milieu. Alors $\vec{n} \wedge \vec{E}_2 = 0$, $\vec{n} \wedge \vec{H}_2 = \vec{C}_S$, $\vec{n}\vec{D}_2 = \rho_S$, où $\vec{C}_S$ est une densité de courant superficielle (ampère/m).

A partir des éléments exposés, le champ électromagnétique est déterminé en tous les points du circuit.

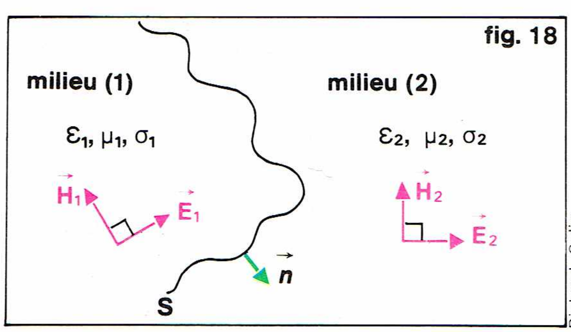

Richard Colin

▶ ***Figure 18 : établissement des conditions aux limites.***

Relation entre les propriétés du champ électromagnétique que l'on observe au voisinage d'un dispositif et les caractéristiques des circuits qui le constituent

Pour établir ces relations, on développe les grandeurs E (x, y, z, t) et H (x, y, z, t) en série de Taylor, telle que si l'on pose $\tau = \alpha t$, on obtient pour le champ électrique :

$$E(x, y, z, \tau, \alpha) = E_0(x, y, z, \tau) + \alpha E_1(x, y, z, \tau) + \alpha^2 E_2(x, y, z, \tau) + \ldots + \alpha^k E_k(x, y, z, \tau)$$

$$\text{avec } E_k(x, y, z, \tau) = \frac{1}{k!}\left[\frac{\partial^k E(x, y, z, \tau, \alpha)}{\partial \alpha^k}\right]_{\alpha = 0}$$

On démontre alors que chaque terme de ce développement de Taylor, au voisinage de $\alpha = 0$, peut être évalué successivement en résolvant uniquement des équations du type statique, c'est-à-dire des équations qui concernent des champs conservatifs pour lesquels le rotationnel ou la divergence sont nuls. On associe donc à chaque champ électrique et magnétique respectif un potentiel qui satisfait l'équation de Poisson. Une fois les potentiels déterminés, il ne reste plus qu'à les relier aux éléments de base du circuit : résistance, capacité et inductance [18]. Par conséquent, il est possible d'évaluer dans certains cas chaque terme de la série par récurrence, et d'obtenir ainsi le champ électromagnétique complet.

Quelques lignes usuelles

Les lignes de transmission sont utilisées pour transporter l'énergie électromagnétique à des fréquences très élevées, d'un point à un autre, à l'aide d'un système ne rayonnant pas. La configuration géométrique du champ électromagnétique qui se propage s'appelle un *mode*. Déterminer les caractéristiques d'une ligne revient à faire en sorte qu'un seul *mode* existe sur une *large bande de fréquence* et que les ondes se propagent avec une *faible atténuation* dans cette même bande.

On peut classer l'ensemble des lignes utilisées de la façon suivante.

a) Les lignes pouvant propager le mode transverse électromagnétique (TEM) dans lequel les champs $\vec{E}$ et $\vec{H}$ sont perpendiculaires à la direction de propagation : ligne bifilaire, câble coaxial, lignes à bandes (*fig.* 19a).

b) Les lignes ne propageant pas le mode TEM mais pouvant propager :

— le mode transverse électrique (TE, $E_z = 0$),

— ou le mode transverse magnétique (TM, $H_z = 0$) guides creux rectangulaires, cylindriques (*fig.* 19b).

c) Les lignes à structures ouvertes ne pouvant propager que des ondes E, H ($E_z \neq 0$, $H_z \neq 0$) comme l'hélice (*fig.* 19c).

d) Les fibres optiques où la lumière se propage en subissant des réflexions totales sur les surfaces de séparation guide air et guide support en donnant naissance à des ondes évanescentes à chaque réflexion (*fig.* 19d).

L'ensemble des lignes de transmission que nous analyserons est caractérisé par le fait qu'elles restent identiques à elles-mêmes lorsqu'elles subissent une translation parallèle à leur axe choisi comme étant l'axe O*z*.

Le mode transverse magnétique (TEM)

Ce mode peut se propager dans un milieu isotrope, sans charge et non conducteur. Toutes les composantes, E_x, E_y et H_x, H_y, sont alors solution de l'équation

$$\frac{\partial^2 f}{\partial t^2} = \frac{1}{\varepsilon\mu}\frac{\partial^2 f}{\partial z^2}$$

où f est une composante, ε et μ les caractéristiques du milieu. En régime sinusoïdal, avec des axes tels que $\vec{E} = E_x\vec{i}$ et $\vec{H} = H_y\vec{j}$, et pour une onde uniforme (les composantes du champ ne dépendant pas de x et y dans une section droite, z = constante), les solutions sont les suivantes :

$$[E] = Ce^{-j\beta z} + De^{+j\beta z} \qquad [H] = \frac{1}{\eta}(Ce^{-j\beta z} - De^{+j\beta z})$$

où C et D sont des constantes, $\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$ est l'impédance d'onde.

Remarques : en posant $\Gamma = \frac{D}{C}e^{+2j\beta z}$ et $\varepsilon = \frac{[E]}{[H]}$, on

fig. 20

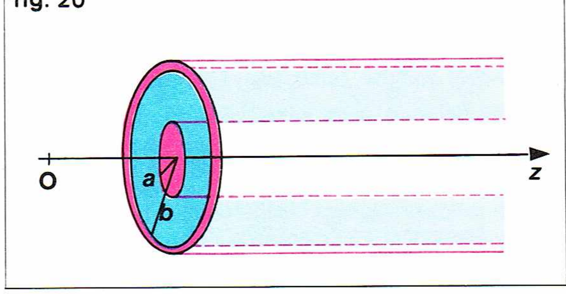

fig. 19

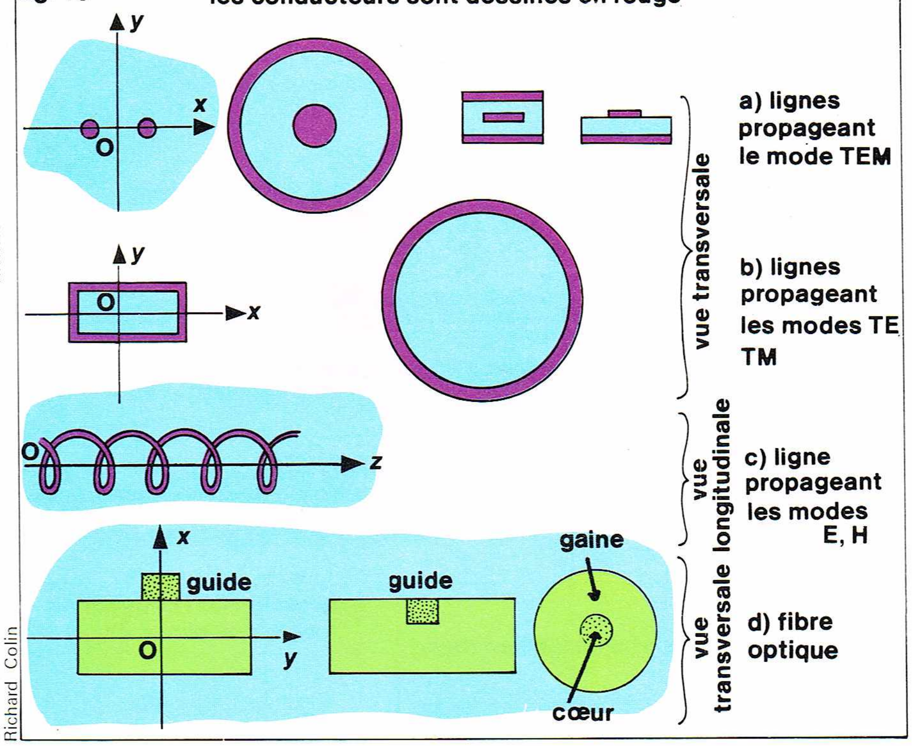

fig. 21

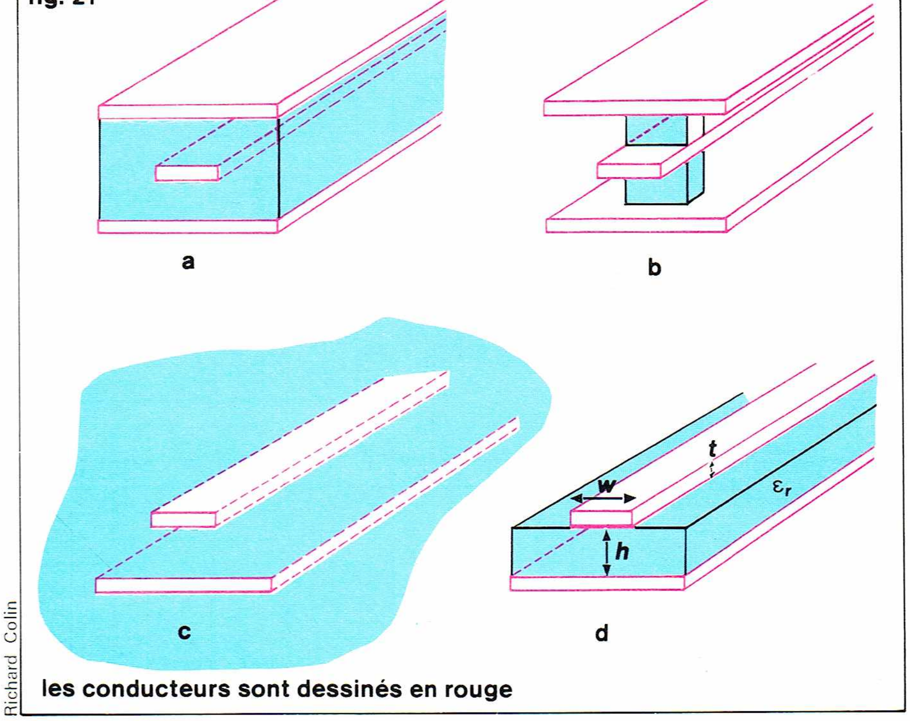

obtient $\varepsilon = \dfrac{1+\Gamma}{1-\Gamma}$ qui est une formule analogue à celle trouvée en théorie des lignes. Cette analogie peut se généraliser à n'importe quel mode. Dans le cas du mode TEM, $\overrightarrow{\text{rot}}\ \vec{E}\,(x, y) = 0$, donc $\vec{E}\,(x, y) = -\overrightarrow{\text{grad}}\ V$ et, comme

$$\text{div}\ \vec{E} = 0, \quad \text{alors } \Delta V = 0$$

C'est l'équation de Laplace. La solution TEM dans une ligne, si elle existe, est la solution correspondant à l'électrostatique.

— *Le câble coaxial à section circulaire*

Au courant I qui circule à l'intérieur du conducteur central (*fig.* 20), correspond un même courant, mais de sens inverse, qui circule dans le conducteur extérieur. Les composantes s'écrivent en coordonnées cylindriques :

$$E_r = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\,\frac{I_0}{r}\,e^{-j\beta z} \qquad H_\theta = \frac{1}{2\pi}\,\frac{I_0}{r}\,e^{-j\beta z}$$

$$E_\theta = 0 \qquad H_r = 0$$

Le calcul, pour une onde progressive, de la différence de potentiel V qui existe entre deux points situés dans une même section droite et appartenant à chaque conducteur, à savoir $V = \int_a^b E_r dr$ donne $V = Z_0 I_0 e^{-j\beta z}$

$$\text{avec } Z_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\ \text{Log}\ \frac{b}{a} \quad \text{d'où} \quad I = I_0 e^{-j\beta z}$$

Z_0 est l'impédance caractéristique de la ligne. La vitesse de phase $v = \dfrac{\omega}{\beta}$ est la vitesse de propagation dans un milieu infini. Il n'y a pas de distorsion, on n'observe aucun phénomène de coupure. On retrouve ces dernières caractéristiques de mode TEM dans toutes les lignes qui le propagent.

Utilisation du câble coaxial : il est utilisé en télécommunications pour des liaisons à grande distance (sous-marines ; liaison d'une île au continent ; d'un continent à un autre). L'atténuation augmentant avec la fréquence, on limite son utilisation vers les fréquences élevées — au-delà de 3 000 MHz sur de courtes distances ($\alpha = 1$ dB/m, à $f = 10$ GHz).

— *Les lignes à rubans* [22] (*fig.* 21a, b, c, d)

Les premières réalisations ont été obtenues entre 1945 et 1955, et depuis cette date, de nombreux développements de cette technique ont été effectués.

Ces lignes sont essentiellement utilisées dans le cas où elles propagent le mode TEM. Dans le cas de la *ligne triplaque* « stripline » (*fig.* 21a), le conducteur central est noyé dans un diélectrique solide homogène, et la ligne propage un mode *TEM pur*. Il en est de même pour la *ligne microbande* idéale dite « microstrip » où les deux conducteurs sont noyés dans un même diélectrique, par exemple l'air (*fig.* 21c). Ce n'est plus le cas pour la ligne « triplaque » (*fig.* 21b) où des supports diélectriques solides maintiennent de place en place le ruban central, et dans le cas de la ligne microbande réelle où le ruban central est posé sur un diélectrique solide différent du diélectrique environnant (*fig.* 21d). Cependant, en ce qui concerne la ligne idéale (*fig.* 21c), la théorie et l'expérience montrent que le champ électromagnétique et, par suite, la puissance transportée sont concentrés dans le diélectrique entre les deux conducteurs, si bien que, pour des calculs approchés, l'hypothèse d'un diélectrique unique et infini conduit à des résultats applicables aux lignes utilisées dans la pratique (*fig.* 21d).

Le calcul de l'impédance caractéristique de telles lignes est très complexe à cause de leur géométrie et du nombre élevé de paramètres qui entrent en jeu.

Exemple (*fig.* 21d) : les paramètres sont la largeur w, l'épaisseur h de diélectrique, l'épaisseur t du ruban, la constante diélectrique ε_r du substrat. Une technique de calcul consiste à déterminer les caractéristiques électriques de la ligne image, à la géométrie plus simple, déduite de la ligne réelle, par *transformation conforme*. Il est donc nécessaire que la ligne image et la ligne réelle aient une impédance caractéristique identique et que la répartition des puissances traversant une section droite soit inchangée. Or, les propriétés analytiques de la transformation conforme montrent :

◀▲ ***A gauche, figure 20 : le câble coaxial à section circulaire. En haut, figure 19*abcd *: les quatre grands types de lignes de transmission usuelles. Ci-dessus, figure 21*abcd *: les lignes à rubans.***

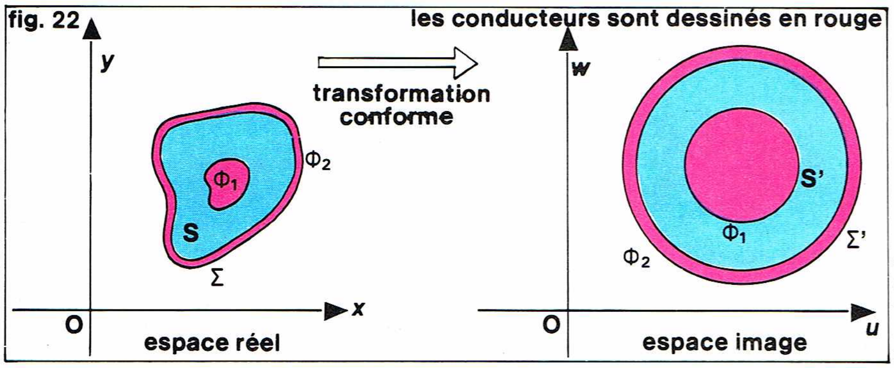

Richard Colin

▲ *Figure 22 : démonstration graphique des propriétés analytiques de la* **transformation conforme.**

▼▶ *A gauche, figure 23 : valeurs des impédances caractéristiques par la méthode de la transformation conforme.*

A droite, figure 25 : propagation pour le mode TE.

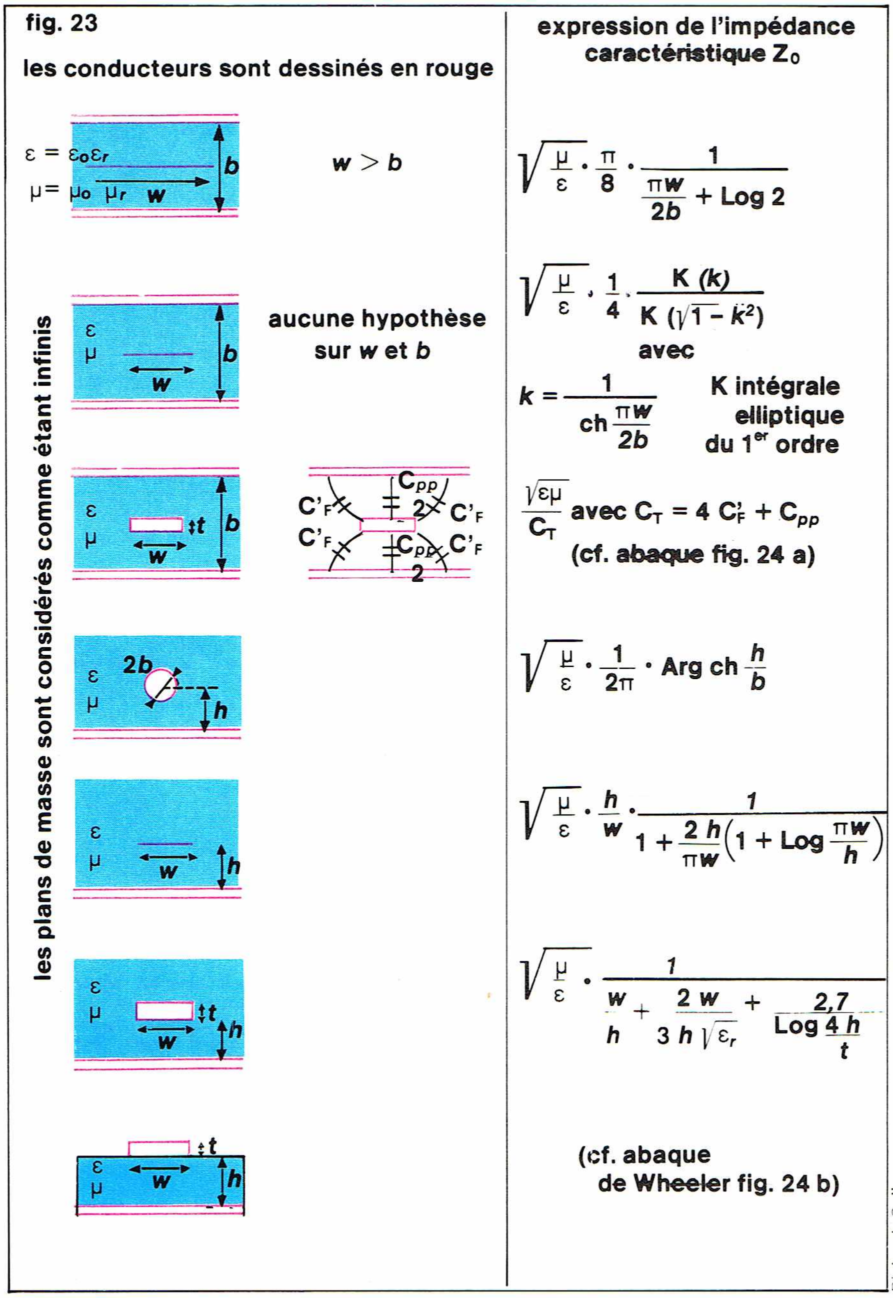

Richard Colin

a) Que la charge linéique Q de deux conducteurs portés aux potentiels Φ_2 et Φ_1 respectivement, est conservée. Puisque $Q = C\,(\Phi_2 - \Phi_1)$, la capacité linéique est conservée; compte tenu que $Z_0 = \frac{\sqrt{\varepsilon\mu}}{C}$, l'impédance caractéristique est aussi conservée (*fig.* 22).

b) La puissance moyenne $\overline{P}$ qui traverse une section droite Σ de surface S dans l'espace réel est égale à la puissance moyenne qui traverse la section droite Σ' de surface S' dans l'espace image déduit de l'espace réel par transformation conforme (*fig.* 22).

En conclusion, Q, C, Z_0, $\overline{P}$ *sont invariants par transformation conforme des conducteurs envisagés.*

Le tableau de la *figure* 23 donne les valeurs des impédances caractéristiques trouvées par cette méthode, compte tenu des hypothèses de départ. Les abaques de la *figure* 24 donnent $Z_0\sqrt{\varepsilon r}$ et Z_0 pour les cas complexes [23]. L'utilisation des lignes à ruban à des fréquences supérieures à 3 GHz est permise grâce à la mise en place de substrat à faibles pertes et aux constantes diélectriques de plus en plus élevées. Les circuits sont alors miniaturisés par rapport aux circuits à câbles coaxiaux ou à guides creux, et la plupart des circuits hyperfréquences embarqués dans les satellites sont de ce type.

Les modes transverse électrique (TE, $E_z = 0$) et transverse magnétique (TM, $H_z = 0$) dans les guides creux [24]

L'origine des découvertes sur les guides creux date de la fin du XIXe siècle, mais la théorie complète fut établie vers 1936 grâce à Brillouin, Carson, Made, Schelkunoff et Southworth. Voyons comment se résume cette théorie.

On appelle $j\beta_g$ la constante de propagation selon Oz, $j\beta$ la constante de propagation dans le vide. L'écriture des équations de Maxwell conduit à l'équation de propagation pour le mode TE (*fig.* 25) :

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} + (\beta^2 - \beta_g^2)\,H_z = 0$$

Enfin l'établissement des conditions aux limites $E_y = 0$ en $x = 0$ et $x = a$, et $E_x = 0$ en $y = 0$ et $y = b$ donne la solution

$$H_z = H_0 \cos\frac{m\pi x}{a} \cos\frac{n\pi y}{b}\, e^{-j\beta_g z}$$

D'où :

$$E_x = \frac{j\omega\mu}{\beta_c^2}\,\frac{n\pi}{b}\,H_0 \cos\frac{m\pi x}{a}\,\sin\frac{n\pi y}{b}\,e^{-j\beta_g z}$$

$$E_y = -\frac{j\omega\mu}{\beta_c^2}\,\frac{m\pi}{a}\,H_0 \sin\frac{m\pi x}{a}\,\cos\frac{n\pi y}{b}\,e^{-j\beta_g z}$$

$$E_z = 0$$

$$H_x = \frac{j\beta_g}{\beta_c^2}\,\frac{m\pi}{a}\,H_0 \sin\frac{m\pi x}{a}\,\cos\frac{n\pi y}{b}\,e^{-j\beta_g z}$$

$$H_y = \frac{j\beta_g}{\beta_c^2}\,\frac{n\pi}{b}\,H_0 \cos\frac{m\pi x}{a}\,\sin\frac{n\pi y}{b}\,e^{-j\beta_g z}$$

A chaque couple de nombres entiers *m* et *n*, correspond une répartition du champ électromagnétique que l'on appelle TE_{mn}. Ce sont les *conditions aux limites* qui ont

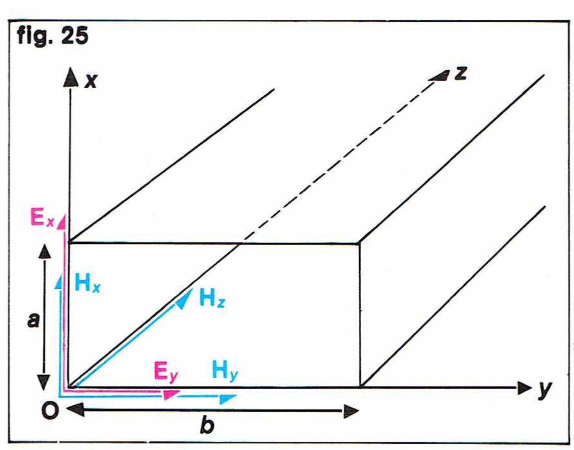

Richard Colin

introduit les nombres entiers *m* et *n*. L'ensemble des modes forme une infinité dénombrable qui constitue un système complet, au sens des mathématiciens. On pose :

$$\beta^2 - \beta_g^2 = \beta_c^2 \quad \text{avec} \quad \beta_c = \sqrt{\frac{m^2\pi^2}{a^2} + \frac{n^2\pi^2}{b^2}}$$

d'où
$$\beta_g = \sqrt{\omega^2\varepsilon\mu - \pi^2\left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}\right)}$$

Pour qu'il y ait effectivement propagation, il faut que β_g soit réel, d'où $\omega^2\varepsilon\mu > \pi^2\left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}\right)$. Pour chaque mode, il y a une « fréquence de coupure », en dessous de laquelle il n'y a plus transmission de champ électromagnétique, mais seulement atténuation.

Pour le mode TE$_{mn}$ $\omega_c = \frac{\pi}{\sqrt{\varepsilon\mu}}\sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}}$. Le guide creux est un filtre *passe-haut ;* on appelle *mode fondamental* le mode pour lequel la fréquence de coupure *est la plus basse* ou encore le mode pour lequel la longueur d'onde de coupure est la plus grande, puisque

$$\frac{1}{\lambda_c} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}} \quad \text{avec} \quad \lambda < \lambda_c \quad \text{et} \quad \beta = \frac{2\,\pi}{\lambda},\ \beta_c = \frac{2\,\pi}{\lambda_c}$$

Pour le mode TE$_{01}$, $\lambda_c = 2\,b$. La vitesse de phase $v_p = \frac{\omega}{\beta_g}$ est égale à $\frac{\omega}{\sqrt{\omega^2\varepsilon\mu - \pi^2\left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}\right)}}$ pour un mode TE$_{mn}$. Elle dépend de la fréquence. Il y a donc distorsion. Pour caractériser la vitesse de propagation de

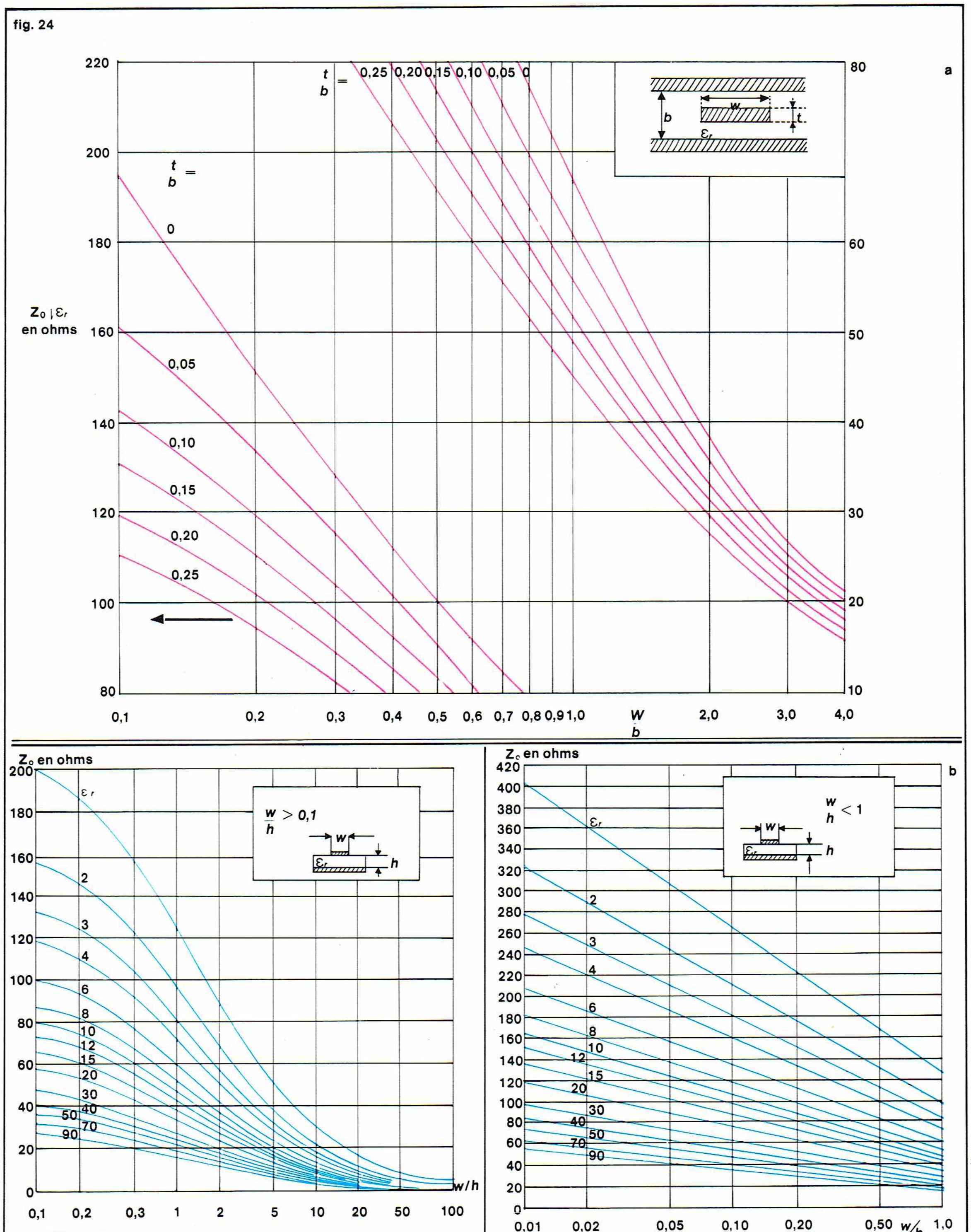

◀ ***Figure 24*ab :** ***les abaques de Wheeler donnent Z₀ $\sqrt{\varepsilon_r}$ et Z₀ pour les cas complexes.***

Richard Colin

▶ *Figure 26 : définition de la vitesse de propagation de l'énergie* v_E.

fig. 26

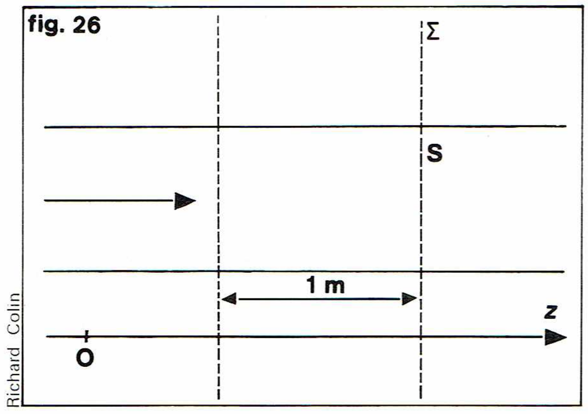

l'information, on définit la vitesse de groupe $v_G = \frac{d\omega}{d\beta_g}$.

On démontre que $v_p \cdot v_G = v^2$ où v est la vitesse de propagation dans l'espace libre. On définit une troisième vitesse, la vitesse de propagation de l'énergie, v_E telle que (*fig.* 26) :

$$v_E = \frac{\text{énergie qui traverse la surface S par unité de temps}}{\text{énergie emmagasinée par unité de longueur de guide}}$$

Pour un guide creux, $v_E = v_G$. On vérifie bien, conformément à la théorie de la relativité, que cette vitesse est inférieure à celle de la lumière. L'étude de la structure de l'onde et le tracé des lignes de champ sont donnés sur la *figure* 27 pour quelques modes TE_{mn} et TM_{mn}.

Utilisation des guides creux

Ils sont requis chaque fois qu'une faible atténuation est nécessaire. En effet, compte tenu qu'ils sont remplis d'air en général, seule l'atténuation des parois conductrices intervient, et vers 10 GHz, leur atténuation est 10 fois plus faible que celles des lignes étudiées précédemment. Ils sont utilisés principalement en télécommunications au niveau des antennes de faisceaux hertziens pour relier ces dernières aux circuits changeurs de fréquences, mais surtout en physique fondamentale, pour étudier l'interaction de la matière avec le champ électromagnétique.

Exemple : $a = 1{,}01$ cm, $b = 2{,}29$ cm ; seul le mode TE_{01} se propage si $b < \lambda < 2b$,

d'où $6{,}5 \text{ GHz} < f < 13 \text{ GHz}$

En pratique, compte tenu de l'atténuation, très élevée au voisinage de la coupure, on adopte la bande suivante, $8{,}2 \text{ GHz} < f < 12{,}4 \text{ GHz}$, dite bande X.

Quelques circuits passifs

Il n'est pas envisageable d'aborder ici l'ensemble des circuits passifs et actifs réalisés dans le domaine des hyperfréquences, un tel sujet faisant l'objet d'un article plus important, mais, pour illustrer l'exposé qui précède sur les lignes de transmission, nous avons choisi de décrire trois types de circuits, à savoir ceux qui permettent de
— stocker l'énergie hyperfréquence : les circuits résonnants ;
— prélever une partie de la puissance de la ligne principale : les coupleurs directifs ;
— intégrer un système actif à la ligne principale : l'adaptation d'un amplificateur de puissance à transistor.

Les circuits résonnants en hyperfréquence (22) (25)

On peut réaliser un circuit résonnant en hyperfréquence, soit en technique microbande, soit en guide creux. Dans le premier cas, un circuit résonnant parallèle et un circuit résonnant série respectivement en parallèle sur la ligne sont représentés sur la *figure* 28a, b. En particulier, d'après ce qui a été vu sur les stubs, le stub 1 (l_1, Z_{01}) [*fig.* 28a], en circuit ouvert à son extrémité représente bien une capacité parallèle ; de même que le stub 2 (l_2, Z_{02}), court-circuité à son extrémité, représente bien une self en parallèle : c'est grâce aux hypothèses de départ, à savoir l_1 et l_2 beaucoup plus petites que $\frac{\pi}{2}\frac{v}{\omega}$ et $Z_{01} \ll Z_{02}$, qu'il en est ainsi.

La pulsation de résonance ω_0 est donnée par la relation :

$$\omega_0^2 LC = 1$$

Dans le cas des guides creux, un circuit résonnant est une cavité siège de multiréflexions de l'onde électromagnétique. Pour des raisons de simplicité — mais les résultats sont généraux — envisageons une cavité rectangulaire (*fig.* 29). Pour le mode TE_{01}, les conditions aux limites en $z = 0$ et $z = h$ déterminent l'expression des composantes du champ :

fig. 27

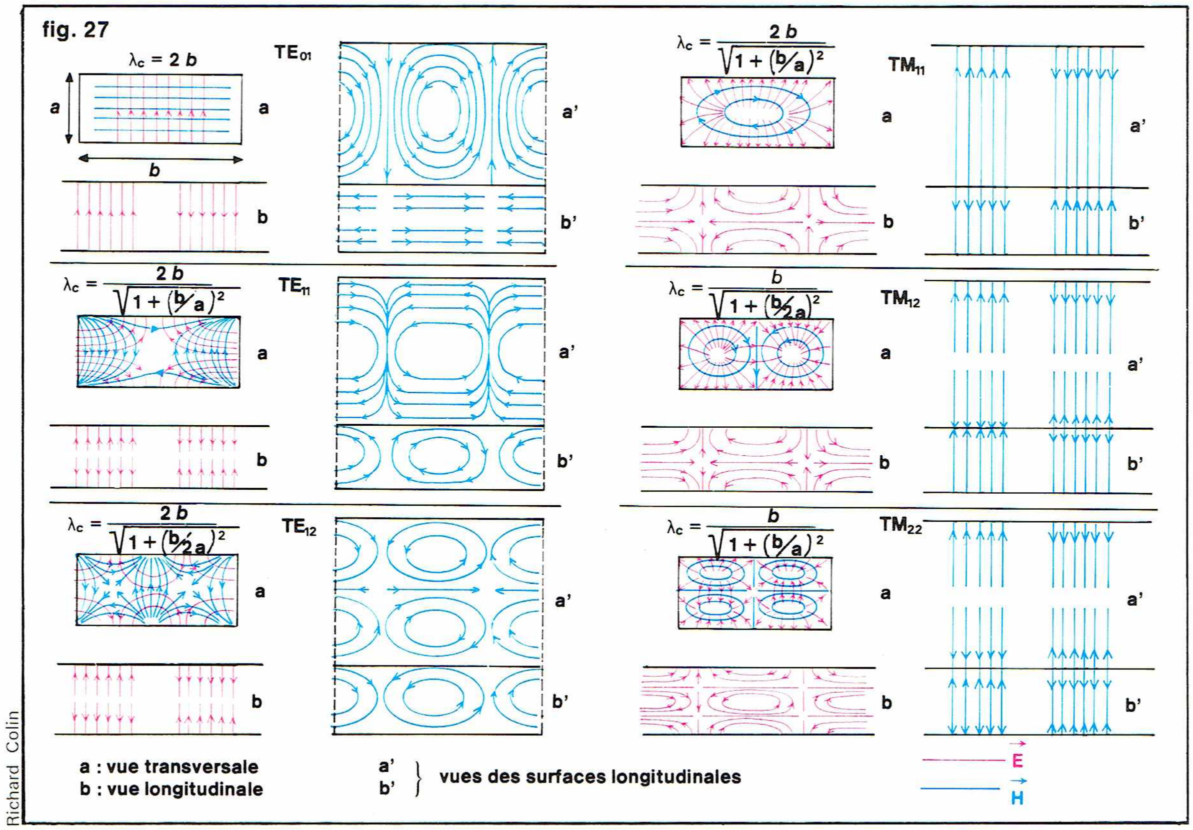

▶ *Figure 27 : tracés des lignes de champ pour quelques modes* TE_{mn} *et* TM_{mn}.

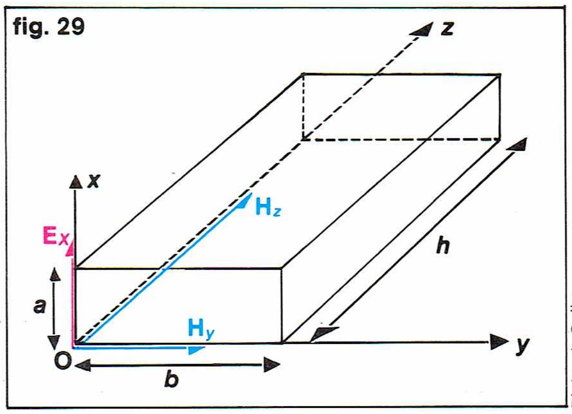

$$H_z = -2jH_0 \cos\frac{\pi y}{b}\sin\frac{p\pi}{h}z$$

$$E_x = \frac{2\,\omega\mu}{\pi}\,bH_0 \sin\frac{\pi y}{b}\sin\frac{p\pi}{h}z$$

$$H_y = 2jp\frac{b}{h}H_0 \sin\frac{\pi y}{b}\cos\frac{p\pi}{h}z$$

$$H_x = E_y = E_z = 0$$

avec $\beta_g h = p\pi$; p est entier positif. Compte tenu que $\beta^2 = \beta_g^2 + \beta_c^2$ et que pour le mode TE_{01}, $\beta_c^2 = \frac{\pi^2}{b^2}$, et $\beta^2 = \omega^2\varepsilon\mu$, on obtient $\omega_{01p} = \frac{\pi}{\sqrt{\varepsilon\mu}}\sqrt{\frac{p^2}{h^2}+\frac{1}{b^2}}$. C'est la pulsation de résonance pour le mode TE_{01p}. La fréquence ne peut prendre que des valeurs bien déterminées définies par cette dernière relation. Pour un mode TE_{mnp} et TM_{mnp}, on a :

$$\omega_{mnp} = \frac{\pi}{\sqrt{\varepsilon\mu}}\sqrt{\frac{m^2}{a^2}+\frac{n^2}{b^2}+\frac{p^2}{h^2}}$$

On caractérise les circuits résonnants par leur coefficient de qualité Q ; d'une façon générale $Q = \omega_0 \frac{W}{P}$ où ω_0 est la pulsation de résonance, W l'énergie emmagasinée, P la puissance dissipée. Dans le cas de circuits non dispersifs, comme les circuits conçus en ligne microbande propageant le mode TEM, on peut écrire $Q = \frac{\omega_0}{2\,R}\left(\frac{\partial X}{\partial\omega}\right)_{\omega_0}$ si l'impédance Z du circuit a pour expression

$$Z = R + jX(\omega) \text{ pour } \omega \neq \omega_0 \text{ avec } X(\omega_0) = 0$$

Revenons à la définition énergétique du coefficient de qualité

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{\omega_0}\frac{P}{W} = \frac{1}{\omega_0}\cdot\frac{\text{puissance dissipée dans la cavité}}{W} + \frac{1}{\omega_0}\cdot\frac{\text{puissance rayonnée}}{W}$$

Dans ce cas, $\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_e}$, Q est le coefficient de qualité en charge, Q_0 le coefficient de qualité à vide, Q_e le coefficient de qualité extérieur. Si le circuit est couplé à plusieurs lignes, $\frac{1}{Q_e} = \Sigma_i \frac{1}{Q_{ei}}$. Pour décrire le couplage du circuit résonnant à la ligne, on définit le coefficient α dit de couplage tel que $\alpha = \frac{Q_0}{Q_e}$; si $\alpha = 1$, le système est au couplage critique, donc parfaitement adapté à la résonance.

Sachant que la puissance dissipée dans les parois conductrices d'une cavité s'écrit

$$P = \frac{1}{\sigma\delta}\iint_{\text{surfaces des parois}} |H_t|^2 dS$$

que l'épaisseur de peau δ à très haute fréquence est très faible (1 μ dans le cuivre à 10 GHz), et que pour un excellent conducteur la conductivité σ est très élevée ($5{,}8\ 10^7\ \Omega$/cm pour le cuivre), on peut atteindre de très hautes valeurs pour le coefficient de qualité Q_0 d'une cavité, par exemple 10 000 à 10 GHz pour une cavité en bande X. Pour une cavité supraconductrice, Q_0 atteint 1 000 000. Dans ces structures, on peut réduire considérablement les pertes par couplage. Dans le cas des circuits microbande, les coefficients obtenus sont beaucoup plus faibles.

Les coupleurs directifs [26]

Un coupleur directif est une jonction à 4 portes — un octopôle — présentant les propriétés suivantes (*fig.* 30) : une onde incidente dans le bras 1 excite des ondes dans les bras 2 et 3, mais pas dans le bras 4; autrement dit, les bras 1 et 4 sont découplés. Il en est de même pour les bras 2 et 3. Les quatre bras sont adaptés. Les coupleurs directifs sont beaucoup utilisés dans les ponts pour mesurer la puissance : si un radar émetteur est en 1, l'antenne réceptrice en 2, un détecteur quadratique en 3 et une charge adaptée en 4, la puissance mesurée en 3 est directement proportionnelle à la puissance allant du radar à l'antenne. En effet, si l'antenne n'est pas adaptée, la puissance qu'elle réfléchit ne passe pas en 3 mais en 4, où elle est dissipée par la charge adaptée : le détecteur contrôle la puissance de sortie du radar. Le coupleur directif réalisé en *guide creux* consiste en deux guides couplés par des ouvertures judicieusement placées dans les parois (*fig.* 31 a). Les coupleurs directifs réalisés *en microbande*

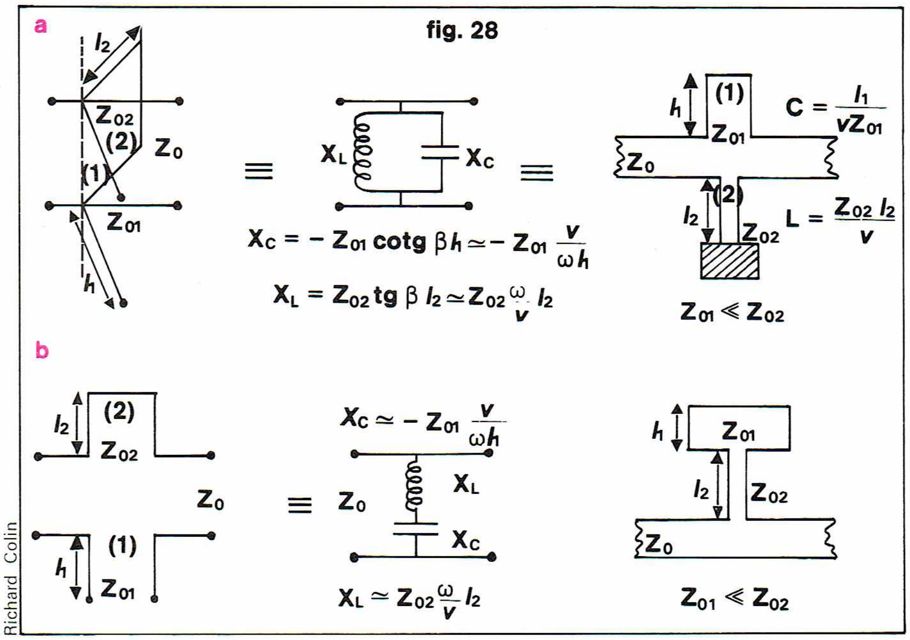

▲ A gauche, figure 29 : représentation schématique d'un circuit résonnant : une cavité rectangulaire. A droite, figure 28ab : représentation d'un circuit résonnant parallèle et d'un circuit résonnant série respectivement en parallèle sur la ligne.

▼ A gauche, figure 30 : représentation schématique d'un coupleur directif. A droite, figure 31 : (a) coupleur directif réalisé en guide creux ; (b) coupleur directif réalisé en microbande.

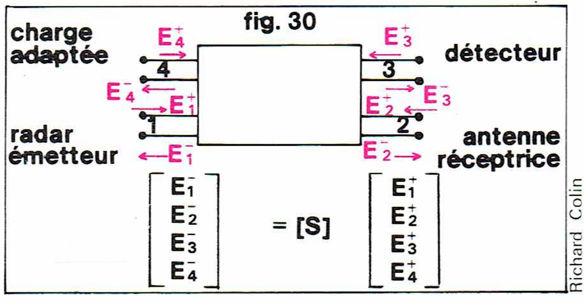

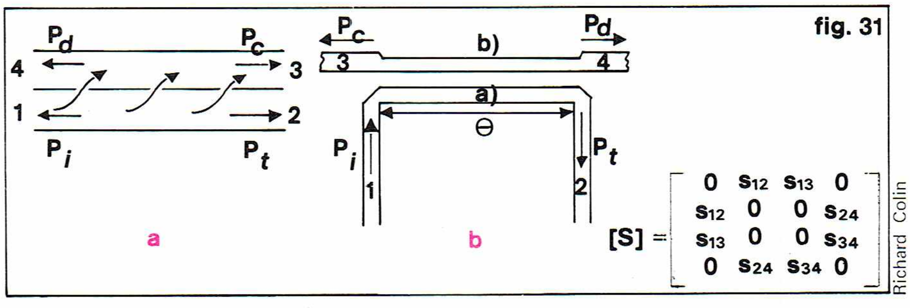

▶ *A gauche, figure 32 ; définitions des paramètres d, b, et λ_0 : le couplage est directif si la relation $\sin\frac{\pi d}{b} = \frac{\lambda_0}{b\sqrt{6}}$ est vérifiée.*
A droite, figure 33 : valeurs des différentes tensions dans les quatre bras si le coupleur est adapté.

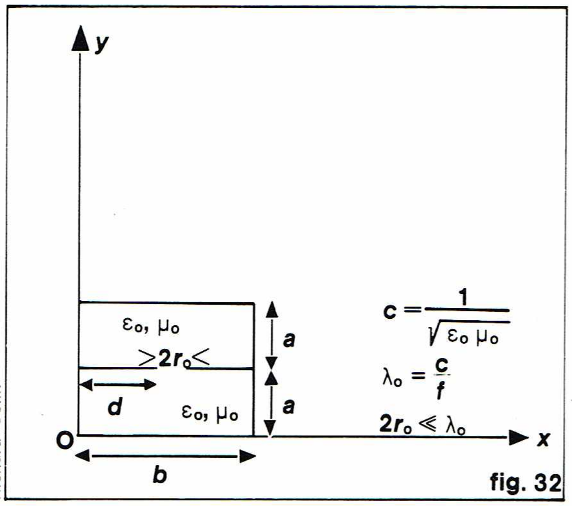

fig. 32

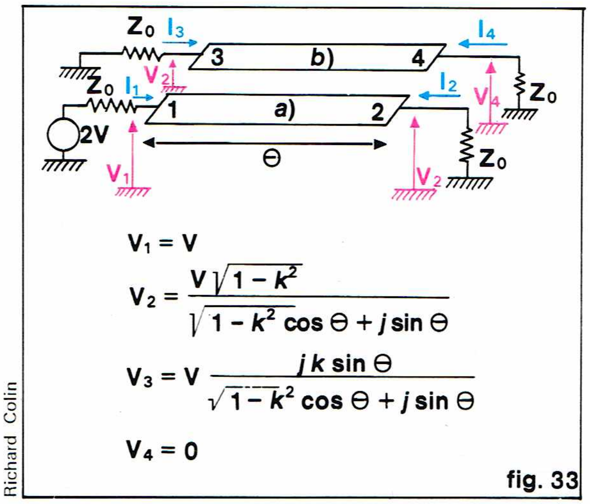

fig. 33

▶ *Page ci-contre, antenne d'un radar à moyenne portée destiné au contrôle du trafic aérien dans la « zone terminale » proche d'un aéroport. Antenne fonctionnant sur une bande L 1 250 MHz avec une vitesse de rotation de 15 tours/mn ; antenne à double faisceau assurant simultanément une couverture haute et basse.*

consistent en 2 rubans parallèles dont les impédances et la longueur sont judicieusement choisies pour ajuster le couplage par rayonnement (*fig.* 31b). Les performances sont mesurées par deux paramètres :

— le coefficient de couplage : $C = 10 \log \frac{Pi}{Pc}$

— la directivité : $D = 10 \log \frac{Pc}{Pd}$

Remarquons que, dans la définition donnée pour le coupleur directif, $Pd = 0$. C'est un cas idéal où D est alors infinie. Or, un multipôle passif ou actif peut se définir à l'aide de la matrice de distribution (S) qui généralise la notion de coefficient de réflexion Γ. Dans le cas d'un octopôle (*fig.* 30), on obtient la relation $(E-) = (S)\,(E+)$ où $(E-)$ et $(E+)$ sont respectivement les matrices-colonnes représentant les amplitudes complexes des ondes réfléchies par la jonction, et les amplitudes complexes des ondes incidentes dans chaque bras. Pour un coupleur directif idéal, la matrice S symétrique et unitaire est donnée sur la *figure* 31. Les coefficients S_{ij} sont liés directement à C et D.

Dans le cas d'un coupleur directif réalisé en *guide creux*, le couplage se fait à l'aide de petites ouvertures percées dans les parois et qui rayonnent la puissance vers le guide non alimenté par une autre source (*fig.* 31a). Le couplage C et la directivité D sont alors optimalisés par ce nombre de trous, leurs dimensions, et leur emplacement dans la paroi du guide ; par exemple, dans le cas d'un coupleur à un trou circulaire, en guide rectangulaire, le couplage est directif si la relation $\sin\frac{\pi d}{b} = \frac{\lambda_0}{b\sqrt{6}}$ est vérifiée, les paramètres d, b, λ_0 étant précisés sur le schéma de la *figure* 32.

Pour obtenir une directivité élevée sur une grande bande de fréquence, on multiplie le nombre de trous. En ce qui concerne les coupleurs directifs réalisés en *microbande* (*fig.* 31b), le couplage s'effectue de façon uniforme sur une longueur électrique θ, entre deux lignes de transmission, selon deux modes simultanément.

Le mode pair : dans ce cas, l'onde excitée dans la ligne b a la même direction de propagation que l'onde se propageant le long de a.

Le mode impair : l'onde excitée dans la ligne b a la direction inverse de propagation de l'onde dans la ligne a. Les impédances caractéristiques correspondantes s'appellent respectivement Z_{0e} et Z_{0o}. Si la condition

$$Z_0^2 = Z_{0o} \cdot Z_{0e}$$

est vérifiée, on a réalisé un *coupleur directif* (Z_0 est l'impédance caractéristique de la ligne isolée). Si le *coupleur est adapté*, les tensions dans chaque bras sont celles données sur la *figure* 33. On pose :

$$k = \frac{\frac{Z_{0e}}{Z_{0o}} - 1}{\frac{Z_{0e}}{Z_{0o}} + 1}$$

Dans le cas où $\theta = \frac{\pi}{2}$, le couplage est maximal et $\left|\frac{V_2}{V_1}\right| = k$, alors $C = 20 \log k$ et D est *infinie*.

Adaptation d'un amplificateur à transistor à une ligne [27]

De la même façon que pour les multipôles passifs, les multipôles actifs peuvent se définir à l'aide de la matrice de distribution S. Sur la *figure* 34a, le quadripôle Q relie un générateur de f. é. m. E_g et d'impédance interne Z_g à une charge Z_L. Il a pour matrice de distribution

$$[S] = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{bmatrix}$$

$|s_{21}|^2$ s'appelle le gain d'insertion (ou transducique) ou encore gain en puissance lorsque $Z_g = Z_L = Z_0$. $|s_{12}|^2$ est alors le gain d'insertion inverse. Nous le supposerons voisin de zéro pour plus de simplicité. Le schéma de la *figure* 34a, utilisé pour les définitions, représente un amplificateur Q relié au générateur et à la charge ; on définit le gain transducique de cet amplificateur de la façon suivante :

$$G_T = \frac{\text{puissance dissipée dans la charge } Z_L}{\text{puissance maximale disponible à la source}}$$

on démontre que $G_T = \frac{|s_{21}|^2\,(1 - |\rho_1|^2)\,(1 - |\rho_2|^2)}{|1 - s_{11}\rho_1|^2\,|1 - s_{22}\rho_2|^2}$.

ρ_1 et ρ_2 sont respectivement les coefficients de réflexion définis dans les plans d'entrée et de sortie du quadripôle Q. A quelles conditions un amplificateur Q est-il adapté respectivement à un générateur et à une charge d'impédance égale à Z_0 ? Le schéma de la *figure* 34b est l'équivalent du schéma de la *figure* 34a, où Q_1 et Q_2 figurent des quadripôles transformateurs d'impédance, de telle façon que les répartitions de champs soient inchangées à l'entrée et à la sortie du quadripôle Q. Les quadripôles Q_1 et Q_2

▼ *Figure 34ab : adaptations d'un amplificateur à transistor à une ligne.*

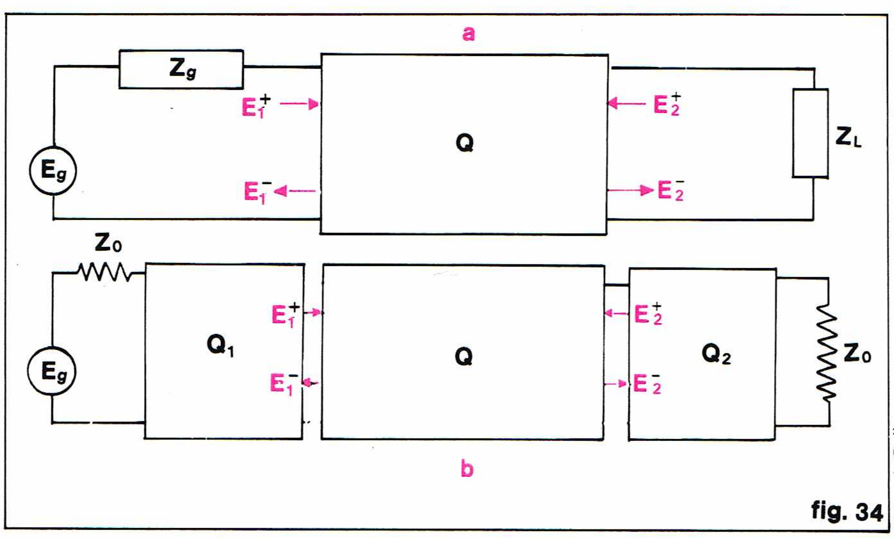

fig. 34

Cliché Thomson - CSF

THOMSON-CSF

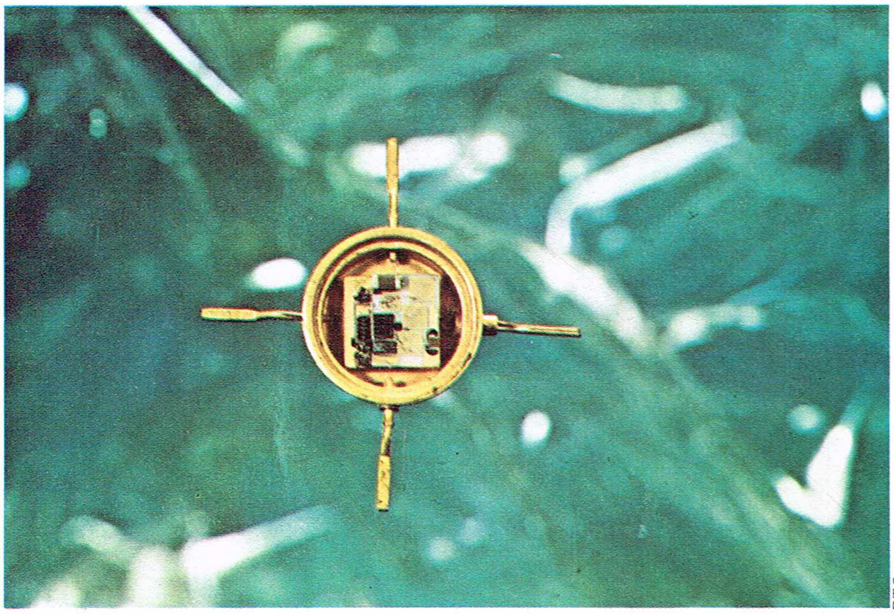

RTC

▲ *Un amplificateur d'hyperfréquences.*

réalisent l'adaptation de telle façon que G_T soit maximal. Or, compte tenu de l'expression de G_T, les conditions d'adaptation s'écrivent :

$$\rho_1 = s_{11}^* \quad \text{et} \quad \rho_2 = s_{22}^*$$

Si elles sont simultanément satisfaites, G_T prend la forme ci-dessous :

$$G_{TMAX} = \frac{1}{1 - |s_{11}|^2} \cdot |s_{21}|^2 \cdot \frac{1}{1 - |s_{22}|^2}$$

Adapter un amplificateur Q à un générateur d'impédance interne Z_0 et à une charge Z_0 consiste à déterminer les éléments des quadripôles Q_1 et Q_2 pour que les conditions $\rho_1 = s_{11}^*$ et $\rho_2 = s_{22}^*$ soient simultanément satisfaites.

Application : les relations $\rho_1 = s_{11}^*$ et $\rho_2 = s_{22}^*$ signifient :

$$|\rho_1| = |s_{11}| \quad \text{et} \quad |\rho_2| = |s_{22}|$$
$$\text{Arg } \rho_1 = -\text{Arg } s_{11} \quad \text{Arg } \rho_2 = -\text{Arg } s_{22}$$

Pour chaque cas, il y a deux conditions à satisfaire, ce qui signifie qu'il suffit de deux éléments pour réaliser chaque adaptation : une capacité série et une self en parallèle par exemple. On suppose que le transistor est monté en émetteur commun, on obtient alors le schéma de la *figure* 35a et les valeurs des éléments d'adaptation sont données par l'abaque de la *figure* 35b.

En conclusion, ce court exposé sur la propagation le long des lignes de transmission en hyperfréquence n'a pas permis de voir l'ensemble de tous les circuits réalisant les fonctions décrites dans le cadre de l'électronique des basses fréquences (1). Si l'élargissement du spectre des fréquences a été possible vers les très hautes fréquences, c'est avant tout grâce à la mise au point de sources de plus en plus performantes : tubes à vide et sources solides à semi-conducteurs, qui, à eux seuls, mériteraient un long développement.

Enfin, soulignons que les principales applications des ondes hyperfréquences contribuent à la communication entre les hommes, entre les civilisations, à travers l'espace (radar, faisceaux hertziens, télécommunications par satellites) et que le nombre des échanges augmentant au cours des années, on peut se poser la question : quelles civilisations verront la saturation du spectre des fréquences ?

▶▼ *Figure 35 :* (a) *transistor monté en émetteur commun ;* (b) *valeurs des éléments d'adaptation données par l'abaque.*

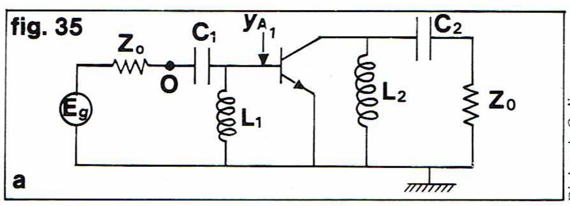

Richard Colin

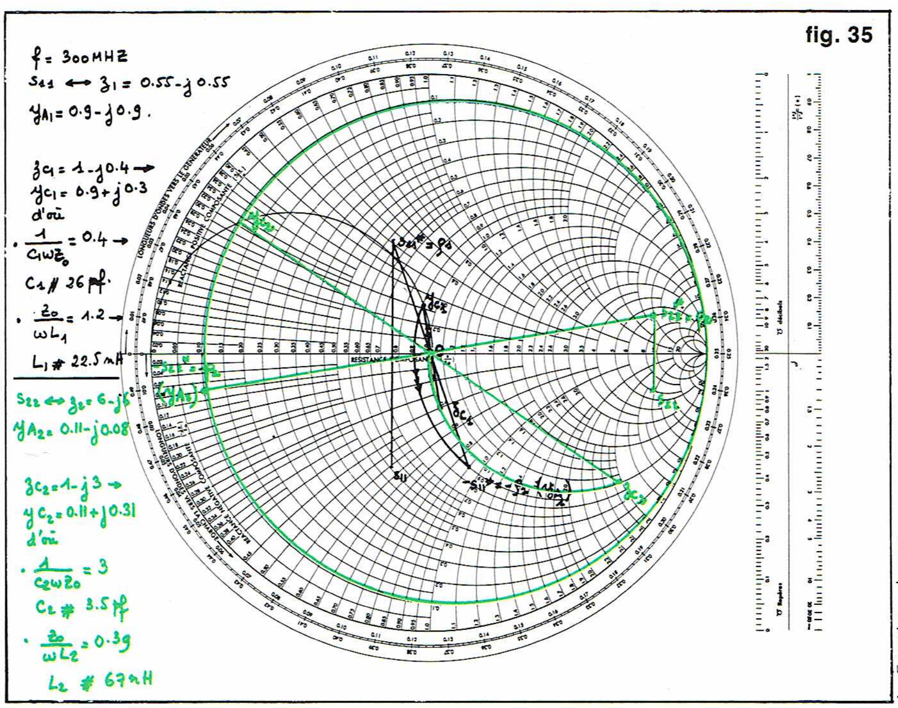

A. Fourrier - Lamer

BIBLIOGRAPHIE

1-2 - AUVRAY J., *Électronique,* Grande Encyclopédie Alpha des sciences et des techniques.

3 - MAXWELL J. C., Roy. Soc. Trans. vol. CLV, Déc. 1864. Grand traité d'électromagnétisme, 1873.

4 - HEAVISIDE O., Phil. Mag., Aug. 1876.

5 - HERTZ H., Sitz. KP Akad Wiss Berlin, t. L, 1888, traduit dans J. Phys. 8, 1889.

6 - LECHER, Wied ann., t. XLII, 1891.

7 - BIRKELAND Kr., Wied Ann., t. XLVII, 1892, traduit dans J. Phys. 3, 1894.

8 - RIGHI A., Mem. Rac. Sci. Inst. Bologna 516, 1897.

9 - BOSE J. C., Roy. Soc. Proc. 42, 1898.

10 - POINCARÉ H., Ecl. Elect. 28, 1899.

11 - BARKHAUSEN H., KURZ K., Phys. Zeits. 21, Jan. 1920.

12 - NICHOLS E. F., TEAR J. D., Nat. Acad. Sci. Proc. 9, June 1923.

13 - GLAGOLEWA A., ARKADIEWA, Zeits f. Physik 24, 1924.

14 - SCHELKUNOFF S. A., Bell Syst. Techn. J 15, Jan. 1936.

15 - CARSON J. R., Bell Syst. Techn. J., 15 April 1936.

16 - VARIAN R. H. and VARIAN S. F., J. of Applied Physics 10 May 1939.

17 - ADLER - CHU - FANO, *Electromagnetic Energy Transmission and Radiation,* MIT Press.

18 - FANO - CHU - ADLER, *Electromagnetic, Fields, Energy and Forces,* MIT Press.

19 - RAMO S., WHINNERY J., *Fields and Waves in Modern Radio,* J. Wiley.

20 - DIEULESAINT E., ROYER D., *Ondes élastiques dans les solides, Applications au traitement du signal,* Masson.

21 - SLATER, *Microwave Electronics,* Mc Graw Hill.

22 - MATTHEI, *Microwave Filters, Impedance Matching Networks and Coupling Structures,* Young, Jones, Mc Graw Hill.

23 - WHEELER - HAIEEE, *Transactions on Microwave Theory and Technics,* nov. 1964.

24 - COLLIN, *Freld Theory of Guided Waves,* Mc Graw Hill.

25 - BONDOURIS G., *Cavités électromagnétiques,* Monographie Dunod.

26 - YOUNG L., *Parallel Coupled Lines and Directional Couplers,* Artech House.

27 - HEWLETT PACKARD Journal, Feb. 1967, vol. 18, N. 6.

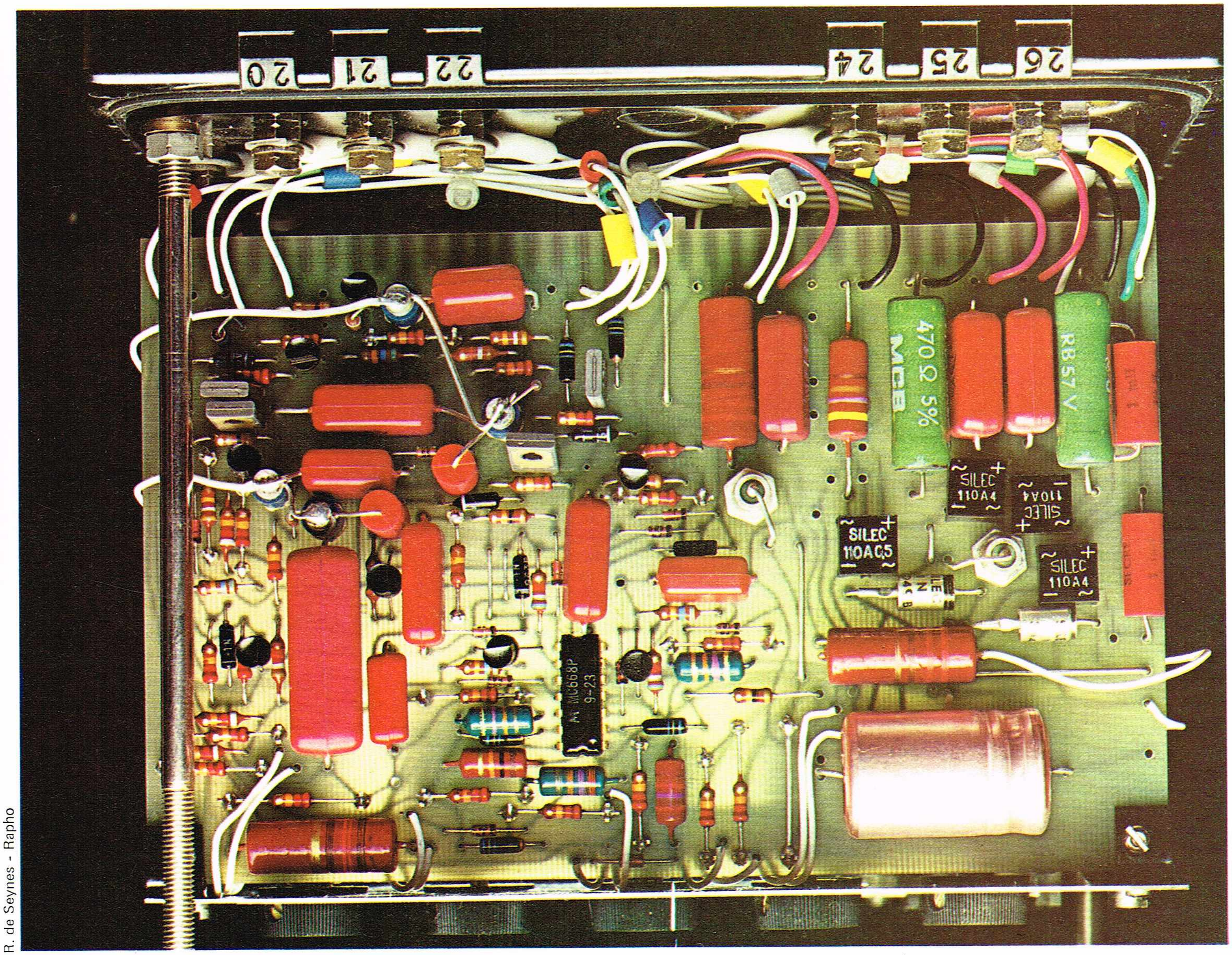

R. de Seynes - Rapho

▲ ***Le développement des composants à semi-conducteurs fiables et de faibles dimensions a introduit, aujourd'hui, l'électronique dans tous les domaines de la technique.***

ÉLECTRONIQUE

L'électronique est la science dont l'objet est l'étude, en vue d'applications pratiques, du mouvement des électrons dans le vide ou dans les milieux matériels. Elle est née avec la découverte par Lee de Forest en 1907 de la *lampe triode*, qui a été le premier dispositif permettant de commander avec une vitesse suffisante une puissance importante par un signal de puissance beaucoup plus faible. Cette fonction « relais rapide » a permis la réalisation des amplificateurs, puis ultérieurement, avec l'apparition des systèmes de traitement des signaux électriques, le développement des télécommunications. Sous ce double aspect de commande et de traitement des signaux, et grâce au développement des composants à semi-conducteurs fiables et de faibles dimensions, l'électronique s'est introduite aujourd'hui dans tous les domaines de la technique : elle permet à nos robots de travailler seuls sur la surface des autres planètes, mais aussi de contrôler la marche de nos appareils ménagers les plus courants.

Les signaux - Notions de théorie du signal

Les grandeurs physiques qui interviennent en électronique sont essentiellement de nature électrique : tension, courant, charge. Pour des fréquences pas trop élevées, les notions de champs électrique et magnétique peuvent être laissées au second plan ; le courant en un point d'un circuit ainsi que la différence de potentiel entre deux points sont parfaitement déterminés. Cela reste vrai tant que les dimensions des systèmes considérés restent faibles devant la longueur d'onde, ce qui sera toujours le cas dans ce qui va suivre. Un paragraphe spécial sera réservé plus loin au cas des hyperfréquences pour lesquelles ces conditions ne sont pas remplies.

Les signaux rencontrés dans les systèmes électroniques seront donc des tensions ou courants, le plus souvent variables, que nous représenterons par des fonctions $s\ (t)$. Parmi toutes les fonctions possibles, celles dont la forme se reproduit identique à elle-même périodiquement sont très souvent rencontrées : on appelle *fonction périodique* une telle fonction $s\ (t)$ telle que

$$s\ (t + k\mathrm{T}) = s\ (t)$$

k étant un *nombre entier algébrique* et T la *période*. La sinusoïde $s\ (t) = \mathrm{A} \cos \left(\frac{2\,\pi t}{\mathrm{T}} + \varphi\right)$, où φ est la phase, est un cas particulier très important. On l'écrit parfois $s\ (t) = \mathrm{A} \cos\ (2\,\pi f t + \varphi)$ en introduisant la *fréquence* $f = 1/\mathrm{T}$ ou plus souvent $s\ (t) = \mathrm{A} \cos\ (\omega t + \varphi)$ avec la *pulsation* $\omega = 2\,\pi f$.

On peut montrer que toute fonction périodique de forme quelconque et de fréquence f_0 peut être considérée comme la somme d'un nombre fini ou infini de fonctions sinusoïdales dont les fréquences sont des multiples entiers de f_0. C'est le principe de la décomposition des signaux en série de Fourier. Par exemple, le signal carré d'amplitude a peut se mettre sous la forme :

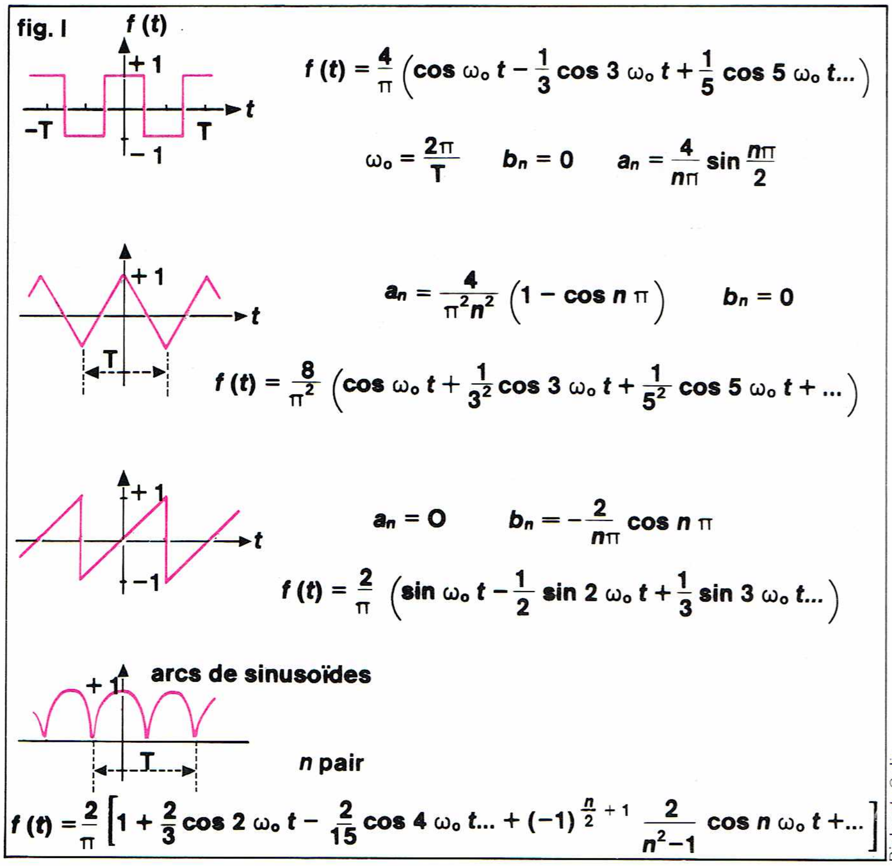

▲ *Figure 1 : décomposition en série de Fourier de quelques signaux périodiques simples.*

$$c(t) = \frac{4a}{\pi}\left[\cos \omega_0 t - \frac{1}{3}\cos 3\,\omega_0 t + \frac{1}{5}\cos 5\,\omega_0 t + ...\right]$$

La *figure* 1 donne les décompositions des formes les plus usuelles en électronique. Les diverses composantes du signal sont appelées *harmoniques* de ce signal ; dans l'exemple ci-dessus, l'harmonique d'ordre 5 a pour amplitude le $\frac{1}{5}$ de l'amplitude de l'harmonique de rang 1 que l'on appelle le *fondamental,* et les harmoniques de rang pair sont nuls. On peut remarquer que les amplitudes successives ne sont pas toutes de même signe. Dans le cas le plus général, les diverses sinusoïdes doivent être déphasées avant d'être ajoutées pour reconstituer la forme cherchée ; c'est ce qui est fait dans l'expression générale ci-dessous, la somme de deux sinusoïdes d'amplitudes a_n et b_n déphasées de 90° étant une sinusoïde de même fréquence, mais dont la phase dépend de a_n et b_n :

$$s(t) = \sum_{n=1}^{n=\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t)$$

Compte tenu des relations bien connues :

$$\cos x = \frac{1}{2}(e^{jx} + e^{-jx}) \quad \text{et} \quad \sin x = \frac{1}{2j}(e^{jx} - e^{-jx})$$

on remplace souvent les sinus et cosinus par des exponentielles complexes,

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} c_n e^{jn\omega_0 t}$$

ce qui conduit à introduire des *fréquences négatives.* Bien entendu, il ne s'agit que d'un artifice de calcul, une fréquence négative n'ayant aucune signification physique. On démontre aisément que $c_n = c_{-n}^*$ les c_n étant éventuellement complexes et $|c_n|^2 = a_n^2 + b_n^2$.

Les coefficients du développement peuvent être calculés par les expressions suivantes :

$$a_n = \frac{2}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} s(t)\cos n\omega_0 t\, dt$$

$$b_n = \frac{2}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} s(t)\sin n\omega_0 t\, dt$$

ou

$$c_n = \frac{1}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} s(t)\, e^{-jn\omega_0 t} dt$$

Il est commode de représenter, en fonction de la fréquence, l'amplitude des divers harmoniques ; l'information ainsi présentée est très importante pour le traitement ultérieur du signal, comme nous le verrons plus loin. On constitue ainsi le *spectre du signal,* formé dans le cas présent de *raies* (*fig.* 2).

A partir des amplitudes des divers harmoniques, on peut calculer la *puissance du signal :* cette puissance est en effet à un coefficient près la moyenne du carré du signal ; par exemple, la loi de Joule nous enseigne qu'une résistance R parcourue par un courant *i* (*t*) est le siège d'une dissipation de chaleur donnée par $P = R\overline{i^2}$. On a donc

$$P = \overline{s^2(t)} = \frac{1}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} s^2(t)\, dt$$

que l'on peut écrire en remplaçant *s* par sa décomposition en série de Fourier

$$P = \frac{1}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} s(t)\left(\sum_n c_n e^{jn\omega_0 t}\right) dt =$$

$$\sum_n c_n \frac{1}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} s(t)\, e^{jn\omega_0 t} dt$$

on reconnaît dans l'intégrale l'expression de c_n

donc $\quad P = \Sigma c_n c_{-n} = \Sigma c_n c_n^* = \Sigma\,|c_n|^2$

ainsi : *la puissance est la somme des puissances contenues dans les divers harmoniques.* C'est le **théorème de Parceval.**

Lorsque la période d'un signal augmente, c'est-à-dire que sa fréquence diminue, les raies de son spectre sont de plus en plus resserrées ; on conçoit qu'à la limite, lorsque la période est infinie, c'est-à-dire que le signal n'est plus périodique, on puisse lui attribuer un spectre continu, c'est-à-dire qu'il est possible d'en reconstituer la forme en ajoutant un nombre infini de sinusoïdes dont les fréquences prennent toutes les valeurs possibles entre 0 et l'infini. Cela a été traité rigoureusement par Fourier qui a démontré que tout signal *s* (*t*) pouvait s'écrire sous la forme d'une somme infinie de sinusoïdes, c'est-à-dire d'une intégrale ·

▼ *Figure 2 : représentation dans le domaine temps V (t) et dans le domaine « fréquences » (spectre) d'un même signal.*

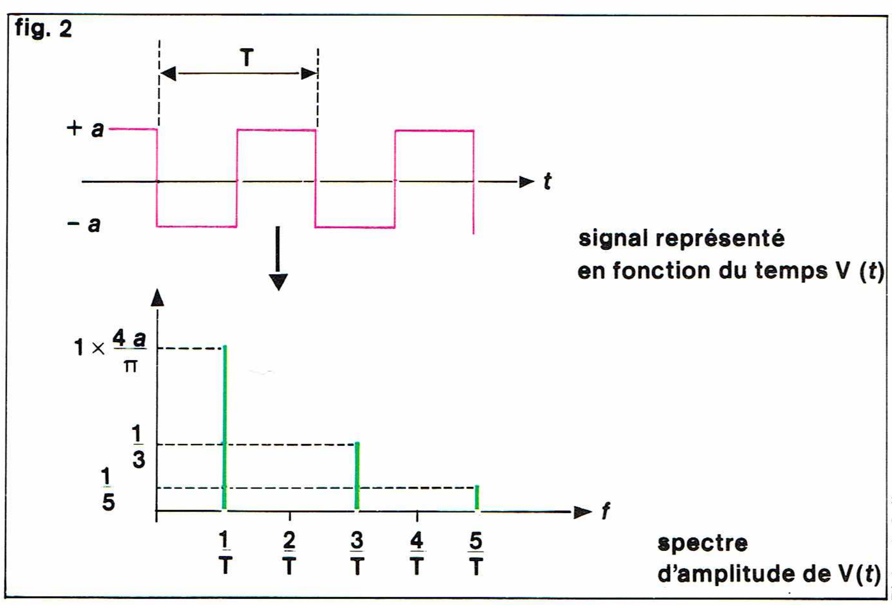

$$s\ (t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F\ (f)\ e^{j2\pi ft}\ df$$

F (f) étant l'amplitude qu'il faut donner à la composante de fréquence f; elle peut être calculée par l'expression :

$$F\ (f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s\ (t)\ e^{-j2\pi ft}\ dt$$

Les fréquences négatives n'ayant pas de sens physique mais n'étant introduites que pour regrouper des termes en sinus et cosinus, les F (f) ne sont pas quelconques. Pour deux fréquences de signe opposé, elles sont *complexes conjuguées*, c'est-à-dire de même module et de phase opposée. En écrivant $F\ (f) = |F|\ e^{j\varphi\ (f)}$ on a $|F\ (f)| = |F\ (-f)|$ et $\varphi\ (-f) = -\varphi\ (f)$.

La courbe donnant le module de F (f) en fonction de la fréquence constitue le *spectre d'amplitude* du signal. Par généralisation du théorème de Parceval, la puissance totale transportée par le signal est la somme des puissances de chaque composante

$$P = \int_{0}^{\infty} |F\ (f)|^2\ df$$

et l'on désigne souvent par *spectre du signal* la représentation du carré de ce module en fonction de la fréquence.

Une impulsion rectangulaire unique constitue un bon exemple de signal non périodique; son spectre est représenté sur la *figure* 3.

On peut observer que les amplitudes des composantes décroissent rapidement au-delà de la fréquence $\frac{1}{\tau}$ (τ étant la largeur du top), mais ne s'annulent jamais. Il faut donc, pour reconstituer le top rectangulaire parfait, ajouter une infinité de sinusoïdes ayant des fréquences allant jusqu'à l'infini. Bien sûr, les composantes de fréquence élevée interviennent avec une amplitude très faible, et leur contribution est peu sensible. Pratiquement, en supprimant toutes les composantes au-delà de $\frac{1}{\tau}$ ou mieux $\frac{2}{\tau}$ on obtiendra une déformation très faible du signal. Retenons de cela que, pour reproduire convenablement un top de largeur τ, il faut ajouter des composantes dont la fréquence s'étend entre 0 et $\frac{2}{\tau}$ environ. Plus le top est bref, et plus large doit être la bande de fréquence retenue. A la limite, pour reproduire un top de largeur nulle [impulsion de Dirac $\delta\ (t)$] il faut une bande de fréquence d'étendue infinie.

Les formules citées plus haut permettent d'associer à tout signal fonction du temps $s\ (t)$ une fonction de la fréquence F (f) que l'on appelle transformée de Fourier de $s\ (t)$. On peut passer aisément de l'une à l'autre qui ne sont que les expressions mathématiques d'une même réalité. $s\ (t)$ est la *forme temporelle du signal* et F (f) sa *forme fréquentielle*. Cette transformation de Fourier a pris en physique une importance considérable, en particulier en optique.

Linéarité - Système linéaire

Très souvent, un système électronique peut être considéré comme une « boîte noire » ayant une entrée à laquelle on applique le signal à traiter, et une sortie où l'on recueille le signal traité (signal de sortie). Si $e\ (t)$ est le signal d'entrée, nous désignerons par $s\ (t)$ celui de sortie. Parmi tous les systèmes possibles, les plus simples à utiliser sont ceux qui satisfont à la condition de linéarité que l'on peut exposer de la façon suivante : soit $s_1\ (t)$ et $s_2\ (t)$ les signaux de sortie correspondant aux deux signaux d'entrée $e_1\ (t)$ et $e_2\ (t)$; on dit que le *système* est *linéaire* si, au signal d'entrée $\lambda_1 e_1 + \lambda_2 e_2$ où λ_1 et λ_2 sont des nombres algébriques, correspond un signal de sortie $\lambda_1 s_1 + \lambda_2 s_2$.

D'après ce que l'on a vu dans le paragraphe précédent, on conçoit que, dans ce cas, il soit possible de calculer la forme $s\ (t)$ du signal de sortie correspondant à une entrée $e\ (t)$ si l'on connaît la réponse du système à tout signal d'entrée de forme sinusoïdale. Il suffit d'ajouter les réponses à toutes les composantes de Fourier du signal d'entrée. Or on peut démontrer qu'un système linéaire ne déforme pas les sinusoïdes, c'est-à-dire qu'il n'en modifie que l'amplitude et la phase.

Si l'entrée est : $e = a \cos \omega_0 t$

la sortie est de la forme : $s = |G|\ a \cos (\omega_0 t + \varphi)$

Le comportement du système linéaire est parfaitement déterminé pour un signal d'entrée sinusoïdal de pulsation ω par le gain G, nombre complexe de module $|G|$ et d'argument φ

$$G\ (\omega) = |G|\ e^{j\varphi}$$

Ce nombre dépend naturellement de la fréquence considérée. Si F $(j\omega)$ est la transformée de Fourier du signal d'entrée, celle du signal de sortie sera :

$$S\ (j\omega) = F\ (j\omega) \times G\ (\omega)$$

puisque chaque composante d'amplitude F $(j\omega)$ du signal d'entrée subit dans la traversée du système une multiplication par G. La relation précédente est fondamentale en électronique, car on essaye toujours de se placer dans le cas où les systèmes utilisés sont linéaires, au moins approximativement.

Les éléments de circuit

Le dipôle

L'élément de circuit le plus simple est le *dipôle*. C'est un système accessible par deux bornes, dont l'état électrique est entièrement déterminé à un instant donné par un courant et une tension. Nous conviendrons d'adopter pour les signes de ces deux grandeurs la convention indiquée sur la *figure* 4, le courant étant compté positif dans le sens entrant. Si, grâce à une source extérieure, on applique entre les deux points A et B une différence de potentiel V, le circuit est parcouru par un courant I. En modifiant V et en notant successivement les valeurs du courant on peut tracer une courbe I (V) qui est la *caractéristique* du dipôle étudié. Dans le cas général,

fig. 3

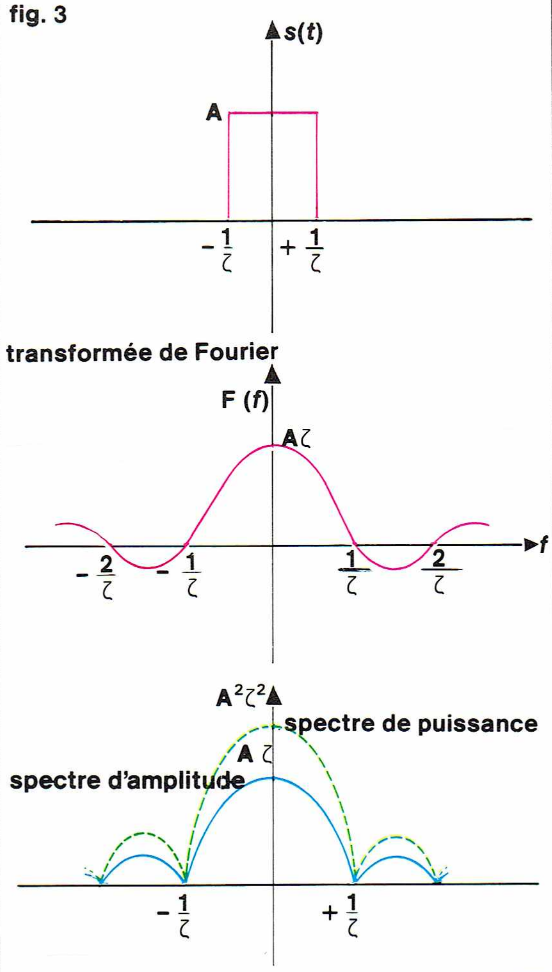

Richard Colin

◀ *Figure 3 : spectre d'une impulsion unique.*

fig. 4

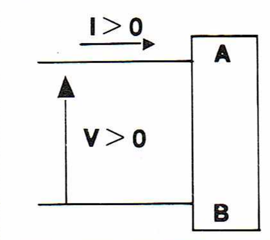

Richard Colin

▲ *Figure 4 : convention de signe pour un dipôle.*

▶ ***Figure 5 :** attaque d'un dipôle et détermination graphique du point de polarisation* M.

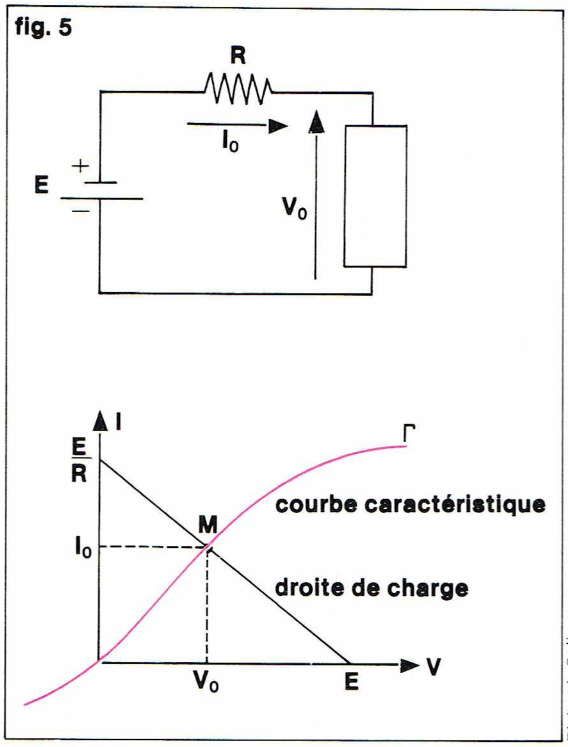

▼ ***Figure 7 :** courbe caractéristique statique d'une capacité* I = *0.*

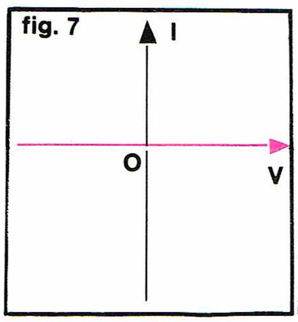

cette courbe peut avoir une forme quelconque, le rapport V/I dépend de V et de I, c'est-à-dire que *le dipôle ne suit pas la loi d'Ohm.* D'autre part, pour I = 0, la tension V peut ne pas être nulle ; c'est ce qui se produit si le circuit comporte des générateurs de tension. Excepté le cas des résistances pures, pour lesquelles la caractéristique est une droite, les méthodes de calcul des circuits linéaires décrites plus haut ne sont pas applicables.

Associé à une source extérieure E et à une résistance R (*fig.* 5), le dipôle est traversé par un courant I_0, V_0 étant la tension à ses bornes. Le point M (I_0, V_0) dans le plan (I, V) est appelé *point de polarisation* du dipôle. Il peut être déterminé graphiquement, car il se trouve à l'intersection de la courbe caractéristique I = I (V) et de la droite d'équation V = E — RI obtenue en appliquant la loi d'Ohm aux bornes de la résistance R. Cette droite, qui joue un rôle important dans les problèmes d'électronique, est appelée *droite de charge* du dipôle.

Un problème que l'on rencontrera très souvent est celui qui consiste à chercher comment est modifié le point de polarisation précédent si la tension E varie : la solution algébrique la plus générale est très difficile et doit être cherchée pour chaque nouvelle forme de caractéristique, mais elle peut être simplifiée si l'on admet que les variations ΔE de E sont faibles. On peut alors assimiler la courbe caractéristique à sa tangente au point M et écrire entre les variations de V et I une relation simple :

$$\frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V - V_0}{I - I_0} = r$$

où *r*, qui a les dimensions d'une résistance, est la pente de la caractéristique au point M ; c'est la *résistance différentielle* du dipôle autour du point de polarisation M (I_0V_0). En différentiant les deux équations du système qui déterminent le point M, on obtient :

$$\begin{cases} \Delta V = r\Delta I \\ \Delta V = \Delta E - R\Delta I \end{cases}$$

équations qui seraient obtenues en appliquant les lois de Kirchhoff à un circuit formé en remplaçant la pile E par une pile fictive ne représentant que les variations ΔE de E et le dipôle non linéaire par sa résistance différentielle *r*. Ce circuit fictif est appelé *schéma équivalent* du circuit réel, sous-entendu, équivalent pour le calcul des variations de V et I autour du point de polarisation M. Ce remplacement du circuit réel par un circuit équivalent linéarisant le système autour d'un point de polarisation sera effectué couramment dans ce qui suit (*fig.* 6).

Un exemple important de dipôle non linéaire est la **diode.** C'est un composant qui n'est conducteur que dans un seul sens, c'est-à-dire dont la résistance différentielle est infinie lorsque la tension est appliquée dans le sens « bloquant ».

La description précédente reste valable tant que les variations de E, c'est-à-dire de V et I, ne sont pas trop rapides. Lorsque la vitesse augmente, il apparaît un retard entre les variations de la tension et du courant ; le rapport ΔV/ΔI cesse d'être indépendant de *t*. Dans le cas simple où l'une des variations est sinusoïdale, l'autre l'est aussi (car c'est un système linéaire pour de faibles amplitudes) mais déphasée. Le rapport ΔV/ΔI n'est plus un nombre réel, la résistance différentielle devient une *impédance différentielle* qui dépend toujours du point de polarisation choisi, mais aussi de la fréquence. L'exemple le plus frappant est celui d'une *capacité parfaite :* il s'agit d'un dipôle qu'aucun courant continu ne peut traverser, et dont la caractéristique est l'axe des tensions lui-même (*fig.* 7) ; sa résistance différentielle est donc infinie. Par contre, on sait que, si la tension V à ses bornes varie, la capacité est traversée par un courant $i = C\frac{dV}{dt}$. En régime sinusoïdal, si $\Delta V = v_0 \cos \omega_0 t$ la variation du courant I, autour de la valeur de repos, qui est ici zéro, est

$$\Delta I = -Cv_0\omega_0 \sin \omega_0 t = Cv_0\omega_0 \cos\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}\right)$$

on passe de ΔV à ΔI par une multiplication par Cω et un déphasage de π/2. C'est le résultat classique, que l'on exprime en écrivant l'impédance du condensateur :

$$Z = \frac{1}{jC\omega}$$

Dans ce cas, cette impédance ne dépend pas du point de polarisation. On retiendra ici le résultat important suivant :

— l'impédance différentielle d'une capacité est infinie à fréquence nulle, ce que l'on exprime plus brièvement en disant qu'une capacité « ne passe pas le continu » ;

— l'impédance différentielle tend vers zéro lorsque la fréquence tend vers l'infini ; une capacité « passe l'alternatif », et d'autant mieux que la fréquence est plus élevée.

Le quadripôle

A de rares exceptions près, le dipôle ne peut pas jouer un rôle de circuit de commande, puisqu'il n'a qu'un seul accès. Cette fonction est effectuée par un circuit plus complexe qui est le *quadripôle.* C'est l'association de deux dipôles, un dipôle d'entrée parcouru par un courant I_1 sous une tension V_1 et un dipôle de sortie I_2, V_2 (*fig.* 8a). Ces deux dipôles ne peuvent pas être représentés complètement chacun par une courbe caractéristique, car ils sont dépendants l'un de l'autre. La caractéristique du circuit de sortie dépend de l'état dans lequel se trouve le circuit d'entrée et réciproquement. Cela est facile à

▼ ***Figure 6 :** schéma réel et schéma équivalent pour les variations autour du point de polarisation.*

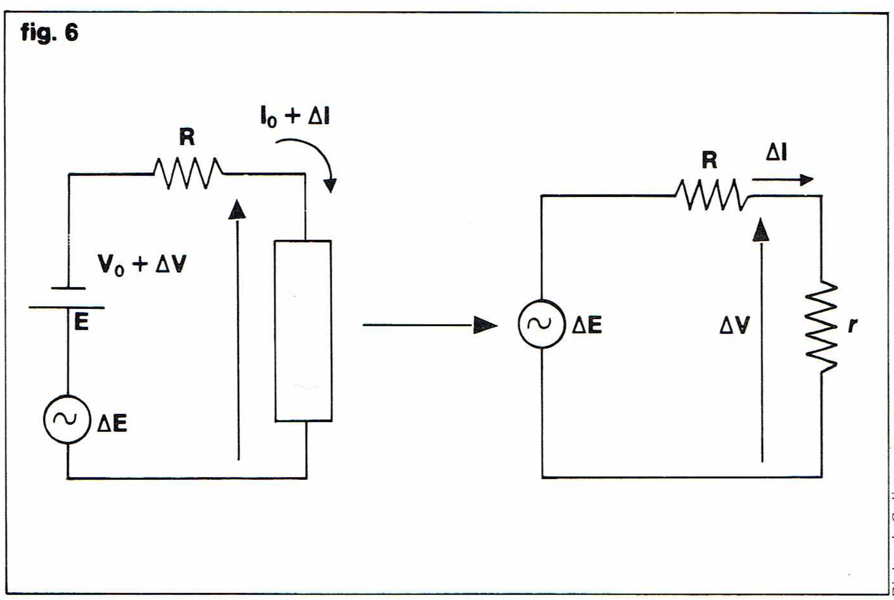

comprendre si l'on considère le cas particulier du quadripôle de la *figure* 8b constitué par trois résistances; sa caractéristique d'entrée est différente suivant que la sortie est « en l'air » ou en court-circuit.

En toute rigueur, il existe deux relations :

$$I_1 = f\ (V_1, I_2, V_2)$$
$$I_2 = g\ (V_2, I_1, V_1)$$

qui ne sont en général ni linéaires, ni même exprimables algébriquement.

En pratique, le comportement du quadripôle est représenté graphiquement par un double réseau de caractéristiques : un réseau d'entrée formé de plusieurs courbes $I_1 = f\ (V_1)$ tracées chacune pour une valeur d'une des grandeurs de sortie I_2 ou V_2, par exemple $I_1 = f\ (V_1)_{V2=Cte}$, et un réseau de sortie $I_2 = g\ (V_2)_{I1=Cte\ ou\ V1=Cte}$.

Dans les circuits, le quadripôle est associé avec des résistances et des sources de tension; la détermination de son point de fonctionnement (I_1, I_2, V_1, V_2) se fait comme nous l'avons vu plus haut en traçant des droites de charges qui sont ici au nombre de deux : droite de charge d'entrée $V_1 = E_1 - R_1I_1$ et de sortie $V_2 = E_2 - R_2I_2$. Si l'on désire déterminer les variations de l'une des grandeurs électriques définissant le point de polarisation lorsque l'une des tensions d'alimentation varie, on pourra soit opérer graphiquement, soit, comme pour les dipôles pour de faibles variations, effectuer une linéarisation du système en assimilant les courbes à leur tangente au point de polarisation. Pour les variations, les deux relations citées plus haut conduisent à deux équations linéaires dont les coefficients ne dépendent que du point de repos choisi :

$$\Delta I_1 = a_{11}\Delta V_1 + a_{12}\Delta V_2$$
$$\Delta I_2 = a_{21}\Delta V_1 + a_{22}\Delta V_2$$

Par des opérations algébriques simples, on peut faire apparaître au premier membre deux variables quelconques. Par exemple, en explicitant les courants en fonction des tensions :

$$\begin{cases} \Delta I_1 = y_{11}\Delta V_1 + y_{12}\Delta V_2 \\ \Delta I_2 = y_{21}\Delta V_1 + y_{22}\Delta V_2 \end{cases}$$

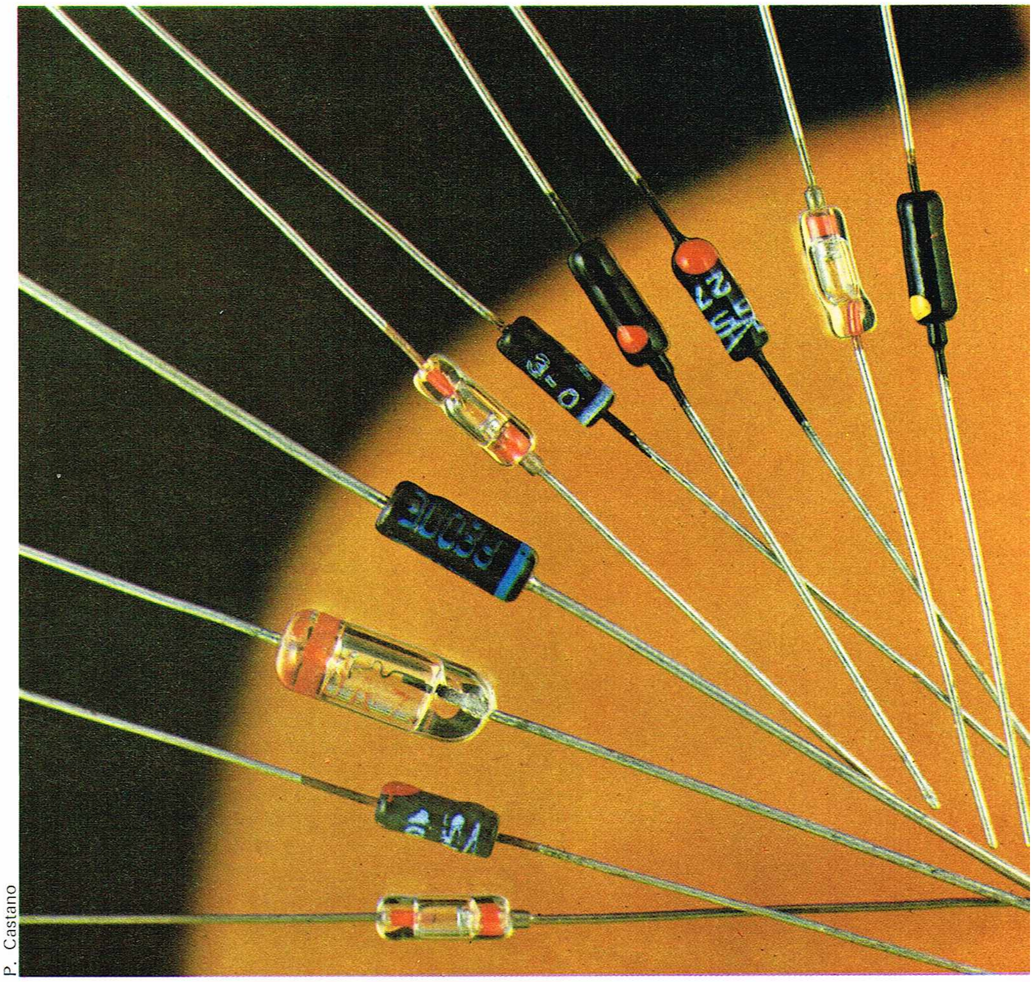

P. Castano

▲ ***Quelques types de diodes miniaturisées.***

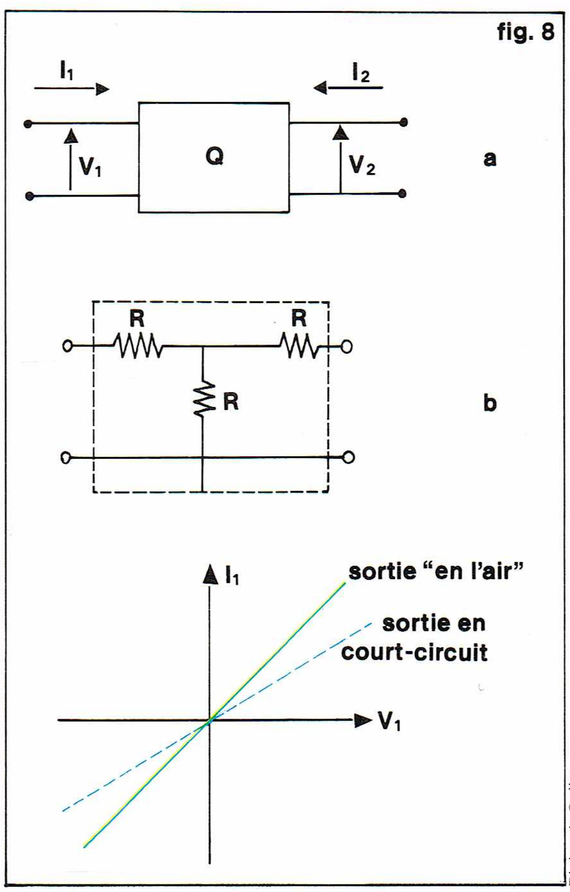

Richard Colin

◀ ***Figure 8 : représentation générale d'un quadripôle et exemple simple.***

on obtient un système pour lequel les coefficients ont les dimensions d'une admittance; on dit que ce sont les *paramètres y* du quadripôle. Il est d'usage d'utiliser des lettres minuscules pour représenter les variations

$$(\Delta I_1 = i_1)$$

Les deux relations ci-dessus peuvent se mettre sous forme matricielle :

$$\begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_{11} y_{12} \\ y_{21} y_{22} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix}$$

La matrice des coefficients *y* est la *matrice admittance*, ou *matrice y* du quadripôle. On obtient de même une *matrice impédance* en explicitant les tensions en fonction des courants :

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_{11} z_{12} \\ z_{21} z_{22} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix}$$

Une représentation souvent rencontrée est qualifiée d'hybride; elle présente l'inconvénient de faire apparaître des paramètres n'ayant pas tous la même dimension, mais est très commode à utiliser avec les transistors :

$$\begin{cases} v_1 = h_{11}i_1 + h_{12}v_2 \\ i_2 = h_{21}i_1 + h_{22}v_2 \end{cases}$$

Les paramètres *h* sont dits « hybrides ».

De même que dans le cas des dipôles, les paramètres précédents ne sont réels que pour des vitesses de variations assez faibles. Au-delà, ils sont complexes et fonction de la fréquence considérée. Il est commode pour calculer les variations de faire appel à un circuit équivalent, obtenu en ne conservant des sources de tension ou courants que leur partie variable et en remplaçant le quadripôle par un « circuit équivalent » qui est un circuit linéaire formé de résistances, capacités, etc., dont les équations de Kirchhoff sont analogues aux systèmes matriciels écrits plus haut.

▶ *Figure 9 : circuits extérieurs associés à un quadripôle générateur d'attaque (u_0, ρ) et impédance de charge Z.*

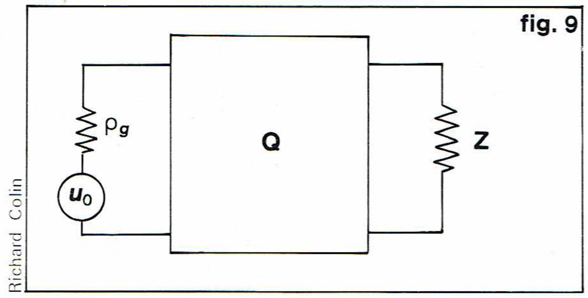

Quadripôle associé à un circuit extérieur

Le signal d'entrée appliqué à un quadripôle est fourni par un circuit plus ou moins complexe qui, pour de faibles variations, c'est-à-dire dans le domaine linéaire, peut être représenté par un générateur ayant une résistance interne ρ_g et une force électromotrice u_0 (théorème de Thévenin). De même, la sortie est connectée à une charge assimilable à une impédance Z (*fig.* 9). Dans ces conditions, l'entrée du quadripôle se comporte comme un dipôle dont on peut calculer l'impédance différentielle. Il suffit d'ajouter aux deux équations précédentes définissant les paramètres, h par exemple, l'équation exprimant la loi d'Ohm en sortie $v_2 = -Zi_2$. Un peu d'algèbre conduit alors à :

$$\frac{v_1}{i_1} = h_{11} - \frac{h_{12}h_{21}}{h_{22} + \frac{1}{Z}}$$

on voit que, pour une charge Z faible, cette « impédance d'entrée » se réduit à h_{11}. De même, les variations de la tension de sortie en fonction de celles d'entrée, c'est-à-dire le « gain en tension » du quadripôle, s'écrivent :

$$G_v = \frac{v_2}{v_1} = \frac{-\frac{h_{21}}{h_{11}}}{h_{22} + \frac{1}{Z} - \frac{h_{21}h_{12}}{h_{11}}}$$

En explicitant la variation i_2 du courant de sortie en fonction de v_2, on trouve une équation de la forme

$$v = v_{20} - \rho i_2$$

montrant que, vu de la sortie, le quadripôle se comporte comme une source ayant une résistance interne ρ dont la valeur est :

$$\rho = \frac{1}{h_{22} - \frac{h_{12}h_{21}}{h_{11} + \rho_g}}$$

Nous verrons plus loin l'importance de ces relations.

Le transformateur parfait

Parmi les nombreux quadripôles que l'on rencontre en électronique, l'un est particulièrement important, c'est le *transformateur*. Il s'agit d'un quadripôle parfaitement linéaire dont les caractéristiques (aux phénomènes de saturation magnétique près) ne dépendent pas des courants et tensions continus qui peuvent lui être appliqués. Sa description complète est du domaine de l'électrotechnique, mais pour l'électronicien, compte tenu des faibles courants utilisés, on peut négliger les pertes et retenir un comportement idéal. Les lois de l'induction permettent d'écrire :

$$\begin{cases} v_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \\ v_2 = L_2 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_1}{dt} \end{cases}$$

où L_1 et L_2 sont les *self-inductions* des bobinages primaires et secondaires couplés par une mutuelle induction M. En l'absence de pertes magnétiques, $M = \sqrt{L_1L_2}$.

Si une impédance Z est connectée au secondaire $v_2 = -Zi_2$, on peut calculer quelle est l'impédance apparente du primaire v_1/i_1. Le calcul simple conduit à l'expression :

$$Z_1 = \frac{v_1}{i_1} = \frac{jL_1\omega Z}{Z + jL_2\omega}$$

en multipliant haut et bas par $\frac{L_1}{L_2}$, on obtient :

$$Z_1 = \frac{v_1}{i_1} = \frac{jL_1\omega \cdot Z\frac{L_1}{L_2}}{Z\frac{L_1}{L_2} + jL_1\omega}$$

de la forme $\frac{R_1R_2}{R_1 + R_2}$ qui montre que l'impédance d'entrée est formée par l'association en parallèle de la self primaire L_1 et d'une impédance $Z\frac{L_1}{L_2}$. Or, la self d'un bobinage étant proportionnelle au carré du nombre de spires de l'enroulement, le rapport L_1/L_2 est aussi le carré du rapport du nombre de tours de fil, donc $Z_1 = L_1 // Z\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2$.

Si la self primaire est assez élevée, l'impédance d'entrée du transformateur se réduit au second terme qui est l'impédance Z, placée en sortie, multipliée par le carré du rapport de transformation. Le transformateur joue le rôle d'un transformateur d'impédance (*fig.* 10).

Éléments actifs et passifs

On distingue deux types fondamentaux de dipôles et quadripôles, les *éléments passifs* et les *éléments actifs*. Les éléments passifs peuvent fonctionner sans source d'énergie extérieure, c'est-à-dire autour du point de polarisation $I_0 = V_0 = 0$; c'est le cas de tous les assemblages de résistances, capacités et selfs ; l'énergie recueillie à leur sortie est toujours inférieure à celle qui leur est appliquée, la différence étant dissipée sous forme de chaleur dans les résistances. Le transformateur décrit plus haut en est un exemple. Pour les éléments actifs au contraire, une source de polarisation est nécessaire, l'énergie contenue dans le signal de sortie peut être plus grande que celle introduite à l'entrée, la différence étant bien entendu puisée dans la source de polarisation. Ainsi un amplificateur de sonorisation est un système qui fournit dans un haut-parleur une énergie importante, très supérieure à celle introduite à son entrée par le microphone, et prélevée, sous forme de courant continu, à la source d'alimentation. L'amplificateur se comporte en quelque sorte comme un transformateur d'énergie, prélevant une puissance électrique à la source, qui est souvent ici le secteur ou des piles, pour la transformer en énergie sonore qui est le fidèle reflet du signal très faible délivré par le micro.

Ces éléments actifs sont toujours dans les circuits associés à des résistances, selfs et capacités ; ils sont la plupart du temps non linéaires.

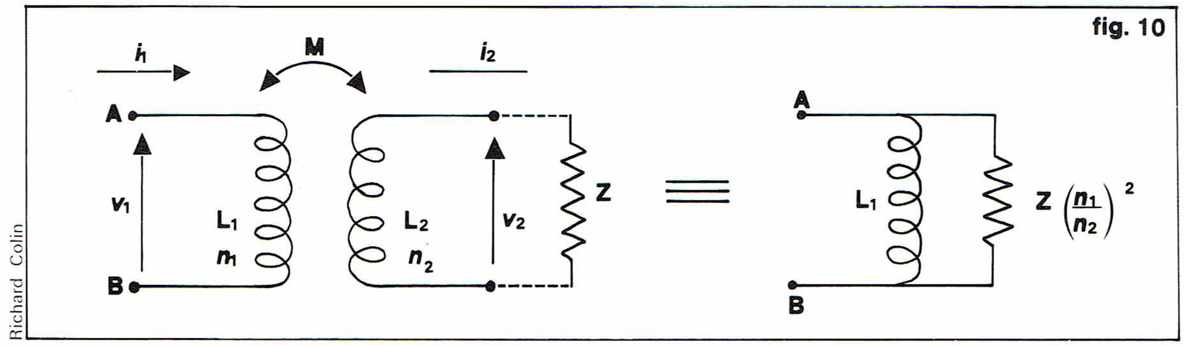

▶ *Figure 10 : transformateur parfait adaptateur d'impédances.*

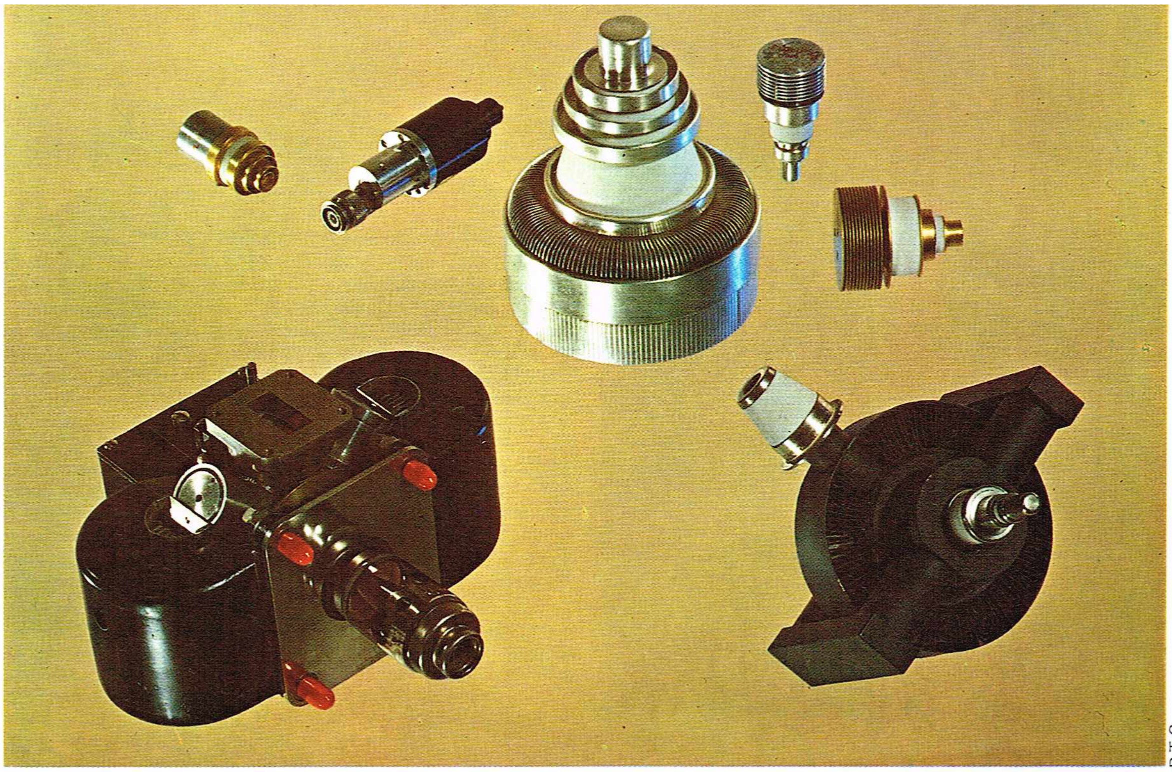

R.T.C.

◀ *Le développement de la radio-électricité, et plus généralement, celui de l'électronique, a commencé avec l'invention, en 1906, par Lee de Forest,* **de la triode**. *Ici, quelques types de triodes de forte puissance.*

Les composants électroniques

De nombreux phénomènes physiques peuvent être mis à profit pour construire des dipôles et quadripôles utilisables comme éléments de circuits électroniques, mais ils ne seront retenus que s'ils sont suffisamment rapides, ce qui élimine pratiquement tous les effets thermiques. Une première catégorie de composants s'est développée à partir de l'émission thermo-électronique.

Émission thermo-électronique - Les tubes à vide

Sous l'influence d'une élévation de température, certains électrons d'un métal peuvent acquérir assez d'énergie pour franchir la surface et sortir du solide. L'énergie minimale nécessaire pour cela est appelée *énergie de sortie* ou *travail de sortie*, c'est une caractéristique de l'élément. Elle est particulièrement faible pour les métaux alcalins tels que le césium (1,8 eV) et vaut 4,5 eV pour le tungstène, qui est souvent utilisé à cause de sa température de fusion élevée. Pour un morceau de métal isolé, les électrons sont retenus par l'attraction électrostatique, et il se forme seulement un nuage électronique au voisinage de la surface. En appliquant un champ électrique grâce à une plaque métallique (anode) placée au voisinage du métal chauffé et portée à un potentiel positif par rapport à ce dernier, on peut extraire les électrons libres et obtenir un courant dans le circuit extérieur. Sa valeur maximale correspondant à la collection complète des électrons traversant la surface est donnée par la loi de Richardson :

$$I = SA_0T^2e^{-W_0/kT}$$

où S est la surface du métal, A_0 une constante identique pour tous les métaux purs, T la température, W_0 le travail de sortie et *k* la constante de Boltzmann.

Lorsque la tension appliquée à la plaque collectrice (anode) est négative, les électrons sont au contraire repoussés, et aucun courant ne peut circuler dans le circuit extérieur. Un tel dispositif ne peut être traversé par le courant que dans un seul sens : c'est une *diode*.

La diode

La *diode thermo-électronique* ou *diode à vide*, utilisant ce principe, comprend, dans une ampoule vidée d'air, une cathode chauffée émettrice d'électrons et une anode collectrice. La cathode n'est plus actuellement en métal pur, mais elle est constituée d'une substance ayant un travail de sortie plus faible, souvent un oxyde; elle est chauffée au voisinage de 1 200 °C par un filament annexe (*fig.* 11). Le courant circulant entre les deux électrodes est bien plus faible que celui prévu par la loi de Richardson, car il existe un nuage électronique constituant une charge d'espace négative qui repousse les électrons vers la cathode. L'intensité du courant est donnée en fonction de la tension appliquée par l'équation de Child-Langmuir $I = \rho V^{3/2}$; le coefficient ρ est la *perveance* du tube et dépend de sa géométrie. La caractéristique I (V) du dipôle ainsi constitué est reproduite sur la *figure* 11 ; le courant n'a de valeur appréciable que pour un seul sens de polarisation, mais ne change pas de signe, tout en étant très faible dans le sens bloquant. Le non-renversement du sens du courant est évident, puisque seule la cathode émet des électrons mais ne se retrouve pas avec les diodes à semi-conducteur, et il est bon de le signaler, car c'est une différence fondamentale entre les deux types de composants. La diode ainsi constituée est progressivement abandonnée, car elle nécessite un circuit de chauffage du filament qui consomme beaucoup d'énergie, de plus elle est considérablement plus grosse qu'un redresseur solide de mêmes performances, et elle est plus fragile mécaniquement.

La triode

C'est Lee de Forest qui, en 1907, eut le premier l'idée permettant de transformer la diode à vide en un relais électrique rapide, donnant ainsi naissance à toute l'électronique actuelle. Le courant anodique d'une diode dépend surtout, nous venons de le voir, du champ électrique au voisinage de la cathode, lui-même très sensible à la charge d'espace régnant en son voisinage. Pour commander ce courant, il suffit d'introduire une électrode

▼ *A gauche, tableau des principales conventions utilisées en électronique. A droite, figure 11 ;* **la diode à vide** : a) *structure;* b) *représentation schématique et caractéristique.*

Principales conventions utilisées en électronique

Résistance	R	
Self	L	
Capacité	C	
Transistors	T	
Diode		
Diode Zener		
Thyristor		

Richard Colin

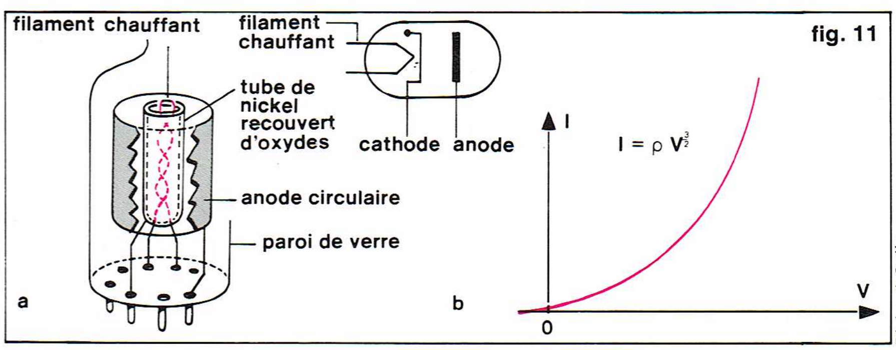

Richard Colin

▶ *A gauche, deux types de* pentodes. *A droite, figure 12 ; potentiel en fonction de la distance à la cathode* x : a) *idéal en l'absence de charge d'espace ;* b) *dans une diode en présence d'un nuage électronique (charge d'espace) au voisinage de la cathode ;* c) *dans une triode avec la grille polarisée négativement ;* d) *avec grille au potentiel de la cathode.*

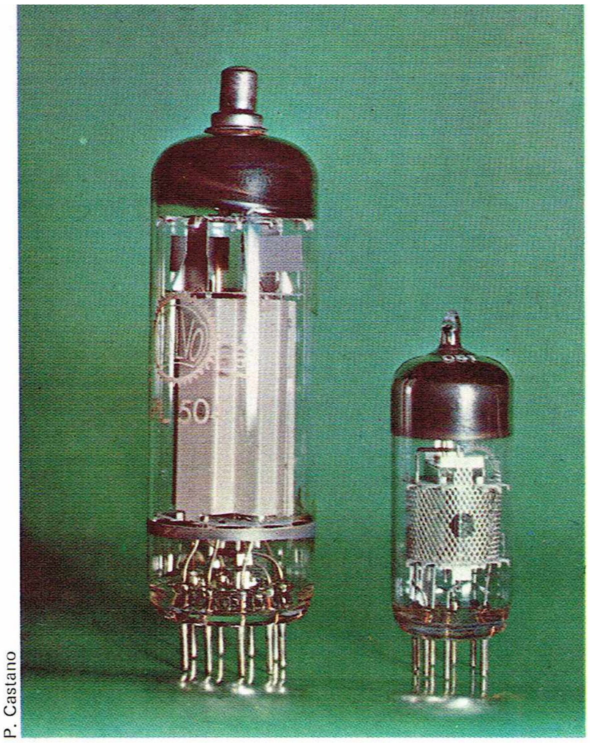

P. Castano

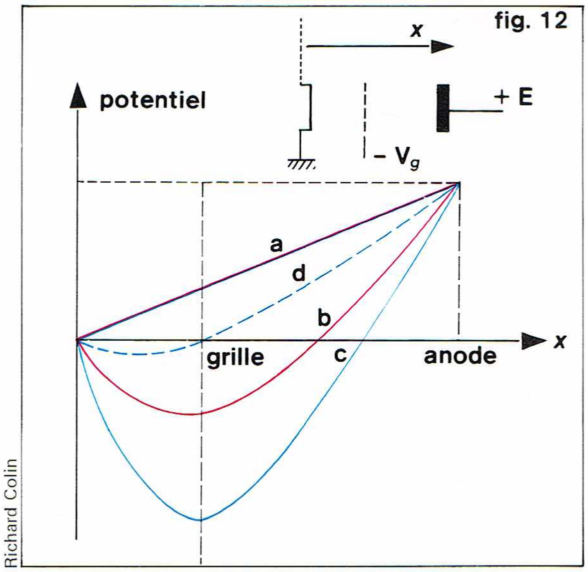

Richard Colin

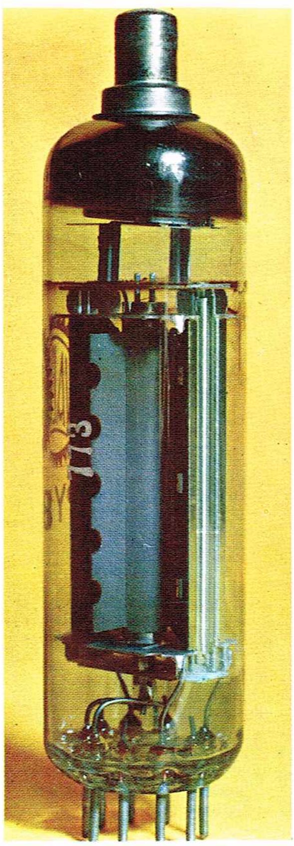

P. Castano

▲ *Une* diode.

supplémentaire ou *grille*, portée à un potentiel négatif par rapport à la cathode, qui modifie la répartition des potentiels dans le tube. On a représenté sur la *figure* 12 cette répartition de potentiels pour une diode et pour le nouveau composant qui porte le nom de *triode*. Pour une tension suffisamment négative appliquée à la grille, aucun électron ne peut parvenir à l'anode, et le courant s'annule ; si la grille est portée au potentiel de la cathode, le courant est au contraire bien plus grand que le courant de la diode de même géométrie, comme le montre la *figure* 12 ; la présence de la grille atténue en effet dans ce cas fortement la barrière de potentiel créé par la charge d'espace. On peut encore accroître le courant en portant la grille à un potentiel positif, mais ce mode de fonctionnement est à éviter, car la grille capte alors beaucoup d'électrons, et il apparaît un « courant grille » important.

Le système ainsi constitué est un quadripôle, ou plus exactement un tripôle, car l'une des électrodes est commune à l'entrée et à la sortie. Le circuit d'entrée est le *dipôle grille-cathode*, la sortie le *dipôle anode-cathode*. En régime de fonctionnement normal, c'est-à-dire avec une grille portée à un potentiel négatif par rapport à la cathode, il n'y a pas de réseau de caractéristiques d'entrée car le courant de grille est nul. Le comportement statique de l'ensemble peut être décrit par un seul réseau de sortie $I_A = f\ (V_{AK})_{V_{gK} = Cte}$; son allure générale est reproduite sur la *figure* 13a.

On utilise parfois une autre représentation en traçant le courant anodique en fonction de la tension grille-cathode pour différentes valeurs de la tension anode-cathode $I_A = f\ (V_{gK})_{V_{AK} = Cte}$ (*fig.* 13b). Le relevé expérimental de ces courbes peut être effectué à l'aide d'un montage analogue à celui qui est représenté sur la *figure* 13c.

Les réseaux précédents permettent de déterminer le point de polarisation lorsque l'on connaît les éléments extérieurs, résistances et piles associées à la triode, mais se prêtent mal à un calcul de variations des tensions et courants autour de ce point de polarisation. Comme il a été exposé plus haut, on effectue pour cela une linéarisation locale. Les grandeurs en jeu sont ici $\Delta I_A = i$, $\Delta I_g = 0$ (courant grille nul) $\Delta V_{gK} = u$, $\Delta V_{AK} = v$.

En explicitant les courants en fonction des tensions, on obtient une seule équation, puisque le courant grille est nul :

$$i = \alpha u + \beta v$$

les coefficients α et β ont les dimensions d'une admittance. Il est d'usage de présenter cette unique relation sous une forme un peu différente

$$\rho i = \mu u + v$$

ou

$$i = \frac{\mu}{\rho} u + \frac{1}{\rho} v$$

Pour $v = 0$, c'est-à-dire à tension grille constante, l'équation se réduit à $v = \rho i$, ce qui montre que ρ est la pente au point de polarisation de la courbe

$$I_A = f\ (V_{AK})_{V_{gK} = Cte}$$

du réseau de sortie, ρ a les dimensions d'une résistance, c'est la *résistance interne* du tube. Si l'on maintient constant le courant anodique $i = 0$, alors $v = -\mu u$, μ est ainsi le rapport entre les variations de potentiel de plaque et de grille ; on l'appelle *coefficient d'amplification* de la triode. Si la tension anodique est maintenue constante ($v = 0$), le terme μ/ρ relie les variations du courant anodique à celle de la tension grille, c'est la *pente* du tube, et aussi la pente au sens géométrique du terme de la caractéristique $I = f\ (V_g)_{V_A = Cte}$ au point de fonctionnement. Pour une triode de faible puissance, les ordres de grandeur de ces paramètres sont les suivants : ρ quelques kilo-ohms (kΩ), μ quelques dizaines (10 à 200), la pente μ/ρ étant ainsi de quelques mA/V.

L'équation fondamentale de la triode permet de construire le schéma équivalent du tube qui se présente comme un générateur de force électromotrice $-\mu u$ et de résistance interne ρ ; la *figure* 14 montre comment, pour calculer les variations autour du point de repos, on peut remplacer le schéma réel par un montage équivalent.

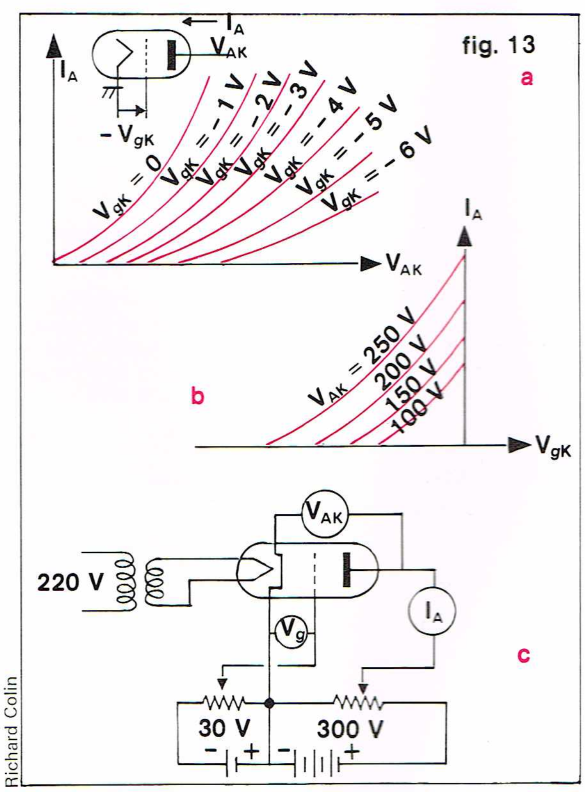

Richard Colin

▶ *Figure 13 :* a) *réseau de Kellog d'une triode ;* b) *réseau* $I_A = f(V_{gK})$ *;* c) *montage pour le relevé des caractéristiques d'une triode.*

La pentode

Dans une triode, l'ensemble grille-anode forme une capacité qui, bien que de très faible valeur, perturbe le fonctionnement du tube aux fréquences très élevées. Il existe des montages permettant de remédier à cet inconvénient, mais il est possible de réduire considérablement cette capacité en intercalant entre la grille et l'anode une électrode supplémentaire portée à un potentiel intermédiaire fixe et formant blindage, c'est la *grille écran*. On constate cependant que cette grille peut recueillir des électrons arrachés à l'anode par le choc du faisceau cathodique (électrons secondaires), et cela se traduit par une forme particulière des caractéristiques pouvant donner naissance à des oscillations parasites. Pour éviter cela, une grille supplémentaire portée au potentiel de la cathode est ajoutée entre l'anode et l'écran, c'est la *grille suppresseuse*. La structure ainsi réalisée comprend alors cinq électrodes, d'où son nom de pentode.

Les circuits utilisant des pentodes sont semblables à ceux qui utilisent des triodes; il faut seulement prévoir une alimentation supplémentaire pour l'écran. Le potentiel de l'écran étant constant, la répartition de la charge d'espace au voisinage de la grille est bien moins sensible à la tension anodique que dans le cas de la triode, et il faut s'attendre à une faible variation de I_A en fonction de V_{AK} pour V_{gK} constant, c'est-à-dire à une forte résistance interne. C'est effectivement ce que l'on constate en observant les caractéristiques du tube EF 86 reproduites sur la *figure* 15.

L'équation de fonctionnement pour les petits signaux établie pour la triode reste valable, mais, compte tenu de la forte valeur de ρ, le terme v/ρ est souvent négligé; il ne reste alors que $i = \frac{\mu}{\rho} u$ que l'on écrit $i = gu$, la pente g étant le paramètre le plus important pour une pentode. En pratique, ρ peut atteindre plusieurs dizaines de kilo-ohms, et g 10 à 50 mA/V, ce qui correspond à un coefficient d'amplification μ de plus de 1 000.

Il est important de remarquer que la pentode n'est un tripôle que parce que l'on maintient constantes les tensions d'écran et de suppresseuse. Il est parfaitement possible d'appliquer des tensions variables à ces deux électrodes, le courant anodique étant alors fonction des tensions sur les trois grilles. La mise en œuvre et le calcul des circuits deviennent alors bien plus complexes, mais l'éventail des possibilités d'utilisation de la pentode s'ouvre considérablement. En fait ces possibilités ont été assez peu utilisées; quelques générateurs de signaux en dents de scie utilisent de façon active les trois grilles, et en télécommunications on emploie ainsi la pentode pour les modulations ou la détection de signaux.

Après avoir régné en maître pendant près d'un demi-siècle sur l'électronique, les tubes disparaissent peu à peu de tous les circuits courants; ils sont volumineux, fragiles et consomment beaucoup d'énergie, en particulier pour le chauffage des cathodes. Il est très difficile d'assurer le fonctionnement sûr d'un appareil comprenant plus de quelques dizaines de tubes; en particulier, les problèmes d'échauffement deviennent difficiles et coûteux à résoudre. Un récepteur de télévision en couleurs est à la limite de ce qui est réalisable, et le développement des systèmes complexes actuels tels que les calculatrices électroniques est impossible avec de tels composants; une calculatrice 8 chiffres, 4 opérations, telle que l'on en trouve actuellement à très bas prix sur le marché, nécessite l'emploi de l'équivalent de plus de 5 000 triodes, et ce chiffre est à multiplier par 1 000 pour un gros ordinateur.

Cependant les tubes électroniques restent encore irremplaçables pour les très fortes tensions et puissances rencontrées dans les émetteurs de radio et de télévision, et aussi sous une forme assez différente comme générateurs d'ondes de fréquences très élevées et de forte puissance (klystrons, carcinotrons, etc.).

Les semi-conducteurs

Les semi-conducteurs doivent leur nom au fait que leur résistivité est intermédiaire entre celle des conducteurs, tels que les métaux, et celle des isolants; en fait, la différence la plus caractéristique tient au sens de variation de cette résistivité avec la température. La résistance d'un fil métallique augmente avec la température (un filament d'ampoule à incandescence est beaucoup plus résistant à chaud qu'à froid) alors que celle d'un semi-conducteur diminue. La physique de ces matériaux a été exposée dans le chapitre de *Physique du solide*, mais il est possible de comprendre le fonctionnement des dispositifs électroniques à semi-conducteurs en se limitant à un exposé simplifié. Les semi-conducteurs sont des éléments tétravalents (germanium, silicium) qui cristallisent dans le système cubique, c'est-à-dire que, dans le réseau cristallin, chaque atome est placé au centre d'un tétraèdre dont les sommets sont les quatre

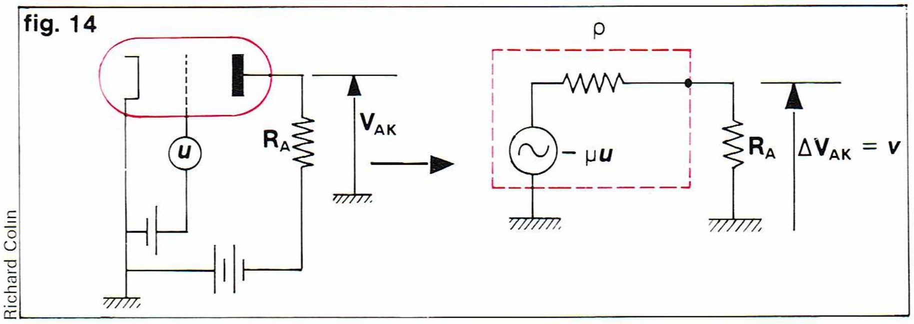

▲ ***Figure 14 : passage du schéma réel au schéma équivalent (cas d'une triode).***

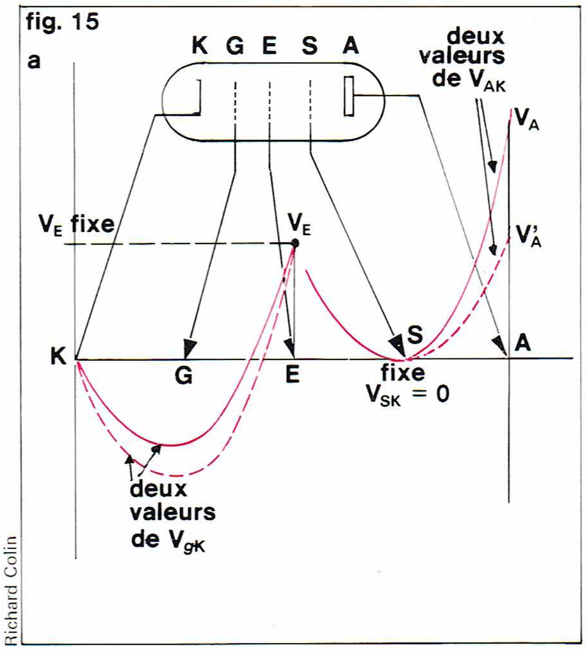

◀ ***Figure 15a : répartition des potentiels dans une pentode.***

▼ ***Figure 15b : représentation schématique et caractéristiques d'une pentode EF 86.***

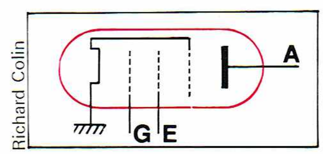

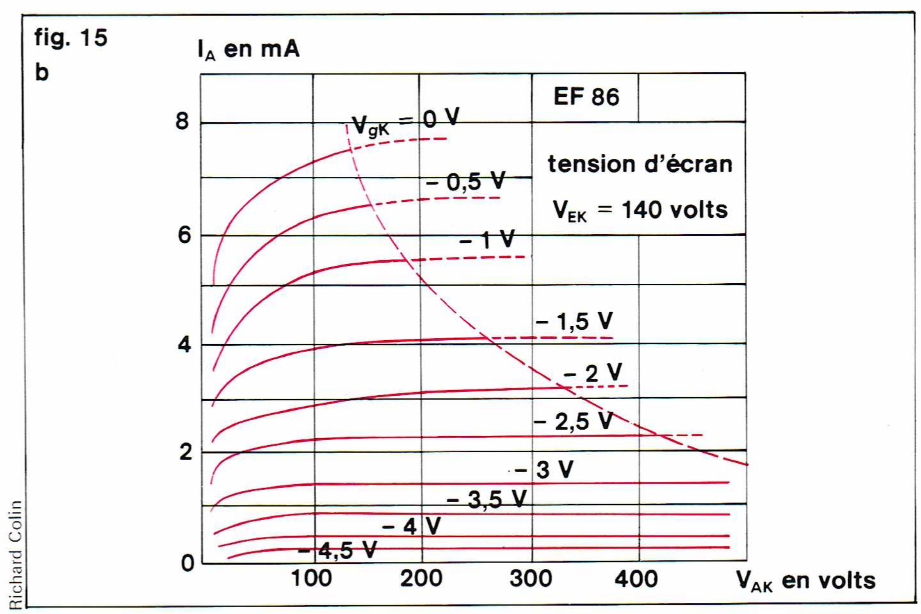

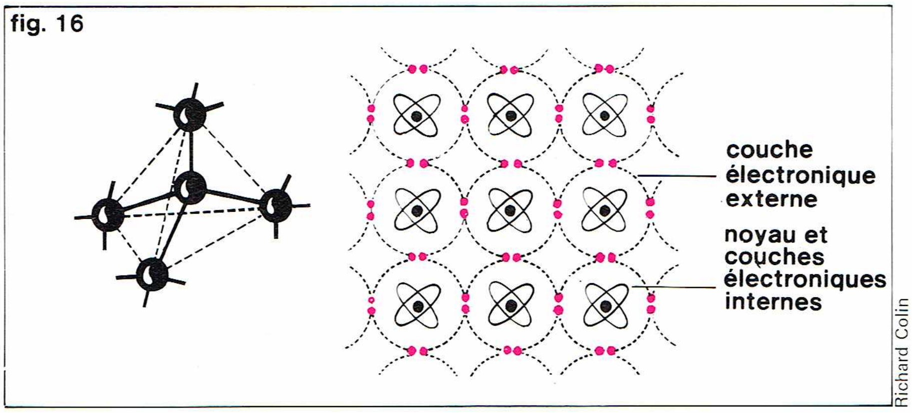

▲ *Figure 16 : environnement d'un atome dans un cristal de semi-conducteur et représentation schématique du réseau cristallin, chaque noyau étant entouré de 8 électrons périphériques.*

atomes voisins. Cette configuration est naturelle pour des éléments tétravalents dont les atomes ont une couche électronique extérieure contenant quatre électrons. On sait en effet qu'une couche électronique est particulièrement stable lorsqu'elle contient huit électrons; cette situation est réalisée ici par la mise en commun de chaque électron par deux atomes voisins. Il se forme ainsi autour de chaque noyau une couche externe de huit électrons *(octet)*, dont quatre sont ceux provenant du noyau lui-même, et les quatre autres appartiennent aussi aux quatre atomes voisins. C'est ce qui est représenté sur la *figure* 16, sur laquelle, pour faciliter le dessin, le réseau est symbolisé sous forme plane. Ainsi, avec une telle configuration, tous les électrons sont retenus par les forces de valence, et aucun ne peut contribuer au transport de charges électriques. Un semi-conducteur est donc isolant, au moins au voisinage du zéro absolu. Lorsque la température s'élève, l'agitation thermique confère à certains électrons une énergie suffisante pour qu'ils brisent leur liaison avec les noyaux et deviennent des électrons libres dans le cristal. Le nombre de ces électrons croît exponentiellement avec la température, car la probabilité pour qu'un électron acquière l'énergie suffisante est proportionnelle à un terme $e^{E/KT}$ où E est l'énergie d'activation nécessaire (gap) et T la température absolue. Sous l'influence d'un champ électrique, ces électrons libres vont se déplacer d'un mouvement d'ensemble et constituer ainsi un courant électrique traversant le solide. Ce type de conduction est identique à celui rencontré avec les métaux, pour lesquels deux électrons par atome sont libres dans le solide et constituent un nuage électronique permanent baignant les noyaux placés aux nœuds du réseau. On conçoit donc que la résistance d'un semi-conducteur décroisse lorsque la température s'élève, puisque le nombre de porteurs augmente. Mais un autre mode de transport de charge intervient ici; chaque électron libre a été arraché à un octet autour d'un noyau qui, ayant ainsi perdu une charge négative, prend une charge positive de même valeur absolue. Il n'y a plus que sept électrons dans la couche électronique externe de cet atome; on dit qu'il s'est formé un « octet déficient ».

Cette déficience en électrons a naturellement tendance à se combler pour revenir à un état d'énergie plus basse; elle le sera par un électron provenant d'un atome voisin, auquel à son tour il manquera un électron, et ainsi de suite. La charge électrique positive due au départ de l'électron initialement arraché par l'agitation thermique se déplace donc dans le réseau par comblement successif de la même façon qu'une particule positive fictive que l'on appelle un *trou*. Si un champ électrique est appliqué au cristal, la probabilité pour que le trou soit comblé par un électron venant du côté cathode est plus grande que de le voir comblé par un électron arrivant d'une autre direction, car sous l'action du champ il se crée un mouvement d'ensemble des électrons de la cathode vers l'anode; le trou se déplace donc de proche en proche vers la cathode, c'est-à-dire dans le sens du champ électrique.

Le transport de charge électrique entre cathode et anode se fait toujours par des électrons qui sont les seules particules réelles mobiles dans le réseau cristallin, mais, dans ce dernier cas, il y a saut successif d'un atome à l'autre et non déplacement « libre » comme dans la conduction de type métallique. Il est plus simple de parler du déplacement d'une particule fictive, le *trou* ayant une charge inverse de celle d'un électron, et il est libre dans le solide.

Dans un semi-conducteur idéalement pur, il y a naturellement autant de trous que d'électrons libres puisque les premiers apparaissent lors de la formation des seconds. On peut écrire une équation :

atome neutre = électron libre + trou

à laquelle, si n est le nombre d'électrons libres par unité de volume et p le nombre de trous, on peut appliquer la loi des équilibres chimiques :

$$np = \text{constante} = n_i^2$$

cette constante n_i étant une caractéristique du matériau ($n_i = 1{,}5 \cdot 10^{10}/\text{cm}^3$ pour le silicium). Pour un tel semi-conducteur pur, dit *intrinsèque*, la conduction est assurée de façon égale par les électrons libres (conduction métallique ou de type N) et par les trous (conduction de type P) [*fig.* 17].

Cet équilibre est rompu si l'on introduit dans le cristal des atomes étrangers. Si l'impureté est constituée d'atomes dont les dimensions ne sont pas très différentes de celles des atomes du réseau intrinsèque, il peut y avoir substitution d'un des atomes du réseau par un atome étranger. La situation est alors très différente suivant la valence de l'impureté ainsi introduite.

Si l'atome étranger est pentavalent (antimoine, phosphore, arsenic), il a cinq électrons dans sa couche externe, c'est-à-dire, compte tenu des quatre électrons provenant des quatre voisins et constituant la liaison de covalence, un de trop qui se trouve dans le cristal et peut contribuer à la conduction de type N. Si la concentration des impuretés est grande devant n_i il y aura ainsi un très grand nombre d'électrons libres supplémentaires dont certains combleront les trous formés naturellement par l'agitation thermique. Il y a en quelque sorte déplacement vers la gauche de l'équilibre chimique : atome neutre $\leftrightarrows n + p$, la relation $np = n_i^2$ restant valable.

L'ensemble du cristal restant neutre électriquement, le nombre d'électrons libres par unité de volume est égal au nombre D d'atomes étrangers, que l'on qualifie dans ce cas de *donneurs* (puisque chacun de ces atomes fournit un électron), augmenté du nombre d'électrons libres ordinaires provenant de l'agitation thermique, qui est égal au nombre de trous, soit $n = D + p$. Si $D = 100\, n_i$ les deux équations précédentes permettent de calculer que le nombre de trous restant est le centième de sa valeur dans le semi-conducteur intrinsèque ($p \sim n_i/100$). Ainsi, il n'y a presque plus de trous (on dit qu'ils sont devenus des porteurs minoritaires), et la conduction se fait essentiellement par les électrons. Un tel semi-conducteur est dit de type N.

Inversement, si l'atome étranger est trivalent (bore, gallium, indium), il lui manque un électron pour constituer un octet; il se forme des trous supplémentaires qui vont être en partie comblés par les électrons libres naturels, dont la concentration sera ainsi très réduite. Les atomes étrangers sont appelés *accepteurs*. Si A est leur concentration, on peut écrire de la même façon que plus haut $p = A + n$. Pour A assez grand, la conduction ne se fait pratiquement plus que grâce aux trous, le semi-conducteur est de type P.

▼ *Figure 17 : dans le cas d'un semi-conducteur pur, tel le silicium, la conduction est assurée par les électrons libres (type N) et par les trous (type P) de façon égale.*

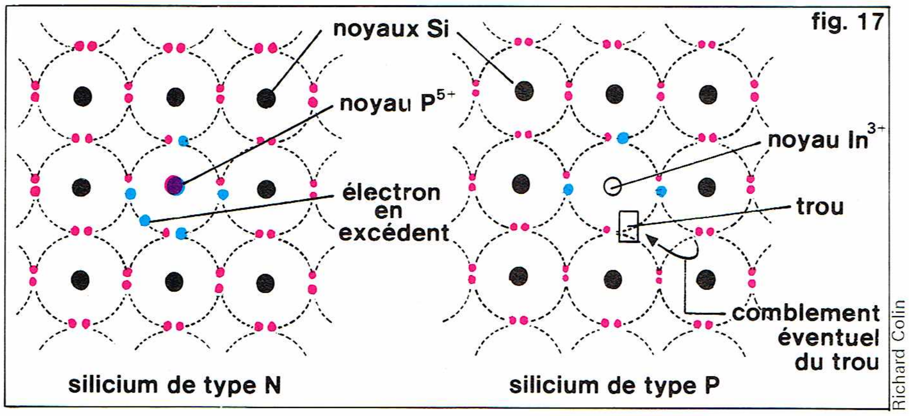

La jonction PN

Plaçons l'un contre l'autre en contact intime deux cristaux semi-conducteurs dont l'un est de type P, l'autre de type N. Au voisinage de la *jonction* ainsi effectuée vont se produire un certain nombre de phénomènes importants, qui sont illustrés par la *figure* 18. Loin de la jonction du côté P, la concentration p_p des trous est grande, celle des électrons n_p faible, la situation est inversée dans la zone N de l'autre côté où $n_n > p_n$. Au voisinage de la jonction, les trous abondants à gauche ont tendance à diffuser vers la droite pour neutraliser les électrons majoritaires du côté N. Cette diffusion suit des lois complexes, mais il est certain que les courbes de concentration doivent se raccorder, comme le montre la *figure* 18a.

Considérons alors la mince couche de matière placée de part et d'autre du plan de jonction. Du côté P, à une distance comprise entre 0 et $-x_p$ le cristal comporte moins de trous que dans une zone plus éloignée de la jonction, mais aussi plus d'électrons. Il y a par rapport à la matière électriquement neutre plus de charges négatives et moins de positives; l'équilibre électrique se trouve donc détruit, et il existe une zone chargée négativement. Symétriquement, dans la zone N entre 0 et x_n, la concentration en trous est plus élevée que celle rencontrée dans la zone située plus à droite, et la concentration des électrons plus faible; c'est cette fois une zone chargée positivement qui apparaît. De part et d'autre de la jonction, il existe donc une double répartition de charge, assez semblable à celle que l'on trouve sur les armatures d'un condensateur (*fig.* 18b). Au voisinage du plan de jonction, une particule positive est attirée du côté P, c'est-à-dire qu'il y règne un champ électrique, dit *champ interne* ($\overrightarrow{E_{int}}$) dirigé de N vers P (*fig.* 18c). Ce champ s'oppose à une diffusion des trous situés à gauche vers la zone N à droite, et réciproquement des électrons de droite vers la gauche.

La jonction polarisée - Diode

Appliquons maintenant à cette jonction un champ électrique extérieur grâce à une pile E_0, le — étant du côté P (*fig.* 19a). Le champ électrique extérieur (E_{ext}) se trouve ainsi avoir le même sens que le champ interne et renforce donc son action. Les électrons sont chassés plus énergiquement encore de la zone de jonction vers la zone N à droite, et les trous vers la région P à gauche. La zone d'épaisseur W dans laquelle sont localisées les charges électriques est donc élargie. On retiendra que cette

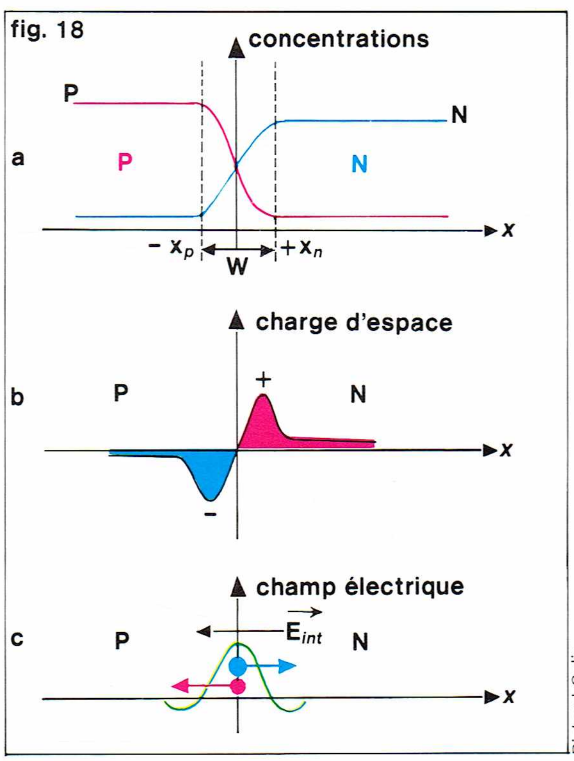

Richard Colin

◄ ***Figure 18 : phénomènes physiques au voisinage de la jonction.***

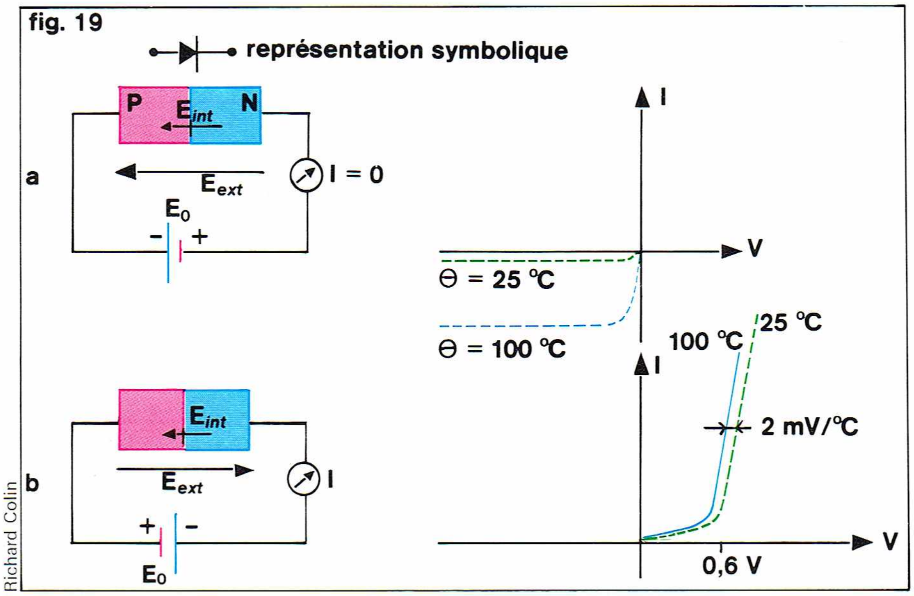

Richard Colin

▲ ***Figure 19 : polarisation d'une jonction.***

épaisseur W suit une loi du type $W = k \cdot \sqrt[n]{V + V_0}$ où V est la tension de polarisation extérieure appliquée, V_0 une constante et *n* un nombre variant de 2 à 3 suivant la technologie utilisée pour fabriquer la jonction. Aucun courant ne peut circuler dans le circuit extérieur. En réalité, ce n'est pas rigoureux, car il existe dans les deux zones des porteurs minoritaires (électrons dans la zone P, trous dans la zone N) dont le passage d'une zone à l'autre est au contraire favorisé par le champ appliqué. Ils sont à l'origine d'un faible courant inverse pratiquement indépendant de la tension, car il ne dépend que des concentrations de ces porteurs dans les deux régions. De plus, des trous et électrons apparaissent toujours dans la zone de jonction, du fait de l'agitation thermique; ces porteurs sont immédiatement séparés par le champ électrique, les trous rejoignant la zone P et les électrons la zone N, d'où un faible courant qui, en vertu de ce qui a été dit plus haut, varie exponentiellement avec la température. Ce courant inverse, ou *courant de fuite*, double environ tous les 7 °C dans le cas du silicium; il est ainsi 16 000 fois plus élevé à 125 °C qu'à 25 °C et ne peut jamais être négligé à haute température. Cette « création de porteurs » dans la zone de jonction peut également être obtenue par l'effet photo-électrique si le cristal est éclairé; c'est ce qui est mis à profit dans les *photodiodes*.

Nous avons enfin remarqué plus haut que la répartition des charges ressemblait à celle qui existe dans un condensateur. Le courant de fuite étant très faible, la jonction polarisée en inverse se comporte effectivement comme un condensateur dont la valeur dépend de l'épaisseur W de la zone perturbée, c'est-à-dire est fonction de la tension de polarisation. Approximativement, cette capacité varie en $V^{-1/2}$.

On appelle diode à capacité variable ou *Varicap* (marque déposée) un tel composant, qui est très utile, car il peut remplacer les condensateurs variables à lames mobiles beaucoup plus volumineux, et dont la commande automatique est bien plus délicate, puisqu'elle nécessite l'emploi d'un moteur d'asservissement.

Inversons le sens de la pile en reliant son pôle + à la région P (*fig.* 19b). Le champ externe se trouve maintenant opposé au champ interne. Tant que $E_{ext} > E_{int}$ le courant électrique circulant dans le circuit extérieur reste faible, mais au-delà la barrière de potentiel interne est en quelque sorte effacée, et le courant croît très vite quand la tension augmente. Sa valeur ne dépend que très peu de la température, car elle est fonction seulement des concentrations des porteurs majoritaires dans les deux zones qui dépendent essentiellement de la quantité d'impuretés donneuses (côté N) et accepteuses (côté P) introduites lors de la fabrication du cristal. On retiendra que, pour un courant donné, la tension aux bornes de la jonction diminue d'environ 2 millivolts par degré Celsius. La valeur limite $E_{ext} = E_{int}$ correspond pour le silicium à une tension de l'ordre de 0,6 volt, et pour le germanium de 0,15 volt.

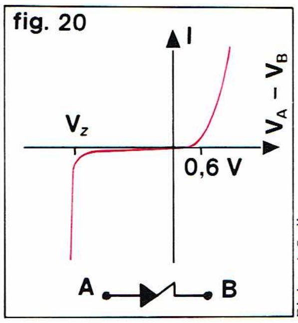

Richard Colin

▲ *Figure 20 : représentation schématique d'une diode Zener et courbe caractéristique.*

En réalité, le courant ne croît pas brusquement à partir de 0,6 ou 0,15 volt, car le champ interne est lui-même fonction, comme W, de la tension extérieure appliquée. La théorie complète montre qu'il n'y a dans la courbe aucune discontinuité; le courant suit une loi exponentielle :

$$I = I_0\,(e^{V/\psi} - 1)$$

où $\psi = \frac{kT}{q}$, k étant la constante de Boltzmann, T la température absolue et q la charge de l'électron. Numériquement, pour T = 300 °K, ψ = 26 mV.

I_0 est le *courant inverse de jonction,* fonction exponentielle de la température, mais qui est très faible à la température ambiante (quelques pico-ampères au plus à 25 °C pour du silicium). Dès que I est notablement supérieur à I_0, ce qui se produit dès que V dépasse une centaine de millivolts, l'expression peut se simplifier en $I = I_0 e^{V/\psi}$. Le courant est directement proportionnel à l'exponentielle de la tension ou inversement la tension varie comme le logarithme du courant. Cette propriété sera utilisée dans les amplificateurs logarithmiques.

Cependant le courant ne prend de valeur notable (des micro-ampères) qu'au-delà de 0,6 volt pour du silicium; c'est pourquoi cette valeur est à retenir.

La jonction PN ne conduit donc le courant que dans un seul sens (au courant de fuite près) ; c'est une diode que l'on représente schématiquement comme il est indiqué sur la *figure* 19.

La diode Zener

Lorsque la jonction est polarisée en sens inverse, le courant ne reste faible que pour des tensions inférieures à une limite au-delà de laquelle il se produit un phénomène de claquage. Le courant croît alors très vite; pratiquement la caractéristique devient verticale, la tension ne dépendant plus du courant. Cette valeur limite de tension est appelée *tension Zener.* Certaines diodes sont construites pour fonctionner normalement dans ces conditions, ce sont les *diodes Zener* ou diodes régulatrices de tension, qui sont largement utilisées comme étalons de tension. On les représente comme il est indiqué sur la *figure* 20.

Le transistor à effet de champ à jonction (T. E. C.)

La zone perturbée au voisinage d'une jonction est très peu conductrice, car les porteurs y sont en faible concentration, comme le montrent les courbes de la *figure* 18. Ils sont en effet repoussés de part et d'autre par le champ interne. Cette zone est pour cette raison appelée souvent *zone isolante* ou *intrinsèque.* La variation de son épaisseur en fonction de la tension inverse appliquée est mise à profit pour réaliser un quadripôle actif dans lequel une tension commande la conductibilité d'un barreau de silicium; c'est le *transistor à effet de champ* à jonction ou T. E. C. (Jonction Field Effect Transistor ou J. F. E. T.).

▼ *Figure 21 : principe du transistor à effet de champ* (T. E. C.).

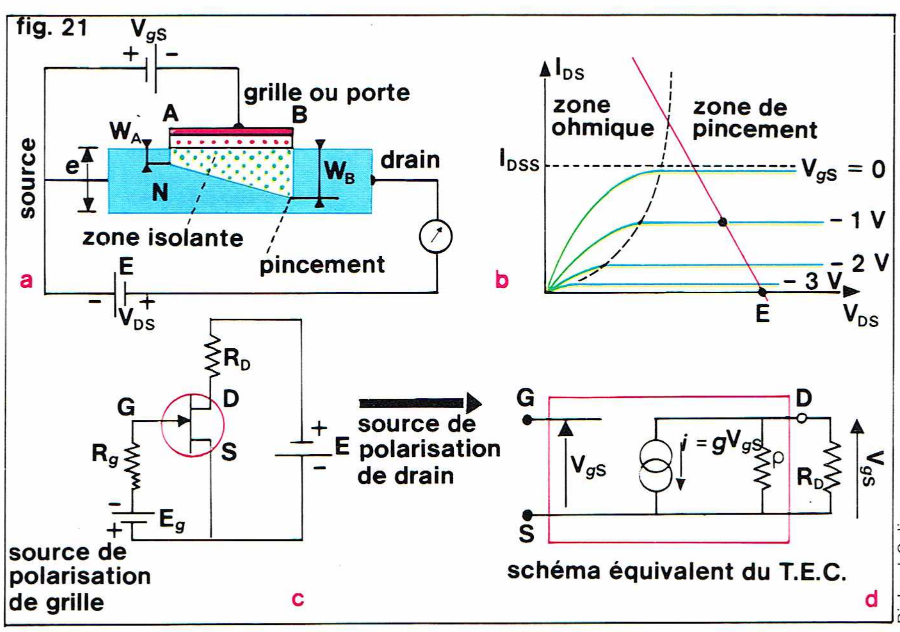

Richard Colin

Ce transistor est constitué par une mince plaquette de silicium de type N sur laquelle est ménagée latéralement une jonction (*fig.* 21a). Deux contacts appelés *source* et *drain* sont pris aux deux extrémités, et un contact dit de *grille* sur la zone P latérale. Appliquons une tension E entre drain et source grâce à une pile extérieure placée entre grille et source; polarisons en inverse la jonction latérale. Il se forme une zone isolante de part et d'autre, et en particulier dans le barreau N, mais elle n'a pas la même épaisseur du côté de la source et du drain, car à gauche la tension entre la zone de grille (qui est équipotentielle, car il n'y a aucun courant grille, la jonction étant polarisée en inverse) et le barreau est $- V_{gS}$, alors qu'elle est $(- V_{gS} - V_{DS})$ à droite où la zone N se trouve portée à un potentiel voisin de V_{DS}. Le courant circulant entre source et drain est donc obligé de passer dans une zone dont l'épaisseur est réduite à $(e - W_B)$ au voisinage du point B. Si l'épaisseur e du barreau est du même ordre de grandeur que celle de la zone intrinsèque W, il existe une tension $V_{gS} = V_p$ dite de *pincement* pour laquelle $e = W_B$ c'est-à-dire que le canal est complètement fermé et qu'aucun courant ne peut circuler entre le drain et la source. Connaissant la loi de variation de l'épaisseur W en fonction de la tension et la résistivité ρ du matériau N, on peut écrire les équations du système. Pour une valeur fixe de la tension de polarisation de grille V_{gS} on montre que le courant I_{DS} varie en fonction de V_{DS} suivant une loi sensiblement parabolique, pour prendre à partir d'une certaine tension une valeur pratiquement constante donnée par :

$$I_{DS} = I_{DSS} \cdot \left(\frac{|V_{gS}|}{|V_p|} - 1\right)^2$$

Le réseau de caractéristiques de sortie ressemble beaucoup à celui d'une pentode (*fig.* 21b). On distingue deux zones :

— au voisinage de l'axe des courants, les caractéristiques partent en éventail de l'origine; le barreau se comporte comme une *résistance variable commandée par la tension grille;* c'est la zone ohmique;

— ensuite, pour des V_{DS} plus élevées, les caractéristiques sont horizontales; c'est la zone de pincement, dans laquelle on cherche en général à se placer. Comme pour les tubes électroniques, un seul réseau suffit à décrire le fonctionnement statique, car la caractéristique d'entrée se réduit à $I_g = 0$.

- *Polarisation du T. E. C.*

Pour fonctionner normalement, le T. E. C. doit recevoir une tension drain-source positive (source d'alimentation), et sa grille doit être négative par rapport à la source. Cela est réalisé dans le montage de la *figure* 21c où l'on a utilisé la représentation schématique du T. E. C. le plus souvent rencontrée. On remarquera que rien dans le dessin ne distingue source et drain; ces deux électrodes sont en effet le plus souvent interchangeables, car le dispositif est symétrique. La position du point de polarisation est déterminée en cherchant l'intersection entre la caractéristique V_{gS} = Cte = E_g avec la droite de charge de sortie d'équation $V_{DS} = E - R_D I_{DS}$.

- *Paramètres pour petits signaux et schéma équivalent*

Autour du point de polarisation, les faibles variations peuvent être calculées en effectuant une linéarisation des caractéristiques, comme nous l'avons exposé plus haut. Par suite de la nullité du courant grille, il reste une seule équation :

$$\Delta I_{DS} = \alpha \Delta V_{DS} + \beta \Delta V_{gS}$$

que l'on écrit en mettant en évidence la *pente*

$$g = \left(\frac{dI_{DS}}{dV_{gS}}\right)_{V_{DS} = \text{Cte}}$$

et la *résistance interne*

$$\rho = \left(\frac{dV_{DS}}{dI_{DS}}\right)_{V_{gS} = \text{Cte}}$$

et en remplaçant les Δ par les lettres minuscules :

$$i_{DS} = g v_{gS} + \frac{v_{DS}}{\rho}$$

Pour un bon T. E. C. utilisé dans la zone de pincement, ρ est souvent de l'ordre du mégohm, et le second terme est alors négligeable; il reste $i_{DS} = g v_{gS}$. Comme pour la pentode, ces relations sont équivalentes à un schéma

contenant une source commandée (*fig.* 21d), et les variations seront calculées sur un schéma équivalent du montage total obtenu, comme il a été exposé plus haut, en ne conservant que les parties variables des sources présentées.

Si la tension d'alimentation de drain E est fixe, on calcule les variations de la tension drain en fonction de celle de la tension grille

$$v_{DS} = -\left(\frac{\rho R_{DS}}{\rho + R_{DS}}\right) g v_{gS}$$

qui, si ρ est grand devant la résistance de charge R_{DS}, se réduit à :

$$v_{DS} = -g R_{DS} v_{gS}$$

Le montage est un amplificateur de gain $-gR_{DS}$. Pour les T. E. C. les plus courants, la pente est de l'ordre de quelques milliampères par volt; elle varie beaucoup avec le point de polarisation choisi. En dérivant l'expression de I_{DS} présentée plus haut, on trouve en effet :

$$g = \left(\frac{dI_{DS}}{dV_{gS}}\right)_{V_{DS} = \text{Cte}} = 2 \cdot \frac{I_{DSS}}{V_P}\left(\frac{V_{gS}}{V_P} - 1\right)$$

elle varie de $g = g_{max} = \dfrac{2\, I_{DSS}}{V_P}$ lorsque la grille est au potentiel de la source, à 0 pour la tension de pincement.

La caractéristique la plus importante du transistor à effet de champ est son impédance d'entrée élevée. L'impédance d'entrée d'un quadripôle est l'impédance différentielle présentée par son dipôle d'entrée $Z_e = \dfrac{\Delta V_1}{\Delta I_1}$, le courant d'entrée est ici le courant grille, c'est-à-dire le courant de fuite inverse de la jonction grille-source; il est très faible, et à 25 °C une impédance d'entrée de 1 000 mégohms est tout à fait normale pour un bon élément. Elle varie naturellement avec la température et peut ne guère dépasser quelques mégohms au-delà de 100 °C; c'est un inconvénient qui n'existe pas avec les transistors à effet de champ à grille isolée que nous allons décrire maintenant.

Le transistor à effet de champ à grille isolée

La variation de la conductibilité d'un matériau sous l'influence d'un champ électrique n'est pas un phénomène limité aux jonctions; il existe pour tous les conducteurs mais n'intéresse le plus souvent qu'une épaisseur très faible et est très difficile à mettre à profit pour réaliser un dispositif actif. Considérons une plaquette de semi-conducteur de type N sur laquelle est placée une électrode métallique permettant d'appliquer un champ électrique E perpendiculaire à la surface; cette électrode est isolée électriquement par une couche isolante de faible épaisseur qui, dans le cas du silicium, est commodément de la silice obtenue par oxydation du cristal (*fig.* 22). Si l'électrode métallique est portée à un potentiel positif par rapport au silicium, les électrons libres sont attirés et s'accumulent au voisinage de la surface. Dans cette zone, le nombre de porteurs augmentant, la conductibilité du solide s'accroît. Si, inversement, on polarise négativement l'aluminium, les électrons sont repoussés, et la conductibilité diminue; si l'intensité du champ est encore accrue dans ce dernier sens, les trous venant s'accumuler sous la surface peuvent devenir plus nombreux que les électrons, et le semi-conducteur de N devient P; c'est le phénomène d'*inversion de population*. C'est ce phénomène qui est mis à profit dans le transistor à effet de champ à grille isolée.

La structure de ce dispositif est représentée sur la *figure* 23g. Pour le fabriquer, on part d'une plaquette de silicium P qui sera le socle sur lequel reposera tout le système; c'est le *substrat*. Par oxydation en phase gazeuse, une mince couche de silice SiO_2 isolante est formée sur toute la surface qui est ensuite recouverte d'une laque (*fig.* 23a) ayant la propriété de devenir insoluble dans les solvants si elle est éclairée par une lumière ultraviolette. Un masque photographique est alors placé sur la pièce qui est insolée (*fig.* 23b), puis la laque restée soluble est éliminée (*fig.* 23c), ne laissant ainsi à nu la silice qu'en deux zones. Par action d'acide fluorhydrique, solvant de la silice, le silicium est mis à nu à ces endroits (*fig.* 23d). Après élimination de la laque restante, l'ensemble est placé dans un four où circule un mélange gazeux contenant une impureté

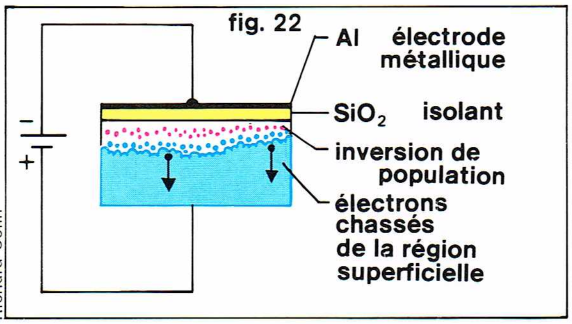

◀ *Figure 22 : inversion de population par effet de champ.*

donneuse d'électrons qui diffuse dans le cristal aux endroits où il est accessible, créant ainsi deux zones N (*fig.* 23e). Une métallisation est alors effectuée sur toute la surface par pulvérisation cathodique d'aluminium (*fig.* 23f). En utilisant de nouveau un masque photosensible suivi d'une attaque chimique, on découpe dans la couche métallique les zones qui vont former les trois électrodes (source, drain, et grille), sur lesquelles des contacts sont pris en écrasant à chaud de fins fils d'or (thermocompression).

● *Fonctionnement*

En absence de toute polarisation de grille, aucun courant ne peut circuler entre la source et le drain, car il devrait franchir deux jonctions constituant deux diodes tête-bêche. Si une tension positive est appliquée à la grille, elle chasse par effet de champ les électrons de la surface, et, à partir d'une valeur suffisante, il se produit une inversion de population qui crée entre source et drain un canal N permettant le passage du courant. La résistivité de ce canal dépend naturellement de la tension appliquée, et le comportement de l'ensemble est analogue à celui du T. E. C. à jonction. On remarquera cependant que le courant n'apparaît que pour une tension positive appliquée à la grille; le I_{DSS} est nul. Pour le T. E. C. à jonction, une tension positive ne pouvait être appliquée, car elle aurait débloqué la jonction grille-source. Ce n'est pas le cas ici, la couche de silice empêchant la circulation de tout courant grille. L'impédance d'entrée du transistor à grille isolée, que l'on appelle souvent M. O. S. (Métal Oxyde Semi-conducteur) à cause de sa structure, est considérable et indépendante de la température. Elle n'est limitée que par les fuites superficielles, mais atteint couramment $10^{13}\,\Omega$ et parfois $10^{17}\,\Omega$.

Les circuits à M. O. S. sont semblables à ceux qui utilisent les T. E. C. à jonctions. La manipulation des transistors à effet de champ à grille isolée est délicate par suite de leur fragilité électrique; la couche de silice peut en effet être percée si une surtension est appliquée à la grille, or, par suite de la valeur de l'impédance et de la faiblesse de la capacité grille-source, une charge élec-

▼ *Figure 23 : structure et fabrication d'un M. O. S. canal N.*

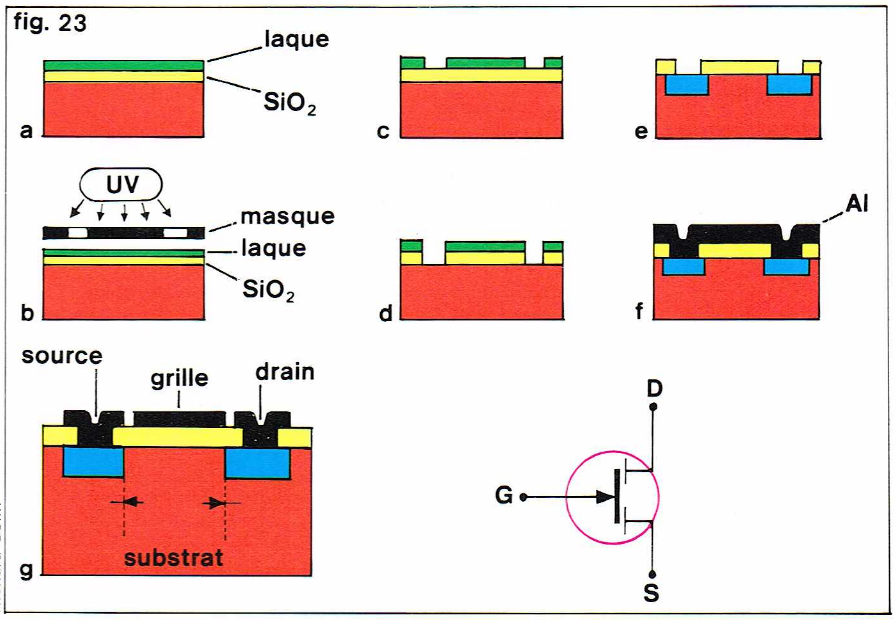

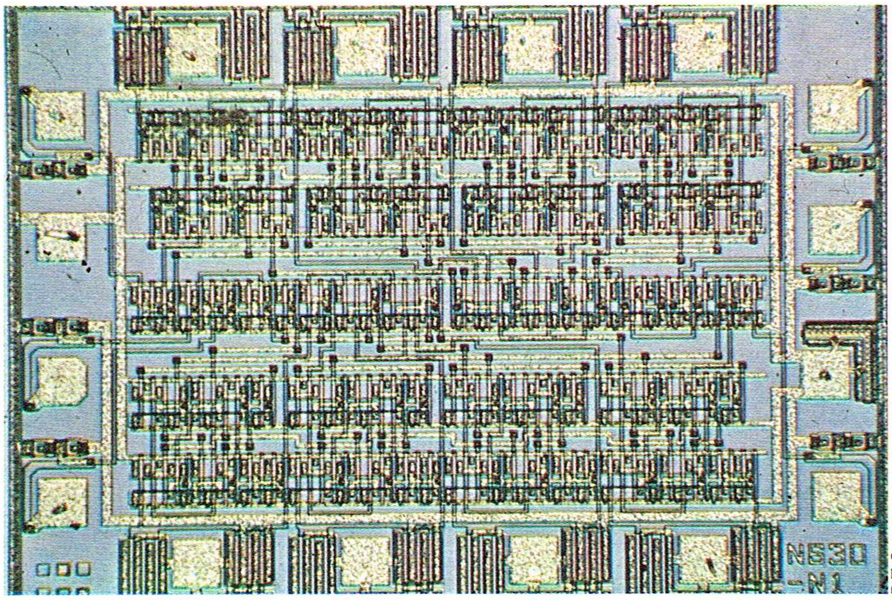

R.T.C.

▲ *Un circuit intégré à* **M. O. S.**

▶ ***Figure 25 : structure du transistor à jonctions et courants de fuite.***

▼ ***Figure 24 : structure d'un*** **M. O. S.** ***canal*** **N** ***à appauvrissement.***

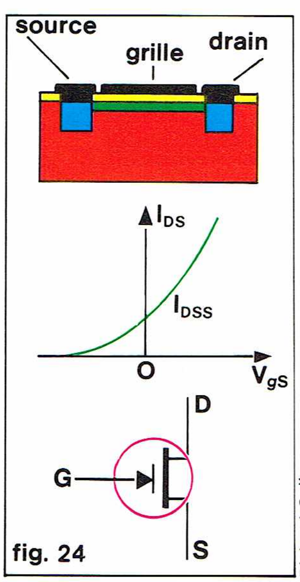

Richard Colin

trique très faible (des microcoulombs) suffit à élever considérablement la tension grille, et il faut prendre les plus grandes précautions vis-à-vis des phénomènes électrostatiques.

● *Différents types de M. O. S.*

Le M. O. S. dont nous avons décrit la fabrication est un *M. O. S. canal N* dit *à enrichissement*, car, à polarisation nulle, le canal n'existe pas entre drain et source et est créé seulement en enrichissant en électrons la zone superficielle par effet de champ. Le plus souvent, on part d'un substrat N ; le fonctionnement est le même, mais le canal est de type P, et les tensions doivent être inversées. Il est possible également, au prix d'un nombre d'opérations plus élevé à la fabrication, de créer par diffusion un canal initial entre source et drain. Le courant à $V_{gS} = 0$ n'est plus nul ; il diminue si une tension négative est appliquée à la grille (M. O. S. canal N) et augmente dans le cas contraire (*fig.* 24). Un tel transistor est appelé *M. O. S. à appauvrissement* ; son réseau de caractéristique est alors très semblable à celui d'un T. E. C., avec une tension de pincement et un I_{DSS} non nul, mais la grille peut être positive, et il n'y a pas de jonction source-grille.

Les M. O. S. individuels sont utilisés en électrométrie à cause de leur impédance d'entrée et dans quelques circuits haute fréquence où certaines de leurs propriétés sont intéressantes, mais leur fragilité limite la généralisation de leur emploi. Par contre, il est facile sur un même substrat d'en fabriquer d'un seul coup plusieurs milliers, et les *circuits intégrés à M. O. S.* se développent de plus en plus. Ce sont eux que l'on rencontre dans les calculatrices électroniques portatives.

Le transistor à jonctions

C'est le composant le plus important, dont la mise au point a révolutionné l'électronique depuis 20 ans.

● *Principe*

Il est constitué de trois couches (*fig.* 25).

— Une couche N dopée fortement, c'est-à-dire dans laquelle la concentration des électrons est élevée et celle des trous très faible (leur produit *np* est toujours constant) ; ce sera *l'émetteur du transistor* (E).

— Une couche mince P dans laquelle la concentration des impuretés est beaucoup plus faible, constituant la *base* (B).

— Une couche de nouveau dopée N formant le *collecteur* (C).

La jonction émetteur-base est polarisée dans le sens direct par une source E_B et la jonction base-collecteur dans le sens inverse par E_C. Sous l'influence de E_B un courant émetteur-base circule entre ces deux électrodes ; c'est un courant d'électrons I_{EN} de E vers B et de trous I_{EP} de B vers E, mais, la concentration des porteurs étant beaucoup plus faible dans la base que dans l'émetteur, le courant de trous est pratiquement négligeable devant le courant d'électrons, et le courant total vaut :

$$I_E = I_{EP} + I_{EN} \# I_{EN}$$

La base étant mince, une grande quantité de ces électrons *émis* par l'émetteur la traversent et se rapprochent de la zone de collecteur. Or il existe au voisinage de cette seconde jonction un champ interne dont le sens est tel que ces électrons sont collectés et rejetés vers le collecteur (les électrons en transit dans la base sont en effet des porteurs minoritaires pour cette zone et peuvent traverser la barrière de jonction). Cependant, pendant la traversée, une faible proportion est neutralisée par les trous de la base, proportion d'autant plus faible que l'épaisseur de la couche est plus réduite. Le courant collecteur s'écrit finalement :

$$I_C = \alpha I_E$$

α étant un nombre voisin de 1. Pour maintenir la neutralité électrique de la base, un courant $I_B = (1 - \alpha)\, I_E$ doit parvenir à cette électrode ; il correspond aux électrons capturés par les trous de la zone de base. Il est important de remarquer que, si la connexion de base était coupée, le courant de collecteur s'annulerait, car la base prendrait une charge de plus en plus négative qui très rapidement empêcherait tout passage de porteurs venant de l'émetteur. Le courant base est donc nécessaire au fonctionnement du système ; il commande en quelque sorte le courant collecteur. Les deux relations précédentes peuvent s'écrire :

$$I_C = \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_B = \beta I_B$$

β est le *gain en courant* du transistor ; il vaut de 10 à plus de 500. Le transistor apparaît ainsi comme une

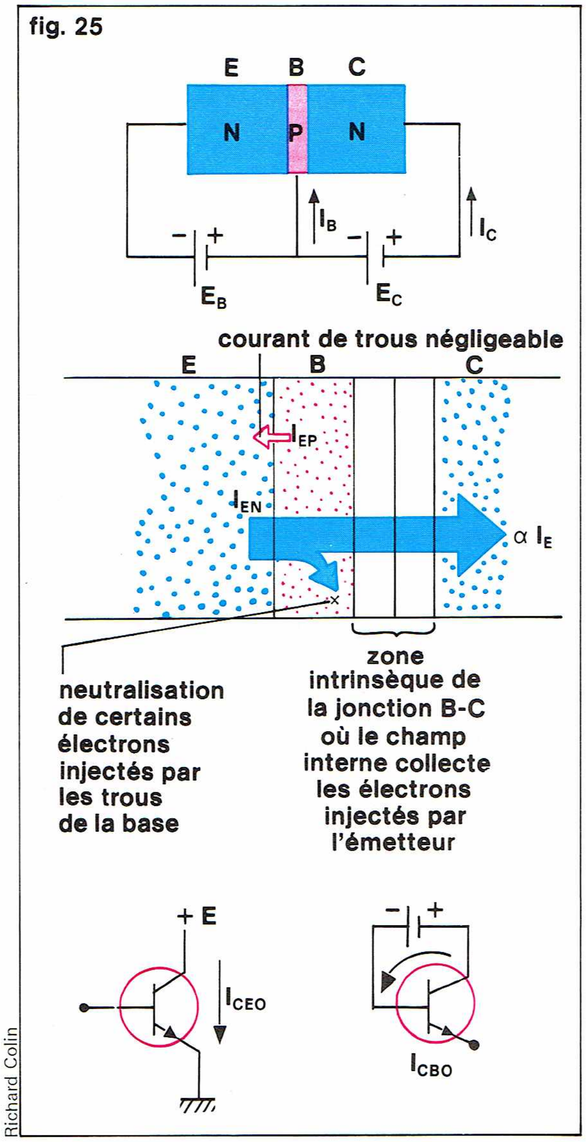

Richard Colin

source de courant commandée. Il a un gain en puissance important, car la puissance nécessaire pour injecter le courant base est de l'ordre de $P_e = I_B \times V_{BE}$ (la tension V_{BE} est celle d'une jonction conductrice, soit typiquement 0,6 volt), et la puissance commandée $P_S = I_C E_C$. Le rapport entre les deux s'écrit alors $P_S/P_e \# \beta \frac{E_C}{0,6}$, il peut être de plusieurs centaines.

En réalité, le fonctionnement est un peu plus complexe, et il faut tenir compte des courants de fuite inverse des jonctions. Laissons « en l'air » la connexion d'émetteur en ne conservant que la pile E_C ; il circule dans le circuit de collecteur un courant faible qui est le courant inverse de la jonction CB, soit I_{CB0}. Si maintenant nous coupons le fil de base, nous observons un courant de collecteur I_{CE0} bien plus élevé que le précédent. En effet, nous venons de voir que le courant collecteur était β fois plus fort que celui parvenant à la base ; le courant de fuite I_{CB0} précédent permet aussi une fuite des charges négatives de la base ; il contribue de la même façon que I_B à son équilibre électrique ; il est donc amplifié comme lui. La mesure montre en effet que :

$$I_{CE0} = \beta I_{CB0}$$

● *Réseaux de caractéristiques du transistor*

On peut considérer le transistor comme un tripôle, l'entrée étant le dipôle base émetteur, la sortie prise entre collecteur et émetteur. Cette fois, aucun courant n'est nul, et la description du fonctionnement nécessite le tracé de deux réseaux.

— *Le réseau d'entrée*. Le circuit d'entrée est la jonction base-émetteur. Les courbes pourront donc, par exemple, exprimer le courant base I_B en fonction de la tension V_{BE} pour différentes valeurs de la tension entre collecteur et émetteur V_{CE} :

$$I_B = f\,(V_{BE})_{V_{CE} = \text{Cte}}$$

Cependant nous avons vu que les porteurs injectés dans la base étaient capturés par le champ interne de la jonction CB qui existe dès qu'elle est polarisée en inverse ; une augmentation de la tension de polarisation n'augmentera que très peu la proportion α de porteurs capturés, qui est déjà très voisine de 1 si la base est assez mince. Le fonctionnement de l'ensemble sera donc peu sensible à la valeur de la tension collecteur, et, pratiquement, pour toutes les valeurs de V_{CE} supérieures à 1 volt, toutes les courbes sont confondues. Il y aura une seule caractéristique d'entrée, et non un réseau (*fig.* 26). La résistance différentielle du dipôle d'entrée qui est l'impédance d'entrée du transistor est donc celle d'une diode ; elle peut être calculée à partir de l'expression du courant écrite plus haut,

soit $$r = \frac{dV_{BE}}{dI_B} = \frac{d}{dI_B}\left(I_0 e^{V_{BE}/\psi}\right) = \frac{\psi}{I_B}$$

Elle ne dépend que du courant base et non du type de semi-conducteur utilisé. Sa valeur numérique est à retenir : 1 kΩ pour $I_B = 26$ µA.

— *Le réseau de sortie*. Il décrit l'évolution du courant collecteur en fonction de la tension collecteur-émetteur pour diverses valeurs de la grandeur d'entrée la plus caractéristique, laquelle est ici le courant base

$$I_C = f\,(V_{CE})_{I_B = \text{Cte}}$$

D'après ce qui précède, on peut écrire : $I_C = \beta I_B + V_{CE_0}$ où V_{CE} n'intervient pas. En réalité, la résistance interne dV_{CE}/dI_C n'est pas infinie comme cette équation simplifiée peut le laisser croire, car le gain β augmente avec la tension. Lorsque V_{CE} s'accroît, l'épaisseur de la zone intrinsèque de la jonction CB augmente ; les électrons provenant de l'émetteur ont donc une épaisseur de base plus faible à franchir avant d'être collectés, et α se rapproche de 1, ce qui a une grosse influence sur

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

Cela se traduit par une inclinaison des caractéristiques (*fig.* 26) et une résistance de sortie r_C relativement faible (typiquement 10 kΩ pour un petit transistor).

Signalons enfin que β diminue pour les courants collecteurs très faibles ; seuls certains transistors spécialement construits ont des gains en courants supérieurs à quelques dizaines, en dessous de 1 µA de collecteur ; ce phénomène est en partie dû à des courants superficiels.

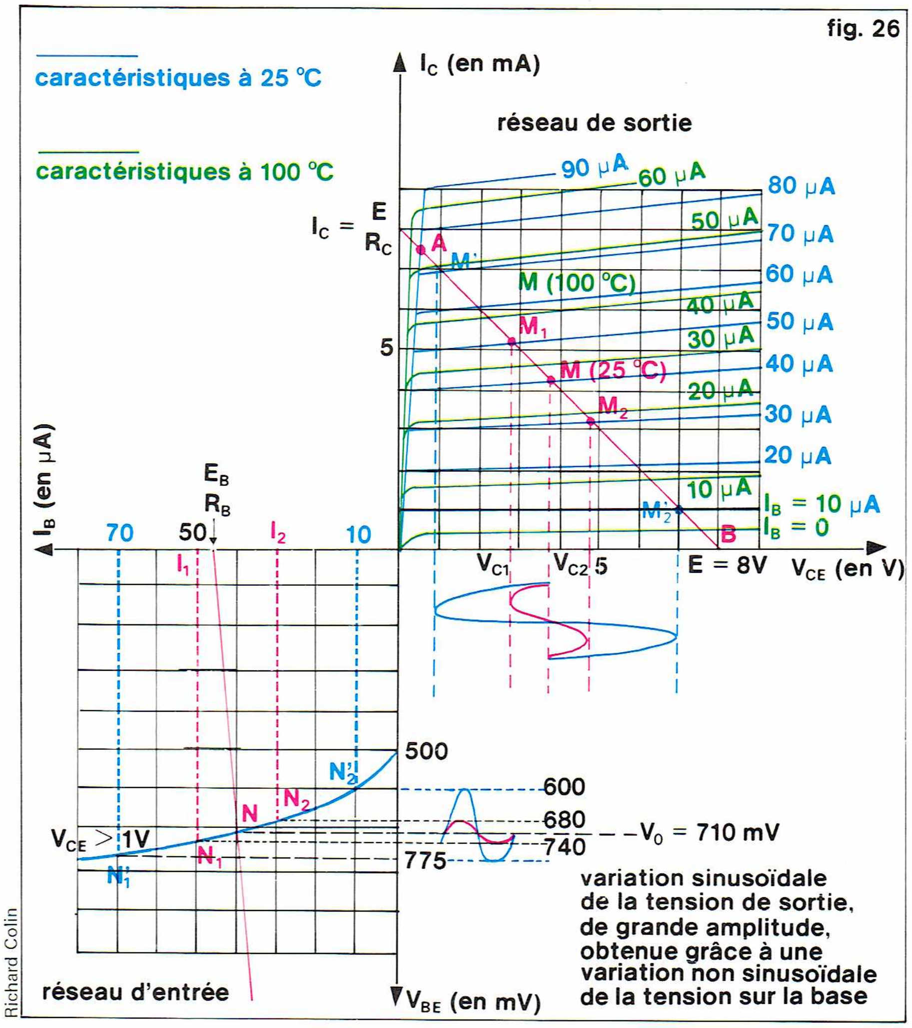

Richard Colin

▲ *Figure 26 ; réseau de caractéristiques d'un transistor à jonctions : droites de charge et point de polarisation.*

● *Fabrication des transistors*

Les premiers transistors étaient au germanium et de type PNP. On les obtenait à partir d'une mince plaquette de germanium N de part et d'autre de laquelle on plaçait une petite bille d'indium. Par chauffage, les atomes d'indium pénétraient dans le réseau du germanium, formant ainsi deux zones P de part et d'autre de la zone centrale N qui constituait la base. L'épaisseur de cette dernière était ajustée en agissant sur la durée du chauffage ; elle restait toujours assez grande pour éviter un perçage et les transistors fabriqués par cette méthode dite *méthode d'alliage* avaient des performances et en particulier un gain faibles.

Les éléments actuels ont une structure plane *(transistors planar)* et sont fabriqués par des techniques de diffusion gazeuse. Pour obtenir des transistors NPN, on part d'une plaquette mince de silicium N (épaisseur de l'ordre de 200 µm) assez fortement dopé de façon à être très conducteur, cela pour diminuer la résistance série du composant. Cette plaquette est d'abord placée dans un four à une température de l'ordre de 1 000 °C en présence de vapeurs contenant du silicium N. Il se dépose à sa surface une mince couche N faiblement dopée et très bien cristallisée de quelques micromètres d'épaisseur ; c'est ce que l'on appelle une *couche épitaxiale* dans l'épaisseur de laquelle on va fabriquer le transistor. Pour cela, on va, comme il a été exposé plus haut pour les M. O. S., effectuer des diffusions d'impuretés après avoir protégé le métal par des masques de géométrie convenable, réalisés par des méthodes photographiques. La fabrication est beaucoup plus longue que celle des transistors à effet de champ, car la structure est plus complexe. Trois cycles successifs au moins de photogravure sous trois masques différents sont nécessaires, mais il est possible d'obtenir simultanément sur une même pastille de très nombreux transistors, et le prix de revient individuel de ceux-ci est réduit à quelques centimes. Les

fig. 27

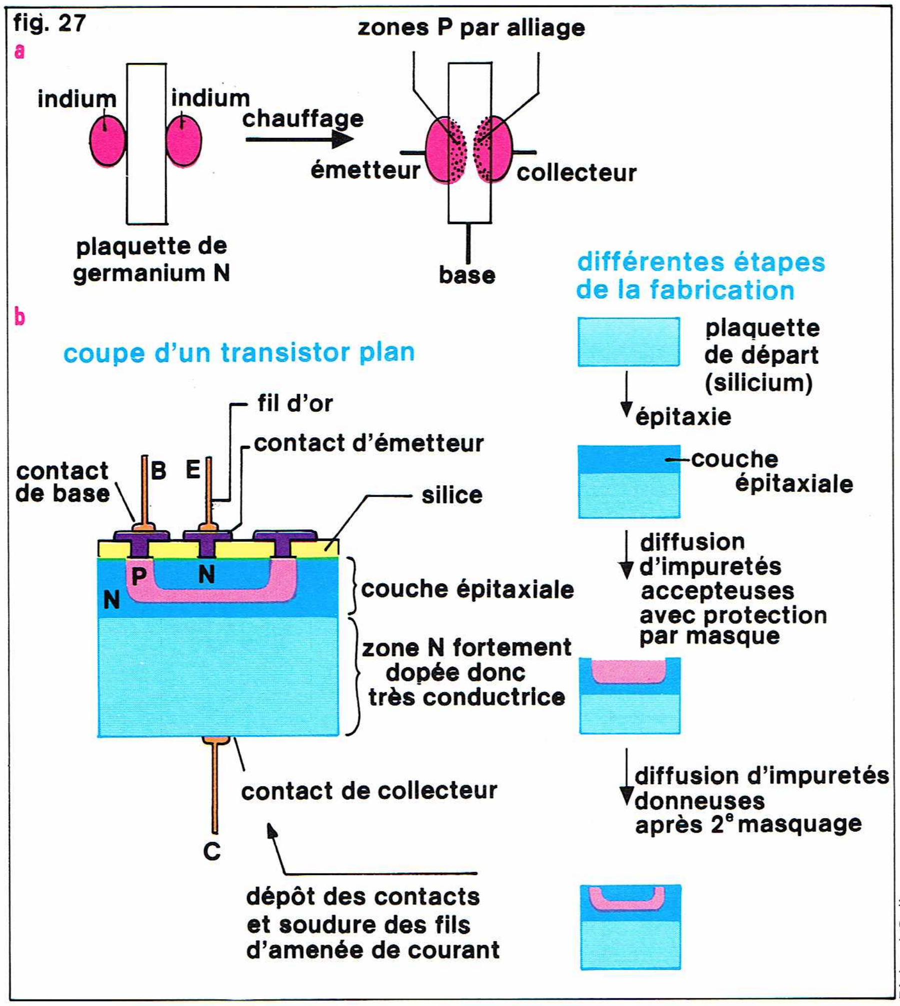

Richard Colin

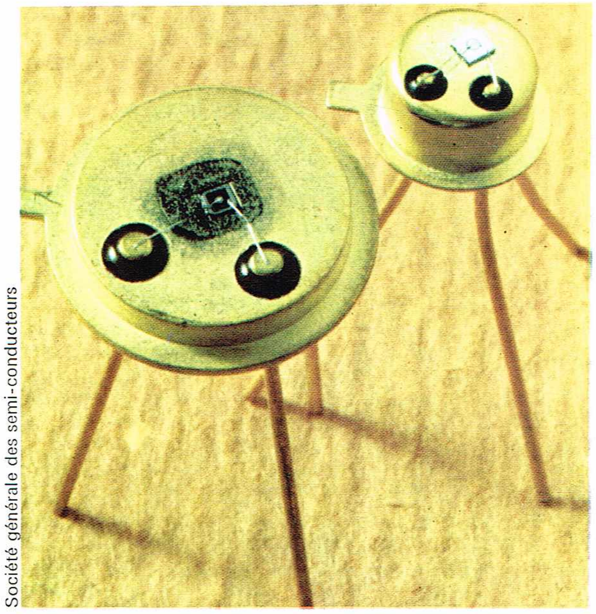

Société générale des semi-conducteurs

▲ *A gauche, figure 27; fabrication des transistors à jonctions :* a) *fabrication d'un transistor* PNP *germanium par alliage;* b) *fabrication d'un transistor planar. A droite, transistors planar au silicium.*

fig. 28

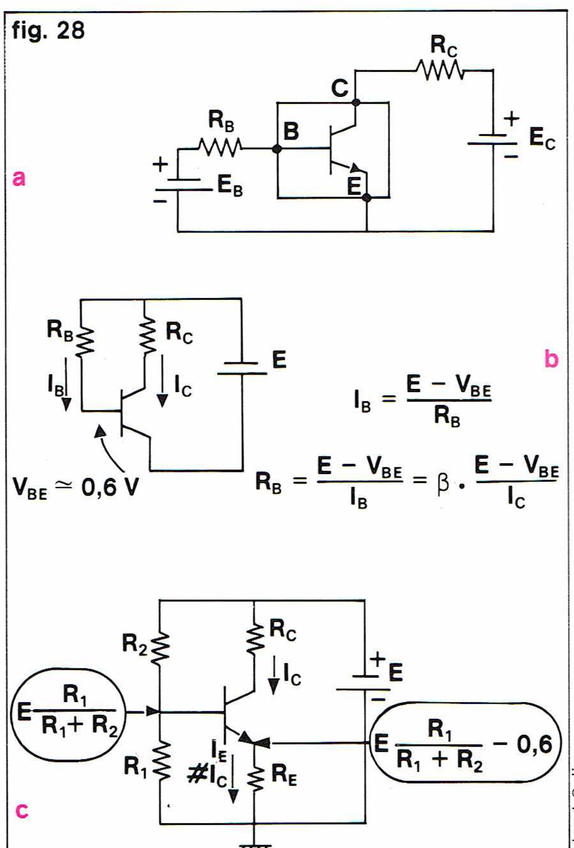

Richard Colin

▶ *Figure 28; polarisation des transistors à jonctions :* a) *application du procédé général de polarisation d'un quadripôle;* b) *montage avec une seule pile;* c) *polarisation par un pont et une résistance d'émetteur.*

composants ainsi fabriqués sont découpés à la scie diamantée et encapsulés individuellement, ce qui est de très loin l'opération la plus coûteuse (*fig.* 27).

● *Polarisation du transistor*

Pour assurer son fonctionnement normal, un transistor doit avoir sa jonction base-émetteur polarisée dans le sens direct, et sa jonction base-collecteur à l'inverse. Cela peut être obtenu grâce à deux piles et deux résistances, conformément à ce qui a été vu plus haut pour les dipôles et quadripôles. La détermination du point de fonctionnement sera effectuée en traçant les droites de charge dans les réseaux d'entrée et de sortie (*fig.* 26). En pratique, on s'aperçoit en regardant le schéma réalisé (*fig.* 28a) que les deux piles, étant placées dans le même sens, peuvent être confondues, alors, E_C étant en général beaucoup plus grand que 0,6 volt, on peut calculer rapidement R_B en remarquant que

$$R_B = \frac{E - V_{BE}}{I_B} \# \frac{E}{I_B}$$

On arrive ainsi au montage de base de la *figure* 28b.

Le choix de la position du point de polarisation d'un transistor n'est pas arbitraire, il est fonction du type d'utilisation qui est envisagé. Revenons à la *figure* 26 et, par un artifice sur lequel nous nous étendrons plus loin, modifions le potentiel de base autour de sa valeur de repos V_0; le point de fonctionnement instantané se déplace alors dans le réseau d'entrée de part et d'autre de N, de N_1 à N_2 par exemple; le courant base évolue alors de I_1 à I_2. Dans la réseau de sortie, le point de fonctionnement se déplace alors alternativement de M_1 à M_2. Le rapport entre les variations des tensions collecteur et base $(V_{C1} — V_{C2})/(I_{B1} — I_{B2})$ est le gain en tension du transistor qui joue le rôle d'amplificateur. Le point de fonctionnement dans le réseau de sortie ne pouvant évoluer au maximum qu'entre le point B correspondant à un courant de base nul et le point A très voisin de l'axe des courants, on voit que l'on ne pourra obtenir une évolution sinusoïdale du potentiel collecteur, d'amplitude maximale, que si le point de repos M est choisi au milieu de AB : c'est la *règle de la demi-alimentation* qui doit être respectée pour de forts signaux sinusoïdaux. La *figure* 26 permet de remarquer que, compte tenu de la relation linéaire reliant I_C et I_B, la tension collecteur ne peut varier sinusoïdalement que si I_B varie de la même façon. Mais alors, la caractéristique d'entrée n'étant pas une droite, la tension base ne doit pas être sinusoïdale. Pour avoir une réponse linéaire, un transistor doit être attaqué par un courant et non par une tension.

Très souvent, on rencontre des circuits de polarisation plus complexes que la simple résistance R_B que nous venons d'utiliser; la raison en est l'action de la température sur le transistor. Un échauffement du semi-conducteur augmente les courants inverses des jonctions, donc le courant de fuite I_{CE0}, qui reste cependant faible dans

le cas du silicium, mais aussi le gain en courant β. On a indiqué sur la *figure* 26 l'allure du réseau à 25 °C et à 100 °C. Avec le circuit de polarisation le plus simple, le courant base de repos est presque indépendant de la température, puisqu'il vaut approximativement E/R_B ; le point de repos M, qui, à 25 °C, se trouvait au milieu de la droite de charge, est à 100 °C fortement décalé vers le haut. Les variations symétriques du potentiel de collecteur ont alors une amplitude maximale possible bien plus faible, et, en pratique, on observe des écrêtages des signaux forts. Pour éviter cela, il faut imposer au potentiel de collecteur de rester au voisinage de sa valeur à 25 °C, c'est-à-dire éviter une influence de la température sur le courant collecteur. On l'obtient (*fig.* 28c) en plaçant une résistance R_E entre émetteur et masse et en alimentant la base par un pont R_1R_2. Si le courant circulant dans ce pont, $\frac{E}{R_1 + R_2}$, est grand devant le courant de base, le potentiel sur la base ne dépend que du rapport des résistances et non de la température. Or la tension aux bornes d'une jonction varie très peu avec la température, environ 2 mV par degré seulement, le potentiel sur l'émetteur est donc presque constant, ce qui maintient bien I_C constant, car $I_C \# I_E = \frac{V_E}{R_E}$. Le calcul de ce circuit est plus complexe que celui de la seule résistance R_B et il a le désavantage de diminuer l'impédance d'entrée du montage à cause de R_1R_2 ; de plus, pour éviter une diminution considérable du gain, une capacité de forte valeur, dite *capacité de découplage*, doit être placée aux bornes de R_E ; nous y reviendrons plus loin. Il faut retenir que, pour des transistors au silicium fonctionnant à la température ambiante normale, la polarisation par R_B seule est la plupart du temps suffisante.

● *Les paramètres basse fréquence pour petits signaux*

Autour d'un point de polarisation, les relations entre les variations de faible amplitude sont ici au nombre de deux comme pour le quadripôle le plus général. On utilise le plus souvent les paramètres hybrides :

$$\begin{cases} v_{BE} = h_{11}i_B + h_{12}v_{CE} \\ i_C = h_{21}i_B + h_{22}v_{CE} \end{cases}$$

— h_{11} est le rapport entre les variations de la tension et du courant d'entrée lorsque la tension de collecteur est maintenue constante. C'est l'*impédance d'entrée* du transistor qui, comme nous l'avons vu plus haut, est inversement proportionnelle au courant base et vaut 1 kΩ pour $I_B = 26\ \mu A$.

— h_{21} est le rapport $\Delta I_C/\Delta I_B$ à V_{CE} constant ; c'est ce que nous avons appelé *gain* du transistor, β.

— $h_{22} = \Delta I_C/\Delta V_{CE}$ à I_B = Cte est la pente des caractéristiques du réseau de sortie tracées à I_B = Cte ; c'est l'*impédance de sortie* du transistor.

— Le terme h_{12} relie les variations de V_{BE} à celles de V_{CE} lorsque le courant base est maintenu constant. Il est de faible valeur, la tension collecteur influant peu sur le fonctionnement de la jonction BE, typiquement 10^{-3} à 10^{-4}. Il a cependant une influence très importante sur les performances du dispositif, c'est un terme de *réaction interne*.

● *Schéma équivalent et schéma équivalent simplifié*

Les systèmes d'équations précédents peuvent être remplacés par des schémas dont ils ne sont que la représentation algébrique. Pour le transistor, plusieurs schémas ont été proposés tels que celui en π (*fig.* 29a), mais le plus commode, tiré directement des équations en *h*, comprend une source de courant et une source de tension commandées (*fig.* 29b). Le terme de réaction h_{12} étant très faible peut être négligé ; on peut montrer que ceci est justifié à chaque fois que la charge est petite devant la résistance interne $1/h_{22}$; ce second élément peut alors lui aussi être omis, et l'on est conduit à un schéma simplifié qui suffit souvent pour obtenir des résultats satisfaisants dans les cas les plus courants et dont l'emploi est très commode (*fig.* 29c).

● *Effets thermiques dans le transistor*

Le transistor auquel est appliquée entre collecteur et émetteur une certaine tension V_{CE} et parcouru par un courant I_C est le siège d'une dissipation d'énergie thermique $P = V_{CE}I_C$. Cet échauffement modifie les caractéristiques du composant, gain en courant et courants de fuite par exemple, mais peut, s'il est trop important, amener la destruction des jonctions. La température maximale à laquelle peut être portée une jonction au silicium est d'environ 180 °C. La puissance électrique nécessaire pour amener le semi-conducteur dans la zone de jonction à cette température dépend de la géométrie du dispositif, mais aussi de la température ambiante. Entre une source chaude portée à une température θ et l'air ambiant à θ_A, la puissance thermique échangée est proportionnelle à l'écart $(\theta - \theta_A)$. La température θ_J d'équilibre d'une jonction peut être calculée en écrivant que la puissance évacuée dans l'air est égale à celle due à l'effet Joule, soit $P = k\,(\theta_J - \theta_A)$ ou $\Delta\theta = \theta_J - \theta_A = k'P$. Cette équation est assez semblable à celle qui exprime la loi d'Ohm $V = RI$, la différence de température $\Delta\theta$ étant assimilable à une tension et la puissance à un courant. Pour cette raison, le coefficient *k'* porte le nom de *résistance thermique*. Il s'exprime en degrés Celsius par watt (°C/W). La résistance thermique est une caractéristique du contact thermique existant entre les deux points considérés, ici la jonction et l'air ambiant ; elle peut être fractionnée en plusieurs termes : la chaleur naissant dans la zone de jonction est d'abord transmise au boîtier du transistor, puis de celui-ci au radiateur sur lequel est placé le composant, et enfin du radiateur dans l'air. Si θ_J, θ_B, θ_R, θ_A sont respectivement les températures de ces différentes régions, la loi de transmission de la chaleur rappelée plus haut permet d'écrire :

$$P = \frac{\theta_J - \theta_B}{R_{JB}} = \frac{\theta_B - \theta_R}{R_{BR}} = \frac{\theta_R - \theta_A}{R_{RA}}$$

où R_{JB} R_{BR} R_{RA} sont les résistances thermiques des interfaces jonction-boîtier, boîtier-radiateur, radiateur-air. De ces trois relations, il découle immédiatement que :

$$(\theta_J - \theta_A) = (\theta_J - \theta_B) + (\theta_B - \theta_R) + (\theta_R - \theta_A) = P\,[R_{JB} + R_{BR} + R_{BA}]$$

ce qui montre que la résistance thermique totale entre jonction et air est la somme des trois résistances partielles. Or elles sont connues : R_{JB} est donnée par le constructeur du transistor ; R_{BR} est en général très faible si l'on a la précaution de mettre une mince couche de graisse thermiquement conductrice entre boîtier et radiateur ; R_{RA} est fonction de la taille du radiateur utilisé et a été mesurée par le fabricant.

Soit par exemple un transistor type 2N 3055 ; son constructeur nous informe que sa résistance thermique boîtier-jonction vaut 1,5 °C/W ; il est placé par l'intermédiaire d'une rondelle de mica sur un radiateur ayant une résistance thermique avec l'air de 2 °C/W. La résistance boîtier-rondelle-radiateur étant de l'ordre de 0,01 °C/W et la température maximale de jonction de 180 °C, la puissance

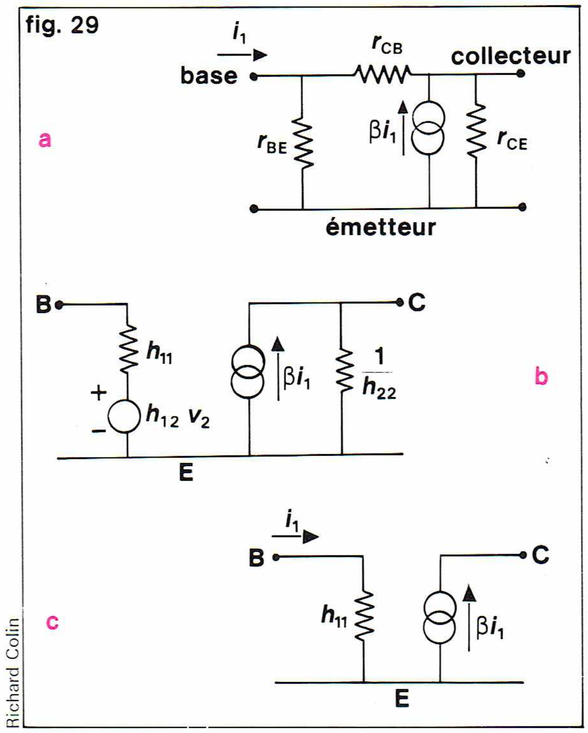

◀ ***Figure 29 ; schémas équivalents du transistor à jonctions :*** a) ***schéma équivalent en π du transistor ;*** b) ***schéma équivalent issu de la définition des paramètres h ;*** c) ***schéma simplifié.***

▶ *Figure 30 : limites de la zone d'utilisation d'un transistor.*

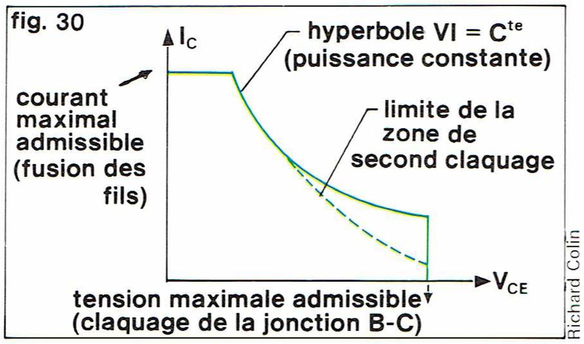

électrique maximale pouvant être dissipée par le transistor lorsque l'air ambiant est à 55 °C est :

$$\frac{(180 - 55)}{1{,}5 + 2 + 0{,}01} = 35 \text{ watts.}$$

Pour les transistors de puissance fonctionnant sous tension élevée, cette notion n'est pas suffisante, car elle suppose l'énergie thermique uniformément répartie dans toute la jonction. Sous forte tension, le produit VI peut prendre des valeurs locales élevées amenant en un temps très court la destruction d'abord localisée, mais qui s'étend rapidement à toute la pastille, du réseau cristallin. C'est le phénomène dit de « second claquage » qui limite souvent la puissance réellement dissipable sous forte tension à une valeur bien plus faible que celle admissible, en dessous de quelques dizaines de volts (*fig.* 30).

Le transistor unijonction (U. J. T.)

C'est un barreau de semi-conducteur le plus souvent de type N possédant une seule jonction latérale, d'où son nom. Les deux extrémités sont appelées *bases* et l'électrode reliée à la zone P latérale *émetteur*. L'ensemble est assimilable au premier abord à une diode D et un diviseur de tension R_{B1} R_{B2}, ces deux résistances étant celles du barreau N entre les bases et la zone de jonction. Si l'émetteur est « en l'air » et la base B_2 portée à une tension positive par rapport à B_1, qui sera notre potentiel de référence, un courant circule normalement dans le barreau, et le potentiel au niveau de la jonction vaut $\frac{V_{BB} \cdot R_{B1}}{R_{B1} + R_{B2}}$, et sera noté ηV_{BB} où η est le rapport intrinsèque de l'U. J. T. Essayons de tracer la caractéristique du dipôle, émetteur — B_1. Tant que la tension de E par rapport à B est inférieure à ηV_{BB} la diode est bloquée puisque sa cathode se trouve à un potentiel supérieur à son anode. Le courant d'entrée est donc nul ou très faible. Lorsque V_1 dépasse ηV_{BB} la diode se débloque, et un courant d'entrée commence à passer, c'est-à-dire que le circuit extérieur injecte des porteurs (trous) vers la zone N. Or la conductibilité d'un semi-conducteur est proportionnelle au nombre de porteurs de charges qu'il contient ; la zone inférieure R_{B1} se trouvant ainsi enrichie en porteurs voit sa résistance décroître. Mais alors le potentiel du barreau à l'aplomb de la zone de jonction diminue par rapport à sa valeur initiale, et la tension dans le sens passant augmente aux bornes de la diode dont le courant augmente, ce qui diminue encore plus la résistance R_{B1}, provoquant un nouvel accroissement du courant. Il y a effet cumulatif, et le courant d'entrée prend rapidement une valeur très importante qu'il est nécessaire de limiter par une résistance dans le circuit extérieur sous peine de destruction de la jonction. L'U. J. T. se trouve ainsi placé dans un état « conducteur ». Si la tension appliquée à l'entrée décroît, le courant décroît tout en restant élevé, jusqu'au moment où pour une valeur de tension très inférieure à ηV_{BB} le courant s'annule brutalement, le dispositif retrouvant son état « non conducteur » initial. La *figure* 31 donne l'aspect de la caractéristique qui présente une zone à résistance négative dans laquelle une augmentation de tension se traduit par une diminution du courant.

Le montage fondamental du transistor unijonction est reproduit sur la *figure* 32. Lorsque l'alimentation U n'est pas connectée, la capacité C est déchargée ; elle se charge lentement dès que l'on ferme l'interrupteur K. Pour une tension faible, le courant d'entrée de l'U. J. T. est négligeable, et la tension sur l'émetteur monte exponentiellement :

$$V_E = U\,(1 - e^{-t/RC}).$$

Lorsque la tension d'amorçage $\eta V_{BB} = \eta U$ est atteinte, le dipôle (émetteur — B_1) devient brutalement conducteur et la capacité se décharge brutalement, le point de fonctionnement du transistor effectuant sur la caractéristique le parcours indiqué. La tension sur l'émetteur baisse très vite, et, quand elle atteint la tension de vallée, l'U. J. T. se désamorce : le courant émetteur redevenant nul, la capacité peut de nouveau se charger, et ainsi de suite. On recueille ainsi sur l'émetteur un signal ayant une forme de dent de scie à montée exponentielle dont la fréquence de répétition ne dépend que de la constante de temps RC. Si la tension d'alimentation U est assez élevée pour que la tension de vallée puisse être négligée, cette période est donnée par l'expression simplifiée : $T = RC \cdot \text{Log}_e\left(\frac{1}{1 - \eta}\right)$.

Au moment de la décharge de C, un courant important traverse la résistance placée dans la base B_1 et l'on peut recueillir sur cette électrode une impulsion positive brève.

Le transistor unijonction est très utilisé comme générateur de dent de scie périodique, générateur d'impulsions, ou minuterie. Avec un condensateur de forte valeur, la période peut dépasser la minute. Pour un type d'U. J. T. donné, la résistance R ne peut pas prendre une valeur quelconque ; si elle est trop faible, l'U. J. T. restera conducteur, et la tension aux bornes de C se maintiendra au voisinage de V_v ; trop élevée, l'U. J. T. ne s'amorcera pas. Les valeurs convenables s'échelonnent habituellement entre 1 kΩ et 1 MΩ.

Le comportement de l'U. J. T. peut être simulé par un montage comportant deux transistors complémentaires et deux résistances (*fig.* 33). Grâce aux deux résistances égales, le potentiel de base de T_1 est voisin de U/2. Si l'entrée A se trouve portée à un potentiel inférieur à cette valeur, le transistor T_1 est bloqué, son courant collecteur est nul, celui de T_2 également, puisqu'il ne reçoit aucun courant base. Si V_A dépasse U/2, T_1 commence à conduire ; son courant injecté dans la base de T_2 est multiplié par le gain de ce second transistor dont le courant collecteur provoque une chute de tension en B, ce qui a pour effet d'accroître la tension base-émetteur de T_1 donc son courant. Il y a effet cumulatif et le courant d'entrée croît brusquement. Le comportement de l'ensemble

▼ *En haut, figure 31 : constitution et caractéristiques de l'U. J. T. En bas, figure 32 :* a) *montage de base de l'U. J. T. ;* b) *forme des signaux.*

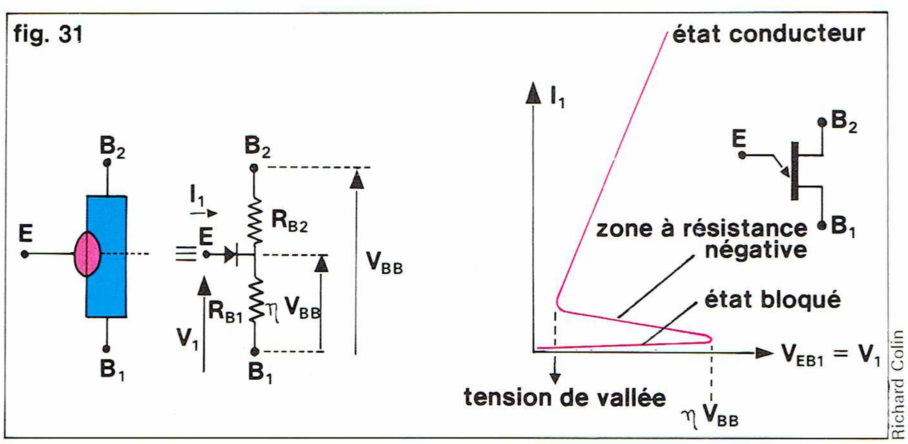

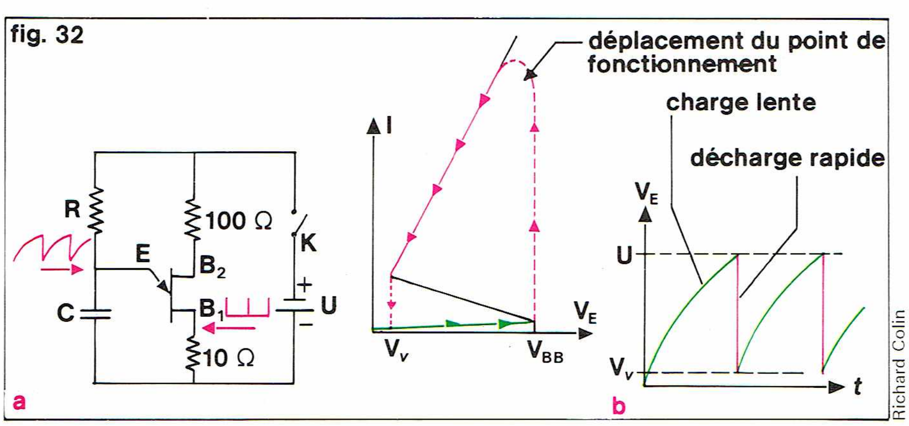

est analogue à celui d'un U. J. T. dont le rapport intrinsèque peut être ajusté en modifiant les résistances alimentant le point B. On a ainsi réalisé un *U. J. T. programmable*. Il existe d'ailleurs un composant portant ce nom, qui est un système à 4 couches P N P N que l'on peut décomposer en deux transistors intimement liés (*fig.* 33).

Le thyristor et le triac

● *Le thyristor*

Le *thyristor* est un composant à quatre couches dont la structure est très voisine de celle de l'U. J. T. programmable précédent mais qui est destiné à fonctionner avec des courants très importants. Il peut être considéré comme formé par la juxtaposition de deux transistors (*fig.* 34). En exprimant l'égalité du courant base de l'un et du courant collecteur de l'autre, et compte tenu des relations définissant chaque transistor :

$$I_{C1} = I_{C10} + \beta_1 I_{B1} = I_{B2}$$
$$I_{C2} = I_{C20} + \beta_2 I_{B2} = I_{B1} - I_g$$

on aboutit à une expression du courant d'anode à partir de laquelle on peut comprendre le fonctionnement du composant :

$$I_A = \frac{(1 + \beta_2) \cdot [I_{C10} + \beta_1 (I_{C20} + I_g)] + I_{C20}}{1 - \beta_1 \cdot \beta_2}$$

On sait en effet que le gain en courant d'un transistor est très faible pour un courant collecteur faible. Si une faible tension est appliquée aux bornes du dispositif, le courant sera naturellement faible, les gains seront inférieurs à 1, et le dénominateur voisin de l'unité ; le courant I_A se réduit alors aux courants de fuite des transistors. Le courant de fuite d'un transistor variant peu avec la tension, le courant total restera faible, même si l'on accroît notablement la tension aux bornes du composant. Cependant, si l'on augmente les courants, soit en élevant par trop la tension, la température ou en injectant un courant extérieur I_g, les gains vont augmenter, et le produit $\beta_1\beta_2$ va se rapprocher de 1 ; on voit sur l'expression de I_A que ce courant devient infini lorsque le dénominateur s'annule. Pratiquement, on constate que la résistance du système entre anode et cathode devient brutalement presque nulle ; par analogie avec les thyratrons à gaz, on dit que le thyristor « s'allume ». Pour revenir à l'état initial de forte résistance, il est nécessaire d'annuler le courant en amenant à zéro ou en inversant la tension d'alimentation ; dans l'état « allumé », la grille n'a aucun pouvoir de commande. La caractéristique du thyristor est, comme le montre la *figure* 35, assez semblable à celle d'un U. J. T.

Le thyristor est utilisé essentiellement dans les circuits « courants forts » où les transistors de puissance sont insuffisants. C'est un composant fortement non linéaire dont l'emploi est toujours délicat. L'impossibilité de l'éteindre sans annuler l'alimentation le rend très difficile à utiliser dans les circuits fonctionnant en courant continu ; par contre, en alternatif, la tension change de sens à chaque alternance, et l'extinction est obtenue très facilement. Un montage de base est représenté sur la *figure* 36. La charge, qui peut être par exemple une ampoule ou une résistance chauffante, est placée en série avec le thyristor. Une tension de déclenchement est prélevée du côté de l'anode par la résistance R et appliquée à la gâchette G. Par suite de la présence de la capacité C, cette tension V_G

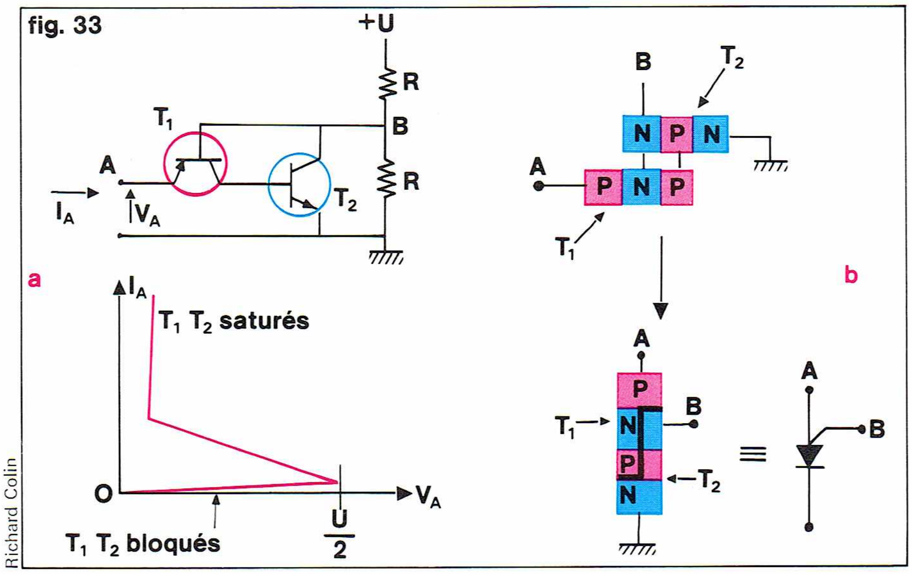

Richard Colin

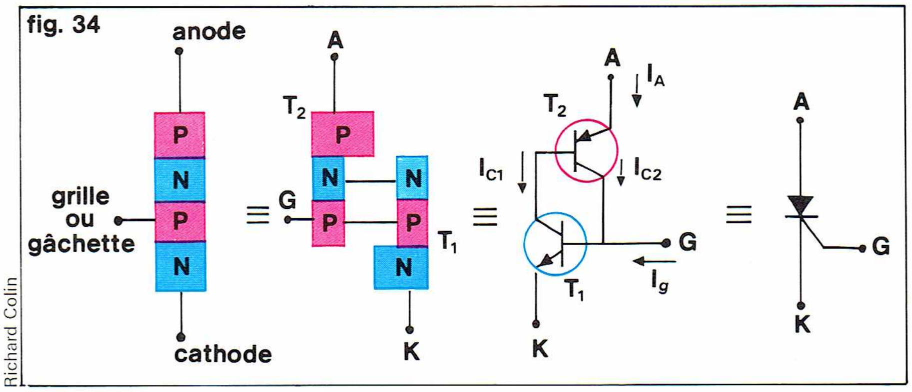

Richard Colin

▲ *En haut, figure 33 : a) simulation d'un U. J. T. avec deux transistors ; b) constitution et représentation de l'U. J. T. programmable. Ci-dessus, figure 34 : structure et représentation du thyristor.*

▼ *A gauche, figure 35 : caractéristique I (V) d'un thyristor. A droite, quelques types de thyristors et de triacs.*

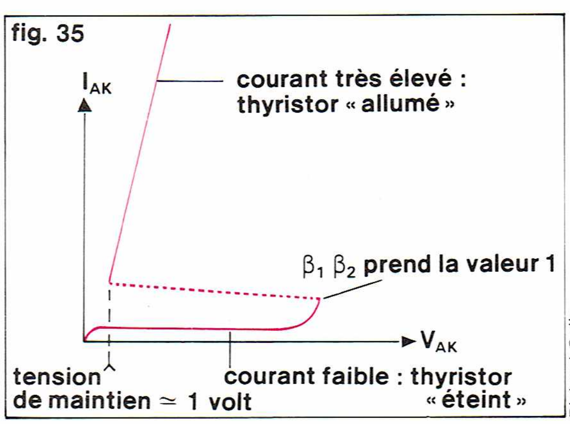

Richard Colin

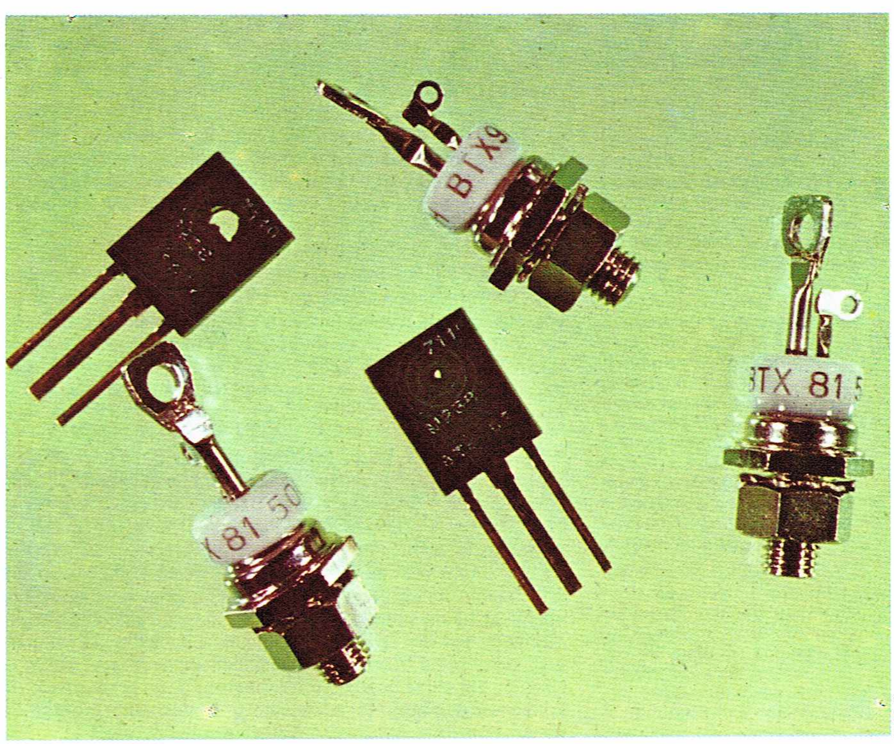

R.T.C.

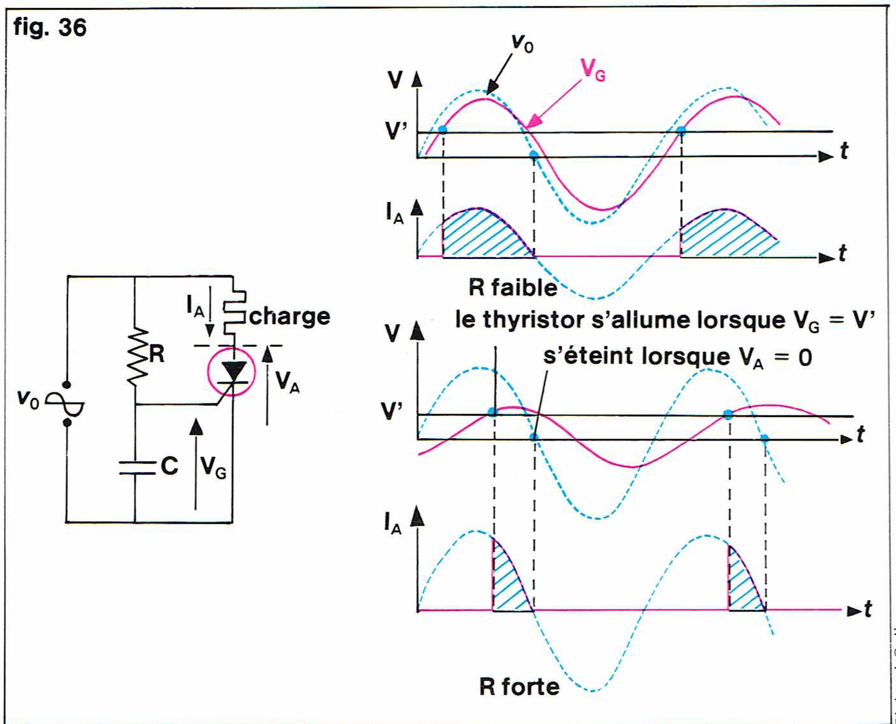

Richard Colin

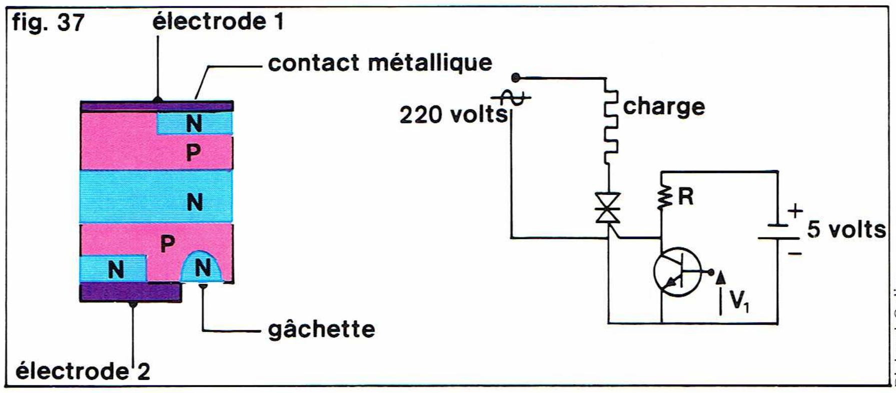

Richard Colin

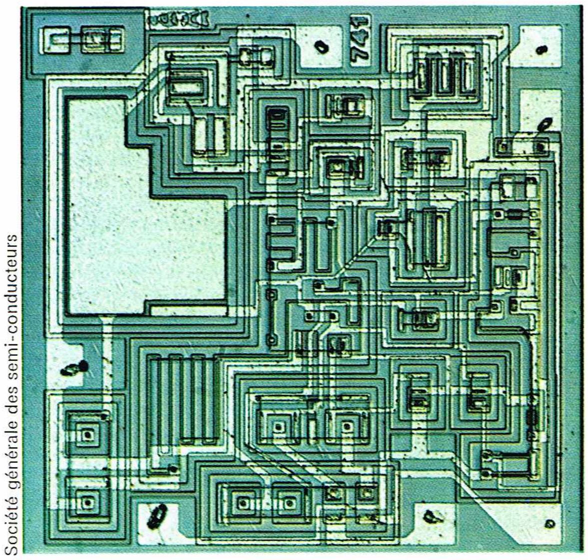

Société générale des semi-conducteurs

▲▶ *En haut, à gauche, figure 36 : montage et utilisation typique d'un thyristor. Ci-dessus, figure 37 : à gauche, constitution d'un triac ; à droite, réalisation d'un interrupteur statique : lorsque* $V_1 = 0$, *le triac, dont la gâchette est alimentée sous 5 volts par* R, *s'allume à chaque alternance du secteur ; si* $V_1 > 0{,}6$ *volt, le transistor se sature, et le triac ne laisse plus passer le courant. En haut, à droite, microphotographie d'un circuit intégré : sur une plaquette de 1,5 × 1,5 mm sont réunis tous les composants constituant un amplificateur opérationnel.*

n'est pas en phase avec le secteur, et elle est d'autant plus retardée par rapport à ce dernier que la résistance est élevée. Le thyristor s'allume lorsque la tension grille atteint une valeur limite V' et s'éteint à la fin de chaque alternance à l'inversion de la tension d'alimentation V_A. On voit sur la *figure* 36 que l'instant d'allumage varie lorsque R varie par suite de la modification simultanée de l'amplitude et de la phase de V_G. La puissance dissipée dans la charge qui est proportionnelle à l'aire hachurée varie ainsi considérablement avec R. Ce schéma est fréquemment utilisé pour contrôler la puissance dissipée dans une résistance chauffante ; il est moins intéressant pour une ampoule, car le courant ne circule que pendant une alternance du secteur, ce qui provoque un fort clignotement. Pour éviter cet inconvénient, on peut utiliser deux thyristors montés tête-bêche, mais leur commande est délicate, et il vaut mieux faire appel à un nouveau composant qui est le triac.

● *Le triac*

Le *triac* est un composant équivalent à deux thyristors montés tête-bêche et réalisé dans un seul cristal de silicium. Grâce à une disposition particulière des couches le constituant, il est possible d'utiliser une seule grille de commande dont le potentiel est référencé par rapport à l'une des extrémités du barreau. Si cette grille est portée à un potentiel suffisant, le triac est conducteur, quel que soit le signe de sa tension d'anode. Ce potentiel de déclenchement est de l'ordre de 2 volts. La *figure* 37 montre une possibilité de réalisation d'un interrupteur statique avec un tel composant. En remplaçant dans le montage de la *figure* 36 le thyristor par un triac, on peut commander de façon continue l'intensité d'une ampoule ; c'est le montage « graduateur » de lumière, très utilisé actuellement, car, contrairement au système comportant un rhéostat en série, il ne dissipe aucune puissance inutile sous forme de chaleur ; ce montage est également utilisé pour faire varier la vitesse de petits moteurs électriques (perceuses).

Les circuits intégrés

Les multiples transistors que l'on fabrique simultanément sur une pastille de silicium, comme nous l'avons vu plus haut, peuvent être connectés entre eux, soit directement par des métallisations positionnées par photogravure, soit par l'intermédiaire de bandes plus ou moins étroites de semi-conducteur constituant des résistances. On réalise ainsi d'un seul coup un circuit qui peut être très complexe : dans l'état actuel de la technologie, on sait réaliser avec un bon rendement de fabrication un circuit comprenant plusieurs milliers de transistors. Les systèmes ainsi réalisés sont appelés *circuits intégrés monolithiques*.

La microphotographie ci-contre représente la surface d'une pastille de silicium de 1,5 × 1,5 mm sur laquelle on a gravé les nombreux transistors et résistances constituant un amplificateur différentiel de grand gain (amplificateur opérationnel). Par rapport aux montages traditionnels, le gain de volume est considérable.

C'est cette réduction de dimensions, et aussi la très faible consommation d'énergie de fonctionnement qui en découle, qui ont permis la fabrication des calculateurs arithmétiques de poche de plus en plus répandus.

Les schémas retenus pour les circuits intégrés sont souvent très différents de ceux auxquels l'électronicien est habitué. Les impératifs technologiques sont en effet différents de ceux rencontrés avec les montages classiques. Une résistance de forte valeur est constituée, par exemple, par une bande très étroite et longue qui occupe sur la plaquette une surface importante ; il est intéressant de la remplacer par un système mettant en œuvre plusieurs transistors beaucoup plus petits. De même, s'il est aisé de fabriquer deux transistors ou deux résistances ayant avec une bonne précision les mêmes caractéristiques, cela en leur imposant seulement les mêmes dimensions, il est difficile de réaliser un composant ayant une valeur fixée à l'avance à mieux que 10 ou 20 % près. Il faut donc faire appel à des circuits peu sensibles aux valeurs absolues des caractéristiques des composants utilisés ; c'est le cas par exemple des amplificateurs différentiels dans lesquels la symétrie des composants est plus importante que leur valeur commune. Il est possible de réaliser des capacités, soit en utilisant un diélectrique (le plus commode est d'utiliser de la silice), soit en faisant appel à une jonction polarisée dans le sens bloqué, mais, au-delà de quelques picofarads, la surface nécessaire devient prohibitive et, pour cette raison, il n'y a jamais de capacités au-delà de 10 à 20 pF dans un circuit intégré. On doit tenir compte de cet impératif dans la conception du schéma.

Lorsque des performances élevées sont nécessaires, on peut utiliser des *circuits hybrides* constitués par la réunion dans un même boîtier de plusieurs circuits monolithiques, et éventuellement de quelques composants discrets. Ces

circuits hybrides sont plus chers que les précédents, mais leur fabrication est plus souple. Si l'on désire faire construire un circuit spécial, la technique hybride devient financièrement intéressante à partir de quelques centaines de pièces, alors que le circuit monolithique ne sera beaucoup moins coûteux que pour 100 000 pièces ou plus. La réalisation des circuits monolithiques est réservée à des montages d'emploi très général fabriqués à des millions d'exemplaires; dans ces conditions, leur coût est très bas; un amplificateur opérationnel comprenant quelques dizaines de transistors et de résistances coûte le même prix qu'un transistor unique en boîtier métallique.

Il est possible de réaliser des circuits monolithiques en remplaçant les transistors bipolaires par des M. O. S. à enrichissement. Ils sont plus faciles à fabriquer, car, comme nous l'avons vu, ils nécessitent moins d'opérations de photogravure et de diffusion, sont plus petits, et peuvent donc être plus nombreux sur la plaquette. Ce sont des circuits intégrés M. O. S. de ce type qui équipent les calculatrices de poche; certains contiennent près de 20 000 composants.

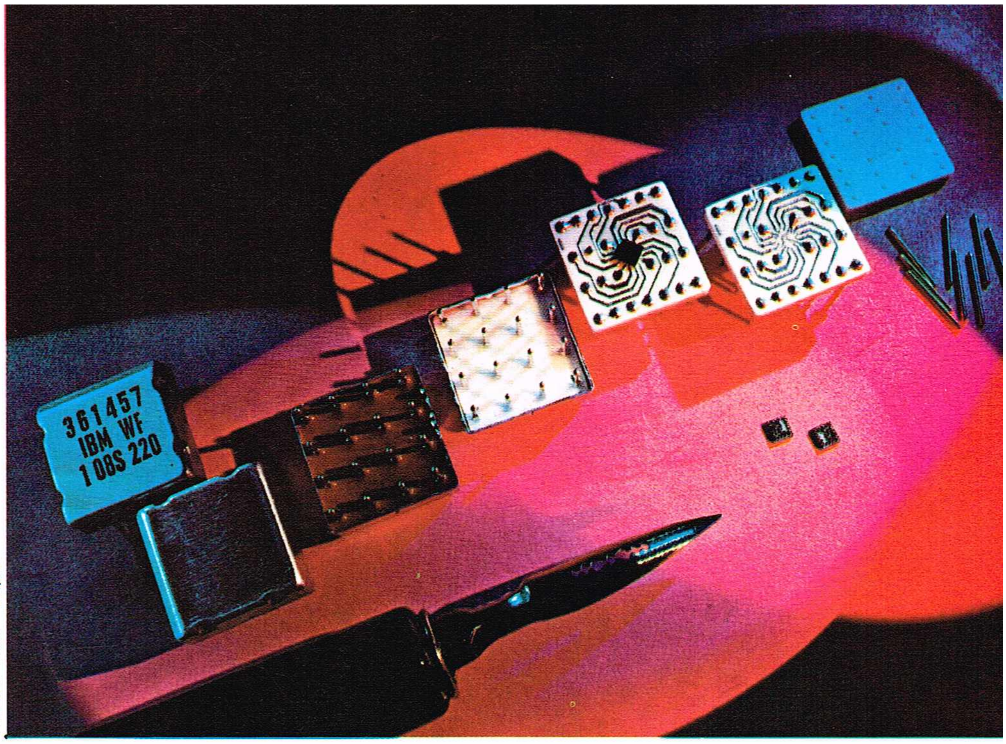

Van der Veen - Rapho

▲ *Circuits intégrés et modules IBM; noter la taille de ces composants en comparaison du porte-plume au premier plan.*

Les circuits électroniques

Les amplificateurs

Un amplificateur est un circuit électrique le plus souvent du type quadripôle délivrant en sortie un signal qui est l'image amplifiée du signal appliqué à l'entrée. Comme tout quadripôle, il est assimilable, vu de l'entrée, à un dipôle dont l'impédance différentielle est l'impédance d'entrée de l'amplificateur. Pour un bon amplificateur, cette impédance est très peu dépendante de la charge dans laquelle débite le montage, car le terme de réaction, par exemple le paramètre h_{12} identique à celui rencontré avec les transistors, doit être très petit. Vu de la sortie, l'amplificateur se comporte comme un générateur ayant une résistance interne, qui est par définition sa résistance de sortie. Il existe de nombreux types d'amplificateurs; nous allons essayer d'en faire le classement. Lorsque le système est au repos, la tension continue à l'entrée est par exemple V_{10} et celle de sortie V_{20}. Si l'on modifie la tension d'entrée très lentement, V_{10} devenant $V_{10} + \Delta V_1$, la tension de sortie peut être modifiée, V_{20} devenant $V_{20} + \Delta V_2$. Le rapport des variations $\Delta V_2/\Delta V_1$ est le *gain de l'amplificateur*, qui est dans ce cas un amplificateur de tensions continues. Le montage est particulièrement intéressant si à une tension $V_{10} = 0$ correspond une tension de repos de sortie également nulle; les variations précédentes sont alors assimilables aux tensions elles-mêmes; c'est le cas de l'amplificateur opérationnel que nous décrirons plus loin. Mais, très souvent, une variation lente du potentiel d'entrée n'agit pas en sortie; seules les modifications rapides de V_1 sont amplifiées; l'amplificateur est alors qualifié « d'alternatif ». Tout amplificateur « continu » peut être transformé en amplificateur alternatif, en plaçant en série avec l'entrée une capacité C. L'impédance de ce composant est infinie pour la fréquence zéro, c'est-à-dire que les tensions continues sur ses deux armatures sont indépendantes; seules les variations assez rapides peuvent être transmises. De façon plus précise (*fig.* 38), la tension alternative V_1 présente à l'entrée est :

$$V_1 = U_0 \frac{jR_eC\omega}{1 + jR_eC\omega}$$

elle est nulle pour $\omega = 0$ (continu) mais devient très voisine de U_0 pour ω supérieur à $\frac{1}{R_eC}$. Pour les fréquences assez élevées, tout se passe comme si C n'existait pas.

Au moins pour des signaux de faible amplitude, un amplificateur est un système linéaire dont le gain est, comme nous l'avons vu au début de cet exposé, un nombre complexe fonction de la fréquence G ($j\omega$). La courbe donnant le module de ce gain en fonction de ω est une caractéristique fondamentale pour un amplificateur. Pour des raisons d'échelle, on ne porte jamais G en fonction de ω mais le logarithme de G en fonction du logarithme de ω. Il est aussi possible de représenter des gains variant dans un rapport 10^6 sur une étendue de fréquence de 1 à 10^6 Hz ou plus. Le gain s'exprime souvent en décibels; par définition, si v_2 et v_1 sont les signaux de sortie et d'entrée, le *gain en décibels* s'écrit :

$$G_{dB} = 20 \log \frac{v_2}{v_1}$$

Certains montages amplificateurs comportent deux entrées au lieu d'une seule, la tension de sortie n'est alors fonction que de la différence entre les deux tensions d'entrée et non de leurs valeurs individuelles; ce sont les **amplificateurs différentiels.**

Un autre type de classification repose sur la valeur de l'impédance de sortie. Lorsqu'une charge R_L est placée en sortie, la tension apparaissant à ses bornes est

$$\frac{GV_1R_L}{R_S + R_L}$$

et le courant de sortie $I_S = \frac{GV_1}{R_S + R_L}$. Si R_S est très faible devant les valeurs possibles de R_L la tension de sortie est indépendante de la charge; c'est alors une grandeur caractéristique du montage; on dit que l'on a un **amplificateur de tension.** Si, au contraire, R_S est très élevée, c'est le courant qui, ne dépendant plus de R_L, est la grandeur importante; c'est le cas des **amplificateurs de courant.** En toute rigueur, la seule caractéristique ayant un sens est le gain en puissance, rapport entre la puissance injectée à l'entrée $P_e = V_1^2/R_e$ et celle recueillie en sortie, $P_S = V_S^2/R_L$. Ce gain dépend naturellement de la charge, mais compte tenu de l'expression de V_S on peut l'écrire :

$$\frac{P_S}{P_e} = \frac{G^2R_LR_e}{(R_S + R_L)^2}$$

il est nul pour $R_L = 0$, car la tension de sortie est alors nulle, mais aussi pour R_L infini, car c'est alors le courant de sortie qui disparaît. Il passe entre ces deux valeurs extrêmes par un maximum pour $R_S = R_L$. C'est pour cette valeur particulière de la charge que la puissance fournie par l'amplificateur pour un signal d'entrée donné est maximale. On dit qu'il y a *adaptation d'impédance* entre l'amplificateur et la charge. Le gain en puissance maximale obtenu est appelé *gain en puissance utilisable;* c'est une caractéristique du circuit.

$$G_{PU} = \frac{1}{4} G_V^2 \cdot \frac{R_e}{R_S}$$

Si les impédances d'entrée et de sortie sont égales, c'est le quart du carré du gain en tension.

fig. 38

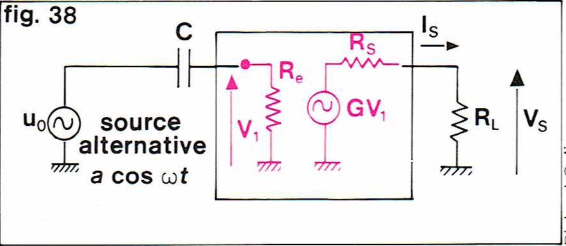

Richard Colin

◄ *Figure 38 : quadripôle représentant l'amplificateur d'impédance d'entrée R_e, d'impédance de sortie R_S et de gain de tension G (autour d'un point de polarisation, les tensions apparaissant ici sont des variations).*

▶ *Figure 39 : a) schéma réel et tensions en différents points, en l'absence de ρ_g et R_L ; b) schéma équivalent simplifié pour des variations rapides.*

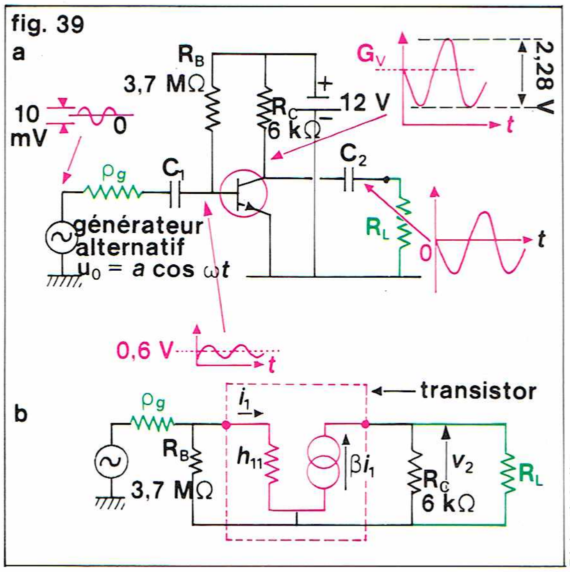

Richard Colin

Réalisation d'un amplificateur avec un transistor à jonctions

Les notions précédentes vont être précisées en décrivant un amplificateur très simple utilisant un seul transistor. Revenons au montage de la *figure* 28b dans lequel nous utilisons un transistor type 2 N 2925 ayant, par exemple, les caractéristiques suivantes : $\beta = 325$, $h_{22}^{-1} = 37\,500\ \Omega$, $h_{12} = 3 \cdot 10^{-4}$ pour un point de polarisation, $I_C = 1$ mA et $V_{CE} = 6$ volts. Pour se placer en un tel point, on peut utiliser, par exemple, une pile de 12 volts, une résistance $R_C = 6$ kΩ (alors $V_{CE} = E - R_C I_C = 6$ volts) ; la résistance de base doit être :

$$R_B = 325 \times \frac{(12 - 0,6)}{10^{-3}} = 3,7\ \text{M}\Omega$$

Pour évaluer le gain en tension du montage, il nous faut faire varier la tension de base autour de sa valeur de repos voisine de 0,6 volt. Pratiquement, la méthode la plus simple est d'appliquer sur la base une faible tension alternative à travers une capacité C_1 qui, comme nous l'avons vu plus haut, ne modifiera pas le potentiel moyen de base. Si l'on désire séparer de même les variations de la tension collecteur de sa valeur continue moyenne, on utilisera en sortie un autre condensateur C_2. On aboutit alors au montage représenté sur la *figure* 39a. Une évaluation graphique du gain est possible en utilisant les réseaux de caractéristiques, mais le calcul direct est plus précis. Il suffit de remplacer le schéma réel par un schéma équivalent obtenu en ne conservant que les éléments variables et en remplaçant le transistor par son schéma équivalent (*fig.* 39b). Le générateur U_0 débite dans les deux résistances R_B et h_{11} placées en parallèle à l'entrée, mais R_B est beaucoup plus grande que h_{11}. On sait en effet que la pente d'un transistor $\frac{\beta}{h_{11}}$ vaut 38 mA/V pour $I_C = 1$ mA ; β étant connu, on en déduit $h_{11} = 325/38 \cdot 10^{-3} = 8\,552\ \Omega$, ce qui est négligeable devant 3,7 MΩ. Le courant d'entrée est donc très sensiblement (pour une fréquence suffisamment élevée pour laquelle la capacité C_1 a une impédance négligeable devant h_{11}) $i_1 = U_0/h_{11}$. La tension de sortie est

$$V_2 = - R_C \beta i_1$$

d'où le gain cherché $\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_2}{U_0} = -\frac{\beta R_C}{h_{11}}$, soit numériquement — 228.

Si l'on construit cet amplificateur, le gain mesuré sera plus faible ; en effet, l'on a utilisé un schéma simplifié qui n'est en toute rigueur valable que si R_C est très faible devant l'impédance interne du transistor ; or 6 kΩ n'est que le sixième du $h_{22}^{-1} = 37\,500\ \Omega$. Pour calculer la valeur exacte du gain, il faut utiliser l'expression que nous avons citée à propos des quadripôles :

$$G_V = -\frac{\frac{h_{21}}{h_{11}}}{h_{22} + \frac{1}{R_C} - \frac{h_{12}h_{21}}{h_{11}}}$$

Elle donne ici — 208. On voit que l'erreur commise n'est que d'environ 10 % pour une simplification considérable du calcul.

Il convient maintenant de remarquer que ce gain a été obtenu avec la sortie « en l'air ». Si une résistance de charge extérieure est connectée en sortie, la tension disponible baisse (résistance dessinée en vert sur la *figure* 39). Le courant βi_1 circule maintenant dans $R_C // R_L$ et la tension de sortie devient $-\frac{R_C R_L}{R_C + R_L} \cdot \beta i_1$

d'où le gain : $G_V = -\frac{R_L}{R_C + R_L} \cdot \frac{\beta R_C}{h_{11}}$.

Il est divisé par deux si $R_L = R_C$. Ceci est évident si l'on applique le théorème de Thévenin à la sortie de C_2 : le montage est équivalent à un générateur de force électromotrice $-\beta R_C/h_{11}$ et d'impédance R_C. Là encore, en toute rigueur, ce n'est pas vrai ; la vraie valeur de l'impédance de sortie est obtenue à partir de l'expression exacte :

$$Z_S = R_C // \frac{1}{h_{22} - \frac{h_{12}h_{21}}{h_{11} + \rho_g}}$$

soit ici numériquement 5 496 Ω pour une source d'attaque d'impédance interne nulle, à peine 10 % de moins que la valeur approchée 6 kΩ.

Enfin, pour terminer, l'impédance d'entrée peut jouer un rôle important : avec le schéma simplifié $V_1/i_1 = h_{11}$, soit 8 552 Ω si le générateur d'attaque a une impédance interne ρ_g de 10 kΩ, la tension réelle sur la base est bien inférieure à U_0 :

$$V_1 = U_0 \frac{h_{11}}{h_{11} + \rho_g} = 0,46\ U_0$$

et le gain apparent du montage V_2/U_0 n'est plus que $228 \times 0,46 = 105$. Le calcul rigoureux donne ici 93.

Le montage que nous venons d'analyser est le plus simple que l'on puisse réaliser avec un transistor unique ; c'est un **amplificateur « alternatif »** par suite de la présence des capacités d'entrée et de sortie. L'émetteur du transistor est un point commun aux circuits d'entrée et de sortie ; on qualifie pour cela le montage d'*émetteur commun*.

Le schéma équivalent permet d'étudier aisément des systèmes plus compliqués. Nous avons vu par exemple que, pour stabiliser le point de repos vis-à-vis des variations de la température, on utilisait un circuit de polarisation comprenant un pont de base R_1R_2 et une résistance d'émetteur R_E. En mettant en place les capacités d'entrée et de sortie, on réalise ainsi un amplificateur alternatif dont les performances sont très différentes du précédent. A titre d'exercice, déterminons d'abord son point de polarisation : la base est reliée à la tension d'alimentation par un pont R_1R_2 ; cet ensemble, en vertu

▼ *Comparaison des dimensions d'un amplificateur audio de 1W, réalisé avec des transistors (main gauche), et le même contenu dans un circuit intégré (main droite).*

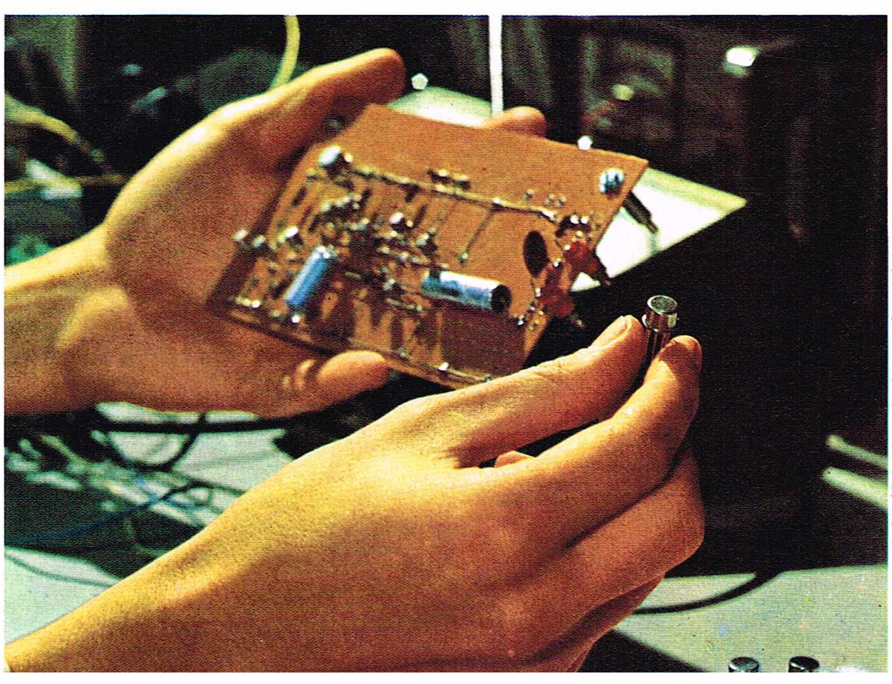

Société générale des semi-conducteurs

du théorème de Thévenin, est équivalent à une source de force électromotrice $ER_1 (R_1 + R_2) = 2$ volts et de résistance interne $R_1 // R_2 = 16{,}66$ kΩ. Tout se passe donc comme si la base était reliée directement par une résistance de 16,66 kΩ à une pile de 2 volts (*fig.* 40 b). En prenant 0,6 volt comme tension V_{BE} on peut écrire la loi d'Ohm dans le circuit base-émetteur :

$$2_V = 16{,}66\ \text{k}\Omega \times I_B + 0{,}6 + R_E\ (\beta + 1)\ I_B$$

équation d'où l'on tire $I_B = 4{,}08\ \mu A$ (le transistor étant le même que plus haut, $\beta = 325$). On en déduit immédiatement $I_C = \beta I_B = 1{,}33$ mA, d'où la tension entre collecteur et masse

$$V_{CM} = E - R_C I_C = 12 - 4 \cdot 10^3 \times 1{,}33 \cdot 10^{-3} = 6{,}68 \text{ volts,}$$

la tension émetteur masse $V_{EM} = R_E I_E = 1{,}33$ volt et, par différence, la tension collecteur-émetteur 5,35 volts. Lorsqu'une valeur approchée seulement suffit, il faut savoir appliquer une méthode simplifiée, si l'on néglige le courant base devant le courant principal du pont R_1R_2 le potentiel sur la base est : $ER_1 (R_1 + R_2) = 2$ volts ; il est alors sur l'émetteur $(2 - 0{,}6) = 1{,}4$ volt, d'où un courant émetteur de 1,4 mA (1,33 valeur exacte).

Une approximation permet aussi d'apprécier le gain du montage, si l'on admet que le V_{BE} est constant, une variation ΔV_B du potentiel sur la base se retrouve sans modification sur l'émetteur, dont le courant varie donc de :

$$I_E = \frac{\Delta V_E}{R_E} = \frac{\Delta V_B}{R_E}$$

Les courants émetteur et collecteur étant presque égaux (au I_B près), la tension sur le collecteur

$$V_{CM} = E - R_C I_C$$

varie de $- R_C \Delta I_C = - R_C \dfrac{\Delta V_B}{R_E}$, d'où le gain en tension $\dfrac{\Delta V_C}{\Delta V_B} = - \dfrac{R_C}{R_E}$, rapport entre les deux résistances. Le calcul plus précis peut être fait en utilisant un schéma équivalent (*fig.* 40c). Entre base et masse, on écrit la loi d'Ohm :

$$V_1 = [h_{11} + (\beta + 1)\ R_E]\ i_1$$

d'où l'on tire déjà l'impédance d'entrée du transistor :

$$Z_{eT} = h_{11} + (\beta + 1)\ R_E = \frac{V_1}{i_1}$$

et la valeur de i_1 qui, reportée dans l'expression de V_2,

$$V_2 = - \beta i_1 R_C$$

donne $$V_2 = - \frac{\beta R_C}{h_{11} + (\beta + 1)\ R_E} V_1$$

d'où le gain : $G_V = \dfrac{- \beta R_C}{h_{11} + (\beta + 1)\ R_E}$ qui, lorsque βR_E est très grand devant h_{11}, prend bien la valeur approchée $- R_C/R_E$. Pour le courant de 1,33 mA, le h_{11} du transistor est 1,33 fois plus faible que pour 1 mA, soit :

$$8\,552/1{,}33 = 6\,414\ \Omega$$

le gain du montage est donc — 3,91 et non — 4 comme le suggère le raisonnement simple précédent. L'erreur est minime, elle l'est d'autant plus que le rapport R_C/R_E est faible devant le β du transistor. En toute rigueur, ce n'est pas encore exact, car nous avons fait appel à un circuit équivalent simplifié ; en tenant compte de tous les paramètres, le résultat est dans le cas présent très voisin, mais le calcul beaucoup plus complexe.

Il est intéressant de revenir sur l'impédance d'entrée du montage ; celle du transistor seul V_1/i_1 vaut

$$[h_{11} + (\beta + 1)\ R_E]$$

soit 332 kΩ ; $R_E = 325$ kΩ en est une valeur approchée suffisante, malheureusement il faut pour un observateur extérieur tenir compte du courant consommé par le pont R_1R_2 et l'impédance d'entrée du montage total est $R_1 // R_2 // Z_{eT} = 15\,900\ \Omega$ seulement.

● *Découplage de l'émetteur*

La résistance R_E augmente la stabilité thermique, mais par contre, comme nous venons de le voir, elle abaisse considérablement le gain en tension. Pour éviter cet effet parfois gênant, il faudrait que l'élément placé dans l'émetteur se comportât comme une résistance R_E pour le courant continu de polarisation, mais comme un court-circuit pour les variations rapides. Ceci est réalisé en plaçant en parallèle sur R_E une capacité C_E dite de « découplage » (en vert sur la *fig.* 40a). L'impédance du circuit d'émetteur est alors :

$$R_E // \frac{1}{jC_E\omega} = \frac{R_E}{1 + jR_E C_E \omega}$$

Elle se réduit à R_E pour $\omega = 0$ et tend vers zéro si ω devient grande. Aux fréquences élevées, on retrouve donc

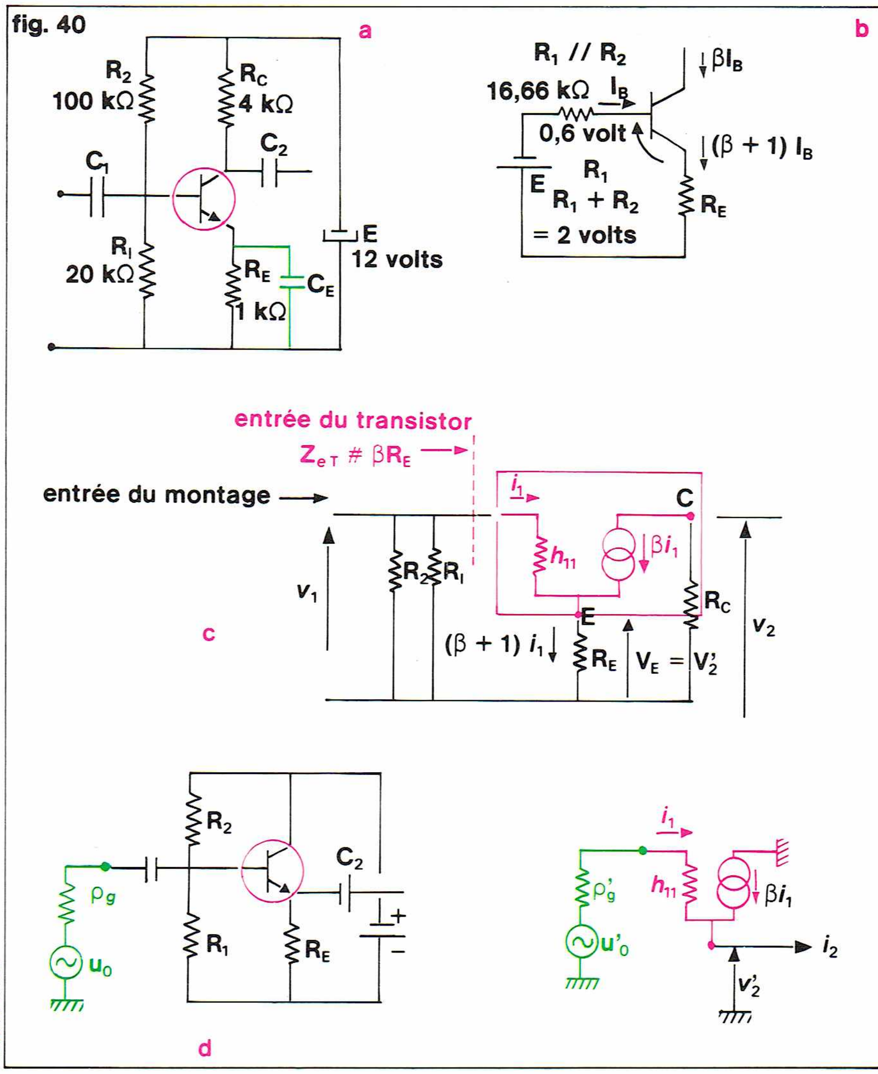

Richard Colin

▲ ***Figure 40 : montages à un transistor :***
a) ***circuit avec résistance d'émetteur ;***
b) ***calcul du point de polarisation ;***
c) ***schéma équivalent pour les variations ;***
d) ***montage collecteur-commun.***

▼ *Un* amplificateur.

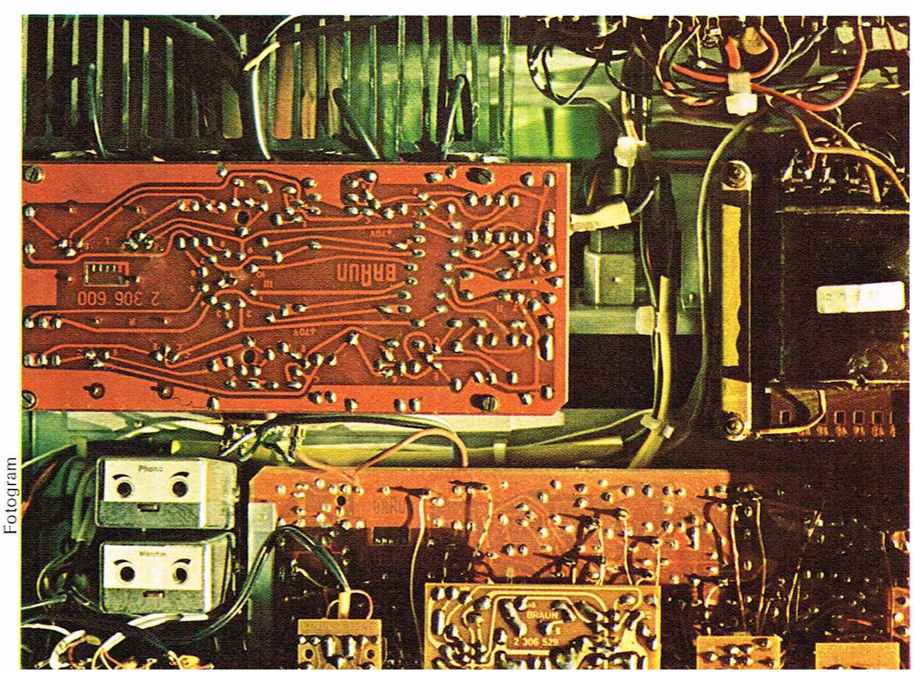

Fotogram

le gain du montage émetteur commun sans résistance d'émetteur. Le calcul rigoureux montre que le découplage est parfaitement efficace à une fréquence ω_0 si l'impédance du condensateur $1/C\omega_0$ est faible devant h_{11}/β et non devant R_E ; cela oblige à utiliser des condensateurs électrochimiques de forte valeur.

- *Le montage collecteur commun*

En présence d'une résistance d'émetteur non découplée, nous venons de voir qu'il existait une variation de potentiel d'émetteur. Cette variation peut être prise comme signal de sortie V_2'. En reprenant les équations écrites plus haut

$$i_1 = \frac{V_1}{[h_{11} + (\beta + 1) R_E]}$$

et

$$V_2' = + R_E i_E = R_E (\beta + 1) i_1 = \frac{R_E (\beta + 1) V_1}{[h_{11} + (\beta + 1) R_E]}$$

Le gain en tension du nouveau montage est :

$$\frac{V_2'}{V_1} = \frac{R_E (\beta + 1)}{h_{11} + R_E (\beta + 1)}$$

Il est très voisin de l'unité. On peut remarquer qu'il ne dépend pas de la résistance R_C de collecteur qui peut être supprimée. Le montage est alors celui représenté sur la *figure* 40d. La tension d'entrée est appliquée entre base et masse, et celle de sortie prélevée entre émetteur et masse, mais le collecteur, étant relié directement au pôle + de la pile, se trouve à un potentiel fixe, c'est-à-dire nul dans le schéma équivalent qui ne prend en compte que les variations ; on peut donc tout aussi bien référencer les tensions d'entrée et sortie par rapport au collecteur, d'où le nom de *collecteur commun* donné au montage.

Le gain voisin de l'unité ainsi obtenu n'est certes pas la propriété qui donne au montage son grand intérêt, mais essentiellement ses qualités d'adaptateur d'impédance. Les calculs effectués plus haut montrent déjà que son impédance d'entrée est élevée, de l'ordre de βR_E si on laisse de côté l'influence du circuit de polarisation R_1R_2. Il est très intéressant de calculer l'impédance de sortie sur l'émetteur, la résistance R_E étant considérée comme la charge dans laquelle débite le transistor. Si ρ_g est l'impédance interne de la source qui alimente la base (dans laquelle on peut compter la résistance interne réelle du générateur d'attaque et le pont de résistances R_1R_2)

avec $$[\rho'_g = \rho_g \,//\, R_1 \,//\, R_2] \quad (fig.\ 40d)$$

et i_2 le courant de sortie qui est maintenant le courant d'émetteur, on peut écrire :

$$U'_0 = (\rho'_g + h_{11})\, i_1 + V'_2$$

avec $i_2 = (\beta + 1)\, i_1$,

donc : $$U'_0 = \frac{(\rho'_g + h_{11})\, i_2}{\beta + 1} + V'_2$$

relation de la forme $RI + V = E$ montrant que le transistor vu de son émetteur se comporte comme un générateur de

résistance interne $$R_S = \frac{\rho'_g + h_{11}}{\beta + 1}$$

expression qui pour ρ'_g grand devant h_{11} est de la forme ρ'_g/β. En résumé, le collecteur commun a un gain très proche de + 1, une impédance d'entrée βR_E et une impédance de sortie ρ_g/β. Il permet de transférer aux bornes d'une charge faible la tension fournie par une source de haute impédance interne ; c'est la fonction d'adaptateur d'impédance annoncée plus haut. Le collecteur commun est le plus simple des amplificateurs continus de gain + 1, la tension de sortie prise directement sur l'émetteur étant à 0,6 volt près égale à celle d'entrée.

Les amplificateurs alternatifs à plusieurs étages

Lorsqu'un gain très important est nécessaire, il est possible de mettre en série plusieurs étages identiques à ceux que l'on a décrits plus haut. Des capacités isolent les tensions de polarisation des étages successifs, et il faut tenir compte du fait que l'impédance d'entrée d'un étage vient se mettre en parallèle sur la charge de l'étage précédent. Il faut donc toujours effectuer le calcul en commençant par la sortie.

La *figure* 41 est un exemple de ce principe. On reconnaît en T_3 un étage collecteur commun qui se contente de recopier la tension collecteur de T_2. L'impédance de sortie

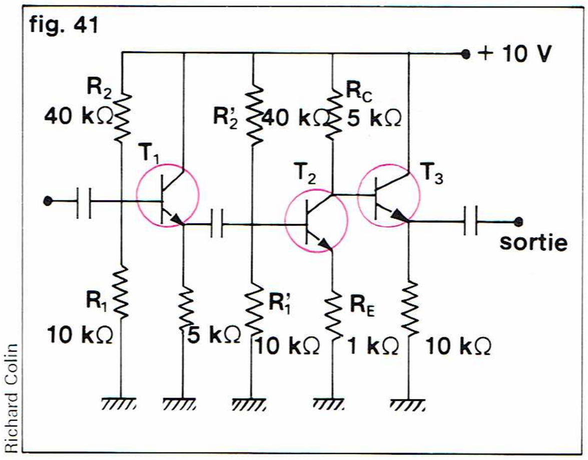

Richard Colin

▶ *Figure 41 :* ***exemple d'amplificateur alternatif à plusieurs étages.***

du système complet peut déjà être calculée ; elle est constituée par 10 kΩ mis en parallèle avec la résistance de la source attaquant T_3 et divisée par le β de ce dernier transistor. Or un transistor se comporte, vu sur son collecteur, comme un générateur de résistance interne égale à sa résistance de charge R_C ; l'impédance de sortie cherchée est donc :

$$10\ k\Omega \,//\, \frac{5\ k\Omega}{\beta} \# 5\ k\Omega/\beta$$

soit avec un β de 325, moins de 20 Ω. L'étage constitué par T_2 a comme résistance de charge 5 kΩ, en parallèle sur l'impédance d'entrée de T_3 qui vaut 10 kΩ × 325 ; la résultante est très proche de 5 kΩ. D'après un paragraphe précédent, ce deuxième étage a donc un gain de — R_C/R_E = — 5. Son impédance d'entrée est environ (1 kΩ × 326) // R_1' // R_2', soit 7,8 kΩ. Tout se passe donc comme si T_1 avait comme charge d'émetteur

$$5\ k\Omega \,//\, 7{,}8\ k\Omega = 3{,}05\ k\Omega$$

C'est encore un étage collecteur commun de gain unité dont l'impédance d'entrée sera (3,05 kΩ × 325) // R_1 // R_2 soit 7,8 kΩ environ. L'amplificateur complet a donc une impédance d'entrée de l'ordre de 8 kΩ, un gain de — 5 et une impédance de sortie inférieure à 20 Ω. En utilisant pour chaque transistor un schéma équivalent plus ou moins exact, on peut obtenir un résultat plus précis, mais il est très important de savoir faire une évaluation rapide. Dans cet exemple, la liaison entre les différents étages a été effectuée soit directement comme de T_2 à T_3, soit par une capacité. On peut également utiliser des transformateurs, mais ce mode de couplage est réservé de plus en plus aux amplificateurs haute fréquence où il est indispensable.

Les amplificateurs de tensions continues

Lorsque les signaux à traiter sont continus ou de fréquence très basse, les capacités de liaison doivent être bannies entre les étages, mais alors de graves difficultés surgissent. D'abord, la liaison directe entre la sortie d'un étage et l'entrée du suivant n'est possible que dans le cas où la tension continue de sortie du premier peut être prise comme tension de polarisation du second. Ce n'est pas souvent le cas, sauf pour la liaison entre un étage quelconque et un collecteur commun comme nous venons de le voir dans l'exemple précédent (T_2T_3). Cette première difficulté peut être levée assez facilement par exemple avec une diode Zener comme sur la *figure* 42. Grâce à une double alimentation + 15, — 5 volts, la base du premier transistor constituant l'entrée de l'amplificateur a pu être mise au potentiel zéro (masse). Son émetteur se trouve alors à — 0,6 volt. En calculant le courant dans R_{E1} on en déduit le potentiel de collecteur 6,2 volts. Grâce à la diode Zener Z 8, la base de T_2 se trouve 8 volts plus bas, soit — 1,8 volt, et l'émetteur de T_2 à — 2,4 volts. Dans ces conditions, la tension de repos en sortie est nulle. Si le potentiel continu d'entrée est modifié, il entraîne tous les autres, le gain de l'ensemble étant voisin de

$$2\ (\text{premier étage}) \times \frac{1\,000}{170}\ (\text{deuxième étage}) = 12$$

Ce calcul n'est qu'approché, nous avons en particulier négligé le courant circulant dans la Zener devant le cou-

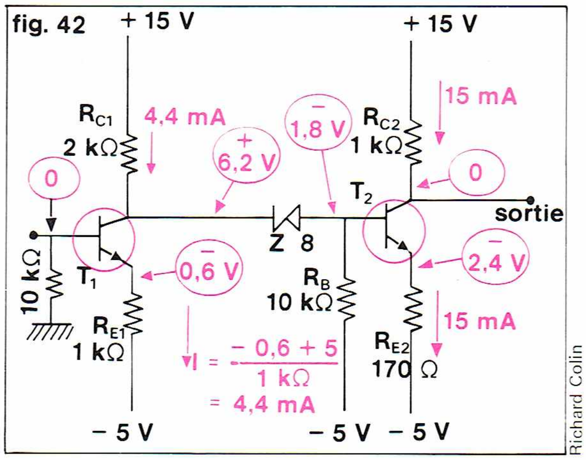

◀ ***Figure 42 :** exemple d'amplificateur continu.*

rant collecteur de T_1 mais il montre bien le principe utilisé. Pour une réalisation pratique, on ajusterait à zéro la tension de sortie au repos en réglant R_{C1} ou R_{E2}.

Un système de ce genre ne peut malheureusement pas être utilisé dès que le gain recherché est élevé. En effet, nous savons que la température modifie le β des transistors et leur V_{BE}, donc en particulier le point de polarisation du premier transistor; cette modification sera considérée comme un signal et amplifiée par les étages suivants. Avec un gain de 1 000, une variation de 1 °C entraînera une dérive d'au moins 2 volts à la sortie (le V_{BE} du transistor d'entrée diminue pour un même courant de 2 mV par degré), l'amplificateur se comporte comme un véritable thermomètre. La méthode la plus courante pour limiter ces dérives est de faire appel à un montage différentiel.

L'amplificateur différentiel

Considérons le montage de la *figure* 43 pour lequel nous supposerons que les deux transistors sont rigoureusement semblables. Si les deux bases qui constituent les deux entrées sont au même potentiel, par exemple zéro, le circuit est entièrement symétrique, et les courants dans les deux transistors égaux. Dans l'exemple proposé,

$$V_E = -0,6 \text{ volt}$$

donc
$$I_E = \frac{-0,6 + 15}{6,8\ k\Omega} = 2,12 \text{ mA}$$

le courant collecteur de chaque transistor est donc 1,06 mA, c'est-à-dire que :

$$V_2 = V_2' = +15 - 1,06 \times 5,6 = 9,06 \text{ volts}$$

si V_1V_1' varient en restant égales, l'équilibre de la répartition des courants est conservé, et V_2 reste égal à V_2'. La tension de sortie différentielle $(V_2' - V_1')$ reste nulle. Par contre, si un déséquilibre apparaît entre les tensions base $V_1 \neq V_1'$ les courants collecteurs des deux transistors cessent d'être égaux, et $(V_2 - V_2')$ prend une valeur non nulle. Si les deux transistors sont construits sur le même substrat, ils sont à la même température, et toute dérive thermique agissant de façon égale sur les deux ne perturbe pas l'égalité de V_2 et V_2'. La tension différentielle de sortie est ainsi indépendante de la température et ne dépend que de la tension différentielle d'entrée $(V_1 - V_1')$. Pour cette raison, tous les amplificateurs à courant continu font appel à des montages différentiels.

Dans certains cas, il est intéressant de prendre comme tension de sortie la tension sur un seul collecteur, par exemple V_2'; elle n'est pas alors indépendante de la valeur commune de V_1 et V'_1. En effet :

$$V_E = V_1 - 0,6 \text{ volt} = V_1' - 0,6 \text{ volt}$$

donc :
$$I_E = \frac{V_E + V_{CC}}{R_E} = \frac{V_1 - 0,6 + V_{CC}}{R_E}$$

c'est-à-dire que :
$$I_{C1} = I_{C2} = \frac{V_1 - 0,6 + V_{CC}}{2\ R_E}$$

donc :

$$V_2 = V_2' = +V_{CC} - R_C I_C =$$
$$V_{CC}\left(1 - \frac{R_C}{2\ R_E}\right) + 0,6 \cdot \frac{R_C}{2\ R_E} - \frac{R_1}{2\ R_E} V_1$$

pour les variations $\frac{\Delta V_2}{\Delta V_1} = -\frac{R_C}{2\ R_E}$ soit 0,41 dans le cas présent; une variation de 1 volt sur la valeur commune de V_1 et V_1' modifie de 0,41 volt les tensions collecteur. 0,41 est le *gain en mode commun* de l'amplificateur, qu'il est souhaitable de rendre le plus faible possible. Ceci est réalisé en remplaçant la résistance R_E par une source de courant constant constituée par un transistor T_3 (en vert sur la *figure* 43a). Le pont diviseur R_1R_2 maintient le potentiel de base de T_3 à un potentiel de

$$-15 \times 9,4/(9,4 + 5,6) = -9,4 \text{ volts}$$

son émetteur est donc à $-9,4 - 0,6 = -10$ volts. Le courant dans la résistance R_E', $\left(\frac{-10 + 15}{5}\right) = 1$ mA, ne dépend pas de la tension collecteur; ce transistor joue donc bien le rôle d'un injecteur de courant constant. La somme des courants des collecteurs de T_1 et T_2 est constante, indépendante de la valeur commune des deux tensions d'entrée lorsqu'elles sont égales; V_2 et V_2' ont alors une valeur $V_2 = 15 - 5,6\ k\Omega \times 0,5\ mA = 12,2$ volts; le gain en mode commun est nul. Pour calculer le gain différentiel, on peut remplacer T_1 et T_2 par leur schéma équivalent simplifié; le courant injecté par T_3 étant constant disparaît sur le schéma équivalent de l'ensemble (*fig.* 43b); alors, pour deux transistors identiques, on peut écrire aux bornes des h_{11}

$$v_1 - v_E = h_{11} i_1$$
$$v_1' - v_E = h_{11} i_1$$

et sur l'émetteur $(\beta + 1)\ i_1 + (\beta + 1)\ i_1' = 0$.

De cette dernière relation, on tire la relation évidente $i_1 = i_1'$ traduisant la constance de la somme des courants de deux transistors. Les tensions de sortie sur les deux collecteurs sont :

$$v_2 = -R_C \beta i_1 \qquad v_2' = -R_C \beta i_1'$$

on déduit de ces équations, en éliminant v_E, variation de la tension d'émetteur, et les courants :

$$v_2 = -\frac{R_C \beta}{2\ h_{11}} (v_1 - v_1') = -v_2'$$

Comme nous l'avions prévu, v_2 ne dépend que de la différence des tensions d'entrées. Le gain différentiel

$$\frac{v_2 - v_2'}{v_1 - v_1'} = -\frac{\beta R_C}{h_{11}}$$

est le même que pour un seul étage émetteur commun. Pour le réduire, on peut placer une résistance r entre le point d'injection du courant T_3 et les émetteurs des deux transistors T_1 et T_2; il devient alors, comme pour un transistor seul :

$$\frac{v_2 - v_2'}{v_1 - v_1'} = \frac{-\beta R_C}{h_{11} + (\beta + 1)\ r}$$

▼ ***Figure 43 :** a) montage d'un amplificateur différentiel; b) schéma équivalent en présence de T_3.*

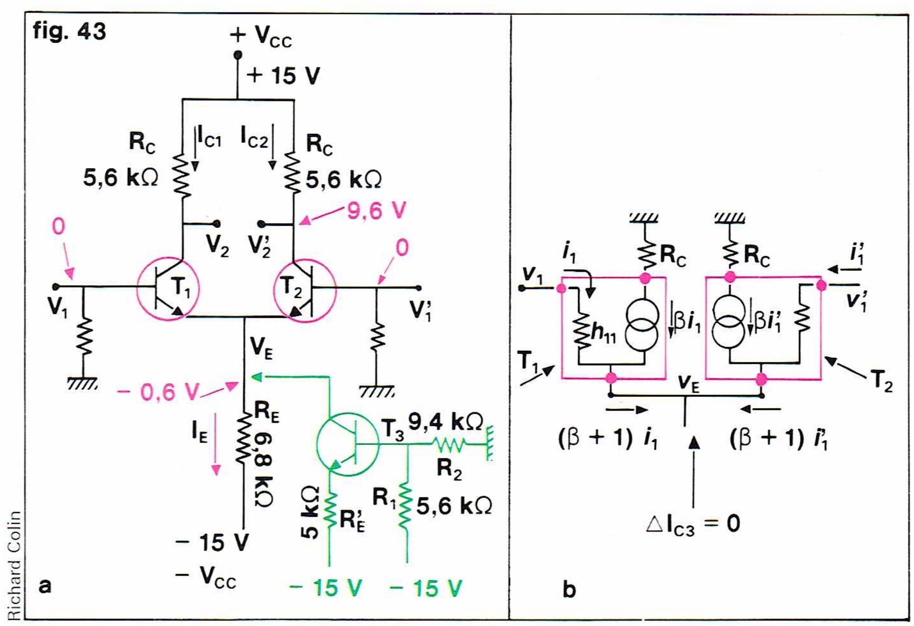

fig. 44

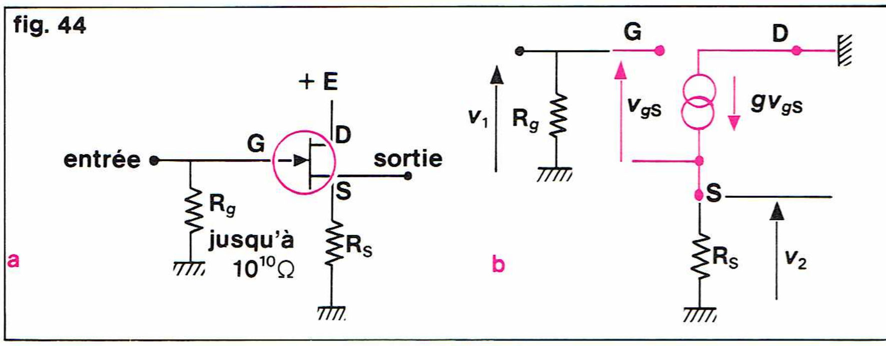

Richard Colin

▲ *Figure 44 ; amplificateur à haute impédance d'entrée : a) étage à haute impédance d'entrée à T. E. C. ; b) schéma équivalent :* $v_1 = v_{gS} + R_S g v_{gS}$ *et* $v_2 = R_S g v_{gS}$ *donc* $v_2/v_1 = R_S g / 1 + R_S g$.

▼ *Ci-dessous, figure 45 : amplificateur de puissance classe A à liaison par transformateur. En bas, un transistor de puissance.*

Les amplificateurs à haute impédance d'entrée

Lorsque l'on désire amplifier un signal provenant d'une source de très forte impédance interne ρ, il est nécessaire d'utiliser un amplificateur à grande impédance d'entrée R_E, car ces deux éléments forment un diviseur de tension et une fraction $R_E/(R_E + \rho)$ seulement de la force électromotrice de la source se retrouve à l'entrée de l'amplificateur. C'est le cas général des tensions d'origine électrostatique (d'où le nom d'amplificateurs électrométriques donné à ces amplificateurs spéciaux) ou prélevées par des électrodes biologiques. Jusqu'à 1 MΩ d'impédance d'entrée, un transistor monté en collecteur commun suffit, au-delà il est illusoire d'augmenter la résistance d'émetteur, car la relation $Z_E = \beta R_E$ cesse d'être valable pour R_E trop grande.

En utilisant la description rigoureuse d'un transistor, on peut montrer que la valeur maximale possible de l'impédance d'entrée en collecteur commun est :

$$Z_{e\,\max} = h_{11}\left[1 + \frac{\beta + 1}{h_{11}\,h_{22}}\right] \# \frac{\beta + 1}{h_{22}}$$

soit moins de 10 MΩ avec les transistors courants. Jusqu'à 10^9 ou 10^{10} Ω, un transistor à effet de champ à jonction peut convenir. On l'utilise le plus souvent dans un montage analogue au collecteur commun qui est le montage drain commun dont le gain en tension est également voisin de l'unité (*fig.* 44) et que l'on fait suivre ensuite d'un amplificateur à transistors à jonctions. La majorité des problèmes courants est ainsi résolue, et l'apparition des transistors à effet de champ à bas prix a rejeté dans l'oubli les circuits plus ou moins complexes qui ont été imaginés pour augmenter les impédances des systèmes à transistors bipolaires. Cependant il ne faut pas oublier que le courant d'entrée d'un T. E. C. augmente exponentiellement avec la température, et au-delà de 100 °C on ne peut guère espérer dépasser quelques mégohms. Au-delà de 10^{10} Ω, on peut utiliser des triodes, dont malheureusement l'impédance d'entrée n'est pas aussi grande que ce que l'on pouvait espérer, car la grille capte toujours des électrons. Les composants de choix sont les transistors M. O. S. dont certains ont un courant d'entrée inférieur à 10^{-17} A, mais qui sont électriquement très fragiles. De toute façon, au-delà de 10^{12} Ω, des précautions draconiennes doivent être prises pour éviter la pollution des surfaces, en particulier par la vapeur d'eau.

fig. 45

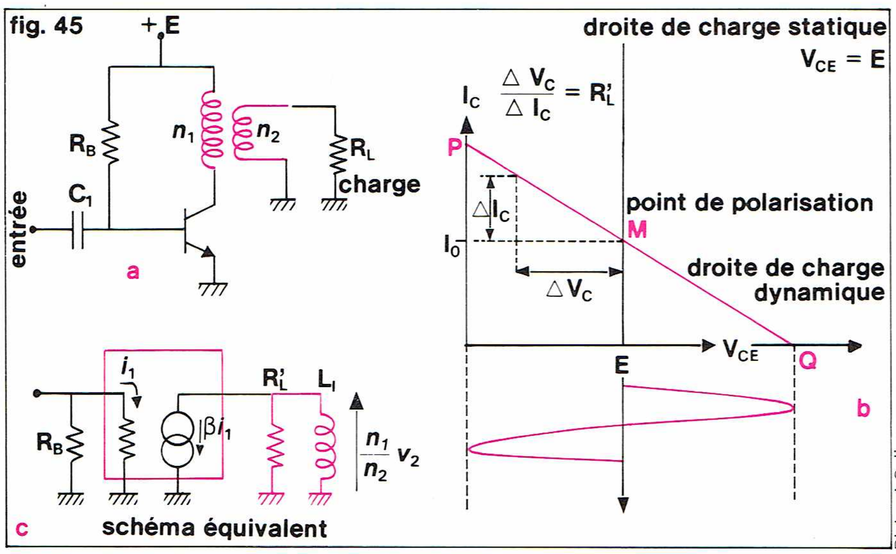

Richard Colin

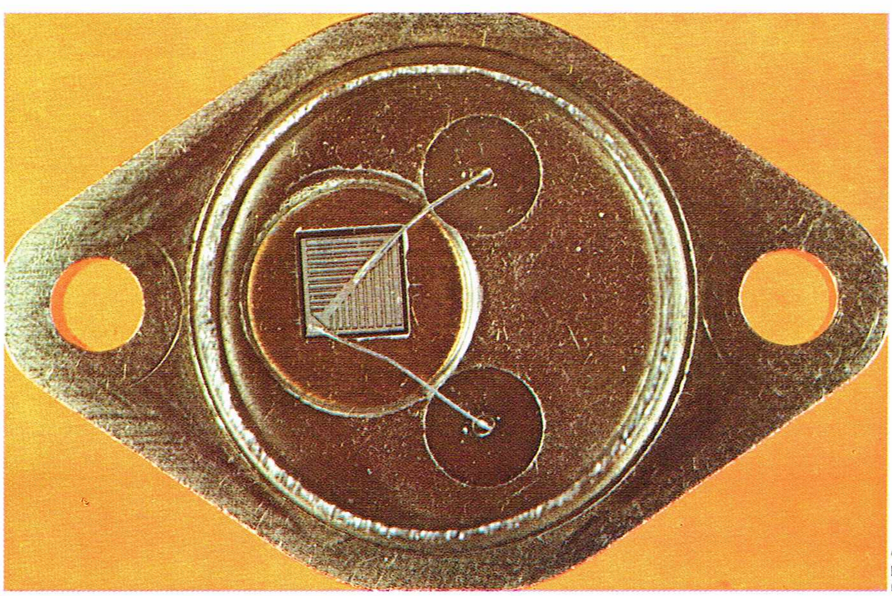

R.T.C.

Les amplificateurs de puissance

Lorsque la puissance délivrée à la charge est la grandeur la plus importante, les schémas précédents sont mal adaptés, car ils ont un rendement trop faible. Cette notion de rendement est fondamentale, car l'énergie perdue l'est sous forme de chaleur dans le transistor. Pour un étage à charge résistive, le calcul montre que, dans le meilleur des cas, 25 % seulement de l'énergie se retrouve dans le signal utile de sortie. Un premier système permettant d'améliorer cette situation utilise un transformateur de liaison, comme il est indiqué sur la *figure* 45a : en continu si la résistance de l'enroulement primaire du transformateur comprenant n_1 spires est nulle, il n'y a aucune perte de tension dans le circuit de collecteur et la droite de charge est verticale $V_C = E$. En alternatif, nous avons vu que le primaire du transformateur était assimilable à une self L_1 en parallèle sur une résistance $R_L\ (n_1/n_2)^2 = R'_L$. Si L_1 est assez élevée (et on cherche toujours à se placer dans ce cas), pour que son impédance $L\omega$ soit très grande devant R_L pour la fréquence de travail la plus basse, tout se passe comme si R'_L était seule, et pour les variations rapides $\Delta V_C/\Delta I_C = -R'_L$. Le point de fonctionnement se déplace sur une droite de pente $-R'_L$ que l'on appelle *droite de charge dynamique* (*fig.* 45b) ; sous l'influence du signal d'entrée, il peut parcourir le segment de droite situé entre les intersections P et Q avec les deux axes. De la même façon que dans le cas rencontré plus haut, le signal sinusoïdal d'amplitude maximale est obtenu lorsque M se trouve au milieu de PQ, mais alors P a pour abscisse 2 I_0, où I_0 est le courant de repos, et la pente de la droite est telle que $R'_L = E/I_0$. R_L étant imposée, on réalise cette condition en choisissant le rapport de transformation n_2/n_1 du transformateur. On dit que, dans cet étage, le transistor travaille en *classe A*. La puissance maximale est facile à calculer ; la tension maximale de sortie en régime sinusoïdal a comme amplitude *crête à crête* 2 E comme on le voit sur la *figure* 45b (le point de fonctionnement balaie alors la droite de charge dynamique de P à Q) ; la puissance utile dans la résistance R_L est donc :

$$P = \frac{V^2}{8\ R} = \frac{4\ E^2}{8\ R'_L} = \frac{E^2}{2\ R'_L}$$

ou, puisque : $R'_L = \dfrac{E}{I_0}$ il vient : $P = \dfrac{EI_0}{2}$

La pile fournissant un courant moyen I_0 sous une tension E délivre une puissance $P_A = EI_0$; on voit que le rendement est de 50 %.

A titre d'exemple, soit à réaliser un amplificateur de ce type alimenté sous 9 volts et délivrant à un haut-parleur de 2,5 Ω une puissance de 1 watt à une fréquence mini-

male de 30 Hz. La puissance étant connue ainsi que E, on en déduit la valeur minimale nécessaire du courant de repos de collecteur $I_0 = 2\ P/E = 0{,}22$ ampère. Le transistor dissipe au repos $P_A = EI_0 = 2$ watts; on le choisira donc en conséquence avec, si nécessaire, un radiateur suffisant. Pour fonctionner dans les meilleures conditions, le transistor doit avoir une charge alternative

$$R'_L = E/I_0 = 40{,}5\ \Omega$$

cela oblige à choisir pour le transformateur un rapport

$$\frac{n_1}{n_2} = \sqrt{\frac{40{,}5}{2{,}5}} \simeq 4$$

Pour éviter que la self de l'enroulement primaire du transformateur n'introduise une perte de gain aux fréquences les plus basses, il faut que son impédance reste grande devant R'_L ce qui donne la condition $L_1\omega_{\text{mini}} \gg R'_L$ ou ici :

$$L_1 \gg 40{,}5\ \Omega/2\ \pi \times 30 = 0{,}21 \text{ henry}$$

On prendra donc un transformateur de liaison ayant un rapport 4 et une self primaire d'au moins un henry; le nombre de spires à bobiner dépend essentiellement du circuit magnétique utilisé.

Le montage push-pull

Le rendement de l'étage en classe A est faible, mais il devient surtout catastrophique à bas niveau; en absence de signal d'entrée la puissance EI_0 est dépensée en pure perte.

Le montage push-pull a été imaginé pour remédier à cette situation. Son schéma initial est représenté sur la *figure* 46. En absence de signal d'entrée, les deux transistors polarisés à $V_{BE} = 0$ sont bloqués, et aucun courant ne circule. Supposons qu'un signal sinusoïdal soit appliqué à l'entrée : pendant l'alternance positive (en rouge), le transistor T_1 se met à conduire, sa base devenant positive, et un courant circule de haut en bas (*fig.* 46, flèche rouge) dans le primaire du transformateur de sortie; une alternance positive de sinusoïde apparaît sur la charge R_L. Pendant ce temps, T_2 dont la base est négative est bloqué. Pendant l'alternance négative (en bleu), au contraire, les potentiels sont inversés. Au secondaire du transformateur d'entrée, par rapport au point milieu, la base de T_1 est négative et celle de T_2 positive. Cette fois, c'est T_2 qui conduit; le courant circulant de bas en haut dans le primaire du transformateur de sortie induit une alternance négative sur R_L. La sinusoïde est ainsi reconstituée aux bornes de la charge par addition des contributions successives des deux transistors, qui n'interviennent chacun que pendant une alternance; on dit qu'ils travaillent en *classe B*. On peut calculer que le rendement maximal est obtenu lorsque l'amplitude du signal observé sur les collecteurs est égale à l'alimentation E; il vaut alors 78 %, mais, et c'est le plus important, la dissipation de repos est nulle. Pour une puissance de sortie maximale P_u on peut utiliser des transistors qui n'acceptent individuellement que $P_u/5$ seulement. Pour améliorer la forme du signal de sortie, on amène généralement les deux transistors au seuil de conduction avec un pont de polarisation R_1R_2 (en vert sur la *figure* 46).

Ce montage, malgré ses grandes qualités, est de moins en moins utilisé, car il nécessite deux transformateurs qui sont lourds et difficiles à fabriquer si l'on désire que le fonctionnement soit assuré dans une large gamme de fréquences. Après avoir régné en maître dans le domaine de la haute fidélité (avec des tubes électroniques) pendant de nombreuses années, il est supplanté actuellement par des montages sans transformateurs.

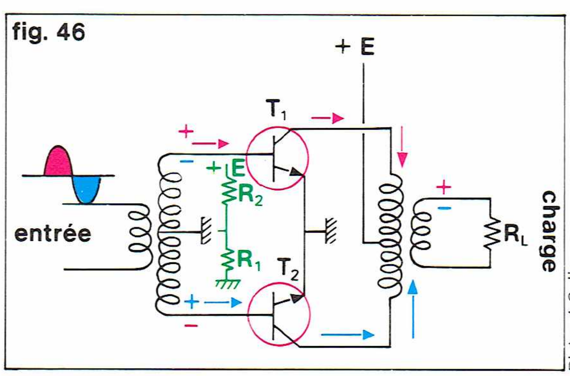

◀ ***Figure 46 : montage push-pull.***

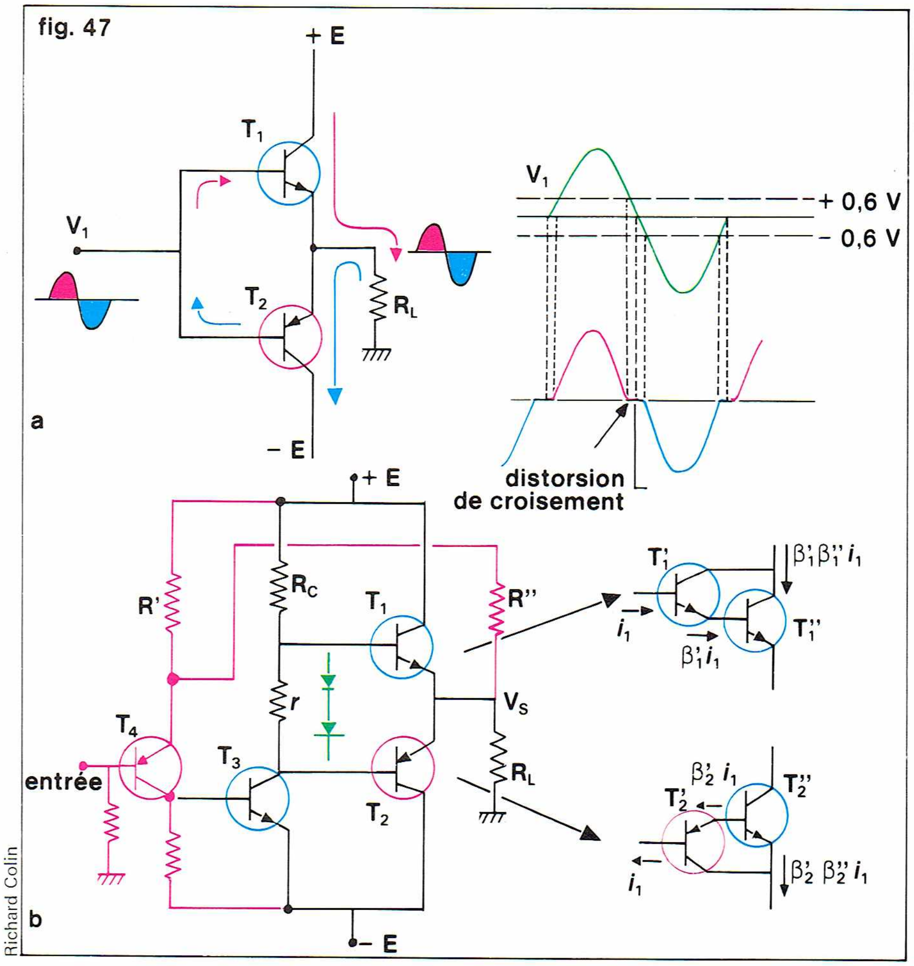

▲ ***Figure 47 : montage push-pull sans transformateur :***
a) ***principe;***
b) ***réalisation.***

L'idée de base du push-pull qui est d'utiliser deux composants dont le courant de repos est nul pour reconstituer une forme d'onde, peut être concrétisée par des circuits n'utilisant pas de transformateur. Considérons en effet deux transistors complémentaires alimentés par deux tensions de signe opposé et dont les bases sont reliées; la conduction de l'un ou l'autre sera obtenue suivant le signe de la tension du signal sur la base (*fig.* 47a). L'utilisation de deux éléments complémentaires supprime la nécessité d'un système déphaseur d'entrée qui, dans le montage d'origine, est constitué par le premier transformateur à point milieu. Un montage aussi simple est insuffisant, car en réalité T_1 ne conduit que lorsque V_1 dépasse 0,6 volt et T_2 lorsque V_1 descend en dessous de — 0,6 volt; entre ces deux valeurs, les deux voies sont bloquées; ceci se manifeste par une déformation caractéristique du signal de sortie, la *distorsion de croisement*. De plus, le montage n'a pas de gain, il est l'équivalent d'un double collecteur commun. Pour y remédier, on réalise le montage représenté sur la *figure* 47b. Le transistor T_3 joue le rôle d'un amplificateur; il est polarisé de façon que son collecteur soit à un potentiel de repos voisin de — 0,6 volt; l'élément *r* (qui est souvent remplacé par deux diodes) est choisi de façon à introduire, lorsqu'il est parcouru par le courant collecteur de T_3, une chute de tension de 1,2 volt; la base de T_1 se trouve ainsi portée au potentiel convenable + 0,6 volt. La distorsion de croisement est ainsi supprimée, T_1 et T_2 étant au seuil de conduction, mais il faut que le point de polarisation de T_3 soit défini exactement. Plusieurs systèmes ont été imaginés : celui qui est représenté sur la *figure* 47 est parmi les plus simples; le transistor T_3 est commandé par le courant collecteur de T_4 dont l'émetteur est relié à la sortie par la résistance R″. Au repos, la tension V_S doit être nulle; si elle tend à augmenter, elle entraîne par R″ le potentiel d'émetteur de T_4 dont le courant augmente, commandant un accroissement du courant collecteur de T_3, donc une baisse de son potentiel de collecteur, ce qui ramène V_S

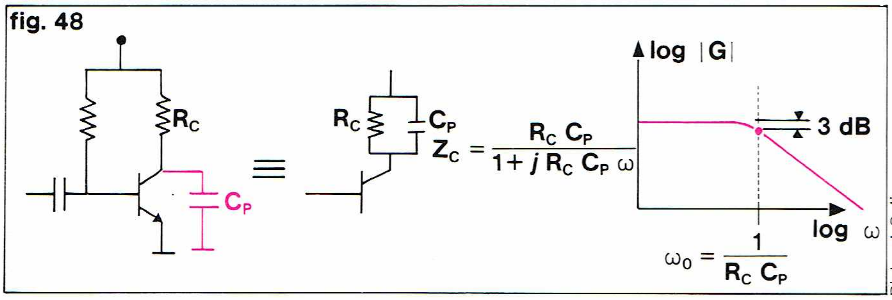

▲ *Figure 48 : capacité parasite de sortie d'un amplificateur et influence sur la bande passante.*

vers sa valeur d'équilibre. Il est parfois difficile de trouver deux transistors de puissance T_1 et T_2 complémentaires, on fait alors appel à deux combinaisons de deux transistors (montages Darlington) comme le montre la *figure* 47. T_1' et T_1'' forment un ensemble équivalent à un seul transistor NPN de gain $\beta_1' \cdot \beta_1''$ où β_1' et β_1'' sont les gains respectifs de T_1' et T_1''; de même, T_2' T_2'' sont assimilables à un seul transistor PNP de gain $\beta_2' \cdot \beta_2''$. La majorité des amplificateurs haute fidélité a un étage de puissance construit suivant ce principe.

Influence de la fréquence sur les caractéristiques des amplificateurs

Pour de *faibles signaux*, les amplificateurs se comportent comme des systèmes linéaires au sens où nous les avons introduits au début de cet exposé. Leur gain est un nombre complexe dépendant de la fréquence : son module, faible aux fréquences basses (sauf pour les amplificateurs continus), est ensuite constant dans une plus ou moins large bande de fréquences, pour décroître par la suite. On appelle *bande passante* de l'amplificateur l'écart de fréquences entre lesquelles le gain reste constant à 3 décibels près.

Pour un amplificateur alternatif utilisant des liaisons par capacité, les fréquences très basses sont défavorisées, car elles passent mal à travers ces capacités.

Étudions l'influence de la capacité d'entrée dans un amplificateur dont l'impédance d'entrée est une résistance R_E : C et R_E forment un diviseur de tension (voir, par exemple, la *figure* 48), et la tension réellement présente sur l'entrée est $v_1 = v_0 \frac{j R_E C \omega}{1 + j R_E C \omega}$; le module de v_1 varie avec la fréquence ainsi que sa phase :

$$|v_1| = v_0 \frac{R_E C \omega}{\sqrt{1 + R_E C^2 \omega^2}}$$

A la pulsation $\omega = \frac{1}{R_E C}$ le module de v_1 est $\sqrt{2}$ fois plus faible que pour les ω élevés, c'est-à-dire que le gain est réduit de 3 dB $\left(20 \log \frac{1}{\sqrt{2}} = -3\right)$; c'est la « fréquence de coupure inférieure » de l'amplificateur; elle peut toujours être ramenée à zéro en faisant appel à une liaison continue.

Pour les *fréquences élevées*, la situation est beaucoup plus délicate; on constate toujours que le gain d'un amplificateur tend à s'annuler si la fréquence de travail augmente suffisamment. Cela est dû à de multiples raisons physiques qui peuvent toutes se ramener à l'intervention de capacités dont l'impédance décroît en haute fréquence.

D'abord, les *capacités parasites* des éléments et du câblage : en parallèle sur la résistance de charge R_C d'un amplificateur existent des capacités C_P qui sont formées par les conducteurs eux-mêmes voisins de la masse et aussi, pour les transistors, entre les différentes zones sur la pastille du semi-conducteur. Il est difficile de descendre en dessous de 10 picofarads (10^{-11} F). La charge réelle de collecteur est alors un circuit RC_P parallèle :

$$Z_C = \frac{R_C}{1 + j R_C C_P} = \frac{R_C}{\sqrt{1 + R_C^2 C_P^2 \omega^2}} e^{j\,(\text{Arc tg } RC\omega)}$$

dont le module réel est très voisin de R_C pour

$$\omega \ll \omega_0 = 1/RC$$

et décroît ensuite en ω^{-1} pour $\omega \gg \omega_0$. Le gain de l'amplificateur qui est proportionnel à Z_C varie comme le montre la *figure* 48; en double représentation logarithmique, la courbe G (ω) a pour asymptotes deux demi-droites se coupant à $\omega = \omega_0$, pulsation pour laquelle le gain a baissé de 3 dB. Dans le cas des amplificateurs à tubes électroniques, la résistance de charge est élevée, et la fréquence de coupure ainsi obtenue souvent gênante (pour une charge de $10^5\ \Omega$ et $C_P = 10$ pF, le gain tombe de 3 dB à $f_C = \frac{1}{2\pi R_C C_P} = 160$ kHz), dans le cas des transistors, R_C n'est plus souvent que de quelques centaines d'ohms, et ce n'est plus cet effet qui limite les performances.

Lorsque la fréquence augmente, les paramètres *h* d'un transistor cessent d'être réels, c'est-à-dire qu'il apparaît des déphasages entre les courants et les tensions. Ceci peut être représenté par des capacités ajoutées au schéma équivalent, et dont certaines ont une signification physique très précise. Le schéma de transistor le plus utilisé a été proposé par Giacoletto : il est construit à partir d'un schéma BF en π (*fig.* 49a). La résistance $r_{B'C}$ traduisant le terme de réaction interne (h_{12}) aux fréquences basses est très grande et peut être souvent négligée. $r_{BB'}$ est la résistance des connexions placées en série entre la borne de base et la zone de base dans le semi-conducteur où a lieu l'effet transistor; elle est de l'ordre de 30 à 100 Ω; $C_{B'E}$ est la capacité de la jonction base-émetteur, elle vaut 100 à 500 pF; $C_{B'C}$ capacité collecteur-base peut être inférieure à 10 pF. On remarquera que la source de courant introduite dans ce schéma est commandée par la tension entre la base physique B' et l'émetteur ($v_{B'E}$), et non celle appliquée de l'extérieur sur la connexion de base (v_{BE}), ce qui complique beaucoup les calculs. Lorsque la résistance de charge de collecteur n'est pas trop élevée, le schéma peut être simplifié comme le montre la *figure* 49b, la capacité d'entrée apparaît plus élevée, à $C_{B'E}$ venant s'ajouter $C_{B'C}$ multipliée par un facteur voisin du gain de l'étage; c'est l'**effet Miller** bien connu avec les triodes. En fonction de la fréquence, le gain de l'étage est réduit de 3 décibels à une fréquence f_1 telle que :

$$\omega_1 = 2\pi f_1 = \frac{1 + \frac{r_{BB'}}{r_{B'E}}}{(C_{B'E} + g R_L C_{B'C})\, r_{BB'}}$$

Pour le transistor 2 N 2925 qui nous est familier : $r_{BB'} = 50\ \Omega$, $r_{B'E} = 8\,000\ \Omega$ environ pour $I_C = 1$ mA, $C_{B'E} = 100$ pF, $C_{B'C} = 10$ pF, $g = 38$ mA/V, et la fréquence de coupure vaut, pour une charge de 1 000 Ω environ 6 MHz.

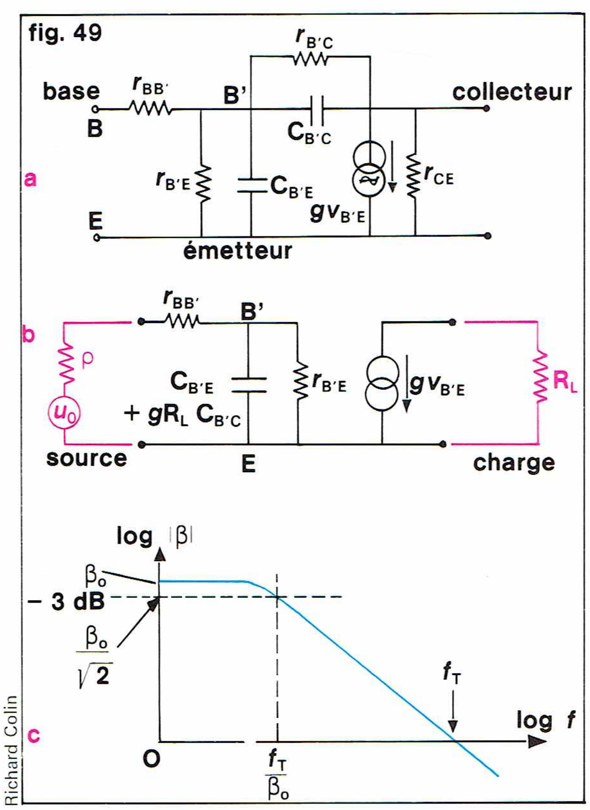

▶ *Figure 49 : a) schéma de Giacoletto d'un transistor à jonctions; b) schéma équivalent d'un transistor monté en émetteur-commun avec une résistance de collecteur R_L; c) évolution du module du gain en courant d'un transistor en fontion de la fréquence.*

La plupart du temps, les constructeurs ne donnent pas les valeurs des éléments du schéma de Giacoletto ; parfois, pour une fréquence donnée, le transistor est décrit par ses paramètres [*y*] dont on donne le module et la phase, mais le plus souvent un chiffre unique est proposé pour évaluer le comportement du composant, c'est la *fréquence de coupure*, ou *fréquence de transition*. Le gain en courant i_C/i_B peut être calculé à partir du schéma de Giacoletto ; il décroît lorsque la fréquence augmente par suite de la présence de la capacité $C_{B'E}$. Or un transistor n'est utile que dans la mesure où il possède un gain supérieur à l'unité. On définit donc une fréquence f_T dite *fréquence de transition* pour laquelle le module de β prend la valeur 1. C'est cette valeur qui est donnée dans tous les feuillets de caractéristiques ; insuffisante pour calculer le comportement du transistor, elle permet cependant de faire une comparaison entre plusieurs types de transistors. Ainsi le 2 N 2925 a une f_T de 160 MHz environ, ce qui ne veut pas dire, loin de là, qu'il sera possible de l'utiliser jusque-là. A 500 kHz, le β qui valait 350 en continu est déjà tombé à 250. On définit parfois une autre fréquence de coupure f_β qui est celle pour laquelle le module du gain a perdu 3 dB par rapport à sa valeur en continu. Cette fréquence est reliée à la précédente par la relation simple $f_\beta = f_T/\beta_0$ où β_0 est le gain à fréquence zéro (*fig.* 49c).

Les amplificateurs haute fréquence

Les capacités parasites inévitables interdisent, comme nous venons de le voir, de réaliser des amplificateurs à charge résistive ayant des gains appréciables aux fréquences élevées. Heureusement, leur influence peut être neutralisée, au moins dans une gamme étroite de fréquence, en faisant appel aux propriétés du circuit résonnant LC. Le dipôle formé par la mise en parallèle d'une bobine de self L supposée parfaite, d'une résistance R et d'une capacité C a une impédance :

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1 - LC\omega^2}{jL\omega}}$$

qui est réelle à une fréquence ω_0 telle que $1 - LC\omega_0^2 = 0$, soit $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. Son module est alors maximal et se réduit à R ; ω_0 est la fréquence de résonance du circuit. De part et d'autre |Z| décroît et voit sa valeur réduite dans le rapport $\sqrt{2}$ pour deux fréquences ω_1 et ω_2 dont la différence est appelée *largeur de bande du circuit oscillant* RLC et a pour valeur $\Delta\omega = \frac{\omega_0}{Q}$ avec $Q = \frac{R}{L\omega_0}$, coefficient de qualité du circuit. En toute rigueur, la bobine L n'est pas parfaite mais a une résistance série *r*. On peut montrer que, si *r* est assez faible, le circuit réel L, *r*, C est équivalent à un circuit théorique RLC avec $R = rQ^2$ où Q a également pour valeur (*fig.* 50) :

$$Q = \frac{L\omega}{r}$$

Ce rappel sur les propriétés du circuit oscillant suffit pour comprendre le principe des amplificateurs haute fréquence. Pour plus de clarté, nous allons traiter un exemple (*fig.* 51a). Le transistor T est supposé parfait, de β et h_{11} réels, mais nous tiendrons compte d'une capacité parasite totale C_P formée de la capacité de câblage et de celle du transistor lui-même. Le condensateur γ est un élément de liaison de forte valeur dont l'impédance est négligeable à la fréquence de travail. On voit sur la *figure* 51b que le schéma équivalent est identique à celui d'un émetteur commun en remplaçant seulement la résistance de charge par une impédance Z formée de R_E, $(C + C_P)$, L en parallèle. Le gain est donc : $G = \frac{v_2}{v_1} = -\frac{\beta}{h_{11}} Z$, il est maximal et réel à la fréquence de résonance $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L\,(C + C_P)}}$. $G_{max} = -\frac{\beta R}{h_{11}}$ et la largeur de bande est : $\Delta f = \frac{\omega_0}{2\pi Q}$ avec $Q = \frac{R_L}{L\omega_0}$.

Ainsi, au voisinage de ω_0 l'influence de la capacité parasite est supprimée, car elle se trouve incluse dans la capacité totale d'accord du circuit oscillant. Si β et h_{11} étaient indépendants de la fréquence, on pourrait, en choisissant convenablement L, obtenir le gain G_{max} à toute fréquence ; on sait, hélas ! qu'il n'en est pas ainsi.

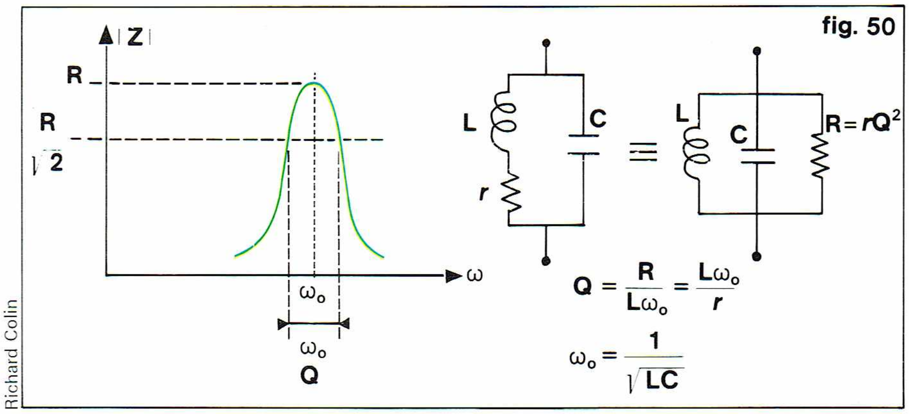

Richard Colin

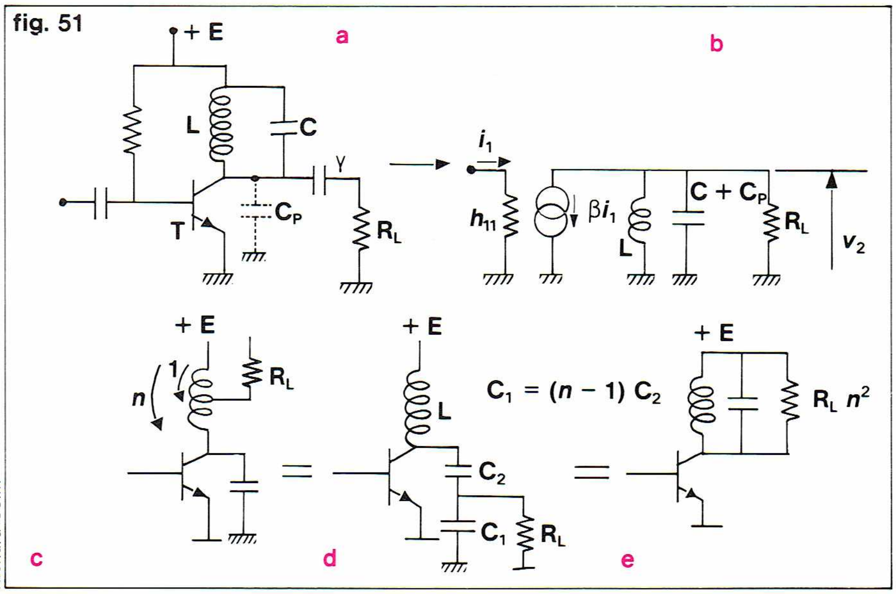

Richard Colin

▲ *En haut, figure 50 : le circuit oscillant. Ci-dessus, figure 51 :* a) *amplificateur* HF *typique ;* b) *le schéma équivalent ;* c) *montage à prise intermédiaire sur le bobinage ;* d) *prise fictive ;* e) *schéma équivalent à toutes les configurations précédentes.*

Pour obtenir une largeur de bande faible, comme on le souhaite souvent, il faut une valeur élevée de R_L ; si la charge est imposée, on peut la connecter en un point intermédiaire sur l'enroulement, et réaliser ainsi un autotransformateur adaptateur d'impédance. Lorsque le Q est élevé, on peut réaliser une prise fictive sur le bobinage (*fig.* 51) en divisant en deux la capacité d'accord.

Avec ce type de circuits, la courbe de gain a toujours la forme en cloche représentée sur la *figure* 50. Pour obtenir par exemple un gain peu variable sur une plage de fréquence plus large, c'est-à-dire aplatir le sommet de la courbe, il faut faire appel à des associations de plusieurs circuits oscillants dont le calcul est complexe et qu'il serait trop long de décrire ici.

Rétroaction dans les amplificateurs

Les propriétés des amplificateurs sont profondément modifiées lorsqu'une partie du signal de sortie est renvoyée sur l'entrée ; c'est ce que l'on appelle la rétroaction ; on distingue souvent la *réaction* lorsque le signal réinjecté est en phase avec le signal d'entrée, et la *contre-réaction* dans le cas contraire. L'influence de cette rétroaction dépend essentiellement de la façon dont elle est pratiquée.

Le signal réinjecté à l'entrée peut être un courant ou une tension et être appliqué en série ou en parallèle. Une formule fondamentale peut être établie lorsque l'on réinjecte en série avec l'entrée une portion β de la tension de sortie. La tension d'entrée V_e réellement appliquée à l'amplificateur est, comme le montre la figure :

$$V_e = V_1 + \beta V_S$$

Si G est le gain de l'amplificateur, on a naturellement : $V_S = GV_e$. On tire de ces deux équations une relation entre V_S et V_1 définissant le *gain apparent* de l'ensemble :

$$G_A = \frac{V_S}{V_1} = \frac{G}{1 - \beta G}$$

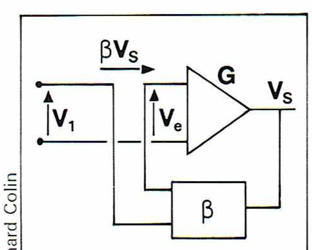

Richard Colin

fig. 51 bis

▲ *Figure 51bis : principe de la rétroaction sur un amplificateur.*

Cette relation montre que, si β est un nombre réel (par exemple si la tension réinjectée est obtenue par un diviseur résistif), le gain apparent est plus faible que le gain réel dans le cas de la contre-réaction ($\beta < 0$), et au contraire supérieur dans le cas de la réaction ($\beta > 0$).

Lors de la contre-réaction le signal injecté à l'entrée est en opposition de phase avec le signal d'entrée direct, donc, dans le cas où G est positif réel, en opposition de phase avec la sortie ; c'est-à-dire que le produit βG est négatif réel. L'expression établie plus haut montre alors immédiatement que, pour un β assez grand de façon que $|G\beta| \gg 1$, le gain apparent devient $-1/\beta$ et ne dépend plus de G.

L'influence sur les impédances et la bande passante peut également être établie. Si R_e est la résistance d'entrée de l'amplificateur isolé, le courant d'entrée est : $i_e = \frac{V_e}{R_e}$

mais $$V_e = \frac{1}{G} \cdot V_S = \frac{V_1}{1 - \beta G}$$

il s'ensuit que : $i_e = \frac{V_1}{R_e\,(1 - \beta G)}$

La résistance apparente d'entrée est $R_E\,(1 - G)$; si $|\beta G| \gg 1$, elle peut être considérablement plus élevée que celle de l'amplificateur seul.

Admettons maintenant que l'amplificateur seul a une fréquence de coupure ω_0 ; son gain peut alors se mettre sous la forme :

$$G = \frac{A\omega_0}{j\omega + \omega_0}$$

A étant le gain à fréquence zéro ; le gain apparent s'écrit alors en reportant cette forme dans l'expression de G_A :

$$G_A = \frac{A\omega_0}{j\omega + \omega_0\,(1 - \beta A)}$$

Le dénominateur montre que G_A a pour fréquence de coupure $\omega_0\,(1 - \beta A)$ qui, dans le cas de la contre-réaction, est supérieur à ω_0. La contre-réaction élargit donc la bande passante.

La contre-réaction est très souvent employée dans les amplificateurs. Le système utilisé pour stabiliser le point de polarisation de l'étage de puissance push-pull décrit plus haut est une contre-réaction, la tension de sortie étant ramenée à l'entrée grâce à R″ et à la jonction émetteur-base de T_4 (*fig.* 47). Les exemples les plus importants sont ceux où interviennent les amplificateurs opérationnels.

L'amplificateur opérationnel

C'est un amplificateur idéal ayant les performances suivantes (*fig.* 52) :

— c'est un amplificateur différentiel à courant continu,

— à bande passante infinie,

— à gain différentiel infini et à gain en mode commun nul,

— à impédance d'entrée infinie,

— à impédance de sortie nulle ;

c'est donc une source de tension idéale.

Il est bien évidemment impossible de réaliser ces performances, mais on s'en rapproche du mieux possible :

— le gain différentiel est toujours très grand, au moins 10^4 et parfois plus de 10^7 ;

— l'impédance d'entrée est élevée ; elle est supérieure à 100 kΩ avec les modèles les moins coûteux construits avec des transistors bipolaires et dépasse de loin 10^{12} Ω avec des M. O. S. ou d'autres systèmes électrométriques ;

— l'impédance de sortie est faible, moins de quelques milliohms parfois et toujours moins de 50 Ω.

Ce sont les performances en fréquence qui sont les plus éloignées de l'idéal ; le gain très élevé n'est effectif que pour des fréquences basses, la fréquence de coupure est toujours faible, et d'autant plus que le gain en continu est plus grand. Pour un amplificateur opérationnel à très bon marché comme le 741, le gain est de 10^5 à fréquence zéro, mais n'est plus que 10^4 à 100 Hz.

Les amplificateurs de ce type ne sont jamais utilisables « en boucle ouverte », car le moindre millivolt d'entrée suffit à les saturer, et ils ne sont employés qu'en présence d'une contre-réaction.

Au moins aux fréquences basses pour lesquelles le gain reste élevé, le calcul des circuits à amplificateurs opérationnels est très simple si l'on applique la **règle fondamentale** suivante : *l'amplificateur ne peut fonctionner en régime linéaire, c'est-à-dire non saturé, que si la différence des tensions entre ses deux entrées est nulle.* En effet, avec un gain infini, la sortie ne peut être finie que si la tension d'entrée est nulle. Pour obtenir une tension de sortie nulle lorsque l'entrée est au zéro, une double alimentation $\pm V_{CC}$ est nécessaire, la tension de sortie étant limitée à $\pm V'_C$ (excursion de sortie ; souvent $V_{CC} \# V'_C = 15$ volts).

● *Emplois fondamentaux des amplificateurs opérationnels*

Le montage le plus simple est représenté sur la *figure* 53a ; il s'agit d'un amplificateur de gain négatif. L'entrée + étant à la masse, sur l'entrée — le potentiel doit être très voisin de zéro en vertu du principe fondamental énoncé plus haut ; on dit que l'entrée V_- est *une masse virtuelle.* Le courant d'entrée traversant R_1 est donc :

$$I_1 = \frac{V_1 - V_-}{R_1} = \frac{V_1}{R_1}$$

le courant d'entrée de l'amplificateur étant nul, I_1 doit traverser R_2 ; on a donc :

$$V_S = -R_2 I_1 = -\frac{R_2}{R_1} V_1$$

Le gain est égal au signe près au rapport des résistances.

De même, le montage de la *figure* 53b est un amplificateur de gain positif ; le diviseur de tension R_1R_2 amène l'entrée — au potentiel $V_S \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right)$; d'autre part, l'entrée + reçoit le signal d'entrée V_1 ; en égalant V_+ et V_- il vient :

$$V_S = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_1$$

Dans les deux cas, les résistances R_1R_2 constituent pour l'amplificateur un circuit de contre-réaction ; G étant infini, le gain apparent ne dépend que du taux de réinjection. Dans le cas du montage 53b, on trouve à l'entrée de l'amplificateur $(V_+ - V_-) = V_1 - V_S \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right)$ qui est bien de la forme $V_1 + \beta V_S$ avec : $\beta = \frac{-R_1}{R_1 + R_2}$. Le gain limite $-1/\beta$ que nous avions calculé a bien la valeur $\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$ trouvée ici directement.

Lorsque $R_1 = R_2$ le montage 53a est un inverseur de phase de gain -1 ; en l'absence de R_1 le montage 53b a pour gain $+1$, la sortie recopie l'entrée sans amplification de tension, mais l'impédance en sortie est nulle, ce qui fait tout l'intérêt du système.

L'amplificateur opérationnel doit son nom à l'emploi qui en a été fait dans les calculateurs analogiques ; il est capable d'effectuer des opérations linéaires. Par exemple, dans le montage 53c, l'entrée — constitue une masse virtuelle ; en écrivant que la résistance de contre-réaction R_0 est parcourue par la somme des courants d'entrée :

$$-\frac{V_S}{R_0} = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3}$$

il vient : $$V_S = -\frac{R_0}{R_1} V_1 - \frac{R_0}{R_2} V_2 - \frac{R_0}{R_3} V_3$$

▼ *Figure 52 : représentation et courbe caractéristique d'un amplificateur opérationnel.*

fig. 52

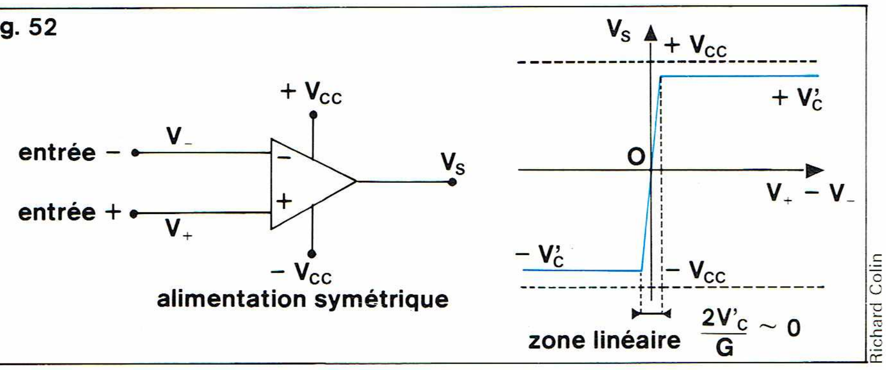

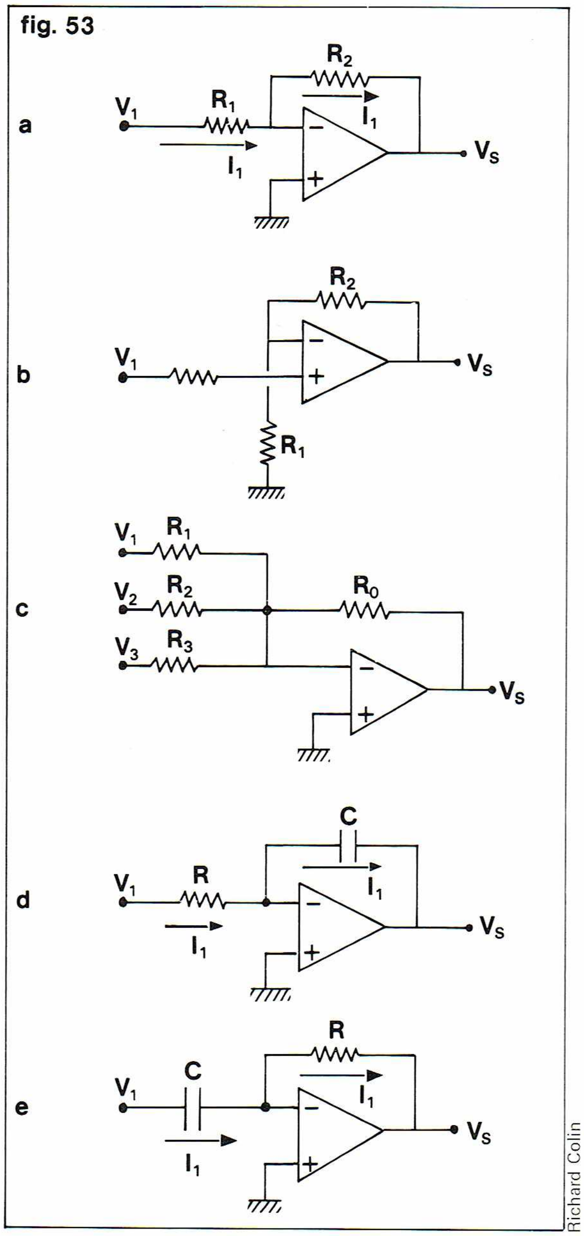

Richard Colin

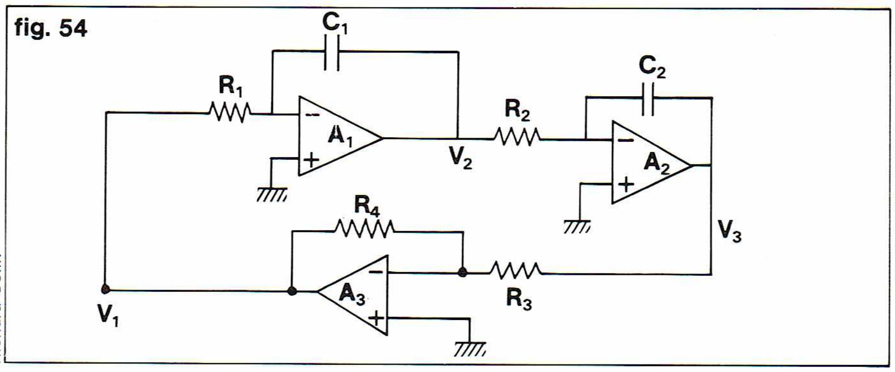

Richard Colin

◀▲ *A gauche, figure 53 : montages fondamentaux de l'amplificateur opérationnel.*
A droite, figure 54 : circuit à 3 amplificateurs opérationnels résolvant une équation différentielle du 2e ordre à coefficients constants.

La sortie est une combinaison linéaire des tensions d'entrée, les coefficients étant tous négatifs. Un des gros avantages du montage est que, V_- étant une masse virtuelle, les sources $V_1V_2V_3$ n'ont aucun couplage entre elles. En utilisant 3 potentiomètres à la place des résistances d'entrée, on réalise un mélangeur à 3 voies. En entrant simultanément sur les entrées + et —, on peut réaliser toute opération du type

$$V_S = \alpha V_1 + \beta V_2 - \gamma V_3 - \delta V_4$$

Cependant l'ampli-op peut réaliser des opérations plus complexes que de simples additions algébriques. Avec le montage 53d, on a par exemple $I_1 = \frac{V_1}{R} = -C\frac{dV_S}{dt}$, le second nombre étant le courant traversant C soumise à la tension — V_S.

On en tire :

$$V_S = -\frac{1}{RC}\int_0^t V_1\,(t)\,dt + \text{Cte}$$

Au signe près, V_S évolue comme l'intégrale de V_1 ; on a réalisé un *intégrateur*. L'inversion de R et de C (*fig.* 53e) conduit de même au différentiateur :

$$I_1 = C\frac{dV_1}{dt} = -\frac{V_S}{R} \quad \text{d'où} \quad V_S = -RC\frac{dV_1}{dt}$$

En combinant ces diverses fonctions, on peut réaliser des circuits susceptibles de résoudre des équations différentielles à coefficients constants. Considérons par exemple le montage de la *figure* 54 :

A_1 est un intégrateur ; on a donc :

$$V_2 = -\frac{1}{R_1C_1}\int_0^t V_1 dt$$

de même, A_2 donne :

$$V_3 = -\frac{1}{R_2C_2}\int_0^t V_2 dt = \frac{1}{R_1R_2C_1C_2}\int_0^t\int_0^t V_1 dt$$

A_3 est un amplificateur inverseur :

$$V_1 = -\frac{R_4}{R_3}V_3$$

on a donc finalement :

$$V_1 = -\frac{R_4}{R_1R_2R_3C_1C_2}\int\int_0^t V_1 dt$$

équation intégrale que l'on peut mettre sous une forme plus habituelle en différentiant deux fois :

$$\frac{d^2V_1}{dt^2} = -\frac{R_4}{R_1R_2R_3C_1C_2}V_1$$

C'est une relation de la forme

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -\omega^2 y$$

dont une solution est : $y = A\cos\omega t$.

On constate en effet que la tension V_1 a une forme sinusoïdale. En ajoutant quelques éléments destinés à fixer les conditions initiales, on a réalisé un embryon de calculateur analogique.

● *Stabilité des systèmes soumis à une rétroaction*

La formule fondamentale établie plus haut montre que, si le produit βG prend la valeur 1, le gain apparent devient infini, c'est-à-dire que la sortie peut prendre une valeur grande, même si l'entrée est au zéro. Une interprétation mathématique stricte de la formule suggère que, si $\beta G > 1$, le gain apparent est de signe inverse du gain propre de l'amplificateur. En réalité, cette situation ne peut jamais être réalisée : en effet, lorsque le système n'est pas alimenté, $G = 0$, donc $\beta G = 0$; à la mise sous tension, G ne passe pas en temps nul de 0 à sa valeur nominale, il existe donc nécessairement un instant où le gain est tel que $G\beta = 1$; la tension de sortie croît alors très vite, et le système se sature, c'est-à-dire sort de la région linéaire où le rapport entre les amplitudes d'entrée et de sortie est une constante. La formule n'est alors plus applicable, et le système reste dans cet état instable. Suivant que le circuit contient ou non des éléments susceptibles de stocker de l'énergie, la tension de sortie peut rester fixée à la limite de la zone linéaire (saturation de l'amplificateur ; pour un ampli-op V_S reste à $\pm V'_C$) ou osciller indéfiniment (ce deuxième cas étant celui des oscillateurs). La condition $G\beta = 1$ est appelée *condition limite d'oscillation*, le gain G de l'amplificateur et celui β du système de réinjection étant en général complexes, il faut écrire :

$$|G|\,|\beta| = 1$$
$$\text{Arg}\,(G\beta) = 2\,k\pi$$

Ces conditions élémentaires permettent de déterminer dans quelles conditions un amplificateur opérationnel dont la sortie est reliée à l'entrée par une résistance est stable ou non.

▶ ***Figure 55 : conditions de stabilité d'un amplificateur opérationnel bouclé par une résistance.***

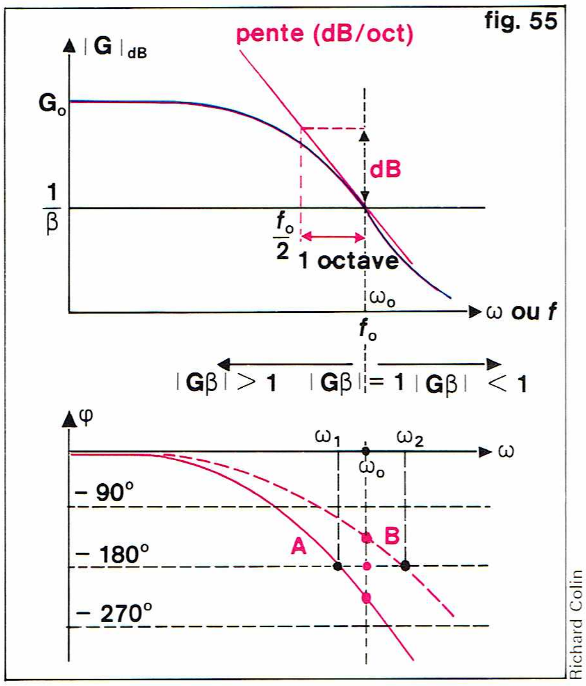

Relions d'abord la sortie à l'entrée + par une résistance R; l'impédance d'entrée étant infinie, la totalité du signal de sortie se retrouve à l'entrée; le taux de réinjection β est égal à 1. D'autre part, le gain G étant très grand, Gβ est très supérieur à 1, la condition d'oscillation est largement dépassée, et le système ne peut pas être stable, ou, pour être plus précis, ne peut pas rester un temps appréciable en régime linéaire. On constate que V_S prend une valeur qui correspond à la saturation de l'amplificateur opérationnel, soit typiquement + 15 volts ou — 15 volts. Pour cette raison, un ampli-op ne fonctionnera jamais en amplificateur linéaire si sa sortie est reliée par un élément quelconque à son entrée +.

Relions maintenant la sortie à l'entrée — comme dans le montage de la *figure* 53a. La rétroaction ayant lieu sur l'entrée —, β est négatif et Gβ ne peut pas prendre la valeur + 1. Cependant il ne faut pas oublier que le gain d'un ampli-op varie avec la fréquence ainsi que le déphasage entre l'entrée et la sortie. Il se peut très bien qu'il existe des fréquences pour lesquelles, le déphasage ayant augmenté de 180°, l'entrée — se comporte comme une entrée +; on est alors dans une situation analogue à celle développée plus haut et une instabilité est possible. Dans le cas simple du montage représenté sur la *figure* 53b, un raisonnement quantitatif peut être fait. Le taux de réinjection β est ici négatif et indépendant de la fréquence, puisqu'il est déterminé par deux résistances

$$\beta = -R_1/(R_1 + R_2)$$

Sur le graphique représentant la variation du module de G avec la fréquence $|G(\omega)|$ traçons la courbe $1/\beta$ en fonction de ω : c'est une droite horizontale dont l'ordonnée est le gain apparent à fréquence 0. Les deux courbes se coupent en un point M correspondant à une fréquence $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$. Pour ce point M : $|G(\omega_0)| = |1/\beta|$ donc : $|\beta G(\omega_0)| = 1$; il en découle que, pour toute fréquence $f < f_0$, $|G|$ étant plus grand que $|G(\omega_0)|$, $|\beta G| > 1$; au contraire, ce produit est inférieur à l'unité pour les fréquences supérieures.

La condition limite d'oscillation ne peut donc pas être satisfaite pour $f > f_0$, mais elle peut par contre l'être pour $f < f_0$ si le déphasage introduit par l'amplificateur est convenable. Nous avons représenté sur la *figure* 55 deux aspects possibles de la courbe donnant le déphasage en fonction de la fréquence. Dans le cas B, à la fréquence $f_2 = \frac{\omega_2}{2\pi}$ pour laquelle le déphasage est de 180° (c'est-à-dire que le signe de G a été inversé) le produit $|G\beta| < 1$; il n'y a donc pas de risque d'oscillation. Au contraire, dans le cas A, à la fréquence $f_1 = \omega_1/2\pi$, $|G\beta| > 1$ est positif, la condition limite d'oscillation est dépassée, il y a instabilité. Il y a donc instabilité si à la fréquence pour laquelle $|G| = 1/\beta$ le déphasage introduit par l'amplificateur dépasse 180°.

Une prévision est possible si l'on connaît la courbe de déphasage $\varphi(\omega)$. Heureusement cette courbe peut être déduite avec une bonne approximation de la courbe de gain. Au moins dans le cas simple rencontré ici, on peut montrer que le déphasage est approximativement proportionnel à la dérivée du gain exprimé en décibels par rapport au logarithme de la fréquence. Si l'on écrit $(dA/d\omega)_{dB/oc}$, la variation du module du gain exprimé en décibels par octave, le déphasage a pour valeur en radians :

$$\varphi \# \frac{\pi}{12} \cdot \left(\frac{dA}{d\omega}\right)_{dB/oc}$$

Ainsi, si le gain chute de 6 dB par octave, c'est-à-dire est divisé par deux (6 dB) pour un doublement de la fréquence (1 octave), φ vaut $\pi/2 = 90°$.

La condition de stabilité énoncée plus haut peut alors être présentée sous la forme suivante : le montage de la *figure* 53a est stable si, à la fréquence pour laquelle le module du gain propre de l'amplificateur opérationnel est égal au gain du montage à fréquence zéro, le module du gain diminue moins vite que 12 dB par octave (ou 20 dB par décade).

● *Représentation classique — Critère de Nyquist*

La formule $G = \frac{G_0}{1 - \beta G_0}$ que nous avons utilisée a été établie en admettant que la tension d'entrée et celle provenant de la sortie sont ajoutées avant d'être appliquées à l'amplificateur. Souvent on fait l'hypothèse qu'elles sont retranchées, l'amplificateur ne recevant que la différence entre ce qui est appliqué à l'entrée du montage et une portion du signal de sortie; c'est la présentation la plus familière aux automaticiens; il y a alors un changement de signe, et il vient : $G = \frac{G_0}{1 + \beta G_0}$; la condition limite d'oscillation est alors $|G\beta| = 1$, $\text{Arg}(G\beta) = \pi$. Il y a instabilité s'il est possible de trouver une fréquence pour laquelle le produit βG est strictement négatif et de module supérieur à l'unité. Le produit βG étant un nombre complexe peut être représenté par un point dans le plan complexe. Ce point, lorsque varie la fréquence, décrit une courbe qui est une caractéristique de l'amplificateur; elle coupe l'axe réel en un point P (*fig.* 56), et il y a stabilité si P est entre l'origine et le point — 1. D'où la règle connue sous le nom de **critère de Nyquist :** *Un système bouclé est stable si la courbe représentant dans le plan complexe le produit Gβ n'entoure pas le point* — 1.

Les oscillateurs

En introduisant dans le circuit un ensemble susceptible d'emmagasiner de l'énergie sous forme électrique (capacité) ou magnétique (self), on peut mettre à profit l'instabilité d'un amplificateur soumis à une rétroaction pour fabriquer des signaux alternatifs périodiques : c'est le principe des *oscillateurs*. Si l'on s'arrange pour que la condition d'oscillation ne soit réalisée qu'autour d'une fréquence unique, le signal fourni pourra être une sinusoïde très pure. Suivant la nature du réservoir d'énergie

▼ ***Figure 56 : conditions d'établissement du critère de Nyquist.***

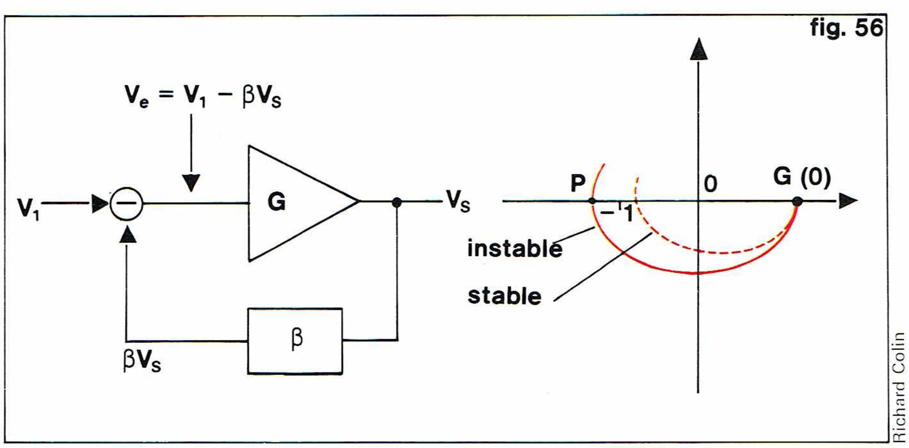

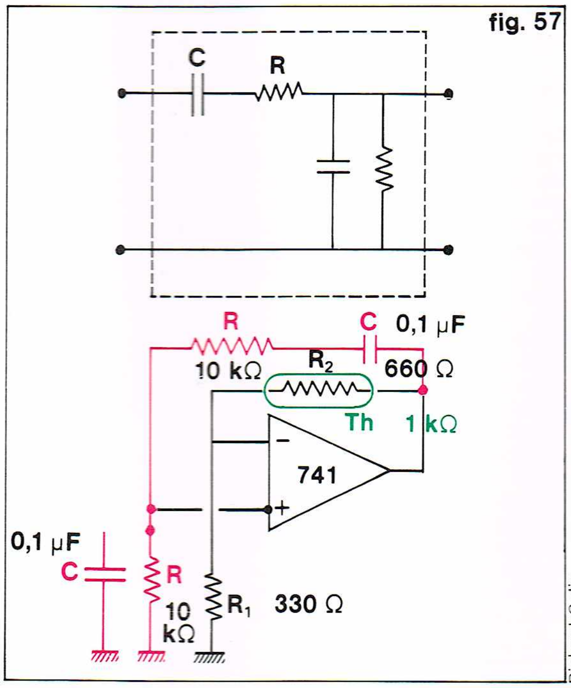

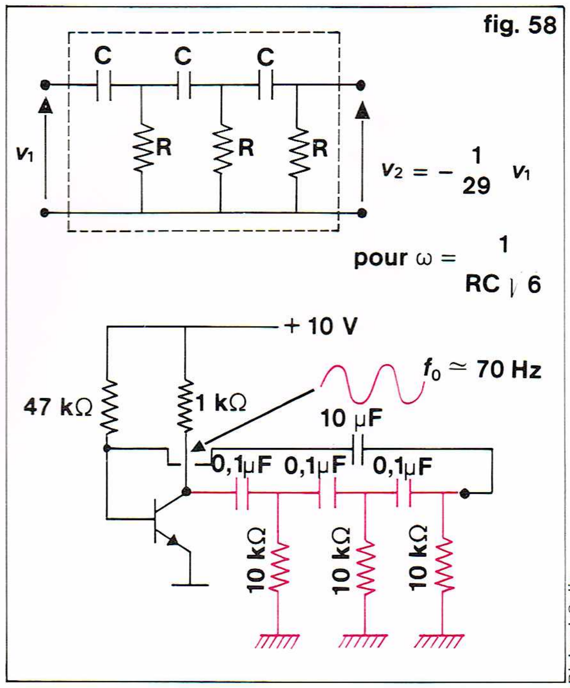

◀ *A gauche, figure 57 : oscillateur à pont de Wien. A droite, figure 58 : oscillateur à « ligne à retard ».*

retenu, on distingue les *oscillateurs basse fréquence* (BF) et les *oscillateurs haute fréquence* (HF), la limite en fréquence entre ces deux types étant d'ailleurs mal définie. Les oscillateurs BF utilisent éventuellement des résistances et des capacités ; au contraire, des bobinages formant des circuits accordés sont employés dans les oscillateurs HF. La fréquence de fonctionnement des premiers peut dépasser 1 MHz, les seconds sont utilisés parfois jusqu'à 50 kHz.

Les oscillateurs BF à résistances et capacités

• *L'oscillateur à pont de Wien*

Le circuit de base autour duquel est construit l'oscillateur est un quadripôle comprenant deux résistances et deux capacités. Sa fonction de transfert, c'est-à-dire en d'autres termes son gain en tension v_2/v_1, peut être calculée aisément. Dans le cas où les éléments sont égaux deux à deux, on obtient :

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{jRC\omega}{(1 - R^2C^2\omega^2) + 3jRC\omega}$$

On voit que, pour la pulsation particulière $\omega_0 = 1/RC$, le gain est réel et a pour valeur $+ 1/3$. Pour réaliser un oscillateur dans lequel ce quadripôle est utilisé comme circuit de rétroaction, il faut ajouter un amplificateur dont le gain compense l'atténuation introduite, c'est-à-dire a pour valeur 3 (de façon que $G\beta = 3 \times \frac{1}{3} = 1$). Le gain de cet amplificateur doit être positif ; on le réalise par exemple avec un ampli-op comme le montre la *figure* 57 ($R_2 = 2\ R_1$).

Ainsi constitué, le montage fonctionne conformément aux prévisions : pour un gain inférieur à 3 ($R_2 < 2\ R_1$), la condition d'oscillation ne peut pas être satisfaite, aucune oscillation n'apparaît ; au contraire, pour un gain supérieur à 3 ($R_2 > 2\ R_1$), un signal alternatif dont la fréquence est celle attendue ($1/2\pi RC$) est observé.

On constate cependant que le réglage de R_2 est très critique, le signal de sortie étant carré et non sinusoïdal dès que le gain devient très légèrement supérieur à 3. Il faut en effet, pour avoir une onde pure, que le fonctionnement de l'amplificateur reste linéaire, ce qui est difficilement conciliable avec le principe même de l'oscillateur. Pour obtenir le résultat cherché, il faut introduire un système de compensation automatique qui contrôle à chaque instant la valeur de R_2 ou R_1 en fonction du niveau d'oscillation obtenu. La méthode universellement utilisée consiste à remplacer R_2 par une *thermistance* (Th) : il s'agit d'un composant passif se comportant comme une résistance pure, fonction de la température du matériau qui le constitue, la résistance diminuant lorsque la température s'accroît. On choisit cet élément de façon qu'à la température ambiante sa résistance soit supérieure à $2\ R_1$. A froid, la condition d'oscillation est remplie, et un signal alternatif apparaît. Un courant alternatif circule alors à travers Th qui s'échauffe. Si la capacité thermique de la thermistance est assez faible, cela suffit à ramener sa résistance en dessous de $2\ R_1$. L'oscillation a tendance à cesser, mais alors R_2 augmente. Il se produit un équilibre pour lequel, si Th est bien choisi, le signal de sortie est une sinusoïde pure. Les valeurs numériques indiquées sur la *figure* 57 conviennent pour obtenir ce résultat avec un ampli-op type 741 alimenté sous $\pm$ 15 volts et une thermistance miniature de valeur nominale 1 kΩ à 20 °C.

Ce type de circuit est très souvent retenu pour construire des générateurs basse fréquence, la variation de la fréquence étant obtenue en utilisant un potentiomètre double de façon à modifier R, ou plus souvent un condensateur double. Le signal obtenu est très pur et, si la régulation par thermistance est bien faite, peut avoir un niveau très peu dépendant de la fréquence.

• *L'oscillateur à « ligne à retard »*

Il utilise un quadripôle de déphasage différent (*fig.* 58). On peut montrer que le circuit a un gain réel de valeur $- 1/29$ à une pulsation ω telle que $RC\omega = 1/\sqrt{6}$. En l'associant avec un étage amplificateur de gain négatif supérieur à 29, on peut satisfaire à la condition d'accrochage et réaliser un oscillateur. C'est un tel montage qui est représenté sur la *figure* 58. Sans aucune stabilisation, la forme d'onde peut être assez proche d'une sinusoïde parfaite, et ce circuit est parfois retenu pour construire des générateurs de fréquence fixe dans les cas où la pureté spectrale du signal n'est pas exigée.

Les oscillateurs HF à circuit accordé

Il y en a de très nombreux, le principe étant toujours de placer entre sortie et entrée d'un transistor un circuit LC de façon à réaliser la condition d'oscillation pour une fréquence bien définie. Un enroulement supplémentaire ajouté à un amplificateur haute fréquence transforme aisément celui-ci en oscillateur, il suffit de ramener sur la base une tension en opposition de phase avec celle qui apparaît sur le collecteur. C'est ce qui est fait dans le montage proposé sur la *figure* 59a : les enroulements primaires et secondaires sont connectés en sens inverse pour assurer l'inversion de phase. Cette inversion de phase peut être obtenue par un autotransformateur (c'est l'*oscillateur de Hartley*) ou par une prise fictive obtenue en divisant en deux le condensateur d'accord (c'est l'*oscillateur Colpitts*). Un circuit très intéressant, car il laisse libre une électrode du transistor, est l'*oscillateur E. C. O.* (Electronic Coupled Oscillator) dont la version transistorisée est représentée sur la *figure* 59d.

▶ *Page 84, figure 59 ;* ***principe d'un oscillateur HF et exemples de réalisations : a) principe ; b) montage Hartley : par rapport au point M, qui est une masse, les points B et C sont en opposition de phase. γ est une capacité de liaison de forte valeur ; c) montage Colpitts : par rapport à la masse qui, grâce à C_1 et C_2, constitue un point milieu fictif pour L, la base et le collecteur sont alimentés en opposition de phase ; d) oscillateur E. C. O.***

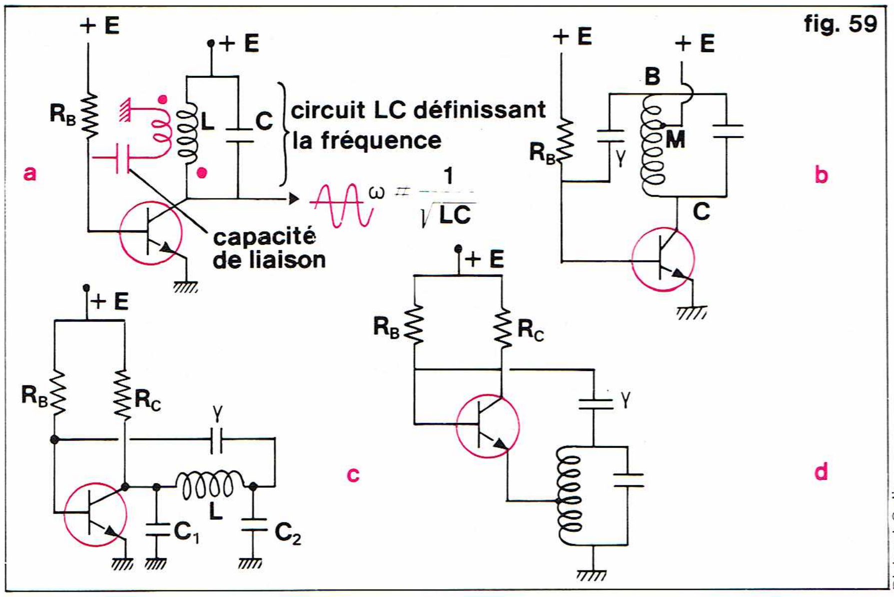

▲ *Figure 59 : légende p. 83.*

▼ *Ci-dessous, figure 60 : caractéristique d'une diode tunnel et schéma d'un oscillateur ;* R *est la résistance de polarisation de* D, γ *une capacité de liaison. En bas, figure 61 ; exemple d'oscillateur à quartz :* a) *montage du quartz oscillateur ;* b) *schéma équivalent avec valeurs typiques pour* $\omega_s = 2{,}581\ 99\ 10^8$, $\omega_p = 2{,}582\ 12\ 10^8$, $Q_s = 129\ 000$ *;* c) *montage typique.*

Les oscillateurs à résistance négative

Il faut, pour bien comprendre le fonctionnement de ces montages très particuliers, dire quelques mots du comportement d'un circuit oscillant soumis à une excitation brutale. Si un courant est établi en un temps très court dans une self accordée par une capacité C, on observe aux bornes du circuit une tension ayant une forme de sinusoïde amortie :

$$v = \frac{I_0}{C} \cdot \frac{e^{-\beta t}}{\Omega} \cdot \sin \Omega t$$

I_0 étant la valeur du courant injecté, Ω une pulsation très proche de la pulsation ω_0 de résonance du circuit LC et β un coefficient d'amortissement ayant pour valeur $\omega_0/2\,Q$.

L'amplitude des oscillations est donc réduite à 37 % de sa valeur initiale ($1/e$) au bout de Q/π périodes. Plus le coefficient de qualité est élevé, et plus l'amortissement est lent. Le diapason excité est une illustration mécanique du même phénomène ; s'il est très peu amorti, c'est-à-dire se comporte comme un système oscillant de Q élevé, le son perçu décroît lentement après un choc.

Si l'on parvenait à supprimer toutes les pertes, c'est-à-dire à rendre infinie la résistance R placée en parallèle sur L et C, il n'y aurait plus d'amortissement, et l'amplitude de l'oscillation resterait indéfiniment constante. On peut aller plus loin et imaginer que Q devienne négatif, alors l'exponentielle aurait un exposant positif, et l'amplitude croîtrait exponentiellement avec le temps. C'est ce principe qui est mis à profit dans les oscillateurs à résistance négative. S'il n'est évidemment pas possible de fabriquer des résistances statiques négatives qui se refroidiraient lorsque le courant les traverse, on peut mettre à profit la résistance différentielle négative qui apparaît dans une zone limitée de la caractéristique de certains composants. Nous avons rencontré un tel phénomène avec les transistors unijonction. Le composant de choix pour les applications envisagées ici est la *diode tunnel* (*fig.* 60). Il s'agit d'une diode semi-conductrice dans laquelle le dopage est très élevé et qui, pour de faibles valeurs de la tension dans le sens passant, présente une partie à résistance négative. Si une telle diode, dont le point de fonctionnement est amené dans cette zone par une polarisation convenable, est placée en parallèle avec un circuit RLC, elle se comporte comme une résistance négative $-r$. La résistance totale aux bornes de L est alors $R\ //\ (-r)$, soit $-Rr/(R-r)$; elle peut être négative si $r > R$. La diode tunnel a ainsi compensé les pertes du circuit oscillant (représentées par R), et l'on observe une oscillation spontanée à une fréquence qui peut être très élevée. Son amplitude est limitée par la largeur de la zone à $r < 0$ sur la caractéristique de la diode tunnel. L'oscillateur ainsi obtenu est de faible puissance mais d'une extraordinaire simplicité. Les émetteurs espions cachés dans une olive ou une tête d'épingle de cravate sont fabriqués selon ce principe. On a réalisé ainsi également des sources de signaux dont la fréquence est de plusieurs gigahertz.

Il faut remarquer cependant qu'il n'y a pas une différence fondamentale entre ces oscillateurs et les montages de Hartley, Colpitts, etc., car, dans ce dernier cas, il n'y a oscillation que parce que l'ensemble du transistor placé aux bornes du circuit LC se comporte comme une résistance négative qui compense ses pertes.

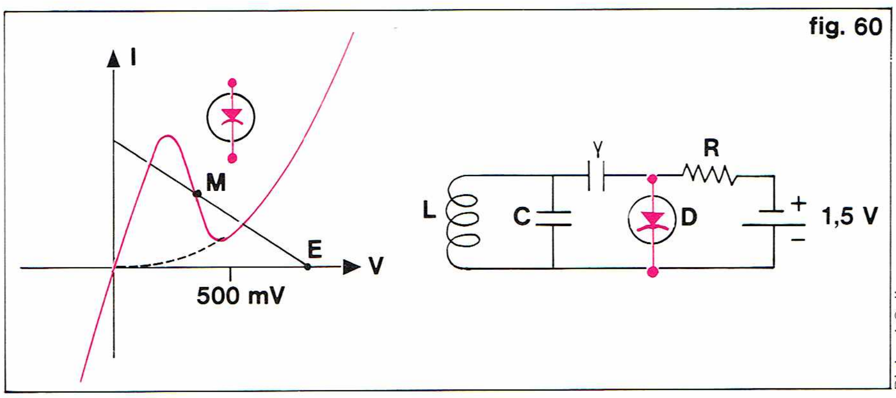

Les oscillateurs à quartz

Si l'on applique une tension alternative aux bornes d'un condensateur constitué par deux armatures planes plaquées sur les faces d'une lame taillée dans un cristal de quartz, on constate que des vibrations mécaniques apparaissent dans ce cristal. Ces vibrations sont particulièrement intenses pour certaines fréquences qui sont les fréquences de résonance du système. Si l'on trace le module de l'impédance électrique de ce dipôle en fonction de la fréquence, on constate qu'elle est respectivement maximale et grande, puis très faible pour ces deux fréquences. Ce système se comporte comme un circuit électrique équivalent au dipôle représenté sur la *figure* 61 ; la fréquence de résonance série est celle pour laquelle le circuit L_1C_1R est accordé, soit $L_1C_1\omega_S^2 = 1$, et la fréquence de résonance parallèle celle pour laquelle résonne le circuit parallèle L_1, $(C_1 + C_0)$ soit

$$L_1 \cdot \frac{C_1C_0}{C_1 + C_0} \cdot \omega_p^2 = 1$$

Pour les bons cristaux, r est de l'ordre de 30 Ω. L'intérêt du dispositif réside dans la valeur considérable du coefficient de qualité équivalent ; des Q apparents de 10^6 ne sont pas rares. Les fréquences caractéristiques sont définies par la géométrie du système et, par conséquent, très stables. La fréquence de résonance série d'un bon quartz est sur plusieurs années constante à mieux que 10^{-6} près, et, au prix de précautions dans la taille du cristal et sa température, on peut descendre en dessous de 10^{-10}. En utilisant de tels quartz pour définir la fréquence d'un oscillateur, on peut obtenir des sources très stables que l'on met à profit pour constituer des horloges de précision. Pour une horloge, une stabilité en fréquence de 10^{-7} correspond à une exactitude de 3 secondes par an. La *figure* 61 représente un montage typique d'oscillateur à quartz.

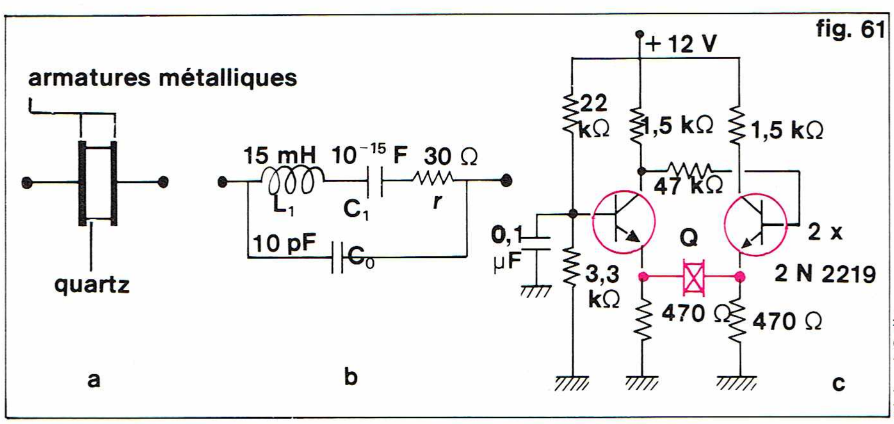

Les circuits digitaux

Tous les circuits que nous avons étudiés jusqu'ici étaient linéaires ou construits avec des composants travaillant dans une zone linéaire. Il n'en est pas de même des *circuits digitaux*, que l'on appelle aussi *circuits de commutation*, dans lesquels les composants se comportent comme des interrupteurs qui ne peuvent être qu'ouverts ou fermés. Le relais électromécanique constitué par une bobine qui, lorsqu'elle est traversée par un courant, attire une palette magnétique et ferme un contact, est le type même de composant de commutation. Ces circuits électromécaniques ont de nombreux avantages et sont encore fréquemment utilisés, mais ils sont lents (la fermeture d'un relais demande au moins une milliseconde), encombrants, et souvent peu fiables ou coûteux. Dans certaines conditions, le transistor peut jouer le rôle de commutateur.

Revenons à la *figure* 26 représentant le réseau de sortie d'un transistor ; on remarquera que toutes les caractéristiques tracées à $I_B =$ Cte viennent se confondre pour les faibles valeurs de V_{CE} en une droite très inclinée. Dans un montage simple où le transistor est associé seulement à deux résistances R_C et R_B (*fig.* 28b), le courant maximal de collecteur correspond au point A (*fig.* 26) sur la droite de charge, soit à peu de chose près $I_{C_{max}} = \frac{E}{R_C}$. Pour placer ainsi le point de fonctionnement, il faut fournir au transistor un courant base minimal de $E/\beta R_C$. Si I_B est supérieur à cette valeur, rien n'est changé, car en A passent aussi toutes les caractéristiques tracées pour les courants de base plus grands que la valeur limite précédente. Ainsi, si le circuit extérieur limite le courant collecteur d'un transistor recevant sur sa base un courant I_B à une valeur plus faible que βI_B, la tension V_{CE} reste très faible ; on dit que le *transistor est saturé*. La *condition de saturation* traduisant cette situation est : courant maximal de collecteur $< \beta I_B$ soit ici $\frac{E}{R_C} > \beta \frac{E}{R_B}$ (en négligeant les $V_{BE} = 0{,}6$ volt) que l'on peut écrire aussi : $R_B > \beta R_C$.

On remarquera qu'un transistor fonctionnant en régime de saturation ne dissipe aucune puissance puisque, quel que soit le courant, la tension à ses bornes reste presque nulle.

Si maintenant on annule le courant base, ou, mieux, que l'on bloque le transistor en polarisant sa base en négatif (transistor NPN), il ne laisse plus passer de courant (aux courants de fuite près) ; il se comporte comme un interrupteur ouvert.

Le transistor T de la *figure* 62 est monté en commutateur. Si $V_B = -V_0$, T est bloqué, et la tension d'entrée V_1 se retrouve en sortie (sous réserve que V_1 reste supérieur à $-V_0$ pour ne pas débloquer la jonction base-collecteur du transistor) ; si $V_B = +V_0$, T reçoit un courant base $\frac{V_0}{R_B}$ et reste saturé tant que son courant collecteur est inférieur à $\frac{\beta V_0}{R_B}$ c'est-à-dire que V_1 n'est pas trop grand. En faisant passer rapidement V_B de $+V_0$ à $-V_0$, on découpe le signal V_1 comme le montre la figure.

Dans les montages dits de commutation, les transistors ne séjournent un temps appréciable que dans les deux états définis plus haut : saturation ou blocage.

L'algèbre de Boole et les fonctions logiques

L'algèbre continue habituelle est mal adaptée aux calculs de ces circuits ; il est commode d'utiliser une *algèbre binaire*, dans laquelle les variables ne peuvent prendre que deux valeurs 0 ou 1, que l'on identifiera aux deux états ouvert ou fermé dans lesquels se trouvent les composants ; c'est l'*algèbre de Boole*.

Une variable booléenne X ne pouvant prendre que deux valeurs 0 ou 1, on définit d'abord le complément de X noté $\overline{X}$. Les principales opérations en algèbre logique sont :

— l'*addition* ou *opération* OU

$$S = A + B = 1 \text{ si } A \textit{ ou } B \text{ vaut } 1$$

— la *multiplication* ou *opération* ET

$$P = AB = 1 \text{ si } A \textit{ et } B \text{ valent } 1$$

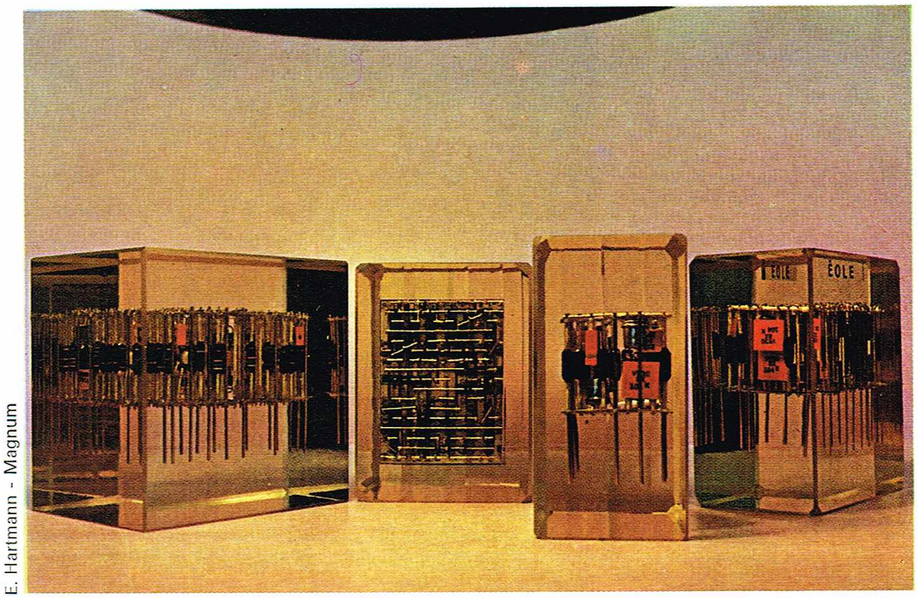

E. Hartmann - Magnum

▲ ***Les mémoires, ici des mémoires d'ordinateurs miniaturisées, sont des systèmes complexes, capables de stocker les valeurs d'un grand nombre de grandeurs binaires.***

Il est d'usage de présenter ces opérations sous forme de tableaux à deux entrées donnant les valeurs possibles de S et P pour toutes les combinaisons de valeurs de A et B. Il ne faut pas oublier qu'il s'agit de variables binaires, ce qui explique l'aspect curieux de certaines relations telles que :

$$A + 1 = 1, \quad AA = A$$

Des combinaisons entre les deux opérations sont possibles, les règles habituelles de l'algèbre restant valables, par exemple : A (B + C) = AB + AC. Deux théorèmes fondamentaux : les **théorèmes de Morgan,** permettent de résoudre tous les problèmes ; ils définissent l'influence de l'opération inversion sur l'addition et le produit booléens :

$$\overline{A + B} = \overline{A} \cdot \overline{B}$$
$$\overline{AB} = \overline{A} + \overline{B}$$

Cette algèbre de Boole permet de résoudre tous les problèmes de logique où les réponses ne peuvent être que *oui* ou *non*. Soit par exemple le problème suivant : une lampe L est commandée par 3 interrupteurs A, B et C ; elle n'est allumée que dans les cas suivants ; B est seul fermé ou B et C sont fermés mais non A, ou A et B sont fermés mais non C, ou enfin si A, B et C sont fermés tous les trois. Attribuons à chaque interrupteur une variable logique qui ne vaut 1 que s'il est fermé. Une variable L décrira l'état de la lampe ; L = 1 si elle est allumée. Nous nous proposons d'établir une relation booléenne donnant la valeur de L en fonction de l'état A, B, C des interrupteurs.

▼ ***Figure 62 : montage découpeur à transistor.***

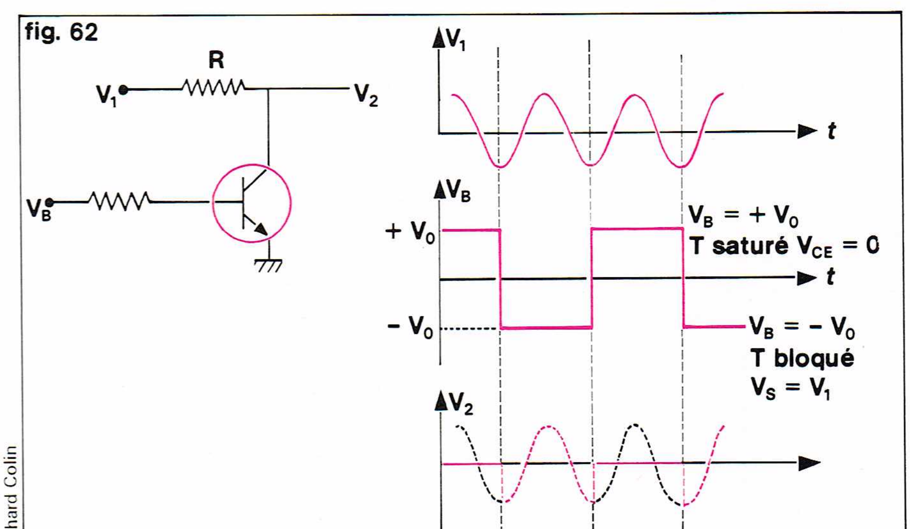

Richard Colin

▶ *Figure 64 ; circuits logiques à transistors : a) inverseur à transistor S = $\overline{A}$; b) circuit « NAND » : lorsque A (ou B) est à la masse, le potentiel de b est 0,6 volt ; pour éviter que cette tension n'amène T au seuil de conduction, on ajoute une ou deux diodes D_1, D_2 en série avec la base, il faut alors, pour rendre T conducteur, amener b à 1,8 volt ; c) circuit « NOR » : si A (ou B) vaut 1, T_2 se bloque et un courant base arrive à T′ par la jonction base-collecteur de T_2, T'_2 est saturé, donc S = 0.*

L ne vaudra 1 que si l'on se trouve dans l'un *ou* l'autre des quatre cas ; on conçoit donc que L doit se présenter sous la forme d'une somme logique de 4 termes dont chacun ne vaut 1 que dans l'une des quatre situations particulières. Dans le premier cas, B est seul fermé, c'est-à-dire que A et C sont ouverts, on a donc B = 1, A = C = 0, c'est-à-dire B = 1 = $\overline{C}$ = $\overline{A}$. La forme logique qui ne vaut 1 que dans ce cas est le produit $B\overline{A}\overline{C}$. Dans le deuxième cas, B et C sont fermés et A ouvert, soit B = C = 1, A = 0 ou $\overline{A}$ = 1, le terme qui convient est le produit $BC\overline{A}$. De même, pour le troisième cas, on trouve $AB\overline{C}$, et pour le quatrième ABC. L s'écrit donc :

$$L = \overline{A}B\overline{C} + \overline{A}BC + AB\overline{C} + ABC$$

Cette expression peut être simplifiée en appliquant les règles du calcul algébrique. Mettons $\overline{A}B$ en facteur dans les deux premiers termes et AB dans les deux autres, il vient : $L = \overline{A}B(\overline{C} + C) + AB(\overline{C} + C)$. Les parenthèses sont égales à 1, car l'un des deux termes C ou $\overline{C}$ vaut forcément 1 ; elles disparaissent de l'écriture, et il reste : $L = \overline{A}B + AB$, expression dans laquelle B peut être mis en facteur : $L = B(A + \overline{A})$. Après la même simplification, il reste L = B. Cela veut dire que l'interrupteur B est seul maître de l'état de L : si B = 1, L est allumée quels que soient A et C ; de même, si B = 0, L est éteinte, et aucune manœuvre sur A et C ne peut la rallumer.

Cette conclusion n'était pas évidente au premier abord à la lecture de l'énoncé, elle apparaît clairement après les simplifications algébriques de l'expression initiale de L. Cette méthode de simplification est très puissante et indispensable dans les cas complexes.

▼ *A gauche, figure 63 ; circuits ET et OU à diodes : a) tableaux des valeurs de la somme et du produit logique de 2 variables ; b) produit de 2 variables logiques à l'aide de 2 diodes ; c) somme de 2 variables logiques à l'aide de 2 diodes. A droite, figure 65 : porte inverseuse en technologie C.M.O.S. (les M.O.S. sont de type à enrichissement). Si A = 0, le M.O.S. M_2 (canal P) a sa grille négative par rapport à sa source, il conduit, amenant S à 1, réciproquement, si A = 1, c'est M_1 (canal N) qui conduit, court-circuitant S à la masse. Dans l'un ou l'autre cas, l'un des deux est toujours bloqué : aucun courant n'est demandé à l'alimentation 5 volts.*

Matérialisation des fonctions logiques : les circuits logiques

A chaque variable logique A, on associe une tension électrique V_A pouvant prendre seulement deux valeurs, par exemple $V_A = 0$ si A = 0, $V_A = +5$ si A = 1. Soit alors une fonction logique L = *f* (ABC), le problème est de réaliser un circuit électrique ayant trois entrées auxquelles on appliquera les trois tensions $V_AV_BV_C$ décrivant A, B et C et une sortie sur laquelle on pourra observer une tension V_L pouvant prendre seulement deux valeurs, 0 *ou* + 5 volts, suivant que la variable L vaut 0 ou 1. Ce circuit est, en quelque sorte, un calculateur simplifié.

L'*addition* et la *multiplication* peuvent être réalisées avec de simples diodes, comme le montre la *figure* 63. Si l'on néglige la tension de conduction 0,6 volt des diodes, on voit que, dans le cas de la *figure* 63b, le potentiel de P est 0 dès que l'une ou l'autre des entrées est à la masse, car il passe alors un courant à travers R et à travers la ou les diodes dont la cathode est mise à la masse. P ne vaut donc 1 que si A et B valent 1, ce qui est la définition de la multiplication P = AB.

fig. 64

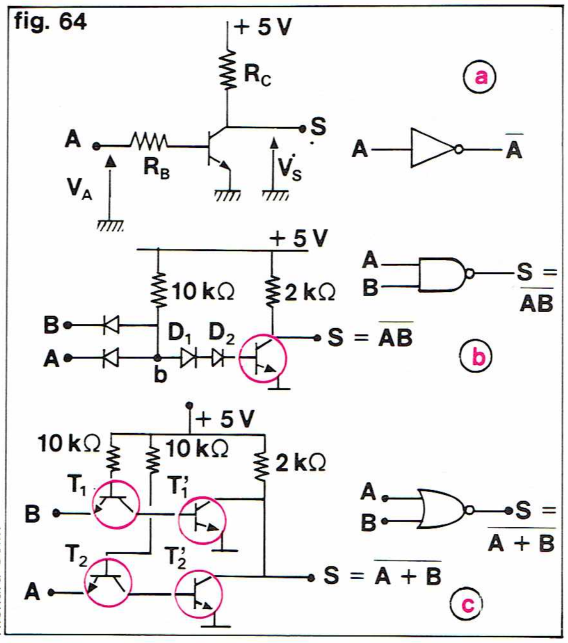

Richard Colin

Au contraire, avec le montage 63c, V_S vaut + 5 volts si l'une *ou* l'autre des tensions d'entrée est amenée à + 5 volts, rendant conductrice la diode correspondante. Donc S = A + B. On peut multiplier le nombre de diodes pour réaliser ces fonctions avec un plus grand nombre de variables, mais ces circuits simples ne permettent pas de réaliser la complémentation d'une variable ; il faut faire appel à un transistor (*fig.* 64a) : si $V_A = +5$ volts, à condition que $R_B < \beta R_C$, le transistor est saturé et $V_C = 0$; réciproquement, si $V_A = 0$, T est bloqué et $V_S = +5$ volts ; on a donc bien S = $\overline{A}$.

En combinant les circuits à diodes et un ou plusieurs transistors, on peut, comme le montrent les théorèmes de Morgan, réaliser n'importe quelle fonction. Les circuits représentés sur la *figure* 64 sont les plus simples mais aussi les plus importants, en particulier le circuit réalisant la fonction NON-ET ou NAND S = $\overline{AB}$. Le NON-OU (NOR) est plus rarement utilisé. Une fonction plus complexe importante est le OU-EXCLUSIF notée A ⊕ B qui vaut 1 si A OU B valent 1 mais non les deux à la fois. Par un raisonnement analogue à celui qui a été détaillé plus haut, on montre que : $A \oplus B = A\overline{B} + \overline{A}B$; on peut remarquer que le complément du OU-EXCLUSIF ne vaut 1 que si A = B, c'est la fonction identité notée A ⊙ B, $A \odot B = \overline{A \oplus B} = AB + \overline{A}\overline{B}$.

Les circuits réalisant ces fonctions simples sont appelés *portes logiques*. Ils sont construits essentiellement sous forme de circuits intégrés. Plusieurs technologies sont en compétition ; on les distingue par les noms des composants utilisés. La logique D. T. L. est réalisée avec des diodes et des transistors ; la *figure* 64b en est un exemple ; c'est une famille de circuits qui disparaît actuellement. Dans la logique T. T. L., les diodes sont remplacées par des transistors, comme dans l'exemple de la *figure* 64c ; c'est la famille de circuits logiques la plus utilisée ; on lui reproche d'être assez lente et de consommer beaucoup d'énergie.

Ce dernier problème est résolu avec les circuits de la famille C. M. O. S. qui met en œuvre des transistors M. O. S. complémentaires ; au repos, la consommation est

fig. 63

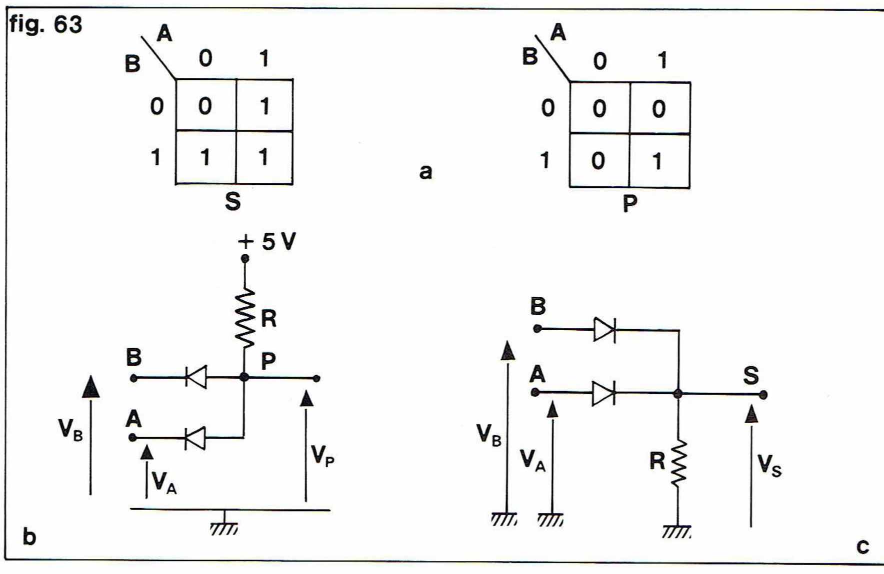

Richard Colin

fig. 65

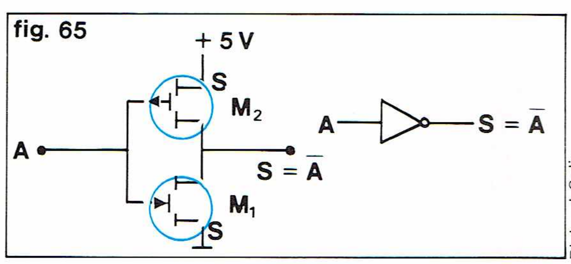

Richard Colin

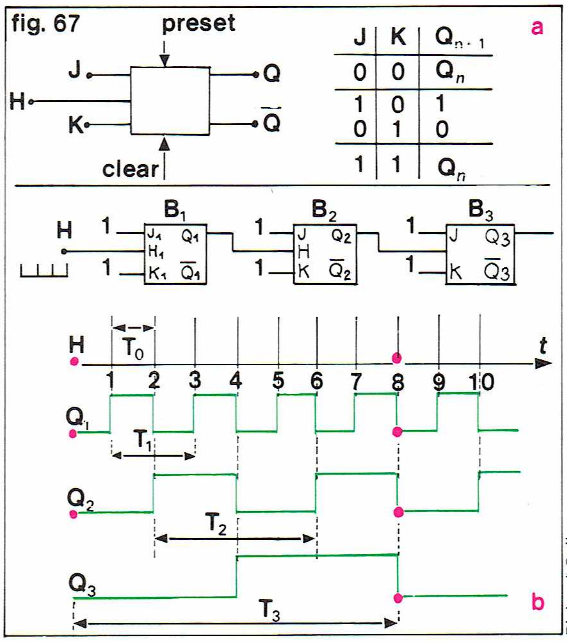

J	K	Q_{n+1}
0	0	Q_n
1	0	1
0	1	0
1	1	$\overline{Q}_n$

◀ *Figure 67; bascule* **JK** *et application au comptage :*
a) bascule **JK** *et son tableau de fonctionnement ;*
Q_{n+1} *représente la valeur de Q après le top d'horloge,* Q_n *la valeur antérieure ;*
b) diviseur par 8 à 3 bascules **T.**

alors rigoureusement nulle (*fig.* 65), mais ils sont fragiles électriquement. On notera sur les figures le mode de représentation le plus usuel ; le petit cercle dessiné en sortie symbolise l'inversion.

Combinaison de portes logiques : les bascules

Considérons le système formé de deux portes NAND interconnectées représenté sur la *figure* 66a. Il est facile de constater qu'il peut exister dans deux états stables possibles lorsque les deux entrées R et S sont au niveau haut. Par exemple (en rouge), si $Q = 1$, le NAND 2 reçoit deux 1 à ses entrées, donc $Q' = 0$; le NAND 1 voit alors à son entrée 1 et 0 ; sa sortie est bien au 1 ; cet état est stable. Il en est de même de l'état inverse (en bleu). Ce circuit est une *bascule bistable*, dite bascule RS. Si l'entrée R est amenée au zéro, on a nécessairement $Q = 1$; lorsque R revient à son état de repos, le système conserve cet état. De même, on force Q à devenir zéro en amenant, même brièvement, S à la masse. La *figure* 66b montre comment, avec une telle bascule, on peut supprimer les rebondissements de contact d'un interrupteur. En compliquant le montage, on peut réaliser des fonctions intéressantes ; c'est ce qui est fait par exemple sur la *figure* 66c où 2 NAND et un inverseur ont été ajoutés à la bascule RS formée par 1 et 2. Au repos, l'entrée d'horloge C_P (clock-pulse) est au niveau bas ; la sortie des NAND 3 et 4 est au 1 (car $\overline{0 \cdot A} = 1$ quel que soit A) ; la bascule RS se trouve dans un état quelconque. Si $D = 1$, lorsque C_P passe à 1, la sortie de 3 passe à 0, forçant Q à prendre la valeur 1 ; cet état persiste lorsque C_P revient à 0, puisque R remonte à 1. Si D avait été au niveau bas, ce serait S qui serait devenu nul, forçant Q à zéro. Ainsi, au moment de l'impulsion d'horloge, Q *recopie* D, et on conserve ensuite cette valeur ; c'est une *mémoire élémentaire*. En technologie T. T. L., le circuit SN 7475 est constitué de quatre bascules de ce type intégrées sur le même substrat, c'est une *mémoire à quatre bits*.

Dans une bascule RS, le changement d'état est obtenu en appliquant une impulsion négative sur l'une des deux entrées, une seule des deux étant sensible. Par exemple, dans l'état $Q = 1$, les tops négatifs sur R sont sans effet, seule l'entrée S est sensible. On a pu réaliser des bascules contenant un système d'aiguillage automatique des impulsions qui dirige celles-ci vers la seule entrée sensible. Le basculement se fait alors à chaque top appliqué sur l'entrée d'horloge, ce sont les *bascules T*.

La plus performante de toutes les bascules est la *bascule type JK maître-esclave* (*fig.* 67a) dont nous donnerons seulement les propriétés. C'est un circuit comprenant :

— une entrée horloge H qui doit être au repos au potentiel bas et est destinée à recevoir des impulsions positives,

— deux entrées appelées J et K,

— et deux sorties Q et $\overline{Q}$.

On ajoute parfois deux entrées baptisées Clear et Preset qui, lorsqu'on leur applique un top négatif à n'importe quel moment, amènent respectivement Q et $\overline{Q}$ à 0 et 1. Si $J = K = 0$, la bascule est insensible, Q est quelconque mais n'est pas modifié par des tops d'horloge agissant sur l'entrée H. Si $J = K = 1$, la bascule se comporte comme une bascule T ; Q change d'état à chaque front de descente du top d'horloge, c'est-à-dire au moment où H, étant monté de 0 à 1, revient à son état de repos. Si $J = 0$, $K = 1$, Q prend la valeur 0 au moment du front de descente du top d'horloge. Si $J = 1$ et $K = 0$, Q prend la valeur 1 (c'est-à-dire, comme dans le cas présent, recopie J) à la descente du top d'horloge.

Les bascules, et en particulier les JK, sont utilisées dans d'innombrables schémas, dont les plus importants sont les *diviseurs de fréquence* et les *compteurs*. Considérons par exemple le système formé par trois bascules JK maître-esclave connectées en série comme le montre la *figure* 67b, les entrées J et K étant toutes au niveau haut. Des impulsions positives de niveau convenable sont appliquées à l'entrée horloge de B_1 ; supposons qu'à l'instant initial $Q_1 = Q_2 = Q_3 = 0$. Les trois bascules ayant leurs entrées J et K au 1 se comportent comme des bascules T ; Q bascule à chaque top d'horloge H ; on remarquera que la fréquence du signal rectangulaire recueilli sur la sortie Q_1 de B_1 est moitié de celle de l'horloge d'entrée H ; B_1 joue donc le rôle d'un diviseur de fréquence par deux. Le signal Q_1 est signal d'horloge pour B_2 qui ne bascule que sur le front de descente, c'est-à-dire aux instants 2 - 4 - 8, etc. Le signal Q_2 est rectangulaire, mais sa fréquence est moitié de celle de Q_1. De la même façon, la bascule B_3 divise encore la fréquence par deux ; il en découle que la fréquence de Q_3 est le huitième de celle de H. En plaçant ainsi *n* bascules bout à bout, on réalise un diviseur de fréquence par 2^n ; c'est ainsi qu'à partir d'un oscillateur à 2^{16} Hz (65 536 Hz) stabilisé par quartz, on obtient à l'aide de 16 bascules réalisées sur un seul circuit intégré du 1 Hz capable d'entraîner les aiguilles d'une montre électronique. Seuls les circuits M. O. S. consomment assez peu d'énergie pour effectuer cette fonction avec une consommation totale de l'ordre du micro-ampère, malgré les centaines de composants élémentaires nécessaires pour construire les 16 étages de division.

En revenant à notre exemple, nous voyons que le système reprend son état de départ ($Q_1 = Q_2 = Q_3 = 0$) au bout de $2^3 = 8$ tops d'horloge, les huit états intermédiaires étant tous différents. Par exemple, au bout de cinq impulsions, on obtient $Q_1 = 1$, $Q_2 = 0$, $Q_3 = 1$; remarquons ici que 101 est la représentation du nombre 5 en numération binaire. Ainsi l'état des *n* bascules nous renseigne sur le nombre de tops d'horloge qui ont été appliqués à l'entrée depuis l'instant initial ; sous réserve que ce nombre soit inférieur à 2^n, nous avons réalisé un *compteur* de capacité $2^n - 1$.

▼ *Figure 66 ; bascule* **RS** *et applications :*
a) montage de base ;
b) avec un **RS**, *il n'y a plus de rebondissements sur le signal* **Q**,
car la bascule réagit au premier contact ;
c) bascule de recopie ou mémoire élémentaire.

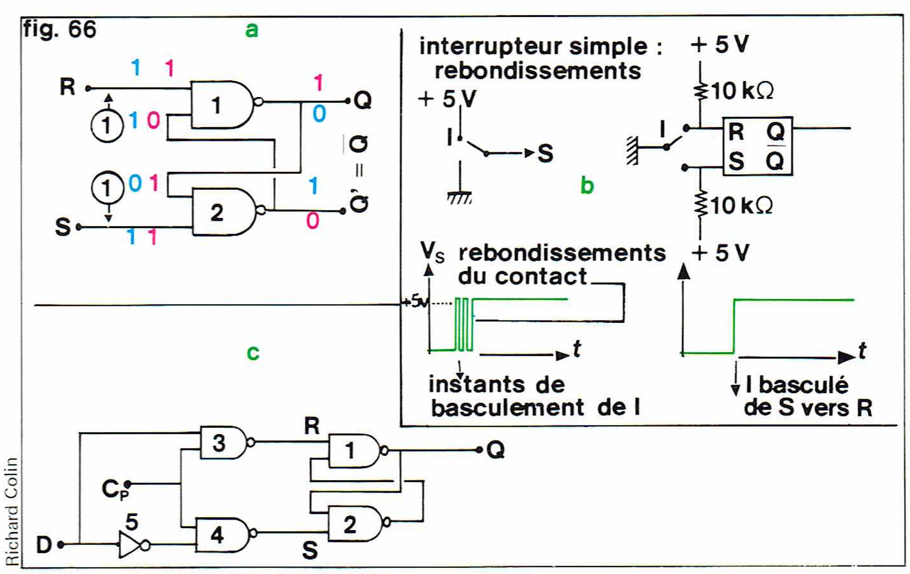

Les mémoires et les registres

Nous venons de voir comment un perfectionnement de la bascule RS permettait de réaliser un circuit gardant en mémoire la valeur d'une grandeur binaire. De façon plus générale, les mémoires sont des systèmes complexes qui sont capables de stocker les valeurs d'un grand nombre de grandeurs binaires, c'est-à-dire des 0 et des 1. Chacun de ces « digits » est placé dans une cellule de la mémoire qui est repérée par son adresse. Chaque cellule peut être constituée par une bascule du type RS ou JK mais peut aussi être réduite à une simple capacité, qui peut être chargée ou non. Nous ne décrirons pas ici les systèmes utilisés qui sont fort nombreux; ceci est du domaine de l'informatique.

Les *registres à décalage* sont des mémoires particulières formées de *n* cellules placées en ligne, chaque cellule étant repérée par son rang. A l'arrivée d'une impulsion d'horloge, le contenu du registre se déplace d'un cran, c'est-à-dire que le contenu de la cellule du rang K passe dans celle de rang K + 1, la cellule de rang 1 prend la valeur de la variable qui était appliquée à l'entrée de la chaîne, et le contenu de la dernière case sort et est perdu. On peut réaliser un tel registre en plaçant bout à bout des bascules JK, le J et le K d'une bascule étant reliés respectivement aux Q et $\overline{Q}$ de l'étage précédent et le signal d'horloge appliqué simultanément en parallèle à toutes les entrées H. Avant un top d'horloge, on a :

▼ ***Figure 68; circuits de commutation principaux :*** a) ***comparateur;*** b) ***trigger de Schmitt à ampli-op;*** c) ***trigger de Schmitt à portes*** NAND; d) ***monostable à portes*** NAND.

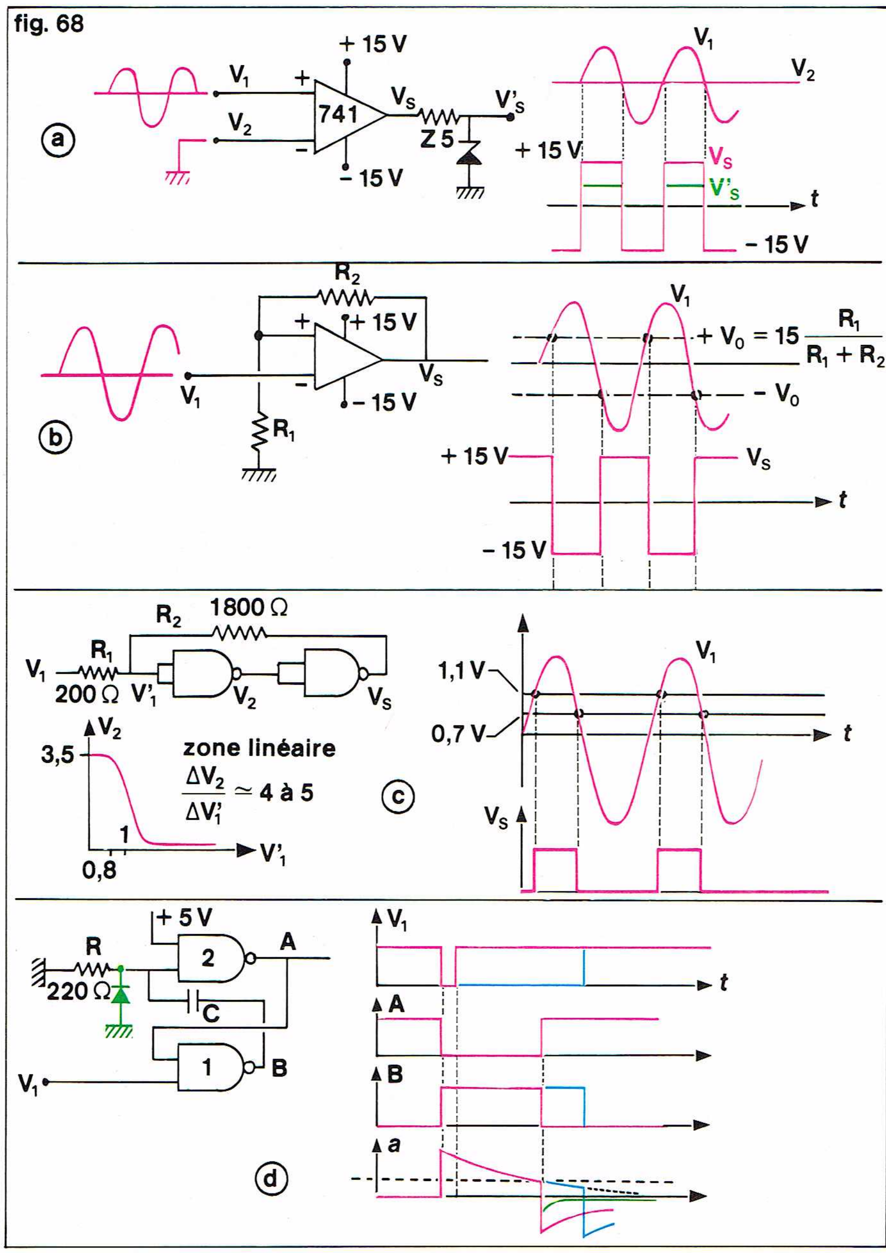

Richard Colin

$$J_{n+1}(t-\varepsilon) = Q_n(t-\varepsilon),$$

$$K_{n-1}(t-\varepsilon) = \overline{Q}_n(t-\varepsilon)$$

Q recopie J ; on a donc :

$$Q_{n+1}(t+\varepsilon) = J_{n+1}(t-\varepsilon) = Q_n(t-\varepsilon)$$

L'information a avancé d'un cran vers la droite.

Circuits digitaux annexes

Nous appelons ainsi un certain nombre de circuits dans lesquels les transistors travaillent en commutation et qui sont souvent associés aux précédents, en particulier pour faire la liaison entre ces derniers et des systèmes analogiques.

● *Le comparateur*

C'est tout simplement un amplificateur opérationnel, de gain aussi grand que possible, utilisé sans aucune contre-réaction. Sa sortie est alors toujours en saturation ± 15 volts.

$$V_S = +15 \text{ volts si } V_+ > V_-$$
$$V_S = -15 \text{ volts si } V_+ < V_-$$

En modifiant le circuit par adjonction, d'une diode Zener par exemple, on peut rendre la sortie compatible avec les logiques classiques :

$$V_S = 5 \text{ volts si } V_+ > V_-$$
$$V_S = 0 \quad \text{ si } V_+ < V_-$$

Comme le montre la *figure* 68a, ce circuit peut transformer une sinusoïde en signaux rectangulaires. Un amplificateur opérationnel type 741 est souvent jugé trop lent pour cette application; il existe des comparateurs spécialement construits, c'est le cas du 72710 qui sort directement des niveaux logiques de la famille T. T. L.

● *Le trigger de Schmitt*

C'est un circuit un peu analogue au précédent mais qui présente un phénomène d'hystérésis. Il est facile de réaliser un tel trigger avec un ampli-op, comme le montre la *figure* 68b. L'entrée + de l'ampli-op étant reliée à la sortie (réaction positive), le circuit ne peut pas fonctionner en régime linéaire, V_S est nécessairement à + ou — 15 volts. Supposons qu'à l'instant initial V_S soit à + 15 volts, V_+ vaut alors $V_0 = \frac{15 R_1}{R_1 + R_2}$. Tant que V_- est inférieur à cette valeur, l'état est stable. Montons lentement $V_1 = V_-$; au moment où V_1 atteint V_0, l'ampli-op se trouve un bref instant en régime linéaire, et à cause de la réaction positive le système bascule; V_S passe à — 15, donc $V_+ = -V_0$, alors $V_1 > V_+$; le nouvel état est stabilisé. Pour revenir à l'état initial, il faut redescendre V_1 en dessous de $-V_0$. Le basculement ne se produit pas pour le même niveau d'entrée à la montée et à la descente, c'est un phénomène d'hystérésis (*fig.* 68b).

Ce montage peut être réalisé avec tout amplificateur à courant continu même très peu linéaire; ainsi, il est très commode d'utiliser comme amplificateur deux portes NAND mises en série. Comme le montre la *figure* 68c, un inverseur logique peut être considéré comme un amplificateur ayant un gain d'ailleurs assez faible (quelques unités), la zone de linéarité (pour la T. T. L.) se situant autour de 1 volt. Si $V_1 = 0$ (niveau bas), $V_2 = 3{,}5$ volts (niveau haut), donc $V_S = 0$ (niveau bas). Si V_1 croît, V_S restant d'abord à zéro, V_1' augmente également, sa valeur étant, par suite de la présence des deux résistances, $V_1' = V_1 \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 0{,}9\ V_1$. Le basculement se produira lorsque V_1' atteindra environ 1 volt; ceci aura lieu pour $V_1 = 1/0{,}9 \# 1{,}1$ volt. Alors V_S saute brutalement à + 3,5 volts, et la valeur de V_1' est donnée par

$$V_1' = V_1'\left(\frac{R_1 + R_2}{R_1}\right) - V_S \frac{R_1}{R_2} = 0{,}7 \text{ volt}$$

En réalité, les seuils sont un peu différents par suite de l'existence du courant d'entrée de la porte dont nous n'avons pas tenu compte.

Ce circuit est très utilisé pour transformer une sinusoïde ou tout autre signal analogique en un signal exploitable par les circuits T. T. L. Les circuits à transistors discrets jouant le même rôle sont de moins en moins utilisés.

● *Le monostable*

C'est un circuit qui, excité par une impulsion brève, délivre un signal rectangulaire d'amplitude et de durée calibrées. La *figure* 68d représente un tel circuit réalisé

avec des portes NAND. Au repos, l'entrée V_1 est au niveau haut (1), à cause de R (220 Ω), le circuit 2 a une entrée au zéro, donc sa sortie au 1. Le circuit 1 a ainsi ses deux sorties au 1, donc B = 0. Amenons V_1 à 0, l'une des entrées de 1 se trouvant au niveau bas B = 1. La montée de la tension en B est transmise par la capacité C en *a*; le circuit 2 a ainsi ses deux entrées au 1, donc A = 0. Lorsque V_1 remonte, B ne change pas, car A, restant au zéro, verrouille la sortie du NAND 2 en position haute. Cet état persiste tant que la tension *a* qui décroît exponentiellement ne descend pas en dessous du seuil considéré comme « haut » par le circuit 2. Lorsque cette limite est franchie, A revient à 1 et B à zéro. La différentiation par C de la transition négative de B est sans effet; on peut d'ailleurs en réduire l'effet en ajoutant une diode entre *a* et la masse. La durée du créneau A ne dépend que de la constante de temps RC; on pourra, en reprenant le raisonnement dans le cas où l'impulsion V_1 est plus large que la précédente, constater que la durée du top V_1 est sans influence sur le signal A (en bleu sur la figure).

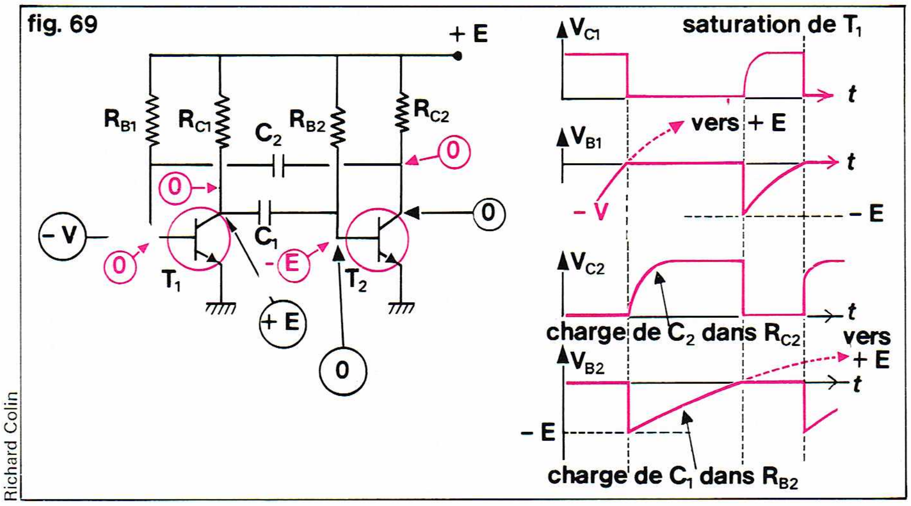

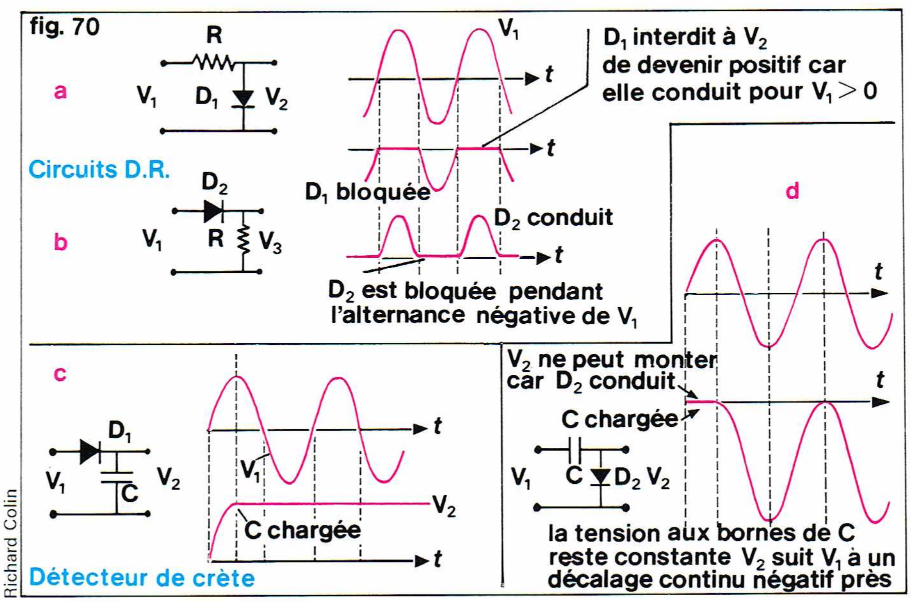

▲ ***En haut, figure 69 : multivibrateur d'Abraham et Bloch; période*** **$T = (R_{B1}C_2 + R_{B2}C_1) \text{Log}_e 2$.** ***Ci-dessus, figure 70 : circuits*** **RD** ***ou*** **CD** ***à 2 éléments.***

Le multivibrateur

C'est un oscillateur qui délivre directement des signaux rectangulaires. Le montage le plus classique est le *multivibrateur astable d'Abraham* et *Bloch* dont la transposition avec des transistors est représentée sur la *figure* 69. Il s'agit d'un amplificateur à deux étages à liaison capacitive dont l'entrée est couplée directement à la sortie; on réalise ainsi une forte réaction positive interdisant tout séjour prolongé des points de fonctionnement dans la zone linéaire des caractéristiques. Les deux transistors sont bloqués ou saturés (si $R_B < \beta R_C$). Supposons qu'initialement T_1 soit bloqué; son potentiel de base étant négatif, et T_2 saturé, les tensions sont celles notées en noir sur la figure; pour simplifier les raisonnements qui vont suivre, nous négligerons systématiquement le V_{BE} = 0,6 volt des transistors conducteurs, c'est pourquoi nous avons indiqué 0 sur la base de T_2. La capacité C_2 a donc son armature de droite à la masse et celle de gauche reliée au + E par R_{B1}; elle se charge, c'est-à-dire que le potentiel de base de T_1 remonte exponentiellement vers + E. Lorsqu'il atteint zéro (ou 0,6 volt), T_1 se débloque, son potentiel collecteur tend à descendre, cette variation est transmise par C_1 à T_2 et, les deux transistors étant alors conducteurs, l'effet de réaction positive agit, il y a basculement et T_1 devient brutalement conducteur. Les capacités ne pouvant pas en un temps nul modifier leur charge (il faudrait un courant infini), le potentiel à leur borne ne peut varier brusquement. Le collecteur de T_1 passant brutalement de + E à 0 (saturation de T_1), la base de T_2 descend de 0 à — E, ce qui assure le blocage du deuxième transistor. Le courant collecteur de T_2 cesse brusquement, mais le potentiel de collecteur de ce transistor ne remonte pas immédiatement à + E, car il faut pour cela charger C_2, ce qui prend un certain temps. Immédiatement après le basculement, les potentiels sur le circuit sont ceux indiqués en rouge sur la figure. La constante de temps C_2R_{C2} étant faible devant celle des circuits de base, la tension collecteur de T_2 se retrouve rapidement à + E, le montage alors dans un état symétrique de celui d'où l'on est parti. Le retour à l'état initial se fait par basculement de T_2 lorsque son potentiel de base franchit le zéro. Le montage passe continuellement d'un état à l'autre, c'est un *oscillateur de relaxation*. La forme des signaux obtenus est dessinée sur la figure. La période s'établit en calculant la durée de remontée des potentiels base de — E à zéro; elle vaut : T = 0,69 $(R_{B1}C_2 + R_{B2}C_1)$; (0,69 = $\text{Log}_e 2$). Le multivibrateur est utilisé comme générateur de signaux rectangulaires employés souvent comme signaux d'horloge dans des systèmes logiques complexes. Il existe de nombreuses variantes de ce montage dont la fréquence de fonctionnement peut dépasser le mégahertz.

Les circuits à diodes

La diode est un élément non linéaire, et les méthodes classiques de calcul sont inapplicables aux circuits qui en contiennent. Pour cette raison, nous avons réservé un paragraphe à part à ces circuits, dont la plupart sont très importants.

Le cas le plus simple est celui où la diode est associée seulement à des résistances; il suffit de tenir compte de la conduction unilatérale du composant. La *figure* 70a montre ce qui se passe lorsqu'un circuit RD (résistance, diode) est attaqué par une tension sinusoïdale.

Les associations DC (diode, condensateur) ont déjà un comportement plus intéressant. Lorsque la diode se trouve en tête comme dans la *figure* 70c, on obtient un détecteur de crête. Pendant la première montée de tension, C se charge à travers D ; elle ne peut plus ensuite se décharger, car cela nécessiterait un courant circulant dans le sens inverse dans D. Le potentiel aux bornes de C garde la valeur crête du signal d'entrée. Si la capacité se trouve en série avec l'entrée, le comportement est plus surprenant : pendant le premier quart d'alternance, D_2 conduit, la tension à ses bornes reste donc faible (on néglige les 0,6 volt). Au sommet de l'alternance, la capacité se trouve chargée sous la tension crête du signal. Pour la même raison que précédemment, elle ne peut plus ensuite se décharger et joue alors le rôle d'une pile. La tension de sortie est alors semblable à celle d'entrée, mais entièrement décalée en dessous du zéro. En associant un détecteur de crête au circuit précédent, on conçoit que l'on puisse réaliser un *doubleur de tension* délivrant une tension continue égale au double de la valeur crête de la sinusoïde d'entrée (*fig.* 71).

Les circuits RDC sont d'analyse bien plus complexe. Nous citerons seulement le plus important qui est le *redresseur avec filtrage par capacité;* il ne diffère du détecteur de crête que par la présence d'une résistance en parallèle sur la capacité. Cette résistance offre un chemin courant de décharge de C. Au début de la première alternance positive de la tension d'entrée, de la même façon que plus haut, C se charge à la valeur

fig. 71

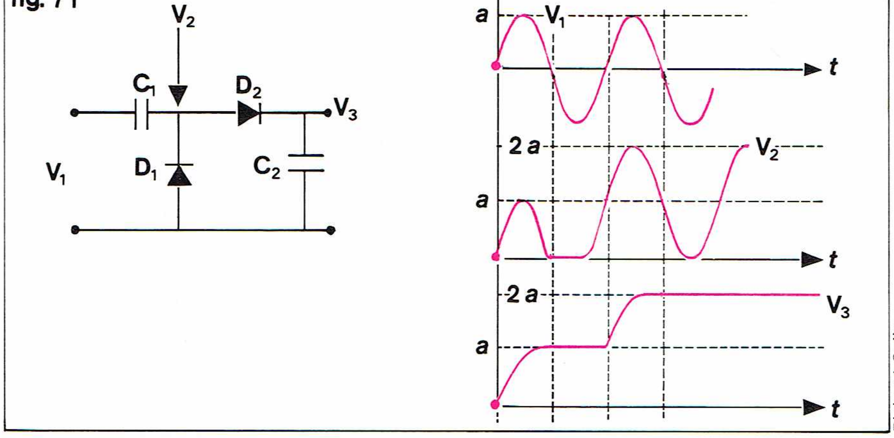

Richard Colin

▲ *Figure 71 : doubleur de tension.*

▼ *Ci-dessous, figure 72 ; circuits de redressement. En bas, figure 73 : principe d'une alimentation stabilisée. L'amplificateur opérationnel commande* T_1 *de façon que ses deux entrées restent au même potentiel :* $V_S R_1/(R_1 + R_2) = V_Z$.

crête de la sinusoïde. Après le premier maximum, si la résistance R est assez élevée, la décharge de C n'est pas assez rapide pour suivre V_1 et la diode D se bloque. La capacité C se décharge librement dans R comme si D et la tension d'attaque V_1 n'existaient pas. Cela dure tant que la tension anodique de D est inférieure à son potentiel de cathode. Dès que V_1 est redevenue assez grande pour débloquer D, la capacité C se recharge, et le cycle recommence. On observe donc en sortie une tension ondulée. L'amplitude de l'ondulation, que l'on appelle souvent ronflement à cause du son qu'elle produit dans un haut-parleur, peut être aisément calculée si l'on admet que la durée pendant laquelle D conduit est faible devant la période. En effet, à partir de la valeur crête *a*, la tension aux bornes de C se déchargeant dans R évolue exponentiellement : $V_C = ae^{-t/RC}$.

Au moment où D conduit de nouveau, c'est-à-dire après un intervalle de temps très voisin de la période T, on a $V'_C = ae^{-T/RC}$; l'amplitude du ronflement est donc : $V = a - V'_C = a\,(1 - e^{-T/RC})$. Si la décharge de C est lente devant la durée d'une période T, c'est-à-dire que R est élevée, l'exposant de l'exponentielle est petit devant l'unité, et l'on peut effectuer un développement au premier ordre : $e^x \# 1 + x$, alors

$$V = a - V'_C \# \frac{aT}{RC}$$

en valeur relative $\frac{V}{a} = \frac{T}{RC}$.

Ce circuit fournit à partir d'une tension alternative une tension continue faiblement ondulée, c'est ce que l'on appelle un *redresseur*. Le plus souvent, la résistance R est constituée par la charge que l'on désire alimenter en courant continu.

Soit à réaliser une alimentation fournissant une tension de 12 volts et un courant de 1 ampère à partir d'une tension alternative sinusoïdale 50 Hz prélevée au secondaire d'un transformateur. L'amplitude de ronflement souhaitée étant inférieure à 0,1 volt, pour obtenir 12 volts continus il faut appliquer au circuit à diode une tension sinusoïdale d'amplitude crête 12 volts, soit $12/\sqrt{2} = 8{,}5$ volts efficaces. La résistance présentée par la charge est 12 V/1 A = 12 Ω. Compte tenu de la période T = 20 ms (*f* = 50 Hz), la formule précédente nous donne la valeur minimale de capacité à prévoir

$$C = \frac{T}{R}\frac{a}{\Delta V} = \frac{2 \cdot 10^{-2}}{12} \cdot \frac{12}{0{,}1} = 2 \cdot 10^{-1}\ \mathrm{F}$$

soit 200 000 μF. C'est une valeur considérable, dont il est difficile de disposer. En pratique, on sera obligé d'admettre un ronflement plus important ou de compliquer le circuit de filtrage.

Une manière élégante de gagner un facteur 2 est d'utiliser un système de *redressement double alternance* dans lequel les deux alternances du signal d'entrée contribuent à la charge de C. Le temps qui s'écoule entre deux recharges de C est ainsi divisé par deux, donc aussi l'amplitude du ronflement. C'est ce qui est obtenu avec le montage présenté sur la *figure* 72b. Si aucune ondulation résiduelle n'est admissible, il faut faire appel à un circuit électronique de stabilisation dont la *figure* 72b montre un exemple simple : tant que la tension aux bornes de C est supérieure à la tension Zener de la diode Z, le potentiel sur la base de T est maintenu constant, donc également la tension de sortie. On a réalisé une *alimentation stabilisée*.

Il existe de très nombreux schémas d'alimentation stabilisée qu'il nous est impossible de détailler ici. De façon générale, ces systèmes comportent une référence de tension qui est le plus souvent une diode Zener et un composant jouant le rôle de résistance variable qui, placé en série avec la tension redressée, compense à chaque instant ses fluctuations. La *figure* 73 donne un exemple typique d'un circuit faisant appel à un amplificateur opérationnel et un transistor de puissance, que l'on appelle *ballast*, qui est l'élément de régulation. A chaque instant, l'ampli-op injecte dans le transistor T_1 qui pilote lui-même T_2 un courant tel que ses deux entrées soient au même potentiel *(principe de la masse virtuelle)*. La tension de sortie garde alors la valeur $V_S = V_Z \times \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1}\right)$ quels que soient le courant débité et la tension non stabilisée V_0 (sous réserve que cette dernière reste supérieure à la valeur souhaitée pour V_S de façon qu'il reste une tension collecteur-émetteur positive sur T_2).

fig. 72

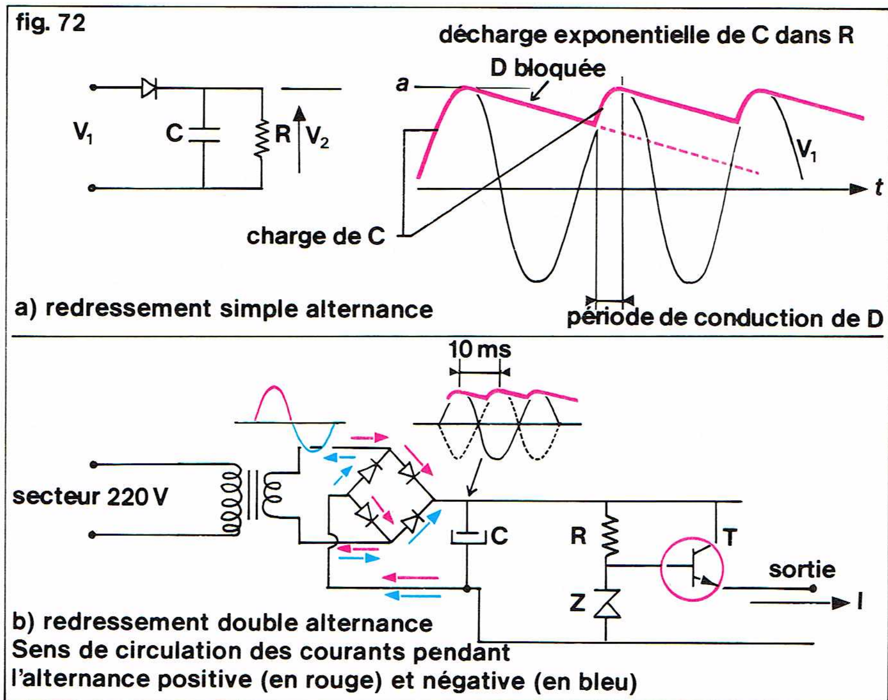

Richard Colin

fig. 73

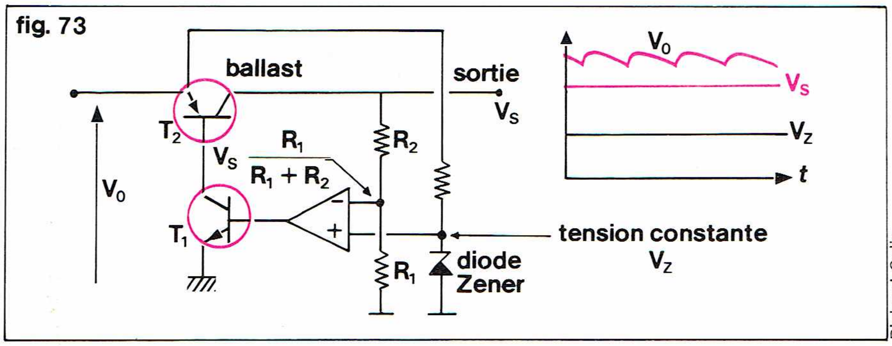

Richard Colin

Les appareils de mesure électroniques

Dans le domaine de la mesure, l'électronique a permis d'améliorer considérablement les performances de certains appareils électriques, les voltmètres par exemple, mais aussi de mesurer des grandeurs qu'il est difficile d'atteindre par d'autres moyens, c'est le cas des analyseurs de

fig. 74

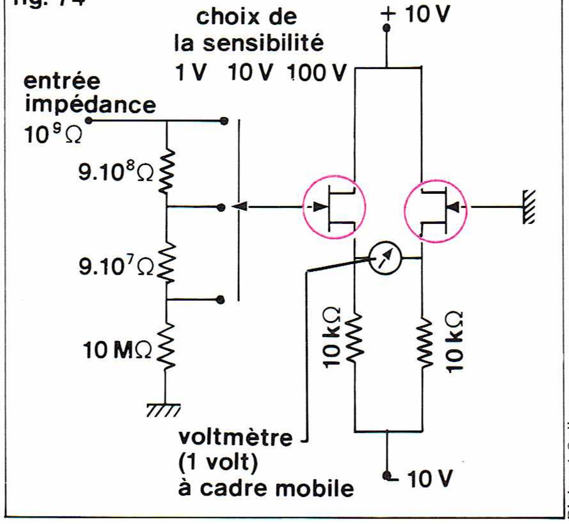

fig. 75

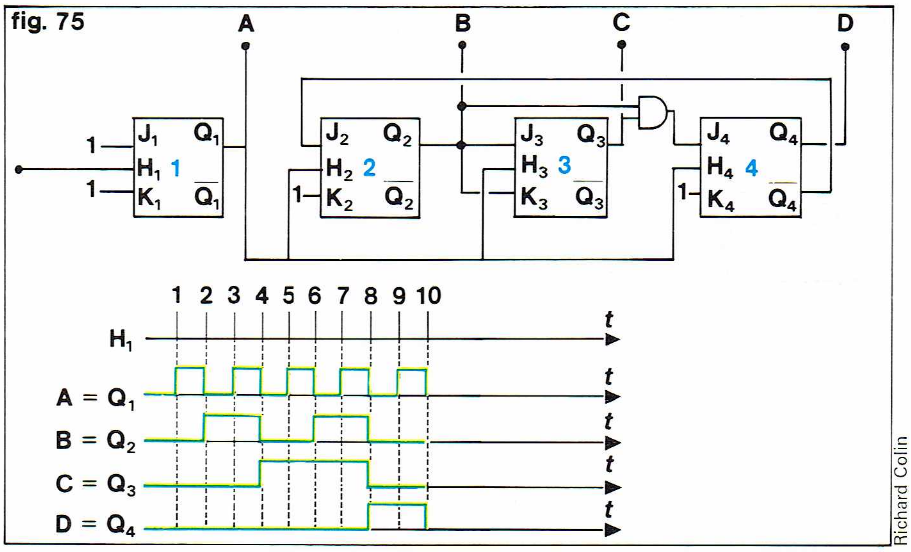

▲ *A gauche, figure 74 : voltmètre électronique à haute impédance d'entrée utilisant 2* **T. E. C.**
A droite, figure 75 : décade formée de 4 bascules **JK.**

spectre. Enfin une révolution s'est amorcée depuis quelques années avec la disparition progressive des appareils à aiguille au profit des systèmes à affichage numérique.

Mesure des tensions

Les appareils à aiguille

Les circuits à haute impédance d'entrée ont permis d'augmenter considérablement la résistance interne des voltmètres. Les meilleurs galvanomètres portatifs avaient une sensibilité pleine échelle de 10 µA, ce qui correspond, si on leur associe des résistances pour en faire des voltmètres, à des résistances d'entrée de 100 000 Ω pour une sensibilité de 1 volt. Le moindre transistor à effet de champ fait 1 000 fois mieux. Le voltmètre électronique réalisé par l'association d'un voltmètre à cadre mobile et d'un amplificateur est devenu avec l'apparition des transistors l'outil de base pour la mesure des tensions.

La *figure* 74 donne un exemple simple de réalisation d'un tel appareil ; l'amplificateur à T. E. C. a un gain voisin de 1 ; il joue seulement le rôle d'adaptateur d'impédances. Tous les voltmètres électroniques fonctionnent suivant ce principe, mais les circuits électroniques modernes, et en particulier les circuits intégrés, ont permis de supprimer le cadran classique avec son aiguille et de le remplacer par un affichage numérique du résultat. Ce sont ces appareils à affichage numérique dont nous allons entreprendre la description.

Les voltmètres digitaux

Un voltmètre numérique permet de lire le résultat d'une mesure directement sous forme d'un nombre. Les éléments lumineux de visualisation sont toujours commandés par des signaux binaires stockés dans une mémoire formée par les différentes bascules bistables constituant un compteur. L'opération consistant à passer de la valeur analogique d'entrée à la suite des 0 et des 1 matérialisés par les états de ces bascules est connue sous le nom de *conversion analogique-digitale*. Une méthode de conversion possible consiste à transformer la tension à mesurer en une durée qui lui est proportionnelle et pendant laquelle on compte les impulsions provenant d'un oscillateur. Le compteur préalablement mis à zéro se trouve à la fin du comptage dans un état caractéristique du nombre N de tops reçus, lui-même proportionnel à la grandeur d'entrée. Si le compteur est formé par une succession de bascules bistables mises bout à bout, nous avons vu dans un paragraphe précédent que l'état des divers étages matérialisait directement la représentation dans le système de numération de base deux (système binaire) du nombre N. Cependant, il est difficile de lire un nombre écrit en binaire dès qu'il est un peu élevé, et l'on a été conduit pour cette raison à utiliser une structure décimale : dans le compteur, les bascules sont associées par groupes de 4, liées entre elles de telle façon que le retour à l'état initial se produise à la dixième impulsion et non à la seizième. Chaque groupe est ce que l'on appelle une *décade*. En utilisant la table de vérité de la bascule JK et en observant les états successifs des entrées J et K des bascules 2, 3 et 4 de la *figure* 75, on pourra constater que ces trois étages constituent un diviseur par 5 qui, associé à la bascule d'entrée, forme 1 décade. L'état de cette décade à chaque instant révèle le nombre d'impulsions qu'elle a reçues ; par exemple, après la cinquième impulsion, on a : A = 1, B = 0, C = 1, D = 0 ; [DCBA] = 0101 est bien la transcription de 5 en binaire. En plaçant bout à bout de telles décades, le signal D de l'une constituant un signal d'horloge pour la suivante, on réalise un compteur décimal ; les différents chiffres du nombre N de tops reçus, écrit en décimal, se trouvent chacun en binaire dans les décades successives. C'est là une représentation mixte du nombre N que l'on appelle *représentation DCB* (décimal codé binaire). Ainsi un compteur de capacité $10^6 - 1$ sera formé par 24 bascules groupées en 6 décades ; si 723 480 impulsions ont été comptées, les états de ces 24 bascules sont 0111 - 0010 - 0011 - 0100 - 1000 - 0000. La visualisation devient alors aisée puisqu'il suffit de traiter séparément l'état de chaque décade.

Le tube de visualisation le plus ancien est le *tube « Nixie »* (marque déposée), constitué par une ampoule de verre contenant du néon sous basse pression, dans lequel sont installées une anode et dix cathodes en fil fin placées l'une derrière l'autre et dont la forme est celle des chiffres de 0 à 9. Si une décharge électrique est établie entre l'anode et l'une des cathodes, cette dernière est entourée d'une gaine lumineuse rouge-orangé, faisant apparaître ainsi le chiffre correspondant. Les autres cathodes, éteintes, sont assez fines pour ne pas être gênantes. La tension de fonctionnement d'un tel tube est de l'ordre de 70 volts pour un courant de quelques milliampères. L' « inscription » ainsi obtenue est très lisible, mais ces tubes sont de moins en moins employés, car leur durée de vie n'est pas très grande, et surtout ils nécessitent une tension d'alimentation peu compatible avec la sécurité des circuits intégrés.

On utilise de plus en plus des *afficheurs à sept segments* (formant une sorte de 8) dans lesquels chaque chiffre est formé par l'illumination de certains de ces « segments ». La *figure* 76 donne l'allure des chiffres obtenus qui, avec la diffusion des calculatrices de poche, est de plus en

fig. 76

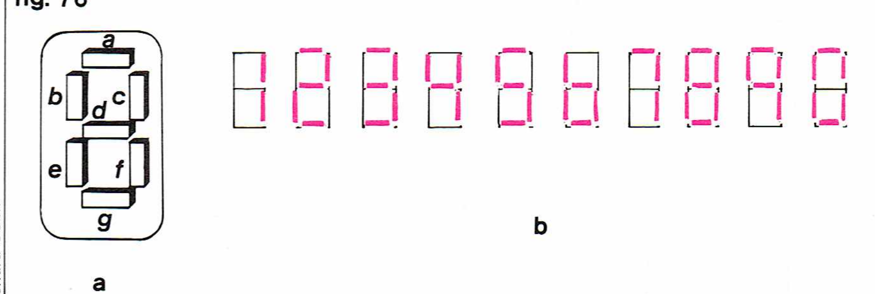

▼ *Figure 76 :*
a) *disposition des 7 segments lumineux dans un afficheur 7 segments ;*
b) *forme des chiffres fournis par un afficheur 7 segments.*

plus familière à tous. L'illumination de chacun des segments peut être produite par différents phénomènes : décharge dans un gaz, électroluminescence par exemple. On peut même faire appel aux cristaux liquides qui ont l'avantage de ne consommer aucune énergie mais sont moins visibles, puisque la lumière qu'ils réfléchissent est seulement prélevée au milieu ambiant. Chaque segment est commandé par une tension pilotée par l'état des quatre étages de la décade correspondante. Ainsi le segment *d* formant la barre du 8 doit être illuminé dans les états 2, 3, 4, 5, 6, 8 et 9, c'est-à-dire pour des valeurs de D, C, A, B qui sont respectivement (0010) ou (0011) ou (0100) ou (0101) ou (0110) ou (1000) ou (1 001). La fonction booléene (*d*) associée à la tension d'alimentation de ce segment sera donc :

$$(d) = \bar{A}\bar{C}B\bar{A} + \bar{D}\bar{C}BA + \bar{D}C\bar{B}\bar{A} + \bar{D}C\bar{B}A + \bar{D}CB\bar{A} + D\bar{C}\bar{B}\bar{A} + D\bar{C}\bar{B}A$$

Il faudra donc, à partir des quatre grandeurs logiques A, B, C, D prélevées sur chaque décade, matérialiser avec un circuit logique complexe les 7 tensions (*a*) (*b*), etc., destinées à alimenter les 7 segments de l'afficheur. Un tel circuit est appelé décodeur DCB-7 segments. Bien que plus simple, le problème est identique avec les tubes Nixie ; il faut fabriquer à partir des mêmes variables les 10 signaux de commande des 10 cathodes, le décodeur est qualifié dans ce cas de DCB-décimal. En technologie T. T. L., le décodeur destiné aux tubes à gaz est le 74141 et pour les « 7 segments » le 7447.

Parmi les nombreux schémas de voltmètres numériques, la *figure* 77 représente l'un des plus simples. Il s'agit d'un système à conversion tension-durée. La tension d'entrée V_1 que nous supposerons comprise entre 0 et 10 volts est appliquée à l'entrée + d'un amplificateur opérationnel 72709 monté en comparateur dont l'entrée — est reliée à un condensateur C. Au repos, la bascule bistable d'entrée 7472 a sa sortie Q au zéro, le transistor T_1 est donc bloqué ainsi que T_2. Par ailleurs, $\bar{Q}$ étant au 1, T_3 est saturé, et la tension V_C aux bornes de C est nulle. De plus, Q = 0 bloque la porte ET (A), et les impulsions de l'oscillateur de fréquence f_0 ne parviennent pas au compteur (qui est formé par plusieurs décades, type 7490 par exemple). Lorsque l'on appuie brièvement sur le poussoir P, l'entrée « préset » de la bascule reçoit un top négatif et Q passe à 1, ce top négatif amène de plus le compteur dans l'état 0 (entrée RAZ) ; Q étant à 1, T_1 se sature et injecte du courant (environ 15 mA) dans la diode Zener Z. La tension entre base de T_2 et le + 20 est alors fixée à 5,6 volts ; compte tenu des 0,6 volt de V_{BE} il reste 5 volts aux bornes de R_E ; le courant émetteur de T_2 est donc de I_0 = 5/5 kΩ = 1 mA. Le transistor se comporte comme une source de courant constant qui peut charger C, car, $\bar{Q}$ étant passé à 0, T_3 est bloqué. V_C monte linéairement de 100 V par seconde.

▼ *Figure 77 : représentation schématique d'un voltmètre numérique (à convertisseur tension → temps).*

fig. 77

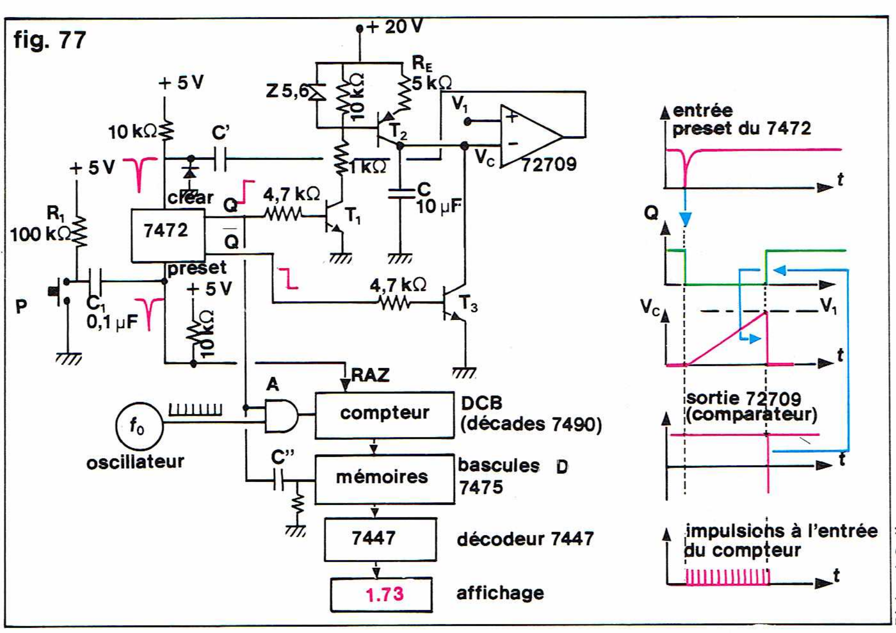

Richard Colin

$$V_C = \frac{I_0}{C}\,t = \frac{10^{-3}}{10^{-5}}\,t = 100\,t$$

Pendant ce temps, Q étant au 1, la porte A est ouverte, et les impulsions s'accumulent dans le compteur. Lorsque V_C atteint la valeur V_1 d'entrée, le comparateur 72709 bascule, sa tension de sortie passant brutalement de + 15 à — 15 volts, cette transition négative différentiée par C' est appliquée au « clear » du 7472, ce qui a pour effet de ramener Q à 0. Immédiatement, T_3 se sature, ce qui ramène V_C à zéro et la sortie du comparateur au + 15, (A) se bloque, et les impulsions cessent d'arriver au compteur. La transition positive de Q différentiée par C'' est appliquée à l'entrée horloge du bloc de bascules D (7475). Le contenu du compteur est mis en mémoire et appliqué au décodeur qui commande les tubes d'affichage. Grâce au bloc mémoire, le chiffre affiché reste fixe jusqu'à la fin de la mesure suivante. Les impulsions ont été comptées pendant une durée $T = \frac{V_1}{100}$ seconde. Si la fréquence de l'oscillateur local f_0 est de 10 kHz, le nombre N de tops comptés est de $\frac{V_1}{100} \cdot 10^4 = 100\,V_1$, soit un top pour 10 millivolts. Si par exemple V_1 = 1,73 volt, N = 173 ; la tension appliquée est lue directement à 10 mV près.

En choisissant f_1 = 100 kHz, l'affichage se fait avec une incertitude de 1 mV seulement, encore faut-il que la linéarité de la dent de scie V_c (*t*) permette une telle pression.

Ce montage est très simple et est encore utilisé dans certains voltmètres digitaux peu coûteux, mais il a l'inconvénient d'être lent. Pour une tension d'entrée de 10 volts, la durée de conversion est de 0,1 seconde, ce qui est suffisant pour une lecture directe mais insuffisant si le résultat doit être exploité par un circuit de calcul. De plus, la précision ne peut guère dépasser le millième.

Pour augmenter la vitesse et la précision, de nombreux autres schémas ont été imaginés qu'il nous est impossible de décrire ici. Lorsque le résultat de la mesure doit être traité de façon numérique par un ordinateur, il n'est pas toujours nécessaire de faire une conversion en DCB ; les convertisseurs analogiques-digitaux les plus rapides fournissent un nombre en binaire pur de 12 digits $\left(\text{précision } \frac{1}{2^{12}} \simeq \frac{1}{4\,000}\right)$ en quelques centaines de nanosecondes au plus.

Le voltmètre numérique est le constituant de base de la plupart des appareils digitaux, la grandeur d'entrée, courant, résistance, température, etc., étant préalablement transformée en une tension.

Visualisation des formes d'onde : l'oscilloscope

L'**oscilloscope** est le plus important de tous les appareils de mesure électronique, et des perfectionnements incessants lui octroient des possibilités et une précision de plus en plus grandes. Visualisant directement sur un écran la forme d'un signal variant avec le temps, il peut jouer le rôle de voltmètre mais aussi, si la base de temps est bien étalonnée, de fréquencemètre, périodemètre ou phasemètre.

L'organe de base d'un oscilloscope est le *tube cathodique*, dans lequel un faisceau électronique fin passe entre deux systèmes d'électrodes de déviation perpendiculaires avant de frapper un écran fluorescent et d'y faire apparaître une tache lumineuse (spot). Nous ne décrirons pas ici ce tube. Si une tension électrique H (*t*), fonction linéaire du temps, est appliquée entre les plaques de déviation horizontales pendant que le signal V (*t*) à observer commande les plaques de déviation verticale, le spot décrit sur l'écran une courbe qui est l'image de la fonction V (*t*). Par suite de la persistance de la fluorescence de l'écran et des impressions rétiniennes, il est possible de faire apparaître une courbe fixe et brillante si V (*t*) est périodique et qu'à chaque traversée de l'écran de gauche à droite le spot revienne exactement sur la même trajectoire. Cela est réalisé si la fréquence du signal V (*t*) et celle de la dent de scie de balayage H (*t*) sont égales ou multiples exactes l'une de l'autre. Ces quelques phrases ont permis d'introduire les différentes fonctions à réaliser pour construire un oscilloscope. Il faut :

— Un amplificateur capable de fournir aux deux plaques de déviation horizontale un signal périodique, ou simplement récurrent, possédant une partie bien linéaire qui commandera le déplacement à vitesse horizontale constante du spot de gauche à droite : c'est la *base de temps*, le signal de déviation étant appelé « dent de scie ».

— Un autre amplificateur attaquant les plaques de déviation verticales et dont le gain doit être variable de façon à l'adapter à toutes les amplitudes possibles du signal à observer.

— Un système de synchronisation assurant la fixité de l'image sur l'écran en commandant le démarrage du balayage en un point fixe sur chaque période de V (t).

L'amplificateur vertical

Pour éviter toute déformation de l'image et surtout une déconcentration du spot, il faut que le potentiel moyen des plaques de déviation reste constant. Cela est réalisé si, lorsque le potentiel d'une plaque augmente, celui de l'autre diminue. On obtiendra ce résultat en faisant appel à un *amplificateur différentiel*. Son gain doit être assez grand, car la sensibilité du système de déviation est faible (de 5 à 50 volts pour un centimètre de l'écran), et les signaux d'entrée peuvent être petits. Par exemple, si l'on désire obtenir une sensibilité apparente de 1 mV/cm avec un tube ayant une sensibilité de 50 V/cm, le gain à réaliser est de 50 000. Ce gain doit être réglable à volonté et de plus constant dans la plus large gamme de fréquences possible de façon à ne pas déformer les signaux traités ; un signal rectangulaire parfait à 20 kHz ne saurait être reproduit de façon satisfaisante si la bande passante de l'amplificateur est inférieure à 500 kHz. Pratiquement, l'examen des signaux basse fréquence rencontrés dans les systèmes de reproduction des sons nécessite une bande de 1 MHz. Pour travailler sur des circuits digitaux ordinaires (T. T. L.), il faut au moins 10 fois plus et la mise au point de certains circuits exige une réponse s'étendant jusqu'à 100 MHz.

Fabriquer un amplificateur ayant toutes ces qualités est très difficile. Nous avons vu comment les capacités parasites dégradaient les performances aux fréquences élevées. Pour y remédier, on est amené à réduire la valeur des résistances de charge, ce qui conduit, si l'on désire conserver la même amplitude de signal, à faire travailler les composants à des courants de plus en plus importants, donc à des niveaux de puissance de plus en plus élevés. Si l'on a besoin d'une amplitude crête à crête de 300 volts, la tension d'alimentation devra avoir au moins cette valeur, le point de repos étant par exemple à 150 volts. Alors, avec une charge de 10 kΩ, le courant de polarisation est de 15 mA et la dissipation de 2,25 watts ; si la capacité parasite est de 30 pF, la bande passante est limitée à $f = 1/2\,\pi RC = 2$ MHz. Dans ce cas, un tube triode type 12 AT 7 peut suffire.

Une bande passante 10 fois plus grande ne sera obtenue qu'en ramenant la résistance de charge à 1 000 Ω, mais le courant est alors de 150 mA, et la puissance dissipée de 22 watts. Une pentode de puissance devient nécessaire.

Les performances actuelles (certains oscilloscopes classiques ont une fréquence de coupure de 500 MHz) n'ont pu être atteintes qu'en augmentant la sensibilité de déviation des tubes cathodiques, ce qui a permis, entre autres choses, de faire appel uniquement à des transistors.

Pour conserver cette largeur de bande, l'atténuateur placé à l'entrée doit être lui-même réalisé avec soin ; ses capacités parasites doivent être compensées comme on le voit sur la *figure* 78 qui représente un amplificateur différentiel à courant continu utilisable pour réaliser un oscilloscope basses fréquences. Le tube cathodique utilisé est le DG7-32, peu coûteux, mais peu sensible (20 V/cm), ce qui a conduit à placer en sortie un étage à deux triodes. Nous avons retenu ce schéma un peu ancien à cause de sa simplicité et de la facilité avec laquelle il peut être construit par un amateur.

L'atténuateur d'entrée n'a que trois positions (1, 1/10, 1/100) ; il est compensé en fréquence par trois capacités ajustables de faible valeur (3 à 30 pF). L'impédance d'entrée, élevée, est obtenue avec un premier étage adaptateur à effet de champ. L'étage de sortie à double

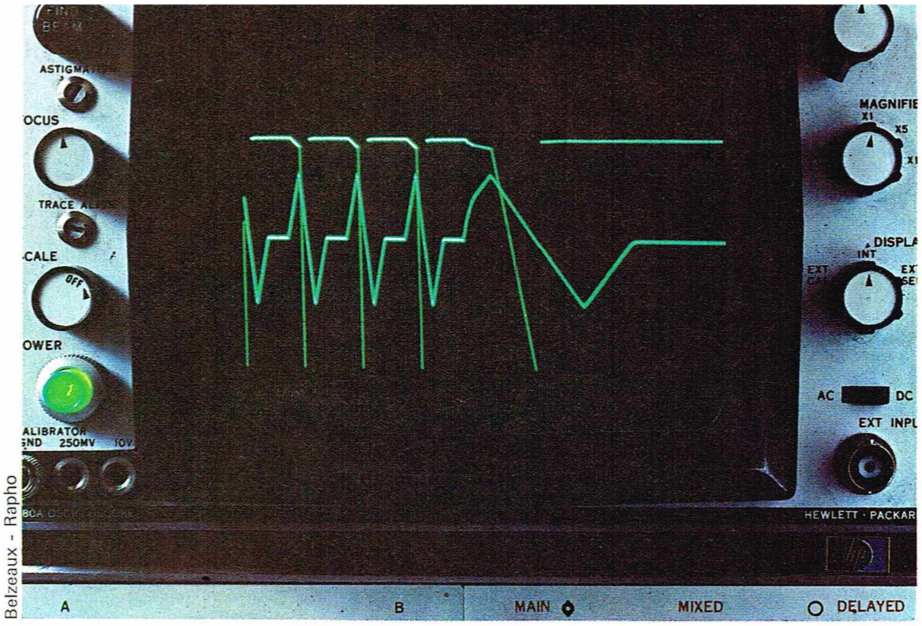

Belzeaux - Rapho

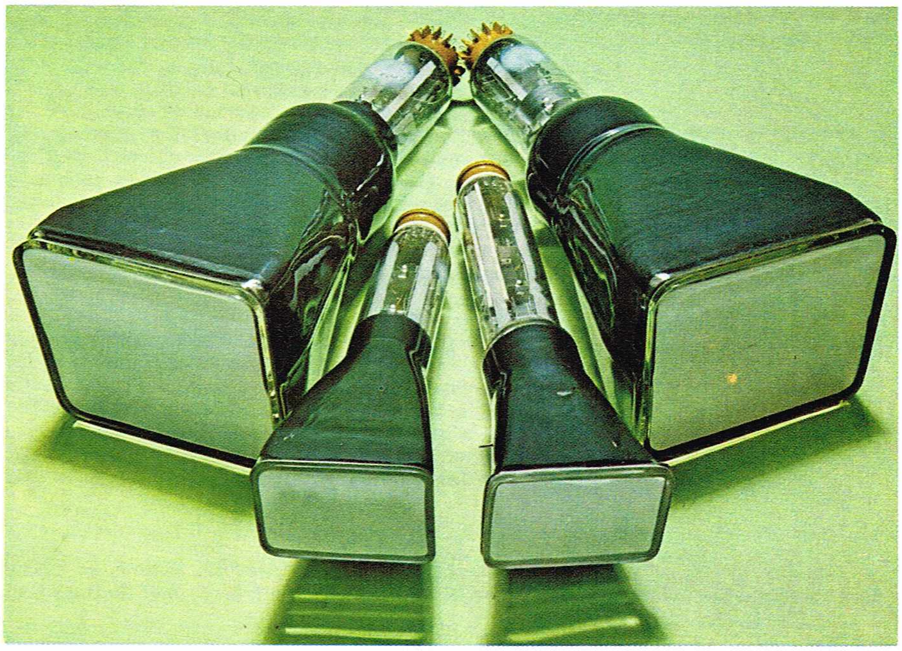

R.T.C.

▲ *En haut, l'oscilloscope est le plus important de tous les appareils de mesure électroniques.*
Ci-dessus, l'organe de base d'un oscilloscope est le **tube cathodique.**

▼ *Figure 78 : exemple de schéma d'amplificateur vertical pour oscilloscope.*

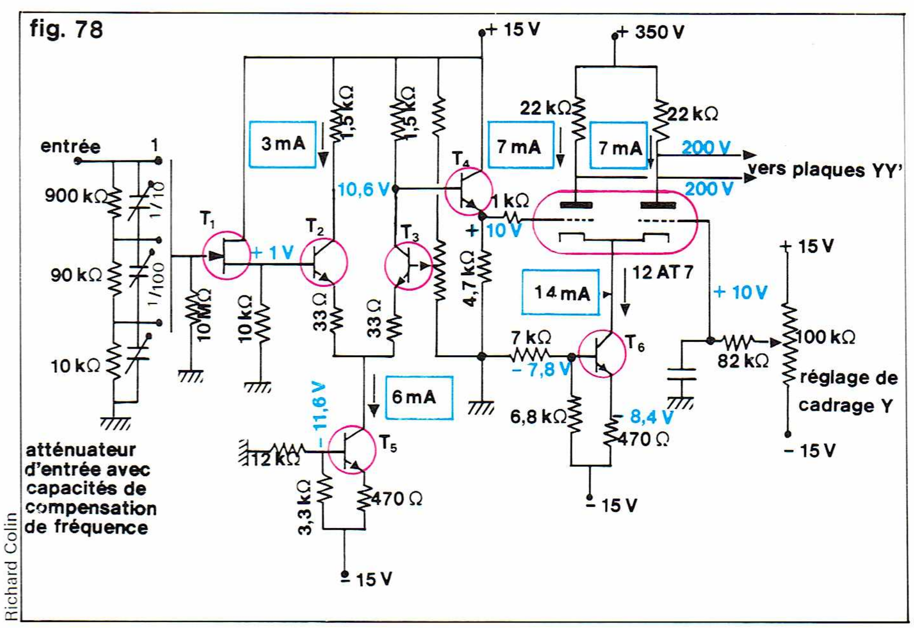

Richard Colin

▶ *Figure 79 : base de temps relaxée à* U.J.T.

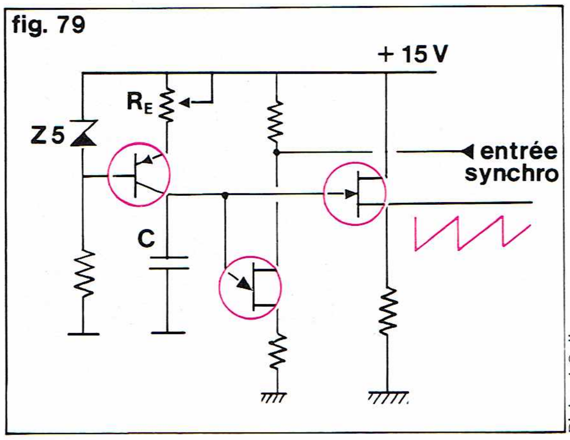

Richard Colin

triode est attaqué par un étage différentiel à transistors (T_2T_3) et un collecteur commun intermédiaire T_4. La polarisation est assurée par des sources de courant T_5 et T_6. En faisant varier le potentiel de grille de la triode de droite, on déséquilibre les tensions de sortie, ce qui a pour effet de déplacer verticalement l'image (cadrage Y).

Avec ce montage, la bande passante obtenue est d'environ 1 MHz. Deux petites bobines placées en série avec les résistances de charge des triodes et calculées de façon à former avec les capacités parasites un circuit accordé un peu au-delà de 1 MHz permettent d'élargir de 50 % la bande passante.

La base de temps

C'est un générateur de signaux triangulaires dont la vitesse de montée est parfaitement contrôlable, la durée d'un balayage pouvant aller de quelques dizaines de secondes à moins de 1 µs. Pour obtenir une parfaite linéarité, la méthode universellement employée consiste à charger un condensateur par un courant constant I_0; la tension à ses bornes est alors proportionnelle au temps :

$$V = \frac{I_0}{C} t$$

Lorsqu'une certaine tension limite est atteinte, un circuit de décharge ramène la capacité à son état de départ en un temps très court, ce qui a pour effet de replacer le spot à gauche de l'écran.

Le transistor unijonction peut être utilisé pour fabriquer de telles dents de scie, mais il est d'emploi difficile au-delà d'une fréquence de récurrence de 100 kHz. La *figure* 79 donne un montage possible pour une durée de balayage supérieure à 10 µs. La capacité commutable C est chargée grâce au transistor T à courant constant

$$I_0 = \frac{V_Z - 0{,}6}{R_E}$$

Lorsque la tension de pic de l'U. J. T. est atteinte, elle se décharge dans son circuit d'émetteur. Un étage à haute impédance d'entrée permet de prélever le signal aux bornes de la capacité sans le déformer. Pour faire varier la fréquence, on agit sur la valeur de I_0 en modifiant R_E, ceci de façon continue et par plots, en commutant C. Pour que l'image sur l'écran soit stable, il faut que la fréquence de cette dent de scie soit un sous-multiple entier de celle du signal; cela est réalisé en modifiant légèrement l'instant d'allumage de l'U. J. T. grâce à une faible partie du signal vertical V (*t*) injectée sur la base B_2 de l'unijonction. C'est le *phénomène de synchronisation*.

Une telle base de temps oscille seule, même en l'absence de signal vertical; on la qualifie de *relaxée*. Ce système est peu à peu abandonné, car la synchronisation est difficile. Des résultats infiniment supérieurs sont obtenus avec les bases de temps déclenchées. Dans ce dernier cas, le spot se trouve au repos à gauche de l'écran, et le balayage ne démarre que lorsque le signal V (*t*) atteint une valeur fixée à l'avance, l'évolution ultérieure du signal de balayage ne dépendant plus de V (*t*). Il est évident alors que les balayages successifs se produiront rigoureusement dans les mêmes conditions, ce qui assure à l'image une fixité parfaite. V (*t*) doit être récurrent mais non nécessairement périodique, la base de temps étant capable de rester au repos un temps quelconque entre chaque déclenchement. De plus, la vitesse de balayage est indépendante de la fréquence de récurrence, et peut être fixée avec une grande précision par le choix des éléments du circuit. L'oscilloscope devient un périodemètre.

La *figure* 80 représente un schéma possible de *base de temps déclenchée*. On retrouve la capacité C et la source de courant constituée par le transistor T_1, mais un transistor T_2 placé en parallèle sur C peut en se saturant décharger cette dernière.

Au repos, la bascule RS se trouve dans l'état Q = 0, donc $\overline{Q} = 1$; le transistor T_2 est saturé, maintenant la tension aux bornes de C à zéro. Le signal de synchronisation prélevé en un point quelconque de l'amplificateur vertical est transformé en signaux rectangulaires par un trigger de Schmitt, puis en impulsions brèves par différentiation. Lorsqu'un de ces tops arrive sur R, la bascule RS change d'état, $\overline{Q}$ devient nul, et le courant fourni par T_1 charge C. Pendant cette charge, toute nouvelle impulsion sur R est sans effet. Lorsque la tension de sortie atteint 10 volts, la Zener Z 10 se débloque, et T_4 se sature, amenant l'entrée S de la bascule à zéro, ce qui a pour effet de la ramener dans l'état de départ, alors, $\overline{Q}$ revenant à 1, T_2 se sature et décharge C. Le système repart à la première impulsion de synchronisation qui se présente ensuite sur R. Le niveau de déclenchement est réglé grâce au potentiomètre P, et la vitesse de balayage, donc sa durée, [puisque l'amplitude maximale (10 volts) est fixée] par R_E et C. Au prix de quelques perfectionnements de détail, ce circuit fonctionne encore fort bien au-delà de 1 MHz (durée de balayage inférieure à la microseconde). On sait construire actuellement des bases de temps déclenchées dont chaque balayage ne dure que quelques dizaines de nanosecondes.

Les perfectionnements de l'oscilloscope

Les oscilloscopes actuels sont devenus des instruments de mesure de haute précision grâce aux perfectionnements apportés aux circuits classiques et aux systèmes annexes qui leur sont associés :

— Les amplificateurs verticaux ont une bande passante très large et des gains bien constants, ce qui confère à l'appareil les qualités d'un voltmètre, avec comme supériorité considérable la connaissance parfaite de ce que

▼ *Figure 80 : base de temps déclenchée.*

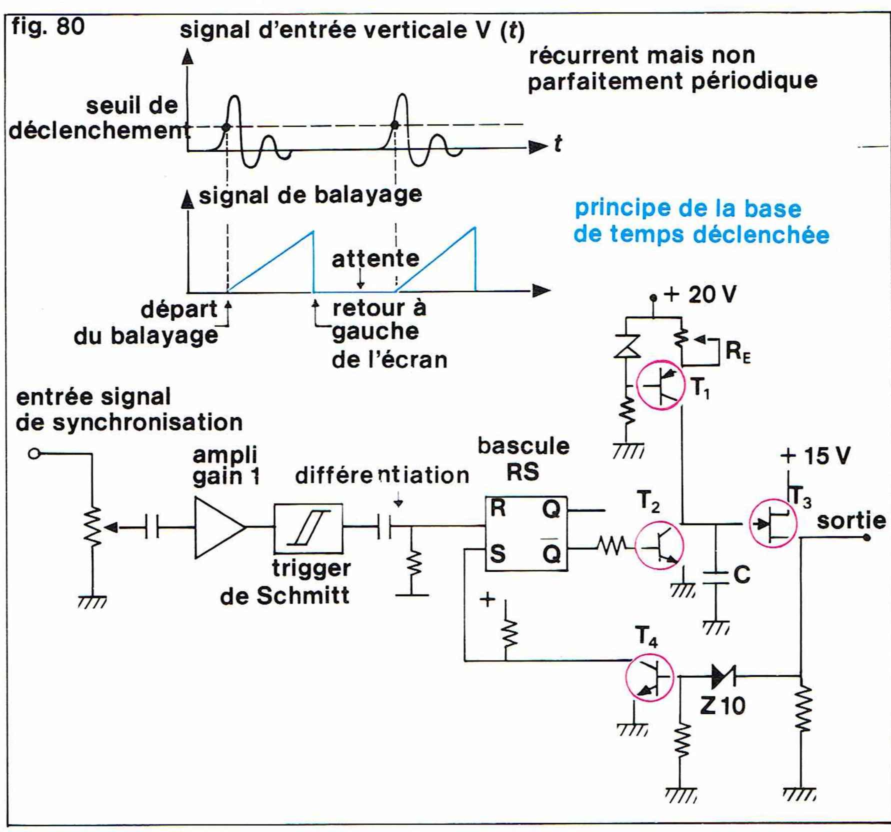

Richard Colin

l'on mesure. Combien de fois l'aiguille d'un contrôleur universel électronique n'indique-t-elle en fait que l'amplitude d'un ronflement parasite à 50 Hz au lieu de celle du signal cherché ! une telle erreur est impossible ici !

— Les amplificateurs d'oscilloscope ont une impédance d'entrée qui est normalisée à 1 MΩ // 30 pF. C'est parfois trop faible pour certaines applications. On fait alors appel à une *sonde atténuatrice* constituée par une simple résistance de 9 MΩ shuntée par une petite capacité de compensation. L'impédance d'entrée passe alors typiquement à 10 MΩ et 6 ou 7 pF, le gain étant divisé par 10.

— Les bases de temps sont parfaitement étalonnées, ce qui permet des mesures de périodes, et donc de fréquences.

— Très souvent, il est intéressant de comparer l'évolution simultanée de deux signaux ; beaucoup d'oscilloscopes possèdent pour cette raison deux entrées verticales et visualisent sur l'écran les deux signaux l'un en dessous de l'autre. Pour obtenir ce résultat, deux solutions sont utilisées.

* Dans les *oscilloscopes bi-faisceau*, on emploie un tube cathodique spécial dans lequel le faisceau électronique est double, ainsi que le système de plaques de déviation verticales. On réalise ainsi l'équivalent de deux tubes ayant la même base de temps. Deux amplificateurs de déviation verticale sont, bien sûr, nécessaires. C'est la meilleure solution, mais elle est coûteuse, et les cathoscopes bi-faisceau ont quelquefois des performances en fréquence insuffisantes.

* Il est possible également de faire appel à une *commutation électronique*, la déviation verticale étant commandée alternativement par l'une ou l'autre des tensions d'entrée. Le système fonctionne en « alterné » si le changement de signal se fait à chaque début de balayage ; le premier signal est décrit pendant les balayages pairs, et le deuxième pendant les balayages impairs. Dès que la vitesse est suffisante, l'œil perçoit deux courbes parfaitement fixes. Le découpage peut aussi être plus rapide que le balayage, les deux courbes sont alors inscrites en pointillé, mais cet effet n'est pas perceptible si, d'un balayage à l'autre, les zones visibles sur chaque trace ne sont pas superposées ; c'est généralement le cas si les fréquences de balayage et le découpage ne sont pas multiples l'une de l'autre. Un commutateur électronique de ce type doit se placer entre les atténuateurs d'entrée et l'amplificateur de déviation vertical qui est unique. La *figure* 81a représente le schéma simplifié d'un tel appareil : les deux signaux d'entrée sont atténués préalablement par deux atténuateurs compensés avant d'être appliqués à deux préamplificateurs adaptateurs d'impédance (qui peuvent se réduire chacun à un seul transistor à effet de champ). Les deux signaux obtenus ainsi sous basse impédance sont traités ensuite par le circuit commutateur proprement dit, constitué par les deux transistors complémentaires T_1 et T_2 dont les bases reçoivent un courant rectangulaire fourni par un multivibrateur. A chaque instant, l'un des transistors est saturé et l'autre bloqué, un seul des deux signaux d'entrée parvient donc à l'entrée de l'amplificateur de grand gain A comme le montre la *figure* 81b. Si l'on désire déplacer l'une des courbes par rapport à l'autre sur l'écran, des tensions continues doivent être ajoutées sur chaque voie avant commutation.

Double base de temps : la loupe électronique

Si un signal présente au cours de chaque période une petite irrégularité de faible amplitude, il est très difficile de déclencher la base de temps sur elle, donc de l'examiner de façon précise avec la vitesse de balayage nécessaire. On peut faire appel alors à un système de « loupe électronique » nécessitant un double générateur de dent de scie. Dans un premier temps, on fait apparaître sur l'écran la totalité d'une période du signal en appliquant aux plaques horizontales la première dent de scie dont le départ est commandé par le circuit de synchronisation habituel. Cette première dent de scie sert de signal de synchronisation à la seconde, beaucoup plus rapide. En réglant le seuil de déclenchement de cette seconde base de temps, on peut la faire partir avec un retard quelconque par rapport à la première, de façon en particulier qu'elle fonctionne pendant l'intervalle de temps où se produit le phénomène que l'on désire observer. Pour permettre d'effectuer ce réglage, on utilise un créneau de tension

Document Philips

▲ ***Les oscilloscopes actuels sont devenus des instruments de mesure de haute précision et aussi de grande maniabilité, comme cet oscilloscope portable.***

▼ ***Figure 81 :*** a) ***principe d'un commutateur électronique ;*** b) ***application au fonctionnement en « alterné ».***

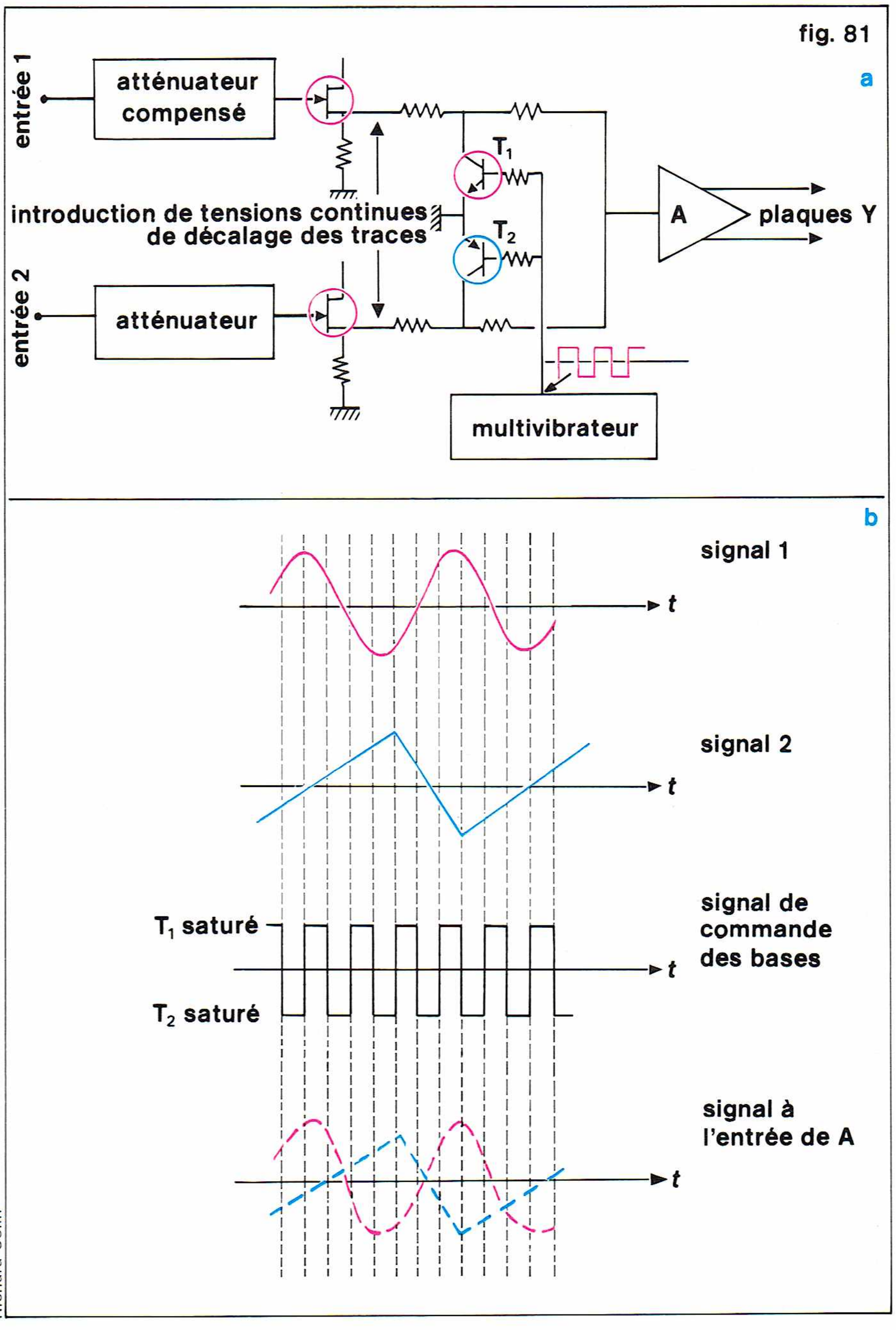

Richard Colin

▶ *Figure 82 : principe de la « loupe électronique ».*

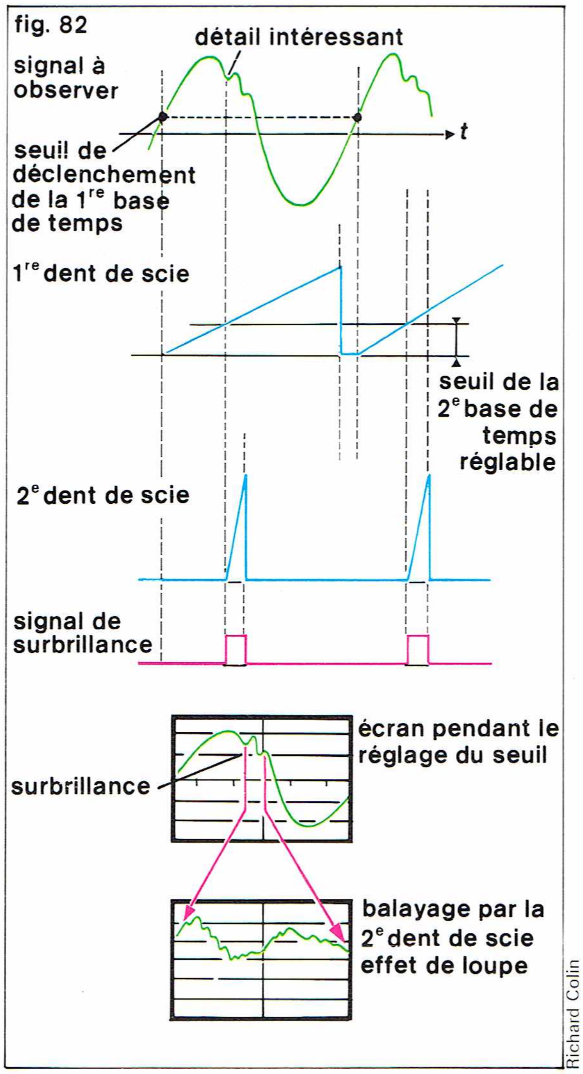

▼ *Figure 83 ; mesure de phases :* a) *mesure d'un déphasage par la méthode de Lissajous ;* b) *phasemètre à bascule* RS.

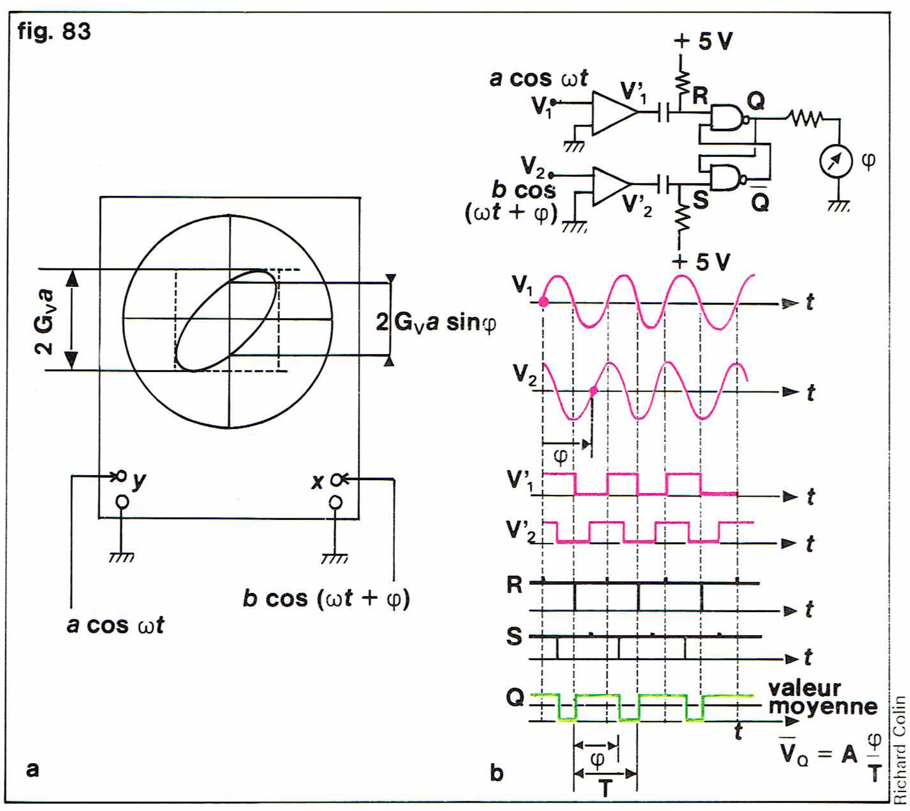

synchrone de la deuxième dent de scie pour augmenter la luminosité du spot. On voit ainsi sur l'écran une surbrillance que l'on amène sur le détail à observer. Sans modifier alors les conditions de synchronisation, il suffit d'appliquer la dent de scie rapide au déviateur horizontal pour voir étalée sur toute la largeur de l'écran la petite portion intéressante : on observe bien un *effet de loupe* (*fig.* 82).

L'affichage numérique des paramètres

L'image perçue sur l'écran ne peut être interprétée que si le gain de l'amplificateur vertical et la vitesse de balayage utilisés sont connus. Si l'écran est photographié, ces deux paramètres doivent être reportés au dos de l'épreuve. Pour éviter un oubli, certains constructeurs ont équipé leur appareil d'un circuit générateur de caractère très complexe (circuit intégré) qui pilote le spot pendant le retour de balayage de façon qu'il écrive dans un coin de l'écran en clair ces deux grandeurs. Ce luxe, inconcevable il y a quelques années, a été rendu possible par les progrès effectués dans le domaine des circuits logiques à haute densité d'intégration (M. O. S.).

Mesure des phases

Lorsque deux tensions sont sinusoïdales et de même fréquence, leur déphasage peut être mesuré très facilement avec un oscilloscope.

Avec un **oscilloscope double faisceau,** il suffit de synchroniser le balayage sur l'une des deux sinusoïdes. En choisissant la vitesse de balayage de façon que la largeur d'une période soit de 6 cm, chaque centimètre de décalage représente un déphasage de 60 degrés.

Avec un **oscilloscope simple faisceau,** cette mesure directe est impossible, et on fait appel à la *méthode* dite *des courbes de Lissajous* (*fig.* 83a). Le premier signal $V_1 = a \cos \omega t$ est appliqué à l'entrée de l'amplificateur vertical, tandis que le second $V_2 = b \cos (\omega t + \varphi)$ pilote le balayage horizontal, la dent de scie habituelle étant supprimée. A chaque instant, le spot a sur l'écran une position définie par les deux équations :

$$\begin{cases} y = G_V a \cos \omega t \\ x = G_H b \cos (\omega t + \varphi) \end{cases}$$

G_V et G_H étant les gains des deux systèmes de déviation.

C'est la représentation paramétrique d'une ellipse qui occupe dans le sens vertical une hauteur $2\,G_V a$ et qui coupe la verticale $x = 0$ en deux points d'ordonnée $y = \pm\, G_V a \sin \varphi$. L'angle φ est donc donné directement par un rapport de deux longueurs mesurées sur l'écran.

Sans utiliser d'oscilloscope, on sait réaliser également des appareils délivrant une tension proportionnelle à la phase entre les deux signaux sinusoïdaux d'entrée. Le montage très simple d'un tel appareil dit **phasemètre à bascule RS** est présenté sur la *figure* 83b. Les deux sinusoïdes dont les amplitudes sont quelconques, sont d'abord transformées en signaux rectangulaires par deux comparateurs rapides (72710), puis différentiées, et les impulsions obtenues appliquées aux entrées R et S d'une bascule RS. Un top sur la voie 1 amène Q à 1, et le top suivant sur la voie 2 le ramène à zéro. La tension sur la sortie Q ne se trouve donc au niveau haut que pendant une fraction de la période qui est proportionnelle au déphasage cherché. Le galvanomètre G qui dévie proportionnellement à la valeur moyenne de cette tension indique donc directement φ. Ce système est, au prix de quelques précautions, parfaitement apériodique et peut ainsi fonctionner entre 10 et 10^6 Hz.

Mesure des fréquences

Pour mesurer une fréquence, la plupart des appareils actuels comptent le nombre de périodes du signal d'entrée pendant un intervalle de temps parfaitement connu, le plus souvent 1 ou 0,1 seconde.

Un **fréquencemètre** comprend les éléments suivants :

— Un *circuit d'entrée* destiné à transformer en impulsions facilement comptables tout signal périodique de forme quelconque. C'est en quelque sorte un trigger de Schmitt suivi d'un différentiateur. Pour les niveaux faibles, un amplificateur peut être prévu.

— Un *compteur numérique,* toujours DCB, associé à des systèmes d'affichage et de mémoire identiques à ceux que nous avons rencontrés à propos des voltmètres digitaux.

— Une *horloge* destinée à fournir des signaux de commande dont la largeur est exactement 1 ou 0,1 seconde. C'est sur la précision de cette horloge que repose celle de l'appareil complet. Le plus souvent, on fait appel à un oscillateur à quartz de haute stabilité de fréquence. Lorsqu'une précision de quelques % suffit, on peut fabriquer des créneaux de 1 seconde en divisant par 100 la fréquence du secteur 50 Hz.

La *figure* 84 représente la structure d'un fréquencemètre 10 MHz. Au repos, la sortie $\overline{Q}$ de la bascule RS est au zéro, les portes P_1 et P_2 ne laissent donc passer aucune impulsion. Lorsque l'on presse le poussoir P, le RS bascule, et P_2 et P_1 s'ouvrent. Les impulsions provenant de l'entrée après mise en forme s'accumulent dans le compteur C_1 ainsi que celles issues de l'oscillateur à quartz 1 MHz dans C_2. Au bout de 1 seconde exactement, la millionième impulsion de l'oscillateur fait apparaître une transition négative à la sortie du compteur C_2 qui, transmise à S, ramène la bascule dans son état initial. Les transitions brutales de Q et $\overline{Q}$ remettent le compteur C_2 à zéro, chargent les mémoires qui transmettent aux afficheurs le résultat du comptage et, finalement, replacent C_1 dans l'état 0. Le système s'arrête, le nombre de périodes du signal d'entrée comptées en une seconde, c'est-à-dire sa fréquence, peut être lu directement.

En utilisant pour C_2 5 décades seulement, la durée de comptage aurait été de 0,1 seconde, et le dernier chiffre lu aurait représenté alors des dizaines de hertz.

Lorsqu'une précision aussi grande n'est pas nécessaire, on peut réaliser des fréquencemètres beaucoup plus simples. Si un monostable délivrant des tops de largeur τ et d'amplitude a est relancé f_0 fois par seconde (avec $f_0 < 1/\tau$), la valeur moyenne de son signal de sortie est : $\overline{V} = af_0\tau$, c'est-à-dire proportionnelle à la fréquence. Un simple voltmètre à aiguille branché sur cette sortie affiche directement f_0. C'est sur ce principe que sont construits les compte-tours d'automobile, les impulsions qui déclenchent le monostable étant prélevées sur le rupteur.

L'analyseur de spectre

Nous avons vu au début de cet exposé comment tout signal variable pouvait être considéré comme la somme d'un nombre fini ou infini de sinusoïdes, l'amplitude complexe de la composante de pulsation ω étant notée $F(j\omega)$. Ainsi un signal $V(t)$ peut être décrit parfaitement, aussi bien par sa valeur à chaque instant que l'on peut suivre sur un oscilloscope, que par son spectre $F(j\omega)$. **L'analyseur de spectre** est un appareil qui visualise directement sur un écran la courbe $|F(j\omega)|^2$ qui représente, comme on l'a vu, la répartition de puissance du signal. En quelque sorte, l'analyseur de spectre joue dans le domaine des fréquences un rôle analogue à celui qui est rempli par l'oscilloscope dans le domaine temps. La faible diffusion de cet appareil est essentiellement due à des raisons économiques; le moindre analyseur de spectre vaut en effet le prix de dix oscilloscopes simples.

Pour réaliser un tel appareil, il faut être capable d'isoler, grâce à un filtre sélectif, parmi toutes les composantes d'un signal, celles qui sont comprises dans une tranche très exacte de fréquence Δf, et de mesurer la puissance transportée correspondante. La largeur Δf est appelée *résolution de l'analyseur*. Le spectre entier sera tracé en déplaçant la fréquence centrale du filtre. Un analyseur de spectre doit donc être constitué par un filtre d'entrée très étroit suivi d'un amplificateur dont la puissance de sortie est lue par un voltmètre efficace. En pratique, la réalisation sous cette forme est impossible, car l'on ne peut pas construire directement un filtre accordé sur une fréquence variable dans une très large gamme de fréquences et ayant seulement quelques hertz de largeur de bande. On résoudra le problème en faisant appel au principe du changement de fréquence que nous allons exposer rapidement et qui va nous permettre de n'utiliser qu'un filtre à fréquence fixe, donc bien plus facile à faire. Avec des quartz, on sait, par exemple, construire un filtre ayant 1 MHz de fréquence centrale et moins de 10 Hz de largeur.

Changement de fréquence

Dans un système linéaire, la grandeur de sortie est fonction de l'entrée; si deux signaux de fréquence f_1 et f_2 sont injectés simultanément, ils se retrouvent amplifiés sans que leurs fréquences soient modifiées. Il n'en est plus de même si le système n'est pas linéaire : imaginons par exemple un circuit qui délivre une tension de sortie proportionnelle au carré du signal d'entrée $V_S = KV_1^2$. Si la grandeur d'entrée est la somme de deux sinusoïdes

$$V_1 = S_1 + S_2 = a \cos \omega_1 t + b \cos \omega_2 t$$

la sortie a pour valeur

$$V_S = KV_1^2 = (a \cos \omega_1 t + b \cos \omega_2 t)^2$$

c'est-à-dire, en effectuant la multiplication et en appliquant les relations trigonométriques classiques :

$$V_S = \frac{a^2 + b^2}{2} + ab \cos(\omega_1 - \omega_2)\, t + ab \cos(\omega_1 + \omega_2)\, t + \frac{a^2}{2} \cos 2\,\omega_1 t + \frac{b^2}{2} \cos 2\,\omega_2 t$$

Ce signal a un spectre contenant un terme à *fréquence zéro* $\frac{(a^2 + b^2)}{2}$, des termes à *fréquences somme et différence* $(\omega_1 - \omega_2)$ et $(\omega_1 + \omega_2)$ et de *fréquence double* $2\,\omega_1$ et $2\,\omega_2$. Les fréquences $(\omega_1 - \omega_2)$ et $(\omega_1 + \omega_2)$ sont dites *fréquences de battement* entre les fréquences d'entrées. Dans le cas le plus général, la non-linéarité d'un système ne peut pas être décrite par un seul terme quadratique KV_1^2, la relation entre entrée et sortie est plutôt de la forme :

$$V_S = GV_1 + K_2V_1^2 + K_3V_1^3 + K_4V_1^4 + \ldots$$

les coefficients K_2, K_3, K_4, etc., devenant de plus en plus petits quand leur ordre augmente. Si on utilise cette relation avec la valeur précédente de V_1 on constate que

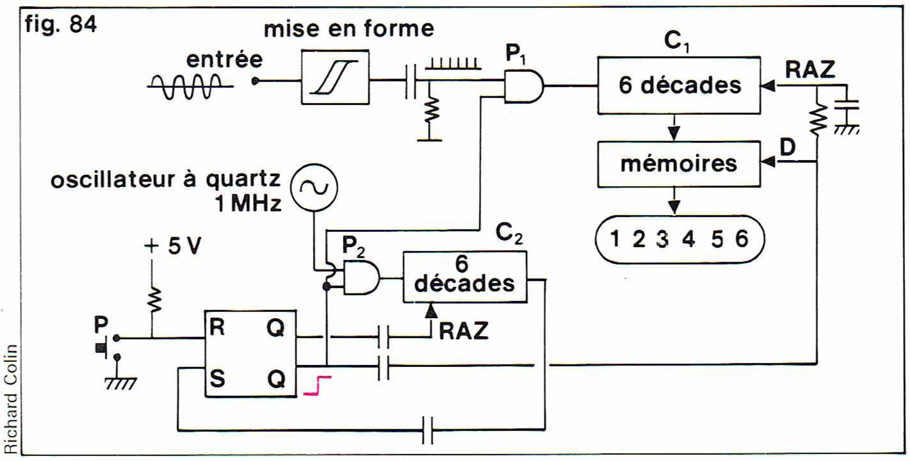

Richard Colin

▲ *Figure 84 : fréquencemètre numérique.*

Adret Électronique

▼ *Analyseur de spectre et synthétiseur de fréquences.*

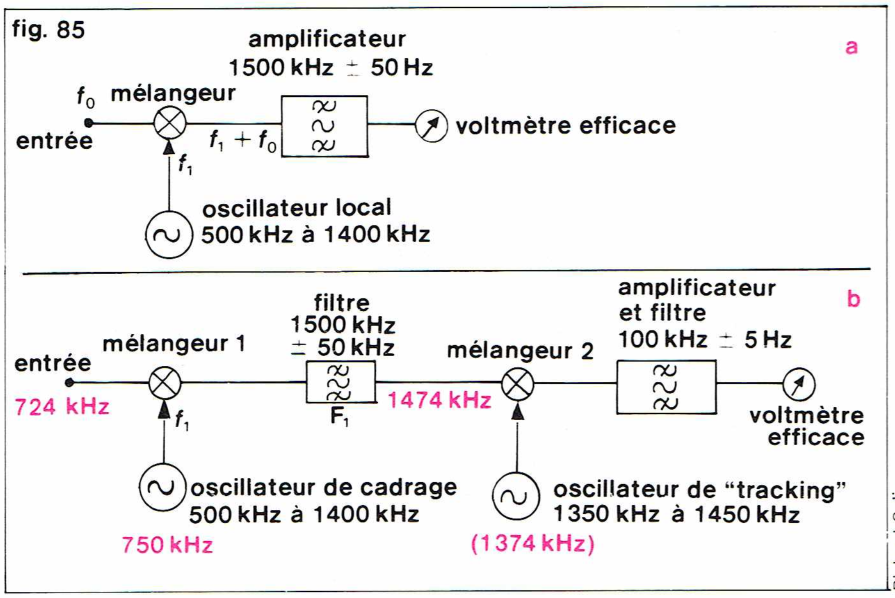

Richard Colin

▲ ***Figure 85 :*** a) ***principe de l'analyseur de spectre à un changement de fréquence;*** b) ***analyseur de spectre à haute résolution à deux changements de fréquence.***

le spectre de V_S contient de très nombreux termes de fréquences $(m\omega_1 \pm n\omega_2)$, *m* et *n* étant des nombres entiers éventuellement nuls.

Parmi toutes ces fréquences, il est facile, en utilisant un filtre convenable, d'en isoler une, par exemple le battement soustractif $(\omega_1 - \omega_2)$, dont l'amplitude est proportionnelle au produit des amplitudes de S_1 et S_2. Si S_2 est un signal parfaitement constant, les variations de l'amplitude du battement reproduiront celles de S_1 seul ; ainsi le battement, bien que de fréquence différente, apporte autant d'informations sur S_1 que ce dernier lui-même.

Dans ces conditions, si l'on désire étudier les composantes d'un signal, comprises dans un intervalle $f + \Delta f$, avec un filtre de largeur Δf mais de fréquence centrale f_0, il suffit d'appliquer simultanément à un système non linéaire que l'on appelle *mélangeur* le signal à étudier et une sinusoïde de fréquence f_1 telle que $f \pm f_1 = f_0$; le battement entre les deux sera sélectionné par le filtre, toutes les autres fréquences créées simultanément étant éliminées.

La *figure* 85a montre le principe d'un analyseur de spectre ayant une résolution de 100 Hz capable de traiter les signaux d'entrée entre 100 kHz et 1 MHz. Il comprend un oscillateur local dont la fréquence peut être ajustée à volonté de 500 kHz à 1 400 kHz, dont le signal est appliqué à un mélangeur recevant d'autre part la tension d'entrée à analyser. Le résultat du mélange est transmis à l'entrée d'un amplificateur accordé sur 1 500 kHz dont la largeur de bande est (grâce à des filtres à quartz) de 100 Hz seulement. Après amplification, l'énergie recueillie est envoyée sur un voltmètre efficace, par exemple un voltmètre thermique. Si f_1 est à un instant donné la fréquence de l'oscillateur local, l'amplificateur sélectionne parmi toutes les fréquences délivrées par le mélangeur celles qui sont contenues dans une bande de 100 Hz autour de 1 500 kHz et qui proviennent des composantes du signal d'entrée contenues dans la bande 1 500 kHz — $f_1 \pm 50$ Hz. En modifiant f_1 on analyse ainsi toute la gamme imposée. En pratique, f_1 varie périodiquement de 500 à 1 400 kHz en synchronisme avec le déplacement horizontal du spot d'un oscilloscope recevant sur son amplificateur vertical le signal délivré par le voltmètre efficace. Le spectre se trouve ainsi tracé directement.

Avec ce système, deux composantes écartées de moins de 100 Hz ne peuvent pas être séparées ; on peut y parvenir si l'on renonce à explorer d'un seul coup toute la bande de 100 kHz à 1 MHz. C'est ce qui est fait avec le montage plus évolué représenté sur la *figure* 85b. Grâce à l'oscillateur de cadrage, on effectue un premier changement de fréquence amenant la zone de fréquence intéressante, dont la largeur est limitée à 100 kHz, autour de 1 500 kHz. A la sortie du filtre F_1 le signal a un spectre limité à la bande 1 500 kHz ± 50 kHz, il est ramené par un second changement de fréquence autour de 100 kHz où il est amplifié par un circuit ayant seulement 10 Hz de largeur de bande avant d'attaquer le voltmètre efficace de sortie. Ainsi, comme le montre la *figure* 85b (en rouge), si le deuxième oscillateur (que l'on appelle *oscillateur de tracking*, car c'est lui qui permet de balayer la plage de 100 kHz sélectionnée par l'oscillateur de cadrage) est réglé sur 1 374 kHz et le premier sur 750 kHz, l'énergie qui fait dévier le galvanomètre provient des composantes du signal d'entrée comprises entre 723 995 et 724 005 Hz. C'est la limitation des possibilités des filtres de sortie qui impose un compromis entre finesse d'analyse et largeur de bande analysée.

L'amplitude détectée par le voltmètre peut, pendant une analyse, varier considérablement entre une fréquence et une autre. On appelle *dynamique de l'analyseur* l'écart relatif entre le plus faible niveau et le plus fort qui peuvent être mesurés sans erreur. 70 décibels (soit un rapport 30 000 en tension) est une valeur courante, les analyseurs les plus performants actuellement dépassant 120 décibels (rapport 10^6). Un tel écart entre les niveaux ne peut évidemment pas être visualisé sur un écran, si l'ordonnée du spot est simplement proportionnelle au signal. Pour résoudre cette difficulté, on utilise des amplificateurs de sortie logarithmiques qui fournissent directement une déviation en décibels.

Les synthétiseurs de fréquence

Ce ne sont pas à proprement parler des appareils de mesure, mais ils peuvent être utilisés pour effectuer des mesures très précises, et il nous a semblé que leur description avait sa place ici. Un **synthétiseur de fréquence** est un générateur fournissant un signal dont la fréquence est construite à partir de celle d'un oscillateur de haute stabilité, à quartz le plus souvent. Cette « synthèse » de fréquence est effectuée par des moyens numériques, et il est possible d'obtenir hertz par hertz la fréquence désirée. Il y a plusieurs procédés de synthèse, nous en décrirons un seul qui est très utilisé et permet d'obtenir les meilleures performances.

L'organe de base d'un synthétiseur est un *oscillateur* dont la fréquence f_1 est pilotée par une tension (V. C. O. ou Voltage Control Oscillator). Ce peut être un oscillateur LC dont une partie de la capacité est constituée par la capacité d'une jonction PN polarisée en sens inverse (Varicap). En agissant sur la tension de polarisation continue de cette diode, on modifie sa capacité, donc la condition d'oscillation du système. Un autre oscillateur à fréquence fixe f_0 sert d'étalon, c'est le *pilote* du synthétiseur. Les signaux de ces deux circuits sont appliqués à deux diviseurs digitaux dont les taux de division sont respectivement N pour F_1 et D pour F_0. A la sortie, grâce à des circuits de mise en forme, les signaux sont transformés en deux sinusoïdes de fréquences f_1/N et f_0/D, soit :

$$x_1 = A \cos \frac{2\pi f_1}{N} t \quad \text{et} \quad x_2 = B \cos \left(\frac{2\pi f_0}{D} t + \varphi\right)$$

Ces sinusoïdes attaquent un *mélangeur* qui est un élément non linéaire, que nous assimilerons à un multiplieur ; sa tension de sortie est donc :

$$V_S = x_1 x_2 = AB \cos \frac{2\pi f_1}{N} t \cos \left(\frac{2\pi f_0}{D} t + \varphi\right)$$

$$V_S = \frac{AB}{2} \cos \left[2\pi \left(\frac{f_1}{N} - \frac{f_0}{D}\right) t - \varphi\right] + \cos \left[2\pi \left(\frac{f_1}{N} + \frac{f_0}{D}\right) t + \varphi\right]$$

Si $\frac{f_1}{N} = \frac{f_0}{D}$, le premier terme se réduit à une tension continue $\frac{AB}{2}$ cos φ qui dépend de la phase entre les deux sinusoïdes. Examinons alors le montage représenté sur la *figure* 86 pour lequel nous supposerons que l'égalité précédente est réalisée ; de plus, les deux sinusoïdes étant en quadrature, alors cos $\varphi = 0$, et la tension continue de sortie du mélangeur est nulle ; le V. C. O. oscille sur $f_1 = \frac{N}{D} f_0$. Si, pour une raison extérieure quelconque, la fréquence du V. C. O. augmente très légèrement, la sinusoïde $\frac{f_1}{N}$ prend de l'avance sur celle issue

du pilote, et la phase φ augmente. Dans une représentation par les vecteurs de Fresnel, cela veut dire que les deux vecteurs représentant les deux signaux qui attaquent le mélangeur voient leur écart angulaire augmenter, la vitesse de rotation de l'un devenant supérieure à celle de l'autre. Une tension continue, par exemple négative, apparaît à la sortie du mélangeur, elle agit sur l'entrée de commande du V. C. O. et, si le sens des connexions est convenable, ramène f_1 à sa valeur initiale. Le système est ainsi automatiquement régulé. Le V. C. O. est piloté de façon que les deux fréquences appliquées au mélangeur restent égales. On a réalisé ce que l'on appelle une boucle d'asservissement de phase (P. L. L. = Phase Lock Loop en anglais). Si le pilote oscille à une fréquence « ronde », 1 MHz par exemple, il est commode de prendre pour D une puissance de 10, par exemple 1 000; alors, en fonction du taux de division N, la fréquence du V. C. O. s'écrit $f_1 = \frac{N}{1\,000}$ MHz. Si le taux de division est 391 (en rouge sur la figure), l'oscillateur pilote f_1 travaille à 391 kHz exactement. Il suffit, avec des bascules JK connectées convenablement, de réaliser un diviseur à taux de division ajustable de 1 à 999 pour obtenir ainsi toutes les fréquences, de kilohertz en kilohertz, de 1 à 999 kHz, ayant toutes une stabilité qui est celle du quartz.

On remarquera que, pour avoir une définition de 1 hertz, il faut diviser f_0 par 10^6 et effectuer la comparaison de phase au niveau du mélangeur à 1 hertz, ce qui est peu pratique. Pour cette raison, les synthétiseurs sont plus complexes, plusieurs changements de fréquence étant en général effectués de façon à augmenter la fréquence de travail du mélangeur et aussi à diminuer le taux de division nécessaire. En télécommunications, où les émetteurs doivent fonctionner à toute une série de fréquences parfaitement définies, les synthétiseurs remplacent de plus en plus les collections de quartz interchangeables utilisées jusqu'alors.

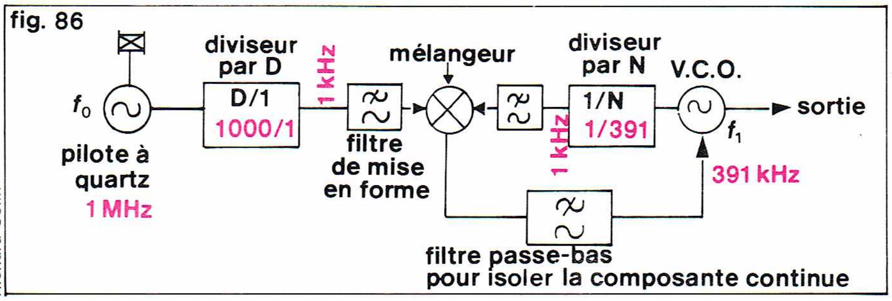

▲ *Figure 86 : principe du synthétiseur à boucle d'asservissement de phase.*

Les corrélateurs

On rencontre très souvent en physique des signaux qui, tout en étant différents, ne sont pas totalement indépendants l'un de l'autre. La connaissance de l'un en un instant donné donne un renseignement souvent de nature statistique sur la valeur que prendra l'autre un peu plus tard.

On constate par exemple que les courbes représentant en fonction du temps deux phénomènes aussi différents que la criminalité et l'activité solaire ont des airs de ressemblance. La criminalité est plus élevée pendant les années où le Soleil est très actif. On dit qu'il y a une corrélation entre la criminalité et l'activité solaire. On a cherché à chiffrer cette corrélation; sa meilleure mesure est la valeur moyenne prise par le produit des deux grandeurs prélevées à deux instants écartés d'une durée τ. Soit $C_{xy}(\tau) = \overline{x(t)\, y(t-\tau)}$, la barre supérieure indiquant l'opération de moyennage. Si x et y n'ont aucun rapport entre elles, les variables $x(t)$ et $y(t-\tau)$ prennent toutes les valeurs possibles positives ou négatives, et la moyenne du produit est nulle; par contre, si x et y ont une légère tendance à avoir le même signe, la moyenne du produit sera positive. Une moyenne pouvant être calculée par une intégrale, on écrira aussi :

$$C_{xy}(\tau) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T}\int_0^T x(t)\, y(t-\tau)\, dt$$

c'est une grandeur qui ne dépend que de l'intervalle de temps τ qui s'écoule entre les deux prises d'échantillon.

Une définition du même genre peut être introduite pour un signal unique; le produit est alors celui de deux valeurs de la même fonction prélevées en deux instants écartés de τ. La fonction obtenue est appelée *fonction d'autocorrélation :*

$$C_{xx}(\tau) = \overline{x(t)\, x(t-\tau)}$$

$$= \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T}\int_0^T x(t)\, x(t-\tau)\, dt$$

Dans ce cas particulier, on peut sentir intuitivement qu'il existe une relation entre la fonction d'autocorrélation et le spectre d'un signal. Si en effet le signal a un spectre limité aux fréquences basses, ses variations sont lentes puisqu'il n'existe parmi ses composantes de fréquence aucune sinusoïde rapide. Si sa valeur à un instant donné est connue, celle un instant très court plus tard est nécessairement peu différente. Cela veut dire que les valeurs de la fonction prises à deux instants voisins sont fortement correlées. Par contre, si les deux échantillons sont éloignés l'un de l'autre, on ne peut plus rien en dire si l'on ne connaît pas l'expression mathématique du signal. De façon générale, la fonction d'autocorrélation doit donc tendre vers zéro lorsque τ augmente, et ceci d'autant plus vite que le spectre du signal considéré est plus large.

La détermination de ces fonctions de corrélation ou d'autocorrélation a permis de développer des méthodes très puissantes lorsque les signaux en jeu sont aléatoires, un bruit par exemple. Ainsi, lorsque l'on cherche à savoir si un bruit ne masque pas un signal dont la fréquence est connue, une corrélation entre ce bruit et une tension ayant exactement la fréquence du signal cherché peut permettre de répondre. En effet, dans l'affirmative, la forme du bruit n'est pas complètement indépendante de celle du signal d'essai, il existe dans le bruit une périodicité cachée qui apparaît immédiatement sur la fonction de corrélation.

Un **corrélateur électronique** (*fig.* 87) doit assurer les trois fonctions suivantes : retarder l'un des signaux d'une quantité contrôlable, faire le produit de ce signal retardé avec le second signal, et enfin faire la moyenne du résultat. Aucune de ces opérations n'est simple.

— Il est d'abord très difficile de retarder un signal d'une durée appréciable. Un retard obtenu par un trajet dans un câble ne peut guère excéder quelques microsecondes. Des lignes à retards ultrasonores (dans lesquelles le signal est d'abord converti en ondes sonores que l'on envoie ensuite se propager dans un milieu convenable avant de les transformer en tensions grâce à un transducteur récepteur) ont été construites pour des retards de 15 à 20 μs (télévision en couleurs), mais elles ont des pertes et sont difficilement utilisables dans un corrélateur. Pour les retards très longs, on peut utiliser une bande magnétique sur laquelle le signal est enregistré par une première tête et lu quelques centimètres ou décimètres plus loin par une seconde. Entre quelques microsecondes et quelques millisecondes, la méthode digitale est la meilleure, le signal à retarder est d'abord échantillonné, c'est-à-dire qu'on le mesure à une série d'instants également espacés dans le temps. Ces valeurs successives sont digitalisées dans un convertisseur A → D, et la suite de 0 et de 1 obtenue envoyée dans un registre à décalage. Sur commande des impulsions d'horloge, ces digits progressent dans le registre, et on peut en disposer avec un retard quelconque en les prélevant au niveau d'une cellule plus ou moins éloignée de l'entrée.

— Le produit qui est la seconde opération peut être effectué par un circuit multiplieur analogique si les deux signaux sont sous forme de tension fonction du temps (ce qui est le cas lorsque le retard a été obtenu par une ligne à retard). Si une digitalisation a été pratiquée pour

▼ *Figure 87 : schéma d'un corrélateur (1 canal).*

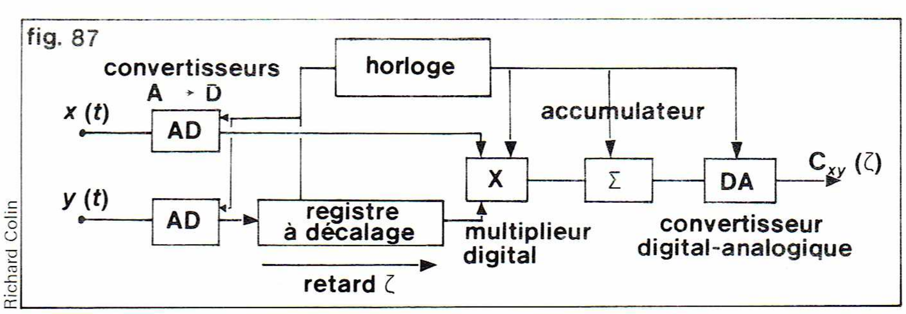

le retard, il est plus simple et plus précis de faire appel à un multiplieur digital.

— Il reste la moyenne qui peut être assurée par un amplificateur opérationnel ou un simple totalisateur numérique dans lequel on ajoute les produits successifs.

Toutes ces opérations doivent être refaites pour chaque nouvelle valeur du retard τ. La miniaturisation des circuits a permis de réaliser des corrélateurs à temps réel dans lesquels N systèmes complets en parallèle calculent simultanément les valeurs de la fonction de corrélation pour N retards différents.

L'opto-électronique

On qualifie d'opto-électronique tout montage dans lequel une liaison électrique est remplacée par une liaison optique, ou encore dans lequel une grandeur physique est transformée en signal optique susceptible d'être ensuite traité par un circuit électrique. Les premières observations dans ce domaine sont très anciennes. Déjà, en 1873, W. Smith remarqua que la résistance du silicium diminue lorsqu'on l'éclaire, et, en 1887, Hertz mit en évidence le premier l'effet photo-électrique en étudiant son éclateur-résonateur. Ce sont les travaux de physiciens comme Planck et Einstein qui ont permis de comprendre la physique de ces phénomènes. Les expériences de diffraction ont conduit les chercheurs à considérer la lumière comme une onde électromagnétique au même titre que les ondes radio-électriques utilisées en radiodiffusion. L'état lumineux en un point dépend d'un champ électrique et d'un champ magnétique perpendiculaires entre eux et à la direction du rayon considéré. Ces champs sont en phase et varient sinusoïdalement avec une fréquence qui varie de $428 \cdot 10^{12}$ Hz (lumière rouge) à $750 \cdot 10^{12}$ Hz (lumière violette). Cet ensemble est associé à une énergie qui se propage dans le vide avec une vitesse qui est une constante universelle $c = 299\,792\,500$ m/s. La longueur d'onde du rayonnement qui est la distance parcourue pendant une période est une grandeur souvent utilisée, elle varie de 0,4 µm (violet) à 0,7 µm (rouge). La lumière blanche habituelle est un mélange complexe de rayonnements de toutes les longueurs d'onde possibles. On distingue dans le « spectre solaire » le bleu de 0,4 à 0,5 µm, le vert de 0,5 à 0,6 µm et le rouge de 0,6 à 0,7 µm ; en dessous de 0,4 µm le rayonnement est invisible, c'est l'ultraviolet ; au-dessus de 0,7 µm, c'est l'infrarouge. Pour expliquer l'effet photo-électrique, il a fallu de plus considérer que la lumière se comportait également comme étant formée de particules sans masse transportant une énergie *hf*, où *h* est la constante de Planck ($6{,}625 \cdot 10^{-34}$ joule · seconde), *f* la fréquence de rayonnement considérée. Pour bien comprendre les termes utilisés dans les articles parlant d'opto-électronique, il faut avoir à l'esprit la définition des différentes unités utilisées qui ont été introduites dans le paragraphe « optique » de cette revue. Le *flux lumineux* qui est une énergie que l'on exprime en watts ou en lumens, la *densité de flux* qui s'exprime en lux = 1 lumen par m^2 ; la candela, qui caractérise une source dans une direction donnée, est une énergie par unité d'angle solide : 1 lumen par stéradian. Pour une source étendue, on définit la *brillance* ou *luminance*, qui s'exprime en candelas par mètre carré.

▼ ***Figure 88 : le tube à néon ; caractéristiques et exemple d'emploi (générateur d'éclairs).***

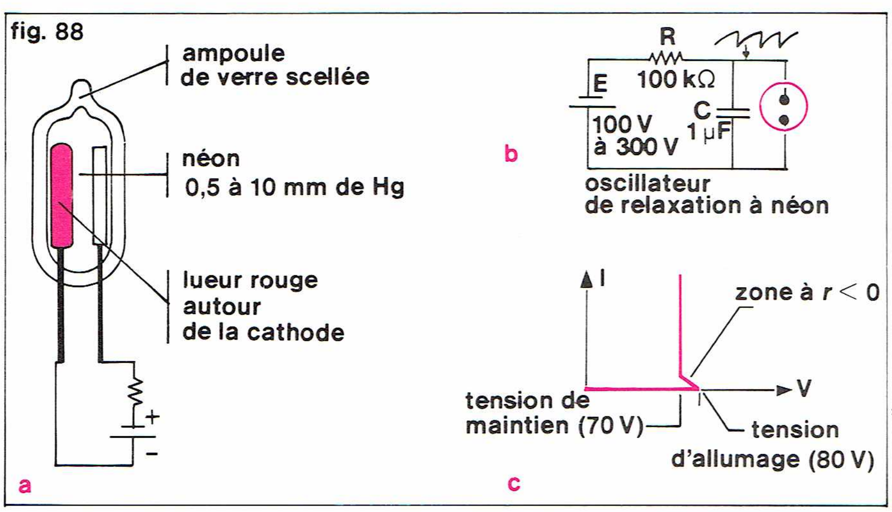

Richard Colin

Les sources lumineuses

On utilise rarement les **lampes d'incandescence,** car il est très difficile de faire varier rapidement leur luminance, et leur rendement lumineux exprimé en lumens par watt électrique consommé est très mauvais.

Les **tubes à lueurs,** dont le plus connu est le **tube à néon** (*fig.* 88a) constitué par une ampoule de verre étanche contenant du néon sous basse pression et où sont disposées deux électrodes, sont déjà plus intéressants. Si une tension électrique qui est de l'ordre de 80 volts est appliquée entre ces électrodes, une décharge s'établit et une gaine lumineuse rouge apparaît autour de la cathode. Ce tube est un dipôle ayant une caractéristique présentant une zone à résistance négative qui peut être utilisée pour réaliser un **oscillateur de relaxation** (*fig.* 88b) dont le fonctionnement est tout à fait analogue à celui de l'oscillateur à U. J. T., la capacité C se déchargeant dans le néon, qui émet un éclair, lorsque la tension à ses bornes atteint le seuil d'allumage (*fig.* 88*c*). On a vu comment, en utilisant des cathodes en fil fin, on pouvait réaliser sur ce principe les afficheurs utilisés dans certains appareils numériques.

Les éléments les plus utilisés actuellement sont les **diodes photo-émissives** et les **diodes lasers.** On sait depuis une vingtaine d'années déjà que, si l'on injecte un courant dans le sens direct dans une jonction PN, une partie de l'énergie peut être dissipée sous forme lumineuse. La longueur d'onde de la lumière, c'est-à-dire l'énergie *hf* des photons émis, est fonction du type de matériau utilisé, en particulier de la largeur de la bande interdite (gap). Une faible partie seulement de l'énergie injectée se retrouve sous forme lumineuse, et les recherches effectuées dans ce domaine ont eu essentiellement pour but d'augmenter ce rendement. Les premières diodes électroluminescentes fonctionnaient à basse température et émettaient surtout du rayonnement infrarouge ; on sait actuellement fabriquer des éléments fournissant une lumière rouge, jaune et même verte, le bleu est sans doute pour bientôt. Par rapport aux lampes à incandescence, les diodes électroluminescentes ont de nombreux avantages et remplacent de plus en plus les premières comme petits voyants de panneau sur les appareils électroniques. Elles ont une durée de vie très importante et une réponse très rapide ; certaines diodes au silicium émettent une lumière presque blanche et présentent un temps de réponse de l'ordre de la nanoseconde (10^{-9} s). L'intensité de la lumière émise est d'autre part une fonction presque linéaire du courant qui traverse la jonction. Du point de vue électrique, il s'agit d'une diode ordinaire, la chute de tension dans le sens direct étant de l'ordre de 1 à 2 volts (cela dépend du matériau). Il est moins connu que la diode électroluminescente est réversible ; éclairée par le rayonnement d'une autre diode, elle délivre une tension électrique, jouant ainsi le rôle de photopile, de très mauvais rendement cependant. Pratiquement, ces composants sont encapsulés sous divers boîtiers, métalliques avec une petite loupe de focalisation d'entrée ou, de plus en plus, plastiques.

Lorsque le courant traversant certaines diodes électroluminescentes augmente, on constate que la puissance lumineuse émise cesse brusquement de croître linéairement pour être multipliée brutalement par un facteur 10 à 100. Il s'agit d'une *émission laser,* le rayonnement émis devenant brutalement cohérent (*fig.* 89). Ceci n'est possible que si la géométrie de la diode permet l'établissement d'un pompage optique analogue à celui qui est utilisé dans les lasers classiques. Par suite de la forte valeur de courant à laquelle apparaît ce phénomène, on considérait jusqu'à une date très récente comme impossible de faire fonctionner des *diodes lasers* à la température ambiante. Depuis peu, des diodes à l'arséniure de gallium émettant dans le proche infrarouge à 300 °K ont été présentées. La génération de lumière par effet laser dans les matériaux semi-conducteurs est encore peu utilisée, mais se développera certainement beaucoup avec l'essor de l'optique intégrée ; des effets d'amplification seront également mis à profit.

Certains matériaux soumis à un champ électrique alternatif émettent de la lumière, c'est en particulier le cas

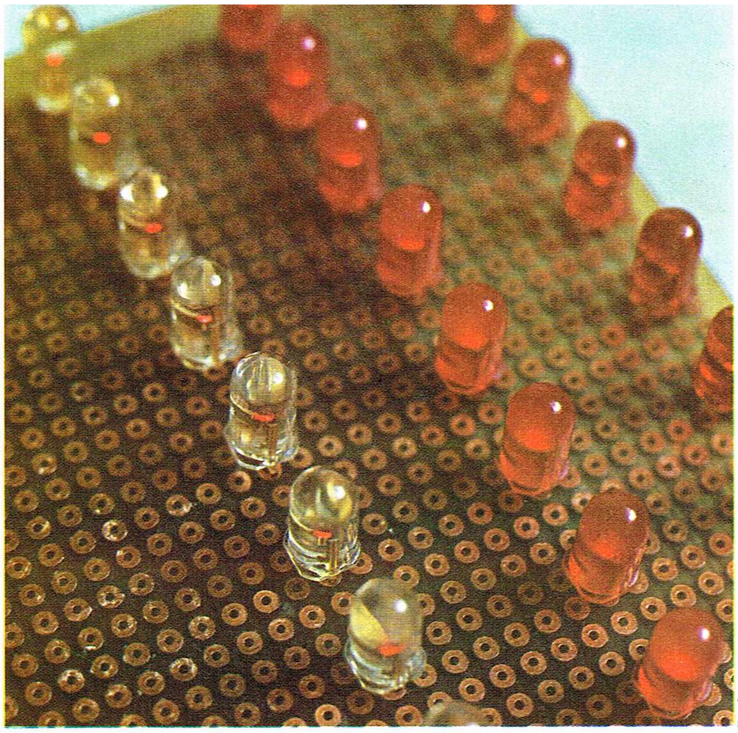

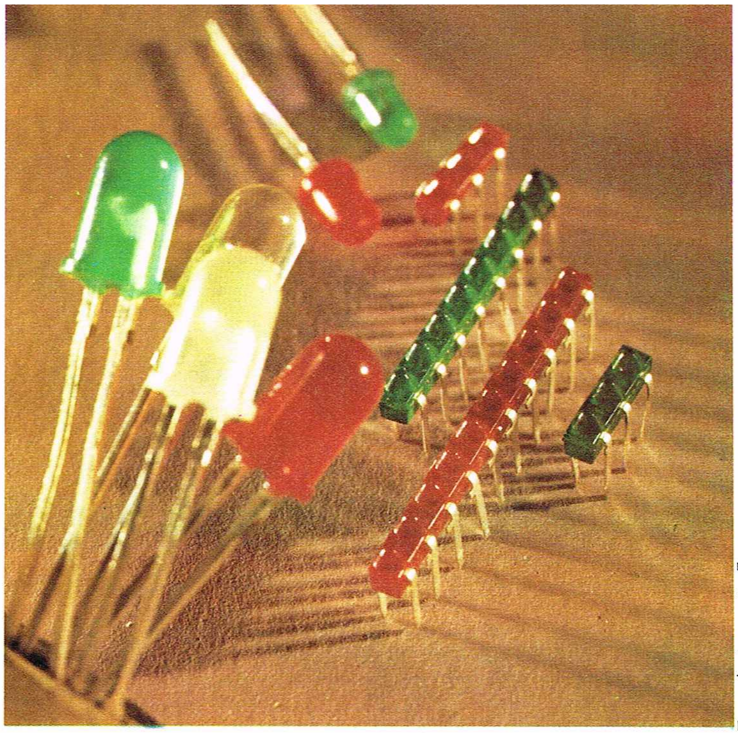

▲ *A gauche, test de longévité de diodes électroluminescentes (Radiotechnique de Caen). A droite, diodes électroluminescentes visibles : éléments simples et barrettes (TIL 261 - TIL 270 et TIL 271 - TIL 280).*

pour le sulfure de zinc contenant certaines impuretés. Sur ce principe sont construites les **cellules électroluminescentes.** Elles ont la structure d'un condensateur dont l'une des armatures est transparente pour laisser sortir le rayonnement, et le diélectrique est constitué par le matériau actif. Le rendement augmente avec la tension appliquée, et les cellules disponibles sont destinées à fonctionner entre 100 et 400 volts (secteur) ; de plus, il augmente beaucoup avec la fréquence, la couleur de la lumière étant d'ailleurs de plus courte longueur d'onde aux fréquences d'excitation élevées. Ces cellules sont essentiellement utilisées dans les systèmes de signalisation ou parfois comme sources lumineuses faibles (lampes pour l'éclairage d'un laboratoire photographique).

Pour être complet, il faut citer également comme sources lumineuses les tubes fluorescents et le spot sur un tube cathodique.

Les détecteurs de lumière

Chaque photon d'un rayonnement de fréquence f transporte une énergie hf qui, comme nous l'apprend la mécanique quantique, ne peut pas être fractionnée ; elle est non absorbée ou utilisée en entier. Si un électron situé au voisinage de la surface d'un métal « heurte » le photon, il peut être arraché au solide si le travail d'extraction est inférieur à l'énergie totale disponible hf, l'excédent d'énergie se retrouvant éventuellement sous forme cinétique :

$$\text{énergie incidente } hf = \text{travail d'extraction } h\nu_0 + \text{énergie cinétique } \frac{1}{2}mV^2$$

Il existe donc une longueur d'onde minimale au-dessus de laquelle un rayonnement ne peut plus arracher d'électrons à un métal donné. Avec des métaux purs, cette fréquence limite se situe dans le proche ultraviolet.

La cellule photo-électrique et le photomultiplicateur

Les électrons arrachés à un métal par effet photo-électrique peuvent être utilisés directement si l'on place au voisinage de la surface photo-émissive une anode collectrice, l'ensemble étant enfermé dans une enceinte où règne un vide poussé. C'est le principe de la **cellule photo-électrique** (*fig.* 90) qui est en quelque sorte une diode dans laquelle l'effet thermo-électronique est remplacé par un effet photo-électrique. Pour chaque type de matériau constituant la cathode, il existe une longueur d'onde limite ; en utilisant des substances à très faible travail de sortie comme les alliages césium-antimoine ou césium-oxyde d'argent, cette limite a pu être repoussée dans le proche infrarouge. Le courant recueilli par l'anode dépend très peu de la tension anodique, car la zone de charge d'espace régnant autour de la cathode d'une diode chauffée est ici presque inexistante. Une des caractéristiques électroniques intéressante est le *courant d'obscurité* qui est, bien sûr, d'autant plus élevé que le travail de sortie est plus faible, donc la sensibilité vers le rouge plus étendue ; 10^{-13} à 10^{-14} ampère pour une cathode type S 4 (Sb-Cs) ayant un maximum de sensibilité dans le bleu (0,4 μm), 100 fois plus pour le type S 1 (AgO-Cs), pour lequel le maximum est à 0,8 μm.

En fonction du flux lumineux reçu, la photocellule a une réponse presque parfaitement linéaire, ce qui la rend précieuse pour les mesures de flux ; elle est par contre peu sensible, typiquement 30 à 100 μA par lumen, ce qui correspond à un rendement quantique de 10 à 15 %, c'est-à-dire qu'un photon sur 7 à 10 seulement fournit un photo-électron utilisable. Pour augmenter cette sensibilité, on introduit parfois un gaz dans l'ampoule : sous forte tension d'accélération, les photo-électrons peuvent arracher des électrons aux molécules du gaz, ce qui augmente les charges disponibles ; malheureusement, la linéarité devient très mauvaise, et on ne peut utiliser ces

▼ *A gauche, figure 89 : apparition de l'effet laser à fort courant direct. A droite, figure 90 : a) cellule photo-électrique ; b) caractéristiques électriques d'une cellule photo-électrique.*

fig. 89

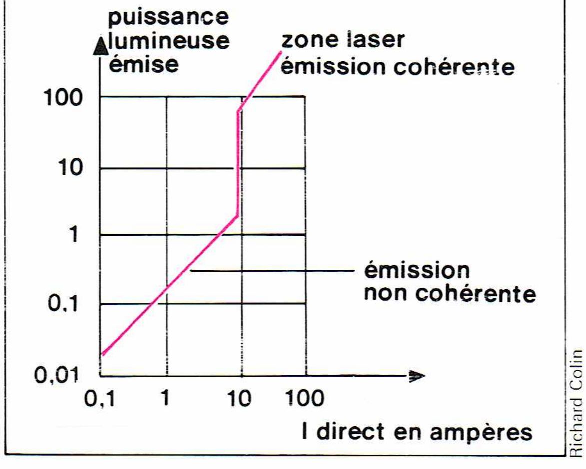

fig. 90

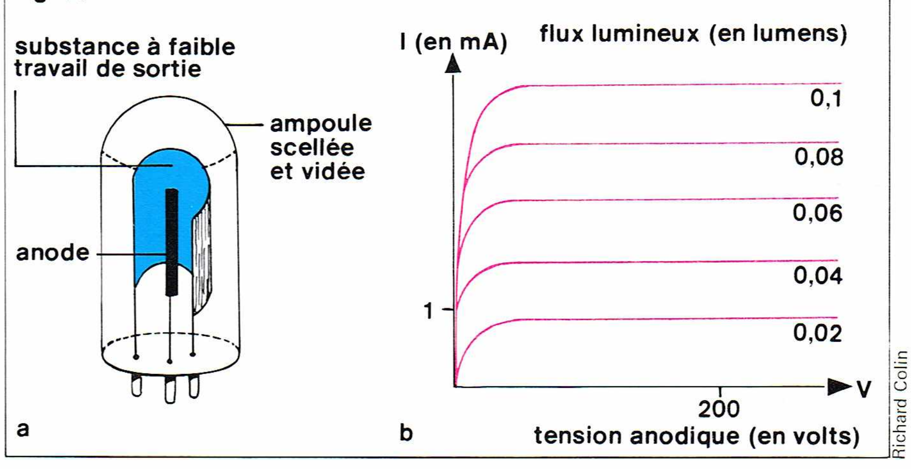

▶ *Figure 91 : principe d'un tube photomultiplicateur (pour éviter que la sortie ne soit portée à un potentiel élevé, on alimente souvent la photocathode en tension négative — E).*

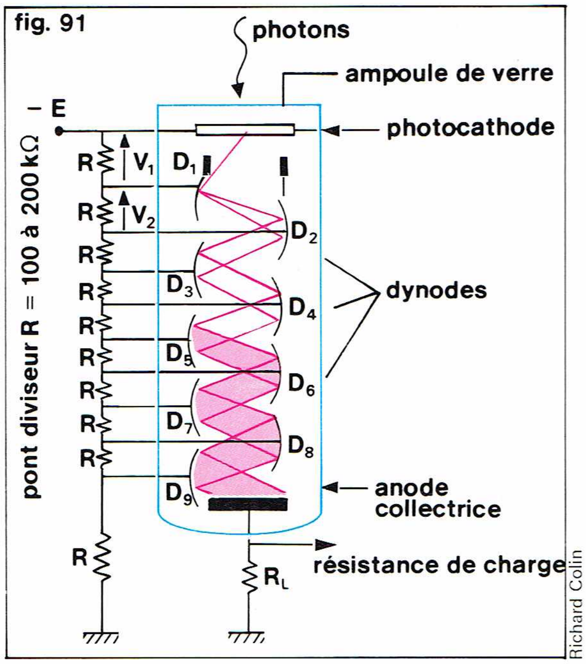

▼ *Le photomultiplicateur est un détecteur très linéaire remarquablement sensible et, de plus, à réponse très rapide.*

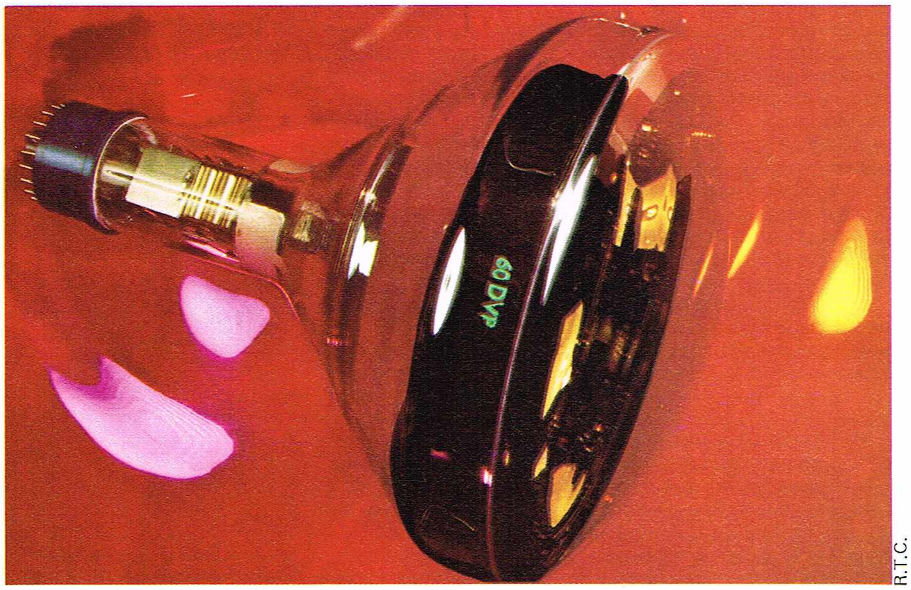

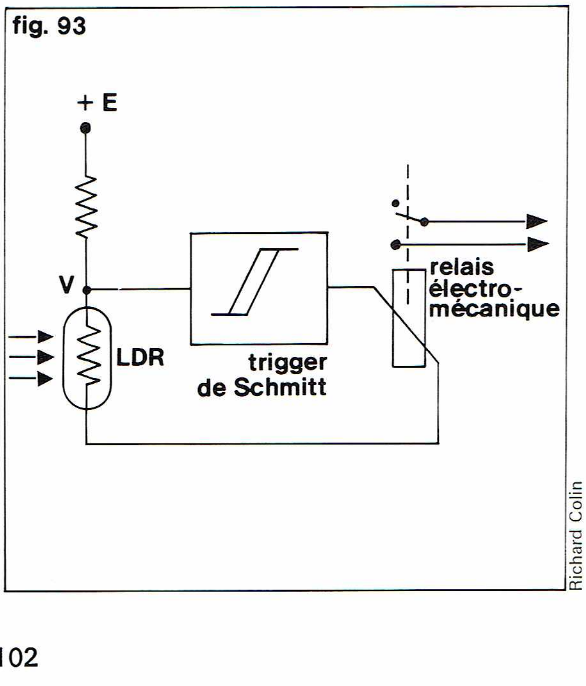

▶ *Figure 93 : principe d'un interrupteur crépusculaire à photorésistance* (LDR : *Light Dependant Resistance*). *A l'obscurité, le potentiel* V *est élevé et déclenche le trigger.*

dispositifs qu'en tout ou rien. Il est beaucoup plus intéressant de faire appel à un phénomène qui était très gênant dans les tubes à vide, l'*émission secondaire*. Si les photo-électrons émis par la photocathode sont accélérés suffisamment et projetés contre une plaque métallique, ils peuvent y arracher plusieurs électrons qui, à leur tour, peuvent être accélérés et frapper une seconde paroi, et ainsi de suite avant d'être captés par une anode finale. C'est le principe des **photomultiplicateurs.**

La *figure* 91 représente un tel tube, qui comprend donc une photocathode, 6 à 10 anodes intermédiaires *(dynodes)*, et une anode collectrice. Les dynodes sont alimentées par un pont diviseur placé entre la cathode et l'alimentation; typiquement, la tension entre deux dynodes est d'une centaine de volts. Les photo-électrons issus de la cathode sont accélérés sous la tension V_1 et viennent frapper la dynode D_1 à laquelle ils arrachent plusieurs électrons secondaires qui, accélérés par V_2, viennent frapper D_2 et ainsi de suite. Si *a* est le nombre moyen d'électrons secondaires arrachés à chaque dynode et *n* le nombre de ces dynodes, le coefficient de multiplication du tube est $G = a^n$. Les coefficients de multiplication usuels varient de 10^4 à 10^8 avec entre 6 et 10 dynodes. Le gain de sensibilité est donc considérable par rapport à une cellule photo-électrique ordinaire, la sensibilité se chiffrant en dizaines d'ampères par lumen. Naturellement, le courant d'obscurité est multiplié dans le même rapport. L'émission électronique spontanée d'une cathode étant un effet thermique, on la réduit en refroidissant. Pour avoir de très faibles courants de fuite, on fait ainsi travailler certains tubes photomultiplicateurs (PM) dans l'azote liquide (— 195 °C). Il va de soi que le gain dépend beaucoup de la tension d'accélération entre dynodes. Pour une chaîne de résistances d'alimentation des dynodes fixe, il faut retenir que la sensibilité varie proportionnellement au logarithme de la tension d'alimentation, elle double pour une variation d'une centaine de volts. Construit avec soin, le photomultiplicateur est un détecteur très linéaire remarquablement sensible et, de plus, à réponse très rapide; il est pour cette raison très utilisé en instrumentation malgré son prix élevé.

Les détecteurs à l'état solide

Sous l'influence d'un rayonnement lumineux, certains porteurs de charge peuvent être libérés dans un semi-conducteur et contribuer alors à la conduction du matériau; c'est ce qui se passe dans les **photorésistances.** Une cellule photoconductrice ou photorésistance est constituée le plus souvent d'un substrat isolant recouvert par évaporation sous vide d'une mince couche de matériau photosensible sur lequel est déposé un jeu d'électrodes (*fig.* 92). L'ensemble se comporte électriquement comme une résistance pure dont la valeur est fonction de l'éclairement. La variation de résistance peut être considérable et passer par exemple de 20 MΩ dans l'obscurité à quelques ohms en plein soleil.

La réponse spectrale dépend de l'énergie nécessaire pour libérer des charges. Dans le domaine visible, le composé le plus utilisé est le sulfure de cadmium (CdS). Le silicium, le germanium sont sensibles surtout dans l'infrarouge. En refroidissant l'ensemble, on réalise des photorésistances sensibles à des rayonnements atteignant une longueur d'onde de 30 µm.

La résistivité de ces éléments varie en fonction de l'éclairement de façon très linéaire, d'où leur emploi en photographie dans les posemètres; malheureusement, leur réponse est très lente. Les photorésistances au séléniure de cadmium sont plus rapides que les cellules CdS mais ont une résistance d'obscurité plus faible. L'augmentation de conductibilité sous l'influence d'une lumière appliquée brusquement est assez rapide, car cela correspond à une libération de porteurs, mais le retour à l'état de forte résistance est très lent, la recombinaison des porteurs créés peut durer plusieurs secondes; en pratique, on doit retenir que la vitesse est d'autant plus grande que l'éclairement est fort. Cette limitation en fréquence est un handicap certain, car la photorésistance est le seul composant se comportant comme une résistance pure commandée. On peut par exemple réaliser un atténuateur commandé par la lumière en remplaçant l'une des deux résistances d'un pont diviseur par une cellule photoconductrice. L'ensemble peut être commandé par une tension ou un courant si l'éclairage est assuré

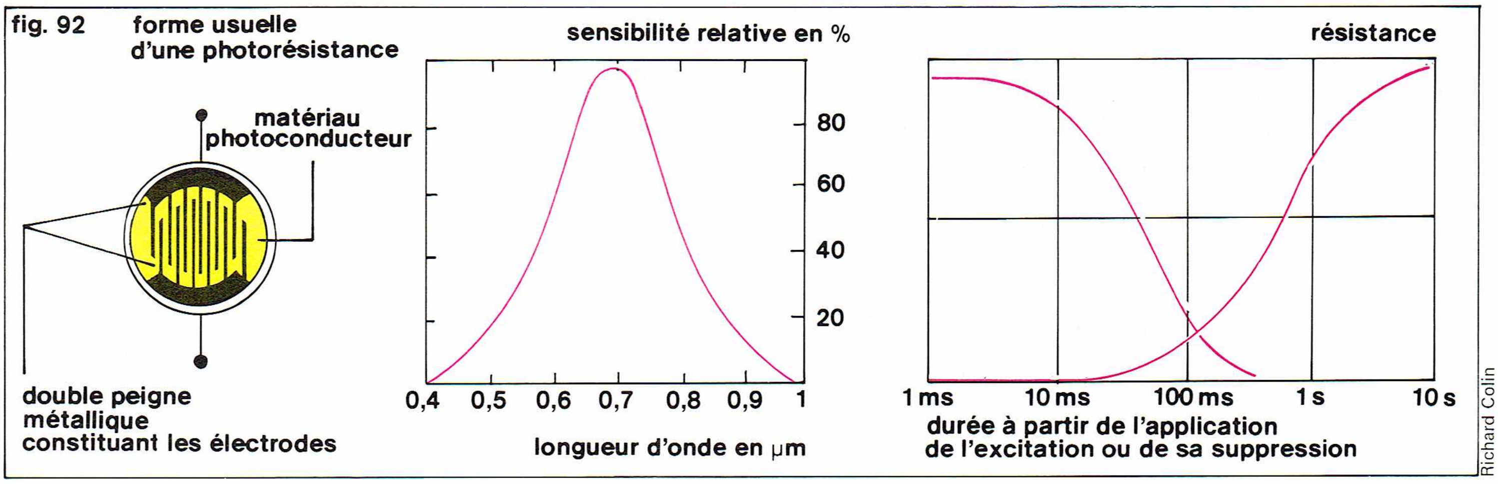

▲ *Figure 92 : caractéristiques typiques des photorésistances.*

par une ampoule à incandescence ou une diode électroluminescente. Le faible prix et la haute sensibilité, tout à fait comparable à celle d'un photomultiplicateur, font que les photorésistances sont très utilisées à chaque fois qu'une grande vitesse de réponse n'est pas nécessaire; on les rencontre par exemple dans les interrupteurs crépusculaires qui déclenchent l'allumage de l'éclairage urbain à la tombée de la nuit et son extinction le matin. La *figure* 93 donne à titre d'exemple le schéma de principe d'un tel système.

L'effet de la lumière peut également se faire sentir au niveau d'une jonction. Si la zone intrinsèque dans une jonction PN est éclairée par un rayonnement convenable, il y a création de porteurs, c'est-à-dire de paires électrons-trous qui sont séparés immédiatement par le champ interne. Ceci se manifeste macroscopiquement comme une augmentation du courant inverse de la jonction. C'est ce qui se passe avec les **photodiodes** (*fig.* 94a), qui sont construites de façon à favoriser la pénétration de la lumière dans la zone de jonction. Comme tout courant inverse de jonction, le courant électrique d'une photodiode est indépendant de la tension appliquée, comme le montre la *figure* 94b. Grâce à la présence du champ interne, le phénomène est très rapide; certaines photodiodes ont un temps de réponse très inférieur à la nanoseconde. En ce qui concerne la réponse spectrale, elle dépend du matériau utilisé mais s'étend dans le proche infrarouge (*fig.* 94b). Pour augmenter la sensibilité de ces détecteurs, on peut mettre à profit l'effet transistor : la photodiode constitue dans ce cas la jonction base-collecteur d'un transistor. L'ensemble est ce que l'on appelle un **phototransistor.** En utilisant un montage Darlington, on réalise un **photodarlington** (*fig.* 95). La sensibilité à la lumière est ainsi très importante, mais les performances sont limitées par les courants d'obscurité qui augmentent très vite avec la température. On a réalisé de même des phototransistors à effet de champ *(photo fets)* qui présentent l'avantage d'avoir une sensibilité réglable avec la tension grille. Tous ces dispositifs sont plus lents que les photodiodes, et rares sont les phototransistors à fréquence de coupure supérieure au MHz.

Si l'énergie des photons qui atteignent une jonction est supérieure à celle nécessaire pour libérer les porteurs, ces derniers présentent un énergie cinétique :

$$\frac{1}{2} mV^2 = \text{énergie du photon} - \text{énergie d'extraction}$$

qui se manifeste sous forme d'une différence de potentiel. La jonction éclairée se comporte comme un générateur, on l'appelle **cellule photovoltaïque.** La tension en circuit ouvert est de l'ordre de 400 mV pour un éclairement de quelques centaines de lux et varie peu au-delà, par contre le courant de court-circuit augmente linéairement avec l'éclairement et dépend de la surface de semi-conducteur utilisée. C'est ce type de composant qui, sous le nom de **pile solaire,** est utilisé pour alimenter les engins spatiaux, et qui équipera peut-être les centrales électriques solaires d'un proche avenir. Le rendement obtenu, c'est-à-dire le rapport entre l'énergie électrique recueillie et l'énergie lumineuse reçue, dépend du matériau et de la technologie; il est de l'ordre de 10 %.

▼ *A gauche, des phototransistors. A droite, figure 95 :*
a) *phototransistor;*
b) *photodarlington.*

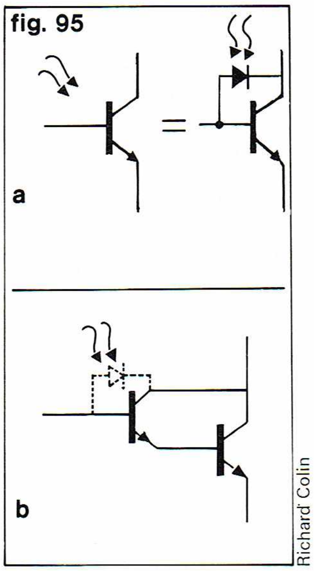

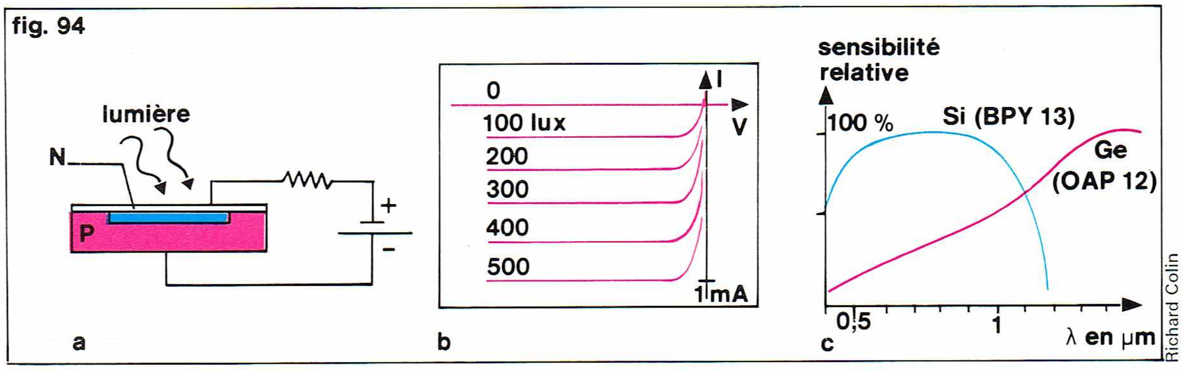

◀ *Figure 94; caractéristiques des photodiodes :*
a) *coupe d'une photodiode plane;*
b) *caractéristique inverse d'une photodiode;*
c) *sensibilité à la lumière.*

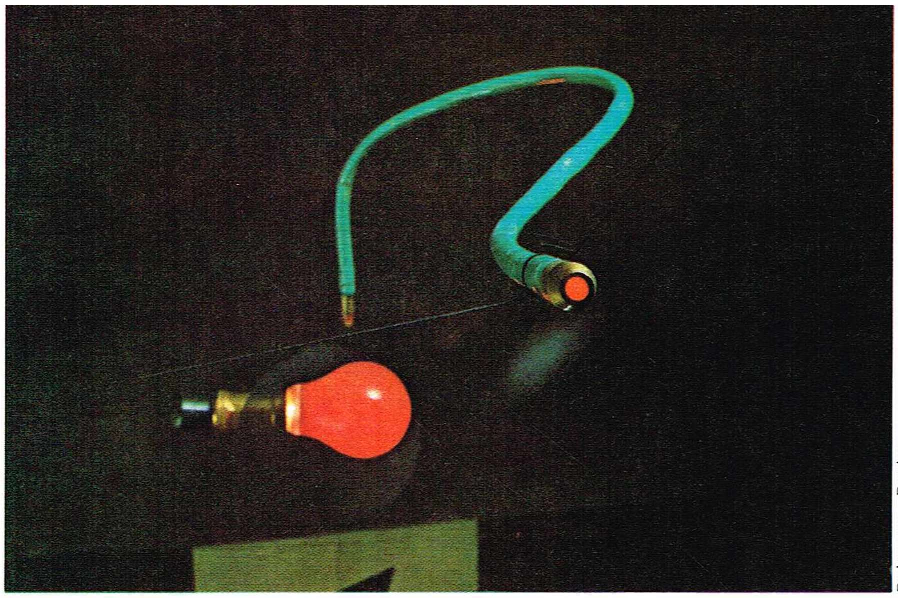

Doisneau - Rapho

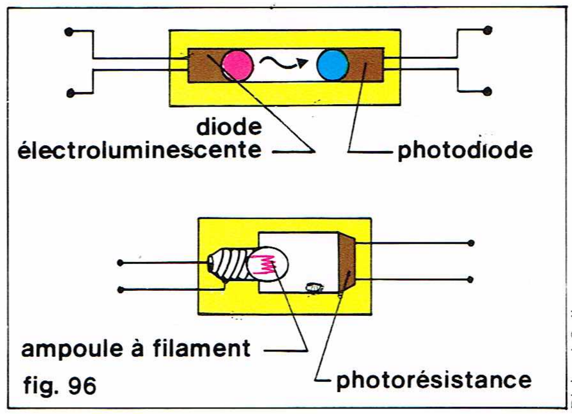

fig. 96

Richard Colin

▲ *A gauche, une application des guides de lumière : une fibre de verre associée à une ampoule transmet la lumière de celle-ci qui apparaît à l'extrémité de la fibre. A droite, figure 96 : exemples de photocoupleur.*

▼ *Figure 97; guide de lumière et ses applications :* a) *guide de lumière placé entre l'émetteur et le récepteur d'un ensemble « photocoupleur »;* b) *détecteur de proximité;* c) *transmission d'un éclair bref dans un guide long de forte section.*

Les circuits opto-électroniques

Le **photocoupleur** est le composant opto-électronique le plus important. Il est constitué par l'association dans un même boîtier d'une source lumineuse et d'un ou plusieurs récepteurs photosensibles. La source lumineuse peut être une lampe à incandescence, un néon ou, le plus souvent, une diode électroluminescente, le récepteur une photorésistance, une photodiode ou un phototransistor (*fig.* 96). Pour l'utilisateur, le photocoupleur se comporte comme un quadripôle électrique dont on définit la *caractéristique de transfert* (rapport entre la grandeur de sortie, tension ou courant, et la grandeur d'entrée). L'intérêt fondamental du photocoupleur est l'*isolement électrique parfait entre l'entrée et la sortie*. En éloignant suffisamment la source lumineuse du récepteur, une tension d'isolement de plusieurs dizaines de kilovolts peut être obtenue sans difficulté. La bande de fréquence de ces dispositifs peut s'étendre jusqu'à quelques dizaines de mégahertz, mais le rendement de transfert en énergie est toujours très faible, et le signal de sortie doit toujours être traité par un circuit actif. La linéarité est un point faible des photocoupleurs, c'est pourquoi on les utilise assez peu en régime linéaire. Il existe actuellement sur le marché de nombreux photocoupleurs dont le circuit de sortie est conçu pour délivrer des signaux compatibles avec les circuits logiques D. T. L. ou T. T. L.

Si l'isolement galvanique entre l'entrée et la sortie doit dépasser 10 ou 20 kV, il n'est pas facile de placer l'émetteur et le récepteur dans le même boîtier. On utilise alors pour conduire la lumière un **guide optique** (*fig.* 97a); il s'agit essentiellement d'un cylindre de matériau transparent dans lequel le faisceau lumineux se propage longitudinalement. On sait en effet (voir chapitre *Optique*) qu'un rayon lumineux ne peut passer d'un milieu dans un autre d'indice de réfraction plus faible s'il fait avec la normale à la surface de séparation un angle d'incidence supérieur à un angle limité λ défini par $\sin \lambda = 1/n$ où n est l'indice du matériau; c'est le *phénomène de réflexion totale*. Un rayon lumineux qui pénètre dans le guide lumière s'y trouve donc emprisonné tant que ce dernier n'est pas trop courbé. Les guides de lumière ont de multiples applications; il est possible, en utilisant des faisceaux de fibres de verre, de répartir la lumière émise par la source en divers points; les bouquets de fibre de verre associés à une ampoule et vendus comme éléments décoratifs en sont un exemple spectaculaire; la lumière de l'ampoule sort dans l'air à l'extrémité de chaque fibre qui apparaît comme un point très brillant. Un exemple d'utilisation possible est représenté sur la *figure* 97b : de la lumière ne parvient au récepteur qu'en présence d'un élément réfléchissant placé devant la sortie de la fibre; on a réalisé un détecteur de proximité.

Le système présente de nombreuses analogies avec les montages à coupleurs directifs qui seront décrits dans le paragraphe consacré aux fréquences. Des études très approfondies sont poursuivies actuellement pour réaliser les guides de lumière susceptibles d'être utilisés pour la transmission d'informations à grande distance. L'une des principales caractéristiques de ces guides est alors leur atténuation, le signal lumineux ayant à traverser une épaisseur de verre de plusieurs kilomètres entre l'émetteur et un récepteur relais. On a réussi à fabriquer des matériaux d'une pureté telle que la transparence sur une épaisseur de un kilomètre est de l'ordre de 95 à 99 %. Dans cette application particulière, les guides se réduisent à des fibres très fines; en effet, dans le cas contraire, il existerait entre les deux extrémités plusieurs chemins possibles de longueurs inégales, donc parcourus en des temps différents (*fig.* 97c). Une impulsion lumineuse très brève appliquée à l'entrée se trouverait élargie à la sortie. Le calcul montre que cet élargissement ne disparaît que si le diamètre du guide est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde, c'est-à-dire de l'ordre du micron pour l'infrarouge proche très souvent utilisé. Pour de telles fibres, plus fines qu'un cheveu, le moindre problème n'est pas, on le conçoit, d'y faire pénétrer la lumière. Des modes de couplages très particuliers (emploi d'ondes évanescentes) ont été étudiés.

Un nombre considérable de montages opto-électroniques ont été imaginés. Nous en citerons quelques-uns empruntés le plus souvent à l'ouvrage *l'Opto-électronique*, Éditions Radio, Paris, 1971.

Les photorésistances sont très souvent utilisées tant qu'une vitesse de réponse élevée n'est pas nécessaire. Le montage représenté sur la *figure* 98 est un **compresseur automatique** de niveau sonore. Si le niveau de sortie est trop élevé, l'ampoule L s'allume, et la résistance R diminue, ce qui atténue le signal d'entrée; ce système très simple et très efficace peut être monté sur un radiorécepteur, par exemple. Par suite de la lenteur de réponse de l'ampoule et de la LDR, aucune distorsion gênante n'est introduite.

fig. 97

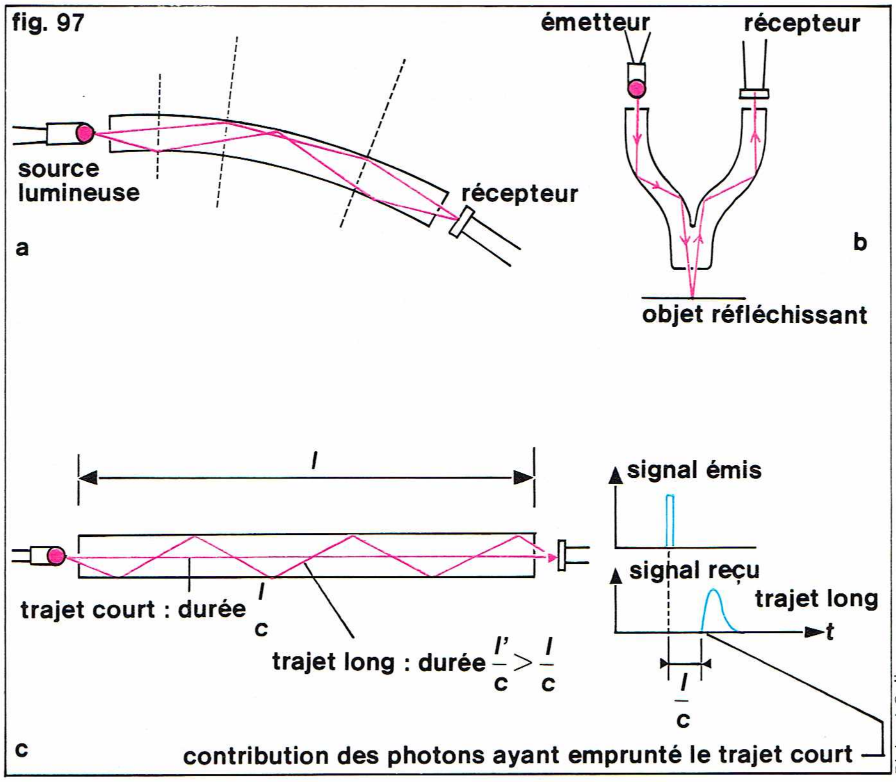

Richard Colin

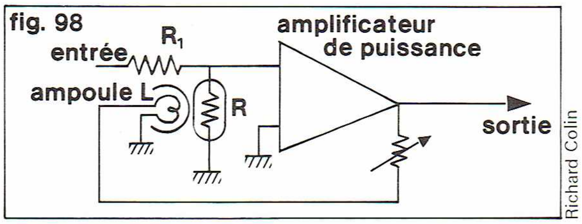

La *figure* 99 représente un **posemètre** pour l'agrandissement photographique. Il s'agit d'un amplificateur différentiel comparant la résistance d'une LDR placée sous le flux de l'agrandisseur et celle d'un potentiomètre P. Les deux diodes électroluminescentes, à l'égalité, ont même brillance. Le mode d'emploi est le suivant : le temps de pose correct ayant été déterminé par un essai préalable, on introduit un diffuseur sous l'objectif de l'agrandisseur, et on égalise la brillance des deux diodes en agissant sur P. Pour le tirage d'un autre négatif, il suffira, après avoir mis en place le diffuseur, de revenir dans les mêmes conditions en agissant sur le diaphragme de l'objectif ; le temps d'exposition correct sera alors le même.

La *figure* 100 représente un **multivibrateur opto-électronique.** A la mise sous tension, l'ampoule L_1 alimentée par la résistance R s'allume, elle éclaire LDR 1 dont la résistance diminue, ce qui provoque l'allumage de L_2 qui, elle-même éclairant LDR 2, allume L_3 ; LDR 3, étant éclairée, court-circuite L_1 qui s'éteint, LDR 1 se retrouvant dans l'obscurité, L_2 s'éteint, puis L_3 ; L_1 cesse d'être shuntée par une faible résistance, se rallume et le cycle recommence. Le clignotement n'est bien visible que si les constantes de temps des LDR et des ampoules sont convenables, et la mise au point est délicate.

Un problème très souvent rencontré en instrumentation est de transporter une information entre deux points portés à des potentiels très différents, par exemple lire les variations d'une tension voisine de 30 kV sur un oscilloscope relié au secteur. L'isolement électrique des photocoupleurs permet de résoudre très facilement ce problème. Si l'on désire une linéarité de transmission parfaite, on peut effectuer une transmission optique par impulsions. La grandeur à transmettre est transformée en une fréquence qui lui est proportionnelle et qui commande une diode électroluminescente. Les éclairs émis sont acheminés par un guide optique vers un détecteur dont le potentiel moyen est voisin de la masse, qui commande un convertisseur fréquence-tension dont la sortie peut être lue sans précautions spéciales, sur un oscilloscope par exemple.

Opto-électronique et optique intégrée

En opto-électronique, une ou plusieurs liaisons électriques sont remplacées par des liaisons optiques, mais le signal est toujours traité sous forme électrique. Il n'en est pas de même en optique intégrée où l'on cherche à effectuer le traitement complet du signal sous forme lumineuse. L'amplification est obtenue par des effets de pompage optique analogues à ceux employés dans les lasers. Il s'agit d'un domaine tout récent actuellement en plein développement.

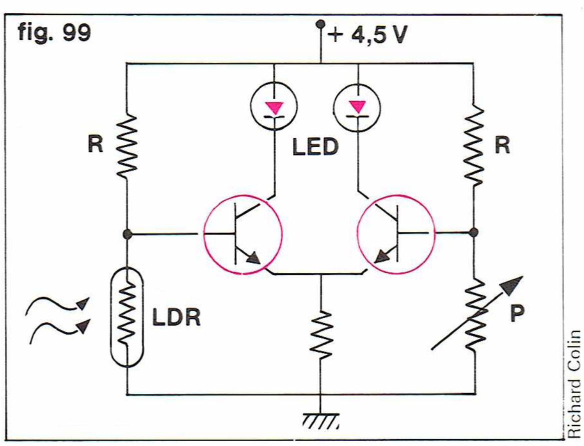

◀ ***Figure 99 : posemètre pour l'agrandissement photographique.***

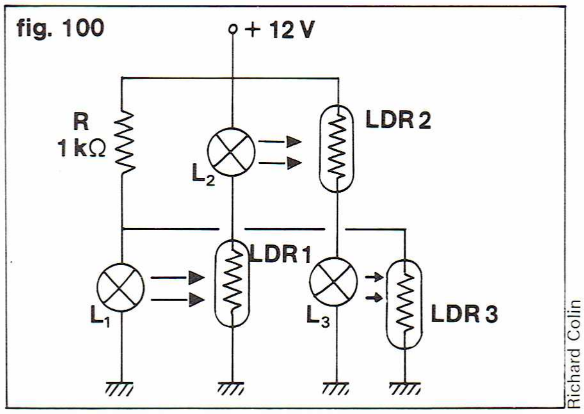

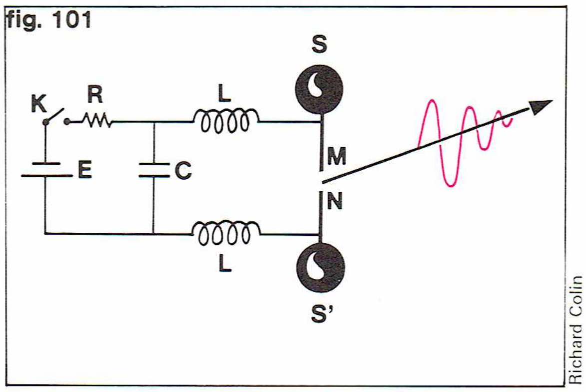

◀▼ ***A gauche, figure 98 : principe d'un compresseur de volume. A droite, figure 100 : clignotant à LDR. En dessous, figure 101 : le doublet de Hertz, premier dispositif rayonnant des ondes.***

Les applications de l'électronique

La radio

Parmi les innombrables applications de l'électronique, la radiodiffusion, la télévision et, de façon plus générale, les télécommunications jouent un rôle privilégié. Le premier dispositif rayonnant des ondes a été le dipôle de Hertz (1888) ; il était constitué par deux sphères S et S′ reliées entre elles par un conducteur interrompu entre M et N (*fig.* 101) par un intervalle de l'ordre du millimètre. Ce « doublet » était alimenté par une source de haute tension à travers deux bobines identiques de coefficient d'auto-induction L. Lorsque l'interrupteur K était fermé, C se chargeait jusqu'au moment où la tension entre M et N était suffisante pour qu'il éclate une étincelle qui ionise l'air et referme le circuit. Le conducteur était parcouru par un courant haute fréquence amorti qui cessait lorsque le potentiel aux bornes de C devenait trop faible pour entretenir l'étincelle. Ce système rayonnait donc des trains d'ondes amorties.

Actuellement, on sait fabriquer des oscillateurs susceptibles d'entretenir dans un conducteur un courant de haute fréquence d'amplitude constante. C'est Maxwell qui formula les équations fondamentales régissant tous les phénomènes électromagnétiques ; sa théorie permet de calculer qu'un élément de circuit rectiligne de longueur d parcouru par un courant sinusoïdal d'intensité I et de fréquence f (longueur d'onde $c/f = \lambda$) rayonne à grande distance r une onde électromagnétique constituée par un champ électrique et un champ magnétique perpendiculaires entre eux et à la direction de propagation, sinusoïdaux et en phase de valeurs :

$$E_\theta = \frac{60\,\pi}{r}\,\frac{d}{\lambda}\,I \sin\theta \cdot \cos 2\,\pi f\left(t - \frac{r}{c}\right)$$

$$H_\Phi = \frac{1}{2\,r}\,\frac{d}{\lambda}\,I \sin\theta \cdot \cos 2\,\pi f\left(t - \frac{r}{c}\right)$$

θ étant l'angle défini sur la *figure* 102 et c la vitesse de la lumière.

Ce qui représente pour tout l'espace une énergie rayonnée dont la valeur en watts est donnée par l'expression :

$$\overline{W} = 80\,\pi^2 \left(\frac{d}{\lambda}\right)^2 I^2_{eff}$$

▶ *A gauche, figure 102 : champs électrique et magnétique constituants de l'onde électromagnétique rayonnée par l'élément de circuit* AB, *de longueur* d *parcourue par un courant* HF. *A droite, figure 103 : répartition du courant et de la tension pour un doublet demi-onde.*

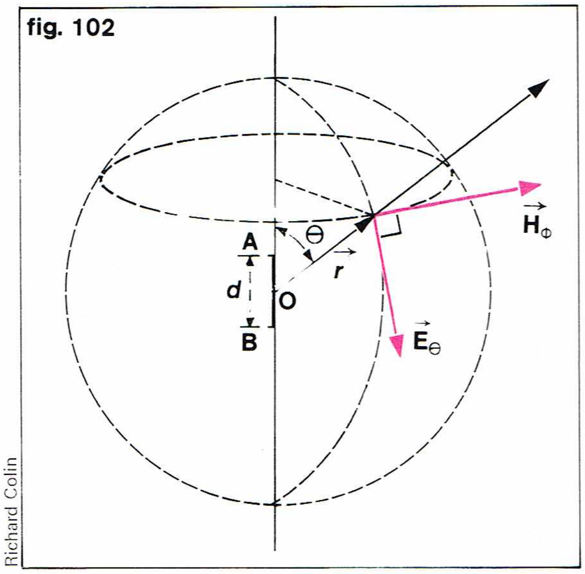

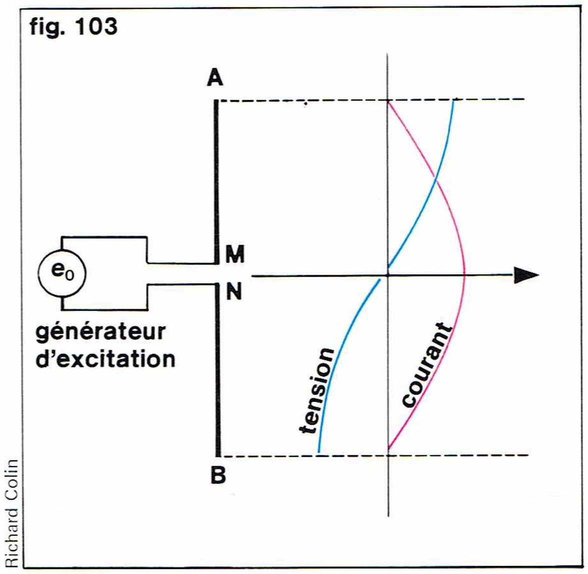

Vis-à-vis de la source fournissant le courant d'excitation, tout se passe donc comme si l'élément de circuit *d* était une résistance :

$$R = 80\,\pi^2 \left(\frac{d}{\lambda}\right)^2$$

Cette résistance apparente est appelée *résistance de rayonnement*. L'application des formules précédentes n'est pas immédiate, car l'intensité I n'est pas une constante le long du conducteur de longueur *d* dès que cette longueur n'est pas très faible devant la longueur d'onde λ ; cependant, elles permettent de dégager la variation en $1/r$, c'est-à-dire relativement lente, des champs en fonction de la distance. Le calcul est facile à mener à son terme dans le cas du doublet demi-onde constitué par un conducteur rectiligne interrompu AMNB dont la longueur est égale à la demi-longueur d'onde dans le vide du signal d'excitation appliqué en MN (*fig.* 103) ; il s'établit dans ce conducteur un régime résonnant présentant au centre un ventre de courant. Vis-à-vis du générateur qui l'alimente, un tel doublet se comporte, à la fréquence de résonance, comme une résistance 73 ohms. Les phénomènes électromagnétiques étant réversibles, un dipôle récepteur placé à grande distance *r* du dipôle émetteur est une source de tension de fréquence *f* et d'impédance interne 73 Ω : c'est une *antenne réceptrice*. Très souvent, on n'emploie pas à l'émission un doublet demi-onde complet, mais une moitié seulement, c'est-à-dire un conducteur vertical excité par sa base et de longueur λ/4 : c'est l'*antenne quart-d'onde*.

▼ *Poste et antennes émettrices installées près de Bagur (Espagne).*

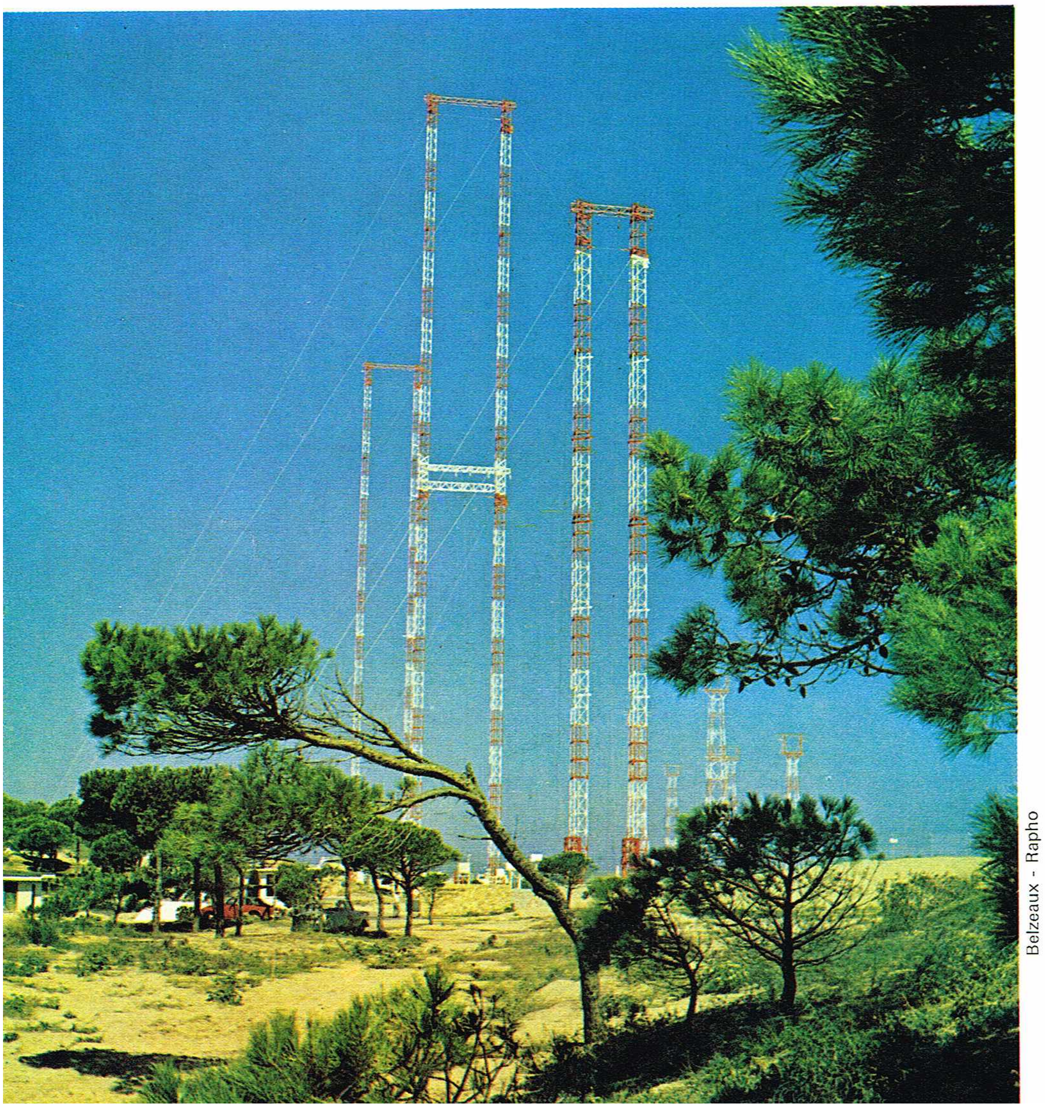

Sans entrer plus avant dans la description des différents systèmes d'antennes émettrices et réceptrices, on voit qu'il est possible, en utilisant à l'émission un oscillateur de puissance suffisante, d'induire à grande distance, aux bornes de sortie d'une antenne réceptrice, une tension faible qui est l'image atténuée du courant parcourant l'antenne émettrice. Cependant, les signaux à transmettre ne se présentent pas naturellement sous forme de tension de haute fréquence ; ce sont des tensions variables de fréquence assez basse délivrées, par exemple, par un microphone. Entre le microphone et l'antenne, il faut effectuer une opération non linéaire qui est une *modulation* destinée à introduire sur le signal haute fréquence (HF) les informations basse fréquence (BF).

Un oscillateur délivre une tension ou un courant que l'on peut écrire $i = i_0 \cos(2\pi ft + \varphi)$. Si ce courant excite une antenne d'émission, le signal reçu à grande distance par l'antenne réceptrice aura la même forme, le récepteur est donc capable d'évaluer les variations éventuelles de l'intensité i_0 ou de la fréquence *f* de l'émetteur, plus difficilement de sa phase φ. Trois voies sont alors possibles pour introduire sur l'onde HF l'information BF : on peut faire varier l'amplitude i_0 au rythme du signal BF à transmettre, c'est la *modulation d'amplitude* (AM) ; on peut aussi sans toucher à i_0 modifier la fréquence *f* autour d'une valeur fixe, c'est la *modulation de fréquence* (FM) ; plus rarement on agit sur la phase. La modulation d'amplitude est la plus utilisée. Si $s(t)$ est le signal issu du microphone, le courant d'excitation de l'antenne est de la forme :

$$i = i_0\,[1 + m\,s(t)] \cos 2\,\pi ft$$

La *figure* 104 montre l'allure d'un signal HF ainsi modulé en amplitude. Nous ne décrirons pas ici les circuits permettant d'obtenir ce résultat ; on conçoit cependant qu'il suffit d'appliquer le signal sinusoïdal pur issu d'un oscillateur HF à l'entrée d'un amplificateur dont le gain variable peut être modifié au rythme de la BF. C'est ce qui est obtenu avec un simple transistor dont le courant émetteur, donc le h_{11}, est modifié par le signal basse fréquence (*fig.* 104).

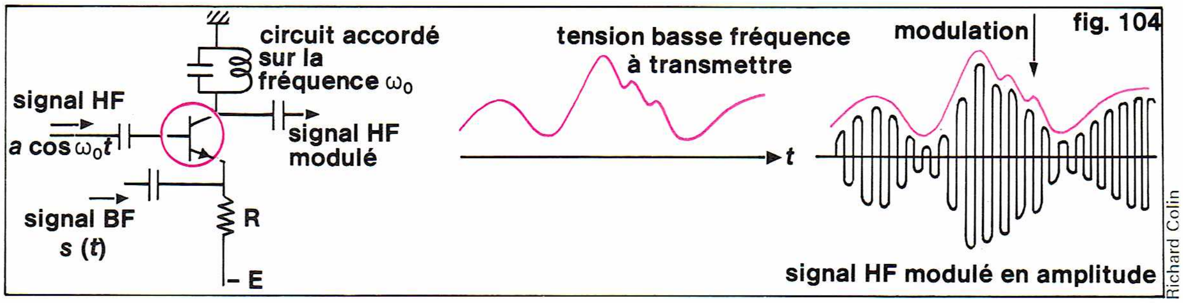

◄ *Figure 104 : modulation d'amplitude. La tension émetteur, donc le courant du transistor, varie au rythme du signal BF s(t), or le gain de l'étage est proportionnel à β/h_{11} et h_{11} est inversement proportionnel au courant émetteur.*

Au niveau de l'antenne réceptrice, tous les champs électromagnétiques de fréquences variées provenant de tous les émetteurs voisins se superposant, il faut d'abord en sélectionner un. Un premier tri est effectué par l'antenne réceptrice elle-même qui favorise les fréquences pour lesquelles elle entre en résonance, c'est-à-dire, par exemple, se comporte comme un doublet demi-onde. Ce tri est souvent peu efficace en radiodiffusion, car les fréquences mises en jeu sont faibles et les longueurs d'onde trop importantes pour que l'on puisse utiliser des antennes accordées (pour recevoir France Inter, une antenne quart-d'onde devrait avoir 450 mètres de long), il n'en est pas de même au-delà de 100 mégahertz, par exemple en télévision, où les antennes sont accordées à l'émetteur que l'on désire recevoir (à 300 MHz, le doublet demi-onde n'a que 50 cm de longueur). Les signaux délivrés par l'antenne sont appliqués à un circuit résonnant LC dont la fréquence de résonance est égale à celle de l'émetteur recherché. Pour éviter de trop amortir ce circuit par l'impédance interne de l'antenne (73 Ω pour un dipôle demi-onde), cette dernière est souvent reliée à une prise intermédiaire du bobinage, comme le montre la *figure* 105a. Il apparaît aux bornes du circuit ainsi constitué un signal qui est la réplique exacte du signal émis, c'est-à-dire de la HF modulée. Il faut en extraire l'information utile basse fréquence. C'est le rôle du *circuit de détection* constitué par la diode D. Le fonctionnement de ce circuit est identique à celui d'un redresseur que nous avons décrit dans un paragraphe antérieur, la tension aux bornes de C est proportionnelle à l'amplitude de la sinusoïde d'entrée, elle varie comme la BF modulante si la constante de temps RC n'est pas trop grande.

Dans le plus simple des récepteurs, dont l'ancêtre est le *détecteur à galène* (il porte ce nom parce que la diode était réalisée par une pointe appuyant sur un cristal de galène naturelle), la charge R est constituée par un écouteur. Ce récepteur sans amplification est simple, ne nécessite aucune source d'énergie, mais est très peu sensible, et seuls les émetteurs puissants ou proches sont captés.

Pour augmenter la *sensibilité*, on peut placer un transistor amplificateur avant le casque, mais on gagne peu, car la diode D n'est pas capable de redresser les signaux d'entrée trop faibles. Il faut amplifier le signal HF lui-même avant de le détecter. Le problème est alors de réaliser un amplificateur sélectif de grand gain et de fréquence d'accord variable. On y parvient partiellement en utilisant un condensateur variable double. Pour chaque position du bouton de réglage, les deux circuits L_1C_1 et L_2C_2 doivent être accordés sur la même fréquence (*fig.* 105b), le transistor étant monté en amplificateur HF dont le gain est maximal pour la fréquence

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}}$$

Pour obtenir un *gain* important, il faut augmenter le nombre d'étages, ce qui conduit à utiliser des condensateurs variables à multiples « cages » dont le réglage est délicat.

La solution universellement retenue fait appel à un *changement de fréquence ;* le récepteur est qualifié alors de *superhétérodyne :* le faible signal reçu de l'antenne est mélangé sur un élément non linéaire avec la tension issue d'un oscillateur local de fréquence telle que le battement entre les deux puisse être amplifié par un amplificateur de fort gain mais travaillant à fréquence fixe. Pour sélectionner un émetteur, on règle la fréquence de l'oscillateur local en même temps que l'accord du circuit d'antenne. La fréquence à laquelle se fait l'amplification est appelée *fréquence intermédiaire ;* en général elle est de 455 kHz. La *figure* 105c donne le schéma synoptique d'un récepteur de radiodiffusion de modèle courant. L'antenne est connectée à un circuit accordé d'entrée (l'antenne peut être remplacée par un barreau de ferrite placé à l'intérieur du bobinage L_1 qui est sensible à la composante magnétique de l'onde électromagnétique incidente) dont la fréquence est commandée par le condensateur variable C_1. Le faible signal HF recueilli est appliqué sur la base du transistor T_1 qui reçoit d'autre part sur son émetteur une tension prélevée sur le bobinage de l'oscillateur local construit autour de T_2 dont la fréquence est réglée par C_2. C_1 et C_2 sont commandés mécaniquement de façon que la différence (ou la somme) entre les fréquences de l'oscillateur local et d'accord d'entrée reste égale à 455 kHz. Le battement à la fréquence intermédiaire est isolé par le premier transformateur FI et appliqué à l'amplificateur de fréquence intermédiaire (en français, on dit souvent ampli MF quand aucune confusion avec modulation de fréquence n'est possible). Le signal HF amplifié est détecté par la diode D et le signal BF recueilli, appliqué à l'entrée de l'amplificateur BF de sortie qui alimente le haut-parleur HP.

Le rapport entre les capacités maximale et minimale d'un condensateur variable mécanique ne pouvant excéder 10, il n'est pas possible de s'accorder sur une fréquence d'entrée variant de plus de $\sqrt{10} = 3{,}16$ fois. Au-delà, il faut changer les bobinages d'antenne et d'oscillateur local. Chaque bande de fréquence pouvant être couverte sans modification des bobinages est appelée *gamme de fréquence*. On distingue traditionnellement la gamme « grandes ondes » (GO) dont les fréquences s'étendent de 150 à 450 kHz environ, la gamme « petites ondes » (PO) de 1 à 3 MHz, et les gammes « ondes courtes » (OC) au-delà de 3 MHz.

▼ *Figure 105 ; les circuits de réception d'une onde modulée en amplitude :*
a) *récepteur « à galène » sans amplification ;*
b) *récepteur à un étage d'amplification HF directe ;*
c) *schéma d'un récepteur de radio (superhétérodyne).*

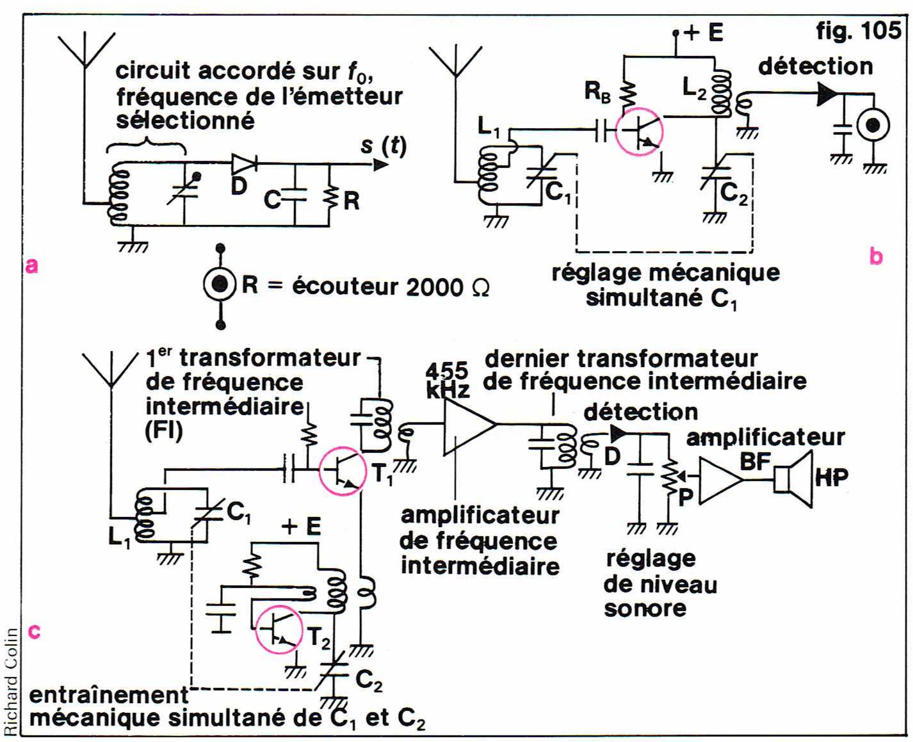

▶ *Figure 106 : oscillateur modulé en fréquence par un signal basse fréquence.*

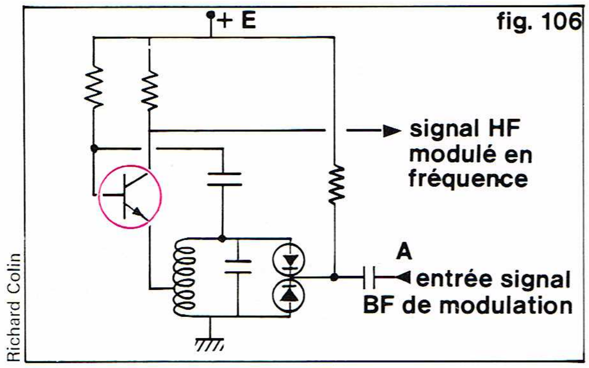

La modulation de fréquence

Les parasites industriels ou naturels (orages) se présentent sous forme de tops brefs superposés au signal reçu ; ils en modifient donc l'amplitude et, à ce titre, sont perçus par les récepteurs ordinaires sous forme de crachements. Ils n'ont par contre aucune influence sur la fréquence. Il est donc intéressant de faire appel au système de modulation de fréquence chaque fois que l'on désire obtenir une liaison très fidèle et exempte de parasites. Il est très facile d'agir sur la fréquence d'un oscillateur : il suffit d'utiliser comme capacité d'accord du circuit LC définissant la fréquence un élément se comportant comme un condensateur dont la valeur varie en fonction d'une tension appliquée. C'est par exemple le cas d'une jonction PN polarisée en sens inverse. Nous avons vu dans un paragraphe antérieur que, si V est la tension inverse appliquée, la capacité apparente de la jonction est $C = \frac{C_0}{\sqrt{V}}$. Le montage représenté sur la *figure* 106 délivre ainsi un signal dont la fréquence varie au rythme du signal basse fréquence appliqué à l'entrée A. Ce signal modifie en effet le point de polarisation des deux diodes à capacité variables qui sont incluses dans la capacité d'accord totale du circuit oscillant de l'*oscillateur*, qui est ici du type E. C. O. Si la réalisation d'un émetteur FM est très simple, il n'en est pas de même du récepteur qui est toujours beaucoup plus complexe qu'un récepteur AM. Au niveau du circuit d'antenne et jusqu'au changement de fréquence, rien ne distingue les deux systèmes, si ce n'est la fréquence intermédiaire beaucoup plus élevée en FM (10,7 MHz au lieu de 455 kHz). Après amplification moyenne fréquence, le signal traverse un *circuit écrêteur* qui en nivelle l'amplitude de façon à éliminer les parasites, puis il est traité par un ensemble spécial appelé *discriminateur* qui transforme la modulation de fréquence en une modulation d'amplitude que l'on détecte de façon classique. Le plus simple des discriminateurs est un simple circuit oscillant dont la fréquence d'accord est décalée par rapport à celle de l'émetteur.

▶ *Page ci-contre, en bas, figure 110 ; principe du récepteur superréaction :* a) *excitation d'un circuit oscillant ;* b) *démarrage d'un oscillateur en l'absence et en présence d'un signal* HF *de synchronisation ;* c) *récepteur superréaction typique.*

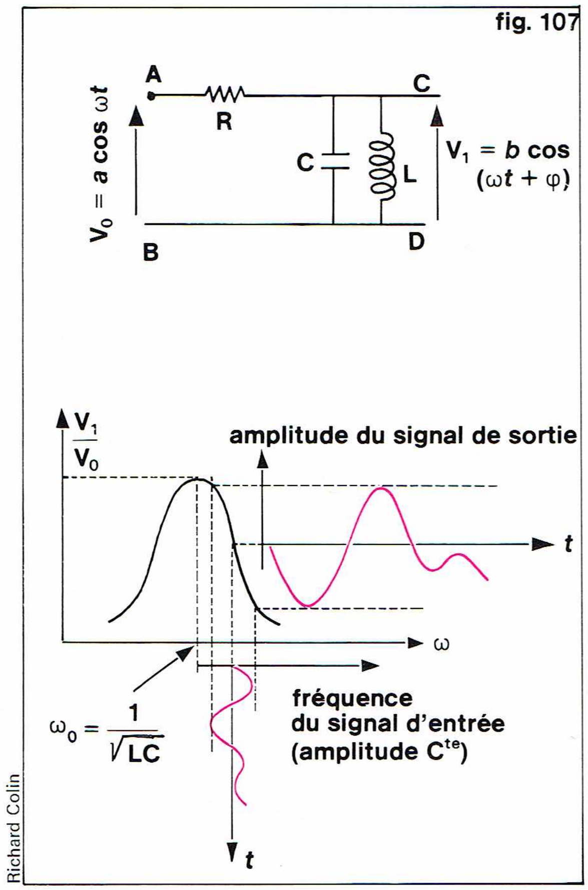

▶ *Figure 107 : transformation d'une modulation de fréquence en une modulation d'amplitude sur le flanc d'une courbe de résonance.*

La *figure* 107 montre comment la variation de fréquence d'une tension d'amplitude constante appliquée à l'entrée se trouve en sortie sous forme de variations d'amplitude. L'impédance du circuit LC variant avec la fréquence, le module du gain du quadripôle ABCD varie également, cette variation étant approximativement linéaire autour du point d'inflexion situé sur l'un ou l'autre des flancs de la courbe. C'est le phénomène qui explique que les émissions en FM sont captées également, mais dans de mauvaises conditions, par les récepteurs AM ordinaires. Pour obtenir une bonne qualité de réception, ce montage simplifié est très insuffisant, et de nombreux autres schémas plus complexes sont utilisés.

La télévision

Le signal qui décrit le contenu d'une image est transmis sur une porteuse hertzienne de la même façon qu'un signal radio ordinaire ; les seules différences portent sur les fréquences en jeu qui sont beaucoup plus élevées. Le principal problème posé par la télévision est l'obtention de ce signal, que l'on appelle *signal vidéo*. Un microphone délivre directement un signal électrique traduisant les fluctuations de pression de l'air qui constituent le son ; une seule grandeur fonction du temps suffit à décrire le phénomène dans son ensemble. Il n'en est plus de même en télévision ; chaque point de l'image est caractérisé par une brillance (et une couleur en TVC) fonction du temps, mais il y a une infinité de points. La quantité d'informations à transmettre est donc infinie ; heureusement, l'œil ne peut pas distinguer deux points trop rapprochés l'un de l'autre et peut donc se contenter d'une image grossière formée d'un nombre limité de points ; de plus, il est peu sensible aux variations rapides de brillance, une succession de 25 images fixes chaque seconde suffit à assurer une impression de mouvement continu (c'est le principe du cinéma). Ces deux circonstances favorables permettent de résoudre le problème : les différents points de l'image sont analysés successivement ligne par ligne de la même façon que l'on parcourt un texte imprimé, chaque image complète étant balayée en 1/25 de seconde. On obtient ainsi une fonction du temps qui représente les brillances de tous les points de l'image. Ce signal seul ne suffit pas, car le récepteur doit être capable d'attribuer à la tension perçue à chaque instant une brillance ayant une position déterminée sur l'écran. Cela est obtenu en informant le récepteur chaque fois que le balayage repart au début d'une ligne et au début (en haut à gauche) d'une nouvelle image. Ce signal supplémentaire est appelé signal de synchronisation. C'est l'ensemble de ces signaux qui constitue le signal vidéo.

L'image est formée dans le récepteur sur l'écran d'un *tube à rayon cathodique* un peu analogue à celui d'un oscilloscope, mais dont la déviation du faisceau est assurée par des champs magnétiques créés par des bobinages de déviation et non pas par des champs électriques. La brillance est commandée à chaque instant en appliquant à l'électrode de contrôle de l'intensité du faisceau (grille ou Wenhelt) le signal vidéo convenablement amplifié. Le déplacement du spot est assuré par deux dents de scie commandant les deux systèmes de bobinages. Pour assurer un synchronisme parfait entre ce déplacement et celui du spot d'analyse dans la caméra de prise de vues, les deux générateurs de dent de scie sont synchronisés par les impulsions de synchronisation extraites du signal vidéo. Le schéma de principe d'un

récepteur noir et blanc est reproduit sur la *figure* 108, le son est transmis en modulation d'amplitude par une porteuse spéciale qui est séparée et traitée à part. On remarquera la fréquence intermédiaire qui est généralement choisie aux environs de 40 MHz. Le signal vidéo est extrait par détection de la tension de sortie de l'amplificateur FI avant d'être appliqué à la grille de commande de brillance du cathoscope et aux systèmes de séparation des tops de synchro. La *figure* 109 montre l'allure du signal vidéo dans le cas d'une image simple ; la tension est maximale pour le blanc (brillance maximale) et est réduite à 30 % de cette valeur pour le noir. La zone comprise entre 0 et 30 % de l'excursion totale de tension est réservée aux tops de synchronisation.

Dans le cas de la télévision en couleurs, la situation est encore plus complexe, car il faut transmettre une information de teinte ; c'est le *signal de chrominance*. Un chapitre complet sera consacré à ces problèmes dans le volume II de *Technologie* et il est impossible de nous étendre plus ici.

La télécommande

Un système est télécommandé si son comportement peut être contrôlé par un opérateur situé à une distance plus ou moins grande. La liaison peut être assurée par un fil, mais le terme est de plus en plus souvent réservé aux cas où aucune liaison galvanique n'existe. On pense à une liaison radio, mais ce n'est pas la seule solution, on peut utiliser la lumière visible ou infrarouge, des ultrasons ou des champs électriques ou magnétiques de basse fréquence.

La télécommande par liaison radio-électrique

Il n'y a pas de différence essentielle avec la radiodiffusion que nous venons de décrire. Les signaux à transmettre ne sont plus des sons mais des informations destinées à être exploitées par le système de pilotage de l'organe commandé. Dans le cas de la télécommande de modèles réduits (modélisme), les fréquences des porteuses hertziennes sont imposées pour éviter les interférences avec d'autres usagers : 27 MHz, 72 MHz ou 144 MHz ; elles doivent être exclusivement utilisées.

Les émetteurs ne méritent aucun commentaire particulier. Les récepteurs de haute sensibilité utilisent le montage superhétérodyne ou parfois un circuit particulier qui est le *détecteur superréaction*. Si l'on injecte brutalement à un circuit bouchon RLC un courant i_0, on a vu qu'une oscillation sinusoïdale amortie apparaît à ses bornes : $v(t) = \frac{i_0}{C}\frac{\sin \omega t}{\omega} e^{-t/2RC}$.

Lorsque la résistance parallèle R est négative, ce qui est le cas pour les oscillateurs, l'exponentielle devient divergente, et cette équation décrit le démarrage de l'oscillation sous l'influence d'une excitation i_0. En l'absence de toute excitation ($i_0 = 0$), un oscillateur ne doit pas démarrer, mais le bruit créé par l'agitation des électrons dans les résistances (bruit thermodynamique), si faible soit-il, suffit à assurer ce démarrage, qui est, on le conçoit, d'autant plus rapide que le signal initial est plus grand. Imaginons alors que l'alimentation d'un oscillateur à résistance négative soit découpée comme le montre la *figure* 110. A chaque rétablissement de l'alimentation, la résistance négative apparaît, et l'oscillation démarre avec une vitesse qui dépend du signal d'excitation à cet instant. Si la durée pendant laquelle l'oscillateur fonctionne est faible, la limite de saturation n'est jamais atteinte, et les amplitudes maximales des bouffées successives de HF ne dépendent que de cette excitation. Dans le cas où le bruit seul assure le démarrage des oscillations, ces amplitudes varient aléatoirement d'une période à l'autre. Si l'on redresse le signal HF, on obtiendra un signal BF de caractère aléatoire qui, dans un haut-parleur, donnera ce que l'on appelle du souffle. Si, par contre, un signal HF dont la fréquence est voisine de la résonance pour le circuit LC est introduit, il aura un rôle prépondérant par rapport au bruit, et le démarrage de l'oscillation se fera en synchronisme avec lui, c'est-à-dire que, d'une période à l'autre, les conditions se retrouveront identiques à elles-mêmes. Toutes les « bouffées de HF » ont alors la même amplitude. Par détection, on obtient un signal constant, le souffle disparaît. C'est cette disparition du souffle en présence d'une porteuse HF qui est utilisée dans les récepteurs superréaction.

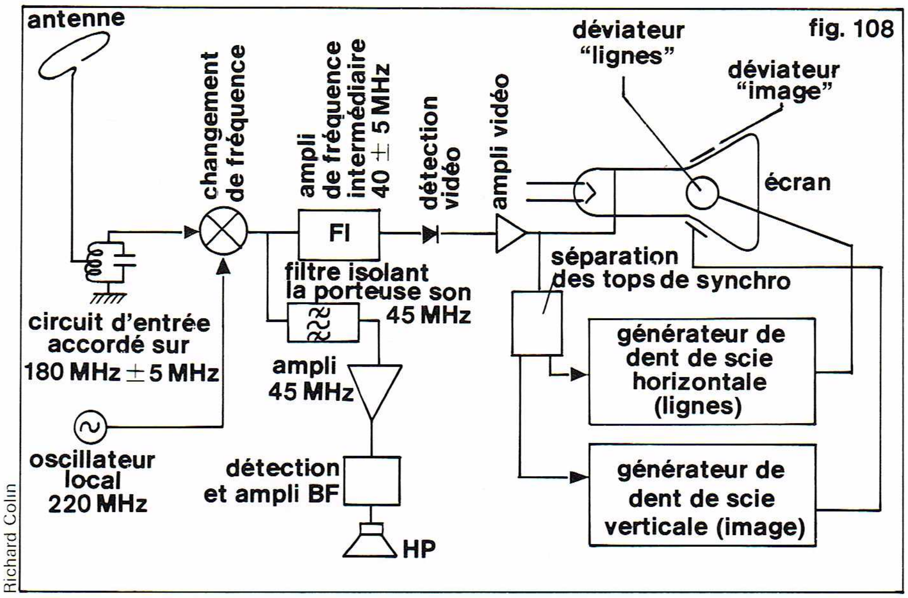

Richard Colin

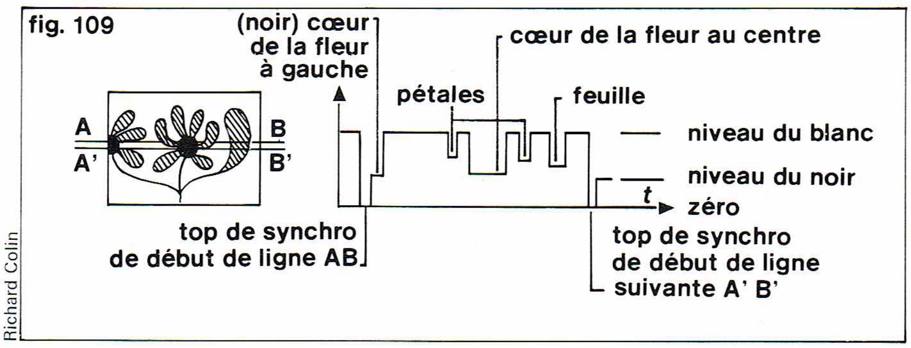

Richard Colin

Le découpage de la tension d'alimentation peut être assuré par un multivibrateur annexe, mais, le plus souvent, on utilise un condensateur placé dans le circuit de base du transistor oscillateur qui, en se chargeant, bloque l'oscillation. Le schéma d'un tel récepteur est représenté sur la *figure* 110c. Le transistor T est monté en oscillateur HF, la réaction positive étant assurée par la capacité γ placée entre collecteur et émetteur. L_2 est une bobine d'arrêt ayant une forte impédance à la fréquence de travail. Lorsque l'oscillation démarre, une tension négative apparaît par redressement (par la jonction BE) sur la base de T qui se bloque. C se décharge ensuite par R_0

▲ ***En haut, figure 108 : schéma synoptique d'un téléviseur noir et blanc (cas de la 1re chaîne, canal 8A, Paris). Ci-dessus, figure 109 : aspect du signal vidéo correspondant à la ligne* AB.**

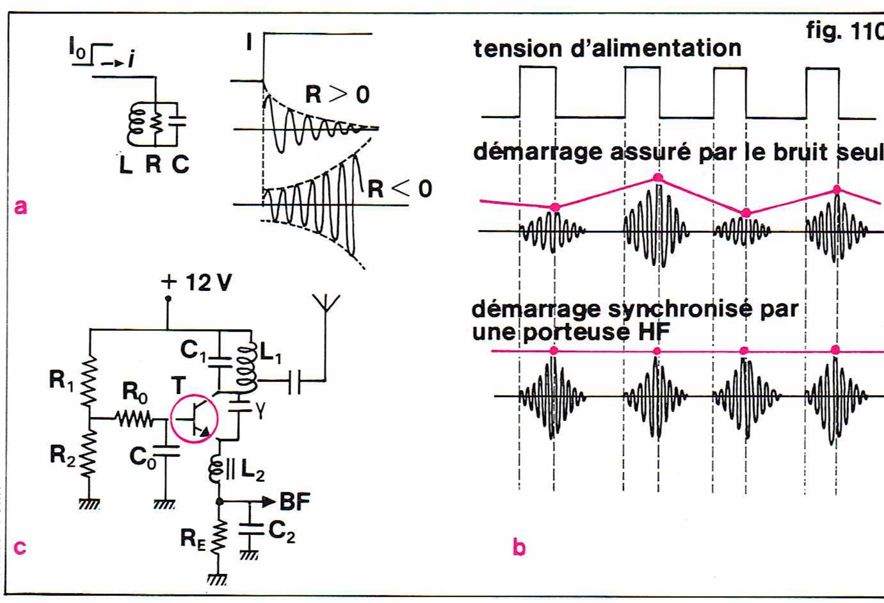

Richard Colin

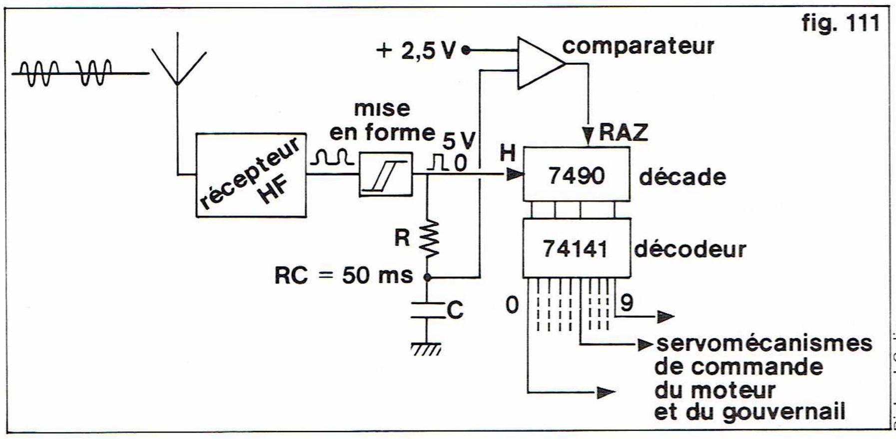

Richard Colin

▲ *Figure 111 : récepteur pas à pas électronique.*

jusqu'au moment où l'oscillation reprend, et ainsi de suite. La fréquence de découpage est réglée par la constante de temps R_0C_0. Le courant qui circule dans le transistor étant sensiblement proportionnel à l'amplitude d'oscillation, la tension BF est simplement obtenue aux bornes de R_E, les résidus de HF étant éliminés par C_2. Ce montage est très sensible, mais son réglage est parfois délicat, et surtout, il est peu sélectif, le coefficient de qualité des bobinages étant toujours assez faible. Pour ces raisons, il est de plus en plus abandonné au profit du superhétérodyne.

L'émetteur de télécommande ne peut transmettre de l'information au récepteur que s'il est modulé. La plus simple des modulations est le tout ou rien : il y a émission, ou non. On peut également utiliser une modulation d'amplitude de forme quelconque, sinusoïdale par exemple, ou une modulation de fréquence. Dans les montages d'amateur, la modulation d'amplitude est presque exclusivement retenue ; il n'en est pas de même pour les systèmes professionnels où la modulation de fréquence, bien que plus complexe, est plus sûre.

La liaison tout ou rien la plus simple utilise un commutateur tournant ; la HF est envoyée par trains dont la durée est de quelques centaines de millisecondes et, à chaque fois, le commutateur avance d'un cran. Ce système a été beaucoup utilisé dans la télécommande de maquettes de navires. Avec un commutateur à cinq positions, les ordres successifs peuvent être les suivants : marche avant — droite — gauche — marche arrière — stop. Si la maquette se déplace vers l'avant, l'envoi d'une impulsion la fait virer à droite, deux impulsions l'auraient envoyée à gauche, trois l'auraient mise en marche arrière, quatre la stoppent. Le nombre de tops à transmettre dépend de la manœuvre que l'on désire commander ainsi que de la position initiale du commutateur. Au cours de la commande, le sélecteur franchit les positions intermédiaires trop rapidement pour que les ordres correspondants puissent être exécutés. Il est très facile de remplacer le commutateur tournant par un système entièrement électronique, c'est ce qui est proposé par exemple sur la *figure* 111. Le circuit principal est une décade intégrée 7490 dont les dix états sont décodés par un décodeur 74141 fournissant 10 tensions (habituellement utilisées pour allumer les cathodes d'un tube Nixie) qui sont ici employées pour piloter les relais qui effectuent les manœuvres suivantes : 0 repos, 1 marche avant lente, 2 marche avant gauche lente, 3 marche avant droite lente, 4 marche arrière lente, 5 marche arrière gauche lente, 6 marche arrière droite lente, 7 marche avant rapide, 8 marche avant gauche rapide, 9 marche avant droite rapide. Le signal d'antenne est d'abord amplifié, détecté et mis en forme ; les impulsions normales ont une durée de 10 ms, une impulsion large fait monter la tension aux bornes de capacité d'intégration C au-delà de 2,5 volts et le comparateur bascule, ce qui ramène le compteur en position zéro.

Il est donc possible à tout moment d'arrêter la maquette par une émission prolongée de l'émetteur. Pour éviter d'avoir à comptabiliser les tops, l'émetteur fonctionne lui-même de façon cyclique (*fig.* 112).

La commande s'effectue grâce à un contacteur à quatre positions : avant, arrière, gauche, droite, associé à un sélecteur de vitesse : lent — rapide — stop. Ces deux organes fournissent, grâce à un système de portes logiques, quatre tensions A'B'C'D' correspondant aux états des quatre bascules constituant la décade 7490. Ainsi, pour la marche avant rapide, les tensions A'B'C'D' matérialisent le nombre binaire 0111 = 7 qui est le numéro associé à cette manœuvre. Ce nombre [A'B'C'D'] est comparé aux sorties ABCD de la décade par un comparateur logique qui ne délivre un 1 que s'il y a identité. Au repos, l'interrupteur A/M est en position A, la bascule RS se trouve dans l'état Q = 0, la porte 1 est bloquée, et les impulsions de 10 ms/50 Hz générées par le multivibrateur ne parviennent ni à la porte 2 ni au modulateur. L'émetteur émet en continu, ce qui maintient au zéro la décade 7490 du récepteur. Lorsque l'on bascule A/M en M (marche), si les commandes sont en position 0, le comparateur reçoit sur ses deux entrées deux zéros et délivre donc un 1 qui, après inversion, bloque la porte 2 ; rien ne se passe. Affichons alors une commande quelconque, par exemple arrière lente (chiffre code 4), le comparateur est déséquilibré, 2 s'ouvre, et des tops parviennent au modulateur et au compteur 7490, 4 tops passent avant que le comparateur, retrouvant son équilibre, 2 se bloque de nouveau ; le récepteur a, lui aussi, reçu 4 impulsions et se trouve bien dans l'état convenable pour commander l'exécution de l'ordre. Si, à partir de cet état, on commande : avant lente (chiffre 1), le comparateur, de nouveau déséquilibré, laissera passer le nombre d'impulsions nécessaires pour que la décade, après avoir parcouru le cycle complet 5, 6, 7, etc., s'arrête en 1. Les deux décades de l'émetteur et du récepteur sont ainsi continuellement dans le même état et automatiquement resynchronisées à chaque arrêt. On peut reprocher à ce montage de n'être pas sûr, car, en cas de panne de l'émetteur, on ne peut plus arrêter la maquette ; on peut y remédier facilement en modifiant le codage de transmission, de façon par exemple que l'arrêt intervienne automatiquement si le récepteur ne perçoit aucun signal pendant une durée plus ou moins longue, mais le schéma est plus complexe, et nous ne le décrirons pas ici.

Une émission par tout ou rien n'est pas forcément incompatible avec une transmission analogique continue d'un ordre. Si l'émetteur fonctionne pendant une durée τ,

▼ *Figure 112 : émetteur pas à pas automatique.*

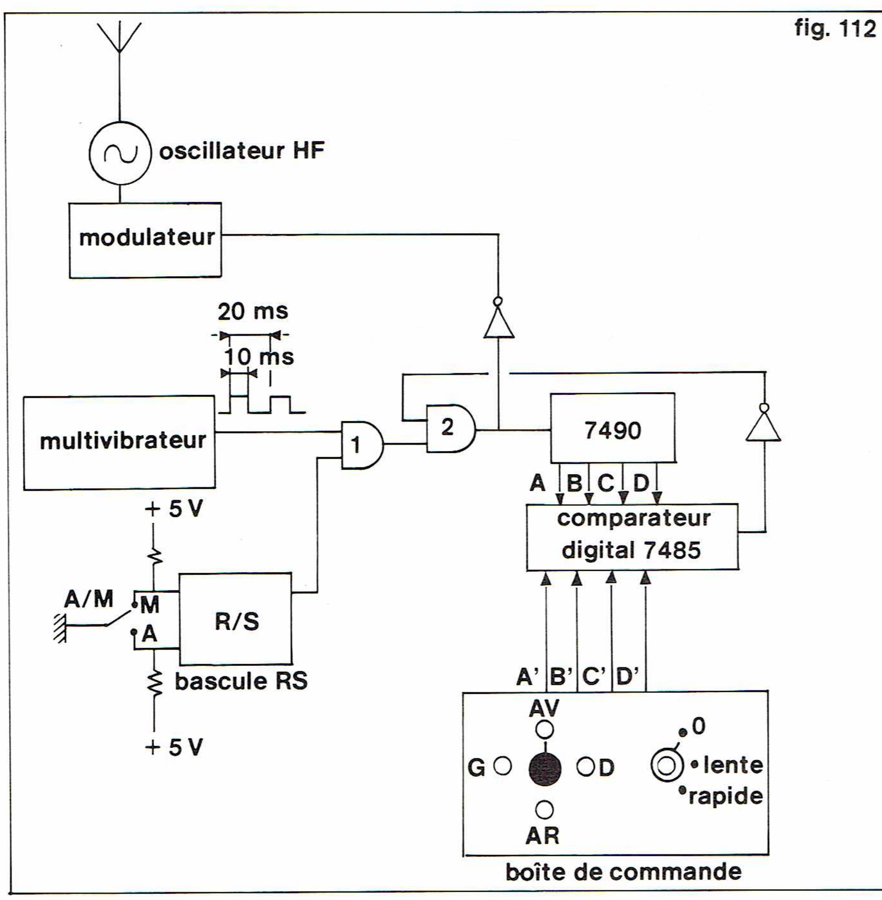

Richard Colin

avec une fréquence de répétition de *f*, on peut concevoir dans le récepteur des circuits délivrant des tensions proportionnelles à τ et à *f* qui sont deux grandeurs indépendantes. Mais la solution de choix permettant d'acheminer plusieurs commandes simultanées et continues avec un émetteur modulé en tout ou rien est le codage en impulsions qu'il serait malheureusement trop long de décrire ici.

La télécommande non radio-électrique

La transmission peut être effectuée par un *faisceau d'ultrasons*. L'émetteur est constitué par un transducteur piézo-électrique excité par une tension dont la fréquence est de l'ordre de 40 kHz. Le même transducteur est employé comme récepteur. Ce système est très utilisé pour réaliser des télécommandes de téléviseurs (niveau sonore, changement de programme à distance).

La *lumière visible* ou *infrarouge* permet également des liaisons à distance; la difficulté réside surtout dans la directivité du faisceau; l'émetteur doit émettre à chaque instant en direction du récepteur, qui doit être toujours visible. L'émetteur est constitué par une ampoule à incandescence ou une diode électroluminescente aux courtes distances, le récepteur est une photodiode, phototransistor, photorésistance ou même PM. Des codages complexes peuvent être imaginés en utilisant par exemple des faisceaux colorés.

La *transmission par boucle magnétique* est très intéressante quand le récepteur se déplace dans une zone parfaitement délimitée. La sortie d'un amplificateur BF de puissance est reliée à une boucle constituée par un conducteur entourant entièrement la zone à contrôler. Cette boucle parcourue par le courant de l'amplificateur crée à son intérieur un champ magnétique variable qui peut être capté par un bobinage constituant le circuit d'entrée du récepteur. Avec le montage représenté sur la *figure* 113, un amplificateur de 2 à 3 watts suffit pour couvrir une surface de plusieurs centaines de mètres carrés. Les fréquences audio sont très bien transmises, et ce système est couramment utilisé pour réaliser un écouteur sans fil permettant l'écoute de la radio ou de la télévision sans déranger d'autres personnes qui ont besoin de silence. Au musée du Louvre à Paris, des boucles magnétiques de faibles dimensions noyées dans le sol, au pied des statues et des tableaux, permettent ainsi aux visiteurs d'écouter les commentaires correspondants. De telles boucles peuvent, bien entendu, transmettre des ordres de télécommande à un mobile se déplaçant à l'intérieur.

La boucle magnétique peut être remplacée par un bâton de ferrite analogue à celui qui est utilisé dans le récepteur. Le couplage entre les deux barreaux peut être assuré jusqu'à quelques dizaines de mètres, réalisant ainsi une liaison BF sans fil, non hertzienne, donc non réglementée, ce qui est parfois intéressant.

Lorsque le récepteur se déplace à la surface d'un lac, on peut utiliser la *conductibilité de l'eau* pour transmettre une information. Un courant alternatif de fréquence musicale est envoyé dans l'eau par deux électrodes situées à quelques mètres l'une de l'autre; la réception se fait par deux tiges distantes de 50 cm à 1 m qui plongent dans l'eau. Ce type de télécommande a été décrit sous le nom de TPO Commande par Ch. Pépin dans la *Pratique de la télécommande de modèles réduits*; il permet des liaisons sur une cinquantaine de mètres en eau douce.

Les applications « domestiques » de l'électronique

L'électronique s'introduit de plus en plus dans les appareils « domestiques » que nous utilisons tous les jours. Sans parler ici de la calculatrice de poche qui devient un objet familier, nous pouvons citer les montres et pendules électroniques, les minuteries (qui, hier électromécaniques, s'équipent actuellement de transistors et de circuits intégrés), l'allumage et l'injection électronique des automobiles, les clignotants, les diaphragmes automatiques dans les appareils photographiques, les flashes électroniques à calculateur, les interphones, les systèmes d'alarme antivol et bien d'autres.

L'*horlogerie* est un domaine où l'électronique s'introduit actuellement rapidement en apportant un gain considérable de précision. La montre classique est un oscillateur mécanique dont le circuit résonnant est constitué par le balancier spiral. Des générations d'horlogers ont donné à ce système des performances et une fiabilité remarquables; une bonne montre est précise à quelques secondes près par jour, ce qui représente pour l'oscillateur une stabilité de fréquence de 10^{-4} environ. Or un oscillateur à quartz peut faire sans difficulté 100 fois mieux; un quartz de haute qualité maintenu à température constante peut fournir une fréquence ne variant pas de plus de quelque 10^{-8} par an. Il était tentant de remplacer le spiral habituel par un oscillateur à quartz; malheureusement, en se limitant aux dimensions de cristaux susceptibles d'être introduits dans une montre, la fréquence obtenue est beaucoup plus élevée que le tic tac traditionnel. Il faut utiliser un diviseur contenant de nombreux transistors qu'il faut alimenter avec la seule source d'énergie dont on peut disposer, une pile au mercure de la taille d'un petit pois et qui doit durer un an. Ce sont les circuits à transistors complémentaires à effet de champ à grille isolée C. M. O. S. qui ont permis de résoudre ce problème. La fréquence de l'oscillateur à quartz est réglée le plus souvent à 2^{15} (32 768 Hz) ou 2^{16} (65 536 Hz); pour descendre à une fréquence de 1 Hz, il faut 15 ou 16 étages de division binaire dont la consommation totale est de l'ordre du microampère. Le problème le plus difficile a été celui de l'affichage; un micromoteur électrique entraînant des aiguilles classiques n'est pas une très bonne solution, et les diodes électroluminescentes utilisées dans les fréquencemètres et les calculatrices ne peuvent être utilisées, car elles consomment un courant au moins 1 000 fois trop grand. Certains constructeurs les ont cependant employées; la lecture de l'heure s'effectue en pressant un bouton.

La solution définitive est apportée par les afficheurs à cristaux liquides, dont il nous faut dire un mot ici. Les « cristaux liquides » sont des substances organiques ayant des molécules de forme spéciale, susceptibles de s'orienter sous l'influence d'un champ électrique. En absence de champ, le liquide est diffusant; il devient transparent en présence du champ. Si une mince couche de cette substance est étalée sur une plaque de métal poli et recouverte d'une électrode transparente, l'ensemble a un aspect grisâtre. Si une tension est appliquée aux deux électrodes ainsi constituées, le liquide devient transparent, et le poli du métal apparaît. Si l'électrode transparente est découpée en plusieurs sections isolées les unes des autres et constituant des motifs géométriques, par exemple les sept segments à partir desquels on peut reconstituer tous les chiffres, il devient possible, en excitant certaines de ces zones, de faire apparaître un caractère quelconque. Il apparaît en brillant sur fond mat, n'a aucune luminosité en lui-même et est donc d'autant plus visible que l'éclairement ambiant est élevé. C'est un inconvénient; la montre à affichage par cristaux liquides ne peut pas être lue de nuit, mais aucune consommation électrique appréciable n'est nécessaire; le courant traversant le liquide se chiffre en fractions de nanoampère. Ce type d'afficheur 7 segments à cristaux liquides se répand rapidement. Les mises au point actuelles portent sur la durée de vie actuellement limitée à quelques milliers d'heures; c'est un problème de pureté et d'étanchéité, qui sera sans aucun doute vite résolu.

Une bonne montre à quartz construite sur ce principe devrait dériver seulement de quelques secondes par mois. Une telle précision est-elle utile? ce n'est pas évident!

L'électronique a révolutionné le marché des *systèmes*

▼ ***Figure 113 : liaison par boucle magnétique.***

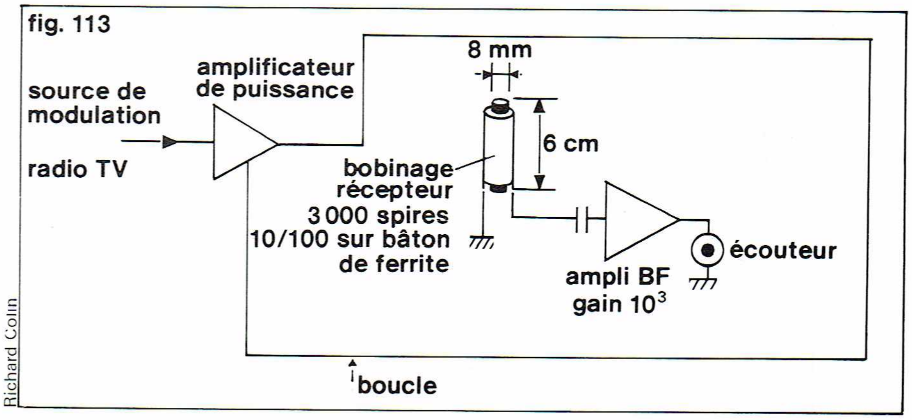

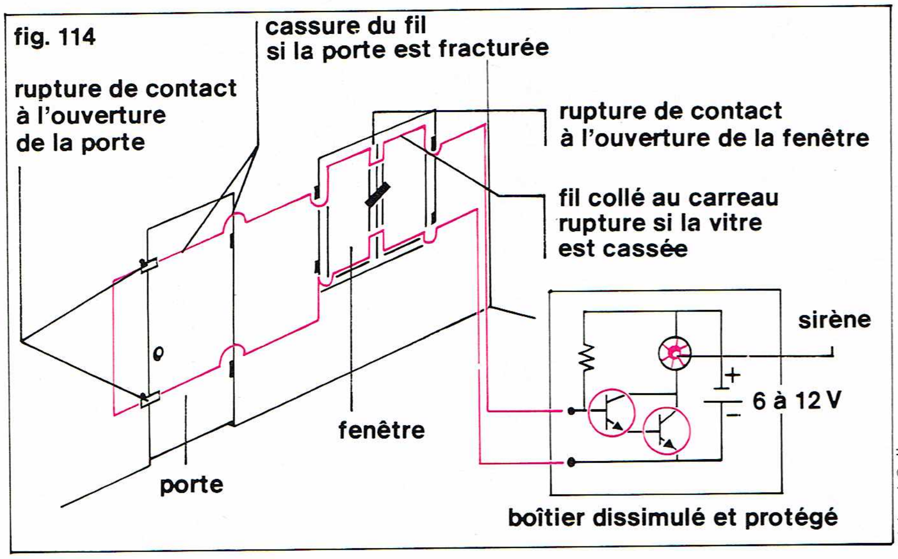

Richard Colin

▲ *Figure 114 : système d'alarme à rupture de contact.*

anti-effraction. Le système le plus simple et qui n'est pas le plus mauvais est le montage à rupture de contact. La *figure* 114 représente un des schémas possibles. Une sirène alimentée par une batterie d'accumulateur ou des piles est placée dans le collecteur d'un transistor, qui est bloqué grâce à un fil maintenant sa base à la masse. Ce fil très fin (de préférence émaillé pour interdire toute épissure) est tendu dans le local à protéger et autour de toutes les ouvertures; sa rupture, par ouverture d'une porte, ou tout simplement parce que le voleur ne l'a pas aperçu et l'a accroché, débloque le transistor et actionne la sirène. Compte tenu de la finesse du fil et de l'émail qui le recouvre, il est très difficile de réparer la cassure, et la sirène hurle jusqu'à épuisement de la source d'énergie. Le point faible de l'installation est le système permettant au propriétaire de pénétrer dans le local sans déclencher l'alerte. De nombreux systèmes sont possibles : retard au déclenchement laissant le temps d'actionner un interrupteur de neutralisation soigneusement dissimulé, contact assuré par le pêne du verrou de sûreté (dont le voleur n'a pas en principe la clef).

Les ultrasons permettent aussi de réaliser des systèmes très efficaces. Un émetteur ultrasonore émet un faisceau qui, après de multiples réflexions sur les murs, est capté par un récepteur. Si un objet se déplace dans la pièce à une vitesse V, il réfléchit une partie du faisceau qui parvient au récepteur avec une fréquence légèrement décalée (effet Doppler). La variation relative est $\frac{V}{c}$, où c est la vitesse du son (330 m/s). Au niveau du récepteur, cette onde réfléchie est mélangée à l'onde directe et donne naissance à un battement BF détectable. Pour une fréquence d'émission de 36 kHz, une vitesse de déplacement de 1 centimètre par seconde seulement crée un décalage Doppler de 1 hertz, d'où une fréquence de battement de 1 hertz qui, détectée, peut déclencher l'alerte. Dans certains systèmes, le faisceau ultrasonore est remplacé par un faisceau hyperfréquence (10^{10} hertz) qui a l'avantage de traverser des murs, ce qui permet de surveiller plusieurs pièces avec un seul émetteur.

De nombreuses autres applications dont certaines ont pourtant une importance considérable n'ont pas été décrites ici; c'est le cas en particulier du *radar* qui guide nos avions et engins spatiaux. L'électro-acoustique utilise également des systèmes très ingénieux pour reproduire les sons en stéréophonie ou quadriphonie; le *magnétophone* est un système très répandu de nos jours qui aurait nécessité une description détaillée.

L'électronique s'est également introduite en médecine, où elle joue un rôle important dans le diagnostic ou la surveillance des malades. Mais c'est sous forme d'*informatique* et surtout de *micro-informatique* qu'elle risque de changer le plus notre vie de tous les jours. La possibilité d'intégrer sur une seule pièce de silicium des milliers de transistors a permis de réaliser pour un coût très faible des systèmes très complexes (microprocesseurs), qui sont de véritables ordinateurs miniatures. On les rencontre déjà dans les appareils de mesure évolués (nous avons cité le cas de l'affichage des caractères sur l'écran d'un oscilloscope), mais ils vont s'introduire de plus en plus dans les systèmes les plus répandus, par exemple le programmateur des machines à laver sera bientôt construit avec un microprocesseur permettant une souplesse de fonctionnement inconnue actuellement; il en est de même dans l'automobile (injection électronique, système antiblocage de roue, systèmes anticollision évaluant grâce à un petit radar la vitesse du véhicule et les distances et commandant automatiquement le freinage, etc.).

Lee de Forest, quand il inventa la triode en 1907, ne pouvait certes pas imaginer un développement aussi prodigieux !

▼ *Une application ingénieuse, et aujourd'hui courante, de l'électro-acoustique pour reprendre les sons en stéréophonie ou quadriphonie : le magnétophone.*

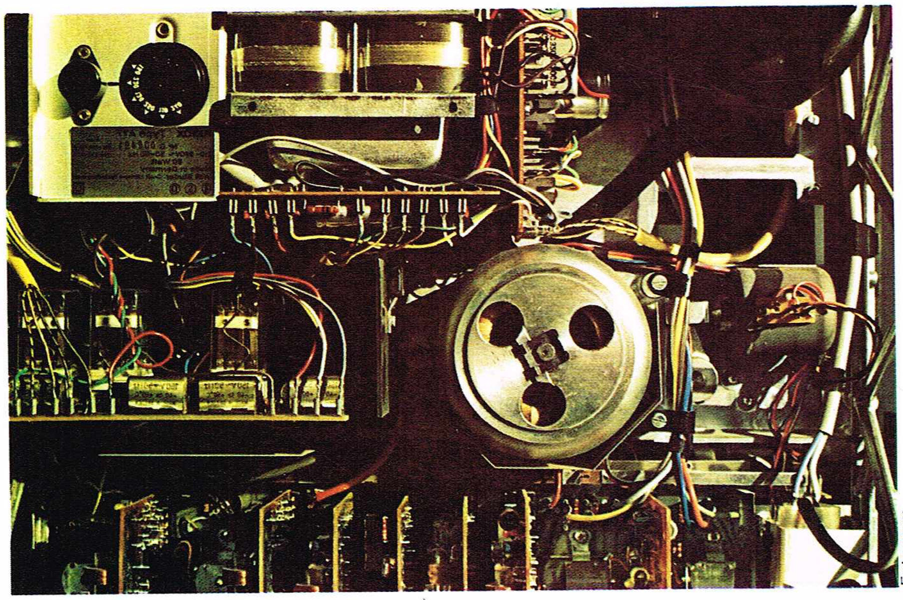

Fotogram

BIBLIOGRAPHIE

Les signaux

ARNAL T., *Signaux et Circuits*, collection Dunod Université, Dunod, Paris, 1970. - ROUBINE E., *Introduction à la théorie de la communication*, t. I, Masson, Paris, 1970.

Les éléments de circuit et composants

AUVRAY J., *Circuits et composants électroniques*, Hermann, Paris, 1975. - BESSON R., *Technologie des composants électroniques*, t. I, Éditions Radio, Paris, 1969. - CASSIGNOL E. J., *Physique électronique des semi-conducteurs*, Bibliographie technique Philips, Dunod Paris, 1965. - FOURNET G., *Électronique*, collection Dunod Université, Dunod, Paris, 1970.

Les circuits

AUVRAY J. (cité ci-dessus), Hermann, Paris, 1975. - GUILLIEN R., *Électronique*, P. U. F., Paris, 1961. - OEHMICHEN J. P., *Emploi rationnel des circuits intégrés*, Éditions Radio, Paris, 1971; *Emploi rationnel des transistors*, Éditions Radio, Paris, 1966.

Les appareils de mesure

DARTEVELLE C. H., *l'Oscilloscope dans le laboratoire et l'industrie*, ER. - HASS A., *le Laboratoire d'électronique*, Éditions Radio, Paris, ER; *Mesures électroniques*, Éditions Radio, Paris, ER. - MAX, *Traitement du signal*, Masson, Paris, 1973. - SCHREIBER H., *le Transistor au laboratoire et dans l'industrie*, ER; *Appareils électroniques à transistors*, ER.

L'opto-électronique

DAMAYE R., *Opto-électronique*, Éditions Radio, Paris, 1971.

Les applications de l'électronique

AISBERG E., *La radio, mais c'est très simple*, ER; *La télévision, mais c'est très simple*, ER; *La télévision en couleurs, c'est presque simple*, ER. - *Encyclopédie des sciences industrielles*, Quillet, t. II. - LIMANN O., *Étude et conception des radiorécepteurs à tubes et transistors*, ER, 1964. - PÉPIN Ch., *Pratique de la télécommande des modèles réduits*, ER, Paris, 1961. - TRÉMOLIÈRES J., *Électronique et Médecine*, ER, 1967.

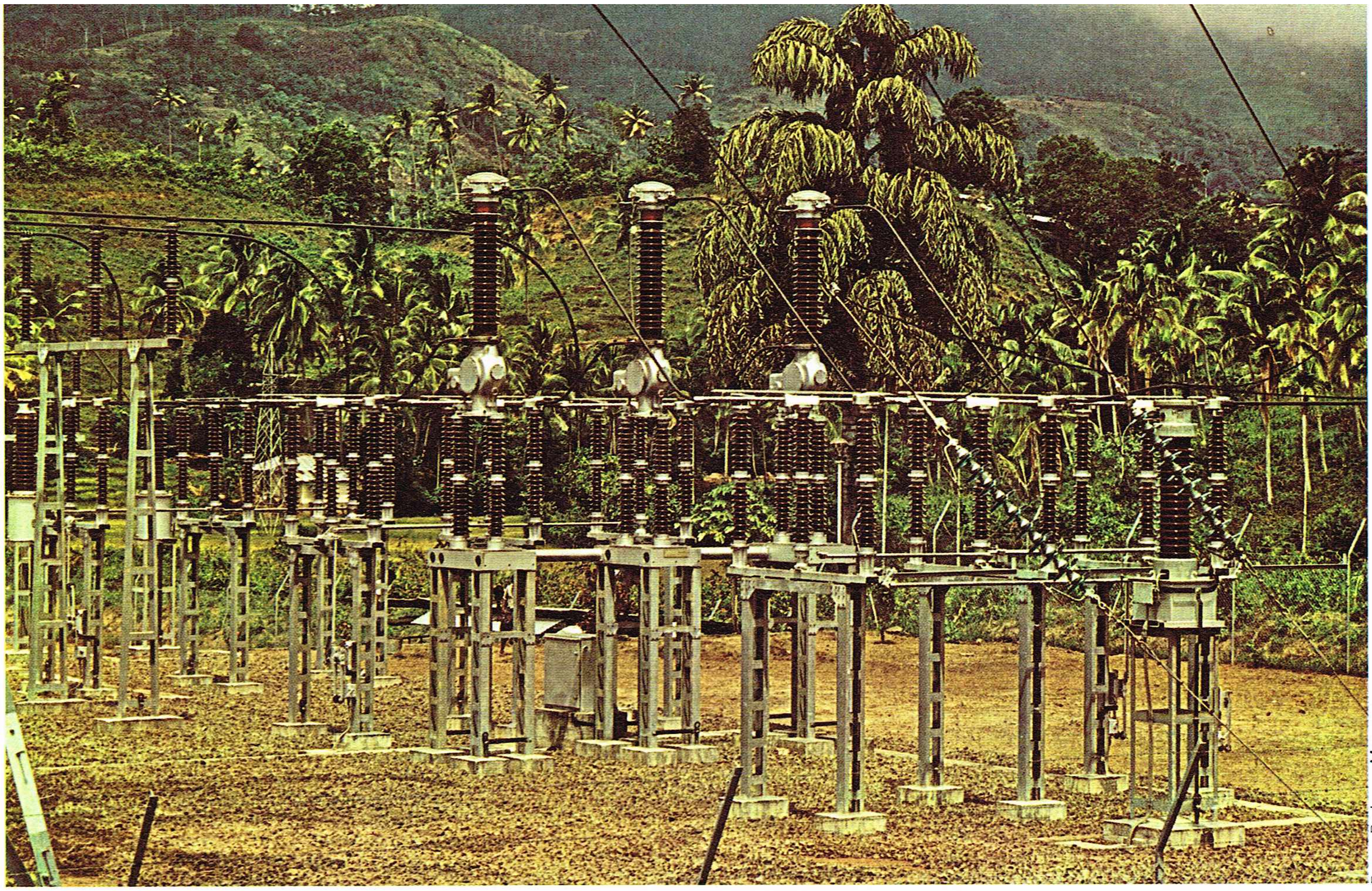

Bruno Barbey - Magnum

▲ *On appelle électrotechnique les applications des lois de la physique en vue de la production, du transport, de la transformation et de l'utilisation de l'énergie électrique ; ici, un poste de distribution installé à Ceylan.*

ÉLECTROTECHNIQUE

Initialement, l'électrotechnique, conformément à son étymologie, consistait en l'application des lois de l'électricité, par opposition à l'électronique, centrée sur les dispositifs à émissions d'électrons. On constate donc une étroite liaison entre ces deux disciplines, en particulier dans le domaine de l'électronique de puissance (ou électronique industrielle).

Il est préférable d'appeler maintenant électrotechnique les applications des lois de la physique en vue de la production, du transport, de la transformation et de l'utilisation de l'énergie électrique. L'électronique, quant à elle, s'intéresse aux mêmes fonctions mais au bénéfice d'un signal.

Sont du domaine de l'électrotechnique, essentiellement, les machines électriques et l'électronique de puissance.

Les machines électriques

Ce terme général recouvre l'ensemble des convertisseurs qui transforment soit l'énergie électrique en énergie électrique de caractéristiques différentes, soit l'énergie électrique en énergie mécanique, soit enfin l'énergie mécanique en énergie électrique.

A ces fonctions correspondent respectivement les machines électriques appelées transformateur et commutatrice d'abord, puis moteur électrique, et enfin, génératrice, dynamo ou alternateur.

Se trouvent en dehors de la description ultérieure tous les convertisseurs directs d'énergie qui transforment en énergie électrique soit l'énergie lumineuse (convertisseurs photovoltaïques), soit l'énergie chimique (piles à combustible et batteries d'accumulateurs), soit l'énergie thermique (convertisseurs thermo-électriques, thermo-ioniques, magnétohydrodynamiques). Certains de ces convertisseurs pourront devenir d'un usage commun dans le futur. Mais actuellement, sauf les accumulateurs, ils demeurent au stade du laboratoire.

Principe général de fonctionnement

Les machines électriques comprennent, toutes, des circuits magnétiques constitués par des tôles ferromagnétiques empilées et qui sont destinées à canaliser les lignes de force du champ d'induction magnétique créé par les circuits électriques ou, dans certaines machines de faible puissance, par un aimant permanent.

D'après la loi de Faraday, une force électromotrice (f. é. m.) $\mathcal{E}$ est induite dans un circuit électrique par la variation avec le temps du flux ψ d'un champ magnétique :

$$\mathcal{E} = \frac{-d\psi}{dt}$$

Ainsi un convertisseur statique, dans lequel tous les circuits sont fixes, ne peut fonctionner que si certains courants sont alternatifs : c'est le cas des *transformateurs.* Par contre, dans un convertisseur mobile — on dit alors électromécanique — dans lequel certains circuits se déplacent les uns par rapport aux autres, le fonctionnement est possible en courant continu et en courant alternatif. Le mouvement le plus commun étant en rotation autour d'un arbre, on parle de *machines électriques tournantes.* Mais il existe des machines linéaires, dont le déplacement s'effectue le long d'un rail.

D'après la loi de Laplace, une force mécanique $\vec{f}$ s'exerce sur un conducteur parcouru par un courant i placé dans un champ d'induction magnétique $\vec{B}$, de telle sorte que, pour une longueur l, on a :

$$\vec{f} = i\vec{l} \wedge \vec{B}$$

Si, sous l'action de $\vec{f}$, le conducteur se déplace d'une longueur $\vec{d\lambda}$, le travail accompli est :

$$d\mathcal{T} = \vec{f}\vec{d\lambda} = i\vec{B}\ (\vec{d\lambda} \wedge \vec{l})$$

$\vec{d\lambda} \wedge \vec{l}$ représente en module la surface ds balayée par le circuit au cours de son déplacement. Ainsi le travail accompli est égal au produit du courant i par la variation de flux $d\psi$ $(= \vec{B} \cdot \vec{ds})$ vue par l'élément de circuit. La puissance mécanique tirée de ce moteur élémentaire est

$$P_m = i\,\frac{d\psi}{dt}$$

On remarque que l'on retrouve au signe près la f. é. m. $\mathcal{E}$, qui serait induite dans le circuit selon la loi de Faraday.

$$\mathcal{E}' = \frac{d\psi}{dt}$$

est appelée force contre-électromotrice (f. c. é. m.), et on a $P_m = \mathcal{E}'i = -\mathcal{E}i$.

Si inversement on déplace dans les mêmes conditions le fil conducteur bouclé sur une charge convenable, la f. é. m. $\mathcal{E}$ est à l'origine d'un courant i et la puissance de sortie délivrée par cette génératrice est $P_G = \mathcal{E}i$.

fig. 1

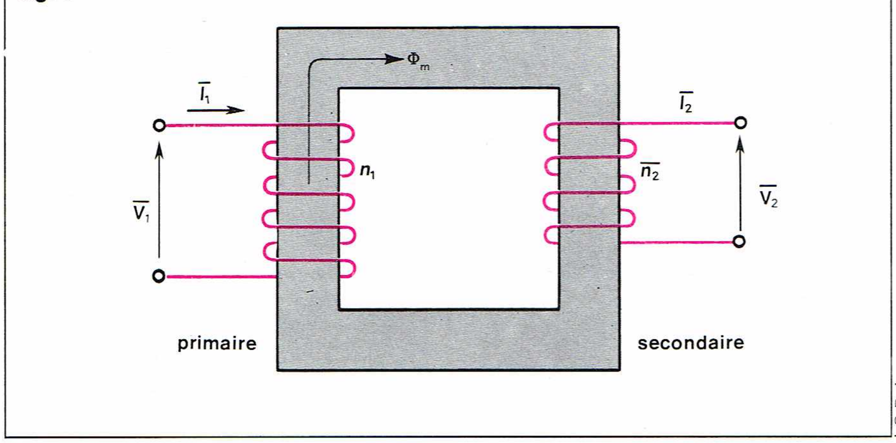

I.G.D.A.

▲ *Figure 1 : schéma de principe d'un transformateur monophasé.*

Ainsi, en première approximation, c'est-à-dire en négligeant les résistances, moteurs et génératrices électriques sont des convertisseurs réversibles et interchangeables. Si maintenant on tient compte de la résistance électrique, la différence de potentiel v aux bornes du circuit élémentaire d'une génératrice est nécessairement inférieure à la f. é. m. $\mathcal{E}$ qui est à l'origine du courant i en raison de la chute ohmique du potentiel, et on a :

(1) $$v = \mathcal{E} - Ri$$

Pour un moteur, au contraire, la tension v appliquée à ses bornes est égale à la somme de la f. c. é. m. $\mathcal{E}'$ et de la chute ohmique :

(2) $$v = \mathcal{E}' + Ri$$

Les transformateurs de puissance

Un transformateur de puissance est un convertisseur statique qui assure la transformation d'une tension alternative sinusoïdale de fréquence donnée en une autre tension de même nature et de fréquence identique en conservant, aux pertes près, la même puissance.

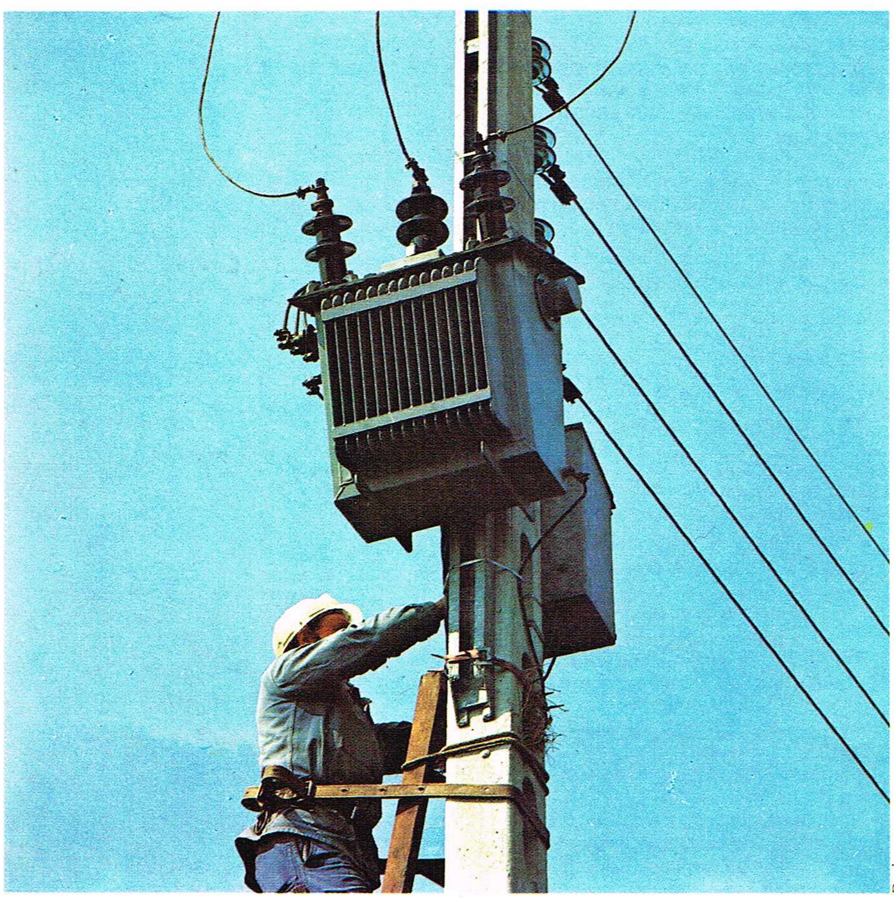

Parimage

▼ *Le transformateur permet de réaliser la transmission de l'énergie électrique à haute tension et à faible courant pour la distribuer sous basse tension et courant plus intense.*

Les premiers transformateurs datent de 1884 environ, époque à laquelle Gaulard réalise une première transmission électrique en courant alternatif sur 37 km à l'occasion de l'Exposition internationale de Turin. Trois ingénieurs hongrois, Dert, Blathy et Zipernowsky, donnent au transformateur sa conception définitive dès 1885. Les puissances actuelles couvrent la gamme allant de quelques voltampères (VA) jusqu'à quelques centaines de mégavoltampères (MVA). On distingue les transformateurs de puissance des transformateurs de mesure et de liaison. Bien que fonctionnant selon des principes identiques, leur utilisation est très différente, et ils seront traités ultérieurement.

Le transformateur monophasé

Un transformateur monophasé classique est constitué d'une carcasse en matériau ferromagnétique sur laquelle sont bobinés deux enroulements distincts appelés *primaire* et *secondaire*, comme l'indique la *figure* 1.

Il est possible que le secondaire comporte plus de deux bornes, comme un transformateur à point milieu. Mais ces sorties sont reliées entre elles par un conducteur. Par contre, le primaire et le secondaire ne comportent aucune liaison galvanique.

Théorie élémentaire

Considérons le montage de la *figure* 1, pour lequel nous allons, dans un premier temps, supposer négligeables les résistances et infinie la perméabilité magnétique relative du fer. On dit alors qu'on a un transformateur parfait. La dernière hypothèse entraîne l'absence de fuites magnétiques, car la réluctance du circuit est nulle, alors que celle de l'air a une valeur finie. Ainsi, le flux par spire au primaire se retrouve intégralement au secondaire.

Si $\overline{V}_1$ est la tension efficace de pulsation ω appliquée au primaire comportant n_1 spires, on a d'après la loi de Faraday et les règles de dérivation avec le temps vues auparavant dans les circuits électriques :

(3) $$\overline{V}_1 = \overline{E}_1 = -j\omega\overline{\Phi}_1 n_1$$

En effet, la tension $\overline{V}_1$ et la f. é. m. $\overline{E}_1$ se confondent en raison de l'absence de résistance. De même, pour le secondaire, avec n_2 spires :

(4) $$\overline{V}_2 = \overline{E}_2 = -j\omega\overline{\Phi}_2 n_2$$

Puisqu'il n'y a pas de fuites magnétiques, les flux Φ_1 et Φ_2 sont égaux. On obtient alors :

(5) $$\frac{\overline{E}_2}{\overline{E}_1} = \frac{\overline{V}_2}{\overline{V}_1} = \frac{n_2}{n_1}$$

La quantité $m = \frac{n_2}{n_1}$, rapport du nombre de spires, est appelée rapport de transformation. On introduit parfois le flux maximal Φ_m égal à $\Phi_1\sqrt{2}$ et, comme on passe de la pulsation ω à la fréquence f par la relation $\omega = 2\pi f$, on trouve la relation pratique qui permet d'évaluer le flux Φ_m, connaissant la tension efficace V_1 :

$$V_1 = 4{,}44\, f n_1 \Phi_m$$

Si le secondaire est fermé sur une charge et débite un courant alternatif $\overline{I}_2$, le courant $\overline{I}_1$ circulant au primaire est donné par le théorème d'Ampère :

(6) $$n_1\overline{I}_1 - n_2\overline{I}_2 = 0$$

relation qu'on peut écrire sous la forme :

(7) $$\frac{\overline{I}_1}{\overline{I}_2} = \frac{n_2}{n_1} = m$$

On constate en effectuant le produit de **(7)** par **(5)** que la puissance absorbée au primaire se retrouve intégralement au secondaire ($\overline{V}_2\overline{I}_2 = \overline{V}_1\overline{I}_1$). Ceci est vrai parce que nous avons considéré un transformateur parfait.

Pour les transformateurs réels, le rapport de ces deux puissances donne le rendement; pour les plus puissants, on dépasse 99 %.

Transformateur réel

Les conditions de fonctionnement du transformateur parfait précédent ne sont pas tout à fait vérifiées pour les transformateurs industriels. En effet, il faut tenir

compte des résistances des enroulements et des flux de fuite, c'est-à-dire des lignes de champ qui sortent du noyau magnétique sans être communes aux enroulements primaires et secondaires. Enfin, il existe un courant magnétisant non nul pour produire le flux commun aux deux enroulements ainsi que des pertes par hystérésis et courant de Foucault.

Le flux Φ_1 qui transite dans le primaire est égal à la somme du flux de fuite du primaire Φ_{f1} et du flux commun Φ_c : $\Phi_1 = \Phi_{f1} + \Phi_c$. De même, pour le secondaire,

$$\Phi_2 = \Phi_{f2} + \Phi_c$$

On appelle, par analogie avec les auto-inductances, inductances de fuite du primaire la quantité

$$l_1 = \frac{n_1}{I_1} \Phi_{f1}$$

De même, l'inductance de fuite du secondaire est

$$l_2 = \frac{n_2}{I_2} \Phi_{f2}$$

En introduisant en outre les résistances R_1 et R_2 des enroulements, les relations **(3)** et **(4)** deviennent :

(8) $\bar{V}_1 = \bar{E}_1 + (R_1 + jl_1\omega)\, \bar{I}_1$

(9) $\bar{V}_2 = \bar{E}_2 - (R_2 + jl_2\omega)\, \bar{I}_2$

La modification du signe résulte de l'application des relations **(1)** et **(2)** au transformateur. En effet, le primaire est un récepteur, alors que le secondaire est un générateur. Il faut noter que d'autres conventions de signe peuvent être adoptées.

On a de cette manière séparé les chutes de tension dues aux fuites magnétiques et retrouvé un transformateur parfait au niveau des tensions $\bar{E}_1$ et $\bar{E}_2$ qui sont dues aux seules variations du flux commun Φ_c :

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{n_2}{n_1}$$

D'autre part, supposons que le transformateur fonctionne à vide ($\bar{I}_2 = 0$). Il se trouve réduit à une simple bobine d'inductance propre L_1 qui absorbe le courant I_{10} tel que, si on fait abstraction de R_1 :

(10) $\bar{E}_1 = jL_1\omega\bar{I}_{10}$

$\bar{I}_{10}$ est appelé courant à vide ou magnétisant : il existe dès que la perméabilité magnétique relative μ_r ne peut plus être considérée comme infinie. Avec les tôles actuelles μ_r vaut quelques milliers dans la zone de fonctionnement non saturée. Si maintenant le transformateur débite un courant secondaire $\bar{I}_2$, $\bar{I}_{10}$ subsiste, et **(6)** devient

(11) $n_1\bar{I}_1 - n_2\bar{I}_2 = n_1\bar{I}_{10}$

Enfin, on sait que, dans toute bobine, il existe des pertes électromagnétiques dues aux courants de Foucault et à l'hystérésis. La relation **(10)** montre que $\bar{I}_{10}$ est en quadrature sur $\bar{E}_1$, donc qu'il n'y aurait pas de puissance active mise en jeu. L'expérience montre que ce n'est pas le cas et qu'il faut ajouter à $\bar{I}_{10}$ une composante wattée sous la forme d'une résistance équivalente R_p en parallèle sur L_1.

L'ensemble des observations précédentes traduites sous forme d'équations peut être transcrit sous la forme d'un schéma électrique équivalent représenté sur la *figure* 2.

La *figure* 3 donne la représentation dans le plan de Fresnel des équations précédentes.

Cette construction un peu compliquée est souvent remplacée par le diagramme de Kapp qui fait l'hypothèse simplificatrice que le courant magnétisant I_{10} est négligeable. Cette hypothèse est fondée puisque I_{10} est toujours inférieur au dixième du courant nominal, c'est-à-dire du courant pour lequel le transformateur a été calculé pour fonctionner de manière permanente sans dommages. Dans ces conditions, **(11)** est remplacé par **(7)**, et on peut écrire **(8)** avec les grandeurs du secondaire :

$$m\bar{V}_1 = \bar{E}_2 + (R_1 + jl_1\omega)\, \bar{I}_2 m^2$$

En reportant dans **(9)**, il vient :

$$m\bar{V}_1 = \bar{V}_2 + [(m^2R_1 + R_2) + j\omega\,(m^2l_1 + l_2)]\, \bar{I}_2$$

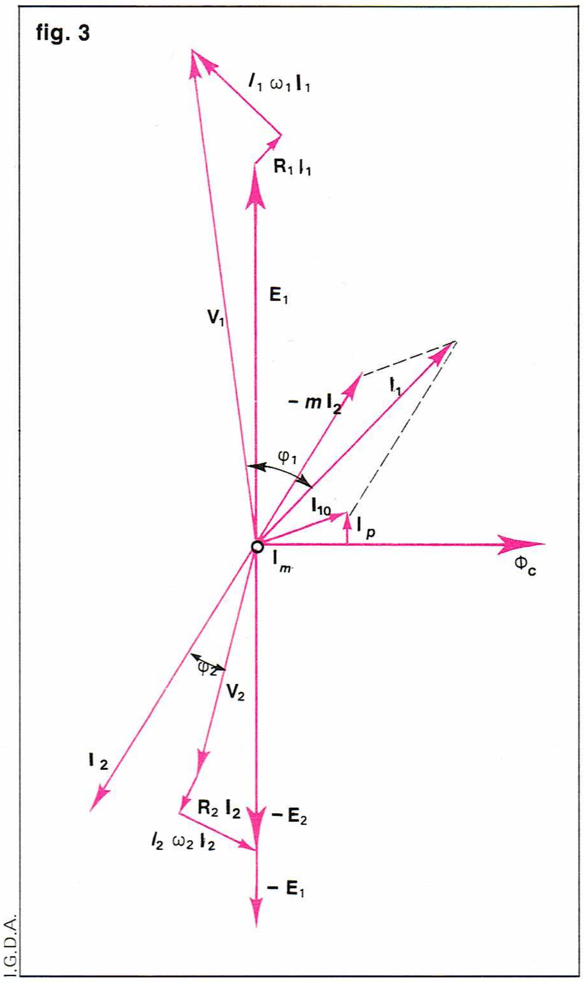

I.G.D.A.

◀ *Figure 3 : diagramme vectoriel de fonctionnement d'un transformateur réel fermé sur une impédance qui absorbe le courant I_2 sous la tension V_2 avec un facteur de puissance cos φ_2.*

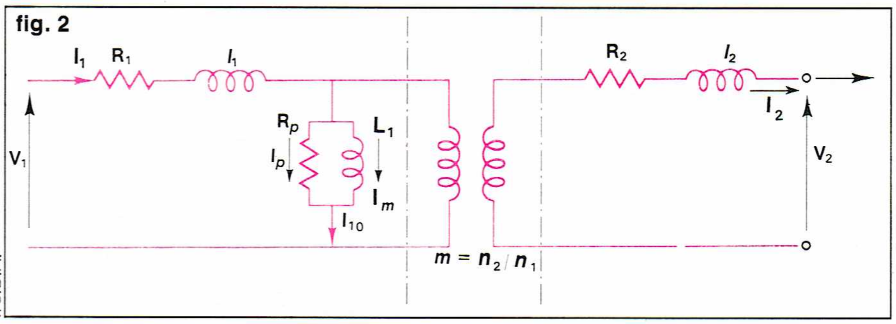

I.G.D.A.

▲ *Figure 2 : schéma électrique équivalent d'un transformateur réel.*

La quantité $R = R_2 + m^2R_1$ est la résistance totale ramenée au secondaire, et l'inductance $l = l_2 + m^2l_1$ est l'inductance totale de fuite ramenée au secondaire.

La relation que représente le diagramme de Kapp de la *figure* 4 est donc :

(12) $m\bar{V}_1 = \bar{V}_2 - (R + jl\omega)\, \bar{I}_2$

On peut ainsi connaître la tension $\bar{V}_1$ nécessaire pour obtenir une tension $\bar{V}_2$ imposée en débitant un courant $\bar{I}_2$ dans une impédance connue.

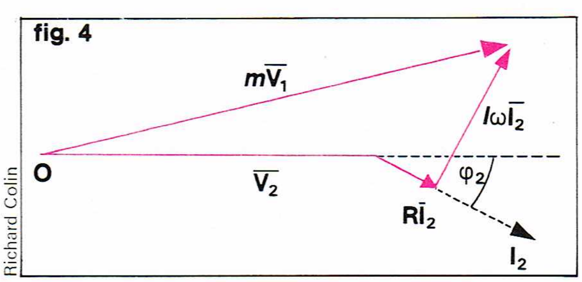

Richard Colin

◀ *Figure 4 ; diagramme de Kapp : φ_2 est le déphasage du courant sur la tension de la charge.*

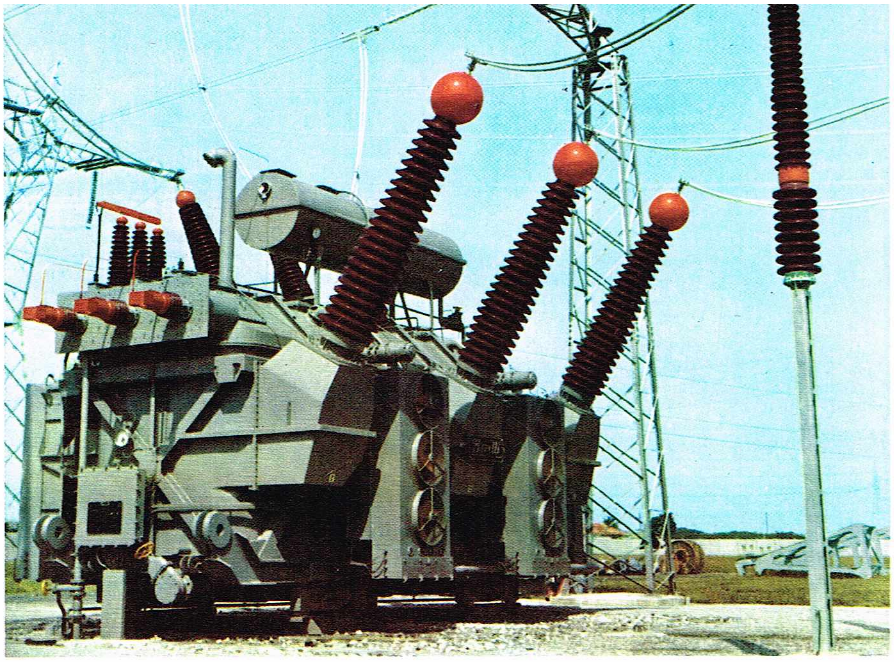

ENEL

▲ *Un autotransformateur triphasé de 400 MVA, 400/230/15 kV, de la station de transformation de Bovisio (Italie).*

La construction du diagramme de Kapp permet de prévoir les performances d'un transformateur en charge sans avoir à faire l'essai direct. En effet, un essai à vide donne le rapport *m*. Un essai en court-circuit, sous tension réduite ($\overline{V}_2 = 0$), donne $R + jl\omega$. Enfin la mesure des résistances en courant continu permet de connaître *l*.

Transfert d'impédance

Une utilisation importante du transformateur, en électro-acoustique, est l'adaptation d'impédance. Supposons le transformateur de la *figure* 1 parfait et fermons son secondaire par une impédance $\overline{Z}_2$: $\overline{V}_2 = \overline{Z}_2\overline{I}_2$. D'après **(5)** et **(7)**, on trouve immédiatement :

$$\overline{V}_1 = \frac{\overline{Z}_2}{m^2}\,\overline{I}_1$$

Ainsi le courant primaire $\overline{I}_1$ qui est absorbé par le transformateur est celui qui circulerait si, en l'absence du transformateur, on disposait l'impédance $\frac{\overline{Z}_2}{m^2}$. On ne modifie donc rien au courant absorbé si l'on déplace une impédance du secondaire au primaire, à condition de la diviser par le carré du nombre de spires du transformateur.

Autotransformateur

Un tel dispositif, représenté sur la *figure* 5, est constitué par un seul enroulement bobiné sur un noyau magnétique. Le rapport de transformation est ajustable grâce à des plots ou à un curseur s'appliquant sur une partie dénudée des spires et qui définissent le secondaire. Le rapport de transformation est égal au rapport du nombre de spires N_2, pris entre le curseur et le point commun du secondaire et de la source, au nombre total N_1. Le rapport de transformation est toujours inférieur ou égal à l'unité.

Les autotransformateurs sont utilisés pour ajuster des tensions à un niveau requis : ils remplacent en alternatif les potentiomètres, puisqu'ils présentent l'avantage de dissiper très peu de puissance, tant à vide qu'en pleine charge. Malheureusement, ils ont l'inconvénient de rendre électriquement solidaires primaire et secondaire et ont un rendement qui est d'autant meilleur que N_2 est plus voisin de N_1.

▼ *Figure 5 : schéma électrique d'un autotransformateur.*

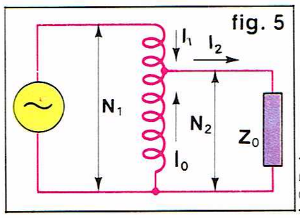

I.G.D.A.

Transformateur triphasé

Les réseaux triphasés sont formés de trois circuits monophasés alimentés par des sources de tension décalées dans le temps de $2\pi/3$, soit, avec des tensions instantanées :

$$v_1 = V\sqrt{2}\sin\omega t$$

$$v_2 = V\sqrt{2}\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$v_3 = V\sqrt{2}\sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \qquad \textbf{(13)}$$

On peut utiliser trois transformateurs monophasés à circuits magnétiques séparés : c'est ce qui se fait pour les très grandes puissances. Une première concentration consiste à bobiner sur trois colonnes séparées les primaires et les secondaires de chaque phase et à prévoir deux colonnes de retour du flux (transformateur triphasé à flux libres). Chacun des enroulements primaire ou secondaire peut être couplé en étoile (notée Y) ou en triangle (noté Δ ou D).

Pour des questions de fonctionnement en régime déséquilibré, il existe un troisième type de couplage appelé zigzag (noté Z) qui exige d'avoir les trois enroulements divisés en deux moitiés comme l'indique la *figure* 6.

Chacun de ces couplages conduit à des déphasages particuliers entre tensions primaires et secondaires, comme l'indique la *figure* 7. De même, les rapports de transformation dépendent du mode de couplage : les résultats sont présentés dans le tableau.

La plupart des transformateurs triphasés sont en fait à flux forcés : les circuits magnétiques relatifs à chaque phase ne sont plus indépendants. L'idée est qu'à chacune des tensions v_1, v_2, v_3 correspondent des flux instantanés φ_1, φ_2, φ_3 dont la somme est nulle à chaque instant en raison de l'identité :

$$\sin\omega t + \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) = 0$$

On peut donc faire l'économie du noyau magnétique de retour comme on fait l'économie du fil neutre de retour dans un circuit électrique triphasé équilibré.

▼▶ *Ci-dessous, figure 6 : schéma électrique d'un enroulement de transformateur triphasé couplé en zigzag. A droite, transformateurs triphasés de grande puissance (chacun de 190 000 kVA, 20/400 kV).*

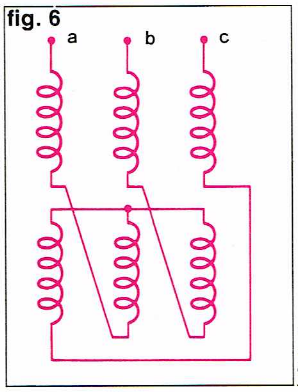

I.G.D.A.

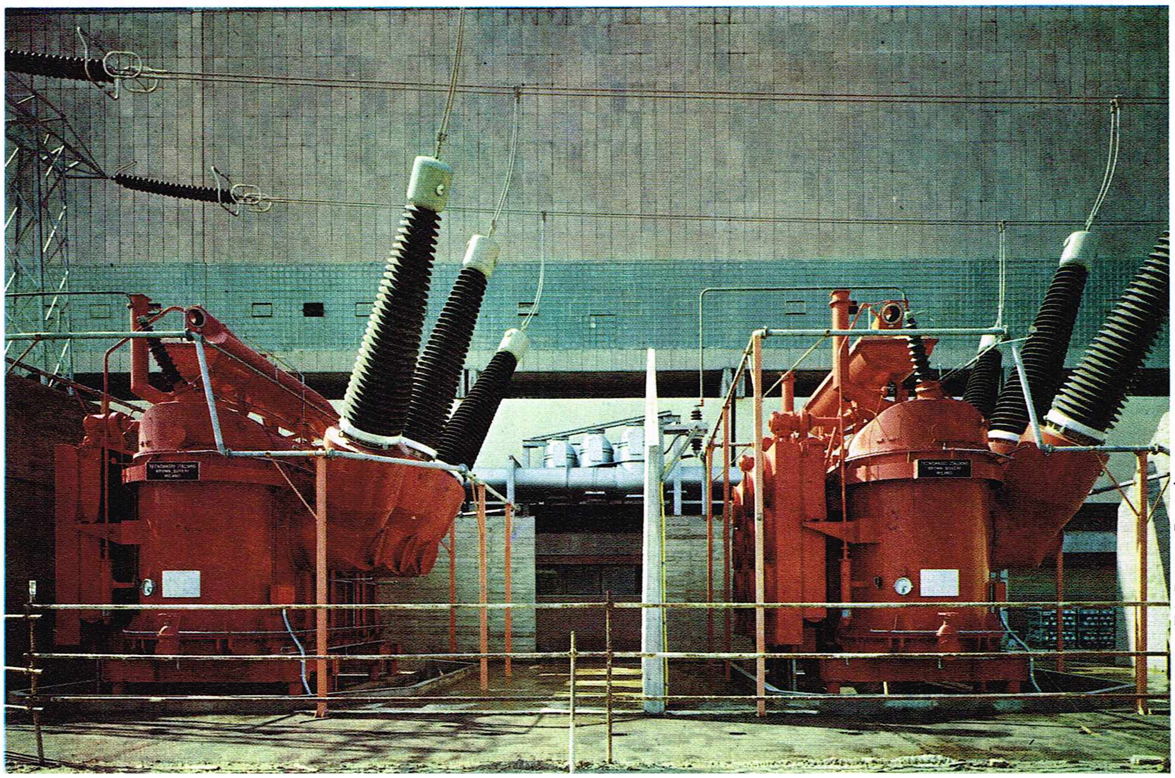

T.I. Brown Boveri

Transformateur de phase

En électronique de puissance, et plus particulièrement dans les dispositifs à redresseurs, il est souvent nécessaire de changer la nature d'un système polyphasé. La transformation d'un système triphasé en système hexaphasé s'effectue à partir d'un transformateur triphasé au primaire mais dont les trois enroulements secondaires comportent trois points milieux reliés entre eux.

La transformation d'un système triphasé en un système diphasé, utilisé dans la traction électrique à fréquence industrielle pour alimenter une paire de caténaires, s'effectue à partir d'un transformateur Scott. Le montage représenté sur la *figure* 8 utilise deux transformateurs monophasés. Supposons que les secondaires fournissent du diphasé, c'est-à-dire deux tensions égales en module mais déphasées de $\frac{\pi}{2}$ ($\overline{V}_1$ et $\overline{V}'_1$).

On va combiner les enroulements primaires pour obtenir trois tensions déphasées de $2\pi/3$ et de même module. C'est le résultat auquel on arrive en reliant le point milieu du primaire du premier transformateur, comportant *n* spires, à l'origine de l'enroulement homologue du second transformateur qui devra comporter $n\sqrt{3}$ spires. Les sorties A, B, C du primaire sont portées sur la *figure* 8. Si on veut la borne neutre, il suffit de prélever la tension à $\frac{2}{3}n$ spires de C. Le système est réversible, et on peut obtenir du triphasé à partir du diphasé, ou *vice versa*.

Caractéristiques de construction

Tous les transformateurs comportent d'une part les colonnes autour desquelles sont disposés les enroulements et d'autre part deux culasses qui assurent la fermeture du flux. La carcasse magnétique est constituée de tôles minces (3 à 5 dixièmes de millimètre) isolées, vernies et empilées. Ce sont des tôles spécialement traitées au silicium à cristaux orientés pour réduire les pertes magnétiques.

Les enroulements sont disposés en galettes concentriques ou superposées. Elles sont formées de conducteurs en cuivre dont la section est circulaire (fil rond) ou presque rectangulaire (fil méplat). La section dépend des intensités et des types de refroidissement qui peuvent être soit à air (naturel ou forcé), soit à huile ou au pyralène. La densité de courant admise est de l'ordre de 3 A par mm^2.

Utilisation des transformateurs

Leur rôle est d'assurer la liaison entre deux circuits à tensions différentes. Ils sont indispensables dans les réseaux de distribution de l'énergie électrique. En effet, il est plus économique en raison du coût du cuivre, des poteaux, etc., de choisir une tension élevée de transport : actuellement le réseau national est à 380 kV, et on prévoit 750 kV en 1980 — valeur déjà atteinte dans les pays étendus comme le Canada. Mais ni les alternateurs des centrales électriques ni, *a fortiori*, les utilisateurs ne peuvent s'accommoder de ces tensions. C'est cette facilité à

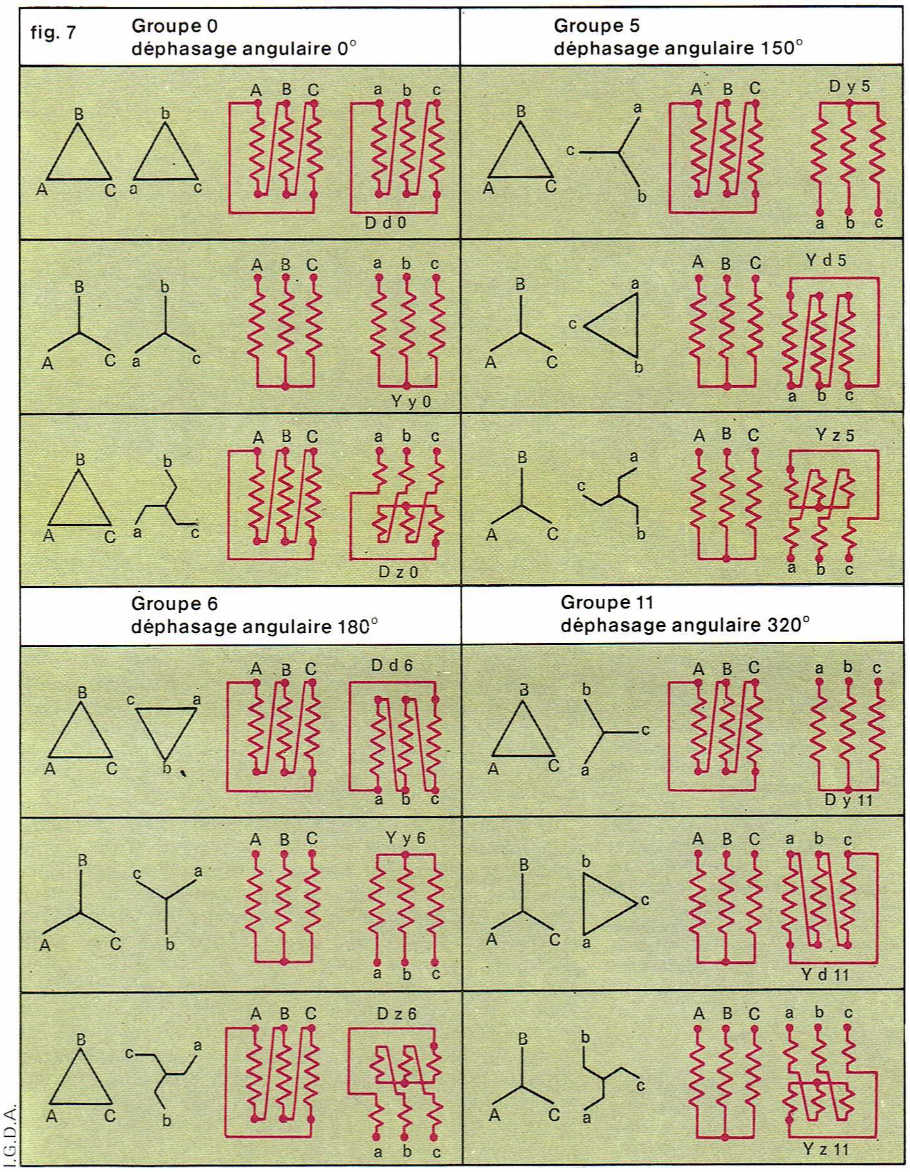

I.G.D.A.

▲ *Figure 7 : différents types de couplage, pour les transformateurs triphasés. Dans chacune des douze cases sont indiqués, en partant de la gauche, les diagrammes vectoriels respectifs des tensions primaires et secondaires (A, B, C sont les bornes du primaire, a, b, c correspondent au secondaire). D, Y, Z symbolisent respectivement les couplages en triangle, en étoile, en zigzag. Les nombres 0, 5, 6, 11 indiquent le déphasage en multipliant par $\frac{\pi}{6}$. Par exemple, Yd5 définit un couplage étoile au primaire, triangle au secondaire, conduisant à un déphasage de la tension secondaire sur la tension primaire de $\frac{5\pi}{6}$.*

▼ *A gauche, tableau des rapports de transformation des différents couplages. A droite, figure 8 ; montage de Scott : transformation du diphasé en triphasé, et vice versa.*

Enroulements primaire	Enroulements secondaire	Rapports de transformation V_1/V_2
Y	*y*	$\frac{N_1}{N_2}$
D	*d*	$\frac{N_1}{N_2}$
Y	*d*	$\sqrt{3}\,\frac{N_1}{N_2}$
D	*y*	$\frac{1}{\sqrt{3}}\,\frac{N_1}{N_2}$
Y	*z*	$\frac{2}{\sqrt{3}}\,\frac{N_1}{N_2}$
D	*z*	$\frac{2}{3}\,\frac{N_1}{N_2}$

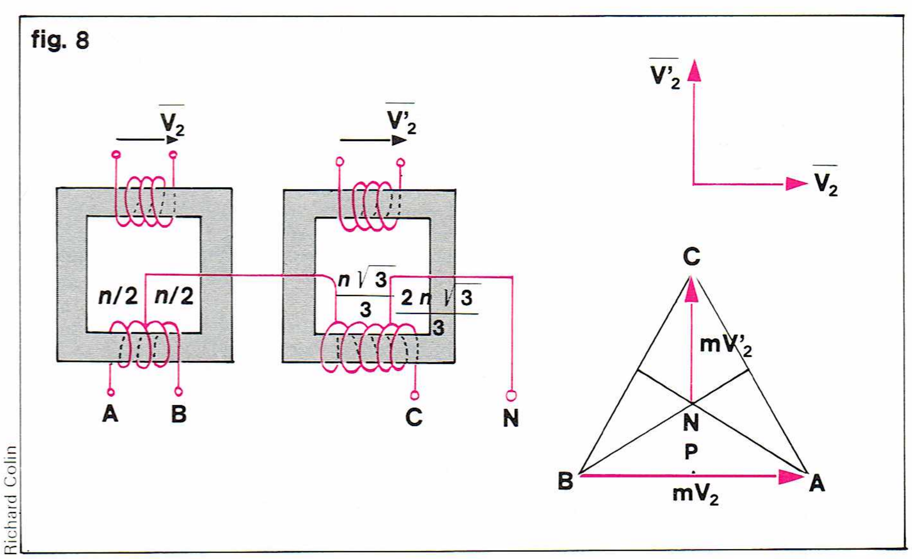

Richard Colin

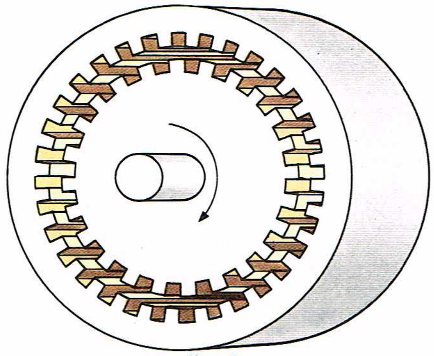

fig. 9

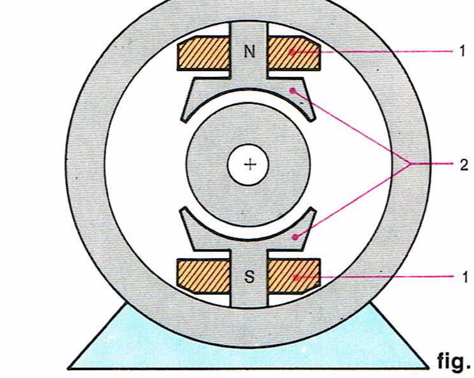

fig. 10

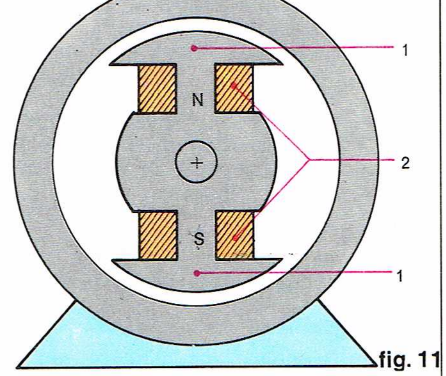

fig. 11

I.G.D.A.

▲ *Figure 9 :* ***schéma de l'armature ferromagnétique d'une machine électrique tournante à bobinage uniformément réparti au rotor et au stator.***
Figure 10 : ***bobinage statorique concentré avec épanouissements polaires.***
Figure 11 : ***bobinage rotorique concentré, appelé à pôles saillants.***

▶ *Figure 12 :* ***schéma d'une machine à deux paires de pôles au rotor.***

modifier les tensions par une machine électrique très simple et de rendement excellent appelée transformateur qui a donné au courant alternatif son avantage décisif sur le courant continu à la fin du XIX[e] siècle.

Les machines électriques tournantes

Une machine tournante comporte deux armatures cylindriques coaxiales, l'une fixe appelée *stator*, l'autre mobile appelée *rotor* qui est solidaire d'un arbre porté par des paliers. Stator et rotor sont séparés par un interstice appelé entrefer, car chacun d'eux est constitué d'un matériau ferromagnétique analogue à celui utilisé dans les transformateurs. Stator et rotor portent, dans des encoches, des conducteurs dirigés parallèlement à l'axe et reliés entre eux pour constituer le bobinage. Les enroulements peuvent être uniformément répartis sur toute la circonférence (*fig.* 9) ou bien concentrés comme sur les *figures* 10 et 11 selon le type de machine. Un des deux bobinages est appelé inducteur, car il est à l'origine du champ d'induction magnétique principal, l'autre est appelé induit, car il recueille les f. é. m. induites.

Selon le sens de la puissance imposée à l'induit et sur l'arbre, la machine peut fonctionner en générateur ou en moteur.

Dans le fonctionnement en moteur, l'induit est alimenté par une source extérieure, et on récupère une puissance motrice sur l'arbre : si C_M est le couple moteur et Ω la vitesse angulaire, la puissance recueillie est $C_M\Omega$. Par exemple, dans le cas des locomotives électriques, pour une vitesse uniforme, le couple moteur est égal au couple résistant à fournir pour faire avancer le train, et la puissance consommée est d'autant plus grande que la vitesse est élevée.

Dans le fonctionnement en générateur, le rotor est entraîné par un dispositif extérieur, turbine à vapeur par exemple, qui fournit un couple mécanique C_M à la vitesse Ω. La puissance mécanique est encore $C_M\Omega$.

Le rôle des bobinages est d'assurer dans le premier cas l'addition des couples élémentaires, dans le second cas celle des f. é. m. induites.

Selon le courant principal d'alimentation, on distingue les machines à courant continu et les machines à courant alternatif qui, elles-mêmes, se répartissent en machines monophasées ou polyphasées et en machines synchrones ou asynchrones.

Toutes ces machines, bien que de conception et de fonctionnement différents, ont en commun la nécessité de voir créer un champ magnétique et de recueillir ou produire des f. é. m. selon des principes identiques que nous allons voir maintenant.

Production d'un champ magnétique dans les machines tournantes

La quasi-totalité de ces machines est hétéropolaire, c'est-à-dire que leurs bobinages sont conçus pour créer une ou plusieurs paires de pôles, successivement Nord et Sud. On obtient ainsi une plus grande variation de flux : cette conception est due à Pixii, qui l'a proposée dès 1832. Mais la première machine électrique, due à Barlow en 1828, ne comportait qu'un seul pôle : ce type de montage est appelé homopolaire. Il est encore susceptible d'être intéressant pour des machines devant fonctionner sous faible tension et forte intensité. L'une d'elles, due à Poirson en 1932 et exposée maintenant au palais de la Découverte de Paris, était destinée à l'électrolyse.

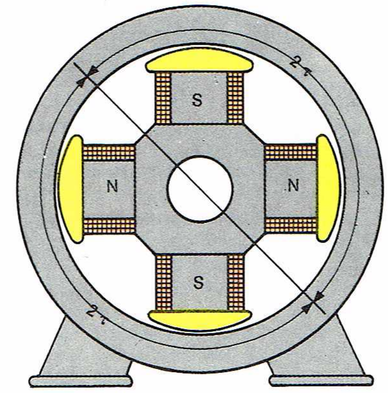

I.G.D.A.

fig. 12

Pour réaliser une alternance de pôles Nord et Sud, la méthode la plus simple consiste à construire une succession d'électro-aimants dont les courants d'alimentation circulent alternativement dans un sens opposé. Ainsi la *figure* 12 montre une machine dont le rotor comporte quatre pôles (2 paires de pôles Nord-Sud). Remarquons que les bobines sont parfois remplacées par des aimants permanents dans la gamme des faibles puissances.

Supposons d'abord que le courant dans ces bobinages soit continu : l'induction b dans l'entrefer est indépendante du temps. Mais elle varie le long de la circonférence. Elle est maximale au droit d'un pôle Nord, minimale en face d'un pôle Sud, et nulle entre les pôles. Si l'on prend pour origine des angles θ un axe de pôle Nord, on peut écrire, approximativement, que

(14) $$b = B \cos p\theta$$

où p est le nombre de paires de pôles. Cette fonction vérifie bien les conditions précédentes. Le champ obtenu est donc fixe dans le temps mais sinusoïdal dans l'espace.

Supposons ensuite que les bobines précédentes, toujours alimentées en courant continu, soient solidaires d'un rotor tournant à la vitesse Ω. La répartition précédente se déplace dans son ensemble à la vitesse Ω. On dit alors qu'on a créé un champ tournant. L'induction, dans le repère mobile, est donnée par **(14)**, mais dans le repère fixe du stator, il faut ajouter $\mp \Omega t$ à θ et l'induction devient :

(15) $$b = B \cos p\,(\theta \mp \Omega t)$$

le signe $\mp$ dépendant du sens de la rotation. C'est la transcription mathématique de ce qu'on appelle « champ tournant » en électrotechnique.

Supposons maintenant à nouveau le rotor immobile mais le courant d'alimentation sinusoïdal de pulsation ω et non plus continu comme précédemment : $i = I \cos \omega t$. L'induction b étant proportionnelle en amplitude au

courant qui la crée, on obtient une induction de la forme :

(16) $b_1 = B \cos \omega t \cos p\theta$

Il y a donc à la fois une variation dans l'espace en raison des 2 p bobines mais aussi dans le temps en raison du courant sinusoïdal. On dit qu'on a créé une induction alternative sinusoïdale. Remarquons que **(16)** peut s'écrire par simple application des relations trigonométriques sous la forme :

$$b_1 = \frac{B}{2} [\cos (p\theta + \omega t) + \cos (p\theta - \omega t)]$$

En faisant le rapprochement avec **(15)**, on constate qu'un champ alternatif sinusoïdal d'amplitude B est équivalent à la superposition de deux champs tournants de même amplitude $\frac{B}{2}$, tournant à la même vitesse $\Omega = \frac{\omega}{p}$ mais en sens contraire. Ce résultat est connu sous le nom de *théorème de Leblanc.*

Supposons enfin qu'au système de bobines précédent comportant p paires de pôles, on ajoute un système identique mais décalé de $\frac{\pi}{2p}$ $\left(\frac{\pi}{4}\right.$ pour le système à 2 paires de pôles de la *figure* 12). Alimentons le premier système par un courant sinusoïdal $i_1 = I \cos \omega t$ donnant l'induction b_1 précisée par **(16)** et le second système par un courant $i_2 = I \sin \omega t$ déphasé de $\frac{\pi}{2}$ par rapport au premier : on dit qu'on a alors une alimentation diphasée. L'induction due à i_2 est :

$$b_2 = I \sin \omega t \cos p \left(\theta \mp \frac{\pi}{2p}\right)$$

soit $b_2 = \mp I \sin \omega t \sin p\theta$ avec un signe dépendant de la position relative de b_2 par rapport à b_1. L'induction totale est la superposition de b_1 et b_2. Elle vaut

$$b = B \cos (p\theta \mp \omega t)$$

on retrouve à peu près la relation **(15)**. On a créé un champ tournant à la vitesse

(17) $\Omega = \frac{\omega}{p}$

grâce à un ensemble de bobines fixes mais alimentées par un système polyphasé bien choisi. Ce résultat est général et est connu sous le nom de *théorème de Ferraris : des enroulements polyphasés fixes parcourus par des courants polyphasés sinusoïdaux produisent un champ tournant.*

La plupart du temps, on adopte un système de courants triphasés, vérifiant **(13)** : il faut donc un jeu de trois bobines décalées de $\frac{2\pi}{3}$ pour $p = 1$ (*fig.* 13) ou 3 p bobines décalées de $\frac{2\pi}{3p}$ pour les dispositifs comportant p paires de pôles.

Force électromotrice induite dans un enroulement de machine

Considérons une spire isolée placée dans un champ d'induction magnétique B comme l'indique la *figure* 14.

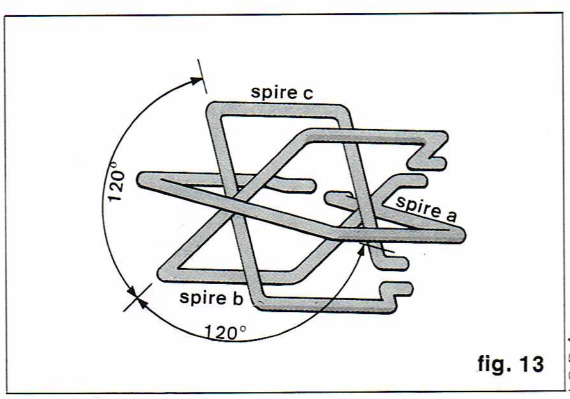

fig. 13

I.G.D.A.

◄ *Figure 13 : création d'un champ tournant par trois bobines fixes alimentées en courant triphasé équilibré. Les trois bobines sont réduites à une seule spire sur le dessin.*

Si S est la section et α l'angle de la normale à la spire avec l'axe du champ, le flux de B dans la spire est

$$\Phi = BS \cos \alpha$$

La f. é. m. induite par le mouvement à la vitesse Ω est :

$$e = \frac{-d\Phi}{dt} = \Omega SB \sin \alpha$$

Si la spire est reliée à des prises fixes placées sur le stator par deux bagues tournantes sur lesquelles frotte un contact glissant, on recueillera une tension e sinusoïdale dont la pulsation est égale à Ω :

(18) $e = \Omega BS \sin (\Omega t + \alpha_0)$

On remarque que l'amplitude est proportionnelle à la vitesse Ω, à la section, donc aux nombres de conducteurs dont la spire est formée, et à l'induction B, donc à peu près à l'intensité de l'alimentation du champ inducteur. D'autre part, pour une bobine inductrice ne comportant qu'une paire de pôles, la pulsation de la tension vaut la vitesse angulaire. On peut prévoir que, si on avait réalisé p paires de pôles, la pulsation aurait été $p\Omega$ puisqu'il y aurait eu p fois plus de changement de flux. On retrouve ainsi la relation **(17)**. Pour un réseau à fréquence f, la pulsation vaut $\omega = 2\pi f$ et, si on exprime la vitesse de rotation en tours par minute N, **(17)** devient :

(19) $N = \frac{60 f}{p}$

Pour un réseau de fréquence 50 Hz, $N = \frac{3\,000}{p}$ tours par minute.

Si on veut une f. é. m. continue, il faut imaginer un système de redressement de la tension **(18)**. C'est à l'ingénieur Z. Gramme qu'on doit la conception d'un redressement mécanique par un montage appelé collecteur et qui sera développé ultérieurement.

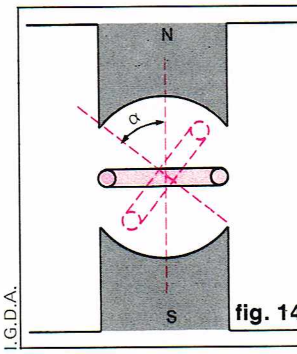

fig. 14

I.G.D.A.

▲ *Figure 14 : création d'une f. é. m. dans une spire tournant à la vitesse Ω et placée dans un champ d'induction magnétique.*

Les machines synchrones

Les machines synchrones sont essentiellement utilisées pour produire l'énergie électrique en courant alternatif : elles portent alors le nom d'alternateur ou de turbo-alternateur lorsqu'on s'intéresse à leur association avec la turbine d'entraînement à vapeur. Mais ces machines étant réversibles, elles peuvent fonctionner en moteur synchrone, dont l'application essentielle est le fonctionnement en compensateur chargé d'améliorer le facteur de puissance des réseaux.

C'est à Boucherot et à Blondel que l'on doit, en 1892, l'utilisation des alternateurs. Les puissances actuelles vont d'une dizaine de voltampères (alternateurs d'automobiles) à 600 000 kVA (Porcheville sur la Seine en aval de Paris, et Cordennay près de Nantes). Des études actuelles prévoient des groupes à

1 200 MVA (1 000 kVA = 1 MVA)

Ces progrès technologiques sont dus à l'amélioration des matériaux magnétiques et isolants utilisés ainsi qu'à d'excellentes conditions de refroidissement forcé à eau et à hydrogène. Les rendements obtenus atteignent 98 %. Pour des puissances plus élevées, il sera peut-être nécessaire de faire appel à des matériaux supraconducteurs en modifiant profondément la construction.

Principe

Il serait théoriquement possible de prendre la disposition de la *figure* 14 : un inducteur fixe et un bobinage mobile dans lequel est prélevée la f. é. m. par l'intermédiaire de contacts glissants sur deux bagues. Cette disposition n'est pas judicieuse pour les très grandes puissances, puisque de grandes intensités devraient transiter par les contacts glissants. C'est pourquoi on a adopté la disposition inverse.

Le rotor porte le champ inducteur produit par une alimentation à courant continu appliquée à une succession de bobines disposées autour de l'arbre de la machine. Par contre, l'induit est fixe et le plus souvent triphasé, c'est-à-dire constitué de spires décalées géométriquement d'un angle $\frac{2\pi}{3p}$ où p, nombre de paires de pôles, est identique à celui du rotor. Un système de deux bagues permet d'alimenter le rotor : mais les intensités dans le circuit inducteur sont faibles (5 % environ du courant d'induit). Le courant continu est produit soit par

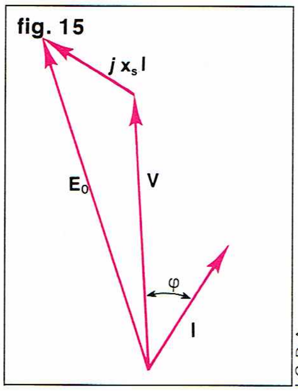

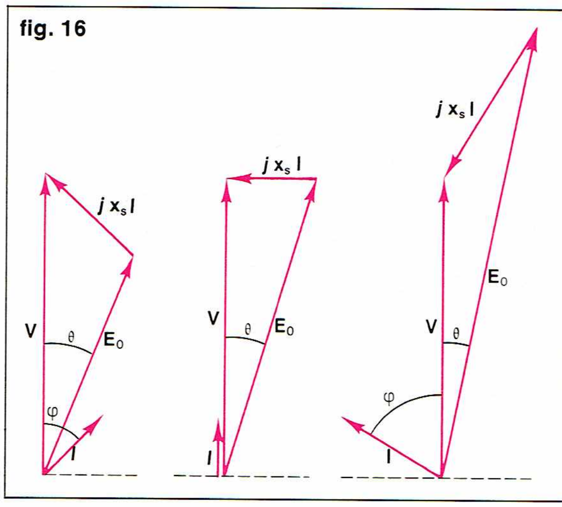

I.G.D.A.

▲▶ *Ci-dessus, figure 15 : diagramme vectoriel simplifié de Behn-Eschenburg d'une machine synchrone fonctionnant en alternateur. Ci-contre, figure 16 : diagramme vectoriel simplifié de Behn-Eschenburg d'un moteur synchrone pour plusieurs facteurs de puissance.*

▼ *A gauche, un stator en service dans un turbo-alternateur de 390 000 kVA, 21 kV, 3 000 tours/minute. A droite, figure 17 : caractéristiques externes d'un alternateur couplé successivement à trois réseaux de facteurs de puissance différents.*

une machine secondaire à courant continu, appelée excitatrice et placée en bout d'arbre de l'alternateur, soit par un dispositif de redressement à diodes.

Le rotor engendre dans le stator une tension sinusoïdale (*cf.* **18**) dont la fréquence f est donnée en fonction de p et de la vitesse de rotation N en tours par minute par **(19).** Pour un réseau à 50 Hz, la vitesse de rotation maximale est 3 000 tours par minute. C'est celle qui est atteinte par les turbines à vapeur d'eau sous pression installées dans les centrales thermiques, que le combustible soit la matière fissile (centrale dite nucléaire) ou le fuel, ou le charbon. Cette vitesse élevée fait que, pour des questions mécaniques, les pôles inducteurs de l'alternateur sont répartis sur toute la circonférence du rotor : les turbo-alternateurs sont à pôles lisses. Pour les centrales hydrauliques, les vitesses de rotation sont plus lentes : il peut y avoir de 10 à 88 pôles correspondant à des vitesses de 600 à 68,2 tours par minute. Les pôles sont alors saillants.

Théorie élémentaire

En première approximation, on peut assimiler une machine synchrone à un générateur ou un récepteur de f. é. m. ou f. c. é. m. sinusoïdale de valeur complexe $\bar{E}$ et d'impédance interne $\bar{Z} = R + jX$ (R est la résistance par phase, et X est la réactance synchrone).

D'après **(18)**, $\bar{E}$ est proportionnel à la vitesse de rotation et au flux inducteur Φ, puisque $\Phi = BS$. Comme la f. é. m. totale n'est pas recueillie sur une seule spire mais sur un groupement en comportant n qui couvre une partie importante de la circonférence, il y a un déphasage entre chaque f. é. m. élémentaire, et leur sommation doit s'effectuer de manière vectorielle. Le résultat est donc affecté d'un coefficient k inférieur à l'unité, appelé coefficient de bobinage. On écrira donc, en module, $E = knN\Phi$.

La résistance R est celle mesurée pour l'ensemble des spires d'une phase, mises en série. Il y a une difficulté, par contre, pour la réactance synchrone. En effet, comme on peut le voir sur la *figure* 13, il y a couplage entre les trois phases, et la notion d'inductance propre doit être interprétée. Le flux recueilli par la spire a est :

$$\varphi_a = Li_a + Mi_b + Mi_c$$

où L est l'inductance propre de la spire et M l'inductance mutuelle avec les spires b et c. De même,

$$\varphi_b = Li_b + Mi_a + Mi_c \quad \text{et} \quad \varphi_c = Li_c + Mi_a + Mi_b$$

Mais en régime équilibré $i_a + i_b + i_c = 0$, on a donc $\varphi_a = (L - M)\, i_a$; $\varphi_b = (L - M)\, i_b$ et $\varphi_c = (L - M)\, i_c$. Tout se passe comme si chaque spire a, b ou c n'était pas couplée à condition de remplacer leur inductance propre L par l'inductance $(L - M)$ appelée inductance cyclique. La quantité X est la réactance correspondante $(L - M)\,\omega$. L'impédance cyclique de la machine synchrone est $\bar{Z} = R + jX$.

Pour un fonctionnement en alternateur, la tension simple aux bornes d'une phase est :

$$\bar{V} = \bar{E} - (R + jX)\,\bar{I} \qquad \textbf{(20)}$$

En moteur synchrone, l'équation devient :

$$\bar{V} = \bar{E} + (R + jX)\,\bar{I} \qquad \textbf{(21)}$$

Fréquemment, on néglige R. Les diagrammes correspondants représentés sur les *figures* 15 et 16 sont dits de Behn-Eschenburg. Si l'on veut davantage de précision, on doit utiliser les diagrammes de Potier ou celui de Blondel.

Courbes caractéristiques

En électrotechnique, on appelle courbes caractéristiques les courbes donnant les variations d'une grandeur (par exemple la tension, la vitesse, le courant) en fonction d'une autre lorsque tous les paramètres indépendants sont maintenus constants. En faisant varier un à un les paramètres, on obtient un réseau de caractéristiques propre à la machine étudiée. Les points intéressants de ces courbes sont les points limites théoriques ou physiques (surcharge par exemple), ainsi que les points correspondant au fonctionnement nominal (tension, courant, vitesse, couple...), c'est-à-dire pour lequel la machine a été calculée pour fonctionner sans usure anormale. Les grandeurs nominales essentielles sont lues sur la plaque signalétique.

La caractéristique externe d'un alternateur est la courbe reliant la tension au courant d'induit pour un courant inducteur donné. Comme le flux est proportionnel au courant inducteur, et que la vitesse d'une machine syn-

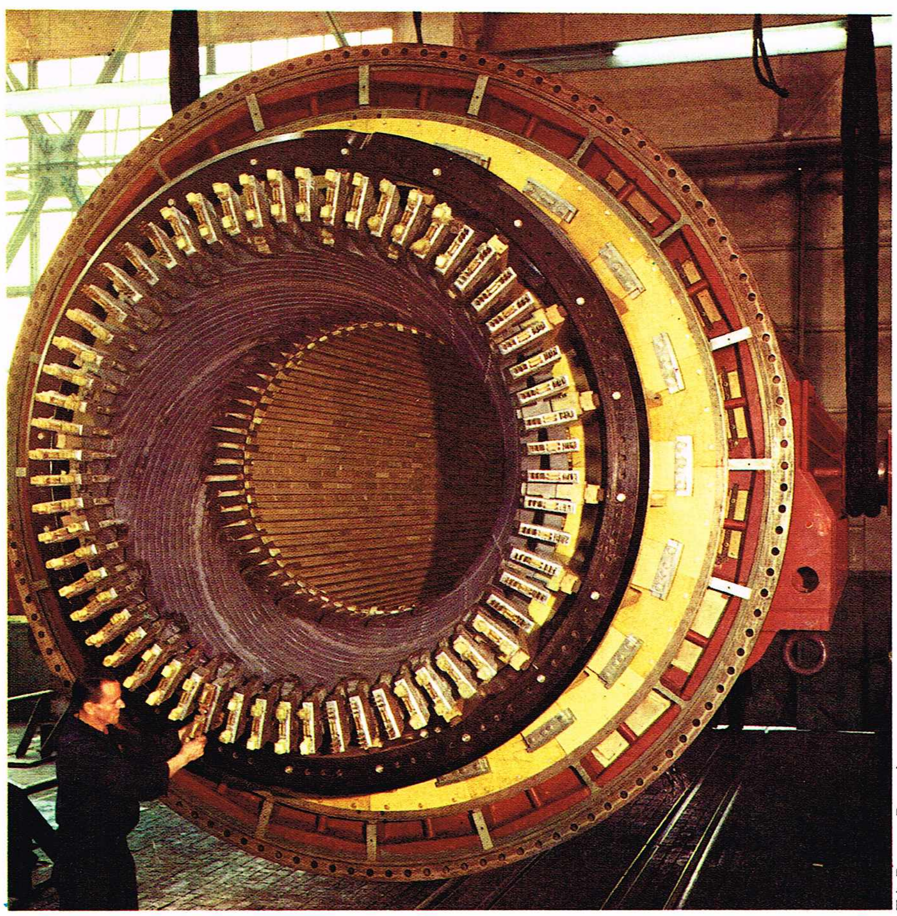

T.I. Brown Boveri

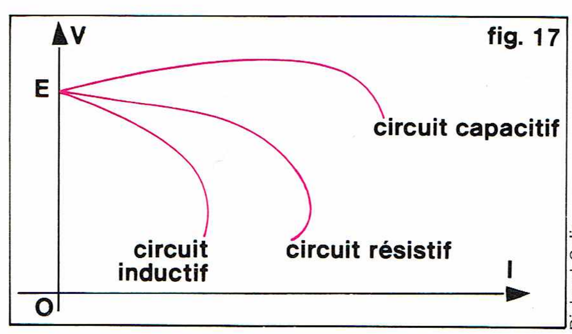

Richard Colin

chrone est constante pour une fréquence imposée, E garde alors une valeur constante. On obtient plusieurs courbes d'allure elliptique selon le facteur de puissance du réseau, comme le montre la *figure* 17.

Une autre série de courbes, dite de Mordey, est parfois donnée. Elle permet de connaître la relation entre le courant d'induit I et le courant d'excitation dans l'inducteur I_e lorsque la machine synchrone échange une puissance constante ($P = VI \cos \varphi$) avec le réseau extérieur (*fig.* 18).

Démarrage d'un moteur synchrone, couplage sur le réseau

Les moteurs synchrones ne démarrent pas seuls : il faut par un moyen quelconque les amener à la vitesse de synchronisme $\frac{\omega}{p}$ $\left(\text{ou } \frac{60\,f}{p} \text{ en tours/mn}\right)$ définie par l'induit. Pour les petits moteurs, il suffit de les lancer à la main à une vitesse égale ou supérieure à la vitesse de synchronisme. Pour les moteurs plus importants, il faut les coupler sur le réseau grâce à une machine annexe, par exemple un moteur à explosion ou une turbine. Enfin on peut parfois les faire démarrer en fonctionnement asynchrone grâce à leurs amortisseurs (voir ultérieurement). En effet, tant que le rotor n'atteint pas la vitesse de synchronisme, il n'y a pas de f. c. é. m. induite à la fréquence du réseau d'alimentation : il s'établit alors un battement, et le couple moyen est nul sur une période.

Calcul du couple, et limite de décrochage

On peut calculer le couple d'une machine synchrone de manière approximative en faisant le bilan des puissances : la puissance échangée avec le réseau est, pour un système à q phases : $qVI \cos \varphi$. Elle se retrouve, au rendement près, sur l'arbre qui tourne à la vitesse de synchronisme $\frac{\omega}{p}$ (en radians par seconde). Le couple vaut donc :

$$C = \frac{qVI \cos \varphi}{\frac{\omega}{p}}$$

Mais en observant les *figures* 15 et 16, on remarque que, en projetant sur un axe orthogonal à V :

$$XI \cos \varphi = E \sin \theta$$

L'angle θ que fait $\bar{V}$ avec $\bar{E}$ est appelé angle de décalage interne : si θ atteint $\mp \frac{\pi}{2}$, la machine synchrone « décroche » : elle va s'arrêter si elle fonctionne en moteur, ou ne plus délivrer de puissance si elle fonctionne en alternateur.

Machine synchrone monophasée

Dans une telle machine, le courant passant dans l'induit engendre un champ alternatif donné par **(16)**, et l'application du théorème de Leblanc, vu précédemment, indique qu'il peut se décomposer en deux champs tournant à la vitesse $\mp \frac{\omega}{p}$. Les résultats précédents s'appliquent à l'un d'eux. L'autre se déplace par rapport au rotor à la vitesse $\frac{2\,\omega}{p}$: on peut lui appliquer à nouveau le théorème de Leblanc en le décomposant en deux champs tournants $\mp \frac{2\,\omega}{p}$ conduisant à des vitesses $-\frac{\omega}{p}$ et $\frac{3\,\omega}{p}$ etc. On constate donc que la f. é. m. de l'alternateur monophasé contient des termes de fréquence $3\,f$, $5\,f$... en plus du terme principal de fréquence f. Pour étouffer ces harmoniques, on utilise un amortisseur, sorte de cage d'écureuil placée dans les pièces polaires de l'inducteur. Les machines synchrones monophasées sont des machines de très faibles puissances dont le rotor est souvent un aimant permanent.

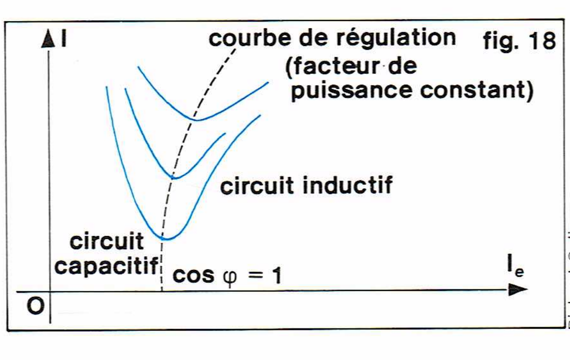

Richard Colin

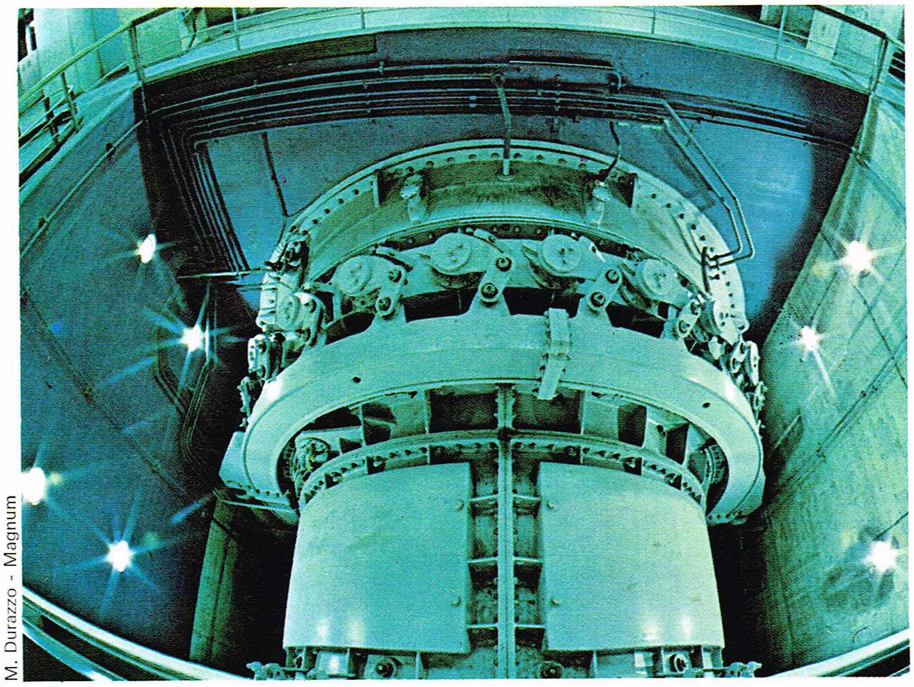

M. Durazzo - Magnum

▲ *Turbines équipant l'usine marémotrice de la Rance (France).*

Compensateur synchrone

La puissance active échangée avec le réseau est, pour une phase, $P = VI \cos \varphi$. La puissance réactive est $Q = VI \sin \varphi$. Si l'on observe les diagrammes de la *figure* 16, on constate que P garde un signe constant; par contre, Q passe d'une valeur positive à une valeur négative en accroissant simplement E, donc le courant d'excitation de l'alternateur. Un compensateur synchrone est un cas particulier d'utilisation en moteur dont la tension et la puissance active sont maintenues constantes. Mais le réglage de la puissance réactive s'effectue par le courant d'excitation. Un compensateur synchrone peut remplacer ainsi une batterie de condensateurs pour améliorer le facteur de puissance du réseau sur lequel il est couplé.

Les machines asynchrones, ou machines d'induction

Si, initialement, les premières machines d'induction furent imaginées pour fonctionner en génératrice par Ferraris et Tesla, elles sont maintenant surtout utilisées en moteur. Signalons toutefois que l'E. D. F. a équipé de basses chutes d'eau de groupes bulbes constitués d'une turbine et d'une génératrice asynchrone (usine marémotrice de la Rance en particulier). D'autre part, les machines asynchrones peuvent être utilisées en changeur de fréquence. La gamme usuelle de fréquences va de quelques watts (moteur de puissance fractionnaire, c'est-à-dire inférieure à 1 kW) à 1 mégawatt. Leur rendement dépend très largement de la vitesse, comme nous allons le voir, et est de l'ordre de 80 %.

Principe

Considérons des conducteurs placés sur un rotor, comme l'indique la *figure* 19, refermés sur eux-mêmes en court-circuit. Plaçons ce rotor dans un champ tournant radial à la vitesse de synchronisme $\frac{\omega}{p}$. En tournant, le champ coupe les inducteurs et y induit des f. é. m. qui, à leur tour, sont à l'origine de courants dans les conducteurs mis en court-circuit. Il y a alors une force de Laplace qui produit le couple. Le sens de rotation est donné par la loi de Lenz : les conducteurs sont entraînés dans le sens du champ tournant de manière à recueillir le flux maximal.

◀▼ ***A gauche, figure 18 : courbes en V de Mordey obtenues à tension et puissance constantes ($P = 3\,VI \cos \varphi$ en triphasé). Ci-dessous, figure 19 : réalisation de principe du rotor bobiné d'une machine asynchrone diphasée.***

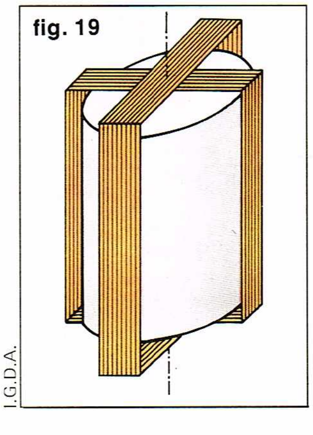

I.G.D.A.

fig. 20

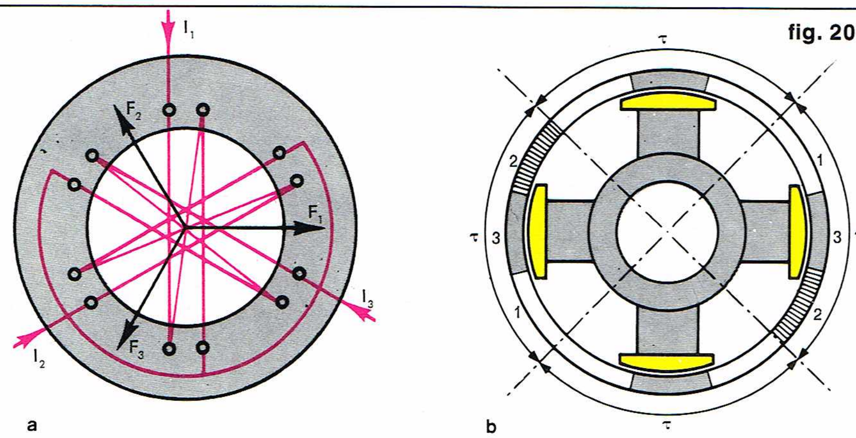

fig. 21

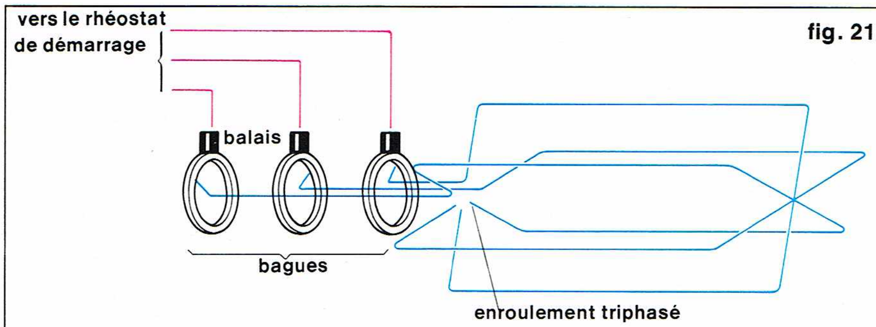

▲ *En haut, figure 20.* a) *Stator d'une machine asynchrone ou synchrone triphasée bipolaire : création d'un champ tournant.* b) *Stator d'une machine asynchrone ou synchrone comportant deux paires de pôles. La différence entre ces deux types de machines réside dans la manière dont est bobiné le rotor : il est en court-circuit et polyphasé pour une machine asynchrone; il est alimenté en courant continu de manière à constituer une succession de pôles Nord et Sud pour une machine synchrone. Si la fréquence d'alimentation est 50 Hz, la vitesse de synchronisme est ici de 1 500 tours/minute.*
Ci-dessus, figure 21 : rotor bobiné avec bagues d'une machine asynchrone triphasée.

fig. 24

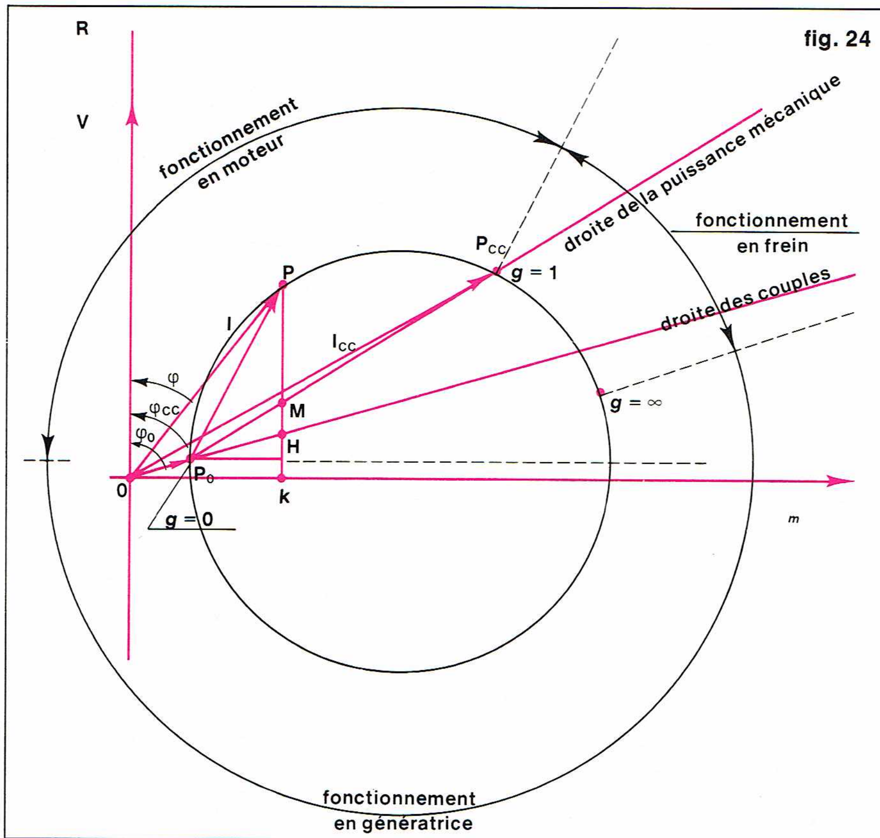

Pratiquement, le stator est polyphasé et analogue à celui des machines synchrones. La *figure* 20 montre un exemple de câblage pour une machine triphasée à deux paires de pôles ($p = 2$).

Le rotor portant des enroulements polyphasés est mis en court-circuit, soit directement pour les faibles puissances, ou bien grâce à un jeu de bagues par le rhéostat de démarrage, dont il sera question ultérieurement. La *figure* 21 montre le câblage d'un tel rotor bobiné. Il existe des rotors plus simples dits rotors à cage dont l'enroulement est constitué par des barres de cuivre ou d'aluminium reliées par des anneaux conducteurs (*fig.* 22). Les moteurs d'induction à cage sont les machines électriques tournantes les plus simples de construction et d'utilisation. Ce sont les plus utilisés.

On caractérise le fonctionnement d'une machine asynchrone par son glissement g, variation relative de vitesses du rotor et du champ tournant statique. Si $N_s = \frac{60\,f}{p}$ est la vitesse en tours par minute du champ tournant du stator comportant p paires de pôles et alimenté à la fréquence f et N la vitesse également en tours par minute du rotor,

(22) $$g = \frac{N_s - N}{N_s}$$

g s'exprime par un nombre sans dimension donné souvent en pourcentage. Ainsi, à l'arrêt ($N = 0$), $g = 100\,\%$, et à la vitesse $N = N_s$ (vitesse de synchronisme), $g = 0\,\%$. La vitesse angulaire relative du rotor par rapport au champ tournant est d'après **(19)** et **(22)** :

(23) $$\omega_R = \frac{(N_s - N)}{60}\,2\,\pi \quad \text{soit} \quad \omega_R = g\omega$$

Or, d'après **(18)**, la f. é. m. induite a une pulsation égale à la vitesse du champ inducteur par rapport à la spire, par conséquent ω_R est la pulsation des courants dans le rotor. En particulier, si le glissement est nul, il n'y a plus de courant dans le rotor, donc plus de couple rotorique : une machine d'induction peut fonctionner à toutes les vitesses, sauf à la vitesse de synchronisme. On retrouve là l'origine du qualificatif asynchrone donné également à ces machines concurremment à celui d'induction qui, lui, en rappelle le principe.

Théorie élémentaire

On suppose que la machine est couplée à un réseau de fréquence f et de tension V imposées. A l'arrêt ($g = 1$), la machine se comporte comme un transformateur à champ tournant dont le secondaire est en court-circuit. De là vient l'idée qu'on peut adapter le schéma électrique équivalent du transformateur réel (*cf. fig.* 2) à la machine asynchrone pour laquelle le stator serait le primaire. D'après **(18)** et **(23)**, le module de la f. é. m. E_2 induite dans le rotor dépend de la vitesse relative, donc de g : $\overline{E}_2 = jn_2 g\omega\overline{\Phi}$. Si R_2 et l_2 sont respectivement la résistance et l'inductance de fuite d'une phase rotorique dans laquelle la pulsation est $g\omega$, on a :

$$\overline{E}_2 = (R_2 + jg\omega l_2)\,\overline{I}_2$$

Si on divise par g cette relation, on obtient directement :

$$jn_2\omega\overline{\Phi} = \left(\frac{R_2}{g} + j\omega l_2\right)\overline{I}_2$$

Ainsi, en comparant avec **(3)**, **(4)**, **(8)** et **(9)**, tout se passe comme si nous avions affaire à un transformateur classique dont la résistance rotorique ne serait plus R_2

fig. 22

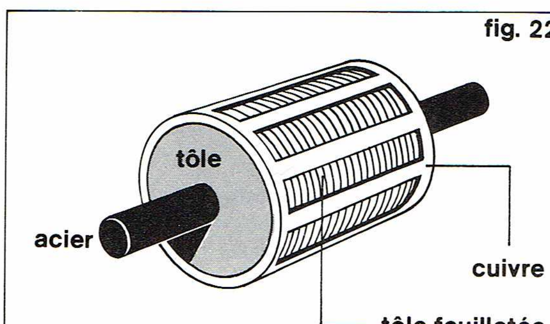

I.G.D.A. — I.G.D.A. — I.G.D.A. — Richard Colin

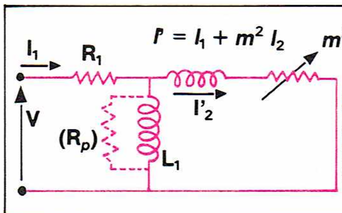

Schéma équivalent électrique d'une machine asynchrone (une phase).

mais $\frac{R_2}{g}$ et dont le secondaire serait en court-circuit. On peut donc reprendre le schéma de la *figure* 2 en multipliant R_2 par $\frac{1}{g}$. Mais il peut être simplifié en appliquant le théorème du transfert d'impédance pour obtenir le schéma définitif de la *figure* 23. Dans la suite, pour alléger les calculs, nous négligerons R_1 et R_p. Ce schéma équivalent permet de tracer le diagramme du cercle des machines asynchrones (*fig.* 24). Ce diagramme représente dans le plan complexe le lieu de l'extrémité du vecteur représentant le courant I_1 échangé avec le réseau lorsque le glissement g varie de $-\infty$ à $+\infty$. On peut lire sur cette sorte d'abaque l'ensemble des grandeurs intéressant le fonctionnement : courant dans le rotor ramené au primaire, facteur de puissance, puissances active et réactive échangées, couple moteur et vitesse...

Courbes caractéristiques

La courbe la plus utile est celle qui donne la valeur du couple en fonction de la vitesse ou du glissement. La puissance active absorbée par une machine vaut pour q phases $P_a = q\,\frac{R'^2}{g}\,I'^2_2$ puisque c'est le seul élément actif du schéma équivalent (*fig.* 23).

Elle se répartit entre les pertes Joule P_j du rotor et la puissance mécanique sur l'arbre P_m. Dans le cas d'un moteur :

$$P_m = P_a - P_j \quad \text{et} \quad P_j = qR'^2 I'^2_2$$

d'où :

(24) $$P_m = (1 - g)\,P_a$$

D'autre part : $$C\Omega = P_m$$

On obtient :

(25) $$C = \frac{Pq}{\omega}\,\frac{V^2}{I'^2\omega^2 + \frac{R'^2}{g^2}}\,\frac{R'}{g}$$

dont la variation avec g est donnée par la *figure* 25. On constate qu'à vitesse nulle ($g = 1$), il existe un couple : un moteur asynchrone peut donc démarrer. On remarque également la possibilité de trois régimes de fonctionnement. Lorsque $0 < g < 1$, le couple est positif : la machine asynchrone fonctionne en moteur. Sa vitesse de rotation est inférieure à la vitesse de synchronisme ($0 < N < N_s$) et le rotor est entraîné par le champ tournant statorique. Lorsque $g > 1$, la vitesse N devient négative, c'est-à-dire que, physiquement, l'arbre tourne dans le sens opposé du champ tournant. Le couple est encore positif, mais la vitesse s'est inversée : on a un freinage du rotor par le champ tournant statorique. Enfin, lorsque g devient négatif, la vitesse N est supérieure à la vitesse de synchronisme N_s et on constate que le couple change de signe : la machine asynchrone fonctionne en génératrice. Il faut entraîner la machine par une turbine pour dépasser N_s.

Démarrage d'un moteur asynchrone

On vient de remarquer que ce moteur peut théoriquement démarrer, mais il faut prendre quelques précautions, sinon, d'une part, l'appel de courant risque de ne pas être supporté par le réseau (l'intensité au démarrage est OP_{cc} sur le diagramme du cercle de la *fig.* 24) et, d'autre part, le couple de démarrage C_d peut être très faible, puisque C_d est très inférieur au couple maximal C_{max} (*cf. fig.* 25). Il existe deux procédés suggérés par la relation **(25)** : la variation de la tension V et celle de la résistance rotorique R′.

La variation de la tension d'alimentation peut être obtenue soit par la mise en place d'un autotransformateur abaisseur (*fig.* 26b), soit par la modification du couplage étoile-triangle des phases du stator (*fig.* 26a). Le courant de démarrage se trouve alors limité.

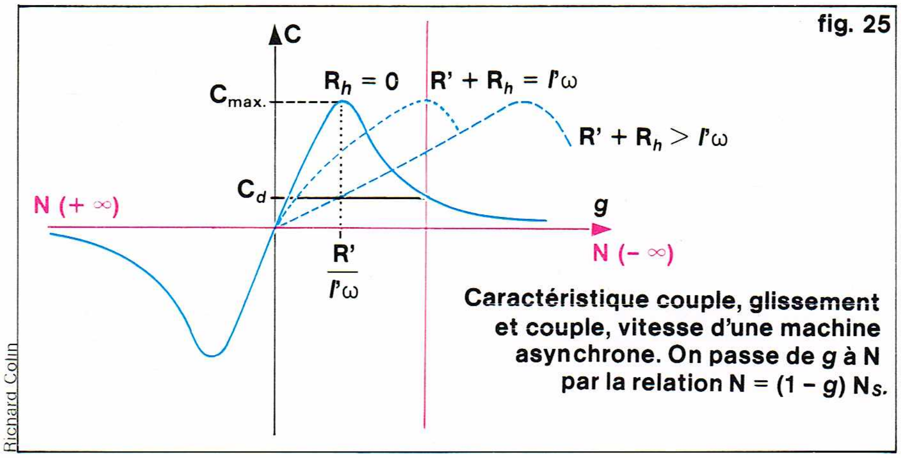

Caractéristique couple, glissement et couple, vitesse d'une machine asynchrone. On passe de g à N par la relation $N = (1 - g)\,N_s$.

L'accroissement du couple de démarrage s'obtient en augmentant pendant le démarrage la résistance rotorique R′. En effet, le couple maximal calculé en dérivant **(25)** se trouve pour la condition $l'\omega = \frac{R'}{g}$: C_m vaut alors $\frac{Pq}{\omega}\,\frac{V^2}{2\,l'\omega}$ c'est-à-dire une valeur indépendante de la résistance rotorique. Si on veut que C_d se confonde avec C_m, il suffit d'ajouter une résistance additionnelle R_h telle que $l'\omega = R' + R_h$. Pour des questions de stabilité et pour ne pas dépasser le point de rupture mécanique de l'accouplement, on prend en général une valeur supérieure (*cf. fig.* 25). Pour les machines à rotor bobiné (*cf. fig.* 21), on dispose un rhéostat de démarrage à trois enroulements qui est mis progressivement en court-circuit. Pour les machines à cage d'écureuil (*cf. fig.* 22), la résistance rotorique est importante, et le rhéostat de démarrage est supprimé. Mais on peut adopter un procédé astucieux, fondé sur l'effet de peau des conducteurs rotoriques parcourus par des courants de pulsation égale à $g\omega$. Au démarrage ($g = 1$), la fréquence est relativement élevée, et les conducteurs présentent une surface active faible. Au fur et à mesure que la vitesse augmente, le glissement devient plus faible, et les conducteurs sont parcourus par des courants à très basse fréquence, donc sans effet de peau : la résistance diminue.

Pour accentuer cet effet, les conducteurs sont placés soit selon une double cage soit dans des encoches profondes.

Rendement

Les machines asynchrones sont d'une grande simplicité. Malheureusement, leur rendement est faible (80 %). Il peut s'évaluer à partir de **(24)** : le rapport de la puissance

◀ *Page ci-contre, en bas, à gauche, figure 24 : diagramme du cercle d'une machine asynchrone. L'axe des ordonnées est l'axe des réels, porté par la tension simple d'alimentation V. On lit successivement :* OP_0, *courant à vide ;* P_0P, *courant secondaire ramené au primaire ;* OP, *courant échangé avec le réseau ; cos φ, facteur de puissance ;* OP_{cc}, *courant de court-circuit lorsque le rotor est bloqué (g = 1) ;* Pk, *puissance active absorbée pour le point de fonctionnement courant ;* PM, *puissance mécanique ;* PH, *couple électromagnétique ;* MH, *pertes Joule rotoriques.*

◀ *Page ci-contre, en bas, à droite, figure 22 : rotor à cage d'écureuil d'une machine asynchrone.*

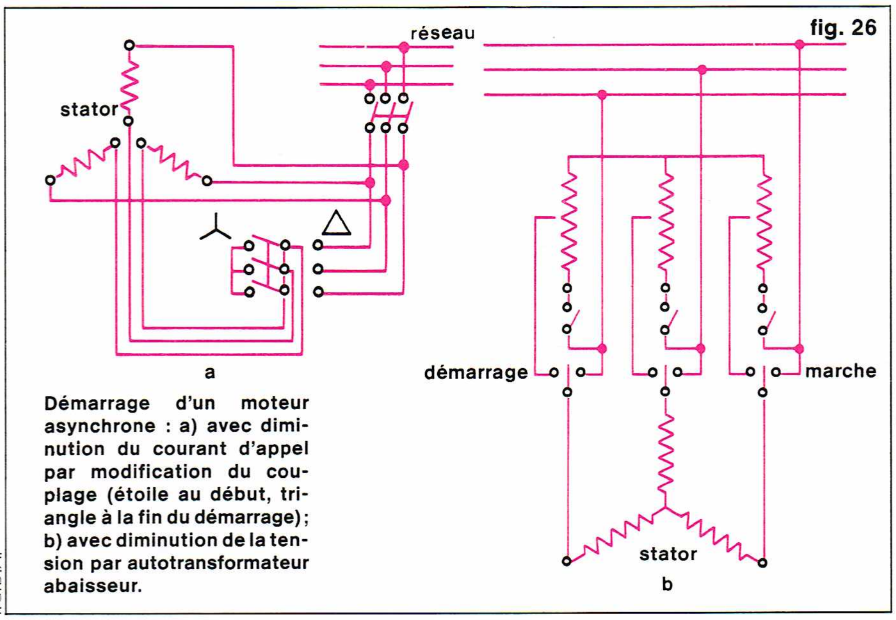

Démarrage d'un moteur asynchrone : a) avec diminution du courant d'appel par modification du couplage (étoile au début, triangle à la fin du démarrage) ; b) avec diminution de la tension par autotransformateur abaisseur.

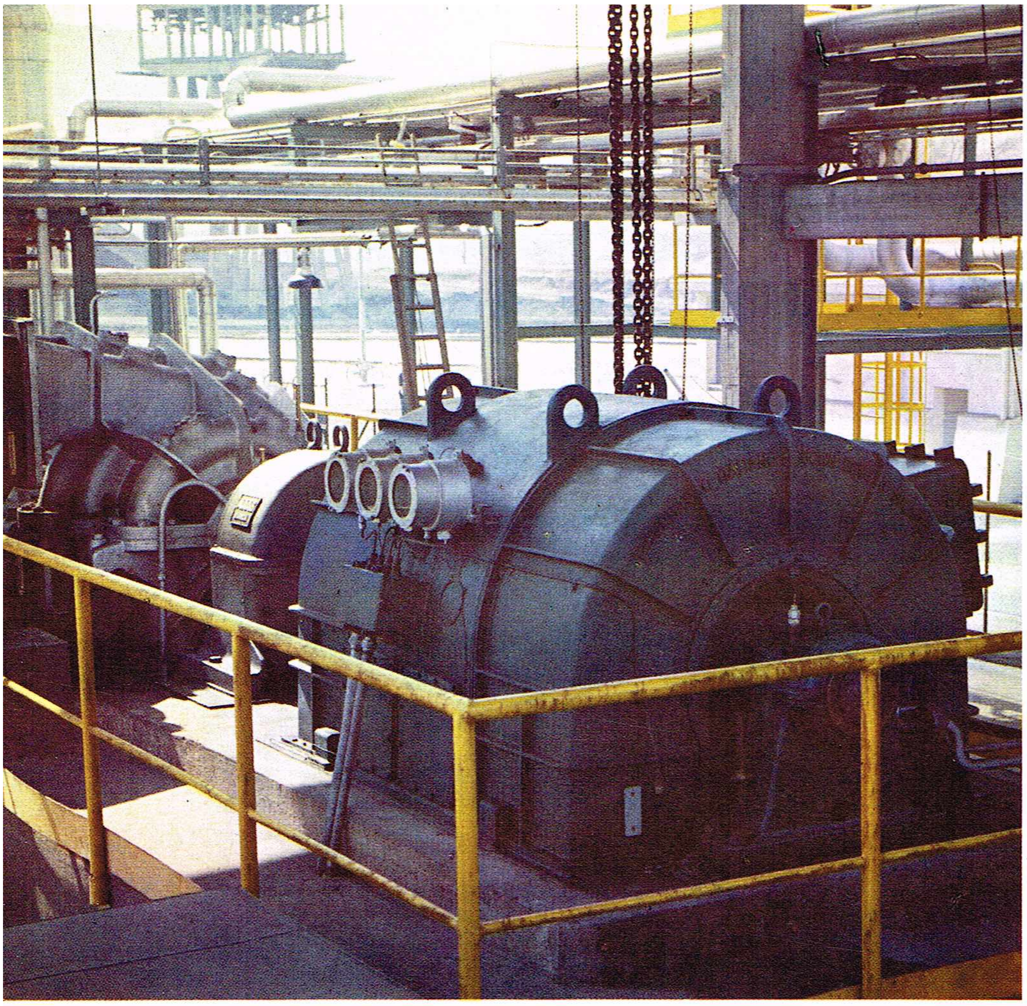

T.I. Brown Boveri

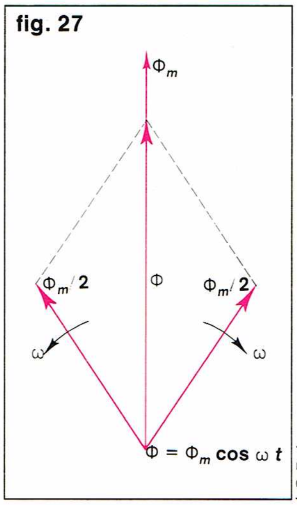

I.G.D.A.

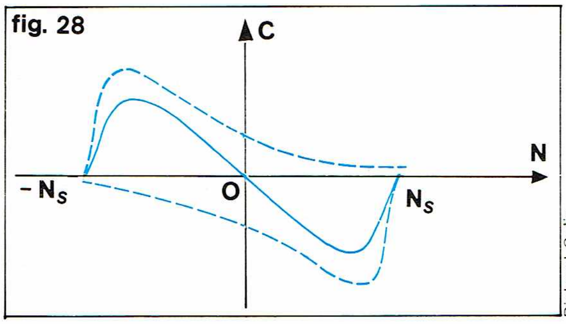

Richard Colin

▲▶ En haut, moteur asynchrone triphasé à cage de 3 600 kW, 6 kV, 1 500 tours/minute, en service dans une usine de chimie. Ci-dessus, figure 27 : décomposition d'un champ alternatif sinusoïdal en deux champs tournants d'amplitude constante, égale à la moitié de la valeur maximale du champ sinusoïdal mais tournant en sens contraire. Ci-contre, figure 28 : caractéristique couple-vitesse d'un moteur asynchrone monophasé; elle est obtenue par la superposition de deux couples résultant des deux champs tournants opposés.

mécanique à la puissance absorbée est $1 - g$. Encore cette valeur est-elle optimiste, puisqu'il n'est tenu compte d'aucune autre perte que les pertes Joule rotoriques. C'est pourquoi les glissements des machines de forte puissance ne dépassent pas quelques pour cent. En fonctionnement en génératrice, le rendement théorique maximal est $\frac{1}{1-g}$. En outre, d'après le diagramme du cercle, on peut voir qu'à tous les régimes de fonctionnement, les machines asynchrones consomment de la puissance réactive.

Moteur asynchrone monophasé

Comme pour les machines synchrones de ce type, l'application du théorème de Leblanc permet de décomposer le champ statorique en deux champs tournant à une vitesse égale mais de sens opposé (*cf. fig.* 27). Le rotor étant toujours polyphasé (bobiné ou à cage), le couple résultant est la somme des couples engendrés par chacun des champs tournants et s'obtient par la superposition de deux caractéristiques semblables à celles de la *figure* 25, mais décalées de la quantité 2 N_S (*fig.* 28).

On constate que le couple au démarrage est nul. Le démarrage peut s'effectuer en lançant le rotor dans un sens ou dans un autre. Mais, industriellement, on monte une phase auxiliaire utilisée pendant le démarrage. Un champ tournant diphasé est créé à partir de l'alimentation unique par une dérivation au travers d'une capacité ou d'une self et d'une résistance en série. Dans ce dernier cas, la self de la phase auxiliaire suffit en général et il n'y a donc qu'une simple résistance.

Pour les micromoteurs (quelques dizaines de watts) utilisés dans l'électroménager ou les servomécanismes industriels, on remplace la phase auxiliaire par deux bagues de déphasage en cuivre entourant une partie des pièces polaires du stator.

Association de machines asynchrones : l'arbre électrique et liaison de téléaffichage

Un tel montage, appelé parfois Selsyn, est un ensemble de deux machines asynchrones, dont les rotors bobinés sont montés en série, alors que les stators sont alimentés en parallèle sur la même source. On peut échanger les rôles des stators et des rotors. Si l'arbre de la première machine est déplacé, l'arbre de la seconde est entraîné également : en régime statique, on a une liaison de téléaffichage; en régime dynamique, on a un « arbre électrique » analogue dans ses effets à une liaison mécanique rigide, car le couple est intégralement transmis. L'explication réside dans la loi de Lenz, les champs tournants statoriques et rotoriques de la seconde machine vont chercher à s'aligner en entraînant le déplacement de l'arbre d'un angle convenable.

Moteur linéaire

Depuis quelques années, un grand intérêt a été porté aux moteurs linéaires, essentiellement dans le domaine de la traction. Le principe de ces machines est identique à celui des machines asynchrones précédentes. Imaginons un stator de machine asynchrone comportant plusieurs pôles, développé à plat, et associons-lui un deuxième stator identique placé en face de manière à créer un entrefer assez étroit pour que les lignes de champ soient bien transversales. Le champ créé par le système polyphasé devient glissant. Si maintenant se trouve disposé dans l'entrefer une plaque métallique, des courants seront induits et la force de Laplace produira un mouvement rectiligne. L'armature polyphasée peut être mobile si l'induit est un rail, c'est le cas de l'aérotrain à moteur linéaire, ou bien inversement, si l'armature polyphasée est fixe, l'induit, simple plaque métallique, est mobile comme dans le cas des matériels de manutention et des servomécanismes.

Machines à courant continu

Les machines à courant continu furent les premières machines électriques à être réalisées. En effet, les chercheurs du début du XIX[e] siècle se sont ingéniés à remplacer les générateurs électrochimiques, tels que la pile de Volta connue depuis 1800, par des générateurs électromécaniques délivrant plus de puissance et qui ont été appelés dynamos.

Clark et Siemens présentèrent la première réalisation, mais en utilisant un aimant permanent pour inducteur. Pacinotti (1863) réalisa un premier moteur de faible puissance sans aimant. Mais c'est à Gramme qu'on doit le progrès décisif avec l'invention du collecteur (1871), dont la présentation actuelle est donnée quelques années plus tard par Hefner-Alteneck. C'est à cette époque que l'électrotechnique commence à pénétrer dans l'industrie et que dynamo et moteur apparurent comme étant des machines identiques fonctionnant sous un régime différent.

Actuellement, malgré le développement considérable du courant alternatif, on a encore besoin de disposer de courant continu pour la charge des batteries d'accumulateurs, l'électrolyse et l'excitation des machines synchrones. En fait, ces applications sont appelées à diminuer beaucoup avec le développement de l'électronique de puissance que nous verrons ultérieurement. Par contre, les moteurs à courant continu sont indispensables dans les applications industrielles nécessitant un fonctionnement à vitesse variable dans une large gamme.

Principe

Une machine à courant continu comporte un inducteur fixe constitué de pôles saillants successivement Nord et Sud créés par des bobinages convenables, un induit mobile bobiné en série et un collecteur, système mécanique assurant le redressement des f. é. m. induites dans le rotor. Les bobinages inducteurs sont parcourus par un courant d'excitation continue. La *figure* 29 donne la configuration d'une telle machine en se limitant à un ensemble bipolaire et en adoptant un bobinage en anneau sur le rotor. Cette disposition, imaginée par Gramme,

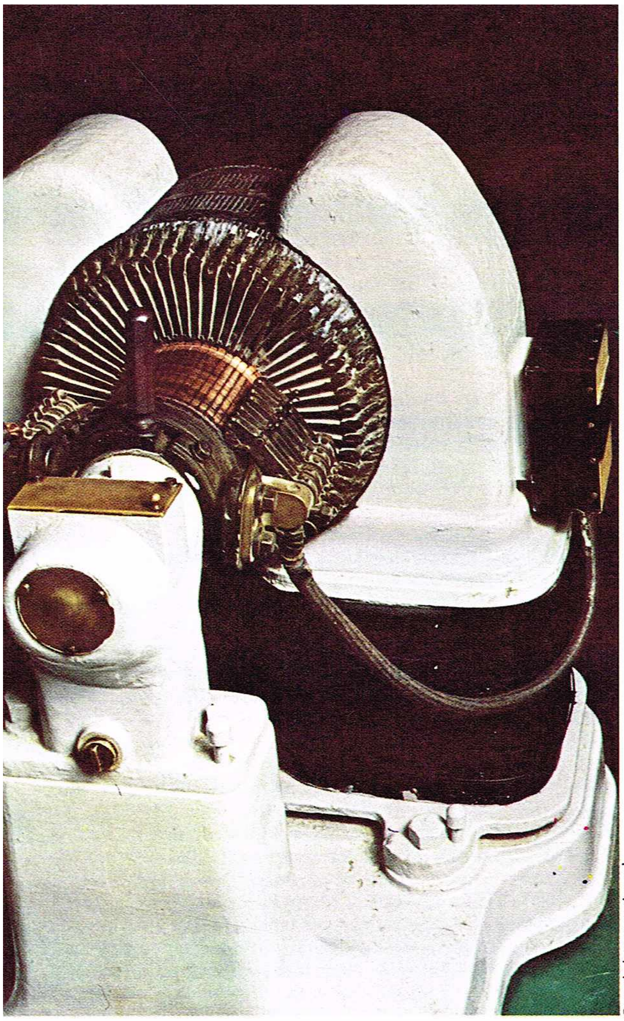

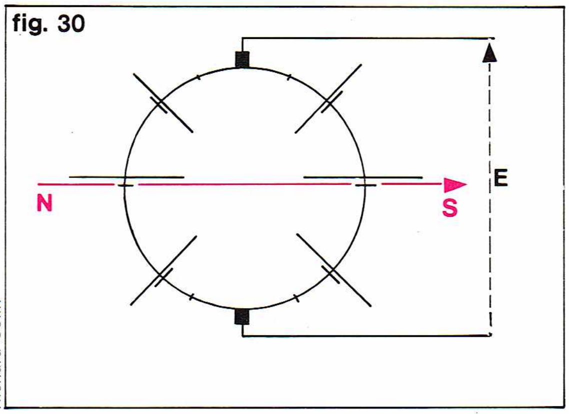

Richard Colin

◀ *A gauche, la dynamo de Gramme, proposée en 1871, fut le premier convertisseur électromécanique pratique. A droite, figure 30 : répartition des f. é. m. induites à un instant donné dans un rotor de machine à courant continu bipolaire. Chaque f. é. m. est représentée par un symbole dont la taille est proportionnelle à sa valeur, les polarités sont respectées.*

▼ *Figure 31 ; tension E recueillie expérimentalement : il y a une légère ondulation due au nombre fini de spires.*

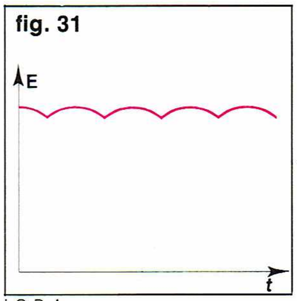

I.G.D.A.

Snark International

n'est plus utilisée, mais elle permet une explication plus simple.

D'après le calcul des f. é. m. induites dans un enroulement et avec les notations antérieures, en particulier si α est l'angle de la normale à la spire avec l'axe du champ, on a vu que e est d'autant plus faible que α est voisin de 0 ou π, et maximale pour $\alpha = \mp \frac{\pi}{2}$.

Ainsi les spires parallèles à l'axe N.-S. donnent la plus grande f. é. m. Celles qui sont orthogonales ne génèrent pas de f. é. m. La *figure* 30 résume ces résultats : le symbole de chaque f. é. m. est proportionnel à son module.

Comme toutes les spires sont en série, la somme globale est nulle, sauf si on prélève les tensions entre les points A et B. On appelle ligne neutre la ligne AB orthogonale à N.-S. Le raisonnement qui vient d'être fait est valable pendant un court instant. Mais si les contacts A et B restent fixes, alors que les spires tournent, on gardera une somme constante de f. é. m., et on aura généré une tension continue. En réalité, les tensions prélevées sont sinusoïdales (*cf.* **18**), et il en résulte une légère ondulation, comme l'indique la *figure* 31. Cette ondulation est d'autant plus faible qu'il y a plus de spires. On n'en tiendra pas compte ultérieurement. Calculons la f. é. m. induite entre A et B en supposant n spires uniformément réparties sur la circonférence.

Chaque spire fournit une tension élémentaire *de*, telle que :

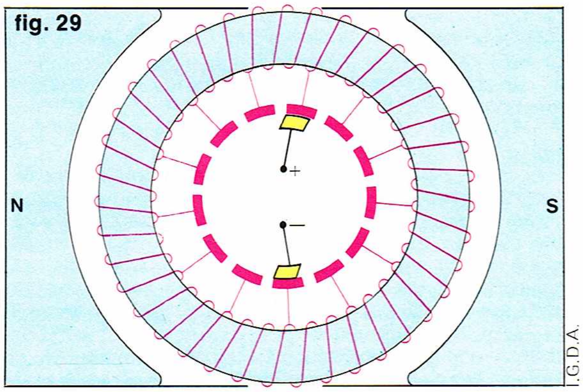

I.G.D.A.

$$de = \Omega n B \frac{S}{2} \sin \alpha \frac{d\alpha}{2\pi}$$

d'où

$$E = \int_0^{\pi} de = \frac{1}{2\pi} n \Omega \Phi$$

en remarquant que, si S est la section totale du fer du rotor, une spire de l'anneau n'a qu'une section $\frac{S}{2}$. Pour tenir compte d'autres éléments comme le nombre de paires de pôles, le coefficient de bobinage, le nombre de tours exprimés par minute et le nombre de voies d'enroulement (c'est la manière dont les f. é. m. sont couplées en série ou en parallèle lorsqu'il y a plusieurs paires de pôles), on écrira que :

(26) $$E = kNn\Phi$$

Ainsi tout le principe de fonctionnement repose sur le collecteur qui assure la sommation des f. é. m. élémentaires à chaque instant. Le collecteur se compose d'une succession de lames conductrices isolées les unes des autres par de fines lamelles isolantes en mica. Les lames sont placées sur la circonférence d'un cylindre solidaire de l'arbre du rotor et sont reliées chacune à une spire du rotor (*cf. fig.* 29). Elles défilent devant deux balais fixes qui sont reliés à la plaque à bornes de la machine. Ces balais sont constitués de graphite — parfois nommé charbon — et ont une forme parallélépipédique. Pour assurer un bon contact avec les lames, ils sont maintenus avec des ressorts. C'est le point délicat des machines à courant continu en raison de l'usure mécanique et des étincelles provenant de la commutation des courants dans les spires qui passent devant eux.

Signalons enfin que le montage en anneau qui nous a servi pour une présentation plus simple est abandonné au profit du bobinage en tambour.

Théorie élémentaire

La relation **(26)** permet de se ramener à l'étude d'une simple source ou récepteur à courant continu. Si R est la résistance de l'induit, et V la tension aux bornes de l'induit, on a :

en moteur :

(27) $$V = E + RI$$

en génératrice :

(28) $$V = E - RI$$

Le couple s'évalue à partir de la conservation de la puissance :

$$EI = C\Omega$$

d'où :

(29) $$C = 60 \frac{nk}{2\pi} \Phi I$$

Le flux Φ est produit par le courant continu circulant dans l'inducteur. On peut donc soit avoir deux sources distinctes (cas des machines à excitation séparée), soit avoir une alimentation unique et alimenter l'induit et l'inducteur en parallèle (excitation shunt) ou en série (montage en excitation série). Les montages shunt et série conduisent à des propriétés complémentaires, aussi existe-t-il encore la possibilité de coupler l'enroulement d'excitation en deux parties et d'en monter une partie en série et l'autre en parallèle : on dit alors qu'on a un montage en excitation compound.

◀ *Figure 29 : induit de machine à courant continu bipolaire bobiné en anneau de Gramme avec son collecteur.*

▶ ***Figure 32 :*** ***génératrice à courant continu montée en excitation indépendante et débitant sur une résistance de charge*** R_c. ***Le potentiomètre*** r ***sert à régler le courant d'excitation.***

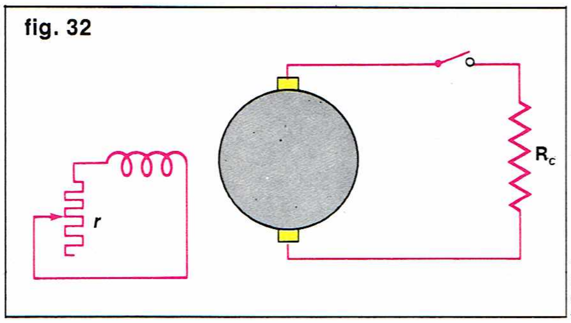

I.G.D.A.

▶ ***Figure 33 :*** ***génératrice à courant continu montée en excitation shunt.***

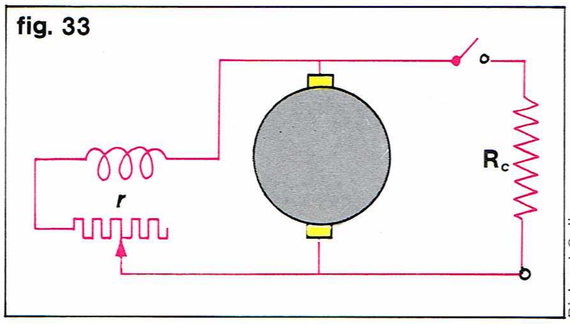

Richard Colin

▶ ***Figure 34 :*** ***génératrice à courant continu montée en excitation série. Remarquer que le potentiomètre de réglage*** r ***est alors disposé en parallèle sur l'enroulement d'excitation.***

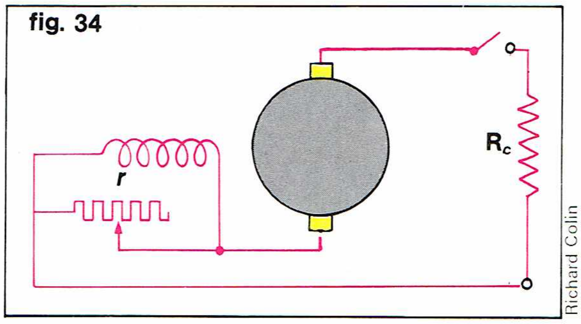

Richard Colin

▶ ***Figure 35 ;*** ***machine à courant continu à excitation compound :*** a) ***montage courte dérivation ;*** b) ***montage longue dérivation.***

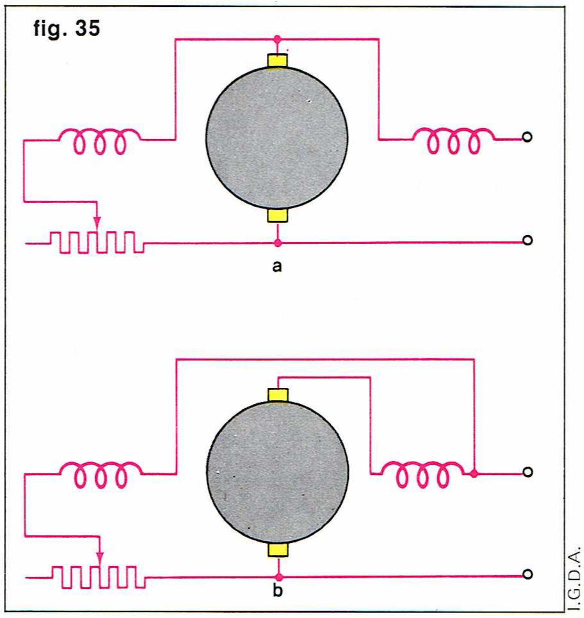

I.G.D.A.

Les *figures* 32, 33, 34, 35 montrent les différents montages qui sont communs au fonctionnement en génératrice et en moteur. Il a été ajouté des rhéostats de réglage du courant d'excitation, indispensables pour assurer l'ajustage de la vitesse, du couple (cas d'un moteur) ou de la tension (cas d'une génératrice).

— *Courbes caractéristiques à vide*

Si l'on considère la *figure* 32, dans laquelle l'interrupteur mettant en circuit la résistance de charge R_e serait ouvert, et si l'on entraîne la génératrice par un moteur auxiliaire à vitesse N constante, on dit qu'on a le fonctionnement à vide. La tension prélevée aux bornes est E. La courbe reliant E au courant d'excitation I_e est appelée caractéristique à vide : en première approximation c'est une droite passant par l'origine, mais en raison de la présence du fer, on constate saturation et hystérésis (*fig.* 36).

D'après **(26)**, de cette caractéristique on peut déduire par affinité les courbes à vide pour d'autres vitesses. En effet, pour un I_e, donc un flux Φ donnés, mais pour deux vitesses N_1 et N_2 différentes, les f. é. m. E_1 et E_2 vérifient :

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

— *Courbes caractéristiques externes d'une génératrice*

Ce sont les courbes donnant la tension de sortie V en fonction du courant I débité lorsque la génératrice est entraînée à vitesse constante et que la résistance totale du circuit d'excitation r n'est pas modifiée. Si R est la résistance d'induit, aux bornes de l'induit, la relation **(28)** est toujours vérifiée, mais les différents couplages modifient la tension de sortie globale.

En excitation séparée, la caractéristique à vide est la droite d'équation $V = E - RI$, dont l'ordonnée à l'origine est fixée par la valeur de la f. é. m. à vide correspondant au courant d'excitation et à la vitesse (*fig.* 37 - V_1).

En excitation shunt (*fig.* 33), on peut prévoir que, plus la génératrice débite, et moins sa tension aux bornes de l'induit est grande, mais ce dernier facteur influence à son tour le courant d'excitation qui diminuera, entraînant finalement une chute de tension en charge plus marquée qu'en excitation séparée (*fig.* 37 - V_2).

En excitation série (*fig.* 34), le courant d'induit et celui de l'inducteur sont égaux ($I = I_e$) : $V = E (R + r) I$. La caractéristique ressemble à une courbe à vide dont le coude est plus marqué.

En excitation compound, l'influence du bobinage série compense la chute de tension constatée, et la caractéristique V (I) est à peu près horizontale.

En liaison avec la saturation, on constate, pour des valeurs de I voisines de la valeur nominale et dans les machines non compensées, un phénomène supplémentaire de chute de tension appelé réaction magnétique d'induit. La réaction d'induit correspond à un affaiblissement du flux inducteur par le flux créé par l'induit parcouru par un courant intense. On y remédie par l'adjonction de pôles auxiliaires et, pour les machines très puissantes, par des enroulements de compensation.

Amorçage d'une génératrice

On appelle amorçage la phase de fonctionnement qui voit croître le courant d'induit au moment du branchement de la charge. A la différence des génératrices à excitation séparée ou série pour lesquelles l'amorçage se fait dans tous les cas, la génératrice shunt, qui doit créer son propre courant inducteur, exige deux conditions. La première est qu'il est nécessaire qu'une f. é. m. rémanente existe. Bien que très faible (2 % de la valeur nominale), cette f. é. m. qui résulte de la rémanence du champ inducteur est suffisante pour faire circuler un petit courant inducteur. Il faut évidemment que le sens de ce courant renforce l'effet de la f. é. m. rémanente. S'il n'en était pas ainsi, il faudrait soit permuter les bornes du circuit inducteur, soit faire tourner le rotor dans l'autre sens. Cette première condition n'est pas suffisante : il faut en outre que la droite des inducteurs $V = rI_e$ coupe la courbe à vide en un point donnant une f. é. m. à vide suffisante (point A de la *fig.* 36). Si la résistance r du circuit inducteur est supérieure à la pente à l'origine de la caractéristique à vide, il n'y aura pas de point de fonctionnement valable.

— *Courbes caractéristiques couple en fonction de la vitesse des moteurs à courant continu*

Le moteur est alimenté par un réseau à courant continu dont la tension V est maintenue constante. Le moteur entraîne une charge (par exemple une génératrice débitant sur un réseau) présentant un couple résistant C_r. En régime établi, couple résistant et couple moteur sont égaux, et on relève la valeur de ces couples en fonction de la vitesse de rotation sans faire varier la résistance r du circuit d'excitation.

Il n'y a pas de différence de comportement pour un moteur à excitation shunt ou à excitation séparée. A

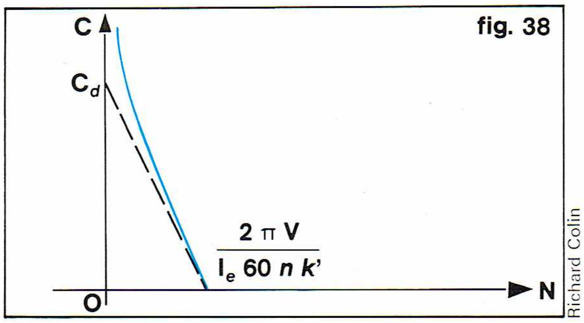

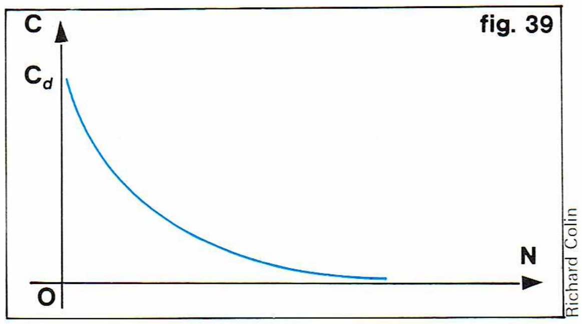

◀ *A gauche, figure 38 : caractéristique de couple d'un moteur à excitation shunt ou à excitation séparée pour une valeur constante et égale à I_e du courant d'excitation. A droite, figure 39 : caractéristique couple-vitesse d'un moteur à courant continu à excitation série.*

partir du système **(28)** et **(29)**, en faisant l'approximation supplémentaire que Φ est proportionnel à I_e, on a pour ce type de montage, après élimination de I :

$$\textbf{(30)} \qquad C = \frac{60\,k'\,I_e}{2\pi\,R}\left[V - \frac{60\,nk'}{2\pi}\,N I_e\right]$$

La caractéristique C (N), à I_e constant, est donc une droite dont l'ordonnée à l'origine (couple au démarrage C_d) est proportionnelle à la valeur du courant d'excitation I_e et à la tension d'induit V. Pour les machines puissantes, à cause de la réaction d'induit, la courbe se déforme (*fig.* 38).

Si, au cours du fonctionnement, le circuit d'excitation n'est plus alimenté, il subsiste le rémanent, et la vitesse prend une valeur théoriquement infinie : pratiquement, la machine s'emballe, et il est indispensable d'annuler la tension d'alimentation, faute de quoi le rotor peut exploser en raison de la force centrifuge atteinte.

Pour un moteur série, $I_e = I$ et l'élimination de I à partir de **(28)** et **(29)** conduit à :

$$C = \frac{60}{2\pi}\,k' I^2$$

or

$$V = \left[k'\,\frac{60\,n}{2\pi}\,N + R\right] I$$

d'où :

$$\textbf{(31)} \qquad C = \frac{60\,k'}{2\pi}\,\frac{V^2}{\left(R + k'\,60\,\frac{n\,N}{2\pi}\right)^2}$$

La courbe obtenue a une allure hyperbolique. Au démarrage, le couple vaut $C'_d = \frac{60\,k'\,V^2}{2\pi\,R^2}$. Ce couple est, toutes choses égales d'ailleurs, très supérieur à C_d car la résistance R de l'induit est beaucoup plus faible que la résistance de l'inducteur d'une machine shunt ou séparée $\left(I_e = \frac{V}{r}\right)$. D'autre part, l'allure hyperbolique (*fig.* 39) est très favorable à un fonctionnement à puissance constante ($C\Omega = K$ est une hyperbole équilatère). Enfin, comme la vitesse tend vers l'infini lorsque le couple tend à s'annuler, un moteur série doit être constamment chargé par un couple résistant, sinon il y a emballement. Toutes ces raisons rendent le couplage à excitation série idéal pour la traction électrique (locomotives, monte-charge...).

Les moteurs compound ont des caractéristiques intermédiaires.

Pour l'ensemble de ces machines, on voit que le réglage de la vitesse est rendu possible simplement par action sur le courant d'excitation, obtenue par simple variation d'un rhéostat mis en série avec le bobinage inducteur et dont la valeur a été dans nos équations incorporée à celle du bobinage lui-même.

Démarrage des moteurs à courant continu

Lorsque la vitesse est nulle, il n'existe pas encore de f. é. m. E, et le courant d'induit $I = \frac{V}{R}$ est très intense. Pour le ramener à une valeur compatible avec les normes de construction de la machine, par exemple une fois et demie la valeur nominale I_n, on dispose en série avec l'induit un rhéostat à plots appelé rhéostat de démarrage, dont les résistances sont progressivement éliminées au fur et à mesure que la vitesse, donc la f. é. m. E, s'accroît...

Utilisation des machines à courant continu

Les génératrices shunt à courant continu sont utilisées dans l'industrie automobile bien qu'elles soient en passe d'être supplantées par des alternateurs avec redresseurs pour la charge des batteries. Les moteurs à courant continu essentiellement « série » sont beaucoup plus utilisés : démarreur d'automobile, moteur de locomotives. Dans ce dernier cas, bien que l'alimentation s'effectue sur les réseaux les plus récemment électrifiés en courant alternatif 25 000 V, 50 Hz, on place dans chaque locomotive un transformateur abaisseur et un dispositif de redressement. On utilise des moteurs dont la puissance est de l'ordre de 1 000 kW. D'autre part, d'après **(31)**, le couple étant proportionnel au carré de la tension, un moteur série peut être alimenté en alternatif ($\sin^2 \omega t$ a une valeur moyenne non nulle valant $\frac{1}{2}$). En fait, en raison de pertes élevées, ce fonctionnement n'est possible que pour de faibles puissances (quelques kW). Ces moteurs sont appelés moteurs universels.

Les moteurs shunt sont appréciés pour le réglage aisé de leur vitesse. Ils sont parfois couplés à une génératrice à courant continu entraînée elle-même à une vitesse constante par une machine extérieure synchrone ou asynchrone pour constituer un groupe Ward-Leonard. La plage de vitesse est alors importante, puisqu'on peut agir à la fois sur la tension d'alimentation du moteur et sur son excitation.

Les inconvénients majeurs des machines à courant continu résident dans une relative complexité, en raison de la présence du collecteur, et un rendement médiocre (85 %).

L'électronique de puissance

L'électronique classique utilise les propriétés des jonctions semi-conductrices et accessoirement celle des émissions thermo-ioniques pour générer, amplifier ou détecter un signal.

L'électronique industrielle ou de puissance utilise les mêmes propriétés pour le contrôle, la régulation, la transformation de la puissance électrique. Les points communs ne manquent pas, surtout si on remarque que les dispositifs d'électronique industrielle possèdent des circuits de contrôle, de protection ou de déclenchement qui traitent en fait des signaux, alors que l'électronique classique nécessite souvent le contrôle et une puissance importante.

Cependant, compte tenu de certaines particularités au niveau des composants (thyristors, triacs) et des méthodes de calcul (influence du courant et des facteurs de puissance), l'électronique de puissance est devenue une spécialité à part. Son champ d'action est très vaste. On peut y distinguer quatre domaines essentiels : l'interconnexion des réseaux continus et alternatifs (redresseurs et onduleurs assistés), les alimentations de puissance à fréquence variable (onduleurs autonomes et alimentations stabilisées), les commandes électriques des machines électriques et la commutation électronique. Les deux derniers domaines mettant en œuvre des résultats d'électrotechnique, d'électronique et d'automatique sont plus technologiques et ne seront pas vus ici.

Les soupapes électriques

L'électronique de puissance utilise la possibilité de modifier la configuration des circuits en fermant ou en ouvrant selon un rythme convenable des contacts statiques constitués de jonctions semi-conductrices ou d'autres systèmes électroniques. Ces contacts sont réalisés grâce à des composants appelés *soupapes électriques* par référence aux dispositifs de contrôle des

▼ *Figure 36 ; courbe à vide d'une machine à courant continu : la machine fonctionne en génératrice sans débiter de courant d'induit, et elle est entraînée à vitesse constante par un moteur.*

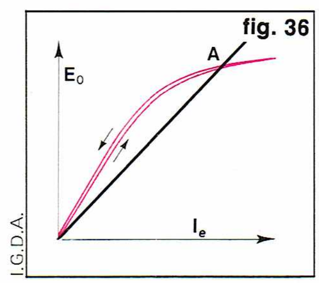

▼ *Figure 37 : caractéristique externe d'une génératrice à courant continu, montée successivement en excitation séparée* (V_1) *et shunt* (V_2). *V (I) serait une simple demi-droite en l'absence de réaction d'induit.*

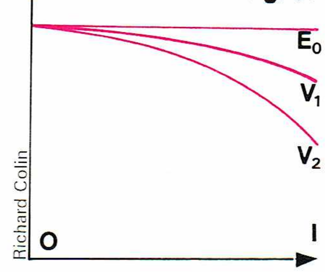

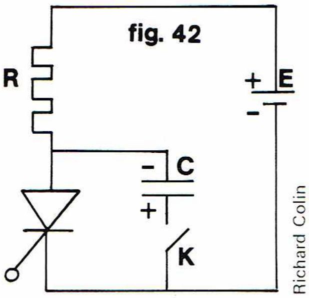

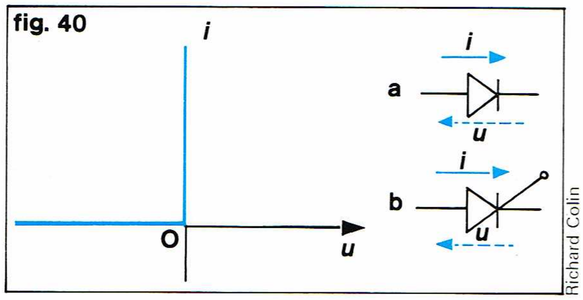

▲ *Figure 42 : circuit de blocage commandé utilisable pour annuler le courant dans un thyristor.*
Figure 40 : caractéristique courant-tension d'une soupape électronique parfaite dont les représentations conventionnelles sont données à droite :
a) soupape simple;
b) soupape commandée.
▼ *Ci-dessous, figure 41 ; le thyristor :*
a) schéma de principe;
b) allure extérieure;
c) construction interne.
Les zones p et n sont constituées respectivement de silicium dopé à l'aluminium et à l'antimoine; les contacts sont assurés grâce à une couche de molybdène.
En bas, figure 43 ; montage monophasé à simple alternance : la source alternative est reliée à la source continue de f. é. m. E par une résistance R et un thyristor à l'allumage retardé d'un angle électrique ψ.

fluides. En effet, ils présentent une résistance très variable suivant le sens de passage du courant. Dans le sens « passant » la résistance est très faible, alors que dans le sens bloquant elle est très forte. Une soupape sera qualifiée de parfaite si ces valeurs extrêmes respectives sont zéro et l'infini. La *figure* 40 donne la caractéristique courant-tension d'une soupape parfaite traduisant les hypothèses précédentes.

Dans les soupapes simples ou à amorçage naturel, le courant passe dès que u (*fig.* 40) devient positif. La soupape se bloque dès que i passe par zéro. Dans les soupapes commandées ou à amorçage contrôlé, le courant passe si u est positif et si un signal convenable est envoyé sur l'électrode de commande. Le blocage s'effectue de manière identique au premier cas.

Actuellement, les soupapes simples sont toutes des diodes à jonction semi-conductrice vue en électronique. Elles ont remplacé les redresseurs à vapeur de mercure. Les soupapes commandées sont encore soit des soupapes à gaz ionisé (ignitron ou excitron), soit de plus en plus des dispositifs à semi-conducteur (thyristor).

Un **excitron** comporte, dans une cuve métallique, une anode en graphite, une cathode constituée d'un bain de mercure et une grille de commande. Une anode auxiliaire en graphite (igniteur) est placée très près de la surface du mercure, de manière à assurer l'entretien d'un arc auxiliaire : les électrons de la cathode sont émis par effet de champ électrique. Un ignitron a un principe identique, mais c'est l'igniteur qui assure la commande en étant alimenté aux moments désirés. Les ignitrons sont encore utilisés dans les montages à moyenne puissance tels que les locomotives alimentées en monophasé 25 000 V à fréquence industrielle mais dont les moteurs sont à courant continu série.

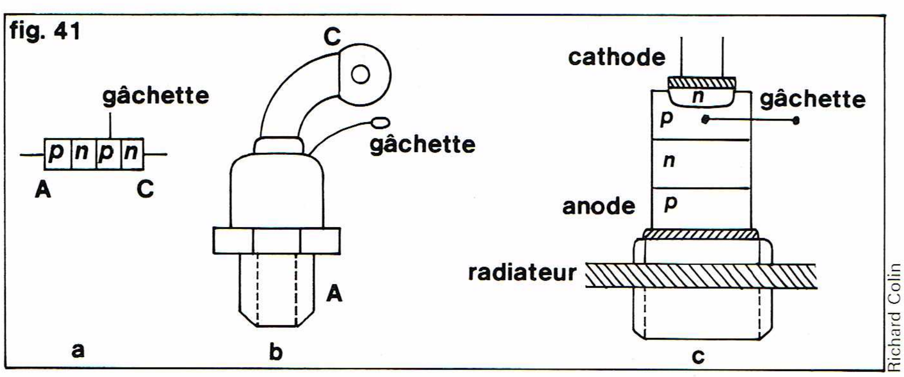

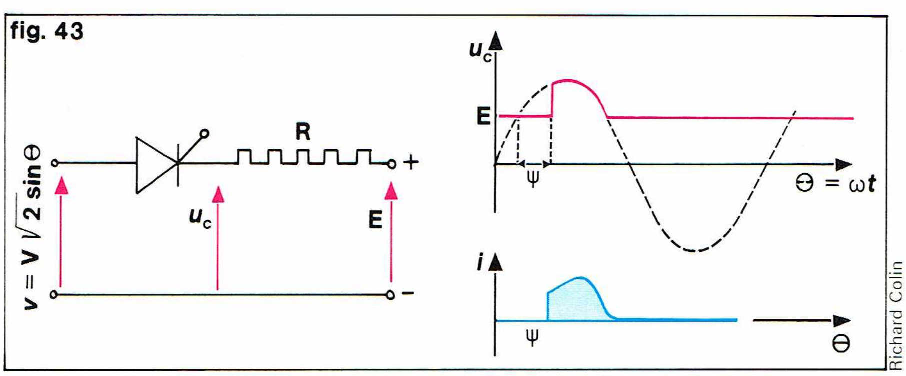

Un **thyristor** ou thyratron sec est formé de trois jonctions réalisées par un empilement de silicium dopé successivement p, n, p, n. Une électrode de commande appelée gâchette ou grille est fixée sur la zone p intermédiaire (commande dite de cathode). Il peut exister des thyristors à commande d'anode appliquée à la zone n (*fig.* 41). Un thyristor se présente sous l'aspect d'un « boulon » surmonté d'un capot qui laisse passer deux fils conducteurs : l'un, de grand diamètre, est la cathode, l'autre, plus petit, est la gâchette. L'écrou du « boulon » sert à fixer l'anode sur un radiateur. Les zones p sont constituées de silicium dopé d'aluminium, les zones n sont dopées à l'antimoine.

En première approximation, on peut assimiler l'association des trois jonctions à trois diodes : les deux diodes extrêmes sont passantes dans le même sens, alors que la troisième l'est dans le sens opposé. Lorsque la tension V est négative, les deux jonctions extrêmes sont bloquées, et le thyristor n'est pas conducteur. Il laisse passer un courant de saturation (quelques mA) et peut supporter une tension inverse de plusieurs centaines de volts (on atteint 3 000 V). Lorsque V est positif, les deux jonctions extrêmes sont passantes. Par contre, la jonction centrale est bloquée. Il circule donc un courant de saturation jusqu'au moment où la tension croissante appliquée dépasse la valeur de la tension inverse de la jonction centrale. Ce phénomène survient pour quelques centaines de volts (600 V au maximum), valeur nécessairement plus faible que dans le cas précédent où deux jonctions étaient polarisées en inverse. A partir de cet instant, le courant d'avalanche emporte la barrière de potentiel et le thyristor devient conducteur. La tension à ses bornes tombe à quelques volts. On dit que le thyristor a basculé. La tension de basculement peut être diminuée sous l'influence d'une impulsion de courant appliquée à la gâchette, qui accroît provisoirement le courant d'avalanche. Actuellement, on trouve des thyristors supportant un courant efficace permanent de 500 A avec une tension de basculement supérieure à 600 V.

Il existe également la possibilité d'amorçage, parfois intempestif par variation rapide de la tension appliquée en raison des capacités parasites.

Le thyristor cesse d'être conducteur, si le courant qui transite tombe en dessous d'un certain seuil appelé courant de maintien. Mais il faut attendre un laps de temps suffisant, appelé temps de récupération, de l'ordre de 20 µs, avant d'appliquer à nouveau une tension positive, sinon un réamorçage sans commande est possible.

Pour bloquer un thyristor, comme pour toutes les soupapes commandées, il faut attendre que le courant s'annule. Cette condition peut être vérifiée normalement par le montage, comme nous le verrons ultérieurement, ou bien imposée par un montage annexe, dont le principe est donné sur la *figure* 42.

On s'arrange pour charger une capacité C, et par un interrupteur électronique, par exemple un autre thyristor commandé par transistor (circuits de faible puissance), la capacité C est subitement déchargée. Le courant dans le thyristor principal s'annule. Il suffit de régler la constante de temps de la décharge pour que l'annulation soit définitive.

On peut résumer les avantages des thyristors : faibles chutes de tension, d'où bon rendement, absences d'annexes telles que chauffage et pompe à vide, peu de puissance de commande nécessaire, faible temps de récupération, possibilité de travailler à des fréquences atteignant 2 000 Hz. Par contre, les thyristors sont encore fragiles et difficilement protégeables contre les surintensités. En outre, il y a de larges dispersions au niveau des gâchettes, impliquant à chaque fois une sérieuse mise au point.

Pour régler la valeur efficace d'un signal alternatif, on utilise fréquemment deux thyristors montés en tête-bêche. On peut faire éliminer une commande de gâchette, en utilisant un ensemble intégré appelé triac, regroupant les deux thyristors.

Les redresseurs

La majeure partie de la production et de la distribution de l'énergie électrique est effectuée en alternatif. Mais l'emploi du courant continu est parfois mieux adapté, voire indispensable : il en est ainsi pour les moteurs à courant continu qui présentent des facilités de réglage

de vitesse ou de couple, ou bien l'électrolyse ou la charge des batteries d'accumulateurs. Pour assurer cette transformation et le passage de l'énergie entre une source à courant alternatif et un récepteur à courant continu, on utilise de moins en moins des machines tournantes (par exemple la commutatrice), onéreuses à la construction et à l'entretien, au bénéfice des montages statiques appelés redresseurs.

Montage élémentaire monophasé à simple alternance

Considérons le montage de la *figure* 43 comportant une soupape commandée et une simple résistance. L'amorçage s'effectue une fois que la tension sinusoïdale d'alimentation $v = V\sqrt{2}\sin\theta$ — en posant $\theta = \omega t$, angle électrique — devient supérieure à E tension continue de la batterie d'accumulateur, à la condition qu'une impulsion convenable soit appliquée sur la gâchette. Nous appellerons ψ l'angle électrique de retard à l'amorçage.

Le courant s'annule lorsque $V\sqrt{2}\sin\theta = E$, et le thyristor se désamorce. La valeur moyenne de i sur une période égale à l'aire hachurée répartie sur la période 2π dépend du retard à l'amorçage, ce qui permet de la régler très aisément :

$$I = \frac{1}{2\pi}\int_{\text{Arcsin}\frac{E}{V\sqrt{2}}+\psi}^{\pi-\text{Arcsin}\frac{E}{V\sqrt{2}}} \frac{V\sqrt{2}\sin\theta - E}{R}\,d\theta$$

En particulier, si $\psi = 0$ et $E = 0$ (cas où le redresseur débite simplement sur la résistance R), $I = \dfrac{V\sqrt{2}}{\pi R}$.

Ce montage n'est pas très intéressant, car le courant circule très peu de temps ; aussi prolonge-t-on son effet par l'adjonction d'une inductance. Considérons le montage de la *figure* 44 où une inductance pure L remplace R. L'amorçage a lieu au même instant que précédemment lorsque la tension sinusoïdale est supérieure à la f. é. m. E et que l'impulsion a été envoyée (présence de la soupape commandée). Le courant i vaut alors :

$$L\frac{d}{dt}i = v - E$$

soit

$$\textbf{(32)} \qquad i = \frac{1}{L\omega}\int_{\theta 1+\psi}^{\theta} (V\sqrt{2}\sin\theta - E)\,d\theta$$

avec $\qquad V\sqrt{2}\sin\theta = E$

L'extinction de la soupape a lieu lorsque i repasse par la valeur 0. L'interprétation physique de l'annulation de **(32)** est que les aires hachurées sur la *figure* 44 sont égales.

Les principaux montages industriels

Les montages monophasés précédents présentent l'inconvénient de n'être couplés au réseau alternatif que pendant peu de temps, interdisant ainsi d'importants transferts de puissance. On utilise donc des montages polyphasés, et on s'arrange en outre pour avoir un régime de charge tel que la conduction soit continue, c'est-à-dire que le courant redressé ne comporte aucune interruption. On y parvient grâce à la présence de l'inductance de lissage (ou self de choc) placée en série avec la charge.

Le **montage polyphasé à simple alternance** consiste à relier les q phases d'un secondaire de transformateur couplé en étoile à une soupape. Les bornes libres des soupapes disposées toutes dans le même sens sont réunies pour former une borne du redresseur. L'autre borne est confondue avec le neutre du transformateur (*cf. fig.* 45).

Si le courant garde une valeur constante dans le circuit à courant continu grâce à l'inductance de lissage et que les soupapes soient parfaites, seule la soupape qui voit la plus grande tension est débloquée, et la tension redressée est l'enveloppe supérieure des sinusoïdes de tension des enroulements secondaires. Si l'on remplace les diodes par des thyristors commandés avec un retard ψ, la tension U_c, valeur moyenne de u_c, vaut pour un système à q phases :

$$U_c = V_2\sqrt{2}\,\frac{q}{\pi}\sin\frac{\pi}{q}\cos\psi$$

La *figure* 46 donne l'allure des tensions redressées correspondant aux montages de la *figure* 43 ($\psi = 0$; $q = 3$ puis $q = 2$).

Pour diminuer les ondulations, on constitue, avec deux dispositifs du type précédent mais montés en opposition, le montage en pont de Graetz (*fig.* 47).

La tension redressée u_c est égale à la différence entre la plus positive des tensions et la plus négative, comme on peut le retrouver en suivant la circulation du courant refermé par la charge extérieure (*fig.* 48).

Si l'on remplace les simples diodes par des thyristors commandés avec un retard ψ, la tension U_c, valeur moyenne de u_c, vaut, dans un montage à q phases :

$$U_c = 2\,V_2\sqrt{2}\,\frac{q}{\pi}\sin\frac{\pi}{q}\cos\psi$$

En particulier, dans un système triphasé de tension simple secondaire V_2 :

fig. 44

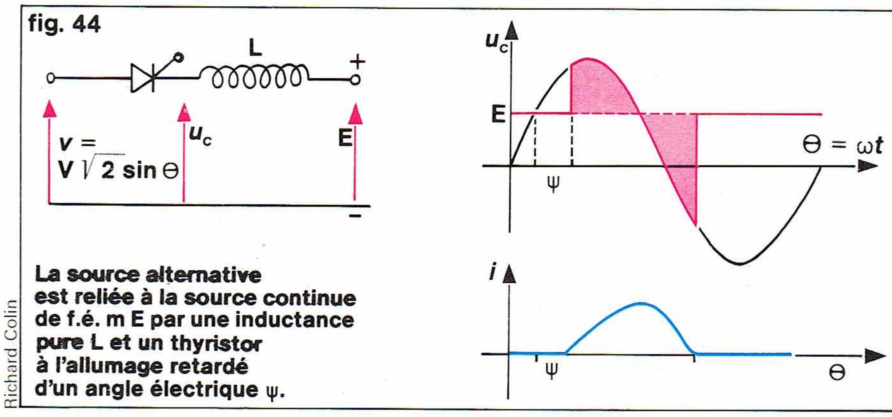

La source alternative est reliée à la source continue de f.é. m E par une inductance pure L et un thyristor à l'allumage retardé d'un angle électrique ψ.

Richard Colin

fig. 45

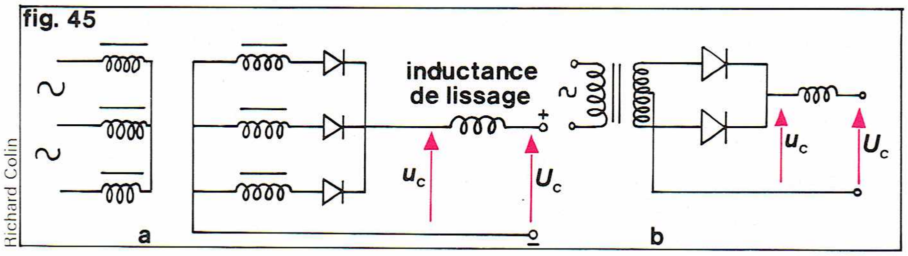

Richard Colin

▲ *En haut, figure 44 ; montage monophasé à simple alternance.*
Ci-dessus, figure 45 ; montages à simple alternance les plus usuels :
a) montage triphasé (le primaire du transformateur peut être couplé en étoile ou en triangle) ;
b) montage monophasé à double alternance appelé également push-pull.

▼ *Ci-dessous, figure 46 ; tensions redressées par les montages à simple alternance de la figure 43.*
En bas, figure 47 ; montages en pont usuels :
a) triphasé ;
b) monophasé.

fig. 46

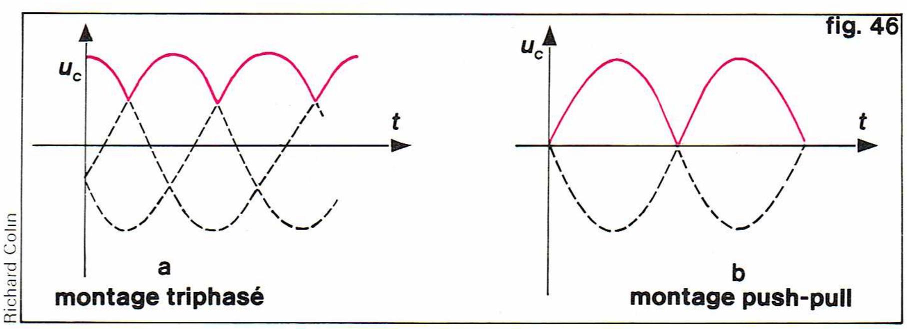

Richard Colin

fig. 47

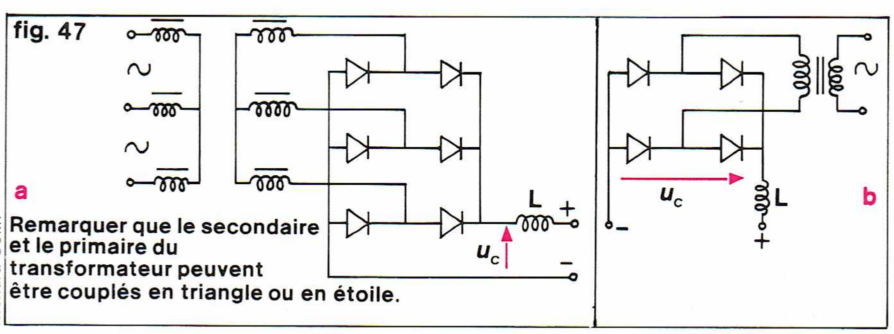

Remarquer que le secondaire et le primaire du transformateur peuvent être couplés en triangle ou en étoile.

Richard Colin

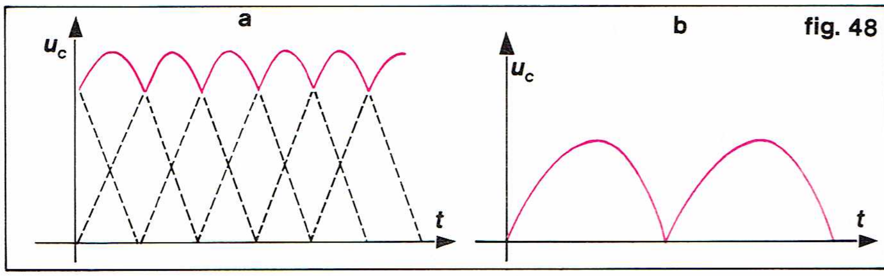

▲ *Figure 48 ; tensions redressées obtenues par les montages en pont : a) triphasé ; b) monophasé. Dans ce dernier cas, on retrouve le même résultat qu'avec le montage push-pull, mais il n'y a plus besoin d'un transformateur à point milieu ; en contrepartie, il faut quatre diodes ou thyristors.*

▼ *Ci-dessous, figure 49 : principe de fonctionnement en onduleur assisté d'un mutateur monophasé. Le thyristor est déclenché très tardivement, et la batterie est branchée avec les polarités de la figure.*

En bas, figure 51 : montage d'un hacheur alimentant un moteur à courant continu. a) Schéma : A, système d'interruption du courant dans le thyristor ; l, inductance de lissage ; D, diode de « roue libre » nécessaire pour éviter l'interruption du courant ; M, moteur à courant continu. b) Allure de la tension en fonction du temps ; la durée des impulsions dépend de la période de la commande appliquée sur la gâchette du thyristor. c) Variation correspondante du courant dans le moteur.

$$U_c = V_2 \sqrt{2} \frac{3}{\pi} \sqrt{3} \cos \psi$$

Pour un pont monophasé de tension totale $V = 2 V_2$:

$$U_c = V \sqrt{2} \frac{2}{\pi} \cos \psi$$

Comme tous les générateurs, les montages précédents peuvent être associés en série ou en parallèle. Dans ce dernier cas, chaque redresseur devant participer à la fourniture du courant total dans la proportion des courants nominaux respectifs, on doit placer une bobine médiatrice ou interphase.

Enfin il faut souligner que nous avons fait une hypothèse mal vérifiée dans la pratique qui concerne l'instantanéité de la commutation entre les soupapes : en réalité, en raison de la présence inévitable d'inductances en série avec chaque soupape, comme les inductances de fuite du transformateur, ce phénomène est impossible, et, pendant un bref laps de temps, deux soupapes peuvent conduire simultanément. La commutation est à l'origine d'une diminution de la tension moyenne redressée appelée chute inductive de tension continue.

Onduleurs assistés ou non autonomes

Il est parfois intéressant de pouvoir transférer de la puissance électrique disponible en courant continu sur un réseau alternatif. On assiste en effet à un certain développement des réseaux de transport d'énergie en continu à haute tension par câble bifilaire. L'énergie produite en alternatif est redressée par les systèmes décrits précédemment, puis transite en continu jusqu'au point d'utilisation où elle est reconvertie en alternatif par des montages appelés onduleurs assistés. Ils sont assistés en ce sens que la conversion n'est possible que si préexiste un réseau alternatif capable de fournir le rythme d'ouverture et de fermeture des soupapes, fixant ainsi sa fréquence. L'intérêt de ce procédé est l'économie qui est faite dans le câble continu (pas de pertes diélectriques, meilleure tenue des isolants), surtout dans les traversées de bras de mer. Ainsi, il existe depuis 1962 une liaison de 60 km entre les réseaux français et anglais qui échangent 160 MW sous 200 kV. Nous allons voir que redresseurs et onduleurs assistés sont des dispositifs réversibles : on les appelle souvent *mutateurs*.

Reprenons le fonctionnement du montage de la *figure* 43 mais en inversant la polarité de E d'une part et en retardant l'amorçage d'un angle ψ très grand, comme l'indique la *figure* 49. La valeur moyenne de u_c devient négative, alors que la valeur moyenne de i est restée positive : le sens du transfert de puissance a changé. Ainsi un montage redresseur correctement retardé et alimenté en continu peut se transformer en onduleur assisté. Tous les montages industriels que nous avons vus à l'occasion du fonctionnement en redresseur conviennent, et ce sont eux qui sont utilisés comme onduleurs pour des échanges de puissance atteignant 1 400 MW sous 800 kV aux États-Unis. Mais il y a aussi des puissances beaucoup plus faibles comme le fonctionnement en récupération des moteurs à courant continu des locomotives alimentées par des caténaires parcourus par un courant alternatif à fréquence industrielle, redressé dans la machine.

Onduleurs autonomes

L'onduleur autonome est un montage statique qui, alimenté par une source continue, fournit à un récepteur quelconque un courant et une tension alternatifs dont la fréquence est fixée par l'onduleur lui-même. Ce montage est utile à titre d'alimentation de secours pour suppléer l'absence de toute énergie, ou tension alternative : par exemple, alimentation d'un ordinateur ou d'un émetteur radio à partir de batteries lors d'une interruption du secteur. On construit des onduleurs autonomes dont la puissance par phase atteint 50 kVA. Le même principe est adopté par les générateurs de chauffage par induction dont la fréquence s'étage de 500 Hz à 5 kHz.

Le principe de base est résumé par la *figure* 50 : lorsque les soupapes S_1, S_2, S_3, S_4 sont commandées selon une séquence convenable, la tension aux bornes de la charge a une allure périodique. En fait, on utilise un montage push-pull, avec charge et décharge d'une capacité.

Cette capacité a pour but de bloquer alternativement les deux soupapes. Les signaux recueillis sur la charge sont périodiques mais non sinusoïdaux. Avec des filtrages, le taux de distorsion peut être inférieur à 3 %. Le rendement est de l'ordre de 85 %.

Hacheurs à courant continu

Ces montages permettent d'ajuster une tension continue à la valeur désirée sans les pertes correspondantes d'un potentiomètre. Ils sont de plus en plus utilisés pour la commande des moteurs à courant continu. Le principe consiste à interrompre — hacher — la tension continue de manière à régler la valeur moyenne au niveau désiré. Pour éviter l'interruption du courant dans la charge, celui-ci est dérivé par une diode appelée diode de roue libre. La *figure* 51 donne un schéma de principe. L'application la plus importante est celle des alimentations des moteurs série des véhicules électriques lors du démarrage : chariot électrique, métro.

Convertisseurs statiques de fréquence : les cycloconvertisseurs

C'est un appareil qui assure la conversion d'énergie entre deux systèmes de tensions alternatives mais de fréquences différentes : citons le passage du 50 Hz au 60 Hz ou au 400 Hz, ces dernières fréquences étant les valeurs normalisées pour la marine et l'aviation. La pre-

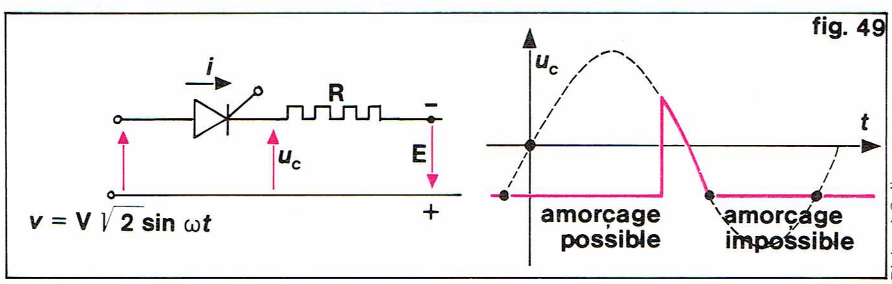

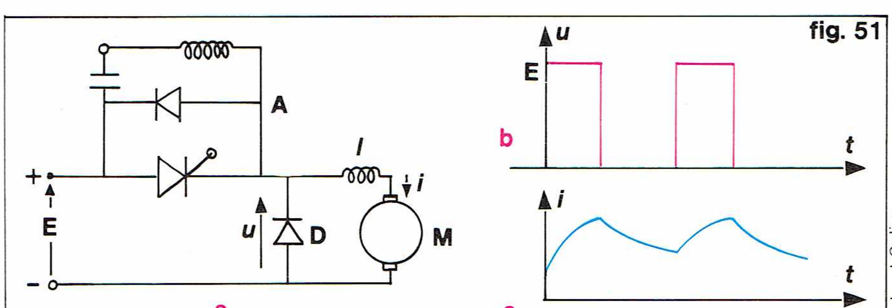

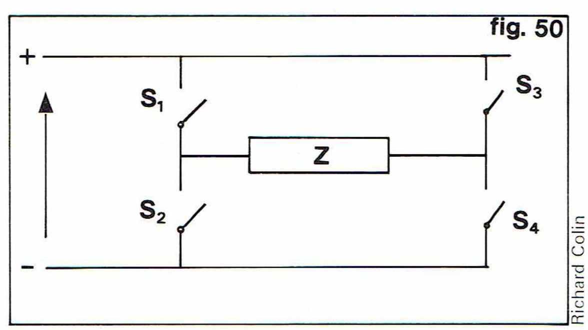

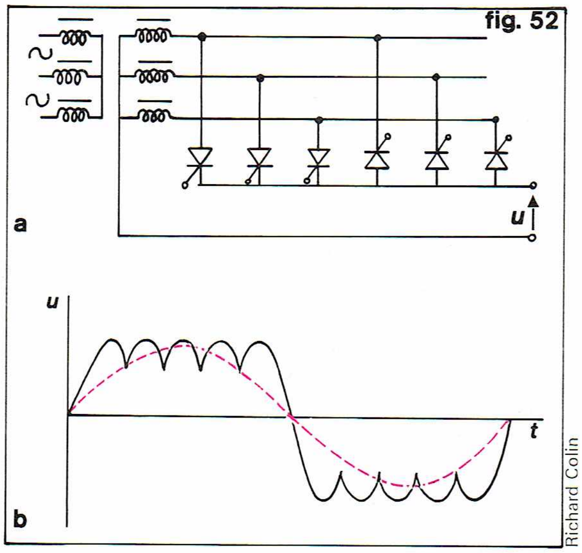

Richard Colin

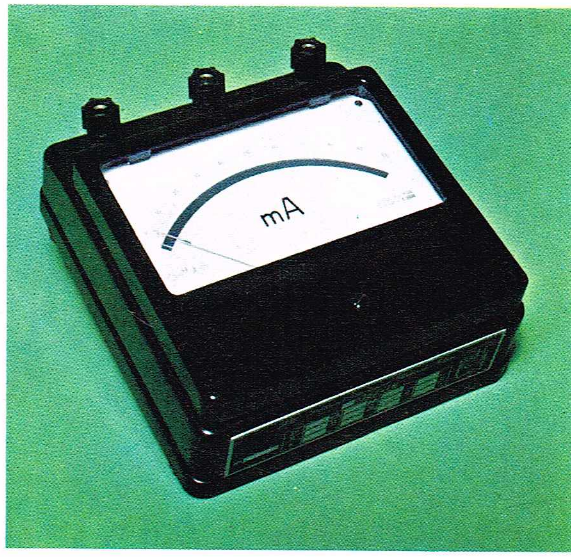

C. Dani

◀ *A gauche, figure 52 ; dispositif cycloconvertisseur :*
a) montage sans le système de déclenchement des thyristors ;
b) tension de sortie obtenue et, en pointillé, l'onde du premier harmonique dont la fréquence est ici 3,66 fois plus faible que la fréquence d'alimentation.
A droite, appareil magnéto-électrique, le milliampèremètre utilise le principe du galvanomètre à cadre mobile ; l'échelle de celui-ci permet des mesures de 100/500 mA.

mière possibilité est d'associer un redresseur à un onduleur autonome. La seconde solution est de produire la tension de sortie à partir de fragments des diverses phases de l'alimentation : ce sont les cycloconvertisseurs. La *figure* 52 présente un montage. La tension de sortie est obtenue par une modulation convenable sur les commandes d'amorçage.

Les mesures en électrotechnique et les appareils

L'électrotechnique a suscité à la fois des conceptions d'appareils tels qu'ampèremètre, voltmètre, wattmètre, et des méthodes de mesure indirectes, par exemple la puissance dans un circuit triphasé, les ponts d'impédance ou de fréquence. Les appareils utilisés actuellement sont de deux types principaux : ceux, traditionnels, à aiguille, et ceux, plus modernes, à affichage numérique de conception électronique. Ces derniers ont été vus en électronique, et nous n'y ferons que quelques allusions lorsqu'ils modifient les méthodes.

Les principaux appareils de mesure à aiguille

Les appareils à aiguille comportent un équipage mobile qu'entraîne un index devant un cadran gradué dans les unités de la grandeur à mesurer. L'équipage mobile est mû par l'un des quatre procédés : effet thermique, effet magnéto-électrique, effet électrodynamique ou encore ferromagnétique. Mais, quel qu'il soit, l'appareil n'est pas exact : erreur de fidélité, d'étalonnage... On appelle classe de ces appareils le pourcentage du maximum de la graduation qui donne la limite supérieure de l'erreur absolue sur l'indication de l'appareil, sous réserve que des facteurs extérieurs tels que température, pression, champ magnétique, restent dans certaines limites définies par les normes. Ainsi, soit un appareil à aiguille de classe 0,3 comportant 150 divisions, l'erreur absolue pour chaque graduation est :

$$\frac{0{,}3 \times 150}{100} = \mp 0{,}45$$

On constate qu'on a intérêt à ne procéder à la lecture que si l'aiguille se trouve dans le dernier tiers, car l'erreur relative se trouve ainsi réduite. On appelle calibre d'un appareil la valeur de la grandeur qui conduit à la déviation maximale. Ainsi, dans le cas précédent, si le calibre est 150 V, une graduation vaut 1 V, et l'erreur absolue est ∓ 0,45 V. Pour une valeur voisine de 100 V, l'erreur relative est ∓ 0,45 %. Mais pour une valeur de 50 V, elle atteint ∓ 0,9 %. Notons que la classe d'un appareil à aiguille bon marché est de 1,5 à 1 en général.

Appareils magnéto-électriques

Ce sont les appareils, ampèremètres ou voltmètres en général, utilisant le principe du galvanomètre à cadre mobile.

Un galvanomètre comporte un cadre rectangulaire bobiné suspendu par un fil de torsion en bronze phosphoreux qui sert en même temps à amener le courant des bornes fixes au cadre. On peut aussi avoir des pivots rigides analogues à ceux des montres. Le cadre est placé dans le champ magnétique d'un courant permanent, orienté radialement dans l'entrefer par rapport au pivot.

Lorsque le cadre se trouve parcouru par un courant électrique, ses deux côtés sont soumis à une force de Laplace qui crée un couple équilibré par celui du fil de torsion. Remarquons que ce principe imaginé en 1837 par Pouillet avec un aimant mobile et un cadre fixe et mis au point définitivement par Deprez et d'Arsonval fonctionne à la manière d'un petit moteur à courant continu sans collecteur.

Dans les galvanomètres, la position d'équilibre est repérée par l'intermédiaire d'un faisceau lumineux réfléchi par un petit miroir solidaire du cadre (miroir de Poggendorff).

Les appareils magnéto-électriques reprennent ce principe avec les modifications suivantes. Ce sont deux ressorts spiraux en bronze phosphoreux, bandés en opposition pour assurer un zéro bien défini malgré les variations de température, qui assurent le couple de torsion. La déviation est repérée par un index en forme de couteau qui défile devant la graduation. On évite l'erreur de parallaxe à l'aide d'un miroir placé sous le cadran.

Les ampèremètres magnéto-électriques à courant continu sont mis en série avec le circuit dans lequel on veut mesurer l'intensité. Mais il est hors de question de faire transiter des intensités supérieures à une dizaine de micro-ampères dans les minces fils de cuivre du cadre. Aussi monte-t-on, en général, des shunts internes ou externes pour les calibres plus élevés. Les ampèremètres magnéto-électriques à courant alternatif fonctionnent sur le même principe mais possèdent en outre un pont redresseur placé dans le circuit du cadre. La graduation en valeur efficace n'est donc rigoureuse que si le courant est bien sinusoïdal puisqu'on adopte la relation

$$I_c = I\sqrt{2}\,\frac{2}{\pi}$$

vue en électronique de puissance.

Les voltmètres placés en dérivation sur le circuit aux bornes duquel on veut mesurer la tension sont en fait des ampèremètres auxquels est associée en série une forte résistance connue. Si cette résistance vaut 1 000 ohms, et que le cadre magnéto-électrique dévie entièrement avec 100 micro-ampères, l'appareil aura un calibre de 100 millivolts.

Appareils électrodynamiques

A la différence des précédents, les appareils électrodynamiques peuvent fonctionner directement en continu ou en alternatif. En effet, le champ créé par l'aimant permanent est maintenant créé par une autre bobine alimentée en série avec le cadre mobile. C'est donc un dispositif qui reprend le principe du moteur série et qui, comme lui, est universel, car le couple est proportionnel au carré du courant. Ces appareils sont malheureusement

◀ *Page ci-contre, en bas, à droite, figure 50 ; schéma de principe d'un onduleur autonome : alimenté en courant continu, il débite une puissance alternative dans l'impédance Z si les interrupteurs S_1 et S_4 se ferment lorsque S_2 et S_3 s'ouvrent, et vice versa.*

▶ *A gauche, un voltmètre de précision à fer mobile, à index lumineux, permettant des étendues de mesures de 150/300/600 V. A droite, un wattmètre permettant des mesures ampèremétriques de 2,5/5 A et des mesures voltmétriques de 75/100/150/200/300/400/600 V.*

C. Dani

C. Dani

fig. 53

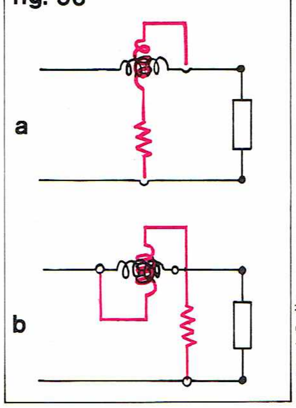

Richard Colin

▲ *Figure 53 : wattmètre électrodynamique : a) montage en courte dérivation (erreurs sur le courant) ; b) montage en longue dérivation (erreurs sur la tension).*

▼ *Figure 54 : réalisation d'un ampèremètre thermique à dilatation.*

fig. 54

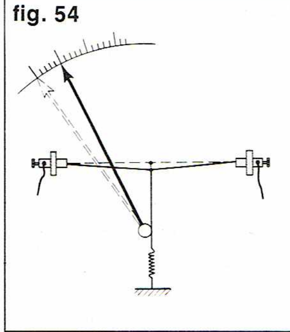

I.G.D.A.

beaucoup moins sensibles que les précédents en raison du faible champ inducteur. Par contre, leur principe est utilisé pour réaliser les wattmètres électrodynamiques.

En effet, si, au lieu d'alimenter en série les deux bobines, on alimente celle du cadre (appelé circuit gros fil) en série avec le réseau, alors que celle du champ fixe (appelé circuit fil fin) est en parallèle aux bornes du réseau, le couple, comme pour une machine à courant continu, est proportionnel au produit des deux courants dérivés (*fig.* 53). Or le courant dérivé dans le circuit fil fin est proportionnel à la tension V. On a réalisé le produit VI, donc un wattmètre. Comme une partie du courant est dérivée dans le circuit « fil fin » ou circuit tension, il y a deux montages possibles (*cf. fig.* 53) : l'un fait une légère erreur sur le courant, l'autre sur la tension.

Nous venons de raisonner en courant continu, mais le même principe peut être utilisé en alternatif. En effet, si $v = V\sqrt{2}\cos\omega t$ et $i = I\sqrt{2}\cos(\omega t - \varphi)$, l'appareil fournit un couple instantané proportionnel à :

$$vi = VI\cos\varphi + VI\cos(2\omega t - \varphi)$$

Or le dernier terme a une valeur moyenne nulle sur une période : le couple moyen est donc proportionnel à la puissance active. Notons qu'il faut s'arranger pour que l'inductance du fil fin soit négligeable pour ne pas introduire un déphasage parasite.

Appareils ferromagnétiques (ou appareils à fer doux)

Une bobine parcourue par un courant crée un champ qui attire une pièce de fer doux solidaire d'une aiguille. Il en existe en fait deux types : le premier où le noyau de fer peut pénétrer plus ou moins dans la bobine (noyau plongeur) ; le second où la bobine fixe parcourue par le courant à mesurer aimante deux pièces de fer doux, l'une fixe, l'autre mobile et c'est la répulsion des pôles qui produit la rotation. Le couple exercé dépend du carré du courant en relation avec l'énergie magnétique emmagasinée. Ce sont donc des appareils qui peuvent, comme précédemment, fonctionner en courant continu ou alternatif, mais les échelles sont différentes en raison du déphasage inévitable entre l'induction et le courant provenant des pertes par hystérésis.

Appareils thermiques

Deux procédés peuvent être utilisés : soit directement par la dilatation du fil entraînant l'aiguille, soit indirectement en évaluant l'échauffement par un thermocouple dont la tension est mesurée. La *figure* 54 donne le montage de principe du premier cas. Comme l'allongement du fil est proportionnel au carré de l'intensité, le système est valable aussi bien en continu qu'en alternatif. Mais la résistance du fil est nécessairement importante puisqu'il faut qu'il soit long et fin, ce qui conduit à des erreurs de consommation élevées. Ce système est pratiquement abandonné. Par contre, les appareils à thermocouples, valables également en continu et en alternatif, ont le grand avantage d'avoir une très large bande de fréquences (0 à 10 MHz) et une inductance nulle. Ils mesurent l'intensité efficace d'un courant périodique, quelle que soit sa forme. Il existe des ampèremètres, des voltmètres et même des wattmètres à thermocouple.

Autres appareils de mesure utilisés en électronique

A côté des appareils fondamentaux précédents, qui peuvent être d'ailleurs maintenant électroniques à affichage numérique, il existe un matériel particulier : fluxmètre, gaussmètre, compteur électrique, transformateur d'intensité, couplemètre, tachymètre...

Fluxmètre

C'est un galvanomètre sans couple de rappel. Le système mobile n'a pas de position d'équilibre. Une remise à zéro s'effectue par une fourchette de rappel. Le principe, dû à Grassot, est le suivant : la variation de flux est recueillie dans une spire comportant plusieurs tours qui est refermée sur le cadre du galvanomètre. Le courant induit dans la spire par la variation de flux est enregistré par le galvanomètre si le couple de la force de Laplace est supérieur au couple de frottement solide proportionnel à la vitesse angulaire. En effet, l'équation du mouvement est :

$$I\frac{d^2\theta}{dt^2} = C_m - a\frac{d\theta}{dt}$$

où I, C_m et a sont, respectivement, le moment d'inertie, le couple moteur proportionnel au courant induit et le coefficient de frottement. Intégrant cette relation entre les instants initial ($t = 0$) et final (t) définis par le démarrage ($t = 0$) et l'arrêt (t) du cadre, dans les positions respectives θ_1 et θ_2 on a :

$$\int_0^t C_m dt = a(\theta_2 - \theta_1)$$

Or C_m est proportionnel au courant i dû à la f. é. m. induite $e = \frac{-d\Phi}{dt}$ dans le circuit de résistance R :

$$i = -\frac{1}{R}\frac{d\Phi}{dt}$$

d'où, comme $C_m = ki$: $\Phi_1 - \Phi_2 = Ra(\theta_2 - \theta_1)$

Ainsi la différence de position angulaire est proportionnelle à la variation de flux.

Gaussmètre

On n'utilise plus beaucoup les fluxmètres, car on peut maintenant mesurer directement les inductions magnétiques grâce au gaussmètre à effet Hall. Lorsque l'ensemble des porteurs de charge d'un solide est mis en mouvement sous l'influence d'un champ électrique $\vec{E}$, au mouvement incohérent préexistant se substitue un mouvement d'ensemble à une vitesse d'équilibre $\vec{v}$ proportionnelle à $\vec{E}$. Si on applique maintenant un champ

d'induction magnétique $\vec{B}$, le champ électrique total devient $\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B}$. On recueille donc dans la direction orthogonale à $\vec{v}$ (donc à $\vec{E}$) et $\vec{B}$ un champ électrique qui se traduit par une tension appelée tension de Hall proportionnelle à $\vec{v}$, donc à l'intensité et à $\vec{B}$. Si on alimente la sonde de Hall avec un courant connu, la tension recueillie est proportionnelle à l'induction qui règne sur la sonde. C'est ce que réalisent les gaussmètres.

Compteur électrique

C'est un appareil intégrant dans le temps la puissance active. Le plus utilisé est le watt-heure-mètre à induction. Il fonctionne un peu comme un moteur asynchrone : un champ tournant est créé par le circuit tournant (gros fil) et le circuit tension (fil fin) d'un wattmètre électrodynamique classique. Il entraîne un disque léger en aluminium grâce au couple proportionnel à la puissance active. Le comptage du nombre de tours donne la consommation de puissance.

Transformateur d'intensité ou de courant

Lorsqu'on utilise en courant alternatif des ampèremètres ou des wattmètres, on évite l'utilisation de shunt en adoptant les transformateurs d'intensité d'autant plus valables qu'on veut mesurer des courants alternatifs élevés. Le transformateur est branché au primaire à la place de l'ampèremètre mais son secondaire est fermé sur un ampèremètre. Comme la résistance de cet appareil est faible, un transformateur d'intensité fonctionne pratiquement en court-circuit. Si N_1 est le nombre de spires au primaire et N_2 celui du secondaire et si le courant secondaire mesuré par l'ampèremètre est I_2, on pourra dire que le courant réel vaut $I = \frac{N_2 I_2}{N_1}$. On choisit évidemment N_1 très inférieur à N_2.

Couplemètre

Dans les essais de machines, on peut évaluer le couple d'un moteur à partir de la puissance délivrée par une machine fonctionnant en génératrice dont on connaît le rendement. Mais on peut faire une mesure directe à partir de couplemètre monté sur l'arbre. Plusieurs principes sont utilisés : jauges de contraintes, mesure optique de la torsion. On utilise aussi des machines balance : les stators ne sont pas totalement fixés au sol mais peuvent basculer d'un angle assez faible. Ce basculement peut être bloqué par la présence de poids disposés au bout d'un bras de longueur connue.

Tachymètre

Ces dispositifs servent à mesurer la vitesse de rotation. Ce sont soit des sortes de chronomètres, soit de petites génératrices. Dans le premier cas, un système mécanique mesure le nombre de tours par minute par un jeu d'engrenage. Dans le second cas, on utilise une petite génératrice à aimant permanent dont la tension de sortie à vide est proportionnelle à la vitesse. Il suffit donc de lire l'indication sur un voltmètre.

Les circuits de mesure

Mesure d'un courant et d'une tension continus

Il semble qu'il n'y ait pas de difficultés : en fait, si on veut faire des mesures précises avec des appareils qui ne sont pas idéaux (un ampèremètre a une résistance faible et non nulle, un voltmètre a une résistance interne élevée mais non infinie), il est nécessaire de connaître l'erreur de consommation des instruments utilisés.

La *figure* 55 donne les deux montages possibles : en (a), appelé longue dérivation, la valeur du courant est exacte, mais celle de la tension est faussée par la présence de l'ampèremètre. En (b), appelé courte dérivation, c'est le courant lu qui est inexact.

La puissance s'obtient en effectuant le produit des deux grandeurs. Notons que les appareils électroniques dont les impédances peuvent prendre des valeurs très élevées pour les voltmètres et faibles pour les ampèremètres ne donnent lieu à aucune difficulté d'emploi.

Mesure en courant alternatif (circuit monophasé)

Les ampèremètres et voltmètres donnent les modules respectifs du courant et de la tension. Pour obtenir le déphasage, on utilise un wattmètre. En effet, $\cos \varphi = \frac{P}{VI}$. Les appareils ont non seulement leurs résistances propres, mais aussi leurs inductances.

Appelons X_{VV} et X_{VW} les réactances respectives des bobinages du voltmètre et de l'enroulement voltmétrique (fil fin) du wattmètre dont les résistances correspondantes sont R_{VV} et R_{VW}. Appelons également X_{AA} et X_{AW} les réactances des enroulements de l'ampèremètre et du circuit ampèremétrique du wattmètre (R_{AA} et R_{AW} étant leurs résistances), on peut calculer les corrections à apporter à chaque lecture.

Pour le montage aval (ou courte dérivation) représenté par la *figure* 56, les valeurs vraies étant indicées par *n* et les valeurs lues par *l*, on a :

$$V_n = V_l$$
$$P_n = P_l - (V_l^2/Z_{VV}^2)\, R_{VV} - (V_l^2/Z_{VW}^2)\, R_{VW}$$

avec $Z_{VV}^2 = R_{VV}^2 + jX_{VV}^2$ et $Z_{VW}^2 = R_{VW}^2 + jX_{VW}^2$

On peut également calculer la puissance réactive :

$$Q_n = Q_l - (V_l^2/Z_{VV}^2)\, X_{VV} - (V_l^2/Z_{VW}^2)\, X_{VW}$$

avec $Q_l = \sqrt{V_l I_l - P_l^2}$

On peut alors déduire

$$I_n = \frac{\sqrt{P_n^2 + Q_n^2}}{V_n} \; ; \; \cos \varphi_n = \frac{P_n}{\sqrt{P_n^2 + Q_n^2}}$$

La *figure* 57 donne le montage amont (ou longue dérivation) ; on obtient de même :

$$I_n = I_l$$
$$P_n = P_l - R_{AA} I_l^2 - R_{AW} I_l^2$$
$$Q_n = Q_l - X_{AA} I_l^2 - X_{AW} I_l^2$$
$$V_n = \frac{\sqrt{P_n^2 + Q_n^2}}{I_n} \; ; \; \cos \varphi_n = \frac{P_n}{\sqrt{P_n^2 + Q_n^2}}$$

Mesure en courant alternatif (circuit triphasé)

Si le système est équilibré, un seul wattmètre branché entre une phase et un neutre suffit : il faut multiplier par trois son indication pour avoir la valeur réelle. Si le système est déséquilibré avec un fil neutre, il est nécessaire

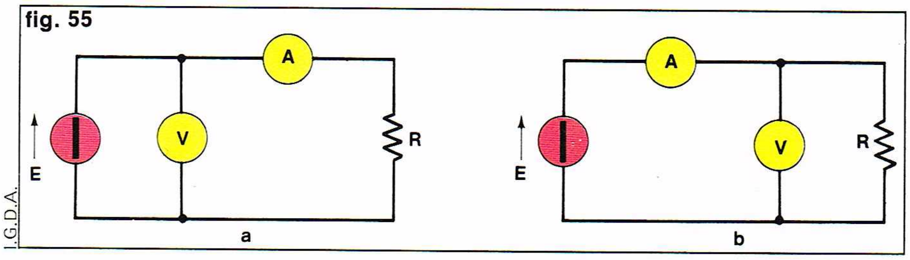

▲ ***Figure 55 ; mesure d'une tension et d'un courant dans un circuit à courant continu :***
a) montage amont ou en longue dérivation ;
b) montage aval ou en courte dérivation.

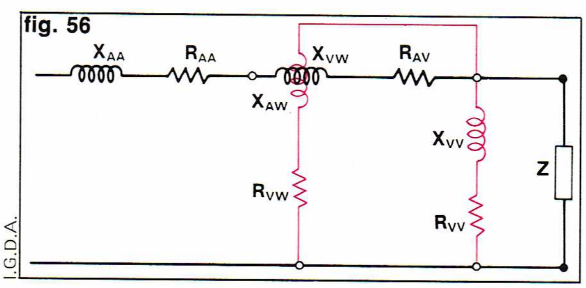

◀ ***Figure 56 ; mesure d'une tension, d'un courant et d'un facteur de puissance en courant alternatif : montage aval.***

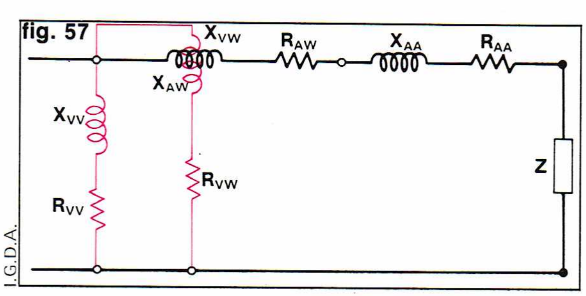

◀ ***Figure 57 ; mesure d'une tension, d'un courant et d'un facteur de puissance en courant alternatif : montage amont.***

▼ *Figure 59 : mesure de la puissance en triphasé avec deux wattmètres (principe).*

Figure 60 ; schéma de principe d'un pont de mesure d'impédance : l'appareil de zéro est souvent un oscilloscope ; à l'équilibre $\bar{Z}_1\bar{Z}_4 = \bar{Z}_2\bar{Z}_3$.

Figure 61 : pont double de Thomson. Le montage est destiné aux mesures de faibles résistances et a été très utilisé en métrologie.

Figure 62 ; pont d'impédance universel utilisé pour mesurer une impédance de la forme X + jY :
a) à l'équilibre $X = \frac{Q}{P} R$, $Y = -\frac{Q}{C\omega P}$ *(capacité) ;*
b) à l'équilibre $X = \frac{PQRC^2\omega^2}{1 + R^2C^2\omega^2}$, $Y = \frac{PQC\omega}{1 + R^2C^2\omega^2}$ *(inductance). Un système de commutation permet de passer d'une configuration à l'autre et permet la mesure d'impédances capacitives (cas a) ou inductives (cas b).*

fig. 58

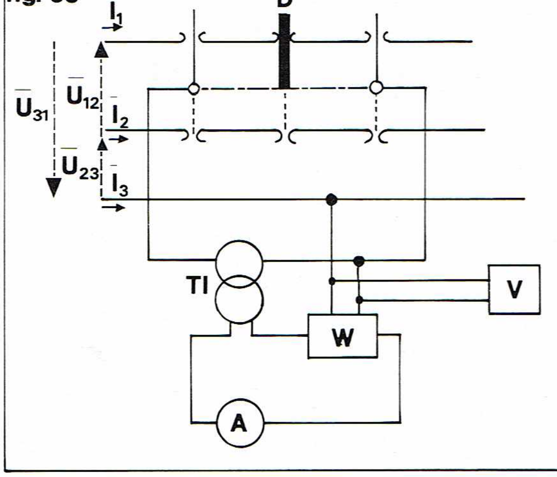

de disposer de trois wattmètres. Par contre, si le système ne comporte que trois fils, on peut n'utiliser que deux wattmètres, et avec l'aide d'un interrupteur à court-circuit n'en disposer même que d'un seul (*fig.* 58).

Considérons le montage de la *figure* 59 alimenté par un système triphasé de tension équilibrée dont les équations ont été données antérieurement. Évaluons les puissances P_1 et P_2 lues par chacun des deux wattmètres W_1 et W_2.

Pour W_1 on a $P_1 = V_{31} \cdot I_1 \cos(\vec{I}_1 ; \vec{V}_{13})$

Pour W_2 on a $P_2 = V_{23} \cdot I_2 \cos(\vec{I}_2 ; \vec{V}_{23})$

en appelant $(\vec{I}_1 ; \vec{V}_{13})$ et $(\vec{I}_2 ; \vec{V}_{23})$ les déphasages respectifs des courants sur les tensions composées indiquées. Si φ est le déphasage du courant sur la tension simple, on sait que la puissance en triphasé vaut : $P = VI\sqrt{3}\cos\varphi$.

Nous allons montrer que $P = P_1 + P_2$. En effet, d'après le diagramme de Fresnel de la *figure* 59, on a

$$(\vec{I}_1 ; \vec{V}_{13}) = \varphi - \frac{\pi}{6} \quad \text{et} \quad (\vec{I}_2 ; \vec{V}_{23}) = \varphi + \frac{\pi}{6}$$

d'où :

$$P_1 = UI\cos\left(\varphi - \frac{\pi}{6}\right) = UI\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\cos\varphi + \frac{1}{2}\sin\varphi\right)$$

$$P_2 = UI\cos\left(\varphi + \frac{\pi}{6}\right) = UI\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\cos\varphi - \frac{1}{2}\sin\varphi\right)$$

La somme algébrique donne bien P.

Mesures d'impédances

Les mesures précises d'impédance s'effectuent par des montages en pont généralisant celui de Wheatstone qui date de 1840. Actuellement, compte tenu des progrès des mesures électroniques, ces méthodes deviennent de moins en moins utilisées, sauf en métrologie.

La *figure* 60 donne le schéma classique : à l'équilibre, on a l'égalité en croix des impédances : $\bar{Z}_1\bar{Z}_4 = \bar{Z}_2\bar{Z}_3$. En alternatif, le générateur est un oscillateur qui fournit une tension sinusoïdale de fréquence connue, et l'appareil de mesure est en général un oscillographe cathodique. L'égalité précédente étant écrite en valeurs complexes, elle doit être séparée en deux égalités relatives l'une à la partie réelle, l'autre à la partie imaginaire. Pour améliorer la précision, il a été imaginé de très nombreuses variantes adaptées à la nature et à l'ordre de grandeur de l'élément à mesurer. La *figure* 61 donne par exemple le schéma du double pont de Thomson et la *figure* 62 représente une configuration utilisée dans les ponts universels d'impédance.

BIBLIOGRAPHIE

CAHEN F., *Électrotechnique*, éd. Gauthier-Villars. - DEMONTVIGNIER M., *Électronique de puissance*, in *Techniques de l'ingénieur* (D461 à D473). - LECORGUILLIER J., *les Vannes électroniques à électrodes de déclenchement*, éd. Dunod. - MOUNIC M., *Semi-conducteurs*, t. III, *les Thyristors*, éd. Foucher. - POLOUJADOFF M., *Conversion électromécanique d'énergie*, coll. Dunod Université.

fig. 59

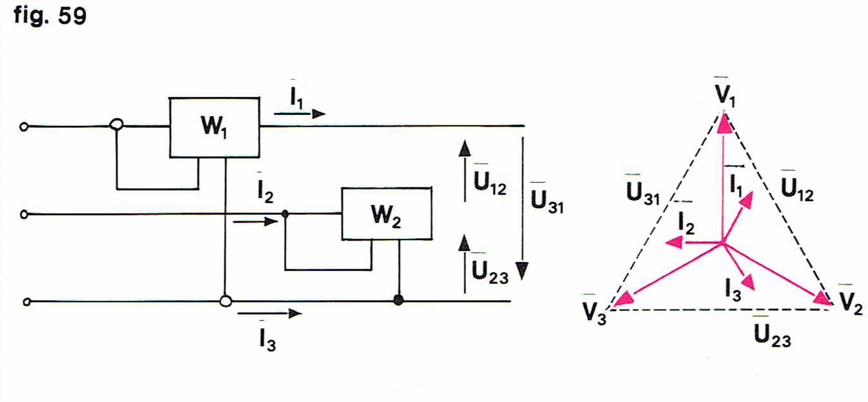

fig. 60

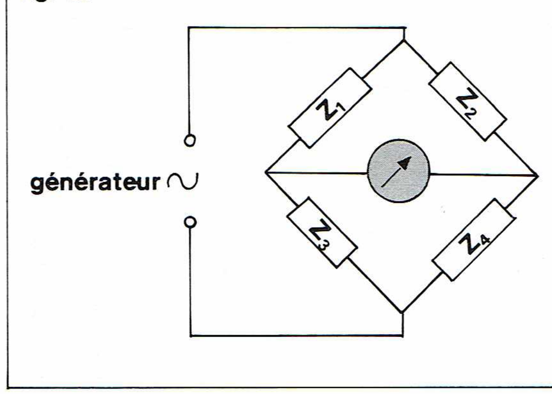

fig. 62

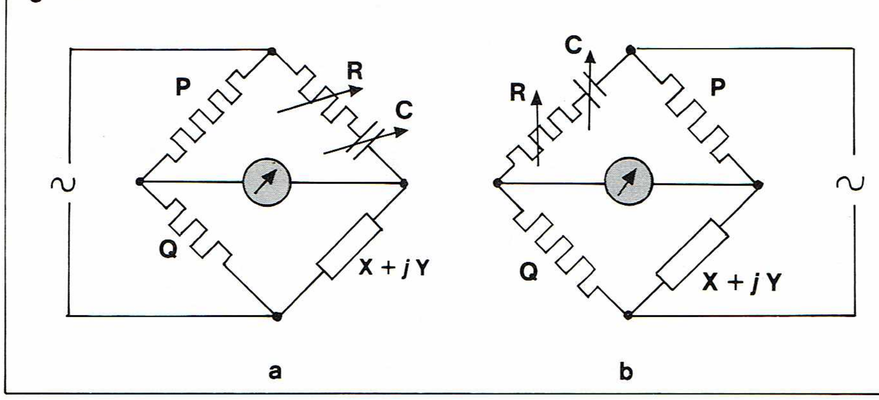

fig. 61

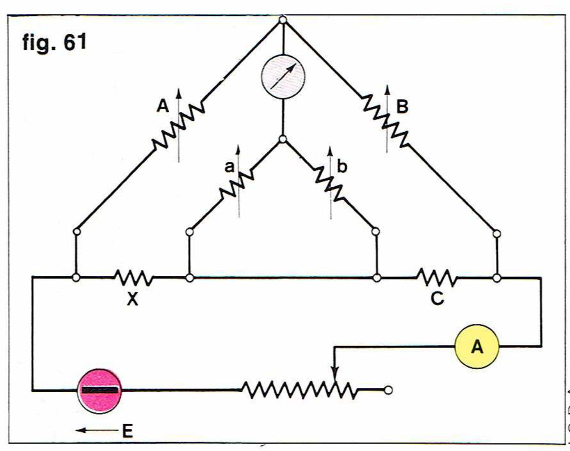

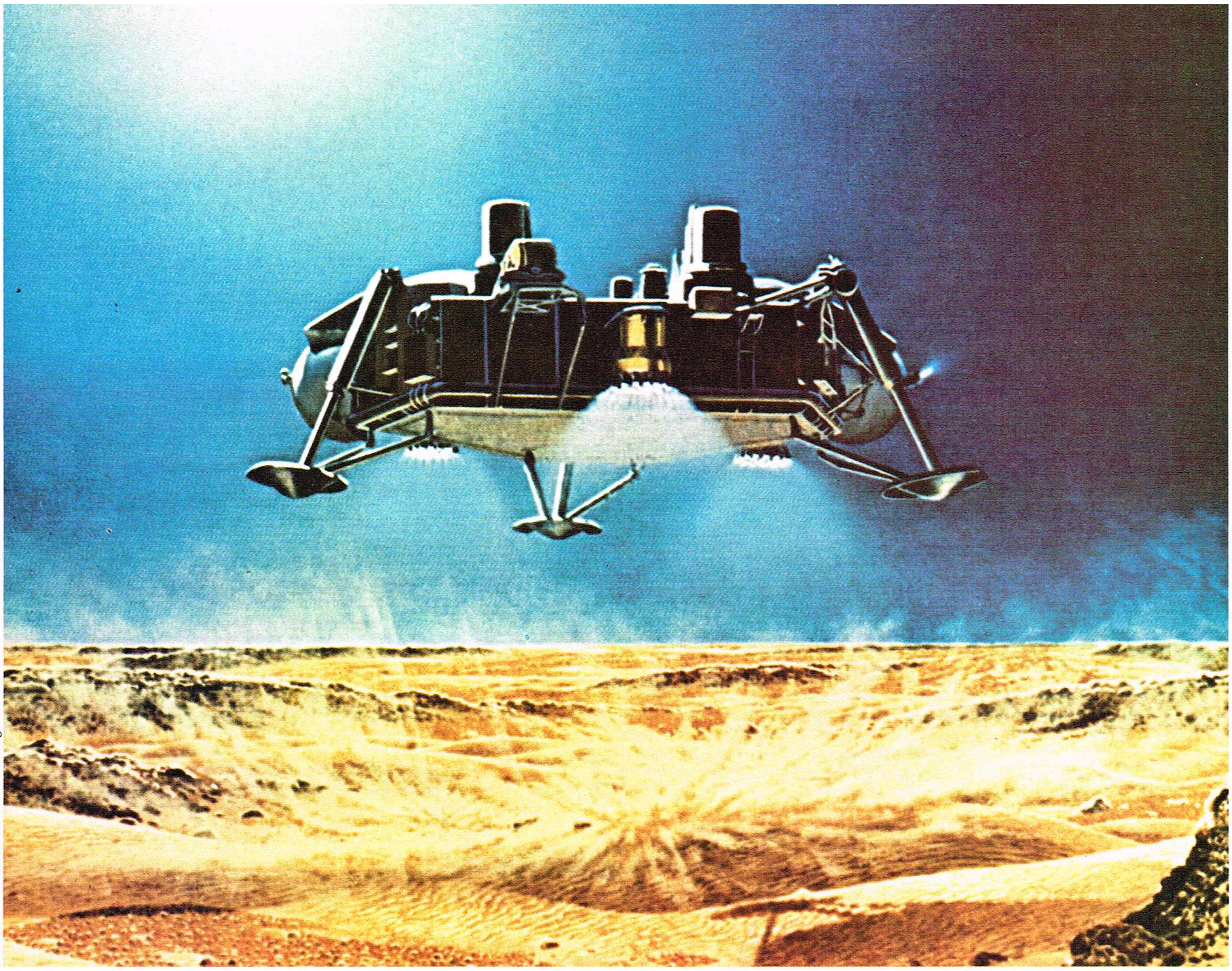

Hamilton - Camera Press - Parimage

CYBERNÉTIQUE ET AUTOMATIQUE

La cybernétique est la science qui étudie les processus de contrôle et de communication chez l'animal et dans la machine. Cette définition a été proposée par Norbert Wiener en 1948. Les humains sont des machines... ne voulant pas dire par là que le système humain ressemble à un ordinateur mais désirant comprendre comment construire des systèmes de plus en plus sophistiqués de manière à donner aux machines des performances de plus en plus proches de celles de l'homme.

La cybernétique est en fait née en 1942, à New York, lors d'un congrès sur l'organisation du cerveau, bien que le terme n'ait été proposé que quelques années plus tard par Wiener. Au nom de Wiener lié à la cybernétique il faut ajouter ceux de A. Rosenblatt, W. S. Mc Culloch, W. Pitts, C. E. Shannon, etc., des physiologistes, neurologues, mathématiciens qui montrent combien la cybernétique est une science générale offrant la possibilité d'un langage unifié pour des disciplines très diverses.

Qu'est-ce que la cybernétique? Certains auteurs comme von Bertalanffy limitent le champ de cette science à l'étude des systèmes à rétroaction, et évoquent la théorie des systèmes comme beaucoup plus générale. En fait, Wiener n'a jamais borné la cybernétique aux systèmes à rétroaction, ni évoqué celle-ci comme la science de la « machine pensante ». Pour lui, la cybernétique s'occupe des processus de contrôle et de communication d'un organisme, que cet organisme soit un être vivant ou une machine. En fait, on pourrait également faire sienne la définition proposée par les scientifiques russes, car elle est suffisamment large : la cybernétique est l'étude des systèmes complexes à l'aide d'un ordinateur.

L'origine des travaux de Wiener date de l'étude des problèmes de lissage, de prédiction et d'interpolation, énormément développés au moment de la Seconde Guerre mondiale à une époque où par exemple la prédiction d'une trajectoire à partir de la connaissance des statistiques d'un processus stochastique revêtait une importance particulière. L'idée de Wiener fut de tenter de rapprocher ces problèmes mathématiques de ceux rencontrés par des psychologues et des physiologistes. L'aspect statistique de la théorie de Wiener est particulièrement important.

Avant de présenter la notion fondamentale de la cybernétique, la rétroaction, rappelons brièvement la **notion de système.** Soit un *organisme* échangeant de l'information avec son environnement. Le comportement de cet organisme sera influencé par des informations sur l'évolution de l'environnement, que nous appellerons les *entrées*, de même que, réciproquement, le comportement de l'environnement sera marqué par l'évolution de l'organisme, l'information étant alors transmise par ce que nous appellerons les *sorties*. Il y a interaction entre l'organisme et l'extérieur, l'organisme n'est donc pas isolé. Le mot organisme précédemment employé sera remplacé par le mot *système :* un système est donc un ensemble séparé de tout le reste par une frontière, recevant de l'information sur l'extérieur par ses entrées et en donnant sur son évolution par ses sorties. L'ensemble des sorties et des entrées ne suffit pas à caractériser l'évolution du système : il faut y ajouter les *états*. Les états sont des paramètres internes qui déterminent le lien entre les grandeurs de sortie et les grandeurs d'entrée : l'ensemble des variables d'état condense l'information sur le passé. Il suffit donc de connaître l'état du système à l'instant t_0 pour prédire son comportement aux instants $t > t_0$; la connaissance des comportements ou des états antérieurs à t_0 n'apporte aucune information complémentaire.

Tout système possède deux fonctions qui vont permettre de faire ces prédictions de comportement : la *fonction de transition d'état* qui permet de calculer le nouvel état, connaissant l'état antérieur et les entrées

▲ *La cybernétique est l'un des stades les plus avancés de l'évolution des techniques : ici, la sonde* Viking *chargée d'étudier la planète Mars; mais le moment n'est pas venu où un ordinateur présentera des possibilités d'interprétation des formes comparables à celles du cerveau.*

◀ *Page ci-contre, en haut, figure 58 : montage expérimental de la mesure de la puissance dans un réseau triphasé par la méthode des « deux wattmètres ». La présence d'un interrupteur à court-circuit permet de n'en disposer qu'un seul* (W). *Cet interrupteur comporte une branche isolante* (D) *qui permet de dériver le courant dans le circuit de mesure comportant un transformateur d'intensité* (TI), *un ampèremètre* (A) *et un voltmètre* (V). *La branche isolante peut basculer pour effectuer les mesures sur la phase 1 et la phase 2.*

▶ *Figure 1 : schéma d'un circuit à rétroaction négative.*

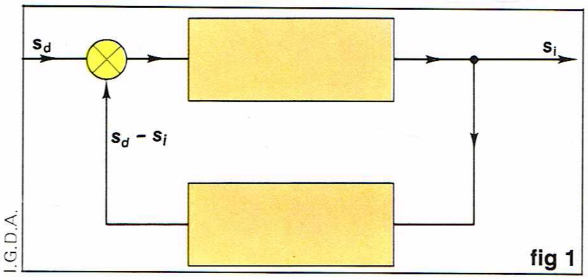

I.G.D.A.

appliquées et la *fonction de sortie* qui permet de calculer les sorties à partir de l'état.

On distingue les *systèmes déterministes* des *systèmes stochastiques :* pour les premiers les fonctions de transition d'état et de sortie déterminent de manière unique le comportement du système, pour les seconds il faut ajouter des lois de probabilité (probabilité d'avoir tel ou tel état après l'état actuel).

Nous ne traiterons que des systèmes déterministes. Cela revient à fixer une fois pour toutes la fonction de transition d'état du système; cette contrainte va nous limiter dans l'étude des systèmes, elle ne s'applique pas en particulier aux systèmes vivants.

Le **mécanisme de rétroaction,** introduit par la cybernétique, est très utilisé dans la technologie moderne pour le contrôle de certaines actions : missiles à tête chercheuse, dépôt d'un robot sur la Lune, etc. Un grand nombre de phénomènes biologiques relèvent aussi de ce mécanisme. Citons le cas de l'homéostase ou maintien d'un équilibre dans un organisme vivant avec en particulier la thermorégulation chez les animaux à sang chaud. Dès que le sang se refroidit, des centres cervicaux jouent le rôle d'avertisseurs et excitent des mécanismes pour réchauffer le corps; la température se trouve maintenue à un niveau constant. Tout mouvement du corps humain est ainsi contrôlé : repérage de la distance restant à accomplir pour atteindre l'objectif, puis correction même si des incidents se présentent.

La cybernétique essaie de montrer que le mécanisme de rétroaction est le fondement du comportement téléologique des organismes vivants aussi bien que celui des machines réalisées par l'homme.

Le schéma général d'une rétroaction se compose des organes suivants :

— un *contrôleur* qui émet des signaux de contrôle servant à modifier le comportement du système à contrôler lorsque ce dernier ne suit plus la trajectoire prévue en raison, par exemple, de phénomènes extérieurs perturbatoires;

— des *capteurs* qui permettent de déterminer d'après les sorties du système sa situation exacte.

La *figure* 1 représente un cas particulier de rétroaction : la *rétroaction négative*. On mesure une sortie s_i qui est comparée à la sortie désirée s_d par un comparateur, celui-ci élaborant alors le signal d'erreur $s_d - s_i$; ce signal d'erreur constitue l'entrée du contrôleur. Ce schéma permet de comprendre comment un système à rétroaction peut parfois mal fonctionner. Supposons que le système de contrôle donne des ordres supérieurs à ceux nécessaires pour contrôler l'erreur ($s_d - s_i$). Si au départ cette erreur est positive, par suite d'ordres de puissance trop élevée, elle devient négative, puis de nouveau positive : ainsi le système est devenu oscillant. On appelle généralement *servomécanisme* les systèmes à rétroaction négative.

Introduisons maintenant la **notion d'adaptation,** qui nécessite la création d'une structure hiérarchisée. Le premier niveau évolue rapidement et a une mémoire courte (l'état antérieur) et donne l'état du système à chaque instant. Le second niveau, plus sophistiqué, est constitué des paramètres d'adaptation : ce niveau a une mémoire longue puisqu'il conserve le souvenir des réactions passées par rapport à certaines entrées et fait évoluer la fonction de transition d'état de façon à réagir « mieux » pour de nouvelles entrées. La fonction d'adaptation est une caractéristique particulièrement importante des systèmes vivants.

Le dernier problème dont nous parlerons est celui de l'adaptation. En effet, le système à contrôler peut être très mal connu. Prenons un exemple : il est assez stupéfiant que le cerveau d'un animal puisse contrôler et gérer un corps qui évolue de la naissance à l'âge adulte non seulement en taille, mais aussi en proportions relatives. Le problème à résoudre est un problème d'identification. En effet, si l'on veut contrôler un système dont on ignore les équations dynamiques, il vaut mieux, au lieu de calculer un organe de contrôle pouvant diriger le système, concevoir un organe de contrôle pouvant s'adapter, au moins dans un certain domaine, aux évolutions du système. Cela impose que le système à contrôler varie suffisamment lentement pour permettre cette phase d'identification (calquer un modèle sur le système) et donner des ordres de contrôle efficaces. Le contrôleur couplé avec un organe d'identification devient un contrôleur adaptatif. En fait, il semble aussi nécessaire que ce dernier agisse sur l'environnement afin, par exemple, d'appliquer des signaux test aux systèmes et de vérifier les assertions effectuées sur le modèle. Les algorithmes généralement proposés pour une phase d'adaptation ne sont applicables qu'à des systèmes de taille faible.

▼ *Les premières études de cybernétique ont été appliquées à la compréhension du système nerveux, et en particulier à la transmission des informations entre les différents organes et le cerveau. Ce modèle de cerveau humain montre, par un système d'impulsions électriques, le fonctionnement d'un cerveau en activité, de même que la façon dont il utilise des stimuli sensoriels, et résume les connaissances sur les fonctions du cerveau auxquelles nous sommes parvenus dans les dix dernières années.*

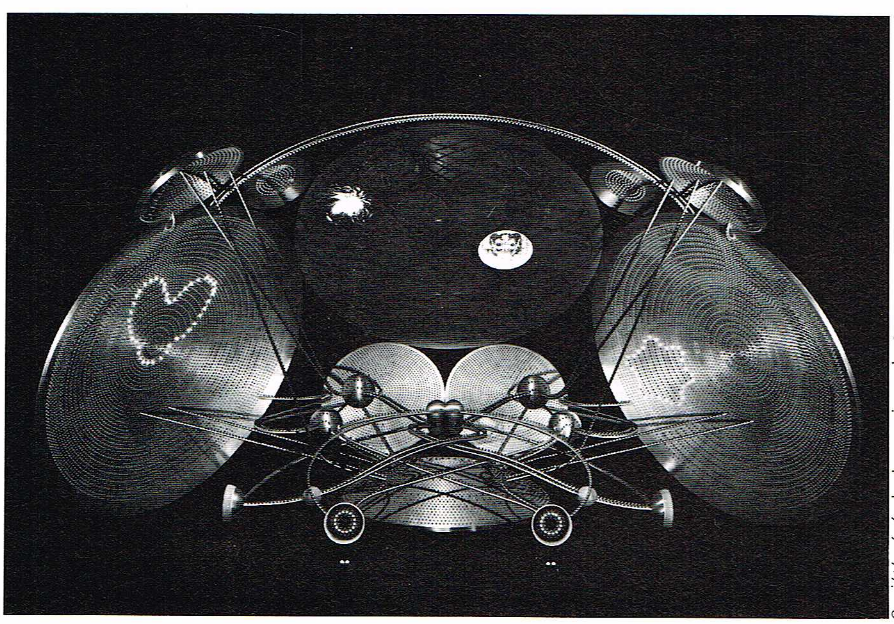

Société générale des semi-conducteurs

Application à la compréhension de la matière vivante

Outre les applications de la cybernétique aux systèmes physiques que nous avons déjà évoquées, citons également l'application à la compréhension du cerveau : des comparaisons s'imposent entre le fonctionnement des ordinateurs et celui des machines : cette interpénétration de la neurophysiologie et de la cybernétique a donné naissance à la **neurocybernétique.** Cependant il est dangereux de vouloir élaborer un modèle électrique, donc une machine artificielle, calqué sur le système cérébral. En effet, un système vivant a la propriété remarquable d'être modérément affecté par le mauvais fonctionnement ou la destruction d'une partie de ses composants : ce n'est pas le cas de tous les systèmes. Ainsi, en 1943, Mc Culloch et Pitts avaient proposé un modèle formé d'unités élémentaires, les « neurones formels » interconnectés. Un neurone formel émet des signaux et en reçoit des terminaisons d'autres modules par l'intermédiaire de synapses. Ce « neurone formel » est analogue à un relais : il est soit actif, soit au repos, mais il faut dépasser un certain seuil d'excitation pour le faire passer du repos à l'état actif. Deux sortes de réseaux neuronaux étaient considérés : les *réseaux cycliques* où la rétroaction présente permettait de corriger des déviations par rapport à l'objectif, et les *réseaux acycliques*.

Ce modèle est un modèle simpliste en ce sens qu'il suppose que tous les neurones sont identiques, que la transmission dans les synapses est fiable, et que les types de connexion sont figés. Ces hypothèses suppriment de nombreuses possibilités, en particulier au niveau de l'adaptation, et surtout ce modèle repose sur des propriétés électriques, alors que, depuis, les neurophysiologistes ont montré le rôle important joué par les pro-

priétés chimiques des constituants du système cérébral. Toutefois le grand mérite de ce modèle est de fournir une image « ordinateur » du système cérébral.

Une autre application de la cybernétique à la matière vivante est la **bionique** : l'organisme devient une machine cybernétique expliquant beaucoup de phénomènes homéostatiques. En particulier se pose ici le problème de la construction d'un modèle du vivant (en particulier des polynucléotides). Les gènes sont constitués par des molécules d'ADN, et la synthèse des protéines s'effectue à partir de ces molécules servant de moules. Un gène se présente sous la forme d'une séquence de bases d'un ADN dirigeant la synthèse d'une protéine sous la forme d'une chaîne d'acides aminés : c'est une micromachine qui transforme le code génétique en protéines spécifiques. Les ADN sont formés de 4 sortes de nucléotides (adénine, thymine, guanine et cytosine). Chaque molécule est caractérisée par l'arrangement en séquence des nucléotides. En prenant le langage de la théorie de l'information exposé plus loin, un ADN est un message écrit dans un alphabet à quatre lettres. La séquence des acides aminés d'une protéine détermine les structures de celle-ci. Or une protéine est constituée de plusieurs milliers d'acides aminés. Il existe vingt acides aminés différents : on peut donc considérer une protéine comme un message codé à partir d'un alphabet à 20 lettres. On peut alors étudier la quantité d'information portée par une protéine à partir de ces notions : c'est un problème de théorie de l'information. L'intérêt de la connaissance de ce code génétique est qu'il est commun à tous les organismes vivants : comment peut-on faire un codage de messages écrits dans un alphabet à 20 symboles dans des messages écrits dans un alphabet avec 4 symboles. On est arrivé à déchiffrer le code génétique. Les recherches actuelles portent sur l'étude du mécanisme de différenciation cellulaire et de l'évolution des espèces.

Intelligence artificielle

Nous avons jusqu'à présent appliqué la cybernétique à la modélisation du système cérébral : l'intelligence artificielle est le domaine scientifique intéressé par la conception de machines pouvant être considérées comme « intelligentes ». Il est bien évident qu'il y a là un abus de langage : l'intelligence n'est pas une caractéristique dont on dote ou non un objet. En 1950, Turing a proposé un test amusant pour déduire si une machine est intelligente ou non : un expérimentateur se trouve seul dans une pièce avec deux télétypes qui lui permettent de questionner deux systèmes A et B : A est un homme, B est une machine, mais l'expérimentateur l'ignore. Si l'expérimentateur, après avoir posé de nombreuses questions aux deux systèmes, a des doutes sur qui est l'homme et qui est la machine, on peut dire que la machine est intelligente ! Ce test est particulièrement difficile à passer pour une machine. En effet, si un calculateur peut résoudre des problèmes numériques ou non pour lesquels il a été programmé, on le voit mal, dans l'état actuel des choses, répondre à des questions posées au hasard par un interlocuteur.

Un des premiers problèmes qui se posent à un robot est la perception. Par exemple, en ayant de l'information par la lumière réfléchie par la surface en face de lui, la machine doit prédire si cette surface peut ou non supporter son poids... Il en est ainsi pour toute décision en liaison avec l'objectif qui lui a été fixé. En face d'une surface, le robot doit donc choisir entre plusieurs solutions et décider : il faut donc qu'il dispose d'une importante bibliothèque de programmes donnant la décision à prendre pour chaque situation qui se présente à lui. Ce que fait le cerveau humain dans ce cas, c'est un modèle de l'Univers : identification de l'environnement afin d'entraîner toute une série d'actions (commande de paroles, de mouvements de membres, etc.), ces actions étant choisies parmi plusieurs après avoir prédit toutes les réactions possibles. D'ailleurs, cette phase de modélisation a pu être améliorée par des actions de l'homme sur l'environnement afin d'augmenter l'information (juger de la texture d'un objet par le toucher, par exemple). Il convient toutefois de distinguer deux types de modèle : le premier type a trait aux relations immédiates avec l'environnement, le second type permet de déduire les propriétés de l'environnement.

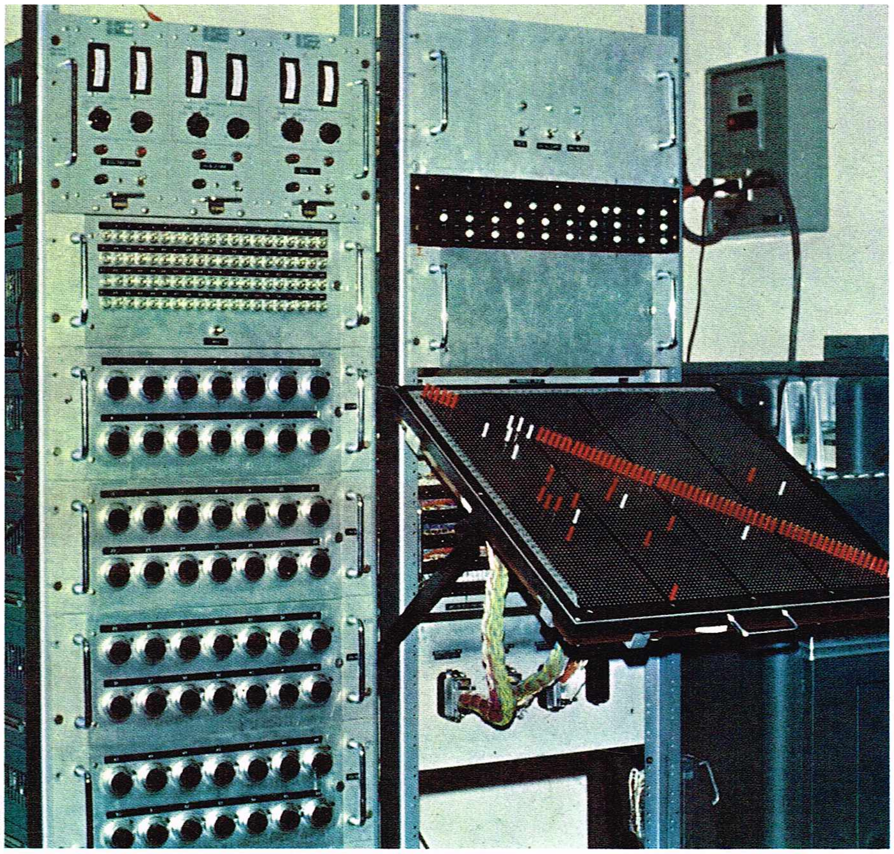

C.N.R.

▲ *Le simulateur de réseaux neuronaux « Diana » (Naples, Laboratoire de cybernétique du C. N. R.).*

Un système du type robot se révélera donc « intelligent » s'il est capable non seulement de saisir les propriétés de l'environnement mais aussi de mettre à jour sa mémoire en prenant en compte les nouvelles propriétés découvertes (adaptation). Un tel système devra utiliser cette expérience passée non seulement pour s'adapter mais aussi pour dénouer des situations qui ne sont pas strictement similaires à celles rencontrées auparavant. Enfin ce système doit pouvoir utiliser son modèle pour agir mais aussi pour élaborer plusieurs solutions avant de choisir : il vaut mieux par exemple qu'un robot placé sur la Lune reconnaisse un précipice avant et agisse de manière à l'éviter plutôt que de reconnaître (si c'est encore possible) avoir fait une erreur *a posteriori*.

Un calculateur capable de réaliser des millions d'opérations numériques par seconde n'est pas intelligent, c'est une machine à calculer. Dès qu'on introduit la possibilité d'adaptation, aussi faible soit-elle, on sort de la catégorie précédente. L'exemple classique est la réalisation d'une machine susceptible de jouer aux échecs : en 1959, Samuel programme un calculateur dans ce dessein. A chaque coup, le calculateur examine plusieurs mouvements possibles et essaie de choisir le meilleur (tous les mouvements possibles ne sont pas examinés, car, malgré la rapidité de la machine, il y a une limitation de temps).

▼ *Inventée par le professeur Higginbothom et le docteur Pugh de Nottingham, cette machine-robot peut assembler et distinguer différentes pièces.*

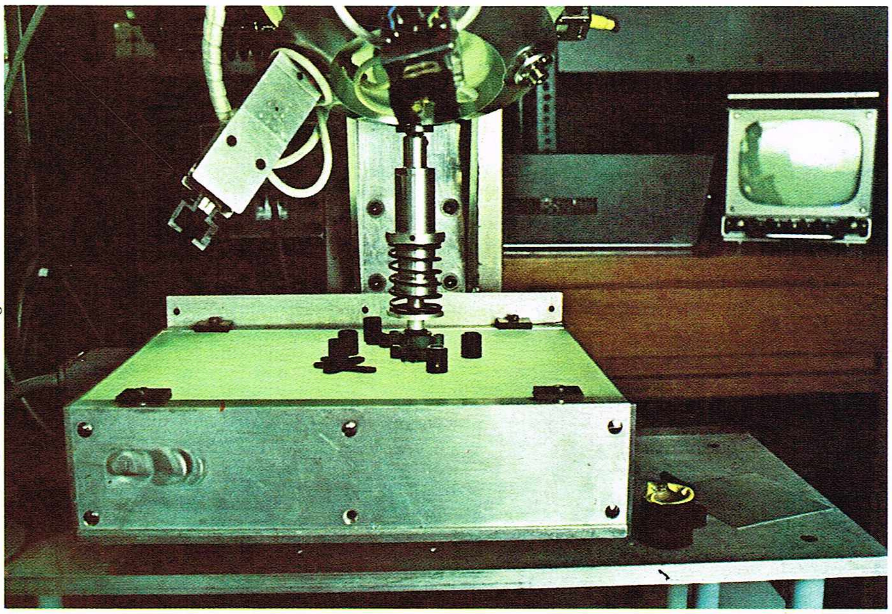

Les Wilson - Camera Press - Parimage

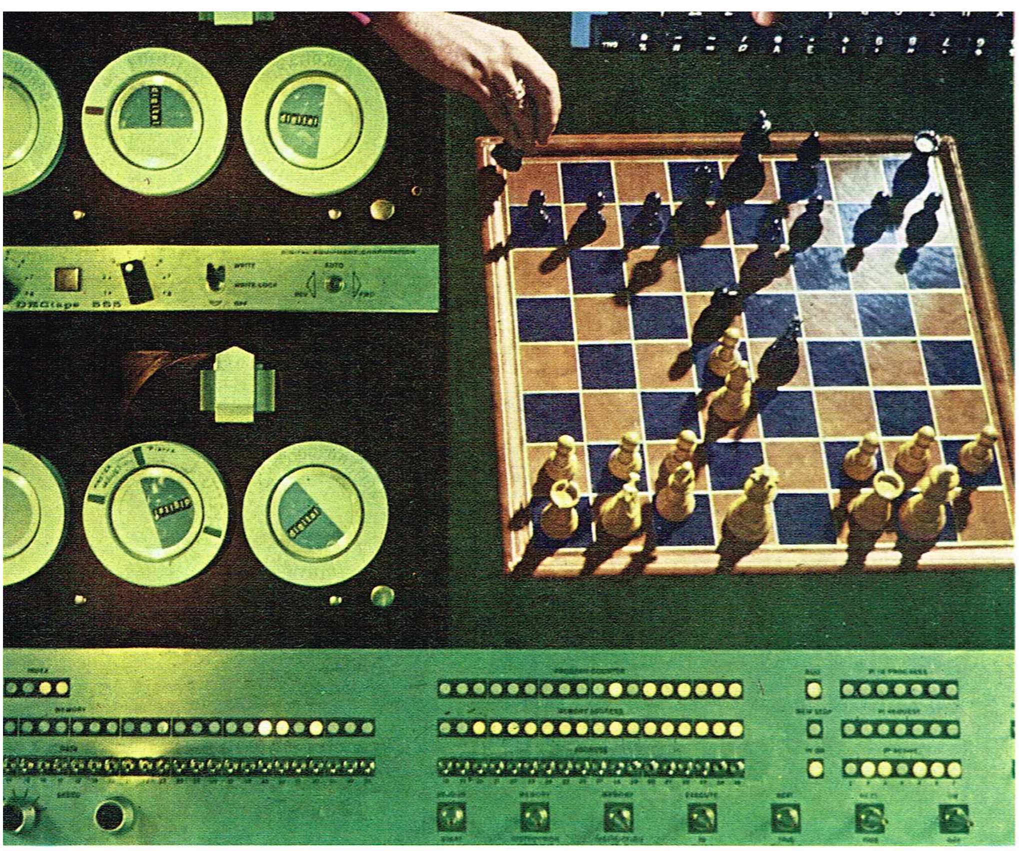

Transworld

▲ *Un exemple classique de machine pensante : l'ordinateur jouant aux échecs.*

▼ *Dans le cas de mécanisme complexe comme la vision, ou le toucher, la solution reste encore du domaine de la recherche, et le robot, si perfectionné soit-il, n'a pas encore remplacé l'homme et sa faculté de capter et d'interpréter des informations complexes.*

Les règles édictées par Samuel pour ne garder que certains mouvements parmi tous les possibles sont du domaine de la recherche heuristique.

Quand donc, comme dans l'exemple précédent, on désire programmer une machine de manière qu'elle gagne lors d'une partie d'échecs ou lorsque l'on désire trouver automatiquement une démarche déductive de manière à démontrer un théorème, on dispose d'une multitude de cas possibles (nombre de possibilités de déplacements des pièces d'un jeu d'échecs, somme de tous les théorèmes déjà démontrés dans le domaine mathématique concerné). Dans chacun des deux exemples, il s'agit de trouver un chemin optimal qui, à partir d'un état initial donné, amène en le moins d'étapes possibles à l'objectif (gagner la partie d'échecs ou démontrer le théorème) : il faut donc trouver cette suite logique d'étapes parmi la multitude de suites possibles.

A partir de la description de ce problème, on peut faire quelques remarques :

— la plupart du temps, l'espace des possibilités est si grand que la place mémoire qu'il nécessite excède les possibilités des calculateurs; compte tenu de la rapidité de réponse demandée, on ne doit donc garder que les situations les plus proches du problème à résoudre (cependant ce choix des situations les plus plausibles peut reposer sur une information incomplète);

— comme le montre l'exemple du jeu d'échecs, il faut non seulement déplacer une pièce de manière à hâter la possibilité de gagner, mais aussi ne pas se placer en une position qui entraînera une riposte catastrophique de l'adversaire, il faut donc aussi étudier simultanément les possibilités de la partie adverse;

— on doit pouvoir « simplifier » l'espace des possibilités; par exemple, il est absurde lors de la recherche d'un chemin de A à B sur une carte routière de garder toutes les villes sur une route donnée si elles ne se pré-

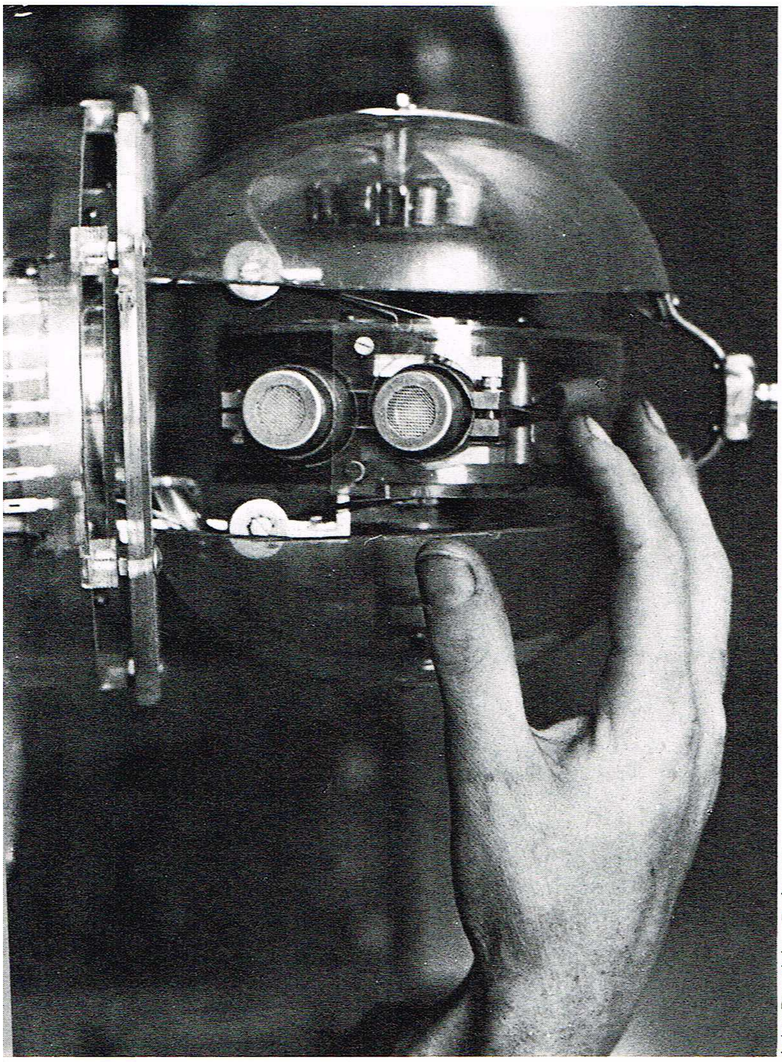

John Drysdale - Parimage

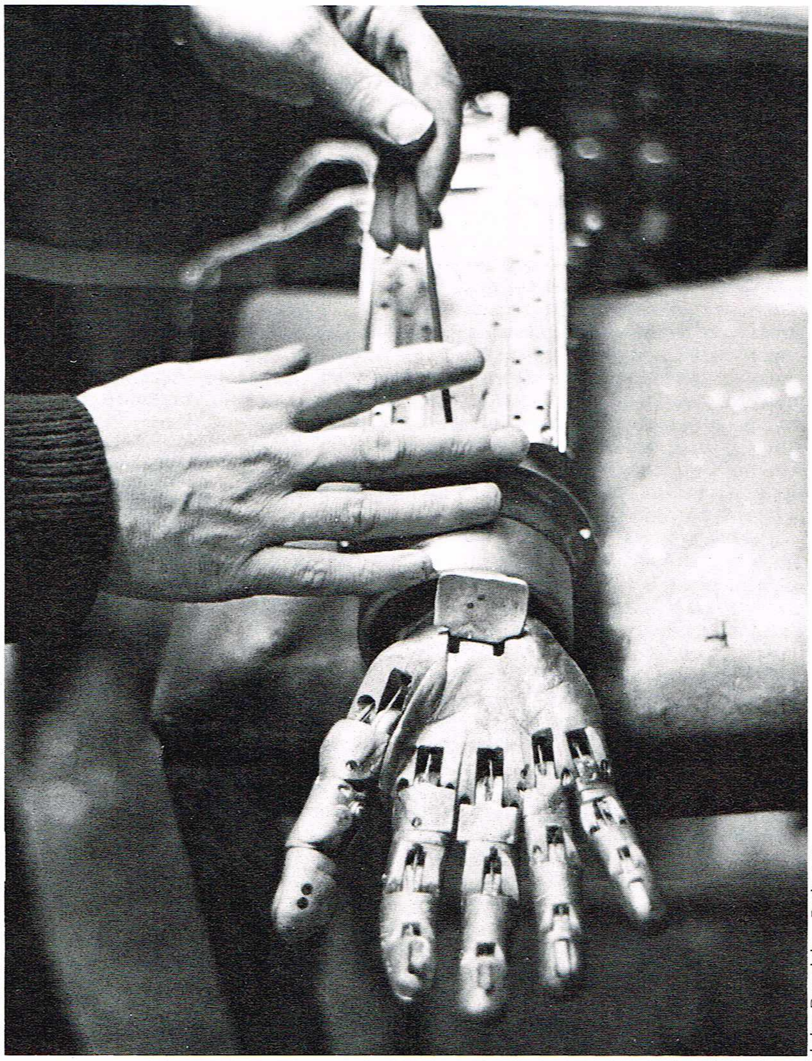

John Drysdale - Parimage

sentent pas comme des points d'intersection. Il existe plusieurs techniques pour éviter d'avoir à lister tous les chemins possibles. L'une repose sur la représentation de l'ensemble des possibilités par un graphe ayant pour origine le point initial et dont chaque nœud est une source d'alternatives; une méthode fondée sur la programmation dynamique bien connue des ingénieurs de contrôle permet alors de trouver un chemin optimal dans le graphe. Cependant ceci revient encore à lister tous les cas possibles, et des méthodes heuristiques sont développées pour éviter cet inconvénient (méthode proposée par Nilsson en 1968, par exemple).

Terminons enfin ce paragraphe sur l'intelligence artificielle par une brève description de la façon dont un robot utilise une série d'images pour bâtir un modèle. Nous commencerons par une application très connue, celle de la reconnaissance de caractères. S'il s'agit de caractères bien typés comme ceux d'une machine à écrire, l'ensemble des possibles est faible; s'il s'agit de caractères écrits, la reconnaissance est beaucoup plus délicate. Dans ce dernier cas, la reconnaissance ne doit plus se faire caractère par caractère mais doit utiliser l'information importante que constitue la suite de caractères formant un mot; ainsi pour le mot « ch-t » dans lequel le troisième caractère est déformé au point de ne pas être reconnaissable, on peut affirmer que ce caractère inconnu ne peut être une consonne, car il n'y a pas de mot français ayant quatre consonnes successives, ni « e », « o », « i », car les mots correspondants n'existent pas. Il ne reste donc que deux mots possibles qu'on offrira à l'utilisateur ou parmi lesquels on choisira après analyse contextuelle de la suite de mots (la phrase doit avoir un sens), mais ce problème est déjà beaucoup plus délicat et non résolu de manière automatique.

Donnons maintenant l'exemple d'un robot manipulateur comportant une caméra T. V. en guise d' « œil », un ordinateur pour « cerveau », et un bras mécanique comme agent moteur. Différents programmes sont disponibles suivant la forme de l'objet à saisir. Si la liste des objets est finie (par exemple cube et sphère), les programmes de reconnaissance sont simples : on caractérise chaque objet par un nombre minimal de paramètres afin de le distinguer d'autres objets (une sphère ne présente pas d'angles). Dans des cas plus complexes, des programmes sophistiqués de reconnaissance des formes permettent l'identification d'objets. De plus, il faut ajouter à la reconnaissance de structure proprement dite celle de la position et de l'orientation dans l'environnement. Des méthodes ont été proposées pour résoudre ce problème, mais la solution reste encore du domaine de la recherche. Citons deux robots réalisés actuellement dans le cadre du projet MAC du Massachusetts Institute of Technology ou du projet d'intelligence artificielle du Stanford Research Institute. Dans le cadre du MAC, un robot a été réalisé, comprenant un calculateur qui commande un bras mécanique pour saisir et manipuler des objets après avoir traité l'information reçue par une caméra. Au Stanford Research Institute a été réalisé un robot mobile : une caméra alimente un calculateur qui extrait les informations dont le robot a besoin; ce dernier possède donc un modèle de l'environnement qui lui permet de localiser des objets et de les pousser à un endroit déterminé. Donnons un exemple de travail réalisé par ce dernier robot dans les années 1970 :

— analyse d'une scène pour reconnaître un certain nombre d'obstacles et leurs positions sur le plancher de la pièce;

— mémorisation de cette scène;

— étant donné la commande « placer le cube près de la porte », utilisation de l'enregistrement précédent pour chercher un chemin qui amène le robot derrière le cube et un autre qui mène du cube à la porte;

— convertir ce plan en une suite de commandes pour les roues du robot (on remarque tout de suite l'incident possible, le robot roulant « les yeux fermés » peut rencontrer des obstacles cachés par d'autres obstacles lors de la première analyse effectuée).

Les tâches décrites dans les exemples ci-dessus sont simples, mais la réalisation en est déjà très complexe. Comme exemple de recherches actuelles, citons dans ce même domaine des essais de main artificielle, car il faut que le robot ait une information sur la pression à exercer par le bras mécanique pour éviter d'écraser l'objet.

fig. 2

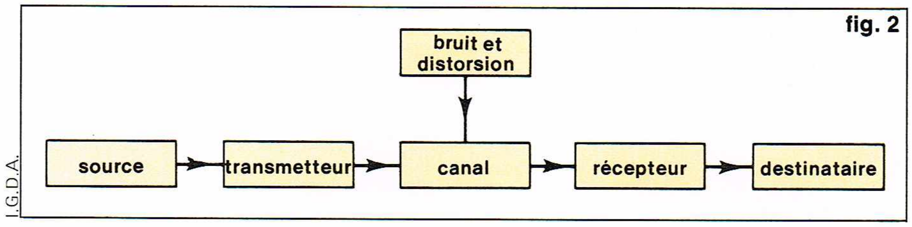

▲ ***Figure 2 : schéma d'un système de communication.***

Concluons cette brève description de la cybernétique en insistant sur son caractère général du fait de son utilisation dans un grand nombre de domaines.

Nous développerons plus particulièrement deux points : la théorie de l'information et l'automatique.

La théorie de l'information

Un système de communication a pour objet de transmettre un message d'un expéditeur à un destinataire. Pour cela, on utilise un support physique : le *signal.* Ce dernier n'est qu'un auxiliaire technique sans lequel la transmission serait impossible (par exemple signaux électriques utilisés pour la conversion de la parole dans une communication téléphonique).

Un système de communication peut être représenté schématiquement par les blocs de la *figure* 2 ; il comprend :

— **Une source de messages.** Cet organe sélectionne un message parmi l'ensemble des possibles.

— **Un transmetteur.** Il transforme le message dans une forme qui permettra la transmission. Dans l'exemple précédent de la communication téléphonique, le transmetteur transforme le message donné sous forme de vibrations de l'air en un signal électrique. Souvent cependant l'opération est plus compliquée. Avant ou après cet organe de conversion s'insère un autre système, le *codeur,* qui réécrit le message avec des symboles (caractères, lettres) pris dans un alphabet différent : par exemple codage dans l'alphabet binaire (0, 1) de la grandeur électrique. Ce codage a plusieurs buts : il permet d'adapter la source à l'organe de transmission (le canal), de lutter contre des erreurs possibles de transmission (en effet, on peut introduire une redondance). Il est parfois aussi nécessaire de reconvertir en d'autres signaux électriques le message codé, toujours pour des raisons de transmission; ainsi un message codé {0, 1} peut être transmis au moyen de signaux électriques sinusoïdaux du type « 0 » représenté par sin $2 \pi ft$ et « 1 » par sin $4 \pi ft$: c'est l'*opération de modulation.*

— **Le canal.** C'est l'organe par lequel s'effectue la transmission. Dans un système de communication de ville à ville, le canal pourra être par exemple l'atmosphère ou des câbles téléphoniques. Durant la transmission, le signal peut être modifié par deux phénomènes : la distorsion et le bruit. La *distorsion* est une transformation fixée qui agit sur le signal : elle est due en général à des considérations techniques (bande passante, par exemple, du canal) ; elle peut être corrigée en appliquant totalement ou au moins partiellement la transformation inverse. Le *bruit,* par contre, est un phénomène statistique dont l'effet ne peut pas être complètement supprimé, car le signal n'est jamais transformé de la même façon : c'est une transformation non prévisible. Pour lutter contre ce phénomène, on peut employer des techniques de codage du type dont nous avons déjà parlé (emploi de redondance) ou utiliser une énergie plus grande pour la transmission, le signal transmis étant dans ce cas plus porteur d'énergie que les signaux aléatoires perturbateurs, mais cette solution augmente le coût de la transmission.

— **Le récepteur.** Le récepteur tente de retrouver le message originel à partir du message reçu. Il comprend donc éventuellement tous les organes inverses du transmetteur : *système de démodulation* et *décodeur.*

— **Le destinataire.** C'est l'organe final, celui à qui était destiné le message. Pour le destinataire et l'expéditeur, le message a une signification logique. Pour l'organe de transmission, le problème est différent : le sens importe peu, ce sont le coût ou le temps de transmission qui comptent. La théorie de l'information n'attache aucune importance à la signification du texte : la quantité d'information transmise peut se concevoir intuitivement par le coût ou la durée de la transmission. L'information

au sens où nous allons la développer n'est pas une propriété du message en tant qu'individualité mais de l'environnement qui produit ces messages. Rappelons-nous que le texte du télégramme importe peu à l'employé des Postes : la théorie de l'information s'occupe du caractère informatif du message en faisant abstraction de sa forme et de sa signification.

Dans ce qui va suivre nous distinguerons deux types de sources de message : les *sources discrètes* dont le nombre de messages est fini ou dénombrable et les *sources continues* que l'on considère pour les problèmes de transmission de la musique, d'images, etc. L'étude de la transmission dans le cas des sources discrètes est plus simple, car il n'y a pas de problème de convergence. Après avoir, dans un premier temps, introduit les concepts d'information et d'entropie tels qu'ils ont été définis par Shannon, nous préciserons le problème du codage. A titre d'exemple de l'importance du problème du codage, signalons qu'aux États-Unis les télégrammes tels qu'annonce de naissance, félicitations pour un mariage... c'est-à-dire des télégrammes aux textes classiques, sont codés par un seul mot, alors qu'un télégramme ayant un texte particulier demande autant de mots que de lettres : cette astuce permet de compacter la transmission, donc d'en réduire le coût.

Information dans le cas de sources discrètes

Information et entropie

Nous nous intéresserons dans un premier temps aux sources de messages discrètes, c'est-à-dire que nous supposerons choisir un message dans un ensemble fini. La théorie de l'information s'intéresse à la transmission de la forme des messages et non pas au transfert de la signification. L'objet d'un message étant d'apporter une information au destinataire, ce message sera d'autant plus « porteur » d'information qu'il sera inconnu du destinataire. Si le message est déjà connu du destinataire, il ne lui apporte aucune information : la quantité d'information est donc liée à la probabilité du message. Plus le message est improbable, plus la quantité d'information doit être grande. On peut espérer aussi que la quantité d'information possède la propriété d'additivité : la quantité d'information apportée par deux messages qui se complètent, c'est-à-dire indépendants, doit être la somme des quantités d'information apportées par chacun des messages. La quantité d'information I apportée par un message m de probabilité p est définie par :

$$I = + \log \frac{1}{p}$$

La base du logarithme définit l'unité : si la base est 2, I se mesure en *bits*, si la base est *e*, I se mesure en *nats*, si la base est 10, I se mesure en *hartleys*. L'unité la plus utilisée est le bit. En effet, beaucoup de codages se font dans l'alphabet binaire (0, 1) en raison de l'utilisation de systèmes informatiques. Considérons une source à deux messages équiprobables que l'on peut symboliser par 0 et 1. La quantité d'information apportée par chaque message vaut $I = \log_2 2 = 1$ bit

fig. 3

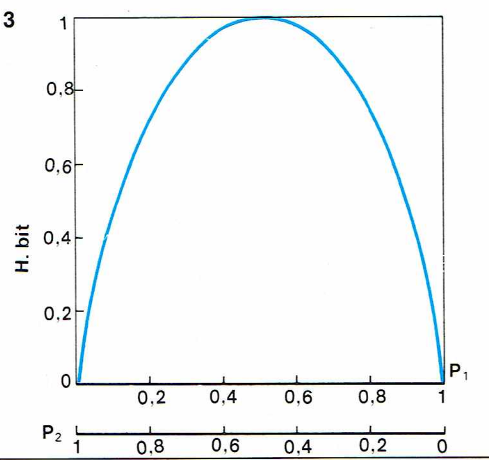

▶ *Figure 3 : variation de l'entropie* H *d'une source à deux symboles de probabilités respectives* P_1 *et* P_2.

I.G.D.A.

Une carte perforée comportant 80 colonnes avec 12 possibilités de perforation par colonne, le nombre de messages susceptible d'être construit vaut 2^{960}

$$(960 = 80 \times 12)$$

La quantité d'information portée par une carte en supposant chaque message équiprobable est donc de 960 bits.

Pour une source dont chaque message n'est pas équiprobable, on associe une quantité d'information à chaque message : $I(m_i) = -\log_2 p_i$, p_i étant la probabilité du message m_i.

Il peut être intéressant de connaître l'information moyenne apportée par une source : c'est l'*espérance mathématique* de la quantité d'information considérée comme variable aléatoire. On la désigne par H, entropie de la source (analogie avec la quantité du même nom en thermodynamique)

$$H = \sum_{i=1}^{n} p_i \log_2 \frac{1}{p_i} = -\sum_{i=1}^{n} p_i \log_2 p_i$$

pour une source de n messages de probabilités $p_1 \ldots p_n$.

Pour une source de n messages équiprobables, cette quantité vaut $H = \log_2 n$ bits. C'est la valeur maximale que peut atteindre la variable entropie. Soit une source de 2 messages m_1 et m_2; on a représenté sur la *figure* 3 la variation de l'entropie H en fonction des probabilités p_1 et p_2 de chaque message m_1 et m_2 :

$$H = -p_1 \log_2 p_1 - p_2 \log_2 p_2$$

Cette fonction passe bien par le maximum égal à 1 pour

$$p_1 = p_2 = 0{,}5$$

Soit des messages écrits dans l'alphabet binaire avec N chiffres binaires $\{0, 1\}$. Le nombre maximal de messages possibles est $2^N = n$. L'entropie sera maximale si les messages sont équiprobables et vaudra

$$+ \log_2 2^N = N \text{ bits}$$

Prenons maintenant les 27 symboles de base d'écriture de notre langue (26 lettres plus l'espace, en excluant la ponctuation). Si ces 27 caractères étaient équiprobables, l'entropie de la source serait : $H = \log_2 27 = 4{,}76$ bits.

En fait, tout caractère n'a pas la même probabilité d'occurrence (E et W par exemple) et une valeur plus proche de l'entropie est de 4 bits. Le fait que les caractères ne soient pas équiprobables fait perdre environ 760 bits d'information sur un texte de 1 000 lettres.

Prenons un dernier exemple : soit 5 messages m_1, m_2, m_3, m_4, m_5 de probabilités respectives 0,3, 0,2, 0,2, 0,15 et 0,15. Pour savoir quel m_i a été émis, on ne dispose que de questions auxquelles il ne peut être répondu que par oui ou non.

Le schéma proposé est le suivant :

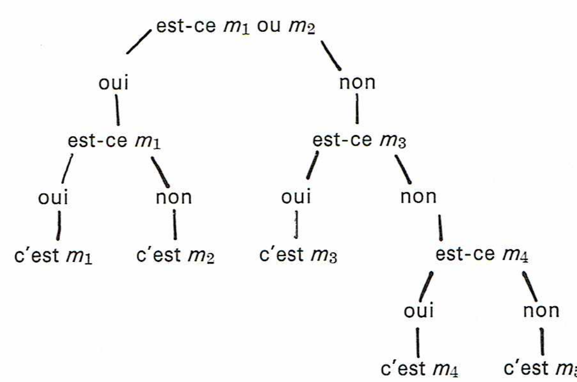

Il faut 2 questions pour trouver m_1, m_2 ou m_3 et 3 questions pour m_4 ou m_5. Le nombre moyen de questions est donc de :

$$2 \times [0{,}3 + 0{,}2 + 0{,}2] + 3 \times [0{,}15 + 0{,}15] = 2{,}3$$

Or l'entropie de la source vaut :

$$H = -0{,}3 \log_2 0{,}3 - 0{,}2 \log_2 0{,}2 - 0{,}2 \log_2 0{,}2 - 0{,}15 \log_2 0{,}15 - 0{,}15 \log_2 0{,}15 = 2{,}27 \text{ bits}$$

Il a été démontré que le nombre moyen de questions du type ci-dessus ne peut jamais être inférieur à l'entropie.

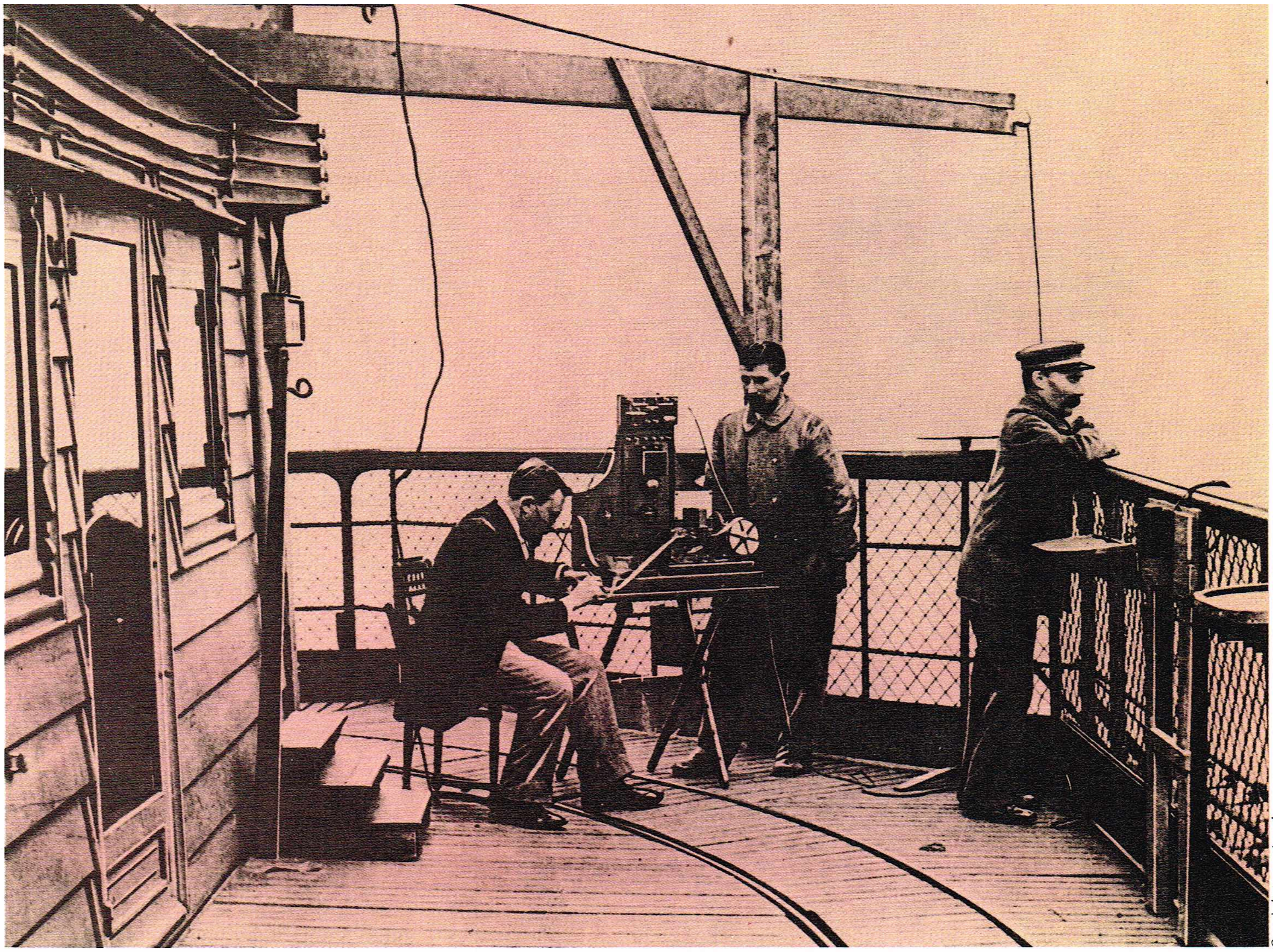

Snark International

▲ *La première liaison sans fil, tour Eiffel-Panthéon, en 1898.*

Canal de communication et information mutuelle

Introduisons maintenant le problème de communication qui met en jeu une source de message et un destinataire reliés par un canal. Raisonnons sur un exemple simple appelé *canal binaire symétrique*. La source X est composée de deux messages possibles (0 ou 1), de même que la réception Y ; on a le jeu de probabilité suivant :

probabilité de recevoir 0, 0 ayant été émis $= 1 - p$
probabilité de recevoir 1, 1 ayant été émis $= 1 - p$
probabilité de recevoir 0, 1 ayant été émis $= p$
probabilité de recevoir 1, 0 ayant été émis $= p$

Définissons deux entropies dites conditionnelles au niveau du destinataire :

H (message reçu, sachant que la source a émis 0)
$$= -(1-p)\log_2(1-p) - p\log_2 p$$

H (message reçu, sachant que la source a émis 1)
$$= -p\log_2 p - (1-p)\log_2(1-p)$$

La moyenne de ces deux entropies s'appelle *entropie conditionnelle* de Y par X, H (Y/X) :

$$\mathrm{H}(Y/X) = \mathrm{P}(X=0)\,[-p\log_2 p - (1-p)\log_2(1-p)] + \mathrm{P}(X=1)\,[-p\log_2 p - (1-p)\log_2(1-p)]$$

$$\mathrm{H}(Y/X) = -p\log_2 p - (1-p)\log_2(1-p)$$

On définit l'*information mutuelle* I (X; Y) entre une source X et un destinataire Y par :

$$\mathrm{I}(X;Y) = \mathrm{H}(Y) - \mathrm{H}(Y/X)$$

Dans notre exemple, elle se calcule par :

$$\mathrm{P}(Y=0) = \mathrm{P}(X=0)(1-p) + \mathrm{P}(X=1)\,p = a$$
$$\mathrm{P}(Y=1) = \mathrm{P}(X=1)(1-p) + \mathrm{P}(X=0)\,p = 1-a$$
$$\mathrm{I}(X;Y) = -a\log_2 a - (1-a)\log_2(1-a) + p\log_2 p + (1-p)\log_2(1-p)$$

La seule quantité sur laquelle puisse jouer l'utilisateur est la probabilité des caractères de source (le canal est en général fixé par des considérations technologiques).

On peut montrer que, dans le cas qui nous intéresse, cette quantité I (X; Y) passe par un maximum pour des symboles 0 et 1 équiprobables à l'émission. Ce maximum, appelé *capacité du canal*, vaut :

$$\mathrm{I}_{max}(X;Y) = 1 + p\log_2 p + (1-p)\log_2(1-p)$$

Les définitions introduites à partir de l'exemple du canal discret binaire sont très générales. L'information mutuelle caractérise l'information transmise par le canal. Le maximum sur les probabilités des caractères de la source est très important dans le cas de la transmission avec bruit. La quantité I (X; Y) est symétrique et peut se calculer par : I (X; Y) = H (X) — H (X/Y), en inversant le rôle de X et Y.

A titre d'exemple, le lecteur pourra calculer les quantités précédemment définies sur le système de communication suivant : on dispose de deux pièces de monnaie, dont l'une est fausse, car elle présente deux côtés « face » ; on en choisit une au hasard et on la jette deux fois. A partir du nombre de « faces » obtenu, on désire savoir si la pièce choisie était bonne ou mauvaise. Ce problème peut se traduire sous forme d'un système de communication suivant le schéma ci-dessous où sont indiquées les probabilités :

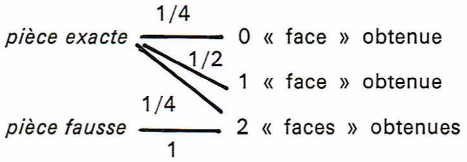

On voit que l'alphabet de la source X est composé de deux caractères (« pièce exacte » et « pièce fausse »), celui du destinataire Y de 3 (chaque caractère correspond à une valeur du nombre de « faces »). En supposant l'équiprobabilité des caractères d'entrée, le lecteur pourra vérifier que : H (X) = 1 et H (X/Y) = 0,45 bit et que l'information mutuelle vaut 0,55 bit. Cet exemple montre la généralité de la notion de système de communication qui ne doit pas simplement être appliquée à des communications au sens classique du mot.

Lettres	Caractères de casse du typographe	Fréquence (anglais)	Code Morse	Code Beaudot
Tableau I — Comparaison des codes Morse et Beaudot				
E	12 000	0,105	•	● ○ ● ● ●
T	9 000	0,072	–	○ ● ○ ● ○
O	8 000	0,065	– – –	○ ○ ○ ● ●
A	8 000	0,063	• –	○ ● ● ● ●
N	8 000	0,059	– •	● ○ ○ ○ ○
Z	200	0,001	– – • •	● ○ ● ● ○

Tableau II

Nombre de messages à coder	Nombre de chiffres binaires pour le codage
1	1
10	4
100	7
1 000	10
10 000	14
100 000	16
1 000 000	19

▲ *A gauche, tableau I : comparaison des codes Morse et Beaudot avec la fréquence d'apparition d'une lettre en langue anglaise. A droite, tableau II donnant la relation entre le nombre de messages à coder et le nombre de chiffres binaires nécessaires pour le codage.*

Codage

Le codage est l'opération de transcription des messages de la source en mots codes écrits dans un alphabet auxiliaire. Cette opération a plusieurs buts :

— Elle permet d'élaborer le signal de transmission; le codage binaire permet ainsi l'utilisation de cartes ou rubans perforés pour la transmission.

— Elle peut permettre de réduire le coût d'une transmission. Prenons l'exemple du code Morse : il assigne aux lettres les plus fréquentes le code le plus court. Le code Morse est un code dont l'alphabet a 4 caractères : le point, le tiret, l'espace de lettres et l'espace de mots. Le code Beaudot, lui, est un code à longueur de mot fixe et ne joue donc pas ce rôle de réducteur de coûts. Le *tableau* I extrait de l'ouvrage d'E. Roubine cité en référence donne une bonne idée de comparaison de ces deux codes.

— Elle permet de lutter contre les erreurs de transmission si l'on insère dans l'opération codage une redondance.

Si l'on veut coder avec une longueur de mot fixe, pour chaque message le nombre de caractères de chaque mot code est déterminé par la nature de l'alphabet et le nombre de messages à coder. Ainsi coder n messages en binaire exige des mots codes de longueur N tels que $2^N > n$. Le *tableau* II donne le nombre de chiffres binaires nécessaires pour coder n messages.

On s'intéresse dans la suite à des codes de longueur de mot variable. On demandera comme principale propriété de pouvoir décoder un mot code sans problème : donc, à deux messages différents devront correspondre deux mots codes différents; de même, toute suite fixée de mots codes doit être déchiffrée de manière unique. Soit donc les codes suivants :

	Code C_1	*Code* C_2
Message m_1	0	0
Message m_2	1	00

Il n'y a aucun problème pour décoder des suites de mots codes du code C_1 mais ce n'est pas le cas pour C_2. 00 peut être interprété comme m_1m_1 ou m_2. Une condition plus restrictive est qu'aucun mot ne soit le préfixe d'un autre (0 mot code est préfixe du mot code 01) : cela permet de déchiffrer immédiatement un texte. Ainsi pour le code m_1, 0, m_2, 01, si le texte 001 est déchiffrable de manière unique, il faut attendre d'avoir reçu tout le texte pour faire le décodage (0 peut être pris pour m_1 ou le début de m_2, 00 pour m_1 suivi de m_1 ou du début de m_2; ce n'est qu'après avoir tout reçu qu'on peut interpréter comme m_1m_2).

Le problème du codage est lié à la notion d'entropie de la source du message. On peut montrer que :

$$\bar{n} \geqslant \frac{H(X)}{\log_2 D}$$

où $\bar{n}$ est la longueur moyenne des mots codes

$$\left(\bar{n} = \sum_{i=1}^{n} n_i p\,(m_i)\right)$$

n_i est la longueur du mot code associé au message m_i de probabilité $p\,(m_i)$.

$$H(X) = -\sum_{i=1}^{n} p\,(m_i) \log_2 p\,(m_i)$$

D est la taille de l'alphabet.

Un code dont la longueur moyenne atteint la borne inférieure [H (X) dans le cas de l'alphabet binaire] est dit optimal. On retrouve ici la notion brièvement introduite à propos du jeu à questions-réponses par « oui » ou « non ». C'était un problème de codage avec un alphabet binaire (chaque réponse constituant un chiffre du mot code).

Un premier problème qui se pose à l'expéditeur d'un message est l'*adaptation de la source au canal*, qui doit être réalisée par le codage. Des signaux émis trop vite risquent d'être modifiés par le canal, et le bruit présent dans celui-ci devient mineur. Le codage permet cette adaptation quand elle est possible. Nous terminerons cette partie en donnant un exemple de code proche d'un code optimal, le *code de Huffmann* (*tableau* III). C'est un code à longueur de mot variable reposant sur la règle simple suivante : un message a un code d'autant plus court que sa probabilité est plus grande.

On peut vérifier qu'aucun mot n'est le préfixe d'un autre. L'entropie de la source vaut 1,79 bit et la longueur moyenne des mots codes 1,95. Ce code n'est pas unique. On appelle *efficacité* e le rapport $\frac{H(X)}{\bar{n}}$; $1 - e$ s'appelle la *redondance du code*. Dans notre exemple, e vaut 0,91, la redondance du code vaut 9 %. La redondance est nulle dans le cas d'un code optimal.

▼ *Tableau III : le code de Huffmann.*

Tableau III — Code de Huffmann

Message	Probabilité	Code
m_1	0,4	1
m_2	0,3	00
m_3	0,2	010
m_4	0,05	0110
m_5	0,03	01110
m_6	0,02	01111

Transmission en présence de bruit

L'information est transmise par des canaux; elle est détériorée par la présence du bruit. Dans le cas discret qui nous intéresse pour l'instant, la notion de bruit est un concept de théorie de l'information : le bruit équivaut à des modifications du message transmis qui entraînent une mauvaise compréhension du destinataire. Ainsi de la transformation de 0 en 1 en transmission binaire peut résulter le décodage erroné d'un message. Le destinataire devra disposer d'une règle de décision qui lui permettra de choisir le message, qu'il croit avoir été émis, à partir du message reçu. C'est un problème de statistiques connu sous le nom de *test d'hypothèse*. Pour éviter des

erreurs, l'expéditeur peut coder de manière à faciliter la décision : création de redondance, répétition de chiffres, etc. Ce problème est celui du codage en présence de bruit. Les *codes* dits *détecteurs-correcteurs d'erreurs* permettent de détecter et de corriger certaines erreurs.

Rappelons que l'information transmise par un canal est caractérisée par la quantité I (X; Y) qui dépend de deux quantités : H(X) qui caractérise l'entrée du canal et mesure l'information transmise par le canal s'il était sans bruit et H (X/Y) qui mesure la perte d'information due au bruit. Prenons un exemple simple : on veut transmettre en binaire des messages équiprobables de longueur 3 chiffres. L'entropie H (X) vaut 3 bits par message. Le canal utilisé peut altérer au plus 1 chiffre (0 devient 1 ou réciproquement). Les probabilités d'erreur sur le 1er chiffre, le 2e chiffre, le 3e chiffre, ou d'absence d'erreur sont les mêmes : $\frac{1}{4}$. Donc, si on reçoit 010, on peut décoder 010, 110, 000, 011, donc en 4 messages possibles. H (X/Y) vaut donc $-\log_2 4 = 2$ bits. L'information transmise vaut 1 bit par message.

On définit la *capacité d'un canal* par le maximum d'information transmissible, maximum calculé en prenant comme variables les probabilités des caractères d'entrée. Ainsi dans le cas du canal binaire symétrique cette quantité vaut : $1 + p \log_2 p + (1 - p) \log_2 (1 - p)$.

Donnons un exemple : soit un alphabet formé de 27 caractères (26 lettres + le séparateur) que nous supposerons équiprobables : on a vu que dans ce cas l'information moyenne était de 4,76 bits par lettre. Le canal est constitué d'un télétype transmettant 100 mots par minute, soit, un mot étant codé par 6 caractères, 600 caractères par minute. La capacité du canal est donc de $4{,}76 \times 10$ bits par seconde, soit environ 50 bits par seconde. Cette notion de capacité d'un canal apparaîtra de manière plus claire lorsque sera étudiée l'information dans le cas continu. Elle nous permet toutefois d'introduire le **théorème fondamental proposé par Shannon** en 1949 (ce théorème a été démontré rigoureusement plus tard). Ce théorème précise que :

— si le taux d'émission R (rapport de l'entropie à la longueur du mot) de la source branchée au canal est inférieur ou égal à la capacité du canal, on peut trouver un codage qui permette une transmission avec une fréquence d'erreur au décodage aussi petite que l'on veut;

— si au contraire ce taux est supérieur à la capacité du canal, on ne peut éviter des erreurs.

Ce théorème est en fait un théorème limite, puisque le codage qui permet d'obtenir une probabilité d'erreur faible demande des codes dont :

— le nombre de mots est une fonction exponentielle de la longueur d'un mot;

— la longueur commune des mots est grande (la taille des codes augmente donc avec cette longueur).

Mais au départ il n'était nullement évident qu'on aurait un tel résultat. On a intérêt, dans un système de transmission d'information, à s'efforcer de diminuer l'effet du bruit. Ce théorème propose, au lieu d'utiliser des moyens tels que l'émission à plus forte puissance ou l'utilisation d'organes technologiques avancés, donc coûteux (maser, etc.), de rechercher un codage optimal. L'inconvénient est, on le comprendra, l'introduction de retard (temps de codage et de décodage), mais la solution est moins onéreuse. Malheureusement il n'existe pas de technique déductive pour obtenir le code optimal.

Codes détecteurs-correcteurs d'erreurs

Ces codes ont l'avantage de permettre de lutter contre le type d'erreurs le plus fréquemment rencontré sur un canal donné. Prenons un exemple simple : le code à clef de parité unique. Partons de mots de même longueur (3 bits par exemple) et convenons d'ajouter le chiffre 1 si le nombre de 1 est impair ou 0 si ce nombre est pair. Ainsi : 010 devient 0101; 110 devient 1100.

Le chiffre ajouté s'appelle *chiffre de parité*. A la réception, on saura s'il y a eu une erreur en comparant le nombre total de « 1 » avec la valeur du chiffre de parité. Ce code permet de détecter une erreur mais ne la corrige pas. Il est évident qu'une double erreur ne se verra pas. Cet exemple simple de code détecteur d'erreurs en montre le principe. Ce type de code a été très employé pour les mémoires à tores magnétiques des calculateurs. Les codes détecteurs-correcteurs sont caractérisés par 2 nombres : n qui est le nombre total de chiffres et k qui est le nombre de chiffres de parité. Ces chiffres qui allongent le mot code permettent par leur effet redondant et non informatif la détection et la correction d'erreurs.

Le nombre de chiffres informatifs de chaque mot code est donc $n - k$. Le nombre de messages à coder ne doit donc pas être supérieur à 2^{n-k}. Les k chiffres de parité permettent de repérer 2^k erreurs. Si le code doit détecter et corriger les erreurs simples, sur un chiffre on doit donc avoir la relation :

$$2^k \geqslant n + 1$$

$n + 1$, car n erreurs possibles auxquelles s'ajoute la transmission sans erreur. Les codes de Hamming sont ceux qui vérifient exactement l'égalité. Reportons-nous au tableau de liaison de n et k (*tableau* IV).

Ces codes permettent de détecter et de corriger les erreurs simples. Ils sont impuissants vis-à-vis des erreurs d'ordre supérieur. Donnons un exemple, le code (7,3) : *tableau* V.

Tableau IV
Liaisons de *n* et de *k* dans le code de Hamming

k	n	Nombre de chiffres d'information
2	3	1
3	7	4
4	15	11
5	31	26

◀ *Tableau IV donnant les liaisons de n et k dans le code de Hamming.*

Tableau V
Code (7,3)

Chiffres : a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	1	0	0	1
0	1	0	1	0	1	0
1	0	0	0	0	1	1
1	0	0	1	1	0	0
0	1	0	0	1	0	1
1	1	0	0	1	1	0
0	0	0	1	1	1	1
1	1	1	0	0	0	0
0	0	1	1	0	0	1
1	0	1	1	0	1	0
0	1	1	0	0	1	1
0	1	1	1	1	0	0
1	0	1	0	1	0	1
0	0	1	0	1	1	0
1	1	1	1	1	1	1

Partie information : $a_1\ a_2\ a_3\ a_4$
Parité : $a_5\ a_6\ a_7$
Règles :

$$a_1 \oplus a_3 \oplus a_5 \oplus a_7 = 0$$
$$a_2 \oplus a_3 \oplus a_6 \oplus a_7 = 0$$
$$a_4 \oplus a_5 \oplus a_6 \oplus a_7 = 0$$

$\oplus$ désignant l'opération OU EXCLUSIF dont la table de vérité est :

$\oplus$	1	0
1	0	1
0	1	0

◀ *Tableau V : un exemple de code détecteur-correcteur d'erreurs, le code (7,3).*

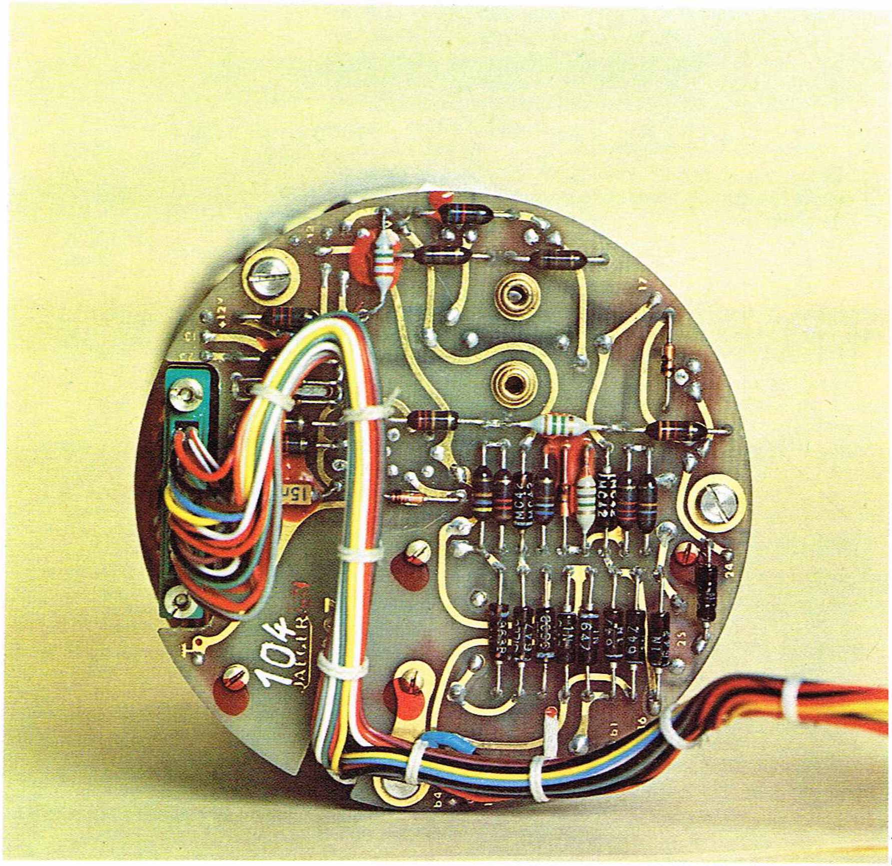

Parimage

▲ *Un codeur numérique de position.*

La technique de correction est la suivante : si le 1er chiffre de parité est faux, marquer 1 ; si c'est le 2e, marquer 2 ; si c'est le 3e, marquer 4. La somme des chiffres obtenue indique la position du chiffre erroné.

Supposons qu'on reçoive 0101110, vérifions les chiffres de parité :

$$0 \oplus 0 \oplus 1 \oplus 0 = 1 \neq 0$$
$$1 \oplus 0 \oplus 1 \oplus 0 = 0$$
$$1 \oplus 1 \oplus 1 \oplus 0 = 1 \neq 0$$

Il y a donc une erreur marquée par la différence au niveau des premiers chiffres de parité. La technique de correction montre que le chiffre a_5 est erroné et qu'il faut considérer qu'a été émis 0101010.

La technique des codes détecteurs-correcteurs d'erreurs repose sur des concepts algébriques. Il faut dans la conception d'un tel code faire un compromis entre la possibilité de correction et la longueur des mots qui augmente le coût de la transmission. Ainsi un code (15, 10) à 10 chiffres de parité (exemple du code du type Bose-Chaudhuri-Hocquenghem, du nom des trois scientifiques qui ont proposé cette méthode en 1959) permet de détecter et corriger les erreurs triples, mais chaque mot ne contient que 5 chiffres d'information !

Le code de l'exemple ci-dessus n'est utilisable que pour des canaux à faible taux d'erreur. Ainsi, pour un canal ayant une probabilité d'erreur de 10^{-5} par symbole, ce code permettra une probabilité d'erreur inférieure à 10^{-11}, mais un taux de transmission moindre ; par contre, pour une probabilité d'erreur de 10^{-2}, l'amélioration ne sera portée qu'à 0,009.

Information dans le cas continu

Les paragraphes précédents étaient consacrés aux problèmes de transmission ou de codage de textes. Dans le cas de la transmission d'images ou de sons le message est une fonction parfois continue du temps. L'emploi du mot continu ne doit pas laisser croire qu'on se limite à la transmission de signaux représentables par des fonctions continues ! Ce mot indique simplement que le signal peut être mesuré à tout instant (la formulation qui va suivre peut donc être employée pour des impulsions répétées). Les signaux sont à transmettre dans un canal à bande passante définie. Si le spectre en fréquence du signal est trop grand, il y aura distorsion ; nous nous placerons dans le cas où il y a accord des plages de fréquence. Par contre, le canal est marqué par un bruit qu'on supposera additif et suivant une loi de Laplace-Gauss. Le destinataire reçoit donc un signal du type « signal émis + bruit » qu'il s'agit d'interpréter. Le terme de « bruit » recouvre ici aussi beaucoup de phénomènes se produisant durant la transmission. Sous les hypothèses précédentes (en ajoutant aussi le caractère stationnaire et l'indépendance du signal et du bruit des phénomènes), la capacité du canal, c'est-à-dire le maximum d'information transmissible, vaut :

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{P}{N}\right)$$

où W est la bande passante, P la puissance du signal et N celle du bruit. Sous l'hypothèse d'ergodicité (P et N sont respectivement les moyennes temporelles du

Niepce - Rapho

▶ *Dans le cas de la transmission d'images ou de sons, le message est une fonction parfois continue du temps.*

carré du signal et du carré du bruit et sont donc mesurées en watts/s), $\frac{P}{N}$ s'appelle le *rapport signal sur bruit*. Cette formule porte le nom de **formule de Hartley-Tuller-Shannon.** Le théorème fondamental s'étend au cas continu.

Il existe un codage qui permet de transmettre l'information à un taux aussi proche que l'on veut de la capacité du canal avec un taux d'erreur très faible; si le taux de transmission est supérieur à C, la probabilité d'erreur reste fixe. Soit par exemple une bande passante de 1 MHz et un rapport signal sur bruit de 1. La capacité du canal vaut : $C = 10^6 \log_2 (1 + 1) = 10^6$ bits/s.

On utilise un code permettant un taux de 0,8 C, c'est-à-dire 800 000 bits/s. On peut espérer, puisqu'on respecte le théorème fondamental, que la probabilité d'erreur pourra être rendue aussi faible qu'on le désire. Supposons que, par suite de perturbations, la puissance du bruit augmente de 3 décibels; le rapport signal sur bruit devient donc égal à 0,5. La capacité réelle vaut :

$$C = 10^6 \log_2 (1 + 0{,}5) = 5{,}85 \cdot 10^5$$

Elle est donc supérieure aux taux de transmission. La probabilité d'erreur va donc prendre une valeur finie non négligeable. Cet exemple simple montre que prendre un taux de transmission très proche de la valeur de la capacité peut avoir des conséquences importantes si la puissance du bruit augmente légèrement. Quelques exemples de capacité de canaux : pour un canal de transmission de la parole, la capacité sera de 48 000 bits par seconde en supposant un rapport signal sur bruit de 36 décibels et une bande passante de 45 kHz; pour un canal devant transmettre un signal vidéo, la capacité sera de $50 \cdot 10^6$ bits par seconde, en supposant un rapport signal sur bruit de 30 décibels et une bande passante de 5 MHz.

Rappelons maintenant un résultat d'électronique. Un élément purement résistif R présente à ses bornes une tension aléatoire dont le carré moyen $\overline{V}^2$ vaut dans la bande W : c'est ce qu'on appelle le *bruit thermique :*

$$\overline{V}^2 = kTW$$

k est la constante de Boltzmann

$$(k = 1{,}37 \cdot 10^{-23} \text{ joule/°K})$$

T est la température absolue (mesurée en °K). On remarquera que cette puissance est indépendante de la valeur de la résistance. Dans le cas d'un bruit non d'origine thermique, on peut employer la même formule en définissant une *température équivalente de bruit :*

$$T_e = \frac{\overline{V}^2}{kW} = \frac{N}{kW}$$

Cette température équivalente de bruit est en particulier utilisée pour définir les bruits des planètes. La capacité d'un canal où se superpose un bruit thermique s'écrit alors :

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{P}{kTW}\right)$$

Supposons la bande passante très grande, le terme

$$\frac{P}{kTW}$$

devient très faible devant 1, d'où une valeur limite pour la capacité :

$$C = 1{,}44 \frac{P}{kT} \simeq 10^{23} \frac{P}{T}$$

Ainsi, si l'on prend comme source une mesure perturbée par un bruit thermique, il faut une énergie de

$$10^{-23} \times T \text{ joules}$$

pour recueillir un bit d'information à la température T. La puissance du signal joue donc un rôle important pour transmettre l'information. Ce résultat était logiquement prévisible.

De la formule ci-dessus on déduit la puissance nécessaire pour transmettre l'information de C bits par seconde :

$$P = 0{,}693\, kTC$$

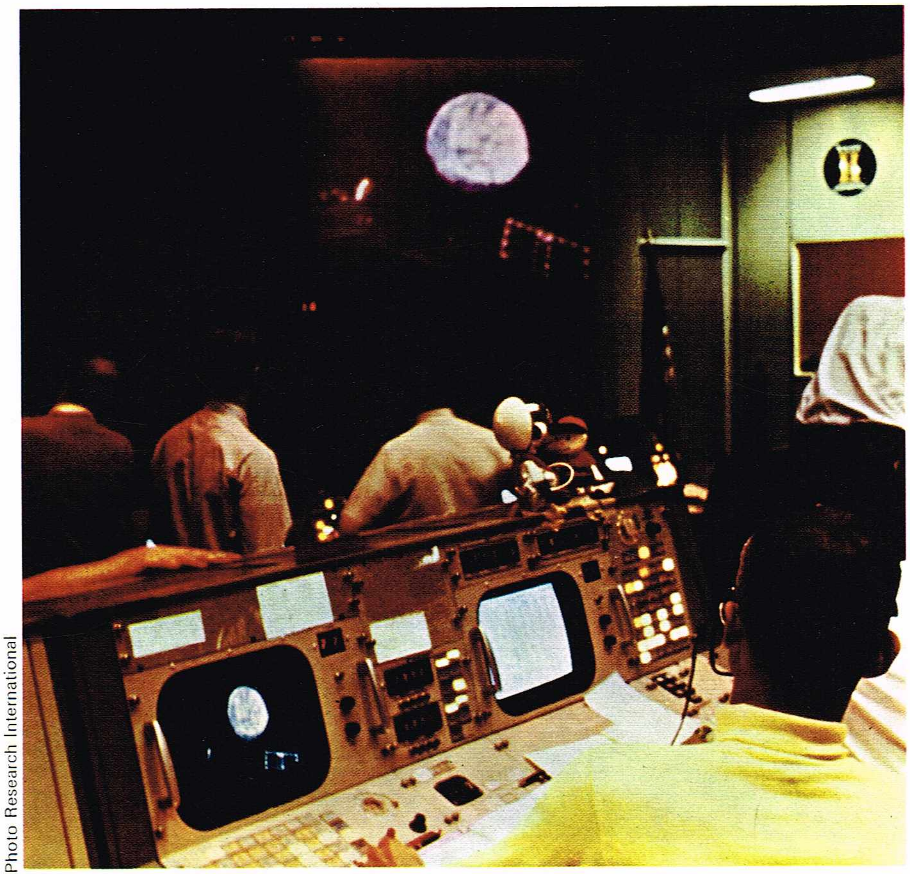

Photo Research International

▲ ***Une image de la Terre filmée par les caméras couleurs de télévision d'Apollo X et transmise au Centre spatial de Houston d'une distance d'environ 22 224 kilomètres.***

Prenons comme exemple le calcul de la puissance nécessaire P_T pour transmettre un texte d'une station orbitale à une station terrestre. En prenant un code de 5,5 chiffres binaires par mot et une vitesse de transmission de 60 mots par minute, la capacité vaut 5,5 bits par seconde. Le signal est marqué par un bruit avant d'atteindre la Terre : ce bruit peut être caractérisé par une température équivalente au bruit de 4 °K (fréquence de transmission de l'ordre de 10^3 MHz). La puissance P_R devant être reçue est donc :

$$P_R = 0{,}693 \times 1{,}37 \cdot 10^{-23} \times 4 \times 5{,}5 = 1{,}9 \cdot 10^{-22} \text{ watt}$$

Admettons comme hypothèse que la station orbitale transmet uniformément dans toutes les directions : en ce cas, le rapport $\frac{P_T}{P_R}$ est équivalent au rapport d'une aire sphérique ayant pour rayon L (distance de transmission), à l'aire du réflecteur parabolique de réception (diamètre D). Prenons comme valeur indicative $L = 150 \cdot 10^6$ km (distance Terre-Soleil) et D = 75 m (diamètre du radiotélescope de Jodrell Bank) :

$$\frac{P_T}{P_R} = 6{,}4 \cdot 10^{19}$$

d'où la valeur de

$$P_T = 6{,}4 \cdot 10^{19} \times 1{,}9 \cdot 10^{-22} = 0{,}012\,16 \text{ watt}$$

Cette valeur est purement théorique (valeur en fait majorée par un facteur pouvant atteindre 10^4), car elle est choquante : beaucoup penseront qu'elle n'est pas en accord avec l'expérience. Pourquoi donc utilise-t-on des systèmes de communication qui consomment beaucoup plus d'énergie que nécessaire ? Il faut tenir compte en fait d'autres considérations : le système de modulation, les caractéristiques du signal ne sont pas en général bien adaptés à ceux du canal, et la plupart des signaux transmis contiennent une certaine redondance, c'est-à-dire beaucoup de détails non nécessaires (la redondance est nécessaire, car elle augmente la fiabilité). Il faut aussi noter que le but d'un système de communication n'est pas de transmettre un bit avec le moins d'énergie possible mais de satisfaire, au moindre coût, à un besoin donné de communication. Cependant, quand l'énergie représente une part importante du coût, les ingénieurs

chargés de la conception créent des systèmes utilisant une bande passante plus large et un rapport signal sur bruit plus faible afin d'utiliser au mieux l'énergie.

Application de la théorie de l'information

Avant de développer certaines applications, donnons quelques exemples pouvant chiffrer la capacité de l'esprit humain.

Prenons comme premier exemple la *lecture :* une personne peut lire environ 500 mots à la minute ; avec une moyenne de 5 lettres par mot, et d'un bit par lettre, cela représente 42 bits par seconde.

Comme deuxième exemple, étudions le *jeu d'échecs*. Les champions peuvent jouer simultanément sur environ 40 jeux durant 6 heures. En supposant qu'une partie dure 40 coups, un champion étudie un mouvement toutes les 13,5 secondes. Quelle est l'information contenue dans un mouvement au jeu d'échecs ? Le joueur a toujours le choix entre environ 6 déplacements, rarement moins de 2. Si chaque mouvement ne contient qu'un demi-bit d'information, c'est que, d'après la *figure* 3, une des possibilités a une probabilité supérieure à 0,9. Pour que le contenu informationnel dépasse 4 bits, le joueur doit avoir le choix entre 16 mouvements équiprobables. L'information est donc comprise entre 0,5 et 4 bits. Si l'on prend une valeur de 3 bits, le champion saisit 0,2 bit d'information par seconde. Deux estimations donc : 0,2 bit par seconde utilisé à bon escient pour une partie d'échecs, d'un autre côté, absorber 40 bits par seconde au cours d'une lecture ! La quantité d'information d'une molécule d'ADN peut être évaluée grossièrement à 8 000 bits pour une molécule composée de 4 000 nucléotides (2 bits par nucléotide). Cependant cette quantité est trop forte : elle ne tient pas compte de la structure (il faudrait déjà diviser par deux), ni de la redondance du code.

Nous avons déjà évoqué l'aptitude du système cérébral à identifier et distinguer des formes avant toute prise de décision et parlé des machines à reconnaître les formes. Nous allons décrire une de ces machines qui utilise la théorie de l'information et qui a été proposée par Uttley (l'*informon*). Définissons une forme par un ensemble de coordonnées $X_1 \dots X_n$ (ce peut être par exemple, s'il s'agit d'une courbe, n valeurs régulièrement espacées). On appelle *discriminateur linéaire* un organe permettant une classification entre plusieurs formes après examen d'une fonction linéaire des X_i. La règle de décision généralement conçue pour un discriminateur linéaire entre deux formes est la suivante (dichotomie) :

$$\text{si} \quad \sum_{i=1}^{n} a_i X_i + a_0 > 0 \quad \textit{forme } 1$$

$$\text{si} \quad \sum_{i=1}^{n} a_i X_i + a_0 < 0 \quad \textit{forme } 2$$

où les a_i, $i = 1$ à n, sont des variables de pondération.

Plaçons-nous dans le cas où les X_i sont des signaux binaires. Par exemple, dans la reconnaissance de caractères écrits, on inscrit la lettre dans un carré que l'on décompose en carrés élémentaires $X_1 \dots X_n$. X_i vaut 1 si le i-ième carré est traversé par le trait de tracé du caractère ; dans le cas contraire, il vaut zéro. Les a_i peuvent être fixées *a priori*, mais cela enlève beaucoup de souplesse au système. Aussi, Uttley a utilisé le concept fondamental de cybernétique, la rétroaction. Dans le système développé, les a_i sont automodifiées en fonction de l'information I (X; Y) transmise entre la sortie Y et la variable X_i. Pour des raisons de stabilité, a_i est prise proportionnelle à l'opposé de I (X; Y). Le système de reconnaissance est devenu un système à apprentissage.

Les applications de la théorie de l'information sont multiples ; nous avons surtout insisté sur les problèmes de communication, mais le lecteur aura trouvé des applications en biologie, en reconnaissance des formes, etc. On trouve aussi des applications en art : on a ainsi pu chiffrer l'information portée par une partition musicale ou par un tableau. Partant d'un tableau chargé, on calcule l'information portée, puis on enlève peu à peu les redondances apportées par le peintre tout en conservant la même quantité d'information ; il est frappant alors de voir que des tableaux très chargés rejoignent des tableaux très purs de peintres modernes.

L'automatique

L'automatique peut être définie comme une branche de la science et de la technologie dont le but est le développement d'outils et de systèmes capables de se gérer sans intervention humaine et pouvant effectuer des tâches du type de celles faites par l'esprit humain.

C'est un fait courant de dire que notre monde est entré dans l'ère de l'automatisation. La quantité obligatoirement limitée d'énergie disponible oblige chaque type d'industrie à rechercher des méthodes optimales de fabrication ; la conquête de l'espace a été réalisée et elle continue grâce aux énormes progrès technologiques pour le contrôle des engins mis sur orbite ou lancés sur d'autres planètes, etc.

Une des contributions les plus importantes à l'automatique moderne est le contrôle par rétroaction (feedback). Il est difficile aujourd'hui de concevoir des systèmes automatiques sans rétroaction. Ce principe de cybernétique a été la base du développement de l'automatique.

La synthèse d'un système de contrôle automatique demande un modèle mathématique du système à contrôler, nécessite une description des performances exigées, des contraintes sur les composants du système, la connaissance des entrées, sorties et perturbations. Si de plus un calculateur digital est utilisé pour le contrôle, il est nécessaire de tenir compte des contraintes qu'il introduit (capacité mémoire, nombre d'entrées possibles, vitesse de calcul, etc.). La solution à ce problème complexe est rarement unique ; c'est le plus souvent une solution résultant de compromis qui est prise.

On distingue trois phases dans l'étude d'un système : l'analyse, la conception et la synthèse.

— Durant l'**analyse,** on étudie les performances du système conçu.

— La **conception** d'un système fait appel à la connaissance du métier qu'a l'ingénieur : on ne peut en effet, en général, faire la conception sans introduire de compromis dans les exigences.

— La **synthèse** est la situation idéale : une procédure mathématique permet de trouver une solution en partant de la description du problème.

Les méthodes d'étude peuvent être classées en trois catégories.

— La première et la plus connue est celle utilisant la transformée de Laplace. L'utilisateur se donne un certain nombre de performances souhaitées, plus ou moins arbitraires (marge de gain, marge de phase, etc.) et en déduit le système de contrôle. Cette méthode est surtout utilisable pour les systèmes une entrée-une sortie linéaires (un système est linéaire s'il est gouverné, par exemple, par une équation différentielle linéaire).

— La deuxième approche, due à Wiener et Hall, cherche à minimiser un index de performance (erreur quadratique). Cette méthode s'applique aux systèmes linéaires soumis à des entrées déterministes ou stochastiques. Ces deux premières méthodes ont été très utilisées jusque vers 1955 (la Seconde Guerre mondiale entraînant un grand développement pour les systèmes militaires). Elles constituent ce qu'on appelle l'*approche classique*. Cette approche présente beaucoup de difficultés pour les systèmes multidimensionnels à coefficients variables dans le temps : les applications sont limitées aux systèmes contrôlés simples.

— La dernière méthode est une généralisation de la seconde ; elle est née durant les années 1955-65 et s'est beaucoup développée comme méthode de contrôle moderne. La méthode consiste à déterminer une loi pour le contrôle, de manière à majorer ou à minimiser un critère : cette loi lie les variables de contrôle aux variables mesurables, c'est bien encore un système à rétroaction. Dans le cas de systèmes simples, cette loi peut être réalisée par un organe électronique passif ou actif ; dans des cas plus complexes, la présence d'un calculateur digital est nécessaire. Utilisant les informations entrées régulièrement dans le calculateur, un programme élabore cette loi de contrôle. Cette approche moderne unifie les méthodes, permet la solution de problèmes impossibles à résoudre par l'approche classique ; elle est très marquée par la venue des calculateurs digitaux et les progrès de leur technologie.

Si le contrôle est encore souvent réalisé par des organes pneumatiques, hydrauliques ou électroniques,

on rencontre de plus en plus de calculateurs dans le monde industriel. Développés tout d'abord dans le domaine militaire et pour la conquête spatiale, ils sont aussi utilisés actuellement pour la conduite automatique d'usines et pour le contrôle de machines-outils. La place d'un ordinateur dans une chaîne de contrôle entraîne la présence d'organes inconnus dans les méthodes de contrôle classique. En effet, il faut laisser le temps à l'ordinateur de « calculer ». Aussi les signaux recueillis sont-ils échantillonnés, c'est-à-dire qu'on ne prend leur valeur qu'à des intervalles de temps réguliers. Comme l'ordinateur ne fonctionne qu'avec des signaux binaires, les tensions électriques sont transformées en mots binaires par des convertisseurs analogiques numériques. Entre ces prises de signaux, le calculateur, grâce à des programmes internes, élabore des commandes qui devront agir sur des organes pour effectuer le contrôle (ouverture d'une vanne, augmentation du courant d'alimentation d'un moteur électrique, etc.). Ces commandes se présentent sous forme binaire ; il faut donc à nouveau les transformer en grandeurs analogiques par des convertisseurs numériques analogiques, puis les intégrer par un filtrage passe-bas pour avoir un signal continu pouvant être appliqué sur les organes d'action. Actuellement, il est possible à un même calculateur de saisir plusieurs données « en même temps » ou dans un intervalle de temps très court par l'intermédiaire de convertisseurs-multiplexeurs.

Grâce à un mode de fonctionnement particulier aux calculateurs, appelé *mode d'interruption*, le calculateur peut interrompre son programme de calcul pour saisir une entrée, puis le reprendre là où il l'avait abandonné. Ajoutons que la technologie intégrée a permis l'embarquement, à bord d'engins interplanétaires, de calculateurs très puissants et sophistiqués.

L'apparition sur le marché des microprocesseurs permet désormais le contrôle ou la surveillance de processus industriels, à l'aide d'équipements de faible volume et de coût peu élevé.

E.P.S.

▲ Avec les systèmes automatiques, la tâche de l'opérateur évolue d'une exécution manuelle répétée au seul contrôle de la machine, laquelle est à même de signaler son propre défaut de fonctionnement. Ci-dessus, un télémanipulateur servant au traitement des radio-isotopes : l'opérateur protégé par une armature de briques de plomb, manœuvre à distance au moyen de servomanipulateurs électromécaniques.
▼ A gauche, chaîne comportant des contrôles automatiques de la fabrication de lames de rasoir. A droite, une machine-outil automatique.

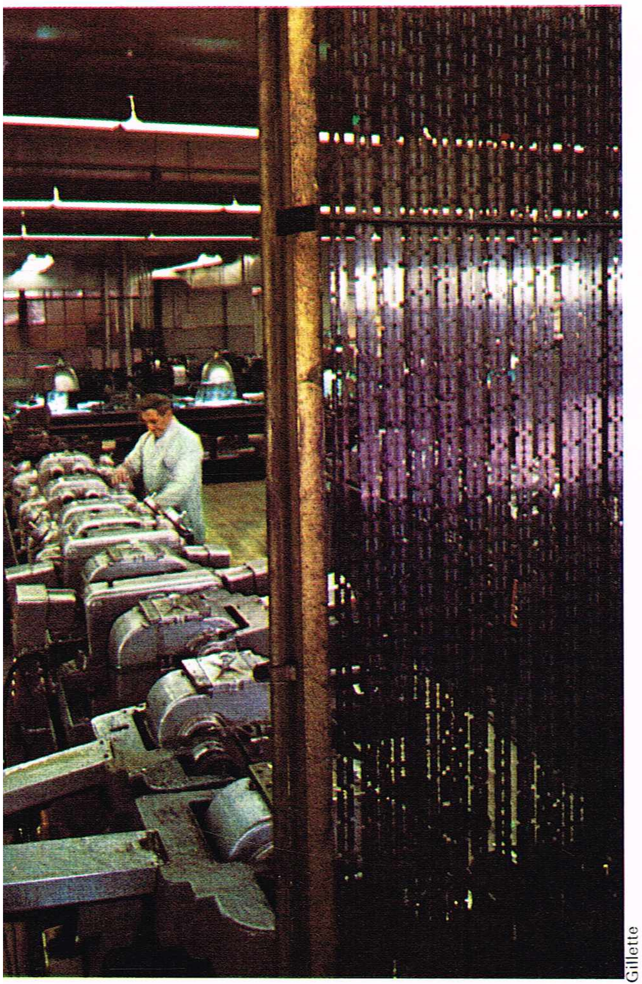

Gillette

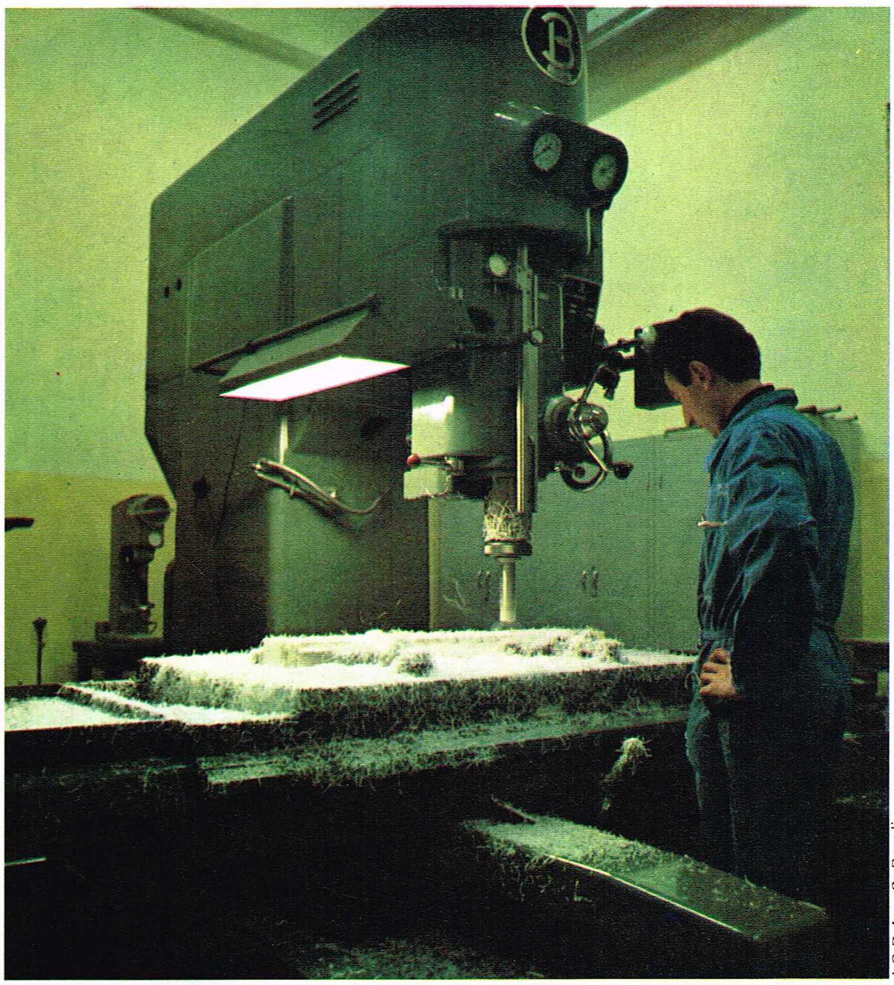

I.G.D.A. - S. Boroli

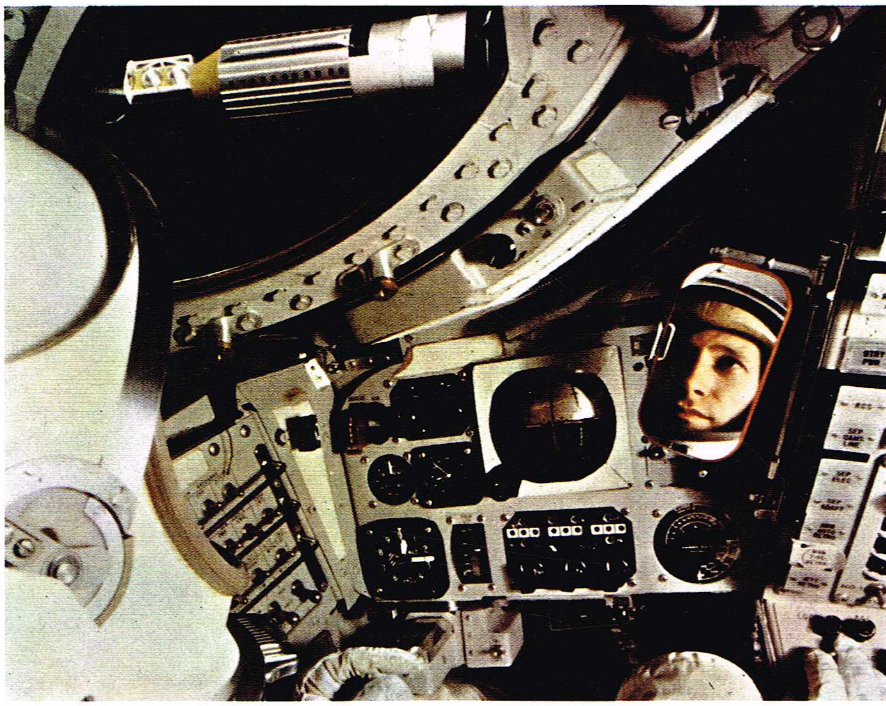

Photo Research International

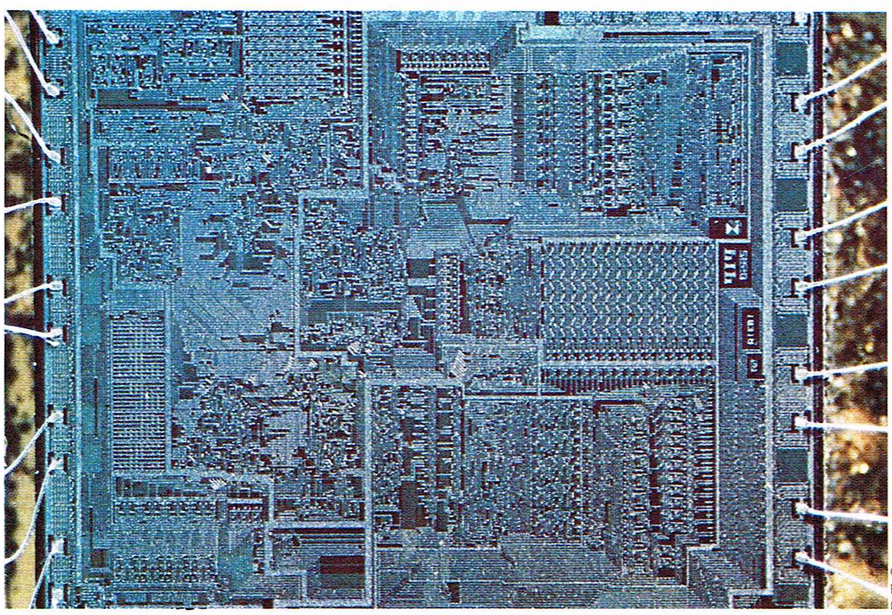

R.T.C.

▲ ***En haut, la technologie intégrée a permis l'embarquement, à bord d'engins interplanétaires, de calculateurs très puissants et sophistiqués. Ci-dessus, l'apparition des microprocesseurs permet désormais le contrôle et la surveillance de processus industriels à l'aide d'équipement de faible volume et de coût peu élevé.***

▼ ***Figure 4 : schéma fonctionnel d'un système de contrôle de niveau d'eau d'un réservoir.***

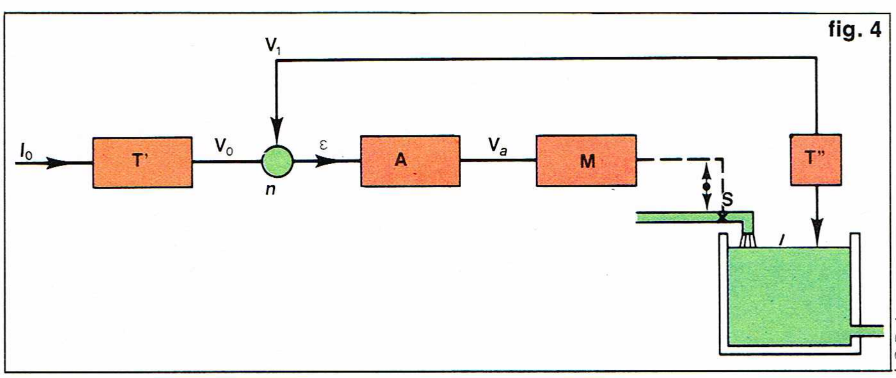

I.G.D.A.

Nous présenterons dans ce qui suit la méthode classique d'étude des systèmes de contrôle dans le cas de systèmes linéaires et non linéaires : cette méthode est fondée sur la transformée de Laplace et sur l'analyse fréquentielle. Un aperçu sera donné sur la méthode moderne (analyse dans l'espace d'état). Nous terminerons par ce qui doit précéder tout calcul : la phase d'identification-modélisation qui fournit un modèle du processus étudié.

Les systèmes linéaires

Un système de commande a pour rôle de transmettre à la grandeur de sortie du système la loi de variation en fonction du temps imposée à l'entrée. Ainsi peut-on commander la hauteur d'eau d'un réservoir par l'ouverture plus ou moins importante de la vanne d'arrivée d'eau. Pour permettre aux systèmes de se corriger eux-mêmes, il faut constituer des asservissements : un système est dit asservi ou bouclé s'il est destiné à corriger l'écart existant entre la valeur désirée de la sortie et la valeur réellement obtenue. Autrement dit, un système asservi, possédant de l'information sur la sortie réellement obtenue, peut se corriger en agissant sur une commande réglée par l'écart entre la sortie réelle et la sortie voulue. Un système fonctionne en régulateur dans le cas particulier où le signal d'entrée est constant en fonction du temps. Prenons l'exemple du système dont un diagramme fonctionnel est donné sur la *figure* 4. Chaque rectangle représente un organe du système asservi. Le rôle de ce système est de contrôler le niveau d'eau dans un réservoir. Soit l_0 la hauteur d'eau désirée. A l'aide d'un transducteur T′ cette valeur est transformée en une tension électrique V_0; ainsi, l'homme chargé de surveiller l'installation affiche à l'aide d'un bouton la valeur l_0 sur un cadran gradué en valeurs réelles (mètres). Ce bouton déplace en réalité un curseur sur un potentiomètre. Le niveau d'eau réel l est mesuré à l'aide du capteur T″ qui transforme également cette grandeur en une tension électrique V_1. Nous disposons donc de deux représentations électriques, l'une du niveau désiré, l'autre du niveau réellement obtenu. A l'aide du comparateur *n*, on élabore le signal dit *signal d'erreur* qui vaut $V_1 — V_0$ (ce comparateur est un amplificateur opérationnel monté en différentiel, puisque nous avons des grandeurs électriques). Ce signal étant en général faible, un amplificateur de puissance A est destiné à fournir une image plus forte V_a de la différence $V_1 — V_0$. V_a servira à la commande du moteur électrique M qui va agir suivant le cas sur l'ouverture ou la fermeture d'une vanne S. Si $V_1 — V_0$ est positif, la vanne est fermée, et on atteindra le niveau l_0 par l'écoulement normal de l'eau du réservoir. Si $V_1 — V_0$ est négatif, la vanne est ouverte de manière à compenser le manque d'eau. Le degré d'ouverture de cette vanne déterminera le remplissage plus ou moins rapide du réservoir : cette performance est une qualité parmi d'autres qui déterminent le calcul d'un système asservi. Cet exemple simplifié permet de comprendre le but d'un système bouclé.

Les éléments fondamentaux d'un système asservi sont :

— les **capteurs**, qui transforment une grandeur physique en une autre, le plus souvent électrique (par exemple, un thermocouple transforme une différence de température en une force électromotrice) ; dans le schéma précédent, les capteurs étaient T′ et T″;

— le **comparateur**, qui élabore la différence entre la sortie réelle et la sortie désirée ;

— les **organes de puissance**, qui permettent de transformer une grandeur généralement faible (sortie du comparateur) en une valeur suffisante pour commander l'actionneur ;

— l'**actionneur**, qui agit sur le système pour tendre à rendre nul l'écart mesuré par le comparateur.

L'étude de tels systèmes repose sur deux faits :

— la présence d'une chaîne de retour (renvoi de la sortie sur l'entrée) rend ces systèmes susceptibles d'entrer en auto-oscillation ; il faut donc résoudre le problème dit de stabilité (on peut imaginer en effet dans l'exemple précédent qu'il ne soit pas possible de maintenir le niveau d'eau à l_0 mais que celui-ci soit tantôt inférieur, tantôt supérieur) ;

— le système doit résoudre des conditions de précision, donc posséder certaines performances dynamiques.

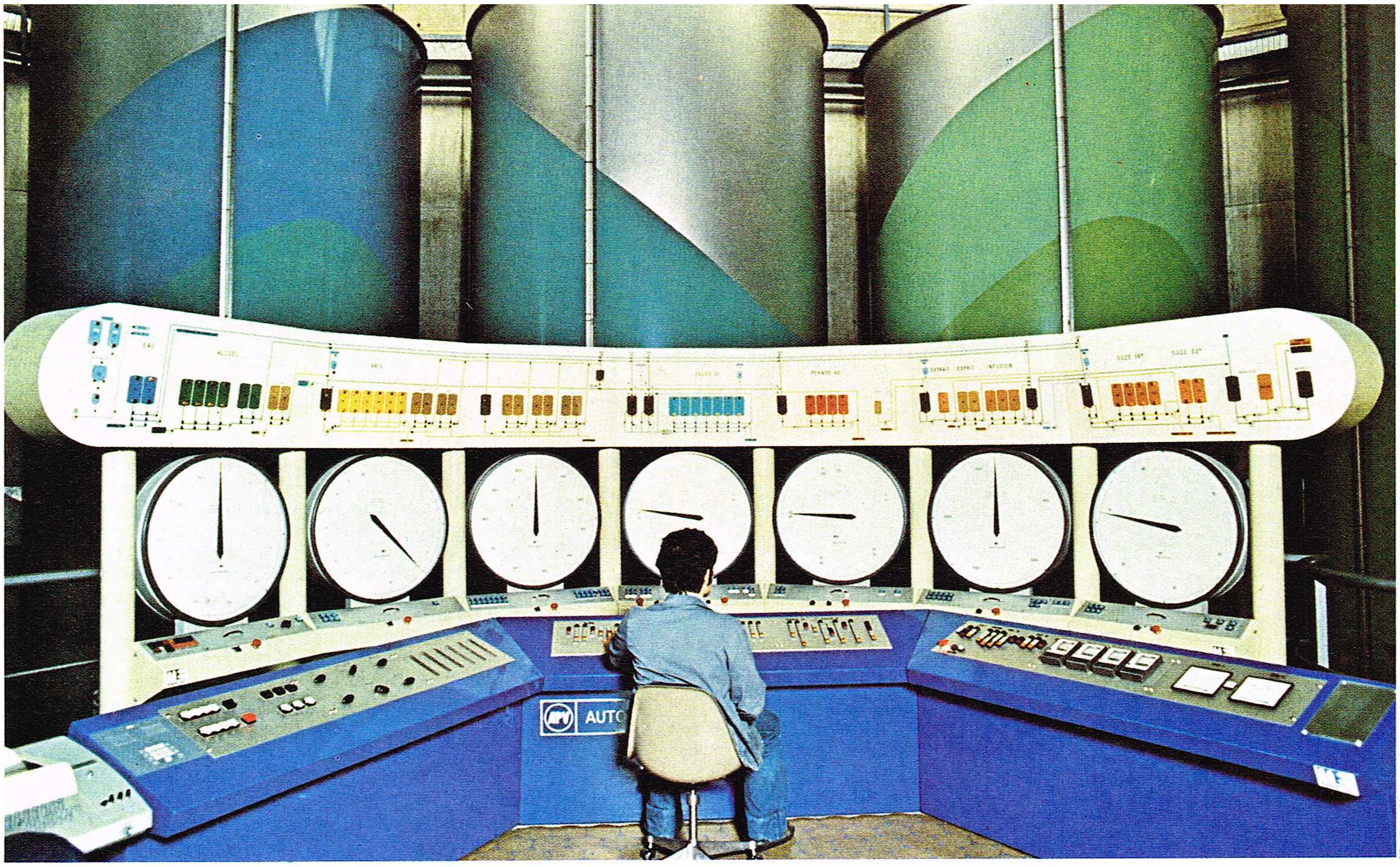

T. Boulley - Fotogram

▲ *Poste de commande des cuves (usine Pernod).*

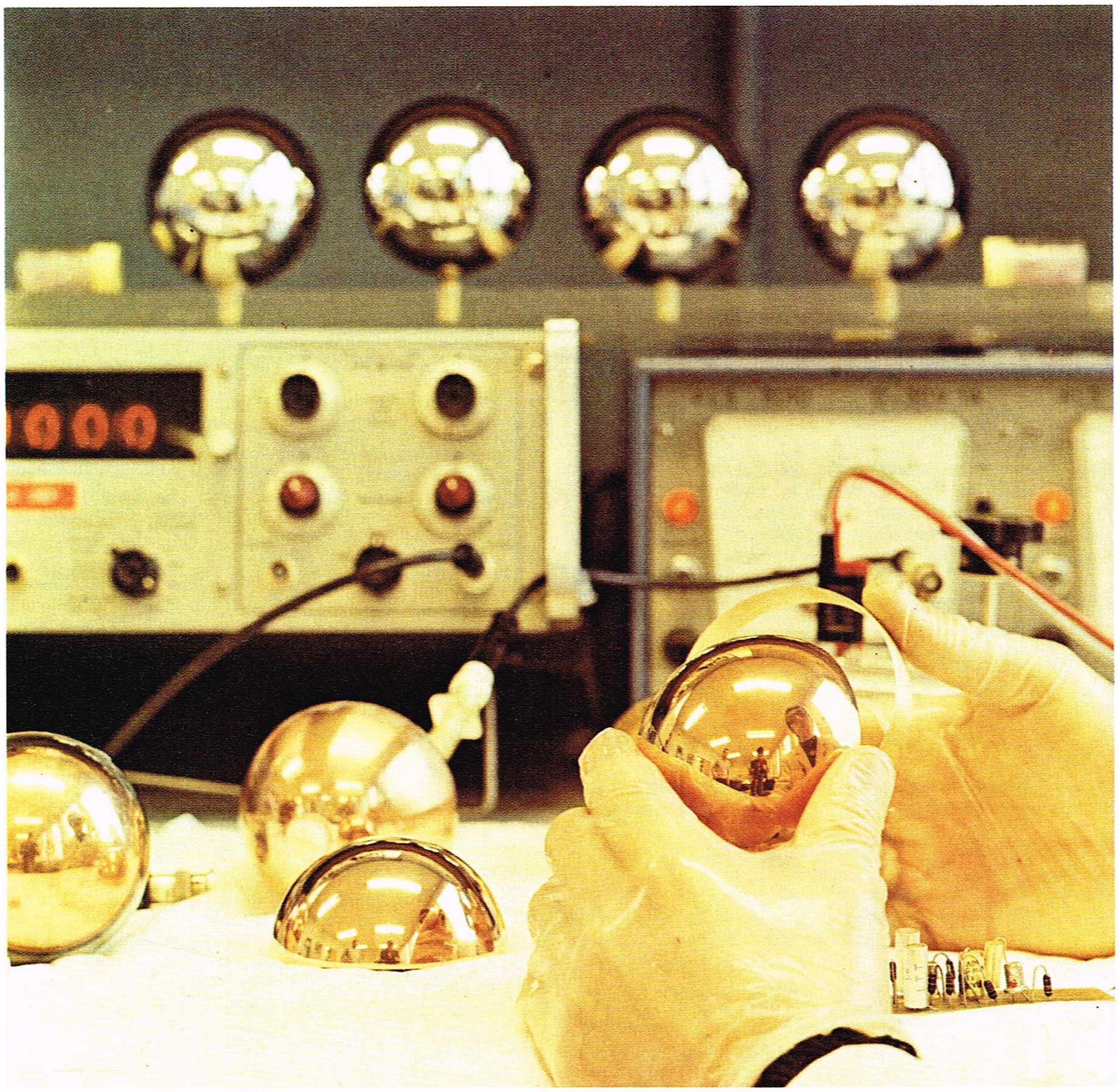

Parimage

◀ ***Fabrication et mise au point de capteurs de champ électrique appliquées aux expériences spatiales (C.N.R.S. Orléans : groupe de recherches ionosphériques).***

▶ *Tableau VI, donnant la correspondance entre certaines fonctions usuelles et leur transformée de Laplace.*

Tableau VI
Correspondance entre certaines fonctions usuelles et leur transformée de Laplace

Fonctions	Transformées de Laplace
$f(t)$ pour $t > 0$	$F(p)$
a	$\frac{a}{p}$
t	$\frac{1}{p^2}$
$\frac{t^{n-1}}{(n-1)!}$	$\frac{1}{p^n}$
e^{-at}	$\frac{1}{p+a}$
$\cos \omega t$	$\frac{p}{p^2+\omega^2}$
$\sin \omega t$	$\frac{\omega}{p^2+\omega^2}$

Pour nous familiariser avec les méthodes de calcul de ces systèmes, nous allons étudier deux systèmes particuliers mais de grande importance : les systèmes du premier et du second ordre. Auparavant, faisons quelques rappels sur la notion de transformée de Laplace afin de pouvoir introduire le concept de fonction de transfert.

Transformée de Laplace

A toute fonction $f(t)$ définie pour t positif, on fait correspondre une fonction $F(p)$ de la variable complexe p ($p = a + jb$).

$$F(p) = L[f(t)] = \int_0^{\infty} e^{-pt} f(t)\, dt$$

$F(p)$ est définie pour les valeurs de p donnant un sens à l'intégrale. Il suffira dans la suite de connaître la formulation de la transformée de certaines fonctions pour étudier quelques systèmes simples. Le *tableau* VI donne la correspondance entre certaines fonctions usuelles et leur transformée de Laplace.

Réciproquement, dès l'instant où il sera possible de décomposer une transformée de Laplace $F(p)$ en somme de fonctions du type de celles du *tableau* VI, l'obtention de la fonction $f(t)$ correspondante sera très facile, car les propriétés essentielles de la transformée de Laplace sont la linéarité et l'additivité.

Rappelons quelques-unes des autres propriétés de ces fonctions :

Si $\quad L[f(t)] = F(p)$

(1) $\quad L\left[\frac{df(t)}{dt}\right] = pF(p) - f(0)$

$$L\left[\frac{d^2f(t)}{dt^2}\right] = p^2 F(p) - p\, f(0) - \frac{df}{dt}(0) \text{ etc.}$$

Cette propriété permet de résoudre simplement les équations différentielles linéaires. Prenons un exemple.

Soit à résoudre $f'(t) + af(t) = K$ avec $a > 0$.

Prenons la transformée de Laplace :

$$pF(p) - f(0) + aF(p) = \frac{K}{p}$$

Donc :

$$F(p) = \frac{f(0)}{p+a} + \frac{K}{p(p+a)} = \frac{f(0)}{p+a} + \frac{K/a}{p} - \frac{K/a}{p+a}$$

Soit, en revenant à $f(t)$ et en appliquant la correspondance :

$$f(t) = f(0)\, e^{-at} + \frac{K}{a} - \frac{K}{a} e^{-at} =$$

$$f(0)\, e^{-at} + \frac{K}{a}(1 - e^{-at})$$

(2) $$\lim_{p \to 0} pF(p) = f(\infty)$$

Cette propriété peut se vérifier sur l'exemple précédent :

$$f(\infty) = \frac{K}{a}$$

$$pF(p) = \frac{p}{p+a} f(0) + \frac{K}{a} - \frac{K}{a}\frac{p}{p+a}$$

$$\lim_{p \to 0} pF(p) = \frac{K}{a}$$

(3) $\quad L[f(t-\tau)] = e^{-\tau p} F(p)$

Cette propriété sera intéressante pour l'étude des systèmes à retard.

Étude de quelques systèmes simples

Système du premier ordre

Un système est dit du premier ordre, d'entrée $i(t)$ et de sortie $u(t)$, lorsqu'il est régi par une équation différentielle linéaire du type :

$$A \frac{du(t)}{dt} + B\, u(t) = i(t)$$

Cette équation peut se mettre sous la forme :

$$T \frac{du(t)}{dt} + u(t) = Ki(t) \text{ avec } T > 0 \text{ et } K > 0$$

T a la dimension d'un temps : c'est la *constante de temps* du système ; K est le *gain* du système, sa dimension est celle du rapport $\frac{u(t)}{i(t)}$; par exemple, si $u(t)$ est une tension mesurée en volts, $i(t)$ un courant mesuré en ampères, K est homogène à une résistance et se mesure en ohms.

Donnons un exemple d'un circuit du premier ordre : soit un moteur électrique à courant continu. La grandeur d'entrée est la tension d'alimentation $V(t)$, la grandeur de sortie le nombre de tours $n(t)$ effectués par seconde. C'est un système du premier ordre régi par l'équation :

$$T \frac{dn(t)}{dt} + n(t) = KV(t)$$

En supposant le système à l'état de repos au temps

$$t = t_0 \; [n(t_0) = V(t_0) = 0]$$

nous allons soumettre le système à différents signaux d'entrée et étudier son comportement.

- *Entrée échelon*

L'entrée $V(t)$ est du type échelon (*fig.* 5) si :

pour $\quad t \leqslant t_0 \quad V(t) = 0$
$\quad\quad\; t > t_0 \quad V(t) = V$

En intégrant directement l'équation du système, on obtient pour $t > t_0$, $n(t) = KV(1 - e^{-(t-t_0)/T})$

Le régime obtenu au bout d'un temps théoriquement infini de par le caractère exponentiel de la courbe est dit *régime permanent* ou *définitif*. Il vaut ici KV, c'est-à-dire que l'on retrouve l'entrée si K vaut l'unité. Le régime précédant le régime permanent est dit *régime transitoire*. La constante de temps T caractérise la durée du régime transitoire, puisque T est le temps au bout duquel la sortie atteint la valeur $KV(1 - e^{-1})$, soit environ 63 % de la valeur caractérisant le régime permanent. T peut se mettre en évidence graphiquement sur la courbe de variation de la sortie en fonction du temps en traçant la tangente à l'origine (*fig.* 5).

- *Entrée rampe*

L'entrée $V(t)$ est dite du type rampe si :

$$V(t) = a(t - t_0) \text{ avec } t > t_0$$

L'intégration de l'équation différentielle donne :

$$n(t) = Ka\,[Te^{-(t-t_0)/T} + (t - t_0) - T]$$

La sortie en régime permanent a pour valeur

$$Ka\,[(t - t_0) - T]$$

Dans le cas où K est différent de 1, l'entrée et la sortie du système divergent. Dans le cas où K = 1 (*fig.* 6), les pentes des droites représentant les variations sortie et entrée en fonction du temps sont identiques, mais la sortie est en retard de T sur l'entrée.

Pour $t > t_0$, $n(t) = u(t) - aT$

on dit qu'il y a *traînage*. Le régime transitoire est du type exponentiel; il est très affaibli dès que $(t - t_0)$ est supérieur à 3 T.

- *Entrée sinusoïdale*

Supposons maintenant que l'entrée du système linéaire quelconque (différent du précédent) soit de type sinusoïdal : $i(t) = I \sin(\omega t + \varphi)$

I est l'amplitude de l'entrée harmonique, ω la pulsation mesurée en radians par seconde, reliée à la fréquence f par la formule $\omega = 2\pi f$ et φ la phase à l'origine. La réponse d'un système linéaire à une entrée harmonique est composée, de même que pour les cas précédents, d'un régime transitoire suivi d'un régime permanent. Le régime permanent est aussi périodique, de même fréquence que le signal d'entrée. C'est ce régime qui est souvent le plus intéressant à étudier, et on appelle *réponse en fréquence* d'un système l'évolution de sa sortie lorsqu'on fait varier la fréquence f du signal d'entrée.

Le régime permanent est de la forme :

$$u(t) = U \sin(\omega t + \psi)$$

avec $U = \dfrac{KI}{\sqrt{1 + T^2\omega^2}}$, et $\psi = -\text{Arc tg } T\omega$

Les courbes de réponse en fréquence sont les courbes représentant les variations du rapport $A = \dfrac{U}{I}$ et de ψ en fonction de ω. Ces courbes sont souvent tracées en coordonnées réduites de manière à présenter un caractère universel pour tout système linéaire (A/K en fonction de $T\omega$ et ψ en fonction de $T\omega$).

Nous décrirons deux types de représentations utilisées : la représentation de Bode et celle de Nyquist.

— *Représentation de Bode*

Dans cette représentation, on trace $\dfrac{A}{K}$ et ψ en coordonnées logarithmiques.

* *Courbe* 1 (*fig.* 7a) : $\dfrac{A}{K} = f(\omega T)$

$$\left[\frac{A}{K}\right]_{dB} = 20 \log_{10}\left(\frac{A}{K}\right) = -20 \log_{10} \sqrt{1 + (T\omega)^2}$$

L'axe des amplitudes est gradué en décibels (dB) et l'axe des abscisses est une échelle logarithmique en ωT. On voit que le diagramme présente deux asymptotes dont l'intersection est au point $\omega T = 1$ et $A = K$:

1re asymptote pour $\omega T < 1$: droite d'équation $\dfrac{A}{K} = 0$ dB

2e asymptote pour $\omega T > 1$: droite d'équation $\dfrac{A}{K} = \dfrac{1}{T\omega}$

Cette droite a pour pente — 20 dB par décade (diminution de 20 décibels pour $\dfrac{A}{K}$ lorsque ωT est multiplié par 10). On notera que pour $\omega T = 1$ la courbe réelle est 3 dB au-dessous du point d'intersection des asymptotes.

* *Courbe* 2 (*fig.* 7b) : $\psi = f(\omega T)$

$\omega T < 0{,}01$ $\quad \psi \sim 0°$

$\omega T > 100$ $\quad \psi \sim -90°$

$0{,}01 < \omega T < 100$ courbe de raccordement en Arc tangente

La phase est donc toujours négative et décroissante : on dit que la sortie est en retard de phase sur l'entrée.

Cette représentation de Bode est générale; dans la plupart des cas, il suffit de tracer les asymptotes pour avoir l'allure de la courbe, le diagramme correspondant est dit *diagramme asymptote de Bode*.

— *Représentation de Nyquist*

Les courbes d'amplitude et de phase précédentes peuvent être condensées en un seul graphique (*fig.* 8) à l'aide de coordonnées polaires. Pour chaque pulsation réduite ωT, on trace un vecteur d'amplitude $\dfrac{A}{K}$ et d'angle polaire ψ. Dans le cas du système du premier ordre qui nous intéresse, le lieu obtenu est un demi-cercle.

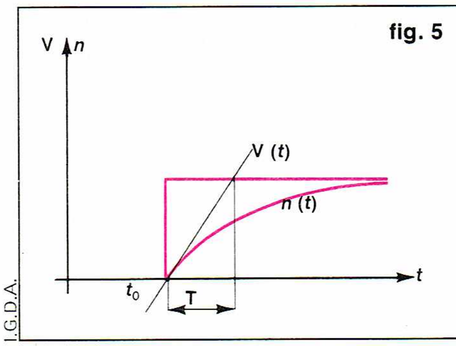

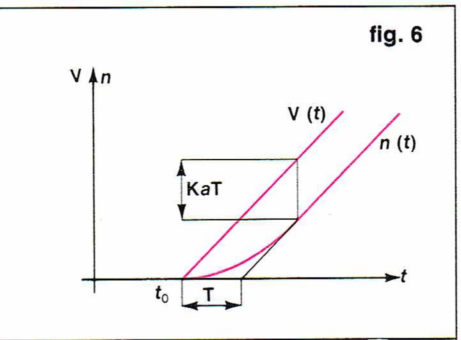

I.G.D.A.

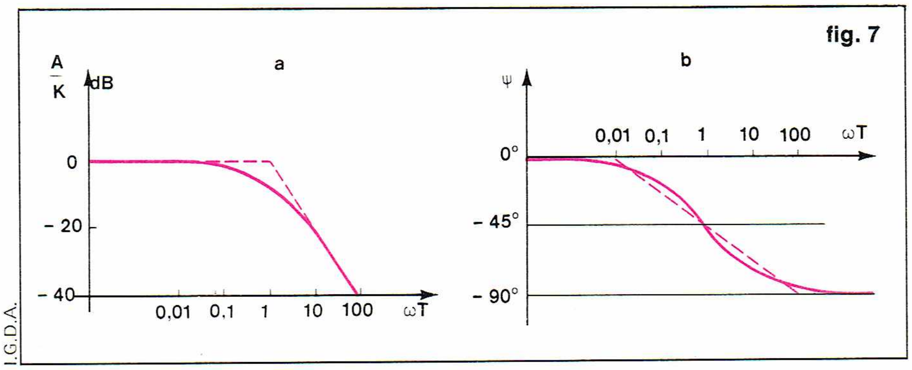

I.G.D.A.

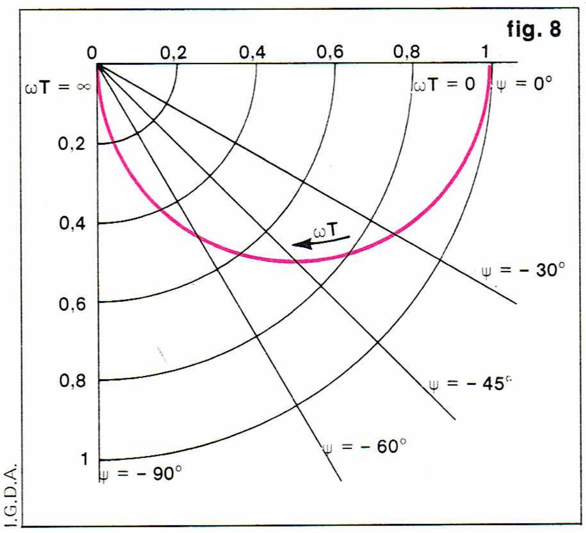

I.G.D.A.

▲ En haut, figure 5 : réponse d'un système du premier ordre à un échelon. Figure 6 : réponse d'un système du premier ordre à une rampe. Ci-dessus, figure 7 : diagrammes de Bode pour amplitude et phase d'un système du premier ordre.

◀ Figure 8 : représentation de Nyquist d'un système du premier ordre.

- *Fonction de transfert*

En supposant que le système parte du repos $u(0) = 0$, désignons par $U(p)$ et $I(p)$ les transformées de Laplace respectives de $u(t)$ et $i(t)$. L'équation d'un système du premier ordre :

$$T\frac{du(t)}{dt} + u(t) = Ki(t)$$

donne : $\quad TpU(p) + U(p) = KI(p)$

Le rapport $H(p) = \dfrac{U(p)}{I(p)} = \dfrac{K}{1 + Tp}$ s'appelle *fonction de transfert* du système du premier ordre. Son image inverse s'appelle *réponse impulsionnelle*.

Dans le cas où $u(0) = V_0$ on aurait trouvé :

$$\frac{U(p)}{I(p)} = \frac{K}{1 + Tp} + \frac{TV_0}{I(p)\,(1 + Tp)}$$

La fonction de transfert est, on le verra, une caractéristique des systèmes linéaires. Ainsi, retrouvons la forme de la sortie dans le cas d'une entrée échelon unité (conditions initiales nulles) :

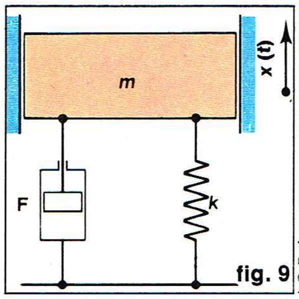

▲ *Figure 9 : schéma d'un accéléromètre.*

$$U\,(p) = \frac{K}{1+Tp}\,I\,(p) = \frac{K}{1+Tp}\cdot\frac{1}{p} = K\left[\frac{1}{p} + \frac{-T}{1+Tp}\right]$$

soit : $u\,(t) = K\,(1 - e^{-t/T})$

Système du second ordre

Un système est dit du second ordre lorsqu'il est régi par une équation différentielle linéaire du deuxième ordre de la forme :

$$A\,\frac{d^2u\,(t)}{dt^2} + B\,\frac{du\,(t)}{dt} + C\,u(t) = D\,i(t)$$

où $u\,(t)$ et $i\,(t)$ sont respectivement la sortie et l'entrée du système.

Nous allons transformer cette équation de manière à obtenir la forme dite *forme canonique*. Introduisons les nouvelles variables :

$$\omega_n = \sqrt{\frac{C}{A}} \qquad \zeta = \frac{B}{2\sqrt{CA}} \qquad b = \frac{D}{A}$$

L'équation devient :

$$\frac{d^2u\,(t)}{dt^2} + 2\,\zeta\omega_n\,\frac{du\,(t)}{dt} + \omega_n^2 u\,(t) = b\,i(t)$$

$\frac{b}{\omega_n^2}$ = K est le gain statique du système ; ω_n est la pulsation propre du système, elle est mesurée en radians par seconde ; ζ est le facteur d'amortissement ; ce nombre est sans dimension.

Prenons comme exemple l'accéléromètre représenté sur la *figure* 9. Cet appareil se compose d'une masse m mobile selon la direction x par rapport à un support auquel elle est attachée par un ressort. Ce ressort développe une force F proportionnelle à son allongement : $F = kx$; k s'appelle la raideur du ressort. On suppose qu'il existe un frottement visqueux qui agit avec une force proportionnelle à la vitesse relative de la masse et de son support $\left(f\,\frac{dx}{dt}\right)$. Les frottements solides sont supposés négligeables. Soumettons l'ensemble à une accélération a et écrivons l'équation de la dynamique relative à m :

$$m\,\frac{d^2x}{dr^2} = -\,kx - f\,\frac{dx}{dt} + ma$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{f}{m}\,\frac{dx}{dt} + \frac{k}{m}\,x = a$$

On obtient ainsi un système du second ordre dont l'équation peut se mettre sous forme canonique avec :

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \qquad \zeta = \frac{f}{2\sqrt{km}} \qquad b = 1$$

● *Fonction de transfert*

Nous allons définir immédiatement la fonction de transfert pour étudier le système. C'est le rapport de la transformée de Laplace de la sortie à la transformée de Laplace de l'entrée lorsque les conditions initiales sont nulles.

Supposons donc $u\,(0) = \frac{du}{dt}\,(0) = 0$

$$U\,(p) = [p^2 + 2\,\zeta\omega_n p + \omega_n^2] = b\,I(p)$$

$$H\,(p) = \frac{U\,(p)}{I\,(p)} = \frac{b}{p^2 + 2\,\zeta\omega_n p + \omega_n^2} = \frac{K}{\frac{p^2}{\omega_n^2} + \frac{2\,\zeta}{\omega_n}\,p + 1}$$

● *Réponse en fréquence*

Soumettons le système à une entrée harmonique

$$i\,(t) = I\,\sin\,\omega t$$

Nous nous intéressons au régime définitif qui est périodique de même fréquence : $u\,(t) = U\,\sin\,(\omega t + \varphi)$.

En remarquant que $\sin\,\omega t$ et $\sin\,(\omega t + \varphi)$ sont la partie imaginaire respectivement de :

$$e^{j\omega t} \text{ et } e^{j\,(\omega t + \varphi)} \quad [e^{j\omega t} = \cos\,\omega t + j\,\sin\,\omega t]$$

remplaçons $i\,(t)$ par $Ie^{j\omega t}$ et $u\,(t)$ par $Ue^{j\,(\omega t+\varphi)}$; on obtient après simplification

$$[(j\omega)^2 + 2\,\zeta\omega_n\,(j\omega) + \omega_n^2]\,e^{j\varphi}\,U = bI$$

donc : $$\frac{U}{I}\,e^{j\varphi} = \frac{b}{(j\omega)^2 + 2\,\zeta\omega_n j\omega + \omega_n^2}$$

Le membre de droite représente $H\,(j\omega)$ ou $H\,(p)$ lorsque $p = j\omega$.

Cette remarque va permettre de déduire la réponse en fréquence du système à partir de la fonction de transfert. L'étude des courbes amplitude et phase se fait en fonction de la pulsation réduite $u = \frac{\omega}{\omega_n}$.

Le rapport des amplitudes sortie-entrée vaut alors :

$$\frac{U}{I} = \frac{b}{\omega_n^2}\,\frac{1}{\sqrt{(1-u^2)^2 + (2\,\zeta u)^2}} = \frac{K}{\sqrt{(1-u^2)^2 + (2\,\zeta u)^2}}$$

et la phase $$\varphi = -\,\mathrm{Arc\,tg}\,\frac{2\,\zeta u}{1 - u^2}$$

— *Diagramme de Bode*

Sur les *figures* 10 et 11 sont représentées les courbes de phase et d'amplitude, caractéristiques d'un système du second ordre. Ces courbes sont la représentation

▼▶ *Figures 10 et 11 : diagrammes de Bode (phase, ci-dessous, et amplitude, ci-contre) d'un système du second ordre (gain statique égal à 1). Courbes paramétrées en valeur de ζ.*

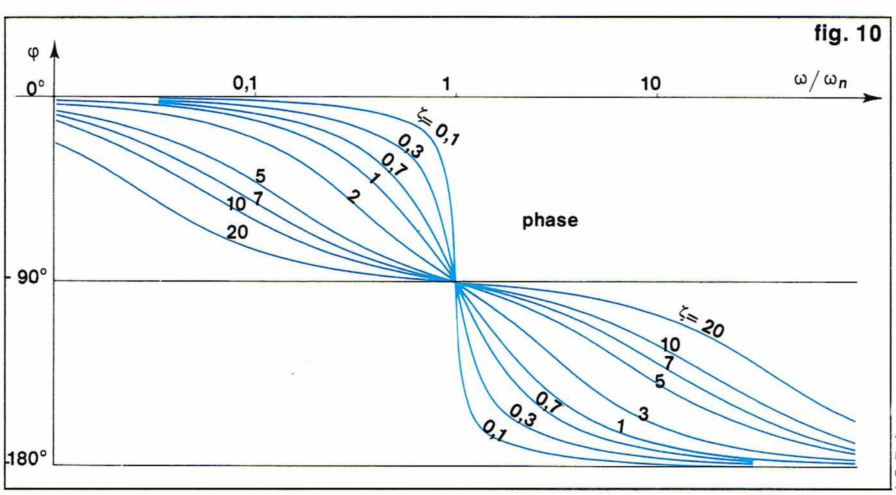

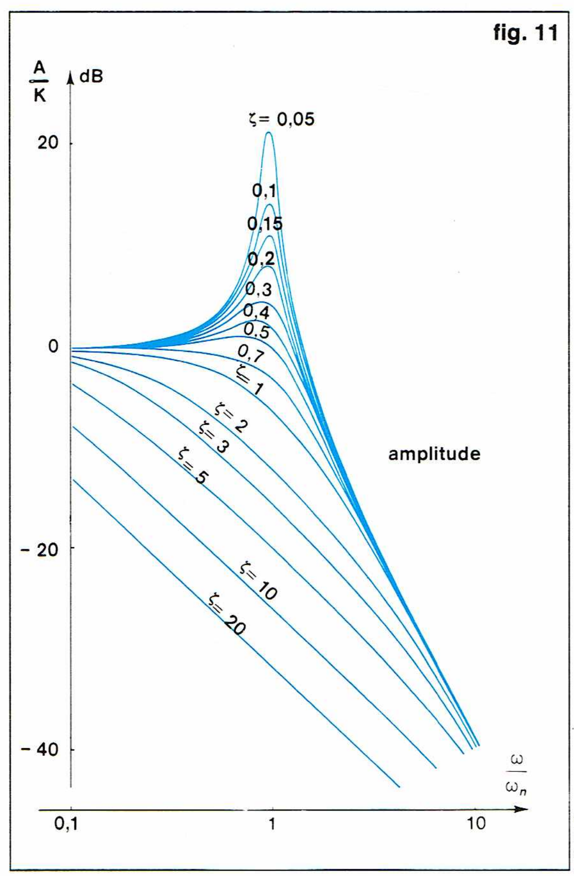

graphique de φ et de $\dfrac{1}{\sqrt{(1-u^2)^2+(2\zeta u)^2}}$ en fonction de u en coordonnées logarithmiques. On note l'existence de deux asymptotes pour le diagramme d'amplitude (*fig.* 11), l'une horizontale pour 0 décibel, l'autre oblique (pente de — 12 décibels par octave). Ces asymptotes se coupent au point d'abscisse $u = 1$ ou $\omega = \omega_n$ et d'ordonnée 0 dB. On remarquera que pour ζ inférieur à 0,7 l'amplitude passe par un maximum supérieur à la valeur statique (la pulsation pour laquelle se produit ce maximum vaut $\omega_n\sqrt{1-2\zeta^2}$, c'est la *pulsation de résonance*). Pour ζ supérieur à 0,7, ce maximum a lieu pour $u = 0$ et vaut 0 dB. On définit aussi la fréquence de coupure à — 3 dB comme la valeur de la fréquence pour laquelle le rapport d'amplitude vaut — 3 dB. La bande passante à — 3 dB est la bande Δf pour laquelle le rapport d'amplitude a une valeur supérieure à — 3 dB.

La phase décroît de 0 à — 180° avec une pente d'autant plus forte au voisinage du point $\omega = \omega_n$ que ζ est plus faible.

— *Diagramme de Nyquist*

Celui-ci est donné sur la *figure* 12 pour différentes valeurs de ζ : il condense la représentation précédente.

● *Étude de la fonction de transfert*

L'étude de la fonction de transfert se ramène à l'étude de la fonction :

$$H(p) = \frac{K}{\dfrac{p^2}{\omega_n^2} + \dfrac{2\zeta}{\omega_n}p + 1}$$

Nous distinguerons trois cas :

* $\zeta > 1$, *système hyperamorti*. Le dénominateur a deux racines réelles :

$$p_1 = -\omega_n(\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}) \qquad p_2 = -\omega_n(\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})$$

Le système est en fait le produit de deux systèmes du premier ordre :

$$H(p) = \frac{K}{1 + 2\zeta\dfrac{p}{\omega_n} + \dfrac{p^2}{\omega_n^2}} = \frac{K}{p_1 p_2}\cdot\frac{1}{1+T_1 p}\cdot\frac{1}{1+T_2 p}$$

$$\text{avec } T_1 = -\frac{1}{p_1} \text{ et } T_2 = -\frac{1}{p_2}$$

T_1 et T_2 sont les constantes de temps de chaque système du premier ordre.

On peut retrouver l'allure des courbes de réponse en fréquence obtenues *figures* 10 et 11, pour $\zeta > 1$, en traçant les diagrammes asymptote de Bode (*fig.* 13 et 14) correspondant à $\dfrac{1}{1+T_1 j\omega}\cdot\dfrac{1}{1+T_2 j\omega}$. Ce diagramme est le résultat de la composition de deux diagrammes; on voit ainsi apparaître sur le diagramme d'amplitude (*fig.* 13) l'asymptote à 40 dB par décade.

* $\zeta < 1$. Le dénominateur de H (p) a deux racines imaginaires conjuguées :

$$p_1 = -\zeta\omega_n + j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$$

et $$p_2 = -\zeta\omega_n - j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$$

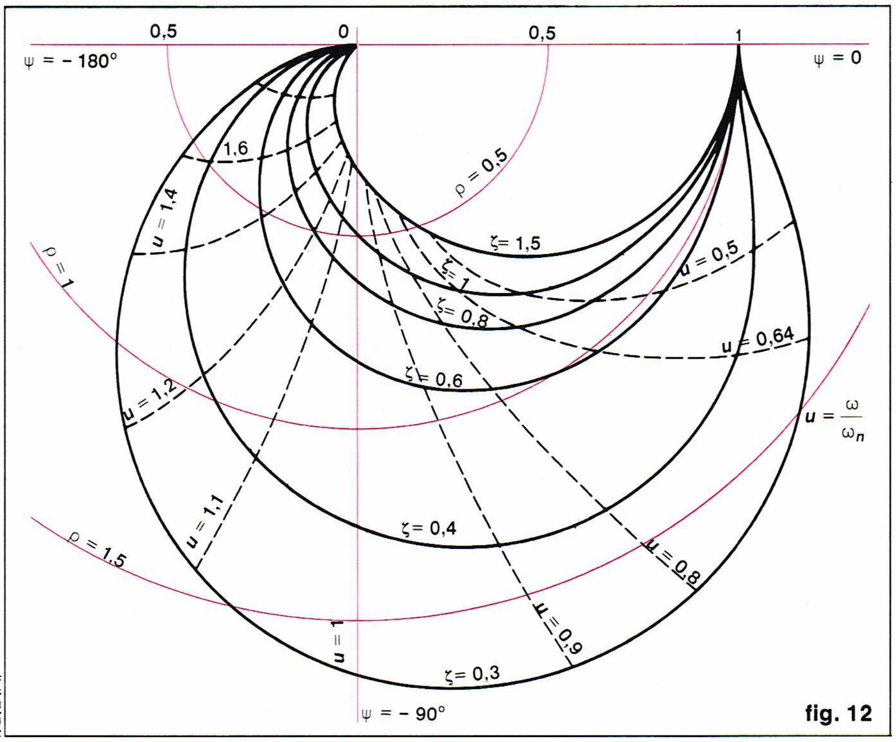

fig. 12

▲ *Figure 12 : diagramme de Nyquist d'un système du second ordre. Courbes paramétrées en valeur de ζ.*

L'image temporelle présentera donc des termes en exponentielles imaginaires. On parle donc dans ce cas d'un mode oscillatoire pour le système.

* $\zeta = 1$, *amortissement critique*. Les racines du dénominateur sont confondues : $p_1 = p_2 = -\omega_n$

L'application suivante va permettre d'éclairer chacun de ces trois cas et d'en expliquer les appellations.

● *Application : réponse d'un système du second ordre à un échelon unité* (*fig.* 15)

L'entrée du système est un échelon de hauteur 1,

$$e(t) = 1,\ t > 0,\ E(p) = \frac{1}{p}$$

La transformée de la sortie vaut :

$$S(p) = \frac{1}{p}\cdot\frac{K}{\dfrac{p^2}{\omega_n^2} + 2\dfrac{\zeta}{\omega_n}p + 1}$$

L'image temporelle de la sortie dépend du type de racines de l'équation, c'est-à-dire du signe de

$$\zeta^2\omega_n^2 - \omega_n^2 = \omega_n^2(\zeta^2 - 1)$$

* $\zeta > 1$, *système hyperamorti*. Posons :

$$\frac{1}{T_1} = \zeta\omega_n + \omega_n\sqrt{\zeta^2-1} \quad\text{et}\quad \frac{1}{T_2} = \zeta\omega_n - \omega_n\sqrt{\zeta^2-1}$$

alors $s(t)$ peut se mettre sous la forme :

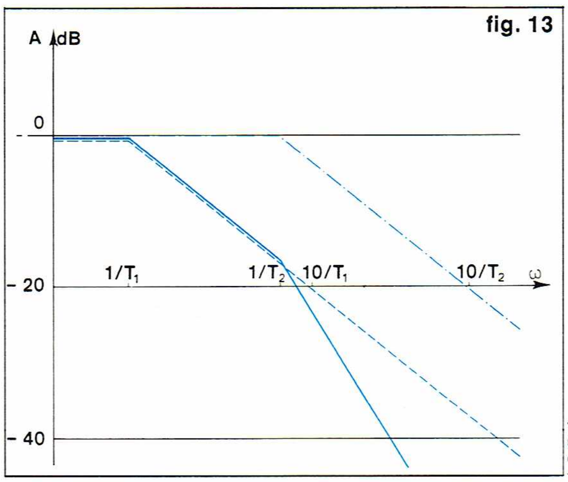

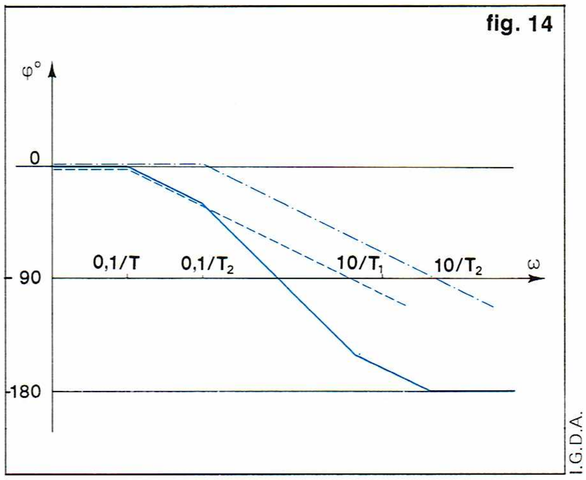

◀ *A gauche, figure 13 : diagramme asymptote de Bode pour l'amplitude d'un système du second ordre. Cas $\zeta > 1$.*
A droite, figure 14 : diagramme asymptote de Bode pour la phase d'un système du second ordre. Cas $\zeta > 1$.

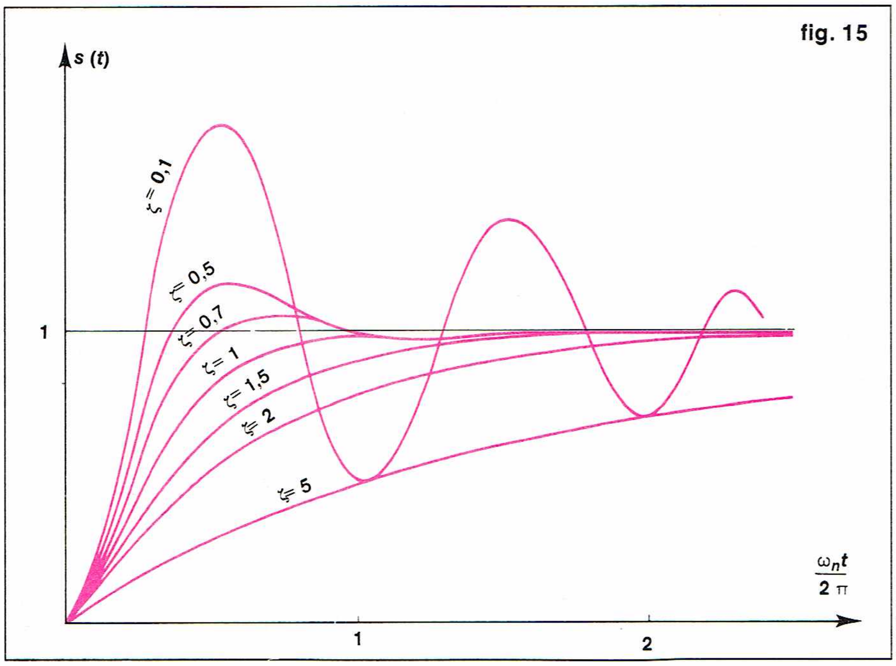

▲ *Figure 15 : réponse d'un système du second ordre à un échelon unité. Types de sorties possibles pour différentes valeurs de* ζ.

$$s\ (t) = K\ [1 + \frac{1}{T_2 - T_1}\ (T_1 e^{-t/T_1} - T_2 e^{-t/T_2})]$$

$s\ (t)$ est donc la combinaison de deux termes exponentiels et d'un terme donnant le régime permanent. Le régime transitoire présente deux constantes de temps, T_1 et T_2. La *figure* 15 représente les variations de $s\ (t)$ dans le cas où $K = 1$.

* $\zeta = 1$. L'équation

$$\frac{p^2}{\omega_n^2} + 2\frac{\zeta}{\omega_n}p + 1 = 0$$

En posant $T = -\frac{1}{\omega_n}$, $s\ (t) = K\ [1 - \left(1 + \frac{t}{T}\right) e^{-t/T}]$

L'allure de la réponse est analogue à la précédente.

* $\zeta < 1$. Les racines de l'équation

$$\frac{p^2}{\omega_n^2} + \frac{2}{\omega_n}p + 1 = 0$$

sont imaginaires conjuguées.

▼ *A gauche, figure 16 : représentation de systèmes par schémas-blocs. A droite, figure 17 : schéma d'un système contre-réactionné par un réseau de fonction de transfert* $K_2\ H\ (p)$.

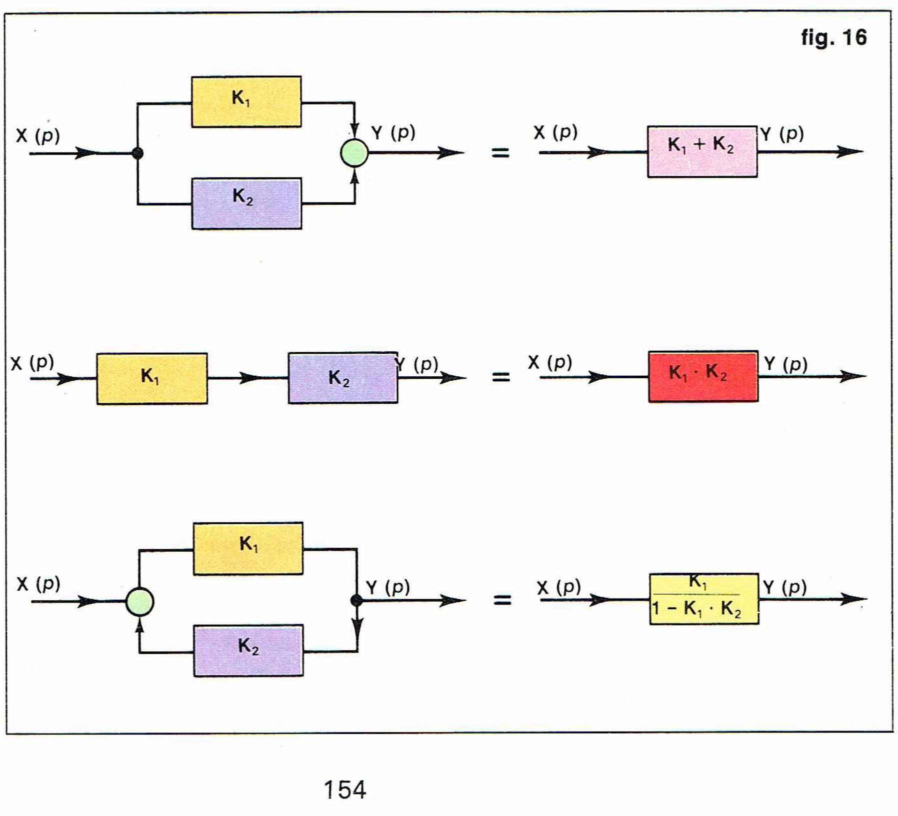

$$s\ (t) = K\ [1 - \frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}}\ e^{-\zeta\omega_n t} \sin\ (\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t + \varphi)]$$

$$\varphi = \text{Arc tg}\ \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}$$

Le régime transitoire présente donc des oscillations [racines imaginaires dans le dénominateur de $S\ (p)$] de pulsation $\omega_p = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$ appelée *pulsation propre du système* ; ces oscillations sont amorties par le terme

$$e^{-\zeta\omega_n t}$$

Le régime permanent vaut toujours K. On adopte en général une valeur de réglage de ζ égale à 0,7, ce qui correspond à un régime très faiblement oscillatoire. On appelle temps de réponse à 5/100 le temps au bout duquel les variations de la sortie sont inférieures à 5/100 de la valeur correspondant au régime définitif.

De très nombreux systèmes sont des systèmes du second ordre ou sont approchables par de tels systèmes : la connaissance de leurs propriétés est donc très importante.

Étude des systèmes asservis linéaires

Les deux exemples précédents, systèmes du premier ordre et du second ordre, ont mis en évidence l'importance de la notion de fonction de transfert pour l'étude des systèmes linéaires. Tout système linéaire peut être représenté par un schéma bloc du type de ceux de la *figure* 16. Cette représentation indique que la transformée de Laplace de la sortie $Y\ (p)$ est égale à la transformée de Laplace de l'entrée $X\ (p)$ multipliée par la valeur de la fonction de transfert indiquée sur le bloc lui-même. Les différents blocs sont reliés entre eux soit directement, soit par l'intermédiaire de détecteurs d'écart. Ce schéma est à différencier d'un schéma fonctionnel (*fig.* 4) qui indique le type d'organes du système (capteurs, amplificateurs, etc.) ; il permet de suivre la transmission depuis l'entrée jusqu'à la sortie du système des différents signaux fournis au système. On peut réduire un ensemble de schémas blocs à un seul bloc liant directement l'entrée à la sortie. Cette opération obéit à deux règles élémentaires, l'addition et le produit.

Ainsi, pour le *premier schéma* de la *figure* 16 (sommation) :

$$Y\ (p) = K_1\ (p)\ X\ (p) + K_2\ (p)\ X\ (p) = [K_1\ (p) + K_2\ (p)]\ X\ (p)$$

Les deux blocs sont donc ramenés à un seul représentant, la fonction de transfert : $K_1\ (p) + K_2\ (p)$.

Pour le *deuxième schéma* de la *figure* 16 (produit) :

$$Y\ (p) = K_2\ (p)\ [K_1\ (p)\ X\ (p)] = [K_1\ (p)\ K_2\ (p)]\ X(p)$$

Les deux blocs en cascade sont ramenés à un seul, de fonction de transfert $K_1\ (p)\ K_2\ (p)$.

Pour le *troisième schéma* de la *figure* 16 :

$$Y\ (p) = K_1\ (p)\ [X\ (p) + K_2\ (p)\ Y\ (p)] = K_1\ (p)\ X\ (p) + K_1\ (p)\ K_2\ (p)\ Y\ (p)$$

D'où un seul bloc reliant l'entrée $X\ (p)$ à la sortie $Y\ (p)$ de fonction de transfert : $\dfrac{K_1\ (p)}{1 - K_1\ (p)\ K_2\ (p)}$

Nous allons maintenant utiliser cette technique pour réduire le schéma bloc d'un système bouclé (*fig.* 17). Soit $K_1G\ (p)$ la fonction de transfert du système seul et $K_2H\ (p)$ celle de l'organe de correction qui permet de l'asservir. La quantité $K_1K_2G\ (p)\ H\ (p)$ est appelée fonction de transfert en boucle ouverte du système. Nous avons la suite d'équations :

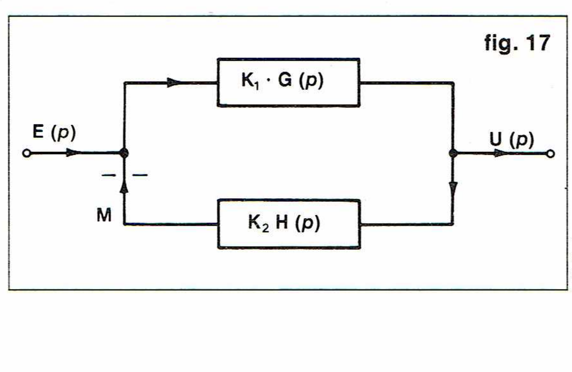

U.S.I.S.

▲ *La production en raffinerie des combustibles et produits pétrochimiques est réglée par trois techniciens assis aux tableaux de commandes (en bas, au premier plan).*

$$[E(p) - K_2H(p)\,U(p)]\,K_1G(p) = U(p)$$

où E (*p*) et U (*p*) sont les transformées de Laplace de l'entrée et de la sortie :

$$\frac{U(p)}{E(p)} = \frac{K_1G(p)}{1 + K_1K_2G(p)\,H(p)}$$

Cette quantité s'appelle la *fonction de transfert en boucle fermée :* c'est en effet celle du système équivalent d'entrée E (*p*) et de sortie U (*p*). Un système est dit *système à retour unitaire* si $K_2H(p) = 1$; sa fonction de transfert en boucle fermée vaut : $\frac{K_1G(p)}{1 + K_1G(p)}$

Il est toujours possible de se ramener à un système à retour unitaire. En effet, selon le schéma de la *figure* 17 :

$$\frac{U(p)}{E(p)} = \frac{K_1G(p)}{1 + K_1K_2G(p)\,H(p)} = \frac{1}{K_2H(p)}\left[\frac{K_1K_2G(p)\,H(p)}{1 + K_1K_2G(p)\,H(p)}\right]$$

Le système équivalent se compose donc d'un système à retour unitaire de fonction de transfert en boucle ouverte $K_1K_2G(p)\,H(p)$ suivi d'un système de fonction de transfert $\frac{1}{K_2H(p)}$. On comprend dès lors le nom de *fonction de transfert en boucle ouverte* donné à la quantité $K_1K_2G(p)\,H(p)$.

Nous n'étudierons donc que les systèmes à retour unitaire (on peut étudier la réponse en fréquence de tout système à l'aide de sa fonction de transfert). Nous ne reviendrons pas sur les deux types de diagrammes utilisés : celui de Bode et celui de Nyquist. Citons également l'abaque de Black qui permet de tracer la fonction de transfert en boucle fermée, connaissant la fonction de transfert en boucle ouverte.

Stabilité

Un système est dit *stable* lorsqu'il revient à sa position d'équilibre après l'application d'une perturbation. Si un système est stable, le fait de renvoyer la sortie sur l'entrée peut le rendre instable. Il est donc intéressant de déduire de la fonction de transfert en boucle ouverte les propriétés de stabilité du système bouclé. Soit H (*p*) la fonction de transfert du système bouclé et KG (*p*) sa fonction de transfert en boucle ouverte :

$$U(p) = H(p)\,E(p) \qquad H(p) = \frac{KG(p)}{1 + KG(p)}$$

La stabilité du système dépend des pôles de H (*p*), donc des solutions de l'équation $[1 + KG(p) = 0]$. En effet, soit $H(p) = \frac{N(p)}{D(p)}$ avec $D(p) = (p - p_1) \ldots (p - p_n)$

— Si les p_i sont réels négatifs, le système est stable (l'image sera une exponentielle négative).

— Si l'un quelconque des p_i est réel positif, le système est instable.

— Si les p_i sont imaginaires avec une partie réelle négative, la solution est sinusoïdale amortie, donc le système est stable.

— Si les p_i sont imaginaires avec une partie réelle nulle, la solution est sinusoïdale, donc instable.

— Si les p_i sont imaginaires avec une partie réelle positive, le système est instable.

Autrement dit, le système bouclé est stable si aucun pôle de H (*p*) n'est situé dans la partie droite du plan complexe.

Plusieurs méthodes d'études sont possibles : critère de Routh, lieu d'Evans ou lieu des racines, critères du Revers et de Nyquist. C'est cette dernière méthode que nous allons détailler; elle revient à résoudre $KG(p) = -1$.

Dans le plan complexe, on positionne le point (— 1,0) appelé *point critique*. Si, en parcourant dans le sens des ω croissants le lieu de Nyquist en boucle ouverte ($KG(j\omega)$), on laisse le point (— 1,0) à gauche, le système est stable; si on le laisse à droite, il est instable; si le point critique appartient au lieu, le système est oscillant. En fait, ce critère est une simplification d'un critère plus général; il s'applique aux systèmes à déphasage minimal [pas de zéros ou de pôles à partie réelle positive dans KG (*p*)]. Dans le plan de Bode, ce critère s'énoncerait : si pour $\omega = \omega_0$ $|KG(j\omega)| = 1$, le système est stable si Arg $KG(j\omega)$ est supérieur à — 180°.

Dans la pratique, on s'impose certaines conditions de gain et de phase, appelées la *marge de gain* et la *marge de phase*. Il est visible en effet sur la *figure* 18 que si l'on augmente le gain statique de K_{st} à K_c on amène le système à la limite de l'instabilité (le lien passe en effet par le point critique). On appelle marge de gain ΔG la distance du lieu au point critique lorsque le déphasage de la fonction de transfert en boucle ouverte vaut ($-\pi$). La marge prise dans la pratique est de 10 à 15 dB. On impose d'autre part à la phase de KG (*p*) d'être supérieure à — 180° lorsque $|KG(p)|$ vaut 1 : c'est la marge de phase φ_m. La valeur pratique de φ_m est 45 à 50°. Ces quantités, marge de gain et marge de phase, peuvent se retrouver sur un diagramme de Bode. Ce sont toutefois des notions qu'il ne faut employer qu'avec précaution.

Précision

On distingue deux sortes de précisions : la *précision statique* et la *précision dynamique*. Cette dernière intervient dans le régime transitoire, tandis que la précision statique se rapporte au régime permanent. Des exemples de précision dynamique sont le temps de réponse que nous avons déjà défini plus haut, et l'amortissement.

▶ *Figure 18 : diagramme de Nyquist d'un système de gain statique K_{st}. Effet de l'augmentation du gain statique sur la stabilité du système.*

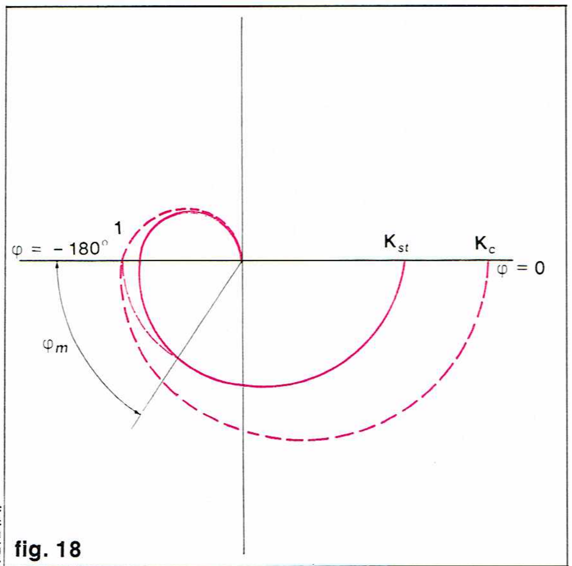

I.G.D.A.

fig. 18

Ainsi, la précision dynamique d'un système du second ordre à retour unitaire est liée à la valeur de la pulsation de résonance et à celle de la pulsation de coupure à — 3 décibels. L'amortissement d'un tel système est caractérisé par le facteur de résonance $Q = \frac{|G_{max}|}{G\ (0)}$ (G_{max} est la valeur maximale de la fonction de transfert, G (0) la valeur pour $\omega = 0$).

Le système est d'autant moins amorti que ce rapport est plus grand. Pour des systèmes d'ordre supérieur, il est difficile de définir des relations entre les trois facteurs (pulsation de coupure, de résonance et facteur de résonance), mais la réponse d'un système du second ordre est relativement typique pour se limiter à son étude. Pour étudier la précision statique, nous allons prendre l'exemple d'un échelon unité. Soit $\varepsilon\ (p)$ la transformée de Laplace de l'erreur ($\varepsilon\ (t)$ = sortie du détecteur d'écart).

$$\varepsilon\ (p) = E\ (p) - K_2H\ (p)\ U\ (p)$$

avec $$U\ (p) = K_1G\ (p)\ \varepsilon\ (p)$$

$$\frac{\varepsilon\ (p)}{E\ (p)} = \frac{1}{1 + K_1K_2G\ (p)\ H\ (p)}$$

— *1^er^ cas :* $K_1K_2G\ (p)\ H\ (p) = A$ constant

$$\varepsilon\ (p) = \frac{1}{p\ (1 + A)}$$

En appliquant la propriété (2) de la transformée de Laplace, $\varepsilon\ (\infty) = \frac{1}{1 + A}$. Il existe donc une erreur que l'on peut réduire en augmentant A.

— *2^e^ cas :* $K_1K_2G\ (p)\ H\ (p) = \frac{A}{1 + Tp}$ (1^er^ ordre).

L'erreur permanente vaut encore

$$\frac{1}{1 + A} \cdot \left(\lim_{p \to 0} p\varepsilon\ (p) = \lim_{p \to 0} \frac{1}{1 + \frac{A}{1 + Tp}}\right)$$

— *3^e^ cas :* $K_1K_2G\ (p)\ H\ (p) = \frac{A}{p\ (1 + Tp)}$

$$\lim_{p \to 0} p\varepsilon\ (p) = \lim_{p \to 0} \frac{1}{1 + \frac{A}{p\ (1 + Tp)}} = 0$$

L'erreur permanente est nulle. La présence d'un élément $\frac{1}{p}$ (intégrateur) annule l'erreur permanente à un échelon unité. On pourra vérifier que l'erreur de traînage (erreur à une entrée rampe) est nulle s'il y a un terme $\frac{1}{p^2}$ dans la fonction de transfert en boucle ouverte. Ce résultat se généralise pour $(n + 1)$ intégrateurs dans la chaîne, pour

▼ *Figure 19 : diagramme de Bode d'un correcteur d'action intégrale. Figure 20 : diagramme de Bode d'un correcteur d'action dérivée. Figure 21 : diagramme asymptote de Bode (phase et amplitude) et diagramme de Nyquist du réseau en fonction de transfert (1 + jω T).*

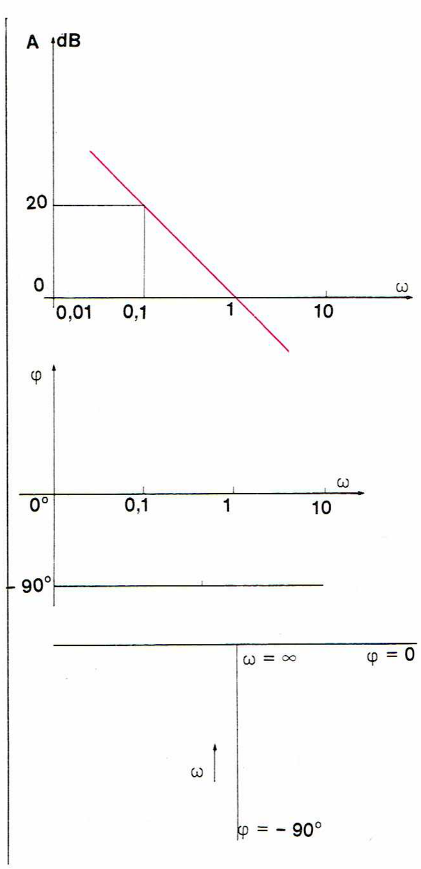

I.G.D.A.

fig. 19

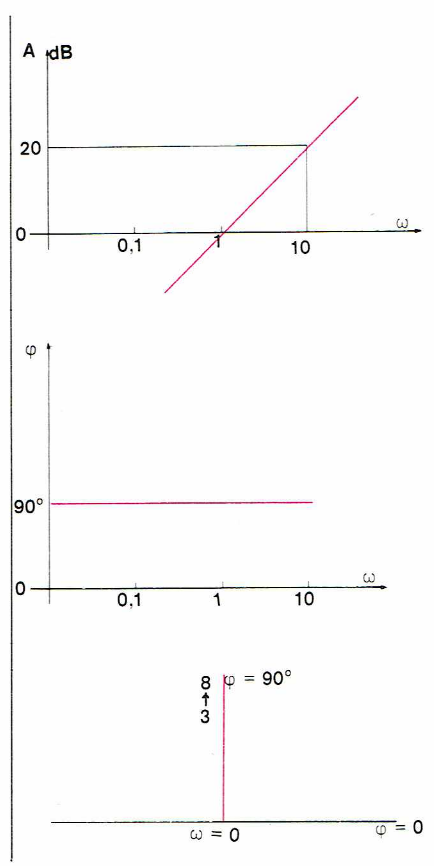

fig. 20

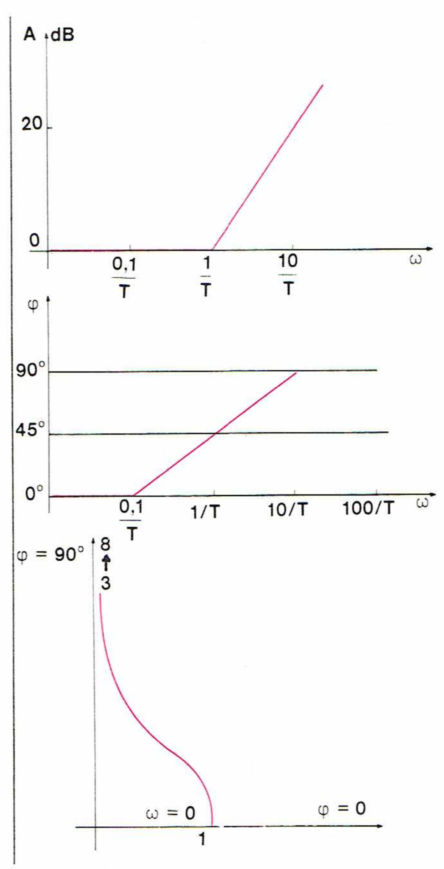

fig. 21

G. Gerster - Rapho

▲ ***Salle de contrôle de Houston.***

annuler des erreurs d'ordre *n*. Cependant tout intégrateur introduit un déphasage de $\left(-\frac{\pi}{2}\right)$ qui peut entraîner un phénomène d'instabilité : il y a donc toujours un compromis à faire. De même, on doit faire un compromis entre précision statique et dynamique : en général, on se fixe un critère de performance pour donner des valeurs aux paramètres du système. Cette étude devrait être complétée par une étude de la sensibilité aux perturbations que l'on a négligée dans cet exposé.

Correction

Nous avons vu que l'augmentation du gain en boucle ouverte pouvait entraîner l'instabilité d'un système, par contre cette augmentation diminue l'erreur à un échelon unité et d'une manière générale améliore la précision. Donc, si on choisit K_1K_2 faible (*fig.* 17), le système est stable mais peu précis; si on choisit K_1K_2 grand, le système a de bonnes performances mais risque d'osciller. Dans la pratique, le compromis consiste à prendre un facteur de résonance compris entre 1,3 et 2,3 décibels. Dans ce qui suit, nous supposerons le système stable et nous chercherons la fonction de transfert C (p) d'un organe appelé *correcteur*, à adjoindre après le détecteur d'écart, de manière à augmenter les précisions statiques et dynamiques du système. Les correcteurs classiques ont une action dite proportionnelle, intégrale ou dérivée :

on dit qu'un correcteur agit de manière proportionnelle si $C(p) = k$ (le signal de commande du système est proportionnel au signal d'écart) ;

on dit qu'un correcteur a une *action intégrale* lorsque le signal de commande est proportionnel à l'intégrale du signal d'erreur $C(p) = \frac{1}{Tp}$ (diagramme de Bode, *fig.* 19) ;

on parle d'*action dérivée* lorsque le signal de commande est proportionnel à la dérivée du signal d'erreur $C(p) = Tp$ (diagramme de Bode, *fig.* 20).

Ces deux dernières actions ne s'emploient jamais sans une action proportionnelle.

- *Action proportionnelle et dérivée* $C(p) = 1 + Tp$

Ce correcteur permet d'avancer la phase du système corrigé par rapport à celle du système non corrigé pour des pulsations situées au voisinage de $\omega = \frac{1}{T}$ et les pulsations supérieures. Le but est de déformer le lieu de Nyquist du système seul dans la région de résonance, ce qui permet de garder un gain statique fort (augmentation de précision tout en gardant la stabilité).

On a tracé sur la *figure* 21 le diagramme asymptotique de Bode de $(1 + j\omega T)$:

$$\omega \to 0 \qquad |1 + j\omega T| \to 1 \qquad |1 + j\omega T|_{dB} \to 0 \qquad \varphi \to 0$$

$$\omega \to \infty \qquad |1 + j\omega T| \to \infty \qquad |1 + j\omega T|_{dB} \to \infty \qquad \varphi \to \frac{\pi}{2}$$

Sur la même figure est tracé le diagramme de Nyquist. Le terme « avance de phase » donné à un tel correcteur est justifié, puisque le déphasage entre la sortie et l'entrée est toujours positif.

Ce correcteur est irréalisable en réseau passif; on l'approche par un correcteur à avance de phase de fonction de transfert $\frac{1 + Tp}{1 + ap}$ ou $\frac{1 + Tp}{1 + ap + bp^2}$. La fonction de transfert $(1 + Tp)$ peut par contre être réalisée avec une bonne approximation par des réseaux actifs (amplificateur opérationnel monté en dérivateur).

- *Action proportionnelle et intégrale*

$$C(p) = 1 + \frac{1}{Tp} = \frac{1 + pT}{Tp}$$

L'avantage d'un tel correcteur est la présence d'un terme en $\frac{1}{p}$ ajouté à une action dérivée. Cette correction améliore la précision statique mais ne touche pas à la précision dynamique, puisqu'elle ne modifie le lieu de Nyquist qu'aux fréquences basses. L'approximation d'une telle fonction de transfert par un réseau résistance-capacité peut se faire par un réseau de fonction de transfert $\frac{1 + Tp}{1 + bTp}$ (correcteur à retard de phase).

L'inconvénient d'une telle approximation est que ce réseau n'ajoute pas un pôle à l'origine. On peut par contre aux dérives près avoir une bonne approximation de la fonction de transfert $\frac{1 + Tp}{Tp}$ à l'aide d'un réseau actif (amplificateur opérationnel contre-réactionné).

La compensation intégrale est inférieure à la compensation dérivée pour ce qui est du régime transitoire, mais elle a l'avantage de diminuer les bruits de fond. La réalisation d'une compensation proportionnelle et intégrale est limitée par des problèmes d'ordre pratique : elle conduit à des réalisations dont les constantes de temps sont très élevées (les correcteurs électroniques ont des constantes de temps limitées à quelques dizaines de minutes, mais on rencontre dans l'industrie des constantes de temps de l'ordre de l'heure, voire de la demi-journée).

● *Action proportionnelle, intégrale et dérivée*

$$C(p) = 1 + \frac{1}{T_1 p} + T_2 p$$

C'est une combinaison des deux actions précédentes : on combine l'avance de phase avec la présence d'un pôle à l'origine. Il faut veiller à ce que les deux correcteurs s'accordent, c'est un réglage de T_1 et de T_2. Un tel correcteur peut s'approcher par un réseau passif de fonction de transfert : $\frac{(1 + ap)}{(1 + cp)} \frac{(A + bp)}{(1 + dp)}$ (correcteur retard avance).

Une telle action améliore la précision statique comme la précision dynamique.

● *Place et réalisation des correcteurs*

Après avoir déterminé les coefficients de la fonction de transfert du correcteur, il faut choisir la technologie de réalisation (hydraulique, pneumatique, mécanique, électrique), l'endroit où sera placé ce correcteur (il peut être en cascade comme nous l'avons développé plus haut, autrement dit agissant directement sur la sortie du détecteur d'écart ou dans une branche de retour). Ce choix dépend du type de technologie utilisé. Actuellement les correcteurs en cascade sont réalisés en général par un ou plusieurs amplificateurs à fort gain contre-réactionnés par des réseaux. La réalisation de correcteurs en réaction dépend en général de l'application particulière faite.

Les systèmes asservis non linéaires

L'hypothèse de la linéarité faite dans la partie précédente, d'une part suppose parfois des approximations, d'autre part peut être impossible à faire parce que le système est intrinsèquement non linéaire (présence de relais). Prenons l'exemple d'un système linéaire gouverné par une équation différentielle : la réponse d'un tel système peut être une oscillation d'amplitude constante (deux racines imaginaires dans l'équation caractéristique) ; cette amplitude est contrôlée par les conditions initiales, et d'autre part limitée par la source d'énergie alimentant le système (limitation d'amplitude d'un oscillateur). Les relais sont des organes essentiels des asservissements et se rencontrent dans les installations industrielles. Une régulation par relais est un asservissement tout ou rien.

Donnons un exemple simple de régulation tout ou rien (*fig.* 22) : une régulation de température par un thermostat à bilame métallique. Supposons que, par suite d'une cause extérieure, la température T ait tendance à diminuer. Au-dessous d'une température T_1 (atteinte au temps t_1), le bilame bascule, et une résistance électrique se trouve alimentée : la température va donc augmenter avec un certain retard dû à l'inertie du système de chauffe.

Lorsque la température atteint la valeur T_2 (temps t_2), il y a basculement inverse du bilame, et la résistance n'est plus alimentée : toujours à cause de l'inertie, la température continue d'augmenter, puis décroît jusqu'à atteindre le niveau T_1 (temps t_3). On constate en étudiant ce système très simple un phénomène classique des systèmes non linéaires : la présence de retards entraîne une oscillation. La fréquence de cette auto-oscillation est liée à la rapidité du système et à la valeur de l'intervalle ($T_2 — T_1$). Ce système de régulation de température utilisé parfois pour les fours est dit du *type tout ou rien (on-off)* : il entraîne toujours une auto-oscillation de la grandeur régulée. Nous allons donner un aperçu des méthodes d'analyse des systèmes non linéaires.

● *Méthode du premier harmonique*. La méthode la plus simple est celle dite du premier harmonique : c'est une généralisation de la méthode utilisant la fonction de transfert. La fonction de transfert en excitation sinusoïdale a été définie pour un système linéaire comme un nombre imaginaire ayant pour module le rapport des amplitudes sortie-entrée et pour angle polaire la phase de la réponse. Ces deux quantités ne dépendaient que de la pulsation de l'excitation. Soumis à une excitation sinusoïdale de pulsation ω ($A \sin \omega t$), un système non linéaire ne produit pas une réponse sinusoïdale. Cette réponse $s(t)$ peut être décomposée en série de Fourier :

$$s(t) = s_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t)$$

avec $s_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} s(t)\, d(\omega t)$

$$a_i = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} s(t) \cos(i\omega t)\, d(\omega t)$$

$$b_i = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} s(t) \sin(i\omega t)\, d(\omega t)$$

En limitant le développement au premier harmonique on peut écrire :

$$s(t) \sim a_1 \cos \omega t + b_1 \sin \omega t$$
$$\sim S \sin(\omega t + \psi)$$

avec $S = \sqrt{a_1^2 + b_1^2}$ et $\psi = \text{Arc tg} \frac{b_1}{a_1}$

On peut donc définir pour le système une fonction de transfert équivalente H', de module $\frac{S}{A}$ et d'angle polaire ψ. Mais maintenant $\frac{S}{A}$ et ψ sont des fonctions de ω et de A : on obtiendra donc autant de lieux de Nyquist que de valeurs possibles d'amplitude de l'entrée. Dans la pratique, cette méthode se justifie par le fait qu'un servomécanisme, tout au moins dans sa partie puissance, joue le rôle d'un filtre passe-bas (élimination des hautes fréquences).

Dans l'étude de problèmes de stabilité intervient la fonction $-\frac{1}{H'}$ de module $\frac{A}{S}$ et d'argument $\pi - \psi$. Les

fig. 22

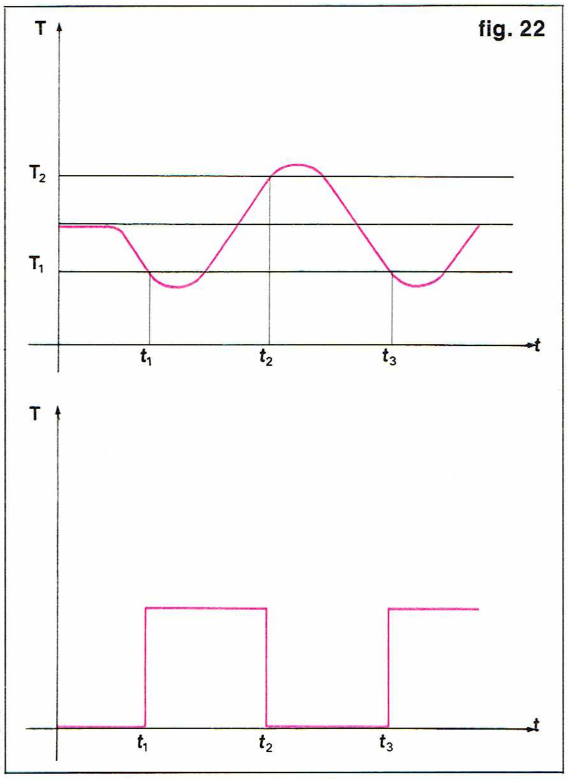

I.G.D.A.

▶ *Figure 22 ; régulation tout ou rien : effet d'oscillation obtenu.*

courbes $\left(-\frac{1}{H'}(A, \omega)\right)$ sont appelées *lieux critiques*. Si l'élément non linéaire est sans inertie, ces courbes ne dépendent que de A : on les gradue en valeurs de A.

Le plus fréquemment, on se trouve en présence d'un système dont une partie est un élément non linéaire, le reste étant approximativement linéaire. On peut alors se ramener à l'étude de deux éléments linéaires en approchant l'élément non linéaire par sa fonction de transfert du premier harmonique. Bien que non rigoureuse, cette méthode présente un grand intérêt, car elle permet d'étudier des non-linéarités de forme quelconque, et elle fournit de bons résultats pour les problèmes classiques d'asservissement.

• *Méthode du plan de phase.* Une autre méthode peut être utilisée : c'est celle dite du plan de phase. Supposons un asservissement décrit par une équation du type :

$$\frac{d^2x}{dt^2} = f\left(x, \frac{dx}{dt}\right)$$

On peut se ramener au système suivant :

$$\frac{dx}{dt} = y \qquad \frac{dy}{dt} = f(x, y)$$

L'état du système est donc déterminé à chaque instant par la connaissance de x et de y dans un plan appelé *plan de phase*. La courbe d'évolution de x et y s'appelle la *trajectoire de phase :* on la gradue en t. Cette méthode est surtout utilisable pour les systèmes décrits par une équation d'ordre 2 ; sinon, en effet, pour une équation d'ordre n il faut tracer une trajectoire dans un hyperespace à n dimensions. Cette méthode permet aussi l'étude des auto-oscillations.

Les méthodes modernes de contrôle

Ces méthodes ne font plus la distinction entre systèmes linéaires et non linéaires et traitent aussi bien les systèmes mono-entrée-mono-sortie que les systèmes multi-entrées et multi-sorties.

Bien que l'introduction de ces techniques soit récente en contrôle, leurs bases mathématiques sont depuis longtemps utilisées en dynamique, mécanique quantique et traitement des équations différentielles. L'idée d'« état » est un concept de base pour la représentation des systèmes : il fut d'abord introduit en 1936 par Turing, puis employé par Shannon en théorie de l'information. L'application du concept d'espace d'état a été utilisée en premier lieu par des scientifiques russes, M. A. Aizrman, A. A. Fel'dbaum, A. M. Letov, A. I. Lur'e dans les années 1940. Du côté américain, R. Bellman a appliqué ce concept aux méthodes d'optimisation. Parmi les travaux plus récents, citons ceux de R. E. Kalman pour la formalisation apportée en théorie des systèmes.

Classons en trois catégories les variables entrant dans la composition d'un système :

— *variables d'entrée* e_i : ce sont les informations venues d'autres systèmes et qui modifient le comportement du système étudié ;

— *variables de sortie* s_i : ces variables décrivent certains aspects du système, intéressants pour l'utilisateur ;

— *variables d'état* x_i : ces variables caractérisent la dynamique du système ; ce sont des variables internes ; l'ensemble des variables d'état est le plus petit ensemble qui permet à l'instant t de résumer tout le passé du système et de prévoir son futur.

Trois vecteurs interviennent donc dans l'étude d'un système :

$$\underline{E} = \begin{bmatrix} e_1 \\ \vdots \\ e_l \end{bmatrix} \quad \underline{S} = \begin{bmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_m \end{bmatrix} \quad \underline{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$$

L'ensemble des valeurs possibles du vecteur X constitue l'*espace d'état*. A chaque instant t, l'état $\underline{X}(t)$ du système est une fonction de l'état initial $\underline{X}(t_0)$ et du vecteur entrée $\underline{X}(t) = F[\underline{X}(t_0); \underline{E}(t_0, t)]$

Le vecteur de sortie est aussi une fonction de $\underline{X}(t_0)$ et $\underline{E}(t_0, t)$: $\underline{S}(t) = G[\underline{X}(t_0); \underline{E}(t_0, t)]$

Ces équations sont les équations d'état du système. Dans le cas où le système peut être décrit par des équations différentielles, on montre que les équations précédentes prennent la forme :

$$\dot{\underline{X}}(t) = F[\underline{X}(t); \underline{E}(t)]$$
$$\underline{S}(t) = G[\underline{X}(t); \underline{E}(t)]$$

où

$$\dot{\underline{X}}(t) = \begin{bmatrix} \frac{dx_1(t)}{dt} \\ \vdots \\ \frac{dx_n(t)}{dt} \end{bmatrix}$$

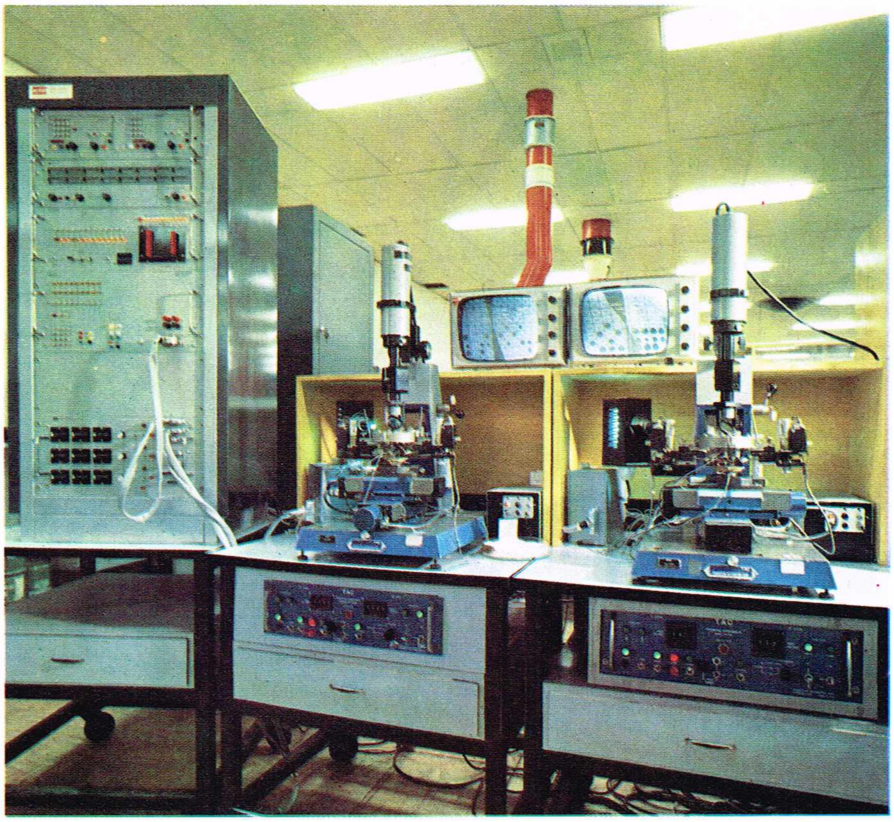

Société générale des semi-conducteurs

▲ ***Contrôle automatique par calculateurs et TV à circuit fermé des caractéristiques électriques de transistors contenus dans de petites lames de silicium.***

▼ ***Contrôle automatique par calculateur d'un satellite artificiel avant son lancement.***

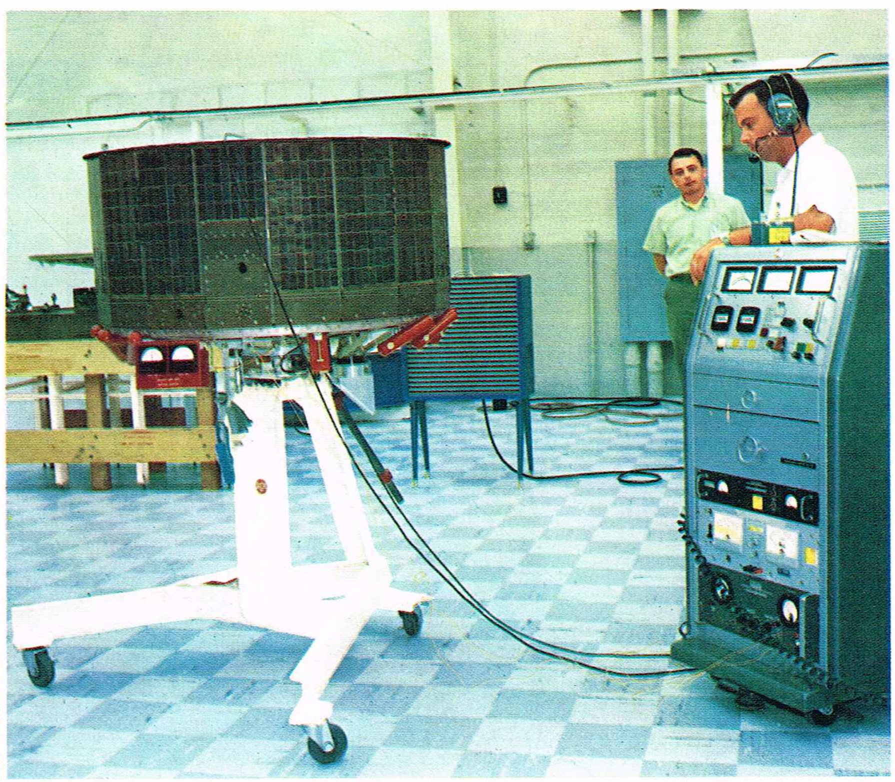

Photo Research International

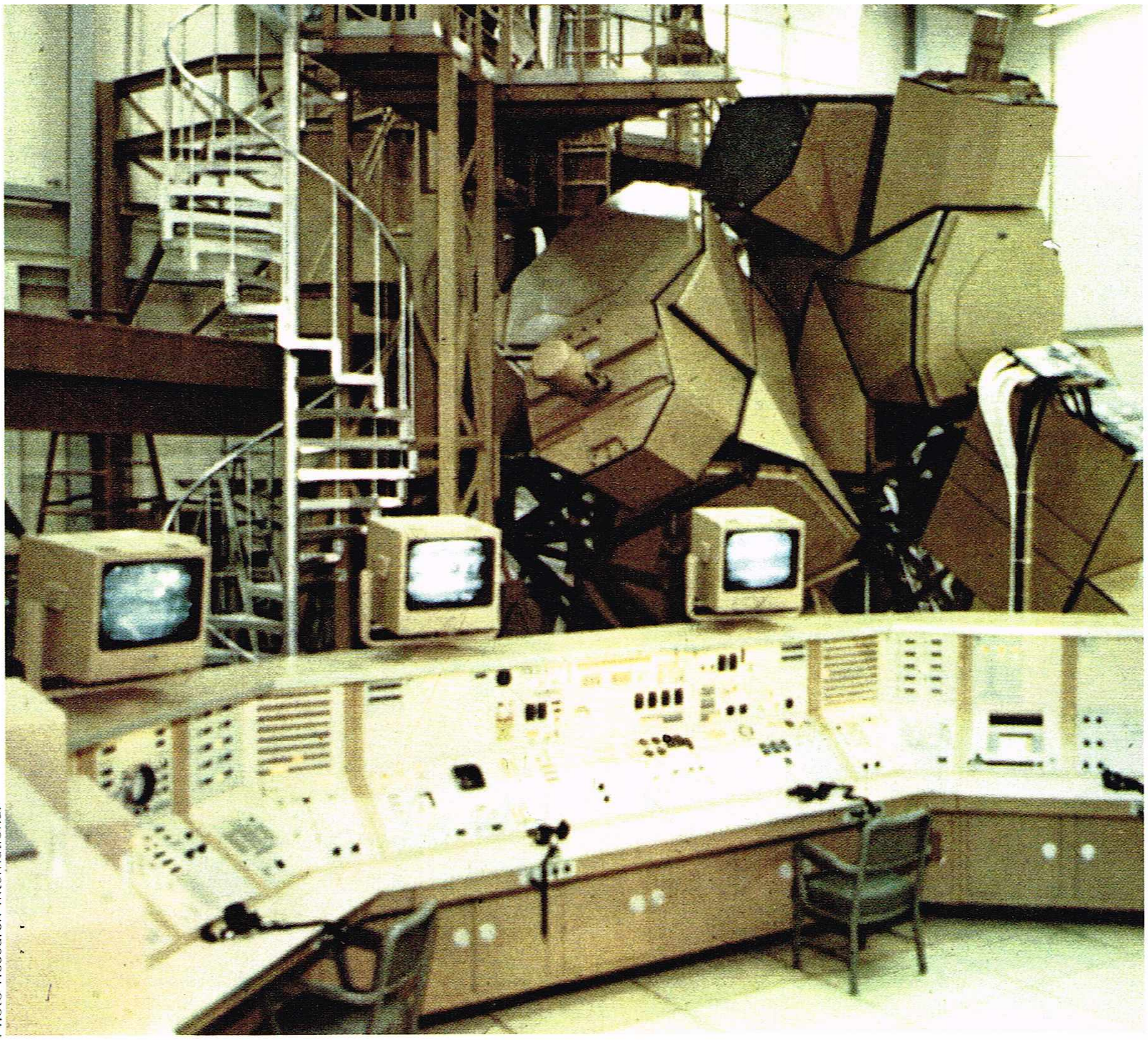

▶ *Simulateur du LEM réalisé à l'aide de calculateurs électroniques.*

Photo Research International

Si le système peut être décrit par des équations différentielles linéaires, ces équations deviennent :

$$\dot{\underline{X}}\ (t) = A\ (t)\ \underline{X}\ (t) + B\ (t)\ \underline{E}\ (t)$$

$$\underline{S}\ (t) = G\ (t)\ \underline{X}\ (t) + D\ (t)\ \underline{E}\ (t)$$

A (t), B (t), G (t), D (t) étant des matrices de dimensions respectives $(n \times n)$, $(n \times l)$, $(m \times n)$, $(m \times l)$. Ces matrices deviennent des matrices à termes constants dans le cas d'équations différentielles à termes constants.

Reprenons l'exemple d'un accéléromètre décrit précédemment :

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{fdx}{mdt} + \frac{k}{m}x = a$$

L'entrée est $a\ (t)$, la sortie $x\ (t)$.
Prenons comme variable d'état

$$x_1 = x\ (t) \quad \text{et} \quad x_2 = \frac{dx}{dt}\ (t)$$

On a $\dfrac{dx_1}{dt} = x_2$ et $\dfrac{dx_2}{dt} = -\dfrac{f}{m}x_2 - \dfrac{k}{m}x_1 + a$

D'où les équations d'état :

$$\begin{bmatrix} \dfrac{dx_1}{dt} \\ \dfrac{dx_2}{dt} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\dfrac{k}{m} & \dfrac{f}{m} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} a$$

$$x\ (t) = (1\ 0) \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

Cet exemple simple illustre la transformation matricielle de l'équation du modèle. Mais la caractérisation d'un système par un ensemble de variables d'état n'est pas unique. En effet, si le nombre de variables est bien fixé, le choix de celles-ci appartient à l'utilisateur. Il est cependant important d'essayer de choisir comme variable d'état des grandeurs mesurables, mais cette possibilité est rarement offerte.

Cette représentation, bien que ne semblant pas changer grand-chose dans l'exemple choisi, apporte en fait une approche unique pour l'analyse et la synthèse des systèmes de contrôle (linéaires, non linéaires, pulsés, multidimensionnels). Le lecteur pourra d'ailleurs, à titre d'exemple, retrouver les différentes possibilités de réponse d'un système linéaire du second ordre sur l'exemple traité.

La notion de fonction de transfert définie pour les systèmes monodimensionnels se généralise aux systèmes multidimensionnels. En effet, partant de :

$$\dot{\underline{X}}\ (t) = A\underline{X}\ (t) + B\underline{E}\ (t)$$

$$\underline{S}\ (t) = C\underline{X}\ (t)$$

on peut écrire en prenant la transformée de Laplace :

$$p\underline{X}\ (p) - \underline{X}\ (O) = A\underline{X}\ (p) + B\underline{E}\ (p)$$

$$\underline{X}\ (p) = L\ (\underline{X}\ (t))$$

$$\underline{X}\ (O) = \underline{X}\ (t = 0)$$

$$\underline{S}\ (p) = C\underline{X}\ (p)$$

De la première équation on tire :

$$\underline{X}\ (p) = (pI - A)^{-1}\ \underline{X}\ (O) + (pI - A)^{-1}\ B\underline{E}\ (p)$$

I étant la matrice identité. La fonction de transfert se définissait aux conditions initiales nulles ; pour un système multidimensionnel à coefficients constants, elle se généralise à une matrice de transfert dont l'expression vaut :

$$\underline{S}\ (p) = C\ (pI - A)^{-1}\ B\underline{E}\ (p)$$

La matrice de transfert est donc C $(pI - A)^{-1}$ B

La technique des variables d'état permet aussi l'étude des problèmes de contrôle optimal. Ces problèmes concernent l'étude d'organes de contrôle visant à minimiser un critère que se fixe l'utilisateur : ainsi un ingénieur chimiste désire concevoir des réacteurs qui permettent d'obtenir un rendement maximal ; lors d'un rendez-vous spatial, on désire minimiser la consommation d'énergie.

La solution du problème fournit une fonction liant des variables de contrôle aux variables mesurées sur le système. Le problème de l'optimisation est très actuel : si son développement s'est tout d'abord appliqué à des systèmes sophistiqués du genre de ceux utilisés dans la conquête de l'espace, on les étudie de plus en plus pour les systèmes rencontrés dans le monde industriel.

L'identification

Avant d'entamer l'étude de tout problème de contrôle, il convient de disposer d'un modèle mathématique représentatif du système : c'est le rôle de l'*identification-modélisation*. Ce problème n'est pas simple, que le système soit de dimension modeste comme un moteur électrique ou imposante comme une installation industrielle. La première méthode qui vient à l'esprit est de prendre les équations classiques de la physique pour décrire le phénomène. Cette méthode nécessite dans un ensemble complexe l'isolabilité d'éléments simples représentatifs de tel ou tel phénomène, ce qui n'est pas toujours possible.

Prenons comme exemple un réacteur chimique : il est difficile de créer à l'intérieur des éléments auxquels on peut accrocher un type de réactions. D'autre part, les modèles physico-chimiques ainsi obtenus sont souvent complexes, avec beaucoup de paramètres difficiles à chiffrer (identification de paramètres). Si ces paramètres sont trop nombreux, il est souvent impossible de donner une valeur à tous, en raison par exemple de l'imprécision des mesures. On préfère alors calquer un modèle approché plus simple qui permettra de mener à bien le contrôle. Nous décrirons succinctement deux méthodes, l'une expérimentale, l'autre du type optimalisation.

- *Méthode expérimentale*. Dans le cas où il est possible d'appliquer au système à identifier des signaux tests, on peut procéder à une identification par l'expérience. Ainsi, on peut appliquer à un système monodimensionnel un échelon unité et observer la sortie obtenue. Streje a proposé une méthode qui permet d'identifier les valeurs des paramètres T, n, τ et K de la fonction de transfert du système, supposée du type :

$$\frac{Ke^{-\tau p}}{(1 + Tp)^n} \quad \text{(système linéaire avec un retard } \tau\text{)}$$

à partir de l'enregistrement de la courbe de réponse à un échelon : c'est une *méthode graphique*. Cette méthode est simple d'emploi, mais sa précision dépend énormément de la précision de l'enregistrement de sortie : elle suppose aussi que le système ne présente pas d'oscillation, puisque la fonction de transfert présumée ne présente pas de pôles imaginaires. Ce genre de méthode ne peut pas toujours s'appliquer : des conditions de sécurité ou de rendement peuvent empêcher l'application de signaux tests.

- *Méthode par simulation-optimalisation*. Une méthode plus sophistiquée consiste alors à opérer par simulation-optimalisation. Elle nécessite l'utilisation d'un calculateur. On part d'un type de modèle simulé par un programme, ce qui permet de calculer la sortie présumée du système pour l'entrée qui lui est réellement soumise. Un programme d'optimalisation fait évoluer les paramètres du modèle jusqu'à ce que les sorties du modèle simulé soient très proches de celles du modèle réel (satisfaction d'un critère du type moindres carrés). Cette méthode demande donc l'utilisation d'un calculateur et une bonne coordination entre les informaticiens et les automaticiens. Elle part en général de considérations physiques sur le système d'équations de modèles physico-chimiques qu'on simplifie. L'identification d'un processus est une opération nécessaire pour le contrôle mais coûteuse. Souvent c'est, hélas ! une phase sautée par l'utilisation d'un modèle approché à cause des difficultés soit économiques, soit techniques de la modélisation.

BIBLIOGRAPHIE

ARBIB H. A., *The Metaphorical Brain : an Introduction to Cybernetics as Artificial Intelligence and Brain Theory*, 1972. - ATLAN H., *l'Organisation biologique et la Théorie de la communication*, 1972. - BERTALANFFY L. von, *Théorie générale des systèmes* (traduction française de J.-B. CHABROL), 1973. - DE CARFORT F. et FOULARD C., *Asservissements linéaires continus*, 1971. - GILLE, DECAULNE et PELEGRIN, *Dynamique de la commande linéaire*, 1973. - RAISBECK G., *Information Theory*, 1963. - ROUBINE E., *Introduction à la théorie de la communication*, tome III, 1970. - TOU J. T., *Modern Control Theory*, 1964. - WIENER N., *Cybernetics* 1948-1961.

RELATIVITÉ RESTREINTE

Historique

Vers la fin du XIX^e siècle, les grands domaines de la recherche en physique étaient la mécanique, la thermodynamique, l'électricité, le magnétisme et l'optique.

En 1687, Newton publiait son œuvre maîtresse, les *Philosophiae naturalis principia mathematica*, où il exposait la théorie de l'attraction universelle et posait ainsi les bases de la mécanique (céleste et terrestre). Depuis, les résultats de cette théorie avaient été vérifiés tant par des expériences terrestres que par des observations astronomiques.

Vers 1871, Boltzmann donnait avec la théorie cinétique des gaz une interprétation mécanique de la thermodynamique.

Dans un mémoire publié en 1864, Maxwell exposait sa fameuse théorie électromagnétique de la lumière et donnait les équations générales du champ électromagnétique. Selon cette théorie, la lumière est une onde électromagnétique formée d'un champ électrique et d'un champ magnétique variables.

En 1888, Hertz mettait en évidence expérimentalement les ondes électromagnétiques, ce qui confirmait définitivement la théorie de Maxwell. Ainsi l'électricité, le magnétisme et l'optique devenaient plusieurs aspects d'une même réalité. Finalement, la physique pouvait se réduire à l'étude et à l'interprétation de deux classes de phénomènes : les phénomènes mécaniques et les phénomènes électromagnétiques. L'une et l'autre classe étaient régies par des lois qui reposaient sur des hypothèses contradictoires. Dans les équations de Newton qui sont à la base des phénomènes mécaniques, on suppose que les actions entre les corps sont instantanées, quelle que soit la distance qui les sépare, alors que, dans les équations de Maxwell, l'information se propage à une vitesse finie qui est celle de la lumière (300 000 km/s).

Au début de notre siècle, l'un des objectifs de la physique théorique était de réduire les incompatibilités apparentes entre ces deux théories. Ainsi naquit et se développa la théorie de la Relativité d'Albert Einstein. Bien que certains travaux contemporains et indépendants comme ceux de Lorentz et de Poincaré continssent beaucoup d'idées qui apparaissent aujourd'hui comme des conséquences de la théorie de la Relativité, il fallut le génie d'Einstein pour analyser et modifier les concepts fondamentaux d'espace et de temps. Celui-ci s'intéressa d'abord aux systèmes animés de mouvements rectilignes et uniformes, et il étendit aux phénomènes électromagnétiques le vieux principe de Relativité galiléenne des phénomènes mécaniques (1).

Ensuite, Einstein élargit le domaine de ses recherches aux systèmes animés de mouvements quelconques grâce à une étude rigoureuse des forces de gravitation (2).

La contribution des résultats de la théorie de la Relativité (3) (4) (5) aux recherches théoriques et aux applications pratiques est considérable. Pour lancer une sonde dans l'espace ou approfondir les connaissances sur les forces nucléaires, ou construire de puissants accélérateurs de particules, il faut recourir aux lois relativistes.

Mécanique classique

Pour déterminer le mouvement d'un corps, il est nécessaire de connaître sa position à des instants successifs. La position du corps, assimilé conceptuellement à un point, est représentée par un ensemble de nombres appelés *coordonnées* (un seul pour un mouvement sur une courbe, deux pour un mouvement sur une surface et trois dans l'espace ordinaire à trois dimensions). Mais le lecteur pourra se demander : « La position par rapport à quoi ? » Il est évident que, par rapport à la Terre, une maison est immobile, alors que, par rapport au Soleil, elle est en mouvement. Ainsi le mouvement d'un corps est entièrement connu quand on spécifie aussi le système de référence. Mais, puisque le choix d'un tel système est arbitraire, il en résulte qu'il n'existe pas d'état de repos absolu d'un corps.

En se limitant au cas d'un espace à trois dimensions, on peut représenter un système de référence (ou référentiel) à l'aide de trois axes orthogonaux (perpendiculaires les uns par rapport aux autres) se coupant en

▶ *Figure 1 : représentation cartésienne de l'espace tridimensionnel.*

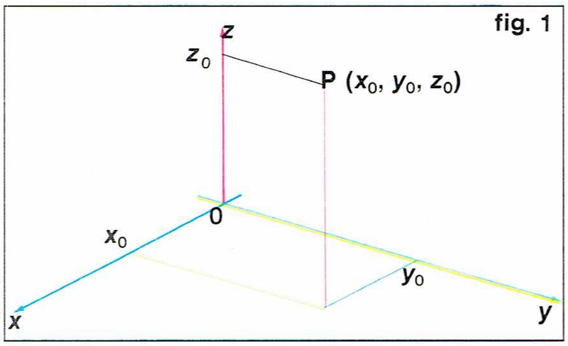

un point appelé origine. La position d'un corps par rapport à l'origine est donnée par l'ensemble des trois coordonnées *x, y, z* (*fig.* 1). Une règle indéformable de longueur arbitraire peut servir comme unité de mesure pour déterminer la valeur de chacune des coordonnées. Il existe toujours une relation entre les coordonnées (*x, y, z*) d'un corps par rapport à un système S et celles (*x', y', z'*) par rapport à un nouveau système S'. Dans le cas où S' se meut d'un mouvement rectiligne uniforme, c'est-à-dire à vitesse constante *v* par rapport à S (dirigée par exemple suivant l'axe des *x*), la relation prend une forme particulièrement simple :

(1) $x' = x - vt$ **(a)**, $y' = y$ **(b)**, $z' = z$ **(c)**, $t' = t$ **(d)**

Les équations **(1)** constituent ce qu'on appelle la *transformation de Galilée* et sont telles que l'équation de mouvement du corps garde la même signification lorsqu'on passe du référentiel S au référentiel S', c'est ce qu'exprime *le postulat de Relativité : Les lois de la mécanique restent invariantes par rapport à tous les systèmes de référence animés d'un mouvement de translation uniforme les uns par rapport aux autres.*

Il en résulte qu'il est impossible, par une expérience de mécanique, de mettre en évidence le mouvement rectiligne et uniforme d'un corps par rapport à un autre corps. Naturellement, ce postulat est faux lorsqu'il ne s'agit plus de mouvement rectiligne uniforme et que les corps ont une certaine accélération.

Par exemple, on peut verser du café dans un avion comme sur la Terre (les lois de la mécanique sont les mêmes) lorsque le vol est calme (sans accélération), mais ce n'est plus vrai pour un vol agité (il existe alors une accélération).

▼ *Dans un avion comme sur terre, les lois de la mécanique sont les mêmes lorsque le vol est sans accélération.*

R. Poinot - TOP

On appellera système de référence inertiel un système de référence où les lois de la mécanique newtonienne sont valables. On peut alors déduire du postulat de Relativité que, dans tout système animé d'un mouvement rectiligne uniforme par rapport à un système inertiel, les lois de la mécanique sont valables.

Tous ces systèmes inertiels sont appelés *systèmes de référence galiléens*. Compte tenu de la précision de la plupart des expériences physiques, la Terre constitue un système inertiel. Toutefois, des observations astronomiques précises ont conduit à penser que les lois de la mécanique newtonienne sont mieux vérifiées pour un système de référence rapporté aux coordonnées d'étoiles fixes.

De la transformation de Galilée on peut déduire aussi la *loi de composition des vitesses*. Soit un train lancé à la vitesse *v* (par rapport au sol), considérons un voyageur se déplaçant par rapport au train avec une vitesse *u* parallèle à *v*. Quelle sera sa vitesse *V* pour un observateur immobile le long de la voie ferrée ? D'après la loi de composition des vitesses, on aura la relation :

(2) $$V = v \pm u$$

où le signe + se rapporte au cas où le voyageur se déplace dans le même sens que le train, et le signe — au cas contraire.

Notons enfin que, parmi les deux paramètres nécessaires pour caractériser le mouvement d'un corps : la position et le temps, seul ce dernier possède un caractère absolu, car il n'est sujet à aucune transformation. En mécanique classique, le temps reste invariant par rapport à tous les systèmes de référence.

Électrodynamique classique

Bien que le postulat de Relativité fût connu depuis longtemps en mécanique, il n'était pas évident, avant Einstein, qu'il s'appliquait à la physique en général. On pensait qu'une expérience d'optique permettrait de déterminer la vitesse de la Terre dans l'espace. L'échec de telles expériences est en accord complet avec la théorie de la Relativité restreinte. Nous allons d'abord rappeler les propriétés des ondes, nécessaires pour la compréhension de ces expériences, et montrer la façon dont elles ont conduit aux postulats de la Relativité.

Si l'on jette une pierre dans l'eau d'un lac, on observe des rides circulaires qui se développent à partir de la perturbation initiale, donc cette perturbation, l'*onde*, se déplace dans le milieu à une certaine vitesse. On remarque que le milieu ne se déplace pas avec l'onde (aucune des particules d'eau dérangées par la pierre n'arrive au rivage), c'est *la perturbation qui se propage*. Le son est un autre exemple d'onde dans laquelle les molécules d'air sont perturbées par une source (un haut-parleur par exemple) ; cette onde, en se propageant, atteint les molécules d'air proches du tympan qu'elle fait vibrer et on entend le son. Il est à noter qu'en l'absence de molécules, dans le vide, le son ne se propage pas. De plus si l'air est en mouvement, la vitesse du son se compose avec la vitesse de l'air d'après l'équation **(2)**. En effet,

on observe couramment que la vitesse du son est augmentée ou diminuée suivant que celui-ci se propage dans la direction du vent ou en sens inverse.

La théorie de Maxwell au début du XIX[e] siècle montra que la lumière était une *onde électromagnétique*, un champ électrique variable pouvant créer un champ magnétique variable et inversement, le tout se propageant à la vitesse *c* sous forme d'une onde. Des expériences purement électriques permirent de déterminer cette vitesse qui a pour valeur approximative 299 800 km/s. Il s'agissait alors de savoir par rapport à quel milieu devait être mesurée la vitesse de la lumière. Comme on ne connaissait que des ondes se propageant dans des milieux matériels, on a appelé « éther » le milieu de propagation des ondes électromagnétiques. Donc on pensait que, dans l'éther, la vitesse de la lumière était *c*, et que, dans un milieu en mouvement par rapport à l'éther, elle s'obtenait à partir de la loi de composition des vitesses **(2)**. L'éther n'était pas une substance mécanique ordinaire, puisqu'il remplissait tout l'Univers, ainsi que le prouve le passage de la lumière dans les vides les plus parfaits; il n'avait pas de poids et n'absorbait pas d'énergie.

On s'interrogea alors pour savoir si la Terre était fixe ou mobile par rapport à l'éther; c'est à ce problème que les expériences que nous allons citer apportèrent une réponse.

Aberration des étoiles

En 1725, James Bradley observa au télescope que les étoiles au zénith dans le ciel avaient des mouvements apparents circulaires de diamètre angulaire 40,5″ et de période une année. C'est ce phénomène qu'on appelle « aberration des étoiles »; il est dû au fait que la Terre se déplace par rapport à l'étoile (*fig.* 2).

En effet, plaçons-nous dans le système de l'étoile et supposons pour l'instant que la Terre soit immobile dans ce système. Le rayon *(a)* qui pénètre dans l'objectif d'un télescope O_1 se dirige vers l'oculaire O_2 puis vient frapper l'œil de l'observateur qui voit l'étoile (*fig.* 3a). En fait, la Terre a, par rapport à l'étoile, une vitesse v_e de l'ordre de 30 km/s que nous allons supposer horizontale. Pendant que la lumière parcourt le trajet O_1O_2, le télescope,

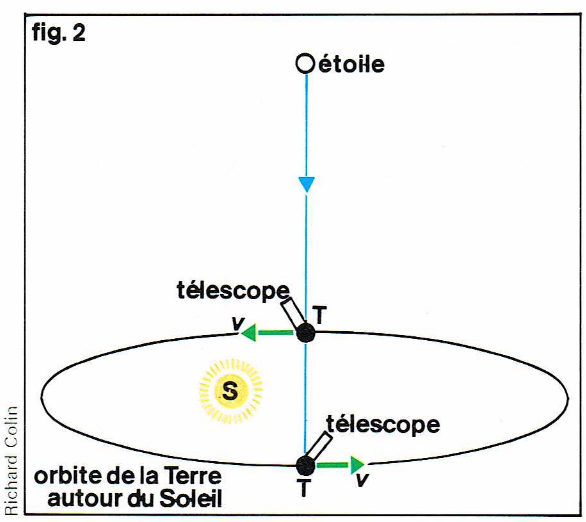

▲ *Le milieu ne se déplace pas avec l'onde, c'est la perturbation qui se propage.*

◄ *Figure 2; expérience de Bradley : mouvement apparent de l'étoile dans le ciel.*

▼ *Figure 3; expérience de Bradley : pour que le rayon lumineux (a) pénètre en O_2 il faut incliner le télescope d'un angle α.*

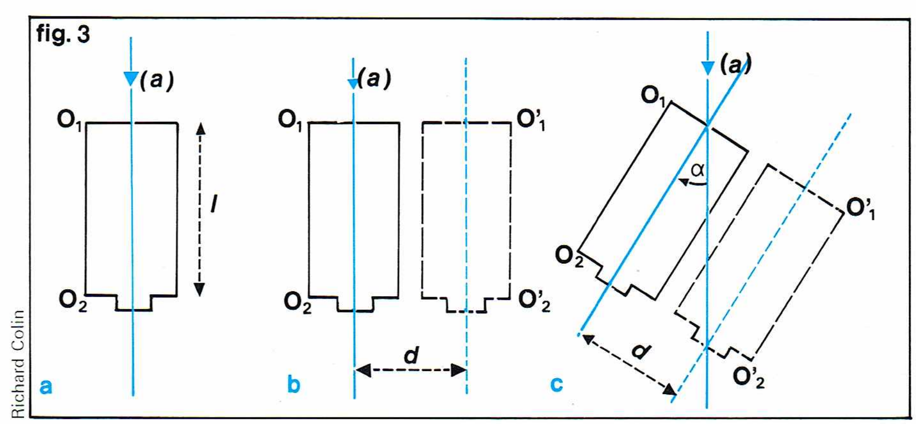

Fig. F.

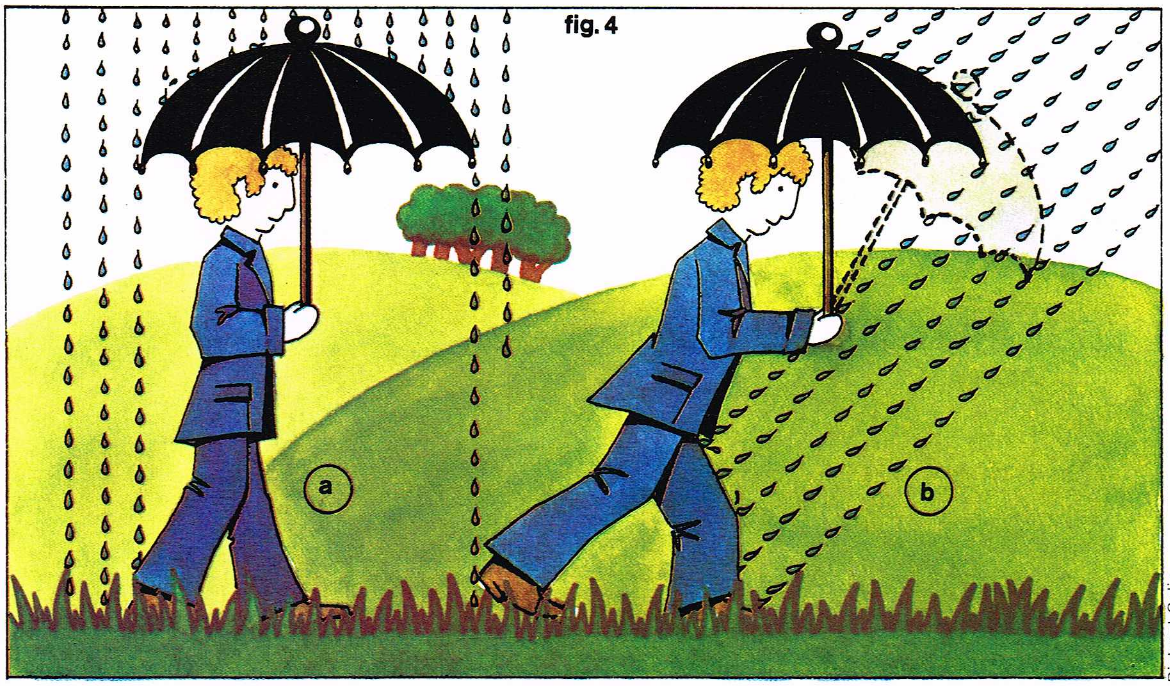

Richard Colin

◀ *Figure 4 :*
a) *un observateur immobile sous la pluie verticale est protégé s'il tient son parapluie vertical;* b) *s'il court en maintenant son parapluie dans la même position, il est mouillé devant.*

▼ *Figure 5 : une « expérience par la pensée » schématisant l'expérience de Michelson-Morley.*

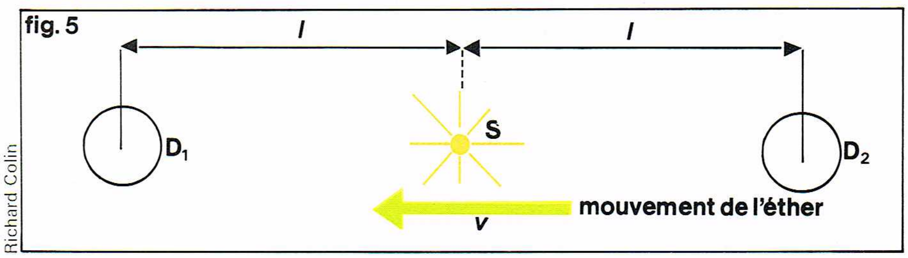

Richard Colin

entraîné par la Terre, se déplace vers la droite en $O'_1O'_2$ (*fig.* 3b); pour que la lumière pénètre encore dans l'oculaire O'_2 il faut incliner le télescope d'un angle α (*fig.* 3c).

Il faut un temps $t = \frac{O_1O_2}{c}$ à la lumière pour parcourir la distance O_1O_2; pendant ce temps, le télescope a avancé de la distance $d = vt$. L'angle d'inclination α est donné par tg $\alpha \simeq \alpha \simeq \frac{d}{O_1O_2} = \frac{v}{c}$. On trouve ainsi

$$\alpha \simeq \frac{1}{10\,000} \text{ rd} = 20{,}5''$$

ce qui correspond à un diamètre angulaire de 41″ à comparer avec la valeur expérimentale de 40,5″ de Bradley.

Au bout de six mois, la vitesse de la Terre a changé de sens, il faut donc incliner le télescope de l'autre côté, d'où le mouvement apparent (*fig.* 2). On peut donner une illustration de ce phénomène d'aberration; vous êtes surpris par la pluie et vous ouvrez votre parapluie pour vous protéger. En l'absence de vent, et si vous êtes immobile, il suffit que vous teniez votre parapluie droit pour être protégé (*fig.* 4a). Par contre, si vous courez, il faut incliner le parapluie pour être protégé. En effet, dans votre système de référence, les rayons de pluie sont inclinés (*fig.* 4b), de même que les rayons lumineux provenant de l'étoile sont inclinés pour l'observateur lié à la Terre. L'aberration des étoiles montre que la Terre se déplace par rapport à l'*éther;* en effet, si la Terre entraînait l'éther, il n'y aurait pas d'aberration (cela correspond au cas où l'observateur entraînerait l'air autour de son parapluie, qu'il n'aurait plus besoin alors d'incliner).

Expérience de Michelson-Morley

Cette expérience avait pour but de déceler le mouvement de la Terre par rapport à l'éther. Avant de la décrire, nous allons en illustrer le principe en décrivant une expérience « par la pensée », c'est-à-dire une expérience qui pourrait être faite en principe mais qu'en pratique on ne pourrait réaliser de cette façon.

Considérons le dispositif schématisé par la *figure* 5 : une source S lance un éclair lumineux qui est reçu par deux détecteurs D_1 et D_2 situés tous deux à la distance l de S. Supposons que la source S liée à la Terre se déplace à la vitesse v vers la droite par rapport à l'éther. D'après **(2)**, la vitesse de la lumière vers la droite serait $c - v$, et vers la gauche $c + v$. Les temps mis par la lumière pour atteindre D_1 et D_2 seraient :

$$\textbf{(3)} \qquad t_1 = \frac{l}{c+v} \text{ et } t_2 = \frac{l}{c-v}$$

Les heures indiquées, par des horloges placées en D_1 et D_2 à l'arrivée des éclairs, seraient donc différentes et permettraient de déceler le mouvement de la Terre par rapport à l'éther. Cette expérience telle qu'elle est décrite n'est pas réalisable pratiquement, car on ne possède pas encore d'horloges capables de garder l'heure exacte avec une précision suffisante. Nous allons décrire à présent l'expérience de Michelson-Morley dont l'idée est la même que celle de cette expérience « par la pensée ».

L'expérience de Michelson-Morley (1887) fut l'une des plus remarquables expériences du XIXᵉ siècle. Son principe en était simple mais elle conduisit à une révolution scientifique aux conséquences très importantes. Le dispositif expérimental est illustré *figure* 6. Un faisceau

◀ *Page ci-contre; astronome regardant le ciel: gravure tirée de* **Selenographia,** *ouvrage du XVIIᵉ siècle.*

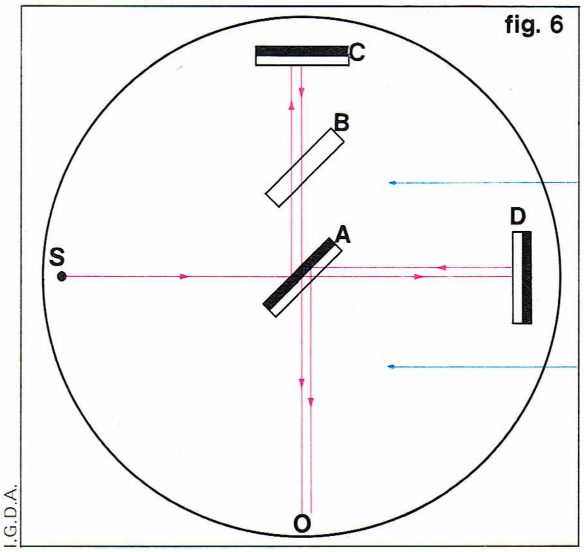

I.G.D.A.

◀ *Figure 6 : expérience de Michelson-Morley. Les rayons incidents et réfléchis ne sont pas superposés pour la commodité du dessin.*

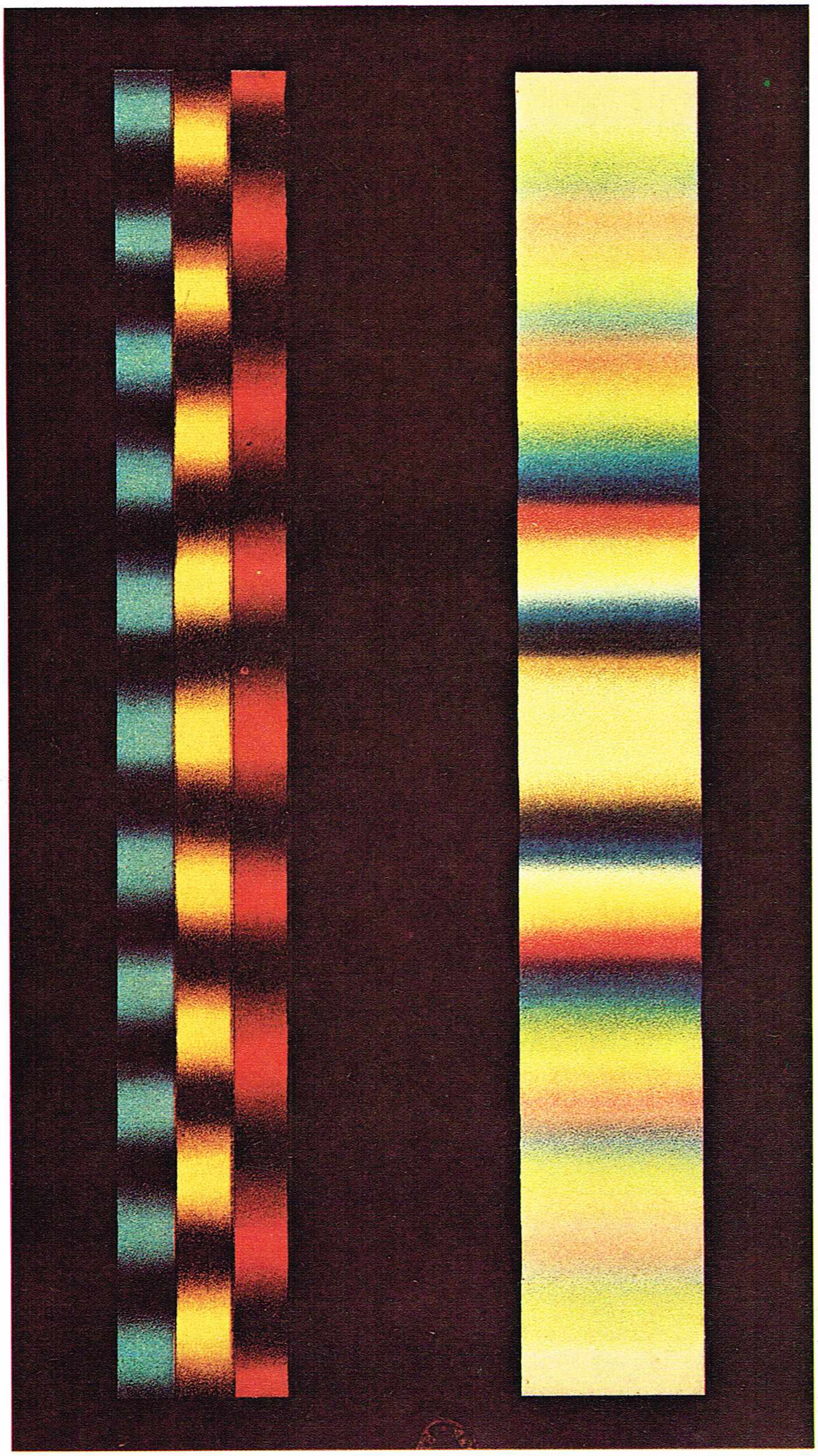

Snark International

▲ ***Expérience de Michelson : interférences des ondes lumineuses. On peut mesurer leur longueur d'onde et montrer leur différence de chemin optique à travers les couleurs d'un spectre.***

lumineux émis par la lampe S tombe sur une glace sans tain A posée au centre d'une plate-forme de marbre flottant dans une cuve contenant du mercure. La moitié de la lumière est réfléchie vers le miroir C alors que l'autre moitié traverse A pour atteindre le miroir D situé à la même distance de A que C. Au retour, la moitié de la lumière venant de C traverse A pour aller vers l'observateur O, et la moitié de la lumière venant de D est réfléchie par A et converge également en O. L'observateur voit donc la superposition des deux rayons lumineux. Si les temps mis à parcourir ACAO et ADAO sont les mêmes, l'observateur verra une image brillante. Par contre, si la lumière venant de D met un temps plus long pour parvenir en O que celle venant de C, l'image est moins brillante; par exemple, pour un temps plus long d'une demi-période, l'image est sombre. Dans la pratique, le miroir D est légèrement incliné pour que l'image ait l'aspect de bandes sombres et brillantes alternativement, dites franges d'interférence. Un retard dans une des branches (AC ou AD) se traduit par un glissement des franges.

Supposons que la Terre bouge par rapport à l'éther avec une vitesse v horizontale dirigée vers la gauche. En utilisant la composition des vitesses **(2)**, on peut montrer que le temps mis à parcourir le bras parallèle au mouvement (ADA) est plus long que celui mis à parcourir le bras perpendiculaire au mouvement (ACA). On aurait donc dû observer un glissement du système de franges alternativement en avant et en arrière selon qu'un bras ou l'autre devenait successivement parallèle au mouvement. Ce glissement aurait dû être de l'ordre de 8/100 de la distance entre les franges et donc susceptible d'être observé. Le résultat de cette expérience fut complètement négatif : aucun glissement des franges ne put être mis en évidence, c'est-à-dire également aucun mouvement de la Terre par rapport à l'éther.

La seule façon de concilier cette expérience avec l'expérience d'aberration des étoiles (et d'autres comme l'expérience de Fizeau) était de supposer que l'éther n'existait pas.

Les postulats de la Relativité restreinte

En énonçant, en 1905, les fondements de sa théorie, Einstein abandonna tout d'abord le concept d'éther (et donc de système de référence absolu), et il étendit le principe de Relativité galiléenne à tous les phénomènes, non seulement mécaniques mais aussi électromagnétiques et de toute autre nature. Il formula ainsi le **premier postulat de la Relativité restreinte :** *Les lois de tous les phénomènes physiques doivent avoir la même forme par rapport à tous les systèmes en translation uniforme les uns par rapport aux autres.* Ceci signifie qu'aucune expérience de physique ne permet d'affirmer que le système de référence dont nous sommes solidaires est au repos ou en mouvement de translation uniforme. Ceci explique également le résultat négatif de l'expérience de Michelson-Morley.

Le **second postulat** de la Relativité restreinte traduit l'abandon de la notion d'éther; on l'appelle encore **« principe de la constance de la vitesse de la lumière ».** Il s'énonce ainsi : *La lumière se propage dans le vide dans toutes les directions avec la vitesse c (égale à 299 800 km/s) qui a toujours la même valeur, quel que soit le mouvement de l'observateur et de la source.* Nous pouvons immédiatement remarquer que ce postulat est en contradiction avec la loi de composition des vitesses **(2)**. Cela va nous amener à réexaminer soigneusement la notion de temps en physique. Mais auparavant, nous allons citer des preuves expérimentales de ce postulat. Il est intéressant de noter que, lorsque Einstein formula le second postulat, il n'en existait aucune preuve, et que c'est par pure nécessité logique qu'il l'énonça.

Depuis, plusieurs expériences de mesure de la vitesse de la lumière provenant d'une source en mouvement rapide ont fourni une preuve expérimentale directe de ce second postulat. Nous ne citerons que celle d'A. H. Yoy et R. F. Sanford (1926) : des particules élémentaires appelées pions neutres π^0 sont produites par des accélérateurs à haute énergie. Ils ne vivent que 10^{-16} seconde, puis ils se désintègrent en deux photons, c'est-à-dire essentiellement en deux éclairs de lumière. Dans cette expérience on observe des photons qui sont émis par des pions π^0 voyageant à une vitesse supérieure à 99,98 % de la vitesse de la lumière. On mesure pour eux une vitesse de $2{,}997\,7 \pm 0{,}000\,4\ 10^8$ m/s en excellent accord avec la vitesse de la lumière émise par une source immobile ($2{,}997\,9\ 10^8$ m/s). Cette expérience ne laisse pratiquement aucun doute sur la validité du deuxième postulat.

Notion de temps en physique

Supposons que la foudre frappe une voie ferrée en deux points A et B très éloignés l'un de l'autre et que ces deux éclairs soient « simultanés ». Posons-nous la

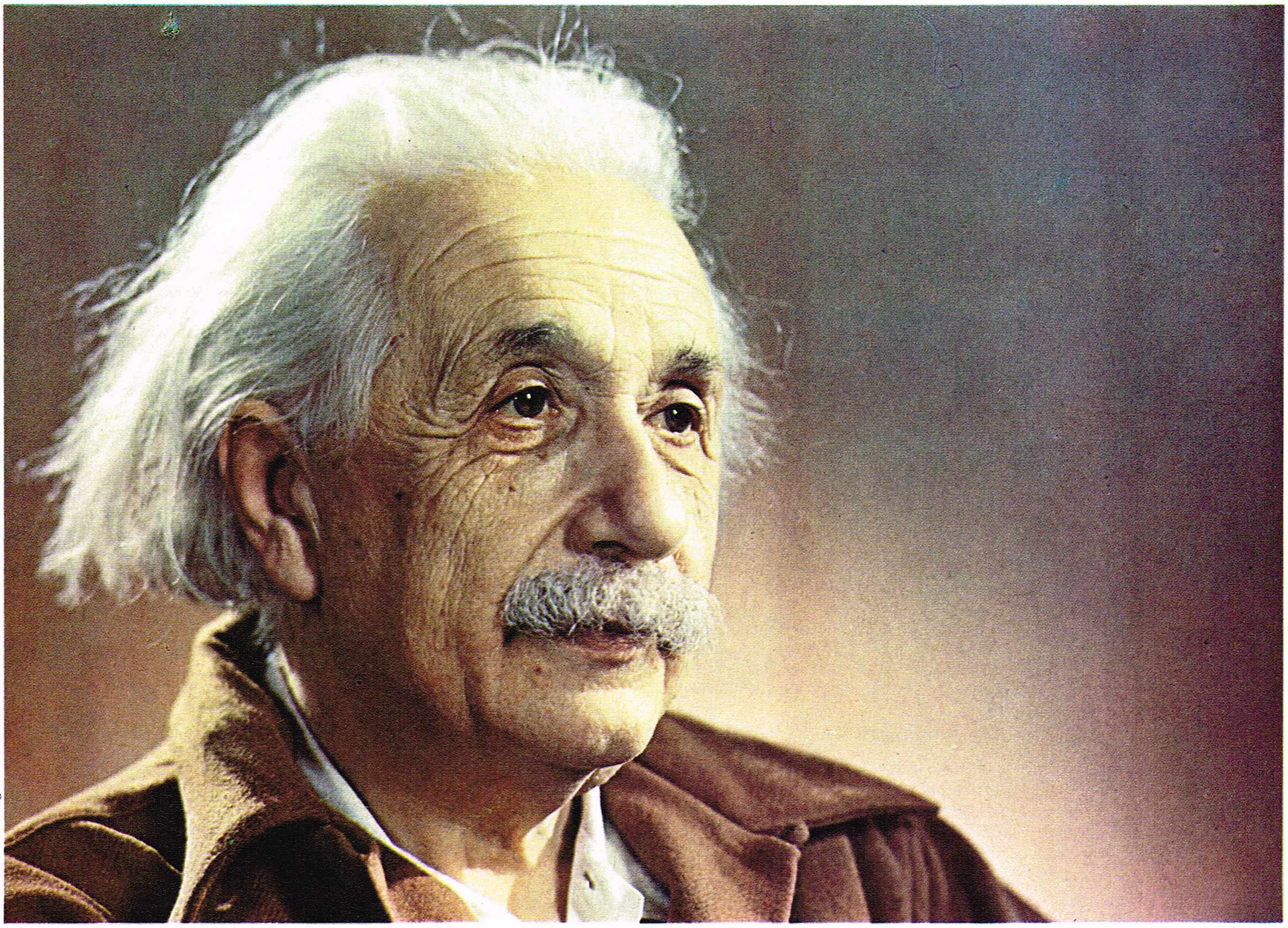

Karshof - Parimage - Camera Press

question : « Cette affirmation a-t-elle un sens ? » Elle ne peut avoir de sens pour un physicien que s'il trouve le moyen de vérifier de manière concrète sa réalité. Il est donc nécessaire de définir la simultanéité de telle sorte que, associée à une méthode expérimentale, il soit possible de décider si les deux éclairs sont simultanés ou non.

Nous pouvons faire la proposition suivante pour constater la simultanéité. On mesure le segment de droite AB le long de la voie ferrée et on place au point M, milieu de AB, un observateur muni d'un appareil (par exemple deux miroirs inclinés à 90°) qui lui permet d'observer simultanément les deux points A et B. S'il aperçoit les éclairs en même temps, ils sont simultanés.

Il est clair que cette définition peut être employée non seulement pour donner un sens exact à la simultanéité de deux événements mais d'un nombre quelconque d'événements quelle que soit la position relative des lieux où ils se produisent par rapport au système de référence (ici la voie ferrée). Par là on arrive à une définition du « temps » en physique. Il suffit en effet d'imaginer qu'on a placé aux points A, B, M de la voie ferrée des horloges de même construction et réglées de telle sorte que les positions respectives de leurs aiguilles soient simultanées (dans le sens indiqué plus haut). On entend alors par le « temps » d'un événement l'indication de l'horloge immédiatement voisine de l'événement. A chaque événement est ainsi associée une valeur du temps qui est en principe observable.

La Relativité de la simultanéité

Supposons qu'un train très long se déplace le long de la voie ferrée avec une vitesse constante *v* (*fig.* 7) ; les voyageurs de ce train se serviront tout naturellement du train comme système de référence auquel ils rapporteront tous les événements. Tout événement qui a lieu le long

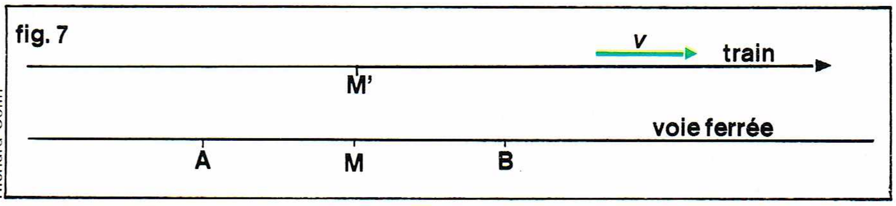

Richard Colin

de la voie ferrée a aussi lieu en un point déterminé du train. La définition de la simultanéité peut aussi être formulée exactement de la même façon par rapport au train que par rapport à la voie. La question qui se pose alors est : « Deux événements (par exemple les deux éclairs A et B) qui sont simultanés *par rapport à la voie*, sont-ils aussi simultanés *par rapport au train ?* » Nous montrerons que la réponse doit être négative.

Quand nous disons que les éclairs A et B sont simultanés par rapport à la voie ferrée, c'est que les rayons issus des points A et B se rencontrent en M milieu de la distance AB sur la voie. Mais aux événements A et B correspondent des endroits A et B dans le train. Soit M' le milieu de la droite AB du train en marche, ce point M' coïncide bien avec le point M à l'instant où se produisent les éclairs, mais il se déplace (*fig.* 7) vers la droite avec la vitesse *v*. Si un observateur dans le train assis en M' n'était pas entraîné à cette vitesse, il resterait de façon permanente en M et les rayons lumineux issus de A et de B l'atteindraient simultanément, c'est-à-dire que les deux rayons se rencontreraient au point où il se trouve, mais en réalité il s'approche du rayon issu de B et s'éloigne de celui issu de A. Les observateurs se servant du train comme système de référence diront donc que l'éclair B s'est produit *avant* l'éclair A. Nous arrivons donc à la

▲ ***En haut, le physicien*** **Albert Einstein** ***(Ulm, 1879-Princeton, 1955). Il est sans conteste le plus grand savant de l'époque contemporaine et est surtout connu pour sa création de la théorie de la Relativité du temps et de l'espace. Ci-dessus, figure 7 : un train se déplace à la vitesse v par rapport à la voie ferrée.***

conclusion importante : « *Des événements qui sont simultanés par rapport à la voie ferrée ne sont pas simultanés par rapport au train, et* vice versa (Relativité de la simultanéité). »

Chaque système de référence a son temps propre, une indication de temps n'a de sens que si l'on indique le système de référence auquel elle se rapporte.

Relativité de la notion de distance spatiale

Considérons deux points déterminés du train qui se déplace avec la vitesse v le long de la voie ferrée et demandons-nous quelle est la distance qui les sépare. Nous savons que, pour mesurer une distance, on a besoin d'un système de référence, par rapport auquel la distance est mesurée. Le plus simple est d'utiliser le train lui-même comme système de référence. Un observateur dans le train mesure la distance en portant sa règle de mesure en ligne droite le long du sol des wagons autant de fois qu'il est nécessaire pour que, parti de l'un des points marqués, il arrive à l'autre. Le nombre de fois qu'il a fallu porter la règle représente la distance cherchée.

Supposons à présent qu'on veuille mesurer cette distance à partir de la voie ferrée. On peut employer la méthode suivante : appelons A′ et B′ les deux points dont il s'agit de déterminer la distance. Ils se déplacent par rapport à la voie ferrée avec la vitesse v. Soit A et B les points de la voie ferrée devant lesquels les points A′ et B′ passent *au même moment t* (par rapport au sol). On mesure alors la distance de ces points A et B en portant un certain nombre de fois l'unité de mesure le long de la voie ferrée.

Il n'est pas du tout prouvé *a priori* que cette dernière mesure donnera le même résultat que la première. La longueur du train mesurée sur le talus peut être différente de celle mesurée dans le train même.

La transformation de Lorentz

L'incompatibilité apparente entre la loi de composition des vitesses **(2)** et le second postulat va être à présent examinée à l'aide des considérations précédentes. La loi de composition des vitesses **(2)** empruntait à la mécanique classique deux hypothèses non justifiées :

— l'intervalle de temps entre deux événements est indépendant du mouvement du système de référence ;

— la distance spatiale de deux points d'un corps rigide est indépendante du mouvement du système de référence.

Si l'on rejette ces deux hypothèses, le dilemme précédent disparaît car la loi de composition des vitesses **(2)** n'est plus valable.

Maintenant nous pouvons envisager de réconcilier la loi de propagation de la lumière dans le vide avec le principe de Relativité. Dans les raisonnements précédents nous avons été conduits à considérer les lieux et les temps par rapport à deux systèmes de référence, à savoir celui de la voie ferrée et celui du train. Comment déterminer le lieu et le temps d'un événement par rapport au train quand on connaît le lieu et le temps de cet événement par rapport au sol ? Est-il possible de donner une réponse à cette question, telle que la loi de propagation de la lumière dans le vide ne contredise pas le principe de Relativité ? Autrement dit, peut-on trouver une relation entre le lieu et le temps d'un événement tel qu'un rayon lumineux se propage par rapport au train et à la voie ferrée avec la même vitesse c. Cette question possède une réponse affirmative et conduit à une loi de transformation des grandeurs spatio-temporelles d'un événement quand on passe d'un système de référence à un autre.

▼ ***Figure 8** : le système S′ se déplace vers la droite à la vitesse v parallèle à Ox′ par rapport au système S. Les axes Ox et Ox′ sont légèrement décalés (alors qu'ils devraient être confondus) pour la commodité du dessin.*

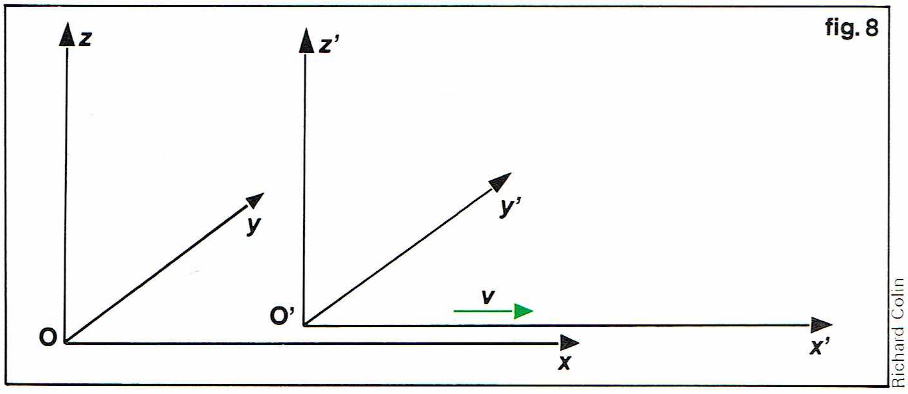

Désignons par S le système de référence lié à la voie ferrée, par S′ le système de référence lié au train. Un événement quelconque est déterminé dans l'espace par rapport à S par les trois coordonnées x, y, z, et dans le temps par une valeur du temps t. Le même événement est déterminé dans l'espace et dans le temps par les valeurs correspondantes x', y', z', t' qui, bien sûr, ne coïncident pas avec x, y, z, t ; nous avons montré dans le paragraphe précédent comment ces grandeurs doivent être considérées comme des résultats de mesures physiques.

A présent, notre problème se précise : quelles sont les valeurs x', y', z', t' d'un événement par rapport à S′ si les valeurs x, y, z, t du même événement par rapport à S sont connues ? Les relations doivent être telles que la loi de propagation d'un rayon lumineux soit satisfaite par rapport à S et à S′.

Ce problème est résolu pour l'orientation relative des systèmes de référence donnée dans la *figure* 8 par les équations **(4)** :

(4a) $$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

(4b) $$y' = y$$

(4c) $$z' = z$$

$$t' = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

C'est ce système d'équations que l'on désigne sous le nom de « transformation de Lorentz ».

Montrons à présent que le second postulat est vérifié, c'est-à-dire que des rayons lumineux de direction quelconque (non parallèle à Ox) se propagent dans le vide à la même vitesse c dans S et dans S′.

Supposons que l'on envoie de l'origine de S un rayon lumineux au temps $t = 0$. Sa propagation a lieu conformément à l'équation :

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = ct$$

soit en élevant cette équation au carré :

(5) $$x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2 = 0$$

La loi de propagation de la lumière et le postulat de Relativité exigent que la propagation du même signal, envisagée de S′, ait lieu suivant la relation :

$$r' = ct' \quad \text{ou}$$

(6) $$x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2t'^2 = 0$$

Pour que l'équation **(6)** soit une conséquence de l'équation **(5)**, on doit avoir :

(7) $$x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2t'^2 = \alpha\,(x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2)$$

où α est une constante.

D'après les équations **(4a)**, **(4b)** et **(4c)**, on reconnaît facilement que la transformation de Lorentz satisfait à l'équation **(7)** pour $\alpha = 1$. Cette transformation représentée par les équations **(4)** peut encore être généralisée au cas où les axes de S et de S′ ne sont pas parallèles.

Pour terminer ce paragraphe, nous pouvons comparer la transformation de Lorentz à celle de Galilée **(1)**.

(1a) $$x' = x - vt$$

(1b) $$y' = y$$

(1c) $$z' = z$$

(1d) $$t' = t$$

Cette dernière peut être dérivée de la transformation de Lorentz en prenant une valeur infinie pour c ou de façon plus réelle en considérant que le rapport $\frac{v}{c}$ est très petit par rapport à 1. On peut donc considérer que la transformation de Galilée, ainsi que toute la mécanique classique, est valable dans la limite où les vitesses des corps considérés sont faibles par rapport à la vitesse de la lumière.

Nous allons exposer à présent quelques-unes des conséquences les plus importantes de la Relativité restreinte.

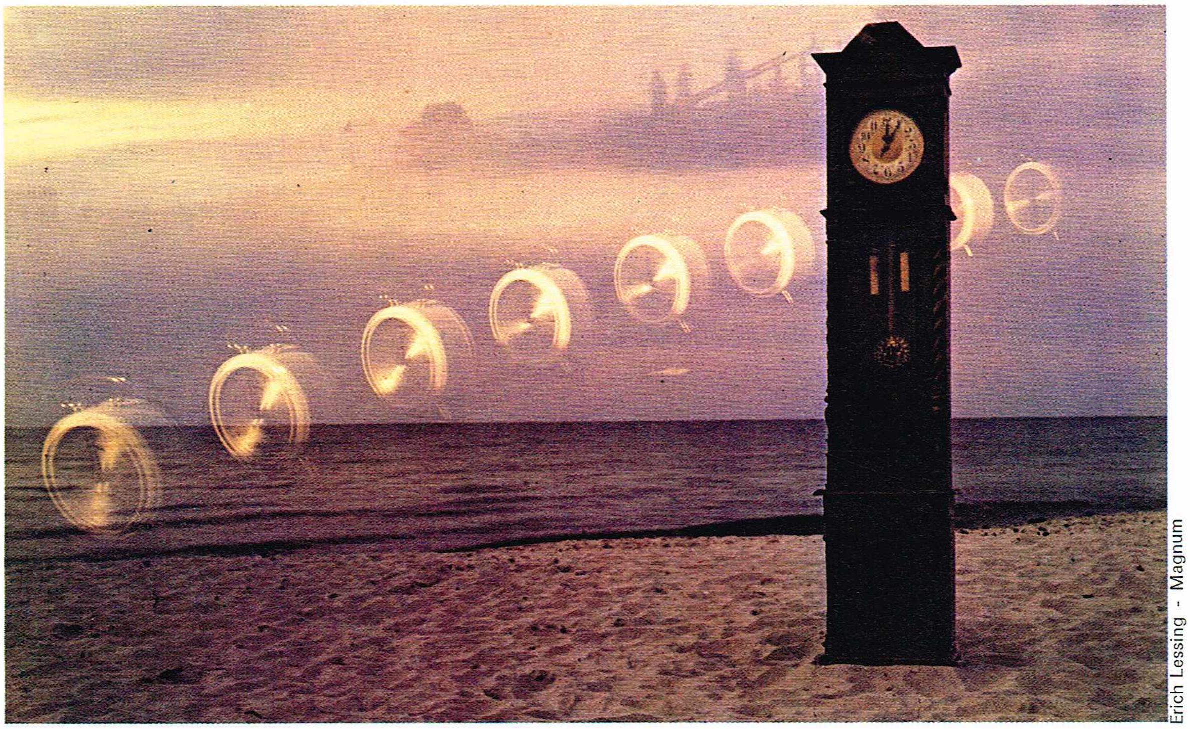

◀ ***Par rapport à une horloge au repos, une horloge en mouvement « retarde ».***

Comportement des horloges en mouvement : dilatation du temps

Considérons une horloge qui est au repos de façon permanente à l'origine $x' = 0$ de S'. Soit $t'_1 = 0$ et $t'_2 = 1$ s deux battements successifs de cette horloge. Les équations **(4a)** et **(4d)** de la transformation de Lorentz permettent de déterminer les instants de S où se produisent les deux battements :

$$t_1 = 0 \text{ et } t_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Dans ces expressions, v représente la vitesse de l'horloge par rapport au référentiel S. Par rapport à ce système de référence, l'intervalle de temps qui sépare deux battements successifs n'est pas une seconde mais $\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$ seconde, c'est-à-dire un temps un peu plus long. Par suite de son mouvement, l'horloge marche un peu plus lentement que lorsqu'elle est au repos. On dit parfois que les horloges en mouvement retardent.

Remarquons que, pour $v = c$, le radical $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ serait nul et l'intervalle de temps entre deux battements successifs infini. Pour des vitesses encore plus grandes, le radical serait imaginaire. Nous en concluons donc *que dans la théorie de la Relativité la vitesse c joue le rôle d'une vitesse limite qui ne peut être atteinte et encore moins dépassée par aucun corps réel.* D'ailleurs, ce rôle de la vitesse c résulte déjà des équations mêmes de la transformation de Lorentz qui n'ont pas de sens si nous donnons à v une valeur supérieure à c.

Nous pouvons généraliser le résultat précédemment obtenu : considérons deux battements d'horloge séparés par l'intervalle de temps $\Delta t'$ dans le référentiel où l'horloge est au repos ; ils seront séparés par un intervalle de temps Δt dans le référentiel où l'horloge est animée de la vitesse v tel que :

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad \textbf{(8)}$$

Pour nous convaincre de ce résultat quelque peu surprenant, nous allons considérer une expérience « par la pensée ».

Expérience par la pensée

Considérons l'appareil constitué par une boîte sur laquelle est placée une source d'éclairs lumineux S, un miroir M et une horloge (*fig.* 9). Nous allons mesurer le temps mis par la lumière pour aller de la source à l'horloge après avoir subi une réflexion sur le miroir. Il est important de préciser que l'expérience qui va être décrite est une expérience « théorique ».

Si l'horloge était une horloge ordinaire permettant de mesurer des intervalles de temps de quelques secondes, la boîte devrait avoir une longueur de plusieurs centaines de milliers de kilomètres, ce qui est bien sûr impossible à faire. On pourrait alors penser à utiliser une horloge plus perfectionnée, un balayage sur un oscilloscope rapide par exemple, de façon à pouvoir mesurer des intervalles de temps de l'ordre de 10^{-9} seconde, et l'appareil pourrait n'avoir alors que quelques mètres de longueur. Mais nous avons vu que, pour que des intervalles de temps Δt et $\Delta t'$, mesurés par rapport à des référentiels en translation l'un par rapport à l'autre, soient sensiblement différents, il faudrait que l'horloge se déplace à une vitesse voisine de la vitesse de la lumière. A notre époque, ces vitesses ne peuvent être atteintes que par des corps de la taille de celle des atomes.

Aussi, bien que ces difficultés technologiques empêchent de réaliser une telle expérience, il est toujours possible de l'*imaginer*, car elle illustre de manière utile notre réflexion sur les conséquences logiques de certains postulats.

Soulignons quand même que des expériences effectivement réalisables existent et qu'elles confirment la validité de ces postulats ; malheureusement ces expériences sont souvent indirectes, et nous les décrirons ultérieurement.

Revenons à l'appareil de la *figure* 9. La source émet un éclair qui illumine l'horloge puis va jusqu'au miroir

fig. 9

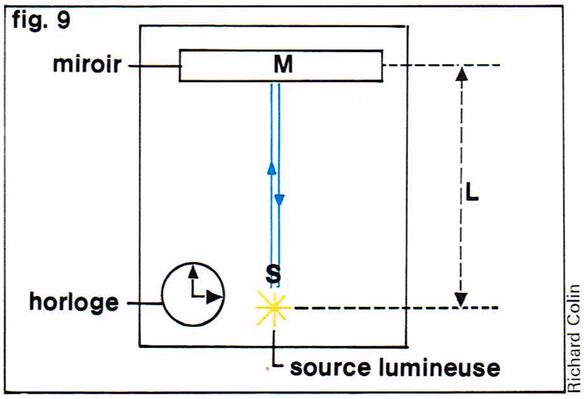

◀ ***Figure 9 : l'éclair lumineux issu de la source S est réfléchi par le miroir et revient en S ; il illumine l'horloge à son départ et à son arrivée.***

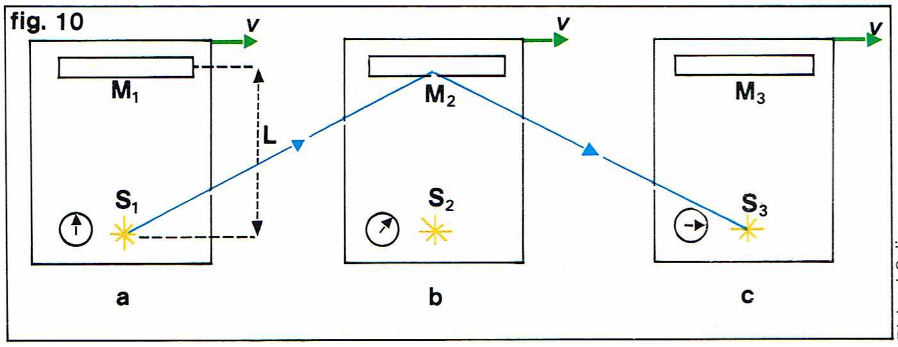

▲ *Figure 10 : la même expérience que sur la figure 9, mais vue par un observateur se déplaçant vers la gauche avec la vitesse v.*

et revient à la source où il illumine à nouveau l'horloge. Nous pouvons imaginer un appareil photographique, placé au-dessus de l'horloge, qui enregistre une image permanente du cadran. L'éclair parcourt une distance 2 L à la vitesse c (d'après le deuxième postulat). La photographie de l'horloge montrera que les aiguilles ont tourné de $\frac{2\,L}{c}$ entre les deux éclairs. Nous avons donc mesuré l'intervalle de temps entre les deux événements suivants : 1) départ du signal de la source ; 2) arrivée du signal réfléchi à la source. De façon plus précise, remarquons que nous avons mesuré cet intervalle de temps avec la même horloge, qui était présente au cours des deux événements (à côté de la source). Un intervalle de temps mesuré de cette manière est dit *intervalle de temps propre*.

Considérons la même expérience du point de vue d'un observateur se déplaçant vers la gauche avec la vitesse v. Dans le système de référence S lié à cet observateur, l'appareil se déplace vers la droite avec la vitesse v (*fig.* 10). Supposons que l'éclair lumineux quitte la source lorsque l'appareil est en position (a). La lumière va jusqu'au miroir puis revient à la source. Mais pendant ce temps, l'appareil s'est déplacé de S_1 à S_2 puis à S_3. Le rayon lumineux a suivi le trajet $S_1M_2S_3$. Supposons que ce trajet ait duré un temps Δt, la distance S_1S_3 est alors égale à $v\Delta t$. On a donc :

$$S_1M_2 = \sqrt{L^2 + \left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2} \quad \text{et} \quad S_1M_2S_3 = 2\sqrt{L^2 + \left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2}$$

▼ *Les horloges ne mesurent pas une quantité mystérieuse appelée « Temps » mais un intervalle de temps entre deux événements bien précis. (Ici, une montre du XVII^e^ siècle.)*

Dans le référentiel S, la lumière se propage avec la vitesse c. Ceci entraîne que :

$$S_1M_2S_3 = c\Delta t \quad \text{d'où} \quad \Delta t = \frac{\frac{2\,L}{c}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Nous avons ainsi mesuré l'intervalle de temps entre l'émission et la réception de l'éclair lumineux, c'est-à-dire entre les *deux mêmes événements* que précédemment, mais, cette fois-ci, dans un système de référence par rapport auquel l'appareil se déplace avec la vitesse v, c'est-à-dire un système de référence dans lequel les deux événements ont lieu à des endroits différents. Un tel intervalle de temps est dit intervalle de *temps impropre*.

Puisque $\frac{2\,L}{c} = \Delta t'$ est l'intervalle de temps propre, on a la relation :

$$\Delta t \text{ (impropre)} = \frac{\Delta t' \text{ (propre)}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad \textbf{(9)}$$

Nous retrouvons ainsi l'effet de dilatation du temps vu précédemment **(8)**.

Nous serions tentés à présent de conclure que l'horloge mobile (celle liée à l'appareil) retarde. Cette conclusion n'est pas fausse, mais elle soulève en apparence un paradoxe et semble en contradiction avec le premier postulat. Si une horloge A se déplace par rapport à une horloge B, alors A retarde par rapport à B ; mais, vu du système de référence où l'horloge A est au repos, c'est B qui se déplace, alors c'est B qui retarde par rapport à A. Il y a là une contradiction logique. Pour la résoudre, il faut réfléchir à ce que mesurent les horloges, elles ne mesurent pas une quantité mystérieuse appelée « Temps », mais un intervalle de temps entre deux événements bien précis. Dans le cas traité plus haut, les deux événements étaient le départ et le retour de l'éclair lumineux. Il n'y avait qu'*un* système de référence où ces deux événements se produisaient au même point de l'espace : le système de référence de l'appareil ; dans ce référentiel, l'intervalle de temps entre ces événements est plus court que dans tout autre référentiel. Pour mesurer un intervalle de temps propre dans le système du laboratoire où l'appareil se déplace, il faut considérer un autre couple d'événements, et donc faire une autre expérience.

Expériences réelles sur la dilatation du temps

Les résultats précédents sont extrêmement surprenants, et nous ne saurions nous contenter d'une « expérience par la pensée ». La première observation d'un effet lié à la dilatation du temps fut réalisée par Yves et Stiwell [7] qui mesurèrent les changements de fréquence des radiations émises par des atomes en mouvement rapide. Leurs résultats se trouvèrent en parfait accord avec la théorie de la Relativité. L'effet qui était mesuré avec précision restait très faible, car les vitesses des atomes n'atteignaient que 0,5 % de la vitesse de la lumière. Des effets vraiment importants nécessitent des particules élémentaires dont la vitesse avoisine la vitesse de la lumière. C'est ainsi que Rossi et Hall [8] et plus récemment Frisch et Smith [9] observèrent les effets de dilatation du temps pour les muons du rayonnement cosmique.

Les muons sont des particules chargées dont la masse est environ 200 fois celle de l'électron. Ils se désintègrent spontanément en un électron, un neutrino et un antineutrino avec une période $t_1 = 1{,}53 \cdot 10^{-6}$ s, que nous définissons comme le temps au bout duquel il ne reste que la moitié du nombre de particules élémentaires initiales. Ceci veut dire que, si 1 000 muons sont présents à un instant initial, il n'en reste que 500 au bout de $1{,}53 \cdot 10^{-6}$ s, et 250 au bout de $3{,}06 \cdot 10^{-6}$ s. Les temps sont mesurés dans le système de référence où les muons sont au repos. Un groupe de muons peut ainsi servir d'horloge pour mesurer des intervalles de temps courts. Si 624 muons existent lorsque se produit un certain événement et s'il n'en reste que 156 lorsque se produit un deuxième événement, c'est que l'intervalle de temps entre les deux événements est de deux périodes, soit $3{,}06 \cdot 10^{-6}$ s.

Les muons sont les particules les plus nombreuses dans le rayonnement cosmique à des altitudes de quelques kilomètres. Ils voyagent pour la plupart verticalement vers la Terre à des vitesses voisines de celle de la lumière.

Dans l'expérience citée, on mesure le temps mis par les muons pour parcourir une distance de l'ordre de 2 000 m à l'aide d'horloges liées au sol et de l'horloge constituée par les muons eux-mêmes. Au cours de l'expérience citée, un compteur de muons était installé au sommet du mont Washington à une altitude de 1 910 m ; il comptait les muons dont la vitesse était comprise entre 0,995 0 et 0,995 4 fois la vitesse de la lumière (environ 99,52 % de la vitesse de la lumière). Ce compteur enregistra par heure 563 ± 10 muons animés de telles vitesses. On déplaça l'appareil à un endroit d'altitude 3 m, et il enregistra 408 ± 9 muons par heure. Dans cette expérience, ce n'était naturellement pas les mêmes muons qu'on chronométrait entre 1 910 m et 3 m, mais l'intensité des rayons cosmiques ne varie pas d'un endroit à l'autre et d'un instant à l'autre (ou du moins pour des distances de quelques milliers de mètres et des intervalles de temps de quelques jours). Les résultats étaient donc interprétables de la même manière que si on avait effectué les mesures sur un seul groupe de muons.

Nous allons comparer les temps de parcours des muons mesurés par des horloges fixes par rapport à la Terre d'une part et par l'horloge des muons d'autre part. Les muons étaient en fait ralentis par l'air, et leur vitesse moyenne n'était plus que 0,992 fois la vitesse de la lumière. Le temps de parcours mesuré par des horloges terrestres était donc :

$$\Delta t_i = \frac{(1\,910 - 3)}{0{,}992 \times 3 \cdot 10^8} = 6{,}4 \cdot 10^{-6}\ \text{s}$$

Cet intervalle de temps est un intervalle de temps impropre qui sépare les deux événements : 1) le muon arrive à l'altitude 1 910 m, et 2) le muon arrive à l'altitude 3 m. L'intervalle de temps propre est mesuré par les horloges des muons eux-mêmes qui sont présentes au cours des deux événements. Comme nettement plus de la moitié des muons arrive à l'altitude de 3 m, l'intervalle de temps mesuré par les muons-horloges est certainement inférieur à leur période, c'est-à-dire à $1{,}56 \cdot 10^{-6}$ s. On peut en donner une estimation plus précise : dans un processus de désintégration aléatoire partant d'un nombre N_0 de particules il en reste au bout du temps t un nombre N donné par :

$$N = N_0 e^{-t/t_0}$$

Le temps t_0 est lié à la période des particules. Quand $N = \frac{N_0}{2}$ t est égal à la période t_1, on en déduit que :

$$t_0 = \frac{t_1}{\text{Log } 2} \quad \text{soit } t_0 = 2{,}21 \cdot 10^{-6}\ \text{s}$$

Le temps de parcours t depuis le mont Washington jusqu'à l'altitude 3 m est tel que :

$$408 = 565\ e^{-t/t_0} \quad \text{soit } t = 0{,}715 \cdot 10^{-6}\ \text{s}$$

L'intervalle de temps propre Δt_p est égal au temps de parcours t, soit : $\Delta t_p = 0{,}715 \cdot 10^{-6}$ s

On constate sans aucun doute qu'il y a entre Δt_i et Δt_p une différence étonnante !

Comparons les valeurs théorique et expérimentale du rapport $\frac{\Delta t_p}{\Delta t_i}$:

— la valeur théorique de ce rapport est

$$\frac{\Delta t_p}{\Delta t_i} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \sqrt{1 - (0{,}992)^2} = 0{,}13$$

— la valeur expérimentale est

$$\frac{\Delta t_p}{\Delta t_i} = \frac{0{,}715 \cdot 10^{-6}}{6{,}4 \cdot 10^{-6}} = 0{,}11$$

La concordance entre ces deux valeurs est bonne, compte tenu des erreurs expérimentales.

On peut remarquer que l'effet mesuré dans cette expérience est important : les muons se désintégraient 9 fois plus lentement que s'ils étaient au repos, leurs horloges retardaient donc dans un rapport 9. Les physiciens qui étudient des particules de hautes énergies produites par des accélérateurs de grande puissance observent des faisceaux d'autres particules élémentaires telles que des pions, des kaons, etc., qui se désintègrent spontanément plus de 100 fois plus vite que les muons. Si la dilatation du temps n'intervenait pas pour ralentir ce processus de

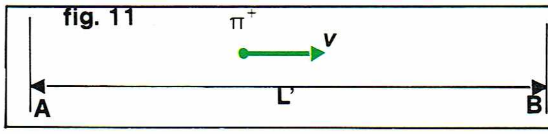

Richard Colin

◀ ***Figure 11 :** un méson π^+ se déplace entre deux repères A et B fixes dans le référentiel du laboratoire.*

désintégration, ces particules disparaîtraient sans avoir pu parcourir plus de quelques mètres, bien que leur vitesse soit très voisine de celle de la lumière. En fait, on peut les observer à plus de cent mètres du point où elles ont été produites dans l'accélérateur et les utiliser pour d'autres expériences.

Comportement des règles en mouvement, contraction des longueurs

La *figure* 11 montre une autre particule élémentaire : le méson π^+ qui voyage à la vitesse v entre deux points A et B fixes dans le référentiel du laboratoire et séparés d'une distance L'.

Dans ce système de référence, il parcourt donc la distance L' en un temps $\frac{L'}{v}$ qui est un intervalle de temps impropre entre les deux événements : 1) le méson passe en A, et 2) le méson passe en B. C'est un intervalle de temps impropre parce que les deux événements se produisent en deux points différents du référentiel du laboratoire et doivent être chronométrés par deux horloges différentes. Par contre, l'horloge du méson π^+ mesurerait l'intervalle de temps propre entre ces deux événements, soit : $\frac{L'}{v}\sqrt{1 - v^2/c^2}$.

Dans le système de référence du méson, les points A et B s'approchent de lui à la vitesse v. Le premier passe, puis le second après un intervalle de temps

$$\frac{L'}{v}\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

Dans le référentiel du méson, la distance entre les deux repères est L = vitesse des repères multipliée par cet intervalle de temps, soit :

$$\textbf{(10)} \qquad L = L'\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

Dans le référentiel où les points A et B sont animés d'une vitesse v, la distance qui les sépare est diminuée d'un facteur $\sqrt{1 - v^2/c^2}$. C'est le phénomène de contraction des longueurs. Cette démonstration simple montre que la dilatation des temps conduit nécessairement à la contraction des longueurs.

Nous allons analyser ce résultat à l'aide de la transformation de Lorentz.

Plaçons une règle de longueur L' sur l'axe $O'x'$ de S' de telle sorte qu'une de ses extrémités coïncide avec le point $x' = 0$ et l'autre avec le point $x' = L'$. Quelle est la longueur de cette règle par rapport au système S ? Autrement dit, où se trouvent l'origine et la fin de la règle par rapport à S *au même instant t* du système S ?

D'après l'équation **(4a)** de la transformation de Lorentz, les valeurs de ces deux coordonnées au temps t sont :

$$x \text{ (origine de la règle)} - vt = 0\,\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

$$x \text{ (fin de la règle)} - vt = L'\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

Leur distance est égale à $L'\sqrt{1 - v^2/c^2}$. Par rapport à S, la règle se déplace à la vitesse v ; il s'ensuit que la longueur d'une règle rigide qui se déplace avec une vitesse v dans le sens de sa longueur est égale à $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ fois sa longueur dans le référentiel où elle est au repos.

On retrouve ainsi le résultat établi plus haut **(10)** : la règle sera plus courte dans le référentiel où elle a une vitesse v que dans le référentiel où elle est au repos ; elle sera d'autant plus courte qu'elle va plus vite. C'est le *phénomène de contraction des longueurs*.

Certains verrons apparaître ici un paradoxe : si nous avions considéré une règle sur l'axe des x de longueur L au repos par rapport à S, nous aurions trouvé conformément au premier postulat que sa longueur par rapport à S' est égale à $L\sqrt{1 - v^2/c^2}$. Comment la règle de S peut-elle être à la fois contractée et dilatée par rapport à S' ? Ce paradoxe disparaît si l'on se rappelle que deux

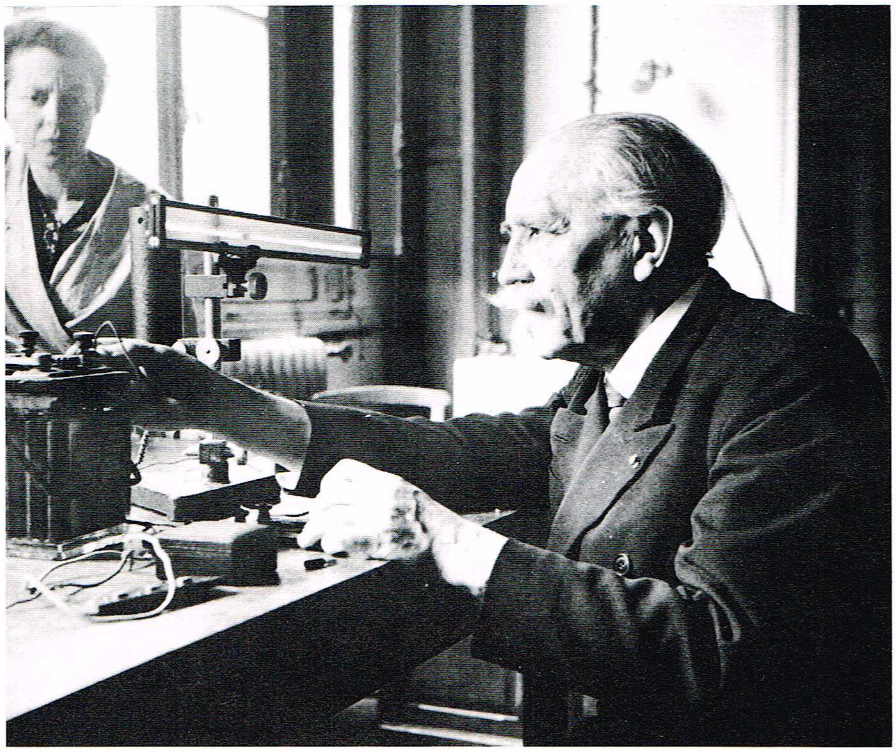

▲ *Les conséquences de la Relativité du temps apparaissent dans l'expérience « du voyageur de Langevin ». Ici, le professeur* P. Langevin *(1872-1946), dans son laboratoire.*

▼ *Figure 12 ; le* paradoxe des jumeaux : *un des jumeaux reste sur terre, l'autre fait un voyage en fusée et revient sur terre.*

événements simultanés dans un référentiel ne le sont plus dans un référentiel en translation par rapport à lui. Les événements que nous avons considérés pour mesurer dans le référentiel S la règle de S′ étaient simultanés dans S, mais ils ne le sont pas dans S′, ils ne peuvent servir pour mesurer dans S′ la règle de S. Il faut refaire une autre expérience avec un nouveau couple d'événements, et il n'y a rien de paradoxal à trouver que cette autre expérience donne un résultat différent.

Le paradoxe des jumeaux ou paradoxe du voyageur de Langevin

Deux jumeaux sont au repos sur la Terre. L'un d'eux fait un voyage en fusée à très grande vitesse jusqu'à une planète voisine et revient sur terre. Pendant le voyage de l'aller, le jumeau resté sur terre voit constamment les horloges de la fusée retarder. Parmi toutes les horloges possibles, il y a les processus biologiques, et le jumeau qui est sur terre pense que celui de la fusée vieillit moins vite que lui. La même conclusion est vraie au cours du trajet retour, puisque la dilatation du temps ne dépend que du carré de la vitesse. A la fin du voyage, les deux jumeaux reviennent côte à côte, mais celui de la fusée est plus jeune que celui qui est resté sur terre. En réalité, pour des vitesses suffisantes, il peut même rencontrer ses arrière-petits-enfants qui seront plus âgés que lui ! Cette conclusion est stupéfiante, mais la plupart des physiciens pensent actuellement que c'est la *conclusion correcte* déduite de la théorie de la Relativité.

Le *paradoxe* semble apparaître quand on se place du point de vue du jumeau de la fusée. *Lui* voit les horloges de la Terre retarder et, quand il retourne sur terre, il pense que le jumeau resté au sol est plus jeune. Nous allons montrer que cette conclusion vient d'une faute de raisonnement et qu'elle est incorrecte.

Les deux situations semblent *a priori* symétriques. Le jumeau de la fusée pourrait penser que c'est le jumeau restant sur terre qui est parti sur un vaisseau spatial (la Terre) et revenu. La différence *physique* est que le jumeau de la fusée a subi une *accélération* à la fin de l'aller pour faire demi-tour, et pas celui de la Terre (*fig.* 12).

Nous pouvons décrire le voyage à l'aide de trois événements différents : le départ de la Terre, le retour sur la Terre et l'accélération du jumeau de la fusée au moment du demi-tour. Le jumeau resté sur terre n'est présent qu'à deux événements, celui de la fusée est présent aux trois. Le voyage n'est pas symétrique pour les deux jumeaux. On ne peut donc pas, en se plaçant du point de vue du jumeau de la fusée, invoquer le principe de Relativité pour affirmer que c'est le jumeau de la Terre qui est resté le plus jeune.

Nous venons de montrer que la résolution du paradoxe fait intervenir une discussion des accélérations subies par la fusée, en toute rigueur il faudrait faire appel à la théorie de la Relativité générale pour introduire les accélérations. Cependant on peut discuter ce problème de façon assez correcte dans le cadre de la Relativité restreinte, et c'est ce que nous allons faire à présent.

Solution du « paradoxe » des jumeaux

Pour simplifier, nous allons modifier le déroulement du voyage (*fig.* 13) : nous considérons maintenant deux fusées, l'une s'éloignant toujours de la Terre à la vitesse *v*, l'autre s'approchant de la Terre à la vitesse *v*. Le jumeau voyageur débute son voyage en sautant sur la première fusée, puis change de fusée à la fin de son voyage aller, puis saute de la deuxième fusée sur la Terre. Nous avons à présent trois observateurs liés à des systèmes de références inertiels : le jumeau resté sur terre, les pilotes des deux fusées.

Du point de vue du jumeau resté sur terre, le voyage a duré un temps total T, T/2 est le temps de l'aller et T/2 celui du retour. Considérons le point de vue du pilote de l'aller : la durée du voyage aller est mesurée en temps

fig. 12

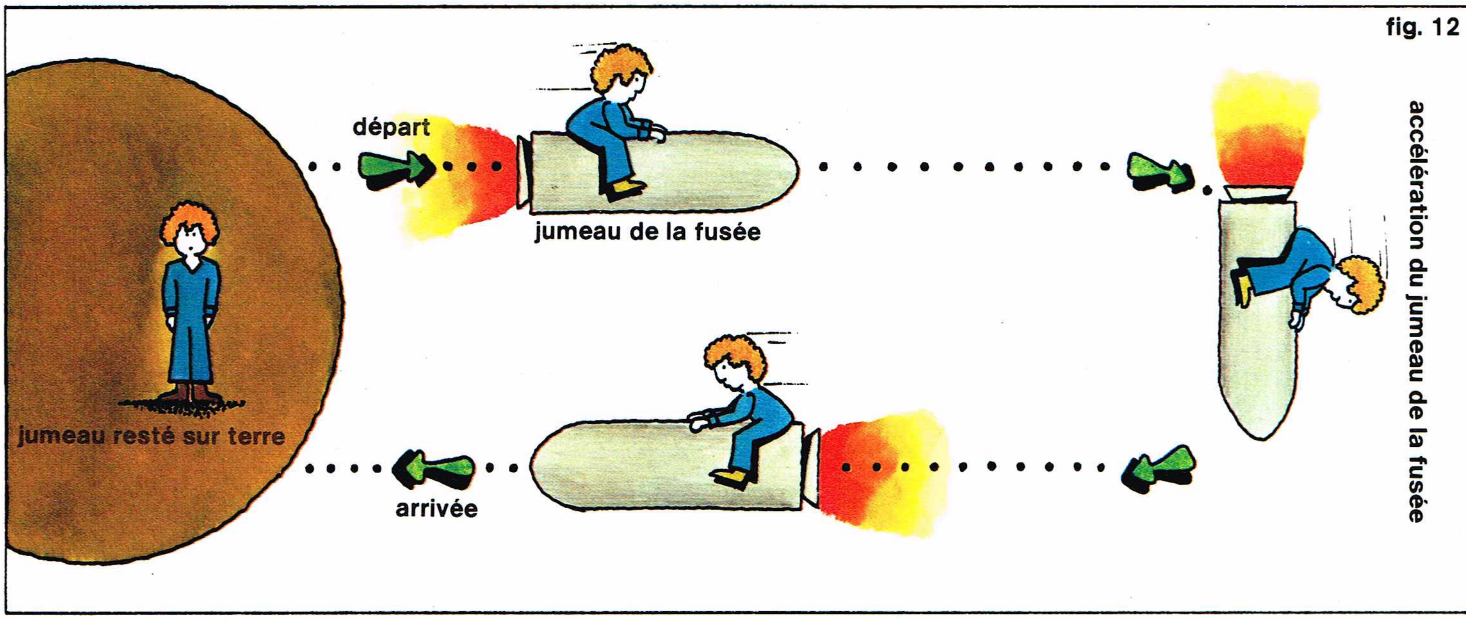

propre, puisqu'il est présent à la fois au départ et au changement de fusée. Par contre, le jumeau resté sur terre mesure un intervalle de temps impropre T/2 entre ces événements, donc, pour le pilote de la fusée, le voyage aller a duré d'après le résultat **(9)** un temps

$$\frac{T}{2}\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

Nous pourrions effectuer le même raisonnement pour le voyage de retour : d'après le deuxième pilote, ce voyage a duré un temps $\frac{T}{2}\sqrt{1 - v^2/c^2}$. Supposons à présent que le jumeau de la fusée n'ait pas de montre mais qu'il calcule la durée de son voyage en interrogeant les pilotes des deux fusées. En quittant la première fusée, il demande au pilote combien de temps a duré son voyage aller ; réponse : $\frac{T}{2}\sqrt{1 - v^2/c^2}$; en quittant la deuxième fusée, il apprend par son pilote que son voyage a duré $\frac{T}{2}\sqrt{1 - v^2/c^2}$. Il en conclut que le voyage total a duré $T\sqrt{1 - v^2/c^2}$. Le jumeau resté sur terre croit que le voyage a duré un temps T, mais en même temps il voit constamment les horloges des fusées retarder d'un facteur $\sqrt{1 - v^2/c^2}$. Les deux jumeaux tombent donc d'accord pour dire que le voyage a duré un temps $T\sqrt{1 - v^2/c^2}$.

Nous allons à présent discuter ce résultat et citer des expériences le confirmant.

Discussion et expériences

Nous avons noté que la solution du problème du paradoxe des jumeaux faisait intervenir l'accélération du jumeau de la fusée, et nous avons contourné cette difficulté en utilisant deux référentiels d'inertie. On peut se demander cependant ce qui se serait passé lors de la fantastique accélération du demi-tour si le jumeau voyageur avait transporté des horloges. Ce n'est que dans le cadre de la théorie de la Relativité générale que l'on peut obtenir une réponse satisfaisante à cette question. Nous nous contenterons de dire qu'un tel traitement est en accord avec le nôtre pourvu que la masse de la fusée soit petite par rapport au système dans lequel elle accélère, c'est-à-dire l'Univers.

Le résultat que nous venons d'exposer est accepté par la majorité des physiciens. Cependant, quelques-uns l'ont refusé et le refusent toujours pour des raisons philosophiques. L'un d'entre eux, Herbert Dingle, poursuivit une controverse durant des décennies jusqu'à ce que, réalisant que cette prédiction concernant les jumeaux se déduisait réellement de la théorie de la Relativité, il décidât que la théorie de la Relativité tout entière devait être rejetée [10].

Plus récemment, Sachs [11], dans un article paru dans la revue américaine *Physics Today*, rejetait la résolution du paradoxe des jumeaux et « démontrait » par un argument mathématique malheureusement erroné que les deux jumeaux au retour sur terre devaient avoir le même âge.

En fait, il y a au moins trois classes d'expériences qui vérifient la conclusion usuelle que le jumeau voyageur est plus jeune à la fin du voyage que son frère resté sur terre [3].

La plus ancienne vérification est fondée sur la comparaison des résultats d'un certain nombre d'expériences indépendantes. Par souci de clarté, nous la présenterons comme une « expérience par la pensée ». Considérons un faisceau de particules élémentaires (des pions positifs par exemple) de faible énergie que nous diviserons en deux faisceaux (les deux jumeaux). Supposons qu'un des faisceaux soit arrêté par une substance absorbante dans laquelle les pions se désintègrent en donnant naissance à d'autres particules élémentaires, les muons (c'est le premier jumeau qui vieillit). L'autre faisceau (le deuxième jumeau) voyage jusqu'à une cible où les pions, qui ne sont pas désintégrés durant le trajet, sont réfléchis (rétrodiffusion) et reviennent finalement s'arrêter dans une deuxième plaque absorbante à côté de la première (les jumeaux se rencontrent à nouveau). L'âge du deuxième faisceau (le deuxième jumeau) peut être déterminé par l'intensité des désintégrations en muons dans l'échantillon.

Nous avons de nombreuses preuves expérimentales que la dilatation du temps agit pour les pions qui voyagent et que les pions ne se transforment pas en muons de façon anormale durant la période de diffusion (qui est une période d'accélération) ou d'absorption (qui est une période de décélération). Il s'ensuit que les deux faisceaux doivent être de taille différente, donc, comme nous l'avons vu plus haut [8] (dans la vérification expérimentale de la dilatation du temps par la décomposition des mésons d'âges différents), le deuxième faisceau (deuxième jumeau) doit être plus grand, donc plus jeune, que le premier ; c'est ce qui est vérifié expérimentalement.

Une deuxième vérification est obtenue en comparant les résultats de mesures fines utilisant l'effet Mössbauer. Nous considérons ici deux jumeaux qui effectuent tous les deux des voyages aller-retour, mais à des vitesses différentes. Le jumeau le plus rapide est ici représenté par un groupe d'atomes excités à haute température, le jumeau lent est un groupe similaire d'atomes à basse température. Nous trouvons que le jumeau rapide vieillit plus lentement que le jumeau lent dans la mesure où la fréquence émise par les atomes les plus chauds (qui peut se comparer à la fréquence de pulsations du cœur du jumeau) est plus faible que celle émise par les atomes les plus froids. Cet effet fut d'abord mis en évidence et analysé par Brian Josephson, alors étudiant à Cambridge !

▼ ***Figure 13 ; le paradoxe des jumeaux : schématisation du voyage.***

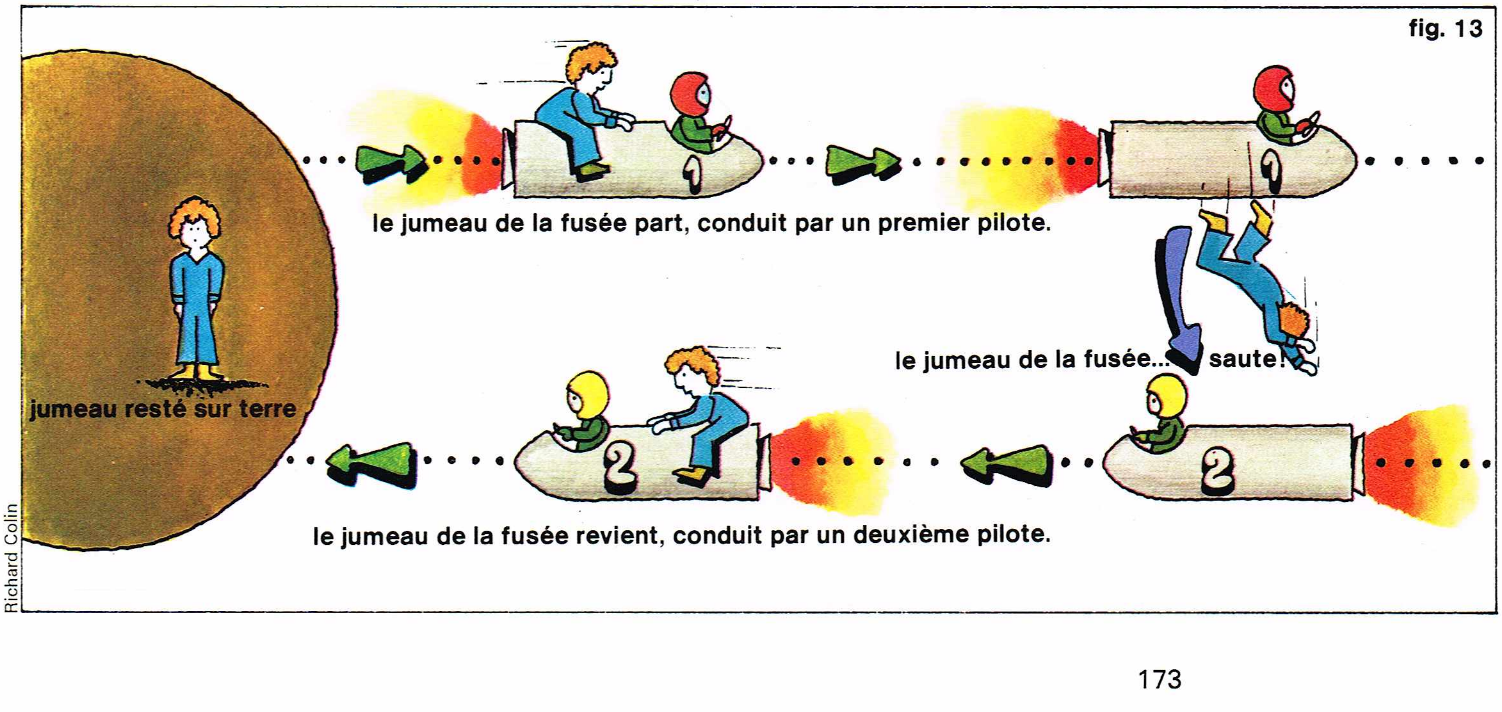

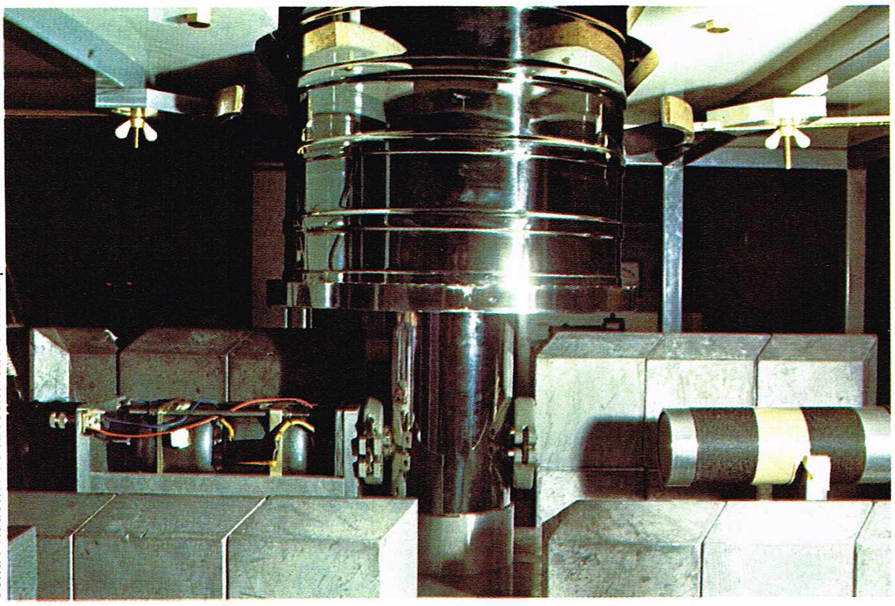

Laboratoire de magnétisme de Bellevue - Centre national de la recherche scientifique

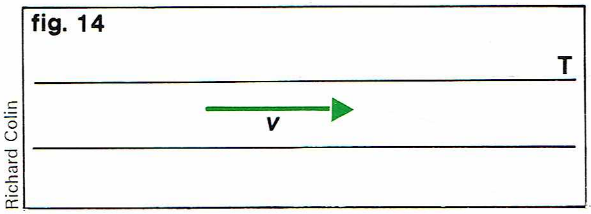

Richard Colin

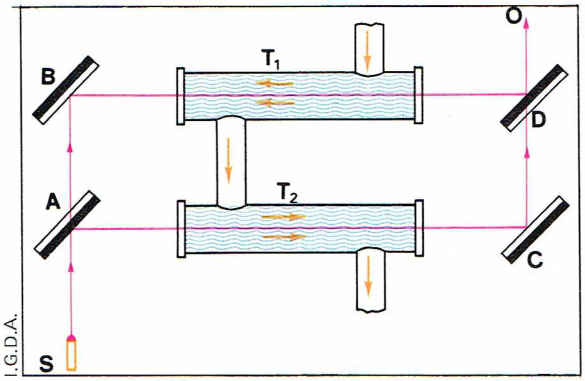

I.G.D.A.

▲▶ *Ci-dessus, appareillage de spectrométrie Mössbauer, à basse température, avec cryostat.*
A droite, en haut, figure 14 : la lumière se propage le long du tuyau T *rempli de liquide animé de la vitesse* v.
En bas, figure 15 : expérience de Fizeau *relative à la variation de la vitesse de la lumière se propageant dans un milieu en mouvement.*
▼ *La « machine de Mössbauer », construite par Richard Mössbauer, pour vérifier la théorie d'Einstein ; l'effet produit par cette machine est appelé* « effet Mössbauer ».

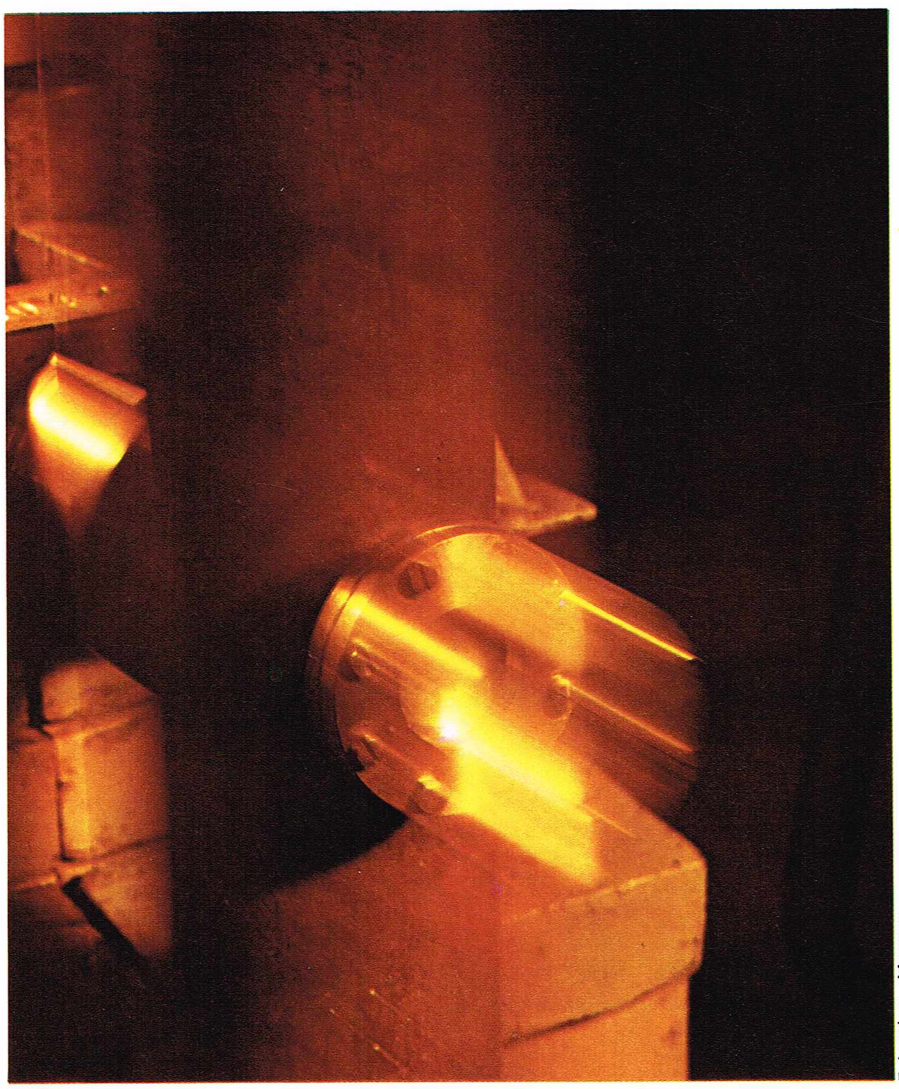

E. Lessing - Magnum

La troisième vérification concerne une observation faite au CERN [13] (Conseil européen pour la recherche nucléaire) sur des muons voyageant à 0,996 5 fois la vitesse de la lumière. Ces muons effectuent des voyages circulaires et retournent à leur point de départ, ce qui permet une comparaison de leur âge (leur durée de vie par rapport à la désintégration en particules plus légères) avec leurs jumeaux immobiles. Ces derniers avaient une durée de vie de 2,2 microsecondes (millionièmes de seconde), alors que ceux qui voyageaient circulairement avaient une durée de vie 12 fois supérieure comme le terme en $\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$ le laisse prévoir.

Composition des vitesses

Considérons un point M se déplaçant dans S avec la vitesse v_1 parallèle à Ox ; dans S′ sa vitesse sera v'_1 parallèle à Ox'. La transformation de Lorentz **(4)** nous permet de montrer que :

(11)
$$v'_1 = \frac{v + v_1}{1 + \frac{vv_1}{c^2}}$$

Dans la limite des faibles vitesses, nous retrouvons la loi de composition des vitesses de la mécanique classique :

(12)
$$v'_1 = v + v_1$$

Nous allons à présent citer des vérifications expérimentales de l'équation **(11)**, et d'abord l'expérience de Fizeau réalisée vers 1850 et qui fut une des premières vérifications de la théorie de la Relativité.

Expérience de Fizeau

La lumière se propage dans un milieu matériel avec une vitesse inférieure à sa vitesse de propagation c dans le vide. Soit v_1 sa vitesse de propagation dans un liquide immobile. Avec quelle vitesse v'_1 se propage-t-elle dans la direction Ox (*fig.* 14) le long du tuyau T si celui-ci est parcouru par ledit liquide animé cette fois de la vitesse v. La vitesse v'_1 nous est donnée par l'équation **(11)** ou **(12)** selon que c'est la transformation de Galilée ou celle de Lorentz qui correspond à la réalité.

Dans l'expérience de Fizeau (*fig.* 15), un faisceau de lumière monochromatique émis par une lampe à mercure S tombe sur une lame de verre A recouverte d'un film fin d'argent d'épaisseur telle que la moitié du faisceau lumineux incident soit réfléchie alors que l'autre moitié traverse A et se réfléchit sur le miroir B : on obtient ainsi deux faisceaux de lumière parallèles de même intensité dont les vibrations sont synchrones. Ces faisceaux traversent les tubes T_1 et T_2 et tombent respectivement sur le miroir C et la lame D, et rejoignent, après réflexion, l'œil de l'observateur O. Si l'eau dans les deux tubes est immobile, les deux faisceaux se retrouvent en phase en O

et leurs intensités s'ajoutent ; si, par contre, l'eau dans les deux tubes se déplace en sens opposé et « entraîne » les rayons lumineux, les rayons qui traversent le tube T_2 arriveront en O avant ceux qui traversent le tube T_1. Si la différence ainsi produite des chemins optiques est égale à une demi-longueur d'onde, alors les intensités des deux faisceaux se soustraient, et on a un phénomène d'interférences lumineuses.

Le résultat de cette expérience indique que c'est la loi de composition des vitesses **(11)** qui doit être retenue. Nous allons à présent donner une autre confirmation expérimentale de la loi de composition des vitesses.

Vitesse limite

Imaginons qu'un vaisseau spatial passant près de la Terre avec la vitesse 0,99 fois c (0,99 c) envoie devant lui un projectile plus petit avec la vitesse 0,99 c par rapport au vaisseau. Quelle est la vitesse de ce projectile par rapport à la Terre ?

D'après l'équation **(11)**, on obtient en faisant

$$v_1 = 0{,}99\,c \quad \text{et} \quad v = 0{,}99\,c, \quad v_1' = 0{,}999\,95\,c$$

On voit apparaître ici l'existence d'une vitesse limite impossible à dépasser qui est la vitesse de la lumière. L'existence de cette vitesse limite est l'une des prévisions caractéristiques de la Relativité.

Ce résultat a été confirmé par de nombreuses expériences, en particulier celle de W. Bertozzi [14] qui est une vérification directe et fondée sur un principe simple. Des paquets d'électrons sont formés dans un accélérateur linéaire. On accélère ces électrons à de grandes vitesses qu'on détermine directement en chronométrant le temps mis par les électrons pour parcourir une distance connue. Le nombre d'électrons est déterminé par la charge totale du faisceau, l'énergie totale du faisceau est mesurée très directement par ses effets calorifiques dans un calorimètre. On calcule ensuite l'énergie de chaque électron. La *figure* 16 représente la vitesse des électrons en fonction de leur énergie : quand l'énergie des électrons augmente, leur vitesse approche mais ne dépasse jamais celle de la lumière.

Équivalence masse-énergie

Nous pouvons brièvement résumer les idées exposées jusqu'à présent : l'expérience nous a conduit à penser que, d'une part, le principe de Relativité est vrai et que, d'autre part, la vitesse de propagation de la lumière dans le vide est constante et égale à c. En réunissant ces deux postulats, nous avons obtenu la loi de transformation pour les coordonnées x, y, z, t d'un événement lorsqu'on passe d'un référentiel galiléen à un autre. Cette transformation n'est pas la transformation de Galilée (contrairement à la mécanique classique), mais la transformation de Lorentz. Nous pouvons à présent réunir cette transformation avec le principe de Relativité de la façon suivante : toute loi générale de la nature doit être telle qu'elle se transforme en une loi de la même forme quand on introduit au lieu des variables d'espace-temps x, y, z, t du système de coordonnées initial S les nouvelles variables d'espace-temps x', y', z', t' du système de coordonnées S' telles que la relation entre x, y, z, t et x', y', z', t' est donnée par la transformation de Lorentz. En résumé : les lois générales de la nature sont invariantes par la transformation de Lorentz. Si l'on découvrait une loi générale ne satisfaisant pas à cette condition, alors un au moins des deux postulats fondamentaux de la théorie serait à rejeter.

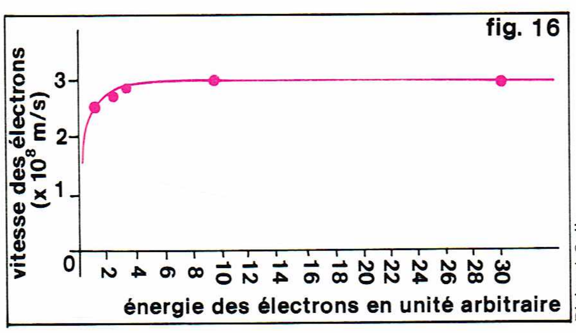

Richard Colin

◀ *Figure 16 : mesure de la vitesse des électrons en fonction de leur énergie.*

temps de parcours, lequel est lui-même d'environ un deux-cent millième de seconde. Le retard à mesurer est ainsi d'un *deux-millionième de milliardième de seconde* ! N'est-il pas admirable que les appareils de M. Michelson permettent de mesurer avec certitude une durée si extraordinairement petite ?

LA PREUVE...

Le savant professeur vient d'annoncer que le résultat prévu a effectivement été observé. M. Michelson, qui avait tout d'abord accueilli avec scepticisme la théorie de la relativité, voit dans ce résultat positif une confirmation expérimentale de l'exposé d'Einstein. Il se place pour cela au point de vue suivant. Une expérience célèbre, et qui est précisément due à M. le professeur Michelson lui-même, a montré d'une façon péremptoire ce qu'il fallait penser de l'influence que peut exercer le mouvement de translation de notre globe terrestre sur les expériences d'optique que l'on fait à sa surface. Cette influence est nulle.

« Or, ce résultat *négatif* a été l'un des points de départ de la nouvelle théorie créée par Einstein ; et ce qui est assez curieux, c'est que le professeur Michelson avait d'abord songé à l'expliquer tout autrement. Il suffit, disait-il, d'admettre que c'est la terre qui, en raison de son énorme masse, entraîne avec elle dans l'espace, et cela d'une manière complète, l'éther dans lequel — suivant la théorie des « ondulations » — on admet que la lumière se propage.

(Voir la suite de l'article, page XL)

LE RECTANGLE EXPÉRIMENTAL INSTALLÉ DANS LA PLAINE DE CLEARING

A Clearing (Illinois), l'Université de Chicago vient de faire installer ce « rectangle » de poteries, long de 450 mètres environ et large de 400, grâce auquel des expériences doivent établir si, conformément à la théorie d'Einstein, l'éther interplanétaire est un élément négligeable dans la mesure de la vitesse de la lumière solaire.

LE LABORATOIRE D'OBSERVATION SITUÉ A L'ANGLE DES CANALISATIONS

A l'angle du rectangle de Clearing, un laboratoire d'observation a été aménagé. Les deux rayons lumineux y sont enregistrés à l'aide d'instruments particulièrement précis. On voit ici un savant, M. J. Purdy, procédant à la mise au point de l'expérience qui va avoir lieu. Au premier plan, la lampe qui produira l'éclair lumineux.

Snark International

▲ ***Une expérience sur la théorie d'Einstein : le rectangle expérimental installé dans la plaine de Clearing et le laboratoire d'observation situé à l'angle des canalisations. Illustrations tirées de Je sais tout, ouvrage publié vers 1920.***

Nous arrivons à présent à un résultat crucial démontré par Einstein et qui a considérablement accentué le caractère révolutionnaire de cette théorie. Ce résultat exprime l'équivalence entre la masse et l'énergie et est souvent résumé par la célèbre formule $E = mc^2$. D'après la théorie de la Relativité, l'énergie cinétique d'un point matériel de masse m n'est plus donnée par l'expression :

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad \text{mais par}$$

$$\textbf{(13)} \qquad E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Cette expression tend vers l'infini quand la vitesse v tend vers la vitesse de la lumière c. Ceci rejoint le résultat obtenu précédemment, à savoir que la vitesse de la lumière est la vitesse maximale d'un corps en mouvement. En général, la vitesse v est très inférieure à c, donc le rapport $\frac{v}{c}$ est petit. On peut alors donner une expression approchée de l'énergie cinétique **(13)** :

$$\frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \simeq mc^2 + m\frac{v^2}{2} + \ldots$$

Le premier terme mc^2 ne contient pas la vitesse, il ne faut donc pas en tenir compte quand il s'agit de savoir comment l'énergie d'un point matériel dépend de sa vitesse. Le deuxième terme $\frac{1}{2}mv^2$ est précisément l'expression non relativiste de l'énergie cinétique.

La physique prérelativiste connaît deux principes de conservation d'importance fondamentale, le principe de conservation de la masse et celui de conservation de l'énergie qui apparaissent complètement indépendants l'un de l'autre. Grâce à la théorie de la Relativité restreinte, ils ont été unifiés en un seul principe. Nous allons montrer comment cette union est possible, puis nous en discuterons le sens.

Le principe de Relativité exige que le principe de conservation de l'énergie ne soit pas seulement valable par rapport à un système de référence S, mais par rapport à

tout système galiléen S′ (c'est-à-dire en translation uniforme par rapport à S).

De ces prémisses et des équations fondamentales de l'électrodynamique de Maxwell, on peut tirer la conclusion suivante : un corps animé de la vitesse v qui absorbe une quantité d'énergie E_0 sous forme de radiations électromagnétiques, éprouve un accroissement d'énergie égal à :

$$\frac{E_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

L'énergie du corps est alors donnée, en tenant compte de l'expression **(13)** de l'énergie cinétique, par :

$$\frac{\left(m + \frac{E_0}{c^2}\right) c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Le corps a donc la même énergie que s'il avait une masse $m + \frac{E_0}{c^2}$. On peut donc conclure que, si un corps absorbe l'énergie E_0, sa masse augmente de $\frac{E_0}{c^2}$. La masse d'un corps n'est pas constante mais varie avec la variation d'énergie de celui-ci. Elle peut donc être considérée directement comme la mesure de son énergie. Le principe de conservation de la masse s'identifie donc au principe de conservation de l'énergie et n'est valable que si le corps n'émet ni n'absorbe d'énergie.

On peut réécrire l'expression pour l'énergie sous la forme $\frac{mc^2 + E_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$, on voit alors que $\frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$ n'est autre que l'énergie que le corps possédait avant d'absorber l'énergie E_0.

En général, les variations d'énergie qu'on peut communiquer à un corps sont telles que la quantité $\frac{E_0}{c^2}$ est négligeable par rapport à la masse m du corps. C'est à cette circonstance qu'on doit attribuer le fait que le principe de conservation de la masse en mécanique classique ait pu être établi et vérifié.

Dans la pratique, on exprime les masses des particules en unités d'énergie. Presque toutes les tables de particules élémentaires donnent maintenant leurs masses en MeV (méga-électron-volt), le MeV étant l'énergie qu'acquiert un électron accéléré par une différence de potentiel d'un million de volts. Ainsi le proton a une masse

$$m = 1{,}673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

qui correspond à une énergie $mc^2 = 1{,}504 \cdot 10^{-10}$ joule, soit 938 MeV.

Particules de masse nulle

Il est bien connu que les rayons lumineux provenant du Soleil chauffent la Terre. La lumière transporte de l'énergie. De plus, des expériences rigoureuses montrent que la lumière exerce une pression, dite pression de radiation, sur une surface qu'elle éclaire. Cette idée de pression de radiation est liée à la notion de quantité de mouvement (ou d'impulsion) transportée par le champ électromagnétique. D'après la théorie électromagnétique de Maxwell, un éclair lumineux transportant une énergie E a une impulsion E/c. La lumière a donc des propriétés mécaniques bien connues. On peut montrer que la mécanique relativiste s'applique à la lumière à condition de considérer que celle-ci est formée de particules de masse nulle, les « photons ». En effet, ceux-ci se déplacent nécessairement à la vitesse de la lumière; en faisant $v = c$ dans l'expression **(13)** de l'énergie, on trouve que cette dernière est infinie (ce qui est impossible), sauf si la masse m est nulle.

Il existe une autre particule de masse nulle, le « neutrino », qui apparaît dans la désintégration radio-active des noyaux et dans la désintégration de certaines particules élémentaires.

Expériences sur l'énergie relativiste

Nous allons citer une série d'expériences qui confirment l'expression **(13)** de l'énergie.

La première d'entre elles vérifie directement l'expression de l'énergie en fonction de la vitesse. Nous l'avons déjà mentionnée [(14)]. Des électrons dont on avait directement mesuré la vitesse en les chronométrant sur une distance connue étaient arrêtés dans un calorimètre où leur énergie se transformait en chaleur. D'après **(13)**, un électron de vitesse v doit avoir une énergie $E = mc^2/\sqrt{1 - v^2/c^2}$. Une fois arrêté, son énergie est $E = mc^2$. Chaque électron perd donc une quantité d'énergie

$$\Delta E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - mc^2$$

Dans l'expérience citée, l'énergie d'un nombre donné d'électrons était transformée en énergie thermique.

La *figure* 16 représente $\frac{v}{c}$ en fonction de ΔE (exprimé en prenant pour unité mc^2). On peut constater que les points expérimentaux suivent de très près la courbe construite avec l'expression théorique.

L'exemple précédent ne dit rien sur l'étonnante conclusion théorique selon laquelle la masse d'un composé n'est pas égale à la somme des masses de ses composantes. La différence de masse se retrouve sous forme d'énergie lors de la réaction de synthèse de ce composé. Nous allons d'abord donner des ordres de grandeur de ces variations de masse (ou de ces énergies) avant de citer deux expériences confirmant quantitativement la loi d'équivalence masse-énergie.

Envisageons d'abord le cas de réactions chimiques : par exemple la réaction d'une mole ($6{,}0225 \cdot 10^{23}$ atomes) de carbone sur une mole d'oxygène pour donner une mole de gaz carbonique :

$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$

Cette réaction s'accompagne d'un dégagement de chaleur de 94 kilocalories qui correspond à la différence de masse entre la masse d'une mole de gaz carbonique (CO_2) et la somme de la masse d'une mole de carbone et de la masse d'une mole d'oxygène. Ce défaut de masse, de l'ordre de $4 \cdot 10^{-9}$ gramme, est très petit par rapport à la masse de la mole de gaz carbonique (égale à 44 grammes). Il ne pourra donc pas être mis en évidence expérimentalement.

Par contre, dans le cas de réactions nucléaires, le défaut de masse est beaucoup plus grand, et l'énergie fournie au cours de la réaction bien plus importante. C'est ce que l'on appelle l'*énergie nucléaire*. Lorsqu'elle est produite par désintégration d'atomes lourds, c'est le processus de *fission*. Citons en exemple la désintégration de ^{239}U en ^{149}Ce suivant la réaction :

$$^{239}U \rightarrow {}^{149}Ce + {}^{99}Ru$$

(U = uranium, Ce = césium, Ru = rubidium). Elle fournit une énergie considérable de l'ordre de 221 MeV par mole d'uranium. La fission d'atomes lourds tels que l'uranium est parfaitement contrôlée et est utilisée actuellement comme source d'énergie. Ce procédé présente comme gros inconvénient celui de produire des composés radio-actifs lourds dont le temps de vie est très long.

Un autre procédé possible est celui de la *fusion*, au cours de laquelle des particules légères fusionnent en une seule particule. Par exemple, la fusion du ^6Li à partir de trois protons et trois neutrons selon la réaction :

$$3\,p + 3\,n \rightarrow {}^6Li$$

fournit une énergie de 30 MeV par mole de lithium. Ce processus a l'avantage de ne produire que des éléments radio-actifs légers de faible durée de vie et de ne pas nécessiter d'uranium comme matière première. L'énergie produite par fusion est utilisée dans la bombe à hydrogène; malheureusement, on ne sait pas encore contrôler la fusion, ce qui permettrait d'utiliser l'énergie produite à des fins pacifiques. De très nombreuses recherches sont en cours dans ce domaine.

Nous allons citer à présent deux vérifications quantitatives de l'équivalence masse-énergie. Par exemple, on sait que le noyau ^7Li est formé de trois protons et quatre neutrons. Une mole de Li pèse 7,015 95 grammes. Une mole d'hydrogène qui se réduit à un proton unique pèse 1,007 82 gramme. Mais une mole d'hélium ^4He qui est composé de deux protons et deux neutrons pèse 4,002 60 grammes. Donc une mole de ^7Li plus une mole d'hydrogène pèsent 0,018 57 gramme de plus que deux moles d'hélium. Considérant alors l'équivalence entre masse et énergie, on peut considérer qu'un seul atome

Keystone

Keystone

◀ *Le savant atomiste britannique,* **sir John Cockroft** *(à gauche), et le professeur* **E. T. S. Walton** *(à droite), de l'université de Dublin obtinrent le prix Nobel de physique en 1951.*

de ^{7}Li plus un atome d'hydrogène ont une énergie $2{,}771 \cdot 10^{-12}$ joule de plus que deux atomes d'hélium au repos.

Si l'on arrivait à assembler un proton et un noyau de ^{7}Li, on s'attendrait à ce qu'ils se décomposent en deux noyaux d'hélium ou particules α. L'énergie cinétique totale de ces deux noyaux α serait de $2{,}771 \cdot 10^{-12}$ joule provenant du changement de masse. Au cours d'une des premières expériences de physique nucléaire, Cockroft et Walton, et plus tard Dee et Walton [15], avaient frappé des noyaux ^{7}Li au repos avec des protons et montré que, parfois, deux particules (des atomes d'hélium) à très haute énergie étaient produites. Dans une expérience plus récente [16], l'énergie cinétique de ces particules était supérieure de $2{,}779 \cdot 10^{-12}$ joule à celle du proton qui avait frappé la cible. Cette valeur est en accord avec celle calculée plus haut, aux erreurs d'expérience près (qui proviennent surtout de la détermination de la masse du lithium au spectrographe de masse).

Quelques années après que les premières transformations nucléaires eurent été étudiées, on découvrit de nouvelles particules, les positrons de même masse m_e que l'électron mais de charge opposée. On a trouvé que, quand un électron rencontre un positron, les deux particules peuvent s'annihiler mutuellement, donnant naissance à des radiations lumineuses (rayons gamma) d'énergie totale $2\,m_e c^2$. Ces rayons gamma subissent des collisions avec les électrons et les atomes de la matière, et transforment leur énergie lumineuse en chaleur. On voit ainsi que toute la masse d'un électron peut se transformer en énergie (ici, en énergie calorifique).

Champs et forces magnétiques et électriques

Ainsi que nous l'avons mentionné en introduction à cet article, la théorie de la Relativité a son origine dans l'électromagnétisme. C'est en étudiant l'électrodynamique des charges en mouvement que Lorentz était parvenu à une formulation très proche de celle d'Einstein. L'article fondamental d'Einstein de 1905 n'était pas intitulé *Théorie de la Relativité*, mais *Sur l'électrodynamique des corps en mouvement*.

A présent, il est évident pour nous que la théorie de la Relativité concerne toutes les lois physiques et pas seulement les lois de l'électromagnétisme, et nous attendons de toute théorie physique qu'elle soit invariante relativiste. Autrement dit, toute loi physique doit avoir la même signification dans tous les repères galiléens. Il est intéressant de noter que la physique possédait une théorie invariante relativiste (la théorie de Maxwell de l'électromagnétisme) bien avant que la nécessité d'invariance relativiste en fût reconnue.

Force magnétique

Considérons un faisceau de particules chargées, par exemple des électrons émis par un tube cathodique. Si nous approchons de ce faisceau un fil parcouru par un courant électrique, nous constatons que ce faisceau d'électrons est dévié. Cette interaction entre un courant et des charges en mouvement peut être décrite en introduisant un *champ magnétique* (rappelons au passage que le *champ électrique* avait été introduit pour rendre compte de l'action à distance entre des charges stationnaires exprimée par la loi de Coulomb). Nous disons qu'un courant électrique engendre un champ magnétique dans le milieu qui l'entoure. Toute charge en mouvement (ou tout courant) qui se trouve plongé dans ce champ subit une force proportionnelle à l'intensité du champ magnétique en ce point. Pour une particule chargée en mouvement, cette force est perpendiculaire à sa vitesse.

La force totale s'exerçant sur une particule de charge q située dans un champ électrique $\vec{E}$ et dans un champ magnétique $\vec{B}$ est :

(14) $$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \wedge \vec{B}$$

($\vec{v} \wedge \vec{B}$ est le produit vectoriel de $\vec{v}$ par $\vec{B}$; c'est un vecteur perpendiculaire à $\vec{v}$ et à $\vec{B}$ et dont l'intensité vaut $vB \sin \theta$ où θ est l'angle entre $\vec{v}$ et $\vec{B}$).

Nous choisirons l'équation **(14)** comme définition de $\vec{B}$. *Ainsi, le champ magnétique est un vecteur qui détermine la partie proportionnelle à la vitesse de la force s'exerçant sur une charge en mouvement.* Autrement dit,

▼ *Mesure du rapport de la charge e à la masse m de l'électron par la méthode de déflexion électrique et magnétique. On observe ici la déviation d'un faisceau d'électrons sous l'action d'une induction magnétique perpendiculaire à la vitesse initiale.*

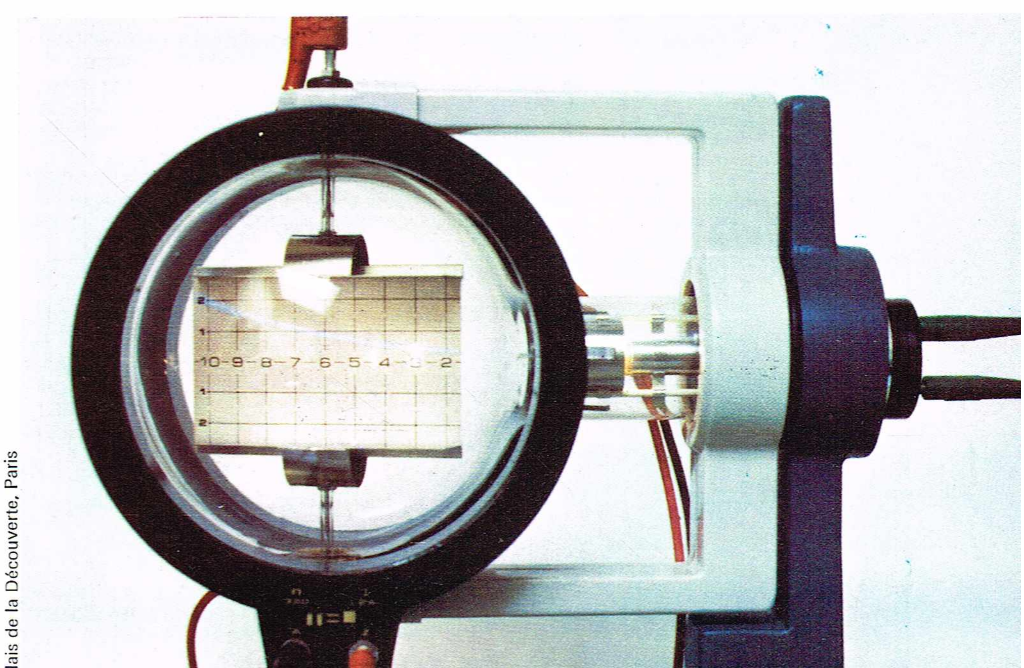

Palais de la Découverte, Paris

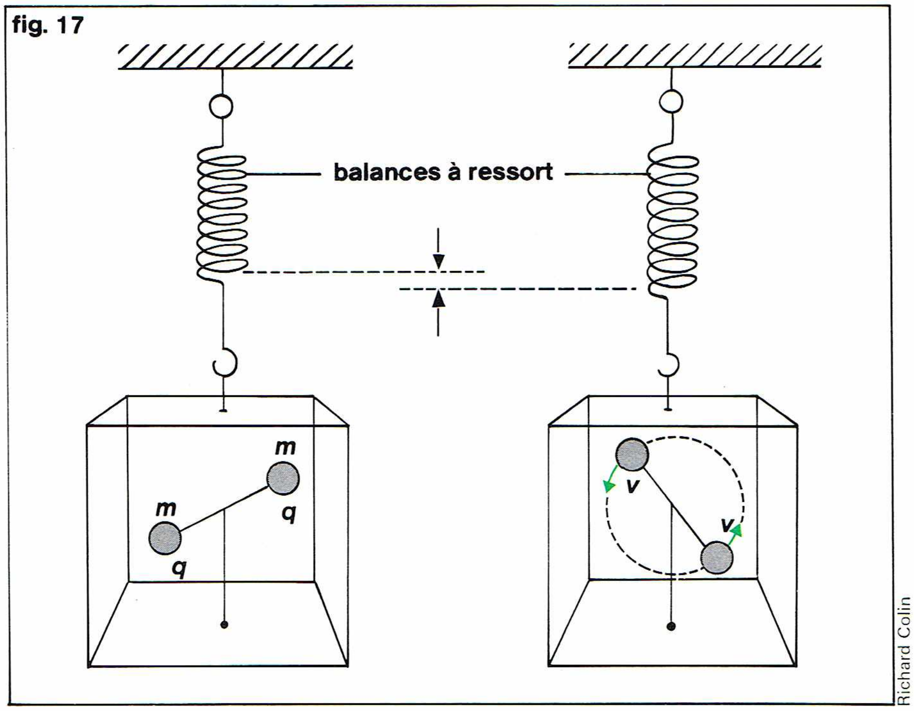

▲ *Figure 17 : une expérience « par la pensée » montrant l'invariance de la charge.*

si l'on désire mesurer la direction et l'intensité du vecteur $\vec{B}$ en un endroit déterminé de l'espace, il faut d'abord choisir une particule de charge q, mesurer la force qui s'exerce sur cette particule au repos pour déterminer le champ électrique $\vec{E}$. Ensuite, il faut mesurer la force qui s'exerce sur la particule animée de la vitesse $\vec{v}$, puis d'une vitesse différente $\vec{w}$. Enfin, il faut déterminer $\vec{B}$ qui permettra à l'équation **(14)** de rendre compte de tous ces résultats.

En regardant l'équation **(14)**, on peut se demander quelle est l'origine de cette force proportionnelle à la vitesse de la particule. C'est à cette question que nous allons répondre à présent.

Invariance de la charge

Pour étudier l'électrodynamique d'une particule chargée, il faut d'abord se demander si la charge de la particule peut être affectée par son mouvement. La réponse à cette question est négative : « La charge totale d'un système n'est pas affectée par le mouvement des porteurs de charges. » Il existe de nombreuses vérifications expérimentales de ce résultat fondamental; nous allons citer comme preuve l'exacte neutralité électrique des atomes et des molécules. L'égalité entre la charge de l'électron et celle du proton a été vérifiée par plusieurs méthodes. Nous citerons l'expérience suivante [17].

Une grande quantité d'hydrogène est comprimée dans un réservoir qui est lui-même isolé électriquement de l'extérieur. Le gaz peut s'échapper du récipient, mais on empêche en même temps les ions de s'échapper. Si la charge du proton et celle de l'électron diffèrent par exemple d'un billionième de la charge e de l'électron ($10^{-9} \times e$), alors chaque molécule d'hydrogène composée de deux protons et de deux électrons porterait une charge de $2 \times 10^{-9}\, e$, et le départ de tout l'hydrogène altérerait de façon mesurable la charge du récipient. En fait, l'expérience aurait pu déceler une charge résiduelle de l'ordre de $10^{-20}\, e$ par atome, et il n'en fut rien. On peut en conclure qu'un électron et un proton ont la même charge avec une précision de 10^{-20}.

Une expérience similaire fut réalisée avec les atomes d'hélium, qui contiennent deux électrons et deux protons comme la molécule d'hydrogène. Le mouvement des particules chargées est très différent dans l'hélium et l'hydrogène. Si le *mouvement* affectait la charge, nous ne pourrions avoir de compensation exacte entre les charges électroniques et nucléaires *à la fois* dans la molécule d'hydrogène et dans l'atome d'hélium. En fait, on a montré expérimentalement que l'atome d'hélium était neutre avec à peu près la même précision expérimentale que dans le cas de l'hydrogène.

Nous désirons insister sur le fait que la charge d'une particule n'est pas affectée par sa vitesse, alors que sa masse en mouvement (égale à son énergie divisée par c^2) est changée d'un facteur $\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$. A cet effet, nous allons décrire une expérience par la pensée (*fig.* 17). Dans la boîte de droite, les deux particules chargées qui sont fixées aux extrémités d'une barre pivotante tournent à la vitesse v. La masse à droite est *supérieure* à celle de gauche, comme on peut le prouver en pesant la boîte à l'aide d'une balance à ressort. La charge électrique totale (déterminée par la force exercée sur une charge test immobile) est la même dans les deux cas. Une expérience réelle équivalente à celle-ci a été réalisée avec un spectrographe de masse qui peut mettre en évidence une différence de masse entre une molécule de deutérium ionisée (2 protons, 2 neutrons, 1 électron) et un atome d'hélium ionisé (également 2 protons, 2 neutrons et 1 électron). Ce sont deux structures très différentes dans lesquelles les particules se déplacent à des vitesses très différentes. La différence d'énergie se traduit par une différence de masse mesurable. Il n'y a pas de différence, à une très grande précision près, dans la charge électrique des deux ions.

Champs électrique et magnétique

La théorie de la Relativité établit que les champs électrique et magnétique sont des aspects différents d'un même phénomène. La formulation exacte de ce résultat fait intervenir des concepts mathématiques qui pourraient ne pas être familiers au lecteur (tenseurs). Nous allons simplement illustrer ce résultat et le préciser.

Considérons (*fig.* 18) un condensateur plan immobile d'armatures parallèles portant les charges $+Q$ et $-Q$. Le champ électrique entre les armatures de largeur a et de longueur b est parallèle à Oy et égal à :

(15) $$E_y = \frac{Q}{\varepsilon_0 ab}$$

où ε_0 est une constante.

Dans un référentiel S′ se déplaçant vers les x positifs avec une vitesse v, les charges se déplacent vers la gauche avec la même vitesse v. Les charges mobiles constituent des courants qui produisent un champ magnétique entre les armatures. Mais le condensateur est le même dans les deux cas. On voit alors que le fait que le *champ soit purement électrique ou associé à un champ magnétique dépend du référentiel* où on le voit. On peut montrer que le champ magnétique est dirigé vers les z négatifs et a pour valeur :

(16) $$B'_z = -\frac{v}{c^2} E_y$$

On exprime ainsi le champ magnétique en fonction du champ électrique dans le référentiel où le condensateur est au repos.

Dans le référentiel S′ où le condensateur se déplace, il y a non seulement apparition d'un champ magnétique, mais encore augmentation du champ électrique, puisque la largeur a des armatures se contracte et laisse la même charge répartie sur une surface plus petite. Dans le réfé-

▼ *Figure 18; transformation du champ électrique lorsqu'on passe du référentiel* S *au référentiel* S′ *:*
a) *condensateur plan, vu dans* S*;*
b) *condensateur plan, vu dans* S′.

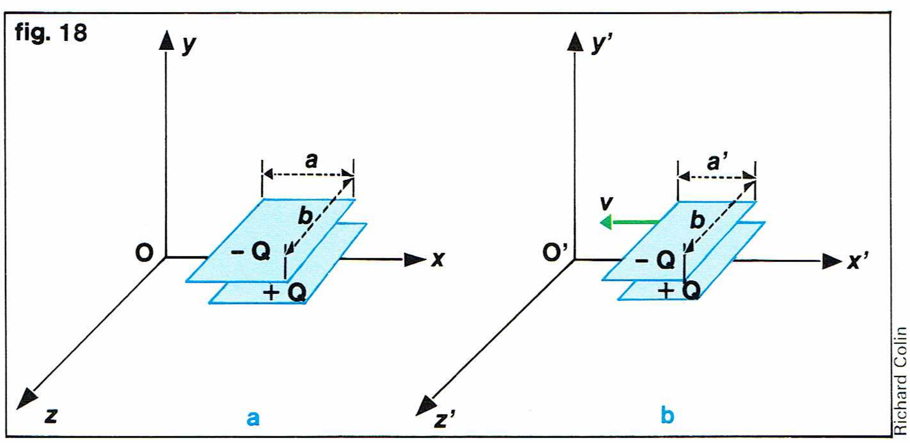

rentiel S′, la largeur a' est donnée par $a' = a\sqrt{1 - v^2/c^2}$. En combinant cette relation avec **(15)**, on obtient :

$$\textbf{(17)} \qquad E'_y = \frac{E_y}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Le champ électrique dans la direction perpendiculaire au mouvement est augmenté d'un facteur $\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$.

D'autre part, si l'on basculait le condensateur de 90°, de façon que ses armatures soient parallèles au plan yOz, le champ électrique créé par le condensateur serait parallèle à Ox. Seule la distance entre les armatures serait contractée dans le référentiel S′; or le champ électrique est indépendant de cette distance. Il est donc inchangé dans le référentiel S′ et :

$$\textbf{(18)} \qquad E_x = E'_x$$

Le champ électrique dans la direction parallèle au mouvement est inchangé.

On peut généraliser ces relations au cas où, dans le référentiel S, on a à la fois un champ électrique E et un champ magnétique B. On obtient :

$$\textbf{(19)} \quad \begin{cases} E'_x = E_x & cB'_x = cB_x \\ E'_y = \dfrac{E_y - vB_z}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} & cB'_y = \dfrac{cB_y + \frac{v}{c}E_z}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\ E'_z = \dfrac{E_z + vB_y}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} & cB'_z = \dfrac{cB_z - \frac{v}{c}E_y}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{cases}$$

Ces équations montrent comment champs électriques et magnétiques se transforment les uns dans les autres dans des référentiels différents. Les diverses composantes du champ électrique et du champ magnétique sont les composantes d'une quantité unique appelée tenseur de champ électromagnétique.

Champ électrique créé par une charge ponctuelle mobile

Un autre exemple de la signification des équations **(19)** est donné par le champ d'une charge ponctuelle mobile. Soit une charge ponctuelle q immobile à l'origine. En un point (x, y, z), elle produit un champ électrique donné par la loi de Coulomb :

$$\textbf{(20)} \quad \begin{cases} E_x = \dfrac{q}{4\pi\varepsilon_0} \dfrac{x}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \\ E_y = \dfrac{q}{4\pi\varepsilon_0} \dfrac{y}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \\ E_z = \dfrac{q}{4\pi\varepsilon_0} \dfrac{z}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \end{cases}$$

Il est radial centré sur la charge.

Dans un référentiel S′ se déplaçant vers la droite avec la vitesse v, la charge q se déplace vers la gauche avec la vitesse v. Nous cherchons le champ électrique en un point x', y', z', au temps $t' = 0$. En combinant **(19)** et **(20)**, on obtient :

$$E'_x = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\sqrt{1 - v^2/c^2}} \cdot \frac{x'}{\left(\dfrac{x'^2}{1 - v^2/c^2} + y'^2 + z'^2\right)^{3/2}}$$

$$E'_y = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\sqrt{1 - v^2/c^2}} \cdot \frac{y'}{\left(\dfrac{x'^2}{1 - v^2/c^2} + y'^2 + z'^2\right)^{3/2}}$$

$$E'_z = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\sqrt{1 - v^2/c^2}} \cdot \frac{z'}{\left(\dfrac{x'^2}{1 - v^2/c^2} + y'^2 + z'^2\right)^{3/2}}$$

Le champ est encore radial, mais il n'a pas la même valeur dans toutes les directions. Par exemple, en un point de coordonnées $(x' = 1, y' = 0, z' = 0)$, c'est-à-dire un mètre en arrière de la charge, on a :

$$E'_x = \frac{q\,(1 - v^2/c^2)}{4\pi\varepsilon_0}$$

En un point de coordonnées $(x' = 0, y' = 1, z' = 0)$, c'est-à-dire à un mètre sur le côté, le champ a pour valeur :

$$E'_y = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

c'est-à-dire qu'il est $(1 - v^2/c^2)^{3/2}$ fois supérieur à ce qu'il est en avant ou en arrière de la charge. Si nous indiquons graphiquement l'intensité du champ par la longueur des lignes de champ dessinées, ces lignes de champ tendent à être plus longues dans des directions perpendiculaires au mouvement (*fig.* 19).

Pour conclure cet exposé, il est bon de s'interroger à nouveau sur le principe de Relativité. Nous avons en effet supposé qu'il existe un système de référence S inertiel, c'est-à-dire tel que, par rapport à lui, le principe de Galilée soit valable (un point matériel abandonné à lui-même et suffisamment éloigné de tous les autres points effectue un mouvement rectiligne et uniforme). Relativement à S, les lois de la nature doivent être aussi simples que possible. Mais, en outre de S, tous les systèmes de référence S′ en translation uniforme par rapport à S doivent être privilégiés dans ce sens, et être tout à fait équivalents à S pour la formulation des lois de la nature. C'est seulement pour ces systèmes de référence (dits galiléens) qu'a été admise la validité du principe de Relativité, et non pour les autres (qui effectuent des mouvements différents). C'est en ce sens que nous parlons du principe de Relativité restreinte ou de la théorie de la Relativité restreinte.

Pour ôter cette limitation, Einstein, en 1915, formula le principe de Relativité générale qui étendait le principe de Relativité à des systèmes accélérés les uns par rapport aux autres. Il bâtit une théorie satisfaisant à ce principe : *la théorie de la Relativité générale.*

fig. 19

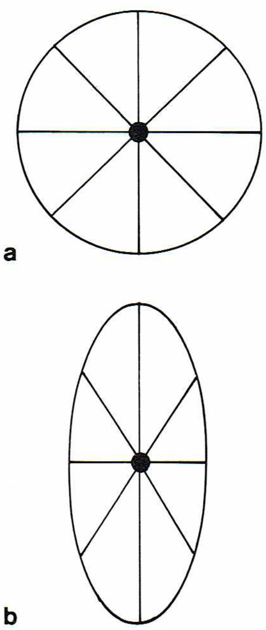

▲ ***Figure 19 :***
a) ***allure du champ électrique créé par une charge ponctuelle placée en O, mesuré dans un référentiel où la charge est au repos. On peut voir que l'intensité du champ est la même dans toutes les directions.***
b) ***allure du même champ électrique mais mesuré dans un référentiel où la charge se déplace avec une vitesse v. On peut voir que l'intensité du champ dans la direction perpendiculaire au mouvement est plus grande que celle du champ parallèle au mouvement.***

BIBLIOGRAPHIE

(1) EINSTEIN A., *Zur Elektrodynamik Bewegter Körper (Sur l'électrodynamique des corps en mouvement)*, Annalen der Physik 17, 1905 (paru en français : Gauthier-Villars, Paris, 1965).
(2) EINSTEIN A., *Die Grundlage der Allgemeinem Relativitäts-Theorie (les Fondements de la théorie générale de la Relativité)*, Annalen der Physik 49, 1916.
EINSTEIN A., *la Théorie de la Relativité restreinte et générale*, Exposé élémentaire, Gauthier-Villars, Paris, 1964.
(3) SMITH J., *Introduction à la Relativité*, Ediscience, Paris, 1969.
(4) *Berkeley Physics Course*, volume I et volume II, Mac Graw Hill.
(5) BOHM, *The Special Theory of Relativity*, Benjamin, New York, 1965.
(6) JOY A. H. et SANFORD R. F., *Astrophysics Journal* 64-250 (1926).
(7) YVES H. E. et STILWELL G. R., *An Experimental Study of the Rate of a Moving Atomic Clock*, Journal of Optical Society of America, XXVIII 215 (1938).
(8) ROSSI B. et HALL D. B., Physical Review 59-223 (1941).
(9) FRISCH D. H. et SMITH J. H., American Journal of Physics 31-342 (1963).
(10) DINGLE J., Nature 195-985 (1962).
(11) SACHS M., Physics Today, Sept. 1971.
(12) ADAIR R. K., Physics Today, Jan. 1972.
(13) BAILEY J., BARTL W., BOCHMANN G. von, BROWN R. C. A., FARLEY F. J. M., JOSTLEIN H., PICASSON E., WILLIAMS R. W., Physical Review Letters 28 B 287 (1968).
(14) BERTOZZI W., American Journal of Physics 32-551 (1964).
(15) DEE P. I. et WATSON E. T. S., Proceedings of the Royal Society 141, 733 (1933).
(16) FAMULARO K. F. et PHILIPPS G. C., Physical Review 91, 1195 (1953).
(17) ZORN J. C., CHAMBERLAIN G. E. et HUGHES V. W., Physical Review 129, 2566 (1963).

RELATIVITÉ GÉNÉRALE

Une approche simple de la théorie de la Relativité générale, tant de sa démarche que de ses objectifs, peut tenir en cette double question : dans quel cadre général l'ensemble des phénomènes physiques, connus ou inconnus, prend-il place ; dans quelle « arène » commune ces phénomènes se déroulent-ils ? Avant d'examiner comment la théorie d'Einstein y répond, il est naturel de s'interroger sur l'intérêt de la question et, ainsi, de la situer dans le processus de développement de la physique.

La connaissance d'un phénomène physique passe nécessairement par l'analyse dudit phénomène à l'état « pur », c'est-à-dire idéalement isolé, en négligeant autant qu'il est possible ses connexions avec d'autres phénomènes. On comprend ce que cette étape de l'étude peut contenir d'arbitraire ; la description faite (la loi mise en évidence, par exemple) ne fournit qu'un reflet approché de la réalité physique, le caractère plus ou moins approché tenant à l'importance plus ou moins grande de ce qui a été négligé, *a fortiori* ignoré. Une connaissance plus approfondie exige de prendre en compte les phénomènes ou effets primitivement négligés et conduit en fait à étendre progressivement le domaine de recherche en situant le phénomène étudié dans un contexte physique de plus en plus large. Ainsi, d'une phrase qui peut, plus ou moins bien, être comprise littéralement, mais qui ne prend son sens profond que replacée dans le texte ou le livre qui la contient. Il arrive d'ailleurs que certaines phrases restent, isolées de leur contexte, totalement hermétiques. Il en est de même de certains phénomènes physiques. L'un des plus célèbres à cet égard est sans doute l'anomalie du mouvement du périhélie de la planète Mercure ; l'avance de ce périhélie, telle qu'elle était mesurée, défiait les prédictions de la mécanique newtonienne. Or, comme on sait, ce « petit point noir » dans la théorie classique (selon le mot de lord Kelvin) ne trouvera son explication correcte qu'avec la Relativité générale, parce que celle-ci apporte une réponse originale à notre question initiale, parce qu'elle replace ce phénomène, et les autres, dans leur « contexte » le plus vaste, dans le cadre global de l'espace et du temps, ou, pour reprendre la terminologie propre à une description quadridimensionnelle (voir le texte *Relativité restreinte*), dans le continuum espace-temps, tel que, précisément, la théorie va le construire.

▼ Le laboratoire de l'Institut polytechnique de Zurich, où Einstein entreprit ses premières recherches.

E. Lessing - Magnum

Certes, que la Relativité générale ait affaire avec l'espace et le temps, n'apparaît pas, en soi, comme un trait original. La physique a toujours eu à se préoccuper des concepts d'espace et de temps dès qu'elle a voulu, par observation ou expérimentation, repérer les phénomènes ou événements et mesurer certaines grandeurs afférentes. Pour tout physicien, la notion clef a été et reste la notion de *mesure ;* et là, l'intermédiaire nécessaire — entre l'observateur qui mesure et le phénomène mesuré — est la *géométrie,* par laquelle l'espace à trois dimensions (théorie classique), ou l'espace-temps (théories relativistes), est pourvu de propriétés métriques. Les concepts classiques avaient conduit à retenir comme cadre de la physique la géométrie la plus « naturelle », la plus immédiatement sensible parce que suggérée par les objets macroscopiques qui nous entourent : la géométrie euclidienne. Cette géométrie repose sur des notions fondamentales, tels le point, la droite, l'angle, le plan, le volume, derrière lesquelles il est aisé de reconnaître des formes usuelles dans la nature. (On a assez dit que cette géométrie — ou, du moins, ses notions de base — serait née de la nécessité, pour les paysans des bords du Nil, de repérer et mesurer leurs champs après chaque crue...) Puis, sur la base d'un certain nombre d'axiomes, un ensemble de propositions logiques a été déduit qui conduisit finalement à l'édifice abstrait et définitif que chacun connaît. C'est dans ce cadre immuable que la physique classique, usant d'un temps unique et absolu, s'est développée. Insistons sur le caractère immuable : la distribution de matière dans un tel espace « euclidien » peut être quelconque, peut évoluer lentement ou violemment, n'importe quel phénomène peut survenir, n'importe quel processus physique à petite ou grande échelle, même à l'échelle de l'Univers tout entier, peut se dérouler, rien du cadre initial ne change : aucune des propositions énoncées, aucun des théorèmes établis n'est modifié, aucune des propriétés métriques de l'espace « euclidien » n'est affectée.

Or c'est cette géométrie euclidienne que la Relativité générale met en accusation. En accusation de rendre impossible l'interprétation correcte, dans toutes ses conséquences, de ce fait bien connu : tous les corps, quelles que soient leurs masses, subissent dans un champ de gravitation donnée (par exemple la pesanteur terrestre) la même accélération. [*C'est par abus de terme que l'on identifie « pesanteur » et « champ gravitationnel terrestre » ; en réalité, la pesanteur est la* résultante *de la force gravitationnelle vraie, due à la masse de la Terre et dirigée vers son centre, et de la force centrifuge due à la rotation de la Terre et perpendiculaire à l'axe de rotation.*] On verra que l'exposé de la théorie de la Relativité générale est essentiellement l'exposé de la manière dont la gravitation intervient pour façonner une nouvelle géométrie (non euclidienne), c'est-à-dire pour doter le cadre « espace-temps » de propriétés métriques nouvelles, capables de refléter la répartition de la matière dans l'espace et de refléter les fluctuations de cette répartition suivant les événements ou phénomènes existants, pour finalement faire que la géométrie soit partie intégrante de la physique. Dans cette perspective, le rôle dévolu à la gravitation ne doit pas surprendre, car, au sens du « contexte » évoqué plus haut, c'est précisément le phénomène naturel le plus universel, constamment et partout présent.

Le principe de l'équivalence

Le **principe de l'équivalence** entre la gravitation et l'inertie exprime comment un système physique (un corps) donné réagit à un champ gravitationnel extérieur.

— Le point de départ est une propriété du champ gravitationnel, propriété connue depuis fort longtemps mais jamais clairement interprétée avant Einstein : les corps mis en mouvement sous l'effet d'un champ gravitationnel donné subissent tous la même accélération, laquelle ne dépend ni de la quantité de matière constituante, ni de la

forme ni de l'état physique des corps. En chute libre dans un tube où l'on a fait le vide (donc, où seul l'effet de la pesanteur va se faire sentir, sans intervention de la résistance de l'air par exemple), une bille de plomb, une goutte d'eau, une feuille de papier tombent également vite. Leur mouvement accéléré relève de la loi de Newton :

(1) $$\mathrm{F} = m_i \times \mathbf{a}$$

où m_i est la « masse inerte » de l'un quelconque des corps soumis à l'accélération **a** provoquée par l'action de la force F. Ici, c'est la gravitation qui est la cause de **a**, c'est-à-dire que :

(2) $$\mathrm{F} = m_g \times g$$

où m_g est la « masse grave » (ou pesante) du corps considéré, et g l'intensité du champ de gravitation existant dans l'environnement de l'expérience (g a les dimensions d'une accélération : longueur × (temps)$^{-2}$).

En rapprochant **(1)** de **(2)**, on trouve que

(3) $$\mathbf{a} = \frac{m_g}{m_i} g$$

Pour des corps aussi différents que les trois corps cités ci-dessus (manifestement de masses inertes différentes et de masses graves différentes), l'accélération **a** devrait être différente, sauf dans l'éventualité où $m_i = m_g$ pour tous les corps. C'est précisément cette éventualité que l'expérience a mise en évidence. *(Expériences faites par Eötvös* [*en* 1890 *et* 1922] *et par Zeeman* [*en* 1917] *: l'égalité fut vérifiée avec une précision de l'ordre de* 10^{-9}. *Récemment* [1964], *Dicke, à Princeton, a atteint la précision de* 10^{-11}.*)* C'est dire en somme qu'une même caractéristique d'un corps se manifeste, tantôt comme « inertie » (résistance à l'action d'une force F), tantôt comme « poids » quand cette force F est d'origine gravitationnelle. On voit donc se dessiner l'idée que la distinction entre les forces d'inertie (qui mettent en évidence l'aspect « inertie ») et les forces gravitationnelles n'est peut-être pas entièrement fondée. L'étude critique de cette distinction sera la seconde étape vers l'énoncé du *principe de l'équivalence*.

— Considérons les trois situations suivantes.

(A) Un observateur au sol regarde tomber une bille du haut d'un immeuble. S'il est muni d'appareils de mesure convenables, il pourra déterminer les caractéristiques du mouvement de la bille en chute libre (mouvement uniformément accéléré) et, donc, mesurer l'intensité g du champ de gravitation présent en ce lieu.

(B) L'observateur et la bille sont dans l'ascenseur de l'immeuble. L'ascenseur descend plus lentement que ne le faisait la bille dans la situation (A), dans la mesure où il n'est pas en chute libre : on l'a freiné (ou décéléré), en lui imprimant, par quelque moyen mécanique, une force d'inertie telle qu'il se trouve finalement soumis, dans son mouvement de descente, à une accélération résultante **a** plus petite que g. Alors l'observateur, s'il tenait la bille dans sa main, et s'il la lâche, sans lui donner d'impulsion, voit cette bille tomber vers le plancher de l'ascenseur selon un mouvement uniformément accéléré comme en (A) mais, ici, avec une accélération g' plus petite que g.

(C) L'ascenseur (avec, à l'intérieur, observateur et bille) rompt ses câbles et tombe en chute libre, c'est-à-dire selon un mouvement uniformément accéléré d'accélération g comme la bille dans la situation (A). L'observateur lâche à nouveau la bille : il ne la voit ni tomber, ni monter vers le plafond de la cabine ; elle reste, par rapport à lui et par rapport au repère que constituent les parois, parfaitement immobile.

Quels enseignements tirer de ces trois situations ?

(A) montre simplement l'existence d'un champ de gravitation d'intensité g telle qu'elle est mesurée par l'observateur alors lié au sol.

(B) montre que, pour l'observateur lié maintenant à l'ascenseur — lequel est en mouvement accéléré par rapport au sol — le champ de gravitation, cause de la chute de la bille, n'a plus que l'intensité $g' < g$. L'intervention de la force d'inertie a, en quelque sorte, absorbé une partie du champ gravitationnel g, ou, disons mieux, a substitué au champ gravitationnel g réel (réel parce que produit par la distribution de matière environnante qui n'est en rien modifiée) un champ gravitationnel fictif g' (fictif en ce sens qu'il n'est pas créé par une source matérielle réelle).

Archives Idées et Éditions

▲ *La gravitation est le phénomène naturel le plus universel, constamment et partout présent. Ici, une illustration du* **Petit Journal** *en 1912 : l'inventeur d'un parachute, voulant expérimenter son appareil, se jette de la première plate-forme de la Tour Eiffel et se tue.*

Enfin (C) nous montre l'ascenseur en chute libre (accélération g) ; la bille, lâchée, ne tombe plus ni ne monte : on peut considérer que c'est la situation (B) poussée à la limite où g' est devenue nulle. On ne peut donc, dans le repère « ascenseur », distinguer force d'inertie et force gravitationnelle, puisque l'une a absorbé totalement l'autre : ces forces sont équivalentes.

Si donc l'observateur prétendait, tant dans le cas (B) que dans le cas (C), suivre les évolutions de la bille, ou faire toute autre expérience concevable, pour connaître l'état de mouvement de l'ascenseur, ses efforts seraient vains, car il n'a aucune possibilité de savoir si l'ascenseur a subi une certaine décélération ou bien s'il y règne un champ gravitationnel particulier, puisque ces deux éventualités sont équivalentes, donc indiscernables.

Ce n'est pas au hasard qu'Einstein a souvent utilisé cet exemple de l'ascenseur qui, outre les commodités évidentes de présentation, donne d'emblée l'image d'un petit domaine de l'espace, très localisé. Ce point est d'une importance capitale. On aura sans doute remarqué que, dans la région où se passent nos expériences (A), (B) et (C), règne un champ de gravitation réel g, sans que l'on ait fait allusion à une variation de cette intensité g soit avec le temps, soit avec la hauteur. Implicitement, on a supposé g constante et uniforme. Donc, *a fortiori,* aucune variation de g n'est perceptible dans un petit volume d'espace égal au volume occupé par l'ascenseur. C'est pourquoi il a été possible, en faisant intervenir une accélération constante, de compenser ou d'absorber l'accélération de la pesanteur globalement dans tout le volume de l'ascenseur. Peut-on alors augmenter arbitrairement la hauteur de cet ascenseur ? Non, car, à partir d'une certaine extension, le champ gravitationnel extérieur n'aurait plus la même intensité au niveau du plafond et au niveau du plancher pour la même raison qui fait que la pesanteur n'a pas exactement la même intensité au sommet de l'Himalaya et au niveau de la mer. *(En fait, l'extension de l'ascenseur devrait être imposante, car, avec* $g = 981$ *cm/s*^{2} *au niveau de la mer, on trouve la valeur* $g = 979$ *cm/s*^{2} *à 10 000 m d'altitude.)* Partant, on n'aurait plus le moyen de compenser un tel champ gravitationnel non uniforme, simultanément en tout point du volume intérieur de l'ascenseur, c'est-à-dire pour toute position possible de la bille quelque part dans ce volume. Par conséquent, toute l'argumentation issue des situations (B) et (C) n'est

Guillumette - Rapho

▲ ***Navigateur repérant sa « route » dans le ciel; gravure extraite d'un ouvrage du XVI*^e^ *siècle (1593) [Bibliothèque nationale].***

correcte que pour un domaine d'espace assez petit pour que le champ gravitationnel puisse y être partout considéré d'intensité $g =$ constante. Il s'ensuit que l'équivalence mise en évidence entre forces d'inertie et forces gravitationnelles n'a qu'une validité *locale*, restreinte à une petite région donnée.

— Toute tentative de description d'un événement physique suppose le repérage de l'événement, c'est-à-dire suppose que l'on a pu le situer par rapport à un repère indéformable, à l'aide d'un mode quelconque « d'étiquetage », en d'autres termes, à l'aide d'un système de coordonnées.

C'est ainsi que, dans le paragraphe précédent, nous avons parlé du repère « sol », ou du repère « ascenseur » (sans avoir eu, d'ailleurs, à préciser le choix de coordonnées). En fait, on sait bien qu'un repère est usuellement idéalisé sous forme d'un ensemble d'axes, orthogonaux ou non, en nombre égal au nombre de dimensions que l'on attribue à l'espace où se produit l'événement. *(Notons que la notion « usuelle » de dimension* [*hauteur, longueur, largeur*] *a, depuis longtemps, reçu une extension par laquelle on accorde le rang de « dimension » à d'autres variables que les variables spatiales. Ainsi, en théorie cinétique, il est nécessaire de connaître, non seulement la position (x, y, z) d'une particule, mais aussi les composantes* v_x, v_y, v_z *de sa vitesse : on travaille dans un espace* [*dit « espace des phases »*] *à 6 « dimensions » : x, y, z,* v_x, v_y, v_z. *Pas plus que les théories cinétiques, la Relativité générale n'a inventé de dimension nouvelle* [*telle que la soi-disant 4*^e^ *dimension*]. *Elle a seulement, comme la Relativité restreinte, mais dans un cadre géométrique différent, traité la variable « temps » comme une quatrième coordonnée. Son espace est alors à 4 « dimensions » : x, y, z et t; d'où l'appellation de « continuum espace-temps ».)*

La Relativité restreinte a mis en évidence une classe de repères particuliers, les repères d'inertie (ou galiléens). Soit un tel repère, que nous appellerons le repère S. Par rapport à lui, des corps libres (non soumis à une force, quelle qu'elle soit) sont en mouvement rectiligne et uniforme. On peut repérer leurs mouvements dans un autre repère d'inertie S′. La Relativité restreinte a établi que, si S′ est au repos ou en translation uniforme par rapport à S, la loi du mouvement pour les corps en question a la même forme dans S et dans S′. Une question immédiate surgit : que se passe-t-il, qu'est-ce qui est modifié si S′ est accéléré par rapport à S, c'est-à-dire s'il cesse d'être d'inertie ? Admettons, pour être plus précis, que S′ a, par rapport à S, un mouvement uniformément accéléré. Alors les corps que nous considérons sont eux-mêmes accélérés relativement à S′; ils ont, par rapport à ce repère, des accélérations de même direction et de même intensité. Nous pouvons traduire ce fait en termes d'équivalence entre forces d'inertie et forces gravitationnelles de la manière suivante (en raisonnant sur l'un quelconque des corps) : l'accélération **a** qu'un corps de masse m_i ressent par rapport à S′ représente l'application d'une force d'inertie (fictive) $\mathbf{a} \times m_i$, laquelle est équivalente à une force gravitationnelle $m_g \times g'$ pourvu que g' soit telle que $\mathbf{a} \times m_i = m_g \times g'$. La valeur correspondante de g' pour ce corps sera la même pour tous les autres corps, puisque, pour chacun d'eux, $m_i = m_g$.

Donc il est possible d'introduire un champ gravitationnel (fictif) unique pour décrire le mouvement de tous ces corps par rapport à S′, en lieu et place de l'accélé-

ration uniforme commune **a** qu'on avait d'abord considérée. On vient en somme d'écrire que, d'une façon générale, S' uniformément accéléré = S' au repos dans un champ gravitationnel uniforme.

Il est alors possible de décrire le mouvement des corps libres relativement à S (où $g' = 0$) et relativement à S' (au repos avec $g' \neq 0$) par une loi de même forme. Cette loi s'écrit, vectoriellement :

$$m_i \frac{d^2\vec{x}}{dt^2} = 0 \text{ dans S, et } m_i \frac{d^2\vec{x}'}{dt'^2} = m_g\vec{g}' \text{ dans S'.}$$

En faisant les transformations de coordonnées $t' = t$ et $\vec{x}' = \vec{y} + \frac{1}{2}\vec{g}'t^2$, on arrive, compte tenu de $m_i = m_g$, à $m_i \frac{d^2\vec{y}}{dt^2} = 0$ dans S'.

C'est bien la même forme, avec un choix de coordonnées différentes, dans S, repère d'inertie, et dans S', repère non inertiel puisque accéléré. Donc, deux observateurs, l'un lié à S, l'autre à S', tomberont d'accord sur un énoncé unique de la loi en question, la loi fondamentale de la mécanique, en l'occurrence ; ils seront seulement en désaccord sur l'existence ou non d'un champ gravitationnel (ils régleront ce différend sur le terrain de la géométrie).

L'acquisition est considérable : alors que la Relativité restreinte postulait que seuls les repères d'inertie étaient équivalents pour formuler une même loi, on arrive maintenant à la conclusion que tous les repères sont équivalents, quel que soit leur état de mouvement. Ceci, d'après ce qui précède, n'est établi que pour les lois de la mécanique. L'apport décisif d'Einstein est d'avoir postulé la généralisation de ce résultat à l'ensemble des phénomènes physiques, à toutes les lois de la nature, et en particulier à l'électromagnétisme.

En résumé, l'égalité (expérimentalement vérifiée) entre la masse inerte et la masse grave rend inopérante toute tentative de distinguer, dans une petite région, entre forces d'inertie et forces gravitationnelles. Il s'ensuit que, localement, un champ de force d'inertie créé par une accélération est équivalent à un champ de gravitation, sans qu'il soit possible, par une quelconque expérience locale, de discriminer entre les deux champs.

Sur la base de l'introduction de forces gravitationnelles, on peut postuler la *généralisation* du principe de Relativité : tous les repères ou systèmes de référence sont, quel que soit leur état de mouvement, équivalents pour la formulation des lois de la nature.

Le continuum espace-temps non euclidien

Nous avons laissé les deux observateurs liés à S et S' en complet désaccord sur la question de savoir s'il existe ou non un champ gravitationnel g', qui, pourtant, a jeté un « pont » entre leurs deux repères et permis une formulation, commune quant à la forme, de la loi de Newton. Notre propos est maintenant de montrer comment ce désaccord peut se régler au prix d'une modification de la géométrie traditionnelle (euclidienne).

— Il sera tout à fait conforme à l'esprit de la théorie d'aborder son aspect géométrique par le biais d'un problème physique qui se pose dès que l'on prétend étendre les conclusions du paragraphe précédent aux phénomènes électromagnétiques. Que peut-on prédire concernant le comportement des rayons lumineux ? C'est au travers de ce problème que l'on peut rendre sensible, du moins de façon intuitive, un point de rencontre entre géométrie et physique : la notion de « plus court chemin d'un point à un autre ».

En géométrie euclidienne, c'est une droite ; en physique, le « plus court chemin » est tracé par le parcours d'un rayon lumineux qui joindrait par exemple un émetteur et un récepteur plongés dans le même milieu. Cette notion de « plus court chemin » est intimement liée à la notion de distance, laquelle relève des propriétés métriques de l'espace. Il n'y aurait pas de conflit fondamental entre géométrie euclidienne et électromagnétisme si les rayons lumineux se propageaient toujours rectilignement. Or ce n'est pas le cas. En effet, envisageons avec Einstein l'expérience idéale suivante, illustrée par la *figure* 1.

L'ascenseur est muni d'une ouverture F et comporte un certain nombre de plaques fluorescentes qui permettent de détecter le passage d'un rayon lumineux (apparition d'un spot sur la plaque touchée par le rayon). Supposons

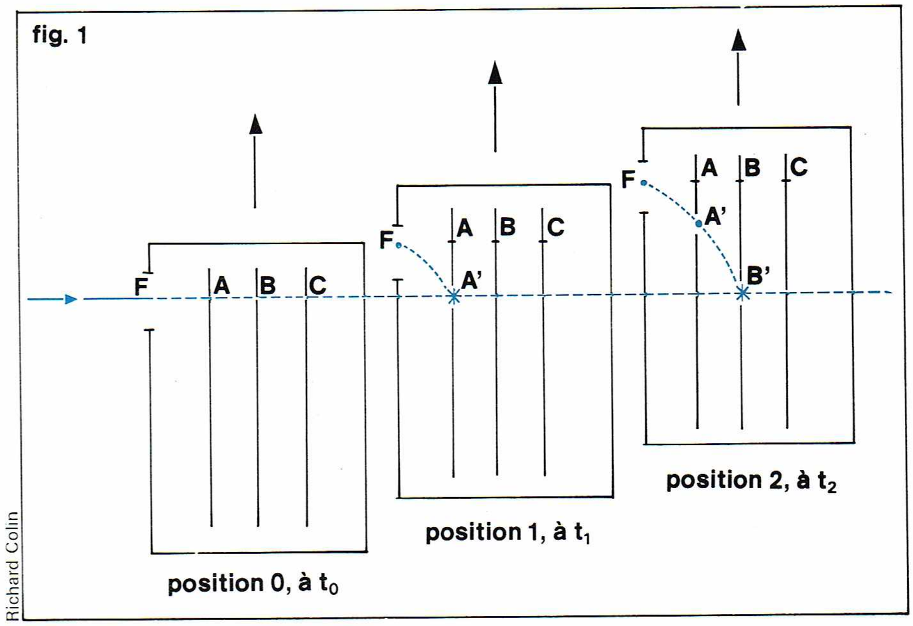

▲ ***Figure 1 : représentation schématique de l'expérience idéale de l'ascenseur, envisagée par Einstein.***

que, dans son mouvement uniformément accéléré, l'ascenseur arrive dans la position 0, à l'instant t_0 où le rayon atteint le centre de F. Si, dans cette position 0, l'ascenseur s'immobilisait instantanément, le rayon lumineux, poursuivant son chemin, frapperait les plaques successivement en A, à l'instant $t_1 > t_0$, en B à l'instant $t_2 > t_1$, etc., c'est-à-dire selon une trajectoire qui serait rectiligne, aussi bien pour un observateur extérieur que pour un observateur intérieur, dans l'ascenseur immobilisé. Mais l'ascenseur monte. Durant l'intervalle de temps $t_1 - t_0$, il passe de la position 0 à la position 1 supérieure. Donc le rayon lumineux frappe la première plaque non pas en A, mais plus bas, en A'. Dans l'intervalle de temps $t_2 - t_0$, l'ascenseur sera passé en position 2 encore plus élevée ; le rayon frappera la seconde plaque en B', et il est clair que BB' > AA'. En suivant ainsi les spots successivement allumés sur chaque plaque durant l'ascension, l'observateur intérieur peut reconstituer le trajet F-A'-B'... du rayon lumineux. Il peut raffiner cette reconstitution en augmentant le nombre de plaques. Il peut aussi, en plaçant les plaques à égale distance les unes des autres, préciser la nature de la trajectoire lumineuse : il trouvera une courbe parabolique. Il sera ainsi convaincu que le champ de gravitation (équivalent au champ d'inertie créé par l'accélération) courbe la trajectoire du rayon lumineux, et pourra prédire que, de façon générale, la lumière est déviée, par rapport à une trajectoire virtuelle rectiligne, lorsqu'elle se propage dans un champ gravitationnel. Notons que les deux observateurs intérieur et extérieur sont évidemment en désaccord, comme les observateurs liés aux repères S et S' précédemment.

— Le caractère universel de la gravitation nous conduit, sur la base de l'analyse précédente, à admettre qu'aucun rayon lumineux ne se propage réellement en ligne droite. En effet, il faudrait, pour que ce soit le cas, que tout le parcours du rayon lumineux soit infiniment éloigné de toute masse, c'est-à-dire de toute gravitation. C'est également vrai pour un corps « libre » : en fait, il sera toujours soumis à une force gravitationnelle due aux autres corps, sauf, encore une fois, dans le cas irréaliste où tous ces autres corps seraient à l'infini. Il s'ensuit que la notion de repère d'inertie est purement idéale ; un tel repère ne peut, rigoureusement parlant, exister. Et, dans le même temps, c'est la notion de ligne droite qui perd toute signification physique concrète. Il faut bien, alors, envisager une conclusion du genre « La gravitation courbe l'espace », en remarquant aussitôt que cette courbure variera au gré de l'intensité du champ gravitationnel. Pour s'en persuader, il suffit de refaire l'expérience précédente avec des accélérations différentes : les intensités équivalentes g' seront chaque fois différentes, donc les spots apparaissant sur les plaques seront différemment décalés, la trajectoire lumineuse, visualisée par ces spots, sera différemment courbée.

fig. 2

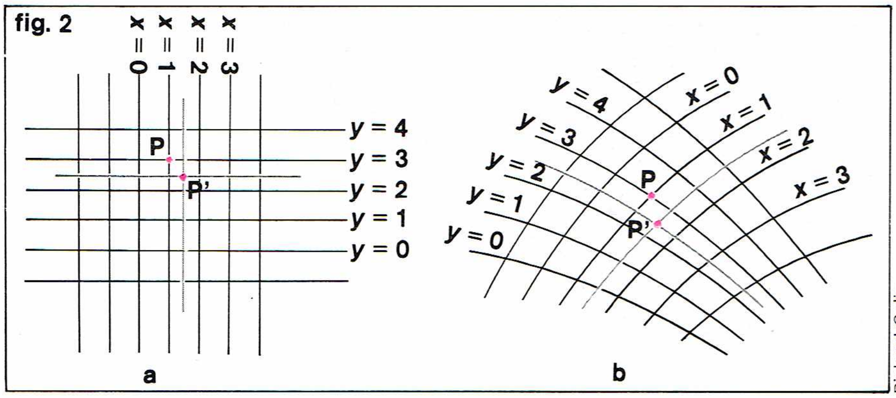

Richard Colin

▲ *Figure 2; repérage d'un point sur une surface plane : surface quadrillée par des axes rectilignes orthogonaux* (a) *ou curvilignes* (b).

Dire que l'espace est courbé par la gravitation revient à dire que la géométrie doit se plier aux exigences de celle-ci, et qu'elle doit, en particulier, adapter ses propriétés métriques aux contraintes gravitationnelles. Le premier problème est de réaliser, dans cette géométrie, ce qu'on sait faire en géométrie euclidienne concernant le repérage d'un point et le traitement analytique qu'on en donne. Nous nous bornerons au cas d'une surface (2 dimensions) et admettrons la généralisation à l'espace quadridimensionnel.

Pour repérer un point sur une surface plane, on procède au quadrillage de cette surface par des axes rectilignes, orthogonaux ou non (*fig.* 2) [orthogonaux dans le cas de la *figure* 2a]. Remarquons que les petits carreaux ou losanges ainsi formés sont tous égaux. En numérotant les axes, ou en les étiquetant d'une façon quelconque, on pourra aisément repérer un point. Ainsi le point P de la *figure* 2a est à l'intersection des axes $x = 1$ et $y = 3$: il a les coordonnées (1, 3). Supposons que la surface plane se gondole; les axes se déforment et deviennent des « axes » curvilignes. Si la surface se déforme de façon irrégulière, le quadrillage réalisé en 2a prend l'allure donnée par la *figure* 2b. Les petits carreaux se sont eux-mêmes déformés irrégulièrement et ne sont plus égaux entre eux. On aura néanmoins la possibilité de repérer le point P qui a toujours ses coordonnées (1,3).

Qu'est-ce qui est alors modifié ? Pour le voir, apportons d'abord un complément important : entre deux axes ou lignes donnés, on peut tracer une infinité d'axes ou de lignes parallèles qui correspondent à des valeurs de x ou de y non entières. Ces valeurs sont infiniment proches, de sorte qu'aucun point du plan n'échappe au quadrillage; tout point du plan a des coordonnées personnelles. Deux points P et P′ infiniment voisins pourront être distingués : l'un aura les coordonnées (x, y), l'autre les coordonnées $(x + dx, y + dy)$. L'introduction des coordonnées permet de donner une formulation analytique à l'expression de la distance **ds** entre ces deux points voisins. Dans le cas de la *figure* 2a, **ds** est donné par la relation $\mathbf{ds}^2 = dx^2 + dy^2$ (théorème de Pythagore !). Pour le cas de la *figure* 2b, le problème, plus difficile, a été résolu par Gauss : $\mathbf{ds}^2 = g_{xx}dx^2 + 2\,g_{xy}dxdy + g_{yy}dy^2$ où les coefficients g_{xx}, g_{xy}, g_{yy} sont des grandeurs qui dépendent des lignes x et y, et donc de la façon dont ces lignes ont été déformées. Comme la déformation n'est pas partout la même, ces coefficients varient selon la position de P. Non déformée, la *figure* 2a représente un cas particulier de la *figure* 2b : celui où $g_{xx} = g_{yy} = 1$ et $g_{xy} = 0$. Dans le cas 2a, x et y sont les coordonnées cartésiennes; dans le cas 2b, on les appellera « coordonnées de Gauss ». Le $\mathbf{ds}^2$ sera dit euclidien dans le cas 2a, non euclidien dans le cas 2b.

Ce traitement analytique peut s'étendre à un nombre quelconque de dimensions, c'est-à-dire à une hypersurface. Si on baptise les axes ou lignes $x_1, x_2, ..., x_n$, un point P aura les coordonnées $(x_1, x_2, ..., x_n)$; un point P′ voisin de P aura les coordonnées

$$x_1 + dx_1, x_2 + dx_2, ..., x_n + dx_n$$

Et on aura une expression de leur distance **ds** par une relation du type vu en 2a et 2b. Par exemple, pour une hypersurface à 4 dimensions, il sera toujours possible d'avoir **ds** sous la forme $\mathbf{ds}^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2$, dans le cas correspondant à 2a.

L'analogue de 2b donne, en écrivant g_{11} pour g_{x1x1}, g_{12} pour g_{x1x2}, etc.,

$$\mathbf{ds}^2 = g_{11}\,dx_1^2 + 2\,g_{12}\,dx_1\,dx_2 + 2\,g_{13}\,dx_1dx_3 + 2\,g_{14}dx_1dx_4 + g_{22}dx_2^2 + 2\,g_{23}dx_2dx_3 + 2\,g_{24}dx_2dx_4 + g_{33}dx_3^2 + 2\,g_{34}dx_3dx_4 + g_{44}dx_4^2 = \sum_{i,j} g_{ij}dx_idx_j$$

Les coefficients g_{ij} (où i et j prennent les valeurs 1, 2, 3, 4) sont symétriques, c'est-à-dire que $g_{12} = g_{21}$, $g_{34} = g_{43}$, par exemple. Donc, on en a fait dix coefficients distincts, variables, répétons-le, avec P : ce sont, dans le cas le plus général, des fonctions de coordonnées x_1, x_2, x_3, x_4. Si l'on raisonnait à partir du point P′, on aurait $\mathbf{ds}'^2$ avec les valeurs des coefficients g'_{ij} au point P′. Il est évident que l'on veut une définition univoque de la distance PP′, donc on veut $\mathbf{ds}^2 = \mathbf{ds}'^2$; il s'ensuit que les g_{ij} doivent pouvoir être considérés comme constants (c'est-à-dire g_{ij} et g'_{ij} de valeurs infiniment proches) sur tout le voisinage du point P, voisinage de dimensions caractéristiques dx_i : la petite région (ou voisinage) autour de P est presque euclidienne (pas de déformations) comme dans le cas de la *figure* 2a, c'est-à-dire que, dans cette petite région, on a de façon *approchée* $\mathbf{ds}^2_{\text{non euclidien}} = \mathbf{ds}^2_{\text{euclidien}}$. (Cette relation peut surprendre si l'on compare les expressions respectives de ces $\mathbf{ds}^2$. Précisons que les coefficients, dans le $\mathbf{ds}^2_{\text{euclidien}}$, sont constants mais pas nécessairement égaux à 1 ou 0 ; on peut, cependant, toujours, se ramener à ces valeurs pour un changement de coordonnées adéquat.)

Donc, les coordonnées de Gauss généralisent les coordonnées cartésiennes, en ce sens qu'elles s'appliquent à des espaces non euclidiens. Mais si l'on veut une relation métrique univoque (« distance ») entre des points voisins, on a constaté qu'elles ne sont utilisables que pour de petits domaines de l'espace non euclidien, qui se comportent approximativement de façon euclidienne. Cette restriction permet de munir le continuum non euclidien de propriétés métriques cohérentes, localement. Alors, il resterait à étudier les propriétés affines d'un tel espace non euclidien, c'est-à-dire les propriétés qui permettent de raccorder une petite région de cet espace à une autre petite région voisine, et ainsi, de proche en proche, d'étendre le domaine relevant des mêmes propriétés métriques. Diverses considérations ont conduit Einstein, pour traiter ce problème de raccordement, à retenir la possibilité la plus simple, celle offerte par la géométrie de Riemann. On doit malheureusement abandonner là l'aspect géométrique de la théorie, car le formalisme utilisé nous obligerait à des développements trop techniques.

— Puisque l'on sait faire de la géométrie non euclidienne, puisque l'on sait, avec son aide, décrire les propriétés d'un espace courbe, le cadre est prêt pour accueillir la gravitation.

Le continuum espace-temps se traite avec un espace à 4 dimensions (3 variables d'espace, 1 variable temporelle). Un choix correct des coordonnées ($x_1 = x$, $x_2 = y$, $x_3 = z$, $x_4 =$ Cte) permet en Relativité restreinte de mettre le $\mathbf{ds}^2_{\text{euclidien}}$ sous la forme

$$\mathbf{ds}^2 = c^2dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$$

où c désigne la vitesse de la lumière dans le vide.

Le passage en Relativité générale se fait, avec le même choix de coordonnées, en partant du $\mathbf{ds}^2_{\text{non euclidien}}$. Si, dans l'expression condensée de ce $\mathbf{ds}^2_{\text{non euclidien}}$, nous mettons à part le terme en x_4, on pourra l'écrire :

$$\mathbf{ds}^2 = g_{44}c^2dt^2 - \sum_{i,j} g_{ij}dx_idx_j$$

(où i et j prennent les valeurs 1, 2, 3).

C'est la gravitation qui courbe l'espace, qui le déforme. Donc, les coefficients g_{44} et g_{ij}, définis comme exprimant la présence des déformations, traduisent ici tout naturellement les déformations dues à la gravitation, c'est-à-dire sont liés à l'intensité du champ gravitationnel. C'est par eux que géométrie et physique se rejoignent : à la fois, ils permettent de définir la métrique, et ils révèlent les déformations dues à la gravitation.

Alors, pour conclure, les observateurs que nous avions laissés en désaccord n'ont plus, pour régler leurs conflits, qu'à adopter le point de vue de la Relativité générale. Ils sont tous plongés dans un continuum non euclidien, ils utilisent le $\mathbf{ds}^2$ écrit ci-dessus, ils ne diffèrent plus que pour les valeurs des g_{ij}, ce qui est parfaitement normal : ils ne sont pas soumis au même champ de gravitation.

Vérifications expérimentales et prédictions

On a vu l'importance décisive des coefficients g_{ij} qui transportent toute l'information concernant la gravitation dans le domaine géométrique. En imposant des conditions sur ces coefficients, et sur certaines grandeurs qui en dérivent, Einstein a pu établir les équations du champ gravitationnel dans le continuum espace-temps riemannien, équations se substituant à l'expression classique fournie par la loi de Poisson $\Delta U = 4\pi G\rho$ (U, potentiel gravitationnel ; G, constante universelle de la gravitation ; ρ, densité de matière). La connaissance des équations du champ de gravitation permet de déduire les lois du mouvement d'un corps, en particulier la loi du mouvement « libre ». Ainsi énoncé, le problème se complique du fait que le corps en mouvement est lui-même source de gravitation. C'est pourquoi, afin d'atteindre plus aisément l'aspect fondamental de cette loi, on introduit la notion de « corps d'épreuve » : c'est un corps si petit (une particule) que le champ gravitationnel qu'il crée est totalement négligeable par rapport au champ gravitationnel créé par l'ensemble des autres masses environnantes, et dans lequel il évolue. Alors, que signifie « La particule d'épreuve est libre » ? En mécanique newtonienne, cela se traduisait par : la particule n'est soumise à aucune force (gravitationnelle ou non gravitationnelle), elle est en mouvement rectiligne uniforme, sa trajectoire est une droite. Or, l'absence de force gravitationnelle (on l'a vu à propos du rayon lumineux) représente une situation totalement irréaliste (toutes les autres masses à l'infini). On ne peut retrouver la notion de particule libre qu'en Relativité générale, car les forces gravitationnelles, toujours et partout présentes, n'y ont pas d'existence explicite : elles sont traduites en termes de courbure de l'espace. Si donc une particule n'est soumise à aucune force d'origine quelconque, autre que gravitationnelle, au regard de la Relativité générale, elle sera libre, son mouvement décrira une trajectoire tout à fait spécifique : une « géodésique », c'est-à-dire une trajectoire (plus ou moins courbée selon l'intensité du champ de gravitation ambiant) qui généralise le concept de « droite » de la géométrie euclidienne. Nous avons déjà rencontré le concept de « géodésique » pour la trajectoire du rayon lumineux, c'est-à-dire pour la trajectoire d'une particule d'épreuve qui serait un photon. Cette dernière « géodésique » apparaît comme un cas limite de la précédente : celui où la masse de la particule tend vers 0.

Après avoir ainsi esquissé la mise en œuvre des principes énoncés aux paragraphes précédents, il est opportun d'examiner les vérifications expérimentales de la théorie. On peut à ce propos s'interroger sur le caractère crucial de telle ou telle expérience en faveur d'une théorie proposée. Après un grand nombre d'expériences ou de vérifications positives, la physique classique a néanmoins dû céder la place aux théories quantiques d'une part et aux théories relativistes d'autre part. Non que les résultats acquis soient devenus caducs, mais elle ne pouvait aller plus loin, et butait par exemple sur l'effet photo-électrique, ou sur « le point noir » évoqué dans l'introduction. Dans cette voie, la Relativité générale est donc aussi bien fondée que la théorie classique : elle contient celle-ci comme cas particulier ou comme approximation et apporte de nouveaux enseignements. Le nombre d'effets nouveaux mesurables sur lesquels elle se justifie est certes assez réduit, mais leur variété et leur précision sont impressionnantes. Et surtout, il faut souligner qu'elle explique *simultanément* et de façon cohérente, sans hypothèses *ad hoc* surajoutées, des faits jusqu'alors sans interprétation, que l'on va brièvement examiner.

— La mécanique newtonienne a permis d'établir le caractère elliptique des orbites décrites par les planètes du système solaire, le Soleil occupant l'un des foyers de chaque ellipse. Elle a également permis de rendre compte des déformations de ces orbites, sous l'influence de forces perturbatrices diverses. Parmi ces dernières, les forces perturbatrices séculaires, essentiellement dues à la présence des planètes autres que celle considérée, ne dépendent que des positions relatives des différentes orbites, agissent toujours dans le même sens et sont quasi proportionnelles au temps. Elles ont donc un effet cumulatif qui peut être observé et mesuré avec précision sur un laps de temps suffisamment long, couramment un siècle. Elles affectent particulièrement le périhélie (point d'une orbite le plus proche du Soleil) dont elles font varier la longitude : à chaque révolution de la planète, le périhélie a tourné légèrement et se trouve en avance sur la position qu'il occupait à la révolution précédente. Appliquant la théorie des perturbations aux éléments de l'orbite elliptique, la mécanique newtonienne permet de prédire la valeur numérique de cette avance du périhélie des planètes. Par exemple, elle prédit une avance de 5 557,62 secondes d'arc par siècle, pour Mercure. Or les observations, dont les premières (suffisamment précises) remontent à 1765, montrent une avance réelle de 5 600,73 secondes d'arc par siècle. D'où un désaccord de 43,11 secondes d'arc : c'est très exactement la teneur du « petit point noir » évoqué dans l'introduction. La Relativité générale s'est attaquée à ce problème. Comme il n'était pas réaliste de reprendre le calcul newtonien de l'avance (les forces perturbatrices sont assez faibles pour que l'approximation newtonienne soit correcte), le traitement relativiste a porté directement sur la trajectoire de Mercure. Assez curieusement (mais le résultat sera concluant), on conserve les 5 557,62 secondes d'arc déjà trouvées, mais on considère qu'elles portent non sur une trajectoire elliptique mais sur une trajectoire modifiée par la Relativité générale. Celle-ci considère la planète comme une particule d'épreuve et écrit l'équation de sa trajectoire « géodésique ». L'équation ainsi obtenue comporte un terme supplémentaire, par rapport à l'équation primitive new-

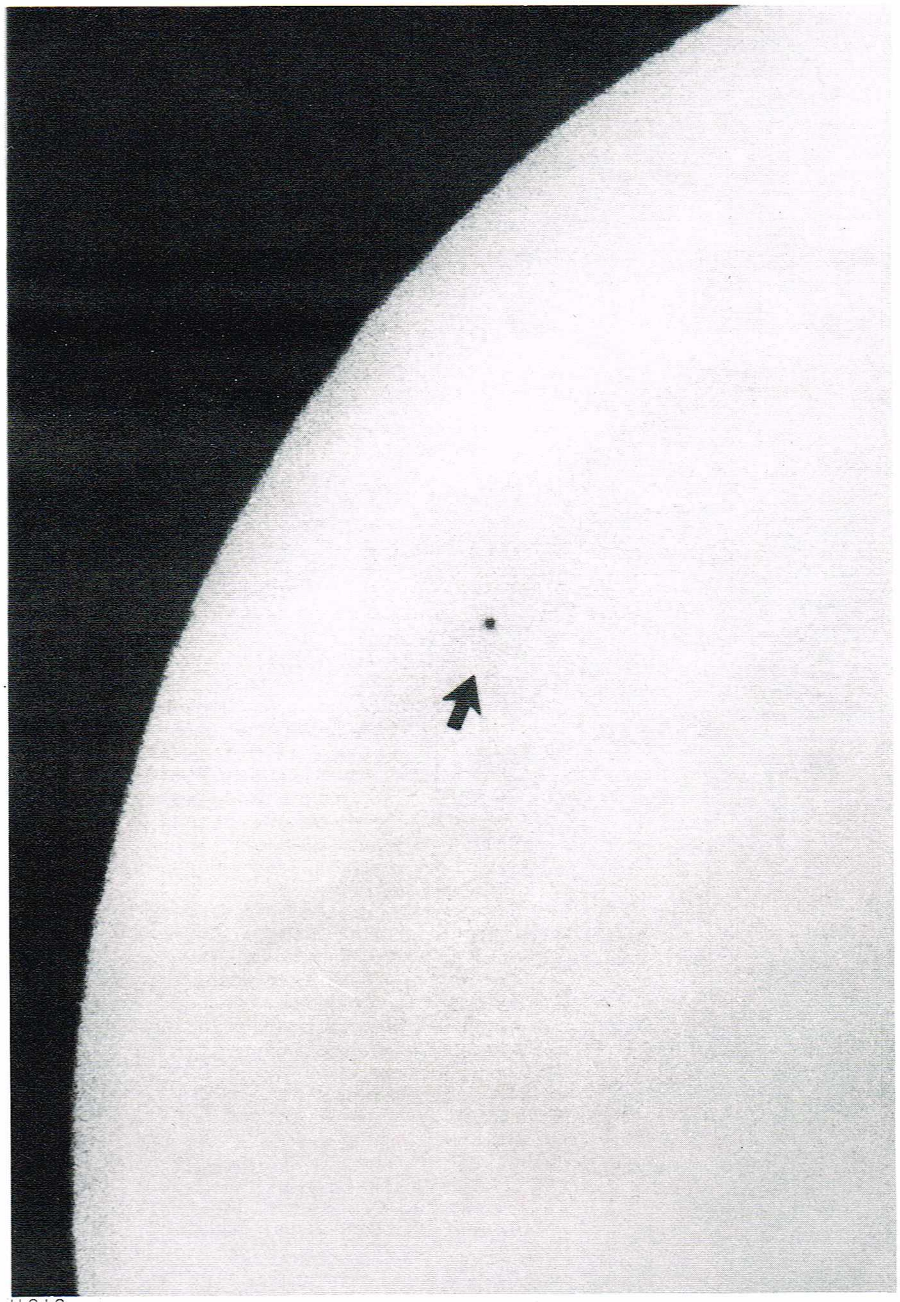

U.S.I.S.

▲ ***Le* périhélie *de la planète* Mercure *(photographiée ici devant le disque solaire) tourne de 5 600″ par siècle, dont 5 557 sont expliquées par la théorie de Newton. La différence, 43″ par siècle, a pu être expliquée par la théorie de la Relativité générale.***

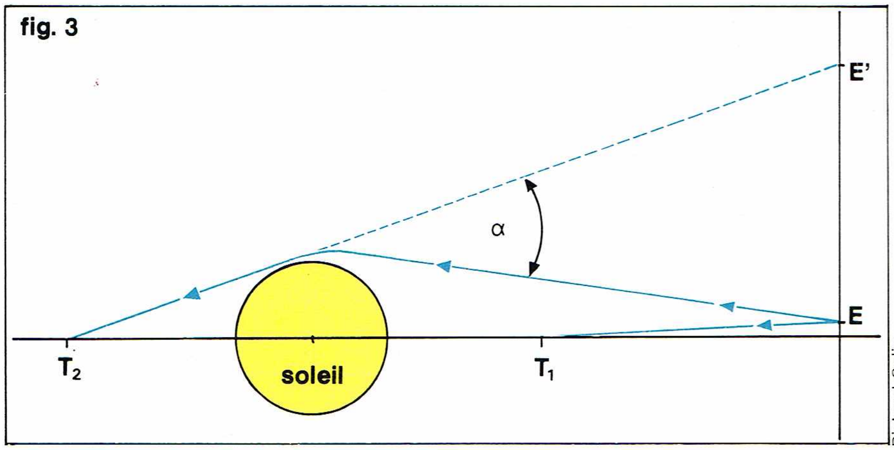

Richard Colin

▲ *Figure 3 : phénomène de déviation de la lumière d'une étoile située derrière le Soleil, et mesure de l'angle de déviation α.*

tonienne, qui représente une contribution supplémentaire à l'avance du périhélie de 43,03″. Cette correction apportée par la Relativité générale est donc remarquablement proche du résidu de 43,11″ observé.

Mercure est le cas le plus favorable parce que sa trajectoire (quasi) elliptique a une forte excentricité. Naturellement, toutes les planètes relèvent du même type de correction. Par exemple, pour Vénus, le résidu observé est de 8,4″ et la correction de la Relativité générale est de 8,6″ ; pour la Terre, le résidu = 5,0″, la correction = 3,8″. Dans ces deux derniers cas (malgré les apparences en ce qui concerne Vénus), les résultats obtenus sont moins convaincants parce que la précision sur les résidus observés est, jusqu'alors, assez médiocre. Pour Mars, la correction prédite est 1,35″, mais le résidu réel n'est pas connu. Enfin la vérification de cet effet pourrait être également tentée sur les trajectoires de satellites terrestres, la difficulté pratique d'observation venant de ce que ces trajectoires sont fortement perturbées.

— Une seconde vérification se rapporte à notre expérience idéale du rayon lumineux frappant des plaques fluorescentes placées dans un ascenseur. Si la conclusion est énoncée correctement, ce phénomène de déviation (ou déflexion) de la trajectoire lumineuse doit être général, et donc être observable si le champ gravitationnel est assez fort. Le champ gravitationnel créé par le Soleil est, dans son voisinage, assez intense pour que l'on puisse espérer une mesure de la déviation de la lumière issue d'une étoile située (loin) derrière le Soleil (*fig.* 3). Le paramètre rendant compte de la déviation est l'angle α. La prédiction de la Relativité générale est une déviation $\alpha = 1{,}75$ seconde d'arc pour un rayon lumineux passant en incidence rasante sur le bord du Soleil. La vérification observationnelle repose sur la comparaison de deux plaques photographiques, prises à quelques mois d'intervalle, comportant la même étoile E.

La première photographie est prise lorsque l'observateur terrestre est en T_1 : le champ de gravitation du Soleil n'a pas d'influence sur le trajet du rayon lumineux ET_1. On a donc la position vraie de l'étoile E. La seconde photographie est prise lorsque l'observateur est en T_2. En quelques mois, l'étoile visée n'a naturellement pas changé de position vraie. Or l'observateur la voit dans la position (apparente) E′, c'est-à-dire qu'il voit l'étoile qui est en fait derrière le Soleil. Il lui est aisé de déduire de la comparaison des deux positions la valeur de l'angle α. Diverses mesures de ce type ont été faites (la première en 1919), à l'occasion d'éclipses solaires, conditions évidentes pour que l'image de l'étoile soit visible sur la plaque prise en T_2, et on a été finalement conduit, vers 1952, à adopter la valeur :

$$\alpha \text{ observé} = 1{,}79 \pm 0{,}66 \text{ seconde d'arc}$$

Précisons que ces observations ont été faites sur des groupes d'étoiles (les Hyades par exemple), la comparaison des configurations, vraie et apparente, de ces groupes permettant d'atteindre une plus grande précision pour α, dans la mesure où il est plus sûr de mesurer les déformations de deux figures ou plutôt de comparer deux positions d'un même objet.

▶ *Page ci-contre, la grande nébuleuse d'Andromède, l'une de nos plus proches voisines : c'est une galaxie spirale très semblable à notre Galaxie.*

Plus récemment (1970-1971), des mesures de déflexion des ondes radio ont été faites à partir du quasar 3C279 qui, chaque mois d'octobre, se trouve occulté par le Soleil, et dont les émissions sont accessibles aux radiotélescopes. Ces mesures semblent, là encore, confirmer la valeur prédite $\alpha = 1{,}75$ seconde d'arc.

— Un bref retour en arrière est nécessaire avant d'évoquer la troisième vérification expérimentale de la théorie. On a vu comment il est possible de définir la distance **ds** entre deux points ou événements voisins P et P′. Ces deux événements peuvent très bien avoir une ou deux coordonnées identiques, par exemple avoir le même x_1 et le même x_2. Alors les termes en dx_1 et dx_2 seront absents dans l'expression $\mathbf{ds}^2$. On peut même envisager que P et P′ soient deux événements qui ont lieu au même endroit, à des instants légèrement différents. Alors leur « distance », dans le continuum espace-temps, est fournie par l'expression

$$\mathbf{ds}^2 = g_{00}dx_0^2 = g_{00}c^2dt^2$$

dans le système de référence choisi. On peut choisir le système lié à P, où une horloge marque le temps t : les deux événements sont tout simplement deux indications de l'horloge, t et $t + dt$, séparés par la racine carrée de

$$\mathbf{ds}^2 = g_{00}\,(\mathrm{P})\; c^2dt^2$$

Si l'on choisit un système de référence lié à un observateur éloigné Q, celui-ci trouvera

$$\mathbf{ds}^2 = g_{00}\,(\mathrm{Q})\; c^2d\mathrm{T}^2$$

son horloge marquant le temps T, pour exprimer la « distance » qui sépare P et P′. Rappelons que les coefficients g_{ij} dépendent du champ gravitationnel ambiant. Donc, pour P et Q éloignés, on aura en général :

$$g_{00}\,(\mathrm{P}) \neq g_{00}\,(\mathrm{Q})$$

On aura donc, en comparant les deux expressions de $\mathbf{ds}^2$, la relation

$$\left(\frac{g_{00}\,(\mathrm{Q})}{g_{00}\,(\mathrm{P})}\right)^{\frac{1}{2}} = \frac{d\mathrm{T}}{dt}$$

Il s'ensuit que, si $g_{00}\,(\mathrm{Q}) > g_{00}\,(\mathrm{P})$, on aura $d\mathrm{T} > dt$: l'horloge de l'observateur Q, qui est dans un champ gravitationnel plus intense, marche moins vite que l'horloge liée à l'observateur P.

Une horloge est un mécanisme caractérisé par des oscillations périodiques. Un atome est un oscillateur tout indiqué : le nombre d'oscillations par unité de temps est sa fréquence caractéristique ν_0. L'atome vibrant à cette fréquence émet un rayonnement de longueur d'onde $\frac{c}{\nu_0}$. Plaçons cet atome-horloge en P. Si le rayonnement est reçu par l'observateur placé en Q, quelle fréquence ν celui-ci va-t-il percevoir ? Si deux oscillations successives (qui vont jouer le rôle des deux événements P et P′) sont séparées par l'intervalle de temps dt, elles seront perçues en Q comme étant séparées par l'intervalle de temps $d\mathrm{T}$. Ainsi dt est la période des oscillations émises par l'atome, et $d\mathrm{T}$ la période de ces oscillations telle que Q les perçoit. Or $dt = \frac{1}{\nu_0}$ et $d\mathrm{T} = \frac{1}{\nu}$. Il s'ensuit que

$$\left(\frac{g_{00}\,(\mathrm{Q})}{g_{00}\,(\mathrm{P})}\right)^{\frac{1}{2}} = \frac{\nu_0}{\nu}, \qquad \text{d'où } \nu_0 > \nu$$

pour Q, l'atome semblera vibrer selon une fréquence plus basse ; s'agissant d'un phénomène lumineux, on dira que sa fréquence est « décalée vers le rouge ».

Si l'atome est placé à la surface du Soleil, et si Q est un observateur terrestre, les calculs prédisent

$$\frac{\nu - \nu_0}{\nu_0} = -\,2{,}10\;10^{-6}$$

Malgré sa faiblesse, ce rapport est mesurable. Les observations sont en bon accord avec cette valeur calculée, mais seulement si l'on observe le bord du Soleil. Si l'on observe le centre du disque solaire, il y a un désaccord net, mais là des effets liés aux mouvements des gaz de l'atmosphère solaire doivent vraisemblablement intervenir.

La nature même des phénomènes physiques en jeu dans les vérifications expérimentales que l'on vient d'examiner montre que les effets de la Relativité générale ne sont mesurables que lorsque le champ gravitationnel est intense. Dans les trois cas, nous étions à l'échelle du système solaire. Il se peut que les diverses tentatives en direction d'une quantification du champ de gravitation, dans le

U.S.I.S.

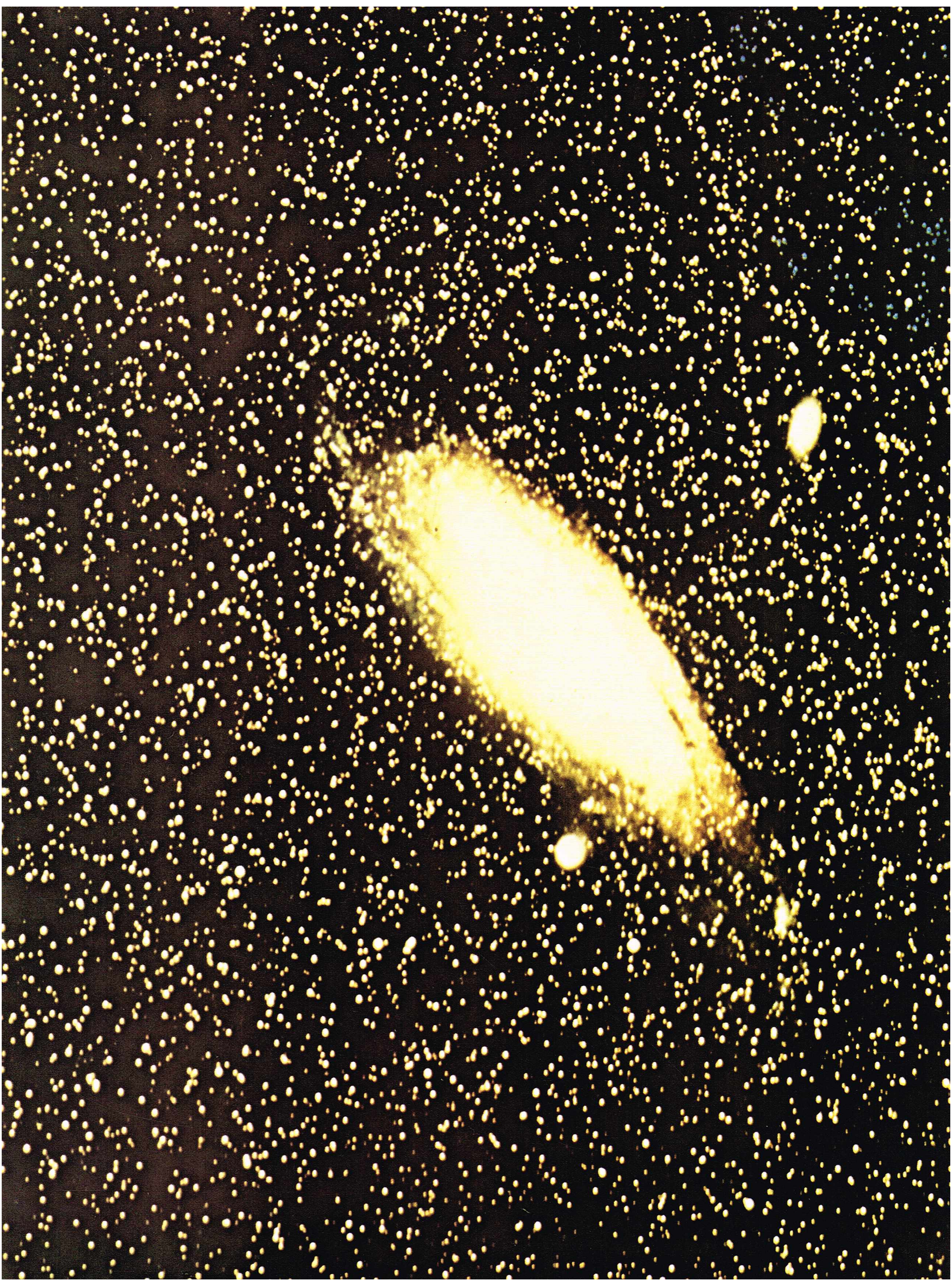

▶ Photographie du Soleil prise aux rayons X au cours de la mission **Skylab.**

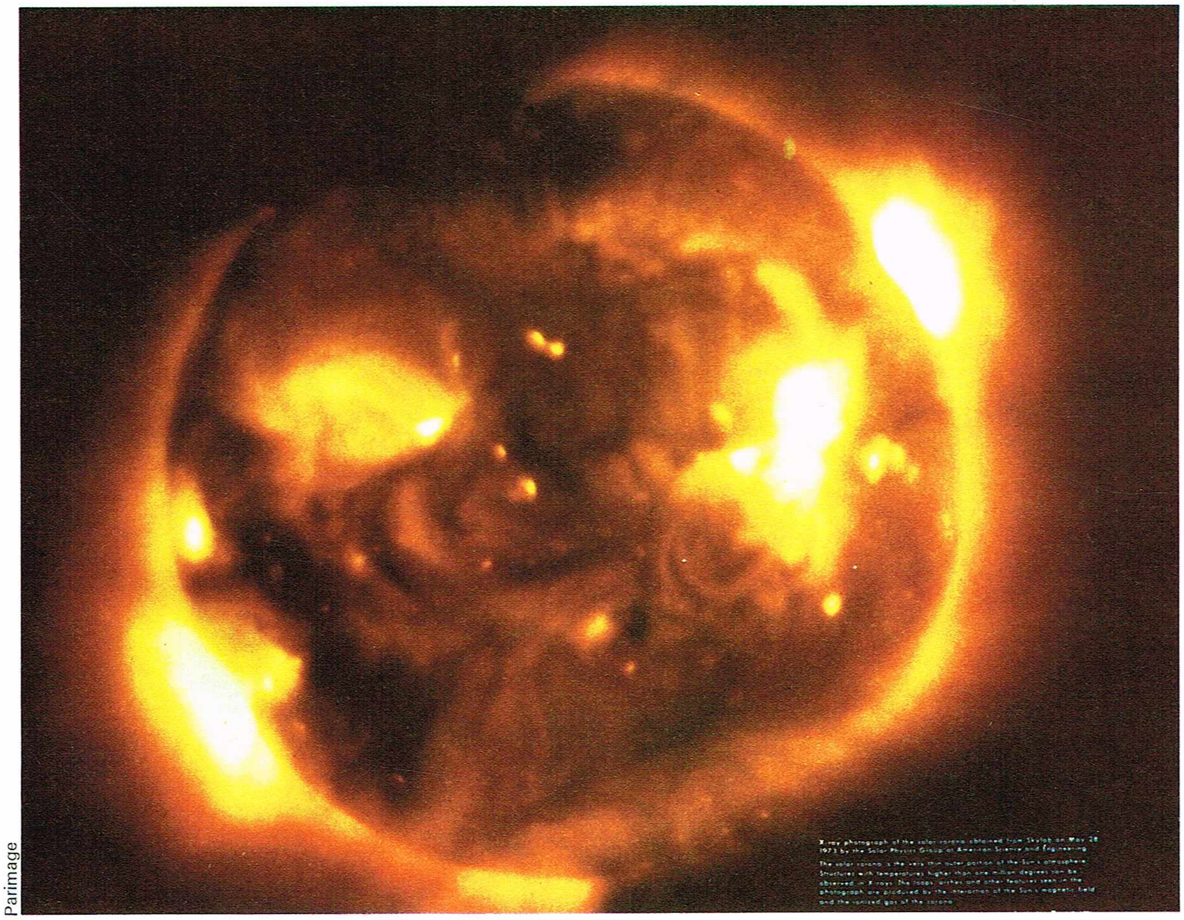

Parimage

cadre de la Relativité générale, apportent des éléments originaux. Mais, dans l'état actuel de nos connaissances, il semble bien que le meilleur terrain d'applications et de recherches de la théorie d'Einstein soit le terrain de l'astronomie, de l'astrophysique et de la cosmologie. Par exemple, les développements modernes de la cosmologie sont sans conteste fondés sur des modèles d'Univers relativistes (modèles de Friedmann, par exemple). C'est également dans le domaine de l'astrophysique (avec toutes les implications possibles pour la cosmologie) que la Relativité générale prédit deux phénomènes d'une importance considérable.

La première prédiction est celle de l'existence d'un rayonnement gravitationnel — qui serait l'homologue du rayonnement électromagnétique de la théorie de Maxwell. Totalement exclues par la théorie newtonienne, des solutions radiatives (correspondant à un transport d'énergie gravitationnelle) sont permises par les équations du champ de la Relativité générale. L'origine hypothétique de ces ondes gravitationnelles, qui se propageraient à la vitesse de la lumière, serait à rechercher dans la formation d'objets célestes très condensés résultant, par exemple, de l'effondrement gravitationnel d'un objet « normal ». Jusqu'à présent, malgré de nombreuses tentatives, dont celles aux États-Unis de Weber (le pionnier en la matière), aucune détection réelle de ces ondes ne paraît avoir été faite. On est là aux limites des possibilités expérimentales, et il faudra sans doute attendre plusieurs années pour que la sensibilité des détecteurs atteigne un seuil suffisant (il faudrait augmenter de 5 à 6 ordres de grandeur la sensibilité des détecteurs actuellement en service).

Nous venons de parler d'« effondrement gravitationnel ». A cette notion est liée une autre prédiction de la Relativité générale. Un objet (étoile, galaxie) existe si la matière qui le constitue, sous quelque forme que ce soit, est dans un certain état d'équilibre sous les effets contradictoires des forces gravitationnelles (attractives) et des forces de pression interne, qui résistent à l'écrasement. Si les secondes l'emportent, l'objet explose. Si c'est l'inverse, tous les constituants de l'objet sont attirés vers le centre : la victoire des forces gravitationnelles, c'est l'effondrement de l'objet qui se contracte brutalement et atteint des densités stupéfiantes. Un exemple d'objets très condensés est fourni par les étoiles à neutrons, dont l'existence supposée a été confirmée par la découverte des pulsars. Ces étoiles représenteraient, selon la Relativité générale, un stade de la contraction gravitationnelle d'un objet, mais non le dernier. Le stade ultime est le « trou noir » : l'objet est alors si condensé, son champ gravitationnel est si intense que les rayons lumineux eux-mêmes sont « piégés » ; un rayon émis à la surface d'un tel corps voit sa trajectoire tellement courbée qu'elle revient sur la surface émissive. De sorte qu'aucun rayon lumineux issu de cette surface ne peut atteindre un observateur extérieur : l'objet reste invisible : il est « noir ». Deux situations observées sont favorables à cette hypothèse des « trous noirs » :

— Certaines perturbations du mouvement des étoiles binaires s'expliqueraient bien par la présence d'une masse plus ou moins importante dans leur voisinage.

— L'origine des nombreuses sources de rayons X, détectées depuis peu à l'aide de satellites, pourrait être dans un phénomène d'accrétion de la matière présente dans l'environnement d'un objet assez massif pour que l'accélération des particules chargées, attirées par le champ gravitationnel de cet objet, soit compatible avec une émission X.

On voit ainsi à quel point la théorie de la Relativité générale est susceptible, après cinquante années d'existence, de susciter des recherches nouvelles, ce qui est un sort assez rare pour une théorie physique.

BIBLIOGRAPHIE

EINSTEIN A., *The Meaning of Relativity*, Princeton University Press, 1955 ; *la Relativité*, Petite Bibliothèque Payot, 1964. - BERGMAN, *Introduction to the Theroy of Relativity*, Prentice-Hall Inc., 1966. - LANDAU et LIFSHITZ, *Théorie des champs*, éditions Mir, Moscou, 1970. - MAVRIDES S., *l'Univers relativiste*, Masson, 1973. - PAPAPETROU A., *Lectures on General Relativity*, D. Reidel Publ. Company, 1975. - TONNELAT M. A., *les Principes de la théorie électromagnétique et de la Relativité*, Masson, 1959.

MÉCANIQUE QUANTIQUE

La théorie physique de la fin du XIX^e siècle apparaît pour les chercheurs de cette époque comme un outil devant leur permettre d'interpréter tout résultat expérimental. Cette théorie est composée essentiellement de deux corps de doctrines : la mécanique et l'électromagnétisme. La mécanique, qui repose sur les travaux de Newton, complétés par ceux de Lagrange et de Hamilton, avait rencontré d'énormes succès dans l'étude du mouvement des corps solides (balistique) et des planètes. L'électromagnétisme, fondé sur les travaux de Maxwell, englobait l'optique comme cas particulier d'ondes électromagnétiques. La grande ambition des théoriciens de cette époque n'était que d'unir ces deux corps de doctrines.

Un ensemble de résultats expérimentaux, obtenus vers la fin du XIX^e siècle et le début du XX^e, allait bouleverser ces conceptions. A la suite de ces résultats, les physiciens comprirent que la théorie physique de la fin du XIX^e siècle que nous appelons aujourd'hui théorie classique, était incomplète et qu'elle n'était qu'une approximation d'une théorie plus vaste. Ainsi apparut-il que la mécanique de Newton n'est plus valable lorsque le système matériel qu'on étudie (une particule ou un ensemble de particules) a une très grande vitesse ou bien une très faible masse ; elle doit être alors remplacée dans le premier cas par la mécanique relativiste et dans le second par la mécanique quantique. Il est clair que, si le système matériel a une très petite masse et une très grande vitesse, il faut l'étudier en utilisant la mécanique quantique relativiste.

La mécanique quantique peut être exposée de différentes manières ; la mécanique ondulatoire en est une. Dans le formalisme ondulatoire, à chaque système matériel (une ou plusieurs particules matérielles) est associée une onde à partir de laquelle on obtient tous les renseignements mécaniques (positions, impulsions, etc.) concernant le système. C'est L. de Broglie qui, le premier, en 1923, a proposé de décrire le comportement mécanique d'une particule matérielle au moyen d'une onde. Mais c'est Schrödinger qui a postulé en 1926 l'équation qui régit l'évolution de cette onde au cours du temps.

Domaine de la validité de la mécanique quantique

La physique quantique repose sur des concepts nouveaux, et jusqu'à présent aucun fait expérimental n'en a contesté la validité. Il n'est, cependant, pas toujours indispensable d'utiliser le formalisme quantique, la physique classique constituant souvent une approximation suffisante.

Lorsque l'on étudie le mouvement d'une particule, on sait qu'il faut utiliser la mécanique relativiste si la vitesse v de la particule est voisine de c, vitesse de propagation dans le vide des ondes électromagnétiques

$$(c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s})$$

De manière plus explicite, dès que le rapport v/c peut être considéré comme négligeable, il est légitime d'utiliser la mécanique de Newton. Le rôle joué par la constante universelle c en mécanique relativiste est, en mécanique quantique, joué par une constante universelle nouvelle h, appelée la *constante de Planck*. Elle permet de décider s'il faut appliquer la mécanique quantique ou la mécanique de Newton. h a les dimensions d'une action, c'est-à-dire d'une énergie multipliée par un temps. On a donc :

$$\text{dimension de } h = \text{énergie} \times \text{temps} = \text{masse} \times (\text{longueur})^2 \times (\text{temps})^{-1}$$

h vaut $6{,}6 \cdot 10^{-34}$ J · s. Si la masse μ, la longueur l et le temps t, caractéristiques du système étudié (une ou plusieurs particules), sont tels que le produit $\mu l^2 t^{-1}$ est beaucoup plus grand que h, on peut se contenter d'utiliser la mécanique de Newton. Prenons deux exemples simples :

— *Exemple* 1 : une masse de 1 g suspendue à un ressort oscille avec une période de 1 s et une amplitude de 1 cm. Dans ce cas, le produit $\mu l^2 t^{-1}$ est égal à 10^{-7} J · s qui est beaucoup plus grand que h. Aussi suffit-il d'utiliser la mécanique de Newton.

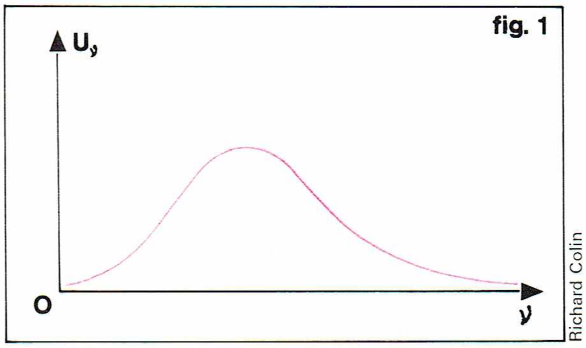

◄ ***Figure 1 :*** ***courbe représentant la variation de*** **U**$_\nu$ ***avec*** ν***.***

— *Exemple* 2 : admettons que le modèle planétaire donne une bonne représentation de ce qui se passe dans les atomes. Dans le cas de l'atome d'hydrogène (1 proton et 1 électron), l'électron, dont la masse est égale à 10^{-30} kg, décrit, sous l'action du champ électrique créé par le noyau, une orbite circulaire dont le diamètre est de l'ordre de 1 Å (soit 10^{-10} m). Les lois de la mécanique classique permettent d'évaluer la période de révolution. On trouve une valeur voisine de 10^{-15} s. Dans ce cas, le produit $\mu l^2 t^{-1}$ est de l'ordre de 10^{-35} J · s c'est-à-dire de l'ordre de grandeur de h. On en conclut que l'atome d'hydrogène doit nécessairement être étudié au moyen de la mécanique quantique.

Découverte de la constante de Planck (1900)

Planck a introduit la constante h en cherchant à résoudre le problème posé par le rayonnement du corps noir. On sait qu'à l'intérieur d'un four dont les parois sont chauffées à la température T, il y a des ondes électromagnétiques dont les fréquences sont comprises entre 0 et l'infini. On sait par ailleurs que chacune de ces ondes transporte de l'énergie (c'est d'ailleurs cette énergie qui permet dans le cas des fours de cuisson de chauffer les aliments) ; si on appelle $U_\nu \Delta\nu$ la quantité d'énergie transportée par les ondes dont la fréquence est comprise entre ν et une valeur voisine $\nu + \Delta\nu$, l'expérience montre que la variation de U_ν avec ν a l'allure de la courbe représentée sur la *figure* 1. Pour expliquer ce résultat, Planck fait l'hypothèse, incompréhensible dans le cadre de la physique de cette époque, que les échanges d'énergie entre les parois de l'enceinte et le rayonnement électromagnétique ne peuvent s'effectuer que par des multiples de $h\nu$. Cette hypothèse est même en contradiction avec la théorie classique du rayonnement, telle qu'elle découle de la théorie de Maxwell. En effet, cette dernière conduit à des échanges d'énergie continus. Planck obtient ainsi la formule suivante qui interprète bien les résultats expérimentaux :

$$U_\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

Dans cette expression, π est le nombre 3,14 et k est la constante de Boltzmann qui vaut $1{,}3 \cdot 10^{-23}$ J/°K.

Le photon

Les lois concernant la lumière ont tour à tour reçu des interprétations ondulatoires et corpusculaires ; mais jusqu'au XIX^e siècle, c'est surtout la théorie ondulatoire qui s'impose. Ainsi, Huyghens (1629-1695) est le premier à proposer l'hypothèse ondulatoire. Mais Newton (1642-1727) objecte que, si la lumière était une onde, comme le son, elle contournerait les obstacles. Il avance alors une théorie corpusculaire : sa théorie implique en particulier que la vitesse de la lumière dans un milieu matériel transparent est supérieure à cette vitesse dans le vide. Ce résultat devait être infirmé par l'expérience de Foucault qui, en 1850, mesure la vitesse de la lumière dans l'eau. Entre-temps, les travaux de Young (1773-1829) et de Fresnel (1788-1827) sur les interférences et la diffraction de la lumière assoient la théorie ondulatoire sur des bases solides. Cette interprétation est confirmée par les travaux de Maxwell (1831-1879) qui présente en 1865 sa théorie de l'électromagnétisme. Dans cette théorie, la lumière est considérée comme constituée d'ondes électromagnétiques dont la longueur d'onde est

▼ ***Le physicien français*** **Augustin Fresnel** ***(1788-1827).***

▶ *Croquis dessiné par Newton. Un premier prisme décompose en lumières colorées le faisceau incident de lumière blanche. Des trous percés dans un écran permettent de sélectionner un faisceau monochromatique, qui peut alors être dévié par un autre prisme.*

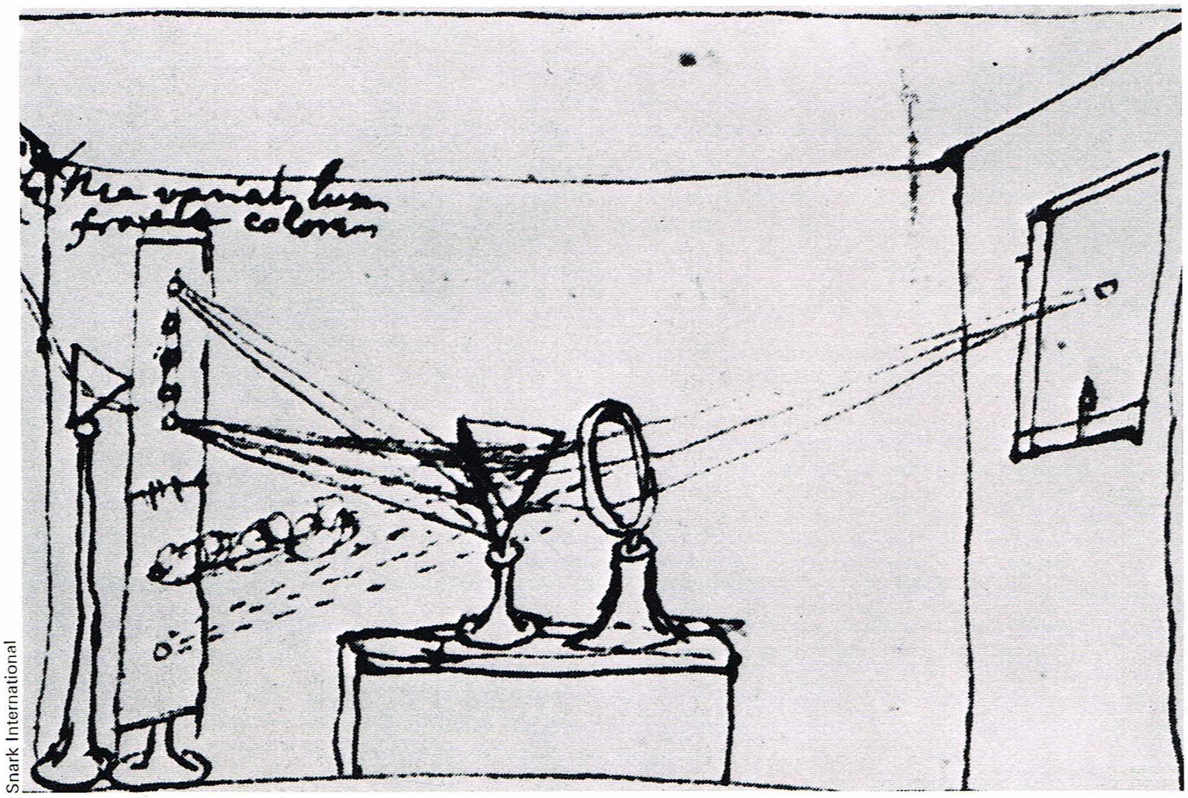

Snark International

▼ *Inexplicable dans la théorie de l'émission de Newton, la* diffraction *a été expliquée par Fresnel au moyen des interférences.*

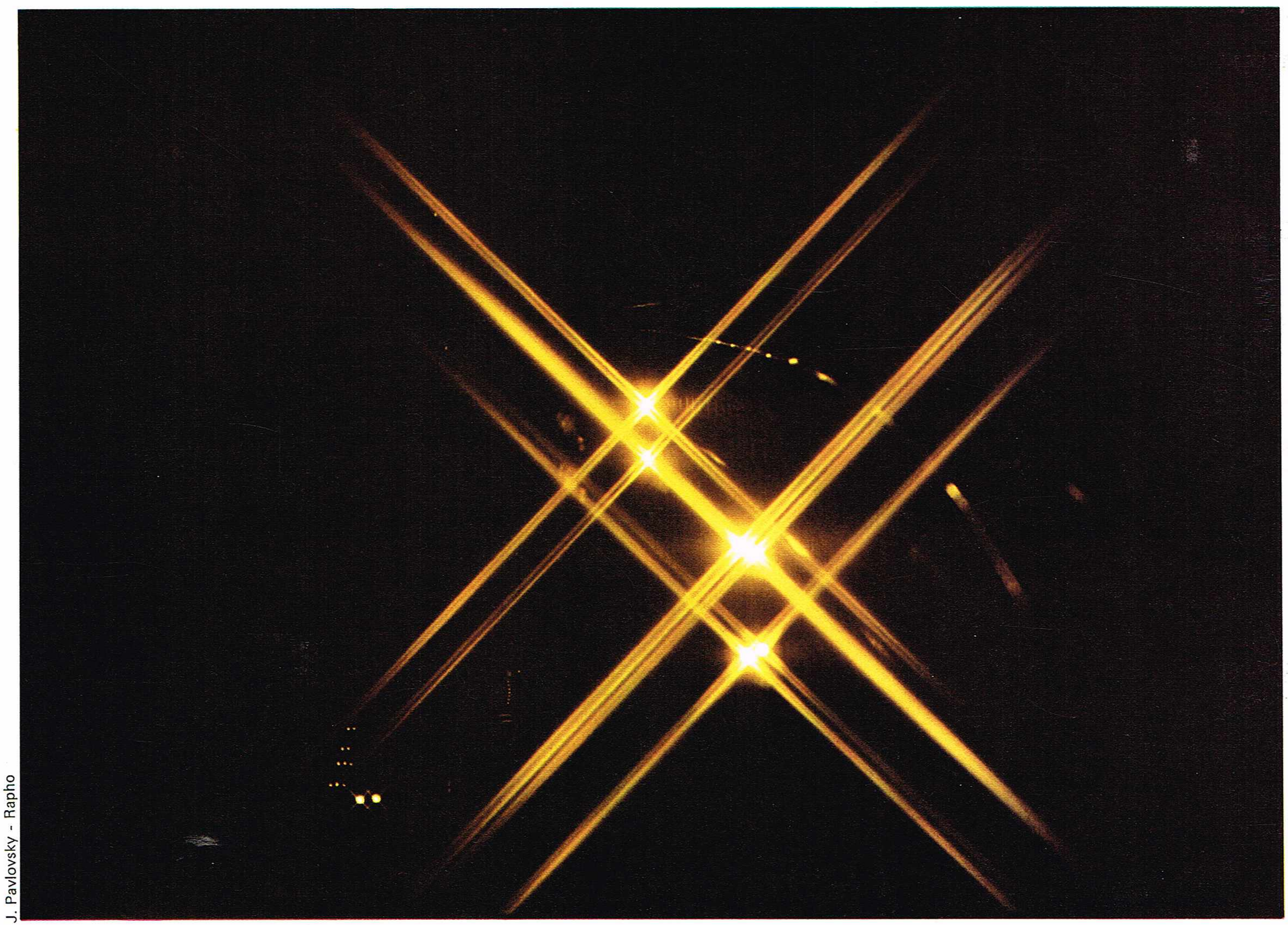

J. Pavlovsky - Rapho

telle qu'elles sont détectables par un récepteur particulier, l'œil humain. Par ailleurs, cette théorie implique l'existence d'autres ondes de longueurs d'onde différentes et détectables par d'autres récepteurs. En 1887, Hertz (1857-1894) découvre des ondes dont les longueurs d'onde sont plus grandes que celles de la lumière (elles seront appelées *ondes hertziennes*) ; cette découverte confirme ainsi la théorie de Maxwell. Depuis, on a mis en évidence des ondes électromagnétiques de longueurs d'onde très petites : les rayons X ont une longueur d'onde comprise entre quelques angströms et quelques centièmes d'angström ; les rayons γ ont une longueur d'onde inférieure au centième d'angström.

De nouveaux résultats expérimentaux allaient cependant ébranler ce bel édifice et montrer que la lumière présente aussi un caractère corpusculaire. Il ne sera présenté ici que deux de ces effets particulièrement importants du point de vue historique.

Effet photo-électrique

Travaux de Hertz (1887)

Lorsqu'un faisceau lumineux éclaire une surface métallique, celle-ci peut, dans certaines conditions, émettre des électrons. Le dispositif expérimental utilisé est représenté schématiquement sur la *figure* 2. On mesure l'intensité I du courant collecté en fonction de :

— la différence de potentiel V entre collecteur et photocathode (le collecteur peut être au potentiel positif ou négatif) ;

— l'intensité J du rayonnement : J mesure la quantité d'énergie lumineuse qui arrive par seconde sur 1 cm^2 de photocathode ;

— la fréquence ν du rayonnement.

On obtient les résultats représentés sur la *figure* 3. On observe que le courant passe dès que $V > -V_0$ (V_0 positif) : la photocathode éclairée émet des électrons d'énergie cinétique $\frac{1}{2}mv^2$, m et v étant respectivement la masse et la vitesse des électrons. Si le potentiel V est négatif, il repousse les électrons. Ceux-ci sont freinés par une énergie potentielle $-eV$, e étant la valeur de la charge de l'électron. Lorsque eV est supérieure ou égale à $\frac{1}{2}mv^2$ les électrons ne peuvent atteindre le collecteur et l'intensité I du courant est nulle. Lorsque V devient positif et croît, le collecteur attire un nombre de plus en plus grand des électrons émis par la photocathode. Lorsque V est positif et très grand, le collecteur attire la plupart des électrons émis par la photocathode ; I, qui mesure la charge qui arrive par seconde sur le collecteur, atteint alors une valeur limite indépendante de V. Cette valeur limite augmente avec l'intensité J du rayonnement ; ce qui signifie que le nombre d'électrons émis par seconde croît avec la quantité d'énergie électromagnétique qui arrive par seconde sur la photocathode. Cependant V_0, et par conséquent l'énergie cinétique des électrons, est indépendant de J. Par contre, V_0 augmente linéairement avec la fréquence ν du rayonnement. Cette variation est représentée sur la *figure* 4. Sur cette figure apparaît une fréquence seuil ν_s. En effet, l'expérience montre que si $\nu < \nu_s$ aucun électron n'est émis par la photocathode. Ces faits expérimentaux sont incompréhensibles en physique classique.

◀ *Le physicien allemand* **Heinrich Hertz** *(1857-1894). En 1887, ses travaux apportent une éclatante confirmation de la théorie électromagnétique de la lumière de Maxwell ; la même année, il découvre l'effet photo-électrique.*

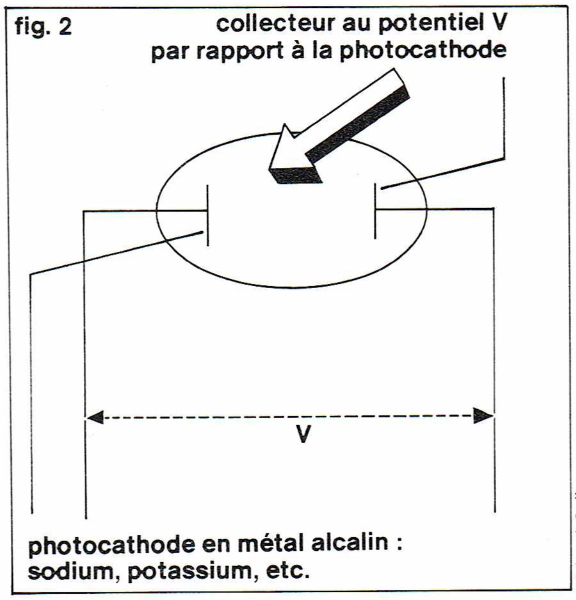

◀ *Figure 2 : représentation schématique du dispositif expérimental mettant en évidence l'effet photo-électrique.*

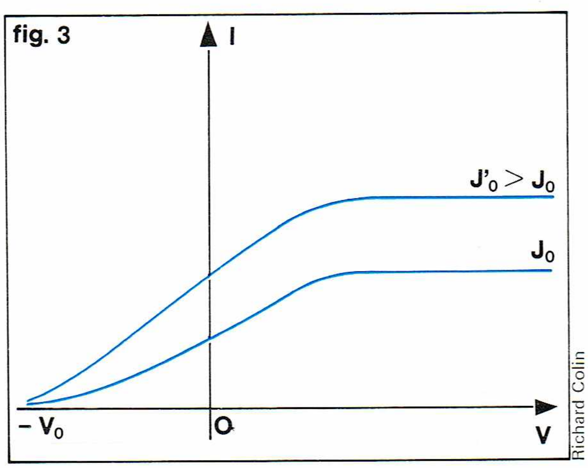

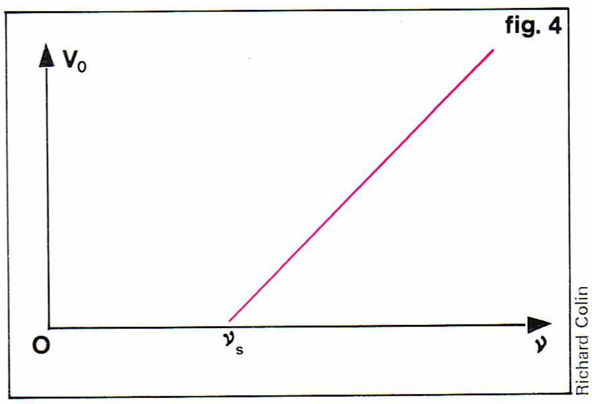

◀ *A gauche, figure 3 : représentation graphique des résultats. A droite, figure 4 : représentation graphique de la relation binaire entre* V_0 *et* ν.

Explication d'Einstein (1905)

Pour expliquer ces phénomènes, Einstein s'inspire de l'hypothèse avancée par Planck dans l'étude du corps noir. Il admet que, pour extraire des électrons du métal, le rayonnement ne peut céder de l'énergie que par quantum $h\nu$. Si l'on admet que les électrons sont retenus dans le métal par une énergie potentielle W, pour arracher un électron du métal il faut lui fournir une énergie supérieure à W; il faut donc que ν soit tel que $h\nu \geqslant W = h\nu_s$. On explique ainsi le seuil en fréquence de l'effet photo-électrique. Lorsque la fréquence ν de l'onde lumineuse est supérieure à ν_s, l'énergie excédentaire du photon est emportée par l'électron sous forme d'énergie cinétique $\frac{1}{2}mv^2$. On a donc :

$$\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - W = h\nu - h\nu_s$$

Or $$\frac{1}{2}mv^2 = eV_0, \text{ d'où } eV_0 = h(\nu - \nu_s)$$

On retrouve ainsi la relation linéaire (*fig.* 4) entre V_0 et ν. Le seuil ν_s dépend du métal (par W). Ainsi, pour le sodium, le potassium et le cérium, la longueur d'onde seuil $\lambda_s = c/\nu_s$ vaut respectivement 4 000 Å, 5 400 Å et 6 900 Å. A partir de la formule $eV_0 = h(\nu - \nu_s)$ on peut déterminer h. Ceci a été fait par Millikan qui trouve une valeur en excellent accord avec celle donnée par Planck.

Lorsque Planck utilisa pour la première fois les quanta $h\nu$ dans l'étude du corps noir, cette hypothèse apparut aux chercheurs de l'époque essentiellement comme un procédé purement mathématique permettant d'adapter la théorie à l'expérience. Par contre, dans l'étude de l'effet photo-électrique, Einstein admet que chaque quantum est porté par un grain de lumière appelé *photon*, qui s'annihile en cédant toute son énergie à l'électron. Quelles sont l'énergie E et l'impulsion p d'un photon? Par hypothèse, $E = h\nu$. Par ailleurs, le photon se propage dans le vide à la vitesse de la lumière c. Pour trouver l'impulsion du photon, il faut donc avoir recours à la théorie de la Relativité (1905). Pour une particule relativiste de masse m et de vitesse v, on a les relations suivantes :

(1) $$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$ **(2)** $$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

d'où **(3)** $E^2 - p^2c^2 = m^2c^4$

De **(1)** et **(2)** on tire $p = \frac{E}{c^2}v$. Donc, si $v = c$, on a $p = \frac{E}{c}$.

En reportant ce résultat dans **(3)**, on en déduit $m = 0$. Le photon est donc une particule relativiste de masse nulle. Par ailleurs, la formule $p = E/c$ entraîne $p = h\nu/c$. L'impulsion p du photon est un vecteur dirigé suivant la direction de propagation de l'onde électromagnétique et de module $h\nu/c$. Prenons deux exemples :

— *Exemple* 1 : quel est le nombre de photons émis par seconde par une lampe de puissance P égale à 75 watts? On admettra que la lumière émise a une longueur d'onde λ égale à 6 000 Å. On sait que $\lambda\nu = c$. Le nombre n de photons émis par seconde est donc :

$$n = \frac{P}{h\nu} = 2{,}2 \cdot 10^{20} \text{ photons/seconde}$$

— *Exemple* 2 : quel est le nombre maximal n' d'électrons émis par seconde par une photocathode, lorsqu'elle reçoit toute la puissance lumineuse précédente? On admettra que le rendement quantique de la photocathode est 0,1 (on appelle *rendement quantique* le rapport entre le nombre d'électrons émis et le nombre de photons qui arrivent sur la photocathode). On a donc :

$$n' = n \times 0{,}1 = 2{,}2 \cdot 10^{19} \text{ électrons/seconde}$$

Ce nombre d'électrons correspond à un courant d'intensité $I = n'e = 3{,}5$ A (la charge électrique de l'électron est $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ coulomb).

Effet Compton (1922)

On observe l'effet Compton lorsque des rayons X durs sont diffusés par la matière. Les rayons X durs sont des rayons X dont la longueur d'onde est petite, de l'ordre de 0,01 Å; on les distingue des rayons X mous dont la longueur d'onde est 10 ou 20 fois plus grande. Ces rayons X durs sont peu absorbés par la matière mais sont diffusés par elle.

Compton envoie sur un bloc de matière un pinceau monochromatique de rayons X durs de longueur d'onde λ et de direction bien définie. Il mesure alors la longueur d'onde λ' du rayonnement diffusé suivant une direction faisant un angle θ avec la direction incidente. Il obtient les résultats suivants :

— pour $\theta = 0$, $\lambda' = \lambda$;

— pour $\theta \neq 0$, $\lambda' > \lambda$.

Compton interprète ces résultats en admettant que l'arrivée du pinceau de rayons X sur la matière correspond à une arrivée de photons projectiles. Ces projectiles rencontrent les électrons de la matière qui jouent le rôle de cible. Au cours de la collision entre les photons et les électrons, les photons perdent une partie de leur énergie qui se transforme en énergie cinétique pour les électrons. Si ν et ν' sont respectivement les fréquences du rayonnement incident et du rayonnement diffusé (on rappelle que $\lambda = c/\nu$ et $\lambda' = c/\nu'$), les énergies E et E' du photon respectivement avant et après le choc sont égales à $h\nu$ et $h\nu'$. Puisque $E > E'$ on en déduit $\nu' < \nu$ et $\lambda' > \lambda$.

Pour étudier de façon plus précise la relation entre λ et λ', et retrouver les résultats expérimentaux, on étudie la collision du photon et de l'électron comme on étudierait celle de deux particules matérielles. Les calculs doivent être faits dans le cadre de la théorie relativiste, puisque, d'une part, le photon se déplace avec la vitesse c et, d'autre part, l'électron peut, après le choc, prendre une vitesse assez grande et voisine de c. Par ailleurs, longtemps avant et longtemps après le choc, le photon et l'électron sont très loin l'un de l'autre, et l'action de ce système de deux particules est dans ce cas très grande devant h; il n'est donc pas nécessaire d'utiliser la mécanique quantique pour décrire ce système de deux particules. Enfin, les résultats expérimentaux s'interprètent bien si l'on admet que les électrons cibles sont des électrons libres (c'est-à-dire qu'ils ne sont pas liés aux atomes du métal) et qu'ils ont une vitesse initiale nulle (en fait, l'impulsion initiale des électrons est négligeable devant leur impulsion finale, et devant celle du photon). On a donc :

— longtemps avant le choc, un photon d'énergie $h\nu$ et d'impulsion $\frac{h\nu}{c}\vec{u}$ ($\vec{u}$ étant le vecteur unitaire indiquant la direction de propagation de l'onde incidente), et un électron d'impulsion nulle et d'énergie mc^2, m étant la masse de l'électron;

— longtemps après le choc, un photon d'énergie $h\nu'$ et d'impulsion $\frac{h\nu'}{c}\vec{u}'$ ($\vec{u}'$ étant le vecteur unitaire indiquant la direction d'observation de l'onde diffusée), et un électron d'impulsion $\vec{p}$ et d'énergie E. On appelle θ l'angle entre $\vec{u}$ et $\vec{u}'$. On peut représenter le phénomène par la *figure* 5.

Comme pour tout choc de particules, d'une part l'énergie totale du système et d'autre part son impulsion totale se conservent au cours du choc (ce résultat est encore vrai en mécanique quantique). On a donc les deux relations suivantes :

— *conservation de l'énergie :*

$$h\nu + mc^2 = h\nu' + E$$

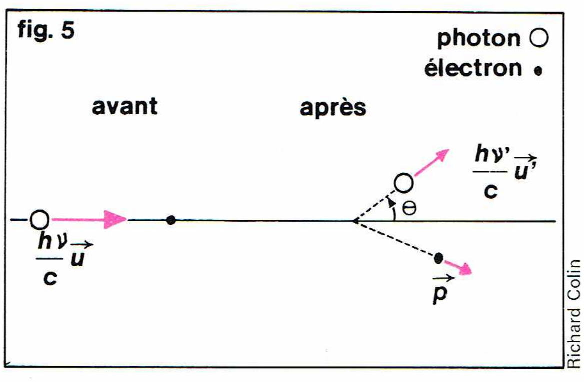

▶ ***Figure 5 :*** ***représentation schématique de l'effet Compton.***

— *conservation de l'impulsion :*

$$\frac{h\nu}{c}\vec{u} = \frac{h\nu'}{c}\vec{u}' + \vec{p}$$

La mécanique relativiste permet d'écrire la relation suivante entre E et $\vec{p}$: $E^2 - p^2c^2 = m^2c^4$ (invariant relativiste déjà rencontré).

A partir de ces trois relations, on trouve entre λ et λ' la relation suivante : $\lambda' = \lambda + \lambda_c\ (1 - \cos\theta)$; λ_c encore appelée longueur d'onde Compton, est égale à $\frac{h}{mc}$ et vaut pour les électrons 0,024 Å. Cette relation permet d'interpréter correctement les résultats expérimentaux.

Remarque : on voit que $\lambda' - \lambda$ est de l'ordre de λ_c. Pour pouvoir mesurer l'effet, il faut que $\lambda' - \lambda$, c'est-à-dire λ_c ne soit pas trop petit devant λ. Aussi, pour observer une diffusion Compton sur des électrons, faut-il que λ soit de l'ordre de 0,01 Å, donc des rayons X durs. Si l'on voulait observer une diffusion Compton sur des particules plus lourdes que l'électron, λ_c serait plus petite, et l'expérience devrait être faite avec des rayons γ.

Ainsi l'interprétation de l'effet Compton est-elle simple dans le cadre d'une théorie corpusculaire des ondes électromagnétiques. En cela, cet effet est une confirmation supplémentaire du bien-fondé de la notion de photon.

Théorie ondulatoire ou théorie corpusculaire?

Alors que, jusqu'à la fin du XIXe siècle, les chercheurs avaient surtout mis en évidence l'aspect ondulatoire de la lumière, à partir des travaux de Planck (1900) de nombreuses expériences permettent de mettre en évidence l'aspect corpusculaire de la lumière. Comment concilier et interpréter ces deux aspects de la lumière?

Expérience d'interférence photon par photon

On peut faire les expériences d'interférence avec des trous d'Young (voir *Optique*) en utilisant une intensité lumineuse très faible. Dans le cadre de l'interprétation corpusculaire, cela signifie qu'il y a très peu de photons qui arrivent par seconde dans le plan d'observation. On peut donc espérer détecter séparément l'arrivée de chaque photon sur le plan d'observation. Lorsque l'on fait une telle mesure avec un compteur de particules dont on déplace la fente d'entrée le long du plan d'observation, on constate que :

— les photons arrivent un par un dans le compteur; ils sont ainsi détectés comme on détecterait des particules matérielles;

— lorsqu'on déplace le compteur, le nombre de photons qui arrivent dans le compteur pendant un intervalle de temps fixé dépend de la position du compteur le long du plan d'observation. On observe des zones où arrivent beaucoup de photons, les « franges brillantes », pour reprendre les termes utilisés dans les expériences classiques d'interférence, et des zones où arrivent peu de photons, les « franges sombres ». La position le long du plan d'observation des « franges brillantes » et des « franges sombres » est la même que dans le cas des expériences classiques d'interférence.

On sait que, dans une expérience d'interférence, la position des franges brillantes et sombres est déterminée à partir du carré du module du champ électrique. Pour concilier l'aspect ondulatoire et corpusculaire de l'expérience d'interférence photon par photon, on peut donner une interprétation statistique au carré du module du champ électrique : la probabilité pour qu'un photon arrive en un point du plan d'observation est proportionnelle au carré du module du champ électrique; cette probabilité est grande là où se trouvent les franges brillantes, et elle est faible là où se trouvent les franges sombres. Tout se passe comme si les photons arrivaient sur le plan d'observation de manière aléatoire mais avec une loi de probabilité proportionnelle au carré du module du champ électrique. Bien évidemment, le champ électrique obéit aux équations de Maxwell. De manière générale, on admettra que la probabilité de détecter un photon en un point de l'espace est proportionnelle au carré du module du champ électrique en ce point.

fig. 6

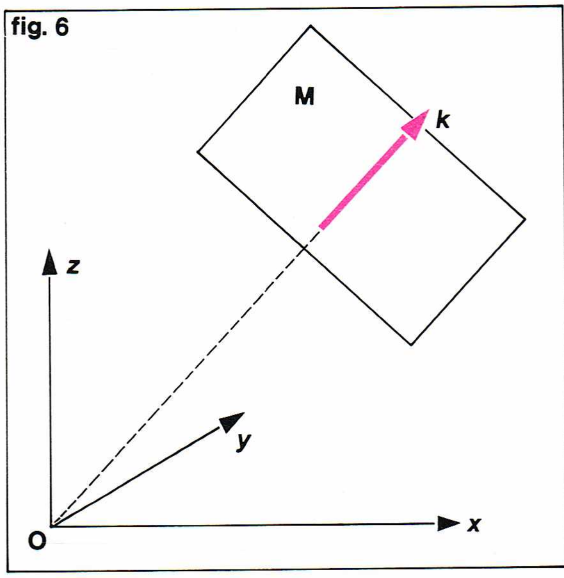

◄ *Figure 6 : pour tous les points d'un même plan, le produit scalaire $\vec{k}\cdot\overrightarrow{OM}$ est le même.*

Outils mathématiques

Ondes planes

Repérons chaque point M de l'espace par ses coordonnées (x, y, z) dans le trièdre Oxyz (*fig.* 6). On appelle onde plane la fonction $f(\overrightarrow{OM}, t)$ dépendant de $\overrightarrow{OM}$ et du temps t qui a pour expression :

$$f(\overrightarrow{OM}, t) = Ae^{i(\omega t - \vec{k}\cdot\overrightarrow{OM})}$$

Dans cette relation, A est l'amplitude de l'onde, ω sa pulsation et $\vec{k}$ son vecteur d'onde. Si on appelle k_x, k_y et k_z les composantes de $\vec{k}$ dans le trièdre Oxyz, le produit scalaire $\vec{k}\cdot\overrightarrow{OM}$ s'écrit $k_xx + k_yy + k_zz$. Il est clair qu'à un instant donné, la fonction $f(\overrightarrow{OM}, t)$ a la même valeur pour tous les points d'un plan perpendiculaire à $\vec{k}$. En effet, pour tous les points d'un même plan, le produit scalaire $\vec{k}\cdot\overrightarrow{OM}$ est le même.

Repérons les points M de l'espace dans un nouveau trièdre Ox'y'z' tel que $\overrightarrow{Ox'}$ soit parallèle à $\vec{k}$ et de même sens. Dans ces conditions, le produit scalaire $\vec{k}\cdot\overrightarrow{OM}$ s'écrit kx', k étant la norme de $\vec{k}$. L'expression de l'onde plane se simplifie et prend la forme :

$$f(\overrightarrow{OM}\cdot t) = Ae^{i(\omega t - kx')}$$

Sur cette expression simplifiée, il apparaît que la fonction $f(\overrightarrow{OM}, t)$ a, pour une valeur donnée de t, la même valeur, non seulement pour tous les points d'un même plan perpendiculaire à $\vec{k}$, mais aussi pour ceux de tous les plans perpendiculaires à $\vec{k}$ et séparés par la distance $\frac{2\pi}{k}$.

En effet, quand on passe d'un plan à l'autre, x' passe de x' à $x' + \frac{2\pi}{k}$ et le produit kx' passe de kx' à $kx' + 2\pi$. Or, on sait que $e^{i2\pi} = 1$.

On appelle *longueur d'onde* λ de l'onde plane la quantité $\frac{2\pi}{k}$. On voit que le module du vecteur d'onde est relié à la longueur d'onde par la relation $k = \frac{2\pi}{\lambda}$.

Ainsi, une onde plane est caractérisée par sa *pulsation* ω et son *vecteur d'onde* $\vec{k}$. Cependant, ces deux grandeurs ne sont pas indépendantes; il existe entre elles une relation appelée *relation de dispersion* qui dépend de la signification physique de l'onde plane et du milieu dans lequel elle se propage. Lorsqu'on utilise une onde plane, on introduit souvent d'autres grandeurs mathématiques, toutes définies à partir de $\vec{k}$ ou de la relation de dispersion. Les grandeurs sont :

— la *fréquence* ν et la *période* T de l'onde, définies par :

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$$

— la *vitesse de phase* v_φ définie par :

$$v_\varphi = \frac{\omega}{k}. \text{ On a donc } v_\varphi T = \lambda$$

— la *vitesse de groupe* v_g définie par :

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} \text{ où } \omega = \omega\ (k) \text{ est la relation de dispersion.}$$

Cas d'une onde plane électromagnétique dans le vide

Dans ce cas, l'expression du champ électrique $\vec{\mathcal{E}}$ est :

$$\vec{\mathcal{E}} = \vec{\mathcal{E}}_0\ e^{i(\omega t - kx)}$$

si on suppose $\overrightarrow{Ox}$ parallèle à $\vec{k}$ et de même sens. Les équations de Maxwell permettent de montrer que $\vec{\mathcal{E}}_0$ est perpendiculaire à $\vec{k}$: le champ électrique $\vec{\mathcal{E}}$ (et aussi le champ magnétique) est donc perpendiculaire au vecteur d'onde $\vec{k}$. Par ailleurs, la relation de dispersion est très simple et s'écrit $\omega = ck$; c étant la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le vide, c'est-à-dire ce qu'on appelle communément la vitesse de la lumière dans le vide. De cette relation de dispersion, on déduit :

$$v_\varphi = v_g = c$$

Superposition d'ondes planes

On appelle *superposition d'ondes planes* une somme d'ondes planes. Par exemple, la fonction $f\ (x, t)$ suivante :

$$f\ (x, t) = g_1 A e^{i\ (\omega_1 t - k_1 x)} + g_2 A e^{i\ (\omega_2 t - k_2 x)}$$

où g_1 et g_2 sont des nombres réels ou complexes. On dira que $f\ (x,\ t)$ est la superposition de deux ondes planes de même amplitude et de vecteurs d'onde k_1 et k_2. Si g_1 et g_2 sont réels et si g_1 est beaucoup plus grand que g_2, il est clair que $f\ (x, t)$ contient surtout l'onde plane de vecteur d'onde $\vec{k}_1$. Pour traduire de manière quantitative la composition d'une superposition d'ondes planes, nous allons étudier ce qui se passe dans le cas d'une onde électromagnétique. Considérons le champ électrique $\vec{\mathcal{E}}$ défini par :

$$\vec{\mathcal{E}} = g_1 \vec{\mathcal{E}}_0 e^{i\ (\omega_1 t - k_1 x)} + g_2 \vec{\mathcal{E}}_0 e^{i\ (\omega_2 t - k_2 x)}$$

Lorsque l'on analyse au moyen d'un spectromètre cette onde électromagnétique, on détermine l'énergie transportée par chaque onde plane. On sait que cette énergie est $|g_1\vec{\mathcal{E}}_0|^2$ et $|g_2\vec{\mathcal{E}}_0|^2$ respectivement pour les ondes $\vec{k}_1$ et $\vec{k}_2$. On peut donc caractériser la composition spectrale de l'onde totale par les rapports :

$$\frac{|g_1\vec{\mathcal{E}}_0|^2}{|g_1\vec{\mathcal{E}}_0|^2 + |g_2\vec{\mathcal{E}}_0|^2} \quad \text{et} \quad \frac{|g_2\vec{\mathcal{E}}_0|^2}{|g_1\vec{\mathcal{E}}_0|^2 + |g_2\vec{\mathcal{E}}_0|^2}$$

soit encore **(4)** $$\frac{|g_1|^2}{|g_1|^2 + |g_2|^2} \quad \text{et} \quad \frac{|g_2|^2}{|g_1|^2 + |g_2|^2}$$

Ces relations supposent que l'amplitude des ondes $\vec{k}_1$ et $\vec{k}_2$ est la même. On peut toujours se placer dans cette condition en modifiant les définitions de g_1 et g_2. Notons par ailleurs que ces expressions sont valables, même si g_1 et g_2 ne sont pas réels.

On admettra que la composition en ondes planes de la fonction $f\ (x, t)$ est donnée par les relations **(4)**.

On peut également considérer une superposition d'ondes planes dont les vecteurs d'onde $\vec{k}$, parallèles entre eux et à $\overrightarrow{Ox}$, ont une projection sur Ox pouvant prendre n'importe quelle valeur entre $-\infty$ et $+\infty$. Dans ce cas, la superposition s'écrit :

$$f\ (x, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} g\ (k)\ e^{i\ (\omega t - kx)}\ dk \quad \text{avec } \omega = \omega\ (k)$$

On dira que $f\ (x, t)$ est une superposition d'ondes planes de module 1, et que la probabilité de trouver l'onde plane dont le vecteur d'onde est compris entre k_0 et $k_0 + dk$ est : $$\frac{|g\ (k_0)|^2\ dk}{\int_{-\infty}^{+\infty} |g\ (k)|^2\ dk}$$

La quantité $$\frac{|g\ (k_0)|^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} |g\ (k)|^2\ dk}$$ s'appelle la *densité de probabilité en* k_0. On précise que, puisque k varie continûment, on ne peut plus définir la probabilité que k soit égal à k_0, mais seulement celle que k soit compris dans un intervalle, par exemple k compris entre k_0 et $k_0 + dk$.

Les ondes de matière L. de Broglie (1923)

Les expériences précédemment décrites et leur interprétation montrent que la lumière, et plus généralement le rayonnement électromagnétique, a un double aspect ondulatoire et corpusculaire. L. de Broglie propose d'étendre cette propriété aux particules matérielles et leur associe une onde. L'énergie $h\nu$ et l'impulsion $\frac{h\nu}{c}$ du photon ne peuvent être définies qu'à partir d'une onde plane qui, précisément, a une fréquence bien définie. Lorsque l'onde électromagnétique est une superposition d'ondes planes de fréquences différentes, il faut admettre que l'énergie et l'impulsion des photons sont des variables aléatoires qui ont les valeurs respectivement $h\nu$ et $\frac{h\nu}{c}$ avec une probabilité égale à celle de trouver l'onde plane de fréquence ν dans l'onde électromagnétique (voir *Outils mathématiques* 1).

Une particule libre en mouvement est caractérisée par son impulsion $\vec{p}$ et son énergie E, qui sont constantes au cours du mouvement. L. de Broglie lui associe une onde plane de fréquence ν et de longueur d'onde λ telles que :

$$\nu = \frac{E}{h} \quad \text{et} \quad \lambda = \frac{h}{||\vec{p}||}$$

ou encore de pulsation ω est de vecteur d'onde $\vec{k}$ tels que :

$$\omega = \frac{E}{\hbar} \quad \text{et} \quad \vec{k} = \frac{\vec{p}}{\hbar}$$

avec $\hbar = \frac{h}{2\pi}$; on rappelle que $||\vec{k}|| = \frac{2\pi}{\lambda}$. Le vecteur d'onde a la direction et le sens de l'impulsion de la particule. En fait, comme l'impulsion de la particule, bien que constante, est connue avec une certaine imprécision, ce n'est pas une onde plane mais une superposition d'ondes planes de fréquences voisines qui doit être associée à la particule libre. Et comme dans le cas du photon, il faut admettre que la probabilité de trouver la particule en un point donné de l'espace est proportionnelle au carré du module de l'onde associée à la particule.

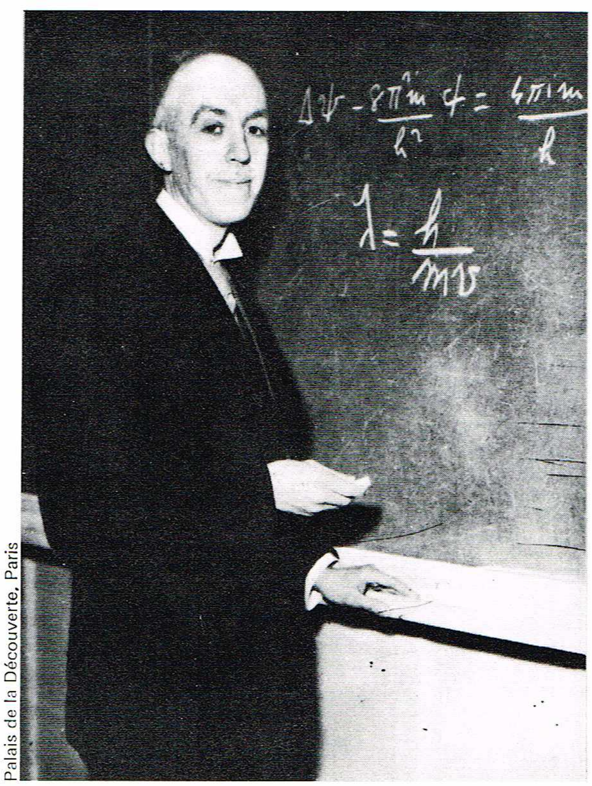

Palais de la Découverte, Paris

▶ ***Le physicien français Louis de Broglie. Cherchant à concilier le double aspect ondulatoire et corpusculaire de la lumière, il crée en 1924 la mécanique ondulatoire.***

On voit que cette théorie est calquée sur celle du photon, mais, tandis que pour le photon la relation de dispersion est $\omega = kc$, pour une particule matérielle libre cette relation est différente. En effet, on a :

$$E^2 - p^2c^2 = m^2c^4$$

m étant la masse de la particule d'énergie E et d'impulsion p. En remplaçant E et p respectivement par $\hbar\omega$ et $\hbar k$, on obtient : $\omega^2 - k^2c^2 = \frac{m^2c^4}{\hbar^2}$

c'est-à-dire : $\omega = \sqrt{\frac{m^2c^4}{\hbar^2} + k^2c^2}$

Si, dans cette relation, on fait tendre la masse m vers zéro, on retrouve la relation de dispersion des photons. La relation de dispersion des photons est donc caractéristique des particules de masse nulle. Notons ici que de telles particules se déplacent nécessairement à la vitesse de la lumière.

Si la vitesse v de la particule est faible devant c, alors l'impulsion de la particule est mv. La longueur d'onde λ de l'onde plane associée vaut h/mv. Calculons un ordre de grandeur de λ pour différents types de particules :

— Pour des particules de masse 10^{-5} g et de vitesse 1 cm/s, λ est de l'ordre de 10^{-23} cm. Cette longueur d'onde est trop petite pour qu'on puisse mettre en évidence par des expériences ondulatoires (interférence ou diffraction) l'onde plane associée à chaque particule. En effet, une onde ne peut être diffractée que lorsqu'elle rencontre des perturbations du milieu dans lequel elle se propage, dont les dimensions sont de l'ordre de grandeur de sa longueur d'onde. Or, on ne connait pas de milieu ayant de perturbations de taille aussi faible.

— Par contre, l'onde plane associée à un électron accéléré sous une différence de potentiel de 50 volts a une longueur d'onde de 2 Å. Une telle onde peut être mise en évidence par des expériences d'interférence et de diffraction. C'est ainsi qu'en 1927 Davisson et Germer ont observé la diffraction d'un faisceau d'électrons par un cristal. Leur expérience est en tout point comparable à la diffraction des rayons X par le même cristal. Ce résultat s'explique parce qu'un cristal est constitué d'atomes ou d'ions séparés par des distances de l'ordre de 1 Å. Depuis les travaux de Davisson et Germer, des expériences analogues à celle de l'optique ondulatoire ont pu être pratiquées en utilisant un faisceau d'électrons : ce sont les expériences de Boersch (1940), Marton (1953), Faget et Fert (1956) ; par ailleurs, on utilise couramment aujourd'hui des neutrons pour étudier les réseaux cristallins. Ces neutrons, produits dans des piles nucléaires, doivent être ralentis suffisamment pour que la longueur d'onde de l'onde associée soit de l'ordre de grandeur des distances interatomiques du cristal. Ces *neutrons* sont dits *thermiques*.

L'ensemble de ces considérations permet de présenter de manière nouvelle le critère qui indique dans quel cas il faut faire appel à la mécanique quantique pour étudier le mouvement d'une particule. En effet, si la longueur d'onde de l'onde associée à cette particule est trop petite pour être détectée par des expériences d'interférence ou de diffraction, il n'est pas nécessaire d'étudier son mouvement au moyen de la mécanique quantique; celle-ci ne devra être utilisée que si cette longueur d'onde est suffisamment grande. De façon plus précise, cette longueur d'onde doit être de l'ordre de grandeur des distances caractéristiques du problème. Appelons d une telle distance.

On doit utiliser la mécanique de Newton si $\lambda \ll d$, soit encore : $\lambda \ll d \Rightarrow \frac{h}{mv} \ll d \Rightarrow dmv \gg h$.

Or, dmv a les dimensions d'une action, puisque c'est le produit : (masse) $\times$ (longueur)^2 $\times$ (temps)$^{-1}$. On voit donc qu'il est équivalent, pour choisir entre la mécanique quantique et celle de Newton, de comparer l'action avec h ou λ avec les distances caractéristiques du problème.

Prenons l'exemple d'un gaz monoatomique à la température de 300 °K et sous une pression de 1 atmosphère. S'il s'agit de l'hélium, sa masse atomique est voisine de 10^{-23} g et sa vitesse quadratique moyenne voisine de 1 300 m/s. La longueur d'onde de l'onde associée est de l'ordre de quelques centièmes d'angström. Or, la distance moyenne entre deux atomes est de l'ordre de 10 Å, elle est beaucoup plus grande que la longueur d'onde. Il n'est donc pas nécessaire de faire appel à la mécanique quantique.

L'équation de Schrödinger (1926)

D'après L. de Broglie, une onde plane doit être associée à une particule libre en mouvement. Mais que se passe-t-il lorsque la particule se meut dans un potentiel ou lorsque le système physique étudié contient plusieurs particules en interaction ? Ce problème a été résolu par Schrödinger.

En 1926, Schrödinger a postulé l'équation qui, aujourd'hui, porte son nom, et que doit satisfaire la fonction associée à tout système de particules matérielles. Cette fonction, appelée *fonction d'onde*, contient tous les renseignements concernant le système.

L'équation de Schrödinger décrit la propagation des ondes de matière dans l'espace. Elle n'est cependant pas l'équation fondamentale de la physique quantique, et la théorie fondée sur cette équation n'est qu'une théorie approximative qui a permis d'énormes progrès, en physique atomique notamment. L'équation repose sur les hypothèses suivantes, qui en limitent le domaine de validité.

— Le nombre de particules du système étudié est constant. Il n'y a ni création, ni annihilation de particules.

— Les vitesses des particules sont suffisamment faibles pour pouvoir ignorer la théorie de la Relativité.

Depuis les travaux de Schrödinger, la théorie quantique s'est considérablement développée, et aujourd'hui, bien que n'étant pas tout à fait satisfaisante, la théorie quantique des champs permet de résoudre de nombreux problèmes dans lesquels les hypothèses précédentes ne sont pas vérifiées.

En physique atomique, les hypothèses rappelées ci-dessus sont acceptables. En effet, les énergies de liaison des électrons aux noyaux sont comprises entre quelques eV et quelques keV ; elles sont donc inférieures à l'énergie nécessaire pour créer une paire électron-positron qui est de l'ordre du MeV.

L'équation de Schrödinger

L'équation de Schrödinger a été postulée par Schrödinger en 1926. Dans le cadre de la physique contemporaine, cette équation ne peut pas être démontrée, sauf si l'on admet des postulats plus vastes. Et en toute rigueur, sa validité n'est confirmée que par les conséquences qu'on en tire, et leur accord avec l'expérience. Il est intéressant de rappeler que la même situation se retrouve en mécanique classique. En effet, l'équation de Newton, $\vec{F} = m\vec{\gamma}$ (où $\vec{F}$ est la force que subit la particule, m et $\vec{\gamma}$ respectivement sa masse et son accélération), doit être considérée soit comme postulée, soit comme démontrée à partir d'un postulat plus vaste, le principe de moindre action, fondement de la mécanique lagrangienne et hamiltonienne. Et on sait que le bien-fondé de l'équation de Newton ou du principe de moindre action n'est confirmé que par les conséquences qu'on en tire et leur accord avec l'expérience.

On peut présenter des arguments heuristiques qui justifient le choix de Schrödinger. Ainsi, l'onde plane associée à une particule libre en mouvement doit être solution de cette équation. On peut alors chercher l'équation aux dérivées partielles la plus simple que vérifie l'onde plane.

Supposons que la particule se déplace le long de l'axe $\vec{Ox}$ vers les x croissants. L'onde plane associée a pour expression : $\psi(x, t) = Ae^{-i(\omega t - kx)}$
x étant l'abscisse de la particule; on rappelle que A est une constante et que ω et k sont reliés à l'énergie E et à l'impulsion p de la particule par les relations

$$E = \hbar\omega \quad \text{et} \quad \vec{p} = \hbar\vec{k}$$

Cette fonction $\psi(x, t)$ vérifie les équations suivantes :

$$i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t} = E\psi \qquad (5)$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} = \frac{p^2}{2m}\psi \qquad (6)$$

Le physicien autrichien Erwin Schrödinger (1887-1961). En établissant l'équation qui porte son nom et qui décrit la propagation des ondes de matière dans l'espace, il fonda les méthodes actuelles de la mécanique quantique.

Palais de la Découverte, Paris

Or, dans le cadre de la mécanique de Newton non relativiste, on a la relation :

$$\text{(7)} \qquad E = \frac{p^2}{2\,m}$$

On en déduit donc que $\psi\ (x,\ t)$ vérifie l'équation aux dérivées partielles suivantes :

$$\text{(8)} \qquad i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2\,m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2}$$

Lorsque la particule se meut dans l'espace, il faut repérer sa position par ses coordonnées x, y et z sur un trièdre d'axes $\overrightarrow{Ox}$, $\overrightarrow{Oy}$ et $\overrightarrow{Oz}$. Si on appelle $\vec{r}$ le *vecteur position* de la particule, $\vec{r}$ a pour composantes x, y et z dans le trièdre.

La fonction d'onde associée à la particule s'écrit alors :

$$\psi\ (x,\ y,\ z,\ t) = Ae^{-i\,(\omega t - \vec{k}\cdot\vec{r})}$$

On peut vérifier qu'avec cette fonction d'onde, l'équation **(6)** doit être remplacée par l'équation **(6′)** suivante :

$$\text{(6′)} \qquad -\frac{\hbar^2}{2\,m}\left(\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}\right) = \frac{1}{2\,m}\,(p_x^2 + p_y^2 + p_z^2)\,\psi = \frac{p^2}{2\,m}\,\psi$$

En désignant par $\Delta\psi$ la parenthèse du membre de gauche, **(6′)** s'écrit :

$$-\frac{\hbar^2}{2\,m}\,\Delta\psi = \frac{p^2}{2\,m}\,\psi$$

$\Delta\psi$ est appelée « laplacien de la fonction ψ ». A partir de **(8)** on obtient **(8′)**

$$\text{(8′)} \qquad i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2\,m}\,\Delta\psi$$

Lorsque la particule se meut dans un potentiel V $(x,\ y,\ z)$, la fonction d'onde $\psi\ (x,\ y,\ z,\ t)$ n'est plus une onde plane. L'énergie de la particule est alors égale à $\frac{p^2}{2\,m} + V\ (x,\ y,\ z)$. Schrödinger postule que la fonction d'onde vérifie l'équation **(9)** :

$$\text{(9)} \qquad i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2\,m}\,\Delta\psi + V\ (x,\ y,\ z)\ \psi$$

On peut vérifier que, si V $(x,\ y,\ z)$ est nul, on retombe sur l'équation **(8′)**.

Si le système contient plusieurs particules et si l'interaction entre ces particules dépend du temps, les propriétés du système sont encore décrites par l'équation de Schrödinger qui s'écrit :

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\sum_i \frac{\hbar^2}{2\,m_i}\,\Delta_i\psi + V\ (x_1,\ y_1,\ z_1,\ x_2,\ y_2,\ z_2,\ ...,\ t)\ \psi$$

ψ est une fonction du temps et des coordonnées de toutes les particules et

$$\Delta_i\psi = \frac{\partial^2\psi}{\partial x_i^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial y_i^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial z_i^2}$$

m_i est la masse de la i-ième particule.

Dès qu'on a plusieurs particules, la résolution de l'équation de Schrödinger devient vite très compliquée. Son étude ne sera pas abordée ici.

Remarque : dans le cas d'une particule libre relativiste, on a déjà vu que : $E^2 - p^2c^2 = m^2c^4$

Par ailleurs, l'onde plane $\psi\ (x,\ y,\ z,\ t) = Ae^{-i\,(\omega t - \vec{k}\cdot\vec{r})}$ vérifie les relations suivantes :

$$-\hbar^2 \frac{\partial^2\psi}{\partial t^2} = E^2\psi \quad \text{et} \quad -\hbar^2\Delta\psi = p^2\psi$$

En raisonnant comme précédemment, on en déduit l'équation que doit vérifier l'onde plane associée à une particule libre relativiste. Cette équation, appelée encore *équation de Klein-Gordon*, s'écrit :

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial t^2} - c^2\Delta\psi = -\frac{m^2c^4}{\hbar^2}\,\psi$$

On vérifie que, si on fait $m = 0$ dans cette équation, on retombe sur l'équation de propagation des ondes électromagnétiques.

Propriétés mathématiques de la fonction d'onde

On a admis dans le cas d'une particule libre que sa probabilité de présence en un point de l'espace est proportionnelle au carré du module de l'onde plane associée. Soit donc $|A|^2$ pour l'onde plane $Ae^{-i\,(\omega t - \vec{k}\cdot\vec{r})}$. On admettra de même que la probabilité de présence d'une particule en un point de l'espace de coordonnées $(x_0,\ y_0,\ z_0)$ est proportionnelle à $|\psi\ (x_0,\ y_0,\ z_0,\ t)|^2$, si $\psi\ (x,\ y,\ z,\ t)$ est la fonction d'onde de la particule qui se meut dans un potentiel quelconque V $(x,\ y,\ z)$. Le coefficient de proportionnalité k est choisi en exprimant que la probabilité de trouver la particule n'importe où dans l'espace est égale à 1. On a donc :

$$k \iiint_{\text{espace}} |\psi\ (x,\ y,\ z,\ t)|^2\ dx\ dy\ dz = 1$$

k étant ainsi déterminé, on modifie l'expression de $\psi\ (x,\ y,\ z,\ t)$ de manière à avoir :

$$\iiint_{\text{espace}} |\psi\ (x,\ y,\ z,\ t)|^2\ dx\ dy\ dz = 1$$

On dit alors que la fonction $\psi\ (x,\ y,\ z,\ t)$ est *normée*. Pour que le calcul de k soit possible, il faut que l'intégrale de $|\psi|^2$ converge. On exprime ceci en disant que la fonction d'onde doit être une fonction de carré sommable. Le temps auquel on norme la fonction d'onde n'a pas d'importance, car on démontre que l'intégrale de $|\psi|^2$ est indépendante du temps.

Pour qu'elle puisse indiquer la probabilité de présence de la particule dans l'espace, la fonction d'onde doit être non seulement de carré sommable, mais également uniforme, c'est-à-dire n'avoir qu'une valeur en chaque point de l'espace. Sans quoi, on pourrait avoir en un même point de l'espace deux probabilités de présence différentes ! A ces deux propriétés s'ajoutent d'autres propriétés qui ne seront pas développées ici parce qu'elles ont une signification physique moins évidente.

Il est important de remarquer que l'onde de L. de Broglie, qui est la fonction d'onde d'une particule libre, n'est pas de carré sommable. En effet, cette onde

$$Ae^{-i\,(\omega t - \vec{k}\cdot\vec{r})}$$

est telle que :

$$\iiint_{\text{espace}} |Ae^{-i\,(\omega t - \vec{k}\cdot\vec{r})}|^2\ dx\ dy\ dz = \iiint_{\text{espace}} |A|^2\ dx\ dy\ dz$$

La théorie de la mécanique quantique admet comme fonction d'onde des fonctions qui ne sont pas de carré sommable, pourvu que leur module soit borné dans tout l'espace.

Comment se présente un problème de mécanique quantique

● *Étude en mécanique newtonienne*

En mécanique newtonienne, pour résoudre le problème du mouvement d'un point matériel de masse m soumis à la force $\vec{F}$ ou au potentiel V (x, y, z), x, y et z étant les coordonnées du point dans un trièdre $Oxyz$, il faut :

— Connaître les conditions initiales, c'est-à-dire la position (x_0, y_0, z_0) et la vitesse $(\dot{x}_0, \dot{y}_0, \dot{z}_0)$ de la particule à l'instant initial t_0; on rappelle que, si la position est définie par les coordonnées de la particule (x, y, z), la vitesse de la particule a pour composantes les dérivées $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ respectivement de x, y, z.

— Trouver la solution générale de l'équation de Newton, $\vec{F} = m\vec{\gamma}$, où $\vec{\gamma}$ est l'accélération de la particule. Cette équation vectorielle correspond à trois équations différentielles du second ordre en x, y et z. La solution générale de ce système d'équations différentielles est composée des fonctions $x = x\ (t)$, $y = y\ (t)$, $z = z\ (t)$ où $x\ (t)$, $y\ (t)$, et $z\ (t)$ dépendent chacune de deux paramètres.

— Déterminer la valeur des paramètres de la solution générale au moyen de conditions initiales. Pour cela, on écrit les relations suivantes :

$$x\ (t_0) = x_0 \quad y\ (t_0) = y_0 \quad z\ (t_0) = z_0$$
$$\dot{x}\ (t_0) = \dot{x}_0 \quad \dot{y}\ (t_0) = \dot{y}_0 \quad \dot{z}\ (t_0) = \dot{z}_0$$

Une fois ce travail accompli, on dispose de tous les renseignements mécaniques concernant la particule : trajectoire, position et vitesse à chaque instant, etc.

● *Étude en mécanique quantique*

En mécanique quantique, le problème se traite d'une manière semblable. Ainsi, il faut :

— Connaître les conditions initiales, c'est-à-dire la fonction d'onde $f_0\ (x, y, z)$ à l'instant initial t_0. Cette fonction doit être uniforme et de carré sommable.

— Trouver la solution générale de l'équation de Schrödinger. Cette équation est une équation aux dérivées partielles du second ordre. Sa solution générale $\psi\ (x, y, z, t)$ contient un nombre infini de paramètres.

— Déterminer la valeur des paramètres de la solution générale au moyen des conditions initiales. Pour cela, on écrit la relation : $\psi\ (x, y, z, t_0) = f_0\ (x, y, z)$

Une fois ce travail accompli, on dispose de tous les renseignements mécaniques concernant la particule. La manière d'utiliser la fonction d'onde sera vue ultérieurement.

Les états stationnaires

On peut chercher des solutions particulières de l'équation de Schrödinger qui se présentent sous la forme du produit d'une fonction de x, y et z, $\varphi\ (x, y, z)$ et d'une fonction de t, $g\ (t)$. Ce travail n'est pas inutile, car, d'une part, ces solutions particulières ont une signification physique, d'autre part, un résultat mathématique assure que la solution générale de l'équation de Schrödinger s'écrit sous la forme d'une somme de toutes ces solutions particulières. En reportant le produit $\varphi\ (x, y, z)\ g\ (t)$ dans l'équation de Schrödinger et en divisant par $\varphi\ (x, y, z)\ g\ (t)$, il vient :

$$\frac{-\frac{\hbar^2}{2\,m}\Delta\varphi + \mathrm{V}\ (x, y, z)\ \varphi}{\varphi} = \frac{i\hbar\frac{dg}{dt}g}{g}$$

Dans cette relation, le membre de gauche est une fonction de x, y, z et celui de droite une fonction de t. Pour que ces deux fonctions puissent être égales quels que soient x, y, z et t, il faut qu'elles soient toutes les deux égales à une même constante. On appelle E cette constante. Les fonctions $\varphi\ (x, y, z)$ et $g\ (t)$ vérifient donc les équations :

$$-\frac{\hbar^2}{2\,m}\Delta\varphi + \mathrm{V}\ (x, y, z)\ \varphi = \mathrm{E}\varphi$$

$$i\hbar\frac{dg}{dt} = \mathrm{E}g$$

La deuxième équation a pour solution $ce^{-\frac{i\mathrm{E}t}{\hbar}}$. Les solutions particulières s'écrivent donc : $\varphi_{\mathrm{E}}\ (x, y, z)\ e^{-\frac{i\mathrm{E}t}{\hbar}}$, l'indice E rappelant que φ dépend de la valeur de la constante E. Cette constante représente l'énergie de la particule lorsque sa fonction d'onde est :

$$\varphi_{\mathrm{E}}\ (x, y, z)\ e^{-\frac{i\mathrm{E}t}{\hbar}}$$

On peut vérifier ce résultat dans le cas d'une particule libre. Sa fonction d'onde $\mathrm{A}e^{-i\,(\omega t - \vec{k}\cdot\vec{r})}$ est un état stationnaire, et on a :

$$i\hbar\frac{\partial e^{-i\omega t}}{\partial t} = \hbar\omega e^{-i\omega t}$$

$$-\frac{\hbar^2}{2\,m}\Delta\ (\mathrm{A}e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}}) = \frac{\hbar^2k^2}{2\,m}\mathrm{A}e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}}$$

On retrouve bien que l'énergie de la particule :

$$\hbar\omega = \frac{\hbar^2k^2}{2\,m} \text{ se confond avec la constante E.}$$

Lorsqu'une particule qui se meut dans un potentiel V (x, y, z) a pour fonction d'onde à l'instant initial t_0 l'état stationnaire $\varphi_{\mathrm{E}}\ (x, y, z)\ e^{-\frac{i\mathrm{E}t_0}{\hbar}}$, sa fonction d'onde s'écrit : $\varphi_{\mathrm{E}}\ (x, y, z)\ e^{-\frac{i\mathrm{E}t}{\hbar}}$

En effet, cette dernière fonction est solution de l'équation de Schrödinger et satisfait à la condition initiale. On en conclut que, lorsqu'une particule a pour fonction d'onde un état stationnaire, à un instant donné, sa fonction d'onde reste le même état stationnaire. En particulier, son énergie E reste constante au cours du temps.

▼ ***Projection de clichés de chambres à bulles.***

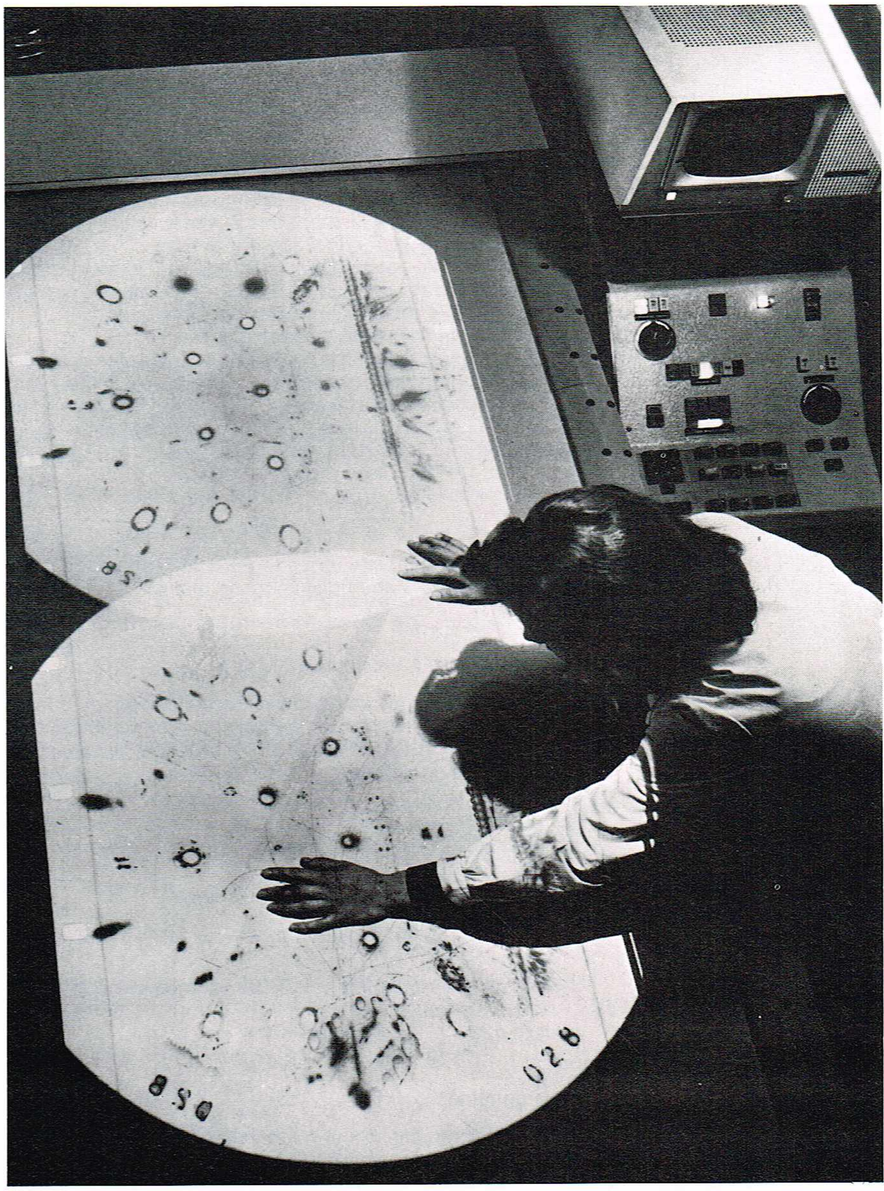

Laboratoire de physique nucléaire théorique du Centre national de la recherche scientifique

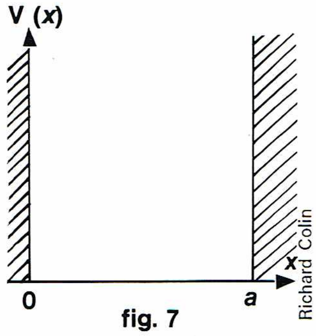

fig. 7

▲ ***Figure 7 :*** ***représentation du potentiel V auquel est soumise la particule astreinte à se mouvoir sur un segment de longueur a.***

Dans le cas des états stationnaires, pour que la fonction d'onde soit de carré sommable, il faut que :

$$\iiint_{espace} |\varphi_E\ (x, y, z)\ e^{-\frac{iEt}{\hbar}}|^2\ dx\ dy\ dz = 1$$

c'est-à-dire :

$$\iiint_{espace} |\varphi_E\ (x, y, z)|^2\ dx\ dy\ dz = 1$$

car le module de la fonction $e^{-\frac{iEt}{\hbar}}$ est égal à 1. La fonction $\varphi_E\ (x, y, z)$ doit donc être de carré sommable, ou à la rigueur son module doit être borné.

Résolution de quelques problèmes simples

Puits carré infini

Une particule de masse m est astreinte à se mouvoir sur un segment de longueur a. Ceci équivaut à dire que la particule est soumise à un potentiel (*fig.* 7) tel que :

$$\text{si}\quad x \leqslant 0, \qquad V(x) = \infty$$
$$\text{si}\quad 0 < x < a, \qquad V(x) = 0$$
$$\text{si}\quad x \geqslant a, \qquad V(x) = \infty$$

La particule n'est donc soumise à aucune force tant qu'elle reste à l'intérieur de l'intervalle [0, a]. Dès qu'elle atteint les points d'abscisse 0 ou a, elle est soumise à une force qui la repousse vers l'intérieur. En aucun cas, la particule ne peut franchir la frontière de l'intervalle.

Pour bien mettre en évidence les différences entre la mécanique newtonienne et la mécanique quantique, on traitera ce problème dans les deux cas.

- *Étude en mécanique newtonienne*

En mécanique newtonienne, lorsque la particule est entre 0 et a, elle n'est soumise à aucune force et, par conséquent, sa vitesse est constante. Lorsque la particule atteint la frontière, elle rebondit en conservant son énergie, sa vitesse change de signe mais sa valeur absolue reste la même. Le mouvement de la particule est donc un mouvement périodique à vitesse constante, la valeur de celle-ci étant fixée à l'instant initial. Cette valeur peut être quelconque, et par conséquent l'énergie $E = 1/2\ mv^2$ de la particule peut prendre n'importe quelle valeur positive. Pendant toute la durée du mouvement, l'énergie de la particule reste rigoureusement constante.

- *Étude en mécanique quantique*

Pour traiter le problème en mécanique quantique, déterminons d'abord les états stationnaires. La particule ayant une probabilité nulle d'être à l'extérieur de l'intervalle [0, a], il faut imposer à toutes les fonctions d'onde, et en particulier aux états stationnaires, d'être nuls pour : $x \leqslant 0$ et $x \geqslant a$. On doit donc résoudre l'équation :

$$-\frac{\hbar^2}{2\ m}\frac{d^2\varphi}{dx^2} = E\varphi \quad \text{pour}\quad 0 < x < a$$

La solution générale de cette équation différentielle du deuxième ordre à coefficients constants est :

$$\varphi_E\ (x) = Ae^{ikx} + Be^{-ikx}$$

où $E = \dfrac{\hbar^2 k^2}{2\ m}$ et k est un nombre réel.

Physiquement, il est raisonnable de supposer que la probabilité de présence de la particule varie continûment. On en déduit que la fonction $\varphi\ (x)$ doit être continue, en particulier en $x = 0$ et $x = a$. On a donc :

$$\varphi_E\ (0) = \varphi_E\ (a) = 0$$

c'est-à-dire : $A + B = 0$ (continuité en $x = 0$)

d'où : $\varphi\ (x) = 2\ iA \sin kx$
$\sin ka = 0$ (continuité en $x = a$)

d'où : $k = n\dfrac{\pi}{a}$ (n entier)

Afin de déterminer la valeur du paramètre, nous allons exiger que : $\displaystyle\int_0^a |\varphi\ (x)|^2\ dx = 1$

cela entraîne : $\varphi\ (x) = \sqrt{\dfrac{2}{a}} \sin \dfrac{n\pi x}{a}$

En toute rigueur, $\varphi\ (x)$ n'est déterminé qu'à un facteur $e^{i\alpha}$ près. Quel que soit α réel, ce terme ne modifiant pas la valeur des probabilités, on choisit $\alpha = 0$.

Les conditions de continuité de $\varphi_E\ (x)$ ont une conséquence très importante : la quantification de l'énergie. En effet, on a trouvé : $E = n^2 \dfrac{\hbar^2\pi^2}{2\ ma^2}$ où $n = 1, 2,...$

Si la fonction de la particule est un état stationnaire, l'énergie de la particule est rigoureusement constante, mais sa valeur ne peut pas être quelconque.

Étudions maintenant le cas d'une particule dont la fonction d'onde n'est pas un état stationnaire, et supposons pour simplifier qu'elle se réduise à une combinaison linéaire de deux états stationnaires d'énergies E_1 et E_2. On a donc :

$$\psi\ (x, t) = \alpha_1\varphi_{E_1}e^{-\frac{iE_1t}{\hbar}} + \alpha_2\varphi_{E_2}e^{-\frac{iE_2t}{\hbar}}$$

La condition de normalisation : $\displaystyle\int_0^a |\psi\ (x, t)|^2\ dx = 1$

impose $|\alpha_1|^2 + |\alpha_2|^2 = 1$

Dans le cas présent, la particule n'a ni l'énergie E_1, ni l'énergie E_2. Mais plus $|\alpha_1|^2$ sera grand devant $|\alpha_2|^2$, plus l'énergie de la particule sera proche de E_1 et inversement. $|\alpha_1|^2$ et $|\alpha_2|^2$ peuvent donc être interprétés comme les probabilités respectives d'avoir une énergie égale, soit à E_1, soit à E_2. On peut donc définir une *énergie moyenne* de la particule égale à : $|\alpha_1|^2\ E_1 + |\alpha_2|^2\ E_2$

L'énergie de la particule n'est plus rigoureusement définie comme dans le cas classique ; seule sa valeur moyenne a un sens.

Étudions maintenant la *position* de la particule.

Si la fonction est un état stationnaire, par exemple celui qui correspond à $n = 1$, la densité de probabilité de présence $|\varphi_1\ (x)|^2 = \dfrac{2}{a}\sin^2\dfrac{\pi x}{a}$ a l'allure de la courbe représentée sur la *figure* 8. La valeur moyenne de la position est donnée par :

$$\int_0^a x\ |\varphi_1|^2\ dx = \frac{a}{2}$$

Ce résultat est vrai quel que soit l'état stationnaire, car $|\varphi_n|^2$ admet $x = \dfrac{a}{2}$ comme axe de symétrie.

Si la fonction d'onde est une combinaison linéaire de deux états stationnaires d'énergies respectives E_1 et E_2, la valeur moyenne de la position est donnée par :

$$\int_0^a x\ |\alpha_1\varphi_{E_1}e^{-\frac{iE_1t}{\hbar}} + \alpha_2\varphi_{E_2}e^{-\frac{iE_2t}{\hbar}}|^2\ dx$$

En effectuant les intégrales, on trouve une expression de la forme : $\dfrac{a}{2} + C\cos\left(\dfrac{E_1 - E_2}{\hbar}t + \theta\right)$

où C est une constante réelle inférieure à $\dfrac{a}{2}$ qui dépend de E_1, E_2 et des modules de α_1 et α_2 et θ est une phase qui est égale à la différence des phases de α_1 et α_2. Ici, la position moyenne dépend du temps, elle oscille autour du point d'abscisse $\dfrac{a}{2}$.

Les coefficients α_1 et α_2 sont déterminés à partir des conditions initiales. Supposons que la fonction d'onde à l'instant initial $t_0 = 0$ soit :

$$f_0 = \frac{1}{\sqrt{a}}\left(\sin\frac{\pi x}{a} + \sin\frac{2\ \pi x}{a}\right) \quad \text{pour}\quad 0 \leqslant x \leqslant a$$

On doit d'abord s'assurer que cette fonction est normée. C'est le cas ici. On égale ensuite pour $t = 0$ la solution générale de l'équation de Schrödinger et f_0. Or cette *solution générale* s'écrit :

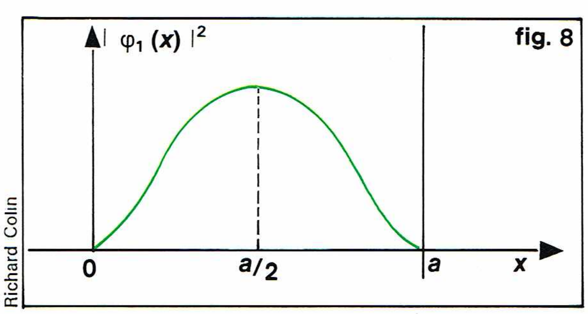

▶ ***Figure 8 :*** ***courbe de la densité de probabilité de présence de*** $|\varphi_1\ (x)|^2 = \dfrac{2}{a}\sin^2\dfrac{\pi x}{a}$ ***;*** $\dfrac{a}{2}$ ***valeur moyenne de la position.***

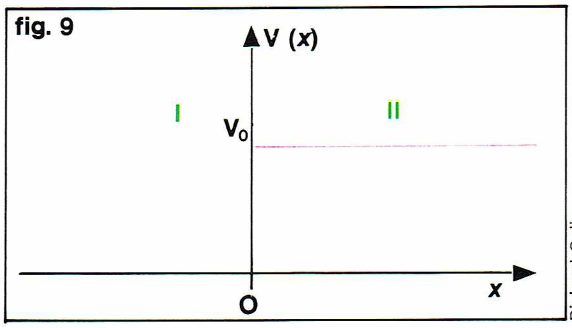

◀ *Figure 9; représentation schématique de la barrière de potentiel :* I, *région du demi-axe négatif;* II, *région du demi-axe positif.*

Richard Colin

$$\sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n \varphi_n e^{-\frac{iE_n t}{\hbar}}$$

avec : $\varphi_n = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin \frac{n\pi x}{a}$, $E_n = n^2 \frac{\hbar^2 \pi^2}{2\, ma^2}$ et $n = 1, 2, \ldots$

Pour $t = 0$, elle devient : $\sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n \varphi_n$

on a donc : $\sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n \varphi_n = \frac{1}{\sqrt{a}} \left(\sin \frac{\pi x}{a} + \sin \frac{2\pi x}{a} \right)$

On peut remarquer que le second membre s'écrit également :

$$f_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\sqrt{\frac{2}{a}} \sin \frac{\pi x}{a} + \sqrt{\frac{2}{a}} \sin \frac{2\pi x}{a} \right)$$

On a donc les résultats suivants :

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \text{ avec } |\alpha_1|^2 + |\alpha_2|^2 = 1$$

et $\alpha_n = 0$ quel que soit n différent de 1 ou 2.

Dans cet exemple, la détermination de la valeur des paramètres qui interviennent dans la solution générale de l'équation de Schrödinger est facile parce que f_0 se présente sous la forme de la somme des fonctions φ_1 et φ_2. On dit encore que f_0 est *décomposée* sur les fonctions φ_n. La théorie montre que la fonction d'onde initiale f_0 peut toujours être décomposée sur les fonctions $\varphi_E(x, y, z)$ des états stationnaires de l'équation de Schrödinger.

La barrière de potentiel

Une particule de masse m qui se meut suivant l'axe Ox est soumise à un potentiel représenté sur la *figure* 9 et tel que :

$$\text{si } x < 0 \quad V(x) = 0$$
$$\text{si } x \geqslant 0 \quad V(x) = V_0 > 0$$

A gauche de l'origine 0 des abscisses, la particule n'est soumise à aucune force. Dès qu'elle atteint le point d'abscisse zéro, elle est soumise à une force qui la repousse vers la gauche, c'est-à-dire vers les points d'abscisse négative. A droite du point d'abscisse zéro, la particule n'est à nouveau soumise à aucune force. Comme précédemment, nous allons étudier ce problème en mécanique newtonienne et en mécanique classique.

● *Étude en mécanique newtonienne*

En mécanique newtonienne, la particule a une vitesse constante dans chacun des deux demi-axes, le demi-axe négatif que nous appelons région I et le demi-axe positif que nous appelons région II. Si nous appelons $\vec{v}_{\mathrm{I}}$ et $\vec{v}_{\mathrm{II}}$ sa vitesse dans ces deux régions, on a la relation :

$$\frac{1}{2} m\vec{v}_{\mathrm{I}}^2 = V_0 + \frac{1}{2} m\vec{v}_{\mathrm{II}}^2$$

on voit, sur cette relation, que $\vec{v}_{\mathrm{II}}$ n'est différent de zéro que si : $\frac{1}{2} m\vec{v}_{\mathrm{I}}^2 > V_0$

Il faut donc distinguer deux cas :

— Si $\frac{1}{2} m\vec{v}_{\mathrm{I}}^2 \leqslant V_0$, la particule ne peut se mouvoir que dans la région I. Lancée dans cette région à l'instant initial vers le point d'abscisse zéro, la particule se dirige vers ce point avec une vitesse constante égale à la vitesse initiale. Quand elle atteint le point d'abscisse nulle, elle rebrousse chemin et se dirige vers les points d'abscisse de plus en plus négative avec une vitesse constante et égale en module à la vitesse initiale.

— Si $\frac{1}{2} m\vec{v}_{\mathrm{I}}^2 > V_0$, la particule peut se mouvoir dans les deux régions. Elle passe d'une région à l'autre en changeant de vitesse, la vitesse dans la région I étant plus grande que celle dans la région II. Lancée dans la région I à l'instant initial vers le point d'abscisse nulle, la particule se dirige vers ce point avec une vitesse constante égale à la vitesse initiale. Quand elle atteint ce point, elle passe dans la région II en étant ralentie.

De cette étude en mécanique newtonienne, il faut essentiellement retenir que, si $\frac{1}{2} m\vec{v}_{\mathrm{I}}^2 < V_0$, la particule lancée dans la région I à l'instant initial ne peut pas passer dans la région II : elle en est empêchée par une barrière de potentiel. On va voir que ce n'est pas le cas en mécanique quantique.

● *Étude en mécanique quantique*

Pour traiter le problème en mécanique quantique, on va d'abord déterminer les états stationnaires,

$$\varphi_E(x)\, e^{-\frac{iEt}{\hbar}}$$

Dans la région I, on a : $-\frac{\hbar^2}{2\, m} \frac{d^2\varphi_E}{dx^2} = E\varphi_E$

Cette équation a pour solution : $Ae^{ikx} + Be^{-ikx}$
où A et B sont des constantes arbitraires, et où :

$$k = \sqrt{\frac{2\, mE}{\hbar^2}}$$

Dans la région II, on a : $-\frac{\hbar^2}{2\, m} \frac{d^2\varphi_E}{dx^2} = (E - V_0)\, \varphi_E$

Cette équation a pour solution : $A'e^{k'x} + B'e^{-k'x}$
où A′ et B′ sont des constantes arbitraires et où :

$$k' = \sqrt{\frac{2\, m\, (V_0 - E)}{\hbar^2}} \quad \text{si} \quad V_0 - E > 0$$

et : $$k' = i\sqrt{\frac{2\, m\, (E - V_0)}{\hbar^2}} \quad \text{si} \quad E - V_0 > 0$$

La fonction $\varphi_E(x)$ s'écrit donc :

$$\varphi_E(x) = \begin{cases} Ae^{ikx} + Be^{-ikx} & \text{pour } x < 0 \\ A'e^{k'x} + B'e^{-k'x} & \text{pour } x > 0 \end{cases}$$

On va voir que, pour des raisons physiques, les constantes A, B, A′ et B′ ne sont pas quelconques. En réalité, le potentiel $V(x)$ ne peut pas varier de façon discontinue, mais nécessairement de façon continue, bien que rapide. Aussi doit-on imposer à la fonction $\varphi_E(x)$ et à sa dérivée $\frac{d\varphi_E}{dx}$ d'être continues partout et en particulier en $x = 0$. Par ailleurs, il a été vu précédemment que $\varphi_E(x)$ doit rester bornée dans tout l'espace.

Pour achever la détermination de $\varphi_E(x)$, on doit distinguer deux cas correspondant aux deux cas rencontrés dans le traitement du problème par la mécanique newtonienne.

— Si $E < V_0$, $\varphi_E(x)$ s'écrit :

$$\varphi_E(x) = \begin{cases} Ae^{ikx} + Be^{-ikx} & \text{pour } x < 0 \\ A'e^{k'x} + B'e^{-k'x} & \text{pour } x > 0 \end{cases} \quad k \text{ et } k' \text{ réels}$$

Lorsque x tend vers $+\infty$, la fonction $A'e^{k'x}$ tend vers $+\infty$. Pour maintenir bornée $\varphi_E(x)$, il faut imposer $A' = 0$. Par ailleurs, la continuité de $\varphi_E(x)$ et de sa dérivée en $x = 0$ entraîne les relations suivantes entre A, B et B′ :

$$A + B = B' \quad (\text{continuité de } \varphi_E(x))$$

$$ik\,(A - B) = -k'B' \left(\text{continuité de } \frac{d\varphi_E}{dx}\right)$$

A partir de ces deux équations, on peut calculer A et B en fonction de B′. On obtient :

$$A = \frac{B'}{2}\left(1 + i\frac{k'}{k}\right) \text{ et } B = \frac{B'}{2}\left(1 - i\frac{k'}{k}\right)$$

D'où l'expression de $\varphi_E(x)$:

$$\varphi_E(x) = \begin{cases} B'\left(\cos kx - \frac{k'}{k} \sin kx\right) & \text{si } x < 0 \\ B'e^{-k'x} & \text{si } x > 0 \end{cases}$$

▶ *A gauche, figure 10 : représentation graphique de la variation de $|\varphi_E(x)|^2$ en fonction de x. A droite, figure 11 : représentation de $|\varphi_E(x)|^2$ dans le cas où V_0 est infini.*

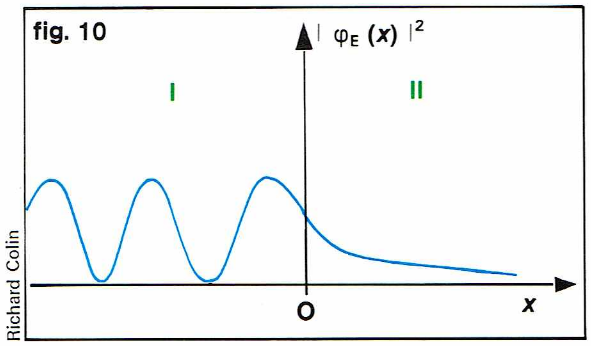

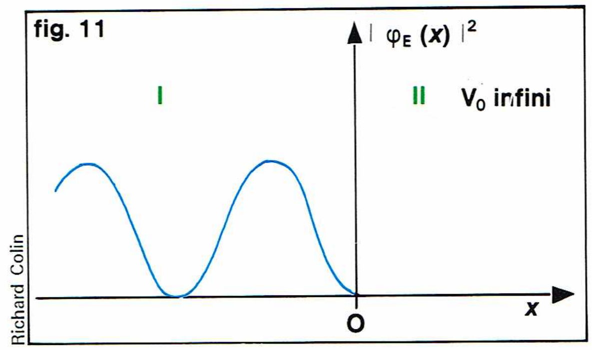

On voit que $\varphi_E(x)$ est déterminée à un coefficient près, B′. Ce résultat est assez général. Ce coefficient est déterminé en imposant à $\varphi_E(x)$ d'être normée ; ce qui n'est possible que lorsque $\varphi_E(x)$ est de carré sommable.

Lorsque la fonction d'onde de la particule est un état stationnaire $\varphi_E(x)\, e^{\frac{-iEt}{\hbar}}$ la probabilité de trouver la particule dans la région II est proportionnelle à $|B'|^2 e^{-2k'x}$. On voit que cette probabilité n'est pas nulle. Ce résultat est contraire au résultat obtenu en mécanique classique. Lorsque la fonction d'onde est une superposition d'états stationnaires d'énergies voisines, on a ce résultat pour chaque état stationnaire et donc pour leur superposition. On a représenté sur la *figure* 10 la variation de $|\varphi_E(x)|^2$ en fonction de x : la probabilité de trouver la particule dans l'espace II décroît exponentiellement. Cette décroissance est d'autant plus rapide que k' est plus grand. Pour estimer la profondeur de pénétration de la particule dans l'espace II, on peut convenir de considérer $e^{-2k'x}$ comme négligeable lorsque x devient plus grand que l tel que $2\,k'l = 1$. On a alors :

$$l = \frac{1}{2\,k'} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\hbar^2}{2\,m\,(V_0 - E)}}$$

On voit d'après cette formule que la profondeur de pénétration de la particule dans la région II est d'autant plus petite que $(V_0 - E)$ est grand. Cette propriété de la particule quantique de pénétrer dans la région II même si son énergie cinétique est inférieure à la hauteur V_0 de la barrière de potentiel est à l'origine d'un effet intéressant, l'*effet tunnel*, qui sera présenté ultérieurement. Notons enfin que cet effet est analogue au phénomène des ondes évanescentes de l'électromagnétisme.

Lorsque l'énergie E de la particule reste finie, et que V_0 tend vers l'infini, on voit que l tend vers zéro. On peut alors vérifier que la dérivée $\frac{d\varphi_E}{dx}$ n'est plus continue en $x = 0$, mais φ_E reste continue. C'est ce qui explique pourquoi dans le puits infini on avait imposé seulement à $\varphi_E(x)$ d'être continue aux bornes de l'intervalle. On a représenté sur la *figure* 11 $|\varphi_E(x)|^2$ dans le cas où V_0 est infini.

— Si $E > V_0$, $\varphi_E(x)$ s'écrit :

$$\varphi_E(x) = \begin{cases} A e^{ikx} + B e^{-ikx} & \text{pour } x < 0 \\ A' e^{ik'x} + B' e^{-ik'x} & \text{pour } x > 0 \end{cases} \quad k \text{ et } k' \text{ réels}$$

Cette fonction est bornée dans tout l'espace quels que soient les coefficients A, B, A′ et B′. Les seules conditions à lui imposer sont d'être continue ainsi que sa dérivée au point d'abscisse $x = 0$. On obtient ainsi les relations :

$$A + B = A' + B' \quad \text{et} \quad k\,(A - B) = k'\,(A' - B')$$

A partir de ces deux équations, on peut calculer A′ et B′ en fonction de A et B. On obtient :

$$A' = \frac{1}{2\,k'}\,[A\,(k' + k) + B\,(k' - k)]$$

$$B' = \frac{1}{2\,k'}\,[A\,(k' - k) + B\,(k' + k)]$$

On voit que $\varphi_E(x)$ dépend de deux paramètres A et B. On peut exprimer ceci de la manière suivante : $\varphi_E(x)$ s'écrit comme une combinaison linéaire des deux fonctions $\varphi_E^{(1)}(x)$ et $\varphi_E^{(2)}(x)$ obtenues en donnant au couple (A, B) deux couples de valeurs arbitrairement choisies. Les valeurs les plus simples qu'on puisse choisir sont (A = 1, B = 0) et (A = 0 et B = 1). On obtient ainsi l'expression suivante pour $\varphi_E^{(1)}(x)$ et $\varphi_E^{(2)}(x)$:

$$\varphi_E^1(x) = \begin{cases} e^{ikx} & \text{pour } x \leqslant 0 \\ \frac{k' + k}{2\,k'}\, e^{ik\,x} + \frac{k' - k}{2\,k'}\, e^{-ik'x} & \text{pour } x \geqslant 0 \end{cases}$$

et :

$$\varphi_E^2(x) = \begin{cases} e^{-ikx} & \text{pour } x \leqslant 0 \\ \frac{k' - k}{2\,k'}\, e^{ik'x} + \frac{k' + k}{2\,k'}\, e^{-ik'x} & \text{pour } x \geqslant 0 \end{cases}$$

Si les fonctions $\varphi_E^{(1)}(x)$ et $\varphi_E^{(2)}(x)$ étaient de carré sommable, on multiplierait chacune des deux fonctions par la constante qui permettrait de la normer. On peut vérifier que le rapport des deux fonctions n'est pas constant ; on dit encore que ces deux fonctions sont linéairement indépendantes.

En mécanique quantique, plutôt que de dire que la partie spatiale $\varphi_E(x)$ des états stationnaires $\varphi_E(x)\, e^{-\frac{iEt}{\hbar}}$ dépend de deux paramètres arbitraires, on préfère définir les fonctions $\varphi_E^{(1)}(x)$ et $\varphi_E^{(2)}(x)$, et dire que pour une valeur donnée E de l'énergie, telle que $E > V_0$, on a deux états stationnaires qui sont :

$$\varphi_E^{(1)}(x)\, e^{-\frac{iEt}{\hbar}} \quad \text{et} \quad \varphi_E^{(2)}(x)\, e^{-\frac{iEt}{\hbar}}$$

Lorsque l'on écrira la solution générale de l'équation de Schrödinger, on considérera ces deux états stationnaires comme indépendants. On dit encore que chaque valeur E de l'énergie telle que $E > V_0$ a une *dégénérescence de degré* 2.

La signification physique des états stationnaires formés à partir de $\varphi_E^{(1)}$ et $\varphi_E^{(2)}$ n'est pas facile à trouver. Aussi va-t-on changer ces fonctions, ce qu'on a le droit de faire mathématiquement. En effet, le problème de la détermination de ces fonctions se pose de la manière suivante : la fonction $\varphi_E(x)$ dépend de quatre paramètres A, B, A′, B′ qui sont reliés entre eux par deux relations. La fonction $\varphi_E(x)$ dépend donc de deux paramètres arbitraires ; elle peut toujours s'exprimer comme une combinaison linéaire de deux fonctions obtenues chacune en fixant la valeur de deux des quatre paramètres. Ainsi, en prenant A = 1 et B′ = 0, on obtient une fonction $\varphi_E^{(1')}$ qui est définie par :

$$\varphi_E^{(1')}(x) = \begin{cases} e^{ikx} + \frac{k - k'}{k' + k}\, e^{-ikx} & \text{pour } x \leqslant 0 \\ \frac{2\,k}{k + k'}\, e^{ik'x} & \text{pour } x \geqslant 0 \end{cases}$$

En choisissant B′ = 1 et A = 0, on obtient une fonction $\varphi_E^{(2')}$ qui est définie par :

$$\varphi_E^{(2')}(x) = \begin{cases} \frac{2\,k'}{k + k'}\, e^{-ikx} & \text{pour } x \leqslant 0 \\ \frac{k' - k}{k + k'}\, e^{ik'x} + e^{-ik'x} & \text{pour } x \geqslant 0 \end{cases}$$

On peut vérifier que les fonctions $\varphi_E^{(1')}$ et $\varphi_E^{(2')}$ sont linéairement indépendantes et que, par ailleurs, les fonctions $\varphi_E^{(1)}$ et $\varphi_E^{(2)}$ sont chacune des combinaisons linéaires de $\varphi_E^{(1')}$ et $\varphi_E^{(2')}$.

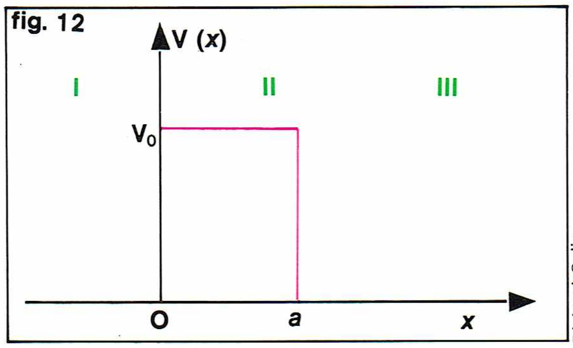

Richard Colin

◀ *Figure 12 : effet tunnel; la particule se meut le long de l'axe Ox et est soumise au potentiel V(x).*

La signification physique des états stationnaires

$$\varphi_E^{(1')} e^{-\frac{iEt}{\hbar}} \text{ et } \varphi_E^{(2')} e^{-\frac{iEt}{\hbar}}$$

est aisée. Le premier contient dans la région I une onde plane qui se dirige vers la région II et une onde réfléchie qui se dirige vers les x décroissants, et dans la région II une onde transmise se dirigeant vers les x croissants. Le second état stationnaire contient dans la région II une onde incidente qui se dirige vers l'origine et une onde réfléchie qui se dirige vers les x croissants, et dans la région I une onde transmise qui se dirige vers les x décroissants.

Ces résultats entraînent que si, à l'instant initial, la particule est dans la région I et se dirige vers le point d'abscisse nulle avec une énergie E supérieure à V_0, la probabilité pour qu'elle rebondisse n'est pas nulle. Ce résultat n'est pas acceptable en mécanique newtonienne. On peut d'ailleurs calculer la probabilité pour que la particule rebondisse et celle pour qu'elle passe dans la région II. On constate que la probabilité pour qu'elle rebondisse diminue lorsque l'énergie de la particule E augmente par rapport à V_0 ; on tend ainsi vers le résultat obtenu en mécanique classique. Tous ces résultats ont de grandes analogies avec ceux obtenus dans les problèmes de propagation des ondes lumineuses.

Effet tunnel

On considère une particule de masse m qui se meut le long de l'axe Ox, en étant soumise au potentiel V (x) (*fig.* 12). Ce potentiel est tel que :

$$V(x) = 0 \text{ si } x < 0 \text{ et } x > a$$
$$V(x) = V_0 > 0 \text{ si } 0 \leqslant x \leqslant a$$

Comme précédemment, il est intéressant de comparer l'étude en mécanique newtonienne et et celle en mécanique quantique. On considérera trois régions :

— la région I correspondant à $x < 0$;

— la région II correspondant à $0 \leqslant x \leqslant a$;

— la région III correspondant à $x > a$.

● *Étude en mécanique newtonienne*

Dans chaque région, la particule a une vitesse constante en module. Si on appelle v_I, v_{II}, v_{III} le module de la vitesse dans chacune des régions, on a la relation :

$$E = \frac{1}{2} m v_I^2 = \frac{1}{2} m v_{III}^2 = V_0 + \frac{1}{2} m v_{II}^2$$

où E est l'énergie de la particule. Il est évident sur cette relation que v_I^2 et v_{III}^2 sont égaux. Pour pousser l'étude, il faut distinguer deux cas : $E \leqslant V_0$ et $E > V_0$

— Si $E > V_0$ et si la particule est lancée dans la région I avec une vitesse initiale dirigée vers le point d'abscisse nulle, elle se dirige vers ce point avec une vitesse de module constant v_I. Arrivée en ce point, elle est freinée par la variation du potentiel, mais passe quand même dans la région II qu'elle traverse avec une vitesse de module v_{II} constant défini par :

$$\frac{1}{2} m v_{II}^2 = \frac{1}{2} m v_I^2 - V_0$$

On voit sur cette relation que v_{II} est inférieur à v_I. Arrivée au point d'abscisse a, la particule est accélérée par la variation du potentiel. Elle passe dans la région III qu'elle parcourt avec une vitesse de module v_{III} constant égal à v_I. Si l'on avait lancé la particule dans la région III en direction du point d'abscisse nulle, on aurait eu des résultats analogues.

— Si $E \leqslant V_0$, la particule ne peut pas se mouvoir dans la région II. On a en effet :

$$E = V_0 + \frac{1}{2} m v_{II}^2 \Rightarrow v_{II} = 0$$

Lorsque la particule est lancée dans la région I, elle y reste : en effet, si, à l'instant initial, sa vitesse est dirigée vers le point d'abscisse nulle, arrivée en ce point, elle rebrousse chemin, sa vitesse gardant la même valeur en module. Il en est de même si la particule est lancée dans la région III.

Dans l'étude quantique, on va trouver que même les états stationnaires d'énergie $E < V_0$ indiquent pour la particule une probabilité non nulle de passer de la région I à la région III, et inversement. Ce phénomène est connu sous le nom d'*effet tunnel*.

● *Étude en mécanique quantique*

La fonction spatiale φ_E (x) des états stationnaires vérifie l'équation suivante :

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2\varphi_E}{dx^2} = E\varphi_E \text{ si } x < 0 \text{ et si } x > a$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2\varphi_E}{dx^2} = (E - V_0)\,\varphi_E \text{ si } 0 \leqslant x \leqslant a$$

On rappelle les conditions mathématiques — lesquelles, on l'a déjà vu, ont pour origine une raison physique — que doit satisfaire φ_E (x) :

* être bornée partout sur l'axe $\overrightarrow{Ox}$;

* être définie et continue ainsi que sa dérivée en $x = 0$ et $x = a$.

Comme dans l'étude faite en mécanique classique, on va distinguer deux cas :

— Si $E > V_0$, les équations différentielles écrites précédemment ont pour solutions :

$$\varphi_E(x) = \begin{cases} Ae^{ikx} + Be^{-ikx} \text{ avec } k = \sqrt{\dfrac{2mE}{\hbar^2}} \text{ si } x < 0 \\ A'e^{ik'x} + B'e^{-ik'x} \\ \quad \text{avec } k' = \sqrt{\dfrac{2m(E - V_0)}{\hbar^2}} \text{ si } 0 \leqslant x \leqslant a \\ A''e^{ikx} + B''e^{-ikx} \text{ si } x > a \end{cases}$$

On a par ailleurs les conditions :

$A + B = A' + B'$ (continuité de φ_E en $x = 0$)

$ik\,(A - B) = ik'\,(A' - B')$

$$\left(\text{continuité de } \frac{d\varphi_E}{dx} \text{ en } x = 0\right)$$

$A'e^{ik'a} + B'e^{-ik'a} = A''e^{ika} + B''e^{-ika}$

(continuité de φ_E en $x = a$)

$ik'\,(A'e^{ik'a} - B'e^{-ik'a}) = ik\,(A''e^{ika} - B''e^{-ika})$

$$\left(\text{continuité de } \frac{d\varphi_E}{dx} \text{ en } x = a\right)$$

φ_E (x) dépend donc de six paramètres reliés entre eux par quatre relations. φ_E (x) dépend donc de deux paramètres arbitraires ou encore indépendants entre eux. On en déduit, comme précédemment, qu'à chaque valeur de l'énergie, on peut associer deux états stationnaires :

$$\varphi_E^{(1)} e^{-\frac{iEt}{\hbar}} \text{ et } \varphi_E^{(2)} e^{-\frac{iEt}{\hbar}}$$

déterminés en fixant la valeur de deux des six paramètres.

Pour que ces états stationnaires soient susceptibles d'une interprétation aisée, on choisit $A = 1$ et $B'' = 0$ pour déterminer $\varphi_E^{(1)}$, et $B'' = 1$ et $A = 0$ pour déterminer $\varphi_E^{(2)}$. L'interprétation de ces états stationnaires est la même que celle des états stationnaires trouvés dans l'étude de la barrière de potentiel pour le cas $E > V_0$.

L'état stationnaire $\varphi_E^{(1)} e^{-\frac{iEt}{\hbar}}$ contient dans les régions I et II une onde incidente et une onde réfléchie, et dans la région III une onde transmise. De même, l'état stationnaire $\varphi_E^{(2)} e^{-\frac{iEt}{\hbar}}$ contient dans les régions II et III une onde incidente et une onde réfléchie, et dans la région I une onde transmise. Les états stationnaires du type $\varphi_E^{(1)} e^{-\frac{iEt}{\hbar}}$ serviront à décrire une particule lancée dans la région I

▶ *Figure 13 : représentation schématique du potentiel* V*(r) auquel est soumise la particule alpha.*

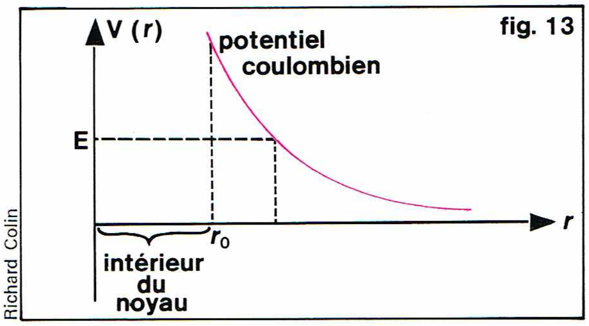

Richard Colin

dans la direction des x croissants. Cette particule aura une probabilité non nulle de passer dans la région III. On peut définir un *coefficient de transmission* T qui dépend de ($E - V_0$) et qui croît avec ($E - V_0$). Les états stationnaires du type $\varphi_E^{(2)} e^{-\frac{iEt}{\hbar}}$ serviront à décrire une particule lancée dans la région III dans la direction des x décroissants. Comme dans le cas précédent, on aura une probabilité non nulle pour que la particule rebondisse, et une probabilité non nulle pour qu'elle soit transmise. Le rebondissement de la particule lorsque $E > V_0$ est évidemment un phénomène qui n'existe pas en mécanique newtonienne.

— Si $E < V_0$, les équations différentielles qui vérifient $\varphi_E(x)$ ont pour solution :

$$\varphi_E(x) = \begin{cases} Ae^{ikx} + Be^{-ikx} \text{ avec } k = \sqrt{\frac{2\,mE}{\hbar^2}} \text{ si } x < 0 \\ A'e^{k'x} + B'e^{-k'x} \text{ avec } k' = \sqrt{\frac{2\,m\,(V_0 - E)}{\hbar^2}} \text{ si } 0 < x < a \\ A''e^{ikx} + B''e^{-ikx} \text{ si } x > a \end{cases}$$

Comme précédemment, les conditions de continuité de $\varphi_E(x)$ et de $\frac{d\varphi_E}{dx}$ en $x = 0$ et $x = a$ permettent d'écrire quatre équations entre les six paramètres A, B, A′, B′, A″, et B″. La fonction φ_E dépend donc de deux paramètres. La dégénérescence de chaque valeur E de l'énergie est donc égale à 2. A chaque valeur de l'énergie correspondent les deux états stationnaires

$$\varphi_E^{(1)} e^{-\frac{iEt}{\hbar}} \text{ et } \varphi_E^{(2)} e^{-\frac{iEt}{\hbar}}$$

$\varphi_E^{(1)}$ étant définie en fixant $A = 1$ et $B'' = 0$, et $\varphi_E^{(2)}$ étant définie en fixant $A = 0$ et $B'' = 1$. Les résultats que contiennent ces ondes stationnaires sont les suivants :

— Si la particule est lancée dans la région I dans la direction des x croissants, elle a une probabilité non nulle de rebondir et de rester dans la région I, mais elle a également une probabilité non nulle de passer dans la région III. Ce phénomène est connu sous le nom d'*effet tunnel* et n'existe pas en mécanique classique.

— Si la particule est lancée dans la région III dans la direction des x décroissants, on a des résultats analogues : rebondissement et transmission.

On connaît de nombreux phénomènes qui s'interprètent au moyen de l'*effet tunnel*. Ainsi :

▼ *Traces de particules alpha en chambre de Wilson.*

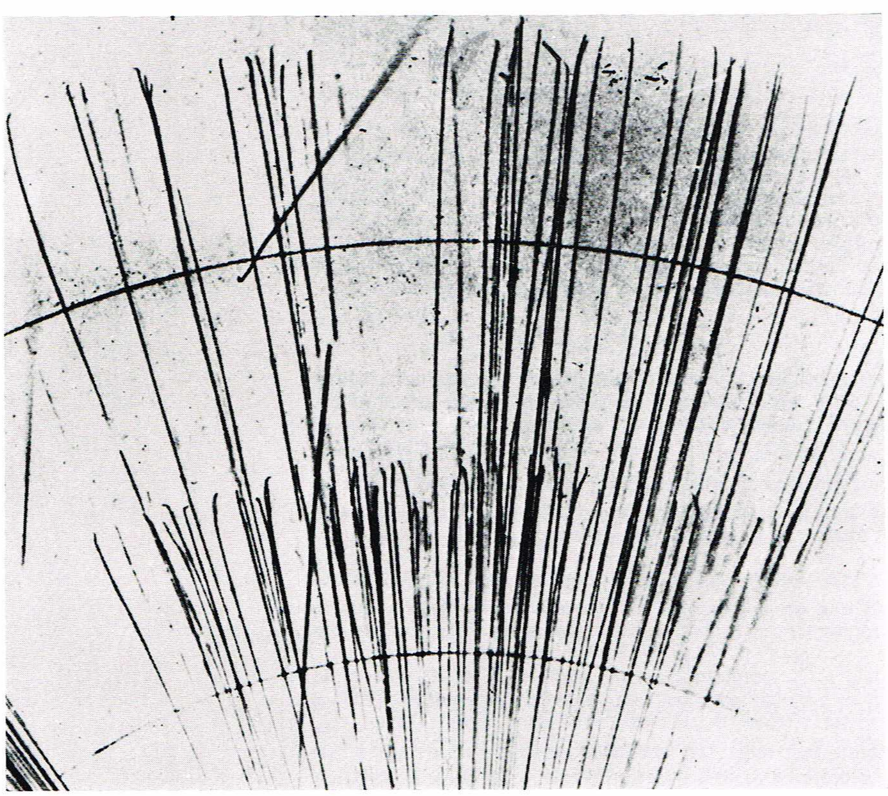

Palais de la Découverte, Paris

— Lorsque l'on applique une différence de potentiel entre deux plaques métalliques séparées par une mince couche d'isolant, on obtient un « courant tunnel ». A l'intérieur de chaque plaque, les électrons sont libres. Quand ils tentent de passer dans l'isolant, ils sont repoussés par un potentiel V (x) qui a l'allure de celui représenté sur la *figure* 12, l'énergie E des électrons étant inférieure à V_0. Aussi les électrons ne peuvent-ils passer d'un métal à l'autre que par effet tunnel. La différence de potentiel n'a pour but que de canaliser les électrons vers l'isolant.

— L'émission par certains noyaux d'une particule alpha (ions He^{++}) a été interprétée dès 1928 par Gamow comme un effet tunnel.

On peut schématiquement représenter le potentiel V (r) auquel est soumise la particule alpha (*fig.* 13) : à l'intérieur du noyau de rayon r_0, le potentiel est constant; nous l'avons pris nul. A l'extérieur du noyau, le potentiel a pour origine la répulsion coulombienne exercée par le noyau chargé positivement sur la particule alpha. On voit que, si l'énergie E de la particule est inférieure à la variation du potentiel en r_0, la particule alpha peut cependant sortir du noyau par effet tunnel. En utilisant la théorie précédente, les prévisions qui sont faites sont en accord avec les résultats expérimentaux.

— La molécule d'ammoniac NH_3 a la forme d'une pyramide dont les quatre sommets sont occupés par l'atome d'azote et les trois atomes d'hydrogène. L'atome d'azote a deux positions d'équilibre, une de chaque côté du plan des hydrogènes, et il peut osciller autour de chacune de ces positions. L'atome d'azote est donc dans un double puits symétrique représenté schématiquement sur la *figure* 14.

Si l'énergie E_0 de l'atome est inférieure à V_0, l'atome aura un mouvement oscillatoire dans la région I ou dans la région II. En outre, par effet tunnel, il peut passer de I à II. La fréquence de ce dernier mouvement sert de référence dans les horloges atomiques.

— Dans la liaison hydrogène, on a un phénomène analogue. L'atome d'hydrogène situé entre deux atomes d'oxygène est dans un double puits symétrique. Par effet tunnel, il peut passer d'une position à l'autre (*fig.* 15).

Du point de vue théorique, l'étude de ces cas simples a permis d'illustrer la recherche de la fonction d'onde d'une particule, connaissant la fonction d'onde à l'instant initial. On a vu l'importance des états stationnaires pour résoudre ce problème. Cette étude a également montré qu'à une certaine valeur de l'énergie peuvent correspondre deux fonctions $\varphi_E(x)$. On dit que la valeur de l'énergie est dégénérée.

Outils mathématiques 2

Pour pouvoir développer le formalisme de la mécanique quantique, quelques notions mathématiques sont nécessaires.

Opérateurs

Considérons la fonction $f(x) = 3\,x^2 + 5\,x - 2$. Sa dérivée $\frac{df}{dx}$ est égale à $6\,x + 5$. L'opération de dérivation fait donc passer d'une fonction à une autre fonction, et nous noterons cette correspondance de la manière suivante :

$$3\,x^2 + 5\,x - 2 \xrightarrow{\frac{d}{dx}} 6\,x + 5$$

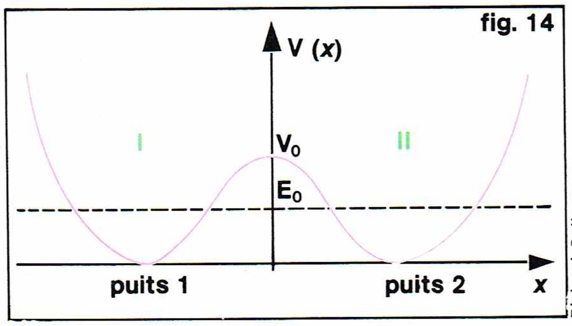

Richard Colin

◀ *Figure 14 : représentation schématique du double puits symétrique.*

Nous dirons que $\frac{d}{dx}$ est l'opérateur qui, agissant sur $f(x)$, lui fait correspondre une nouvelle fonction. Il est clair que l'opérateur $\frac{d}{dx}$ ne peut agir sur n'importe quelle fonction ; il est nécessaire que celle-ci soit *dérivable*. On dit que $\frac{d}{dx}$ est défini sur l'ensemble des fonctions dérivables.

L'opérateur $\frac{d}{dx}$ jouit de propriétés importantes. En effet, f_1 *et* f_2 étant deux fonctions dérivables, on a :

$$\frac{d}{dx}(f_1 + f_2) = \frac{df_1}{dx} + \frac{df_2}{dx}$$

Par ailleurs, f étant une fonction dérivable et λ une constante, on a :

$$\frac{d}{dx}(\lambda f) = \lambda \frac{df}{dx}$$

On traduit ces deux propriétés en disant que $\frac{d}{dx}$ est *opérateur linéaire*. Il existe bien d'autres opérateurs linéaires définis sur des ensembles de fonctions. Citons deux exemples qui seront utiles ultérieurement :

$$f \xrightarrow{\frac{d^2}{dx^2}} \frac{d^2f}{dx^2}$$

$$f \xrightarrow{x} xf$$

Il est facile de vérifier que ces deux opérateurs sont linéaires. Pour le premier, c'est évident. Pour le second, on a bien :

$$x(f_1 + f_2) = xf_1 + xf_2$$
$$x(\lambda f) = \lambda(xf)$$

De façon générale, une fonction V (x) est un opérateur linéaire défini sur l'ensemble des fonctions.

Fonctions propres et valeurs propres d'un opérateur linéaire

Considérons la fonction e^{3x}. On a : $\frac{d}{dx}(e^{3x}) = 3\,e^{3x}$

L'opérateur $\frac{d}{dx}$ agissant sur la fonction e^{3x} donne donc une fonction proportionnelle à e^{3x}, la constante de proportionnalité étant égale à 3. On dit que e^{3x} est une *fonction propre* de l'opérateur linéaire $\frac{d}{dx}$, et que 3 est la *valeur propre* associée.

Souvent, il n'est pas nécessaire de rechercher toutes les fonctions propres d'un opérateur. Par exemple, on peut se limiter à la recherche des fonctions propres bornées. Dans le cas de l'opérateur $\frac{d}{dx}$, cette exigence nous conduit à ne retenir que les fonctions e^{ikx} où k est un nombre réel. De façon générale, en mécanique quantique où la recherche des fonctions propres d'opérateurs linéaires joue un rôle fondamental, on se limite, par suite de leur signification physique, à des fonctions de carré sommable, ou bornées.

Produit scalaire et norme

En géométrie élémentaire, on définit le produit scalaire de deux vecteurs comme une application bilinéaire qui à deux vecteurs $\vec{V}_1$ et $\vec{V}_2$ fait correspondre un nombre qu'on peut noter $<\vec{V}_1 \mid \vec{V}_2>$. Certains ensembles de fonctions pouvant être munis d'une structure d'espace vectoriel, on peut parfois définir le produit scalaire de deux fonctions. Par exemple, l'ensemble des fonctions réelles d'une variable réelle x, continues dans l'intervalle $[a, b]$, peut être muni d'une structure d'espace vectoriel, et on peut définir le produit scalaire de deux fonctions f_1 et f_2, noté $<f_1 \mid f_2>$, par :

$$<f_1 \mid f_2> = \int_a^b f_1(x)\, f_2(x)\, dx$$

On peut vérifier que $<f_1 \mid f_2>$ possède toutes les propriétés d'un produit scalaire.

On appellera *norme* de la fonction f qu'on notera $\|f\|$ la racine carrée du produit scalaire de f par elle-même :

$$\|f\| = \sqrt{<f \mid f>}$$

Si $\|f\| = 1$ on dit que f est normée.

Lorsque l'on considère des fonctions de la variable réelle x qui peuvent prendre des valeurs complexes, on modifie légèrement la définition du produit scalaire afin que la norme reste réelle. On pose :

$$<f_1 \mid f_2> = \int_a^b f_1^*(x)\, f_2(x)\, dx$$

où f_1^* est la fonction complexe conjuguée de f_1.

Le produit scalaire permet de définir l'orthogonalité de deux fonctions. On dit que f_1 et f_2 sont *orthogonales* si leur produit scalaire est nul.

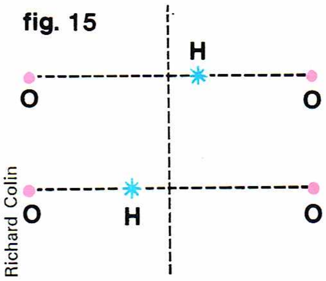

Richard Colin

▲ *Figure 15 : l'atome d'hydrogène situé entre deux atomes d'oxygène est dans un double puits symétrique.*

Bases orthonormées

Considérons un espace vectoriel à deux dimensions (*fig.* 16). Si l'on fait choix de deux vecteurs indépendants $\vec{u}_1$ et $\vec{u}_2$ (c'est-à-dire non colinéaires), on peut représenter tout vecteur $\vec{V}$ de l'espace par une combinaison linéaire de $\vec{u}_1$ et $\vec{u}_2$ (*fig.* 16a). On a : $\vec{V} = x_1\vec{u}_1 + x_2\vec{u}_2$; x_1 et x_2 sont appelées les *composantes* de $\vec{V}$ sur la base $\{\vec{u}_1, \vec{u}_2\}$. Les deux vecteurs $\vec{u}_1$ et $\vec{u}_2$ constituent une *base*. Il est important de remarquer que cette base n'est pas unique.

Si l'espace vectoriel est muni d'un produit scalaire, il est commode de choisir les vecteurs de base orthogonaux et normés. Soit $\vec{v}_1$ et $\vec{v}_2$ deux tels vecteurs (*fig.* 16b). On a :

$$\vec{V} = c_1\vec{v}_1 + c_2\vec{v}_2$$

Dans ce cas, on établit facilement les résultats suivants :

$$c_1 = <\vec{v}_1 \mid \vec{V}>$$
$$c_2 = <\vec{v}_2 \mid \vec{V}>$$

En outre, l'expression du produit scalaire de deux vecteurs $\vec{V}$ et $\vec{V}'$ de composantes respectivement c_1, c_2 et c_1', c_2' prend la forme particulièrement simple suivante :

$$<\vec{V} \mid \vec{V}'> = c_1c_1' + c_2c_2'$$

On en déduit : $\|\vec{V}\| = \sqrt{c_1^2 + c_2^2}$

Si l'espace vectoriel est de dimension infinie (comme c'est souvent le cas pour les espaces de fonctions rencontrées en mécanique quantique), on généralise ces résultats en prenant cependant quelques précautions.

Soit $\{f_n, n = 1, 2, ...\}$ un ensemble de fonctions orthonormées constituant une « base » d'un espace vectoriel de fonctions. Toute fonction f de cet espace peut s'écrire :

▼ *Figure 16 ; bases orthonormées : représentation d'un espace vectoriel à deux dimensions. $\vec{u}_1$ et $\vec{u}_2$ constituent une base* (a) ; *$\vec{v}_1$ et $\vec{v}_2$ sont les vecteurs de base orthogonaux et normés* (b).

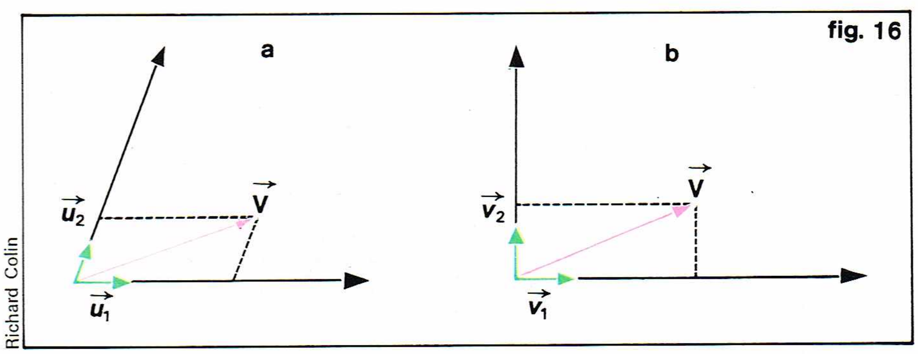

Richard Colin

$$f = \sum_{n=1}^{\infty} c_n f_n$$

avec $c_n = \int_a^b f_n\,(x)\,f\,(x)\,dx$

et $\int_a^b f^2\,(x)\,dx = \sum_{n=1}^{\infty} c_n^2$

Il est clair que ce dernier résultat n'a de sens que si la série du deuxième membre converge.

Dans le cas de fonctions d'une variable réelle à valeurs complexes, comme précédemment on a :

$$c_n = \int_a^b f_n^*\,(x)\,f\,(x)\,dx$$

et $\int_a^b f^*\,(x)\,f\,(x)\,dx = \sum_{n=1}^{\infty} c_n^* c_n = \sum_{n=1}^{\infty} |c_n|^2$

Opérateurs hermitiens

Le produit scalaire de deux fonctions est utile pour définir une classe particulièrement importante d'opérateurs : les *opérateurs hermitiens*. f et g étant deux fonctions et A un opérateur, si le produit scalaire de la fonction f par la fonction A (g) est égal au produit scalaire de la fonction A (f) par la fonction g, on dit que A est *hermitien*. On a donc :

$$<f \mid A\,(g)> \;=\; <A\,(f) \mid g>$$

L'intérêt des opérateurs hermitiens en mécanique quantique tient à leurs propriétés particulières. On ne retiendra que les deux propriétés suivantes :

— si A est un opérateur hermitien, le produit scalaire $<f \mid A\,(f)>$ est réel;

— si A est un opérateur hermitien, ses valeurs propres sont réelles et les fonctions propres correspondantes sont orthogonales.

On vérifie aisément que l'opérateur x est hermitien, mais il n'en est pas de même de l'opérateur $\frac{d}{dx}$. En effet :

$$\int_a^b f^*\,(x)\,\frac{dg}{dx}\,dx = -\int_a^b \frac{df^*}{dx}\,g\,(x)\,dx$$

si les fonctions f et g sont nulles aux bornes de l'intervalle $[a, b]$, ce qui est le cas dans les applications de la mécanique quantique. En revanche, l'opérateur $i\frac{d}{dx}$ est un opérateur hermitien.

Commutateurs

Étudions l'action successive ou produit des deux opérateurs x et $\frac{d}{dx}$ sur une fonction $f\,(x)$. Suivant l'ordre dans lequel agissent ces opérateurs, on obtient des résultats différents. En faisant d'abord agir x, puis $\frac{d}{dx}$, on a :

$$\frac{d}{dx}\,(x\,(f)) = f + x\frac{df}{dx}$$

En revanche, en faisant d'abord agir $\frac{d}{dx}$, puis x, on trouve simplement : $x\frac{df}{dx}$

Le produit des deux opérateurs x et $\frac{d}{dx}$ dépend donc de l'ordre dans lequel il est fait. On dit que les deux opérateurs x et $\frac{d}{dx}$ ne commutent pas, et on appelle commutateur la différence des produits. De façon générale, étant donné deux opérateurs A et B, leur commutateur est lui-même un opérateur noté [A, B], et on a :

$$[A, B] = AB - BA$$

Dans le cas des deux opérateurs x et $\frac{d}{dx}$, le calcul précédent montre que le commutateur $\left[\frac{d}{dx}, x\right]$ est l'opérateur qui laisse inchangée la fonction f. Ce résultat est vrai quel que soit f. On écrit : $\left[\frac{d}{dx}, x\right] = 1$

Les postulats de la mécanique quantique

L'espace des états

Tous les renseignements mécaniques concernant un système matériel peuvent être obtenus à partir de sa fonction d'onde. Cette fonction représente donc l'état du système. Par ailleurs, pour des raisons d'ordre probabiliste déjà vues, la fonction d'onde est nécessairement de carré sommable, ou à la rigueur bornée. L'ensemble des états possibles d'un système matériel est donc représenté par un ensemble de fonctions de carré sommable. Si, comme c'est le cas en électromagnétisme, on souhaite que la somme des deux états soit aussi un état, on est conduit à postuler que l'ensemble des états a une structure d'espace vectoriel. Cet ensemble est appelé l'*espace des états*. Il est intéressant d'y définir une base. On verra, par la suite, suivant quel critère on effectuera ce choix.

Les observables

Pour des raisons physiques liées au célèbre principe d'incertitude dont on verra un peu plus loin le sens exact, on est amené à postuler qu'à chaque grandeur physique on doit associer une *observable*, c'est-à-dire un opérateur hermitien dont l'ensemble des fonctions propres constitue une base de l'espace des états. En outre, toute mesure de la grandeur représentée par cet opérateur ne peut avoir comme résultat qu'une des valeurs propres de cet opérateur. Après la mesure, le système matériel est nécessairement dans l'état représenté par la fonction propre correspondant à la valeur propre trouvée. Mesurer une grandeur permet donc de préciser la fonction d'onde du système juste après la mesure. Par la suite, cette fonction va évoluer au cours du temps suivant l'équation de Schrödinger. On voit donc que le processus de mesure permet de fixer la fonction d'onde initiale du système; on dit encore que le processus de mesure permet de « préparer » le système.

Il est clair que, si on mesure deux fois de suite la même grandeur physique A, on doit retrouver le même résultat, c'est-à-dire la même valeur propre de A. Si, au contraire, après avoir mesuré A, on mesure B et que B n'ait pas les mêmes fonctions propres que A, après cette dernière mesure le système sera passé d'un état propre de A à un état propre de B. Ce résultat est un aspect du principe d'incertitude. L'état final du système dépend de l'ordre dans lequel les mesures de A et de B ont été faites.

Lorsque le système matériel est de façon générale dans un état ψ, nous savons que la mesure de A ne peut avoir pour résultat qu'une valeur propre de A. Mais comment prévoir laquelle? Pour répondre à cette question, un nouveau postulat est indispensable. L'expérience révèle que le résultat peut être n'importe quelle valeur propre. Et si l'on fait plusieurs mesures sur des systèmes identiques dans le même état ψ, la valeur moyenne de ces mesures est donnée par le produit scalaire $<\psi \mid A\psi>$.

Soit a_n et f_n les valeurs propres et les fonctions propres correspondantes de A; on a :

$$\psi = \sum_{n=1}^{\infty} c_n f_n$$

d'où : $<\psi \mid A\psi> \;=\; \sum_{n=1}^{\infty} |c_n|^2\,a_n$

Ainsi $|c_n|^2$ apparaît comme la probabilité de trouver la valeur propre a_n si l'on est dans l'état ψ.

Exemples d'observables

L'opérateur associé à la position d'une particule en mouvement sur une droite est représenté par x. Son action sur une fonction ψ se réduit à la multiplication par x. La recherche des valeurs propres et des fonctions propres de cet opérateur soulève quelques difficultés mathématiques. On se contentera d'indiquer que l'ensemble des valeurs propres de x est l'ensemble des nombres réels.

L'opérateur associé à l'impulsion p de la particule est $-i\hbar\frac{d}{dx}$. Cette forme est facile à comprendre. En effet, une particule d'impulsion déterminée est décrite par une onde plane $e^{-i\,(\omega t - kx)}$. Cette fonction est fonction propre de l'opérateur impulsion, et la valeur propre correspondante est égale à $\hbar k$. C'est un résultat que nous avons déjà rencontré.

Pour trouver l'expression d'opérateurs dépendants de x et de p, on prend l'expression classique, et on remplace x et p par les opérateurs correspondants. Ainsi, l'énergie cinétique $\frac{p^2}{2m}$ d'une particule en mouvement sur une droite est représentée par $-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2}{dx^2}$. Cet opérateur a les mêmes fonctions propres que l'impulsion, et les valeurs propres sont égales à $\frac{\hbar^2 k^2}{2m}$.

Si la particule est en mouvement dans un potentiel V (x), son énergie a pour expression $\frac{p^2}{2m} + V(x)$, et l'opérateur correspondant qu'on désigne traditionnellement par H est donc :

$$H = -\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2}{dx^2} + V(x)$$

Cet opérateur, appelé *hamiltonien* de la particule, joue un rôle important. Ses valeurs propres E sont les différentes valeurs possibles de l'énergie de la particule, et les fonctions propres correspondantes $\varphi_E(x)$ sont les parties spatiales des états stationnaires déjà rencontrées. La solution de l'équation de Schrödinger est donc ramenée, grâce au formalisme présent, à la recherche des fonctions propres et des valeurs propres de l'hamiltonien H. On a : $H\varphi = E\varphi$

On pourrait définir bien d'autres opérateurs, par exemple le *moment cinétique*. Cette grandeur joue un rôle fondamental dans l'étude des atomes. Dans l'espace à trois dimensions, le vecteur moment cinétique est représenté par trois opérateurs L_x, L_y, L_z. Pour obtenir leur expression, ici encore, on part de l'expression classique.

La méthode qui consiste à partir de l'expression classique d'une grandeur physique pour obtenir l'observable correspondante est appelée le *principe de correspondance*. Si la grandeur n'a pas d'analogue classique, c'est son étude expérimentale qui permet d'induire l'expression de l'observable. C'est ainsi qu'on a procédé pour découvrir et étudier le spin de l'électron dont l'analogue classique n'existe pas.

Le principe d'incertitude

Par suite de leur faible masse, les systèmes microscopiques sont perturbés au cours du processus de mesure. Si, par exemple, pour mesurer la position d'un électron, on l' « éclaire » en lui envoyant des photons, ces photons communiquent à l'électron une impulsion qui peut ne pas être négligeable devant l'impulsion initiale de l'électron ; par ailleurs, cette modification de l'impulsion est aléatoire (voir effet Compton). Par contre, on peut admettre qu'en prenant suffisamment de précautions, on peut rendre négligeable la perturbation produite par le processus de mesure sur un système macroscopique : ainsi, éclairer une balle de tennis en mouvement pour la photographier ne perturbe pas sa trajectoire, bien qu'elle soit heurtée par les photons. La conséquence importante de la perturbation par la mesure d'un système microscopique a déjà été signalée : les résultats de la mesure successive de deux grandeurs A et B dépendent de l'ordre dans lequel ces mesures sont faites.

Cette propriété fondamentale des systèmes microscopiques a été érigée en principe par Heisenberg, et se traduit mathématiquement par la non-commutation des observables A et B. De façon plus précise, Heisenberg a montré que les incertitudes ΔA et ΔB avec lesquelles A et B sont mesurés, sont reliées entre elles par une relation. Pour bien en comprendre le sens, il faut préciser ce qu'on entend par *incertitude* d'une mesure.

Prenons un exemple très simple. Supposons qu'on mesure par deux techniques différentes une même longueur et qu'on trouve les résultats suivants :

par la première technique	par la seconde technique
2,52 m	2,50 m
2,55 m	2,52 m
2,53 m	2,58 m
2,56 m	2,60 m

Des premiers résultats on déduit que la valeur moyenne des résultats est :

$$1/4\ (2{,}52 + 2{,}55 + 2{,}53 + 2{,}56) = 2{,}54 \text{ m}$$

et que la précision des mesures est de l'ordre de 1 à 2 cm. Des seconds résultats on déduit une valeur moyenne de 2,55 m, et une précision de l'ordre de 5 cm. L'incertitude sur le deuxième résultat est donc plus grande que sur le premier.

Pour définir mathématiquement l'incertitude de chacun des deux processus de mesure, on convient de faire la moyenne des carrés des écarts par rapport à la moyenne et d'en prendre la racine carrée. Ainsi l'incertitude du premier processus de mesure est :

$$\Delta_1 = \left[\frac{1}{4}(2{,}52 - 2{,}54)^2 + \frac{1}{4}(2{,}55 - 2{,}54)^2 + \frac{1}{4}(2{,}53 - 2{,}54)^2 + \frac{1}{4}(2{,}56 - 2{,}54)^2\right]^{1/2}$$

ou encore :

$$\Delta_1 = \sqrt{\frac{1}{4}\left[(2{,}52)^2 + (2{,}55)^2 + (2{,}53)^2 + (2{,}56)^2\right] - (2{,}54)^2}$$

On trouve ainsi $\Delta_1 = 1{,}5$ cm. En procédant de la même façon, on trouve que l'incertitude Δ_2 du deuxième processus de mesure est 4,1 cm.

En mécanique quantique, la valeur moyenne dans l'état ψ de l'observable A étant définie par $\langle\psi \mid A\psi\rangle$, l'incertitude est définie par :

$$\Delta A = \sqrt{\langle\psi \mid A^2\psi\rangle - \langle\psi \mid A\psi\rangle^2}$$

La première relation d'incertitude trouvée par Heisenberg est celle qui relie les incertitudes sur la position x et l'impulsion p. Il a trouvé : $\Delta x \cdot \Delta p \geqslant \frac{1}{2}\hbar$

Cette relation signifie que, plus on précise la position en diminuant son incertitude, moins l'impulsion est connue avec précision.

La démonstration des relations d'incertitude repose sur le caractère hermitien des observables et sur la valeur de leur commutateur. De façon générale, si A et B sont deux observables, on trouve :

$$\Delta A \cdot \Delta B \geqslant \frac{1}{2i} \langle \psi \mid [A, B]\, \psi\rangle$$

ce qui conduit bien à la relation entre x et p si l'on note que : $[x, p] = i\hbar$

Remarquons que, si A et B commutent, on ne trouve aucune limite inférieure au produit $\Delta A \cdot \Delta B$. Chaque grandeur peut être déterminée avec une précision aussi grande qu'on le désire. Mathématiquement, si les opérateurs commutent, on peut choisir un même ensemble de fonctions propres communes, et il est bien clair qu'après une mesure de A, le système étant dans un état propre de cette observable, la mesure de B donnera un résultat parfaitement déterminé qui est la valeur propre dans laquelle la mesure de A l'a préparé.

Le principe d'incertitude a un très grand nombre de conséquences. Citons par exemple le fait qu'en mécanique quantique, une particule ne peut jamais être au repos ; en effet, dans ce cas, sa position serait déterminée, et on aurait $x = 0$, mais, son impulsion étant nulle, on aurait aussi $p = 0$, ce qui contredirait la relation

$$\Delta x \cdot \Delta p \geqslant \frac{1}{2}\hbar$$

BIBLIOGRAPHIE

COHEN-TANNOUDJI C., DIU B., LALOE F., *Mécanique quantique,* t. I et II, Herman, 1973. - FERMI E., *Notes on Quantum Mechanics,* Phœnix Books, The University of Chicago Press, Chicago and London, 1961. - HEISENBERG W., *les Principes physiques de la théorie des quanta,* Paris, Gauthier-Villars, 1972. - LANDAU L., LIFCHITZ F., *Mécanique quantique,* éditions Mir, Moscou, 1967. - MATTHEWS P. T., *Introduction à la mécanique quantique,* Dunod, Paris, 1970. - MESSIAH A., *Mécanique quantique,* t. I et II, Dunod, Paris, 1964. - PAULING J., *Introduction to Quantum Mechanics with Application to Chemistry,* New York, London, Mc Graw-Hill Book Co., 1935.

fig. 1

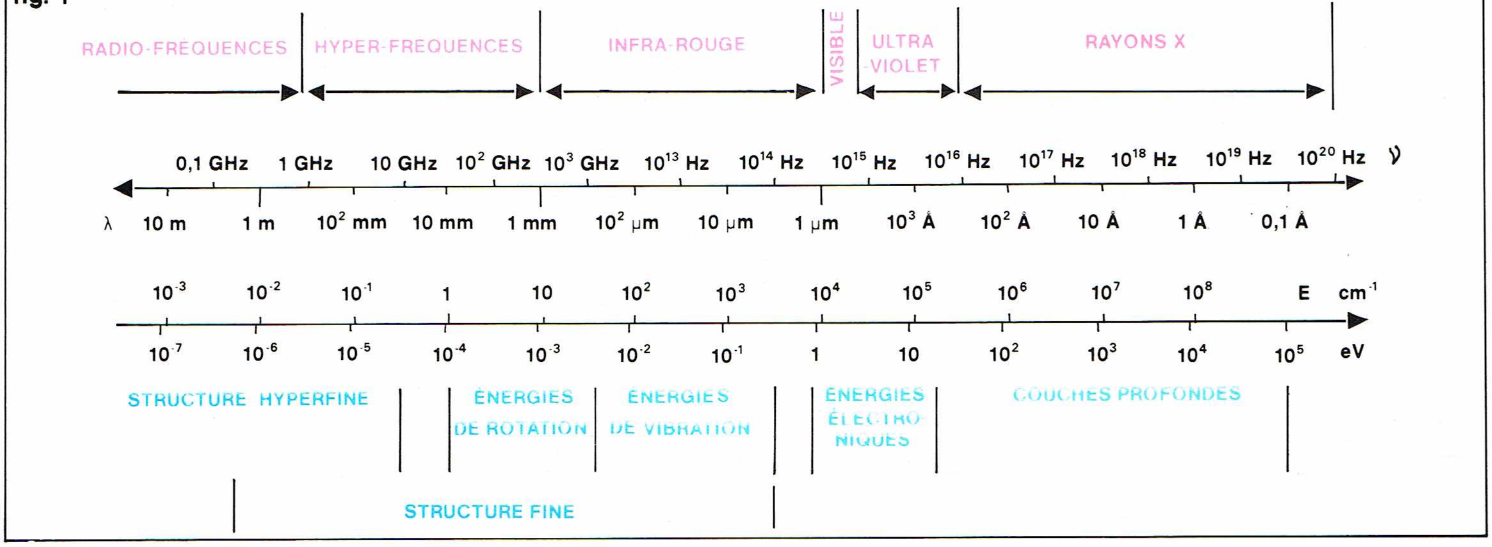

▲ ***Figure 1 : échelle d'énergie de la physique atomique et moléculaire.***

PHYSIQUE ATOMIQUE

Les grandes idées de la physique microscopique

Physique atomique et physique tout court

La physique atomique est l'étude de la structure de l'atome, des interactions entre les particules qui constituent l'atome, et des interactions entre un atome et d'autres systèmes (photons, particules, atomes). Nous verrons qu'elle se distingue radicalement de l'étude des constituants de l'atome, le noyau et les électrons, qui relèvent respectivement de la physique nucléaire et de la physique des particules élémentaires.

En revanche, la physique atomique est partie prenante dans d'autres branches de la physique : physique du solide et même physique des fluides, physique des plasmas, astrophysique et géophysique. Elle joue également un rôle considérable en chimie.

Quelles sortes d'interactions déterminent la structure de l'atome ? Une seule espèce, les interactions électromagnétiques. Ce sont elles qui, en physique atomique et moléculaire, sont à la base de toutes les forces, de tous les couplages (éventuellement par l'intermédiaire d'effets purement quantiques), qui fixent les énergies (*fig.* 1) et les dimensions. Rappelons quelles sont les autres interactions.

— *Les interactions fortes.* Leur portée est de 10^{-15} m, et malgré leur intensité, elles n'interviennent que très peu à des distances de l'ordre de 1 Å $= 10^{-10}$ m. Mais surtout un *électron (qui est un lepton) n'est pas sensible aux interactions fortes.* Ces dernières, en revanche, jouent un rôle fondamental en physique nucléaire.

— *Les interactions faibles.* Elles sont à très courte portée (probablement de l'ordre de 10^{-17} m), mais les électrons y sont sensibles, à l'inverse des interactions fortes. Elles jouent un rôle le plus souvent négligeable en physique atomique, et n'ont jamais été mises en évidence dans ce domaine jusqu'en 1976. Mais il n'est pas exclu que des expériences déjà commencées n'aboutissent, dans les années 1977-1980, à mesurer l'écart qu'elles entraînent par rapport aux prévisions de la physique atomique fondées sur les interactions électromagnétiques seules.

— *Les interactions gravitationnelles.* Elles sont négligeables dans l'atome ; le rapport de l'attraction gravitationnelle sur l'attraction électrostatique entre un proton et un électron est de l'ordre de $5 \cdot 10^{-40}$! Par contre, l'influence de la gravitation terrestre a été mesurée, dans le domaine de la physique microscopique, lors d'expériences d'interférences de neutrons.

Physique atomique et physique de l'atome

La plus grande partie de cet exposé sera consacrée à la physique des atomes (ou des ions atomiques). Pourtant, ils ne constituent pas l'espèce la plus répandue sur notre Terre, sur laquelle il existe une bien plus grande variété de molécules, simples ou complexes, et de cristaux. C'est que beaucoup d'atomes ne gardent pas leur individualité, mais tendent à former des molécules. Ils ne survivent en tant qu'atomes que dans un milieu très dilué, comme il en existe dans notre Univers (encore que les molécules y soient nombreuses) ou comme nous savons en produire en laboratoire. La fin de cet exposé est d'ailleurs intitulée *Collisions-Molécules.*

L'intérêt de l'étude de l'atome isolé provient, bien sûr, de la relative simplicité du problème. Ce sont les expériences sur l'atome d'hydrogène qui ont permis de dégager certains des concepts de la physique microscopique exposés dans les pages qui vont suivre. Un autre intérêt réside dans le fait que les propriétés de la molécule ou du solide peuvent être « extrapolées » à partir des propriétés de l'atome. Nous en verrons quelques exemples.

Inégalités de Heisenberg

Énoncé

L'exposé de mécanique quantique a donné une formulation rigoureuse du principe d'incertitude, qui sera pour nous le principe fondamental de la physique microscopique, mais qui est susceptible d'être démontré à partir d'autres postulats. Soit ΔP et ΔQ les écarts quadratiques moyens des valeurs de deux observables P et Q dont le commutateur [P, Q] vaut $i\hbar$. On a l'inégalité de Heisenberg:

$$\Delta P \cdot \Delta Q \geqslant \hbar/2$$

Soit x, y, z, p_x, p_y, p_z les coordonnées et les composantes de l'impulsion d'une particule. Nous utiliserons la notion vague d'« écart par rapport à la moyenne » Δx ou Δp_x par exemple, et nous réduirons les inégalités de Heisenberg à un ordre de grandeur :

$$\Delta x \Delta p_x \gtrsim \hbar \quad \Delta y \Delta p_y \gtrsim \hbar \quad \Delta z \Delta p_z \gtrsim \hbar$$

Ces inégalités signifient que, quel que soit l'état de la particule, x et p_x (par exemple) ne peuvent jamais être parfaitement définis simultanément, et que le produit $\Delta x\, \Delta p_x$ des « extensions » des deux grandeurs a une limite inférieure. La dénomination de principe d'incertitude risque de laisser croire que les paramètres de la particule sont exactement définis, et qu'une fatalité inhérente à la physique nous empêche de les mesurer simultanément avec une précision infinie. En réalité, *c'est la particule elle-même qui occupe, jusqu'au moment de la mesure, les intervalles Δx et Δp_x des variables x et p_x.*

Une première conséquence : $a_0 = 0{,}53$ Å

Considérons un proton localisé à l'origine des coordonnées dans un très petit volume de dimension ρ. Sa vitesse V est très mal définie, puisque, au mieux, on a $\Delta V_x \simeq \hbar/M\rho$, où M est la masse du proton.

Ajoutons un électron pour constituer un atome d'hydrogène. L'électron peut-il être localisé dans le même volume que le proton, avec la même extension en vitesse ?

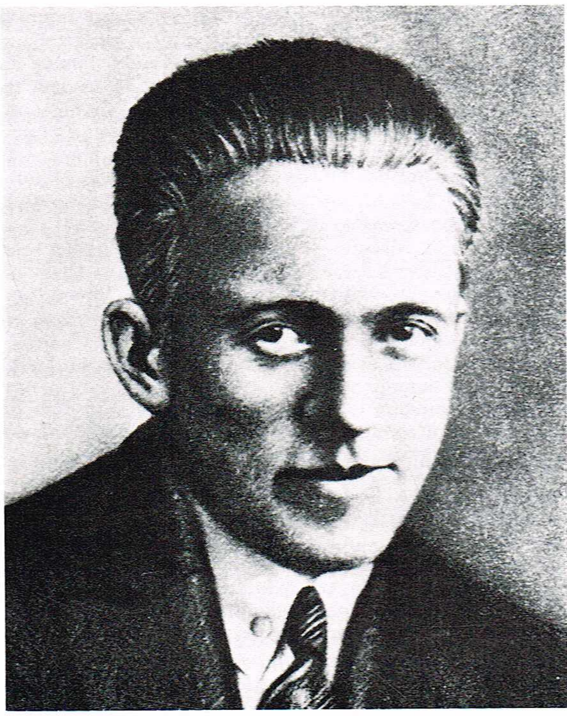

Palais de la Découverte, Paris

Keystone

◀ *A gauche, le physicien allemand* **Werner Heisenberg :** *ses travaux lui ont valu le prix Nobel de physique en 1932.*
A droite, le physicien allemand **Max Planck,** *prix Nobel de physique en 1918.*

Non, puisqu'on aurait alors $\Delta x \Delta p_x \simeq m\hbar/M \ll \hbar$ (la masse m de l'électron est près de 2 000 fois inférieure à celle du proton). Il nous faut supposer qu'en général l'électron aura une vitesse de l'ordre de $v \gg \Delta V$ (correspondant à un mouvement déterminé, ou complètement aléatoire en direction), ce qui nous permet de considérer le proton comme immobile en première approximation.

Supposons l'électron confiné dans une sphère de rayon $r \gg \rho$. On a $\Delta x \simeq r$, $\Delta p_x \simeq mv$ et $rmv \simeq \hbar$: nous obtenons un premier résultat, *le moment cinétique est de l'ordre de grandeur de h au moins*. L'énergie totale de l'électron est la somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle :

$$E = \frac{1}{2} mv^2 - \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{e^2}{r} \simeq \frac{\hbar^2}{2m} \frac{1}{r^2} - \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{e^2}{r}$$

Il est facile de calculer la valeur de r pour laquelle cette énergie est minimale et on trouve $r \simeq \hbar^2\varepsilon_0/m\pi e^2$. C'est le rayon Bohr (ou unité atomique de longueur) qui vaut $a_0 = 0{,}53$ Å. L'énergie potentielle correspondante est l'unité atomique d'énergie (ou Hartree). L'énergie totale est négative (on obtient un état lié stable), et l'on a :

$$-E = \frac{me^4}{8\varepsilon^2\hbar^2} = \frac{1}{2} \text{ u. a. d'énergie} = 13{,}6 \text{ eV}$$

(u. a. = unité atomique)

En conclusion, le principe d'incertitude combiné à la loi de Coulomb nous montre que l'atome d'hydrogène existe et que ses grandeurs caractéristiques sont

$$a_0 = 0{,}53 \text{ Å} \quad \text{et} \quad E = -13{,}6 \text{ eV}$$

Une deuxième conséquence

Considérons l'espace des phases d'une particule libre défini par les variables x, y, z, p_x, p_y, p_z. En principe, un état de la particule est défini par un point de cet espace ; mais à cause des inégalités de Heisenberg, ce point est indéterminé à l'intérieur d'un parallélépipède de côtés $2\Delta x$, $2\Delta y$, $2\Delta z$, $2\Delta p_x$, $2\Delta p_y$, et $2\Delta p_z$. Toujours sans soucis de rigueur, écrivons $4\Delta x\ \Delta p_x \simeq h$. Le volume du parallélépipède caractéristique d'un état de la particule est de l'ordre de h^3 : c'est ce volume élémentaire des phases que l'on utilise parfois en mécanique statistique (*fig.* 2).

◀▼ *A gauche, le physicien danois* **Niels Bohr,** *à qui l'on doit notamment la théorie justement célèbre de l'atome de Bohr, représentation dont découlent un grand nombre de découvertes.*
Ci-dessous, figure 2 : l'espace des phases est le produit de l'espace géométrique et de l'espace des impulsions. On a symbolisé ici l'espace des impulsions correspondant aux trois variables p_x, p_y, p_z. On a représenté deux états possibles d'une particule, du point de vue de l'impulsion ; ces deux états diffèrent par les valeurs de p_y et de p_z.

Photothèque d'Histoire nationale

fig. 2

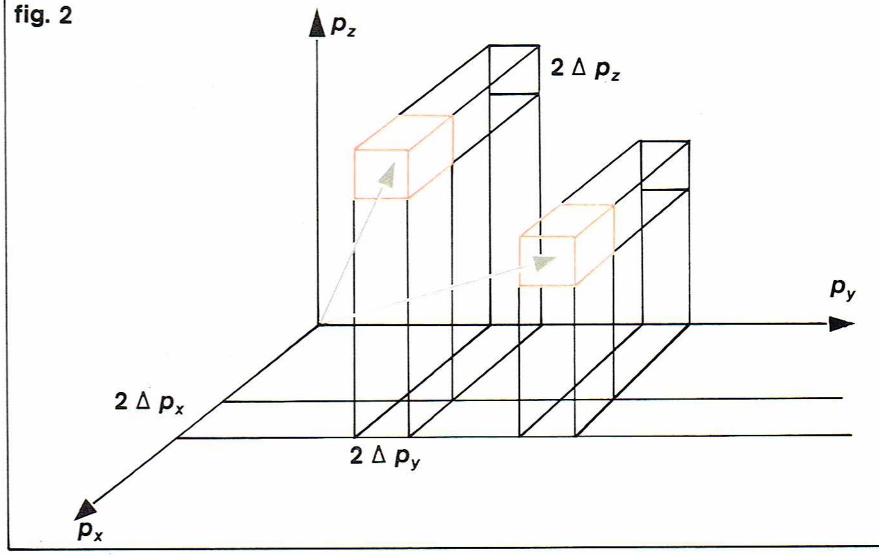

Richard Colin

Deux états distincts de la particule correspondent non pas à deux points de l'espace des phases, mais à deux parallélépipèdes élémentaires différents. Si la particule occupe un volume fini de l'espace des phases, les états possibles forment un spectre discret et sont en nombre fini.

Pour un système macroscopique, du fait de la valeur très faible de la constante de Planck h, tout se passe comme si l'on avait un continuum d'états en nombre infini comme le prévoit la théorie classique. Prenons par exemple un gaz à température ambiante dans un volume de 1 cm^3 ; prenons $\bar{v} \simeq 5 \cdot 10^2$ m/s, $m \simeq 10^{-25}$ kg (masse d'une molécule du gaz), $\bar{p} \simeq 5 \cdot 10^{-23}$ kgm/s. Le volume de l'espace des phases est le produit du volume géométrique 10^{-6} m^3 par le volume de l'espace des impulsions (de l'ordre de 8 $\bar{p}^3$), soit 10^{-72} kg^{3}m^{6}s^{-3}. Le nombre d'états possibles, sachant que h vaut $6{,}6 \cdot 10^{-34}$ kgm^{2}s^{-1}, est de l'ordre de $5 \cdot 10^{27}$: il n'est plus possible de distinguer des états individuels.

Une remarque s'impose : si tous les états sont occupés par une molécule, on aboutit à une densité de 500 kg/cm^3, très supérieure à la densité d'un corps solide sur notre Terre. On voit qu'il est possible de beaucoup diminuer la température (donc $\bar{v}$) tout en conservant une probabilité d'occupation $\leqslant 1$, c'est-à-dire en conservant la discernabilité des molécules : il n'y a pratiquement jamais deux molécules dans le même état (même si les molécules sont des bosons). Une exception importante : l'hélium, pour des raisons, entre autres, liées à sa masse très faible.

Dans certains corps célestes (« naines blanches », étoiles à neutron), les densités atteignent ou dépassent les 500 kg/cm^3. Dans ce cas, l'espace des phases se dilate par élévation de la température interne.

Nous verrons plus loin que, pour un système microscopique, le nombre fini d'états possibles a des conséquences importantes.

Dualité onde-corpuscule

Une image physique des inégalités de Heisenberg

La mécanique ondulatoire et les inégalités de Heisenberg sont nées de la constatation, théorique ou expérimentale, du caractère parfois corpusculaire des ondes électromagnétiques et du caractère parfois ondulatoire des particules matérielles.

Nous allons nous limiter à la particule libre non relativiste. A cette particule est associé un « paquet d'ondes ». Ce paquet d'ondes, qui est explicité dans divers cas en *Mécanique quantique*, est une superposition linéaire d'ondes progressives groupées autour d'une fréquence ν et d'une longueur d'onde λ (*fig.* 3). L'extension dans l'espace géométrique de ce paquet d'ondes représente la délocalisation de la particule.

L'équation de Schrödinger nous enseigne que l'énergie est reliée à la fréquence par $E = h\nu$. Mais cette relation est d'un intérêt limité, car en général, en mécanique non relativiste, E n'est défini qu'à une constante près. Plus intéressantes sont les relations :

$$\vec{p} = \hbar\vec{K} \quad \text{avec } K = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{et } \lambda = \frac{h}{p}$$

$$\frac{d\omega}{dK} = \frac{d\nu}{d(1/\lambda)} = \frac{dE}{dp} = \frac{d}{dp}(p^2/2m) = p/m = v$$

▼ *Figure 3 : paquet d'ondes se propageant suivant l'axe Ox et d'extension $\pm\,\Delta x$ autour de son maximum. On peut se représenter sa construction par la somme de trois morceaux de sinusoïde, à gauche. L'étalement des fréquences est considérable : il en résulte un paquet d'ondes très localisé, puisque ici, $2\Delta x$ n'est pas très supérieur à λ.*

fig. 3

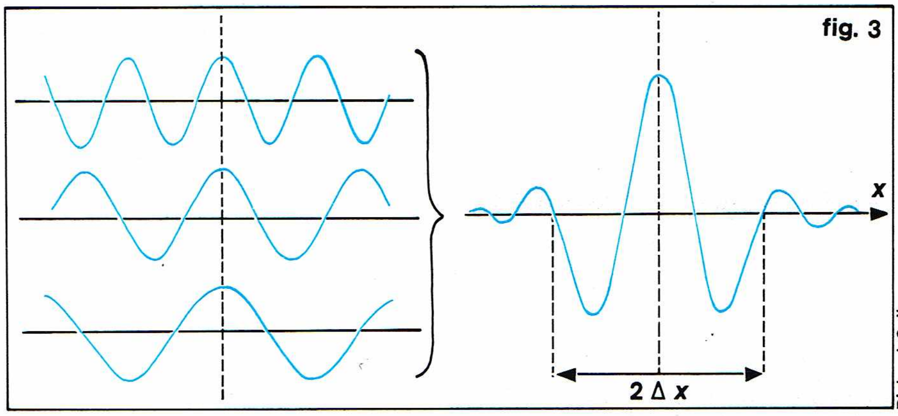

Richard Colin

Si les valeurs de la longueur d'onde sont groupées autour d'une valeur λ, on voit qu'on peut parler d'une vitesse v de la particule, qui est égale à la vitesse de groupe $d\omega/dK$ du paquet d'ondes (c'est la vitesse du maximum).

Soit $2\,\Delta x$ l'extension suivant l'axe x du paquet d'ondes. Pour mesurer la valeur moyenne de K_x, on compte le nombre N d'oscillations de la fonction d'onde le long du segment $2\,\Delta x$; rappelons que l'onde associée est la superposition d'ondes de la forme

$$\exp i\,(\omega t - K_x x - K_y y - K_z z).$$

On trouve : $2\,K_x \Delta x = N\,2\pi$ ou $K_x = N\pi/\Delta x$ avec une précision $\Delta N \simeq 1$

$$\Delta K_x \simeq \frac{\pi}{\Delta x} \quad \text{ou} \quad \Delta p_x \cdot \Delta x \simeq \frac{h}{2}$$

Nous retrouvons la limite inférieure des inégalités de Heisenberg. *C'est l'extension spatiale finie de l'onde qui entraîne une indétermination sur $\vec{K}$ et λ, donc une indétermination sur $\vec{p}$.* Ce fait est lié aux propriétés de la transformée de Fourier (voir *Mécanique quantique*).

Une quatrième relation d'incertitude

La seule particule pour laquelle l'impulsion $\vec{p}$ (et donc l'énergie) est parfaitement définie est celle qui a une extension spatiale infinie et qui est décrite par $\exp i\,(\omega t - \vec{K}\vec{r})$. On voit que la définition en énergie d'une particule est liée à son extension dans l'espace, ou en d'autres termes au temps d'observation pendant lequel un observateur fixe peut effectuer la mesure.

Si la particule a une extension spatiale finie $2\,\Delta x$, le temps de mesure pour un observateur fixe est au plus $t \simeq 2\,\Delta x/v$. De son côté, l'énergie n'est définie qu'à $\Delta E \simeq mv\Delta v$ près. On voit que l'on a :

$$\Delta E \cdot \Delta t \simeq mv \cdot 2\,\Delta x = \Delta p \cdot 2\,\Delta x \quad \text{ou} \quad \Delta e \cdot \Delta t \simeq h$$

Cette relation, qui s'écrit aussi en unités de fréquence $\Delta\nu \cdot \Delta t \simeq 1$, est très générale. Insistons encore sur le fait qu'il ne s'agit pas d'une incertitude sur la mesure d'une grandeur très bien définie. C'est l'énergie elle-même qui possède toutes les valeurs réparties sur la plage ΔE. Une telle « délocalisation » de l'énergie et de l'impulsion entraîne d'ailleurs une évolution dans le temps du paquet d'ondes de la particule, comme on l'a vu précédemment en *Mécanique quantique*.

Considérons maintenant un état lié. Si c'est un état stable, on peut considérer que Δt est infiniment grand. Donc $\Delta E = 0$, l'énergie d'un état lié stable est parfaitement définie. Si c'est un état instable, on peut définir une durée de vie τ, temps moyen au bout duquel le système a évolué vers un autre état plus stable. L'énergie d'un état lié instable n'est définie qu'à $\Delta E \simeq h/\tau$ près.

Par exemple, la grande majorité des états d'énergie d'un atome est stable. Les durées de vie sont comprises généralement entre 10^{-7} et 10^{-9} s. La « délocalisation » en énergie va de quelques MHz à quelque 100 MHz. Il existe des méthodes qui permettent la mesure de cette « largeur », mesure qui est d'un grand intérêt pour les physiciens.

Diffraction - Interférences

La conséquence la plus importante de la dualité onde-corpuscule réside dans le fait que de nombreux phénomènes physiques peuvent s'interpréter en termes de diffraction ou d'interférences. La longueur d'onde associée à la particule est la longueur d'onde de De Broglie :

$$\lambda = h/p = h/mv$$

On obtiendra des phénomènes de diffraction ou d'interférences lorsque l'expérience fera intervenir une différence de marche caractéristique de l'ordre de λ.

Une telle différence de marche peut être déterminée par l'expérimentateur ou être imposée par la nature. Dans ce dernier cas, elle sera en général de l'ordre de 1 Å en physique atomique ou moléculaire et en physique du solide, et de l'ordre de 1 fermi (10^{-5} Å) en physique nucléaire. Nous allons rappeler quelques ordres de grandeur.

— Électron d'énergie 150 eV : $\lambda = 1$ Å. La diffraction d'électrons est un puissant moyen d'étude des solides

et en particulier des surfaces. On a aussi réalisé des interférences d'électron.

— Électron d'énergie 1 GeV : $\lambda = 1$ fermi. Les électrons, qui ne sont sensibles qu'aux interactions électromagnétiques, sont diffractés par les noyaux et donnent de précieux renseignements sur la répartition des charges dans les nucléons.

— Neutron d'énergie 0,1 eV : $\lambda = 1$ Å. La diffraction des neutrons thermiques (neutrons ralentis dont l'énergie est voisine de l'énergie thermique à température ambiante, soit 0,025 eV) est le moyen le plus utilisé pour étudier la matière. Les neutrons sont en effet très pénétrants, et de plus ils sont sensibles aux propriétés magnétiques de la matière du fait de leur moment magnétique.

Bien entendu, la dualité onde-corpuscule ne concerne pas que les particules élémentaires. On a pu observer la diffraction d'atomes par le réseau constitué d'un plan de clivage cristallin.

Discussion d'une expérience d'interférence

Prenons un exemple récent (1975). La *figure* 4 décrit un interféromètre à neutrons, utilisant plusieurs réflexions de Bragg sur un monocristal de silicium dépourvu de dislocation. Ces réflexions correspondent à des interférences constructives, pour lesquelles la différence de marche est imposée par le cristal (c'est la quantité $2\,d \sin \theta$). L'expérimentateur introduit en plus une différence de marche « macroscopique » entre les deux faisceaux. Dans le cas considéré, c'est la pesanteur qui déphase le faisceau le plus haut par rapport au faisceau le plus bas.

Soit λ_0 la longueur d'onde de De Broglie associée à une particule d'énergie E, soumise à un potentiel V_0, et λ la longueur d'onde de la même particule d'énergie E, mais soumise à V. La mécanique quantique permet de démontrer sans difficulté :

$$K_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} = \frac{1}{\hbar}\sqrt{2\,m\,(E - V_0)}$$

$$\text{et } K = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{1}{\hbar}\sqrt{2\,m\,(E - V)}$$

Puisque les parties AC et BD sont équivalentes et que l'on connaît l'effet de la pesanteur sur la vitesse (donc sur λ) en AB et CD, on retrouve facilement le déphasage entre les deux faisceaux :

$$\delta = (K - K_0)\frac{a}{\cos\theta} = \frac{a}{\cos\theta}\frac{1}{\hbar}\left[\sqrt{2\,m\,(E - mgz)} - \sqrt{2\,m\,(E - mgz_0)}\right]$$

L'énergie potentielle $mg\,(z - z_0)$ étant petite devant l'énergie cinétique, on va poser $E - mgz_0 = mv_0^2/2$:

$$\sqrt{2\,m\,(E - mgz_0)} = \sqrt{m^2 v_0^2} = mv_0$$

$$\sqrt{2\,m\,(E - mgz)} \simeq mv_0\left[1 - \frac{g\,(z - z_0)}{v_0^2}\right]$$

donc :

$$\delta = -\frac{a}{\cos\theta}K_0\frac{g\,(z - z_0)}{v_0^2}$$

En faisant tourner le plan des deux faisceaux autour du faisceau incident fixe, d'un angle de $\pm\,30°$ par rapport au plan horizontal, δ varie de $\pm\,8\,\pi$ du fait de la variation de $z - z_0$ et on observe 4 franges d'interférence de chaque côté du zéro.

Remarquons le taux de comptage : un neutron toutes les 4 secondes en moyenne ! Sachant que $v_0 \simeq 3$ km/s, on voit que les neutrons sont distants les uns des autres en moyenne de 10 km, et qu'à chaque instant il y a au plus un neutron à l'intérieur de l'interféromètre. La particule manifeste alors de manière éclatante son caractère ondulatoire, *puisqu'elle passe à la fois par le faisceau AB et le faisceau AC*, pour donner lieu à un phénomène d'interférence au point D. Toute tentative pour localiser la particule sur l'un des faisceaux ferait d'ailleurs disparaître les interférences. En résumé, avant la détection, c'est l'aspect ondulatoire qui se manifeste ; au moment de la détection, c'est l'aspect corpusculaire.

Peut-on voir la diffraction d'une bille de verre ?

Il existe une onde associée à tout objet, même macroscopique. On peut se demander s'il est possible de la mettre en évidence. Pour essayer de répondre, nous allons considérer un objet macroscopique, mais le plus léger possible.

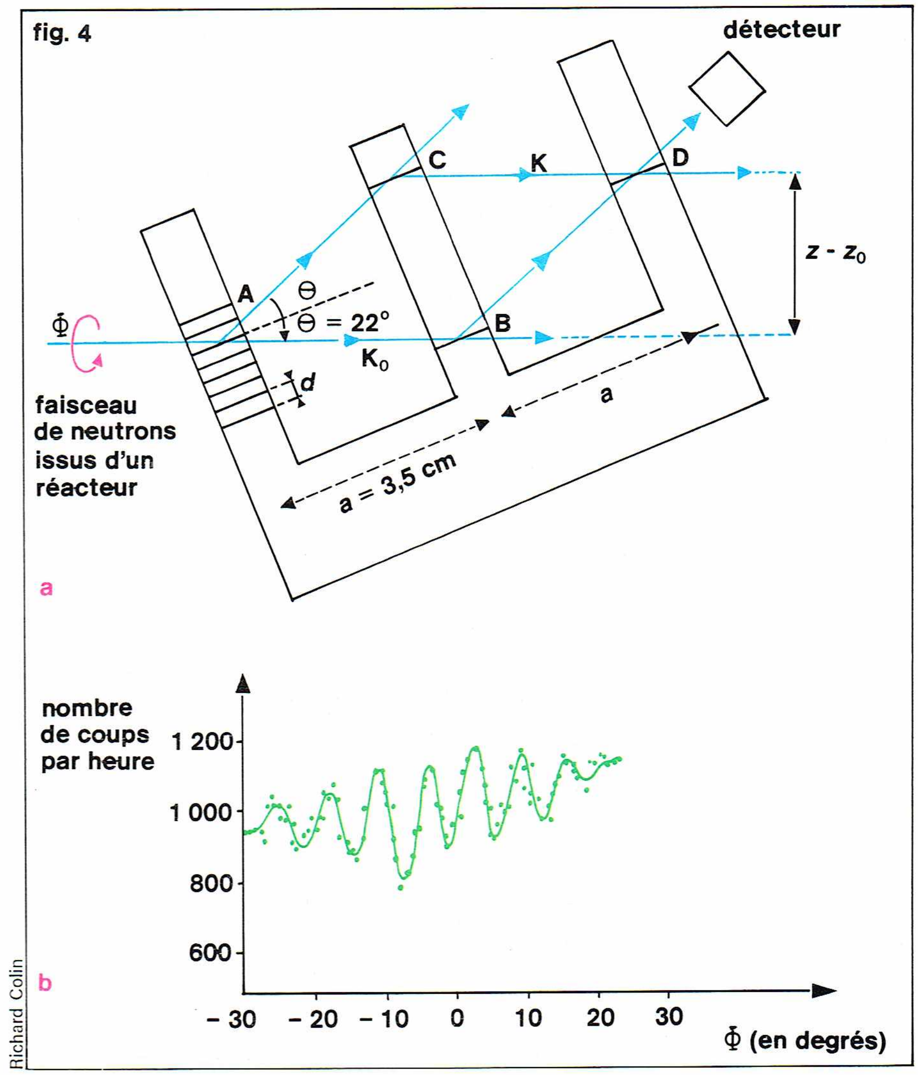

▲ *Figure 4 :*
a) schéma d'un interféromètre à neutrons utilisant un monocristal de silicium. Les faisceaux qui interfèrent sur le détecteur sont **ABD** *et* **ACD**. *Tout l'ensemble peut tourner autour du faisceau incident.*
b) Mise en évidence des interférences par la variation du taux de comptage avec Φ. Le déphasage entre les deux faisceaux est lié à la différence de hauteur $z - z_0$. Chaque point représente à peu près une heure de comptage.

Soit une bille de verre de diamètre $d = 1\,\mu$ (on sait fabriquer de telles billes, et on peut les observer au microscope). Avec une densité de 2 g/cm³, sa masse est de 10^{-12} g. Imaginons qu'elle soit très bien protégée des perturbations extérieures, en état d'apesanteur, et que sa vitesse ne soit que de 0,01 μ/s (ce qui correspond à une énergie de $0{,}3 \cdot 10^{-12}$ eV, soit 10^{-11} fois l'énergie d'agitation thermique à température ambiante). La longueur d'onde de De Broglie vaut alors $\lambda = 0{,}7$ Å.

Nous allons essayer d'observer la diffraction de cette bille par un réseau d'atomes situés à une distance *a* les uns des autres (*fig.* 5). Lorsque la bille est à une distance *y* du réseau, le potentiel d'interaction bille-réseau est une fonction V (*x*) de *x*.

— Il y aura phénomène de diffraction si V (*x*) est une fonction présentant un taux de modulation non négligeable. Il faut donc que l'on ait $a \gtrsim d$. Dans le cas $a \ll d$, le réseau d'atomes se comporte comme une barrière de potentiel continue.

— Si les dimensions du paquet d'ondes sont supérieures à *a*, la bille sera diffractée par le réseau. Dans le cas contraire, elle sera diffractée par un seul atome, mais la distance caractéristique du potentiel d'interaction est *d* (et non la taille de l'atome).

On voit que, dans tous les cas, il y a diffraction d'une onde de courte longueur d'onde par un obstacle de grandes dimensions, le rapport λ/a ou λ/d étant inférieur à 10^{-4}. La trajectoire de la bille est celle prévue par la mécanique classique (ou, pour parler un autre langage, par l'optique géométrique), avec des écarts angulaires inférieurs à 10^{-4} rd.

En conclusion, il y a peu d'espoir de mettre en évidence le caractère ondulatoire d'un objet macroscopique, même dans un cas extrêmement favorable, et somme toute plutôt irréaliste.

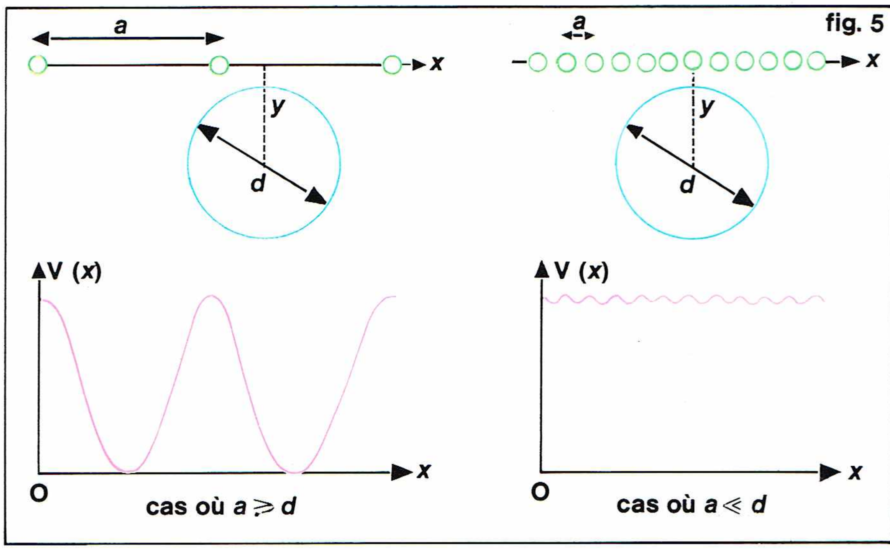

▲ *Figure 5 : potentiel d'interaction V(x) bille-réseau pour a ≫ d et a ≪ d.*

▶ *Page ci-contre, en bas, figure 10 : à gauche, coupe de l'aimant de Stern et Gerlach, avec les lignes de champ magnétique. C'est div* $\vec{B} = 0$ *qui entraîne la décroissance de B vers le haut ; le gradient atteint jusqu'à 3 000 G/mm. A droite, intensité enregistrée par le détecteur en fonction de z. On a figuré en pointillé la courbe correspondant à une répartition continue et équiprobable de toutes les valeurs* M_z.

Quantification

Retour sur l'atome d'hydrogène

Nous avons vu que, dans le cas extrême autorisé par les inégalités de Heisenberg, l'atome d'hydrogène a des dimensions de l'ordre de $a_0 = 0{,}53$ Å, l'énergie cinétique de l'électron étant de l'ordre de $-\mathrm{E} = 13{,}6$ eV. Posons maintenant $\Delta x \cdot \Delta p_x \simeq n\hbar$ avec n entier (le cas limite précédent correspondant à $n = 1$). On trouve :

$$r \simeq n^2 a_0, \quad -\mathrm{E} \simeq \frac{1}{n^2}\mathrm{R_H} \quad \text{avec} \quad \mathrm{R_H} = \frac{me^4}{8\,\varepsilon_0^2 h^2} = 13{,}6 \text{ eV}$$

L'énergie totale E est toujours négative, on obtient encore un état lié.

Calculons le volume de l'espace des phases pour un électron lié à un proton et confiné entre les sphères de rayon n^2a_0 et $(n+1)^2\,a_0$. Le volume géométrique est de l'ordre de $4\,\pi n^4 a_0^2 x\, 2\, n a_0 = 8\,\pi n^5 a_0^3$, et le volume de l'espace des impulsions est de l'ordre de $8\,\overline{p}^3 = (8\,m\mathrm{R_H})^{3/2}/n^3$. Le volume de l'espace des phases est le produit des deux :

$$8\,\pi n^5 \left(\frac{h^2\varepsilon_0}{m\pi e^2}\right)^3 \left(\frac{m^2e^4}{\varepsilon_0^2 h^2}\right)^{3/2} \frac{1}{n^3} = \frac{8}{\pi^2} n^2 h^3 \simeq n^2 h^3$$

Pour un électron simplement confiné à l'intérieur d'une sphère de rayon n^2a_0, le volume de l'espace des phases est $\Sigma_1^n\, p^2h^3 = n\,(n+1)\,(2n+1)\,h^3/6 \simeq n^3h^3/3$ pour n assez grand.

Conclusion : le nombre d'états possibles pour un électron formant un état lié avec un proton (ce qui impose une limite supérieure à la vitesse) et confiné dans une sphère de rayon n^2a_0 est de l'ordre de $n^3/3$.

Conditions de quantification

Il est naturel de définir un état de l'électron par son énergie (et par d'autres paramètres éventuellement). Un électron confiné dans une région de l'espace a une énergie qui ne peut prendre qu'un certain nombre de valeurs (une seule quand on réalise le confinement maximal autorisé par le principe d'incertitude). *C'est une caractéristique générale des états liés : leur énergie est quantifiée.*

Prenons au contraire un état non lié, par exemple un proton et un électron d'énergie totale positive. L'électron peut s'éloigner à l'infini, et les états d'énergie du système forment un continuum entre 0 et $+\infty$.

Comment calculer les énergies possibles de l'atome d'hydrogène ? La meilleure solution est, bien entendu, de nous servir de la mécanique quantique et de résoudre l'équation de Schrödinger qui, dans ce cas, est exactement soluble. Mais nous pouvons aussi simplement faire appel à la dualité onde-corpuscule (et à la providence du physicien). Nous allons imaginer que, dans un certain état particulier, l'électron tourne sur un cercle de rayon r (c'est le « modèle de Bohr ») et est représenté par une onde $\psi\,(r, \varphi)$ de longueur d'onde λ, comme sur la *figure* 6. Cette onde est périodique, de période $2\,\pi r/n$ (n entier quelconque), puisque l'électron est revenu au même point lorsque φ a augmenté de $2\,\pi$. Il en résulte :

$$2\,\pi\,\frac{r}{n} = \lambda = \frac{h}{mv} \quad \text{donc} \quad mrv = n\hbar$$

Donc le moment cinétique de l'électron est quantifié. Écrivons de plus l'accélération normale de l'électron :

$$\frac{v^2}{r} = \frac{1}{m}\frac{1}{4\,\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r^2} \qquad \frac{1}{m}\frac{e^2}{4\,\pi\varepsilon_0}\,r = v^2r^2 = n^2\frac{\hbar^2}{m^2}$$

Nous trouvons une valeur pour r, et de là une valeur pour l'énergie potentielle, l'énergie cinétique et l'énergie totale E :

$$r = n^2\frac{\varepsilon_0 h^2}{\pi m e^2} \qquad \mathrm{E} = -\frac{1}{n^2}\frac{me^4}{8\,\varepsilon_0^2 h^2}$$

Pour $n = 1$, nous retrouvons les valeurs relatives au niveau fondamental déjà déduites des inégalités de Heisenberg elles-mêmes. Ces valeurs sont exactement celles que donne la théorie quantique non relativiste de l'atome d'hydrogène (avec un électron sans spin et un noyau de masse infinie).

Quantification du moment cinétique

Nous venons d'envisager certains états de l'atome d'hydrogène, à structure circulaire définie par un seul nombre quantique, n. Puisque les rayons croissent comme n^2, il y a n états de ce genre à l'intérieur d'une sphère de rayon n^2a_0 : nous sommes loin de remplir les $n^3/3$ cellules de l'espace des phases (pour $n \gg 1$).

Nous savons aussi que le principe d'incertitude impose une délocalisation à l'électron, par rapport au cercle de la trajectoire classique. Il en résulte (*fig.* 7) que le vecteur moment cinétique est délocalisé par rapport à la normale au plan de l'orbite classique, et que sa valeur effective est inférieure à la valeur moyenne du moment cinétique calculé classiquement.

En fonction des deux remarques précédentes, nous ferons deux hypothèses :

a) Nous conserverons $\mathrm{E} = -\dfrac{1}{n^2}\dfrac{me^4}{8\,\varepsilon_0^2 h^2}$. La valeur $r = n^2\dfrac{\varepsilon_0 \cdot h^2}{\pi m e^2}$ n'est plus qu'un rayon moyen caractéristique

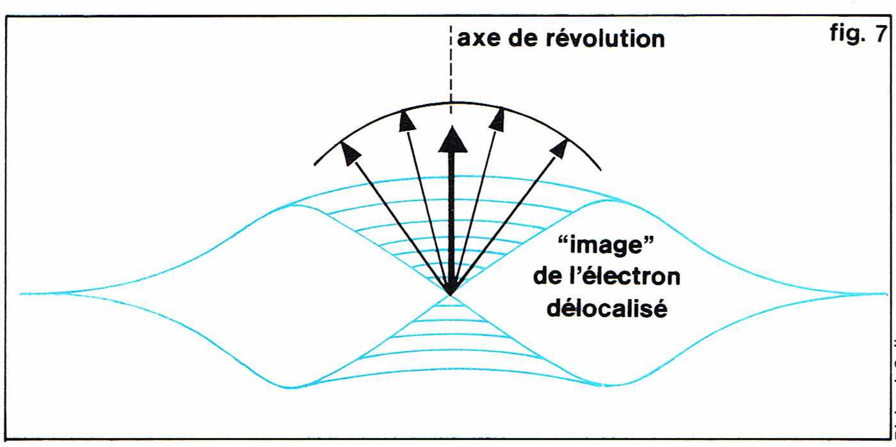

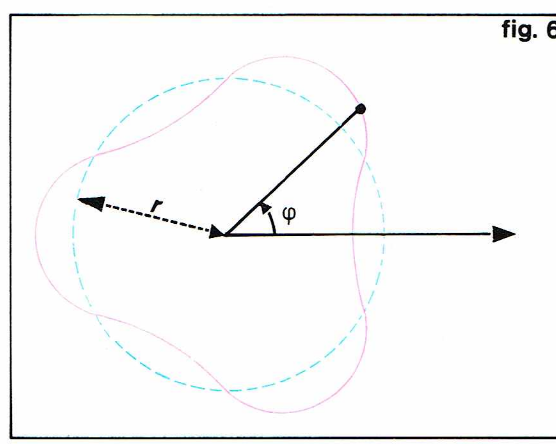

▼ *A gauche, figure 7 : délocalisation du « vecteur » moment cinétique. A droite, figure 6 : quantification de la longueur d'onde (orbite de Bohr : n = 3).*

de l'état n. La valeur maximale du moment cinétique n'est plus que $(n - 1)\hbar$.

b) Il y a n états de même énergie définie par n. Ils se distinguent par la valeur du moment cinétique, qui va de 0 à $(n - 1)\hbar$ par valeurs entières. L'état de moment cinétique nul a la symétrie sphérique : l'électron a toujours une vitesse, mais les composantes de cette vitesse sont des grandeurs aléatoires. L'état de moment cinétique $(n - 1)\hbar$ est celui pour lequel le mouvement de l'électron est le plus proche d'un mouvement circulaire.

On dit que le niveau d'énergie p, qui recouvre p états différents de moment cinétique $l\hbar$ (l varie de 0 à $n - 1$), *est p fois dégénéré*. Le nombre total d'états dans une sphère de rayon $n^2 a_0$ est $p = n(n - 1)/2 \simeq n^2/2$ pour $n \gg 1$. Nous sommes encore loin du compte.

Le spectre de l'hydrogène

La meilleure vérification expérimentale des intuitions ci-dessus réside dans l'observation du spectre d'émission de l'atome d'hydrogène (*fig.* 8). A moyenne résolution, on observe des raies groupées « en séries », caractérisées par le niveau inférieur de la transition. Par exemple, la série Balmer, située dans le visible, contient les raies qui retombent sur $n = 2$, la fréquence la plus faible se situant dans le rouge (H_α, $\lambda = 6\,563$ Å), et la fréquence limite dans l'ultraviolet proche. Les longueurs d'onde de toutes les raies sont bien représentées par la formule de Balmer :

$$\frac{1}{\lambda} = R'_H \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{q^2}\right)$$

avec $R'_H = 109\,678\ \text{cm}^{-1}$ et n, q entiers.

Cette formule est en accord avec la « théorie » précédente puisque $E(q) - E(n) = h\nu = hc/\lambda$. Il suffit de prendre $R_H = hc\,R'_H$, et l'accord avec la valeur théorique de R_H est de l'ordre de 10^{-5}, à condition de prendre pour m la masse réduite du couple électron-proton, soit :

$$m = \frac{m_e M_p}{m_e + M_p} \simeq m_e\left(1 - \frac{m_e}{M_p}\right)$$

A plus haute résolution, chaque niveau d'énergie $E(n)$ révèle une structure qui correspond aux n valeurs possibles du moment cinétique. On dit que la dégénérescence est levée (*fig.* 8). Ceci est dû à un effet relativiste : les différents états qui ont l'énergie $E(n)$ correspondent à des répartitions différentes pour les électrons, plus ou moins « étalées » dans l'espace géométrique et dans l'espace des impulsions, et donc à des effets relativistes différents (corrections en v^2/c^2). Ces effets se répercutent sur la masse m, donc sur l'énergie E.

On trouve bien que chaque niveau $E(n)$ se divise en n états différents, observables grâce aux raies optiques correspondantes. Précisons néanmoins que ceci n'est qu'une seconde approximation, qui n'est justifiée que grâce à une coïncidence propre à l'atome d'hydrogène.

L'expérience de Stern et Gerlach

Nous nous sommes fait une idée de l'espace associé à un atome d'hydrogène d'énergie $E(n)$, et nous avons le sentiment qu'il nous manque des nombres quantiques pour décrire tous les états possibles. L'expérience de Stern et Gerlach va nous fournir le dernier élément.

Nous allons admettre les deux points suivants (le premier est d'ailleurs assez intuitif, puisque le mouvement d'une charge équivaut à un courant).

— A un moment cinétique $\vec{j}$ est associé en général un moment magnétique $\vec{M}$, colinéaire avec $\vec{j}$.

— Dans un champ magnétique $\vec{B}$, le moment magnétique $\vec{M}$ ne s'aligne pas sur $\vec{B}$ (à cause de l'existence de $\vec{j}$) mais précesse autour. La composante de $\vec{M}$ sur $\vec{B}$ est une constante du mouvement.

La *figure* 9 décrit l'expérience destinée à mesurer M_z. Un jet d'atomes de chrome, possédant un moment cinétique $\vec{j}$ dans l'état fondamental, traverse un champ magnétique $\vec{B}$. Ce dernier a pour direction moyenne Oz et possède un fort gradient (ici B_z est croissant vers le bas). Les atomes qui se déplacent suivant Oy sont détectés et on mesure l'intensité $I(z)$ du flux reçu par le détecteur en fonction de z.

Dans le champ, les atomes ont une énergie potentielle $-\vec{M}\cdot\vec{B} = -M_z B_z$. Ils sont soumis à une force :

$$F_z = \frac{\partial}{\partial z} M_z B_z = M_z \frac{\partial B_z}{\partial z}$$

donc ils sont déviés par rapport à Oy, et la mesure de la déviation permet de calculer M_z, connaissant $\partial B_z/\partial z$. Dans notre cas, si on a $M_z > 0$, alors $-M_z B_z$ est négatif, et les atomes sont déviés vers le bas (B_z croissant) pour minimiser l'énergie. Si on a $M_z < 0$, les atomes sont déviés vers le haut.

La *figure* 10 représente $I(z)$. En pointillé, la courbe théorique correspondant à la théorie classique d'un moment magnétique $\vec{M}$ associé à un moment cinétique $\vec{j}$ (gyroscope aimanté) : toutes les valeurs de M_z entre $-M$ et $+M$ sont possibles, donc on observe toutes les déviations entre $-z_0$ et $+z_0$. En continu, la courbe expérimentale : on observe sept déviations comprises

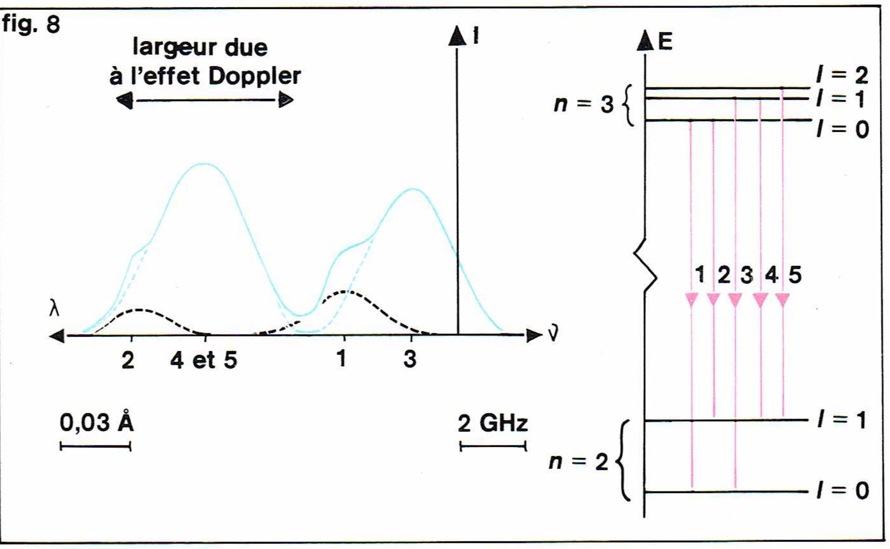

Richard Colin

▲ *Figure 8 : raie* H_α. *(6 563 Å) de l'hydrogène.*

▼ *Ci-dessous, figure 9 : schéma de l'expérience de Stern et Gerlach sur le chrome (Cr). Le jet atomique est défini en direction par des diaphragmes; il traverse l'aimant de Stern et Gerlach, représenté brisé pour plus de commodité, puis à une distance assez grande, il est analysé par un détecteur mobile.*

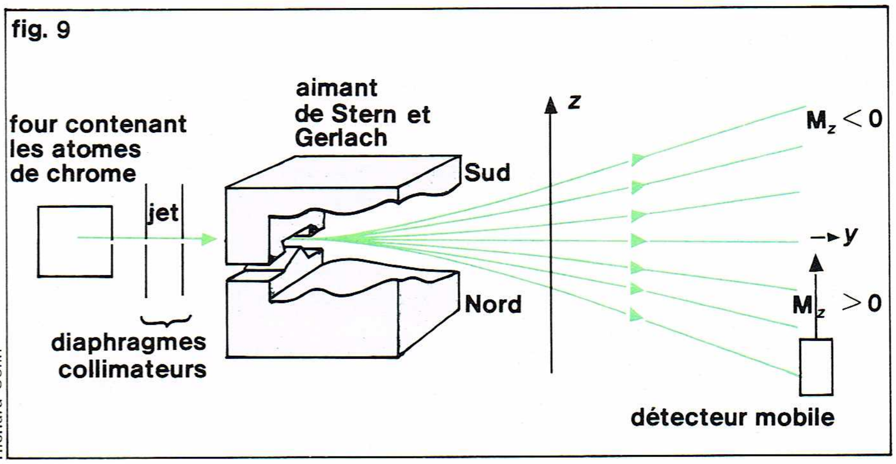

Richard Colin

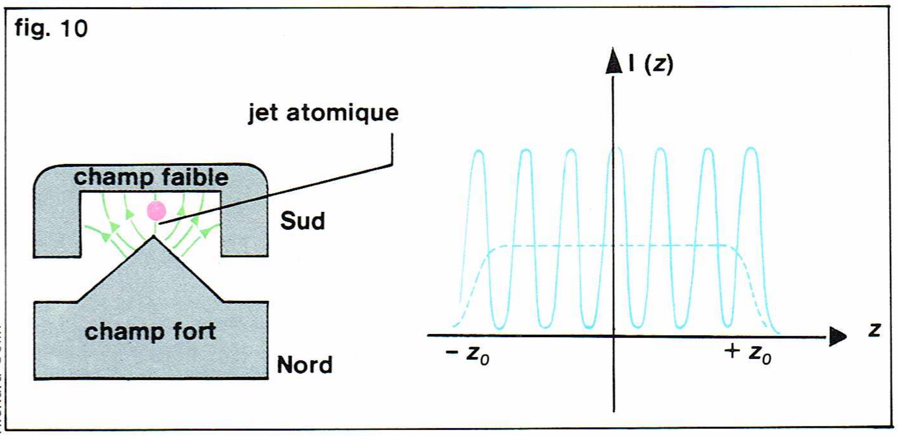

Richard Colin

entre $-z_0$ et $+z_0$, y compris la déviation nulle. Les intensités mesurées correspondent à la division du jet atomique en sept faisceaux, trois déviés vers le haut, trois vers le bas, et un non dévié.

Ce résultat est absolument inexplicable par la théorie classique.

La quantification spatiale

L'expérience de Stern et Gerlach s'interprète de la manière suivante.

— Chaque déviation observée correspond à une valeur de M_z.

— Les valeurs possibles de M_z, donc de j_z, sont quantifiées.

— Si le moment cinétique, en module, vaut $j\hbar$ (j entier), les valeurs possibles de j_z sont au nombre de $2j+1$:

$$j_z : -j\hbar,\ -(j-1)\hbar,\ \ldots,\ 0,\ \ldots,\ (j-1)\hbar,\ j\hbar$$

— Pour le chrome, on a $j = 3$.

Généralisons tout de suite. Soit j_z la projection d'un moment cinétique quelconque $\vec{j}$ sur un axe Oz arbitraire.

— Les valeurs possibles de j_z sont quantifiées. Leur nombre sera désigné par $2j+1$.

— Ces valeurs sont $-j\hbar$, $-(j-1)\hbar$, ... jusqu'à $j\hbar$. Ce résultat est connu sous le nom de quantification spatiale.

Nous devons faire trois remarques. En premier lieu, l'exemple du chrome a été choisi parce qu'il correspond à une expérience effectivement réalisée en 1953. Mais le moment cinétique $\vec{j}$ n'a pas pour origine le mouvement des électrons autour du noyau ; il est lié au spin, qui est une propriété intrinsèque de l'électron.

Ensuite, si $2j+1$ est impair, j est entier, comme nous l'avons mentionné. Mais le cas $2j+1$ pair laisse place à des valeurs de j demi-entières : de telles valeurs existent, mais pas dans le cas d'un moment cinétique orbital.

Enfin, insistons sur le fait que l'axe Oz est arbitraire. *Aucun vecteur, au sens géométrique du terme, ne peut satisfaire les postulats de la quantification spatiale.* En mécanique quantique, un moment cinétique sera représenté par un opérateur. Notre représentation par des vecteurs est proche de la réalité pour j très grand, puisque les valeurs autorisées de j_z sont alors en très grand nombre ; elle s'en écarte beaucoup pour j de l'ordre de 1.

Revenons à l'atome d'hydrogène, et posons $l_z = m\hbar$. Un état d'énergie E (n) et de moment cinétique $l\hbar$ recouvre en fait $2l+1$ états, caractérisés par m. Ce dernier est le nombre quantique qui nous manquait. En effet, le nombre d'états d'énergie E (n) est :

$$\sum_0^{n-1} (2l+1) = n + n(n-1) = n^2$$

Le nombre des états d'énergie comprise entre E (1) et E (n), c'est-à-dire des états confinés dans l'espace à l'intérieur d'une sphère de rayon n^2a_0, est :

$$\sum_1^n p^2 = \frac{1}{6} n(n+1)(2n+1) \simeq \frac{1}{3} n^3 \quad \text{pour} \quad n \gg 1$$

Nous venons de retrouver le nombre de cellules de l'espace des phases, tel que nous l'imposait le principe d'incertitude.

▼ ***Figure 11 : spectre d'absorption et de fluorescence X.***

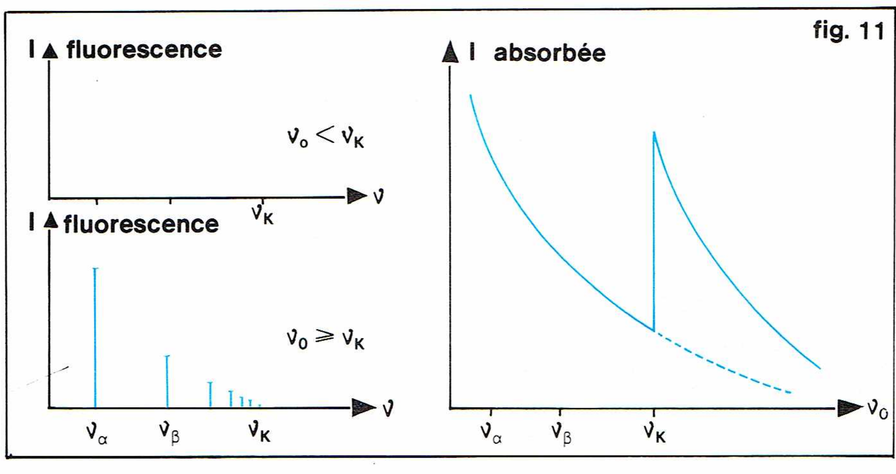

Quantification et physique macroscopique

Les règles de quantification jouent-elles un rôle dans la physique macroscopique ? Par exemple, l'énergie des électrons « libres » d'un métal est-elle quantifiée du fait du confinement de l'électron à l'intérieur du morceau de métal ? Sur le plan des principes, la réponse est oui. Si le morceau de métal est un cube de côté a, on doit avoir :

$$a = n\lambda \quad \text{avec } n \text{ entier}$$

La longueur d'onde de De Broglie des électrons « libres » est de l'ordre de 10 Å (nous verrons que l'énergie est de l'ordre de quelques eV à toute température). Pour $a = 1$ cm, n vaut 10^7 ! Dans ces conditions, on peut considérer que λ varie de manière continue (puisque deux valeurs consécutives ne diffèrent que de 10^{-7}), et avec elle l'énergie et l'impulsion.

Prenons un autre exemple, celui d'un bêtatron de rayon $r = 1$ m dans lequel tournent des électrons confinés par un champ magnétique B = 0,1 T. Les électrons sont relativistes :

$$E \simeq pc = reBc = 30 \text{ MeV} \quad (m_0c^2 \simeq 0{,}5 \text{ MeV})$$
$$\lambda = h/p \simeq 4 \cdot 10^{-4} \text{ Å}$$

On peut définir un « nombre quantique principal » n, par $n = 2\pi r/\lambda$. On a $n = 1{,}5 \cdot 10^{14}$. Quand n varie d'une unité, la variation relative des grandeurs physiques associées est si faible, de l'ordre de 10^{-14}, que l'on peut considérer qu'il s'agit d'une variation continue.

Allons plus loin ! Classiquement, l'électron, soumis à une accélération centripète, émet un rayonnement électromagnétique de fréquence ν (et ses harmoniques), ν étant la fréquence de rotation $\nu = c/2\pi r$. C'est le « rayonnement synchrotron », ou rayonnement de freinage. Il en résulte une diminution progressive de l'énergie des électrons. Dans notre cas, la fréquence fondamentale est $\nu \simeq 50$ MHz.

Quantiquement, l'électron peut effectuer des transitions spontanées de l'orbite n à l'orbite $n-1$, $n-2$, etc. Les fréquences émises sont :

$$\frac{1}{h}[E(n) - E(n-1)],\ \frac{1}{h}[E(n) - E(n-2)],\ \ldots$$

Puisque $\Delta n/n$ est très faible, on obtient :

$$\frac{1}{h}\frac{dE}{dn} \cdot 1,\ \frac{1}{h}\frac{dE}{dn} \cdot 2,\ \ldots$$

Ce sont les harmoniques de la fréquence fondamentale :

$$\frac{1}{h}\frac{dE}{dn} = \frac{1}{h}\frac{d}{dn}\left(\frac{hc}{\lambda}\right) = \frac{1}{h}\frac{d}{dn}\left(hc\frac{n}{2\pi r}\right) = \frac{c}{2\pi r} = \nu$$

Rappelons que l'énergie $E \simeq pc = hc/\lambda$ est l'énergie totale : un électron dans un champ magnétique n'a pas d'énergie potentielle.

On voit que la fréquence quantique coïncide avec la fréquence classique.

Un principe général de la mécanique quantique, dit « principe de correspondance », postule qu'aux grands nombres quantiques la mécanique quantique doit être équivalente à la mécanique classique.

Le principe de Pauli

Un peu de physique à plusieurs électrons

Jusqu'ici, nous avons beaucoup parlé de l'atome d'hydrogène, le plus simple de tous les atomes. Que se passe-t-il dans un système à plusieurs électrons ?

Si le système constitue un état lié, atome, molécule, électrons de conduction d'un solide, etc., il existe des niveaux d'énergie quantifiés souvent en très grand nombre. On pourrait penser que l'état le plus stable est l'état pour lequel tous les électrons sont dans le niveau d'énergie le plus bas. Pour un atome de numéro atomique Z, tous les électrons seraient dans l'état $n = 1$ qui est le plus proche du noyau (il n'a pas la même énergie que dans le cas de l'hydrogène, mais il existe). Pour un conducteur, tous les électrons seraient pratiquement immobiles en l'absence de champ électrique (à KT près).

Il n'en est rien. Pour un atome de numéro atomique grand, les électrons occupent jusqu'au niveau $n = 7$ (dans l'état d'énergie le plus bas de l'atome). Pour un métal, les électrons de conduction ont une énergie qui va de 0 à plusieurs eV, même au zéro absolu. Dans tous les domaines de la physique, de nombreuses expériences confirment ces résultats paradoxaux.

Nombre quantique principal	Valeurs possibles de l	Nombre de cellules de l'espace des phases	Nombre maximum d'électrons
1	0	1	2
2	0 1	1 + 3 = 4	8
3	0 1 2	1 + 3 + 5 = 9	18
n	0 1 - - - n-1	$\Sigma_0^{n-1}(2l+1) = n^2$	$2n^2$

◀ *Figure 12 : tableau du nombre maximal d'électrons par état.*

Spectre de rayons X

Nous ne décrirons qu'une seule expérience dans le domaine de la physique de l'atome, relative à la fluorescence des rayons X.

Une feuille métallique est irradiée par des rayons X de fréquence ν_0. Sur la *figure* 11 sont dessinés les spectres d'absorption et de fluorescence, c'est-à-dire l'intensité absorbée fonction de ν_0, et l'intensité réémise à la fréquence ν, fonction de ν (et pour ν_0 fixée). Trois faits sont à souligner :

— L'absorption subit une nette discontinuité pour une certaine fréquence ν_K. Elle devient beaucoup plus grande pour $\nu_0 \geqslant \nu_K$.

— Pour $\nu_0 < \nu_K$, aucune raie de fluorescence n'est émise dans le domaine de fréquence exploré. Pour $\nu_0 \geqslant \nu_K$, on observe l'émission de plusieurs raies de fluorescence, dont les fréquences sont ν_α, ν_β, ... $\leqslant \nu_K$.

— Aucune singularité du spectre d'absorption ne correspond à $\nu_0 = \nu_\alpha$, ν_β, ...

L'interprétation de ces faits est donnée sur la même figure.

— Au-dessus du niveau $n = 1$ (baptisé K par les spectroscopistes des rayons X), l'atome considéré a ses niveaux $n = 2, 3$, ... (baptisés L, M, ...) peuplés par des électrons. Ceci est vrai même dans l'état fondamental de l'atome, et les électrons L, M, ... ne retombent pas dans le niveau K. Les différences d'énergie entre les niveaux L, M, ... d'une part et le niveau K d'autre part sont de l'ordre de $h\nu_\alpha$, $h\nu_\beta$, ...

— De même, normalement, un électron du niveau K ne peut pas passer dans le niveau M, L, ... même avec l'apport d'énergie d'un photon $h\nu_\alpha$, $h\nu_\beta$, ... On dit que les niveaux K, L, M, ... sont remplis complètement.

— Pour l'essentiel, tout ce que peut faire un photon qui interagit avec un électron K se ramène à une ionisation : l'électron K est arraché à l'atome. L'énergie minimale nécessaire est $h\nu_K$, qui est l'énergie d'extraction à partir de la couche K. Ce phénomène est un processus d'absorption des photons très important (le photon disparaissant pour assurer la conservation de l'énergie) qui commence pour $\nu_0 \geqslant \nu_K$.

— Il existe alors une « place libre » sur la couche K. Elle peut être comblée par un électron venant des couches L, M, ... avec émission d'énergie sous forme de rayons X de fréquence ν_α, ν_β, ... En toute rigueur, les niveaux d'énergie K, L, M, ... de l'ion ne sont pas les mêmes que ceux de l'atome neutre.

— A la fin de ce processus, il reste, bien sûr, toujours un ion qui devra se neutraliser par la suite.

Le principe de Pauli

L'interprétation précédente est codifiée dans le principe de Pauli qui régit toute la physique à plusieurs électrons. Le lecteur verra qu'il lui correspond, en mécanique quantique, le postulat d'antisymétrisation.

Premier énoncé : deux électrons ne peuvent avoir tous leurs nombres quantiques identiques.

Les nombres quantiques orbitaux de l'électron (position et vitesse) peuvent se représenter par une cellule de l'espace des phases (produit de l'espace géométrique par l'espace des impulsions). Mais l'électron possède en plus un degré de liberté interne associé à son spin $s = 1/2$: c'est un nombre m_s qui ne prend que les valeurs $+ 1/2$ ou $- 1/2$.

Le spin est associé à un moment cinétique $\hbar/2$ et m_s est interprété comme la projection sur un axe Oz, en unités de $\hbar$.

Deuxième énoncé : une cellule de l'espace des phases contient au plus deux électrons correspondant à des valeurs de m_s opposées (on dit que les spins sont « antiparallèles »).

Nous avons vu qu'un niveau d'énergie n correspond à un petit nombre de cellules de l'espace des phases, ou en d'autres termes, à un ensemble limité de valeurs des nombres quantiques de l'électron. Par exemple, $n = 1$ correspond à une seule cellule de l'espace des phases : le niveau correspondant ne peut contenir que deux électrons. La *figure* 12 résume les résultats que nous connaissons pour n quelconque.

Dans le texte de *Mécanique statistique*, le lecteur verra que toutes les particules de spin demi-entier ($s = 1/2$, $3/2$, ...) sont appelées fermions et obéissent au principe de Pauli. Ce n'est pas le cas des particules de spin entier ($s = 0, 1$, ...), qui sont appelées bosons.

Atome et photon

L'atome à Z électrons

Position du problème

Dans le paragraphe consacré au principe d'exclusion, ou principe de Pauli, nous avons considéré un atome de numéro atomique Z, dont les électrons étaient caractérisés par n et l comme dans l'atome d'hydrogène. Il nous faut revenir sur ce point.

Le problème est *a priori* très compliqué : définir un état atomique, c'est définir l'état d'un système de Z électrons et d'un noyau lourd, toutes ces particules interagissant deux à deux. La solution exige des approximations.

La première approximation consiste à supposer le noyau immobile et à traiter les électrons comme des particules indépendantes. Ceci veut dire que l'on définira un état de l'atome par la donnée de l'état de chaque électron, compte tenu, bien sûr, du principe de Pauli. En particulier, l'énergie de chaque état atomique sera la somme des énergies de chaque électron.

La deuxième approximation concerne l'équation qui régit le mouvement d'un électron, c'est-à-dire l'équation de Schrödinger à un électron qui nous donnera l'état de la particule (sa fonction d'onde) et son énergie. Il n'est pas question d'écrire que l'électron i n'est soumis qu'au potentiel coulombien du noyau $V_N(r_i) = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Ze^2}{r_i}$, comme pour un ion hydrogénoïde de numéro atomique Z et de charge (Z — 1). Il faut en plus condenser la répulsion des autres électrons dans une énergie potentielle qui ne dépend que des paramètres de l'électron i (modèle à électrons indépendants). On admet que l'on peut choisir un potentiel central $V_c(r_i)$ qui ne dépend que de la distance de l'électron i au noyau. Ce potentiel reste, bien sûr, à calculer !

Un exemple : l'atome de sodium

Nous ne parlerons pas du calcul du potentiel $V_c(r)$. La mécanique quantique recherche les méthodes de calcul les plus adaptées au type d'atome considéré, le reste est affaire d'ordinateur. Nous nous bornerons à mettre en évidence l'importance de $V_c(r)$.

Considérons l'atome de sodium et anticipons un peu sur la suite. Le noyau contient Z = 11 protons. Il y a 2 électrons sur la couche K ($n = 1$), 8 sur la couche L

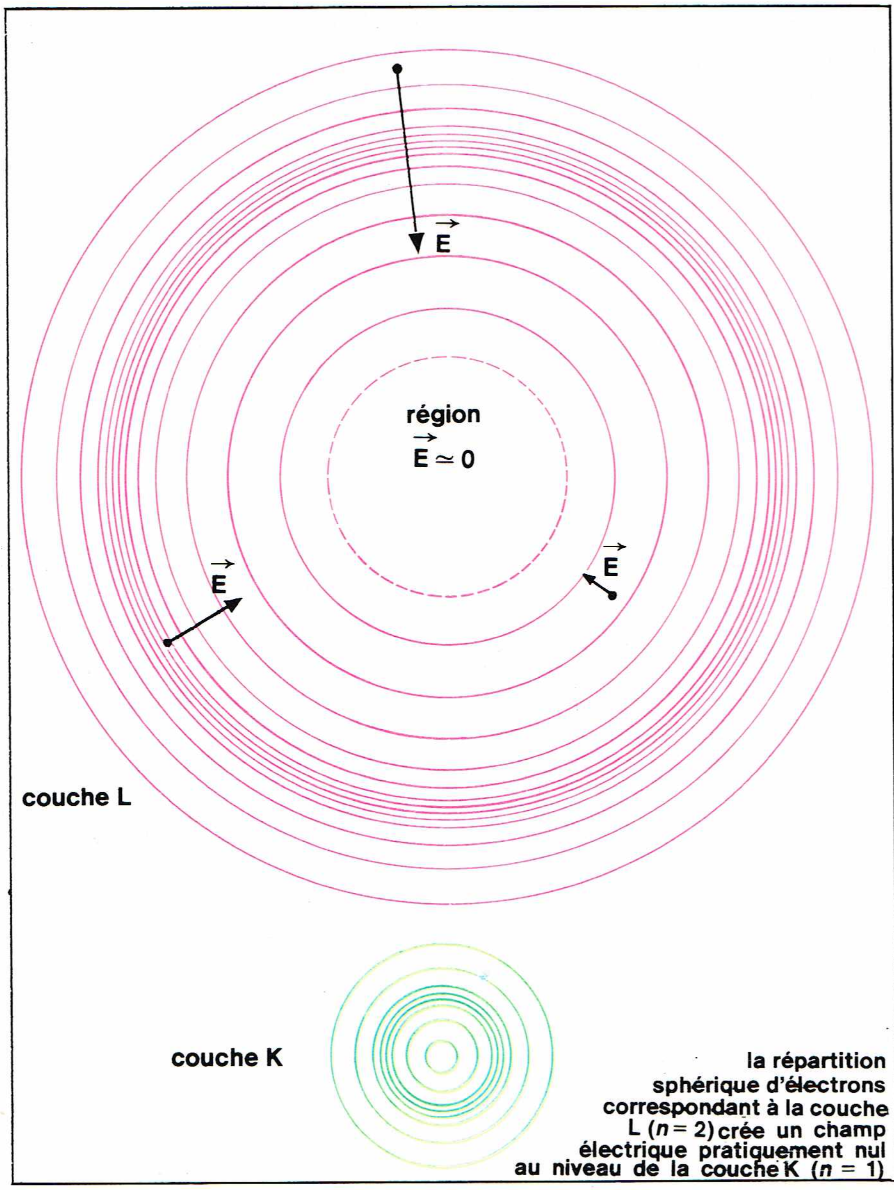

▶ *Page ci-contre, figure 15 :*
a) *à gauche, les courbes donnant la probabilité de présence de* $|\Psi|^2$ *fonction de r pour n = 3 ; à droite, l'image classique des trajectoires (qui oublie la délocalisation de l'électron).*
b) *on a représenté les premiers niveaux du sodium et du césium, et quelques niveaux de l'atome de Bohr. Le niveau fondamental et le premier niveau excité (l = 0 et l = 1) proviennent du niveau de l'atome de Bohr, n = 3 pour le sodium et n = 6 pour le césium. L'énergie est déplacée vers le bas du fait de la pénétration des orbites dans le « cœur » des électrons internes, d'autant plus que l est plus faible (pénétration plus grande) et que le « cœur » contient plus d'électrons (donc correspondrait à un effet d'écran plus important).*

($n = 2$), 1 sur la couche M ($n = 3$). Nous allons calculer le potentiel d'ionisation, et le comparer à la valeur expérimentale de l'ordre de 5 eV.

Prenons $V_c(r) = 0$, c'est-à-dire négligeons l'énergie d'interaction électron-électron. Le potentiel d'ionisation n'est autre que l'énergie de liaison de l'électron externe, c'est-à-dire l'électron M. Ce dernier n'est soumis qu'à l'attraction du noyau Ze, et les deux équations qui régissent le mouvement d'un électron deviennent :

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Ze^2}{r^2} \quad \text{(force centripète = force de Coulomb)}$$

$$nh/mv = 2\pi r \qquad (n\lambda = 2\pi r)$$

Ce sont les mêmes équations que pour l'atome d'hydrogène (voir le paragraphe *Quantification*) à condition de changer e^2 en Ze^2. L'énergie (qui est en e^4) est multipliée par Z^2.

$$V_i = E(3) = R_H \frac{Z^2}{3^2} = 13{,}6 \frac{11^2}{3^2} \simeq 180 \text{ eV}$$

Le résultat est trop grand par un facteur 40, ce qui ne saurait nous surprendre, puisque nous avons négligé la répulsion de l'électron externe par les 10 autres électrons ! En revanche, l'accord est bien meilleur pour l'énergie d'extraction d'un électron K :

$$E_K = h\nu_K = R_H \frac{Z^2}{1^2} \simeq 1\,650 \text{ eV}$$

Expérimentalement, on trouve $\lambda_K = 11{,}6$ Å, soit $E_K = 1\,100$ eV

Prenons $V_c(r) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{10\,e^2}{r}$ (répulsion par 10 électrons supposés concentrés à l'origine des coordonnées). Le potentiel total est celui de l'atome d'hydrogène :

$$V(r) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left[-\frac{Ze^2}{r} + \frac{10\,e^2}{r}\right] = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r}$$

$$V_i = E(3) = R_H/3^2 \simeq 1{,}5 \text{ eV}$$

C'est une valeur trop petite par un facteur 3 mais déjà plus réaliste. En revanche, l'erreur sur E_K est maintenant énorme :

$$E_K = h\nu_K = R_H/1^2 = 13{,}6 \text{ eV}$$

Ceci était prévisible, car un électron K ($n = 1$) est plus proche du noyau que les électrons L ou M. L'action de ces derniers ne saurait être représentée par le potentiel choisi, qui suppose que tous les autres électrons sont concentrés au voisinage du noyau.

Configuration

L'exemple précédent montre qu'un potentiel coulombien ne peut pas constituer une fonction $V_c(r)$ acceptable, c'est-à-dire conduisant à une description de toutes les propriétés de l'atome conforme à l'expérience. Tant que le potentiel est central, le moment cinétique $\vec{l}$ est une constante du mouvement (voir texte de *Mécanique*). L'état d'un électron dépend de 3 nombres entiers n, l et m avec $0 \leqslant l \leqslant n-1$ et $-l \leqslant m \leqslant l$ (en oubliant le nombre quantique de spin). Quand le potentiel est coulombien, on démontre en mécanique quantique que l'énergie E ne dépend que de n. Mais, *dans le cas général d'un potentiel central non coulombien, E dépend de n et de l.*

Par définition, une configuration est un état de l'atome défini par la valeur de n et de l pour chaque électron. Une telle définition donne l'énergie totale $E = \Sigma E(n, l)$. Ce niveau d'énergie est en général dégénéré, puisque chaque électron est décrit par autant de fonctions d'onde qu'il y a de valeurs de m.

Les différentes valeurs de l sont représentées par des lettres attribuées par les premiers spectroscopistes :

$l =$	0	1	2	3	4	...
noté :	s	p	d	f	g	...

En exposant, on indique le nombre d'électrons identiques. Par exemple, la configuration fondamentale du zinc (Z = 30) est $1\,s^2, 2\,s^2, 2\,p^6, 3\,s^2, 3\,p^6, 3\,d^{10}, 4\,s^2$ et la première configuration excitée est $1\,s^2, 2\,s^2, 2\,p^6, 3\,s^2, 3\,p^6, 3\,d^{10}, 4\,s, 4\,p$.

Loi de Moseley

Nous venons de voir que, dans le modèle à électrons indépendants de la configuration, l'énergie E (n, l) d'un électron dépend de n et de l. Nous allons considérer un premier cas, celui des couches profondes d'un atome lourd.

Considérons les électrons $n = 1$ (ils sont 2, puisque $n = 1$ entraîne $l = 0$ et $m = 0$, ce qui signifie que l'état n'est pas dégénéré du point de vue orbital et correspond à une seule cellule de l'espace des phases). Ce sont les électrons les plus proches du noyau, puisque le rayon des orbites varie en n^2, et ils ne se « mélangent » pratiquement pas aux autres électrons qui sont sensiblement plus loin. On dit que les électrons $n = 1$ forment une couche, la couche K (déjà rencontrée dans le paragraphe sur le principe de Pauli).

De la même façon, les électrons $n = 2, 3, ...$ forment les couches L, M, ..., correspondant à une distance au noyau et à une énergie approximativement déterminées. Mais l'influence de l sur la valeur de E (n, l) se fait de plus en plus sentir pour les grandes valeurs de n : on peut même parler de sous-couches définies par la valeur de l à l'intérieur de la couche n.

Faute de pouvoir calculer $V_c(r)$ pour un atome, nous allons essayer de lui trouver une expression au voisinage de chaque valeur de r correspondant à une couche. Considérons les électrons K : les autres électrons constituent une répartition « extérieure » à la couche $n = 1$, et ne créent pas de champ électrique à ce niveau (en supposant que la répartition est sphérique), comme l'indique la *figure* 13. Dans ces conditions, les électrons K sont soumis au potentiel des seuls Z protons du noyau. En fait, ceci n'est qu'approché : chaque électron K est

soumis au potentiel de l'autre et pour une faible part au potentiel des électrons $n = 2, 3, ...$ qui ont une petite probabilité de présence au voisinage du noyau. Finalement, on écrit le potentiel « vu » par les électrons K sous une forme coulombienne :

$$V_c(r_K) \simeq -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r_K}(Z - s_K) \qquad s_K \simeq 1$$

L'énergie de la couche K est donc :

$$E_K \simeq R_H \frac{(Z - s_K)^2}{1^2} \qquad s_K \simeq 1$$

On dit que le noyau est écranté. Le coefficient d'écran s_K est faible, de l'ordre de 1.

Plus généralement, on aura :

$$E_n \simeq R_H \frac{(Z - s_n)^2}{n^2} \quad n = 2\ (L),\ 3\ (M),\ ...$$

Mais le coefficient d'écran croît vite (il est de l'ordre de grandeur du nombre d'électrons sur la couche n), et il dépend légèrement de l. On a $s^2 \simeq 10$, $s^3 \simeq 20$, etc.

Nous avons vu (principe de Pauli) que les énergies E_K, E_n correspondent expérimentalement aux fréquences des discontinuités d'absorption ν_K, ν_n, ... La loi de Moseley exprime les résultats précédents : la racine carrée des fréquences des discontinuités d'absorption des rayons X varie linéairement en fonction de Z (*fig.* 14) :

$$\sqrt{\nu_n} = \sqrt{\frac{R_H}{h}}\frac{Z - s_n}{n}$$

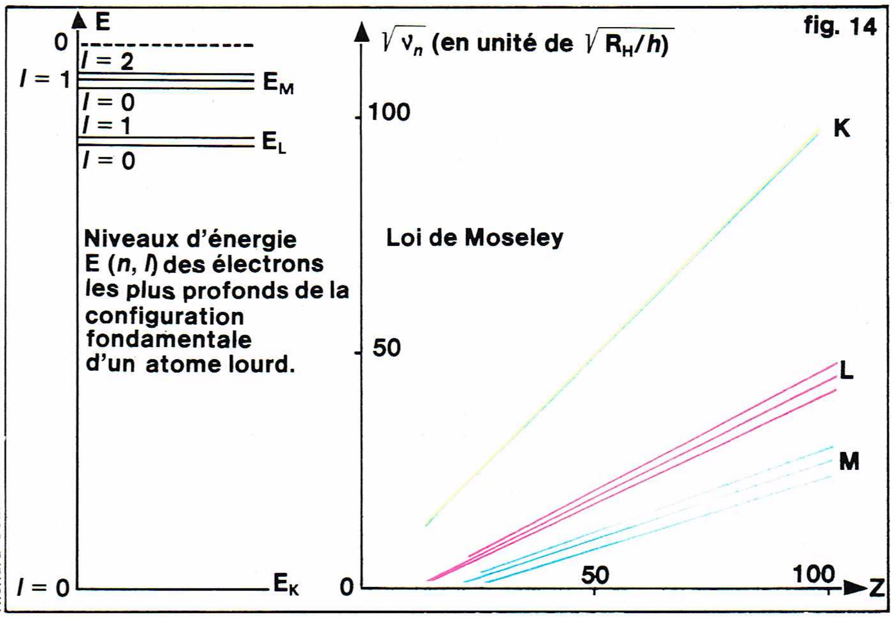

▲ *Figure 14 : la fréquence de la discontinuité d'absorption à partir de E_n est appelée ν_n. L'énergie $h\nu \simeq E_n$ est l'énergie nécessaire pour éjecter un électron hors de l'atome avec une vitesse nulle ; en réalité, les niveaux d'énergie de l'ion ne sont pas tout à fait les mêmes que ceux de l'atome neutre (en particulier à cause du couplage spin-orbite), d'où le dédoublement de certaines droites pour Z grand.*

Configurations excitées des alcalins

L'exemple précédent, relatif aux couches profondes d'un atome, a confirmé que $V_c(r)$ ne pouvait être un potentiel coulombien, puisqu'il est assez bien représenté par plusieurs potentiels coulombiens *différents* (correspondant à des $Z - s_n$ différents) suivant la « profondeur » de l'électron. Ce fait est lié à la dépendance en l de l'énergie E (n, l), bien qu'elle apparaisse peu marquée dans notre exemple.

Au contraire, dans le cas des configurations excitées des alcalins, nous allons voir que l'influence de l est très grande. Dans la configuration fondamentale d'un alcalin, il existe un électron moins lié que les autres (l'électron de valence), qui est un électron ns (n varie de 2 pour le lithium à 6 pour le césium). Par exemple, la configuration excitée du sodium est $1s^2 2s^2 2p^6 3s$. On obtient une configuration excitée du sodium dans le domaine des énergies de quelques eV, en modifiant les nombres quantiques de l'électron de valence.

Pourquoi l'état fondamental correspond-il à un électron ns ? Comment se placent les états excités ? La notion de phénomène d'écran joue encore un rôle important. Considérons un électron dans l'état de l maximal, soit $l = n - 1$. La *figure* 15a donne la probabilité de présence $|\psi|^2$ en fonction de r : l'électron reste toujours loin du noyau. D'ailleurs, la trajectoire classique serait un cercle. L'électron de valence reste toujours à l'extérieur du « cœur » des autres électrons, et la charge qu'il voit vaut

$$Ze - (Z - 1)e = e$$

tout se passe comme si l'on avait affaire à l'électron de l'atome d'hydrogène sur un niveau n. Ceci correspond à $V_c(r) = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{(Z-1)e^2}{r}$ (voir l'exemple de l'atome de sodium).

Considérons un électron dans l'état $l = 0$. La courbe $|\psi|^2$ fonction de r montre que l'électron se rapproche beaucoup du noyau ($|\psi|^2$ est même maximal en $r = 0$). Classiquement, la trajectoire serait une ellipse très allongée. La charge vue par l'électron est tantôt e, tantôt Ze, le plus souvent une valeur intermédiaire : les $Z - 1$ électrons du cœur ne forment plus complètement écran entre le noyau et l'électron de valence. En moyenne, la charge vue est supérieure à e, et l'électron $l = 0$ est beaucoup plus lié que l'électron $l = n - 1$.

En conclusion, l'énergie de la configuration dépend fortement de l et est *croissante avec* l (*fig.* 15b), l'état fondamental correspondant à $l = 0$. Comme on le voit, dans le cas du sodium par exemple, les configurations $n = 4$ chevauchent les configurations $n = 3$ (en pointillé sur la *fig.* 15b).

La dépendance de E (n, l) en fonction de l (qui existe aussi, rappelons-le, pour les couches profondes),

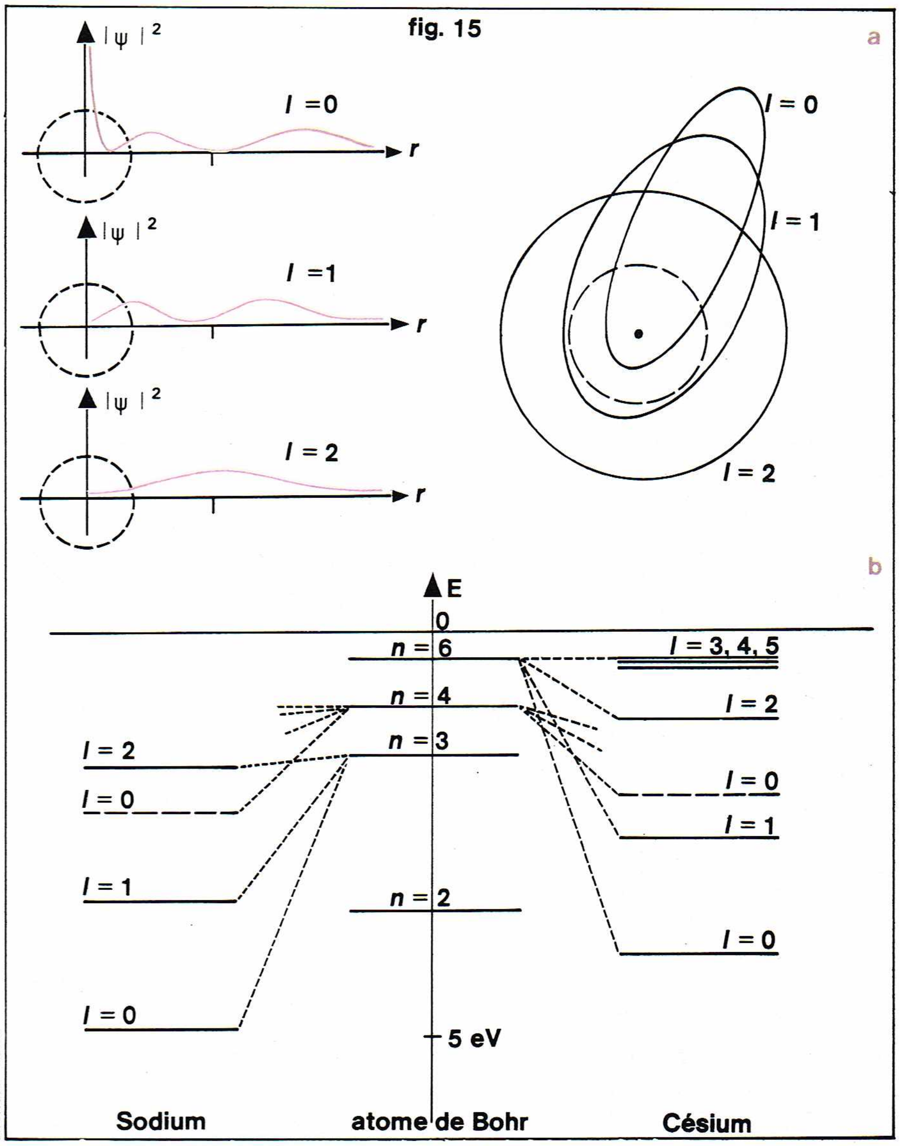

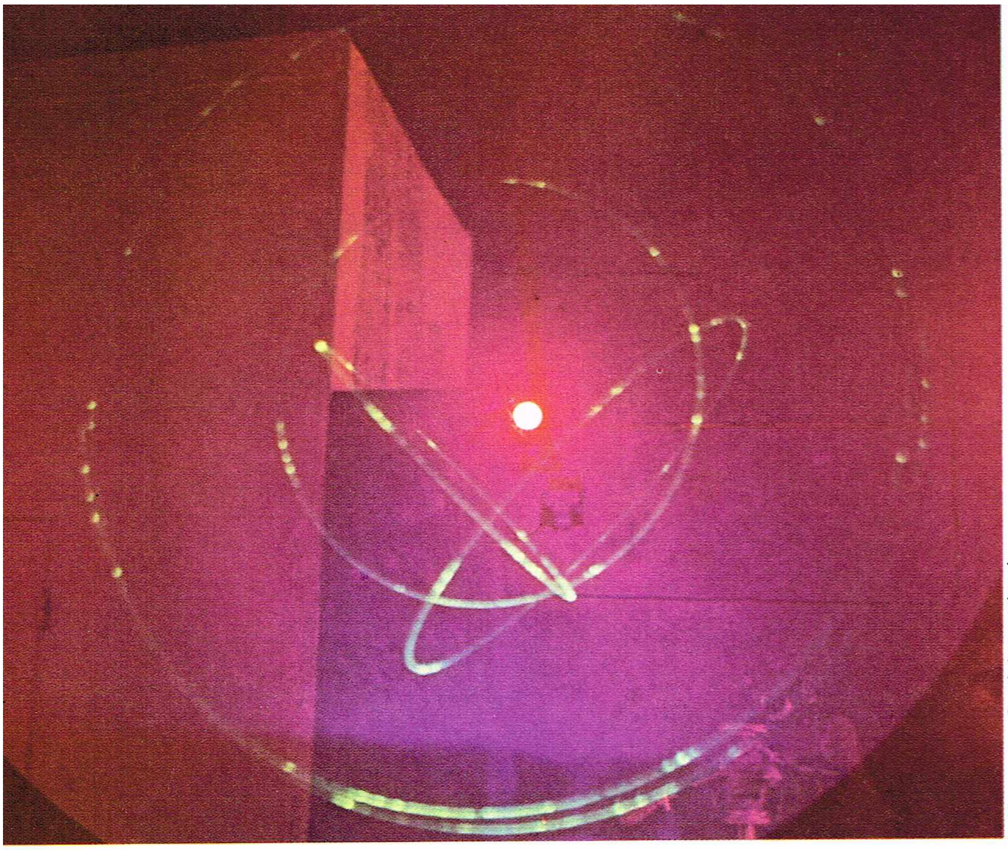

E. Rousseau - Snark International

▲ ***Maquette de l'atome de Perrin.***

due à la présence d'une interaction non coulombienne, est souvent appelée levée de dégénérescence par pénétration des orbites.

Remplissage des sous-couches

Dégénérescence d'une configuration

Nous avons vu qu'une sous-couche est définie par une valeur de n et une valeur de l. On obtient une configuration par la donnée du nombre d'électrons par sous-couche.

Nous savons que l'état d'un électron (n, l) est $2(2l+1)$ fois dégénéré : du point de vue orbital, il peut être décrit par $2l+1$ fonctions indépendantes (correspondant à un nombre m allant de $-l$ à $+l$), et il faut encore spécifier l'état de spin ($+1/2$ ou $-1/2$), qui représente un degré de liberté interne à l'électron, c'est-à-dire indépendant du mouvement.

Quelle est la dégénérescence de p électrons (n, l) ? Il s'agit de compter le nombre de possibilités lors de la disposition de p électrons dans $(2l+1)$ cellules de l'espace des phases, en respectant les deux grands principes de la mécanique quantique :

— les électrons de même état de spin sont des particules indiscernables, ce qui veut dire que le fait d'échanger deux électrons ne modifie pas l'état quantique du système ;

— le principe d'exclusion, ou principe de Pauli, exige qu'il y ait au plus deux électrons par cellule de l'espace des phases, avec des états de spin différents.

Il y a $2(2l+1) = 4l+2$ manières de placer le premier électron, mais seulement $4l+1$ pour le second, et $4l+3-p$ pour le p-ième électron à cause du principe de Pauli. Il faut de plus diviser par $p!$ puisque les $p!$ permutations des électrons ne comptent pas pour des états différents. Au total, la dégénérescence vaut :

$$G = \frac{(4l+2)(4l+1)\ldots(4l+3-p)}{p!} = \frac{(4l+2)!}{p!\,(4l+2-p)!}$$

Pour $p = 1$, on a, bien sûr, $G = 4l+2$. Pour $p = 4l+2$, on a $G = 1$: la sous-couche est complète avec $4l+2$ électrons, et il n'y a plus aucun degré de liberté de disponible. Une telle sous-couche a alors la symétrie sphérique : une direction privilégiée (un moment cinétique par exemple) conduirait à une dégénérescence $G > 1$ du fait de la quantification spatiale.

La dégénérescence d'une configuration est égale au produit des dégénérescences des sous-couches incomplètes. Reprenons l'exemple de la première configuration excitée du zinc :

$$\underbrace{1s^2,\ 2s^2,\ 2p^6,\ 3s^2,\ 3p^6,\ 3d^{10}}_{\text{complètes}},\ \underset{2}{4s},\ \underset{6}{4p} \qquad G = 12$$

Remplissage des sous-couches

Comment construire l'atome de numéro atomique Z ? Nous allons supposer résolu le problème le plus difficile, celui de la détermination du potentiel central $V_c(r)$, qui prend en compte l'essentiel des interactions électron-électron.

La connaissance de $V_c(r)$ entraîne celle de l'énergie $E(n, l)$ des sous-couches. Puisque les électrons sont supposés indépendants, il suffit de remplir ces sous-couches avec les Z électrons, en commençant par les plus profondes pour minimiser l'énergie. Mais pouvons-nous prévoir dans quel ordre nous allons rencontrer ces sous-couches, dans l'échelle des énergies ? La réponse est oui, car la théorie et l'expérience montrent que cet ordre dépend peu de la valeur exacte de $V_c(r)$, qui, bien sûr, diffère d'une valeur de Z à une autre. L'ordre de remplissage est indiqué sur la *figure* 16.

— Puisque $E(n, l)$ croît aussi bien avec n qu'avec l, on va grouper ces deux nombres quantiques par valeurs croissantes de $n+l$. L'énergie la plus basse correspond, bien sûr, à $n+l=1$ (soit $n=1$, $l=0$).

— A l'intérieur du sous-ensemble $n+l=k$, l'énergie croît avec n, c'est-à-dire que l'augmentation de n l'emporte sur la diminution de l. Physiquement, l'éloignement de l'origine des coordonnées (noyau et centre du potentiel V_c) lié à l'augmentation de n l'emporte sur la pénétration des orbites dues à la diminution de l.

Il existe quelques exceptions à ce remplissage régulier ; citons pour les atomes légers le chrome (Z = 24) et le cuivre (Z = 29).

Éléments de transition

Une des conséquences de l'ordre d'occupation énoncé ci-dessus est qu'il existe des sous-couches vides alors que se remplit une sous-couche de nombre quantique n supérieur. Mais le cas le plus intéressant est le cas du remplissage d'une sous-couche nd alors que la sous-couche $(n+1)\,s$ est complète. Les éléments obtenus sont dits éléments de transition :

$n = 3$ va de Z = 21 à Z = 30
et comprend fer, cobalt, nickel, cuivre

$n = 4$ va de Z = 39 à Z = 48

$n = 5$ va de Z = 71 à Z = 80

Les sous-couches nd et $(n+1)\,s$ sont très proches en énergie, et il en résulte que les électrons de valence sont mal définis : ils proviennent de l'une ou l'autre des sous-couches suivant le cas. Le manganèse (Z = 25) $3d^5\,4s^2$ a des valences qui vont de 2 à 7, le fer (Z = 26) $3d^6\,4s^2$ a les valences 2 et 3, etc.

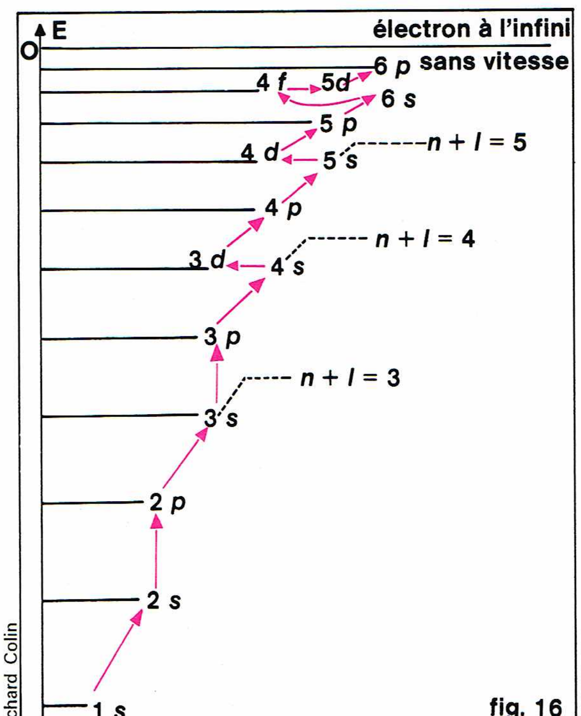

Richard Colin

▶ ***Figure 16 : niveaux d'énergie d'un électron dans un certain potentiel central $V_c(r)$. L'ordre des sous-couches dépend peu de la forme exacte de $V_c(r)$, mais certaines sous-couches ont des énergies très voisines, ce qui peut conduire à des anomalies par rapport à l'ordre normal de remplissage indiqué par les flèches.***

Prenons le cas du mercure (Z = 80) 5 d^{10} 6 s^2. C'est la sous-couche 5 d qui se remplit en dernier (au moins théoriquement, car l'or (Z = 79) est une exception). Mais la première configuration excitée est 5 d^{10} 6 s 6 p et est donc obtenue par excitation de l'un des électrons 6 s^2. Beaucoup plus élevée en énergie est la configuration 5 d^9 6 s^2 6 p.

Mentionnons que l'on appelle « terres rares » les 14 éléments qui correspondent au remplissage de la sous-couche 4 f alors que la sous-couche 6 s est complète (Z = 57 à Z = 70). Leurs propriétés chimiques sont très voisines, car elles sont dues aux couches 5 p^6 et 6 s^2, et leur séparation est très délicate.

Archives I.G.D.A.

▲ *Le chimiste russe* Mendeleïev *à sa table de travail. On lui doit de nombreux travaux, mais son nom est surtout lié à la classification périodique des éléments chimiques parue dans un ouvrage de 1879.*

Table de Mendeleïev

Termes spectraux

Nous sommes maintenant capables de prévoir, sauf exceptions, la configuration fondamentale de l'élément de numéro atomique Z (le problème de l'ordre des configurations excitées est plus difficile). Mais nous savons aussi deux choses :

— Le modèle de la configuration est un modèle à électrons indépendants, qui repose sur une entière confiance dans notre détermination d'un potentiel central $V_c(r)$. Il est certain qu'il ne s'agit que d'une approximation, et qu'il existe des termes de couplage entre deux électrons.

— La configuration est souvent fortement dégénérée. Cette dégénérescence, qui provient uniquement des sous-couches incomplètes, risque d'être levée par les termes de couplage entre électrons correspondants.

Il existe de nombreuses façons de coupler les électrons de valence. Nous ne citerons que le couplage le plus répandu, appelé couplage de Russel-Saunders ou « couplage L, S ».

— Les moments cinétiques orbitaux individuels des électrons de valence sont couplés. Seul $\vec{L} = \Sigma \vec{l_i}$ est une constante du mouvement. L'énergie de couplage est *électrostatique :* les nuages électroniques à symétrie non sphérique se repoussent de manière différente suivant l'orientation relative des moments $\vec{l_i}$.

— Les moments de spin des électrons sont couplés, de telle sorte que seul $\vec{S} = \Sigma \vec{s_i}$ soit une constante du mouvement. L'énergie du couplage est encore *électrostatique :* son origine est purement quantique et réside dans le principe de Pauli.

— La dégénérescence de la configuration est partiellement levée, et il apparaît plusieurs « termes spectraux », caractérisés chacun par un couple de valeurs L, S. Les écarts d'énergie peuvent être de l'ordre de 1 eV, car les énergies de couplage sont électrostatiques (au même titre que l'effet de pénétration des orbites, par exemple).

— Pour deux électrons, les valeurs de L sont des nombres entiers compris entre $|l_1 - l_2|$ et $l_1 + l_2$ (voir texte de *Mécanique quantique*). Les niveaux sont désignés par des lettres conventionnelles, analogues à celles qui représentent les configurations :

L :	0	1	2	3	4	
noté :	S	P	D	F	G	...

— Pour deux électrons toujours, les valeurs de S sont les nombres 0 et 1, c'est-à-dire $|s_1 - s_2|$ et $s_1 + s_2$ avec $s_1 = s_2 = 1/2$, sauf pour la sous-couche complète non dégénérée s^2 pour laquelle le principe de Pauli impose S = 0 (spins « antiparallèles »). Comme la dégénérescence provenant du spin vaut 2 S + 1, on parle de niveau singulet (S = 0) ou de niveau triplet (S = 1). La *figure* 17 donne un exemple.

— Pour plus de deux électrons, on couple

$$\vec{L_1} = \vec{l_1} + \vec{l_2}$$

avec $\vec{l_3}$ et ainsi de suite. On fait de même pour le spin (maintenant S sera demi-entier > 0 si le nombre d'électrons à coupler est impair). Dans le cas le plus général, L et S ont une interprétation physique simple, ils représentent l'ordre de grandeur du moment cinétique orbital et du moment cinétique de spin en unités de $\hbar$.

Existe-t-il d'autres levées de dégénérescence?

Oui. Nous venons de passer en revue les couplages les plus intenses, ceux qui correspondent à une énergie électrostatique. Il reste les couplages associés à une énergie magnétique. En effet, à tout moment cinétique de particule chargée ($\vec{l}$ et $\vec{s}$) est associé en général un moment magnétique. Nous ne citerons que deux de ces couplages.

— Le couplage spin-orbite est le couplage entre le moment magnétique de spin et le champ magnétique *dans le référentiel de l'électron* créé par le mouvement de noyau chargé. Il est à l'origine de la « structure fine », qui est une nouvelle levée de dégénérescence.

— Le couplage hyperfin est le couplage entre le magnétisme de l'électron et le moment magnétique du noyau (dans le cas où ce dernier possède un spin). Il constitue l'une des causes de la « structure hyperfine ».

Les énergies mises en jeu dans ces couplages sont en général très inférieures à 1 eV (de 10^{-2} à 10^{-7} eV, comme il est noté sur la *figure* 1 de la première partie). Néanmoins, ces interactions ont des conséquences importantes dans tous les domaines de la physique.

La table de Mendeleïev

Il nous reste à essayer de prévoir quel est le terme spectral qui constitue l'état fondamental de l'atome. Ceci est possible grâce à la règle de Hund, que nous donnons sans justification, mais qui est vérifiée dans la grande majorité des cas (*fig.* 17) :

— le terme d'énergie la plus basse dans une configuration est celui qui correspond à la plus grande valeur de S, et pour cette valeur de S à la plus grande valeur de L compatible avec les règles de la mécanique quantique (postulat d'antisymétrisation). Dans l'exemple de la *figure* 17, le principe de Pauli interdit une combinaison L, S sur deux.

▼ *Figure 17 : termes issus de la configuration fondamentale du carbone. La sous-couche incomplète est 2p². Il faut coupler deux électrons de l = 1. On obtient* L = *0, 1 ou 2, c'est-à-dire des termes* S, P *ou* D. *En couplant les deux spins s = 1/2, on obtient* S = *0 ou* S = *1. Il y a 2 électrons identiques, et le postulat d'antisymétrisation interdit une combinaison (*L, S*) sur deux. En notant les termes* $^{2S+1}$L *(dégénérescence* G = *[2*S + *1] [2*L + *1]), il reste* ^{1}S, ^{3}P, ^{1}D. *D'après la règle de Hund, le niveau fondamental est* ^{3}P.

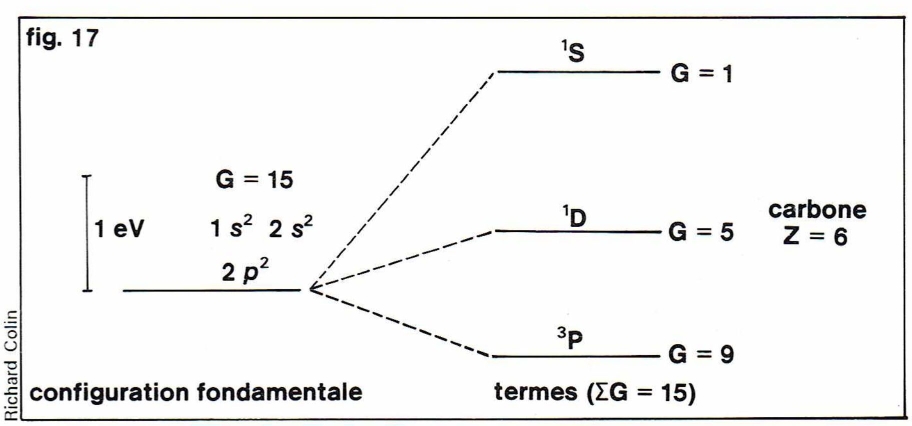

Richard Colin

fig. 18	3 d					4 s	Z	
	↑					↑↓	21	scandium
	↑	↑				↑↓	22	titane
	↑	↑	↑			↑↓	23	vanadium
	↑	↑	↑	↑	↑	↑	24	chrome (exception)
	↑	↑	↑	↑	↑	↑↓	25	manganèse
	↑↓	↑	↑	↑	↑	↑↓	26	fer
	↑↓	↑↓	↑	↑	↑	↑↓	27	cobalt
	↑↓	↑↓	↑↓	↑	↑	↑↓	28	nickel
	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑	29	cuivre (exception)
	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	30	zinc

▶ *Figure 18 ; un exemple de remplissage : la première série des métaux de transition. On reste dans l'approximation de la configuration : chaque électron est représenté individuellement, chaque case correspondant à une valeur de m_e, chaque flèche représentant un des deux degrés de liberté du spin. Le remplissage respecte l'ordre en énergie des sous-couches (4s avant 3d), sauf deux exceptions, et le principe de Pauli, mais symbolise en plus la règle de Hund : S doit être maximal.*

Le remplissage des cellules de l'espace des phases représenté dans la *figure* 18 illustre la règle de Hund : les électrons sont disposés « spins parallèles » pour donner à S la valeur maximale, tant que leur nombre ne dépasse pas $2\,l + 1$. En réalité, les nombres quantiques individuels tels que m_e n'ont plus de sens, du fait du couplage. Seuls comptent L et M_L, S et M_S.

C'est le respect des règles énoncées dans les pages précédentes qui entraîne la périodicité des propriétés chimiques et physiques qui est à l'origine de la table de Mendeleïev (*fig.* 19). Nous ne donnerons que deux exemples d'une telle périodicité.

La valence est égale au nombre d'électrons assez peu liés à l'atome pour participer aux liaisons chimiques. Elle est constante le long des colonnes de la table (quand elle est bien définie, ce qui n'est pas le cas pour les éléments de transition) : elle vaut 1 pour les alcalins, 2 pour les alcalino-terreux, 3 pour la colonne III B, 0 pour les gaz rares.

Le potentiel d'ionisation est l'énergie nécessaire pour arracher un électron à l'atome. Il est d'autant plus faible que le noyau est mieux « écranté » par les autres électrons au nombre de Z — 1, c'est-à-dire d'autant plus faible que ces derniers sont plus groupés pour former le « cœur » de l'atome. Ce sont les atomes alcalins qui ont le plus petit potentiel d'ionisation V_i, puisqu'ils ont 1 électron périphérique *ns* et un cœur formé de Z — 1 électrons de *n* inférieur ; on trouve que V_i décroît de 5 à 4 V en fonction de Z. A l'opposé, ce sont les gaz rares qui marquent les sommets de la courbe V_i fonction de Z (de 25 V à 12 V) : ils ont 8 électrons périphériques, et le cœur ne contient que Z — 8 électrons qui constituent un écran médiocre.

Action d'un champ électrique statique

Moment dipolaire induit

Classiquement, un champ électrique $\vec{E}$ déforme le cortège électronique, tirant les électrons d'un côté et le noyau de l'autre. Dans le nouvel état d'équilibre, les centres de gravité des charges de signe opposé ne coïncident plus : l'atome possède alors un moment dipolaire électrique induit $\vec{D} = \alpha\vec{E}$, et une énergie $W = -\frac{1}{2}\vec{D}\cdot\vec{E} = -\frac{1}{2}\alpha\vec{E}^2$ (*fig.* 20a). Le facteur 1/2 résulte de l'intégration entre 0 et E.

Dans une première approximation, la mécanique quantique aboutit aux mêmes résultats. Prenons le cas simple d'un atome à un seul électron de valence, soumis à l'action d'un champ uniforme $\vec{E}$. L'hamiltonien H_0 devient ($\vec{r}$ est la coordonnée de l'électron) :

$$H = H_0 + qV(\vec{r}) = H_0 + q\,\overrightarrow{\text{grad}}\,V\cdot\vec{r} = H_0 - q\vec{r}\cdot\vec{E}$$

en prenant comme origine des potentiels V (O) = 0. Il en résulte que :

— L'hamiltonien perturbateur $H_1 = qV(\vec{r})$ dépend de $\vec{r}$ (et non de r) et n'est pas un potentiel central (à symétrie sphérique). Donc le moment cinétique $\vec{l}$ n'est plus une constante du mouvement. Mais du fait de la symétrie de révolution autour de E, m_e reste bien défini.

— Si H_1 reste faible devant H_0, la mécanique quantique permet de résoudre ce problème par une méthode dite de « perturbation ». Elle montre que le niveau *l* est « contaminé » par les niveaux $l \pm 1$. (Exemple : *fig.* 20a.)

▶ *Page ci-contre, en bas. Figure 21 : a, on a représenté le champ électrique créé par les deux noyaux d'une molécule diatomique ; G désigne le centre de gravité des charges. A gauche, on a dessiné les lignes de champ ; à droite, pour une distance internucléaire pas trop grande, on a décomposé le champ électrique en un champ à symétrie sphérique et un champ E_s grossièrement parallèle à l'axe. b, niveaux d'énergie d'un électron. Dans le champ central non coulombien, on a un niveau défini par l. On fait intervenir E_s. Le champ n'est pas uniforme, donc l'hamiltonien ne se réduit pas à $-e\vec{r}\cdot\vec{E}_s$, mais du fait de la symétrie de révolution, l_z reste une constante de mouvement et m_e un « bon nombre quantique ». Les niveaux de même $|m_e|$ ont même énergie, mais la dégénérescence est partiellement levée.*

fig. 19

Numéros des colonnes des anciennes tables de Mendeleïev.

Symbole de la dernière sous-couche

	IA	IIA		
1s	1 H	2 He		
2s	3 Li	4 Be		
3s	11 Na	12 Mg		
4s	19 K	20 Ca		3d
5s	37 Rb	38 Sr		4d
6s	55 Cs	56 Ba	Terres rares	5d
7s	87 Fr	88 Ra	Actinides	6d
	1	2		

	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA			IB	IIB
3d	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn
4d	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd
5d	71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg
6d	103 Lw									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIB	VIIIB
2p	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3p	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4p	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5p	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6p	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
	1	2	3	4	5	6

Nombre d'électrons dans la dernière sous-couche à l'état fondamental (sauf exceptions colorées en bleu clair)

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Terres rares →	4f	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb
Actinides →	5f	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No

▶ *Figure 19 : table de Mendeleïev.*

On peut montrer que H_1 n'a pas d'éléments de matrice à l'intérieur d'un état propre de H_0 (un état propre d'un atome isolé n'a pas de moment dipolaire électrique). Le calcul de l'effet de H_1 relève donc de la théorie des perturbations poussée au second ordre. Les fonctions d'onde sont perturbées au premier ordre en E : les états propres perturbés ont un moment dipolaire électrique $<\vec{D}> = \alpha\vec{E}$. Les énergies sont perturbées au second ordre en E : la variation d'énergie est proportionnelle à E^2. Cet effet est appelé « effet Stark quadratique ».

Calculons un ordre de grandeur pour $E = 10^7$ V/m (une valeur souvent atteinte dans les expériences d'effet Stark). Le coefficient de « contamination » d'un niveau par les niveaux où l diffère de $\pm$ 1 est

$$\varepsilon = \frac{<Y^m_{l\pm1} |H_1| Y^m_l>}{\Delta W}$$

avec $H_1 = - ezE = - eEr\cos\theta$, et il est de l'ordre de $H_1/\Delta W$ (ΔW = écart d'énergie entre les niveaux de H_0). $H_1 = erE \simeq 10^{-3}$ eV (en prenant $r \simeq 1$ Å) et $\Delta W \simeq 1$ eV. Le mélange est de l'ordre de 10^{-3}, le moment dipolaire induit $<\vec{D}>$ de l'ordre de $5 \cdot 10^{-3}$ debye (1 debye = $10^{-18} \times$ [1 *ues* charge] $\times$ [1 cm] = 0,208 $e \times 1$ Å) et l'énergie $-\frac{1}{2}<\vec{D}>\vec{E}$ de l'ordre de 10^{-6} eV, c'est-à-dire 10^{-2} cm^{-1} (250 MHz en unité de fréquence).

Un exemple d'effet Stark naturel

Considérons une molécule diatomique (*fig.* 21a). Les électrons se meuvent dans un potentiel dû aux noyaux qui n'a plus la symétrie sphérique comme dans le cas d'un atome, mais seulement la symétrie de révolution autour de l'axe internucléaire. Néanmoins, on peut décomposer le champ des noyaux en un champ central et en un champ E_s grossièrement parallèle à l'axe internucléaire. Pour construire les niveaux électroniques d'une molécule, on peut considérer d'abord le champ central : on obtient les niveaux d'énergie d'un électron, caractérisés par l. Puis on fait agir E_s, qui a la symétrie de révolution (mais qui est loin d'être uniforme !).

L'ordre de grandeur de E_s est celui du champ électrique interne d'un atome (10^{11} V/*m*). L'effet Stark correspondant est considérable et ne relève pas d'une théorie de perturbations. Mais on retrouve les caractéristiques générales de l'effet Stark quadratique :

— la dégénérescence de nombre quantique magnétique m_e est partiellement levée. En effet, les éléments de matrice $<l', m'_e |H_1| l, m_e>$ dépendent de m_e ;

— les états de même valeur absolue de m_e ont même énergie : les niveaux sont deux fois dégénérés (sauf le niveau $m_e = 0$). Ceci découle de considérations de symétrie simples, explicitées *figure* 20b.

En conclusion, les niveaux électroniques d'une molécule diatomique sont caractérisés pour chaque électron par $\lambda = |m_e|$ (et peut-être par l si le mélange par effet Stark n'est pas trop fort), la direction de quantification étant l'axe internucléaire. S'il y a plusieurs électrons, les niveaux sont caractérisés par Λ, $\Lambda\hbar$ étant le module de la projection du moment cinétique électronique total. Par analogie avec l'atome, les niveaux sont désignés, dans les deux cas considérés, par des lettres grecques (*fig.* 21b) :

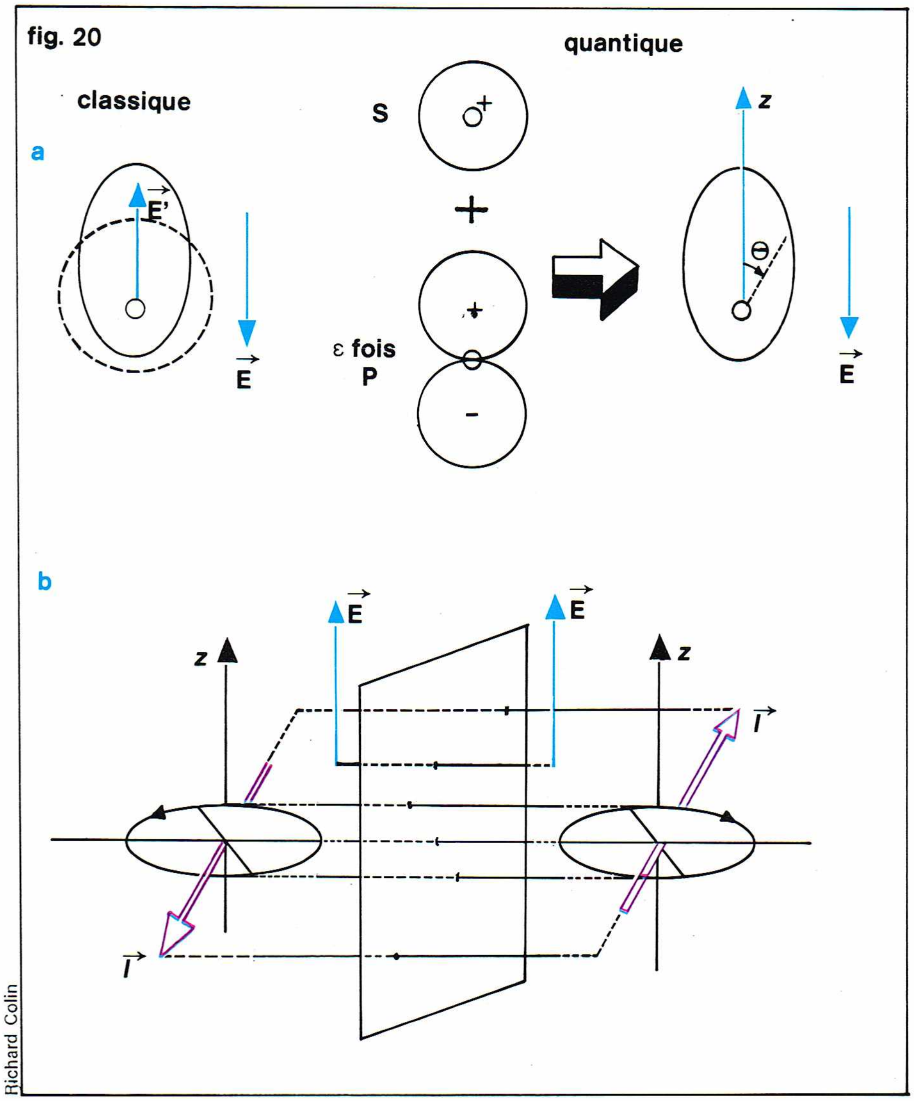

▲ *Figure 20 : a, à gauche, déformation du cortège électronique par un champ électrique ; à droite, modification correspondante de la fonction d'onde. L'état S (symétrie sphérique) est « contaminé » par un état P (ici Y^0_1 qui est proportionnel à cos θ). b, symétrie de l'effet Stark. On fait une symétrie par rapport à un plan parallèle à $\vec{E}$ de tout le système physique (atome dans l'état l, m_e et champ). Le nouveau système obtenu a même énergie, car l'hamiltonien n'a pas changé (les interactions électromagnétiques sont invariantes dans une telle symétrie), mais $\vec{l}$ a changé de sens, comme tout vecteur axial. Donc les états m_e et $- m_e$ ont même énergie.*

0	± 1	± 2	...	Projection $\vec{l}$ ou $\vec{L}$	0	± 1	± 2	...
σ	π	δ	...	Appellation	Σ	Π	Δ	...
0	1	2	...	λ Λ	0	1	2	...

Dans tout ce qui précède, nous n'avons jamais tenu compte du spin de l'électron : le champ électrique n'agit jamais directement sur lui, et, dans une molécule, le couplage spin-orbite est très inférieur à l'hamiltonien de l'effet Stark dû à E_s.

Dans un solide, les électrons sont également soumis au champ électrique de plusieurs noyaux (il correspond au potentiel périodique qui intervient dans la théorie des bandes). Pour un électron lié à un noyau, le champ des autres noyaux (dit « champ cristallin ») provoque un autre type d'effet Stark naturel.

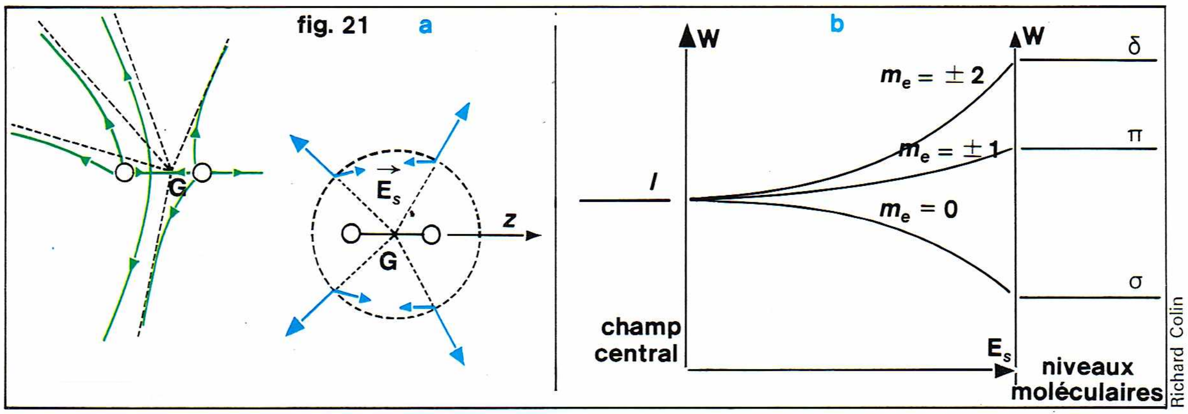

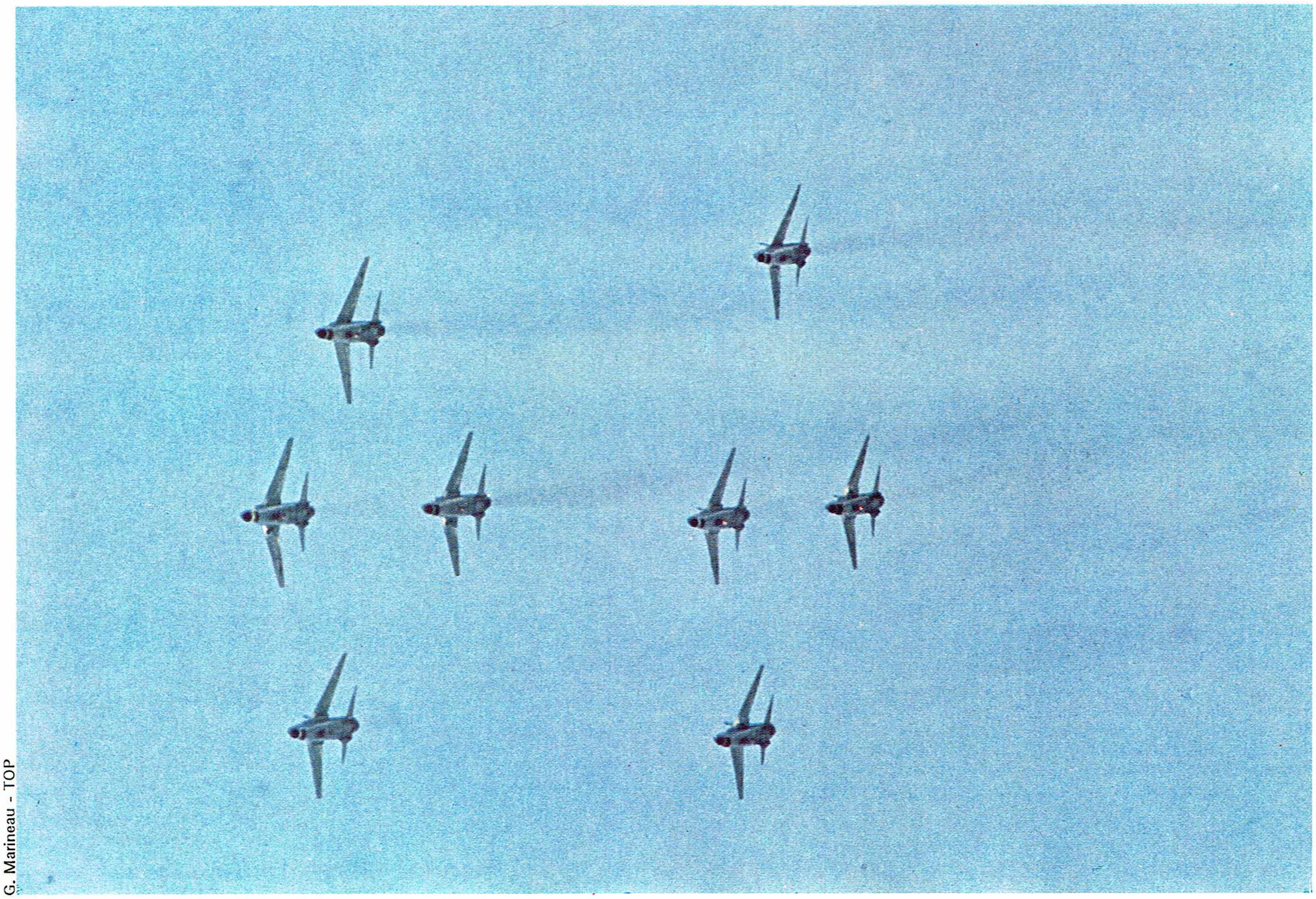

G. Marineau - TOP

▲ *Lorsque ν est inférieur aux fréquences propres des électrons (cas de la lumière visible et infrarouge) on parle de diffusion Rayleigh ; c'est ce phénomène qui explique la luminosité et la couleur bleue du ciel.*
▼ *Figure 22 : rayonnement du dipôle électrique induit par une onde électromagnétique polarisée rectilignement.*

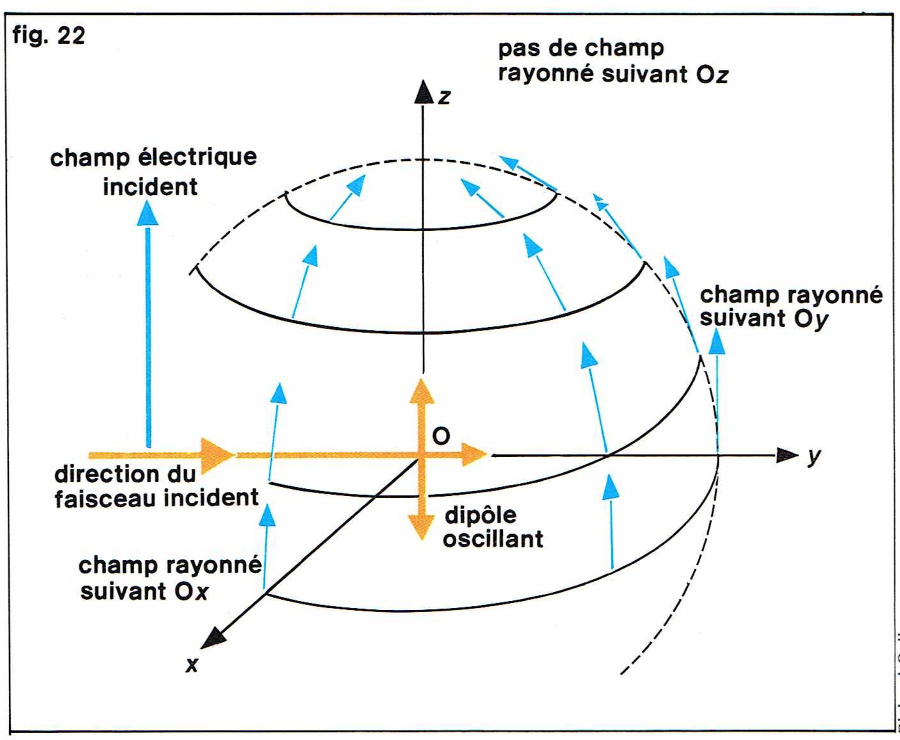

Richard Colin

Champ électromagnétique non résonnant

Rayonnement du dipôle induit

Nous allons nous intéresser à l'action sur un atome d'un champ électrique oscillant de fréquence ν. Cette fréquence ne coïncide avec aucune des fréquences propres de l'atome, qui sont définies par $h\nu_0 = W_i - W_j$ (W_i et W_j étant 2 niveaux d'énergie). On ne considérera pas ici les effets du champ magnétique, qui sont en général négligeables.

Tant que $\vec{E}$ reste faible par rapport au champ interne d'un atome, ce qui est le cas général, on peut appliquer les résultats du chapitre précédent. La seule différence est que $\vec{D}$ est modulé à la fréquence ν du champ incident : le moment dipolaire électrique résultant est oscillant et peut donc rayonner (voir l'article *Équations de Maxwell*).

Rappelons les résultats suivants :

— Si le champ $\vec{E}$ incident est polarisé suivant l'axe Oz, le dipôle induit oscille aussi le long de Oz. Le rayonnement émis est alors polarisé linéairement.

— Le rayonnement émis est nul dans la direction de Oz, et maximal dans le plan xOy (rayonnement d'une antenne, *figure* 22).

— Le champ rayonné, à la fréquence ν, décroît en $1/r$. Il est proportionnel à l'accélération de l'électron (dérivée seconde de $\vec{D}$).

— La puissance absorbée, égale à la puissance rayonnée, est $P = \vec{E} \cdot d\vec{D}/dt$. En effet, la variation d'énergie de l'ensemble atome-champ électrique pendant le temps dt est $0 = -\vec{E} \cdot d\vec{D} + dW$; l'énergie dW qui apparaît représente l'énergie rayonnée, puisqu'en moyenne l'énergie cinétique du dipôle ne varie pas. L'énergie absorbée est représentée par $\vec{E} \cdot d\vec{D}$, que l'on aurait pu écrire directement $P dt = \vec{f} \cdot \vec{V}\ dt = q\vec{E} \cdot d\vec{r}$. Posons $E = E_0 \cos 2\pi\nu t$, $D = D_0 \cos (2\pi\nu t + \varphi)$. La puissance

moyenne rayonnée est $P = \frac{1}{2} E_0 D_0 \cos \varphi$: elle est proportionnelle à la composante de D en quadrature avec E, ce qui démontre la nécessité de faire intervenir des « forces de dissipation » de l'énergie.

Diffusion de la lumière et des rayons X

Il résulte des considérations ci-dessus que, lorsqu'une onde électromagnétique traverse un milieu, d'une part le faisceau est atténué, d'autre part l'onde est diffusée dans toutes les directions.

Lorsque ν est inférieur aux fréquences propres des électrons (cas de la lumière visible et infrarouge), on parle de diffusion Rayleigh. C'est un phénomène peu intense, délicat à étudier en laboratoire. En revanche, il explique la luminosité du ciel, qui est une évidence pour chacun de nous à cause du très grand nombre de molécules de l'atmosphère. La couleur bleue (en l'absence de gouttelettes d'eau) s'explique aisément si l'on sait que l'intensité diffusée varie en ν^4.

Lorsque ν est supérieur aux fréquences propres des électrons (rayons X mous), on parle de diffusion Thomson. L'intensité diffusée devient indépendante de ν.

Peut-on expliquer la diffusion en termes de photons ? Oui, à condition d'introduire la notion de transition virtuelle. Prenons le cas d'un atome dont l'état fondamental est un état S (L = 0). Nous avons vu qu'en présence d'un champ électrique $\vec{E}$ la fonction d'onde de cet état est « mélangée » à la fonction d'onde des états P (L = 1). Il y a donc une certaine probabilité de trouver l'atome dans un état excité P, probabilité proportionnelle au carré du coefficient de « contamination », c'est-à-dire à E^2, donc au nombre de photons incidents.

Tout cela peut s'interpréter (*fig.* 23) en disant que l'atome absorbe un photon et passe dans l'état excité d'énergie $h\nu_0$. Bien sûr, l'énergie n'est pas conservée, le défaut d'énergie valant $h(\nu_0 - \nu)$; mais la mécanique quantique nous apprend que, lors d'une interaction de durée τ, l'énergie n'est jamais définie à mieux que $\Delta E \simeq h/\tau$. Il suffit de prendre $\tau = 1/\nu_0 - \nu$ comme temps caractéristique du processus considéré : le niveau excité est tellement élargi que la conservation de l'énergie est assurée.

Si $h(\nu_0 - \nu) = 1$ eV, τ doit être inférieur à 10^{-15} s. Un processus aussi bref est qualifié de transition virtuelle : en général, il ne se passe rien, ni pour l'atome, ni pour le photon réémis identique à lui-même (si ce n'est que sa propagation est modifiée, ce qui se traduit macroscopiquement dans la notion d'indice). Mais il peut y avoir échange d'impulsion entre le photon et l'atome, avec changement de direction du photon et recul correspondant de l'atome. C'est le phénomène de diffusion.

Effet Raman

Considérons une molécule en interaction avec une onde électromagnétique. Nous verrons dans la troisième partie qu'une molécule, dans un état électronique donné, a des fréquences de vibration N qui correspondent à des oscillations des noyaux autour de leur position moyenne. Ces oscillations ont pour effet de moduler les fonctions d'onde électroniques.

Classiquement, il en résulte que le moment dipolaire électrique oscillant $D_0 \cos(2\pi\nu t + \varphi)$ est modulé à la fréquence N :

$$D_0 (1 + \varepsilon \cos 2\pi N t) \cos(2\pi\nu t) + \varphi) = D_0 \{\cos[2\pi\nu t + \varphi] + \frac{\varepsilon}{2}\cos[2\pi(\nu + N)t + \varphi] + \frac{\varepsilon}{2}\cos[2\pi(\nu - N)t + \varphi]\}$$

Il apparaît dans le rayonnement diffusé les deux fréquences latérales $\nu + N$ et $\nu - N$, dont le décalage en fréquence est caractéristique de la molécule : c'est l'effet Raman. D'une manière plus générale, les raies de fréquence inférieure à ν sont appelées raies Stokes, les raies de fréquence supérieure à ν, raies anti-Stokes.

Quantiquement, au cours de la transition virtuelle, l'atome ne retombe pas sur le niveau de départ. En effet, chaque niveau électronique donne naissance à une série de niveaux, appelés dans notre cas « niveaux de vibration » (*fig.* 24a), séparés par l'énergie hN. La retombée sur les niveaux plus haut ou plus bas que le niveau de départ donne les raies Stokes et anti-Stokes.

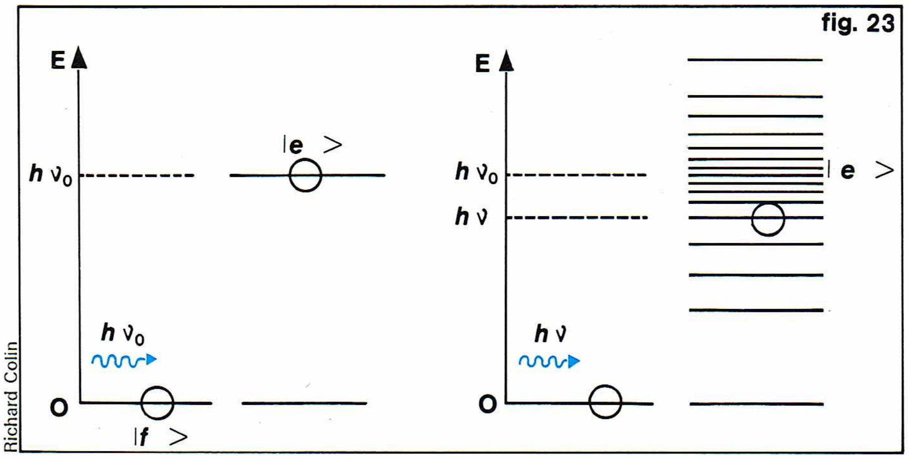

Richard Colin

L'effet Raman a une très grande importance pour l'étude des molécules. Les raies Raman sont encore plus faibles que la raie Rayleigh, et les écarts de fréquence sont souvent faibles. Il faut donc une source puissante et monochromatique : ainsi, de nos jours, on éclaire le milieu avec un laser, et on détecte la lumière diffusée (à angle droit par exemple) à travers un spectrographe (*fig.* 24b).

Transitions résonnantes - Laser et maser

Absorption, fluorescence

Quand la fréquence ν de l'onde électromagnétique devient égale à l'une des fréquences propres de l'atome ν_0, l'absorption devient très grande, on dit que la transition est résonnante. Par conservation de l'énergie, la diffusion devient aussi très importante : elle porte alors le nom de fluorescence (de l'infrarouge aux rayons X).

Revenons sur l'interprétation ondulatoire de ces phénomènes. Les dipôles induits par le champ électrique oscillant rayonnent. On peut démontrer que l'onde émise vers l'avant interfère dans tous les cas de manière destructive avec l'onde incidente, diminuant ainsi l'intensité de cette dernière : c'est l'absorption. L'onde émise dans toutes les autres directions constitue la fluorescence. A la résonance, l'amplitude du dipôle oscillant passe par un maximum aigu, ce qui explique le phénomène de transition résonnante.

Du point de vue corpusculaire, l'énergie est conservée à la résonance. L'atome reste alors assez longtemps dans

▲ ***Figure 23 : à gauche, une transition réelle : à l'instant initial l'atome est dans l'état fondamental $|f>$ et reçoit un photon de fréquence ν_0. L'état du système global est $|f>|h\nu_0>$; à l'instant final, le système est dans l'état $|e>|0>$ (où $|0>$ désigne l'absence de photon) de même énergie. A droite, une transition virtuelle : le système passe de l'état $|f>|h\nu>$ à l'état $|e>|0>$ qui est un état instable de largeur $\geqslant h(\nu_0 = \nu)$, largeur due à une durée de vie $\leqslant 1/\nu_0 - \nu$ très courte et qui permet d'assurer la conservation de l'énergie au sens de la mécanique quantique.***

▼ ***Figure 24 : (a) schéma de principe de l'effet Raman ; (b) schéma d'une expérience moderne d'effet Raman.***

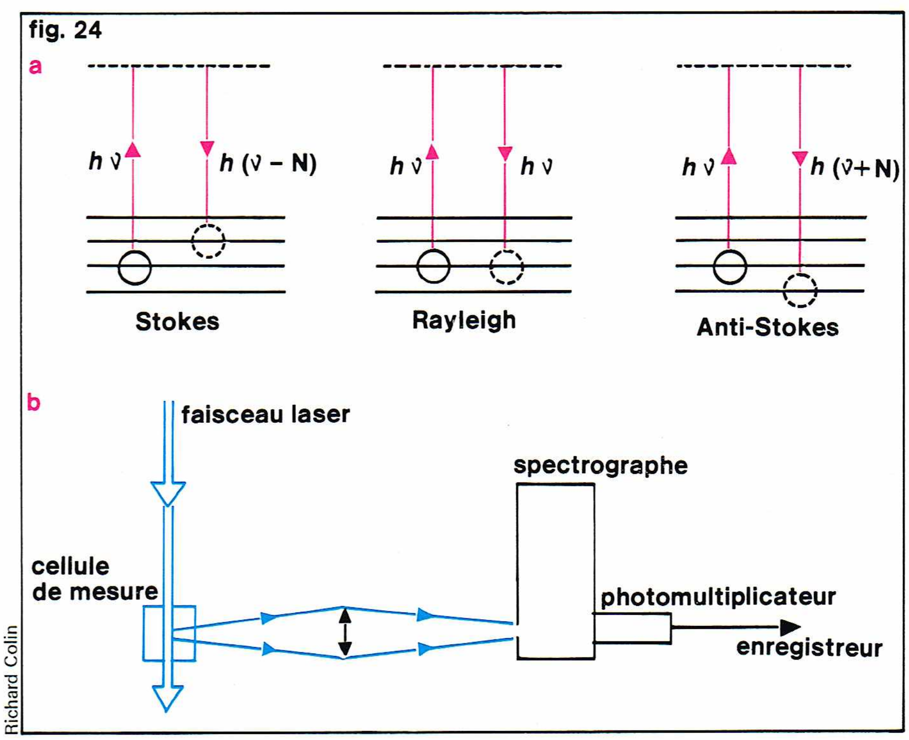

Richard Colin

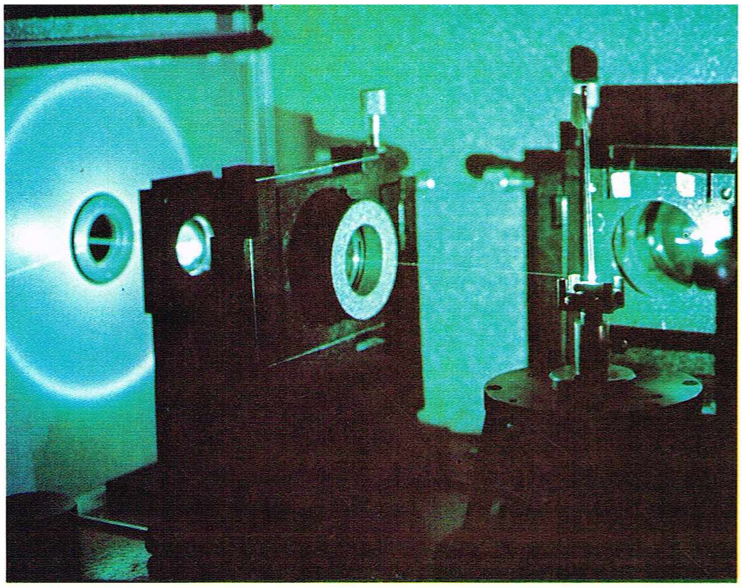

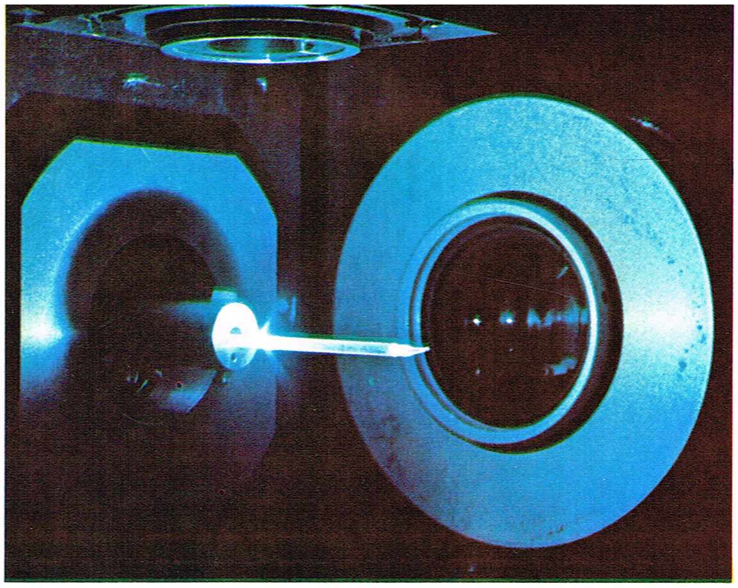

4 clichés : Laboratoire de spectrochimie infrarouge et Raman de Vitry-Thiais du Centre national de la recherche scientifique

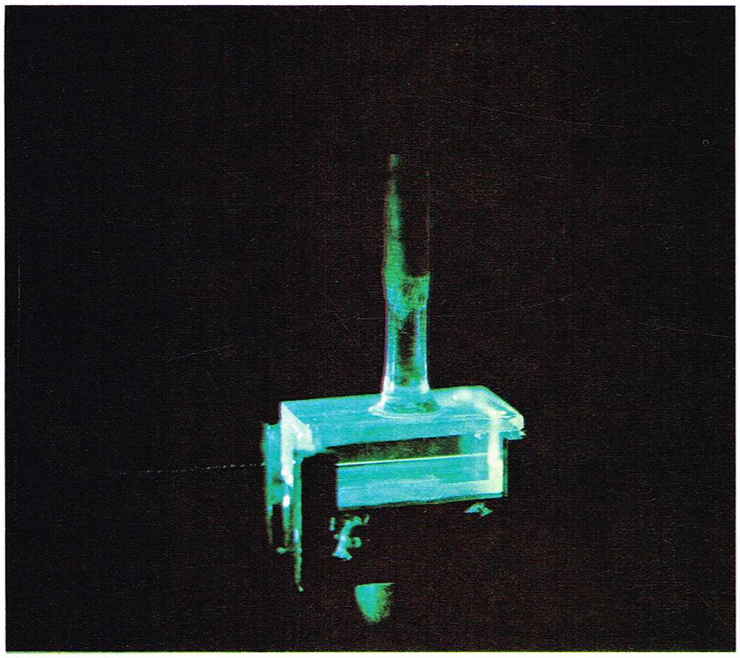

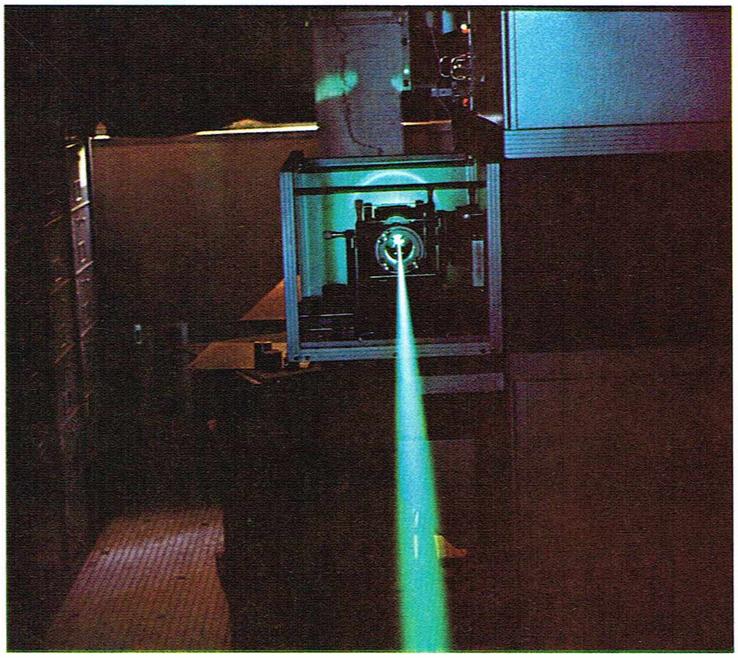

▲ *En haut, à gauche : platine complète du spectromètre Raman (T 800) ; à droite, laser à argon ionisé 4 880 Å équipant un spectromètre Raman : objectif d'entrée du monochromateur et renvoi illuminé par la raie verte du laser. Ci-dessus, à gauche, faisceau de laser à argon pénétrant une cellule à liquide pour spectromètre Raman T 800 ; à droite, faisceau laser sortant d'un laser à argon.*

l'état excité (toutes proportions gardées, bien sûr, c'est-à-dire un temps compris entre 10^{-7} et 10^{-9} s) pour que le photon réémis ne soit pas identique au photon incident. Cette modification apportée au faisceau de projectiles représente à la fois l'absorption et la fluorescence.

Quelle est la largeur (en fréquence ou en énergie) de la résonance ? On distingue en spectroscopie deux types de largeur.

— Une *largeur homogène* est une largeur caractéristique de l'atome étudié et des interactions qui entrent en jeu. C'est le cas de la largeur naturelle qui vaut $\Delta\nu_N = 1/2\,\pi\tau$, où τ est la durée de vie du niveau excité considéré (voir la première partie). Des collisions sur les atomes, ou bien le champ électromagnétique lui-même (pour de fortes intensités), introduisent de nouvelles largeurs homogènes.

— Une *largeur inhomogène* est un étalement de la résonance provoquée par la dispersion des paramètres qui influent sur la transition. La plus importante est la largeur Doppler.

Supposons que le milieu absorbant soit un gaz, et que l'onde électromagnétique se propage dans le sens de l'axe O*z*. Du fait de l'effet Doppler (voir le chapitre *Électromagnétisme*), chaque atome « voit » la fréquence ν $(1 - V_z/c)$, où V_z est la composante sur O*z* de la vitesse de l'atome. Les valeurs de V_z sont réparties autour de 0 sur un intervalle de l'ordre de $\pm\, V = \sqrt{3\,kT/M}$. M est la masse de l'atome, T la température absolue. Il en résulte que les différentes résonances sont dispersées autour de ν sur une largeur $\Delta\nu_D \simeq 2\,\nu V/c$. A température ambiante, on a $V/c \simeq 10^{-6}$. Dans le visible, $\Delta\nu_D$ est de l'ordre du GHz (10^9 Hz) et est toujours plus grand que la largeur naturelle (voir en première partie le spectre de l'hydrogène).

Probabilités de transition

Quelle est l'intensité de la résonance ? Nous distinguerons les facteurs classiques et les facteurs quantiques, et nous commencerons par les premiers.

La probabilité par *unité de temps* d'absorption d'un photon par *un atome* s'écrit en utilisant la notion de section efficace. Cette dernière sera développée dans la troisième partie *(Collisions)*. Le faisceau incident est strictement monochromatique, et correspond à un flux de Φ photons par seconde et par unité de surface. Sauf pour les flux très grands, la probabilité cherchée s'écrit : Π abs. $= \sigma\Phi$. σ est la section efficace et résume toute l'interaction atome-photon.

Le faisceau incident transporte une puissance P_0 à travers une surface S et sa densité (en volume) d'énergie est *u*. L'absorption est définie par le coefficient

$$K = -\frac{1}{P}\frac{dP}{dz}$$

On peut démontrer les formules suivantes :

$$\Pi \text{ abs.} = \sigma\frac{1}{h\nu}\frac{P}{S} = \sigma\frac{1}{h\nu}uc \quad \text{et} \quad K = N\sigma$$

(N : nombre d'atomes susceptibles d'absorber par unité de volume).

Exactement, à résonance ($\nu = \nu_0$), on a en théorie classique :

$$\sigma = 3\,\lambda^2/2\,\pi \simeq \lambda^2$$

C'est une section efficace considérable. Mais, dans un gaz, à cause de l'effet Doppler, seule une petite fraction des atomes (10^{-1} à 10^{-3}) satisfait à la condition de résonance ; σ (ν) devient très faible en dehors de la largeur naturelle $\Delta\nu_N$ suivant la loi :

$$\sigma(\nu) = \sigma_0 \frac{1/4\,\pi^2\tau}{(\nu - \nu_0)^2 + (1/4\,\pi\tau)^2} \quad \text{avec} \quad \frac{1}{2\,\pi\tau} = \Delta\nu_N$$

et la probabilité d'absorption décroît en $1/\nu^2$ loin de la résonance.

L'expression faisceau strictement monochromatique implique une largeur spectrale $\Delta\nu$ inférieure à la largeur naturelle. Depuis 1975, ceci ne relève plus de l'utopie, grâce à de nouveaux lasers accordables et stabilisés. Par exemple, l'expérience de la *figure* 25b (Massachusetts Institute of Technology, 1975) a été faite grâce à un laser accordable utilisant un colorant comme milieu actif. Sa largeur de raie $\Delta\nu = 250$ kHz (finesse $5 \cdot 10^{-10}$) est très inférieure à la largeur naturelle du sodium $\Delta\nu_N = 10$ MHz ($\tau = 1{,}6 \cdot 10^{-8}$ s). Sa stabilité en fréquence est très bonne.

Mais en général, les sources en optique ont une largeur beaucoup plus grande, supérieure à une largeur Doppler : elles se caractérisent alors par leur densité spectrale d'énergie $u_\nu = \frac{du}{d\nu}$. Dans ces conditions, en ordre de grandeur :

$$\Pi \text{ abs.} = \int \sigma(\nu) \frac{1}{h\nu} c u_\nu(\nu)\, d\nu \simeq \sigma(\nu_0) \frac{c}{h\nu_0} u_\nu(\nu_0)\, \Delta\nu_N$$

Toutes les grandeurs notées, sauf u_ν, caractérisent l'atome. Par définition du *coefficient d'Einstein d'absorption* B_{12} (du niveau 1 vers le niveau 2), on écrira, toujours pour un atome :

$$\Pi \text{ abs.} = B_{12} u_\nu(\nu_0)$$

Ce coefficient est très utile dans tous les cas *broad line* (raie large), où la densité spectrale d'énergie varie peu sur un intervalle $\Delta\nu_N$. Classiquement, $B_{12} = e^2/4\,\varepsilon_0 m h \nu_0$ (m : masse de l'électron).

Règles de sélection

Que deviennent, en mécanique quantique, les valeurs trouvées pour $\sigma(\nu_0)$, K et B_{12}? La théorie montre (et l'expérience confirme) qu'il faut les multiplier par un facteur $f < 1$ appelé force d'oscillateur. Ce facteur condense l'aspect quantique de notre problème, car il est proportionnel au carré de l'élément de matrice de l'opérateur dipôle électrique :

$$f = \frac{4\,\pi m \nu_0}{\hbar} |\langle 2|z|1\rangle|^2 \text{ proportionnel à } |\langle 2|ezE|1\rangle|^2$$

Les valeurs de f sont très variables suivant la forme des fonctions d'onde des états $|1\rangle$ et $|2\rangle$. Pour la raie jaune du sodium (première raie dite de résonance, 3 S → 3 P), on a $f \simeq 1$. En revanche, plus les niveaux sont excités, plus f est faible.

Mais la propriété fondamentale de la force d'oscillateur est d'être nulle si certaines règles, dites règles de sélection, ne sont pas vérifiées. La transition est dite alors interdite.

— Un niveau est toujours caractérisé par son nombre quantique de moment cinétique J. Une transition dipolaire électrique obéit à $\Delta J = J_2 - J_1 = 0$ ou ± 1 (avec de plus $J_1 = 0 \rightarrow J_2 = 0$ interdite).

— Dans le cas du couplage L, S, un niveau est défini par L et par S (voir le chapitre *Table de Mendeleïev*). On doit avoir en général $\Delta L = \pm 1$ et $\Delta S = 0$ (un champ électrique E ne peut modifier un spin directement). Par exemple, la première raie de résonance du mercure 6^1 S → 6^3 P devrait être interdite (car $S = 0 \rightarrow S = 1$) ; un léger écart par rapport au couplage L, S fait que, dans l'état excité, S n'est pas parfaitement défini, et lui donne une force d'oscillateur de 0,03.

Émission spontanée - Émission stimulée

Nous sommes familiarisés avec le phénomène d'émission spontanée ; c'est l'émission (plus ou moins isotrope) d'un photon par un atome au cours d'une désexcitation de 2 vers 1. Classiquement, c'est l'émission d'une onde électromagnétique par un dipôle qui s'amortit avec une constante de temps τ.

Nous ne dirons rien de l'origine physique de l'émission spontanée, bien qu'elle soit très paradoxale. En effet, les états excités des atomes sont en principe des états stationnaires au sens de la mécanique quantique, et ils ne devraient pas évoluer en l'absence de perturbation extérieure.

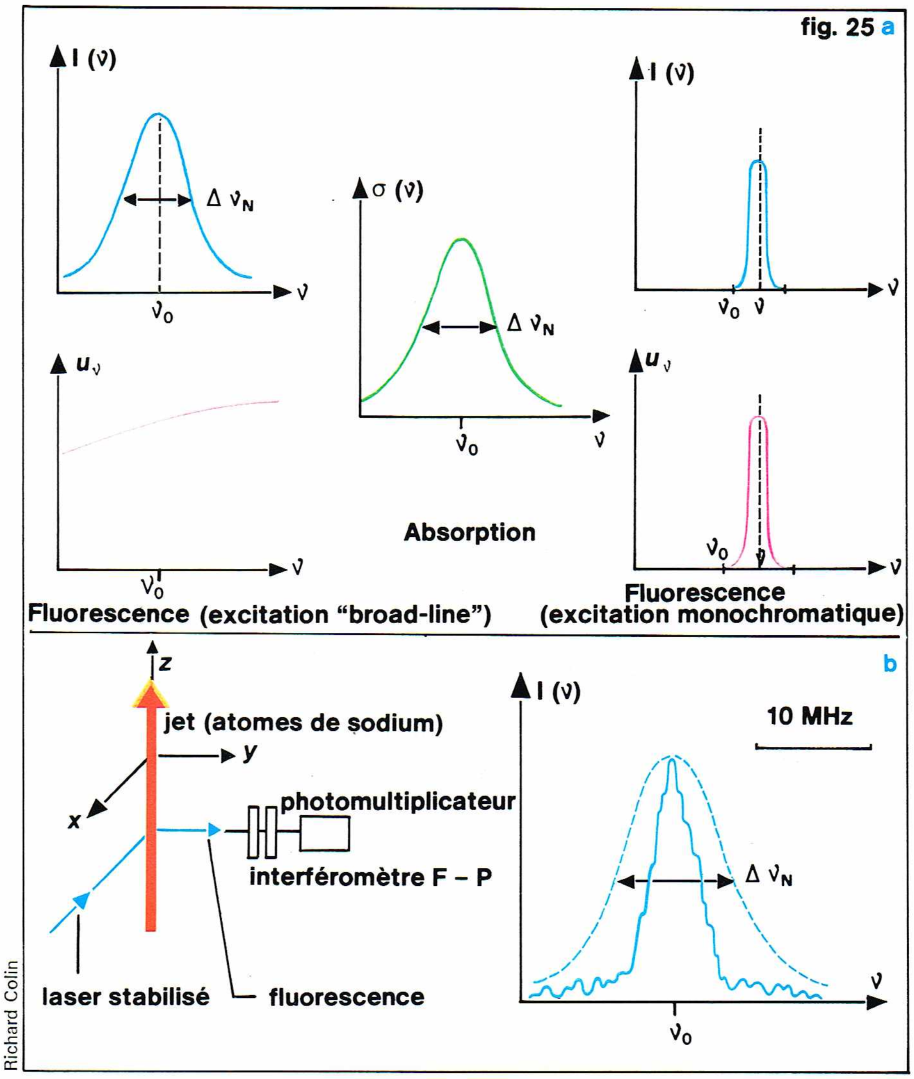

Richard Colin

▲ *Figure 25 :*
a, au centre, section efficace d'absorption d'un photon σ (ν) ; à gauche, fluorescence dans le cas d'une excitation « broad-line » ; I (ν) est alors une courbe identique à σ(ν) ; à droite, fluorescence dans le cas d'une excitation monochromatique (u_ν centré sur ν, largeur $\Delta\nu$ très inférieure à $\Delta\nu_N$) : la fluorescence a alors la même largeur $\Delta\nu$ et est aussi centrée sur ν et non sur ν_0 (elle est d'autant plus faible que $|\nu - \nu_0|$ est plus grand).
b, à gauche, schéma du montage expérimental pour la mesure de I (ν). L'effet Doppler est éliminé puisque la composante de la vitesse sur la direction de propagation de la lumière est toujours nulle. A droite, est reproduit un spectre de fluorescence, nettement plus étroit que la courbe de Lorentz de largeur $\Delta\nu_N$ dessinée en pointillé.

L'émission spontanée est caractérisée par la durée de vie τ, ou le coefficient d'Einstein $A_{21} = 1/\tau$. La *figure* 25a montre le spectre en fréquence de l'onde émise : si la largeur de l'excitation est très supérieure à la largeur naturelle $\Delta\nu_N$ (excitation « broad line »), le spectre de fluorescence est une courbe de Lorentz, analogue à celle de $\sigma(\nu)$, et de largeur $\Delta\nu_N$. Si la largeur de l'excitation $\Delta\nu$ est très inférieure à $\Delta\nu_N$, la fluorescence a la même largeur $\Delta\nu$ et est centrée sur la même fréquence.

La *figure* 25b montre les résultats de l'expérience. L'excitation et la détection à angle droit d'un jet atomique permettent d'éliminer l'effet Doppler. La densité d'énergie est de 1 mW/cm² (aux fortes puissances, les phénomènes deviennent plus complexes). La largeur de la fluorescence, nettement inférieure à $\Delta\nu_N$, est due non pas au laser, mais à une résolution limitée à 6 MHz à la détection (ce qui correspond pourtant à un interféromètre de Fabry-Perot de 50 cm de long, avec un pouvoir de résolution $\lambda/\Delta\lambda$ de 10^8 !).

La durée de vie classique est

$$\tau = \frac{3\,\varepsilon_0 m c^3}{2\,\pi e^2 \nu_0^2} = \frac{3\,\varepsilon_0 m c}{2\,\pi e^2} \lambda_0^2$$

Quantiquement, il faut la diviser par la force d'oscillation f. Par exemple, les deux premiers niveaux excités de l'hélium, 2^3 S et 2^1 S, ne peuvent se désexciter sur le niveau fondamental 1^1 S (surtout le premier, qui viole $\Delta S = 0$ en plus de $\Delta L = \pm 1$) : leur durée de vie est très longue, et ces niveaux sont appelés *métastables*.

Il existe un autre mode de désexcitation radiative d'un niveau, c'est l'émission stimulée. Un photon qui interagit avec un atome dans le niveau excité 2 peut provoquer l'émission d'un second photon et la retombée dans le niveau 1. C'est le mécanisme symétrique de celui de l'absorption, et la probabilité est la même.

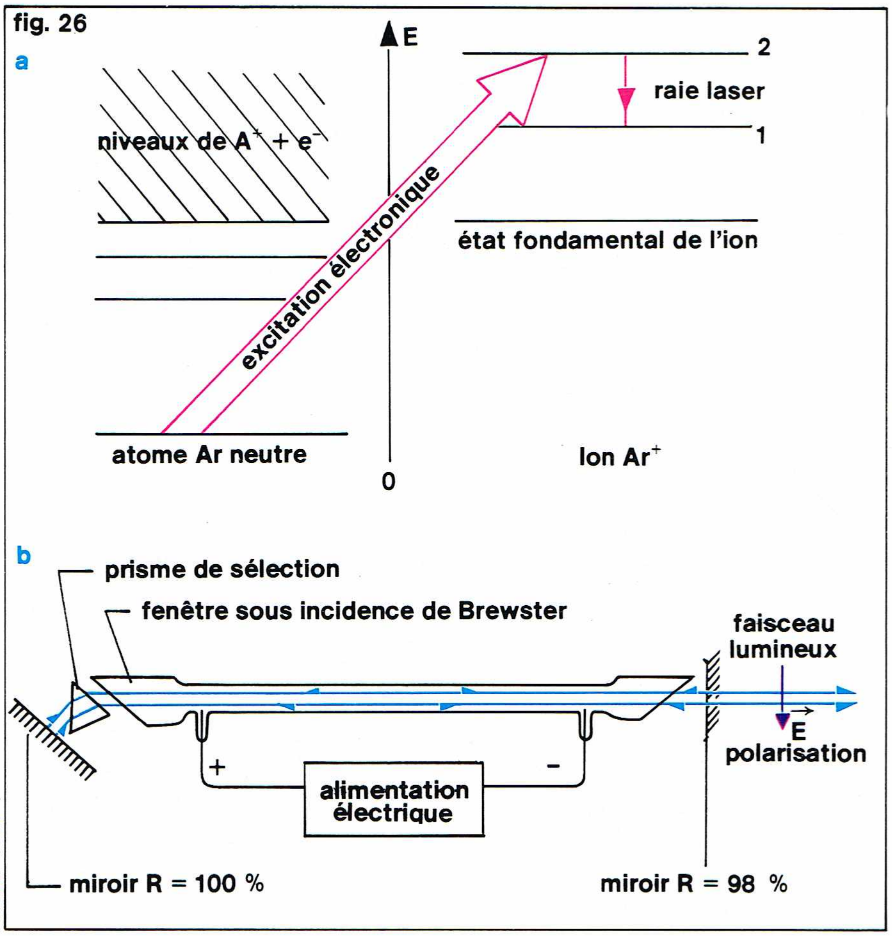

Richard Colin

▲ *Figure 26 : a, principe du laser à argon ionisé. A gauche, niveaux d'énergie de Ar ; à droite, niveaux d'énergie de Ar^+ (même échelle) : la décharge produit, à partir du niveau fondamental de Ar, des niveaux 2 de Ar^+. b, schéma de la partie optique d'un laser à argon ionisé ; la longueur peut atteindre 2 m.*

En particulier, si l'irradiation est « broad line »

$$(\Delta\nu \gg \Delta\nu_N)$$

l'émission stimulée est caractérisée par le coefficient d'Einstein B_{21} :

$$\Pi \text{ stim.} = B_{21} u_\nu (\nu_0)$$

(probabilité par seconde de retombée de 2 → 1 stimulée, pour un atome). Si g_1 et g_2 sont les dégénérescences de 1 et 2, on peut démontrer :

$$g_1 B_{12} = g_2 B_{21} \qquad \frac{B_{21}}{A_{21}} = \frac{\lambda_0^3}{8\pi h}$$

A la dégénérescence près, $B_{12} = B_{21}$.

La caractéristique la plus importante de l'émission stimulée est que l'état final comporte deux photons, pour un seul photon dans l'état initial. Le photon émis par émission stimulée est *identique au photon incident* : mêmes fréquence, direction et polarisation. Il est représenté par un champ électromagnétique de même phase que le champ incident.

En tant que mode de désexcitation, en présence de rayonnement, l'émission stimulée est en compétition avec l'émission spontanée. Elle est très prépondérante dans le domaine des radiofréquences ($A_{21} \rightarrow 0$ quand $\lambda_0 \rightarrow \infty$). En revanche, prenons dans le visible une durée de vie $\tau = 1/A_{21} = 10^{-8}$ s et $B_{21} = 10^{21}$ MKSA. On aura Π stim. $= A_{21}$ pour $u_\nu = 10^{-13}$ Jsm^{-3}, ce qui correspond pour une lampe spectrale ($\Delta\nu = \Delta\nu_D = 3 \cdot 10^9$ Hz) à une puissance ($P = Scu_\nu$) de l'ordre de 10 W/cm^2, c'est-à-dire à 10^4 fois la puissance d'une lampe spectrale usuelle. Mais en tant que mode d'émission d'un photon, l'émission stimulée ouvre la voie à l'amplification de la lumière.

Principe du laser et du maser

Considérons deux niveaux d'énergie 1 et 2 non dégénérés, d'énergie E_1 et $E_2 = E_1 + h\nu_0$. On a n_1 atomes dans le niveau 1, n_2 atomes dans le niveau 2. A l'équilibre thermodynamique, $n_2/n_1 = \exp - h\nu_0/KT < 1$. A la limite des températures infinies ($kT \gg h\nu_0$), on a $n_2/n_1 = 1$.

Imaginons que, par un moyen quelconque, nous puissions créer une *inversion de populations*, c'est-à-dire nous placer dans le cas $n_2/n_1 > 1$ (on dit aussi qu'il s'agit d'une « température négative »). Si une onde électromagnétique de fréquence ν_0 se propage dans le milieu, il règne en tout point une certaine densité spectrale d'énergie u_ν. Le nombre de photons qui disparaissent est proportionnel à $n_1 B_{12} u_\nu$ (absorption), le nombre de ceux qui apparaissent dans le faisceau est proportionnel à $n_2 B_{21} u_\nu = n_2 B_{12} u_\nu$: la variation du nombre de photons est proportionnelle à $(n_2 - n_1)\, B_{12} u_\nu$. Le milieu est amplificateur, alors qu'en temps normal ($n_2 < n_1$) il est absorbant.

Que faut-il pour faire un bon amplificateur ? Si la condition $n_2 - n_1 > 0$ est nécessaire et suffisante, il est préférable d'avoir $n_2 - n_1$ le plus grand possible : c'est le mécanisme d'inversion des populations qui apporte l'énergie indispensable à l'amplification.

Que faut-il pour faire un oscillateur ? Il faut d'abord assurer une réaction entre l' « entrée » et la « sortie » qui provoque l'oscillation. Ensuite, il faut créer une densité spectrale d'énergie assez grande pour que le « seuil » d'inversion de population $n_2 - n_1$ soit le plus bas possible (à cause des pertes, il n'est jamais nul, bien sûr) : pour cela, on utilise une cavité résonnante adaptée aux ondes électromagnétiques utilisées.

La première amplification par émission stimulée a été utilisée dans les oscillateurs dans le domaine des ondes centimétriques appelés **masers** (un acronyme signifiant *microwave amplifier by stimulated emission of radiation*). Le premier a fonctionné en 1954, sur une transition à 24 GHz entre deux niveaux de la molécule NH_3. Nous ne détaillerons pas le mécanisme d'inversion des populations. Nous noterons que, dans les masers, l'émission spontanée est négligeable et ne contribue pas aux pertes.

Le problème était plus difficile dans le domaine optique, mais le premier **laser** *(light amplifier by stimulated emission of radiation)* a oscillé en 1960 entre les deux premiers niveaux de l'ion Cr^{3+} dans le rubis (corindon Al_2O_3 avec des impuretés de Cr^{3+}), sur une raie rouge. Le fonctionnement était en pulses, car l'inversion de population était discontinue (excitation par un flash). La cavité était un interféromètre de Fabry-Perot), c'est-à-dire l'intervalle compris entre deux miroirs.

On a fabriqué par la suite des amplificateurs optiques, c'est-à-dire des milieux amplificateurs sans cavité, qui servent à amplifier les lasers.

On sait faire aussi des lasers de gain si élevé qu'ils oscillent sans miroirs (en pulses courts de l'ordre de quelque 10^{-9} s).

Dans le laser à argon ionisé, l'oscillation laser a lieu entre *deux niveaux excités* de l'ion Ar^+. Le mécanisme d'inversion de population est simple : une décharge continue peuple de manière sélective le niveau 2 de l'ion Ar^+ (directement à partir du fondamental de l'atome neutre), alors que le niveau 1 reste vide. Il en résulte une inversion de population entre 1 et 2.

Il existe plusieurs niveaux qui bénéficient du peuplement sélectif. L'oscillation laser peut donc avoir lieu sur plusieurs raies.

La *figure* 26b reproduit un schéma de principe d'un laser dans sa partie optique (« tête » du laser). L'argon (pression de l'ordre de 1 mm de mercure) est contenu dans un tube, isolant du point de vue électrique, mais bon conducteur de la chaleur (tube en oxyde de béryllium, par exemple). Le tube est fermé par des fenêtres transparentes, inclinées à l'incidence de Brewster (voir le texte d'*Optique*) pour qu'une polarisation de la lumière soit transmise sans pertes (ce qui impose, bien sûr, cette polarisation au faisceau laser).

Dans le dessein de stocker beaucoup d'énergie, la cavité est fermée par un miroir R = 100 % et un miroir de sortie R = 98 %, par exemple. Le laser peut osciller sur plusieurs raies à la fois, mais il est possible d'en sélectionner une seule par un prisme mobile (avec traitement antireflet) : la cavité ne se referme sur elle-même que pour une seule longueur d'onde.

L'alimentation de la décharge consomme 30 kW. La puissance dissipée dans le tube (550 V, 40 A) est de 22 kW, ce qui exige un refroidissement par eau. Le laser émet une puissance de 10 W sur toutes les raies (jusqu'à 4 W sur une seule raie, pour la plus intense).

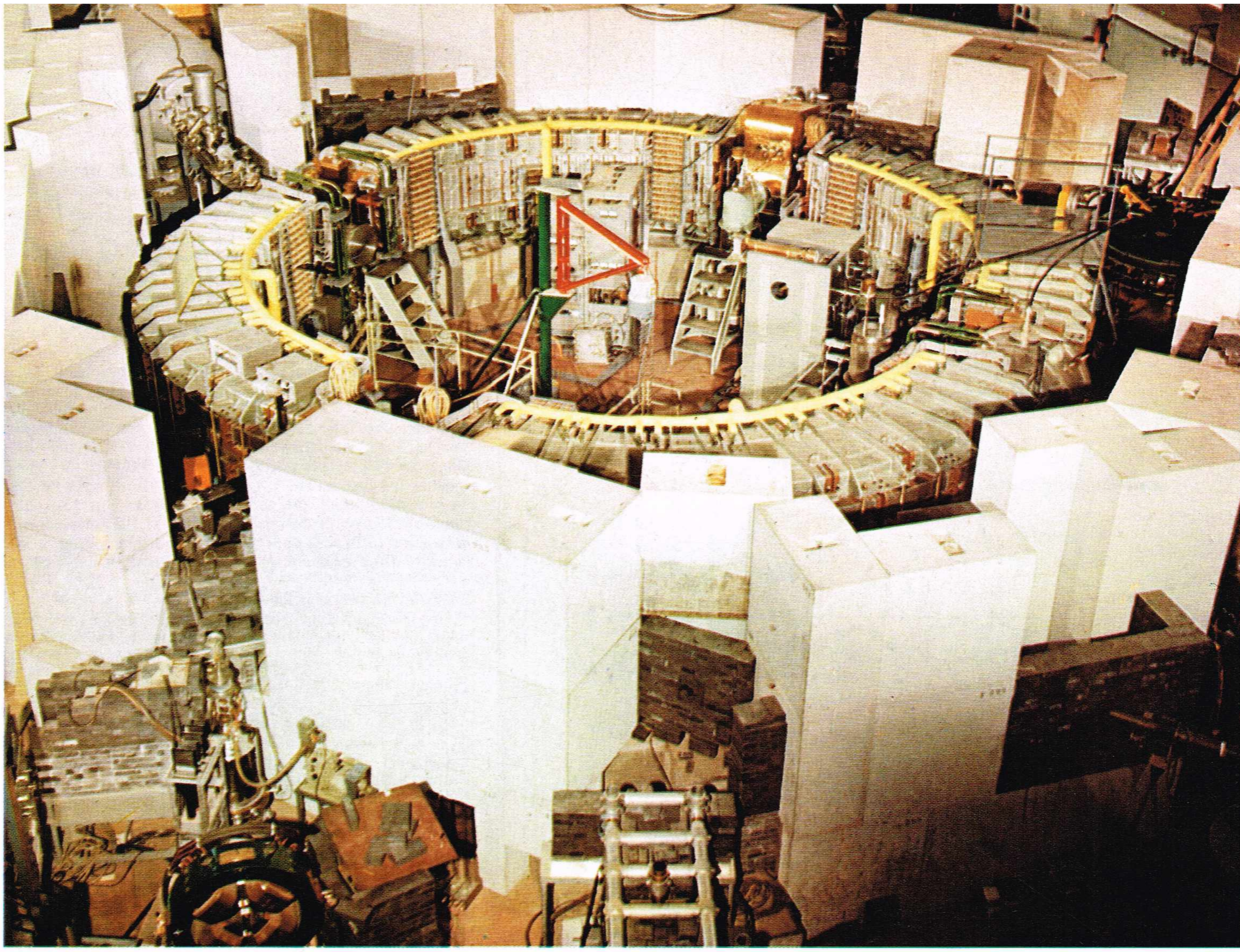

I.G.D.A. - C.N.E.N.

▲ *Un synchrotron à électrons.*

Collisions - Molécules

Généralités sur les collisions

L'étude des collisions intéresse la physique atomique, la physique nucléaire, la physique des particules et bien d'autres branches. Il n'est pas question d'en donner ici un exposé complet, aussi ne parlerons-nous que des diffusions, c'est-à-dire des collisions sans création ni disparition de particules, très importantes en physique des basses énergies. Ces collisions se manifestent ou bien seulement par une modification des trajectoires (collisions dites élastiques), ou bien aussi par une modification des variables internes des particules (collisions dites inélastiques).

Nous restreindrons encore cet exposé en ne considérant le plus souvent que des diffusions ne mettant en jeu que deux particules. Le lecteur admettra volontiers que, sauf dans la matière condensée (gaz sous forte pression, liquide), les collisions à deux corps sont beaucoup plus fréquentes que les collisions à trois corps, et ainsi de suite.

Quelques généralités sur la diffusion

Le mouvement du centre de gravité de deux particules (ou centre de masse, en abrégé c-d-m) n'est pas perturbé lors de la collision, et donc n'est associé à aucune information. Pour réduire le nombre de variables du problème, nous devons nous placer dans le référentiel du c-d-m.

Soit $\vec{p}$ et $-\vec{p}$ les impulsions des particules avant la collision, mesurées dans le référentiel du c-d-m, $\vec{p}'$ et $-\vec{p}'$ les impulsions après collisions. Il est facile de démontrer, en mécanique classique aussi bien que relativiste, les résultats suivants (*fig.* 27) :

a) si la diffusion est élastique (l'énergie cinétique totale se conserve après la collision), alors $|\vec{p}'| = |\vec{p}|$, seule change la direction de l'impulsion (toujours dans le référentiel du c-d-m) ;

b) si la diffusion est inélastique avec excitation d'une des particules qui voit son énergie interne augmenter

▼ *Figure 27 ; impulsions des particules dans le référentiel du c-d-m :* a) *avant collision ;* b) *après collision élastique ;* c) *après collision inélastique et excitation des particules ;* d) *après collision inélastique et désexcitation des particules (collision « exothermique », appelée aussi collision de deuxième espèce). Les figures* b, c, d *ont été dessinées dans l'hypothèse de la conservation du moment cinétique « orbital » (moment cinétique des trajectoires).*

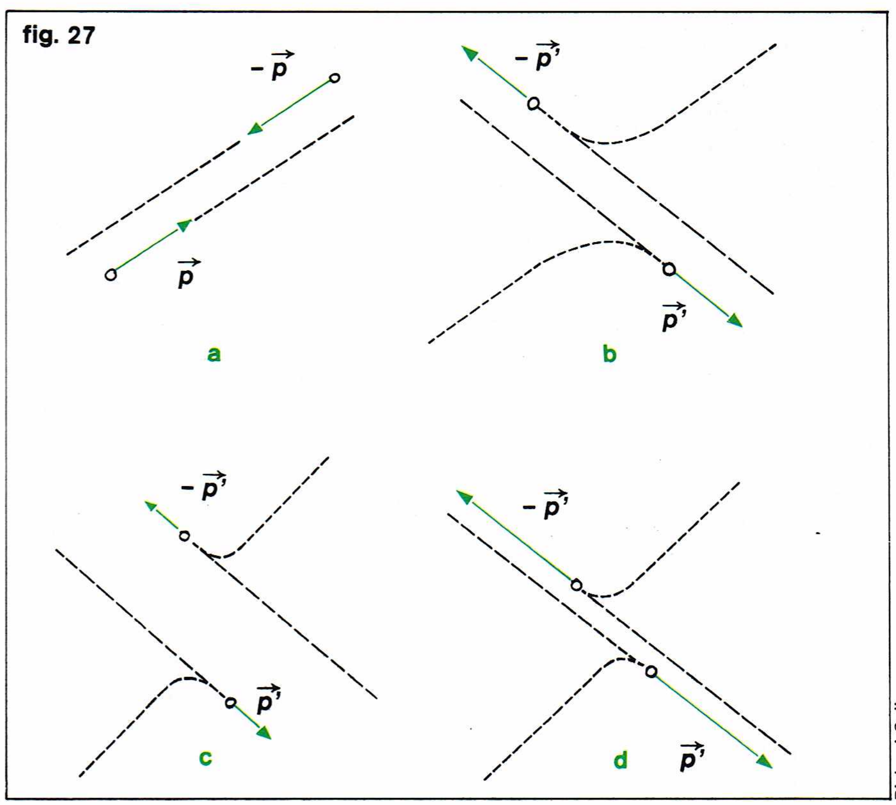

Richard Colin

a. Mesure de la section efficace de la collision "déviation de 45° dans le référentiel du laboratoire". Le faisceau de projectiles a une densité de particules n et un flux $\Phi = nV_r$ (V_r = vitesse relative projectile-cible). Un détecteur compte le nombre de projectiles dN déviés autour de l'angle θ = 45° dans l'angle solide $d\Omega$. On a $dN/d\Omega = Q(\theta)\,\Phi$.

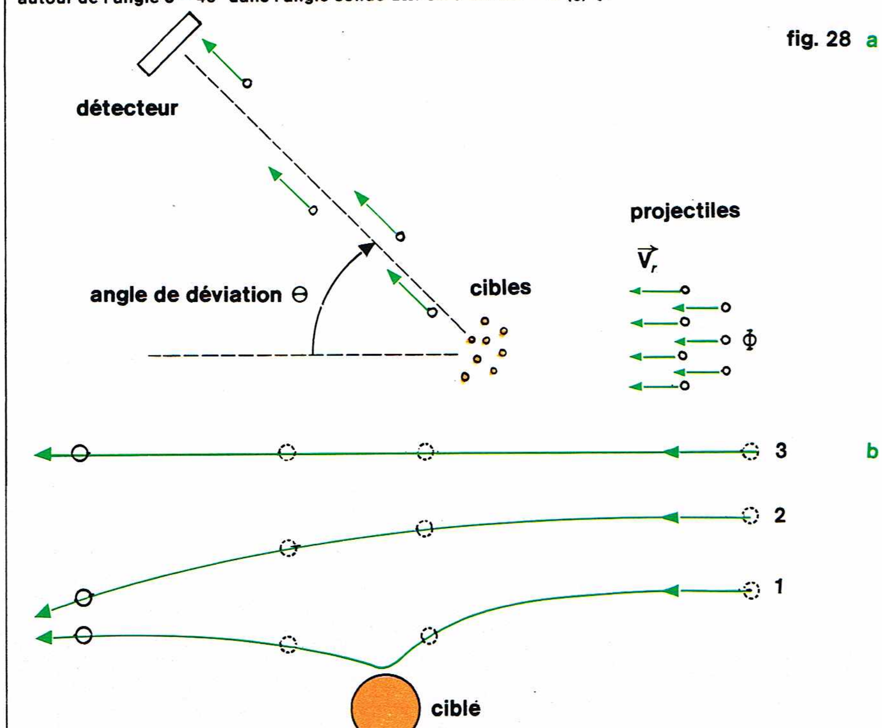

b. La définition ne s'applique plus pour $\theta = 0$. Le détecteur compte des particules telles que (1), soit dN_1 proportionnel à $d\Omega$, mais aussi des particules telles que (3), soit $dN_3 = \Phi\, dS$ simplement (dS = surface du détecteur).

Richard Colin

▼ *Figure 29 : illustration de la définition de la section efficace élastique en théorie quantique. Après collision, le paquet d'ondes transmis se propage dans la même direction, alors que le paquet d'ondes diffusé s'éloigne radialement. Dans la région commune, l'interférence est destructive, ce qui entraîne l'atténuation du faisceau transmis.*

(l'énergie cinétique totale diminue), alors $|\vec{p}'| < |\vec{p}|$, l'énergie cinétique de chacune des particules diminue ;

c) si on a désexcitation d'une des particules, donc augmentation de l'énergie cinétique totale (réaction « exothermique »), alors $|\vec{p}'| > |\vec{p}|$, l'énergie cinétique de chacune des particules augmente.

Ces conclusions ne sont valables que dans le référentiel du c-d-m. Rappelons aussi que, dans ce référentiel, le moment cinétique total $\vec{L} = \Sigma_i \vec{r}_i \wedge \vec{p}_i$ est défini sans ambiguïté (c'est-à-dire indépendant de l'origine des coordonnées), puisque la somme des impulsions est nulle. Nous allons voir maintenant, en trois exemples, comment les principes de la physique quantique modifient notre vision classique des collisions.

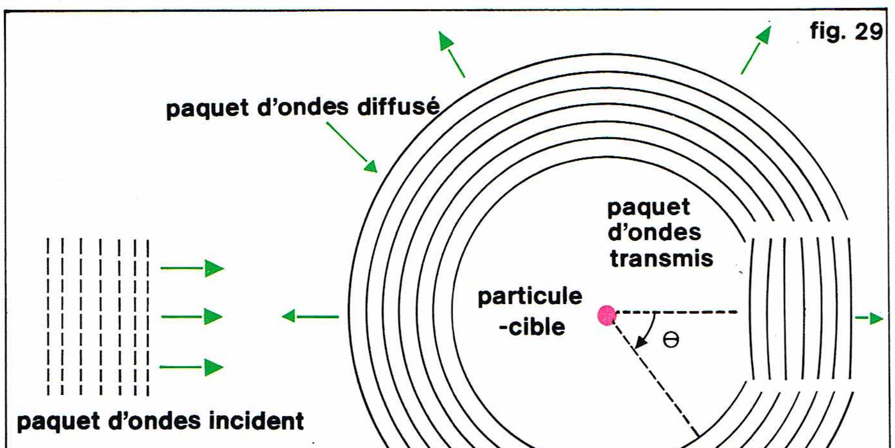

Le paquet d'ondes incident a des dimensions grandes par rapport aux distances caractéristiques de la collision ce qui assure une bonne définition de l'énergie et de la direction.

Richard Colin

Section efficace

Section efficace classique

La probabilité pour que se produise tel type de collision qui intéresse le physicien est mesurée par la section efficace Q. Du point de vue d'une particule-cible, une expérience de collision est caractérisée en mécanique classique par le flux Φ de particules-projectiles (débit par unité de surface). Soit N le nombre de collisions par seconde et par particule-cible. A flux donné, certaines collisions seront plus probables que d'autres, et on caractérise cette probabilité par le nombre N/Φ qui a les dimensions d'une surface : c'est la section efficace Q (*fig.* 28a).

Classiquement, Q est défini pour toutes les collisions, sauf les collisions élastiques avec déviation nulle ($\theta = 0$). Dans ce cas, il est impossible de distinguer lors de la mesure les projectiles 1 (*fig.* 28b) qui ont subi ce type de collisions des projectiles 3 passés trop loin pour interagir. Du point de vue théorique, l'indétermination de la section efficace pour $\theta = 0$ conduit souvent à une section efficace totale de diffusion élastique infinie).

Section efficace quantique

Une particule libre d'impulsion $\vec{p}$ se propageant suivant l'axe Oz est représentée par l'onde plane e^{ikz} avec $k = |\vec{k}| = |\vec{p}/\hbar|$ (voir le texte de *Mécanique quantique*). Plus exactement, cette onde va représenter pour nous un flux permanent de particules occupant l'espace avec une densité de 1 particule par unité de volume et un flux $\Phi = V = p/m$.

On peut démontrer qu'après une collision élastique la fonction d'onde dans le référentiel du c-d-m est de la forme :

$$\psi = e^{ikz} + f(\theta)\,\frac{1}{r}\,e^{ikr} \quad \text{pour } r \to \infty$$

Puisque l'état interne des particules n'est pas modifié après collision, la fonction d'onde d'une particule est la somme de la fonction d'onde incidente et d'une fonction d'onde diffusée de la forme e^{ikr}/r (il faut ici bien distinguer ikr de $i\vec{k}\cdot\vec{r} = ikz$ de l'onde incidente). Les particules s'éloignant de la zone de collision, la nouvelle variable est r et non plus z ; leur densité décroît en $1/r^2$ (*fig.* 29), d'où le terme en $1/r$ dans la fonction d'onde ; enfin l'amplitude dépend de la direction θ.

Dans le cas d'une collision inélastique, on peut toujours distinguer parmi toutes les particules celles qui ont subi une collision. Pour ces dernières, la fonction d'onde s'écrit alors simplement (avec $k' = p'/\hbar = kv'/v$) :

$$\psi = f(\theta)\,\frac{1}{r}\,e^{ik'r} \quad \text{pour } r \to \infty$$

Ces résultats, démontrés en mécanique quantique, ne sont valables que pour une interaction décroissant plus vite que $1/r$. Ceci exclut le cas du potentiel coulombien (collisions de deux particules chargées).

Un calcul simple aboutit à la section efficace :

$$Q(\theta) = |f(\theta)|^2 \quad \text{pour une collision élastique}$$

$$Q(\theta) = \frac{v'}{v}\,|f(\theta)|^2 \quad \text{pour une collision inélastique}$$

La section efficace est ici définie pour toutes les directions, même $\theta = 0$.

Mesure des sections efficaces

Dans une expérience de mesure de sections efficaces de collision, le physicien essaye de se rapprocher des conditions idéales de la définition de la section efficace.

a) Une vitesse relative bien définie exige des jets de particules homocinétiques et très bien collimatées, c'est-à-dire, en vertu du principe d'incertitude, des paquets d'ondes de grandes dimensions. Lorsque ces dimensions sont beaucoup plus grandes que la longueur caractéristique de la collision (« portée » du potentiel par exemple), les résultats expérimentaux ne dépendent plus de la forme du paquet d'ondes.

b) Il faut un système de détection sensible à la collision étudiée. En particulier, il doit présenter une bonne résolution angulaire et pouvoir explorer une grande partie des directions de l'espace (à l'exception de la région du faisceau transmis).

En réalité, de nombreuses expériences de collision se font dans des conditions très différentes, par exemple dans une vapeur atomique sans aucune sélection de vitesse, ni en module, ni en direction. Dans ces conditions, les paquets d'ondes sont réduits à la dimension minimale, de l'ordre de $\lambda/2\pi$ (λ = longueur d'onde de De Broglie). On ne peut mesurer que des grandeurs intégrées sur les angles, du type de la section efficace totale $\int Q(\theta)\, d\theta$. A cause de leur facilité de mise en œuvre, ces expériences ont pourtant une grande importance en physique.

Diffusion élastique par un potentiel central

Un rappel de mécanique classique

Il est facile de démontrer que l'énergie d'un système de deux particules de masses m_1 et m_2, dans le référentiel du c-d-m et dans le cas d'un potentiel central V (r), est donnée par :

$$E = \frac{1}{2}\mu V^2 + V(r) = \frac{1}{2}\mu\left(\frac{dr}{dt}\right)^2 + \frac{1}{2\mu}\frac{L^2}{r^2} + V(r)$$

où μ est la masse de la « particule relative » ou masse réduite ($1/\mu = 1/m_1 + 1/m_2$), V la vitesse (vitesse relative des deux particules), L le module de son moment cinétique. Nous sommes ramenés à un problème à une variable, la distance des deux particules r. Tout se passe comme si une « particule relative » se déplaçait dans le potentiel V (r) + $L^2/2\mu r^2$.

A énergie totale E donnée, les particules passeront d'autant plus loin l'une de l'autre que le moment cinétique L est plus grand (*fig.* 30a). C'est l'origine physique de la « barrière centrifuge » $L^2/2\mu r^2$, dont le rôle est montré sur la *figure* 30b. Classiquement, le moment cinétique L = $\mu V_0 b$ croît comme le paramètre d'impact b (V_0 vitesse relative à l'infini).

Cas du potentiel central en physique quantique

Il est intuitif qu'une particule libre totalement délocalisée, représentée par une onde plane, n'a pas de moment cinétique bien défini. On démontre en mécanique quantique que les opérateurs $\vec{p}$ et $\vec{L}$ ne commutent pas : si $\vec{p}$ est parfaitement défini, $\vec{L}$ est indéterminé. Les ondes de moment cinétique bien défini sont les ondes sphériques : du point de vue angulaire, ce sont les harmoniques sphériques ; du point de vue radial, elles se comportent comme $\frac{1}{r}e^{\pm ikr}$ pour $r \to \infty$.

Un paquet d'ondes incident de grandes dimensions est la superposition d'un grand nombre d'ondes sphériques entrantes $\left(\text{de la forme } \frac{e^{-ikr}}{r}\right)$ correspondant à un grand nombre de valeurs du moment cinétique. On peut démontrer qu'une onde sphérique de moment cinétique $l\hbar$ a une valeur pratiquement nulle pour $r < l/k$: un paquet d'ondes sphériques entrantes groupées autour de la valeur l va converger vers l'origine, rebrousser chemin aux environs de $r = l/k$, puis diverger à l'infini sous forme d'ondes sphériques sortantes $\frac{e^{+ikr}}{r}$. Physiquement, le paquet d'ondes fait demi-tour lorsque son énergie totale E s'est entièrement convertie en « énergie centrifuge » : $E = \frac{l(l+1)\hbar^2}{2\mu r^2}$, donc $r^2 \simeq \frac{l^2\hbar^2}{2\mu}\frac{2}{\mu V_0^2}$ ou $r \simeq \frac{l}{k}$

Que se passe-t-il au cours de la collision ? Les ondes sphériques qui se rapprochent suffisamment de l'origine subissent un déphasage 2 δ_l au cours de leur aller-retour à l'intérieur du potentiel V (r). La recombinaison des ondes sortantes ne donne pas le paquet d'ondes incident, puisque les coefficients ne sont plus les mêmes (les déphasages dépendent de l) : on trouve en plus un terme de la forme $f(\theta)\frac{e^{ikr}}{r}$ (pour $r \to \infty$) déjà rencontré dans la définition de la section efficace.

On peut démontrer qu'on a :

$$Q(\theta) = |f(\theta)|^2 = \frac{4\pi}{k^2}\sum_0^\infty (2l+1)\sin^2\delta_l$$

Une application : l'effet Ramsauer-Townsend

La décomposition en ondes sphériques, ou « méthode des déphasages », est d'un emploi commode lorsqu'un petit nombre d'ondes partielles sont perturbées. Ces dernières sont telles que $l/k \leqslant a$, a étant la « portée » du potentiel. Il faut donc que le produit ak ne dépasse pas quelques unités. C'est en particulier le cas de la collision gaz rare-électron lent ; un exemple de section efficace est donné *figure* 31.

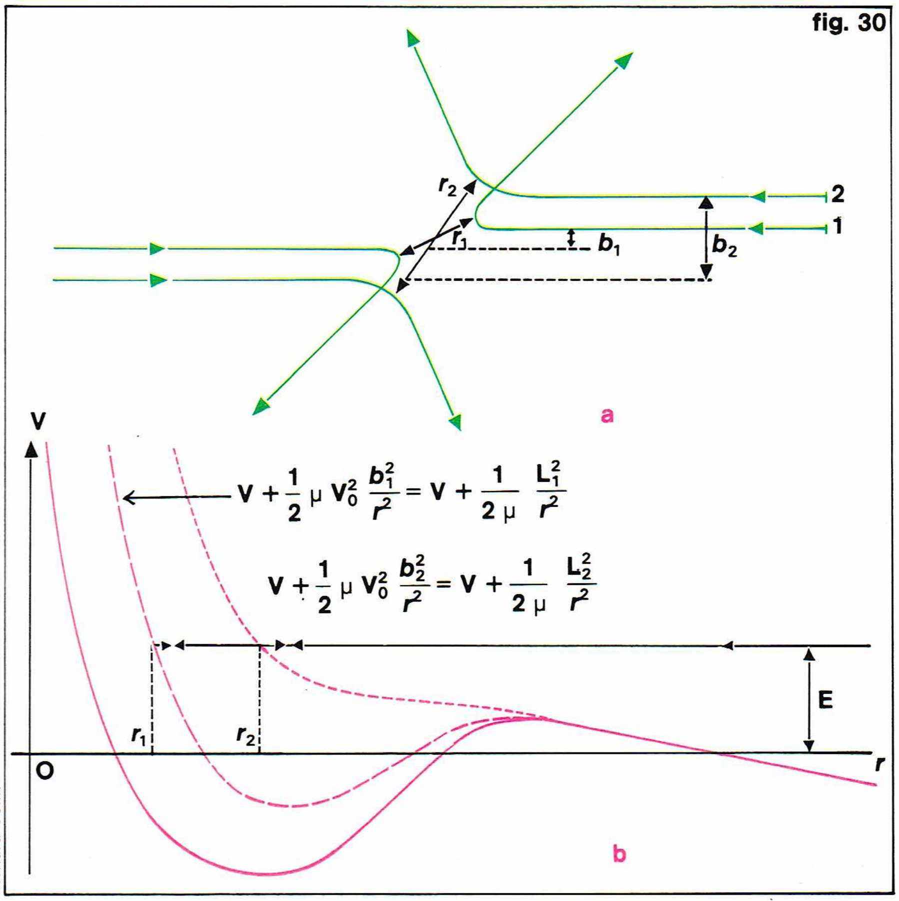

Richard Colin

▲ ***Figure 30 :*** ***a, dans le référentiel du c-d-m, représentation du paramètre d'impact b et de la distance d'approche r. b, diagramme d'énergie de la « particule relative ». Classiquement, la particule a un paramètre d'impact b et une distance d'approche r, abscisse du point de retour. On a représenté sur la figure le potentiel d'interaction V (r) seul ou additionné de la barrière centrifuge pour deux valeurs b_1 et b_2 du paramètre d'impact, associées aux distances d'approche r_1 et r_2.***

Comment interpréter la quasi-annulation de la section efficace pour une certaine énergie (le gaz devient alors transparent aux électrons lents) ? Il faut d'abord noter que nous avons $ak < 1$, seule l'onde partielle $l = 0$ (onde S) pénètre dans la région du potentiel et contribue à la diffusion. Ensuite, il faut admettre que, pour une certaine énergie, on a $\delta_0 = \pi$. Ceci exige $ak \simeq \pi$ à l'intérieur du potentiel, mais, comme celui-ci est fortement attractif pour un électron, $k = mv/\hbar$ tend à augmenter, et la condition n'est pas contradictoire avec $ak < 1$ à l'infini.

Au cours de son aller-retour, l'onde $l = 0$ se déphase de $2\delta_0 = 2\pi$, c'est-à-dire reste inchangée par rapport aux autres. La recombinaison redonne l'onde incidente : l'onde diffusée disparaît.

Collisions de particules identiques

Un important problème de la physique quantique

Deux particules sont indiscernables lorsque tous leurs nombres quantiques sont identiques. L'échange de deux

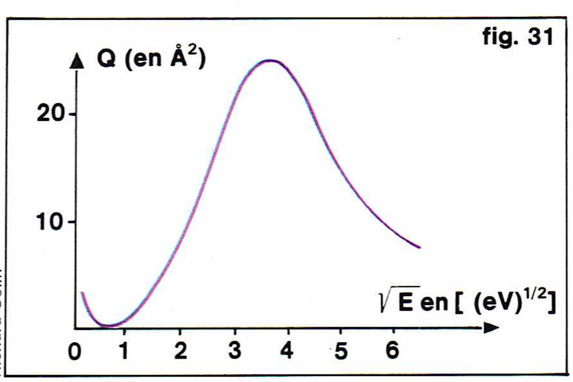

Richard Colin

◀ ***Figure 31 : section efficace totale de collision argon-électron lent. Un atome de gaz rare (couche électronique complète) est une structure « ramassée ». Le potentiel atome-électron est attractif ; sa « portée » est de l'ordre de a = 1 Å ; sa valeur moyenne est de plusieurs dizaines de volts. La longueur d'onde de De Broglie de l'électron est $\lambda \sim 10$ Å, soit $k \sim 0,5$ Å^{-1}. Nous sommes bien dans le cas ak < 1 : seule l'onde l = 0 s'approche assez pour pénétrer dans le cortège électronique et être déphasée.***

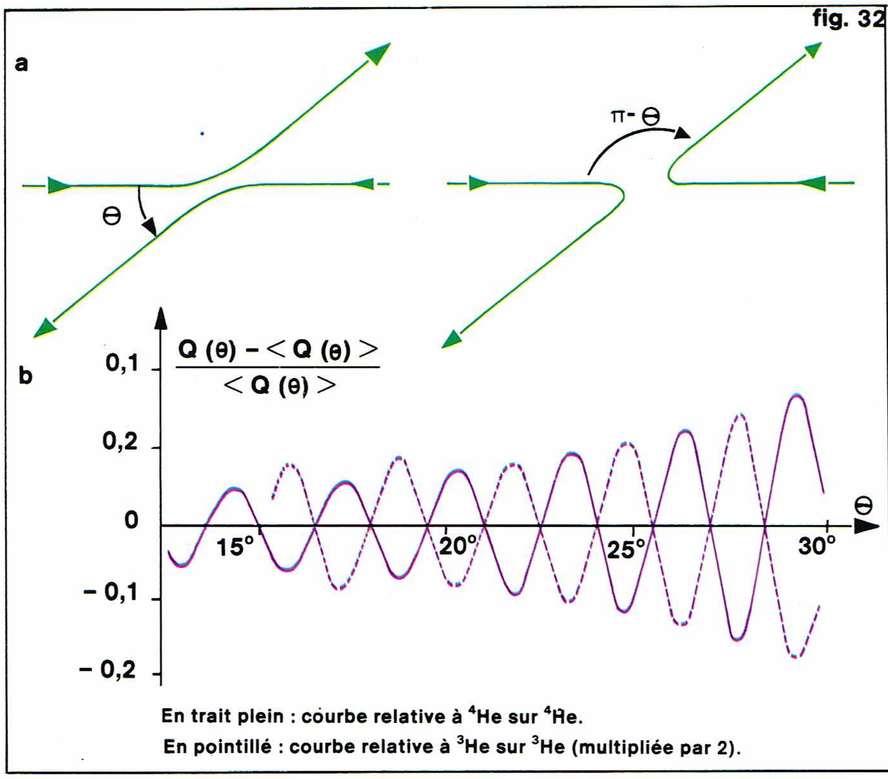

Richard Colin

▲ ***Figure 32 :*** ***a, collision entre particules identiques.*** ***b, collision entre atomes d'hélium. En abscisse, l'angle de déviation θ dans le référentiel de laboratoire (résolution = 0,2°) ; en ordonnée, en valeur relative, la section efficace comptée à partir de sa valeur moyenne ⟨ Q(θ)⟩. L'énergie est de l'ordre du keV.***

telles particules ne conduit pas à un nouvel état physique, et la mécanique quantique a dû se fixer des règles (symétrisation ou antisymétrisation) pour éliminer une dégénérescence purement artificielle.

Lors d'une collision de particules identiques, les deux situations de la *figure* 32a sont indiscernables. Nous savons que l'onde diffusée doit être symétrique dans l'échange de deux bosons, antisymétrique dans l'échange de deux fermions :

$$\frac{1}{r} e^{ikr} [f(\theta) + f(\pi - \theta)] \quad \text{pour 2 bosons}$$

$$\frac{1}{r} e^{ikr} [f(\theta) - f(\pi - \theta)] \quad \text{pour 2 fermions}$$

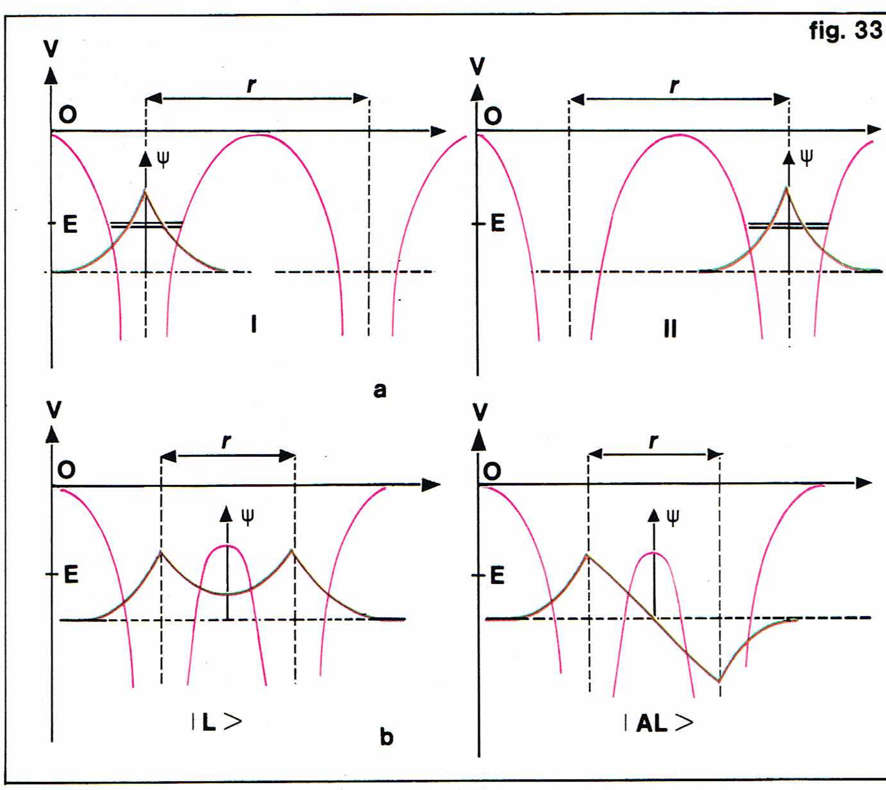

Richard Colin

La section efficace devient

$$Q(\theta) = |f(\theta) \pm f(\pi - \theta)|^2$$

[classiquement, on aurait trouvé $|f(\theta)|^2 + |f(\pi - \theta)|^2$]. Le terme croisé $\pm 2 \operatorname{Re} f^*(\theta) f(\pi - \theta)$ est un terme d'interférence quantique. Une mesure de $Q(\theta)$ doit le mettre en évidence à condition qu'il existe des angles θ pour lesquels $f(\theta)$ et $f(\pi - \theta)$ soient d'amplitudes comparables. En revanche, de tels termes d'interférence se « brouillent » souvent par intégration sur les angles, et les théories classique et quantique de la section efficace totale donnent le même résultat.

Collisions He-He

Un cas très instructif est celui des collisions He - He. Avec ^4He sur ^4He, on a des bosons ; si l'on utilise ^3He sur ^3He avec les spins nucléaires parallèles ($I = 1/2$), on a des fermions. Notons que la collision ^3He sur ^3He avec spins antiparallèles ne donne pas de terme d'interférence : les particules sont discernables, les états finals orthogonaux, et la section efficace est donnée par :

$$Q(\theta) = |f(\theta)|^2 + |f(\pi - \theta)|^2$$

si l'on renonce à détecter l'orientation du spin nucléaire.

La *figure* 32b donne les sections efficaces expérimentales dans les deux cas. Le potentiel d'interaction étant le même pour ^4He-^4He et ^3He-^3He, l'amplitude $f(\theta)$ est la même, seul change le signe dans l'expression de $Q(\theta)$. Il en résulte que les termes d'interférence sont en opposition de phase, ce qui est bien vérifié par l'expérience. L'énergie du faisceau de ^3He est corrigée pour tenir compte de la différence de masse entre ^3He et ^4He. Le résultat pour ^3He est multiplié par 2, puisqu'il n'y a qu'une collision sur deux où les spins sont parallèles et où le terme d'interférence existe. Le contraste, qui augmente avec θ, serait maximal pour $\theta = 45°$ ($\theta = 90°$ dans le référentiel du c-d-m) ; en effet, les ondes qui interfèrent ont alors la même amplitude ; mais celle-ci est très faible, car la fonction $f(\theta)$ est fortement « pointée » vers zéro aux énergies utilisées.

Généralités sur les molécules

Formation des molécules

Une molécule diatomique, la plus simple des molécules, est un état lié de deux atomes. Dans son état fondamental, c'est un état d'énergie négative (les deux atomes dans leur état fondamental, immobiles et très éloignés l'un de l'autre, représentant l'origine des énergies). La collision de deux atomes (système d'énergie positive) ne peut donner naissance à une molécule dans l'état fondamental que si une troisième particule entre dans le bilan énergétique (collision à trois corps, émission d'un photon). Par exemple, le taux de formation de molécules de Na_2 dans la vapeur de sodium pure croît comme le carré de la pression, un atome Na devant en rencontrer deux autres pour qu'il se forme une molécule pendant que le troisième atome emporte l'énergie excédentaire.

Admettons que l'énergie d'interaction de deux atomes soit représentée par une énergie potentielle $V(r)$, où r est la distance entre les noyaux (voir *fig.* 30b). Une condition nécessaire, mais pas suffisante, pour qu'il existe un état lié des deux atomes est que $V(r)$ présente au moins un minimum (avec $V = 0$ à l'infini). C'est un cas fréquent, car V est toujours répulsif pour $r \to 0$ (répulsion à courte distance des noyaux) et souvent attractif pour $r \to \infty$ (les forces mises en jeu sont les forces électrostatiques dipôle-dipôle induit en $1/r^7$, dites forces de Van der Waals).

Niveaux d'énergie électroniques

Que deviennent les niveaux d'énergie d'un atome A lorsqu'il se rapproche suffisamment près d'un atome B ? Prenons l'exemple classique de l'ion moléculaire H_2^+. A grande distance, un atome H et un proton forment un système à deux états I et II de même énergie E (*fig.* 33a). A courte distance, par effet tunnel, l'électron peut traverser la barrière de potentiel ; nous savons que les états I et II ne sont plus stationnaires et que les nouveaux états propres du système sont :

$$|L\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|I\rangle + |II\rangle) \qquad |AL\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|I\rangle - |II\rangle)$$

Dans l'état $|L\rangle$ la densité électronique est forte entre les deux noyaux. Puisque l'énergie potentielle d'un électron dans le champ d'un noyau est négative, l'énergie de l'état est abaissée par rapport à E : l'état $|L\rangle$ est plus stable, il est appelé liant. L'énergie de $|AL\rangle$ est supérieure à E : il est appelé antiliant (voir *fig.* 33b).

On peut dire aussi que dans l'état $|L\rangle$ la concentration d'électrons au centre de la molécule fait écran à la répulsion coulombienne des noyaux. Mais les considérations ci-dessus ne sont valables que si les énergies ne sont pas trop perturbées. Pour des distances r trop faibles, l'énergie d'interaction noyau-noyau devient prépondérante, et l'énergie du système devient supérieure à E dans tous les cas. Mais nous pouvons conclure qu'à toute distance r assez faible, chaque niveau d'énergie du système correspondant à $r \to \infty$ se divise en deux niveaux d'énergie dont l'écart croît quand r décroît.

Plus généralement, soit N atomes ou ions éloignés les uns des autres, N — 1 dans l'état $|u\rangle$ et un dans l'état $|v\rangle$. Si ces états ne sont pas dégénérés, l'ensemble forme un état d'énergie E qui est N fois dégénéré. A plus courte distance, l'état $|v\rangle$ peut se « propager » d'un atome à l'autre, la dégénérescence est levée, et il apparaît N niveaux d'énergie distincts (*fig.* 34). On peut généraliser au solide, en considérant un très grand nombre d'ions ($N \simeq 10^{23}$) et les niveaux d'énergie d'un électron. Aux grands espacements, l'électron reste lié à un ion, et l'ensemble a des niveaux d'énergie E_0, E_1, ... extrêmement dégénérés. Lorsque les ions se rapprochent, cette dégénérescence est levée, chaque niveau donnant naissance à une bande contenant un très grand nombre de niveaux. Dans un modèle à électrons indépendants, on remplit ces bandes (en respectant le principe de Pauli) en commençant par la plus basse (bande de valence) jusqu'à ce que l'ensemble soit neutre (au zéro absolu, le dernier niveau occupé est appelé niveau de Fermi).

La liaison chimique

L'ion moléculaire H_2^+ existe-t-il?

Nous venons de voir que, pour certaines distances r, le système atome H - proton possédait un état $|L\rangle$ d'énergie inférieure à l'énergie correspondant à r infini. Mais le problème n'est pas résolu pour autant. Le principe d'incertitude interdit en effet aux noyaux de se trouver immobiles et bien localisés : on dit qu'il y a vibration des noyaux, et à cette vibration correspond une énergie positive qui conditionne tout le problème de l'existence des molécules (c'est aussi elle qui empêche l'existence de l'hélium solide sous sa pression de vapeur saturante, même au zéro absolu).

Calculons quelques ordres de grandeur. Le défaut d'énergie de l'état $|L\rangle$ (exprimé en unités de fréquence) n'est autre que la fréquence à laquelle l'électron passe d'un noyau à l'autre. Pour r de l'ordre de 1 Å, elle est de l'ordre des fréquences électroniques de l'atome, correspondant à une énergie E_e de plusieurs eV.

L'énergie de vibration est de l'ordre de la pulsation de vibration des noyaux $\sqrt{K/M}$, M étant la masse du noyau et K la constante de rappel. Puisque l'énergie varie de E_e sur une distance de l'ordre de r, on a

$$K \simeq E_e/r^2 = E_e\hbar^2/r^2\hbar^2 \simeq E_e p^2/\hbar^2 \simeq m E_e^2/\hbar^2$$

(où m et p sont la masse et l'impulsion de l'électron). D'où $E_v \simeq E_e\sqrt{m/M}$.

On peut aussi calculer l'énergie de rotation

$$E_r \simeq MV^2 \simeq L^2/Mr^2 \simeq \hbar^2/Mr^2 \simeq p^2/M$$

(L est le moment cinétique de rotation autour du centre de la molécule). On a donc $E_r \simeq E_e m/M$.

En résumé, les énergies mises en jeu sont :

$$E_e \simeq 1 \text{ eV}, \; E_v \simeq \sqrt{\frac{m}{M}}\, E_e, \; E_r \simeq \frac{m}{M}\, E_e, \; \text{avec} \sqrt{\frac{m}{M}} \simeq 10^{-2}$$

Les énergies de vibration et de rotation étant très inférieures au défaut d'énergie de l'état L, l'ion moléculaire H_2^+ est stable.

Une tentative de généralisation

Continuons dans les considérations qualitatives précédentes. Pourquoi la molécule H_2 existe-t-elle? Si les deux électrons du système atome H-atome H ont des spins opposés, ils sont discernables et les états I et II existent (ils diffèrent par l'échange des deux électrons) : la molécule H_2 aura un état liant $|L\rangle$ présentant un défaut d'énergie notable. Une autre manière d'aborder le problème consiste à considérer les électrons comme indépendants : on peuple avec 2 électrons les niveaux d'énergie de l'ion H_2^+. Si les spins sont antiparallèles, on peut mettre les deux électrons dans l'état $|L\rangle$ (les états $|L\rangle$ et $|AL\rangle$ ne sont pas dégénérés du point de vue orbital). Cette approximation est très grossière, mais elle conduit au bon résultat : la molécule H_2 existe, et son état fondamental est un singulet ($S = 0$) du point de vue électronique.

Nous avons négligé ci-dessus l'énergie d'interaction entre les électrons. C'est cette dernière qui explique, dans la théorie des termes spectraux atomiques, que les niveaux singulets se trouvent plus haut en énergie que les niveaux triplets ($S = 1$). Dans le cas de H_2, c'est l'interaction de chaque électron avec les deux noyaux qui explique le résultat inverse. La grande majorité des molécules est diamagnétique (du point de vue électronique) dans l'état fondamental. Il nous faut néanmoins citer une exception classique, O_2.

Considérons le système atome H-atome He. Les états I et II n'existent plus, car la couche de l'atome He est complète, et on ne peut la modifier sans une considérable augmentation d'énergie qui ne sera pas compensée par ailleurs. On a donc un système à un seul état. Quand les deux atomes se rapprochent, le principe de Pauli interdit aux électrons de se concentrer entre les deux noyaux. L'état du système se comporte comme un état antiliant; la molécule HeH n'existe pas dans l'état fondamental.

On a vu, dans le cas de H_2, le rôle fondamental joué par les couples d'électrons mis en commun par deux atomes après délocalisation. C'est la liaison covalente, fondamentale en chimie.

Approximation de Born-Oppenheimer

Nous allons pour terminer justifier le fait de réduire, dans l'étude des molécules et de nombreuses collisions, l'interaction de deux atomes à une énergie potentielle V (r), où r est la distance internucléaire. Cette simplification est nommée « approximation de Born-Oppenheimer ».

Nous avons vu que l'énergie de vibration (et *a fortiori* de rotation) est très inférieure aux énergies électroniques, au moins dans les états les plus bas. Puisqu'on a $M \gg m$, il en résulte que la vitesse des noyaux est très inférieure à celle des électrons. Dans ces conditions, on peut supposer les noyaux immobiles et résoudre l'équation de Schrödinger pour les électrons en considérant r comme un paramètre. Soit $\psi_i^r(\vec{x_e})$ et $V_i(r)$ les fonctions propres

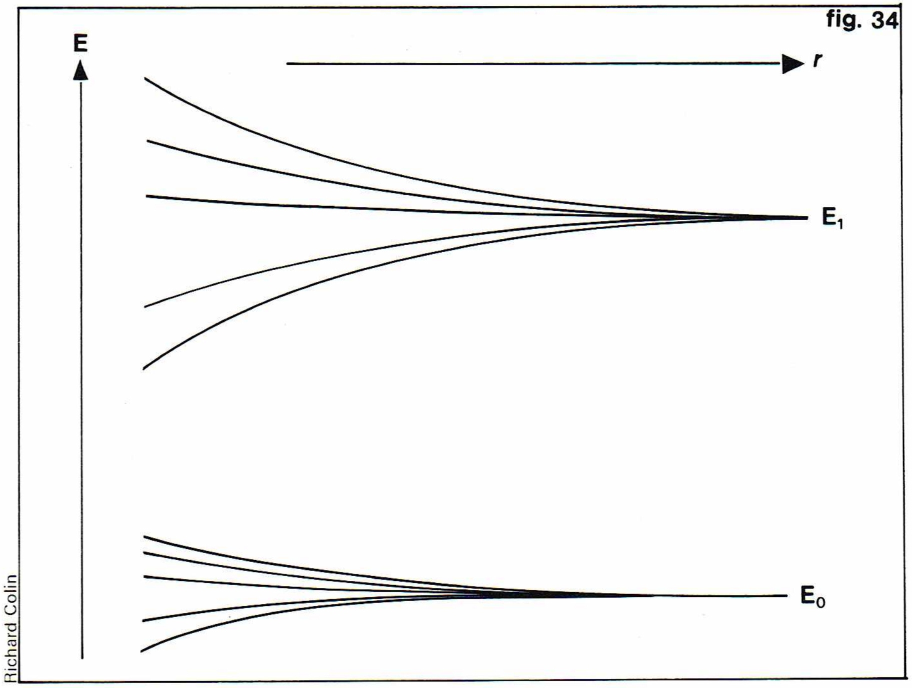

▲ Figure 34 : soit 5 atomes (ou ions) à une distance moyenne r les uns des autres. Pour r très grand, 4 atomes sont dans l'état $|u\rangle$, le dernier dans l'état $|v\rangle$ (ou $|v'\rangle$ d'énergie supérieure à $|v\rangle$, etc.); l'énergie de l'ensemble est alors E_0 (ou $E_1 > E_0$, etc.), qui est au moins 5 fois dégénéré. Quand r diminue, la dégénérescence est levée, d'autant plus fortement que r est petit et que l'état $|v\rangle$ est moins lié.

◀ Page ci-contre, figure 33 : a, représentation des états de l'ensemble atome H et proton. On a porté en abscisse le déplacement suivant l'axe qui joint les deux protons (distants de r) ; en ordonnée, l'énergie potentielle de l'électron et sa fonction d'onde. L'énergie potentielle est représentée par deux puits de potentiel centrés sur chacun des protons. Dans l'état I, la fonction d'onde est concentrée autour du proton de gauche; dans l'état II, autour du proton de droite. Le double trait représente le « domaine classique » de l'électron. b, lorsque la distance r diminue, la barrière de potentiel qui sépare les deux puits devient moins haute et moins large. Par effet tunnel, l'électron passe d'un proton à l'autre. Les nouveaux états propres sont les combinaisons symétriques $|L\rangle$ et antisymétriques $|AL\rangle$ des états I et II : $|L\rangle$ est liant et $|AL\rangle$ antiliant.

Werbe Photo

Keystone

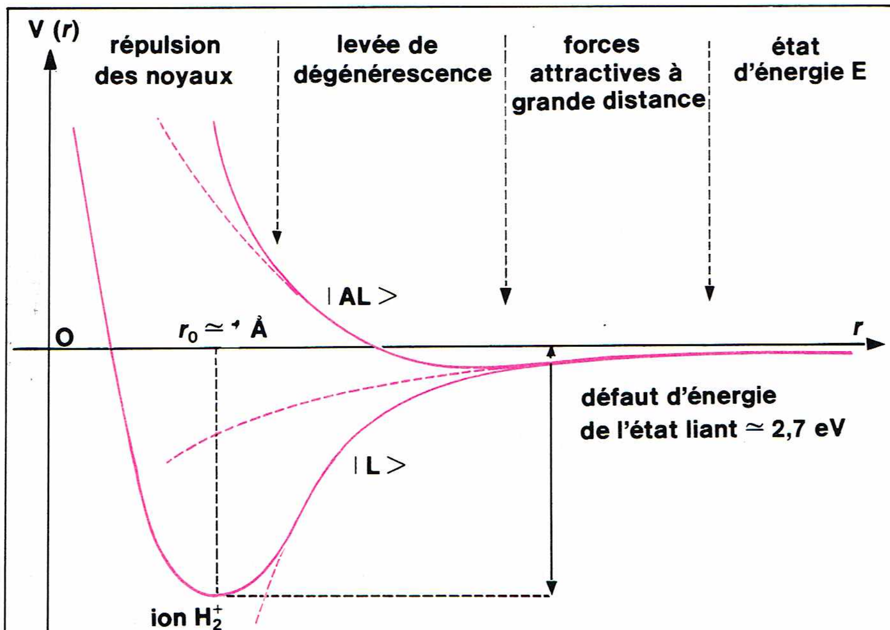

fig. 35

Richard Colin

▲ *En haut, à gauche, un portrait du physicien allemand,* Max Born : *il fut prix Nobel de physique en 1954 ; à droite, le physicien américain* J. R. Oppenheimer *(1904-1966), le père de la bombe « A ». Ci-dessus, figure 35 : énergie d'interaction d'un atome H et d'un proton, les noyaux étant immobiles et séparés par une distance r. On a porté sur la figure en trait plein les valeurs propres de l'équation de Schrödinger de l'électron qui donnent par continuité, pour $r \to \infty$, l'énergie de l'état fondamental de l'atome* H *(énergie* E*). Par convention, on a pris* V *(r) = 0 pour $r \to \infty$.*

▼ *Figure 36 : représentation classique de la vibration et de la rotation d'une molécule diatomique de centre de gravité* G.

Vibration : c'est le déplacement des noyaux le long de l'axe de la molécule. Si l'amplitude reste faible, on peut encore parler de distance internucléaire r_0. Rotation : c'est le déplacement des noyaux perpendiculairement à l'axe de la molécule. $\vec{L}$ est une constante, le mouvement est plan.

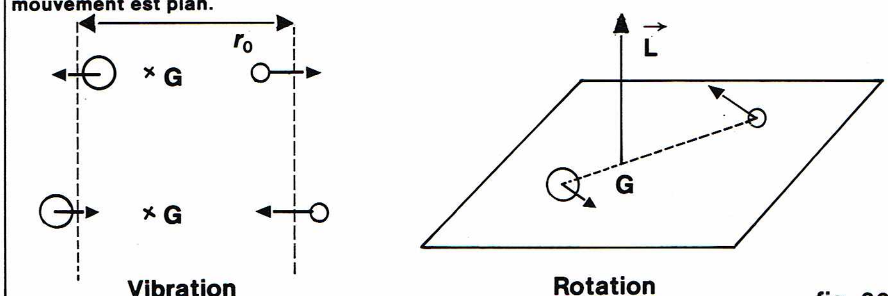

fig. 36

Richard Colin

et les énergies associées ($\vec{x}_e$ représente les coordonnées électroniques, et l'indice i les différentes solutions).

Supposons (par anticipation) que la fonction d'onde nucléaire soit confinée dans un domaine petit par rapport à la distance internucléaire moyenne r_0. Dans ce cas, r varie peu et sera remplacé par r_0. On démontre que la fonction d'onde nucléaire φ (r) est solution de l'équation de Schrödinger avec le potentiel V_i (r), et que la fonction d'onde totale est ψ_i $(\vec{x}_e)$ φ (r), c'est-à-dire que les variables $\vec{x}_e$ et r sont séparées.

La *figure* 35 montre deux courbes $V_i(r)$ pour les états $|L\rangle$ et $|AL\rangle$ de $H_2{}^+$, déjà rencontrées. Il apparaît trois régions où V (r) varie. En premier lieu, pour r de l'ordre de quelques Å, se manifestent des forces attractives à longue distance. Elles varient ici en $1/r^5$ et l'énergie en $1/r^4$ (forces entre une charge et le dipôle électrique qu'elle induit). Entre atomes neutres, les forces sont en $1/r^7$ et l'énergie en $1/r^6$ (dipôle-dipôle induit).

Pour $r < 2$ Å, la dégénérescence 2 du niveau considéré est levée par suite de la délocalisation de l'électron entre les deux protons (on parle parfois de « résonance », par exemple dans le cas de la molécule de benzène).

Enfin, pour r petit, les courbes remontent à cause de la répulsion coulombienne des noyaux. L'énergie du niveau $|L\rangle$ présente alors un minimum très marqué pour $r \simeq 1$ Å. La profondeur du puits est de l'ordre de 2,7 eV, assurant une très bonne stabilité à l'ion $H_2{}^+$ (nous verrons néanmoins que l'énergie de liaison de l'état fondamental est inférieure à cette valeur).

On peut constater que même l'état $|AL\rangle$ présente un léger défaut d'énergie associé à un minimum très peu marqué dû aux forces à longue distance. Dans certains cas (couple alcalin-gaz rare par exemple), une telle situation donne naissance à une molécule très instable, dite « molécule de Van der Waals ».

Il reste à vérifier sur φ (r) l'hypothèse $r \simeq r_0$. C'est le cas pour de nombreuses molécules, au moins tant que les énergies de vibration et de rotation restent faibles par rapport aux écarts entre niveaux électroniques. Citons néanmoins une exception célèbre, NH_3. Même dans les deux niveaux les plus bas (ceux de la transition du maser à ammoniac), l'atome N traverse le plan des atomes H (« inversion » de la molécule), et sa fonction d'onde est très délocalisée.

Niveaux d'énergie de vibration et de rotation

Séparation des variables

Nous faisons toujours l'hypothèse que l'extension spatiale de la fonction d'onde nucléaire est faible comparée à r_0. Dans ces conditions, le moment d'inertie de la molécule est bien défini, puisque la distance entre noyaux est presque constante : les mouvements de rotation et de vibration sont alors indépendants (*fig.* 36).

Reportons-nous au paragraphe *Diffusion élastique par un potentiel central* (p. 227, et *fig.* 30b). Le mouvement de vibration est celui de la « particule relative » dans le potentiel V (r). En cas de rotation avec le moment ciné-

tique $\vec{L}$, on rajoute la « barrière centrifuge », pratiquement constante pour nous et égale à $L^2/2\,\mu r_0^2$, ce qui revient à une translation vers le haut des énergies. Toujours dans le cadre de notre hypothèse, la courbe de potentiel se réduit à une parabole au voisinage du minimum, soit $V(r) \simeq -V(r_0) + (r = r_0)^2 \times \dfrac{V''(r_0)}{2}$: le mouvement de vibration est celui d'un oscillateur harmonique de constante de rappel $K = V''(r_0)$. Le mouvement de rotation est celui d'un « rotateur rigide » de moment d'inertie $I = \mu r_0^2$ par rapport au centre de gravité de la molécule et tournant dans un plan perpendiculaire à $\vec{L}$.

Remarquons que la molécule peut posséder, en plus de $\vec{L}$, un moment cinétique de deux origines différentes. Le premier est le moment cinétique électronique (orbital et de spin) qui est pris en compte dans la théorie des niveaux électroniques. Le second est le moment cinétique de spin des noyaux (qui peut donner une composante le long de l'axe de la molécule) correspondant à une énergie interne bien définie, caractéristique de l'état du noyau.

Niveaux de vibration

On sait calculer, en mécanique quantique, les niveaux d'énergie de l'oscillateur harmonique :

$$E_v = \left(v + \frac{1}{2}\right)\hbar\omega \qquad \omega = \sqrt{\frac{k}{\mu}} \qquad v = 0, 1, 2, \ldots$$

Ces niveaux sont équidistants (*fig.* 37a) et non dégénérés. Le fait le plus important est que l'énergie du niveau le plus bas $v = 0$ ne soit pas nulle ; il joue un rôle fondamental, comme nous l'avons déjà dit au paragraphe *La liaison chimique*, dans le problème de l'existence des molécules.

Quel est l'ordre de grandeur de $\hbar\omega$? ω est d'autant plus grand que la constante de rappel K est plus grande (molécule à forte énergie de liaison) et que μ est plus petit (molécule contenant au moins un atome léger). Les variations de ω sont illustrées *figure* 37b. Prenons d'abord l'exemple des molécules Rb Br (halogénure d'alcalin très stable) et Rb Kr (« molécule de Van der Waals » de très faible énergie de liaison) : les masses réduites sont presque les mêmes (Rb = 85, Br = 79, Kr = 84), et pourtant les énergies de vibration $\hbar\omega$ sont respectivement 181 cm^{-1} et 13 cm^{-1}. L'effet de la masse est illustré par H_2 et D_2 ; les nuages électroniques, donc les constantes K, sont les mêmes, mais la masse réduite de H_2 est la moitié de celle de D_2. Les énergies de vibration sont dans un rapport voisin de $\sqrt{2}$ (respectivement 4 401 cm^{-1} et 3 112 cm^{-1}). Les énergies électroniques étant de l'ordre de 10^5 cm^{-1}, on retrouve bien le rapport

$$\sqrt{m/M} \simeq 10^{-2} \text{ à } 10^{-3}$$

L'énergie moyenne d'un oscillateur harmonique en équilibre thermodynamique à la température T vaut kT, soit 200 cm^{-1} à la température ambiante. Dans ces conditions, seul le niveau fondamental sera peuplé pour une molécule légère, telle H_2, tandis que plusieurs niveaux seront occupés pour une molécule lourde, telle Rb Br. De toute façon, pour qu'une molécule soit stable, il faut que les niveaux de vibration vers la limite de dissociation (V = 0) soient pratiquement vides, ce qui exige $V_0 \gg kT$ (la condition $V_0 > \hbar\omega_0/2$ étant la condition pour que la molécule existe).

fig. 37 Représentation des niveaux de vibration d'une molécule dans l'état fondamental et dans un état excité. La longueur des traits horizontaux donne une idée de l'extension spatiale de la "particule relative". Quand le potentiel cesse d'être parabolique, les niveaux ne sont plus équidistants à cause des termes correctifs (dits *anharmoniques*).

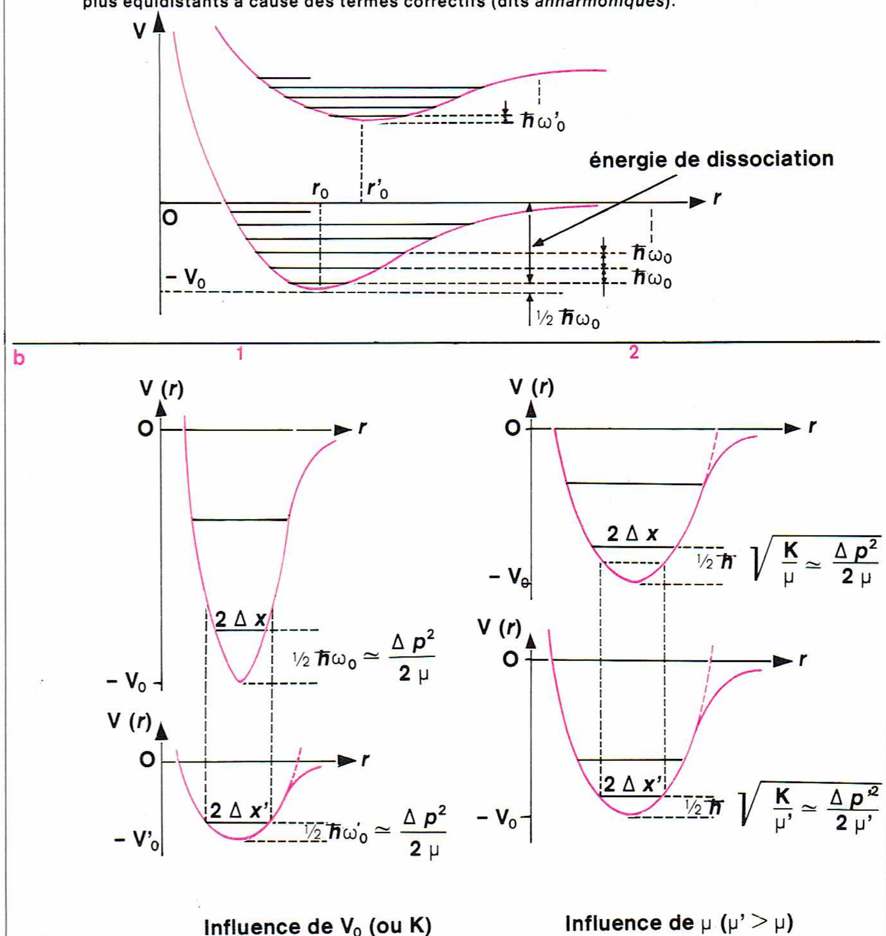

1 — Influence sur ω_0 de la constante de rappel K (ou, ce qui revient pratiquement au même, de la profondeur du puits de potentiel). Le niveau fondamental se positionne de telle sorte que l'on ait toujours $\Delta x \cdot \Delta p = \Delta x' \cdot \Delta p' \simeq \hbar$

2 — Influence de μ ($\mu' > \mu$). Il faut que l'on ait $\Delta x \cdot \Delta p = \Delta x' \cdot \Delta p' \simeq h$. On a $\omega_0 = \sqrt{K/\mu}$ d'où $\Delta p^2 \simeq \hbar\sqrt{\mu K}$: Δp augmente avec μ.

Richard Colin

▼ *Figure 38 : a, on a représenté deux systèmes de raies mettant en évidence les vibrations d'une molécule. A gauche, figurent les transitions électroniques partant d'un état B (niveau de vibration v' = 1 par exemple) vers l'état A : c'est la « bande de vibration ». A droite, figure le spectre de vibration pure. Si on néglige les termes anharmoniques, les niveaux sont équidistants ; on a la règle de sélection $\Delta V = \pm 1$, donc une seule fréquence est absorbée ou émise, ν_A.*
b, on a représenté le spectre Raman de vibration. La molécule est irradiée avec la fréquence non résonnante ν_0 ; pendant un temps très court, elle passe « virtuellement » dans l'état noté en pointillés, d'où elle retombe avec la règle de sélection $\Delta V = \pm 1$ ou 0. L'intensité des raies Raman dépend en particulier de la population du niveau de départ ; si ce dernier est le niveau v = 0 (le plus peuplé), la raie anti-Stokes n'existe pas, sinon l'intensité de la raie anti-Stokes est inférieure à celle de la raie Stokes, elle-même inférieure à la raie Rayleigh.

fig. 38

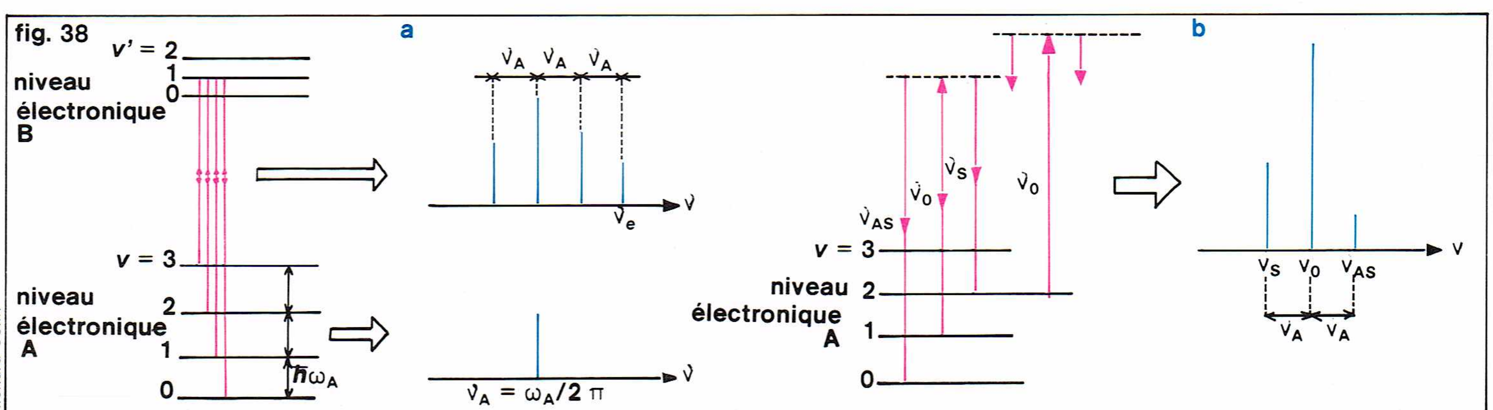

Richard Colin

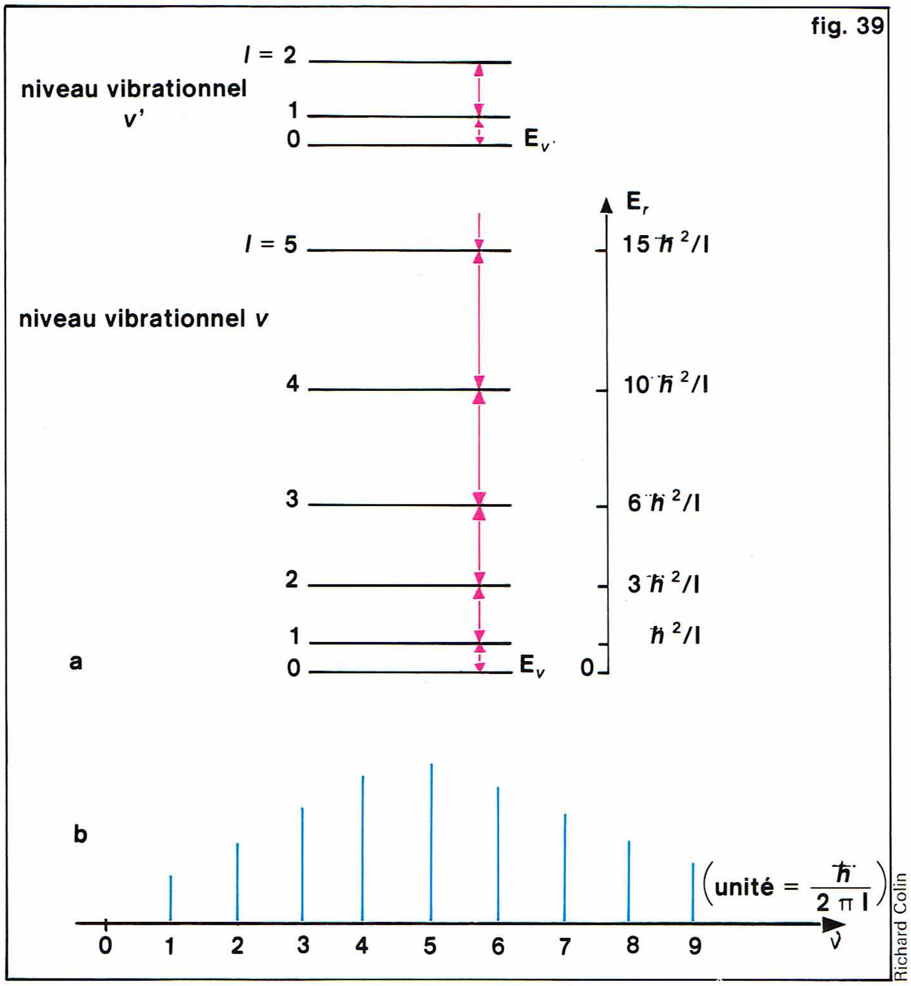

▲ *Figure 39 : a, on a représenté les niveaux de rotation de l'état de vibration v, d'énergie E_v. L'énergie de rotation est $E_r = l(l+1)\hbar^2/2I$ avec I constant en première approximation (il faut par exemple négliger la distorsion centrifuge, qui tend à augmenter r_0, donc $I = \mu r_0^2$, quand le moment cinétique augmente). Le moment d'inertie I reste à peu près le même pour des niveaux de vibration v' voisins du niveau v. b, les raies de rotation pure obéissent à la règle de sélection $\Delta l = \pm 1$. Les fréquences sont données par $(l+1)\hbar/2\pi I$, et les raies sont équidistantes; elles sont dans l'infrarouge très lointain ou dans le domaine des micro-ondes ($\hbar/2\pi I$ est de l'ordre de 10^{11} Hz). L'intensité des raies dépend en particulier de la population du niveau de départ qui résulte de la compétition de la dégénérescence (qui croît avec l) et du facteur de Boltzmann (qui décroît).*

Une molécule, comme un atome, n'a pas de moment dipolaire électrique permanent (c'est une propriété liée à l'invariance de l'hamiltonien dans une symétrie par rapport à l'origine). Mais, si nous considérons une molécule hétéropolaire (faite de deux atomes différents), il n'y a pas en général de plan de symétrie perpendiculaire à l'axe, et la molécule a un moment dipolaire instantané, de valeur moyenne nulle, que l'on peut considérer comme fluctuant lentement (du fait des faibles fréquences de rotation). Ce moment dipolaire électrique se manifeste lors des phénomènes suffisamment rapides; c'est ainsi qu'il est modulé par la vibration de la molécule et peut être la source d'une émission électromagnétique.

La *figure* 38a illustre cette émission. Les fréquences correspondantes tombent dans l'infrarouge; à une énergie de 1 000 cm^{-1} correspond une longueur d'onde

$$\lambda = 10^{-3}\ cm = 10\ \mu$$

par exemple, la raie 10,6 μ du laser à CO_2 est une raie de vibration de la configuration électronique fondamentale. La vibration de la molécule décale aussi les fréquences de transition électronique; on obtient un ensemble de raies, parfois très serrées, qui constituent une « bande de vibration ».

Si la molécule est homopolaire (H_2, O_2, etc.), le moment dipolaire électrique est nul (il se réduit à celui des électrons et fluctue donc à des fréquences très élevées) : elle est dite alors inactive dans l'infrarouge. Les fréquences de vibration ne se manifestent alors qu'en effet Raman (*fig.* 38b) : classiquement, on dit que la vibration des noyaux module le cortège électronique. Si $\Delta V = 0$ (diffusion élastique), on obtient la raie de diffusion Rayleigh à la même fréquence. Si $\Delta V = +1$, c'est la raie Stokes de fréquence $\nu_0 - \nu_A$. Si $\Delta V = -1$, c'est la raie anti-Stokes de fréquence $\nu_0 + \nu_A$.

Niveaux de rotation

Les niveaux d'énergie du rotateur rigide sont donnés très simplement par la mécanique quantique :

$$E_r = \frac{\vec{L}^2}{2I} = \frac{l(l+1)\hbar^2}{2I}$$

puisque les valeurs propres de $\vec{L}^2$ sont $l(l+1)\hbar^2$. Le nombre l prend les valeurs 0, 1, ... ; les niveaux d'énergie ne sont pas équidistants, leur écart varie linéairement avec l (*fig.* 39a). La dégénérescence de chaque niveau est $2l+1$.

Calculons l'ordre de grandeur de $\hbar^2/I = \hbar^2/\mu r_0^2$. Il dépend surtout de la masse réduite μ pour une molécule diatomique, car les valeurs de r_0 restent de l'ordre de 1 Å, et nous prendrons 10 cm^{-1} ($\hbar^2/I$ varie de 40 cm^{-1} pour une molécule légère comme HF à moins de 1 cm^{-1} pour une molécule lourde). Par rapport aux énergies électroniques, on a bien le rapport $m/M \simeq 10^{-4}$ à 10^{-5}.

Pour toutes les molécules, de nombreux niveaux de rotation sont peuplés à température ambiante (rappelons qu'alors kT vaut 200 cm^{-1}). Les populations sont proportionnelles à $(2l+1)\exp(-E_r/kT)$, et l'énergie moyenne de rotation est de l'ordre de kT : il en résulte que la contribution des niveaux de rotation d'une molécule à la chaleur spécifique est importante.

Le problème de l'absorption ou de l'émission de rayonnement électromagnétique par les niveaux de rotation est analogue à celui qui concerne les niveaux de vibration : il faut un moment dipolaire électrique qui ait des éléments de matrice non nuls entre deux états de rotation, ou, pour parler classiquement : qui ait au moins une composante modulée par la rotation de la molécule.

C'est le cas pour une molécule diatomique hétéropolaire. Les fréquences correspondantes sont données par la formule :

$$\frac{1}{h}\ [E_r(l+1) - E_r(l)] = \frac{\hbar}{4\pi I}$$

$$[(l+2)(l+1) - (l+1)l] = \frac{\hbar}{2\pi I}(l+1)$$

Elles tombent dans l'infrarouge très lointain ou les micro-ondes (à une énergie de 10 cm^{-1} correspond une longueur d'onde de 0,1 cm, donc une fréquence de $3 \cdot 10^{11}$ Hz). L'intensité des raies est déterminée en particulier par la population du niveau de départ qui varie à l'équilibre thermodynamique comme

$$(2l+1)\exp - \frac{l(l+1)\hbar^2}{2IkT}$$

(à cause de la dégénérescence $2l+1$).

Cette fonction passe par un maximum pour

$$l \simeq IkT/\hbar^2$$

en prenant pour $\hbar^2/I$ la plus grande valeur de l'ordre de 40 cm^{-1}, on trouve $l \simeq 5$ à température ordinaire.

Ces raies de rotation pure sont représentées sur la *figure* 39b. Le spectre de rotation se superpose aussi au spectre de vibration, apparaissant ainsi dans l'infrarouge plus proche, où les mesures sont plus faciles et les détecteurs plus sensibles.

Si la molécule est homopolaire, il reste encore l'effet Raman pour mettre en évidence les niveaux de rotation. Comme pour les niveaux de vibration, on peut dire que la rotation de la molécule, qui entraîne le cortège électronique, module la projection du dipôle électrique électronique responsable de la diffusion de la lumière. Mais dans ce cas, la règle de sélection est $\Delta l = \pm 2$ ou 0.

BIBLIOGRAPHIE

BARCHEWITZ P., *Spectroscopie atomique et moléculaire*, Masson. - BRUHAT G. et KASTLER A., *Optique*, Masson. - CAGNAC B., et PEBAY-PEYROULA J. C., *Physique atomique*, Dunod. - COHEN-TANNOUDJI C., DIU B. et LALOE F., *Mécanique quantique*, coll. Enseignement des sciences, Hermann. - D'ESPAGNAT B., *Conception de la physique contemporaine*, Hermann. - HERZBERG, *Molecula Spectra and Molecular Structure*, t. I : *Spectra of Diatomic Molecules*, Van Nostrand. - KUHN H. G., *Atomic Spectra*, Longmans. - LOPES L., *Fondements de la physique atomique*, Hermann. - MERZBACHER E., *Quantum Mechanics*, Wiley. - ROUAULT, *Physique atomique*, Armand Colin.

PHYSIQUE NUCLÉAIRE

La physique nucléaire est une discipline qui cherche à étudier et à provoquer les processus physiques où interviennent les noyaux atomiques. En cela, elle se distingue de la physique atomique, qui étudie les processus produits par les électrons de l'atome, ainsi que de la physique des particules élémentaires, qui étudie les réactions entre les particules élémentaires (baryons, hypérons, photons, leptons, etc.).

Les **noyaux** sont des systèmes liés de *neutrons* et de *protons*. Le neutron et le proton sont des particules élémentaires et leurs propriétés conditionnent, dans une certaine mesure, celles des noyaux. La physique nucléaire a, par conséquent, de nombreux rapports avec la physique des particules élémentaires. Cependant, les noyaux possèdent un grand nombre de propriétés très remarquables qui sont dues au fait qu'ils forment des systèmes composés d'un grand nombre de neutrons et de protons. C'est par l'étude de ces propriétés que la physique nucléaire se distingue de la physique des particules élémentaires. Les neutrons et les protons sont groupés sous le nom commun de **nucléons.**

On appelle *noyaux légers* ceux qui ont un petit nombre de nucléons, à savoir $A \leqslant 40$. Le nombre A de nucléons est souvent appelé *nombre de masse*, ou même *masse atomique*.

Les *noyaux lourds* ont un nombre de nucléons supérieur à 150 environ, et les noyaux les plus lourds connus jusqu'à présent ont quelque 250 nucléons.

Les noyaux ont une dimension de l'ordre de

$$5 \cdot 10^{-13} \text{ cm}$$

et les énergies mises en jeu par le mouvement des nucléons dans le noyau sont de l'ordre de 10^6 eV = 1 MeV. L'électron-volt est égal à l'énergie acquise par un électron qui abaisse son énergie potentielle de 1 volt. Les énergies mises en jeu par les noyaux sont donc environ 1 million de fois supérieures à celles mises en jeu par les électrons de l'atome, et donc par les liaisons chimiques.

Les unités utilisées en physique nucléaire reflètent les ordres de grandeur des phénomènes nucléaires. Elles sont résumées dans le *tableau* I.

Les propriétés des nucléons, qui sont les constituants des noyaux, sont résumées dans le *tableau* II.

On désigne généralement par Z le nombre de protons et par N le nombre de neutrons d'un noyau, de sorte que le nombre de nucléons est $A = N + Z$. Pour un atome neutre, le nombre de protons est égal au nombre d'électrons qui gravitent autour du noyau. C'est pour cela que le nombre Z de protons est caractéristique de l'*élément chimique* de l'atome. Il est usuel de désigner les noyaux en précisant l'élément chimique de l'atome neutre correspondant ainsi que le nombre total de nucléons. Ainsi, on désigne par l'expression ^{208}Pb le noyau du plomb ayant $Z = 82$ protons et $N = 126$ neutrons. Lorsqu'on tient à préciser N et Z, on représentera le noyau du plomb par le symbole $^{208}_{82}\text{Pb}_{126}$ en indiquant en bas à gauche le nombre de protons et à droite le nombre de neutrons.

Les noyaux ayant un nombre Z donné de protons et des nombres N différents de neutrons sont appelés *isotopes* d'un élément donné. Ainsi les noyaux

$$^{40}_{20}\text{Ca}_{20},\ ^{41}_{20}\text{Ca}_{21},\ ^{42}_{20}\text{Ca}_{22},\ ^{43}_{20}\text{Ca}_{23},\ \ldots$$

sont des isotopes du calcium. Les atomes dont les noyaux sont des isotopes d'un même élément ont évidemment les mêmes propriétés chimiques.

Ainsi que le montre le *tableau* II, les nucléons ont un *spin* égal à $\frac{1}{2}$. Le spin d'un système est égal au moment cinétique de ce système lorsqu'il est au repos. Les noyaux ont aussi un spin. Celui-ci résulte de la somme des spins des nucléons et des moments cinétiques qu'ils ont à l'intérieur du noyau. D'après les lois de composition des moments cinétiques qui sont données par la mécanique quantique, les noyaux ayant un nombre pair de nucléons ont un spin entier égal à 0, 1, 2, ... selon le noyau. Ceux qui ont un nombre impair de nucléons ont un spin demi-entier $\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \ldots$

Les noyaux sont également dans un état de *parité* donnée. La parité est un nombre quantique qui détermine si la fonction d'onde du noyau change de signe ou non lorsqu'on fait une inversion d'espace. Lorsqu'un noyau est dans un état de spin J et de parité $\Pi = +$ ou $-$, on désignera son état par le symbole J^{π}. Ainsi le noyau $^{40}_{20}\text{Ca}_{20}$ a un spin et une parité 0^+ dans son état fondamental, et l'isotope $^{41}_{20}\text{Ca}_{21}$ du calcium a un spin et une parité $7/2^-$ dans son état fondamental.

La physique nucléaire forme un domaine trop vaste pour que l'on puisse en évoquer tous les aspects en un seul chapitre de l'encyclopédie. Toute la partie qui concerne l'instrumentation nucléaire sera traitée dans le

Tableau I

Quelques unités et constantes physiques utiles en physique nucléaire (voir aussi *tableaux* II et V)

Grandeur	Unité	Symbole
Longueur	1 fermi = 10^{-13} cm	fm
Surface (section efficace)	1 barn = 10^{-24} cm^2 1 barn = 100 fm^2	b
Energie	1 méga-électron-volt = 1,6021 · 10^9 erg 1 méga-électron-volt = 10^6 électron-volt 1 méga-électron-volt = 10^{-3} giga-électron-volt	MeV eV GeV
Charge électrique	e = 4,8030 esu e^2 = 1,440 MeV · fm	e
Moment magnétique	1 magnéton nucléaire $= e\hbar/2 M_p c$ = 3,152 MeV · gauss^{-1} · 10^{-17}	
Activité radio-active	1 curie = 3,7 · 10^{10} désintégrations par sec.	Ci

Energie du proton : $M_p c^2 = 938{,}26$ MeV
Energie du neutron : $M_n c^2 = 939{,}55$ MeV
Energie de l'électron : $mc^2 = 0{,}511$ MeV
Constante de Planck : $h = 4{,}1355 \cdot 10^{-23}$ MeV · s $\quad \hbar = h/2\pi$
Vitesse de la lumière : $c = 2{,}9979 \cdot 10^{10}$ cm/s $= 2{,}9979 \cdot 10^{23}$ fm/s
$e^2/\hbar c = 1/137{,}039$
Rayon de Bohr $= 0{,}5292 \cdot 10^5$ fm

▲ ***Tableau I :** quelques unités, constantes et définitions utiles en physique nucléaire.*

▼ ***Tableau II :** propriétés des nucléons (protons et neutrons).*

Tableau II

Propriétés des nucléons

Propriétés	Protons	Neutrons
Masse	$M_p = 1{,}672 \cdot 10^{-24}$g $M_p c^2 = 938{,}26$ MeV	$M_n = 1{,}675 \cdot 10^{-24}$g $M_n c^2 = 939{,}55$ MeV
Spin	1/2	1/2
Vie moyenne dans le vide	stable	17 minutes
Charge électrique	e	0
Moment magnétique (en magnétons nucléaires)	2,7927	− 1,9131

▲ *Le physicien italien Enrico Fermi. Il fut le réalisateur de la première pile à uranium et graphite, en 1942, à Chicago.*

▶ *Les grandes dates historiques de l'ère atomique.*

Quelques dates historiques

1896 : Becquerel découvre la radio-activité.

1898 : Marie Curie découvre le radium et le polonium par la radiochimie.

1905 : Einstein énonce la théorie de la Relativité restreinte et l'équivalence entre la masse et l'énergie.

1908 : Rutherford et Royds identifient les rayons alpha.

1911 : Rutherford découvre le modèle planétaire de l'atome en mesurant la diffusion de particules alpha.

1913 : J. J. Thompson découvre des isotopes stables.
N. Bohr formule la théorie de l'atome d'hydrogène.
Découverte des rayons cosmiques.

1919 : Rutherford découvre que les protons sont des constituants du noyau.

~ 1920 : Développement de la mécanique quantique par de Broglie, Heisenberg, Born, Dirac, Schrödinger *et al.*

1929 : Gamov formule le modèle de la radio-activité alpha.

1930 : Pauli postule l'existence du neutrino.

~ 1931 Premières utilisations par Cockcroft et Walton de particules accélérées.
Construction du premier accélérateur Van de Graaff et du premier cyclotron.

1932 : Chadwick, Bothe et Joliot découvrent le neutron.
Heisenberg propose l'hypothèse que les noyaux sont constitués de neutrons et de protons.

1933 : Fermi formule la théorie de la radio-activité bêta.

1934 : I. Curie et F. Joliot découvrent la radio-activité artificielle.

1935 : Yukawa propose que les forces nucléaires sont dues à l'échange d'un méson.

1936 : N. Bohr énonce le concept de noyau composé et de la goutte liquide.
Breit et Wigner formulent la théorie des résonances des neutrons lents.

1938 : Hahn et Strassman découvrent le phénomène de fission.
Bethe découvre le cycle de carbone, source de l'énergie solaire.

1942 : Fermi *et al* construisent le premier réacteur nucléaire.

1947 : Découverte du méson π par Lattes, Occhialini et Powell.

1950 : Meyer, Jensen, Haxen et Suess énoncent le modèle des couches du noyau.

1953 : Découverte des noyaux déformés par Adler, A. Bohr, Winther *et al.*
Danysz et Puinski découvrent un hypernoyau produit par un rayon cosmique.

1954 : Feshbach, Porter et Weisskopf formulent le modèle optique, à la suite de travaux de Bethe de 1940.
A. Bohr, Mottelson et Rainwater formulent le modèle unifié des noyaux.
Théorie de Brueckner de l'énergie de liaison.

1957 : Lee et Yang découvrent que la parité n'est pas conservée dans la radio-activité bêta.
Débuts de l'application de la théorie microscopique des noyaux par Elliot, Brown *et al.*

1958 : A. Bohr, Mottelson et Pines proposent l'hypothèse que la surface nucléaire est dans la phase supraconductrice.

1967 : Les expériences faites à Dubna (1964), à Saclay (1966), les calculs de Strutinsky (1967) conduisent à la découverte de la double barrière de fission.

chapitre *Instrumentation nucléaire*. Dans ce chapitre, nous tentons d'exposer les processus fondamentaux qu'on rencontre en physique nucléaire. Certains aspects importants ont été omis afin de ne pas trop allonger le texte et faute de pouvoir donner l'expression mathématique qui leur convient. C'est ainsi que nous n'avons pas exposé la notion de *spin isotopique* et les lois de conservation en général, les phénomènes de résonance magnétique, la réflexion des neutrons par les cristaux, etc. Le lecteur pourra utilement et facilement compléter ce texte en consultant les livres cités en bibliographie.

Énergie de liaison

Le noyau est un système composé de N neutrons et de Z protons qui sont liés par des forces nucléaires. Cette liaison se traduit par une *énergie de liaison* qui, d'après la loi d'Einstein, $E = mc^2$, se traduit à son tour par un défaut de masse. En effet, si l'on désigne par M_n et M_p les masses du neutron et du proton (*tabl.* II), la masse M (N, Z) du noyau est inférieure à la masse $NM_n + ZM_p$ de ses constituants d'une quantité $B(N, Z)/c^2$ où B (N, Z) est l'*énergie de liaison du noyau*. Les énergies de liaison des noyaux sont données à une bonne approximation par la **formule de Weiszacker :**

$$B(N, Z) = b_{vol}A - b_{sur}A^{2/3} - \frac{1}{2} b_{sym} \frac{(N - Z)^2}{A} - \frac{3}{5} \frac{Z^2e^2}{R}$$

Les différents termes de cette formule peuvent être interprétés par le **modèle de la goutte liquide** : le noyau est assimilé à une goutte liquide uniformément chargée et maintenue sphérique par une tension de surface. Le coefficient $b_{vol} \simeq 16$ MeV représente l'énergie de volume de la goutte. Il est proportionnel au nombre total $A = N + Z$ de nucléons du noyau. Le terme $b_{sur} \simeq 17$ MeV représente l'énergie de surface due à la tension de surface. Le troisième terme $b_{sym} \simeq 50$ MeV vient de ce que les forces nucléaires agissant entre les neutrons et les protons sont plus attractives que celles qui agissent entre deux nucléons de même espèce. Le dernier terme représente l'énergie électrostatique de la sphère uniformément chargée, dont la charge totale Ze est donnée par le nombre Z de protons et dont le rayon est $R = 1{,}24\ A^{1/3}$ exprimé en fermis (fm).

Les masses des noyaux sont mesurées par des spectromètres de masse ainsi que par des mesures d'énergie au cours des réactions nucléaires. Le principe du fonctionnement d'un spectromètre de masse est illustré sur la *figure* 1. Les noyaux sous forme d'ions (atomes dont on a épluché quelques électrons afin de leur donner une charge électrique) sont accélérés par un potentiel V à une énergie QV, où Q est la charge de l'ion, et ils sont ensuite déviés par un champ magnétique pour être enfin recueillis sur une plaque photographique où ils laissent une trace. Le rayon de courbure de leur trajectoire dans le champ magnétique donne le rapport Q/M où M est la masse de l'ion, sensiblement égale à celle du noyau. Les spectromètres de masse servent également à déterminer l'abondance isotopique des éléments dans la nature et à identifier les produits d'une réaction nucléaire.

Rappelons que les isotopes d'un élément sont des noyaux qui ont le même nombre Z de protons mais des nombres différents de neutrons. Ces noyaux ont les mêmes propriétés chimiques, et ils peuvent donc être utilisés comme traceurs, en particulier lorsque certains isotopes sont radio-actifs (voir le chapitre *Les radio-nucléides*).

La *figure* 2 montre l'énergie de liaison B (N, Z) divisée par le nombre de nucléons. En moyenne, l'énergie de liaison est de 8 MeV par nucléon. Elle augmente cependant avec le nombre de nucléons jusqu'à atteindre un maximum dans la région du ^{54}Fe, après quoi elle diminue. De l'énergie est donc libérée si on *fusionne* deux noyaux légers (voir *La fusion, source de l'énergie solaire,* p. 243) ou si on *fissionne* un noyau lourd (voir *La fission, source de l'énergie nucléaire,* p. 241). C'est cette propriété qu'exploitent les réacteurs et les armes nucléaires.

La formule de Weiszacker montre également ce qui limite la stabilité des noyaux. Un trop grand nombre de protons finit par créer une répulsion électrostatique trop grande. Un trop grand excès de neutrons est empêché

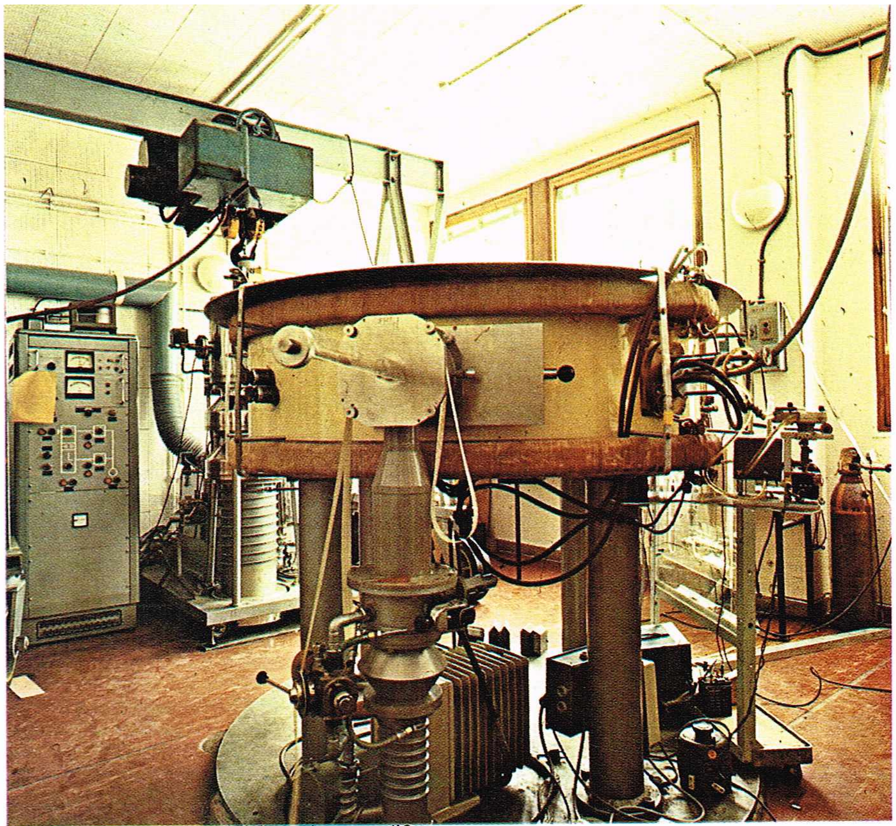

Centre de spectrochimie nucléaire et de masse d'Orsay - Centre national de la recherche scientifique

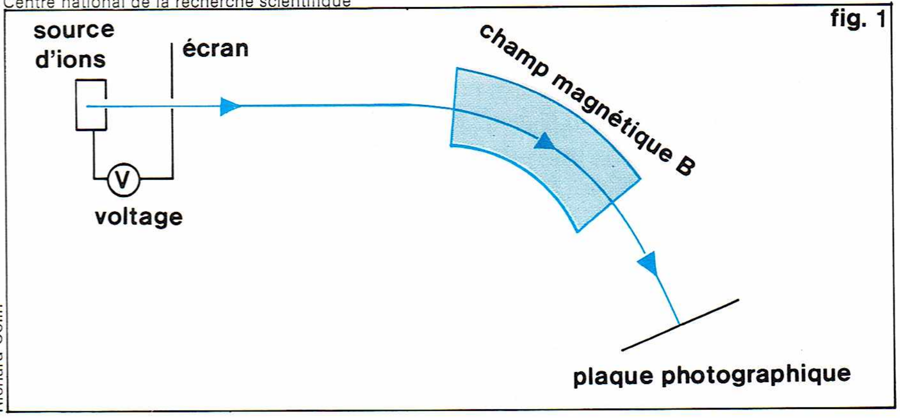

fig. 1

Richard Colin

▲ *En haut, appareil d'étude de l'énergie des particules émises lors de la désintégration des noyaux radio-actifs, en service au centre de spectrométrie nucléaire et de masse d'Orsay (France). Ci-dessus, figure 1 : représentation schématique d'un spectromètre de masse.*

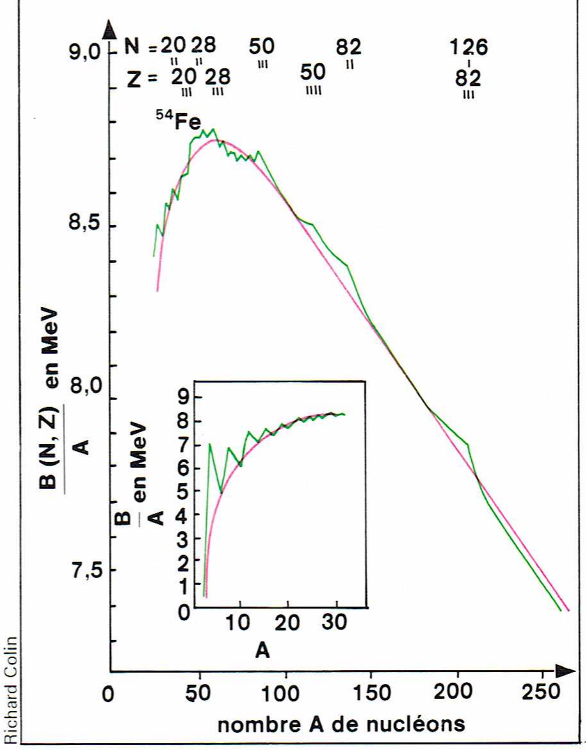

fig. 2

Richard Colin

◀ *Figure 2 : énergies de liaison par nucléon B (N, Z)/A en fonction du nombre A de nucléons. La courbe en trait plein est la valeur donnée par la formule de Weiszacker, (d'après A. Bohr et B. Mottelson,* Nuclear Structure, vol. 1, *W. A. Benjamin, 1969).*

▶ *Figure 3 : les noyaux connus sont groupés dans une zone relativement restreinte du plan (N, Z). Dans une zone plus vaste (hachurée), des noyaux pourraient exister pendant des temps suffisamment longs pour être étudiés expérimentalement. Au-delà de ces noyaux pour N ~ 114 et Z ~ 126 se situerait la région des noyaux superlourds qui n'ont pas encore été découverts (document* **Rapport de prospective - Physique corpusculaire, vol. 1 Physique nucléaire. N° spécial du « Progrès Scientifique »,** *publication de la Délégation générale à la recherche scientifique et technique, 35, rue Saint-Dominique - 75700 Paris).*

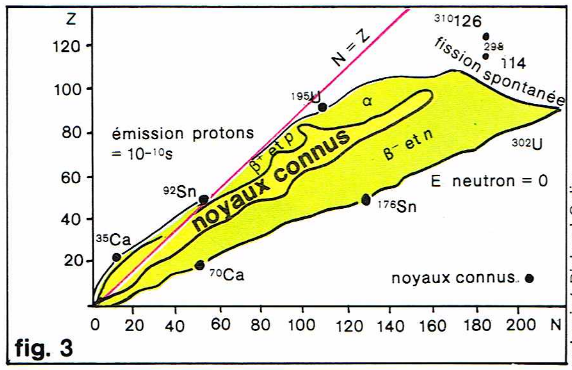

▼ *Figure 4 : séquence des orbites permises aux nucléons dans un puits de potentiel central. A chaque orbite correspond une énergie caractéristique ; on observera que les orbites se groupent en paquets autour de certaines énergies moyennes. Ces regroupements constituent les couches, et les nombres placés au-dessus de chaque couche correspondent au nombre total de nucléons de même espèce présents dans le noyau quand toutes les orbites situées dans cette couche et celles au-dessous sont remplies (document* **La Recherche, n° 46, juin 1974,** *« la structure du noyau atomique » par G. Ripka et D. Isabelle).*

par le terme de symétrie proportionnel à $(N - Z)^2/A$. Les noyaux stables sont donc confinés dans une vallée de stabilité illustrée sur la *figure* 3.

Les énergies de liaison sont modulées par des effets de couche (voir *Le modèle des couches*). Les noyaux à couches complètes sont particulièrement stables. On prévoit la possibilité que des *noyaux superlourds*, c'est-à-dire plus lourds que tous les noyaux stables détectés jusqu'à présent, ayant environ 120 protons et 180 neutrons, seraient stables à cause de l'effet de fermeture de couche. Malgré de nombreux efforts, on n'a pas encore réussi expérimentalement à les former.

Le modèle des couches et le modèle unifié

Un très grand nombre de propriétés du noyau s'expliquent en supposant que les nucléons occupent des orbites quantifiées et liées dans un puits de potentiel sphérique, qui est commun à tous les nucléons. Les orbites se groupent par paquets d'orbites ayant à peu près la même énergie, et les nucléons qui occupent ces orbites forment des couches, d'où le nom **modèle des couches.** Le potentiel moyen résulte de l'interaction moyenne d'un nucléon avec les autres nucléons du noyau. La séquence des orbites dans le potentiel moyen est montrée sur la *figure* 4. Les orbites sont repérées par le nombre quantique radial n, le moment cinétique orbital l et le moment cinétique total j qui résulte de l'addition du spin $\frac{1}{2}$ du nucléon à son moment orbital l. L'énergie de l'orbite ne dépend pas de la projection m du moment cinétique total sur un axe. La projection m prend les valeurs $-j \leqslant m \leqslant j$. Chaque couche de moment cinétique j peut être occupée par $2j + 1$ protons et $2j + 1$ neutrons.

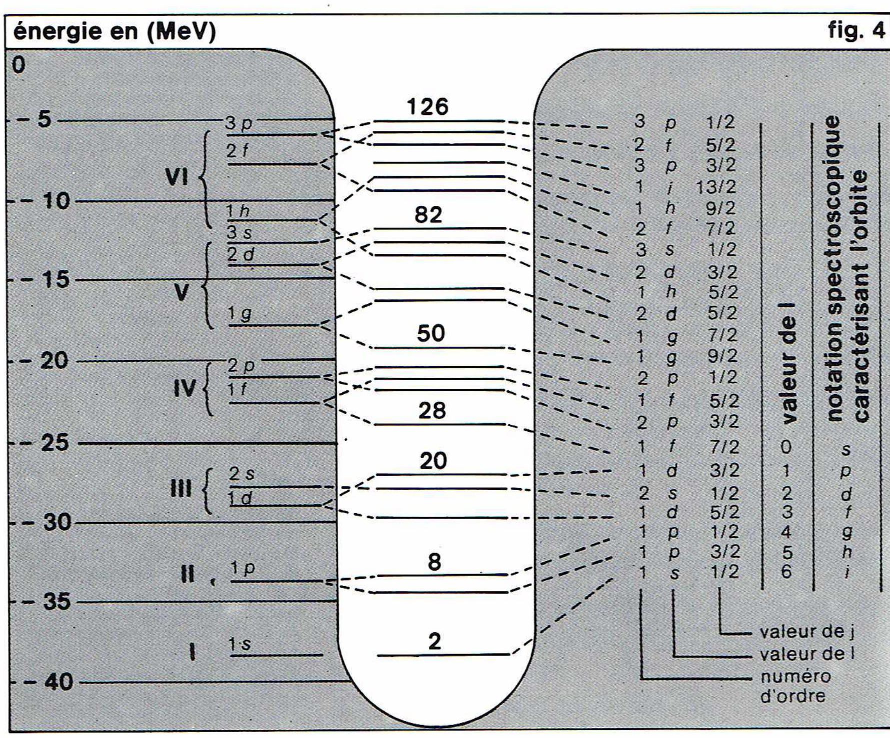

D'après le modèle des couches, on bâtit le noyau en remplissant les Z orbites les plus basses par des protons et les N orbites les plus basses par des neutrons. On observe expérimentalement que les noyaux pair-pair (N pair et Z pair) ont un spin nul de sorte que chaque couple de nucléons forme une paire de moment cinétique nul.

Les noyaux pair-impair ont un spin et une parité égaux à ceux de l'orbite dans laquelle on a placé le nucléon impair. C'est en mesurant le spin et la parité des noyaux pair-impair que l'on a pu établir la séquence des niveaux de la *figure* 4.

Lorsque les $2j + 1$ orbites de j donné et de projections m différentes sont occupées par des nucléons, on dit que le noyau possède une *couche complète*. Les noyaux ayant le nombre de neutrons et de protons nécessaires à former des couches complètes sont particulièrement stables. Il est relativement difficile de les exciter et d'en extraire des nucléons. Les nombres de nucléons qui donnent des couches complètes sont appelés *nombres magiques*. Ce sont : 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126. Des exemples de noyaux à couches complètes sont :

$$^{4}_{2}He_{2},\ ^{16}_{8}O_{8},\ ^{40}_{20}Ca_{20},\ ^{48}_{20}Ca_{28},\ ^{208}_{82}Pb_{126}$$

Le modèle des couches n'est qu'en contradiction apparente avec le modèle de la goutte liquide.

Le **modèle unifié** a réussi à les concilier. D'après ce modèle, il y a une relation entre les orbites que décrivent les nucléons et le potentiel dans lequel les nucléons se déplacent. La forme du potentiel est à peu près la même que la densité de nucléons, et celle-ci dépend des orbites qu'ils occupent. Les propriétés macroscopiques décrites par le modèle de la goutte liquide (vibrations, résonances géantes, fission, etc.) sont reliées à la forme et au mouvement d'ensemble du potentiel. Les propriétés microscopiques (spectre des noyaux pair-impair, moments électriques et magnétiques, etc.) sont déterminées par les orbites quantifiées que décrivent les nucléons. Ces deux propriétés sont interdépendantes, on dit : *self-consistantes*. Le modèle unifié, encore valable aujourd'hui, a reçu quelques vérifications spectaculaires : il a expliqué le spectre des noyaux pair-impair déformés (voir *Les noyaux déformés*) ainsi que la double barrière de fission.

Les noyaux déformés

Quelques noyaux légers ($19 \leqslant A \leqslant 28$), ou appartenant à la région des terres rares ($90 \leqslant N \leqslant 110$ et $65 \leqslant Z \leqslant 75$), ou à celle des transuraniens ($N \simeq 150$, $Z \simeq 100$), ont des propriétés qui ne peuvent pas s'expliquer par le schéma des orbites de la *figure* 4.

Les spectres de ces noyaux sont composés de *bandes de rotation* (*fig.* 5). Une bande de rotation est une famille de niveaux de spins J croissants et dont les espacements en énergie suivent la loi $E_J = J\ (J + 1)/2\ \theta$. En outre, on observe des taux de transition par radio-activité extrêmement forts entre niveaux appartenant à une même bande de rotation. Ces propriétés rappellent celles des spectres des molécules diatomiques. On les interprète en supposant que ces noyaux possèdent une forme ellipsoïdale (d'où le nom de *noyaux déformés*), et la bande de rotation correspond au mouvement de rotation autour d'un axe perpendiculaire à l'axe de symétrie. Le rapport des axes de l'ellipsoïde est typiquement de l'ordre de 0,75.

L'espacement des niveaux d'une bande de rotation dépend du paramètre θ qui est le *moment d'inertie* du noyau. Les moments d'inertie ont une valeur comprise entre celle d'un ellipsoïde rigide et celle d'un liquide irrotationnel contenu dans cet ellipsoïde. Le moment d'inertie est très sensible à la supraconductivité de la surface nucléaire (voir *La supraconductivité de la surface nucléaire*).

D'après le modèle unifié, le potentiel dans lequel se déplacent les nucléons d'un noyau déformé a la même forme ellipsoïdale que la distribution de matière. La séquence (ainsi que les nombres quantiques des orbites) n'est donc pas la même que celle qui est illustrée sur la *figure* 4. C'est pour cela que ce schéma de niveaux n'explique pas les propriétés des noyaux déformés. Par contre, lorsque l'on calcule le spectre des orbites dans un potentiel déformé, on explique fort bien les propriétés spectroscopiques des noyaux déformés. Pour ces noyaux,

le mouvement des nucléons dans les orbites se superpose au mouvement de rotation de l'ensemble du noyau. A partir de moments cinétiques J supérieurs à 10 environ, les forces de Coriolis et les forces centrifuges dues à la rotation se font sentir. On observe des déviations significatives de la loi $E_J = J\,(J+1)/2\,\theta$ et la forme ellipsoïdale est également distordue. En outre, la rotation détruit la supraconductivité du noyau (voir *La supraconductivité nucléaire*, p. 240). A de très hauts moments cinétiques $J \simeq 50$, le noyau finit par acquérir une forme d'assiette perpendiculaire à l'axe de rotation. Il finit enfin par fissionner lorsque le moment cinétique atteint $J \simeq 100$ pour les noyaux de masse moyenne.

Les moments magnétiques et quadripolaires

Les noyaux ont un moment magnétique qui résulte d'une part de ce que les nucléons ont eux-mêmes un moment magnétique et d'autre part de ce que les protons chargés créent des courants électriques qui produisent un moment magnétique. En unités de magnétons nucléaires (*tabl.* II), les *moments magnétiques* des nucléons sont donnés par l'expression : $\mu = g_l \vec{l} + g_s \vec{s}$, où $\vec{l}$ est le moment cinétique orbital et $\vec{s}$ le spin du nucléon, et les g_l et g_s sont des facteurs gyromagnétiques dont les valeurs sont :

$$g_l = 0 \quad g_s = -3{,}85 \quad \text{pour le neutron}$$
$$g_l = 1 \quad g_s = 5{,}58 \quad \text{pour le proton}$$

Plusieurs méthodes sont utilisées pour mesurer le moment magnétique d'un noyau. Une méthode consiste à mesurer la structure hyperfine des raies atomiques. Le principe est le suivant : les électrons qui gravitent autour du noyau créent un champ magnétique H au centre de l'atome où se trouve le noyau. Le champ magnétique donne à l'atome une énergie potentielle égale à

$$W = -\mu H$$

où μ est le moment magnétique du noyau. Un calcul montre que si J est le spin du noyau, I le spin total des électrons, l'énergie potentielle W est égale à :

$$W = -(\mu H/IJ)\,[F\,(F+1) - I\,(I+1) - J\,(J+1)]$$

où F est le moment cinétique total de l'atome qui résulte de l'addition du spin J du noyau au moment cinétique total I des électrons. F prend les valeurs $I+J$, $I+J-1$, ..., $|I-J|$. Donc chaque niveau atomique est en réalité scindé en $2J+1$ niveaux (si $J < I$), ce qui donne la structure hyperfine. En comptant cette multiplicité de niveaux, on détermine le spin J du noyau, et, en mesurant le déplacement des raies dû à l'énergie W de chaque niveau atomique, on peut mesurer μH. Le champ H peut être calculé, et on en déduit μ. Les champs H créés au centre de l'atome par le noyau sont de l'ordre de 10^5 gauss, et les raies optiques sont déplacées d'une énergie de l'ordre de 10^{-7} eV. D'autres méthodes fondées sur les techniques de transitions résonnantes induites par un champ magnétique oscillant à une fréquence contrôlée sont également utilisées. En réalité, les déplacements observés des raies ne peuvent pas être complètement expliqués par l'énergie potentielle $W = -\mu H$ évoquée ci-dessus. On montre également que le gradient du champ électrique produit par les électrons de l'atome ajoute un terme supplémentaire à l'énergie potentielle, qui est proportionnel au *moment quadripolaire* Q du noyau. Le moment quadripolaire électrique est défini en fonction de la *distribution de charge* $\rho\,(x, y, z)$ ainsi :

$$Q = \int dx\,dy\,dz\,(2z^2 - x^2 - y^2)\,\rho\,(x, y, z)$$

L'énergie potentielle due au couplage du moment quadripolaire Q au gradient du champ électrique produit par les électrons peut être calculée, et l'observation du déplacement des raies permet ainsi de déterminer Q. D'autres méthodes utilisant par exemple l'excitation coulombienne du noyau sont aussi utilisées. Lorsque l'on ajoute un nucléon à un noyau à couches complètes, celui-ci se place sur une orbite du modèle des couches (*fig.* 4). Les moments magnétiques et quadripolaires du noyau devraient être égaux à celui du nucléon dans cette orbite, car le noyau à couches complètes a un moment cinétique nul. La même remarque s'applique aux noyaux à couches complètes dont on a ôté un nucléon pour former un trou.

fig. 5

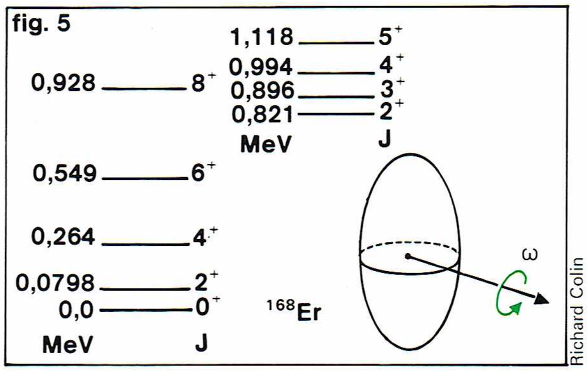

◀ *Figure 5 : spectre rotationnel du ^{168}Er; on voit deux bandes de rotation. D'autres niveaux ont été identifiés mais ils n'ont pas été portés sur la figure. Le ^{168}Er est un noyau déformé et son spectre correspond à une rotation de fréquence angulaire ω autour d'un axe perpendiculaire à son axe de symétrie.*

Le *tableau* III donne les valeurs observées pour quelques-uns de ces noyaux pair-impair, ainsi que la contribution du nucléon impair. On voit qu'il y a de sérieuses déviations de la prédiction du modèle des couches. On interprète ces déviations en invoquant la polarisation des couches complètes par le nucléon extérieur (*fig.* 6). D'après le modèle unifié, le nucléon extérieur modifie la forme du potentiel moyen, et la distribution de matière de la couche complète suit cette modification en se déformant à son tour.

▼ *Tableau III : les moments quadripolaires et magnétiques.*

Tableau III

Moments quadripolaires et magnétiques de noyaux ayant un nucléon en plus ou en moins d'une couche complète

Noyau	Orbite	Moment quadripolaire		Moment magnétique	
		Q_{orb}	Q_{obs}	μ_{orb}	μ_{obs}
$^{15}_{8}O_7$	$p^{-1}_{1/2}$			0,64	0,72
$^{17}_{8}O_9$	$d_{5/2}$	- 0,066	- 0,026	- 1,91	- 1,89
$^{39}_{19}K_{20}$	$d^{-1}_{3/2}$	- 0,052	- 0,09	0,12	0,39
$^{41}_{20}Ca_{21}$	$f_{7/2}$			- 1,91	- 1,59
$^{209}_{83}Pb_{126}$	$h_{9/2}$			2,62	4,08

La deuxième colonne indique l'orbite où est placé (ou d'où on a extrait) le nucléon impair (voir *figure* 4). L'indice −1 indique qu'il s'agit d'un trou.
Q_{orb} est le moment quadripolaire qu'aurait un proton dans l'orbite,
Q_{obs} est la valeur observée expérimentalement (en unités de 10^{-24} cm^2),
μ_{orb} est la valeur du moment magnétique d'un nucléon dans l'orbite,
μ_{obs} est la valeur mesurée en magnétons nucléaires (voir *tableau* I).

fig. 6

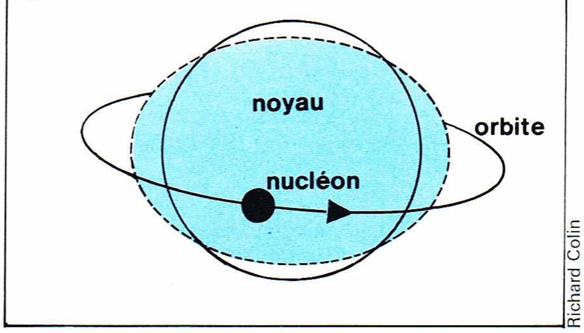

◀ *Figure 6 : un nucléon dans une orbite du modèle des couches peut polariser un noyau sphérique à couches complètes et augmenter ainsi le moment quadripolaire d'un noyau pair-impair.*

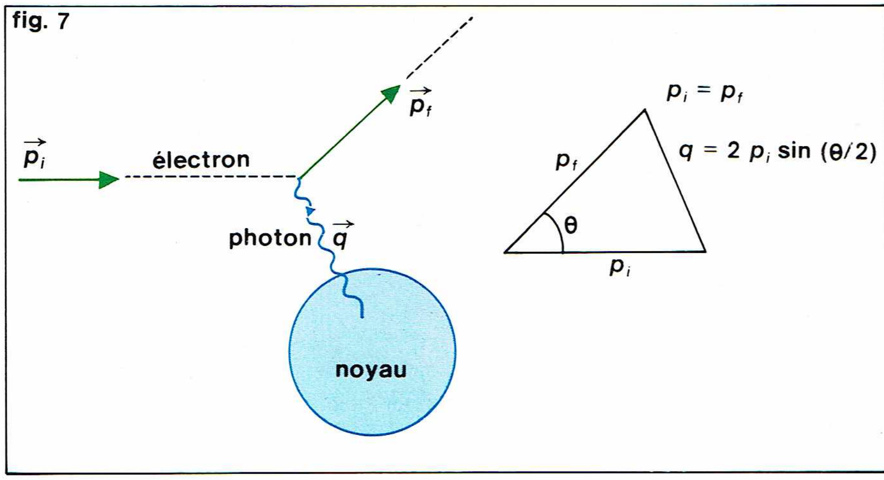

▲ *Figure 7 : un électron d'impulsion initiale $\vec{p_i}$ est diffusé par un noyau en échangeant avec lui un photon d'impulsion $\vec{q}$. L'électron acquiert alors une impulsion $\vec{p_f}$ et sa trajectoire est déviée d'un angle θ. L'échange d'un photon est équivalent à une interaction de Coulomb entre la charge de l'électron et la distribution de charge du noyau.*

La distribution de charge et de matière des noyaux

La dimension des noyaux est de l'ordre de 10^{-13} cm, c'est-à-dire inférieure de plusieurs ordres de grandeur à la longueur d'onde du rayonnement de la lumière visible ou des rayons X qui est de l'ordre de 10^{-8} cm. On ne peut donc pas « photographier » le noyau et des moyens indirects doivent être employés pour le « voir ». La méthode la plus fructueuse consiste à exposer le noyau à un faisceau d'électrons mono-énergétiques d'une énergie E de l'ordre de quelques centaines de MeV et à observer leur diffusion. A ces énergies, les électrons sont relativistes, et ils ont une impulsion $p_i = E/c$. Lorsqu'ils sont diffusés élastiquement (sans perte d'énergie) à un angle θ (*fig.* 7), ils échangent avec le noyau cible un photon dont l'impulsion est égale à $q = 2\ p_i \sin(\theta/2)$. On montre alors que la section efficace de diffusion de l'électron est :

$$\sigma(\theta) = \sigma_M(\theta)\ |F(q)|^2$$

Le premier facteur est la section efficace d'un électron sur une charge Ze ponctuelle, et on sait parfaitement la calculer. Le deuxième facteur est le carré de la transformée de Fourier de la distribution de charge $\rho(r)$

$$F(q) = \int dr\, r^2 \rho(r) \sin(qr)/qr$$

La *distribution de charge* $\rho(r)$ est égale à la quantité de charge électrique par unité de volume au point situé à une distance r du centre du noyau. On voit donc qu'en comptant le nombre d'électrons diffusés à un angle θ, on détermine non pas la densité de charge, mais sa transformée de Fourier F (q). On ne peut pas calculer $\rho(r)$ en fonction de F (q) sans connaître F (q) pour toutes les valeurs de q. Les valeurs de q sont limitées par l'énergie du faisceau incident : $q < 2$ E/c. Si q est assez grand, on peut néanmoins déterminer la densité de charge avec un détail de l'ordre de π/q. Pour résoudre un détail de l'ordre de 1 fm = 10^{-13} cm, il faut un faisceau d'électrons ayant une énergie d'environ 300 MeV, ce qui est parfaitement réalisable avec les accélérateurs actuels. Tout se passe comme si on avait « éclairé » le noyau par un rayonnement dont la longueur d'onde est $\lambda \simeq 2\pi/q$. Un microscope capable d'utiliser un rayonnement d'une longueur d'onde aussi courte permettrait de résoudre le même détail que cette diffusion d'électrons. A titre d'exemple, le facteur de forme mesuré du ^{58}Ni est montré sur la *figure* 8 ainsi que la distribution de charge qui rend le mieux compte de ces mesures. Les distributions de charge peuvent être représentées par la fonction :

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + e^{(r-R)/a}}$$

Au centre du noyau, la densité de charge est constante et égale à $\rho_0 = 0{,}08$ proton par fm^3 environ. La densité de charge a un rayon R $\simeq 1{,}2\ A^{1/3}$ et une épaisseur $a \simeq 0{,}54$ fm. D'autres renseignements sur la densité de charge nous sont fournis par le rayonnement des atomes mu-mésiques. Lorsqu'un méson-mu (méson μ) est arrêté dans la matière, il est capté par le champ électrique d'un noyau, et il se forme un atome mu-mésique. Le méson-mu a une masse 200 fois supérieure à celle de l'électron. Il en résulte qu'il décrira des orbites atomiques dont les rayons sont quelque 200 fois plus petits que ceux des électrons. L'orbite du méson peut même pénétrer un noyau lourd tel que le plomb. En s'approchant du noyau, le méson-mu cascade d'une orbite quantifiée à une autre, en émettant à chaque saut un rayon X que l'on peut observer. La fréquence ν du rayon X est égale à la différence $(E_1 - E_2)/h$ des énergies des orbites entre lesquelles le méson-mu effectue la transition. On sait calculer ces énergies à partir de la densité de charge $\rho(r)$ du noyau. Elles sont d'autant plus sensibles à la densité de charge que l'orbite est rapprochée du noyau. La mesure de la fréquence des rayons X nous donne des renseignements supplémentaires très précis sur la densité de charge.

La densité de neutrons est beaucoup plus difficile à mesurer, car il faut la sonder avec des interactions nucléaires moins bien connues. La plupart des mesures sont compatibles avec une densité de neutrons qui occupe le

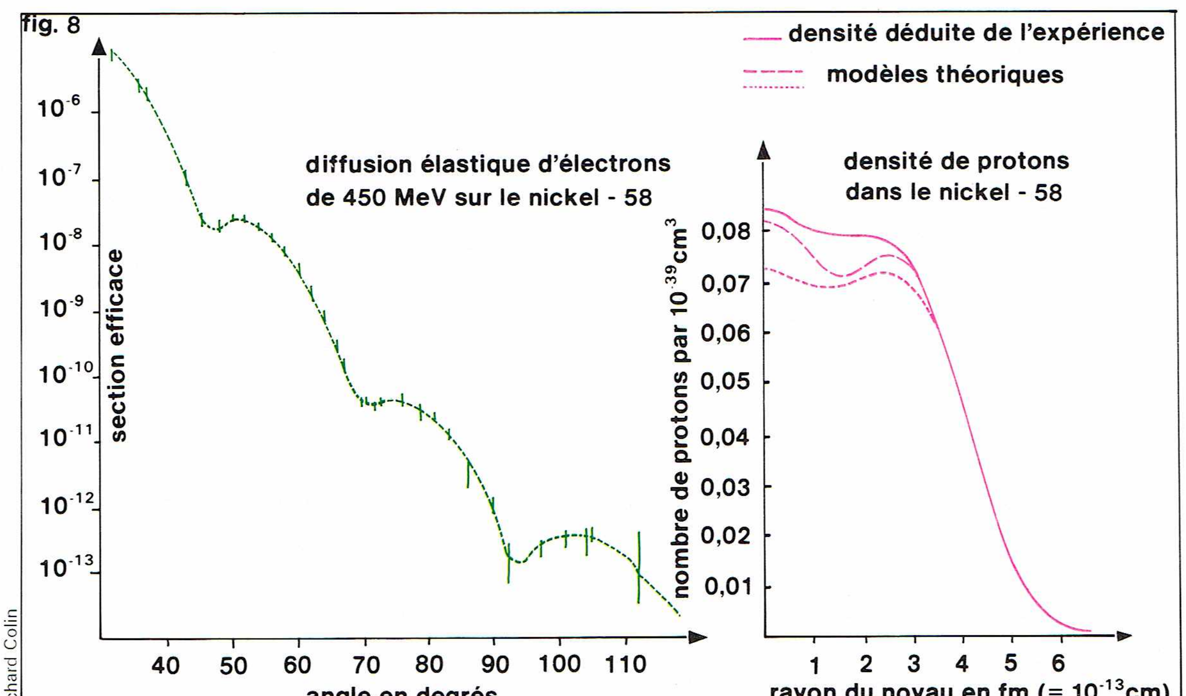

▶ *Figure 8 : section efficace de diffusion élastique d'électrons par le ^{58}Ni, en unités de barns par stéradian, mesurée à l'accélérateur linéaire d'électrons de Saclay (France). Sur la figure de droite, on a porté la densité de charge que l'on déduit de cette mesure de diffusion d'électrons ainsi que deux calculs théoriques de cette distribution de charge* (d'après Activités scientifiques et techniques, 1974, *publication du C.E.A.*).

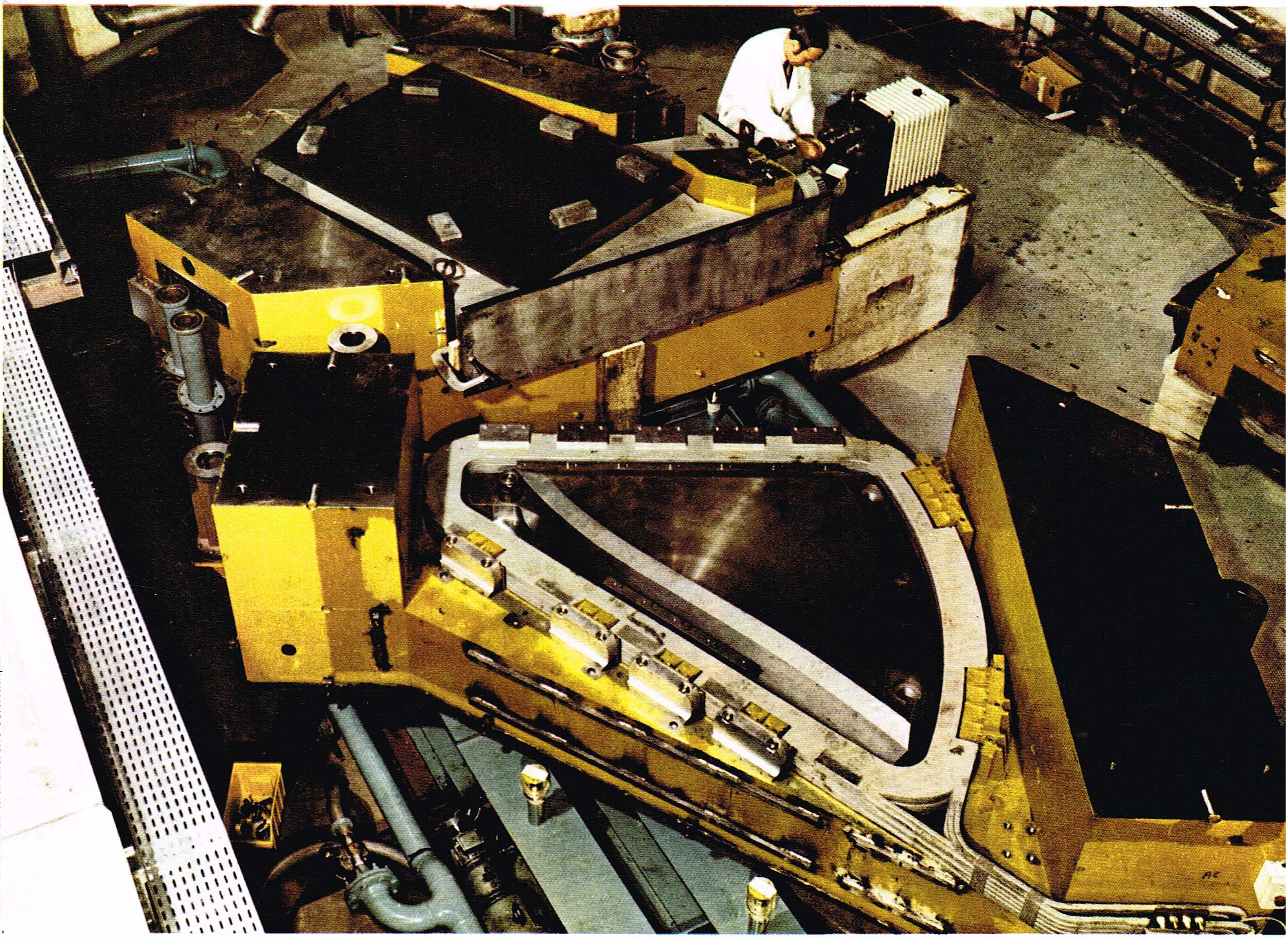

Centre de recherches nucléaires de Strasbourg - Centre national de la recherche scientifique

▲ ***Pièces polaires du spectromètre à haute résolution SPES II au cours du montage, au synchrotron à protons Saturne de Saclay (France).***

même volume que la densité des protons. Les mesures les plus précises actuellement sont faites en observant la diffusion de protons de 10^3 MeV. La précision des analyses de ces expériences ne fait pas encore ressortir une différence significative entre les densités de neutron et de proton.

La spectroscopie nucléaire

Il faut fournir au noyau une énergie de l'ordre du MeV, c'est-à-dire d'un million d'électrons-volts (*tableau* II) si on veut l'exciter. En absorbant cette énergie, le noyau peut effectuer une transition entre son **état fondamental** et un de ses nombreux **états excités.** L'inverse de ce processus est la *radio-activité :* un noyau dans un état excité peut perdre son énergie d'excitation en émettant un photon (radio-activité γ), un électron (radio-activité β), un ou plusieurs nucléons, une particule alpha (radio-activité α), etc. Il peut même se fissionner en un ou plusieurs morceaux. La détermination des états excités du noyau et l'étude de leurs propriétés sont l'objet de la *spectroscopie nucléaire*.

D'après la mécanique quantique, un noyau ne peut pas absorber une quantité arbitraire d'énergie. En effet, les énergies des états nucléaires sont quantifiées, c'est-à-dire qu'elles ne prennent que des valeurs discrètes bien déterminées (de l'ordre du MeV). Cependant, à cause du principe d'incertitude de Heisenberg, si un état nucléaire a un temps de vie τ (voir *La radio-activité*), l'énergie de cet état est entachée d'une incertitude $\Gamma \sim h/\tau$ où h est la constante de Planck. On dit que cet état a une *largeur* Γ. Les temps de vie τ et les largeurs correspondantes Γ peuvent prendre des valeurs très différentes selon la nature de l'état excité du noyau : par exemple, les états excités lors de l'absorption d'un neutron ont une largeur de l'ordre de 1 eV et donc un temps de vie de l'ordre de 10^{-18} s, tandis que certains états collectifs tels que la résonance géante dipolaire ont des largeurs de l'ordre de quelques MeV et des temps de vie de l'ordre de 10^{-21} s.

L'énergie qu'il faut fournir au noyau est un million de fois supérieure à celle des processus chimiques. C'est pour cela que la spectroscopie nucléaire a exigé la construction d'*accélérateurs de particules*, capables de fournir des faisceaux de protons, de deutons, de particules alpha et de noyaux plus lourds, ayant des énergies qui s'étalent depuis plusieurs MeV à quelques GeV ($= 10^3$ MeV). Les noyaux d'une cible sont alors excités au cours des collisions avec ces particules accélérées. Les accélérateurs sont traités dans le chapitre *Instrumentation nucléaire*.

L'ensemble des états excités d'un noyau constitue son *spectre*. Les spectres des noyaux sont en général très complexes, mais on peut cependant y trouver des régularités, surtout parmi les premiers états excités. C'est ainsi qu'un grand nombre de noyaux pair-pair (ceux qui ont un nombre pair à la fois de protons et de neutrons) présentent des états excités qui s'interprètent comme des *vibrations* de la surface (*fig.* 9). Ces vibrations sont très faciles à exciter par des projectiles au cours des réactions nucléaires, et elles correspondent aux modes normaux de vibration de la surface d'une goutte liquide. On a identifié les vibrations quadripolaires et octopolaires qui donnent lieu à des états excités de spin et de parité respec-

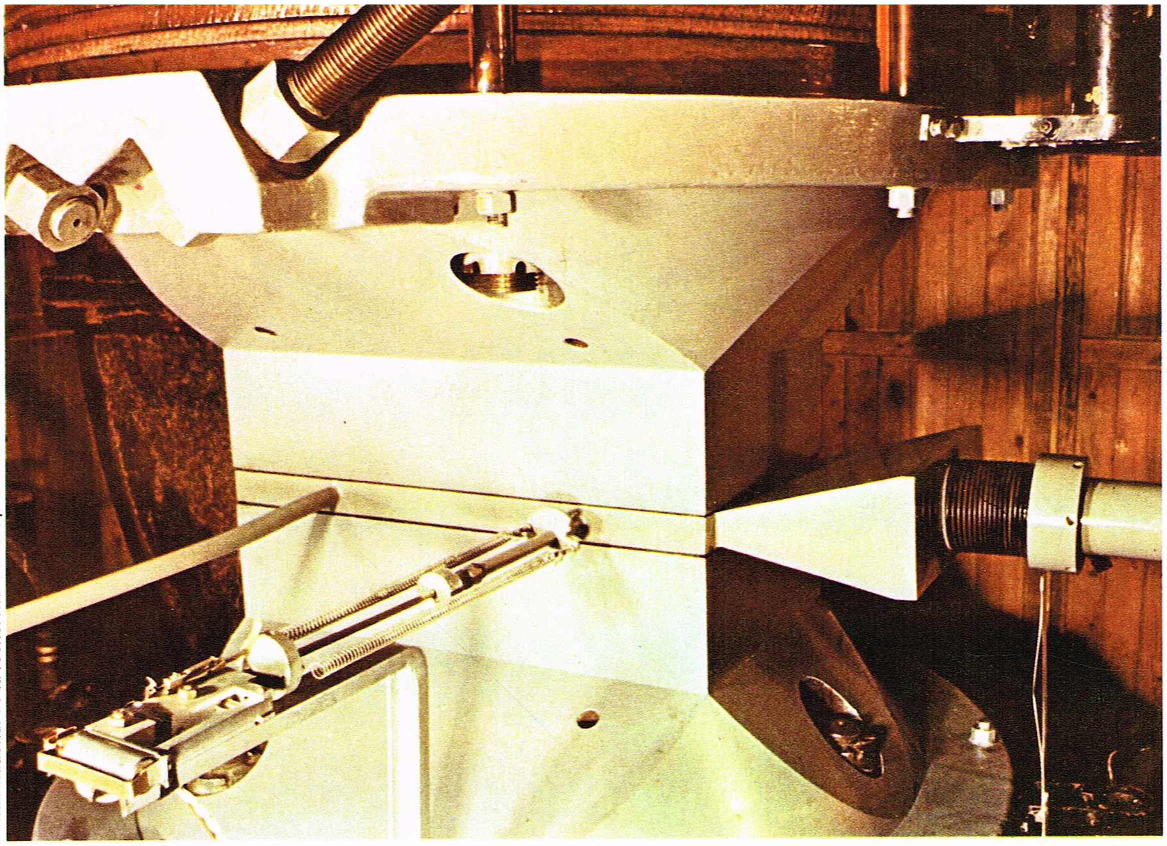

▶ *Grand spectrographe dans l'aimant permanent en service au centre de spectrométrie nucléaire et de masse d'Orsay.*
▼ *Ci-dessous, figure 9 : les modes de vibration quadripolaire et octopolaire, et la résonance géante dipolaire des noyaux pair-pair sphériques dans le modèle de la goutte liquide.*
En bas, figure 10 : représentation schématique du mécanisme d'excitation d'un noyau par un proton incident. Lors de l'interaction, celui-ci transfère une partie E_f — E_i de son énergie cinétique au noyau cible. L'absorption de cette quantité d'énergie par le noyau se traduit par le passage d'un nucléon de son orbite vers une orbite occupée d'énergie supérieure.

Centre de spectrochimie nucléaire et de masse d'Orsay - Centre national de la recherche scientifique

fig. 9

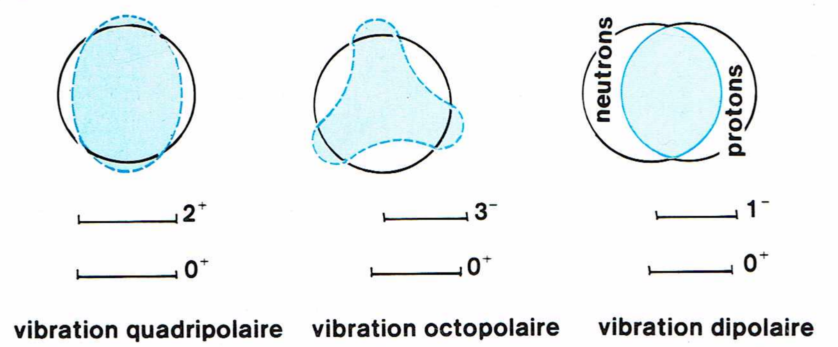

On a indiqué au-dessous l'état excité du noyau par rapport au fondamental O^+ qui correspond à chacun des modes de vibration.

Richard Colin

fig. 10

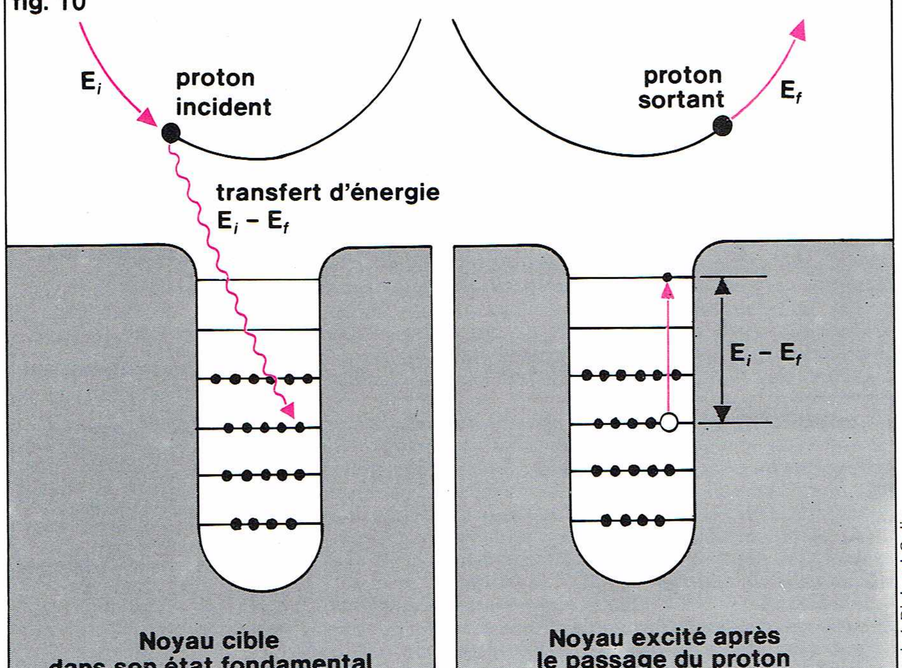

document *la Recherche*, n° 46, juin 1974, "la structure du noyau atomique" par G. Ripka et D. Isabelle.

redessiné Richard Colin

tivement égaux à 2^+ et 3^-. On a également identifié une vibration dipolaire, dite *résonance géante dipolaire*, qui est le mode de vibration le plus facilement excité par une interaction électromagnétique entre le projectile et le noyau cible. La résonance géante dipolaire correspond à une vibration de l'ensemble des protons en opposition de phase à l'ensemble des neutrons. Dans le modèle des couches, ces vibrations correspondent à des excitations dites « particule-trou », pour lesquelles le projectile entre en interaction avec la cible en excitant un nucléon d'une orbite occupée vers une orbite vide et en formant ainsi un état excité particule-trou (*fig.* 10).

On peut évidemment former des états excités plus complexes en excitant plusieurs nucléons vers des orbites inoccupées. Aussi les spectres nucléaires sont-ils très complexes dès que l'on atteint des énergies d'excitation de quelques MeV, et cela surtout pour les noyaux pair-impair (*fig.* 11).

L'établissement des spectres des noyaux, en particulier la détermination du spin et de la parité des niveaux, ainsi que leurs temps de vie et leurs modes de désexcitation radio-active, est un travail expérimental laborieux qui se poursuit depuis déjà quelques dizaines d'années.

On peut évaluer la **densité de niveaux**, c'est-à-dire le nombre n (E) dE d'états excités ayant une énergie comprise entre E et E + dE. D'après le modèle des couches, la densité de niveaux est égale à :

$$n\ (E) = \frac{1}{E\sqrt{48}} \exp\ [2\,\pi^2\, g(\varepsilon_F)\ E/3]^{1/2}$$

où g (ε_F) est l'inverse de l'espacement moyen des orbites du modèle des couches au voisinage de la dernière orbite occupée. On voit que la densité de niveaux augmente exponentiellement avec l'énergie d'excitation du noyau : aux énergies d'excitation de 8 MeV environ la densité de niveaux atteint quelques dizaines de milliers de niveaux par MeV.

La supraconductivité de la surface nucléaire

On peut montrer par un calcul que, dans les noyaux, il se forme des *paires de Cooper* entre les neutrons d'une part et les protons d'autre part, de sorte que la surface nucléaire est dans la phase supraconductrice. Cette prévision théorique n'est pas aisée à vérifier expérimentalement, car on ne sait pas induire des courants électriques dans les noyaux comme on le fait dans les métaux supraconducteurs.

Certaines propriétés sont cependant très sensibles à la supraconductivité du noyau, notamment les moments d'inertie des noyaux déformés (voir *Les noyaux déformés*). La supraconductivité abaisse le moment d'inertie d'un facteur 2 par rapport au moment d'inertie d'un corps

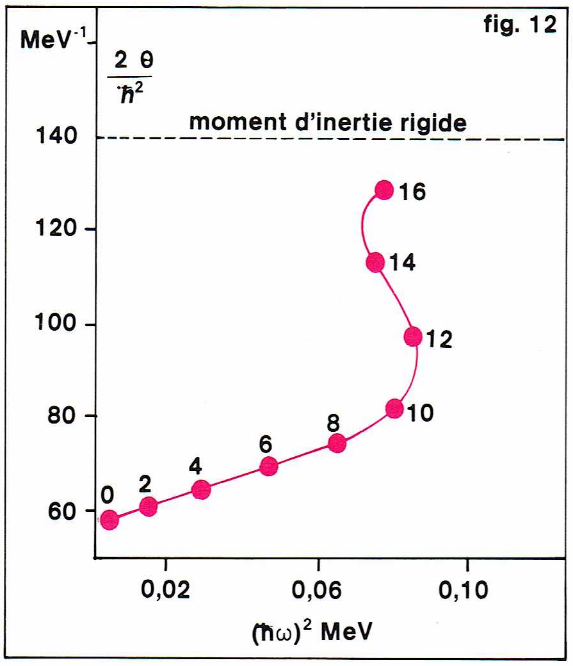

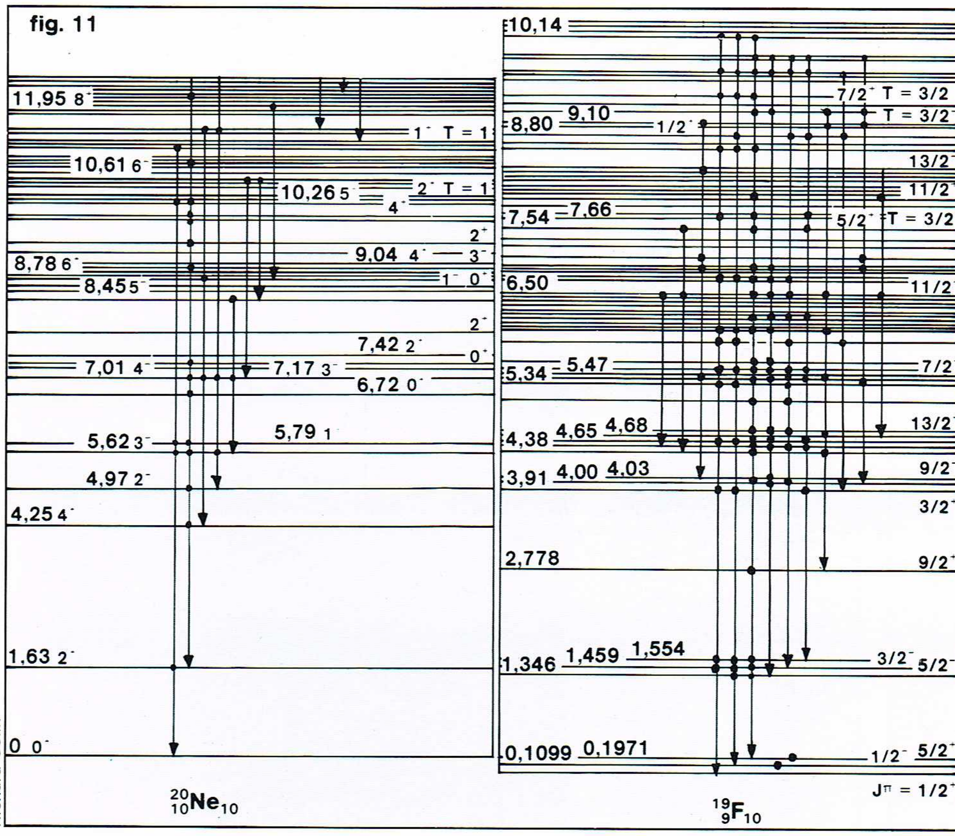

rigide. Ce phénomène peut être simulé par une expérience banale. Si l'on fait tourner brusquement un œuf cru sur une table, il s'arrête vite, car son contenu liquide n'a pas suivi en entier la rotation, et peu d'énergie de rotation a été emmagasinée. Par contre, un œuf cuit brusquement, soumis à une rotation, continuera à tourner, car, étant rigide à l'intérieur, toute sa masse subit la rotation, de sorte qu'une plus grande énergie de rotation est emmagasinée. L'œuf cuit a un moment d'inertie supérieur à celui d'un œuf cru qui imiterait un noyau dont une partie des nucléons est dans la phase supraconductrice.

Lorsqu'un noyau déformé tourne à une fréquence ω suffisamment grande, les forces de Coriolis et les forces centrifuges peuvent détruire la phase supraconductrice, et au cours de cette transition de phase le moment d'inertie augmente brusquement. Ce phénomène, observé dans un grand nombre de cas, constitue une des manifestations les plus dramatiques de la phase supraconductrice des noyaux (*fig.* 12). On spécule actuellement sur la possibilité de créer des courants de Josephson au contact de deux noyaux supraconducteurs, mais une telle expérience, qui pourrait servir à former des noyaux très riches en neutrons ou en protons, n'a pas encore été réalisée.

La fission, source de l'énergie nucléaire

La fission, qui est à l'origine de l'énergie nucléaire libérée dans les réacteurs et dans les armes nucléaires, est un processus au cours duquel un noyau se scinde en deux (et plus rarement trois) morceaux.

La formule de Weiszacker (voir page 235) prévoit qu'environ 200 MeV sont libérés lorsqu'un noyau lourd tel que le ^{240}Pu se fissionne en deux morceaux. Le modèle de la goutte liquide permet de comprendre pourquoi des noyaux tels que le ^{236}U ou le ^{240}Pu ne se fissionnent pas spontanément et instantanément. Considérons la manière dont varie l'énergie d'une goutte liquide uniformément chargée, lorsque celle-ci se déforme de plus en plus jusqu'à se scinder en deux morceaux (*fig.* 13). Aux faibles déformations, l'énergie commence par augmenter, car la surface augmente, mais, aux plus fortes déformations, cet effet est compensé par un gain en énergie électrostatique, les protons chargés positivement ayant tendance à s'éloigner les uns des autres. Il se forme ainsi une *barrière de fission* haute de 10 MeV environ (*fig.* 14). Le noyau doit franchir cette barrière pour fissionner, et il sera stable à moins qu'on ne lui fournisse l'énergie nécessaire pour franchir la barrière de fission. C'est ce qui se produit lorsqu'un noyau de ^{235}U, par exemple, absorbe un neutron. Le neutron est capturé dans le puits de potentiel du modèle des couches (voir *Le modèle des couches,* p. 236), et il communique ainsi au noyau l'énergie qui lui est nécessaire pour fissionner.

▲ Figure 12 : variation du moment d'inertie θ du noyau déformé ^{162}Er en fonction de la fréquence de rotation ω du noyau. Les nombres écrits sur la courbe indiquent le moment cinétique du noyau. On a également porté la valeur du moment d'inertie rigide. La brusque augmentation du moment d'inertie correspond à une transition de phase du noyau vers la phase normale.
Figure 11 : spectres du ^{20}Ne et du ^{19}F. L'énergie est donnée en MeV, et spin et parité sont indiqués pour les niveaux pour lesquels ils ont pu être identifiés. On remarquera la très grande densité de niveaux dès que l'énergie d'excitation atteint quelques MeV. Les flèches indiquent les transitions principales dues à la désexcitation par radio-activité gamma.

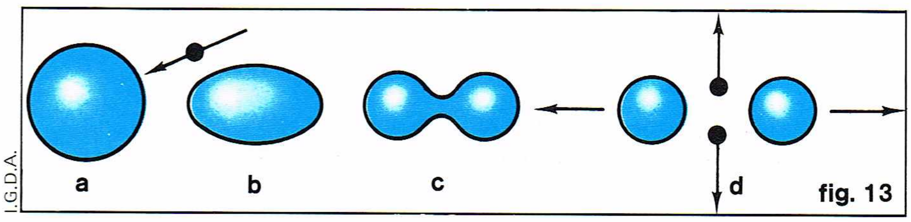

▲ Figure 13 : formes successives que prend un noyau qui subit une fission après avoir absorbé un neutron. Ces formes correspondent aux déformations croissantes des figures 14 et 15.

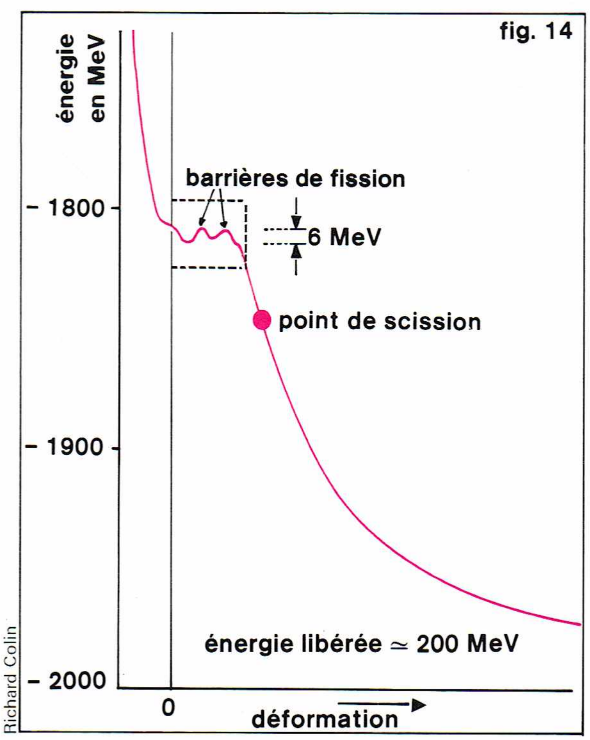

◀ Figure 14 : variation d'énergie du ^{240}Pu en fonction de sa déformation. La partie entourée d'un carré est agrandie sur la figure 15. Le point de scission représente la déformation à partir de laquelle le noyau se sépare en deux morceaux.

▶ *Représentation « idéalisée » (modèle) du noyau d'un atome d'uranium 235 (proportion : 92 protons, 143 neutrons).*

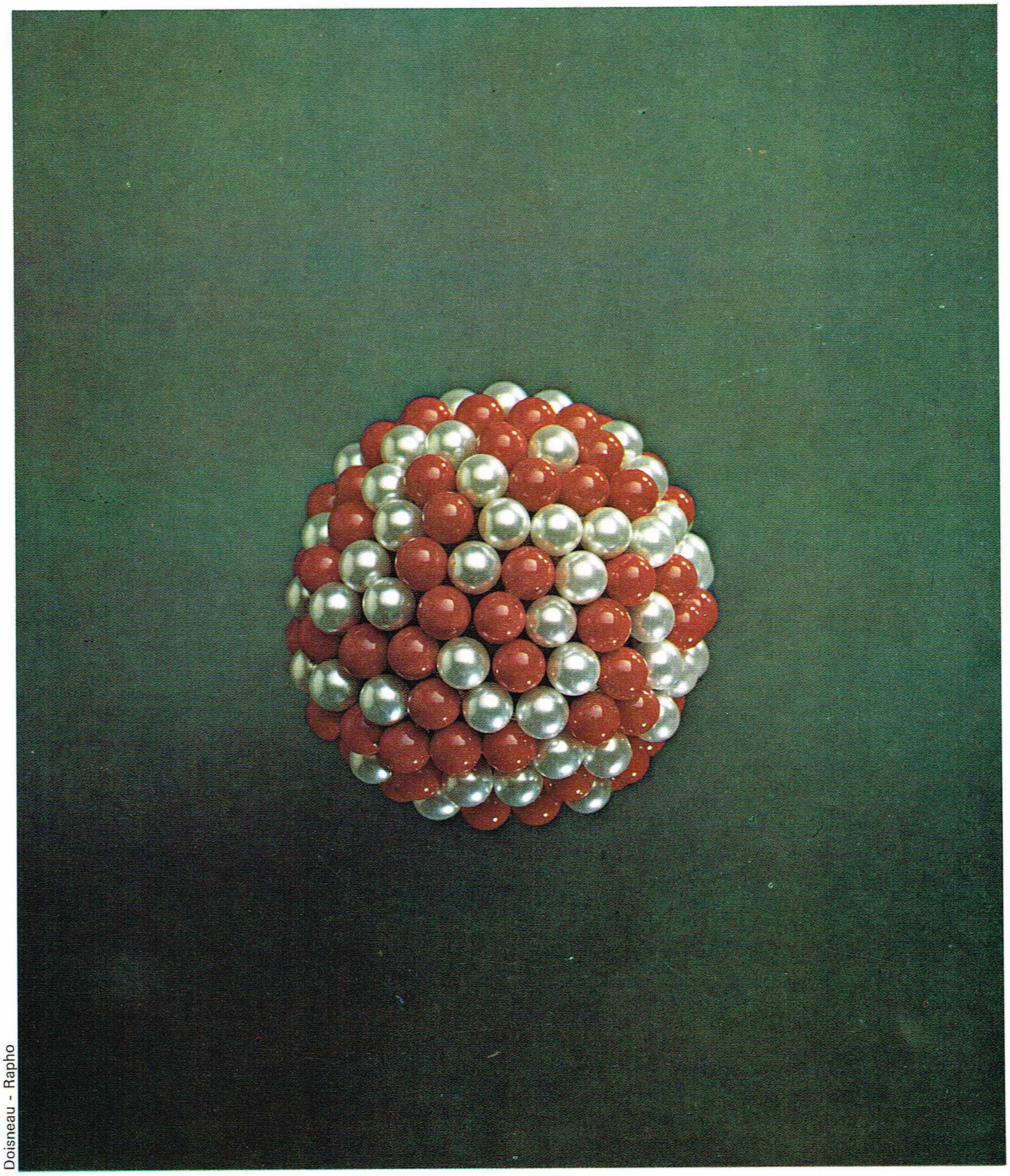

Doisneau - Rapho

▼ *Figure 15 : variation de l'énergie du ^{240}Pu en fonction de sa déformation (détail de la figure 14) montrant la double barrière de fission. Le modèle de la goutte liquide (trait hachuré) ne prévoit qu'une barrière de fission, tandis que, d'après les calculs dans le cadre du modèle unifié, deux barrières apparaissent (trait plein). En haut de la figure, on a indiqué les formes du noyau lors des déformations successives.*

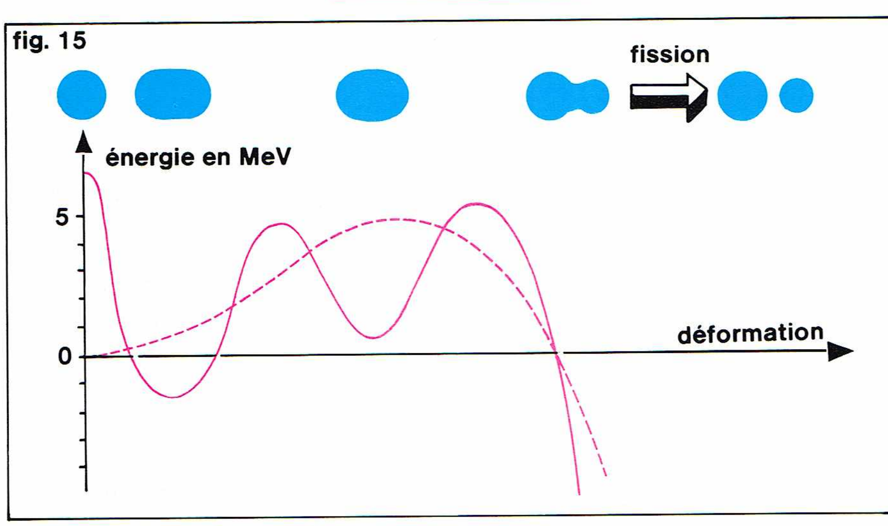

Richard Colin

Dans un matériau où des noyaux fissiles tels que le ^{235}U se trouvent en concentration suffisante, il peut se produire une **réaction en chaîne.** En effet, lorsqu'un neutron est absorbé par un noyau de ^{235}U, les produits de fission, à savoir les morceaux dans lesquels le noyau d'uranium s'est scindé, émettent des neutrons qui, à leur tour, provoquent la fission d'autres noyaux de ^{235}U, et ainsi de suite. Le réglage du taux de ces réactions en chaîne est un problème délicat de technologie nucléaire, et il sera traité dans le texte *Instrumentation nucléaire*.

Le modèle de la goutte liquide ne donne qu'une image grossière de la barrière de fission. D'après le modèle unifié (voir *Le modèle des couches et le modèle unifié*), à mesure que le noyau se déforme, le potentiel moyen dans lequel sont captés les nucléons se déforme à son tour, et les orbites des nucléons changent également. En calculant l'énergie des nucléons dans les orbites d'un potentiel de plus en plus déformé, on trouve que le ^{240}Pu a non plus une, mais deux barrières de fission (*fig.* 15). La découverte expérimentale et l'explication théorique de cette double barrière de fission forment une des preuves les plus remarquables du modèle unifié des noyaux.

Un noyau ne se fissionne pas nécessairement en deux morceaux identiques. La *fission asymétrique*, c'est-à-dire la fission d'un noyau en deux morceaux de masse inégale, est très fréquente (*fig.* 16). La fission asymétrique ne peut pas non plus s'expliquer par le modèle de la goutte liquide, mais exige un calcul semblable à celui qui explique la double barrière de fission.

La fusion, source de l'énergie solaire

Le processus inverse de la fission est la fusion de deux noyaux en un noyau plus lourd.

La formule de Weiszacker montre que de l'énergie sera libérée si l'on fusionne deux *noyaux légers* de masse atomique inférieure à 20 environ. Le Soleil et les bombes à hydrogène trouvent leur source d'énergie dans le processus de fusion. Un effort très considérable est actuellement fourni pour pouvoir contrôler des réactions de fusion pour en faire une source d'énergie sur terre.

A la surface du Soleil se produit une suite de réactions nucléaires qui dégagent chacune de l'énergie et qui forment ce qu'on appelle un *cycle solaire*. Il y a deux cycles solaires principaux qui sont illustrés sur le *tableau* IV.

Le premier, dit *cycle de carbone*, a pour effet de combiner quatre protons (^1H) pour former une particule alpha (un noyau de ^4He) et de libérer environ 26 MeV d'énergie. Les neutrinos émis au cours de ces réactions s'échappent du Soleil. Dans ce cycle, le ^{12}C est récupéré à la fin et ne sert donc que de catalyseur.

Le second cycle représente une autre manière de former une particule alpha avec quatre protons.

La radio-activité

Certains noyaux peuvent libérer de l'énergie en émettant une particule alpha (noyau de ^4He), un électron, un positon ou encore un rayon gamma. Ce processus porte le nom de *radio-activité*. La radio-activité est un des exemples très rares où le noyau manifeste spontanément son existence. Sa découverte par Becquerel en 1896 peut être considérée comme le début de la physique nucléaire. Bien que les radio-activités alpha (émission de noyaux de ^4He), bêta (émission d'électrons ou de positons) et gamma (émission de radiation électromagnétique sous forme de photons) soient des processus très différents que nous décrirons plus loin, la radio-activité d'un ensemble de noyaux dans un morceau macroscopique de matière suit des lois statistiques qui sont indépendantes de leur mode de désintégration.

Soit N (0) le nombre de noyaux radio-actifs d'un échantillon au temps $t = 0$. Au temps t ultérieur, le nombre N (t) de noyaux radio-actifs aura décru selon la loi :

$$N(t) = N(0)\, e^{-t/\tau}$$

où τ est la **vie moyenne** du noyau radio-actif.

Cette loi exprime le fait que chaque noyau radio-actif a une égale probabilité de se désintégrer par radio-activité. On cite souvent la **période** ou encore la **demi-vie** T du noyau. La période T est reliée à la vie moyenne par l'équation :

$$T = \tau \log 2 = 0{,}693\,147\ \tau$$

On appelle enfin **activité** d'un échantillon le nombre de noyaux qui se désintègrent par unité de temps. L'unité de l'activité est le curie, noté Ci : 1 Ci = $3{,}7 \cdot 10^{10}$ désintégrations par seconde.

La vie moyenne ou la période d'un élément radio-actif peut être mesurée en observant la décroissance exponentielle de l'activité d'un échantillon. Inversement, la connaissance de la période d'un noyau permet parfois de déterminer l'âge d'un objet. Considérons, par exemple, la méthode de datage par le carbone. Les rayons cosmiques produisent continuellement dans l'atmosphère du ^{14}C qui est un isotope radio-actif du carbone dont la période est T = 5 570 années. Le ^{14}C se combine chimiquement avec l'oxygène et devient partie intégrante des tissus organiques. Ainsi, au moment de leur formation, les tissus animaux et végétaux ont la même distribution isotopique (rapport du nombre de noyaux de ^{14}C au nombre de noyaux stables de ^{12}C) que l'atmosphère. Mais au cours du temps, le nombre de noyaux de ^{14}C diminue par radio-activité. De vieux échantillons, tels que le charbon ou le pétrole, dont l'âge dépasse beaucoup

fig. 16

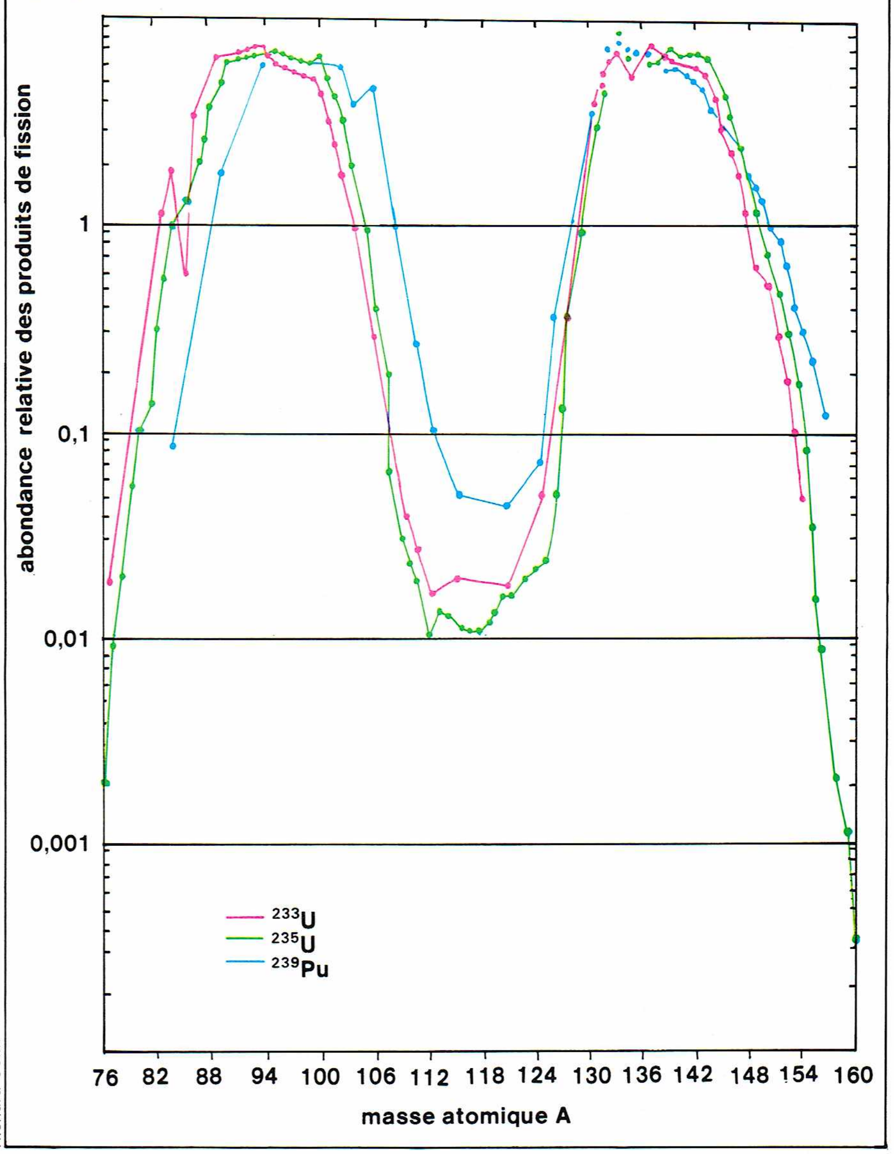

▲ *Figure 16 : abondance relative (en %) des produits de fission des trois noyaux ^{233}U, ^{235}U et ^{239}Pu en fonction de leur masse atomique A. On voit que, pour ces trois noyaux, le modèle de fission le plus probable est en deux morceaux de masse inégale : c'est le phénomène de fission asymétrique.*

▼ *Tableau IV : les deux cycles du Soleil.*

Tableau IV

Les deux cycles du soleil

Réaction	Énergie dégagée	Temps moyen de la réaction
$^{12}C + {}^1H \rightarrow {}^{13}N + \gamma$	1,93 MeV	10^6 années
$^{13}N \rightarrow {}^{13}C + e^+ + \nu + \gamma$	1,20 MeV	10 minutes
$^{13}C + {}^1H \rightarrow {}^{14}N + \gamma$	7,60 MeV	$2 \cdot 10^5$ années
$^{14}N + {}^1H \rightarrow {}^{15}O + \gamma$	7,39 MeV	$< 3 \cdot 10^7$ années
$^{15}O \rightarrow {}^{15}N + e^+ + \nu + \gamma$	1,71 MeV	2 minutes
$^{15}N + {}^1H \rightarrow {}^{12}C + {}^4He$	4,99 MeV	10^4 années
$^1H + {}^1H \rightarrow {}^2H + e^+ + \nu$	0,41 MeV	$7 \cdot 10^9$ années
$^2H + {}^1H \rightarrow {}^3He + \gamma$	5,51 MeV	4 secondes
$^3He + {}^3He \rightarrow {}^4He + 2\,{}^1H + \gamma$	12,98 MeV	$4 \cdot 10^5$ années

▶ *Page ci-contre, en haut, figure 18 : énergie potentielle d'une particule alpha en fonction de sa distance R au centre du noyau ayant Z protons. Aux grandes distances, la particule alpha ne sent que la répulsion coulombienne 2 Ze²/R. Aux distances inférieures au rayon R du noyau, elle sent un potentiel attractif dû aux forces nucléaires. Une particule alpha dont l'énergie E est inférieure à la barrière coulombienne peut la pénétrer en R₁ et ressortir en R₂ par effet tunnel.*

▼ *Figure 17 : famille de noyaux radio-actifs correspondant à la désintégration des ^{238}U. Les radio-activités bêta et alpha sont indiquées par les symboles, β et α, et les périodes sont indiquées en années (a), jours (j), ou secondes (s) [d'après E. Segré,* Nuclei and Particles, *W.A. Benjamin, 1965].*

la période T = 5 570 années, ont déjà perdu tout leur ^{14}C. D'autres ont une distribution isotopique dont la mesure permet de déterminer l'âge de l'objet. Cette méthode, qui ne peut servir à mesurer des âges supérieurs à 30 000 années, a beaucoup servi l'archéologie, par exemple.

L'âge des roches peut aussi parfois être déterminé en mesurant le ^4He formé par la radio-activité des traces de ^{238}U que contenait la roche au moment de sa formation, à condition toutefois que cet hélium ne se soit pas échappé de la roche. Les roches terriennes les plus anciennes ainsi datées ont un âge d'environ $2,7 \cdot 10^9$ années. L'âge des météorites les plus anciennes est d'environ $4,5 \cdot 10^9$ années. On pense que cela doit être environ l'âge de la Terre.

Un noyau radio-actif peut se transformer soit en un noyau stable, soit en un noyau également radio-actif. Dans ce dernier cas, on dit qu'il est le *noyau parent* du nouveau noyau radio-actif. Ce dernier est à son tour parent d'un autre noyau, et ainsi de suite. On forme ainsi des *familles de noyaux radio-actifs* qui se désintègrent successivement les uns dans les autres, la famille se terminant sur un noyau stable.

La *figure* 17 montre la famille de noyaux naturellement radio-actifs qui commence par le ^{238}U et qui se termine par le ^{206}Pb.

La radio-activité alpha

Un noyau excité artificiellement au cours d'une réaction nucléaire peut se désexciter en émettant des particules lourdes telles qu'un neutron, un proton, un deuton, une particule alpha, etc. Par contre, les noyaux naturellement radio-actifs émettent soit des particules alpha, soit des électrons (radio-activité bêta), soit encore des photons (radio-activité gamma). La particule alpha est un noyau de ^4He composé de deux neutrons et de deux protons. Elle est un des noyaux les plus stables, c'est-à-dire des plus difficiles à exciter ou à casser. C'est pourquoi l'émission d'une particule alpha est souvent énergétiquement possible alors que l'émission d'un proton ou d'un neutron ne l'est pas, ce qui peut être vérifié sur la formule de Weiszacker.

Les vies moyennes des noyaux radio-actifs qui émettent des particules alpha varient de quelque $3 \cdot 10^{-7}$ seconde pour le ^{217}Po à $4,5 \cdot 10^9$ années pour le ^{238}U. Cette étonnante variété des vies moyennes peut s'expliquer par le **modèle de Gamov,** qui fait appel à l'**effet tunnel** qui résulte de la mécanique quantique et qui n'a pas d'équivalent en mécanique classique. Dans ce modèle, on imagine que la particule alpha préexiste dans le noyau, et on considère son énergie potentielle en fonction de sa distance R au centre du noyau (*fig.* 18). Les forces nucléaires étant de courte portée, à grande distance le potentiel se réduit à celui de la répulsion 2 Ze²/R coulombienne. A l'intérieur du noyau, les forces nucléaires, plus fortes que les forces électromagnétiques, créent un puits de potentiel dans lequel la particule alpha est captée. D'après la mécanique classique, la particule alpha resterait indéfiniment capturée dans le puits de potentiel, mais, d'après la mécanique quantique, la particule alpha a une probabilité de traverser la barrière de potentiel ; dans ce cas, on dit qu'elle s'est échappée par effet tunnel. On montre que ce processus donne au noyau une vie moyenne T qui se calcule par l'expression :

$$\frac{1}{T} = \log 2 \frac{v_0}{R} e^{-2G} \quad \text{où} \quad G = \sqrt{\frac{2M}{\hbar^2}} \int_{r_1}^{r_2} dr \sqrt{V(r) - E}$$

Dans cette expression, v_0 est la vitesse moyenne de la particule dans le puits, R le rayon du puits, M et E la masse et l'énergie de la particule alpha, V (r) la forme du potentiel (*fig.* 18), et les distances r_1 et r_2 sont les points d'entrée et de sortie de la barrière de potentiel. Pour une particule alpha émise avec une énergie E d'un noyau ayant Z protons, l'expression ci-dessus peut être représentée par la loi :

$$\log_{10} T = 1{,}61 \, (Z E^{-1/2} - Z^{2/3}) - 28{,}9$$

où T est exprimé en années et E en MeV. On voit que la variation de la vie moyenne est exprimée sur une échelle logarithmique, ce qui explique l'étonnante échelle des valeurs des temps de vie observées. Puisque les vies moyennes atteignent l'ordre de grandeur de l'âge de la Terre, il subsiste dans la nature quelques noyaux qui, après leur formation, n'ont pas encore eu le temps de se désintégrer, d'où la radio-activité naturelle. D'un autre côté, au cours des explosions nucléaires ainsi que dans les réacteurs, on forme des noyaux radio-actifs, dont les vies moyennes s'étendent sur des milliers d'années, et qui sont donc une source de pollution particulièrement dangereuse.

La radio-activité bêta

La radio-activité bêta naturelle est un processus au cours duquel un noyau émet un électron e^- et un **antineutrino** $\bar{\nu}$, tandis qu'un de ses neutrons se transforme en un proton. La *figure* 17 en montre plusieurs exemples, notamment :

$$^{210}_{83}Bi_{127} \rightarrow {}^{210}_{84}Po_{126} + e^- + \bar{\nu}$$

La radio-activité bêta des noyaux a un intérêt scientifique de première importance, car elle a servi à découvrir le **neutrino** ν, et elle met en évidence la *non-conservation de la parité*. En outre, la plupart des découvertes concernant les interactions faibles ont été faites en étudiant la radio-activité bêta des noyaux. Le neutron lui-même est instable par rapport à la radio-activité bêta, car il se désintègre en un proton, un électron et un antineutrino avec une vie moyenne de 17 minutes et en libérant environ 0,8 MeV d'énergie :

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$$

Un *neutrino* est une particule de spin $\frac{1}{2}$, de masse nulle et de charge nulle. Il emporte une partie de l'énergie et du moment cinétique libérés par la désintégration bêta.

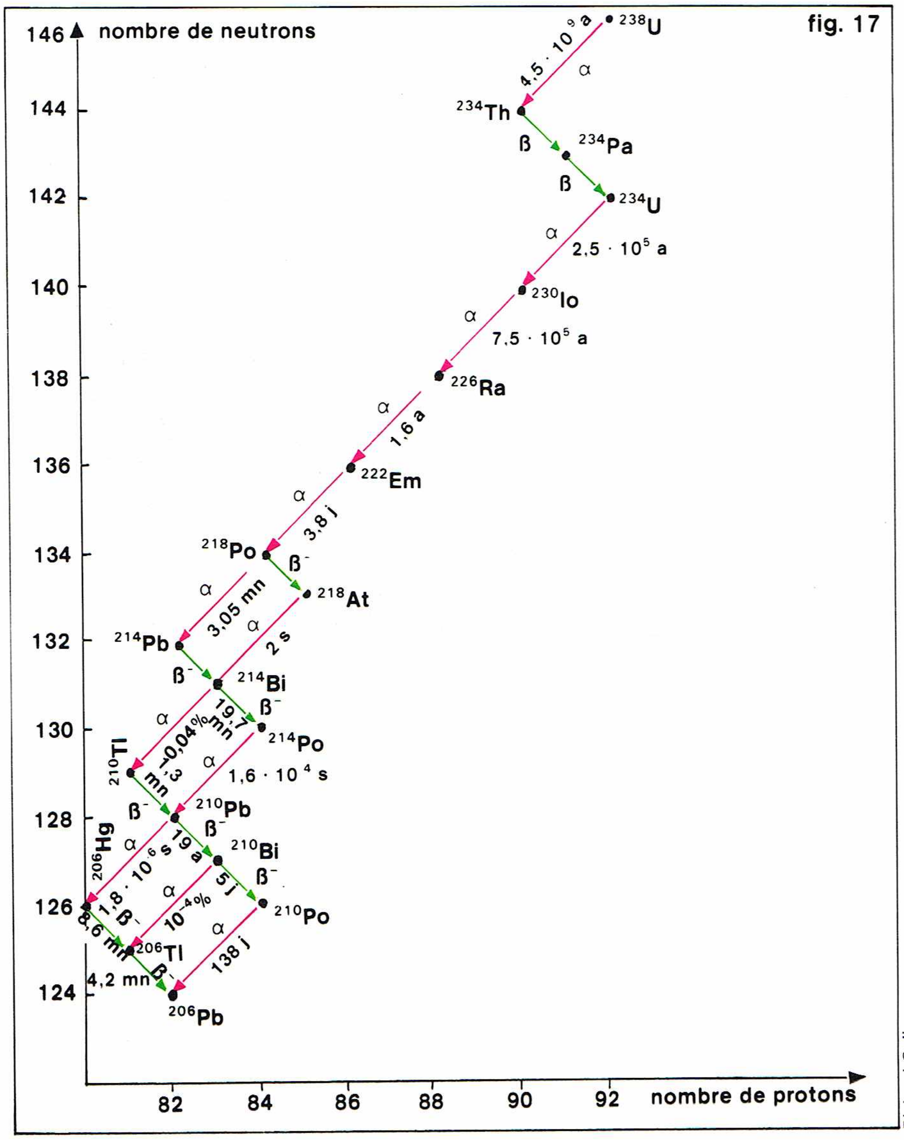

Richard Colin

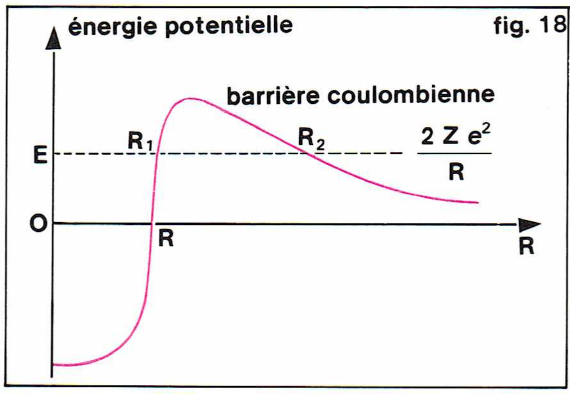

Richard Colin

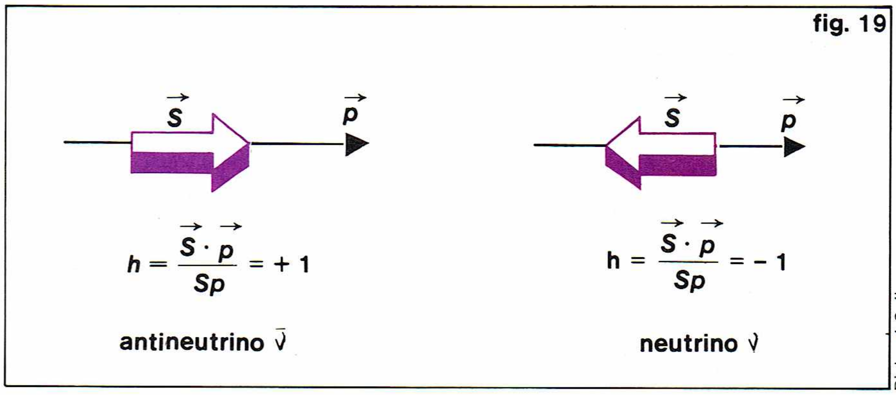

Richard Colin

C'est essentiellement en mesurant le bilan d'énergie et de moment cinétique que Pauli postula dès 1930 l'existence du neutrino qui traversait les compteurs de particules sans les déclencher et qui ne pouvait donc pas être directement observé. Le neutrino est distinct de l'antineutrino.

Un neutrino est une particule émise lors de la radio-activité β^+ au cours de laquelle un positon e^+ (l'antiélectron) est émis par un noyau qui transforme un de ses protons en un neutron. Par exemple :

$$^{11}_{6}C_5 \rightarrow {}^{11}_{5}B_6 + e^+ + \bar{\nu}$$

L'existence du neutrino a été confirmée par l'observation du mécanisme inverse de la radio-activité bêta, à savoir l'absorption des antineutrinos par des protons : $\bar{\nu} + p \rightarrow e^+ + n$. On a également vérifié expérimentalement que le neutrino et l'antineutrino sont des particules distinctes. On a vérifié que l'antineutrino a son spin toujours aligné parallèlement à son impulsion et que le neutrino a son spin toujours aligné antiparallèlement à son impulsion (*fig.* 19). On dit que les ***hélicités h*** de ces deux particules sont opposées : pour l'antineutrino $h = +1$ et pour le neutrino $h = -1$.

Le fait qu'un antineutrino (ou un neutrino) est toujours émis avec une hélicité donnée a été découvert en 1960 et a constitué la découverte capitale que la *parité* n'est pas conservée au cours d'une désintégration bêta. En effet, l'hélicité permet de distinguer un antineutrino de son image dans un miroir, car l'image miroir de l'hélicité change de signe (*fig.* 20).

La radio-activité bêta et, en général, les interactions faibles sont les premiers processus physiques découverts ne conservant pas la parité.

La théorie de la radio-activité bêta est assez bien connue, et on peut l'utiliser pour étudier la spectroscopie nucléaire. Inversement, la radio-activité bêta des noyaux a servi à établir la théorie des interactions faibles des particules élémentaires.

Ajoutons enfin qu'en plus du neutrino ν et de l'antineutrino $\bar{\nu}$, il existe aussi un neutrino distinct ν_μ ainsi que son antiparticule $\bar{\nu}_\mu$. Le neutrino ν_μ est émis lors des réactions où le méson-mu intervient à la place de l'électron, par exemple : $\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu$.

La radio-activité gamma

Un noyau dans un état excité d'énergie E_1 peut effectuer une transition vers un état d'énergie inférieure E_2, en émettant un photon dont la fréquence ν et l'énergie $h\nu$ sont données par la relation $h\nu = E_1 - E_2$ (voir cependant les effets de recul discutés plus loin). Le photon est un quantum de radiation électromagnétique. Les radiations électromagnétiques émises par les noyaux ont des longueurs d'onde de l'ordre de 10^{-10} à 10^{-11} cm, donc environ 100 à 1 000 fois plus petites que celles des rayons X. Elles portent le nom de *rayons gamma*. Inversement, un noyau dans son état fondamental E_0 peut absorber un photon d'énergie $h\nu = E_1 - E_0$ et faire une transition vers un état excité d'énergie E_1. L'observation des rayons gamma émis par les noyaux constitue un des outils les plus précieux de la spectroscopie nucléaire. En effet, la mesure de l'énergie des rayons gamma donne la différence entre les énergies des états initial et final du noyau. En outre, lorsque le noyau est excité au préalable par un faisceau de particules incidentes (voir *Les réactions nucléaires,* p. 247), on peut mesurer la *distribution*

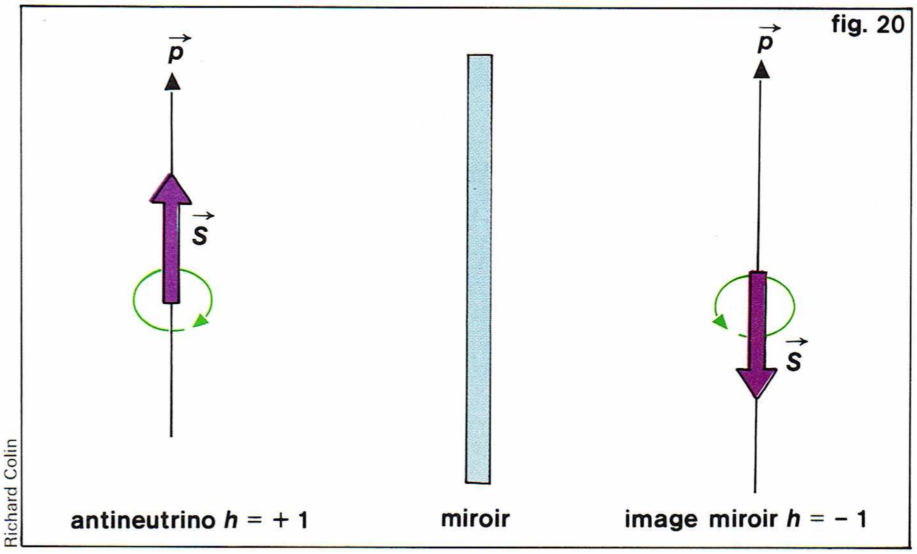

Richard Colin

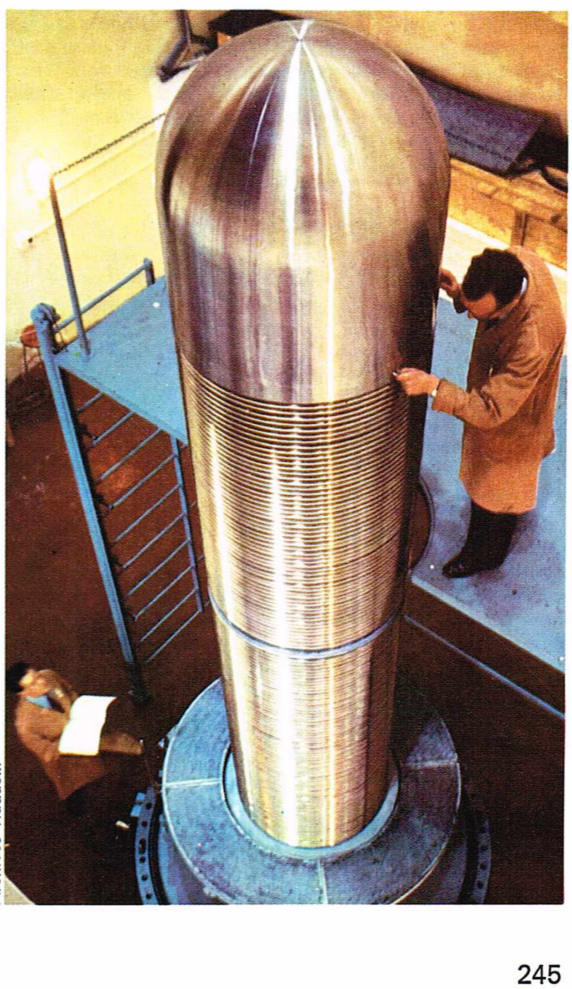

Archives Radaelli

▲ Figure 19 : le neutrino (antineutrino) a toujours son spin S antiparallèle (parallèle) à son impulsion p. On dit qu'il a une hélicité h égale à — 1 (+ 1). C'est l'hélicité qui distingue le neutrino de son antiparticule, l'antineutrino. Figure 20 : l'image miroir d'un antineutrino d'hélicité h = + 1 est une particule d'hélicité h = — 1. Au cours d'une radio-activité β⁻, c'est toujours un antineutrino d'hélicité h = + 1 qui est émis, de sorte que l'image miroir de cet événement ne se produit jamais : la parité est violée au cours de cette radio-activité.

◄ Accélérateur Van de Graaff du laboratoire de l'UKAEA à Aldermaston.

angulaire, c'est-à-dire la distribution des rayons gamma émis à des angles différents par rapport au faisceau incident. Cette distribution angulaire peut souvent servir à déterminer le spin d'un des niveaux entre lesquels s'effectue la transition.

Les rayons gamma sont émis par les courants électriques produits par les protons, ainsi que par les courants magnétiques produits aussi bien par les neutrons que par les protons. Le mécanisme d'absorption et d'émission de photons est très bien connu, car il fait intervenir l'électromagnétisme dont on connaît bien la théorie. En mesurant le taux d'émission des rayons gamma, on peut en tirer des renseignements précieux sur les fonctions d'onde des états entre lesquels le noyau effectue des transitions.

Au lieu de libérer de l'énergie en émettant un photon, le noyau peut parfois transmettre son énergie directement à un des électrons qui gravite autour du noyau de l'atome, par un processus qui s'appelle l'**effet Auger.** Les électrons émis au cours de ce processus sont appelés *électrons de conversion interne*, et ils ne doivent pas être confondus avec les électrons qui sont émis par la radioactivité bêta et qui sont émis en même temps qu'un neutrino.

La *fluorescence nucléaire* n'est, en général, pas observée. Rappelons que la fluorescence est un phénomène qui est fréquemment observé en physique atomique et qui consiste à absorber par un système un photon émis par un autre système identique au premier. En effet, si un noyau émet un photon en se désexcitant d'un état d'énergie E_1 vers son état fondamental d'énergie E_0, un autre noyau, identique au premier, devrait pouvoir absorber ce photon pour faire une transition vers l'état excité d'énergie E_1. Cependant, le photon émis a une impulsion $p = h\nu/c$ de sorte que le noyau recule, et il acquiert une énergie cinétique $p^2/2\,M$, où M est sa masse. L'énergie libérée $E_1 - E_0$ doit donc servir à donner au photon son énergie $h\nu$ et au noyau son énergie cinétique de recul, de sorte que :

$$E_1 - E_0 = \frac{p^2}{2\,M} + h\nu \quad \textit{émission}$$

L'énergie du photon est donc inférieure de $p^2/2\,M$ à $E_1 - E_0$.

De même, lorsqu'un noyau absorbe un photon de fréquence ν, l'impulsion du photon l'oblige à reculer, de sorte que l'énergie $h\nu$ du photon doit servir à la fois à l'exciter de l'état fondamental d'énergie E_0 à l'état excité d'énergie E_1 et à lui donner une énergie cinétique $p^2/2\,M$. On a donc :

$$h\nu = E_1 - E_0 + \frac{p^2}{2\,M} \quad \textit{absorption}$$

On voit que l'énergie du photon émis est inférieure d'une quantité $\frac{p^2}{M} = \frac{\hbar^2\nu^2}{Mc^2}$ à l'énergie nécessaire pour que le photon puisse être absorbé, et la fluorescence ne peut donc pas se produire. En général, cette différence est supérieure à la largeur naturelle Γ du niveau excité, celle-ci étant reliée à son temps de vie τ par la relation $\Gamma = h/\tau$.

Il y a cependant un cas où la fluorescence peut avoir lieu : lorsque les noyaux appartiennent à un réseau cristallin, leur énergie est quantifiée, et en général ils ne peuvent pas absorber une énergie inférieure à une énergie critique E_c. Si cette énergie est très supérieure à l'énergie de recul $\hbar^2\nu^2/Mc^2$, le recul provoqué par l'émission du photon doit être partagé par tout le cristal qui a une masse quasi infinie et qui n'a donc pas d'énergie cinétique de recul. La fluorescence nucléaire peut donc avoir lieu entre deux noyaux implantés dans un réseau cristallin. Elle porte alors le nom d'**effet Mössbauer.** Les énergies des photons sont tellement fines qu'une vitesse relative de quelques dixièmes de millimètre par seconde entre le cristal absorbeur suffit parfois à détruire l'effet Mössbauer. En effet, la vitesse relative change la fréquence du photon émis à cause de l'effet Doppler.

Les réactions nucléaires

Mis à part le phénomène de radio-activité naturelle, le noyau ne se manifeste guère, car il est au centre de l'atome entouré par un nuage d'électrons environ 10 000 fois plus étendu que lui. Presque toutes les connaissances que nous possédons du noyau viennent de l'étude des *réactions nucléaires*. Celles-ci sont produites lors du bombardement d'une cible par des projectiles accélérés à des énergies suffisantes pour pénétrer le nuage d'électrons et pour perturber le noyau, en l'excitant par exemple. Sauf pour les neutrons, les projectiles chargés électriquement peuvent donc être accélérés par des accélérateurs de particules (tandems, cyclotrons, accélérateurs linéaires, synchrotrons, etc.) à des énergies variant de quelques MeV à plusieurs GeV.

On accélère couramment les électrons, les protons, les deutons, les particules alpha, et actuellement, à l'aide d'accélérateurs à ions lourds, on dispose également de faisceaux de noyaux plus lourds tels que ^{12}C, ^{16}O, ^{24}Mg voire même le ^{208}Pb et l'uranium. Les faisceaux produits par les accélérateurs peuvent produire des faisceaux secondaires en traversant une cible. C'est ainsi qu'on dispose de faisceaux secondaires de photons, de neutrons, de mésons π et même de particules étranges telles que les mésons K ou Λ par exemple. Plusieurs choses peuvent arriver avec des probabilités variables lorsqu'un projectile subit une collision avec un noyau cible.

Considérons par exemple un deuton (le noyau formé par un neutron et un proton) qui entre en collision avec un noyau de $^{24}_{12}Mg_{12}$. Le potentiel entre le deuton et le ^{24}Mg ressemble à celui qui est dessiné sur la *figure* 18. A grande distance, le deuton ne sent que la répulsion coulombienne entre sa charge et celle des 12 protons du ^{24}Mg. Tant que le deuton est accéléré à une énergie inférieure à 5 MeV environ, il ne peut pas franchir la barrière coulombienne, et la collision sera identique à celle de deux charges électriques ponctuelles. Mais il peut également arriver que la force électrostatique casse le deuton en un proton et un neutron.

A des énergies supérieures à 5 MeV, le deuton pénètre la barrière coulombienne, et les forces nucléaires entrent en jeu. Dans ce cas, plusieurs possibilités se présentent.

— Le deuton peut ressortir avec la même énergie. Dans ce cas, il laisse le noyau cible ^{24}Mg dans son état fondamental. On dit qu'il y a eu *diffusion élastique* du deuton (voir *La diffusion élastique et le potentiel optique*, p. 247).

— Le deuton peut ressortir avec une énergie inférieure à son énergie initiale; dans ce cas, le noyau cible absorbe de l'énergie et, à la fin de la réaction, se trouve dans un état excité. On dit qu'il y a eu *diffusion inélastique* du deuton. L'étude des diffusions inélastiques est un des outils principaux de la spectroscopie nucléaire.

— Le neutron du deuton peut être capturé par le $^{24}_{12}Mg_{12}$; dans ce cas, il se forme un noyau de $^{25}_{12}Mg_{13}$ (soit dans son état fondamental, soit dans un état excité), et il sort un proton. Il peut aussi arriver que le proton du deuton soit capturé; dans ce cas, la réaction produit un noyau de $^{25}_{13}Al_{12}$ et il sort un neutron. Enfin, il peut aussi arriver que le deuton se combine avec un neutron de la cible; dans ce cas, la réaction produit un noyau de $^{23}_{12}Mg_{11}$ et il sort un noyau de ^3H. Ces réactions portent le nom de *réactions de transfert* (voir *Les interactions directes et les réactions de transfert*, p. 248), et elles servent beaucoup en spectroscopie, en particulier pour étudier les noyaux radio-actifs instables qui sont formés par ces réactions.

— Le produit final de la réaction peut être plus complexe : le deuton peut non seulement se scinder en un neutron et un proton, mais il peut en outre éjecter des

fig. 21

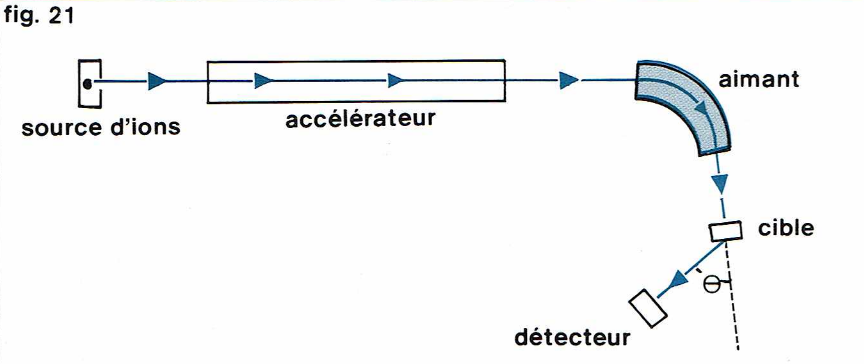

Richard Colin

▼ *Figure 21 : schéma du dispositif expérimental utilisé pour mesurer la section efficace d'une réaction nucléaire. Des ions (atomes dont on a arraché quelques électrons) d'une source sont injectés dans un accélérateur qui leur communique une énergie de plusieurs MeV. Les ions sortants passent par un aimant dont le champ magnétique dévie la trajectoire et sert à produire un faisceau monoénergétique. Ils sont ensuite dirigés sur une cible. Le nombre de noyaux diffusés à un angle θ par rapport au faisceau incident est compté par le détecteur.*

particules de la cible. Le produit final de la réaction se compose alors de plusieurs particules. Ces *réactions complexes* sont plus difficiles à analyser.

Le dispositif expérimental d'une réaction nucléaire est illustré schématiquement sur la *figure* 21. Un faisceau de particules mono-énergétiques est fourni par un accélérateur. Ces particules bombardent une cible. Un détecteur permet de compter le nombre de particules diffusées à un angle θ. Les accélérateurs et les détecteurs seront décrits dans le texte *Instrumentation nucléaire*. Les détecteurs sont en général capables d'identifier la nature de la particule diffusée (proton, photon, particule alpha, etc.) ainsi que son énergie. Souvent, on utilise un second détecteur placé en *coïncidence* avec le premier.

Par exemple, si on veut étudier la diffusion inélastique d'un deuton par le ^{24}Mg, le détecteur A pourra compter les deutons qui sont diffusés à un angle θ et à une énergie donnée, tandis que le compteur B pourra compter les rayons gamma qui sont aussitôt émis par le noyau excité qui fait une transition vers son état fondamental (voir *La radio-activité gamma*). En ne comptant que les événements où les deux compteurs sont déclenchés en même temps, c'est-à-dire en coïncidence, et où l'énergie du rayon gamma est égale à l'énergie perdue par le deuton, on peut s'assurer que c'est bien la diffusion inélastique qu'on observe et pas un autre événement qui aurait déclenché les détecteurs.

Les différentes réactions nucléaires qui peuvent se produire ont lieu avec des probabilités diverses qui se mesurent par le *concept de section efficace*. Le nombre N d'événements observés par unité de temps est proportionnel au flux Φ de particules incidentes (le nombre de particules heurtant la cible par unité de surface) et au nombre N_c de noyaux exposés dans la cible. On a donc $N = \sigma \Phi N_c$ où σ est un facteur de proportionnalité dont la dimension est une surface et qui porte le nom de *section efficace* de l'événement observé. Les sections efficaces varient de plusieurs barns (1 barn = 10^{-24} cm^2) à 10^{-6} barns pour des événements rares. Toute l'information nucléaire qui peut être extraite de l'étude des réactions est contenue dans la section efficace mesurée.

La réalisation expérimentale des réactions nucléaires est un grand art qui requiert une électronique très poussée ainsi que beaucoup de finesse et d'astuce de la part du physicien. Il y a de très nombreuses difficultés à surmonter avant de pouvoir mesurer la section efficace d'une réaction. Citons-en quelques-unes à titre d'exemple :

— il faut reconnaître l'événement étudié, c'est-à-dire éliminer le *bruit de fond* formé par d'autres événements qui déclenchent également les détecteurs ;

— il faut souvent mesurer l'énergie du faisceau incident ainsi que celle des particules sortantes, et cela avec une résolution supérieure à 1 MeV si on veut faire de la spectroscopie nucléaire ;

— il faut que l'intensité du faisceau incident soit suffisante pour que le nombre d'événements enregistrés soit assez grand ; en effet, pour N événements enregistrés, la section efficace, c'est-à-dire la probabilité que l'événement ait lieu, n'est définie qu'à une précision de l'ordre de $1/\sqrt{N}$;

— il faut connaître l'efficacité des détecteurs ainsi que leur calibration ;

— il faut une bonne géométrie, c'est-à-dire une bonne définition de l'angle de diffusion de chaque particule détectée ;

— il faut pouvoir fabriquer une électronique qui puisse reconnaître si deux événements ont lieu à un intervalle de temps de l'ordre de 10^{-9} seconde, etc.

La diffusion de neutrons lents : le noyau composé

Les réacteurs produisent des neutrons à des énergies thermiques de l'ordre de kT, c'est-à-dire quasiment nulles à l'échelle nucléaire. La diffusion de ces *neutrons lents* par les noyaux est particulière, car, ne portant pas de charge électrique, un neutron qui entre en collision avec un noyau peut le pénétrer, n'ayant pas à franchir de barrière coulombienne. L'énergie de séparation d'un neutron est de l'ordre de 8 MeV pour un noyau moyennement lourd et décroît jusqu'à 5 MeV environ pour les noyaux très lourds. Ainsi le *noyau composé*, formé par le noyau cible et le neutron qui l'a pénétré, a une énergie d'excitation variant de 8 à 5 MeV selon le noyau.

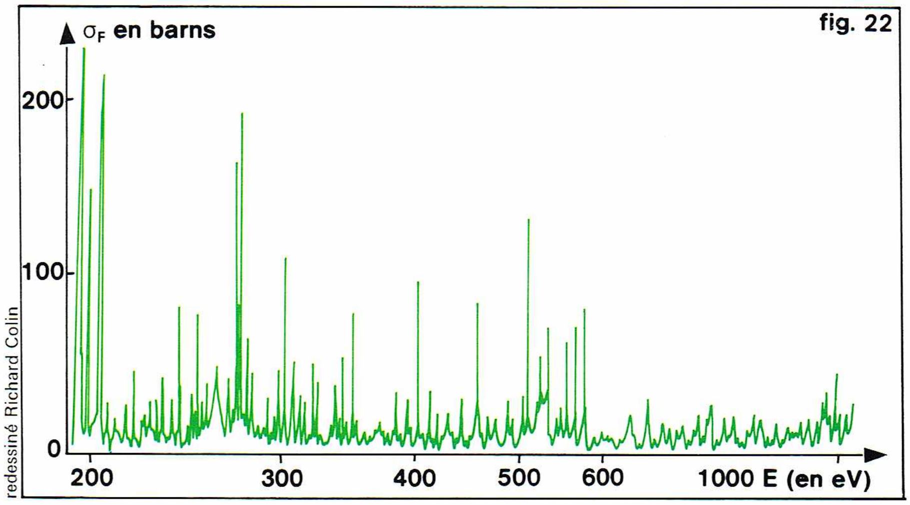

redessiné Richard Colin

▲ *Figure 22 : la section efficace de fission du* ^{239}*Pu sous l'action de neutrons de basse énergie présente une série de résonances étroites (de l'ordre de milli-électron-volt) et serrées (de l'ordre de l'électron-volt) qui sont typiques du domaine d'application du modèle du noyau composé (document* **Rapport de prospective. Physique corpusculaire, vol. 1 Physique nucléaire. N° spécial du « Progrès scientifique »**, *publication de la Délégation générale à la recherche scientifique et technique, 35, rue Saint-Dominique - 75700 Paris).*

Les sections efficaces de diffusion de neutrons lents se caractérisent par une série de pics étroits (d'une largeur de l'ordre du milli-électron-volt) et serrés (d'un espacement moyen de l'ordre de l'électron-volt), illustrés sur la *figure* 22. Le processus qui donne lieu à ces pics est le suivant : lorsque le neutron pénètre le noyau, l'énergie d'excitation qu'il apporte au noyau composé est dissipée à l'ensemble des nucléons du noyau. Celui-ci « oublie » son mode de formation, et beaucoup plus tard une fluctuation de la distribution de l'énergie parmi les nucléons permet de reconcentrer toute l'énergie d'excitation sur un seul neutron, qui peut alors s'échapper du noyau. On montre que chaque pic représente une résonance, et qu'au voisinage de la résonance la section efficace de diffusion est donnée par la **formule de Breit-Wigner :**

$$\sigma = \frac{\lambda\!\!\!^{-2}}{4\pi} \frac{\Gamma^2}{\Gamma^2/4 + (E - E_r)^2}$$

où ƛ est la longueur d'onde du neutron incident, E l'énergie du noyau composé, E_r l'énergie et Γ la largeur de la résonance. Le temps de vie τ du noyau composé, c'est-à-dire l'intervalle moyen de temps qui sépare la rentrée et la sortie du neutron, est relié à la largeur Γ par la relation $\tau = h/\Gamma$ où h est la constante de Planck (*tabl.* I). Une largeur de 1 eV indique un temps de vie de l'ordre de 10^{-20} seconde, soit environ 10^3 fois plus longtemps qu'il ne faut à un nucléon pour traverser le volume du noyau.

La diffusion élastique et le potentiel optique

Un projectile est diffusé élastiquement lorsque, à la suite de la collision, il ressort avec la même énergie et qu'il laisse le noyau cible dans son état fondamental. La diffusion élastique est assez bien décrite en supposant que l'interaction entre le projectile et le noyau cible est décrite par un potentiel appelé *potentiel optique* à cause de l'analogie qui existe en mécanique quantique entre la diffusion d'une particule par un potentiel et la diffusion de la lumière par un milieu dont l'indice de réfraction est inhomogène. Le potentiel optique peut être écrit sous la forme suivante :

$$V(r) = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} + \frac{V_0}{1 + \exp(r - R)/a}(1 + i\xi)$$

Le premier terme, où Z_1 et Z_2 représentent les nombres de protons du projectile et de la cible, est la *répulsion coulombienne*. Le deuxième terme est un *potentiel attractif* qui généralise, pour la diffusion de particules, le potentiel moyen du modèle des couches. Les valeurs typiques des paramètres pour des protons ayant une énergie de quelques dizaines de MeV sont :

$$R = 1{,}35\, A^{1/3}\ \text{fm},\quad a = 0{,}6\ \text{fm},\quad V_0 = -40\ \text{MeV}$$

Le terme $i\xi$ du potentiel optique rend celui-ci complexe, et il représente l'absorption du flux de particules diffusées élastiquement. En effet, lorsque l'énergie du projectile est suffisante, en plus de la diffusion élastique, d'autres réactions peuvent se produire, de sorte que le nombre de particules diffusées *élastiquement* est inférieur au

▶ *Page 248, en haut, figure 23 :* *représentation schématique du processus qui donne lieu à une réaction de strippage. Lorsque le deuton s'approche du noyau, son neutron est capturé par le puits de potentiel créé par ce noyau et le proton s'échappe. Le neutron est capturé dans une orbite du modèle des couches.*

▼ *Figure 24 : le processus d'échange d'un méson π^- entre deux nucléons est à l'origine des forces nucléaires. Ce processus donne lieu à une force de Yukawa V (r) dont la portée μ est égale à la longueur de Compton du méson π^-. On a représenté le processus d'échange de charge dans lequel le neutron se transforme en proton, et réciproquement. Lorsqu'un méson π^0 est échangé, les nucléons ne changent pas de nature. Le processus d'échange d'un méson est analogue à celui d'échange d'un photon (fig. 7) qui est à l'origine des forces électromagnétiques. En bas, tableau V : liste des mésons considérés actuellement comme contribuant le plus aux forces nucléaires.*

fig. 23

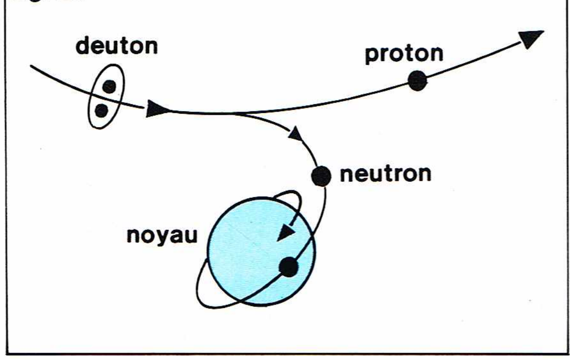

nombre de particules incidentes, d'où la perte de flux. Le calcul de la section efficace de diffusion par le potentiel optique ci-dessus permet d'expliquer les distributions angulaires des particules diffusées élastiquement. Dans le cas où apparaissent des résonances, le potentiel optique ne rend compte que de la section efficace moyenne sur les résonances.

Les interactions directes et les réactions de transfert

Lorsque le projectile a une énergie de plusieurs dizaines de MeV ou davantage, il n'interagit en général qu'avec un petit nombre de nucléons par un processus qui est à l'opposé de celui qui donne lieu aux résonances des neutrons lents. On dit qu'il y a eu *interaction directe* entre le projectile et quelques nucléons du noyau cible ou du projectile. Un exemple d'interaction directe est fourni par la réaction de strippage illustrée par la *figure* 23. Un deuton est incident sur un noyau cible, et le neutron du deuton est capté par le puits de potentiel du modèle des couches. En mesurant l'énergie du proton sortant, on peut déterminer l'énergie de l'orbite dans laquelle le neutron a été capturé. En mesurant la distribution angulaire des protons émis par rapport à la direction du faisceau incident, on peut déterminer le moment cinétique du neutron capté dans l'orbite, ce qui peut servir à identifier cette orbite.

Au lieu d'interagir avec des nucléons individuels de la cible, le projectile peut interagir avec les degrés de liberté collectifs de la cible : ainsi les vibrations sont-elles facilement excitées par une interaction directe.

Ce qui caractérise une interaction directe et ce qui la différencie du processus de formation d'un noyau composé, c'est la distribution angulaire des fragments émis lors de la réaction. Lorsqu'un noyau composé est formé, celui-ci a une vie moyenne assez longue pour que son mode de formation soit « oublié ». Dans ce cas, les fragments sont émis de manière symétrique à l'avant et à l'arrière. Par contre, une interaction directe a lieu instantanément, et les fragments sont émis à des angles (vers l'avant) qui sont donc déterminés par la direction du faisceau incident. Bien entendu, les interactions directes et la formation du noyau composé sont deux processus extrêmes et tous les moyens termes sont observés.

A très haute énergie, on observe la *diffusion quasi élastique*. Par exemple, lorsqu'un proton de

$$1 \text{ GeV} = 10^3 \text{ MeV}$$

est diffusé par un noyau, tout se passe comme si le noyau était composé d'un ensemble de nucléons libres, et la diffusion du proton avec chacun de ses nucléons se fait comme si les autres nucléons étaient absents. En effet, l'énergie de liaison des nucléons est très inférieure dans ce cas à l'énergie que leur transmet le proton de 1 GeV à chaque collision.

Les forces nucléaires

Les nucléons du noyau sont liés les uns aux autres par les forces nucléaires. La force qui agit entre deux nucléons peut être étudiée en observant la diffusion entre deux protons, la diffusion des neutrons par des protons et d'autres réactions plus complexes telles que la photodésintégration du deuton, la diffusion des protons par les deutons, etc. Le deuton qui est un système lié composé d'un neutron et d'un proton fournit d'autres données : énergie de liaison égale à 2,224 MeV, moment quadripolaire égal à $2,74 \cdot 10^{-27}$ cm², moment magnétique égal à 0,857 magnéton nucléaire. Deux neutrons ou deux protons ne forment pas de système lié.

L'ensemble de ces données fait apparaître trois propriétés fondamentales des forces nucléaires.

— Elles ont une *courte portée*, de l'ordre de $1,5 \cdot 10^{-13}$ cm.

— A très courte portée, à des distances inférieures à $0,5 \cdot 10^{-13}$ cm environ, elles deviennent *répulsives*.

— Il y a une *force tenseur* importante. La force tenseur permet à deux nucléons de changer leur moment cinétique orbital de 2 unités. C'est à cause de la force tenseur que le deuton possède un moment quadripolaire non nul.

Quelque dix années de mesures souvent complexes nous ont fourni une connaissance assez détaillée des forces agissant entre les nucléons. A l'origine des forces nucléaires se trouve le processus d'échange de mésons (*fig.* 24). Lorsque deux nucléons échangent un méson de masse *m*, tout se passe comme s'ils interagissaient avec un potentiel de la forme $V(r) = \frac{e^{-r/\mu}}{r}$ où $\mu = \frac{\hbar}{m_\pi c}$ est la longueur de Compton du méson échangé. L'expression citée ici n'est que qualitative, l'expression exacte étant plus complexe, car elle dépend de la nature (spin, isospin et parité, etc.) du méson échangé. La portée de la force est inversement proportionnelle à la masse du méson échangé. Le méson le plus léger qui puisse être échangé est le méson π dont la longueur de Compton est $1,46 \cdot 10^{-13}$ cm, ce qui explique la courte portée des

fig. 24

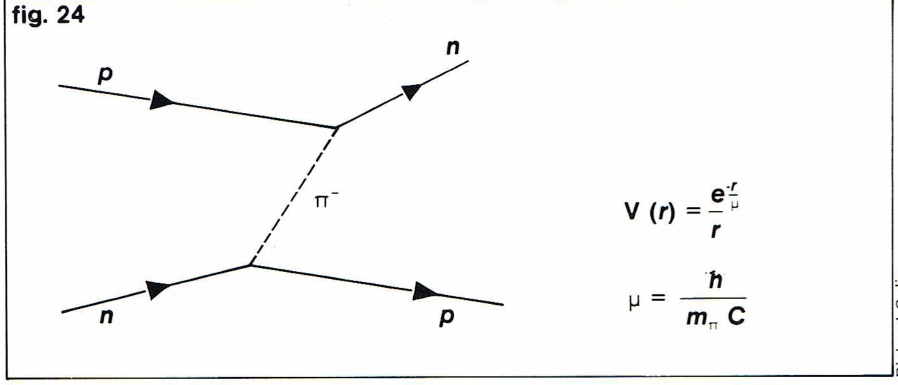

Tableau V
Mésons échangés par deux nucléons en interaction

Méson échangé	Isospin	Spin et parité	Masse × c² (en MeV)	Longueur de Compton ħ/mc (en fm)	Largeur (en MeV)
π	1	0⁻	135	1,46	< 0,01
η	1	0⁻	549	0,36	≃ 0,1
χ₀	1	0⁻	957	0,20	
ρ	1	1⁻	770	0,26	146
ω	0	1⁻	783	0,25	9
Φ	0	1⁻	1 019	0,19	6
ε	0	0⁺	760	0,26	640

forces nucléaires. Le *tableau* V donne la liste des mésons que l'on considère actuellement comme contribuant le plus aux forces nucléaires. Certains de ces mésons ont une vie moyenne si courte que, d'après le principe d'incertitude, leur énergie mc^2, et donc leur masse m, s'étend sur une grande largeur. Ainsi le ε, dont l'existence n'est pas encore définitivement établie expérimentalement, a une largeur de 640 MeV. Les largeurs des autres mésons sont plus faibles (*tableau* V). On ne possède pas actuellement de théorie capable d'expliquer quantitativement la répulsion à très courte portée des forces nucléaires.

Lorsque deux nucléons échangent un méson π par exemple, ils peuvent également changer de nature. On évalue à quelques % la probabilité qu'après un échange d'un méson π, un nucléon se transforme en une résonance baryonique N* ou Δ, dont la masse est de l'ordre de 1 300 MeV. Ces processus doivent également être inclus dans la théorie des forces nucléaires.

Enfin, *dans le noyau*, les forces nucléaires peuvent différer quelque peu de ce qu'elles sont pour deux nucléons dans le vide. Par exemple, un nucléon peut émettre un méson π, un second peut l'absorber et se transformer en une résonance baryonique, et puis se désexciter en émettant un méson π qui est absorbé par un troisième nucléon. Ce processus donne lieu à des forces à trois corps. Les recherches actuelles visent à estimer l'effet de tels processus, dans les noyaux.

Les forces nucléaires appartiennent à ce qu'on appelle les interactions fortes. Jusqu'à présent, on a détecté dans la nature quatre espèces d'interactions.

— Les *interactions fortes*, dont les forces nucléaires. Pour se fixer une échelle, admettons que l'intensité des interactions fortes soit de l'ordre de l'unité.

— Les *interactions électromagnétiques*, dues à l'échange de photons et responsables de la radio-activité gamma et des liaisons chimiques. Leur intensité est de l'ordre de $e^2/\hbar c = 1/137$.

— Les *interactions faibles*, responsables de la radio-activité bêta. Leur intensité est de l'ordre de 10^{-14}.

— Les *interactions gravitationnelles* qui gouvernent les mouvements des astres et qui lient les étoiles à neutrons ont une intensité de l'ordre de 10^{-39}.

Le problème d'unifier toutes ces forces en une seule théorie est un vieux rêve dont la réalisation se fait toujours attendre.

Les hypernoyaux

Les neutrons et les protons ne sont pas les seules particules susceptibles de former des systèmes liés par les interactions fortes. On a pu observer des noyaux formés par des neutrons, des protons et une ou deux particules Λ. La particule Λ a une masse égale à 1 115 MeV, un spin et une parité $\frac{1^+}{2}$ comme les nucléons, mais son étrangeté est égale à — 1. Les interactions fortes et électromagnétiques conservent l'étrangeté, de sorte que le Λ, étant le baryon le plus léger d'étrangeté non nulle, ne se distingue que par l'interaction faible. Il a une vie moyenne de l'ordre de 10^{-10} seconde, ce qui lui donne amplement le temps d'être capturé par un noyau. Un noyau contenant un Λ s'appelle un **hypernoyau.** Les hypernoyaux sont instables, car le Λ s'y désintègre suivant le mode $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$ ou $\Lambda \rightarrow n + \pi^0$. Dans le noyau, le Λ peut aussi se désintégrer en interagissant avec un nucléon suivant les modes $\Lambda + p \rightarrow p + n$ ou $\Lambda + n \rightarrow n + n$. L'énergie de liaison d'un Λ croît à peu près linéairement avec la masse atomique du noyau. Elle croît de 3 MeV environ pour les noyaux de masse A = 4 à quelque 12 MeV pour les noyaux de masse A = 14.

BIBLIOGRAPHIE

BOHR A., MOTELSON B., *Nuclear Structure*, Benjamin W. A., 1969. - DETRAZ C., *les Réactions nucléaires*, la Recherche n° 56, mai 1975. - ISABELLE D., RIPKA G., *la Structure du noyau atomique*, la Recherche n° 46, juin 1974. - SEGRÉ E., *Nuclei and Particles*, Benjamin W. A., 1965. - *Rapport de prospective en physique corpusculaire*, vol. I, *Physique nucléaire*, n° spécial du Progrès scientifique, D.G.R.S.T. - VALENTIN L., *Noyaux et Particules*, Hermann, 1975.

LES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES

Les particules élémentaires sont, dans l'état actuel de nos connaissances, les constituants fondamentaux de la matière. Les atomes sont constitués d'électrons et d'un noyau, lui-même composé de protons et de neutrons. Ces trois éléments, électron, proton et neutron, sont conventionnellement appelés des particules élémentaires.

La découverte de ces particules est passée par plusieurs étapes.

L'électron est connu depuis la fin du XIX^e^ siècle (J. J. Thomson, 1890), et l'on a très tôt mesuré sa masse et sa charge électrique, laquelle est prise négative par une convention qui remonte à un choix de signes fait bien longtemps auparavant en électricité.

En 1905, Einstein put montrer, en analysant les lois expérimentales de l'effet photo-électrique (c'est-à-dire l'éjection d'électrons à partir d'une substance par la lumière), que le rayonnement (lumière visible, rayons X, rayonnement radio, etc.) est lui-même constitué de particules, les *photons*. L'existence de ces photons fut plus tard établie d'une manière expérimentale directe (Compton, 1922). Le *proton* avait été découvert lui aussi au début du XX^e^ siècle, et l'on avait alors mesuré sa masse et sa charge ; il était apparu comme beaucoup plus lourd que l'électron (1 830 fois), alors que sa charge électrique, positive, était exactement égale en grandeur à celle de l'électron.

En 1930, Dirac prédit, sur la base d'arguments théoriques, qu'il devait exister une particule très analogue à l'électron, que l'on a appelée l'antiélectron ou *positon*. La masse de ce positon devait être strictement égale à celle de l'électron et sa charge électrique opposée, donc

▼ Tableau I : les trente particules connues en 1957 consistaient en seize baryons et antibaryons, sept mésons, six leptons et antileptons, et enfin le photon. Les particules à interactions fortes (hadrons), sujettes aux forces nucléaires, sont les mésons, les baryons et les antibaryons. Le photon, les leptons et les antileptons ne sont pas soumis aux forces nucléaires. Depuis 1957, le nombre d'hadrons a énormément augmenté (comme le montre le tableau II) ; pendant ce temps, le nombre de leptons et d'antileptons n'a augmenté que de deux unités, car on a réalisé qu'il existait deux espèces de neutrinos, et non une seule (représentées par les cercles blancs sur ce tableau).

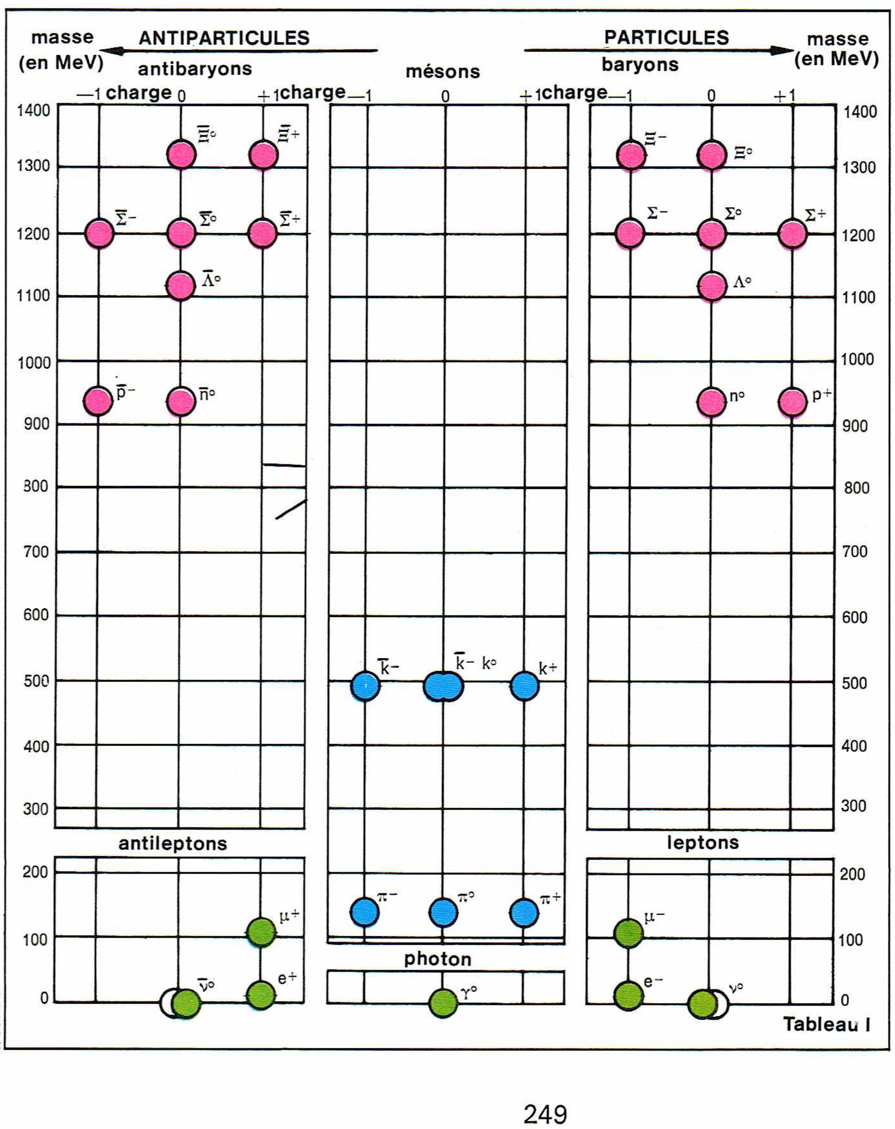

I.G.D.A.

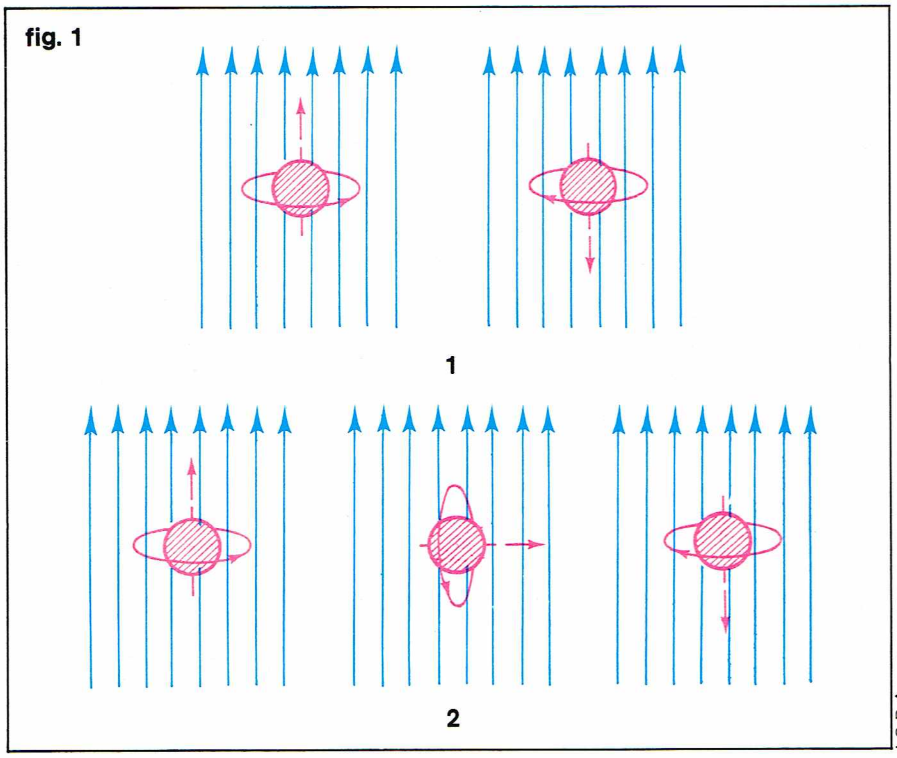

▲ *Figure 1 : le moment cinétique propre (spin) d'une particule ne peut prendre qu'un certain nombre de positions par rapport à une direction donnée, comme par exemple celle d'un champ magnétique extérieur (dont les lignes de force sont représentées par des flèches bleues). La figure du haut* (**1**) *montre les deux orientations possibles du spin d'une particule de spin 1/2. La figure du bas* (**2**) *montre les trois orientations possibles du spin d'une particule de spin 1.*

▶ ***La légende du tableau II ci-contre est développée page 252.***

positive (d'où le nom de positon). Le positon fut découvert peu après dans les rayons cosmiques (Anderson, 1932).

En 1934, le second constituant du noyau, le *neutron*, fut découvert par Chadwick, et l'on put constater qu'il était neutre (charge électrique nulle) et que sa masse était très légèrement supérieure à celle du proton. L'existence d'une autre particule, le *méson* π, fut prédite ensuite théoriquement (Yukawa, 1937) pour expliquer les propriétés des forces nucléaires qui lient ensemble protons et neutrons à l'intérieur du noyau. On le découvrit dans les rayons cosmiques en 1947, peu après la découverte dans les mêmes conditions d'une autre particule élémentaire (le *muon*).

A la même époque, on s'attendait également à l'existence d'une particule neutre, le *neutrino*, qui ne fut observé réellement qu'en 1958.

Jusqu'à cette époque, il y avait eu dans la découverte des particules élémentaires un va-et-vient remarquable entre la théorie et l'expérience, chaque nouvelle particule permettant de comprendre un peu mieux la structure de la matière. La période qui suivit fut toute différente. Parmi les rayons cosmiques, d'abord, puis parmi les particules produites dans les grands accélérateurs mis en service à partir des années cinquante, on découvrit une multitude de nouvelles particules; d'abord les particules dites étranges, précisément à cause de leur caractère totalement inattendu, puis les très nombreuses particules à très courte vie, ou résonances.

Masse et spin d'une particule

Deux des caractéristiques fondamentales d'une particule sont sa *masse* et son *spin*.

A cause du fait que les particules sont le plus souvent observées avec des vitesses considérables, éventuellement très proches de celle de la lumière, il est nécessaire de décrire leur mouvement par les méthodes de la relativité restreinte. Expérimentalement, on peut mesurer l'énergie E et la quantité de mouvement **p** d'une particule (on reviendra plus loin sur les méthodes que l'on utilise pour effectuer ces mesures). Lorsque la particule est au repos (vitesse nulle), l'énergie est liée à la masse m par la relation d'Einstein :

$$E_0 = mc^2 \quad (1)$$

où c est la vitesse de la lumière. Lorsque la vitesse v de la particule est petite en comparaison de c, l'énergie cinétique s'ajoute à l'énergie de masse de telle sorte que :

$$E = mc^2 + \frac{1}{2}mv^2 \quad (2)$$

alors que la quantité de mouvement **p** est proportionnelle à la vitesse :

$$\mathbf{p} = mv \quad (3)$$

Lorsque la vitesse v n'est pas petite par rapport à c, les relations qui existent entre l'énergie, la masse, la quantité de mouvement et la vitesse deviennent plus compliquées :

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad \mathbf{p} = \frac{mv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (4)$$

Il en découle d'ailleurs une relation plus simple entre E, m et **p**, qui s'écrit :

$$E = \sqrt{m^2c^4 + \mathbf{p}^2c^2} \quad (5)$$

On observe effectivement que, quelles que soient l'énergie et la quantité de mouvement d'une particule, celles-ci sont toujours bien liées par la dernière relation (**5**) avec une valeur bien déterminée de la masse.

Plutôt que de donner la masse m d'une particule, on convient en général de donner son énergie de repos mc^2, de telle sorte que celle-ci s'exprime en unités d'énergie. L'énergie conventionnellement utilisée est l'électron-volt (1 eV, c'est-à-dire l'énergie d'une charge électrique égale à celle de l'électron soumise à un potentiel de 1 volt) ainsi que les multiples de l'électron-volt (méga-électron-volt ou 1 MeV, soit un million d'eV; giga-électron-volt ou 1 GeV, soit un milliard d'eV). Ainsi, l'énergie de repos d'un électron est approximativement 0,551 MeV, celle d'un proton 938 MeV ou 0,938 GeV, celle d'un neutron 940 MeV.

Il convient de signaler le cas particulier des particules de masse nulle (ou dont la masse est si petite qu'elle n'a jamais pu être mise en évidence). Il existe au moins deux types de ces particules, le photon et les neutrinos. De telles particules ont toujours une vitesse égale à celle de la lumière, ce qui n'a rien pour surprendre puisque le photon est précisément la particule constitutive de la lumière. La relation (**5**) entre l'énergie et la quantité de mouvement devient alors simplement :

$$E = \mathbf{p}c \quad (6)$$

Au contraire de la masse, qui est une notion bien connue de la mécanique classique, le spin est une caractéristique spécifiquement quantique des particules, analogue au moment cinétique propre d'une toupie ou d'un gyroscope. On sait qu'une toupie dont le centre d'inertie est au repos a un moment cinétique propre qui est un vecteur. En mécanique quantique, on établit qu'une particule au repos (de vitesse nulle) a également un moment cinétique propre dont la grandeur est un multiple entier ou demi-entier de la quantité fondamentale $\hbar$ ($\hbar$ étant égale à la constante de Planck h divisée par 2π). Le spin vaut donc $s\hbar$, où s est un nombre entier ou demi-entier (*fig.* 1). C'est ainsi que s vaut 1/2 pour l'électron, le proton, le neutron et le muon, 0 pour le méson π, 1 pour le deutéron (noyau du deutérium), etc.

De la manière dont nous venons de le décrire, le spin est défini pour une particule au repos. Pour une particule en mouvement, il suffit d'imaginer un observateur en mouvement qui se déplace à la même vitesse que la particule et voit donc celle-ci au repos, pour donner une définition du spin qui revient à la précédente. De là même, il résulte que le cas des particules de masse nulle est singulier, puisqu'il n'y a pas d'observateur qui puisse les voir au repos, leur vitesse étant toujours égale à c, quel que soit l'observateur qui la mesure. Il est cependant possible, grâce à une synthèse de la relativité restreinte et de la mécanique quantique, de définir d'une manière à la fois élégante et précise le spin d'une particule quelconque. Dans le cas des particules de masse nulle, on peut alors constater expérimentalement que le spin du photon est 1 et celui des neutrinos est 1/2. (*Nota :* le nom même du spin vient du verbe anglais *to spin* qui signifie tourner sur soi-même.)

Les interactions fondamentales

Pour comprendre comment procède la physique des particules, il convient de réaliser l'extrême ténuité de ses

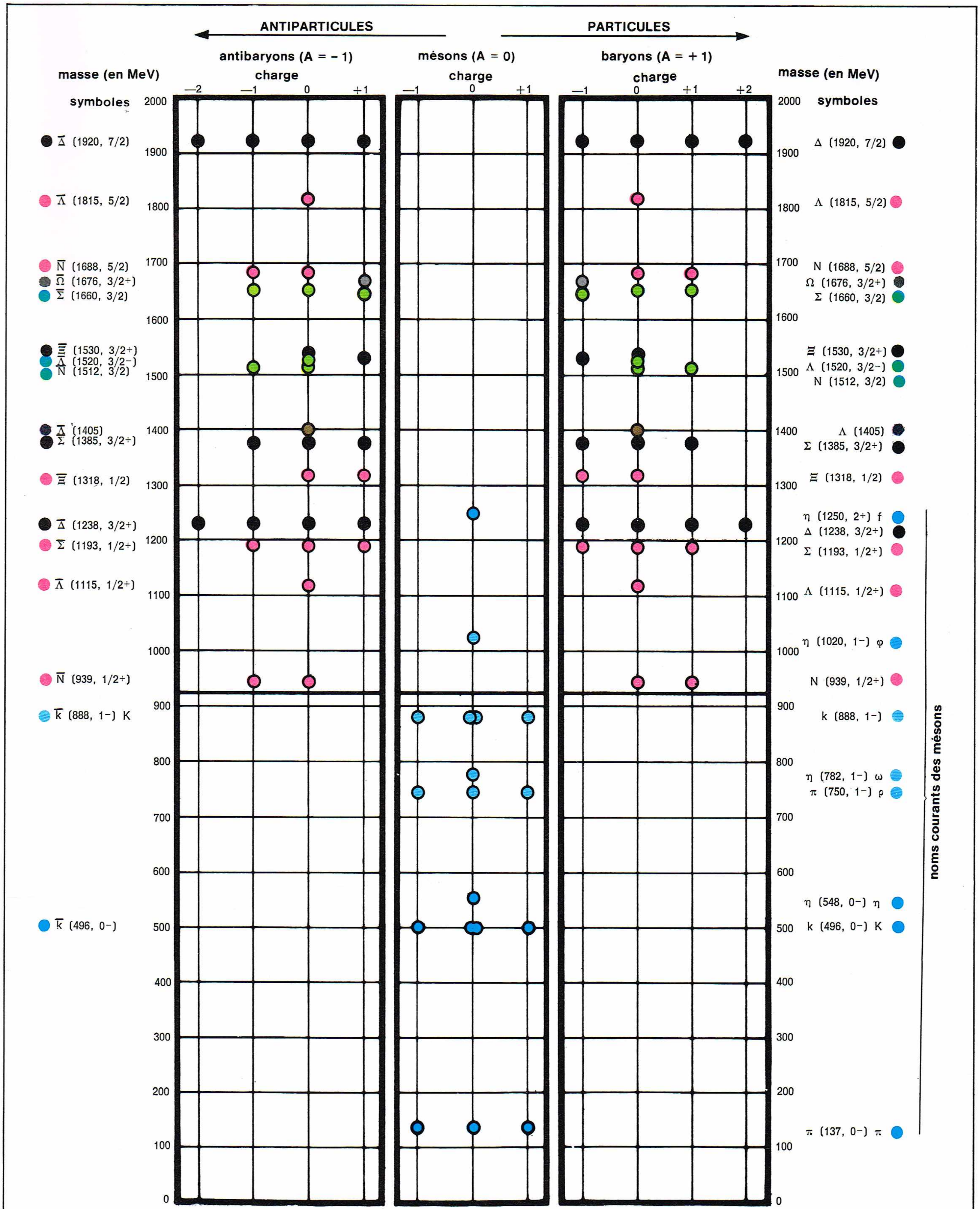

Tableau II

I.G.D.A.

◀ *Page 251, tableau II : masse des particules à interactions fortes (hadrons) selon une classification plus récente. La liste représentée ici est encore incomplète et il conviendrait d'y ajouter, en particulier vers le haut, à l'extérieur du présent tableau, les particules Ψ et Ψ′ découvertes en 1974-1975. Les nombres entre parenthèses donnent la masse au repos (en MeV), le spin et la parité (indiquée par un signe + ou —). Les masses indiquées sont les moyennes pour un multiplet de spin isotopique où les particules ne diffèrent que par la charge. Une même lettre est utilisée pour des particules situées sur la même trajectoire de Regge. Les couleurs servent seulement à repérer des particules si proches par la masse qu'elles pourraient être confondues sur la figure. Le nombre A désigne le nombre baryonique.*

objets. Un exemple emprunté à un autre domaine nous permettra d'éclairer le problème.

Imaginons qu'un être gigantesque, pour qui la Terre serait une particule élémentaire, veuille comprendre la nature et la constitution de la Terre. Pour améliorer l'analogie, nous supposerons qu'il a à sa disposition une réserve énorme de Terres toutes semblables par leur masse et leur rotation (leur spin), et, éventuellement, toutes semblables entre elles. De même, il dispose d'une vaste quantité de Lunes, de Vénus, etc. Ces « particules » sont trop petites pour qu'il les observe de près, mais il dispose de canons qui lui permettent de les lancer à grande vitesse, et de détecteurs pour les repérer. Canons et détecteurs sont à l'échelle d'une galaxie et ne lui permettent donc pas de regarder finement les détails. Que pourra-t-il donc apprendre ?

En envoyant des Terres et des Lunes les unes contre les autres à des vitesses relatives diverses, il va réaliser ce qui, pour nous, sera des orbites hyperboliques. Il n'est pas difficile alors de montrer que, étant donné une statistique suffisante de telles expériences, dans lesquelles on mesure les vitesses et la déviation des astres, il est possible de s'assurer que les lois de la mécanique sont celles de Newton et que la force agissante est celle de la gravitation (force en mm'/r^2, r étant la distance relative des astres, m et m' leurs masses). De même, lorsque deux astres entrent en collision, on peut, en étudiant la statistique des fragments, avoir quelque notion des forces de cohésion dans les planètes et de leur constitution interne.

C'est essentiellement cette méthode de la force brute que l'on utilise pour étudier les particules élémentaires. Grâce à des accélérateurs, on produit des particules d'énergie variée que l'on envoie sur d'autres particules (les électrons et les constituants des noyaux d'un matériau cible), et l'on accumule des millions de mesures pour atteindre statistiquement les propriétés des particules et les caractéristiques des forces qui agissent entre elles.

Grâce à ces méthodes, on a pu établir qu'il n'existe vraisemblablement qu'un petit nombre d'interactions fondamentales entre les particules, qui sont les suivantes :
— les interactions gravitationnelles ;
— les interactions faibles ;
— les interactions électromagnétiques ;
— les interactions fortes.

Interactions gravitationnelles

Ce sont les plus faibles de toutes, et, en pratique, on n'a jamais pu les observer directement entre deux particules. Cependant, comme elles s'ajoutent, elles acquièrent une grande importance quand un corps se trouve soumis à l'action gravitationnelle d'un objet formé d'un très grand nombre de particules (il y a environ 4×10^{51} protons et neutrons dans la Terre, par exemple).

Interactions faibles

Ce sont des interactions qui se manifestent surtout par la désintégration des particules. (Ainsi, dans notre exemple, l'observateur patient découvrirait que des forces doivent être responsables de l'explosion de certaines étoiles en supernovae.) Le meilleur exemple de ces phénomènes est fourni par la désintégration même du neutron, lequel, laissé à l'état libre en dehors d'un noyau, se désintègre en moyenne au bout d'un quart d'heure selon la réaction :

$$n \rightarrow p + e + \bar{\nu}$$

soit en donnant naissance à un proton (p), un électron (e) et un (anti) neutrino ($\bar{\nu}$).

Interactions électromagnétiques

Ce sont, de loin, les mieux comprises. On les connaît très bien à l'échelle macroscopique où l'on sait exprimer comment des charges électriques interagissent avec le champ électromagnétique. Depuis la découverte de Maxwell, en 1865, des lois fondamentales de l'électrodynamique, on possède une description sans faille connue de ces phénomènes. En pratique, on a constaté que les équations de Maxwell, dûment réinterprétées dans le formalisme de la mécanique quantique, permettent de décrire exactement tous les phénomènes dans lesquels des particules chargées interagissent avec des photons. Cette théorie, que l'on appelle l'électrodynamique quantique, a joué un rôle essentiel, car elle a souvent servi d'inspiration et de guide pour mieux comprendre l'ensemble des autres interactions.

Interactions fortes

Ces interactions sont à la fois les plus intenses et les plus mal connues. Le type en est donné par les forces nucléaires qui lient protons et neutrons à l'intérieur du noyau.

Intensité et portée des interactions fondamentales

Parmi les propriétés qui caractérisent les interactions fondamentales, on doit d'abord mentionner leur intensité et leur portée.

La notion de **portée** apparaît de la manière la plus nette dans le cas des forces nucléaires. Lorsqu'un proton et un neutron sont situés à une distance relative r, on constate (par les méthodes complexes décrites plus haut) que la force qui s'exerce entre eux décroît exponentiellement. Une expression approximative de cette propriété consiste à dire qu'à distance suffisante, il s'exerce entre le proton et le neutron un potentiel de la forme

$$V(r) = \frac{G}{r} e^{-r/r_0}$$

où r_0 est de l'ordre de 1,2 fermi (soit $1{,}2 \times 10^{-13}$ cm). Cela permet de comprendre pourquoi, dans notre environnement habituel, les forces nucléaires jouent un rôle aussi minime malgré leur grande intensité. Cela tient à ce que, à la distance de 10^{-8} cm qui sépare en général deux noyaux différents dans un solide ou une molécule, l'énergie potentielle $V(r)$ contient un facteur exponentiel de l'ordre de e^{-10^5} qui est bien au-delà, par sa petitesse, de tout ce que nous pouvons détecter. On exprime ce fait en disant que les interactions fortes ont une portée finie de l'ordre de r_0.

Les interactions faibles, quant à elles, ont une portée si petite que l'on n'a pu la mesurer. Tout se passe comme si elles ne s'exerçaient que lorsque deux particules coïncident en position (certaines théories prévoient pour la portée des interactions faibles une distance de l'ordre de 10^{-15} cm, actuellement inaccessible).

Les interactions électromagnétiques et gravitationnelles ne décroissent pas exponentiellement avec la distance, car le potentiel de Coulomb et celui de Newton sont tous deux proportionnels à $1/r$ jusqu'à des distances macroscopiques très élevées, voire même astronomiques. On dit qu'elles sont de portée infinie.

Ayant dégagé cette notion de portée, nous pouvons maintenant préciser celle d'**intensité** des interactions. Imaginons pour cela de placer, par exemple, deux protons au contact. Cela est concevable, car ces particules ont, comme on le verra plus loin, une extension finie de l'ordre de 10^{-13} cm. Comme elles se touchent, toutes les interactions, y compris les interactions faibles, peuvent s'exercer. Cela étant, le rapport des énergies (potentielles) gravitationnelle, faible, électromagnétique et forte est de l'ordre de

$$10^{-37};\ 10^{-10};\ 10^{-2};\ 1$$

Parmi les commentaires que ces chiffres appellent, nous noterons surtout le rapport énorme (10^{-35}) des forces de pesanteur et des forces électriques. Le fait que la pesanteur soit la force dominante dans notre environnement tient à la compensation presque exacte des forces coulombiennes attractives et répulsives dues aux électrons et aux protons.

Interactions et classification des particules

On distingue trois types de particules selon la nature des interactions qu'elles peuvent subir :

a) Les **hadrons** (d'un mot grec signifiant fort) sont toutes les particules qui peuvent subir des interactions fortes. Exemples : proton, neutron, méson π.

b) Les **leptons** (d'un mot grec signifiant faible) sont les particules non hadroniques qui subissent des interactions faibles. Les seules connues sont l'électron, le muon et les neutrinos (ainsi que leurs antiparticules).

c) Le **photon** forme une classe à lui seul. Il ne subit que des interactions électromagnétiques (et gravitationnelles).

Particules et antiparticules

A toute particule est associée une antiparticule, en général différente, de même masse et de charge électrique opposée. Ce n'est qu'à cette condition qu'il est permis de formuler de manière cohérente l'électrodynamique quantique, et ce fait a été vérifié expérimentalement pour presque toutes les particules connues.

L'antiparticule associée à l'électron (noté par le symbole e) est le positon (noté par le symbole $\bar{e}$ ou e^+). Lorsqu'un électron et un positon se rencontrent, ils peuvent s'annihiler en donnant naissance à des photons (notés γ), le plus souvent selon la réaction :

$$e + \bar{e} \rightarrow \gamma + \gamma$$

Les positons sont produits abondamment dans les chocs entre particules. On a observé l'existence d'un atome analogue à l'atome d'hydrogène, le positonium, où le proton habituellement présent dans l'atome d'hydrogène est remplacé par un positon, de sorte que le positonium est un état lié ($e\bar{e}$) d'un électron et d'un positon. Le positonium s'annihile d'ailleurs rapidement en donnant naissance à deux ou trois photons selon le cas.

L'antiproton ($\bar{p}$) a une charge négative opposée à celle du proton (p). Il a été observé en 1955. L'antineutron ($\bar{n}$) est électriquement neutre, comme le neutron. Néanmoins, le neutron et l'antineutron sont des particules distinctes, car, au contraire de deux neutrons, ils s'annihilent le plus souvent quand ils viennent au contact. Une telle annihilation résulte en général en la production d'un certain nombre de mésons π, variable selon les réactions. De même, proton et antiproton (*fig.* 2), proton et antineutron, neutron et antiproton peuvent s'annihiler.

Le méson π se présente sous trois formes distinctes : deux particules chargées π^+ et π^- et une particule neutre π^0. Les deux particules chargées π^+ - π^- forment une paire d'antiparticules, alors que le π^0 est sa propre antiparticule. Cela signifie qu'il n'existe pas une particule $\bar{\pi}^0$ distincte du π^0. Il en est de même du photon qui est également sa propre antiparticule.

En observant les interactions entre particules et antiparticules, on a pu constater qu'elles sont strictement identiques entre des couples de particules (par exemple, p - e, p - π^-) et les couples correspondants d'antiparticules (dans ce cas, $\bar{p}$ - $\bar{e}$, $\bar{p}$ - π^+), sauf le cas particulier des interactions faibles qui requiert plus de précision. Il en résulte donc en principe l'existence possible d'antinoyaux formés d'antiprotons et d'antineutrons, lesquels ont d'ailleurs été produits dans le cas de l'antideutérium et de l'antihélium. De même, on peut concevoir des antiatomes (non observés) où des positons seraient associés à des antinoyaux. On aurait ainsi de l'antimatière qui ne se distinguerait en rien, par ses propriétés optiques, chimiques, nucléaires, etc., de la matière ordinaire. Il a d'ailleurs été suggéré qu'un amas de galaxies sur deux pourrait être constitué d'antimatière.

La notion de charge

Le concept de charge électrique est bien connu, et l'on sait comment, en électrodynamique ordinaire, la charge détermine l'intensité des forces électriques. Dans le domaine des particules élémentaires, la charge apparaît sous un autre aspect qui est celui d'une loi de conservation. On constate en effet que, dans toutes les réactions observées, la charge totale des particules initiales est égale à la charge totale des particules finales. Cela n'est d'ailleurs possible que parce que toutes les charges sont des multiples entiers, positifs ou négatifs, de celle de l'électron. A titre d'exemple, nous donnons quelques réactions observées en indiquant les charges des particules, celle de l'électron étant — 1 par convention :

$$\underset{(-1)}{e} + \underset{(1)}{\bar{e}} \rightarrow \underset{(0)}{\gamma} + \underset{(0)}{\gamma}$$

$$\underset{(0)}{n} \rightarrow \underset{(1)}{p} + \underset{(-1)}{e} + \underset{(0)}{\bar{\nu}}$$

$$\underset{(1)}{p} + \underset{(-1)}{\bar{p}} \rightarrow \underset{(1)}{\pi^+} + \underset{(1)}{\pi^+} + \underset{(-1)}{\pi^-} + \underset{(-1)}{\pi^-} + \underset{(0)}{\pi^0}$$

$$\underset{(1)}{p} + \underset{(1)}{\pi^+} \rightarrow \underset{(0)}{n} + \underset{(1)}{\pi^+} + \underset{(1)}{\pi^+} + \underset{(0)}{\pi^0} \quad \text{etc.}$$

Cette loi de conservation de la charge n'est pas la seule de son espèce. On a en effet constaté l'existence de plusieurs autres quantités additivement conservées.

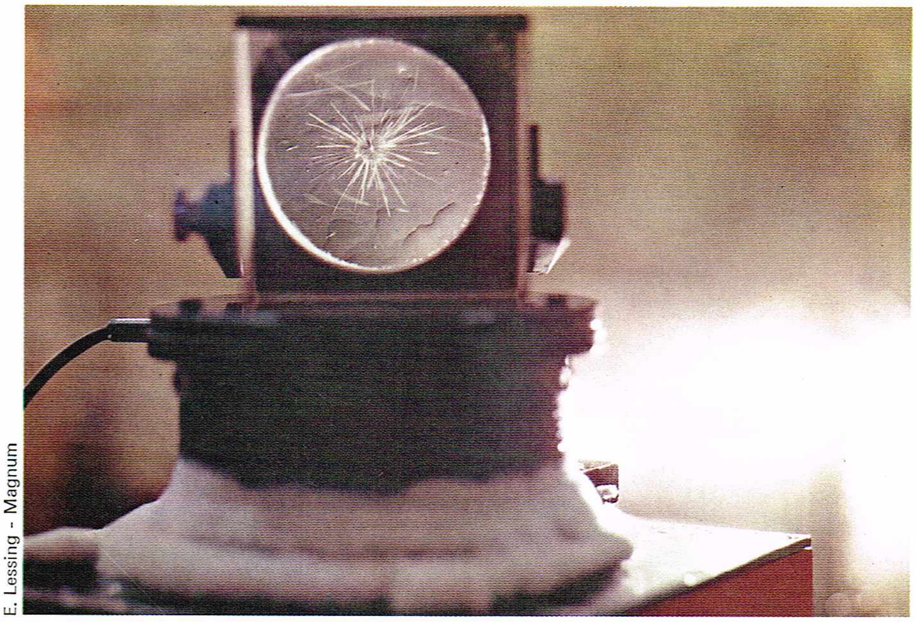

E. Lessing - Magnum

▲ *Traces de particules* α *provenant de la désintégration du plutonium, observées en chambre de Wilson.*

Charge baryonique

On peut associer à toutes les particules une « charge » différente de la charge électrique et appelée charge baryonique ou nombre baryonique, qui est conservée dans toutes les réactions observées. Pour les particules les plus connues, on posera pour valeur de cette quantité :

Particules	p	n	$\bar{p}$	$\bar{n}$	π^+	π^-	π	e	$\bar{e}$	μ	$\bar{\mu}$	ν	$\bar{\nu}$
Charge baryonique	1	1	— 1	— 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Exemples :

$$\underset{(1)}{n} \rightarrow \underset{(1)}{p} + \underset{(0)}{e} + \underset{(0)}{\bar{\nu}}$$

$$\underset{(1)}{p} + \underset{(-1)}{p} \rightarrow \underset{(0)}{\pi^+} + \underset{(0)}{\pi^-} + \underset{(0)}{\pi^0} + \underset{(0)}{\pi^0}$$

On appelle *baryons* (du grec lourd) les particules dont le nombre baryonique est différent de zéro, et *mésons* les hadrons de nombre baryonique zéro.

Charge leptonique

Elle vaut + 1 pour l'électron, le muon μ^- et le neutrino ν, — 1 pour le positon, le muon μ^+ et l'antineutrino $\bar{\nu}$ et zéro pour toutes les autres particules. Par exemple :

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu}\,; \quad \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}$$

sont des réactions permises et observées, alors que la réaction

$\mu^- \rightarrow e^- + \nu + \nu$ est interdite et inobservée.

Charges électronique et muonique

On constate en fait qu'il existe deux neutrinos différents ν_e et ν_μ ainsi que les antineutrinos $\bar{\nu}_e$ et $\bar{\nu}_\mu$. On peut assigner deux charges (conservées) qui valent pour la charge électronique :

e^-	e^+	ν_e	$\bar{\nu}_e$	(zéro pour les autres particules)
1	— 1	1	— 1	

pour la charge muonique :

μ^-	μ^+	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	(zéro pour les autres particules)
1	— 1	1	— 1	

On notera que la charge leptonique n'est autre que la somme des charges électronique et muonique.

L'étrangeté

Il existe encore un autre type de charge, l'étrangeté (Gell-Mann et Nishijima, 1954), qui est conservée par toutes les interactions, sauf les interactions faibles. Nous en donnons une table partielle :

Particule	p	n	$\bar{p}$	$\bar{n}$	π^+	π^-	π^0	K^+	K^0	K^-	$\bar{K}^0$	Λ^0	Σ^+	Σ^-	Σ^0
Étrangeté	0	0	0	0	0	0	0	1	1	— 1	— 1	— 1	— 1	— 1	— 1

$\bar{\Lambda}^0$	$\bar{\Sigma}^+$	$\bar{\Sigma}^-$	$\bar{\Sigma}^0$	Ξ^-	Ξ^0	$\bar{\Xi}^-$	$\bar{\Xi}^0$
1	1	1	1	— 2	— 2	2	2

▼ *Figure 2 :* *voir légende page 254.*

fig. 2

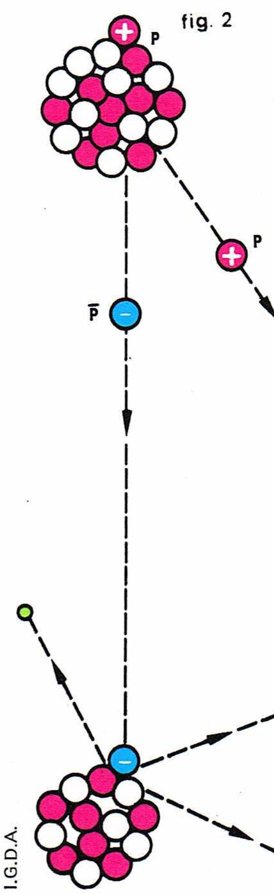

I.G.D.A.

Tableau III

Les particules élémentaires les plus importantes

Nom de la famille	Nom de la particule	Symbole	Masses**	Spin	Charge électrique	Antiparticule	Nombre de particules distinctes	Vie moyenne	Mode de désintégration typique
	photon	rayon γ	0	1	neutre	même particule	1	infinie	—
	graviton	—	0	2	neutre	même particule	1	infinie	—
famille électro-nique	neutrino électronique	ν_e	0	1/2	neutre	$\bar{\nu}_e$	2	infinie	—
	électron	e^-	1	1/2	négative	e^+ (positon)	2	infinie	—
famille muonique	neutrino muonique	ν_μ	0 (?)	1/2	neutre	$\bar{\nu}_\mu$	2	infinie	—
	muon	μ^-	206,77	1/2	négative	μ^+	2	$2{,}20 \cdot 10^{-6}$	$\mu^- \to e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$
mésons	méson π	π^+ π^- π^0	273,2 273,2 264,2	0 0 0	positive négative neutre	π^- π^+ π^0	3	$2{,}55 \cdot 10^{-8}$ $2{,}55 \cdot 10^{-8}$ $1{,}8 \cdot 10^{-16}$	$\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu$ $\pi^- \to \mu^- + \bar{\nu}_\mu$ $\pi^0 \to \gamma + \gamma$
	méson K	K^+ K^0	966,3 974,6	0 0	positive neutre	$\bar{K}^+$ négative $\bar{K}^0$	4	$1{,}23 \cdot 10^{-8}$ $\{ 0{,}92 \cdot 10^{-10}$ * $\{ 6 \cdot 10^{-8}$ *	$K^+ \to \pi^+ + \pi^0$ $K^0 \to \pi^+ + \pi^-$
	méson η	η	1 074	0	neutre	même particule	1	plus de 10^{-22}	$\eta \to \gamma + \gamma$
baryons	nucléons	p (proton) n (neutron)	1 836,12 1 835,65	1/2 1/2	positive neutre	$\bar{p}$ négative $\bar{n}$	4	infinie 1 013	— $n \to p + e^- + \bar{\nu}_e$
	lambda	Λ^0	2 182,8	1/2	neutre	$\bar{\Lambda}^0$	2	$2{,}62 \cdot 10^{-10}$	$\Lambda^0 \to p + \pi^-$
	sigma	Σ Σ Σ	2 327,6 2 342,6 2 333,5	1/2 1/2 1/2	positive négative neutre	$\bar{\Sigma}^+$ négative $\bar{\Sigma}^-$ positive $\bar{\Sigma}^0$	6	$7{,}9 \cdot 10^{-11}$ $1{,}6 \cdot 10^{-10}$ environ 10^{-20}	$\Sigma^+ \to n + \pi^+$ $\Sigma^- \to n + \pi^-$ $\Sigma^0 \to \Lambda^0 + \gamma$
	ksi	Ξ Ξ	2 584,7 2 572	1/2 1/2	négative neutre	$\bar{\Xi}$ positive $\bar{\Xi}$	4	$1{,}7 \cdot 10^{-10}$ $3 \cdot 10^{-10}$	$\Xi^- \to \Lambda^0 + \pi^-$ $\Xi^0 \to \Lambda^0 + \pi^0$
	oméga	Ω	3 280	3/2 (?)	négative	$\bar{\Omega}$ positive	2 36	environ 10^{-10}	$\Omega^- \to \Xi^0 + \pi^-$

* Le méson K a deux vies moyennes. Toutes les autres particules n'en ont qu'une.
** En unités de masse électronique.

▲ ***Tableau III :** les particules élémentaires les plus importantes.*

Ainsi les réactions fortes

$$\pi^- + p \to K^- + \Sigma^+$$
$$\pi^- + p \to K^0 + \Lambda^0$$

sont observées, alors que

$$\pi^- + p \to K^+ + \Sigma^-$$

est interdite et inobservée. Par contre, dans des interactions faibles comme

$$K^0 \to \pi^+ + \pi^-$$
$$\Lambda^0 \to p + \pi^-$$

etc., l'étrangeté n'est pas conservée.

On appelle particules étranges celles d'étrangeté non nulle. Ce nom leur vient de ce qu'elles appartiennent aux particules inattendues découvertes vers 1948.

On ne manquera pas de constater l'analogie qui existe entre ces lois de conservation inexpliquées et l'état de la chimie au début du XIXe siècle.

La parité

◄ ***Page 253, figure 2,** création et destruction d'un antiproton ; un proton p de haute énergie interagit avec un noyau et produit un nouveau proton p accompagné d'un antiproton $\bar{p}$. Ce dernier en traversant la matière finit par rencontrer un nouveau noyau et s'annihile en détruisant un proton (ou un neutron) et en produisant un certain nombre de mésons.*

Il existe une autre loi de conservation, la parité, qui est de nature toute différente et directement géométrique. Elle est liée au changement de sens (direct ou rétrograde) d'un trièdre de référence de l'espace. Dans un tel changement, les coordonnées (x, y, z) d'un point sont transformées en leurs opposés ($-x$, $-y$, $-z$). Un vecteur ordinaire (position $\vec{x}$, vitesse $\vec{v}$, quantité de mouvement $m\vec{v}$, champ électrique $\vec{E}$) change alors de signe : on peut dire qu'il a la parité -1. Par contre un « pseudo-vecteur » tel que le champ magnétique $\vec{B}$, le moment cinétique $\vec{x} \wedge \vec{p}$, le rotationnel d'un vecteur ordinaire, etc., ne change pas de signe : on dira qu'il a la parité $+1$. De même, certaines quantités scalaires sont invariantes (comme l'énergie cinétique $\frac{1}{2} m\vec{v}^2$), alors que d'autres (comme le produit scalaire $\vec{E} \cdot \vec{B}$) changent de signe. On dit que ces dernières sont des pseudo-scalaires.

Si les équations de base d'un problème ne dépendent pas du choix que l'on fait pour le sens du trièdre de référence, elles consisteront toujours à égaler un vecteur à un vecteur, un scalaire à un scalaire, mais jamais un vecteur à un pseudo-vecteur, par exemple. En d'autres termes, s'il apparaît dans une expression des termes qui ne changent pas de la même façon par symétrie d'espace, c'est que les équations de base du problème elles-mêmes ne sont pas invariantes dans cette symétrie.

Une autre manière de décrire ce genre de considération, qui parle plus à l'imagination, consiste à comparer deux situations déduites l'une de l'autre par réflexion dans un miroir où, par exemple, une main gauche devient une main droite.

Ce genre de considérations est très utilisé en mécanique quantique, et il est possible de vérifier qu'effectivement, il y a bien invariance par symétrie pour les interactions électromagnétiques et fortes (on dit alors habituellement qu'il y a « conservation de la parité »). Ce fut par conséquent une grande surprise de constater (Yang et Lee, 1956) que la parité n'est pas conservée dans les interactions faibles.

Pour le voir, on peut utiliser la désintégration bêta du cobalt 60 en nickel 60, électron et antineutrino :

$$Co \to Ni + e + \bar{\nu}$$

On dispose en pratique d'un échantillon contenant du cobalt 60, et on ne peut observer que la quantité de mouvement $\vec{p}$ de l'électron (puisque le noyau de nickel

est trop lent pour qu'on le détecte et que le neutrino est en pratique inobservable individuellement). Or, ce que l'on observe est la probabilité pour que l'électron soit émis avec la quantité de mouvement $\vec{p}$ et cette probabilité, mathématiquement, ne peut être que de la forme

$$dP/d^3\vec{p} = A\ (\vec{p}^2)$$

à cause de l'invariance par rotation, A étant une fonction de $\vec{p}^2$. Comme $\vec{p}^2$ ne change pas par symétrie d'espace, il en est de même de la probabilité, et il n'y a pas moyen de détecter une violation sous-jacente de la parité.

On raffine donc l'expérience en polarisant l'échantillon de cobalt. Cela signifie que, par des moyens magnétiques, on aligne les spins des noyaux de cobalt dans une direction donnée de telle sorte que la valeur moyenne du spin $\vec{S}$ (quantité moyenne, donc macroscopique) soit fixée et différente de zéro. Dans ce cas, la probabilité peut s'écrire en général sous la forme

$$dP/d^3\vec{p} = A\ (\vec{p}^2,\ S^2) + \vec{S}\cdot\vec{p}\ B\,(\vec{p}^2,\ S^2)$$

toujours en respectant l'invariance par rotation. Or, $\vec{p}$ est un vecteur ordinaire, alors que $\vec{S}$, comme tout moment cinétique, est un pseudo-vecteur (ainsi, le moment cinétique orbital $\vec{x} \wedge \vec{p}$ est visiblement un pseudo-vecteur). Donc, par symétrie, $\vec{S}\cdot\vec{p}$ est transformé en $-\vec{S}\cdot\vec{p}$. Si donc la probabilité d'émission dans une direction donnée est modifiée lorsque l'on change le signe de $\vec{S}$ (en changeant le signe du champ magnétique polarisant), cela signifie alors que le terme $\vec{S}\cdot\vec{p}$ est présent, et donc que les équations de base du problème (beaucoup plus compliquées en pratique) ne sont pas invariantes par symétrie.

Cette expérience, et d'autres de même nature, ont permis d'établir que la parité n'était pas conservée dans les interactions faibles.

Parité, conjugaison de charge et inversion de sens du temps

Une analyse plus détaillée des interactions faibles a permis de constater qu'elles violent également la conjugaison de charge ou, plus explicitement, que les équations de base de ces interactions ne sont pas invariantes lorsque toutes les particules y sont remplacées par leurs antiparticules, rien n'étant modifié par ailleurs. De plus, il est apparu que, si la parité (P) et la conjugaison de charge (C) sont fortement non conservées, il n'en est pas de même de leur produit (PC), qui est à peu près conservé. En termes imagés, cela signifie qu'un monde, vu dans un miroir et où, de plus, chaque particule est remplacée par son antiparticule, est presque identique au monde réel.

Finalement, en 1964, il est apparu que ce produit PC n'est pas exactement conservé mais que l'énergie (le potentiel ou l'hamiltonien selon les langages) des interactions faibles consiste en réalité en une somme de deux termes. Le premier conserve PC, alors que le second, mille fois plus petit environ, viole la conservation de PC. Pour cette raison, on parle parfois de ce second terme, actuellement très mal connu, comme d'une nouvelle interaction, dite « superfaible ».

Il est intéressant de remarquer à ce propos que, par des arguments théoriques très généraux, on s'attend que le produit PCT des deux transformations déjà rencontrées P et C et de l'inversion de sens du temps T sera conservé. La violation du produit PC par les interactions faibles signifierait alors une violation, minime mais décelable, de l'invariance des équations fondamentales de la physique par changement de signe du temps.

Autres lois de conservation

Les lois de conservation que nous venons de discuter sont faciles à décrire. Il existe cependant d'autres lois de conservation, spécifiques aux interactions fortes, qui ne peuvent être présentées qu'avec un outillage mathématique beaucoup plus poussé. C'est ainsi que l'on sait, depuis 1938, par l'étude des forces nucléaires proprement dites (forces entre protons et neutrons), que ces forces sont invariantes par un ensemble de transformations abstraites où la fonction d'onde d'un proton, par exemple, est remplacée par une combinaison linéaire de fonctions d'ondes de proton et de neutron. L'ensemble de ces transformations constitue un groupe, isomorphe au groupe de rotation, qui laisse invariantes toutes les interactions fortes. On l'appelle souvent groupe du spin isotopique.

Plus récemment (Gell-Mann, Neeman, 1958), on a constaté l'invariance approximative des interactions fortes sous l'action d'un groupe moins évident, le groupe SU (3) des mathématiciens. Sous l'action d'une opération de ce groupe, par exemple, la fonction d'onde d'un proton devient une combinaison linéaire de fonctions d'ondes de proton, neutron, Λ^0, Σ^+, Σ^-, Σ^0, Ξ^- et Ξ^0.

A partir de là, des arguments de simplicité mathématique ont conduit à postuler que tous les hadrons, y compris les résonances, pourraient être des combinaisons de nouvelles particules inobservées, les quarks. Cette spéculation est soutenue par un ensemble impressionnant de prédictions théoriques en accord avec l'expérience, mais tous les efforts accomplis jusqu'à présent pour tenter d'observer les quarks se sont soldés par un échec. Les recherches actuelles tendent donc à voir dans les quarks de nouveaux objets plus fondamentaux qui n'auraient pas toutes les propriétés que l'on rencontre dans les particules plus ordinaires.

Les résonances

Les premières particules connues étaient stables ou avaient des temps de vie suffisamment longs pour que l'on pût observer leur trajectoire dans un appareil détecteur. En effet, si une particule a une durée de vie τ et qu'elle se déplace à une vitesse proche de *c*, elle peut parcourir une distance $c\tau$ avant de se désintégrer. $c\tau$ vaut environ 600 m dans le cas du muon, 7 m dans le cas du π^+, 10 cm pour le Λ^0 et peut être d'ailleurs plus élevée par l'effet relativiste de dilatation du temps lorsque la vitesse est très proche de *c*.

Toutes les particules que nous venons de mentionner ont des temps de vie qui vont de 10^{-6} à 10^{-10} seconde et se désintègrent par interactions faibles. Or, si une particule a le choix entre une désintégration par interaction faible ou par interaction électromagnétique ou forte, elle passera inévitablement par le second mode, beaucoup plus probable à cause de l'intensité des interactions. En contrepartie de cette probabilité de désintégration élevée, sa durée de vie sera beaucoup plus faible.

C'est ainsi que certaines particules se désintègrent sous l'action des forces électromagnétiques. C'est le cas notamment du π^0 ($\tau = 1{,}8 \times 10^{-16}$ s) et du

$$\Sigma^0\ (\tau \simeq 10^{-20}\ s)$$

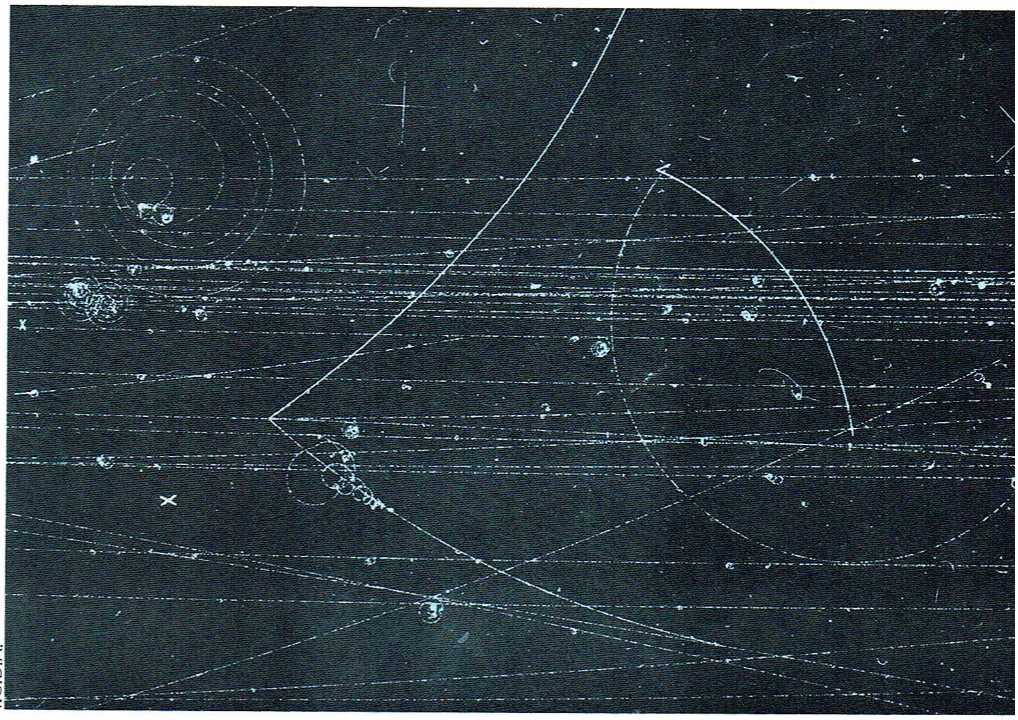

I.G.D.A.

▲▼ Photographie (ci-dessus) et schéma d'interprétation (ci-dessous) de traces de particules à la chambre à bulles à hydrogène. A droite, un faisceau de mésons π^+ d'énergie 11 GeV interagit avec les protons de l'hydrogène selon la réaction $\pi^+p \rightarrow p\pi^-\pi^+\pi^+$. La présence d'un champ magnétique fait incurver les traces des particules selon leur signe. A gauche, la désintégration d'un méson π^+ en un méson μ^+ et un électron positif e^+.

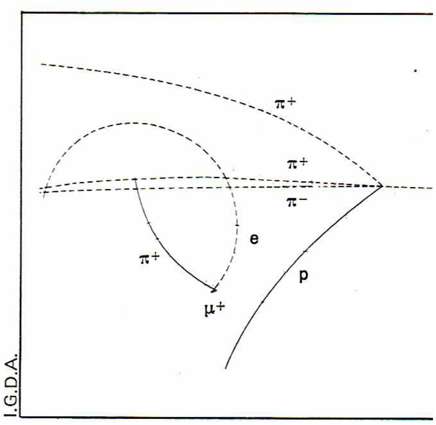

I.G.D.A.

Tableau IV

Interactions		symétrie SU (3)	symétrie de spin isotopique	étrangeté	nombre baryonique	charge électrique	nombre électronique	nombre muonique	parité	PC (parité × échange particules-antiparticules)	inversion du temps
		Lois de conservation									
fortes	très fortes	oui	oui	oui	oui	oui			oui	oui	oui
fortes	moyennement fortes	non	oui	oui	oui	oui			oui	oui	oui
électromagnétiques			non	oui	oui	oui			oui	oui	oui
faibles	faibles			non	oui	oui	oui	oui	non	oui	oui
faibles	superfaibles				oui	oui	?	?	non	non	non

▼ ***Figure 3 :** les* **trajectoires de Regge** ***des 14 baryons de masse inférieure à 2 000 MeV. Les lignes colorées relient des particules récurrentes situées sur une même trajectoire. Pour les baryons, le spin est demi-entier (1/2, 3/2, 5/2, ...). Les récurrences peuvent avoir 2, 4 ou 6 unités de spin en plus du spin de la particule fondamentale. Entre parenthèses sont indiqués la masse, le spin et la parité (cette dernière par un signe + ou —).***

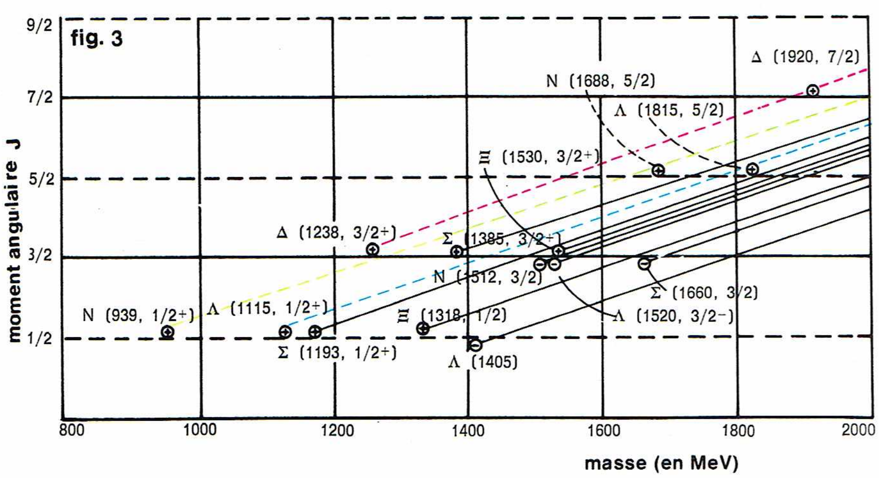

I.G.D.A.

On réserve en général le nom de *résonances* à des particules qui se désintègrent par interactions fortes et dont les vies moyennes sont typiquement de l'ordre de 10^{-23} s. Il est clair qu'on ne peut pas les détecter par leurs trajectoires, beaucoup trop courtes (de l'ordre de 10^{-13} cm ; un rayon d'atome !).

La détection de ces résonances doit donc procéder de manière indirecte. Pour cela, on peut considérer leur mode de formation plutôt que leur désintégration. Prenons par exemple le cas du méson π^0 qui se désintègre normalement en deux photons en $1{,}8 \times 10^{-16}$ s selon le schéma :

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$$

Habituellement, on constate la présence du π^0 en mesurant l'énergie et l'impulsion du système des deux photons, et en constatant que leur masse globale est bien celle du π^0. En principe, on pourrait établir l'existence et les caractéristiques du π^0 d'une autre manière (analogue à celle qui a permis de mesurer sa vie moyenne) en le formant à partir des deux photons au lieu de se contenter d'observer sa désintégration. Pour cela, il suffit en principe d'envoyer deux photons l'un sur l'autre (en pratique, on envoie un photon sur le champ électrique d'un noyau, lui-même constitué de photons). Si ces deux photons forment un π^0, celui-ci vivra trop peu de temps pour qu'on le détecte, car il se désintégrera trop vite en deux nouveaux photons. Comment saura-t-on donc que le π^0 existe ? Parce que, à cause de son existence, les deux photons ont « résonné » et que l'on constate que la probabilité de diffusion des photons est incomparablement plus grande, quand leur énergie est celle d'un π^0, que dans toutes les autres bandes d'énergie. Au total, l'existence du π^0 se traduit par l'apparition de la courbe en cloche caractéristique d'une résonance dans la probabilité (ou la section efficace) de diffusion des deux photons. La largeur Γ de la courbe en cloche est d'ailleurs inversement proportionnelle à la durée de vie τ du π^0 ($\Gamma = \hbar/\tau$), ce qui permet de mesurer à la fois la masse et la vie moyenne du π^0.

La même technique s'applique, de manière d'ailleurs plus facile, au cas des résonances proprement dites. C'est ainsi que la particule dite Δ^{++} s'observe par une courbe de résonance dans la diffusion d'un méson π^+ sur un proton.

Bien que l'on ait pu autrefois distinguer « particules » et « résonances » comme des objets de nature différente, les premières étant en quelque sorte considérées comme plus « fondamentales » que les secondes, cette distinction apparaît maintenant comme totalement abandonnée.

Ce sont les résonances qui constituent le plus gros des effectifs des particules élémentaires, et l'on pense généralement que l'on n'en a encore découvert qu'une partie.

Interactions et lois de conservation

Nous pouvons maintenant indiquer dans le *tableau* IV les lois de conservation vérifiées par chacune des interactions fondamentales en laissant de côté le cas des interactions gravitationnelles.

On notera que l'invariance du spin isotopique est vérifiée exactement par les interactions fortes et qu'elle est violée par les interactions électromagnétiques. Si cette invariance était absolument respectée, les particules dont les fonctions d'ondes sont combinées lors d'une transformation devraient avoir strictement la même masse. Ainsi, le proton et le neutron devraient avoir la même masse, de même que le triplet des mésons π (π^+, π^-, π^0) ou celui des baryons Σ (Σ^+, Σ^-, Σ^0). En fait, les masses de ces particules sont effectivement très voisines : en prenant pour unité la masse de l'électron, celle du proton est 1 836,12 et celle du neutron 1 838,65 ; de même, le π^+ et le π ont la même masse (car ce sont des antiparticules) égale à 273,2 fois celle de l'électron, alors que la masse du π^0 est très voisine, soit 264,2 masses d'électron. On pense que ces légères différences de masses sont dues à l'effet des interactions électromagnétiques, mais il n'existe pas de calcul entièrement satisfaisant justifiant ce point de vue. Finalement, soulignons que les particules ainsi groupées par l'invariance de spin isotopique ont toutes le même spin (1/2 pour le proton et le neutron, 0 pour les trois mésons π, 1/2 pour les trois baryons Σ, etc.). On dit que ces particules forment un *multiplet*.

De manière analogue, si la symétrie SU (3) était strictement vérifiée, on pourrait grouper les particules en des ensembles plus vastes de particules de même masse et de même spin. Ainsi le proton, le neutron, le baryon Λ^0, les trois membres Σ^+, Σ^-, Σ^0 du multiplet des Σ et les deux membres Ξ^- et Ξ^0 du multiplet des Ξ appartiendraient à un tel ensemble. En pratique, toutes ces particules ont effectivement le même spin, mais leurs masses diffèrent appréciablement.

On peut décrire cette « violation de la symétrie SU (3) » en supposant que l'énergie due aux interactions fortes (ou le potentiel, ou l'hamiltonien selon le langage) consiste en deux parties : les interactions très fortes qui conservent SU (3) et les interactions moyennement fortes (qui seraient environ 10 % des précédentes) qui ne conservent pas SU (3).

La classification actuelle des hadrons

Nous venons de voir que les hadrons peuvent être classés en ensemble de particules de même spin et de masses très voisines (multiplets de spins isotopiques) ou en ensemble plus vaste de particules de même spin et de masses analogues quoique moins proches [multiplets SU (3)]. Cette classification correspond à des relations bien définies entre de nombreuses propriétés de ces particules (masse, temps de vie, modes de désintégration, réactions).

Il est apparu depuis les années soixante qu'il existe une autre manière de classer les particules qui présente également des régularités remarquables. Considérons par exemple la *figure* 3 où l'on a représenté un certain nombre de baryons sur un graphique dans lequel l'abscisse est la masse, et l'ordonnée est le spin (ici noté J). On constate immédiatement que des particules (ou résonances) de même charge ou en multiplets isotopiques de même multiplicité mais de spins différents se situent sur des droites parallèles. Les particules ainsi associées ont leur spin qui diffère de deux unités. Les droites qui interpolent ainsi le spin des particules en fonction de la masse constituent ce que l'on appelle des « trajectoires de Regge ». Il existe également de telles trajectoires pour les mésons, où cependant le spin est une fonction linéaire de la masse au carré et non pas de la masse elle-même. (On sait d'ailleurs interpréter théoriquement cette différence de comportement.) Là encore, un grand nombre de propriétés des particules s'interpolent de manière naturelle sur une même trajectoire de Regge.

On constate donc qu'il y a, parmi la foule des particules et des résonances à interactions fortes, des régularités considérables qui les associent en fait en un très petit nombre de familles. Une famille est constituée par l'ensemble des particules situées sur toutes les trajectoires de Regge dont les premiers éléments (ceux de plus bas spin et de plus basse masse) constituent un multiplet de la symétrie SU (3).

Dans le modèle des quarks, on suggère d'interpréter ces régularités de la manière suivante : il existe trois quarks différents (q_1, q_2, q_3) ainsi que les antiquarks correspondants ($\bar{q}_1$, $\bar{q}_2$ et $\bar{q}_3$). Les trois quarks forment un seul multiplet SU (3), alors que, du point de vue de la symétrie de spin isotopique, les deux quarks (q_1, q_2) forment un doublet de même masse, le quark q_3 formant un singulet de masse légèrement différente. Le spin des quarks est 1/2. Les baryons (tous les baryons) sont des états liés de trois quarks, alors que les mésons sont des états liés d'un quark et d'un antiquark. En permutant le rôle joué dans un baryon ou un méson par chacun des quarks fondamentaux, on engendre toute une famille de multiplets de SU (3). Ainsi un multiplet de SU (3) serait constitué par des « atomes » formés de quarks différents mais ayant les mêmes fonctions d'ondes. Les trajectoires de Regge seraient alors la manifestation d'excitations orbitales de ces « atomes », tout comme, par exemple, un atome ou un noyau présente toujours un niveau fondamental de bas spin et des états excités de spin plus élevé. La linéarité de ces trajectoires manifesterait une simplicité encore mystérieuse de la dynamique des interactions fortes.

Quelle qu'en soit la raison, il semble donc qu'en réalité il règne beaucoup d'ordre et de régularité dans le foisonnement des particules hadroniques, et cela encourage bien des espoirs de pouvoir quelque jour découvrir la clef de cet ordre.

L'état présent de nos connaissances sur les interactions fondamentales

Les interactions fortes

On y a découvert de très grandes régularités dont on ne connaît pas encore l'origine. On sait correler entre eux, par le calcul à 10 % près, un grand nombre de faits expérimentaux, par des méthodes très variées plus ou moins bien reliées entre elles. Cependant, il n'existe pas de méthode sûre et universelle pour calculer les données expérimentales ni pour expliquer l'ensemble de leurs régularités.

Les interactions électromagnétiques

On en connaît très bien les lois fondamentales, ce qui signifie que l'on sait calculer avec une très grande précision les phénomènes dominés par ces interactions. Citons comme exemples les propriétés des atomes (calcul des niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène à près de 10^{-7} près), le moment magnétique de l'électron et du muon (au millionième près), les probabilités de production et d'annihilation de paires e^+ - e^- ou μ^+ - μ^-, la diffusion des électrons sur les positons, sur les électrons ou les protons, des photons sur les électrons, etc. On peut résumer l'ensemble de ces connaissances en disant que, à la limite extrême de la précision expérimentale, les équations de Maxwell quantifiées sont exactement vérifiées jusqu'à des distances d'au moins 10^{-14} cm.

Les interactions faibles

Peu à peu, on a réussi à cerner par un va-et-vient entre la théorie et l'expérience la forme des lois des interactions faibles. Cela signifie à présent qu'une formule d'une ligne exprime l'énergie de toutes les interactions faibles et qu'il est possible, à partir de là, de calculer pratiquement tous les phénomènes qui mettent en jeu des interactions faibles. Cependant, bien que ce qui est acquis soit entièrement digne de confiance, on n'est pas certain de connaître tous les termes de ces lois fondamentales, et la recherche est toujours en cours. Elle devient malheureusement de plus en plus difficile, car les termes mal connus deviennent très difficilement accessibles. Cela tient dans certains cas à des raisons théoriques, car notre ignorance des interactions fortes constitue un obstacle préalable qui nous empêche de démêler les interactions faibles. Parfois aussi, cela tient à des raisons expérimentales : en effet, un bon nombre de propriétés des interactions faibles ne sont démêlables qu'en opérant des expériences sur les neutrinos. Or les neutrinos interagissent en général très peu avec les autres particules (par exemple, un neutrino seulement venant du Soleil sur cent millions subira une interaction en traversant toute la Terre), de telle sorte que l'on doit réaliser des expériences très chères en hommes, en équipement et en temps, pour avancer dans ce domaine de la physique.

Les interactions gravitationnelles

Pour l'instant, elles demeurent essentiellement connues à l'échelle macroscopique où elles semblent bien décrites par la Relativité générale. La synthèse du macroscopique et du microscopique, de la Relativité générale et de la mécanique quantique, se heurte encore à l'heure actuelle à de grosses difficultés, peut-être fondamentales ou peut-être simplement techniques.

Il convient de souligner qu'aucun autre type d'interaction ou, si l'on préfère, aucun autre type de force ne paraît exister à l'échelle microscopique, de telle sorte que la multitude des forces et des formes d'énergie que nous connaissons à notre échelle dérive entièrement de ces quatre interactions fondamentales.

Quelques particules particulièrement importantes

Le proton et le neutron

Ces deux constituants du noyau, de masses très voisines, forment un doublet isotopique. On les appelle d'ailleurs collectivement les nucléons. Leur spin est 1/2. A relativement basse énergie (moins de 300 MeV d'énergie cinétique totale des deux particules dans le repère du centre de masses), on peut décrire leur interaction par un potentiel. Le potentiel d'interaction proton-proton est le même que celui de l'interaction neutron-neutron (à part la répulsion coulombienne des protons), et cela constitue une confirmation de la symétrie de spin isotopique. Les particules s'attirent lorsqu'elles sont à une

***◀ Page ci-contre, tableau IV : les lois de conservation satisfaites par chacun des types d'interactions ; on a indiqué par* oui *ou* non *les cas où la loi de conservation est satisfaite ou violée ; lorsque rien ne figure dans la case correspondante, cela peut correspondre, selon le cas, au fait que la question n'a pas de sens ou que la réponse n'est pas un simple* oui *ou* non.**

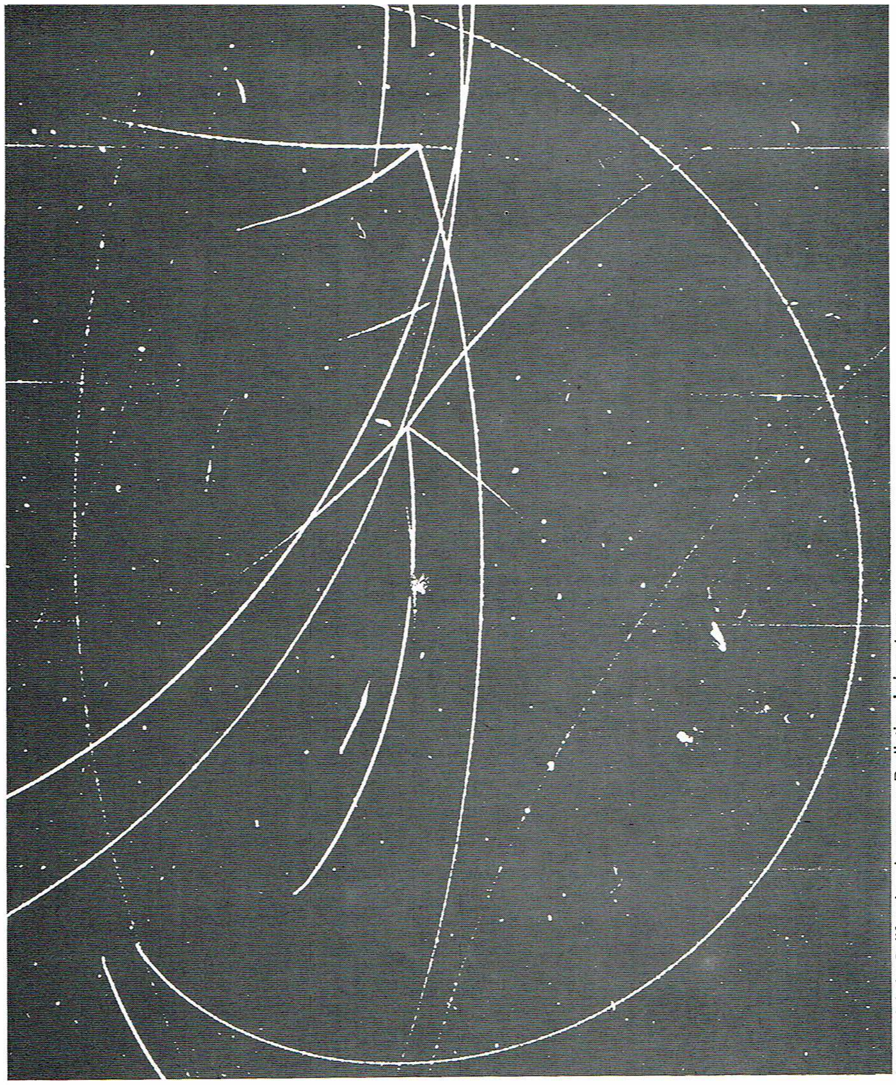

▲ *Interactions de neutrons dans une chambre de Wilson placée auprès du cyclotron de Berkeley (université de Californie, États-Unis). En haut et au centre de la photo, on voit l'explosion de deux noyaux d'oxygène frappés par deux neutrons (dont les traces sont invisibles puisqu'il s'agit de particules neutres). Les traces des particules sont incurvées à cause du champ magnétique dans lequel est placée la chambre de Wilson.*

distance comprise entre 0,4 fermi (1 fermi = 10^{-13} cm) et l'infini. Cette force d'attraction décroît exponentiellement avec la distance (c'est l'effet de portée finie des forces nucléaires). Lorsqu'elles sont à moins de 0,4 fermi, les nucléons se repoussent fortement.

En envoyant des électrons se diffuser sur des nucléons, on a pu constater que ces derniers avaient une extension spatiale finie, de l'ordre d'un fermi, et l'on connaît avec précision la répartition de la charge électrique en leur intérieur. Ainsi le neutron, globalement neutre, a-t-il une structure en couches : il a un centre chargé positivement et une périphérie chargée négativement. Le proton est stable, alors que le neutron est instable à l'état libre où il se désintègre avec une vie moyenne de l'ordre d'un quart d'heure selon le schéma

$$n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e$$

($\bar{\nu}_e$ étant l'antineutrino électronique). A l'intérieur d'un noyau, le neutron est stabilisé par l'effet du principe d'exclusion de Pauli (voir le texte de *Physique nucléaire*), car le proton de désintégration ne peut trouver d'état quantique vide où se produire.

Les mésons π

Ils sont au nombre de trois : deux mésons chargés π^+ et π^- qui sont chacun l'antiparticule de l'autre et un méson neutre π^0 qui est sa propre antiparticule. Ils n'existent pas à l'état libre dans la nature, et il faut donc les produire artificiellement. La méthode la plus fréquemment utilisée pour cela consiste à envoyer un faisceau de protons rapides issu d'un accélérateur sur une cible (un bloc de métal, par exemple). Il en résulte la production d'un grand nombre de mésons π que l'on peut sélectionner en énergie et en direction à l'aide de séparateurs magnétiques.

On pense communément que la structure spatiale étendue du proton et du neutron est due à un nuage de mésons π virtuels qui entoure le nucléon. Cette notion de particule virtuelle constitue un aspect assez technique de la mécanique quantique, mais on peut la décrire en termes simples, sinon rigoureux, de la manière suivante. Parmi les relations d'incertitude de Heisenberg, il en est une qui relie l'incertitude sur l'énergie d'un état, soit ΔE, et la durée Δt de l'intervalle de temps correspondant; cette relation s'écrit :

$$\Delta E \Delta t \gtrsim \hbar$$

Imaginons que l'état considéré soit celui d'un nucléon au repos. Si le nucléon émet un méson π, son énergie augmente d'au moins mc^2 l'énergie de masse du méson dont la masse est désignée par m. Mais une telle variation d'énergie

$$\Delta E = mc^2$$

est tolérable pendant un temps inférieur à

$$\Delta t = \frac{\hbar}{\Delta E} = \frac{\hbar}{mc^2}$$

Comme la vitesse de ce méson π est au plus égale à c et qu'il n'existe qu'un temps Δt, il peut tout au plus se trouver à une distance de l'origine donnée par :

$$r_0 = c\Delta t = \frac{\hbar}{mc}$$

Malgré le caractère quelque peu léger de ce calcul, il n'en donne pas moins une conclusion importante que des calculs plus élaborés confirment : un nucléon contient des mésons π, en perpétuel état d'émission et de réabsorption, qui étalent sur une distance r_0 ($\sim 1{,}2 \times 10^{-13}$ cm) la plupart des propriétés du nucléon et, en particulier, sa charge électrique. On peut ainsi s'expliquer pourquoi la charge du proton et du neutron est étalée. De même, si un second nucléon s'approche du premier, il peut tout aussi bien absorber le méson π émis par le premier nucléon. Cet échange de mésons π entre deux nucléons aboutit en fait à créer un potentiel d'interaction entre eux, qui n'est autre que celui des forces nucléaires.

Ce phénomène est très important en physique des particules. Alors qu'en physique macroscopique, on doit considérer des objets (la Terre et la Lune, par exemple) entre lesquels une force (ici gravitationnelle) agit, en physique des particules, la force elle aussi est identifiable à la présence d'une particule. En d'autres termes : les particules déterminent les forces qui agissent sur elles.

La théorie mésonique des forces nucléaires, que nous venons d'esquisser, permet en fait une étude assez détaillée des potentiels nucléaires. Il est nécessaire pour cela de considérer non seulement l'échange de mésons π virtuels, mais aussi celui de résonances mésoniques (mésons η, ρ, ω, ...).

Les mésons π ne sont pas des particules stables. Les mésons chargés π^+ et π^- se désintègrent avec une vie

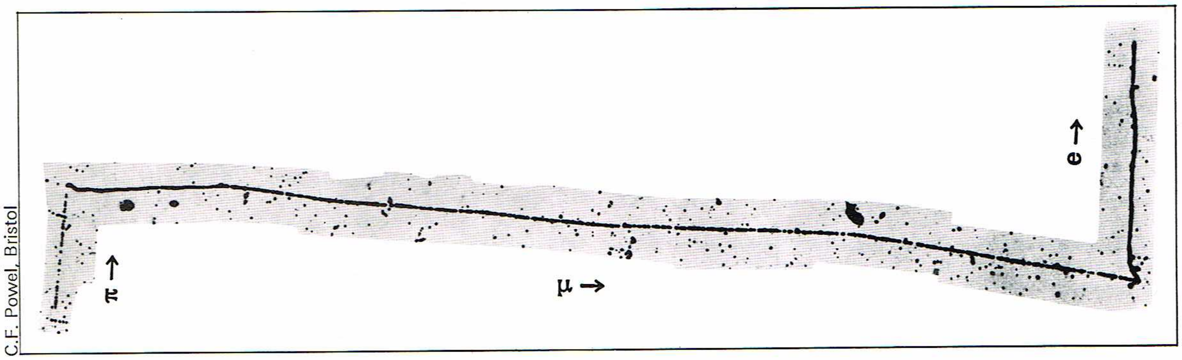

▶ *Exemple de désintégration d'un méson π ($\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$) dans une émulsion photographique : un méson π se désintègre en un muon et un antineutrino (invisible parce que neutre) ; après un certain parcours, le muon se désintègre à son tour en produisant un électron, un neutrino et un antineutrino (tous deux invisibles).*

moyenne de 2,55 × 10^{-8} s en donnant un muon et un antineutrino muonique (ou les antiparticules) :

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$
$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

il s'agit là d'une interaction faible.

Les mésons π neutres se désintègrent électromagnétiquement en deux photons avec une vie moyenne de 1,8 × 10^{-16} s :

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$$

On dispose à présent, par des moyens indirects, d'une assez bonne connaissance des interactions entre mésons π.

Les mésons K

Les mésons K sont des particules étranges. Ils forment un doublet isotopique comprenant un méson chargé K^- et un neutre K^0. Les antiparticules correspondantes sont un méson négatif K^- et un autre méson neutre $\bar{K}^0$.

La désintégration du K^0 et du $\bar{K}^0$ est intéressante. Elle procède par interactions faibles. On observe, par une étude détaillée de ces désintégrations, que les combinaisons linéaires d'états

$$K_S^0 = \frac{1}{\sqrt{2}} (K_0 + \bar{K}_0)$$

$$K_L^0 = \frac{1}{\sqrt{2}} (K_0 - \bar{K}_0)$$

ont des vies moyennes très différentes qui sont respectivement 0,92 × 10^{-10} s et 6 × 10^{-8} s. On a également pu mesurer la différence de masse entre le K_S^0 et le K_L^0 qui est très petite mais différente de zéro. Une analyse détaillée de cette mesure, tenant compte du fait que celle-ci a été effectuée dans un laboratoire où agit la pesanteur terrestre, permet de montrer que particule et antiparticule (ici le K^0 et le $\bar{K}^0$) subissent la même force de pesanteur. En d'autres termes, il n'y a pas d'antigravitation pour les antiparticules.

Les muons

Les deux muons μ^- et μ^+ constituent une paire d'antiparticules. Ils ressemblent énormément, hormis par la masse, aux électrons. Ils se désintègrent par interaction faible :

$$\mu^- \rightarrow e + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$
$$\mu^+ \rightarrow \bar{e} + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

Les neutrinos

Les neutrinos sont au nombre de quatre : neutrinos électronique, muonique et antineutrinos électronique, muonique (ν_e, ν_μ, $\bar{\nu}_e$, $\bar{\nu}_\mu$). Ce sont des particules neutres, de masse probablement nulle et en tout cas très petite. Ils ont été détectés expérimentalement pour la première fois en 1956. A l'heure actuelle, on forme, grâce aux accélérateurs, des faisceaux secondaires de neutrinos qui constituent un moyen puissant d'étude des interactions faibles.

Les neutrinos semblent jouer un rôle très mineur dans la nature, sauf peut-être dans l'explosion des supernovae où ils pourraient être un agent important dans le mécanisme explosif.

BIBLIOGRAPHIE

ADAIR R. K., FOWLER E. C., *Strange Particles*, Interscience Publishers, New York, 1963. - BETHE H. A., *What Holds the Nucleus Together*, in Scientific American, septembre 1963. - DE BENEDETTI S. A., *Mesonic Atoms*, in Scientific American, octobre 1956. - GAMOW G., *The Principle of Uncertainty*, in Scientific American, janvier 1958; *The Exclusion Principle*, in Scientific American, juillet 1959. - GLASER D. A., *The Bubble Chamber*, in Scientific American, février 1955. - HOFSTADTER, *The Atomic Nucleus*, in Scientific American, juillet 1956. - LIVINGSTON M. S., *High-Energy Accelerators*, Interscience Publishers, New York, 1954. - MORRISON P., *The Overthrow of Parity*, Scientific American, mars 1951. - OMNÈS R., *Introduction à l'étude des particules élémentaires*, Ediscience, Paris, 1969. - YANG C. N., *Elementary Particles*, Princeton U. P., Princeton, 1961.

fig. 1

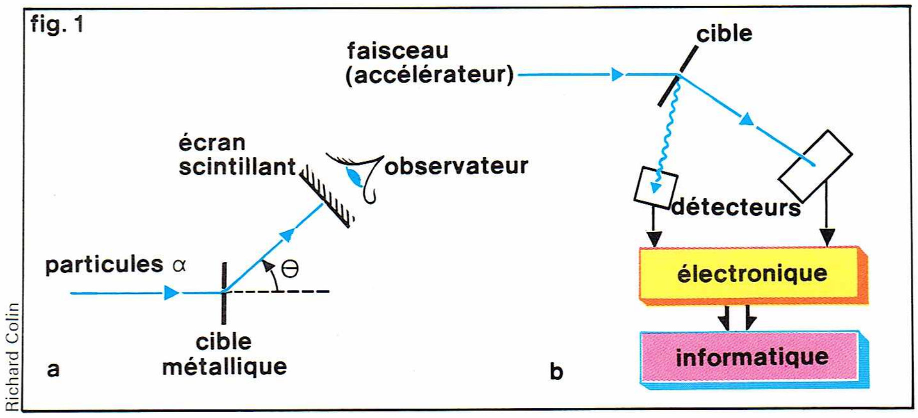

▲ *Figure 1 : schéma simplifié de dispositif d'instrumentation nucléaire ;*
a, expérience de Rutherford : l'observateur compte les particules diffusées selon un angle θ, en observant de visu *leur impact sur un écran scintillant ;*
b, dispositif actuel : le principe reste le même, mais la détection fait largement appel à l'électronique et à l'informatique.

INSTRUMENTATION NUCLÉAIRE

La physique nucléaire a pris son essor avec les découvertes sur la radio-activité effectuées à la fin du siècle dernier par Henri Becquerel, Pierre et Marie Curie. Cependant, on considère souvent que les travaux de Rutherford et ses élèves (vers 1908) sur la diffusion des particules α par diverses cibles constituent la première expérience de physique nucléaire : ces mesures ont conduit Rutherford à postuler l'existence de ce petit édifice extraordinairement dense et compact que constitue le noyau de l'atome. La *figure* 1a donne un schéma simplifié du dispositif expérimental : un faisceau de particules α émis par une source radio-active naturelle est envoyé sur une cible métallique mince. L'observateur compte les particules diffusées à un angle θ en observant *de visu* leur impact sur un écran scintillant. En près de soixante-dix ans, d'incessants raffinements techniques ont fourni une panoplie extrêmement variée au physicien nucléaire. Aujourd'hui, celui-ci a perdu le contact visuel direct qu'avait Rutherford avec ses manipulations. Cependant, le schéma de principe de la plupart des expériences est demeuré le même (*fig.* 1b) : on bombarde une cible avec un faisceau de projectiles, en général issu d'un accélérateur; on obtient des renseignements à partir de l'étude des particules secondaires émises après interaction entre l'un des ions du faisceau et un noyau de la cible. A cet effet, un ou plusieurs détecteurs sont placés au voisinage de la cible. Le décodage des informations qu'ils fournissent fait un large appel aux techniques de l'électronique et de l'informatique.

Accélérateurs de particules

L'étude du noyau, puis de ses constituants, procède d'une interaction entre l'observateur et les systèmes qu'il étudie. Pour accroître ses connaissances, le physicien s'efforce de provoquer des perturbations sans cesse plus profondes de l'objet sur lequel il concentre ses recherches. C'est le rôle des projectiles de créer ces perturbations. Les forces d'interaction nucléaires ne se manifestent que si les deux partenaires d'une collision sont très près l'un de l'autre, à une distance de l'ordre du fermi

$$(1 \text{ fermi} = 10^{-15} \text{ m})$$

Pour étudier les manifestations de ces forces, il est d'abord nécessaire que les projectiles, lorsqu'ils sont chargés positivement, comme c'est fréquemment le cas, possèdent une énergie cinétique suffisante pour vaincre la force de répulsion électrique (ou barrière coulombienne) créée par le noyau cible. Les particules α émises par les sources radio-actives naturelles ont une énergie comprise entre environ 5 et 8 MeV et ne peuvent franchir la barrière créée par les noyaux les plus lourds (barrière d'environ 22 MeV pour le système $\alpha + {}^{208}_{82}Pb$).

Les différents accélérateurs construits depuis 1930 permettent maintenant l'étude de n'importe quel noyau. La *figure* 2 illustre le domaine d'énergie et le type d'ions accélérés correspondant à chaque type de machine.

Les progrès constants qui ont été réalisés dans la technique des accélérateurs sont liés à une multitude de développements particuliers. Parmi les plus importants,

▶ *Figure 2 : croissance en énergie des différents types d'accélérateurs de particules.*

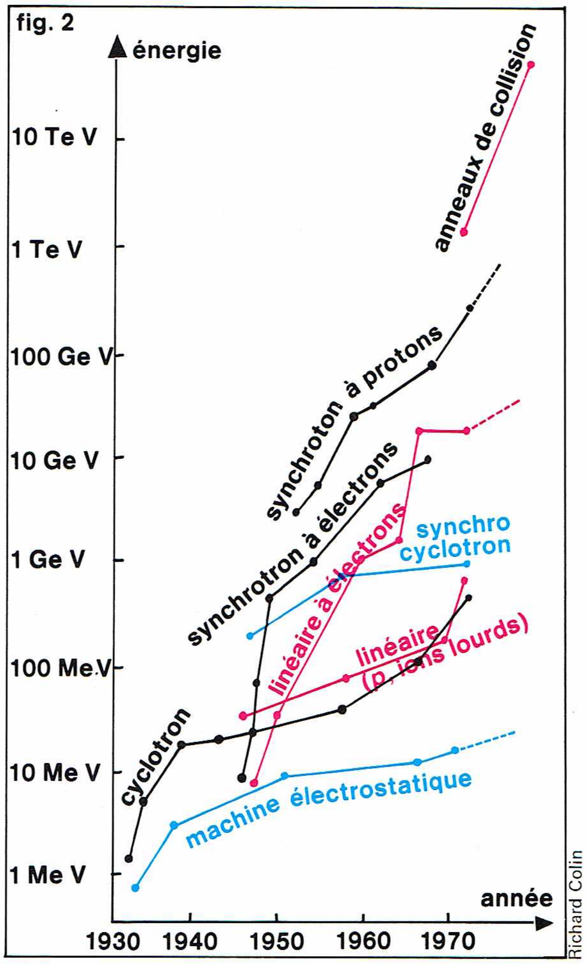

▼ *Figure 3 : spectre d'énergie de deutons de 13 MeV diffusés élastiquement et inélastiquement sur une cible de ²⁰⁸Pb à un angle θ = 150°. Les particules diffusées sont analysées par un aimant (le pic noté ²⁸Si correspond à une impureté de silicium dans la cible).*

citons les progrès des sources d'ions, les puissances accrues des sources de champ haute fréquence, les performances atteintes sur le vide très poussé (10^{-11} à 10^{-12} torr ou mm de Hg pour les anneaux de stockage du CERN), une maîtrise sans cesse plus grande des trajectoires de particules dans un champ électromagnétique (ce progrès étant tributaire de l'utilisation des ordinateurs, soit pour le calcul préalable des modèles, soit pour le contrôle du processus d'accélération). Les particules légères (protons, deutons puis électrons) ont constitué les premiers projectiles. La première tendance dans les améliorations apportées aux accélérateurs a été d'accroître leur énergie. On dispose ainsi de « sondes » nucléaires de plus en plus précises.

La mécanique ondulatoire, élaborée par Louis de Broglie, nous apprend qu'à une particule de masse m et de vitesse v on peut associer une onde caractérisée par la longueur d'onde $\lambda = \frac{h}{mv}$, où h est une constante appelée constante de Planck. Cette longueur d'onde fournit une bonne estimation de la précision avec laquelle on peut localiser la particule ; pour un proton, elle vaut 3 fermis à 100 MeV, 0,74 fermi à 1 GeV. Dans le même temps, la perturbation créée dans le système étudié devient de plus en plus profonde. Lorsque l'énergie atteint l'ordre de grandeur de l'énergie de masse au repos des constituants du noyau, on peut créer de nouvelles particules et aborder leur fascinante étude.

Une deuxième évolution des accélérateurs a consisté dans l'élargissement de la gamme des particules accélérées. On appelle ions lourds les projectiles possédant un nombre de masse A supérieur à 4. L'étude, assez récente, de leur interaction avec d'autres noyaux a ouvert un nouveau champ en physique nucléaire. Il existe, en fonctionnement ou en construction, des accélérateurs potentiellement capables de communiquer à des ions d'uranium une énergie suffisante pour franchir la barrière coulombienne dans une collision uranium + uranium.

L'énergie finale communiquée à un faisceau d'ions n'est pas la seule caractéristique intéressant le physicien. A titre d'exemple, la *figure* 3 montre le spectre d'énergie de deutons (projectiles formés d'un proton et d'un neutron) diffusés à un angle donné θ sur une cible de ^{208}Pb. Les différents pics visibles sur la figure correspondent à des processus au cours desquels le projectile du faisceau interagit avec un noyau cible et laisse celui-ci soit dans son état fondamental (la diffusion est dite élastique), soit dans un état excité (la diffusion est dite inélastique) ; on peut donc espérer étudier ces différents états quantiques dans lesquels le noyau de plomb est susceptible d'exister ; pour que cette étude soit possible, il est nécessaire que l'énergie E du faisceau incident soit définie avec une incertitude ΔE plus petite que l'écart en énergie entre deux niveaux quantiques voisins. La résolution en énergie $\frac{\Delta E}{E}$ apparaît donc comme une caractéristique importante de l'accélérateur. Elle est de l'ordre de 10^{-2} sur de nombreuses machines, et atteint 10^{-4} sur les accélérateurs électrostatiques. Dans l'expérience schématisée *figure* 3, l'énergie de la particule diffusée varie assez vite en fonction de l'angle θ. Pour que ce dernier paramètre puisse être défini avec précision, il importe que le faisceau incident possède de bonnes qualités géométriques (faible extension spatiale, faible ouverture angulaire).

Les interactions nucléaires entre un projectile et un noyau cible sont des phénomènes très rares, cela en raison de la faible distance à laquelle se font sentir les forces nucléaires et de l'extrême petitesse du noyau, dont le diamètre est environ 10 000 fois plus faible que celui de l'atome. Pour augmenter la probabilité de ces événements, on pourrait songer à accroître l'épaisseur de la cible, c'est-à-dire le nombre de noyaux cibles. On est vite limité : on ne peut, en effet, empêcher les ions du faisceau d'interagir électriquement avec les nombreux électrons qui entourent les noyaux de la cible. Il en résulte une diminution de l'énergie du faisceau et une dégradation de la résolution en énergie. On doit donc, dans de nombreux cas, n'utiliser que des cibles minces. Pour garder un taux assez élevé d'événements intéressants, on s'efforce d'accroître le nombre de particules accélérées. On sait aujourd'hui préparer des faisceaux comportant plus de 10^{12} ions par seconde.

Il existe actuellement une grande diversité de machines, qu'expliquent la maîtrise acquise dans les aptitudes techniques, mais aussi la nécessité d'aborder des voies de recherches très variées, qui exigent des compromis différents parmi les qualités évoquées ci-dessus.

Les **machines électrostatiques** constituent, par leur principe, les plus simples des accélérateurs. Elles compor-

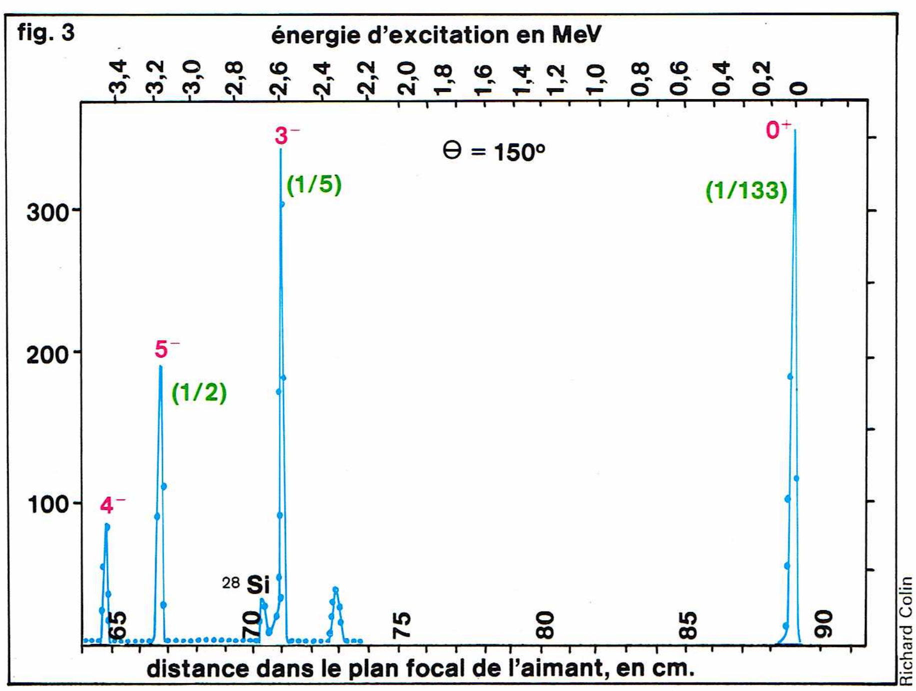

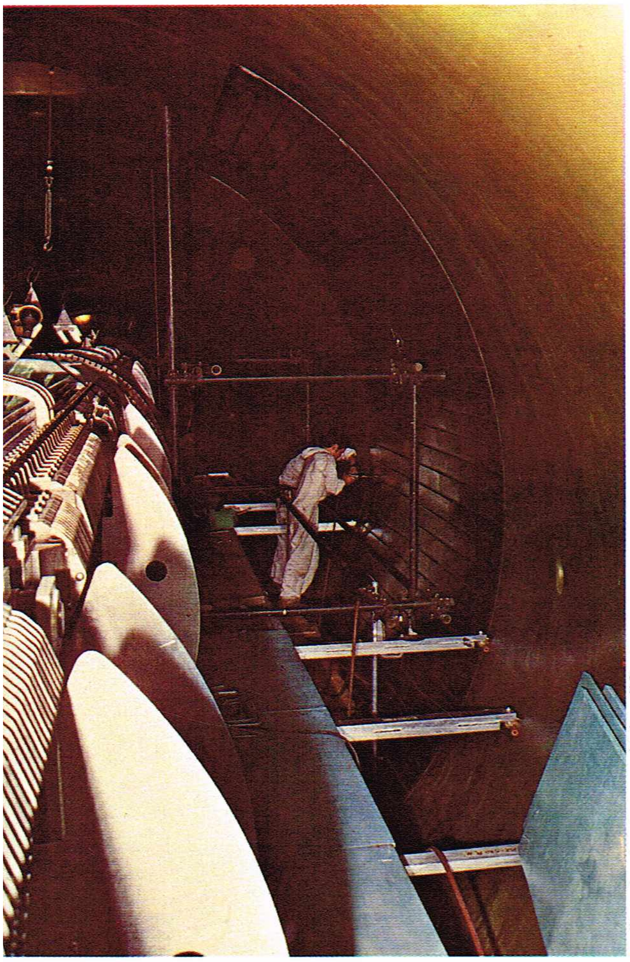

Institut de physique nucléaire d'Orsay

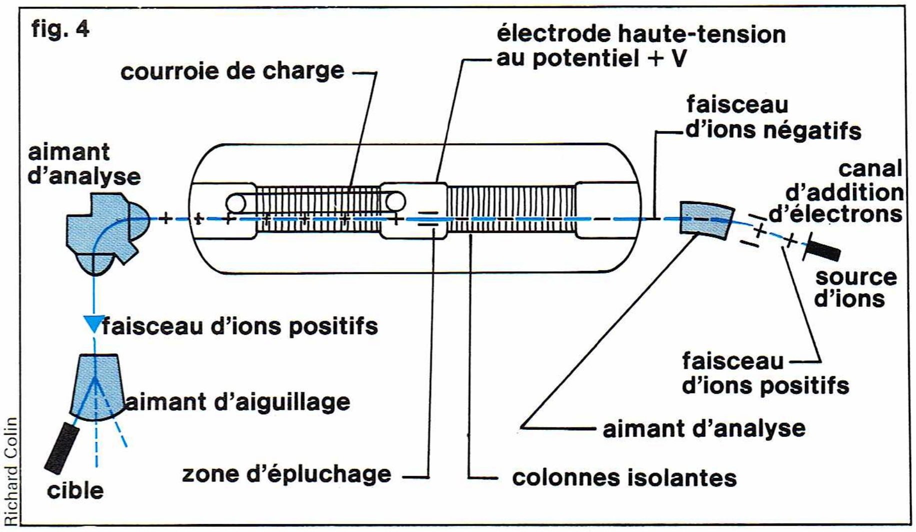

Richard Colin

tent une électrode que l'on porte à un potentiel élevé V en la chargeant électriquement (si C est sa capacité et Q sa charge, on a la relation Q = CV). Un champ électrique s'établit alors entre cette électrode et une autre mise à la masse. Ce champ est susceptible d'accélérer une particule de charge q. Comme dans tous les accélérateurs, le faisceau d'ions est conduit dans un tube sous un vide assez élevé (ici de l'ordre de 10^{-7} torr) de manière à éviter que les particules ne dissipent une partie de leur énergie au cours de chocs avec les molécules du gaz résiduel; elles acquièrent ainsi, au terme de l'accélération, l'énergie cinétique $E_c = qV$.

La *figure* 4 illustre le principe de fonctionnement du *tandem Van de Graaff*, le plus utilisé parmi ce type d'accélérateurs, et dans lequel la haute tension accélère deux fois la particule chargée. Le faisceau d'ions portant une charge élémentaire négative pénètre dans l'accélérateur où il remonte le champ électrique. Arrivés à l'électrode haute tension, les ions traversent une feuille mince (par exemple 20 μg/cm² de carbone). Ils y interagissent avec les électrons du milieu, et perdent ainsi un certain nombre d'électrons. Ce phénomène porte le nom *d'épluchage*. Les ions positifs ainsi créés sont à nouveau accélérés par le champ électrique existant entre l'électrode haute tension et l'autre extrémité du tandem mise à la masse. Si z est le degré d'ionisation de l'ion épluché, il a reçu au total l'énergie

$$E_c = (z + 1)\, eV \qquad (1)$$

La photographie de la *figure* 5 montre l'intérieur de la cuve d'un tel accélérateur. L'électrode haute tension est chargée par l'intermédiaire d'une courroie isolante elle-même chargée et déchargée par un système de balais. La chute de potentiel entre l'électrode centrale et la masse est réalisée par une chaîne hautement résistive ($R \sim 10^{11}\,\Omega$) répartie le long du tube accélérateur. Le long de ce tube sont répartis des disques métalliques séparés par des zones isolantes (céramique). Ces disques équipotentiels ont notamment pour fonction d'assurer un bon guidage du faisceau (focalisation).

Les possibilités en énergie d'un tel accélérateur sont limitées par la tension positive que peut supporter le terminal. Afin de diminuer les risques de claquage, le système d'accélération est placé dans une enceinte pressurisée remplie d'un gaz électronégatif, par exemple l'hexafluorure de soufre SF_6 sous une pression de l'ordre de 7,5 atmosphères; ce gaz piège les électrons susceptibles d'être produits dans le milieu et empêche le développement d'avalanches qui pourraient provoquer un claquage. Avec un tel dispositif, on peut atteindre une tension de 14 MV au terminal : un ion oxygène ayant perdu 6 électrons par épluchage est alors accéléré à une énergie de 98 MeV. Des améliorations technologiques, portant notamment sur le remplacement du système de charge avec courroie, devraient, dans un proche avenir, permettre d'obtenir des tensions plus élevées ($\geqslant$ 20 MV).

Au terme de l'accélération, le faisceau est défléchi par un aimant d'analyse qui possède une double fonction : il élimine les particules produites après épluchage avec un état de charge différent de celui que l'on désire garder; il est exploité pour stabiliser l'énergie du faisceau. Après déflexion, celui-ci passe entre les deux lèvres d'un diaphragme; si l'énergie diffère un peu de la valeur souhaitée, l'une des lèvres reçoit un excédent de courant par rapport à l'autre. Cette information est utilisée pour corriger la charge de l'électrode haute tension. On peut de cette manière stabiliser cette tension avec une précision relative de l'ordre de 10^{-4}. Cette excellente résolution en énergie fait de ce type d'accélérateurs des machines bien adaptées à une physique nucléaire de précision dans un domaine d'énergie relativement basse.

Les autres types d'accélérateurs portés sur la *figure* 2 utilisent le concept d'accélération résonnante : le champ électrique accélérateur est produit par une tension oscillant à grande fréquence, tension qui reste faible en regard de l'énergie finale communiquée aux particules. Celles-ci subissent une série d'accélérations successives et reçoivent à chaque fois un gain d'énergie :

$$E_c = q \cdot V \cdot \sin \Phi \qquad (2)$$

Dans cette expression, Φ représente le déphasage entre la tension accélératrice et la particule accélérée. La possibilité de maintenir Φ dans une plage de valeurs assez étroite autour d'une valeur moyenne Φ_0, c'est-à-dire d'assurer la stabilité en phase, explique que l'on puisse atteindre des énergies de l'ordre de la centaine de GeV avec des tensions V de quelques dizaines de kV.

Les **accélérateurs linéaires** imposent aux particules une trajectoire rectiligne. L'accélération est produite par le champ électrique longitudinal existant entre une série d'électrodes excitées à des radiofréquences. Ces accélérateurs exigent une puissance HF importante : par ailleurs, leurs dimensions varient comme la longueur d'onde de la source HF. Aussi leur apparition ne remonte-t-elle qu'aux années 1950, bien que leur principe de fonctionnement ait été bien connu dès 1930 : ils doivent beaucoup aux techniques radar dont les exigences ont nécessité la création de puissantes sources hyperfréquences sur des longueurs d'onde courtes.

◀▲ *A gauche, figure 5 : intérieur de la cuve du tandem Empereur d'Orsay (France) en cours de montage; on aperçoit une partie du dispositif d'accélération. En régime de fonctionnement, la cuve (longueur = 25 m, diamètre = 6 m à l'endroit de l'électrode haute tension) est remplie d'hexafluorure de soufre SF_6 sous une pression de 7,5 atmosphères. Ci-dessus, figure 4 : principe de fonctionnement du tandem Van de Graaff à deux étages (d'après R. J. Van de Graaff, Nucl. Instr. Methods, 8, 195, 1960).*

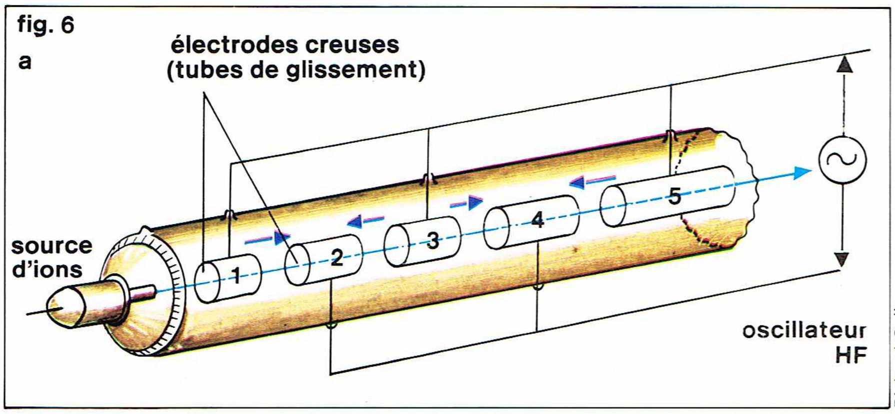

▲ *Figure 6a : principe de fonctionnement de l'***accélérateur linéaire à protons et à ions lourds.**

● Les *accélérateurs linéaires construits pour les protons et les ions lourds* comportent une série d'électrodes creuses (*fig.* 6a). Supposons reliées entre elles les électrodes de numéro impair d'une part, celles de numéro pair d'autre part. Si une tension alternative est appliquée entre ces deux séries, un champ électrique longitudinal alternatif apparaît dans chaque intervalle entre deux électrodes successives. Par conséquent, les particules chargées positivement peuvent être accélérées dans ces intervalles. Elles traversent l'intérieur des électrodes sans pratiquement subir de force (d'où le nom de tubes de glissement donné aux électrodes). Pour qu'à chaque passage entre deux électrodes successives il y ait accélération, il faut que la longueur des tubes de glissement soit calculée pour que la particule « voit » un champ électrique constamment accélérateur. La vitesse des particules augmentant cependant que la fréquence du champ électrique demeure constante, cette condition exige des tubes de glissement de plus en plus longs.

On peut voir ceux-ci sur la *figure* 6b qui montre l'intérieur de la cavité accélératrice d'un accélérateur à protons. La structure représentée sur cette photographie est celle le plus fréquemment adoptée : en fait, tous les tubes de glissement sont reliés à l'enceinte métallique de cuivre, qui possède un diamètre de l'ordre du mètre. L'ensemble constitue une cavité résonnante excitée à sa fréquence de fonctionnement à l'aide d'un oscillateur. Il s'établit alors un système d'ondes stationnaires qui présentent un nœud de champ électrique à l'emplacement des tubes de glissement et un ventre dans les intervalles entre électrodes. Ce champ électrique est longitudinal et fournit la force qui accélère les ions.

▼ *Figure 6b : intérieur de la cavité résonnante de l'***accélérateur linéaire à protons** *de Berkeley (États-Unis).*

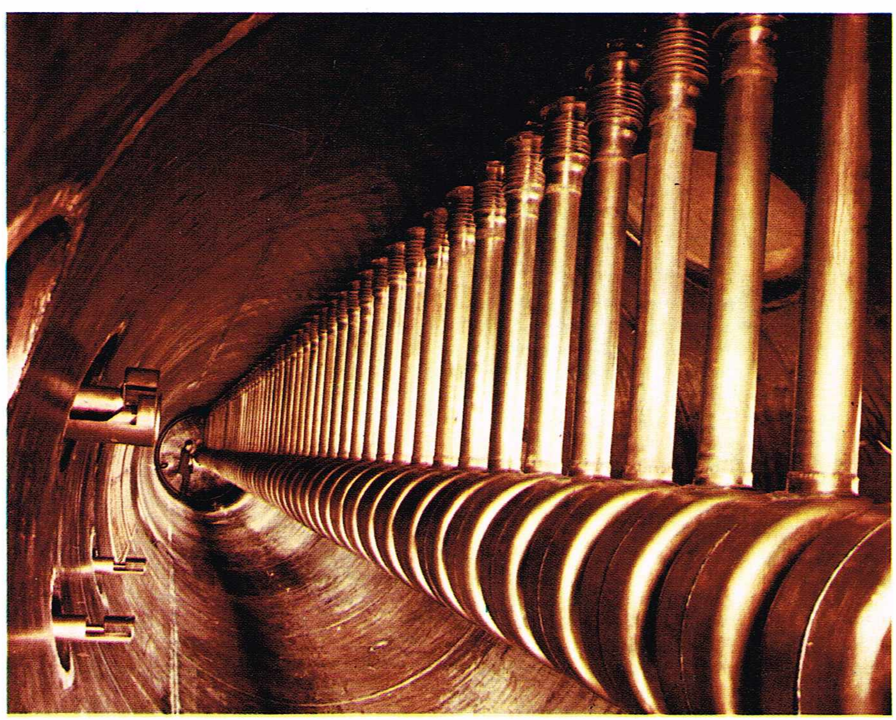

Ce type de machine est exploité pour accélérer les ions lourds à une énergie allant jusqu'à une dizaine de MeV par nucléon, et les protons à une énergie allant jusqu'à une centaine de MeV. En raison de l'excellente qualité optique du faisceau, cet accélérateur est utilisé pour préaccélérer les protons qui sont ensuite injectés dans les synchrotrons, machines circulaires permettant d'atteindre des énergies bien supérieures. Les fréquences HF utilisées s'élèvent à 20 à 100 MHz pour les ions lourds, environ 200 MHz pour les protons.

● Les *accélérateurs linéaires à électrons* communiquent à ces derniers des énergies de l'ordre du GeV ou plus. Or, la relativité nous indique qu'aucune particule ne peut se déplacer à une vitesse supérieure à celle de la lumière, qui, dans le vide, s'élève à c = 300 000 km/s. Quand la vitesse v de la particule croît, il se produit une augmentation de sa masse, égale à $\frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$ où m_0 est sa masse à vitesse nulle, et $\beta = \frac{v}{c}$. Quand v devient comparable à c, la masse croît, mais la vitesse tend vers c et ne varie que lentement. Cet effet relativiste apparaît d'autant plus vite que la masse au repos m_0 est petite. Il se manifeste à basse énergie pour l'électron, environ 1 840 fois plus léger que le proton, et, de ce fait, l'électron acquiert assez facilement une vitesse voisine de celle de la lumière. Le canon à électrons que constitue la source d'ions de l'accélérateur délivre les électrons à une énergie qui vaut couramment 50 keV ; le paramètre β vaut alors 0,4. Quand l'électron atteint une énergie de 2 MeV, on a β = 0,98. Dès lors, il se déplace à une vitesse pratiquement égale à celle de la lumière. Cette propriété entraîne une simplification de la structure accélératrice : celle-ci est constituée d'une cavité cylindrique qui se comporte comme un guide d'onde dans lequel se propage une onde longitudinale. Elle accélère l'électron si elle progresse à la même vitesse que lui. Or, dans un guide d'onde cylindrique, la vitesse de phase de l'onde est supérieure à c. Afin d'obtenir l'égalité entre vitesse de phase de l'onde et vitesse de l'électron, on découpe le tube d'accélération en cellules voisines séparées par des diaphragmes appelés iris, qui ont pour but de diminuer la vitesse de phase. L'intervalle entre ces iris décroît progressivement en début d'accélération, tant que la vitesse de l'électron croît. Puis il demeure constant dès que v devient pratiquement égal à c. La majeure partie de la puissance émise est dissipée dans le guide d'onde. De ce fait, l'énergie est injectée en plusieurs points de l'accélérateur par une série de klystrons dont la phase est synchronisée à celle d'un émetteur principal.

La fréquence d'émission est voisine de 3 000 MHz. Cette valeur conduit à des guides d'onde d'environ 10 cm de diamètre. Le champ électrique accélérateur possède une amplitude de l'ordre de 10 MV/m, ce qui correspond à une longueur du tube d'accélération de 100 m par GeV d'énergie fournie à l'électron.

La photographie de la *figure* 7 montre une vue aérienne du laboratoire de Stanford (États-Unis). On y distingue la construction entourant le tube de l'accélérateur long de 3 km, qui communique aux électrons une énergie finale de 20 GeV, ce qui est en fait, de loin, la machine la plus performante, de ce seul point de vue. L'obtention du champ électrique mentionné ci-dessus nécessite une dépense d'énergie de l'ordre de 1 MW/m. De ce fait, et pour que la puissance moyenne consommée ne soit pas prohibitive, ces machines fonctionnent en régime pulsé : ainsi, dans l'accélérateur de Stanford, la puissance maximale de 13 000 MW n'est dissipée que pendant un peu moins de 1 millième du temps de fonctionnement total, à raison d'impulsions de 2 millionièmes de seconde se répétant 360 fois par seconde. L'intensité du faisceau peut atteindre 30 μA, ce qui correspond à 1,8 $\times$ 10^{14} électrons par seconde.

Compte tenu de la puissance dissipée par ce type de machine, il serait particulièrement intéressant de construire un accélérateur linéaire supraconducteur. L'emploi de cavités supraconductrices refroidies à l'hélium permettrait d'obtenir une répartition uniforme des particules dans le temps, et de construire un appareil plus compact par l'emploi de champs accélérateurs plus élevés. Des développements technologiques sont poussés dans plusieurs centres, et une maquette fonctionne déjà à Stanford.

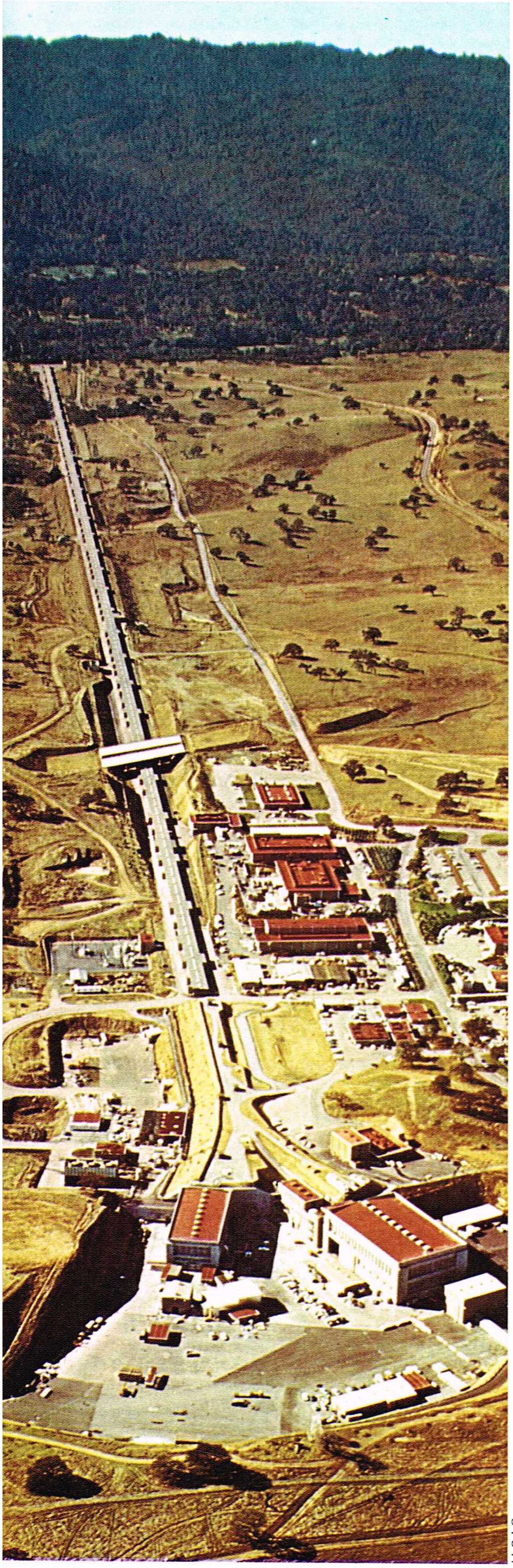

Le **cyclotron**, conçu par Lawrence et Livingston en 1932, constitue l'un des plus anciens outils du physicien nucléaire : le premier accélérateur performant fondé sur l'accélération résonnante. La *figure* 8 permet d'en comprendre le principe de fonctionnement. Dans une chambre d'accélération, sous vide, deux électrodes en forme de D (d'où leur nom « dees ») constituent l'extrémité d'une ligne haute fréquence excitée de façon qu'entre les dees soit créée une tension sinusoïdale de fréquence constante f_{HF} (de l'ordre de la dizaine de MHz). Ces électrodes métalliques sont creuses, de sorte qu'en leur sein le champ électrique est nul. La tension sinusoïdale existant dans l'espace entre les deux dees crée en cette région un champ électrique sinusoïdal de même fréquence. Les ions, portant une charge positive q et issus d'une source d'ions placée au centre de l'accélérateur, traversent plusieurs fois l'espace inter-dees, de façon qu'à chaque passage ils y soient accélérés par le champ électrique et voient leur énergie cinétique augmenter d'une quantité dont rend compte la formule **(2)**. Un champ magnétique a pour but de courber la trajectoire des particules et de les obliger à passer dans la zone d'accélération. A cet effet, la chambre d'accélération est placée entre les pôles d'un gros électro-aimant. Celui-ci produit un champ d'induction magnétique B uniforme, perpendiculaire au plan médian horizontal de l'accélérateur qui contient la trajectoire de la particule. Ce champ B ($B \simeq 1{,}5$ tesla = 15 000 gauss) crée une force, connue sous le nom de force de Laplace, située dans ce plan médian, perpendiculaire à la trajectoire et de module qvB. Elle courbe la trajectoire en un cercle de rayon :

$$R = \frac{mv}{qB} \tag{3}$$

où m et v représentent la masse et la vitesse de l'ion. La fréquence de révolution de la particule sur cette orbite circulaire est donnée par :

$$f = \frac{v}{2\pi R} = \frac{qB}{2\pi m} \tag{4}$$

Elle est indépendante du rayon de la trajectoire et de la vitesse du projectile. Cette propriété permet l'accélération résonnante : il suffit que l'on ait $f_{HF} = f$ pour qu'à chaque passage entre les dees l'ion « voit » un champ électrique accélérateur et gagne de l'énergie. Sa trajectoire comporte alors une succession de demi-cercles de rayon de plus en plus grand. Au terme de l'accélération, le faisceau est extrait de la zone de champ magnétique grâce à un champ électrostatique appliqué entre deux électrodes de déflexion. Puis il est conduit sous vide par guidage électromagnétique jusqu'à l'aire expérimentale.

◀ *Figure 7 :* ***vue aérienne du laboratoire de Stanford (États-Unis) et de l'accélérateur linéaire à électrons, long de 3 km, qui communique aux électrons une énergie finale de 20 GeV.***

fig. 8

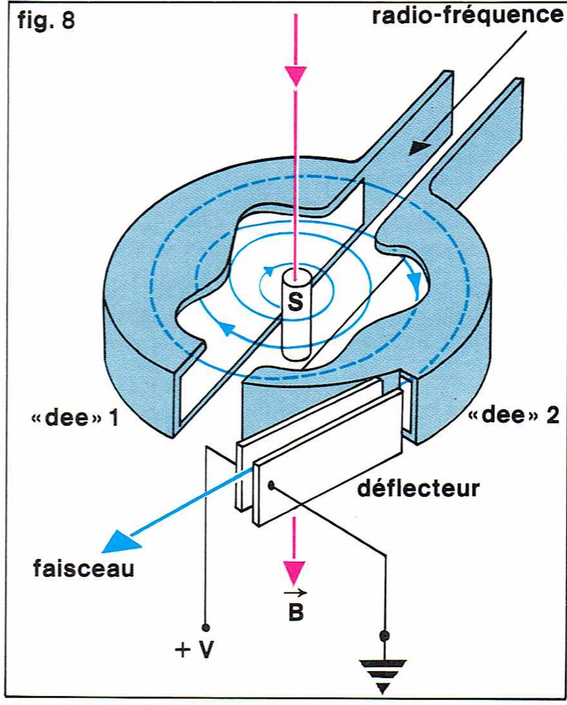

◀ *Figure 8 :* ***principe de fonctionnement du cyclotron ; les particules issues de la source S sont accélérées à chaque passage entre les « dees » ; le champ d'induction magnétique $\vec{B}$ (représenté seulement au centre) incurve la trajectoire des particules.***

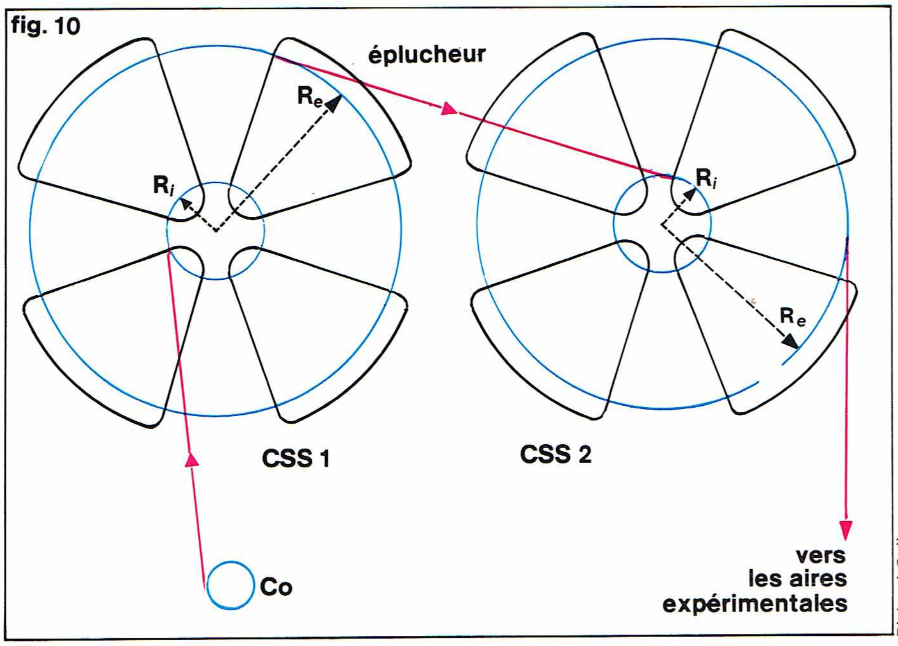

▲ *Figure 10 : schéma de l'ensemble GANIL, conçu pour accélérer tous les ions lourds depuis le carbone (à une énergie maximale de 100 MeV par nucléon) jusqu'à l'uranium (à une énergie maximale de 8 MeV par nucléon) [d'après M. Lefort, la Recherche, n° 61, p. 967, 1975].*

Sur la *figure* 8 est schématisée la trajectoire idéale de la particule accélérée. En fait, la trajectoire réelle peut s'en écarter quelque peu, pourvu qu'on ait donné au champ magnétique une structure telle qu'il existe des forces de rappel : la particule oscille alors autour de la trajectoire moyenne, mais la stabilité dans l'espace du faisceau est assurée. Ce problème du guidage du faisceau au cours de l'accélération est important pour toutes les machines. Dans les premiers cyclotrons, dits à *focalisation faible*, le champ magnétique présente la symétrie de révolution autour de l'axe vertical de la machine, et son module décroît légèrement quand le rayon de la trajectoire augmente. On voit qualitativement sur la *figure* 9a que cette structure entraîne la présence d'une force de rappel sur une particule qui s'écarte du plan médian. Pourvu que la décroissance de B avec R soit assez lente, on peut aussi assurer la focalisation dans le plan horizontal. Cette méthode de focalisation faible limite à environ 20 MeV l'énergie que l'on peut communiquer à un proton : le rayon de la trajectoire augmentant avec la vitesse de l'ion, celui-ci rencontre un champ magnétique de plus en plus faible. Dans le même temps, sa masse croît, comme l'indique la Relativité. Ces deux raisons entraînent une diminution de la fréquence de révolution [voir formule **(4)**]. Dès lors, il n'y a plus synchronisme entre champ accélérateur et particule ; celle-ci prend un retard de plus en plus grand par rapport au champ. La phase Φ qui figure dans la formule **(2)** croît ; lorsqu'elle vaut π, il n'y a plus accélération.

A partir des années 1950 ont été réalisés des cyclotrons, dits *isochrones*, permettant d'atteindre des énergies plus grandes (quelques centaines de MeV). Le principe de fonctionnement demeure le même, mais la structure du champ magnétique est différente (*fig.* 9b). Le champ moyen croît avec le rayon de la trajectoire de manière à conserver constant le rapport $\frac{B}{m}$ et garder l'isochronisme entre le mouvement de rotation de la particule et le champ accélérateur. Si le champ magnétique présentait la symétrie de révolution, il serait défocalisant verticalement et le faisceau éclaterait. Un champ à secteur permet d'éviter cet effet : le long d'un cercle de rayon donné le champ est tantôt plus fort, tantôt plus faible que la valeur moyenne (*fig.* 9b). On montre que cette structure (obtenue en plaçant des morceaux de fer — ou *shims* — sur les pôles de l'électro-aimant) assure la focalisation verticale. La plupart des accélérateurs construits dans le domaine d'énergie de l'ordre de la centaine de MeV utilisent ce procédé de focalisation. Ils permettent notamment d'obtenir une plus grande intensité que les synchrocyclotrons, premier type de machine conçue pour dépasser la limite d'énergie des cyclotrons à focalisation faible.

Une nouvelle génération de cyclotrons voit le jour actuellement, les *cyclotrons isochrones à secteurs séparés*. Ils comportent des secteurs à champ magnétique intense ($B \simeq 1{,}6$ tesla = 16 000 gauss) séparés de secteurs sans champ. Ils sont, de ce fait, plus volumineux que les cyclotrons compacts traditionnels, mais les zones sans champ situées entre les aimants offrent plusieurs avantages : on peut y placer le ou les dispositifs haute fréquence, de même que le système d'extraction ; la source d'ions peut, elle aussi, se trouver hors des aimants. En particulier, pour un ensemble comprenant plus d'un accélérateur, cette structure se prête bien à l'injection du faisceau issu d'une autre machine. La *figure* 10 montre le plan très schématique d'un ensemble appelé GANIL (Grand Accélérateur national à ions lourds) conçu en France pour accélérer des ions lourds, et comportant deux cyclotrons à secteurs séparés. Sa réalisation commence actuellement, et il devrait être opérationnel vers 1980. Il comporte trois accélérateurs couplés en série. Les ions, préaccélérés par un cyclotron compact C_0 sont injectés dans un premier cyclotron à secteurs séparés CSS_1. Celui-ci leur communique une énergie suffisante pour que, par traversée d'une mince couche d'épluchage, leur état de charge soit multiplié par 4 (par exemple, l'ion Ar^{4+} devient Ar^{16+}, l'ion U^{8+} devient U^{32+}). Cet ion très chargé est alors injecté dans le second cyclotron à secteurs séparés CSS_2 où il est à nouveau accéléré. Chacun des deux CSS comporte 4 secteurs. Le rayon d'injection a été fixé à $R_i = 0{,}75$ m, celui d'extraction à $R_e = 4\,R_i = 3$ m. Un gain d'énergie d'un facteur 16 sera ainsi obtenu dans chacun des deux accélérateurs.

Le **synchrocyclotron** est de conception très semblable à celle du cyclotron. Il comporte les mêmes éléments. Le champ magnétique possède la même structure que dans le cyclotron à focalisation faible ; il décroît donc quand le rayon de la trajectoire augmente.. De ce fait, la fréquence de révolution f de l'ion accéléré décroît quand il acquiert de l'énergie. A la différence du cyclotron dans lequel la fréquence du champ accélérateur f_{HF} est constante, celle du synchrocyclotron est modulée. Il est possible de la faire varier sinusoïdalement grâce à un condensateur variable inclus dans le dispositif HF. L'accélération des particules s'effectue pendant les intervalles de temps correspondant à la diminution de f_{HF}, ce qui permet de respecter la condition d'isochronisme $f_{HF} = f$.

A titre d'exemple, dans le synchrocyclotron d'Orsay, capable d'accélérer des protons à une énergie de 160 MeV, f_{HF} est modulée entre 25 MHz et 20 MHz, à raison de 450 modulations par seconde. La *figure* 11 montre une vue du synchrocyclotron de 600 MeV du CERN.

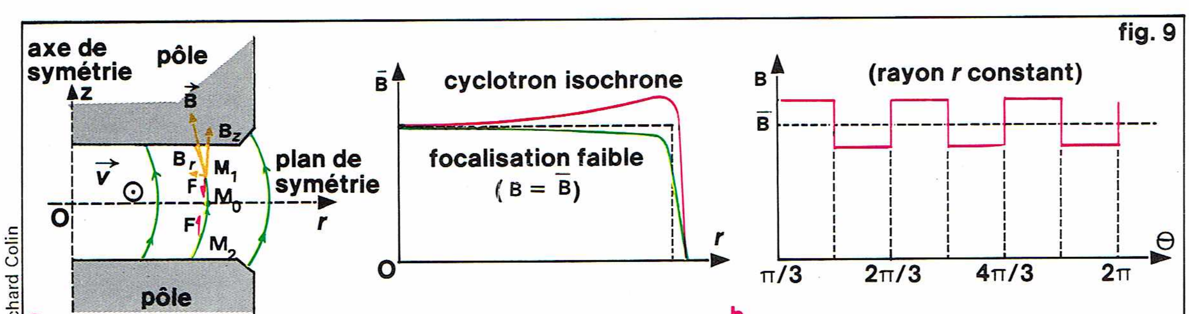

▶ *Figure 9 : focalisation dans le cyclotron ; a, la forme en « barillet » des lignes de champ correspondant à la focalisation faible fait apparaître une force de rappel lorsque la particule s'écarte du plan de symétrie ; b, carte de champ du cyclotron isochrone ; le champ moyen croît avec le rayon (courbe de gauche en rouge) pour compenser la variation relativiste de la masse ; le long d'une trajectoire circulaire, le champ n'est plus constant (courbe de droite correspondant à un cyclotron à trois secteurs, avec trois « collines » et trois « vallées »).*

Le **synchrotron** est une machine circulaire conçue pour porter les protons à une énergie cinétique supérieure au GeV, correspondant au domaine d'étude des particules élémentaires. Plusieurs synchrotrons ont été également construits pour accélérer les électrons jusqu'à une dizaine de GeV (*fig.* 2).

Le rayon de courbure de la trajectoire circulaire d'un proton de 300 GeV (performance maintenant réalisée) dans un champ d'induction magnétique de 1,6 tesla serait de 625 m. On ne peut évidemment envisager de construire un cyclotron ou un synchrocyclotron possédant un électro-aimant de telles dimensions. Dans un synchrotron, l'accélération s'effectue sur une trajectoire de rayon constant. Des électro-aimants disposés le long de ce parcours guident le faisceau ; celui-ci passe fréquemment entre des électrodes accélératrices où il accroît à chaque fois son énergie. Un tel processus devient possible à condition que le champ magnétique B et la fréquence du champ accélérateur f_{HF} soient simultanément modulés pendant l'accélération.

La *figure* 12 illustre la programmation de ces grandeurs correspondant aux premières années de fonctionnement du synchrotron construit au CERN (Centre européen de recherche nucléaire) à Genève, et qui accélère les protons à une énergie de 28 GeV. D'abord accélérés par un accélérateur linéaire qui leur communique une énergie de 50 MeV, les protons sont injectés sur l'orbite du synchrotron de 200 m de diamètre. Le champ magnétique à ce stade de l'accélération n'est que de 148 gauss. Le long de la trajectoire sont réparties 14 cavités accélératrices qui, à chaque tour, augmentent de 54 keV l'énergie des protons. La fréquence f_{HF} de ces cavités est 20 fois plus grande que la fréquence de rotation des particules (harmonique 20) ; on peut de la sorte accélérer simultanément 20 paquets de protons répartis le long de la trajectoire et comprenant chacun 10^{11} projectiles. La courbe de la *figure* 12a indique que la fréquence f_{HF} est modulée entre 2,9 et 9,55 MHz, cependant qu'en fin d'accélération le champ magnétique a atteint la valeur de 14 000 gauss. Le cycle de fonctionnement de la machine est typiquement de 2,4 s.

Depuis 1972, les protons sont injectés dans le synchrotron principal à une énergie de 1 GeV, acquise grâce à un accélérateur intermédiaire, le « booster » (ou lanceur) dans lequel les protons pénètrent après accélération par le linéaire. C'est un plus petit synchrotron, constitué de 4 anneaux superposés, qui a été rajouté pour améliorer notablement l'intensité du faisceau.

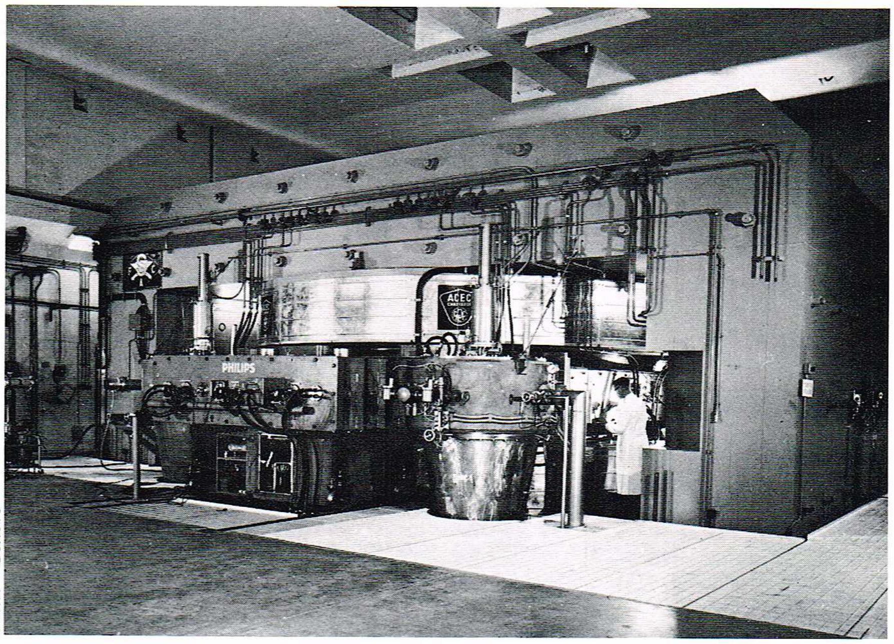

CERN - Genève

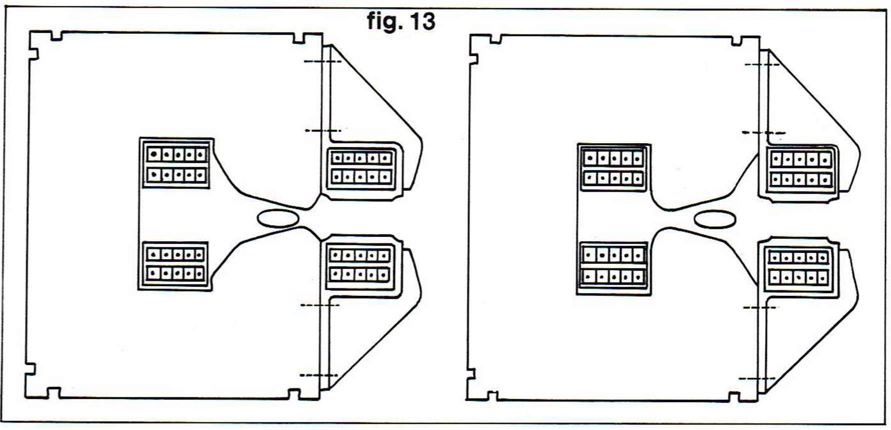

Richard Colin

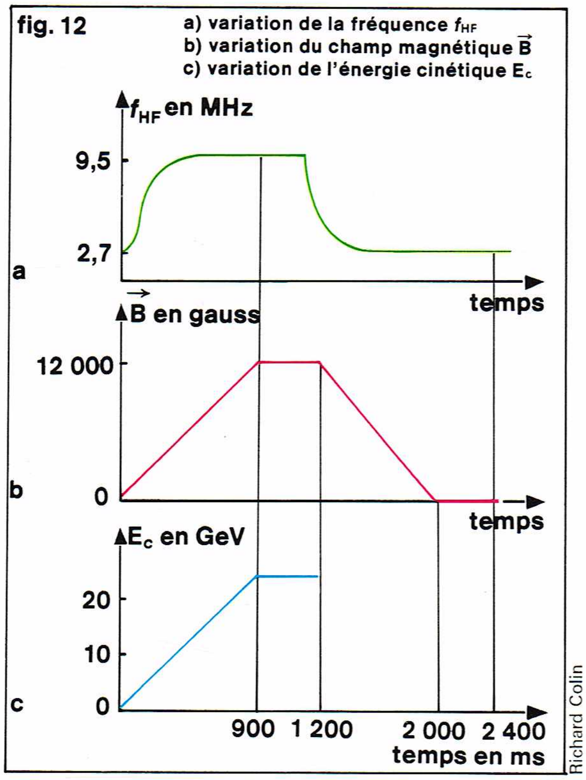

Richard Colin

Pendant leur accélération, les protons parcourent près de 300 000 km et traversent successivement trois machines. Il est remarquable que, sur cette énorme distance, ils ne s'éloignent jamais de plus de quelques centimètres de la trajectoire moyenne. Cette étonnante précision dans le contrôle du parcours permet de les accélérer dans une chambre de dimensions réduites et limite en conséquence la taille des électro-aimants (au CERN, la chambre d'accélération, dans laquelle règne un vide de 2×10^{-6} torr, a une section elliptique de $14{,}5 \times 7$ cm). Cette parfaite maîtrise des trajectoires a été rendue possible par la découverte, en 1950, d'un nouveau procédé de focalisation dit : *focalisation forte ou à gradients alternés*. La *figure* 13 permet d'en comprendre le principe. Elle montre la coupe de deux électro-aimants successifs disposés le long de la trajectoire. L'ellipse est une coupe de la chambre d'accélération que le proton parcourt de l'arrière vers l'avant du dessin, le centre de la trajectoire étant vers la gauche. Sur la trajectoire moyenne, le champ est vertical ascendant. Dans l'électro-aimant de gauche, en raison de la forme donnée aux pièces polaires, le champ magnétique croît en même temps que le rayon de l'orbite. Une particule s'écartant du plan moyen horizontal subit une force qui tend à accentuer l'écart : cet aimant est défocalisant pour les mouvements verticaux. L'effet est inverse dans l'aimant de droite. Ainsi le proton traverse une succession d'aimants qui, pour les mouvements verticaux, sont alternativement focalisants et défocalisants. Il en est de même pour les oscillations dans le plan horizontal autour de la trajectoire moyenne. On montre que l'ensemble est focalisant dans les deux directions. La variation du champ en fonction du rayon (ou encore son gradient) étant importante, il en résulte des oscillations rapides autour de l'axe de la chambre (un

▲ ***En haut, figure 11 :** une vue du synchrocyclotron de 600 MeV du CERN (Genève). La culasse de l'aimant mesure 11 m × 6,5 m × 6 m ; les pièces polaires ont un diamètre de 5 m ; on aperçoit la bobine d'excitation supérieure mais la bobine inférieure est masquée par le dispositif haute fréquence et par une pompe à diffusion (à droite).*

***Ci-dessus, figure 13 :** profil de deux aimants consécutifs ; dans le synchrocyclotron du CERN, le long de l'orbite, cent aimants sont disposés ; chacun d'eux pèse 32 tonnes. Leur position est définie avec une tolérance de 0,3 mm verticalement et 0,6 mm horizontalement ; près de la trajectoire des protons, le module du champ varie de 4,4 % par centimètre.*

◀ ***Figure 12 :** exemple de variation de trois paramètres en fonction du temps dans le cas du synchrotron du CERN à Genève.*

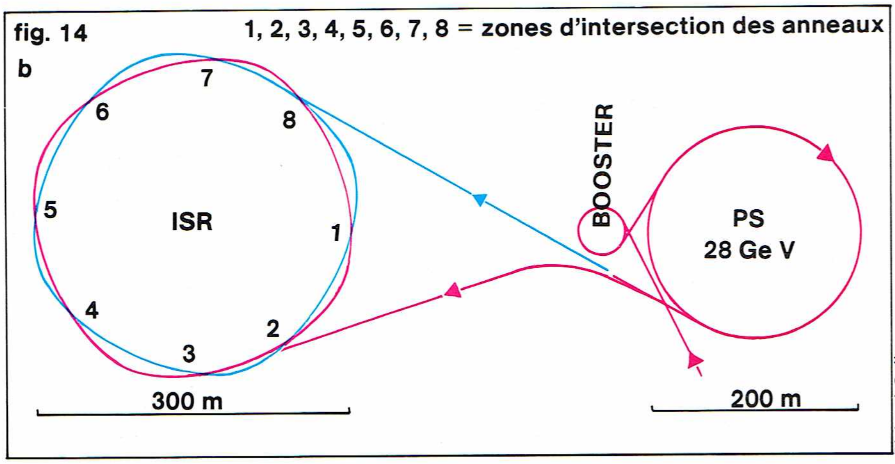

▲ *Figure 14*b *: schéma de l'implantation des accélérateurs et des anneaux de stockage du* CERN.
Le schéma ne comporte pas le super-synchrotron de 400 GeV en cours de construction.

▼ *Figure 14*a *: vue aérienne du* CERN *; vers le centre de l'ensemble, on distingue la partie supérieure du tunnel abritant le synchrotron, et vers la gauche, la partie supérieure du tunnel des anneaux de stockage (*ISR *ou Intersection Storage Ring).*

CERN - Genève

peu plus de 6 oscillations par tour au CERN) ; mais l'amplitude de ces mouvements est faible. Pour chiffrer le gain apporté par cette focalisation, il suffit de comparer sur le *tableau* I les dimensions de la chambre d'accélération et le poids des aimants de l'accélérateur de Dubna (U. R. S. S.) utilisant, comme les premiers synchrotrons, la focalisation faible, et du synchrotron de Brookhaven (États-Unis) aux caractéristiques comparables à la machine du CERN.

Le gigantisme de ces installations (le diamètre du nouvel accélérateur de Batavia est voisin de celui de la machine en construction au CERN : 2,2 km) explique leur faible nombre, ainsi que le mode de travail des chercheurs qui se regroupent en équipes internationales pour réaliser des expériences à l'aide des faisceaux ainsi obtenus.

Les **anneaux de collision** ont fait leur apparition vers 1969 à Stanford (États-Unis), et peu après à Novosibirsk (U. R. S. S.). Ce type de machine permet de réaliser une collision de plein fouet entre deux particules circulant en sens inverse. Dans une telle interaction, l'énergie disponible est beaucoup plus grande que dans un choc entre un projectile et une particule au repos emprisonnée dans une cible. Dans ce dernier cas, une grande partie de l'énergie du système en interaction correspond à l'entraînement de l'ensemble qui se déplace globalement avant, pendant et après l'interaction : son centre de gravité conserve une vitesse constante. Dans le cas où deux particules de même masse et de même énergie se heurtent frontalement, le centre de gravité du système qu'elles constituent est au repos par rapport au laboratoire. Il n'y a pas dans ce cas d'entraînement global ; dès lors, la somme des énergies de chacune des particules est mise en jeu dans l'interaction. Ainsi, lorsqu'un proton de 28 GeV interagit avec un proton au repos, l'énergie « utile » n'est que de 7 GeV environ ; elle s'élève à peine à 19 GeV si l'énergie du projectile est portée à 200 GeV. Dans une collision frontale entre deux protons de même vitesse, l'énergie « utile » devient 56 GeV dans le premier cas, 400 GeV dans le second. L'accélérateur équivalent (qui donnerait la même énergie utile dans un choc d'un projectile sur une cible au repos) devrait fournir une énergie de 1 700 GeV dans le premier cas et de 80 000 GeV dans le second. Ce gain en énergie est plus important encore avec des électrons : des anneaux de collision entre électrons de 3 GeV équivalent à un accélérateur de 36 000 GeV.

La *figure* 14 montre l'implantation des anneaux de collision protons-protons du CERN. Ils comportent deux chambres toriques dans lesquelles sont injectées les particules issues du synchrotron. Les interactions entre ces particules sont observées aux zones d'intersection des anneaux (au nombre de 8 dans le cas du CERN). Lorsque les particules sont de même masse mais de charges opposées (électrons-positons), les deux faisceaux sont injectés dans la même chambre qu'ils parcourent en sens inverse. Comme dans le synchrotron, le guidage est assuré par des aimants. Un inconvénient de cette méthode réside dans le faible nombre d'interactions observables. Ceci provient de la densité de particules, beaucoup plus faible dans un faisceau que dans une cible. Pour que ce nombre d'interactions soit raisonnable, il est nécessaire que les faisceaux possèdent une grande intensité : des valeurs de l'ordre de l'ampère sont obtenues.

Les faisceaux stockés dans les anneaux sont d'autant plus intéressants que leur durée de vie est grande. Celle-ci est limitée par les collisions des particules des faisceaux avec les molécules du gaz résiduel. Diminuer celles-ci exige un vide très poussé, de l'ordre de 10^{-9} torr ; on l'améliore encore dans les zones d'interaction ($\sim 10^{-10}$ torr), de manière que ces chocs parasites perturbent au minimum les interactions que l'on désire étudier. Avec de telles valeurs du vide, l'intensité des faisceaux de protons stockés dans les anneaux du CERN diminue d'un facteur 2 en 20 heures. Notons que, dans ce dispositif, l'angle des faisceaux à l'intersection est de 15° ; le choc n'est donc pas exactement frontal. Mais la vitesse du centre de gravité des deux protons est faible devant la vitesse de chacun d'eux, et le gain en énergie demeure très substantiel.

Ce gain spectaculaire en énergie apporté par les anneaux de collision ne rend pas caducs les accélérateurs classiques. En effet, outre le taux plus faible d'interactions

mentionné précédemment, on ne peut stocker que des particules stables (protons, électrons). Les expériences mettant en jeu d'autres types de projectiles supposent la préparation de faisceaux secondaires auprès d'accélérateurs. C'est pourquoi la construction de deux synchrotrons de très grande énergie a été récemment menée à bien en même temps que la réalisation de plusieurs dispositifs d'anneaux de collision. On envisage déjà, sur les deux machines de Batavia et du CERN, en disposant des aimants supraconducteurs le long de l'anneau d'accélération, de porter l'énergie des protons à 1 000 GeV.

Les *tableaux* II et III présentent les principaux types d'accélérateurs et leurs caractéristiques.

Systèmes de détection

Étudier une interaction nucléaire entre un projectile et un noyau cible, ou entre deux particules circulant dans des anneaux de collision, nécessite l'identification des produits de la réaction et la mesure de leurs caractéristiques (énergie, angle d'émission, instant d'émission par rapport à l'interaction...). Du nombre et de la précision des grandeurs que l'on peut mesurer dépend la richesse des informations obtenues sur le système étudié.

Une large gamme de détecteurs a été réalisée pour parvenir à ces fins. Un détecteur est, *a priori*, un morceau de matière dans lequel le projectile auquel on s'intéresse interagit et abandonne tout ou partie de son énergie. Les phénomènes ainsi provoqués sont mis à profit pour obtenir des renseignements sur la particule. Le processus le plus fréquent intervenant avec les particules chargées consiste en une *ionisation* des atomes ou molécules du milieu détecteur : des électrons sont arrachés, et l'on produit ainsi des charges positives et négatives. Ces charges peuvent être exploitées de diverses manières.

— Leur collection (avec ou sans amplification) que l'on peut réaliser en des temps très brefs ($\sim$ un milliardième à un millionième de seconde) fournit un signal électrique, ou impulsion, qui est le support de ces informations et qu'une électronique appropriée permet de décoder.

Tableau I

Comparaison entre les accélérateurs de Dubna et de Brookhaven

	Dubna (U. R. S. S.)	Brookhaven (États-Unis)
Focalisation	Faible	Forte
Énergie maximale des protons	10 GeV	33 Gev
Rayon moyen de l'orbite	30,5 m	128 m
Champ maximum sur l'orbite	1,3 tesla	1,3 tesla
Section de la chambre d'accélération	150 × 40 cm	18 × 8 cm
Poids total des aimants	35 000 t	4 000 t

▲ ***Tableau I : principales caractéristiques des accélérateurs de Dubna (U. R. S. S.) et de Brookhaven (États-Unis).***

— Une autre voie consiste à visualiser par certains phénomènes secondaires la trajectoire des particules. On a alors la possibilité de photographier ces parcours. Toute l'histoire d'une interaction peut ainsi être « enfermée » dans un cliché et reconstituée *a posteriori*.

Un détecteur peut renseigner de manière précise sur l'*énergie* de la particule, sur l'*instant* de la détection (mesuré par rapport à l'instant de détection d'autres particules ou celui où s'est produite la réaction étudiée), et dans quelques cas sur l'*endroit* où la particule a été détectée. Dans le cas de particules chargées, on peut aussi mesurer l'*impulsion* en les défléchissant à l'aide d'un champ magnétique, comme le montre la formule **(3)**. La réalisation des systèmes de détection fait appel à tous les domaines de la physique (électronique, physique des solides, des plasmas...). Les multiples besoins des nombreuses expériences menées à bien ont conduit à une variété extrêmement riche de réalisations. Il ne saurait être

▼ ***A gauche, tableau II : les principaux accélérateurs à moyenne énergie. A droite, tableau III : les principaux accélérateurs à grande énergie.***

Tableau II

Les principaux accélérateurs à moyenne énergie

Il existe 12 tandems Van de Graaff du type Empereur, dont la tension au terminal peut atteindre 14 MeV. Deux sont en France (Orsay, Strasbourg).

	Lieu	Ions	Énergie maximale	Mise en service
Accélérateurs linéaires	Berkeley (États-Unis)	Ions lourds	9 MeV par nucléon	1974
	Darmstadt (R.F.A.)	Ions lourds	10 à 15 MeV par nucléon	1976
	Los Alamos (États-Unis)	Protons Pions	800 MeV	1974
Cyclotrons isochrones	Plusieurs machines pouvant accélérer des protons jusqu'à une centaine de MeV, dont un cyclotron en France (Grenoble) : protons et ions lourds jusqu'au néon. Ensemble *Alice* (Orsay-France) : accélérateur linéaire injectant dans cyclotron isochrone. Ions lourds, du carbone au krypton.			
Cyclotrons à secteurs séparés	Maryland (États-Unis)	Protons	140 MeV	1969
	Vancouver (Canada)	Protons	550 MeV	1974
	Zurich (Suisse)	Protons	585 MeV	1974
	Indiana (États-Unis)	Protons	200 MeV	1974
Synchro-cyclotrons	Orsay (France)	Protons d, α, ^{3}He	200 MeV	1958 Rénové 1977
	Dubna (U.R.S.S.)	Protons	700 MeV	Rénové 1975
	Columbia (États-Unis)	Protons	550 MeV	Rénové 1974
	CERN (Genève)	Protons	600 MeV	Rénové 1974
	Gatchina (U.R.S.S.)	Protons	1 GeV	1969

Tableau III

Les principaux accélérateurs à haute énergie

	Lieu [*nom de l'accélérateur*]	Énergie maximale en GeV	Mise en service
Synchrotrons à protons	Saclay (France) [*Saturne*]	3	1958 Rénové 1977
	Berkeley (États-Unis) [*Bevatron*]	6	1955
	Dubna (U.R.S.S.)	10	1957
	Argonne (États-Unis)	12,5	1963
	CERN I (Genève) [*PS*]	28	1959
	Brookhaven (États-Unis)	33	1960
	Serpoukov (U.R.S.S.)	76	1967
	Batavia (États-Unis)	200-500	1972
	CERN II (Genève) [*SPS*]	200-500	1976
Synchrotrons à électrons	Daresbury (Grande-Bretagne) [*Nina*]	5	1966
	Erevan (U.R.S.S.) [*Arus*]	6	1967
	Hambourg (R.F.A.) [*Desy*]	7	1964
	Cambridge (États-Unis)	7	1962
	Cornell (États-Unis)	10	1967
Accélérateurs	Orsay (France)	2,3	1961
	Saclay (France)	0,6	1969
	D'autres accélérateurs existent avec une énergie inférieure à 3 GeV		
	Stanford (États-Unis)	21	1966
Anneaux de collision (énergie des faisceaux supérieure à 1 GeV)	Frascati (Italie) [*ADONE*]	2 × 1,5 (e^--e^+)	1969
	Cambridge (États-Unis) [*CEAB*]	2 × 3 (e^--e^+)	1972
	Stanford (États-Unis) [*SPEAR*]	2 × 2,5 (e^--e^+)	1972
	Hambourg (R.F.A.) [*DORIS*]	2 × 3 (e^--e^+)	1974
	Novosibirsk (U.R.S.S.) [*VEPP 3*]	2 × 3 (e^--e^+)	1972
	Novosibirsk (U.R.S.S.) [*VEPP 4*]	2 × 7 (e^--e^+)	1978 ?
	Orsay (France) [*DCI*]	2 × 1,8 (e^--e^+)	1976
	CERN (Genève) [*ISR*]	2 × 20 (p-p)	1971

▶ *Figure 15 : schéma simplifié d'un* compteur proportionnel.

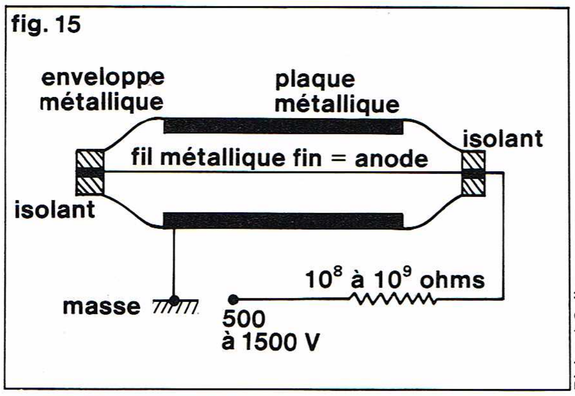

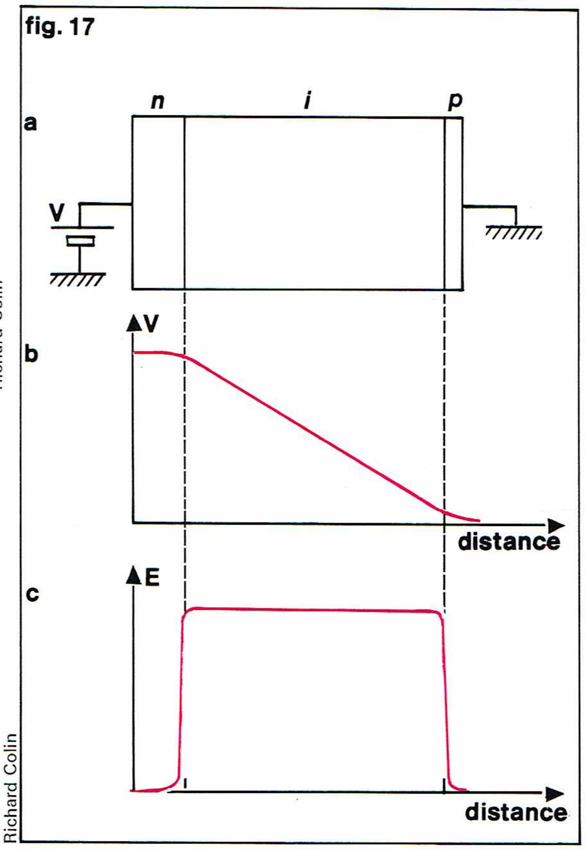

▶ *Figure 17 : a, schéma de principe d'un détecteur à semi-conducteur; b, répartition du potentiel dans le cristal; c, répartition du champ électrique dans le cristal.*

question d'en effectuer une revue complète dans ces quelques pages. Seul, le principe de fonctionnement des dispositifs les plus employés sera esquissé. Plusieurs techniques ne seront pas évoquées, comme la méthode de séparation de masse en ligne qui a été à l'origine de nombreux résultats concernant des noyaux éloignés de la zone de stabilité.

Quelques compteurs

● Les *compteurs à gaz* sont parmi les plus anciens détecteurs. Ils comportent deux électrodes situées dans un milieu gazeux; le champ électrique établi entre ces deux électrodes assure la collection des charges créées par ionisation du gaz par les particules que l'on souhaite détecter. La *figure* 15 illustre le principe du *compteur proportionnel :* la coque cylindrique de ce détecteur est à la masse, cependant que l'anode, constituée par un fil formant l'axe du dispositif, est portée à un potentiel de quelques milliers de volts. Il s'établit dans l'espace empli de gaz un champ électrique à symétrie radiale dont le module décroît en raison inverse de la distance au filament central. Un électron créé dans le milieu gazeux remonte le champ. Au voisinage du fil, dans la zone où le champ est le plus intense, il acquiert une énergie suffisante pour ioniser à son tour de nouvelles molécules gazeuses. Une amplification interne du nombre initial d'électrons est ainsi obtenue. On règle la valeur du potentiel de façon à éviter que l'avalanche ne conduise à une étincelle. Il apparaît ainsi sur le filament une impulsion dont la hauteur est (à des fluctuations statistiques près) proportionnelle au nombre d'ionisations primaires, c'est-à-dire à l'énergie que la particule a abandonnée dans le milieu gazeux. On peut donc, à partir de cette impulsion, détecter le passage de la particule et mesurer cette énergie. Les électrons sont absorbés par le filament en quelques nanosecondes (1 nanoseconde = 10^{-9} s); il devient possible de définir l'instant de la collection avec une précision meilleure que 10^{-9} seconde.

Longtemps supplanté par des dispositifs plus performants, le compteur proportionnel connaît un regain d'intérêt : il est parfois utilisé dans le plan focal d'un aimant pour y détecter l'impact produit par une particule chargée qui a été analysée par l'aimant; il constitue l'élément de base des chambres proportionnelles multifils, récemment conçues dans le domaine des hautes énergies, et qui ont connu un rapide essor (voir plus loin).

● Le *scintillateur* comporte un cristal scintillant qui émet un rayonnement de fluorescence lorsque les atomes ou molécules qui le constituent sont excités par une particule chargée. Cette particule est le rayonnement que l'on veut détecter, ou résulte de l'interaction d'une particule neutre avec un électron (effet photo-électrique ou effet Compton d'un photon γ) ou un proton (choqué par un neutron) du milieu. Dans le premier cas le détecteur est un plastique scintillant (anthracène, stilbène); des cristaux d'iodure de sodium activés au thallium sont employés pour la détection des photons.

Le cristal, transparent au rayonnement de fluorescence qu'il émet, est couplé optiquement à la cathode d'un photomultiplicateur (voir *figure* 16). Ce rayonnement visible ou ultraviolet arrache des électrons à la cathode. Une tension de 1 000 à 2 000 volts répartie entre les différentes électrodes du photomultiplicateur (cathode, dynodes, anode) permet de multiplier ces électrons par

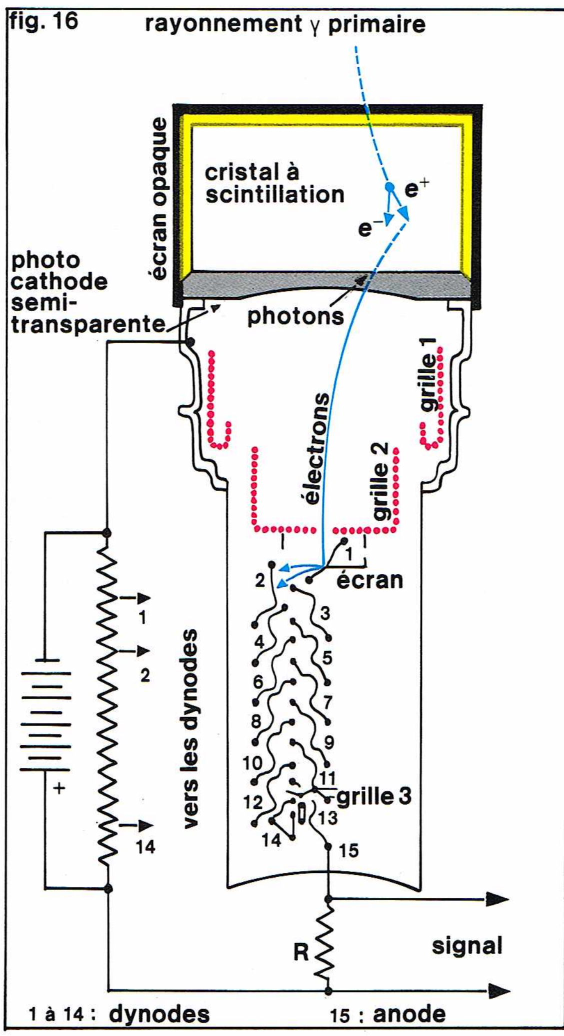

▶ *Figure 16 : schéma d'un* scintillateur; *cet appareil comprend un cristal à scintillation (ici, pour détecter les photons γ) couplé à un tube photomultiplicateur (RCA 7046).*

un important facteur ($\gtrsim 10^6$). On recueille ainsi une impulsion à l'anode.

● Les *détecteurs à jonction* sont de conception plus récente. Un tel détecteur est constitué par du matériau semi-conducteur (silicium ou germanium). C'est une diode possédant une zone intrinsèque entre les parties à structure *p* et *n*, et polarisée en non-conduction, comme l'indique la *figure* 17a ; le potentiel et le champ électrique présentent la répartition schématisée sur la *figure* 17b et c. En l'absence de création de charges (ou porteurs) par une particule extérieure, seul existe le courant inverse de la diode, dû aux électrons portés de la bande de conduction à la bande de valence par agitation thermique. On peut diminuer son importance en refroidissant le barreau de silicium ou de germanium ; à cet effet, celui-ci est placé à l'extrémité d'une tige de cuivre qui plonge dans un récipient d'azote liquide. Une particule chargée pénétrant dans le cristal semi-conducteur crée elle aussi par excitation des porteurs de charge. Ceux qui apparaissent dans la zone intrinsèque, ou zone sensible, et dont le nombre est, à de faibles fluctuations statistiques près, proportionnel à l'énergie qu'y abandonne la particule, sont collectés par le champ électrique en un temps $\lesssim 1\ \mu$s. Là encore, une impulsion est ainsi formée, qu'on amplifie et analyse.

Ce type de détecteur est très largement employé en physique nucléaire. En raison de son numéro atomique plus élevé, le germanium est utilisé pour détecter les photons γ, qui interagissent dans le cristal par effet photoélectrique ou effet Compton. Bien que l'on commence à faire appel à du germanium ultra-pur, la zone intrinsèque est en général obtenue en compensant une impureté de type *p* à l'aide de lithium. Il est nécessaire de maintenir en permanence des détecteurs à la température de l'azote liquide. Malgré cet inconvénient, leur avènement vers 1965 a révolutionné l'étude des γ. Les cristaux scintillants d'iodure de sodium NaI avaient fourni le premier moyen d'une étude quantitative des photons — ou rayonnement électromagnétique — qui constituent une source très riche d'informations sur le noyau. Mais la résolution en énergie des NaI reste très limitée (5 à 10 %) et ne permet donc pas la séparation de raies rapprochées. Les détecteurs au germanium offrent au contraire une excellente résolution ($\sim$ 2 keV pour une énergie des γ de 1 MeV). Ils sont par contre moins efficaces.

La détection des particules chargées par des semi-conducteurs s'effectue en général à l'aide de compteurs au silicium dits barrière de surface, obtenus par un contact métal-semi-conducteur. Le semi-conducteur est de type *n*, et une couche d'inversion de type *p* se crée à l'interface métal-semi-conducteur. Une zone sensible — ou zone de charge d'espace — dont la profondeur croît d'une fraction de mm à $\sim$ 1 mm en fonction de la tension de polarisation, se crée autour de la surface de contact. Ces détecteurs permettent une mesure précise de l'énergie des particules. Ils sont très utilisés également pour identifier les projectiles en même temps qu'ils mesurent leur énergie. La *figure* 18 représente un abaque obtenu à l'aide d'un *télescope ;* il s'agit d'un système comportant deux détecteurs que traverse successivement la particule : un détecteur mince dans lequel elle abandonne une fraction ΔE de son énergie E, et un autre détecteur dans lequel elle est stoppée et où elle perd donc le reste de son énergie cinétique, soit (E — ΔE). Dans la représentation bidimensionnelle de la *figure* 18, on voit que chaque type de projectile se regroupe le long d'une hyperbole donnée. On peut ainsi séparer topologiquement les différentes particules secondaires. Pour chacune d'elles, il est ensuite possible de reconstituer le spectre en énergie. On peut affiner l'identification en mesurant une autre caractéristique : le temps de vol ou temps que met la particule pour parcourir une distance connue entre deux détecteurs.

● Les *détecteurs Cerenkov* sont exploités pour étudier les particules chargées de grande énergie, c'est-à-dire des particules pour lesquelles les effets relativistes sont importants. On sait que, dans un milieu caractérisé par l'indice de réfraction *n*, la lumière ainsi que tout rayonnement électromagnétique se propagent à la vitesse $v = \frac{c}{n}$. Une particule traversant ce matériau avec une vitesse supérieure à *v* (donc caractérisée par une valeur

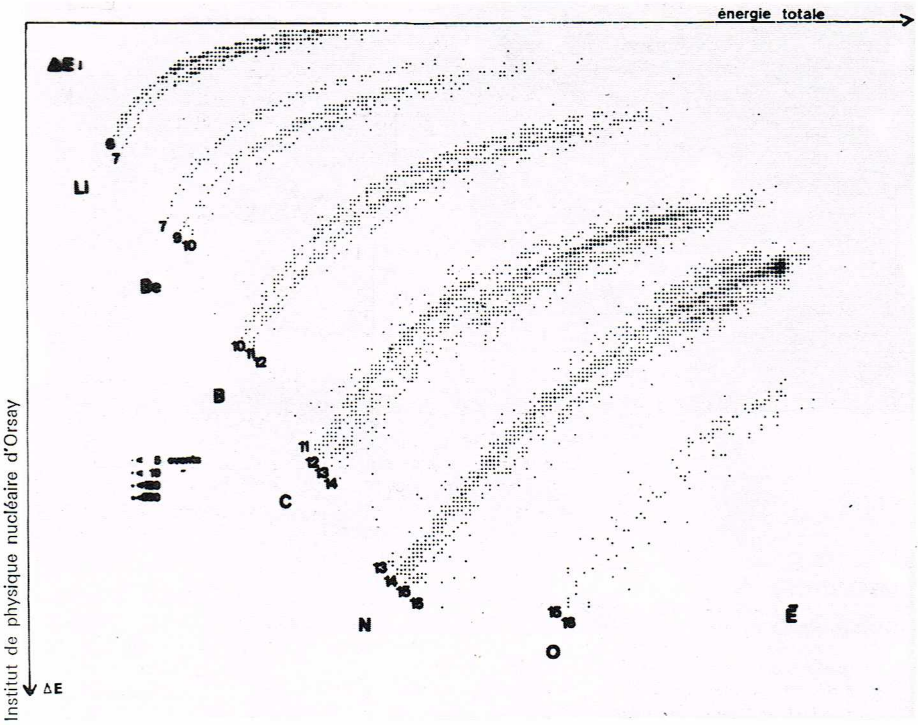

Institut de physique nucléaire d'Orsay

▲ ***Figure 18 :* *abaque représentant la variation d'énergie* ΔE *en fonction de l'énergie totale* E *pour divers ions de masse comprise entre 6 et 16, observés dans la réaction*** ^{14}***N (113 MeV) + Ag. Cet abaque est obtenu grâce à un télescope constitué de deux détecteurs au silicium : le premier (ΔE) présente une épaisseur de 47 μ, le second de 450 μ.***

du paramètre $\beta = \frac{v}{c} > \frac{1}{n}$) perd une partie de son énergie en émettant une radiation lumineuse, dite de Cerenkov. Cette lumière est émise à un angle θ par rapport à la direction de la particule incidente défini par la relation $\cos \theta = \frac{1}{n\beta}$. Elle est focalisée sur une cathode et, par l'intermédiaire d'un photomultiplicateur, convertie en une impulsion électrique.

On peut comprendre la formule ci-dessus donnant la direction θ, si l'on admet que, la particule ayant excité les différents centres ralentisseurs du milieu, ceux-ci émettent une onde électromagnétique qui se propage à la vitesse $\frac{c}{n}$, cependant que la particule progresse à la vitesse *v*. L'effet résultant de ces ondes est nul dans une direction quelconque (interférences destructives des ondes issues des divers centres), sauf dans la direction θ où l'ensemble des émissions se trouve en phase pour donner une onde résultante conique (*figure* 19).

Pour une énergie de particule donnée, l'effet Cerenkov est d'autant plus facile à mettre en évidence que la particule est légère, la condition $\beta > \frac{1}{n}$ étant plus vite satisfaite. Le compteur Cerenkov peut être utilisé pour discriminer des particules légères (électrons) et des particules plus lourdes d'énergie comparable. On choisit l'indice du milieu de manière que seules les particules les plus légères donnent naissance à la radiation Cerenkov. Pour des particules ultrarelativistes (c'est-à-dire caractérisées par un paramètre β voisin de l'unité), il faut un indice *n*

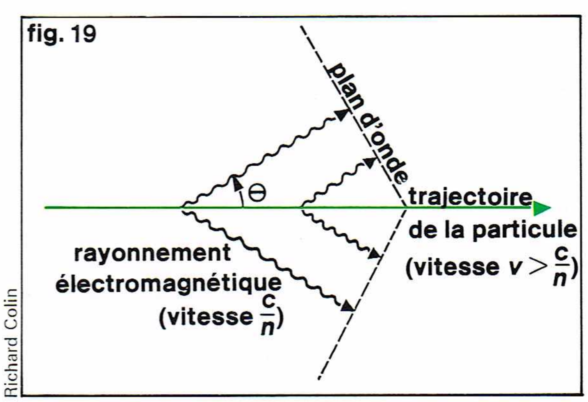

Richard Colin

◀ ***Figure 19 : principe de l'effet Cerenkov.***

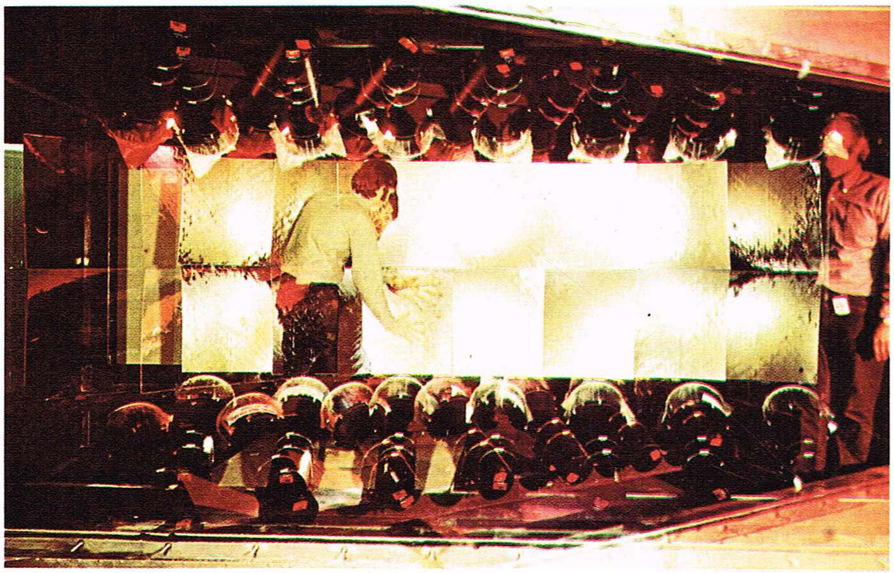

CERN - Genève

▲ *Figure 20 : installation de miroirs devant constituer des réflecteurs pour un compteur Cerenkov.*

▶ *Figure 21 : cycle de détente et de recompression à 30 °C du fréon.*

▼ *Figure 22 : montage de la chambre à hydrogène liquide* BEBC *(Bigh European Bubble Chamber) au* CERN *: le corps de la chambre est descendu dans l'enceinte.*

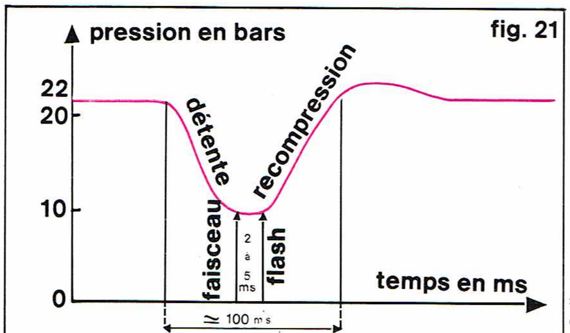

Les pressions et ordres de grandeur du temps caractérisent *Gargamelle*, chambre à liquide lourd du CERN

Richard Colin

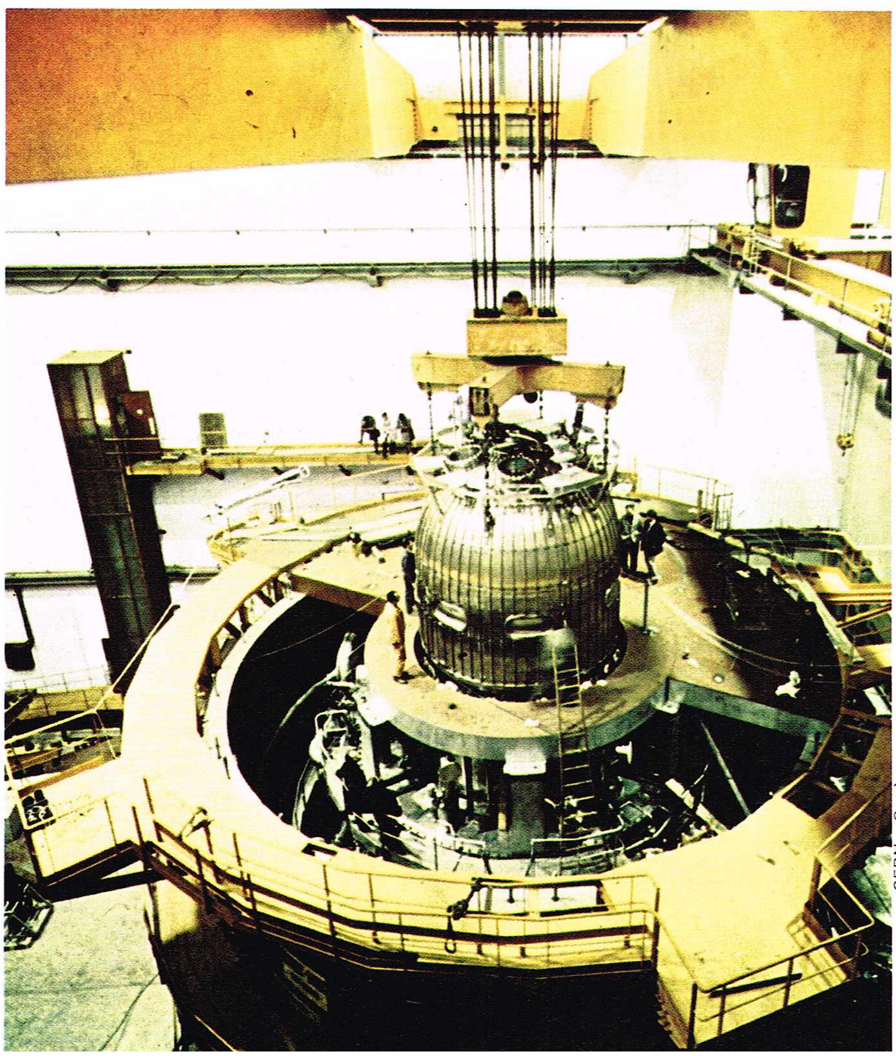

CERN - Genève

lui-même voisin de 1. Le milieu peut alors être un gaz dont on ajuste l'indice de réfraction en réglant la pression à la valeur convenable. La *figure* 20 montre le montage d'un grand compteur Cerenkov.

Détecteurs de visualisation ou de position

Ils ont été conçus pour obtenir un maximum d'informations sur des événements rares. La plaque photographique fut le premier de ce type de détecteurs. La chambre de Wilson, dont l'apparition remonte à 1912, a fourni aux physiciens nucléaires un outil au maniement certes très délicat, mais qui pendant de longues années a permis de belles observations (découvertes de particules e^+, μ, K...). Elle est devenue aujourd'hui une pièce de musée. Mais l'étude des interactions entre particules a conduit à la réalisation de nouveaux types de détecteurs.

● La *chambre à bulles* comporte un volume de liquide maintenu temporairement au-dessus de son point d'ébullition. Pour obtenir cette condition, on part d'un état initial dans lequel la substance contenue dans la chambre se trouve normalement en phase liquide. Une décompression brutale (qui s'effectue à température pratiquement constante) conduit à une pression telle que le liquide soit surchauffé (la température est supérieure à la température d'ébullition correspondant à la pression atteinte). Le liquide n'est plus alors dans un état stable. Si une particule ionisante le traverse à ce moment, des bulles prennent naissance le long de la trajectoire. En éclairant violemment et en photographiant, on peut ainsi fixer sur un cliché le parcours de la particule à l'intérieur du liquide. Des prises de vue sous différents angles permettent de reconstituer la (ou les) trajectoire(s) dans l'espace.

Afin d'éviter que l'ébullition ne se généralise à toute la chambre, le liquide est à nouveau comprimé à sa pression initiale et reste à l'état liquide (*figure* 21). Le temps de sensibilisation, pendant lequel on peut photographier les bulles, est de l'ordre des millisecondes. La détente et la décompression nécessitent des temps de 50 à 100 ms. Ces chiffres montrent l'impossibilité de déclencher le fonctionnement d'une chambre à bulles par un événement particulier que l'on souhaite étudier (les particules ont des vitesses voisines de celle de la lumière). Une chambre à bulles fonctionne de manière cyclique. La période de répétition, de l'ordre de la seconde, est comparable à celle des synchrotrons. C'est auprès de ces grands accélérateurs que sont exploités ces détecteurs, et leur temps de sensibilisation est synchronisé avec la pulsation du faisceau accéléré.

Malgré les difficultés technologiques qu'il pose (température 248° en dessous de 0 °C), l'hydrogène liquide constitue le matériau utilisé dans de nombreuses chambres (*fig.* 22). Sa structure (le noyau de l'atome d'hydrogène ne comporte qu'un proton) en fait une cible intéressante pour l'étude des interactions entre particules fondamentales. Les chambres à liquide lourd (propane, mélanges propane-fréon...), tirent leur intérêt de leur plus grande densité, qui leur confère un pouvoir d'arrêt plus grand ; elles ont aussi une plus grande efficacité aux γ.

Afin d'observer davantage de phénomènes et d'obtenir plus d'informations sur chacun d'eux, des chambres à bulles de plus en plus grandes ont été réalisées. Il en existe actuellement une quinzaine d'un volume utile supérieur à 100 litres. Le *tableau* IV fournit les principales caractéristiques des plus importantes. Les clichés qu'elles permettent d'obtenir s'élèvent à quelques dizaines de millions par an. Leur analyse a entraîné le développement d'une puissante instrumentation. Des appareillages spécifiques ont été construits, fondés sur l'utilisation de tubes à rayons cathodiques. Ils permettent, non seulement un codage rapide de l'information brute, mais aussi, avec l'aide d'un ordinateur en ligne, la reconnaissance de la forme des traces et leur paramétrisation immédiate.

Chaque chambre à bulles est placée dans un champ d'induction magnétique intense qui courbe la trajectoire des particules chargées et permet ainsi de mesurer leur impulsion. La principale qualité de cet instrument réside dans la finesse des traces grâce à laquelle la trajectoire peut être reconstituée avec une excellente précision, de l'ordre de 50 microns.

● La *chambre à étincelles* est constituée d'une série (2 ou plus) de plaques métalliques planes parallèles placées dans une enceinte remplie de gaz. Entre deux

plaques successives est appliquée une différence de potentiel de quelques kilovolts par centimètre d'épaisseur, un peu inférieure à la tension de claquage. Une particule ionisante pénétrant dans l'espace compris entre ces électrodes y crée des paires d'ions; ceux-ci sont mis en mouvement par le champ électrique intense et provoquent une décharge qui se traduit par l'apparition d'une étincelle située à l'endroit où les ions ont été créés. On dispose ainsi d'un moyen de visualiser l'endroit où la particule a traversé l'espace interplaque; plusieurs plaques permettent de jalonner le parcours de la particule. Dans certains cas, le matériau des plaques peut aussi servir de cible.

Dans la pratique, la tension permettant d'obtenir l'étincelle n'est pas maintenue en permanence entre les plaques : on applique une impulsion de tension lorsqu'un événement intéressant se produit. Cette possibilité de *déclencher* le fonctionnement de la chambre à étincelles résulte de la durée de vie moyenne des charges créées par ionisation (supérieure à la microseconde) qui est très supérieure au temps nécessaire pour établir l'impulsion de tension (quelques nanosecondes). Sur la *figure* 23, qui illustre le principe de fonctionnement de ce détecteur, les compteurs I et II ont pour but de « signer » les événements intéressants; ces détecteurs sont souvent des scintillateurs plastiques. La tension continue V_c, de l'ordre de quelques centaines de volts, a pour fonction d'éliminer les charges créées par l'étincelle ou par une particule n'ayant pas déclenché le détecteur. Cette tension continue (dite de balayage) provoque la migration des ions sur les plaques conductrices.

La *figure* 24 montre une expérience montée dans l'un des halls d'expériences du CERN et utilisant un des faisceaux issus du synchrotron; elle comporte plusieurs chambres à étincelles. Ce type de détecteur, d'emploi assez commode, en raison de la possibilité de le déclencher, de coût relativement faible, a été et reste encore abondamment utilisé. La visualisation de la position de l'étincelle met en œuvre des moyens divers : méthode optique par photographie ou tube de télévision à balayage digitisé, détection du courant sur l'électrode qui est alors morcelée sous forme de fils régulièrement espacés... La précision sur la trace est d'une fraction de mm.

Un type voisin de détecteur est constitué par la *chambre à dard*, de principe similaire, mais dans laquelle une impulsion plus brève de tension est appliquée. L'étincelle ne se produit pas, mais le long de la trace d'une particule ionisante se forme un plasma au voisinage des ions primaires. On peut, grâce à ce dispositif, étudier le parcours d'une particule sur une distance de plusieurs mètres.

● La *chambre proportionnelle multifils* comporte une série de fils parallèles situés à égale distance de deux plaques métalliques (grandeurs typiques : diamètre des fils 20 microns; distance inter-fils 2 mm; distance fils-plaques 5 mm; la surface des plaques peut atteindre plusieurs mètres carrés, et la chambre comporter plusieurs milliers de fils). Les fils sont à la masse, les plaques à un potentiel négatif de 4 à 5 kilovolts. L'espace entre les plaques est rempli d'un gaz comportant une forte proportion d'argon. Le mode de fonctionnement est celui du compteur proportionnel, précédemment décrit : quand une particule ionisante pénètre dans la chambre, il apparaît une impulsion qui est recueillie uniquement par le fil près duquel est passée la particule (la multiplication des charges se produit dans le champ électrique intense régnant au voisinage de ce fil, comme il a été décrit pour le compteur proportionnel). On peut donc localiser le passage de la particule (dans la direction perpendiculaire aux fils) avec une précision meilleure qu'un millimètre. Le signal est amplifié, et un système de lecture à ferrites identifie le fil siège de l'impulsion. Ce détecteur n'est pas déclenché; la tension demeure appliquée en permanence sur les plaques.

L'avantage essentiel de la chambre proportionnelle multifils réside dans sa grande rapidité. Son temps mort (intervalle de temps minimal entre deux événements qu'il permet de séparer) est de quelques dizaines de nanosecondes. Il a de ce fait apporté un gain substantiel en rapidité d'acquisition. Ceci explique la rapide expansion connue par cette technique récente (première réalisation en 1969), malgré un prix de revient assez élevé dû à la nécessité d'équiper chaque fil d'un amplificateur auquel est associé un dispositif de lecture comprenant un retard

Tableau IV
Principales caractéristiques des plus grandes chambres à bulles

Laboratoire [*nom de la chambre*]	Dimensions en m	Volume en m³ total	Volume en m³ utile	Champ magnétique en teslas	Nombre de caméras	Date de mise en service
Argonne	3,7 (⌀) × 2,5	26	20	2 (supra)	4	1969
Brookhaven	2,1 (⌀) × 3,5	9,5	8	3 (supra)	3	1970
CERN [*BEBC*]	3,7 (⌀) × 4,1	34	20	3,5 (supra)	4	1973
NAL-Batavia	3,8 (⌀) × 4,6	30	25	3 (supra)	6	1973
CERN [*Gargamelle*]	1,9 (⌀) × 4,8	12	10	2 (classique)	8	1971
Serpoukov [*Mirabelle*]	1,6 (⌀) × 4,7	9	6	2 (classique)	8	1971

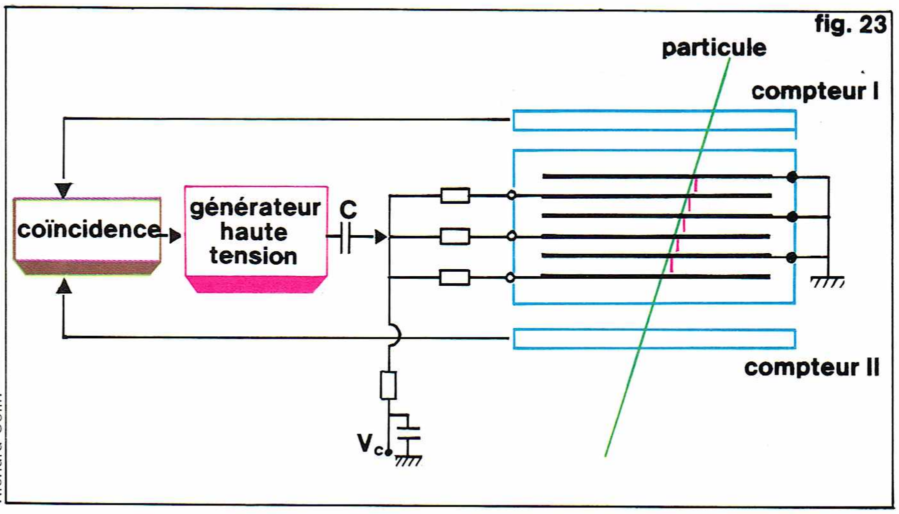

Richard Colin

▲ *En haut, tableau IV : principales caractéristiques des plus grandes chambres à bulles.*
Ci-dessus, figure 23 : schéma de principe de la chambre à étincelles*;*
on désire obtenir la trace de toute particule ayant traversé les compteurs I *et* II *:*
la coïncidence entre les impulsions issues de ces compteurs assure que la condition est bien remplie; on déclenche alors le générateur qui applique la différence de potentiel de fonctionnement entre deux plaques successives.

▼ *Figure 24 : montage d'une expérience comportant des chambres à étincelles (à gauche).*

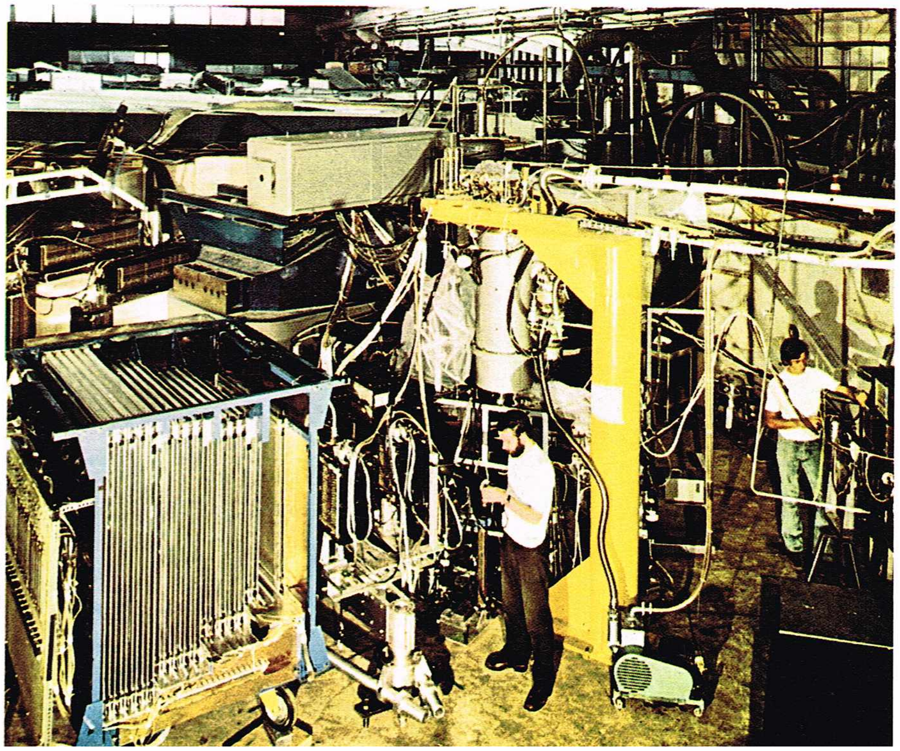

CERN - Genève

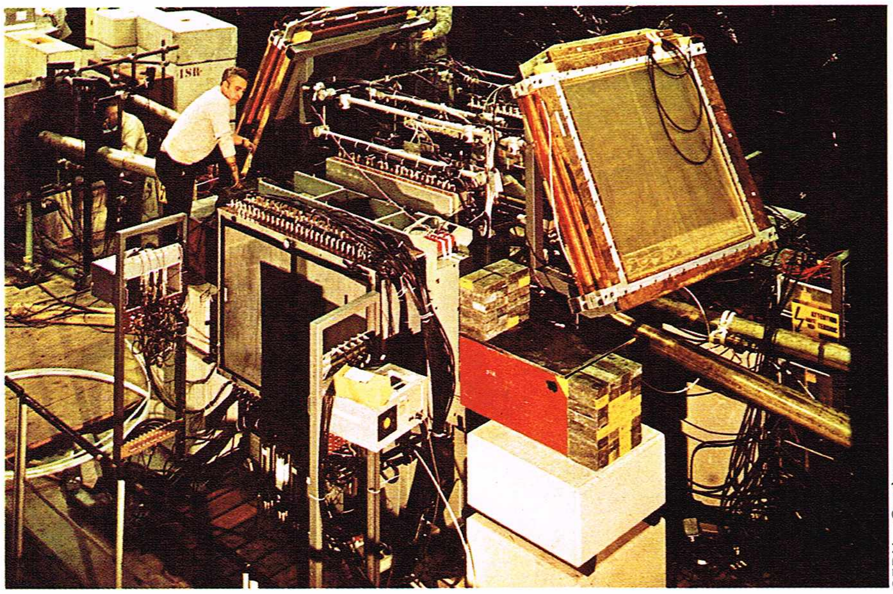

CERN - Genève

▼ ***Figure 26 :** vue du spectromètre «Oméga», avec un ensemble de chambres à étincelles susceptibles de se déplacer dans l'aimant. D'autres détecteurs (chambres proportionnelles, compteurs Cerenkov) peuvent être disposés dans l'aimant supraconducteur qui produit un champ magnétique vertical d'environ 2 teslas dans un espace de 3 m de diamètre et 1,5 m de haut.*

fixe et une mémoire. Sur la photographie de la *figure* 25, on voit des chambres proportionnelles multifils disposées au voisinage d'une zone d'intersection des anneaux de stockage du CERN.

Spectromètres magnétiques

Les spectromètres magnétiques ont longtemps fourni le seul moyen de mesurer avec précision les spectres d'énergie des particules chargées. Si le développement des détecteurs offre maintenant une autre possibilité d'atteindre ces grandeurs, l'analyse magnétique des produits de réaction reste largement exploitée. Les importants progrès réalisés dans ce domaine sont doubles : une amélioration spectaculaire des qualités optiques des spectromètres a été accompagnée du bouleversement des techniques de détection (la plaque photographique est pratiquement abandonnée au profit de compteurs qui présentent une réponse très rapide tout en permettant une bonne précision de mesure).

Des systèmes de plus en plus complexes ont été réalisés. Pour obtenir tout à la fois une grande efficacité (angle solide important), une résolution et une dispersion en énergie améliorées, on corrige les aberrations que donnerait un seul aimant en mettant en jeu plusieurs constituants. L'un des dispositifs les plus performants, utilisé en physique nucléaire dans le domaine des moyennes énergies, est le système appelé QD3, qui comporte un quadripôle et trois aimants dipolaires : il permet d'analyser les particules émises dans un angle solide de 14 millistéradians avec une résolution en énergie $\frac{E}{\Delta E} = 5\,000$. Des systèmes achromatiques, formés d'un analyseur et d'un spectromètre de dispersions égales et opposées, permettent d'effectuer des mesures de précision à l'aide d'accélérateurs dont le faisceau a une définition en énergie très moyenne.

Dans le domaine de la physique des particules, l'incursion vers les plus hautes énergies exige une puissance accrue de l'analyse magnétique, alors que la mesure doit toujours être effectuée avec précision. La *figure* 26 montre une vue du grand spectromètre « oméga » récemment mis en service au CERN.

Électronique et informatique

Les techniques de détection précédemment esquissées n'ont pu se développer qu'en raison d'un essor parallèle dans les circuits électroniques que comprend toute installation. On place habituellement ceux-ci en deux catégories.

— L'électronique linéaire permet d'amplifier sans distorsion les signaux, en général de faible amplitude, issus du détecteur. Les composants modernes (transistors à effet de champ, circuits intégrés...) y sont largement utilisés.

— L'électronique rapide a pour but d'effectuer certaines fonctions logiques qui interviennent dans le traitement des informations. La tendance est d'utiliser des

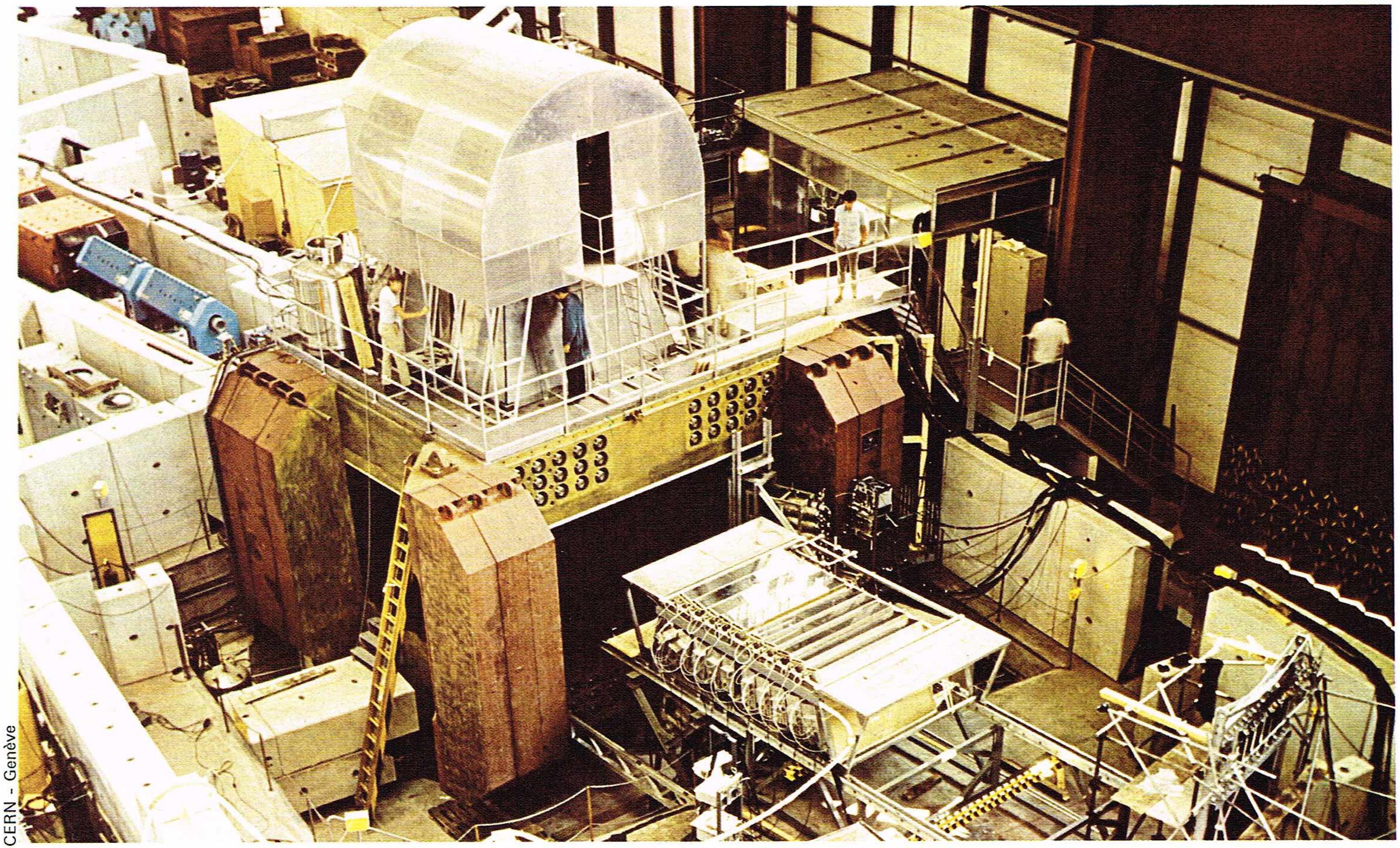

CERN - Genève

circuits toujours plus rapides permettant de réaliser des taux de comptages sans cesse plus élevés.

La conséquence naturelle de cette tendance est un usage toujours accru des techniques d'informatique. Le physicien nucléaire n'utilise pas l'ordinateur uniquement pour le calcul scientifique; la réalisation et le dépouillement des expériences nécessitent aussi largement son emploi. L'acquisition d'un maximum d'informations pendant la durée d'une expérience exige de l'ordinateur une grande vitesse d'entrée-sortie. La sélection des informations qui seront gardées et traitées peut actuellement être réalisée en des temps très brefs grâce à l'utilisation de microprogrammes spécialement conçus. Un premier traitement est effectué souvent « en ligne » : les données issues de l'expérience sont fournies, après sélection, directement à l'ordinateur qui les gère en des temps de l'ordre de quelques microsecondes; il peut notamment mener à bien certains contrôles qui sont communiqués au physicien, ce qui permet d'éventuelles interventions sur l'expérience. L'ordinateur est utilisé pour analyser les informations qui ont été stockées sur fichiers.

Il y a une quarantaine d'années, le physicien nucléaire construisait entièrement de ses mains les outils qu'il exploitait. C'est chose impossible aujourd'hui. Les chercheurs travaillant dans le domaine du noyau ou celui des particules sont regroupés autour d'accélérateurs toujours plus importants dans de grands laboratoires, comptant de nombreux ingénieurs et techniciens. Ces recherches ont stimulé le développement de plusieurs activités hors des laboratoires; et le physicien se tourne maintenant vers des entreprises industrielles pour les problèmes d'électronique, d'informatique, pour la construction des machines. Les expériences, préparées, réalisées et analysées par des équipes où chacun prend plus spécialement en charge une partie du travail, sont souvent planifiées et programmées plusieurs mois avant l'obtention du faisceau. Le physicien nucléaire est contraint de se plier à cette planification qui résulte de l'importance des moyens mis en œuvre.

Les énormes accélérateurs modernes constituent la preuve la plus tangible de la rapide et constante expansion d'une discipline encore jeune, puisque son enfance nous ramène à la fin du siècle dernier, dans un hangar de la rue Lhomond à Paris où Marie et Pierre Curie découvraient et séparaient les premiers radio-éléments naturels.

BIBLIOGRAPHIE

ALLKOFER O. C., *Spark Chambers,* Verlag Karl Thiemig KG München. - *Anneaux de stockage à intersections du CERN,* CERN/PIO-oct. 1971. - BAKER W., *Wire Spark Chambers,* Physics Today, 20/7/1967. - BERTOLINI G. & COCHE A., *Semiconductor Detectors,* North-Holland Publishing Company, 1968. - BRUCK H., *les Accélérateurs circulaires de particules,* P. U. F., Paris, 1966. - *Bubble and Spark Chambers,* R. P. Shutt editor, in Pure and Applied Physics, vol. 27, I and II. - CHARPAK G., *Filet à particules,* Sciences, Progrès et découvertes, n° 3441-1972. - CHARPAK G. et al., Nucl. Instr. Meth. 97, 1971, 377. - DEARNELEY G. & NORTHROP D. C., *Semiconductor Counters for Nuclear Radiations,* Spon, 1964. - GARGAMELLE, *Chambre à liquide lourd,* CERN/PIO/RA-av. 1971. - HENDRIE D. L., *Magnetic Detection of Charged Particle,* Nuclear Spectroscopy and Reactions, ed. J. Cerny, Academic Press, 1974. - KEIL E., *Intersecting Storage Rings,* rapport CERN 72-14. - LAPOSTOILE P. & SEPTIER A., *Linear Accelerators,* Amsterdam, North Holland. - LIVINGOOD J. J. ,*Cycle Particle Accelerators,* Van Nostrand, New York, 1961. - LIVINGSTON M. S. & BLEWETT J. P., *Particle Accelerators,* Mac Graw Hill Book Company, New York, 1962. - NETTER F., *l'Accélérateur linéaire à électrons de Saclay à grand cycle utile et forte intensité,* BIST, n° 179, 1973. - PERSICO E., FERRARI E. & SEGRÉ S. E., *Principle of Particle Accelerators,* W. A. Benjamin, New York, 1968. - *Proton Synchrotron of 28 GeV,* Technical notebook, n° 2, CERN, 1970. - ROSE P. H. & GALEJS A., *The Production and Acceleration of Ion Beams in the Tandem Accelerator,* Progress in Nucl. Phys. and Instr., vol. 2, 1967. - ROSENBLATT J., *Particle Acceleration,* Methuen & Co. LTD, London, 1968. - SONDEREGGER P., *Modern Experimental Technics.* - WILSON R. R., *The Batavia Accelerator,* Scientific American, Feb. 1974, p. 72.

LES RADIONUCLÉIDES

Structure atomique et nucléaire

Atomes

L'atome est l'élément d'un corps pur non susceptible de décomposition par les méthodes de la chimie. En fait, au début du XX^e siècle, on savait peu de chose sur l'atome; les diverses tentatives expérimentales pour mesurer son diamètre concordaient pour lui attribuer une valeur d'environ 10^{-10} m, mais sa structure interne demeurait inconnue. On savait seulement que l'atome était électriquement neutre. Il fallut attendre les expériences de Rutherford en 1911 et les hypothèses de Bohr en 1913 pour avoir une idée précise de la structure de l'atome.

La théorie de Bohr a subi depuis de nombreux remaniements sous l'influence des travaux expérimentaux et de la mécanique ondulatoire. On peut actuellement considérer que l'atome comprend :

— Un **noyau** placé au centre de l'atome et dont le diamètre est environ de 10^{-14} m. Le noyau est composé de *neutrons* et de *protons* et sa charge électrique est égale à Ze, où Z est le numéro atomique et e la charge électrique élémentaire.

— Un **cortège de Z électrons** qui gravitent autour de ce noyau sur différents niveaux électroniques K, L, M, etc.

Éléments et isotopes

La chimie étudie les *molécules,* qui sont des assemblages d'atomes; la seule propriété des atomes qui intéresse le chimiste est la façon dont ils s'assemblent en molécules, ce que l'on appelle leurs propriétés chimiques. Or ces assemblages d'atomes se font par l'intermédiaire des électrons périphériques : c'est pourquoi les propriétés chimiques d'un atome dépendent uniquement du nombre de ses électrons. On voit donc l'importance du nombre de protons d'un noyau, qu'on appelle *nombre atomique.* C'est lui, en effet, qui impose le nombre des électrons et commande ainsi l'aspect extérieur de l'atome et ses propriétés chimiques. Par suite, tous les atomes qui ont le même nombre atomique, même s'ils diffèrent par le nombre de leurs neutrons, ont les mêmes propriétés chimiques; ils appartiennent au même *élément,* c'est-à-dire au même type chimique d'atome.

La chimie ne permet de distinguer dans la nature que 90 types chimiques d'atomes, les 90 éléments naturels que l'on trouve dans la *table de Mendeleïev.* Chacun de ces éléments est caractérisé par son *nombre atomique :* ${}_{1}H$, ${}_{16}O$, ${}_{26}Fe$.

Il existe cependant des atomes qui ont le même nombre de protons et des nombres de neutrons différents. Ces atomes sont appelés *isotopes.* Ils ont le même nombre atomique, donc la même enveloppe extérieure, et, par suite, les mêmes propriétés chimiques; ils appartiennent au même élément, mais le nombre plus ou moins grand de neutrons présents dans leur noyau modifie profondément leurs propriétés nucléaires.

Par exemple, il y a deux isotopes naturels de l'hydrogène qui ont tous les deux 1 proton, donc 1 électron, et respectivement 0 et 1 neutron :

— hydrogène léger ${}_{1}^{1}H$

— hydrogène lourd ou deutérium ${}_{1}^{2}H$

Dans la nature, aux 90 éléments recensés dans la table de Mendeleïev correspondent 325 isotopes différents; il est donc clair que la classification des atomes en éléments, si elle satisfait le chimiste, ne peut satisfaire le physicien nucléaire.

Nucléides

Ce sont des espèces d'atomes caractérisés par leur nombre de masse, leur nombre atomique et leur état énergétique nucléaire, sous réserve que la vie moyenne dans cet état soit assez longue pour pouvoir être observée.

Les nucléides sont très nombreux, on a identifié 325 nucléides naturels, c'est-à-dire que l'on trouve dans la nature, et plus de 1 200 nucléides artificiels, c'est-à-dire fabriqués par l'homme.

◀ *Page ci-contre, en haut, figure 25 : expérience montée au voisinage d'une des 8 zones d'intersection des anneaux de stockage du CERN et utilisant des chambres proportionnelles multifils.*

Pour les reconnaître, on a adopté la notation suivante, soit, pour un nucléide de symbole X : ${}^{A}_{Z}X$, A étant le nombre de masse représentant le nombre total de nucléons (neutrons + protons), et Z étant le numéro atomique représentant le nombre d'électrons dans le cortège électronique.

Observons que, si le nucléide X a Z électrons, il y aura dans son noyau Z protons et A — Z neutrons.

Exemples :

${}^{59}_{27}Co$ qui comporte { 27 électrons, 27 protons, 59 — 27 = 32 neutrons

${}^{60}_{27}Co$ qui comporte { 27 électrons, 27 protons, 60 — 27 = 33 neutrons

Les radionucléides

Stabilité et instabilité des noyaux

L'étude de la table de Mendeleïev montre que, pour les isotopes les plus abondants des éléments légers, il y a, dans le noyau, autant de protons que de neutrons :

$$A = 2Z \quad \text{ou} \quad N = A - Z = Z$$

Pour les atomes dont la masse est plus élevée, le nombre de neutrons devient plus élevé que le nombre de protons. Les forces de liaison intranucléides sont proportionnelles au nombre des nucléons, tandis que les forces de répulsion électrostatiques obéissent à la *loi de Coulomb* $\left(F = \frac{qq'}{r^2}\right)$. La force de répulsion qui s'exerce sur un proton est proportionnelle au produit de la charge électrique Ze^+ par la charge e^+ d'un proton, soit au produit Ze^2.

L'énergie correspondant aux forces de répulsion croît donc comme le carré du nombre de protons. Elle varie de 0,1 MeV par particule pour un petit noyau, à 3,5 MeV pour les gros noyaux comme celui du plutonium.

Pour que le noyau reste stable, il faut qu'il contienne suffisamment de neutrons qui apportent des forces de liaison sans apporter des forces de répulsion électrostatique. Le rapport $\frac{\text{nombre de neutrons}}{\text{nombre de protons}}$, qui, pour les éléments légers, est égal à 1, croît progressivement à partir du ${}^{48}_{22}Ti$ pour atteindre 1,5 pour les éléments les plus lourds.

Pour un nombre de masse A donné, le noyau peut être stable pour des proportions légèrement différentes de protons et de neutrons. Ces nucléides ayant même A mais un Z différent sont appelés *isobares*. Les isobares se trouvent sur les droites N + Z = A qui sont perpendiculaires à la droite bissectrice N = Z :

— lorsque A est pair, ce qui est le cas de 166 nucléides naturels, plusieurs nucléides stables peuvent exister;

— lorsque A est impair, ce qui est le cas de 108 nucléides naturels, il n'existe en général qu'un seul nucléide stable.

Les radionucléides

Quand un noyau est situé hors de la zone de stabilité, il existe une certaine probabilité pour que l'état d'équilibre instable dans lequel il se trouve se rompe; le noyau peut alors se transformer en noyau stable en expulsant une particule.

Les noyaux instables sont dits *radio-actifs*, et les nucléides correspondants sont appelés *radionucléides* ou, plus improprement, *radio-éléments*.

Nous avons vu que plus de 1 500 nucléides avaient été dénombrés; sur ce nombre, plus de 80 % sont des radionucléides : sur 325 nucléides naturels, 274 sont des radionucléides, et tous les nucléides artificiels sont des radionucléides.

Propriétés des radionucléides

Radio-activité

Les radionucléides sont donc par essence radio-actifs, c'est-à-dire qu'ils peuvent *spontanément* se transformer en nucléides stables. On peut dire que la différence entre un noyau stable et un noyau radio-actif n'est pas une différence fondamentale. En fait, les noyaux radio-actifs ne sont discernables des noyaux stables qu'au moment même où la radio-activité se manifeste, c'est-à-dire au moment où ils changent de nature.

D'où provient alors la différence entre un nucléide et un radionucléide ?

— la quantité d'énergie contenue dans les noyaux n'est pas la même;

— les noyaux qui ont le plus d'énergie disponible tendent à se transformer en d'autres qui en contiennent moins;

— les noyaux stables sont simplement ceux qui n'ont plus la possibilité de passer à un état énergétique inférieur.

Pour devenir stables, les radionucléides perdent de l'énergie, cette énergie se retrouvera sous forme de rayonnements, qui sont en quelque sorte les signes extérieurs de la radio-activité.

Loi de désintégration

La **loi de désintégration** des radionucléides a été établie expérimentalement en 1902 par Rutherford et Soddy; elle peut s'énoncer de la façon suivante : *Lorsqu'on examine un grand nombre de noyaux radio-actifs, le*

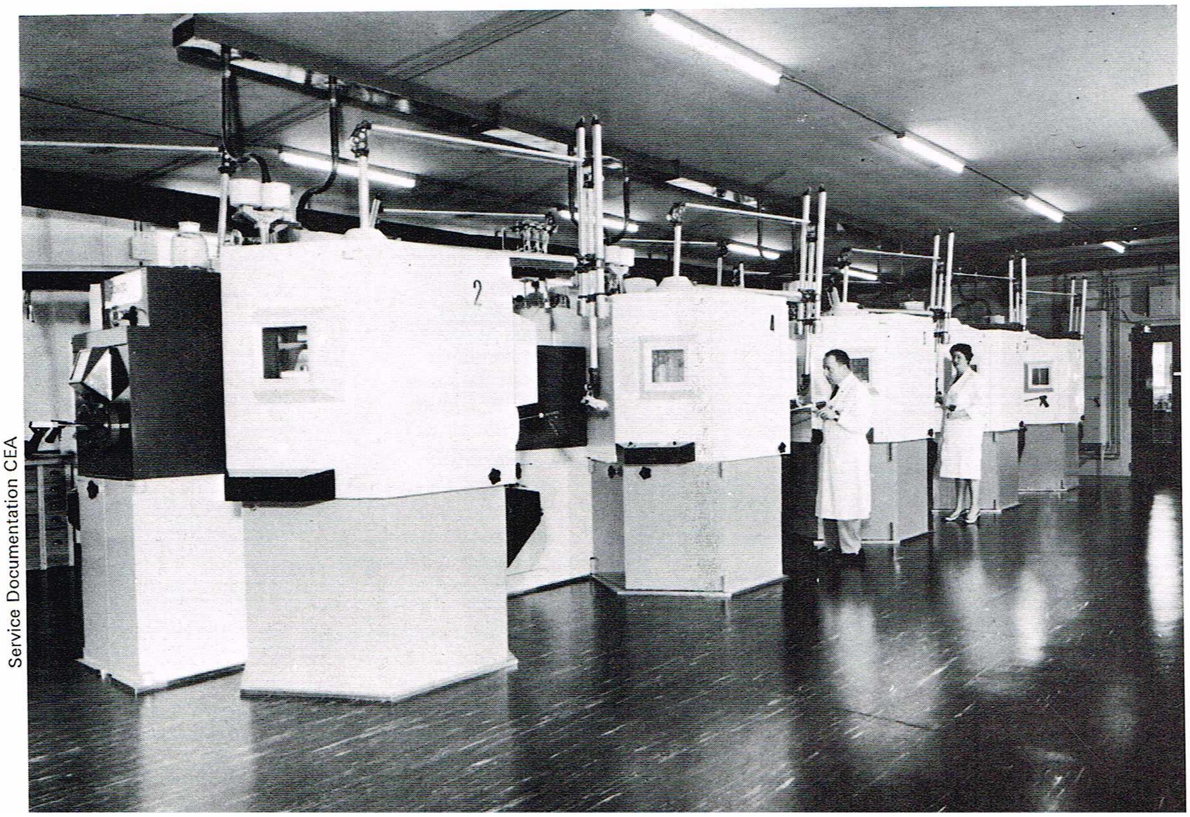

Service Documentation CEA

▶ ***Les radionucléides peuvent spontanément se transformer en nucléides stables en perdant de l'énergie qui se retrouve sous forme de rayonnement; ils doivent donc être maniés avec précautions : ici, la chaîne Albega de manipulation des radionucléides.***

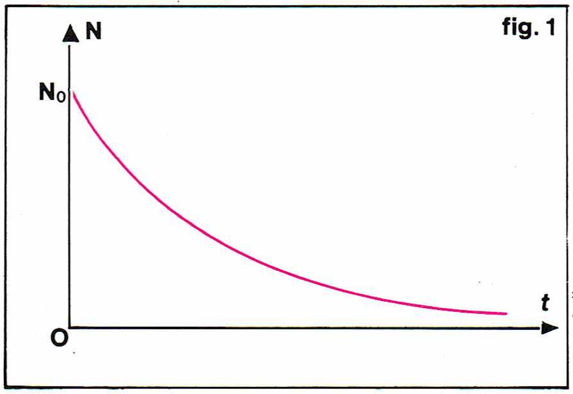

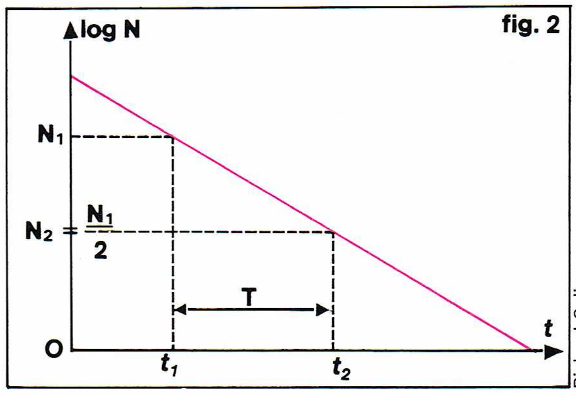

◄ ***Figures 1 et 2 : décroissance radio-active d'un radionucléide ; à gauche, en coordonnées cartésiennes ; à droite, en coordonnées semi-logarithmiques.***

nombre de noyaux se désintégrant pendant un court intervalle de temps est proportionnel au nombre de noyaux présents.

Si N est le nombre d'atomes présents à l'instant t, on a :

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

Soit, en intégrant sur un intervalle de temps compris entre 0 et t :

$$\text{Log } N = -\lambda t + c$$

La constante c est déterminée par les conditions initiales, pour $t = 0$, $N = N_0$, donc $c = \text{Log } N_0$. Finalement, nous avons :

(1) $$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Période du radionucléide (ou demi-vie)

La *période* est le temps T au bout duquel le nombre de noyaux radio-actifs aura diminué de moitié. On a :

$$\frac{N}{N_0} = \frac{1}{2} = e^{-\lambda T}$$

Soit $\text{Log } 2 = \lambda T$

(2) $$T = \frac{\text{Log } 2}{\lambda} = \frac{0{,}693}{\lambda}$$

La période est la caractéristique de la décroissance radio-active la plus employée ; elle est la même pour tous les atomes d'une même espèce ; chaque radionucléide a une période bien précise ; celle-ci est indépendante de l'âge des atomes considérés.

La relation **(1)** peut s'écrire :

$$N(t + T) = N_0 e^{-\lambda(t+T)} = N(t)\, e^{-\lambda T}$$

et, après n périodes, on a :

$$N(t + nT) = N(t)\, e^{-\lambda nT} = N(t)\, (e^{-\lambda T})^n$$

or $$e^{-\lambda T} = c\, 2^{-1}$$

donc $N(t + nT) = N(t)\, 2^{-n}$

(3) $N(nT) = N_0\, 2^{-n}$ si $t = 0$

Donc, au bout de n périodes, le nombre de noyaux radio-actifs aura diminué d'un facteur 2^n.

Vie moyenne du radionucléide

On peut définir pour un grand nombre d'atomes radio-actifs identiques une grandeur appelée *vie moyenne* τ égale à la somme des durées de vie de tous les atomes divisée par le nombre initial d'atomes radio-actifs.

Au temps t, il reste N atomes, et, pendant le temps dt (de t à $t + dt$), il y a $-dN = \lambda N_0 e^{-\lambda t} dt$ atomes qui se désintègrent. Pour cet instant t, la somme des durées de vie est : $t\lambda N_0 e^{-\lambda t} dt$. En sommant sur tous les temps t, on obtient la somme totale des durées de vie :

$$\int_0^\infty t\lambda N_0 e^{-\lambda t} dt$$

Nous avons donc

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^\infty t\lambda N_0 e^{-\lambda t} dt = \int_0^\infty t\lambda e^{-\lambda t} dt$$

(4) $$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

La vie moyenne est donc l'inverse de la constante de désintégration ; elle est reliée à la période par la relation : $T = 0{,}693\ \tau$. τ sera le temps au bout duquel le nombre de noyaux radio-actifs aura été divisé par e.

Décroissance radio-active

La *figure* 1 représente, en coordonnées cartésiennes, la décroissance radio-active d'un radionucléide. Cette décroissance suit une loi exponentielle :

(1) $$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

λ étant la pente à l'origine.

Par contre, si l'on représente cette décroissance en coordonnées semi-logarithmiques (*fig.* 2), on a :

$$\text{Log } N = -\lambda t + \text{Log } N_0$$

dont la représentation est une droite de pente $-\lambda$ et d'ordonnée à l'origine $\text{Log } N_0$.

Cette représentation est particulièrement commode, car elle permet une détermination immédiate de la période du radionucléide. Si N_1 est le nombre d'atomes radio-actifs présents au temps t_1 et si $N_2 = \frac{N_1}{2}$ est le nombre d'atomes présents au temps t_2, on a la période du radionucléide : $T = t_1 - t_2$

Modes de désintégration des radionucléides

Les radionucléides, pour passer de leur état instable à un état stable, utilisent différents modes de désintégration que l'on peut classer en deux groupes :

— *Les transitions par partition :* ce sont celles pour lesquelles il y a expulsion du noyau de un ou plusieurs nucléons (désintégration α, fission).

— *Les transitions isobariques :* qui ont lieu sans modification apparente de la masse du radionucléide (désintégration β, capture électronique).

Désintégration α - transition par partition

Un radionucléide X se transforme en un nucléide Y, radio-actif ou non, avec émission spontanée d'un noyau d'hélium appelé *particule* α :

$${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He$$

Le processus de désintégration α entraîne donc un changement de A et de Z :

Exemples : $${}^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{222}_{86}Rn + {}^{4}_{2}\alpha$$
$${}^{239}_{94}Pu \rightarrow {}^{235}_{92}U + {}^{4}_{2}\alpha$$
$${}^{210}_{84}Po \rightarrow {}^{206}_{82}Pb + {}^{4}_{2}\alpha$$

Dans ce dernier exemple, le nucléide formé ${}^{206}_{82}Pb$ est stable ; par contre, dans les précédents, la désintégration a conduit aux ${}^{222}_{82}Rn$ et ${}^{235}_{92}U$ qui sont eux-mêmes des radionucléides, donc instables. Le processus de désintégration n'est donc pas achevé.

Désintégration β - transition isobarique

Un radionucléide X se transforme en un nucléide Y avec émission spontanée d'un électron appelé particule β. Deux cas sont possibles :

● *Émission* β^-. Il y a départ d'un électron négatif ; un neutron se transforme en proton dans le noyau :

Tableau I
Radionucléides de très longue période (T > 2 · 10⁸ ans)

Radionucléide	Abondance isotopique (%)	Période radio-active (T en années)	Principaux rayonnements émis
^{40}K	0,012	$1{,}3 \cdot 10^9$	β^-, γ
^{50}V	0,25	$\simeq 10^{12}$	
^{87}Rb	27,85	$6{,}1 \cdot 10^{10}$	β^-
^{115}In	95,80	$\simeq 10^{14}$	β^-
^{130}Te	34,50	$\simeq 10^{21}$	β^-
^{138}La	0,089	$7 \cdot 10^{10}$	β^-, γ
^{144}Nd	23,87	$1{,}5 \cdot 10^{15}$	α
^{147}Sm	15,07	$6{,}7 \cdot 10^{11}$	α
^{176}Lu	2,60	$4{,}6 \cdot 10^{10}$	β^-, γ
^{187}Re	62,93	$4 \cdot 10^{12}$	β^-
^{209}Bi	100	$2{,}7 \cdot 10^{17}$	α
^{232}Th	100	$1{,}4 \cdot 10^{10}$	α, γ
^{238}U	99,28	$4{,}5 \cdot 10^9$	α, γ
^{235}U	0,71	$7{,}1 \cdot 10^8$	α, γ

Certains nucléides sont également suspectés d'être radio-actifs en tenant compte des considérations de masse et d'énergie; ce sont : ^{48}Ca, ^{96}Zr, ^{113}Cd, ^{123}Sb, ^{180}Ta, ^{180}W, ^{190}Pt.

▲ *Tableau I : les radionucléides de très longue période ($T > 2 \cdot 10^8$ ans).*

$$^1_0n = {}^1_1p + {}^0_{-1}e$$

Le processus de désintégration β^- entraîne un changement de Z qui devient Z + 1, mais A ne change pas.

Exemples :

$$^A_ZX \rightarrow {}_{Z+1}^{\;\;A}Y + {}^0_{-1}e$$

$$^{14}_6C \rightarrow {}^{14}_7N + {}^0_{-1}e$$

$$^{60}_{27}Co \rightarrow {}^{60}_{28}Ni + {}^0_{-1}e$$

● *Émission* β^+. Il y a départ d'un électron positif; un proton se transforme en neutron dans le noyau :

$$^1_1p \rightarrow {}^1_0n + {}^0_{+1}e$$

Le processus de désintégration β^+ entraîne un changement de Z qui devient Z — 1, mais A ne change pas.

Exemples :

$$^A_ZX \rightarrow {}_{Z-1}^{\;\;A}Y + {}^0_{+1}e$$

$$^{30}_{15}P \rightarrow {}^{30}_{14}Si + {}^0_{+1}e$$

$$^{18}_9F \rightarrow {}^{18}_8O + {}^0_{+1}e$$

Capture électronique - Transition isobarique

C'est un processus concurrent de la désintégration β^+. Il se produit quand le radionucléide ne dispose pas de l'énergie suffisante pour créer un électron positif. Dans ce cas, un électron du cortège électronique est absorbé par le noyau, comme dans la désintégration β^+. C'est un proton qui se transforme en neutron à l'intérieur du noyau, mais suivant la réaction ci-après :

$$^1_1p + {}^0_{-1}e \rightarrow {}^1_0n$$

Le processus de capture électronique entraîne un cnangement de Z qui devient Z — 1, mais A ne change pas. Il n'y a pas de rayonnement nucléaire émis, puisqu'il n'y a pas d'électron de créé, mais la capture d'un électron de l'orbite électronique de l'atome provoque un réarrangement des courbes électroniques avec production de rayons X et d'électrons Auger.

Exemples : $^A_ZX + {}^0_{-1}e \rightarrow {}_{Z-1}^{\;\;A}Y$

$$^7_4Be + {}^0_{-1}e \rightarrow {}^7_3Br$$

$$^{58}_{27}Co + {}^0_{-1}e \rightarrow {}^{58}_{26}Fe$$

Fission - Transition par partition

Sous l'action d'un neutron, ou même quelquefois spontanément, certains noyaux lourds peuvent se scinder en deux; ce phénomène est accompagné de l'émission de plusieurs neutrons.

● *Fission spontanée* (exemple : ^{252}Cf) :

$$^A_ZX \rightarrow {}^{A'}_{Z'}Y + {}^{A''}_{Z''}W + a \cdot {}^1_0n$$

avec $\begin{cases} A = A' + A'' + a \\ Z = Z' + Z'' \end{cases}$

● *Fission induite :*

$$^A_ZX + {}^1_0n \rightarrow {}^{A'}_{Z'}Y + {}^{A''}_{Z''}W + b \cdot {}^1_0n$$

avec $\begin{cases} A = A' + A'' + b \\ Z = Z' + Z'' \end{cases}$

Exemple :

$$^{235}_{92}U + {}^1_0n \rightarrow {}^{133}_{51}Sb + {}^{101}_{41}Nb + 2\,{}^1_0n$$

Transition isomérique

Ce type de transition a lieu lorsqu'un noyau est dans un état excité et qu'il passe soit à un autre niveau excité, soit à l'état stable. Ce processus est accompagné de photons mais n'entraîne aucun changement de A et de Z.

$$^A_ZX^* \rightarrow {}^A_ZX + \gamma$$

Exemple : $^{99}_{43}Tc^m \rightarrow {}^{99}_{43}Tc + \gamma$

Les radionucléides naturels

La radio-activité naturelle

Elle a été découverte en 1896 par le physicien français Henri Becquerel qui mit en évidence les rayonnements émis par l'uranium en impressionnant des plaques photographiques. Deux ans plus tard, en 1898, en étudiant les nouvelles propriétés de la matière, Pierre et Marie Curie purent extraire de certains minéraux rares un corps doté de propriétés analogues, mais beaucoup plus intenses : c'était le *radium*.

Depuis la découverte de la radio-activité naturelle, 51 radionucléides naturels ont été dénombrés; or les radionucléides, en se désintégrant, disparaissent petit à petit, et il est admis que les noyaux de l'Univers se sont formés il y a au moins 6 milliards d'années. Comment se fait-il alors que l'on trouve encore sur la Terre des noyaux radio-actifs ?

Après 30 périodes radio-actives, tous les noyaux d'un radionucléide sont pratiquement désintégrés. Pour avoir subsisté, il faudrait donc que les radionucléides naturels eussent une période supérieure à 200 millions d'années.

Radionucléides naturels ayant une période supérieure à $2 \cdot 10^8$ ans

Le *tableau* I qui recense les radionucléides ayant une période T supérieure à $2 \cdot 10^8$ ans met en évidence que cette règle se vérifie pour les radionucléides de masse moyenne, mais que seulement trois radionucléides de masse élevée répondent à cet impératif :

— l'uranium 238 : $^{238}_{92}U$ $T = 4{,}5 \cdot 10^9$ ans

— l'uranium 235 : $^{235}_{92}U$ $T = 7{,}1 \cdot 10^8$ ans

— le thorium 232 : $^{232}_{90}Th$ $T = 13{,}9 \cdot 10^9$ ans

Les familles radio-actives naturelles

L'identification de radionucléides naturels de masse élevée et de période relativement courte tels que le radium 226 (T = 1 600 ans) ou le polonium 210 (T = 138 jours) semble donc en contradiction avec la limite de $2 \cdot 10^8$ ans définie précédemment.

En fait, l'existence de ces radionucléides s'explique par leur appartenance à trois familles radio-actives naturelles :

— la famille uranium 238 (uranium 1)
— la famille thorium 232
— la famille uranium 235 (actinium U)

Ainsi, ^{238}U engendre en se désintégrant par émission α ^{234}Th, lui-même instable, qui engendre à son tour par émission β^- du ^{234}Pa, et ainsi de suite : il faut 14 désintégrations successives avant d'aboutir à un noyau stable de ^{206}Pb. Si on trouve donc du radium sur terre, c'est qu'il s'en reforme constamment à la suite des désintégrations de l'uranium 238.

Les *tableaux* II, III et IV donnent la composition de ces trois familles radio-actives naturelles et les caractéristiques principales des radionucléides qui les composent.

Les radionucléides produits par réactions nucléaires

Des réactions nucléaires se produisent dans la haute atmosphère sous l'influence des rayonnements cosmiques. Un noyau cible soumis au bombardement d'une particule incidente d'énergie supérieure à 50 MeV émet un jet de particules plus légères et donne naissance à un noyau plus léger que le noyau cible.

Les particules légères émises sont des neutrons, des protons ou des noyaux légers tels que les isotopes de l'hydrogène, de l'hélium ou du lithium (processus de spallation).

Deux radionucléides naturels importants sont produits de cette façon :

— le tritium, ^3H, de période 12,4 ans;
— le béryllium, ^7Be, de période 53 jours.

Des réactions nucléaires classiques se produisent également dans la haute atmosphère, par exemple :

$$^{14}_{7}N + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{14}_{6}C + ^{1}_{1}p$$

qui donne naissance en permanence au carbone 14 de période 5 400 ans.

Ces processus nucléaires expliquent l'existence de certains radionucléides naturels de vie relativement courte. D'autres radionucléides sont également produits par réactions nucléaires induites par les rayonnements cosmiques; ce sont principalement :

^{10}Be (T = $2,7 \cdot 10^8$ ans)	^{22}Na (T = 2,6 ans)
^{32}P (T = 14,3 jours)	^{33}P (T = 25 jours)
^{35}S (T = 88 jours)	^{39}Cl (T = 55 minutes)

Les radionucléides artificiels

La radio-activité artificielle

Elle a été découverte en 1934 par Irène et Frédéric Joliot-Curie qui réussirent à produire du $^{30}_{15}P$ en bombardant de l'aluminium avec des particules α du polonium :

$$^{27}_{13}Al + ^{4}_{2}\alpha \rightarrow ^{30}_{15}P + ^{1}_{0}n$$

Le $^{30}_{15}P$ était le premier radionucléide découvert; il se désintégrait avec une période de 2,5 minutes en émettant des positons :

$$^{30}_{15}P \rightarrow ^{30}_{14}Si + ^{0}_{+1}\beta^+$$

Production des radionucléides artificiels

Radionucléides produits par les réacteurs

La production des radionucléides repose sur le principe suivant : une petite quantité d'un nucléide stable est placée dans le canal d'un réacteur et soumise à un important bombardement de neutrons. Certains de ces neutrons sont capturés par le noyau du nucléide, et il y a formation d'un radionucléide qui se désintégrera selon les lois définies précédemment.

L'activité du radionucléide formé est égale à :

$$A = \frac{0,6 \cdot \Phi \cdot \sigma}{3,7 \cdot 10^{10}\ M} \cdot (1 - e^{-0,693\ t/T})$$

Tableau II
Famille uranium 238

Radionucléide	Abondance isotopique (%)	Période radio-active (T)	Principaux rayonnements émis
^{238}U (U_I)	99,28	$4,49 \cdot 10^9$ ans	α, γ
^{234}Th (UX_1)		24,10 jours	β^-, γ
^{234}Pa (UX_2)		1,175 minute	β^-, γ
^{234}U (U_{II})	0,0058	$2,5 \cdot 10^5$ ans	α, γ
^{230}Th (Io)		$8,0 \cdot 10^4$ ans	α, γ
^{226}Ra		1 622 ans	α, γ
^{222}Rn		3,825 jours	α
^{218}Po (RaA)		3,05 minutes	α, β
^{214}Pb (RaB)		26,8 minutes	β^-, γ
^{218}At		1,5 à 2 secondes	α, β^-
^{214}Bi (RaC)		19,7 minutes	β^-, α
^{214}Po (RaC′)		$1,637 \cdot 10^{-4}$ secondes	α
^{210}Tl (RaC″)		1,5 minute	β^-
^{210}Pb (RaD)		22 ans	β^-, γ
^{210}Bi (RaE)		5,02 jours	β^-, α
^{210}Po		138,3 jours	α, γ
^{206}Tl		4,19 minutes	β^-
^{206}Pb	23,6	Stable	

▲ *Tableau II : la famille uranium 238.*

avec : A = activité spécifique (en curies par gramme) ;
M = masse atomique de l'élément irradié ;
Φ = flux de neutron (en $n \cdot cm^2/s$) ;
T = période radio-active du radionucléide ;
σ = section efficace d'activation (en barns) ;
t = durée de l'irradiation.

La quantité de radionucléide produite dépend donc de nombreux paramètres, dont les principaux sont :

— l'*intensité du flux* de neutrons qui varie de 10^{10} à 10^{15} $n \cdot cm^2/s$ selon les réacteurs;
— la *qualité de la cible;* quand l'abondance isotopique est faible, on utilise des cibles enrichies isotopiquement;
— la *section efficace d'activation*, qui est caractéristique de chaque réaction nucléaire.

Différents types de réactions nucléaires peuvent être produits dans un réacteur, selon que l'on utilise des neutrons thermiques, des neutrons épithermiques ou des neutrons rapides; les principales réactions utilisées sont (n, γ) ; (n, p) ; (n, α).

Exemples :

$$^{50}_{24}Cr + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{51}_{24}Cr + \gamma \quad \text{réaction } n, \gamma$$

$$^{58}_{28}Ni + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{58}_{27}Co + ^{1}_{1}P \quad \text{réaction } n, P$$

$$^{62}_{28}Ni + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{59}_{26}Fe + ^{4}_{2}\alpha \quad \text{réaction } n, \alpha$$

Les principaux radionucléides obtenus par irradiation dans un réacteur sont : ^{82}Br, ^{45}Ca, ^{38}Cl, ^{51}Cr, ^{58}Co, ^{64}Cu, ^{198}Au, ^{125}I, ^{131}I, ^{59}Fe, ^{140}La, ^{54}Mn, ^{197}Hg, ^{203}Hg, ^{32}P, ^{42}K, ^{86}Rb, ^{111}Ag, ^{24}Na, ^{35}S, ^{90}Y, ^{65}Zn.

Radionucléides produits par les accélérateurs

Si les accélérateurs, en particulier les cyclotrons, furent très utilisés pendant les années qui suivirent la découverte de la radio-activité artificielle, ils furent rapidement détrônés par les réacteurs. Néanmoins, les réactions obtenues avec les réacteurs sont relativement limitées, car

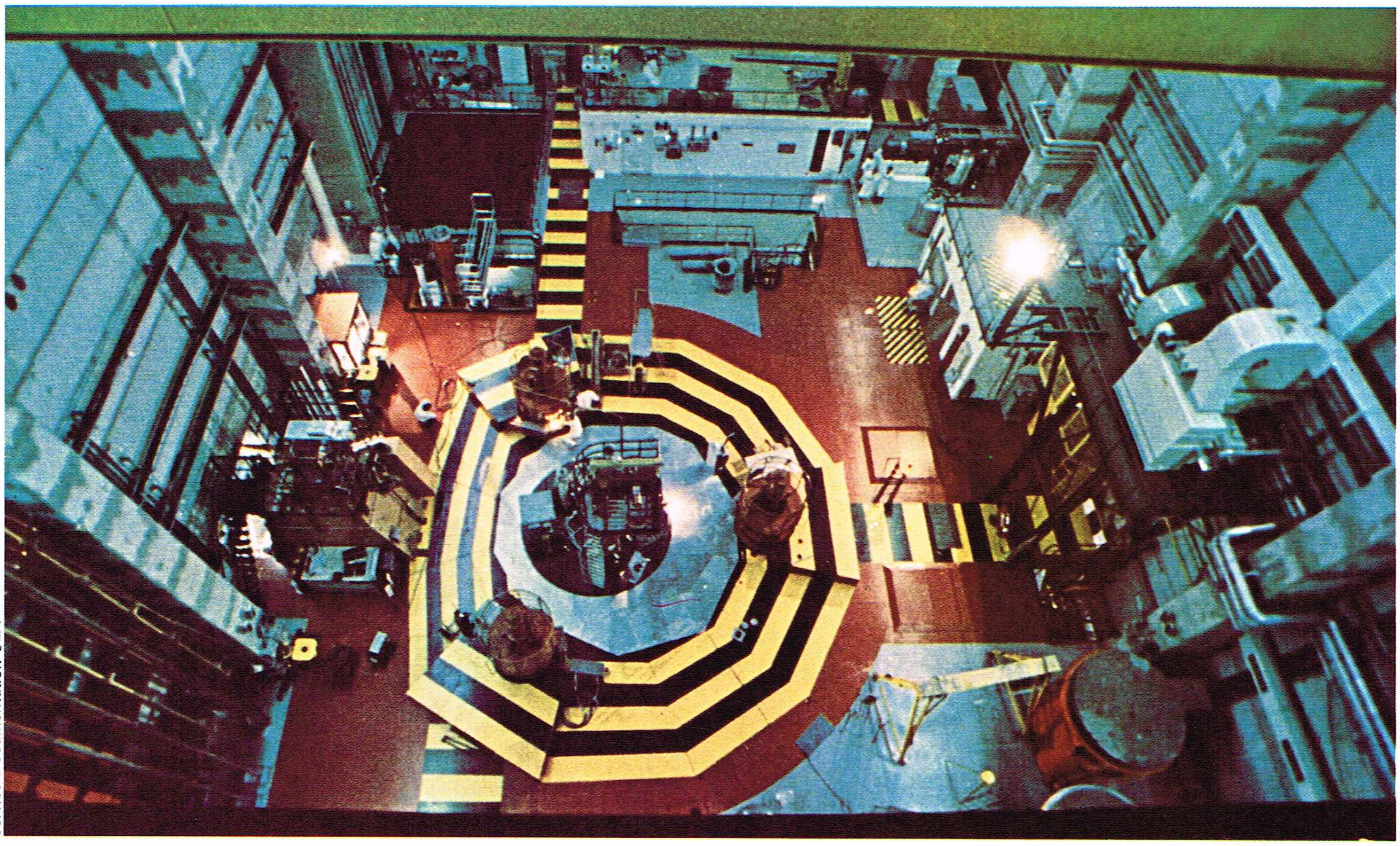

Service Documentation CEA

▲ *Le cœur de* Phénix, *réacteur nucléaire français mis en service en 1973, qui sert non seulement à la production d'énergie mais aussi à la fabrication de radionucléides par bombardement de nucléides stables par des neutrons.*

▼ *Tableau III : la famille thorium 232.*

Tableau III
Famille thorium 232

Radionucléide	Abondance isotopique (%)	Période radio-active (T)	Principaux rayonnements émis
^{232}Th	100	$1{,}39 \cdot 10^{10}$ ans	α, γ
^{228}Ra ($MsTh_1$)		6,7 ans	β^-, γ
^{228}Ac ($MsTh_2$)		6,13 heures	β^-, γ
^{228}Th (RdTh)		1,90 an	α, γ
^{224}Ra (ThX)		3,64 jours	α, γ
^{220}Rn (Tn)		54,5 secondes	α
^{216}Po (ThA)		0,158 seconde	α, β^-
^{212}Pb (ThB)		10,6 heures	β^-, γ
^{216}Ac		$\simeq 3 \cdot 10^{-4}$ secondes	α
^{212}Bi (ThC)		60,5 minutes	β^-, α, γ
^{212}Po (ThC′)		$3{,}04 \cdot 10^{-7}$ secondes	α
^{208}Tl (ThC″)		3,1 minutes	β^-, γ
^{208}Pb	52,3	Stable	

le seul projectile est le neutron. Les besoins de radionucléides de plus en plus sophistiqués ont apporté la renaissance des accélérateurs, qui offrent une panoplie beaucoup plus variée de projectiles.

De nombreux accélérateurs permettent de produire des radionucléides artificiels; c'est le cas des générateurs Cockcroft-Walton, des accélérateurs Van de Graaff et des grandes machines telles que les synchrotrons; mais l'accélérateur le plus intéressant est sans conteste un cyclotron d'énergie 7 à 10 MeV.

La quantité de radionucléide formée est :

$$A = 1{,}68 \cdot 10^{-16} \frac{nj}{Z} (1 - e^{-\lambda t}) \int_0^{E_m} \sigma\,(E)\,P\,(E)\,dE$$

avec : A = activité en μCi;
n = nombre d'atomes par cm^3 de la cible;
j = courant d'ions en μA;
Z = nombre de charges positives de la particule projectile;
λ = constante de désintégration du radionucléide en heures;
t = durée de l'irradiation en heures;
σ (E) = section efficace en barns;
P (E) = parcours de la particule dans la cible;
E_m = énergie de la particule projectile à la surface de la cible.

Les réactions nucléaires les plus importantes pour la production de radionucléides sont celles qui sont produites par les particules chargées positivement : (p, n); (d, n); (d, 2 n); (d, α); (α, n). Il faut également noter la réaction (γ, n) et la réaction (d, p) qui produit les mêmes radionucléides que la réaction (n, γ) dans les réacteurs.

Exemples :

$^{6}_{3}Li + ^{2}_{1}d \rightarrow ^{7}_{4}Be + ^{1}_{0}n$ réaction d, n

$^{85}_{37}Rb + ^{2}_{1}d \rightarrow ^{85}_{38}Sr + ^{1}_{0}n + ^{1}_{0}n$ réaction d, 2 n

$^{121}_{51}Sb + ^{4}_{2}\alpha \rightarrow ^{123}_{53}I + ^{1}_{0}n + ^{1}_{0}n$ réaction α, 2 n

$^{52}_{24}Cr + ^{1}_{1}P \rightarrow ^{52}_{25}Mn + ^{1}_{0}n$ réaction p, n

Les principaux radionucléides obtenus par irradiation dans un accélérateur sont : ^{18}F, ^{43}K, ^{123}I, ^{51}Cr, ^{64}Cu, ^{68}Ga, ^{68}Ge, ^{125}I, ^{52}Mn, ^{54}Mn, $^{110}Ag^m$, ^{7}Be, ^{75}Se, ^{85}Sr, ^{65}Zn.

Radionucléides produits par générateurs

Un générateur de radionucléides est un système composé de deux radionucléides dont l'un, qui a une période relativement longue, génère le second, qui a une période plus courte. Les deux radionucléides sont en équilibre radio-actif, et l'activité du générateur décroît avec la période du radionucléide père.

Le principe du générateur consiste à séparer le radionucléide fils, ce qui permet d'employer des radionucléides à très courte période, très utilisés en médecine, en effectuant la séparation père-fils sur le lieu même de l'utilisation.

Dans le cas de deux radionucléides en filiation, le nombre d'atomes B_t du radionucléide fils présent au temps t est obtenu par la formule :

$$B_t = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} A_0 \left(e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}\right) + B_0 e^{-\lambda_B t}$$

avec : A_0 = nombre d'atomes du radionucléide père à l'instant t_0 ;

B_0 = nombre d'atomes du radionucléide fils à l'instant t_0 ;

λ_A = constante de désintégration du radionucléide père ;

λ_B = constante de désintégration du radionucléide fils.

La séparation père-fils se fait généralement par chromatographie sur colonne, opération qui consiste à fixer le radionucléide père sur un adsorbant minéral ou organique ; le radionucléide fils est séparé par élution.

Les principaux générateurs de radionucléides sont :

$$^{99}_{42}Mo \xrightarrow[67\ h]{\beta^-,\ \gamma} {}^{99}_{43}Tc^m \xrightarrow[6\ h]{\gamma} {}^{99}_{43}Tc$$

$$^{68}_{32}Ge \xrightarrow[280\ j]{C.E.} {}^{68}_{31}Ga \xrightarrow[68\ mn]{\beta^+,\ EC} {}^{68}_{30}Zn$$

$$^{113}_{50}Sn \xrightarrow[118\ j]{C.E.} {}^{113}_{49}In^m \xrightarrow[1{,}7\ h]{\gamma} {}^{113}_{49}In$$

C.E. signifie capture électronique.

Les générateurs actuellement disponibles permettent de produire les radionucléides suivants : ^{38}Cl, ^{42}K, ^{72}As, $^{82}Rb^m$, $^{83}Kr^m$, $^{111}Cd^m$, $^{115}In^m$, $^{125}Te^m$, ^{131}Cs, $^{189}Os^m$, ^{194}Au, ^{222}Rn, ^{28}Al, ^{68}Ga, $^{87}Sr^m$, ^{90}Y, $^{99}Tc^m$, $^{113}In^m$, ^{132}I, $^{137}Ba^m$.

Molécules marquées

Une molécule marquée est une molécule dont l'un des atomes constitutifs a été remplacé par un isotope radioactif. Les méthodes les plus utilisées pour la préparation des molécules marquées sont :

— la synthèse chimique ;
— la biosynthèse ;
— la synthèse sous radiation.

Exemple :

$$H_3{}^{32}PO_4 + AgNO_3 \xrightarrow{NH_4OH} Ag_3{}^{32}PO_4$$

Le plus grand nombre des molécules marquées sont des composés de ^{3}H, ^{14}C et ^{35}S. Toutefois, ces composés ne conviennent pas très bien au diagnostic médical ; de nombreuses molécules marquées ont été développées ces dernières années, utilisant principalement les radionucléides suivants ^{131}I, ^{125}I, ^{51}Cr, $^{99}Tc^m$, ^{75}Se, ^{57}Co, ^{197}Hg, ^{205}Hg, ^{32}P, $^{111}In^m$.

Procédé Szilard-Chalmers

Quand un noyau d'un atome entreprend une transformation nucléaire, plusieurs processus peuvent affecter la nature chimique du produit ; par exemple, les liaisons peuvent être rompues par l'éjection brutale d'un électron orbital *(effet Auger)*. Dans ce cas, des espèces atomiques et moléculaires d'état énergétique varié sont formées, les atomes de recul séparés permettent d'obtenir une activité spécifique environ 1 000 fois plus grande que par une simple irradiation.

Ce procédé Szilard et Chalmers est très utilisé pour obtenir des radionucléides « sans entraîneur », en particulier après des réactions nucléaires (n, γ) ; $(n, 2n)$; (γ, n).

Fission nucléaire

Certains radionucléides sont également préparés en utilisant le procédé de fission induite, en bombardant une cible d'uranium avec des neutrons. C'est le cas par exemple pour : $U\ (n, f)\ {}^{111}Ag$

$U\ (n, f)\ {}^{90}Sr \rightarrow {}^{90}Y$

$U\ (n, f)\ {}^{140}Ba \rightarrow {}^{140}La$

Ce procédé de préparation des radionucléides nécessite cependant des séparations chimiques relativement complexes pour isoler le radionucléide que l'on veut obtenir des autres produits de fission.

Caractéristiques des principaux radionucléides artificiels

Sur plus de 1 200 radionucléides artificiels, environ une centaine est très utilisée dans les applications médicales et industrielles des radionucléides. Le *tableau* V récapitule les caractéristiques principales de ces radionucléides.

▶ ***Page 280, tableau V : mode de production, période et énergie des principaux rayonnements des radionucléides.***

BIBLIOGRAPHIE

EVANS R. D., *The Atomic Nuclears,* Mac Graw Hill, 1955. - HAHN P. F., *The Manual of Artificial Radioisotope Therapy,* Academic Press, New York, 1951. - INGRAND J., HEGESIPPE M., *les Radio-isotopes et le Diagnostic médical,* Masson, 1975. - JOLIOT-CURIE I., *les Radio-éléments naturels,* Hermann, 1946. - LE GALLIC Y., *Bulletin d'informations scientifiques et techniques,* n° 163, octobre 1971. - POURQUIER H., *la Télécobalthérapie en cancérologie,* Masson, 1962. - TUBIANA M., *les Isotopes radio-actifs en médecine et en biologie,* Masson, 1962. - TUBIANA M., DUTREIX J., DUTREIX A., *Bases physiques de la radiothérapie et de la radiobiologie,* Masson, 1963. - *Annual Review of Nuclear Science,* vol. II, p. 221. - *Progress of Nuclear Physics,* vol. I, p. 168.

▼ ***Tableau IV : la famille uranium 235.***

Tableau IV
Famille uranium 235

Radionucléide	Abondance isotopique (%)	Période radio-active (T)	Principaux rayonnements émis
^{235}U (AcU)	0,715	$7{,}13 \cdot 10^{8}$ ans	α, γ
^{231}Th (UY)		25,64 heures	β^-, γ
^{231}Pa		$3{,}43 \cdot 10^{4}$ ans	α, γ
^{227}Ac		22 ans	β^-, α, γ
^{227}Th (RdAc)		18,6 jours	α
^{223}Fr (AcK)		21 minutes	β^-, α, γ
^{223}Ra (AcX)		11,2 jours	α, γ
^{219}Rn (An)		3,92 secondes	α, γ
^{215}Po (AcA)		$1{,}83 \cdot 10^{-3}$ secondes	α, β^-
^{211}Pb (AcB)		36,1 minutes	β^-, γ
^{215}At		$\simeq 10^{-4}$ secondes	α
^{211}Bi (AcC)		2,16 minutes	α, β^-, γ
^{211}Po		25 secondes	α
^{207}Tl		4,79 minutes	β^-, γ
^{207}Pb	22,6	Stable	

TABLEAU V

Radionucléide	Mode de production	Période	Énergie des principaux rayonnements α MeV	β− max β+ max MeV	γ MeV	X keV
Aluminium 26	A	7 · 10⁵ a → $7 \cdot 10^5$ a		1,16	1,83	1,25
Américium 241	T	433 a	5,44 5,49		0,060	
Antimoine 124	R	60 j		0,21 0,61 0,95 1,60 2,31	0,603 0,646 0,723 1,368 1,692	
Antimoine 125 + Tellure 125 m	R	2,8 a		0,09 0,13 0,30 0,46 0,62	0,176 0,428 0,463 0,600 0,636	27
Argent 110 m + Argent 110 à l'équilibre		250 j		2,23 2,89	0,658 0,706 0,764 0,885 0,937 1,384 1,505	
Argent 111	R	7,5 j		0,69 0,78 1,03	0,243 0,340 0,620	
Arsenic 76	R	26 h		0,58 1,18 1,85 2,41 2,97	0,560 0,657 1,216 1,228 1,438	
Baryum 133	A	7,8 a			0,080 0,276 0,302 0,356 0,382	31
Baryum 140 + Lanthane 140 à l'équilibre	PF	12,8 j		0,47 1,00 1,02 1,36 1,69 2,17	0,163 0,329 0,438 0,487 0,538 0,816 0,925 1,597	
Béryllium 7	A	53 j			0,477	
Bismuth 207	A	30,2 a			0,570 1,063 1,771	75
Brome 82	R	35,3 h		0,44	0,554 0,619 0,698 0,777 0,827 1,044 1,317 1,475	
Cadmium 109 + Argent 109 m à l'équilibre	A	1,3 a			0,088	22
Césium 131	A	9,7 j				30
Césium 134	PF	2,06 a		0,089 0,42 0,66	0,563 0,569 0,604 0,796 0,802 1,167 1,365	32
Césium 137 + Baryum 137 m à l'équilibre	PF	30 a		0,51 1,17	0,662	32
Calcium 45	R	164 j		0,26		
Carbone 14	R	5 730 a		0,16		
Cérium 139	PF A	137 j			0,166	33
Cérium 141	PF	32,5 j		0,44 0,58	0,145	36
Cérium 144 + Praséodyme 144 à l'équilibre	PF	285 j		0,18 0,24 0,32 3,00	0,080 0,134 0,696 1,489 2,186	36
Chlore 36	R	$3 \cdot 10^5$ a		0,71		
Chrome 51	R	27,7 j			0,320	5
Cobalt 56	R	77,3 j		0,42 1,46	0,84 1,03 1,26 1,36 1,77 2,02 2,60 3,26 3,45	6,5

Radionucléide	Mode de production	Période	Énergie des principaux rayonnements α MeV	β− max β+ max MeV	γ MeV	X keV
Cobalt 57	A	270 j			0,014 0,122 0,136	6,4
Cobalt 58	R	71,6 j		0,47	0,811 0,864 1,674	6,4
Cobalt 60	R	5,27 a		0,32	1,17 1,33	
Curium 244	T	18,1 a	5,669 5,766 5,808			
Erbium 169	R	9,7 j		0,34	0,008	
Etain 113 + Indium 113 m à l'équilibre	G	115 j			0,393	24
Europium 152	R	12,4 a		0,22 0,36 0,68 1,04 1,46	0,244 0,443 0,869 0,963 1,087 1,112 1,408	
Fer 55	R	2,7 a				5,9
Fer 59	R	44,9 j		0,27 0,47	0,192 0,335 1,10 1,29	6,9
Holmium 166 m	R	$1,2 \cdot 10^3$ a		0,065	0,081 0,184 0,280 0,412 0,532 0,711 0,810 0,830	49,1
Iode 125	R A	60 j			0,035	27,5
Iode 129	PF	$1,6 \cdot 10^7$ a		0,15	0,038	29,8
Iode 131	R PF	8,0 j		0,33 0,60	0,080 0,164 0,284 0,364 0,637 0,722	
Iridium 192	R	74,4 j		0,24 0,54 0,67	0,296 0,308 0,316 0,468 0,604 0,612	
Lanthane 140	R PF	40,2 h		1,25 1,36 1,69 2,17	0,32 0,49 0,81 0,92 1,60 2,52	
Lutétium 176	R	$5 \cdot 10^{10}$ a		0,42	0,088 0,202 0,307	55,8
Lutétium 177	A	6,74 j		0,17 0,38 0,50	0,113 0,208 0,250 0,321	
Manganèse 54	A R	312 j			0,835	5,4
Mercure 197	R	2,7 j			0,077 0,191 0,269	68,8
Mercure 203	R	47 j		0,21	0,279	72,9
Molybdène 99 + Technétium 99 m à l'équilibre	R G	2,7 j		0,45 0,87 1,18	0,181 0,740	
Neptunium 237 + Protactinium 233 à l'équilibre	T	$2,1 \cdot 10^6$ a	4,764 4,769 4,786 4,870	0,15 0,25 0,58	0,030 0,087 0,145 0,198 0,312 0,340	98
Nickel 63	R	100 a		0,066		
Niobium 95	R PF	35,1 j		0,16	0,766	
Or 195	A	183 j			0,030 0,100 0,131	67
Or 198	R	2,7 j		0,28 0,96	0,412 0,676	
Or 199	A	3,1 j		0,25 0,30 0,46	0,050 0,158 0,208	70,5

Radionucléide	Mode de production	Période	Énergie des principaux rayonnements α MeV	β− max β+ max MeV	γ MeV	X keV
Phosphore 32	R	14,26 j		1,7		
Plutonium 238	T	87 a	5,46 5,50			
Plutonium 239	T	$2,4 \cdot 10^4$ a	5,105 5,144 5,157			
Polonium 210	R	138,4 j	5,305		0,804	
Potassium 40	N	$1,3 \cdot 10^9$ a		1,30	1,460	
Potassium 42	R	12,4 h		2,00 3,52	1,52	
Praséodyme 143	R	13,8 j		0,93		
Prométhium 147	PF	2,62 a		0,225		
Rhénium 186	R	90 h		0,933 1,071	0,122 0,137	63
Rubidium 86	R	18,7 j		0,71 1,78	1,077	
Ruthénium 103 + Rhodium 103 m à l'équilibre	PF	39,6 j		0,102 0,215	0,040 0,497 0,610	
Ruthénium 106 + Rhodium 106 à l'équilibre	PF	369 j		2,0 2,4 3,1 3,5	0,513 0,624 1,050	
Scandium 46	R	84 j		0,357	0,89 1,12	
Sélénium 75	A	118 j			0,121 0,136 0,265 0,280 0,401	10,5
Sodium 22	A	2,6 a		0,545	0,511 1,275	0,85
Sodium 24	R	15 h		1,39	1,368 2,754	
Soufre 35	R	88 j		0,17		
Strontium 85	A	65 j			0,514	13,4
Strontium 89	R	50,6 j		1,463		
Strontium 90 + Yttrium 90 à l'équilibre	PF	28,2 a		0,54 2,27		
Tantale 182	R	115 j		0,430 0,520	0,068 0,100 1,120 1,190 1,220	59,3
Technétium 99 m	G	6,04 h			0,140 0,142	18,4
Technétium 99	R	$2,1 \cdot 10^5$ a		0,292		
Thallium 204	R	3,85 a		0,764		
Thorium 228 + descendants à l'équilibre	N	1,910 a	5,344 5,427		0,094 0,132 0,214	
Thulium 170	R	127 j		0,886 0,970	0,084	52,4
Tritium	R N	12,37 a		0,018		
Tungstène 185	A	74 j		0,430		
Uranium 232	N	72 a	5,267 5,324		0,058	
Uranium 233	N	$1,6 \cdot 10^5$ a	4,778 4,821		0,029 0,042 0,054 0,097 0,146 0,164 0,291 0,317	
Ytterbium 169	R	32 j			0,063 0,109 0,130 0,177	50,7
Yttrium 88	A	107 j		0,76	0,898 1,836	14
Yttrium 90	G	2,7 j		2,27		
Yttrium 91	A	59 j		1,54		
Zinc 65	A	244 j		0,33	1,115	8,0
Zirconium 95 + Niobium 95 non à l'équilibre	PF	65,2 j		0,36 0,40	0,724 0,756	

Légende — mode de production :

- R : réacteur
- A : accélérateur
- G : générateur
- PF : produit de fission
- T : transuranien
- N : naturel

M. Brigaud - E.D.F.

▲ *Vue générale de la centrale nucléaire Phénix, à Marcoule.*

LES RÉACTEURS NUCLÉAIRES

La quantité immense d'énergie contenue dans la matière et calculable à partir de l'équation d'Einstein ($E = mc^2$) a fortement passionné les physiciens de l'atome du début du XXe siècle; F. Joliot, en 1935, dans sa conférence à l'occasion de la remise du prix Nobel, suggérait qu'il serait sans doute possible d'obtenir de grandes quantités d'énergie, si l'on connaissait une réaction nucléaire exoénergétique qui produirait des particules de même nature que celles provoquant cette réaction. Ainsi les sous-produits d'une réaction pourraient en engendrer une autre, et ainsi de suite.

Des expériences fondamentales furent conduites par différents chercheurs, tels Hahn et Strassmann qui démontrèrent (1937-1938) l'existence dans les produits de l'irradiation de l'uranium par les neutrons, d'isotopes du baryum, et von Halban, Joliot et Kowarski qui mirent en évidence l'émission de neutrons d'énergie élevée accompagnant la fission de l'uranium.

Dès lors, la fission nucléaire, réaction exoénergétique et capable de se reproduire en chaîne, a été l'objet de multiples applications tant militaires que civiles, dont notre époque est le témoin.

La fission nucléaire

Fission nucléaire et énergie dégagée par fission

Le noyau d'un atome contient deux sortes de particules ou nucléons : les neutrons et les protons. On appelle nombre de masse A le nombre total de nucléons, et nombre atomique Z le nombre de protons du noyau.

Ces nucléons sont unis entre eux par une énergie de liaison L du noyau qui est l'énergie qu'il faudrait fournir au noyau pour le dissocier en ses constituants élémentaires; en fait, l'énergie de liaison est la différence entre la somme des masses des constituants pris isolément et la masse du noyau correspondant. L'énergie de liaison L augmente avec la masse du noyau, et un noyau est d'autant plus stable que l'énergie de liaison moyenne par nucléon $\frac{L}{A}$ est plus grande. La variation de l'énergie de liaison par nucléons en fonction du nombre de masse est donnée sur la *figure* 1 ; on constate qu'elle diminue lorsque le nombre de masse A du noyau est supérieur à 130 environ.

Pour les noyaux lourds, il existe un mode de désintégration qui produit un fort dégagement d'énergie, c'est la fission nucléaire, qui se définit ainsi : c'est la coupure d'un noyau lourd en deux noyaux dont l'ordre de grandeur des masses est la moitié de la masse initiale.

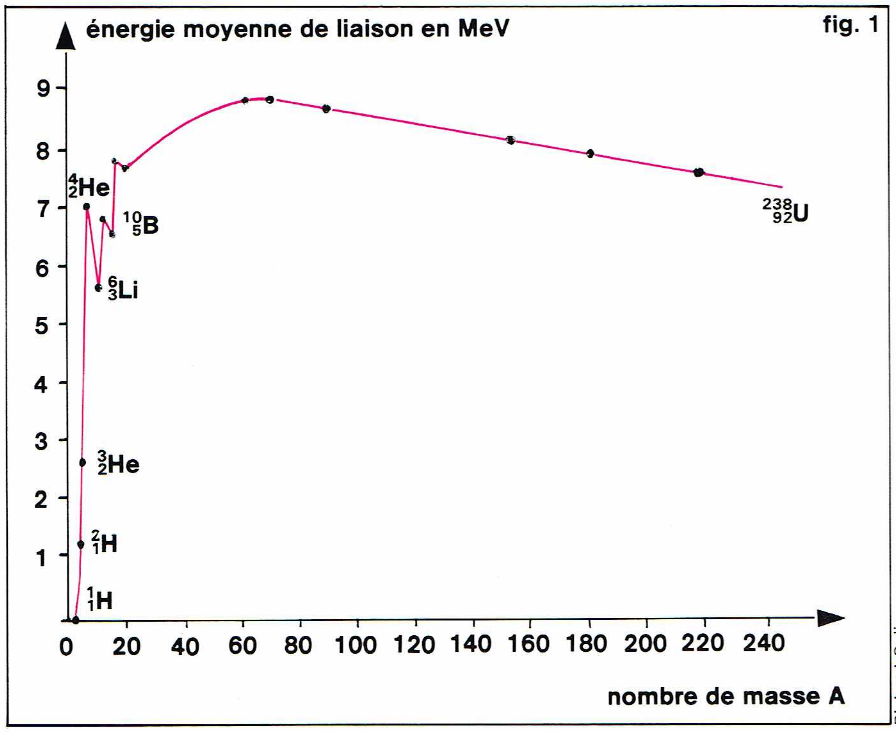

Richard Colin

▲ *Figure 1 : représentation graphique de l'énergie moyenne de liaison des nucléons en fonction du nombre de masse.*

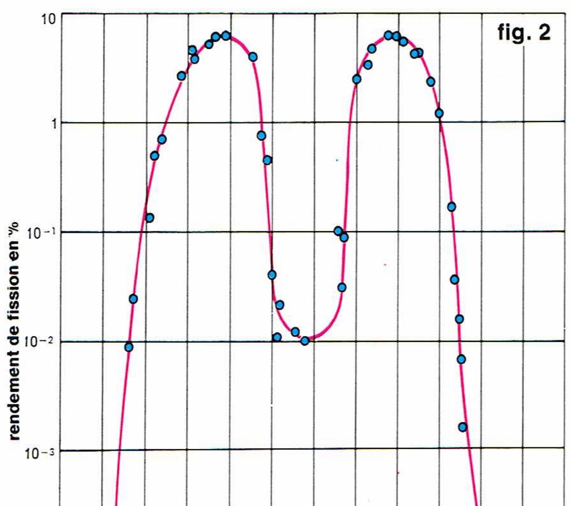

I.G.D.A.

▶ *Figure 2 : distribution des fragments de fission en fonction de leur nombre de masse dans le cas de l'uranium 235 frappé par des neutrons thermiques.*

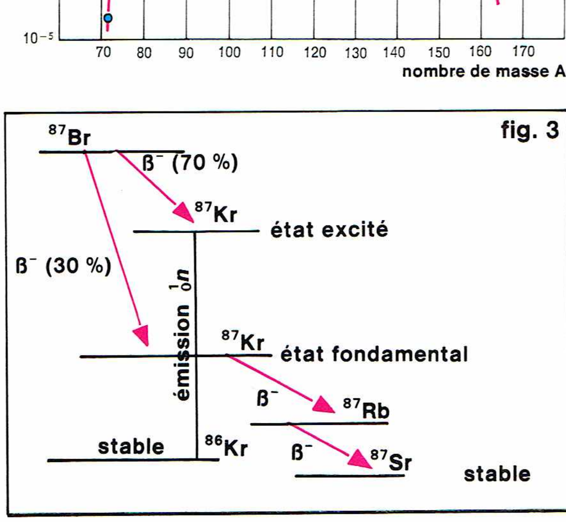

Richard Colin

▶ *Figure 3 : exemple de désintégration du Br87, avec émission d'un neutron par désexcitation de Kr87.*

La fission des noyaux lourds est obtenue en les bombardant par des neutrons d'énergie suffisante pour les briser. Par exemple (*fig.* 2), l'uranium 235, sous l'impact de neutrons thermiques, peut se couper d'environ 30 façons différentes, donnant une soixantaine de fragments de fission distincts. Les neutrons émis par la fission nucléaire sont pourvus d'une grande énergie cinétique ; on les appelle neutrons rapides. Au fur et à mesure de leur passage dans le milieu, ils se ralentissent jusqu'à être en équilibre avec le milieu ; on les appelle alors neutrons thermiques. Rappelons que l'uranium naturel est composé principalement de deux isotopes : l'uranium 238 à raison de 99,3 % et l'uranium 235 à raison de 0,7 %.

L'isotope ^{238}U subit aussi la fission par des neutrons rapides ; d'autres noyaux produits artificiellement peuvent être fissionnés par simple absorption de neutrons, tels le plutonium 239 et l'uranium 233. Le phénomène de fission spontanée, sans apport extérieur de neutrons, est assez rare. En même temps que les deux fragments, sont émis plusieurs neutrons rapides, capables de déclencher de nouvelles fissions ; il y a donc une réaction en chaîne possible, exploitée sous contrôle dans les réacteurs nucléaires.

L'énergie produite par la fission de noyaux lourds apparaît en partie instantanément sous différentes formes :

— énergie cinétique des fragments (ou produits) de fission,

— énergie cinétique des neutrons de fission,

— énergie des rayons gamma émis instantanément,

et, avec un certain retard, sous la forme de rayon bêta et de rayon gamma émis par les produits de fission.

La fission d'un noyau d'uranium 235 libère une énergie d'environ 200 méga-électrons-volts ; l'intérêt de ce grand dégagement d'énergie est illustré dans l'exemple suivant : la fission complète de 1 gramme d'^{235}U (contenant $2{,}6 \cdot 10^{21}$ atomes) correspond à $0{,}78 \cdot 10^{11}$ joules, soit presque 1 mégawatt-jour.

La plupart des produits de fission sont radio-actifs, c'est-à-dire qu'ils se décomposent en émettant soit une particule β^- (électron), ou β^+ (positon), soit une particule α (noyau d'hélium), soit un rayon γ (photon). Cette radio-activité est due à un excès de neutrons dans le produit de fission nécessitant plusieurs transitions successives avant que le noyau final devienne stable. Il apparaît, au cours des chaînes de filiations radio-actives, un très grand nombre d'espèces (plus de 200) parmi lesquelles se trouvent des éléments n'existant pas à l'état naturel, par exemple le prométhium, $^{147}_{61}$Pm.

Comme chaîne radio-active intéressante, on peut citer celle du tellure 135 produit par la fission d'^{235}U avec une probabilité de 5,6 %

$$^{135}\text{Te} \xrightarrow[2\text{ mn}]{} {}^{135}\text{I} \xrightarrow[6{,}7\text{ h}]{} {}^{135}\text{Xe} \xrightarrow[9{,}2\text{ h}]{} {}^{135}\text{Cs} \xrightarrow[2\cdot 10^4\text{ ans}]{} {}^{135}\text{Ba}\quad(\text{stable})$$

La radio-activité des produits de fission constitue un inconvénient dans l'exploitation de l'énergie atomique.

Le nombre des radio-éléments existant simultanément dans un réacteur est si grand que l'on peut assimiler un réacteur à une source radio-active de forte intensité ; par exemple, le nombre de particules β émises par 1 gramme d'^{235}U, 24 h après avoir subi la fission, est estimé à $9{,}9 \cdot 10^{15}$ par seconde (soit une activité de plus de 200 000 curies).

Neutrons émis par la fission

Environ 99 % des neutrons produits au cours de la fission sont émis instantanément. Ils proviennent des produits de fission, et le temps qui sépare l'impact du neutron de l'émission est compris entre 10^{-16} et 10^{-14} s.

Environ 1 % des neutrons continue à être émis pendant quelques minutes après l'impact. Ce sont les neutrons dits retardés qui sont directement liés à la désintégration radio-active de certains produits de fission. Quel que soit le noyau fissile, il existe cinq groupes de neutrons retardés distingués par leur période, et, dans chaque groupe, l'intensité neutronique diminue exponentiellement en fonction du temps. Par exemple, la *figure* 3 donne la désintégration du ^{87}Br, avec émission d'un neutron par désexcitation de ^{87}Kr. Malgré leur faible abondance, les neutrons retardés sont indispensables pour assurer la stabilité de fonctionnement des réacteurs nucléaires.

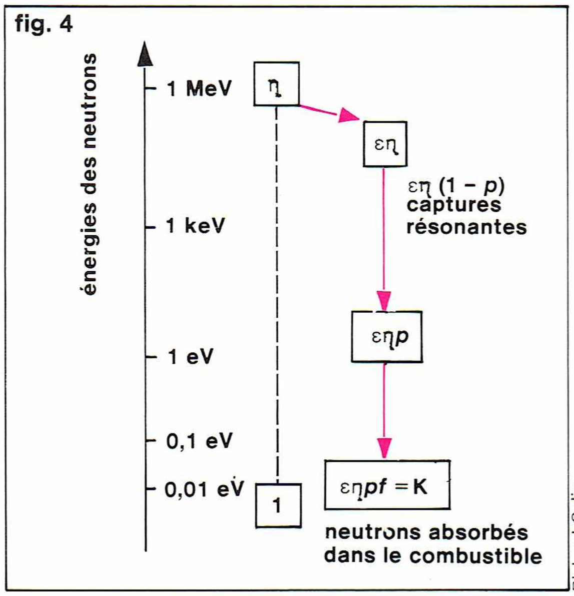

Richard Colin

◀ *Figure 4 : schéma de la réaction de fission mettant en évidence les divers phénomènes physiques suivants :* $K = \eta \cdot \varepsilon \cdot p \cdot f$.

Réaction de fission en chaîne

Quand un neutron frappe le noyau d'un atome lourd, il y a une certaine probabilité de fission de ce noyau. Cet événement n'est pas unique ; en effet, le neutron peut être absorbé par le noyau lourd pour donner d'autres éléments (c'est par exemple la formation de Pu^{239} à partir de la capture d'un neutron par l'U^{238}), ou bien le neutron peut être capturé par les matériaux de structure entourant l'uranium, ou bien le neutron peut s'échapper du milieu formé par l'ensemble des matériaux fissiles et de structure.

Pour que la réaction de fission en chaîne puisse se maintenir, il faut qu'il existe un bilan favorable entre les trois processus simultanés suivants :

— production de neutrons par la fission ;
— capture des neutrons sans fission, dans le combustible et les matériaux de structure ;
— fuites de neutrons vers l'extérieur du milieu.

En physique des réacteurs, on a coutume d'exprimer ceci en introduisant le facteur de multiplication K défini comme le rapport entre le taux de neutrons produits et le taux des neutrons absorbés et des fuites :

$$K = \frac{\text{taux des neutrons produits}}{\text{taux (fuites + absorptions)}}$$

Dans le cas d'un milieu infini, où il n'est pas tenu compte des fuites, le facteur de multiplication peut se décomposer en quatre facteurs qui mettent en évidence les divers phénomènes physiques suivants (*fig.* 4) :

$$K = \eta \cdot \varepsilon \cdot p \cdot f$$

η est le nombre de neutrons rapides produits pour chaque neutron thermique absorbé dans le combustible (absorption donnant lieu à fission ou capture).

ε = facteur de fission rapide ; c'est le rapport du nombre total de neutrons rapides produits par fissions dues à des neutrons de toute énergie au nombre de neutrons rapides produits par fissions dues à des neutrons thermiques.

p = facteur de trappe, probabilité pour que le neutron échappe à la capture par l'^{238}U pendant son ralentissement.

f : facteur d'utilisation thermique, est défini par le rapport du nombre de neutrons thermiques absorbés dans le combustible au nombre total de neutrons thermiques absorbés dans les matériaux constituant le cœur du réacteur.

Si l'on tient compte des dimensions finies du cœur du réacteur, le facteur de multiplication effectif K_{eff} est alors défini par $K_{eff} = \eta \varepsilon p f \cdot F$, F étant la probabilité pour que le neutron émis revienne ou reste dans le milieu multiplicateur.

Principe de fonctionnement d'un réacteur

Un réacteur nucléaire est une installation dans laquelle il est possible d'initier, d'entretenir et de contrôler la réaction de fission des noyaux lourds, et de récupérer l'énergie produite au cours de cette réaction.

Le schéma de principe du fonctionnement d'un réacteur nucléaire à neutrons thermiques est indiqué sur la *figure* 5. Au centre se trouve le cœur constitué d'éléments combustibles en uranium, plutonium ou thorium, entourés du modérateur qui sert à ralentir les neutrons de fission : graphite, eau lourde, eau légère ou tout corps constitué d'éléments légers. Dans le cœur se produit la réaction en chaîne, et son contrôle s'effectue au moyen de barres de contrôle. Un matériau réflecteur empêche les neutrons de fuir du cœur. La protection biologique, dont le matériau de base est en général du béton lourd,

▼ *A gauche, figure 5 : schéma de principe d'un réacteur nucléaire à neutrons thermiques. A droite, vue générale de la cuve d'un réacteur de recherche au Centre d'études nucléaires de Grenoble (C.E.A.).*

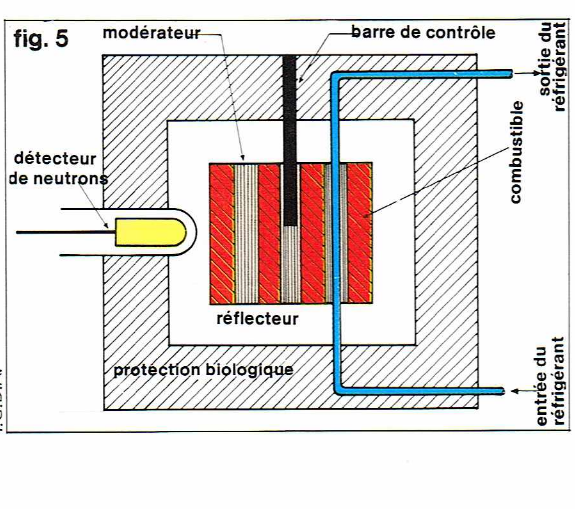

I.G.D.A.

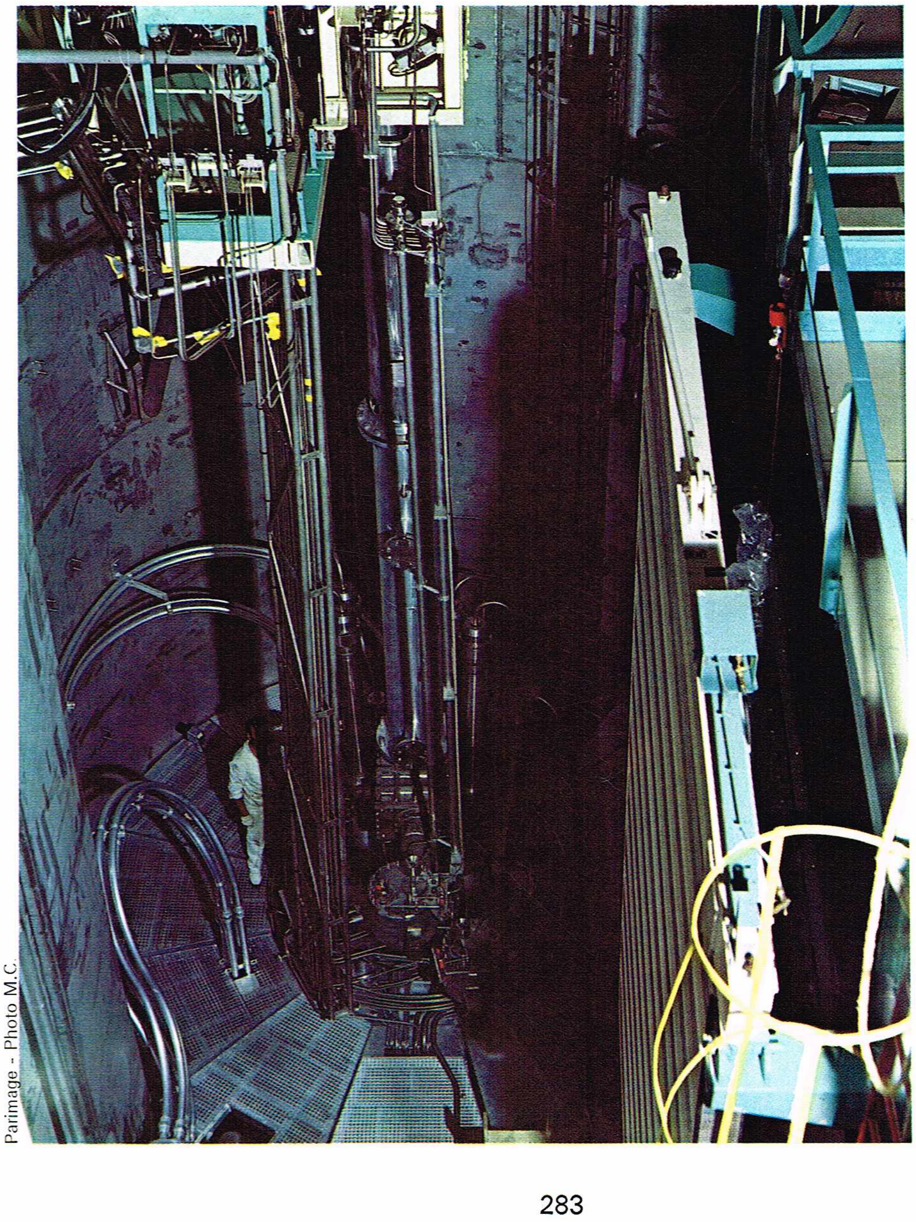

Parimage - Photo M.C.

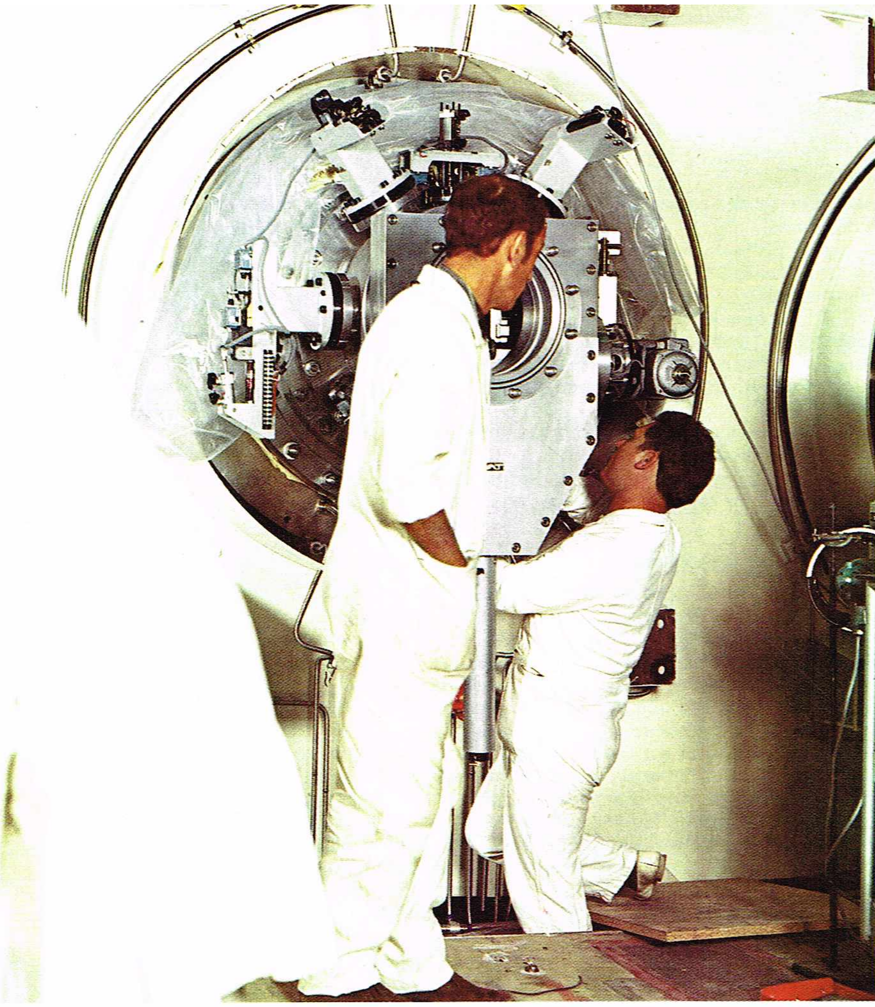

▲ ***Grand réflecteur d'eau lourde situé autour du cœur du réacteur (Centre d'études nucléaires de Grenoble - C. E. A.).***

Parimage - Photo M.C.

est destinée à protéger les personnes et aussi les structures des rayonnements ionisants liés à la réaction en chaîne.

Un fluide réfrigérant sert à évacuer les calories produites dans le cœur et à les transmettre par l'intermédiaire d'un échangeur au circuit vapeur qui actionne un groupe turbo-alternateur. Une pompe de circulation est en général nécessaire pour faire circuler le fluide réfrigérant dans le circuit cœur-échangeur.

Les détecteurs de neutrons destinés au contrôle de la réaction peuvent être situés dans le cœur ou la protection biologique. Dans un réacteur, la réaction en chaîne est déclenchée par les neutrons existant initialement; ils proviennent des fissions spontanées de l'uranium ou du plutonium, ou d'une source artificielle de neutrons introduite dans le cœur, et constituent la première génération. Certains de ces neutrons provoquent de nouvelles fissions, et les neutrons produits se ralentissent, diffusent dans le combustible, sont absorbés, s'échappent du cœur ou produisent de nouvelles fissions; ils forment la seconde génération neutronique, ainsi de suite. Ces divers événements se produisent pendant le temps τ : durée de vie d'une génération de neutrons.

Si N représente la population neutronique au début d'une génération, le nombre de neutrons créés au cours d'une génération est égale à $N\,(K_{eff} - 1)$; l'évolution de la population neutronique pendant une génération est alors :

$$\frac{dN}{dt} = \frac{N\,(K_{eff} - 1)}{\tau}$$

A un instant donné, la population neutronique est alors :

$$N = N_0 e^{\frac{(K_{eff} - 1)}{\tau}}$$

N_0 est le nombre initial de neutrons. On pose généralement $T = \dfrac{\tau}{K_{eff} - 1}$ période du réacteur qui exprime le temps au bout duquel le nombre de neutrons existants est multiplié ou divisé par *e*, base des logarithmes népériens.

Dans le fonctionnement d'un réacteur, les neutrons immédiats et retardés interviennent simultanément; soit β la fraction du nombre total des neutrons de fission apparaissant sous forme de neutrons retardés. On peut considérer le coefficient de multiplication effectif comme étant la somme de $(1 - \beta)\,K_{eff}$, du aux neutrons prompts, et de $K\beta_{eff}$ dû aux neutrons retardés. Supposons que le réacteur diverge ($K_{eff} > 1$), mais que $(1 - \beta)\,K_{eff}$ soit inférieur à l'unité, l'augmentation de la population neutronique est alors due uniquement aux neutrons retardés, elle est donc lente et le contrôle est facile. Cette condition est réalisée par $1 < K_{eff} \leqslant \dfrac{1}{1 - \beta}$. Si $K_{eff} > \dfrac{1}{1 - \beta}$, la réaction en chaîne diverge à cause des neutrons prompts, le contrôle est difficile.

Physique des réacteurs

La physique des réacteurs a pour objet la compréhension et la prédiction du comportement des neutrons dans un réacteur nucléaire. Cette connaissance est nécessaire à deux niveaux :

— Pour les études de projet : il s'agit de concevoir, d'optimiser le réacteur et de garantir sa sûreté.

— Pour l'exploitation : il s'agit de prévoir et contrôler le comportement de l'installation et de réaliser le cycle de combustible le plus économique possible.

Malgré la diversité des filières, les problèmes de physique des réacteurs présentent une grande unité. Le problème fondamental est de connaître la distribution énergétique, spatiale et temporelle des neutrons dans le réacteur. Elle est caractérisée par une grandeur appelée *flux neutronique* $\Phi\,(E, \vec{x}, t)$.

L'ensemble des phénomènes mis en jeu est traduit par une équation fondamentale, l'équation du transport, relative au flux neutronique. Cette équation est une *équation de bilan* entre les différents événements que peut « vivre » un neutron : naissance par fission, déplacement au sein du cœur, fuite à l'extérieur du cœur, perte d'énergie par choc sur les noyaux des différents matériaux, absorption, celle-ci pouvant être stérile (capture) ou donner lieu à une nouvelle fission.

L'interaction des neutrons avec la matière est représentée par une grandeur appelée *section efficace* σ qui caractérise la probabilité de la réaction. Une section efficace dépend de trois paramètres $\sigma\,(i, r, E)$; de l'isotope considéré (i), de la réaction (r) ; dans le cas fréquent où plusieurs réactions sont possibles, chacune possède une section efficace caractéristique, et enfin elle varie suivant l'énergie E du neutron incident. L'unité de section efficace, homogène à une surface, est le barn

$$(1 \text{ barn} = 10^{-24}\,\text{cm}^2)$$

Si l'on désigne par $N\,(i, \vec{x})$ le nombre d'atomes par cm^3 de noyaux i dans un volume élémentaire dV autour du point $\vec{x}$, le nombre total de réactions du type r dans le réacteur est alors pour ce noyau i :

$$T\,(i, r) = \int_V \int_E N\,(i, \vec{x})\,\sigma\,(i, r, E)\,\Phi\,(\vec{x}, E)\,dE\,dV$$

Ce sont des termes de ce type qui interviennent dans l'équation fondamentale citée plus haut.

On voit dès lors apparaître les différentes démarches de la physique des réacteurs :

— Il faut tout d'abord une connaissance précise des propriétés nucléaires des matériaux qui constituent le cœur du réacteur : c'est la physique nucléaire qui apporte les données nécessaires sur les sections efficaces.

— Il faut résoudre l'équation de bilan dans le réacteur pour obtenir le flux neutronique et par suite les différents taux de réactions $T\,(i, r)$.

En fait, il n'est pas possible de se reposer uniquement sur les deux points précédents pour le calcul d'un réacteur. Tout d'abord les mesures de sections efficaces ne sont pas suffisamment précises pour atteindre les précisions demandées par les projets. En outre, les méthodes de calcul raffinées deviennent rapidement inextricables, et il est nécessaire de faire un certain nombre d'approximations (discrétisation en énergie, par exemple).

En conséquence, les études sont orientées vers l'utilisation d'« expériences critiques », réacteurs de puissance nulle, dont le cœur est constitué par le milieu à étudier. Les expériences réalisées mettent en jeu des milieux simples et sont ainsi faciles à analyser. Les résultats expérimentaux obtenus, qui sont des caractéristiques du bilan neutronique, permettent de tester de façon systématique données de base et méthodes de calcul et de les modifier en conséquence pour éliminer les écarts calcul-expérience. En outre, il faut noter que ce type

d'approche est en parfait accord avec les préoccupations de l'ingénieur qui calcule un réacteur : ce qui est important pour lui, c'est de prévoir des taux de réaction.

En résumé, on peut dire que la physique des réacteurs est un intermédiaire indispensable entre la physique nucléaire qui fournit les données de base, la physique mathématique qui élabore les méthodes de calcul et le projet qui utilise un formulaire testé et justifié par la physique des réacteurs.

Nous allons à présent donner un aperçu des problèmes de physique des réacteurs rencontrés dans les différents types de filières.

Physique des réacteurs à eau naturelle

L'eau est le fluide le plus communément utilisé pour le transfert de l'énergie calorifique et sa transformation en énergie mécanique. Contenant une forte densité de noyaux d'hydrogène très efficaces pour ralentir les neutrons par chocs élastiques jusqu'à l'énergie thermique, il semble naturel de l'utiliser comme fluide modérateur et caloporteur dans les réacteurs nucléaires.

Deux modes d'extraction des calories de l'eau, circulant dans le cœur, ont conduit à définir deux types de réacteurs. D'une part les réacteurs à eau sous pression ou PWR (Pressurized Water Reactor) où l'extraction des calories s'effectue en phase liquide; d'autre part les réacteurs à eau bouillante ou BWR (Boiling Water Reactor) où l'extraction des calories s'effectue en phase vapeur.

Sur le plan de la physique, ces deux types de réacteurs ont de nombreux aspects communs. Ce sont des réacteurs à neutrons thermiques. La réaction en chaîne y est entretenue principalement grâce à la fission de l'uranium 235. La section efficace de fission de cet isotope est particulièrement élevée pour les neutrons lents (ou neutrons thermiques). Pour bénéficier de cet avantage, il est nécessaire de ralentir les neutrons jusqu'à l'énergie thermique après quelques chocs diffusants. L'hydrogène de l'eau est en l'occurrence un très bon modérateur. Malheureusement, il a l'inconvénient de capturer facilement les neutrons, imposant ainsi l'utilisation d'uranium enrichi (de l'ordre de 3 %).

Les neutrons évoluent donc dans un milieu composé principalement de noyaux lourds (combustible) et légers (modérateur). Il est avantageux du point de vue du bilan neutronique que ces deux milieux soient séparés. En effet, le principal obstacle au ralentissement des neutrons est la probabilité de capture élevée de l'^{238}U. Pour les neutrons épithermiques, cet isotope présente une section efficace de capture résonnante (véritable piège à neutrons). Il importe donc que le parcours des neutrons dans le modérateur soit suffisamment long pour qu'une grande partie d'entre eux se thermalisent sans rencontrer l'^{238}U. Cela conduit à localiser le combustible sous forme de barreaux cylindriques formant un réseau régulier baignant dans l'eau qui joue alors le double rôle de fluide caloporteur et de modérateur.

Le pas du réseau détermine un paramètre important en neutronique : le rapport de modération (r)

$$r = \frac{\text{nombre de noyaux de modérateur}}{\text{nombre de noyaux de combustible}}$$

En raison de deux phénomènes antagonistes, il existe une valeur optimale de r pour laquelle la réactivité ρ est maximale. En fait, le neutronicien choisit une valeur de r légèrement inférieure à r_{opt} pour satisfaire à un critère de sécurité : le coefficient de température du modérateur $\frac{\partial \rho}{\partial T}$ doit être négatif. Une fois les caractéristiques du réseau fixées, il reste à résoudre de nombreux problèmes.

Les propriétés du combustible varient au cours du temps, entraînant une variation du bilan neutronique qui se traduit par une diminution constante de la réactivité. Les phénomènes défavorables sont :

— l'usure du combustible,

— l'apparition de produits de fission très capturants (le plus important étant le xénon 135 qui « empoisonne » le combustible dès le début de vie du cœur). Le seul élément favorable est l'apparition des isotopes fissiles (^{239}Pu et ^{241}Pu) :

$$^{238}\text{U} \xrightarrow{n,\gamma} {}^{239}\text{U} \xrightarrow{\beta^-} {}^{239}\text{Np} \xrightarrow{\beta^-} {}^{239}\text{Pu} \xrightarrow{n,\gamma}$$

$$^{240}\text{Pu} \xrightarrow{n,\gamma} {}^{241}\text{Pu} \xrightarrow{n,\gamma} {}^{242}\text{Pu}$$

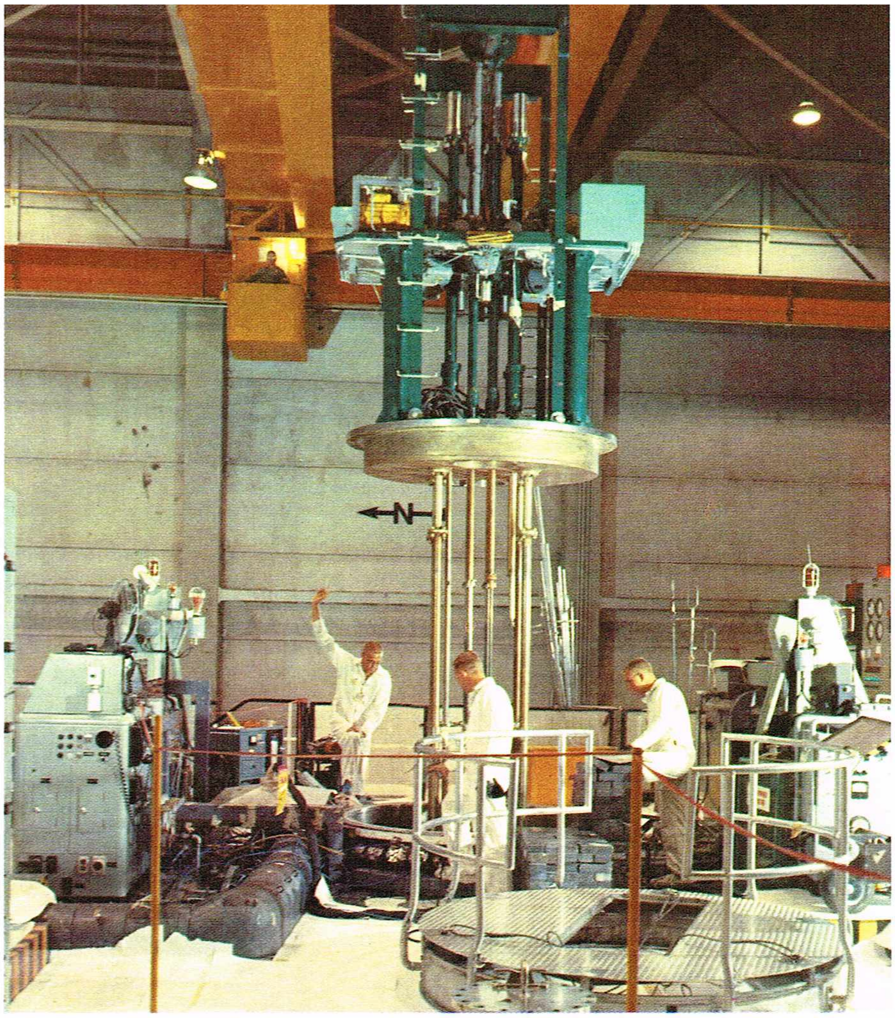

Agipresse

▲ ***Système des barres de contrôle d'un réacteur au laboratoire atomique de Los Alamos (États-Unis).***

Il est donc clair que le choix d'une durée de cycle, optimale économiquement, impose un enrichissement au départ pour lequel le cœur a un excédent de réactivité que l'on doit pouvoir contrôler.

Contrôle de la réactivité

On peut distinguer deux sortes de contrôle :

— *Les variations rapides de réactivité*

Elles peuvent être provoquées par des effets de température : passage froid-chaud à puissance nulle, effet de vide, empoisonnement xénon, etc. Ces variations sont contrôlées à l'aide de barres de matériaux absorbants (argent, indium, cadmium) que l'on enfonce plus ou moins dans le cœur. Il existe de plus une réserve d'antiréactivité sous la forme de barres de sécurité qui, en tombant, sont capables à tout moment de rendre le réacteur sous critique.

— *Les variations lentes de réactivité*

Elles sont dues à l'épuisement du combustible. La recherche d'un taux de combustion économiquement intéressant impose le contrôle d'un important excédent de réactivité pour le premier cœur.

Les solutions retenues diffèrent pour les PWR et les BWR, bien que consistant toutes les deux dans l'adjonction d'éléments capturants dans le cœur : les poisons.

— *Pour les PWR*. On utilise un poison soluble. Le bore 10 sous forme d'acide borique dont le titre dans l'eau du circuit primaire est ajusté au cours du temps. Le titre en bore est cependant limité à environ 0,2 % pour que le coefficient de température du modérateur reste négatif. Pour le premier cœur, l'excédent de réactivité est tel qu'il faut souvent adjoindre un autre mode de contrôle : les poisons consommables.

Dans certains assemblages, les vides laissés pour recevoir d'éventuelles barres de commande sont occupés par des crayons de matériaux absorbants (Pyrex) dont l'usure est liée au taux de combustion local. Les caractéristiques de ces crayons et leur position sont étudiées pour compenser l'excédent de réactivité, et en même temps servent à aplatir la distribution de puissance.

— *Pour les BWR*. Le changement de phase de l'eau interdit la solution poison soluble.

Seuls les poisons consommables sont utilisés sous forme de plaques borées entre les boîtiers d'éléments combustibles ou d'oxyde de gadolinium mélangé au combustible.

Distribution de puissance

Elle doit être calculée de façon à respecter les limites technologiques (point chaud à ne pas dépasser) et à utiliser au mieux le combustible chargé (puissance la plus plate possible). Les solutions diffèrent entre les PWR et les BWR et impliquent des stratégies de rechargement différentes (par tiers pour les PWR et par 2/9 pour les BWR).

Thermohydraulique

Les problèmes de neutronique et de thermohydraulique sont intimement couplés, surtout pour les BWR. Le physicien doit être capable de calculer la répartition de la densité du modérateur, d'assurer une bonne distribution du fluide caloporteur.

Il est impératif d'éviter la fusion du combustible, et des considérations de thermohydraulique sur la transmission de chaleur entre le combustible et le fluide caloporteur conduisent à des limitations de la température de l'eau primaire en fonction de la valeur de la pression primaire.

Si l'on examine ce qui se passe lorsqu'un fluide (eau) se déplace dans un canal chauffant, on distingue plusieurs zones qui dépendent de la vitesse massique et de la qualité du mélange eau-vapeur.

Au début, tant que le flux est suffisamment faible pour que la température de gaine (T_g) reste inférieure à la température de saturation (T_{sat}), l'écart de température entre gaine et eau est proportionnel au flux calorifique, l'écoulement s'effectue en phase unique (liquide).

Dès que T_g atteint et dépasse « T_{sat} », des bulles se forment à partir de centres actifs existant sur la paroi à cause de la surchauffe locale; c'est l'ébullition locale. La fraction de vide, c'est-à-dire la fraction de volume occupée par la vapeur, est faible. L'agitation provoquée par la formation des bulles améliore le transfert de chaleur. Dans cette configuration, l'écart entre T_g et T_{sat} est donné par l'expression

$$\Delta T_{sat} = T_g - T_{sat} = 7{,}9\ \Phi^{0{,}25}\ e^{-P/62{,}5}$$

(Φ en W/cm² et P en bars)

La température de gaine $T_g = T_{sat} + \Delta T_{sat}$ dépend peu du flux thermique et ne dépend ni de la vitesse ni de la température de l'eau.

Dans cette zone, un effet important peut se produire : si le flux de chaleur est trop grand, le taux de formation de bulles est tel qu'un film de vapeur se forme autour du canal chauffant, empêchant l'eau de mouiller le canal. Le coefficient d'échange thermique est brusquement réduit, une élévation anormale de la température de la gaine en résulte, préjudiciable au comportement du combustible; c'est le phénomène de caléfaction.

Dès que l'enthalpie du liquide atteint l'enthalpie de saturation (ou $T_e = T_{sat}$), les bulles s'élèvent à travers le liquide et occupent tout le canal; la fraction de vide varie très rapidement avec l'enthalpie. Les conditions de transfert de chaleur et ses limites sont les mêmes que pour la zone décrite précédemment.

Les bulles en grand nombre ont tendance à se rassembler en un noyau gazeux continu, et un film liquide tapisse la gaine. C'est la zone d'écoulement annulaire. Des gouttelettes sont emportées dans le noyau gazeux, l'épaisseur du film décroît au fur et à mesure que la qualité de la vapeur augmente. Il peut se produire à la limite une rupture du film liquide, phénomène dit d'assèchement, conduisant aussi à la caléfaction.

Dans la zone d'écoulement à brouillard, la vapeur entraîne des gouttelettes de liquide; on observe une brusque augmentation de la température de paroi. L'écoulement à brouillard est ensuite suivi de l'écoulement à simple phase vapeur comparable à celui des gaz, avec modification brutale des coefficients d'échange thermique.

Les différentes zones jusqu'à celle d'écoulement annulaire se rencontrent dans les réacteurs à eau, la zone à brouillard en étant exclue.

Dans un PWR, on rencontre les deux premières zones (fonctionnement sous-saturé). Une certaine ébullition locale est tolérée au point le plus chaud du combustible, le « ΔT_{sat} » calculé est faible (environ 3 °C en prenant Φ = 185 W/cm² et P environ 155 bars). La fraction de vide est faible, environ 4 à 5 %.

Dans un BWR où l'on rencontre les différentes zones, le « ΔT_{sat} » est d'environ 10 °C; la fraction de vide est en moyenne de 20 % sur tout le canal, et au plus de 75 % à la sortie du canal.

Physique des réacteurs à neutrons rapides

Définition

Le terme réacteurs à neutrons rapides regroupe une grande variété de réacteurs, dont la propriété commune est de ne pas contenir d'éléments légers (carbone, hydrogène), introduits dans les réacteurs thermiques dans le dessein de ralentir les neutrons en dessous de la région des résonances des éléments lourds. Cette caractéristique entraîne deux conséquences :

— Il n'est plus possible de tirer parti des fortes remontées des sections efficaces de fission à très basse énergie (0,025 eV), principe de base des réacteurs thermiques. Le *tableau* I, qui compare ces sections efficaces moyennées sur un flux thermique et sur un flux de réacteur rapide de puissance, illustre bien ce fait.

— Le rapport σ fission $^{235}U/\sigma$ capture ^{238}U est beaucoup plus faible pour un flux rapide ($\simeq$ 10) que pour un flux thermique ($\simeq$ 200).

En conséquence, il est nécessaire d'enrichir le combustible en isotopes fissiles, l'ordre de grandeur minimal étant d'environ 10 %.

De plus, le tableau ci-dessous montre la supériorité du plutonium 239 comme combustible rapide par rapport à l'uranium 235 : α légèrement plus faible et $\eta - 1$ nettement supérieur.

On peut se demander si la présence d'uranium 238, élément capturant, est bien nécessaire. En fait, elle est essentielle pour quatre raisons principales :

— *La régénération du ^{239}Pu est possible* par capture neutronique dans le ^{238}U par la chaîne suivante :

$$^{238}U + n \rightarrow {}^{239}U \xrightarrow{\beta^-} {}^{239}Np \xrightarrow{\beta^-} {}^{239}Pu$$

Comparaison des sections efficaces moyennées sur un flux thermique et un flux de réacteur rapide de puissance

Isotope	Flux	σ_f en barns	σ_c en barns	ν : neutrons émis par fission	$\alpha = \frac{\sigma_c}{\sigma_f}$	$\eta - 1 = \frac{\nu\sigma_f}{\sigma_c + \sigma_f} - 1$
^{235}U	thermique	582	99	2,42	0,17	1,07
	rapide	1,78	0,50	2,45	0,28	0,91
^{239}Pu	thermique	743	269	2,87	0,36	1,11
	rapide	1,72	0,44	2,93	0,26	1,33

▶ *Tableau donnant en comparaison les sections efficaces moyennes sur un flux thermique et un flux de réacteur rapide de puissance.*

Elle a deux avantages :

- le plutonium formé pourra servir après retraitement à alimenter de nouveaux réacteurs, de sorte qu'on peut dire que la filière rapide brûle en fait de l'^{238}U ;
- la formation de plutonium dans le cœur minimise les variations de réactivité au cours de la vie du cœur et permet d'envisager des taux de combustion très élevés.

— L'^{238}U apporte la contribution principale au coefficient de température négatif, par effet Doppler, pour la sûreté du réacteur.

— L'^{238}U contribue à 10 % de la puissance par ses fissions rapides au-dessus du seuil de 1 MeV.

— La fabrication d'un combustible plutonium pur est plus difficile.

Description sommaire

En règle générale, un réacteur à neutrons rapides se compose de trois zones. Ce sont, du centre vers la périphérie :

— *Une zone cœur :* c'est la partie fissile du réacteur, en général constituée de deux milieux concentriques d'enrichissements différents, le plus enrichi étant à l'extérieur.

Cette zone externe plus enrichie permet d'obtenir, dans la seconde zone du cœur, pour un niveau de flux donné, plus de fissions, donc plus de puissance à volume constant, et d'obtenir un aplatissement radial de puissance. Le cœur est constitué d'aiguilles de PuO_2/UO_2, gainées en acier inoxydable, disposées dans des tubes verticaux hexagonaux et refroidies par du sodium liquide.

— *Une couverture entourant le cœur :* elle peut avoir deux rôles suivant sa nature :

- rôle de réflecteur qui renvoie les neutrons vers le cœur et permet de réduire la masse critique et d'aplatir la puissance. C'est le cas de l'acier, du nickel ;
- rôle régénérateur : c'est le cas des couvertures d'UO_2 appauvri à 0,4 % d'^{235}U, qui utilisent les neutrons de fuite du cœur pour transformer l'^{238}U en ^{239}Pu. C'est grâce à ces couvertures qu'un réacteur rapide peut devenir surrégénérateur, c'est-à-dire produire plus de ^{239}Pu qu'il n'en consomme.

Le choix entre les deux types de couvertures est un choix économique. Actuellement, pour une meilleure utilisation de l'uranium naturel, le critère de surrégénération est retenu. Les couvertures des réacteurs actuels ou en projet sont en uranium appauvri, qui est un résidu des usines d'enrichissement.

— *Des écrans et des protections biologiques :* par exemple, acier inoxydable refroidi au sodium.

Particularités de la physique des réacteurs rapides

Les deux principales caractéristiques de la filière rapide, grande gamme d'enrichissement possible et fuites importantes hors cœur, font que les spectres de neutrons s'étendent sur un très grand domaine d'énergie, comme le montre la *figure* 6 (1 keV à 10 MeV). Il est donc nécessaire de bien connaître, dans toute cette gamme d'énergie, le bilan neutronique dans le cœur et dans les couvertures. Quatre points sont particulièrement importants dans cette analyse.

— Il est nécessaire de bien connaître le bilan neutronique au démarrage du réacteur. Ceci demande une connaissance approfondie des caractéristiques neutroniques des éléments constituants (PuO_2, UO_2, sodium, acier).

— L'évolution du réacteur au cours du temps doit être correctement prévue. Un réacteur de 1 200 MWe (mégawatts électriques), par exemple, est rechargé par moitié chaque année. Il faut donc bien connaître :

- le gain de régénération, celui du cœur parce qu'il intervient directement pour limiter la perte de réactivité par cycle ; celui de la couverture, car il permet au réacteur d'être surrégénérateur. Un gain de régénération mal défini conduit à une estimation erronée du coût du cycle de combustible et de l'approvisionnement en plutonium pour les cœurs suivants ;
- l'effet dû aux produits de fission, qui sont des éléments capturants et s'accumulent dans le cœur.

— Les problèmes directement liés au projet doivent être bien connus : distributions de puissance, efficacité des barres de commande.

— Au point de vue de la sûreté du réacteur, la possibilité d'une ébullition de sodium impose de pouvoir calculer correctement cet effet qui entraîne un gain de réactivité, quand il se produit dans la partie centrale du cœur.

Toutes ces études ont fait et font actuellement l'objet d'un effort expérimental important sur « expériences critiques ». Parmi celles-ci, on peut citer, en France, le réacteur couplé rapide-thermique Ermine, le réacteur Harmonie et le réacteur Masurca. Les expériences réalisées sur ces installations ont permis la mise au point de la centrale de démonstration Phénix (250 MWe) qui fonctionne depuis 1973.

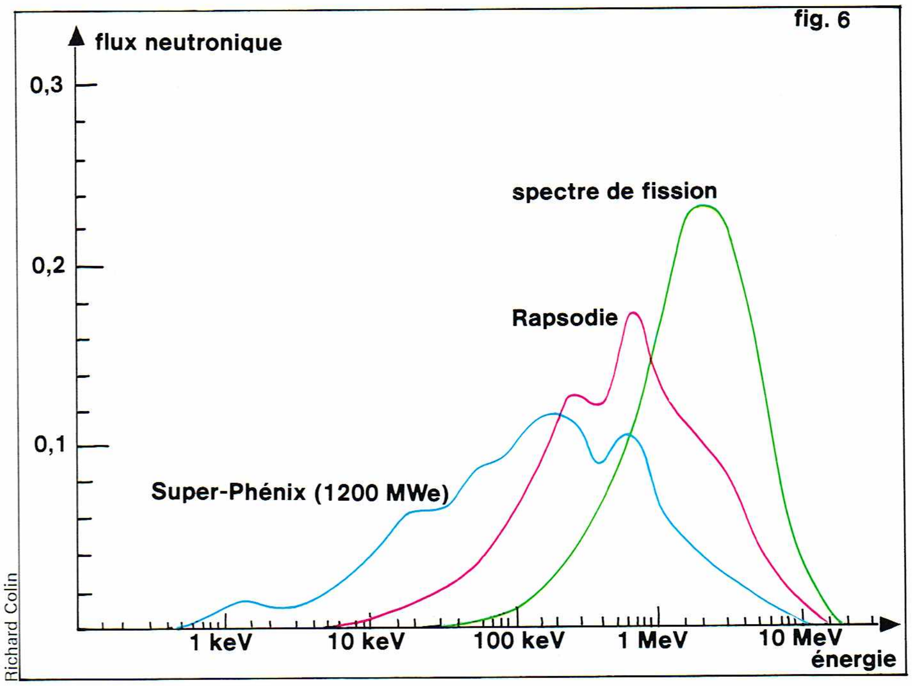

Richard Colin

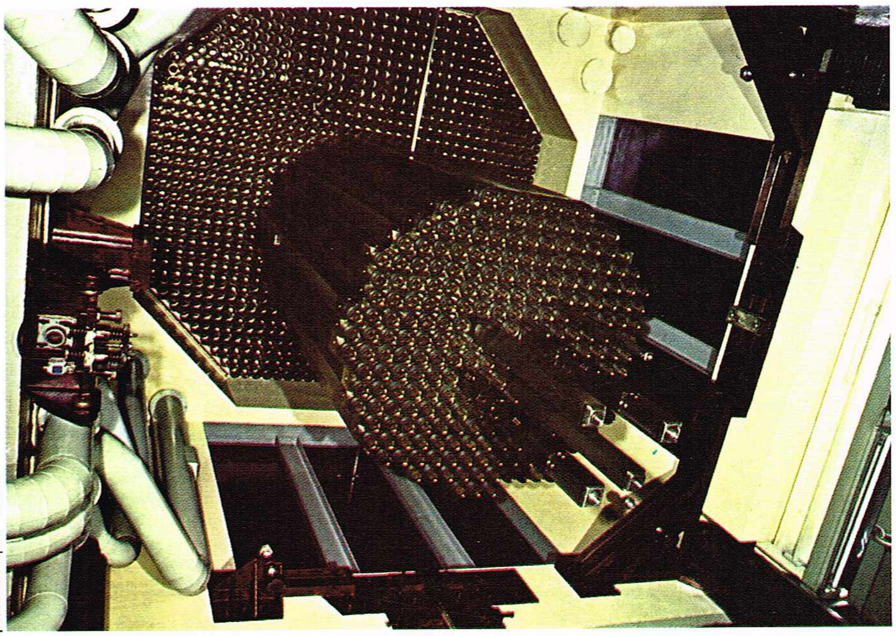

photothèque C.E.A.

▲ *En haut, figure 6 : comparaison de spectres de neutrons dans les réacteurs à neutrons rapides. Ci-dessus, le cœur du réacteur* Masurca *(vue de dessous).*

Le combustible

Le combustible nucléaire contient la matière fissile, c'est-à-dire l'uranium 235 ou 233 ou le plutonium, ou encore un mélange d'éléments fissiles et fertiles comme le thorium et l'uranium 238. Une caractéristique importante du combustible est son enrichissement. L'uranium est utilisé sous forme métallique ou céramique (oxyde, carbure), le plutonium est utilisé sous forme d'oxyde mélangé à de l'oxyde d'uranium.

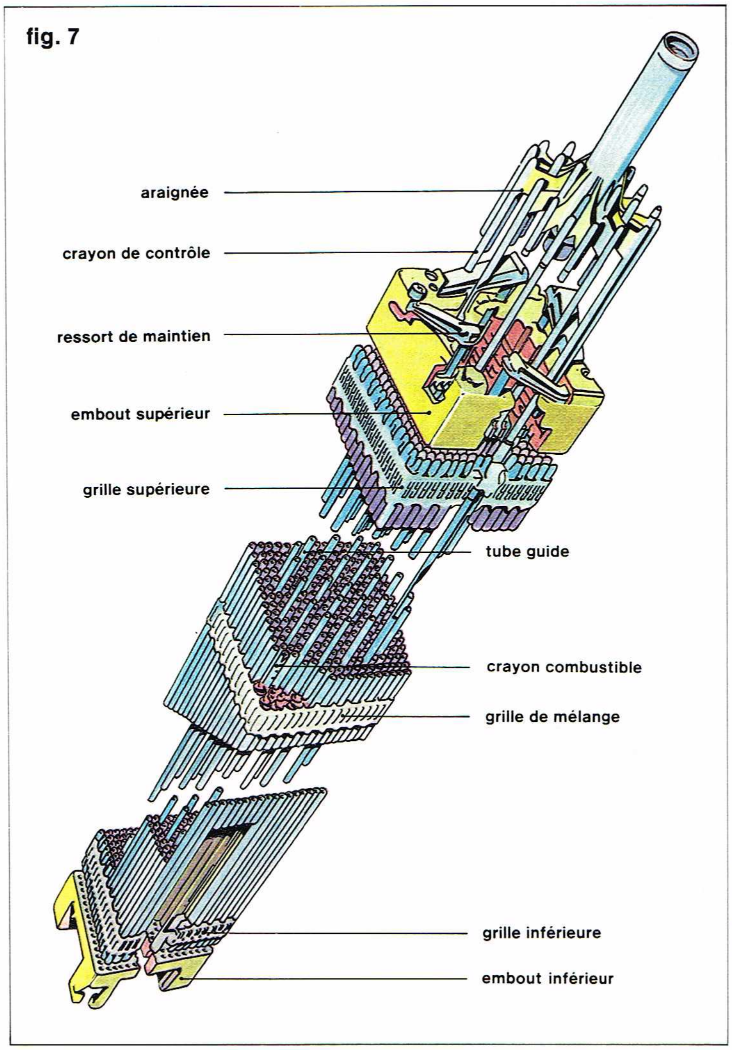

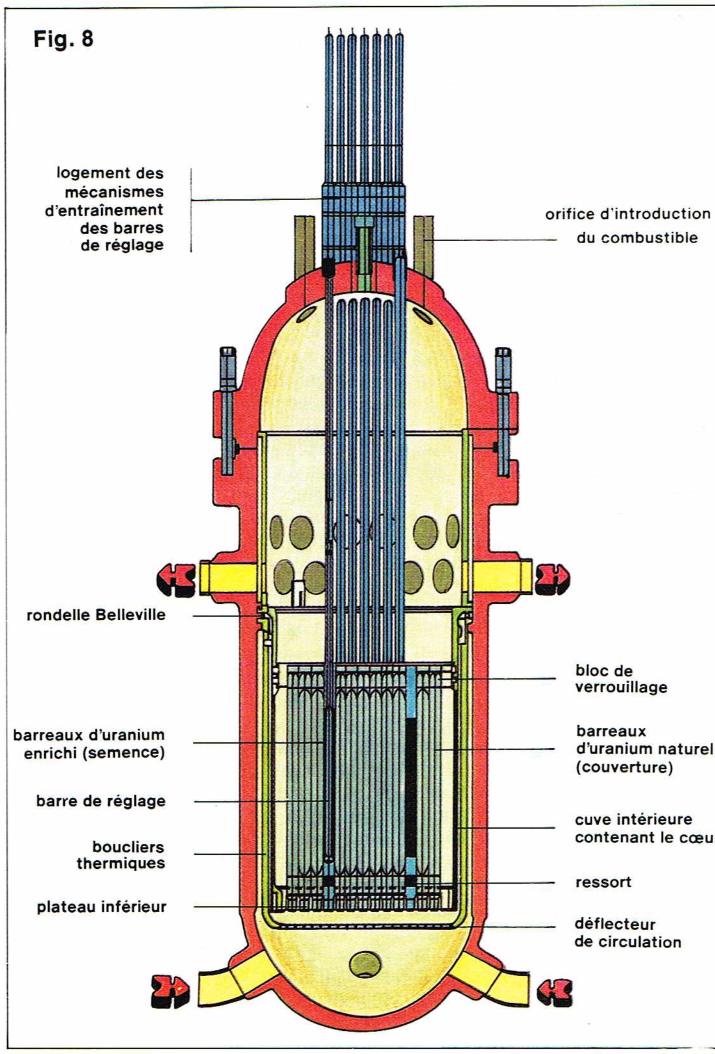

▲ *A gauche, figure 7 : assemblage combustible* PWR *17 × 17 (crayons et grappe de contrôle). A droite, figure 8 : coupe verticale de la cuve d'un* PWR.

Le matériau combustible, sous forme de barreau, tube, pastilles, sphérules, est placé dans une gaine étanche dont le rôle principal est de servir de barrière à la dissémination des produits de fission. Cette gaine doit donc avoir une bonne résistance mécanique sous flux neutronique et thermique, de plus elle doit assurer un bon échange thermique entre le combustible et le fluide caloporteur, et également capturer faiblement les neutrons.

Le choix d'un matériau de gaine résulte d'un compromis entre ces conditions parfois contradictoires. Les matériaux couramment employés sont le magnésium, l'acier inoxydable, l'alliage de zirconium. On trouvera à la suite une description succincte des éléments combustibles des réacteurs à eau sous pression, des réacteurs à haute température et des réacteurs à neutrons rapides.

Assemblage combustible d'un PWR

L'assemblage combustible (*fig.* 7 et 8) est constitué de 264 crayons combustibles réunis en un réseau carré de 17 × 17 crayons. Le squelette de l'assemblage est constitué par les 24 tubes guides des crayons des grappes de contrôle fixés aux pièces d'extrémité inférieure et supérieure et par7 grilles de maintien des crayons combustibles réparties sur toute la hauteur. Un tube central sert de canal à l'instrumentation interne du cœur.

Les caractéristiques essentielles de l'assemblage PWR sont regroupées ci-après :

Longueur hors tout de l'assemblage	4 058 mm
Encombrement	214 × 214 mm
Poids d'un assemblage	environ 640 kg
Nombre de crayons	264
Nombre de grilles	7
Diamètre extérieur de la gaine (Zircaloy)	9,5 mm
Épaisseur de la gaine	0,57 mm
Pas des crayons	12,6 mm
Densité du combustible UO_2	95 %
Diamètre des pastilles	8,2 mm
Nombre de pastilles par crayon	272
Pressurisation des crayons à	30 bars

La pièce d'extrémité inférieure assure la distribution du fluide réfrigérant dans l'assemblage et supporte les charges verticales imposées à la structure. Cette pièce est constituée d'une plaque épaisse de section carrée en acier inoxydable percée d'ouvertures cylindriques et supportée par quatre montants en forme d'équerre.

La pièce d'extrémité supérieure constitue le plénum de sortie du réfrigérant et représente un logement de protection pour les éléments associés à l'assemblage.

Les tubes guides servent de logement aux crayons absorbants, aux crayons à poisons consommables, aux sources de neutrons. Les tubes guides présentent une réduction de diamètre à leur partie inférieure jouant le rôle d'amortisseur hydraulique pour les barres de contrôle arrivant en fin de course.

Les grilles de maintien réparties sur toute la hauteur de l'assemblage supportent les crayons combustibles et assurent un espacement correct entre eux pendant leur séjour dans le cœur. Une grille est constituée d'éléments métalliques minces crénelés formant un réseau carré régulier, et chaque élément de grille peut comporter, suivant le cas, ressorts, bossettes, ailettes de mélange (pour améliorer le mélange du réfrigérant dans les régions chaudes).

Les crayons combustibles sont constitués de pastilles de dioxyde d'uranium contenues dans un tube en Zircaloy 4. Les pastilles, de forme cylindrique, sont formées de poudre d'UO_2 légèrement enrichi, pressées à froid, puis frittées de façon à obtenir la densité requise. Les extrémités des pastilles comportent un évidement sphérique destiné à absorber les effets de l'expansion ther-

mique. Une chambre d'expansion et un espace suffisant pastille-gaine sont ménagés dans le crayon combustible pour tenir compte du relâchement des gaz de fission, de la dilatation thermique différentielle entre gainage et combustible et du gonflement des pastilles dû aux produits de fission.

Le combustible des réacteurs à haute température

La technologie de base du combustible HTR repose sur le concept des particules enrobées.

La particule enrobée

Chaque particule est constituée d'un noyau sphérique de 300 à 800 μm, en carbure ou oxyde d'uranium ou de thorium.

La première couche d'enrobage du noyau est en pyrocarbone (PyC) poreux. Elle a pour rôle d'arrêter les fragments de fission et assure un volume libre pour l'accumulation des gaz de fission; de plus, elle absorbe les variations dimensionnelles du noyau et des enrobages externes ainsi qu'un déplacement éventuel du noyau durant la vie du combustible (effet amibe). Les couches externes — PyC à haute densité et, éventuellement, SiC ou ZrC — jouent le rôle d'enveloppe étanche devant résister à la pression interne des gaz de fission.

Élément combustible

Les particules fissiles et fertiles sont mélangées et réparties uniformément au sein d'une matrice carbonée — poudre de graphite et brai — pour constituer des « compacts ». Les éléments combustibles peuvent se présenter sous diverses formes dont les plus usuelles sont des éléments prismatiques ou des éléments sphériques.

— *Éléments prismatiques*

Les « compacts » ont la forme de bâtonnets de 16 mm de diamètre et 50 mm de haut. Ils sont logés dans des trous borgnes percés longitudinalement dans des briques de graphite. Ces briques qui jouent le rôle de modérateur ont une section droite hexagonale de 793 mm de haut et 360 mm entre plats. Parallèlement aux trous de combustible, sont percés des canaux de 21 mm de diamètre assurant le passage du gaz de refroidissement. Trous de combustible et canaux sont régulièrement distribués pour assurer convenablement le passage de la chaleur du combustible vers le gaz.

Dans le cœur du réacteur, les briques sont empilées les unes au-dessus des autres pour former une colonne le long de laquelle tous les canaux sont alignés grâce à des pions de centrage. Le cœur est formé de la juxtaposition de ces colonnes.

— *Éléments sphériques*

Le « compact » de forme sphérique est enfermé dans une coque de graphite pour former un boulet de 60 mm de diamètre. Le cœur est alors constitué d'un empilement de ces boulets.

Performances du combustible

Les variations dimensionnelles du graphite sous irradiation — effet Wigner — entraînent l'apparition de contraintes, au sein des briques de graphite, qui limitent leur durée de vie dans le cœur et obligent à les renouveler en même temps que le combustible.

Les enrobages des particules sont également soumis à des contraintes dues à l'effet Wigner dans le PyC et à la pression des gaz de fission. A ces contraintes s'ajoute l'effet amibe — déplacement du noyau à travers ses enrobages sous l'effet d'un gradient thermique à haute température — qui diminue la résistance des enrobages. Le dimensionnement des noyaux et des enrobages est calculé pour maintenir intacte l'étanchéité des particules durant toute la vie du combustible.

Élément combustible des réacteurs à neutrons rapides

Le combustible est sous forme de pastilles d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium obtenues par frittage (il doit contenir une forte proportion, environ 15 %, de matériau fissile, uranium 235 ou plutonium 239). Malgré sa faible conductibilité thermique qui impose un faible diamètre des pastilles, l'oxyde est préférable à un alliage du point de vue de la tenue sous irradiation, et par conséquent du temps de séjour en pile.

Les pastilles sont contenues dans des gaines étanches en acier inoxydable qui constituent les aiguilles. Un espace libre à l'intérieur de la gaine reçoit les produits de fission gazeux et évite que la pression interne ne devienne trop élevée. Pour permettre leur chargement et leur déchargement, les aiguilles sont groupées par faisceaux dans des assemblages à section hexagonale dont les structures sont également en acier inoxydable. Le nombre d'aiguilles par assemblage est d'environ 250. Le cœur est constitué par la juxtaposition côte à côte, en position verticale, d'autant d'assemblages qu'il en faut pour former un ensemble critique. Les pieds des assemblages sont logés dans les trous d'une plaque appelée sommier.

Le démarrage, le réglage de la puissance et l'arrêt du réacteur sont effectués au moyen de barres de commande contenant un matériau absorbeur de neutrons (carbure de bore enrichi en bore 10), réparties parmi les assemblages et mobiles verticalement.

Autour, au-dessus et au-dessous du cœur, se trouve la « couverture » constituée d'aiguilles d'oxyde d'uranium naturel ou appauvri. Par capture des neutrons s'échappant du cœur, l'uranium 238 de la couverture se transforme en plutonium 239 sous l'effet des neutrons se déplaçant dans le cœur (de même que l'uranium 238 contenu dans les assemblages combustibles).

Transfert de chaleur

La fission des atomes dégage une énergie dont la plus grande part est transformée en chaleur au sein du combustible et du modérateur. Si on exclut la conversion directe en énergie électrique — réacteur thermo-ionique, par exemple — la chaleur est extraite du cœur par circulation d'un fluide.

Différents schémas sont alors possibles suivant que le fluide de refroidissement contient ou non le combustible lui-même (en suspension ou en solution), que ce fluide actionne directement une machine (turbine à gaz, turbine à vapeur, etc.) ou transfère sa chaleur à un fluide secondaire par l'intermédiaire d'un échangeur. Dans certains cas, on interpose entre le circuit primaire et le circuit d'utilisation de la chaleur un circuit intermédiaire pour éviter l'interaction du fluide primaire et du fluide de travail. En bout de chaîne, la chaleur est transformée en électricité ou utilisée en tant que telle pour le chauffage de locaux ou de procédés industriels.

Le fluide primaire doit satisfaire à certains critères :

— *Propriétés nucléaires*

- faible section de capture dans le cas des réacteurs à neutrons thermiques;
- faible pouvoir de modération dans le cas des réacteurs à neutrons rapides;
- faible radio-activité induite par les impuretés et produits de corrosion.

— *Propriétés physiques ou physico-chimiques*

- stabilité sous rayonnement;
- compatibilité vis-à-vis des matériaux de structure et du fluide secondaire;
- points de fusion et d'ébullition, tension de vapeur compatibles avec les pressions et températures d'utilisation.

De plus, le coût et l'approvisionnement ne doivent pas être trop contraignants, et le fluide doit posséder les qualités requises en tant que caloporteur — faible puissance de pompage et coefficients d'échanges élevés.

Pour le choix du fluide, ces qualités se traduisent par une masse volumique ρ_v, une chaleur spécifique C et une conductibilité thermique λ élevées, tandis que la viscosité dynamique doit être la plus faible possible.

En effet, la chaleur extraite peut s'écrire sous forme simplifiée :

$$Q = hS\Delta t \qquad (1)$$

et

$$Q = qC\Delta\theta \qquad (2)$$

tandis que la puissance de pompage est proportionnelle à $\frac{q^3 S}{\rho_v^2 A^3}$.

Il peut être intéressant, pour diminuer la puissance de pompage :

— de diminuer le débit q, mais on devrait augmenter l'échauffement $\Delta\theta$ du fluide dans le cœur, donc la température du combustible;

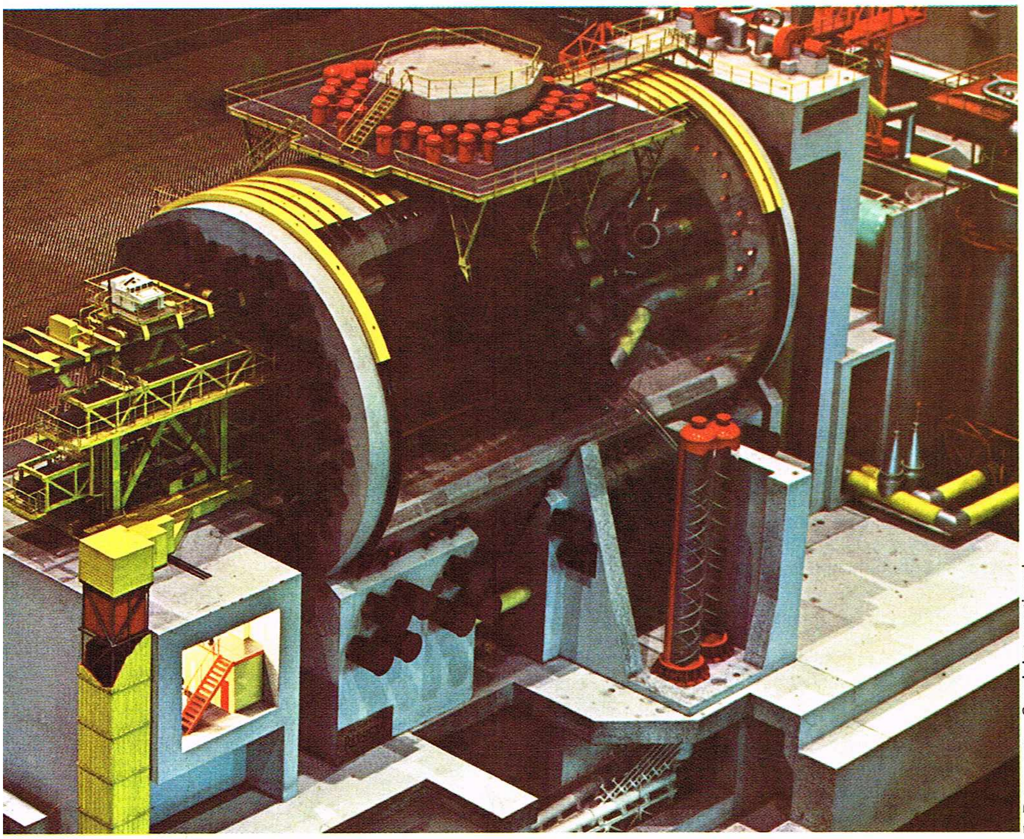

E. Rousseau - Snark International

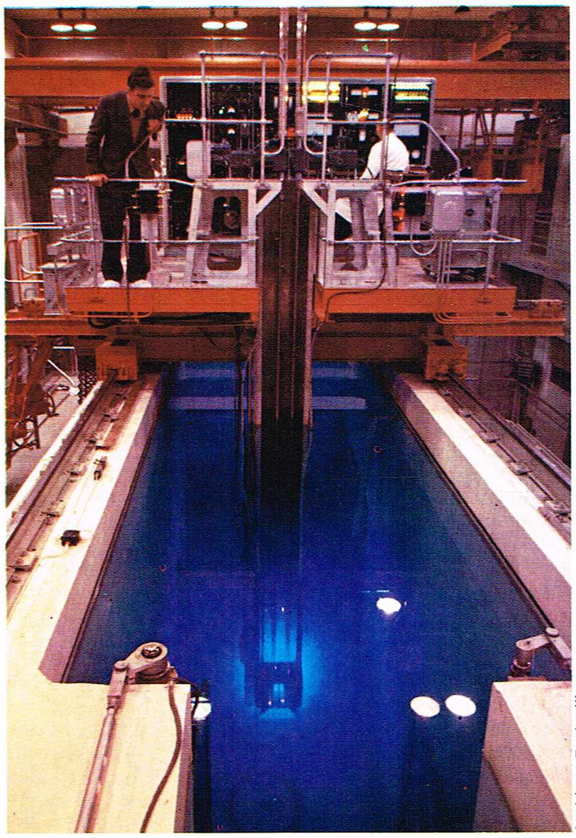

Archives Radaelli

▲ *A gauche, maquette d'une pile atomique (type* **U N G G***). A droite, piscine d'un réacteur de recherche; la faible lumière bleutée est due à la radiation connue sous le nom d'effet Cerenkov (U. K. A. E. A.).*

▼ *Détail de la maquette de la pile atomique ci-dessus.*

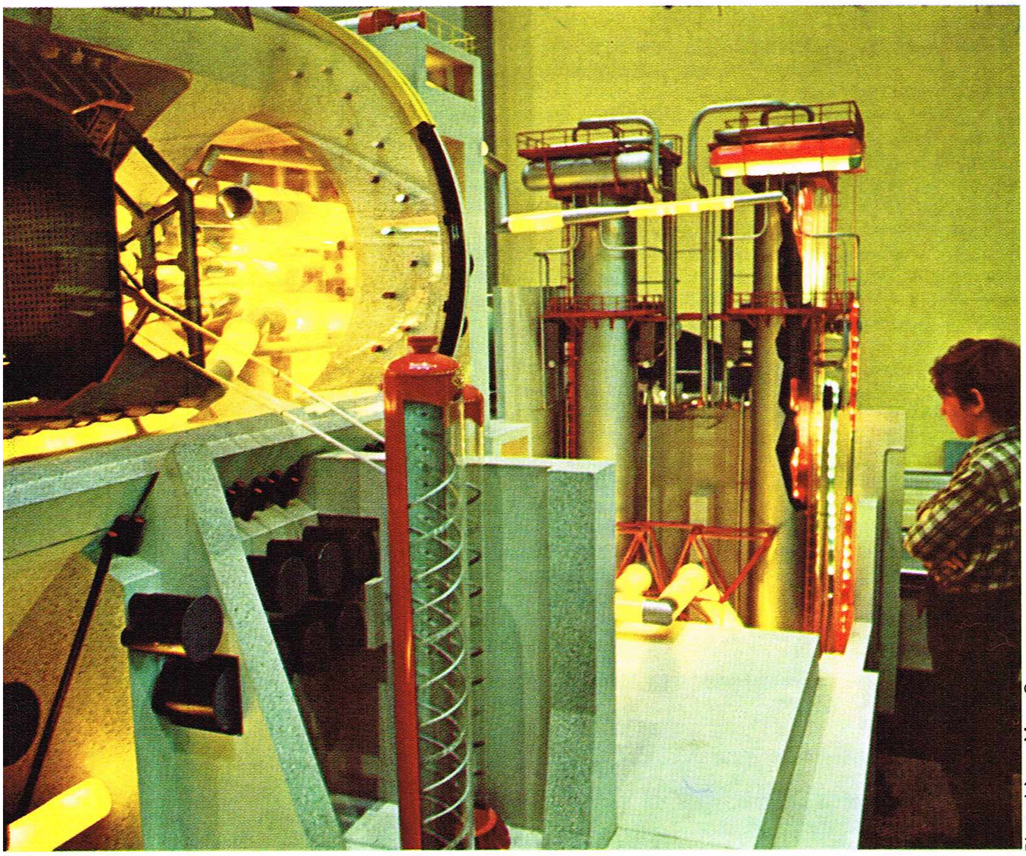

Photothèque Marc Garanger

— de diminuer la surface d'échange S, mais on augmenterait du même coup l'écart de température entre la surface du combustible et le fluide Δt;

— d'augmenter la section de passage A dans les limites imposées par les aspects neutroniques, mais ceci a pour effet de diminuer le coefficient d'échange h, donc d'augmenter la température du combustible.

Il s'agit en définitive d'optimiser ces paramètres pour minimiser le coût de l'énergie fournie.

Principaux types de réacteurs

Base de classification

Pour les réacteurs nucléaires, nombreux sont les modes de classification; chaque système de classification s'appuie sur des problèmes technologiques particuliers :
— le spectre neutronique (thermique ou rapide),
— le modérateur (eau, graphite, béryllium, etc.),
— le réfrigérant (eau, gaz, sel fondu, métal liquide, etc.),
— l'utilisation du réacteur (expérimental, de propulsion marine, électrogène, chauffage de locaux ou de procédés industriels).

Plus rarement, ce classement fait apparaître :
— l'énergie des neutrons, la puissance du réacteur ou la température du fluide de refroidissement,
— le type de combustible solide (uranium naturel, oxyde ou carbure), en solution dans un sel ou en suspension.

Étant donné la grande diversité des réacteurs, aucun classement n'est simple, mais celui qui s'impose le mieux, car il fait appel à une technologie de base pour l'ensemble du circuit primaire, est le type de réfrigérant — classement à l'intérieur duquel apparaîtraient des sous-classes. Cependant, les réacteurs de recherche, souvent de type piscine, car l'accès au cœur y est plus aisé, sont toujours restés en dehors de ce classement. En dehors de ceux-ci, on pourra citer :

— Les réacteurs à gaz : CO_2, vapeur d'eau, N_2O_4, hélium; ce dernier type est particulièrement adapté pour les très hautes températures au-delà de 600 °C. Ce sont les réacteurs thermiques types UNGG *(Uranium Natural Graphite Gas)*, AGR *(Advanced Gas Reactor)* ou HTR *(High Temperature Reactor)* ou les réacteurs rapides à gaz.

— Les réacteurs à eau, eau légère ou eau lourde, le modérateur pouvant lui-même être du graphite, de l'eau

légère ou de l'eau lourde. Citons les PWR *(Pressurized Water Reactor)* et les BWR *(Boiling Water Reactor)*, le SGHWR *(Steam Generating Heavy Water Reactor)* en Grande-Bretagne ou la filière canadienne CANDU.

— Les réacteurs rapides à métal liquide : sodium ou sodium-potassium.

— Les réacteurs à sels fondus — halogénure de béryllium et lithium au sein duquel est dissous le combustible — à cœur homogène ou hétérogène (modéré au graphite).

— Les réacteurs à liquides organiques dont les études ont été arrêtées.

Nous donnerons seulement ici les caractéristiques des réacteurs expérimentaux; les réacteurs à caractère industriel seront étudiés en *Technologie*.

Réacteurs expérimentaux

Les phénomènes complexes engendrés dans les réacteurs nucléaires ne sont pas encore tous connus de façon très précise, et bon nombre de réacteurs ont été construits dans le dessein d'améliorer la connaissance de ces phénomènes. Parmi les réacteurs expérimentaux, on peut distinguer ceux qui sont destinés à préciser les caractéristiques neutroniques d'un type de réacteur, ce sont des maquettes critiques de très faible puissance, dont un exemple est la pile Minerve, et ceux destinés à l'étude de l'interaction des rayonnements et de la matière, par exemple Osiris. Rappelons enfin les divers réacteurs prototypes construits en vue d'étudier le fonctionnement d'un réacteur de puissance : G1 : pour les réacteurs UNGG (Marcoule) ; PAT : pour les réacteurs de propulsion navale (PWR) (Cadarache) ; EL4 : pour les réacteurs à eau lourde-gaz (Brennilis) ; Rapsodie : pour les réacteurs à neutrons rapides (Cadarache).

Minerve

Située pour l'instant au Centre d'études nucléaires de Fontenay-aux-Roses avant sa réinstallation au Centre d'études nucléaires de Cadarache, la pile Minerve, réacteur de recherche destiné à des mesures fines de physique, est du type pile piscine avec combustible en plaque d'alliage uranium enrichi-aluminium. Sa principale originalité réside en une cavité centrale carrée de dimensions variables de 0 à 900 mm qui permet d'y effectuer aussi bien des mesures de sections efficaces dans un canal de faible dimension que des études sur des portions de réseaux de réacteurs à neutrons thermiques ou rapides. Le cœur de puissance très faible et immergé sous 3 mètres d'eau est utilisé comme zone nourricière pour les différentes expériences qui sont placées au centre de la cavité (*fig.* 9).

Minerve est destinée essentiellement aux études de neutroniques, particulièrement spécialisée dans la technique d'oscillation délicate et très précise ; à cette fin, elle est équipée d'un oscillateur électromécanique vertical à performances élevées, d'un pilote automatique de grande précision de mesure de variation de réactivité. Les autres installations particulières permettent les mesures de l'effet Doppler, les mesures d'indices de spectre, des mesures de phénomènes dynamiques ou aléatoires.

Depuis sa mise en service en 1959, Minerve a servi pour des expériences de détermination de sections efficaces thermiques et d'intégrales de résonance, puis pour des études sur le recyclage du plutonium dans le cadre de la filière des réacteurs à uranium naturel ; ces études étaient effectuées dans une portion de réseau à uranium naturel-eau lourde. Ensuite, le réacteur a été utilisé pour des études de la filière à neutrons rapides grâce à la réalisation d'assemblages critiques thermiques-rapides, en particulier pour la mesure des sections efficaces effectives des isotopes supérieurs du plutonium et la capture globale des produits de fission. L'ensemble des résultats fournis est utilisé pour l'amélioration des méthodes de calcul neutronique des projets de réacteurs.

Actuellement, le réacteur est utilisé à 50 % pour des études de la filière à eau ordinaire : mesures de la section globale de capture des produits de fission, études sur les poisons absorbants et sur le recyclage du plutonium dans les réacteurs à eau. La grande variété des études qui se sont développées grâce à Minerve constitue pour les ingénieurs et les physiciens un réel intérêt au niveau de la recherche, et de nombreux étudiants y ont préparé leur thèse. Cet aspect universitaire constitue aussi une part importante des activités.

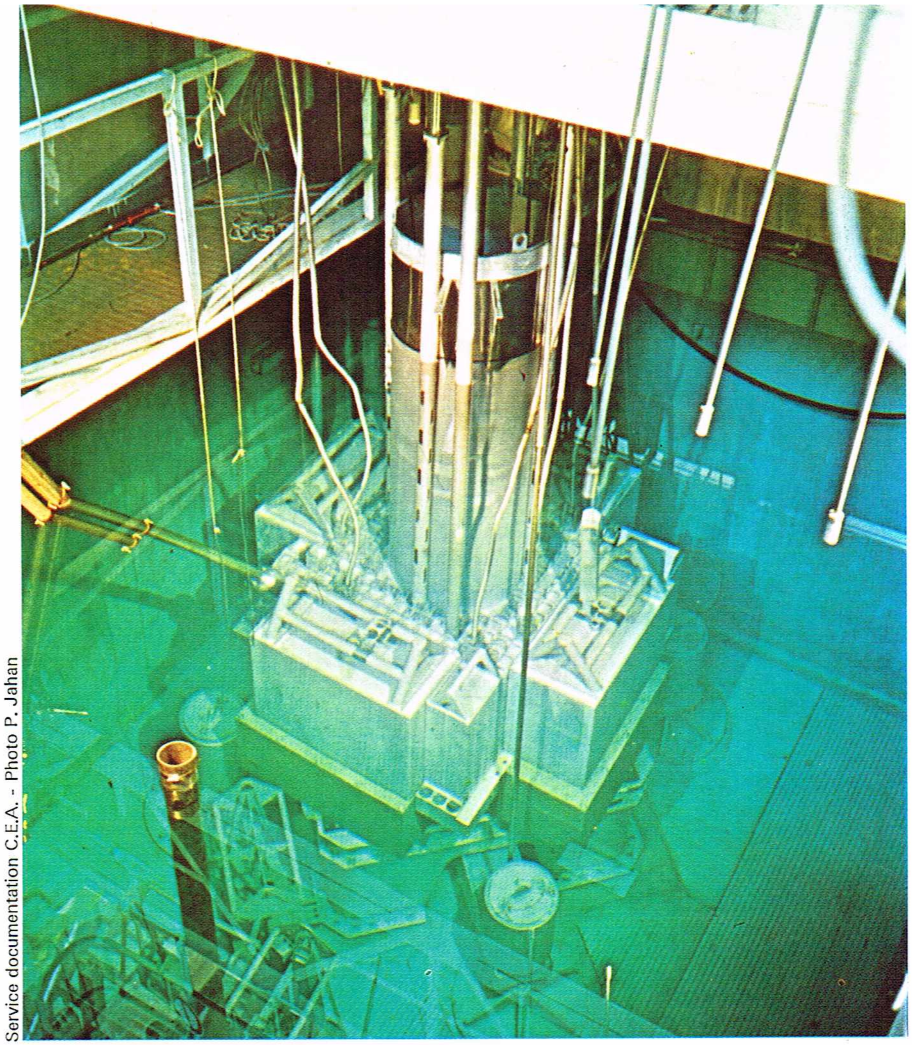

Service documentation C.E.A. - Photo P. Jahan

▲ ***La pile* Minerve, *réacteur de recherche destiné à des mesures fines de physique, est du type « pile piscine » avec combustible à plaques d'alliage uranium enrichi - aluminium.***

▼ ***Le réacteur* « Ispra I » *est du type thermique électrogène à uranium enrichi, modéré et réfrigéré à l'eau lourde.***

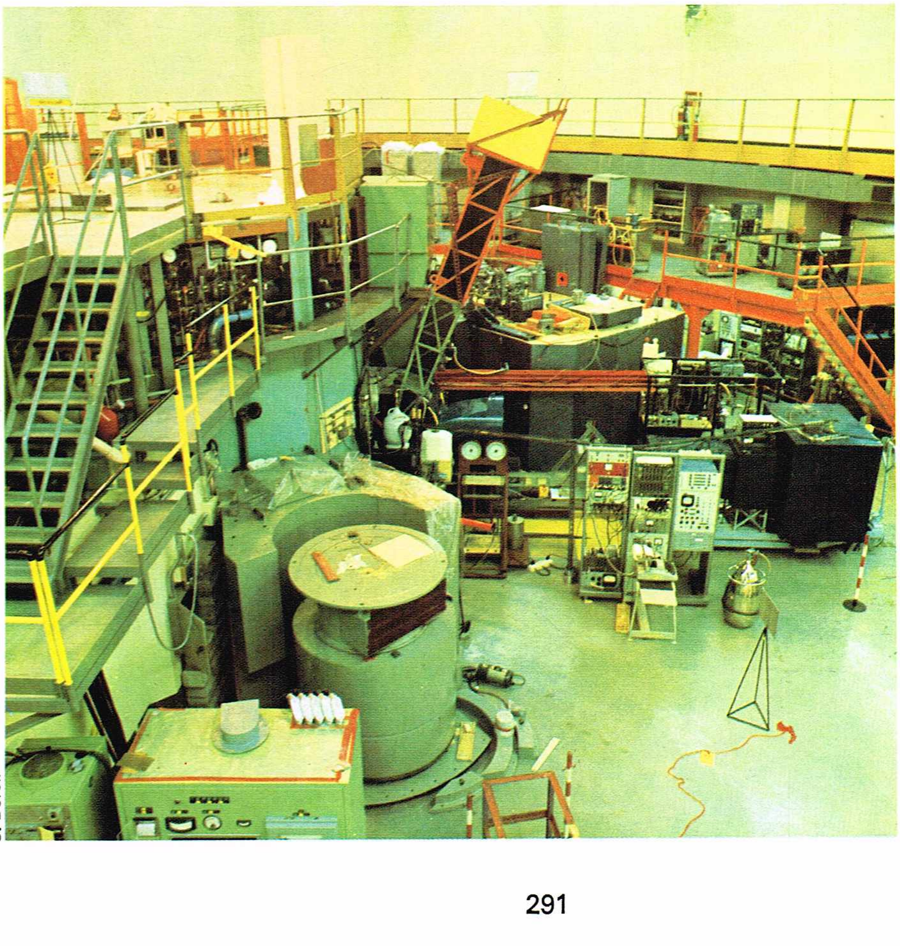

S. Boroli

fig. 9

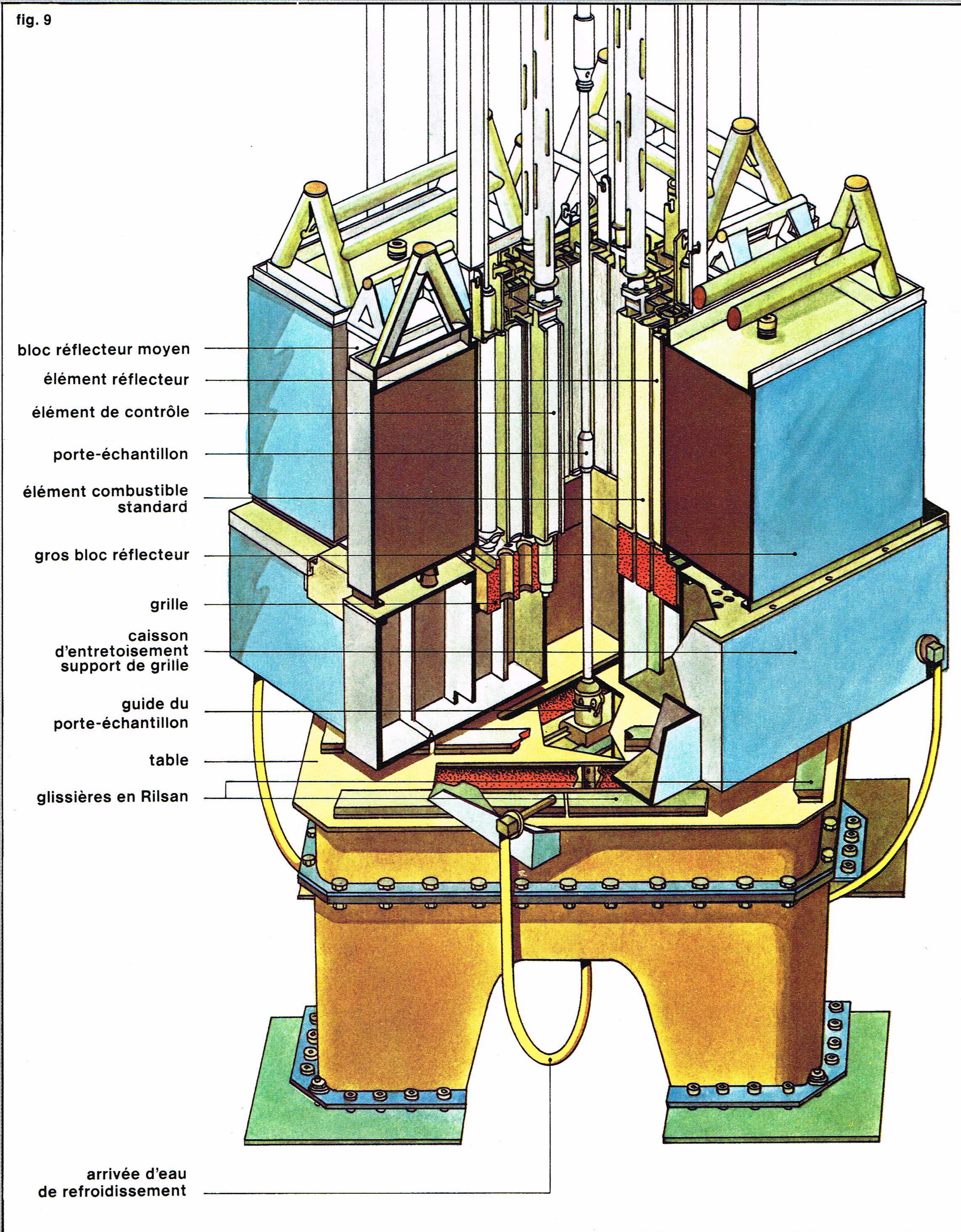

Redessiné Richard Colin

Osiris

Implanté au Centre d'études nucléaires de Saclay, le réacteur Osiris marque une étape dans la recherche des hautes performances liées à la simplicité d'emploi. Osiris appartient à la famille des « piles piscines » où l'eau sert à la fois de modérateur, de refroidisseur et de protection biologique. Il bénéficie à ce titre de commodités expérimentales propres à ce type de réacteur. Le cœur d'Osiris est refroidi par une circulation ascendante d'eau, séparée de l'eau de la piscine par une cheminée. Cette disposition permet de s'affranchir des limitations de puissance inhérentes aux piles piscines et de mettre ainsi à la disposition des utilisateurs des flux de neutrons particulièrement intéressants :

— la puissance nominale est de 70 MWth ;

— le flux maximal en neutrons thermiques est de $3{,}7 \cdot 10^{14}$ n/cm²/s ;

— le flux maximal en neutrons rapides est de $2{,}6 \cdot 10^{14}$ n/cm²/s.

Le combustible est constitué par de l'uranium enrichi à 93 % en U 235 sous forme de plaques en alliage uranium-aluminium gainées d'aluminium. Le cœur, qui a approximativement la forme d'un cube de 60 cm de côté, est contenu dans un caisson composé de plaques de Zircaloy. Le caisson (il y a 56 alvéoles pour les combustibles, les éléments de contrôle et les expériences) contient en outre les éléments de contrôle et les expériences situées à l'intérieur du cœur. Le bloc cœur et les tuyauteries d'alimentation sont placés dans une piscine de 7 × 6 mètres et de 11 mètres de profondeur.

Osiris est principalement destiné à l'étude du comportement des matériaux de structure et des combustibles sous irradiation neutronique ; à cet égard, il sert de banc d'essai pour les éléments de réacteurs en construction ou en projet pour toutes les filières de réacteurs étudiées par le CEA : les « neutrons rapides », « l'eau légère » et les « hautes températures ». Les échantillons de matériaux à irradier sont placés dans des montages spéciaux qui peuvent se présenter sous deux formes :

— des dispositifs de dimensions assez importantes (boucles, capsules) conçus pour un essai bien déterminé et qui sont démantelés dans les cellules chaudes d'Osiris ;

— des navettes standards de petites dimensions transportées par un procédé hydraulique ou pneumatique vers des laboratoires spécialisés indépendants d'Osiris, tel le Laboratoire d'analyse par activation.

Ces dispositifs peuvent être irradiés dans de nombreux emplacements en pile, soit à l'intérieur, soit en dehors du caisson de cœur.

Osiris sert en outre pour la production de radio-éléments. L'ensemble Osiris comprend également une pile critique *Isis* dont la puissance est limitée à quelques centaines de kW. Isis est destinée à décharger Osiris de tous les essais neutroniques relatifs aux configurations du cœur, à la dosimétrie des expériences, aux mesures de flux et aux effets de réactivité.

Les réacteurs à gaz

Les réacteurs nucléaires à refroidissement par gaz ont été les premiers réacteurs électrogènes développés en France à partir des connaissances acquises par les réacteurs plutonigènes G2 (1959) et G3. Les études de la filière UNGG (combustible : uranium naturel, modérateur graphite, caloporteur gaz carbonique) se sont poursuivies jusqu'en 1968, date à laquelle l'E. D. F. a réorienté son programme nucléaire vers les réacteurs à eau. A l'heure actuelle, le parc de l'E. D. F. compte 5 réacteurs de ce type en fonctionnement en France, Chinon 2 et 3, Saint-Laurent 1 et 2, Bugey 1 et en Espagne Vandellos.

Saint-Laurent 1, situé sur les bords de la Loire, délivre une puissance de 500 MWe. Tout le circuit primaire est intégré dans un caisson en béton précontraint. Les échangeurs de chaleur sont situés sous le cœur qui est supporté par une aire en acier. Reposant sur cette aire, l'empilement est constitué de briques de graphite de section droite hexagonale, clavetées entre elles. Les éléments combustibles sont des barreaux d'uranium (43 mm de diamètre) comportant un noyau central en graphite et gainés d'une enveloppe en magnésium dont la surface est ailetée pour améliorer les échanges thermiques. L'empilement est percé de 3 000 canaux qui comportent chacun 15 éléments combustibles de 600 mm de long.

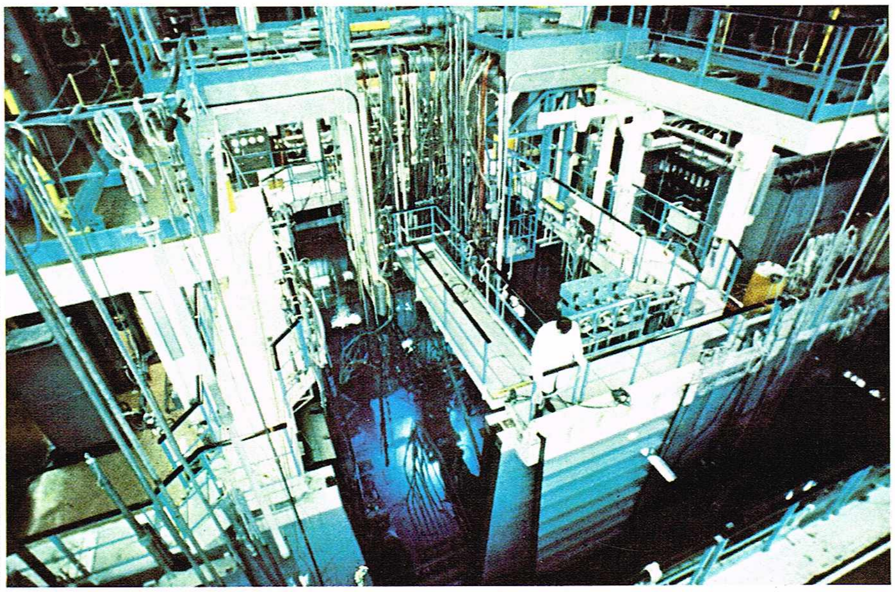

Service documentation C.E.A. - Photo P. Jahan

▲ **Osiris** *appartient à la famille des « piles piscines » où l'eau sert à la fois de modérateur, de refroidisseur et de protection biologique.*

◀ *Page ci-contre, perspective éclatée de l'ensemble du cœur du réacteur* **Minerve.**

▼ *Les centrales jumelles de Saint-Laurent-des-Eaux appartiennent à la famille des réacteurs nucléaires à refroidissement par gaz.*

D. Berretty - Rapho

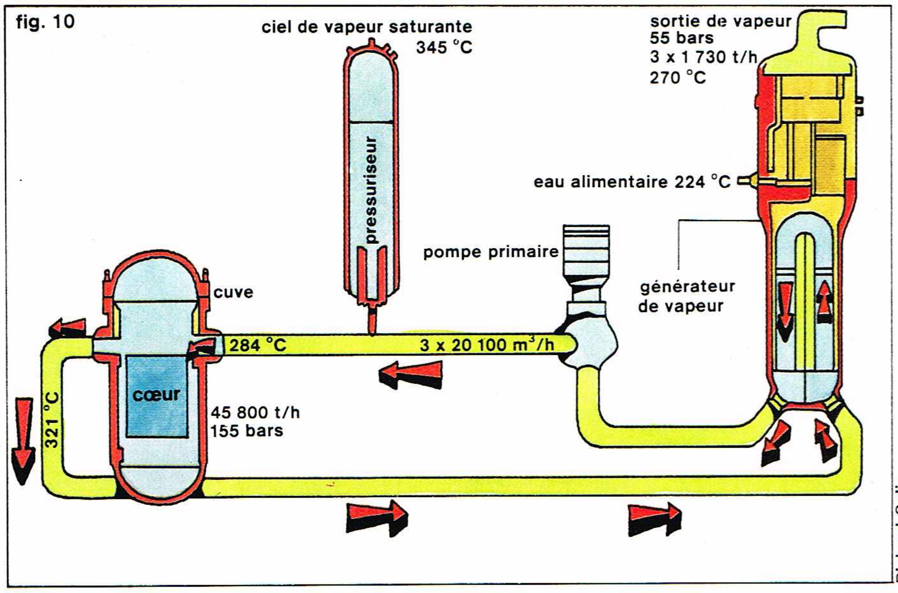

▲ *Figure 10 : représentation schématique d'une boucle du circuit primaire dans une chaudière à eau sous pression.*

▼ *Le réacteur nucléaire* AGR *de Windscale (Grande-Bretagne) utilise le graphite comme modérateur et le* CO_2 *comme réfrigérant.*

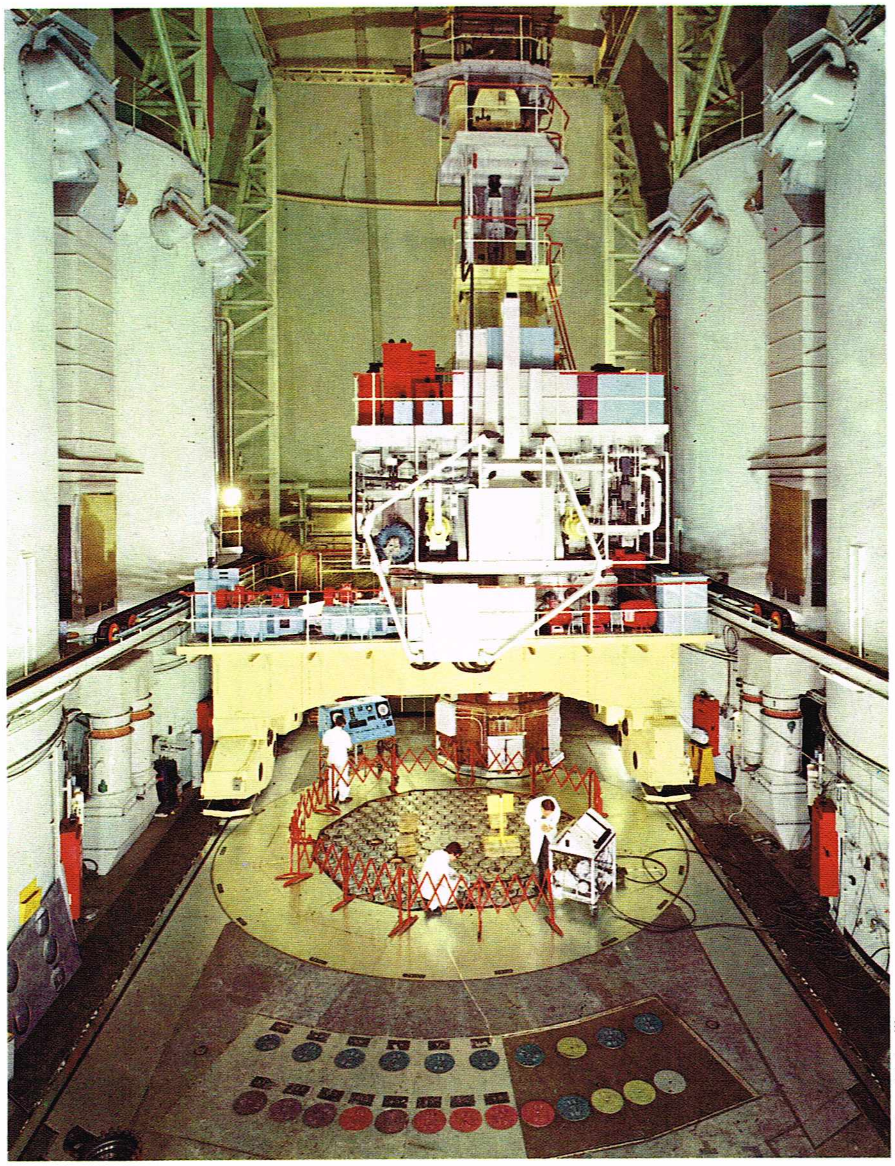

La chaleur est extraite du cœur par un débit de 350 m³/s de CO_2 sous 28 bars qui s'échauffe de 225 °C à 400 °C. Cette chaleur est cédée à travers les échangeurs au circuit d'eau qui sort du réacteur une vapeur à 390 °C et 36 bars. Cette vapeur est détendue dans la turbine, passe au condenseur et retourne aux générateurs de vapeur, décrivant un cycle thermodynamique dont le rendement brut est de 30 %.

Dans la lignée des réacteurs à gaz, les **réacteurs de type HTR** *(High Temperature Reactor)* virent leur première réalisation dans le réacteur expérimental Dragon à Winfrith en Grande-Bretagne (1964) qui fut construit dans le cadre de l'Euratom. Lui succédèrent les réacteurs AVR en Allemagne (élément combustible à boulet) et Peach Bottom aux États-Unis. Aujourd'hui, le réacteur prototype de Fort-Saint-Vrain (300 MWe) en est à sa phase de démarrage, et, en Allemagne, un prototype (300 MWe) de technologie AVR est en construction.

Les offres qui sont faites actuellement aux producteurs d'électricité (1 200 MWe) reposent sur l'élément combustible prismatique. L'empilement des briques prismatiques, cœur entouré de ses réflecteurs axiaux et latéraux, repose sur le fond du caisson en béton précontraint par l'intermédiaire de gros blocs supportant plusieurs colonnes. Chaque gros bloc est soutenu par des piliers en graphite qui prennent appui sur le calorifuge du caisson (briques de silice fondue). A la partie supérieure, chaque groupe de 7 colonnes est coiffé d'un système permettant de régler le débit localement. L'hélium à 50 bars circule dans le cœur de haut en bas et s'échauffe de 340 à 740 °C.

Les générateurs de vapeur sont situés dans des puits disposés dans l'épaisseur du caisson. A la sortie du cœur, l'hélium est dirigé vers ces échangeurs qu'il traverse avant de retourner à l'entrée du cœur. Tout le circuit primaire est donc intégré dans le caisson, mais selon une disposition qui diffère de celle de Saint-Laurent 1.

Grâce à ces hautes températures, les rendements thermodynamiques sont élevés (39 %), de plus la possibilité du cœur HTR de fournir de l'hélium à très haute température, 1 000 °C et sans doute au-delà, peut être mise à profit en détendant directement l'hélium dans une turbine à gaz, ce qui permet de très haut rendement et une chaleur de rejet à 200 °C, donc encore utilisable pour les besoins industriels ou de chauffage.

Dans les procédés industriels (sidérurgie, gazéification du charbon, raffinage du pétrole, etc.), les HTR sont l'objet d'études avancées qui devraient déboucher dans un avenir proche.

Les réacteurs à eau ordinaire

Réacteurs à eau sous pression

L'extraction des calories de l'eau s'effectue en phase liquide. L'eau circulant dans le cœur est confinée dans un circuit étanche où elle est maintenue à une pression supérieure à la pression de saturation correspondant à sa température moyenne. Dans le circuit primaire, l'eau cède sa chaleur à l'eau du circuit secondaire eau-vapeur à travers un générateur de vapeur.

La *figure* 10 présente un schéma de principe d'une chaudière à eau sous pression : on y observe la cuve et un pressuriseur fonctionnant à vapeur saturante associés à une boucle primaire. La boucle comporte l'ensemble des organes associés à un générateur de vapeur, c'est-à-dire une ou deux pompes de circulation, les tuyauteries primaires correspondantes et éventuellement les vannes d'isolement.

La pression du fluide primaire est de 155 bars pour une température de fonctionnement de 325 °C à la sortie cœur (inférieure de 20 °C à la température de saturation).

Dans le générateur de vapeur, la vapeur produite dans le circuit secondaire est à une température d'environ 270 °C à la pression de saturation qui lui correspond (environ 55 bars), et est ensuite envoyée à la turbine. Ces caractéristiques ont tendance à évoluer vers des valeurs plus élevées.

Le rendement du cycle thermodynamique est inférieur à celui des chaudières classiques malgré une resurchauffe de la vapeur après l'étage haute pression. Le rendement théorique selon le cycle de Carnot serait d'environ 42 %, le rendement réel étant de l'ordre de 33 à 35 %. Il dépend évidemment du site, c'est-à-dire de la température de refroidissement de la source froide (rivière ou tour de réfrigération).

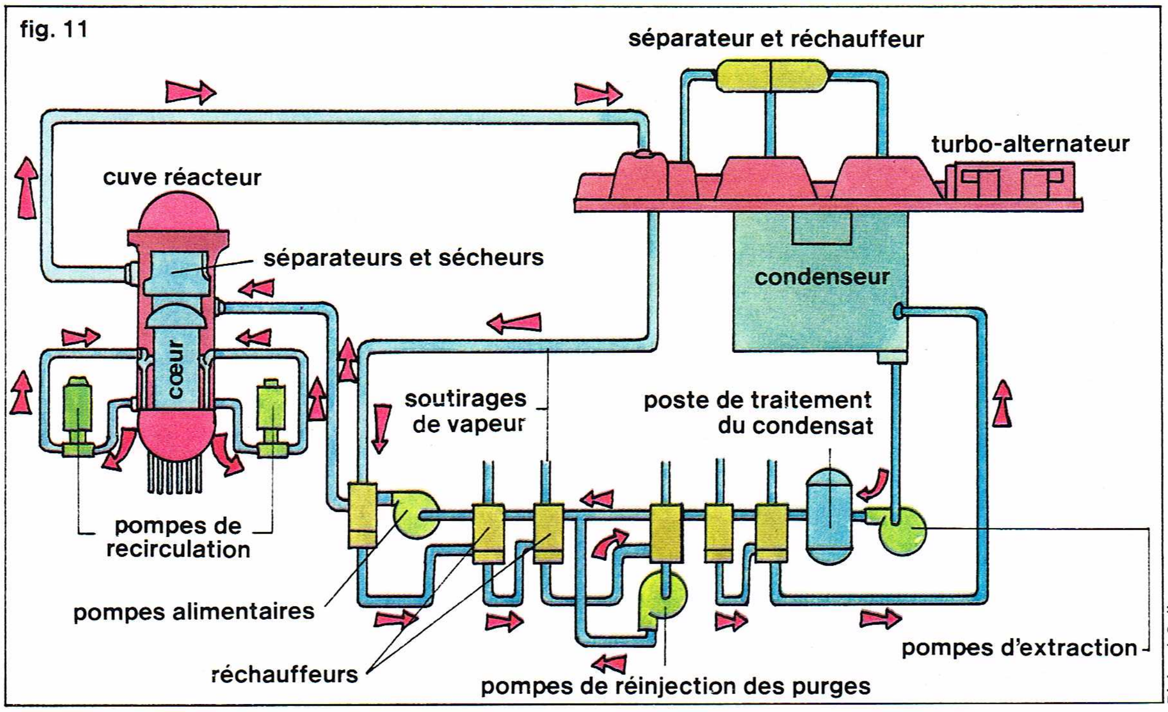

Richard Colin

◀ ***Figure 11 : représentation schématique d'un réacteur* BWR *à cycle simple.***

Le principe de confinement du circuit primaire permet d'éviter toute transmission de produits actifs (produits de fission et produits de corrosion) vers la turbine.

Réacteur à eau bouillante

On produit la vapeur dans le cœur du réacteur, et on l'utilise directement dans une turbine, réalisant ainsi un réacteur bouillant à cycle direct.

La *figure* 11 présente un schéma général comprenant une cuve et ses deux boucles de recirculation de l'eau (chaudière à circulation forcée) ; la vapeur est produite à une pression de 70 bars et à la température de saturation de 285 °C.

L'eau entraînée par la vapeur est séparée dans des séparateurs type cyclone. Le circuit d'utilisation de la vapeur est conçu pour faire face aux risques de contamination soit par les produits de fission gazeux entraînés par la vapeur, soit par les produits de corrosion actifs entraînés par l'eau restant dans la vapeur (taux d'humidité 3 °/₀₀, soit 17 t/h d'eau entraînée pour un BWR 980 MWe) ; soit par l'activation de l'oxygène, d'une part celui contenu dans l'eau alimentaire (les spécifications de *General Electric* pour le BWR 6 imposent une teneur < 200 ppb), d'autre part celui provenant de la décomposition radiolytique de l'eau (la quantité de gaz formé est d'environ 3 l/mn — MWe à TPN).

On notera cependant que l'activation de l'oxygène par les neutrons rapides ($O_8^{16} + n_0^1 \rightarrow N_7^{16} + P^1$) conduit à la formation d'azote 16 de demi-vie de 7,3 secondes avec émission de γ très actifs de 6 à 7 MeV (action certaine au niveau de l'étage HP de la turbine).

Le rendement théorique d'un BWR, selon le cycle de Carnot, est comparable à celui d'un PWR (45 %) ; il en est de même pour le rendement réel (34 %).

Ces deux types de réacteur rejettent à la source froide, c'est-à-dire, à l'eau de refroidissement, une plus grande quantité de chaleur que les chaudières classiques. Il en résulte une quantité d'eau de refroidissement nécessaire d'environ 200 l/kWh au lieu de 140 l/kWh ; de plus, la réglementation actuelle, qui limite la température de rejet à 30 °C et l'échauffement à 10 °C, conduit à envisager d'autres moyens de réfrigération que les fleuves (sites en bord de mer, tour de réfrigération).

Compacité des réseaux et puissance spécifique

Comparée à d'autres modérateurs, l'eau a un « pouvoir modérateur » élevé ; par exemple, il faut 7 fois moins de chocs à un neutron de fission (2 MeV) pour être ralenti jusqu'à l'énergie thermique dans l'eau que dans le graphite. Cette qualité permet de réaliser des réseaux compacts où le rapport de volume de modérateur au volume du combustible est relativement faible : 2,15 (PWR) et 2,75 (BWR), la différence est liée à la différence de densité du fluide de refroidissement entre PWR et BWR.

Les puissances spécifiques élevées de 100 MW/m³ (PWR) et 56 MW/m³ (BWR) permettent de réaliser des cuves compatibles avec les possibilités de réalisation industrielle, cuve de l'ordre de 4 m de diamètre et de 12 m de hauteur pour un PWR, et de 5,50 m de diamètre et de 21 m de hauteur pour un BWR, pour des puissances thermiques de 2 700 à 2 900 MWth. Ces cuves, devant résister à la pression, ont des épaisseurs d'environ 13 cm (BWR) à 22 cm (PWR).

Différences entre PWR et BWR

Les différences essentielles tiennent au fait que les PWR sont des réacteurs à cycle indirect, alors que les BWR utilisent un cycle direct.

Dans un PWR, l'eau du circuit primaire reste dans un espace limité où l'on peut facilement, en dehors des conditions accidentelles, assurer son confinement ainsi que celui des éléments radio-actifs qu'elle véhicule : cette eau est épurée et conditionnée par maintien à un pH basique et injection d'hydrogène pour limiter la teneur en oxygène formé par décomposition radiolytique de l'eau. On a pu utiliser des gainages inoxydables sans problème à un moment où le zirconium était encore cher, toutefois, pour des raisons d'économie neutronique, les combustibles modernes sont gainés par du Zircaloy. Comme le fluide primaire ne change pas de phase, on utilise un poison soluble pour contrôler la réactivité, le bore : du fait de réactions secondaires conduisant au tritium, ce bore est une source de contamination (quelques centaines de curies par an pour une centrale de 1 000 MW) : les gaz radio-actifs (gaz rares provenant d'un élément combustible défaillant) sont dans leur majorité récupérés dans le circuit de conditionnement d'eau.

Le développement relativement important du circuit primaire rend nécessaire la construction d'une enceinte de grande dimension pour assurer le confinement des produits radio-actifs en cas de ruptures des tuyauteries du circuit primaire.

Dans un BWR, une partie de l'eau circulant dans le cœur se retrouve dans la turbine, traverse le condenseur et divers échangeurs de chaleur avant de retourner dans le cœur : c'est dans le condenseur que l'on retrouve les éventuels produits radio-actifs gazeux provenant du réacteur.

Il y a donc lieu :

— de protéger la turbine et une partie du poste d'eau qui sont des zones à accès contrôlés ;

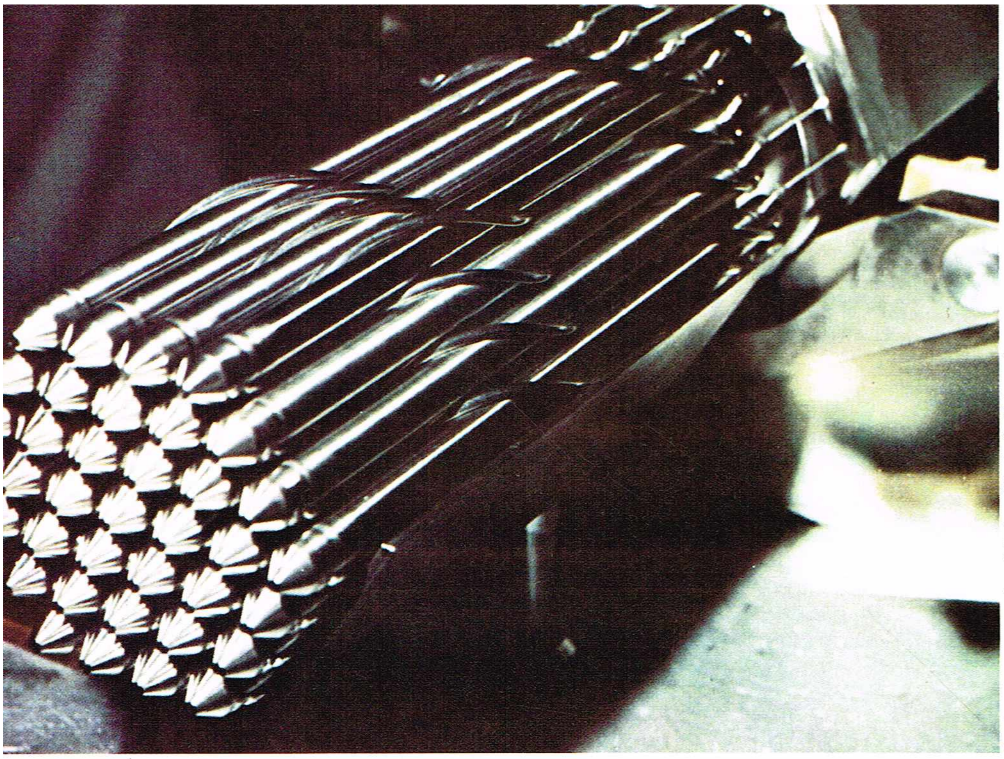

Service documentation C.E.A. - Photo G. Tabourdeau

▲ *L'assemblage combustible du surrégénérateur* Phénix, *mis en service en 1973 (France). Partie haute correspondant aux aiguilles fertiles seules.*

▼ Phénix : *le caloporteur est le sodium. Les circuits principaux, qui font circuler le sodium dans le circuit secondaire, sont équipés de pompes mécaniques et d'échangeurs tubulaires de plusieurs centaines de tubes (les échangeurs intermédiaires seuls sont dans la cuve du réacteur).*

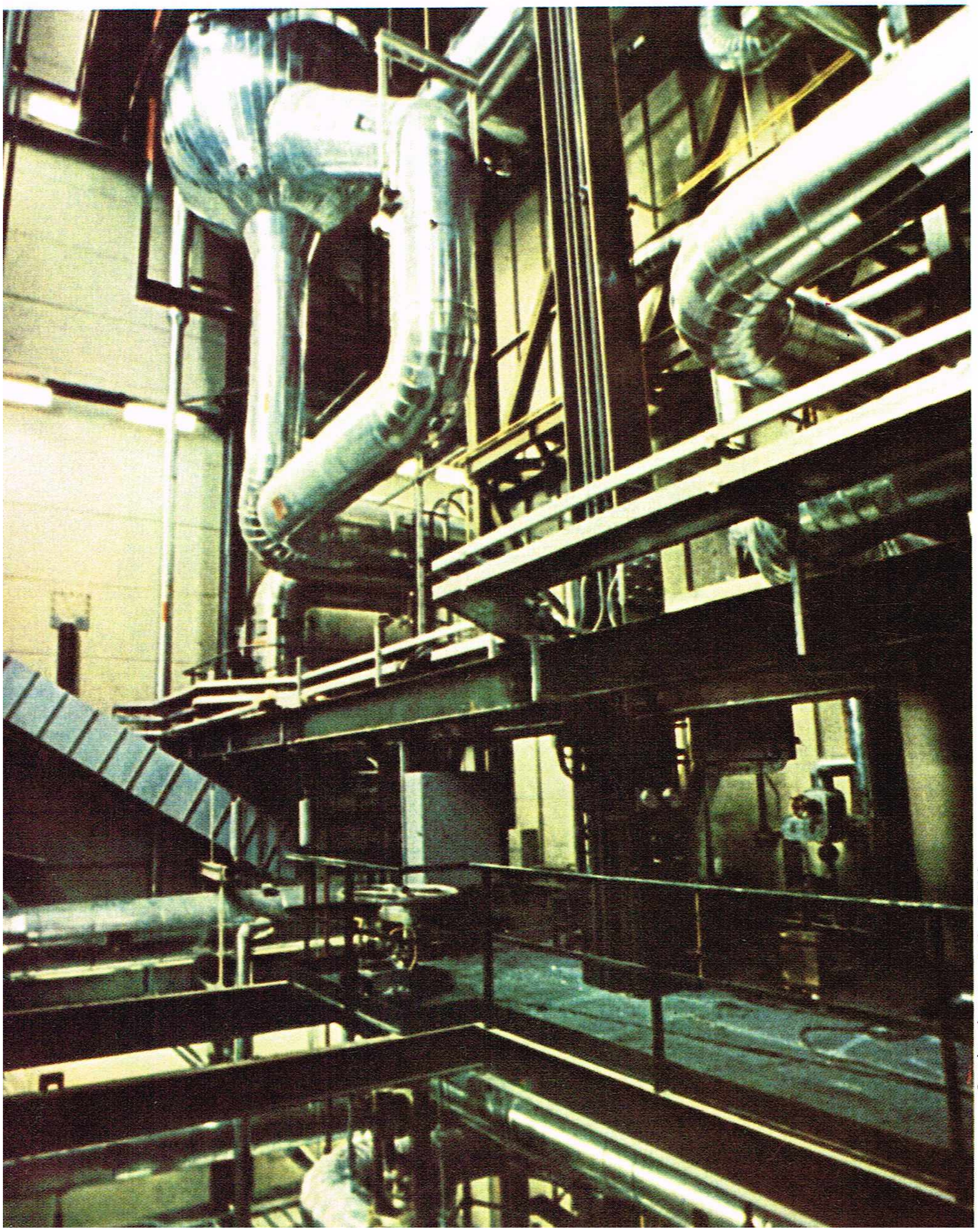

Service documentation C.E.A.

— de surveiller l'activité des gaz extraits du condenseur et de prévoir des stockages tampons avant le rejet des gaz à la cheminée ; dans les réacteurs en service, l'activité rejetée par les réacteurs bouillants est supérieure de 2 ou 3 décades à celle des réacteurs pressurisés ; l'activité rejetée reste très largement inférieure aux valeurs autorisées ;

— de procéder à une épuration de la totalité du débit alimentaire pour éviter d'envoyer dans la cuve des corps susceptibles de s'activer.

On procède par ailleurs à une épuration de l'eau de la cuve, mais on ne la conditionne pas ; l'emploi du Zircaloy pour le gainage est pratiquement nécessaire, les essais d'utilisation de l'acier inoxydable ayant donné de mauvais résultats.

Pour permettre le confinement des produits radioactifs, on dispose sur *la tuyauterie vapeur et d'eau alimentaire* de vannes d'isolement à fermeture rapide au passage de l'enceinte. On notera que le développement du circuit primaire extérieur à la cuve est suffisamment limité pour permettre l'utilisation d'une enceinte de dimensions réduites en utilisant le concept de « suppression de pression » qui consiste à envoyer la vapeur dans une piscine pour favoriser sa condensation lors d'une rupture du circuit primaire.

Les réacteurs surrégénérateurs

La surrégénération : son intérêt pour une meilleure utilisation de l'uranium

Les réacteurs surrégénérateurs, à la différence des autres, n'utilisent pas le ralentissement des neutrons pour favoriser le maintien de la réaction en chaîne. Les neutrons à haute énergie non seulement provoquent la fission des atomes d'uranium 235 comme dans les autres réacteurs, mais ils extraient également de l'énergie de l'uranium 238, soit directement par une réaction de fission qui n'est possible qu'au-delà d'un certain seuil d'énergie, soit en le convertissant en plutonium 239 qui est fissile à toutes énergies. La fission de l'uranium 238 ne se produit que dans les réacteurs rapides. La conversion de l'uranium en plutonium existe par contre dans tous les réacteurs. Cependant le taux de cette conversion ne peut être supérieur à l'unité que dans les réacteurs rapides. Ce phénomène est appelé la surrégénération.

La conséquence sur l'utilisation de l'uranium est d'une importance capitale. Les réacteurs thermiques ne peuvent employer pour produire de l'énergie que l'uranium 235 et une faible proportion de l'uranium 238 (au total environ 2 % de l'uranium dans le meilleur des cas, celui des réacteurs à eau lourde), alors que les réacteurs rapides transforment en énergie la totalité de l'uranium. Pouvant extraire de la même masse d'uranium une énergie plus de cinquante fois supérieure, ils permettent d'économiser considérablement les ressources, et en même temps de minimiser l'influence de l'augmentation de prix de l'uranium.

Les caractéristiques fondamentales

Pour que le maintien de la réaction en chaîne soit possible sans que les neutrons soient ralentis, le cœur d'un surrégénérateur doit être constitué de matière fissile très enrichie, environ 15 % pour un grand réacteur. Il faut pour raison économique en extraire une forte puissance. Or, du fait qu'il n'y a pas de modérateur, le volume du cœur est relativement petit. Il découle de ces deux considérations que la densité de puissance est très élevée, environ 500 kW/l.

Cette caractéristique impose le choix d'un caloporteur de hautes performances thermiques. Toutes les réalisations et tous les projets existant actuellement emploient comme réfrigérant le sodium dont les propriétés nucléaires et hydrauliques sont satisfaisantes et les caractéristiques thermiques remarquables. En particulier, sa température d'ébullition étant de 880 °C à la pression atmosphérique, il permet d'obtenir des températures élevées dans des circuits sans pression, en conservant une grande marge de sécurité pour éviter l'ébullition. De cette constatation découlent deux autres caractéristiques des surrégénérateurs refroidis au sodium : du fait de la température élevée, la possibilité de produire de l'énergie électrique avec un rendement excellent, supérieur à 40 %, et du fait de l'absence de pression, la possibilité de construire des centrales de très grande puissance unitaire.

Par ailleurs, comme la surrégénération assure le renouvellement de la matière fissile à mesure qu'elle est brûlée, le temps de séjour en pile des assemblages combustibles n'est limité que par l'importance des dommages qu'ils subissent à long terme du fait de l'irradiation. Pour raison économique également, un taux de combustion élevé, nécessaire pour un long séjour en pile, est une autre exigence des surrégénérateurs. Le but à atteindre se situe vers 120 000 MWj/t ou, si on l'exprime en pourcentage d'atomes brûlés, vers 14 %. Or le flux neutronique est beaucoup plus élevé que dans les autres réacteurs. Les gaines des aiguilles combustibles et les structures de leurs assemblages doivent donc avoir une excellente tenue sous irradiation.

Les caractéristiques technologiques

— *Le caloporteur*

Le caloporteur est, comme il a été dit plus haut, le sodium. Ce métal fond à 98 °C et bout à 880 °C à la pression atmosphérique. Sa chaleur spécifique est 0,3 $cal \cdot g^{-1}\,°C^{-1}$ et sa conductibilité thermique 0,7 $W \cdot cm^{-1}\,°C^{-1}$. A la condition de préchauffer la totalité des circuits, il est facile d'y introduire le sodium à l'état liquide, après quoi il est maintenu en permanence dans cet état.

Le sodium peut être pompé par des pompes mécaniques et aussi par des pompes électromagnétiques qui utilisent le principe du moteur électrique. A cause de leur faible rendement, les pompes électromagnétiques ne sont employées que sur des circuits auxiliaires. Les circuits principaux sont équipés de pompes mécaniques.

Les propriétés nucléaires du sodium sont acceptables, car il ne ralentit pas trop les neutrons et ne les capture pas trop. Cependant, à son passage dans le cœur, il s'active, l'isotope 23 qui constitue la totalité du sodium naturel se transformant en isotope 24 ou, dans une beaucoup plus faible proportion, en isotope 22, tous les deux émetteurs de rayons γ durs, le premier de période 15 heures et le second de période 2 ans et demi.

Pour éviter son oxydation, le sodium doit être tenu à l'abri de l'air et donc couvert par un gaz neutre (argon ou hélium). La réaction chimique du sodium avec l'eau est violente. Les générateurs de vapeur sont construits avec de grandes précautions en utilisant l'expérience acquise au cours de très nombreux essais pour éviter le contact entre l'eau et le sodium. Cependant le risque d'une réaction entre eau et sodium primaire actif n'est pas accepté, on interpose donc des circuits secondaires de sodium assurant le transfert de chaleur entre l'ensemble cœur-circuit primaire du réacteur et les générateurs de vapeur.

L'acier inoxydable est compatible avec le sodium à la condition que celui-ci ne contienne que peu d'impuretés. Une excellente étanchéité des circuits est nécessaire. Un degré satisfaisant de pureté est obtenu par une simple action physique qui consiste à refroidir le sodium à un niveau de température où la solubilité des impuretés est faible et à les filtrer.

— *La cuve et le circuit primaire*

La cuve est cylindrique avec un fond bombé. Elle comporte à sa partie inférieure le sommier qui supporte le cœur. Elle contient les pompes et les échangeurs intermédiaires. Les pompes font circuler le sodium dans le cœur — il passe entre les aiguilles combustibles à l'intérieur des assemblages — et dans les échangeurs intermédiaires. Ceux-ci sont des échangeurs tubulaires de plusieurs centaines de tubes. Le sodium est surmonté par de l'argon. La cuve est fermée à sa partie supérieure par un toit surmonté d'une dalle qui supporte les pompes, les échangeurs, les mécanismes de barres de commande et les dispositifs permettant la manutention des assemblages. Ce concept est dit « intégré », par opposition au concept à boucle où le circuit primaire est extérieur à la cuve du réacteur.

— *Circuits secondaires et générateurs de vapeur*

La technologie des circuits secondaires, semblable à celle du circuit primaire, est adaptée aux propriétés du sodium et aux exigences de son emploi qui ont été indiquées plus haut. Les générateurs de vapeur peuvent être de configurations diverses. Cependant, pour toutes les centrales construites ou en projet, ils sont du type à passe unique et à faible réserve de vaporisation.

Des considérations d'ordre technologique, économique et de sécurité portant sur les écarts de température et les surfaces d'échanges conduisent à adopter un cycle vapeur utilisant au mieux les possibilités de températures élevées qu'offrent le combustible et le fluide caloporteur. Le cycle vapeur auquel on aboutit est semblable à celui des centrales thermiques classiques. Les caractéristiques de la vapeur sont 180 bars et 490°, alors que la température du sodium primaire est 530° et celle du sodium secondaire 510°. Avec resurchauffe, le rendement thermodynamique atteint 41 %.

La sûreté

En ce qui concerne la sûreté, les surrégénérateurs ont des caractéristiques qui présentent des aspects très favorables : température de la gaine très inférieure à celle du point de fusion, fonctionnement à la pression atmosphérique ; et d'autres qui le sont moins : gaines soumises à un flux intense de neutrons, dimensions réduites des canaux de refroidissement. Les spécifications des projets, les systèmes de surveillance et d'arrêt et les règles d'exploitation tiennent compte de ces particularités.

Pour la prévention des accidents et la protection de l'environnement, les réacteurs à neutrons rapides satisfont aux mêmes impératifs et sont soumis aux mêmes réglementations que les autres.

▼ **Phénix :** ***les générateurs de vapeur sont pourvus d'un système de détection de fuite d'eau par mesure du taux d'hydrogène dans le sodium. Ces générateurs nécessitent une grande pureté de l'eau d'alimentation dont la totalité passe dans un poste de traitement.***

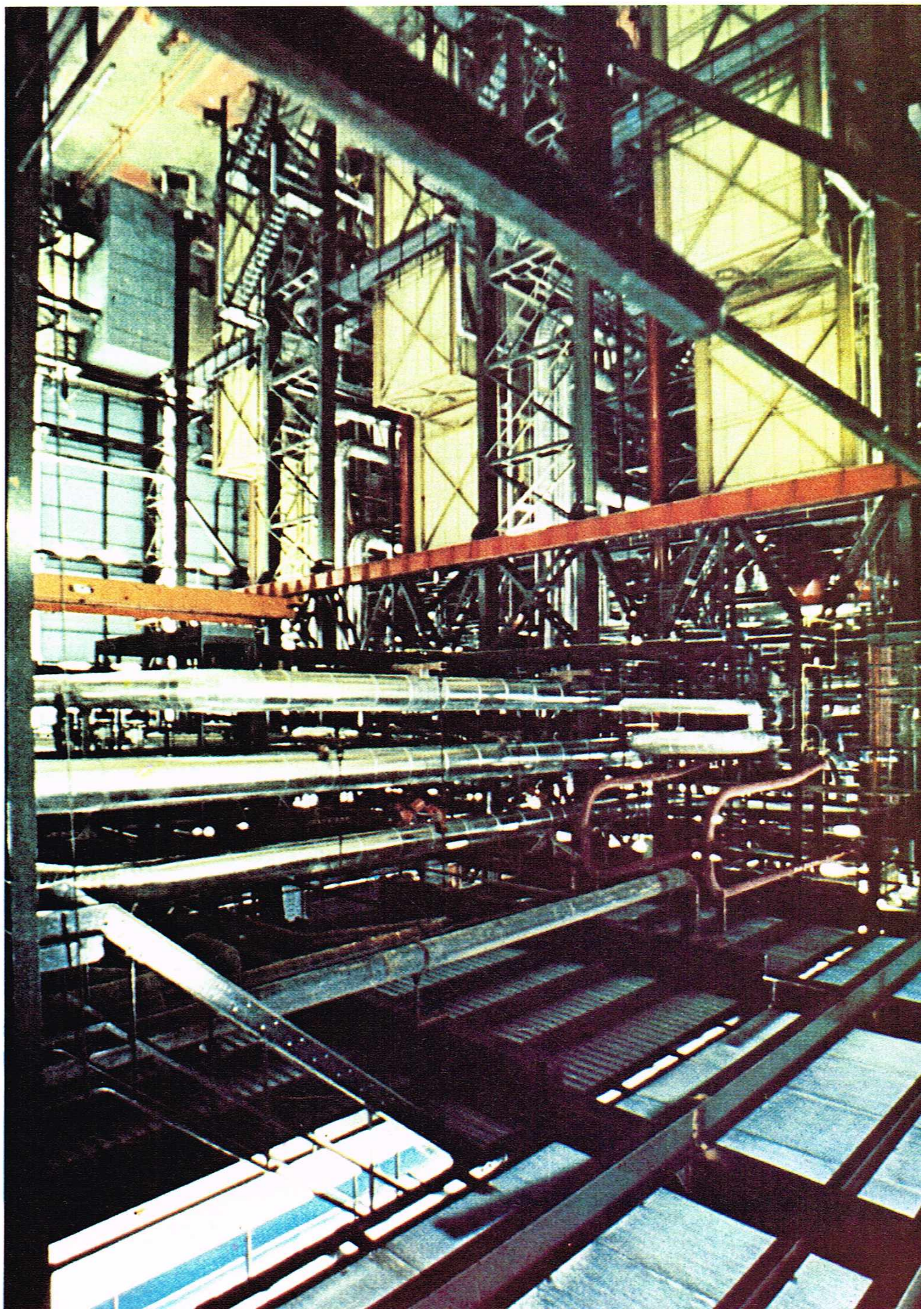

Service documentation C.E.A. - Photo P. Jahan

Le développement des surrégénérateurs

Dans une première phase, les surrégénérateurs doivent utiliser le plutonium fabriqué dans les autres réacteurs. Progressivement, la contribution du plutonium produit par les surrégénérateurs eux-mêmes augmentera. Leur développement cessera d'être lié aux autres filières et deviendra surtout fonction de leur propre « temps de doublement », temps nécessaire pour qu'un réacteur produise la quantité de plutonium nécessaire au fonctionnement d'un autre réacteur identique. On obtiendra très vraisemblablement avant la fin du siècle actuel des temps de doublement inférieurs à 20 ans. Si l'infléchissement prévisible de la courbe de croissance de la demande d'énergie se réalise, les réacteurs rapides pourront alors assurer la quasi-totalité de la production d'électricité nucléaire avec une consommation très faible d'uranium naturel.

D'assez nombreux pays ont déjà construit ou se préparent à construire des réacteurs expérimentaux et des réacteurs de production d'électricité d'environ 300 MW : (U. R. S. S., France, Grande-Bretagne, Allemagne, États-Unis, Japon, Italie, Inde). L'étape suivante sera constituée par des centrales de puissance supérieure à 1 000 MW électriques qui seront mises en service entre 1980 et 1990.

BIBLIOGRAPHIE

BLANC D., *Physique nucléaire*, Masson. - CAHEN et TREILLE, *Précis d'énergie nucléaire*, Dunod. - CHELET Y., *l'Énergie nucléaire*, Seuil, coll. « le Rayon de la science ». - GUÉRON J., *l'Énergie nucléaire*, coll. « Que sais-je ? », P. U. F. - THIRIET L., *l'Énergie nucléaire*, Dunod. - *Bibliothèque des sciences et techniques nucléaires*, I. N. S. T. N., P. U. F. - *Bulletin d'informations scientifiques et techniques du C. E. A.*, Dunod, Gauthier-Villars. - *Revue générale nucléaire (R. G. N.) de la S. F. E. N.*

▼ Circuits des générateurs de vapeur du surrégénérateur de Douneray (Écosse) mis en service en 1962.

Parimage - Camera Press

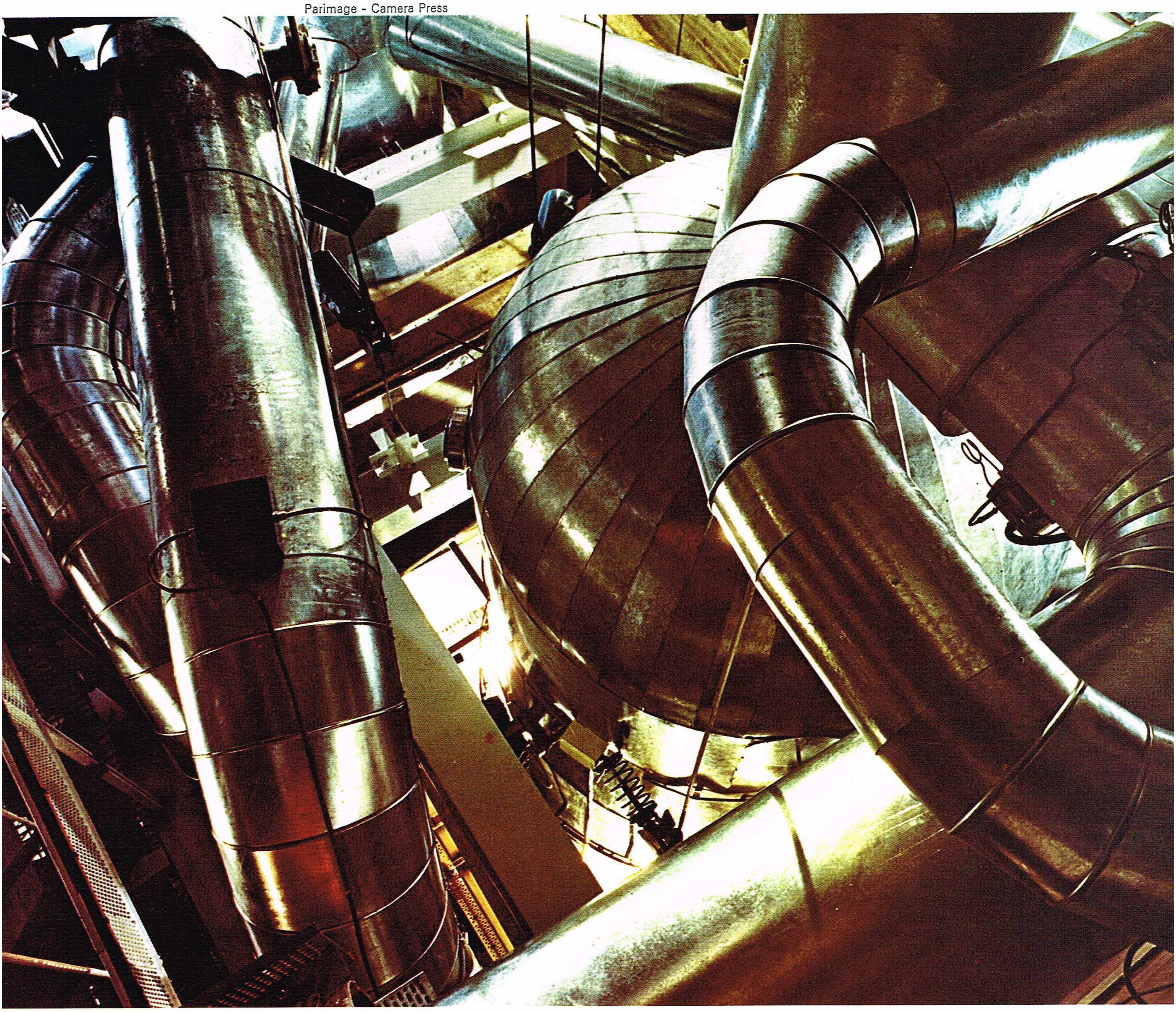

LA SYMÉTRIE EN PHYSIQUE

La symétrie joue un rôle fondamental en physique : elle permet de simplifier, souvent de façon importante, la résolution des problèmes, et de comprendre le sens profond de nombreuses lois fondamentales. Que faut-il entendre par symétrie ? Deux exemples simples vont nous aider à préciser cette notion.

• *Premier exemple*. La résolution d'une équation algébrique. Soit l'équation :

$$f(x) = 6x^4 - 35x^3 + 62x^2 - 35x + 6 = 0$$

qui est de la forme

$$f(x) = ax^4 + bx^3 + cx^2 + bx + a = 0$$

Si dans $f(x)$ on change x en $1/x$, on obtient :

$$f\left(\frac{1}{x}\right) = \frac{6}{x^4} - \frac{35}{x^3} + \frac{62}{x^2} - \frac{35}{x} + 6$$

ou encore, en réduisant au même dénominateur :

$$f\left(\frac{1}{x}\right) = \frac{1}{x^4}(6 - 35x + 62x^2 - 35x^3 + 6x^4)$$

c'est-à-dire : $f(x) = x^4 f\left(\frac{1}{x}\right)_0$

$x = 0$ n'étant pas solution de l'équation $f(x) = 0$, on en déduit que les équations $f(x) = 0$ et $f(1/x) = 0$ ont les mêmes solutions.

Désignons par x_1, x_2, x_3 et x_4 les quatre racines de l'équation $f(x) = 0$. Le résultat que nous avons obtenu signifie que les quatre nombres $\frac{1}{x_1}, \frac{1}{x_2}, \frac{1}{x_3}$ et $\frac{1}{x_4}$ sont identiques aux quatre nombres x_1, x_2, x_3 et x_4. Il ne faut, cependant, pas aller trop loin dans nos conclusions. Nous n'avons pas démontré que chaque racine était inchangée, c'est-à-dire que $x_1 = \frac{1}{x_1}$, $x_2 = \frac{1}{x_2}$, etc., mais simplement que l'ensemble $\{x_1, x_2, x_3, x_4\}$ était identique à l'ensemble $\left\{\frac{1}{x_1}, \frac{1}{x_2}, \frac{1}{x_3}, \frac{1}{x_4}\right\}$. Nous dirons que la transformation qui à x fait correspondre $1/x$ laisse invariant l'ensemble $\{x_1, x_2, x_3, x_4\}$ des solutions de l'équation $f(x) = 0$. Cette *propriété d'invariance* est une propriété de symétrie. Le fait de la remarquer simplifie considérablement la résolution de l'équation. Remarquons pour commencer que la transformation groupe les racines par paires. Si on laisse pour l'instant de côté le cas où une des racines est égale à 1 ou à -1, $1/x_1$ qui est différent de x_1 ne peut être égal qu'à x_2, x_3 ou x_4. Si $\frac{1}{x_1} = x_2$, on a nécessairement $\frac{1}{x_3} = x_4$ et évidemment $\frac{1}{x_2} = x_1$ et $\frac{1}{x_4} = x_3$. Ainsi non seulement l'ensemble $\{x_1, x_2, x_3, x_4\}$ est invariant par la transformation qui change x en $\frac{1}{x}$ mais chacun des couples (x_1, x_2) et (x_3, x_4) jouit de cette propriété.

Ce résultat incite à poser $X = x + 1/x$ et à chercher une nouvelle équation $g(X) = 0$. La raison de cette démarche est que, $x + 1/x$ étant invariant, X correspond à un des couples invariants de racines de $f(x) = 0$, et par conséquent l'équation $g(X) = 0$ aura un nombre de racines deux fois moindre que $f(x) = 0$; $g(X) = 0$ sera donc une équation du second degré. On a en effet :

$$f(x) = x^2\left[6\left(x^2 + \frac{1}{x^2}\right) - 35\left(x + \frac{1}{x}\right) + 62\right]$$

$$f(x) = x^2\,[6(X^2 - 2) - 35X + 62]$$

$$f(x) = x^2 g(X)$$

où $g(X) = 6X^2 - 35X + 50$

L'équation $g(X) = 0$ est facile à résoudre, elle a pour racines 5/2 et 10/3. On en déduit que les racines de l'équation $f(x) = 0$ sont les solutions des équations

$$x + \frac{1}{x} = \frac{5}{2} \quad \text{et} \quad x + \frac{1}{x} = \frac{10}{3}$$

Ces équations sont du second degré. Les racines de la première sont 2 et 1/2 et celles de la seconde 3 et 1/3. Chaque couple de racines est, comme nous l'avions annoncé, invariant par la transformation qui à x fait correspondre $1/x$.

La méthode que nous venons de décrire est générale ; elle s'applique à toutes les équations algébriques de *degré pair*, ayant la propriété de symétrie étudiée. La résolution d'une telle équation se ramène toujours à la résolution d'une équation algébrique de degré moitié.

Si l'équation algébrique de départ est de *degré impair*, la méthode est encore applicable. En effet, si l'équation est, par exemple, de degré 5, elle a cinq racines. Si l'ensemble de ces racines est invariant par la transformation qui à x fait correspondre $1/x$, on peut affirmer que les racines se répartissent nécessairement en couples de racines inverses l'une de l'autre. Le nombre de racines étant impair, il est indispensable qu'une des racines soit sa propre inverse. Cette racine est donc égale soit à 1, soit à -1. On vérifie aisément que seule la valeur -1 convient. Ainsi toute équation de la forme

$$ax^5 + bx^4 + cx^3 + cx^2 + bx + a = 0$$

admet -1 comme racine. Pour appliquer la méthode précédente on divise donc le polynôme par $x - 1$ et on se ramène au cas d'une équation de degré pair.

A la lumière de l'exemple que nous venons de discuter, nous dirons qu'une équation jouit d'une propriété de symétrie lorsque l'ensemble de ses racines est invariant par certaines transformations. Cette propriété de symétrie convenablement utilisée simplifie grandement la résolution de l'équation. A titre d'exercice, le lecteur pourra développer une théorie analogue pour les équations algébriques du type : $ax^4 + bx^3 + cx^2 - bx + a = 0$ dont l'ensemble des racines est invariant par la transformation qui à x fait correspondre $-1/x$.

• *Deuxième exemple*. Cet exemple, pris cette fois-ci en électricité, va nous montrer, sous un aspect plus géométrique, l'équivalence entre la propriété d'invariance et la propriété de symétrie, et, comme dans le premier exemple, cette propriété nous permettra de résoudre simplement le problème posé. Considérons un réseau de résistances disposées suivant les arêtes d'un tétraèdre comme l'indique la *figure* 1. Sachant que la différence de potentiel entre A et B est V, quelle est l'intensité I du courant qui arrive en A et repart en B ?

Le problème est essentiellement celui de calculer la résistance équivalente R de ce réseau, l'intensité I étant alors donnée par I = V/R. Le réseau n'étant pas plan, on ne peut pas utiliser directement les formules usuelles relatives aux associations de résistances en série et en parallèle. Mais, compte tenu des branches arrivant en A et partant de B, le réseau possède une propriété de symétrie. En effet, le plan passant par A, B et le milieu de CD est un plan de symétrie. Cette symétrie que nous visualisons ici sous forme géometrique peut s'énoncer dans le langage de transformations laissant invariant le réseau. La transformation est définie lorsqu'on sait faire correspondre à chaque branche du réseau une branche déterminée du même réseau. On voit facilement que le plan de symétrie est équivalent à la transformation qui :

— à la branche AB, fait correspondre la branche AB ;
— à la branche AC, fait correspondre la branche AD ;
— à la branche AD, fait correspondre la branche AC ;
— à la branche CD, fait correspondre la branche DC ;
— à la branche BC, fait correspondre la branche BD ;
— à la branche BD, fait correspondre la branche BC.

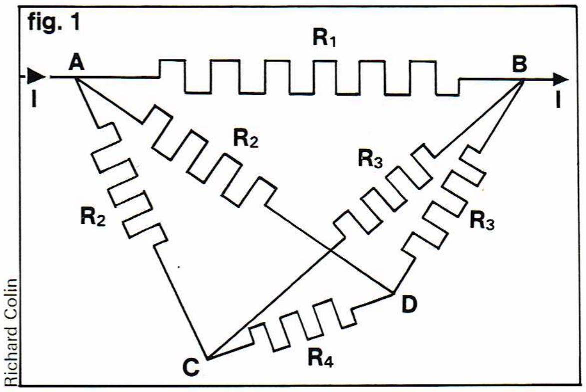

Richard Colin

◄ ***Figure 1 :*** ***réseau de résistances placées suivant les arêtes d'un tétraèdre.***

► *Figure 2 et figure 3 : représentation de deux réseaux équivalents à celui de la figure 1 et conduisant à la même valeur de* R.

fig. 2

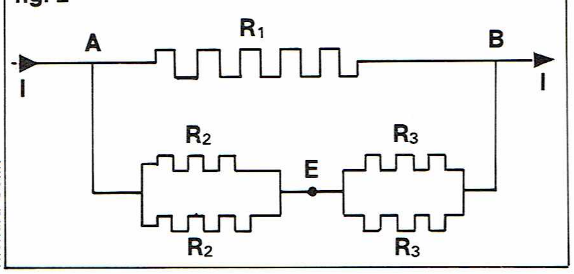

fig. 3

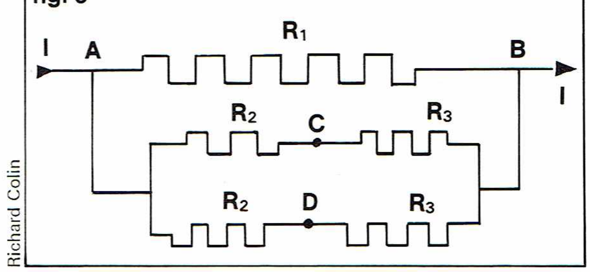

Cette transformation, compte tenu de la valeur des résistances des différentes branches, laisse le réseau inchangé. Remarquons qu'au lieu de définir la transformation comme une permutation des branches, on pourrait aussi bien la définir comme une permutation des sommets,
— au sommet A, on fait correspondre le sommet A ;
— au sommet B, on fait correspondre le sommet B ;
— au sommet C, on fait correspondre le sommet D ;
— au sommet D, on fait correspondre le sommet C.

La propriété de symétrie du réseau étant ainsi précisée, comment en tirer parti pour calculer la résistance équivalente R ? La propriété de symétrie du réseau implique que l'intensité du courant qui passe dans la branche AC soit égale à celle du courant qui passe dans la branche AD ; de même, l'intensité du courant qui passe dans la branche BC est égale à celle du courant qui passe dans la branche BD. L'intensité du courant qui passe dans la branche CD est nécessairement nulle. En effet, l'intensité du courant allant de C vers D doit être égale à celle du courant allant de D vers C. La valeur de R est donc indépendante de R_4 et, pour la calculer, on peut remplacer le réseau étudié par le réseau plan représenté sur la *figure* 2 où les points C et D, au même potentiel, sont confondus en E. On en déduit immédiatement :

$$R = \frac{R_1\,(R_2 + R_3)}{2\,R_1 + R_2 + R_3}$$

Le réseau représenté sur la *figure* 2 n'est pas le seul réseau équivalent au réseau de départ. Le réseau représenté sur la *figure* 3 lui est aussi équivalent et conduit évidemment à la même valeur de R.

R étant indépendant de R_4, dans le calcul utilisant le réseau de la *figure* 2, on a fait choix de la valeur particulière $R_4 = 0$, alors que, dans le calcul utilisant le réseau de la *figure* 3, on a fait choix de la valeur $R_4 = \infty$.

Groupes de symétrie

On dit qu'une équation ou un système physique possède des *propriétés de symétrie* lorsqu'il existe certaines transformations qui les laissent invariants. Par définition, il y a donc équivalence entre propriétés de symétrie et propriétés d'invariance relativement à des transformations.

Dans les exemples étudiés, le nombre de transformations était égal à deux. En effet, l'ensemble des racines de l'équation $6\,x^4 - 35\,x^3 + 62\,x^2 - 35\,x + 6 = 0$ est invariant par la transformation qui à x fait correspondre $1/x$, mais aussi par la transformation qui à x fait correspondre x. Cette transformation banale joue un rôle très important, et il convient de ne pas l'oublier. On l'appelle la **transformation identité.** Elle peut toujours être définie. Dans le cas du réseau de résistances de la *figure* 1, la transformation identité est telle que :
— au sommet de A corresponde le sommet A
— au sommet de B corresponde le sommet B
— au sommet de C corresponde le sommet C
— au sommet de D corresponde le sommet D

Il n'est pas difficile d'imaginer des exemples où le nombre des transformations est supérieur à deux. Ainsi l'ensemble des racines de l'équation

$$ax^8 + bx^6 + cx^4 + bx^2 + a = 0$$

est invariant par les quatre transformations qui à x font correspondre respectivement x, $-x$, $1/x$, $-1/x$. Si l'on désigne par t_1, t_2, t_3 et t_4 ces quatre transformations, on a :

$$t_1\,(x) = x$$
$$t_2\,(x) = -x$$
$$t_3\,(x) = 1/x$$
$$t_4\,(x) = -1/x$$

Il est clair que, si l'ensemble des 8 racines de l'équation précédente est invariant par une quelconque des transformations t_i ($i = 1, 2, 3, 4$), il est aussi invariant si on effectue deux transformations consécutives. Si on effectue par exemple d'abord la transformation t_2 puis la transformation t_3 on a :

$$t_2\,(x) = -x \text{ et } t_3\,[t_2\,(x)] = t_3\,(-x) = -1/x$$

on trouve : $t_3\,[t_2\,(x)] = t_4\,(x)$

Ce résultat s'écrit : $t_3 * t_2 = t_4$

On dira que t_4 est égal au produit de t_2 par t_3. Plus généralement, le produit de deux transformations de l'ensemble t_1, t_2, t_3, t_4 est une transformation de cet ensemble. On peut le vérifier en contrôlant le *tableau* I où sont rassemblés tous les produits de deux transformations.

Ce résultat est tout à fait normal, car, si les transformations t_2 et t_3 laissent l'ensemble des racines invariant, leur produit $t_3 * t_2$ doit aussi laisser cet ensemble invariant, et, si donc l'ensemble $\{t_1, t_2, t_3, t_4\}$ est l'ensemble de toutes les transformations qui laisse invariant l'ensemble des racines, il est nécessaire que $t_3 * t_2$ soit une des transformations t_i ($i = 1, 2, 3, 4$).

La définition du produit de deux transformations que nous avons donnée est ce qu'on appelle en algèbre une **loi de composition interne** définie sur l'ensemble des transformations t_1, t_2, t_3, t_4. Cette loi de composition possède certaines propriétés que nous allons établir.

— *La loi de composition est associative.* Cela signifie que, t_i, t_j, t_k étant trois transformations, on a :

$$t_i * (t_j * t_k) = (t_i * t_j) * t_k$$

et ceci quels que soient i, j et k. Par exemple :

$$t_2 * (t_3 * t_4) = (t_2 * t_3) * t_4$$

car $t_3 * t_4 = t_2$

d'où $t_2 * (t_3 * t_4) = t_2 * t_2 = t_1$

et $t_2 * t_3 = t_4$

d'où $(t_2 * t_3) * t_4 = t_4 * t_4 = t_1$

— *Il existe un élément neutre pour la loi de composition.* On appelle élément neutre e une transformation telle que, quel que soit i, on ait :

$$e * t_i = t_i * e = t_i$$

On vérifie à l'aide du *tableau* I que l'élément neutre pour la loi de composition est la transformation t_1.

— *Chaque transformation est inversible.* On appelle inverse d'une transformation t_i la transformation t_i' telle que :

▼ *Tableau I : table de multiplication du groupe de symétrie de l'équation* $ax^8 + bx^6 + cx^4 + bx^2 + a = 0$.

Tableau I
Produit de deux transformations

	t_i	
t_j	$t_j * t_i$	

	t_1	t_2	t_3	t_4
t_1	t_1	t_2	t_3	t_4
t_2	t_2	t_1	t_4	t_3
t_3	t_3	t_4	t_1	t_2
t_4	t_4	t_3	t_2	t_1

$$t_i * t'_i = t'_i * t_i = e$$

On vérifie à l'aide du *tableau* I que chaque transformation est sa propre inverse. On a en effet :

$$t_1 * t_1 = t_1$$
$$t_2 * t_2 = t_1$$
$$t_3 * t_3 = t_1$$
$$t_4 * t_4 = t_1$$

Lorsqu'une loi de composition interne définie sur un ensemble possède toutes les propriétés que nous venons d'établir, on dit que l'ensemble possède une **structure de groupe.**

Ce résultat est général. L'ensemble des propriétés de symétrie d'une équation, d'une figure géométrique ou d'un système physique, c'est-à-dire l'ensemble des transformations qui laissent invariants l'équation, la figure géométrique ou le système physique, possède une structure de groupe.

La *théorie des groupes* a fait l'objet de très nombreux travaux de la part des mathématiciens. Elle constitue l'outil indispensable du physicien qui étudie les problèmes de symétrie. Dans la suite de ce chapitre, nous en donnerons un aperçu. Les chapitres suivants seront consacrés à diverses applications choisies dans différents domaines de la physique.

Le groupe des transformations $\{t_1, t_2, t_3, t_4\}$ que nous venons d'étudier possède la propriété particulière suivante : quelles que soient les deux transformations t_i et t_j on a : $t_i * t_j = t_j * t_i$

Ce résultat dont on peut contrôler l'exactitude en se reportant au *tableau* I se traduit en disant que le groupe t_1, t_2, t_3, t_4 est *commutatif* ou *abélien*. Cette propriété n'est pas partagée par tous les groupes de symétrie, l'exemple qui suit va nous le montrer.

Considérons un système de trois charges électriques identiques placées aux sommets d'un triangle équilatéral (*fig.* 4). Ce système possède certaines propriétés de symétrie que nous allons étudier.

Pour discerner les trois charges, nous leur attribuerons respectivement les numéros 1, 2 et 3. Si on désigne par O le centre de gravité du triangle équilatéral, on constate qu'une rotation d'$\frac{1}{3}$ de tour (c'est-à-dire d'un angle égal à $\frac{2\pi}{3}$) autour d'un axe passant par O et perpendiculaire au plan de la figure amène le système en coïncidence avec lui-même. Nous désignerons par a cette transformation laissant invariant le système. Une rotation de $\frac{2}{3}$ de tour autour de O amène aussi le système en coïncidence avec lui-même. Il n'est pas nécessaire d'introduire un symbole nouveau pour désigner cette deuxième transformation. On peut la désigner par $a * a$, car elle est le produit de la première transformation par elle-même. Si on appelle e la transformation identité (rotation d'angle nul), on a évidemment

$$a * a * a = e$$

Les trois transformations e, a et $a * a$ ne sont pas les seuls éléments de symétrie du triangle équilatéral. Une rotation d'un demi-tour autour d'un axe passant par le sommet 1 et le milieu du côté joignant les sommets 2 et 3 laisse le triangle inchangé.

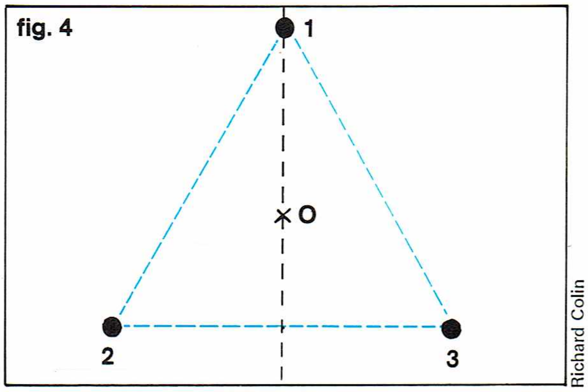

◀ ***Figure 4 :* système de trois charges électriques identiques placées aux sommets d'un triangle équilatéral et possédant certaines propriétés de symétrie.**

Nous désignerons cet élément de symétrie par b. Il est clair qu'il existe deux autres axes de symétrie analogues à b; ce sont les axes passant respectivement par les sommets 2 et 3 et qui joignent les milieux des côtés opposés.

Montrons qu'ici encore il n'est pas nécessaire d'introduire de nouvelles notations pour désigner ces deux dernières transformations.

La première s'écrit $b * a$ et la seconde $b * a * a$. Pour le voir, nous allons introduire une notation permettant de représenter les divers éléments de symétrie du triangle équilatéral de façon très commode.

Chaque transformation qui amène le triangle en coïncidence avec lui-même est une *permutation des sommets*. Ainsi la transformation a amené :

le sommet 1 sur le sommet 2
le sommet 2 sur le sommet 3
le sommet 3 sur le sommet 1

Nous représenterons conventionnellement cette permutation par le symbole :

$$a = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix}$$

qui indique sur la première ligne la position des trois sommets avant la transformation et sur la deuxième ligne la position des trois sommets après la transformation. Avec cette notation on a :

$$b = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 3 & 2 \end{pmatrix}$$

et on en déduit :

$$b * a = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 3 & 2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

car a transforme d'abord 1 en 2, puis b transforme 2 en 3, donc $b * a$ transforme 1 en 3, etc. Insistons sur le fait qu'écrire $b * a$ signifie qu'on fait agir d'abord a, puis b. De même, on a :

$$b * (a * a) = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 3 & 2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 1 & 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 3 \end{pmatrix}$$

Ainsi $b * a$ laisse le sommet 2 inchangé et permute les sommets 1 et 3, tandis que $b * a * a$ laisse le sommet 3 inchangé et permute les sommets 1 et 2. Ils correspondent donc respectivement aux axes de symétrie passant par les sommets 2 et 3.

Est-ce que l'ensemble des six transformations

$$\{e, a, a * a, b, b * a, b * a * a\}$$

possède une structure de groupe, et est-ce qu'il n'existe pas d'autres transformations laissant invariant le triangle équilatéral ?

Une manière de répondre à ces questions est de vérifier que tout produit de a et de b appartient nécessairement à l'ensemble précédent. Remarquons pour commencer que $b * b = e$; donc tout produit constitué uniquement de b est égal soit à b, soit à e suivant la parité du nombre de facteurs du produit.

A priori, le produit $a * b$ ne fait pas partie de l'ensemble, mais il est facile de montrer avec notre notation que

$$a * b = b * a * a$$

en effet :

$$a * b = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 3 & 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 3 \end{pmatrix} = b * a * a$$

On vérifierait de même que : $a * a * b = b * a$

Ces deux résultats sont importants. Tout d'abord, ils révèlent que le groupe de symétrie du triangle équilatéral n'est pas abélien, car $a * b \neq b * a$.

Ensuite, on peut montrer que tout produit de a et de b, grâce aux résultats que nous venons de trouver, est un des six éléments du groupe :

$$\{e, a, a * a, b, b * a, b * a * a\}$$

Par exemple : $a * b * a * b * a = a$

car $(a * b) * (a * b * a) = (b * a * a) * (a * b * a)$
$= b * (a * a * a) * (b * a) =$
$(b * e) * (b * a)$
$= (b * b) * a = e * a = a$

▶ *Tableau II : représentations irréductibles d'un groupe de quatre éléments.*

En vertu de la propriété d'associativité, les parenthèses ne sont pas utiles. Ici elles ne servent qu'à indiquer comment on a groupé les termes pour faire les calculs. Le groupe n'étant pas abélien, l'ordre des facteurs doit absolument être respecté.

La structure du groupe de l'ensemble des éléments de symétrie d'un système physique étant bien établie, nous allons, toujours sur le même exemple, aller un peu plus loin sur la théorie des groupes.

La représentation des opérations de symétrie du triangle équilatéral par des permutations illustre une notion fondamentale en théorie des groupes : l'**isomorphisme.** En effet, en tant que tel, l'ensemble des permutations de trois objets a une structure de groupe identique à celle du groupe des éléments de symétrie du triangle équilatéral. On dit que ces deux groupes sont isomorphes, et la correspondance entre les éléments du premier groupe et les éléments du deuxième est appelée isomorphisme. L'intérêt de cette notion est évident : si deux groupes sont isomorphes, il suffit en effet d'en étudier un seul, car les deux groupes ont exactement les mêmes propriétés mathématiques. En particulier, on peut se contenter d'étudier un groupe d'un point de vue abstrait, purement algébrique, sans chercher à le représenter. Ainsi, le groupe des éléments de symétrie du triangle équilatéral est isomorphe au groupe défini de la manière suivante : soit a et b deux éléments d'un ensemble muni d'une loi interne, notée $*$, associative et telle qu'il existe un élément neutre e et que chaque élément de l'ensemble possède, par hypothèse, un inverse. Si on étudie le groupe engendré dans ces conditions par a et b, sachant, en outre, que

$$a * a * a = b * b = e$$

et que
$$a * b = b * a * a$$

on vérifie aisément qu'il est isomorphe au groupe des éléments de symétrie du triangle équilatéral.

La notion d'isomorphisme n'est pas suffisante pour tirer pleinement avantage de la théorie des groupes. Il nous faut introduire une autre notion très utile, celle d'**homomorphisme.** Si a_1, a_2, a_3, ..., sont les éléments d'un groupe A et b_1, b_2, b_3, ..., les éléments d'un groupe B, nous avons vu que A et B sont dits isomorphes si on a établi une correspondance qui associe, quel que soit i, l'élément a_1 de A à l'élément b_1 de B, et que si $a_1 * a_2 = a_3$ on doit avoir nécessairement $b_1 * b_2 = b_3$.

Il est important de souligner qu'un isomorphisme est une bijection, c'est-à-dire une correspondance qui à deux éléments différents de A associe deux éléments différents de B et réciproquement. On peut imaginer des correspondances qui ne sont pas des bijections et qui, cependant, sont très utiles. Reprenons, par exemple, le groupe $\{t_1, t_2, t_3, t_4\}$ des transformations qui laissent invariant l'ensemble des racines de l'équation

$$ax^8 + bx^6 + cx^4 + bx^2 + a = 0$$

et considérons l'ensemble des deux nombres $\{1, —1\}$. Si à t_1 et t_2 on associe le nombre 1 et à t_3 et t_4 on associe le nombre — 1, la correspondance que nous appellerons f n'est visiblement pas bijective, car

$$f(t_1) = f(t_2) = 1 \text{ et } f(t_3) = f(t_4) = -1$$

Cependant, si à la loi de composition interne $*$ on associe la multiplication dans l'ensemble $\{1, — 1\}$ on vérifie que, quelles que soient les transformations t_i et t_j, si $t_i * t_j = t_k$ on a : $f(t_i) \cdot f(t_j) = f(t_k)$.

Vérifions-le pour quelques produits. On a vu que $t_2 * t_2 = t_1$. Or $f(t_2) = 1$ et $f(t_1) = 1$. On vérifie que

$$f(t_2) \cdot f(t_2) = f(t_1)$$

De même $t_3 * t_4 = t_2$. Or $f(t_3) = — 1$, $f(t_4) = — 1$ et $f(t_2) = 1$. On vérifie à nouveau que

$$f(t_3) \cdot f(t_4) = f(t_2)$$

La correspondance f entre les groupes $\{t_1, t_2, t_3, t_4\}$ et $\{1, — 1\}$ est un homomorphisme. Deux transformations différentes n'ont pas nécessairement deux images différentes par f. Toutefois, et ceci est important, chaque transformation a une image et une seule.

Dans la théorie des groupes, les homomorphismes entre un groupe et des groupes de nombres ou plus généralement de matrices jouent un rôle essentiel. Ces homomorphismes sont appelés des représentations linéaires.

Tableau II
Représentations irréductibles d'un groupe de quatre éléments

	t_1	t_2	t_3	t_4
R_1	1	1	1	1
R_2	1	1	- 1	- 1
R_3	1	- 1	1	- 1
R_4	1	- 1	- 1	1

La théorie des **représentations linéaires** a eu depuis les premiers travaux du siècle passé un développement considérable.

Nous ne retiendrons de cette théorie qu'une seule notion, celle de *représentations linéaires irréductibles.* On peut dire que les représentations irréductibles d'un groupe sont les représentations linéaires les plus simples de ce groupe, c'est-à-dire celles qui font correspondre aux divers éléments du groupe des matrices de dimensions les plus faibles. De façon un peu plus précise, on dit qu'une représentation linéaire est irréductible si l'homomorphisme qui à chaque élément du groupe associe une matrice est tel qu'on ne puisse pas trouver une représentation équivalente à l'aide de matrice de dimension moindre. Ainsi pour le groupe des transformations

$$\{t_1, t_2, t_3, t_4\}$$

on sait démontrer qu'il n'existe que 4 représentations irréductibles, toutes de dimension 1 (c'est-à-dire que l'homomorphisme associe à chaque transformation t_i un nombre). Ces diverses représentations sont rassemblées dans le *tableau* II.

On remarquera que la représentation R_1 qui à toute transformation associe le nombre 1 est particulièrement banale. Ce type de représentation irréductible, dite *représentation identité,* existe toujours. La représentation R_2 est celle qui nous a servi à introduire la notion d'isomorphisme.

Nous arrêterons là ces considérations générales pour développer dans les chapitres qui suivent quelques exemples pris dans différents domaines de la physique.

Physique de l'état solide

Ordre des axes de rotation d'un réseau cristallin

Les propriétés de symétrie de l'état solide ont été étudiées dès le XVIII[e] siècle. Elles traduisent essentiellement la structure périodique des cristaux à l'échelle atomique dont la preuve expérimentale a été apportée en 1912 par la diffraction des rayons X. Dans un cristal, les atomes sont répartis aux nœuds d'un réseau périodique tridimensionnel.

Sur la *figure* 5, nous avons représenté un réseau périodique à deux dimensions. Chaque nœud du réseau se déduit du nœud origine O, choisi arbitrairement par deux translations successives, la première suivant $\overrightarrow{Ox}$ et la seconde suivant $\overrightarrow{Oy}$. Les translations suivant $\overrightarrow{Ox}$ sont des multiples de la longueur a et celles suivant $\overrightarrow{Oy}$ des multiples de b. Par exemple, le nœud M se déduit de O par une translation de $2a$ parallèlement à $\overrightarrow{Ox}$, suivie d'une translation de $3b$ parallèlement à $\overrightarrow{Oy}$; un tel nœud est conventionnellement appelé le nœud (2,3).

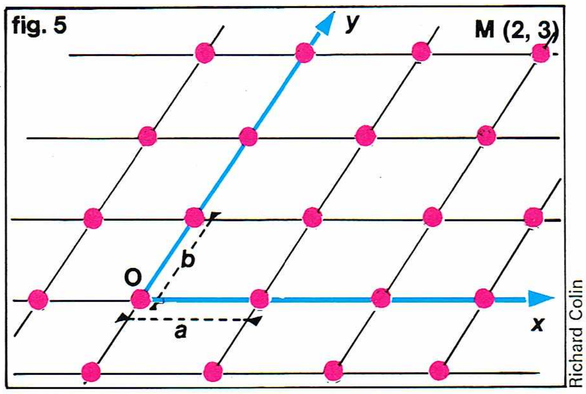

◀ *Figure 5 : réseau périodique bidimensionnel.*

A trois dimensions (*fig.* 6), tout nœud d'un réseau périodique se déduit du nœud origine O par 3 translations successives suivant $\vec{Ox}$, $\vec{Oy}$, et $\vec{Oz}$. La translation suivant $\vec{Ox}$ est un multiple d'une longueur *a*, celle suivant $\vec{Oy}$ un multiple de la longueur *b* et celle suivant Oz un multiple de la longueur *c*. Ainsi tout point M a dans ce système d'axes trois coordonnées entières.

Par exemple, sur la *figure* 6, le nœud M se déduit du nœud origine par les translations 2 *a* suivant $\vec{Ox}$, *b* suivant $\vec{Oy}$ et 4 *c* suivant $\vec{Oz}$; M est appelé le nœud (2, 1, 4).

Cette périodicité du réseau cristallin qui exprime la discontinuité de la matière à l'échelle atomique, n'autorise l'existence que de certains éléments de symétrie. Nous allons montrer que seuls sont compatibles avec la structure périodique les axes de symétrie d'ordre 2, 3, 4 ou 6. Les axes de symétrie d'ordre 5 ou supérieur à 6 sont interdits.

Rappelons qu'une figure possède un axe de symétrie d'ordre *n* si elle se superpose à elle-même après une rotation de $2\pi/n$. Un carré, par exemple, possède un axe de symétrie d'ordre 4.

Lors d'une rotation, un nœud M du réseau de coordonnées entières *x, y, z* vient en M′ de coordonnées *x′, y′, z′*; M′ est nécessairement un nœud du réseau si la rotation est une opération de symétrie, et donc *x′, y′* et *z′* sont aussi des entiers. Les coordonnées *x′, y′* et *z′* s'expriment linéairement en fonction des coordonnées *x, y* et *z*, c'est-à-dire :

$$x' = \alpha_1 x + \beta_1 y + \gamma_1 z$$
$$y' = \alpha_2 x + \beta_2 y + \gamma_2 z$$
$$z' = \alpha_3 x + \beta_3 y + \gamma_3 z$$

Les neuf coefficients α_1, β_1, etc., qui caractérisent la rotation de $2\pi/n$ que nous étudions sont nécessairement des entiers, car, quels que soient *x, y* et *z* entiers, *x′, y′* et *z′* doivent être entiers.

Faisons maintenant le choix d'un nouveau système d'axes $\vec{OX}$, $\vec{OY}$, $\vec{OZ}$ orthogonaux entre eux et tels que $\vec{OZ}$ coïncide avec l'axe de rotation. Dans ce nouveau système d'axes, les coordonnées du point M sont X, Y et Z et celles du point M′, X′, Y′, Z′. Ces nouvelles coordonnées n'ont plus de raison d'être des nombres entiers. Dans le cas présent, X′, Y′ et Z′ se déduisent de X, Y et Z par les relations linéaires suivantes :

$$X' = X\cos\frac{2\pi}{n} - Y\sin\frac{2\pi}{n}$$
$$Y' = X\sin\frac{2\pi}{n} + Y\cos\frac{2\pi}{n}$$
$$Z' = Z$$

Dans les deux systèmes d'axes $\vec{Ox}$, $\vec{Oy}$, $\vec{Oz}$ et $\vec{OX}$, $\vec{OY}$, $\vec{OZ}$ la rotation de $2\pi/n$ est caractérisée par des ensembles de coefficients différents. On démontre en algèbre linéaire que, quel que soit le système d'axes, la somme $\alpha_1 + \beta_2 + \gamma_3$ est constante. On a donc :

$$\alpha_1 + \beta_2 + \gamma_3 = 1 + 2\cos\frac{2\pi}{n}$$

$\alpha_1 + \beta_2 + \gamma_3$ étant entiers, on en déduit que $2\cos\frac{2\pi}{n}$ est un nombre entier. Cette condition restreint considérablement les valeurs de *n*. On vérifie facilement que *n* ne peut prendre que les valeurs 1, 2, 3, 4 ou 6. La valeur 1 correspond à la rotation d'angle nul. Les autres valeurs correspondent respectivement à des angles de rotation de π, $2\pi/3$, $\pi/2$ et $\pi/3$.

Ferro-électricité

Du point de vue de leurs propriétés électriques, ces corps solides peuvent être répartis en deux familles : les *conducteurs* et les *isolants;* les premiers laissant passer facilement le courant électrique tandis que les seconds s'opposent à son passage. Cette division n'est pas absolue; il existe des cas intermédiaires.

Les isolants, qu'on appelle aussi des *diélectriques*, ont la propriété de se polariser lorsqu'on les place dans un champ électrique, et l'intensité de cette polarisation est proportionnelle à ce champ. Toutefois, certains diélectriques comme le titanate de baryum, $BaTiO_3$, conservent une polarisation $\vec{P}$ lorsqu'on supprime le champ électrique si leur température est inférieure à une température seuil T_0. Dans le cas du titanate de baryum, T_0 est égale à 120 °C. La longueur de $\vec{P}$ est une fonction de la température; elle augmente lorsque celle-ci décroît. Par analogie avec le ferromagnétisme, de telles substances sont appelées des *ferro-électriques*.

Nous allons montrer que l'existence de cette polarisation « spontanée » $\vec{P}$ implique l'absence de centre de symétrie dans la structure du cristal. Rappelons qu'on dit qu'un point O est un *centre de symétrie* si, à tout atome situé au point M, il correspond un atome situé en M′ tel que les vecteurs $\vec{OM}$ et $\vec{OM'}$ soient opposés. Si le cristal ferro-électrique possédait un centre de symétrie, le vecteur polarisation $\vec{P}$, qui est lié au cristal, se transformerait en $-\vec{P}$ dans l'opération de symétrie considérée. Comme, par ailleurs, la structure cristalline est invariante dans cette opération de symétrie, la polarisation ne devrait pas changer. On en conclut que le vecteur $\vec{P}$ est nécessairement nul s'il existe un centre de symétrie. En conséquence, l'existence d'une polarisation spontanée est incompatible avec celle d'un centre de symétrie. Dans le cas du titanate de baryum, si on élève sa température, on constate qu'au-dessus de 120 °C la structure cristalline possède un centre de symétrie. Cette structure cristalline est représentée sur la *figure* 7. Plus exactement, cette figure représente la maille cristalline du titanate de baryum, c'est-à-dire la cellule élémentaire permettant d'engendrer tout le cristal par translation. Comme on le voit, cette maille a toutes les propriétés de symétrie du cube et possède en particulier un centre de symétrie. Lorsque, au-dessous de 120 °C, le titanate de baryum acquiert une polarisation spontanée, il perd son centre de symétrie par suite du déplacement de l'ion titane qui s'écarte du centre du cube. Le passage de l'état sans polarisation à l'état avec polarisation est un changement de phase qui s'accompagne de la perte d'éléments de symétrie.

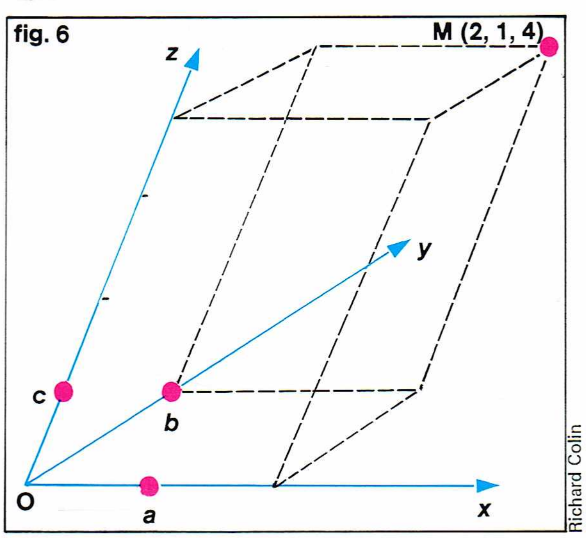

◀ *Figure 6 : réseau périodique tridimensionnel.*

▶ ***Figure 7 : maille cristalline du titanate de baryum*** $BaTiO_3$.

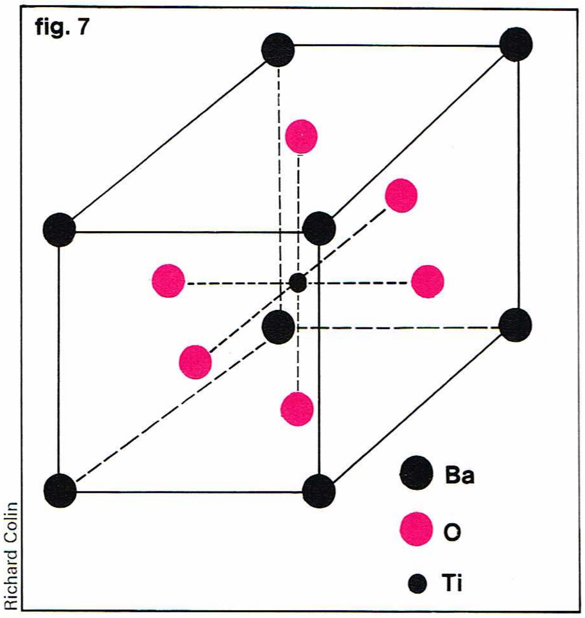

De nombreux changements de phase existent en physique ; ils sont aujourd'hui l'objet d'importants travaux.

Optique cristalline

Les propriétés optiques des cristaux sont caractéristiques de leur anisotropie. En effet, la propagation de la lumière à travers un cristal n'est pas la même suivant toutes les directions. Ici encore, nous allons voir que les propriétés de symétrie du cristal se reflètent dans ses propriétés optiques. Un corps transparent isotrope est caractérisé par un indice de réfraction n, c'est-à-dire que la lumière se propage dans toutes les directions à la même vitesse $v = c/n$, où c est la vitesse de la lumière dans le vide. A la suite des travaux de Maxwell prouvant que les ondes lumineuses sont des ondes électromagnétiques, on sait que l'indice de réfraction n est lié à la permittivité diélectrique ε par la formule $\varepsilon = n^2$. Le coefficient ε caractérise les propriétés d'un diélectrique placé dans un champ électrique. En effet, par définition, l'induction électrique $\vec{D}$ est proportionnelle au champ électrique $\vec{E}$ et on a $\vec{D} = \varepsilon\vec{E}$. Cette relation montre que, dans un milieu isotrope, $\vec{D}$ et $\vec{E}$ ont même direction et même sens. Dans un milieu anisotrope, il n'est plus le même en général. Les directions de $\vec{D}$ et de $\vec{E}$ ne sont plus identiques. Cependant les composantes du vecteur $\vec{D}$ s'expriment linéairement en fonction de celle du vecteur $\vec{E}$. En désignant par D_1, D_2, D_3 et E_1, E_2, E_3 les composantes respectives de $\vec{D}$ et de $\vec{E}$ dans un système d'axes $\overrightarrow{Ox_1}$, $\overrightarrow{Ox_2}$ et $\overrightarrow{Ox_3}$, on a :

$$D_1 = \varepsilon_{11}E_1 + \varepsilon_{12}E_2 + \varepsilon_{13}E_3$$
$$D_2 = \varepsilon_{21}E_1 + \varepsilon_{22}E_2 + \varepsilon_{23}E_3$$
$$D_3 = \varepsilon_{31}E_1 + \varepsilon_{32}E_2 + \varepsilon_{33}E_3$$

Dans un milieu anisotrope, la permittivité diélectrique est donc caractérisée par 9 coefficients ε_{ij} (i, j = 1, 2 et 3), dont les valeurs dépendent du système d'axes. On démontre cependant que, quel que soit le système d'axes, on a toujours $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$; cette propriété réduit donc à 6 le nombre de coefficients indépendants caractérisant la permittivité d'un milieu anisotrope.

Nous allons montrer que les propriétés de symétrie du milieu permettent de réduire encore davantage ce nombre. Supposons pour commencer que le milieu cristallin possède un plan de symétrie. Nous allons choisir comme système d'axes $\overrightarrow{Ox_3}$ perpendiculaire au plan et $\overrightarrow{Ox_1}$ et $\overrightarrow{Ox_2}$ dans le plan et orthogonaux entre eux. Si le champ électrique $\vec{E}$ est parallèle au plan de symétrie, on a nécessairement $E_3 = 0$, E_1 et E_2 étant quelconques. L'opération de symétrie par rapport au plan laissant le cristal et le champ $\vec{E}$ invariant, quelle est son action sur le vecteur $\vec{D}$? Pour répondre à cette question, étudions comment se transforme un vecteur dans une opération de symétrie par rapport à un plan.

Le résultat de cette opération est représenté sur la *figure* 8, où le plan de symétrie est le plan $\overrightarrow{Ox_1}$, $\overrightarrow{Ox_2}$. On voit que le vecteur $\vec{V}$ se transforme en $\vec{V}'$ dont les composantes suivant $\overrightarrow{Ox_1}$ et $\overrightarrow{Ox_2}$ sont les mêmes que celles de $\vec{V}$, mais dont la composante suivant Ox_3 est opposée à celle de $\vec{V}$. Dans le cas que nous étudions,

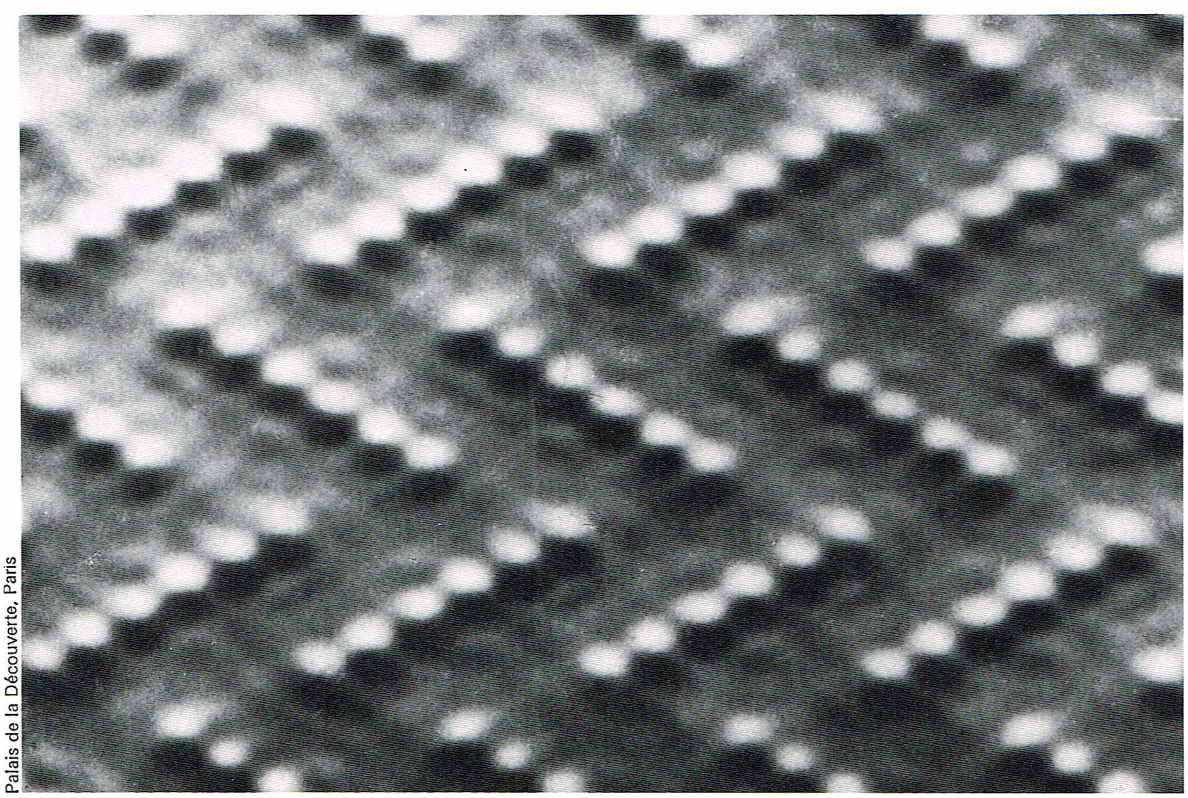

▶ ***Projection de la densité électronique d'un cristal de dicyanacétylène suivant un axe cristallographique.***

$\vec{D}$ subira donc la transformation que nous venons de décrire. Dans l'opération de symétrie laissant invariants le cristal et le champ $\vec{E}$, $\vec{D}$ doit lui aussi être inchangé. On en conclut que $\vec{D}$ est nécessairement parallèle au plan de symétrie, ce qui implique que sa composante D_3 est nulle. L'existence du plan de symétrie dans la structure cristalline entraîne donc que $D_3 = 0$ si $E_3 = 0$. En reportant ce résultat dans les équations, on a :

$$D_3 = \varepsilon_{31}E_1 + \varepsilon_{32}E_2 = 0 \text{ avec } E_1 \text{ et } E_2 \text{ quelconques.}$$

On en déduit : $\varepsilon_{31} = \varepsilon_{32} = 0$. Compte tenu de la relation $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$, on a aussi $\varepsilon_{13} = \varepsilon_{23} = 0$. Ces résultats nous montrent que, si on applique un champ $\vec{E}$ perpendiculaire au plan de symétrie, $\vec{D}$ est parallèle à $\vec{E}$.

Appliquons ces résultats à un cristal ayant toutes les symétries d'un cube ; par exemple, le cristal dont la maille élémentaire est représentée sur la *figure* 7. Si l'on choisit les axes $\overrightarrow{Ox_1}$, $\overrightarrow{Ox_2}$, $\overrightarrow{Ox_3}$ parallèles aux arêtes du cube, on constate que les 3 plans $(\overrightarrow{Ox_1}, \overrightarrow{Ox_2})$ $(\overrightarrow{Ox_2}, \overrightarrow{Ox_3})$ et $(\overrightarrow{Ox_3}, \overrightarrow{Ox_1})$ sont des plans de symétrie. On a donc :

$$\varepsilon_{12} = \varepsilon_{21} = \varepsilon_{23} = \varepsilon_{32} = \varepsilon_{31} = \varepsilon_{13} = 0$$

Seuls sont différents de zéro ε_{11}, ε_{22} et ε_{33}. Les plans contenant un des axes et la bissectrice des deux autres sont aussi des plans de symétrie. Leur existence entraîne $\varepsilon_{11} = \varepsilon_{22} = \varepsilon_{33}$. En effet, le plan de symétrie qui passe par $\overrightarrow{Ox_3}$ et la bissectrice des axes $\overrightarrow{Ox_1}$ et $\overrightarrow{Ox_2}$ par exemple, implique que, si $\vec{E}$ est parallèle à ce plan, $\vec{D}$ est aussi parallèle à ce plan. Donc, si $E_1 = E_2$, on a $D_1 = D_2$, c'est-à-dire $\varepsilon_{11}E_1 = \varepsilon_{22}E_2$, soit encore $\varepsilon_{11} = \varepsilon_{22}$. En prenant en compte les autres plans, on arriverait au résultat annoncé.

En conclusion, dans un cristal qui a les symétries du cube, les vecteurs $\vec{E}$ et $\vec{D}$ sont toujours parallèles, et du point de vue de ses propriétés optiques un tel cristal se comporte comme un corps isotrope.

On a vu que, juste au-dessous de 120 °C, le titanate de baryum perd son centre de symétrie. L'expérience montre que le titane s'est déplacé légèrement dans une direction parallèle à un des axes du cube. Si on choisit cette direction comme axe $\overrightarrow{Ox_3}$, et $\overrightarrow{Ox_1}$ et $\overrightarrow{Ox_2}$ parallèles aux deux autres arêtes du cube, on constate que les seuls plans de symétrie qui subsistent sont les trois plans $(\overrightarrow{Ox_1}, \overrightarrow{Ox_2})$, $(\overrightarrow{Ox_2}, \overrightarrow{Ox_3})$, $(\overrightarrow{Ox_3}, \overrightarrow{Ox_1})$ et les deux plans passant par $\overrightarrow{Ox_3}$ et contenant les deux bissectrices de l'angle $\overrightarrow{Ox_1}$, $\overrightarrow{Ox_2}$.

Les raisonnements précédents s'appliquent mais, dans ce cas, on trouve : $\varepsilon_{12} = \varepsilon_{21} = \varepsilon_{23} = \varepsilon_{32} = \varepsilon_{13} = \varepsilon_{31} = 0$, $\varepsilon_{11} = \varepsilon_{22} \neq 0$ et $\varepsilon_{33} \neq 0$. Ainsi la perte de certains éléments de symétrie a augmenté le nombre de coefficients de permittivité, et les vecteurs $\vec{E}$ et $\vec{D}$ ne sont plus parallèles. Du point de vue optique, l'expérience confirme que seules les directions $\overrightarrow{Ox_1}$ et $\overrightarrow{Ox_2}$ sont équivalentes ; le cristal est anisotrope.

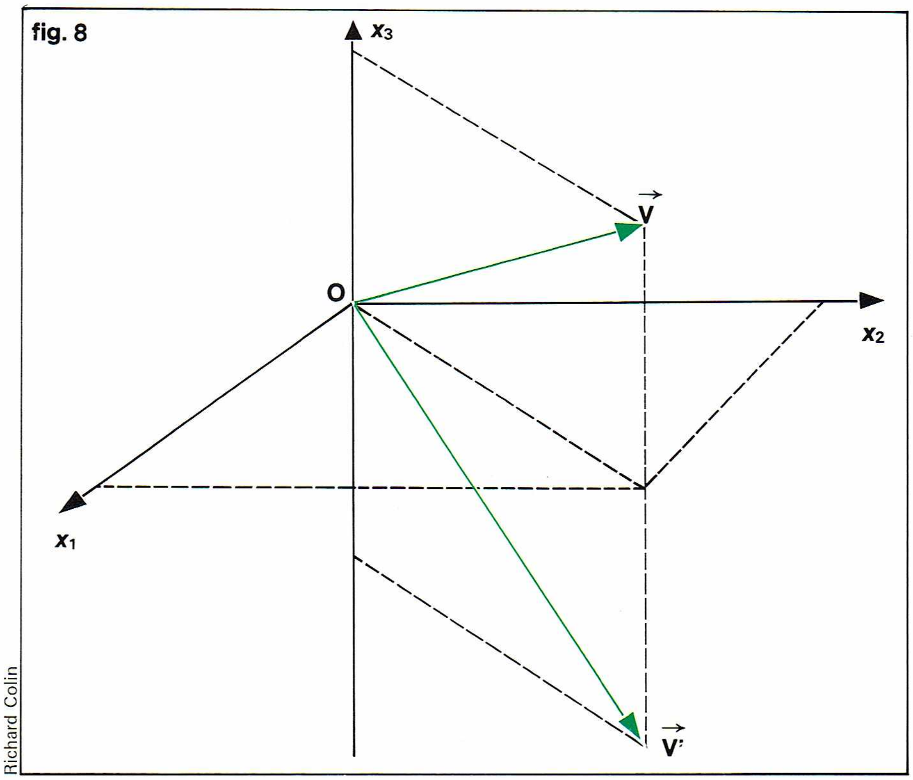

Richard Colin

▲ ***Figure 8 : symétrique d'un vecteur $\vec{V}$ par rapport à un plan.***

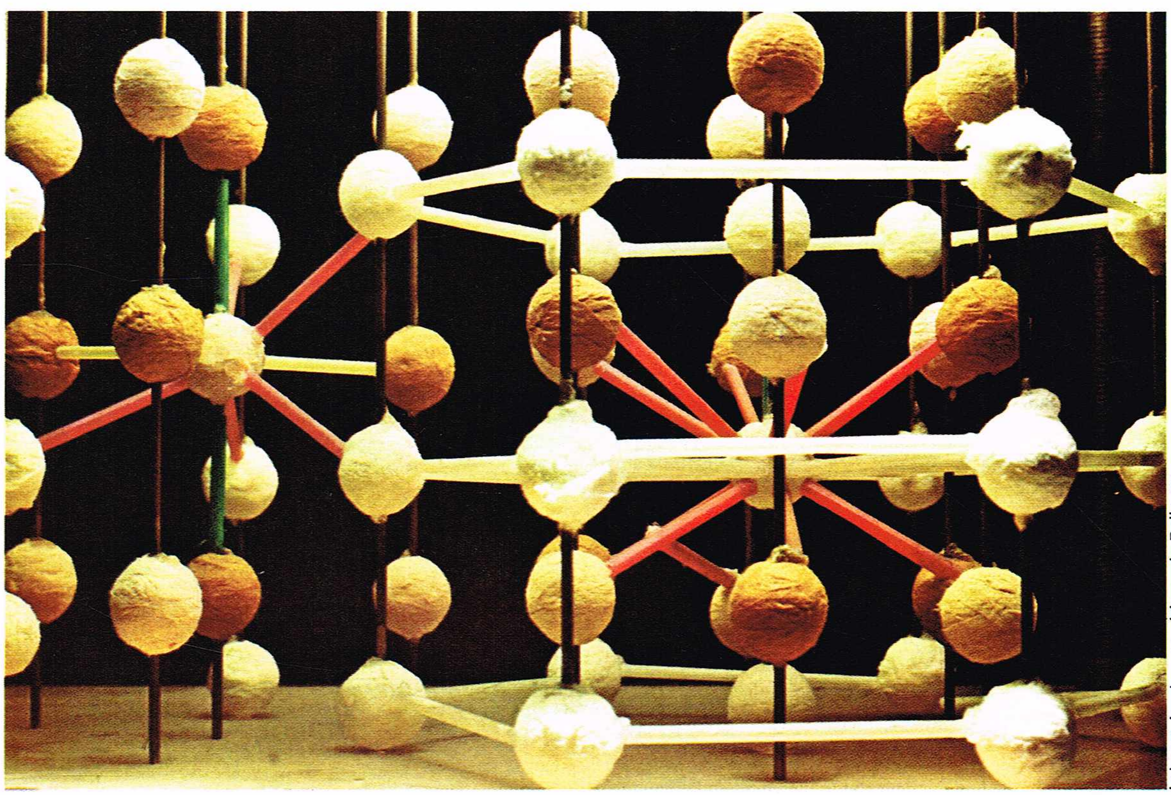

Laboratoire de magnétisme de Bellevue - Centre national de la recherche scientifique

◄ ***Les propriétés de symétrie du cristal se reflètent dans ses propriétés optiques. Ici, un modèle de structure cristalline.***

▶ *Figure 9 : représentation graphique d'un potentiel pair.*

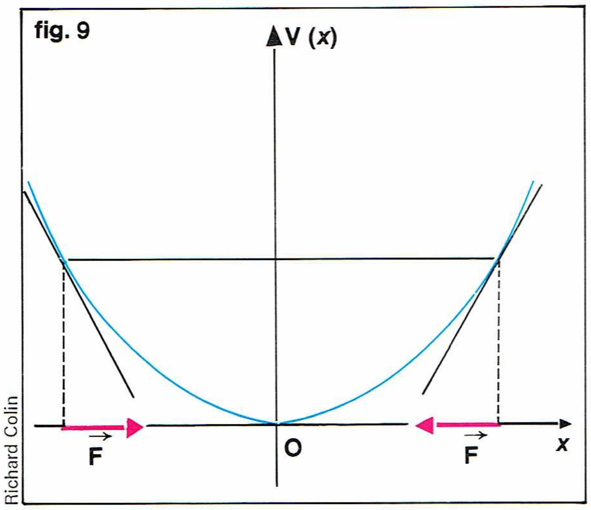

Mécanique

Particule dans un potentiel pair

Considérons une particule de masse m, en mouvement le long d'un axe $\overrightarrow{Ox}$, dont l'énergie potentielle V (x) est telle que V $(-x)$ = V (x). Sur la *figure* 9, nous avons représenté un tel potentiel que nous avons supposé monotone sur chaque demi-axe, ce qui signifie que la dérivée a un signe constant sur chaque demi-axe. Ainsi, pour $x > 0$, elle est toujours positive, alors qu'elle est toujours négative pour $x < 0$. Nous allons étudier qualitativement le mouvement de la particule, d'abord en mécanique classique, puis en mécanique quantique.

L'origine O est un point d'équilibre. En effet, c'est un minimum du potentiel et la force $\vec{F}$ qui s'exerce sur la particule J est nulle $\left(\vec{F} = -\dfrac{dV}{dx}\right)$. Si on place la particule en ce point sans vitesse initiale, elle y reste indéfiniment. Cet équilibre est stable. En effet, si on écarte la particule de O, elle est alors soumise à une force dirigée vers O et qui tend constamment à la ramener en O. Nous allons montrer que le mouvement autour de O est oscillatoire et qu'il reflète la symétrie du potentiel.

Si on lâche la particule en O avec la vitesse initiale v_0, le mouvement s'effectue à énergie totale E_t constante. On a :

$$E_t = \frac{1}{2} mv^2 + V(x) = \frac{1}{2} mv_0^2$$

où v^2 est le carré de la vitesse au point d'abscisse x. Supposons v_0 positive, la particule s'éloigne d'abord de l'origine ; son énergie potentielle V (x) croît, ce qui entraîne que son énergie cinétique $\frac{1}{2} mv^2$ et donc sa vitesse décroissent. Celle-ci finit par s'annuler au point x_M. De ce point, la particule revient vers l'origine sous l'action de la force de rappel $\vec{F} = -\dfrac{dV}{dx} < 0$. Dans cette deuxième phase du mouvement, V (x) décroît et la vitesse croît. Quand la particule atteint l'origine, V est nulle et sa vitesse est $-v_0$. Commence alors la troisième phase du mouvement au cours de laquelle la particule s'éloigne de O en se dirigeant vers les points d'abscisses négatives. Puisque V $(-x)$ = V (x), son énergie potentielle croît, et donc sa vitesse diminue en valeur absolue jusqu'à s'annuler au point d'abscisse $-x_M$. De ce point, la particule revient vers l'origine sous l'action de la force de rappel $\vec{F} = -\dfrac{dV}{dx} > 0$. Dans cette quatrième phase du mouvement, V (x) décroît tandis que la vitesse croît jusqu'à atteindre son maximum v_0 quand la particule arrive à l'origine. De là, elle se dirige à nouveau vers x_M et les quatre phases précédemment décrites se reproduisent à nouveau.

Au cours des phases 1 et 2, la particule passe par les mêmes points, ceux dont l'abscisse est comprise entre O et x_M. Cependant, si au point x la vitesse de la particule est v au cours de la phase 1, cette vitesse devient $-v$ au cours de la phase 2. D'après la description faite plus haut, il est clair que les mouvements des phases 1 et 3 sont symétriques par rapport à O. En effet, les points par lesquels passe la particule sont symétriques, et d'autre part en 2 points symétriques les vitesses sont symétriques (elles ont même valeur, mais elles sont dirigées en sens inverse). De même, on peut vérifier que les mouvements des phases 2 et 4 sont symétriques par rapport à O. Ainsi donc, le mouvement de la particule est oscillatoire autour de l'origine, et il reflète la symétrie du potentiel.

La même étude peut s'effectuer en mécanique quantique. On sait que, lorsque l'énergie est fixée égale à E, la fonction d'onde est un état stationnaire (voir *Mécanique quantique*) qui s'écrit $\psi(x, t) = \varphi_E(x)\, e^{-\frac{iEt}{\hbar}}$ où E et $\varphi_E(x)$ satisfont à l'équation :

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2\varphi_E(x)}{dx^2} + V(x)\,\varphi_E(x) = E\varphi_E(x)$$

Quelles vont être les conséquences de la symétrie du potentiel ? Le potentiel étant symétrique autour de $x = 0$, la probabilité pour la particule de se trouver entre x et $x + dx$ doit être égale à celle de se trouver entre $-x$ et $-x - dx$. On doit donc avoir :

$$|\varphi_E(x)|^2 = |\varphi_E(-x)|^2$$

Si la fonction $\varphi_E(x)$ associée à E est unique, on peut toujours la choisir réelle. On en déduit que $\varphi_E(x)$ est soit paire, soit impaire ; c'est-à-dire qu'on a soit $\varphi_E(-x) = \varphi_E(x)$, soit $\varphi_E(-x) = -\varphi_E(x)$. Ce résultat aurait pu être obtenu directement à partir de l'équation ci-dessus. En effet, si on change x en $-x$ dans cette équation, on obtient :

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\varphi_E(-x) + V(-x)\,\varphi_E(-x) = E\varphi_E(-x)$$

comme $\qquad V(-x) = V(x)$

et comme $\qquad \varphi_E(-x) = \dfrac{d^2}{dx^2}\varphi_E(-x)$

l'équation s'écrit :

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2}{dx^2}\varphi_E(-x) + V(x)\,\varphi_E(-x) = E\varphi_E(-x)$$

Donc, si $\varphi_E(x)$ est une solution acceptable, $\varphi_E(-x)$ est aussi une solution acceptable. Si, comme nous l'avons supposé plus haut, $\varphi_E(x)$ est unique et réelle, on voit que nécessairement $\varphi_E(-x)$ est proportionnelle à $\varphi_E(x)$. Le facteur de proportionnalité ne peut être égal qu'à 1 ou -1, car ces deux fonctions doivent être normées, c'est-à-dire :

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\varphi_E(x)|^2\, dx = \int_{-\infty}^{\infty} |\varphi_E(-x)|^2\, dx = 1$$

Illustrons ces considérations générales par l'étude d'un exemple simple. Considérons une particule de masse m assujettie à se déplacer sur un axe $\overrightarrow{Ox}$ et soumise au potentiel V (x) suivant :

$$V(x) = \begin{cases} \infty & \text{si } x < -L \\ 0 & \text{si } -L \leqslant x \leqslant L \\ \infty & \text{si } x > L \end{cases}$$

Ce problème a déjà été étudié en mécanique quantique. Les fonctions $\varphi_E(x)$ sont solutions de l'équation :

$$(1) \quad -\frac{\hbar^2}{2m}\varphi_E(x) = E\varphi_E(x) \quad \text{pour } -L \leqslant x \leqslant L$$

Pour $x < -L$ ou $x > L$, $\varphi_E(x)$ est identiquement nulle. La solution générale de cette équation différentielle est $Ae^{ikx} + Be^{-ikx}$ avec $k = \sqrt{\dfrac{2mE}{\hbar^2}}$.

Pour déterminer les solutions physiquement acceptables, il faut satisfaire aux conditions aux limites en $x = -L$ et $x = L$ qui s'écrivent :

$$Ae^{-ikL} + Be^{ikL} = 0$$
$$Ae^{ikL} + Be^{-ikL} = 0$$

Ces deux conditions déterminent les valeurs acceptables de k et établissent une relation entre A et B. On trouve :

$$k = n\frac{\pi}{2L} \text{ et } A = \pm B,\ n \text{ entier.}$$

Au lieu de procéder de la sorte, on peut utiliser des arguments de symétrie qui simplifient la recherche des fonctions $\varphi_E(x)$. Ainsi, la discussion générale précédente nous ayant montré que ces fonctions $\varphi_E(x)$ sont nécessairement soit paires, soit impaires, il nous suffit de considérer des solutions de la forme $c \sin kx$ (fonction impaire) ou $c \cos kx$ (fonction paire). Ces fonctions ayant une parité déterminée lorsque les conditions de continuité sont satisfaites en $x = L$, elles le sont automatiquement en $x = -L$. On n'a donc plus pour chaque type de fonction qu'une seule condition aux limites à écrire, c'est-à-dire : $\sin kL = 0$ et $\cos kL = 0$. Ce qui entraîne respectivement

$$2\,kL = 2\,p\pi \quad \text{et} \quad 2\,kL = (2\,p + 1)\,\pi$$

p étant entier; ce résultat coïncide évidemment avec le précédent.

– *Remarque* 1. Si la fonction d'onde $\psi(x, t)$ est, à un instant donné, choisi comme origine des temps, une superposition d'états stationnaires de même parité, elle garde cette parité au cours du temps. En effet, à un instant ultérieur t quelconque, la fonction s'écrit :

$$\psi(x, t) = \sum_n c_n \varphi_{E_n}(x)\, e^{-\frac{iE_n t}{\hbar}}, \quad c_n \text{ constant}$$

où E_n sont les valeurs possibles de l'énergie, et, quel que soit n, on a $\varphi_{E_n}(-x) = \varepsilon \varphi_{E_n}(x)$, où ε vaut 1 ou -1 pour tout n. Ainsi la parité de $\psi(x, t)$ se conserve au cours du temps. Ce résultat est un premier exemple qui montre qu'une loi de conservation est la conséquence d'une propriété de symétrie du système.

– *Remarque* 2. Les propriétés de symétrie des fonctions $\varphi_E(x)$ peuvent être obtenues systématiquement si on utilise les résultats de la théorie des groupes. Nous nous contenterons ici de faire sentir la démarche. On démontre que les fonctions $\varphi_E(x)$ correspondant à une valeur de E bien déterminée sont associées à une représentation irréductible de groupe d'invariance de l'équation que vérifie $\varphi_E(x)$. Quel est dans le cas présent ce groupe de transformation ? Il comprend deux éléments, l'identité e qui à toute fonction $f(x)$ fait correspondre la même fonction $f(x)$, et l'élément a qui à toute fonction $f(x)$ fait correspondre la fonction $f(-x)$. On peut démontrer qu'un tel groupe n'a que deux représentations irréductibles R_1 et R_2 rassemblées dans le tableau suivant :

	e	a
R_1	1	1
R_2	1	-1

Quelle que soit la représentation, e est représentée par la multiplication par 1, alors que a est représentée par la multiplication par 1 dans R_1 et par -1 dans R_2. Or, nous avons trouvé que $\varphi_E(-x)$, résultat de l'action de a sur $\varphi_E(x)$, est égale à $\varphi_E(x)$ ou à $-\varphi_E(x)$. Dans le cas où $\varphi_E(x)$ est paire, il faut donc l'associer à la représentation R_1, tandis que, si $\varphi_E(x)$ est impaire, il faut l'associer à R_2.

Dans le cas général où l'équation que vérifie $\varphi_E(x)$ est invariante par les opérations d'un groupe de transformations G, on démontre que la connaissance des représentations irréductibles de G impose des restrictions aux propriétés mathématiques des fonctions $\varphi_E(x)$. Ainsi, dans le cas que nous venons de discuter, la théorie des groupes impose le choix de fonctions $\varphi_E(x)$ de parité donnée.

Particules identiques

Lorsqu'un système physique est constitué de particules identiques, son énergie potentielle présente un type de symétrie qui a des conséquences physiques importantes. Supposons que le système ne soit constitué que de deux particules, et que son énergie potentielle ne dépende que des positions $\vec{r}_1$ et $\vec{r}_2$ des deux particules. Désignons cette énergie potentielle par $V(\vec{r}_1, \vec{r}_2)$. Si on permute les deux particules, l'énergie potentielle devient $V(\vec{r}_2, \vec{r}_1)$. Les deux particules étant identiques, leur permutation n'entraîne aucune modification du système. Donc

fig. 10

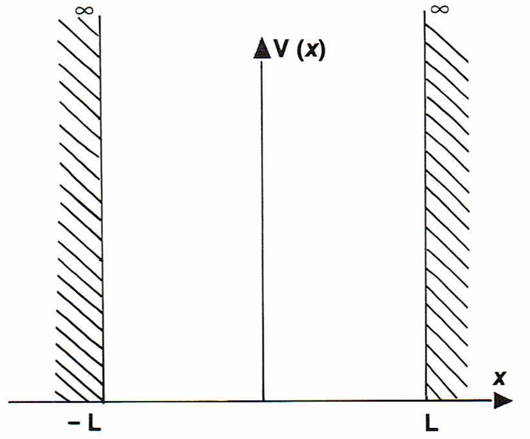

Richard Colin

◀ ***Figure 10 : représentation graphique d'un puits de potentiel carré.***

$V(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = V(\vec{r}_2, \vec{r}_1)$. Cette propriété s'étend aux cas des systèmes constitués de plus de deux particules identiques.

L'étude d'un exemple simple va nous permettre d'illustrer l'importance de cette propriété de symétrie. Considérons deux particules identiques de masse m, sans interaction entre elles, se déplaçant suivant l'axe $x'Ox$. On affectera respectivement des indices 1 et 2 les grandeurs physiques relatives à la première et à la deuxième particule. Ces deux particules sont placées dans un puits de potentiel carré infini identique à celui représenté sur la *figure* 10. Comme dans les problèmes à une particule, la fonction d'onde $\psi(x_1, x_2, t)$ d'un état d'énergie fixée E est un état stationnaire qui s'écrit :

$$\psi(x_1, x_2, t) = \varphi_E(x_1, x_2)\, e^{-\frac{iEt}{\hbar}}$$

où la fonction $\varphi_E(x_1, x_2)$ et E vérifient l'équation :

$$\textbf{(2)} \quad -\frac{\hbar^2}{2\,m}\left(\frac{\partial^2}{\partial x_1^2}\varphi_E(x_1, x_2) + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2}\varphi_E(x_1, x_2)\right) = E\varphi_E(x_1, x_2)$$

pour x_1 et x_2 tous deux compris entre $-L$ et L.

Pour les autres valeurs de x_1 et x_2, la fonction $\varphi_E(x_1, x_2)$ est identiquement nulle.

La probabilité de trouver la première particule entre les points x_1 et $x_1 + dx_1$ et la seconde particule entre x_2 et $x_2 + dx_2$ est $|\varphi_E(x_1, x_2)|^2\, dx_1 dx_2$. Si on permute les deux particules, en vertu de la propriété de symétrie, cette probabilité ne doit pas changer. Or, après permutation, cette probabilité s'écrivant $|\varphi_E(x_2, x_1)|^2\, dx_1 dx_2$, on a donc nécessairement $|\varphi_E(x_1, x_2)|^2 = |\varphi_E(x_2, x_1)|^2$ ce qui implique, si les fonctions sont réelles,

$$\varphi_E(x_2, x_1) = \pm\, \varphi_E(x_1, x_2)$$

On dira que la fonction $\varphi_E(x_1, x_2)$ est soit **symétrique** (signe +), soit **antisymétrique** (signe —). Ce résultat est général et il est indépendant de la forme du potentiel.

Dans le cas particulier que nous étudions, nous allons déterminer explicitement la forme des fonctions $\varphi_E(x_1, x_2)$.

Cherchons une solution de l'équation **(2)** de la forme $f_1(x_1)\, f_2(x_2)$. En reportant dans **(2)**, il vient

$$-\frac{\hbar^2}{2\,m}\left[f_1''(x_1)\, f_2(x_2) + f_1(x_1)\, f_2''(x_2)\right] = Ef_1(x_1)\, f_2(x_2)$$

En divisant les deux nombres de l'équation par

$$f_1(x_1)\, f_2(x_2)$$

il vient :

$$-\frac{\hbar^2}{2\,m}\left(\frac{f_1''(x_1)}{f_1(x_1)} + \frac{f_2''(x_2)}{f_2(x_2)}\right) = E$$

Le premier membre est la somme d'une fonction de x_1 et d'une fonction de x_2. Pour que cette somme soit constante, il faut que chacune de ces fonctions se réduise à une constante. En désignant respectivement par e_1 et e_2 les constantes, les équations auxquelles satisfont $f_1(x_1)$ et $f_2(x_2)$ s'écrivent :

$$\textbf{(3)} \quad -\frac{\hbar^2}{2\,m} f_1''(x_1) = e_1 f_1(x_1) \qquad -L \leqslant x_1 \leqslant L$$

$$(4) \qquad -\frac{\hbar^2}{2m} f_2''(x_2) = e_2 f_2(x_2) \qquad -L \leqslant x_2 \leqslant L$$

et $E = e_1 + e_2$.

Ces équations ne sont valables que si x_1 et x_2 appartiennent à l'intervalle $-L, L$; en dehors de cet intervalle les fonctions f_1 et f_2 doivent être nulles. Les équations **(3)** et **(4)** sont identiques à l'équation **(1)** que nous avons déjà résolue. On a donc pour $i = 1$ ou 2 :

$$f_i(x_i) = c \sin k_i x_i \text{ avec } k_i L = p\pi$$

ou $$f_i(x_i) = c \cos k_i x_i \text{ avec } k_i L = (p + 1/2)\pi$$

Dans ces expressions, p est un entier, et la constante e_i est égale à $e_i = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$.

En vertu des propriétés de symétrie, nous savons que $\varphi_E(x_1, x_2)$ est nécessairement soit symétrique, soit antisymétrique. On en déduit que les fonctions $\varphi_E(x_1, x_2)$ sont nécessairement de la forme :

$$\varphi_E(x_1, x_2) = f_1(x_1) f_2(x_2) + f_1(x_2) f_2(x_1) \quad \text{(symétrique)}$$

ou $$\varphi_E(x_1, x_2) = f_1(x_1) f_2(x_2) - f_1(x_2) f_2(x_1) \quad \text{(antisymétrique)}$$

Ces deux fonctions, symétrique et antisymétrique, correspondent toutes deux à la même valeur $E = e_1 + e_2$ de l'énergie. Étudions les premiers niveaux dans les deux cas :

— *Fonctions symétriques :*

E	$\varphi_E(x_1, x_2)$
$\frac{\hbar^2\pi^2}{4mL^2}$	$2c^2 \cos\frac{\pi}{2L}x_1 \cdot \cos\frac{\pi}{2L}x_2$
$\frac{5\hbar^2\pi^2}{8mL^2}$	$c^2\left(\cos\frac{\pi}{2L}x_1 \cdot \sin\frac{\pi}{L}x_2 + \cos\frac{\pi}{2L}x_2 \cdot \sin\frac{\pi}{L}x_1\right)$
$\frac{\hbar^2\pi^2}{mL^2}$	$2c^2 \sin\frac{\pi}{L}x_1 \cdot \sin\frac{\pi}{L}x_2$
$\frac{10\hbar^2\pi^2}{8mL^2}$	$c^2\left(\cos\frac{\pi}{2L}x_1 \cdot \cos\frac{3\pi}{2L}x_2 + \cos\frac{\pi}{2L}x_2 \cdot \cos\frac{3\pi}{2L}x_1\right)$

— *Fonctions antisymétriques :*

E	$\varphi_E(x_1, x_2)$
$\frac{5\hbar^2\pi^2}{8mL^2}$	$c^2 \cos\frac{\pi}{2L}x_1 \cdot \sin\frac{\pi}{L}x_2 - \cos\frac{\pi}{2L}x_2 \cdot \sin\frac{\pi}{L}x_1)$
$\frac{10\hbar^2\pi^2}{8mL^2}$	$c^2\left(\cos\frac{\pi}{2L}x_1 \cdot \cos\frac{3\pi}{2L}x_2 - \cos\frac{\pi}{2L}x_2 \cdot \cos\frac{3\pi}{2L}x_1\right)$

Ces tableaux montrent que certaines valeurs de l'énergie autorisées pour les fonctions symétriques sont interdites pour les fonctions antisymétriques. C'est le cas des valeurs $\frac{\hbar^2\pi^2}{4mL^2}$ et $\frac{\hbar^2\pi^2}{mL^2}$. Ces valeurs correspondent aux cas $e_1 = e_2$ qui entraînent que les fonctions antisymétriques correspondantes sont identiquement nulles, et donc inacceptables. Ce résultat est général : dans une assemblée de particules identiques, si la fonction d'onde du système est antisymétrique, deux particules ne peuvent pas être dans le même état. Ce résultat très important est un aspect du principe de Pauli qui s'applique à certaines particules.

La discussion précédente montre qu'un système de particules identiques n'a pas les mêmes propriétés suivant que la fonction d'onde est symétrique ou antisymétrique. On appelle *bosons* les particules dont les fonctions d'onde sont symétriques, et *fermions* celles dont la fonction d'onde est antisymétrique. Dans une assemblée de fermions, deux particules ne peuvent pas être dans le même état, tandis que, dans une assemblée de bosons, aucune interdiction de cet ordre n'existe. Les électrons, les protons, les neutrons sont des fermions, les photons sont des bosons.

Notons, et ceci est un complément à la discussion précédente, que deux particules ne peuvent pas se trouver au même point si $\varphi_E(x_1, x_2)$ est antisymétrique. En effet, $\varphi_E(x_1, x_2)$ s'annule lorsque $x_1 = x_2$. Ce résultat n'est plus valable si $\varphi_E(x_1, x_2)$ est symétrique.

Conservation de l'impulsion

Considérons une particule de masse m placée dans un potentiel $V(x, y, z)$, x, y, z étant les coordonnées de la particule dans un système d'axes $\overrightarrow{Ox}, \overrightarrow{Oy}, \overrightarrow{Oz}$. Supposons que le potentiel ne dépende pas de x. On en déduit que $\frac{\partial V}{\partial x} = 0$, ce qui implique que la composante F_x suivant l'axe $\overrightarrow{Ox}$ de la force $\vec{F}$ agissant sur la particule est nulle. L'équation fondamentale de la dynamique projetée sur l'axe $\overrightarrow{Ox}$ donne :

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = F_x = 0$$

c'est-à-dire :

$$\frac{d}{dt}\left(m\frac{dx}{dt}\right) = \frac{d}{dt}(p_x) = 0$$

On en déduit que p_x composante suivant $\overrightarrow{Ox}$ de l'impulsion $\vec{p}$ ($\vec{p}$ est aussi appelé quantité de mouvement) est constante. Cette loi de conservation d'une composante de l'impulsion est une conséquence d'une propriété de symétrie du potentiel : en effet, le potentiel V ne change pas si on change x en $x + a$, a étant une longueur quelconque. On dit encore que le potentiel est invariant par translation suivant l'axe $\overrightarrow{Ox}$. De façon générale, si le potentiel est invariant par translation suivant une direction $\overrightarrow{Ou}$, la composante de l'impulsion suivant $\overrightarrow{Ou}$ est constante au cours du mouvement. L'énergie potentielle de gravitation est un exemple d'un tel potentiel. Elle s'écrit en effet mgh où m est la masse du point matériel, h sa hauteur par rapport au sol et g l'accélération de la pesanteur.

Si on admet que g est constant, cette énergie potentielle ne dépend que de la position du point matériel par rapport au sol et est invariante dans toute translation selon un axe horizontal. On en déduit que les composantes horizontales de l'impulsion du point matériel restent constantes au cours du mouvement.

Un système physique constitué de deux points matériels dont l'énergie potentielle d'interaction ne dépend que de la distance r entre les deux points matériels est un autre exemple de potentiel invariant par translation. En effet, si on déplace suivant une direction et d'une même quantité les deux points, l'énergie potentielle reste constante. De cette invariance du potentiel dans toute translation du système physique on déduit que l'impulsion totale du système, c'est-à-dire la somme $\vec{p_1} + \vec{p_2}$ des impulsions $\vec{p_1}$ et $\vec{p_2}$ des deux particules, reste constante au cours du mouvement. Ce résultat est très important pour l'étude du choc de deux particules. Il s'étend facilement aux systèmes composés d'un grand nombre de points matériels. En mécanique quantique, le problème se présente sous une forme différente, mais les conclusions sont les mêmes.

On trouve en mécanique classique et quantique un grand nombre de lois de conservation. Toutes ces lois de conservation sont liées à des propriétés de symétrie du système. Ainsi, l'énergie se conserve si l'énergie d'interaction est invariante par translation dans le temps, le moment cinétique se conserve si l'énergie d'interaction est invariante par rotation, etc. Dans tous les cas, la prise en compte de la symétrie du système physique facilite son étude.

BIBLIOGRAPHIE

HAMERMESH M., *Group Theory,* Addison-Wesley Publishing Company, London-Paris, 1962. - WEYL H., *The Classical Groups,* Princeton University Press, 1946.

LEXIQUE DE PHYSIQUE

SUPPLÉMENT AUX VOLUMES XIV ET XV DE LA GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

ABRÉVIATIONS

adj.	adjectif	*n.*	nom	*p. ex.*	par exemple
ex.	exemple	*par ext.*	par extension	syn.	synonyme

A

abaque. *n.* Système de courbes (en général des segments de droite) tracées sur un plan, correspondant à une équation donnée et qui en donne la solution graphiquement.

aberration chromatique. Phénomène parasite, provenant de la variation de l'indice des milieux transparents avec la longueur d'onde de la lumière, et dont la conséquence est qu'un système optique fournit autant d'images qu'il y a de longueurs d'onde dans la lumière qui le traverse.

aberration des étoiles. Mouvement circulaire apparent des étoiles au zénith, de diamètre angulaire 40,5″ et de période une année.

absorption acoustique. Le coefficient d'absorption est le rapport de l'énergie sonore absorbée à l'énergie incidente.

accélérateur. *n.* Machine utilisée pour accélérer des particules élémentaires et pouvant leur communiquer des énergies de plusieurs centaines de milliards d'électron-volts.

accélérateur linéaire. Accélérateur dans lequel la trajectoire de l'ion est rectiligne et qui utilise le concept d'accélération résonnante.

accélération de Coriolis. Accélération qui, ajoutée aux accélérations relative et d'entraînement, permet de calculer l'accélération absolue. Seuls les corps en mouvement dans un référentiel en rotation subissent l'accélération de Coriolis.

accommodation. *n.* Changement des propriétés optiques du cristallin de l'œil permettant la formation de l'image d'un objet exactement sur la rétine à condition que cet objet soit situé entre le *ponctum remotum* et le *ponctum proximum*.

acoustique. *n.* Science des phénomènes sonores. On désigne par acoustique physique l'extension des phénomènes sonores aux phénomènes inaudibles, c'est-à-dire finalement à l'ensemble des vibrations dans les milieux élastiques.

action dérivée. Signal correcteur d'un système, fonction linéaire de la dérivée de l'écart entre la sortie réelle et la sortie désirée.

action intégrale. Signal correcteur d'un système, fonction linéaire de l'intégrale de l'écart entre la sortie réelle et la sortie désirée.

action proportionnelle. Signal correcteur d'un système, fonction linéaire de l'écart entre la sortie réelle et la sortie désirée.

adaptatif. *adj.* Qualifie un organe technologique automatique lorsqu'il a la possibilité de modifier son modèle de l'environnement afin de mieux accomplir l'objectif qui lui a été fixé.

adaptation. *n.* Faculté d'un organisme de tenir compte de modifications internes ou externes afin de continuer son existence.

adaptation d'impédance. Association d'une source et d'une charge ayant des impédances d'entrée et de sortie imaginaires conjuguées (parties réelles identiques, parties imaginaires de signe opposé). C'est lorsque cette condition est remplie que le générateur délivre dans la charge une puissance maximale.

adapter une charge Z_t à une ligne d'impédance caractéristique Z_0. Faire en sorte que le générateur qui alimente la ligne « voie » la charge Z_0.

adiabatique. *adj.* Une transformation est dite adiabatique quand le système considéré n'échange pas de chaleur avec l'extérieur.

aérodynamique. *n.* Partie de la mécanique des fluides consacrée à l'étude des mouvements de l'air.

aimantation. *n.* Moment magnétique par unité de volume acquis par un milieu matériel soumis à l'influence d'une induction magnétique.

aléatoire. *adj.* Se dit d'une grandeur qui peut prendre un certain nombre de valeurs à chacune desquelles est attachée une probabilité.

amorphe. *adj.* Caractérise une substance non cristallisée, c'est-à-dire ne présentant aucun ordre cristallin à longue distance. *Ex.* Les verres.

amortissement. *n.* Phénomène ayant pour effet de diminuer l'amplitude des oscillations d'un système jusqu'à les faire cesser complètement.

analyse fréquentielle. Méthode d'analyse d'un système linéaire consistant à étudier l'évolution du gain et du déphasage sortie-entrée en fonction de la fréquence d'un signal sinusoïdal appliqué en entrée.

anéchoïde (chambre). Local dépourvu de réverbération. En général, une chambre anéchoïde possède de grandes dimensions.

anémomètre. *n.* Instrument servant à la mesure de la vitesse d'un courant gazeux. L'anémomètre à fil chaud utilise la variation de résistivité d'un fil chaud refroidi par le fluide en mouvement.

angle de Brewster. Angle d'incidence d'une lumière polarisée sur un miroir donnant une intensité nulle par réflexion.

angle de diffusion. Angle que font entre elles les directions de la vitesse d'une particule avant et après un choc.

angle de perte d'un miroir magnétique. Valeur minimale de l'angle sous lequel une particule peut aborder la direction locale du champ magnétique pour être réfléchie dans un miroir magnétique.

angles d'Euler. Angles permettant de définir sans ambiguïté la position relative de deux référentiels ayant la même origine. Les angles d'Euler constituent des coordonnées généralisées commodes pour les problèmes concernant des solides en rotation.

angström. *n.* Unité de longueur de la physique atomique; il vaut 10^{-10} m ou 10^{-4} μ. En abrégé, Å.

anisotrope. *adj.* Qui n'est pas identique dans toutes les directions de l'espace.

anneaux de stockage ou **de collision.** Dispositif permettant de réaliser une collision entre deux particules circulant à grande vitesse en sens inverse. Dans le cas où les deux particules ont même charge (par exemple deux protons), l'ensemble comporte deux chambres toriques dans lesquelles circulent les ions dont on observe les interactions aux zones d'intersection. Lorsque les particules sont de même masse mais de charge opposée (électrons-positons), les deux faisceaux sont accélérés dans la même chambre.

aplanétisme. *n.* Propriété d'un système optique d'être stigmatique pour tous les points situés dans une petite portion d'un plan perpendiculaire à l'axe optique.

arbre électrique. Dispositif constitué par deux machines asynchrones dont les stators sont montés en parallèle et les rotors montés en série. Il permet de transférer de l'énergie mécanique d'une machine à l'autre par une simple liaison électrique d'où la dénomination tirée de l'analogie avec un arbre mécanique de transmission.

asservissement. *n.* Système automatique avec rétroaction susceptible de corriger les écarts existant entre la sortie réelle et la sortie désirée.

automatique. *n.* Branche de la science et de la technologie dont le but est le développement d'outils et de systèmes capables de se gérer sans intervention humaine et pouvant effectuer des tâches analogues à celles conçues par l'esprit humain.

axe principal. Les axes principaux d'un solide sont des axes tels que la matrice d'inertie, calculée dans le repère constitué par ces axes, soit diagonale.

B

Balmer (série de). Ensemble des raies dans le visible et le proche ultra-violet émises par les niveaux excités de l'atome d'hydrogène vers le niveau $n = 2$. C'est aussi le nom donné à la formule qui donne l'inverse des longueurs d'onde de ces raies.

balourds. *n.* Petites masses que l'on fixe sur les systèmes mécaniques tournant à grande vitesse afin de réaliser l'équilibrage dynamique du système.

bande passante. Domaine des fréquences correctement transmises par un appareil. La bande passante de l'oreille humaine s'étend entre 20 et 20 000 Hz.

barre de commande. Nom générique regroupant l'ensemble des éléments de commande. Parmi les barres de commande, on distingue les barres de réglage et les barres de sécurité. Les barres de réglage comprennent les barres de compensation et les barres de pilotage, elles permettent le fonctionnement normal du réacteur. Les barres de sécurité sont destinées à arrêter rapidement un réacteur nucléaire en cas de nécessité.

barre de contrôle. Expression employée pour barre de commande.

barrière coulombienne. Action répulsive qu'un noyau exerce sur une particule chargée positivement, en raison de sa charge. Les deux ions ainsi chargés doivent posséder une énergie cinétique suffisante pour s'approcher assez près et permettre aux forces de nature nucléaire de se manifester.

bascule. *n.* Circuit électronique pouvant se trouver dans deux états discrets. On distingue les bascules bistables, monostables ou astables suivant que des deux états, un seul ou aucun peut se maintenir indéfiniment (tant que les conditions extérieures sont inchangées).

base de temps. Circuit fournissant les tensions en « dent de scie » assurant le balayage linéaire du tube cathodique dans un oscilloscope ou un téléviseur.

bâtonnet. *n.* Un des deux types de cellules nerveuses de la rétine sensibles à la lumière; les bâtonnets servent à la vision nocturne; ils ne donnent pas d'impression colorée.

battement. *n.* Variation périodique de l'intensité sonore, due à la superposition de deux sons de fréquences voisines. La fréquence du battement est la différence de ces deux fréquences.

bel. *n.* Unité de mesure du niveau d'intensité sonore. Le bel est le logarithme décimal du rapport de l'intensité mesurée à une intensité de référence de 10^{-12} watt/m². Cette intensité standard correspond environ au seuil de l'audition à 1 000 Hz.

binaire. *adj.* Composé de deux symboles.

bionique. *n.* Discipline cherchant à créer dans l'électronique et l'informatique des dispositifs imités du vivant. La bionique cherche en particulier à créer des dispositifs dont le comportement ressemble à celui du cerveau humain.

biréfringence. *n.* Propriété de certains cristaux qui donnent deux rayons réfractés à partir d'un rayon incident.

bit. *n.* Unité de mesure de l'information correspondant à l'utilisation des logarithmes à base 2 dans la formule de Shannon.

Bohr (modèle de). Modèle semi-classique de l'atome d'hydrogène et des ions hydrogénoïdes (à un seul électron). Il ajoute une hypothèse de quantification à la mécanique classique.

brillance. *n.* Ancien terme qui servait à désigner la luminance énergétique.

De Broglie (longueur d'onde de). Longueur d'onde de l'onde associée à une particule de vitesse parfaitement définie ($\lambda = h/mv$).

bruit. *n.* Signal ne transportant pas d'information utile : une écoute très confortable est obtenue avec un rapport du signal utile au bruit de 60 décibels.

C

caléfaction. *n. (burn-out).* Apparition d'une pellicule ou gaine de vapeur entre une surface chauffante et un liquide. Dans un réacteur à fluide de refroidissement liquide, vaporisation locale du fluide au contact de la gaine d'un élément combustible, provoquant à cet endroit un échauffement excessif endommageant cet élément.

canal. *n.* Organe d'un système de communication par lequel l'information est transmise.

canonique. *adj.* Un système canonique est un système fermé.

capacité *n.* 1° Valeur maximale de l'information transmise par un canal. Ce maximum est pris par rapport aux probabilités des caractères d'entrée. 2° La charge Q d'un condensateur (charge de son armature positive) est proportionnelle à la différence de potentiel U entre ses armatures. Le quotient $\frac{Q}{U}$ caractérise le condensateur; on l'appelle sa capacité. Elle varie en raison inverse de la distance des armatures, et dépend de la nature du diélectrique. La capacité est exprimée en farad (F), mais on préfère généralement à cette unité trop grande certains de ses sous-multiples : μF (10^{-6} F), nF (10^{-9} F), pF (10^{-12} F).

capacité calorifique. Produit de la masse d'un corps par sa chaleur spécifique.

capteur. *n.* Organe physique saisissant une grandeur sur un système. *Ex.* Capteur de pression. Un grand nombre de capteurs convertissent la grandeur mesurée en signal électrique.

caténaire. *n.* Câble d'alimentation électrique aérien des locomotives.

central (potentiel). Potentiel à symétrie sphérique (mais non coulombien) qui intervient dans le modèle à électrons indépendants. Il représente l'énergie d'interaction d'un électron avec les Z — 1 autres électrons de l'atome.

centre de gravité ou **centre de masse.** La position du centre de gravité d'un système de particules (et, en particulier, d'un solide) est donnée par la relation

$$\vec{R} = \frac{\sum_i m_i \vec{r_i}}{\sum_i m_i}$$

où les m_i sont les masses des particules et $\vec{r_i}$ leurs positions. Le mouvement du centre de gravité d'un ensemble de points matériels est le même que celui d'un point matériel unique soumis à la résultante des forces extérieures et dont la masse serait égale à la somme des masses constituant le système.

centre guide. Point de l'espace par rapport auquel un système de coordonnées, tournant à la fréquence cyclotron dans un plan perpendiculaire au champ magnétique, fait apparaître une particule comme libérée du mouvement cyclotron. En pratique, pour un champ variant lentement dans l'espace et dans le temps, c'est le centre du cercle, trajectoire instantanée de la particule.

Cerenkov (compteur). Détecteur dans lequel on décèle le passage d'une particule chargée relativiste grâce à l'émission d'une lumière, dite radiation Cerenkov. Cette émission intervient si la vitesse v de la particule vérifie la relation $v > \frac{c}{n}$ où c est la vitesse de la lumière dans le vide et n l'indice de réfraction du milieu détecteur.

chaleur latente. Quantité de chaleur qui doit être absorbée pour transformer une masse donnée d'une phase en une masse équivalente d'une autre phase quand les deux phases sont en équilibre.

chaleur spécifique. Rapport d'une quantité de chaleur reçue par un système à l'accroissement de sa température.

chambre à bulles. Détecteur dans lequel on peut visualiser la trajectoire de particules chargées, grâce à de petites bulles qui jalonnent leur parcours. Pour obtenir ces bulles, on porte le milieu liquide du détecteur dans un état surchauffé grâce à une brusque détente. Après détente et photographie du milieu, le liquide est à nouveau comprimé et retrouve son état normal.

chambre à étincelles. Détecteur constitué d'une série de plaques métalliques; pour visualiser le passage d'une particule chargée entre deux de ces plaques, on applique entre elles une impulsion de tension. Les ions créés par la particule entraînent l'apparition d'étincelles qui jalonnent la trajectoire.

champ électrique. On appelle champ électrique toute région de l'espace où une charge électrique est soumise à une force électrique. Le champ électrique en un point M est caractérisé par le vecteur champ électrique $\vec{E}$, défini par la relation $\vec{F} = q\vec{E}$, $\vec{F}$ étant la force qui s'exerce sur la charge q placée au point M. L'intensité du vecteur $\vec{E}$ s'exprime en volt par mètre (V/m).

champ magnétique. On appelle champ magnétique toute région de l'espace où une petite aiguille aimantée est soumise à un système de forces magnétiques. Il est caractérisé en tout point par un vecteur induction magnétique $\vec{B}$. L'existence d'un champ magnétique est liée au mouvement de charges électriques.

champ sonore. Volume de matière dans lequel se propage l'onde sonore.

champ tournant. C'est un champ d'induction magnétique produit par un système polyphasé (en général triphasé) de courants alternatifs et qui se déplace globalement avec une vitesse angulaire de rotation dépendant de la fréquence du réseau et du nombre de pôles de l'armature polyphasée.

champs self consistants. Champs électromagnétiques produits par les particules chargées et leur mouvement dans un plasma.

charge électrique. L'électrisation se caractérise par l'apparition de forces (attractives ou répulsives) entre des corps voisins. Cette propriété est liée au développement, à la surface des corps, de petites quantités d'électricité, encore appelées charges électriques. Les charges positives sont liées au noyau atomique; l'électron constitue le porteur de charge négative, la valeur absolue de sa charge représentant la charge élémentaire :

$$e = 1{,}602 \cdot 10^{-19} \text{ coulomb.}$$

chemin optique (entre deux points A et B du parcours d'un rayon lumineux). C'est le chemin que parcourerait la lumière dans le vide pendant le temps qu'elle met pour aller de A à B en traversant des milieux d'indices différents.

chimioluminescence. *n.* Émission de lumière monochromatique lors d'une réaction chimique.

choc (onde de). Surface de discontinuité pour les grandeurs thermodynamiques et hydrodynamiques à l'intérieur d'un fluide, se propageant à la vitesse du son.

chute ohmique de potentiel. Différence de potentiel aux bornes d'un circuit purement résistif.

circuit fil fin. Dans un wattmètre, correspond à la partie de circuit, très résistante, qui mesure la tension.

circuit gros fil. Dans un wattmètre, correspond à la partie du circuit, peu résistante, qui mesure le courant.

circuit oscillant. Circuit formé d'une self et d'une capacité dont le comportement est celui d'une résistance pure pour une fréquence bien particulière appelée fréquence de résonance $f = 1/2\,\pi\,\sqrt{LC}$.

circuits intégrés. Association sur une même plaquette de silicium d'un grand nombre de transistors et résistances interconnectés par des métallisations superficielles et formant un circuit complexe.

cisaillement. *n.* Généralement employé dans le sens de contrainte tangentielle.

classification périodique. Voir *Mendeleïev (table de).*

codage. *n.* Opération réalisant la transcription de messages d'un alphabet à un autre selon les règles d'un code. Le codage peut ajouter des propriétés aux messages originels (possibilité de détection ou de correction d'erreurs).

code. *n.* Règles d'équivalence entre deux ensembles de messages.

codeur. *n.* Organe réalisant l'opération de codage.

coefficient de couplage (noté C). Caractérise, dans un coupleur directif, la fraction de puissance désirée P_c prélevée sur la puissance incidente P_i :

$$C = 10 \log \frac{P_i}{P_c}$$

coefficient de frottement de glissement statique. Valeur limite du rapport de la composante tangentielle à la composante normale de la réaction qu'exerce un solide sur un autre au point de contact; au-delà de cette valeur, il se produit un glissement des solides l'un sur l'autre.

coefficient de frottement de pivotement statique. Valeur limite du rapport de la composante normale du couple appliqué à la composante normale de la réaction qu'un solide exerce sur un autre au point de contact; au-delà de cette valeur, il se produit un pivotement des solides l'un par rapport à l'autre.

coefficient de qualité. Grandeur caractérisant la capacité d'un oscillateur d'emmagasiner l'énergie qui lui est apportée à la fréquence propre de cet oscillateur.

cohérence spatiale. Propriété de deux éléments d'une source lumineuse ou de deux sources différentes d'émettre des vibrations dont le déphasage ne dépend pas du temps.

cohérence temporelle. Propriété d'une source lumineuse d'émettre une vibration dont la phase ne varie pas avec le temps.

cohésion. *n.* Force agissant entre les atomes ou molécules d'une substance liquide ou solide et assurant les diverses liaisons entre eux.

collimateur. *n.* Instrument d'optique servant à effectuer des visées.

collision élastique. Collision dans laquelle l'énergie cinétique totale des particules est conservée.

communication. *n.* Relation dynamique entre deux organes ou systèmes. On parle de théorie de la communication pour grouper toutes les formulations y afférant.

comparateur. *n.* Organe d'une chaîne de mesure réalisant la comparaison entre deux grandeurs.

compteur proportionnel. Détecteur comprenant deux électrodes situées dans un milieu gazeux. L'électrode haute tension est un filament au voisinage duquel existe un champ électrique important. Celui-ci permet de multiplier par ionisations successives les ions primaires produits par la particule ionisante; on recueille ainsi une impulsion électrique.

compteur proportionnel multifils. Ensemble de détection comportant un grand nombre de fils parallèles situés entre deux électrodes planes, le milieu entre ces électrodes étant rempli de gaz (il peut y avoir plusieurs milliers de fils). Chaque fil se comporte comme le filament central d'un compteur proportionnel. Quand une particule ionisante traverse le compteur, on obtient une impulsion électrique sur le fil dont elle s'est le plus approchée, ce qui permet ainsi de la localiser dans une direction.

condensateur. *n.* Un condensateur est un système constitué par deux conducteurs voisins, ou armatures, séparés par un isolant ou diélectrique. Il est caractérisé par sa capacité, rapport de la charge acquise Q à la tension appliquée U. L'énergie électrique emmagasinée par le condensateur a pour expression :

$$W = \frac{1}{2} QU = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} CU^2$$

Le condensateur joue un rôle important en courant alternatif. En haute fréquence, il se comporte comme un court-circuit.

conducteur. *n.* On appelle conducteur tout corps qui permet l'établissement d'un courant électrique. La conduction est assurée par des porteurs de charges mobiles, qu'un champ électrique, si faible soit-il, met en mouvement : électrons libres dans le cas des conducteurs métalliques, ions dans celui des liquides.

conductivité (notée σ). *n.* Pour un grand nombre de matériaux, c'est le coefficient de proportionnalité entre la densité de courant de conduction $\vec{C}$ lié aux électrons libres — et dû à l'application d'un champ électrique $\vec{E}$ et ce champ. On pose : $\vec{C} = \sigma\vec{E}$. Le phénomène correspondant s'appelle conductibilité.

conductibilité électrique ou **thermique.** Propriété physique que possèdent les corps de transmettre l'électricité ou la chaleur.

conductivité électrique. Grandeur qui caractérise la conductibilité électrique d'une substance. Elle est définie comme le rapport de la densité de courant dans ce corps au champ électrique qui lui est appliqué.

conductivité thermique. Grandeur définie comme le rapport entre l'énergie transmise par unité de temps à travers une surface de 1 cm² d'un corps solide et le gradient de température.

cône. *n.* Un des deux types de cellules nerveuses de la rétine, sensibles à la lumière. Il en existe trois sortes dont les maximums de sensibilité se trouvent respectivement dans le bleu, le jaune, le rouge; elles permettent la vision des couleurs.

configuration. *n.* Désigne un état de l'atome dans le modèle à électrons indépendants. Elle est caractérisée par les valeurs des nombres quantiques *n* et *l*.

conformateur à diodes. Circuit à diodes transformant un signal triangulaire en une sinusoïde. Ce circuit est très utilisé dans les générateurs BF car les signaux triangulaires sont très faciles à fabriquer, surtout aux fréquences très basses où la génération directe de sinusoïdes devient difficile.

conique. *n.* Courbe dont l'équation en coordonnées cartésiennes est du second degré. Il y a trois sortes de coniques : les ellipses, les hyperboles et les paraboles.

conservatif. *adj.* Une force est dite conservative si elle effectue un travail nul lorsque son point d'application décrit un circuit fermé. *Ex.* Les forces électriques, les forces de gravitation sont conservatives.

constante de propagation à la coupure β_c. Détermine la longueur d'onde λ_c à laquelle la propagation le long d'une ligne cesse :

$$\left(\lambda_0 = \lambda_c, \ \beta_c = \frac{2\pi}{\lambda_c}\right)$$

Elle ne dépend que des caractéristiques géométriques de la section droite de la ligne, du mode envisagé, et des constantes ε et μ du milieu de propagation. Elle est reliée aux constantes de propagation guidée et dans l'espace libre par la relation $\beta_g^2 + \beta_c^2 = \beta^2$.

constante de propagation dans l'espace libre (notée β ou β_0). C'est le rapport de la pulsation ω de la source divisée par la vitesse de propagation de l'onde électromagnétique dans un milieu infini caractérisé par ε et μ réels. β ou $\beta_0 = \omega\sqrt{\varepsilon\mu}$.

constante de propagation le long d'une ligne (notée β_g). Caractérise la propagation résultante le long de l'axe, de la ligne. Elle est reliée à la longueur d'onde λ_g par la relation $\beta_g = \frac{2\pi}{\lambda_g}$.

constante de temps. Temps au bout duquel un phénomène décroissant exponentiellement a vu son amplitude diminuée d'un facteur égal à 1/*e*.

continu. *adj.* Qui n'est pas séparé dans le temps ou dans l'espace; qui forme un tout composé de parties non séparées. Quand les dimensions des systèmes sont grandes devant les distances intermoléculaires, on peut considérer un fluide comme un milieu continu.

contrainte. *n.* Force s'exerçant sur un élément de surface, rapportée à l'aire de cet élément de surface.

convertisseur analogique digital. Circuit transformant une tension analogique en une série de 0 et 1 constituant un mot digital (ce mot est, par exemple, un nombre binaire pur). Le convertisseur A → D constitue le cœur des voltmètres numériques.

convertisseur photo-voltaïque. Des cellules photo-sensibles regroupées constituent un générateur d'électricité convertissant l'énergie solaire en énergie électrique. Le dispositif s'appelle convertisseur photo-voltaïque.

coordonnées généralisées. Grandeurs, longueurs, angles..., qui caractérisent la position d'un système mécanique dans l'espace. Pour décrire complètement l'état d'un système, elles doivent être en nombre égal au nombre de degrés de liberté du système.

corrélateur. *n.* Appareil capable de calculer et de visualiser la fonction de corrélation de deux signaux. Cette fonction est une caractéristique chiffrée de la dépendance de ces deux signaux l'un par rapport à l'autre.

couplage en étoile. Type de branchement des différentes phases d'un transformateur triphasé tel que chacune d'elles soit disposée entre un fil de ligne et un point commun appelé neutre.

couplage en triangle. Type de branchement des différentes phases d'un transformateur triphasé tel que chacune d'elles soit disposée entre deux fils de ligne.

couplage en zigzag. Type de branchement des différentes phases d'un transformateur hexaphasé (chaque enroulement triphasé est divisé en deux enroulements indépendants électriquement mais disposés sur le même noyau magnétique).

coupure. *n.* Condition conduisant à un indice optique nul, c'est-à-dire à une onde qui ne se propage plus dans le plasma.

courant électrique. Lorsqu'une différence de potentiel est établie entre deux points d'un même conducteur, celui-ci n'est plus en équilibre électrostatique; les charges électriques se déplacent d'un mouvement d'ensemble. Si la différence de potentiel est indépendante du temps, le régime de déplacement des charges est alors stationnaire : le courant est dit *continu.* D'autres courants électriques, dits *alternatifs*, inversent continuellement leur sens de parcours. Les plus utilisés sont les courants alternatifs sinusoïdaux : l'intensité est une fonction sinusoïdale du temps.

courbe d'équilibre des phases. Courbe des valeurs de température et de pression pour lesquelles les deux phases peuvent coexister en équilibre.

cristal. *n.* Substance minérale solide dont l'arrangement atomique ou moléculaire présente un caractère périodique. A l'échelle macroscopique, il affecte une forme géométrique bien définie.

cristal liquide. Nom donné à des substances organiques qui, dans un certain domaine de températures, présentent une phase intermédiaire (appelée phase mésomorphe), caractérisée par un ordre suivant une ou deux directions.

cybernétique. *n.* Science constituée des théories de la communication et du contrôle s'appliquant aussi bien au vivant qu'à la machine.

cycle de Carnot. Cycle d'un système qui subit des transformations réversibles.

cyclotron. *n.* Accélérateur circulaire dans lequel les particules décrivent une trajectoire spiralée; un champ magnétique courbe la trajectoire, cependant que leur énergie cinétique s'accroît à chaque passage dans l'intervalle séparant deux électrodes (ou dees) entre lesquelles on établit une tension sinusoïdale à haute fréquence (de l'ordre de la dizaine de mégahertz).

D

décibel. *n.* Unité de mesure objective de l'intensité sonore, valant un dixième de bel.

décodage. *n.* Opération inverse du codage.

découplage. *n.* Mise en parallèle sur les deux bornes d'un circuit d'un condensateur de forte valeur dont l'impédance devient négligeable aux fréquences élevées.

décrément logarithmique. Grandeur caractéristique d'une oscillation à amortissement visqueux; c'est le logarithme népérien du rapport des amplitudes de deux maximums successifs.

dee. *n.* Nom anglais de la lettre D donné, en raison de leur forme, aux électrodes accélératrices d'un cyclotron.

déformation. *n.* Modification des distances mutuelles des différents points d'un corps.

déformation élastique. Déformation réversible d'un solide soumis à une force extérieure (étirage, cisaillement).

déformation plastique. Déformation irréversible d'un solide, qui peut aller jusqu'à la rupture.

dégénérescence. *n.* C'est le nombre d'états distincts (ou de fonctions d'onde indépendantes) associés à un niveau d'énergie (c'est-à-dire à une énergie donnée).

degré de liberté. Le nombre de degrés de liberté d'un système mécanique est le nombre de paramètres caractérisant la position du système que l'on peut faire varier sans détruire ce système.

densité de courant. Quotient de l'intensité du courant circulant dans un conducteur par l'aire de la section droite.

densité d'états. Nombre d'états accessibles d'un système isolé d'énergie E par unité d'énergie.

déphasage. *n.* Grandeur caractérisant le retard entre la réponse d'un oscillateur à une sollicitation alternative et cette sollicitation elle-même.

déplacement virtuel. On appelle déplacement virtuel d'un solide en équilibre un petit déplacement compatible avec les liaisons. Dans un tel déplacement, le travail de toutes les forces autres que les forces de contact est nul (principe des travaux virtuels).

dérive. *n.* Mouvement du centre guide de la trajectoire d'une particule chargée, placée dans des champs électriques et magnétiques.

description. *n.* Il existe en mécanique des fluides deux types de description des systèmes hydrodynamiques. 1) *Description eulérienne :* évolution dans le temps d'un champ de scalaires ou de vecteurs. 2) *Description lagrangienne :* trajectoire d'un élément de volume du fluide.

désintégration radio-active. Diminution d'une substance radio-active due à l'émission nucléaire de particules alpha ou bêta, de rayons gamma ou de positons.

détection. *n.* Opération qui consiste à fabriquer une tension continue proportionnelle à l'amplitude d'un signal alternatif.

diagramme de Kapp. Construction dans le plan de Fresnel des vecteurs représentatifs des courants et des tensions d'un transformateur. Cette construction fait l'hypothèse simplificatrice de l'absence de courant magnétisant. Ce diagramme permet de prévoir la chute de tension lorsque le transformateur est chargé.

diamagnétisme. *n.* Qu'il possède ou non un moment magnétique permanent, tout atome sera perturbé par un champ magnétique quelconque, cette perturbation suffisant pour qu'une aimantation apparaisse. L'atome acquiert ainsi un moment magnétique induit. Ce phénomène porte le nom de diamagnétisme. L'aimantation, en sens contraire du champ magnétisant, est toujours très faible.

diapason. *n.* Instrument formé de deux barres métalliques, encastrées à l'une de leurs extrémités, servant à produire par leur vibration un son de fréquence déterminée.

diélectrique. *n.* Les diélectriques, encore appelés isolants, sont le siège, en présence d'un champ électrique, du phénomène de polarisation. Les centres de gravité des charges positives et négatives, confondus à l'état normal, s'écartant l'un de l'autre, la substance diélectrique devient équivalente à un ensemble de dipôles orientés dans la même direction. Les diélectriques sont utilisés dans la réalisation des condensateurs.

différence de potentiel. La différence de potentiel électrique (d.d.p.) $V_A - V_B$ entre deux points A et B est, par définition, le travail des forces électriques lorsqu'une charge électrique de un coulomb est déplacée de A à B. $V_A - V_B$ s'exprime en volts.

diffraction. *n.* Perturbation provoquée par l'interaction de l'onde avec un objet de dimensions comparables à la longueur d'onde, responsable d'importantes modifications de sa propagation.

diffusion d'une onde électromagnétique. Interaction non résonnante d'une onde électromagnétique avec les atomes (ou de très petites particules). Elle se traduit par une faible réémission dans toutes les directions. On distingue la diffusion Thomson (rayons X) et la diffusion Rayleigh (aux environs du spectre visible).

diffusion de particules. Collision sans création ni annihilation de particules. C'est le cas des collisions à basse énergie.

dilatance. *n.* Propriété qu'ont certains corps d'augmenter de volume sous l'action d'un état de contrainte de cisaillement.

dilatation. *n.* Augmentation des dimensions d'un système recevant de la chaleur.

diode. *n.* Composant ne laissant passer le courant que dans un seul sens. Ceci n'est rigoureusement vrai que pour les « diodes à émission thermo-électronique dans le vide ». Pour les diodes à semi-conducteur, un courant très faible peut circuler dans le sens « bloquant » : c'est le courant de fuite inverse dû aux porteurs minoritaires.

diode tunnel. Diode à jonction PN dont la caractéristique présente dans la zone conductrice une partie de résistance différentielle négative. Les diodes tunnel constituent de très bons oscillateurs jusqu'à des fréquences de plusieurs gigahertz.

dioptre. *n.* Surface de séparation entre deux milieux transparents.

dipôle. *n.* Ensemble de deux charges électriques *e* (ou masses magnétiques *m*) de signe opposé, séparées par une distance *l* caractéristique. Un dipôle est caractérisé par son moment dipolaire électrique (ou magnétique), défini comme le produit de la charge électrique (ou masse magnétique) par la distance *l*.

directivité. *n.* Caractérise la dépendance angulaire de la sensibilité (ou de l'intensité sonore émise) par rapport à l'axe d'un récepteur (ou d'un émetteur) sonore.

discontinuité d'absorption des rayons X. Brusque augmentation de l'absorption des rayons X qui se produit lorsque la fréquence devient assez grande pour ioniser l'atome à partir d'une nouvelle couche profonde (effet photo-électrique).

dislocation. *n.* Défaut de structure du réseau cristallin.

dispersion. *n.* Variation de la vitesse de propagation avec la fréquence.

distance de Debye. Distance sur laquelle la répartition des particules chargées dans un plasma fait écran au champ électrique de l'une d'entre elles.

distorsion. *n.* Déformation d'un signal introduite lors de sa reproduction. La distorsion d'amplitude est la conséquence de la non linéarité de la relation entre l'entrée et la sortie du système de reproduction. La distorsion de fréquence traduit la dépendance en fréquence de cette relation.

distribution canonique. Distribution de probabilités suivant laquelle la probabilité P_i de trouver un système dans un état d'énergie E_i est proportionnelle à $e^{-\beta E_i}$.

ditherme. *adj.* Un système parcourt un cycle ditherme lorsqu'il se trouve successivement au cours de ce cycle en contact avec deux sources de chaleur à des températures différentes.

Doppler (effet). [électromagnétique]. Changement de la fréquence d'une onde électromagnétique qui interagit avec un atome en mouvement, dû au passage dans le référentiel de l'atome. En physique atomique, il se traduit souvent par un élargissement des raies (de l'ordre de $\Delta\nu/\nu = 10^{-6}$) du fait de la répartition aléatoire des vitesses des atomes dans un gaz.

Doppler-Fizeau (effet). [acoustique]. Écart entre la fréquence apparente d'une onde sonore perçue par un observateur avec la fréquence réelle émise par une source en mouvement relatif avec celui-ci.

doublet. *n.* En mécanique des fluides, un doublet est l'ensemble constitué par une source et un puits ayant la même intensité.

drain. *n.* L'une des électrodes d'un transistor à effet de champ joue un rôle analogue au collecteur d'un transistor, ou l'anode d'une triode ou d'une pentode.

ductile. *adj.* Caractérise un solide présentant une zone de déformation plastique importante. La plupart des monocristaux (surtout les métaux) sont ductiles.

dynamique. *n.* Branche de la mécanique qui étudie le comportement des corps en mouvement.

dynamique (gamme). Rapport, souvent exprimé en décibels, des intensités sonores extrêmes correctement traitées par un appareil. La dynamique de l'oreille humaine est de l'ordre de 150 à 200 décibels.

E

éclairement. *n.* Quantité d'énergie lumineuse reçue par un récepteur rapporté à l'unité de surface.

écouteur. *n.* Petit haut-parleur, placé contre l'oreille, produisant un champ sonore dans le voisinage immédiat de celle-ci.

écran (coefficient d'). Nombre que l'on retranche du numéro atomique Z d'un atome. Il traduit la diminution de la force d'attraction qui s'exerce sur un électron, diminution provoquée par la présence d'autres électrons (qui font « écran ») entre le noyau et l'électron considéré.

effet amibe. Modification dimensionnelle du noyau (combustible ou fertile) d'une particule enrobée au cours de la vie d'un combustible HTR.

effet Compton. Diffusion (avec changement de longueur d'onde) des photons par des particules; observé primitivement lors du choc des photons d'un faisceau de rayon X sur des électrons au repos.

effet gyroscopique. Effet, d'apparence paradoxale, dont les corps symétriques en rotation rapide autour de leur axe sont le siège. Cet effet a de très nombreuses applications, qui vont du fonctionnement de la bicyclette aux systèmes de guidage par inertie.

effet Landau. Amortissement d'une onde électronique dans un plasma sans effets dissipatifs.

effet de peau. Un champ électromagnétique ne peut pénétrer dans un conducteur parfait. Si la conductibilité est finie, le champ pénètre mais est très vite atténué. A la distance de la surface appelée profondeur de peau δ, l'amplitude du champ est multipliée par $\frac{1}{e}$ où e vaut 2,718...

effet photo-électrique. Émission d'électrons par certaines surfaces métalliques lorsqu'elles reçoivent un faisceau d'ondes électromagnétiques.

effet Purkinje. Déplacement du maximum de la sensibilité de l'œil vers le bleu lorsque l'œil est adapté à la vision nocturne.

effet Raman. Diffusion avec changement de longueur d'onde. Lorsqu'un faisceau de lumière monochromatique frappe une molécule, une partie de l'énergie lumineuse est diffusée sans changement de longueur d'onde, une autre partie est diffusée avec changement de longueur d'onde, la différence d'énergie servant à activer ou désactiver la molécule.

effet Ramsauer-Townsend. Brusque diminution de la section efficace à très faible énergie dans certaines collisions. L'onde associée à la particule est déphasée de 2π au cours de la collision, et l'état final est donc identique à l'état initial : c'est un effet purement quantique.

effet Stark. Déplacement d'un niveau d'énergie et levée de la dégénérescence (en général partielle) sous l'effet d'un champ électrique.

effet de vide. Effet sur la réactivité d'un accroissement du volume de la vapeur présente dans le cœur d'un réacteur. Le coefficient de vide est négatif dans les réacteurs à eau bouillante.

effet Wigner. Changement des propriétés chimiques et physiques du graphite dans un réacteur nucléaire en raison de la création de défauts dans le réseau cristallin. Cet effet se traduit notamment par une accumulation d'énergie stockée dans le graphite, par le changement des dimensions du réseau cristallin et par la modification des dimensions extérieures. Le graphite peut reprendre ses propriétés initiales par un recuit approprié. Ce terme est étendu aux changements de propriétés de matériaux autres que le graphite lorsqu'ils sont soumis à l'action des rayonnements.

élasticité. *n.* Tendance d'un corps à reprendre la forme et les dimensions qu'il avait avant l'application d'une contrainte ou d'une déformation, après que l'on ait cessé la sollicitation.

électret. *n.* Matériau capable de créer autour de lui un champ électrique permanent, et, plus généralement, tout corps dont les propriétés électriques ont été modifiées par l'action combinée d'un champ électrique et de la température.

électromagnétisme. *n.* On appelle électromagnétisme l'ensemble des phénomènes liés aux interactions d'un champ électrique et d'un champ magnétique : action d'un champ magnétique sur un courant, champ magnétique créé par un courant, induction électromagnétique, magnétisme (théorie ampérienne), création et propagation des ondes électromagnétiques.

électron. *n.* L'électron est une petite particule ayant une charge négative unité, une masse et un diamètre faibles. Sa charge vaut

$$(1{,}60207 \pm 0{,}00007)\ 10^{-19}\ \text{coulomb},$$

sa masse est $\frac{1}{1\,837}$ fois celle de l'atome d'hydrogène et son diamètre est d'environ 10^{-14} m. Chaque atome est constitué d'un noyau et d'un ou plusieurs électrons. Les rayons cathodiques et les rayons bêta sont des électrons.

électron-volt. *n.* Unité d'énergie. Un électron-volt (eV) est l'énergie que prend un électron (ou toute particule simplement chargée) accélérée dans le vide sous une différence de potentiel de 1 volt

$$(1\ \text{eV} = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \text{J}).$$

élément actif. Un élément actif d'un circuit nécessite la présence d'une source d'énergie extérieure (alimentation). La puissance du signal de sortie peut être supérieure à celle injectée à l'entrée. La puissance supplémentaire ainsi obtenue est fournie par l'alimentation.

élément capturant. Substance qui, dans un processus nucléaire, a la propriété d'acquérir une particule supplémentaire. L'hydrogène, par exemple, capture un neutron pour donner du deutérium.

élément passif. Élément dont le fonctionnement ne nécessite pas de source d'alimentation. Les résistances, selfs et capacités sont des composants passifs.

ellipsoïde d'inertie. A tout solide, on peut associer un ellipsoïde d'inertie construit de la façon suivante : sur chaque droite Δ passant par l'origine, on porte deux points dont la distance à l'origine est égale à $1/\sqrt{I_\Delta}$, où I_Δ est le moment d'inertie du solide par rapport à la droite Δ. L'ensemble des points ainsi construits constitue l'ellipsoïde d'inertie, dont les axes de symétrie sont les axes principaux du solide.

émission spontanée. Désexcitation d'un atome avec émission d'un photon, en l'absence de toute perturbation extérieure. L'inverse de la probabilité par seconde d'émission spontanée est la durée de vie.

émission stimulée ou **émission induite.** Désexcitation d'un atome avec émission d'un photon, provoquée par l'interaction de l'atome avec un premier photon déjà présent. Les deux photons ont absolument les mêmes caractéristiques (fréquence, direction, polarisation) : le rayonnement qui leur est associé est dit « cohérent ».

émittance. *n.* L'émittance M d'une source en un point O, est le flux lumineux dF émis par une petite portion de cette source $d\Sigma$ située en O, rapporté à l'unité de surface.

$$M = dF/d\Sigma\ \text{(unité : le lumen).}$$

émittance énergétique. Même définition que pour l'émittance mais en considérant l'énergie rayonnée (unité : watt $\cdot$ m^{-2}).

énergie. *n.* C'est la capacité de fournir du travail. L'*énergie potentielle* est l'énergie résultant de la position d'un corps par rapport à un autre ou de deux parties relatives d'un même corps. L'*énergie cinétique* est l'énergie due au mouvement. Unité MKSA : le *joule* qui est l'énergie dépensée quand une force de un newton agit sur une distance de un mètre.

énergie cinétique. Grandeur dont la variation au cours du mouvement est égale au travail des forces appliquées, que celles-ci soient conservatives ou qu'elles ne le soient pas.

enthalpie libre. Un système en contact avec une source de chaleur à température constante T' et à pression constante p' a une enthalpie libre G définie par : $G = \bar{E} - T'S + p'V$ où E est l'énergie moyenne, S l'entropie, et V le volume du système.

entropie. *n.* Information moyenne fournie par une source. En thermodynamique, l'entropie exprime le principe de dégradation de l'énergie.

équation de bilan. Équation représentant le décompte des neutrons produits et des neutrons perdus par absorption ou par fuite dans un réacteur nucléaire. Dans la pratique, ce décompte est rapporté à un nombre déterminé de neutrons d'une génération, par exemple 100. Cette équation concrétise le bilan neutronique dans le cœur du réacteur.

équation de Clausius-Clapeyron. Équation qui relie la pente de la courbe d'équilibre des phases à la variation d'entropie ΔS et à la variation de volume ΔV entre les deux phases à température et pression données.

équation d'état. Relation reliant le volume, la pression moyenne et la température absolue d'un système macroscopique donné.

équation de Klein-Gordon. Analogue de l'équation de Schrödinger en mécanique quantique relativiste.

équilibrage dynamique. Opération mécanique qui consiste à amener le moment cinétique d'un solide symétrique tournant à grande vitesse à être parallèle à l'axe de rotation.

équilibrage statique. Opération mécanique qui consiste à amener le centre de gravité d'un solide symétrique tournant à grande vitesse sur l'axe de rotation.

équilibre. *n.* État d'un système macroscopique qui ne tend pas à évoluer au cours du temps.

équilibre entre phases. Deux phases sont en équilibre lorsque les enthalpies libres de chacune d'elles sont égales.

espace de configuration. Espace mathématique dans lequel l'état d'un système à N degrés de liberté est représenté par un point unique dont les coordonnées sont les coordonnées généralisées du système. L'espace de configuration d'un système mécanique à N degrés de liberté est donc un espace à N dimensions.

espace des phases. Espace vectoriel qui, pour chaque particule, comprend trois coordonnées de position et trois coordonnées de vitesse.

état. *n.* Pour un système, ensemble des valeurs prises par les variables d'état à un instant donné.

état accessible. État d'un système isolé dont l'énergie E, connue avec la précision δE, est comprise entre E et $E + \delta E$.

état stationnaire. État qui ne dépend pas du temps.

éther. *n.* Au XIX[e] siècle, on pensait que les ondes lumineuses se propageaient dans un certain « milieu » appelé éther. L'éther avait des propriétés remarquables, il remplissait l'espace tout entier y compris le vide, il n'avait pas de poids et était parfaitement élastique. L'expérience de Michelson-Morley prouva de façon irréfutable que l'éther n'existait pas.

excentricité. *n.* Grandeur caractéristique d'une conique et qui détermine sa nature : si l'excentricité est supérieure à 1, la conique est une ellipse ; si elle est égale à 1, c'est une parabole ; si elle est inférieure à 1, c'est une hyperbole.

excitation compound. Certaines machines à courant continu comportent deux bobines d'excitation créant le champ d'induction : l'une est alors montée en série avec l'induit, l'autre est disposée en shunt, c'est-à-dire en parallèle sur l'induit.

excitation série. Dans certaines machines à courant continu, le circuit d'excitation est monté en série avec l'induit. Ces machines sont surtout utilisées pour la traction électrique.

excitation shunt. Dans certaines machines à courant continu, le circuit d'excitation est monté en parallèle sur l'induit. Ces machines présentent une grande facilité de réglage de la vitesse et du couple.

excitron. *n.* Redresseur à vapeur de mercure monoanodique commandé par une grille, alors que l'igniteur est toujours alimenté et maintient l'ionisation locale du mercure.

exclusion (principe d'). Autre énoncé du principe de Pauli. Il postule que deux particules ayant tous leurs nombres quantiques identiques ne peuvent se trouver au même point de l'espace.

expérience « par la pensée ». C'est une expérience qui pourrait être faite en principe mais qu'en pratique on ne peut réaliser de cette façon. Cette notion, qui a un grand intérêt pédagogique, fut introduite pour la première fois par A. Einstein.

extension en phase. Volume d'un domaine dans l'espace des phases.

F

facteur d'absorption. Rapport entre le flux d'énergie absorbé par un corps et le flux d'énergie de rayonnement reçu par ce corps.

facteur de Boltzmann. Facteur $e^{-\beta E}$ où β est le paramètre de température et E une énergie.

famille logique. Ensemble de circuits logiques construits autour du même schéma de base. Les éléments d'une même famille sont toujours compatibles entre eux.

fermé. *adj.* Un système fermé échange, avec l'extérieur, de l'énergie mais pas de matière.

fermi. *n.* Unité de longueur adaptée à la physique nucléaire et à la physique des particules :

$$1\ \text{fermi} = 10^{-15}\ \text{mètre}.$$

ferroélectrique. *adj.* Un composé ferroélectrique est un composé qui possède une polarisation électrique en l'absence de champ électrique appliqué.

ferromagnétisme. *n.* Dans les corps ferromagnétiques, un couplage apparaît entre les moments magnétiques permanents, suffisamment intenses, des atomes. Ainsi, le ferromagnétisme est-il caractérisé par l'existence d'une aimantation spontanée même en l'absence de champ magnétique extérieur. Les ferromagnétiques acquièrent une aimantation très importante dans un champ magnétisant et en conserve une partie après sa disparition.

fertile. *adj.* Qualificatif s'appliquant à un atome susceptible d'être transformé en atome fissile par réaction nucléaire (capture d'un neutron). *Ex.* Uranium 238 et thorium 232.

F. E. T. ***(field effect transistor).*** Transistor à effet de champ. Tripôle dans lequel la conduction entre deux électrodes (source et drain) est commandée par la tension appliquée à une troisième électrode appelée grille ou porte. L'ensemble est l'équivalent à l'état solide d'une pentode.

fissile. *adj.* Qualificatif s'appliquant à un atome susceptible de subir la fission nucléaire par des neutrons lents. *Ex.* Uranium 233, uranium 235, plutonium 239.

fission. *n.* La fission nucléaire est la division d'un noyau lourd en deux parties (rarement plus) dont les masses sont du même ordre de grandeur, habituellement accompagnée de l'émission de neutrons, de rayons gamma et, rarement, de petits fragments nucléaires chargés. La fission peut se produire spontanément ou sous l'effet d'un bombardement neutronique (fission provoquée).

fluide. *n.* Corps qui ne peut rester en équilibre que lorsque l'état de contrainte imposé est sphérique.

fluide caloporteur. Fluide (liquide ou gaz), appelé aussi fluide de refroidissement, circulant dans un réacteur nucléaire pour en évacuer la chaleur. Généralement, un fluide de refroidissement primaire traverse le cœur du réacteur; la chaleur de ce fluide est extraite par un fluide de refroidissement secondaire (situé à l'extérieur du cœur et donc non actif) utilisé pour la production d'énergie. Dans les réacteurs à cycle direct, le fluide de refroidissement primaire est utilisé directement pour la production d'énergie.

fluide modérateur. (Voir **modérateur**). Les qualités essentielles d'un bon fluide modérateur sont d'être un bon ralentisseur de neutrons et d'induire le minimum de captures possibles. L'eau lourde (D_2O) possède ces qualités et permet l'emploi de l'uranium naturel. L'eau légère (H_2O) est un bon ralentisseur, mais par contre, l'hydrogène induit une forte capture de neutrons, son emploi oblige à utiliser des combustibles à uranium enrichi. On peut aussi employer comme fluide modérateur certains liquides organiques.

fluidique. *n.* Application de la dynamique des fluides, principalement de l'air, à la réalisation d'automatismes utilisant des interactions entre des écoulements, ou entre un écoulement et une paroi.

fluorescence. *n.* Réémission à la même longueur d'onde, mais dans toutes les directions de l'espace, d'une onde électromagnétique absorbée par un atome.

flux lumineux. Grandeur définie par rapport à un récepteur déterminé (l'œil, par exemple) et proportionnelle à l'énergie transportée par la lumière; le facteur de proportionnalité est l'efficacité lumineuse. Pour l'œil, cette efficacité est nulle pour les rayonnements invisibles.

focalisation forte ou **à gradients alternés.** Procédé de guidage d'un faisceau de particules chargées qui consiste à faire subir à celles-ci l'action de champs magnétiques successifs alternativement focalisants puis défocalisants dans une direction donnée. L'effet global est focalisant.

fonction de distribution. Grandeur proportionnelle au nombre des particules dans un élément donné de l'espace des phases, c'est-à-dire dont la position et la vitesse ont des valeurs données.

fonction d'état. Variable qui dépend uniquement de l'état du système.

fonction génératrice. Fonction caractéristique d'une transformation canonique, telle que la différence entre le nouvel hamiltonien et l'ancien hamiltonien soit égale à la dérivée par rapport au temps de la fonction génératrice.

fonction de transfert. Pour un système linéaire, rapport des transformées de Laplace de la sortie et de l'entrée du système, lorsque les conditions initiales sont nulles. C'est la transformée de Laplace de la réponse impulsionnelle.

fondamental. *adj.* Se dit du son ayant la fréquence la plus basse pouvant être émise par un système résonnant donné.

force centrale. Une force centrale est une force qui est portée par la droite joignant son point d'application à un point fixe donné, quel que soit son point d'application. *Ex.* Les forces de gravitation, les forces coulombiennes sont des forces centrales.

force centrifuge. Force d'inertie à laquelle est soumis un solide fixe par rapport à un repère en rotation uniforme; elle tend à éloigner le point matériel du centre de rotation.

force contre-électromotrice (f.c.é.m.). On appelle force contre-électromotrice E' d'un récepteur (moteur, électrolyseur) le quotient de la puissance électrique P' qu'il consomme autrement que par effet Joule par l'intensité I du courant qui le traverse

$$E' = \frac{P'}{I}$$

force de Coriolis. Produit, changé de signe, de la masse du point matériel par l'accélération de Coriolis. Elle est responsable de la déviation vers l'Est des corps en mouvement par rapport à la Terre.

force électromotrice (f. é. m.). Lorsqu'un générateur maintient un courant constant dans un circuit, la puissance électrique qu'il fournit est proportionnelle à l'intensité du courant qui le traverse. On appelle force électromotrice E le rapport de la puissance électrique P à l'intensité I

$$E = \frac{P}{I}$$

Comme une différence de potentiel, dont elle a les dimensions, E s'exprime en volts.

force d'inertie. Force qu'il faut ajouter aux forces réelles appliquées à un corps si l'on veut appliquer le principe fondamental de la dynamique dans un repère non inertiel.

force d'oscillateur. Nombre sans dimension qui caractérise l'intensité d'une raie atomique; il est égal à la probabilité d'absorption, en mécanique quantique, divisée par la probabilité d'absorption en théorie classique du rayonnement.

forces généralisées. Grandeurs (forces, couples, etc.) qui caractérisent les sollicitations auxquelles est soumis un système mécanique.

Fourier (série de). La décomposition en série de Fourier d'un son complexe fournit l'amplitude de chacun des sons purs qui le composent.

fovéa centralis. Petite région de la rétine située sur l'axe optique de l'œil, particulièrement sensible à la lumière.

foyer. *n.* Dans un système optique, point conjugué d'un point à l'infini.

fréquence. *n.* C'est le nombre de révolutions ou de cycles effectués en une seconde par un corps animé d'un mouvement circulaire uniforme ou d'un mouvement périodique. Unité MKSA : cycle par seconde ou hertz (Hz).

fréquence cyclotronique ou **gyrofréquence.** Fréquence de rotation d'une particule chargée, placée dans un champ magnétique.

fréquence propre. C'est la fréquence à laquelle vibre un oscillateur harmonique laissé à lui-même.

fusion. *n.* Passage d'un corps solide à l'état liquide, sous l'effet de la chaleur. Les solides cristallins possèdent une température de fusion bien définie pour laquelle l'enthalpie présente une discontinuité, appelée « chaleur latente de fusion ».

G

gain. *n.* Rapport sortie-entrée d'un système linéaire soumis à une entrée sinusoïdale. C'est généralement une fonction de la fréquence. Pour une entrée quelconque, on parle du gain comme du rapport sortie-entrée en régime permanent.

gain transducique (noté G_T). Rapport de la puissance dissipée dans la charge terminale Z_L divisée par la puissance maximale disponible à la source.

galvanomètre. *n.* Appareil utilisé pour mesurer des courants très faibles.

galvanoplastie. *n.* Dépôt électrolytique d'un métal sur un corps conducteur.

gaz. *n.* Tout corps qui se présente à l'état de fluide compressible et expansible aux conditions normales de température et de pression.

géoïde. *n.* Forme moyenne de la Terre; le géoïde coïncide approximativement avec un ellipsoïde de révolution aplati aux pôles, d'excentricité 1/297.

géostationnaire. *adj.* Se dit d'un satellite qui paraît rester immobile dans le ciel; sa vitesse angulaire est donc égale à celle de la Terre. De tels satellites sont particulièrement précieux dans le domaine des télécommunications.

gravitation. *n.* C'est l'attraction universelle existant entre tous les corps matériels. La force d'attraction entre deux masses m et m' séparées par la distance r est : $F = G\frac{mm'}{r^2}$, G étant la constante d'attraction universelle.

groupe (vitesse de). Vitesse de propagation de la modulation d'amplitude d'une onde, et donc de l'information transportée par celle-ci. Vitesse de groupe et vitesse de phase sont identiques si la longueur d'onde est proportionnelle à la fréquence (c'est-à-dire que la vitesse de phase ne dépend pas de la fréquence).

gyroscope. *n.* Solide symétrique possédant un point fixe et maintenu en mouvement de rotation rapide autour de son axe.

H

hamiltonien. *n.* Fonction utilisée pour décrire l'évolution d'un système mécanique, et qui s'identifie à l'énergie totale du système si les forces mises en jeu sont conservatives.

harmonique. *n.* Son dont la fréquence est un multiple entier de celle du fondamental. On appelle ordre de l'harmonique l'ordre de cette multiplicité.

hartley. *n.* Unité d'information correspondant à l'utilisation de logarithmes de base 10 dans la formule de Shannon.

Heisenberg (inégalités d'). Inégalités qui fixent une limite inférieure au produit des écarts quadratiques moyens de deux variables conjuguées en mécanique quantique. *Ex.* $\Delta x \cdot \Delta p_x \geqslant \hbar/2$.

holographie. *n.* Procédé de reproduction photographique utilisant des sources de lumière cohérentes, dans lequel on enregistre l'intensité et la phase de l'onde et permettant de reproduire le relief des objets.

homéostat. *n.* Système complexe contrôlant lui-même son fonctionnement d'après un objectif préalablement fixé.

Hund (règle de). Règle qui dit que le niveau d'énergie le plus bas issu d'une configuration donnée est celui pour lequel le spin total est le plus grand (compte tenu du principe de Pauli).

hydraulique. *adj.* Mu par l'eau ; qui utilise la force motrice de l'eau (*ex.* turbine hydraulique, usine hydraulique) ou, par extension, d'un liquide (*ex.* presse ou frein hydraulique).

hydraulique. *n.* Science relative à l'écoulement et à l'utilisation de la force motrice de l'eau.

hydrodynamique. *adj. et n.* Relatif aux mouvements des fluides; partie de la mécanique consacrée à l'étude des mouvements des fluides.

hypersonique. *adj.* Très grand devant la vitesse du son ; en aérodynamique, le régime hypersonique est caractérisé par des nombres de Mach très supérieurs à 1, en général de l'ordre de 10 ou supérieurs.

hyperstatique. *adj.* Un système mécanique en équilibre est dit hyperstatique s'il n'est pas possible de calculer toutes les réactions des appuis à partir des équations de la statique des solides indéformables.

hystérésis. *n.* Phénomène de retard observé entre l'excitation magnétique et l'induction magnétique.

I

identification. *n.* Processus par lequel on arrive à mettre un modèle mathématique sur le comportement d'un système.

identiques (particules). Se dit de particules ayant tous leurs nombres quantiques internes égaux. La mécanique quantique postule que tout état d'un système est invariant par échange de deux particules identiques. Il faut en tenir compte dans l'écriture des fonctions d'onde, le calcul des dégénérescences, etc. (voir principe de Pauli).

ignitron. *n.* Redresseur à vapeur de mercure monoanodique commandé directement par l'igniteur : l'ionisation du mercure est produite par effet de champ lorsque le redresseur doit devenir passant.

image réelle. Image formée par la convergence des rayons provenant des différents points d'un objet (après passage dans un système optique approprié).

image virtuelle. Image formée par un système optique et d'où semblent provenir les rayons lumineux au sortir du système.

impédance. *n.* Les lois énoncées pour les courants continus sont applicables aux valeurs instantanées, ou efficaces, des courants alternatifs. Ainsi la loi d'Ohm U = RI devient-elle $u = Zi$ ou $U_{eff} = ZI_{eff}$, la résistance R étant remplacée par l'impédance Z de la portion de circuit. Pour un circuit RLC (résistance, inductance, capacité) :

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}$$

ω étant la fréquence angulaire du courant; comme la résistance, l'impédance s'exprime en ohms.

impédance acoustique. Quotient de la pression acoustique et de la vitesse de déplacement du fluide mesurées au même point.

impédance caractéristique ou **itérative** (notée Z_0). C'est le rapport de la tension entre les deux conducteurs d'une ligne bifilaire parcourue par une onde progressive, divisée par le courant passant dans ces conducteurs, en un point d'abscisse donnée. En conséquence, une ligne d'impédance caractéristique égale à Z_0 et fermée par une charge Z_0, est le siège d'une onde progressive. Elle diffère de l'impédance d'onde par un facteur, fonction uniquement de la géométrie de la ligne.

impédance d'onde ou **intrinsèque** (notée η). Pour une direction de propagation donnée, c'est le rapport des amplitudes complexes de la composante transversale du champ électrique divisée par la composante transversale du champ magnétique. Elle est réelle pour une onde progressive, imaginaire pour une onde évanescente.

impulsion. *n.* L'impulsion d'une particule matérielle est le produit de sa masse par sa vitesse.

incompressible. *adj.* Qui ne peut être comprimé. En mécanique des fluides, un milieu incompressible est caractérisé par une masse volumique qui a une divergence nulle.

indice. *n.* Caractéristique d'un milieu transparent. Rapport de la vitesse de la lumière dans le vide à la vitesse de la lumière dans ce milieu.

inductance de fuite. Inductance traduisant dans le schéma équivalent d'un transformateur ou d'une machine asynchrone le fait qu'une partie du flux du primaire ne se retrouve pas au secondaire à cause d'une dispersion du champ magnétique (fuite).

inductance de lissage. Inductance disposée en aval d'un redresseur pour filtrer le courant débité.

induction électromagnétique. Lorsque le flux d'induction magnétique qui traverse un circuit varie, ou lorsqu'une partie du circuit, dans son déplacement, coupe un flux d'induction magnétique, il apparaît dans le circuit un courant induit. Le sens de ce courant est tel que, par ses effets, il s'oppose à la cause qui lui a donné naissance (loi de Lenz). Le phénomène est appelé *auto-induction* lorsque l'induction magnétique variable est créée par le circuit lui-même.

information. *n.* Élément pouvant être transmis par un signal pris au sens large du terme. L'aspect mathématique afférant est regroupé sous le nom de théorie de l'information dont le créateur fut Shannon.

infrason. *n.* Son de fréquence inférieure à la limite audible par l'homme (20 Hz), mais ayant parfois des effets physiologiques qui lui sont préjudiciables.

intégrateur. *n.* Organe dont la sortie est l'intégrale de l'entrée.

intensité acoustique. Flux d'énergie transporté par l'onde sonore traversant une surface unité pendant l'unité de temps.

intensité lumineuse. Pour une source ponctuelle, l'intensité lumineuse dans une direction est le rapport du flux lumineux dF envoyé dans cette direction dans un angle solide élémentaire $d\Omega$ à la valeur de cet angle : $I = dF/d\Omega$ (unité : candela, Cd).

interaction newtonienne. Interaction entre deux corps caractérisée par le fait que la force exercée sur chacun des corps est portée par la droite joignant les deux corps, et que son module est inversement proportionnel au carré de la distance séparant les deux corps.

interférence. *n.* Interaction de deux ondes cohérentes, caractérisée par des renforcements et affaiblissements localisés de l'intensité résultante (franges d'interférence).

interféromètre. *n.* Appareil destiné à réaliser des interférences.

intermodulation. *n.* Distorsion caractérisée par l'adjonction de fréquences, combinaisons linéaires des fréquences originales à reproduire.

intervalle. *n.* Mesure de la différence de fréquence entre deux sons purs, habituellement représentée par le rapport de leurs fréquences, ou le logarithme de ce rapport.

intervalle de temps impropre. Intervalle de temps entre deux événements, mesuré dans un référentiel où les événements n'ont pas lieu au même point.

intervalle de temps propre. Intervalle de temps entre deux événements, mesuré dans le référentiel où les événements ont lieu au même endroit.

invariant relativiste. Expression mathématique invariante par transformations de Lorentz.

inversion de populations. On appelle ainsi, pour un système à deux niveaux, une situation hors de l'équilibre thermodynamique dans laquelle le niveau le plus haut en énergie est plus peuplé que le niveau le plus bas (« température négative »). L'émission stimulée est alors supérieure à l'absorption, autorisant l'amplification de l'onde électromagnétique.

ionophone. *n.* Système haut-parleur dans lequel la pression acoustique est obtenue par les brusques variations de la température de l'air, dues à la modulation de la haute tension qui l'ionise.

ions (haut-parleur à). Sorte de ionophone dans lequel la modulation de l'ionisation de l'air est obtenue à l'aide d'une électrode supplémentaire.

iris. *n.* Diaphragme disposé le long du tube d'un accélérateur linéaire à électrons afin que l'onde associée au champ électrique accélérateur ait une vitesse de phase égale à la vitesse des électrons accélérés.

irrotationnel. *adj.* Dont le rotationnel est nul. En mécanique des fluides, les écoulements dont le champ de vitesse dérive d'un potentiel sont des écoulements irrotationnels (source, puits, tourbillon, ...).

isobare. *adj.* A pression constante. S'applique en particulier à la pression magnétique.

isochrones (cyclotrons). Cyclotrons dans lesquels la fréquence constante du champ électrique accélérateur reste toujours égale à la fréquence de rotation de la particule accélérée (à de petites fluctuations de phase près).

isolant. *n.* Certains corps électrisés par frottement portent des charges électriques seulement au point frotté, les forces de liaison dues à la structure du milieu rendant difficile le déplacement des porteurs de charge : ce sont des isolants. *Ex.* L'ébonite, le verre, la résine, l'ambre, etc. Du point de vue de l'électrocinétique, un isolant présente une résistance ohmique élevée.

isomorphisme. *n.* (algèbre). Deux ensembles munis de lois internes sont isomorphes s'il est possible d'établir une bijection qui respecte les lois internes.

isotherme. *adj.* Lorsqu'une transformation physique ou chimique s'effectue à température constante, cette transformation est dite isotherme.

isotrope. *adj.* Qui est identique dans toutes les directions de l'espace. La pression hydrostatique est isotrope.

J - K

jonction (détecteur à). Détecteur constitué de matériau semi-conducteur (silicium ou germanium), ayant la structure d'une diode polarisée en non conduction et comportant une zone intrinsèque entre les parties de type N et P. Les porteurs créés dans la zone intrinsèque par une particule chargée engendrent une impulsion électrique.

Kellog (réseau de). Réseau de caractéristiques décrivant l'évolution du courant de sortie d'un quadripôle en fonction de la tension de sortie pour diverses valeurs de la grandeur d'entrée la plus caractéristique : courant base pour un transistor, tension grille pour un tube électronique ou un transistor à effet de champ.

L

lagrangien. *n.* Fonction mathématique qui est égale à l'énergie cinétique du système considéré, diminuée de son énergie potentielle.

lame quart d'onde. Lame cristalline dont l'épaisseur est telle que placée sur le trajet d'un rayon lumineux, elle augmente le chemin optique d'un quart de longueur d'onde.

laminaire. *adj.* En mécanique des fluides, un écoulement laminaire est caractérisé par le glissement des couches de fluide les unes sur les autres. Le régime laminaire est opposé au régime turbulent.

laser. *n.* ***(light amplifier by stimulated emission of radiation).*** Désigne le plus souvent un oscillateur émettant un faisceau de lumière cohérente, de grandes directivité et monochromaticité. Il existe aujourd'hui (1977) des lasers de l'ultra-violet proche à l'infra-rouge très lointain.

L. E. D. ***(light emitting diode).*** Diode électroluminescente. Composant ayant la structure d'une diode à fonction PN qui émet de la lumière quand il est traversé par un courant passant dans le sens direct. Les L. E. D. ont une très grande durée de vie et remplacent de plus en plus les voyants lumineux à incandescence.

liaison galvanique. Liaison électrique directe en général constituée par un fil de cuivre.

liaison de télé-affichage. Transmission d'un angle à distance.

libre parcours moyen. Dans un gaz, distance que parcourt une molécule entre deux chocs sur d'autres molécules.

linéaire. *adj.* Se dit d'un système dont la sortie peut s'écrire comme produit de convolution de l'entrée avec une fonction particulière appelée réponse impulsionnelle.

liquide. *adj. et n.* Qui coule ou qui tend à couler. Tout corps qui se présente à l'état fluide.

loi de composition interne. (algèbre). Étant donné un ensemble, on dit qu'il est muni d'une loi interne si on sait faire correspondre à deux éléments de l'ensemble un troisième élément.

loi de Dulong et Petit. La chaleur spécifique molaire des solides est indépendante de la température et égale à trois fois la constante R des gaz parfaits, à condition que la température soit suffisamment élevée.

loi de Mariotte. Le produit de la pression d'une masse donnée de gaz parfait par son volume ne dépend que de la température.

loi de Stefan-Boltzmann. La densité d'énergie émise par un corps noir varie comme la puissance quatrième de la température de ce corps.

longueur d'onde (notée λ ou λ_0). Distance dont une onde plane doit se propager dans l'espace libre pour subir un changement de phase égal à 2π radians. Elle est reliée à la constante de propagation dans l'espace libre notée β ou β_0 par la relation

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ ou } \beta_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}.$$

lorentzienne. *n.* ou **courbe lorentzienne.** Fonction mathématique qui intervient de façon très générale dans les phénomènes de résonance, dans l'expression de la puissance absorbée par le résonateur en fonction de la fréquence.

luminance. *n.* Si un élément d'une source lumineuse $d\Sigma$ émet une intensité dI dans une direction inclinée d'un angle α sur sa normale, la luminance est définie par : $L = dI/dZ \cdot \cos\alpha$ (unité : candéla/m²).

luminance énergétique. Même définition que pour la luminance mais à partir du flux énergétique et non du flux lumineux.

L, S (couplage). Également appelé couplage de Russel-Saunders. C'est un couplage entre électrons d'un atome dans lequel on couple entre eux les moments orbitaux d'une part (pour donner L) et les moments de spin d'autre part (pour donner S).

M

machmètre. *n.* Instrument servant à mesurer le nombre de Mach d'un avion, c'est-à-dire le rapport entre la vitesse de l'avion et celle du son.

macroscopique. *adj.* Très grand devant les dimensions atomiques.

magnétisme. *n.* On appelle magnétisme la propriété de la matière de s'aimanter sous l'action d'un champ magnétique. Elle est liée à l'existence, dans toute substance, des atomes formés d'électrons pivotant sur eux-mêmes et tournant autour du noyau. Chaque atome possède, de ce fait, un moment magnétique permanent, ou peut acquérir un moment magnétique induit sous l'action d'un champ magnétique.

magnétohydrodynamique. *n.* Partie de la mécanique des fluides consacrée à l'étude des écoulements de fluides conducteurs en présence d'un champ magnétique.

maser. *n.* ***(microwave amplification by stimuled emission of radiation).*** Source de rayonnement électromagnétique, monochromatique et cohérente dans le domaine des micro-ondes.

masque (effet de). Phénomène auditif subjectif ayant pour effet de privilégier la perception d'un son de forte intensité sur celle d'un son plus faible émis simultanément.

masse. *n.* Quantité inaltérable de matière. Les physiciens lui ont attribué deux propriétés plus précises : l'inertie ou la résistance à l'accélération et la gravitation.

masse effective. Masse apparente d'une particule qui se déplace dans un cristal. Cette masse, différente de la masse réelle d'une particule libre, intervient dans les propriétés de transport de ce cristal.

masse gravitationnelle. Masse mesurée à partir de l'attraction gravitationnelle exercée sur le point matériel considéré par une autre masse. On démontre l'identité de cette masse avec la masse inerte.

masse inerte. Rapport de la force exercée sur un point matériel à l'accélération résultant de cette force.

matrice de distribution ou **de répartition** (notée [S]). Tableau à n lignes et n colonnes reliant l'amplitude complexe des ondes réfléchies (b_i) à l'amplitude complexe des ondes incidentes (a_i)

$$n = 2, \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

avec $$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}$$

matrice d'inertie. Matrice liant les composantes du vecteur instantané de rotation d'un solide au moment cinétique de celui-ci.

mécanique. *n.* Science qui étudie la relation entre forces et mouvements.

méga-électron-volt (MeV). *n.* Unité d'énergie adaptée à la physique nucléaire :

$$1 \text{ MeV} = 1{,}6 \times 10^{-13} \text{ joule.}$$

mélangeur. *n.* Circuit non linéaire qui, recevant deux signaux de fréquences différentes, génère des signaux dont les fréquences sont des combinaisons linéaires des deux premières. Les battements somme ($f_1 + f_2$) et différence ($f_1 - f_2$) sont les plus importants parmi ces signaux.

mémoire. *n.* Circuit électronique pouvant conserver une plus ou moins grande quantité d'informations sous forme binaire. Une mémoire est formée par l'association de cellules du type bascule bistable. Chacune de ces cellules peut stocker un bit. Sur un seul circuit, les mémoires les plus performantes actuellement peuvent contenir jusqu'à 16 384 cellules (16 K).

Mendeleïev (table de). Classification des éléments suivant la périodicité des propriétés chimiques et physiques. Cette périodicité reflète celle du remplissage des couches électroniques des atomes.

méson. *n.* Deux types de particules de masse comprise entre celle de l'électron et celle du proton ont été découvertes dans le rayonnement cosmique et au laboratoire. L'une des particules de masse environ 215 fois la masse de l'électron (215 m_e) est appelée *méson* μ ou *muon* ; l'autre, de masse environ 280 m_e, est le *méson* π. Des mésons de charges positive et négative ont été découverts, et il y a des preuves expérimentales raisonnables de l'existence de mésons neutres. Les deux types des mésons se désintègrent spontanément.

microcanonique. *adj.* Un système microcanonique est un système isolé, c'est-à-dire qu'il n'échange avec l'extérieur ni énergie, ni matière.

microphone. *n.* Appareil détectant la pression acoustique et la transformant en signal électrique.

microscopique. *adj.* Petit, de l'ordre des dimensions atomiques.

miroir. *n.* Surface réfléchissante.

miroir ou **bouteille magnétique.** Configuration magnétique présentant un accroissement de l'induction magnétique, qui entraîne la réflexion des particules chargées abordant cette région sous un angle suffisant.

mobilité électronique. Caractérise la facilité avec laquelle les électrons se déplacent dans un réseau sous l'effet d'un champ électrique. Elle est définie comme le rapport entre la vitesse de l'électron et le champ électrique appliqué.

mode de propagation. Configuration géométrique du champ électromagnétique.

mode transverse électrique (noté TE ou H). Mode de propagation pour lequel $E_z = 0$.

mode transverse électromagnétique (noté TEM). Mode de propagation pour lequel $E_z = H_z = 0$

mode transverse magnétique (noté TM ou E). Mode de propagation pour lequel $H_z = 0$.

modérateur. *n.* Substance utilisée dans les réacteurs nucléaires pour réduire, au moyen de chocs, de collisions, de diffusion et sans capture appréciable, l'énergie cinétique des neutrons de façon à les amener dans une gamme de vitesses où la probabilité de fission sera la meilleure. C'est un ralentisseur de neutrons qui peut être solide ou liquide : graphite, eau lourde, eau légère, béryllium, par exemple.

modulation. *n.* Modification des caractéristiques d'un signal de haute fréquence (porteuse) au rythme d'un signal de fréquence plus basse. Cette modification peut porter sur l'amplitude (modulation d'amplitude, la plus courante), la fréquence (F.M.) ou la phase.

mole. *n.* Quantité de substance contenant N (nombre d'Avogadro $= 6{,}02252 \cdot 10^{23}$) molécules.

moment cinétique. Le moment cinétique d'une particule matérielle est le produit vectoriel du vecteur position de la particule par son impulsion.

moment d'une force. Le moment d'une force par rapport à un point O est le produit vectoriel de la force par le vecteur joignant son point d'application au point O.

moment d'inertie. Le moment d'inertie d'un ensemble de points matériels par rapport à un point, une droite ou un plan est la somme des produits de la masse de chacun de ces points matériels par le carré de la distance de chacun d'eux au point, à la droite ou au plan considérés.

moment magnétique. Vecteur qui caractérise les propriétés magnétiques d'une particule chargée en mouvement, d'un circuit électrique parcouru par un courant, ou d'un matériau magnétique plus complexe.

monochromatique. *adj.* Se dit d'une radiation constituée d'ondes de même fréquence.

monotherme. *adj.* Un système qui décrit un cycle monotherme, c'est-à-dire avec une seule source de température, ne peut d'après le second principe de la thermodynamique fournir de travail.

montage en parallèle. Des conducteurs sont montés en dérivation ou en parallèle quand ils partent tous d'un même point A pour aboutir à un même point B. Ils sont ainsi tous alimentés sous la même différence de potentiel $V_A - V_B$.

montage en série. Lorsque plusieurs conducteurs sont en série, ils sont tous parcourus par le même courant. La différence de potentiel aux bornes de l'ensemble est la somme des différences de potentiel entre les extrémités de chaque conducteur.

M. O. S. ***(métal oxyde semi-conduction).*** Sigle réservé aux composants utilisant l'effet d'un champ électrique créé à la surface d'un semi-conducteur par une électrode métallique isolée du semi-conducteur par une mince couche de silice. Les transistors à effet de champ de structure M. O. S. ont une impédance d'entrée extrêmement élevée.

Moseley (loi de). Cette loi dit que la racine carrée de la fréquence de la discontinuité d'absorption X relative à une couche électronique déterminée (K, ou L, etc.) est une fonction linéaire du numéro atomique Z.

mot-code. *n.* Suite de caractères de l'alphabet du codage associé à un message à coder.

moyenne quadratique. Valeur obtenue en prenant la racine carrée de la moyenne des carrés de la valeur instantanée de la grandeur à mesurer.

multivibrateur. *n.* C'est une bascule astable passant continuellement d'un état à l'autre. Les multivibrateurs sont les plus simples des générateurs de signaux « rectangulaires ».

muon. *n.* Voir *méson.*

N

NAND ou **NON-ET.** Opération logique $\overline{A \cdot B}$. Le résultat ne vaut zéro que si A et B valent 1.

nat. *n.* Unité d'information correspondant à l'utilisation de logarithmes népériens dans la formule de Shannon.

neutrino. *n.* Particule élémentaire neutre électriquement, de masse au repos très faible (probablement nulle) et de nombre quantique de spin $\frac{1}{2}$. Quand le spin est orienté parallèlement au moment linéaire, la particule est un antineutrino. Quand le spin est orienté antiparallèlement au moment linéaire, la particule est un neutrino. Son existence fut postulée par Pauli pour expliquer les processus de désintégration bêta, et fut détectée par Reines et Cowan.

neutron. *n.* Particule élémentaire neutre de nombre de masse 1. C'est l'un des constituants de tous les noyaux de nombre de masse supérieur à un. Il est instable par rapport à la désintégration bêta avec une durée de vie d'environ 12 minutes. Il ne produit pas d'ionisation primaire détectable dans son passage à travers la matière, mais il interagit avec la matière surtout par collisions et parfois magnétiquement. Quelques propriétés du neutron sont : masse = 1,00894 masse atomique, charge 0, nombre quantique de spin $\frac{1}{2}$.

neutrons épithermiques. Neutrons d'énergie cinétique supérieure à celle de l'agitation thermique; l'emploi de ce terme est souvent limité aux énergies juste au-dessus du domaine thermique, c'est-à-dire aux énergies comparables à celles des liaisons chimiques.

neutrons rapides. Neutrons produits par la fission, non ralentis, d'énergie cinétique supérieure à une certaine valeur spécifiée. Cette valeur peut varier assez largement et dépend du domaine intéressé. En physique des réacteurs, cette valeur est souvent fixée à 0,1 MeV.

neutrons thermiques. Neutrons essentiellement en équilibre thermique avec le milieu dans lequel ils se trouvent. Ce sont les neutrons arrivés au stade ultime de ralentissement par l'effet du modérateur.

newtonien. *adj.* En rhéologie, un fluide newtonien est un fluide dont la viscosité est constante quel que soit le gradient de vitesse.

niveau métastable. Niveau excité qui ne peut se désexciter radiativement par un processus direct, à cause des règles de sélection. Il possède de ce fait une durée de vie naturelle très longue, c'est-à-dire supérieure à la milliseconde.

niveau virtuel. Cette expression désigne un état perturbé d'un atome de durée de vie très courte, par suite de la violation de la loi de conservation de l'énergie. Un tel état a une énergie très mal définie, du fait de l'inégalité de Heisenberg temps-énergie.

nombre d'Avogadro. Nombre de molécules contenues dans une mole de corps pur (environ $6 \cdot 10^{23}$).

nombre d'onde. Inverse de la longueur d'onde.

nombre quantique magnétique. C'est la projection sur un axe arbitraire dit axe de quantification (en unité de $\hbar$) du moment cinétique de la particule.

nombre quantique orbital. C'est, en unité de $\hbar$, la grandeur du moment cinétique orbital (c'est-à-dire lié au mouvement du centre de gravité) de la particule.

nombre quantique principal. C'est le nombre qui caractérise les énergies (quantifiées) d'un électron plongé dans un potentiel coulombien et formant un état lié.

NOR ou **NON-OU.** Opération logique $\overline{A + B}$. Le résultat vaut zéro si A ou B (ou les deux) vaut 1.

normal. *adj.* Orthogonal à une surface. La contrainte normale est la projection de la contrainte sur la normale à la surface sur laquelle elle s'applique.

nutation. *n.* Mouvement de rotation, généralement de faible amplitude, qu'effectue l'axe d'un gyroscope autour de la direction perpendiculaire au plan constitué par l'axe du gyroscope et la verticale.

Nyquist (critère de). Critère permettant de prévoir la stabilité ou l'instabilité d'un circuit bouclé à partir de son comportement en « boucle ouverte ».

O

objectif. *n.* Nom donné au système optique d'une lunette qui se trouve tourné vers l'objet à examiner.

octave. *n.* Intervalle de fréquence séparant deux sons de fréquences dont l'une est double de l'autre.

oculaire. *n.* Dans un instrument d'optique, lentille ou système de lentilles près duquel on applique l'œil.

onde. *n.* Perturbation progressive qui se propage dans un milieu par la vibration périodique des particules du milieu. Une *onde transverse* est telle que la vibration des particules est perpendiculaire à la direction de propagation. Une *onde longitudinale* est telle que la vibration des particules est parallèle à la direction de propagation.

opposition de phase. On dit que deux phénomènes oscillatoires sont en opposition de phase s'ils sont décalés dans le temps d'une demi-période.

optimisation. *n.* Calcul du programme, du modèle, rendant maximum (ou minimum) un critère fixé comme objectif.

optique. *n.* Ensemble des phénomènes mettant en jeu la lumière.

optique géométrique. Branche de l'optique fondée sur la notion de rayon lumineux, sur l'étude de sa propagation dans les milieux transparents, de sa réfraction et de sa réflexion.

ordre. *n.* Pour un système linéaire, degré du dénominateur de la fonction de transfert.

oscillateur harmonique. Système mécanique caractérisé par le fait que, si on l'éloigne de sa position d'équilibre, il est soumis à une force proportionnelle à l'écart par rapport à l'équilibre et tendant à le faire revenir à sa position initiale. De tels systèmes, très usuels dans tous les domaines de la physique, peuvent être le siège d'oscillations.

oscillation forcée. Oscillation dont est le siège un oscillateur qui subit une sollicitation alternative; cette oscillation a la même fréquence que la sollicitation.

oscillation de relaxation. Phénomène dont est le siège un oscillateur que l'on a écarté de sa position d'équilibre et que l'on laisse revenir de lui-même à l'équilibre; les oscillations de relaxation ont pour fréquence la fréquence propre de l'oscillateur.

oscilloscope. *n.* Instrument permettant la visualisation d'un signal électrique variant dans le temps ou d'un signal électrique fonction d'un autre signal électrique.

P

paléophone. *n.* « la voix du passé ». Première description d'un appareil d'enregistrement et de reproduction des sons, dû à l'inventeur et poète Charles Cros (1877).

panchromatique. *adj.* Sensible à toutes les longueurs d'onde de la lumière visible.

paquet d'ondes. Superposition d'ondes monochromatiques représentant une particule localisée dans l'espace (et donc d'impulsion mal définie du fait des inégalités d'Heisenberg).

paradoxe. *n.* Contradiction à laquelle aboutit dans certains cas un raisonnement. Quelques paradoxes célèbres en physique : le *paradoxe de Gibbs* en thermodynamique, le *paradoxe des jumeaux* en Relativité.

paradoxe de Venturi. Baisse de la pression au sein d'un fluide en mouvement dans un conduit si celui-ci est rétréci.

parfait. *adj.* **(fluide).** Se dit d'un fluide pour lequel la viscosité est nulle. Le fluide parfait est opposé au fluide visqueux. Il n'a aucune existence réelle.

paramagnétisme. *n.* Les atomes de certaines substances, dites paramagnétiques, possèdent un moment magnétique permanent. Ces aimants élémentaires ne réagissent pas les uns sur les autres, et l'agitation thermique impose une répartition statistique uniforme; la matière n'est donc pas spontanément aimantée. Mais sous l'action d'un champ magnétique extérieur, les petits aimants tendent à s'aligner dans la direction du champ magnétisant. Un moment magnétique résultant apparaît alors.

paramètre extensif. Paramètre macroscopique décrivant un système en équilibre et ayant une valeur égale à la somme de ses valeurs pour chaque partie du système.

paramètre intensif. Paramètre macroscopique décrivant un système en équilibre et ayant la même valeur pour toute partie du système.

paramètre de température. Ce paramètre noté β est égal à l'inverse du produit kT où k est la constante de Boltzmann et T la température absolue.

particule résonnante. Particule dont la vitesse est proche de la vitesse de phase d'une onde dans un plasma.

particules sans corrélation. Des particules sont dites sans corrélation si la probabilité de trouver l'une d'entre elles dans un état donné est indépendante de la probabilité d'en trouver une autre dans un état quelconque.

pavillon acoustique. Tube de section régulièrement croissante permettant d'adapter l'impédance acoustique d'une source (ou d'un récepteur) avec celle du milieu de rayonnement (ou de réception), afin d'augmenter les échanges d'énergie.

pentode. *n.* Tube électronique possédant cinq électrodes : une cathode, une anode et trois grilles intermédiaires. La grille la plus proche de la cathode commande le courant anodique comme dans la triode, les deux autres jouent le rôle d'un blindage électrostatique entre l'entrée et la sortie.

période. *n.* Intervalle de temps séparant deux états identiques d'un phénomène périodique. La période est l'inverse de la fréquence.

permanent. *adj.* Qui ne varie pas dans le temps. Un écoulement permanent est un écoulement dans lequel le champ de vitesse n'est pas fonction du temps.

phase. *n.* Forme particulière, solide, liquide ou gazeuse d'assemblage des molécules d'une substance.

phonautographe. *n.* Premier dispositif permettant l'enregistrement des sons, inventé par L. Scott de Martinville en 1859. La trace des vibrations sonores était conservée sur un rouleau enduit de noir de fumée.

phone. *n.* Unité de mesure subjective de l'intensité sonore correspondant par définition à l'unité de mesure objective (décibel acoustique) pour la fréquence de 1 000 Hz.

phonographe. *n.* Première réalisation pratique d'un appareil d'enregistrement et de reproduction des sons, d'un principe entièrement mécanique, due à l'américain Thomas Edison (1877).

phonon. *n.* Analogie mécanique du photon, le phonon est la quantification de l'énergie de vibration des atomes. Sa masse est nulle et son énergie est égale au produit de la constante de Planck par la fréquence de la vibration considérée. Les ondes sonores peuvent être décrites au moyen de la propagation des phonons.

photocathode. *n.* Plaque métallique ayant la propriété de libérer des électrons sous l'influence d'un rayonnement lumineux (effet photo-électrique). Ces électrons sont recueillis par une anode portée à un potentiel positif par rapport à la plaque précédente; l'ensemble est placé dans une ampoule vidée d'air.

photocoupleur. *n.* Association d'une source lumineuse commandée par le signal d'entrée et d'un photodétecteur délivrant le signal de sortie. Le photocoupleur permet de réaliser un isolement galvanique parfait entre l'entrée et la sortie.

photodiode. *n.* Diode à jonction polarisée dans le sens bloquant, dont le courant de fuite augmente avec l'éclairement reçu. Cette augmentation est due à la création par la lumière de paires électrons-trous dans la zone intrinsèque de la jonction.

photoluminescence. *n.* Phénomène consistant en l'absorption d'énergie lumineuse puis en sa rediffusion sur une longueur d'onde différente.

photomultiplicateur. *n.* Dispositif dans lequel on établit une tension entre plusieurs électrodes successives afin de multiplier le nombre d'électrons émis par une photocathode.

photon. *n.* Quantum de lumière ou grain de lumière. Plus petite quantité d'énergie lumineuse pouvant exister; sa grandeur dépend de la fréquence de la vibration ν : $\omega = h\nu$ (h constante de Planck).

photorésistance. *n.* Élément semi-conducteur se comportant comme une résistance pure dont la valeur est fonction de l'éclairement reçu. Sous l'influence de la lumière, les variations de résistance sont malheureusement lentes, et ceci d'autant plus que l'éclairement est faible.

photosensible. *adj.* Sensible au rayonnement lumineux.

piézo-électricité. *n.* Ensemble des phénomènes liant les déformations mécaniques d'un corps à la modification de ses propriétés électriques. Les effets peuvent être linéaires (piézo-électricité vraie) ou quadratiques (électrostriction).

piézo-transistor. *n.* Semi-conducteur dont la résistivité est très sensible à une déformation mécanique.

pile piscine. Réacteur nucléaire où le cœur est plongé dans une piscine de grandes dimensions. L'eau de la piscine sert à la fois de modérateur, de refroidisseur et de protection biologique (hauteur d'eau au-dessus du cœur de 8 à 10 mètres). Cette configuration permet de grandes commodités expérimentales.

pincement (tension de). Valeur minimale de la tension grille source assurant, quelle que soit la tension drain source, l'annulation du courant drain d'un transistor à effet de champ.

pion. *n.* Voir *méson*.

plan focal. Portion de plan, lieu géométrique des foyers d'un système optique.

plan de symétrie. Une figure possède un plan de symétrie si à tout point P on peut associer un point P' de telle façon que tous les segments PP' aient même plan médiateur. Ce plan médiateur est le plan de symétrie.

Planck (constante de). Constante fondamentale de la physique microscopique; c'est elle qui fixe beaucoup d'ordres de grandeur (moments cinétiques, longueurs d'onde, etc.). Elle vaut

$$h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}\ \text{J.s} \quad \text{ou} \quad 6{,}626 \cdot 10^{-27}\ \text{erg.s.}$$

On utilise aussi souvent $\hbar = h/2\pi$.

plastique. *adj.* Se dit des déformations permanentes d'un solide et du comportement de ce solide lorsqu'il reçoit des déformations permanentes.

point aveugle. Partie de la rétine correspondant au départ du nerf optique et dépourvue de cellules nerveuses sensibles à la lumière.

point fixe. Repère utilisé pour déterminer une échelle de températures. La température de fusion de la glace et la température d'ébullition de l'eau à la pression atmosphérique sont souvent utilisées.

point matériel. Particule de matière sans dimension mais possédant une masse. Il s'agit là d'une notion idéale sans réalité physique, mais justifiée par le fait que le mouvement du centre de gravité d'un solide est le même que celui d'un point matériel de même masse que le solide.

point triple. État d'une substance tel que les trois phases solide, liquide et gazeuse coexistent.

poison. *n.* Substance qui, par suite de sa section efficace d'absorption des neutrons élevée, réduit la réactivité d'un réacteur nucléaire. *Ex.* Xénon, gadolinium, cadmium, etc.

poison consommable. Poison nucléaire introduit à dessein dans un réacteur pour contribuer à la compensation des variations à long terme de la réactivité au moyen de sa combustion progressive.

polarimètre. *n.* Appareil destiné à étudier le pouvoir rotatoire des substances.

polarisation. *n.* Pour une onde électromagnétique, caractérise l'évolution de l'orientation du vecteur champ électrique au cours du temps. On distingue : les ondes polarisées rectilignement (le vecteur garde une direction fixe) et elliptiquement (l'extrémité du vecteur décrit une ellipse).

polarisation d'un circuit. Application d'une tension aux bornes du circuit. La valeur de cette tension ainsi que le courant correspondant définissent dans un plan d'ordonnée I et d'abscisse V un point appelé point de polarisation.

pôles lisses. Conception de rotor de machine synchrone telle que les pôles formant l'inducteur ne présentent pas d'excroissances importantes. On trouve ce type de montage dans les turbo-alternateurs.

pôles saillants. Conception de rotor de machine synchrone telle que les pôles formant l'inducteur sont bien individualisés. On trouve ce type de montage dans les alternateurs des centrales hydrauliques.

polycristallin. *adj.* Caractérise un solide constitué par un agglomérat de monocristaux microscopiques sans orientation préférentielle.

ponctum proximum. Point le plus proche de l'œil sur lequel celui-ci peut accommoder. Pour un œil normal jeune, il est situé à une vingtaine de centimètres de l'œil.

ponctum remotum. Point le plus éloigné de l'œil que l'on peut voir nettement sans accommoder. Pour un œil normal, il est situé à l'infini.

pont de Wheatstone. Montage constitué de quatre résistances, destiné à mesurer l'une d'entre elles initialement inconnue.

pont de Wien. Circuit constitué par deux résistances et deux condensateurs et utilisé comme filtre sélecteur de fréquence dans certains oscillateurs basse fréquence.

portance. *n.* Action de porter. En aérodynamique, la portance est la composante normale au mouvement des forces qui s'exercent sur une surface (portance d'une aile d'avion).

positon. *n.* Particule de même masse et de charge électrique positive de même valeur que celles de l'électron (qui est parfois appelé négatron). Les positons sont créés soit par désintégration radioactive de certains noyaux instables, soit en même temps qu'un électron, dans une collision entre un photon énergétique (plus qu'un MeV) et une particule chargée électriquement (ou un autre photon). Il ne se désintègre pas spontanément mais, lorsqu'il subit une collision avec un autre électron, la paire électron-positon est annihilée.

postulat. *n.* Principe premier indémontrable directement, mais vérifié par l'ensemble de ses conséquences.

potentiel. *n.* ou **énergie potentielle.** Grandeur dont la variation lors du déplacement du point d'application d'une force conservative est égale au travail effectué par cette force durant ce déplacement. En conséquence, la force est égale au gradient du potentiel.

potentiel électrique. Dans un champ électrique, on appelle potentiel en un point M la fonction $V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r} + C^{te}$ dont dérive le champ (ε_0 est la permittivité du vide, q la charge électrique, source du champ). Par convention, lorsqu'il n'y a pas de charges à l'infini, on donne à la constante la valeur nulle. Le potentiel est alors le travail qu'il faut effectuer pour amener de l'infini à la distance r la charge de un coulomb.

poussée. *n.* En hydrostatique, analogue à la portance (voir ce mot); force verticale due à une différence de masse volumique entre un corps et le milieu qui l'entoure (poussée d'Archimède).

pouvoir de résolution. Pour un appareil dispersif : $R = \lambda/\Delta\lambda_m$. λ étant une longueur d'onde et $\Delta\lambda_m$ le plus petit intervalle de longueur d'onde distingué à travers l'appareil au voisinage de la longueur d'onde λ.

pouvoir rotatoire. Propriété qu'ont certaines substances de faire tourner le plan de polarisation de la lumière polarisée rectilignement qui les traverse.

pouvoir séparateur. Plus petit intervalle de longueur d'onde distingué à la sortie d'un appareil dispersif.

préaimantation. *n.* Champ magnétique de fréquence ultrasonique superposé au champ de modulation d'un magnétophone pour améliorer la qualité de l'enregistrement.

précession. *n.* Mouvement de rotation de l'axe d'un gyroscope autour de la verticale.

précession de Larmor. Mouvement de rotation uniforme du moment cinétique d'une particule magnétique autour de la direction du champ magnétique.

pression. *n.* Contrainte normale à un élément de surface et orientée en sens contraire à la normale à cet élément de surface.

pression acoustique. Écart de la pression instantanée en un point du milieu de propagation avec la pression moyenne existant en l'absence de l'onde sonore.

pression magnétique. Un plasma placé dans un champ magnétique subit une pression dite pression magnétique, perpendiculaire à ce champ, et dont l'intensité est proportionnelle au carré de l'induction magnétique.

pression de radiation. Pression créée par le choc de photons ou de phonons sur une surface.

primaire. *n.* Dans un transformateur, c'est l'enroulement relié à la source d'énergie.

principe de correspondance. C'est un principe qui établit un lien entre la physique quantique et la physique classique. Il dit qu'aux grands nombres quantiques, les lois de la physique quantique se confondent avec les lois de la physique classique.

principe d'Heisenberg. Ce principe d'incertitude indique qu'on ne peut connaître avec exactitude la position et la quantité de mouvement d'une particule.

principe de Pauli. Il détermine l'état d'un ensemble de particules identiques. Dans l'échange de deux particules, l'état doit être symétrique, c'est-à-dire ne pas changer de signe, dans le cas de bosons (particules de spin nul ou entier) ; il doit être antisymétrique, c'est-à-dire changer de signe, dans le cas de fermions (spin demi-entier).

principe de Relativité. Principe fondamental de la physique, selon lequel toutes les expériences de physique donnent des résultats identiques dans des référentiels en translation rectiligne et uniforme les uns par rapport aux autres.

probabilité. *n.* La probabilité P_i d'apparition d'un événement i dans un système est définie par rapport à un ensemble statistique de N systèmes :

$$P_i = N_i/N \quad (N \to \infty)$$

profondeur de champ. Mesuré sur l'axe d'un système optique, segment sur lequel doit se trouver un objet pour donner une image nette et donc observable.

proton. *n.* Particule élémentaire ayant une charge positive équivalente à la charge négative de l'électron mais possédant une masse environ 1 837 fois supérieure. En fait, le proton est le noyau positif de l'atome d'hydrogène.

puissance. *n.* Pour une loupe ou un microscope, rapport de l'angle sous lequel on voit l'image (en radian) à la grandeur de l'objet (en mètre). Unité : la dioptrie.

puits. *n.* En mécanique des fluides, un puits est un écoulement bidimensionnel, à potentiel, dont le débit est négatif.

pulsation. *n.* Grandeur caractéristique d'un mouvement oscillatoire ; elle est égale à la fréquence multipliée par 2π.

push-pull. *n.* Montage utilisé dans les étages de sortie des amplificateurs de puissance. Il comprend deux tubes ou transistors fournissant alternativement le courant de sortie.

pyralène. *n.* Huile ininflammable utilisée comme réfrigérant des enroulements de transformateur.

pyrocarbone (PyC). *n.* Variété de carbone obtenue par une technique de traitement à haute température.

pyromètre. *n.* Appareil utilisé pour mesurer des températures élevées par des mesures de rayonnement.

Q

quadrature. *n.* On dit qu'un phénomène oscillatoire est en quadrature retard ou en quadrature avance par rapport à un autre phénomène s'il est en retard ou en avance d'un quart de période par rapport à ce dernier.

quadriphonie. *n.* Extension de la stéréophonie consistant à reproduire, en plus de l'espace sonore avant, un champ sonore à l'arrière de l'auditeur.

quadripôle. *n.* Circuit électrique accessible par quatre bornes groupées en un dipôle d'entrée et un dipôle de sortie. Le rapport entre les variations de la tension aux bornes de sortie et les variations de tension appliquées à l'entrée est le gain en tension du quadripôle.

quantification spatiale. Quantification de la projection d'un moment cinétique sur un axe arbitraire. Définit le nombre quantique magnétique.

quantité de mouvement. Syn. d'*impulsion*.

Quinke (tube de). Interféromètre acoustique utilisable pour la mesure de la longueur d'onde d'un son, fonctionnant par dédoublement du parcours de l'onde provenant d'une source unique.

R

radiance. *n.* Quantité d'énergie totale émise par un objet sous forme de radiation électromagnétique.

radiation. *n.* C'est l'émission et la propagation d'énergie dans l'espace ou dans un milieu matériel sous forme d'ondes. Ce terme est utilisé également pour décrire des faisceaux de particules élémentaires comme des rayons alpha ou bêta ou des rayons cosmiques.

radio-actif. *adj.* Caractérise un noyau qui se désintègre en émettant des faisceaux de particules ou des ondes électromagnétiques. Les rayonnements les plus communément émis sont des rayonnements alpha, bêta ou gamma.

rapport gyromagnétique. Rapport du moment magnétique d'une particule à son moment cinétique.

Rayleigh (disque de). Disque constitué d'une lame de mica métallisée, suspendue au sein d'un fluide en mouvement par un fil de torsion. De la mesure de l'angle de rotation du disque on déduit la valeur quadratique moyenne de la vitesse du fluide, pourvu que les dimensions du disque soient faibles devant la longueur d'onde.

rayon de Larmor. Rayon de la circonférence décrite par une particule chargée, animée d'une vitesse perpendiculaire à un champ magnétique uniforme.

rayons cosmiques. Radiations très pénétrantes qui frappent la Terre ; on suppose qu'elles sont créées dans l'espace interstellaire. Elles sont classées en *primaires*, provenant directement de la source, et en *secondaires*, produites dans la haute atmosphère par la collision de noyaux et de rayons cosmiques primaires.

rayons gamma. (γ). Peuvent être émis par des substances radio-actives. Ce sont des ondes électromagnétiques d'énergie très supérieure aux rayons X ordinaires. Les rayons gamma sont très pénétrants, une fraction appréciable d'un faisceau pouvant traverser plusieurs centimètres de plomb.

rayonnement. *n.* Propagation d'énergie ne nécessitant pas l'intervention d'un milieu matériel.

réactance synchrone. Partie imaginaire de l'impédance interne d'une machine synchrone.

réacteur. *n.* Dispositif dans lequel une réaction de fission nucléaire en chaîne auto-entretenue peut être maintenue et dirigée (réacteur à fission). Ce terme est aussi appliqué à un dispositif dans lequel une réaction thermonucléaire peut être produite et dirigée (réacteur à fusion). Syn. de *pile atomique*.

reconnaissance de formes. Branche de la science et de la technologie dont le but est le développement d'outils ou de systèmes permettant une classification, une identification de signaux ou d'images.

redondance. *n.* Caractère des éléments de l'alphabet ajoutés au mot-code pour répéter l'information (ces éléments sont utilisés comme détecteurs ou correcteurs d'erreurs).

référentiel. *n.* Système d'axes à partir desquels sont repérées les positions des points d'un système.

référentiel barycentrique. Référentiel d'inertie dont l'origine est le centre de gravité des particules formant le système. Le référentiel barycentrique est particulièrement utile dans l'étude des collisions.

référentiel galiléen. Syn. de *référentiel d'inertie*.

référentiel d'inertie. Référentiel dans lequel s'applique le principe fondamental de la dynamique.

réflexion. *n.* Lorsqu'un rayon lumineux arrive en un point d'un dioptre ou d'un miroir, il naît un nouveau rayon (rayon réfléchi) qui revient dans le milieu initial à partir de ce point.

réfraction. *n.* Lorsqu'un rayon lumineux arrive en un point d'un dioptre, il naît un nouveau rayon qui, à partir de ce point, se propage dans le second milieu. Ce rayon, dit réfracté, n'est pas dans la même direction que le rayon incident ; c'est ce qu'on appelle le phénomène de réfraction.

registre à décalage. Mémoire dont toutes les cellules sont disposées sur une seule ligne. Sur commande, l'information peut circuler sur cette ligne de gauche à droite ou inversement. Le contenu des cellules se décale d'un cran à chaque impulsion d'horloge.

règles de sélection. Règles relatives aux nombres quantiques des niveaux d'énergie, et qui ont pour but de déterminer quels sont les éléments de matrices ou forces d'oscillateur qui sont nuls.

régulateur. *n.* Système asservi dont l'entrée est constante.

relation de dispersion. Condition portant sur la pulsation et le nombre d'onde et caractérisant les oscillations susceptibles de se propager dans un plasma.

relation d'Onsager. Relation de symétrie entre les coefficients qui relient, en thermodynamique des phénomènes irréversibles, les flux et les forces.

relaxation (oscillateur de). Montage auto-oscillateur fournissant des signaux rectangulaires et dont la période est déterminée par le temps de retour à l'équilibre d'un circuit excité par le basculement périodique d'un élément actif. (Le multivibrateur est un exemple typique d'oscillateur de relaxation.)

réluctance. *n.* Grandeur physique qui, dans les circuits magnétiques, permet de lier les ampères-tours au flux créé.

repère. *n.* Syn. de *référentiel*.

réponse impulsionnelle. Réponse d'un système linéaire à un signal appelé impulsion de Dirac

$$[\delta(t) = 0 \text{ pour } t \neq 0, \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t)\,dt = 1].$$

C'est une caractéristique des systèmes linéaires.

réseau. *n.* Système diffractant constitué par un ensemble de fentes très fines tracées sur une surface (plane en général).

réseau cristallin. Ensemble géométrique et périodique de points, associé à la disposition des atomes dans un cristal et possédant ses éléments de symétrie.

réseau équivalent. (élect.). Deux réseaux électriques ayant deux points communs sont équivalents (relativement à ces deux points) si leurs résistances entre ces deux points sont égales.

réseau réciproque. Ensemble périodique de points construit de façon géométrique à partir d'un réseau cristallin donné. Les propriétés physiques (diffraction, mouvement des électrons, ...) s'expriment plus simplement dans cet espace.

réseau de résistances. (élect.). Ensemble de résistances électriques joignant différents points de l'espace de sorte qu'on puisse passer d'un point à un autre en suivant un chemin constitué de résistances.

résistance. *n.* La résistance électrique d'un conducteur mesure la difficulté plus ou moins grande qu'il oppose au passage du courant. Elle est indépendante des potentiels appliqués, et ne dépend que des paramètres géométriques et de la nature du conducteur. L'unité de résistance est l'ohm (Ω).

résistance différentielle. C'est le rapport entre les variations de tension ΔV et de courant ΔI d'un dipôle autour d'un point de polarisation. On réserve ce terme de résistance au cas où ces variations restent « en phase ».

résistivité. *n.* Inverse de la conductivité électrique. Elle caractérise la résistance d'une substance conductrice de longueur et de section unité, et dépend de sa nature chimique.

résonance. *n.* Phénomène extrêmement général en physique qui se produit chaque fois qu'un oscillateur est soumis à une sollicitation de fréquence égale à sa fréquence propre, et qui se traduit par le fait que l'oscillateur absorbe la plus grande partie de l'énergie qui lui est fournie par le système excitateur, et présente des amplitudes de vibration considérables pouvant aller jusqu'à entraîner la destruction du système.

résonateur acoustique. Dispositif passif présentant la combinaison d'une masse acoustique et d'une élasticité acoustique : le résonateur de Helmholtz est formé d'un réservoir d'air ouvert par un col ; le fluide du réservoir exerce sur la masse d'air du col une force de rappel, l'ensemble définissant une fréquence de résonance.

rétroaction. *n.* Effet qui permet de connaître à l'entrée d'un système l'évolution de sa sortie. On dit aussi que le système est en boucle fermée.

réverbération. *n.* Réflexions multiples du son sur les parois et objets qu'il rencontre. Souvent nuisible, ce phénomène est atténué si l'on dispose des matériaux absorbants sur le trajet de l'onde sonore.

réversible. *adj.* Un système évolue d'une manière réversible quand une modification infiniment petite suffit à le faire évoluer dans l'autre sens.

rhéologie. *n.* Étude des déformations et des vitesses de déformation des matériaux qui sont soumis à des contraintes.

rotor. *n.* Partie mobile d'une machine électrique tournante.

Rydberg (constante de). C'est la constante qui intervient dans la loi de Balmer à propos des séries dans l'atome d'hydrogène. Elle est égale au potentiel d'ionisation de l'atome d'hydrogène exprimé en cm^{-1}, soit $1{,}097 \cdot 10^5\ cm^{-1}$.

S

sabine. *n.* Unité d'absorption égale à l'absorption d'une surface d'un pied carré (env. 0,09 m^2) totalement absorbante pour toutes les directions d'incidence.

scintillateur. *n.* Détecteur comportant un cristal scintillant qui émet un rayonnement de fluorescence lorsque les atomes ou molécules qui le constituent sont excités par une particule chargée.

second claquage. Phénomène thermique rapide se manifestant aux tensions élevées dans les transistors de puissance et pouvant entraîner leur destruction. A cause du « second claquage », la puissance dissipable dans un transistor diminue lorsque la tension de fonctionnement s'accroît.

secondaire. *n.* Dans un transformateur, c'est l'enroulement relié à la charge consommant l'énergie.

section efficace. Mode d'expression particulier de la probabilité d'une interaction d'un type déterminé entre un rayonnement incident et une particule ou un système de particules constituant la cible. C'est le quotient du nombre d'interactions se produisant dans l'unité de temps, par la densité de flux du rayonnement incident.

semi-conducteur. *n.* Nom donné à des substances dont la conductivité varie de façon considérable avec la température ; les semi-conducteurs deviennent des isolants à très basse température.

servomécanisme. *n.* Système à rétroaction négative.

shunt. *n.* On dit qu'un appareil de résistance *a* est shunté lorsqu'on a placé en dérivation entre ses bornes un conducteur de résistance *s* ou shunt. Le rôle du shunt est de ne laisser passer dans l'appareil qu'une fraction connue de l'intensité principale. Pour obtenir la valeur du courant mesuré, il faut alors multiplier l'indication de l'appareil par le facteur $1 + \frac{a}{s}$.

similitude. *n.* En mécanique des fluides, on dit qu'il y a une relation de similitude entre deux ou plusieurs phénomènes si les équations réduites qui les décrivent sont identiques. C'est grâce aux relations de similitude que l'on peut faire des études sur maquettes en soufflerie ou en tunnel hydrodynamique.

simultané. *adj.* Deux événements sont dits simultanés s'ils se produisent en même temps. D'après la théorie de la Relativité restreinte, deux événements simultanés dans un repère ne le sont plus dans un repère en translation uniforme par rapport au premier.

solide indéformable. Ensemble de points matériels assujettis à rester à distances constantes les uns des autres.

son. *n.* Perturbation mécanique se propageant dans un milieu déformable sous la forme d'une onde de pression. Les sons audibles (20 à 20 000 Hz) sont directement détectés par l'oreille, tandis que les ultrasons et infrasons nécessitent un appareillage particulier.

sonar. *n.* Abréviation de ***sound navigation and ranging.*** Appareil de détection permettant la navigation et la télémétrie, au moyen de la propagation d'une onde sonore, dans le milieu aquatique.

sone. *n.* Unité subjective d'intensité sonore définie comme l'intensité ressentie à la fréquence de 1 000 hertz pour un niveau sonore supérieur de 40 décibels au seuil auditif.

sonomètre. *n.* Appareil servant à mesurer l'intensité du bruit et composé d'un microphone et d'un amplificateur de mesure.

sortance. *n.* La sortance d'un circuit logique (fan-out) est le nombre maximal de circuits de même type que l'on peut connecter en parallèle à sa sortie.

soufflerie. *n.* En aérodynamique, installation permettant d'étudier l'écoulement autour d'un obstacle fixe.

soupape électrique. Terme appliqué à tous les dispositifs, commandés ou non, n'autorisant le passage du courant que dans un seul sens, appelé sens passant.

source. *n.* 1° Au sens de la théorie de l'information, organe fournissant des messages à transmettre. 2° L'une des électrodes d'un transistor à effet de champ. La source joue un rôle analogue à l'émetteur d'un transistor ou à la cathode d'une triode ou d'une pentode. 3° En mécanique des fluides, une source est un écoulement bidimensionnel, à potentiel dont le débit est positif. L'opposé de la source est le *puits*.

sourde (chambre). Local isolé des sons extérieurs, servant aux mesures acoustiques.

spectre acoustique. Amplitude relative des sons purs entrant dans la composition d'un son complexe en fonction de leurs fréquences.

spectrographe. *n.* Appareil destiné à l'analyse des vibrations électromagnétiques émises par une source.

spectrographe de masse. Appareil permettant de séparer les atomes d'un corps selon leur masse.

spectromètre magnétique. Dispositif permettant de mesurer l'impulsion d'une particule chargée grâce à un champ magnétique.

spectroscopie. *n.* Observation de la composition spectrale du rayonnement électromagnétique émis par une source ; interprétation et prévision de cette composition.

spin. *n.* Degré de liberté interne d'une particule, associé à un moment cinétique. Il est caractérisé par un nombre quantique de spin ($s = 1/2$ pour un électron) et par un nombre quantique magnétique de spin ($m_s = \pm 1/2$ pour un électron).

stabilité. *n.* Caractéristique d'un système capable de reprendre son évolution après une modification transitoire.

stationnaire (onde). Vibration spatialement localisée, résultant de la superposition d'une onde directe et de l'onde réfléchie.

statique. *n.* Branche de la mécanique qui étudie l'équilibre des corps au repos.

statistique de Bose-Einstein. Les bosons suivent cette statistique. Ils sont indiscernables.

statistique de Fermi-Dirac. Les particules qui suivent cette statistique s'appellent des fermions et sont indiscernables. Il y a au maximum un fermion par niveau d'énergie.

statistique de Maxwell-Boltzmann. Limite commune des statistiques de Bose-Einstein et de Fermi-Dirac. Dans cette statistique les particules sont discernables.

stator. *n.* Partie fixe d'une machine électrique tournante.

stéréophonie. *n.* Technique visant à reconstituer une sensation auditive spatiale.

Stern et Gerlach (expérience de). Expérience effectuée en 1921 et démontrant la quantification spatiale (existence de m_ℓ ou m_s).

stigmatisme. *n.* Propriété d'un système optique capable de fournir une image ponctuelle à partir d'un objet ponctuel.

strippage ou **épluchage.** *n.* Processus par lequel un atome ou un ion animé d'une grande vitesse traversant un milieu matériel perd des électrons par interaction avec les constituants du milieu traversé.

structure dissipative. Organisation d'un système hors d'équilibre qui dissipe de l'énergie.

sublimation. *n.* Transformation d'un solide en phase vapeur, sans passer par l'état liquide.

subsonique. *adj.* Qui est inférieur à la vitesse du son. En aérodynamique, un écoulement subsonique est caractérisé par un nombre de Mach inférieur à 8.

superfluide. *adj.* Caractérisant la disparition complète de la viscosité de l'hélium liquide au voisinage du zéro absolu de température.

superhétérodyne. *n.* et *adj.* Procédé de réception dans lequel, grâce à un oscillateur local et un mélangeur d'entrée, les signaux d'antenne sont transposés à une fréquence unique (souvent 450 kHz environ) avant d'être amplifiés puis détectés. La réception superhétérodyne est universellement adoptée en radio ou télévision. C'est une invention française.

super-réaction. *n.* et *adj.* Procédé de réception dans lequel le signal d'antenne contrôle le démarrage d'un oscillateur périodiquement bloqué. Un récepteur super-réaction est très sensible mais peu sélectif et peu stable. Le procédé n'est plus utilisé qu'en télécommande de modèles réduits.

supersonique. *adj.* Qui est supérieur à la vitesse du son. En aérodynamique, un écoulement supersonique est caractérisé par un nombre de Mach supérieur à 12.

surface de Fermi. Nom donné à la surface, définie dans l'espace réciproque, qui correspond au dernier état d'énergie occupé à 0 °K de la bande de conduction d'un métal. La plupart des propriétés physiques d'un métal font intervenir la densité des états électroniques au voisinage de cette surface.

surface d'onde. Lieu géométrique des points atteints par une vibration au bout d'un temps donné à partir d'une source ponctuelle.

surrégénérateur. *n.* ***(breeder).*** Réacteur nucléaire produisant, à partir d'une substance fertile, une substance fissile identique à celle qu'il consomme et en quantité supérieure à celle qui est consommée.

susceptibilité magnétique. Caractérise les matériaux magnétiques. Elle est définie comme le rapport entre l'aimantation du milieu matériel et le champ magnétique appliqué.

symétrie. *n.* Un système physique possède des propriétés de symétrie lorsqu'il existe des transformations qui le laissent invariant.

symétrie (effets de). Effets liés à l'interaction de particules identiques dans un système. Du fait de la forme des fonctions d'onde imposée par le principe de Pauli, on observe, par exemple, des effets d'interférences.

synchrocyclotron. *n.* Accélérateur circulaire présentant la structure du cyclotron, mais dans lequel la fréquence du champ électrique accélérateur est modulée de manière à conserver l'isochronisme entre la particule accélérée et le champ accélérateur.

synchrone. *adj.* Se dit de deux mouvements qui ont lieu en même temps.

synchronisation. *n.* Phénomène tendant à verrouiller l'une sur l'autre les fréquences de deux oscillateurs liés faiblement l'un à l'autre. En injectant ainsi dans l'oscillateur de balayage d'un oscilloscope une faible partie du signal d'entrée à observer, on assure la fixité de l'image sur l'écran; c'est la synchronisation de l'oscilloscope.

synchrotron. *n.* Accélérateur circulaire de grande énergie dans lequel les particules sont accélérées le long d'une trajectoire circulaire à rayon constant. Pour obtenir ce résultat, il faut faire varier simultanément les valeurs du champ magnétique et de la fréquence du champ électrique accélérateur.

synthétiseur de fréquences. Dispositif qui, à partir du signal issu d'un oscillateur à quartz de grande stabilité, génère grâce à des opérations de battement et de division toute fréquence souhaitée affichée sur le panneau de commande sous forme numérique.

système. *n.* Ensemble séparé de l'environnement par une frontière, recevant de l'information sur l'extérieur par ses entrées, en donnant sur son évolution par ses sorties, et créé pour satisfaire à un objectif.

système de communication. Ensemble d'organes assurant la transmission de l'information. Il se compose d'un émetteur, d'un récepteur, d'un canal et parfois d'un codeur et d'un décodeur.

système isolé. Système qui n'échange avec l'extérieur ni chaleur ni matière.

système de référence inertiel. Système de référence où les lois de la mécanique newtonienne sont valables. Compte tenu de la précision de la plupart des expériences physiques, la Terre constitue un système de référence inertiel.

T

tandem. *n.* Accélérateur électrostatique dans lequel la haute tension est utilisée pour accélérer deux fois le même ion; d'abord chargé négativement, celui-ci remonte le champ électrique du premier étage; il traverse ensuite une cible mince dans laquelle il est ionisé par strippage avant d'être accéléré à nouveau.

télescope. *n.* 1° Instrument d'optique destiné à l'observation des objets éloignés et spécialement des astres. 2° Système d'identification de particules chargées constitué par l'association de deux (ou plus) détecteurs.

température Celsius. La température Celsius est définie à partir d'une échelle où les points de fusion de la glace et d'ébullition de l'eau à la pression atmosphérique constituent les repères 0 °C et 100 °C respectivement.

température de Debye. Température caractéristique d'un corps solide définie par la pulsation maximale ω_D du spectre de ses vibrations acoustiques. Elle est en général de l'ordre de quelques centaines de degrés Kelvin.

température d'Einstein. Température au-dessus de laquelle la loi de Dulong et Petit est vérifiée.

température Kelvin. Température absolue T exprimée dans une échelle où la température absolue du point triple de l'eau a la valeur 273,16 degrés.

temps de relaxation. Temps nécessaire pour atteindre l'équilibre en partant d'une situation très éloignée de l'équilibre. Syn. de *constante de temps.*

temps de réverbération. Intervalle de temps séparant la fin de l'émission d'un son et le moment où son atténuation atteint 60 décibels.

tension. *n.* Contrainte normale à un élément de surface et orientée dans le même sens que la normale à cet élément de surface.

terme. *n.* Au sens de terme spectral, désigne les niveaux d'énergie issus de la configuration après introduction d'un couplage entre les électrons, mais avant la prise en compte des interactions magnétiques faibles (telle l'interaction spin-orbite, etc.).

théorème de Carnot. Les rendements de deux machines réversibles fonctionnant entre les mêmes températures sont égaux quelle que soit la nature des machines et sont supérieurs au rendement de n'importe quelle machine irréversible fonctionnant entre les mêmes températures.

thermistance. *n.* Thermomètre composé d'un semi-conducteur dont la résistance diminue quand la température s'élève.

thermocouple. *n.* Ensemble de deux conducteurs métalliques soudés à leurs extrémités. Lorsque les deux soudures sont à des températures différentes, il existe entre elles une différence de potentiel qui ne dépend que de la nature des fils et de la température des soudures.

thermodynamique. *n.* Partie de la physique qui traite, d'un point de vue macroscopique, des relations entre les phénomènes mécaniques et thermiques.

thermomètre. *n.* Système macroscopique dont un seul des paramètres varie quand le système cède ou absorbe de la chaleur.

thermostat. *n.* Réservoir de grandes dimensions, de température constante en contact avec le système à étudier.

thyristor. *n.* Composant actif à semi-conducteur constitué de quatre couches respectivement, P, N, P, N. L'électrode de commande ou *gâchette* permet de rendre l'ensemble conducteur, le retour à l'état bloqué (haute impédance) ne peut se faire que par annulation du courant principal. Le thyristor n'est commode à utiliser qu'en alternatif. Les puissances commandées peuvent atteindre des dizaines de kilowatts sous des tensions de plusieurs centaines de volts.

timbre. *n.* Impression auditive subjective liée à la composition spectrale d'un son.

tourbillon. *n.* Mouvement tournant d'un fluide. En mécanique des fluides, un tourbillon est un écoulement singulier à potentiel dont la vitesse radiale est nulle.

traînée. *n.* En aérodynamique, la traînée est la composante, parallèle au mouvement, des forces qui s'exercent sur une surface (*ex.* traînée d'une aile d'avion).

transducteur. *n.* En électro-acoustique, dispositif permettant la conversion des signaux électriques en onde sonore, et réciproquement. *Ex.* Haut-parleurs, microphones.

transformation canonique. Transformation permettant de passer d'un ensemble de coordonnées et impulsions généralisées à un nouvel ensemble de coordonnées et impulsions généralisées possédant la propriété d'obéir, comme le premier ensemble de variables généralisées, aux équations de Hamilton.

transformation identité (ou **identique**). La transformation identité d'une figure géométrique est la transformation qui à tout point de la figure fait correspondre ce même point.

transformations de Lorentz. Groupe de transformations laissant invariantes les lois physiques.

transistor. *n.* Composant « solide » ayant grossièrement le comportement d'une triode. Le courant collecteur-émetteur est proportionnel au courant de commande injecté dans la base.

transistor à effet de champ. En électro-acoustique, couramment utilisé pour sa grande résistance d'entrée permettant notamment d'adapter l'impédance élevée d'un microphone à électret à celle de l'amplificateur.

transistor unijonction (U.J.T.). Composant actif constitué par un barreau de semi-conducteur muni d'une jonction latérale. L'U.J.T. est utilisé le plus souvent comme générateur d'impulsions.

transitoire. *adj.* Qualifie un phénomène survenant dans un système soumis à un changement brutal de conditions, persistant peu de temps après cette perturbation.

trans-sonique. *adj.* Correspond à des vitesses voisines de la vitesse du son. En aérodynamique, le régime trans-sonique est caractérisé par des nombres de Mach compris entre 8 et 12.

travail. *n.* Le travail d'une force est le produit scalaire de cette force par le déplacement de son point d'application.

triac. *n.* Composant semi-conducteur se comportant comme deux thyristors placés tête-bêche. Une seule électrode de commande permet de contrôler les deux alternances du courant principal. Les triacs ne sont utilisés qu'en alternatif.

triboluminescence. *n.* Émission de lumière produite par une substance à la suite d'un choc ou d'une déformation.

trigger. *n.* Circuit dont la tension de sortie ne peut prendre que deux valeurs selon le niveau de la tension appliquée à l'entrée. Les triggers sont très utilisés dans les circuits de déclenchement des oscilloscopes.

triode. *n.* C'est un tripôle électrique obtenu en intercalant une électrode supplémentaire appelée grille entre la cathode et l'anode d'une diode à vide. Le potentiel de cette grille contrôle l'intensité du courant anodique.

tripôle. *n.* Circuit accessible par trois bornes. C'est un quadripôle dont les dipôles d'entrée et de sortie ont un point commun.

turbulence. *n.* Aspect macroscopiquement désordonné du mouvement d'un fluide.

U

ultrason. *n.* Son de fréquence supérieure à la limite audible par l'homme (environ 16 à 20 kHz). Les ultrasons sont remarquables par leur comportement physique proche de celui de la lumière (réflexions). Au-delà de 1 gigahertz (10^9 hertz), les ultrasons sont appelés hypersons.

univers. *n.* En thermodynamique, c'est l'ensemble du système et la partie du milieu extérieur qui échangent de l'énergie.

uranium enrichi. C'est de l'uranium dans lequel la proportion de l'isotope 235 a été augmentée par rapport à celle qui existe dans l'uranium naturel (0,71 % d'U 235 dans l'uranium naturel). L'enrichissement se fait par diverses méthodes dites de séparation des isotopes (la diffusion gazeuse est le procédé industriel utilisé actuellement). L'uranium enrichi constitue le combustible nucléaire le plus courant.

V - Z

variable d'état. Élément d'un ensemble de variables dont la connaissance ajoutée à celle de l'entrée à un instant t_0 permet de connaître l'évolution de la sortie d'un système à l'instant $t_0 + \varepsilon$. Les variables d'état condensent l'information sur le passé.

Varicap (marque déposée). Diode à capacité variable; c'est une jonction PN polarisée en inverse qui se comporte comme une capacité dont la valeur est fonction de la tension appliquée.

V. C. O. ***(voltage control oscillator).*** Oscillateur dont la fréquence est fonction d'une tension continue de commande.

vidéo (signal). Terme utilisé en télévision. C'est le signal contenant à la fois les informations de brillance provenant de l'image à transmettre et les tops de synchronisation.

viscosité. *n.* Caractéristique d'un fluide dont le mouvement des molécules est soumis à des forces de frottement intermoléculaires. La viscosité entraîne au sein d'un fluide en mouvement une déperdition d'énergie.

visqueux. *adj.* Se dit d'un fluide dont la viscosité n'est pas nulle. Plus généralement, qui est épais ou s'écoule avec difficulté.

vitesse absolue. Vitesse d'un point par rapport à un référentiel d'inertie.

vitesse d'Alfven. Limite basse fréquence de la vitesse de phase des ondes cyclotroniques se propageant parallèlement au champ magnétique.

vitesse aréolaire. Aire balayée, par unité de temps, par le vecteur joignant l'origine à un point mobile. Dans le cas d'une interaction newtonienne, cette vitesse est constante (loi des aires).

vitesse de groupe. Vitesse de propagation des battements obtenus par superposition de plusieurs vibrations de fréquences légèrement différentes. Cette vitesse est la vitesse de propagation de l'énergie.

vitesse de libération. Vitesse minimale qu'il faut imprimer à un objet lancé verticalement pour qu'il échappe à l'attraction terrestre.

vitesse de phase. Vitesse de propagation d'une onde électromagnétique monochromatique.

vitesse de phase d'un mode (notée v_p). Vitesse à laquelle doit se déplacer un observateur le long d'une ligne sans perte pour voir un champ constant, soit $\beta_g z - \omega t =$ cte, ou encore $v_p = \frac{dz}{dt} = \frac{\omega}{\beta}$.

vitesse relative. Vitesse d'un point par rapport à un repère qui est lui-même en mouvement par rapport à un référentiel d'inertie.

vitesse de transport de l'énergie (notée v_E). Rapport de la puissance se propageant le long d'une ligne divisée par l'énergie électromagnétique totale emmagasinée par unité de longueur. Elle est égale à la vitesse de groupe introduite précédemment.

Zener (diode Zener). Les diodes Zener sont des diodes à jonction construites pour travailler dans ces conditions, la tension à leurs bornes est alors indépendante du courant qui les traverse. Elles sont utilisées comme référence de tension. L'effet Zener est un effet d'avalanche se produisant dans une jonction PN polarisée en inverse.

Zircaloy. *n.* Alliage de zirconium et d'un ou plusieurs autres métaux (étain, fer, chrome, nickel) qui est particulièrement résistant au point de vue mécanique et chimique.

zone de Brillouin. Maille élémentaire du réseau réciproque, construite de façon symétrique autour d'un de ses nœuds.

ERRATA ET COMPLÉMENTS

Volume I

Page 204, dans le chapitre « Enregistrement magnétique », 4e paragraphe, lire : les vitesses normalement utilisées sont 4,75, 9,5, 19 et 38 cm/s.
Supprimer la mention entre parenthèses.

Volume II

Page 50, légende de la photographie figurant en haut de page, lire : Module amplificateur large bande 225-400 MHz, qui sort 25 watts crête avec 6 dB de gain. Ce composant sert d'amplificateur de puissance dans des dispositifs de communication UHS/VHS. Cette fonction peut être remplie actuellement par des transistors d'émission pouvant sortir jusqu'à 60 watts dans la bande 225-400 MHz.

HISTORIQUE DE LA PHYSIQUE

RECHERCHES SUR L'ORIGINE DE LA MATIÈRE

École ionienne : Thalès, Anaximandre, Anaximène

École pythagoricienne

Les atomistes : Leucippe, Démocrite

ASTRONOMIE

388-313 : Héraclide du Pont : rotation de la terre

370 : Eudoxe : mouvement épicycloïdal des planètes

281 : Aristarque de Samos : héliocentrisme

161-126 : Hipparque : théorie des excentriques

130-150 : Ptolémée

DYNAMIQUE

384-322 : Aristote

GÉOMÉTRIE

300 : Euclide : "les éléments"

STATIQUE

287-212 : Archimède

ASTRONOMIE

1473-1543 : Copernic

1572 : Tycho Brahé : observations astronomiques

1609 : Kepler : lois du mouvement des planètes

1610 : Galilée : découverte des satellites de Jupiter

1632 : Galilée impose l'héliocentrisme

MÉCANIQUE

1564-1642 : Galilée

1589 : Galilée : isochronisme des oscillations du pendule

1629-1695 : Huygens : conservation de la force vive

1643-1727 : Newton

1670 : Leibniz : "théorie du mouvement"

1687 : Newton : lois de l'attraction universelle

OPTIQUE

1619 : Snell : lois de la réfraction

1657 : principe de Fermat

1672 : Newton : analyse de la lumière

1694 : Huygens : "traité de la lumière"

1704 : Newton : "traité d'optique"

1810 : Malus : polarisation de la lumière

1822 : Fresnel : théorie ondulatoire de la lumière

1849 : Fizeau : mesure de la vitesse de la lumière

1864 : Maxwell : équations du champ électromagnétique

1887 : expérience de Morley et Michelson

LES GAZ

1644 : Torricelli : tube barométrique

1647 : Pascal : expérience sur le vide

1661 : Boyle : combustion des gaz

1679 : Mariotte : compressibilité des gaz

CHALEUR

1690 : Denis Papin : "mémoire sur l'emploi de la vapeur"

1703 : Stahl : théorie du phlogistique

1730 : Réaumur : échelle thermométrique

1774 : Lavoisier : théorie du calorique

1780 : Lavoisier et Laplace : calorimétrie

1807 : Fourier : "théorie analytique de la chaleur"

1824 : Carnot : "réflexions sur la puissance motrice du feu"

MÉCANIQUE ANALYTIQUE

1743 : D'Alembert : "traité de dynamique"

1747 : Maupertuis : principe de moindre action

1788 : Lagrange : "Mécanique analytique"

ÉLECTRICITÉ

1733 : Dufay : découverte des deux sortes d'électricité

1785 : Coulomb : "mémoire sur l'électrodynamique"

1800 : Volta : pile électrique

1820 : Ampère : lois de l'électromagnétisme

1827 : Ohm : loi du courant électrique

1833 : Faraday : l'électrolyse

1834 : Lenz : loi sur les courants induits

1879 : Crookes : décharges électriques dans les gaz

1897 : Thomson : mesure de la charge de l'électron

THERMODYNAMIQUE

1841 : Meyer et Joule : équivalent mécanique de la calorie

1850 : Kelvin : "mémoire sur la chaleur"

1854 : Clausius : l'entropie

1872 : Boltzmann : théorie cinétique des gaz

1879 : Stefan : loi du rayonnement thermique

PHYSIQUE ATOMIQUE ET NUCLÉAIRE

1895 : Roentgen : rayons X

1896 : Becquerel : observation sur la radio-activité

1898 : P. et M. Curie : radium

1900 : Planck : théorie des quanta

1905 : Einstein : effet photo-électrique

1905 : Einstein : relativité restreinte

1911 : Bohr : théorie quantique de l'atome

1916 : Einstein : relativité générale

1918 : Rutherford : désintégration de l'atome

1923 : De Broglie : mécanique ondulatoire

1925 : Heisenberg : mécanique quantique

1925 : Pauli : principe d'exclusion

1934 : Chadwick : découverte du neutron

1945 : explosion de la première bombe atomique

1947 : observation du méson π

1956 : non-conservation de la parité

1964 : modèle des quarks

Table de quelques constantes physiques

N	nombre d'Avogadro	$6{,}023 \times 10^{23}$ mol^{-1}
c	vitesse de la lumière dans le vide	$2{,}998 \times 10^{8}$ m · s^{-1}
h	constante de Planck	$6{,}626 \times 10^{-34}$ J · s
$\hbar$	quantum de moment cinétique ($= h/2\pi$)	$1{,}054 \times 10^{-34}$ J · s
a_0	premier rayon de l'atome de Bohr ($= 4\pi\varepsilon_0 \hbar^2/me^2$)	$0{,}529 \times 10^{-10}$ m
μ_B	magnéton de Bohr ($= e\hbar/2$ m)	$0{,}927 \times 10^{-23}$ J · T^{-1}
m	masse de l'électron au repos	$0{,}911 \times 10^{-30}$ kg
M_P	masse du proton au repos	$1{,}672 \times 10^{-27}$ kg
e	charge de l'électron	$1{,}602 \times 10^{-19}$ C
k_B	constante de Boltzmann	$1{,}38 \times 10^{-23}$ J · °K^{-1}
	énergie associée à 1 eV	$1{,}602 \times 10^{-19}$ J
	température associée à 1 eV ($= 1$ eV/k_B)	11 605 °K
	fréquence associée à 1 eV ($= 1$ eV/h)	$2{,}418 \times 10^{14}$ Hz
	nombre d'onde associé à 1 eV ($= 1$ eV/hc)	8 065 cm^{-1}
ε_0	permittivité du vide	$0{,}885 \times 10^{-11}$ F · m^{-1}
μ_0	perméabilité magnétique du vide ($= 4\pi \cdot 10^{-7}$ H · m^{-1})	$1{,}256 \times 10^{-6}$ H · m^{-1}

TABLEAU DE DIFFÉRENTS TYPES DE RÉACTEURS

	Spectre neutronique	Modérateur	Caloporteur	Combustible	Utilisation
UNGG	Thermique	Graphite	CO_2	U naturel	Électrogène
HTR	Thermique	Graphite	H_e	U enrichi	Électrogène Chaleur de procédé
GCFR	Rapide	—	H_e	U enrichi Pu	Électrogène Calogène
PWR	Thermique	H_2O	H_2O	U enrichi	Électrogène - Propulsion navale - Calogène
BWR	Thermique	H_2O	H_2O	U enrichi	Électrogène Calogène
LMFBR	Rapide	—	Na liquide	Pu	Électrogène Calogène

ABRÉVIATIONS

UNGG - Réacteur à uranium naturel graphite gaz.
HTR - (High temperature reactor) Réacteur à haute température.
GCFR - (Gas cooled fast reactor) Réacteur rapide refroidi par gaz.
PWR - (Pressurized water reactor) Réacteur à eau pressurisée.
BWR - (Boiling water reactor) Réacteur à eau bouillante.
LMFBR - (Liquid metal fast breeder reactor) Réacteur rapide surrégénérateur à métaux liquides.
HWR - (Heavy water reactor) Réacteur à eau lourde.
AGR - (Advanced gas reactor) Réacteur à gaz avancé.
SGHWR- (Steam generating heavy water reactor) Réacteur à eau lourde producteur de vapeur (Grande-Bretagne).
MSBR - (Molten salt breeder reactor) Réacteur surrégénérateur à sels fondus.

INDEX DES NOMS CITÉS

Les références sont données par l'indication du numéro de la page où se trouve le terme, suivi le cas échéant, des lettres *a* et *b* se rapportant respectivement à la colonne de gauche et à la colonne de droite de chaque page.

Les références sont données, pour les illustrations, par le numéro de la page en caractères gras et, pour le texte, par le numéro de la page en caractères maigres pour une simple citation, et en italique pour un développement plus complet.

Pour les différentes variantes se rattachant à un même terme, un astérisque indiquera le renvoi à ce dernier. *Ex.:*
référentiel d'inertie (ou repère galiléen) I - 41 a, **41**
repère galiléen
* référentiel d'inertie

D

E

F

N

O

P

Q

R

S

T

U

V

Z

ENCYCLOPÉDIE DES SCIENCES

CHIMIE

GRANGE BATELIÈRE

LEXIQUE DE CHIMIE

SUPPLÉMENT AU VOLUME XII DE LA GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

ABRÉVIATIONS

adj.	adjectif	*n.*	nom	*p. ex.*	par exemple
ex.	exemple	*par ext.*	par extension	*syn.*	synonyme

A

accumulateur. *n.* Appareil permettant le stockage de l'énergie électrique.

acide adipique. Diacide à six carbones utilisé dans la synthèse du Nylon. Formule :
$COOH—CH_2—CH_2—CH_2—CH_2—COOH$.

acide ascorbique. Vitamine C, hydrosoluble, formule brute C_6H_8O ; se rencontre dans les fruits. Sa carence donne le scorbut.

acide barbiturique ou **malonylurée.** Composé de formule :

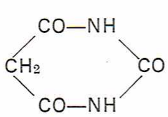

acide de Brönsted. Molécule ou ion susceptible de fournir un proton (ion H^+).

acide carboxylique. Molécule possédant le groupement fonctionnel $—\overset{\displaystyle O}{\overset{\|}{C}}—OH$. Formule générale :

$$R—\underset{\displaystyle O}{\underset{\|}{C}}—OH.$$

acide folique. Vitamine B_9 ; se rencontre dans les épinards, la levure, le foie.

acide de Lewis. Molécule ou ion possédant une lacune électronique ; cette molécule peut donc accepter un doublet électronique d'une autre espèce chimique, établissant ainsi une liaison covalente.

acide maléique. Diacide éthylénique de formule :

$$COOH—CH = CH—COOH.$$

acide pantothénique. Vitamine B_5, hydrosoluble. Vitamine de croissance que l'on trouve dans la levure de bière.

acide tartrique. Famille de trois isomères d'un acide-alcool de formule développée :

$$COOH—CHOH—CHOH—COOH.$$

Deux d'entre eux sont inverses optiques ; le dernier est inactif par nature.

acides phtaliques. Ensemble de trois acides carboxyliques comportant deux fonctions —COOH fixées sur un noyau benzénique.

acidimétrie. *n.* Détermination de la normalité d'un acide présent dans une solution. En général, elle s'effectue par une analyse volumétrique.

acidité. *n.* Caractère de ce qui est acide. Cette notion a un sens différent suivant la théorie dans laquelle on se place. Voir *acide de Brönsted* et *acide de Lewis.*

activité. *n.* Caractéristique thermodynamique de l'état d'un constituant définie à partir de son potentiel chimique par la relation :

$$\mu_i = \overset{\circ}{\mu_i} + RT.Lna_i$$

($\overset{\circ}{\mu_i}$ est le potentiel chimique standard, a_i l'activité).

addition tête à queue. Dans le cas de la polymérisation d'un dérivé éthylénique dissymétrique ($CH_2 = CH—A$), se dit lorsque la réaction se fait toujours par la même extrémité de la molécule. On obtient :

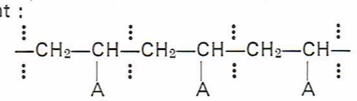

addition tête à tête. Dans le cas de la polymérisation d'un dérivé éthylénique dissymétrique ($CH_2 = CH—A$), se dit lorsque deux extrémités semblables de la molécule se trouvent liées. On obtient :

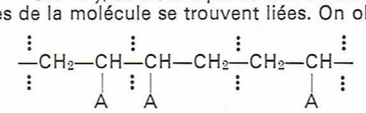

adiabatique. *adj.* Se dit d'une transformation pendant laquelle aucun échange de chaleur n'a lieu entre le système étudié et le milieu extérieur.

adsorption. *n.* Fixation de molécules à la surface d'un solide.

adsorption chimique. Type d'adsorption dans laquelle les molécules adsorbées sont liées au solide par des forces de grande énergie de type covalent. L'adsorption chimique s'accompagne souvent d'une dissociation des molécules adsorbées. Par exemple, l'hydrogène, molécule diatomique, s'adsorbe sur le nickel sous forme d'atome ; la molécule a donc été rompue.

adsorption physique. Type d'adsorption dans laquelle les molécules adsorbées sont liées au support solide par des forces de petite énergie, du type forces de Van der Waals.

affinité chimique. Opposé de la variation d'enthalpie libre d'une réaction. Caractérise la capacité de réaction d'un système chimique.

agent anti-fuite. Substance tensio-active qui permet, par capillarité, de limiter la perte de liquide lors de l'apparition d'une fissure dans un récipient.

agent anti-redéposition. Substance que l'on incorpore à une poudre à laver pour stabiliser les suspensions de micelles formées entre les détergents et les impuretés graisseuses.

agent bouche-fuite. Substance solide que l'on met en suspension dans une solution afin qu'elle colmate les fissures qui peuvent se produire dans les parois du récipient.

agent tensio-actif. Substance qui modifie la tension superficielle d'une solution et donc son pouvoir mouillant.

agents séquestrants. Coordinats possédant plusieurs doublets électroniques disponibles qu'ils fournissent à l'ion central. En formant avec certains ions métalliques des complexes solubles stables, les agents séquestrants les soustraient aux réactions chimiques indésirables qu'ils pourraient provoquer dans le milieu où ils se trouvent.

alcali. *n.* Ancienne dénomination pour les solutions des hydroxydes des cations monovalents (soude, potasse, ammoniaque).

alcalimétrie. *n.* Détermination de la normalité d'une base présente dans une solution ; en général, elle s'effectue par une analyse volumétrique.

alcaloïde. *n.* Substance naturelle d'origine végétale, qui possède un cycle comportant un atome d'azote.

alcanes *n.* ou **hydrocarbures saturés.** Composés organiques formés uniquement de carbone et d'hydrogène et dont la molécule ne comporte aucune liaison multiple.

alcènes. *n.* ou **oléfines** ou **hydrocarbures oléfiniques.** Hydrocarbures dont la molécule est caractérisée par la présence d'une double liaison (1 liaison σ et 1 liaison π) entre deux carbones.

alcool. *n.* Molécule organique qui comporte le groupement fonctionnel —OH.

alcyne *n.* Molécule comportant une triple liaison (1 liaison σ et 2 liaisons π) entre deux carbones.

aldéhyde. *n.* Molécule possédant le groupement fonctionnel :

—CH =O ; formule générale R—CH =O

(R, radical alkyle).

alkylat. *n.* Produit d'addition d'un alcane sur un alcène et conduisant à un alcane ramifié, en présence d'acide sulfurique comme catalyseur.

alkylation. *n.* Réaction aboutissant à la fixation d'un radical alkyle, c'est-à-dire d'un radical formé de carbone et d'hydrogène. *Ex. :* radical méthyle $—CH_3$, radical éthyle $—C_2H_5$, etc.

alliage. *n.* Mélange solide de deux ou de plusieurs métaux. Il est constitué de micro-cristaux des solutions solides, formés à partir des métaux composants.

Par ext. on appelle aussi alliage le solide obtenu par solidification d'une solution d'un non métal dans un métal ; *ex. :* les alliages fer-carbone.

alliage antifriction. Alliage ayant la propriété de posséder un petit coefficient de frottement. Utilisé pour confectionner les pièces mobiles en contact avec d'autres pièces.

alumine activée. Oxyde d'aluminium partiellement hydraté obtenu par déshydratation incomplète de l'hydroxyde et qui sert soit de catalyseur (d'hydratation et de déshydratation), soit de support d'un catalyseur.

aluminium anodisé. Aluminium ayant subi une oxydation anodique qui le recouvre d'une couche d'alumine protectrice.

aluminothermie. *n.* Opération métallurgique consistant à réduire un oxyde ou un halogénure par l'aluminium.

amalgamation d'un métal. Formation d'un amalgame du métal. On réalise souvent une amalgamation superficielle d'un bloc métallique en plaçant celui-ci au contact d'une solution de sel de mercure.

amalgame. *n.* Alliage liquide d'un métal avec le mercure.

amines. *n.* Familles de composés organiques azotés que l'on peut considérer comme dérivant de l'ammoniac NH_3 par remplacement d'un ou plusieurs hydrogènes par des radicaux alkyle. On distingue trois classes d'amines :
— amines primaires, R—NH_2 ;
— amines secondaires, R—NH—R' ;
— amines tertiaires,

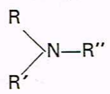

R, R' et R'' représentant des radicaux alkyle.

amino-résine. *n.* Matière plastique obtenue par polycondensation de l'urée avec le méthanal (formol), encore appelée résine urée-formol.

amorphe. *adj.* Se dit d'un solide dans lequel on ne peut reconnaître aucune structure ordonnée.

amphétamines. *n.* Classe de médicaments qui produisent des effets dopants.

amphotère. *adj.* Se dit d'un composé qui est à la fois acide et basique.

analeptique. *n.* Médicament stimulant le fonctionnement de certains organes.

analyse gravimétrique. Analyse quantitative qui se ramène à la mesure de la masse d'une phase solide.

analyse qualitative. Détermination de la nature des produits qui constituent un mélange.

analyse quantitative. Détermination de la masse de chacun des produits qui constituent un mélange.

analyse volumétrique. Analyse quantitative qui se ramène à la mesure d'un volume.

androgène. *n.* Hormone mâle sécrétée chez le mâle par les testicules et, dans les deux sexes, par le cortex surrénal.

anévrine, *n.* Voir *thiamine*.

anion. *n.* Ion chargé négativement. *Ex. :*

Cl^-, O^{2-}, SO^{2-}, NO_3^-.

anneaux de Rashig. Petits cylindres de grès ou d'acier dont on remplit les colonnes à distiller ou les tours d'absorption pour augmenter la surface de contact entre les deux phases.

antagonisme de deux médicaments. Action opposée de deux médicaments.

anticoagulant. *n.* Composé qui s'oppose à la coagulation du sang.

antidote ou **contre-poison.** *n.* Substance capable d'empêcher les effets nocifs d'un corps toxique.

antigel. *n.* Substance que l'on incorpore à une phase liquide pour abaisser sa température de solidification.

antioxydant. *n.* Substance que l'on mêle à un produit pour empêcher son oxydation par l'air.

apomorphine. *n.* Dérivé de la morphine par déshydratation. Utilisé comme vomitif.

arc électrique. Étincelles qui prennent naissance entre deux pièces conductrices (métal ou graphite), dans l'air ou tout autre gaz, lorsqu'on leur applique une tension électrique.

atactique. *adj.* Se dit d'un polymère dont la macromolécule ne présente aucune structure régulière.

atome. *n.* Particule neutre formée d'un noyau central, où est concentrée presque toute la masse, et d'un certain nombre d'électrons gravitant autour de ce noyau. La charge électrique du noyau est positive ; elle est égale et opposée à celle du nuage électronique.

atome-gramme. Ensemble de N ions, N étant le nombre d'Avogadro.

au rouge. Dans l'expression « chauffé au rouge ». Se dit d'une substance portée à une température comprise entre 500 et 700 °C et qui émet une lumière rouge.

Auréomycine. *n.* Antibiotique produit par un Champignon *(Streptomyces aureofaciens)*.

autoclave. *n.* Récipient clos en acier dans lequel on effectue une opération chimique sous pression et à haute température.

auto-oxydable. *adj.* Qui est susceptible d'oxydation spontanée.

azéotrope. *n.* Mélange liquide qui a la propriété de donner à l'ébullition un mélange gazeux de même composition sous une pression donnée. Il se comporte donc, à cette pression, comme un corps pur.

B

bain galvanique. Solution électrolytique, aqueuse ou non, utilisée dans une électrolyse.

bain-marie. *n.* Procédé de chauffage consistant à interposer une substance liquide (eau ou huile) entre la source de chaleur et le récipient à chauffer.

barbituriques. *n.* Dérivés de l'acide barbiturique, ou malonylurée, qui ont des propriétés somnifères.

base de Brönsted. Molécule ou ion susceptible de fixer un proton (ion H^+).

base de Lewis. Molécule ou ion possédant un doublet électronique disponible (non liant) qu'il peut fournir à une autre espèce en formant avec elle une liaison covalente.

basicité. *n.* Caractère de ce qui est basique. Cette notion prend des sens différents suivant la théorie dans laquelle on se place. Voir *base de Brönsted* et *base de Lewis*.

bateau. *n.* Une des formes sous lesquelles se présente le cyclohexane et qui évoque la forme d'un bateau.

batterie cadmium-nickel. Accumulateur dont les électrodes sont l'une en cadmium et l'autre en nickel. Plus léger et plus résistant que l'accumulateur au plomb, sa tension à la décharge est moins stable.

batterie sèche. Série de piles dans lesquelles l'électrolyte habituellement liquide a été gélifié.

bec Bunsen. Appareil de chauffage utilisé au laboratoire et utilisant la combustion dans l'air du gaz de ville.

becher. *n.* Récipient de verre de forme cylindrique.

benzol. *n.* Mélange de benzène, toluène et xylènes obtenu par distillation des goudrons de houille.

benzolisme. *n.* Intoxication par le benzol.

bitume. *n.* Matière combustible naturelle riche en hydrocarbures.

bitume de Judée. Bitume extrait sur les bords de la mer Morte (lac Asphaltite), utilisé par Niepce pour effectuer les premières photographies sur métal.

bombe calorimétrique. Appareil destiné à la mesure des chaleurs de réaction à volume constant.

bromisme. *n.* Intoxication par le brome ou ses composés.

butadiène. *n.* Molécule dérivée du butane et qui comporte deux liaisons éthyléniques conjuguées. Le butadiène est utilisé pour la synthèse de nombreuses matières plastiques. Formule :

$$CH_2 = CH—CH = CH_2.$$

C

calcithermie. *n.* Opération métallurgique consistant à réduire un oxyde ou un halogénure par le calcium.

calomel. *n.* Nom du chlorure de mercure au nombre d'oxydation + 1. Formule :

$$Hg_2Cl_2.$$

calorimètre. *n.* Appareil destiné à la mesure des quantités de chaleur.

calorimètre de Junker. Calorimètre destiné à mesurer les chaleurs de combustion dans le cas des gaz.

caoutchouc butyl. Matière plastique élastomère obtenue par polymérisation de l'isobutène (méthylpropène). C'est un polymère réticulé.

caoutchouc nitrile. Élastomère obtenu par copolymérisation du nitrile acrylique et du butadiène.

carbène. *n.* Intermédiaire de réaction, insaturé, donc très réactif, de formule brute CH_2.

carboglace. *n.* Dioxyde de carbone (CO_2) solide ; ce solide a la propriété de se sublimer sous la pression atmosphérique.

carburéacteur. *n.* Réacteur de propulsion utilisant un carburant liquide, le kérosène (ou pétrole lampant), mélange d'alcanes légers.

catalyse. *n.* Réaction avec utilisation des catalyseurs.

catalyse hétérogène. Réaction dans laquelle le catalyseur forme une phase distincte des substances qui réagissent.

catalyse homogène. Réaction dans laquelle le catalyseur et les produits qui réagissent ne forment qu'une seule phase.

catalyse stéréospécifique. Réaction catalytique amenant la préparation d'un isomère particulier d'une molécule.

catalyseur. *n.* Substance qui accélère une réaction et qui l'oriente vers un produit final bien déterminé. Certaines réactions possibles n'ont pas lieu en l'absence de catalyseur, leur vitesse étant nulle.

catalyseur de Ziegler-Natta. Catalyseur stéréospécifique utilisé pour effectuer la polymérisation des dérivés de l'éthylène et notamment du styrène. Les catalyseurs de ce type sont des mélanges de chlorure de titane ($TiCl_4$) et de triméthyl-aluminium [$Al(CH_3)_3$].

cation. *n.* Ion chargé positivement. *Ex. :*

Na^+, Ca^{2+}, Fe^{3+}, NH_4^+.

centrale thermonucléaire. Usine produisant de l'énergie électrique à partir de l'énergie libérée par la fission des atomes lourds.

cétone. *n.* Molécule possédant un groupement carbonyle CO lié à deux radicaux alkyle. Formule générale :

R—CO—R'.

chaîne droite. On dit qu'une molécule organique est « à chaîne droite » quand son squelette carboné se présente sous forme linéaire.

chaîne ramifiée. On dit qu'une molécule organique est « à chaîne ramifiée » quand au moins un de ses atomes de carbone est lié à trois ou même quatre autres carbones.

chaînes latérales. Dans une molécule dont le squelette carboné est ramifié, on nomme chaîne latérale chacune des ramifications.

chaise. *n.* Une des formes sous lesquelles se présente le cyclohexane et qui évoque la forme d'une chaise.

chaleur de dissolution. Quantité de chaleur échangée avec le milieu extérieur lors de la dissolution d'une mole (ou de l'unité de masse) d'un corps.

chaleur d'évaporation. Quantité de chaleur nécessaire pour faire passer l'unité de masse d'un corps de l'état liquide à l'état gazeux, à température et pression constantes.

chaleur de formation. Chaleur de la réaction (parfois hypothétique) qui permet de passer à une molécule d'un corps composé à partir des molécules des corps simples dont elle est constituée.

chaleur de fusion. *n.* Quantité de chaleur nécessaire pour faire passer l'unité de masse d'un corps de l'état solide à l'état liquide, à pression et température constantes.

chaleur massique. Quantité de chaleur à fournir à l'unité de masse d'un corps pour élever sa température d'un degré. On définit une chaleur massique à volume constant et une chaleur massique à pression constante.

chaleur de réaction. Quantité de chaleur reçue par un système au cours d'une réaction chimique. Si la réaction s'effectue à pression constante, la chaleur de réaction est égale à la variation d'enthalpie du système ; à volume constant, elle est identique à la variation d'énergie interne.

chaleur de sublimation. Quantité de chaleur nécessaire pour faire passer l'unité de masse d'un corps de l'état solide à l'état gazeux, à température et pression constantes.

chalumeau oxyacétylénique. Appareil réalisant, en continu, la combustion de l'acétylène dans l'oxygène et permettant d'obtenir des températures élevées. Utilisé pour la soudure ou le découpage des tôles.

charbon actif. Carbone pulvérulent, mal cristallisé, qui a un grand pouvoir absorbant.

chimiothérapie. *n.* Traitement d'une maladie par un agent chimique de synthèse.

chloramine. *n.* Amine primaire ou secondaire dont un des hydrogènes fixés sur l'azote a été remplacé par un atome de chlore. Propriétés antiseptiques.

chloration photochimique. Action du chlore sur une substance organique qui ne s'effectue qu'en présence de lumière (ultraviolette en général).

chromatographie. *n.* Technique d'analyse qualitative (exceptionnellement quantitative) qui utilise la différence d'adsorption sur une substance fixe des constituants d'un mélange. Ces constituants sont entraînés par une phase mobile (liquide ou gaz) plus ou moins rapidement suivant l'intensité de leur adsorption sur le support.

classification périodique. Disposition des éléments chimiques par ordre de numéros atomiques croissants, dans un tableau qui comprend 18 colonnes (dans les classifications modernes). On s'aperçoit alors que chaque colonne comprend des éléments ayant des propriétés chimiques comparables ; elle constitue une famille d'éléments.

cocaïne. *n.* Alcaloïde contenu dans les feuilles de coca.

coefficient de Van't Hoff. Nombre par lequel est multipliée la vitesse d'une réaction quand on augmente la température de 10 °C.

coke. *n.* Substance composée presque uniquement de carbone, obtenue à partir de la houille et du pétrole.

coking. *n.* Cracking très important des dérivés du pétrole, amenant à la préparation de coke.

colchicine. *n.* Alcaloïde extrait du colchique et utilisé en thérapeutique pour traiter les accès aigus de goutte.

colloïde. *n.* Substance en solution dans laquelle les molécules ne sont pas isolées mais groupées en amas, qui restent en suspension au sein du solvant.

colorant de cuve. Colorant insoluble qui est d'abord réduit pour être solubilisé puis fixé sur un tissu à teindre. On régénère ensuite la molécule d'origine par oxydation.

colorant de développement. Colorant préparé à partir d'une molécule déjà fixée sur une fibre textile.

colorant direct ou **colorant substantif.** Colorant susceptible de teindre les fibres cellulosiques sans traitement préalable de la fibre par un mordant.

colorant réactif. Colorant dont la molécule possède une fonction chimique qui lui permet de se fixer sur une fibre textile par une réaction chimique et pas seulement par adsorption.

colorant substantif. Voir *colorant direct*.

colorants azoïques. Composés organiques de synthèse formés à partir des amines aromatiques et dont la molécule est caractérisée par deux noyaux benzéniques liés entre eux par le groupement —N=N—.

colorants sensibilisateurs. Substances qui permettent la sensibilisation des sels d'argent à toutes les longueurs d'onde visibles.

colorimètre. *n.* Appareil destiné à la mesure des transmittances ou des densités optiques des substances, dans le domaine des longueurs d'onde de la lumière visible.

comburant. *n.* Dans une combustion, on appelle comburant le corps oxydant. Le corps oxydé est appelé *combustible*.

complexe. *n.* En cinétique chimique, intermédiaire de réaction très instable dans lequel un atome se présente avec une valence inhabituelle.

complexe de coordination. Édifice chimique dans lequel un ion (ou un atome) reçoit, de la part de plusieurs molécules ou ions qui l'entourent, des doublets électroniques. Il s'établit ainsi entre l'ion central et les coordinats des liaisons covalentes, parfois appelées liaisons de coordination.

complexométrie. *n.* Détermination de la normalité d'un composé (en général, un cation métallique) en formant à partir de celui-ci un complexe de coordination.

composé organométallique. Composé organique dans lequel un atome métallique est lié par une liaison covalente polarisée à un atome de carbone.

concentration micellaire critique. Concentration à partir de laquelle un soluté ne peut plus exister à l'état dissous mais fournit un colloïde.

condensation. *n.* Passage d'une substance de l'état gazeux à l'état liquide.

constante diélectrique. Caractéristique des milieux non conducteurs ; rapport de la force mutuelle entre deux charges électriques placées dans le vide à la force qui s'exerce entre ces mêmes charges lorsqu'elles sont, dans le milieu considéré, à la même distance l'une de l'autre.

constante d'équilibre. Fonction de la température qui caractérise un équilibre chimique. Dans un mélange en équilibre, elle exprime une relation entre les concentrations (ou les pressions partielles dans le cas des mélanges gazeux).

contraction des lanthanides. Décroissance régulière et importante du rayon ionique des ions trivalents des lanthanides (de La^{3+} à Lu^{3+}). Ce phénomène est dû au faible effet d'écran des électrons $4f$ dont le nombre augmente du lanthane au lutétium.

contre-poison. *n.* Voir *antidote*.

coordinat. *n.* Molécule ou ion possédant un doublet électronique disponible (non liant) et donc susceptible de fournir ce doublet pour former une liaison covalente avec une molécule acceptrice.

copolymérisation. *n.* Polymérisation que l'on effectue en mélangeant deux (ou même trois) monomères différents.

copulation. *n.* Réaction d'un sel de diazonium sur une amine aromatique ou un phénol et conduisant à un colorant diazoïque.

cornue. *n.* Récipient généralement en verre, à long col recourbé, dans lequel on effectue des distillations.

corps composé. Corps pur dont la molécule est constituée de plusieurs atomes différents.

corps pur. Substance formée d'une seule sorte de molécule (contraire : *mélange*).

corps simple. Corps pur dont la molécule n'est formée que d'un seul type d'atome (*ex. :* oxygène O_2, ozone O_3, soufre S_8).

coupe. *n.* Dans une distillation fractionnée, ensemble de produits qui ont des propriétés voisines.

coupellation. *n.* Opération métallurgique qui consiste à chauffer à l'air un mélange métallique liquide. On met à profit le fait que les différents métaux constituants s'oxydent à des vitesses différentes ; le moins oxydable reste liquide, les autres sont éliminés sous forme d'oxydes solides.

couple thermoélectrique. Force électromotrice que l'on obtient lorsque les deux extrémités d'un fil métallique sont portées à des températures différentes.

courbe de distillation. Courbe qui indique la composition d'un carburant en précisant quelle fraction du mélange a un point d'ébullition compris entre deux limites.

covalence. *n.* Nombre de liaisons d'un atome dans une molécule.

cracking. *n.* Réaction chimique dans laquelle une molécule est rompue pour former plusieurs molécules plus petites. On réalise industriellement le cracking des alcanes (pétrole) ; chaque molécule d'alcane fournit une molécule d'alcane de masse molaire plus petite et une molécule d'alcène. On prépare ainsi industriellement l'éthylène, le propène...

cracking hydrogénant. Voir *hydrocracking*.

creuset. *n.* Récipient en terre réfractaire ou en métal, dans lequel on effectue des opérations de fusion.

cristallin. *adj.* Se dit d'un solide dont les éléments constitutifs (atomes, molécules ou ions) sont ordonnés. Ils forment un motif géométrique déterminé, qui se répète dans toutes les directions.

cristallisateur. *n.* Appareil dans lequel on évapore le solvant d'une solution afin de récupérer les solutés solides.

cristallisation fractionnée. Procédé de séparation des constituants d'un mélange, qui consiste à faire apparaître par refroidissement des cristaux de l'un des constituants.

cristalloïde. *n.* ou *adj.* Substance en solution dont les constituants, molécules ou ions, peuvent traverser une membrane poreuse.

cross-link. Dans un polymère réticulé, chaîne carbonée qui relie deux macromolécules.

cryoscopie. *n.* Étude de la température de cristallisation commençante d'une solution.

curare. *n.* Extrait végétal, contenant de nombreux alcaloïdes, qui possède des propriétés paralysantes.

cyanocobalamine. *n.* Vitamine B_{12}. Vitamine dont la molécule est un complexe du cobalt. Sa formule brute est :

$$C_{63}H_{88}CoN_{14}O_{14}P.$$

cyclanes. *n.* ou **cycloalcanes** ou **naphtènes** ou **hydrocarbures naphténiques.** Hydrocarbures dont le squelette carboné comporte un cycle et dans lesquels toutes les liaisons sont des simples liaisons carbone-carbone.

cycloalcanes. *n.* Syn. de *cyclanes*.

cyclone. *n.* Appareil destiné à traiter les fumées. On crée dans un récipient un tourbillon gazeux; les particules solides viennent se coller sur la paroi extérieure.

D

décanteur. *n.* Appareil dans lequel on sépare par gravité un mélange hétérogène de deux liquides non miscibles ou un mélange liquide-solide.

D.D.T. Dérivé de l'éthane utilisé comme insecticide. Son emploi est réglementé car c'est un produit dangereux. Formule développée :

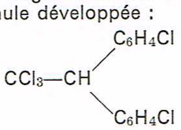

degré d'oxydation. Nombre entier, conventionnellement attribué aux atomes dans les molécules ou les ions. Il indique le nombre d'électrons gagnés (ou perdus) par l'atome.

degré de polymérisation. Nombre moyen de molécules de monomère constituant les molécules d'un polymère.

démixtion. *n.* Fractionnement d'un mélange de deux liquides par abaissement de la température au-dessous du point où ils ne sont plus miscibles.

densité optique. Logarithme décimal de la transmittance d'une solution.

densitométrie. *n.* Analyse quantitative qui se ramène à la détermination de la densité du mélange réactionnel.

désactivation. *n.* Retour d'un atome, d'une molécule ou d'un noyau à l'état fondamental par émission d'un photon.

détergent. *n.* Substance rendant possible le passage des graisses en solution, donc le lavage. Les particules graisseuses sont entourées de molécules du détergent; c'est l'édifice ainsi constitué qui passe dans la solution.

détergent amphotère. Molécule de détergent dont la partie hydrophile est à la fois acide (anionique) et basique (cationique).

détergent anionique. Molécule de détergent dont la partie hydrophile est capable de se transformer en anion grâce à des fonctions du type —COOH, $—SO_3H$.

détergent cationique. Molécule de détergent dont la partie hydrophile est un cation ou peut se transformer en cation. *Ex. :* les sels d'ammonium quaternaires.

détergent non ionique. Molécule de détergent dont la partie hydrophile n'est pas susceptible d'ionisation.

diagramme des phases. Pour un corps pur, c'est un diagramme construit dans le système de coordonnées pression-température; il indique les domaines où les différents états du corps pur sont stables (variétés allotropiques du solide, liquide, vapeur).

diazoalcane. *n.* Molécule de formule développée :

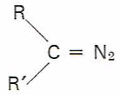

diène. *n.* Hydrocarbure insaturé dont la molécule comprend deux liaisons éthyléniques. *Ex. :* le butadiène $CH_2{=}CH{—}CH{=}CH_2$.

diol. *n.* Molécule possédant deux groupements fonctionnels alcool (—OH).

dismutation. *n.* Réaction chimique dans laquelle un élément subit à la fois une réduction et une oxydation.

dispositif thermostatique. Dispositif assurant la constance de la température au cours d'une réaction.

doublet électronique. Paire d'électrons d'un même atome ayant les mêmes nombres quantiques, sauf leur spin qui est opposé. Ce doublet peut, soit appartenir en propre à l'atome (doublet non liant), soit servir à lier cet atome à son voisin (liaison covalente).

dowtherm. *n.* Liquide qui permet des échanges calorifiques à haute température. *Ex. :* le sodium liquide.

E

eau désionisée. Eau naturelle débarrassée de ses ions par deux passages successifs sur des résines échangeuses d'ions, l'une acide (elle remplace les cations par des ions H_3O^+), l'autre basique (elle remplace les anions par des ions OH^-).

eau distillée. Eau plus pure que les eaux naturelles et que l'on obtient par distillation. On effectue parfois plusieurs distillations successives en mélangeant, pour la première, l'eau de départ avec une substance oxydante qui la débarrasse des produits organiques.

eau régale. Liquide constitué d'un tiers d'acide nitrique concentré et de deux tiers d'acide chlorhydrique concentré. L'eau régale a la propriété de dissoudre les métaux nobles comme l'or et le platine.

ébullioscopie. *n.* Étude de la température d'ébullition commençante d'une solution.

E.D.T.A. Éthylène diamine tétracétate. Ligand ayant la possibilité de fournir six doublets électroniques à un ion métallique.

effet bathochrome. Déplacement des longueurs d'onde d'absorption ultraviolette des transitions électroniques vers les grandes longueurs d'onde, c'est-à-dire vers le visible.

effet hypsochrome. Déplacement des longueurs d'onde d'absorption des transitions électroniques vers les courtes longueurs d'onde.

effluent. *n.* Flux de liquide ou de gaz qui sort d'un réacteur.

élastomère. *n.* Polymère naturel ou de synthèse ayant des propriétés d'élasticité.

électro-analyse. Analyse quantitative utilisant une méthode électrochimique.

électro-attracteur. *n.* Se dit d'un atome ou d'un substituant attirant à lui le doublet électronique qui le lie au squelette carboné; la liaison se trouve ainsi polarisée.

électrochimie. *n.* Étude des phénomènes chimiques qui s'accompagnent de production ou de consommation d'énergie électrique.

électrode au calomel. Électrode constituée de la chaîne de conducteurs suivante :

$$Hg \mid Hg_2Cl_2 \text{ (solide)} \mid K^+ + Cl^-$$

Son bilan est le suivant :

$$2Hg + 2Cl^- \rightarrow Hg_2Cl_2 + 2e^-$$

(électrode de référence usuelle).

électrode à hydrogène. Électrode constituée d'une plaque de platine plongeant dans une solution acide et sur laquelle barbote de l'hydrogène gazeux. Il se produit, au contact de cette électrode, l'oxydoréduction de l'élément hydrogène suivant le schéma :

$$\tfrac{1}{2}H_2 + H_2O \rightarrow H_3O^+ + e^-.$$

électrode à quinhydrone. Électrode constituée d'une lame de platine plongeant dans une solution contenant le couple redox quinone-hydroquinone. Son bilan est le suivant :

$$C_6H_4O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow C_6H_6O_2.$$

électrolyse. *n.* Ensemble des phénomènes physico-chimiques produits au cours du passage d'un courant électrique dans une solution conductrice (électrolyte).

électron ou **négaton.** *n.* Particule fondamentale dont la masse est de $9 \cdot 10^{-31}$ kg et dont la charge électrique est négative ($e = -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ coulomb). Les électrons qui gravitent autour des noyaux atomiques sont responsables des liaisons entre les atomes. Dans les métaux, leur migration constitue le courant électrique.

électrophorèse. *n.* Migration des *micelles* d'un *colloïde* sous l'action d'un champ électrique. Ce phénomène est utilisé comme technique d'analyse et comme procédé de purification des eaux.

électropositif. *adj.* Syn. de *réducteur*. Atome donneur d'électrons et qui se transforme alors en ion positif.

électrovalence. *n.* Pour un ion, nombre algébrique de ses charges élémentaires.

élément Weston. Pile qui sert d'étalon de force électromotrice; elle est constituée de la chaîne de conducteurs suivante :

⊖ Hg	Hg_2SO_4	$Cd^{2+}SO_4^{2-}$	$CdSO_4$	Hg, Cd ⊕
liquide	solide	solution	solide	solide

éluant. *n.* Phase liquide (ou gaz) qui sert à faire migrer les différents constituants d'un mélange lors d'une chromatographie.

émétine. *n.* Composé naturel extrait de la racine d'ipéca, utilisé pour traiter la dysenterie amibienne ou comme vomitif.

endothermique. *adj.* Se dit d'une réaction pendant laquelle le système chimique reçoit de la chaleur du milieu extérieur.

énergie d'activation. Quantité minimum d'énergie que doit recevoir une molécule pour pouvoir entrer en réaction.

énergie ionisante. Énergie nécessaire à l'arrachement d'électrons à un atome ou à une molécule.

énergie de résonance. Énergie de stabilisation des molécules qui comportent des électrons délocalisés.

enthalpie. *n.* Fonction d'état thermodynamique (symbolisée par H). Elle est définie, pour un système fluide, par la somme de l'énergie interne U et de la fonction d'état PV (produit du volume par la pression) :

$$H = U + PV.$$

Lorsqu'une réaction chimique a lieu à pression constante, la variation d'enthalpie représente la quantité de chaleur fournie au système par le milieu extérieur.

entropie. *n.* Fonction d'état thermodynamique (symbolisée par S). La différentielle de l'entropie est de la forme : $\partial S = \partial Q/T$, ∂Q étant la quantité de chaleur reçue par le système pendant une transformation infinitésimale, T étant la température thermodynamique du système. La fonction entropie caractérise le désordre du système étudié.

enzyme. *n.* Molécule organique, de grosse masse moléculaire, qui sert de catalyseur dans des réactions chimiques.

E.P.D.M. Sigle pour Ethylene-Propylene-Diene-Modified. Matière plastique obtenue par copolymérisation de l'éthylène, du propène et du butadiène. Ce dernier produit permet à la macromolécule de

posséder des doubles liaisons et donc d'être vulcanisable.

époxyde. *n.* Molécule dans laquelle on trouve un cycle constitué d'atomes de carbone et d'un atome d'oxygène :

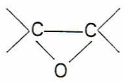

équation stœchiométrique. Équation symbolisant le bilan d'une réaction chimique. Au premier membre apparaissent les symboles des molécules des substances de départ ; au second ceux des molécules des produits. Chaque symbole est précédé d'un coefficient stœchiométrique qui indique le nombre de molécules de chaque espèce qui entrent en réaction ou celui des molécules produites.

équilibre chimique. Réaction dans laquelle les produits de départ ne disparaissent pas complètement. En fait il ne s'agit que d'équilibre statistique, la composition du mélange restant fixe. Cependant, des molécules de réactifs continuent à disparaître mais cette disparition est exactement compensée par l'apparition du même nombre de molécules par réaction des corps de l'état final.

erlenmeyer. *n.* Fiole de verre de forme tronconique.

érythromycine. *n.* Antibiotique extrait des cultures de *Streptomyces erythreus* et actif contre les Bactéries Gram positives.

essence absolue. Solution d'essence concrète dans l'éthanol.

essence concrète. Produit solide obtenu par traitement de végétaux par un solvant approprié puis évaporation du solvant.

ester. *n.* Résultat de l'action d'un acide carboxylique (R—COOH) sur un alcool (R′—OH). La formule de l'ester est R—CO—O—R′.

état cholestérique. État organisé dans une phase liquide (cristaux liquides). Dans cet état, les molécules à longue chaîne sont disposées parallèlement dans une série de plans parallèles et équidistants ; d'un plan à l'autre, l'orientation des chaînes tourne d'un angle caractéristique.

état excité. Pour une molécule ou un atome, état d'énergie non minimum. La molécule (ou l'atome) peut revenir à l'état fondamental en émettant un photon.

état fondamental. État d'énergie minimum pour un atome ou une molécule isolés.

état natif. Un élément que l'on trouve dans la nature à l'état de corps pur est à l'*état natif*. *Ex. :* soufre, argent, or.

état nématique. État organisé dans une phase liquide (cristaux liquides). Dans cet état, les centres de masse de molécules à longue chaîne sont répartis au hasard comme dans un liquide ordinaire, mais toutes les chaînes sont parallèles.

état singulet. État énergétique d'un atome (ou d'une molécule) qui ne se décompose pas en plusieurs niveaux énergétiques quand on fait agir un champ magnétique. Le spin doit être nul.

état smectique. État organisé dans une phase liquide (cristaux liquides) et dans lequel les molécules à longue chaîne ont leurs centres de masse distribués au hasard dans une série de plans parallèles et équidistants ; toutes les chaînes sont orientées parallèlement.

état standard. État choisi conventionnellement comme référence pour les différentes espèces chimiques. On fixe la température, la pression, la variété allotropique (pour les cristaux).

état triplet. État énergétique d'un atome (ou d'une molécule) qui se décompose en trois niveaux énergétiques sous l'action d'un champ magnétique car le spin est 1.

eutectique. *n.* Mélange liquide qui cristallise comme un corps pur à température constante mais en laissant déposer deux phases solides distinctes.

évaporateur. *n.* Appareil dans lequel on chauffe une solution pour faire évaporer le solvant afin de la concentrer ou, en poussant l'opération jusqu'au bout, de récupérer les solutés.

exothermique. *adj.* Se dit d'une réaction pendant laquelle le système chimique fournit de la chaleur au milieu extérieur.

F

ferrochrome. *n.* Alliage de fer et de chrome, avec des impuretés de carbone, qui sert en sidérurgie pour fabriquer les aciers au chrome.

filtre électrostatique. Appareil destiné à éliminer les particules solides des fumées. La fumée traverse une zone où règne un champ électrostatique ; les particules solides viennent s'accumuler sur une des électrodes.

filtre-presse. *n.* Type de filtre dans lequel le mélange liquide-solide est comprimé entre deux plateaux recouverts d'une toile filtrante ; le solvant s'écoule et il reste entre les plateaux la substance solide.

fission. *n.* Explosion d'un noyau lourd sous l'impact d'un neutron. Le noyau éclate en plusieurs morceaux, deux en général.

flottation. *n.* Procédé d'enrichissement de certains minerais. Réduit en poudre, le minerai est entraîné par une solution aqueuse ; la partie intéressante flotte en surface, incorporée à une mousse ; la gangue forme des boues qui restent au fond des bacs.

fluide caloporteur. Substance fluide (gaz ou liquide) utilisée pour réaliser des échanges et des transports d'énergie calorifique.

fluorescence. *n.* Émission de lumière monochromatique par une substance ayant été irradiée. Ce phénomène cesse en même temps que l'excitation, contrairement à la phosphorescence.

fonction. *n.* Ensemble de composés organiques possédant des propriétés chimiques voisines et dont la formule développée comporte le même groupement caractéristique, appelé *groupement fonctionnel*.

fonction d'onde. Voir *orbitale*.

forces de London. Type de forces de Van der Waals qui s'exercent entre des molécules non polaires. Elles sont dues au mouvement des électrons dans les molécules, tel qu'à un instant donné une molécule quelconque peut être assimilée à un dipôle, même si la moyenne temporelle du moment dipolaire est nulle.

forces de Van der Waals. Forces de faible énergie qui se manifestent entre des molécules. Ce sont des interactions électriques du type dipôle-dipôle.

forme énolique. Forme tautomère des aldéhydes et des cétones résultant du déplacement d'un atome d'hydrogène du carbone vers l'oxygène. *Ex. :*

CH_3 — CHO (éthanal), CH_2 = CHOH (énol).

formes α et β des glucides. Les deux formes cycliques que peut prendre la molécule d'un glucide, et notamment d'un hexose, et qui correspondent à des pouvoirs rotatoires différents.

formule brute. Représentation d'une molécule faisant apparaître uniquement les symboles des atomes constituants affectés, en indice, du nombre de fois que l'on trouve chaque atome dans la molécule. Cette formule ne représente pas les liens des atomes entre eux.

formule développée. Représentation d'une molécule faisant apparaître la façon dont les atomes constituants sont liés entre eux.

four à bassin. Four à réverbère dans lequel on fond le verre ; il comporte un creuset unique de très grande dimension.

four à creusets. Four contenant des creusets, c'est-à-dire des récipients en matière réfractaire dans lesquels on fond une substance.

four à moufles. Four contenant des moufles, c'est-à-dire des récipients en terre réfractaire qui évitent aux substances que l'on chauffe le contact de la flamme.

four à pots. Syn. de *four à creusets*.

four à réverbère. Four dans lequel les matières à traiter sont chauffées indirectement par l'intermédiaire d'une voûte en briques réfractaires portée à haute température grâce à la combustion d'un gaz.

fréon. *n.* Mélange de dérivés fluorochlorés du méthane utilisé comme liquide réfrigérant dans les réfrigérateurs.

fréquence de bending. Fréquence d'absorption infrarouge d'une molécule polyatomique due à la vibration de l'angle entre deux liaisons.

fréquence de rocking. Fréquence d'absorption infrarouge d'une molécule polyatomique due à une déformation dissymétrique (*rocking* = balancement) de cette molécule.

fréquence de stretching. Fréquence d'absorption infrarouge due à la vibration de la longueur d'une liaison chimique.

frittage. *n.* Opération consistant à obtenir un solide compact à partir d'une poudre. On fait agir à la fois la température et la pression de manière que les grains de la poudre se soudent entre eux.

fumée. *n.* Mélange hétérogène solide-gaz.

furfurol. *n.* Molécule de formule développée

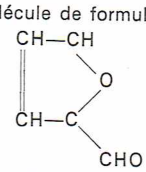

Le furfurol sert à la fabrication de certaines matières plastiques.

fusion. *n.* Passage d'une substance de l'état solide à l'état liquide.

G-H-I

galvanoplastie. *n.* Procédé électrochimique permettant de déposer sur un bloc métallique une couche d'un autre métal.

gas plant. Appareil destiné à séparer les produits les plus légers obtenus à partir du pétrole brut en fractions plus homogènes.

gaz à l'eau. Gaz contenant de l'oxyde de carbone et de l'hydrogène, obtenu par oxydation du charbon par l'eau.

gaz hilarant. Oxyde de diazote, N_2O ; à faible dose, il a des propriétés euphorisantes ; à plus forte dose, il est utilisé comme anesthésique.

gaz naturel. Gaz contenu dans certaines roches poreuses et que l'on exploite comme source d'énergie. Il est constitué essentiellement d'alcanes légers.

gaz parfait. Modèle de fluide dont les caractéristiques sont liées par la relation $PV = nRT$ (P pression, V volume du système, n nombre de moles, T température thermodynamique, R constante universelle dont la valeur est 8,32 J · K^{-1}). Sous faible pression, les gaz réels peuvent être assimilés à des gaz parfaits.

gaz pauvre. Gaz obtenu à partir de la houille par chauffage en présence d'air ; il contient CO et N_2.

gaz de queue. Résidu gazeux obtenu à la sortie d'un réacteur industriel après que l'on ait soutiré les produits intéressants. Ce mélange est en général recyclé, c'est-à-dire réintroduit à l'entrée du réacteur.

getter. *n.* Substance chimique utilisée pour parfaire le vide dans les tubes électroniques; elle doit réagir avec les constituants du gaz résiduel (habituellement l'air). On utilise surtout des alliages de magnésium avec les métaux alcalino-terreux.

glucides. *n.* Composés organiques dont la formule brute peut être formellement considérée comme l'union d'un certain nombre d'atomes de carbone et de molécules d'eau (voir *hydrates de carbone*). *Ex. :* le glucose $C_6H_{12}O_6$ ($6C + 6H_2O$).

glycérol ou **glycérine.** *n.* C'est le propane triol :

$CH_2OH—CHOH—CH_2OH$.

glycol. *n.* Nom vulgaire de l'éthane diol, le plus simple des diols :

$CH_2OH—CH_2OH$.

goudron de houille. Mélange liquide visqueux que l'on obtient comme sous-produit dans la préparation du gaz d'éclairage à partir de la houille.

Gram (méthode de coloration de). Procédé de coloration des microbes dû au médecin danois Gram, qui permet de distinguer deux types de germes : ceux qui prennent la coloration (Gram positifs) et ceux qui ne la prennent pas (Gram négatifs).

grignard. *n.* Récipient clos dans lequel on effectue une opération chimique à chaud mais à des pressions voisines de la pression atmosphérique.

grillage. *n.* Opération qui consiste à chauffer un minerai à l'air. On transforme ainsi, *par ex.,* les minerais sulfurés en oxydes.

groupe amino. Groupement fonctionnel des amines : $—NH_2$ pour les amines primaires, —NH— pour les amines secondaires, >N— pour les amines tertiaires.

groupe chromophore. Groupement fonctionnel possédant plusieurs paires d'électrons π délocalisés et absorbant des longueurs d'onde visibles; la substance est alors colorée.

groupes auxochromes. Substituants qui rendent plus foncée la teinte d'un colorant en augmentant le nombre d'électrons délocalisés de la molécule. *Ex. :* groupe amino, groupement hydroxyle.

halogénation. *n.* Fixation d'une molécule d'halogène sur une molécule insaturée.

halogènes. *n.* Famille d'éléments situés dans la colonne 17 de la classification périodique. Ils se caractérisent par une couche électronique externe comportant 7 électrons. Ce sont des oxydants puissants. Cette famille comprend par ordre de numéros atomiques croissants : le fluor F, le chlore Cl, le brome Br et l'iode I.

héroïne. *n.* Alcaloïde obtenu par acétylation de la morphine. Substance hallucinogène redoutable.

hétéroatome. *n.* Tout atome d'une molécule organique, excepté celui de carbone et celui d'hydrogène, est appelé hétéroatome.

hormones. *n.* Substances qui règlent le fonctionnement de certains organes des êtres vivants. Déversées dans le sang par les éléments producteurs (glandes endocrines), elles servent alors de messagers chimiques qui apportent l'information aux organes destinataires.

huile multigrade. Lubrifiant liquide dont la viscosité varie peu avec la température.

huiles essentielles. Huiles d'origine végétale utilisées en pharmacie et en parfumerie, obtenues par distillation.

huiles de Fusel. Mélange d'alcools, plus lourds que l'éthanol, que l'on obtient en fin de distillation des produits de la fermentation alcoolique.

hydrates de carbone. Ancien nom des sucres, ou *glucides.*

hydrocarbures aromatiques. Famille d'hydrocarbures dérivés du benzène et comportant au moins un noyau benzénique.

hydrocarbures insaturés. Composés organiques formés uniquement de carbone et d'hydrogène, et dont la molécule comporte une ou plusieurs liaisons multiples, soit liaison éthylénique (double liaison), soit liaison acétylénique (triple liaison). Ces molécules se caractérisent par leurs propriétés d'addition.

hydrocarbures naphténiques. Syn. de *cyclanes.*

hydrocarbures oléfiniques. Syn. d'*alcènes.*

hydrocarbures paraffiniques. Syn. d'*alcanes* et d'*hydrocarbures saturés.*

hydrocarbures saturés. *Voir alcanes.*

hydrocracking. *n.* ou **cracking hydrogénant.** Opération de cracking qui s'effectue en présence d'hydrogène et conduit uniquement à des alcanes.

hydrofinishing. *n.* Opération d'hydrogénation des huiles en fin de préparation de manière à saturer les doubles liaisons.

hydrolyse. *n.* Réaction d'une molécule ou d'un ion avec une molécule d'eau, au cours de laquelle une liaison de la molécule d'eau se trouve rompue.

hydroquinone. *n.* Paradiphénol. Formule développée :

hydrotraitement. *n.* Traitement des produits pétroliers par l'hydrogène destiné à les débarrasser des hétéroatomes gênants.

hypnotique. *n.* Substance chimique capable de provoquer un sommeil artificiel.

hypothèse d'Avogadro. Hypothèse selon laquelle des volumes égaux de différents gaz, mesurés dans les mêmes conditions de température et de pression, contiennent un même nombre de moles.

image latente. Résultat de l'exposition d'un film photographique. L'image est invisible à l'œil; elle est constituée d'atomes d'argent obtenus par réduction des ions.

imidazol. *n.* Cycle à cinq atomes comportant deux atomes d'azote. Il possède, grâce à ses électrons π délocalisés, un caractère aromatique.

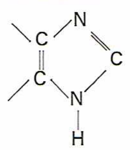

indanthrones. *n.* Colorants dérivés de l'indane.

indicateur de pH. Substance qui change de couleur avec le pH et permet donc une détermination de celui-ci.

indice de cétane. Caractéristique d'un carburant diesel, analogue à l'indice d'octane pour un carburant de moteur à explosion, mais défini à partir du cétane ($C_{16}H_{34}$, isomère à chaîne droite).

indice d'octane. Échelle empirique caractérisant le pouvoir antidétonant d'un carburant. C'est le pourcentage de triméthyl-2,2,4 pentane, présent dans un mélange de cet alcane avec l'heptane normal qui a les mêmes performances que le carburant étudié.

indice de saponification. Nombre de milligrammes de potasse (KOH) nécessaires pour saponifier 1 gramme d'un ester.

indigo. *n.* Substance colorante bleu foncé.

inhibiteur de corrosion. Composé que l'on incorpore à une solution pour éviter la corrosion du récipient qui la contient.

ion. *n.* Édifice chimique non neutre, c'est-à-dire porteur d'une charge électrique. Ce peut être soit un atome ayant perdu ou gagné un ou plusieurs électrons (Cl^-,S^{2-},Cu^+,Fe^{2+},Fe^{3+}...), soit un édifice polyatomique (SO_4^{2-},NH_4^+...). Les ions existent dans certains cristaux et dans des solutions.

ion carbonium. Encore appelé *carbocation,* c'est un ion dans lequel la charge positive est portée par un atome de carbone qui ne comporte ainsi que trois substituants et un site quantique vide. Ces ions carbonium sont des acides de Lewis très réactifs.

ionique. *adj.* 1° Qui contient des ions. 2° Qui possède les propriétés des ions.

isomères. *n.* et *adj.* Molécules dont les formules brutes sont identiques. Deux molécules isomères ne diffèrent que par l'arrangement des atomes les uns par rapport aux autres. De plus, deux isomères doivent pouvoir être séparés.

isomérie cis-trans. Type d'isomérie géométrique propre aux alcènes : deux substituants —A et —B des carbones de la double liaison se trouvent du même côté (isomère cis) ou du côté opposé (isomère trans) de la double liaison.

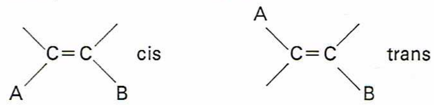

isomérisation. *n.* Réaction chimique au cours de laquelle une molécule est transformée en une molécule isomère.

isomorphe. *adj.* Se dit de deux composés solides dont les cristaux ont la même structure.

isotactique. *adj.* Se dit d'un polymère obtenu par catalyse d'un complexe de coordination et dont la macromolécule possède une structure ordonnée.

isotope. *n.* et *adj.* Deux atomes sont isotopes s'ils correspondent au même élément (on les place alors dans la même case de la classification périodique). Ils ont donc même nuage électronique; leur noyau possède le même nombre de protons. Ils ne diffèrent que par le nombre de neutrons de leur noyau.

insuline. *n.* Protéine sécrétée par le pancréas et riche en cystine (acide aminé soufré). Elle intervient dans le métabolisme des sucres.

L-M

lactone. *n.* Ester cyclique résultant de l'estérification interne d'un acide alcool.

lanthanides. *n.* ou **terres rares.** Famille de 14 éléments, voisins du lanthane. Ils se caractérisent par la présence d'un seul électron dans la sous-couche 5*d* et par une sous-couche électronique 4*f* incomplètement remplie.

laudanum. *n.* Teinture d'opium utilisée habituellement par application externe.

leucodérivé. *n.* Molécule incolore obtenue par réduction d'un colorant.

liaison π. Liaison covalente dont le doublet électronique de liaison peut être décrit par une orbitale n'ayant pas d'axe de symétrie de révolution.

liaison σ. Liaison covalente dont le doublet électronique de liaison peut être décrit par une orbitale ayant une symétrie de révolution autour de l'axe qui joint les deux noyaux atomiques.

liaison covalente. *n.* Liaison forte entre deux atomes s'effectuant dans une direction bien précise (liaison directive). Elle résulte de la mise en commun de deux électrons par les deux atomes.

liaison hétéropolaire. Type de liaison covalente dans laquelle le doublet électronique de liaison est fourni en totalité par l'un des atomes (atome donneur).

liaison ionique. Liaison forte, non directive, purement électrostatique, entre plusieurs ions.

liaison peptidique. Liaison entre deux acides aminés, obtenue par élimination d'une molécule d'eau entre la fonction acide de l'un et la fonction amine de l'autre. On obtient le groupement —C(=O)—NH—.

ligand. *n.* Mot anglais dont l'usage est admis et dont la traduction française est *coordinat.*

linters. *n.* Courtes fibres cellulosiques restant fixées sur les cotonniers après l'égrenage.

lipides. *n.* Substances chimiques qui résultent de l'estérification des acides carboxyliques (acides gras) par le glycérol. Syn. *corps gras.*

liqueur de Fehling. Réactif permettant de caractériser les *aldéhydes.* On prépare la liqueur de Fehling par action de la soude sur une solution contenant des ions cuivriques et de l'acide tartrique. L'ion complexe formé entre l'ion cuivrique et les ions tartrates est réduit par l'aldéhyde.

L.S.D. Diéthyl-amine de l'acide lysergique; substance hallucinogène très dangereuse.

lit catalytique fluide. Procédé dans lequel le catalyseur solide est utilisé en suspension dans le gaz qu'il traite. La séparation en fin de réaction est effectuée par un cyclone.

lit catalytique mobile. Dispositif permettant de renouveler la charge de catalyseur d'un réacteur sans arrêter son fonctionnement. Le catalyseur circule dans le réacteur et est évacué de manière continue.

lit fixe de catalyseur. Garnissage fixe de catalyseur dans un réacteur. Lorsque l'on veut changer la charge de catalyseur, le réacteur doit être mis hors circuit.

loi de Beer-Lambert. Loi qui régit la densité optique d'une solution en précisant qu'elle est une fonction affine de la molarité de chaque constituant.

loi de Dulong et Petit. Loi empirique précisant que le produit de la chaleur massique d'un corps simple par sa masse moléculaire est toujours voisin de 6,4.

loi de Hess. Loi de la thermochimie, conséquence du premier principe de la thermodynamique : la chaleur d'une réaction est égale à la somme des chaleurs de formation des produits diminuée de la somme des chaleurs de réaction des réactants.

malonylurée. *n.* Voir *acide barbiturique.*

matte. *n.* Sulfure métallique très impur que l'on recueille après le premier traitement d'un minerai.

maturation chimique. Addition à une émulsion photographique des substances nécessaires à la sensibilisation du sel d'argent et à sa conservation.

maturation physique. Grossissement contrôlé des grains d'une émulsion photographique.

mésomérie. *n.* Déplacement des électrons d'une liaison π sous l'action de substituants ou de charges électriques dans une molécule ou un ion.

méta. *n.* Produit solide obtenu par polymérisation de l'éthanal (CH_3—CHO) et qui peut servir de combustible.

métabolites. *n.* Intermédiaires dans la suite des réactions qui aboutissent à l'assimilation des aliments par les tissus vivants.

métal *n.* Élément possédant un certain nombre de propriétés chimiques : conductivité à l'état solide et liquide, éclat du solide. Du point de vue chimique, ce sont des réducteurs. En fait, la séparation entre métal et non métal n'est pas nette; le caractère métallique apparaît peu à peu lorsqu'on se déplace de droite à gauche et de haut en bas dans le tableau de la classification périodique.

métaux alcalino-terreux. Famille d'éléments qui occupent la deuxième colonne du tableau périodique; ils possèdent deux électrons sur la couche extérieure, et la couche précédente est incomplète : calcium (Ca), strontium (Sr), baryum (Ba), radium (Ra). Métaux divalents et très réducteurs.

métaux alcalins. Famille d'éléments qui occupent la première colonne du tableau périodique : lithium (Li), sodium (Na), potassium (K), rubidium (Rb), césium (Cs), francium (Fr). Ils ne possèdent qu'un électron sur la couche périphérique; ils sont donc monovalents. Ce sont des réducteurs puissants.

métaux de transition. Ensemble des métaux qui occupent les colonnes 3 à 12 du tableau périodique; leur structure électronique se caractérise par le remplissage progressif des sous-couches électroniques *d.*

méthanal ou **formol.** *n.* Aldéhyde dérivé du méthane. Formule :

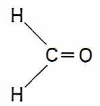

méthode des chambres de plomb. Ancien procédé de synthèse de l'acide sulfurique. L'oxydation du dioxyde de soufre est réalisée en phase gazeuse homogène, le catalyseur étant constitué d'oxydes d'azote.

méthode Solvay. Procédé de fabrication du carbonate de sodium en usage quasi exclusif de nos jours. L'opération fondamentale consiste à faire barboter du dioxyde de carbone dans une solution de saumure contenant de l'ammoniac. L'hydrogéno-carbonate de sodium précipite.

micelles. *n.* Amas de molécules plus ou moins solvatées qui restent en suspension stable au sein d'un liquide, formant ainsi un colloïde.

molalité. *n.* Dans une solution, la molalité d'un soluté est le nombre de moles de ce soluté contenues dans l'unité de masse du solvant.

molarité. *n.* Syn. de *concentration.* Nombre de moles de soluté contenues dans un litre de solution.

mole. *n.* Syn. à la fois des locutions : *atome-gramme molécule-gramme, ion-gramme.* Ensemble de N particules (atomes, molécules ou ions), N étant le nombre d'Avogadro.

molécule. *n.* Édifice chimique neutre, formé par l'association de plusieurs atomes. C'est la plus petite unité possible de chaque corps pur.

molécule acceptrice. Molécule possédant une lacune électronique et pouvant donc se lier à une autre molécule (ou à un ion) par liaison covalente, en acceptant un doublet électronique fourni par son partenaire.

molécule-gramme. Ensemble de N molécules d'un corps pur, N étant le nombre d'Avogadro.

molécule polaire. Molécule dans laquelle le barycentre des charges positives (noyaux) n'est pas confondu avec le barycentre des charges négatives (électrons). Ces molécules sont assimilables à des dipôles électriques.

moment dipolaire. Caractéristique des molécules polaires; produit de la somme des charges positives par la distance du barycentre des charges positives au barycentre des charges négatives.

mordançage. *n.* Application d'un mordant sur une fibre textile.

mordant. *n.* Substance chimique qui permet la teinture des fibres cellulosiques.

morphine. *n.* Principal alcaloïde (10 % en masse) contenu dans l'opium.

mutarotation. *n.* Évolution du pouvoir rotatoire spécifique d'une solution d'un glucide, obtenue à partir d'un seul isomère (soit forme α, soit forme β), résultant de l'équilibre entre les formes α et β qui se réalise peu à peu.

myrcène 1. Composé de la famille des terpènes; huile d'odeur agréable; formule :

$$CH_2{-}CH{-}\underset{\underset{CH_2}{|}}{C}{-}CH_2{-}CH_2{-}CH{=}\underset{\underset{CH_3}{|}}{C}{-}CH_3$$

N-O

naphtènes. *n.* Syn. de *cyclanes.*

narcotique. *n.* Substance chimique provoquant engourdissement et somnolence.

négaton. *n.* Syn. d'*électron.*

néomycine. *n.* Antibiotique produit par un Champignon *(Actinomyces fradiae),* utilisé en dermatologie et pour traiter les affections intestinales.

neutron. *n.* Particule fondamentale dont la masse est voisine de celle du proton et dont la charge électrique est nulle. Élément constitutif des noyaux atomiques. Cette particule est instable; elle se décompose en un proton, un électron, un neutrino; période, 13 mn.

nicotine. *n.* Alcaloïde contenu dans les feuilles de tabac. Formule :

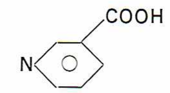

nitrile acrylique. Dérivé de l'éthylène, de formule : $CH_2{=}CH{-}CN$. Par polymérisation, on obtient différentes matières plastiques et notamment des fibres synthétiques.

nombre atomique. Syn. de *numéro atomique.*

nombre d'Avogadro. A l'isotope 16 de l'oxygène (son noyau comporte 8 protons et 8 neutrons) on attribue la masse atomique 16. Le nombre d'Avogadro est le nombre d'atomes d'oxygène contenu dans 16 grammes d'oxygène. Il vaut $6{,}023.10^{23}$.

nombre de masse. Nombre de nucléons d'un noyau atomique, donc également somme du nombre des protons et du nombre des neutrons de ce noyau.

nombres quantiques. Certaines grandeurs physiques ne sont pas susceptibles de variation continue. Elles prennent un certain nombre de valeurs bien précises. Chacune de ces valeurs est caractérisée par un nombre appelé nombre quantique. *Ex.:* 1) L'énergie de l'électron de l'atome d'hydrogène est de la forme : $E = Eo/n$ (n nombre entier); 2) l'énergie d'un oscillateur harmonique est $E = h\ (v + \frac{1}{2})$; v est le nombre quantique de vibration, nombre entier positif.

non ionique. Dans lequel on ne peut reconnaître les propriétés des ions.

normalité acide. Nombre de moles de protons (ions H^+) pouvant être libérées par un litre d'une solution contenant un acide de Brönsted. On peut donner une définition symétrique de la *normalité basique :* nombre de moles de protons pouvant être captées par un litre de solution contenant une base de Brönsted.

normalité oxydante ou **réductrice.** Nombre de moles d'électrons pouvant être fixées par un litre d'une solution contenant un oxydant. Nombre de moles d'électrons pouvant être libérées par un litre d'une solution contenant un réducteur.

noyau atomique. Partie centrale des atomes, constituée d'un assemblage de protons et de neutrons. Dans le noyau est concentrée pratiquement toute la masse de l'atome. Les dimensions des noyaux sont de l'ordre de 10^{-15} m.

noyau benzénique. Groupement de six carbones formant un hexagone régulier. Les carbones sont liés entre eux d'une part par six liaisons σ mais ils mettent également en commun six électrons π qui sont délocalisés, c'est-à-dire que l'on ne peut pas attribuer les paires électroniques à un carbone en particulier.

nucléon. *n.* Particule lourde, constituant du noyau, soit proton, soit neutron.

numéro atomique ou **nombre atomique.** Nombre d'électrons d'un atome et donc également nombre de protons de son noyau.

Nylon 66. Macromolécule obtenue par polycondensation entre l'acide adipique :

$$(COOH{-}CH_2{-}CH_2{-}CH_2{-}CH_2{-}COOH)$$

et l'hexaméthylène diamine :

$$(NH_2{-}CH_2{-}CH_2{-}CH_2{-}CH_2{-}CH_2{-}CH_2{-}NH_2).$$

Utilisé pour faire des fibres synthétiques.

œstrogènes. *adj.* Qui précèdent et accompagnent le rut chez les femelles des mammifères.

oléfines. *n.* Syn. d'*alcènes.*

oléum. *n.* Mélange homogène liquide d'acide sulfurique et de trioxyde de soufre.

opium. *n.* Suc des capsules de pavot contenant de nombreux alcaloïdes.

orbitale *n.* ou **fonction d'onde.** Fonction mathématique des coordonnées de position d'une particule; la norme de cette fonction représente la probabilité de présence de la particule.

ordre d'une réaction. On dit qu'une réaction a un ordre si sa vitesse peut être représentée par une expression de la forme :

$$v = k\,[A]^{a}[B]^{b}.$$

[A], [B], etc., représentent les concentrations ou molarités des réactifs; *a* est l'ordre partiel par rapport au réactif A, etc. La somme des ordres partiels est appelée ordre total. Les ordres de réaction sont des nombres entiers petits, et exceptionnellement des nombres demi-entiers.

organomagnésien. *n.* Composé organométallique à base de magnésium. Il est obtenu par action du magnésium sur un halogénure d'alkyle au sein d'un solvant anhydre ayant les propriétés d'une base de Lewis, comme l'éther. Sa formule développée est de la forme R—Mg—X (R radical alkyle; X halogène).

osazone. *n.* Molécule résultant de l'action de deux molécules de phénylhydrazine sur le glucose (ou tout autre glucide); la fonction aldéhyde et la fonction alcool voisine agissent sur la phénylhydrazine.

oxime. *n.* Résultat de l'action de l'hydroxylamine (NH_2OH) sur les aldéhydes et les cétones. Formule développée :

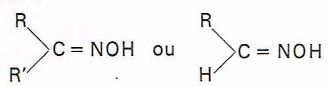

oxydant. *n.* En solution, substance pouvant capter des électrons.

oxydoréductimétrie. *n.* Détermination de la normalité d'un oxydant (ou d'un réducteur) présent dans une solution.

ozoniseur. *n.* Appareil permettant la préparation d'ozone (O_3) et l'action de ce composé sur une autre substance.

P

papavérine. *n.* Un des alcaloïdes de l'opium; formule brute : $C_{20}H_{21}NO_4$; utilisé en thérapeutique comme hypotenseur et vasodilatateur.

papier indicateur. Ruban de papier imprégné d'un indicateur de pH, permettant une détermination rapide mais grossière du pH d'une solution. On dépose une goutte de solution sur le papier et on examine la couleur de la tache, en la comparant à une échelle colorimétrique de référence.

paraffine. *n.* Syn. d'*alcanes* et d'*hydrocarbures saturés.*

paraison. *n.* 1° Opération qui consiste à tourner une masse de verre pâteux à l'extrémité de la canne de soufflage pour l'égaliser. 2° Masse de verre en fusion utilisée lors de l'opération précédente.

parathion. *n.* Thiophosphate de paranitrophényle et de diéthyle; utilisé comme insecticide; très toxique.

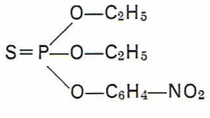

passivation. *n.* Opération chimique au terme de laquelle un métal ne peut plus subir d'oxydation.

passivation anodique. Traitement d'un métal, qui consiste à le recouvrir d'une couche d'oxyde le protégeant de la corrosion.

pénicilline. *n.* Antibiotique produit par un Champignon *(Penicillium notatum)* actif sur les Bactéries Gram positives (streptocoques, staphylocoques,...).

peroxyde. *n.* Composé qui contient deux atomes d'oxygène liés entre eux par une liaison covalente. C'est soit un composé ionique contenant l'ion peroxyde O_2^{2-} ($^-$O—O$^-$), soit une molécule contenant ce groupement; *ex. :* l'eau oxygénée

$$H_2O_2\,(H—O—O—H).$$

pesticide. *n.* Produit chimique utilisé pour débarrasser les cultures de leurs parasites.

pH. Caractéristique de l'acidité d'une solution. Pour les solutions aqueuses c'est le cologarithme décimal de la molarité des ions H_3O^+.

pétrochimie. *n.* Ensemble des procédés chimiques utilisant le pétrole brut comme matière première.

phase. *n.* Partie homogène d'un système chimique.

phénol. *n.* Alcool aromatique. Molécule possédant un groupement hydroxyle OH fixé sur un noyau aromatique.

phénylhydrazine. *n.* Molécule de formule C_6H_5—NH—NH_2; réactif caractéristique des aldéhydes et des cétones; on obtient des dérivés cristallisés (phénylhydrazone) permettant de distinguer l'aldéhyde ou la cétone de départ.

phlogistique. *n.* Substance hypothétique que l'on supposait s'échapper des produits en combustion (principe du feu des alchimistes). Notion périmée.

phosphorescence. *n.* Émission de lumière visible monochromatique par une substance préalablement irradiée. Contrairement à la fluorescence, ce phénomène se prolonge, parfois longtemps (plusieurs heures), après la fin de l'irradiation.

photochimie. *n.* Étude de l'effet des radiations électromagnétiques dans le visible ou l'ultraviolet sur le déroulement des réactions chimiques.

pierre philosophale. Objet mythique dont la possession était supposée nécessaire par les alchimistes, pour transformer en or les métaux vils, comme le plomb.

pile. *n.* Appareil produisant de l'énergie électrique.

pile à combustible. Pile électrochimique dont la réaction productrice d'énergie est une réaction de combustion.

pile électrochimique. Voir *pile galvanique.*

pile-étalon. Pile électrochimique qui délivre une tension bien reproductible et qui sert d'étalon de force électromotrice. On utilise d'habitude l'élément Weston.

pile galvanique ou **pile électrochimique.** Pile qui produit de l'énergie électrique à partir de l'énergie fournie lors d'une réaction chimique qui est une réaction d'oxydoréduction.

plomb tétraéthyle. Composé organométallique de formule brute $Pb(C_2H_5)_4$. L'atome de plomb est lié tétraédriquement aux quatre radicaux éthyle. Cette substance est ajoutée aux carburants dont elle augmente l'indice d'octane, c'est-à-dire le pouvoir antidétonant.

point critique. Limite, pour les températures et pressions élevées, de la courbe d'ébullition d'un corps pur. A pression supérieure à la pression du point critique, il n'existe plus qu'un seul état fluide; on ne peut distinguer liquide et gaz.

point éclair. Température d'inflammation pour un carburant liquide.

point d'équivalence. Au cours d'un dosage (acidimétrie, alcalimétrie, oxydoréductimétrie, complexométrie), point de la courbe indicatrice qui signale la fin du dosage, c'est-à-dire l'instant où le produit que l'on dose est entièrement consommé.

point de fumée. Caractérise la quantité de résidu solide (fumée) que produit un carburant lors de sa combustion.

point isoélectrique. pH pour lequel un acide aminé est en majorité sous forme de molécules. La quantité d'ions est donc minimale et la conductibilité de la solution également.

point triple. Dans le diagramme des phases d'un corps pur, point de concours de trois courbes représentant les équilibres entre deux phases. Au point triple, trois phases sont en équilibre.

polarisation. *n.* Phénomène qui amène la chute de la force électromotrice d'une pile électrochimique par modification de la nature de l'une de ses électrodes.

polarographie. *n.* Technique électrochimique d'analyse permettant de titrer la teneur des solutions en cations métalliques. Elle consiste à établir une courbe intensité-potentiel; la cathode de la cellule électrochimique est constituée par une goutte de mercure qui se renouvelle périodiquement.

polyaddition. *n.* Action de molécules semblables qui s'additionnent les unes sur les autres pour former une macromolécule.

polymère. *n.* Corps dont la molécule est formée par addition de plusieurs molécules d'un autre corps.

polymère monodispersé. Polymère dans lequel le nombre de molécules de monomère constituant les macromolécules ne varie pratiquement pas de l'une à l'autre.

polymère réticulé. Polymère qui contient des macromolécules comportant des ramifications nombreuses.

polymère vivant. Polymère obtenu dans des conditions où les réactions de rupture de chaîne sont pratiquement impossibles.

polymérisation. *n.* Réaction au cours de laquelle plusieurs molécules semblables (nécessairement insaturées) s'additionnent les unes aux autres pour former une molécule de plus grande masse moléculaire. Si le nombre de molécules composantes est très grand, on obtient une macromolécule.

polymérisation anionique. Polymérisation qui s'effectue grâce à un carbanion comme intermédiaire de réaction.

polymérisation cationique. Polymérisation qui s'effectue avec un carbocation comme intermédiaire de réaction.

polymérisation par complexe de coordination. Polymérisation qui s'effectue en présence de catalyseurs qui sont des complexes des métaux de transition.

polymérisation en émulsion. Polymérisation qui s'effectue à partir de réactifs se trouvant sous forme de gouttelettes au sein d'une solution, en général aqueuse.

polymérisation en masse. Polymérisation qui s'effectue en l'absence de solvant.

polymérisation radicalaire. Polymérisation qui s'effectue grâce à un radical comme intermédiaire de réaction.

polymérisation en suspension. Polymérisation qui s'effectue à partir de réactifs formant des micelles en suspension dans une solution, en général aqueuse.

pot catalytique. Technique proposée pour diminuer la pollution due aux moteurs à explosion. Les gaz partiellement brûlés traversent une couche de catalyseur au contact de laquelle s'effectue une oxydation complète qui les débarrasse des produits dangereux, notamment l'oxyde de carbone.

potentiel chimique. Le potentiel chimique d'un constituant dans une phase est l'enthalpie libre molaire partielle de ce constituant.

pouvoir adsorbant. Pouvoir de certaines substances solides de fixer des molécules à leur surface.

pouvoir calorifique. Quantité de chaleur produite par la combustion d'une mole (ou d'un kilogramme) d'un corps composé.

précipité. *n.* Phase solide apparaissant dans une solution au cours d'une réaction.

pression de vapeur Reid. Pression de vapeur d'un carburant mesurée à une température de référence, 37,8 °C.

principe d'exclusion de Pauli. Postulat selon lequel la *fonction d'onde* des électrons atomiques change de signe quand on permute les caractéristiques de deux électrons. Une de ses conséquences essentielles est que deux électrons d'un même atome ne peuvent pas avoir leurs quatre nombres quantiques identiques.

principe de Franck Condon. Hypothèse qui prévoit que lors du passage d'une molécule de l'état fondamental à un état excité, la transformation étant très rapide, les noyaux, très lourds, ne subissent aucun déplacement.

principe d'incertitude. Postulat de la mécanique quantique, dont l'une des conséquences est la suivante : lorsqu'on désire effectuer les mesures de deux grandeurs, appelées grandeurs liées, le produit des erreurs absolues commises est supérieur à $h/2\pi$ (h *constante de Planck*) ; autrement dit, on ne peut simultanément améliorer à l'infini la précision des mesures de ces deux grandeurs. (*Ex.* de grandeurs liées : position et vitesse d'une particule.)

procédé Airlift. Procédé de régénération d'un catalyseur de cracking utilisant un lit catalytique fluide. Après évacuation du catalyseur, celui-ci est débarrassé du coke qui le souille, puis recyclé.

procédé Bayer. Procédé de préparation de l'alumine nécessaire à l'élaboration de l'aluminium. On traite la bauxite par une solution de soude ; l'alumine passe en solution, contrairement aux oxydes de fer et à la silice.

procédé Bergius. Procédé permettant d'effectuer la synthèse des alcanes pouvant servir de carburant par hydrogénation du charbon.

procédé Bessemer. Procédé d'élaboration de l'acier à partir de la fonte. La fonte liquide est placée dans un convertisseur dont le revêtement intérieur est acide (à base de silice) ; on souffle de l'air à travers la fonte par le fond de l'appareil.

procédé Claus. Procédé de fabrication du soufre à partir du sulfure d'hydrogène (H_2S), mis au point pour exploiter le gaz de Lacq.

procédé de contact. Procédé de synthèse de l'acide sulfurique. On réalise l'oxydation du dioxyde de soufre par l'air, le catalyseur étant un solide (V_2O_5 est le plus utilisé).

procédé Deacon. Procédé de préparation du chlore à partir du chlorure d'hydrogène par oxydation par l'oxygène.

procédé Dow. Procédé de synthèse du bromure d'éthyle à partir de l'éthane et du bromure d'hydrogène par irradiation du milieu réactionnel.

procédé Frasch. Procédé d'extraction du soufre natif, qui consiste à le liquéfier *in situ* et à le remonter par pompage à la surface.

procédé Kaldo. Procédé moderne d'élaboration de l'acier. Il dérive du procédé L.D. ; l'oxydation de la fonte est réalisée par l'oxygène ; le convertisseur tourne autour de son axe.

procédé L.D. Procédé moderne d'élaboration de l'acier, dérivé du procédé Bessemer. On souffle de l'oxygène pur à la surface de la fonte liquide contenue dans le convertisseur.

procédé Mérox. Procédé de désulfurisation des produits pétroliers consistant à transformer les thiols en disulfures par oxydation, puis dissolution sélective de ces derniers.

procédé Mond. Procédé d'élaboration du nickel, fondé sur la grande affinité de ce métal pour l'oxyde de carbone. Le traitement par ce gaz permet de séparer le nickel de ses impuretés (surtout du cuivre). On régénère ensuite le nickel en décomposant le nickel tétracarbonyle formé.

procédé Thomas. Procédé d'élaboration de l'acier à partir de la fonte. Dérivé du procédé Bessemer ; le remplacement du garnissage acide du convertisseur par un garnissage basique permet l'élimination du phosphore.

produits de fission. Noyaux de nombre de masse moyen (compris entre 72 et 162 pour la fission de l'uranium), obtenus par fission d'un noyau lourd.

progestatifs. *n.* Hormones femelles nécessaires à la nidification de l'œuf fécondé.

propergol. *n.* Ensemble d'un combustible et d'un comburant utilisé pour la propulsion des fusées.

propriétés antigrippantes. Propriétés de certains solides comme le graphite qui, possédant un petit coefficient de frottement, sont capables de servir de contact sur les machines tournantes.

protéines. *n.* Substances organiques azotées, formées par l'enchaînement d'un nombre parfois très grand de molécules d'acides aminés (syn. *protides*).

proton. *n.* Particule fondamentale dont la masse est 1 836 fois celle de l'électron et dont la charge électrique positive est égale et opposée à celle de l'électron. Élément constitutif des noyaux atomiques. Le noyau de l'atome d'hydrogène est un proton.

provitamine. *n.* Substance sécrétée par certains êtres vivants et qui peut, après transformation, donner une vitamine.

pseudo-alliage. *n.* Se dit d'un alliage constitué de métaux non miscibles à l'état solide. Les pseudo-alliages sont constitués par la juxtaposition de microcristaux des métaux purs.

pyrolyse. *n.* Chauffage d'une substance à l'abri de l'air.

pyrophorique. *adj.* Se dit d'une substance qui s'enflamme spontanément à l'air.

pyrotechnie. *n.* Science des matières explosives ; art du feu d'artifice.

Q-R

quinine. *n.* Alcaloïde extrait du quinquina ; formule brute : $C_{20}H_{24}N_2O_2$; utilisée principalement pour traiter le paludisme.

quinone. *n.* Molécule de formule développée :

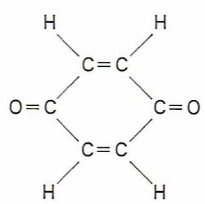

racémique. *n.* Mélange équimoléculaire de deux inverses optiques et donc inactif par compensation.

radical. *n.* Édifice chimique possédant un ou plusieurs électrons non appariés. On les note par leur symbole chimique suivi d'un point. Ce peut être soit un atome (Cl., Br.), soit un édifice polyatomique (CH_3., C_6H_6O, ...). Ces espèces sont en général trop réactives pour exister à l'état libre à température ordinaire ; ce sont des intermédiaires de réaction.

radio-activité. *n.* Propriété des noyaux atomiques instables qui se transforment en éjectant une particule *(hélion, électron, positon)* et en fournissant un rayonnement électromagnétique de très petite longueur d'onde (rayons γ).

radiochimie. *n.* Étude de l'effet des radiations électromagnétiques de petite longueur d'onde (rayons X et rayons γ) sur le déroulement d'une réaction chimique.

radio-isotope. *n.* Isotope radio-actif d'un élément.

rayons X. Rayonnement électromagnétique de longueur d'onde comprise entre 0,1 et 10 Å environ. Ils sont produits par bombardement d'un échantillon métallique par des électrons très énergétiques.

réactifs de Grignard. Du nom de leur inventeur, on nomme parfois ainsi les organomagnésiens.

réactifs de groupe. Dans l'analyse qualitative d'une solution contenant plusieurs cations, série de réactifs permettant de classer les différents cations en groupes ayant des propriétés voisines.

réaction en chaîne. Réaction dans laquelle un intermédiaire de réaction instable (radical ou ion) est périodiquement formé.

réaction de Curtius. Méthode de préparation des amines par hydrogénation des azotures d'alkyle ($R—N_3$).

réaction de Diels-Alder. Réaction d'addition d'un alcène sur un diène conjugué ; cette addition se fait en position 1,4 et conduit à la synthèse d'un dérivé du cyclohexène.

réaction de Friedel et Craft. Sur un noyau benzénique, substitution d'un hydrogène par un radical alkyle (—R) ou un radical acyle (—CO—R).

réaction de Gattermann. Réaction qui conduit à un aldéhyde aromatique par action d'un composé aromatique sur l'oxyde de carbone et le chlorure d'hydrogène en présence de chlorure d'aluminium comme catalyseur.

réaction d'Hofmann. Méthode de préparation des amines par action de l'ammoniac sur un halogénure d'alkyle en phase liquide.

réaction de Leuckart. Méthode de préparation des amines par action d'une cétone sur le formiate d'ammonium à chaud.

réaction de Tischtchenko. Réaction de dismutation d'un aldéhyde conduisant à l'ester de l'acide carboxylique et de l'alcool dérivés de cet aldéhyde.

réaction de Würtz. Traitement par le sodium d'un halogénure d'alkyle amenant la synthèse d'un alcane par doublement du radical alkyle.

réducteur. *n.* Composé susceptible de fournir des électrons.

réducteurs chromogènes. Composés réducteurs qui, mêlés au sel d'argent d'une émulsion, se transforment en un corps coloré ; utilisés pour la fabrication des films couleurs.

reforming catalytique. Opération qui consiste, à l'aide d'un catalyseur, à passer d'un alcane à chaîne droite à un alcane isomère à chaîne ramifiée. Ces derniers ont un pouvoir antidétonant plus important.

règle de Hund. Le fait d'apparier deux électrons demande de l'énergie. Dans un atome à l'état fondamental (énergie minimale), lorsqu'une sous-couche est incomplètement remplie, les électrons se disposent de manière que le spin total de l'atome soit maximal, c'est-à-dire spins parallèles.

règle de Markovnikoff. Règle mise en évidence par le chimiste Markovnikoff et qui régit l'addition des halogénures d'hydrogène sur les alcènes : l'halogène se fixe sur le carbone le plus substitué.

règle de l'octet ou **règle des octaves.** Règle qui veut que dans un ion ou une molécule chaque atome possède toujours huit électrons. Cette règle souffre de nombreuses exceptions.

relargage. *n.* Opération qui consiste à ajouter du chlorure de sodium à une solution pour faire précipiter une substance dissoute ; utilisée dans l'industrie du savon et en teinturerie.

rendement quantique. Dans l'effet photoélectronique, rapport du nombre d'électrons émis par l'anticathode au nombre de photons incidents.

résine A.B.S. Matière plastique obtenue par copolymérisation du styrène et du nitrile acrylique.

résine alkyde. Matière plastique obtenue par polycondensation du glycérol avec un diacide (phtalique, maléique, ou adipique).

résine Delrin. Matière plastique très dure obtenue par polymérisation du méthanal (CH_2O).

résine échangeuse d'ions. Macromolécule organique de synthèse, constituée soit d'un macro-anion, soit d'un macrocation et de petits ions de signe contraire assurant la neutralité électrique. Au contact d'une solution contenant d'autres ions, il s'établit un équilibre, la résine fixant les ions de la solution et libérant ceux qu'elle contenait.

résine polyester. Matière plastique obtenue par polycondensation d'un diacide et d'un diol. Certaines sont utilisées comme fibres textiles.

R.F. Abréviation de *ratio frontis*. Rapport de la distance parcourue par une substance lors d'une chromatographie sur plaque ou sur papier à la distance parcourue par le solvant (éluant).

riboflavine. *n.* Vitamine B_2; formule brute $C_{15}H_{20}O_6N_4$. Vitamine liposoluble que l'on trouve dans le foie, le lait, le jaune d'œuf.

R.M.N. Résonance magnétique nucléaire. Type de spectroscopie dans le domaine des micro-ondes utilisant le fait que certains noyaux atomiques placés dans un champ magnétique ont deux niveaux d'énergie possibles; l'écart énergétique entre ces niveaux correspond à un photon du domaine des micro-ondes. Cet écart est sensible à l'environnement de l'atome considéré. La R.M.N. permet, en particulier, l'étude des protons (noyaux d'hydrogène) d'une molécule.

S

saturnisme. *n.* Intoxication chronique par les sels de plomb.

saumure. *n.* Solution aqueuse, concentrée, de chlorure de sodium.

savon métallique. Sel d'un métal alcalin ou alcalino-terreux que l'on incorpore à un lubrifiant liquide pour augmenter sa viscosité.

S.B.R. Sigle pour Styrene-Butadiene-Rubber. Matière plastique élastomère obtenue par copolymérisation du styrène et du butadiène.

self-extinguible. *adj.* Se dit d'un matériau organique capable de stopper un début de combustion en dégageant un gaz qui n'entretient pas cette combustion.

semi-conducteur. *n.* ou *adj.* Corps simple non métallique ou corps composé qui conduit l'électricité. La résistivité des semi-conducteurs est plus grande que celle des métaux; de plus, elle décroît quand la température augmente.

sensibilisation photochimique. Opération qui consiste, dans la préparation des films photographiques, à rendre le bromure d'argent sensible aux longueurs d'onde visibles; habituellement, il n'est sensible qu'à l'ultraviolet et au bleu. On incorpore à AgBr des substances chimiques comme les cyanines.

sensitométrie. *n.* Mesure de la sensibilité d'une émulsion photographique en fonction de la longueur d'onde.

silicone. *n.* Molécule dans laquelle des atomes de silicium sont reliés entre eux par des ponts constitués par un atome d'oxygène, les autres valences du silicium étant saturées par des radicaux alkyle.

S.N.G. Sigle pour Substitution Natural Gas. Gaz contenant des alcanes légers (essentiellement du méthane) produit par cracking des alcanes lourds et destiné à servir de combustible en remplacement du gaz naturel.

solidification. *n.* Passage d'une substance de l'état liquide à l'état solide.

soluté. *n.* Dans une solution, est appelé soluté tout constituant dont la fraction molaire est petite.

solution. *n.* Mélange liquide ou solide homogène. Dans ce dernier cas, on précise habituellement solution solide.

solvant. *n.* Constituant d'une solution dont la fraction molaire est voisine de 1, et donc plus grande que celle des autres constituants appelés solutés.

solvatation. *n.* Association d'un soluté (molécule ou ion) avec les molécules du solvant.

solvaté. *adj.* Se dit d'un ion ou d'une molécule en solution, lorsqu'ils sont liés à des molécules du solvant.

spectre de masse. Courbe produite par un spectrographe de masse et donnant la répartition des différents morceaux obtenus par rupture et ionisation d'une molécule, suivant leur masse.

spectrographe de masse. Appareil destiné à trier les particules chargées positivement et à déterminer leur masse molaire. De tels appareils peuvent servir à distinguer les différents isotopes d'un même élément.

spectrophotomètre. *n.* Appareil destiné à la mesure de la transmittance ou de la densité optique. Le domaine de longueurs d'onde exploré fait partie de l'infrarouge, de la lumière visible ou de l'ultraviolet.

spectrophotométrie d'absorption. Étude, en fonction de la longueur d'onde, de la densité optique d'une substance.

spectrophotométrie d'émission. Analyse de la lumière émise par des substances ayant reçu une excitation.

spin. *n.* Moment cinétique intrinsèque d'une particule, d'un atome ou d'un ion. C'est une notion de mécanique quantique dont voici une image imparfaite : une particule est semblable à une toupie en rotation rapide sur elle-même.

stéréochimie. *n.* Étude de la forme des molécules.

stœchiométrie. *n.* Proportions dans lesquelles les molécules réagissent les unes sur les autres au cours d'une réaction chimique.

straight run. Ensemble des coupes que l'on recueille après une première distillation, sous pression atmosphérique, du pétrole brut.

streptomycine. *n.* Antibiotique produit par un Champignon *(Streptomyces griseus)*; actif sur les Bactéries Gram négatives et le bacille de la tuberculose.

styrène. *n.* Phényl éthylène, utilisé pour la synthèse de nombreuses matières plastiques. Formule : $C_6H_5—CH=CH_2$.

sublimation. *n.* Passage d'une substance de l'état solide à l'état gazeux.

sublimé corrosif. Ancienne dénomination du chlorure mercurique, $HgCl_2$.

substituant. *n.* Atome ou groupement fonctionnel qui se substitue à un atome d'hydrogène dans une molécule organique.

sulfamides. *n.* Famille de composés antibiotiques qui dérivent du benzène sulfamide.

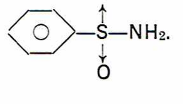

sulfonation. *n.* Sur un noyau benzénique, substitution d'un hydrogène par le groupement $—SO_3H$. Réalisé par traitement des hydrocarbures aromatiques par l'acide sulfurique ou les oléums.

sulfones. *n.* Famille de composés du type : $R—SO_2—R'$ (R et R' radicaux alkyle).

syndiotactique. *adj.* Se dit d'un polymère obtenu par catalyse d'un complexe de coordination et dont la macromolécule possède une structure ordonnée.

synergisme de deux médicaments. Action complémentaire de deux médicaments.

synthèse. *n.* Suite de réactions chimiques aboutissant à la préparation d'une molécule à partir de molécules plus simples.

synthèse de Fischer-Tropsch. Synthèse des carburants liquides (essences) par hydrogénation de l'oxyde de carbone.

synthèse de Gabriel. Méthode de préparation des amines primaires. On commence par faire agir l'ammoniac sur l'anhydride phtalique pour produire le phtalimide.

synthèse de Reppe. Réaction amenant la synthèse du cyclo-octatétraène à partir de l'acétylène.

synthèse de Strecker. Méthode de synthèse des aminoesters à partir des aldéhydes (ou des méthylcétones) par action du cyanure d'ammonium.

T-U-V-X-Z

tampon de vapeur ou **vapor lock.** Ensemble de bulles qui empêchent la circulation correcte d'un liquide et notamment l'alimentation d'un moteur en carburant.

tanins. *n.* Substances contenues dans de nombreux végétaux et capables d'effectuer le tannage des peaux, c'est-à-dire de les rendre imputrescibles.

tartre émétique ou **tartre stibié.** Tartrate de potassium et d'antimoine utilisé comme vomitif.

tautomérie. *n.* Équilibre entre deux molécules ayant même formule brute. La tautomérie se distingue de l'isomérie car on ne peut séparer les deux formes tautomères.

température d'inflammation. Température à partir de laquelle les alcanes lourds deviennent spontanément combustibles.

température de rosée. Température à laquelle apparaît la première gouttelette de liquide (rosée) par refroidissement d'un mélange gazeux.

teneur en cendre. Lors d'une analyse gravimétrique, on recueille la phase solide sur un papier et on place le tout dans un four pour le dessécher. Le papier support brûle et sa teneur en cendre est la masse résiduelle de ses produits de combustion que l'on doit déduire de la mesure.

tension de vapeur. C'est la pression d'un corps pur à l'état gazeux en équilibre avec le même corps à l'état liquide. Cette grandeur dépend de la température.

terres rares. Syn. de *lanthanides.*

théorie cinétique des gaz. Étude statistique du comportement des gaz, considérés comme une population de molécules dont on étudie les chocs mutuels et les chocs sur les parois.

thermochimie. *n.* Étude thermodynamique des réactions chimiques.

thermocouple. *n.* Thermomètre qui utilise l'effet thermoélectrique; on ramène le repérage de la température à une mesure de force électromotrice.

thermodurcissable. *adj.* Se dit d'un polymère qui durcit lorsqu'on élève la température.

thermodynamique. *n.* Partie de la physique qui étudie les transformations des différentes formes de l'énergie.

thermoplastique. *adj.* Se dit d'un polymère qui se ramollit lorsqu'on élève la température.

thiamine ou **anévrine.** *n.* Vitamine B_1, hydrosoluble ; se trouve dans l'écorce de riz ; sa carence donne le béri-béri.

thiobarbituriques. *n.* Dérivés soufrés de l'acide barbiturique.

thiol. *n.* Molécule possédant le groupement fonctionnel —SH.

thyroxine. *n.* Hormone thyroïdienne qui fut la première à être isolée. Sa molécule contient quatre atomes d'iode.

titrage. *n.* Détermination du titre et donc de la molarité d'un constituant dans un mélange.

titrage potentiométrique. Titrage électrochimique nécessitant la mesure, au voltmètre électronique, de la différence de potentiel entre deux électrodes.

titre. *n.* Nombre de grammes d'un constituant contenu dans un litre d'une solution ou dans un kilogramme d'un mélange solide.

toluène. *n.* Méthyl-benzène :

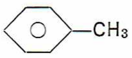

tour de lavage. Appareil dans lequel un liquide pulvérisé en fines gouttelettes débarrasse un gaz de ses éléments solubles soit solides, soit gazeux.

transmittance. Rapport de l'intensité d'une lumière qui a traversé une certaine épaisseur de solvant à l'intensité de la lumière ayant traversé la même épaisseur d'une solution, la lumière utilisée étant monochromatique.

transmutation. *n.* Transformation d'un atome en un autre atome. Rêve des alchimistes (fabrication de l'or), cette opération est rendue possible par les méthodes de la physique nucléaire.

transposition de Beckmann. Transformation d'une cétoxime (oxime obtenue à partir d'une cétone) en amide substitué.

tyrothricine. *n.* Association des deux antibiotiques (gramicidine et tyrocidine) produits par un Champignon *(Bacillus brevis)* ; active sur les Bactéries Gram positives.

unité cellobiose. Groupement de deux hexoses analogue au cellobiose (disaccharide obtenu par association de deux hexoses) qui est le motif constitutif de la cellulose.

uréthanne. *n.* Composé résultant de l'estérification de l'acide carbamique ($HO—CO—NH_2$) ; sa formule est donc de la forme $R—O—CO—NH_2$.

valence. *n.* Voir *covalence* et *électrovalence.*

valeur en eau d'un calorimètre. Quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un degré la température d'un calorimètre et de ses accessoires. Exprimée en calories, elle s'exprime par le même nombre que la quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un degré la température d'une certaine masse d'eau, d'où son nom.

vaporisation. *n.* Passage d'une substance de l'état liquide à l'état gazeux.

vapor lock. Syn. de *tampon de vapeur.*

variétés allotropiques. Différentes formes cristallines sous lesquelles se présente un corps pur à l'état solide.

visbreaking. *n.* Cracking léger des fractions lourdes du pétrole brut amenant à la préparation des carburants.

vitamine. *n.* Substance nécessaire à certaines phases de l'assimilation des aliments par les êtres vivants.

vulcanisation du caoutchouc. Opération effectuée sur les caoutchoucs naturels ou artificiels et consistant à incorporer du soufre. L'action de la chaleur réalise des ponts soufrés entre les chaînes des macromolécules de caoutchouc. Les matériaux obtenus ont des qualités mécaniques supérieures.

xylènes. *n.* Diméthyl-benzène. Il existe trois xylènes isomères suivant les positions respectives des radicaux méthyle.

zéolithe. *n.* Substance naturelle se présentant comme une argile (alumino-silicate) et qui a la propriété d'échanger les ions

ERRATA

Volume XII

Page 18, dans le tableau figurant en bas de page, la numérotation des colonnes est incomplète ; il convient de lire :

SYSTÈME PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS
(Représentation moderne)

Période	Groupe I A	Groupe II A	Groupe III A	Groupe IV A	Groupe V A	Groupe VI A	Groupe VII A	Groupe VIII	Groupe I B	Groupe II B	Groupe III B	Groupe IV B	Groupe V B	Groupe VI B	Groupe VII B	Groupe O

Pages 35 et 45, les photographies figurant en haut de page ont été inversées.

INDEX DES NOMS CITÉS

La référence aux différents termes figurant dans le volume de Chimie est donnée par l'indication du numéro de la page où se trouve la citation, suivi, le cas échéant, des lettres *a* et *b* se rapportant respectivement à la colonne de gauche et à la colonne de droite de chaque page.

Les références sont données, pour les illustrations, par le numéro de la page en caractères gras et, pour le texte, par le numéro de la page en caractères maigres pour une simple citation, et en italique pour un développement plus complet.

Pour les différentes variantes se rattachant à un même terme, un astérisque indiquera le renvoi à ce dernier. *Ex. :*

acétaldéhyde
 * aldéhyde acétique
aldéhyde acétique (acétaldéhyde) 135 b

A

B

C

D

E

Q-R-S

T-U-V-W-X-Y-Z

GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

CHIMIE

GRANGE BATELIÈRE, ÉDITIONS ATLAS, PARIS - ÉDITIONS KISTER, GENÈVE
ÉDITIONS ÉRASME, BRUXELLES-ANVERS

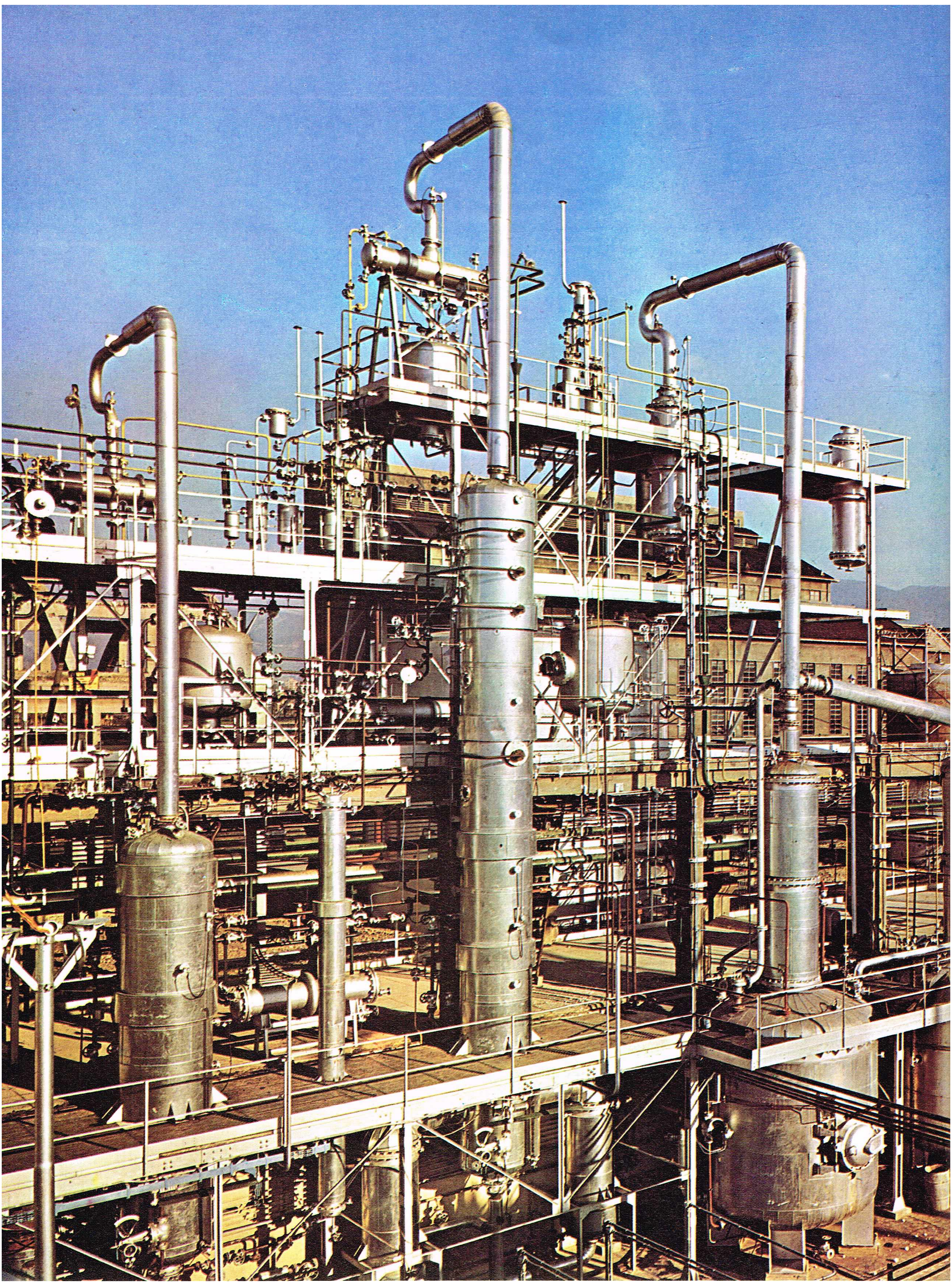

Publiée sous le haut patronage de :
Messieurs les professeurs :
Jean DORST, membre de l'Institut,
Charles FEHRENBACH, membre de l'Institut,
Roger HEIM, membre de l'Institut,
Monsieur l'amiral André JUBELIN,
Messieurs les professeurs :
Pierre LÉPINE, membre de l'Institut,
Louis LEPRINCE-RINGUET, de l'Académie française,
Jean-François LEROY, professeur au Muséum national d'histoire naturelle,
Henri NORMANT, membre de l'Institut,
Monsieur Jacques PICCARD, docteur ès sciences h.c.

Ont collaboré à ce volume :

R. DENNILAULER, pour les colorants et la teinture.
P. TEISSEIRE, pour quelques aspects de la chimie des parfums.
B. LEBLANC, pour les émulsions sensibles pour la photographie.
F. BLANC, pour la toxicologie.
J. LÉVY, pour la chimie pharmaceutique.

Les schémas portant la référence Richard Colin
ont été réalisés d'après des croquis fournis par les auteurs.

Réalisation	IDÉES ET ÉDITIONS 16, avenue de Friedland, 75008 Paris
Comité de direction	Simone DEVAUX, Uberto TOSCO.
Rédaction	Patrick PHLIPONEAU, Françoise MENU, Marie-Noëlle PAILLETTE, Vanina DORÉ, Monique LIONS-GENTIL.
Recherche de l'illustration	Mathilde RIEUSSEC.
Mise en pages	Tito TOPIN et Serge BROCHE.
Illustrations techniques	Richard COLIN.
Coordinateur des dessins	Mario LOGLI.
Fabrication	Sylvia COLIN, Jocelyne DUCHESNE, Jocelyne TÉPÉNIER.
Directeur de la publication	G. BORDES.

Dans ce volume :

LA CHIMIE

Corson - Fotogram

◀ *La* chimie *est la science qui étudie la composition, la structure et les propriétés de la matière ainsi que ses transformations. Ici, quelques appareils en verre et produits utilisés en laboratoire pour des contrôles physico-chimiques.*

LA CHIMIE

L'homme, depuis son apparition sur Terre, a progressivement appris à utiliser la matière qui l'entoure pour satisfaire ses besoins, sans cesse plus nombreux et plus variés. Il ne s'est pas limité à l'utilisation des produits naturels, mais, en perfectionnant sans cesse sa connaissance de la matière, il a appris à la transformer. Ainsi, de nouvelles substances n'existant pas dans la nature ont pu être synthétisées, et des produits existant en trop faible quantité ou trop difficiles à se procurer ont été fabriqués en partant de substances plus abondantes ou plus accessibles. Et c'est ainsi que, depuis la découverte du feu, en passant par l'alchimie, l'homme a élaboré une science qu'il perfectionne encore : **la chimie.**

La chimie est la science qui étudie la composition, la structure et les propriétés de la matière ainsi que ses transformations.

Les applications de la chimie *dans la vie moderne sont innombrables. Qu'il s'agisse de bâtir — le ciment, le plâtre, le verre, les métaux et leurs alliages, les matières plastiques, les panneaux de particules, etc., sont fabriqués grâce à la chimie qui, souvent, intervient à plusieurs stades de leur élaboration. Qu'il s'agisse de se nourrir — la fabrication de certains aliments comme le sucre, de certaines boissons comme le vin ou la bière, des conserves alimentaires, etc., mettent en jeu la chimie. Les médicaments, les insecticides, les produits d'entretien, les cosmétiques, les peintures, etc., n'existent que grâce à la chimie. Sans elle, la photographie, le cinéma, la télévision, qui sont aussi des applications de la physique, n'auraient pas vu le jour. En fait, il est peu d'industries, de techniques ou d'arts qui ne fassent appel à la chimie, et celle-ci intervient à de nombreux titres dans la vie du monde moderne.*

C'est certainement pour la production d'énergie *que la chimie a été la plus grande consommatrice des ressources terrestres. Parmi les transformations que peut subir la matière, la combustion est sans nul doute la plus utile pour la production de chaleur et d'autres formes d'énergie. Dès que l'homme a su faire du feu et le maîtriser, il a brûlé les produits inflammables les plus aisément accessibles (bois, paille, tourbe, etc.), puis il a pratiqué la combustion du charbon qu'il devait parfois extraire du sol avec d'énormes difficultés, et actuellement il « brûle » du pétrole en quantités extraordinaires. C'est ainsi qu'en France, en 1974, on a consommé 110 millions de tonnes de pétrole, et*

une quantité de charbon correspondant à 31 millions de tonnes de pétrole (T. E. P. = tonnes équivalent pétrole) ; la consommation de gaz a été de 15,5 millions de T. E. P. Il faut ajouter à cela l'électricité d'origine hydraulique (13 T. E. P.) et nucléaire (2,5 T. E. P.). Ainsi, sur 172 millions de T. E. P. 156,5 millions de T. E. P. ont produit de l'énergie par voie chimique, c'est-à-dire par oxydation sous l'influence de l'oxygène de l'air.

D'autres sources éventuelles d'énergie pour l'avenir, telles que l'énergie d'ensoleillement captée par des fours solaires ou des photopiles spatiales, l'énergie géothermique, les énergies marémotrice et thermique des mers, l'énergie éolienne, si elles ne sont pas conditionnées aux progrès de la chimie de façon directe, y sont cependant étroitement liées.

Le chimiste doit sans cesse adapter aux progrès des techniques et aux exigences de la vie moderne les produits qu'il fabrique.

Si l'on prend par exemple les carburants, et plus particulièrement l'essence d'automobile, on ne peut plus se contenter, pour juger de sa qualité, de mesurer son pouvoir calorifique, c'est-à-dire l'énergie qu'elle peut fournir par unité de volume. Les progrès de la technique automobile ont conduit à augmenter le taux de compression dans les moteurs de façon telle que de nouvelles essences ont dû être mises au point. Pour cela, il a fallu étudier dans le plus grand détail la réaction chimique qui a lieu dans le cylindre lorsque l'étincelle jaillit. On a alors appris que, pour que le moteur fonctionne sans cliquetis, il faut que le front de flamme (sorte de « piston » de gaz en combustion) progresse à une certaine vitesse en poussant le piston de métal. Les constituants de l'essence doivent être de structure telle qu'ils ne subissent pas une inflammation immédiate et brutale. Les chimistes ont alors défini la nature des produits répondant à cette exigence. Cependant, ils se sont aperçus qu'il était nécessaire, pour répondre aux besoins des moteurs modernes, d'utiliser un composé auxiliaire antidétonant : le plomb tétraéthyle. *Puis, plus récemment, dans le cadre de la lutte antipollution, on a cherché à limiter la teneur en gaz toxiques dans les gaz d'échappement des véhicules automobiles. Des études furent entreprises dans le monde entier, et la solution la plus rationnelle et la plus efficace semblait être celle du « pot catalytique » que l'on adapte à la sortie des gaz d'échappement pour en éliminer les gaz toxiques. Malheureusement, cette solution idéale au problème de la pollution atmosphérique est peu compatible avec le maintien des taux de compression actuels et donc avec le maintien des performances de nos moteurs. Des recherches actuellement en cours visent à réduire, sinon à supprimer, le plomb tétraéthyle dans les essences. Les solutions proposées pourraient amener à de profondes modifications des raffineries actuelles.*

Un autre exemple illustrant la nécessité de l'adaptation journalière du chimiste aux besoins de la civilisation est celui des détergents. On sait que, depuis la dernière guerre, les savons ont été progressivement remplacés par des détergents synthétiques. Ceux-ci sont des mélanges solides ou liquides de plus en plus complexes dont la fonction n'est pas exclusivement d'éliminer les salissures mais aussi de supprimer la teinte jaune prise par le linge, de le rendre plus souple, etc. Le rejet en quantité importante dans les rivières de ces détergents dont la nature chimique n'était pas compatible avec la biodégradation par les micro-organismes a obligé à mettre au point une seconde génération de produits aisément éliminables. Mais les chimistes n'étaient pas pour autant arrivés au bout de leurs peines. En effet, parmi les constituants des détergents, les phosphates, dont la fonction essentielle est de complexer les ions calcium de l'eau, se sont petit à petit révélés indésirables en favorisant la prolifération des Algues dans les rivières. Il faut alors trouver un remplaçant à ce produit, et c'est un des buts des recherches actuelles dans le domaine des détergents.

Dans le domaine des matériaux organiques synthétiques (matières plastiques, fibres synthétiques, caoutchoucs synthétiques) qui consomment près de 50 % du pétrole brut destiné à la pétrochimie, les progrès contribuent sans cesse à améliorer nos conditions de vie.

C'est grâce à des membranes semi-perméables polymériques que l'on a pu réaliser des reins artificiels. Les records de skis de la dernière décennie sont dus en partie à des polymères, qui, par ailleurs, ont fait le succès de certaines poêles où les crêpes se font sans beurre.

Ainsi, la chimie est partout dans notre vie de chaque jour. Les pneus de nos voitures sont fabriqués à partir d'un élastomère synthétique dont la composition, les charges et les additifs sont soigneusement choisis et dosés pour assurer une excellente résistance à l'abrasion, aux déchirures, à l'oxydation, etc. Les chambres à air, dont la fonction est différente et qui doivent avant tout être imperméables à l'air, sont constituées par un autre élastomère de synthèse. Les toiles qui maintiennent le caoutchouc du pneu sont aussi des polymères de synthèse dont la résistance mécanique a atteint des niveaux très élevés par rapport aux fibres naturelles ou aux premières fibres artificielles. Certaines fibres synthétiques atteignent de tels niveaux de résistance à la traction qu'elles sont utilisées pour la fabrication de filets destinés à arrêter les avions en bout de piste. Les mêmes fibres synthétiques permettent de réaliser des moquettes pratiquement inusables que l'on peut utiliser dans les lieux de passage du grand public. En ce qui concerne les colles et les adhésifs, les progrès réalisés au cours des vingt dernières années sont tels que la plupart des problèmes de jonction des matériaux les plus divers sont pratiquement résolus.

La pénétration des matières plastiques dans la vie moderne est telle que la production mondiale a atteint 43 millions de tonnes en 1973 et que, dans les pays les plus industrialisés, la consommation par habitant et par an est de l'ordre de 50 kg. La progression de la consommation est telle qu'elle doit rejoindre celle de l'acier en l'an 2000, ou un peu au-delà.

La chimie intervient encore dans la lutte contre les maladies de l'homme et contre les parasites de toutes sortes. En ce qui concerne les médicaments, si les hommes connaissent depuis fort longtemps l'effet de certaines drogues végétales et minérales (opium, quinquina, ipéca, etc.), ce n'est qu'au XIXe siècle que furent isolés les premiers principes actifs de ces drogues, et l'on estime que 95 % des produits pharmaceutiques actuellement utilisés ont été découverts au XXe siècle. Ce développement plus tardif que celui des autres branches de la chimie est dû à la nécessité de mise en œuvre de disciplines différentes (médecine, physiologie, pharmacologie, analyse chimique, biochimie, etc.) et à l'extrême complexité des composés utilisés.

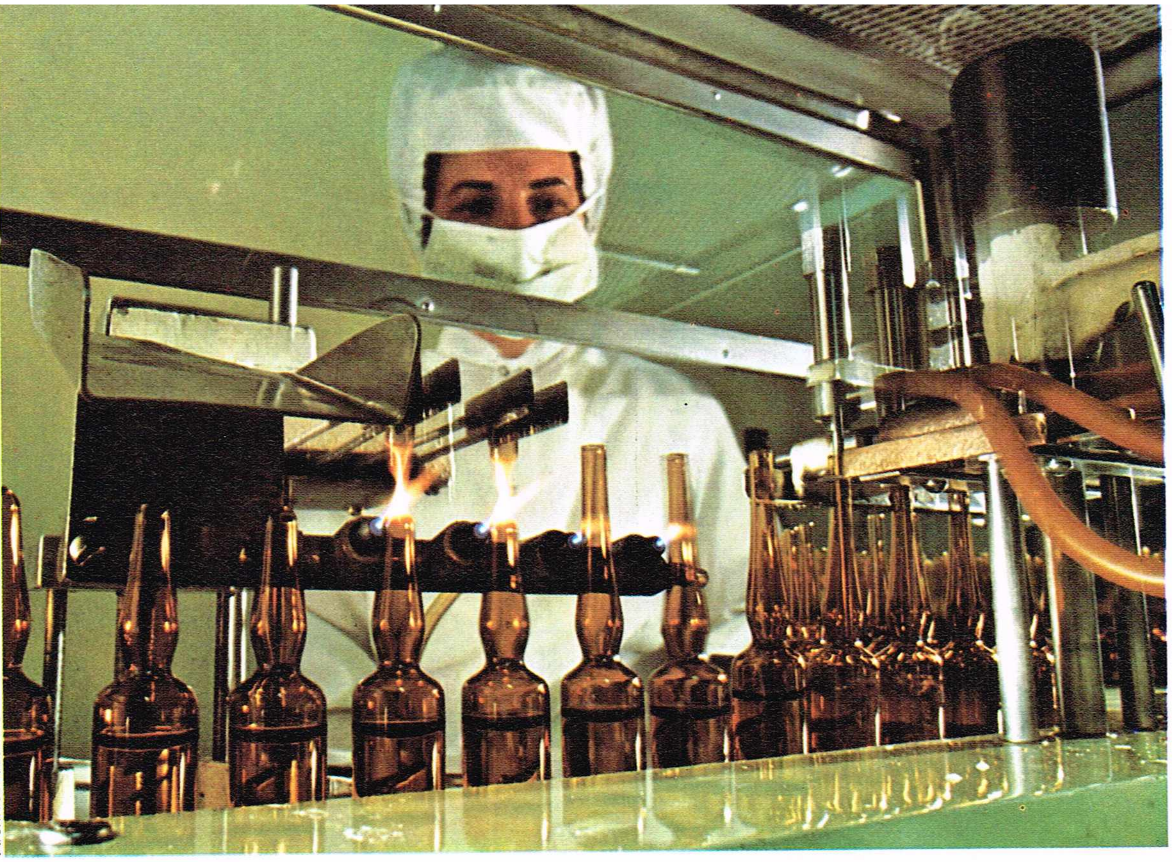

Archives I.G.D.A.

▲ *La chimie pharmaceutique s'est surtout développée au cours de ce siècle, puisque l'on estime que 95 % des produits actuellement utilisés ont été découverts au XXe siècle.*

Certes, les découvertes les plus utiles à l'homme ne sont pas toujours sans inconvénient pour son environnement, et par conséquent pour lui-même. C'est ainsi que les insecticides chlorés, qui ont permis d'enrayer la propagation de terribles maladies et de sauver des millions de vies humaines, sont actuellement accusés de nuire à la végétation et de transmettre par la nourriture humaine des composés chlorés toxiques pour l'organisme. Les chimistes du monde entier se penchent sur le problème du remplacement du D. D. T. par des substances naturelles ayant un effet négatif sur le développement ou la reproduction des Insectes. Le problème le plus difficile à résoudre est celui de la synthèse à bon marché de ces substances naturelles connues.

Il serait aisé de poursuivre longtemps l'énumération des multiples apparitions de la chimie dans la vie de tous les jours. Cela ne peut se faire que grâce à des chercheurs qui, bien souvent sans le souci de découvrir une application à leurs travaux, pénètrent sans cesse plus avant dans la connaissance de la matière. Le temps des découvertes fortuites est révolu, et l'image du chimiste devant un creuset et une cornue doit être remplacée par celle d'une équipe travaillant dans de vastes laboratoires, avec un matériel souvent très compliqué.

Le but de cette partie de l'Encyclopédie sera de préciser la structure intime de la matière, les lois qui président à sa transformation dans les réactions chimiques, de décrire les plus importantes familles de composés chimiques pour atteindre facilement la compréhension des applications modernes de la chimie. Chaque fois que cela sera possible, on illustrera par un exemple d'utilisation familière la donnée parfois rébarbative que constitue une formule ou un schéma réactionnel. On tentera, aussi souvent qu'on le pourra, d'établir des relations propriétés-structure, c'est-à-dire d'expliquer par l'architecture moléculaire d'un produit chimique l'essentiel des propriétés qui le destinent à tel ou tel usage.

Avant d'aborder la chimie telle qu'elle existe actuellement, il est intéressant d'examiner ce qu'elle a été avant, et par quelles démarches intellectuelles l'homme en a fait une science si riche de réalisations actuelles et de promesses.

C. Raimond-Dityvon

◀ *Dans le domaine des matériaux organiques synthétiques, les recherches sur les polymères ont conduit à diverses utilisations et notamment dans l'industrie des skis. Ici, l'usine des skis Rossignol à Voiron, dans l'Isère.*

Buscaglia

▲ *A gauche,* **l'Alchimiste***, estampe du XVIII*e *siècle de J.-P. Le Bas, d'après un tableau de David II Teniers. Durant plus d'un millénaire, l'œuvre des alchimistes, bien que truffée de conceptions magiques et métaphysiques, et stimulée par l'illusoire espoir de découvrir la pierre philosophale ou l'élixir de longue vie, a rassemblé un patrimoine inestimable d'observations et de découvertes, qui font de l'alchimie le précurseur de la science chimique. A droite, miniature persane du XVIII*e *siècle représentant un alchimiste au travail (Seattle Art Museum). Dans le monde islamique, l'alchimie, dont les Arabes eurent connaissance par la conquête de l'Égypte (VII*e *siècle), eut des conséquences pratiques importantes, surtout dans le domaine de la pharmacologie.*

HISTORIQUE

Sans faire remonter à la préhistoire les origines de la chimie moderne, on peut affirmer qu'en ces époques lointaines, l'homme avait déjà quelques connaissances s'apparentant à cette science. En effet, il connaissait certains éléments et plus particulièrement les métaux (cuivre, or, argent et fer), et certains alliages comme le bronze. Cela a eu une telle importance que la division de la préhistoire en âges est fondée sur la connaissance des métaux et des alliages. L'homme se servait de ces derniers pour fabriquer des outils et des objets d'ornement selon des techniques rudimentaires mais souvent très habiles. L'art de la teinture des tissus et de la préparation des couleurs pour la peinture de même que la connaissance de certains médicaments remontent à cette époque. Toutes ces découvertes anciennes ont pour caractéristique commune de ne pas être reliées entre elles par un principe unificateur, leur seul but étant l'utilisation de substances que l'on trouvait facilement dans la nature.

L'alchimie

Bien que l'on ne puisse considérer comme scientifiques les recherches des alchimistes, il faut admettre que leurs travaux ont contribué à la création de la chimie, qui puise ses racines dans cet ensemble disparate de notions et de recettes grâce auxquelles on a espéré pendant des siècles transformer les métaux les plus courants en or ou en argent.

*L'***alchimie***, dont le nom dérive de l'arabe Al-Kimiya (pierre philosophale), est apparue pour la première fois en Égypte où elle se répandit à partir du I*er *siècle. Cependant certains considèrent qu'elle est originaire de Chine (on connaît un traité qui remonte à l'an 140 avant J.-C.), où, comme du reste dans tout le Moyen-Orient, les connaissances relatives au travail des métaux, des porcelaines, des émaux, etc., étaient très évoluées.*

Sous la domination romaine, l'alchimie se propagea de l'Égypte à la Grèce et à l'Italie; elle connut ensuite une période de déclin au cours des siècles qui marquèrent la décadence de l'Empire romain. Les Arabes, après la conquête de l'Égypte (640 après J.-C.), assurèrent une large diffusion des techniques et de la recherche alchimique en Espagne et en Europe occidentale.

Les résultats que les alchimistes se proposaient d'obtenir étaient d'une nature telle qu'il est impossible de considérer l'alchimie comme une véritable science. En premier lieu, ils poursuivaient la recherche de la « pierre philosophale », corps que l'on supposait capable de transmuter en or ou en argent les métaux les plus vils tels que le plomb et le fer. Ils tentaient, en outre, de créer l'élixir de longue vie, capable de prévenir les infirmités de la vieillesse et même d'éviter la mort. Ces objectifs, si manifestement éloignés des possibilités humaines, étaient pourtant tellement exaltants qu'ils allaient nourrir pendant des siècles le désir de recherche.

C'est dans l'Europe occidentale du Moyen Age, à un moment où les métaux précieux étaient rares, que les recherches alchimiques connurent leur plein épanouissement. Quelques-uns parmi les plus grands représentants de la pensée médiévale (de Raymond Lulle à Roger Bacon, d'Albert le Grand à Arnaud de Villeneuve) s'intéressèrent aux spéculations alchimiques et contribuèrent à leur élaboration. Roger Bacon, qui fut sans doute parmi les hommes les plus savants de son temps, crut à la transmutation, cependant que les alchimistes, dans toutes les cours européennes, s'employaient à la réaliser au bénéfice des finances de leurs souverains respectifs. Un certain nombre de bâtiments à usage de laboratoires existant près du palais de l'empereur Rudolph II à Prague attestent l'intérêt que ce souverain porta à l'alchimie.

Parmi les adeptes de l'alchimie, il y avait des gens sincères et enthousiastes, comme Bernard Trévisan, mais il y eut aussi de nombreux charlatans qui transformèrent l'alchimie en fraude et en exercice de fourberie. Les écrits de ces derniers sont un ramassis de symboles obscurs

et de termes mystérieux, mais leurs démonstrations publiques furent souvent conduites avec une habileté si consommée que les plus méfiants s'y trompèrent : par exemple, ils plongeaient des morceaux de fer dans des sources ou des eaux contenant des sels de cuivre, et ils les ressortaient couverts d'une mince couche de cuivre métallique ; le mercure, qui contient souvent des impuretés d'argent et d'or, était très utilisé dans leurs expériences. Toutefois, les moins habiles ou les plus ingénus parmi les alchimistes payèrent souvent de leur vie la faillite de leurs expériences et la déception des espoirs de leurs protecteurs : les pendaisons et les bûchers furent fréquents, surtout en Allemagne, pays très sensible à l'accusation de sorcellerie.

Mais l'ambition des résultats qu'elle se proposait était si grande que l'alchimie connut un déclin très lent : bien que, dès 1404, le Parlement anglais eût interdit la fabrication de l'or par alchimie, certains monarques anglais tolérèrent les expériences menées dans ce domaine ; celles-ci étaient encore tellement nombreuses au XVII^{e} siècle qu'un savant tel que Robert Boyle dut demander au Parlement un nouvel acte contre la production de l'or. Newton lui-même avait un petit laboratoire au Trinity College, où il effectuait des expériences de transmutation (comme nous le verrons plus loin, ces expériences sont fondées pour un physicien, mais elles sortent complètement du domaine de la chimie). Au début du XX^{e} siècle encore, aux États-Unis, un certain docteur Emmens proclamait qu'il avait découvert l'« argentaurum », sorte de pierre philosophale moderne.

A propos des résultats concrets obtenus par les alchimistes, c'est-à-dire des découvertes qui ont contribué aux progrès de la chimie, rappelons la comparaison allégorique que Francis Bacon faisait entre chimie et alchimie : il évoquait la fable du paysan qui avait caché de l'or en un lieu non précisé de sa vigne: ses enfants se mirent à labourer activement le terrain tant et si bien que, s'ils ne trouvèrent pas l'or, ils obtinrent d'abondantes vendanges. En effet, les alchimistes éclairèrent la connaissance de plusieurs éléments et de leurs composés; ils obtinrent les principaux acides minéraux (nitrique, sulfurique et chlorhydrique) ; ils découvrirent les propriétés solvantes et oxydantes de l'eau régale ; ils obtinrent certains éléments, comme l'antimoine, l'arsenic, le bismuth et le phosphore, auparavant inconnus, et de nombreux composés chimiques importants, comme l'alun, le borax, l'éther, la crème de tartre, le minium et d'autres sels de plomb, de fer, d'argent, le sulfure de baryum, dont ils découvrirent aussi la phosphorescence. Ils introduisirent l'usage pratique de nombreux appareils de laboratoire, comme les creusets, les cornues pour la distillation, le bain-marie et même certaines balances rudimentaires. Enfin, ils découvrirent certains procédés chimiques tels que la préparation des alcalis à partir des cendres des végétaux et l'extraction de l'or par amalgamation.

Les expériences de transmutation n'aboutirent jamais à aucun résultat. Ce n'est qu'au cours de ce siècle, avec la découverte des réactions nucléaires, qui font partie du domaine de la physique et non de la chimie, que l'on a enfin réalisé quelque chose de très semblable à la transmutation.

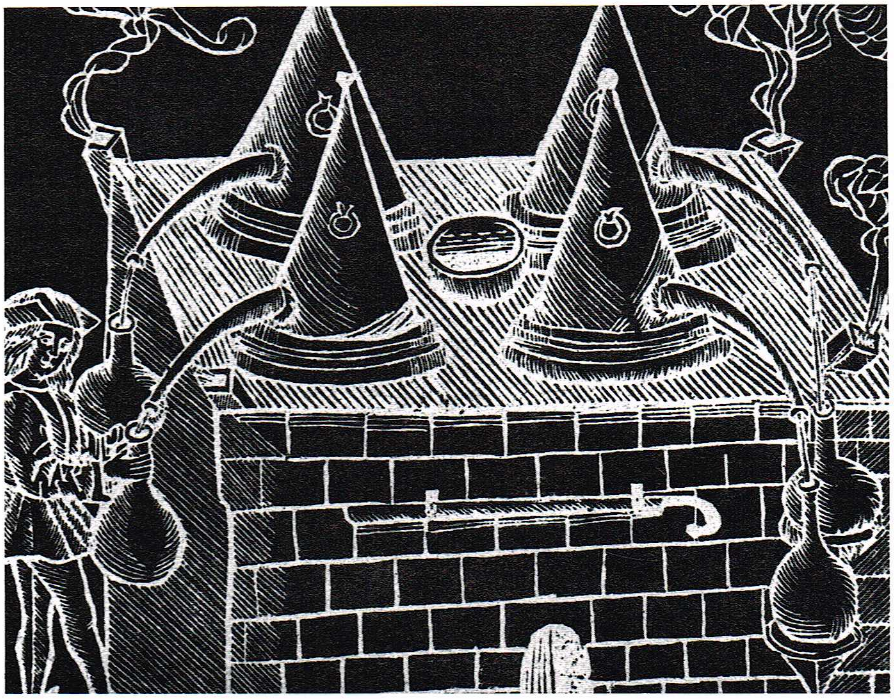

Buscaglia

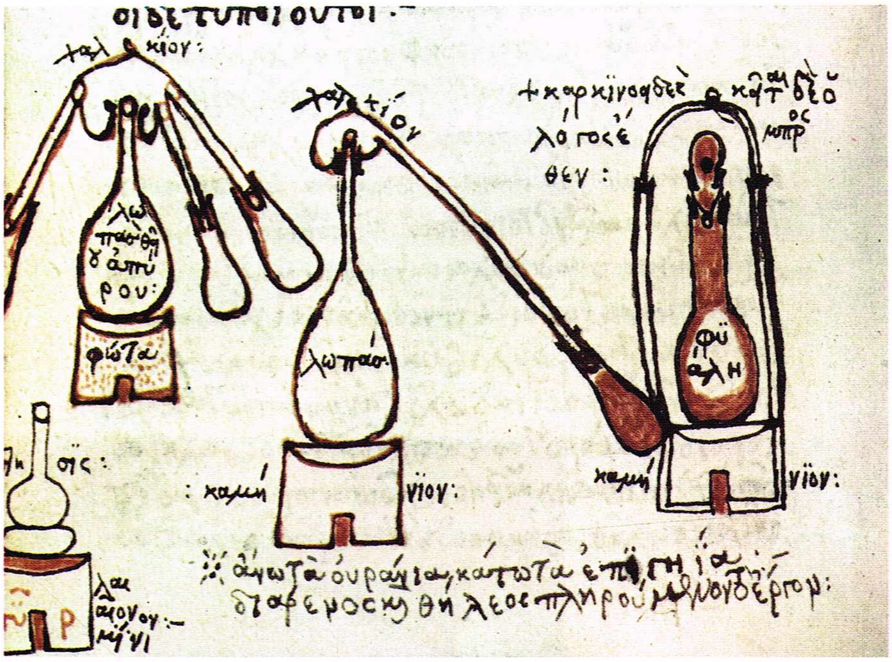

Ciccione

▲ **En haut, gravure du XV^{e} siècle représentant plusieurs distillateurs chauffés par un four unique.**
Ci-dessus, dessins de cornues et d'alambics illustrant un manuscrit grec (Paris, Bibliothèque nationale). C'est en Égypte, dans le cadre de la culture alexandrine du I^{er} siècle, que prit naissance l'alchimie.

La iatrochimie et la théorie du phlogistique

On peut faire remonter les origines de la chimie proprement dite au XVI^{e} siècle. Les circonstances qui conduisirent certains savants à s'intéresser à la chimie sont en tout point semblables à celles qui présidèrent à la naissance de l'alchimie. En effet, de même que, pour l'alchimie, le fait déterminant avait été la rencontre entre les techniques de travail de quelques matières et certains courants philosophiques, de même le fait essentiel qui favorisa la naissance de la chimie fut l'intérêt que portèrent certains humanistes à l'étude des techniques artisanales. Parmi les nombreux ouvrages consacrés aux techniques de la distillation et aux pratiques métallurgiques, une importance particulière peut être accordée (pour la distillation) aux ouvrages

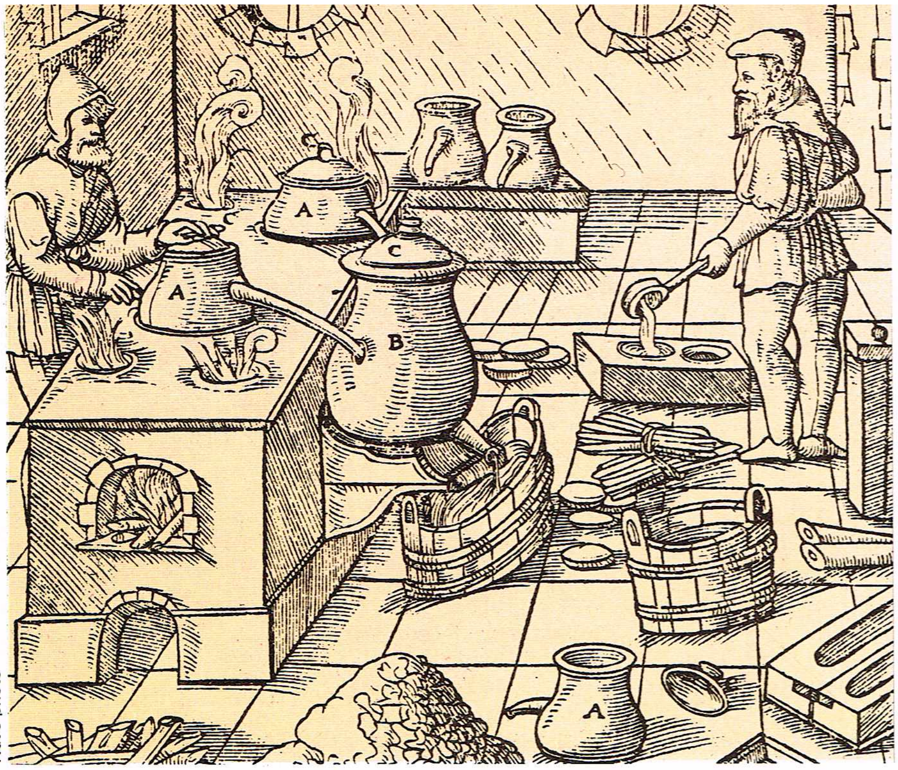

Nat's photo

▲ *Cette planche tirée du* De re metallica *de* Georges Agricola *(1556), représente la fusion et l'élimination des scories d'un minerai. Agricola appartient à ce groupe d'humanistes qui se consacra à l'étude des techniques artisanales et contribua ainsi au développement des sciences chimiques.*

de Hieronimus Brunschwygk, qui remontent au début du XVI^e siècle, et au De re metallica *d'Agricola, publié en 1556 : ces ouvrages décrivent non seulement les techniques d'extraction, mais aussi les procédés métallurgiques. A la même époque, Paracelse (1493-1541) faisait faire des progrès considérables aux théories sur la transmutation et la nature des métaux, et créait la* **iatrochimie**, *ancêtre de la chimie pharmaceutique.*

Au XVII^e siècle, la chimie marque ses débuts de science autonome par une série d'importantes découvertes, dont l'identification de certains éléments et de leurs composés, et par la fabrication d'appareils plus efficaces. Cependant, sur le plan théorique, la confusion augmentait avec la multiplication des découvertes; en effet, le chemin à parcourir était hérissé de préjugés et encombré par le lourd héritage de l'alchimie. Manquaient, en outre, les bases de départ nécessaires à la construction d'un raisonnement rigoureusement scientifique, car la plupart des progrès accomplis au cours des siècles passés, notamment dans l'étude des phénomènes relatifs à la matière, ressortissaient au domaine de la physique.

La chimie, quant à elle, avait hérité de l'Antiquité la distinction entre corps *et* substance, *entre objet matériel doué de masse, de forme et de dimensions, et la matière qui constitue ces mêmes corps : par exemple, un bâton en bois est un corps, le bois dont il est constitué est une substance. Les alchimistes s'étaient occupés des substances, c'est-à-dire de la matière, mais sans faire une nette distinction entre les éléments et les composés; en outre, au Moyen Age et même par la suite, on croyait couramment que les substances naturelles se ramenaient à un très petit nombre de types simples, participant de la nature du feu, de l'air, de la terre et de l'eau. Cette vision correspond en fait à l'identification des états d'agrégation de la matière (états gazeux, liquide et solide), mais à une identification assez confuse, puisqu'on considérait comme « matière » le résultat le plus apparent des réactions de combustion, c'est-à-dire le feu.*

Les difficultés dans lesquelles se débattaient les expérimentateurs des XVI^e et XVII^e siècles sont imputables à l'écroulement survenu à cette époque de la conception aristotélicienne, qui avait jusqu'alors lourdement influencé toute la pensée scientifique; la plupart des savants considéraient même comme suspectes toutes les autres théories des philosophes grecs, y compris l'atomisme de Démocrite et d'Épicure. Mais puisque la révolte contre la trop longue domination des théories aristotéliciennes n'avait pas débouché sur la création d'une nouvelle pensée théorique de validité générale, les mêmes savants qui avaient pris la tête de la rébellion contre l'aristotélisme se rabattirent sur l'atomisme, du moins comme hypothèse de travail. Robert Boyle (1627-1691), par exemple, tenta

Ciccione

Archives I.G.D.A. - Freeman

▶ *A gauche,* Paracelse, *l'un des plus célèbres* alchimistes, *fut le fondateur de la* iatrochimie, *ancêtre de la chimie pharmaceutique. A droite,* Robert Boyle, *dont le nom est lié à la formation d'une des premières lois sur les gaz parfaits. Ce grand savant combattit âprement l'alchimie, dont la pratique était encore très répandue au XVII^e siècle (portrait exécuté par* F. Kerseboom*; Londres,* National Portrait Gallery*).*

d'expliquer les propriétés et les réactions des gaz en termes de mouvements mécaniques de corpuscules. Une école de pharmaciens français soutint qu'il était possible de parvenir au « principe » de la matière par la distillation destructive de substances organiques et crut avoir isolé par ce procédé les éléments fondamentaux.

Pendant ce temps, Georg Ernst Stahl (1660-1734) énonçait la **théorie du phlogistique,** *ou* **phlogistique,** *qui semblait fournir une explication à presque tous les phénomènes chimiques connus, qu'elle tentait pour la première fois d'insérer dans un tableau d'ensemble théorique. Stahl croyait que le* phlogistique, *principe du feu, reliquat de la pensée des alchimistes, se séparait du corps qui brûlait; d'après cette théorie, lorsqu'un métal se transformait, en brûlant, dans la chaux (oxyde) correspondante, il perdait le phlogistique; lorsque l'oxyde était réduit en métal, il regagnait le phlogistique; cependant, la nature de ce dernier était assez incertaine. Cette manière de comprendre les réactions d'oxydation est contraire aux connaissances actuelles, dans ce sens qu'elle considère les oxydes comme des substances plus simples que les métaux, tandis qu'en réalité, une oxydation est la fixation d'oxygène, et une réduction la perte d'oxygène. Malgré cela, la théorie du phlogistique eut le grand mérite de mettre pour la première fois en évidence que les réactions chimiques se produisent selon des schémas bien définis; de plus, elle suscita un important travail de recherche.*

La chimie pneumatique et l'œuvre de Lavoisier

La théorie du phlogistique résista tant que l'étude de la nature des gaz ne fut pas poussée à fond. Au XVIII[e] *siècle, la* **chimie pneumatique,** *étude de la matière à l'état gazeux, prit de l'importance; bientôt on arriva à la conclusion que l'air n'était pas étranger à de nombreux processus chimiques, dont les combustions et les oxydations, et qu'il était composé de plusieurs gaz. Certains gaz furent alors isolés, dont on détermina les propriétés; la découverte par Joseph Black (1728-1799) de la réaction entre l'anhydride carbonique et la chaux ou la magnésie révolutionna la pensée chimique, par la démonstration qu'un gaz pouvait être « fixé » dans un composé solide. Cette phase de la recherche chimique culmina lors de la découverte de l'oxygène, à laquelle parvinrent indépendamment J. Priestley et C. W. Scheele vers 1770. D'autres éléments furent reconnus en tant que tels, ce qui vint enrichir le tableau des substances fondamentales de la chimie.*

Cependant, la théorie du phlogistique ne pouvait encore être répudiée sans des essais expérimentaux appropriés, essais qui furent conduits avec une rigueur digne des temps nouveaux; l'une des principales objections à la théorie était le fait que la « chaux », considérée comme plus simple que le métal dont elle dérivait, avait en revanche un poids supérieur. Ce fut **Antoine Laurent de Lavoisier** *(1743-1794) qui eut le mérite de découvrir et de démontrer que la combustion ne se produisait pas par perte de phlogistique, mais résultait de la combinaison de l'oxygène de l'air avec le corps combustible. Sa théorie, proposée entre 1770 et 1790, était le premier pas de la chimie moderne. Lavoisier est considéré comme l'un des pères de la chimie par la rigueur et l'importance de son œuvre; c'est lui qui énonça, notamment, le principe de la conservation de la masse dans les réactions chimiques. A cette époque de profonds bouleversements sociaux et économiques, les savants ne furent pas épargnés; Lavoisier fut guillotiné sous la Terreur le 8 mai 1794; mais la fameuse phrase attribuée au tribunal révolutionnaire (« La République n'a pas besoin de savants, il faut que la justice suive son cours ») n'aurait pas été prononcée. Quelques années après, un autre chimiste français, N. Leblanc, après avoir mis au point et adapté à la production industrielle un procédé de fabrication de la soude, se suicidait à l'Hôtel-Dieu, à Paris.*

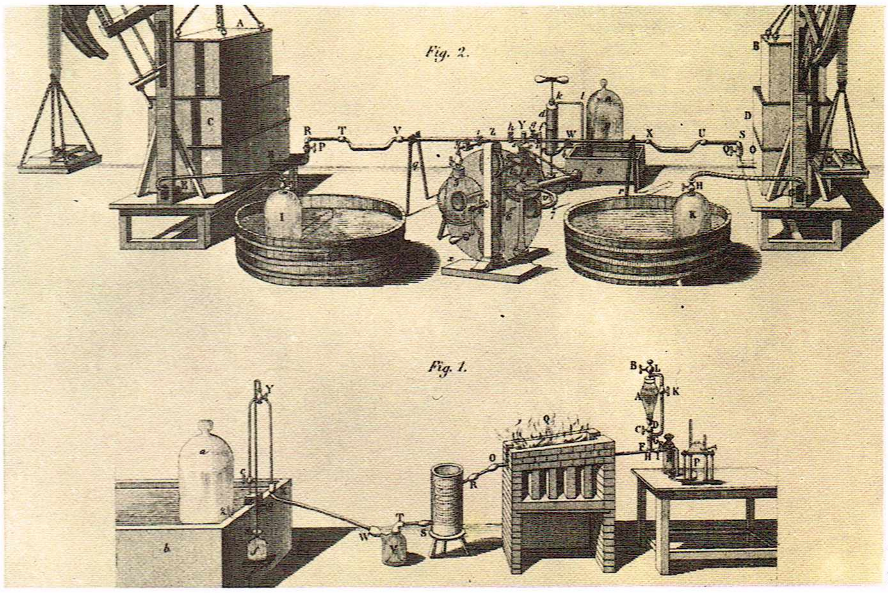

Ciccione

▲ ***Appareils utilisés par* Lavoisier *pour ses expériences relatives à la décomposition et à la recomposition de l'eau (planche tirée de l'ouvrage de Lavoisier* Sur la décomposition et la recomposition de l'eau, *« Œuvres », Paris).***

La chimie au XIX[e] siècle

Le début du XIX[e] *siècle fut une période extrêmement féconde pour la chimie; les méthodes analytiques qui s'étaient développées au cours du siècle précédent et qui avaient permis de déterminer la composition de nombreuses substances trouvaient un appui très solide dans le principe de la conservation de la masse. Mais, surtout, un problème ancien prenait une nouvelle importance : dans quelles proportions et comment les éléments sont-ils associés dans les composés?*

Au début du XIX[e] *siècle, après une très longue controverse, on finit par admettre que les éléments se combinent dans des proportions définies. Mais il fallait expliquer théoriquement les raisons de ce phénomène. En 1808, John Dalton proposa, une fois de plus, une théorie atomique, fondée cette fois sur des principes de nature à la rendre acceptable pour la plupart des chimistes. Selon Dalton, chaque élément était caractérisé par des* **atomes** *ayant une masse et des dimensions variant d'un élément à l'autre. Les progrès de l'analyse et l'étude des réactions de combinaison entre les gaz devaient bientôt permettre de prouver l'hypothèse des combinaisons chimiques en proportions constantes et multiples. Il manquait, toutefois, une notion fondamentale, celle de la distinction entre* atomes

▶ *Installations pour la fabrication de sirops et et de sucres de fécule. Le vertigineux développement qui a placé l'industrie chimique au centre de l'industrie moderne n'a commencé qu'à la moitié du XIXᵉ siècle.*

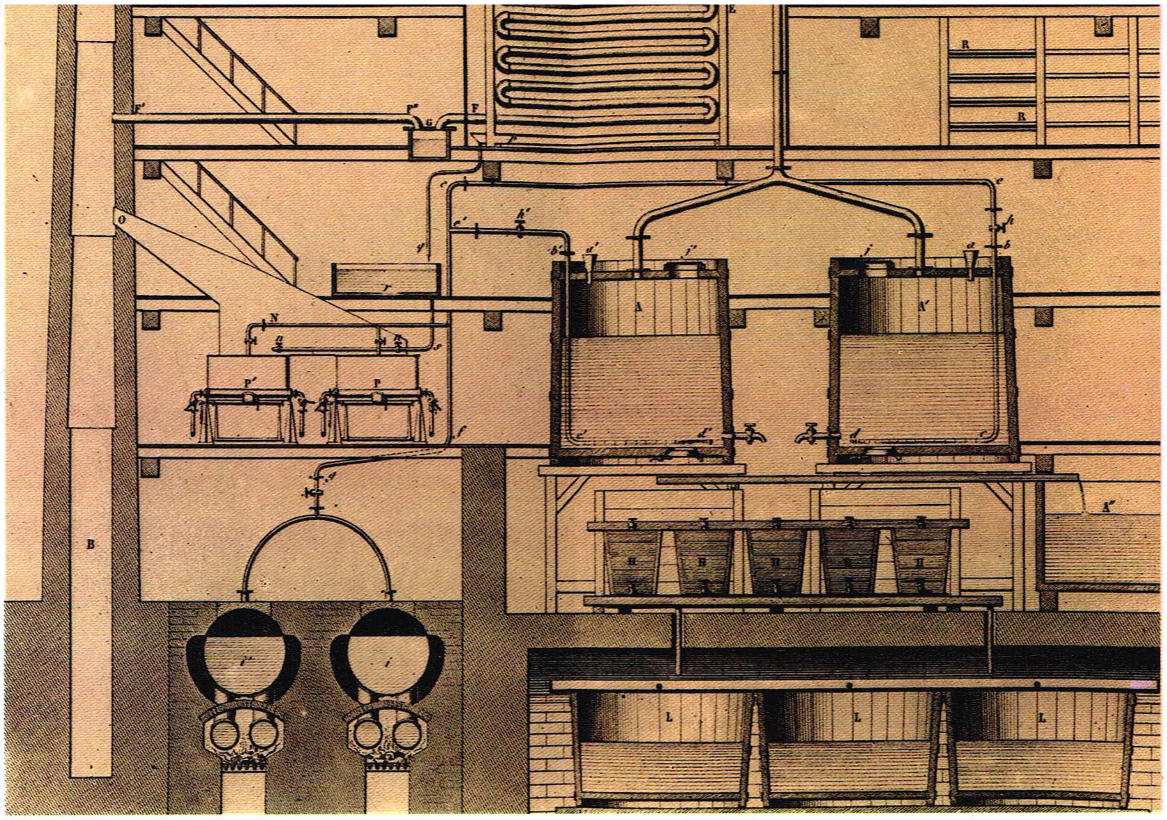

Ciccione

et molécules, *et cela gêna considérablement les progrès des théories chimiques de l'époque.*

*Dès 1811, Avogadro avait pressenti l'existence des molécules, mais ses tentatives pour imposer son idée n'avaient eu qu'un maigre succès. Bien des années après, à la suite des études d'un autre Italien, Cannizzaro, l'***hypothèse d'Avogadro** *devint une des bases fondamentales de la chimie.*

Parallèlement à ces études, des investigations actives étaient poursuivies dans d'autres branches de la chimie ; la découverte de la pile par Volta, suivie bientôt par l'application de l'électrolyse comme méthode de recherche chimique, rendit possible la purification des métaux alcalins grâce aux travaux de Davy, mais, surtout, la découverte de la pile imposa l'idée que les forces qui unissaient les éléments dans un composé (que l'électricité pouvait dissocier) étaient de nature électrostatique.

C'est au Suédois Berzelius que l'on doit une première théorie **(théorie dualistique)** *sur les liaisons chimiques : selon cette théorie, tous les éléments contiennent des particules chargées positivement et négativement, avec prédominance des unes ou des autres, ces particules de charges opposées étant maintenues ensemble par des forces d'attraction. Cette conception connut un succès considérable en chimie minérale (à cette époque, en effet, la plupart des composés connus et étudiés étaient de nature ionique, possédant effectivement des liaisons fondées sur l'attraction entre particules — mais il s'agissait d'ions et non d'atomes de charges opposées) ; cependant, elle se révéla inapte à expliquer les liaisons existant dans les composés organiques, que l'on commençait alors à étudier. En effet, dans les composés organiques, prédominent des liaisons de nature non ionique.*

Lorsque l'on constata que, dans les composés organiques, le chlore, fortement négatif d'après Berzelius, pouvait remplacer l'hydrogène, considéré comme positif, la théorie dualistique commença à être abandonnée ; ce furent justement les chimistes organiciens qui s'intéressèrent le plus aux liaisons chimiques. En particulier, la notion de **valence** *établie, ceux-ci s'aperçurent qu'il était possible d'expliquer en termes de valence un grand nombre des faits observés ; en outre, Van't Hoff établit que le carbone forme des liaisons avec les autres éléments selon certaines directions, précisément celles qui vont du centre aux sommets d'un tétraèdre. Ses travaux, en même temps que ceux de Kekule (à qui l'on doit aussi l'explication de la structure du benzène, qui avait constitué l'une des plus grosses énigmes pour les chimistes organiciens), sont à la base de la* **stéréochimie organique** *moderne ; Boutlerov en poursuivit l'élaboration et les perfectionna.*

Pendant ce temps, les chimistes minéralistes se consacraient à la recherche d'une classification des éléments susceptible d'expliquer les ressemblances de comportement constatées pour certains d'entre eux et la variation progressive de propriétés, observée dans des groupes d'éléments successifs. Après quelques tentatives, en 1869, le Russe Mendeleïev et l'Allemand Meyer présentèrent indépendamment deux versions de la table périodique des éléments : c'est en se fondant sur cette table que Mendeleïev put prédire l'existence de certains éléments non encore découverts et en indiquer les propriétés avec une très bonne approximation. Le **système périodique des éléments** *s'affirma peu à peu comme l'un des fondements de la chimie minérale, sur lequel repose encore la chimie moderne.*

Dans la seconde moitié du XIXᵉ siècle, on assista à l'essor des études de physico-chimie *(tournées essentiellement vers les colloïdes et la photochimie), qui s'étaient jusqu'alors développées plus lentement ; les résultats les plus récents de la physique, notamment dans le domaine de la thermodynamique, furent rapidement appliqués à la chimie, surtout grâce à Ostwald, Arrhenius et Van't Hoff. La* **chimie physique** *prit à ce moment l'importance qui lui est à juste titre reconnue aujourd'hui. Elle permit les premières explications correctes de nombreux phénomènes, parmi lesquels l'électrolyse et les équilibres chimiques de nombreuses réactions.*

Ainsi, au début du XXᵉ siècle, les chimistes croyaient être parvenus à une vision désormais satisfaisante de la nature et du comportement des éléments et des composés chimiques.

L'industrie chimique

*Le XIX^e siècle est important non seulement en raison du développement de la chimie en tant que science, mais aussi à cause de la naissance de l'***industrie chimique.** *Antérieurement déjà, certaines technologies avaient eu recours à des procédés chimiques, et il existait même des usines chimiques, comme celles qui produisaient le savon et le verre. En 1650, Glauber avait fondé à Amsterdam une usine essentiellement chimique et avait fixé dans ses écrits quelques-uns des principes de base destinés à permettre à l'industrie chimique de s'insérer utilement dans l'économie nationale. Au XVIII^e siècle, l'Angleterre avait vu naître les premières fabriques d'acide sulfurique, mais ce fut essentiellement au moment de la Révolution française et à l'époque napoléonienne que l'industrie chimique connut un grand essor, grâce notamment au blocus maritime anglais, qui obligea à fabriquer les produits de première nécessité à partir de matières premières et selon des technologies nouvelles. Le sucre, par exemple, qui était extrait de la canne à sucre d'origine coloniale, fut, pour la première fois, préparé à partir de la betterave, selon un procédé qui est toujours en usage. La soude, obtenue à partir de cendres végétales, devint insuffisante pour les besoins et fut alors produite selon un procédé chimique dû à Leblanc, procédé remplacé, une quarantaine d'années plus tard, par la méthode Solvay, moins coûteuse.*

La fin des guerres napoléoniennes ne marqua pas l'arrêt du développement des industries chimiques dans les pays européens les plus évolués du XIX^e siècle : Angleterre, France et Allemagne. Au contraire, on passa rapidement à l'exploitation industrielle des plus récentes découvertes de la chimie organique. En 1856, Perkins découvrait le premier colorant synthétique dérivé de l'aniline : des fabriques de colorants allaient bientôt surgir tant en Angleterre qu'en France, mais elles ne furent guère encouragées par la politique économique du moment, ce qui permit à l'Allemagne, vers la fin du siècle, de conquérir une primauté incontestée, non seulement dans ce secteur, mais aussi dans l'ensemble de l'industrie et de la recherche chimiques.

La Première Guerre mondiale favorisa énormément la recherche et le développement industriels. L'Allemagne fut obligée de fabriquer une bonne partie des matières premières nécessaires à son effort de guerre; en particulier, elle dut produire de grandes quantités d'acide nitrique et de nitrates pour les explosifs; les autres nations, privées de tous les produits qui étaient auparavant fabriqués exclusivement par l'industrie allemande, se virent contraintes de créer leurs propres installations de production. Ainsi, l'industrie chimique devint une branche irremplaçable de l'économie nationale.

▼ Le laboratoire de Justus von Liebig, à Giessen, sur une gravure de 1840. Ce savant allemand contribua considérablement au développement de la chimie organique.

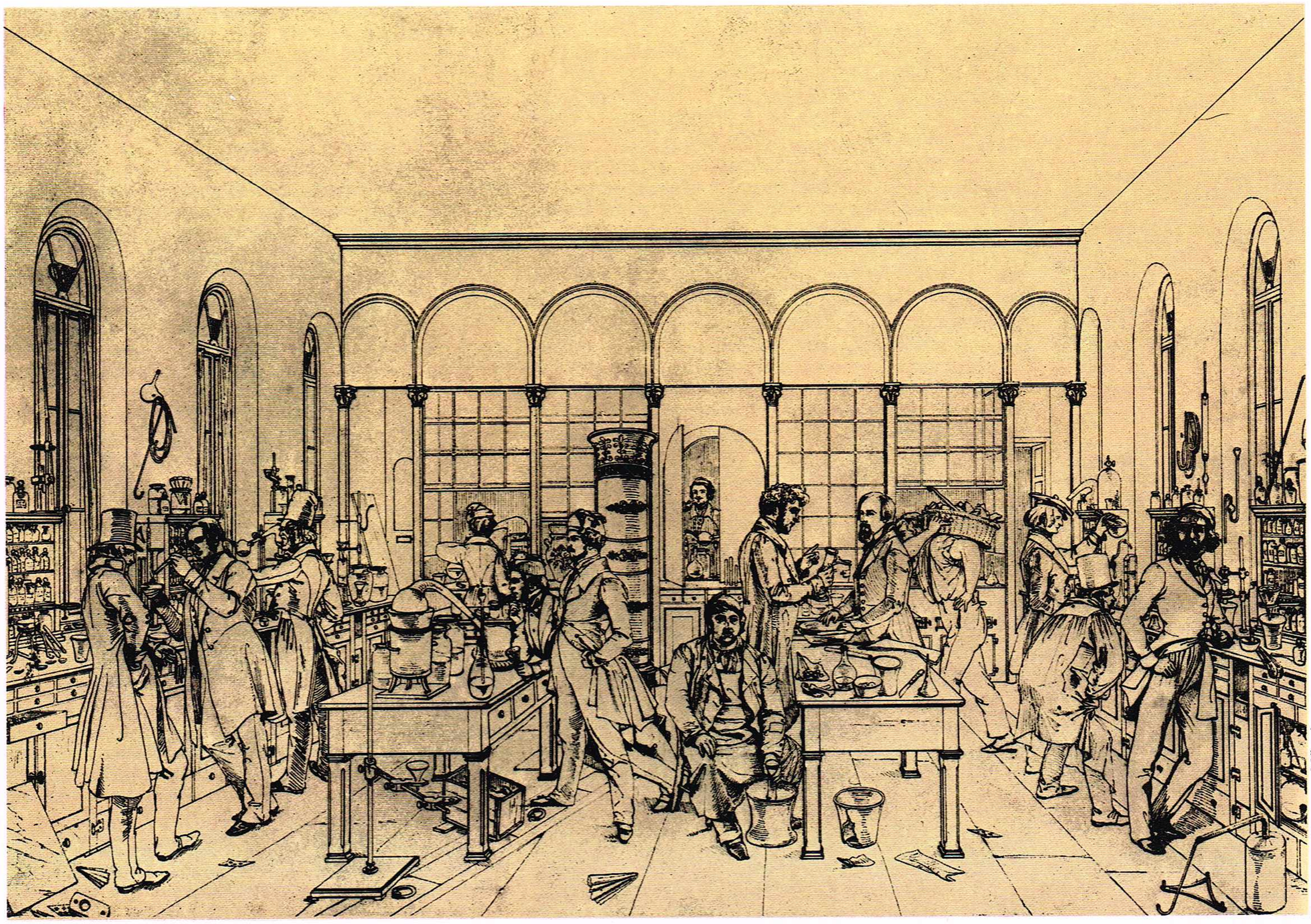

Deutsches Museum München

De Cesare

▶ **Henri Becquerel**, *qui, au cours de ses travaux, découvrit presque accidentellement, le phénomène de la radio-activité des minerais d'uranium.*

La théorie atomique moderne

Au début du XX^e siècle, la découverte de la **radio-activité** *par Becquerel et les Curie balaya l'illusion des chimistes, qui croyaient avoir atteint une connaissance suffisante de la matière; cette découverte fut d'une extrême importance, non seulement parce qu'elle permit une meilleure compréhension des phénomènes nucléaires (qui intéressaient davantage les physiciens que les chimistes), mais surtout parce qu'elle marqua le début d'une révision révolutionnaire des théories sur la structure des atomes, sur leurs liaisons et leurs modes de réaction. Grâce surtout aux études du physicien Moseley, mort à la guerre, en 1915, à l'âge de 27 ans, Niels Bohr fut en mesure de proposer un premier modèle de la structure électronique des atomes, jetant ainsi les bases de la* **théorie atomique moderne.** *Ce travail, poursuivi en commun par des mathématiciens, des physiciens et des chimistes, permit de construire les théories modernes relatives aux liaisons chimiques dans les composés organiques ou inorganiques; son intérêt demeure grand, puisque, aujourd'hui, ce secteur de la chimie est peu exploré, à cause des difficultés que l'on rencontre pour réaliser les instruments susceptibles de permettre les mesures spéciales indispensables.*

Les études sur la radio-activité furent poursuivies par de nombreux et brillants savants, qui parvinrent même à synthétiser des éléments n'existant pas dans la nature. En outre, les matériaux radio-actifs se révèlent des sources importantes d'énergie, et nombreuses sont les centrales thermonucléaires destinées à la production d'énergie électrique actuellement en construction. Malheureusement, la radio-activité est devenue aussi un moyen d'extermination, comme l'a tragiquement démontré la Seconde Guerre mondiale; elle pèse lourdement dans les rapports internationaux et constitue même une menace pour la survie de la civilisation.

Au cours de ce siècle, un autre vaste domaine d'étude s'ouvrait à la chimie : la **biochimie,** *ou* **chimie biologique.** *On peut faire remonter ses origines aux expériences de Lavoisier sur la respiration de l'homme et à la fabrication synthétique d'un premier produit organique naturel, l'urée, effectuée en 1828 par Wöhler; en 1860, en réalisant la synthèse de nombreux produits organiques, Berthelot démontrait que ces derniers sont soumis aux mêmes lois que celles qui régissent tous les autres composés chimiques; puis on découvrit que les relations énergétiques à l'intérieur des organismes obéissent aux mêmes lois que celles du monde inorganique. A la fin du siècle, on parvint aussi à identifier de nombreuses enzymes, mais, jusque-là, il n'existait pas de domaine biochimique spécifique, situé sur le même plan que les autres branches de la chimie.*

La situation devait changer rapidement, et de nombreux laboratoires de biochimie étaient créés dans différents pays; des années de travail intense, moins spectaculaire mais non moins essentiel que, par exemple, celui des études sur la radio-activité, aboutirent à la détermination de la structure des vitamines et des hormones et, partiellement, à la compréhension de leurs fonctions. On étudia ensuite, avec des méthodes plus fines, les protéines, les hydrates de carbone, les lipides et d'autres substances fondamentales pour les organismes. La biochimie progressa ensuite beaucoup plus rapidement : il ne s'est pas écoulé beaucoup d'années depuis la découverte et l'utilisation de la pénicilline, et déjà des études fondamentales ont été accomplies sur la nature de certains virus. Aujourd'hui, la biochimie se propose la tâche ambitieuse de comprendre le mécanisme de l'hérédité et, en dernière analyse, de la vie elle-même.

Bien qu'il soit fort éloigné de l'esprit scientifique de se bercer de l'illusion d'avoir atteint à une connaissance complète dans un domaine de recherche donné, on doit néanmoins constater que les découvertes fondamentales en biochimie se succèdent à un rythme tellement accéléré qu'il est souvent très difficile de suivre de manière complète la grande masse de travaux scientifiques publiés chaque année dans une seule discipline. Ce fait témoigne aussi de ce que, en une décennie à peine, les connaissances relatives à un sujet donné, laborieusement apprises et souvent considérées comme des vérités immuables, deviennent rapidement caduques.

Les difficultés inhérentes à l'information ne sont pas le moindre des problèmes de la science moderne. Il s'ensuit une spécialisation de plus en plus poussée des chercheurs, ainsi que la tendance à subdiviser la chimie, comme beaucoup d'autres disciplines, en de nombreux domaines de recherche, subdivisés à leur tour en plusieurs branches spécialisées.

▼ *Gravure montrant Lavoisier, dans son propre laboratoire, alors qu'il effectuait des expériences sur la respiration de l'homme.*

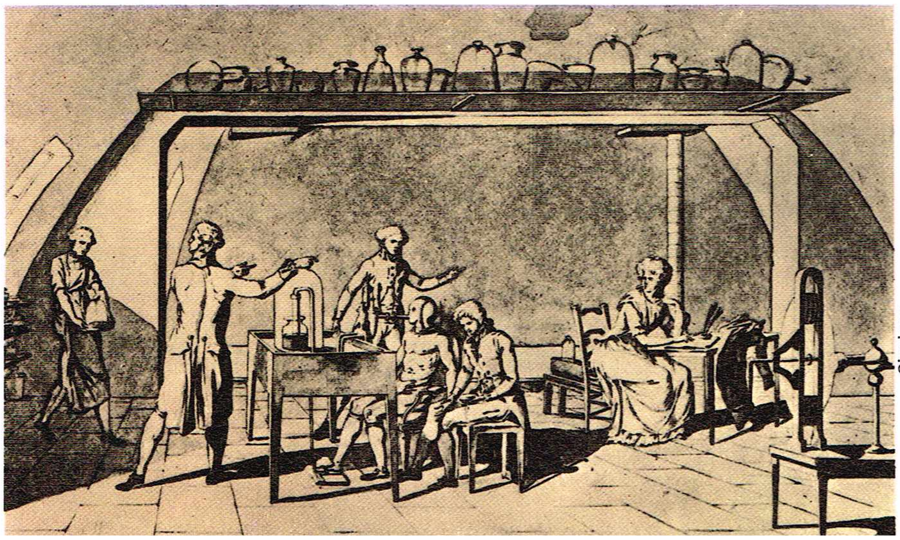

Ciccione

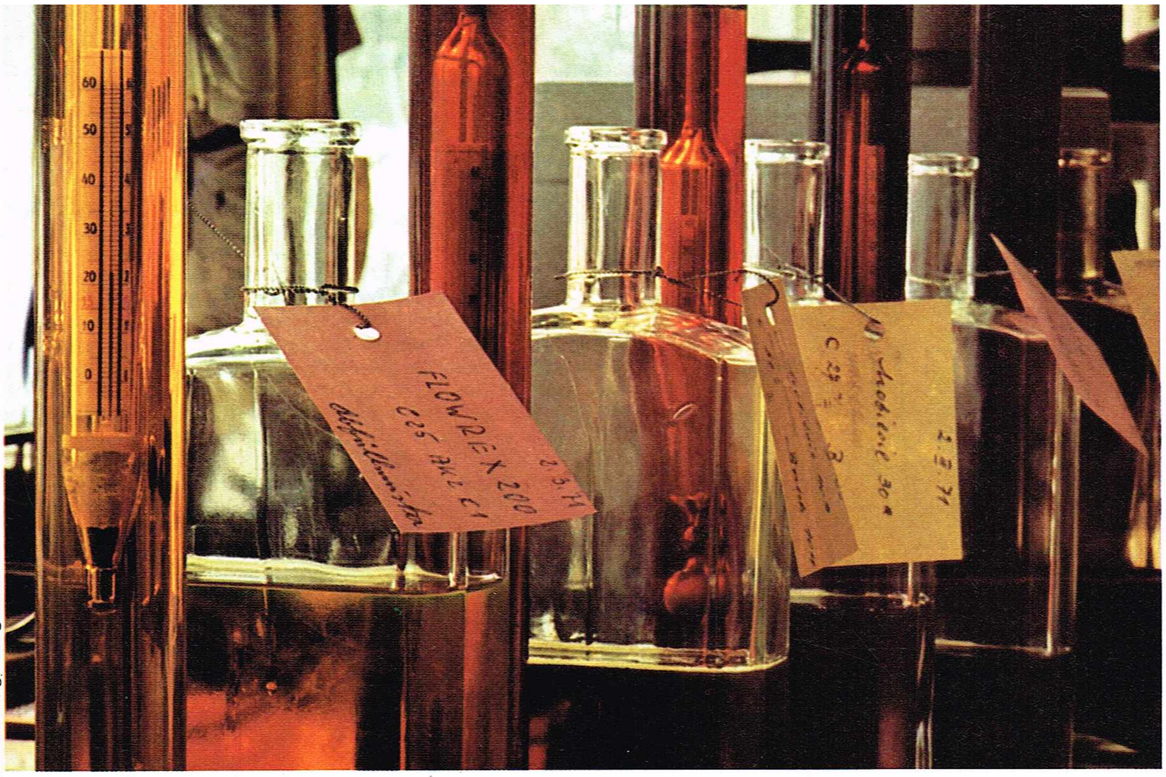

Eric Lessing - Magnum

◀ *La* **pétrochimie** *est la chimie des dérivés du pétrole; elle ne constitue qu'une partie de la chimie organique et se caractérise essentiellement par les tonnages élevés qu'elle produit. Ici, une photographie prise dans les laboratoires de recherche de la Mobil Oil.*

LES DIFFÉRENTES SUBDIVISIONS DE LA CHIMIE

Il est d'usage de distinguer dans la chimie deux grandes branches :

— la *chimie organique,* ou *chimie du carbone,* qui traite des composés qui, à l'origine, étaient extraits des êtres vivants mais qui, en fait, concerne un ensemble de substances ayant en commun un certain nombre de caractéristiques;

— la *chimie minérale,* encore appelée *chimie inorganique,* relative à tous les produits non organiques.

La frontière entre ces deux grandes branches de la chimie est parfois confuse. Le développement depuis quelques années de la chimie des composés organométalliques et de certains complexes de coordination associant dans une même molécule une partie organique et une partie métallique, donc minérale, a fait naître une nouvelle chimie que l'on pourrait appeler *chimie métallo-organique* puisque l'on parle déjà volontiers de chimistes métallo-organiciens. Cependant les caractères généraux de la chimie organique sont dans l'ensemble suffisamment différents de ceux de la chimie minérale pour justifier la distinction de ces deux branches, sinon pour les opposer totalement l'une à l'autre. C'est ainsi que, généralement, les composés organiques sont combustibles, et cette propriété est la base de leur identification grossière. Par contre, en règle générale, les composés minéraux ne brûlent pas. Ces composés minéraux ont souvent un caractère ionique qui explique leur solubilité dans l'eau; en revanche, les composés organiques sont rarement ionisables. Fréquemment, les composés minéraux sont infusibles ou difficilement fusibles, alors que les corps organiques ont très souvent des points de fusion assez bas. Mais une généralisation des caractères distinctifs des composés organiques et minéraux est impossible et se heurte à chaque tentative à de multiples exceptions qui font ressortir le caractère arbitraire de cette subdivision de la chimie.

On peut aussi distinguer les activités des chimistes en se fondant sur l'origine des produits qu'ils étudient. On peut citer dans cet ordre d'idée la pétrochimie, la carbochimie, la phytochimie, etc.

— La **pétrochimie** est la chimie des dérivés du pétrole. On devrait dire pétroléochimie pour éviter une confusion avec la chimie de la pierre (*petros* en grec). Le terme de pétrochimie a cependant été officiellement admis. Il ne faut pas confondre la pétrochimie, par laquelle les hydrocarbures dérivant du pétrole brut sont transformés en produits de consommation tels que les matières plastiques, les caoutchoucs synthétiques, les détergents, etc., et le raffinage, qui consiste à modifier la répartition et la structure des molécules présentes dans le brut pour en faire des essences, du fuel, du kérosène, des huiles lubrifiantes, etc. La pétrochimie ne constitue qu'une partie de la chimie organique et se caractérise essentiellement par les tonnages élevés qu'elle produit. Ainsi, en 1974, l'Europe a produit 10 millions de tonnes d'éthylène et plus de 4 millions de tonnes de benzène pour les besoins de la pétrochimie.

— La **carbochimie** est la chimie des dérivés du charbon. Son importance a considérablement décru au cours des deux dernières décennies, en raison de l'apparition progressive de la pétrochimie et du raffinage du pétrole brut. Ainsi, en 1930, aux États-Unis, 6 % seulement des composés organiques provenaient du pétrole; en 1965, la situation s'inversait puisque 94 % des composés organiques industriels étaient d'origine pétrolière. En Europe, la régression de la carbochimie a été plus tardive en raison de la Seconde Guerre mondiale, et, en 1965, la carbochimie correspondait encore à 32 % des produits organiques industriels. Il n'est pas exclu que la raréfaction du pétrole et l'augmentation de son prix concourent dans l'avenir à remettre le charbon à l'honneur, au moins dans les régions du globe où son extraction est aisée.

Ainsi, les principales sources de composés organiques sont le pétrole (et les gaz naturels) ainsi que le charbon pour une part très modeste. Ce sont des sources de *carbone fossile* formées au cours des temps géologiques par décomposition d'êtres vivants. Le pétrole est issu de la décomposition de plancton marin, le charbon est le vestige des végétaux terrestres de l'ère primaire et surtout de l'ère tertiaire. Ces sources de matières premières sont consommées par l'homme plus vite qu'elles ne se régénèrent, et leur consommation risque d'épuiser toutes les ressources pour les générations à venir. Il est important à ce propos de noter que la quasi-totalité du pétrole brut consommé est transformée en énergie et que moins de 5 % de nos besoins en brut sont consommés par la pétrochimie.

La chimie organique puise aussi ses matières premières dans des sources de *carbone non fossile* donc régénérables. La chimie fondée sur les déchets végétaux (paille, bois, etc.) peut conduire à des intermédiaires de synthèse, à des matières plastiques, etc. C'est ainsi que le sucre, l'alcool éthylique, le furfurol sont obtenus à partir de plantes. On fabrique en France un « Nylon » à partir d'huile de ricin. Bon nombre d'autres produits, tels les huiles, les alcaloïdes, les acides gras, etc., sont directement extraits des plantes.

— La **phytochimie** a pour objet l'étude de la chimie des végétaux. Les animaux aussi fournissent à l'homme certains composés chimiques : c'est le cas du spermaceti des cachalots, du musc du chevrotin porte-musc, etc.

— En ce qui concerne la **chimie minérale,** elle tire ses produits des minerais, des minéraux et extrait du sol des oxydes, des sulfures, des carbonates, des sels, etc., qu'elle transforme ensuite. Les problèmes d'épuisement des ressources sont ici généralement beaucoup moins

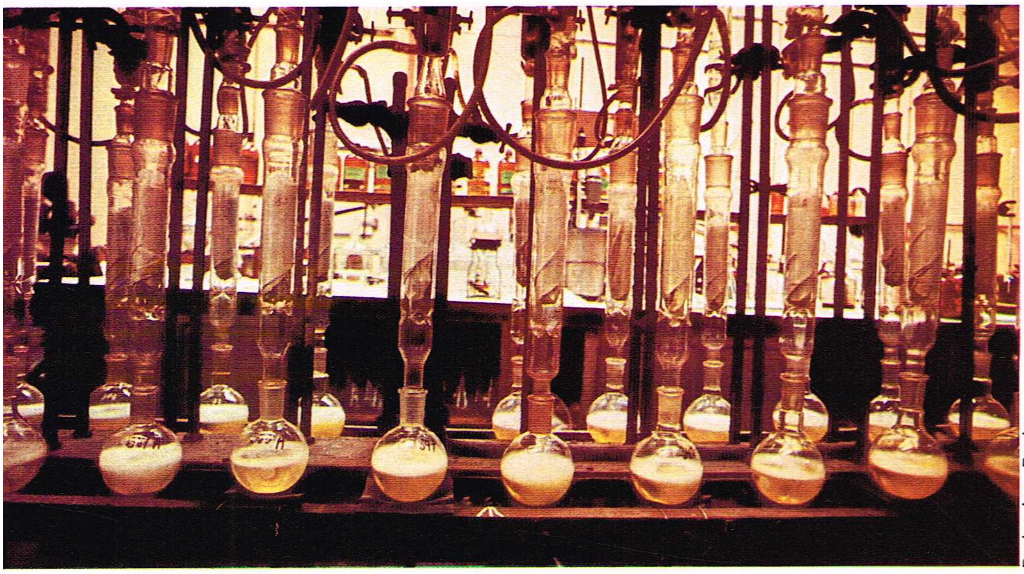

Pavlovsky - Rapho

▲ ***Bon nombre de produits, telles les huiles, sont directement extraits des plantes. Ici, matériel de laboratoire servant aux études comparées des huiles alimentaires.***

Parimage

▶ ***Usine de fabrication d'engrais à partir du maërl (sable des fonds marins) [Saint-Malo].***

aigus qu'en pétrochimie. Certaines ressources sont quasi inépuisables. Cependant les problèmes résident dans la difficulté sans cesse croissante que l'on rencontre dans l'extraction de réserves de plus en plus difficiles à atteindre. L'ensemble de l'écorce terrestre, des océans et de l'atmosphère est essentiellement constitué de silicium (28 %), d'aluminium (8 %) et d'oxygène (46 %). Le composé le plus abondant de l'écorce terrestre est la silice (60 % du poids de l'écorce terrestre) que l'on trouve sous forme de sable, de quartz, etc. L'alumine, les silico-alumines, les silicates, les carbonates (de calcium essentiellement) constituent le reste. Les métaux, même les plus courants, ne constituent qu'une très faible fraction de la masse de l'écorce terrestre. Ainsi le fer, quatrième élément par ordre d'abondance, ne constitue que 4 % de l'écorce terrestre et se trouve réparti dans des minerais dont certains sont les produits de départ de sa métallurgie. Il est remarquable de constater que l'élément le plus abondant, le silicium, n'a pas donné lieu à autant d'applications que le carbone dont la teneur dans l'écorce terrestre est inférieure à 1 %. Cela tient à la difficulté de transformer la silice en composés chimiques réactifs alors que les composés hydrocarbonés du pétrole ou du charbon sont chimiquement réactifs. Le silicium n'est cependant pas sans applications ; on ne citera pour mémoire que le verre, les graisses de silicones, les réfractaires, etc.

— La **chimie des métaux précieux** concerne des éléments dont l'existence dans l'écorce terrestre se chiffre en *parties par million* (ppm), soit 1 gramme par tonne. Ainsi, on trouve dans l'écorce terrestre 0,1 ppm d'argent, 0,01 de palladium, 0,07 d'or et de platine. Cependant, les chimistes doivent préparer d'importantes quantités de ces métaux dont certains sont des catalyseurs industriels utilisés en grand tonnage. C'est le cas du platine dont la consommation annuelle dans le monde est de l'ordre de 10 000 tonnes pour le seul *« reforming catalytique »* qui permet de fabriquer des essences à haut indice d'octane.

On peut aussi distinguer plusieurs chapitres dans l'ensemble de la chimie en se fondant sur le mode d'activation des réactions.

— La **thermochimie** est la partie de la chimie qui étudie l'influence de la chaleur sur le déroulement des réactions. Elle est associée à la thermodynamique chimique qui permet de prévoir en fonction de la température la possibilité d'évolution du système considéré, et à la cinétique chimique qui étudie la vitesse des réactions chimiques en fonction de différents paramètres (température, pression, concentration).

A l'action de la chaleur peut se superposer celle de différents autres agents activant la réaction pour lui permettre d'atteindre plus rapidement l'état d'équilibre fixé par la thermodynamique. Parmi ces moyens d'activer la réaction, le plus important est la **catalyse.** Ce moyen consiste à introduire dans le milieu en réaction un composé (ou un métal) qui, sans être transformé chimiquement, participe à la transformation en augmentant sa vitesse et, dans certains cas, sa sélectivité. Selon que les catalyseurs sont solides et insolubles dans le milieu ou au contraire solubles dans le milieu, on distingue la *catalyse hétérogène* de la *catalyse homogène.*

— La **photochimie.** La lumière est un moyen naturel d'activer les réactions chimiques. C'est ainsi que la fixation du gaz carbonique de l'air par les plantes vertes pour l'élaboration de leurs constituants est une réaction photochimique, c'est-à-dire catalysée par les radiations visibles : il s'agit de l'assimilation chlorophyllienne. L'industrie utilise ce mode d'activation, et la photochimie en a déjà trouvé des applications.

— La **radiochimie.** D'une façon générale les radiations, même si elles ne font pas partie du spectre visible, peuvent activer les réactions chimiques, et la radiochimie pourrait mettre à profit certaines radiations émises par les réacteurs nucléaires pour catalyser des réactions comme la synthèse des matières plastiques.

On peut enfin subdiviser la chimie en branches en se fondant sur l'objectif poursuivi et sur l'activité principale impliquée.

— La **chimie générale** traite des lois générales régissant la structure de la matière et ses transformations.

— La **chimie physique,** ou **physico-chimie,** étudie avec l'aide de la physique les relations entre les propriétés chimiques des composés et leur structure.

— La **chimie analytique,** dont l'objet est la détermination qualitative ou quantitative de la composition des substances chimiques, identifie, dose et sépare en utilisant les appareils très évolués de la physique.

— La **chimie biologique** est la chimie des êtres vivants ; elle étudie les mécanismes complexes des phénomènes vitaux. Elle s'intéresse donc aux réactions chimiques qui se déroulent dans les êtres vivants et aux actions que peuvent avoir sur elles des agents extérieurs. Elle intervient en collaboration avec la physiologie animale et végétale. C'est l'auxiliaire nécessaire de la médecine moderne. On connaît en effet l'importance des analyses biochimiques dans la préparation aux opérations chirurgicales et dans le diagnostic des maladies.

— La **géochimie** étudie la composition des roches, la genèse au cours des temps géologiques de certains dépôts fossiles (pétrole, charbon, schistes et sables bitumineux, etc.). Elle détermine aussi l'abondance des différents éléments chimiques de notre planète et de son atmosphère.

— La **chimie agraire** a pour but l'étude des applications de la chimie aux problèmes de l'agriculture et de l'élevage. Son domaine d'action est très vaste : elle s'occupe de l'étude des sols, des pesticides, des engrais, de la conservation des graines, etc.

On pourrait ainsi multiplier à l'infini les subdivisions de la chimie fondées sur ses applications, mais il n'est pas utile de s'étendre plus sur ce chapitre, car, à la limite, chaque activité industrielle ayant une composante chimique, on peut créer autant de « chimies » que d'applications pratiques.

STRUCTURE DE LA MATIÈRE

La matière, malgré son infinie variété, ne se présente à nos yeux que sous trois états : solide, liquide et gazeux. Certains corps sont constitués de matière sous deux états différents (suspension d'un solide dans un liquide, dispersion d'un gaz dans un liquide, inclusion de gaz dans un solide). D'autres substances, bien que d'apparence homogène, sont des mélanges plus ou moins complexes de corps simples : ainsi, l'eau de mer est constituée par de l'eau et des sels divers.

Dans la nature, les corps que l'on rencontre sont toujours sous forme de mélanges. Si l'on sépare les différents constituants d'un mélange, on obtient des *corps purs*. On distingue deux sortes de corps purs :

— les *corps simples* qui sont des corps purs résistant à toutes tentatives de décomposition ;

— les *corps composés*, ou corps purs susceptibles de se décomposer en d'autres corps purs.

Sous l'influence de la chaleur et de la pression, la matière peut passer d'un état à un autre. Les différentes transformations possibles sont : la fusion et la solidification, la vaporisation et la condensation, enfin la sublimation.

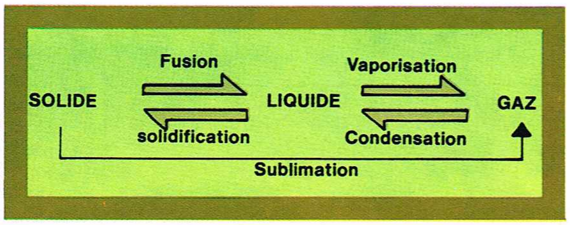

Richard Colin

◀ *Les diverses modifications physiques de l'état de la matière.*

Ces modifications physiques de l'état de la matière ne sont pas toujours possibles. C'est ainsi que, sous l'action de la chaleur, certaines substances solides ou liquides se décomposent avant de fondre ou de se transformer en vapeurs. Ainsi, si l'on chauffe un morceau de bois, il se décompose en émettant des vapeurs qui, refroidies, ne redonnent pas le bois de départ. Par contre, un bloc de glace, lorsqu'on le chauffe, se transforme en eau, et si l'on poursuit le chauffage, l'eau se transforme en vapeur d'eau. Les changements sont dans ce cas réversibles puisque la vapeur d'eau peut, par refroidissement, donner de l'eau liquide, puis de l'eau solide, la glace.

La matière sous l'état solide peut présenter des degrés d'organisation divers. Elle peut être *amorphe* ou *cristalline*. L'état cristallin de la matière est parfois visible à l'œil nu, mais, souvent, un examen au microscope ou au moyen de rayons X est nécessaire pour en déceler l'existence.

On verra plus loin que les trois états solide, liquide et gazeux de la matière résultent de degrés d'association différents entre les particules élémentaires constitutives de cette matière : les atomes et les molécules.

Atomes et molécules

Les différents corps purs qui existent dans la nature, malgré leur grande diversité, ne sont constitués que d'un nombre restreint d'éléments (une centaine). C'est sous forme d'*atomes* que les éléments entrent dans la composition des corps purs. Ce sont les « briques » qui permettent l'édification de l'architecture complexe de l'Univers.

Depuis l'essor de la chimie au XIXe siècle, on a cherché un classement permettant de regrouper les éléments ayant des propriétés analogues. Dès que l'on a su mesurer la masse de l'atome, on a cherché à relier ses propriétés chimiques à cette *masse atomique*. En fait, on s'est vite aperçu que des éléments de masse atomique voisine n'ont souvent pas de ressemblance chimique.

Plus que la masse atomique, le *nombre atomique*, qui sera défini plus tard, apparut comme fondamental dans la classification des éléments. En 1862, le Français Chancourtois disposait les éléments dans l'ordre des masses atomiques croissantes le long d'une hélice tracée sur un cylindre de façon à placer sur une même verticale les corps ayant des propriétés analogues (vis tellurique). Puis, en 1864, Newlands, en Angleterre, observait que, dans la disposition des éléments proposée par Chancourtois, les éléments placés l'un en face de l'autre étaient séparés par 8 intervalles. Il énonça alors la règle des octaves qui n'était malheureusement valable que pour une petite partie de la liste des éléments. C'est enfin en 1869 que le Russe Dimitri Ivanovitch Mendeleïev résolut complètement le problème de la classification périodique des éléments ; il publia en 1871 une première table qui contenait les 63 éléments connus à l'époque.

Cette *table de Mendeleïev* comporte 8 colonnes de 12 lignes. Les éléments placés sur une même colonne ont des propriétés analogues. Pour faire cadrer sa classification avec sa théorie, Mendeleïev a dû laisser des cases vides. Ainsi, dans le groupe III, il prévoyait l'existence d'un « ékabore » (sous le bore) et d'un « ékaaluminium » (sous l'aluminium) et précisait leurs propriétés physico-chimiques ; or, l'ékaaluminium fut découvert en 1875 par Lecoq de Boisbaudran et appelé gallium, l'ékabore en 1879 par Nilson et appelé scandium. Depuis, bon nombre d'autres éléments prévus par Mendeleïev ont été découverts.

Dans sa *forme classique*, la classification périodique comporte des périodes horizontales dans lesquelles les propriétés varient de façon continue, et des groupes verticaux subdivisés en sous-groupes *A* et *B* dans lesquels les éléments ont des propriétés similaires. Le groupe *IA* est celui des métaux alcalins (lithium, sodium, potassium, rubidium, césium, francium), le groupe *IIB* celui des métaux alcalino-terreux, le groupe *VIIB* celui des halogènes, etc. Depuis la forme classique, on a adopté

▼ *La* **table de Mendeleïev.**

SYSTÈME PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS (Mendeleïev, 1871)

Séries	Groupe I — R^2O	Groupe II — RO	Groupe III — R^2O^3	Groupe IV RH^4 RO^2	Groupe V RH^3 R^2O^5	Groupe VI RH^2 RO^3	Groupe VII RH R^2O^7	Groupe VIII — RO^4
1	H = 1							
2	Li = 7	Be = 9,4	B = 11	C = 12	N = 14	O = 16	F = 19	
3	Na = 23	Mg = 24	Al = 27,3	Si = 28	P = 31	S = 32	Cl = 35,5	
4	K = 39	Ca = 40	— = 44	Ti = 48	V = 51	Cr = 52	Mn = 55	Fe = 56, Co = 59, Ni = 59, Cu = 63.
5	(Cu = 63)	Zn = 65	— = 68	— = 72	As = 75	Se = 78	Br = 80	
6	Rb = 85	Sr = 87	?Yt = 88	Zr = 90	Nb = 94	Mo = 96	— = 100	Ru = 104, Rh = 104, Pd = 106, Ag = 108.
7	(Ag = 108)	Cd = 112	In = 113	Sn = 118	Sb = 122	Te = 125	J = 127	
8	Cs = 133	Ba = 137	?Di = 138	?Ce = 140	—	—	—	— — — —
9	(—)	—	—	—	—	—	—	
10	—	—	?Er = 178	?La = 180	Ta = 182	W = 184	—	Os = 195, Ir = 197, Pt = 198, Au = 199.
11	(Au = 199)	Hg = 200	Tl = 204	Pb = 207	Bi = 208	—	—	
12	—	—	—	Th = 234	—	U = 240	—	— — — —

SYSTÈME PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS (forme classique)

Groupe	I A B	II A B	III A B	IV A B	V A B	VI A B	VII A B	VIII	O
Formes limites de combinaisons : a) dans les composés hydrogénés b) dans les composés oxygénés	M_2O	M O	M_2O_3	MH_4 MO_2	MH_3 M_2O_5	MH_2 MO_3	M H M_2O_7	MO_4 MO_2 M O	
Période très petite	**1** H 1,0080								**2** He 4,003
Première petite période	**3** Li 6,940	**4** Be 9,013	**5** B 10,82	**6** C 12,012	**7** N 14,008	**8** O 16,000	**9** F 19,00		**10** Ne 20,183
Seconde petite période	**11** Na 22,991	**12** Mg 24,32	**13** Al 26,98	**14** Si 28,09	**15** P 30,975	**16** S 32,066	**17** Cl 35,457		**18** Ar 39,944
Première grande période	**19** K 39,100 **29** Cu 63,54	**20** Ca 40,08 **30** Zn 65,38	**21** Sc 44,96 **31** Ga 69,72	**22** Ti 47,90 **32** Ge 72,60	**23** V 50,95 **33** As 74,91	**24** Cr 52,01 **34** Se 78,96	**25** Mn 54,94 **35** Br 79,916	**26** Fe 55,85 **27** Co 58,94 **28** Ni 58,71	**36** Kr 83,80
Seconde grande période	**37** Rb 85,48 **47** Ag 107,880	**38** Sr 87,63 **48** Cd 112,41	**39** Y 88,92 **49** In 114,82	**40** Zr 91,22 **50** Sn 118,70	**41** Nb 92,91 **51** Sb 121,76	**42** Mo 95,95 **52** Te 127,61	**43** Tc [99] **53** I 126,91	**44** Ru 101,1 **45** Rh 102,91 **46** Pd 106,4	**54** Xe 131,30
Troisième grande période	**55** Cs 132,91 **79** Au 197,0	**56** Ba 137,36 **80** Hg 200,61	**57 - 71** Σ La **81** Tl 204,39	**72** Hf 178,50 **82** Pb 207,21	**73** Ta 180,95 **83** Bi 209,00	**74** W 183,86 **84** Po 210	**75** Re 186,22 **85** At [210]	**76** Os 190,2 **77** Ir 192,2 **78** Pt 195,09	**86** Rn 222,0
Quatrième grande période	**87** Fr [223]	**88** Ra 226,05	**89 - 101** Σ Ac						

Σ La = Lanthanides

57 La;	**58** Ce;	**59** Pr;	**60** Nd;	**61** Pm;	**62** Sm;	**63** Eu;	**64** Gd;	**65** Tb;	**66** Dy;	**67** Ho;	**68** Er;	**69** Tm;	**70** Yb;	**71** Lu.
138,92	140,13	140,92	144,27	[145]	150,35	152,0	157,26	158,93	162,51	164,94	167,27	168,94	173,04	174,99

Σ Ac = Actinides

89 Ac;	**90** Th;	**91** Pa;	**92** U;	**93** Np;	**94** Pu;	**95** Am;	**96** Cm;	**97** Bk;	**98** Cf;	**99** Es;	**100** Fm;	**101** Md;	**102** No;	**103** Lw.
227	232,05	231	238,07	[237]	[242]	[243]	[243]	[249]	[249]	[254]	[255]	[256]	—	—

I.G.D.A.

SYSTÈME PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

(Représentation moderne)

Période	Groupe A	Groupe A	Groupe A	Groupe A	Groupe A	Groupe A	Groupe A	Groupe VIII			Groupe B	Groupe B	Groupe B	Groupe B	Groupe B	Groupe B	Groupe B	Groupe
1 1s	1 H 1,008																	2 He 4,003
2 2s 2p	3 Li 6,940	4 Be 9,013											5 B 10,82	6 C 12,011	7 N 14,008	8 O 16,000	9 F 19,00	10 Ne 20,183
3 3s 3p	11 Na 22,991	12 Mg 24,32											13 Al 26,98	14 Si 28,09	15 P 30,975	16 S 32,066	17 Cl 34,457	18 Ar 39,944
4 4s 3d 4p	19 K 39,000	20 Ca 40,08	21 Sc 44,96	22 Ti 47,90	23 V 50,95	24 Cr 52,01	25 Mn 54,94	26 Fe 55,85	27 Co 58,94	28 Ni 58,71	29 Cu 63,57	30 Zn 65,38	31 Ga 69,72	32 Ge 72,60	33 As 74,91	34 Se 78,96	35 Br 79,916	36 Kr 83,80
5 5s 4d 5p	37 Rb 85,48	38 Sr 87,63	39 Y 88,92	40 Zr 91,22	41 Nb 92,91	42 Mo 95,95	43 Tc 99	44 Ru 101,1	45 Rh 102,91	46 Pd 106,4	47 Ag 107,880	48 Cd 112,41	49 In 114,82	50 Sn 118,70	51 Sb 121,76	52 Te 127,61	53 I 126,91	54 Xe 131,30
6 6s (4f) 5d 6p	55 Cs 132,91	56 Ba 137,36	57 La 138,92	72 Hf 178,50	73 Ta 180,95	74 W 183,86	75 Re 186,22	76 Os 192,2	77 Ir 193,1	78 Pt 195,09	79 Au 197,2	80 Hg 200,61	81 Tl 204,39	82 Pb 207,21	83 Bi 209,00	84 Po 210	85 At 210	86 Rn
7 7s (5f) 6d	87 Fr 223	88 Ra 226,05	89 Ac 227															

Eléments de transition

Eléments semi-métalliques

Lanthanides 4f

58 Ce 140,13	59 Pr 140,92	60 Nd 144,27	61 Pm 145	62 Sm 150,35	63 Eu 152,0	64 Gd 157,26	65 Tb 158,93	66 Dy 162,51	67 Ho 164,94	68 Er 167,27	69 Tm 168,94	70 Yb 173,04	71 Lu 174,99

Actinides 5f

90 Th 232,05	91 Pa 231	92 U 238,07	93 Np 237	94 Pu 242	95 Am 243	96 Cm 243	97 Bk 249	98 Cf 249	99 E 254	100 Fm 255	101 Md 256	102 No 253	103 Lw —

I.G.D.A.

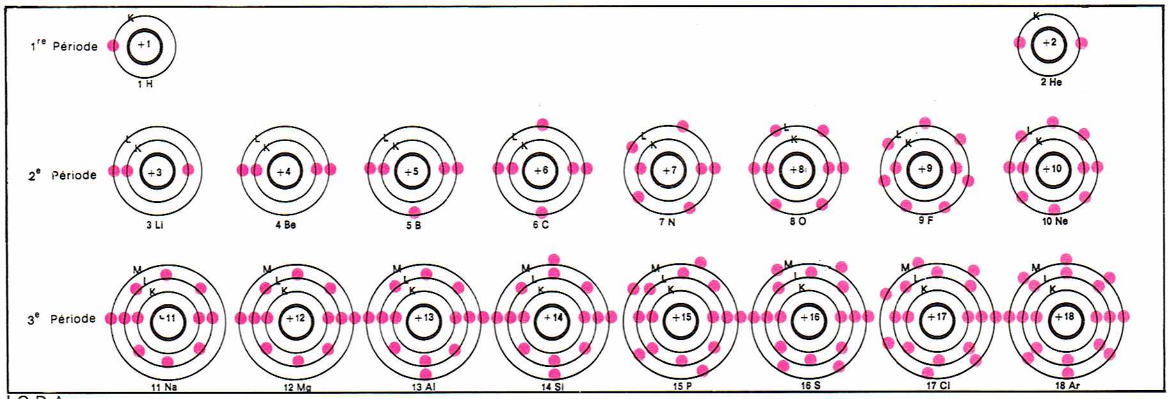

I.G.D.A.

◀ ***Représentation schématique des couches électroniques des éléments des trois premières périodes.***

différents *tableaux modernes,* dans lesquels on fait intervenir la structure corpusculaire de l'atome que nous verrons plus loin.

La classification périodique des éléments a été longtemps un instrument de prévision et a contribué largement à la rationalisation de la chimie. Les théories les plus modernes de la structure intime de la matière n'ont pas remis en cause cette géniale classification. Ainsi, les éléments connus, maintenant au nombre de 103, sont constitués de particules insécables de matière, les *atomes.*

L'atome

C'est la plus petite particule matérielle qui puisse être obtenue par fractionnement ou décomposition chimique d'une substance. Tous les atomes sont formés par trois sortes de particules appelées *particules élémentaires :*

— les *électrons,* ou *négatons,* particules de masse négligeable par rapport à celle de l'atome et chargées d'électricité négative;

— les *protons,* particules de masse non négligeable par rapport à celle de l'atome et chargées d'électricité positive;

— les *neutrons,* particules de masse presque égale à celle des protons mais ne portant aucune charge électrique, d'où leur nom.

La majeure partie de la masse d'un atome est concentrée dans son *noyau,* très petit par rapport à l'atome. Le noyau est composé de deux types de particules, les neutrons et les protons dont l'ensemble constitue les *nucléons.*

L'atome étant électriquement neutre, le nombre Z des électrons extérieurs au noyau est égal au nombre de protons du noyau. Z représente la charge nucléaire, c'est le *numéro atomique* ou *nombre atomique* de l'atome considéré. On désigne habituellement par N le nombre de neutrons contenus dans le noyau. Ainsi, le nombre total de nucléons du noyau est $Z + N = A$, A étant la *masse* (nombre de masse du noyau atomique de l'atome considéré).

Les éléments chimiques, représentés habituellement par des symboles E, peuvent aussi être désignés par $^{A}_{Z}E$ où A et Z ont les significations précédentes. Ainsi, l'azote, par exemple, est représenté par $^{14}_{7}N$; cela signifie que l'atome d'azote possède 7 protons et 7 neutrons, donc 14 nucléons.

L'atome de Bohr

Dans la représentation de l'atome proposée par Bohr, les électrons gravitent autour du noyau central sur des orbites rappelant celles que parcourent les planètes dans leur révolution autour des astres. L'ensemble de l'atome est électriquement neutre puisque les Z électrons sont en nombre égal au nombre de protons du noyau. De plus, les électrons planétaires ne peuvent se trouver que sur certaines orbites stables formant une suite discontinue. On dit que l'énergie de l'atome est quantifiée. On désigne les différentes *couches* renfermant des électrons par les lettres *K, L, M, N...* en partant du noyau. En général, les électrons ayant l'énergie la plus élevée sont les plus éloignés du noyau. La couche électronique la plus proche du noyau peut au maximum renfermer 2 électrons, la couche suivante 8 électrons.

L'hydrogène est le plus simple des atomes : son noyau ne renferme qu'un seul proton et pas de neutron, et, autour de ce proton, gravite un seul électron. L'élément suivant est l'hélium, dont le noyau est formé de 4 nucléons (2 protons et 2 neutrons) autour desquels gravitent 2 électrons.

Si l'on néglige le noyau, on peut classer les éléments en fonction de leur nombre croissant d'électrons. Ainsi, le lithium a 3 électrons périphériques, le béryllium 4, le bore 5, le carbone 6, etc. En classant les éléments en fonction de leur nombre croissant d'électrons, on retrouve la classification périodique des éléments proposée par Mendeleïev.

Théories modernes

Bien que le modèle de Bohr ait permis une vérification quantitative de l'énergie des radiations émises par l'atome d'hydrogène et quelques autres atomes simples, il s'est révélé incapable d'expliquer le comportement spectral d'éléments plus complexes. Par ailleurs, la découverte des propriétés ondulatoires des atomes et des électrons a rendu caduque l'hypothèse de Bohr. La représentation pourtant si séduisante de l'électron « planète » gravitant autour du noyau devait être battue en brèche par Davisson et Germer en 1926.

Ces deux expérimentateurs montrèrent en effet qu'un faisceau d'électrons frappant des cristaux d'oxyde de nickel produisait des effets de diffraction similaires à ceux des rayons X. Ce phénomène ne pouvait s'expliquer que par un comportement ondulatoire de l'électron. Cela du reste ne faisait que démontrer expérimentalement la dualité onde-particule proposée trois ans plus tôt par de Broglie.

Ainsi, l'électron ne peut être représenté comme un grain de matière en mouvement autour d'un atome central. On ne peut déterminer ni la vitesse ni la direction d'un électron, mais la probabilité qu'il y a de le trouver dans un certain volume de l'espace situé autour du noyau et que l'on appelle *orbitale.* L'impossibilité de déterminer avec précision la position et la vitesse d'un électron relève du *principe d'incertitude* formulé par Heisenberg.

Dans une orbitale, ou *nuage électronique,* la probabilité de présence de l'électron est appelée *densité électronique.* Elle peut être déterminée à l'aide d'une équation, proposée par Schrödinger, et appelée *fonction d'onde.* Comme dans le modèle de Bohr, les électrons se trouvent autour du noyau à des niveaux d'énergie déterminés.

◀ ***Page ci-contre, en haut,* la classification périodique *dans sa* forme classique; *en bas, dans l'une de ses* représentations modernes.**

Couche	ORBITALES ATOMIQUES Nombres quantiques n	l	m	Symbole général	Symbole spécifique
K	1	0	0	$1s$	$1s$
L	2	0	0	$2s$	$2s$
	2	1	0	$2p$	$2p_z$
	2	1	1		$2p_x$
	2	1	—1		$2p_y$
M	3	0	0	$3s$	$3s$
	3	1	0	$3p$	$3p_z$
	3	1	1		$3p_x$
	3	1	—1		$3p_y$
	3	2	0	$3d$	$3d_{z^2}$
	3	2	1		$3d_{xz}$
	3	2	—1		$3d_{yz}$
	3	2	2		$3d_{x^2-y^2}$
	3	2	—2		$3d_{xy}$

I.G.D.A.

◀ ***Tableau des orbitales atomiques, caractérisées par leurs nombres quantiques.***

CONFIGURATIONS ÉLECTRONIQUES DES ATOMES DES ÉLÉMENTS

Symbole	Numéro atomique (Z)	NOMBRE ET DISTRIBUTION DES ÉLECTRONS																		
		1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	4d	4f	5s	5p	5d	5f	6s	6p	6d	6f	7s
H	1	1																		
He	2	2																		
Li	3	2	1																	
Be	4	2	2																	
B	5	2	2	1																
C	6	2	2	2																
N	7	2	2	3																
O	8	2	2	4																
F	9	2	2	5																
Ne	10	2	2	6																
Na	11	2	2	6	1															
Mg	12	2	2	6	2															
Al	13	2	2	6	2	1														
Si	14	2	2	6	2	2														
P	15	2	2	6	2	3														
S	16	2	2	6	2	4														
Cl	17	2	2	6	2	5														
Ar	18	2	2	6	2	6														
K	19	2	2	6	2	6		1												
Ca	20	2	2	6	2	6		2												
Sc	21	2	2	6	2	6	1	2												
Ti	22	2	2	6	2	6	2	2												
V	23	2	2	6	2	6	3	2												
Cr	24	2	2	6	2	6	5	1												
Mn	25	2	2	6	2	6	5	2												
Fe	26	2	2	6	2	6	6	2												
Co	27	2	2	6	2	6	7	2												
Ni	28	2	2	6	2	6	8	2												
Cu	29	2	2	6	2	6	10	1												
Zn	30	2	2	6	2	6	10	2												
Ga	31	2	2	6	2	6	10	2	1											
Ge	32	2	2	6	2	6	10	2	2											
As	33	2	2	6	2	6	10	2	3											
Se	34	2	2	6	2	6	10	2	4											
Br	35	2	2	6	2	6	10	2	5											
Kr	36	2	2	6	2	6	10	2	6											
Rb	37	2	2	6	2	6	10	2	6			1								
Sr	38	2	2	6	2	6	10	2	6			2								
Y	39	2	2	6	2	6	10	2	6	1		2								
Zr	40	2	2	6	2	6	10	2	6	2		2								
Nb	41	2	2	6	2	6	10	2	6	4		1								
Mo	42	2	2	6	2	6	10	2	6	5		1								
Tc	43	2	2	6	2	6	10	2	6	6		1								
Ru	44	2	2	6	2	6	10	2	6	7		1								
Rh	45	2	2	6	2	6	10	2	6	8		1								
Pd	46	2	2	6	2	6	10	2	6	10										
Ag	47	2	2	6	2	6	10	2	6	10		1								
Cd	48	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2								
In	49	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	1							
Sn	50	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	2							
Sb	51	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	3							
Te	52	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	4							
I	53	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	5							
Xe	54	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	6							
Cs	55	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	6			1				
Ba	56	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	6			2				
La	57	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	6	1		2				
Ce	58	2	2	6	2	6	10	2	6	10	2	2	6			2				
Pr	59	2	2	6	2	6	10	2	6	10	3	2	6			2				
Nd	60	2	2	6	2	6	10	2	6	10	4	2	6			2				
Pm	61	2	2	6	2	6	10	2	6	10	5	2	6			2				
Sm	62	2	2	6	2	6	10	2	6	10	6	2	6			2				
Eu	63	2	2	6	2	6	10	2	6	10	7	2	6			2				
Gd	64	2	2	6	2	6	10	2	6	10	7	2	6	1		2				
Tb	65	2	2	6	2	6	10	2	6	10	9	2	6			2				
Dy	66	2	2	6	2	6	10	2	6	10	10	2	6			2				
Ho	67	2	2	6	2	6	10	2	6	10	11	2	6			2				
Er	68	2	2	6	2	6	10	2	6	10	12	2	6			2				
Tm	69	2	2	6	2	6	10	2	6	10	13	2	6			2				
Yb	70	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6			2				
Lu	71	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	1		2				
Hf	72	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	2		2				
Ta	73	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	3		2				
W	74	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	4		2				
Re	75	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	5		2				
Os	76	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	6		2				
Ir	77	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	9						
Pt	78	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	9		1				
Au	79	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		1				
Hg	80	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2				
Tl	81	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	1			
Pb	82	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	2			
Bi	83	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	3			
Po	84	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	4			
At	85	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	5			
Rn	86	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	6			
Fr	87	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	6			1
Ra	88	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	6			2
Ac	89	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	6	1		2
Th	90	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	6	2		2
Pa	91	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	2	2	6	1		2
U	92	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	3	2	6	1		2
Np	93	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	5	2	6			2
Pu	94	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	6	2	6			2
Am	95	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	7	2	6			2
Cm	96	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	7	2	6	1		2
Bk	97	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	8	2	6	1		2
Cf	98	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	10	2	6			2

I.G.D.A.

Dans l'ordre d'énergie croissante, c'est-à-dire de stabilité décroissante, les niveaux énergétiques sont désignés par les symboles suivants : 1*s*, 2*s*, 2*p*, 3*s*, 3*p*, 3*d*, 4*s*...

La forme géométrique des orbitales varie suivant la valeur de leurs *nombres quantiques*, qui sont :

— *n*, le nombre quantique principal : il est représenté par des nombres entiers 1, 2, 3, 4, etc. Il correspond (au moins pour les faibles valeurs de *n*) aux orbites de l'atome de Bohr. A chaque nombre *n* correspond un niveau d'énergie déterminé, et les électrons se répartissent autour du noyau suivant ces niveaux croissants d'énergie.

— *l*, le nombre quantique azimutal : on peut le considérer comme le moment angulaire de l'électron, bien qu'en mécanique quantique ce concept ne soit pas défini, puisqu'on ne peut représenter l'électron comme un corps ayant une position et une vitesse. Pour la première orbitale de chaque niveau (pour chaque nombre *n*), le moment angulaire est nul, il s'agit des orbitales *s*. Les valeurs possibles de *l* sont limitées par celles de *n*. Ainsi, *l* peut avoir pour valeur 0, 1, 2, 3... *n* — 1, mais pas au-delà. Par exemple, si $n = 3$, les valeurs de *l* peuvent être 0, 1, et 2, à l'exclusion d'autres valeurs.

— m_l, le nombre quantique magnétique : il indique comment le moment angulaire orbital est orienté par rapport à une direction fixe. Ses valeurs peuvent être :

$$m = \pm l ; \pm l - 1 ; \pm l - 2, \ldots 0.$$

Ainsi, si :

$$l = 2, m_l = -2, -1, 0, +1, +2.$$

— m_s, le nombre quantique de spin : ce nombre est, comme le précédent, en relation avec les propriétés magnétiques, mais ne représente que le moment angulaire inhérent de l'électron et ne peut prendre que deux valeurs :

$$+\frac{1}{2} \text{ et } -\frac{1}{2}.$$

En introduisant comme constantes ces nombres quantiques, on peut résoudre l'équation de Schrödinger, et les solutions que l'on obtient sont les orbitales de fonction d'ondes plus souvent appelées orbitales. Les résultats obtenus peuvent être représentés graphiquement en indiquant la distribution radiale de la probabilité de trouver un électron dans une région de l'espace. Ces solutions peuvent être portées sur des axes cartésiens (*x, y, z*), et l'on obtient des figures de révolution autour des axes qui sont les orbitales atomiques. Ces figures représentent les régions de l'espace où la probabilité de trouver un électron est maximale.

Selon le *principe d'exclusion de Pauli*, chaque orbitale atomique ne peut renfermer plus de 2 électrons, et lorsque ces 2 électrons sont présents, ils sont obligatoirement de spin opposé (antiparallèles). La population électronique d'une orbitale (voir tableau p. 19) peut donc être 0, 1 ou 2. Ainsi le premier niveau ($n = 1$) ne peut renfermer au maximum que 2 électrons, le second niveau 8 électrons, le troisième 18, le quatrième 32. Chaque niveau est divisé en sous-niveaux *s*, *p*, *d* et *f*. Le tableau ci-contre indique pour les 98 premiers éléments la répartition des électrons *s*, *p*, *d* et *f* dans les différents niveaux (1, 2... 7). Le premier niveau, n'ayant qu'une orbitale *s*, ne peut donc renfermer que 2 électrons. Le niveau 2 renferme au maximum 2 électrons *s* et $3 \times 2 = 6$ électrons *p*, soit 8 électrons, et ainsi de suite.

D'après la *règle de Hund*, les électrons d'un même sous-niveau tendent à avoir le même spin. Cela se conçoit aisément puisque les électrons se repoussent mutuellement et préfèrent occuper des orbitales séparées. Les électrons remplissent donc les orbitales libres tant qu'il en existe, et, lorsqu'ils sont contraints d'occuper une même orbitale, leurs spins sont opposés. Ce remplissage progressif des orbitales, en respectant la règle de Hund, est appelé *principe Aufbau* (de l'allemand : construction).

La configuration spatiale des orbitales atomiques permet, comme on le verra plus loin, de rendre compte des liaisons interatomiques et de la géométrie des molécules.

Les orbitales *s* sont des sphères ayant pour centre le noyau de l'atome ; les orbitales *p* sont des sphères accolées et dirigées selon les axes cartésiens, elles sont donc au nombre de 3 et sont désignées par p_x, p_y et p_z, les orbitales *d*, au nombre de 5, sont dirigées suivant l'axe des *z* (d_{z^2}), suivant les axes *x* et *y* ($d_{x^2-y^2}$), ou entre les

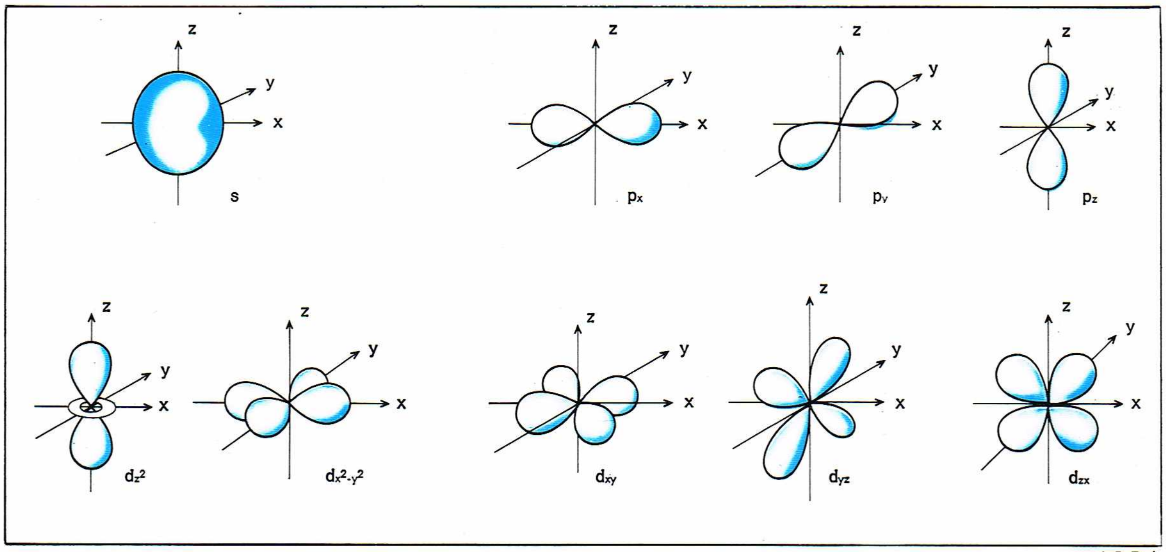

I.G.D.A.

◀ *Représentation schématique de la configuration spatiale des orbitales.*

axes cartésiens (d_{xy}, d_{yz}, d_{zx}) [schéma ci-dessus]. Les orbitales *f*, au nombre de 7, sont plus complexes encore et ne seront pas détaillées ici.

Ainsi, la matière solide, liquide ou gazeuse qui nous entoure est formée de 90 éléments dont les propriétés chimiques sont liées au nombre des électrons périphériques existant autour d'un noyau positif formé de protons et de neutrons. Les électrons les plus réactifs, c'est-à-dire ceux qui sont situés à la périphérie des atomes, vont participer à la liaison de ces atomes entre eux pour former des édifices plus complexes : les *molécules*.

La molécule

Les atomes existent rarement à l'état libre mais se combinent entre eux pour former des *molécules*. La combinaison des atomes entre eux résulte du remaniement concerté des électrons périphériques, certains de ces électrons assurant un lien entre les atomes. La liaison chimique consiste en une mise en commun d'électrons entre deux atomes identiques ou différents. Le réarrangement électronique qui permet la liaison chimique peut avoir lieu de trois manières différentes.

— Les électrons peuvent être cédés par l'atome : il se forme alors un ion positif.

— Inversement, l'atome peut recevoir d'un autre atome un électron supplémentaire : il se forme dans ce cas un ion négatif.

— Enfin les électrons peuvent être mis en commun entre deux atomes.

Tous les atomes ne présentent pas la même facilité de réarrangement de leurs électrons pour se lier à d'autres atomes. Pour certains d'entre eux, en effet, les orbitales qui énergétiquement seraient accessibles à des électrons de liaison sont déjà occupées, c'est le cas par exemple de l'hélium et du néon qui existent sous forme d'atomes isolés (gaz monoatomiques). Pour d'autres éléments, bien qu'ils possèdent des orbitales à un niveau énergétique convenable pour former des liaisons, celles-ci n'interviennent pas. Il s'agit dans ce cas d'une impossibilité énergétique; en effet, le réarrangement électronique correspondant à la liaison interatomique n'apporterait pas le gain de stabilité qu'il fournit dans les autres cas. C'est le cas du mercure dont les atomes restent isolés tant à l'état liquide que gazeux.

La liaison ionique

Lorsqu'un atome neutre gagne ou perd un ou plusieurs électrons, il acquiert une charge négative ou positive. La particule chargée ainsi formée est un *ion*, l'ion positif étant le *cation*, l'ion négatif l'*anion*.

Par exemple, lorsque le sodium, qui n'a qu'un électron dans son orbitale 3*s*, perd cet unique électron périphérique, il se transforme en cation Na^+ dont la structure électronique est celle du néon, le gaz rare le plus proche du sodium dans la classification périodique. Si le fluor acquiert un électron supplémentaire, il devient l'anion F^- qui a aussi la structure électronique du néon. La réunion des deux ions de charges opposées conduit à un composé,

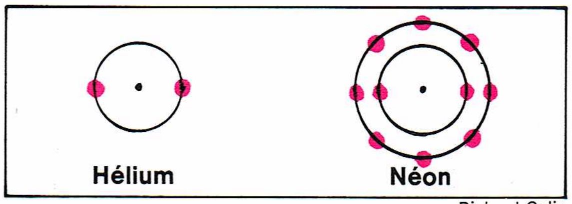

Richard Colin

◀ *Le réarrangement électronique n'est pas facile dans le cas de l'hélium et du néon dont la couche périphérique est saturée.*

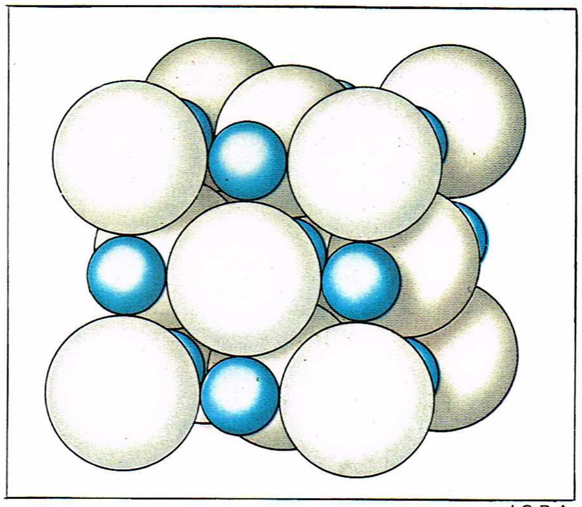

I.G.D.A.

◀ *Représentation de la structure cristalline du chlorure de sodium (NaCl), caractérisée par une liaison ionique : en bleu, les ions Na^+; en blanc, les ions Cl^-. La répartition ordonnée de ces ions ne dépend pas de la liaison ionique, qui n'est pas directionnelle.*

le fluorure de sodium (NaF). Ainsi, lorsqu'on fait réagir le fluor (élément fortement électronégatif) avec le sodium (élément fortement électropositif), une violente réaction a lieu qui conduit à la formation de NaF. Il en est de même avec le sodium et le chlore pour la formation du chlorure de sodium. Ces composés ioniques sont formés d'ions Na^+ et Cl^- (ou F^-) en nombre égal maintenus dans une structure cristalline cubique grâce aux forces d'attractions électrostatiques.

Les éléments des groupes *I* et *II* réclament une énergie relativement faible pour le passage de leurs atomes aux cations correspondant à une seule charge (groupe *I*) ou à deux charges électriques (groupe *II*). Cependant, il est beaucoup plus difficile de former les cations trivalents des éléments du groupe *III*. Il en résulte que, bien qu'il existe des structures solides dans lesquelles on rencontre des ions à trois et même plus de trois charges positives, elles ne sont pas aussi répandues que celles des éléments des groupes *I* et *II*. On remarque aussi que les ions négatifs les plus stables portent une ou deux charges négatives, plus rarement trois. C'est le cas des anions halogènes du groupe *VII* (F^-, Cl^-, Br^-, I^-), des oxydes O^{--}, des sulfures S^{--}, ions doublement chargés des éléments du groupe *VI*, des oxyanions tels que NO_3^-, SO_4^{--}, PO_4^{---}, etc.

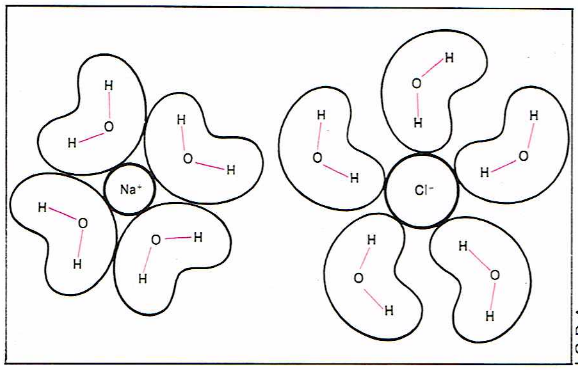

I.G.D.A.

▶ *Exemple d'ion solvaté où les molécules d'eau forment des agrégats autour de l'ion (Na^+ ou Cl^-).*

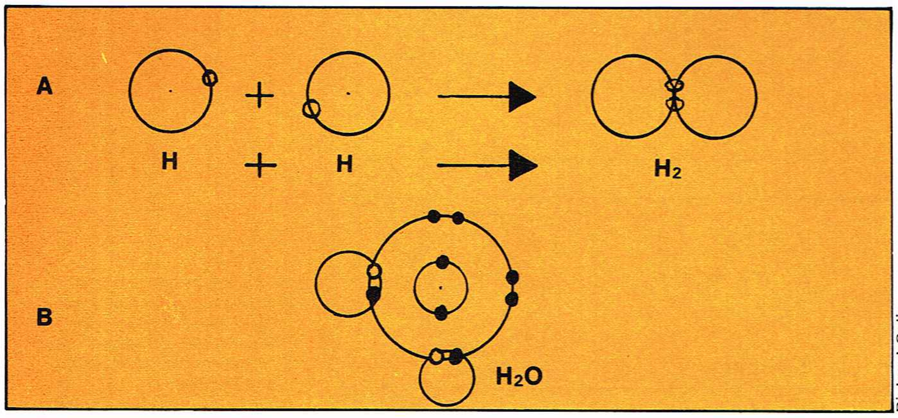

Richard Colin

▲ *Ci-dessus, la plus simple des molécules à liaison covalente : la molécule d'hydrogène (A); la molécule d'eau (B) résulte de deux liaisons covalentes. A droite, le recouvrement des deux orbitales 1s de chaque atome H conduit à une orbitale moléculaire.*

Beaucoup de ces composés ioniques sont solubles dans l'eau et permettent, grâce à leurs ions, le passage du courant électrique; ce sont alors des *électrolytes.* Les composés ioniques mis en solution dans l'eau sont dissociés en leurs ions qui sont entourés des molécules d'eau, lesquelles, grâce à leur polarité, forment des agrégats moléculaires autour de l'ion. On dit alors que l'*ion* est *solvaté.*

La liaison covalente

Elle est formée par la mise en commun d'électrons appartenant primitivement à chacun des partenaires de la liaison.

La plus simple des molécules à liaison covalente est la molécule d'hydrogène H_2. Cette molécule ne résulte pas de l'attraction électrostatique d'un proton H^+ et d'un anion H^-, mais de la mise en commun des deux électrons des atomes isolés. De même, la molécule d'eau résulte de deux liaisons covalentes entre un atome d'oxygène et deux atomes d'hydrogène.

Lorsque deux atomes sont suffisamment proches l'un de l'autre pour que leurs orbitales puissent se recouvrir, il se produit des interactions électrostatiques (répulsions entre électrons, répulsions entre noyaux et attractions noyaux-électrons). La liaison covalente a lieu lorsque l'ensemble des forces de répulsion est inférieur à l'ensemble des forces d'attraction, et l'attraction résultante est obtenue grâce à une redistribution des charges qui correspond à une augmentation de la densité électronique entre les deux noyaux. Le nuage électronique agit comme un écran entre les deux noyaux et contribue à diminuer la force de répulsion entre ceux-ci.

La différence essentielle entre la liaison ionique et la liaison covalente est que, dans la première, bien que le nombre des charges positives soit égal au nombre des charges négatives, on ne peut parler de molécule réelle mais seulement d'un arrangement ordonné des ions donnant des cristaux de taille indéfinie. On ne peut donner dans le cas des composés ioniques que des formules empiriques. Ainsi la formule NaCl ne représente pas une molécule de chlorure de sodium formée d'un ion chlore et d'un ion sodium. Par contre, les molécules à liaison covalente sont de véritables entités dans lesquelles les liaisons entre atomes sont très fortes, mais qui possèdent peu d'attractions entre elles. C'est la raison pour laquelle la plupart des composés n'ayant que des liaisons covalentes sont des gaz, des liquides ou des solides à faible température de fusion.

● *Représentation dans l'espace des molécules à liaison covalente*

Les molécules sont rarement planes, et leur structure tridimensionnelle résulte du recouvrement d'orbitales ayant des volumes et des positions bien définis dans l'espace. La liaison chimique covalente schématisée précédemment comme la mise en commun d'électrons est due, en fait, au recouvrement des orbitales atomiques des deux atomes de la liaison. Chacune des orbitales atomiques pouvant renfermer jusqu'à 2 électrons, on doit considérer que, lorsque la liaison met en jeu plus de 2 électrons (3 ou 4), les électrons supplémentaires passent dans une orbitale qui ne participe pas à la liaison.

Deux orbitales atomiques qui se recouvrent se combinent pour donner une orbitale moléculaire σ liante de basse énergie qui assure la liaison, et une orbitale antiliante σ^*, de plus haute énergie, qui contribue à la répulsion des atomes et non à leur liaison.

Dans la plus simple des molécules, celle de l'hydrogène, le recouvrement des deux orbitales 1*s* de chaque atome H conduit à une orbitale moléculaire dans laquelle, autour des deux noyaux, la densité électronique est variable, et maximale entre les deux noyaux.

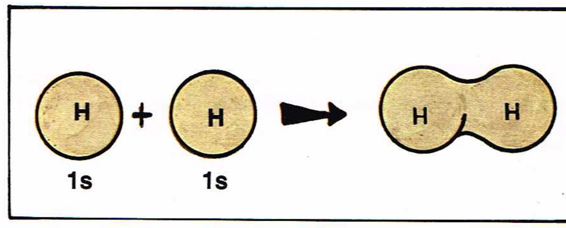

Richard Colin

Dans la molécule d'hydrogène H_2, les deux électrons de liaison sont dans une orbitale liante de basse énergie; la molécule est très stable, il faut fournir 104 kcal d'énergie pour la détruire.

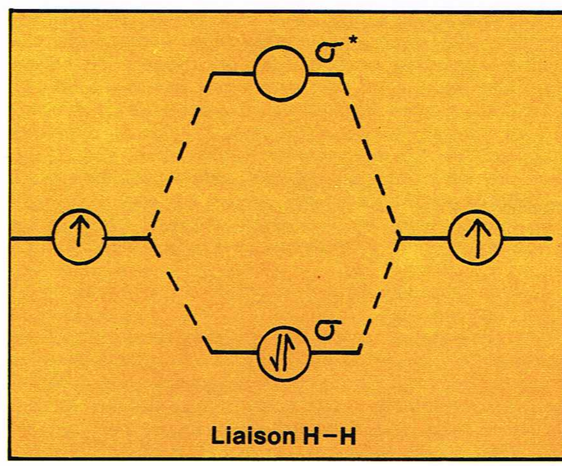

Richard Colin

▶ *Représentation schématique de la formation des orbitales liante (σ) et antiliante (σ^*).*

Dans certaines conditions, on peut observer dans l'hydrogène en phase vapeur des ions moléculaires H_2^+, c'est-à-dire des molécules d'hydrogène ayant perdu un électron. Dans ce cas, la liaison σ ne comporte qu'un seul électron, et la stabilité de la molécule est moins grande (il suffit de 61 kcal pour la rompre avec formation d'un atome d'hydrogène et d'un proton). Par contre, l'ion H_2^-, c'est-à-dire la molécule d'hydrogène ayant acquis un électron, est instable, car, la liaison devant comporter trois électrons, le troisième doit aller dans l'orbitale antiliante.

Si l'on envisage des éléments à orbitale *p* (parmi ceux-ci, le carbone est particulièrement important), les recouvrements, se faisant avec des orbitales dirigées dans l'espace, vont conduire à des *angles de liaison.* On peut dire d'une façon générale que la liaison sera d'autant plus stable que le recouvrement des orbitales sera plus important.

Les orbitales *p* étant dirigées selon les axes cartésiens, on doit s'attendre à ce que les liaisons qu'elles formeront avec l'hydrogène fassent entre elles des angles de 90°.

Or, dans le cas de la molécule d'eau, par exemple, dans laquelle les deux orbitales $2p_x$ et $2p_z$ de l'atome d'oxygène se recouvrent avec l'orbitale $1s$ des deux atomes d'hydrogène, du fait de la répulsion de ces derniers, l'angle est supérieur à 90°. Dans le cas du carbone, on doit alors faire intervenir la notion d'hybridation des orbitales.

● *L'hybridation des orbitales. Cas du carbone*

Les orbitales *s* et *p* de certains éléments (dont le carbone) peuvent se combiner entre elles et conduire à de nouvelles orbitales *sp*. Ainsi l'orbitale $2s$ du carbone et les trois orbitales *p* (dont une est vacante) peuvent fournir quatre nouvelles orbitales désignées par sp^3 et orientées du centre aux sommets d'un tétraèdre. Il résulte de cette hybridation que les angles que font entre elles les quatre orbitales sp^3 sont égaux à 109° 28'.

Lorsque le carbone est lié à quatre atomes d'hydrogène, il se forme la molécule de méthane CH_4. Dans cette molécule, les quatre liaisons covalentes C—H résultent du recouvrement d'une orbitale sp^3 du carbone avec l'orbitale sphérique $1s$ de l'hydrogène. Lorsque deux atomes de carbone sont liés entre eux, comme dans la molécule d'éthane, par exemple : $H_3C—CH_3$, la liaison covalente C—C résulte du recouvrement axial de deux orbitales sp^3 appartenant chacune à un atome de carbone.

Le carbone peut aussi présenter un autre type d'hybridation, il s'agit de l'hybridation sp^2. Dans ce cas, l'orbitale $2s$ du carbone est hybridée avec deux orbitales $2p$ pour former trois orbitales coplanaires faisant entre elles un angle de 120°. La troisième orbitale *p*, qui ne participe pas à l'hybridation, est perpendiculaire au plan des trois premières, et ses lobes sont disposés de part et d'autre du plan.

Ainsi, dans une molécule comme l'éthylène : $H_2C{=}CH_2$ quatre orbitales sp^2 assurent les liaisons covalentes avec les quatre atomes d'hydrogène, deux orbitales sp^2 se recouvrent et forment la liaison σ C—C, comme dans le cas de l'éthane, et les deux orbitales non hybridées, perpendiculaires au plan de la molécule, se recouvrent latéralement. Ce recouvrement latéral d'orbitales fournit un nouveau type de liaison appelé liaison π. Ainsi, dans la molécule d'éthylène, les deux liaisons qui lient les atomes de carbone sont de nature différente. L'une, la liaison σ, qui résulte d'un recouvrement axial d'orbitale, est « solide » et assure la stabilité de la molécule ; l'autre, la liaison π, est plus aisée à ouvrir sous l'influence de réactifs divers en raison de son recouvrement latéral.

Outre les conséquences de l'existence d'une liaison sur la réactivité chimique, on peut prévoir qu'elle limitera la rotation des atomes autour de leur axe de liaison.

Dans le cas de la liaison σ C—C, la rotation est libre et ne modifie pas la géométrie de la molécule. Par contre, dans le cas d'une liaison π la rotation demanderait une dépense d'énergie pour désaccoupler les deux orbitales. La liaison est donc rigide et explique l'existence d'isomères dont il sera question au chapitre des oléfines.

Un troisième et dernier mode d'hybridation du carbone est l'hybridation *sp* que l'on rencontre, par exemple, dans la molécule d'acétylène $HC{\equiv}CH$. Dans ce cas, l'orbitale $2s$ du carbone est hybridée avec son orbitale $2p$ vacante. Les deux atomes de carbone sont liés par un recouvrement

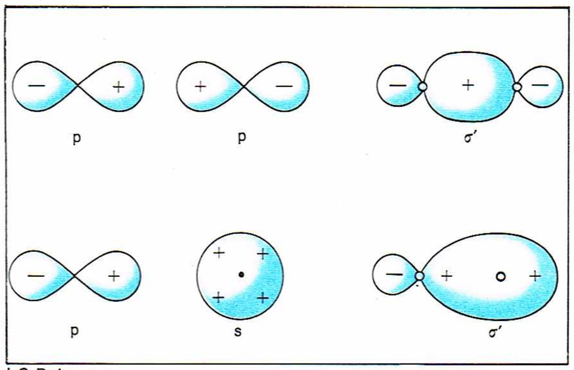

I.G.D.A.

◀ *Diagramme de formation de deux orbitales moléculaires simples à partir d'orbitales atomiques.*

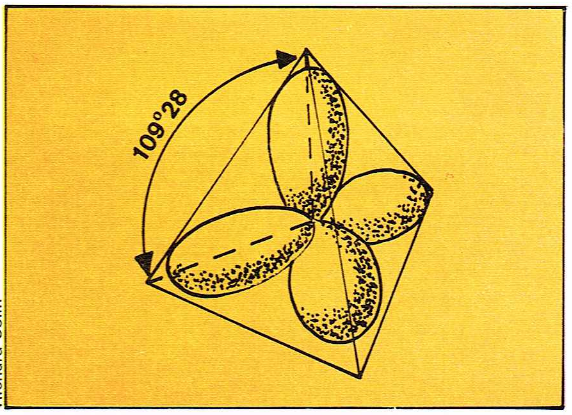

Richard Colin

◀ *L'hybridation des orbitales dans le cas du carbone conduit à la formation, entre les 4 orbitales* sp^3, *de 4 angles égaux à 109° 28' chacun.*

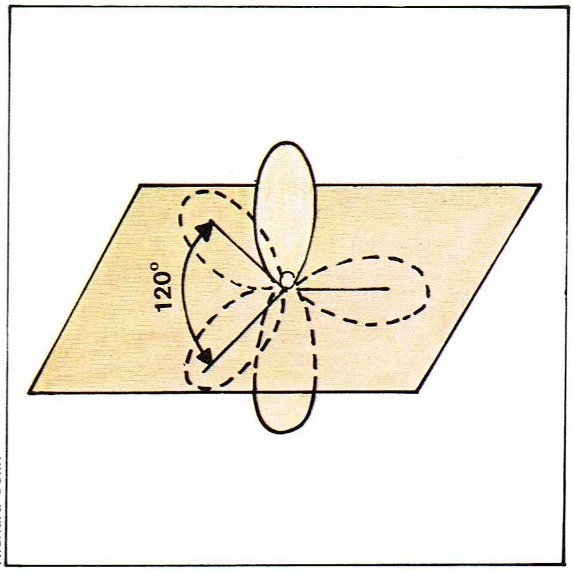

Richard Colin

◀ *L'hybridation* sp^2 *du carbone.*

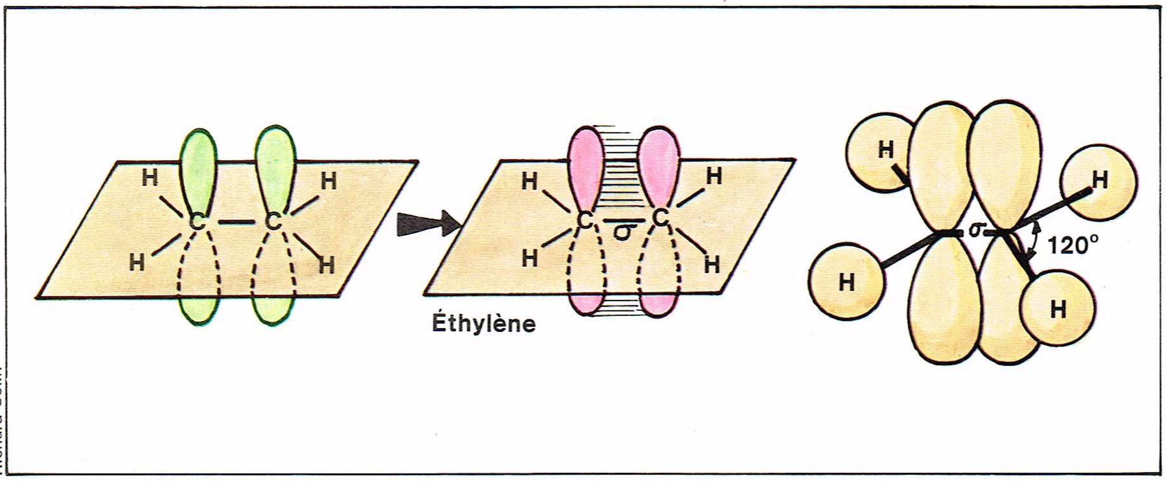

Richard Colin

◀ *Dans le cas de l'éthylène, les deux liaisons qui lient les atomes de carbone sont de nature différente : deux orbitales* sp^2 *se recouvrent et forment la* liaison σ C-C ; *les deux autres orbitales perpendiculaires au plan de la molécule se recouvrent latéralement et forment une* liaison π.

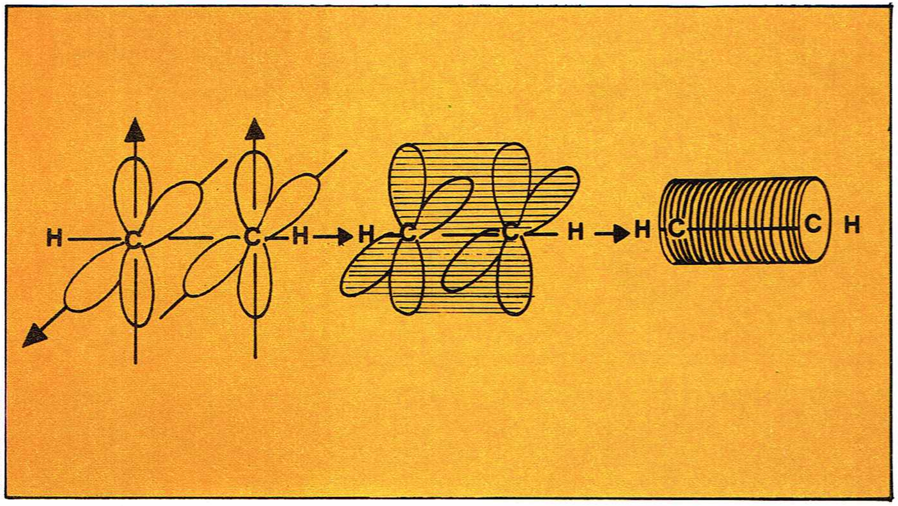

Richard Colin

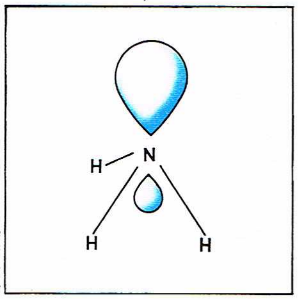

I.G.D.A.

▲ ***Structure de la molécule d'ammoniac : noter qu'il reste une orbitale libre pour une liaison ultérieure.***

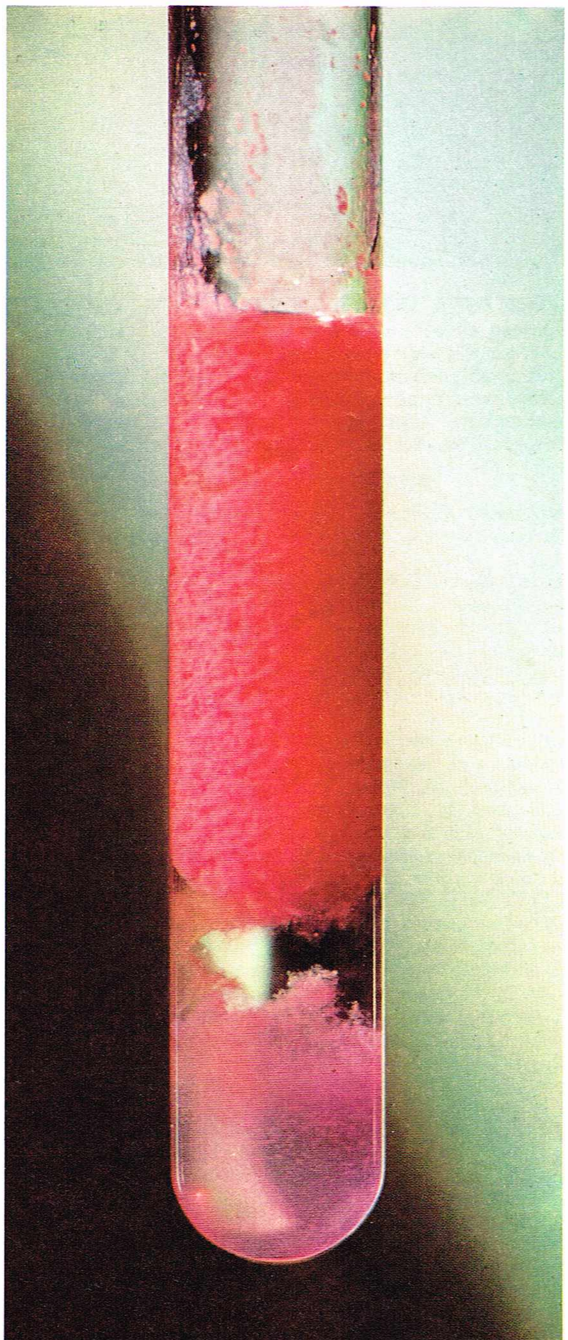

Rassegna Medica

▶ ***A gauche, la précipitation du complexe nickel-diméthylglyoxime, rouge. Ce complexe est utilisé dans l'analyse quantitative du nickel. A droite, les trois types de liaisons interatomiques les plus importantes.***

axial des orbitales *sp* (liaison σ), les deux orbitales *p* non hybridées de chaque atome de carbone se recouvrent latéralement et forment deux liaisons π. En fait, cette structure électronique est telle qu'on peut se représenter la molécule d'acétylène comme deux atomes de carbone alignés avec deux atomes d'hydrogène, la liaison σ des deux atomes de carbone étant entourée d'une sorte de « manchon » électronique. Comme dans le cas de l'éthylène, l'ouverture des deux liaisons π assure une excellente réactivité chimique, mais la structure linéaire de la molécule exclut toute possibilité d'isomères.

L'hybridation d'orbitales d'autres atomes que le carbone est possible. Ainsi, à titre d'exemple, dans la molécule d'ammoniac : NH_3, il s'agit d'hybridation sp^3, mais une des quatre orbitales hybrides est occupée par un doublet électronique existant à l'origine dans l'atome d'azote.

La liaison de coordination

La covalence n'est pas limitée au cas précédent dans lequel chacun des atomes de la liaison fournit un électron. La possibilité existe qu'une molécule, un ion ou un atome ayant un doublet électronique libre le cède à une autre molécule, ion ou atome ayant une orbitale vacante. Dans ce cas, la liaison est encore assurée par *deux électrons,* mais ceux-ci ne proviennent que d'*un des atomes.* Ainsi, l'oxyde de carbone CO possède un doublet électronique qu'il peut aisément céder à des atomes ou à des ions métalliques. La liaison de coordination qui se forme entre CO et le fer de l'hémoglobine du sang explique l'action toxique et parfois mortelle de ce gaz. De nombreux composés formés par l'interaction de molécules donneuses avec des espèces acceptrices sont groupés sous le nom de composés de coordination. Les liaisons covalentes de coordination, encore appelées *liaisons donneur-accepteur,* ont une grande importance en chimie et en particulier en catalyse, comme on le verra plus loin.

Un des exemples les plus simples de liaison de coordination est celle que donne l'ammoniac, NH_3, lorsqu'on le dissout dans de l'eau pour former l'hydroxyde d'ammonium. Dans ce cas, le doublet électronique libre de la quatrième orbitale hybride sp^3 de l'azote fournit deux électrons à l'orbitale vacante $1s$ de l'ion H^+ :

$$H_3N: + H^+ \rightarrow NH_4^+$$

Lorsqu'elle est formée, la liaison de coordination n'est pas différente des liaisons covalentes formées par échanges d'électrons. Ainsi, dans l'ion ammonium NH_4^+, les quatre atomes d'hydrogène sont à la même distance de l'atome d'azote.

La formation de complexes de coordination entre certaines molécules organiques et des ions métalliques est mise à profit pour l'analyse quantitative. C'est le cas par exemple du complexe nickel-diméthylglyoxime.

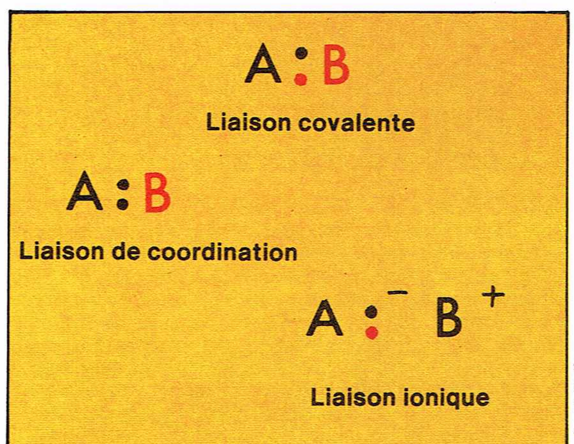

Richard Colin

La liaison métallique

En plus de ces trois types classiques de liaisons, il existe une liaison d'un type un peu particulier ; c'est la liaison métallique que l'on rencontre chez certains éléments à caractères particuliers que l'on appelle les *métaux.*

La liaison métallique est une liaison covalente qui s'étend dans trois dimensions sur une suite infinie d'atomes de métal. Dans la liaison métallique, le nombre

des électrons de valence est beaucoup trop faible pour assurer à chaque atome une couche électronique complète. De plus, les électrons de liaison dans un métal sont liés de façon si lâche avec chaque atome du métal qu'ils sont pratiquement libres de se déplacer dans l'ensemble de la structure.

Les électrons utilisés pour former la liaison métallique sont ceux qui sont les moins liés à chaque atome : ce sont les électrons de plus haut niveau d'énergie, c'est-à-dire ceux des couches périphériques. Ce qui reste lorsque les électrons périphériques ont été utilisés pour la liaison métallique, c'est un ion positif. Ainsi, un cristal métallique peut être considéré comme formé d'atomes chargés positivement, encastrés dans une sorte de matrice de charges négatives que sont les électrons des orbitales moléculaires entourant les charges positives. Si la quantité d'électrons cédés par chaque atome pour former ce flot d'électrons délocalisés est grande, la force entre les atomes et les électrons délocalisés sera grande. Un tel métal sera relativement dur et aura une température de fusion élevée. Par contre, les métaux qui ont peu d'électrons dans leurs couches externes (sodium, calcium, aluminium) seront relativement mous et auront des températures de fusion basses. Si les métaux conduisent le courant électrique, c'est grâce à la mobilité des électrons dans cette structure que l'on peut assimiler à des orbitales moléculaires macroscopiques.

Les dimensions de l'atome

La masse atomique

Les chimistes ont observé depuis longtemps qu'il existe des relations pondérales précises lorsque des réactions chimiques se produisent. C'est ainsi que, dès 1799, Proust énonçait la loi des proportions constantes (ou définies) : « Les différents échantillons d'une substance pure contiennent toujours les mêmes proportions d'éléments. » Puis Dalton, en 1803, formulait la loi des proportions multiples : « Si deux éléments sont susceptibles de s'unir entre eux de plusieurs façons (pour donner des composés différents), les masses de l'un de ces éléments qui s'unissent à la même masse de l'autre sont dans un rapport simple. »

On définit alors la masse atomique relative moyenne des éléments. Cette masse était relative, car elle était rapportée à celle de l'oxygène dont la masse est 16. Depuis 1961, la base des masses atomiques est celle du carbone considérée comme égale à 12,000 00. Elle est moyenne, car elle se rapporte à la composition isotopique habituelle de chaque élément.

Mais on n'a pas poursuivi longtemps la détermination des masses atomiques en comparant grâce à la balance de laboratoire les poids des composés obtenus par réaction de différents éléments. C'est le spectrographe de masse qui a permis de déterminer avec une précision remarquable les masses atomiques des éléments en se fondant sur le carbone comme élément de référence de masse 12.

Les masses atomiques, étant mesurées par rapport à un élément standard, le carbone, ne représentent que des rapports, donc des nombres abstraits. En fait, le spectrographe de masse permet de mesurer avec une très grande précision la masse des atomes; ainsi l'atome d'hydrogène, dont la masse atomique relative est de 1,008, pèse en réalité $1,673 \times 10^{-24}$ g. Des masses aussi faibles impliquent des nombres énormes d'atomes dans la plus petite particule de matière. L'étude quantitative des réactions chimiques ne pouvant se faire en raisonnant sur des nombres aussi compliqués, on a décidé de fixer une fois pour toutes un très grand nombre de molécules correspondant à un poids raisonnable de l'ordre de la dizaine de grammes. L'atome de référence étant à l'époque l'oxygène, dont on avait fixé la masse à 16, sachant par ailleurs que la masse réelle de l'atome est $2,6 \cdot 10^{-23}$ g, le nombre d'atomes réels dans une mole d'atomes d'oxygène est :

$$16 : 2,6 \cdot 10^{-23} = 6,023 \cdot 10^{23}.$$

C'est le *nombre d'Avogadro*.

Ainsi, l'atome-gramme d'un élément correspond à la masse de $6,023 \times 10^{23}$ atomes de cet élément, soit six cent deux mille milliards d'atomes de cet élément. La masse de l'atome-gramme d'un élément est appelée masse atomique.

Pour les molécules, on définit la molécule-gramme ou mole comme étant constituée de $N = 6,023 \cdot 10^{23}$ molécules identiques. La masse moléculaire d'un composé se calcule en faisant la somme des masses atomiques des atomes qui le composent. Ainsi la masse moléculaire de l'eau, de formule H_2O, est égale à :

$$(1,008 \times 2) + 16,0 = 18,016.$$

Ainsi, la formule d'un corps, l'eau par exemple, montre non seulement que l'eau est formée de deux éléments, l'hydrogène et l'oxygène, mais aussi qu'elle est triatomique, c'est-à-dire qu'elle renferme deux atomes d'hydrogène pour un seul d'oxygène. Par ailleurs, cette formule exprime le fait que 2,016 g d'hydrogène sont liés à 16 g d'oxygène et que la masse de la molécule-gramme d'eau est 18,016. Cependant ces formules ne donnent aucune indication sur la taille et la forme des molécules.

La taille des atomes

La taille des atomes est connue avec moins de précision que leur masse, particulièrement pour les atomes à l'état liquide ou gazeux. A l'état solide, la diffraction des rayons X permet de déterminer la taille des atomes. Le rayon atomique des atomes que nous connaissons va de $0,74 \cdot 10^{-8}$ cm pour l'hydrogène à $4,5 \cdot 10^{-8}$ cm pour le césium. La taille des atomes n'est pas proportionnelle à leur masse atomique mais varie périodiquement à mesure que la masse de l'atome augmente.

D'une façon générale, on peut dire que l'atome a pour ordre de grandeur un angström (1 Å), c'est-à-dire 10^{-8} cm.

La taille des molécules

Elle dépend évidemment de la taille des atomes qui les constituent mais aussi de la distance qui les sépare (distance interatomique), ainsi que des angles que font entre elles les liaisons interatomiques. Il résulte du nombre de ces variables une infinie diversité de tailles et de formes des molécules. Certaines, très simples, comme la molécule d'hydrogène, l'eau, l'ammoniac, le méthane, ont encore des dimensions très faibles, voisines de l'angström, puisqu'elles sont formées elles-mêmes d'un très petit nombre d'atomes. D'autres, comme les macromolécules naturelles ou synthétiques formées de milliers d'atomes, atteignent des tailles qui, sans permettre leur examen à l'œil nu, ou au microscope habituel, les rendent visibles au microscope électronique.

◄ ***Page ci-contre, en haut, la structure linéaire de la molécule d'acétylène exclut toute possibilité d'isomères.***

▼ ***Représentation schématique et dimensions de quelques molécules simples.***

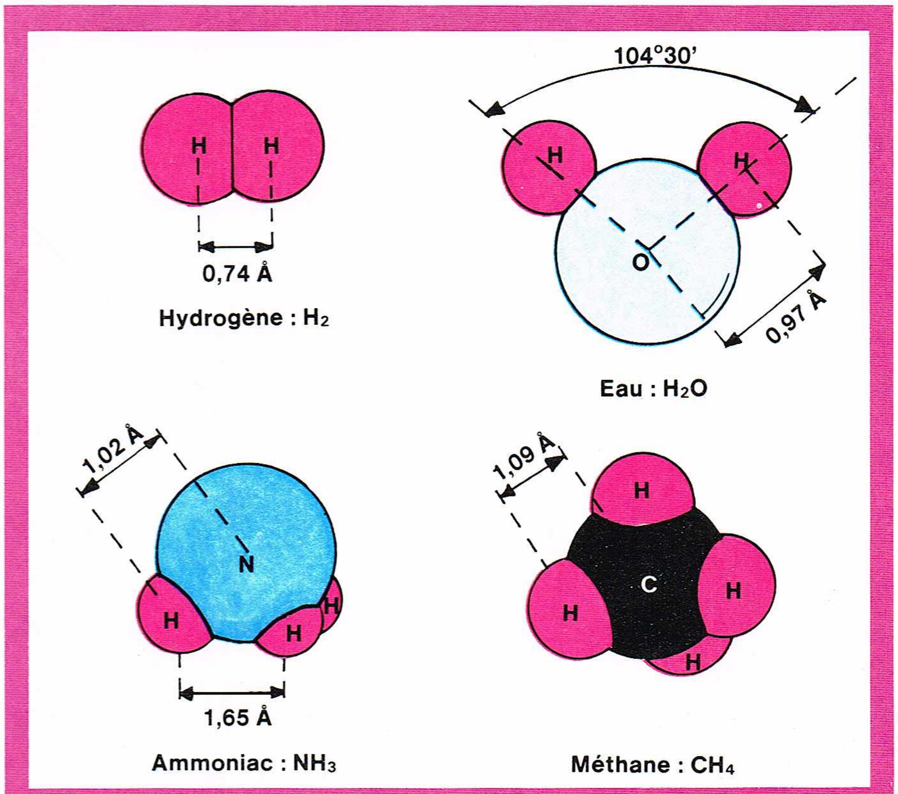

Richard Colin

LES DIFFÉRENTS ÉTATS DE LA MATIÈRE

Si nous pouvions observer la matière à l'échelle de l'angström, nous la trouverions formée des molécules, atomes ou ions que nous venons de décrire. Nous pourrions en outre observer que ces grains ultimes de matière sont en fait le résultat de concentrations plus ou moins grandes d'électrons entourant des noyaux chargés d'électricité positive. A notre échelle, la matière se présente sous trois formes essentielles : solide, liquide ou gaz, qui correspondent à des états d'agrégation différents des atomes ou des molécules. Ces états d'agrégation dépendent à leur tour de l'intensité et de la nature des forces qui contribuent à maintenir entre elles les particules (atomes, ions ou molécules).

Les forces d'attraction

Les forces d'attraction intermoléculaires ont une très grande importance dans l'explication de certaines propriétés physiques comme la volatilité, la viscosité, la tension superficielle, la solubilité, etc. Grâce aux forces de cohésion que nous venons de passer en revue, les atomes ou les molécules sont maintenus ensemble à l'état solide ou liquide. Lorsque ces forces de cohésion deviennent trop faibles pour maintenir ces états condensés de la matière, celle-ci se vaporise et prend un troisième état qui est l'état gazeux. Ces forces intermoléculaires, appelées parfois valences secondaires, furent mises en évidence par Van der Waals au cours de ses travaux sur l'équation d'état des gaz réels et sont souvent appelées *forces de Van der Waals*.

Les interactions dipolaires

On les observe pour des molécules polaires, c'est-à-dire porteuses d'atomes à charges électriques opposées. Ces molécules présentent un moment dipolaire et mettent en œuvre des forces d'attraction importantes à l'échelle moléculaire bien qu'elles se comportent à l'échelle habituelle comme des systèmes électriquement neutres. Ainsi, des molécules polaires comme le nitrobenzène peuvent s'aligner dans un cristal, ou, lors de collisions, en phase vapeur par attraction entre les extrémités de charges opposées de leur molécule. Des orientations moléculaires de ce type sont évidemment contrariées par l'agitation thermique, et, par conséquent, les interactions dipolaires dépendent fortement de la température.

La liaison hydrogène

Lorsque l'atome d'hydrogène qui n'a qu'un seul électron est lié à un autre élément, son noyau, c'est-à-dire le proton, est moins protégé par une couche électronique que n'importe quel autre élément. Il résulte de cette caractéristique unique de l'hydrogène qu'il lui est possible de s'approcher des couches électroniques externes d'autres molécules. Il apparaît ainsi un nouveau type d'attraction entre le proton et la charge négative portée par une autre molécule. Ce type de liaison a lieu en particulier lorsque la molécule qui se lie à l'hydrogène a un atome à doublet électronique libre (oxygène, azote, etc.).

La température d'ébullition anormalement élevée de l'eau (+ 100 °C) par rapport à celle du méthane (— 161 °C), alors que leurs masses moléculaires sont voisines (respectivement 18 et 16), s'explique par l'existence dans l'eau de liaisons hydrogène que l'on schématise ainsi :

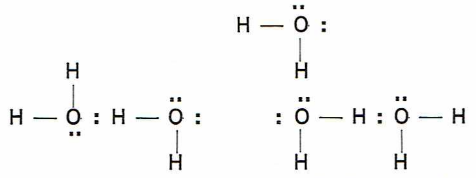

On rencontre encore la liaison hydrogène dans les acides organiques qui existent souvent à l'état de dimères :

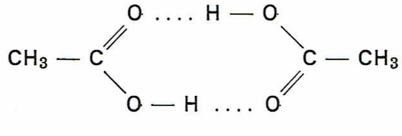

La liaison hydrogène joue un rôle primordial dans la chimie des solutions aqueuses et chez les êtres vivants. La structure des protéines et des acides nucléiques est due en grande partie à l'intervention de liaisons hydrogène, et les mécanismes de la régulation cellulaire et de la reproduction dépendent énormément de ce type particulier de liaison intermoléculaire qui peut être considéré comme un cas particulier d'attraction dipolaire.

Les forces de dispersion

Aucune des forces d'attraction intermoléculaire que nous venons de décrire ne peut rendre compte du fait que des composés symétriques et non polaires puissent présenter des attractions de Van der Waals. Comment expliquer en effet que des gaz monoatomiques comme l'hélium ou le néon puissent être liquéfiés lorsque la température est suffisamment basse? On doit alors invoquer un troisième type de forces proposé par London en 1930, d'où le nom qui leur est encore donné de *forces de London*. Ces forces ont leur origine dans le fait que les molécules ou les atomes dont le moment dipolaire est nul peuvent présenter dans le temps un moment dipolaire « temporaire ». En effet, nous avons décrit les atomes comme formés d'un nuage électronique sphérique parfaitement symétrique et dont la densité électronique, dans le cas des molécules symétriques, est très régulière. En réalité, à tout instant, il peut exister une délocalisation électronique qui crée une charge électrique d'un côté de l'atome, puis, à un autre instant, de l'autre côté. Si un autre atome se trouve à proximité, le champ électrique oscillant du premier atome va induire dans le second des oscillations de charge telles qu'il puisse former avec le premier une association du type dipolaire. Il s'agit alors d'une *attraction dipolaire induite*.

Ces forces de London existent dans tous les atomes et molécules et constituent l'essentiel des forces d'attraction lorsqu'il n'existe pas de dipôles permanents. En particulier dans les milieux formés de molécules non polaires, il n'existe que des forces de dispersion. On conçoit que l'énergie de telles interactions soit très faible, et d'autant plus faible que les atomes n'ont pas la possibilité de venir à proximité l'un de l'autre. On constate d'autre part que ces forces sont d'autant plus importantes que le nuage électronique de l'atome ou de la molécule est plus volumineux. Plus un atome comporte d'électrons dans son nuage électronique symétrique, plus celui-ci a tendance à former un dipôle, et plus sa tendance à passer de l'état gazeux à l'état liquide est grande. Ainsi, la température d'ébullition de l'hélium, qui a deux électrons, est — 268,9 °C alors que celle du radon, qui a 86 électrons, est — 61,8 °C. L'énergie mise en jeu dans les forces d'attraction intermoléculaires varie comme l'inverse de la puissance six de la distance intermoléculaire. Il résulte de cela que ces forces ne peuvent s'exercer que si les molécules peuvent s'approcher suffisamment les unes des autres.

On verra plus loin que les branchements dans les molécules d'hydrocarbures, en obligeant celles-ci à rester à une certaine distance les unes des autres, diminuent leur énergie d'attraction et facilitent leur passage de l'état liquide à l'état vapeur (abaissement de la température d'ébullition). Par contre, on peut volontairement abaisser l'énergie de cohésion d'un composé chimique. Par exemple, lorsqu'une matière plastique est naturellement trop rigide, comme le polychlorure de vinyle, on y ajoute un plastifiant qui a pour effet de la rendre plus souple en obligeant ses molécules à s'éloigner les unes des autres.

L'état solide

C'est l'état de la matière qui, contrairement aux états liquide et gazeux, permet à un corps de conserver sa forme s'il n'est pas soumis à des forces extérieures. La plupart des solides sont cristallins et, sur la base de la symétrie de l'architecture tridimensionnelle de leur arrangement atomique, on les classe en sept systèmes cristallins : triclinique, monoclinique, orthorhombique, tétragonal, hexagonal, cubique et rhomboédrique.

La nature des forces qui lient entre eux les atomes ou les molécules constitutifs d'un solide est variable. On distingue : la liaison ionique, c'est le cas par exemple du chlorure de sodium; la liaison covalente, c'est celle que l'on observe par exemple dans le diamant; la liaison

métallique, par exemple dans le sodium ; la liaison moléculaire, c'est celle que l'on rencontre dans les gaz inertes ; et enfin la liaison hydrogène qui permet l'association des molécules d'eau dans les cristaux de glace. Ainsi, le réseau cristallin régulier des composés solides est maintenu grâce à la mise en œuvre des forces de liaison et de cohésion dont nous avons parlé précédemment.

La parfaite régularité géométrique des cristaux est parfois interrompue, et les imperfections ainsi créées ont une grande importance en physique (croissance cristalline, luminescence, absorption, etc.) mais aussi en chimie (les défauts du réseau cristallin de certains composés ont permis d'expliquer certains types de catalyse). L'absence de régularité dans la disposition des molécules à l'intérieur d'un solide conduit à l'état amorphe ; c'est le cas du verre et des caoutchoucs naturels et synthétiques. En fait, il ne s'agit pas alors de véritables phases comme les phases liquide ou solide, mais plutôt de systèmes dans un état d'équilibre instable. On sait que, dans certaines conditions, le verre peut repasser à l'état cristallin, c'est la dévitrification. De même, les caoutchoucs sont susceptibles par élongation de prendre une structure cristalline.

La règle des phases

En fonction de différentes variables physiques comme la température et la pression, un composé donné peut exister en différentes phases. Ainsi, l'eau constitue une phase solide en dessous de 0 °C, puis une phase liquide jusqu'à 100 °C à la pression atmosphérique et une phase vapeur au-delà de 100 °C.

On appelle *phase* une partie homogène d'un système séparée des autres par une délimitation physique. Tout solide représente une phase distincte séparée du reste du système par sa surface. Les solutions solides, par nature homogènes, ne représentent aussi qu'une seule phase. La solution d'un liquide dans un autre, lorsqu'elle est homogène, constitue encore une seule phase liquide. Par contre, lorsque deux liquides ne sont pas miscibles, ils se séparent dans le récipient qui les contient en deux phases liquides séparées par leur surface commune.

Pour caractériser un système, il est nécessaire en outre de fixer le nombre c de constituants indépendants de ce système. Ainsi, le système chimique que l'on observe lorsque l'on décompose à la chaleur du carbonate de calcium est représenté par l'équation suivante :

$$CaCO_3\ (s) \rightleftharpoons CaO\ (s) + CO_2\ (g).$$

On y distingue trois phases (deux solides, s, le carbonate de calcium et la chaux, et une gazeuse, g, le CO_2). Il existe seulement deux constituants indépendants puisque, d'après l'équation chimique, connaissant la concentration de deux des constituants, on peut calculer celle du troisième.

Un système est caractérisé par sa variance (ou degré de liberté) V. C'est un nombre qui fixe les variables température, pression, concentration, que l'on peut faire varier sans modifier l'équilibre du système.

La variance V d'un système est fournie par l'équation de Gibbs $V = c - f + 2$ où f est le nombre de phases.

L'état liquide

Lorsque l'on chauffe un solide cristallin, l'agitation thermique des molécules peut devenir suffisante pour vaincre les forces de cohésion de l'état solide. A une certaine température, appelée température de fusion, l'ordre parfait qui caractérisait le solide cristallin fait place à un état désordonné, l'état liquide. Puis, par augmentation de la température, on arrive au point d'ébullition au-delà duquel le reste des forces de cohésion qui pouvait encore exister dans le liquide a disparu ; on obtient un gaz où les forces de cohésion deviennent vite négligeables.

L'état liquide est donc un état intermédiaire entre une phase solide fortement ordonnée et une phase gazeuse parfaitement désordonnée.

La structure des liquides est telle que les molécules qui les composent sont, comme dans les solides, très proches les unes des autres, mais ne présentent pas la régularité de l'architecture cristalline des solides. L'état liquide et l'état solide, qui sont des états très condensés de la matière, ont une densité qui varie peu avec la pression et avec la température, contrairement à celle des gaz, comme nous le verrons plus loin. La solubilité mutuelle de liquides différents est aussi intermédiaire entre la solubilité mutuelle totale de tous les gaz et la solubilité mutuelle des composés cristallins purs qui est un phénomène assez rare.

Selon la pression et la température, on peut définir sur un diagramme les domaines d'existence des phases solide, liquide et vapeur. Le *point triple* est le point correspondant à une température et à une pression où les trois phases solide, liquide et gaz sont en équilibre. A partir du point triple, la courbe de fusion définit l'équilibre entre le solide et le liquide. Cette ligne est considérée

▼ ***Représentation de la structure du diamant : la nature des forces qui lient entre eux les atomes est de type liaison covalente.***

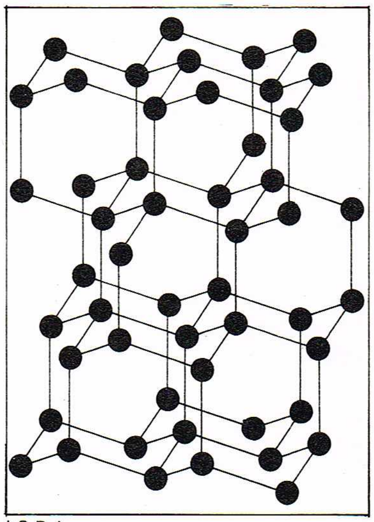

I.G.D.A.

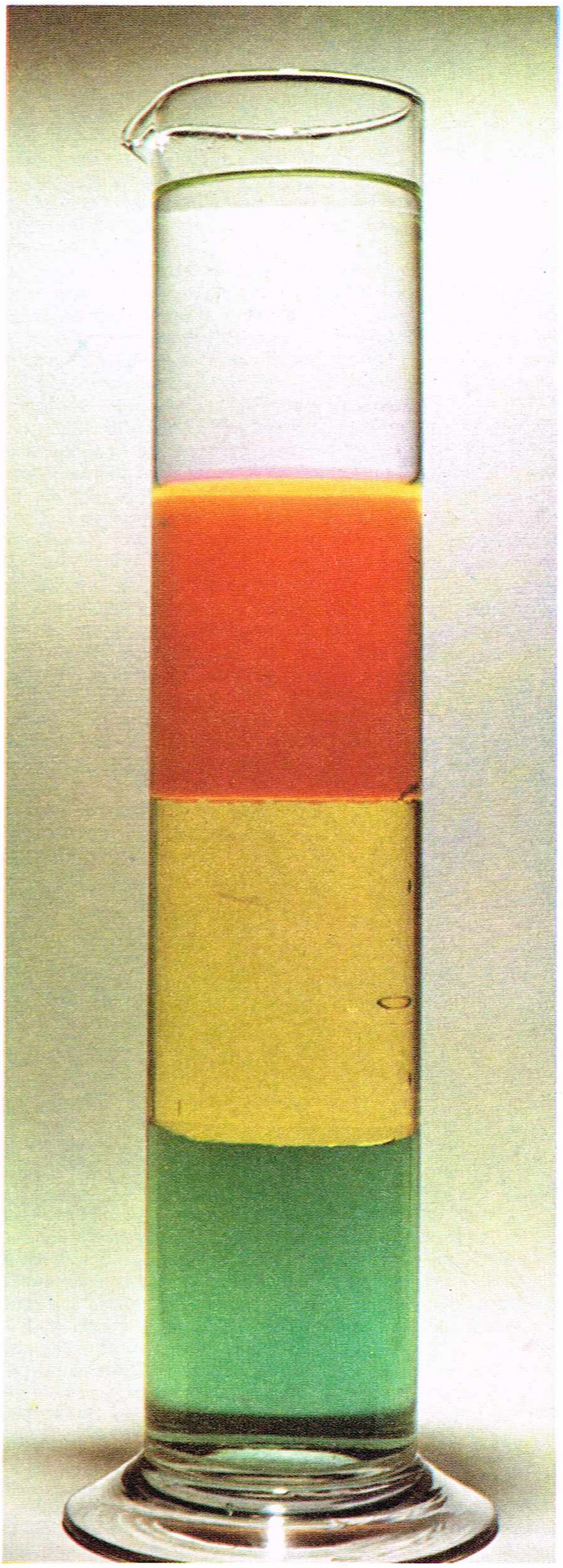

Nuridsany et Pérennou

◀ ***Liquides de densités différentes et non miscibles : en bas, eau colorée par le vert d'iode (densité 1) ; au centre, huile végétale (densité 0,9) ; au-dessus, alcool à brûler (densité 0,84) ; en haut, pétrole raffiné (densité 0,8).***

▶ ***Graphique montrant, selon la pression et la température, les domaines d'existence des phases solide, liquide et vapeur de l'eau :*** **A**, ***phase solide (glace);*** **B**, ***phase liquide (eau);*** **C**, ***phase vapeur. Les flèches indiquent les points de la coexistence de deux phases (solide et liquide, liquide et vapeur, vapeur et solide); ce n'est qu'au*** **point triple** ***que coexistent les trois phases en équilibre.***

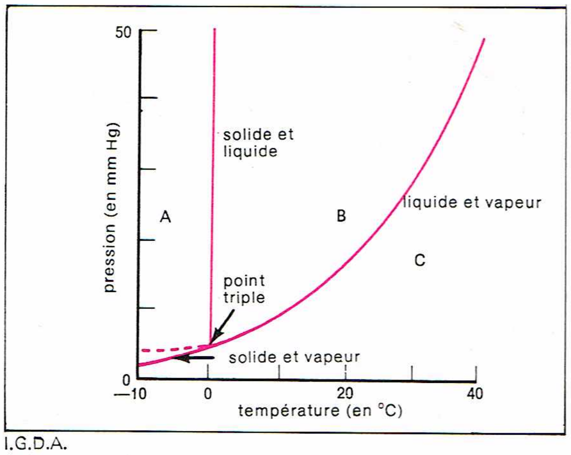

I.G.D.A.

comme infinie, sans point critique. Par contre, la courbe de vaporisation qui sépare le liquide de la vapeur se termine en un point appelé *point critique*. Au-delà de ce point, les phases liquide et gaz ne se distinguent plus l'une de l'autre. Puisque le liquide peut alors être converti en gaz sans changement discontinu des propriétés, quel que soit le trajet parcouru dans le diagramme pression-température, on peut dire qu'il n'y a au-dessus du point critique aucune différence entre le liquide et le gaz.

Un liquide est généralement caractérisé par une tension de vapeur qui dépend de la température. Un certain nombre de molécules peuvent se déplacer librement comme le feraient des molécules de gaz et constituent à la surface du liquide une phase vapeur en équilibre avec ce liquide. Le nombre de ces molécules qui possèdent une énergie suffisante pour se soustraire aux forces de cohésion est fonction de l'énergie moyenne des molécules de liquide et, en outre, de la température. La tension de vapeur se mesure avec les mêmes unités que la pression. Dans les conditions d'équilibre, la tension de vapeur d'un liquide ne dépend que de la température et non de la pression exercée sur le liquide. La tension de vapeur augmentant avec la température, lorsqu'elle devient égale à la pression externe, le liquide entre en ébullition.

Quelques exceptions sont à mentionner dans le diagramme de phases que nous venons de décrire. Premièrement, certaines molécules un peu compliquées se décomposent en dessous de leur température de fusion ou de leur température d'ébullition, de sorte que le diagramme ne peut être observé. Deuxièmement, certains liquides comme la glycérine sont facilement en surfusion, de sorte qu'on met difficilement en évidence leur cristallisation.

La structure des liquides reste difficile à élucider. On sait qu'elle est intermédiaire entre celle des solides et celle des gaz. Alors que dans les solides, et plus précisément dans les cristaux, les molécules (ou les atomes) vibrent continuellement autour de quelques points de l'espace qui définissent le réseau, dans les liquides, les molécules subissent une agitation qui les amène à des déplacements considérables. La diffraction des rayons X permet de déterminer avec précision le nombre d'atomes voisins et la distance qui les sépare. Dans le cas des liquides, les informations fournies par les rayons X ne sont que qualitatives et montrent un degré d'organisation beaucoup plus faible.

On distingue les *liquides normaux*, qui obéissent à certaines relations empiriques entre la tension de vapeur, la viscosité, la température d'ébullition, et les *liquides associés* qui présentent des déviations à ces relations. Il s'agit de substances qui peuvent contracter entre molécules des associations du type de la liaison hydrogène. A ce sujet, l'eau représente le cas le plus typique des liquides associés; son point d'ébullition, anormalement élevé pour une masse moléculaire aussi faible, est dû aux associations de molécules d'eau par liaison hydrogène. L'acide fluorhydrique, dont les molécules sont associées en formant des structures cycliques, se comporte comme un liquide normal dont la masse moléculaire serait plus grande. Certaines substances présentent des transformations à l'intérieur de la phase liquide. C'est le cas par exemple de quelques composés organiques à longue chaîne comme l'oléate d'ammonium. Dans ces sous-phases liquides, l'ordre à grande distance n'existe pas dans les trois directions de l'espace, mais seulement dans deux directions, on a alors affaire à des *états smectiques* (structures par plan), ou dans une seule direction, ce sont les *états nématiques* (structures linéaires).

Les solutions

La miscibilité de deux corps dépend de leurs forces de cohésion respectives et augmente lorsque les interactions entre les molécules de ces deux corps sont de nature identique et d'intensités comparables. Lorsqu'il en est rigoureusement ainsi, la dissolution d'un corps dans l'autre se fait sans absorption ni dégagement de chaleur et sans variation de volume. On dit que la solution est idéale ; c'est le cas de la solution naphtalène-benzène. De telles solutions obéissent à des lois simples découlant de la loi de Raoult, mais ces solutions idéales sont rares ; cependant, lorsque les solutions sont très diluées, elles obéissent à cette loi. Les solutions qui répondent à la loi de Raoult sont celles de composés non-électrolytes ne formant pas d'associations moléculaires.

● *Les lois de Raoult*

Ces lois sont relatives à la cryoscopie et à l'ébullioscopie des solutions.

— *Cryoscopie*. Alors qu'un corps pur commence à se solidifier à température fixe et conserve cette température pendant tout le temps de la solidification, la composition de la phase liquide étant invariable, une solution se comporte différemment. En premier lieu, la congélation commence à une température t inférieure à celle du solvant pur t_0. La différence $\Delta t = t_0 - t$ est l'abaissement cryoscopique de la solution. Cette différence est toujours faible, le plus souvent inférieure à 1 °C. En second lieu, les cristaux qui apparaissent au début de la congélation sont ceux du solvant pur. Une solution diluée de sucre dans l'eau, lorsqu'on la refroidit en dessous de 0 °C, laisse déposer des cristaux de glace (et non d'eau sucrée) ; de plus, au cours de la congélation, la température s'abaisse progressivement à partir de la température t.

On a pu mettre en évidence quelques lois très simples concernant la cryoscopie des solutions.

La loi de Raoult s'énonce ainsi : « L'abaissement cryoscopique Δt d'une solution diluée, non électrolysable, est proportionnel à la concentration c de la solution, inversement proportionnel à la masse moléculaire M du composé dissous (ou soluté), et dépend de la nature du solvant. » D'où la formule :

$$\Delta t = k\frac{c}{M}$$

où k est la constante cryoscopique du solvant. Cette constante a pour valeur 1 850 dans le cas de l'eau qui est un solvant très utilisé, mais certains corps ont des constantes beaucoup plus élevées; c'est le cas du camphre : $k = 40\ 000$. On utilise pour cette raison le camphre dans les déterminations cryoscopiques de masses moléculaires de composés organiques. En effet, connaissant la concentration d'un composé de masse moléculaire inconnue dans un solvant de constante k, il est possible de déterminer par la mesure de l'abaissement cryoscopique Δt la valeur de M. La loi de Raoult est une loi limite qui ne peut fournir que des résultats approchés. En effet, la loi n'est rigoureuse que pour une dilution infinie, c'est-à-dire lorsque la concentration tend vers zéro. Cependant les résultats obtenus dans la mesure des masses moléculaires, grâce à l'amélioration des techniques de mesure, sont d'une précision suffisante dans la pratique.

— *Ébullioscopie*. On observe que l'ébullition d'une solution commence à une température t supérieure à la température t_0 du solvant pur à la même pression. La différence $t - t_0$ est l'élévation ébulliométrique Δt. Cette élévation ébulliométrique est proportionnelle à la concentration c de la solution, inversement proportionnelle à la masse moléculaire du soluté, et dépend de la nature du solvant. La formule est donc la même que pour l'abaissement cryoscopique, mais Δt est l'élévation ébulliométrique et k la constante ébulliométrique. L'ébulliométrie est une méthode de détermination des masses moléculaires moins précise et moins générale que la cryoscopie, et de ce fait moins utilisée.

L'état gazeux

C'est le plus simple des états d'agrégation de la matière. Les gaz n'ont ni forme, ni volume propre mais tendent à occuper tout l'espace qui se trouve à leur disposition; cela résulte du fait que les forces d'attraction entre les molécules gazeuses sont extrêmement faibles. Le comportement des gaz peut être expliqué par une série d'hypothèses dont l'ensemble constitue la *théorie cinétique des gaz,* qui a trouvé dans la pratique de très nombreuses confirmations. L'hypothèse de base de cette théorie consiste à considérer ces gaz comme étant formés de particules punctiformes dont le volume est négligeable par rapport à l'espace occupé par le gaz. Cela explique, en particulier, la possibilité de les comprimer. Les gaz sont en outre expansibles et exercent une pression sur le récipient qui les contient. On rend compte de ce phénomène en admettant une agitation désordonnée des molécules qui rebondissent sans cesse sur les parois. Par ailleurs, le nombre de molécules gazeuses par unité de volume est beaucoup plus faible que dans les cas des liquides ou des solides. Ainsi, dans les conditions normales (1 atmosphère, 0 °C) 99,96 % du volume occupé par l'oxygène est en réalité « vide ». Il faut, de plus, admettre que les chocs entre particules et contre les parois sont parfaitement élastiques. En d'autres termes, contrairement à ce qui se passe à notre échelle, dans des chocs entre des billes par exemple, aucune partie de l'énergie mécanique mise en jeu n'est transformée en chaleur. S'il en était ainsi, l'agitation moyenne des gaz tendrait à diminuer et s'annulerait progressivement avec le temps. Il existe en fait entre les molécules gazeuses une distribution statistique de l'énergie cinétique. L'énergie cinétique moyenne est proportionnelle à la température absolue.

La théorie cinétique des gaz est en mesure de justifier parfaitement le comportement d'un gaz idéal. Les gaz réels dont les molécules ne sont pas punctiformes et exercent entre elles des attractions mutuelles suivent cependant un comportement prévisible sur la base de cette théorie. La discordance devient importante seulement à pression élevée et à basse température (dans ces cas, le volume des molécules et les forces d'attraction mutuelle deviennent particulièrement importants). Par simple compression à température ambiante, on peut liquéfier un gaz (ce qui est important pour le transport et le stockage des gaz industriels). Mais de nombreux savants, parmi lesquels Faraday, se heurtèrent aux gaz permanents (hydrogène, azote, oxyde de carbone, méthane, etc.). La découverte du point critique par Andrews résolut le problème de la liquéfaction. Il existe en effet pour chaque gaz une température caractéristique, appelée *température critique,* au-dessus de laquelle il est impossible de le liquéfier, quelle que soit la pression.

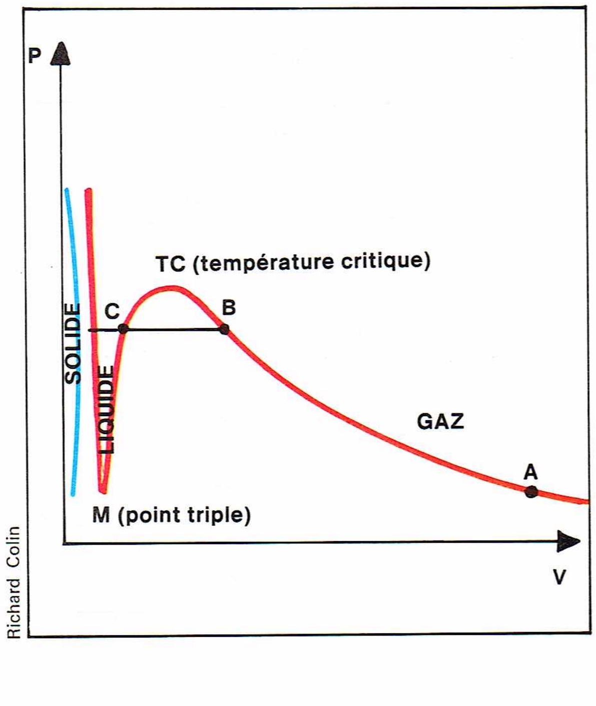

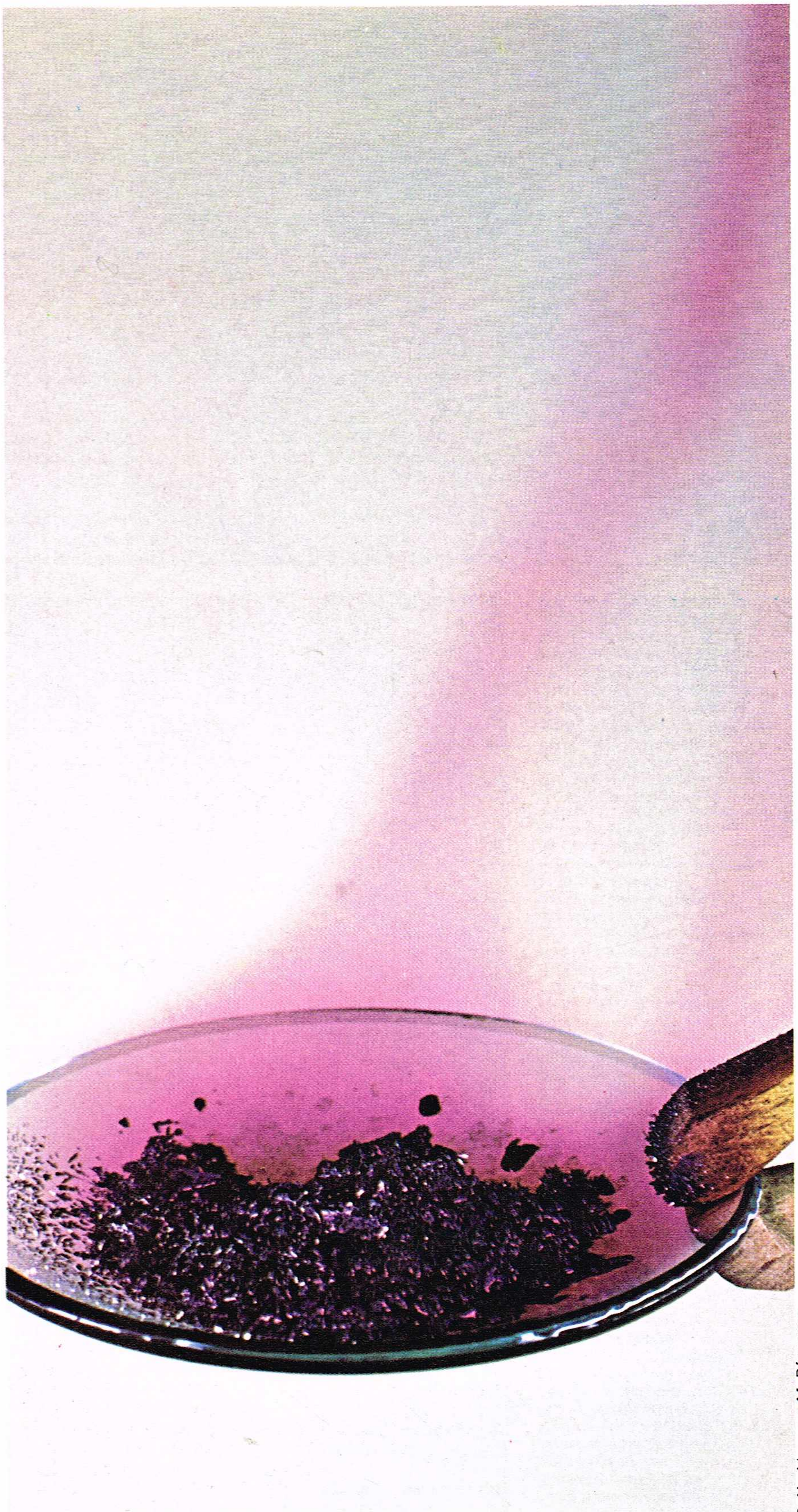

◀▲ *Ci-dessus, un exemple illustrant le phénomène de* sublimation, *ou passage direct de l'état solide à l'état gazeux : en chauffant des paillettes d'iode, celles-ci se transforment directement en vapeur. A gauche,* diagramme d'état. *En partant du point A et en augmentant la pression, la vapeur commence à se condenser en B. Au cours de la condensation, la température et la pression restent constantes jusqu'en C. Une augmentation de la pression après C ne provoque qu'une faible variation de volume car le liquide est quasi incompressible.*

Cette température, à laquelle les forces de cohésion entre molécules « prennent la supériorité », dépend de la possibilité de ces molécules de s'attirer les unes les autres et par conséquent de leur polarité. C'est ainsi que l'eau, molécule très polaire, a une température critique de + 374 °C, l'oxyde de carbone de — 139 °C, l'hydrogène de — 240 °C, l'azote de — 147 °C. La *pression critique* est la pression nécessaire pour liquéfier une substance à la température critique.

Un gaz est caractérisé par son *volume,* sa *température* et la *pression* qu'il exerce sur le récipient qui le renferme. Dès le XVII[e] siècle, Boyle constata que le produit de la pression par le volume d'un gaz était fonction uniquement de la température. Mariotte retrouva plus tard l'*équation d'état des gaz* qui s'écrit :

$$PV = RT,$$

où R est une constante et T la température absolue exprimée en degrés Kelvin. Tout gaz qui suit la *loi de Boyle-Mariotte* est dit *gaz parfait.*

La pression d'un gaz résulte, d'après la théorie cinétique, des chocs de ses molécules contre les parois du récipient. Si l'on réduit le volume, on augmente le nombre des chocs et, par conséquent, on augmente la pression.

A *pression constante,* le volume d'une masse donnée de gaz augmente linéairement avec la température. Cette augmentation de température correspond à une augmentation d'énergie, donc de la vitesse des molécules. Pour maintenir la pression constante, c'est-à-dire pour conserver le même nombre de chocs par unité de surface de la paroi du récipient, il faut augmenter le volume. Le coefficient de dilatation du volume gazeux est :

$$\alpha = \frac{1}{V}\left(\frac{\delta V}{\delta T}\right)_P.$$

De même, si l'on maintient le *volume constant,* la pression du gaz augmente pour satisfaire à la loi d'état et le coefficient d'augmentation de pression est :

$$\beta = \frac{1}{P}\left(\frac{\delta P}{\delta T}\right)_V.$$

Gay-Lussac observa que, pour un gaz parfait, ces coefficients étaient égaux à $\frac{1}{T}$ entre 0 et 100 °C et il trouva $\alpha = \beta = \frac{1}{273}$. Cette particularité est valable pour tous les gaz à condition d'opérer sous de faibles pressions. Si cette condition fait défaut, l'équation des gaz parfaits n'est plus valable pour un gaz réel.

La théorie cinétique nous permet de montrer que la variation de volume d'un gaz est due à la variation du volume compris entre les molécules constituant ce gaz. La véritable variable n'est plus V mais V — *b*, si l'on désigne par la constante *b* le covolume du gaz (c'est-à-dire le volume occupé par les molécules par unité de masse). D'autre part, la pression du gaz n'est pas seulement due aux chocs des molécules sur les parois mais également aux forces d'interaction entre elles. Ces considérations ont conduit Van der Waals (1873) à l'équation caractéristique :

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT,$$

où *a* est une constante provenant de la pression interne du gaz.

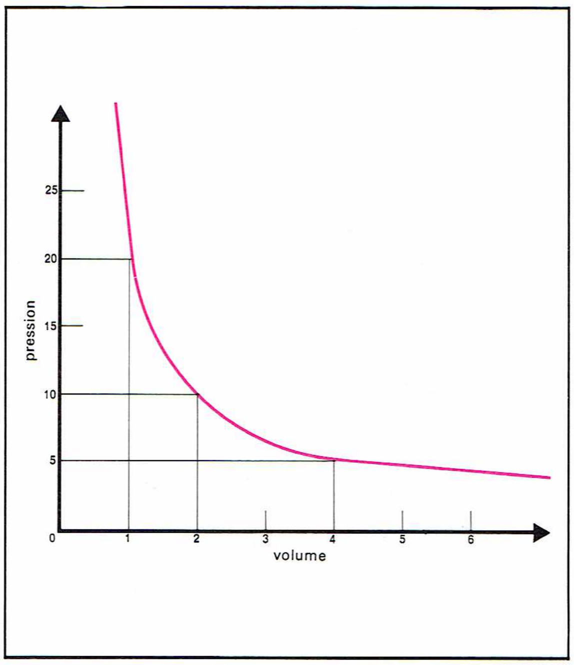

I.G.D.A.

▶ *Représentation graphique de la* **loi de Boyle-Mariotte :** *la pression d'un gaz est fonction de son volume pour une température constante; cette relation n'est rigoureuse que pour les gaz parfaits; on peut noter que, pour une valeur double de la pression, le volume est réduit de moitié.*

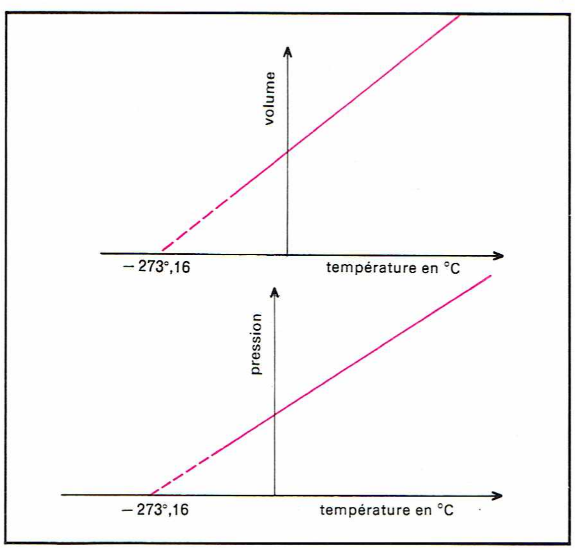

I.G.D.A.

▶ *Représentation schématique de la relation théorique entre le volume et la température d'un gaz à pression constante :* **loi de Charles** *(en haut), et de la relation entre la pression et la température, à volume constant :* **loi de Gay-Lussac** *(en bas). Ces relations sont linéaires; à gauche, les droites sont représentées par un tireté, car, aux très basses températures, les gaz peuvent se condenser ou présenter des irrégularités de comportement.*

La loi d'Avogadro-Ampère

Une considération très utile pour comprendre le comportement des gaz est due à Avogadro. Celui-ci a formulé une hypothèse (reconnue valable par une multitude de résultats expérimentaux) qui, transformée en loi, dit : « Dans les mêmes conditions de température et de pression, les moles des corps purs gazeux occupent toutes le même volume. » Dans les conditions normales, ce volume molaire est V = 22,4 l. Cela signifie qu'une mole d'oxygène, d'hydrogène, d'azote, etc., occupe toujours, à 0 °C et 76 cm de mercure, le même volume : 22,4 l. On peut à partir de cette donnée calculer la masse volumique et la densité d'un gaz. Puisqu'une mole de gaz (soit M grammes de gaz) occupe un volume de 22,4 l, la *masse volumique* est :

$$a = \frac{M}{22{,}4} \text{ exprimée en g/l.}$$

En ce qui concerne la *densité,* qui est le rapport de la masse d'un certain volume de gaz à la masse du même volume d'air (dans les mêmes conditions de température et de pression), puisque 1 l d'air pèse 1,293 g, 22,4 l pèsent 1,293 × 22,4 = 29 g. La densité est donc donnée par la relation :

$$d \simeq \frac{M}{29}.$$

On peut mesurer la densité, donc la masse moléculaire d'un gaz en pesant un ballon vide puis, successivement, plein de gaz à étudier et plein d'air. On en déduit la masse de gaz et la masse d'air et on calcule le rapport de ces masses.

Si le corps est liquide (ou solide) à la température ordinaire, on utilise la *méthode de Meyer,* qui consiste à mesurer le volume d'air déplacé lors de la vaporisation d'une masse donnée de substance.

L'état colloïdal

Certaines substances, comme la colle et la gélatine, forment avec l'eau de fausses solutions qui sont en fait des *suspensions* de particules, ou micelles, formées de plusieurs molécules entourées d'eau d'adsorption et animées de mouvement brownien. A l'origine, on réservait le nom de *colloïdes* à ces substances dont la propriété essentielle était de ne pas traverser les membranes semi-perméables, au contraire des *cristalloïdes.*

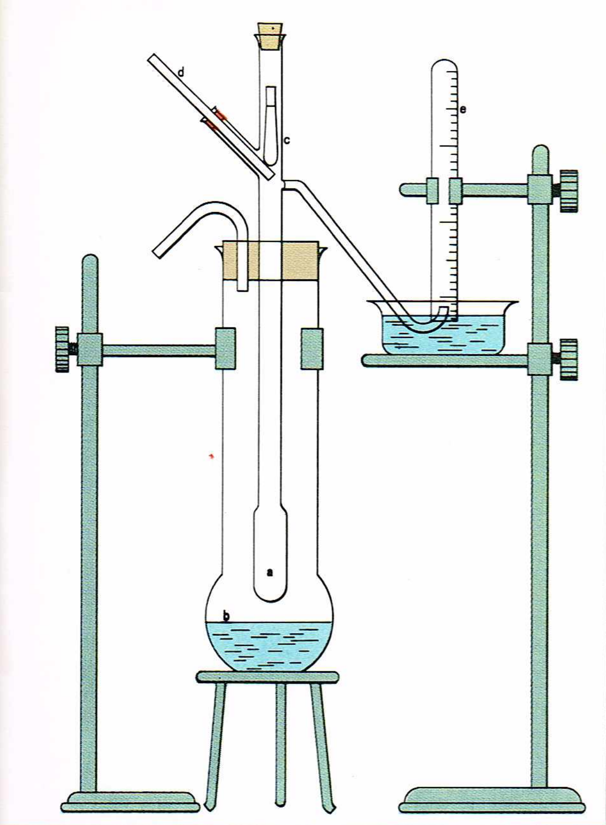

I.G.D.A.

Gio Caprotti

Le fondateur de la science moderne des colloïdes est Thomas Graham. Lors de travaux de recherche sur la diffusion, il fut amené à caractériser les cristalloïdes, tels les sels minéraux, comme des substances qui diffusent au travers d'une membrane de parchemin et les colloïdes (du mot grec signifiant colle), tels l'amidon ou la gélatine, qui n'y diffusent pas. L'invention, en 1903, de l'ultramicroscope permit l'amélioration des techniques d'observation des systèmes colloïdaux. Puis, en 1924, ce fut l'invention par Swedberg de l'ultracentrifugeuse, qui, en rendant possible la sédimentation des particules des sols à une vitesse mesurable, permit la détermination précise de la taille de ces particules.

On peut classer les colloïdes de plusieurs manières. Une distinction rationnelle semble être celle établie entre les *colloïdes lyophiles,* c'est-à-dire ayant une affinité importante pour les solvants (*hydrophiles* lorsque le solvant est l'eau), et les *colloïdes lyophobes,* caractérisés au contraire par une faible affinité (*hydrophobes* lorsque le solvant est l'eau). Dans le cas des colloïdes lyophiles, la phase dispersée présente une certaine affinité pour le milieu dispersif, tandis que dans les colloïdes lyophobes, il n'y a aucun rapport entre les particules dispersées et le solvant. D'après ces deux propriétés respectives, les deux catégories de colloïdes acquièrent des caractéristiques différentes.

Par exemple, les colloïdes lyophiles sont plus stables et, une fois précipités, peuvent dans certaines conditions être réunis en suspension, c'est-à-dire former des précipités réversibles. Ils modifient en outre les caractéristiques physiques du solvant : en effet, ils augmentent sa viscosité initiale et provoquent une diminution de sa tension superficielle.

Au contraire, une fois précipités, les colloïdes lyophobes ne se remettent pas en suspension *(colloïdes irréversibles) ;* ils ne modifient ni la viscosité, ni la tension superficielle du solvant.

A la catégorie des colloïdes lyophiles appartiennent les colloïdes organiques (amidon, glycogène, dextrine, savons, etc.). Par contre, les colloïdes minéraux (or, hydrates de fer, d'argent, de zinc, etc.) sont lyophobes.

Une caractéristique des solutions colloïdales est de s'altérer avec le temps. Les particules de la phase dispersée tendent en effet à se réunir en agrégats toujours croissants, qui atteignent les dimensions d'une suspension grossière. A ce stade, on assiste au phénomène de la *coagulation.* Quand il se coagule, le colloïde englobe toujours une partie plus ou moins grande du solvant. S'il l'englobe totalement, la masse coagulée prend un aspect gélatineux ; dans ce cas, le phénomène s'appelle *gélatinisation.*

Lorsqu'on applique une différence de potentiel à une solution colloïdale, on met en évidence une autre propriété : on remarque que les particules de la phase dispersée se déplacent vers un des pôles. Ce phénomène porte le nom d'*électrophorèse.* On en conclut que les particules colloïdales possèdent une charge électrique et que c'est précisément cette charge électrique qui permet l'état de solution colloïdale. Par leur charge électrique, les particules devraient exercer les unes envers les autres une force répulsive ; en réalité, elles neutralisent les forces de cohésion moléculaire qui tendent à les agréger. La neutralisation des charges électriques du colloïde et donc la précipitation de ce dernier sont réalisées au *point isoélectrique.*

On peut augmenter la stabilité de l'état colloïdal d'une substance par addition d'un autre colloïde, appelé pour cette raison *colloïde protecteur.*

On définit actuellement les colloïdes comme des systèmes dispersés dont la dimension des particules est comprise entre 10^{-7} et 10^{-4} cm. Parmi ces systèmes, on distingue : les *sols* (dispersions de solides dans un liquide), les *émulsions* (dispersions de liquides dans les liquides), les *aérosols* (dispersions de solides ou de liquides dans les gaz) et les *gels,* qui sont des systèmes dans lesquels un des constituants forme un réseau suffisamment rigide dont les autres constituants remplissent les espaces vides.

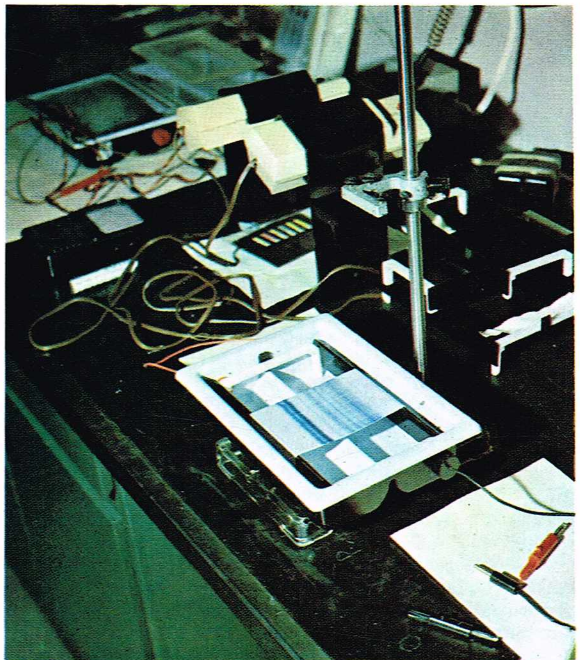
Gio Caprotti

◀▲ ***En haut, à gauche, représentation schématique de l'appareillage utilisé pour mesurer la densité et la masse moléculaire d'un gaz ou d'un liquide selon la*** **méthode de Meyer :** ***la fiole*** **c** ***contenant l'échantillon est maintenue par la baguette*** **d** ***;*** ***elle se rompt en tombant dans le tube*** **a**, ***lequel est maintenu à la température désirée grâce à la vapeur du liquide bouillant dans le récipient*** **b** ***;*** ***le volume d'air déplacé par la vaporisation de l'échantillon est recueilli dans l'éprouvette*** **e** ***et mesuré.***

Lorsque l'on applique une différence de potentiel à une solution **colloïdale**, ***les particules se déplacent vers les électrodes ; ce phénomène porte le nom d'*****électrophorèse**. ***Ci-dessus et ci-contre, deux phases d'une expérience d'électrophorèse sur acétate de cellulose : préparation du matériel, et tracé d'électrophorèse.***

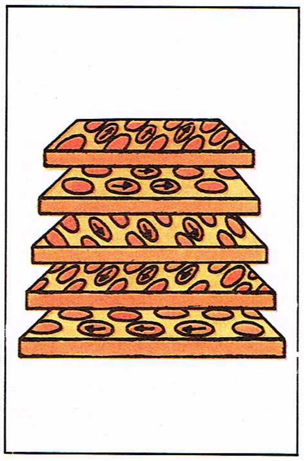

▲ *Modèle de structure des* **cristaux liquides de type cholestérique** *: ces esters du cholestérol sont constitués par des empilements de plans contenant une seule couche de molécules orientées parallèlement dans un même plan; d'un plan à l'autre, l'axe des molécules subit une rotation, ce qui entraîne un arrangement en hélice.*

Les émulsions sont des dispersions d'un liquide dans un autre; le plus souvent, une des phases est l'eau ou une solution aqueuse, l'autre étant une huile insoluble dans l'eau. La phase dispersée peut être soit l'huile (émulsion du type huile dans l'eau), soit l'eau (émulsion du type eau dans l'huile). Pour la stabilité de telles émulsions, un agent émulsifiant est presque toujours nécessaire : il s'agit souvent d'un savon ou un détergent synthétique.

Les gels sont des structures tridimensionnelles. Un gel tend à « gonfler » lorsqu'on l'expose à un solvant, l'importance du gonflement étant une mesure du degré de réticulation du gel. La gélatine, les gelées sont des gels d'usage courant dans l'industrie alimentaire.

Les mousses sont des dispersions de gaz dans des liquides en présence d'un agent tensio-actif tel qu'un savon ou un détergent.

L'état colloïdal n'est pas un quatrième état de la matière qui s'ajouterait aux solides, liquides et gaz mais une dispersion homogène et parfois structurée d'un de ces états dans un autre.

Les cristaux liquides

Il existe encore des états intermédiaires de la matière dont l'importance pratique est très grande : il s'agit des cristaux liquides.

On sait que les cristaux présentent des propriétés d'anisotropie, c'est-à-dire que leurs propriétés optiques, physiques ou mécaniques ne sont pas les mêmes dans toutes les directions. Par contre, les liquides sont isotropes, et, au point de fusion, les cristaux perdent leur anisotropie. Ce phénomène n'apparaît pas dans les cristaux liquides. Si l'on chauffe, par exemple, un cristal de benzoate de cholestéryle, il se transforme à 145 °C en un liquide trouble; si l'on poursuit le chauffage, ce n'est qu'à 179 °C que l'on obtient le liquide clair et isotrope correspondant à l'état liquide habituel. Le processus est réversible : en abaissant la température, la phase intermédiaire responsable de la turbidité du produit fondu se reforme. Cette phase existant entre le point de fusion et le « point de clarification » est la *mésophase*. Ainsi, les cristaux liquides présentent simultanément les propriétés d'anisotropie de la mésophase et la fluidité des liquides habituels.

On distingue trois types de cristaux liquides : *smectiques, nématiques* et *cholestériques*. Les premiers n'ont pas en fait d'application pratique jusqu'à ce jour. Les cristaux nématiques commencent à trouver des applications. Mais ce sont essentiellement les cristaux cholestériques qui sont utilisés dans la pratique. Ce sont des esters du cholestérol, molécule assez longue et optiquement active grâce à ses carbones asymétriques. Ils forment une texture du type nématique que l'on peut considérer comme un empilement de plans moléculaires. Dans chacun de ces plans, les longues molécules sont parallèles mais, lorsque l'on passe d'un plan à un autre, on observe une rotation de l'axe des molécules, d'où il résulte un arrangement en hélice.

En raison de cette structure hélicoïdale, toute lumière arrivant sur une couche de cristal liquide sera réfléchie lorsque sa longueur d'onde correspondra exactement au pas de l'hélice. En utilisant différents esters du cholestérol, on peut obtenir un pas correspondant à la lumière visible. Par ailleurs, le pas de l'hélice dépend de la température. Dans la pratique, ces effets peuvent être utilisés pour mesurer des températures sur des surfaces. En effet, la température ayant une influence sur le pas de l'hélice, il existe une zone de température correspondant à la lumière visible, et à chaque température correspond une couleur du spectre. Ce phénomène a déjà trouvé de nombreuses applications en biologie (mesure de la température au voisinage de la peau, thermomètres spéciaux, etc.).

Par ailleurs, les cristaux liquides nématiques, qui sont le plus souvent des dérivés du diphényle, ont la propriété d'être influencés par un champ électrique. Ainsi, un film transparent de cristaux liquides nématiques disposés entre deux plaques de verre rendues conductrices de l'électricité peut devenir opaque quand on applique un certain voltage. La transparence réapparaît lorsque l'on supprime le courant. On peut ainsi réaliser des « fenêtres sans rideaux »; mais l'importance pratique est grande surtout dans le domaine de l'électronique pour les indicateurs numériques et dans la télévision.

LES TRANSFORMATIONS DE LA MATIÈRE

Outre les transformations physiques que peut subir la matière, telles la fusion, la solidification, l'ébullition, la condensation et la sublimation, transformations qui résultent de modifications dans les forces de cohésion, elle peut subir des transformations chimiques : ce sont les réactions chimiques.

La réaction chimique

Généralités

La réaction chimique est le phénomène qui se produit lorsque des composés chimiques sont mis en contact et se transforment en des composés différents.

Pour qu'une réaction chimique se produise entre deux corps, il faut que ceux-ci aient une affinité l'un pour l'autre. Il existe en effet plusieurs possibilités dans l'évolution d'un système chimique. Ou bien les corps ne réagissent pas du tout l'un sur l'autre (c'est le cas, par exemple, du mélange anhydride carbonique-eau), et le *système* est *stable*, ou bien, au contraire, la réaction entre les deux corps est spontanée dès qu'ils entrent en contact, le *système* étant alors *instable* (c'est le cas de l'action de l'eau oxygénée sur le permanganate de potassium par exemple). Mais souvent, les corps, bien qu'ayant une affinité chimique l'un pour l'autre, ne réagissent pas lorsqu'on les met en contact, même pendant des durées prolongées. Le méthane du gaz d'éclairage ne réagit avec l'oxygène de l'air que si l'on amorce la réaction par un catalyseur, une étincelle, etc. Il s'agit alors d'un *système métastable* ou *en état de faux équilibre*. Les états métastables sont très répandus dans les systèmes chimiques. Par exemple, les composés organiques sont en état de faux équilibre en présence d'oxygène ou d'air, comme en témoigne la facilité avec laquelle ils subissent le phénomène d'oxydation qui les transforme finalement en gaz carbonique et en eau. Il est important pour le chimiste de prévoir le sens de l'évolution des systèmes chimiques.

C'est la *thermodynamique* qui, en précisant l'instabilité relative de l'état initial et de l'état final de la réaction, permet de déterminer si un système est susceptible d'évoluer.

Dès les débuts de la chimie moderne, on s'était rendu compte de l'intérêt qu'il y a à déterminer les conditions d'équilibre des systèmes chimiques. Ces premières lois, sans avoir la précision des constantes thermodynamiques actuelles, ont encore l'avantage d'orienter le chimiste dans ses recherches.

Le **principe de Berthelot,** connu également sous le nom de **principe du travail maximal,** peut s'énoncer comme suit : « Un système chimique laissé à lui-même évolue de façon à libérer le plus de chaleur. » Ce principe, bien que trouvant de nombreuses confirmations dans les réactions chimiques, n'est cependant pas universel. En effet, certaines réactions dont le caractère exothermique n'est pas très important ne suivent pas la loi de Berthelot. Par exemple, la synthèse de l'ammoniac à partir d'azote et d'hydrogène, bien qu'exothermique et libérant 11 kcal/mole, se produit dans des conditions opératoires sévères et notamment à pression élevée. De plus, même les réactions très exothermiques et complètes à température ambiante régressent à température élevée. C'est ainsi que vers 2 500 °C l'eau se dissocie à raison de 4 %. On constate, en fait, qu'à température suffisamment élevée les systèmes se transforment avec absorption de chaleur. Il y a donc dans les réactions chimiques un autre principe moteur que la perte d'énergie calorifique du système. Ce principe est celui qu'exprimait déjà Matignon en disant qu'un système se transforme dans le sens où il libère le plus grand nombre de molécules gazeuses. Il existe par conséquent deux principes moteurs des réactions chimiques : d'une part l'*exothermicité* (ou l'*endothermicité*), d'autre part la *contraction* (ou l'*augmentation de volume*). Ces principes s'opposent et conduisent à un compromis, lequel se traduit par une réaction équilibrée, donc incomplète.

Le **principe de Le Chatelier** exprime la manière dont les systèmes chimiques en équilibre réagissent aux modifications des facteurs qui caractérisent leur état. Selon Le Chatelier, un système soumis à une variation de ces facteurs réagit de façon à la réduire ou à l'annuler. Soumis à une augmentation de pression, le système se contracte de façon à réduire sa pression.

De même que nous avons vu précédemment que la pression, la température et le volume ne varient pas indépendamment mais sont reliés par l'équation d'état, de même, dans un équilibre chimique, les concentrations des constituants sont reliées par la *constante d'équilibre*. Si dans un mélange en équilibre on introduit ou on enlève un composant, le système évolue de façon à le résorber ou à le régénérer au moins partiellement.

Ces principes qualitatifs trouvent leur justification dans les lois de la thermodynamique. Ainsi, lorsque selon le principe de Berthelot on dit qu'un système chimique libère de la chaleur, c'est qu'au cours de la transformation il s'est formé des liaisons chimiques plus fortes que celles qui existaient à l'origine. Connaissant les énergies de liaison, on peut déterminer par le calcul la chaleur de réaction, c'est-à-dire, pour une réaction ayant lieu à pression constante, la variation d'*enthalpie*. Cette grandeur thermodynamique sera définie en physique ; nous nous bornerons ici à dire qu'elle caractérise les chaleurs de transformation à pression constante (voir chapitre *La thermodynamique*).

De même, la **règle de Matignon** exprime en fait que dans une réaction chimique l'état final le plus probable sera celui qui fait appel au plus grand nombre de molécules. Cette probabilité est mesurée par une fonction thermodynamique : l'*entropie*. En d'autres termes, une réaction chimique évolue dans le sens de l'augmentation du nombre des molécules, c'est-à-dire vers un état d'entropie plus élevé. L'entropie augmente avec la température, et c'est ainsi que les systèmes chimiques réalisent leur tendance au désordre dans la fusion, l'évaporation, la sublimation, par élévation de température. Comme pour l'enthalpie, on se bornera à donner de l'entropie la définition d'une grandeur thermodynamique caractérisant le degré de désordre d'un système (voir chapitre *La thermodynamique*).

Ainsi, les deux principes moteurs des réactions chimiques peuvent, en se neutralisant ou en ajoutant leurs effets, donner lieu à quatre types principaux de réactions.

Une réaction endothermique qui s'accompagne d'une diminution d'entropie est impossible ; elle est équilibrée si elle se fait avec augmentation d'entropie.

Une réaction exothermique est toujours possible ; elle est complète si elle se fait avec augmentation de l'entropie ; elle est équilibrée si l'entropie diminue.

On distinguera donc :

— les *réactions endothermiques équilibrées,*
— les *réactions exothermiques équilibrées,*
— les *réactions complètes* (ou *totales*),
— les *réactions impossibles*.

La thermodynamique chimique définit ce que l'on appelle le *potentiel chimique,* qui caractérise chaque système chimique et que l'on peut comparer à un potentiel de gravité. En d'autres termes, un système chimique est instable par rapport aux systèmes dont le potentiel chimique est inférieur au sien. Ce potentiel varie de façon à peu près linéaire avec la température, mais la pente de ces variations varie avec les systèmes.

On peut tracer des *courbes potentiel chimique-température* qui permettent de prévoir dans quel domaine de température un système chimique est stable par rapport à un autre, et par conséquent de prévoir la possibilité d'une réaction.

Il n'est pas suffisant pour le chimiste de prévoir qu'une réaction est possible, il doit en outre pouvoir en connaître la vitesse en fonction des paramètres température, pression et concentration. C'est la *cinétique chimique* qui permet de prévoir la vitesse de la réaction chimique. Si l'on désire, par exemple, préparer du cyclohexane à partir de benzène, on apprend par la thermodynamique que la réaction est possible à basse température. En pratique, si l'on met du benzène en présence d'hydrogène, on n'observe aucune réaction. La raison en est que les molécules en présence, bien qu'animées des mouvements dus à la chaleur et subissant des chocs réciproques, ne reçoivent pas lors de ces collisions l'énergie

Palais de la découverte - Paris

▲ **Marcelin Berthelot** *(1827-1907)* ***dans son laboratoire. Le principe de Berthelot, ou principe du travail maximal, indique qu'« un système chimique laissé à lui-même évolue de façon à libérer le plus de chaleur ».***

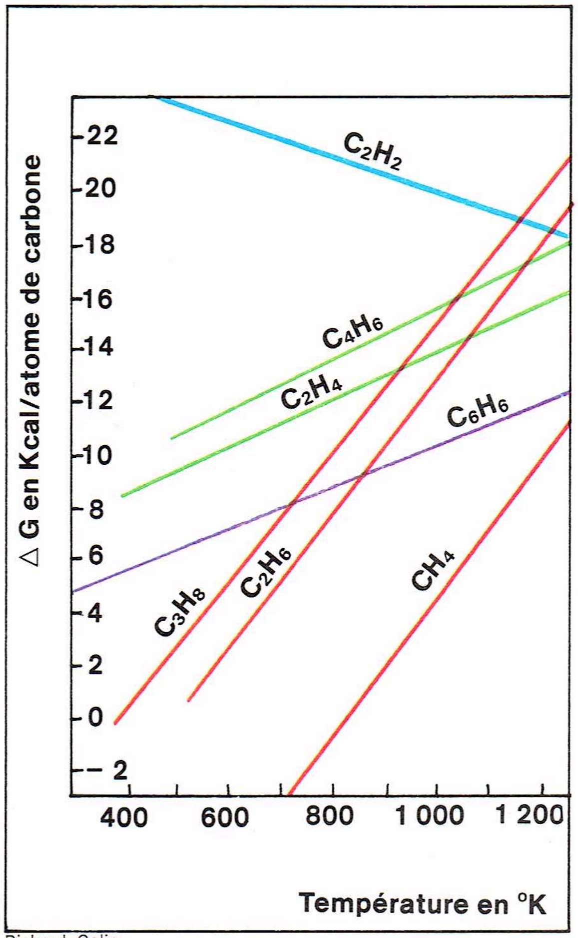

Richard Colin

◀ ***Courbes de l'énergie libre de formation de quelques hydrocarbures en fonction de la température : cette énergie varie de façon linéaire avec la température.***

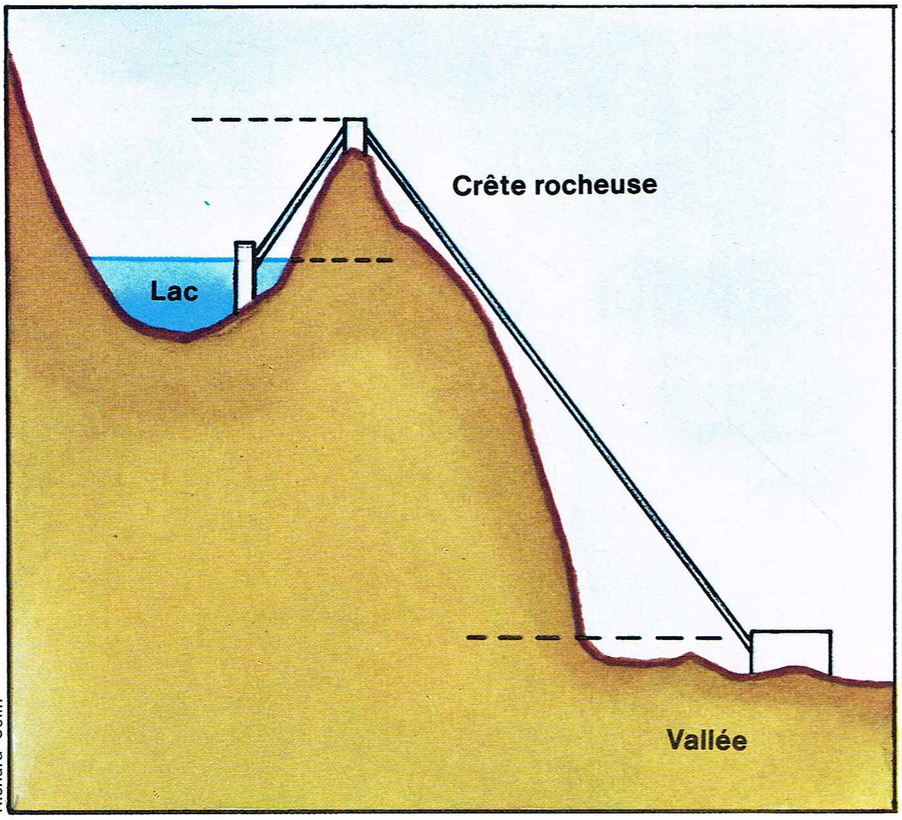

▲ ***La notion de barrière de potentiel peut être schématisée en comparant le cours de la réaction chimique au passage de l'eau dans une canalisation destinée à alimenter une vallée à partir d'un lac de montagne, lorsqu'une crête rocheuse interdit la descente directe de l'eau par gravité : il est alors nécessaire de fournir de l'énergie pour que l'eau monte au-dessus de l'obstacle rocheux ; en termes chimiques, cette énergie est l'énergie d'activation de la réaction.***

nécessaire au déclenchement de l'acte chimique. En effet, pour aller de l'état initial à l'état final, le système doit passer par un état plus difficile à atteindre que l'état final. Cet état de niveau énergétique supérieur consiste dans les premières distorsions de la molécule initiale. On dit que le système doit passer par un *état activé* et qu'il lui faut vaincre une *barrière de potentiel* pour redescendre à l'état final le plus stable.

On peut schématiser cette notion de barrière de potentiel en comparant le cours de la réaction au passage de l'eau dans une canalisation destinée à alimenter une vallée à partir d'un lac de montagne. Une crête rocheuse interdisant le passage direct de l'eau qui par gravité atteindrait la vallée, on doit d'abord fournir de l'énergie pour que l'eau monte au-dessus de l'obstacle rocheux. L'énergie à fournir dépend évidemment de la hauteur de la crête rocheuse à franchir. En termes chimiques, cette énergie est l'*énergie d'activation* de la réaction.

La transformation des systèmes métastables, même si elle s'accompagne au total d'un dégagement de chaleur, nécessite donc pour être déclenchée un certain apport d'énergie : c'est l'énergie d'activation. C'est ainsi que la combustion du charbon dans l'air ne peut avoir lieu que s'il est porté à une certaine température.

Dans le cas des réactions chimiques de synthèse, l'inconvénient de l'activation thermique est son manque de sélectivité ; en effet, toutes les molécules d'un système formé de plusieurs réactifs seront activées à des degrés semblables, favorisant ainsi des réactions indésirables.

On a donc recours à d'autres moyens d'activation que la chaleur, et, en particulier, à l'*activation catalytique*. Dans ce cas, on augmente la vitesse de la réaction en introduisant dans le système une substance étrangère qui, sans être consommée lors de la transformation, permet cependant de l'activer. Cette substance est le *catalyseur*.

On peut encore activer, comme on le verra plus loin, les réactions chimiques au moyen des radiations lumineuses, de radiations diverses de l'énergie électrique, enfin, par entraînement, c'est-à-dire en déclenchant la réaction par une autre réaction qui se produit spontanément.

La connaissance parfaite d'une réaction chimique nécessite que soit précisé dans quelle phase elle se produit, ou à quelle interface.

Les réactions qui se déroulent au sein d'une phase (gazeuse, liquide ou solide) sont dites *réactions homogènes*.

Les réactions qui se déroulent à l'interface de deux milieux sont dites *réactions hétérogènes*. Pour les réactions catalytiques, selon que le catalyseur est soluble dans le milieu ou constitue une phase distincte (le plus souvent solide), on parle de catalyse homogène ou hétérogène. On aura intérêt, si l'on désire augmenter le rendement d'une réaction catalytique, à augmenter le plus possible la surface catalytique, en utilisant des catalyseurs très divisés ou très poreux. Mais dans certains cas, les parois des récipients où se produisent les réactions ont sur celles-ci une action inhibitrice certaine. Dans ces cas, une augmentation du rapport surface/volume diminuera considérablement la vitesse de réaction. Ainsi, dans l'action du chlore sur le méthane en présence de lumière, la réaction, rapide dans de grands récipients, est pratiquement inexistante dans des petits tubes de quelques millimètres de diamètre.

La connaissance de la nature homogène ou hétérogène d'une réaction chimique est de la plus grande importance pour sa conduite dans des réacteurs industriels. A ce niveau, en effet, les problèmes de transferts de masse et de chaleur prennent une très grande importance, et leur solution n'est pas la même selon que la réaction est homogène (c'est le cas le plus simple) ou hétérogène. Les formes chimiques actives des réactions sont de natures diverses et, souvent, on ignore par quel mécanisme intime la réaction se produit. Leur connaissance est cependant très importante, non seulement d'un point de vue fondamental mais aussi pour la réalisation pratique d'une transformation chimique. Parmi les formes actives qui peuvent participer au déroulement d'une réaction, on distingue : les molécules activées, les radicaux libres, les ions et les complexes.

Le mécanisme intime des réactions

Les réactions chimiques passent par des intermédiaires instables ; parmi ceux-ci, on peut citer les ions. Un **ion** est un atome ou une molécule dont l'état électronique est instable et qui a acquis une *charge positive (cation)* ou gagné une *charge négative (anion)*. Ces ions peuvent résulter de la coupure d'une liaison chimique. C'est la *scission hétérolytique,* que l'on peut schématiser comme suit :

$$A - B \rightarrow A:^{-} + B^{+}.$$

Les deux atomes A et B de la liaison se sont transformés en ions.

En phase gazeuse, la formation d'ions ne peut se faire par une simple élévation de la température. Pour créer l'ionisation des gaz, il faut des décharges électriques ou l'action des rayons X, ou encore celle des particules α. Le spectrographe de masse, précieux moyen d'analyse, permet de séparer et d'identifier les particules chargées produites par l'action de rayons corpusculaires ou électromagnétiques sur une substance donnée. Les ions interviennent énormément dans les réactions en solution dans l'eau. L'union d'ions de charges opposées pour former une molécule se fait sans énergie d'activation particulière ; il en résulte que les réactions de neutralisation sont rapides et instantanées.

Par contre les réactions entre ions de même signe, qui ne sont pas favorisées par l'attraction électrostatique, sont beaucoup plus lentes. Les ions peuvent aussi réagir avec les molécules. Par exemple, la réaction d'hydrolyse des dérivés halogénés pour former des alcools peut s'écrire :

$$RX + OH^{-} \rightarrow ROH + X^{-}.$$

L'ion ne subissant de la part de la molécule neutre ni attraction ni répulsion, la force ionique du milieu a peu d'importance dans ce type de réaction.

Les ions peuvent catalyser des réactions ; c'est le cas de certaines hydrolyses et isomérisations catalysées par les ions H^{+} ou OH^{-}.

Généralement, on pense aux molécules de la chimie minérale lorsque l'on parle de réactions ioniques. En fait, un grand nombre de composés chimiques peuvent former des ions. C'est le cas des molécules organiques. Ainsi, dans l'éther, le triphénylméthane réagit avec le potassium avec libération d'hydrogène et formation de deux ions, un ion négatif carboné, ou *carbanion,* et l'ion potassium positif :

$$(C_6H_5)_3CH + K \rightarrow (C_6H_5)_3C^{-} + K^{+} + 1/2H_2.$$

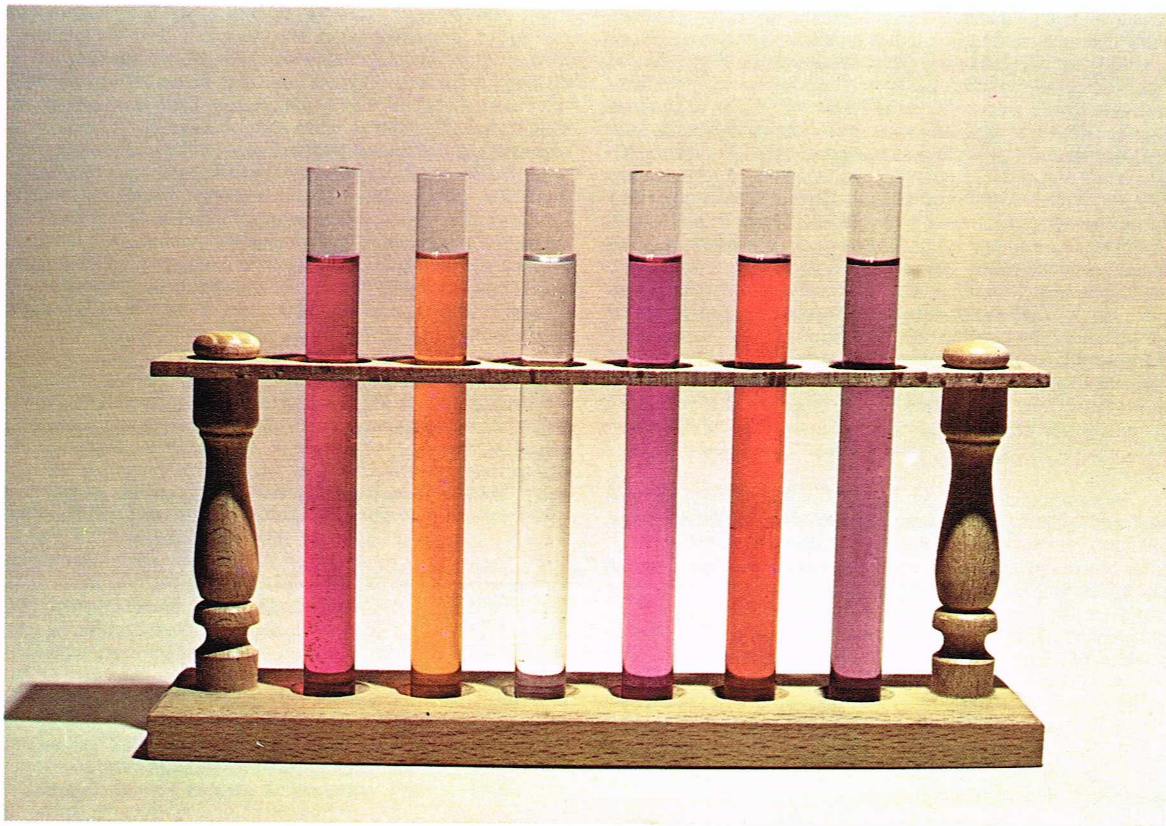

C. Nuridsany

◀ ***Différents* réactifs colorés *utilisés en chimie analytique ; de gauche à droite, eau iodée, fuchsine, hélianthine, liqueur de Fehling, sulfate d'indigo et permanganate de potassium.***

De même, le chlorure de triphénylméthyle peut, dans certaines conditions, se dissocier en un ion carboné positif appelé *ion carbonium,* ou *carbocation,* et en ion chlore négatif :

$$(C_6H_5)_3CCl \rightleftharpoons (C_6H_5)_3C^+ + Cl^-.$$

Les changements de coloration qui accompagnent l'ionisation de certains composés organiques peuvent être mis à profit pour montrer l'apparition d'ions dans un milieu. C'est la base de l'emploi des indicateurs colorés, comme nous le verrons plus loin à propos de l'analyse chimique.

Mais les carbocations et les carbanions jouent un rôle important dans le mécanisme de nombreuses réactions de la chimie organique. C'est ainsi que la polymérisation de l'isobutène en caoutchouc butyle met en jeu comme intermédiaire instable le carbocation tertiobutyle :

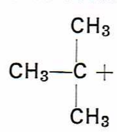

La polymérisation des diènes en caoutchoucs synthétiques peut se faire grâce à l'intervention de carbanions formés intermédiairement, grâce aux systèmes catalytiques, tel le butyl-lithium. Ainsi, les ions interviennent dans de très nombreuses réactions de la chimie organique et minérale.

Un deuxième type d'intermédiaire actif des réactions chimiques est constitué par les **radicaux** ou les atomes. Ceux-ci peuvent être engendrés par la scission homolytique de certaines liaisons. Ainsi, portés à haute température ou soumis à des radiations lumineuses de longueur d'onde appropriée (3 400 Å pour le chlore), les halogènes se scindent en atomes :

$$Cl_2 \rightleftharpoons Cl\cdot + Cl\cdot$$

Certains radicaux organiques peuvent provenir de la dissociation homolytique de liaisons particulièrement labiles.

Certains radicaux peuvent acquérir la stabilité de molécules organiques. Ainsi, l'hexaphényléthane est un composé incolore dont les solutions se colorent très rapidement en jaune par libération de radicaux triphénylméthyle :

$$(C_6H_5)_3C - C(C_6H_5)_3 \rightarrow 2(C_6H_5)_3C\cdot$$

Bien qu'il ne soit pas toujours aussi facile de les mettre en évidence d'une manière directe, les radicaux interviennent dans de nombreuses réactions.

Ainsi, la combustion des hydrocarbures, le cracking thermique des fractions pétrolières, la synthèse du polystyrène ou du polychlorure de vinyle mettent en jeu des *radicaux libres*. Dans certains cas, ceux-ci sont engendrés par la décomposition thermique des molécules à transformer (cas du cracking) ; dans d'autres cas, ils sont produits *in situ* par addition au milieu réactionnel de substances aisément décomposables en radicaux (cas des polymérisations radicalaires). Dans ces derniers cas, les composés les plus employés sont des peroxydes organiques (peroxydes de benzoyle, d'acétyle, de tertiobutyle) dont la liaison O—O se rompt facilement sous l'influence de la chaleur :

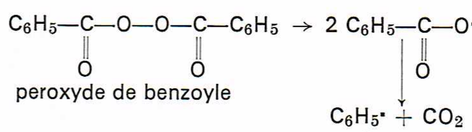

ou des diazoïques qui, par perte d'une molécule d'azote, engendrent deux radicaux. C'est le cas du diazobisisobutyronitrile (A.D.B.N.).

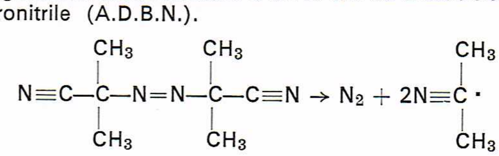

On peut encore engendrer par électrolyse les radicaux indispensables au déroulement de la réaction. Ainsi, dans la réaction de Kolbe sur les sels de sodium des acides organiques, on a :

$$2R{-}COO^- \xrightarrow{+\,e^-} 2R{-}COO\cdot \xrightarrow{-\,CO_2} 2R\cdot \rightarrow R{-}R$$

On utilise, enfin, pour engendrer les radicaux libres l'action de composés oxydants ou réducteurs. Par exemple, dans certaines polymérisations, on utilisera le couple sel ferreux-eau oxygénée pour engendrer des radicaux ·OH :

$$Fe^{++} + HO:OH \rightarrow Fe\,OH^{++} + \cdot OH$$

Un état également instable et réactif d'une espèce chimique est constitué par les *molécules excitées*. Dans ces formes activées, un électron a quitté l'orbitale où il se trouve normalement pour aller dans une orbitale dans laquelle il est moins lié à l'édifice chimique. Ces états excités peuvent être obtenus par *irradiation* mais sont souvent les intermédiaires normaux de réactions chimiques.

Enfin, l'état d'activation dans une réaction chimique peut être apporté par un *complexe*. Ce complexe peut se former avec des ions. C'est ainsi que beaucoup de réactions catalysées par les acides et les bases sont expliquées par la fixation d'un proton ou d'un ion hydroxyle sur le réactif. Par exemple, dans les réactions de substitution du groupement OH des alcools, la réaction est rendue possible par la formation du produit intermédiaire de fixation du proton sur l'alcool :

$$R:\ddot{\underset{..}{O}}:H + H^+ \rightleftharpoons R:\overset{\displaystyle H}{\ddot{\underset{..}{O}}}:H^+$$

L'élimination de H_2O par l'espèce substituante (Br^- par exemple) est alors plus aisée que n'aurait été l'élimination de OH^-.

Un autre exemple d'intervention de complexes est celui de l'halogénation des hydrocarbures aromatiques. Dans ce cas, un catalyseur (le plus souvent $FeCl_3$) polarise la liaison halogène-halogène, et l'extrémité positive du dipôle ainsi engendré forme avec le noyau aromatique un complexe appelé *complexe* π, qui précède la création d'une liaison σ C — halogène et l'élimination de l'hydracide (voir *L'halogénation des aromatiques*).

Certaines molécules employées pour catalyser des réactions forment un complexe avec le réactif. C'est le cas, par exemple, de BF_3 qui forme avec l'éther éthylique ou l'acide acétique des complexes isolables (l'éthérate de fluorure de bore par exemple). Dans la réaction de Friedel et Crafts, le chlorure d'aluminium $AlCl_3$ forme, avec les réactifs et les produits, des complexes dont la stabilité détermine la cinétique de la réaction. Ainsi, on admet que dans l'isomérisation des hydrocarbures paraffiniques il se forme intermédiairement le complexe :

$$\left[\begin{array}{c} Cl \\ Cl:\ddot{\underset{..}{Al}}:Cl \\ Cl \end{array}\right]^- R^+$$

entre le chlorure d'aluminium et des traces de dérivés halogénés R—Cl. Ce complexe est la source d'ions carbonium R^+ qui interviennent dans le mécanisme ionique de l'isomérisation.

Beaucoup de catalyseurs sont, comme nous le verrons plus tard, des métaux de transition (nickel, platine, fer, etc.) ou leurs dérivés (oxydes, sulfures, etc.). On peut expliquer leur comportement par leur aptitude à former des complexes qui mettent en jeu leurs orbitales *d* vacantes et certaines de leurs orbitales hybrides. La catalyse homogène par complexes consiste à former des intermédiaires actifs de transformation chimique en synthétisant des complexes métalliques (voir *La catalyse*). Les complexes sont des intermédiaires très importants dans toutes les réactions biochimiques. C'est ainsi que les enzymes interviennent grâce à des processus où les complexes mis en cause ne sont pas sans rappeler ceux de la catalyse hétérogène.

Il serait erroné de dire qu'actuellement la chimie est capable de décrire le mécanisme intime de toutes les réactions dont elle maîtrise le déroulement. Dans bien des cas, en effet, bien que l'on puisse mettre en évidence un schéma réactionnel d'ensemble, il est impossible d'affirmer l'existence des formes intermédiaires instables qui interviennent dans la transformation considérée. On peut certes le plus souvent affirmer que l'intermédiaire est ionique, radicalaire ou complexe, mais très souvent sa description ne va pas au-delà de cette affirmation. Même lorsque l'on ajoute à des réactifs l'intermédiaire présumé de leur réaction, on ne peut affirmer qu'il ne se transformera pas dans le milieu en un intermédiaire réel, dont celui que l'on a introduit n'aura été que le *précurseur*. Le caractère très réactif des espèces intermédiaires rend obligatoirement difficile et souvent impossible leur isolement. Leur existence n'est généralement étayée que par la convergence de différentes méthodes d'investigation. Au premier plan de celles-ci il faut citer la *thermodynamique*, qui détermine avec rigueur les conditions d'équilibre des états initial et final des réactions chimiques, et la *cinétique chimique*, qui traite d'aspects plus complexes du phénomène chimique et plus particulièrement de la vitesse de passage de l'état initial à l'état final dans un état de non-équilibre. La thermodynamique détermine l'aptitude du système chimique à passer d'un état à l'autre, c'est-à-dire en quelque sorte la force motrice du système, la cinétique traitant de la manière dont cette évolution a lieu. Il y a donc lieu, avant d'aborder les réactions chimiques, de rappeler brièvement les bases de la thermodynamique et de la cinétique chimique.

La thermodynamique

Le **premier principe de la thermodynamique** est celui de la *conservation de l'énergie*. De même que le principe de conservation de la matière permet une description quantitative des transformations que celle-ci subit dans les réactions chimiques, de même, le premier principe permet de rendre compte des différentes transformations d'énergie qui accompagnent la réaction.

En toute rigueur, on pourrait dire que la conservation de l'énergie n'est pas une loi absolue et que, suivant la fameuse équation d'Einstein qui lie la masse à l'énergie, $E = mc^2$, chaque fois qu'il apparaît de l'énergie E, une certaine masse *m* disparaît. En fait, *c* représentant la vitesse de la lumière, soit 300 000 km/s ou $3 \cdot 10^{10}$ cm/s, la perte de masse lors d'une réaction chimique est plus que négligeable et notoirement en deçà de ce que nos appareils de mesure permettent de détecter. On néglige donc cet aspect des transformations de la matière et de l'énergie que l'on considère séparément.

Il est impossible de mesurer le contenu énergétique d'un système chimique de la manière dont on détermine sa masse par exemple; on peut cependant en mesurer les variations d'énergie.

Les systèmes chimiques renferment différents types d'énergie, parmi lesquels on peut citer :

— l'*énergie interne;* ce sont les forces intermoléculaires, les énergies de liaison entre atomes et les énergies correspondant aux mouvements divers des molécules (translation, vibration, rotation, etc.) ;

— l'*énergie potentielle* dans le champ de gravitation ; en d'autres termes, le travail des forces de pesanteur ;

— l'*énergie cinétique;* dans un système ouvert, on devra tenir compte de l'énergie cinétique des courants de matières (écoulements de fluides par exemple).

On peut ajouter à cela l'énergie résultant des forces de tension superficielle, l'énergie magnétique, etc.

Le premier principe enseigne que la variation globale d'énergie qui accompagne un processus chimique ne dépend que de l'état initial et de l'état final du système. Cette variation d'énergie est égale à la somme de la quantité de travail et de chaleur échangée. On l'exprime ainsi pour un système matériellement isolé :

$$\Delta U = Q + W,$$

où ΔU est la variation d'énergie interne, Q et W respectivement la quantité de chaleur et la quantité de travail échangées. On compte comme positive toute énergie fournie au système.

Pour une transformation à volume constant, le travail des forces de pression étant nul, l'expression se réduit à :

$$\Delta U_v = Q_v.$$

Pour une transformation à pression constante, on a :

$$U_2 - U_1 = \Delta U = Q_P - P(V_2 - V_1),$$

que l'on peut écrire :

$$(U_2 + PV_2) - (U_1 + PV_1) = Q_P.$$

Cette expression conduit à utiliser une fonction caractéristique du système que l'on appelle *enthalpie* et qui est reliée à l'énergie interne U par l'égalité : $H = U + PV$.

Si la transformation a lieu à pression constante, $\Delta U + P\Delta V$ représente la chaleur reçue par le système et qui a été transformée en travail : $P\Delta V$, auquel s'ajoute une certaine augmentation de l'énergie interne U du système. Dans ce cas, la différence entre l'enthalpie de l'état final et celle de l'état initial est égale à la chaleur de

réaction à pression constante Q_P :

$$(\Delta H)_P = Q_P;$$

l'enthalpie H joue le rôle de l'énergie interne U pour les réactions à volume constant.

Comme toutes les fonctions thermodynamiques, l'enthalpie ne peut être exprimée en valeur absolue. On n'en détermine que des variations.

Dans l'expression d'une réaction chimique, on peut, outre l'égalité pondérale entre les produits formés et les réactifs de départ, exprimer sa *variation d'enthalpie*, c'est-à-dire la *chaleur de réaction*. Comme il s'agit de variations, on doit fixer un état de référence ; on prend habituellement 1 bar pour la pression et 25 °C (298 °K) pour la température, les gaz étant pris à l'état de gaz parfaits. On exprime donc les quantités de chaleur par $\Delta H°_{298}$ pour l'état de référence. Pour des états différents de l'état de référence, il faut connaître les variations de H. Ce sont les mesures calorimétriques de réactions de combustion, dont la somme algébrique sert à retrouver la réaction principale, qui permettent de mesurer les quantités de chaleur. Mais les calorimètres opérant le plus souvent à volume constant (calorimètres clos), ils fournissent ΔU et non ΔH.

Les enthalpies des substances élémentaires sont données dans des tables relatives à l'état standard. On trouve aussi les enthalpies pour les réactions de combustion (chaleurs de combustion) et pour diverses réactions chimiques (chaleurs de réaction).

Le **deuxième principe de la thermodynamique** limite les possibilités de transformation de la chaleur en travail. S'il est possible de transformer intégralement du travail en chaleur, la réciproque n'est pas vraie. Une machine thermique ne peut céder uniquement sous forme de travail la chaleur empruntée à la source chaude ; un certain gaspillage est inéluctable. La chaleur ne peut être transformée en travail que si une autre quantité de chaleur passe de la source chaude à la source froide. Le rapport des chaleurs Q_1 (reçue de la source chaude) et Q_2 (reçue de la source froide par une machine réversible) est égal au rapport $\frac{T_1}{T_2}$ des températures absolues des deux sources.

Dans un cycle réversible, on a donc :

$$\sum \frac{Q_i}{T_i} = 0 \quad \text{ou} \quad \int \frac{dQ}{T} = 0.$$

Dans une transformation réversible amenant un système d'un état initial *i* à un état final *f*, la valeur de l'intégrale $\int_i^f \frac{dQ}{T}$ est égale à la variation $S_f - S_i$ d'une fonction S, l'*entropie*. Si la transformation est irréversible, $dS > \frac{dQ}{T}$; si, de plus, elle est adiabatique ($dQ = 0$), on a $dS > 0$. Ainsi, contrairement à l'énergie interne, qui reste constante, l'entropie d'un *système isolé*, lorsqu'il subit une transformation irréversible, ne peut qu'augmenter. Une caractéristique fondamentale des processus irréversibles est qu'ils conduisent à une augmentation de l'entropie et réduisent progressivement l'aptitude du système à fournir du travail. On dit que ces systèmes tendent vers le désordre. L'état de désordre est plus probable que l'état ordonné. Ainsi, une réaction spontanée va d'un état de faible probabilité à un état de probabilité plus élevé.

Boltzmann, considérant que l'entropie augmente dans les processus spontanés et liant cette augmentation du désordre à la probabilité, proposait en 1896 l'équation suivante :

$$S = k \cdot lnY + c^{te},$$

où S est l'entropie du système, *k* la constante de Boltzmann, et Y le rapport de la probabilité de l'état actuel à celle de l'état où régnerait un ordre complet.

En 1912, Planck suggérait que la constante indéterminée devait être nulle :

$$S = k \cdot lnY.$$

Dans un arrangement totalement ordonné comme on peut le trouver dans un solide à la température du zéro absolu, Y serait égal à l'unité et S égal à 0.

Le **troisième principe de la thermodynamique** assigne à l'entropie de tout système cristallisé une valeur nulle au zéro absolu. Cela revient à admettre qu'à cette température toute énergie cinétique de translation, de rotation, toute vibration ayant disparu, le cristal se trouve dans un état parfaitement ordonné. Ainsi, toute substance possède une entropie définie par une valeur absolue indépendante de l'origine arbitraire que l'on est contraint de définir pour les autres fonctions thermodynamiques.

En résumé, sans s'étendre sur la thermodynamique, qui concerne surtout les physiciens, on peut affirmer que la notion d'enthalpie (chaleur de formation, chaleur de réaction) est des plus utiles pour le chimiste : elle lui permet de prévoir par le calcul le résultat de réactions chimiques. De même, l'entropie permet d'expliquer pourquoi certaines réactions sont si favorisées bien qu'elles produisent peu, et parfois pas, de chaleur.

S'il est utile au chimiste de prévoir les effets thermiques des réactions chimiques et leurs possibilités d'existence, il lui est non moins nécessaire de connaître l'influence des différents facteurs sur la vitesse de ces transformations. C'est la cinétique chimique qui va traiter de ce second aspect des réactions.

La cinétique chimique

La cinétique chimique traite de l'influence de différents facteurs physiques (température, pression, concentration) sur la vitesse des réactions. Celle-ci est mesurée par la variation, en fonction du temps, de la concentration des espèces chimiques intervenant dans la réaction.

Influence de la concentration — Ordre des réactions

Dans certains cas, la vitesse est proportionnelle à une puissance simple de la concentration C_1, C_2... des réactifs :

$$V = kC_1^n \cdot C_2^m...$$

On dit que la réaction est d'ordre $(n + m)$, somme des exposants. Mais elle est d'ordre partiel *n* par rapport au corps 1, *m* par rapport au corps 2, etc. La réaction peut présenter un ordre par rapport aux réactifs, mais aussi par rapport aux produits : l'ordre peut être entier ou fractionnaire, positif ou négatif. Pour les réactions simples, l'ordre est un nombre entier qui n'excède pas 3. En effet, la probabilité que plus de trois molécules se rencontrent avec l'énergie d'activation nécessaire à leur réaction (choc triple) est très faible. En ce qui concerne les réactions complexes, qui, en fait, sont la somme de plusieurs équations successives, il est nécessaire d'utiliser plusieurs équations cinétiques pour en décrire le mécanisme.

Il est important de souligner ici que l'équation cinétique ne correspond pas toujours à l'équation stœchiométrique.

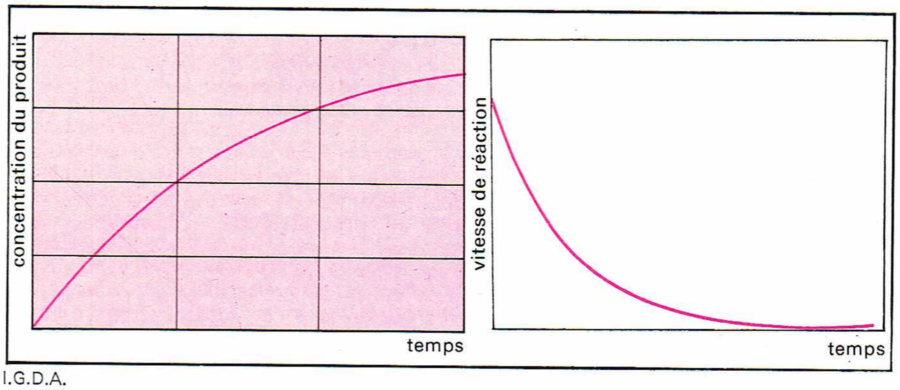

I.G.D.A.

▲ *A gauche, relation entre la concentration en produit formé et le temps dans le cas d'une réaction d'ordre 1. A droite, relation entre la vitesse de réaction et le temps dans le cas d'une réaction d'ordre 1.*

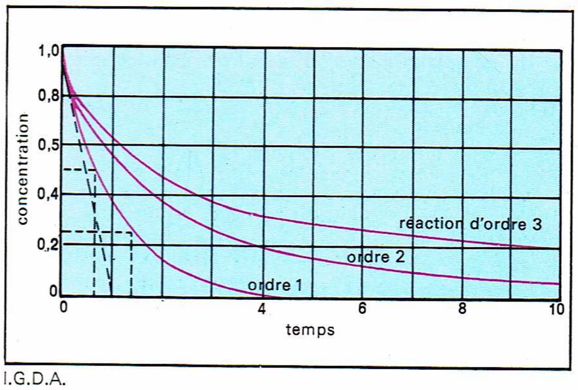

I.G.D.A.

◀ *Comparaison entre le déroulement de réactions d'ordres 1, 2 et 3, lorsque la concentration initiale en réactifs et la vitesse initiale sont égales dans les trois cas.*

▶ *Variations du nombre de collisions en fonction de l'énergie de la molécule, à différentes températures.*

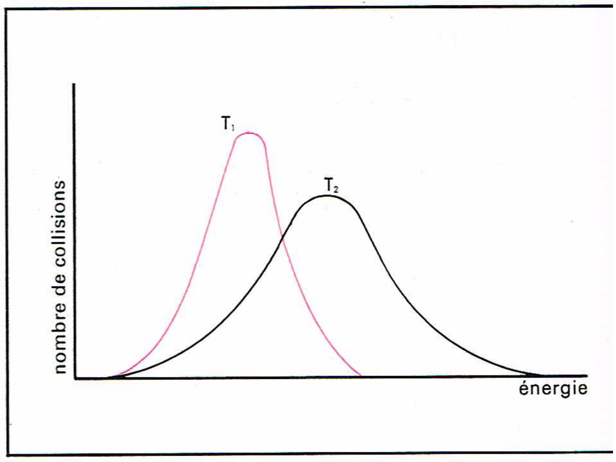

I.G.D.A.

Le cas de la synthèse thermique des hydracides halogénés est, à ce point de vue, particulièrement illustratif. Alors que pour l'acide iodhydrique les ordres sont bien ceux qui correspondent à la stœchiométrie :

$$H_2 + I_2 \rightarrow 2IH$$

et $$V = k(H_2)(I_2),$$

dans le cas de l'acide bromhydrique, l'expression de la vitesse se complique énormément tandis que la stœchiométrie reste la même :

$$H_2 + Br_2 \rightarrow 2HBr$$

et $$V = k\,\frac{(H_2)\sqrt{(Br_2)}}{C + \frac{(HBr)}{(Br_2)}}$$

— Les *réactions d'ordre 1* sont celles dont la vitesse est proportionnelle à la concentration d'un seul des corps réagissants :

$$V = -\frac{dC}{dt} = k_1C.$$

Cette expression montre que la constante k est égale à la vitesse pour une valeur unitaire de la concentration. Par ailleurs, mise sous la forme :

$$k_1 = -\frac{dC}{C}\cdot\frac{1}{dt},$$

elle fait ressortir que la vitesse est égale à la fraction de réactif $\left(-\frac{dC}{C}\right)$ qui se transforme par unité de temps ($dt = 1$).

L'ordre 1 peut signifier que le processus chimique se produit en un acte unique n'impliquant qu'une particule, mais il correspond le plus souvent à des phénomènes complexes dans lesquels un seul corps traduit son intervention par l'influence de sa concentration sur la vitesse de la réaction.

— Dans les *réactions d'ordre 2,* la vitesse est proportionnelle au produit de la concentration de deux réactifs ou au carré de la concentration d'un seul corps :

$$V = k_2 \cdot C_A \cdot C_B \quad \text{ou} \quad V = k_2 \cdot C^2.$$

Dans ce cas la constante de vitesse est égale à la vitesse de réaction lorsque la concentration (ou le produit des concentrations) est égale à l'unité.

— Les *réactions d'ordre* 3 sont très peu nombreuses. En fait, la plupart de celles que l'on connaît correspondent à des réactions où la concentration de deux ou d'un seul des réactifs est maintenue constante.

Influence de la température

La vitesse d'une réaction chimique dépend de la concentration des réactifs mais aussi de la température. C'est en 1889 qu'Arrhenius proposa la relation qui lie la vitesse de réaction à la température :

$$k = Ae^{-E/RT}$$

Dans cette expression, k est la constante de vitesse, E l'énergie d'activation et A un facteur pratiquement indépendant de la température qui, dans les réactions bimoléculaires, est le *nombre de collisions.* En outre, e est la base des logarithmes naturels, R la constante des gaz parfaits et T la température absolue. La constante A de l'équation d'Arrhenius a été interprétée par Eyring; elle s'écrit :

$$A = \frac{1}{h\nu^*CN}$$

où h est la constante de Planck, ν^* le coefficient de fugacité du complexe activé, C le facteur de compressibilité moyen du milieu réactionnel, et N le nombre d'Avogadro.

D'après la théorie d'Eyring, la réaction passe par l'intermédiaire d'un complexe activé qui se décompose ensuite pour former les produits. On peut, grâce à cette théorie, prévoir les constantes de vitesse à partir de la structure chimique et de la répartition d'énergie. Malheureusement, ces résultats sont généralement très qualitatifs et ne donnent encore que des ordres de grandeur des vitesses.

Les réactions réversibles et irréversibles

Dans l'étude de la vitesse des réactions, il faut faire une autre distinction importante : entre les réactions irréversibles et réversibles.

Une réaction chimique est dite *irréversible* si elle évolue vers un système final dans lequel un ou tous les constituants du système initial ont disparu. C'est le cas, par exemple, de la formation de l'eau par action de l'hydrogène sur l'oxygène (mélange tonnant).

La réaction est dite *réversible* si elle s'arrête en apparence à un moment où les constituants du système initial et du système final subsistent en présence les uns des autres sans que leurs concentrations molaires varient. Il y a alors *équilibre chimique*. Pour une réaction donnée, s'effectuant avec une certaine vitesse, l'équilibre est atteint si la réaction inverse s'effectue à la même vitesse. C'est, par exemple, le cas d'une réaction entre un alcool et un acide organique donnant un ester et de l'eau, et inversement :

$$RCOOH + R'OH \rightleftharpoons RCOOR' + H_2O$$

Si le système initial est indiqué par A + B et le système final par AB, les molécules AB se dissocient en A et B avec une vitesse v' alors que les molécules A et B forment des molécules AB avec une vitesse v :

$$A + B \underset{v'}{\overset{v}{\rightleftharpoons}} AB$$

L'équilibre est atteint si $v = v'$.
Comme $v = k \cdot C_A \cdot C_B$ et $v' = k' \cdot C_{AB}$, on a pour l'état d'équilibre :

$$k \cdot C_A \cdot C_B = k' \cdot C_{AB}$$

et donc :

$$\frac{C_{AB}}{C_A \cdot C_B} = \frac{k}{k'} = K$$

où K est la constante d'équilibre pour une température donnée.

Pour les réactions réversibles, il y a lieu de remarquer que l'équilibre se déplace sous l'effet de l'augmentation de la pression dans le cas des milieux gazeux et sous l'effet d'une augmentation de température. Dans le premier cas, l'équilibre se déplace du côté du volume minimal, et inversement en cas de diminution de la pression. Dans le deuxième cas, l'équilibre se déplace dans le sens de la réaction qui absorbe de la chaleur, et inversement en cas de diminution de la température.

En ce qui concerne les catalyseurs qui, comme nous le verrons plus loin, ont pour effet d'augmenter la vitesse des réactions, ils n'ont aucun effet sur la constante d'équilibre.

Dans la pratique, on peut favoriser la production d'un composé issu d'une réaction équilibrée, en éliminant celui-ci à mesure de sa formation ou en éliminant le coproduit de la réaction. Ainsi, dans la préparation des esters par action des acides sur les alcools, on déplace l'équilibre vers la transformation totale en ester en éliminant l'eau formée, par des méthodes physiques ou chimiques.

Mais l'élimination d'un produit de la réaction peut ne pas être souhaitable. Ainsi, dans le cas de *réactions équilibrées autocatalytiques,* c'est-à-dire où le produit de la réaction est nécessaire à l'accomplissement de celle-ci, il serait sans intérêt d'éliminer complètement le produit formé. C'est ce qui se passe dans la préparation des acides gras par hydrolyse des graisses.

En revanche, dans le cas d'une *réaction catalytique inhibée,* on a avantage à soustraire le produit de la réaction inhibiteur de celle-ci.

La cinétique précise donc qu'il n'est pas indifférent d'éliminer l'un quelconque des produits, mais qu'il faut se limiter à celui (ou à ceux) dont l'effet cinétique est nul ou défavorable.

En ce qui concerne l'action de la température, dans le cas des réactions exothermiques, l'élévation de température augmente la vitesse mais fait régresser l'équilibre. C'est ainsi que, thermiquement, la synthèse de l'ammoniac ($N_2 + 3H_2 \rightleftharpoons 2NH_3$) est réalisable à 1 000 °C, mais la constante d'équilibre est alors de 10^{-7} !

$$K = \frac{P^2_{NH_3}}{P_{N_2} \times P^3_{H_2}} = 10^{-7}$$

Notons au passage que, dans ce cas, ce sont les pressions P des réactifs et des produits qui interviennent dans la constante d'équilibre et non les concentrations.

Ici, l'emploi d'un catalyseur devient une nécessité en permettant de réaliser la réaction à basse température.

Les réactions simultanées ou concurrentes

Il est relativement rare, surtout en chimie organique, qu'une réaction se produise seule et ne conduise qu'au produit que l'on désire obtenir. Très souvent, la réaction principale est accompagnée de réactions secondaires qui se déroulent simultanément en consommant une partie plus ou moins importante du réactif de départ et en diminuant le rendement en produit désiré. Il est important de connaître l'influence de différents paramètres sur la réaction principale et sur la ou les réactions concurrentes, de manière à éviter ces dernières. C'est le plus souvent l'emploi de catalyseurs sélectifs qui permet de résoudre ce problème.

Les réactions consécutives ou successives

Dans les réactions consécutives, les produits d'une réaction subissent une nouvelle réaction qui conduit à de nouveaux produits. Parfois, certaines réactions sont de véritables cascades de transformations successives. Par exemple, dans la réaction du chlore sur le méthane, on forme du chlorure de méthyle; celui-ci réagit à son tour pour donner du chlorure de méthylène, lequel à son tour donne du chloroforme, qui, par réaction sur le chlore, donne le tétrachlorure de carbone :

$CH_4 + Cl_2 \rightarrow HCl + CH_3Cl$ (chlorure de méthyle)
$CH_3Cl + Cl_2 \rightarrow HCl + CH_2Cl_2$ (chlorure de méthylène)
$CH_2Cl_2 + Cl_2 \rightarrow HCl + CHCl_3$ (chloroforme)
$CHCl_3 + Cl_2 \rightarrow HCl + CCl_4$ (tétrachlorure de carbone).

Dans de telles réactions, il est aisé d'obtenir le produit final avec un rendement excellent; le premier produit peut aussi être fourni avec une certaine sélectivité, à condition de limiter la conversion. En ce qui concerne les produits intermédiaires qui se forment pour disparaître ensuite, leur concentration passe par un maximum en fonction du degré de conversion, mais il est impossible de les obtenir seuls.

Un type particulier de réactions successives est celui des *réactions autocatalytiques,* où la réaction produit son propre catalyseur. Le réactif A se transforme en C grâce à un intermédiaire B qui est le précurseur de C :

$$A \rightarrow B \rightarrow C.$$

Pendant la réaction, B passe par un maximum de concentration puis disparaît en se transformant en C.

Les réactions en chaîne

Dans ces réactions, l'espèce réactive qui permet à la réaction de se réaliser se régénère suivant un processus cyclique. La chloration photochimique ou thermique des composés organiques illustre ce type de réaction :

$Cl_2 + h\nu \rightarrow 2Cl\cdot$ *initiation*

$Cl\cdot + RH \rightarrow R\cdot + HCl$
$R\cdot + Cl_2 \rightarrow R{-}Cl + Cl\cdot$ } *propagation*

$2R\cdot \rightarrow R{-}R$
$2Cl\cdot \rightarrow Cl_2$
$R\cdot + Cl\cdot \rightarrow R{-}Cl$ } *rupture*

La décomposition sous l'influence de la lumière (ou de la chaleur) des molécules de chlore en radicaux Cl· (ou atomes de chlore) déclenche la réaction. C'est l'étape d'*initiation.* Puis les deux équations suivantes représentent l'étape de *propagation.* On voit que l'atome de chlore attaque une molécule de composé RH (hydrocarbure par exemple) pour former un radical R· ainsi que de l'acide chlorhydrique, et, dans la seconde réaction, le radical R· attaque une molécule de chlore en formant le dérivé halogéné R—Cl et en régénérant un atome de chlore Cl·. Lorsque ce processus est amorcé, il devrait se poursuivre jusqu'à épuisement de l'un des réactifs, mais les réactions de rupture de chaîne l'interrompent en partie en recombinant les atomes et les radicaux ou en faisant des réactions parasites avec les parois du réacteur, avec l'oxygène, etc.

Dans certains cas de réactions en chaîne, une seule particule réactive peut en produire plusieurs autres. Ce phénomène, en se produisant dans un processus cyclique, peut donner lieu à un branchement de chaînes dont le nombre croît rapidement en progression géométrique; la réaction devient alors une *explosion.*

Les réactions en chaîne sont particulièrement intéressantes dans les polymérisations, dans les oxydations, etc. Ce type de mécanisme de réaction est particulièrement sensible aux inhibiteurs car une seule molécule étrangère peut rompre la chaîne de milliers de molécules.

Les réactions en phase hétérogène

Du point de vue de la cinétique chimique, elles ne constituent pas une catégorie de réactions au même titre que les précédentes mais posent un certain nombre de problèmes dans les études quantitatives de réactions. Lorsque l'on parle de réactions en phase hétérogène, on fait souvent allusion à la catalyse, dont il sera question au chapitre suivant. Cependant, les réactions chimiques peuvent être hétérogènes sans être catalytiques. C'est, par exemple, le cas de la réaction d'un gaz sur un liquide dans lequel il est insoluble. Dans ce cas, de même que dans celui d'un liquide sur un solide, il faut faire intervenir, en plus des considérations chimiques, des facteurs physiques qui peuvent être limitatifs de la vitesse réactionnelle. Ainsi, la *vitesse de transfert des réactifs et des produits* entre les deux phases devient très importante et complique énormément le traitement mathématique de la réaction. La *diffusion* est également un facteur important dans les réactions hétérogènes. Dans la pratique, pour réduire l'effet limitatif de la diffusion sur la vitesse de réaction, on opère dans des réacteurs munis de dispositifs efficaces d'agitation.

Les réactions chimiques se produisant parfois à des vitesses trop faibles pour être exploitées industriellement, on doit les *activer.* Le moyen le plus couramment utilisé pour activer une réaction est la température, dont l'effet peut être intensifié par l'emploi de catalyseurs. Un autre intérêt des catalyseurs sera d'orienter la réaction vers la production d'un produit à l'exclusion d'autres produits indésirables. Ainsi, les catalyseurs auront un double but : activer une réaction chimique et augmenter sa sélectivité.

La catalyse

Depuis fort longtemps, l'homme avait observé que certaines substances pouvaient par leur seule présence modifier la vitesse d'une réaction. Ce n'est qu'en 1835 que Berzélius appela ces substances *catalyseurs,* la catalyse étant l'action de ces substances sur les réactions chimiques.

Un catalyseur est une substance qui augmente la vitesse d'une réaction chimique sans y être elle-même impliquée de façon permanente. Lorsque la réaction catalytique a lieu dans une seule phase, il s'agit de *catalyse homogène;* lorsqu'elle a lieu à l'interface de deux phases, il s'agit de *catalyse hétérogène.* On parle parfois de *catalyseurs négatifs,* c'est-à-dire de substances qui diminuent la vitesse d'une réaction; mais la grande majorité des catalyseurs étant utilisée pour favoriser les réactions chimiques et non pour les inhiber, on a gardé du catalyseur la notion d'activateur des réactions.

Par ailleurs, on précise souvent, dans la définition d'un catalyseur d'une réaction, qu'il modifie la vitesse sans être consommé ou altéré. Cette définition est très théorique. En effet, les catalyseurs subissent au cours de l'acte catalytique des modifications qui les altèrent progressivement. D'autre part, lors des manipulations en laboratoire ou dans l'industrie, une certaine perte est inévitable. Bon nombre de catalyseurs hétérogènes subissent des modifications plus ou moins profondes de leur surface catalytique qui obligent à les régénérer périodiquement. Par exemple, le platine déposé sur

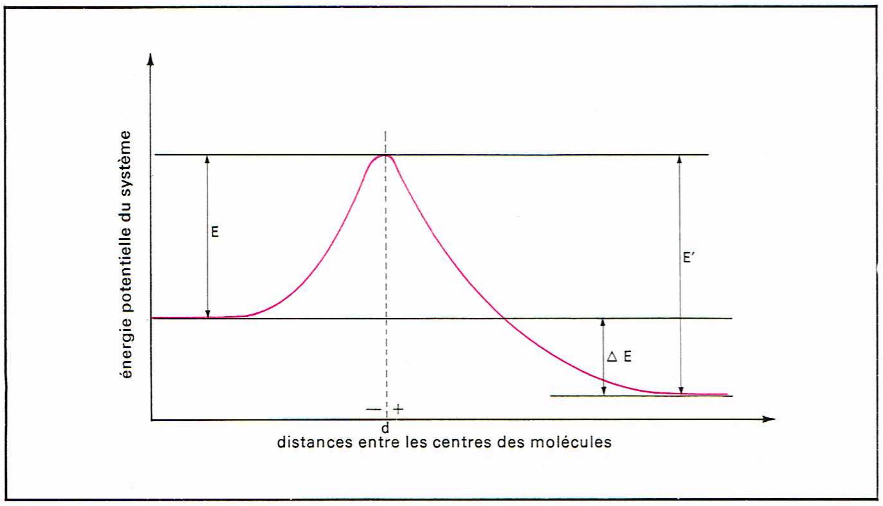

I.G.D.A.

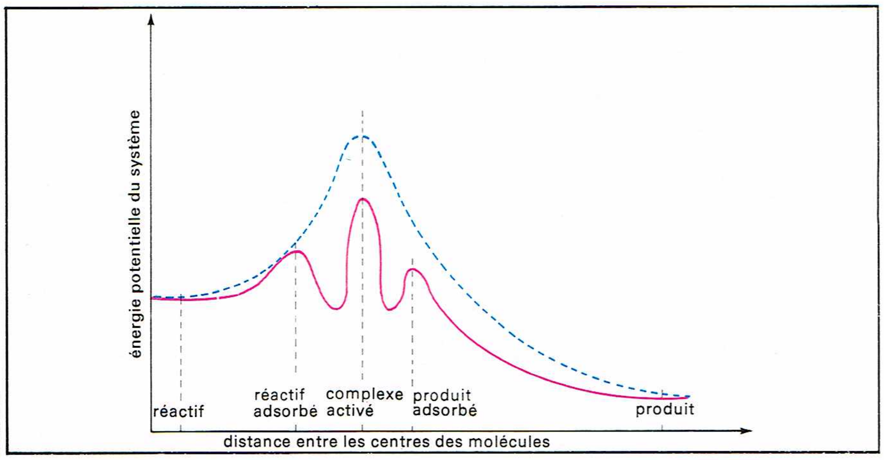

I.G.D.A.

▲ ***Courbes des variations de l'énergie potentielle d'un système en fonction de la distance entre le centre des molécules : en haut, durant une réaction normale ; en bas, durant une réaction catalysée.***

alumine, utilisé dans le « reforming catalytique », se recouvre de coke qui gêne progressivement l'accès des réactifs et que l'on doit « brûler » périodiquement. Au cours de leur « fonctionnement », certains catalyseurs métalliques subissent des modifications de leur réseau cristallin qui atténuent ou suppriment leur efficacité.

Un certain nombre de principes fondamentaux concernant la catalyse doivent être rappelés ici.

En premier lieu, un catalyseur ne peut accélérer qu'une réaction thermodynamiquement possible ; il ne peut pas rendre possible une réaction classée comme impossible par la thermodynamique.

Ensuite, l'équilibre atteint par une réaction est indépendant de la présence d'un catalyseur. En d'autres termes, un catalyseur augmente la vitesse d'une réaction mais n'en modifie pas la valeur de l'équilibre. Par conséquent, un catalyseur qui accélère la réaction directe accélère également la réaction inverse dans un équilibre. Cela a une application pratique, qui, *a priori,* peut paraître paradoxale : dans l'étude du catalyseur le plus approprié pour une réaction, on recherche souvent celui de la réaction inverse lorsqu'elle est plus aisée à étudier. Enfin, bien que par définition le catalyseur ne soit pas concerné de façon permanente dans la transformation catalytique et en sorte théoriquement inchangé, il peut intervenir de façon temporaire avec le ou les réactifs. Il forme, avec le réactif, des espèces chimiques intermédiaires qui se transforment plus facilement en produit de la réaction que le réactif lui-même. Ainsi, le catalyseur assure à la réaction un nouveau cours énergétiquement plus favorable que son déroulement purement thermique.

Pour passer de l'état initial à l'état final, le catalyseur peut mettre en jeu plusieurs étapes, mais nécessitant une activation plus faible que la réaction purement thermique. En catalyse hétérogène, les réactifs sont activés par adsorption sur une surface solide. En catalyse homogène, il se forme un complexe entre le réactif (ou les réactifs) et le catalyseur. Ce complexe, en se dissociant, fournit le produit et régénère le catalyseur.

La catalyse homogène

On classe les différents types de catalyse homogène sur la base des espèces intermédiaires actives qu'elles mettent en jeu. C'est ainsi que l'on distingue : la *catalyse acide-base,* qui met en jeu le proton ou l'ion H_3O^+, l'ion OH^-, l'acide acétique, l'ammoniac, etc. ; la *catalyse par les complexes de coordination,* qui met en jeu des sels métalliques ou leurs complexes de coordination avec des substances organiques ou minérales ; la *catalyse d'oxydo-réduction* et, enfin, la *catalyse homogène en milieu gazeux,* mettant en œuvre des molécules gazeuses minérales, comme I_2, NO, etc.

● *La catalyse acide-base*

Un grand nombre de réactions chimiques, dont certaines sont d'un intérêt industriel important, sont catalysées par les acides et les bases. Le plus grand nombre d'entre elles sont catalysées par les ions H_3O^+ et OH^-.

Certaines réactions sont catalysées à la fois par H_3O^+ et par OH^- (c'est le cas de l'hydrolyse des esters), d'autres uniquement par H_3O^+ ou par OH^-. Mais on peut aussi catalyser des réactions par des acides ou des bases dans leur définition la plus large, c'est-à-dire par des substances capables de céder ou d'accepter un proton. Cette catalyse, qui s'étend à d'autres espèces que H_3O^+ et OH^-, est appelée *catalyse acide-base généralisée.* Les solvants protoniques, l'eau tout spécialement, peuvent également jouer le rôle d'acides et faire apparaître dans l'expression de la vitesse de réaction un terme de réaction « spontanée ». On rencontre ce cas dans l'hydratation des oléfines en alcools.

La catalyse acide-base ne se rencontre pas seulement dans les milieux aqueux. De nombreuses réactions des oléfines ont lieu en milieu hydrocarboné, grâce à la présence de protons. Ainsi, la polymérisation de l'isobutène en caoutchouc butyle se fait par l'intermédiaire de carbocations qui sont formés par l'addition d'un proton à l'isobutène :

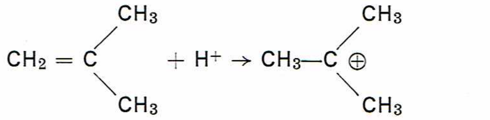

Ce proton est engendré par l'action de traces d'eau sur le chlorure d'aluminium, qui est le catalyseur de la réaction :

$$AlCl_3 + H_2O \rightarrow H^+ + (AlCl_3OH)^-.$$

D'autres réactions, qui seront étudiées plus tard, sont catalysées par les ions carbonium et qualifiées de réactions cationiques, il s'agit de l'alkylation (réaction de Friedel et Crafts), de l'isomérisation, etc. L'eau a une grande importance dans ces réactions catalysées par les acides. En effet, le proton H^+ est extrêmement petit par rapport aux autres ions ou molécules ; dès qu'il s'approche d'une molécule, il ne met pas en jeu les forces de répulsion entre nuages électroniques mais exerce par contre une action polarisante extrêmement importante. C'est pourquoi on ne rencontre pas le proton à l'état libre ; il se fixe sur une molécule support pour « diluer » sa charge. Dans l'eau, il se fixe sur une molécule avec libération de 103 kcal et formation de H_3O^+, cette espèce étant ensuite solvatée par trois molécules d'eau. Si le milieu comporte des molécules acceptrices, telles que les oléfines, le proton se fixe sur celles-ci ; on conçoit la concurrence qui peut exister dans le milieu entre oléfine à transformer et traces d'eau acceptrices de proton.

● *La catalyse par complexes de coordination*

On assiste depuis une dizaine d'années au développement d'un nouveau type de catalyse, qui met en jeu des complexes de coordination entre un ion métallique et les molécules de réactifs. Le départ d'une recherche qui s'est développée dans le monde entier a été donné par la découverte, par K. Ziegler en 1954, de la polymérisation stéréospécifique des oléfines par les complexes de métaux de transition. Certains de ces complexes, en particulier les complexes obtenus par réaction d'un sel de titane sur un alkylaluminique et utilisés pour la polymérisation du propylène, agissent du reste en phase hétérogène. Après la polymérisation stéréospécifique du propylène et la polymérisation régulière de l'éthylène, ces catalyseurs ont permis de synthétiser le polybutadiène cis 1-4, le polyisoprène cis 1-4, qui est un succédané du caoutchouc naturel dont il reproduit exactement

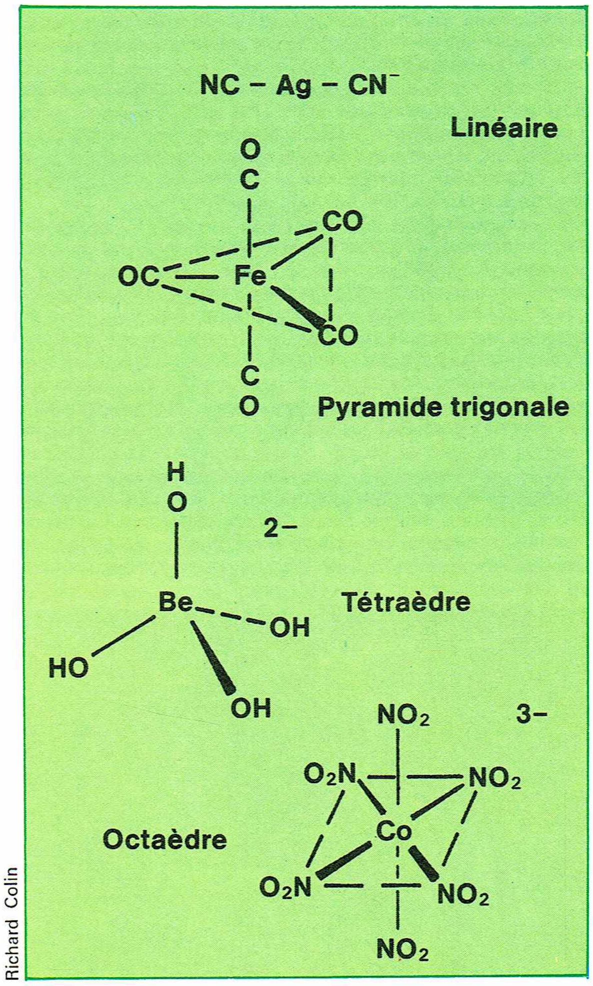

Richard Colin

A. Rizzi

la structure moléculaire. Dans le domaine des synthèses industrielles de grands intermédiaires chimiques, la catalyse homogène par complexes a permis la synthèse de l'acétaldéhyde à partir d'éthylène, la synthèse des aldéhydes à partir des oléfines (synthèse OXO), la synthèse de l'acide acétique par action de l'oxyde de carbone sur le méthanol, etc.

Le succès de ce type de catalyse est dû à deux caractéristiques essentielles : d'une part, son activité extrêmement élevée par rapport à celle des catalyseurs habituels de la catalyse hétérogène qui utilisent aussi des métaux de transition, et, d'autre part, sa sélectivité souvent très grande et parfois absolue permettant de n'obtenir qu'un seul produit à l'exclusion de sous-produits souvent gênants. Cette sélectivité peut aller jusqu'à un contrôle stérique du catalyseur sur les réactifs tel qu'il peut imposer la configuration du produit. C'est ainsi que, grâce à ces catalyseurs, on a pu reproduire la microstructure cis 1-4 du polyisoprène avec une pureté presque totale et atteindre ainsi le degré d'organisation stérique du caoutchouc naturel. L'activité de ces catalyseurs complexes, exprimée en masse de produit transformé par gramme de complexe mis en œuvre, la sélectivité quasi absolue de leur action peuvent les faire comparer à des enzymes rudimentaires, enzymes qui, comme catalyseurs des réactions biologiques, ont des activités encore bien plus importantes, que le chimiste n'espérait pas atteindre il y a une dizaine d'années.

Un *complexe* est, on le verra plus loin, formé d'un métal (ou d'un ion) central auquel des atomes, ions ou molécules sont fixés par une liaison de coordination. En d'autres termes, l'ion métallique central peut être considéré comme un acide de Lewis (accepteur d'électrons) qui recevrait les électrons des bases de Lewis, que l'on nomme *coordinats,* ou *ligands.*

Selon l'hybridation des orbitales du métal de transition, les complexes peuvent être plan carrés, tétraédriques, octaédriques, etc. Les réactifs liés par une liaison de coordination avec ce métal ne seront donc pas disposés de façon quelconque dans l'espace. Il sera de même possible, en choisissant judicieusement certains coordinats n'intervenant pas dans la réaction, de bloquer certaines positions et d'obliger les réactifs à se présenter l'un à l'autre dans une position bien déterminée de l'espace. Ainsi, le complexe joue un effet de matrice sur la réaction, qu'il favorise par ailleurs grâce à l'état électronique du métal.

- *La catalyse d'oxydo-réduction*

Certains ions métalliques de cuivre, de nickel, de cobalt ou de fer sont susceptibles de catalyser, à l'état de traces infimes, des réactions comme la décomposition de l'eau oxygénée ou l'oxydation des ions sulfite en ions sulfate. Les concentrations molaires peuvent être aussi faibles que 10^{-13} pour les ions cuivre. On conçoit que de telles réactions sont extrêmement sensibles aux poisons, c'est-à-dire à des substances qui neutralisent l'action du catalyseur.

- *La catalyse en phase gazeuse*

Certains composés, tels NO ou I_2, peuvent agir comme de véritables catalyseurs en phase gazeuse. Ainsi, dans l'oxydation de SO_2 en SO_3, NO intervient catalytiquement en s'oxydant puis en se réduisant :

$$NO + 1/2O_2 \rightarrow NO_2$$
$$NO_2 + SO_2 \rightarrow SO_3 + NO.$$

La catalyse hétérogène

Si les réactifs et le catalyseur constituent deux phases distinctes, comme dans le cas de gaz réagissant à la surface de solides ou de liquides en présence de solides, on parle de *catalyse hétérogène* ou de *catalyse de contact,* ou encore de *catalyse interfaciale.*

La catalyse hétérogène a une importance considérable en chimie industrielle et particulièrement en chimie organique. Les progrès de la chimie industrielle sont plus souvent dus à la mise au point d'un nouveau catalyseur qu'à la découverte d'une nouvelle réaction.

Les catalyseurs solides peuvent être groupés dans des classes où se retrouvent des types de composés qui sont

▲ A gauche, représentation schématique de quelques types de complexes ; ceux-ci sont formés d'un métal central auquel sont fixés, par une liaison de coordination, des ions, des atomes ou des molécules. Certains de ces complexes sont utilisés comme catalyseurs. A droite, appareillage de laboratoire servant pour la manipulation de certains gaz, notamment en catalyse hétérogène ; en bleu, les vases « Dewar » destinés à contenir l'air et l'azote liquides. Au-dessus de ceux-ci, un four cylindrique chauffé électriquement.

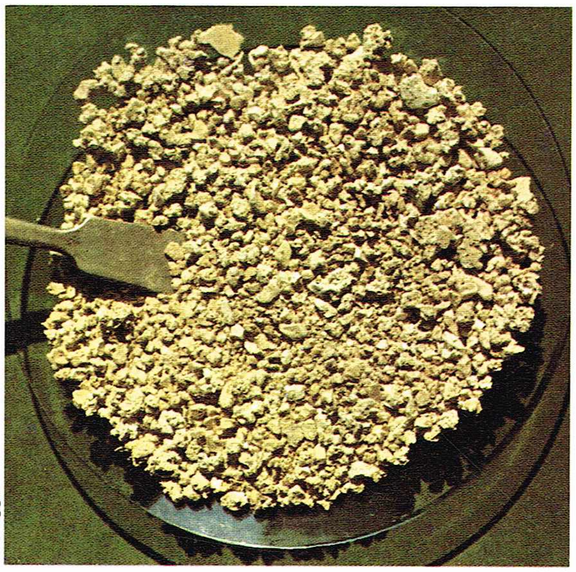

T. Poggio

▶ *Un catalyseur (pour la catalyse hétérogène) utilisé pour les réactions d'hydrogénation et de déshydrogénation : il s'agit d'un mélange de nitrates déposés sur de l'alumine et calcinés de façon à fournir des oxydes.*

susceptibles de catalyser des réactions diverses. C'est ainsi que l'on peut distinguer les acides, les métaux et les oxydes métalliques.

— *Les acides*. Ce sont des composés solides pouvant engendrer des ions carbonium dans le milieu réactionnel, comme nous venons de le voir en catalyse homogène. Parmi ceux-ci, on peut citer les silico-alumines amorphes ou cristallisées utilisées dans le cracking des hydrocarbures.

— *Les métaux*. Ce sont le fer, le nickel, le cobalt, le platine, le palladium, dont l'action consiste le plus souvent à mobiliser des atomes d'hydrogène pour catalyser les réactions d'hydrogénation, de déshydrogénation ou d'hydrogénolyse. Parmi les plus importantes réactions industrielles catalysées par les métaux, il faut citer la synthèse de l'ammoniac (catalyseur au fer) et le reforming (catalyseur au platine). Dans le cas du reforming, on utilise, outre la capacité déshydrogénante du platine, l'activité acide d'une silico-alumine utilisée comme support du platine. Il s'agit alors d'un catalyseur bifonctionnel qui allie la fonction isomérisante du support acide à la fonction déshydrogénante du métal supporté. On peut aussi utiliser deux métaux différents : c'est le cas des nouveaux catalyseurs bimétalliques de reforming (platine-rhénium). Les métaux sont rarement utilisés

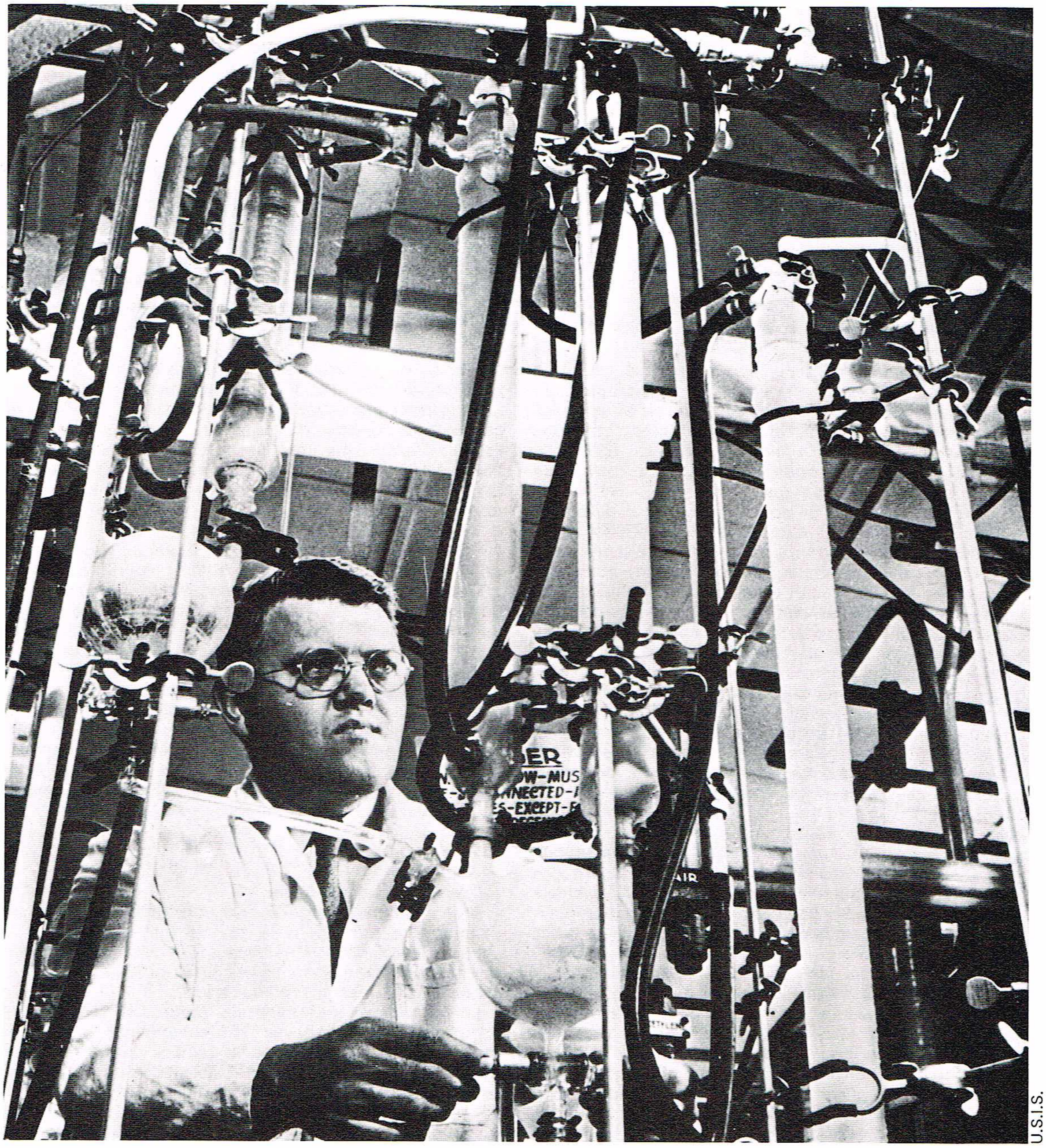

U.S.I.S.

▶ *Un chercheur observant le déroulement d'une réaction catalytique dans un laboratoire d'électrochimie de la société Dupont de Nemours (États-Unis). De telles réactions ont conduit à la mise au point de nouveaux procédés pour la fabrication d'acétate de vinyle, produit entrant dans la composition des peintures.*

pour catalyser des oxydations, en raison de leur aptitude à s'oxyder eux-mêmes aux températures auxquelles ont lieu les oxydations. Cependant, certains métaux nobles, comme l'argent ou le palladium, sont utilisés industriellement dans la synthèse de l'oxyde d'éthylène et de l'acétaldéhyde, par oxydation de l'éthylène.

— *Les oxydes métalliques*. On en distingue deux classes.

La première classe groupe les oxydes qui, par chauffage, peuvent perdre ou fixer de l'oxygène dans leur réseau cristallin, et qui par conséquent ne sont pas stœchiométriques; ils possèdent pour cette raison une certaine conductivité électrique. On les appelle *oxydes semi-conducteurs*. Certains sulfures métalliques sont pour la même raison semi-conducteurs. Les oxydes et les sulfures métalliques sont utilisés pour catalyser les réactions nécessitant la mobilisation de l'oxygène et du soufre. On citera parmi les oxydes semi-conducteurs V_2O_5, MoO_3, WO_3, utilisés pour l'oxydation partielle des composés organiques, Cr_2O_3, utilisé pour la cyclisation des paraffines en aromatiques et, parmi les sulfures, WS_2, utilisé pour la désulfuration en présence d'hydrogène (hydrodésulfuration).

La deuxième classe d'oxydes est formée des oxydes métalliques dont le réseau cristallin est parfaitement stœchiométrique et pour lesquels la température ou toute autre action ne modifient pas la conductivité électrique (qui est du reste très faible) ; on les nomme *oxydes isolants*. Les métaux formant ces oxydes ne sont pas, comme les précédents, des métaux de transition et n'agissent donc pas par l'intermédiaire de leurs orbitales *d*. Les plus importants des oxydes isolants sont SiO_2, Al_2O_3 et MgO. Ce sont d'excellents catalyseurs d'hydratation et de déshydratation. Ainsi, l'alumine Al_2O_3 est utilisée pour la déshydratation de l'éthanol ou éthylène, mais catalyse aussi la réaction inverse d'hydratation de l'éthylène.

Le déroulement d'une réaction en catalyse hétérogène est beaucoup plus complexe qu'il apparaît en catalyse homogène. Le cycle catalytique comporte ici plusieurs étapes successives pouvant avoir sur la vitesse de la réaction une importance variable. Il s'agit d'abord de l'étape de diffusion vers le catalyseur des réactifs, qui, dans une seconde étape, sont adsorbés sur la surface avant d'y réagir chimiquement. Les produits qui résultent de cette réaction à la surface doivent, dans une étape ultérieure, être désorbés pour diffuser enfin dans le milieu réactionnel. Les transferts de matière correspondant aux étapes de diffusion des réactifs et des produits sont importants dans la mise en œuvre de ces catalyseurs; il ne faut pas que ces étapes soient limitatives de la vitesse de l'ensemble du processus. Pour cela, un contact intime des réactifs et des produits doit être assuré par des dispositifs d'agitation appropriés. Au problème de diffusion des réactifs et des produits s'ajoute celui des transferts de chaleurs des réactions exo- ou endothermiques. En fait, la réaction chimique se produit au niveau de la surface catalytique; c'est elle qui importe dans ce type de catalyse et non la masse du catalyseur. On définit l'*activité intrinsèque* d'un catalyseur solide comme son activité rapportée au mètre carré de catalyseur. La surface spécifique est la surface en mètres carrés par gramme de catalyseur. Un catalyseur sera d'autant plus actif que sa surface sera plus grande. La surface spécifique de certains catalyseurs utilisés industriellement atteint plusieurs centaines de mètres carrés par gramme. Pour atteindre une telle surface, les catalyseurs doivent avoir une structure poreuse, mais la porosité ne doit pas être telle qu'elle limite l'accès des réactifs ou le départ (désorption) des produits.

En ce qui concerne le phénomène d'adsorption des réactifs à la surface du catalyseur, on distingue l'*adsorption physique,* réversible et mettant en jeu des forces d'attraction du type des forces de Van der Waals, de l'*adsorption chimique,* ou *chimisorption,* dans laquelle les réactifs contractent avec les atomes de la surface de véritables liaisons chimiques. La chimisorption des réactifs à la surface s'apparente à la complexation des réactifs sur les métaux de transition telle que nous venons de la décrire en catalyse homogène. Le mécanisme de l'acte catalytique en phase adsorbée est encore très mal connu. Les progrès actuels de la catalyse par les complexes ne pourront qu'aider à sa compréhension.

Les catalyseurs industriels doivent répondre à un certain nombre de critères dont la mise en œuvre présente souvent des problèmes complexes. Ils doivent évidemment être les plus efficaces possibles aux températures et aux pressions requises par la réaction à catalyser. Mais cette activité catalytique doit se maintenir le plus longtemps possible. Or, bon nombre de facteurs concourent à diminuer la durée de vie des catalyseurs. Au premier plan de ceux-ci, il y a leur « empoisonnement ». Certains composés, couramment appelés *poisons de catalyseurs,* forment avec ceux-ci des associations irréversibles qui altèrent progressivement leur surface. C'est ainsi que les catalyseurs métalliques sont empoisonnés par les composés soufrés, d'où la nécessité de désulfurer certaines charges industrielles avant leur traitement catalytique. Les catalyseurs acides sont empoisonnés par les constituants basiques présents à l'état d'impuretés dans les milieux réactionnels, etc. La perte d'activité d'un catalyseur peut aussi résulter du recouvrement d'une partie ou de la totalité de sa surface par des composés tels que les matériaux polymériques, les dépôts carbonés comme le coke, etc., qui entravent progressivement l'accès de la surface catalytique aux réactifs.

Une autre cause de perte d'activité des catalyseurs solides est le phénomène d'*attrition,* c'est-à-dire d'usure des grains de catalyseur les uns contre les autres. Cette usure est d'autant plus importante que les grains de catalyseur sont maintenus en mouvement continuel pour favoriser les transferts de chaleur et de matière (réacteurs agités, lits mobiles, lits fluides, etc.). Par attrition, la porosité des catalyseurs disparaît progressivement et leur surface diminue dans le même temps.

La mise au point des catalyseurs industriels peut paraître à certains égards empirique. En fait, elle met en œuvre de très nombreuses techniques permettant de mesurer leur surface, le nombre des sites catalytiquement actifs, leur densité, leur résistance à l'attrition, et des tests permettant de chiffrer leur activité vis-à-vis de certaines réactions types.

La forme physique sous laquelle se présentent les catalyseurs hétérogènes varie en fonction de leurs applications. Ainsi, les réactions mettant en jeu des gaz se font en remplissant de catalyseur des tours verticales et en faisant passer les gaz à vitesse élevée à travers ce lit fixe de catalyseur. Dans ce cas, le catalyseur est formé de macroparticules en forme de sphères, de granules ou de pastilles, ayant des diamètres de 3 à 25 mm. On peut aussi remplir le réacteur d'une poudre très fine de catalyseur. Lorsque les gaz passent à travers cette poudre, cette dernière est soulevée et agitée par l'action des gaz; la poudre ainsi mise en mouvement a l'aspect d'un liquide. Cette technique est celle du *lit fluidisé*. On peut, enfin, favoriser le contact entre un réactif (généralement liquide) et le catalyseur en agitant l'ensemble réacteur et contenu. Cette technique est surtout utilisée en laboratoire ou pour des fabrications de faible tonnage. Les catalyseurs solides peuvent aussi être présentés sous forme de pastilles, de petites sphères ou de petits cylindres obtenus par extrusion.

Il existe donc deux types principaux de catalyse : la catalyse homogène et la catalyse hétérogène. La première simplifie au maximum les problèmes de transfert de matière et de chaleur et permet parfois d'utiliser des systèmes catalytiques bien définis assurant une excellente sélectivité de la transformation. La seconde présente sur la première l'avantage d'une plus grande facilité de séparation du mélange catalyseur-produit. En effet, dans le cas de la catalyse homogène par les métaux de transition, la mise en œuvre de très faibles quantités de complexe actif rend très souvent laborieuse sa récupération (ou son élimination lorsque l'on consent à le perdre).

La catalyse homogène supportée

Cette récupération difficile est la raison pour laquelle on assiste actuellement au développement d'un troisième type de catalyse qui allie les avantages de la catalyse homogène et ceux de la catalyse hétérogène et que l'on appelle *catalyse homogène supportée*. Les catalyseurs utilisés dans ce cas sont des complexes de nature chimique bien définie que l'on « fixe » sur des supports insolubles dans le milieu réactionnel. Ces supports peuvent être, par exemple, des polymères synthétiques. Bien que ce nouveau type de catalyse n'ait pas à ce jour reçu la consécration industrielle des précédents, il semble

▶ ***Page ci-contre, en haut : le caractère acide ou basique d'une solution peut être mis en évidence d'une manière rapide grâce à l'emploi de réactifs colorés. Ici, de gauche à droite, sous l'action d'une base (la potasse par exemple), l'hélianthine, rouge, devient jaune, la phtaléine du phénol, incolore, vire au rose, et le tournesol, rouge, devient bleu.***

devoir constituer l'avenir de l'activation des transformations chimiques.

Autres modes d'activation des réactions

Outre la chaleur *(activation thermique)* et les catalyseurs *(activation catalytique)*, on peut activer les réactions chimiques grâce à de l'énergie lumineuse (voir *La photochimie*), ou électrique *(électrolyse)*, ou encore par les radiations émises par les substances radio-actives *(radiochimie)*. Enfin, l'introduction dans le milieu réactionnel de substances capables de se décomposer aisément en produisant des radicaux libres conduit à un mode d'activation que l'on qualifie souvent à tort de catalyse et qui est, en fait, une *réaction à schéma initié*. Ainsi, les peroxydes organiques, tel le peroxyde de benzoyle, en se décomposant à la température à laquelle on effectue la polymérisation du styrène, fournissent des radicaux libres qui initient ensuite une réaction en chaîne. Les réactions d'oxydation illustrent aussi les mécanismes radicalaires. Ces réactions sont généralement sensibles aux impuretés susceptibles de capter les radicaux actifs.

Les grands types de réactions chimiques

Sans présumer du mécanisme intime des réactions chimiques, lequel, comme on l'a vu précédemment, n'est pas toujours aisé à mettre en évidence, on peut classer les réactions en fonction des réactifs et des produits qu'elles mettent en œuvre. On distingue :

— Les *combinaisons directes* d'éléments ou d'éléments avec des composés ou encore de composés entre eux. C'est le cas, par exemple, de l'action du chlore sur l'éthylène qui fournit un nouveau composé, le dichloroéthane :

$$CH_2{=}CH_2 + Cl_2 \rightarrow ClCH_2{-}CH_2Cl.$$

— Les *décompositions*, c'est-à-dire les transformations de composés en composés plus simples. C'est le cas, par exemple, de la décomposition du carbonate de calcium en chaux et en gaz carbonique :

$$CO_3Ca \rightarrow CaO + CO_2$$

ou de l'eau en ses éléments (hydrogène et oxygène) :

$$H_2O \rightarrow H_2 + 1/2O_2$$

— Les *substitutions*. Dans ce cas, un élément prend la place d'un autre dans un composé. C'est ainsi que dans l'action du chlore sur le méthane, un des atomes d'hydrogène du méthane est remplacé par un atome de chlore et l'hydrogène ainsi déplacé forme avec un autre atome de chlore de l'acide chlorhydrique :

$$CH_4 + Cl_2 \rightarrow CH_3Cl + HCl.$$

— Les *doubles décompositions*, dans lesquelles deux composés en réagissant l'un sur l'autre fournissent deux autres composés. Par exemple, le chlorure de baryum réagit en solution aqueuse sur l'acide sulfurique et donne le sulfate de baryum et l'acide chlorhydrique :

$$BaCl_2 + H_2SO_4 \rightarrow BaSO_4 + 2HCl.$$

— Les *polymérisations*. Il s'agit de la formation, à partir de molécules de masse moléculaire faible, de composés à masse moléculaire élevée provenant de la jonction d'un grand nombre de ces petites molécules, appelées monomères. La grosse molécule, ou macromolécule, est le polymère. On distingue deux types de polymérisations : les *polyadditions*, dans lesquelles des monomères insaturés (oléfines, diènes, etc.) s'additionnent les uns aux autres, et les *polycondensations*, où les monomères se lient les uns aux autres en éliminant une petite molécule (le plus souvent l'eau). La polymérisation de l'éthylène en polyéthylène appartient au groupe des polyadditions; la préparation du Nylon 6-6 à partir d'acide adipique et d'hexaméthylène diamine est une polycondensation.

— Les *oxydo-réductions*. Ce sont les réactions dans lesquelles des transferts d'électrons font passer un élément à un degré d'oxydation inférieur par gain d'électrons (réduction), alors que simultanément un autre élément s'oxyde en perdant des électrons. Par exemple :

$$SnCl_2 + 2HgCl_2 \rightarrow SnCl_4 + Hg_2Cl_2$$

où l'étain passe du degré d'oxydation 2 dans $SnCl_2$ à 4 dans $SnCl_4$, pendant que le mercure est réduit du degré d'oxydation 2 dans $HgCl_2$ à 1 dans Hg_2Cl_2.

Nous traiterons ultérieurement d'autres réactions de la chimie minérale ou organique à propos de la description des principaux composés de ces grandes divisions de la chimie.

Les acides et les bases

Avant d'aborder la chimie minérale et la chimie organique, il est important de préciser les notions d'acidité et de basicité qui interviendront souvent dans ces deux grands chapitres de la chimie.

Ces concepts sont connus de tout le monde grâce à certaines propriétés des acides et des bases. Ainsi, la saveur acide du vinaigre est due à la présence d'un acide, l'acide acétique. L'effervescence qui se produit lorsque l'on verse un acide sur une roche calcaire, c'est-à-dire sur un carbonate, est spécifique des acides. Les acides et les bases changent la couleur de certains colorants végétaux comme la teinture de tournesol.

Autrefois, on appelait acide toute substance ayant un hydrogène remplaçable par un métal :

$$HCl + Na \rightarrow NaCl + 1/2H_2$$

Puis on a défini un acide comme un composé pouvant perdre un proton H^+ :

$$HCl \rightleftharpoons H^+ + Cl^-,$$

une base étant alors définie comme une substance pouvant accepter un proton :

$$NaOH + H^+ \rightarrow Na^+ + H_2O.$$

C'est en 1923 que Bronsted proposa une définition générale des acides et des bases telle qu'elle vient d'être décrite ci-dessus et que l'on peut écrire :

$$\text{acide} \rightleftharpoons \text{base} + H^+ \quad \text{ou} \quad \text{base} + H^+ \rightleftharpoons \text{acide}.$$

On peut tirer de ces équilibres les constantes K*a* et K*b* pour l'acide ou la base telles que :

$$Ka = \frac{aH^+ . \, a \text{ base}}{a \text{ acide}}; \qquad Kb = \frac{a \text{ acide}}{aH^+ . \, a \text{ base}}$$

Ces constantes sont exprimées en fonction de l'activité des espèces en présence, c'est-à-dire en fonction de leur concentration affectée d'un certain coefficient, dit *coefficient d'activité*, qui permet d'adapter à des équilibres réels la forme mathématique de la loi idéale. A tout acide est donc associée une espèce chimique contenant un proton de moins; c'est la base conjuguée de l'acide. Réciproquement, l'addition d'un proton à une molécule ou à un ion forme un acide qui est l'acide conjugué de la base. Ainsi, la base conjuguée de l'acide chlorhydrique HCl est l'ion chlore Cl^- et l'acide conjugué de l'aniline ($C_6H_5{-}NH_2$) est $C_6H_5NH_3^+$.

L'acide chlorhydrique exempt d'eau n'a pas de caractère acide, il ne l'acquiert que lorsque, dissous dans l'eau, il peut transférer son proton sur une molécule d'eau en donnant un *ion hydronium* (oxonium) H_3O^+ :

$$HCl + H_2O \rightarrow H_3O^+ + Cl^-.$$

Bien qu'en réalité le proton ne soit pas libre en solution mais fixé dans l'ion oxonium, on parlera souvent pour simplifier de concentration en H^+.

Les bases minérales telles que la soude NaOH, la potasse KOH, la chaux $Ca(OH)_2$ peuvent accepter un proton, ce qui s'écrit :

$$OH^- + H_3O^+ \rightleftharpoons H_2O + H_2O$$

En 1923, G. N. Lewis a étendu la notion d'acide et de base de la façon suivante :

— Une *base* est un composé ayant dans sa molécule un atome porteur d'un doublet électronique libre. Ainsi, l'ammoniac est une base grâce au doublet de l'azote :

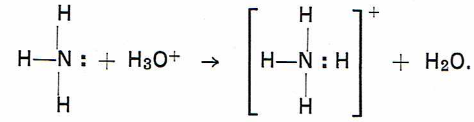

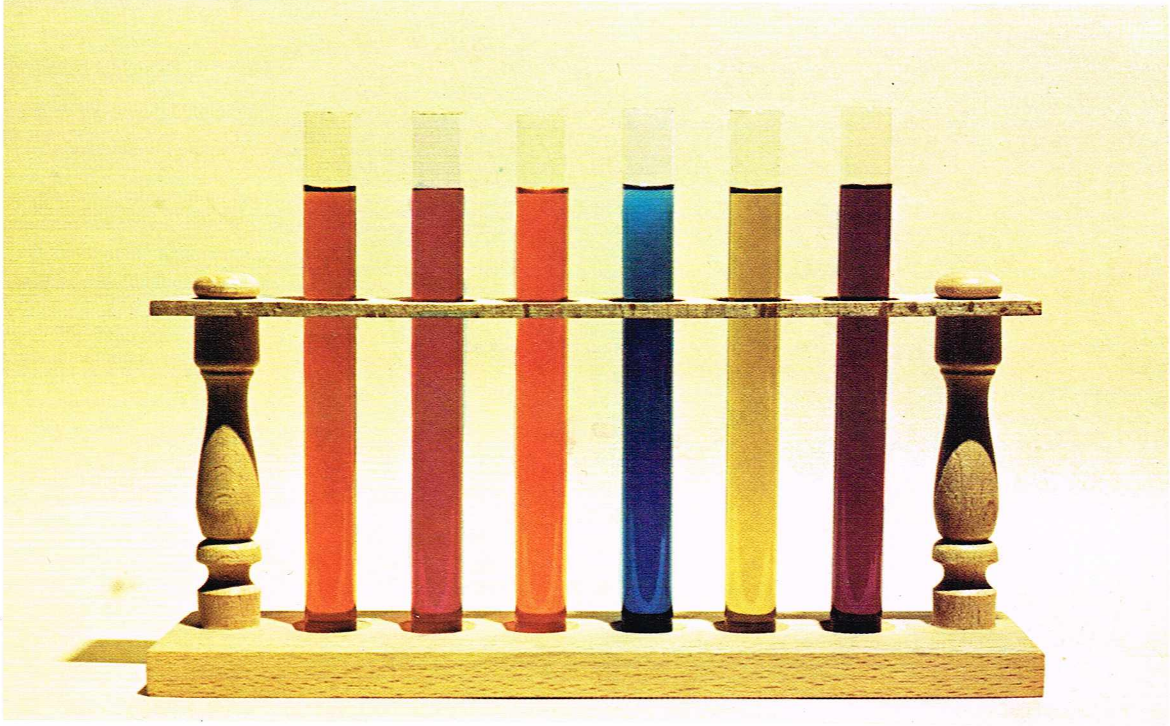

C. Nuridsany

▼ *Ci-dessous, courbes de la variation du pH au cours de la saturation d'une solution basique (ammoniaque à la concentration N/100) par une solution acide (acide chlorhydrique en solution normale). En bas, variation du pH, lors de la saturation d'une solution acide (acide chlorhydrique N/100), par une solution basique (soude en solution normale).*

— Un *acide* est une substance pouvant recevoir une ou plusieurs paires d'électrons pour former des liens de coordination. Ainsi, le chlorure d'aluminium $AlCl_3$ est un acide de Lewis. Celui-ci donne avec les ions chlore un complexe $[AlCl_4]^-$ associé avec le cation lié à l'ion chlore.

Les acides de Lewis $AlCl_3$, BF_3, $SnCl_4$ sont très importants en catalyse. Ils peuvent engendrer des protons ou des carbocations. Ainsi, dans l'alkylation par les dérivés halogénés en présence de $AlCl_3$, on a :

$$AlCl_3 + RCl \rightarrow AlCl_4^- + R^+$$

Le pH

La dissociation ionique de l'eau en ions OH^- et H^+ fixés sous forme d'ions oxonium peut s'écrire de façon simplifiée :

$$H_2O \rightleftharpoons H^+ + OH^-$$

Le produit ionique, ou constante de dissociation de l'eau, est égal au produit des concentrations :

$$[H^+] \times [OH^-] = K_e$$

Cette constante de dissociation varie avec la température : elle est de $1{,}14 \cdot 10^{-15}$ à 0 °C, de $1{,}03 \cdot 10^{-14}$ à 25 °C, et de $2{,}92 \cdot 10^{-14}$ à 40 °C. Elle peut donc être considérée comme égale à $1 \cdot 10^{-14}$ à la température ordinaire.

Étudions la concentration des ions H^+ dans l'eau pure et dans différentes solutions.

— *Eau pure*. Comme H_2O se dissocie en autant d'ions H^+ que d'ions OH^-, on obtient :

$$[H^+] = [OH^-] = \sqrt{K_e} = 10^{-7} \text{ mole/litre.}$$

Remarquons que, comme la masse moléculaire de l'eau est 18, 1 litre d'eau, soit 1 000 g d'eau, contient $\frac{1\,000}{18} = 55$ moles d'eau. Puisque $[H^+] = 10^{-7}$ mole/litre, par mole d'eau pure, il y a :

$$\frac{10^{-7}}{55} \simeq 2 \cdot 10^{-9} \text{ mole d'ions } H^+.$$

Cela signifie que sur 1 milliard de molécules d'eau, 2 molécules seulement sont dissociées à la température ordinaire.

— *Solutions*. Si à de l'eau pure on ajoute un acide, on augmente la concentration en ions H^+ ; donc, $[H^+] > 10^{-7}$, et comme $[H^+] \times [OH^-] = 10^{-14}$, la concentration en OH^- diminue et $[OH^-] < 10^{-7}$. Lorsque la solution contient plus d'ions H^+ que OH^-, elle est dite acide, et c'est le contraire dans le cas des solutions basiques.

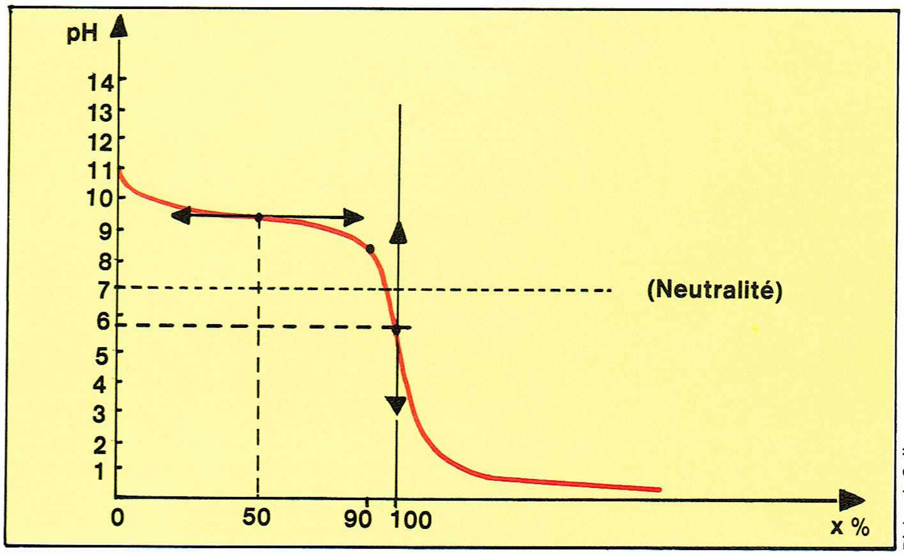

Richard Colin

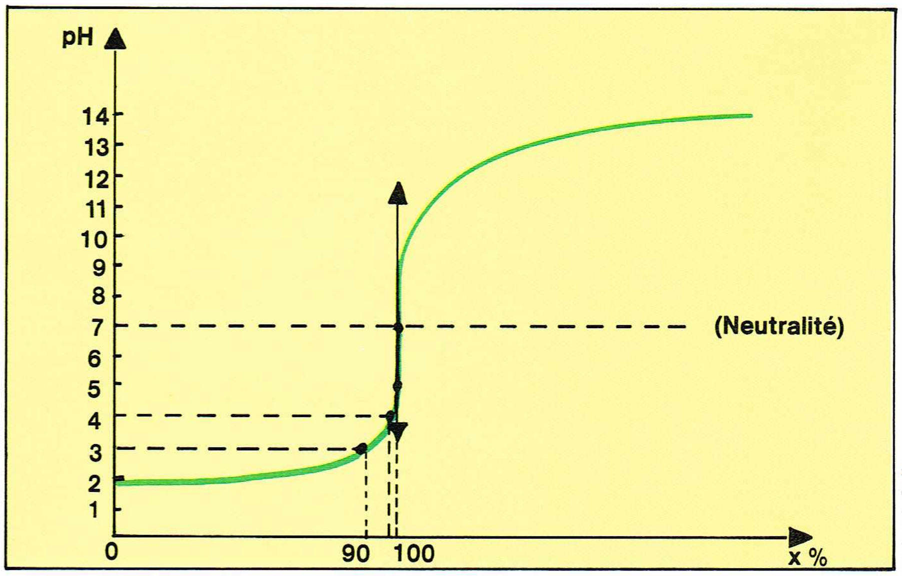

Richard Colin

▶ ***Détermination du pH à l'aide de papier pH ; la rosace des couleurs de référence, au centre, permet de trouver le pH de la solution, en fonction de la couleur de virage du papier imprégné de solution. A droite, une solution d'acide chlorhydrique de pH sensiblement égal à 2 ; à gauche, une solution de soude, de pH voisin de 9.***

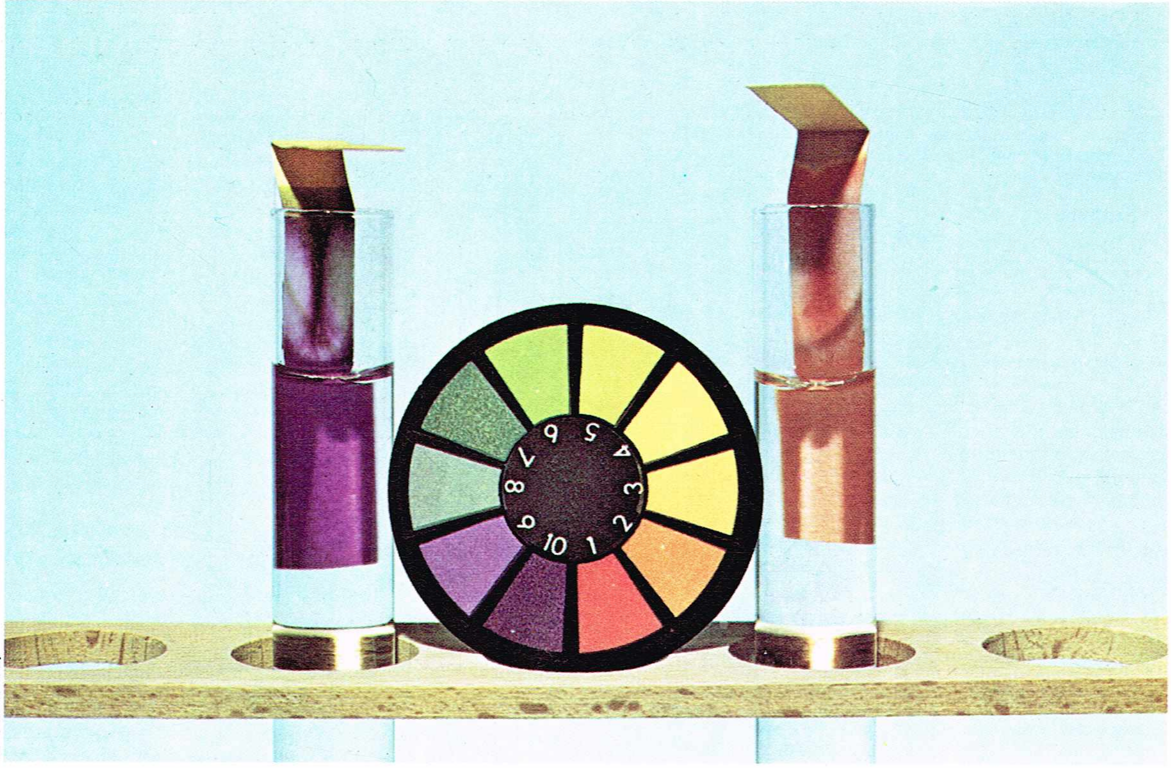

C. Nuridsany

Le pH permet d'exprimer cette acidité, ou cette basicité, sous forme de chiffres simples. Le pH est l'opposé du logarithme (ou le cologarithme) de la concentration en ions hydrogène.

$$pH = \text{colog}\,[H^+].$$

Ainsi, le pH de l'eau pure est 7 $[H^+] = 10^{-7}$; les pH < 7 correspondent à des solutions acides, les pH > 7 à des solutions basiques.

Pour les solutions d'acides et de bases dans l'eau, on définit la *molarité* et la *normalité*. Une *solution molaire* est une solution renfermant 1 mole d'acide ou de base par litre. Une *solution normale* contient une mole d'ions H_3O^+ ou OH^- par litre, en supposant que l'ionisation de l'acide ou de la base est totale. Ainsi, pour une solution d'acide chlorhydrique, la solution molaire renferme 36,5 g par litre d'acide (une mole) et la solution normale la même masse d'acide. Pour l'acide sulfurique (H_2SO_4), la solution molaire renferme 98 g d'acide et la solution normale $\frac{98}{2} = 49$ g d'acide. On parle aussi de solution décinormale (4,9 g/l) et centinormale (0,49 g/l).

Connaissant la normalité d'un acide totalement dissocié dans l'eau (acide fort), on peut en calculer le pH. Ainsi, une solution normale de HCl, qui renferme par conséquent une mole de H_3O^+ (ou H^+) par litre, a un pH $= 0$; une solution décinormale (N/10) d'acide chlorhydrique, donc de concentration 10^{-1} en H^+, a un pH $= 1$; une solution centinormale (10^{-2} H^+) a un pH de 2, etc. Cela n'est valable que pour les acides totalement dissociés. Dans le cas des acides faibles, comme l'acide acétique, dont la dissociation est incomplète, la concentration en ions H^+ dans la solution est inférieure à la concentration initiale de l'acide. C'est ainsi que le pH d'une solution décinormale d'acide acétique, qui devrait être égal à 1, est en fait égal à 2,88.

On peut mesurer le pH d'une solution acide ou basique grâce à des indicateurs colorés. Ce sont des matières colorantes naturelles ou synthétiques dont la couleur change sous l'action des acides ou des bases. Certains indicateurs colorés universels, obtenus en mélangeant des indicateurs colorés dont l'ensemble permet de couvrir l'échelle de pH de 2 à 10, sont déposés sur des bandes de papier absorbant et permettent, par simple appréciation de la couleur qu'ils prennent dans une solution, de déterminer un pH. Une méthode précise consiste à utiliser des pH-mètres, appareils permettant de mesurer directement le pH d'une solution.

Ainsi, la chimie générale et la chimie physique permettent de décrire la structure intime de la matière, de connaître les lois qui régissent ses transformations diverses et de prévoir le résultat de ces transformations. Le chimiste doit, en outre, connaître les propriétés des principaux corps simples et composés qui constituent la matière. Outre la structure de celle-ci, il faut connaître sa composition.

Le but des chapitres qui suivent sera de décrire cette matière. Nous adopterons la classification chimie minérale, chimie organique, et nous commencerons par la chimie minérale.

BIBLIOGRAPHIE

ATHERTON M. A. et LAWRENCE J. K., *An Experimental Introduction to Reaction Kinetics,* Longman, Londres, 1970. - BASOLO F. et JOHNSON R., *Coordination Chemistry,* W. A. Benjamin, New York-Amsterdam, 1964. - BOND G. C., *Catalysis by Metals,* Academic Press, 1962. - BOND G. C., *Principles of Catalysis,* The Chemical Society Monographs for Teachers, nº 7, 1972. - COTTON F. et WILKINSON G., *Advanced Inorganic Chemistry,* Intern. Publishers, New York-Londres, 1966. - EMMET P. H. Ed., vol. 1-7, *Catalysis,* vol. 1, chap. 3-5, Reinhold Publishing Corp., New York, 1954-1960. - GERMAIN J.-E., *la Catalyse hétérogène,* Dunod, Paris, 1959. - GRAY H. B., *les Électrons et la Liaison chimique,* Devaquet, Gandebœuf, Loève, Ostrowetzky, Édiscience, Paris, 1969. - HINSHELWOOD C. N., *Kinetics of Chemical Change,* Oxford Univ. Press, Oxford, 1940. - HOUGEN O. A., WATSON K. M. et RAGATZ R. A., *Kinetics and Catalysis, Part III : Of Chemical Principles,* 2e éd., John Wiley and Sons, New York, 1947. - JUNGERS J. C. et coll., *Analyse cinétique de la transformation chimique,* Éd. Technip., Paris. - KING E. L., *Introduction à la cinétique chimique,* édition française, Prof. Lepoutre. - KING E. S., *How Chemical Reactions Occur,* Benjamin, New York, 1963. - PASCAL P., *Chimie générale,* Masson, Paris, 1951. - PAULING L., *The Nature of the Chemical Bond,* Cornell U. P., New York, Londres, 1945. - RYSCHKEWITSCH G. E., *Chemical Bonding and the Geometry of Molecules,* Reinhold Publ. Corp., New York-Londres, 1963. - SIENKO M. J., *Stœchiometry and Structure,* Benjamin, New York-Amsterdam, 1964. - THOMAS J. M. et THOMAS W. J., *Introduction to the Principles of Heterogeneous Catalysis,* Academic Press, 1967.

NOMS, SYMBOLES ET NUMÉROS ATOMIQUES DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES											
Nom	Symbole	Numéro atomique	Nom	Symbole	Numéro atomique	Nom	Symbole	Numéro atomique	Nom	Symbole	Numéro atomique
Actinium	Ac	89	Dysprosium	Dy	66	Mendélévium	Md	101	Rubidium	Rb	37
Aluminium	Al	13	Einsteinium	Es	99	Mercure	Hg	80	Ruthénium	Ru	44
Américium	Am	95	Erbium	Er	68	Molybdène	Mo	42	Samarium	Sm	62
Antimoine	Sb	51	Etain	Sn	50	Néodyme	Nd	60	Scandium	Sc	21
Argent	Ag	47	Europium	Eu	63	Néon	Ne	10	Sélénium	Se	34
Argon	Ar	18	Fer	Fe	26	Neptunium	Np	93	Silicium	Si	14
Arsenic	As	33	Fermium	Fm	100	Nickel	Ni	28	Sodium	Na	11
Astate	At	85	Fluor	F	9	Niobium	Nb	41	Soufre	S	16
Azote	N	7	Francium	Fr	87	Nobélium	No	102	Strontium	Sr	38
Baryum	Ba	56	Gadolinium	Gd	64	Or	Au	79	Tantale	Ta	73
Berkélium	Bk	97	Gallium	Ga	31	Osmium	Os	76	Technétium	Tc	43
Béryllium	Be	4	Germanium	Ge	32	Oxygène	O	8	Tellure	Te	52
Bismuth	Bi	83	Hafnium	Hf	72	Palladium	Pd	46	Terbium	Tb	65
Bore	B	5	Hélium	He	2	Phosphore	P	15	Thallium	Tl	81
Brome	Br	35	Holmium	Ho	67	Platine	Pt	78	Thorium	Th	90
Cadmium	Cd	48	Hydrogène	H	1	Plomb	Pb	82	Thulium	Tm	69
Calcium	Ca	20	Indium	In	49	Plutonium	Pu	94	Titane	Ti	22
Californium	Cf	98	Iode	I	53	Polonium	Po	84	Tungstène	W	74
Carbone	C	6	Iridium	Ir	77	Potassium	K	19	Uranium	U	92
Cérium	Ce	58	Krypton	Kr	36	Praséodyme	Pr	59	Vanadium	V	23
Césium	Cs	55	Lanthane	La	57	Prométhium	Pm	61	Xénon	Xe	54
Chlore	Cl	17	Lawrencium	Lr	103	Protactinium	Pa	91	Ytterbium	Yb	70
Chrome	Cr	24	Lithium	Li	3	Radium	Ra	88	Yttrium	Y	39
Cobalt	Co	27	Lutétium	Lu	71	Radon	Rn	86	Zinc	Zn	30
Cuivre	Cu	29	Magnésium	Mg	12	Rhénium	Re	75	Zirconium	Zr	40
Curium	Cm	96	Manganèse	Mn	25	Rhodium	Rh	45			

▲ ***Tableau des noms, symboles et numéros atomiques des éléments chimiques.***

LA CHIMIE MINÉRALE

La chimie minérale, ou chimie inorganique, traite de tous les éléments chimiques et de leurs composés, exception faite des nombreux composés du carbone avec l'hydrogène, l'oxygène et l'azote qui constituent le domaine de la chimie organique. Pour décrire les éléments et leurs composés minéraux, nous adopterons le classement par groupes correspondant à la classification périodique; nous passerons en revue les éléments en donnant, à chaque fois, leurs propriétés physiques et chimiques, les propriétés de leurs principaux dérivés et les applications pratiques des uns et des autres.

Comme l'indique le tableau, l'hydrogène devrait être traité dans le groupe I des alcalins, mais il s'apparente aussi aux éléments du groupe VII, qui se distinguent par leur aptitude à donner des ions M^-. C'est la raison pour laquelle il sera traité seul avant les autres éléments du groupe I.

Hydrogène

C'est un gaz incolore, inodore, pratiquement insoluble dans l'eau et qui fut isolé par Cavendish en 1766. Son importance en chimie minérale et organique est très grande. Il forme des combinaisons chimiques avec tous les éléments autres que les gaz rares. L'eau est à coup sûr le composé le plus important de l'hydrogène, mais d'autres composés comme les hydrocarbures, les composés organiques divers, l'ammoniac, l'acide sulfurique sont d'une très grande importance.

Actuellement, la quasi-totalité de l'hydrogène produit est fabriquée soit par oxydation ménagée du fuel lourd, soit par reforming à la vapeur d'eau de fractions légères de pétrole ou du gaz naturel. On peut aussi utiliser l'hydrogène produit dans le steam-cracking et surtout dans le reforming des hydrocarbures.

On envisage dans l'avenir deux modes de production de l'hydrogène, liés au développement de l'énergie nucléaire. Il s'agit d'une part de l'électrolyse de l'eau à haute température, et d'autre part de la décomposition de l'eau par des processus cycliques d'oxydo-réduction. L'hydrogène pourrait alors dans l'avenir être un combustible issu d'une source de matière inépuisable : l'eau.

On préparait autrefois au laboratoire l'hydrogène par action de l'acide sulfurique sur le zinc :

$$Zn + H_2SO_4 \rightarrow ZnSO_4 + H_2.$$

L'hydrogène étant accessible commercialement en bouteilles sous pression, ce mode de préparation ne présente plus d'intérêt.

L'hydrogène possède trois isotopes : l'**hydrogène,** de masse 1 (de beaucoup le plus répandu), le **deutérium,** ou hydrogène de masse 2, et le **tritium,** de masse atomique 3. L'hydrogène de masse 1 est le plus léger de tous les éléments; il est formé d'un seul proton et d'un seul électron, sa molécule est biatomique (H_2). Il existe, malgré cette extrême simplicité de la molécule, deux isomères qui diffèrent l'un de l'autre par le spin; il s'agit de l'*hydrogène ortho* (spin parallèle) et de l'*hydrogène para* (spin antiparallèle). A la température ambiante, l'hydrogène renferme 75 % de forme ortho. Les isomères ortho

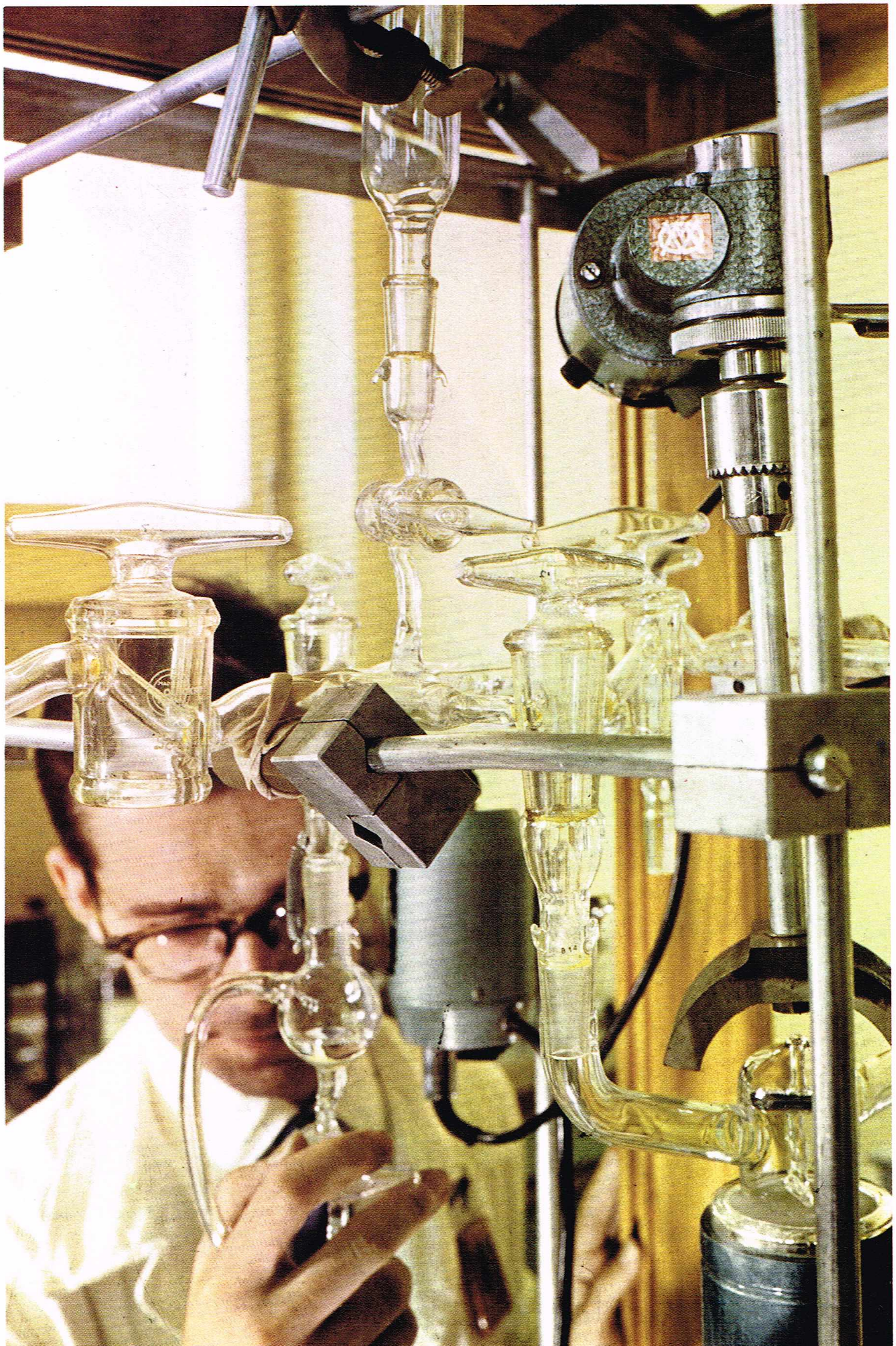

▶ *Appareillage utilisé pour la synthèse de molécules marquées au tritium (isotope de l'hydrogène, de masse atomique égale à 3) [Institut Donegani, Novare, Italie].*

Montecatini - Edison

et para qui ont pu être séparés par chromatographie en phase gazeuse ont des propriétés physiques légèrement différentes.

L'hydrogène est difficilement liquéfiable; il bout à 20,2 °K et, à cette température, est constitué par 99,8 % d'isomère para. Il se solidifie à 13,7 °K. Il est très peu soluble dans l'eau.

Réactions chimiques

L'hydrogène est stable et relativement peu réactif à la température ordinaire. Il réagit avec l'*oxygène* pour former de l'*eau :*

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O.$$

La réaction a lieu spontanément au-dessus de 500 °C. Au-dessous, elle doit être activée par une étincelle électrique, une flamme ou un catalyseur (platine par exemple). C'est le mélange tonnant. La combustion de l'hydrogène dans l'oxygène est très exothermique (57,8 kcal/mole à 25 °C et 1 atmosphère), et la flamme produite peut atteindre des températures très élevées (3 000 °C).

L'hydrogène réagit aussi avec les *halogènes*. La réaction est particulièrement violente avec le *fluor* et conduit à une explosion, même dans l'obscurité et à — 250 °C. Avec du *chlore*, il faut opérer à la lumière ou chauffer le mélange gazeux; cette réaction est utilisée pour la synthèse de l'*acide chlorhydrique :*

$$H_2 + Cl_2 \rightarrow 2HCl.$$

Le *brome* et l'*iode* réagissent moins facilement que les deux précédents halogènes.

La synthèse de l'*ammoniac* résulte de la combinaison de l'*azote* avec l'hydrogène :

$$3H_2 + N_2 \rightleftharpoons 2NH_3.$$

Cette réaction, extrêmement importante sur le plan industriel, est la base de la fabrication des engrais et de nombreux composés azotés. Elle sera traitée dans le chapitre concernant l'azote. C'est une réaction exothermique qui se produit avec diminution d'entropie et qui nécessite un catalyseur à base de fer.

L'hydrogène réagit avec le *soufre* pour former l'*hydrogène sulfuré :*

$$S + H_2 \rightarrow H_2S.$$

Il réagit de la même façon avec le *sélénium* et le *tellure*.

On utilise l'hydrogène pour réduire à haute température certains *oxydes métalliques*. On peut ainsi fabriquer du fer à partir de son oxyde :

$$Fe_3O_4 + 4H_2 \rightarrow 3Fe + 4H_2O.$$

Les réactions que peuvent fournir l'hydrogène et l'oxyde de carbone sont nombreuses, et certaines d'entre elles sont industriellement très importantes. C'est le cas, par exemple, de la *synthèse du méthanol :*

$$CO + 2H_2 \rightarrow CH_3OH;$$

de la *méthanation*, réaction qui intervient dans les synthèses industrielles mettant en jeu CO et H_2 :

$$CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O;$$

de la *synthèse de Fischer-Tropsch*, qui aboutit à des mélanges d'hydrocarbures utilisables comme combustibles liquides et à des composés oxygénés :

$$nCO + 2nH_2 \rightarrow (CH_2)n + nH_2O.$$

L'hydrogène réagit sur les *hydrocarbures insaturés* en présence de catalyseurs, pour les transformer en *hydrocarbures saturés :*

$$H_2 + C_2H_4 \rightarrow C_2H_6$$
$$3H_2 + C_6H_6 \rightarrow C_6H_{12}, \quad \text{etc.}$$

Ces réactions sont exothermiques. Certaines ont une grande importance industrielle, telle l'hydrogénation du benzène en cyclohexane.

Enfin, l'hydrogène réagit avec les *métaux* pour former des *hydrures*. Ainsi, avec les métaux alcalins, ces hydrures sont obtenus par action de l'hydrogène sur le métal à des températures élevées (jusqu'à 700 °C). Dans les hydrures, l'hydrogène est considéré comme un ion H^- (ion hydrure).

Groupe IA

Ce groupe comprend le lithium (Li), le sodium (Na), le potassium (K), le rubidium (Rb), le césium (Cs) et le francium (Fr). Comme cela se produit pour le premier élément de chaque groupe, le lithium a des propriétés différentes de celles de ses homologues, mais présente certaines similitudes avec le magnésium. Les anomalies du lithium résultent essentiellement de la faible taille de l'atome ou de l'ion, et de la charge de l'ion Li^+, qui est la plus grande de tous les ions alcalins et lui confère une tendance élevée à la solvatation et à la formation de liaisons covalentes.

Les éléments du groupe IA sont des métaux légers de couleur blanc argenté, qui s'oxydent facilement à l'air humide et réagissent violemment avec l'eau en formant une base hydroxylée ou *alcali*. On les appelle pour cette raison *métaux alcalins*.

Ces métaux ne se trouvent pas dans la nature à l'état libre mais sous forme de composés, le plus souvent ioniques. Une de leurs caractéristiques est la couleur qu'ils confèrent à la flamme d'un bec Bunsen lorsqu'on y introduit un de leurs composés. Cette émission dans le visible de radiations spécifiques de chaque métal alcalin peut servir à leur analyse qualitative. Ces couleurs sont : rouge pour le lithium, jaune pour le sodium, violet pour le potassium et le rubidium et rouge bleuâtre pour le césium. Les métaux alcalins les plus abondants dans la nature sont le sodium et le potassium sous forme de composés.

Eléments du groupe IA

Propriétés	Lithium	Sodium	Potassium	Rubidium	Césium	Francium
Numéro atomique	3	11	19	37	55	87
Masse atomique	6,939	22,9898	39,102	85,47	132,905	(223)
Rayon atomique (en Å)	1,125	1,572	2,025	2,16	2,35	-
Configuration électronique	$1s^22s^1$	$3s^1$	$4s^1$	$5s^1$	$6s^1$	$7s^1$
Densité à 20 °C	0,535	0,971	0,862	1,532	1,90	-
Point de fusion (en °C)	179	97,9	63,5	39,0	28,45	(27)
Point d'ébullition (en °C)	1336	882,9	757,5	700	670	-

◀ ***Tableau des propriétés des éléments du groupe IA.***

Castano - Ciboldi

▲ Sodium *métallique présentant des traces d'oxyde; la réactivité du sodium est telle qu'on ne le trouve pas à l'état natif dans la nature mais à l'état de composé.*

Lithium

Les minerais les plus importants pour l'extraction du lithium sont le *lépidolite :* $Li_2 (F, OH)_2 Al_2 (Si_2O_3)_3$, et le *spodumène :* $LiAl (SiO_3)_2$.

Le métal est obtenu par électrolyse du chlorure de lithium fondu ou dissous dans la pyridine. L'électrolyse des solutions aqueuses de LiCl ne conduit pas au lithium, mais à son hydroxyde LiOH.

Le lithium est un métal mou, blanc argenté, dont les surfaces fraîchement coupées se ternissent à l'air par formation d'oxyde et de nitrure de lithium. La réaction du lithium avec l'eau est beaucoup moins vigoureuse que celle du sodium et ne conduit pas à l'inflammation de l'hydrogène produit. Le lithium est un métal léger, de densité 0,53, qui fond à 179 °C et bout à 1 336 °C.

Les principaux composés du lithium sont l'**hydroxyde de lithium,** LiOH, qui est une base forte, le **carbonate de lithium,** CO_3Li_2, qui se décompose par chauffage :

$$CO_3Li_2 \rightarrow CO_2 + Li_2O,$$

et le **chlorure de lithium,** LiCl, très soluble dans l'eau. Le lithium réagit avec l'azote en donnant Li_3N. On connaît aussi Li_2NH et $LiNH_2$ qui s'hydrolysent sous l'action de l'eau en donnant de l'ammoniac.

Enfin, l'**hydrure de lithium et d'aluminium,** $LiAlH_4$, obtenu par action de l'hydrure de lithium sur le chlorure d'aluminium, est un réducteur énergique utilisé en synthèse organique :

$$AlCl_3 + 4LiH \rightarrow LiAlH_4 + 3LiCl.$$

On utilise aussi comme réducteur en chimie organique des solutions de lithium dans les amines, et en particulier dans l'éthylène-diamine : $H_2N—CH_2—CH_2—NH_2$. Le lithium, grâce à sa chaleur massique extrêmement élevée (0,784 cal/g · °C à 0 °C), devrait être un excellent fluide de refroidissement pour les échangeurs de chaleur; malheureusement il est trop corrosif, et on lui préfère le sodium. On peut utiliser le lithium ou ses composés

S.E.F.

▶ *Une mine de sel gemme (chlorure de sodium) à Racalmuto (Agrigente, Italie).*

organiques *(butyl-lithium)* pour polymériser les diènes conjugués comme le butadiène et l'isoprène (caoutchoucs synthétiques).

Sodium

La réactivité du sodium fait qu'on ne le trouve pas à l'état natif dans la nature, mais à l'état de composé, et plus particulièrement de *chlorure de sodium*, dans l'eau de mer *(sel marin)* et des lacs salés, dans les mines de sel *(sel gemme)*, dans les *carbonates* (CO_3Na_2 et CO_3NaH), dans le *borax* ($B_4O_7Na_2.10H_2O$) et dans les *silicates*.

Le métal pur est obtenu par électrolyse du chlorure de sodium fondu à 800 °C.

Le sodium est un métal mou, blanc argenté, se coupant aisément au couteau. Il fond à 97,9 °C et bout à 882,9 °C. Le sodium est très utilisé en synthèse organique comme réducteur, en particulier sous forme d'amalgame. Il est possible, en le portant au-dessus de son point de fusion dans un hydrocarbure inerte tel que la décaline, d'en préparer des émulsions extrêmement réactives. Les grains de sodium de ces émulsions ont des diamètres de l'ordre du micron, et cela facilite certaines réactions de sodation de composés organiques.

Le sodium s'oxyde rapidement à l'air humide. Il réagit violemment avec l'eau en formant de la soude et de l'hydrogène qui s'enflamme spontanément à la surface de l'eau :

$$Na + H_2O \rightarrow NaOH + 1/2H_2.$$

Comme les autres métaux alcalins, le sodium est soluble dans l'ammoniac liquide et dans certaines amines, en donnant des solutions bleues. Ces solutions conduisent le courant électrique, et le « transport » du courant doit s'y faire grâce à des électrons solvatés, c'est-à-dire des électrons libérés du métal et occupant des cavités du liquide. On utilise ces solutions en synthèse organique.

L'**amidure de sodium**, $NaNH_2$, peut être préparé à partir de solutions de sodium dans l'ammoniac liquide, en présence de traces catalytiques de chlorure ferrique :

$$Na + NH_3 \rightarrow NaNH_2 + 1/2H_2$$

Le sodium est utilisé comme fluide de transfert de calories dans les installations thermonucléaires.

Parmi les nombreux composés du sodium, on peut citer le **peroxyde de sodium**, Na_2O_2, obtenu par oxydation directe du sodium par l'oxygène. A plus haute température, le peroxyde de sodium se transforme en **superoxyde de sodium**, NaO_2. Le peroxyde de sodium est un oxydant énergique ; traité par de l'eau, il fournit de l'eau oxygénée et de la soude :

$$Na_2O_2 + 2H_2O \rightarrow 2NaOH + H_2O_2$$

Il est utilisé industriellement comme agent de blanchiment et pour la purification de l'air, dont il élimine le gaz carbonique et l'oxyde de carbone :

$$2Na_2O_2 + 2CO_2 \rightarrow 2Na_2CO_3 + O_2$$
$$Na_2O_2 + CO \rightarrow Na_2CO_3$$

L'**hydroxyde de sodium** ou **soude caustique**, NaOH, est obtenu par électrolyse du chlorure de sodium en solution aqueuse. On utilise pour cela des cellules d'électrolyse munies d'un diaphragme qui permet d'isoler le compartiment anodique du compartiment cathodique :

$$Na^+Cl^- + H_2O \rightarrow Na^+OH^- + 1/2H_2 + 1/2Cl_2$$

Il faut en effet éviter la formation d'hypochlorite de sodium ClONa qui pourrait résulter de l'action du chlore qui se dégage à l'anode, sur l'hydroxyde de sodium qui se forme à la cathode.

On utilise surtout les cellules d'électrolyse à amalgame dans lesquelles la cathode est constituée par une couche de mercure. Le sodium libéré du sel par le passage du courant fait un amalgame avec le mercure. Cet amalgame est décomposé par l'eau dans un autre compartiment de la cellule d'électrolyse où il se forme de l'hydrogène et de la soude exempte de chlorures :

$$NaHg_n + H_2O \rightarrow 1/2H_2 + NaOH + nHg.$$

Le mercure est récupéré et recyclé à la cathode. Le chlore gazeux se dégage à l'anode en graphite.

La soude est une base forte très hygroscopique qui se dissout dans l'eau avec une forte élévation de température. Ses applications industrielles sont très nombreuses.

C. Rives - Marina - Cedri

▲ ***Le chlorure de sodium** est, de tous les composés minéraux utilisés par l'homme, celui qui a les applications les plus nombreuses et les plus variées.*

Le **chlorure de sodium**, NaCl, communément appelé **sel**, et dont on connaît l'importance dans l'alimentation humaine, est certainement, de tous les composés minéraux utilisés par l'homme, celui qui a les applications les plus nombreuses et les plus variées. Il est utilisé dans la conservation des aliments et des peaux, et dans l'industrie chimique. Outre la fabrication du sodium et de la soude que nous venons de voir, il est utilisé pour la fabrication du sulfate de sodium obtenu par double décomposition du sulfate de magnésium et du chlorure de sodium :

$$MgSO_4 + 2NaCl \rightarrow Na_2SO_4 + MgCl_2$$

et dans la préparation d'autres composés du sodium.

Le **carbonate de sodium**, Na_2CO_3, est aussi un composé important du sodium. C'est, pour le tonnage de production, le troisième après le chlorure et l'hydroxyde, le sulfate étant le quatrième. On le trouve rarement à l'état libre, et, autrefois, on le préparait par incinération de matières végétales, et en particulier des Algues, d'où le nom de « ash » (cendres) qu'il conserve dans les langues anglo-saxonnes. Ce fut en France, à cause du blocus maritime anglais qui nous privait des cendres d'Algues, que fut développé le procédé Leblanc permettant de fabriquer le carbonate de sodium par chauffage de sulfate de sodium avec du charbon et du carbonate de calcium. Puis, en 1866, ce procédé, qui fut considéré comme une étape fondamentale du développement de l'industrie chimique, a été remplacé par le procédé Solvay encore appliqué actuellement. Le procédé Solvay peut être schématisé par les réactions suivantes :

$$NH_3 + CO_2 + H_2O \rightleftharpoons NH_4(HCO_3) \quad (1)$$
$$NaCl + NH_4(HCO_3) \rightleftharpoons NH_4Cl + NaHCO_3 \quad (2)$$
$$2NaHCO_3 \xrightarrow{260\,°C} Na_2CO_3 + H_2O + CO_2 \quad (3)$$

Pour que le procédé soit rentable, il faut récupérer l'ammoniac. Cela est réalisé grâce à la réaction suivante :

$$2NH_4Cl + Ca(OH)_2 \rightleftharpoons 2NH_3 + 2H_2O + CaCl_2 \quad (4)$$

Le gaz carbonique nécessaire à la réaction (1) et la chaux nécessaire à la réaction (4) proviennent de la calcination du carbonate de calcium dans un four à chaux :

$$CO_3Ca \rightarrow CO_2 + CaO.$$

PROCÉDÉ SOLVAY POUR LA PRÉPARATION DU CARBONATE DE SODIUM

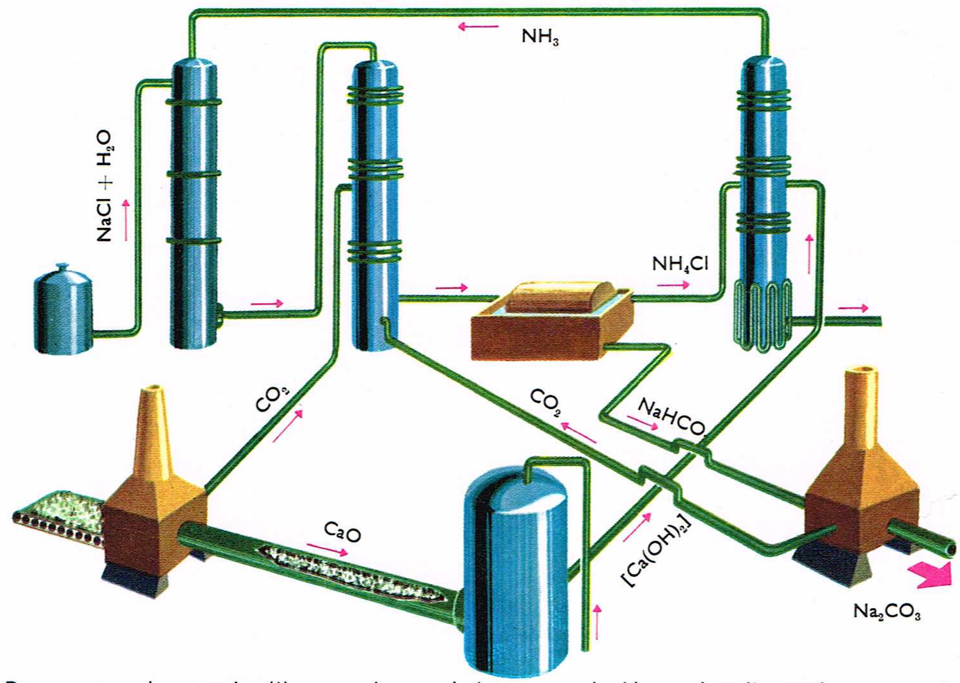

Dans une tour de saturation (1), on envoie une solution aqueuse de chlorure de sodium et du gaz ammoniac provenant de la tour (7). La solution résultante saturée en gaz ammoniac passe dans une tour de carbonatation (2). Elle se sature avec du gaz carbonique (CO_2) obtenu en même temps que de l'oxyde de calcium (CaO) en décomposant dans un four à chaux (3) du carbonate de calcium ($CaCO_3$). De la tour sort un mélange de chlorure d'ammonium (NH_4Cl) et de bicarbonate de soude ($NaHCO_3$) ; les deux composants sont séparés par un filtre rotatif (4). Dans un four de décomposition (5), le bicarbonate de soude perd de l'eau et du gaz carbonique et se transforme en carbonate de sodium (Na_2CO_3). Le gaz carbonique est renvoyé dans la tour de carbonatation.
Pour que le système soit rentable, il est nécessaire de récupérer le gaz ammoniac.
L'oxyde de calcium obtenu dans le four (3) est transformé dans une tour d'hydratation (6) en hydroxyde de calcium [$Ca(OH)_2$], lequel, avec le chlorure d'ammonium provenant du filtre, est envoyé dans une tour (7) où l'on obtient du gaz ammoniac et, comme sous-produit, du chlorure de calcium ($CaCl_2$).
Le carbonate de sodium est aussi appelé soude Solvay et sert à la préparation de la soude de formule NaOH.

I.G.D.A.

Le procédé Solvay permet de synthétiser le *carbonate acide de sodium* ou *bicarbonate de sodium* utilisé en pharmacie et pour la neutralisation de composés acides sensibles aux bases fortes. Le *carbonate de sodium* est utilisé en grande partie dans la fabrication du verre et dans l'industrie du savon.

Parmi les composés importants du sodium, il faut citer l'**alliage plomb-sodium** dont le débouché presque exclusif est la fabrication du plomb tétraéthyle et du plomb tétraméthyle utilisés pour augmenter l'indice d'octane des essences.

Les **phosphates** et **polyphosphates de sodium** sont aussi des sels de sodium utilisés en quantités importantes pour la formulation des détergents.

Le sodium joue un rôle indispensable dans la chimie des êtres vivants. Sous forme ionique, due à la dissociation du chlorure de sodium, il est présent dans les liquides interstitiels de l'organisme et dans le plasma. L'ion sodium joue un rôle primordial dans la polarisation de la membrane cellulaire. Les perturbations du métabolisme du sodium dans l'organisme sont nombreuses : obésités, déshydratation, diabète insipide, etc.

Potassium

Le potassium est, en abondance, le septième élément de la lithosphère avec une teneur de 2,6 %. L'eau des océans en renferme 0,07 % sous forme de *chlorure de potassium*. C'est un solide, comme le sodium, de point de fusion 63,5 °C, et dont la température d'ébullition est 757,5 °C. On rencontre le potassium principalement sous forme de *chlorure*, associé à du chlorure de sodium *(sylvine*, ou *sylvinite)*, ou de *chlorure double :*

$$KCl.MgCl_2.6H_2O$$ (ou *carnallite*)

ou encore $KCl.MgSO_4.3H_2O$ (ou *caïnite*), enfin sous forme de *silicate double*, ou *leucite*. L'organisme humain en renferme environ 0,4 %, surtout dans le liquide céphalo-rachidien et dans le sang.

Les sels de potassium sont connus depuis très longtemps, mais le potassium ne fut isolé par électrolyse de la potasse qu'en 1807 par Davy.

Le potassium s'oxyde très rapidement et doit, pour cette raison, être conservé à l'abri de l'air. Comme le sodium, le potassium réagit violemment sur l'eau en formant de l'hydrogène et de la potasse KOH. Il réagit avec les halogènes et la plupart des métalloïdes en donnant des sels presque tous solubles dans l'eau.

On prépare le potassium par électrolyse de la potasse ou du chlorure de potassium fondus, ou par réduction du carbonate par le charbon.

Il forme de nombreux composés qui, pour la plupart, tirent leur importance industrielle du fait que le potassium est un élément indispensable au développement des plantes (engrais potassiques). Parmi les composés les plus importants du potassium, il faut citer :

L'**hydroxyde de potassium** ou **potasse,** KOH, que l'on peut obtenir soit par électrolyse du chlorure de potassium en solution, soit par action de la chaux sur une solution aqueuse de carbonate :

$$K_2CO_3 + Ca(OH)_2 \rightarrow 2KOH + CaCO_3.$$

C'est une base forte mais plus onéreuse que la soude et, pour cette raison, peu employée dans l'industrie. Elle entre dans la fabrication du savon noir.

Le **chlorure de potassium,** KCl, qui se trouve en grande quantité dans les dépôts de sels potassiques et que l'on extrait notamment de la sylvine et de la carnallite, sert à la préparation d'autres composés potassiques.

Le **bromure** et l'**iodure de potassium,** KBr et KI, préparés par réaction du carbonate sur des sels de fer, sont employés en médecine et en photographie.

Le **sulfate de potassium,** K_2SO_4, est employé comme engrais.

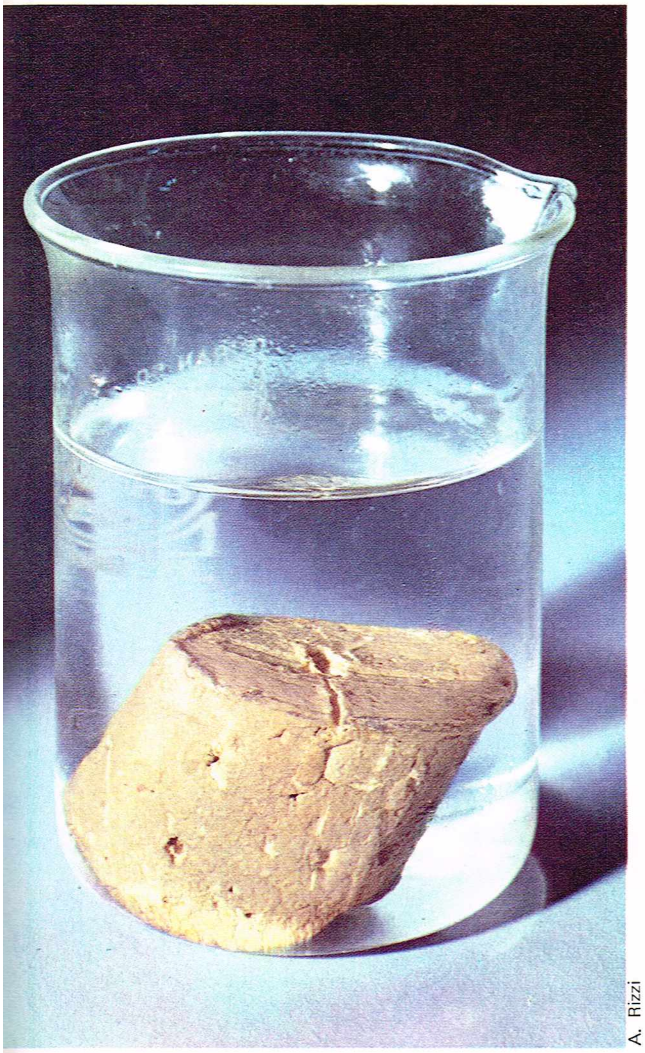

A. Rizzi

◀ ***Un échantillon de potassium : ce métal alcalin, qui s'oxyde très rapidement à l'air et qui réagit violemment avec l'eau, doit être conservé dans du pétrole ou dans un solvant dérivé d'hydrocarbures aliphatiques.***

Le **nitrate de potassium,** KNO_3, ou **salpêtre,** résulte de la réaction du nitrate de sodium sur le chlorure de potassium :

$$NaNO_3 + KCl \rightarrow KNO_3 + NaCl.$$

Le **carbonate de potassium,** K_2CO_3, produit de grande importance industrielle, se préparait autrefois par lessivage des cendres de nombreuses plantes. C'est une substance blanche soluble dans l'eau et utilisée dans la fabrication des verres difficilement fusibles et des savons mous. On ne peut pas le préparer par le procédé Solvay, mais on le fabrique par carbonatation de la potasse :

$$2KOH + CO_2 \rightarrow K_2CO_3 + H_2O.$$

Le **cyanure de potassium,** KCN, très toxique, est utilisé dans la métallurgie de l'or et de l'argent, en galvanoplastie et dans certaines synthèses organiques.

Citons enfin le **permanganate de potassium,** $KMnO_4$, réactif chimique très important, oxydant énergique, utilisé comme désinfectant, et le **bichromate de potassium,** $K_2Cr_2O_7$.

Rubidium

Il a été découvert en 1861 par Bunsen et Kirchhoff, grâce à l'emploi du spectroscope, et son nom lui a été donné pour rappeler la raie rouge principale de son spectre. Le rubidium existe en abondance dans l'écorce terrestre mais aucun minerai ne le renferme comme élément principal. C'est la raison de sa faible production et de la rareté de ses applications. Tout le rubidium produit est en réalité un sous-produit de la préparation d'autres métaux alcalins.

Le rubidium est un solide blanc argenté, mou, qui fond à 39 °C et bout à 700 °C. Ses principaux usages sont dans la fabrication de cellules photo-électriques et des tubes sous vide.

Césium

Comme le rubidium, le césium est très dispersé dans l'écorce terrestre et souvent associé à d'autres éléments alcalins.

C'est un métal blanc argenté qui s'enflamme spontanément à l'air ; il fond à 28,45 °C et bout à 670 °C. Il décompose l'eau violemment et s'oxyde au contact de l'air. On le prépare par électrolyse du cyanure fondu ou par réduction du chlorure. Chimiquement, ses propriétés sont peu différentes de celles du potassium.

Le césium est utilisé dans les cellules photo-électriques et dans les instruments de détection infrarouge. On étudie actuellement son utilisation dans les moteurs ioniques.

Francium

Ce dernier métal de la série des alcalins a été découvert en 1939 en France par Marguerite Perey dans les produits de désintégration de l'actinium. Sa masse atomique est 223, et l'on connaît tous les isotopes du francium de masse 203 à 224. Le francium n'a pas d'application pratique.

▼ ***Tableau des propriétés des éléments du groupe IB.***

Eléments du groupe IB			
Propriétés	**Cuivre**	**Argent**	**Or**
Numéro atomique	29	47	79
Masse atomique	63,54	107,88	197,0
Rayon atomique (en Å)	1,271	1,442	1,441
Configuration électronique	$3d^{10}4s^1$	$4d^{10}5s^1$	$4f^{14}5d^{10}6s^1$
Densité à 20 °C	8,92	10,5	19,3
Point de fusion (en °C)	1083	960,5	1063
Point d'ébullition (en °C)	2595	2210	2970

Groupe IB

Le cuivre (Cu), l'argent (Ag) et l'or (Au), qui possèdent un seul électron *s* à l'extérieur d'une couche *d* saturée, sont classés dans le groupe I. Mais on les classe dans le groupe IB et non IA en raison de leur grande différence chimique avec les métaux alcalins. Ce sont des métaux relativement peu fusibles, très bons conducteurs de la chaleur et de l'électricité. Leurs oxydes perdent facilement de l'oxygène par chauffage, particulièrement ceux d'or et d'argent. Mis à part le cuivre, ce sont des métaux nobles qui, contrairement aux métaux alcalins, ont tendance à former facilement des complexes.

Cuivre

Ce métal utilisé aux origines mêmes de la civilisation était connu à Chypre sous le nom d'*oes cyprium,* devenu *aes cyprium,* puis *cuprum* (d'où vient le nom de l'élément).

Abondant dans la lithosphère et l'écorce terrestre, il est présent dans de nombreux sols et roches aussi bien que dans les argiles des océans, le limon des rivières, les Algues et d'autres plantes, et dans de nombreux Mollusques et Arthropodes, etc.

Le cuivre est extrait de minerais sulfurés : *chalcosine* Cu_2S, *chalcopyrite* $CuFeS_2$, ou oxydés : *cuprite* Cu_2O, *malachite* (carbonate basique) $CuCO_3 . Cu(OH)_2$. Les minerais renferment presque toujours d'autres éléments métalliques qu'il faut séparer. La faible teneur en cuivre du minerai oblige à concentrer celui-ci. Le concentré mêlé à un fondant est traité au four réverbère, puis au convertisseur. On obtient ainsi divers produits intermédiaires : matte, puis blister, avant de parvenir au cuivre affiné thermique.

Une grande partie du cuivre pur utilisé partout dans le monde subit en outre un affinage électrolytique. Certains

minerais sont également traités directement à l'acide sulfurique, et la liqueur obtenue peut être utilisée pour l'électrolyse. On peut également précipiter le cuivre par déplacement sur du fer; cette dernière métallurgie, dite humide, n'intéresse qu'une faible partie de la production du cuivre. On obtient dans ce cas du « cément de cuivre ».

Le cuivre est un métal rouge clair, malléable, ductile, excellent conducteur de la chaleur et de l'électricité. Très oxydable, surtout à l'air humide, il se recouvre d'une couche adhérente de carbonate basique, le vert-de-gris. Son point de fusion est 1 083 °C, son point d'ébullition 2 595 °C, sa densité à 20 °C est de 8,92. Les états de valence les plus courants du cuivre sont I et II; cependant il existe plusieurs composés correspondant à la valence III.

Par chauffage en présence d'air, on obtient l'oxyde CuO qui, lorsqu'on poursuit le chauffage, se transforme en Cu_2O. Le cuivre est attaqué par les acides oxydants :

$$3Cu + 2NO_3^- + 8H^+ \rightarrow 3Cu^{++} + 2NO + 4H_2O,$$

et par l'acide chlorhydrique gazeux à froid :

$$Cu + HCl \rightleftharpoons CuCl + 1/2H_2$$

Il se dissout par formation d'un complexe en présence de cyanures alcalins :

$$Cu + 2CN^- + H_2O \rightarrow Cu\ (CN)_2^- + OH^- + 1/2H_2$$

Dans certains acides organiques et dans l'ammoniac en présence d'oxygène, il se dissout en formant une solution d'un bleu intense qui peut dissoudre la cellulose.

Les composés solubles du cuivre présentent une certaine toxicité (certains sont utilisés comme anticryptogamiques). On distingue les *composés cuivreux* correspondant au degré d'oxydation + 1, et les *composés cuivriques* qui correspondent au degré d'oxydation + 2.

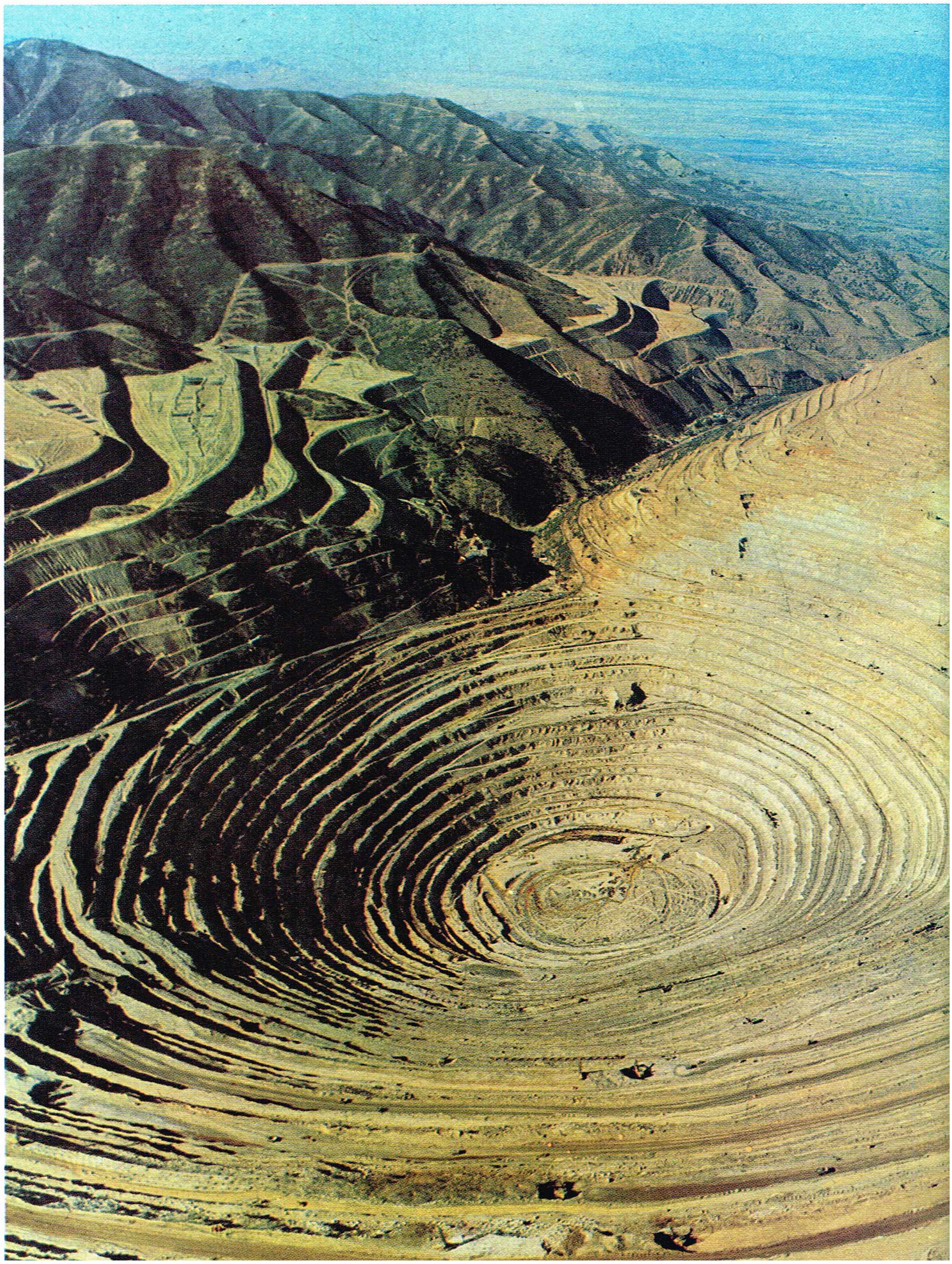

▶ *Vue aérienne d'une des plus grandes mines de cuivre du monde : celle de Salt Lake City (Utah, États-Unis).*

Parmi les *composés cuivreux,* l'**oxyde cuivreux,** Cu_2O, est une poudre jaune rougeâtre que l'on obtient par action d'une solution alcaline sur un sel cuivreux :

$$2Cu^+ + 2OH^- \rightarrow Cu_2O + H_2O,$$

ou par décomposition thermique de l'oxyde cuivrique CuO :

$$2CuO \xrightarrow{1\,000\ °C} Cu_2O + 1/2O_2.$$

Cet oxyde est utilisé dans les vernis marins pour préserver les coques des navires des incrustations dues aux micro-organismes marins.

Parmi les sels cuivreux, les **halogénures** (blancs ou jaunâtres) sont peu solubles et stables seulement à l'état solide. En solution, ils tendent à se décomposer; ainsi :

$$2CuCl \rightleftharpoons Cu + CuCl_2.$$

En effet, dans ces conditions, l'ion cuivreux se dismute en ion cuivrique qui s'est donc oxydé et en cuivre métallique qui a été réduit. Les solutions de chlorure cuivreux sont utilisées pour l'analyse des gaz en raison de leur propriété d'absorber l'oxyde de carbone en formant un complexe incolore :

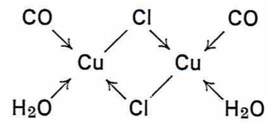

Le **cyanure cuivreux,** blanc et insoluble, a un comportement analogue au chlorure; il est soluble dans un excès d'ions CN^- avec formation de complexes stables :

$$Cu(CN)_2^-, \quad Cu(CN)_3^{--} \quad \text{et} \quad Cu(CN)_4^{---}.$$

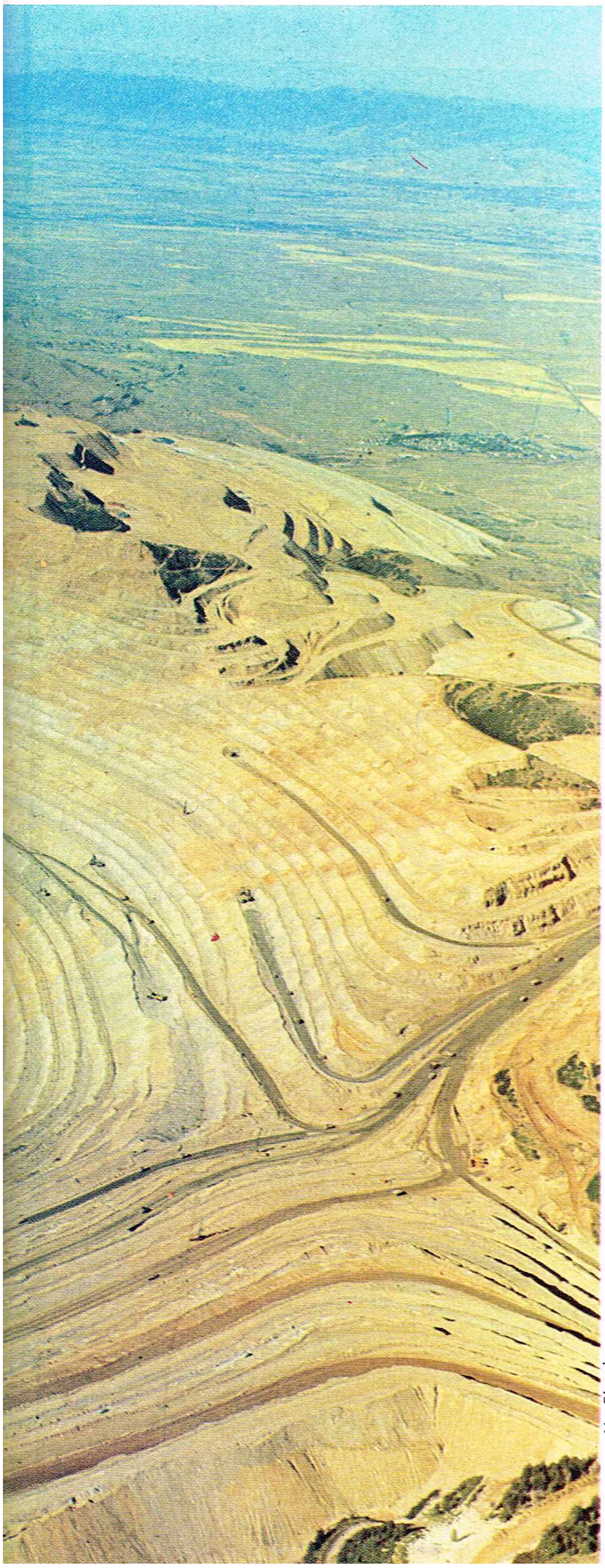

N. Cirani

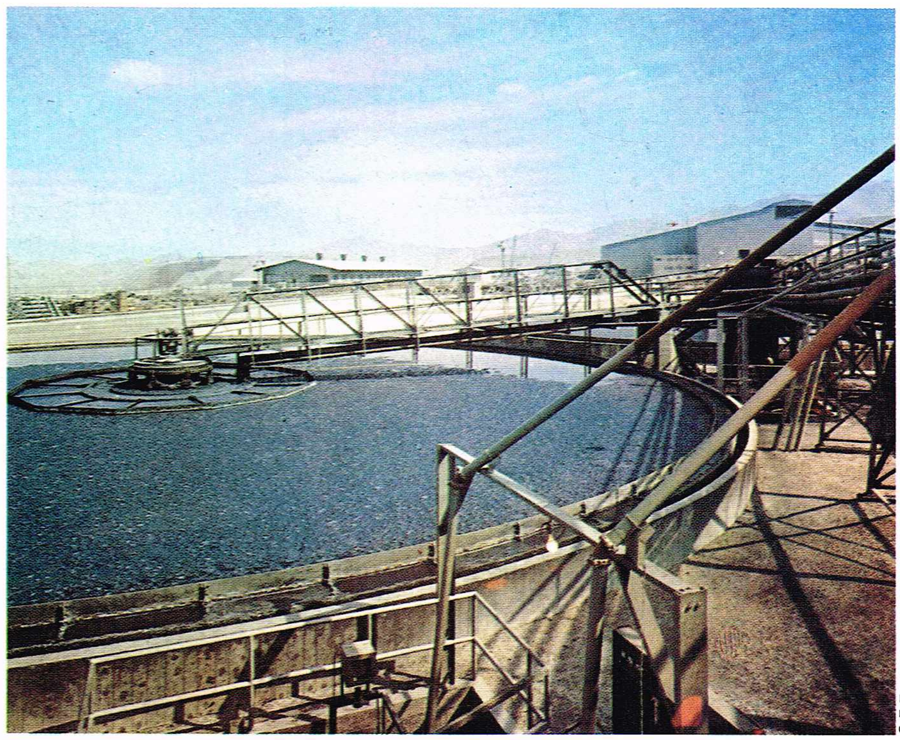

S.E.F.

▲ ***Bassin de condensation de sulfate de cuivre, près de la grande mine de cuivre de Chuquicamata (Chili).***

Parmi les composés cuivriques, l'**oxyde cuivrique,** CuO, peut être obtenu par calcination à l'air de sels divers ou par oxydation du cuivre à l'air. Par chauffage, il se transforme, avec perte d'oxygène, en oxyde cuivreux. En présence de composés oxydables, l'oxyde cuivrique peut céder son oxygène et se transformer en cuivre métallique. L'oxyde cuivrique est utilisé dans les émaux et les verres de couleurs verte et bleue.

L'**hydroxyde de cuivre,** $Cu(OH)_2$, peut être obtenu par addition d'un hydroxyde alcalin à une solution de sels cuivriques. Il se forme un précipité bleu, mais on peut aussi obtenir l'hydroxyde sous forme de cristaux. Par chauffage, la solution aqueuse d'hydroxyde est déshydratée en oxyde. L'hydroxyde $Cu(OH)_2$ est soluble dans les tartrates alcalins, et la solution bleue obtenue, connue sous le nom de *liqueur de Fehling,* est utilisée pour le dosage des sucres.

Le **sulfate de cuivre,** $CuSO_4.5H_2O$, est certainement le plus courant des sels de cuivre. Il est formé de cristaux bleus qui, par chauffage, se transforment en cristaux verts de monohydrate, et, si l'on poursuit le chauffage, on obtient le sulfate anhydre blanc. Ce dernier est utilisé pour déshydrater les solvants. Le pentahydrate est obtenu par action de l'acide sulfurique sur le cuivre en présence d'oxygène ou non :

$$Cu + 1/2O_2 + H_2SO_4 + 4H_2O \rightarrow CuSO_4.5H_2O$$
$$Cu + 2H_2SO_4 + 3H_2O \rightarrow CuSO_4.5H_2O + SO_2.$$

Le sulfate de cuivre est utilisé dans l'agriculture. Certains carbonates basiques de cuivre sont utilisés comme pigments (malachite).

▶ *Radiographie d'*alliages **de cuivre-nickel** ***en fonction de la teneur en ces deux éléments; ces alliages sont caractérisés par leur résistance à la corrosion par l'eau de mer.***

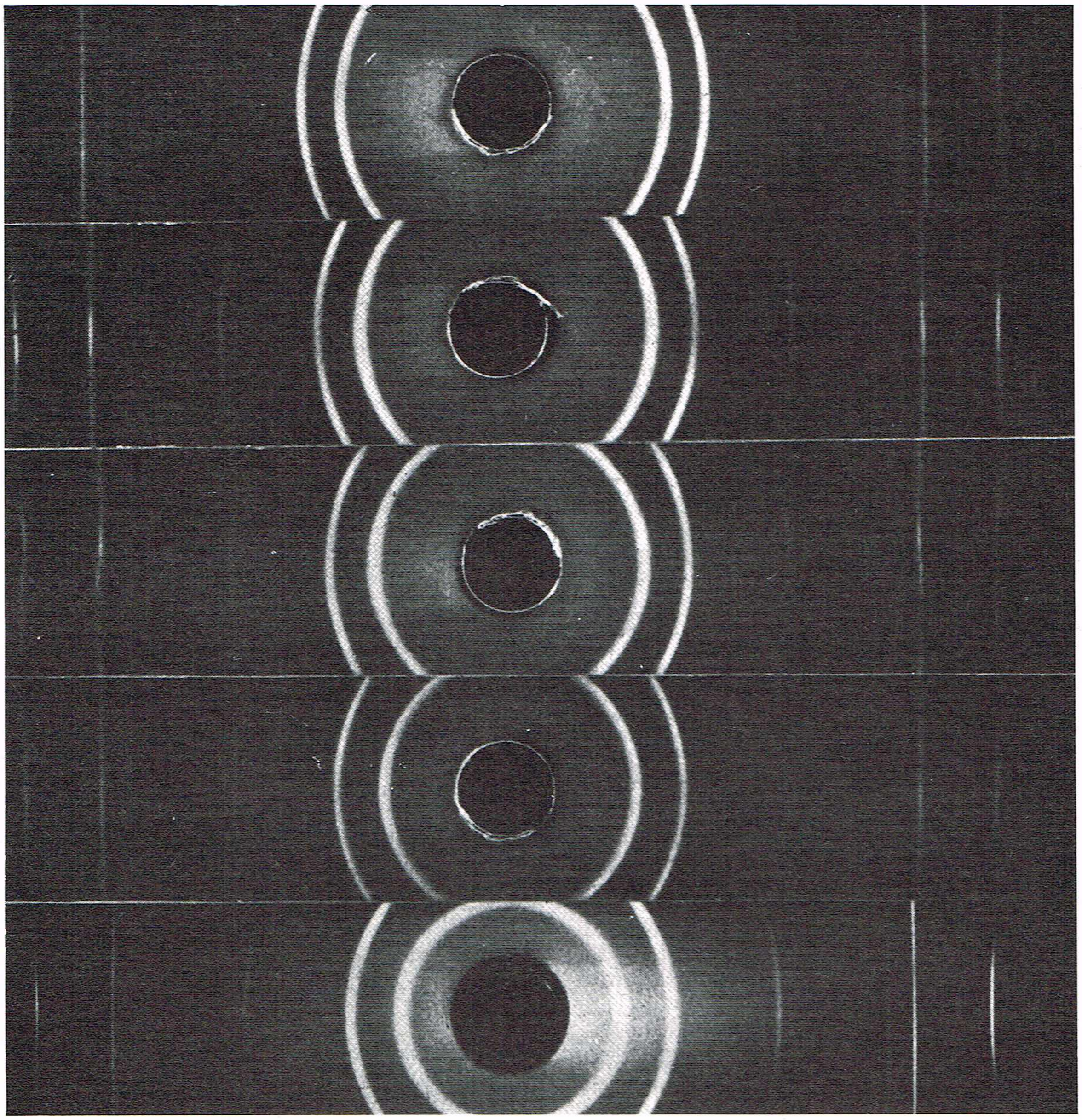

Palais de la découverte - Paris

Le **sulfure de cuivre,** CuS, est noir, peu soluble et s'oxyde lentement à l'air en présence d'humidité pour se transformer en oxyde. A froid, dans un courant d'hydrogène, il est réduit en Cu_2S.

Les ions cuivriques forment des complexes dont l'importance est parfois très grande, surtout comme catalyseurs dans des réactions d'oxydation et dans d'autres processus où interviennent des mécanismes d'oxydo-réduction mettant en jeu le Cu^{I} et le Cu^{II}. Le cuivre intervient dans certaines enzymes comme la phénolase et dans l'hémocyanine (sous forme de Cu^{I}).

Les alliages de cuivre. Le cuivre est susceptible de s'allier à un très grand nombre d'éléments. On en distingue plusieurs catégories :

— Les *cuivres faiblement alliés,* c'est-à-dire renfermant moins de 1 à 2 % de l'élément d'addition. Ce sont les cuivres à l'argent, au cadmium, au chrome, au zirconium (pour caractéristiques mécaniques élevées et haute conductivité), les cuivres au tellure, au plomb et au soufre (pour décolletage et haute conductivité), au béryllium (pour caractéristiques mécaniques très élevées et conductivité moyenne : électrodes de soudage par point, ressorts de contact pour ordinateurs, outils anti-étincelles).

— Les *alliages cuivre-zinc,* communément appelés *laitons,* qui présentent des propriétés très diverses selon leur titre en cuivre : depuis 95 % de cuivre et 5 % de zinc (laiton pour émaillage et médailles), jusqu'à 60 % de cuivre et 40 % de zinc (laiton d'horlogerie). De nombreuses nuances permettent de fabriquer des pièces pour le décolletage (avec 2,5 % de plomb), le matriçage, et l'emboutissage. Les laitons simples ou complexes (on appelle laitons à haute résistance ceux auxquels on a ajouté divers éléments [Fe, Si, Al, Ni ou Sn] en quantité ne dépassant pas 5 %) sont les plus importants en tonnage des alliages de cuivre.

— Les *alliages cuivre-étain,* appelés *bronzes,* qui sont surtout des alliages de fonderie. On y trouve un titre en étain qui varie de 4 % à 23 % (métal des cloches). Les bronzes complexes, auxquels on a ajouté du zinc ou du plomb, sont utilisés dans les procédés antifriction.

— Les *alliages cuivre-aluminium* qui comportent 6 à 12 % d'aluminium avec ou sans addition de manganèse, de nickel ou de fer. Ces alliages ont une excellente résistance à la corrosion dans divers milieux et des caractéristiques comparables à celles des aciers simples. On les utilise en particulier dans les constructions navales, la robinetterie, la fabrication de pièces de monnaie, etc.

— Les *alliages cuivre-nickel* renferment plus de 50 % de cuivre. On les emploie dans le génie chimique pour leur résistance à la corrosion par l'eau de mer.

— Les *maillechorts* sont des alliages ternaires (cuivre, zinc, nickel) à titre variable ; ils ont des utilisations diverses.

— Les *alliages cuivre-plomb* sont des pseudo-alliages, car le plomb est pratiquement insoluble dans le cuivre. Ils sont utilisés pour la fabrication d'éléments antifriction (coussinets).

Argent

Cet élément est situé entre le cuivre et l'or dans le sous-groupe IB de la classification périodique. L'argent se trouve dans la nature principalement à l'état de sulfure Ag_2S *(argentite)*. Il peut aussi être dissous ou intimement associé à d'autres sulfures comme les sulfures de plomb et de cuivre. Les autres minerais d'argent sont la *cérargyrite :* AgCl, la *pyrargyrite :* $3Ag_2S \cdot Sb_2S_3$, la *stéphanite :* $5Ag_2S \cdot Sb_2S_3$. On trouve enfin l'argent à l'état natif. Dans la nature, il est très souvent associé à l'or.

C'est un métal qui cristallise dans le système cubique; sa densité est de 10,5, son point de fusion 960,5 °C et son point d'ébullition 2 210 °C. Métal malléable et très ductile, c'est le meilleur conducteur connu de la chaleur et de l'électricité.

On connaît 2 isotopes stables de masses atomiques 107 et 109, et 14 radio-isotopes de masses atomiques comprises entre 102 et 117. Les isotopes de masses 112 à 117 sont des produits de fission de l'uranium. La valence principale de l'argent est 1, mais il peut être également bivalent et trivalent.

L'argent est récupéré dans le traitement des galènes argentifères. La galène fournit des alliages plomb-argent à faible teneur en argent qui sont la matière première de la fabrication de l'argent. On enrichit l'alliage plomb-argent (qui contient au maximum 0,5 à 1 % d'argent) soit en tenant compte du diagramme Pb/Ag, soit par zingage (l'argent se concentre dans le zinc). Pour extraire l'argent, l'ancienne méthode était la *coupellation* qui consistait à chauffer à l'air dans une coupelle, en présence de phosphate d'os, l'alliage Pb/Ag; le plomb s'oxydait en PbO et était absorbé par la coupelle poreuse; seul l'argent restait inaltéré.

Actuellement, on préfère le procédé par *cyanuration*. Par action de NaCN sur l'alliage Pb/Ag, il se forme le dérivé $Na[Ag(CN)_2]$, soluble, qui est séparé du plomb, lequel ne réagit pas. On traite alors par la poudre de zinc le complexe obtenu, ce qui a pour effet de faire précipiter l'argent :

$$2Na[Ag(CN)_2] + Zn \rightarrow 2NaCN + Zn(CN)_2 + 2Ag.$$

L'argent est raffiné par électrolyse.

Dans les conditions habituelles, l'argent ne se combine pas à l'oxygène de l'air. Sa réaction avec l'oxygène n'a lieu que sous pression ou à température élevée. A sa température de fusion, l'argent est oxydable et peut absorber 20 fois son propre volume d'oxygène. Mais cette oxydation étant réversible, l'oxyde Ag_2O formé à haute température se décompose au refroidissement. L'oxyde d'argent se décompose aussi facilement sous l'influence de l'eau oxygénée H_2O_2 :

$$Ag_2O + H_2O_2 \rightarrow H_2O + O_2 + 2Ag.$$

L'argent se combine facilement au soufre dès la température ordinaire. Dans une atmosphère renfermant des traces d'hydrogène sulfuré ou d'autres composés soufrés, l'argent se ternit rapidement en se recouvrant d'une couche de sulfure, mais cette couche n'attaque pas l'argent en profondeur et peut aisément être éliminée par un traitement physique ou chimique.

L'argent résiste à l'attaque de la plupart des acides minéraux et organiques (acides chlorhydrique, phosphorique, acétique, benzoïque, etc.), mais se dissout aisément dans l'acide nitrique. Il résiste aussi à l'attaque des bases en solution, ainsi que des sels fondus. Par contre, l'argent et son sulfure se dissolvent aisément dans les solutions diluées de cyanure de sodium ou de potassium (c'est la base du procédé d'extraction de l'argent).

Les **halogénures d'argent** sont tous insolubles dans l'eau, sauf le **fluorure** AgF. Le **chlorure** est soluble dans des solutions diluées d'ammoniaque, grâce à la formation de l'ion complexe $[Ag(NH_3)_2]^+$. Le **bromure** se dissout seulement dans l'ammoniaque concentrée, et l'**iodure** est totalement insoluble dans l'ammoniaque. Le **thiosulfate** d'argent est soluble par formation des complexes $Na[AgS_2O_3]$, $Na_3[Ag(S_2O_3)_2]$ et $Na_5[Ag(S_2O_3)_3]$. Tous les sels d'argent, mais surtout les halogénures, sont décomposés par la lumière (en particulier par les radiations ultraviolettes) avec formation d'argent métallique. Ce phénomène est à la base de l'utilisation des halogénures d'argent (bromure et iodure) pour la préparation de couches sensibles en photographie.

H. Chaumeton - Jacana

▲ *Dans la nature, l'argent peut se trouver sous forme de minerais mais aussi à l'état natif : il s'agit alors de métal pur.*

▼ *Une vue d'une mine importante, celle de San Luis Potosi en Bolivie, d'où l'on extrait de l'argent et du plomb.*

N. Cirani

Le **cyanure d'argent**, AgCN, est blanc, insoluble, comme le **sulfocyanure d'argent**, AgSCN, mais se dissout dans un excès de cyanure de sodium avec formation du complexe $Na[Ag(CN)_2]$ utilisé dans les bains galvaniques pour les dépôts d'argent.

Le **nitrate d'argent** est certainement le composé industriellement le plus important de ce métal. Il est utilisé dans la préparation des émulsions photographiques. Il est très soluble dans l'eau.

Outre ses utilisations en photographie, l'argent trouve des applications en *catalyse*. La réaction d'oxydation de l'éthylène en oxyde d'éthylène est catalysée par l'argent déposé sur un support. L'argent trouve aussi des applications en médecine et en chirurgie dentaire. Sa conductibilité électrique, sa résistance aux agents chimiques et à l'oxydation, même à température élevée, permettent de l'utiliser dans la construction mécanique, dans la réalisation de contacteurs électriques, et dans certaines industries de pointe (industrie atomique). Aux États-Unis, l'industrie aérospatiale utilise presque autant d'argent que l'industrie photographique.

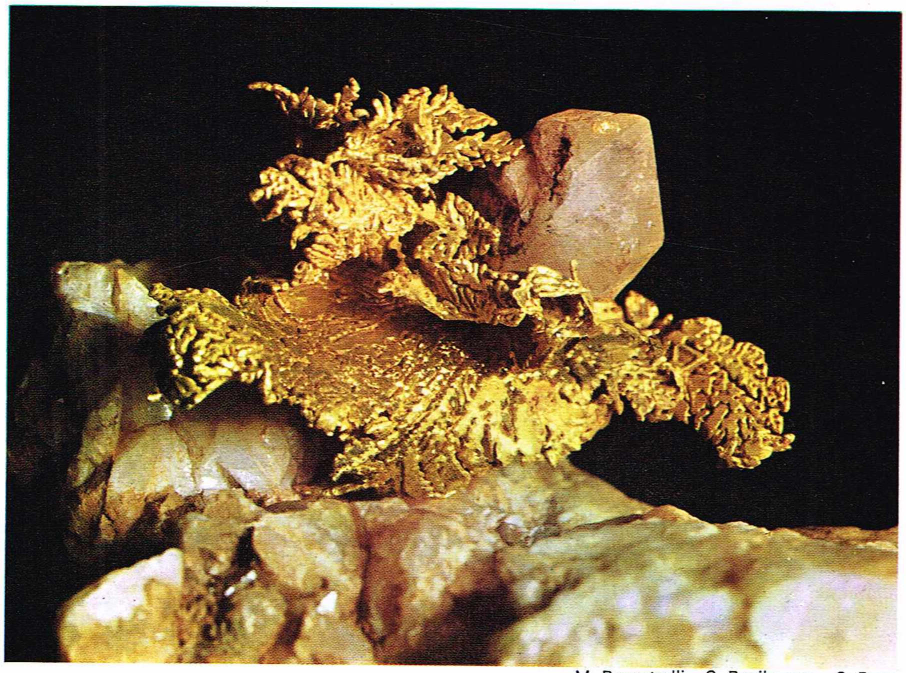

M. Bavestrelli - C. Bevilacqua - S. Prato

▲ *L'or existe à l'état natif dans la nature : ici de l'or sur quartz, provenant de la Mineria Dalmatia (Kelsey Eldorado Co., Californie) [British Museum, Londres].*

Or

L'or existe à l'état natif dans la nature ; on le rencontre sous forme de pépites, de grains arrondis, de lamelles ou de paillettes, associé au sélénium et au tellure. A l'état natif, on le rencontre souvent dans des roches à base de quartz ou dans les placers (dépôts alluviaux formés de débris de roches, sable, galets arrachés par les eaux aux terrains ayant renfermé de l'or).

En dehors de son extraction primitive des dépôts alluviaux, l'or peut être extrait de façon plus rapide par le procédé d'*amalgamation*. Ce procédé consiste à faire passer le sable aurifère ou le quartz broyé sur des plaques inclinées de cuivre amalgamé. Les parcelles d'or forment un amalgame qui est ensuite distillé.

Un autre procédé est la *cyanuration*. Le minerai est mis en contact avec du cyanure de sodium. Il se forme un composé soluble de formule $Na[Au(CN)_2]$ que l'on soumet ensuite à l'action du zinc :

$$2Au + 4NaCN + O_2 + 2H_2O \rightarrow 2Na[Au(CN)_2] + 2NaOH + H_2O_2$$

$$2Na[Au(CN)_2] + Zn \rightarrow 2Au + Na_2[Zn(CN)_4].$$

L'or ainsi obtenu peut ensuite être affiné par électrolyse du complexe d'or obtenu par attaque à l'*eau régale* (mélange d'acide chlorhydrique et d'acide nitrique).

A l'état pur, l'or est un métal jaune brillant. Il fond à 1 063 °C sans altération ; on se réfère à cette température pour l'étalonnage de certains couples thermo-électriques. Il bout à 2 970 °C. C'est un excellent conducteur de la chaleur et de l'électricité. Pour sa grande malléabilité (feuilles d'or), sa ductilité et son inertie chimique, l'or trouve une grande variété d'applications. On l'utilise surtout sous forme d'alliages avec le cuivre, l'argent, le fer, le nickel et le zinc. Le *carat* est la mesure du titre des alliages d'or exprimé en parties d'or pur contenues dans 24 parties d'alliage. L'or à 18 carats contient 18 parties d'or sur 24 d'alliage. L'adhésivité remarquable de l'or et son inaltérabilité justifient son emploi en art dentaire. A l'état colloïdal, l'isotope ^{198}Au de l'or est doué de propriétés antiseptiques.

L'or est difficilement attaqué par les réactifs chimiques, il ne réagit pas avec l'oxygène et ne s'altère donc pas à l'air. Il ne réagit pas avec les acides mais est attaqué par les halogènes (le chlore et l'iode). L'attaque du chlore se fait par l'intermédiaire de l'eau régale qui le fait passer à l'état d'$AuCl_3$ et $HAuCl_4$. Le chlore gazeux attaque l'or vers 200 °C. L'or est aussi attaqué par le mercure, avec lequel il forme un amalgame.

L'or donne surtout des composés covalents et des complexes.

Le **chlorure d'or** est très instable ; il est en équilibre avec le chlore et le chlorure aurique $AuCl_3$:

$$AuCl_3 \rightleftharpoons AuCl + Cl_2.$$

Le chlorure et le **bromure d'or** se décomposent à température relativement basse en or et halogène :

$$2AuBr \xrightarrow{130\ °C} Br_2 + 2Au.$$

L'or monovalent, en dehors de ces halogénures, forme des complexes avec le chlore : $[AuCl_2]^-$ et les ions cyanures : $[Au(CN)_2]^-$. L'or^{III} donne des complexes, tels : $[AuCl_3OH]^- H^+$ et $AuCl_4H$ **(acide aurichlorhydrique)** que l'on obtient par action de HCl sur $AuCl_3$:

$$AuCl_3 + HCl \rightarrow HAuCl_4.$$

Groupe IIA

Le béryllium (Be), le magnésium (Mg), le calcium (Ca), le strontium (Sr), le baryum (Ba) et le radium (Ra) forment le groupe II A de la classification périodique, ou groupe des métaux alcalino-terreux. Le béryllium, premier élément du groupe, a plus d'analogies avec l'aluminium qu'avec les autres éléments du groupe. Les éléments alcalino-terreux ont les caractéristiques des métaux : ils réagissent avec l'eau, bien que moins fortement que les métaux alcalins, pour donner des bases moins fortes que celles que l'on obtient avec ces derniers. Le seul élément de ce groupe qui réagisse avec l'eau avec la vivacité des métaux alcalins est le baryum. Ces métaux, comme les métaux alcalins, sont solubles dans l'ammoniaque. Ils donnent en outre des composés peu solubles comme les oxalates et certains sulfates. Les deux plus importants représentants du groupe sont le calcium et le magnésium.

Béryllium

Le béryllium est un métal très peu répandu dans la nature ; son minerai le plus important est le *béryl* : c'est un silicate dont la composition correspond à $6SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot 3BeO$, et qui contient environ 10 % d'oxyde de béryllium. Lorsque, dans ce silicate, l'aluminium est remplacé par le chrome, il s'agit de la pierre précieuse appelée émeraude. Le béryl est donc un minerai rare et pauvre, et la métallurgie du béryllium est une métallurgie difficile. Elle consiste en une attaque à chaud (600-700 °C) du béryl par le fluosilicate de sodium en présence de carbonate de sodium :

$$6SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot 3BeO + Na_2SiF_6 \xrightarrow{Na_2CO_3} 3BeF_2 + 2AlF_3 + 6NaF + 9SiO_2.$$

La masse réactionnelle issue du grillage est traitée par de l'eau, et la solution obtenue amenée à pH 11,3-11,6 avec de la soude afin de précipiter l'hydroxyde de béryllium.

L'hydroxyde est ensuite transformé en fluorure par les réactions suivantes :

$$Be(OH)_2 + 2NH_3 + 4HF \rightarrow (NH_4)_2BeF_4 + 2H_2O$$

$$(NH_4)_2BeF_4 \rightarrow BeF_2 + 2NH_4F.$$

Le fluorure de béryllium est réduit par chauffage à 1 350 °C avec du magnésium :

$$BeF_2 + Mg \rightarrow Be + MgF_2.$$

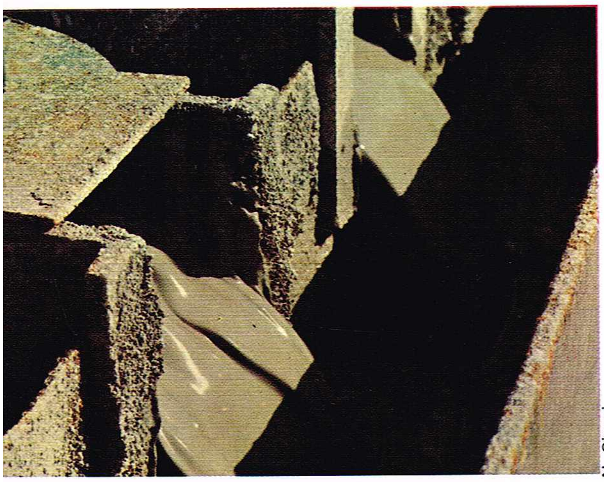

N. Cirani

Eléments du groupe IIA (Métaux alcalino-terreux)						
Propriétés	**Béryllium**	**Magnésium**	**Calcium**	**Strontium**	**Baryum**	**Radium**
Numéro atomique	4	12	20	38	56	88
Masse atomique	9,013	24,312	40,08	87,63	137,36	226,05
Rayon atomique (en Å)	1,05	1,621	1,97	2,13	2,17	–
Configuration électronique	$1s^2 2s^2$	$3s^2$	$4s^2$	$5s^2$	$6s^2$	$7s^2$
Densité	1,86	1,75	1,55	2,60	3,6	4,4 5
Point de fusion (en °C)	1285	650	845	757	710	700
Point d'ébullition (en °C)	2970	1100	1439	1366	1696	1100

▲ A gauche, un détail du traitement du minerai d'or dans les mines de Johannesburg (République sud-africaine). A droite, tableau des propriétés des éléments du groupe IIA.

Le béryllium fond à 1 285 °C et bout à 2 970 °C. Il a une grande résistance et un faible allongement. Il a une grande dureté. Presque tout le béryllium produit industriellement sert à faire des alliages béryllium-cuivre qui sont les plus durs des alliages riches en cuivre et qui ont une élasticité remarquable. On les utilise dans les montages électriques et électroniques pour fabriquer des ressorts conducteurs de l'électricité. On en fait aussi des outils de sécurité ne produisant pas d'étincelles.

Le béryllium métal et son oxyde, ainsi que les sels de béryllium, sont toxiques et provoquent une inflammation des voies respiratoires.

Le béryllium est facilement attaqué par les acides (sauf l'acide nitrique), avec libération d'hydrogène :

$$Be + 2HCl \rightarrow BeCl_2 + H_2.$$

Il est attaqué par des bases fortes comme la potasse :

$$Be + 2KOH + 2H_2O \rightarrow K_2\,[Be\,(OH)_4] + H_2.$$

L'**hydroxyde de béryllium,** $Be\,(OH)_2$, est un hydrate amphotère qui donne lieu à deux dissociations :

$$(BeO_2)^{--} + 2H^+ \rightleftharpoons Be\,(OH)_2 \rightleftharpoons Be^{++} + 2OH^-.$$

Parmi les autres composés du béryllium, il faut citer le **carbure de béryllium,** Be_2C (analogue au carbure d'aluminium et qui dégage du méthane lorsqu'on le traite par de l'eau), et l'**oxyde de béryllium,** BeO, difficilement soluble et bon réfractaire.

Magnésium

C'est un élément assez largement répandu dans la nature. On le trouve dans de nombreux *silicates (amiante, talc, serpentine),* sous forme de *carbonate* ($MgCO_3$) dans la *magnésite,* dans la *dolomite* ($CaCO_3 \cdot MgCO_3$). On le trouve aussi sous forme de *sulfate* dans la *caïnite* ($KCl \cdot MgSO_4 \cdot 3H_2O$), de *chlorure* dans la *carnallite* ($MgCl_2 \cdot KCl \cdot 6H_2O$).

Le magnésium entre dans la composition de la chlorophylle ; c'est donc un élément essentiel du règne végétal. L'eau de mer en renferme aussi des quantités importantes, de sorte que ce métal peut être considéré comme disponible en quantités pratiquement illimitées.

Le magnésium métallique est obtenu industriellement par électrolyse du chlorure fondu, avec des électrodes au graphite. On peut aussi réduire l'oxyde de magnésium MgO en présence de silicium :

$$3MgO + Si \rightleftharpoons MgSiO_3 + 2Mg.$$

Enfin on peut extraire le magnésium de l'eau de mer qui en renferme 0,13 %. Pour cela, on traite l'eau de mer avec le produit de calcination de la dolomite qui est en fait un mélange de CaO + MgO. Il se forme un précipité d'hydroxyde de magnésium $Mg\,(OH)_2$. Ce précipité lavé est traité par l'acide chlorhydrique qui le transforme en chlorure $MgCl_2$. Ce dernier peut ensuite être électrolysé pour la production du métal.

Le magnésium est un métal léger, blanc argenté, facilement fusible (650 °C) et très volatil (1 100 °C) ; ce caractère le rapproche du zinc, du cadmium et du mercure.

Le magnésium a une grande réactivité chimique. Il s'oxyde à l'air et se recouvre d'une couche d'oxyde qui le protège d'une attaque ultérieure. Il n'est attaqué par l'eau qu'à l'ébullition, avec formation d'hydroxyde de magnésium :

$$Mg + 2H_2O \rightarrow Mg\,(OH)_2 + H_2.$$

Il réagit avec la plupart des acides, mais n'est pas attaqué par les bases.

Le magnésium s'unit directement à de nombreux éléments comme les halogènes, le soufre, l'azote, le phosphore, le bore et le silicium. C'est un réducteur puissant à chaud. En présence d'air, et plus particulièrement sous forme de poudre, il brûle avec production d'une lumière intense. Il trouve ainsi son application dans les ampoules au magnésium, la pyrotechnie et les bombes incendiaires.

Le principal emploi du magnésium est la fabrication d'alliages légers, utilisés en particulier dans l'industrie automobile. Les principaux métaux utilisés dans ces alliages sont l'aluminium, le manganèse et le zinc.

Le magnésium peut réagir avec les composés organiques avec formation d'*organomagnésiens mixtes* (réactifs de Grignard) R-Mg-X et d'*organomagnésiens symétriques* R-Mg-R dans lesquels R représente un reste organique hydrocarboné et X un halogène.

Parmi les principaux dérivés du magnésium, il faut citer l'**oxyde de magnésium** ou **magnésie,** MgO, qui peut se former par oxydation du magnésium mais que l'on produit de façon plus économique par déshydratation de $Mg\,(OH)_2$. La réduction de MgO en magnésium nécessite des conditions énergiques ; on utilise pour cela

▼ Copeaux de magnésium métallique ; ce métal léger, blanc argenté, présentant une grande réactivité chimique, entre dans la composition d'alliages légers utilisés dans l'industrie automobile.

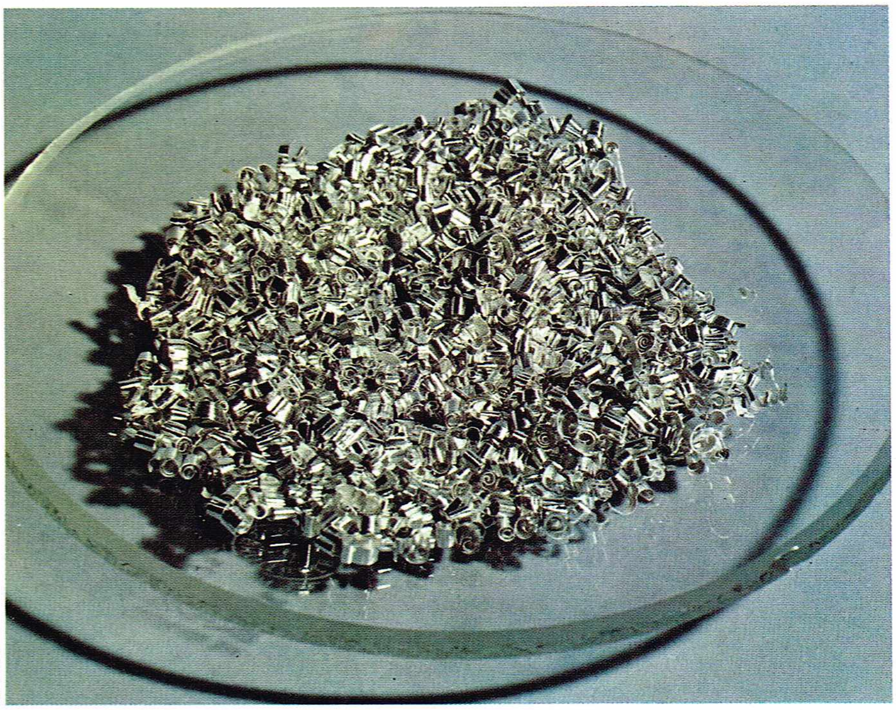

A. Rizzi

▶ ***Fragments de calcium métallique, conservés dans du pétrole pour les isoler du contact avec l'air : en effet, le calcium réagit avec l'oxygène et l'azote.***

le silicium, ou plus précisément le ferro-silicium qui est le composé industriel. La **magnésie hydratée,** Mg $(OH)_2$, est une base forte peu soluble dans l'eau.

Le **chlorure de magnésium,** $MgCl_2$, présent dans l'eau de mer, possède de nombreux hydrates (2 à 12 molécules d'eau). La déshydratation d'un chlorure hydraté fournit l'**oxychlorure** avec production d'acide chlorhydrique :

$$2MgCl_2 + H_2O \rightarrow MgCl_2 \cdot MgO + 2HCl.$$

L'oxychlorure $MgCl_2 \cdot MgO$ peut se faire par simple mélange du chlorure à l'oxyde ; il se forme alors un ciment (ciment dentaire).

Le **sulfate de magnésium** cristallise avec sept molécules d'eau ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) ; il est utilisé dans l'industrie textile et dans la fabrication du papier.

Enfin, le **carbonate de magnésium,** CO_3Mg, insoluble dans l'eau, entre avec le carbonate de calcium dans la composition des roches calcaires.

Calcium

Le calcium est un élément très répandu dans la nature, plus particulièrement dans les roches où on le trouve à l'état de *carbonate :* CO_3Ca (c'est le cas de la *calcite* et de l'*aragonite*), à l'état de *phosphates* (principalement les *apatites,* $Ca_5 (PO_4)_3$ (F, Cl, OH), qui sont des minerais de phosphore), à l'état de *fluorure :* CaF_2, enfin, à l'état de *sulfate :* $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (c'est le gypse). Comme carbonate, c'est un constituant essentiel de la coquille des Mollusques, et, à l'état de phosphate, on le trouve dans les os des Vertébrés.

C'est le plus important des métaux alcalino-terreux, avant le baryum, le strontium et le radium. Il se présente sous la forme d'un solide blanc argenté qui fond à 845 °C et bout à 1 439 °C.

On le prépare par réduction thermique de la chaux CaO en présence d'aluminium (aluminothermie) avec purification ultérieure par distillation sous vide. On peut aussi le préparer par électrolyse du chlorure fondu.

Le métal réagit avec de nombreux éléments tels que l'hydrogène, l'azote et l'oxygène. Sa combinaison avec l'oxygène est extrêmement exothermique, et cette propriété fait du calcium un puissant réducteur parfois utilisé pour la réduction de certains oxydes métalliques.

En présence d'hydrogène, le calcium se transforme, entre 300 et 400 °C, en **hydrure de calcium :**

$$Ca + H_2 \rightleftharpoons CaH_2.$$

Cet hydrure peut se dissocier en Ca et H_2, mais en réagissant sur l'eau, c'est une source d'hydrogène (hydrolithe) :

$$CaH_2 + 2H_2O \rightarrow Ca (OH)_2 + 2H_2.$$

Chauffé en présence d'air, le calcium réagit avec l'oxygène et l'azote et forme simultanément l'**oxyde** et le **nitrure ;** ce dernier, en réagissant sur l'eau, forme de l'ammoniac :

$$Ca_3N_2 + 6H_2O \rightarrow 3Ca (OH)_2 + 2NH_3.$$

Parmi les composés les plus importants du calcium, il faut citer :

L'**oxyde de calcium,** CaO, ou **chaux vive,** que l'on prépare par dissociation thermique du carbonate :

$$CaCO_3 \rightleftharpoons CaO + CO_2.$$

La chaux vive réagit sur l'eau en donnant l'**hydroxyde de calcium** ou **chaux éteinte :**

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca (OH)_2$$

qui est une base forte très peu soluble dans l'eau et que l'on utilise en suspension (lait de chaux) pour différentes neutralisations d'acidité dans l'industrie.

La chaux, en présence du gaz carbonique de l'air, durcit et trouve une utilisation comme liant.

La chaux vive réagit sur le chlore; il se forme du **chlorure de chaux :**

$$CaO + Cl_2 \rightarrow CaOCl_2.$$

Parmi les halogénures, le **chlorure de calcium,** $CaCl_2$, est un sous-produit de la fabrication de la soude Solvay. Anhydre, il est utilisé comme agent déshydratant des solvants organiques et des gaz. Très soluble dans l'eau, ce sel, hydraté ($CaCl_2 \cdot 6H_2O$), donne une saumure permettant de maintenir une température très basse jusqu'à — 50 °C.

Castano - Cavallari

Le **fluorure de calcium,** CaF_2, se trouve dans le minerai appelé *fluorite* et dans le *spath-fluor* qui servent de point de départ à la synthèse de l'acide fluorhydrique et des composés organiques fluorés.

Le **sulfate de calcium** existe dans la nature sous forme d'*anhydrite.* Son dihydrate : $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ est le *gypse.* Le gypse non calciné est utilisé dans le ciment portland pour éviter sa prise trop rapide. Calciné, le gypse entre dans la fabrication des tuiles. Chauffé à environ 120 °C, il perd une partie de son eau d'hydratation et se transforme en *hémihydrate,* c'est le *plâtre* $2CaSO_4 \cdot H_2O$. Au contact de l'eau, la forme hémihydrate du plâtre se réhydrate en gypse qui cristallise en fines aiguilles qui s'enchevêtrent et constituent la masse solide du plâtre pris.

Le **nitrate de calcium,** $CaNO_3$, est utilisé comme engrais azoté. On le prépare par la réaction :

$$2NO_2 + CaCO_3 + \tfrac{1}{2}O_2 \rightarrow Ca (NO_3)_2 + CO_2.$$

Le **carbonate de calcium,** $CaCO_3$, et le **bicarbonate de calcium,** Ca $(HCO_3)_2$, sont extrêmement importants. Le premier parce qu'il constitue la partie principale des roches calcaires, le second (beaucoup plus soluble dans l'eau que le premier) parce qu'il explique la dissolution de ces roches :

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \rightleftharpoons Ca (HCO_3)_2.$$

Réversiblement, sous l'action de la chaleur ou d'une violente agitation, la solution de bicarbonate peut laisser précipiter du carbonate en libérant du CO_2.

Le sulfate de calcium légèrement soluble et le bicarbonate de calcium sont responsables de la dureté de certaines eaux dites calcaires qui provoquent des dépôts de tartre dans les récipients ou les installations où on les chauffe.

Le **phosphate de calcium,** $Ca_3 (PO_4)_2$, est utilisé comme engrais phosphoré après traitement à l'acide sulfurique qui le transforme en **superphosphate.** Le phosphate de calcium est un des principaux constituants des os de Vertébrés, avec le phosphate de magnésium et le carbonate de calcium.

Le **carbure de calcium,** C_2Ca, est obtenu par action de la chaux sur le charbon au four électrique vers 2 500-3 000 °C :

$$CaO + 3C \rightarrow C_2Ca + CO.$$

Un emploi du carbure de calcium est la synthèse de l'acétylène par action de l'eau :

$$C_2Ca + 2H_2O \rightarrow HC \equiv CH + Ca (OH)_2.$$

Cette synthèse, autrefois très importante comme point de départ de nombreuses synthèses organiques, est actuellement peu utilisée en raison de la possibilité d'utiliser l'éthylène, dont la fabrication à partir du pétrole est beaucoup moins onéreuse.

Par action de l'azote vers 800-850 °C, le carbure de calcium est transformé en **cyanamide calcique**, qui est un excellent engrais azoté, car elle libère de l'ammoniac sous l'action de l'humidité du sol :

$$C_2Ca + N_2 \rightarrow CN_2Ca + C$$
$$CN_2Ca + 3H_2O \rightarrow CaCO_3 + 2NH_3.$$

Strontium

C'est un élément peu abondant dans la nature. L'écorce terrestre en renferme 0,02 à 0,03 %. Ses principaux minerais sont la *célestine* (*sulfate de strontium* $SrSO_4$) et la *strontianite* (*carbonate de strontium* $SrCO_3$), découverte à Strontian en Écosse.

Le strontium est un métal dur, malléable, ductile, blanc argenté dont les propriétés sont intermédiaires entre celles du calcium et celles du baryum.

Le métal pur peut être obtenu par électrolyse du chlorure fondu, mais de préférence par réduction de l'oxyde à haute température, en présence de silicium :

$$3SrO + Si \rightarrow 2Sr + SrSiO_3.$$

L'**oxyde de strontium** est obtenu par décomposition thermique du carbonate ; il réagit sur l'eau en donnant la strontiane :

$$SrO + H_2O \rightarrow Sr\,(OH)_2$$

qui est une base forte donnant un octahydrate. En plus de l'oxyde SrO, le strontium forme un **bioxyde** SrO_2 très instable.

Le **nitrate de strontium** est utilisé en pyrotechnie pour les feux d'artifice, les fusées et les balles traçantes, en raison de la coloration rouge de la flamme. On le prépare par action de l'acide nitrique sur le carbonate de strontium.

Parmi les usages récents du strontium, il faut citer la fabrication d'aimants permanents pour petits moteurs électriques, qui sont obtenus par frittage d'un mélange de carbonate de strontium humide et d'oxyde de fer. On peut citer enfin l'emploi de carbonate de strontium dans la fabrication des verres que l'on place devant les écrans des récepteurs de télévision pour éviter l'émission de rayons X.

A. Rizzi

◀ ***Fragments de* chaux vive, *ou* oxyde de calcium *; cette substance présente une grande affinité pour l'eau avec laquelle elle donne l'*hydroxyde de calcium *ou* chaux éteinte.**

Bulloz

▼ ***Planche ancienne traitant de la chaux et de ses usages dans la construction, extraite du* Jardin de santé *publié en 1501 (Petit Palais, Paris).***

Eléments du groupe IIB			
Propriétés	**Zinc**	**Cadmium**	**Mercure**
Numéro atomique	30	48	80
Masse atomique	65,38	112,41	200,61
Rayon atomique (en Å)	1,33	1,49	1,50
Configuration électronique	$3d^{10}4s^2$	$4d^{10}5s^2$	$4f^{14}5d^{10}6s^2$
Densité	7,14	8,64	13,546
Point de fusion (en °C)	419,4	320,9	− 38,84
Point d'ébullition (en °C)	907	767,3	357

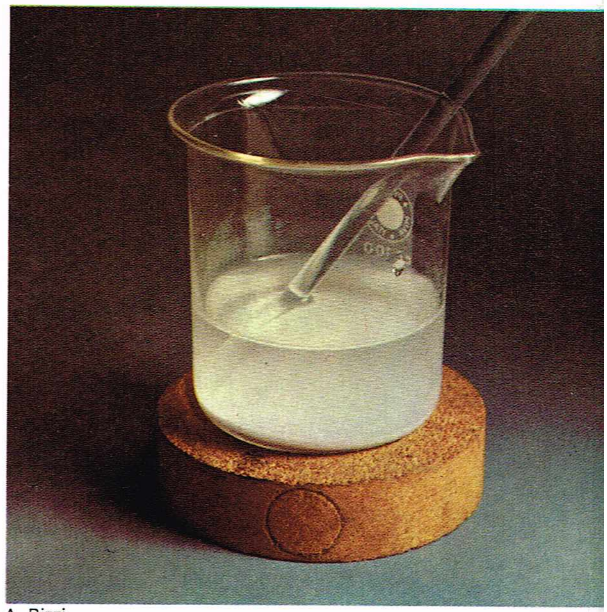

A. Rizzi

▲ *A gauche, tableau des propriétés des éléments du groupe IIB. A droite, un précipité de sulfate de baryum : ce sel peu soluble est utilisé pour le dosage gravimétrique de l'acide sulfurique ; il est aussi employé comme milieu contrastant lors des radiographies de l'estomac et de l'intestin.*

Le strontium, à l'encontre du baryum, n'est pas toxique pour l'organisme. Cependant ses isotopes artificiels, le ^{89}Sr et le ^{90}Sr, sont très dangereux, car ils pénètrent dans les os, comme le strontium naturel, où ils peuvent prendre la place du calcium et provoquer un cancer. Ces isotopes se trouvent dans les produits de fission de l'uranium.

Baryum

C'est le plus lourd des métaux alcalino-terreux ; son nom vient du grec *barus* (lourd). Il est moyennement répandu dans la nature (0,4 à 0,5 % de l'écorce terrestre). Ses principaux minerais sont la *barytine* ($BaSO_4$) et la *witherite* ($BaCO_3$).

Le baryum métallique est obtenu par réduction sous vide de l'oxyde par l'aluminium ou le silicium à haute température :

$$4BaO + Si \rightarrow 2BaO \cdot SiO_2 + 2Ba$$
$$4BaO + 2Al \rightarrow BaO \cdot Al_2O_3 + 3Ba.$$

C'est un métal blanc argenté, malléable, extrudable et usinable dont on peut faire des plaques, des barres et des fils ; sa densité est élevée (3,6 à 20 °C) ; il fond à 710 °C et bout à 1 696 °C. Le baryum et ses composés donnent dans la flamme une coloration verte.

Le baryum réagit directement avec l'eau, l'oxygène, l'azote, les halogènes, le phosphore, le soufre et l'ammoniac. Sa grande réactivité avec les gaz, et en particulier avec les gaz de l'air, en fait un agent de dégazage des tubes à vide (« getter »).

Il devient gris à l'air, puis noir avec formation de BaO. A l'*oxyde de baryum,* BaO, correspond l'*hydroxyde de baryum,* Ba $(OH)_2$, base forte peu soluble dans l'eau (eau de baryte). Si l'air est humide, le baryum peut s'enflammer spontanément. Il forme un hydrure lorsqu'on le chauffe dans l'hydrogène à 200 °C. Cet *hydrure de baryum,* BaH_2, est un solide qui est aisément décomposable par l'eau et les acides.

Comme le calcium, le baryum peut réduire les oxydes métalliques mais il n'est pas utilisé en raison de son prix trop élevé.

Le baryum forme des composés analogues à ceux du calcium. Parmi ceux-ci, le **carbonate de baryum** a une grande importance pour précipiter les sulfates que l'on doit éliminer dans certains procédés industriels.

Par ailleurs, le **sulfate de baryum,** $BaSO_4$, est utilisé pour le dosage gravimétrique de l'acide sulfurique :

$$H_2SO_4 + BaCO_3 \rightarrow BaSO_4 + CO_2 + H_2O.$$

Le sulfate de baryum, préparé par double décomposition de différents sels de baryum avec des sulfates solubles, est une poudre blanche utilisée comme charge dans le papier, le cuir et certains articles en caoutchouc. Le sulfate de baryum est aussi utilisé comme milieu opaque contrastant dans les radiographies aux rayons X de l'estomac et de l'intestin.

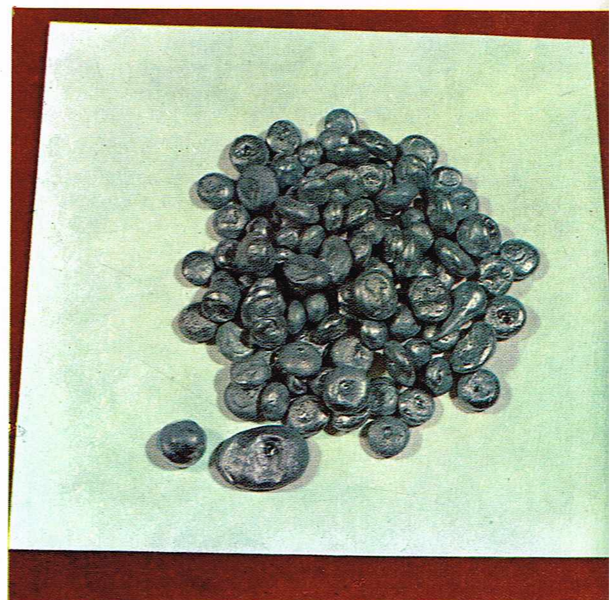

Castano - Cavallari

▶ *Grenaille de zinc métallique obtenue par resolidification du métal en fusion.*

Le **nitrate de baryum,** Ba $(NO_3)_2$, est préparé par action de l'acide nitrique sur le carbonate de baryum. Il est utilisé en pyrotechnie.

Le **peroxyde de baryum,** BaO_2, peut être obtenu par chauffage sous courant d'oxygène de l'oxyde BaO entre 400 et 600 °C :

$$2BaO + O_2 \rightleftharpoons 2BaO_2.$$

La réaction est réversible, et, vers 800 °C, le peroxyde se décompose en libérant de l'oxygène. Le peroxyde de baryum a été utilisé autrefois pour la synthèse industrielle de l'eau oxygénée :

$$BaO_2 + H_2SO_4 \rightarrow BaSO_4 + H_2O_2.$$

Radium

Le radium a été découvert en 1898 par Pierre et Marie Curie dans un minerai radio-actif, la *pechblende.* Il accompagne l'uranium dans ses minerais et résulte de la désintégration de ce dernier. Ses composés étant le plus souvent solubles dans l'eau, ils sont entraînés par les eaux souterraines, et le radium est ainsi assez disséminé dans l'écorce terrestre.

L'extraction du radium des minerais d'uranium est assez complexe. Elle comporte d'abord un traitement acide qui transforme les alcalino-terreux en sulfates, puis un traitement au carbonate pour convertir les sels de radium et de baryum en carbonates. Un traitement à

l'acide chlorhydrique élimine le plomb et la silice. On répète plusieurs fois ce traitement, et, finalement, les carbonates de Ba et de Ra sont transformés en bromures que l'on sépare par cristallisation fractionnée.

Les propriétés chimiques du radium sont celles des alcalino-terreux. Son utilisation en médecine pour le traitement des tumeurs a nettement diminué depuis l'utilisation du cobalt 60.

Groupe IIB

Les éléments du groupe IIB, le zinc (Zn), le cadmium (Cd) et le mercure (Hg), ont les caractéristiques des métaux, et le zinc et le mercure ont des applications importantes.

Zinc

Le zinc n'est pas un élément rare ; son principal minerai est la *blende* qui est un *sulfure de zinc,* ZnS (cubique) ; la *wurtzite,* forme hexagonale du sulfure, est moins courante. On peut citer aussi le *carbonate de zinc,* $ZnCO_3$, ou smithsonite, et les silicates.

La métallurgie du zinc comporte d'abord le grillage de la blende :

$$2ZnS + 3O_2 \rightarrow 2ZnO + 2SO_2$$

puis l'oxyde de zinc est réduit par de l'oxyde de carbone ; en fait on opère en présence de charbon à 950-1 000 °C :

$$ZnO + CO \rightarrow Zn + CO_2.$$

On purifie enfin le zinc par distillation. L'impureté la plus importante est le cadmium. On peut obtenir du zinc très pur par électrolyse d'une solution faiblement acide de sulfate de zinc. La poudre de zinc est obtenue en refroidissant rapidement des vapeurs de zinc.

Le zinc est un métal blanc bleuté qui fond à 419,4 °C et bout à 907 °C ; sa densité à 20 °C est 7,14. A la température ambiante, l'air sec n'attaque pas le zinc, mais l'air humide le transforme en surface en carbonate basique hydraté qui le protège de toute attaque ultérieure. On l'utilise pour la protection du fer (galvanisation, electroplating, etc.) contre la corrosion.

Le composé le plus important du zinc est certainement l'**oxyde de zinc,** ZnO, qui peut être obtenu directement à partir des minerais de zinc ou à partir du métal. Son utilisation la plus importante est comme pigment blanc (il absorbe les rayons ultraviolets beaucoup plus intensément que les autres pigments blancs). Il est donc utilisé dans les peintures et les céramiques. Il trouve aussi un débouché important comme charge renforçante et activateur de vulcanisation dans les caoutchoucs naturels et synthétiques. Il est enfin utilisé en cosmétologie et en médecine.

L'**hydroxyde de zinc,** $Zn(OH)_2$, est un composé amphotère :

$$2H^+ + ZnO_2^{2-} \rightleftharpoons Zn(OH)_2 \rightleftharpoons Zn^{2+} + 2OH^-.$$

En présence d'un acide, on observe la formation d'ions Zn^{2+} alors qu'en présence de base il se forme des zincates solubles. La formation de zincates explique l'action de la soude sur le zinc avec formation d'hydrogène. Au-dessus de 39 °C, l'hydroxyde de zinc se décompose :

$$Zn(OH)_2 \rightleftharpoons ZnO + H_2O.$$

Le **chlorure de zinc,** $ZnCl_2$, s'hydrolyse facilement et donne des complexes en milieu acide (il se forme l'ion $ZnCl^-_4$). On l'utilise comme flux décapant dans la soudure et dans les batteries sèches. Le chlorure de zinc anhydre est utilisé en chimie organique dans certaines réactions.

Le **sulfate de zinc,** $ZnSO_4$, est obtenu en traitant la blende par l'acide sulfurique. Il est utilisé dans la préparation des fils de rayonne de viscose, comme pigment blanc à l'état de lithopone (coprécipitat de $ZnSO_4$ + BaS), dans l'agriculture, etc.

Le **sulfure de zinc,** ZnS, est obtenu par action de l'hydrogène sulfuré sur le chlorure de zinc :

$$ZnCl_2 + H_2S \rightarrow ZnS + 2HCl.$$

Le sulfure de zinc peut être luminescent à la suite d'un traitement thermique qui crée des défauts dans son réseau cristallin. Il est utilisé dans les peintures luminescentes.

C. Bevilacqua

▲ ***Des gouttelettes de mercure natif : liquide à la température ordinaire, le mercure est le plus volatil de tous les métaux (il bout à 357 °C).***

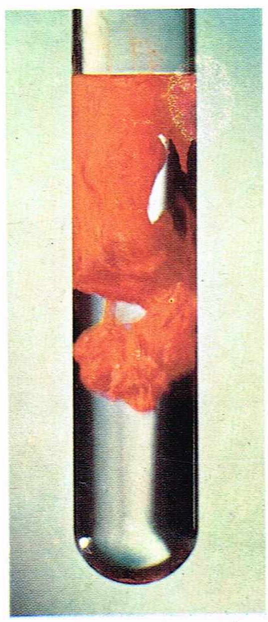

A. Rizzi

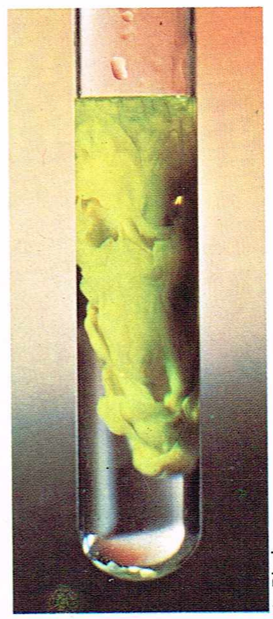

A. Rizzi

◀ ***Précipités d'iodure mercurique (à gauche) et d'iodure mercureux (à droite). Les différentes colorations des composés contenant du mercure dépendent des divers degrés d'oxydation.***

Cadmium

Le cadmium est presque en totalité produit industriellement au cours du raffinage du zinc. Ses propriétés physiques sont très voisines de celles du zinc. Il résiste à la corrosion atmosphérique et, comme le zinc, on l'utilise pour la protection des métaux ferreux ; une couche de placage électrolytique plus faible que celle qui est nécessaire avec le zinc conduit au même résultat. On l'utilise dans les batteries cadmium-nickel et certains alliages.

Le composé le plus important du cadmium est le **sulfure de cadmium,** CdS, peu soluble dans les acides, et utilisé comme pigment jaune et pour certaines applications en électronique.

Le **sulfate de cadmium,** $CdSO_4 \cdot 8H_2O$, entre dans la constitution de l'élément Weston (pile utilisée comme étalon de force électromotrice).

Mercure

Le mercure est le plus volatil des métaux ; il bout à 357° C et se solidifie à — 38,84 °C. C'est un métal rare que l'on rencontre parfois à l'état natif, mais dont la source principale est le sulfure (ou *cinabre*). Cet élément était connu des anciens Chinois et Hindous ; on en a trouvé dans des tombeaux égyptiens datant de 1500 avant J.-C. Il tire son nom de la planète Mercure et son symbole Hg vient du mot latin *hydrargyrum ;* on l'appelait autrefois vif-argent.

▶ *Page ci-contre, en haut, tableau des propriétés des éléments du* **groupe IIIA.**

▶ *Page ci-contre, en bas, salle de contrôle et atelier pour la production des terres rares ou lanthanides, (usine de Vaugouin La Rochelle).*

▼ *Le* mercure *est un bon conducteur de l'électricité; on l'utilise dans les interrupteurs des thermostats, où il constitue un contact électrique mobile.*

Extrait du cinabre, il est préparé par simple chauffage à l'air :

$$HgS + O_2 \rightarrow Hg + SO_2.$$

Le mercure formé est entraîné par le SO_2 et l'air en excès; les vapeurs passent dans l'eau froide où le métal se condense. Ce métal impur est ensuite débarrassé de ses impuretés par traitement à l'acide et finalement distillé. On contrôle sa pureté en comparant le potentiel électrochimique du métal à celui d'un échantillon-étalon.

Le mercure est un métal gris clair, brillant, liquide à la température ordinaire. Sa densité à l'état liquide, à 20 °C, est 13,546; c'est un bon conducteur de l'électricité qui joue un rôle important en électrochimie (polarographie, piles-étalons, électrodes au chlorure mercureux ou calomel). Les lampes à vapeur de mercure émettent une lumière riche en rayons ultraviolets.

Métal peu réactif, il ne s'oxyde pas à l'air à la température ordinaire. Par contre, il réagit à chaud avec l'oxygène et le soufre. Seuls les acides oxydants, l'acide nitrique et l'acide sulfurique, l'attaquent à chaud.

Quelques métaux se dissolvent dans le mercure, les uns de façon extrêmement vive, d'autres avec absorption de chaleur, en formant un amalgame. Certains d'entre eux sont utilisés dans les réactions chimiques **(amalgame de sodium)**, d'autres pour les soins dentaires **(amalgame d'argent)**, d'autres encore pour la fabrication d'électrodes **(amalgame de cadmium)**. Les composés du mercure sont les composés mercureux qui ne correspondent pas à l'ion Hg^+ mais à l'ion biatomique $[Hg—Hg]^{++}$, et les composés mercuriques correspondant à Hg^{++}.

Parmi les *composés mercureux,* le plus important est le **chlorure mercureux,** Hg_2Cl_2, ou **calomel,** insoluble dans l'eau et utilisé en médecine.

Le **sulfate mercureux,** Hg_2SO_4, est utilisé comme catalyseur en chimie organique.

Parmi les *sels mercuriques,* le **chlorure mercurique,** $HgCl_2$, ou **sublimé corrosif,** qui s'obtient à partir du sulfate :

$$HgSO_4 + 2NaCl \xrightarrow{300\ °C} HgCl_2 + Na_2SO_4,$$

est un désinfectant énergique.

L'**iodure de mercure,** HgI_2, jaune sous sa forme orthorhombique, se dissout dans les solutions aqueuses d'iodure de potassium. L'**iodomercurate de potassium** obtenu est le **réactif de Nessler,** utilisé pour mettre en évidence des traces d'ammoniac dans l'eau.

Le **fulminate de mercure,** $Hg(CNO)_2$, est utilisé comme détonateur dans les explosifs.

La plupart des composés du mercure sont toxiques. En agriculture, les composés organiques du mercure *(organomercuriels)* sont utilisés comme fongicides et comme herbicides.

Propriétés	Scandium	Yttrium	Lanthane
Numéro atomique	21	39	57
Masse atomique	44,97	88,92	138,92
Rayon atomique (en Å)	1,44	1,61	1,69
Configuration électron.	$3d^14s^2$	$4d^15s^2$	$5d^16s^2$
Densité	3	4,47	6,2
Point de fusion (en °C)	1539	1509	920
Point d'ébullition (en °C)	2730	2927	3470

Propriétés			Actinium
Numéro atomique			89
Masse atomique			(227)
Rayon atomique (en Å)			–
Configuration électron.			$6d^17s^2$
Densité			–
Point de fusion (en °C)			1050
Point d'ébullition (en °C)			–

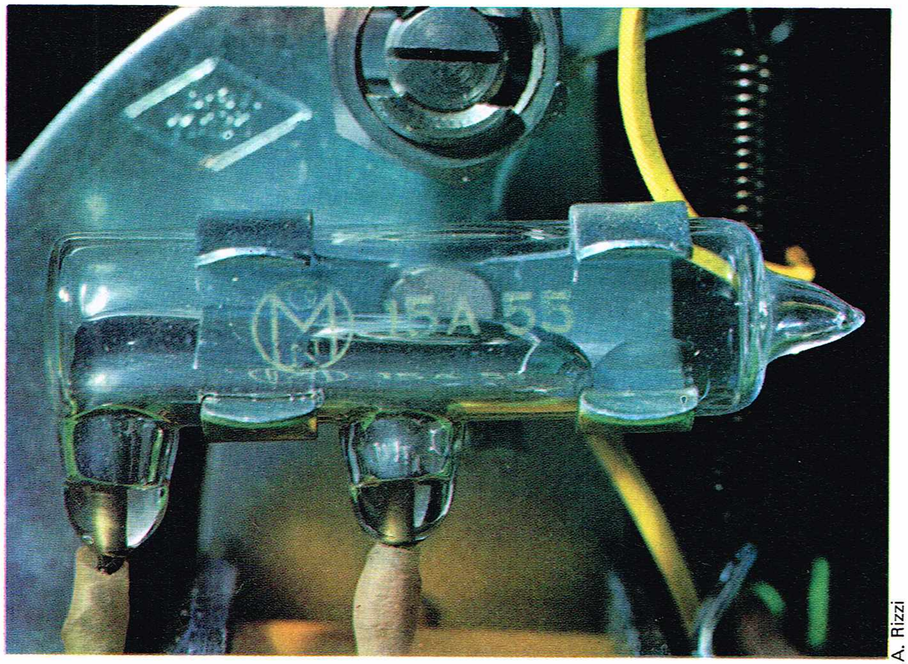

A. Rizzi

Groupe IIIA

Ce groupe renferme les éléments scandium (Sc), yttrium (Y) et lanthane (La), et un élément, l'actinium (Ac), qui prend naissance dans les désintégrations radioactives naturelles. Le lanthane et l'actinium ont dans le groupe IIIA une situation particulière. Le lanthane est le chef de file d'une famille de métaux, les **terres rares,** que l'on désigne maintenant sous le nom de **lanthanides.** L'actinium est le premier d'une autre famille de métaux, les **actinides,** à partir du numéro atomique 89, et qui comprend les *transuraniens.*

Scandium et yttrium

Ce sont des métaux très rares découverts au siècle dernier. On les obtient à l'état libre par électrolyse de leurs chlorures $ScCl_3$ et YCl_3 à l'état fondu. Ils ont des propriétés chimiques assez similaires à celles des alcalino-terreux. La basicité de leurs hydroxydes augmente du scandium à l'yttrium, lequel fournit une base relativement forte. Ces éléments donnent des sels parmi lesquels les carbonates, stables, et les oxalates, peu solubles, utilisés pour l'analyse quantitative de ces éléments. L'**oxyde d'yttrium,** Y_2O_3, est utilisé dans la céramique.

Lanthanides

Le groupe des lanthanides comprend 15 éléments dont les numéros atomiques vont de 57 à 71 et dont les pro-

Eléments du groupe IIIA

Cérium	Praséodyme	Néodyme	Prométhium	Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Holmium	Erbium	Thulium	Ytterbium	Lutétium
58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
140,13	140,92	144,27	(147)	150,43	152,2	156,9	159,2	162,46	164,94	167,2	169,4	173,04	174,99
1,64	1,64	1,64	–	1,66	1,85	1,61	1,59	1,59	1,58	1,57	1,56	1,70	1,55
$4f^2 5d^0 6s^2$	$4f^3 5d^0 6s^2$	$4f^4 5d^0 6s^2$	$4f^5 5d^0 6s^2$	$4f^6 5d^0 6s^2$	$4f^7 5d^0 6s^2$	$4f^7 5d^1 6s^2$	$4f^9 5d^0 6s^2$	$4f^{10} 5d^0 6s^2$	$4f^{11} 5d^0 6s^2$	$4f^{12} 5d^0 6s^2$	$4f^{13} 5d^0 6s^2$	$4f^{14} 5d^0 6s^2$	$4f^{14} 5d^1 6s^2$
6,67	6,77	7,00	–	7,54	5,26	7,89	8,27	8,54	8,80	9,05	9,33	6,98	9,84
795	932	1024	(1027)	1072	826	1312	1356	1407	1461	1497	1545	824	1652
3468	3127	3027	–	1900	1439	3000	2800	2600	2600	2900	1727	1427	3327

Thorium	Protactinium	Uranium	Neptunium	Plutonium	Américium	Curium	Berkélium	Californium	Einsteinium	Fermium	Mendélév.	Nobélium	Lawrencium
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
232,04	(231)	238,04	(237)	(242)	(243)	(247)	(247)	(251)	(254)	(253)	(256)	(254)	(257)
–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
$6d^2 7s^2$	$5f^2 6d^1 7s^2$	$5f^3 6d^1 7s^2$	$5f^5 6d^0 7s^2$	$5f^6 6d^0 7s^2$	$5f^7 6d^0 7s^2$	$5f^7 6d^1 7s^2$	–	–	–	–	–	–	–
11,7	15,4	19,07	19,50	–	11,7	–	–	–	–	–	–	–	–
1750	(1230)	1132	637	640	–	–	–	–	–	–	–	–	–
3850	–	3818	–	3235	–	–	–	–	–	–	–	–	–

priétés physiques et chimiques sont assez voisines. Outre le **lanthane**, il s'agit des 14 éléments suivants dans lesquels les 14 électrons 4 *f* sont successivement ajoutés à la configuration du lanthane.

Les lanthanides ne sont pas des éléments extrêmement rares. On en trouve des dépôts en Scandinavie, en Inde, en U.R.S.S. et aux États-Unis. La *monazite* et d'autres minerais renferment les lanthanides au degré d'oxydation + 3. Le **thulium**, qui est dans la lithosphère le moins abondant des lanthanides, y est cependant aussi commun que le bismuth.

Le **prométhium** ($_{61}Pm$) n'existe pas dans la nature mais peut être obtenu artificiellement par des méthodes radio-actives.

Les propriétés chimiques des lanthanides varient légèrement avec la dimension de leurs ions. Une caractéristique de cette série d'éléments, connue sous le terme « contraction des lanthanides », est que leur rayon ionique diminue avec l'augmentation de leur masse atomique. Cela résulte du fait que, lorsque la charge nucléaire augmente, le remplissage progressif des électrons 4 *f* ne se fait pas dans les orbitales externes mais dans l'orbitale interne.

L'extraction des terres rares contenues dans la monazite est une opération complexe. Elle consiste dans un premier temps à traiter le minerai par l'acide sulfurique pour obtenir les sulfates de terres rares et le sulfate de thorium. Ce traitement libère en outre l'acide phosphorique des phosphates. On peut aussi chauffer le minerai

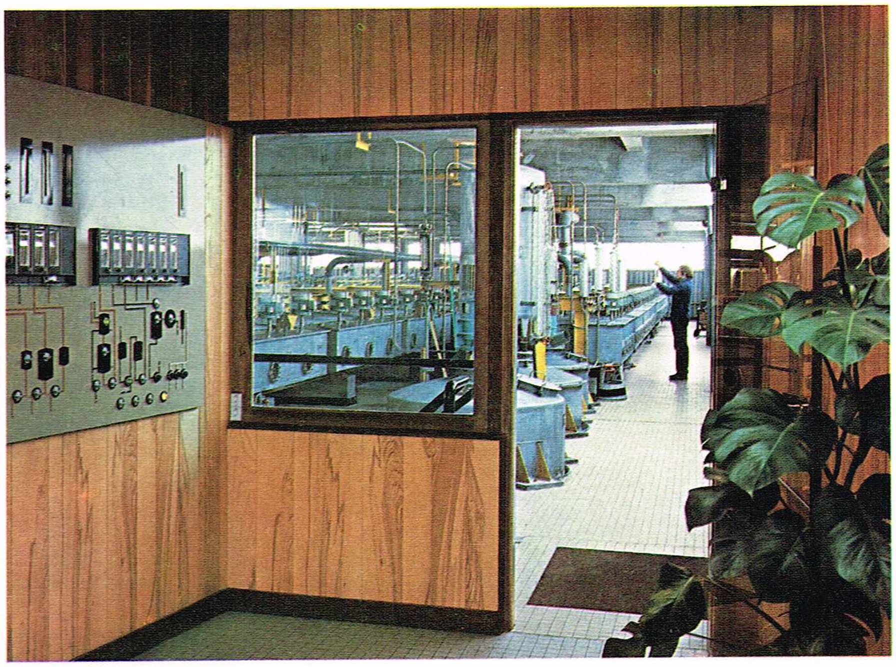

Rhône-Poulenc - Service A.T.C.

en présence de soude, et l'on obtient alors des hydroxydes de terres rares et de thorium ainsi que du phosphate de sodium.

Le **thorium** est séparé des terres rares par précipitations fractionnées, et les terres rares sont récupérées dans les filtrats en les précipitant à l'état de sulfate double de sodium et de terres rares. Ce sulfate double est ensuite transformé en hydroxyde. En ce qui concerne le **cérium,** on le sépare des autres terres rares en l'oxydant à l'état cérique, tétravalent, et on le purifie par une suite de cristallisations, d'extractions par des solvants et par d'autres traitements. La séparation des terres rares contenues dans le mélange débarrassé du cérium (appelé *didymium*) se fait par échange d'ions ou extraction aux solvants. On produit ainsi avec une pureté dépassant 99,9 % tous les oxydes de terres rares.

Les lanthanides sont des métaux d'aspect gris argenté. Mis à part l'europium et l'ytterbium, très réactifs, ils ne s'oxydent pas à l'air. Leur dureté augmente rapidement avec leur masse atomique, mais l'europium et l'ytterbium sont des métaux mous comme le sodium. La densité des lanthanides varie de 6,2 pour le lanthane à 9,8 pour le lutétium. Les températures de fusion varient de 795 °C (cérium) à 1 652 °C (lutétium), et les points d'ébullition de 1 427 à 3 470 °C.

Les lanthanides forment tous des ions au degré d'oxydation + 3. Cependant, le cérium présente l'état d'oxydation + 4, et l'europium, l'ytterbium et le samarium le degré d'oxydation + 2. Parmi les principaux dérivés des lanthanides (Ln), il faut citer les **chlorures** $LnCl_3$, les **hydroxydes** $Ln(OH)_3$, les **oxydes** Ln_2O_3 donnant avec d'autres oxydes des composés définis (par exemple avec Fe_2O_3 des **ferrites**), et les **carbonates** $Ln_2(CO_3)_3$.

Parmi les usages industriels des lanthanides, on citera les catalyseurs de cracking, le polissage du verre optique, les pierres à briquet (ferro-cérium), la coloration de certains verres par les oxydes (oxyde de cérium, par exemple).

Actinides

La série qui commence avec l'actinium (Ac, élément de numéro atomique 89) comprend le thorium (Th), le protactinium (Pa) et l'uranium (U), et se termine par les éléments transuraniens (du 93e au 103e élément).

Les actinides sont analogues aux lanthanides dans le fait que les électrons entrants se placent dans les orbitales internes plutôt que dans les orbitales externes. Ces éléments ont pour cela des propriétés très similaires à celles des lanthanides. Il existe cependant des différences importantes entre ces deux séries. Ces différences résultent essentiellement des énergies de liaisons plus faibles et d'une protection moins efficace par les électrons 5 *f* comparée à celle des orbitales 4 *f*. Dans les éléments précédents, les lanthanides, les orbitales 4 *f* ont des énergies assez élevées et s'étendent dans l'espace au-delà des orbitales 5 *s* et 5 *p*, mais, après le cérium, ces orbitales deviennent des orbitales internes de faible énergie. Comme orbitales internes, elles ne sont pas accessibles pour créer des liaisons chimiques, et les complexes ou les éléments covalents des lanthanides n'utilisent pratiquement pas leurs orbitales 4 *f*. Il en est de même pour les actinides, mais ici, les orbitales 5 *f* ont dans l'espace une extension au-delà des orbitales 6 *s* et 6 *p* plus importante que les 4 *f* par rapport aux 5 *s* et 5 *p*. Sur le plan chimique, les actinides ont une tendance à former des complexes plus nombreux que les lanthanides dont les composés sont surtout ioniques.

Comme chez les lanthanides, le rayon ionique des actinides diminue à mesure que la masse atomique augmente, et le meilleur moyen de réaliser la séparation des actinides est, comme pour les lanthanides, l'emploi des résines échangeuses d'ions. Par rapport aux lanthanides, on trouve plus fréquemment un degré d'oxydation différent de + 3, et en effet, on observe parfois le degré d'oxydation + 4 et même + 6. Mis à part l'uranium, le thorium et le plutonium, dont l'importance pratique est grande, les autres éléments de la série ont surtout une importance théorique. Les éléments transuraniens n'existent pas dans la nature mais ont été découverts et produits dans des réactions nucléaires.

L'**actinium** est un élément radio-actif naturel qui provient de la désintégration de l'uranium 235. Très similaire au lanthane, il forme des composés analogues incolores. Les seuls dérivés connus correspondent au degré d'oxydation + 3 (halogénures, oxydes, sulfures).

Le **thorium** se trouve principalement dans le minerai appelé monazite qui est un phosphate complexe de thorium, d'uranium, de cérium et de lanthanides. On peut l'obtenir pur par décomposition thermique de son iodure ThI_4. Il est similaire au platine, mou et ductile, mais durcit lorsqu'il est travaillé à froid. Il est soluble dans l'acide chlorhydrique concentré et dans l'eau régale. A froid, il réagit facilement avec les halogènes, le soufre, l'azote et le carbone. C'est un élément radio-actif. A l'état métallique, c'est un réducteur énergique. Il existe dans ses composés presque exclusivement au degré d'oxydation + 4. L'oxyde ThO_2 et le sulfure sont très réfractaires.

L'**oxyde de thorium** a eu une grande importance pratique aux temps de l'éclairage par le gaz pour la fabrication des manchons pour becs à gaz qui étaient imprégnés de nitrate de thorium. La thorine, ThO_2, obtenue par action d'une base sur un sel fondu et chauffage de l'hydrate obtenu, est utilisée comme catalyseur. Le thorium peut être une source d'uranium 233 radio-actif et fossile :

$$^{232}_{90}\mathrm{Th} \xrightarrow{n,\gamma} {}^{233}_{90}\mathrm{Th} \xrightarrow{\beta} {}^{233}_{91}\mathrm{Pa} \rightarrow {}^{233}_{92}\mathrm{U}.$$

Le **protactinium** est un élément très rare dans la nature. Il est radio-actif et provient de la désintégration de $^{238}_{92}U$. Ses propriétés chimiques n'ont été étudiées que récemment. Son principal degré d'oxydation est + 5. Il donne des pentahalogénures $PaCl_5$et PaI_5 qui, en se dissociant à haute température, fournissent le métal. Il présente aussi le degré d'oxydation + 4 (PaO_2 et PaF_4).

L'**uranium** est le plus important des actinides. Sa découverte en 1781 alors que la planète Uranus avait été découverte deux ans plus tôt lui valut le nom qu'il porte. C'est sur cet élément que Becquerel découvrit la radio-activité en 1896.

L'uranium naturel comporte trois isotopes, mais ^{238}U est de beaucoup le plus abondant (99,28 %) ; viennent ensuite ^{235}U (0,71 %) et ^{234}U (0,006 %). Assez répandu dans l'écorce terrestre, il est cependant difficile de le trouver à des concentrations exploitables. Ses principaux minerais sont la *pechblende* qui contient l'*oxyde* U_3O_8, la *carnotite (vanadate),* la *coffinite (silicate)* et l'*autunite (phosphate).*

Trois isotopes sont importants pour les piles atomiques et les explosifs nucléaires : il s'agit de ^{238}U, ^{235}U et ^{233}U. Ce dernier ne se trouve pas dans l'uranium naturel puisque sa période de demi-désintégration est trop courte. L'uranium est utilisable en tant que combustible nucléaire, car l'isotope ^{235}U, bombardé par les neutrons lents, subit un phénomène de fission. Ses atomes se scindent en deux ou plusieurs fractions appelées *produits de fission,* avec libération de deux ou trois neutrons engagés dans la réaction. Cette fission se présente sous forme d'une réaction en chaîne qui peut être contrôlée. Une partie de l'uranium se transforme en énergie thermique. Parmi les neutrons formés au cours de cette réaction se trouve un nombre de neutrons rapides suffisant pour rendre possible la transmutation de ^{238}U, qui n'est pas fissile, en plutonium (Pu). Celui-ci peut à son tour être utilisé comme combustible nucléaire. Pour obtenir des combustibles nucléaires dans des réacteurs plus simples que ceux qui utilisent l'uranium naturel, on enrichit celui-ci en ^{235}U. Parmi les moyens d'enrichir l'uranium naturel 235, le plus utilisé est la diffusion gazeuse. L'uranium légèrement enrichi en ^{235}U (quelques %) est fréquemment utilisé dans les réacteurs nucléaires pour la production d'électricité. Le troisième isotope ^{233}U est produit en irradiant du thorium par les neutrons.

L'uranium est un métal blanc argenté ductile et malléable, similaire d'aspect à l'acier. Sa densité est 19,1 ; il conduit relativement peu l'électricité.

On obtient l'uranium métallique en traitant la pechblende par l'acide nitrique, en calcinant en oxyde le nitrate obtenu et en réduisant l'oxyde par le carbone, l'aluminium ou le calcium. Industriellement, on réduit par le calcium le tétrafluorure :

$$UF_4 + 2Ca \rightarrow U + 2CaF_2$$

que l'on obtient par action de l'acide fluorhydrique sur l'oxyde :

A. Rizzi

◀ *Paillettes* **d'acide borique** : *cette substance est utilisée dans diverses industries comme celle de la céramique, dans l'analyse chimique, et comme antiseptique.*

$UO_2 + 4HF \rightarrow UF_4 + 2H_2O$.

L'uranium présente des états d'oxydation + 3, + 4, + 6, et finalement l'état d'oxydation de l'ion uranile UO_2^{2+}. On signalera les **oxydes** UO_2, U_3O_8, UO_3 et deux espèces de sels, les **uranates** correspondant à l'anion ($U_2O_7^{--}$) et les **sels d'uranyle** correspondant au cation (UO_2^{2+}). Les uranates sont jaunes et insolubles dans l'eau. Le **nitrate d'uranyle,** $UO_2(NO_3)_2$, le **phosphate** et l'**acétate,** tous de couleur jaune, sont employés en chimie analytique.

Il faut citer aussi les **carbures d'uranium** : le **monocarbure** UC, le **dicarbure** UC_2 et le **sesquicarbure** U_2C_3. Les deux premiers sont obtenus par action directe du carbone sur l'uranium fondu ou par action de l'oxyde de carbone sur le métal à haute température. Le sesquicarbure est obtenu par chauffage d'un mélange de UC et UC_2.

L'uranium réagit directement avec l'azote en donnant des **nitrures** UN, U_2N_3 et UN_2. Vers 300 °C, l'uranium réagit avec l'hydrogène et donne un **hydrure** UH_3. Parmi les halogénures d'uranium, le plus important est l'**hexafluorure** UF_6. Ce composé a une forte tension de vapeur à la température ordinaire, et c'est la raison pour laquelle on l'utilise dans le procédé de diffusion gazeuse pour la séparation des isotopes 238 et 235 de l'uranium.

Les éléments transuraniens

Tous les éléments de nombre atomique supérieur à 92 (uranium) ont des durées de demi-désintégration trop courtes pour avoir subsisté dans l'écorce terrestre depuis leur formation. On les a découverts et on les produit par réactions nucléaires. Ce sont : le **neptunium** (Np), le **plutonium** (Pu), l'**américium** (Am), le **curium** (Cm), le **berkélium** (Bk), le **californium** (Cf), l'**einsteinium** (Es), le **fermium** (Fm), le **mendélévium** (Md), le **nobélium** (No), le **lawrencium** (Lr), le **rutherfordium** (Rf), le **hahnium** (Ha) ou **nielsborium** (Ns).

Parmi ces éléments artificiels, le seul qui ait une importance pratique est le plutonium (Pu). Son isotope 239 est fissile et a une période relativement brève (24 000 ans). On l'obtient par réaction nucléaire, et il peut subir une fission comme l'uranium 235. Il est utilisé comme matériau fissile, en particulier pour les armes atomiques. Il est assez difficile à isoler des barres d'uranium enrichi des piles atomiques, mais l'importance de cet élément justifie des méthodes complexes et coûteuses.

Les états d'oxydation du plutonium sont, dans l'ordre de stabilité croissante, + 4, + 3 et + 6. Les sels sont généralement colorés. On connaît le carbure, le nitrure, le siliciure et le sulfure. Les composés du plutonium ont des propriétés généralement voisines de celles des composés correspondants de l'uranium.

En raison de leur haut pouvoir d'émission de particules α, et du fait qu'ils sont absorbés par la moelle des os, le plutonium et les autres transuraniens sont des poisons radiologiques qui doivent être manipulés avec des équipements spéciaux.

Groupe IIIB

Ce groupe est constitué par les éléments suivants : le bore (B), l'aluminium (Al), le gallium (Ga), l'indium (In) et le thallium (Tl).

Tous ces éléments ont 3 électrons dans leur couche externe et sont trivalents. Ils peuvent s'ioniser (sauf le bore) en formant l'ion M^{3+}.

Les 2 éléments les plus répandus sont le bore et l'aluminium. Le premier présente des analogies avec le silicium, c'est-à-dire qu'il est caractérisé par des propriétés non métalliques; son oxyde a des propriétés acides faibles, mais nettes, tandis que l'aluminium a des caractères métalliques, comme les autres éléments du groupe.

Bore

Les minerais de bore sont assez répandus dans la nature. On mentionnera les *borosilicates,* le *borax* (*borate de sodium* $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$), *l'acide borique* H_3BO_3, la *boracite (borate de magnésium),* etc.

On peut obtenir le bore soit à partir du borax extrait directement, soit à partir du borax résultant du traitement d'un minerai par le carbonate de sodium à ébullition.

Le borax traité par H_2SO_4 conduit à l'acide borique : $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O + H_2SO_4 \rightarrow Na_2SO_4 + 4H_3BO_3 + 5H_2O$, ensuite, on déshydrate l'acide borique par chauffage pour obtenir l'anhydride :

$$2H_3BO_3 \rightarrow B_2O_3 + 3H_2O.$$

La réduction de l'oxyde ne peut pas se faire par le carbone, car il se forme dans ce cas le carbure de bore B_4C. On opère la réduction par le sodium :

$$B_2O_3 + 6Na \rightarrow 2B + 3Na_2O$$

ou par le magnésium :

$$B_2O_3 + 3Mg \rightarrow 2B + 3MgO.$$

On peut encore obtenir le bore par réduction de son bromure BBr_3 par l'hydrogène à 1 000 °C. On obtient alors du bore cristallin très pur.

▼ *Le minerai de* **pechblende** *contient de l'uranium, dont deux isotopes naturels,* ^{238}**U** *et* ^{235}**U**, *qui sont utilisés dans les piles atomiques et les explosifs nucléaires.*

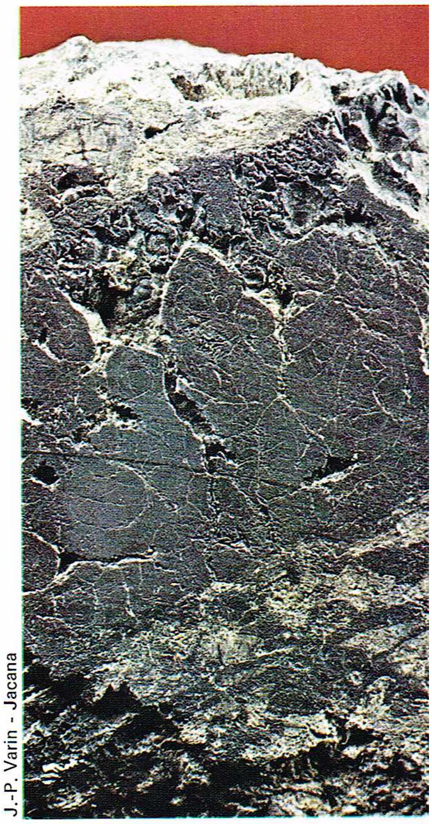

J.-P. Varin - Jacana

Eléments du groupe IIIB

Propriétés	Bore	Aluminium	Gallium	Indium	Thallium
Numéro atomique	5	13	31	49	81
Masse atomique	10,82	26,98	69,72	114,76	204,39
Rayon atomique (en Å)	0,80	1,248	1,245	1,497	1,549
Configuration électronique	$1s^2 2s^2 2p^1$	$3s^2 3p^1$	$3d^{10} 4s^2 4p^1$	$4d^{10} 5s^2 5p^1$	$4f^{14} 5d^{10} 6s^2 6p^1$
Densité	2,33	2,70	5,93	7,30	11,85
Point de fusion (en °C)	2300	660	29,8	156	302,5
Point d'ébullition (en °C)	2550	2600	2070	2300	1457

◀ *Tableau des propriétés des éléments du groupe* **IIIB.**

▶ *Les soufflards boracifères de Larderello (Toscane, Italie) ne sont pas seulement utilisés pour extraire l'acide borique contenu dans la vapeur d'eau, mais servent aussi de source de chaleur et d'électricité.*

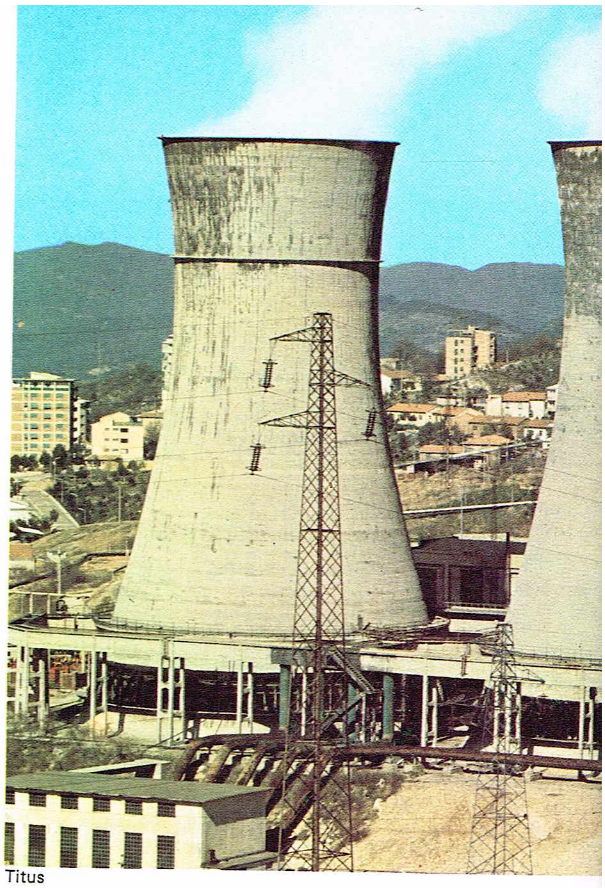

Titus

La résistance électrique du bore diminue lorsque la température augmente. L'élément se combine facilement au fluor et au chlore. Chauffé à l'air, il brûle avec une flamme verte en donnant l'**anhydride borique,** B_2O_3. A plus haute température, il se combine à l'azote pour donner le **nitrure de bore,** BN, réfractaire.

Parmi les composés du bore, il faut citer tout particulièrement les *boranes* ou *hydrures de bore*. On peut obtenir ces hydrures par action de l'acide chlorhydrique sur les borures métalliques. On peut classer ces hydrures en deux groupes. Ceux dont la formule générale est BH_{n+4}, relativement stables, et les hydrures instables, de formule B_nH_{n+6}.

Le **borane,** BH_3, n'existe pas à l'état libre mais dans certains composés comme les borohydrures alcalins (**borohydrure de sodium,** $NaBH_4$, ou de **potassium,** KBH_4).

Le **diborane,** B_2H_6, est le plus important des hydrures de bore. On peut l'obtenir par action du borohydrure de sodium sur le trifluore de bore :

$$3Na(BH_4) + 4BF_3 \rightarrow 2B_2H_6 + 3Na(BF_4).$$

Le **tétraborane,** B_4H_{10}, se prépare en traitant le borure de magnésium Mg_3B_2 par l'acide phosphorique aqueux. Le diborane est un composé instable très inflammable mais qui, chauffé avec précautions, peut se transformer en boranes supérieurs B_5H_{11} et $B_{10}H_{14}$. Ce dernier borane a été utilisé comme carburant pour les engins spatiaux. Les hydrures mixtes (borohydrures de sodium ou de potassium) sont utilisés comme réducteurs en chimie organique.

Parmi les halogénures, le *fluorure* BF_3 et le *chlorure* BCl_3 sont importants.

Le **fluorure de bore** est obtenu par action de HF sur B_2O_3 (HF étant obtenu par action de l'acide sulfurique sur le fluorure de calcium) :

$$B_2O_3 + 3CaF_2 + 3H_2SO_4 \rightarrow 2BF_3 + 3CaSO_4 + 3H_2O$$

Le fluorure de bore est un gaz. C'est un accepteur d'électrons qui agit comme acide de Lewis (voir le chapitre « Transformation de la matière ») dans de nombreuses réactions. Il donne avec l'éther $(CH_3)_2O$ une combinaison stable : $(CH_3)_2O \rightarrow BF_3$, appelée *éthérate de fluorure de bore*.

La préparation du **chlorure de bore,** BCl_3, se fait par réaction du carbone et du chlore sur l'anhydride borique :

$$B_2O_3 + 3C + 3Cl_2 \rightarrow 2BCl_3 + 3CO.$$

Parmi les autres composés du bore, les **organoboranes** sont des dérivés organiques présentant un certain intérêt en synthèse; leur formule générale est :

$$B(C_nH_{2n+1})_3.$$

Un autre composé important du bore est l'**acide borique,** H_3BO_3, que l'on obtient en traitant le borax $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ par l'acide sulfurique. C'est un solide qui se présente sous forme de poudre ou de cristaux. Par chauffage, il se transforme successivement en **acide métaborique,** HBO_2, et en **acide tétraborique,** $H_2B_4O_7$. L'acide borique en solution saturée est un antiseptique. On l'utilise aussi en céramique et dans d'autres industries, ainsi qu'en analyse chimique (perles de borax).

Le **perborate de sodium** est obtenu par action de l'eau oxygénée et de la soude sur une solution de borax. Il s'agit en fait, non d'un perborate de formule $NaBO_3$, mais d'un métaborate de sodium contenant de l'eau oxygénée de cristallisation, et de formule :

$$NaBO_2 \cdot H_2O_2 \cdot 3H_2O$$

Ce composé, stable à la température ordinaire, libère facilement de l'oxygène par chauffage, et on l'utilise pour le blanchiment.

Aluminium

L'aluminium est un métal assez répandu dans la nature. C'est, dans l'ordre d'abondance dans l'écorce terrestre, le troisième élément après l'oxygène et le silicium (8,1 % en poids). On le trouve dans les roches éruptives, micas, feldspaths et autres silicates d'aluminium; dans les roches sédimentaires, sous forme de *bauxite* ($Al_2O_3 \cdot H_2O$, contenant de l'oxyde de fer Fe_2O_3 et de titane TiO_2) et de *latérites*. L'aluminium est extrait principalement de ces deux minerais qui en contiennent respectivement 32 à 40 % et 26,5 %. On trouve aussi l'aluminium sous forme d'oxydes dans les roches métamorphiques (corindon). On peut encore citer comme composés naturels de l'aluminium la *cryolithe,* ou *fluoro-aluminate de sodium* Na_3AlF_6, le *kaolin,* dont le constituant principal est la kaolinite $2SiO_2Al_2O_3 \cdot 2H_2O$ (les argiles sont des kaolins impurs), enfin, le *spinelle* Al_2O_3, MgO.

La métallurgie de l'aluminium est fondée sur l'électrolyse de l'alumine dans un milieu ionisant constitué par la cryolithe fondue. Le mélange est introduit dans une cuve de grande capacité dont les parois internes sont garnies de briques réfractaires. La cathode est constituée par des blocs d'anthracite, l'anode par des blocs en coke de pétrole (sous-produit du cracking du pétrole) qui plongent dans la masse fondue. L'aluminium pur s'accumule au pôle négatif au fond de la cuve et y est soutiré par une ouverture. La préparation de l'aluminium nécessite l'obtention d'alumine pure. Dans le *procédé Bayer,* on traite la bauxite par des solutions concentrées de soude sous pression. L'hydrate d'alumine $Al_2O_3 \cdot H_2O$ donne $NaAlO_2$, l'hydrate de fer $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ est déshydraté en Fe_2O_3. La silice et les silicates ne sont pas attaqués, de même que TiO_2 et les carbonates alcalino-terreux.

Une filtration et un lavage permettent de séparer une solution concentrée d'aluminate de sodium des « boues rouges » qui renferment Fe_2O_3, de la bauxite inattaquée, les silicates, TiO_2, et les alcalino-terreux. Ces boues rouges constituent un résidu sans application possible et dont il faut se débarrasser.

La solution d'aluminate est diluée et « ensemencée » par de l'alumine pure précipitée d'une opération précédente. Cette opération est le point essentiel du procédé Bayer; elle évite que l'hydrate ne précipite sous une forme gélatineuse difficile à laver et à manipuler; il se forme un hydrate cristallin plus facile à manipuler. Cet hydrate recueilli sur des filtres rotatifs est envoyé dans des fours où il est calciné à 1 400 °C pour fournir l'alumine anhydre.

L'alumine hydratée est utilisée pour la production de certains sels tels que le *sulfate d'aluminium* et pour la fabrication d'*alumine activée*. L'alumine anhydre, en plus de son utilisation principale dans la production de l'aluminium, est utilisée comme abrasif, réfractaire et dans les céramiques.

L'alumine activée obtenue en chauffant l'hydrate d'alumine de façon à en éliminer la quasi-totalité de l'eau est utilisée comme support de catalyseur dans l'industrie chimique. On peut utiliser l'alumine mélangée à de la silice; les silico-alumines sont aussi des catalyseurs importants, en particulier pour le cracking catalytique dans l'industrie du pétrole. L'alumine anhydre est aussi un agent de déshydratation. La réduction de l'alumine Al_2O_3 par le carbone ne conduit pas, comme dans la métallurgie du fer, au métal, mais au carbure d'aluminium Al_4C_3. Ce dernier réagit sur l'eau en formant du méthane et de l'alumine :

$$Al_4C_3 + 6H_2O \rightarrow 3CH_4 + 2Al_2O_3.$$

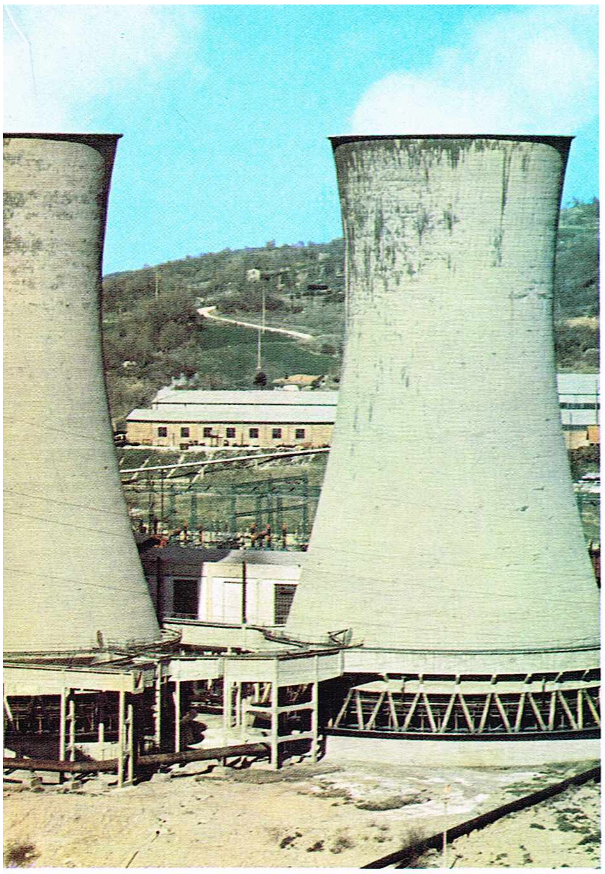

L'aluminium est un métal léger de densité 2,70, bon conducteur de l'électricité et de la chaleur, résistant bien à la corrosion, cette résistance pouvant, du reste, être augmentée par passivation (modification de la surface d'un métal, qui le rend passif, c'est-à-dire moins réactif à l'égard des agents chimiques) anodique. On l'utilise surtout pour la fabrication d'alliages légers à haute résistance mécanique.

C'est un métal blanc argenté, très mou, ductile et malléable. Il se recouvre à l'air d'une couche d'oxyde qui le protège. L'aluminium, broyé aux environs de son point de fusion et sous atmosphère inerte (azote) pour éviter son oxydation, fournit la poudre d'aluminium utilisée dans les peintures et dans certains explosifs.

L'aluminium est un métal très réactif vis-à-vis de l'oxygène, des halogènes, de l'azote et du carbone. Il brûle dans l'oxygène en donnant l'alumine :

$$2Al + 3/2O_2 \rightarrow Al_2O_3.$$

C'est un puissant réducteur de certains oxydes métalliques (aluminothermie) :

$$2Al + Fe_2O_3 \rightarrow Al_2O_3 + 2Fe$$

Il n'est pas attaqué par l'acide nitrique grâce à une passivation superficielle ; il réagit peu avec l'acide sulfurique ; par contre, il se dissout facilement dans l'acide chlorhydrique :

$$Al + 3HCl \rightarrow AlCl_3 + 3/2H_2$$

ainsi que dans les bases :

$$Al + NaOH + 3H_2O \rightarrow NaAl(OH)_4 + 3/2H_2$$

avec formation d'hydrogène.

La plupart des composés de l'aluminium renferment l'aluminium trivalent (Al^{3+}), mais on connaît aussi des composés de l'aluminium monovalent (Al^{+}) et divalent (Al^{++}).

Parmi les composés de l'aluminium, outre l'**alumine** dont il vient d'être question et qui est le plus important, il faut citer les halogénures, et plus particulièrement le chlorure.

Le **chlorure d'aluminium**, $AlCl_3$, se prépare par action du chlore sur l'aluminium. C'est un acide de Lewis qui complète sa structure électronique à 8 électrons en acceptant les doublets électroniques d'autres atomes. A l'état gazeux, il existe à l'état de dimère Al_2Cl_6 que l'on peut représenter ainsi :

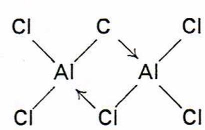

Castano - Cavallari

◄ ***Copeaux d'aluminium pur : cet élément, le troisième en abondance dans l'écorce terrestre, est un métal léger, très malléable, qui se recouvre à l'air d'une couche d'oxyde protectrice.***

Montecatini-Edison

◄ ***Extraction et stockage de bauxite, principal minerai d'aluminium, dans les mines de San Giovanni Rotondo en Italie.***

Rhône-Poulenc - Service A.T.C.

▶ *Une étape de la fabrication du sulfate d'aluminium, produit utilisé dans l'industrie du cuir, dans les papeteries, teintureries, savonneries, et aussi pour la fabrication des rubis synthétiques.*

La qualité d'acide de Lewis fait d'$AlCl_3$ un catalyseur pour certaines réactions importantes de la chimie organique comme la *réaction de Friedel et Crafts* (réaction de substitution, dans laquelle un groupe alcoyle ou acyle se substitue à un atome d'hydrogène dans un noyau aromatique).

Le **fluorure d'aluminium**, AlF_3, doit son importance à son aptitude à donner des complexes comme la cryolithe Na_3AlF_6.

Le **sulfate d'aluminium** est un des plus importants sels d'aluminium. On l'obtient par action de l'acide sulfurique sur l'alumine. Le sulfate donne de nombreux hydrates qui entrent dans la composition des *aluns*, sulfates doubles hydratés de formule :

$$Me_2SO_4 \cdot Al_2(SO_4)_3 \cdot 24H_2O$$

(où Me = Na, K, Rb, Cs, NH_4, Tl), et que l'on utilise dans l'industrie du cuir et en papeterie.

Les sels organiques d'aluminium comme le **stéarate**, le **palmitate** et l'**acétate** sont utilisés pour l'imperméabilisation des tissus et la gélification de certains lubrifiants. Certains composés organométalliques de l'aluminium, comme le **triéthyl-aluminium**, $Al(C_2H_5)_3$, sont utilisés industriellement pour la synthèse d'oléfines linéaires ou d'alcools primaires à longue chaîne à partir d'éthylène. Le triéthyl-aluminium et d'autres **alkyl-aluminiums** sont utilisés comme agents réducteurs dans la préparation des catalyseurs stéréospécifiques pour la polymérisation des oléfines et des diènes. L'**hydrure de lithium et d'aluminium**, $LiAlH_4$, est un réducteur très utilisé en synthèse organique.

Gallium, indium et thallium

Ces trois éléments assez rares dans la nature ne se trouvent jamais en concentration suffisante pour une exploitation économique par extraction. On les rencontre généralement ensemble. Ils présentent le degré d'oxydation + 3, ce qui permet de les comparer à l'aluminium, mais le thallium, en particulier, possède aussi le degré d'oxydation + 1 qui le rapproche des métaux alcalins et de l'argent.

Gallium

Le gallium constitue l'impureté de certaines blendes et des minerais de cuivre. C'est le sous-produit du raffinage électrolytique du cuivre et de la métallurgie du molybdène et de l'aluminium. Ses propriétés ont été décrites en se fondant sur la classification périodique des éléments avant sa découverte en 1875 par Lecoq de Boisbaudran. Il doit son nom à ce dernier. C'est un métal mou, blanc bleuté, à point de fusion très bas (29,8 °C), et qui, par ailleurs, peut rester facilement en surfusion. Le gallium diffuse facilement dans l'aluminium avec lequel il a des propriétés communes. On l'utilise dans les thermomètres à haute température (compte tenu du large éventail de température où il se trouve à l'état liquide — il bout à 2 070 °C) et dans certains alliages spéciaux et très fusibles avec l'étain, le plomb, le bismuth et le cadmium. Il entre dans la fabrication des semi-conducteurs.

L'**hydroxyde de gallium**, $Ga(OH)_3$, est, comme l'hydrate d'alumine, un composé amphotère. Par action d'un acide, il forme des sels de Ga^{3+}, et, par action de la soude, il se forme du gallate de sodium.

Indium

L'indium est un métal relativement peu répandu, qui n'a pas de minerai propre et qui constitue un sous-produit de la fabrication du zinc et de l'aluminium.

C'est un métal mou, sans propriétés mécaniques importantes, et qui fond à 156 °C. Il bout à 2 300 °C. Les halogènes réagissent violemment avec l'indium. L'oxygène ne réagit qu'à chaud, il se forme alors l'**oxyde d'indium**, In_2O_3.

L'indium est un métal dont l'intérêt réside dans le dépôt électrolytique pour l'obtention de surfaces métalliques à faible coefficient de frottement (paliers, par exemple). Il est aussi utilisé dans les dispositifs de sécurité fusibles, comme alliage pour la soudure, etc., mais son usage principal se trouve actuellement dans l'électronique, en association avec l'antimoine.

Thallium

Le thallium est obtenu comme sous-produit de l'exploitation des pyrites et de la blende. On peut préparer le métal à partir de son chlorure, ou par électrolyse de son sulfate ou de son carbonate.

Bien qu'il soit aussi abondant dans l'écorce terrestre que le mercure, le thallium n'a que des applications très limitées.

C'est un métal plus mou que le plomb et plus dur que l'indium, et qui se ternit rapidement lorsqu'il est exposé à l'air. Il fond à 302,5 °C et bout à 1 457 °C.

A l'air sec, il se transforme en **oxyde de thallium**, Tl_2O, et, à l'air humide, en **hydroxyde**. Ses composés existent avec le Tl à la valence 1 *(composés thalleux)* et à la valence 3 *(composés thalliques)*. Parmi ses composés, on peut citer le **chlorure**, le **sulfate** et le **sulfure**.

Le **sulfate de thallium** a été utilisé pour combattre les rongeurs et les fourmis. L'**oxyde de thallium** peut être utilisé pour les circuits électroniques imprimés. Le thallium peut former de nombreux alliages avec des métaux divers. Avec le mercure, on obtient un alliage qui fond à — 60 °C.

Groupe IVA

Le titane (Ti), le zirconium (Zr) et le hafnium (Hf) sont des métaux de transition appartenant au groupe IVA. Leur état d'oxydation le plus courant est + 4, mais les états d'oxydation + 2 et + 3 peuvent exister dans ce groupe, en particulier pour le titane.

Titane

Le titane est un élément relativement abondant dans l'écorce terrestre. On le trouve dans de nombreux minerais à l'état d'oxyde : TiO_2 *(rutile, anatase, brookite)*, de TiO_3Ca *(pérovskite)*, de CaTiO (SiO_4) [*titanite*]. Le minerai le plus important est l'*ilménite* (Fe, Mg, Mn) TiO_3.

On prépare le titane par réduction de son chlorure par le magnésium à 850 °C sous atmosphère d'argon :

$$TiCl_4 + 2Mg \rightarrow Ti + 2MgCl_2.$$

Il est purifié par fusions successives, de sorte que les impuretés se concentrent dans la fraction liquide, d'où elles peuvent être éliminées.

Le métal a des propriétés comparables à celles de l'acier inoxydable : il est dur, peut subir aisément toutes les opérations mécaniques (laminage, filage, étirage) ; il se soude à l'arc, peut être usiné aux machines-outils. Il est plus léger que le fer, sa densité est 4,49. Il fond à 1 668 °C. Il est stable à l'air et conduit l'électricité. Il brûle au rouge dans l'oxygène en formant l'oxyde TiO_2. Il réagit vers 800 °C avec l'azote en donnant le **nitrure de titane**, TiN. Il réagit avec les halogènes, à 150 °C avec le fluor et à partir de 300 °C avec le chlore. Il réagit à plus haute température avec le carbone et donne le **carbure de**

▼ ***Tableau des propriétés des éléments du groupe IVA.***

Eléments du groupe IVA			
Propriétés	**Titane**	**Zirconium**	**Hafnium**
Numéro atomique	22	40	72
Masse atomique	47,90	91,22	178,50
Rayon atomique (en Å)	1,49	1,58	1,57
Configuration électronique	$3d^2 4s^2$	$4d^2 5s^2$	$4f^{14} 5d^2 6s^2$
Densité	4,49	6,52	13,31
Point de fusion (en °C)	1668	1857	2300
Point d'ébullition (en °C)	3260	≃ 2910	≃ 5400

▶ *Tableau des propriétés des éléments du* groupe IVB.

Eléments du groupe IVB					
Propriétés	**Carbone**	**Silicium**	**Germanium**	**Etain**	**Plomb**
Numéro atomique	6	14	32	50	82
Masse atomique	12,010	28,06	72,60	118,70	207,21
Rayon atomique (en Å)	0,771	1,173	1,223	1,412	1,538
Configuration électronique	$1s^2 2s^2 2p^2$	$3s^2 3p^2$	$3d^{10} 4s^2 4p^2$	$4d^{10} 5s^2 5p^2$	$4f^{14} 5d^{10} 6s^2 6p^2$
Densité	2,26 (graphite) 3,52 (diamant)	2,33	5,32	7,30	11,4
Point de fusion (en °C)	2750	1414	958	231,8	327,5
Point d'ébullition (en °C)	4830 (graphite)	2355	2830	2362	1755

titane, TiC. Il se dissout dans l'acide chlorhydrique à ébullition pour donner le **trichlorure,** $TiCl_3$, et il est attaqué à froid par l'acide nitrique. Il est facilement attaqué par l'acide fluorhydrique en donnant du **fluorure de titane,** TiF_4.

Le titane allie des qualités mécaniques remarquables à une faible densité qui fait gagner 40 % de poids par rapport à l'acier. Pour ces raisons, le titane est utilisé dans les structures d'avions et de vaisseaux spatiaux (capsules *Mercury* et *Gemini*). Par ailleurs, l'industrie chimique utilise de plus en plus le titane pour les équipements destinés à la manipulation de produits corrosifs. On l'utilise aussi pour les implants orthopédiques.

Parmi les composés du titane, le **bioxyde,** TiO_2, est préparé à partir du minerai que l'on attaque à l'acide sulfurique. On précipite l'hydroxyde de titane que l'on calcine ensuite. L'oxyde de titane est très utilisé comme pigment blanc.

Le **tétrachlorure,** $TiCl_4$, est obtenu à partir du bioxyde :

$$TiO_2 + 2C + 2Cl_2 \rightarrow TiCl_4 + 2CO.$$

L'**hydroxyde,** Ti $(OH)_4$, ou **acide orthotitanique,** est un composé amphotère. Les autres composés du titane ont peu d'importance pratique.

Zirconium

Le zirconium est assez répandu dans la nature, mais peu abondant. On le trouve à l'état d'oxyde (ZrO_2) dans la *baddéleyite,* et à l'état de silicate ($ZrSiO_4$) dans les *zircons.*

La métallurgie du zirconium consiste d'abord à transformer l'oxyde ZrO_2 en carbure ZrC par chauffage en présence de carbone. Ensuite, le carbure de zirconium est transformé en chlorure par action du chlore vers 800 °C :

$$ZrC + 2Cl_2 \rightarrow ZrCl_4 + C.$$

Le métal est obtenu par réduction du chlorure grâce au magnésium fondu :

$$ZrCl_4 + 2Mg \rightarrow Zr + 2MgCl_2.$$

On peut aussi purifier le zirconium par décomposition de son iodure ZrI_4. Lorsque le zirconium est utilisé pour le gainage de l'uranium dans les piles atomiques, il doit être le plus possible débarrassé du hafnium qu'il renferme. Ce dernier a en effet une forte section de capture pour les neutrons.

Fortement électropositif, le zirconium n'est attaqué que par l'eau régale et l'acide fluorhydrique. L'**oxyde de zirconium,** ZrO_2, est un oxyde stable.

Le point de fusion du zirconium est 1 857 °C, son point d'ébullition 2 910 °C, et sa densité 6,52.

L'utilisation la plus importante du zirconium est l'industrie nucléaire, où il est utilisé pour le gainage d'éléments combustibles à cause de sa faible section efficace de capture des neutrons thermiques, de sa résistance élevée à la corrosion et de sa tenue excellente à l'eau sous pression et à la vapeur d'eau. Le zirconium trouve aussi des emplois en pyrotechnique, dans les lampes photoflash, les « getters », et dans l'équipement chimique.

Hafnium

Le hafnium présente une parenté très étroite avec le zirconium qu'il accompagne dans ses minerais. Cette similitude résulte évidemment de la structure électronique semblable de ces deux éléments, mais aussi des valeurs très voisines de leurs rayons atomiques et ioniques.

La séparation des deux éléments est extrêmement difficile et s'effectue par cristallisation fractionnée de certains de leurs sels ou grâce à l'utilisation de résines échangeuses d'ions.

Ni le hafnium ni ses composés n'ont actuellement d'applications. Les composés ont un comportement chimique analogue à celui des composés du zirconium.

Groupe IVB

Le carbone (C), le silicium (Si), le germanium (Ge), l'étain (Sn) et le plomb (Pb), qui constituent le groupe IVB de la classification périodique, sont caractérisés par le degré d'oxydation + 4. Ils présentent en outre le degré d'oxydation + 2 dont la stabilité croît du germanium à l'étain et au plomb. Les premiers éléments de ce groupe ont un caractère nettement non métallique, alors que l'étain et le plomb présentent les caractères des métaux. De même, le caractère acide des oxydes diminue lorsque l'on passe du carbone au plomb. Mis à part le carbone dont le rayon atomique est faible, les autres éléments de ce groupe se distinguent par des rayons atomiques très voisins les uns des autres.

Ces éléments sont très répandus dans l'écorce terrestre, surtout le silicium, qui constitue la partie essentielle des roches, sous forme de silicates et de silice, et le carbone, qui est présent dans les roches comme les carbonates, dans l'atmosphère à l'état de gaz carbonique et dans les composés organiques.

Carbone

Nous ne traiterons dans ce chapitre que des composés non organiques du carbone, les très nombreux composés que peut faire le carbone avec l'hydrogène et d'autres éléments étant traités en détail dans le chapitre de la chimie organique.

Le carbone comprend deux isotopes stables, le ^{12}C et le ^{13}C (1,108 %). Il présente en outre plusieurs isotopes radio-actifs de masse comprise entre 10 et 16, parmi lesquels le ^{14}C sert à la datation. Le carbone 14 se forme constamment dans l'atmosphère par l'action de neutrons cosmiques sur l'azote. Dans l'air, la teneur en ^{14}C est constante. Par contre, elle décroît dans les végétaux à partir de leur mort, et c'est la détermination de la teneur en ^{14}C des végétaux qui permet de déterminer leur « âge » entre 1 000 et 15 000 ans.

Le carbone existe à l'état élémentaire sous forme de diamant et de graphite, qui sont deux variétés allotropiques cristallisées du carbone. Parmi les nombreuses variétés de carbone amorphe, on peut citer le coke, le charbon de bois, le noir de fumée, le noir animal, etc.

▶ *Page ci-contre, deux formes de* carbone *à l'état d'élément : en haut, le* graphite, *solide gris, utilisé dans les réacteurs et les creusets grâce à sa résistance aux hautes températures. En bas, le* diamant, *le corps le plus dur qui soit connu, est utilisé comme pierre précieuse, mais aussi pour couper le verre et pour fabriquer des trépans utilisés dans les forages pétroliers.*

Ces variétés ont toutes des propriétés chimiques analogues, mais diffèrent par leurs propriétés physiques.

Le *diamant* est un corps cristallisé de densité 3,52, présentant un réseau cubique à faces centrées. Il est incolore et transparent quand il est pur. C'est le corps le plus dur qui soit connu. Il peut acquérir par la taille un éclat incomparable, dû à son indice de réfraction élevé ($n = 2{,}407$). Il n'est pas conducteur de l'électricité. Il se transforme en graphite vers 2 000 °C. On l'utilise comme pierre précieuse, mais aussi pour couper le verre et pour la fabrication des trépans utilisés dans les forages pétroliers.

Le *graphite* pur est un solide gris, cristallisé, de densité 2,26. Sa structure résulte de cristaux hexagonaux empilés en lamelles parallèles. Le graphite conduit le courant électrique dans le sens des lamelles d'hexagones, mais la conductibilité électrique dans le sens perpendiculaire à ces lamelles est 200 fois plus faible. Le graphite est utilisé, grâce à sa résistance à haute température, dans la fabrication de creusets et de réacteurs. On l'utilise comme modérateur (pour le ralentissement des électrons) dans les réacteurs nucléaires. Le « glissement »

A. Moulin - Jacana

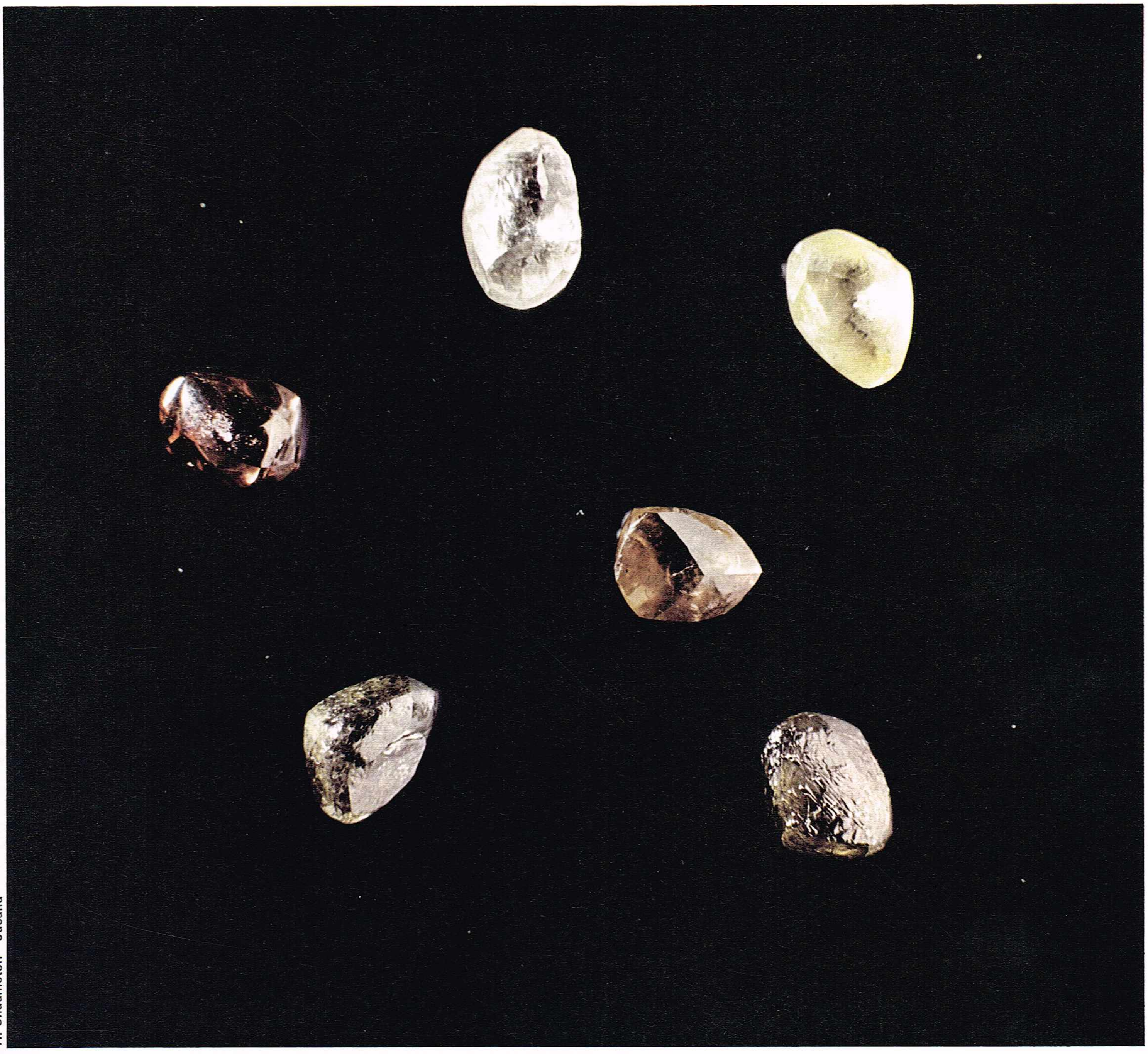

H. Chaumeton - Jacana

facile de ses plans cristallins les uns sur les autres explique ses propriétés de lubrification (c'est un lubrifiant solide).

Le *carbone amorphe* est utilisé sous différentes formes dans l'industrie et pour la fabrication de produits domestiques. Le *coke,* résidu de la distillation de la houille à l'abri de l'air, est employé dans la métallurgie. Le *charbon de cornue,* obtenu par dépôt sur les parois de cornues où l'on chauffe de la houille, sert à la fabrication des électrodes. Le *charbon de bois* produit par la combustion incomplète du bois est un combustible mais peut être un réducteur en métallurgie et servir à absorber les gaz résiduels dans les ampoules sous vide. Le *noir de fumée,* obtenu lorsqu'une substance carbonée brûle en présence de trop peu d'oxygène, entre dans la fabrication des encres, des peintures et des cirages. Le *carbon-black* est, comme le noir de fumée, un produit de décomposition des hydrocarbures en présence d'un défaut d'oxygène; il sert dans les pneumatiques comme charge renforçante, augmentant ainsi la résistance du pneu à l'abrasion sur route. Le *noir animal* résulte de la calcination des os à l'abri de l'air.

Les *charbons actifs* sont des formes très poreuses du carbone que l'on obtient en carbonisant à l'abri de l'air des composés carbonés à forte teneur en oxygène : charbons bitumineux, lignites, bois, coques de noix de coco, etc. On augmente le pouvoir adsorbant de ces charbons en éliminant les hydrocarbures qui restent adsorbés dans leurs pores soit par la vapeur d'eau seule, soit par le mélange air-vapeur d'eau. Ces charbons actifs peuvent avoir des surfaces spécifiques de l'ordre de 1 000 m^2/g. Ils sont utilisés pour absorber les gaz, pour décolorer certains produits naturels comme les jus sucrés et pour purifier l'eau. On les utilise aussi dans la purification de l'air. Les fibres de carbone sont utilisées comme les fibres d'amiante ou de verre dans les plastiques renforcés. Les fibres de carbone sont obtenues par dégradation thermique contrôlée de fibres textiles, tel le polyacrylonitrile.

Parmi les composés non organiques du carbone, il faut citer les carbures formés par réaction du carbone avec un autre élément. On distingue deux grands groupes de carbures : ceux qui, lorsqu'on les traite par l'eau ou un acide dilué, fournissent un hydrocarbure comme le méthane (**carbure de béryllium** Be_2C, et **d'aluminium** Al_4C_3) ou l'acétylène (**carbure de calcium** CaC_2, **de baryum** BaC_2) ou d'autres hydrocarbures (**carbure de magnésium** Mg_2C_3, **d'uranium** U_2C_3, **de fer** Fe_3C, etc.), et ceux qui ne sont pas attaqués. Les premiers sont caractérisés par une liaison hétéropolaire ou saline, les seconds par une liaison covalente qui leur confère une faible réactivité et une dureté importante (par exemple, le **carbure de bore** B_4C ou **de silicium** SiC).

Parmi les carbures, le **carbure de calcium,** CaC_2, a une grande importance pratique. On l'obtient par action, au four électrique, de la chaux sur le carbone à 2 000 °C :

$$CaO + 3C \rightarrow CaC_2 + CO.$$

C'est la matière première de la fabrication d'un engrais important, la cyanamide calcique, $CaCN_2$, et il a servi très longtemps à la synthèse de l'acétylène pour la préparation de nombreux dérivés organiques.

De même, le **carbure de silicium,** SiC, est obtenu au four électrique à 1 900 °C par action du charbon sur la silice :

$$SiO_2 + 3C \rightarrow SiC + 2CO.$$

C'est un composé un peu moins dur que le diamant. Il est utilisé comme abrasif *(carborundum)* et comme réfractaire doté d'une bonne conductibilité thermique.

Parmi les dérivés halogénés du carbone, il faut citer le **tétrachlorure de carbone,** CCl_4, qui est un excellent solvant. C'est un produit non inflammable pouvant être utilisé pour combattre les incendies, mais qui se décompose à la chaleur en fournissant des vapeurs toxiques. Le tétrachlorure de carbone, contrairement au tétrafluorure, ne peut être obtenu directement; on le prépare par chloration du méthane.

Avec l'oxygène, le carbone donne deux composés, l'**oxyde de carbone,** CO, et l'**anhydride carbonique,** CO_2, ce dernier étant présent dans l'atmosphère et produit par la respiration des animaux et des plantes. L'oxyde de carbone se produit par combustion de composés renfermant du carbone, en présence d'air en défaut, ou par action de la vapeur d'eau sur le charbon au rouge :

$$C + H_2O \rightleftharpoons CO + H_2.$$

On utilise aussi le reforming des hydrocarbures à la vapeur et en particulier le reforming du méthane :

$$CH_4 + H_2O \rightleftharpoons CO + 3H_2.$$

On forme aussi de l'oxyde de carbone dans la réduction de certains oxydes métalliques par le charbon.

On peut préparer au laboratoire de l'oxyde de carbone en décomposant certains composés comme l'acide formique :

$$HCOOH \xrightarrow{H_2SO_4} CO + H_2O.$$

L'oxyde de carbone est produit en même temps que l'hydrogène dans les fours à coke et dans les hauts fourneaux. Le *gaz à l'eau* (mélange équimoléculaire de CO et H_2, résultant de la réduction de l'eau par le charbon) est fabriqué par action de la vapeur d'eau sur le coke préalablement porté au rouge dans l'air. Depuis que l'on utilise les fractions pétrolières pour fabriquer le mélange $CO + H_2$ (reforming à la vapeur ou oxydation partielle), le gaz à l'eau n'est plus utilisé en synthèse pétrochimique.

L'oxyde de carbone est un gaz incolore, inodore et très toxique. Sa toxicité résulte de la réaction qu'il donne avec l'hémoglobine du sang qu'il transforme en carboxyhémoglobine inapte à assurer le transport de l'oxygène dans l'organisme. Il existe des dispositifs divers permettant de détecter de façon continue l'accumulation d'oxyde de carbone à un niveau de concentration excessif dans les locaux où il s'en produit. Le principe de ces instruments de détection est fondé soit sur la chaleur dégagée par l'oxydation catalytique de CO en CO_2, soit sur l'absorption du CO dans l'infrarouge, etc. Une détection qualitative peut être obtenue grâce à un papier humide imbibé de chlorure de palladium :

$$PdCl_2 + H_2O + CO \rightarrow Pd + 2HCl + CO_2$$

la précipitation de palladium métallique décelant la présence de CO.

L'oxyde de carbone se disproportionne dès 35 °C en carbone et CO_2, en présence de palladium :

$$2CO \rightarrow C + CO_2.$$

Il brûle avec une flamme bleue en produisant du CO_2. Il réagit de façon réversible avec la vapeur d'eau pour former $CO_2 + H_2$:

$$CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2$$

la constante de cet équilibre variant fortement avec la température.

L'oxyde de carbone réduit les oxydes métalliques; c'est un agent efficace de la réduction des minerais de fer dans les hauts fourneaux.

Il est absorbé par les bases (NaOH, KOH) à la température ordinaire avec formation de formiate de sodium ou de potassium.

Il donne avec les métaux de transition des complexes, les métaux carbonyles, dont certains ont une grande importance industrielle comme catalyseurs. Ainsi, la synthèse *oxo* (synthèse industrielle d'aldéhydes par action de l'oxyde de carbone et de l'hydrogène sur les oléfines) utilise le cobalt carbonyle $Co_2(CO)_8$ transformé par l'hydrogène en hydrure de cobalt tétracarbonyle $HCo(CO)_4$. On citera encore le chrome carbonyle $Cr(CO)_6$, le nickel carbonyle $Ni(CO)_4$, etc. L'oxyde de carbone est un agent de synthèse important en chimie organique industrielle.

L'oxyde de carbone réagit avec le chlore pour donner le phosgène ($COCl_2$), composé gazeux extrêmement toxique utilisé lors de la Première Guerre mondiale comme gaz de combat et actuellement employé dans certaines synthèses organiques.

L'**anhydride carbonique** (CO_2) est un gaz incolore, d'odeur forte, soluble dans l'eau, qui se forme dans la combustion de produits carbonés en présence d'un excès d'oxygène. Il s'en produit aussi dans les fermentations; c'est un produit du métabolisme animal, et il est important dans le cycle du carbone sur la Terre. C'est la raison pour laquelle on le trouve en petite quantité dans l'atmosphère terrestre (environ 0,03 % en volume). Cependant, on ne l'extrait pas de l'atmosphère, et la source principale

de CO_2 est le sous-produit de la synthèse de l'ammoniac et son extraction de différents mélanges gazeux industriels. Au laboratoire, on peut le préparer par action d'un acide sur un carbonate :

$$CaCO_3 + 2HCl \rightarrow CO_2 + H_2O + CaCl_2.$$

Sa masse volumique, très supérieure à celle de l'air (1,976 g/l à 0 °C et 1 atmosphère), fait que, dans certaines grottes où le brassage de l'air ne peut se faire, il s'accumule au niveau du sol et rend l'atmosphère irrespirable à ce niveau (grotte du Chien). Le CO_2 est facilement liquéfiable. Il peut aussi être facilement mis sous forme solide, plus communément appelée glace sèche, neige carbonique ou carboglace, les principaux usages du CO_2 solide se trouvant dans la conservation des aliments par le froid. Le gaz carbonique liquéfié remplace progressivement le CO_2 solide. Le CO_2 gazeux est utilisé dans les extincteurs et comme gaz inerte dans certaines installations chimiques. L'anhydride carbonique porté à haute température se décompose en oxyde de carbone et en oxygène. Il n'entretient pas la combustion. Ses solutions aqueuses présentent une faible acidité :

$$H_2O + CO_2 \rightleftharpoons H_2CO_3.$$

Cet équilibre a une grande importance dans la nature pour la dissolution et la reprécipitation des roches calcaires.

L'acide carbonique, H_2CO_3, n'a jamais été isolé ; il subit les deux dissociations successives suivantes :

$$H_2CO_3 \rightleftharpoons (HCO_3)^- + H^+$$
$$(HCO_3)^- \rightleftharpoons CO_3^{2-} + H^+.$$

Les **carbonates métalliques** sont connus pour les métaux suffisamment électropositifs. Les carbonates alcalins sont solubles dans l'eau et fortement hydrolysés, si bien qu'ils agissent comme des bases alcalines :

$$Na_2CO_3 + 2H_2O \rightarrow H_2CO_3 + 2Na^+ + 2OH^-.$$

Les carbonates acides alcalins (ou *bicarbonates*) sont solubles, sauf le bicarbonate de sodium $NaHCO_3$, qui l'est peu. Les carbonates alcalino-terreux sont insolubles et se dissocient à la chaleur :

$$CO_3Ca \rightarrow CO_2 + CaO.$$

Tous les carbonates neutres ou acides traités par un acide, même faible, libèrent du CO_2.

Parmi les composés du carbone avec le soufre, il faut citer le **sulfure de carbone,** CS_2. C'est un liquide qui constitue un excellent solvant en chimie organique, mais il est très inflammable et toxique. Autrefois, on le fabriquait par action directe du soufre sur le charbon de bois entre 900 et 1 000 °C ; actuellement, il est fabriqué par action du soufre sur le méthane en présence d'un catalyseur :

$$CH_4 + 4S \rightarrow CS_2 + 2H_2S.$$

On utilise le sulfure de carbone dans l'industrie de la rayonne et de la cellulose, pour la fabrication du tétrachlorure de carbone, comme accélérateur dans la vulcanisation du caoutchouc, etc.

L'oxysulfure de carbone, COS, est une molécule intermédiaire entre CS_2 et CO_2.

Avec l'azote, le carbone forme de nombreux composés, parmi lesquels les plus importants renferment le groupe CN (ou l'ion cyanure CN^-). On peut les considérer comme intermédiaires entre les composés minéraux et organiques.

Le **cyanogène,** ou **dicyanogène,** a pour formule $(CN)_2$; le radical $—C{\equiv}N$, qui compte 7 électrons autour du carbone, se comporte comme un halogène et existe à l'état de dimère $N{\equiv}C—C{\equiv}N$ ou $(CN)_2$. C'est un gaz très toxique qui brûle avec une flamme vive. On peut l'obtenir par chauffage du cyanure mercurique :

$$Hg(CN)_2 \rightarrow Hg + (CN)_2,$$

ou par action du cyanure de potassium sur le sulfate de cuivre.

L'acide cyanhydrique, HCN, est un acide très faible, extrêmement toxique, qui sert à la préparation des cyanures. Avec les métaux alcalins, il forme des cyanures ioniques, et avec les métaux de transition des complexes stables. On prépare industriellement l'acide cyanhydrique en faisant réagir entre 500 et 700 °C l'ammoniac sur l'oxyde de carbone et en décomposant le formamide qui se forme intermédiairement :

$$CO + NH_3 \rightarrow HCONH_2 \rightarrow HCN + H_2O.$$

On peut aussi faire réagir l'ammoniac sur le méthane en présence d'oxygène :

$$CH_4 + NH_3 + 3/2O_2 \rightarrow HCN + 3H_2O.$$

Parmi les cyanures, les plus importants sont le **cyanure de sodium,** NaCN, et le **cyanure de potassium,** KCN, utilisés dans les bains électrolytiques et dans la métallurgie de l'or et de l'argent.

Silicium

Après l'oxygène, le silicium est l'élément le plus abondant de l'écorce terrestre (26 %). Il entre dans la constitution de la majeure partie des roches. Le silicium existe dans la nature à l'état de *silice* SiO_2 plus ou moins pure *(quartz, calcédoine),* de *sables siliceux,* et à l'état combiné sous forme de *silicates, alumino-silicates,* etc.

On prépare le silicium en réduisant la silice, soit par le magnésium :

$$3SiO_2 + 2Mg \rightarrow Si + 2MgSiO_3,$$

soit par le carbure de calcium :

$$3SiO_2 + 2C_2Ca \rightarrow 3Si + 2CaO + 4CO.$$

On peut obtenir aussi un alliage riche en silicium (98 %), le ferrosilicium, en réduisant au four électrique la silice par du charbon :

$$SiO_2 + 2C \rightarrow Si + 2CO.$$

Enfin le silicium très pur utilisé dans la fabrication des transistors est préparé à partir de $SiCl_4$ ou de $SiHCl_3$ très pur que l'on réduit ensuite à l'hydrogène.

Le silicium est un élément très dur, peu fusible (1 414 °C), peu volatil (2 355 °C). Il peut se présenter sous forme d'une poudre brune amorphe ou sous forme cristalline. C'est un bon conducteur de l'électricité (sa résistance diminue lorsque la température augmente, ce qui est un comportement typique des éléments non métalliques, notamment du silicium et du carbone). Par chauffage à l'air, il brûle en donnant de la silice :

$$Si + O_2 \rightarrow SiO_2.$$

Cependant le silicium en blocs reste inaltéré à l'air, car il est protégé par une mince couche d'oxyde.

Le silicium se combine à froid avec le fluor et donne SiF_4, et à chaud il se combine avec les autres halogènes et l'azote. Il réagit avec HF pour donner de l'acide fluosilicique, H_2SiF_6, et de l'hydrogène. Avec les bases fortes, il forme des silicates et de l'hydrogène.

On utilise le silicium dans la préparation des **silicones** qui sont des polymères organosiliciés dont les chaînes macromoléculaires renferment des maillons du type :

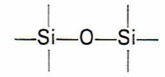

comme dans les silicates minéraux. On part en fait du triméthylchlorosilane qui est obtenu par action du chlorure de méthyle sur du silicium en poudre renfermant du cuivre. On peut aussi traiter le chlorure de silicium par un organomagnésien.

Les silicones peuvent exister sous forme de liquides, de graisses, d'élastomères ou de résines. La structure tridimensionnelle de ces dernières peut être représentée ainsi :

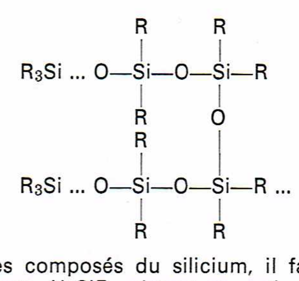

Parmi les composés du silicium, il faut citer l'**acide fluosilicique,** H_2SiF_6, obtenu par action de l'acide fluorhydrique sur la silice :

$$SiO_2 + 6HF \rightarrow H_2SiF_6 + 2H_2O.$$

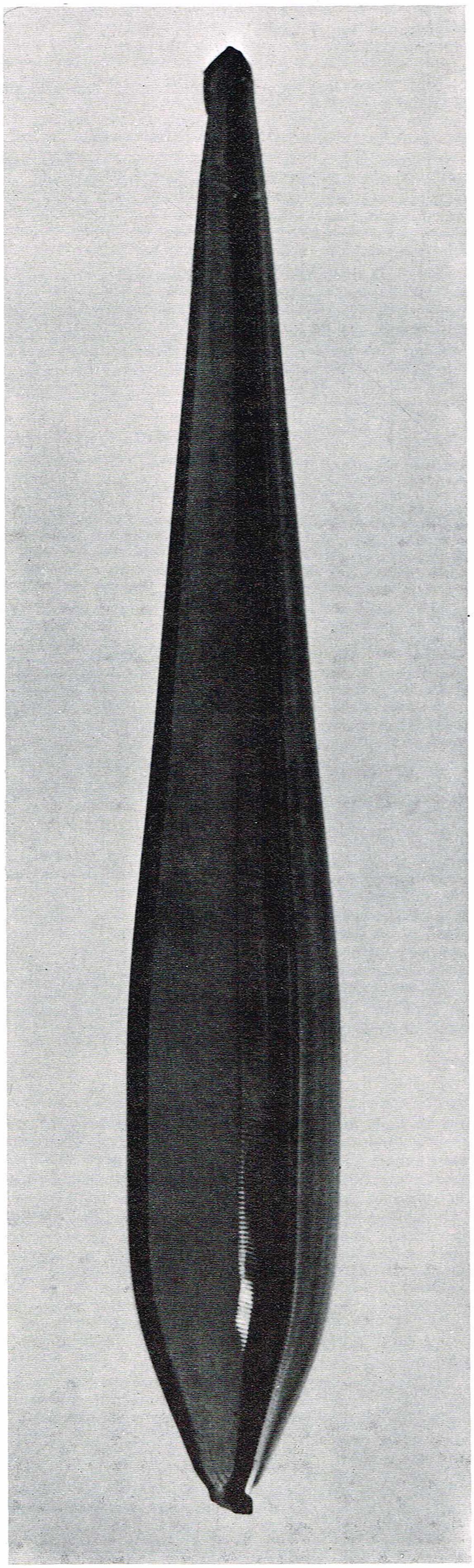

U.S.I.S.

▶ ***Un des cristaux*** **de silicones** ***les plus parfaits (environ une fois à une fois et demie sa taille normale), produit par les chercheurs de la General Electric Company à New York.***

(L'acide fluorhydrique est vendu en solution aqueuse à 30 % dans des récipients en matière plastique, car il attaque le verre. Ses sels sont toxiques et utilisés comme insecticides.)

Le **tétrachlorure de silicium,** $SiCl_4$, est obtenu par chauffage de la silice en présence de carbone dans un courant de chlore. Il réagit avec l'eau en donnant de la silice, SiO_2, et de l'acide chlorhydrique qui forme un écran de vapeurs très dense. Son principal usage est la fabrication des silicones. Il est utilisé dans l'armée comme écran de fumée protecteur.

Le principal composé oxygéné du silicium est la **silice** $(SiO_2)_x$. C'est un des plus importants composés du silicium dans la nature. Toutes les formes de silice sont constituées par des tétraèdres SiO_4 dans lesquels chacun des oxygènes est en commun avec le tétraèdre voisin. Il en résulte que la silice est une molécule géante dont la composition moyenne répond à la formule SiO_2. La silice existe sous trois formes cristallines : le *quartz,* la *tridymite* et la *cristobalite*. La silice est inerte vis-à-vis de la plupart des éléments non métalliques, des acides et des oxydes métalliques à la température ordinaire. Elle est attaquée par HF et donne SiF_4, et par les bases fortes ou les carbonates en formant des *silicates :*

$$SiO_2 + Na_2CO_3 \rightarrow Na_2SiO_3 + CO_2$$

utilisés dans la fabrication de verres et comme réfractaires.

Nombreux sont les acides qui peuvent théoriquement dériver de la silice (H_2SiO_3, H_4SiO_4, $H_6Si_2O_7$, etc.) ; dans la nature, il existe les sels correspondants : les **silicates.** Un composé gélatineux, $SiO_2 \cdot nH_2O$, se dépose à partir des solutions aqueuses de silicates solubles (de sodium et de potassium, par exemple autour des geysers). C'est un acide faible qui, déshydraté avec précautions, donne un solide appelé **gel de silice** ou **silica-gel,** et qui est très utilisé pour sa capacité d'adsorption des gaz. Certains silicates entrent dans la composition de produits de grande importance comme les verres, que l'on obtient à partir de silice, de soude, de potasse, de chaux, d'oxyde de plomb (et de nombreux autres composés lorsqu'il s'agit de fabriquer des verres spéciaux).

Les silicates peuvent être classés selon le mode d'enchaînement des motifs tétraédriques SiO_4. On distingue :

— les *nésosilicates*, de formule $(SiO_4)^-$, où les tétraèdres sont indépendants et isolés les uns des autres par des cations ;

— les *sorosilicates,* de formule $(Si_2O_7)^{6-}$;

— les *cyclosilicates,* dans lesquels les tétraèdres sont disposés en anneaux, chaque tétraèdre étant lié aux autres par deux de ses sommets ;

— les *inosilicates*, où les tétraèdres sont associés en chaînes simples ou en rubans ;

— les *phyllosilicates*, où les tétraèdres sont soudés les uns aux autres par trois de leurs sommets, de façon à former un réseau plan à maille hexagonale, de formule $(Si_4O_{10})^{4-}$; les micas, le talc, la kaolinite appartiennent à ce type de silicate ;

— les *tectosilicates,* où les tétraèdres sont soudés les uns aux autres par leurs quatre sommets ; c'est le type de structure de toutes les variétés de silice et des feldspaths où une partie du silicium est remplacée par de l'aluminium.

Les applications des silicates sont nombreuses. On les utilise comme réfractaires, comme ciments, dans la fabrication des verres ordinaires au sodium et des verres spéciaux au plomb ou à base de borosilicates (Pyrex). On les utilise aussi comme échangeurs d'ions et comme isolants thermiques (amiante).

Germanium

Les minerais de germanium sont très rares. On obtient le germanium comme sous-produit de l'extraction du zinc à partir de la *blende*. Le germanium utilisé comme semi-conducteur doit être très pur. Sa purification se fait par distillations successives de son chlorure $GeCl_4$.

C'est un élément présentant des caractères métalliques : il est brillant, dur et fragile. Il réagit avec l'oxygène au rouge. Le germanium est utilisé comme redresseur de courant, dans les transistors et dans les cellules photoélectriques.

Il peut prendre les degrés d'oxydation + 2 et + 4 et rappelle le silicium par ses propriétés chimiques.

Rhône-Poulenc, Service A.T.C.

▲ *Ci-dessus, fragments de* silicate de sodium.

▼▶ *Ci-dessous, poudre de* silica-gel *(ou* gel de silice*), acide dérivé du silicium, très utilisé pour sa capacité d'adsorption des gaz.*
A droite, les différents modes d'enchaînement des tétraèdres (SiO_4) dans les silicates.

A. Rizzi

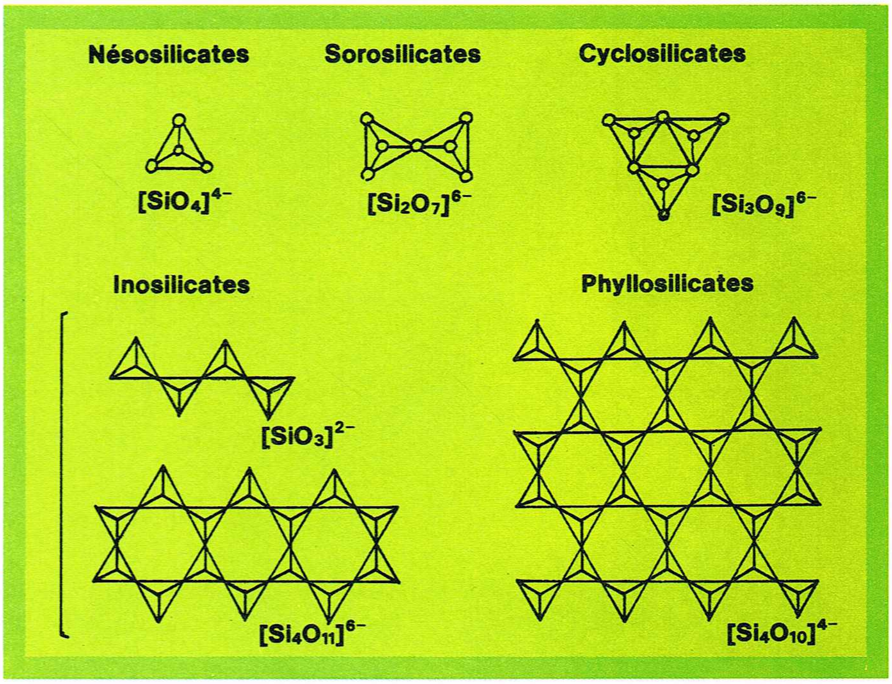

Richard Colin

Castano - Ciboldi

▲ *Étain à l'état natif; ce métal très malléable était utilisé dès le troisième millénaire avant J.-C. dans les alliages du type du bronze.*

▼ *Un des nombreux exemples d'utilisation de l'étain : le fer-blanc étamé qui sert dans la réalisation des boîtes de conserves.*

A. Rizzi

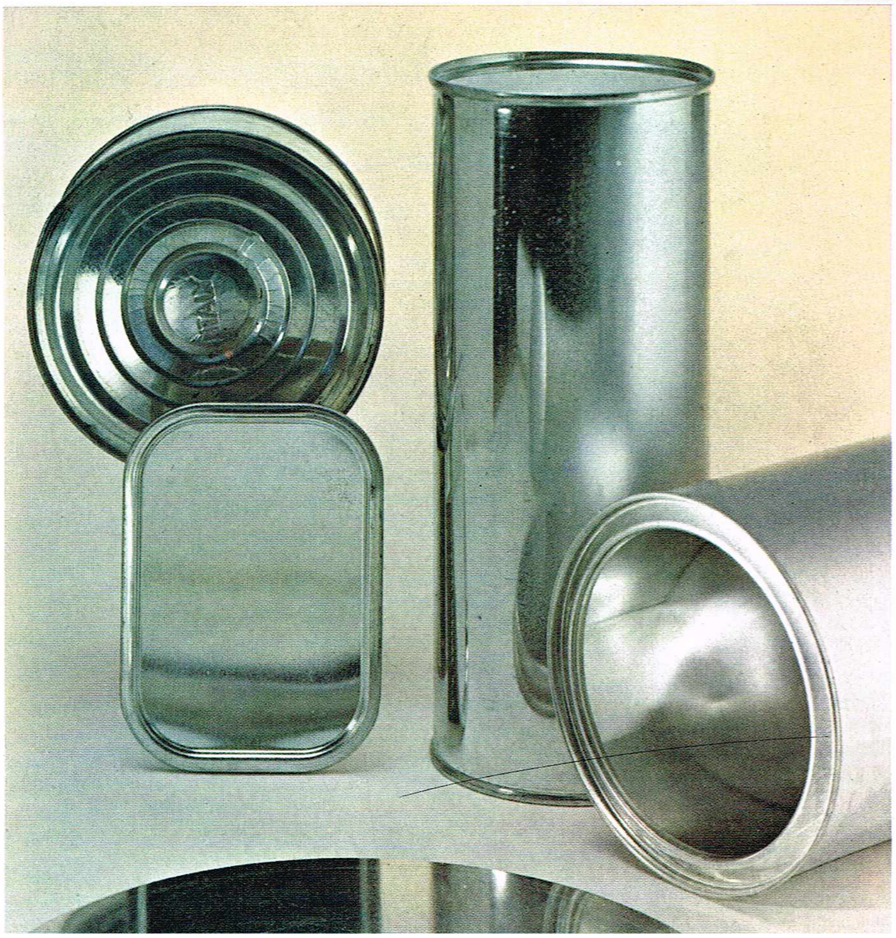

Il s'unit au chlore et à l'hydrogène. Avec ce dernier, il donne des **hydrures** volatils GeH_4, Ge_2H_6 et Ge_3H_8. L'**oxyde,** GeO_2, est amphotère; il donne avec les alcalins des **germanates,** et s'unit aux acides en donnant des **sels germaniques :**

$$GeO_2 + 4H^+ \rightarrow Ge^{4+} + 2H_2O.$$

Parmi les composés du germanium, il faut encore mentionner le **sulfure,** GeS_2, et certains composés organo-métalliques comme le **germanium tétraéthyle,** $Ge(C_2H_5)_4$.

Étain

L'étain fait la transition entre le germanium, dont le caractère métallique est très peu marqué, et le plomb, nettement métallique.

Peu répandu dans la nature, on le trouve le plus souvent sous la forme de son oxyde SnO_2, appelé *cassitérite.* Il était utilisé dès le troisième millénaire avant J.-C. dans les alliages du type du bronze.

Il présente trois formes allotropiques : l'*étain ordinaire* ou *étain blanc* cristallisé dans le système quadratique, entre 13 et 160 °C; l'*étain blanc* dont les cristaux sont orthorhombiques de 161 à 232 °C; à basse température, l'étain a la structure du diamant, c'est l'*étain gris.*

Il fond à 231,8 °C et bout à 2 362 °C. C'est un métal blanc argenté, mou, ductile, de faible résistance à la traction, facile à laminer. A la température ordinaire, il est inaltérable à l'air et permet de protéger les métaux sur lesquels il est déposé. Par contre, à chaud, il s'unit aux halogènes, à l'oxygène, au soufre et au phosphore.

C'est un composé amphotère; il réagit avec les acides pour former des sels, par exemple avec l'acide chlorhydrique :

$$Sn + 2HCl \rightarrow SnCl_2 + H_2$$

et avec les bases à chaud pour donner des **stannites :**

$$Sn + 2NaOH + 2H_2O \rightarrow Na_2Sn(OH)_4 + H_2.$$

L'extraction métallurgique de l'étain se fait par réduction thermique de la cassitérite en présence de carbone :

$$SnO_2 + 2C \rightarrow Sn + 2CO.$$

Le métal brut est raffiné par *liquidation;* cette opération consiste à refondre les lingots à + 260 °C sur des soles inclinées en acier; l'étain s'écoule lentement en abandonnant des épines riches en fer qui sont renvoyées au four de réduction.

La principale utilisation de l'étain est la fabrication de fer-blanc, soit par étamage électrolytique, soit en plongeant les tôles d'acier dans l'étain fondu. On l'utilise aussi dans de nombreux alliages : par exemple de cuivre, pour obtenir les bronzes, ou de plomb pour la soudure, ou encore dans les alliages antifriction.

Parmi les composés de l'étain, on distingue les dérivés de l'étain au degré d'oxydation + 2 *(composés stanneux)* de ceux qui correspondent au degré d'oxydation + 4 *(composés stanniques).*

Dans le groupe des *composés stanneux,* on peut citer l'**hydroxyde,** $Sn(OH)_2$, peu soluble dans l'eau et qui, avec les alcalis, donne des **stannites :**

$$Sn(OH)_2 + 2NaOH \rightarrow Na_2Sn(OH)_4$$

qui ont tendance à se transformer en **stannates :**

$$Na_2Sn(OH)_4 + 2H_2O \rightarrow Na_2Sn(OH)_6 + H_2$$

$$2Na_2Sn(OH)_4 \rightarrow Sn + Na_2Sn(OH)_6 + 2NaOH.$$

Le **chlorure stanneux,** $SnCl_2$, réducteur énergique, n'est stable qu'en présence d'étain métallique. Le **sulfure,** SnS, brun, est peu soluble.

Parmi les *composés stanniques,* on notera l'**oxyde,** SnO_2, utilisé dans les verres, et dont dérive l'**acide stannique,** H_2SnO_3. On connaît aussi l'**acide orthostannique,** $Sn(OH)_4$. Le **stannate de sodium,** $Na_2Sn(OH)_6$, est utilisé dans l'industrie des colorants. Le **sulfure,** SnS_2, jaune, peu soluble dans les acides, a été utilisé comme pigment. Le composé le plus important de l'étain est certainement le **chlorure stannique,** $SnCl_4$, point de départ de la synthèse des composés organostanniques. Certains d'entre eux comme le maléate ou le dilaurate de dibutyl-étain sont utilisés pour augmenter la stabilité du polychlorure de vinyle à la

lumière et à la chaleur. D'autres composés organiques de l'étain sont utilisés comme fongicides.

Plomb

Connu et utilisé depuis la plus haute antiquité, le plomb est un élément relativement abondant dans l'écorce terrestre où on le trouve dans des gisements relativement concentrés. La majorité du plomb que l'on trouve dans la nature est sous forme de *sulfure* et son principal minerai est la *galène*, PbS. Souvent, le zinc et d'autres éléments plus rares comme le cuivre, l'or et l'argent accompagnent le plomb dans ses minerais.

On peut obtenir le plomb par grillage d'une partie de son sulfure, le sulfure restant servant à réduire l'oxyde formé :

$$2PbS + 3O_2 \rightarrow 2PbO + 2SO_2$$

$$2PbO + PbS \xrightarrow{800\ °C} 3Pb + SO_2.$$

Mais plus fréquemment on opère le grillage et la réduction en présence de silice et de chaux. Il se produit les réactions suivantes :

$$2PbS + 3O_2 \rightarrow 2PbO + 2SO_2$$

$$PbS + 2O_2 \rightarrow PbSO_4$$

$$2PbSO_4 + 2SiO_2 \rightarrow 2PbSiO_3 + 2SO_2 + O_2$$

$$2C + O_2 \rightarrow 2CO$$

$$PbO + CO \rightarrow Pb + CO_2$$

$$PbSiO_3 + CaO + CO \rightarrow Pb + CaSiO_3 + CO_2.$$

On peut purifier le plomb, comme l'étain, par fusion partielle ou par électrolyse du fluoroborate de plomb, $Pb(BF_4)_2$.

Le plomb est un métal mou, gris bleuté, malléable, assez mauvais conducteur de l'électricité. C'est, parmi les métaux d'usage courant, celui qui résiste le mieux à la corrosion. Il s'oxyde rapidement à l'air, mais le revêtement d'oxyde adhère bien au métal et le protège de toute oxydation ultérieure. Dans ses composés il existe aux degrés d'oxydation II et IV. Il est relativement insoluble dans les acides chlorhydrique et sulfurique, mais se dissout lentement dans l'acide nitrique. C'est un métal dont l'oxyde est amphotère. Il donne de nombreux composés minéraux et organiques.

Le plomb et ses composés sont toxiques et provoquent des malaises plus ou moins graves, connus sous le nom de *saturnisme*. Le plomb est utile dans les installations nucléaires, car il forme un écran contre les rayons γ. La toxicité du plomb ne pose pas de problème en ce qui concerne son emploi dans les canalisations d'eau potable, car celle-ci renferme toujours de l'anhydride carbonique, qui provoque la formation rapide en surface d'une couche protectrice de carbonate basique insoluble.

On connaît trois *oxydes de plomb* : la litharge, le minium et le bioxyde.

La **litharge**, jaune, de formule PbO, est la forme cristalline orthorhombique qui existe à basse température sous forme quadratique de couleur rouge. Cet oxyde a des propriétés basiques et se forme directement par action de l'oxygène sur le plomb. Il se dissout à froid dans les bases alcalines. On l'utilise dans l'industrie du verre, des émaux et comme produit de base pour fabriquer d'autres composés du plomb.

L'oxyde, Pb_3O_4, est rouge; on l'obtient en chauffant entre 350 et 500 °C le monoxyde PbO dans un four sous courant d'air. C'est un oxyde salin connu sous le nom de **minium**, utilisé dans les revêtements antirouille et dans certains mastics.

Le **bioxyde**, PbO_2, peut se préparer par action directe de l'oxygène sur le minium. On le prépare industriellement en oxydant du plomb granulé dans l'acétate de plomb en solution au moyen d'air. L'acétate basique de plomb obtenu est traité par l'anhydride carbonique, et, une fois l'oxyde de plomb précipité, l'acétate de plomb régénéré est réutilisé. La production de bioxyde de plomb a beaucoup diminué au cours des dernières années, en raison de la concurrence d'autres pigments blancs comme les oxydes de titane et de zinc. Le bioxyde de plomb se comporte comme un anhydride d'acide; il est soluble dans les alcalis et forme des *plombates*, $K_2Pb(OH)_6$.

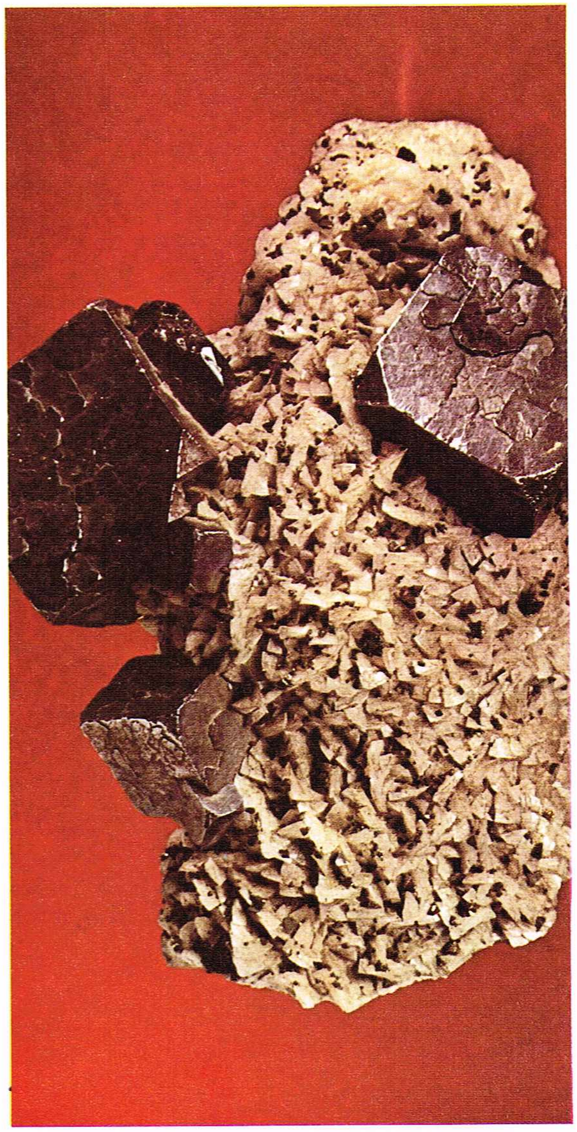

◀ *Le principal minerai de plomb est la* **galène** *ou* **sulfure de plomb :** *ici des cristaux de galène sur de la dolomie.*

H. Chaumeton - Jacana

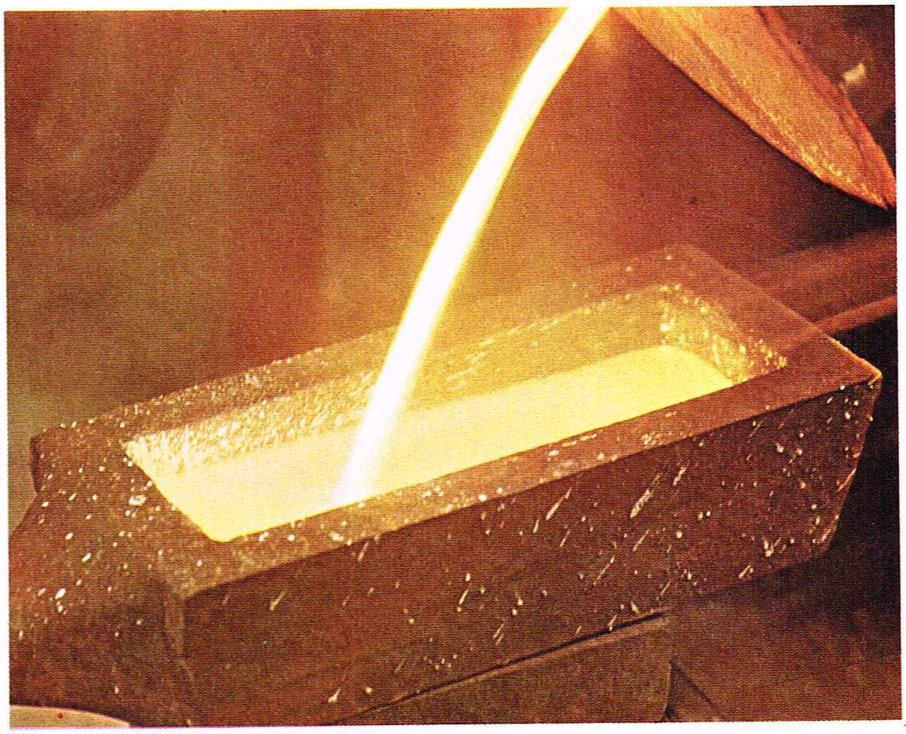

▼ *Une des phases de la métallurgie du plomb : après le grillage du minerai, la fusion et la réduction s'effectuent dans un four à water-jacket ; le plomb s'écoule dans une cuve, puis est soumis à l'affinage.*

Peñarroya

▶ *Page ci-contre, cristaux de* vanadinite, *un des minerais du* vanadium ; *le vanadium entre dans la composition de l'acier, qu'il rend ainsi plus résistant.*

Les sels de plomb les plus importants correspondent au degré d'oxydation + 2, qui est le plus stable. Les **halogénures,** $PbCl_2$, PbI_2 et $PbBr_2$, sont tous peu solubles. Le **sulfate,** $PbSO_4$, est peu soluble dans l'eau mais légèrement soluble dans l'acide sulfurique concentré avec formation de $Pb(HSO_4)_2$. Les **silicates de plomb** entrent dans la composition de certains verres. Le **chromate de plomb,** $PbCrO_4$, est utilisé comme pigment jaune résistant à l'oxydation.

Le **carbonate de plomb,** $PbCO_3$, a une certaine importance sous forme de carbonate basique :

$$2PbCO_3 \cdot Pb(OH)_2$$

qui constitue la *céruse,* pigment blanc utilisé dans les peintures. On l'obtient facilement en faisant passer des vapeurs d'acide acétique, de l'air et de l'anhydride carbonique sur du plomb :

$$2Pb + 4CH_3COOH + O_2 \rightarrow 2Pb(CH_3COO)_2 + 2H_2O$$

$$Pb(CH_3COO)_2 + H_2O \rightarrow Pb(OH)(CH_3COO) + CH_3COOH$$

$$6Pb(OH)(CH_3COO) + 2CO_2 \rightarrow 2PbCO_3 \cdot Pb(OH)_2 + 3Pb(CH_3COO)_2 + 2H_2O.$$

Le **sulfure,** PbS, noir, est insoluble dans les acides concentrés; il se dissout seulement en présence d'un oxydant puissant susceptible de le transformer en sulfate.

Les composés organométalliques du plomb, et principalement le **plomb tétraméthyle,** $Pb(CH_3)_4$ et le **plomb tétraéthyle,** $Pb(C_2H_5)_4$, constituent, après les batteries d'accumulateurs, le deuxième débouché économique du plomb. On les prépare par action du chlorure d'éthyle (ou de méthyle) sur l'alliage plomb-sodium. Ils sont utilisés comme agents antidétonants dans les essences. Parmi les autres composés organiques du plomb, les sels de plomb des acides organiques sont utilisés comme siccatifs pour les peintures, et les savons de plomb (qui sont des sels d'acides gras à longue chaîne) entrent dans la composition de certaines graisses lubrifiantes.

Groupe VA

Le vanadium (V), le niobium (Nb) et le tantale (Ta) forment le groupe VA. Ce sont des métaux de couleur gris acier qui fondent à température élevée. Le plus abondant, le plus diffusé et celui qui a la plus grande importance pratique est le vanadium qui, au degré d'oxydation + 5, présente des analogies avec le phosphore. Ces éléments ont généralement le degré d'oxydation + 5, typique de ce groupe, mais ils présentent aussi des composés à degré d'oxydation inférieur (tendance qui diminue avec l'augmentation de la masse atomique). Le rayon atomique du niobium est pratiquement identique à celui du tantale. Les deux éléments sont très proches l'un de l'autre et leurs composés présentent des analogies notables.

▼ *Tableau des propriétés des éléments* du groupe VA.

Eléments du groupe VA

Propriétés	Vanadium	Niobium	Tantale
Numéro atomique	23	41	73
Masse atomique	50,95	92,91	180,95
Rayon atomique (en Å)	1,23	1,34	1,34
Configuration électronique	$3d^3 4s^2$	$4d^4 5s^1$	$4f^{14} 5d^3 6s^2$
Densité	6,1	8,4	16,6
Point de fusion (en °C)	1715	2400	3010
Point d'ébullition (en °C)	≃ 3500	3300	≃ 5425

Vanadium

Les minerais de vanadium sont la *vanadinite,* $3Pb_3(VO_4)_2 \cdot PbCl_2$, la *patronite,* VS_4, et la *carnotite, vanadate d'uranyle et de potassium.* On trouve aussi le vanadium dans les cendres de certains végétaux, dans les bitumes et dans les pétroles.

On obtient le métal par réduction de l'oxyde par le calcium (en présence de chlorure de calcium pour fluidifier les scories), l'oxyde résultant du grillage du sulfure :

$$V_2O_5 + 5Ca + 5CaCl_2 \rightarrow 2V + 5CaO \cdot CaCl_2.$$

Le vanadium brut peut être raffiné par réduction de son chlorure par l'hydrogène.

Le métal pur fond à 1 715 °C et possède d'excellentes caractéristiques mécaniques, mais de petites quantités d'impuretés (oxygène, azote, hydrogène) le rendent dur et cassant. On l'utilise en alliage avec l'acier, qu'il rend plus dur et plus résistant.

Le principal composé est le **pentoxyde** ou **anhydride vanadique,** V_2O_5; c'est un solide rouge-brun qui se dissout dans l'eau avec une réaction acide. En fonction du pH de la solution, il se forme différents **acides vanadiques** : en solution fortement alcaline, il se forme l'**orthovanadate** ($Na_3VO_4 \cdot H_2O$), puis, vers pH = 9, le **métavanadate,** $NaVO_3$. L'addition de NH_4Cl à une solution d'orthovanadate de sodium donne un précipité de métavanadate d'ammonium NH_4VO_3 à partir duquel on prépare V_2O_5. L'anhydride vanadique est un catalyseur important dans de nombreuses synthèses organiques et dans l'oxydation de SO_2.

Le vanadium peut présenter en outre les degrés d'oxydation + 4, + 3 et + 2 caractérisés par des colorations intenses.

Niobium

Le niobium et le tantale, relativement rares, sont presque toujours associés dans leur minerai qui est un niobiotantalate complexe : $Fe[(Nb, Ta)O_3]_2$, dans lequel le fer peut être en partie remplacé par le manganèse.

On obtient le métal à partir de son pentoxyde Nb_2O_5 par aluminothermie, ou en réduisant le chlorure $NbCl_5$ par l'hydrogène. Pur, c'est un métal blanc-gris, brillant, de dureté moyenne, ayant de bonnes propriétés mécaniques mais assez peu ductile. Il est stable à l'air à la température ordinaire. On l'utilise généralement pour améliorer certaines propriétés des aciers (en particulier pour les outils de coupe). Il résiste à tous les acides, sauf l'acide fluorhydrique qui l'attaque lentement. Par contre, s'il résiste aux solutions alcalines, il est attaqué par la soude et la potasse fondues. A chaud, il brûle dans le chlore gazeux en formant le pentachlorure. Il réagit avec le soufre.

Ses composés les plus importants correspondent au degré d'oxydation + 5 (mais on connaît aussi des composés aux degrés d'oxydation + 4, + 3 et + 2). Parmi ceux-ci, il faut citer l'**orthoniobate,** Na_3NbO_4, le **métaniobate,** $NaNbO_3$, le **pentachlorure** et le **pentafluorure.**

Tantale

Le tantale s'extrait de son minerai, la *tantalite,* par fusion avec $KHSO_4$. Le produit obtenu est traité à l'eau puis à l'acide fluorhydrique et il se forme le fluorotantalate de potassium K_2TaF_7 que l'on peut séparer du sel de niobium $K_2(NbOF_5) \cdot H_2O$ peu soluble. Le fluorotantalate de potassium traité par du sodium métallique fournit le tantale :

$$K_2TaF_7 + 5Na \rightarrow Ta + 2KF + 5NaF.$$

Cet élément est gris comme le platine, dur mais ductile, très résistant aux agents chimiques; on l'utilise donc pour la fabrication de certains instruments chirurgicaux et comme filament pour les ampoules électriques. Dans certains cas, il peut se substituer au platine. A haute température, à l'air, il s'oxyde et brûle en formant le pentoxyde, Ta_2O_5. Le tantale métallique est utilisé dans certains aciers spéciaux et, pour sa résistance aux agents chimiques, dans certains appareillages employés dans l'industrie chimique.

Les principaux composés du tantale correspondent au degré d'oxydation + 5 (il faut cependant noter les **chlorures** $TaCl_4$ et $TaCl_3$). On notera le **pentoxyde,**

H. Chaumeton - Jacana

▶ *Usine de fabrication de l'ammoniac : principal composé hydrogéné de l'azote, l'ammoniac est un gaz facilement liquéfiable, dont l'évaporation produit un froid intense, d'où son utilisation dans les installations frigorifiques.*

Montecatini - Edison

soluble seulement dans l'acide fluorhydrique, le **tantalate,** TaO_4Na_3, et les **halogénures** de formule générale TaX_5.

Il faut enfin citer les deux **carbures,** TaC et Ta_2C, très durs et utilisés dans certains aciers spéciaux pour l'outillage.

Groupe VB

L'azote (N), le phosphore (P), l'arsenic (As), l'antimoine (Sb) et le bismuth (Bi), sont tous des éléments importants et très étudiés qui constituent le groupe VB de la classification périodique. Le degré d'oxydation + 5, caractéristique de ce groupe, voit son importance diminuer lorsque la masse atomique augmente. A ce degré d'oxydation correspondent des anhydrides qui donnent naissance à des acides dont la force décroît lorsque la masse atomique augmente. L'importance et la stabilité du degré d'oxydation + 3 vont en sens inverse de la masse moléculaire, et les oxydes correspondants ont des caractères acides qui diminuent lorsque croît la masse moléculaire pour disparaître complètement avec le bismuth. Cela signifie que le comportement non métallique diminue lorsque la masse atomique augmente. On peut donc considérer comme typiquement non métalliques l'azote et le phosphore, comme semi-métalliques (ou métalloïdiques) l'arsenic et l'antimoine, et comme métallique, le bismuth.

Les plus importants sont certainement l'azote et le phosphore, éléments essentiels pour la vie des animaux et des végétaux, et dont les nombreux composés ont des applications importantes.

Azote

L'azote constitue à l'état libre les 4/5 de l'air que nous respirons. L'unique minerai d'où l'on puisse l'extraire est le *nitrate de sodium,* $NaNO_3$, dont il existe des gisements importants au Chili. On le trouve aussi largement répandu dans les composés protéiques de la matière vivante.

Pour préparer l'azote, si l'on ne désire pas qu'il soit débarrassé des gaz rares de l'air on peut éliminer l'oxygène de l'air soit en le combinant à un métal comme le cuivre :

$$2Cu + O_2 + 4N_2 \rightarrow 2CuO + 4N_2$$

ou au carbone :

$$C + O_2 + 4N_2 \rightarrow CO_2 + 4N_2$$

soit par distillation de l'air après liquéfaction.

Si l'on désire de l'azote pur, on peut l'obtenir par décomposition du nitrite d'ammonium :

$$NH_4NO_2 \rightarrow N_2 + 2H_2O.$$

L'azote est un gaz inodore, incolore, difficilement liquéfiable et peu soluble dans l'eau. La stabilité de la molécule biatomique N_2 rend l'azote très peu réactif et on l'utilise comme gaz inerte dans de nombreuses réactions chimiques. A l'état liquide, il est utilisé comme source de froid. Il entre dans des synthèses industrielles de grande importance comme celles de l'ammoniac, de l'acide nitrique, de l'urée et de la cyanamide calcique. Malgré sa faible réactivité, l'azote, dans certains cas, à la température ordinaire ou plus facilement à chaud, réagit directement avec les éléments pour former des nitrures. La plupart de ceux-ci réagissent avec l'eau en libérant de l'ammoniac :

$$Mg_3N_2 + 6H_2O \rightarrow 3Mg(OH)_2 + 2NH_3.$$

Les composés de l'azote avec l'hydrogène

Le principal composé est certainement l'**ammoniac,** NH_3, que l'on obtient industriellement, directement par action de l'azote sur l'hydrogène :

$$N_2 + 3H_2 \rightleftharpoons 2NH_3.$$

Il s'agit d'une réaction exothermique avec diminution d'entropie, favorisée par une pression élevée et une température basse. Elle est catalysée par des oxydes de fer (Fe_3O_4) activés par des oxydes alcalins (CaO, MgO, Al_2O_3, K_2O, etc.). Les procédés industriels actuels utilisent des pressions de 250 à 300 bars et des températures de l'ordre de 500 °C. L'ammoniac est utilisé pour la plus grande partie dans l'industrie des engrais, dans la synthèse de l'urée et du phosphate d'ammonium et dans la préparation de composés organiques azotés (acrylonitrile, amines, etc.).

On peut aussi préparer l'ammoniac par hydrolyse de certains nitrures métalliques :

$$AlN + 3H_2O \rightarrow Al(OH)_3 + NH_3$$

et de la cyanamide calcique :

$$CaCN_2 + 3H_2O \rightarrow 2NH_3 + CaCO_3$$

mais ces modes de préparation ne sont plus utilisés dans l'industrie.

L'ammoniac est un gaz à odeur caractéristique, irritant, facilement liquéfiable. En raison de la polarité de sa molécule, l'ammoniac est un excellent solvant de différents sels minéraux. Il se dissout facilement dans l'eau, à laquelle il confère une réaction basique en raison des équilibres suivants :

$$NH_3 + H_2O \rightleftharpoons NH_4OH$$

$$NH_4OH \rightleftharpoons NH_4^+ + OH^-.$$

Par évaporation, l'ammoniac produit un froid intense, d'où son emploi dans les appareils frigorifiques.

Eléments du groupe VB					
Propriétés	**Azote**	**Phosphore**	**Arsenic**	**Antimoine**	**Bismuth**
Numéro atomique	7	15	33	51	83
Masse atomique	14,008	30,975	74,91	121,76	209,00
Rayon atomique (en Å)	0,74	1,10	1,21	1,41	1,52
Configuration électronique	$1s^2 2s^2 2p^2$	$3s^2 3p^3$	$3d^{10} 4s^2 4p^3$	$4d^{10} 5s^2 5p^3$	$4f^{14} 5d^{10} 6s^2 6p^3$
Densité	0,81	1,85 (blanc)	5,73	6,70	9,80
Point de fusion (en °C)	− 210	44,1 (blanc)	816,5	630	271
Point d'ébullition (en °C)	− 195,8	280 (blanc)	633	1640	1560

◀ *Tableau des propriétés des éléments du* groupe VB.

▶ ***Le sulfate d'ammonium est l'engrais ammoniacal le plus anciennement utilisé : il fournit aux plantes le complément d'azote nécessaire à leur bonne croissance.***

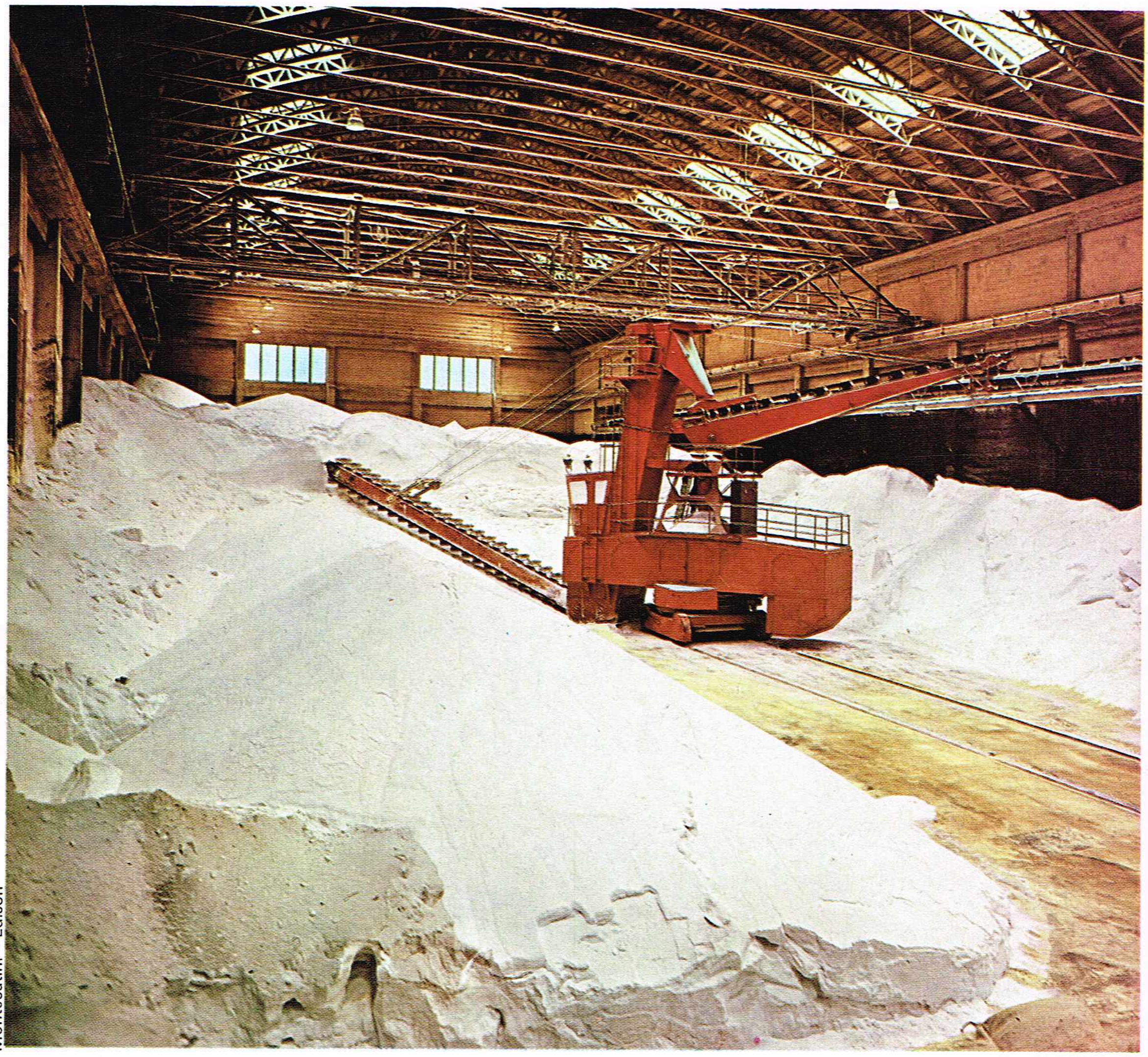
Montecatini - Edison

L'ammoniac, par ses propriétés physiques et chimiques, a beaucoup d'analogies avec l'eau : chaleur de fusion et chaleur massique anormalement élevées, formation de liaisons hydrogène, réaction avec les métaux, etc.

L'ammoniac gazeux brûle dans l'oxygène (réaction explosive entre certains rapports des concentrations), mais, en présence de catalyseurs appropriés, on peut l'oxyder à l'air avec formation d'oxyde d'azote qui sert ensuite à la fabrication de l'acide nitrique. Enfin, il réagit facilement avec les halogènes.

L'**hydroxyde d'ammonium,** ou **ammoniaque,** donne de nombreux sels par réaction avec les acides. Ces sels d'ammonium ont un comportement assez similaire à celui des sels de potassium, comme pouvaient le laisser prévoir les rayons ioniques presque identiques de l'ammonium et du potassium.

Le **chlorure d'ammonium,** NH_4Cl, sous-produit du procédé Solvay, est utilisé dans de nombreuses synthèses. Le **nitrate** et le **sulfate d'ammonium,** NH_4NO_3 et $(NH_4)_2\,SO_4$, sont très utilisés comme engrais, et le nitrate d'ammonium entre dans la fabrication de certains explosifs. On citera encore le **carbonate d'ammonium,** $(NH_4)_2\,CO_3$, le **bicarbonate,** NH_4HCO_3, et le **sulfure,** $(NH_4)_2\,S$.

En substituant les atomes d'hydrogène de l'ammoniac par des groupes alkyle, on obtient des **amines,** par exemple l'**éthylamine** (CH_3—CH_2—NH_2), la **diéthylamine** $(CH_3—CH_2)_2\,NH$, la **triéthylamine** $(CH_3—CH_2)_3\,N$. La basicité de ces composés organiques est supérieure à celle de l'ammoniac.

Par substitution de l'hydrogène par des métaux, on obtient des **amidures,** par exemple l'**amidure de sodium,** $NaNH_2$:

$$2Na + 2NH_3 \rightarrow 2NaNH_2 + H_2$$

qui est utilisé dans les synthèses minérales et organiques.

Un autre composé hydrogéné de l'azote ayant une certaine importance est l'**hydrazine,** N_2H_4, que l'on prépare par oxydation de l'ammoniac par le chlore en solution alcaline :

$$NH_3 + NaOCl \rightarrow NH_2Cl + NaOH$$

$$NH_2Cl + 2NH_3 \rightarrow NH_2—NH_2 + NH_4Cl.$$

C'est un liquide qui peut se combiner à l'eau en donnant l'**hydrate d'hydrazonium** $[NH_2—NH_3]\,OH$, qui est une base faible et qui se combine aux acides pour donner les sels d'hydrazonium. C'est un réducteur énergique qui s'oxyde à l'air et que l'on utilise comme carburant pour les fusées.

L'**hydroxylamine,** NH_2OH, est un composé utilisé en chimie organique pour former des oximes avec les aldéhydes et les cétones. C'est un solide qui se dissout dans l'eau en lui conférant une forte réaction alcaline. Il se décompose à chaud avec une réaction explosive. En solution aqueuse, on peut l'obtenir en neutralisant par $Ba\,(OH)_2$ le sulfate d'hydroxylamine obtenu par action de l'acide sulfurique sur le nitrométhane :

$$CH_3NO_2 + H_2SO_4 \rightarrow (NH_3OH)\,HSO_4 + CO$$

$$(NH_3OH)HSO_4 + Ba\,(OH)_2 \rightarrow NH_2OH + BaSO_4 + 2H_2O.$$

L'**acide azothydrique,** HN_3, peut s'obtenir par action de l'acide nitreux sur l'hydrazine :

$$H_2N—NH_2 + HNO_2 \rightarrow HN_3 + 2H_2O.$$

C'est un liquide d'odeur pénétrante, très explosif. Il se comporte comme un acide faible et ses sels avec les métaux lourds sont utilisés comme agents détonants.

Les composés avec les halogènes

Ils répondent à la formule générale NX_3. Le fluorure est gazeux, le chlorure liquide et l'iodure solide. Ils sont tous explosifs.

Les composés oxygénés de l'azote

Ils ont une grande importance industrielle pour certains d'entre eux. Il existe cinq oxydes d'azote correspondant aux cinq degrés d'oxydation : + 1, + 2, + 3, + 4 et + 5, et qui sont respectivement : le *protoxyde d'azote,* N_2O, l'*oxyde,* NO, le *trioxyde (anhydride nitreux),* N_2O_3, le *bioxyde,* NO_2 et le *pentoxyde (anhydride nitrique),* N_2O_5. Les deux premiers ne réagissent pas avec l'eau pour donner des acides, les autres donnent des acides dont la force augmente avec le degré d'oxydation de l'azote.

Le **protoxyde d'azote,** N_2O, peut être obtenu par chauffage du nitrate d'ammonium :

$$NH_4NO_3 \rightarrow N_2O + 2H_2O.$$

C'est un gaz incolore, inodore, soluble dans l'eau et l'alcool, explosif en mélange avec l'hydrogène. Inhalé, il agit comme un narcotique, et il est utilisé comme anesthésique. Il lui correspond théoriquement l'**acide hyponitreux,** $H_2N_2O_2$, solide, explosif, mais qui ne se forme pas par action directe de l'eau sur l'oxyde. Les sels de cet acide sont fabriqués par réduction énergique des nitrites; ils peuvent être neutres ou posséder un atome d'hydrogène (sels acides).

L'**oxyde (monoxyde) d'azote,** NO, est le principal produit de la réduction des acides nitreux et nitrique :

$$3Cu + 8HNO_3 \rightarrow 3Cu(NO_3)_2 + 2NO + 4H_2O.$$

On l'obtient industriellement en oxydant l'ammoniac à l'air, à 600 °C, en présence de catalyseur au platine-rhodium :

$$4NH_3 + 5O_2 \rightarrow 4NO + 6H_2O.$$

C'est un gaz incolore, soluble dans l'eau et dans les solutions de sulfate ferreux où il se forme un complexe du fer, ($FeNOSO_4$). Il se combine très rapidement à l'oxygène de l'air pour donner l'oxyde NO_2, de couleur rouge (vapeurs rousses). Il peut être réduit par l'hydrogène en présence de catalyseur pour fournir l'ammoniac et l'hydroxylamine. C'est l'anhydride d'un acide hypothétique de formule $H_2N_2O_3$, mais qui n'a jamais été isolé.

Le **trioxyde (sesquioxyde) d'azote** ou **anhydride nitreux,** N_2O_3, est un gaz qui se forme dans la fabrication industrielle de l'acide nitrique et qui provient de la réaction du monoxyde sur le bioxyde :

$$NO + NO_2 \rightarrow N_2O_3.$$

Au laboratoire, le mélange $NO + NO_2$ peut être obtenu par action de l'acide nitrique sur l'anhydride arsénieux.

Le sesquioxyde d'azote est un liquide bleu indigo, bouillant à + 3 °C, donc gazeux à la température ordinaire. Il est très instable et se décompose aisément en monoxyde d'azote et en bioxyde d'azote. Par réaction avec l'eau, à froid, il donne l'acide nitreux :

$$N_2O_3 + H_2O \rightarrow 2HNO_2.$$

Cet acide n'existe qu'en solution très diluée et tend à se décomposer en acide nitrique et oxyde d'azote :

$$3HNO_2 \rightarrow HNO_3 + H_2O + 2NO.$$

Par contre, ses sels, les **nitrites,** sont stables, et les nitrites alcalins sont obtenus par action d'un mélange équimoléculaire de $NO + NO_2$ sur une solution de carbonate; ainsi :

$$NO + NO_2 + Na_2CO_3 \rightarrow 2NaNO_2 + CO_2.$$

Parmi les nitrites, tous solubles dans l'eau, sauf le nitrite d'argent, le plus important est probablement le **nitrite de sodium,** $NaNO_2$, employé pour la synthèse des colorants azoïques. Les nitrites peuvent se comporter soit comme oxydants, soit comme réducteurs. Par réaction avec l'acide sulfurique dilué, les nitrites dégagent du bioxyde d'azote et du monoxyde d'azote.

Le cation nitrosyle NO^+ présent dans la structure de la molécule d'acide nitreux peut se trouver en combinaison avec des anions comme le **chlorure,** NOCl, le **sulfate,** NO (HSO_4), et le **perchlorate,** NO (ClO_4).

Le **bioxyde d'azote** ou **peroxyde d'azote,** NO_2, est un liquide incolore, bouillant à 21 °C. Par chauffage entre sa température d'ébullition et 150 °C, il se dimérise en tétroxyde, N_2O_4 :

$$2NO_2 \rightleftharpoons N_2O_4.$$

Le bioxyde et le tétroxyde d'azote existent en équilibre et peuvent être obtenus par action de l'oxygène sur le monoxyde d'azote :

$$2NO + O_2 \rightarrow 2NO_2$$

ou par chauffage du nitrate de plomb :

$$Pb(NO_3)_2 \rightarrow PbO + 2NO_2 + \tfrac{1}{2}O_2.$$

La coloration brune que prend le mélange gazeux, $NO_2 + N_2O_4$, dépend de la quantité de N_2O_4 qu'il renferme. En effet, NO_2 est coloré, alors que N_2O_4 est incolore.

En présence d'eau, le bioxyde d'azote donne une solution acide constituée par un mélange d'acides nitreux et nitrique :

$$2NO_2 + H_2O \rightarrow HNO_2 + HNO_3.$$

Le bioxyde d'azote est un oxydant; par exemple, il peut oxyder l'hydrogène sulfuré en soufre :

$$H_2S + NO_2 \rightarrow NO + H_2O + S.$$

L'anhydride nitrique ou **pentoxyde d'azote,** N_2O_5, est obtenu au laboratoire par distillation d'acide nitrique fumant sur un déshydratant énergique comme P_2O_5. C'est un solide cristallin incolore, facilement décomposable :

$$N_2O_5 \rightarrow N_2O_4 + 1/2\ O_2$$

Il explose par chauffage. C'est un oxydant énergique et qui, avec l'eau, forme l'acide nitrique (réaction exothermique) :

$$N_2O_5 + H_2O \rightarrow 2NO_3H.$$

Rhône-Poulenc. Service A.T.C.

▲ ***Atelier de production de l'acide nitrique à l'usine Rhône-Poulenc de Rouen-Grand-Quevilly.***

L'**acide nitrique** est le plus important des acides renfermant de l'azote, et c'est un des acides minéraux les plus utilisés. Pendant un temps, la seule source d'acide nitrique était constituée par les nitrates que l'on trouve en abondance au Chili. Ces nitrates étaient traités par l'acide sulfurique :

$$NO_3Na + H_2SO_4 \rightarrow HNO_3 + NaHSO_4.$$

La difficulté d'importer les nitrates du Chili en période de guerre a incité l'industrie à réaliser la synthèse de l'acide nitrique à partir de l'azote et de l'oxygène de l'air. L'acide nitrique a en effet une importance très grande dans la synthèse de nombreux explosifs. La synthèse directe qui consisterait à faire réagir l'azote sur l'oxygène en présence d'un arc électrique étant trop onéreuse, on part de l'ammoniac.

L'oxydation de l'ammoniac se fait entre 800 et 950 °C sur un catalyseur constitué par des toiles métalliques formées de 90 % de platine et 10 % de rhodium :

$$4NH_3 + 5O_2 \rightarrow 4NO + 6H_2O.$$

Il faut éviter que l'ammoniac ne soit en excès dans le mélange air-ammoniac pour ne pas produire la réaction indésirable suivante :

$$4NH_3 + 3O_2 \rightarrow 2N_2 + 6H_2O.$$

Il faut aussi que la vitesse de passage du courant gazeux sur le catalyseur soit assez faible pour qu'il ne sorte pas du réacteur de l'ammoniac non transformé qui réagirait sur l'oxyde d'azote formé selon :

$$6NO + 4NH_3 \rightarrow 5N_2 + 6H_2O.$$

Dans une seconde étape du procédé, le monoxyde d'azote est oxydé en bioxyde d'azote :

$$2NO + O_2 \rightleftharpoons 2NO_2.$$

Cette opération nécessite une température inférieure à la première et un excès d'air.

La dernière étape du procédé consiste en l'absorption du bioxyde d'azote dans l'eau :

$$3NO_2 + H_2O \rightleftharpoons 2HNO_3 + NO.$$

On obtient ainsi de l'acide à 60-65 %. Après oxydation du NO accompagnant l'acide nitrique dans cette dernière étape, on obtient d'une part l'acide et d'autre part un gaz de queue qui contient de l'azote, de l'oxygène, de la vapeur d'eau et une certaine quantité d'oxyde d'azote que l'on détruit, pour éviter la pollution de l'air, en le faisant passer avec du méthane (ou des gaz de raffinerie) sur un catalyseur :

$$CH_4 + 2NO_2 \rightarrow N_2 + CO_2 + 2H_2O.$$

▼ ***Les sels de l'acide nitrique, les* nitrates *(ici, nitrate de potassium en lumière polarisée), sont tous solubles dans l'eau.***

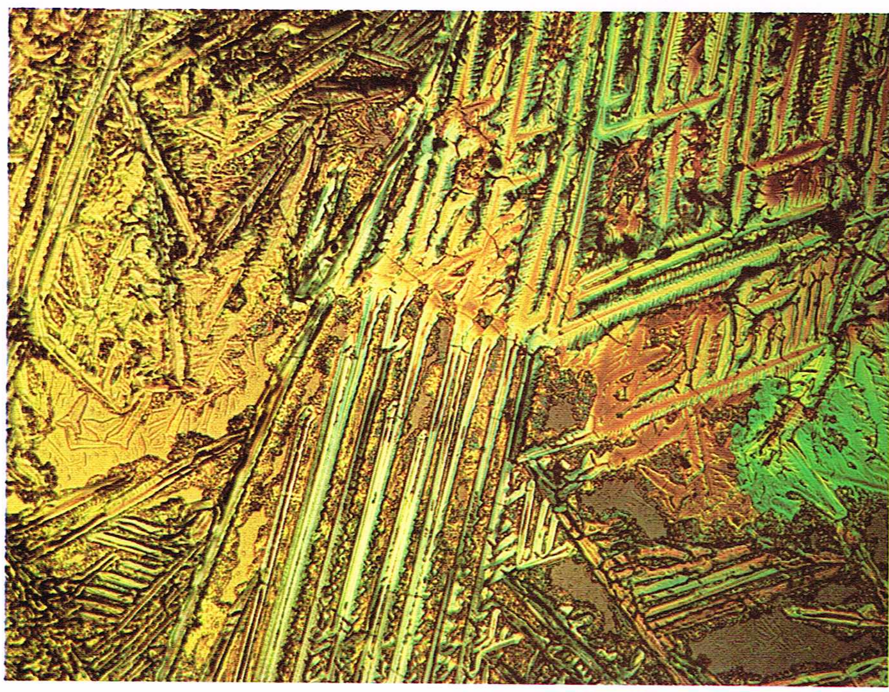

Ermie - Jacana

On peut obtenir l'acide nitrique concentré en le distillant sur de l'acide sulfurique ; la simple distillation ne permet pas de dépasser la composition de l'azéotrope, qui correspond à 68 % de HNO_3 dans le mélange HNO_3-H_2O. On peut remplacer l'acide sulfurique par une solution de nitrate de magnésium.

L'acide nitrique pur se décompose lentement dès la température ordinaire :

$$4HNO_3 \rightarrow 2H_2O + 2N_2O_4 + O_2.$$

Il constitue l'*eau-forte* des anciens graveurs. Il peut attaquer de nombreux métaux en formant des nitrates et en se réduisant en oxyde d'azote, en sous-oxyde d'azote et parfois en ammoniac. Notons la réaction avec le cuivre :

$$3Cu + 8HNO_3 \rightarrow 3Cu(NO_3)_2 + 2NO + 4H_2O.$$

L'acide nitrique est un oxydant puissant.

Inactif à l'état concentré vis-à-vis de certains métaux, l'acide nitrique peut, par contre les attaquer à l'état dilué, C'est le phénomène de *passivation*. Ainsi le fer, mis en contact avec de l'acide concentré, se passive et devient alors inattaquable par l'acide dilué. On peut faire cesser cet état de passivation en touchant le métal, avec un fil de cuivre par exemple. Il se forme ainsi localement une pile fer-cuivre qui amorce la dissolution de la pellicule de fer passive dans l'acide dilué. Cette pellicule est un film invisible d'oxyde de fer.

Les sels de l'acide nitrique, les **nitrates,** sont tous solubles dans l'eau. Les nitrates alcalins et alcalino-terreux se décomposent à température élevée en **nitrites** et en oxygène :

$$2NaNO_3 \rightarrow 2NaNO_2 + O_2.$$

Les nitrates des métaux dont les nitrites sont instables donnent directement l'oxyde par chauffage. C'est le cas du nitrate de fer qui donne Fe_2O_3 et du bioxyde d'azote. Le nitrate d'argent fond sans se décomposer et ne se transforme pas en nitrite par chauffage.

L'acide nitrique réagit sur l'acide chlorhydrique et donne du chlore et du monoxyde d'azote :

$$3HCl + HNO_3 \rightarrow 3/2Cl_2 + NO + 2H_2O.$$

Il se forme aussi un peu de chlorure de nitrosyle (NOCl), qui résulte de l'action du chlore sur NO. Le mélange formé par une partie d'acide nitrique et trois parties d'acide chlorhydrique est appelé *« eau régale »*. Ce liquide attaque tous les métaux et en particulier l'or et le platine.

Phosphore

Le phosphore est assez abondant dans l'écorce terrestre, qui en renferme 0,13 %. En raison de sa grande réactivité, on ne le trouve jamais à l'état libre. On le trouve le plus souvent à l'état de phosphates divers, dont les plus importants sont la *phosphorite,* $Ca(PO_4)_2$, et les *apatites* de formule générale :

$$3Ca(PO_4)_2 \cdot CaX_2, \quad \text{où} \quad X_2 = F_2,\ Cl_2,\ O,\ (OH)_2,\ CO_3,$$

et parmi lesquelles les *fluoroapatites* sont les plus répandues. On trouve aussi le phosphore dans les os d'où on l'a extrait pendant longtemps. Le phosphore est un constituant important des végétaux, et il entre dans la composition d'engrais importants.

On peut obtenir le phosphore en traitant le phosphate de calcium par la silice et le carbone vers 1 500 °C à l'arc électrique :

$$Ca_3(PO_4)_2 + 3SiO_2 + 5C \rightarrow 3CaSiO_3 + 5CO + 1/2P_4.$$

Les vapeurs de phosphore et d'oxyde de carbone sont recueillies dans de l'eau où le phosphore blanc se condense. Le phosphore peut être purifié par distillation fractionnée sous anhydride carbonique pour éviter son oxydation. On peut aussi le recristalliser dans le sulfure de carbone. Le phosphore se volatilise sous forme de molécules tétra-atomiques (P_4), partiellement dissociées au-dessus de 800 °C en molécules biatomiques (P_2) et qui se condensent dans l'eau sous forme de phosphore blanc. On connaît en effet trois variétés du phosphore : les phosphores blanc, rouge et noir.

Le *phosphore blanc* est un solide blanc jaunâtre, très toxique, mou comme de la cire, insoluble dans l'eau, soluble dans les solvants organiques comme le sulfure de carbone et le benzène. Il fond à 44,1 °C et s'enflamme spontanément à l'air ; on le conserve donc sous l'eau où

il est protégé de l'oxydation. Il se combine violemment avec pratiquement tous les éléments, excepté l'azote et le carbone. Dans l'obscurité, il présente le phénomène de phosphorescence, caractéristique liée à son oxydation.

A chaud, il peut décomposer l'eau avec production d'hydrogène :

$$P_4 + 16H_2O \xrightarrow{600\,°C} 4H_3PO_4 + 10H_2.$$

Chauffé vers 250-300 °C, en l'absence d'air, le phosphore blanc se transforme en phosphore rouge.

Le *phosphore rouge* est moins toxique et moins oxydable que le phosphore blanc; il ne se dissout pas dans le sulfure de carbone et ne présente pas le phénomène de phosphorescence. On l'utilise pour les feux d'artifice et la fabrication des allumettes. Le phosphore rouge fond à 590 °C; sa densité (2,18) est plus élevée que celle du phosphore blanc (1,85). Le phosphore rouge est un composé polymérique.

Le *phosphore noir* est un solide grisâtre à l'éclat métallique. On l'obtient en chauffant du phosphore blanc à 200 °C sous de très fortes pressions ou en opérant à la pression atmosphérique, mais en présence de mercure agissant comme catalyseur. Il a une structure covalente tridimensionnelle. Cette forme, de densité plus élevée (2,70), ressemble au graphite par sa structure lamellaire.

Composés du phosphore et de l'hydrogène

Parmi les composés hydrogénés du phosphore, il faut citer l'hydrogène phosphoré, PH_3, et la *diphosphine*, P_2H_4, correspondant respectivement à l'ammoniac et à l'hydrazine, mais beaucoup moins stables.

L'**hydrogène phosphoré,** PH_3, peut s'obtenir par action du phosphore blanc sur les alcalis dilués à chaud :

$$P_4 + 3NaOH + 3H_2O \rightarrow PH_3 + 3NaH_2PO_2$$

ou par action de l'eau sur les phosphures :

$$AlP + 3H_2O \rightarrow PH_3 + Al(OH)_3.$$

C'est un gaz d'odeur désagréable et caractéristique, très toxique, facilement inflammable.

Les hydrogènes peuvent être remplacés par des radicaux organiques; on obtient alors des **alkyl-phosphines,** PR_3, dont certaines ont un intérêt en synthèse organique et en catalyse.

La **diphosphine,** $H_2P—PH_2$, se forme en même temps que PH_3; c'est un liquide spontanément inflammable.

Les **phosphures** se forment par réaction directe du phosphore avec de nombreux éléments plus électropositifs que lui :

$$4Al + P_4 \rightarrow 4AlP.$$

Avec de l'eau ou des acides dilués, les phosphures de métaux alcalins et alcalino-terreux donnent de la phosphine; les autres ont les caractères de composés intermétalliques et sont utilisés en métallurgie comme désoxydants.

Dérivés halogénés du phosphore

Le phosphore donne avec les halogènes des composés de formules générales PX_3 *(trihalogénure)*, PX_5 *(pentahalogénure)* et POX_3 *(oxyhalogénure)*, qui ont une grande importance, surtout les chlorures.

Le **trichlorure de phosphore,** PCl_3, est un liquide d'odeur piquante. On l'obtient par action directe du chlore sur le phosphore rouge pris en excès :

$$P + 3/2Cl_2 \rightarrow PCl_3.$$

Le **pentachlorure de phosphore,** PCl_5, s'obtient par action du chlore sur le trichlorure, mais on pourrait aussi l'obtenir par action de chlore en excès sur le phosphore rouge. On l'utilise en chimie organique pour substituer un atome de chlore à un groupement —OH dans une molécule :

$$CH_3—CH_2OH + PCl_5 \rightarrow CH_3—CH_2Cl + POCl_3 + HCl.$$

L'**oxychlorure de phosphore,** $POCl_3$, se forme par oxydation de PCl_3. En pratique, on le prépare par action du chlore et de l'eau sur PCl_3 :

$$PCl_3 + H_2O + Cl_2 \rightarrow POCl_3 + 2HCl.$$

C'est le chlorure d'acide de l'acide orthophosphorique H_3PO_4. C'est un agent de chloruration et aussi le point de départ de macromolécules dérivant du phosphore.

Parmi les composés oxygénés du phosphore, les plus importants sont ceux qui renferment le phosphore aux degrés d'oxydation + 3 et + 5. Ce sont tous des anhydrides d'acides, et la force des acides qu'ils engendrent augmente avec le degré d'oxydation.

L'**oxyde** P_2O_3 que l'on obtient à partir du phosphore blanc par combustion dans l'air en défaut, est un solide blanc. La molécule a en réalité une structure dimérique P_4O_6. A l'abri de l'air, vers 210 °C, l'oxyde P_4O_6 se dismute :

$$2P_4O_6 \rightarrow 3P_2O_4 + 2P.$$

Sous l'action de l'eau, il donne l'acide orthophosphoreux :

$$P_4O_6 + 6H_2O \rightarrow 4H_3PO_3.$$

C'est un composé très réducteur qui peut fixer de l'oxygène en donnant l'oxyde P_4O_{10}.

L'**anhydride phosphorique,** P_2O_5, se forme par combustion du phosphore dans un excès d'air. C'est un des déshydratants les plus énergiques que l'on connaisse. Avec l'eau, il donne les acides métaphosphorique HPO_3 et orthophosphorique H_3PO_4 :

$$P_2O_5 + H_2O \rightarrow 2HPO_3$$
$$P_2O_5 + 3H_2O \rightarrow 2H_3PO_4.$$

A l'état de vapeur, il a une structure dimère de formule P_4O_{10}. En raison de sa grande affinité pour l'eau, l'anhydride phosphorique est utilisé pour déshydrater les gaz et pour préparer certains anhydrides à partir des acides correspondants.

L'**acide orthophosphorique** est obtenu en traitant un phosphate par l'acide sulfurique :

$$Ca_3(PO_4)_2 + 3H_2SO_4 + 2H_2O \rightarrow 3CaSO_4 \cdot 2H_2O + 2H_3PO_4$$

A. Rizzi

◀ ***Un échantillon de phosphore rouge.*** *Moins toxique et moins oxydable que le phosphore blanc, on l'utilise pour les feux d'artifice et la fabrication des allumettes.*

▼ *Un des stades du traitement de* ***la phosphorite,*** *un des principaux minerais de phosphore.*

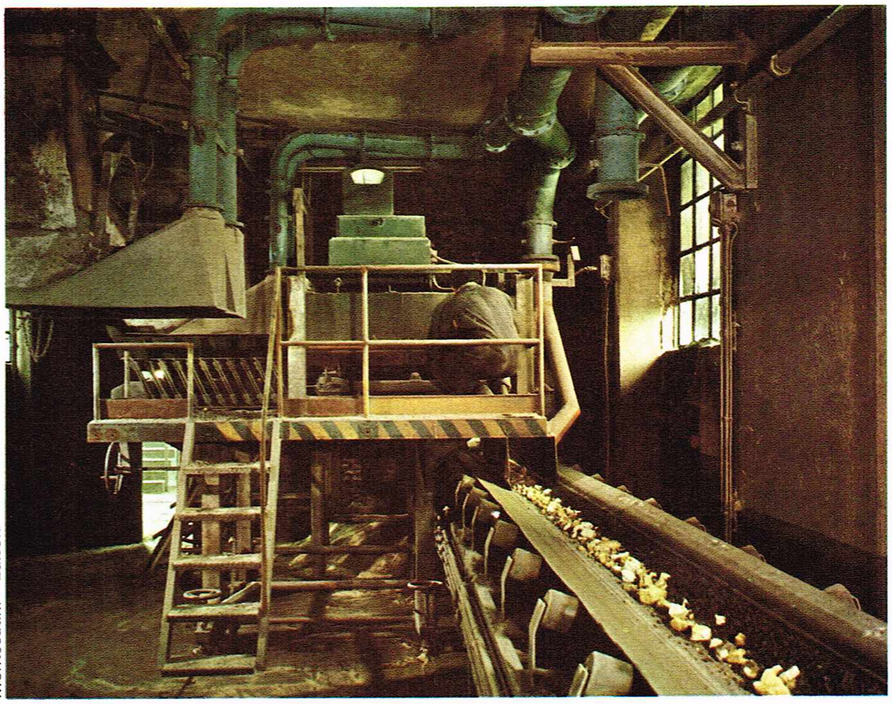

Montecatini - Edison

▶ *Mine de phosphates près de Thiès, au Sénégal.*

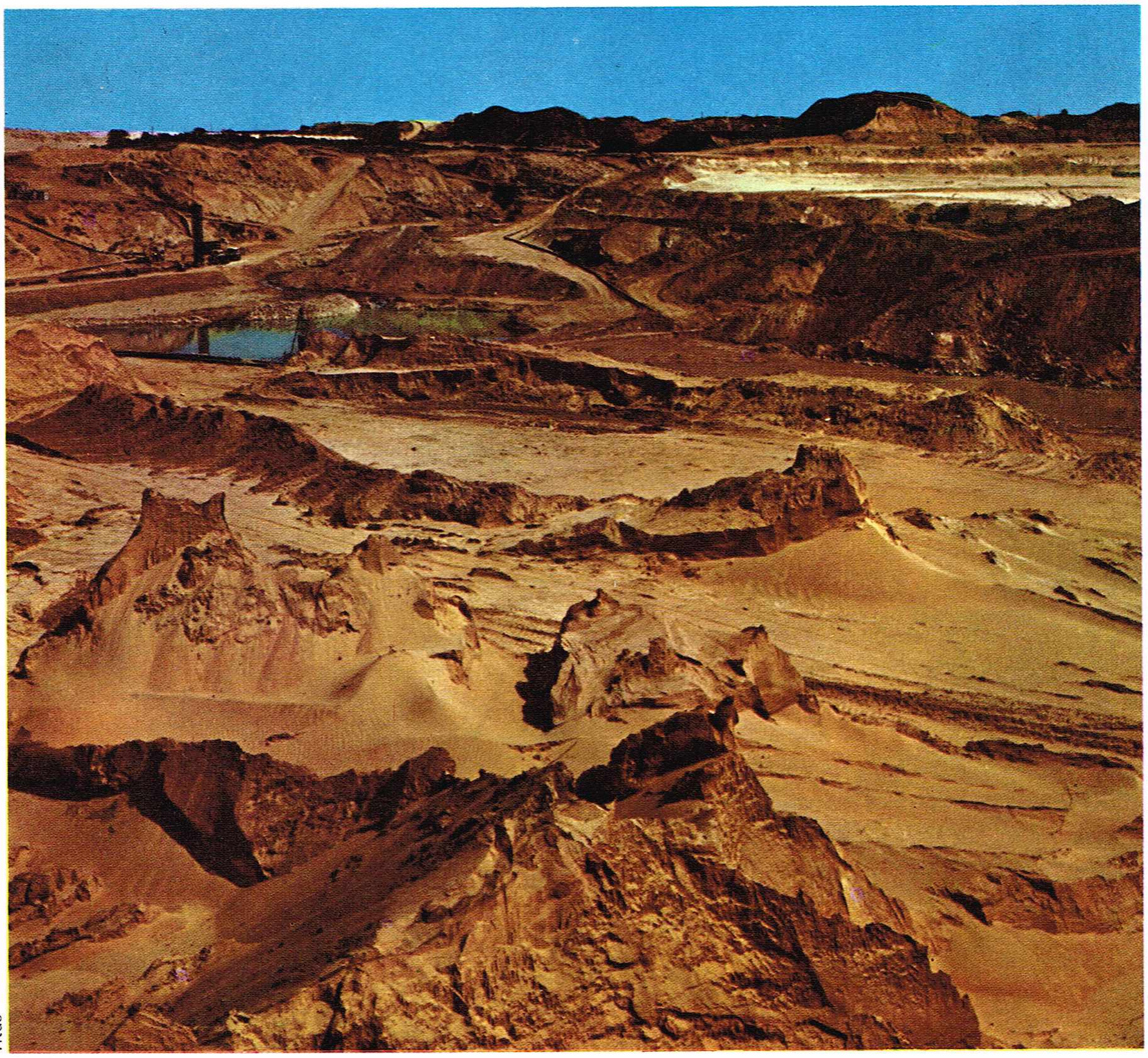

Titus

▼ *Filtre UCEGO utilisé dans un atelier de production d'acide phosphorique à l'usine Rhône-Poulenc de Rouen-Grand-Quevilly.*

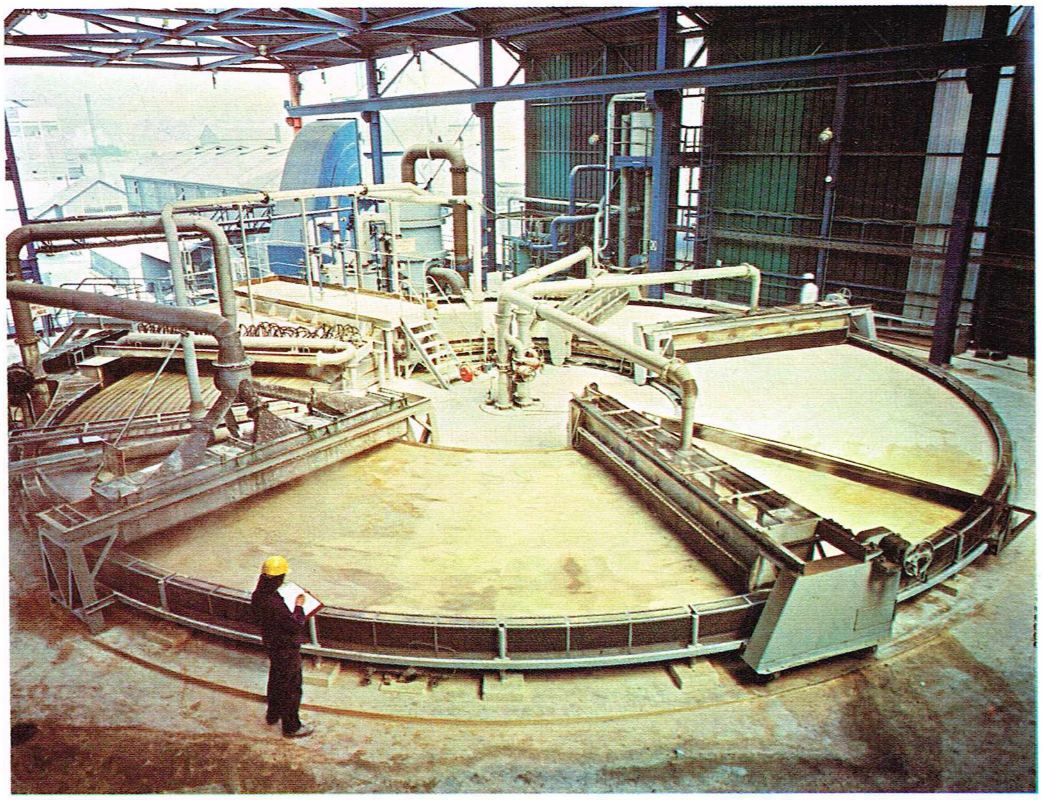

Rhône-Poulenc. Service A.T.C.

ou, si l'on désire un produit de plus haute pureté, en passant par le phosphore et l'anhydride phosphorique selon le schéma :

$$Ca_3(PO_4)_2 \xrightarrow{C + SiO_2} P \xrightarrow{O_2} P_2O_5 \xrightarrow{H_2O} H_3PO_4.$$

C'est un solide facilement fusible, très soluble dans l'eau, à laquelle il confère une réaction acide. Par chauffage, il perd de l'eau et se transforme en **acide pyrophosphorique,** $H_4P_2O_7$.

Les sels de l'acide phosphorique, les **phosphates,** peuvent être neutres ou posséder encore des hydrogènes acides (par exemple Na_3PO_4, Na_2HPO_4 et NaH_2PO_4). Parmi les phosphates neutres, seuls les phosphates alcalins sont solubles dans l'eau, les autres ne se dissolvent que dans les acides minéraux. Les phosphates neutres et acides de sodium et d'ammonium sont importants dans l'industrie textile, et pour diminuer la dureté des eaux. Les phosphates mono- et disodique servent à la préparation des polyphosphates de sodium. Ces derniers sont utilisés pour le blanchiment : leur hydrolyse maintient un pH basique nécessaire au milieu lessiviel, et les fibres textiles résistent mieux à ce milieu qu'à celui des carbonates alcalins.

Le principal débouché des phosphates se trouve dans les engrais. La majorité de ceux-ci est obtenue en traitant l'apatite par l'acide sulfurique. On obtient par ce traitement un mélange de phosphates divers et de sulfate de calcium, connu sous le nom de *superphosphate :*

$$Ca_3\,(PO_4)_2 + H_2SO_4 \rightarrow 2CaHPO_4 + CaSO_4$$
$$Ca_3\,(PO_4)_2 + 2H_2SO_4 \rightarrow Ca(H_2PO_4)_2 + 2CaSO_4.$$

Le guano, la farine d'os et de poisson sont également formés de quantités notables de phosphore. On utilise aussi comme fertilisants les scories de déphosphatation, résidus du procédé Thomas de la préparation du fer.

Les autres oxydes et acides correspondant à des degrés d'oxydation inférieurs du phosphore n'ont pas l'importance des précédents.

Arsenic

L'arsenic est très disséminé dans la nature; on le trouve à l'état de *sulfures* As_2S_2 *(réalgar)* et As_2S_3 *(orpiment)*, d'*arséniures* NiAs, $CoAs_2$; le principal minerai est une *arséniopyrite*, le *mispickel*, de formule FeAsS. Les *pyrites* FeS_2 renferment souvent de l'arsenic.

On peut obtenir l'arsenic par réduction de son oxyde par le carbone :

$$2As_2O_3 + 3C \rightarrow 4As + 3CO_2$$

ou par chauffage du mispickel à l'abri de l'air :

$$FeAsS \rightarrow FeS + As.$$

La majorité de la production d'arsenic est utilisée sous forme d'arséniate de plomb ou de calcium pour combattre l'anthonome du cotonnier, et sous forme d'arsénite de cuivre + acétate de cuivre, comme insecticide. L'arsenic élémentaire est utilisé dans la fabrication des « plombs » de chasse.

L'*arsenic métallique* est un solide cristallin gris acier, brillant, peu conducteur de l'électricité et de la chaleur. Il existe en outre deux variétés allotropiques de l'arsenic : l'*arsenic amorphe* ou *vitreux* et l'*arsenic jaune*. Le métal n'a pas de point de fusion, il se sublime. La nature cassante de ce métal fait qu'il n'a pas d'application à l'état pur; on l'utilise par contre dans les alliages, et en particulier dans les alliages antifriction.

L'arsenic s'oxyde à l'air et se transforme en **trioxyde,** As_2O_3. La combustion de l'arsenic s'accompagne de fumées d'odeur alliacée caractéristique. Très électronégatif, l'arsenic peut se combiner directement à certains métaux (Zn, Mg, Co ou Pt) en donnant des arséniures. Certains de ceux-ci, comme Al_3As_2, fournissent par action de l'eau ou d'acide dilués l'**hydrogène arsénié,** AsH_3, gaz extrêmement toxique qui se dissocie, par chauffage à l'abri de l'air, en arsenic et hydrogène; la détection de l'arsenic par la méthode de Marsh est fondée sur cette dissociation. On peut encore obtenir l'hydrogène arsénié par réduction de l'acide arsénieux ou arsénique, par l'hydrogène naissant (provenant par exemple de l'action du zinc sur un acide) :

$$H_3AsO_3 + 3Zn + 3H_2SO_4 \rightarrow AsH_3 + 3ZnSO_4 + 3H_2O.$$

Les hydrogènes de l'hydrogène arsénié peuvent être remplacés par des radicaux organiques, et il se forme des **arsines,** ayant un certain intérêt en synthèse organique.

Les composés halogénés de l'arsenic ont une certaine analogie avec ceux du phosphore; les plus communs correspondent à la formule AsX_3, et le plus important est le **trichlorure d'arsenic,** $AsCl_3$, qui est un liquide huileux, incolore et toxique.

Parmi les composés oxygénés de l'arsenic, il faut citer l'**anhydride arsénieux,** As_2O_3, l'**anhydride arsénique,** As_2O_5, et l'**anhydride mixte,** As_2O_4. A l'anhydride arsénieux correspond l'acide arsénieux, et à l'anhydride arsénique l'acide arsénique.

L'**anhydride arsénieux,** As_2O_3, peut être obtenu par combustion de l'arsenic. C'est un solide blanc, inodore, qui se sublime à 220 °C sans fondre. On peut le réduire par des réducteurs énergiques en arsenic métallique ou bien l'oxyder en arséniate par l'iode en solution alcaline (réaction utilisée en analyse chimique) :

$$As_2O_3 + H_2O + 2OH^- \rightarrow 2H_2AsO_3^-$$

$$NaH_2AsO_3 + I_2 + 4NaHCO_3 \rightarrow Na_3AsO_4 + 2NaI + 4CO_2 + 3H_2O.$$

L'anhydride arsénieux est peu soluble dans l'eau mais soluble dans les acides et les bases avec lesquelles il donne des arséniates. Il est très toxique. L'acide arsénieux H_3AsO_3 existe dans les solutions aqueuses de l'anhydride, mais n'a jamais été isolé.

L'**anhydride arsénique,** As_2O_5, s'obtient par chauffage modéré (160-200 °C) de l'acide correspondant ou à partir de l'anhydride arsénieux par l'acide nitrique fumant :

$$As_2O_3 + 4HNO_3 \rightarrow As_2O_5 + 2H_2O + 4NO_2.$$

Il se dissout dans l'eau en formant l'**acide arsénique,** H_3AsO_4, que l'on peut isoler sous forme d'un solide

Bulloz

▲ L'Arsenic, *planche tirée de l'ouvrage de J. Cuba,* le Jardin de santé *(1501).*

▼ *Un échantillon d'*arsenic natif *(musée d'Histoire naturelle, Milan).*

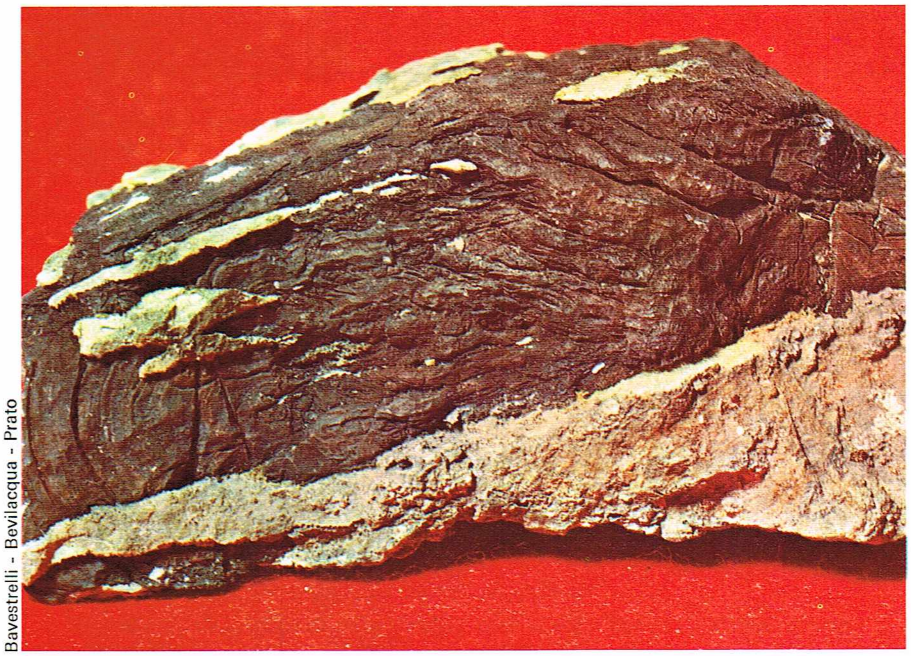

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

cristallin soluble dans l'eau. Ses réactions chimiques sont très semblables à celles de l'acide phosphorique.

Il faut encore signaler les **sulfures,** As_4S_4 et As_2S_3, qui sont bien définis, et As_2S_5 instable. Ces sulfures se dissolvent facilement dans les sulfures alcalins en donnant des **thioarsénites** et **thioarséniates :**

$$As_2S_3 + 3Na_2S \rightarrow 2Na_3AsS_3$$
$$As_2S_5 + 3Na_2S \rightarrow 2Na_3AsS_4.$$

Antimoine

L'antimoine est moins répandu dans la nature que l'arsenic. Son minerai est la *stibine,* Sb_2S_3, mais on le trouve aussi sous forme d'*oxyde,* Sb_2O_3, et à l'état natif. L'extraction de l'antimoine de la stibine débute par un grillage :

$$Sb_2S_3 + 9/2O_2 \rightarrow Sb_2O_3 + 3SO_2;$$

l'oxyde est ensuite réduit :

$$2Sb_2O_3 + 3C \rightarrow 4Sb + 3CO_2.$$

On peut aussi réduire Sb_2O_3 par le cyanure de potassium fondu :

$$Sb_2O_3 + 3KCN \rightarrow 2Sb + 3KNCO.$$

L'élimination ultérieure des impuretés qui souillent l'antimoine se fait par fusion en présence d'oxydants.

L'antimoine a un caractère métallique plus accusé que l'arsenic. Sa forme stable est gris argenté à l'éclat métallique. C'est un métal fragile qui se pulvérise facilement. Il n'est pas altéré à l'air et brûle seulement à haute température. Il est soluble dans l'acide chlorhydrique à froid et dans l'eau régale. Il se combine facilement avec les halogènes. Sa principale application est la production d'alliages, en particulier avec le plomb qu'il durcit (alliages antifriction, plaques d'accumulateurs, soudure, etc.), avec l'étain, et avec l'étain et le cuivre. L'antimoine trouve en outre des applications sous forme de ses composés. Ainsi, l'*oxyde blanc d'antimoine* est utilisé dans les verres et dans les émaux, et pour la préparation de tissus résistant au feu. Le sulfure d'antimoine est utilisé dans l'industrie du caoutchouc. Les chlorures et fluorures d'antimoine sont utilisés comme catalyseurs.

L'**hydrogène antimonié,** SbH_3, peut être obtenu par action de l'oxyde d'antimoine sur l'hydrogène naissant ou par traitement d'un antimoniure de métal électropositif par l'acide chlorhydrique :

$$Sb_2Mg_3 + 6HCl \rightarrow 2SbH_3 + 3MgCl_2.$$

C'est un gaz très toxique, d'odeur particulière, qui se décompose totalement vers 200 °C en antimoine et hydrogène.

En ce qui concerne les composés halogénés qui correspondent à la formule générale SbX_3 et SbX_5, le **trichlorure,** $SbCl_3$, est un solide mou employé pour colorer les fûts métalliques en fer ou en acier. Le **pentachlorure,** $SbCl_5$, est un liquide jaune utilisé comme agent de chloration et comme catalyseur.

Les composés oxydés de l'antimoine sont semblables à ceux de l'arsenic. Le **trioxyde,** Sb_2O_3, est obtenu par combustion de l'antimoine à l'air; il est soluble dans certains acides (chlorhydrique, tartrique, etc.) :

$$Sb_2O_3 + 6HCl \rightarrow 2SbCl_3 + 3H_2O.$$

Avec les alcalis, il forme des **méta-antimonites,** tel $Na[SbO(OH)_2]$. Chauffé à l'air, il se transforme en **tétroxyde,** Sb_2O_4. Au trioxyde correspond l'**acide,** H_3SbO_3, qui présente un caractère amphotère et qui donne naissance par perte d'eau à l'**acide méta-antimonieux,** $HSbO_2$.

Le **pentoxyde,** Sb_2O_5, est obtenu par chauffage de l'acide antimonique; par chauffage ultérieur, cet oxyde perd de l'oxygène et se transforme en tétroxyde. L'acide correspondant, l'**acide antimonique,** H_3SbO_4, est obtenu en traitant l'antimoine métallique ou son trioxyde par l'acide nitrique. C'est une poudre blanche, insoluble dans l'eau.

Il faut enfin citer les **sulfures d'antimoine.** Le **trisulfure,** Sb_2S_3, et le **pentasulfure,** Sb_2S_5. Le premier constitue le minerai appelé *stibine,* le second est utilisé comme pigment rouge-orangé. Ces sulfures réagissent avec le sulfure de sodium, comme l'arsenic, pour donner les **thioantimonites** et les **thioantimoniates :**

$$Sb_2S_3 + Na_2S \rightarrow 2NaSbS_2$$
$$Sb_2S_5 + 3Na_2S \rightarrow 2Na_3SbS_4.$$

Bismuth

Le bismuth existe à l'état naturel sous forme de *sulfure,* Bi_2S_3, dans la *bismuthine* d'où on l'extrait par un procédé similaire à celui de l'antimoine. Une partie du bismuth est obtenue en tant que sous-produit dans la métallurgie du plomb et du cuivre. Enfin, on le rencontre à l'état libre. Sa purification est effectuée par électrolyse.

Physiquement semblable à l'antimoine mais de couleur blanc rosé, c'est un mauvais conducteur de la chaleur et de l'électricité; sa densité à 20 °C est de 9,80; c'est un des très rares métaux dont le volume augmente lors de la solidification; il fond à 271 °C et forme de nombreux alliages à très bas point de fusion avec le plomb, l'étain et le cadmium. Il ne s'oxyde à l'air qu'à chaud et se combine directement avec les halogènes. Il se dissout seulement dans les acides nitrique et sulfurique concentrés et à chaud.

L'**hydrure,** BiH_3, ne peut être isolé à cause de son instabilité.

Les dérivés halogénés existent principalement sous la forme BiX_3 et sont hydrolysables en présence d'eau :

$$BiCl_3 + H_2O \rightarrow BiOCl + 2HCl.$$

On connaît aussi le **pentafluorure,** BiF_5.

Le **trioxyde,** Bi_2O_3, a un caractère exclusivement basique et, pour cela, est insoluble dans les alcalis. L'**hydroxyde,** $Bi(OH)_3$, de nature colloïdale, s'obtient par action des alcalis à froid sur les sels de bismuth; en milieu basique, il est oxydé par le chlore en **méta-bismuthate alcalin :**

▼ A gauche, tableau des éléments du groupe VIA. A droite, un échantillon d'antimoine natif; c'est un métal fragile qui se pulvérise facilement.

Eléments du groupe VIA

Propriétés	**Chrome**	**Molybdène**	**Tungstène**
Numéro atomique	24	42	74
Masse atomique	52,01	95,95	183,86
Rayon atomique (en Å)	1,25	1,36	1,37
Configuration électronique	$3d^5 4s^1$	$4d^5 5s^1$	$4f^{14} 5d^4 6s^2$
Densité	7,19	10,2	19,3
Point de fusion (en °C)	1830	2620	3380
Point d'ébullition (en °C)	2300	4800	5700

A. Rizzi

$$Bi(OH)_3 + 3KOH + Cl_2 \rightarrow KBiO_3 + 2KCl + 3H_2O.$$

Si l'on traite le métabismuthate de potassium par un acide dilué, on obtient le **pentoxyde,** Bi_2O_5, instable. Certains composés du bismuth comme le **nitrate de bismuth basique** et le **carbonate de bismuth basique** sont utilisés en pharmacologie dans le traitement des muqueuses gastro-intestinales. Certains composés organiques du bismuth sont utilisés pour le traitement des angines. Enfin, le bismuth entre dans la composition de certains catalyseurs (par exemple, celui qui est utilisé dans la synthèse de l'acrylonitrile à partir du propylène).

Groupe VIA

Le chrome (Cr), le molybdène (Mo) et le tungstène (W), qui constituent le groupe VIA de la classification périodique, sont des métaux qui fondent à très hautes températures. Les éléments de ce groupe peuvent présenter tous les degrés d'oxydation de 0 à + 6. En milieu acide, le chrome est plus stable au degré d'oxydation + 3, et en milieu alcalin au degré + 6. Le molybdène et le tungstène sont plus stables au degré d'oxydation + 6. Ces métaux peuvent former des complexes carbonyles de formule générale $Me(CO)_6$. Tous donnent des carbures très durs.

Chrome

Le chrome doit son nom au fait que ses composés sont colorés de façon intense. On prépare le chrome à partir de son minerai principal, la *chromite,* Cr_2FeO_4, qui appartient au *type spinelle,* et que l'on peut écrire $Cr_2O_3 \cdot FeO$. Les ferrochromes sont obtenus par réduction directe de la chromite au four électrique ou par aluminothermie. L'obtention de chrome pur implique une séparation préalable de l'oxyde pur :

$$Cr_2O_3 + 2Al \rightarrow Al_2O_3 + 2Cr.$$

Le chrome est un métal bleuté, brillant, malléable lorsqu'il a été obtenu en atmosphère privée d'oxygène. Il résiste à l'oxydation, même à chaud, et ne se dissout pas dans l'acide nitrique qui le passive. Il se dissout dans les acides chlorhydrique et sulfurique et se combine directement à l'azote, aux halogènes, au carbone, au silicium et au bore. Sa résistance à l'oxydation le fait utiliser pour le chromage des autres métaux. Les aciers au chrome sont durs, tenaces et inoxydables.

Dans ses composés, le chrome peut se trouver aux degrés d'oxydation + 2, + 3 et + 6. Les *dérivés chromeux* (du chrome Cr^{2+}) s'obtiennent soit par dissolution du métal dans un acide en absence d'oxygène, soit par réduction des composés chromiques :

$$CrCl_3 + 1/2H_2 \rightarrow CrCl_2 + HCl.$$

Les dérivés chromeux s'oxydent facilement à l'air en donnant des dérivés du Cr^{3+}, les dérivés chromiques.

Les *dérivés chromiques* sont les plus importants. **L'oxyde,** Cr_2O_3, est vert, mais sa teinte dépend de son mode de préparation, et, s'il est vert intense à l'état très divisé, il peut être presque noir à l'état compact. Chauffé à haute température, il devient insoluble dans les acides, et, chauffé en présence de bases alcalines, il se transforme en chromites. Fondu avec un silicate, il le colore en vert, et on l'utilise pour cette raison dans les émaux. Il a des propriétés réfractaires mais, pour cet usage, on utilise directement la chromite.

Le **sulfate de chrome,** $Cr_2(SO_4)_3$, a un comportement analogue au sel d'aluminium et peut donner un alun qui cristallise en gros octaèdres violets. En général, les sels chromiques ont une ressemblance avec les sels d'aluminium et sont utilisés comme mordants pour la teinture et le tannage des peaux.

L'hydroxyde, $Cr(OH)_3$, se dissout dans les bases alcalines :

$$Cr(OH)_3 + NaOH \rightarrow Na[Cr(OH)_4]$$

et présente un comportement amphotère. Les sels chromiques peuvent donner de nombreux complexes avec l'eau, l'ammoniac, les amines, par exemple :

$$[Cr(NH_3)_6]Cl_3.$$

Au degré d'oxydation + 6 devrait correspondre l'**acide chromique,** H_2CrO_4, qui n'existe pas à l'état libre. On connaît par contre son anhydride, l'**anhydride chromique,** CrO_3, que l'on obtient en traitant le bichromate de sodium par l'acide sulfurique. Il forme des aiguilles rouges solubles dans l'eau. C'est un oxydant assez énergique. Il faut aussi noter les sels de l'acide chromique, les **chromates.** Les chromates alcalins sont obtenus directement à partir du minerai (la chromite) que l'on calcine vers 1 000-1 100 °C en présence de carbonate de sodium :

$$4FeCr_2O_4 + 8Na_2CO_3 + 7O_2 \rightarrow 8Na_2CrO_4 + 2Fe_2O_3 + 8CO_2.$$

Les chromates sont généralement jaunes. Le chromate de plomb, insoluble, est utilisé comme pigment.

En milieu acide, les chromates alcalins contiennent les ions $(CrO_4)^{2-}$ et $(Cr_2O_7)^{2-}$, ion condensé de l'acide bichromique $2CrO_3H_2O$ non isolé. Les bichromates (par exemple $Na_2Cr_2O_7$, le bichromate de sodium) existent en solution aqueuse en équilibre avec les chromates en fonction du pH :

$$2Na_2CrO_4 + 2HCl \rightleftharpoons 2NaCl + Na_2Cr_2O_7 + H_2O.$$

Les bichromates de sodium et de potassium sont utilisés comme oxydants. L'acide chromique traité par l'eau

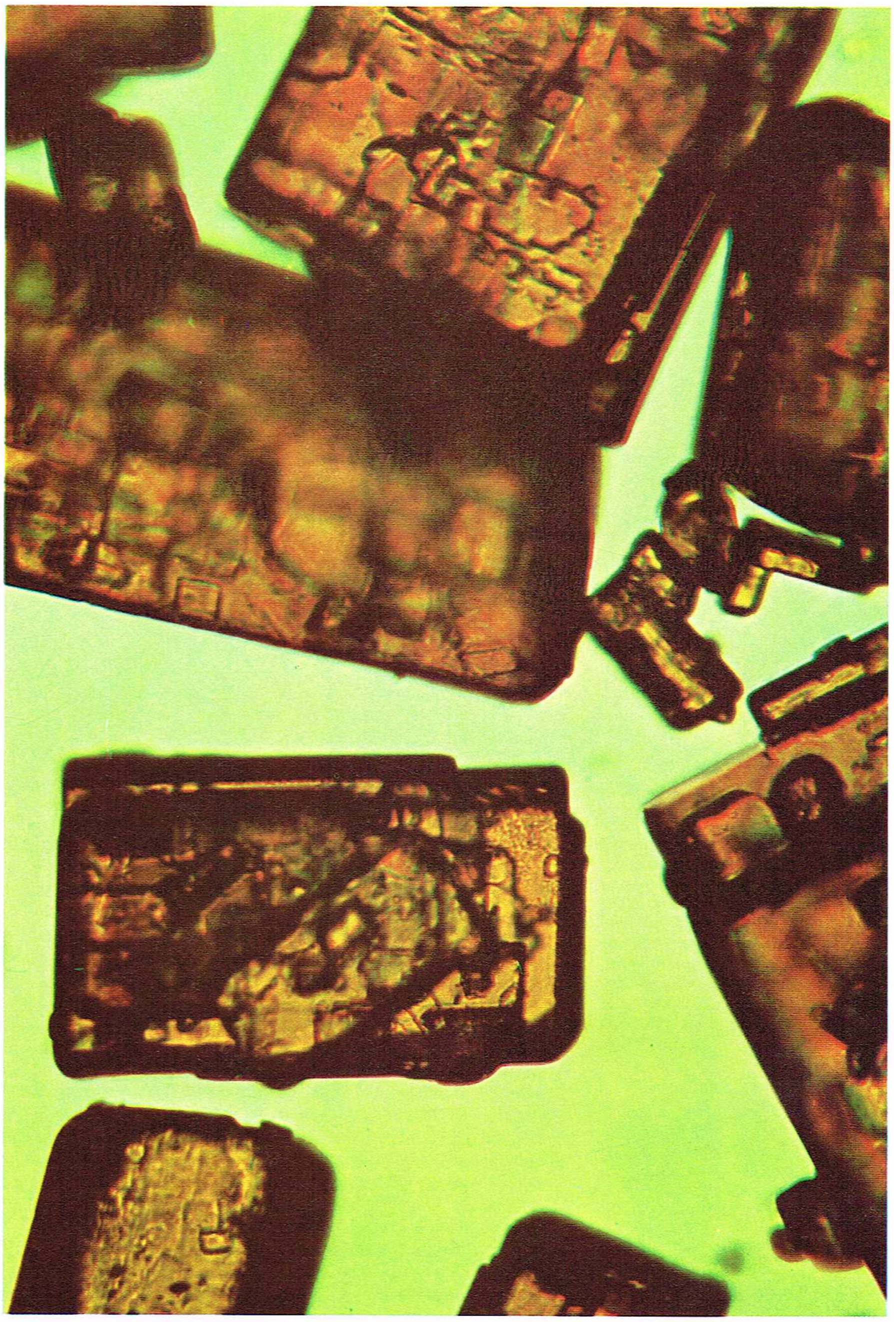

Ermie - Jacana

▲ ***Microphotographie de* bichromate de potassium*; c'est un oxydant puissant.***

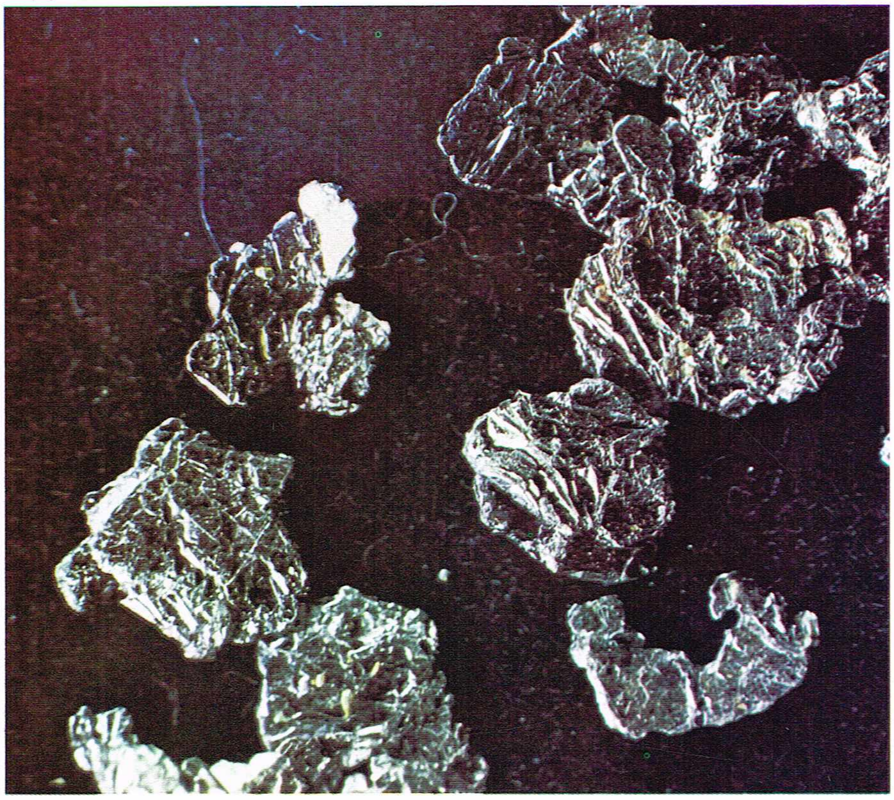
J.-P. Varin - Jacana

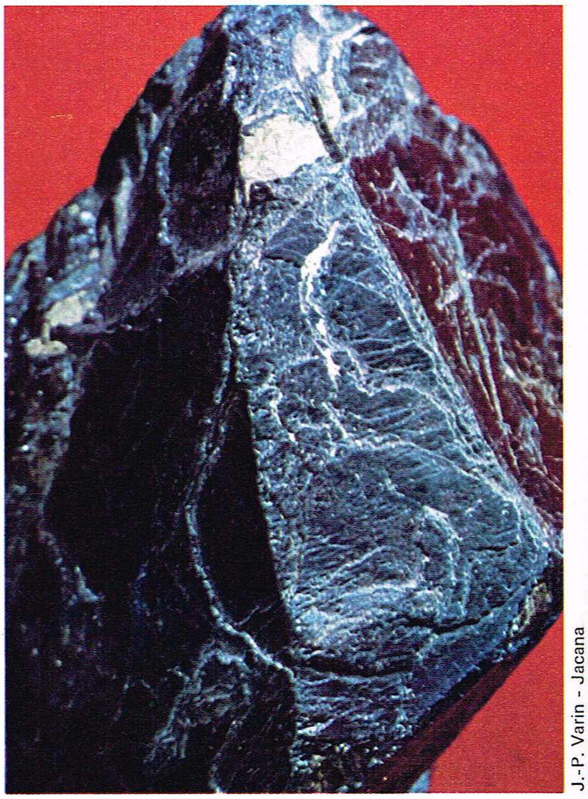
J.-P. Varin - Jacana

▲ ***A gauche, échantillons de* molybdénite, *minerai de* molybdène. *A droite, un échantillon de* wolframite, *minerai de* tungstène. *Ce dernier est, de tous les éléments, celui dont la température de fusion est la plus élevée (3 380 °C).***

oxygénée en solution aqueuse forme un **peroxyacide,** H_2CrO_5, ou des **peroxychromates** selon les conditions. Leur coloration intense permet de détecter des traces d'eau oxygénée.

Molybdène

Le molybdène est obtenu par grillage à l'air ou par fusion en présence de soude de son minerai, la *molybdénite,* MoS_2 :

$$MoS_2 + 7/2O_2 \rightarrow 2SO_2 + MoO_3.$$

Le trioxyde MoO_3 obtenu est ensuite réduit par le carbone ou l'hydrogène.

Le molybdène, comme le tungstène, est un métal réfractaire ; il ne fond qu'à 2 620 °C ; c'est un métal dur, très résistant mécaniquement et bon conducteur de l'électricité. On l'utilise dans des alliages spéciaux et dans des aciers inoxydables.

Par chauffage à l'air, il se transforme en trioxyde, MoO_3. A chaud, le molybdène se combine au chlore, au brome, et, à froid, au fluor. Le métal est aisément oxydé par les nitrates, les nitrites, les chlorates et les peroxydes alcalins à la fusion. Par contre, il est peu attaqué par les acides.

Il faut mentionner les degrés d'oxydation + 2, + 3, + 4, + 5 et + 6 qui est le plus élevé et aussi le plus important. A ce degré d'oxydation correspond le **trioxyde** ou **anhydride molybdique,** MoO_3, solide blanc, soluble dans les acides sulfurique et fluorhydrique concentrés ainsi que dans les bases alcalines et dans l'ammoniaque (pour donner des molybdates). On l'obtient par déshydratation de l'**acide molybdique,** H_2MoO_4. Les sels de cet acide, les **molybdates,** sont utiles en analyse. Le **molybdate d'ammonium** a une structure complexe :

$$(NH_4)_6\,[Mo(Mo_6O_{24})] \cdot 4H_2O.$$

En présence de phosphates, il donne un précipité jaune caractéristique, de formule :

$$(NH_4)_3\,PO_4 \cdot 12MoO_3 \cdot 6H_2O.$$

Dans les degrés d'oxydation inférieurs, il faut mentionner le **pentoxyde,** Mo_2O_5, le **bioxyde,** MoO_2, et de nombreux halogénures, tous intensément colorés.

On connaît aussi le **trisulfure,** MoS_3, qui, avec les sulfures alcalins, peut former un **thiomolybdate,** Na_2MoS_4, et qui, chauffé à l'abri de l'air, se transforme en **disulfure,** MoS_2, en libérant du soufre. Le disulfure de molybdène est utilisé comme lubrifiant à haute température.

Les composés du molybdène sont utilisés comme catalyseurs, en particulier comme catalyseurs d'hydrodésulfuration dans l'industrie pétrolière, dans les hydrodésalkylations du toluène en benzène et dans la synthèse de l'acrylonitrile à partir de propylène.

Tungstène

Le tungstène, dont le symbole W est la première lettre de wolfram, nom qu'il porte dans certains pays, est, de tous les éléments, celui dont la température de fusion est la plus élevée (3 380 °C). Bien que ce soit un des éléments les plus rares de l'écorce terrestre, il en existe quelques dépôts importants, en particulier en Chine et en Corée du Nord.

Ses principaux minerais sont la *scheelite* ($CaWO_4$) et la *wolframite,* (Mn, Fe) WO_4, qui est un tungstate de fer et de manganèse en proportions variables.

On obtient le tungstène principalement à partir de la wolframite, par fusion avec de la soude. Le tungstate alcalin ainsi obtenu est transformé en sel de calcium correspondant. Par traitement à l'acide chlorhydrique, on obtient le trioxyde WO_3, que l'on peut réduire par l'hydrogène à 1 200 °C ou par aluminothermie.

Le tungstène en blocs est blanc brillant, bon conducteur de l'électricité ; il a une densité élevée. On l'utilise dans les aciers pour outillage (aciers rapides), pour les filaments des lampes électriques et pour les résistances des fours. Les **carbures de tungstène,** WC et W_2C, sont extrêmement durs et utilisés pour les outils de coupe.

Le tungstène est stable à l'air, insoluble dans les acides et les bases habituels. Par contre, il est soluble dans un mélange d'acides fluorhydrique et nitrique, dans le chlorate de potassium et dans un mélange de soude et de nitrate de potassium à la fusion. Il réagit à froid avec le fluor et à chaud avec le chlore. Le **trioxyde** jaune, WO_3, se comporte comme un anhydride et se dissout dans les alcalis pour former un tungstate, qui, traité par un acide fort, libère l'**acide tungstique,** H_2WO_4.

Comme le molybdène, le tungstène a tendance à former des acides et des sels complexes contenant différents autres éléments, par exemple les **acides phospho-** et **arsénio-tungstiques,** les **boro-** et **silicotungstates.** De plus, le tungstène peut former un **pentoxyde,** W_2O_5, et un **bioxyde,** WO_2, ainsi que de nombreux composés halogénés correspondant à des degrés d'oxydation inférieurs, tous très colorés. Enfin, on connaît un **tri-** et un **disulfure de tungstène.**

Groupe VIB

L'oxygène (O), le soufre (S), le sélénium (Se), le tellure (Te) et le polonium (Po) appartiennent au groupe VIB de la classification périodique et sont typiquement non métalliques, en particulier les premiers éléments du groupe qui sont en outre les plus abondants et les plus importants. Par contre, le tellure et le polonium présentent quelques propriétés métalliques. Ils donnent tous des ions Me^{2-}, en accord avec leur position dans la classification périodique. De plus, dans certains cas, on relève une certaine diminution du caractère non métallique à mesure que la masse atomique augmente. Les oxydes, qui correspondent tous au degré d'oxydation + 6, sont tous des anhydrides d'acides, les acides qui en dérivent sont forts (ceux du soufre et du sélénium), ou faibles (ceux du tellure). D'autres degrés d'oxydation différents de + 6 sont fréquents comme + 4, + 2 et — 2 (l'oxygène constitue une exception apparente avec son degré d'oxydation le plus fréquent — 2).

Eléments du groupe VIB

Propriétés	Oxygène	Soufre	Sélénium	Tellure	Polonium
Numéro atomique	8	16	34	52	84
Masse atomique	16,000	32,066	78,96	127,61	(210)
Rayon atomique (en Å)	0,66	1,04	1,97	1,37	1,76
Configuration électronique	$1s^22s^22p^4$	$3s^23p^4$	$3d^{10}4s^24p^4$	$4d^{10}5s^25p^4$	$4f^{14}5d^{10}6s^26p^4$
Densité	1,14	2,07	4,79	6,24	(9,2)
Point de fusion (en °C)	– 218,4	119	220,2	452	254
Point d'ébullition (en °C)	– 183	444,60	688	1390	–

▲ ***Tableau des éléments du* groupe VIB.**

Oxygène

L'oxygène est un élément très diffusé et très abondant. On le trouve dans l'air, dans l'eau et dans de nombreux minéraux : oxydes, silicates, sulfates, carbonates, pour ne citer que les principaux.

On peut le préparer au laboratoire par chauffage du peroxyde de baryum :

$$BaO_2 \rightarrow 1/2O_2 + BaO$$

ou à partir du perchlorate de potassium en présence de bioxyde de manganèse :

$$KClO_3 \xrightarrow{M_nO_2} 3/2O_2 + KCl$$

ou encore par électrolyse de l'eau rendue conductrice par addition d'un sel.

Industriellement, on l'obtient par distillation fractionnée de l'air liquide.

L'oxygène est un gaz incolore, inodore, qui se liquéfie et se solidifie à basse température; il se dissout aisément dans l'eau, dans l'alcool et dans l'argent fondu. Il déclenche et entretient les réactions de combustion qui sont toujours plus vives dans l'oxygène pur que dans l'air. Ce gaz indispensable à la vie existe sous forme de molécule biatomique O_2; il existe aussi une forme allotropique triatomique, l'ozone, O_3, qui se forme lorsque l'on produit des décharges électriques dans l'oxygène.

L'**ozone** est un gaz bleu, instable, d'odeur caractéristique, liquéfiable à — 112 °C en un liquide bleu foncé. L'ozone se forme dans les hautes couches de l'atmosphère sous l'influence des radiations ultraviolettes. On produit commercialement l'ozone dans des appareils appelés ozoniseurs, dans lesquels on soumet l'oxygène de l'air à des décharges électriques. C'est un puissant oxydant; on l'utilise pour la stérilisation de l'eau et de l'air ambiant. Il détruit les micro-organismes pathogènes. Son pouvoir oxydant est mis à profit dans la méthode de dosage qui consiste à libérer l'iode de l'iodure de potassium :

$$2KI + H_2O + O_3 \rightarrow I_2 + 2KOH + O_2.$$

De plus, l'ozone a la propriété de réagir avec les composés organiques à double liaison pour donner des **ozonides :**

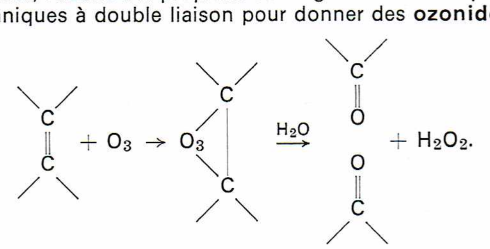

Ces composés sont très instables et peuvent exploser violemment, mais, traités avec précaution, ils conduisent à des aldéhydes qui permettent de déterminer la position de la double liaison dans le composé organique de départ. La réaction de formation et de décomposition de l'ozonide est l'*ozonolyse*.

Les composés les plus importants de l'oxygène sont les **oxydes** dont beaucoup constituent des minéraux et des minerais importants. Ils peuvent être formés par combinaison directe avec les éléments, le plus souvent à chaud. Souvent, le même élément possède plusieurs oxydes correspondant à des degrés d'oxydation différents. De nombreux oxydes résistent à la chaleur et trouvent une application comme réfractaires, d'autres, en particulier ceux des métaux nobles, sont peu ou très peu stables et, sous l'action de la chaleur, redonnent le métal en libérant de l'oxygène.

L'eau, H_2O, est le composé le plus important de l'oxygène; elle apparaît comme coproduit de nombreuses réactions chimiques, mais son importance réside surtout dans son énorme abondance et dans le fait qu'elle est indispensable à toute vie animale ou végétale. Dans la nature, l'eau se trouve sous forme solide (glace), liquide ou gazeuse (vapeur d'eau). La conductibilité électrique de l'eau est extrêmement faible lorsque l'eau est très pure; elle augmente lorsqu'elle renferme des impuretés conductrices.

Les points de congélation et d'ébullition de l'eau à la pression atmosphérique ont été pris respectivement comme points 0 et 100 de l'échelle Celsius ou centigrade des températures. La glace a une densité inférieure à celle de l'eau, sur laquelle elle flotte donc. L'eau présente un maximum de densité à 4 °C. La glace présente plusieurs structures cristallines dans lesquelles les molécules d'eau sont liées par des liaisons hydrogène. Lorsqu'on augmente la température, ces liaisons hydrogène deviennent plus rares, mais ne disparaissent pas totalement, même à l'état liquide. Ces associations de molécules d'eau par liaisons hydrogène rendent compte de son point d'ébullition anormalement élevé par comparaison avec des composés analogues comme H_2S, H_2Se, etc. :

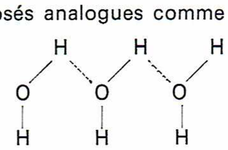

La grande importance chimique (et géochimique) de l'eau réside dans son pouvoir solvant élevé, en particulier pour les sels. Ce pouvoir de solubiliser les molécules à liaison ionique est dû à sa grande constante diélectrique et à un moment dipolaire élevé. L'eau peut aussi dissoudre des composés moléculaires et des gaz (oxygène, CO_2, etc.). C'est le solvant de choix de la chimie minérale; on l'utilise en chimie organique pour certaines séparations; à l'état de trace dans les gaz ou les liquides, elle peut avoir un effet catalytique ou inhibiteur important.

L'eau est à la fois un acide et une base : en effet elle peut céder un proton :

$$H_2O \rightarrow H^+ + OH^-$$

ou accepter un proton :

$$H_2O + H^+ \rightarrow H_3O^+.$$

Ces deux réactions limitent l'utilisation de l'eau comme milieu réactionnel.

L'eau est un oxydant et un réducteur. Certains éléments (phosphore, carbone, sodium, etc.) réduisent l'eau en libérant l'hydrogène. D'autres, plus rares, comme le fluor, donnent une réaction brutale en libérant l'oxygène :

$$2F_2 + 2H_2O \rightarrow 4HF + O_2.$$

L'**eau lourde,** D_2O, est le composé dans lequel le deutérium remplace l'hydrogène. On trouve l'eau lourde en petite quantité dans l'eau ordinaire (0,015 %). On la sépare de l'eau ordinaire par électrolyse. La séparation est due au fait que l'ion D^+ a une mobilité plus faible que l'ion H^+ et qu'en conséquence, le rapport $\frac{D}{H}$ dans le gaz libéré à la cathode est inférieur à celui qui existe dans l'électrolyte. Ce dernier s'enrichit en eau lourde. L'eau lourde intervient dans la technologie nucléaire comme modérateur de neutrons.

L'oxygène présente les degrés d'oxydation — 1 (plutôt que — 2) dans l'eau oxygénée H_2O_2 et dans les peroxydes, ces composés étant des oxydants énergiques. L'eau oxygénée pure est un liquide visqueux, incolore, qui se décompose assez facilement en présence de traces d'impuretés, en particulier des poudres métalliques ; par contre, elle peut être stabilisée par des traces d'acides (en particulier l'acide urique). C'est un oxydant fort :

$$H_2O_2 + 2KI + H_2SO_4 \rightarrow I_2 + 2H_2O + K_2SO_4$$

utilisé dans l'industrie et au laboratoire. Dans certains cas, l'eau oxygénée peut se comporter comme un réducteur :

$$NaClO + H_2O_2 \rightarrow NaCl + H_2O + O_2.$$

Les **peroxydes,** par exemple BaO_2, comme l'eau oxygénée, renferment le groupement $(—O—O—)^{-}{}_2$; il existe aussi des **peracides,** par exemple CH_3COO_2H, et des **peranhydrides,** par exemple TiO (O_2), qui renferment le même groupement. L'eau oxygénée est utilisée comme désinfectant (en solution diluée), comme agent de blanchiment et comme carburant de fusées.

On prépare industriellement l'eau oxygénée par hydrolyse à la vapeur d'eau du persulfate d'ammonium :

$$(NH_4)_2 S_2O_8 + 2H_2O \rightarrow H_2O_2 + 2(NH_4) HSO_4$$

lui-même obtenu par électrolyse d'une solution de sulfate acide d'ammonium. On obtient aussi l'eau oxygénée par oxydation de l'éthyl-2-dihydroanthraquinone, que l'on réhydrogène en présence de nickel de Raney [nickel très finement divisé obtenu par l'attaque à la soude de l'alliage de Raney (Ni/Al) et utilisé comme catalyseur d'hydrogénation] dans un processus cyclique.

Soufre

Le soufre est assez diffusé dans la nature ; on le rencontre rarement en abondance. On le trouve dans le sol à l'état natif et dans les émanations volcaniques, sous forme d'hydrogène sulfuré et d'anhydride sulfurique. Il entre dans la composition de nombreux minéraux. On exploite les gisements de *soufre natif* et de certains *sulfures* (*pyrite* FeS_2) et *sulfates* (*gypse* $SO_4Ca \cdot 2H_2O$).

Le soufre est généralement extrait par fusion des roches qui le renferment à l'état natif. En Sicile, l'extraction se fait encore par le procédé des Calcaroni où une partie du soufre brûle à l'air et fait fondre la partie non oxydée. Aux États-Unis (Louisiane, Texas), où le soufre est enfoui profondément dans le sol, on le fond au moyen de vapeur d'eau surchauffée que l'on envoie dans le sol, et on le remonte à la surface par une surpression d'air : c'est le procédé Frasch. Actuellement, le pétrole et les gaz naturels sont devenus des sources importantes de soufre. L'hydrogène sulfuré, provenant des différents traitements de désulfuration des fractions pétrolières, est transformé en soufre par oxydation à l'air dans le procédé Claus :

$$H_2S + 3/2O_2 \rightarrow H_2O + SO_2$$
$$2H_2S + SO_2 \rightarrow 2H_2O + 3S.$$

La réaction globale peut s'écrire :

$$3H_2S + 3/2O_2 \rightarrow 3H_2O + 3S.$$

Les trois quarts du soufre produit dans le monde sont utilisés pour la production de l'acide sulfurique, important non seulement comme acide mais aussi dans l'industrie des engrais. On utilise aussi du soufre dans les industries de la cellulose, du caoutchouc, des colorants, des insecticides, etc.

Le soufre se présente sous plusieurs formes. Le soufre ordinaire est un solide jaune dont les cristaux ont une symétrie orthorhombique : c'est le *soufre rhombique* qui

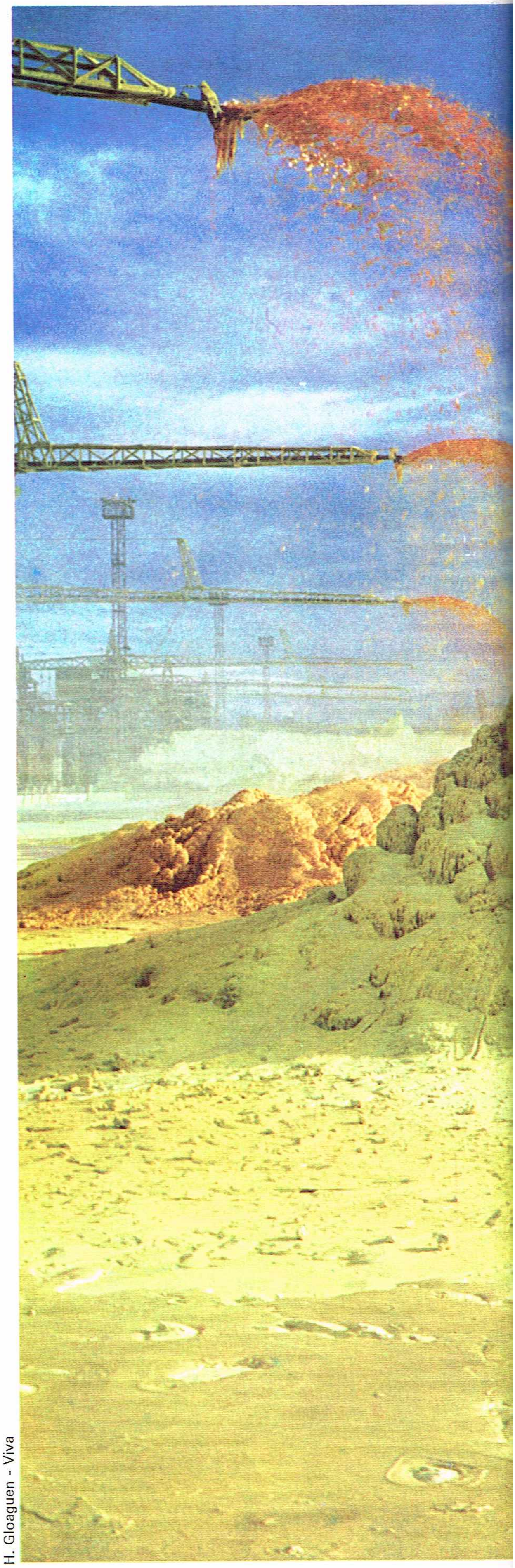

H. Gloaguen - Viva

▶ Le pétrole et les gaz naturels sont devenus des sources importantes de soufre. Ici, une des étapes de l'obtention de soufre à l'usine de Lacq.

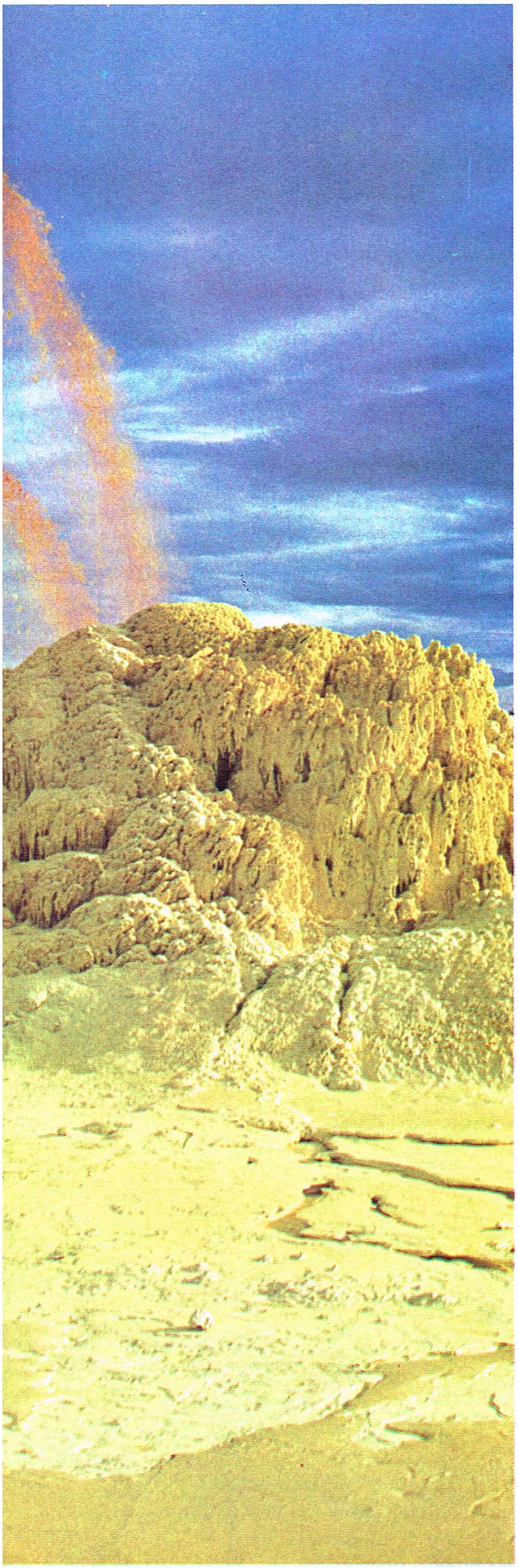

C. Bevilacqua

fond à 112,8 °C. Ce soufre, fondu, recristallise sous *forme monoclinique* qui est la forme stable du soufre au-dessus de 95 °C ; sa température de fusion est 119 °C et il bout à 444,6 °C. Les molécules de soufre rhombique, monoclinique ou sous forme liquide, ont pour formule S_8 et ont une configuration cyclique non plane. Par chauffage, les molécules S_8 se transforment dès 450 °C en molécules S_2 qui à leur tour peuvent se transformer en atomes S vers 2 000 °C.

Le soufre qui vient d'être fondu est un liquide jaune paille de faible viscosité, car ses molécules S_8 glissent facilement les unes contre les autres. Si l'on chauffe ce soufre liquide, vers 230 °C il devient beaucoup plus visqueux car les molécules cycliques se sont transformées en molécules linéaires qui s'enchevêtrent les unes dans les autres. Il est alors rouge foncé.

Rapidement refroidi par immersion dans l'eau, il donne un produit plastique ayant une structure fibreuse. La condensation rapide des vapeurs de soufre S_2 sur des parois froides produit la *fleur de soufre*.

Les formes cristallines du soufre sont solubles dans le sulfure de carbone. Le soufre est insoluble dans l'eau, peu soluble dans l'alcool et dans l'éther.

Le soufre peut se combiner directement avec de nombreux éléments comme l'hydrogène, les halogènes, le fer en poudre (à chaud), le cuivre (à condition que le soufre soit à l'état de vapeur) et le mercure (à la température ordinaire). Il brûle à l'air avec une flamme bleue caractéristique en dégageant une odeur suffocante (celle de l'anhydride sulfureux formé). Il se dissout dans les alcalis caustiques en donnant des sulfures (ou des polysulfures lorsqu'on l'utilise en excès) ainsi que des hyposulfites.

L'**hydrogène sulfuré**, H_2S, est un gaz d'odeur nauséabonde rappelant celle des œufs pourris. Il s'en dégage dans les émanations volcaniques et il s'en forme lors de la décomposition des composés protéiques. On peut le préparer au laboratoire par action des acides dilués sur le sulfure de fer :

$$FeS + 2HCl \rightarrow H_2S + FeCl_2.$$

C'est un gaz incolore, facilement liquéfiable et qui brûle à l'air en donnant du SO_2 et de l'eau. C'est un agent réducteur :

$$H_2S + I_2 \rightarrow 2HI + S.$$

Il est soluble dans l'eau, dans laquelle il donne une solution acide utilisée en analyse chimique (**acide sulfhydrique**).

Les sels de l'acide sulfhydrique sont les **sulfures.** Ils peuvent exister sous forme de **sulfure acide** ou **sulfhydrate** (par exemple : NaHS). Les sulfures de métaux alcalins sont solubles dans l'alcool et dans l'eau et sont utilisés dans l'industrie du papier et du cuir. Les sulfures des métaux lourds, insolubles dans l'eau, peuvent être obtenus en faisant passer un courant de H_2S dans une

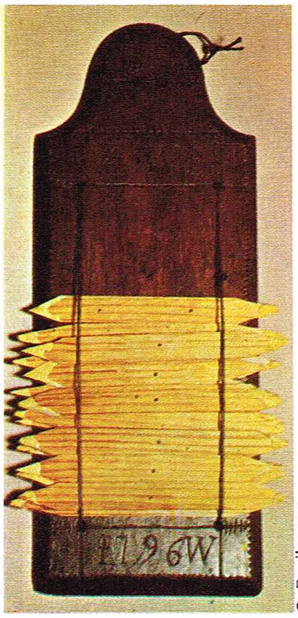

C. Bevilacqua

▲ En haut, cristaux de soufre (musée d'Histoire naturelle, Milan). Ci-dessus, premiers exemplaires d'allumettes au soufre (1796; Londres British Museum).

▶ ***Atelier de fabrication de l'*****anhydride sulfureux** ***à l'usine Rhône-Poulenc de Saint-Fons (Rhône).***

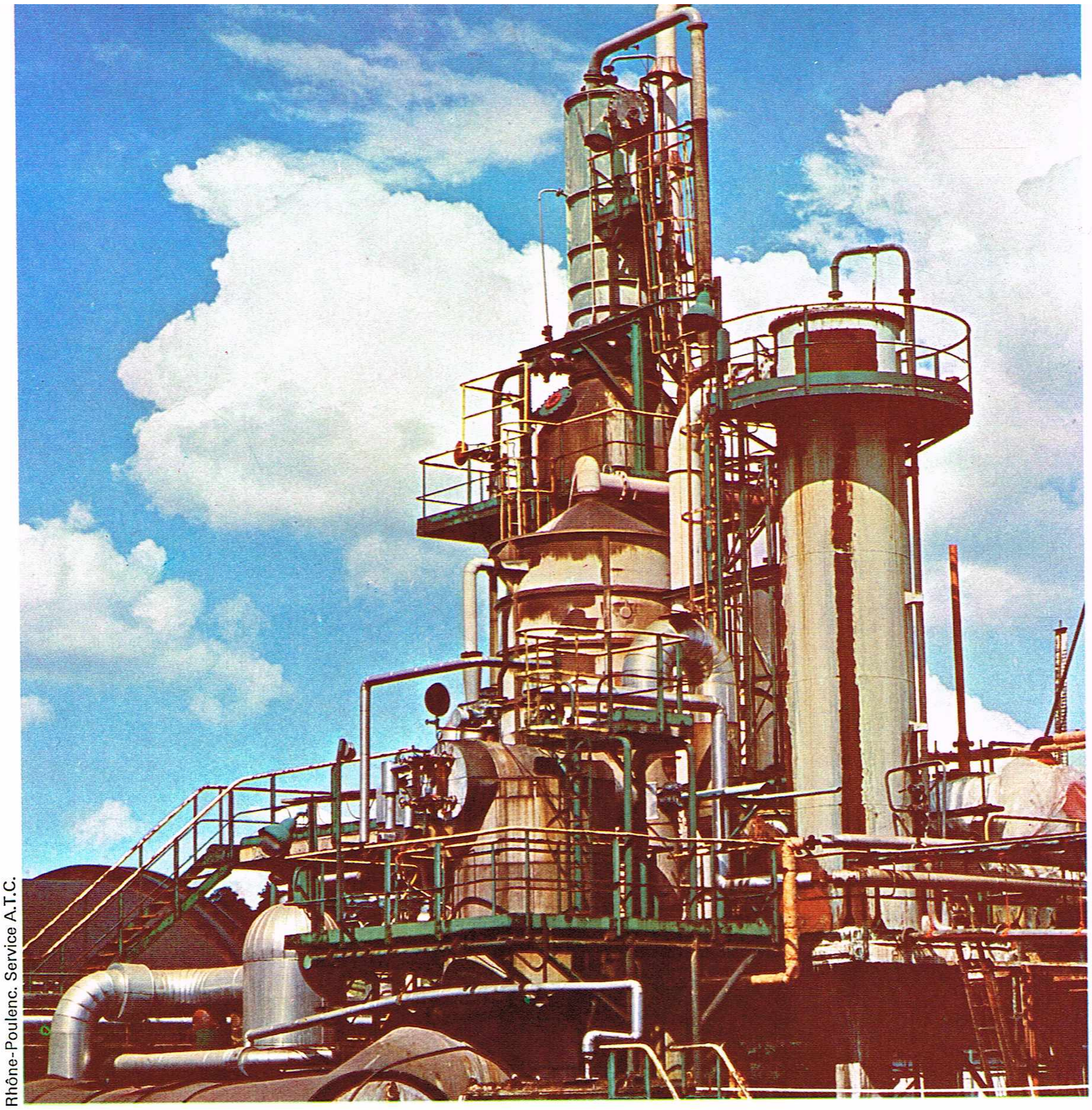

Rhône-Poulenc. Service A.T.C.

solution de sel métallique. Les sulfures d'aluminium et de chrome n'existent pas en présence d'humidité, car, résultant de l'action d'un acide faible sur une base faible, ils s'hydrolysent très facilement :

$$Al_2S_3 + 6H_2O \rightarrow 2Al(OH)_3 + 3H_2S.$$

Les différences de solubilité des sulfures de métaux lourds sont mises à profit en chimie analytique pour la séparation de ces éléments. Certains sulfures sont solubles dans les acides (par exemple ceux de zinc, manganèse, cobalt et nickel), d'autres dans les bases ou les sulfures alcalins (sulfures d'antimoine, d'arsenic), d'autres enfin ne sont solubles que dans les acides fortement oxydants ou dans l'eau régale (sulfure d'argent, de plomb, de mercure).

Les **polysulfures** sont des composés de formule générale MeS_x avec le groupement S_x^{2-} dans lequel x varie de 2 à 8. Les polysulfures alcalins ont une importance dans l'industrie des colorants et pour le tannage.

Les composés du soufre avec les halogènes s'obtiennent généralement par combinaison directe des éléments et sont tous assez réactifs. Le **chlorure de soufre,** S_2Cl_2, est utilisé en chimie organique et dans la vulcanisation du caoutchouc. Il faut signaler en outre le **bichlorure,** SCl_2, le **tétrachlorure,** SCl_4, l'**hexafluorure,** SF_6; avec le brome, on ne connaît que le seul **bromure,** S_2Br_2; les composés de l'iode ne sont pas connus.

Avec l'oxygène, le soufre forme quatre oxydes qui sont le **protoxyde,** SO, le **sesquioxyde,** S_2O_3, le **bioxyde** ou **anhydride sulfureux,** SO_2, et le **trioxyde** ou **anhydride sulfurique,** SO_3. Aux deux premiers correspondent des acides inconnus, les deux derniers sont des anhydrides d'acides dont la force augmente avec le nombre d'oxydation. Le protoxyde se forme en soumettant à une décharge électrique un mélange de soufre et d'anhydride sulfureux. Le sesquioxyde se forme en faisant réagir à froid le soufre et l'anhydride sulfurique :

$$S + SO_3 \rightarrow S_2O_3.$$

Il devrait lui correspondre l'acide $H_2S_2O_4$ ou **acide hydrosulfureux** dont on ne connaît que les sels que l'on peut préparer de la façon suivante :

$$Zn + 2SO_2 \rightarrow ZnS_2O_4$$

$$ZnS_2O_4 + Na_2CO_3 \rightarrow ZnCO_3 + Na_2S_2O_4.$$

Les **hydrosulfites alcalins (ou dithionates alcalins)** sont des réducteurs énergiques utilisés dans l'industrie des colorants.

L'**anhydride sulfureux,** SO_2, présent dans les émanations volcaniques, est obtenu par combustion du soufre ou des pyrites :

$$4FeS_2 + 11O_2 \rightarrow 8SO_2 + 2Fe_2O_3.$$

C'est un gaz d'odeur suffocante, facilement liquéfiable et dont l'évaporation produit un froid intense. C'est un puissant réducteur; on l'utilise comme décolorant et comme agent de stérilisation. Ses solutions sont utilisées comme fongicides et pour la préservation des bois. L'anhydride sulfureux se dissout facilement dans l'eau. L'acide sulfureux auquel il devrait donner naissance n'a jamais été isolé mais on connaît ses sels, les **sulfites neutres,** Me_2SO_3, et les **sulfites acides,** $MeHSO_3$, ou **bisulfites,** stables et décomposés par les acides forts avec libération d'anhydride sulfureux. Certains sont utilisés industriellement, en particulier le **sulfite de sodium,** Na_2SO_3, et le **bisulfite de calcium,** $Ca(HSO_3)_2$.

En faisant bouillir une solution de sulfite avec du soufre :

$$Na_2SO_3 + S \rightarrow Na_2S_2O_3$$

ou en oxydant le sulfure de calcium à l'air :

$$2CaS_2 + 3O_2 \rightarrow 2CaS_2O_3$$

ou en traitant un sulfure par l'anhydride sulfureux :

$$3Na_2S + 4SO_2 + H_2O \rightarrow 3Na_2S_2O_3 + H_2S$$

il se forme un **thiosulfate,** sel stable de l'**acide thiosulfurique,** $H_2S_2O_3$ (que l'on peut considérer comme

Rhône-Poulenc. Service A.T.C.

▲ ***Atelier de production d'acide sulfurique à l'usine Rhône-Poulenc du Havre; au premier plan, la matière première : le soufre.***

dérivant de l'acide sulfurique par remplacement d'un des quatre oxygènes par un soufre). L'acide thiosulfurique est un acide fort instable, même en solution. Le **thiosulfate de sodium** est utilisé pour le développement des épreuves photographiques. Il agit comme réducteur; cette réaction caractéristique avec l'iode est utilisée en analyse chimique :

$2Na_2S_2O_3 + I_2 \rightarrow 2NaI + Na_2S_4O_6$ *(tétrathionate de sodium).*

L'**anhydride sulfurique,** SO_3, est obtenu industriellement par oxydation de l'anhydride sulfureux par l'oxygène en présence de catalyseur :

$$2SO_2 + O_2 \xrightarrow{V_2O_5} 2SO_3$$

et au laboratoire par chauffage de pyrosulfates alcalins :

$$K_2S_2O_7 \rightarrow SO_3 + K_2SO_4.$$

Il se combine violemment à l'eau pour donner l'**acide sulfurique,** H_2SO_4, qui est l'acide le plus important du soufre. A l'état pur, l'acide sulfurique est un liquide visqueux, assez dense, qui dégage énormément de chaleur lorsqu'on le verse dans de l'eau. C'est un acide fort qui peut dissoudre de nombreux métaux; concentré, c'est aussi un oxydant, et, par son avidité pour l'eau, il agit comme déshydratant.

La production industrielle de l'acide sulfurique a débuté en Angleterre au XVIII^e siècle. Elle consiste dans la combustion du soufre ou des pyrites pour former de l'anhydride sulfureux qui est ensuite oxydé en anhydride sulfurique, lequel, absorbé dans de l'eau, donne l'acide sulfurique. Il existe deux méthodes pour réaliser l'oxydation : la *méthode des chambres de plomb* et le *procédé par contact.*

Dans la *méthode des chambres de plomb,* on forme d'abord l'anhydride sulfureux, qui est ensuite oxydé en présence d'eau et d'oxyde d'azote qui catalyse la réaction. On suppose que le processus met en jeu le sulfate acide de nitrosyle, $NOHSO_4$, selon les réactions suivantes :

$$S + O_2 \rightarrow SO_2$$

$$SO_2 + 2NOHSO_4 + 2H_2O \rightarrow 3H_2SO_4 + 2NO$$

$$2NO + O_2 \rightarrow 2NO_2$$

$$2H_2SO_4 + NO + NO_2 \rightarrow 2NOHSO_4 + H_2O.$$

Cette méthode, aujourd'hui en voie de disparition, produit un acide dilué (53 à 60 degrés Baumé), que l'on doit concentrer ensuite jusqu'à 66 degrés Baumé pour avoir l'acide pratiquement pur.

Le *procédé par contact* est catalytique et opère l'oxydation à l'air de SO_2 en présence d'oxyde de vanadium, V_2O_5. L'anhydride sulfurique formé est un liquide incolore qui se solidifie en prismes à 16 °C. On l'absorbe dans l'acide sulfurique concentré à 66 degrés Baumé ou dilué, et l'on obtient un *oléum,* c'est-à-dire un acide sulfurique renfermant un excès de SO_3 (acide fumant).

On ne produit pas directement l'acide sulfurique par la réaction :

$$SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$$

à cause de la trop forte exothermicité de cette réaction (21,28 kcal).

Les **sulfates** neutres sont pour la plupart solubles dans l'eau, sauf les sulfates alcalino-terreux. Les sulfates acides sont généralement plus solubles et stables, mais, à chaud, ils se transforment en **pyrosulfates,** sels de l'**acide pyrosulfurique** $H_2S_2O_7$:

$$2NaHSO_4 \rightarrow Na_2S_2O_7 + H_2O.$$

On peut aussi obtenir l'acide pyrosulfurique par action de l'anhydride sulfurique sur l'acide sulfurique :

$$SO_3 + H_2SO_4 \rightarrow H_2S_2O_7.$$

▶ *Une photographie de* Pierre et Marie Curie *prise en 1904. C'est en souvenir de celle-ci que le premier élément radio-actif obtenu à l'état pur fut appelé* polonium.

Archives I.G.D.A.

Par décomposition thermique de ses sels, il se forme ensuite SO_3 :

$$Na_2S_2O_7 \rightarrow Na_2SO_4 + SO_3.$$

Pour cette raison, on utilise les pyrosulfates pour solubiliser les substances difficilement attaquables.

Il faut aussi mentionner certains chlorures oxygénés du soufre.

Le **chlorure de thionyle,** $SOCl_2$, obtenu par action du pentachlorure de phosphore sur SO_2, est le chlorure d'acide de l'acide sulfureux :

$$PCl_5 + SO_2 \rightarrow SOCl_2 + POCl_3.$$

C'est un liquide incolore, d'odeur désagréable, qui se décompose en présence d'eau :

$$SOCl_2 + H_2O \rightarrow SO_2 + 2HCl.$$

C'est un agent de chloration.

L'**acide chlorosulfonique,** SO_3HCl, s'obtient par action de l'acide chlorhydrique sur l'anhydride sulfurique. Il s'hydrolyse brutalement dans l'eau en donnant de l'acide sulfurique et de l'acide chlorhydrique.

Enfin, le **chlorure de sulfuryle,** SO_2Cl_2, se forme par combinaison directe du chlore et de l'anhydride sulfureux; on l'utilise comme agent de chloration.

Il existe en outre des peracides du soufre et, en particulier, l'**acide de Caro,** H_2SO_5 :

$$ClSO_3H + H_2O_2 \rightarrow H_2SO_5 + HCl$$

solide cristallin, très oxydant, et l'**acide peroxydisulfurique,** $H_2S_2O_8$, qui, avec ses sels, est un oxydant énergique.

Il faut citer enfin les **acides thioniques,** de formule générale $H_2S_nO_6$, dans lesquels *n* varie de 2 à 6 (**acide dithionique** $n = 2$, **trithionique** $n = 3$, etc.), qui renferment des groupements du type —S—S—.

Sélénium

Le sélénium est assez répandu dans la nature, mais seulement en petites quantités et dans de rares minerais. On le retire des boues des chambres de plomb et surtout du raffinage électrolytique du cuivre. Il se présente sous plusieurs formes, dont la plus stable est le *sélénium gris* ou *métallique* qui présente une bonne conductibilité électrique après exposition à des rayons lumineux (d'où son emploi dans les cellules photo-électriques).

Parmi ses composés, l'**hydrogène sélénié,** ou **hydrure de sélénium,** H_2Se, est un gaz incolore, facilement liquéfiable, moins stable que l'hydrogène sulfuré; il se prépare de la façon suivante :

$$2Al + 3Se \rightarrow Al_2Se_3$$
$$Al_2Se_3 + 6HCl \rightarrow 2AlCl_3 + 3H_2Se.$$

Le gaz est plus toxique que H_2S, et ses solutions aqueuses sont plus fortement acides.

Les dérivés halogénés du sélénium ont une étroite analogie avec ceux du soufre.

L'**anhydride sélénieux,** SeO_2, se forme par combustion du sélénium et se dissout dans l'eau avec formation d'**acide sélénieux,** H_2SeO_3, stable, même à l'état solide, mais plus faible que l'acide sulfureux. Les sélénites sont facilement réduits en sélénium métallique.

L'**anhydride sélénique,** SeO_3, se dissout dans l'eau avec formation d'**acide sélénique,** H_2SeO_4, lequel peut aussi être obtenu par oxydation de l'acide sélénieux. C'est un acide fort plus oxydant que l'acide sulfurique. Les séléniates sont isomorphes des sulfates.

Tellure

Plus rare que le sélénium, le tellure est cependant localement plus abondant dans certains minerais. La majeure partie du tellure est obtenue comme sous-produit dans l'extraction du cuivre, de l'or et du bismuth. La forme la plus stable est, comme pour le sélénium, la forme métallique. Le tellure est utilisé pour durcir le plomb et dans la métallurgie de l'acier et du cuivre où, comme additif, il confère au métal une meilleure aptitude à l'usinage.

L'**hydrogène telluré,** TeH_2, est très instable et très réducteur. Il réagit à froid avec l'oxygène en libérant du tellure et brûle facilement. Il se dissout dans l'eau en donnant une solution acide. Les **tellurures** alcalins sont incolores et solubles, ceux des métaux lourds sont colorés et insolubles. Les dérivés halogénés, très nombreux, sont assez semblables à ceux du sélénium et du soufre.

Le **bioxyde de tellure,** ou **anhydride tellureux,** TeO_2, que l'on obtient par combustion du tellure, est peu soluble dans l'eau mais réagit avec les bases alcalines pour donner des **tellurites** (ex. : Na_2TeO_3). Cependant, l'**acide tellureux,** H_2TeO_3, n'a jamais été isolé.

Polonium

C'est le premier élément radio-actif qui ait été obtenu à l'état pur; son nom lui a été donné en souvenir de l'origine polonaise de Marie Curie. Il a une activité assez intense et un comportement chimique intermédiaire entre celui du tellure et celui du bismuth. Il a des caractères nettement métalliques.

Groupe VIIA

Le manganèse (Mn), le technétium (Tc) et le rhénium (Re) constituent le groupe VIIA de la classification périodique; le plus important des trois est le manganèse; le rhénium est rare, et le technétium est un élément artificiel. On trouve ces éléments assez fréquemment au degré d'oxydation + 7 qui est caractéristique du groupe; par contre, on les trouve plus rarement au degré d'oxydation — 1.

Manganèse

Le manganèse est assez répandu dans la nature. Ses principaux minerais sont : la *pyrolusite,* MnO_2, et différents *oxydes* (Mn_2O_3, par exemple) et *carbonates* ($MnCO_3$, par exemple). Le métal est obtenu assez souvent sous forme de *ferro-alliage* (les ferromanganèses sont des produits métallurgiques utilisés pour l'affinage de la fonte et la préparation des aciers). Le métal pur est obtenu par aluminothermie.

Le manganèse est un métal gris, brillant, pouvant se présenter sous deux formes : la *forme* γ, relativement malléable, et la *forme* α, très dure et très cassante. Ses mauvaises propriétés mécaniques font qu'il n'est jamais employé seul mais en addition dans les fontes et les aciers dont il contribue à augmenter les qualités méca-

niques. Finement divisé, le métal réagit avec l'eau bouillante et peut devenir pyrophorique. Il se dissout dans les acides en formant des sels manganiques. Il se combine directement avec les halogènes, le soufre, le phosphore, le carbone et le silicium. Il est utilisé comme désoxydant dans la métallurgie du fer, et, très fréquemment, il entre dans la composition des aciers. On l'utilise aussi dans certains alliages spéciaux du cuivre et du nickel.

Le manganèse peut présenter tous les degrés d'oxydation de + 1 à + 7, mais le manganèse + 1 et le manganèse + 5 correspondent à des composés instables. Les oxydes MnO et Mn_2O_3 ont un caractère basique; Mn_3O_4 est un oxyde du type salin; MnO_2 est amphotère, et, enfin, Mn_2O_7 a des propriétés d'anhydride d'acide.

L'**oxyde de manganèse,** MnO, est obtenu par réduction à chaud des oxydes supérieurs en présence d'hydrogène. A l'air, il tend à s'oxyder en Mn_3O_4. L'**hydroxyde,** $Mn(OH)_2$, est blanc mais brunit à l'air par oxydation. Les sels manganiques, rose pâle (couleur de l'ion Mn^{++}), sont isomorphes des sels correspondants du magnésium. Le **sulfate de manganèse,** $MnSO_4$, qui peut cristalliser sous différentes formes hydratées, a une certaine importance. Le **sulfure,** MnS, et le **carbonate,** $MnCO_3$, sont des minerais de manganèse; ce dernier, facilement décomposable à chaud, a été autrefois utilisé comme source d'anhydride carbonique :

$$MnCO_3 \xrightarrow{120\ °C} MnO + CO_2.$$

L'**oxyde manganique,** Mn_2O_3, a un caractère salin (on peut l'écrire $MnO \cdot MnO_2$). On peut aussi noter parmi les composés au degré d'oxydation + 3 l'**hydroxyde manganique,** $Mn(OH)_3$, qui, chauffé à 100 °C en l'absence d'air, se transforme en MnO(OH) et différents sels assez peu solubles.

L'**oxyde,** Mn_3O_4, est le plus stable des oxydes du manganèse, tous les autres oxydes se transformant en cet oxyde lorsqu'on les chauffe entre 900 et 1 000 °C. On peut le considérer soit comme $Mn_2O_3 \cdot MnO$, soit comme $MnO_2 \cdot 2MnO$.

Le **bioxyde de manganèse,** MnO_2, qui correspond au minerai la pyrolusite, a un caractère amphotère. Avec les bases fortes, il peut former des **manganites.** Le bioxyde de manganèse est un oxydant puissant; on peut l'utiliser pour produire du chlore au laboratoire :

$$MnO_2 + 6HCl \rightarrow [H_2MnCl_6] + 2H_2O \rightarrow MnCl_2 + 2HCl + Cl_2 + 2H_2O$$

mais ses principales applications industrielles sont la fabrication des permanganates de sodium et de potassium, des sulfates et chlorures de manganèse. On l'utilise comme dépolarisant dans les piles Leclanché, comme agent décolorant des verres teintés par des composés du fer, et comme oxydant dans la production de certains composés organiques.

Aux degrés d'oxydation + 6 et + 7, on trouve les composés les plus importants du manganèse, les **manganates** et les **permanganates.** Par fusion alcaline oxydante du bioxyde de manganèse, on obtient un manganate alcalin, K_2MnO_4, vert :

$$2MnO_2 + 4KOH + O_2 \rightarrow 2K_2MnO_4 + 2H_2O.$$

Dans l'eau, ou en milieu acide même très faible, le manganate se dismute :

$$3K_2MnO_4 + 3H_2O \rightleftharpoons MnO_2 \cdot H_2O + 2KMnO_4 + 4KOH.$$

On obtient industriellement le permanganate de potassium par oxydation anodique, ou par action du chlore :

$$2K_2MnO_4 + Cl_2 \rightarrow 2KCl + 2KMnO_4.$$

Le permanganate de potassium cristallise en prismes violet foncé à reflets métalliques. Il est soluble à raison de 6 % dans l'eau et ses solutions sont d'un violet intense et fortement oxydantes et désinfectantes.

Selon que l'on opère en milieu acide, neutre ou alcalin, l'oxydation permanganique répond aux équations suivantes :

en milieu acide :

$$MnO_4^- + 5e^- + 8H^+ \rightarrow Mn^{++} + 4H_2O$$

en milieu neutre ou légèrement alcalin :

$$MnO_4^- + 3e^- + 2H_2O \rightarrow MnO_2 + 4OH^-$$

en milieu nettement alcalin :

$$MnO_4^- + e^- \rightarrow MnO_4^{--}.$$

Grâce au changement net de coloration qui l'accompagne, chacune de ces réactions se prête bien à l'analyse par des solutions titrées.

L'**acide permanganique,** $HMnO_4$, dont dérivent les permanganates, est un solide brun, cristallisé, qui se comporte comme un acide fort. Son **anhydride,** Mn_2O_7, s'obtient en traitant avec précaution le permanganate de potassium par l'acide sulfurique concentré à — 20 °C. C'est un liquide vert olive qui explose dès qu'il est porté à 10 °C; son odeur rappelle celle du chlore.

Eléments du groupe VIIA			
Propriétés	**Manganèse**	**Technétium**	**Rhénium**
Numéro atomique	25	43	75
Masse atomique	54,94	99	186,22
Rayon atomique (en Å)	1,18	1,36	1,37
Configuration électronique	$3d^54s^2$	$4d^55s^2$	$4f^{14}5d^56s^2$
Densité	7,43	11,5	21,0
Point de fusion (en °C)	1247	2200	3150
Point d'ébullition (en °C)	2030	–	≃ 5900

▲ ***Tableau des éléments du groupe VIIA.***

Technétium

Le technétium est le premier élément fabriqué artificiellement. Son isotope $_{99}Tc$ a une vie très longue qui permet l'étude chimique de cet élément. On le trouve à la dose de 6 % environ dans les produits de fission de l'uranium. Parmi les composés du technétium, on connaît les **pertechnétates,** analogues aux permanganates, et l'**anhydride,** Tc_2O_7, qui est une poudre jaune. Les propriétés chimiques du technétium sont très voisines de celles du rhénium.

Rhénium

Le rhénium est un des éléments les plus rares dans l'écorce terrestre. On le rencontre en très petites quantités dans les minerais d'autres éléments (des groupes VI et VIII). En Allemagne, on le récupère dans la métallurgie du cuivre. On l'oxyde en perrhénate de potassium $KReO_4$, et on le réduit ensuite par l'hydrogène en rhénium métal :

$$2KReO_4 + 7H_2 \rightarrow 2KOH + 2Re + 6H_2O.$$

Le rhénium est similaire au platine, dur et peu ductile; c'est un métal très réfractaire (il fond à 3 150 °C). Il est peu oxydable lorsqu'il est compact; sous forme de poudre, il s'oxyde facilement à l'air. Dans l'oxygène, le rhénium se transforme en **oxyde,** volatil, Re_2O_7. Dans l'air humide, il se forme l'**acide perrhénique,** $HReO_4$, qui se forme aussi par action des acides nitrique et sulfurique concentrés sur le métal. Avec les alcalis à la fusion, on obtient les **perrhénates.** On connaît des dérivés du rhénium au degré d'oxydation + 7, mais aussi + 6, + 5, + 4 et + 3.

Groupe VIIB

Les halogènes, c'est-à-dire le fluor (F), le chlore (Cl), le brome (Br), l'iode (I) et l'astate (At), qui forment ce groupe sont typiquement non métalliques; le fluor et le chlore sont gazeux, le brome liquide, l'iode et l'astate solides. Leur couleur devient progressivement plus foncée, depuis le jaune pour le fluor jusqu'au violet pour l'iode.

Eléments du groupe VIIB					
Propriétés	**Fluor**	**Chlore**	**Brome**	**Iode**	**Astate**
Numéro atomique	9	17	35	53	85
Masse atomique	19,00	35,46	79,92	126,92	(210)
Rayon atomique (en Å)	0,64	0,99	1,14	1,33	–
Configuration électronique	$1s^2 2s^2 2p^5$	$3s^2 3p^5$	$3d^{10} 4s^2 4p^5$	$4d^{10} 5s^2 5p^5$	$4f^{14} 5d^{10} 6s^2 6p^5$
Densité	1,11	1,56	3,12	4,94	–
Point de fusion (en °C)	– 223	– 101	– 7,3	113,7	(302)
Point d'ébullition (en °C)	– 188	– 34,1	58,8	187	–

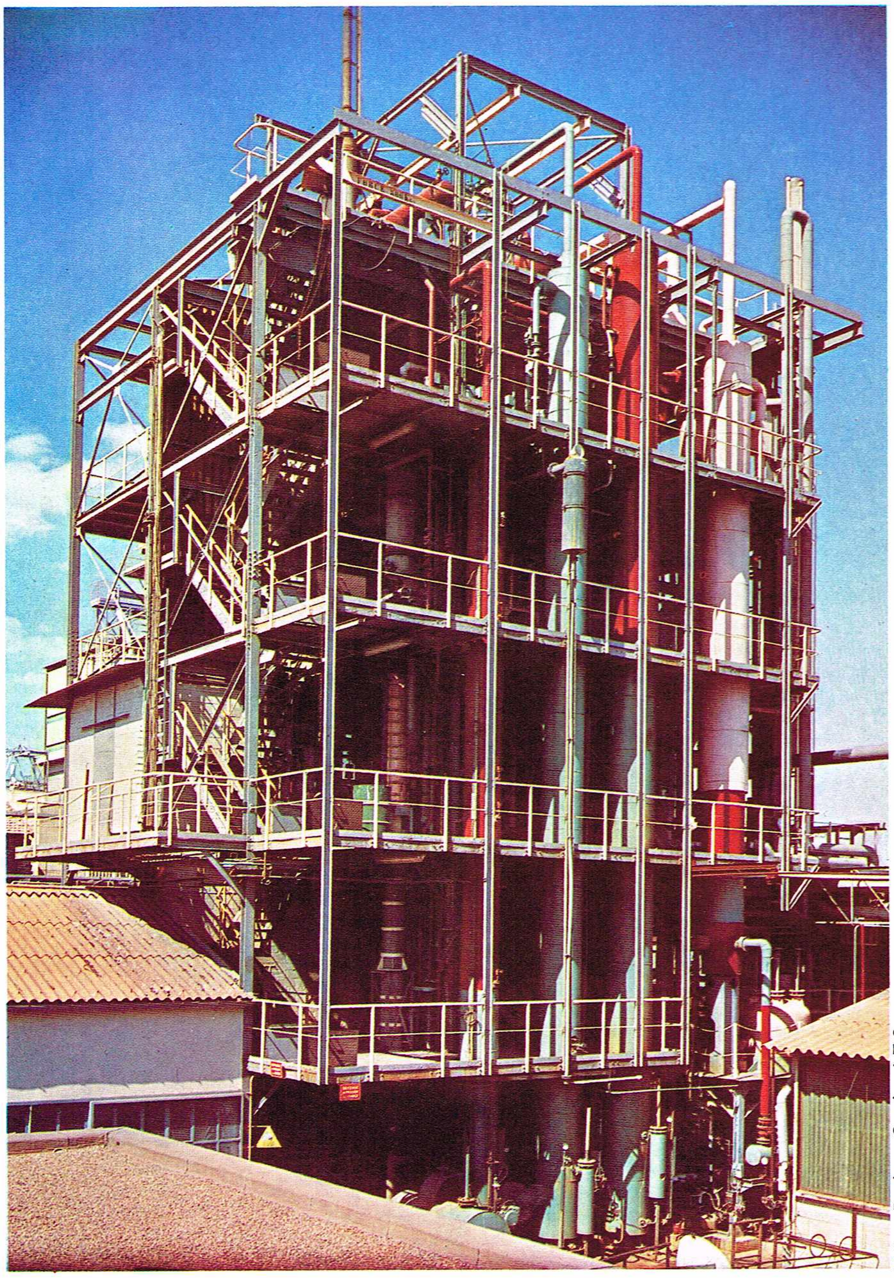

Rhône-Poulenc. Service A.T.C.

L'iode a une électronégativité très faible par rapport à celle des autres halogènes et présente certains caractères métalliques. Ces éléments peuvent présenter tous les degrés d'oxydation de — 1 à + 7 et se combinent facilement avec les métaux (surtout ceux dont la masse atomique est faible). Ils forment directement des sels, d'où leur nom d'*halogènes,* qui signifie « qui engendre le sel ». Par ailleurs, ils réagissent directement avec la plupart des autres éléments. Les halogènes forment facilement des ions X^-. Ils sont en effet situés dans la classification périodique près des gaz rares et tendent à acquérir un électron pour atteindre une stabilité supérieure. Sont caractéristiques de ce groupe les hydracides HX, tous gazeux, sauf l'acide fluorhydrique qui est liquide.

Les halogènes peuvent se combiner entre eux pour donner de nombreux composés interhalogénés d'autant plus stables que la différence des nombres atomiques des deux halogènes est plus grande. Les fluorures sont les plus stables. Parmi les nombreux composés connus, on peut citer le principal : ClF_3, gaz incolore utilisé comme incendiaire, et ClF :

$$F_2 + Cl_2 \rightarrow 2ClF$$

les fluorures de brome BrF, BrF_3 et BrF_5, les fluorures d'iode IF_5, IF_7, IOF_3, le chlorure de brome BrCl, les chlorures d'iode ICl et ICl_3, et le bromure d'iode IBr.

En ce qui concerne l'importance des halogènes, le chlore vient en premier lieu, le brome et l'iode sont assez répandus mais en quantités plus modestes, le fluor, presque aussi abondant que le chlore, est très fréquent dans les roches. On trouve les halogènes dans la nature, sous des formes très diverses qui attestent leur réactivité élevée.

Fluor

Le fluor se trouve dans quelques minerais importants, la *cryolithe,* $AlF_3 \cdot 3NaF$, les *fluoroapatites*

$$3Ca_3(PO_4)_2 \cdot CaF_2,$$

et surtout la *fluorine,* CaF_2. On peut obtenir le fluor pur par électrolyse, dans des cellules spéciales, d'un mélange HF-KF fondu et anhydre.

Le fluor est un gaz jaune verdâtre qui, en l'absence d'humidité, n'attaque pas le verre. C'est le plus électronégatif de tous les éléments et aussi le plus réactif. Il se combine de façon explosive avec l'hydrogène, même à l'obscurité et à la température ambiante. Il réagit violemment, même à basse température, avec le soufre et le phosphore rouge. Le carbone finement divisé « brûle » dans le fluor. Il se combine instantanément et avec une rare violence avec tous les éléments, les métaux alcalins, alcalino-terreux et le fer. L'or et le platine sont peu attaqués par le fluor, ainsi que le cuivre, qui, recouvert d'une couche de fluorure, devient passif.

Le fluor réagit violemment avec de nombreux composés. Avec l'eau, la réaction est violente, et il se forme de l'oxygène :

$$2F_2 + 2H_2O \rightarrow 4HF + O_2.$$

Le fluor peut se substituer à l'oxygène des acides, d'où l'origine des **fluoacides** : par exemple, à l'acide silicique H_2SiO_3 correspond l'**acide fluosilicique,** H_2SiF_6.

L'**acide fluorhydrique,** HF, est préparé en traitant la fluorine par de l'acide sulfurique concentré :

$$CaF_2 + H_2SO_4 \rightarrow CaSO_4 + 2HF$$

dans des appareils en platine ou en plomb. C'est un liquide incolore, d'odeur irritante, dont les vapeurs sont très toxiques. Il attaque la plupart des métaux avec dégagement d'hydrogène, mais les métaux nobles et le plomb résistent à son action. Il attaque les silicates et le verre, d'où son emploi pour graver sur ce dernier des signes opaques.

Les **fluorures** sont pour la plupart solubles avec une hydrolyse alcaline; les fluorures de plomb et de métaux alcalino-terreux sont par contre peu solubles. Les fluorures alcalins peuvent se combiner avec HF pour donner des fluorures complexes ou **hydrofluorures** (KF · HF).

L'importance industrielle du fluor est due essentiellement à la fabrication de *dérivés fluorocarbonés,* comme le **dichlorodifluorométhane :**

$$CCl_4 + 2HF \xrightarrow{SbCl_5} CCl_2F_2 + 2HCl$$

utilisé comme réfrigérant et comme constituant des aérosols.

Le **tétrafluoréthylène,** $CF_2 = CF_2$, est le monomère d'un plastique autolubrifiant, le *téflon :*

$$—CF_2—CF_2—CF_2—CF_2—$$

On utilise encore le fluor dans la production de l'uranium (traitement de UO_2 par l'acide fluorhydrique et production d'hexafluorure par action de ClF_3 sur UF_4 formé précédemment, ou traitement direct de UF_4 par le fluor à 475 °C). Le **trifluorure de chlore** est un agent de fluoration important. L'acide fluorhydrique est un catalyseur d'alkylation en chimie organique.

Parmi les composés du fluor, on peut citer les **fluorures d'oxygène,** F_2O et F_2O_2, dont l'importance n'est que théorique.

Chlore

Le chlore est l'halogène le plus répandu ; on le trouve sous forme de divers sels, dont le plus abondant est le chlorure de sodium (sel marin) ; on le trouve aussi à l'état libre dans certaines éruptions volcaniques.

Industriellement, on prépare le chlore par *électrolyse* du chlorure de sodium fondu ou en solution, mais, dans ce cas, il se forme de grandes quantités de soude. De nombreuses industries, chloration, préparation de matières plastiques, etc., produisant de l'acide chlorhydrique à titre de sous-produit, on a développé des procédés permettant d'oxyder HCl en chlore. Ces procédés dérivent de l'ancien *procédé Deacon :*

$$4HCl + O_2 \rightarrow 2H_2O + 2Cl_2.$$

Au laboratoire, on peut préparer le chlore par action de l'acide chlorhydrique sur le bioxyde de manganèse :

$$CaO \cdot 2MnO_2 + 10HCl \rightarrow 2Cl_2 + 2MnCl_2 + CaCl_2 + 5H_2O$$

$$2MnCl_2 + 3Ca(OH)_2 + O_2 \rightarrow CaO \cdot 2MnO_2 + 2CaCl_2 + 3H_2O.$$

C'est un gaz jaune verdâtre facilement liquéfiable et très soluble dans l'eau (eau de chlore à propriétés oxydantes). Moins réactif que le fluor, il se combine à de nombreux éléments à la température ordinaire. Avec l'hydrogène, il se combine violemment mais seulement à la lumière. Il attaque l'or mais, par contre, s'il est parfaitement exempt d'eau, il n'attaque pas le fer, le bronze et le cuivre compact. On le conserve et on le commercialise dans des récipients en fer ou en cuivre. Comme le fluor, il a tendance à se substituer à l'hydrogène de nombreux composés. On l'utilise ainsi pour la préparation de composés chlorés comme le tétrachlorure de carbone, le chloroforme, le phosgène, le chlorure de soufre, la chloramine, etc.

L'**acide chlorhydrique,** HCl, est un des acides minéraux les plus utilisés. On l'obtient par action du chlore sur l'hydrogène, mais aussi comme sous-produit de nombreuses synthèses industrielles de dérivés chlorés. C'est un gaz incolore, d'odeur irritante, très soluble dans l'eau. On l'utilise généralement en solutions, qui ont la propriété, par leur caractère acide fort, d'attaquer de nombreux métaux, alors que HCl sec ne se comporte pas comme un acide.

Les **chlorures** sont généralement solubles, à l'exception des chlorures d'or, de palladium et de plomb, peu solubles, et des chlorures mercureux, cuivreux, d'argent et de thallium, insolubles.

On connaît de nombreux composés du chlore avec l'oxygène, correspondant à des degrés d'oxydation de + 1 à + 7. Ce sont tous des anhydrides d'acides mais les acides correspondants n'ont pas toujours été isolés. Leur stabilité augmente avec leur teneur en oxygène. Certains sont utilisés comme oxydants.

L'**anhydride hypochloreux,** Cl_2O, est un gaz jaune-brun facilement liquéfiable et explosif ; avec l'eau, il donne l'acide hypochloreux :

$$Cl_2O + H_2O \rightleftharpoons 2ClOH.$$

C'est un acide très faible et instable (lorsqu'on tente de l'isoler, on n'obtient que l'anhydride), et c'est un oxydant énergique.

Par contre, les **hypochlorites** sont stables et agissent comme des oxydants forts. Ils sont décomposés par les acides forts. Les solutions d'**hypochlorite de calcium,** $Ca(OCl)_2$, improprement appelé chlorure de chaux, sont utilisées pour le blanchiment des textiles et comme désinfectants.

L'**acide chloreux,** $HClO_2$, auquel correspondrait l'anhydride non isolé, Cl_2O_3, n'existe qu'en solution diluée.

Le **chlorite de sodium,** $NaClO_2$, que l'on obtient à partir du bioxyde de chlore, est utilisé pour le blanchiment des textiles :

$$2ClO_2 + 2NaOH + H_2O_2 \rightarrow 2NaClO_2 + 2H_2O + O_2.$$

Les chlorites d'argent et de plomb, peu solubles, explosent par percussion.

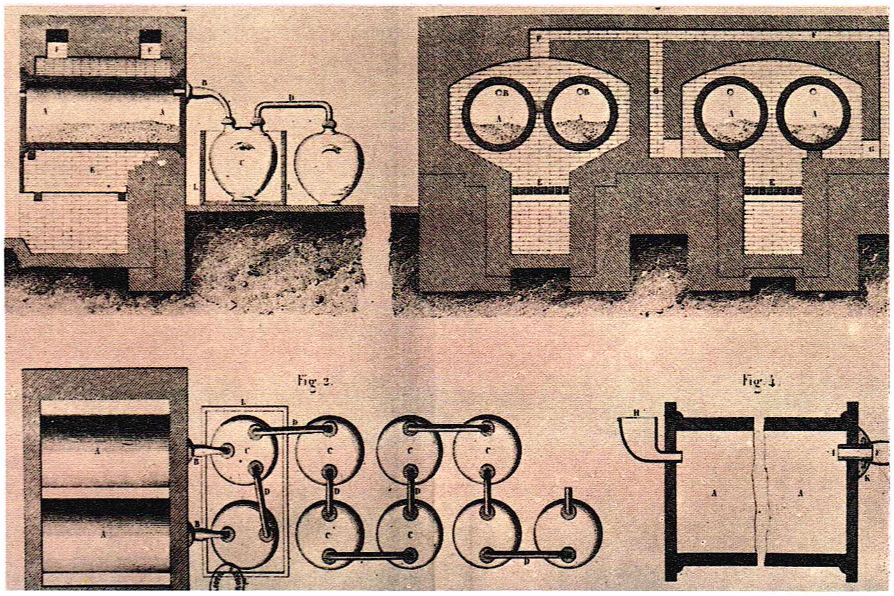

C. Ciccione

▲ *Installations pour la production d'*acides chlorhydrique et nitrique *(planche tirée du* Traité de chimie générale *de V. Pelouze et E. Fremy).*

◀ *Page ci-contre, en haut, tableau des éléments du* groupe VIIB. *En bas, atelier de production de* chlorofluoroalcanes *(nom commercial pour le groupe : flugène) [usine Rhône-Poulenc de Salindres, Gard]. C'est sous sa forme d'acide fluorhydrique anhydre, HF, que le fluor est utilisé industriellement dans la fabrication de* dérivés fluorocarbonés.

▼ *Usine de production de* chlore et de soude. *Industriellement, on prépare le chlore par* électrolyse *du chlorure de sodium fondu ou en solution, et l'on obtient parallèlement de grandes quantités de soude.*

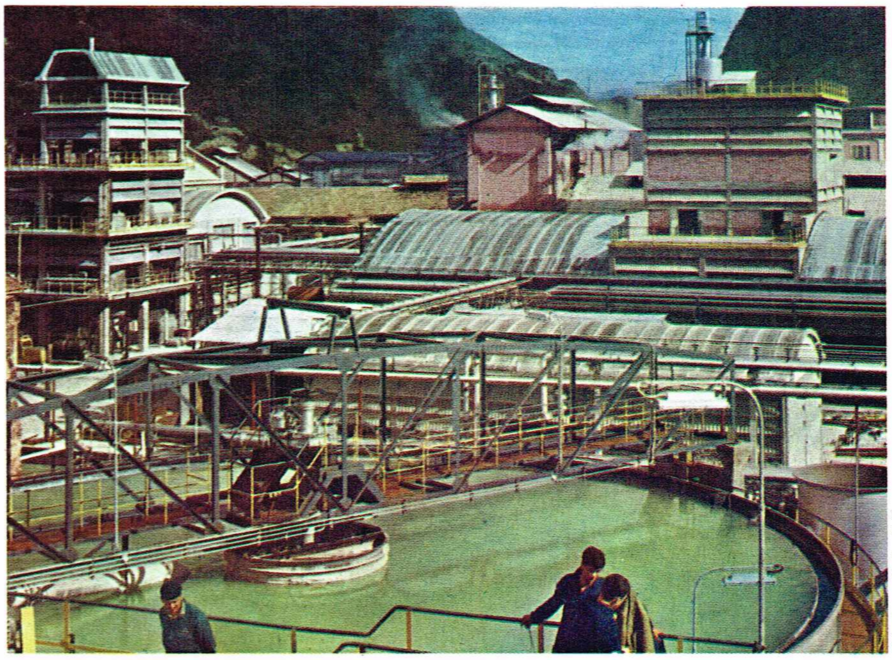

Montecatini - Edison

Le **bioxyde de chlore,** ClO_2, est obtenu industriellement par réduction d'un chlorate par l'acide oxalique :

$$2KClO_3 + 2H_2C_2O_4 \rightarrow 2ClO_2 + 2H_2O + 2CO_2 + K_2C_2O_4.$$

C'est un gaz jaune-vert, facilement liquéfiable, d'odeur caractéristique, irritante; c'est un désinfectant et un décolorant puissant, mais il est très explosif. En solution avec des bases alcalines, il réagit lentement en donnant des chlorates et des chlorites :

$$2ClO_2 + 2NaOH \rightarrow NaClO_2 + NaClO_3 + H_2O.$$

L'**acide chlorique,** $HClO_3$, non isolable (qui correspondrait à l'**anhydride,** Cl_2O_5), s'obtient en traitant par un acide fort le chlorate de baryum :

$$Ba(ClO_3)_2 + H_2SO_4 \rightarrow BaSO_4 + 2HClO_3.$$

C'est un acide fort et un oxydant énergique en solution concentrée. Les chlorates peuvent être préparés industriellement par électrolyse vers 70 °C de solutions de NaCl dans des électrolyseurs sans diaphragme. L'hypochlorite formé se dismute en chlorate et chlorure :

$$3NaClO \rightarrow NaClO_3 + 2NaCl.$$

Le **chlorate de potassium,** $KClO_3$, qui se prépare par électrolyse d'une solution de chlorure de potassium, est utilisé pour la fabrication des allumettes et de certains explosifs. A chaud, le chlorate de potassium se dismute en chlorure et en perchlorate :

$$4KClO_3 \xrightarrow{400\ °C} 3KClO_4 + KCl.$$

L'**oxyde,** Cl_2O_6, peut être préparé par action de l'ozone sur le bioxyde de chlore :

$$2ClO_2 + 2O_3 \rightarrow Cl_2O_6 + 2O_2.$$

C'est un liquide rouge qui explose facilement. Dans l'eau, il a une réaction neutre, mais, avec les bases, se comporte comme un anhydride mixte, fournissant du chlorate et du perchlorate :

$$2ClO_3 + 2KOH \rightarrow KClO_3 + KClO_4 + H_2O.$$

L'**anhydride perchlorique,** Cl_2O_7, est obtenu en déshydratant l'acide perchlorique par l'anhydride phosphorique. C'est un liquide incolore, huileux, plus stable que les autres oxydes (il n'explose qu'au choc et par chauffage) et qui se dissout lentement dans l'eau pour former l'**acide perchlorique,** $HClO_4$. Ce dernier est obtenu plus facilement par action de l'acide sulfurique sur le perchlorate de potassium. En solution aqueuse, il est dense et huileux comme l'acide sulfurique, et stable s'il n'est pas trop concentré. L'acide perchlorique est l'un des acides les plus forts que l'on connaisse, et, à l'état concentré, c'est aussi un oxydant puissant. Les perchlorates sont tous solubles dans l'eau (toutefois, les perchlorates de potassium, de rubidium et de césium sont peu solubles) et s'obtiennent par oxydation anodique des chlorates. Certains sont utilisés pour la fabrication des explosifs. Le **perchlorate de magnésium,** $Mg(ClO_4)_2$, est un très bon déshydratant pour les gaz.

Brome

Le brome existe dans la nature sous forme de sels divers, mais on le trouve principalement dans des gisements de sels provenant de mers anciennes. La teneur en brome des eaux des mers et des océans est de 0,068 g/l. Le brome est extrait des eaux salées par déplacement et entraînement par le chlore.

C'est un liquide de couleur rouge-brun dégageant des vapeurs rouges désagréables et suffocantes. Sa densité est élevée (3,12). Il est soluble dans l'eau (eau de brome, qui est un oxydant) et plus encore dans le chloroforme et le sulfure de carbone. On peut l'obtenir en traitant un bromure par le chlore :

$$MgBr_2 + Cl_2 \rightarrow Br_2 + MgCl_2.$$

Il ressemble au chlore mais il est moins réactif. Il se substitue à l'hydrogène de nombreux composés organiques, en particulier à la lumière ou en présence de

▶ *Salle d'électrolyse du chlore de l'usine Rhône-Poulenc à Saint-Auban. L'électrolyse s'effectue dans des cellules à fond d'acier (cathode) sur lequel coule le mercure qui se charge en amalgame de sodium, alors que le chlore se dégage à l'anode.*

catalyseurs. Certains de ses composés sont utilisés en pharmacie, en photographie et comme colorants.

L'**acide bromhydrique,** HBr, est un gaz que l'on peut obtenir par action du brome sur l'hydrogène par synthèse photochimique à froid :

$$H_2 + Br_2 \rightarrow 2HBr$$

ou bien par action de l'eau sur le tribromure de phosphore :

$$PBr_3 + 3H_2O \rightarrow H_3PO_3 + 3HBr.$$

C'est un acide fort. Il dissout les métaux avec production d'hydrogène. Les bromures sont très solubles dans l'eau. Le bromure d'argent (utilisé dans les pellicules photographiques) et le bromure de plomb sont très peu solubles dans l'eau.

Les composés oxygénés du brome ont peu d'intérêt pratique. On les obtient de façon identique aux composés correspondants du chlore. On connaît en particulier l'**anhydride hypobromeux,** Br_2O, le **dioxyde,** BrO_2, les **acides hypobromeux,** HBrO, et **bromique,** $HBrO_3$. Les **hypobromites** et les **bromates** s'obtiennent de façon analogue aux hypochlorites et aux chlorates.

Iode

La plus grande partie de l'iode produit industriellement dans le monde provient des eaux mères de la purification des nitrates du Chili; on l'extrait aussi des cendres de certaines Algues, de certaines eaux minérales et enfin des eaux salées qui accompagnent le pétrole brut.

A partir des iodures, on peut obtenir l'iode par oxydation avec le chlore :

$$2KI + Cl_2 \rightarrow 2KCl + I_2$$

à partir des iodates, par réduction avec le bisulfite :

$$2IO_3^- + 5HSO_3^- \rightarrow I_2 + 5SO_4^{--} + 3H^+ + H_2O.$$

On le purifie par sublimation. L'élément se présente sous forme de lamelles gris-noir à l'éclat métallique, et ses vapeurs sont d'un violet intense. Il est peu soluble dans l'eau, par contre facilement soluble dans les solutions d'iodures alcalins avec formation de complexes. Il se dissout facilement dans l'alcool (teinture d'iode), l'éther, avec une coloration brune, et dans le sulfure de carbone et le chloroforme avec une coloration violette.

Chimiquement, l'iode est semblable au chlore et au brome, mais il réagit moins facilement, même avec l'hydrogène. Beaucoup de ses propriétés chimiques témoignent d'un certain comportement métallique. L'iode et les polyiodures alcalins se comportent comme des oxydants. L'intense coloration bleue que donne l'iode en présence de solutions aqueuses concentrées d'amidon est mise à profit en analyse chimique.

L'**acide iodhydrique,** IH, se forme par synthèse directe à froid ou, de préférence, en traitant par l'iode des composés hydrogénés, par exemple :

$$I_2 + H_2S \rightarrow 2IH + S.$$

C'est un gaz incolore, d'odeur piquante, très soluble dans l'eau. La solution aqueuse est un acide fort. En solution concentrée, par action de l'air :

$$O_2 + 4HI \rightarrow 2H_2O + 2I_2$$

ou de la lumière, la solution brunit en libérant de l'iode.

Les **iodures** sont généralement solubles, à l'exception des iodures d'argent, de mercure, de thallium et de plomb.

Certains iodures comme les iodures alcalins peuvent additionner de l'iode en formant des polyiodures :

$$I^- + I_2 \rightarrow I_3^- \; (+ I_2 \rightarrow I_5^-, \text{etc.}).$$

L'acide iodhydrique en solution peut agir comme réducteur énergique, car il tend à former de l'iode élémentaire avec une relative facilité.

Parmi les composés oxygénés de l'iode, l'**anhydride iodique,** I_2O_5, qui correspond à l'**acide** HIO_3, est un solide cristallin très soluble dans l'eau. C'est un acide fort et un oxydant énergique. Les **iodates** sont généralement moins solubles que les chlorates correspondants.

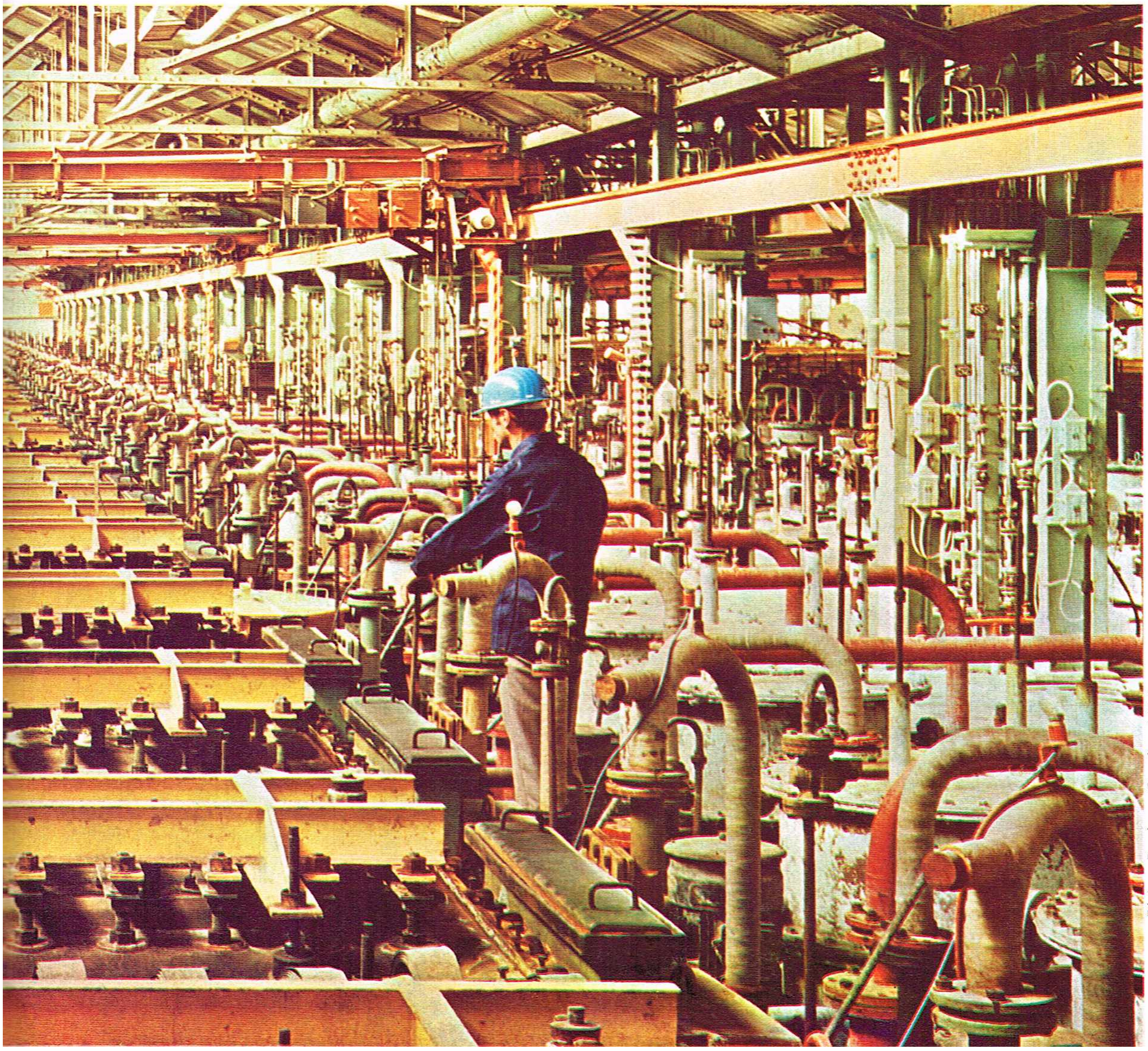

Rhône-Poulenc. Service A.T.C.

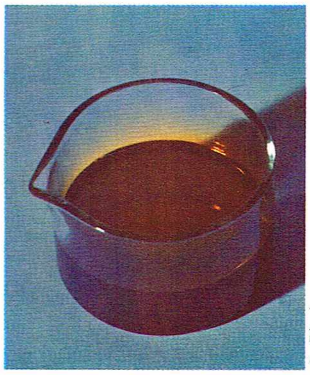

A. Rizzi

▲ ***Le brome** est un liquide de couleur rouge-brun dégageant des vapeurs rouges désagréables et suffocantes.*

L'**acide periodique,** HIO_4, donne avec l'eau des hydrates qui se comportent à leur tour comme des acides (par exemple, $HIO_4 \cdot 2H_2O$ se comporte comme l'acide H_5IO_6 appelé **acide paraperiodique**).

On ne connaît pas les acides iodeux et hypo-iodeux. Les hypo-iodites peuvent exister transitoirement en solution alcaline et à froid.

Dans certains solvants organiques, l'iode peut se dissocier selon l'équilibre suivant :

$$I_2 \rightleftharpoons I^- + I^+.$$

Au cation I^+ correspondent certains sels comme le **perchlorate d'iode,** $IClO_4$. On connaît aussi le cation I^{3+} qui a un comportement typiquement métallique et donne des composés jaunes du type IA_3 : par exemple, $I(ClO_4)_3$.

Astate

C'est un élément que l'on n'obtient qu'artificiellement :

$$^{209}_{83}Bi + ^{4}_{2}\alpha \rightarrow ^{211}_{85}At + 2^{1}_{0}n$$

et ses isotopes ont une durée de vie très brève. Il a un comportement chimique plus semblable à celui du polonium qu'à celui de l'iode. L'astate se sublime.

Groupe VIII

Il est formé par les éléments suivants : fer (Fe), cobalt (Co), nickel (Ni), platine (Pt) et les métaux de la famille du platine. Tous ces éléments présentent la structure typique des métaux de transition. Les trois éléments Fe, Co, Ni de la première triade possèdent des rayons extrêmement voisins et ont des propriétés très semblables. Les deux autres triades sont réunies dans le groupe de la « mine du platine ».

Ce sont tous des métaux blanc-gris, difficilement fusibles, qui, en accord avec leur place dans la classification périodique, peuvent présenter tous les degrés d'oxydation de + 1 à + 8 avec des degrés de stabilité différents. Le ruthénium (Ru) et l'osmium (Os) sont les seuls à posséder un degré d'oxydation + 8 stable. Le cobalt, le rhodium (Rh) et l'iridium (Ir) (en particulier les deux derniers) forment des complexes stables au degré d'oxydation + 3. Le nickel, le palladium (Pd) et le platine sont particulièrement stables au degré d'oxydation + 2. Tous possèdent la caractéristique d'adsorber de grandes quantités de gaz, en particulier l'hydrogène, et constituent, à l'état finement divisé, les catalyseurs de nombreuses réactions.

Leur diffusion dans la nature est très variable. Le fer est très diffusé et assez abondant; par contre, les métaux de la mine du platine sont extrêmement rares.

Signalons enfin que l'osmium et le platine sont les éléments dont la masse spécifique est la plus élevée. Le fer, le cobalt et le nickel sont fortement magnétiques, en particulier le fer.

Fer

Très répandu dans l'écorce terrestre (4,20 %), on le trouve cependant très rarement à l'état natif. Certaines météorites ferreuses peuvent contenir plus de 90 % de fer. On trouve le fer dans les *oxydes* (*magnétite* Fe_3O_4, *hématite* Fe_2O_3, *limonite* $Fe_2O_3 \cdot H_2O$), les *carbonates* (*sidérite* $FeCO_3$), les *sulfures* (*pyrite* FeS_2), dans les *phosphates*, et dans les *silicates*. Les minerais d'où l'on extrait le fer sont principalement les *oxydes* et les *carbonates*. Les oxydes sont traités dans des hauts fourneaux fonctionnant en continu. Le charbon sert de combustible; il permet d'atteindre des températures élevées et joue le rôle de réducteur :

$$2C + O_2 \rightleftharpoons 2CO$$
$$Fe_2O_3 + 3CO \rightleftharpoons 2Fe + 3CO_2$$
$$CO_2 + C \rightleftharpoons 2CO.$$

Dans la métallurgie du fer, le minerai est d'abord soumis à un concassage et au criblage, et à différents autres traitements permettant de le mettre sous la meilleure forme pour son traitement ultérieur.

Dans une usine sidérurgique moderne, on élabore l'acier en plusieurs étapes. Le minerai est d'abord réduit dans un haut fourneau ; à 1 400 °C, on obtient un produit liquide riche en carbone (3,5 à 4,5 %) appelé *fonte*. La fonte est transformée en *acier liquide,* à 1 600 °C, par affinage dans un creuset à l'oxygène pur et désoxydation (au ferromanganèse). La coulée de l'acier est réalisée ensuite soit dans des moules en sable (aciers moulés), soit plus généralement en lingotières, soit encore dans une installation de coulée continue donnant directement des demi-produits. On procède ensuite, après solidification et démoulage, excepté pour le dernier type de coulée, à un chauffage et à une homogénéisation de température des lingots vers 1 200 °C dans des fours pits (verticaux). Les lingots sont ensuite transformés par laminage sur des trains dégrossisseurs duoréversibles (dits « blooming » ou « slabbing ») en *blooms* s'il s'agit de produits longs, en *brames* s'il s'agit de produits plats. Le laminage est ensuite pratiqué à chaud sur des trains finisseurs de types très variés selon que l'on désire obtenir des tôles, des profilés (rails, poutrelles, etc.).

Il peut se faire aussi que l'on dispose de fonte liquide stockée avant traitement à l'aciérie. Les procédés employés par la suite sont alors pneumatiques ou sur sol. Dans le premier cas, l'agent affinant peut être l'oxygène (procédé LD pour la conversion des fontes hématites, procédés dérivés pour la fonte phosphoreuse et procédé Kaldo) ou l'air atmosphérique (procédé Thomas pour la conversion des fontes phosphoreuses et, parfois encore, procédé Bessemer pour les fontes hématites). Il peut se faire également qu'on cherche à valoriser les ferrailles, et, dans ce cas, on emploie le four Martin à enfournement solide ou le four électrique à arcs, qui,

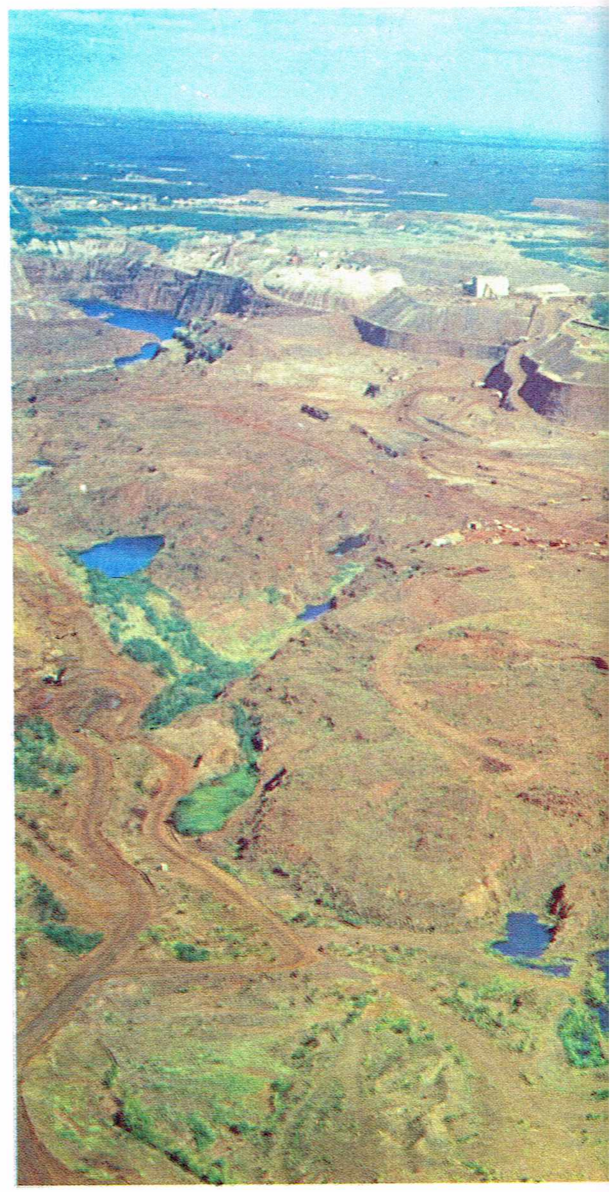

▶ ***Une mine de fer à ciel ouvert (États-Unis).***

Eléments du groupe VIII									
Propriétés	**Fer**	**Cobalt**	**Nickel**	**Famille du platine**					
				Ruthénium	**Rhodium**	**Palladium**	**Osmium**	**Iridium**	**Platine**
Numéro atomique	26	27	28	44	45	46	76	77	78
Masse atomique	55,85	58,94	58,71	101,1	102,9	106,4	190,2	192,2	195,1
Rayon atomique (en Å)	1,165	1,157	1,149	1,34	1,34	1,37	1,35	1,36	1,38
Configuration électronique	$3d^6 4s^2$	$3d^7 4s^2$	$3d^8 4s^2$	$4d^7 5s^1$	$4d^8 5s^1$	$4d^{10} 5s^0$	$4f^{14} 5d^6 6s^2$	$4f^{14} 5d^7 6s^2$	$4f^{14} 5d^9 6s^1$
Densité	7,86	8,80	8,90	12,3	12,4	12,03	22,7	22,65	21,45
Point de fusion (en °C)	1530	1490	1452	2400	1966	1555	2700	2454	1774
Point d'ébullition (en °C)	2735	3100	2830	4900	3900	3170	4600	4500	3800

▲ ***Tableau des éléments du*** **groupe VIII.**

E.P.S.

▶ *Une des étapes de la métallurgie du fer : le minerai est d'abord réduit dans un haut fourneau ; à 1 400 °C, on obtient un produit liquide,* la fonte.

Parimage

réservé naguère à l'élaboration de qualité, tend à devenir un engin de grosse production.

Le fer est rarement utilisé, car il serait trop ductile et malléable. Par contre, on utilise une grande variété d'aciers dans lesquels les propriétés du fer sont améliorées par des quantités variables d'un ou plusieurs autres métaux.

Le fer métallique est inaltérable dans l'air sec et dans l'eau exempte de gaz carbonique. A l'air humide, il se recouvre de rouille [oxyde de fer hydraté $FeO(OH)$] qui ne forme pas un revêtement protecteur, d'où une corrosion rapide et complète :

$$Fe + 2H_2O + 2CO_2 \rightarrow Fe(HCO_3)_2 + H_2$$
$$2Fe(HCO_3)_2 + 1/2O_2 \rightarrow 2FeO(OH) + 4CO_2 + H_2O.$$

Il se dissout facilement dans les acides même dilués avec formation d'hydrogène :

$$Fe + 2HCl \rightarrow FeCl_2 + H_2.$$

Porté au rouge, il décompose l'eau :

$$3Fe + (4 + n)H_2O \rightarrow Fe_3O_4 \cdot nH_2O + 4H_2$$

en se transformant en oxydes qui, à leur tour, peuvent être réduits par l'hydrogène formé. L'acide nitrique concentré ne dissout pas le fer, en raison d'un phénomène de passivation.

On connaît les oxydes suivants : FeO, l'*oxyde ferreux,* Fe_2O_3, l'*oxyde ferrique,* et Fe_3O_4, un *oxyde salin* qui constitue le minerai, la magnétite.

L'**oxyde ferreux,** FeO, peut être obtenu, par exemple, par chauffage, à l'abri de l'air, d'oxalate ferreux :

$$FeC_2O_4 \rightarrow FeO + CO + CO_2.$$

Il est instable, même à température ambiante, et se décompose rapidement à froid en fer et Fe_3O_4 :

$$4FeO \rightleftharpoons Fe_3O_4 + Fe.$$

L'**hydrate de fer,** $Fe(OH)_2$, est une base faible qui se forme lorsqu'on traite une solution de sel ferreux par une base. C'est un précipité qui se présente sous la forme d'une masse gélatineuse verte qui fonce rapidement par oxydation à l'air.

L'**oxyde ferrique,** Fe_2O_3 (ou **sesquioxyde de fer**), se forme lorsque l'on chauffe à l'air un grand nombre de composés du fer. On l'utilise comme abrasif et comme pigment rouge. Fortement calciné, il devient insoluble dans les acides. On le trouve dans la nature sous forme d'hématite, qui est le principal minerai de fer.

L'**hydroxyde,** $Fe(OH)_3$, est obtenu par action des bases alcalines ou de l'ammoniac sur les sels ferriques ; c'est un gel brunâtre. Dans la soude caustique concentrée, il peut se dissoudre en donnant du **ferrite,** $NaFeO_2$, dont le comportement est amphotère.

L'**oxyde salin,** Fe_3O_4, est constitué par la magnétite (aimant naturel) et conduit relativement bien l'électricité. C'est un oxyde mixte, contenant à la fois des ions Fe^{2+} et Fe^{3+}, et ayant la formule d'une spinelle :

$$[Fe^{3+} + Fe^{2+}]\ O_4^{2-}.$$

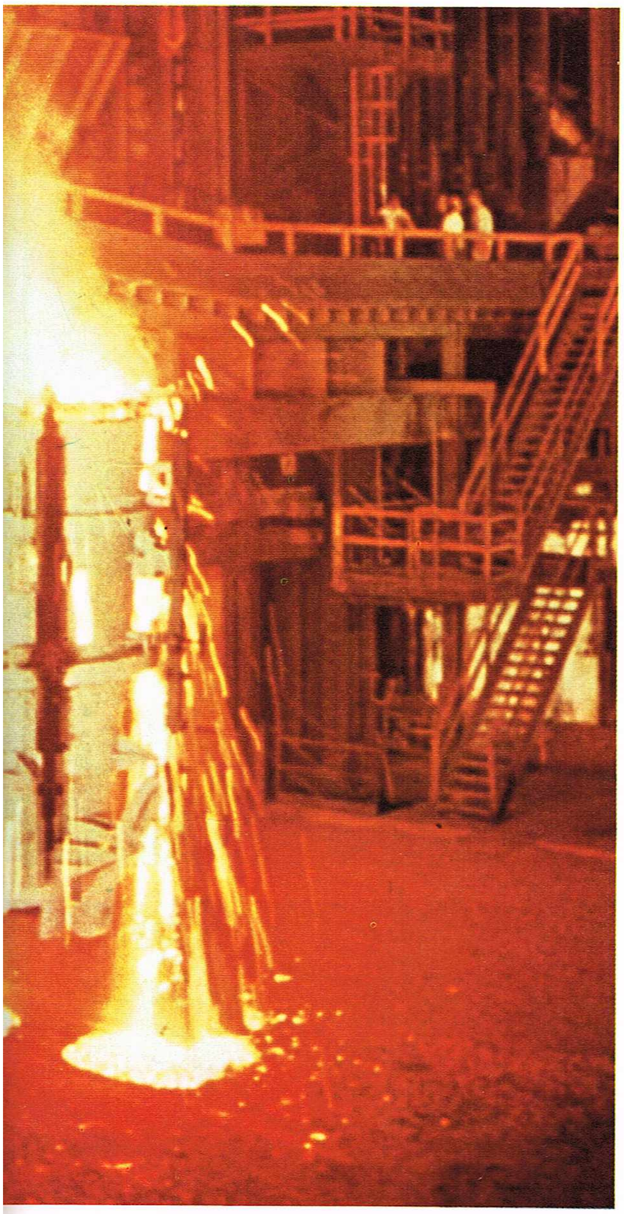

C'est l'oxyde qui se forme lorsqu'on chauffe le fer à l'air à une température supérieure à 1 100 °C, température à laquelle l'oxyde ferrique perd de l'oxygène :

$$3Fe_2O_3 \xrightarrow{1\,100\,°C} 2Fe_3O_4 + 1/2O_2.$$

Il faut signaler aussi divers **sulfures de fer** dont les principaux sont FeS **(sulfure ferreux)** et FeS_2, abondamment diffusé dans le minerai appelé pyrite. Le sulfure ferreux s'obtient par précipitation d'un sel ferreux par un sulfure alcalin. Il est facilement décomposé par les acides en libérant de l'hydrogène sulfuré.

La **pyrite,** FeS_2, n'est pas un véritable sulfure mais doit être considérée comme un disulfure constitué par l'anion S_2^{--}. Par combustion de la pyrite, on obtient l'oxyde ferrique :

$$2FeS_2 + 11/2O_2 \rightarrow Fe_2O_3 + 4SO_2.$$

Ainsi, le fer tend à donner des composés dans lesquels il se trouve à l'état d'oxydation + 2 (composés ferreux) et + 3 (composés ferriques). Les sels ferreux à l'état solide et en solution ont une coloration vert clair. Ils se forment lorsque l'on traite le fer par un acide, même oxydant, pourvu qu'il soit dilué et froid. Ils s'oxydent en sels ferriques, lentement en solution acide, rapidement en milieu neutre et presque instantanément en milieu alcalin. A froid, ils absorbent l'oxyde d'azote en formant un complexe $[FeNO]^{++}$, de couleur brune, cette coloration pouvant disparaître par chauffage (cette réaction est utilisée pour l'identification des acides nitreux et nitrique qui forment des oxydes d'azote par réduction en présence de sels ferreux).

Le sel ferreux le plus commun est le **sulfate :**

$$FeSO_4 \cdot 7H_2O\,;$$

le **sulfate de fer et d'ammonium :**

$$(NH_4)_2\,SO_4 \cdot FeSO_4 \cdot 6H_2O$$

(sel de Mohr), moins oxydable, est utilisé dans les colorants, comme désinfectant et pour des emplois divers.

Les **carbonates, phosphates** et **silicates ferreux** sont assez répandus dans les minéraux.

L'**oxalate ferreux,** FeC_2O_4, donne avec l'oxalate de potassium un sel complexe utilisé en photographie comme réducteur. Les sels ferriques ont des ressemblances avec les sels d'aluminium, avec lesquels ils sont isomorphes. On les obtient par oxydation des sels ferreux, lesquels peuvent être réformés grâce à l'emploi d'oxydants énergiques.

Le **chlorure ferrique,** $FeCl_3$, anhydre, est obtenu en chauffant de la limaille de fer dans un courant de chlore :

$$2Fe + 3Cl_2 \rightarrow 2FeCl_3.$$

On l'utilise comme catalyseur en chimie organique.

Le **sulfate ferrique,** $Fe_2(SO_4)_3$, peut donner des aluns bien cristallisés.

Il existe aussi des composés dans lesquels le fer se trouve au degré d'oxydation + 4 comme les **perferrites** ($BaFeO_3$, par exemple), assez stables en milieu alcalin mais qui se décomposent en présence d'acides avec libération d'oxygène. Les composés du fer au degré d'oxydation + 6 sont relativement plus stables. Il s'agit des **ferrates** (K_2FeO_4) que l'on obtient à partir du fer ou des sels ferriques, grâce à des oxydants forts (nitrate de potassium, chlore, peroxyde de sodium). Ils sont isomorphes des chromates et des sulfates, et sont solubles dans l'eau qui peut les décomposer :

$$2K_2FeO_4 + 5H_2O \rightarrow 2Fe(OH)_3 + 4KOH + 3/2O_2.$$

Le fer ferreux et ferrique forme avec les ions CN^- des complexes extrêmement importants. Les **hexacyanoferrates** $[Fe(CN)_6]^{4-}$ et $[Fe(CN)_6]^{3-}$ sont peu dissociés en solution et ne donnent plus les réactions caractéristiques des ions ferreux et ferriques. L'**hexacyanoferrate** (II) **de potassium,** $K_4\,[Fe(CN)_6]$, ou **ferrocyanure de potassium,** est obtenu par décomposition avec le sel de calcium correspondant; le **ferricyanure de potassium** est $[FeK_3(CN)_6]$.

Ces ions entrent dans des réactions complexes conduisant à des produits importants. Le **bleu de Prusse** ou **ferrocyanure ferrique** est utilisé comme pigment bleu foncé $Fe\,[Fe(CN)_6]_3$. Le **ferrocyanure de potassium** n'est pas toxique mais, chauffé en présence d'acide sulfurique dilué, il dégage de l'acide cyanhydrique. L'**acide ferrocyanhydrique,** $H_4Fe(CN)_6$, est un solide blanc que l'on obtient en traitant le sel de baryum par l'acide sulfurique. Il se décompose en s'oxydant partiellement à l'air. En plus du bleu de Prusse, de nombreux ferrocyanures sont colorés et utilisés en analyse (par exemple, pour le cuivre). Le **ferrocyanure ferreux,** par contre, est blanc mais devient bleu à l'air par oxydation.

Le **ferricyanure de potassium,** $K_3\,[Fe(CN)_6]$, est obtenu par oxydation du ferrocyanure :

$$K_4\,[Fe(CN)_6] + 1/2Cl_2 \rightarrow K_3\,[Fe(CN)_6] + KCl.$$

Il se présente sous forme de cristaux rouge foncé, mais la poudre est jaune et la solution jaune verdâtre. Avec les sels ferreux, on obtient un précipité bleu. L'acide ferricyanhydrique, $H_3Fe(CN)_6$, est plus instable que l'acide ferrocyanhydrique.

Parmi les complexes du fer, il faut encore citer le **fer pentacarbonyle,** $Fe(CO)_5$, qui se forme par action directe de l'oxyde de carbone sur le fer finement divisé. Il est instable à la chaleur; on connaît aussi $Fe_2(CO)_9$ et $Fe_3(CO)_{12}$.

Actuellement, la production par certaines industries de sous-produits contenant du fer en quantités importantes pose des problèmes de récupération. Il s'agit en particulier des bains décapants de l'industrie de l'acier, qui renferment $FeSO_4$ et $FeCl_2$, et des « boues rouges » du procédé Bayer pour la fabrication de l'aluminium, qui contiennent de l'oxyde ferrique hydraté.

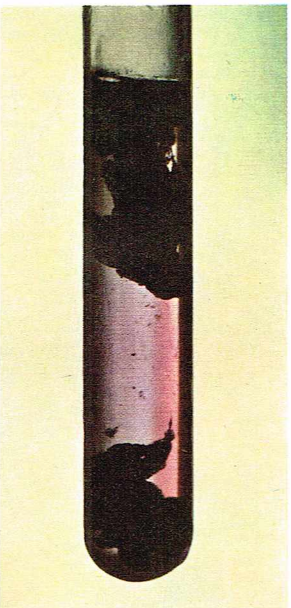

A. Rizzi

▲ *Précipité de sulfure* **de cobalt.**

Cobalt

Le cobalt, très rare à l'état natif et assez peu répandu dans l'écorce terrestre, se trouve dans quelques minerais qui sont des *arséniures* ($CoAs_2$) et des *sulfo-arséniures* ($CoAsS$). Dans la métallurgie du cobalt, qui est une opération longue et complexe, après élimination de la gangue par flottation, le minerai est grillé. Le soufre et l'arsenic s'éliminent à l'état d'oxydes volatils. La solution obtenue par attaque chlorhydrique est traitée par H_2S en milieu acide. Ni et Co restent en solution. Par action combinée de la chaux et du chlore agissant comme oxydant, le métal s'oxyde. L'oxyde Co_2O_3 hydraté précipite. On le réduit enfin, après calcination, par le carbone ou l'hydrogène. Il est difficile d'éliminer totalement du cobalt le nickel qui intervient comme une impureté aux caractères très voisins de ceux du cobalt.

Le cobalt est un métal blanc argenté, fragile, ne se travaillant pas à froid. Il est ferromagnétique mais moins que le fer. Il ne s'altère pas à l'air. Il se dissout facilement dans l'acide nitrique mais plus lentement dans les acides sulfurique et chlorhydrique. On l'utilise dans certains aciers spéciaux, dans les aimants, et comme catalyseur. Les composés du cobalt sont utilisés dans l'industrie des émaux, de la poterie, du verre et des peintures.

On connaît les *composés cobalteux,* correspondant au degré d'oxydation + 2, et les *composés cobaltiques,* dérivant du degré d'oxydation + 3.

L'**hydroxyde de cobalt,** $Co(OH)_2$, bleu, vire au rose en solution. Par déshydratation, il fournit l'**oxyde,** CoO, gris-vert, que l'on peut aussi former par action du métal sur la vapeur d'eau :

$$Co + H_2O \rightleftharpoons CoO + H_2.$$

Le **chlorure de cobalt,** $CoCl_2$, est bleu lorsqu'il est anhydre et rose sous forme hydratée. C'est une caractéristique commune à tous les sels cobalteux qui peuvent ainsi servir d'indicateur de la présence d'humidité. Les sels cobalteux calcinés avec de l'aluminium donnent un **aluminate de cobalt,** $Co(AlO_2)_2$, de couleur bleue.

En oxydant l'hydrate cobalteux, on obtient l'**hydrate cobaltique,** $Co(OH)_3$, noir, qui, par déshydratation à 160 °C, se transforme en **oxyde,** Co_2O_3, noir.

Les sels cobaltiques sont peu nombreux. On notera simplement le **fluorure de cobalt,** CoF_3, qui est un agent de fluoration que l'on obtient par action du fluor sur le chlorure cobalteux.

$$CoCl_2 + 3/2F_2 \rightarrow CoF_3 + Cl_2.$$

Le cobalt III a une grande tendance à former des complexes ioniques. Parmi ceux-ci, on peut mentionner le complexe $[Co\,(CN)_6]^{3-}$ et l'acide correspondant, ainsi que $[Co\,(NO_2)_6]^{3-}$ dont le sel de potassium, peu soluble, est utilisé en chimie analytique :

$$Co^{++} + 7NO_2^- + 2H^+ \rightarrow [Co\,(NO_2)_6]^{3-} + NO + H_2O.$$

Parmi les complexes du cobalt, il faut enfin citer les **cobalt carbonyles,** $Co_2(CO)_8 \cdot Co(CO)_4$ et l'**hydrure,** $HCo\,(CO)_4$, qui interviennent dans la catalyse de la synthèse OXO des aldéhydes.

Si l'on chauffe l'oxyde et l'hydrate de cobalt, on obtient finalement l'**oxyde salin** noir, Co_3O_4.

Les **oxydes,** Co_2O_3 et Co_3O_4, se dissolvent avec difficulté dans les acides en formant les sels cobalteux correspondants et de l'oxygène :

$$Co_3O_4 + 3H_2SO_4 \rightarrow 3CoSO_4 + 1/2O_2 + 3H_2O.$$

Le cobalt est indispensable à la vie, la **vitamine B_{12},** complexe du cobalt trivalent, est un facteur d'antianémie pernicieuse. Le cobalt joue un rôle dans la nutrition animale et végétale (oligo-élément). L'isotope radioactif ^{60}Co est utilisé en médecine (cobalthérapie).

Nickel

On trouve le nickel dans la nature à l'état natif ou sous forme de *sulfures (pyrrhotine)*, de *silicates (garniérite)*, d'*arséniures (nickélite)* ou d'*oxydes (latérites)*.

La métallurgie du nickel est assez complexe ; plusieurs méthodes permettent d'extraire le métal pur, parmi lesquelles les trois plus importantes sont l'exploitation électrique, la réduction chimique et le procédé au carbonyle. Les minerais sulfurés, après les traitements habituels, sont grillés pour former une matte sulfurée

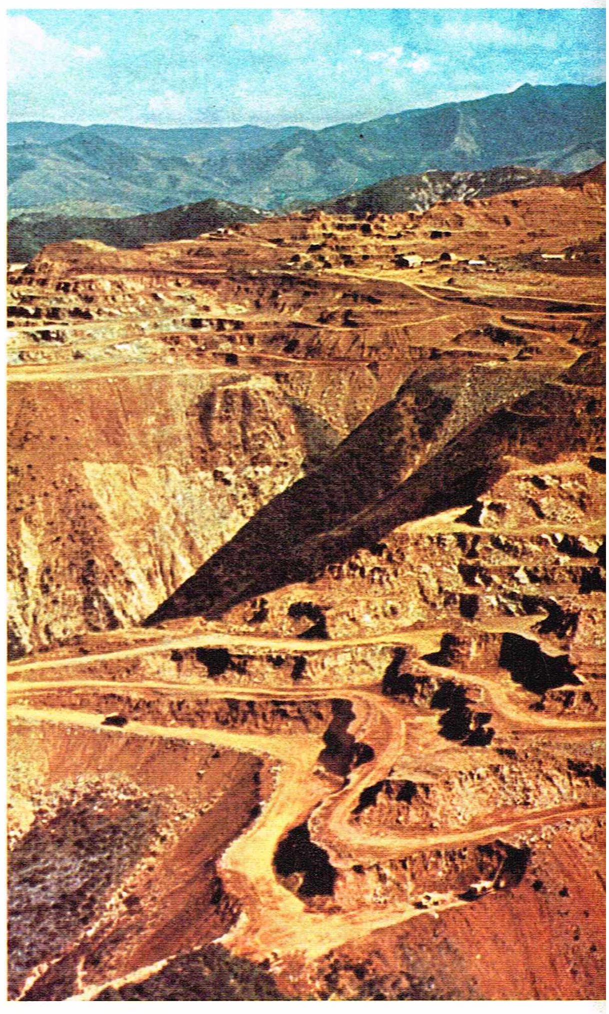

▶ *Plateau d'extraction* **de nickel** *en Nouvelle-Calédonie.*

Société Métallurgique le Nickel - S.L.N.

▲ ***Une des étapes de la métallurgie du nickel : une coulée de scories (Doniambo, Nouvelle-Calédonie).***

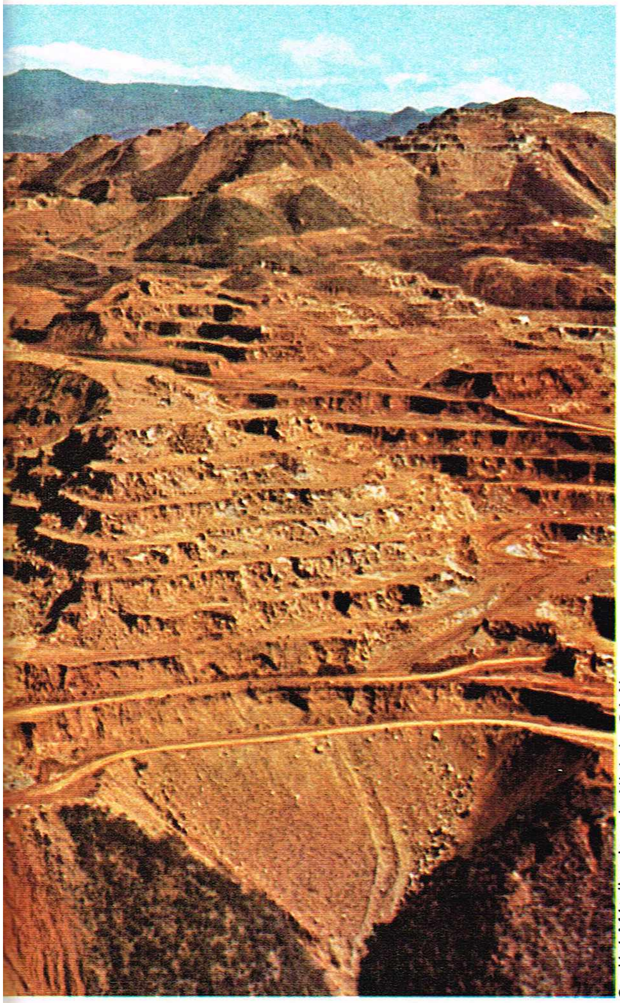

Société Métallurgique le Nickel - S.L.N.

qui est ensuite transformée en oxyde, NiO, qui peut être réduit par le carbone. On peut produire du nickel pur par le procédé Mond qui consiste à transformer le nickel du minerai en un composé volatil, le *nickel tétracarbonyle,* $Ni(CO)_4$, qui est ensuite décomposé par la chaleur en nickel et en oxyde de carbone que l'on recycle. On peut enfin fondre et couler les mattes sous forme d'anodes qui permettent de purifier le métal par voie électrolytique.

Le nickel est un métal blanc brillant, malléable, résistant à la corrosion dans de nombreux milieux, fortement magnétique, bon conducteur de la chaleur et de l'électricité. On peut le laminer et l'étirer en fils. Il réagit au rouge avec la vapeur d'eau. Sa résistance élevée aux alcalis concentrés et aux agents atmosphériques justifie son utilisation dans le nickelage pour la protection d'autres métaux. Il peut adsorber de nombreux gaz et en particulier l'hydrogène. Il est très utilisé sous différentes formes comme catalyseur d'hydrogénation. Le *nickel de Raney* est une forme extrêmement divisée de nickel que l'on obtient par réaction de la soude sur un alliage (50/50) de nickel et d'aluminium. Le traitement à la soude a pour effet de solubiliser l'aluminium et de fournir du nickel dont l'activité catalytique résulte de l'extrême division.

Les applications du nickel sont nombreuses. Il est surtout utilisé dans la fabrication de l'acier inoxydable, dans le nickelage, dans la préparation de différents alliages au nickel et dans de nombreux autres usages, dont la catalyse.

Parmi les principaux composés du nickel II il faut signaler l'**oxyde,** NiO, vert clair, que l'on obtient par calcination de certains sels :

$$NiCO_3 \rightarrow NiO + CO_2.$$

L'**hydroxyde,** $Ni(OH)_2$, est peu soluble dans l'eau mais très soluble dans l'ammoniaque avec formation du complexe : $[Ni\ (NH_3)_6]^{++}$; il est aussi vert clair comme une bonne partie des composés du nickel II.

Le **sulfate de nickel et d'ammonium :**

$$NiSO_4 \cdot (NH_4)_2\ SO_4 \cdot 6H_2O$$

est utilisé dans les bains de nickelage. Avec la diméthylglyoxime, les sels de nickel donnent le complexe suivant utilisé en analyse chimique :

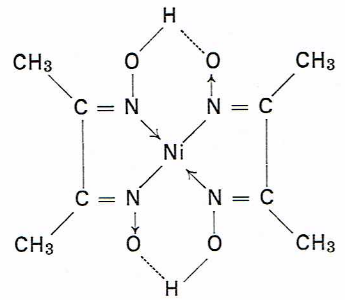

Par oxydation des composés du nickel II en milieu alcalin, on obtient l'**oxyde** et l'**hydroxyde** de formules Ni_2O_3 et $Ni(OH)_3$, peu stables et qui se décomposent en cédant de l'oxygène.

Les complexes du nickel III avec les cyanures sont moins stables que ceux du cobalt. Le cobalt et le nickel donnent les sulfures CoS et NiS noirs et solubles dans les acides.

Éléments de la famille du platine

On les trouve tous à l'état natif, en mélange ou en alliages entre eux dans des proportions diverses. Le platine, le plus abondant ($2 \cdot 10^{-5}$ % dans l'écorce terrestre), a été découvert en 1735. Le rhodium, le palladium, l'osmium et l'iridium furent identifiés entre 1803 et 1804, et le ruthénium a été découvert en 1845. On les obtient comme sous-produits de l'affinage d'autres métaux comme le cuivre ou le nickel.

La séparation de ces éléments est rendue assez difficile par la similitude de leurs propriétés, lesquelles peuvent en outre varier selon qu'ils sont à l'état pur ou en mélanges avec d'autres métaux de la même famille. Par exemple, alors que le platine est facilement soluble dans l'eau régale et que l'iridium ne s'y dissout pas, un alliage platine-iridium traité par l'eau régale laisse en solution dans l'eau régale une partie de son iridium.

On peut, par exemple, oxyder le platine brut renfermant les autres éléments par le peroxyde de sodium, traiter à l'eau et distiller dans un courant de chlore. Les tétroxydes de ruthénium, RuO_4, et d'osmium, OsO_4, distillent et on les sépare ultérieurement l'un de l'autre par distillation dans un courant de chlore. La solution résiduelle est traitée à l'eau régale et au chlorure d'ammonium. Il précipite alors de l'hexachloroplatinate et de l'hexachloroiridate d'ammonium qui sont ensuite décomposés en présence de plomb. On dissout le plomb dans l'acide nitrique et il reste une « éponge » de platine et d'iridium. On dissout le platine dans l'eau régale et il reste l'iridium. Les eaux mères de la précipitation du platine et de l'iridium sont traitées par le cyanure mercurique. Le cyanure de palladium précipite tandis que le rhodium reste en solution où il est réduit par le magnésium.

Tous ces métaux ont comme caractéristique commune une résistance élevée aux agents chimiques. Ce sont tous en effet des métaux nobles, c'est-à-dire difficilement oxydables (leurs oxydes sont instables) et insolubles dans les acides.

▼ ***Installation industrielle pour la production de nickel à Nouméa. En Nouvelle-Calédonie existent les plus grands gisements de garniérite, l'un des principaux minerais de nickel.***

S.E.F.

Ruthénium et osmium

Le **ruthénium** est parmi les éléments les plus rares de la famille du platine. C'est un métal gris acier, dur et cassant, inattaquable par les acides. L'eau régale le dissout seulement en présence d'oxygène avec formation du **trichlorure,** $RuCl_3$; ce dernier peut aussi être obtenu par chauffage du métal pulvérisé dans un courant de chlore ou encore, à partir du bioxyde, RuO_2, par action de l'acide chlorhydrique :

$$RuO_2 + 4HCl \rightarrow RuCl_3 + 1/2Cl_2 + 2H_2O.$$

A l'air, le ruthénium en poudre s'oxyde en formant le **sesquioxyde,** Ru_2O_3. Le **bioxyde,** RuO_2, peut être obtenu par action de l'oxygène à froid sur le métal. Parmi les sels de ruthénium, il faut citer les **ruthénates** (par exemple, K_2RuO_4) et les **perruthénates** comme $KRuO_4$. Dans le **tétroxyde de ruthénium,** RuO_4, le métal est au degré d'oxydation + 8; il s'agit d'un composé solide sous forme d'aiguilles jaunes qui fondent à 25 °C. Il est peu stable et se dissocie en RuO_2 et en oxygène. Le ruthénium forme enfin des composés carbonyles et de nombreux complexes de coordination.

L'**osmium,** très semblable au ruthénium, est l'élément le plus rare de la famille du platine et celui qui a la densité la plus élevée (22,7). Parmi ses composés les plus importants se trouvent le **bioxyde,** OsO_2, et le **tétroxyde,** OsO_4. Ce dernier est obtenu sous forme de cristaux jaune clair en calcinant à l'air le métal en poudre. Le tétroxyde est volatil, soluble dans l'eau, l'alcool et l'éther; la solution est neutre, a une odeur caractéristique et une toxicité élevée. On l'utilise comme oxydant et catalyseur de certaines réactions de la chimie organique ainsi qu'en histologie. On peut enfin signaler l'**octafluorure d'osmium.**

Les applications du ruthénium, de l'osmium et de leurs composés sont assez rares.

Rhodium et iridium

Ces métaux sont tous deux assez durs, très résistants aux acides mais oxydables à l'air, à chaud. Leurs composés principaux sont ceux dans lesquels l'élément est au degré d'oxydation + 3, en particulier pour le rhodium.

Le rhodium et l'iridium peuvent former de nombreux complexes. A l'état finement divisé ou sous forme de complexes, ce sont des catalyseurs très actifs.

Le **rhodium,** lorsqu'il est sous forme compacte, n'est attaqué que par le fluor à chaud, mais, sous forme finement divisée (comme on l'obtient par exemple par réduction de ses sels), on peut l'attaquer par l'eau régale et l'acide sulfurique concentré et chaud. Il adsorbe assez bien l'hydrogène et n'est pas « empoisonné » par les composés soufrés. On l'utilise souvent en alliage avec le platine, par exemple dans les catalyseurs utilisés pour la synthèse de l'acide nitrique par combustion de l'ammoniac. Le rhodium est aussi employé en alliage avec le platine pour la préparation de couples thermo-électriques. Le rhodium a un effet protecteur sur d'autres métaux que le platine.

L'**iridium** doit son nom aux colorations variées de ses différents sels. Il est souvent utilisé en alliage avec le platine (qu'il rend plus résistant) pour la fabrication de creusets, capsules et électrodes. A l'état de poudre, il s'oxyde à l'air au rouge en formant le **bioxyde,** IrO_2, et, dans ces conditions, il est aussi attaqué par le chlore. Il existe sous des degrés d'oxydation plus nombreux que le rhodium. En effet, en plus du degré d'oxydation + 3,

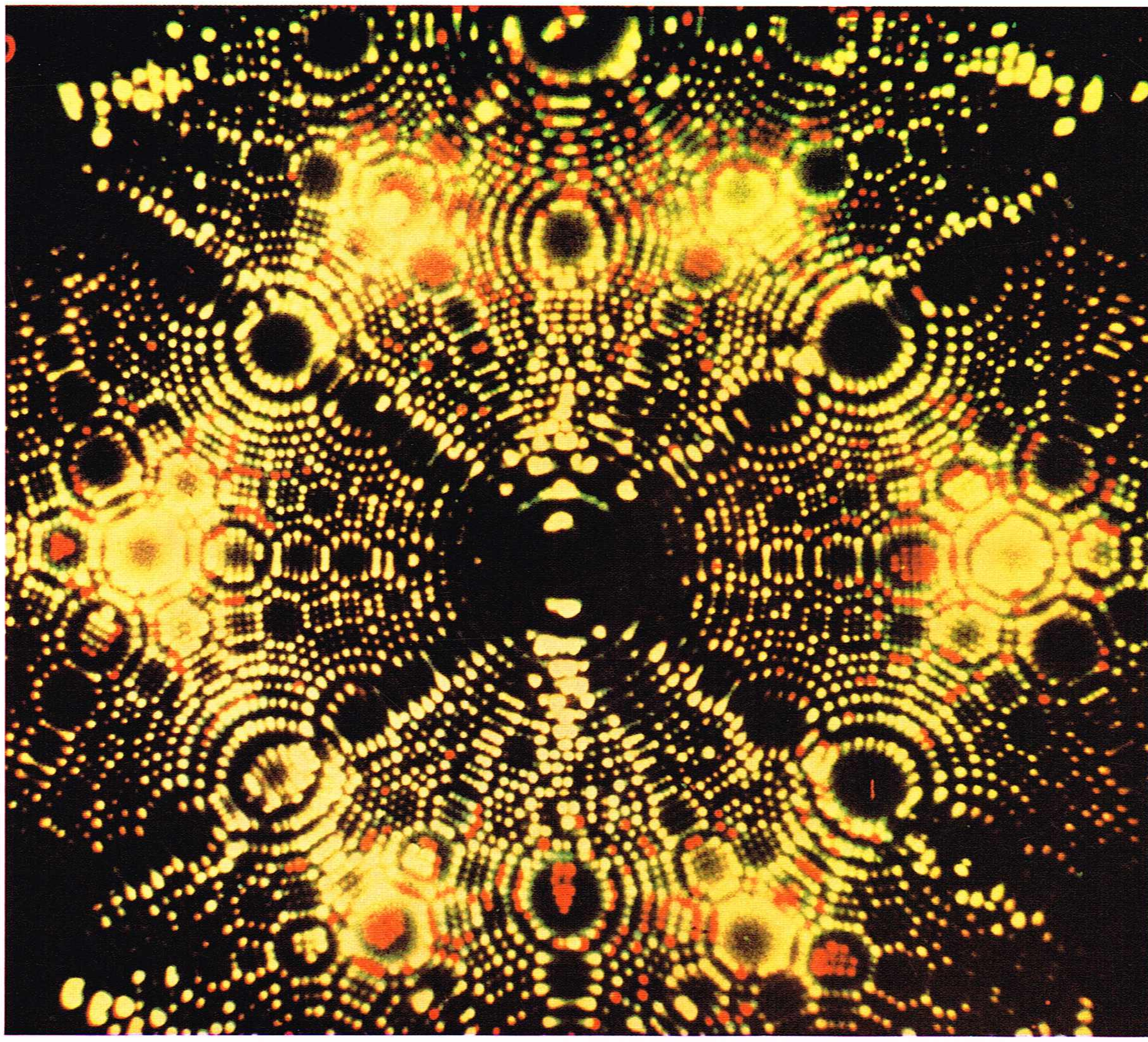

Montecatini - Edison

◀ ***Photographie, prise au microscope à ionisation de champ, d'une pointe d'aiguille de platine refroidie à une température voisine du zéro absolu (agrandissement : × 2 · 10⁶).***

on le trouve aux degrés + 4, + 2 et + 1. Parmi ses nombreux sels et composés complexes, on citera les **chloro-iridates** comme Na_2IrCl_6 :

$$Ir + 2NaCl + 2Cl_2 \rightarrow Na_2IrCl_6.$$

Palladium et platine

Ils sont ductiles, pas très durs et plus facilement fusibles que les autres éléments du groupe. Ils sont en outre davantage attaqués par les acides, mais ont une faible affinité pour l'oxygène. Ils sont très actifs comme catalyseurs et présentent les degrés d'oxydation + 2 et + 4.

Le **palladium** est blanc argenté. Finement divisé, il se dissout dans les acides concentrés et chauds. Au rouge, il s'oxyde à l'air avec formation de PdO qui, à haute température, se décompose. Le métal est utilisé sous forme d'alliages ayant des propriétés magnétiques particulières et dans des alliages avec l'or. En plaques et finement divisé, il adsorbe des quantités considérables d'hydrogène et on l'utilise comme catalyseur d'hydrogénation.

Le palladium forme des composés halogénés du type PdX_2 et PdX_4. Le **chlorure**, $PdCl_2$, s'obtient par chauffage direct du métal dans un courant de chlore. On peut le réduire par action de l'oxyde de carbone à l'air humide ; on obtient ainsi le métal :

$$PdCl_2 + CO \rightarrow PdCOCl_2$$
$$PdCOCl_2 + H_2O \rightarrow Pd + CO_2 + 2HCl.$$

Cette réaction est utilisée pour détecter des traces d'oxyde de carbone dans l'air. Avec l'eau régale en présence de chlorure de potassium, le palladium forme l'**hexachloropalladate de potassium,** K_2PdCl_6, qui, par action des bases, se transforme en **bioxyde** PdO_2, instable. Le palladium forme de nombreux complexes.

Le **platine** est un métal très ductile et malléable qui peut être travaillé par battage à chaud. On l'utilise pour faire des récipients de laboratoire, des appareils et des fours électriques, et en joaillerie. A l'état très divisé, le platine adsorbe l'oxygène et peut être utilisé comme catalyseur d'oxydation. C'est aussi le catalyseur du procédé de *reforming* qui permet d'améliorer l'indice d'octane des essences. Lorsqu'on réduit les solutions de ses sels, on obtient le *noir de platine* (finement divisé), par contre, le chauffage du chloroplatinate d'ammonium, $(NH_4)_2\,[PtCl_6]$, fournit la *mousse de platine* utilisée en catalyse.

Les électrodes en platine recouvert de noir de platine sont utilisées comme électrodes standards en électrochimie.

Stable à l'air et résistant aux acides, le platine est attaqué à haute température par les hydroxydes et nitrates alcalins, cyanures, hyposulfites, soufre, sulfures, chlore, plomb, arsenic, antimoine et par le carbone finement divisé. Ses oxydes et ses hydroxydes ne peuvent être obtenus que par voie indirecte. Ainsi, PtO et PtO_2 sont peu stables et perdent facilement de l'oxygène. On connaît les halogénures platineux et platiniques (PtX_2 et PtX_4), mais le composé halogéné le plus important est l'**acide chloroplatinique,** H_2PtCl_6, que l'on obtient en dissolvant du platine dans l'eau régale et en évaporant la solution. Parmi les chloroplatinates, il faut citer les chloroplatinates d'ammonium et de potassium, jaunes et peu solubles. L'acide chloroplatinique réagit avec la soude caustique en formant l'**hydroxyde amphotère,** $Pt(OH)_4$:

$$H_2PtCl_6 + 6NaOH \rightarrow Pt(OH)_4 + 6NaCl + 2H_2O.$$

On connaît aussi l'**acide cyanoplatinique,** $H_2Pt\,(CN)_6$, et les **cyanoplatinates** ainsi que de nombreux complexes du platine.

▶ *Tableau des éléments du groupe O.*

Eléments du groupe 0 (gaz rares)						
Propriétés	**Hélium**	**Néon**	**Argon**	**Krypton**	**Xénon**	**Radon**
Numéro atomique	2	10	18	36	54	86
Masse atomique	4,003	20,183	39,944	83,8	131,3	222
Rayon atomique (en Å)	–	1,60	1,91	2,00	2,2	–
Configuration électronique	$1s^2$	$1s^22s^22p^6$	$3s^23p^6$	$3d^{10}4s^24p^6$	$4d^{10}5s^25p^6$	$4f^{14}5d^{10}$ $6s^26p^6$
Densité (gaz)	0,178	0,900	1,78	3,74	5,89	9,96
Densité (liquide)	0,126	1,204	1,65	2,6	3,06	4,4
Point de fusion (en °K)	1	24,43	83,7	116,5	161,6	202
Point d'ébullition (en °K)	4,216	27,2	87,2	120,2	166	208
Chaleur de fusion (en kcal/mole)	0,0033	0,078	0,265	0,36	0,49	0,8
Chaleur d'évaporation (en kcal/mole)	0,022	0,441	1,500	2,310	3,27	4,3
Potentiel de 1^{re} ionisation (en eV)	24,58	21,47	15,68	13,99	12,1	10,7
Solubilité de l'eau à 26 atm (en ml/l à 20 °C)	8,8	10,4	33,6	60	125	224
Température critique (en °K)	5,19	44,4	153,1	210,6	289,6	377,5
Pression critique (en atm)	2,26	26,86	47,966	54,8	58,2	62,4

Groupe O

Le groupe O de la classification périodique est constitué par les gaz inertes ou gaz rares : hélium (He), néon (Ne), argon (A), krypton (Kr), xénon (Xe) et radon (Rn), qui furent identifiés assez tardivement en raison de leur rareté et de leur inertie chimique. Ces éléments sont tous des gaz monoatomiques qui se trouvent dans l'air en petites quantités. Le plus abondant est l'argon. L'hélium, comme son nom l'indique, est un des constituants principaux du Soleil (41 %) mais ne constitue que $5{,}3 \cdot 10^{-4}$ du pourcentage en volume de l'air.

L'hélium n'a que 2 électrons ; tous les autres gaz rares sont caractérisés par une couche externe de 8 électrons qui correspond à une stabilité élevée. Ils sont tous d'une inertie chimique notable. Leur couche électronique externe étant saturée, ils ne peuvent pas donner d'ions négatifs. Par ailleurs, le potentiel d'ionisation très élevé s'oppose à la formation d'ions positifs stables. Cependant, on a préparé au cours des dernières années des fluorures, fluorures complexes et oxyfluorures de certains gaz rares comme le krypton, le xénon et le radon.

Hélium

L'hélium est extrait des gaz naturels par liquéfaction et distillation fractionnée ; il est aussi produit par désintégration radio-active de l'uranium. Il s'en forme continuellement dans l'écorce terrestre, qui s'échappe ensuite dans l'atmosphère où sa faible densité fait qu'il ne s'accumule pas au-delà d'une teneur de 0,000 5 % en volume. Il est assez difficile à liquéfier (4,216 °K) et se solidifie à 1 °K ; à cette température, il présente le phénomène curieux d'une conductibilité thermique très élevée, une superfluidité et une viscosité extrêmement faible. Parmi les principaux usages de l'hélium, il faut citer le remplacement de l'hydrogène pour le gonflement des ballons météorologiques et l'utilisation comme substitut à l'azote de l'air dans les gaz de plongée sous-marine (sa solubilité dans le sang étant beaucoup plus faible que celle de l'azote). On utilise aussi l'hélium pour la soudure à l'arc, mais l'argon tend à le remplacer dans cet emploi.

Néon

Le néon ne se trouve que dans l'air d'où on l'obtient par liquéfaction et distillation fractionnée. Il est utilisé dans les tubes au néon pour l'éclairage et dans les dispositifs cryogéniques. Le néon peut être aisément séparé de mélanges avec d'autres gaz rares, car il s'adsorbe facilement sur le charbon actif, en particulier à basse température.

Argon

L'argon est relativement abondant dans l'air et se prépare par liquéfaction de l'air et distillation. On peut le purifier des traces d'oxygène et d'azote qu'il renferme par passage sur du carbure de calcium à 800 °C. Il est assez soluble dans l'eau. On l'utilise comme atmosphère inerte bon marché, dans les tubes à gaz et dans la soudure de l'acier inoxydable.

Krypton et xénon

Le krypton et le xénon sont extraits de résidus de distillation de grandes quantités d'air liquide. On peut les séparer par distillation fractionnée. Le xénon, soluble dans les graisses plus que dans l'eau, a été employé comme anesthésique général. Le krypton est utilisé dans certaines lampes électriques et dans les détecteurs de radiations.

Radon

Le radon a de nombreux isotopes dont trois naturels qui se forment par désintégration du radium. Il est utilisé en radiographie et en radiothérapie.

BIBLIOGRAPHIE

COTTON F.A. WILKINSONG, *Advanced Inorganic Chemistry,* Interscience, New York, 1966. - MICHEL A. et BENARD J., *Chimie minérale,* Masson, Paris, 1964. - PASCAL P., *Chimie générale,* 3 vol., Masson, Paris, 1949-51. - SAMUEL D.M., *Industrial Chemistry,* Inorganic Royal Institute of Chemistry, Londres, 1970.

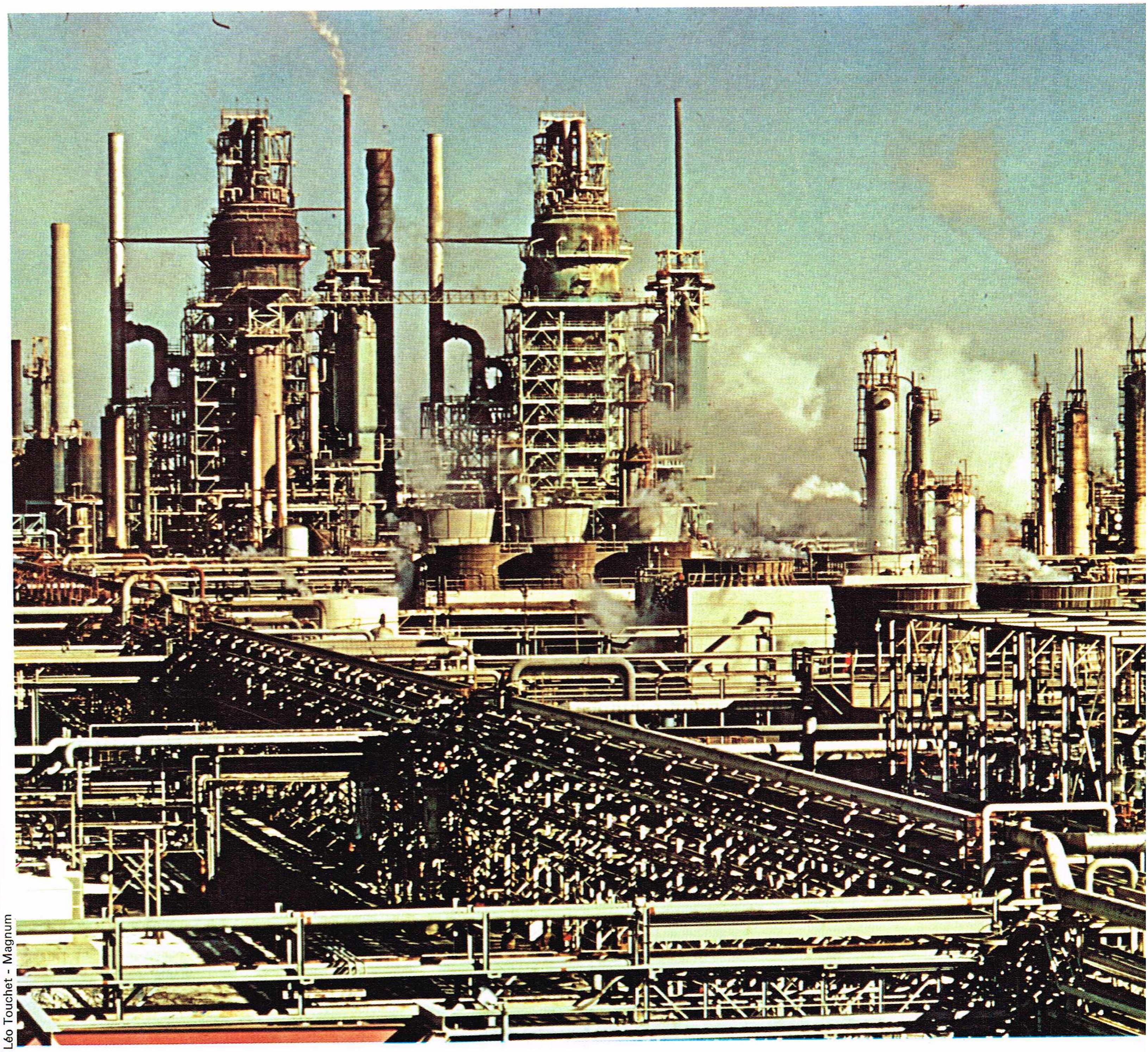

Léo Touchet - Magnum

▲ ***Les** hydrocarbures sont les composés les plus simples de la chimie organique, puisqu'ils ne sont composés que de carbone et d'hydrogène. Ici, des installations industrielles pour le raffinage du pétrole aux États-Unis.*

LA CHIMIE ORGANIQUE

La chimie organique concerne les substances chimiques dans lesquelles il entre toujours du carbone lié à de l'hydrogène et à certains autres éléments comme l'oxygène, l'azote, le soufre, le chlore, le phosphore, etc. La chimie organique peut être définie comme étant la chimie du carbone, mais pourquoi n'existe-t-il pas une chimie du soufre, de l'oxygène ou du fer? Cela est dû au fait que la plupart des composés chimiques qui constituent la matière vivante sont des composés du carbone et que ce dernier a, par ailleurs, la propriété de se lier à lui-même en fournissant une variété extraordinairement riche de produits.

Initialement, on réservait aux substances produites par des organismes vivants, animaux ou végétaux, le nom de *composés organiques*. Cette dénomination reste valable puisque les dérivés du carbone sont plus abondants et plus importants dans les phénomènes de la vie que ceux de n'importe quel autre élément. Cependant, bon nombre de composés organiques actuellement produits par synthèse ne sont pas présents dans les organismes vivants. Lorsque l'on désire préciser que la chimie se rapporte directement aux êtres vivants, on parle plutôt de *chimie biologique*.

Les composés organiques sont connus de l'homme depuis la préhistoire. Le sucre, le vin, le vinaigre sont constitués par des composés organiques, et la fermentation alcoolique est pratiquée par l'homme depuis la plus haute antiquité.

Au XVII[e] siècle, on savait que la distillation sèche du bois fournit un liquide (jus pyroligneux) qui renferme de l'acide acétique, de l'alcool méthylique et de l'acétone.

▶ *Nombre de composés organiques, à structure très complexe, n'existent pas à l'état naturel : c'est le cas des* **matières plastiques** *notamment.*

Martin Fraudreau - TOP

▶ *Parmi les industries fondées sur la chimie organique, la* **pétrochimie,** *à partir des hydrocarbures du pétrole brut, fournit des fibres synthétiques, des pesticides, des détergents, etc., dont l'importance ne cesse de croître dans le monde. Ici, les installations industrielles de* **Purfina.**

Y. Machatschek - TOP

▶ *Page ci-contre, tableau des* **principaux radicaux organiques.**

Puis, à la fin du XVIII[e] siècle, des techniques moins brutales que la distillation permirent d'isoler sans les décomposer certains constituants de la matière vivante : acide tartrique extrait du raisin, acide citrique du citron, acide lactique du lait, etc. ; l'urée fut isolée de l'urine par H.-M. Rouelle en 1773. A cette époque, on admettait que les composés organiques ne pouvaient être formés que grâce à l'intervention d'une force vitale et qu'il n'était pas possible d'envisager leur synthèse à partir de composés minéraux. Cette théorie fut battue en brèche par F. Wöhler en 1828, lorsqu'il annonça sa découverte de la synthèse de l'urée à partir d'un sel minéral, le cyanate d'ammonium. Depuis, bien d'autres composés organiques ont été synthétisés à partir de composés minéraux, et même à partir des éléments eux-mêmes. Ainsi, la synthèse industrielle actuelle de l'urée utilise le gaz carbonique et l'ammoniac qui peuvent eux-mêmes résulter respectivement de l'action du carbone sur l'oxygène et de l'azote sur l'hydrogène. Il s'agit d'une synthèse totale.

On connaît actuellement plusieurs centaines de milliers de composés organiques, dont certains ont une grande complexité de structure. Nombre d'entre eux n'existent pas à l'état naturel dans les êtres vivants : c'est le cas des matières plastiques, des fibres synthétiques, de la plupart des caoutchoucs synthétiques, etc.

La distinction entre chimie minérale et organique n'étant plus liée à l'origine des composés, c'est dans certaines particularités du carbone qu'il faut rechercher la justification de la chimie organique.

La principale caractéristique du carbone d'où résulte la grande diversité des composés organiques est l'aptitude de cet élément à former des chaînes ouvertes linéaires ou ramifiées et des cycles ; en outre, le carbone peut contracter avec lui-même ou avec d'autres éléments des liaisons multiples (doubles ou triples) ; enfin, sa structure tétraédrique lui permet de fournir des composés doués d'activité optique.

La propriété de former des chaînes n'est pas spécifique du carbone. Le silicium peut aussi se lier à lui-même pour former des chaînes dont les masses moléculaires sont parfois très élevées et qui ont trouvé des applications, dans les silicones, par exemple. Le soufre, à un degré beaucoup plus faible, peut donner des chaînes. De même, l'aptitude à l'activité optique, liée à une dissymétrie dans la molécule, n'est pas limitée au carbone.

Ainsi, plus on progresse dans la connaissance de la chimie organique, plus on s'aperçoit que sa distinction d'avec la chimie minérale a un caractère quelque peu artificiel. On conserve cependant la distinction entre ces deux grands chapitres de la chimie, la chimie organique étant essentiellement la chimie des dérivés du carbone dont certains peuvent être extraits des êtres vivants.

Situation actuelle de la chimie organique

Les industries fondées sur la chimie organique ont actuellement une importance très grande dans l'économie moderne. Il suffit de citer la pétrochimie qui, à partir des hydrocarbures du pétrole brut, synthétise les matières plastiques, les fibres synthétiques, les caoutchoucs synthétiques, les pesticides, les détergents dont l'importance croît annuellement dans le monde. Cette chimie est en perpétuel progrès. Les produits sont remplacés par d'autres, plus actifs, moins polluants, meilleur marché; les techniques évoluent vers une automatisation plus grande, vers une diminution du nombre des étapes, une amélioration de la sélectivité, etc. Des recherches se poursuivent sans cesse pour trouver de nouveaux médicaments, pour améliorer les prothèses, etc. Le chimiste a encore beaucoup à faire pour réaliser des synthèses dans des conditions de sélectivité aussi grandes que celles des synthèses naturelles. C'est la recherche des catalyseurs qui permettra d'améliorer la sélectivité des synthèses. On connaît déjà le succès de la catalyse stéréospécifique par les complexes de métaux de transition, mise au point par K. Ziegler et G. Natta. L'étude des enzymes devrait permettre dans l'avenir de nouveaux progrès.

Outre les progrès que les chimistes cherchent à réaliser dans la vitesse et dans la sélectivité des transformations de la matière, il existe une autre voie de recherche qui est celle de nouvelles sources de carbone pour réaliser les synthèses actuelles. Ainsi, en période de pénurie de pétrole brut, les chimistes organiciens doivent envisager la possibilité d'utiliser d'autres sources de carbone fossile comme le charbon ou les schistes et sables bitumineux, ou des sources de carbone non fossile et donc régénérable, comme les déchets de certains végétaux cultivés en grandes quantités.

Les économies d'énergie, la lutte contre la pollution sont d'autres raisons d'effectuer des recherches en chimie organique, recherches qui, par ailleurs, sont liées aux progrès d'autres techniques utilisatrices de composés organiques (automobile, électronique, nucléaire, etc.).

Les composés organiques sont formés de carbone et d'hydrogène, et d'autres éléments comme l'oxygène, l'azote, le soufre, le phosphore, etc. On peut considérer que les composés organiques sont formés d'une structure de base hydrocarbonée sur laquelle se greffent des atomes ou groupes d'atomes autres que le carbone et l'hydrogène. On dit que sur le « *squelette hydrocarboné* » sont fixées des « *fonctions* », lesquelles sont des groupements d'atomes qui apportent au squelette des propriétés particulières.

Une étude de la chimie organique doit donc commencer par les composés les plus simples, ceux qui ne renferment que du carbone et de l'hydrogène, et que l'on appelle les **hydrocarbures,** pour se poursuivre par les **composés à « hétéroatomes »,** porteurs de fonctions.

Les hydrocarbures

Ce sont les composés les plus simples de la chimie organique, si l'on ne considère que leur composition, puisqu'ils ne sont formés que de carbone et d'hydrogène. En fait, en raison de l'aptitude du carbone à former des chaînes linéaires, ramifiées ou cycliques et à contracter avec d'autres atomes de carbone des liaisons multiples, la variété des hydrocarbures est extrêmement grande.

On classe les hydrocarbures de la façon suivante :

— les **hydrocarbures saturés,** c'est-à-dire des composés hydrocarbonés dans lesquels toutes les valences du carbone sont satisfaites par la liaison avec des atomes d'hydrogène ou avec d'autres atomes de carbone; ils ne présentent que des liaisons simples entre carbones. On distingue parmi ceux-ci les *composés à chaîne ouverte* ou *alcanes* et les *composés cycliques* ou *cyclanes;*

— les **hydrocarbures insaturés,** c'est-à-dire composés hydrocarbonés dans lesquels le nombre des atomes d'hydrogène liés aux atomes de carbone est inférieur à ce qu'il est dans les hydrocarbures saturés et où apparaissent des doubles ou des triples liaisons. Parmi ceux-ci, on distingue les *oléfines, di-oléfines* et *cyclo-oléfines* porteuses de doubles liaisons, et les *acétyléniques,* à triples liaisons;

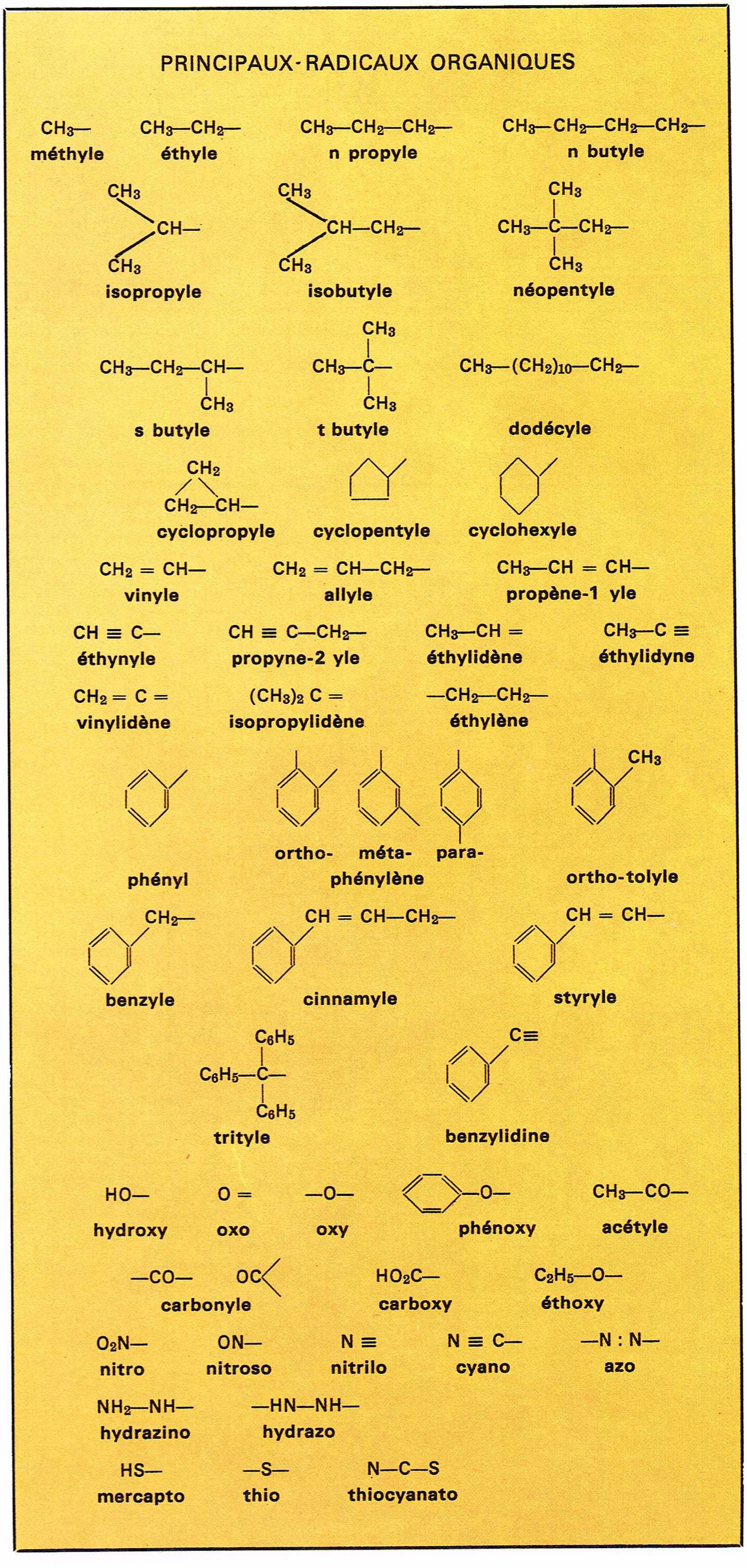

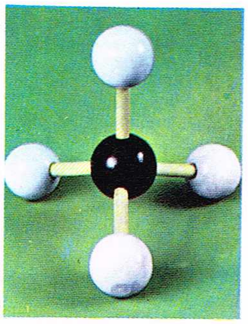

A. Rizzi

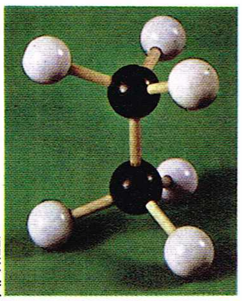

A. Rizzi

▲ *En haut, modèle de la molécule du* **méthane**, *CH_4; en bas, modèle de la molécule de l'***éthane**, *C_2H_6 (en noir, les atomes de carbone; en blanc, les atomes d'hydrogène).*

— les **hydrocarbures aromatiques** ou **benzéniques** (du nom du premier d'entre eux, le benzène) caractérisés par la présence de cycles à six atomes de carbone dans lesquels on trouve l'équivalent de trois doubles liaisons.

Les hydrocarbures saturés

Les alcanes

Ce sont des hydrocarbures saturés appelés encore *paraffines* ou *hydrocarbures paraffiniques*.

Le plus simple d'entre eux est le **méthane**, CH_4. C'est un gaz qui bout à — 161 °C ; c'est le principal constituant du gaz naturel. Le second, formé par la liaison de deux atomes de carbone et la saturation par de l'hydrogène des valences restantes, est l'**éthane**, $CH_3—CH_3$ ou C_2H_6; c'est aussi un gaz, présent en faibles quantités dans les gaz naturels et qui bout à — 89 °C. Le troisième hydrocarbure est le **propane** $CH_3—CH_2—CH_3$ (ou C_3H_8) qui bout à — 42 °C. Et ainsi de suite... Il existe une série homologue d'hydrocarbures saturés qui se déduisent les uns des autres par addition à l'extrémité de la chaîne d'un nouvel atome de carbone. On aura successivement :

		Point d'ébullition
$CH_3—CH_2—CH_2—CH_3$	**butane**	— 0,5 °C
$CH_3—CH_2—CH_2—CH_2—CH_3$	**pentane**	+ 36 °C
$CH_3—CH_2—CH_2—CH_2—CH_2—CH_3$	**hexane**	+ 69 °C
$CH_3—(CH_2)_5—CH_3$	**heptane**	+ 98 °C
$CH_3—(CH_2)_6—CH_3$	**octane**	+ 126 °C

Il n'y a pas de limite théorique à l'accroissement de la chaîne hydrocarbonée. La **paraffine**, utilisée pour le paraffinage du papier et des cartons, pour la préparation des cirages, des bougies, etc., est un alcane ayant de 20 à 40 atomes de carbone. Le **polyéthylène** peut être considéré comme une paraffine ayant plusieurs dizaines de milliers d'atomes de carbone.

En plus de cette série homologue d'hydrocarbures, il existe des hydrocarbures dans lesquels les atomes de carbone apparaissent dans des chaînes latérales. Ainsi, avec quatre atomes de carbone, on peut former deux hydrocarbures, le *butane normal* ou *n-butane* que nous venons de citer et l'*isobutane :*

$CH_3—CH_2—CH_2—CH_3$ et $CH_3—CH(CH_3)—CH_3$

Le premier bout à — 0,5 °C, le second à — 12 °C; cependant, leur formule brute C_4H_{10} est la même, et ils ne diffèrent que par la disposition de leurs atomes dans l'espace, ce qui se traduit par des différences de propriétés physiques. Ces composés sont appelés des *isomères*. On dit que le butane, de formule brute C_4H_{10}, a deux isomères : l'isomère à chaîne droite ou butane normal et l'isomère à chaîne ramifiée ou isobutane.

Avec cinq atomes de carbone, on dénombre trois isomères :

$CH_3—CH_2—CH_2—CH_2—CH_3$, *pentane normal*

$CH_3—CH(CH_3)—CH_2—CH_3$, *isopentane*

$CH_3—C(CH_3)_2—CH_3$ *néopentane*

Mais, au fur et à mesure que la chaîne hydrocarbonée augmente, le nombre des isomères augmente considé-

Lawson - Rapho

▶ *Les* **alcanes** *sont des hydrocarbures saturés; il existe une série homologue de ces hydrocarbures (butane, pentane, hexane, etc.) qui se déduisent les uns des autres par addition à l'extrémité de la chaîne d'un nouvel atome de carbone. Ici, site de stockage industriel.*

rablement. Ainsi, on dénombre cinq isomères de l'hexane qui sont les suivants :

$CH_3—CH_2—CH_2—CH_2—CH_2—CH_3$
hexane normal

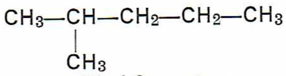

méthyl-2 pentane

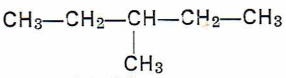

méthyl-3 pentane

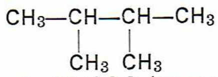

diméthyl-2,3 butane

et 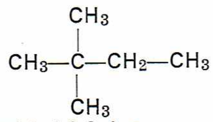

diméthyl-2,2 butane

Ensuite, le nombre des isomères devient très rapidement si grand qu'il est hors de propos de les écrire tous, comme l'atteste le tableau suivant :

Nombre de C	*Nombre d'isomères*	*Nombre de C*	*Nombre d'isomères*
7	9	15	4 347
8	18	20	366 319
9	35	30	4 111 846 763
10	75	40	$6{,}25 \cdot 10^{13}$

La grande variété des isomères pour des composés aussi simples que les hydrocarbures oblige à l'emploi d'une nomenclature systématique. Ainsi, les alcanes sont désignés par un nom dont le préfixe indique le nombre d'atomes de carbone (mis à part les tout premiers termes) suivi de la désinence *ane*.

Lorsqu'il existe une ramification sur la chaîne principale, on la situe sur celle-ci en faisant suivre son nom du *chiffre* correspondant à la numérotation de l'atome de carbone dans la chaîne. Exemple :

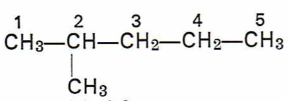

méthyl-2 pentane

La numérotation des atomes de carbone de la chaîne principale (la plus longue) doit être faite de façon à affecter la ramification du chiffre le plus faible (il s'agit du méthyl-2 pentane et non du méthyl-4 pentane).

Lorsque la chaîne principale comporte plusieurs groupements latéraux, on les cite dans l'ordre croissant de leur nombre d'atomes de carbone. Lorsque deux substituants sont fixés à un même atome de carbone, on leur affecte évidemment le même chiffre. Par ailleurs, l'hydrocarbure suivant :

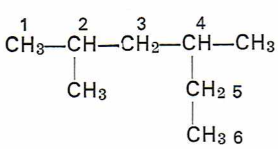

est le diméthyl-2,4 hexane (et non le méthyl-2 éthyl-4 pentane). Les substituants aux chaînes principales portent le nom de l'hydrocarbure correspondant suivi de la désinence *yle*. Par exemple :

$—CH_3$ = *méthyle*
$—CH_2—CH_3$ = *éthyle*
$—CH_2—CH_2—CH_3$ = *propyle*
$CH_3—CH—CH_3$ = *isopropyle*, etc.
|

Ainsi, les alcanes ou paraffines peuvent être *linéaires* (ou *normaux*) ou *ramifiés* (ou *branchés*). Toutes les liaisons entre atomes de carbone sont des liaisons de carbones hybridés sp^3 ; il en résulte une structure tétraédrique des atomes de carbone d'où découlent des angles de valence de 109° 28′. Les chaînes hydrocarbonées sont donc en fait en zigzag. Par ailleurs, la liaison σ entre les atomes de carbone autorise une libre rotation autour de celle-ci, de sorte que les molécules d'hydrocarbures peuvent prendre un grand nombre de conformations possibles sans qu'aucune isomérie due à la conformation de la molécule puisse être mise en évidence. On peut dire que, grâce à la libre rotation, les molécules d'hydrocarbure à l'état liquide et gazeux changent sans cesse de forme.

La distance C—C dans un alcane est de 1,54 Å :

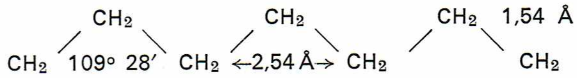

Propriétés physiques. Les propriétés physiques des alcanes dépendent de leur masse moléculaire et de la façon dont les atomes sont disposés dans la molécule. Les hydrocarbures normaux sont gazeux à la température ordinaire et sous 760 mm de mercure de C_1 à C_4, puis liquides de C_5 à C_{17}, enfin solides à partir de C_{18}. Les températures d'ébullition des hydrocarbures normaux croissent régulièrement avec l'augmentation de leur masse moléculaire en raison de l'augmentation des forces d'attraction intermoléculaires. Les ramifications latérales ayant pour effet de limiter ces forces d'attraction, les hydrocarbures ramifiés ont des températures d'ébullition inférieures à celles des hydrocarbures normaux de même masse moléculaire. Ainsi, le pentane bout à 36 °C, l'isopentane à 28 °C, le néopentane à 9,5 °C.

Les températures de fusion des paraffines normales augmentent en fonction de la masse moléculaire, mais de façon non régulière. Les températures de fusion des hydrocarbures à nombre pair d'atomes de carbone se placent sur une courbe supérieure à celle des hydrocarbures à nombre impair de carbones, en fonction du nombre des atomes de carbone. Les points de fusion tendent asymptotiquement vers une température limite de 135 °C environ. Comme pour la température d'ébullition, les branchements de la chaîne ont une influence. Ce qui importe dans le cas de la fusion, c'est la possibilité d'un agencement régulier des molécules dans le cristal. D'une façon générale, plus la molécule est symétrique et compacte, et plus sa température de fusion est élevée. Ainsi, le pentane normal fond à — 130 °C, le néopentane à — 21 °C, l'octane normal à — 56,8 °C et l'hexaméthyléthane, très compact, à + 101 °C.

La densité des alcanes normaux varie de 0,626 (à 20 °C) pour le pentane à 0,769 pour le pentadécane. Tous les hydrocarbures sont plus légers que l'eau et se rassemblent à sa surface, car ils sont insolubles dans l'eau. Ils sont par contre solubles dans de nombreux composés organiques.

D'autres propriétés des alcanes ont une grande importance pratique ; il s'agit en particulier de leur viscosité qui augmente avec la longueur de leur chaîne, et de leur indice d'octane qui augmente avec les ramifications.

Sources d'hydrocarbures. Les sources d'hydrocarbures saturés sont les gaz naturels et les produits de distillation du pétrole brut. Le méthane se trouve dans le gaz de marais qui résulte de la fermentation anaérobie de la cellulose. On peut enfin extraire des constituants cireux de certaines plantes des hydrocarbures, comme le *n-heptane* que l'on isole de certains pins. Toutes les cires paraffiniques naturelles renferment des paraffines à nombre impair d'atomes de carbone qui proviennent probablement de la décarboxylation des acides gras naturels. On peut synthétiser de différentes façons les alcanes (à partir des alcools, à partir des dérivés halogénés par la réaction de Wurtz, et à partir des organomagnésiens), mais ces modes de préparation ne sont utilisés que pour des buts analytiques ou pour de rares applications.

En fait, les deux principales sources d'hydrocarbures paraffiniques sont les gaz naturels et le pétrole brut. Les gaz naturels renferment essentiellement du méthane avec de petites quantités d'éthane, de propane et de butane ; leur composition varie énormément avec leur origine. La quasi-totalité des gaz naturels est utilisée comme combustible ; une petite partie sert de point de départ à différentes synthèses organiques.

Le pétrole brut, mis à part les premiers termes (propane, butane), ne fournit que des mélanges d'hydrocarbures dans lesquels on trouve des alcanes avec d'autres types d'hydrocarbures. Le propane et le butane sont commercialisés comme combustibles sous le nom de *gaz de pétrole liquéfiés* (G.P.L.). On peut extraire de fractions

PRINCIPALES RÉACTIONS DES PARAFFINES

1° Cracking (exemple : cracking de l'octane) :

C_8H_{18} →
- $C_4H_{10} + C_4H_8$ (*butane*, *butène*)
- $C_6H_{14} + C_2H_4$ (*hexane*, *éthylène*)
- $C_4H_{10} + CH_4 + C_2H_4 + C$ (*butane*, *méthane*, *éthylène*)
- $C_8H_{16} + H_2$ (*octène*)

2° Oxydation complète ou combustion (exemple : l'octane) :

$$2\,C_8H_{18} + 25\,O_2 \rightarrow 16\,CO_2 + 18\,H_2O$$

3° Oxydation incomplète avec HNO_3 concentré :

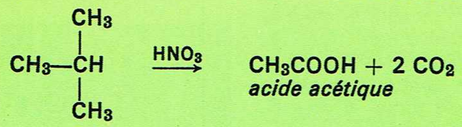

4° Chloration :

$$CH_4 + Cl_2 \rightarrow CH_3Cl + HCl$$

chlorure de méthyle

5° Sulfochloration :

$$R{-}H + SO_2 + Cl_2 \rightarrow RSO_2Cl + HCl$$

6° Nitration :

$$R{-}H + HO{-}NO_2 \rightarrow RNO_2 + H_2O$$

▲ ***Tableau des* principales réactions des paraffines.**

▼ ***Ci-dessous,* modèle de la molécule *de* cyclohexane *sous la forme* « chaise », *en haut, et sous la forme* « bateau », *en bas (en noir, les atomes de carbone; en blanc, les atomes d'hydrogène).***

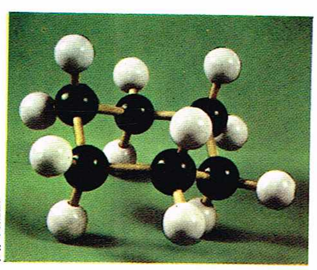

A. Rizzi

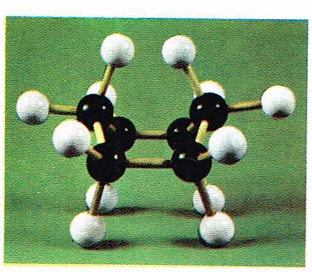

A. Rizzi

lourdes de la distillation du pétrole (kérosène, gas-oil) des paraffines normales à longue chaîne (C_{12}-C_{18}), utilisées pour la synthèse de détergents biodégradables. Cette extraction est effectuée grâce aux tamis moléculaires ou à l'urée.

Propriétés chimiques. Les propriétés chimiques des alcanes sont peu nombreuses. Le nom de paraffines qui leur a été donné (du latin *parum :* peu, et *affinis :* voisin, allié) exprime leur manque de réactivité.

Leur réaction la plus importante dans la pratique est leur oxydation totale en présence d'air, ou combustion. C'est la base de leur emploi dans les moteurs à combustion interne (essence), dans les chaudières domestiques et industrielles (fuel) et dans toute application génératrice de chaleur ou d'énergie. La chaleur produite lors de la combustion varie avec la masse moléculaire et la structure de l'hydrocarbure. Elle est en moyenne de 11,5 kcal par gramme.

Dans le cas du méthane, la réaction est la suivante :

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$$

et dans le cas général :

$$C_nH_{2n+2} + \frac{3n+1}{2}\,O_2 \rightarrow n\,CO_2 + (n+1)\,H_2O.$$

Si la combustion se fait en présence d'un défaut d'oxygène par rapport à la stœchiométrie, il se forme de l'oxyde de carbone et même du carbone.

On peut réaliser une oxydation partielle des paraffines qui conduit à des acides, des alcools et autres composés oxygénés de masse moléculaire inférieure à la paraffine de départ.

A des températures suffisamment élevées et en l'absence d'oxygène, les hydrocarbures se décomposent en produisant des hydrocarbures de plus faible masse moléculaire. Cette pyrolyse particulière qui fournit un mélange de paraffines et d'oléfines est le cracking.

Les alcanes réagissent avec les halogènes et plus particulièrement avec le chlore pour donner, à la lumière, des composés chlorés utilisés comme solvants et dans les synthèses organiques. Ainsi, le méthane, par chloration photochimique, donne le **chlorure de méthyle,** CH_3Cl, le **chlorure de méthylène,** CH_2Cl_2, le **chloroforme,** $CHCl_3$, et le **tétrachlorure de carbone,** CCl_4.

$$CH_4 + Cl_2 \rightarrow CH_3Cl + HCl$$
$$CH_3Cl + Cl_2 \rightarrow CH_2Cl_2 + HCl$$
$$CH_2Cl_2 + Cl_2 \rightarrow CHCl_3 + HCl$$
$$CHCl_3 + Cl_2 \rightarrow CCl_4 + HCl.$$

En présence de lumière et d'un mélange de SO_2 et de chlore, les alcanes peuvent donner des **dérivés sulfochlorés** utilisés comme bases pour la synthèse des détergents :

$$RH + SO_2 + Cl_2 \rightarrow RSO_2Cl + HCl.$$

L'acide nitrique réagit avec les alcanes et fournit des **dérivés nitrés :**

$$RH + HNO_3 \rightarrow RNO_2 + H_2O.$$

Les cyclanes

Les *cyclanes* ou *cycloalcanes,* ou encore *hydrocarbures naphténiques,* ou plus simplement *naphtènes,* sont des hydrocarbures saturés cycliques. Ils sont formés par des cycles dont les maillons (CH_2) sont liés par des liaisons σ comme les alcanes. Leur formule générale est $(CH_2)_n$ ou C_nH_{2n}; les premiers termes sont :

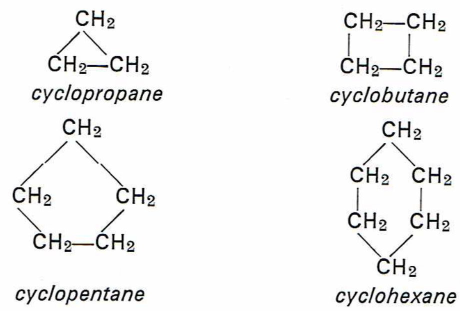

On les désigne du nom de l'hydrocarbure paraffinique acyclique ayant le même nombre d'atomes de carbone, précédé du préfixe *cyclo.* Il peut exister des substituants sur les cycles; on a par exemple le *diméthyl*-1,3 *cyclopentane :*

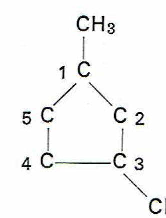

Les plus importants parmi ces hydrocarbures sont le **cyclopentane** et le **cyclohexane.** Les cycles à 3 et 4 atomes de carbone dont les angles internes sont respectivement de 60° et 90° présentent des tensions moléculaires en raison de l'écart avec l'angle normal de valence de 109° 28′. Ces cycles s'ouvrent facilement et se comportent comme les oléfines correspondantes. Le cyclopentane, avec des angles internes de 108°, est stable; quant au cyclohexane, il doit sa stabilité au fait qu'il n'est pas plan et peut exister sous la forme « chaise » et la forme « bateau » :

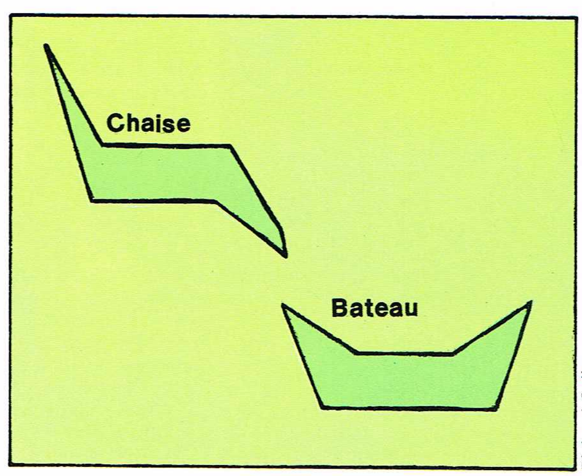

Richard Colin

Les cyclanes bouillent 10 à 20 °C plus haut que les alcanes normaux de même nombre d'atomes de carbone; leur densité est supérieure à celle des alcanes. Leur chaleur de combustion rapportée à la masse est plus faible que celle des alcanes correspondants, mais, en raison de leur densité plus élevée, leur chaleur de combustion rapportée au volume est beaucoup plus grande.

Les cyclanes ayant 5 atomes de carbone et plus se comportent chimiquement comme les alcanes. Le plus important représentant des cyclanes est le cyclohexane que l'on obtient par hydrogénation catalytique du benzène et qui est le point de départ de la synthèse des Nylons 6 et 66.

Les hydrocarbures insaturés

Les alcènes

Les *alcènes,* ou *hydrocarbures oléfiniques,* ou encore *oléfines,* sont des hydrocarbures insaturés caractérisés par la présence dans leur molécule d'une double liaison (ou de plusieurs doubles liaisons). Ils sont insaturés, puisqu'ils ne renferment pas le nombre maximal d'atomes d'hydrogène correspondant à la tétravalence du carbone. Leur formule générale est (pour les mono-oléfines) :

$$C_nH_{2n}.$$

Le premier terme est l'**éthylène,** de formule brute C_2H_4, dans laquelle deux atomes de carbone sont reliés par une double liaison; la seconde oléfine est le **propène** (ou **propylène**) :

$CH_2 = CH_2$ *éthylène* $CH_2 = CH—CH_3$ *propène*

A partir de quatre atomes de carbone, aux isoméries de la chaîne hydrocarbonée s'ajoutent les isoméries de position de la double liaison, et c'est ainsi qu'il existe trois **butènes :**

$CH_2 = CH—CH_2—CH_3$, *butène*-1 $CH_3—CH = CH—CH_3$, *butène*-2

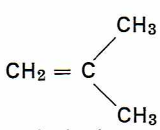

isobutène

cinq **pentènes** *(pentène*-1, *pentène*-2, *méthyl*-2 *pentène*-1, *méthyl*-2 *pentène*-2, *méthyl*-3 *pentène*-1*),* etc.

A ces isoméries de position s'ajoute l'isomérie géométrique qui résulte de la restriction à la rotation libre autour de la double liaison. Il s'agit de l'**isomérie cis-trans.** C'est ainsi qu'il existe deux butènes-2 : le *butène*-2 *cis* et le *butène*-2 *trans.*

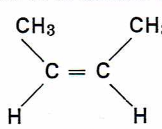

butène-2 *cis*

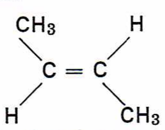

butène-2 *trans*

Mis à part quelques oléfines que l'on désigne par des noms vulgaires, on nomme les oléfines du nom de l'hydrocarbure paraffinique correspondant, suivi de la désinence *ène.* La position de la double liaison, qui doit être située dans la chaîne la plus longue, est indiquée par un chiffre qui correspond à la numérotation des atomes de carbone à partir de l'extrémité la plus proche de cette double liaison; par exemple :

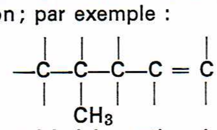

méthyl-4 *pentène*-1

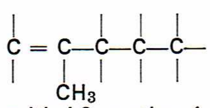

méthyl-2 *pentène*-1

Un hydrocarbure oléfinique peut avoir plusieurs doubles liaisons. Il s'agit alors de *diènes, triènes... polyènes.* Selon les positions relatives des doubles liaisons, on distingue :

— les *hydrocarbures alléniques* ou *cumulènes,* dont les doubles liaisons sont fixées au même atome de carbone :

$CH_2 = C = CH—CH_3$ *(butadiène*-1,2 ou *méthylallène);*

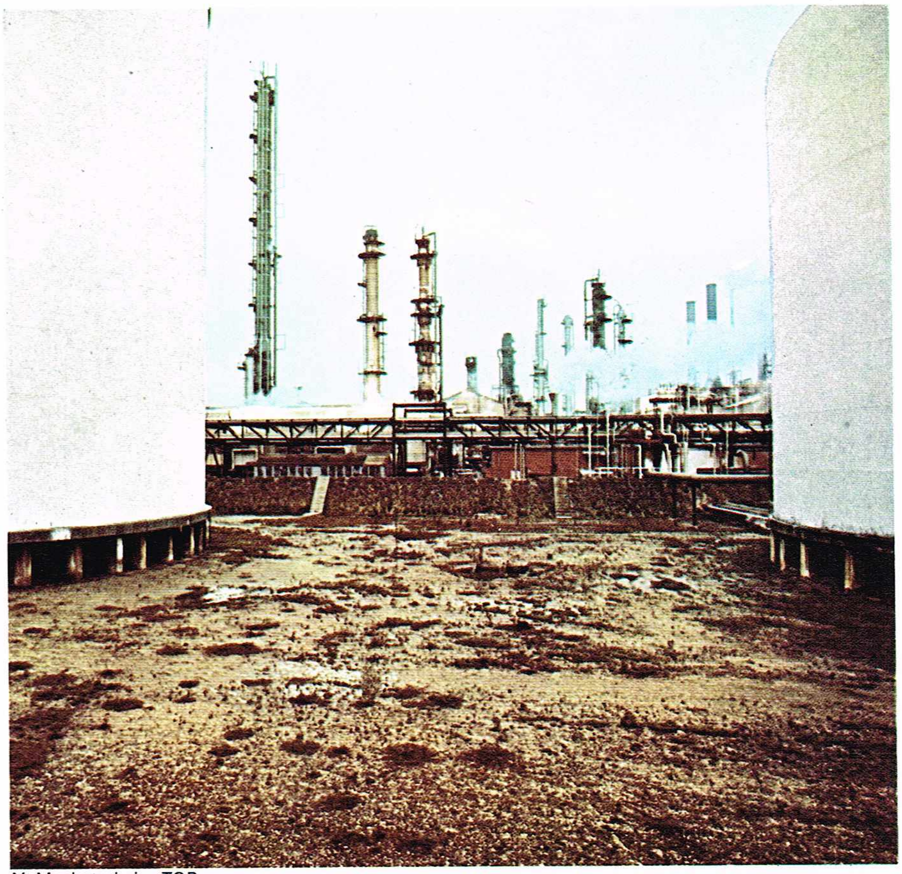

Y. Machatschek - TOP

▲ ***Les alcènes ou* oléfines *sont des hydrocarbures insaturés, caractérisés par la présence dans leur molécule d'une ou de plusieurs doubles liaisons. Leurs propriétés chimiques justifient leur position prépondérante comme intermédiaires dans les synthèses pétrochimiques (installations* Purfina).**

— les *diènes conjugués,* dans lesquels les deux doubles liaisons sont séparées par une liaison simple :

$CH_2 = CH—CH = CH_2$ *(butadiène*-1,3*);*

— enfin les *polyènes non conjugués,* dans lesquels les doubles liaisons ont une position quelconque dans la chaîne.

Les doubles liaisons oléfiniques peuvent encore se trouver dans des cycles. Il s'agit alors de *cyclo-oléfines* ou *cyclènes,* par exemple :

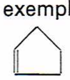

cyclopentène

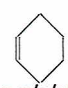

cyclohexène

Enfin, plusieurs doubles liaisons peuvent exister dans le même cycle; par exemple :

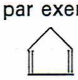

cyclopentadiène-1,3

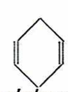

cyclohexadiène-1,4

Les oléfines sont produites industriellement par cracking de coupes pétrolières (naphta par exemple), à

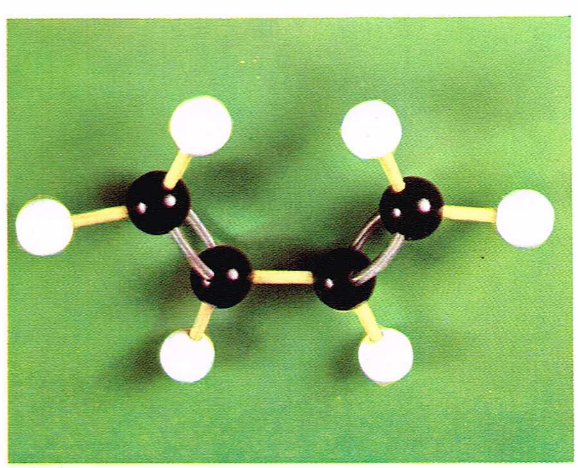

A. Rizzi

◀ ***Modèle de la molécule de* butadiène *(en noir, les atomes de carbone; en blanc, les atomes d'hydrogène).***

Naphtachimie

▲ *Les oléfines sont produites industriellement par* cracking *de coupes pétrolières. Ici, détail d'une des tours de l'unité de cracking à l'usine de Lavéra* (Naphtachimie).

▼ *Schéma des différentes* préparations des oléfines.

PRÉPARATION DES OLÉFINES

1° Cracking (exemple : cracking du butane) :

$$CH_3—CH_2—CH_2—CH_3 \rightarrow \begin{cases} \underset{\textit{éthane}}{CH_3—CH_3} + \underset{\textit{éthylène}}{CH_2 = CH_2} \\ \underset{\textit{propylène}}{CH_3—CH = CH_2} + \underset{\textit{méthane}}{CH_4} \\ \underset{\textit{butène-1}}{CH_2 = CH—CH_2—CH_3,} \quad \underset{\textit{butène-2}}{CH_3—CH = CH—CH_3} \end{cases}$$

2° Déshydratation des alcools :

$$CH_3—CH_2OH \xrightarrow{Al_2O_3} CH_2 = CH_2 + H_2O$$

3° Déshydrohalogénation des halogénures d'alkyle :

$$R—CH_2—CH_2Br + KOH \rightarrow R—CH = CH_2 + KBr + H_2O$$

4° Déshalogénation des composés dihalogénés :

$$R—CHBr—CH_2Br + Zn \rightarrow R—CH = CH_2 + ZnBr_2$$

5° Oligomérisation de l'éthylène :

$$nCH_2 = CH_2 \xrightarrow{Al(C_2H_5)_3} CH_3—CH_2—(CH_2—CH_2)_{n-2}—CH = CH_2$$

haute température, en présence de vapeur d'eau (steam-cracking). Ce procédé produit des quantités importantes d'éthylène, de propylène, de butène et de butadiène. Les oléfines de masse moléculaire plus élevée sont présentes dans des coupes ou dans les essences de steam-cracking, d'où on ne les extrait pas. Aux États-Unis, l'éthylène est surtout fabriqué par cracking de l'éthane. On extrait de la coupe C_4 un diène important, le *butadiène,* et de la coupe C_5 *l'isoprène* (ou *méthyl*-2 *pentadiène*-1,3).

Lorsque les oléfines ne peuvent pas être obtenues dans les effluents du procédé de steam-cracking, on a recours pour leur préparation à des réactions d'élimination sur des composés saturés. Ainsi, à partir des alcools, par déshydratation, on peut préparer des oléfines, et l'éthylène, en particulier, peut être obtenu par déshydratation de l'éthanol. On peut aussi éliminer une molécule d'acide chlorhydrique d'un dérivé chloré. Les oléfines à longue chaîne peuvent être obtenues par oligomérisation d'oléfines simples comme l'éthylène. Par exemple, en présence de catalyseurs à base d'alkyl-aluminiques, on peut préparer des oléfines à double liaison terminale, linéaires et à nombre pair d'atomes de carbone. Dans le domaine des masses moléculaires C_8 à C_{18}, ces oléfines peuvent servir pour la synthèse de plastifiants et de détergents. On peut encore obtenir des oléfines en traitant par de la poudre de zinc un composé dihalogéné sur deux atomes de carbone adjacents :

$$R—CHCl—CHCl—R' \xrightarrow{Zn} R—CH = CH—R'.$$

L'hydrogénation partielle des acétyléniques fournit des oléfines :

$$R—C \equiv C—R' + H_2 \rightarrow R—CH = CH—R'.$$

Enfin, les réactifs de Grignard sont parfois utilisés pour allonger la chaîne carbonée des bromo-alcènes.

Propriétés physiques. Les propriétés physiques des alcènes diffèrent très peu de celles des alcanes de même masse moléculaire. Les températures d'ébullition sont seulement de quelques degrés inférieures à celles des alcanes alors que, pour les premiers termes, les points de fusion sont de quelques degrés supérieurs.

La polarisabilité des alcènes est supérieure à celle des alcanes. La solubilité dans l'eau des alcènes de bas poids moléculaire, bien que faible, est supérieure à celle des alcanes correspondants.

Propriétés chimiques. Les propriétés chimiques des oléfines sont très nombreuses et variées et justifient la position prépondérante de ces hydrocarbures comme intermédiaires dans les synthèses pétrochimiques. Les plus importantes de ces réactions chimiques sont des *réactions d'addition.* Parmi celles-ci, on citera :

— l'*hydrogénation :*

$$R—CH = CH—R' + H_2 \rightarrow R—CH_2—CH_2—R'$$

— les *halogénations,* et en particulier la *chloration,* qui permet d'obtenir des composés dihalogénés :

$$R—CH = CH—R' + Cl_2 \rightarrow R—CHCl—CHCl—R'$$

— l'*addition d'hydracides* comme l'acide chlorhydrique, qui conduit à un dérivé monohalogéné :

$$R—CH = CH—R' + HCl \rightarrow R—CH_2—CHCl—R'.$$

Cette addition, étant dissymétrique, se fait dans un sens déterminé, lorsque l'oléfine est asymétrique, selon la règle de Markownikoff : l'halogène se fixe sur le carbone le plus substitué. Ainsi, l'addition de HCl sur le propène fournit le chloro-2 propane :

$$CH_2 = CH—CH_3 + HCl \rightarrow CH_3—CHCl—CH_3.$$

Cette règle est en accord avec le mécanisme réactionnel qui débute par l'addition d'un proton H^+ à l'oléfine et qui forme l'ion carbonium, lequel réagit ensuite avec l'ion Cl^-. En présence de peroxydes, l'addition de l'hydracide se fait en sens inverse, comme l'a montré Kharasch. Ainsi le bromure de vinyle additionne HBr de deux façons :

$$CH_2 = CHBr + HBr \begin{cases} \xrightarrow{\text{normal}} CH_3—CHBr_2 \\ \xrightarrow{+\text{ peroxydes}} CH_2Br—CH_2Br \end{cases}$$

— Les oléfines peuvent aussi additionner l'*acide sulfurique* qui est sans effet sur les paraffines. Cette réaction est un moyen d'éliminer les oléfines présentes dans les paraffines. Il se forme un sulfate acide d'alkyle qui, hydrolysé, fournit un alcool en régénérant l'acide sulfurique, par exemple, dans le cas de l'éthylène :

$$CH_2 = CH_2 + HOSO_3H \rightarrow CH_3—CH_2—O—SO_3H$$

$$CH_3—CH_2—O—SO_3H + H_2O \rightarrow CH_3—CH_2OH + H_2SO_4.$$

— Les oléfines réagissent avec le *chlore en solution alcaline* et additionnent les éléments de l'acide hypochloreux pour donner des *chlorhydrines*. Dans ce cas, le chlore s'additionne à la double liaison sous forme de cation Cl^+, et le OH^- neutralise l'ion carbonium formé :

$$CH_3—CH = CH_2 + [Cl_2 + H_2O] \rightarrow CH_3—\overset{\oplus}{C}H—CH_2Cl$$

$$\rightarrow CH_3—\underset{\displaystyle OH}{\underset{|}{C}H}—CH_2Cl.$$

— Les oléfines sont très sensibles à l'*oxydation*. Ainsi, la décoloration du permanganate de potassium en milieu acide, en présence d'oléfines, est un test de la présence de ces dernières. Il se forme dans ce cas un *glycol*. On peut aussi ajouter à une double liaison oléfinique deux groupes hydroxyles, en faisant réagir l'acide acétique en présence d'eau oxygénée :

$$R—CH = CH—R' + H_2O_2 \xrightarrow[100\,°C]{CH_3COOH} R—CHOH—CHOH—R'.$$

En présence d'acide perbenzoïque, on limite l'oxydation à la formation d'un époxyde qui peut ensuite être transformé en glycol :

$$R—CH = CH—R' + C_6H_5—COOOH \rightarrow \underset{H}{\overset{R}{C}}\!\overset{O}{—}\!\underset{H}{\overset{R'}{C}}$$

$$\rightarrow R—CHOH—CHOH—R'.$$

L'époxydation de l'éthylène peut se faire directement par l'oxygène, en présence de catalyseurs à base d'argent. C'est la fabrication industrielle de l'oxyde d'éthylène.

L'oxydation plus poussée des oléfines conduit à leur coupure au niveau de la double liaison avec formation de deux acides dont l'identification est un moyen de déterminer la position de la double liaison :

$$R—CH = CH—R' \rightarrow R—C\begin{matrix}OH\\ \\ O\end{matrix} + R'—C\begin{matrix}OH\\ \\ O\end{matrix}$$

mais ces oxydations sont peu sélectives, et l'on préfère utiliser l'ozone (O_3) qui forme dans un premier temps un ozonide qui est ensuite décomposé par l'eau ou par l'hydrogénation catalytique :

$$R—CH = CH—R \xrightarrow{O_3} R—CH\overset{O_3}{—}CH—R$$

$$\xrightarrow[(Pt)]{H_2} 2R—C\begin{matrix}H\\ \\ O\end{matrix} + H_2O.$$

C'est la *réaction d'ozonolyse*, que l'on effectue dans des appareils spécialement conçus pour cet usage, appelés ozoniseurs.

— Enfin, une réaction très importante des oléfines est la réaction de *polyaddition*, par laquelle on forme des macromolécules ayant des propriétés de matières plastiques, de fibres ou d'élastomères. La polymérisation des oléfines par polyaddition utilise des initiateurs ou des catalyseurs divers :

$$nCH_2 = CH—R \rightarrow (—CH_2—\overset{\displaystyle R}{\overset{|}{C}H}—)_n.$$

Parmi les oléfines à plusieurs doubles liaisons, les diènes conjugués comme le butadiène ou l'isoprène présentent un mode de réactivité particulier, c'est l'*addition en* 1,4. Ainsi, l'addition du brome au butadiène fournit deux dibromobutènes :

$$CH_2 = CH—CH = CH_2 + Br_2$$

$$\rightarrow BrCH_2—CH = CH—CH_2Br$$

dibromo-1,4 *butène*-2

et $BrCH_2—CHBr—CH = CH_2$

dibromo-3,4 *butène*-1.

Cette addition 1,4 s'explique par la mésomérie du cation allylique formé par addition de Br^+ à l'oléfine :

$$BrCH_2—\overset{\oplus}{C}H—CH = CH_2 \leftrightarrow BrCH_2—CH = CH—\overset{\oplus}{C}H_2$$

La polyaddition des diènes conjugués conduit en général à des élastomères et peut se faire en 1,4 (*polybutadiène cis* 1,4 et *polyisoprène cis* 1,4).

Enfin, une réaction particulière des diènes conjugués est la *réaction de Diels-Alder* par laquelle un diène réagit en 1,4 avec une oléfine ou un acétylénique activés :

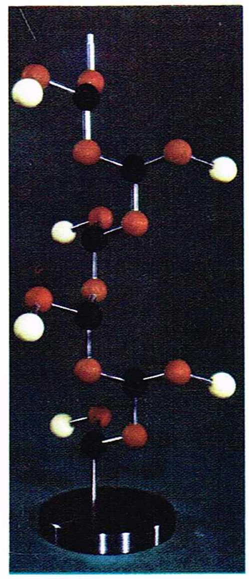

Montecatini - Edison

▲ ***Modèle représentant la structure du polymère* polybutène-α-isotactique.**

▼ ***A gauche, sphérolites de* polybutène-1-isotactique *(microphotographie en nicols croisés). A droite, structure* du polypropylène isotactique.**

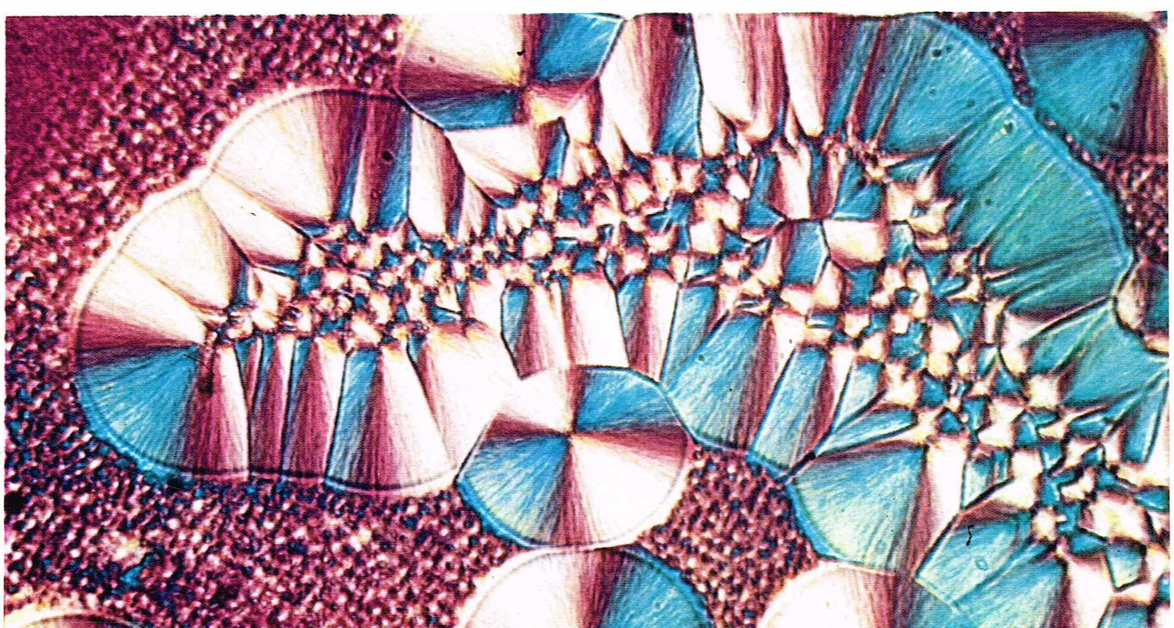

Centre de recherches sur les macromolécules du Centre National de la Recherche Scientifique de Strasbourg

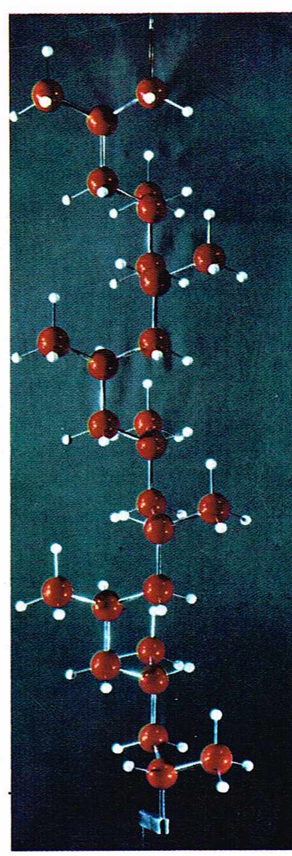

Montecatini - Edison

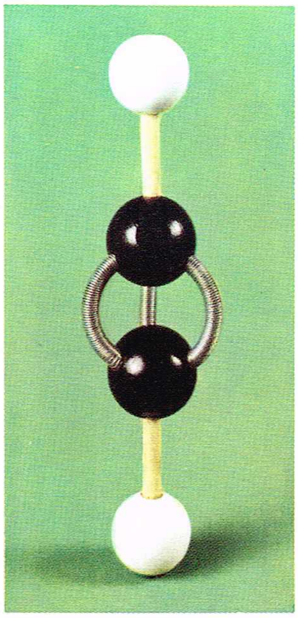

A. Rizzi

▲ ***Modèle de la molécule d'acétylène, C_2H_2 (en noir, les atomes de carbone ; en blanc, les atomes d'hydrogène).***

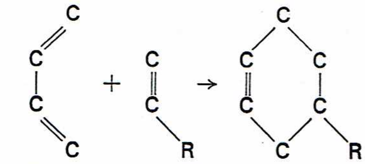

diène philodiène

ainsi :

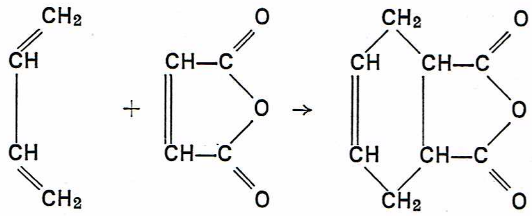

butadiène *anhydride maléique*

Dans le cas d'une oléfine utilisée comme philodiène, il se forme un *alkyl cyclohexène,* et avec un acétylénique, un *alkyl cyclohexadiène*. Le groupement R qui active la double liaison de l'oléfine peut être un acide, un éther, un ester, un groupe nitro, mais peut aussi être un groupe vinyle ($—CH = CH_2$). Il en résulte que les diènes réagissent avec eux-mêmes pour donner des *dimères*. Par exemple, l'isoprène donne le limonène :

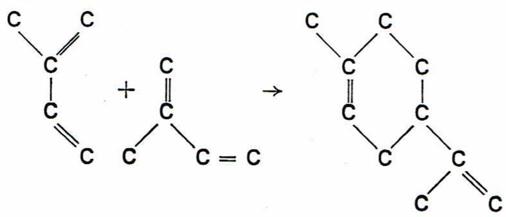

Ces quelques exemples n'épuisent pas la liste des nombreuses réactions des oléfines que l'on aura l'occasion de revoir dans les chapitres ultérieurs.

Les alcynes

Les alcynes, ou hydrocarbures acétyléniques, du nom du premier d'entre eux, l'**acétylène,** sont des hydrocarbures insaturés comportant dans leur molécule au moins une triple liaison. Selon que la triple liaison est à l'extrémité ou dans une chaîne, on distingue les *acétyléniques vrais* des *acétyléniques bisubstitués :*

$$R—C \equiv CH \quad \text{et} \quad R—C \equiv C—R'.$$

Pratiquement, le plus important des hydrocarbures acétyléniques est l'acétylène lui-même, de formule $HC \equiv CH$. Sa molécule est linéaire. Ses deux atomes de carbone sont liés par une liaison σ et deux liaisons π.

On désigne les alcynes du nom de l'alcène correspondant en remplaçant la désinence *ène* par la désinence *yne*.

Les propriétés physiques des alcynes sont très voisines de celles des alcènes et des alcanes. Cependant, leurs points d'ébullition sont légèrement supérieurs, et leur solubilité dans l'eau est plus importante.

L'acétylène, seul acétylénique ayant une certaine importance industrielle, peut être fabriqué soit à partir du charbon, en passant par le carbure de calcium, soit à partir du gaz naturel :

$$3C + CaO \xrightarrow{2\,000\,°C} CaC_2 + CO$$

$$CaC_2 + 2H_2O \longrightarrow HC \equiv CH + Ca(OH)_2.$$

La fabrication du carbure de calcium, donc de l'acétylène à partir de ce produit, est très onéreuse à cause du prix élevé de l'énergie électrique nécessaire au chauffage des fours : il faut dépenser 9 000 kWh d'électricité pour produire une tonne d'acétylène.

Le chauffage, vers 1 500 °C, du gaz naturel contenant du méthane produit essentiellement de l'acétylène si le temps de contact est très court (de 0,001 à 0,01 s). De plus, l'effluent gazeux doit être refroidi brusquement (trempe) pour éviter toute décomposition ultérieure de l'acétylène formé :

$$2CH_4 \rightleftharpoons C_2H_2 + 3H_2 — 95{,}5 \text{ kcal.}$$

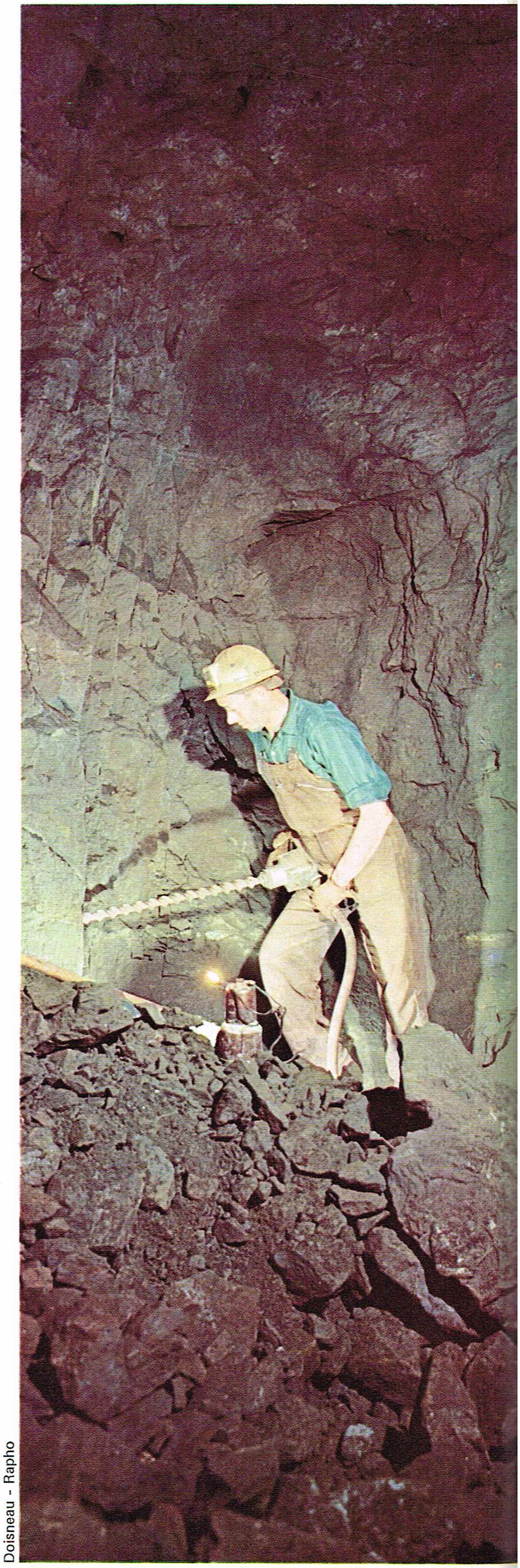

Doisneau - Rapho

▶ ***L'acétylène a perdu beaucoup de son importance comme matière première de la chimie organique industrielle mais on l'utilise toujours pour la soudure et le découpage du fer et de l'acier grâce au chalumeau oxyacétylénique, et parfois dans les lampes à acétylène.***

Propriétés physiques. L'acétylène est un gaz incolore qui bout à — 84 °C. Il est difficilement liquéfiable, car, thermodynamiquement instable, il explose au choc en libérant ses éléments constitutifs :

$$C_2H_2 \rightarrow 2C + H_2 + 56 \text{ kcal.}$$

On peut cependant stocker et transporter l'acétylène dans des conditions normales de sécurité en le dissolvant dans de l'acétone (sous 12 atmosphères, 1 volume d'acétone dissout 300 volumes d'acétylène) et en ajoutant à cette solution un produit solide poreux.

L'acétylène a perdu beaucoup de son importance comme matière première de la chimie organique industrielle en raison de la concurrence que lui a faite l'éthylène, moins cher et plus facile à transporter. On l'utilise toujours pour la soudure et le découpage du fer et de l'acier grâce au chalumeau oxyacétylénique, et certaines synthèses industrielles de composés organiques dérivent encore de cet hydrocarbure.

Propriétés chimiques. Comme les oléfines, les acétyléniques, et en particulier l'acétylène, donnent des *réactions d'addition,* parmi lesquelles on peut citer :

— L'*hydrogénation catalytique,* qui conduit à des oléfines et à des paraffines :

$$R{-}C \equiv C{-}R' + H_2 \rightarrow R{-}CH = CH{-}R' \quad + H_2 \rightarrow R{-}CH_2{-}CH_2{-}R'.$$

Cette réaction est utilisée pour éliminer de certaines oléfines destinées à la polymérisation les acétyléniques qu'elles contiennent et qui sont des poisons des catalyseurs. Elle intervient aussi dans l'hydrogénation sélective des essences de steam-cracking qui contiennent des acétyléniques susceptibles de former avec les diènes des gommes et que l'hydrogénation transforme en oléfine.

— L'*addition d'halogènes,* en particulier du chlore, qui conduit à une série importante de solvants chlorés; l'addition du chlore à l'acétylène fournit le *tétrachloréthane :*

$$HC \equiv CH + 2Cl_2 \rightarrow Cl_2CH{-}CHCl_2$$

qui, par action de la chaux ou par pyrolyse, conduit au *trichloréthylène :*

$$Cl_2CH{-}CHCl_2 \xrightarrow{-HCl} Cl_2C = CHCl$$

et à d'autres solvants chlorés *(pentachloréthane, hexachloréthylène),* par action ultérieure du chlore puis de la chaux.

L'addition d'acide chlorhydrique fournit le *chlorure de vinyle :*

$$HC \equiv CH + HCl \rightarrow CH_2 = CHCl$$

l'addition d'acide cyanhydrique donne l'*acrylonitrile :*

$$HC \equiv CH + HCN \rightarrow CH_2 = CHCN$$

l'addition d'acide acétique, l'*acétate de vinyle :*

$$HC \equiv CH + CH_3COOH \rightarrow CH_2 = CH{-}OCOCH_3.$$

Ces trois composés vinyliques sont des monomères importants dans la fabrication des matières plastiques et des fibres textiles. L'addition d'eau à l'acétylène, en présence de sulfate mercurique et d'acide sulfurique, conduit à l'acétaldéhyde :

$$HC \equiv CH + H_2O \rightarrow CH_3{-}CHO.$$

Enfin, l'acétylène peut réagir avec les *diazoalcanes* pour donner des *bis-pyrazoles;* les carbènes s'additionnent à l'acétylène pour former des dérivés du cyclopropène et du cyclopropane; l'acétylène donne, comme les oléfines, la réaction de Diels-Alder.

Dans certaines conditions, avec des catalyseurs appropriés, l'acétylène donne un dimère, le *vinylacétylène,* un trimère cyclique, le *benzène,* un tétramère cyclique, le *cyclo-octatétraène :*

$CH_2 = CH{-}C \equiv CH$ 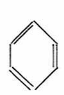 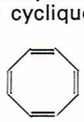

vinylacétylène *benzène* *cyclo-octatétraène*

En présence de certains catalyseurs à base de cuivre utilisés dans des réactions avec l'acétylène, ce dernier peut donner un polymère insoluble, le *cuprène.* Enfin, certains polymères de dérivés acétyléniques sont des semi-conducteurs.

L'acétylène et les acétyléniques vrais possèdent des hydrogènes remplaçables par un métal. Ainsi, l'acétylène réagit avec les solutions aqueuses de nitrate d'argent ammoniacal, ou de chlorure cuivreux ammoniacal avec formation de carbures insolubles :

$$HC \equiv CH + 2Ag(NH_3)_2NO_3 \rightarrow AgC \equiv CAg + 2NH_4NO_3 + 2NH_3$$

$$HC \equiv CH + 2Cu(NH_3)_2Cl \rightarrow CuC \equiv CCu + 2NH_4Cl + 2NH_3.$$

Les carbures de métaux lourds sont thermodynamiquement instables et peuvent exploser au choc. Les acétylures et les carbures des métaux alcalins et alcalino-terreux sont hydrolysés par l'eau avec production d'acétylène.

Les hydrocarbures aromatiques

Parmi les composés à structure cyclique, ceux qui sont formés par une seule sorte d'atomes sont des composés homocycliques. Parmi ceux-ci, les composés ayant conservé les caractères des composés aliphatiques (alcanes) sont les composés *alicycliques (cyclanes),* les autres, qui dérivent du benzène, sont les *composés aromatiques.* Les *hydrocarbures aromatiques,* appelés encore *hydrocarbures benzéniques,* dérivent du plus simple d'entre eux, le benzène, de formule brute C_6H_6.

C'est Kekulé qui, en 1865, proposait pour le benzène la formule cyclique dans laquelle six atomes de carbone liés à six atomes d'hydrogène sont reliés par des liaisons alternativement doubles et simples :

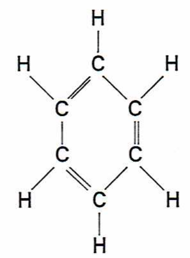

Mais cette formule laissait prévoir deux composés bisubstitués sur deux carbones voisins :

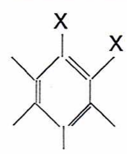 et 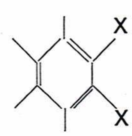

En fait, jamais deux composés « ortho » bisubstitués n'ont pu être mis en évidence. Kekulé lui-même proposa en 1872 une structure du benzène telle qu'il existe un équilibre entre deux structures :

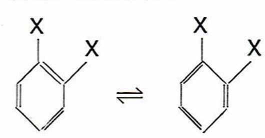

Puis d'autres représentations ont été données pour le benzène. En fait, on admet que le benzène peut exister sous plusieurs formes, et que la molécule est un hybride de résonance entre ces différentes formes. Les théories électroniques modernes décrivent le benzène comme six atomes de carbone liés par six liaisons σ, les six électrons correspondant aux trois doubles liaisons étant délocalisés sur l'ensemble des six atomes de carbone. Pour éviter de localiser les trois doubles liaisons, on représente le noyau benzénique par une des formules suivantes :

ou 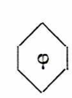

L'identité des six liaisons carbone-carbone a été prouvée par diffraction électronique. Alors que la longueur de liaison C—C dans un alcane est de 1,54 Å, qu'elle est de 1,34 Å dans l'éthylène, elle est de 1,39 Å dans le benzène. On retrouve du reste cette distance entre atomes de carbone dans le graphite. Cette structure particulière du benzène lui confère une stabilité plus grande que celle du cyclohexatriène-1,3,5 hypothétique dans lequel cette structure de résonance n'existerait pas.

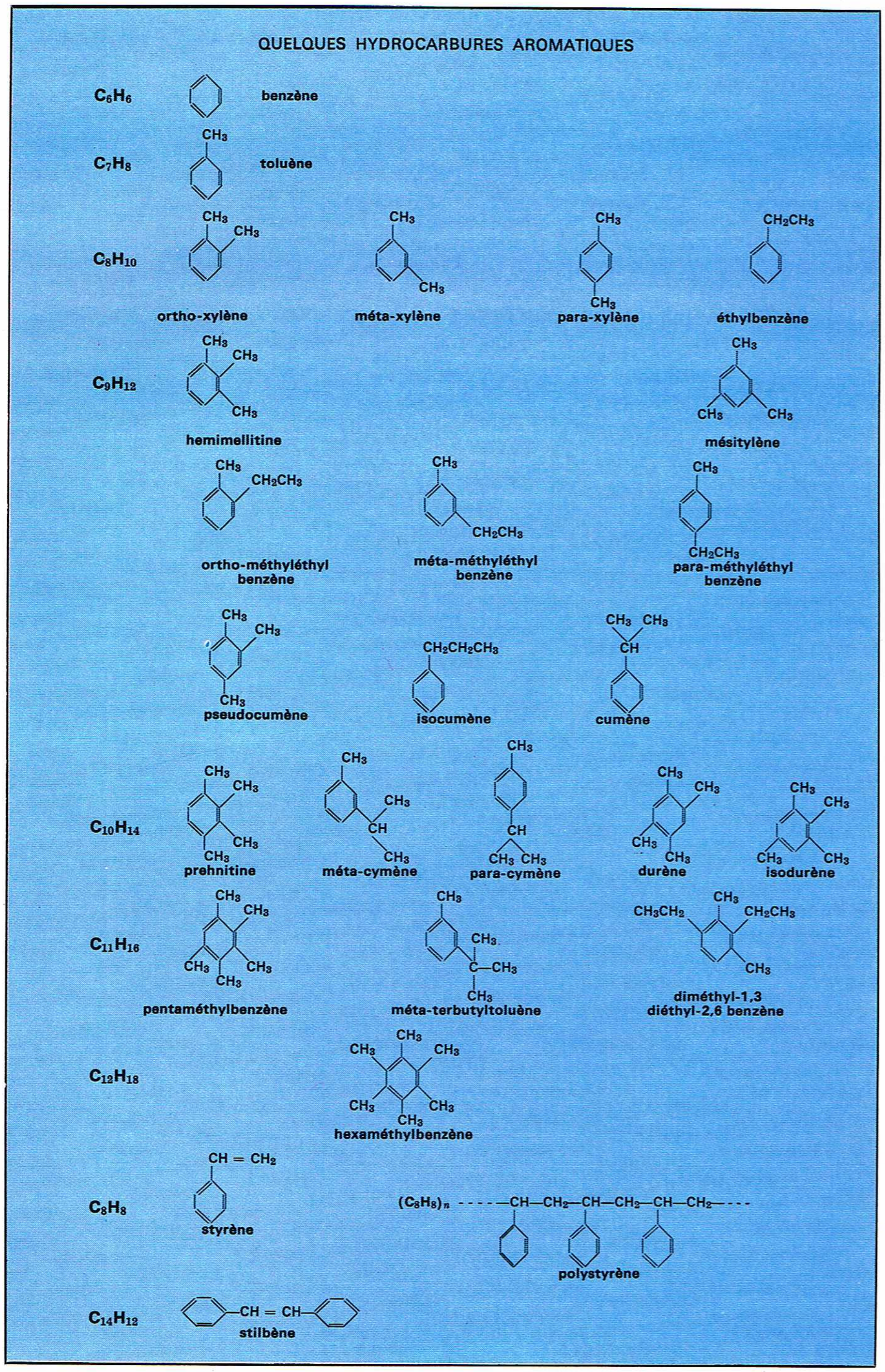

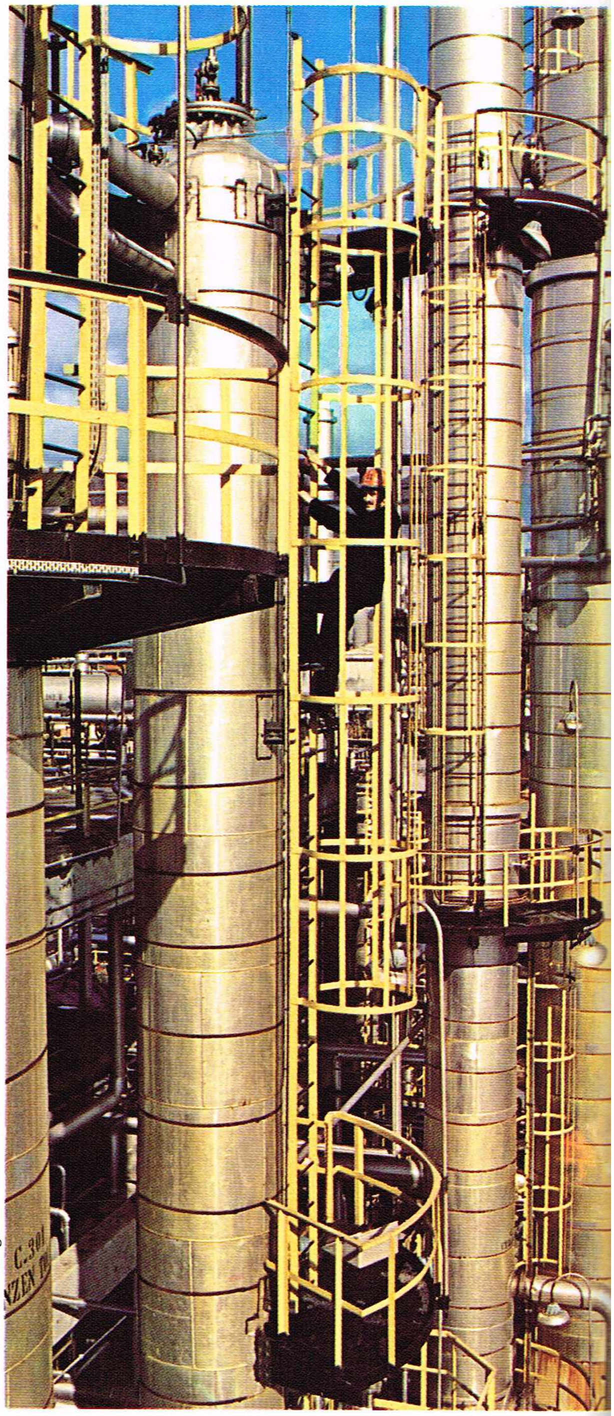

Léonard Freed - Magnum

▲ *A gauche, tableau récapitulatif des hydrocarbures aromatiques; ils dérivent du plus simple d'entre eux, le* benzène, C_6H_6. *A droite, installations industrielles de fabrication du styrène; celui-ci subit facilement une polymérisation, qui fournit une matière plastique : le* polystyrène.

Cette énergie de stabilisation du benzène est l'*énergie de résonance;* elle est égale à 36 kcal/mole. C'est à cause de cette énergie de résonance que les réactions d'addition sur le benzène sont plus difficiles que les mêmes réactions sur les oléfines.

L'énergie de résonance peut être déterminée à partir des chaleurs de combustion. Dans ce cas, l'énergie de résonance est la différence entre l'énergie de formation que l'on détermine expérimentalement (par la chaleur de combustion du composé) et l'énergie de formation que l'on calcule en additionnant les énergies des différentes liaisons considérées comme localisées. On peut aussi mesurer l'énergie de résonance à l'aide des chaleurs d'hydrogénation. En première approximation, la chaleur d'hydrogénation d'un composé non conjugué contenant *n* doubles liaisons est égale à *n* fois la chaleur d'hydrogénation d'une double liaison isolée. Ainsi, si l'on soustrait de la chaleur d'hydrogénation de trois molécules de cyclohexène celle d'une molécule de benzène, la différence est l'énergie de résonance :

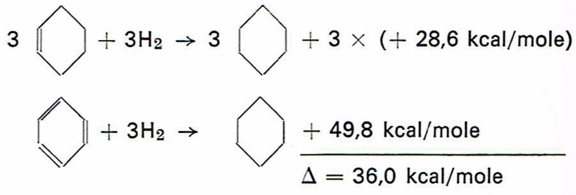

On observe une augmentation de l'énergie de résonance lorsque le noyau benzénique est conjugué avec un groupe insaturé; c'est le cas du styrène :

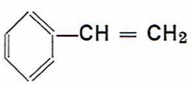

De même, la jonction avec un autre noyau benzénique augmente l'énergie de résonance; celle du biphényle est de 90 kcal/mole, soit plus de deux fois celle du benzène. Contrairement aux hydrocarbures paraffiniques, olé-

finiques et acétyléniques, les hydrocarbures benzéniques ne présentent pas de filiation d'atome de carbone en atome de carbone. Ils n'ont pas de formule générale du type C_nH_n, bien que le benzène réponde à cette formule.

Les hydrocarbures benzéniques sont considérés comme dérivant du benzène, de trois façons différentes :

— par *jonction de cycles* grâce à des liaisons C—C :

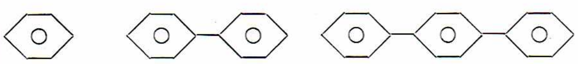

benzène *biphényle* *terphényle* etc.

— par *accolement de cycles* avec mise en commun d'une liaison C—C :

benzène *naphtalène* *anthracène*

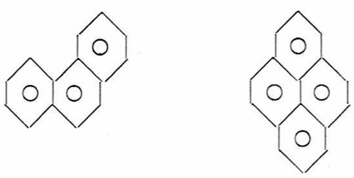

phénanthrène *pyrène*

On constate que, par accolement progressif des cycles, le rapport H/C diminue. On tend vers la structure du graphite ;

— par *substitution des hydrogènes* du benzène par des groupes alcoyles :

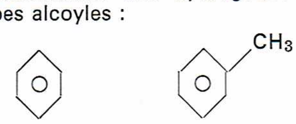

benzène *toluène*

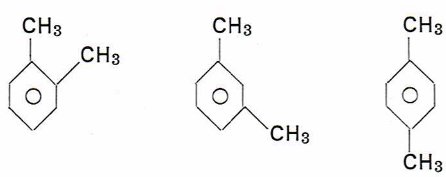

ortho- *méta-* *para-*

xylènes

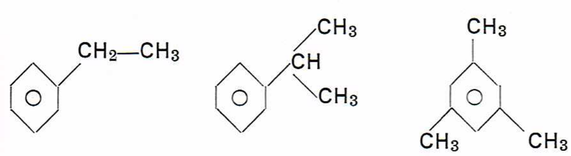

éthylbenzène *isopropylbenzène* ou *cumène* *mésitylène*

Les radicaux aromatiques les plus importants portent les noms suivants :

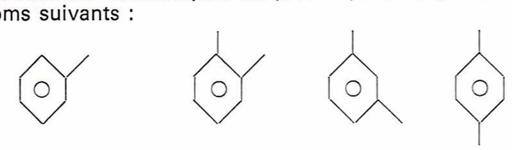

phényle *ortho-* *méta-* *para-*

phénylène

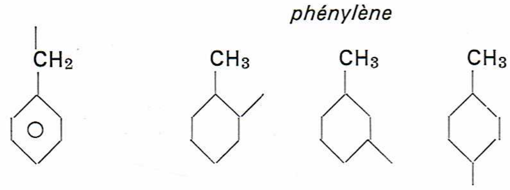

benzyle *ortho-* *méta-* *para-*

tolyle

Propriétés physiques. En ce qui concerne les propriétés physiques, les hydrocarbures aromatiques ont des points d'ébullition supérieurs à ceux des alcanes correspondants. Ainsi, le benzène bout à 80,1 °C, alors que l'hexane bout à 68,8 °C. Ces températures d'ébullition plus élevées résultent de forces d'attraction plus grandes entre les molécules planes de benzène qu'entre les molécules déformables de l'hexane. En ce qui concerne la température de fusion + 5,5 °C pour le benzène, alors que l'hexane fond à — 95 °C, sa valeur résulte de la structure plus symétrique du benzène. Les hydrocarbures benzéniques sont d'excellents solvants, en particulier pour les peintures, vernis, etc., mais ils doivent être manipulés avec précaution en raison de leur toxicité.

Le benzène est un liquide qui brûle avec une flamme fuligineuse en raison du rapport C/H élevé de sa molécule. On l'obtient soit par distillation du goudron de houille, soit à partir des produits de reforming du pétrole.

Propriétés chimiques. Les réactions du benzène et des hydrocarbures benzéniques en général sont soit des réactions d'addition, soit des réactions de substitution.

— Parmi les *réactions de substitution,* on peut citer : la *chloration,* en présence de chlorure ferrique qui conduit assez sélectivement au *monochlorobenzène,* la chloration ultérieure en *ortho-* et *para-dichlorobenzène* étant plus lente :

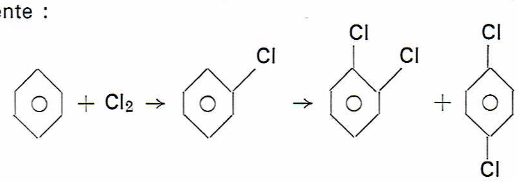

De même, le benzène réagit aisément avec l'*acide nitrique* en présence d'acide sulfurique en donnant un produit monosubstitué, le nitrobenzène, point de départ de la fabrication de l'aniline :

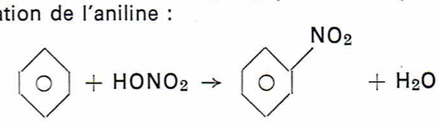

Par action de l'*acide sulfurique* concentré, on obtient l'acide benzène-sulfonique :

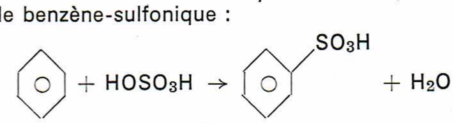

La sulfonation des alkylbenzènes à longue chaîne latérale (dodécylbenzène) suivie de la neutralisation par la soude de l'acide sulfonique obtenu est un mode d'obtention de détergents. Le benzène réagit en outre sur les halogénures d'alkyle R—X et avec les chlorures d'acyle R—CO—Cl, en présence de chlorure d'aluminium, pour donner des alkylbenzènes et des acylbenzènes ; c'est la réaction de *Friedel et Crafts :*

$$C_6H_6 + R—Cl \xrightarrow{AlCl_3} C_6H_5—R + HCl.$$

L'*alkylation* du noyau benzénique peut se faire en utilisant des oléfines et des catalyseurs comme HF ou BF_3. C'est ainsi que l'on fabrique l'*éthylbenzène,* qui sert à la fabrication du styrène, et l'*isopropylbenzène,* point de départ de la synthèse du phénol et de l'acétone :

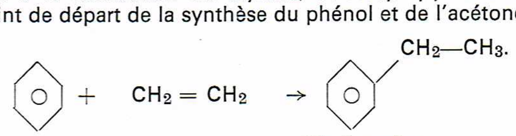

éthylbenzène

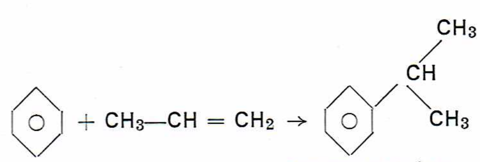

isopropylbenzène

L'alkylation par le dodécène donne le dodécylbenzène.

— Parmi les *réactions d'addition* du benzène, on peut citer l'*hydrogénation,* qui conduit au cyclohexane, et la *chloration* photochimique, par laquelle on forme l'hexachlorocyclohexane. Bien que l'oxydation des chaînes latérales des aromatiques ne concerne pas le noyau benzénique, on considère cette réaction comme une réaction des aromatiques. Au laboratoire, on peut oxyder

les chaînes latérales en utilisant le bichromate de sodium en présence d'acide sulfurique. Industriellement, on oxyde l'hydrocarbure par l'oxygène, en présence d'oxyde de vanadium (V_2O_5) comme catalyseur. Le toluène fournit l'acide benzoïque :

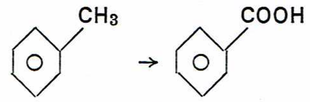

L'orthoxylène conduit à l'anhydride phtalique, et le paraxylène à l'acide téréphtalique :

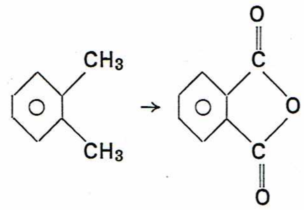

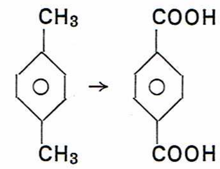

Bien que le noyau benzénique soit très résistant à l'oxydation, on peut oxyder le benzène en phase vapeur à 400-450 °C en présence de V_2O_5 ; il se forme l'anhydride maléique :

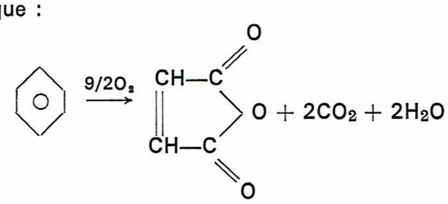

Les sources industrielles d'hydrocarbures

Les trois principales sources d'hydrocarbures sont le gaz naturel, le pétrole brut et le charbon.

— Le *gaz naturel* renferme surtout du méthane ainsi que des quantités plus faibles d'éthane, de propane et de butane.

— Le *pétrole brut* contient des hydrocarbures paraffiniques, naphténiques et aromatiques en proportions variables suivant son origine géographique. Il ne renferme ni oléfines, ni acétyléniques. Les oléfines doivent être produites dans le *steam-cracking*, ou *vapocraquage*, qui consiste à craquer les molécules d'hydrocarbures, grâce à la chaleur, en présence de vapeur d'eau. Les aromatiques présents en quantités insuffisantes dans les bruts sont produits à partir des paraffines et des naphtènes dans l'opération de *reforming*. Les hydrocarbures de trop haute masse moléculaire, inutilisables dans les essences en particulier, sont transformés en molécules plus petites, oléfiniques et paraffiniques, grâce au *cracking catalytique*. Avant d'être soumis à ces opérations de raffinage, le pétrole brut est distillé à la pression atmosphérique, puis sous vide pour le fractionner en essences, kérosène, fuel, gas-oil, huiles lubrifiantes, qui sont des coupes caractérisées par un certain intervalle de distillation.

— Les hydrocarbures proviennent aussi de la *houille*, bien que cette source perde progressivement de son importance devant le développement du pétrole. Par distillation de la houille, on obtient un résidu solide, le coke, utilisé pour la réduction des minerais. Il se forme en outre des gaz (hydrogène, oxyde de carbone, ammoniac) et du goudron de houille. De ce goudron, par distillation, on peut extraire bon nombre de produits organiques dans lesquels les hydrocarbures aromatiques dominent.

— Enfin, on trouve des hydrocarbures de différents types dans les *plantes* et chez les *êtres vivants* en général.

La quasi-totalité (90 % environ) des hydrocarbures extraits du sol sous forme de pétrole brut ou de gaz naturel est utilisée pour la production d'énergie (carburants, combustibles) ; le reste sert à la synthèse de

▶ ***Le gaz naturel renferme surtout du méthane ainsi que des quantités plus faibles d'éthane, de propane, et de butane. Ici, torches de gaz naturel en Iran.***

Serraillier - Rapho

Paul Fusco - Magnum

▲ *C'est par fermentation que l'on fabrique l'alcool destiné à l'alimentation : production de vin à partir de moût de raisin, de bière à partir de moût du malt, etc. Ici, un laboratoire de tests dans une cave vinicole en Californie.*

▶ *Page ci-contre, schéma des différentes* préparations des alcools.

▼ *Alambics industriels servant à la distillation des vins récoltés dans la région de Cognac.*

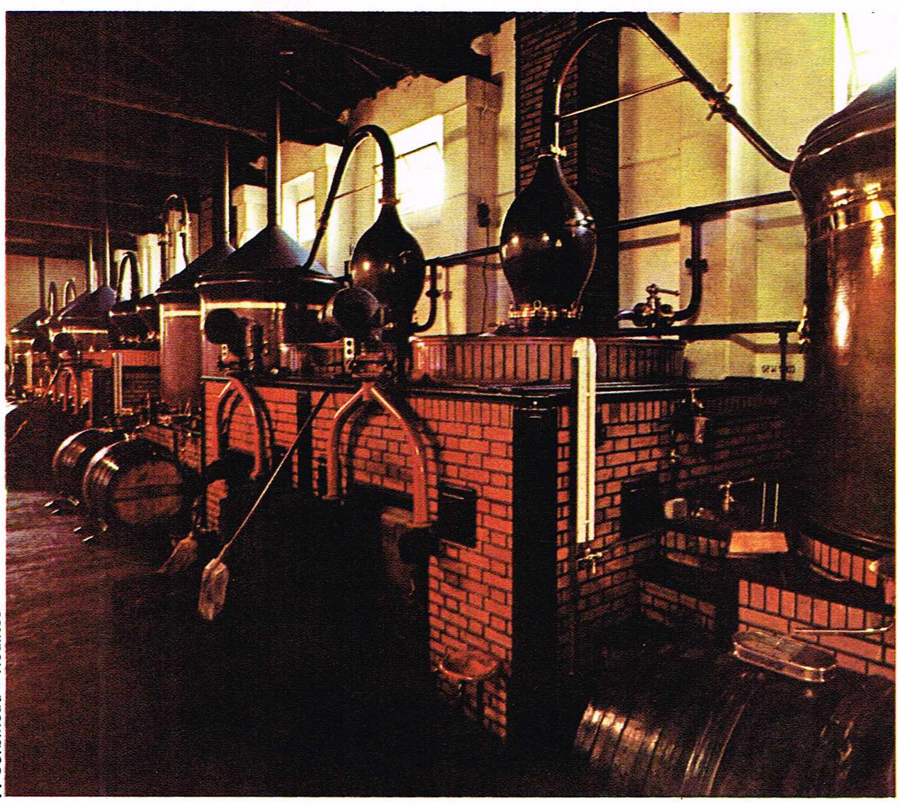

F. Corbineau - Réalités

composés plus complexes, porteurs d'autres atomes que le carbone et l'hydrogène et qui alimentent les industries chimiques. Ces éléments autres que le carbone et l'hydrogène, liés en groupements appelés *fonctions chimiques,* en se substituant aux hydrogènes des squelettes hydrocarbonés de base, vont conduire à de nouveaux composés que nous allons passer en revue en commençant par les fonctions oxygénées.

Les composés à hétéroatomes

Les composés oxygénés

Les alcools

Ce sont des composés très importants que l'on peut considérer comme résultant de la substitution dans un hydrocarbure, saturé ou insaturé, d'un atome d'hydrogène par le groupement —OH appelé *groupement hydroxyle.* Leur formule générale est R—OH.

Selon que le groupement hydroxyle est lié à un atome de carbone lui-même lié à un seul autre atome de carbone (carbone primaire), ou à deux autres atomes de carbone (carbone secondaire), ou à trois (carbone tertiaire), on distingue : les *alcools primaires,* $R{-}CH_2OH$, les *alcools secondaires,* R—CHOH—R′, et tertiaires, $R{-}\overset{\overset{\Large OH}{|}}{\underset{\underset{\Large R''}{|}}{C}}{-}R'$.

La nomenclature officielle des alcools consiste à faire suivre le nom de l'hydrocarbure correspondant de la désinence *ol.* Lorsque la molécule renferme deux ou plus de deux groupes —OH, on parle de *diols, triols... polyols.*

Le premier terme est le **méthanol,** CH_3OH, encore appelé **alcool méthylique,** puis l'**éthanol,** $CH_3{-}CH_2OH$ ou **alcool éthylique,** etc.

De nombreuses méthodes permettent de synthétiser les alcools ; parmi celles-ci, les plus importantes du point de vue industriel sont l'hydratation des oléfines en présence d'acide sulfurique, la réduction catalytique des aldéhydes, des cétones ou des esters, la fermentation du sucre ou de matières cellulosiques et l'hydrolyse des esters naturels. Il faut ajouter à ces méthodes les plus employées l'hydrolyse des halogénures d'alkyle, la réduction des amines primaires par l'acide nitreux, la réaction des composés organomagnésiens de Grignard avec les aldéhydes, les cétones et les esters.

Propriétés physiques. Les alcools sont en général des liquides incolores, solubles dans l'eau, cette solubilité diminuant à mesure que la masse moléculaire augmente. La solubilité dans l'eau ainsi que les températures d'ébullition anormalement élevées des alcools par rapport à celles des alcanes de masses moléculaires voisines sont dues aux liaisons hydrogène.

En effet, le méthanol bout à + 65 °C alors que l'éthane, dont la masse moléculaire est voisine (30 au lieu de 32), bout à — 88 °C. L'existence de liaisons hydrogène entre molécules d'alcool explique les températures d'ébullition élevées ; les liaisons hydrogène entre les alcools et l'eau expliquent la solubilité des alcools dans l'eau. La densité et le point de fusion des alcools augmentent régulièrement avec leur masse moléculaire.

Propriétés chimiques. Les alcools primaires et secondaires peuvent être respectivement déshydrogénés en aldéhydes et en cétones, en phase vapeur, sur des catalyseurs au cuivre vers 300 °C. En présence d'oxygène, l'hydrogène formé est transformé en eau, et la réaction est complète :

$$R{-}CH_2OH + 1/2\,O_2 \rightarrow \underset{\textit{aldéhyde}}{R{-}CHO} + H_2O$$

$$R{-}CHOH{-}R' + 1/2\,O_2 \rightarrow \underset{\textit{cétone}}{R{-}CO{-}R'} + H_2O.$$

Les alcools tertiaires résistent à l'oxydation mais, dans des conditions sévères, fournissent des aldéhydes et des cétones ayant un nombre d'atomes de carbone inférieur :

$$CH_3{-}\overset{\overset{\large CH_3}{|}}{\underset{\underset{\large OH}{|}}{C}}{-}CH_2{-}CH_3 \xrightarrow[-\,H_2O]{+1/2\,O_2} CH_3{-}\overset{\overset{\large CH_3}{|}}{\underset{\underset{\large O}{\|}}{C}} + OHC{-}CH_3$$

Des oxydants comme le bichromate de potassium en milieu sulfurique ou l'anhydride chromique dans l'acide acétique peuvent oxyder les alcools primaires et secondaires en aldéhydes et en cétones.

L'hydrogène des alcools est remplaçable par un métal avec formation d'un alcoolate. Ainsi, le sodium réagit sur l'alcool éthylique pour donner de l'éthylate de sodium, avec libération d'hydrogène :

$$CH_3—CH_2OH + Na \rightarrow CH_3—CH_2ONa + 1/2H_2.$$

Avec les acides minéraux ou organiques, les alcools donnent des *esters;* cette réaction, appelée *estérification,* est équilibrée. L'ester formé réagit en effet sur l'eau formée et redonne l'alcool et l'acide de départ : c'est l'*hydrolyse.*

$$R—CH_2OH + R'—COOH \underset{\text{hydrolyse}}{\overset{\text{estérification}}{\rightleftarrows}} R—CH_2OCOR' + H_2O.$$

Pour déplacer cet équilibre dans le sens de la production totale d'ester, on peut soit éliminer l'eau au fur et à mesure de sa formation, soit remplacer l'acide par son anhydride.

Le **méthanol,** CH_3OH, ou **alcool méthylique,** est le premier des alcools. On l'a obtenu pendant très longtemps par distillation sèche du bois entre 160 et 500 °C. Il se formait des gaz, un liquide et un résidu de charbon. Du liquide appelé « jus pyroligneux », on tirait l'acide pyroligneux qui renfermait de 1 à 5 % de méthanol, de 5 à 10 % d'acide acétique, moins de 1 % d'acétone et des traces de nombreux autres composés organiques. L'extraction du méthanol nécessitait de coûteuses distillations.

Le procédé industriel actuel consiste à faire agir l'oxyde de carbone sur l'hydrogène, en présence de catalyseurs à base d'oxyde de zinc et d'oxyde de chrome entre 300 et 400 °C, et entre 200 et 300 bars de pression :

$$CO + 2H_2 \rightarrow CH_3OH.$$

Il se forme en même temps un peu d'éther méthylique, $CH_3—O—CH_3$, et des alcools supérieurs.

L'alcool méthylique est toxique. Son principal débouché est la fabrication du formol et la synthèse de substances organiques. On l'utilise pour dénaturer l'alcool éthylique.

L'éthanol, ou **alcool éthylique,** $CH_3—CH_2OH$, existe dans la nature comme produit de la fermentation des sucres. C'est par fermentation que l'on fabrique l'alcool destiné à l'alimentation : production de vin à partir du moût de raisin, de la bière à partir du moût de malt et d'alcool éthylique pur à partir de matières sucrées (mélasses de betterave), de céréales ou de substances amylacées (riz, avoine, pomme de terre, etc.), ou plus simplement à partir de moût de bois avec hydrolyse acide préalable qui transforme la cellulose en oses simples fermentescibles. La réaction de fermentation provoquée par des enzymes consiste dans la transformation du glucose en alcool et anhydride carbonique :

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2CH_3—CH_2OH + 2CO_2.$$

Le mécanisme intime de la fermentation alcoolique est très complexe. Cette transformation biochimique n'a lieu qu'entre 5 et 50 °C et pour une concentration en sucre inférieure à 12 %, en présence de sels minéraux renfermant l'azote et le phosphore indispensables à la vie des micro-organismes qui permettent la réaction. Les produits secondaires de la fermentation sont l'aldéhyde acétique, l'acide succinique et un mélange d'alcools supérieurs désigné par le nom d'*huiles de Fusel* et dont la composition varie avec la nature du produit brut fermenté. L'alcool obtenu est de l'alcool à 90 %. Une seconde distillation est nécessaire pour obtenir un mélange d'alcool et d'eau à 95,5 % d'alcool qui est un azéotrope. Pour obtenir l'alcool à 100 %, appelé encore *alcool absolu,* on distille l'alcool sur de la chaux vive ou on entraîne l'eau avec du benzène dans une distillation azéotropique.

Industriellement, on produit l'alcool éthylique par hydratation catalytique de l'éthylène. On fait réagir l'acide sulfurique sur l'éthylène. Il se forme du sulfate acide d'éthyle qui est hydrolysé par l'eau en produisant de l'éthanol et en régénérant l'acide sulfurique :

$$CH_2 = CH_2 + H_2SO_4 \rightarrow CH_3—CH_2—OSO_3H$$
$$CH_3—CH_2—OSO_3H + H_2O \rightarrow CH_3—CH_2OH + H_2SO_4.$$

PRÉPARATION DES ALCOOLS

1° Hydratation des oléfines :

$$R—CH = CH_2 + H_2O \rightarrow R—CHOH—CH_3$$

2° Saponification des esters naturels :

$$R—CH_2—O—CO—R' + NaOH \rightarrow R—CH_2—OH + R'—COONa$$

3° Hydrolyse des halogénures d'alkyle :

$$R—CH_2Cl + NaOH \rightarrow R—CH_2OH + NaCl$$

4° Réaction d'une amine primaire avec l'acide nitreux :

$$R—CH_2—NH_2 + HNO_2 \rightarrow R—CH_2OH + N_2 + H_2O$$

5° Réduction des aldéhydes, cétones et esters :

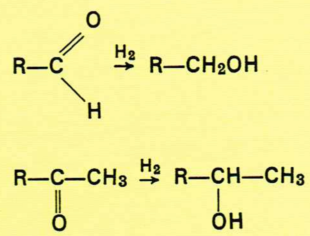

$$R—CH_2O—CO—CH_3 \xrightarrow{2H_2} R—CH_2OH + CH_3—CH_2OH$$

6° Réaction des composés de Grignard avec les aldéhydes, cétones, esters :

$$R'MgX + H—CHO \rightarrow R'—CH_2OMgX \xrightarrow{H_2O} R'—CH_2OH + MgX(OH)$$

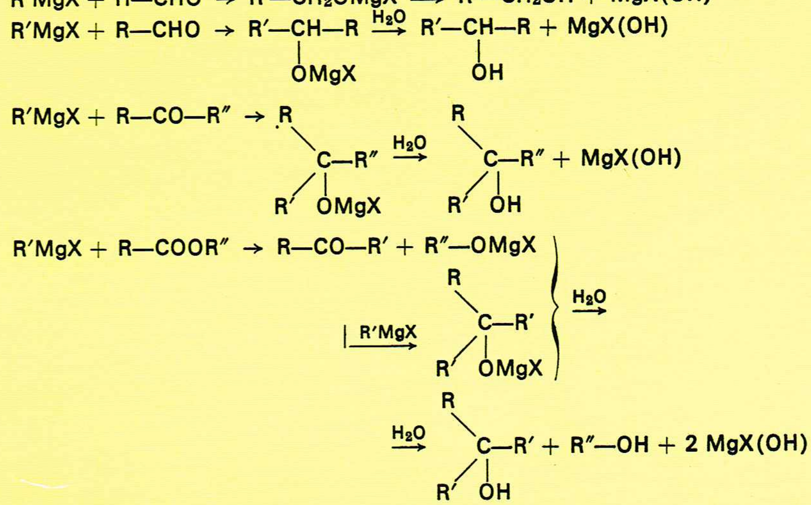

PRÉPARATION DES PHÉNOLS

1° A partir du cumène :

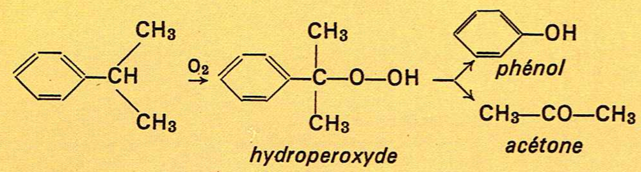

2° A partir des dérivés halogénés :

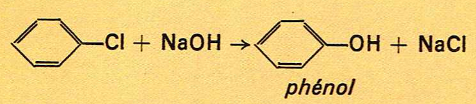

3° Par fusion alcaline des acides sulfoniques :

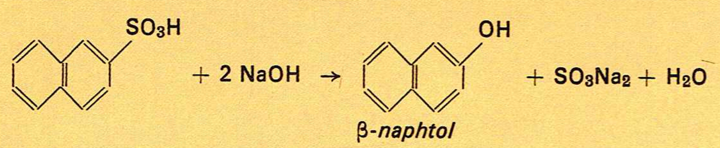

4° A partir du toluène (phénol) :

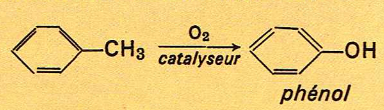

5° Par hydrolyse de diamines aromatiques :

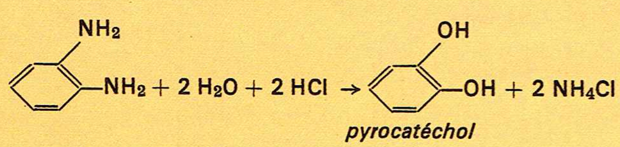

▲ *Schéma des différentes* **préparations des phénols.**

Cette réaction peut aussi être catalysée en phase vapeur par l'acide phosphorique.

L'alcool éthylique est un liquide limpide, incolore, d'odeur agréable, miscible à l'eau en toutes proportions (la solution se fait avec diminution de volume).

L'alcool éthylique est principalement utilisé comme solvant, comme combustible (dans ce cas, il est dénaturé, c'est l'alcool à brûler) ainsi que dans les synthèses organiques.

A faibles doses, l'alcool éthylique agit comme un excitant de l'organisme, à doses plus élevées comme un narcotique, et à doses très élevées comme un toxique qui provoque la dégénérescence de nombreux organes. L'alcootest qui permet de déterminer la teneur en alcool dans le sang sur la base de la teneur en alcool de l'air expiré est fondé sur la réaction d'oxydation de l'alcool par de l'anhydride chromique en présence d'acide sulfurique.

D'autres alcools ont une importance pratique certaine. C'est le cas par exemple de l'**alcool isopropylique,** $CH_3—CHOH—CH_3$, que l'on obtient par hydratation du propylène et que l'on utilise comme liquide dégivrant; les **butanols primaire** et **secondaire ;** l'**alcool amylique** ou **pentanol** ($C_5H_{11}OH$) ; le **cyclohexanol** qui se produit en même temps que la cyclohexanone lors de l'oxydation du cyclohexane; enfin, les **alcools à longue chaîne,** C_{10} à C_{14}, obtenus par polymérisation de l'éthylène par le triéthylaluminium, oxydation et hydrolyse, sont des bases pour les détergents biodégradables :

$$3nCH_2 = CH_2 + Al(CH_2—CH_3)_3 \rightarrow Al[(CH_2—CH_2)_n\ CH_2—CH_3]_3$$

$$Al[(CH_2—CH_2)_n\ CH_2—CH_3]_3 + 3/2O_2 \rightarrow Al[O\ (CH_2—CH_2)_n\ CH_2—CH_3]_3$$

$$Al[O(CH_2—CH_2)_n\ CH_2—CH_3]_3 + H_2O \rightarrow Al(OH)_3 + 3HO(CH_2—CH_2)_n\ CH_2—CH_3$$

où $n = 8$ à 12.

Les phénols

Lorsque le groupement hydroxyle —OH est fixé à un cycle benzénique, le composé obtenu n'est plus un alcool mais un phénol. On a été amené à différencier la fonction alcool de la fonction phénol en raison d'une réactivité différente du groupement —OH. Dans les phénols, le noyau influe considérablement sur la réactivité du groupement hydroxyle, et, inversement, le groupement —OH a un effet sur la réactivité du noyau.

Le plus simple des phénols est le **phénol** improprement appelé **acide phénique :** C_6H_5OH. On peut l'obtenir par extraction du goudron de houille; on le synthétise industriellement à partir du chlorobenzène :

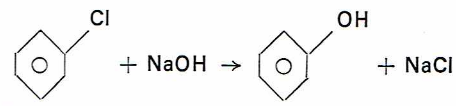

il se forme en même temps un peu de diphényl éther :

$$C_6H_5—O—C_6H_5,$$

ou à partir de l'hydroperoxyde de cumène :

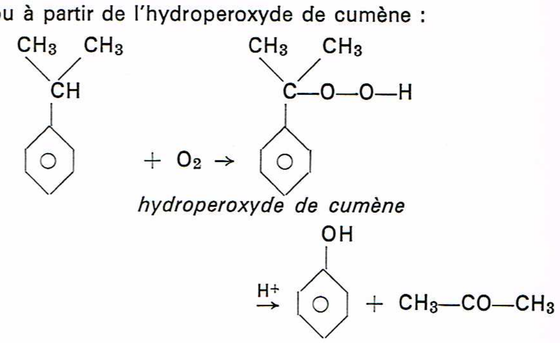

Il se forme une mole d'acétone pour chaque mole de phénol.

Propriétés chimiques. L'acidité de l'hydrogène de l'hydroxyle est beaucoup plus grande chez les phénols que chez les alcools. Il est possible, par simple neutralisation avec une base, de former un **phénate** qui est l'équivalent d'un alcoolate :

$$ArOH + NaOH \rightarrow ArONa + H_2O.$$

L'acidité des phénols étant cependant inférieure à celle de l'acide carbonique, ce dernier peut déplacer le phénol de ses phénates en solution aqueuse :

$$ArONa + [CO_3H_2] \rightarrow ArOH + NaHCO_3.$$

La présence du groupement —OH facilite l'oxydation du noyau. L'air ou les agents oxydants oxydent le phénol en produisant des composés plus ou moins complexes, dont certains sont colorés. L'un de ces produits d'oxydation à l'air est la **quinone :**

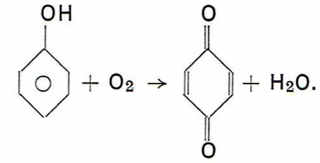

Comme le benzène, le phénol et ses homologues donnent des réactions de substitution du noyau (sulfonation, nitration, chloration, etc.). Le groupement —OH a un effet d'orientation des substitutions tel que les dérivés ortho- et para- prédominent.

Le phénol est toxique. Il a une action destructrice sur les cellules de l'épiderme avec lequel il entre en contact. Les phénols sont toxiques pour les micro-organismes, ce qui leur a valu longtemps d'être utilisés comme antiseptiques.

Les principaux emplois du phénol sont les **résines phénol-formol,** les **alkyl-phénols** et d'autres aromatiques tels que le **bisphénol A** et le **2,4 D.**

Parmi les autres phénols, il faut citer :
— les **crésols** :

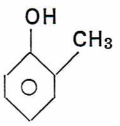

orthocrésol

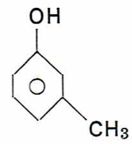

métacrésol

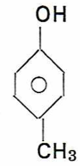

paracrésol

l'alkylation du paracrésol par l'isobutène fournit le ditertiobutyl-2, 6 méthyl-4 phénol ou ditertiobutyl paracrésol, utilisé comme antioxydant pour les essences, les huiles et les caoutchoucs :

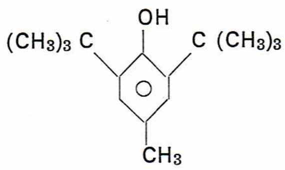

— les **naphtols** dérivant du naphtalène :

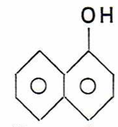

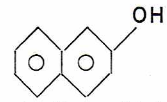

l'α *naphtol* et le β *naphtol*

— enfin les **polyphénols** :

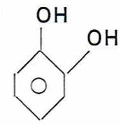

pyrocatéchol

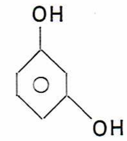

résorcine

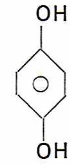

hydroquinone

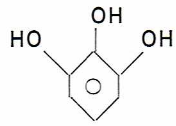

pyrogallol

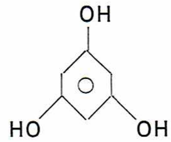

phloroglucine

▼ ***Cristaux de* résorcine *vus au microscope polarisant, en extinction complète. La résorcine est un diphénol dérivant du benzène.***

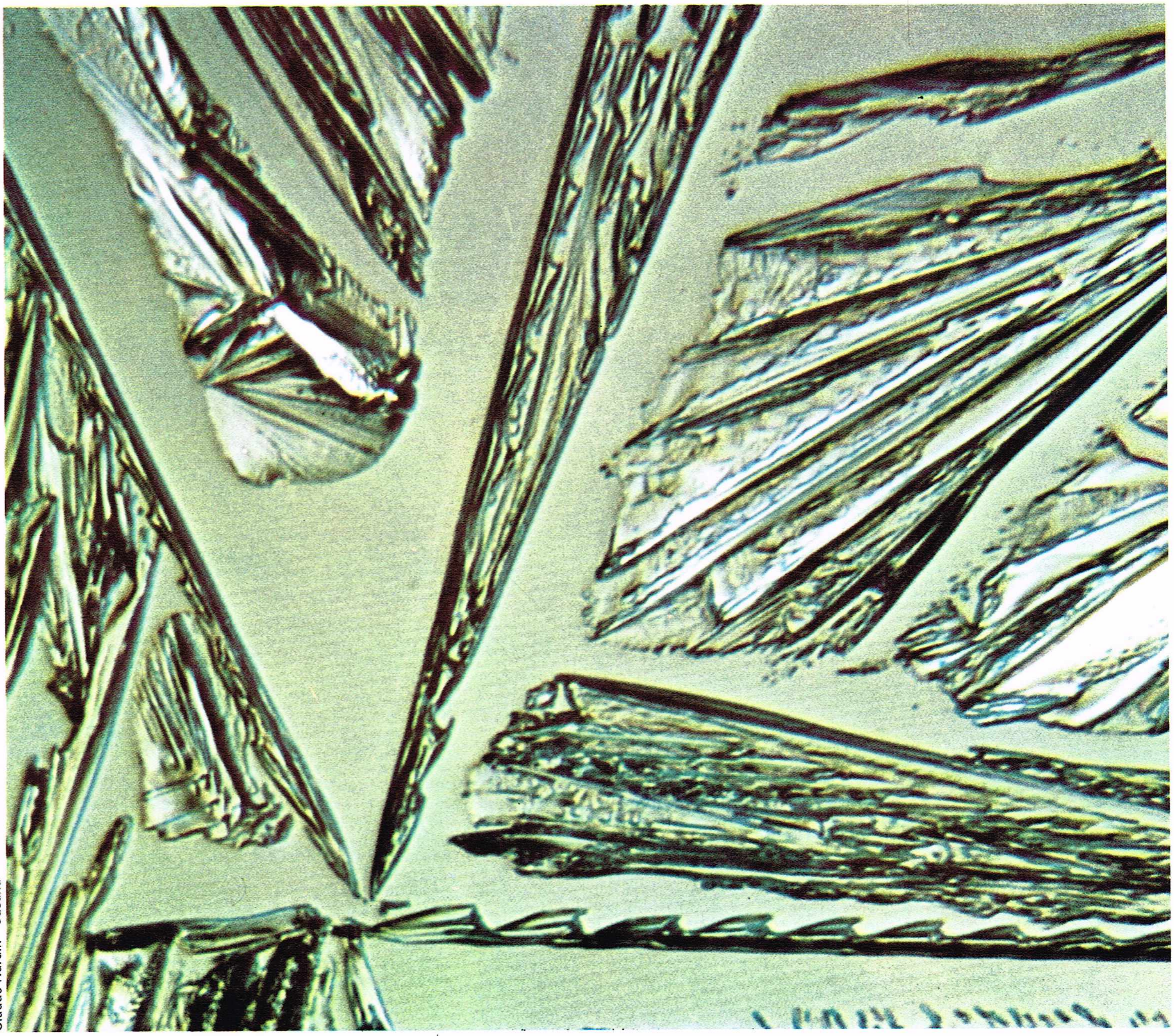

Claude Nardin - Jacana

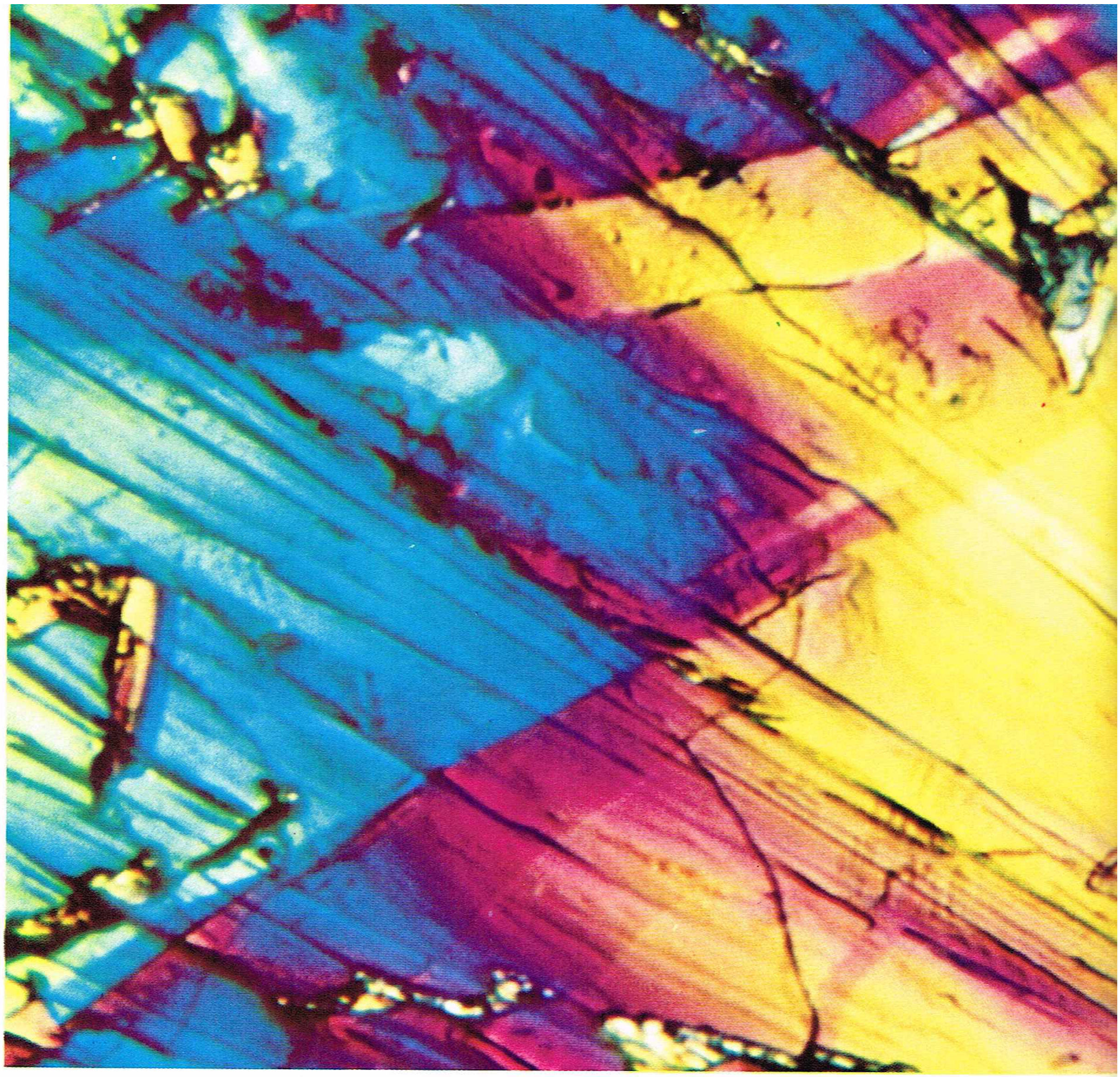

L'hydroquinone et le pyrogallol sont utilisés en photographie. Les solutions alcalines de pyrogallol sont utilisées pour absorber l'oxygène contenu dans les gaz.

Les éthers

Les éthers, de formule générale R—O—R′ dans laquelle R et R′ sont des radicaux aliphatiques, alicycliques ou aromatiques, peuvent être considérés comme dérivant des alcools, par substitution de l'hydrogène de l'hydroxyle par un radical alkyle, ou comme dérivant des hydrocarbures par substitution par un radical alcoxy (R—O—). Lorsque R = R′, il s'agit d'*éthers simples;* dans le cas contraire, ce sont des *éthers mixtes*.

On peut préparer les éthers par action d'un chlorure d'alkyle sur un alcoolate (synthèse de Williamson). Industriellement, on les obtient par action de l'acide sulfurique sur un alcool. Il se forme un sulfate acide d'alkyle qui est ensuite transformé en éther avec restitution de l'acide sulfurique :

$$C_2H_5OH + HOSO_2OH \rightarrow C_2H_5OSO_2OH + H_2O$$

$$C_2H_5OSO_2OH + C_2H_5OH \rightarrow C_2H_5{-}O{-}C_2H_5 + H_2SO_4.$$

On peut, de cette façon, obtenir des éthers simples ou mixtes. Cette méthode a été utilisée initialement pour la synthèse de l'éther éthylique que l'on nomme parfois encore, pour cette raison, éther sulfurique. On peut enfin synthétiser des éthers mixtes tertiaires en ajoutant un alcool à une oléfine substituée, en présence d'acide sulfurique.

Propriétés physiques. Les éthers sont des liquides d'odeur agréable, peu solubles dans l'eau, solubles dans les solvants organiques; les premiers termes sont très volatils. Les éthers ne pouvant pas s'associer entre eux par des liaisons hydrogène, leurs températures d'ébullition sont très proches de celles des hydrocarbures de masse moléculaire voisine. Ainsi, l'éther éthylique bout à 34 °C, et le pentane à 36,1 °C.

Propriétés chimiques. Les éthers sont relativement inertes chimiquement. Leurs principales réactions chimiques sont dues à l'existence sur l'oxygène de doublets électroniques qui font des éthers des bases de Lewis. Les éthers réagissent donc avec les acides comme l'acide chlorhydrique, mais aussi avec des acides de Lewis ($AlCl_3$, BF_3, RMgX) :

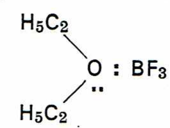

Les complexes avec les acides forts, par exemple l'acide iodhydrique, peuvent être décomposés par chauffage en halogénure d'alkyle et en alcool :

$$R{-}O{-}R + IH \rightarrow RI + ROH.$$

Les éthers sont facilement auto-oxydables à l'air avec formation de peroxydes explosifs. On peut se débarrasser de ceux-ci en secouant l'éther avec une solution de sulfate ferreux avant de le distiller.

L'**éther éthylique,** $C_2H_5{-}O{-}C_2H_5$, est le plus important des éthers; on l'obtient par action de l'acide sulfurique sur l'alcool éthylique. C'est un liquide limpide, incolore, très volatil et inflammable. Le mélange de ses vapeurs avec l'air est explosif. Il bout à 34 °C. Bien qu'il soit très peu soluble dans l'eau, sa solubilité est cependant de 6,8 %, et il dissout 1,2 % d'eau. Le principal usage de l'éther est celui de solvant, en particulier pour la nitrocellulose, comme anesthésique local, et en synthèse organique, en particulier comme solvant des organomagnésiens.

L'**éther méthylique,** $CH_3{-}O{-}CH_3$, est un gaz; sa température d'ébullition est — 24 °C.

L'**éther isopropylique,** $(CH_3)_2{-}CH{-}O{-}CH\ (CH_3)_2$, obtenu comme sous-produit de la fabrication de l'alcool isopropylique, est un solvant bon marché.

Parmi les *éthers aromatiques,* il faut citer l'**acide dichloro-2,4 phénoxyacétique (2,4 D)** utilisé comme herbicide :

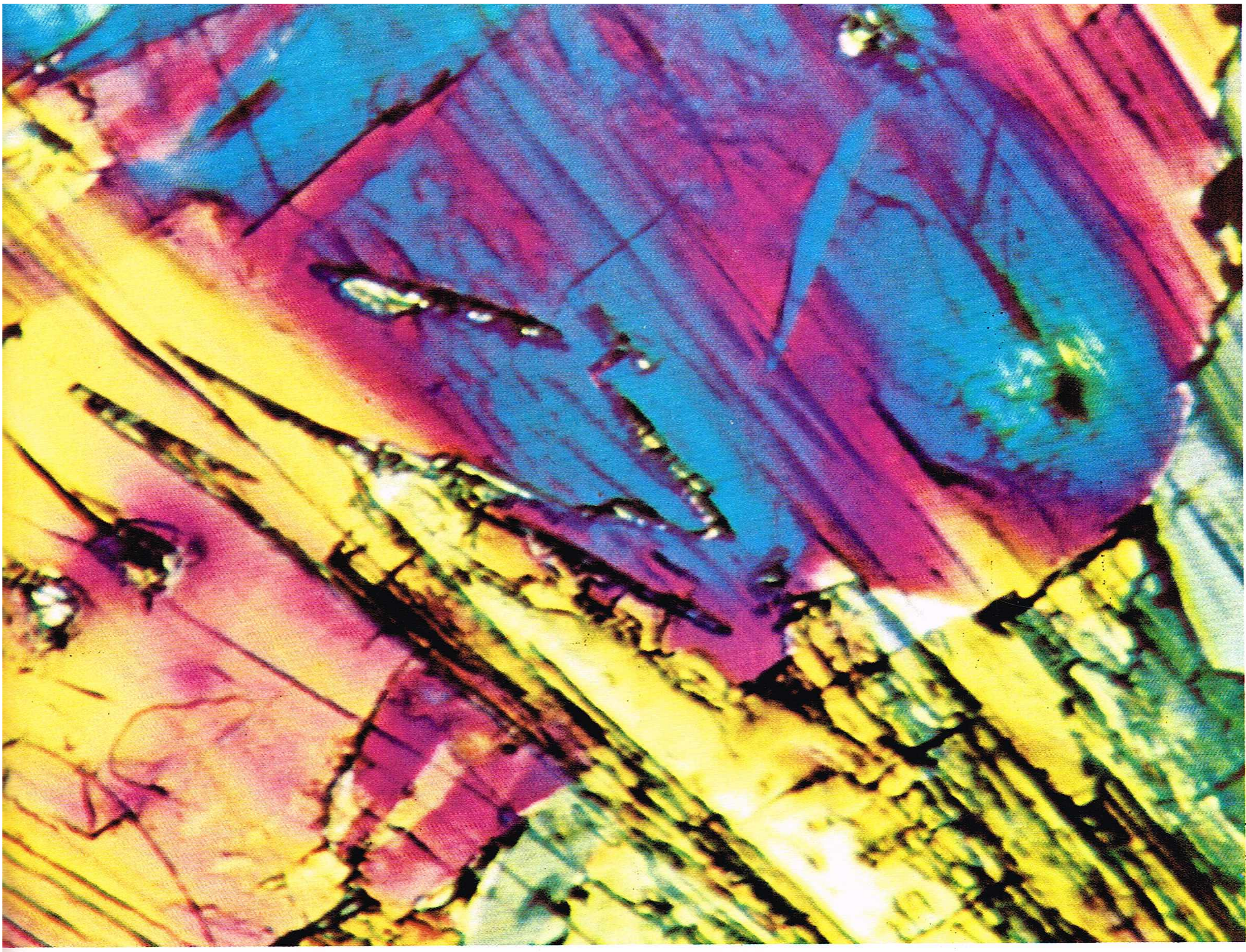

Claude Nardin - Jacana

▲ *Cristaux de gaïacol vus au microscope polarisant, en extinction complète. Le gaïacol est un éther que l'on extrait de la résine de gaïac (arbre résineux d'Amérique) et de la créosote du hêtre.*

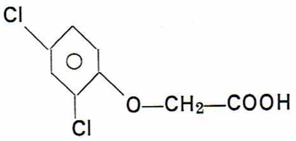

et l'**oxyde de diphényle** ou **éther phénylique** utilisé comme fluide caloporteur :

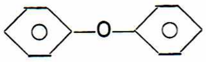

Il existe enfin des *éthers cycliques*, que l'on peut aussi classer dans les hétérocycles oxygénés.

Il s'agit en premier lieu de l'**oxyde d'éthylène,** CH_2—CH_2 (pont O), que l'on obtient industriellement par oxydation catalytique de l'éthylène en présence de catalyseurs à l'argent. C'est un gaz de point d'ébullition 10,7 °C, dont l'utilisation principale est la synthèse du glycol.

On citera ensuite le **tétrahydrofuranne** utilisé comme solvant :

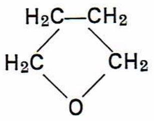

et le **dioxane-1,4,** lui aussi utilisé comme solvant :

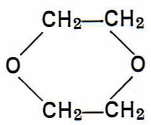

▼ *Représentation schématique des* phénols polycycliques.

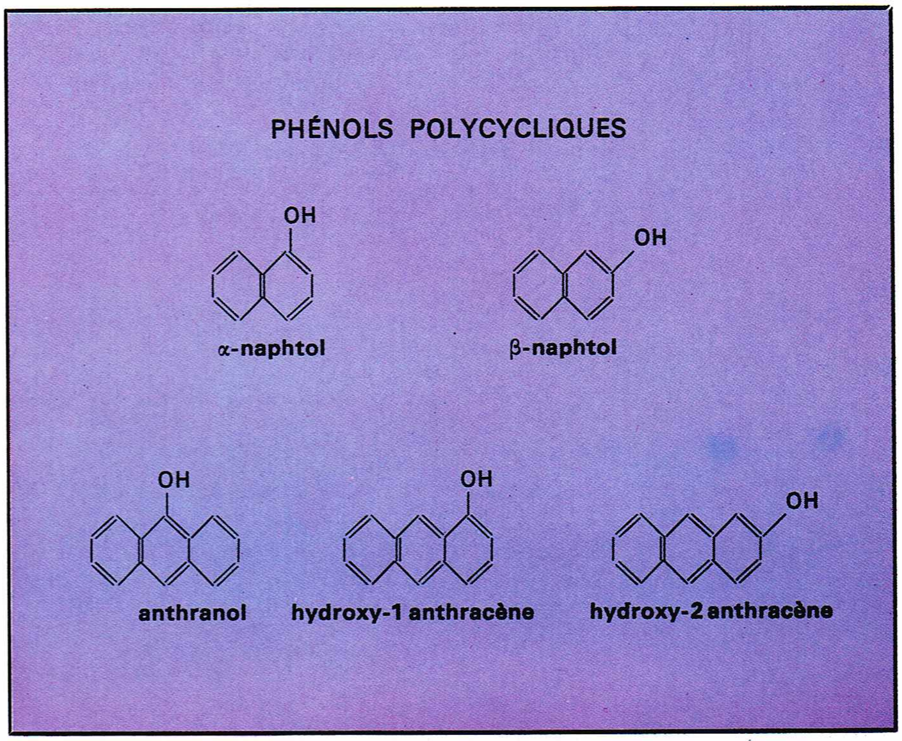

PRÉPARATION DES ALDÉHYDES

1° Hydroformylation des oléfines (synthèse oxo) :

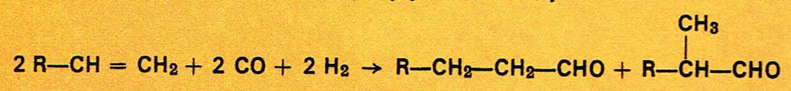

2° Oxydation ménagée des alcools primaires :

$$CH_3{-}CH_2{-}CH_2OH \xrightarrow{1/2O_2} CH_3{-}CH_2{-}CHO + H_2O$$

3° Réduction catalytique des chlorures d'acides :

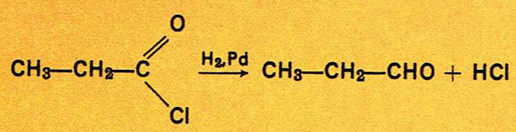

4° Réduction des acides carboxyliques et de leurs sels de calcium :

$$CH_3{-}CH_2{-}COOH + HCOOH \xrightarrow{TiO_2} CH_3{-}CH_2{-}CHO + CO_2 + H_2O$$

$$(CH_3{-}CH_2{-}COO)_2\,Ca + (HCOO)_2\,Ca \rightarrow 2\,CH_3{-}CH_2{-}CHO + 2\,CaCO_3$$

▲ ***Schéma des différentes*** **préparations des aldéhydes.**

On utilise enfin comme solvants à point d'ébullition élevé des dérivés monoalcoylés et dialcoylés de l'éthylène glycol et du diéthylène glycol. On citera le **méthylcellosolve** $CH_3{-}O{-}CH_2{-}CH_2OH$, qui bout à 124 °C, le **butylcarbitol** $C_4H_9OCH_2{-}CH_2OCH_2{-}CH_2OH$, qui bout à 231 °C, et le **diglyme** :

$$CH_3OCH_2CH_2O{-}CH_2{-}CH_2OCH_3,$$

qui bout à 161 °C.

Aldéhydes

Si l'on substitue deux atomes d'hydrogène fixés à un carbone primaire d'une chaîne aliphatique, par deux groupements hydroxyle —OH, on obtient un composé instable qui, en perdant une molécule d'eau, se transforme en un aldéhyde; la molécule intermédiaire instable est l'hydrate d'aldéhyde :

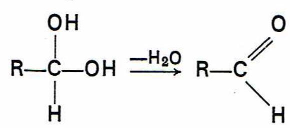

Les aldéhydes, comme les cétones, renferment le groupement C = O appelé *groupement carbonyle.*

On peut considérer les aldéhydes comme des alcools déshydrogénés, d'où leur nom d'aldéhydes :

$$R{-}CH_2OH \xrightarrow{-H_2} R{-}CHO.$$

Dans la nomenclature officielle, les aldéhydes sont désignés par le nom de l'alcane correspondant suivi de la désinence *al.* La fonction aldéhyde étant obligatoirement fixée à l'extrémité d'une chaîne, il n'est pas nécessaire de préciser sa position.

Les méthodes de préparation des aldéhydes sont nombreuses : on peut citer l'oxydation contrôlée des alcools primaires, la réduction catalytique des chlorures d'acides en présence de palladium, le chauffage vers 450 °C en présence de thorine du mélange de l'acide correspondant et d'acide formique.

Mais le procédé industriel le plus important pour la synthèse des aldéhydes est la synthèse OXO (hydroformylation). Elle consiste à faire réagir sur une oléfine un mélange d'oxyde de carbone et d'hydrogène en présence d'un sel de cobalt. Il se forme, suivant le sens de l'addition de l'hydrogène et du groupe formyle CHO, un aldéhyde à chaîne linéaire et un aldéhyde ramifié. Ainsi, avec le propylène à 100-160 °C et entre 200 et 300 bars, on forme le *butanal,* ou *n butyraldéhyde,* et l'*isobutanal,* ou *isobutyraldéhyde :*

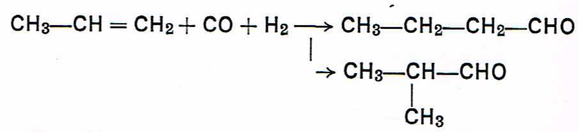

Propriétés physiques. Seul le premier terme, le *formol* (HCHO), est gazeux, les autres aldéhydes sont liquides et d'odeur piquante et désagréable, mais, lorsque leur masse moléculaire augmente, cette odeur devient progressivement agréable et rappelle celle de certains fruits.

Bien qu'ils ne puissent pas présenter comme les alcools un degré élevé d'association moléculaire par liaison hydrogène, les aldéhydes ont une température d'ébullition élevée par rapport aux alcanes de même masse moléculaire. Cette température est cependant inférieure à celle des alcools correspondants. L'augmentation des températures d'ébullition des aldéhydes par rapport à celles des alcanes est due à un certain degré d'association par attraction électrostatique entre dipôles, les molécules étant polarisées de la façon suivante : $R{-}\overset{+}{C}H = \overset{-}{O}$. La solubilité dans l'eau, importante pour les premiers termes, peut s'expliquer par des liaisons hydrogène entre les hydrates.

Propriétés chimiques. La présence du groupement C = O qui draine les électrons de la liaison adjacente vers l'oxygène tend à créer sur le carbone en α du groupement carbonyle une charge positive qui explique la réactivité du carbone en α.

Enfin, les aldéhydes (comme les cétones) peuvent exister sous la *forme énolique* qui explique certaines de leurs réactions :

$$\underset{\textit{aldéhyde}}{R{-}CH_2{-}CHO} \rightleftharpoons \underset{\textit{énol}}{R{-}CH = CHOH.}$$

Les aldéhydes sont des composés extrêmement réactifs qui sont altérés par exposition prolongée à l'air et à la lumière. Grâce à leur groupe carbonyle C = O, ils donnent une grande variété de *réactions d'addition :* parmi celles-ci, on peut citer :

— l'*hydrogénation catalytique,* qui les transforme en alcools primaires :

$$CH_3{-}CHO \xrightarrow{H_2} CH_3{-}CH_2OH$$

— l'*addition d'eau,* qui conduit à un hydrate stable, dans des cas rares comme celui du chloral $CCl_3{-}CHO$:

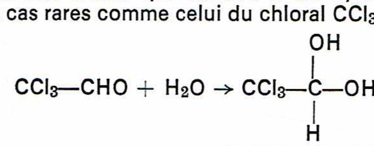

hydrate de chloral

— l'*addition du bisulfite de sodium,* qui conduit à un composé cristallisé permettant d'identifier l'aldéhyde ou de le purifier :

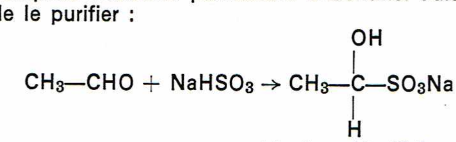

combinaison bisulfitique

— l'*addition d'acide cyanhydrique,* qui conduit à une cyanhydrine utile en synthèse organique :

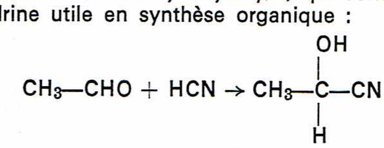

cyanhydrine

— enfin l'*addition d'alcool,* qui fournit un acétal :

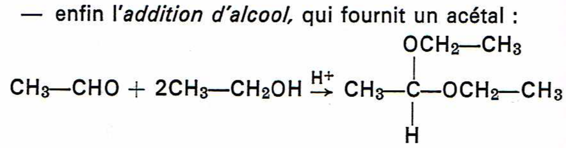

acétal

Le groupement aldéhyde est facilement oxydable à l'air et conduit, par une oxydation radicalaire en chaîne, à un acide.

Une autre importante série de réactions des aldéhydes est celle dans laquelle l'oxygène du groupement carbonyle est substitué par d'autres groupes d'atomes. C'est

le cas de la réaction avec l'hydroxylamine qui fournit une oxime :

$$R{-}CHO + NH_2OH \rightarrow R{-}CH = NOH + H_2O$$

de l'hydrazine qui conduit à une hydrazone :

$$R{-}CHO + NH_2{-}NH_2 \rightarrow R{-}CH = N{-}NH_2 + H_2O$$

et de la semicarbazide ($NH_2CONHNH_2$) qui conduit à une semicarbazone. Ces composés cristallisés permettent d'identifier et de séparer les aldéhydes.

Enfin un autre type de réaction des aldéhydes est constitué par les *réactions de polymérisation*. Parmi celles-ci, la *condensation aldolique* fournit un aldéhyde-alcool (aldol) qui peut ensuite être déshydraté en aldéhyde crotonique. La formation directe d'aldéhyde crotonique est la *crotonisation :*

$$CH_3{-}CHO + CH_3{-}CHO \longrightarrow \underset{\textit{aldol}}{CH_3{-}\underset{\displaystyle OH}{\underset{|}{C}H}{-}CH_2{-}CHO}$$

$$\xrightarrow{H_2O} \underset{\textit{aldéhyde crotonique}}{CH_3{-}CH = CH{-}CHO}$$

La *réaction de Tischtchenko* s'apparente à la précédente mais, la base minérale (soude ou potasse) étant remplacée par un alcoolate d'aluminium, on forme directement l'ester :

$$2R{-}CHO \rightarrow R{-}CH_2OCO{-}R.$$

Les aldéhydes peuvent en outre donner par polymérisation en milieu acide des trimères cycliques, les trioxanes.

L'**aldéhyde formique** ou **formol,** H—CHO, est le premier des aldéhydes. C'est un gaz que l'on a identifié dans les sécrétions des fourmis rouges (d'où son nom). On le fabrique industriellement par oxydation du méthanol à l'air sur des catalyseurs à l'argent, vers 600 °C. Il est commercialisé en solutions à 37 % dans l'eau :

$$CH_3OH + 1/2O_2 \rightarrow H{-}CHO + H_2O.$$

Dans l'eau, le formol existe sous forme d'hydrate non volatil, $HO{-}CH_2{-}OH$. Lorsque l'on concentre des solutions de formol, ce méthylène glycol réagit sur lui-même et donne un polycondensat : le *polyformaldéhyde,* $HO(CH_2O)_n H$.

Un autre polymère du formol est le *trioxane :*

$$3H{-}CHO \rightarrow$$

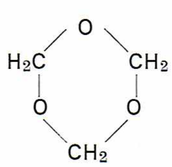

Les principales applications du formol sont la préparation de résines urée-formol, la désinfection et la fabrication de l'*hexaméthylènetétramine* ou *urotropine* utilisée notamment comme antiseptique urinaire :

$$6H{-}CHO + 4NH_3 \rightarrow 6H_2O +$$

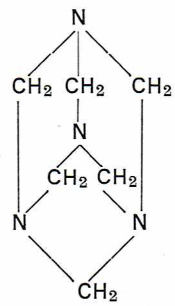

L'**acétaldéhyde** ou **aldéhyde acétique,** $CH_3{-}CHO$, a une grande importance industrielle et biologique. On peut l'obtenir par déshydrogénation ou oxydation partielle de l'alcool éthylique en phase vapeur ou par hydratation de l'acétylène en phase liquide en présence de mercure et d'acide sulfurique, enfin par oxydation de l'éthylène en phase liquide en présence de catalyseur au palladium.

Il se polymérise facilement en donnant un trimère, le *paraldéhyde,* liquide utilisé comme soporifique, et un tétramère, le *métaldéhyde,* utilisé comme combustible solide, le méta, et comme produit pour lutter contre les limaces et les escargots. Le principal usage de l'acétaldéhyde est la synthèse de l'acide acétique.

L'action du chlore sur l'acétaldéhyde conduit au *trichloro-acétaldéhyde* ou *chloral :*

$$CH_3{-}CHO + 3Cl_2 \rightarrow CCl_3{-}CHO + 3HCl.$$

A. Rizzi

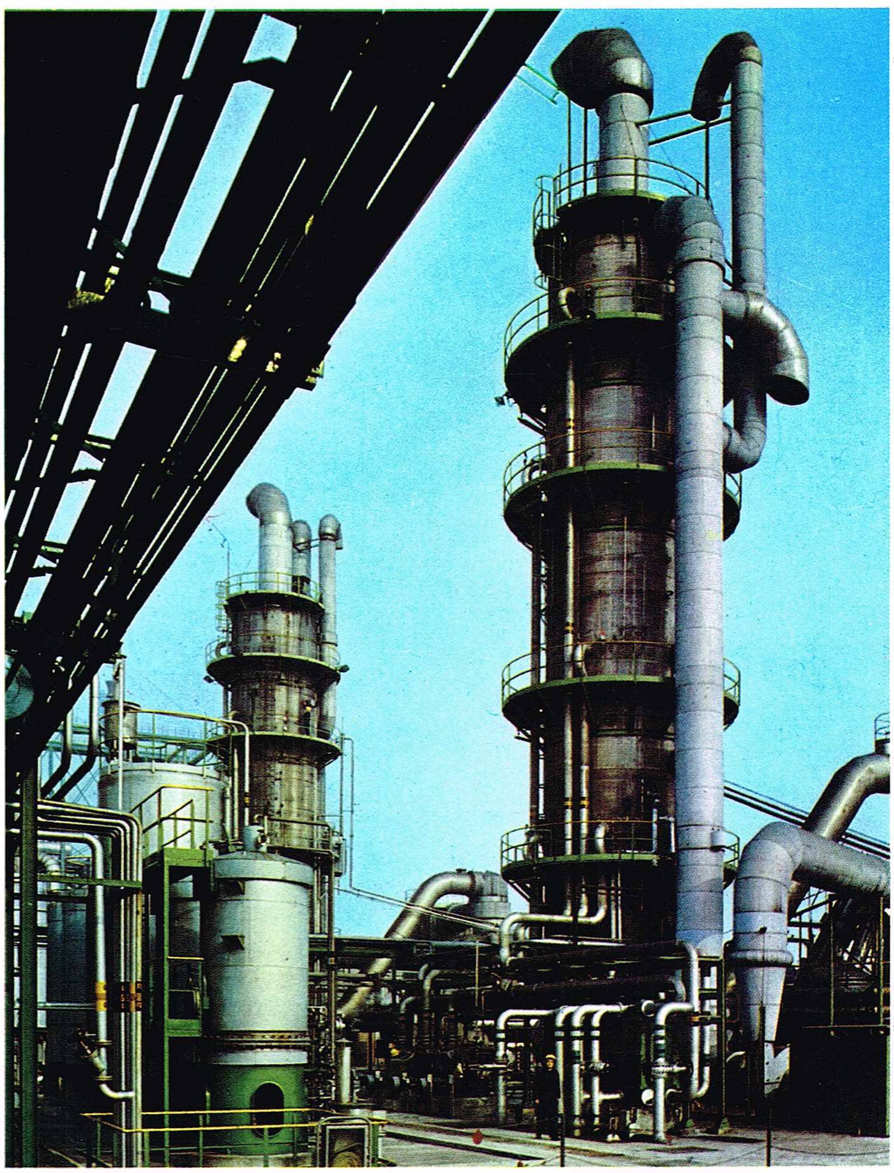

Montecatini - Edison

▼ *A gauche, un échantillon de* **novolaque,** ***produit résultant de la réaction entre le phénol et l'aldéhyde formique en milieu acide. A droite, installations industrielles pour la production de*** **l'aldéhyde formique.**

▶ ***Tableau des*** **principaux aldéhydes aromatiques.**

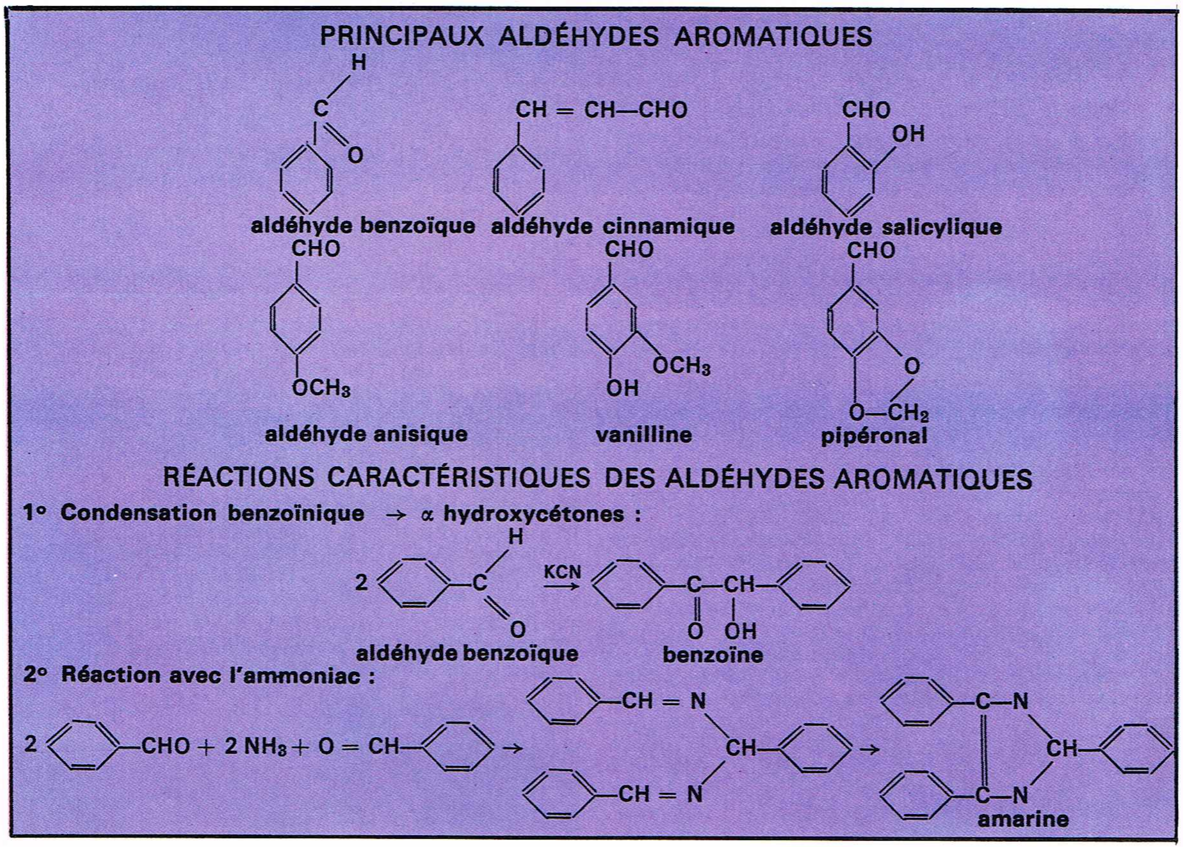

C'est un des rares aldéhydes à donner un hydrate stable. Le chloral réagit sur le chlorobenzène en présence d'acide sulfurique pour former un important insecticide le *dichloro-diphényl-trichloroéthane* (D. D. T.) :

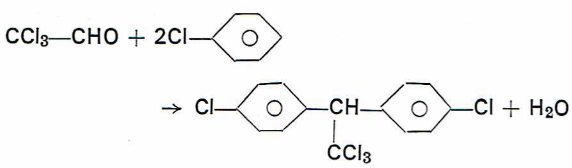

Aldéhydes supérieurs

Parmi les aldéhydes supérieurs, les plus importants sont l'**aldéhyde caprylique,** $C_7H_{15}CHO$, et l'**aldéhyde pélargonique,** $C_8H_{17}CHO$, utilisés en parfumerie. Parmi les aldéhydes insaturés, on citera l'**acroléine :**

$$CH_2 = CH—CHO,$$

formée par déshydratation des graisses, le **citronellal,** $C_{10}H_{18}O$, et le **citral,** $C_{10}H_{16}O$, très utilisés en pharmacie.

Cétones

Les cétones, de formule générale R—CO—R′ dans laquelle R et R′ peuvent être identiques, ont des analogies chimiques avec les aldéhydes grâce à la présence dans la molécule du groupement carbonyle.

Dans la nomenclature officielle, on les désigne du nom de l'hydrocarbure ayant le même nombre d'atomes de carbone, suivi de la désinence *one* ; on doit spécifier par un chiffre la position de la fonction dans la chaîne.

On peut préparer les cétones par oxydation des alcools secondaires :

$$CH_3—CH(OH)—CH_3 \xrightarrow{1/2O_2} CH_3—CO—CH_3 + H_2O.$$

On peut aussi les fabriquer par distillation sèche des sels de calcium d'acides carboxyliques :

$$(R—COO)_2\,Ca \rightarrow R—CO—R + CaCO_3,$$

par réaction des chlorures d'acides ou des nitriles avec les réactifs de Grignard, par condensation des esters d'acides carboxyliques contenant un groupe méthylénique, ou méthylique activé, en présence d'alcoolate de sodium, etc. Enfin, dans certaines conditions, les oléfines réagissent sur l'oxyde de carbone et l'hydrogène en donnant une cétone :

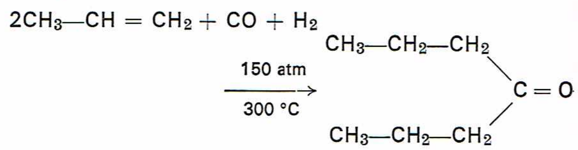

Propriétés physiques. Les cétones inférieures sont liquides et les termes supérieurs solides. Leur solubilité dans l'eau diminue avec l'augmentation de leur masse moléculaire.

Propriétés chimiques. Beaucoup de leurs réactions chimiques sont semblables à celles des aldéhydes mais, en général, les cétones sont moins réactives. Par réduction des cétones, on obtient des alcools secondaires. Par réduction plus douce en présence de magnésium amalgamé, il se forme un *pinacol* (alcool bifonctionnel dont les deux fonctions sont portées sur deux carbones voisins). Par exemple, avec l'acétone, on a :

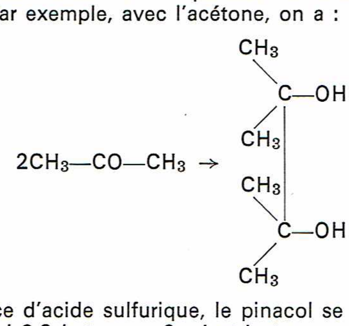

En présence d'acide sulfurique, le pinacol se transforme en *diméthyl-3,3 butanone-2 :* c'est la *transposition pinacolique.*

Le bisulfite de sodium, l'acide cyanhydrique, les esters de l'acide orthoformique et les thioalcools donnent avec les cétones des réactions analogues à celles des aldéhydes. Les cétones réagissent aussi avec l'hydroxylamine, la phénylhydrazine, la semicarbazide. L'ammoniac avec les cétones donne des *cétimines.*

A la différence des aldéhydes, les cétones n'ont pas la propriété de se polymériser.

▶ ***Page ci-contre, schéma des différentes*** **préparations des cétones aromatiques.**

L'**acétone**, CH_3—CO—CH_3, est la cétone la plus simple et aussi la plus importante. On l'obtenait autrefois par distillation sèche du bois. Actuellement, on la produit par déshydrogénation de l'alcool isopropylique ou par oxydation du même alcool avec coproduction d'eau oxygénée :

$$CH_3—CHOH—CH_3 + O_2 \rightarrow CH_3—CO—CH_3 + H_2O_2.$$

On la fabrique aussi, industriellement, en même temps que le phénol par oxydation de l'isodropylbenzène ou cumène.

C'est un liquide limpide, incolore, d'odeur agréable mais très tenace, inflammable et miscible à l'eau en toutes proportions. On l'utilise surtout comme solvant et comme produit de départ de nombreuses synthèses organiques.

La **méthyléthylcétone** ou **butanone-2**, de formule CH_3—CO—CH_2—CH_3, est souvent désignée par le sigle **M. E. K.** On l'obtient par déshydrogénation de l'alcool butylique secondaire et par oxydation du butane. C'est un solvant industriel.

La **cyclohexanone** est fabriquée industriellement par oxydation du cyclohexane. Transformée ensuite en oxime par action de l'hydroxylamine, puis en caprolactame par transposition de Beckmann, elle conduit finalement au Nylon-6 :

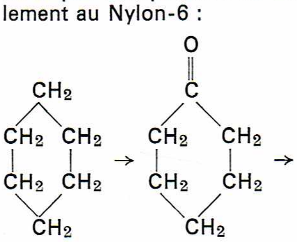

cyclohexane cyclohexanone

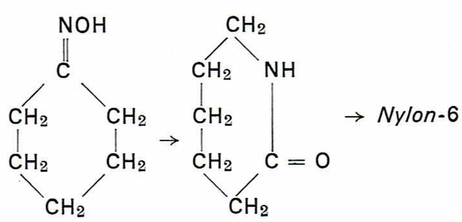

oxime *caprolactame*

La **muscone** extraite des sécrétions du rat musqué et la **civettone** extraite de la civette ou chat africain sont des cétones macrocycliques ayant respectivement 15 et 17 atomes de carbone dans leur cycle.

La **cyclopentadécanone**, connue sous le nom d'**exaltone**, est utilisée en parfumerie :

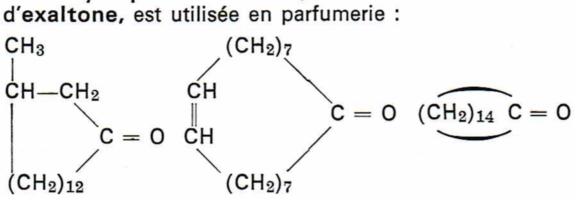

muscone *civettone* *cyclopentadécanone*

On trouve encore des cétones supérieures dans les matières grasses rancies et dans certains fromages. Elles résultent de la décomposition bactérienne des graisses.

Acides carboxyliques (ou organiques)

Si l'on substitue tous les hydrogènes d'un carbone primaire par des groupements hydroxyles, on obtient un composé très instable qui tend à éliminer une molécule d'eau :

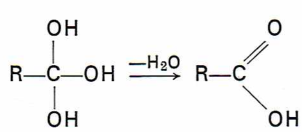

Le résultat de cette déshydratation est un groupe carboxyle caractéristique des acides organiques (—COOH). Si l'on considère l'acide comme dérivant de la molécule d'eau, le groupe qui a substitué l'hydrogène est le radical acyle R—C = O.

PRÉPARATION DES CÉTONES AROMATIQUES

1° Distillation sèche des sels de calcium de deux acides organiques :

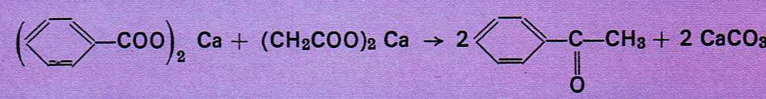

benzoate de calcium *acétate de calcium* *acétophénone*

2° Action d'un chlorure d'acide sur un composé de Grignard :

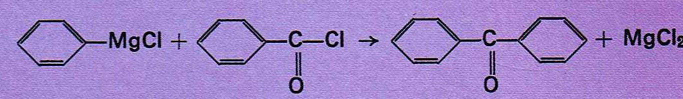

chlorure de phényl magnésium *chlorure d'acide de l'acide benzoïque* *benzophénone*

3° Réaction de Friedel et Crafts :

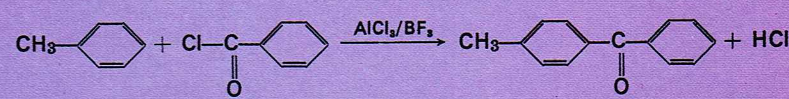

toluène *méthylbenzophénone*

4° Synthèse de Houben-Hoesch à partir des polyphénols :

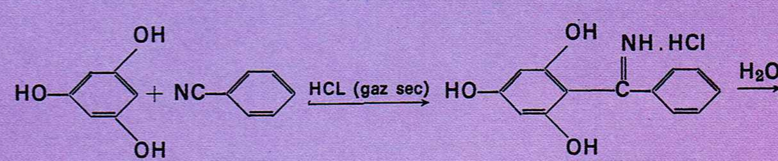

phloroglucine *benzonitrile* *chlorhydrate de l'imine de la phlorobenzophénone*

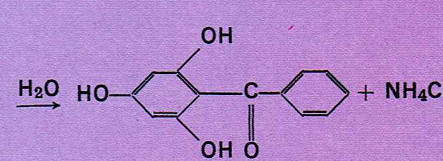

trihydroxybenzophénone

TRANSPOSITION DE BECKMANN

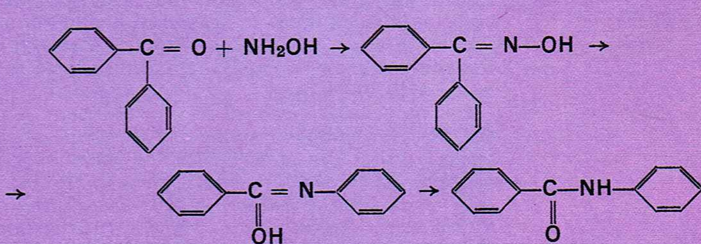

PRÉPARATION DES ACIDES CARBOXYLIQUES

1° Addition d'anhydride carbonique aux réactifs de Grignard :

$$CH_3{-}MgCl + CO_2 \rightarrow CH_3{-}C(=O){-}OMgCl \xrightarrow{H_2O} CH_3{-}C(=O){-}OH + MgCl(OH)$$

2° Addition d'oxyde de carbone à une oléfine ou un alcool :

$$CH_2 = CH_2 + CO + H_2O \xrightarrow{Ni(CO)_4} CH_3{-}CH_2{-}COOH$$

$$CH_3{-}CH_2OH + CO \rightarrow CH_3{-}CH_2{-}COOH$$

3° Oxydation partielle des paraffines :

$$\underset{\textit{propane}}{CH_3{-}CH_2{-}CH_3} \xrightarrow{O_2} \begin{cases} HCOOH + 3\,H_2O + 2\,CO_2 & \textit{acide formique} \\ CH_3{-}COOH + 2\,H_2O + CO_2 & \textit{acide acétique} \\ CH_3{-}CH_2{-}COOH + H_2O & \textit{acide propionique} \end{cases}$$

4° Saponification des graisses naturelles :

$$\begin{matrix} CH_2{-}OCOC_{17}H_{35} \\ | \\ CH{-}OCOC_{17}H_{35} \\ | \\ CH_2{-}OCOC_{17}H_{35} \end{matrix} \longrightarrow \begin{matrix} CH_2{-}OH \\ | \\ CH{-}OH \\ | \\ CH_2{-}OH \\ \textit{glycérine} \end{matrix} + \underset{\textit{acide stéarique}}{3\,C_{17}H_{35}{-}COOH}$$

5° Oxydation des alcools primaires ou des aldéhydes :

$$CH_3{-}CH_2OH \xrightarrow{Cr_2O_3} CH_3{-}COOH$$

$$CH_3{-}CHO \xrightarrow{Cr_2O_3} CH_3{-}COOH$$

6° Hydrolyse des nitriles :

$$CH_3Cl + KCN \rightarrow CH_3{-}CN + KCl$$

$$CH_3{-}CN \xrightarrow{H_2O} CH_3{-}C(=O){-}NH_2 \xrightarrow{H_2O} CH_3{-}C(=O){-}ONH_4 \xrightarrow{HCl} CH_3{-}COOH + NH_4Cl$$

▲ *Schéma des différentes* **préparations des acides carboxyliques.**

La nomenclature officielle voudrait que les acides fussent désignés par le nom de l'hydrocarbure saturé correspondant suivi de la désinence *oïque*. Par exemple, l'acide acétique $CH_3{-}COOH$ devrait s'appeler l'**acide éthanoïque**; on l'appelle encore l'**acide méthane carboxylique.**

Les modes de synthèse des acides sont nombreux. On citera l'oxydation des alcools primaires et des aldéhydes, l'hydrolyse des nitriles, la saponification des graisses naturelles, l'addition d'anhydride carbonique aux réactifs de Grignard, la synthèse malonique, la synthèse par l'acétoacétate d'éthyle et la carbonylation des oléfines et des alcools. L'oxydation ménagée des paraffines fournit un mélange d'acides plus ou moins complexe suivant la nature de la paraffine.

Propriétés physiques. Les termes inférieurs sont des liquides mobiles, les termes moyens des liquides huileux, et les supérieurs des solides. Ces derniers sont peu volatils et sans odeur; par contre, les termes moyens ont une odeur désagréable de rance. La solubilité dans l'eau décroît avec la masse moléculaire pour disparaître totalement pour les acides supérieurs. La température de fusion augmente avec la masse moléculaire. Les acides à nombre pair d'atomes de carbone fondent à une température supérieure à la température de fusion des acides de nombre impair d'atomes de carbone, suivant immédiatement dans la série. Les températures d'ébullition des acides sont encore plus « anormalement » élevées que celles des alcools, en raison de leur possibilité de s'associer sous forme de dimères par des liaisons hydrogène :

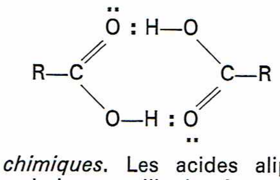

Propriétés chimiques. Les acides aliphatiques sont dissociés en solution, et l'hydrogène du groupement carboxylique est substituable par un métal. Ce ne sont généralement pas des acides forts (les plus dissociés sont l'acide trichloracétique, l'acide formique et l'acide acétique), leurs sels avec des bases fortes subissent donc une hydrolyse et ont une réaction alcaline.

Les principales réactions des acides carboxyliques sont : leur réduction en aldéhydes et en alcools, la formation d'anhydride d'acide par élimination d'eau entre deux molécules d'acide au moyen d'un déshydratant énergique,

$$2R{-}COOH \xrightarrow{P_2O_5} (R{-}CO)_2\,O + H_2O$$

la formation de chlorures d'acides R—COCl, la réaction avec les alcools qui donne des esters R—COOR′, la formation d'amides (R—CO—NR′—R″) par chauffage du sel d'ammonium de l'acide ou par réaction d'un chlorure d'acide ou d'un ester avec l'ammoniac ou une amine. Citons encore la décarboxylation en hydrocarbure, RH, souvent obtenue en fondant le sel de l'acide avec une base, enfin la formation de cétones par distillation sèche des sels métalliques. Les réactions biochimiques des acides, en particulier les oxydations catalysées par les enzymes, portent sur le carbone en β de la fonction acide.

L'**acide formique,** H—COOH, est le premier terme de la série, on l'obtient par réaction de l'oxyde de carbone sur la soude :

$$NaOH + CO \rightarrow HCOONa$$
$$2HCOONa + H_2SO_4 \rightarrow 2HCOOH + Na_2SO_4$$

L'acide formique anhydre est un liquide limpide, incolore, d'odeur piquante; il est caustique et provoque des brûlures sur la peau. C'est le plus fort des acides aliphatiques, et il présente des réactions particulières par rapport aux autres membres de la série, car il présente dans sa molécule le groupe aldéhyde :

$$H{-}\overset{\overset{\displaystyle O}{\|}}{C}{-}OH$$

pour cette raison, il a un caractère réducteur; il a aussi des propriétés antiseptiques. On peut le déshydrogéner et le déshydrater à chaud :

$$H{-}COOH \rightarrow H_2 + CO_2$$
$$H{-}COOH \rightarrow H_2O + CO.$$

Par chauffage de ses sels, excepté le sel de zinc, il donne des oxalates à partir desquels est isolé l'acide oxalique.

$$2H{-}COONa \rightarrow H_2 + \begin{matrix} COONa \\ | \\ COONa \end{matrix}$$

Les principaux usages de l'acide formique sont la teinture des textiles et le tannage des cuirs.

L'**acide acétique,** $CH_3{-}COOH$, est le plus important des acides organiques. Il peut être obtenu à partir de sources non fossiles de carbone, soit par distillation sèche du bois, soit par fermentation de jus de fruits (vinaigre). Industriellement, on le fabrique par oxydation de l'acétal-

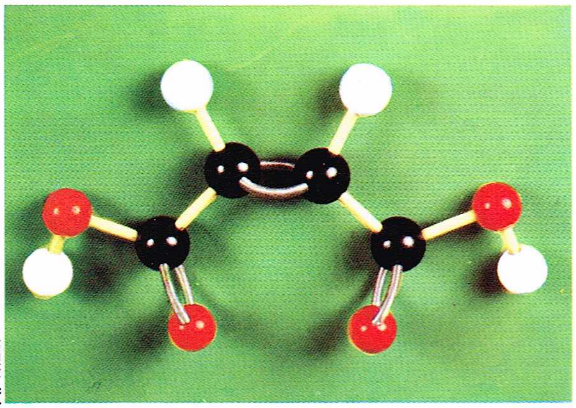

A. Rizzi

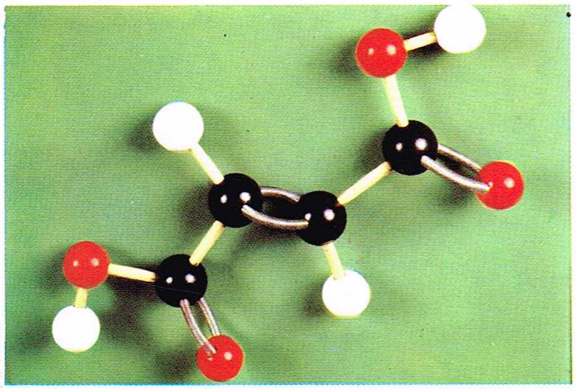

A. Rizzi

P. Castano

▲ ***A gauche, en haut, modèle de la molécule d'acide maléique ; en bas, modèle de la molécule d'acide fumarique, isomère de structure du précédent (en noir, le carbone ; en blanc, l'hydrogène ; en rouge, l'oxygène). A droite, lame mince de cristaux d'acide stéarique, photographiés en lumière polarisée ; c'est un acide abondant dans les graisses naturelles.***

déhyde, en présence d'acétate de manganèse, ou par oxydation du butane en phase liquide, en même temps qu'il se forme dans ce dernier cas de la méthyléthylcétone.

$$CH_3—CH_2—CH_2—CH_3 + O_2 \rightarrow CH_3—CO—CH_2—CH_3 + H_2O$$

$$2CH_3—CO—CH_2—CH_3 + 3O_2 \rightarrow 4CH_3—COOH$$

Enfin, une méthode récente permet de fabriquer industriellement l'acide acétique par carbonylation du méthanol en présence de complexes du rhodium :

$$CH_3OH + CO \rightarrow CH_3—COOH$$

L'acide acétique est un liquide incolore, d'odeur piquante. Lorsqu'il est anhydre, il cristallise à 16,7 °C en donnant des cristaux semblables à de la glace (acide acétique glacial). Ses molécules sont fortement associées à l'état liquide et à l'état de vapeur.

Les utilisations de l'acide acétique sont nombreuses : il sert à la préparation de l'anhydride acétique, à la synthèse d'esters divers (acétates) utilisés comme solvants, dans la production de l'acétate de vinyle, de l'acétate de cellulose, etc.

Acides supérieurs saturés

L'**acide propionique,** $CH_3—CH_2—COOH$, et l'**acide butyrique,** $CH_3—CH_2—CH_2—COOH$, sont obtenus par oxydation des alcools ou aldéhydes correspondants, ou par fermentation. On les utilise dans les acétopropionates et acétobutyrates de cellulose. Les acides supérieurs à chaîne linéaire sont importants dans les substances naturelles, car ils entrent dans la composition des huiles végétales et des graisses animales et végétales, sous forme d'esters de la glycérine.

Les acides naturels ont pratiquement toujours un nombre pair d'atomes de carbone. Parmi ceux-ci, l'**acide palmitique** $C_{15}H_{31}COOH$ et l'**acide stéarique,** $C_{17}H_{35}COOH$, sont importants pour leur abondance dans les graisses naturelles.

Acides insaturés

Certains de ces acides se trouvent en quantités importantes dans les composés naturels. Nombreuses sont les réactions pour les obtenir.

Le premier terme est l'**acide acrylique**

$$CH_2 = CH—COOH$$

que l'on obtient par oxydation de l'acroléine en présence d'oxyde d'argent :

$$CH_2 = CH—CHO \xrightarrow{Ag_2O} CH_2 = CH—COOH$$

L'**acide méthacrylique,** $CH_2 = C(CH_3)—COOH$, surtout intéressant par son ester méthylique dont la polymérisation fournit le polyméthacrylate de méthyle (plexiglas), peut être obtenu à partir d'acétone et d'acide cyanhydrique. La cyanhydrine transformée en méthacrylamide par l'acide sulfurique est ensuite convertie en ester par action de l'alcool méthylique. On peut aussi traiter l'isobutène par le peroxyde d'azote et l'acide nitrique, l'acide α hydroxyisobutyrique étant ensuite transformé en méthacrylate.

Les **acides maléique** et **fumarique** peuvent être obtenus par oxydation des butènes. L'acide maléique, étant cis, peut donner facilement un anhydride, l'anhydride maléique, qui peut aussi être obtenu à partir du benzène.

$$CH_3—CH = CH—CH_3 \xrightarrow{+3O_2} \begin{matrix} H—C—COOH \\ \| \\ H—C—COOH \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} HOOC—C—H \\ \| \\ H—C—COOH \end{matrix}$$

acide maléique *acide fumarique*

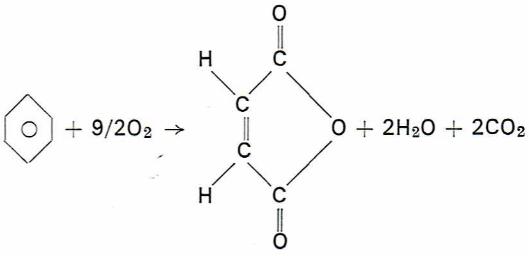

anhydride maléique

Le principal débouché de l'anhydride maléique est la fabrication de résines polyesters.

Parmi les acides insaturés à longue chaîne, l'**acide oléique** : $CH_3—(CH_2)_7—CH = CH—(CH_2)_7—COOH$, est un acide naturel important ; il est liquide au-dessous de 16 °C ; c'est l'isomère cis ; l'isomère trans, appelé **acide élaïdique,** fond à 44 °C. L'acide oléique se trouve dans de nombreuses graisses sous forme d'esters et a une grande importance pratique.

▶ ***Microcristaux d'acide acétylsalicylique, ou aspirine, observés au microscope en lumière polarisée.***

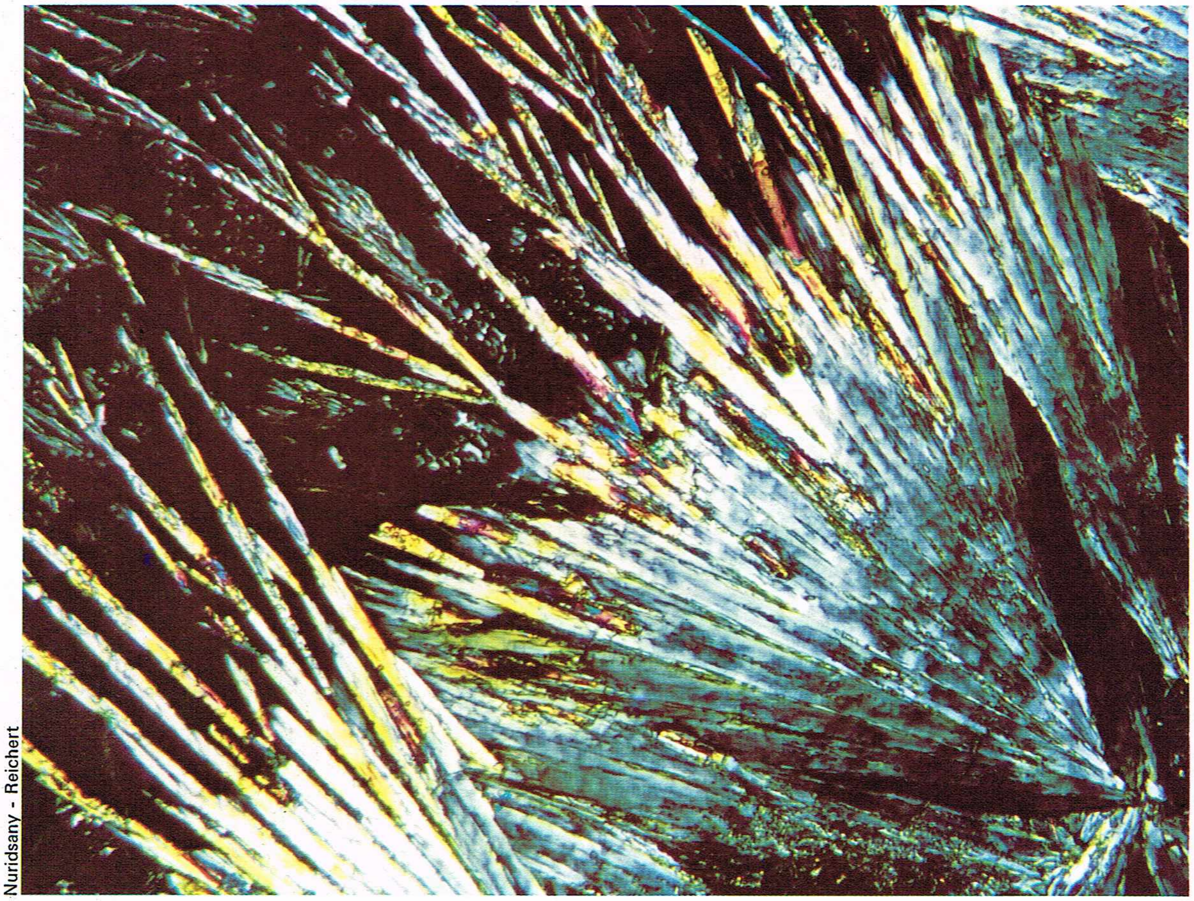
Nuridsany - Reichert

Parmi les acides gras ayant plusieurs doubles liaisons dans leur molécule, on citera l'**acide linoléique** ayant 18 atomes de carbone et deux doubles liaisons, et l'**acide linolénique** à 18 atomes de carbone et trois doubles liaisons. Ces acides confèrent aux huiles qui les contiennent des propriétés siccatives.

Diacides

L'**acide oxalique,** HOOC—COOH, existe sous forme de sel acide de potassium dans différentes plantes, et en particulier dans l'oseille (sel d'oseille). Il est utilisé pour le dérouillage des métaux, le nettoyage et le blanchiment du bois.

Parmi les autres diacides représentés par la formule générale $HOOC—(CH_2)_n—COOH$, certains ont une grande importance dans la fabrication de matières plastiques et de fibres. L'**acide malonique** ($n = 1$) se décarboxyle par chauffage et produit de l'acide acétique. L'**acide succinique** ($n = 2$) et l'**acide glutarique** ($n = 3$) se transforment par chauffage en anhydrides cycliques. L'**acide adipique** ($n = 4$) est obtenu par oxydation du cyclohexane et entre, avec l'hexaméthylènediamine, dans la fabrication du Nylon 66.

Parmi les diacides aromatiques, l'**acide orthophtalique** qui donne facilement un anhydride, l'anhydride phtalique, peut être préparé par oxydation à l'air de l'orthoxylène ou du naphtalène en présence de V_2O_5 vers 350 °C. Il sert à la fabrication d'esters (phtalates d'octyle, d'éthyl hexyle, etc.) utilisés comme plastifiants, et pour la fabrication de résines alkyde et polyester, ainsi que dans diverses synthèses organiques. L'**anhydride phtalique** peut être décarboxylé catalytiquement au-dessus de 200 °C en acide benzoïque :

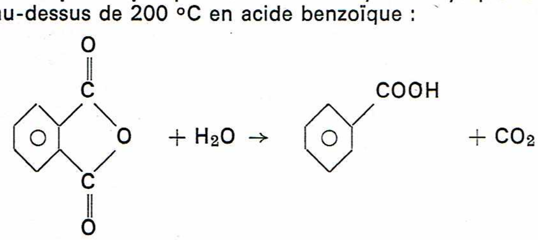

anhydride phtalique *acide benzoïque*

L'**acide téréphtalique** $C_6H_4(COOH)_2$ peut être obtenu par hydrolyse de son ester, le téréphtalate de méthyle; celui-ci est obtenu par oxydation du paraxylène à l'air en présence de sels de cobalt vers 200 °C. On opère en deux étapes : on forme d'abord l'acide paratoluique qui est estérifié par le méthanol, et l'on oxyde ensuite le second groupe méthyle :

$$C_6H_4(CH_3)_2 \rightarrow CH_3—C_6H_4—COOH \rightarrow CH_3—C_6H_4—COOCH_3 \rightarrow HOOC—C_6H_4—COOCH_3 \rightarrow C_6H_4(COOCH_3)_2$$

Le téréphtalate de méthyle $C_6H_4(COOCH_3)_2$ est utilisé dans la synthèse de fibres polyesters (Tergal).

Autres acides

L'**acide salicylique** est un acide phénol utilisé, ainsi que les sels de sodium, comme antiseptique :

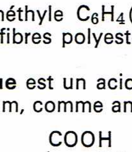

L'**acide acétylsalicylique** est l'aspirine, utilisée comme analgésique :

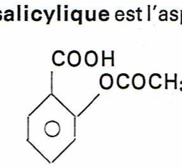

L'**acide citrique,** l'**acide tartrique** et l'**acide gluconique** sont des agents « séquestrants ». Les **acides abiétiques** sont les constituants essentiels de la résine de pin. Les **acides naphténiques** proviennent du raffinage de pétrole brut et sont des mélanges d'acides cyclopentane carboxylique et cyclohexane carboxylique :

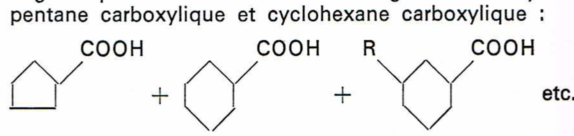

On les utilise lorsque l'on cherche un acide organique bon marché.

Anhydrides d'acides

A l'exception de l'acide formique, qui, en se déshydratant, donne de l'oxyde de carbone, les acides carboxyliques forment des anhydrides par élimination d'une molécule d'eau entre deux molécules d'acides :

$$2R{-}C\begin{smallmatrix}\nearrow O\\ \searrow OH\end{smallmatrix} \xrightarrow{-H_2O} R{-}\overset{O}{\overset{\|}{C}}{-}O{-}\overset{O}{\overset{\|}{C}}{-}R$$

Lorsque deux fonctions acides sont portées par une même molécule, il se forme un anhydride cyclique.

L'**anhydride acétique** se prépare à partir de l'acide acétique en passant par le cétène :

$$CH_3{-}COOH \xrightarrow[600\ °C]{} \underset{\textit{cétène}}{CH_2 = C = O} + H_2O$$

$$CH_2 = C = O + CH_3{-}COOH \rightarrow \underset{\textit{anhydride acétique}}{CH_3{-}\overset{O}{\overset{\|}{C}}{-}O{-}\overset{O}{\overset{\|}{C}}{-}CH_3}$$

C'est un agent puissant d'estérification des alcools en acétates.

Peracides et peroxydes d'acyle

Par action de l'eau oxygénée sur un acide carboxylique en présence d'un acide minéral, il se forme un *peroxyacide* encore appelé *peracide :*

$$CH_3{-}COOH + H_2O_2 \overset{H_2SO_4}{\rightleftharpoons} \underset{\textit{acide peracétique}}{CH_3{-}\overset{O}{\overset{\|}{C}}{-}O{-}OH} + H_2O$$

Ces composés sont utilisés en synthèse organique pour préparer des époxydes à partir d'oléfines.

Les *peroxydes d'acyle* sont obtenus par réaction d'un anhydride d'acide ou d'un chlorure d'acide sur une solution alcaline d'eau oxygénée, par exemple :

$$2C_6H_5COCl + Na_2O_2 \rightarrow \underset{\textit{peroxyde de benzoyle}}{C_6H_5{-}\overset{O}{\overset{\|}{C}}{-}O{-}O{-}\overset{O}{\overset{\|}{C}}{-}C_6H_5} + 2NaCl$$

Les **peroxydes d'acétyle** et de **benzoyle** sont utilisés comme initiateurs de polymérisations. Ce sont des composés devant être manipulés avec précaution, car ils sont explosifs.

Esters

Le remplacement de l'hydrogène de la fonction acide par un groupe alkyle conduit à un ester : $R{-}C\begin{smallmatrix}\nearrow O\\ \searrow OR'\end{smallmatrix}$

On prépare les esters par action d'un alcool sur un acide :

$$R{-}COOH + R'OH \rightleftharpoons R{-}COOR' + H_2O.$$

Cette réaction équilibrée s'appelle l'*estérification;* elle est limitée par la réaction inverse d'*hydrolyse* de l'ester formé. Pour rendre complète la formation d'ester, on remplace l'acide par son anhydride :

$$(R{-}CO)_2\,O + R'OH \rightarrow R{-}COOR' + R{-}COOH.$$

On nomme les esters du nom de l'acide correspondant; ainsi, le produit d'estérification de l'acide acétique par l'alcool éthylique est l'**acétate d'éthyle.**

Les esters, volatils, ont souvent une odeur fruitée agréable. Ce sont des composés hydrolysables en présence d'acides ou de bases. En présence de base, l'hydrolyse est appelée *saponification*. Contrairement à l'hydrolyse, la saponification est complète; elle est utilisée pour le dosage quantitatif des esters (indice de saponification). Le terme de saponification provient du procédé de fabrication des savons par hydrolyse, en présence de soude, des corps gras (glycérides) qui sont des esters de la glycérine avec les acides gras :

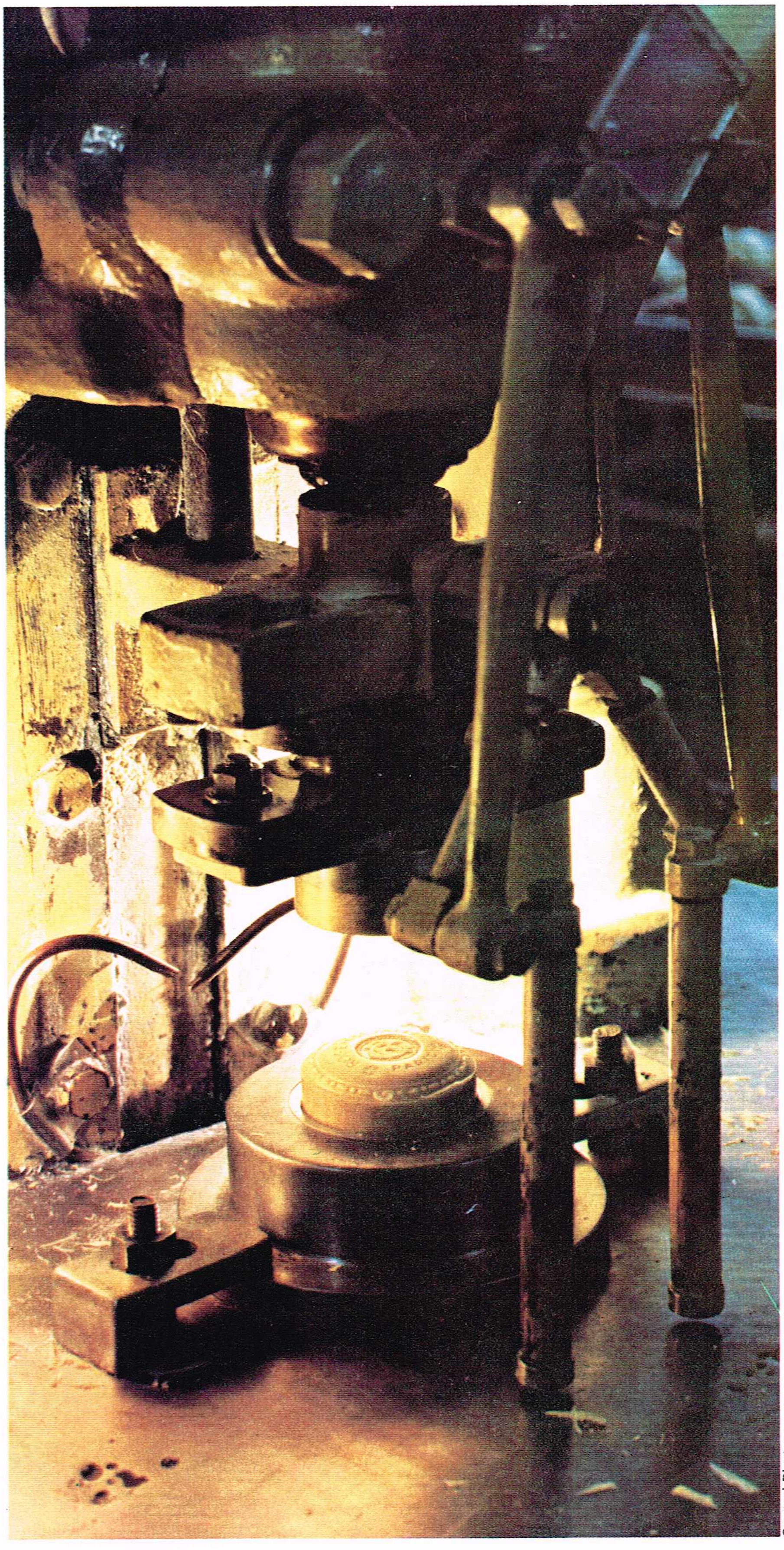

Central Photo

▲ ***En présence de base, l'hydrolyse est appelée* saponification *; ce terme provient du procédé de fabrication des savons par hydrolyse des glycérides, en présence de soude. Ici, opération de frappage d'une savonnette.***

$$
\begin{array}{lcl}
CH_2{-}O{-}CO{-}R & & CH_2OH \\
| & & | \\
CH{-}O{-}CO{-}R + 3NaOH & \rightarrow & CHOH + 3\,RCOONa \\
| & & | \\
CH_2{-}O{-}CO{-}R & & CH_2OH
\end{array}
$$

glycéride + *soude* → *glycérine* + *savon*

Les **glycérides** se trouvent dans les graisses, les huiles animales et végétales. Elles sont très variées, en fonction de la nature de l'acide (palmitique, stéarique, oléique). Les graisses naturelles solides renferment essentiellement des glycérides des acides palmitique et stéarique, alors que les graisses liquides sont constituées par des glycérides de l'acide oléique. Il existe des glycérides mixtes dans lesquelles les trois molécules d'acides sont différentes. Dans ce cas, la glycéride est optiquement active.

Les graisses animales et végétales solides sont utilisées pour la production de la stéarine, de la margarine et des savons.

Parmi les esters les plus importants, les **acétates d'éthyle, de butyle, d'amyle** sont des solvants, les **phtalates de butyle, d'octyle** des plastifiants, et beaucoup de résines et de matières plastiques sont des esters **(polyacétate de vinyle, acétate de cellulose,** etc.).

Les composés azotés

Amines

On peut considérer les amines comme résultant du remplacement de un, deux ou trois hydrogènes de l'ammoniac NH_3 par des radicaux alkyle. On distingue ainsi les amines primaires des amines secondaires et tertiaires :

$NH_3 \rightarrow R{-}NH_2 \rightarrow R{-}NH{-}R' \rightarrow R{-}N(R''){-}R'$

ammoniac — *amine primaire* — *amine secondaire* — *amine tertiaire*

Dans les amines, la dénomination primaire, secondaire, tertiaire se rapporte au degré de substitution de l'azote, alors que, dans les alcools, il s'agissait de la nature de l'atome de carbone porteur de l'hydroxyle. Le groupement NH_2 est appelé *groupe amino.* La nomenclature officielle préconise de faire précéder le nom de la chaîne principale du préfixe *amino :*

$CH_3{-}CH_2{-}CH(NH_2){-}CH_2{-}CH_2{-}CH_3$ *amino*-3 *hexane*

Dans le cas des amines secondaires et tertiaires, on fait précéder le terme amino du nom des chaînes les plus courtes :

$CH_3{-}CH(N(CH_3)_2){-}CH_2{-}CH_3$ *diméthylamino*-2 *butane*

Parfois enfin, on fait précéder de la lettre N le nom des groupes fixés à la fonction amine :

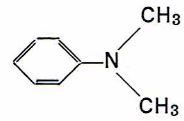

N, diméthylaniline

Les méthodes de préparation des amines sont très nombreuses. Une des méthodes industriellement les plus importantes consiste à faire réagir l'ammoniac sur un halogénure d'alkyle :

$$RX + NH_3 \rightarrow [RNH_3]^+ X^-.$$

Il se forme d'abord un sel d'alkyl-ammonium qui réagit sur l'ammoniac en excès :

$$RNH_3X + NH_3 \rightleftharpoons RNH_2 + NH_4X$$

mais l'amine formée peut à son tour réagir sur le dérivé halogéné : il se forme alors une amine secondaire, puis une amine tertiaire :

$$RNH_2 + RX \rightarrow R_2NH_2X$$
$$R_2NH_2X + NH_3 \rightleftharpoons R_2NH + NH_4X$$

et :

$$R_2NH + RX \rightarrow R_3NHX$$
$$R_3NHX + NH_3 \rightleftharpoons R_3N + NH_4X$$

finalement, l'amine tertiaire peut réagir sur l'halogénure d'alkyle et fournir un sel d'ammonium quaternaire :

$$R_3N + RX \rightarrow R_4NX.$$

Il est difficile de préparer par cette méthode des amines aromatiques. Dans ce cas, on peut passer par le dérivé nitré obtenu par action de l'acide nitrique sur l'hydrocarbure, et l'on réduit ensuite le dérivé nitré. C'est ainsi que l'on synthétise l'aniline :

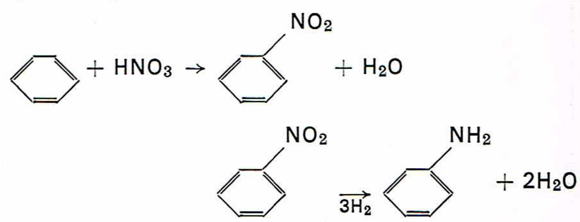

On peut aussi préparer les amines par passage d'ammoniac et de vapeurs d'alcool sur de la thorine à 360 °C. Parmi les autres modes de synthèse des amines, on peut citer : l'hydrolyse alcaline des isocyanates ; l'action d'un halogénure d'alkyle sur la phtalimide potassique suivie d'une hydrolyse alcaline (synthèse de Gabriel) ; la réduction des nitriles (qui donne des amines primaires et secondaires) ; la réaction d'Hofmann qui consiste à faire réagir l'hypobromite de sodium sur un amide ; la réaction de Curtius qui consiste à décomposer l'azide formée à partir d'un chlorure d'acide ; la décomposition de l'azide (composé dérivé de l'acide azothydrique HN_3 par substitution d'un radical à l'hydrogène), ou de l'amide, par

▼ *Schéma des diverses* préparations des amines.

PRÉPARATIONS DES AMINES

1° Méthode d'Hofmann (alkylation de l'ammoniac) :

$$R{-}CH_2Cl + NH_3 \rightarrow R{-}CH_2{-}NH_2 + HCl$$

2° Hydratation des isocyanates :

$$R{-}CH_2{-}N=C=O + H_2O \rightarrow R{-}CH_2{-}NH_2 + CO_2$$

3° Réduction des dérivés nitrés :

$$R{-}CH_2{-}NO_2 + 3\,H_2 \rightarrow R{-}CH_2{-}NH_2 + 2\,H_2O$$

4° Méthode de Gabriel à la phtalimide potassique :

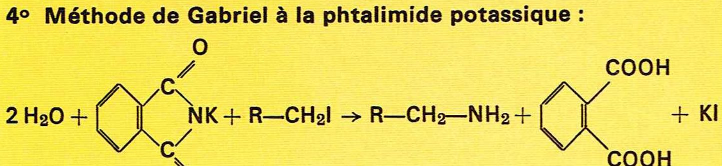

acide phtalique

5° Réduction des nitriles :

$$R{-}CH_2{-}C\equiv N + 2\,H_2 \rightarrow R{-}CH_2{-}CH_2{-}NH_2$$

6° Réaction d'Hofmann à partir des acides :

$$R{-}CH_2{-}COOH \xrightarrow{NH_3} R{-}CH_2{-}COONH_4 \xrightarrow{-H_2O} R{-}CH_2{-}CONH_2 \xrightarrow{Br_2 + KOH} R{-}CH_2{-}NH_2 + CO_2$$

7° Réaction de Curtius à partir des acides :

$$R{-}CH_2{-}COOH \xrightarrow{PCl_3} R{-}CH_2{-}COCl \xrightarrow{NaN_3} R{-}CH_2{-}CON_3 \xrightarrow{H_2O} R{-}CH_2{-}NH_2 + CO_2 + N_2$$

8° Réduction des amides et des azides :

$$R{-}CH_2{-}CONH_2 \xrightarrow{LiAlH_4} R{-}CH_2{-}CH_2{-}NH_2$$
$$R{-}CH_2{-}CON_3 \xrightarrow{LiAlH_4} R{-}CH_2{-}CH_2{-}NH_2$$

9° Réaction de Leuckart :

$$CH_3{-}CO{-}CH_3 + HCOONH_4 \rightarrow CH_3{-}CH(NH_2){-}CH_3 + CO_2 + H_2O$$

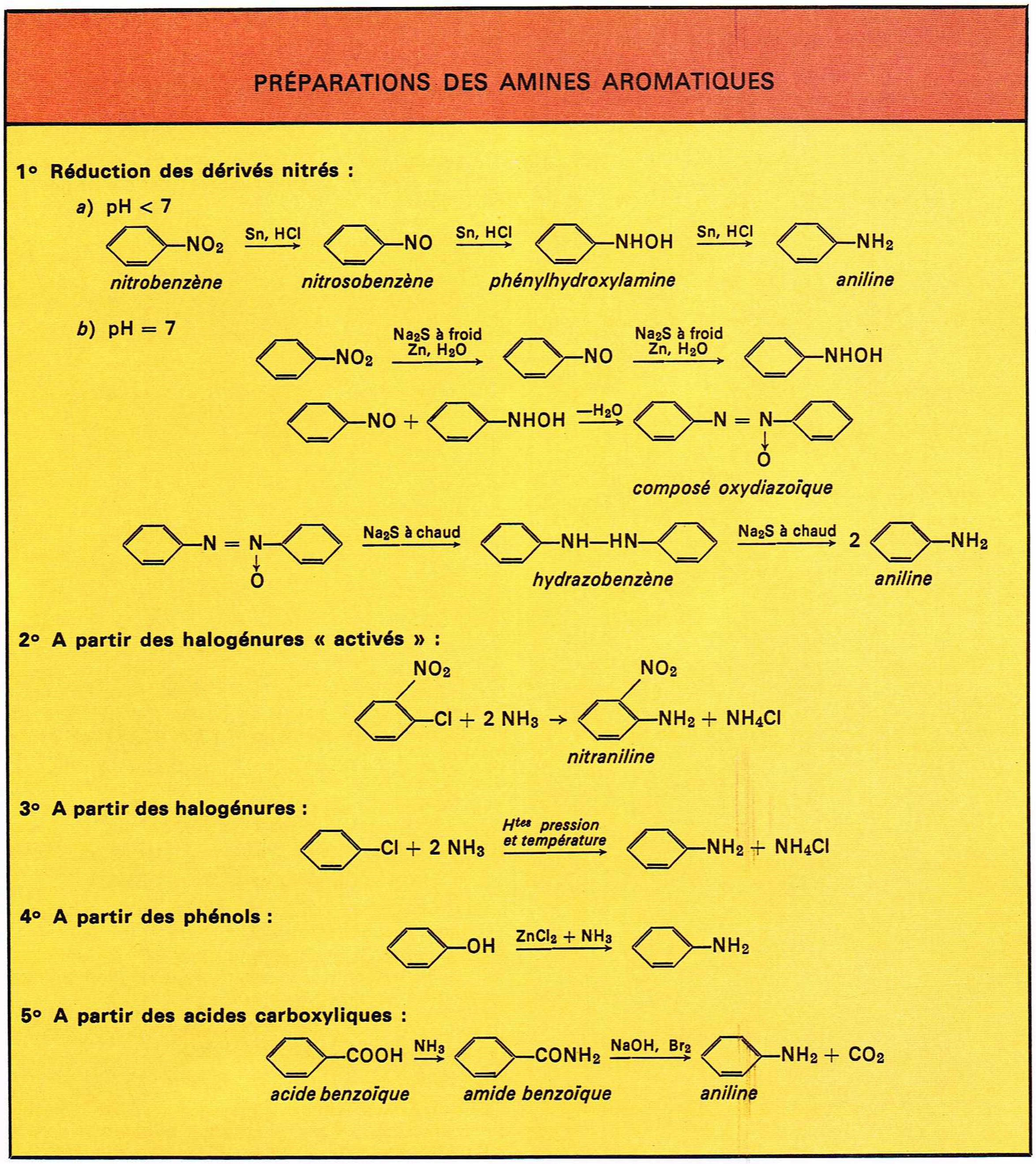

◀ *Schéma des diverses* **préparations des amines aromatiques.**

l'hydrure de lithium aluminium, conduisant aussi à l'amine; enfin, la réaction à chaud des cétones avec le formiate d'ammonium (réaction de Leuckart).

Propriétés physiques. Les premiers termes sont gazeux, puis liquides, et les termes supérieurs solides. La solubilité dans l'eau décroît avec la masse moléculaire.

Les amines primaires et secondaires peuvent former des associations moléculaires par liaisons hydrogène, mais à un degré beaucoup plus faible que les alcools. Cela explique que leurs points d'ébullition soient inférieurs à ceux des alcools, en restant supérieurs à ceux des hydrocarbures de même masse moléculaire. Par contre, les amines tertiaires, non associées, ont un point d'ébullition voisin de celui de l'hydrocarbure.

Propriétés chimiques. Les amines, comme l'ammoniac, sont des bases. Elles se combinent au proton pour donner un cation ammonium ou alkyl ammonium :

$$NH_3 + H_2O \rightleftharpoons NH_4^+ + OH^-$$
$$CH_3{-}NH_2 + H_2O \rightleftharpoons CH_3{-}NH_3^+ + OH^-.$$

Les amines aliphatiques sont plus fortes que l'ammoniac. La propriété basique des amines est utilisée pour neutraliser certains milieux acides. Les sels d'ammonium quaternaires, tel $[R_4N]^+ Cl^-$, sont formés par action d'un halogénure d'alkyle comme R—Cl, sur une amine tertiaire.

Les amines primaires, secondaires et tertiaires peuvent être différenciées les unes des autres par leur action sur l'acide nitreux. Les amines primaires donnent un alcool, les amines secondaires une nitrosamine, et les tertiaires ne réagissent que très difficilement. De même, l'action du chloroforme et des bases et celle du sulfure de carbone permettent de distinguer les amines.

Les mono-, di- et trialkylamines sont synthétisées industriellement en vue d'utilisations variées. Les méthylamines sont obtenues en faisant réagir l'ammoniac sur l'alcool méthylique. Les alkylamines supérieures sont le plus souvent obtenues par action de l'ammoniac sur les chlorures d'alkyle correspondants.

Les amines aliphatiques sont utilisées comme herbicides et fongicides (mono- et diméthylamines), accélérateurs de vulcanisation pour les caoutchoucs, solvants pour le filage de certaines fibres textiles, inhibiteurs de corrosion, etc.

Parmi les diamines aliphatiques, l'**hexaméthylène diamine,** $NH_2{-}(CH_2)_6{-}NH_2$, est un des monomères de la synthèse du Nylon 66. La **pentaméthylène diamine** ou **cadavérine,** $H_2N{-}(CH_2)_5\,NH_2$, la **tétraméthylène**

A. Rizzi

▲ ***Les pigments connus communément sous le nom d'anilines et utilisés dans l'industrie des colorants notamment, dérivent de*** **monoamines.**

diamine ou **putrescine,** $H_2N—(CH_2)_4—NH_2$, sont formées lors de la décomposition des protéines.

La **phénylamine** ou **aniline,** $C_6H_5—NH_2$, est la plus importante des bases aromatiques ; on l'utilise comme intermédiaire dans la synthèse d'accélérateurs de vulcanisation et d'antioxydants pour les caoutchoucs, pour les colorants et pour la synthèse de certains médicaments.

Amides

Les amides dérivent des acides par substitution du groupement OH par un groupement NH_2. Leur formule générale est donc :

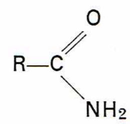

On les désigne du nom de l'acide correspondant avec la désinence *amide :* par exemple, $CH_3—CO—NH_2$ est l'*acétamide*.

Propriétés. Les amides sont neutres ou légèrement basiques. Ce sont d'excellents solvants pour beaucoup de composés organiques. Par hydrolyse, ils fournissent l'acide et l'amine (ou l'ammoniac) :

$$R—CO—NH_2 + HCl + H_2O \rightarrow R—COOH + NH_4Cl$$
$$R—CO—NH_2 + NaOH \rightarrow R—COONa + NH_3$$

Certains déshydratants comme l'anhydride phosphorique les déshydratent en nitriles :

$$R—CO—NH_2 \rightarrow H_2O + R—C \equiv N.$$

Les amides ont peu d'applications.

Le **diméthylformamide,** $H—CON\ (CH_3)_2$, est un solvant utilisé en particulier dans le filage des fibres acryliques.

L'**acide carbamique** est un composé instable que l'on peut considérer comme l'amide de l'acide carbonique hypothétique :

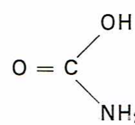

On ne connaît que certains de ses sels et ses esters qui sont connus sous le nom d'*uréthannes* et utilisés comme sédatifs et somnifères. On peut les obtenir par action d'un alcool sur l'acide isocyanique :

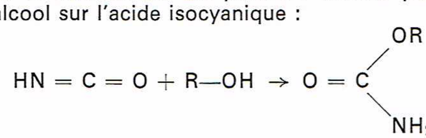

Les uréthannes simples comme le *carbamate d'éthyle* ont des propriétés anesthésiques douces, le dicarbamate dérivé du méthyl-2 propyl-2 propanediol-1,3 est le *méprobamate (équanil) :* c'est un tranquillisant très connu.

L'**urée** est le diamide de l'acide carbonique. On l'obtient industriellement par action du gaz carbonique sur l'ammoniac. La synthèse industrielle passe par l'acide carbamique et le carbamate d'ammonium. Par chauffage vers 150 °C, le carbamate d'ammonium fournit l'urée :

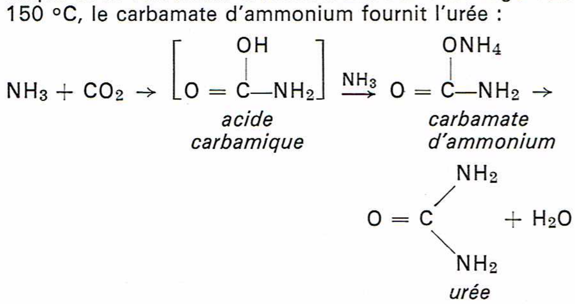

L'urée est le produit final du métabolisme de l'azote chez les Mammifères ; elle est éliminée par l'urine. L'urée est, pour une large part, utilisée comme engrais et dans la préparation des résines urée-formol (d'usage multiple dans l'habillement, l'ameublement et la fabrication d'objets très variés). Elle forme avec les composés organiques à chaîne linéaire des composés d'inclusion cristallins qui permettent de les séparer des composés ramifiés. C'est une des méthodes pour séparer dans les coupes pétroli. res les paraffines normales des isoparaffines.

Nitriles

Ils sont caractérisés par le groupement fonctionnel $—C \equiv N$. On les désigne en faisant précéder le mot nitrile de celui de l'hydrocarbure dont ils dérivent ou de celui de l'acide correspondant ; par exemple $CH_3—C \equiv N$ est l'*éthane nitrile* ou *acétonitrile*.

Les nitriles peuvent être considérés comme dérivant de l'acide cyanhydrique $H—C \equiv N$, par substitution de l'hydrogène par un groupe alkyle.

L'acide cyanhydrique et les nitriles peuvent présenter le phénomène de tautomérie qui les transforme en *isonitriles :*

$$H—C \equiv N \leftrightarrow H—N = C.$$

Les isonitriles sont toxiques et sans application pratique. Ils ont une odeur très désagréable et sont souvent désignés sous le nom de *carbylamines*.

Les nitriles sont par contre très importants par les réactions chimiques auxquelles ils donnent lieu. Ils sont liquides ou solides, mais sont moins toxiques que l'acide cyanhydrique. Par saponification en présence d'acides ou de bases, ils donnent des acides carboxyliques :

$$R—C \equiv N + H_2O \rightarrow R—CO—NH_2$$
$$R—CO—NH_2 + H_2O \rightarrow R—COONH_4.$$

Par hydrogénation catalytique, ils donnent des amines primaires :

$$R—C \equiv N + 2H_2 \rightarrow R—CH_2—NH_2.$$

Le seul nitrile important est l'**acrylonitrile** ou **nitrile acrylique,** $CH_2 = CHCN$, que l'on peut obtenir industriellement soit par action de l'acide cyanhydrique sur l'oxyde d'éthylène, suivie de déshydratation de la cyanhydrine :

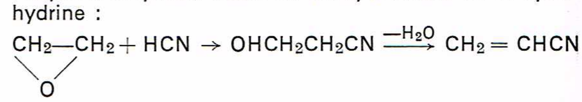

soit par addition d'acide cyanhydrique à l'acétylène :

$$HC \equiv CH + HCN \rightarrow CH_2 = CHCN$$

mais le procédé qui semble le plus important est l'*ammonoxydation du propylène :*

$$CH_3CH = CH_2 + NH_3 + 3/2O_2 \rightarrow CH_2 = CHCN + 3H_2O.$$

Le principal débouché est la synthèse de fibres textiles (Orlon, Crylor), des résines ABS (polystyrène-butadiène-acrylonitrile) et du caoutchouc nitrile.

Dérivés nitrés

Ils sont caractérisés par la présence dans leur molécule du groupement $—NO_2$.

Dans la structure électronique de ces composés, un des deux atomes d'oxygène est lié à l'azote par quatre électrons, c'est-à-dire par une double liaison, le second est lié à l'azote par saturation de la couche électronique de l'oxygène par le doublet libre de l'azote :

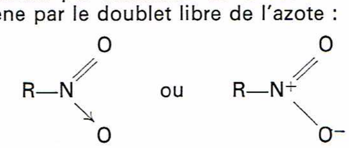

Une caractéristique importante du groupe nitro est son caractère polaire. Pour cette raison, les nitroalcanes ont des moments dipolaires élevés qui conduisent à des températures d'ébullition elles-mêmes élevées. Les dérivés nitrés sont d'excellents solvants des composés organiques et des sels minéraux.

La nitration des alcanes se fait par l'acide nitrique en phase vapeur :

$$R—H + HO—NO_2 \xrightarrow{400\ °C} R—NO_2 + H_2O.$$

La nitration peut s'accompagner de scissions de la molécule et fournir des dérivés nitrés de plus faible masse moléculaire. La présence du groupe nitro très électro-attracteur tend à diminuer la densité électronique sur le carbone situé en α, lequel peut devenir acide. Il se forme alors des sels avec les bases fortes en solution :

LA TOLITE OU T.N.T.

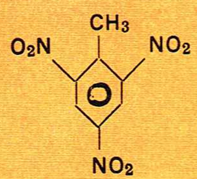

Formule brute : $C_7H_5N_3O_6$

Masse volumique : 1,65 à 20 °C (en g/cm³)

Vitesse de détonation : 6971 en m/s

Pression de détonation : 220 en kbar

$R{-}CH_2{-}NO_2 + NaOH \rightarrow [R\bar{C}HNO_2]\,Na^+ + H_2O.$

Les dérivés nitrés aromatiques sont certainement les plus importants industriellement.

Le **nitrobenzène** est obtenu en traitant le benzène par l'acide nitrique fumant ou l'acide nitrique additionné d'acide sulfurique :

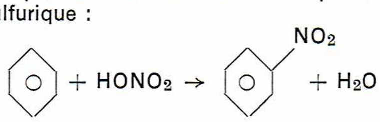

La présence du groupe nitro diminue la vitesse de substitution du second groupe et oriente son entrée sur le cycle en méta. Il est difficile d'obtenir directement le dérivé trinitré. Par contre, la nitration du toluène fournit les dérivés **ortho-** et **paramononitrés** (le groupe CH_3 oriente en ortho et para), puis le **dinitro-2,4 toluène,** enfin le **trinitrotoluène** ou **trinitro-2,4,6 toluène,** connu sous le sigle **T. N. T.** et utilisé comme explosif.

Autres composés azotés

Parmi les composés azotés, il faut encore mentionner les **composés nitrosés,** de formule générale $R{-}N = O$, que l'on peut obtenir par réduction des **isocyanates,** $R{-}N = C = O$, qui résultent de l'action du phosgène sur les amines :

$$R{-}NH_2 + ClCOCl \xrightarrow{-HCl} R{-}NHCOCl \rightarrow R{-}N = C = O + HCl.$$

Parmi ceux-ci, le **tolylène diisocyanate** est un monomère important pour la fabrication des polyuréthannes. Les *diazoïques,* de formule $R{-}N = N{-}R$, dans lesquels les groupes R, identiques ou différents, peuvent être aromatiques, sont des composés importants pour la synthèse des colorants. Les **sels de diazonium,** de formule $[Ar{-}\overset{+}{N} \equiv N]\,X^-$, sont les précurseurs des composés diazoïques.

Les composés soufrés

Mercaptans

Ils sont caractérisés par la présence dans leur molécule du groupement —SH. Ils doivent leur nom à leur propriété de réagir avec le mercure (*mercurium captans :* qui saisit le mercure). L'analogie du groupe SH avec le groupe OH des alcools les fait encore appeler *thiols* (contraction du mot *thioalcool*). Ce sont des composés

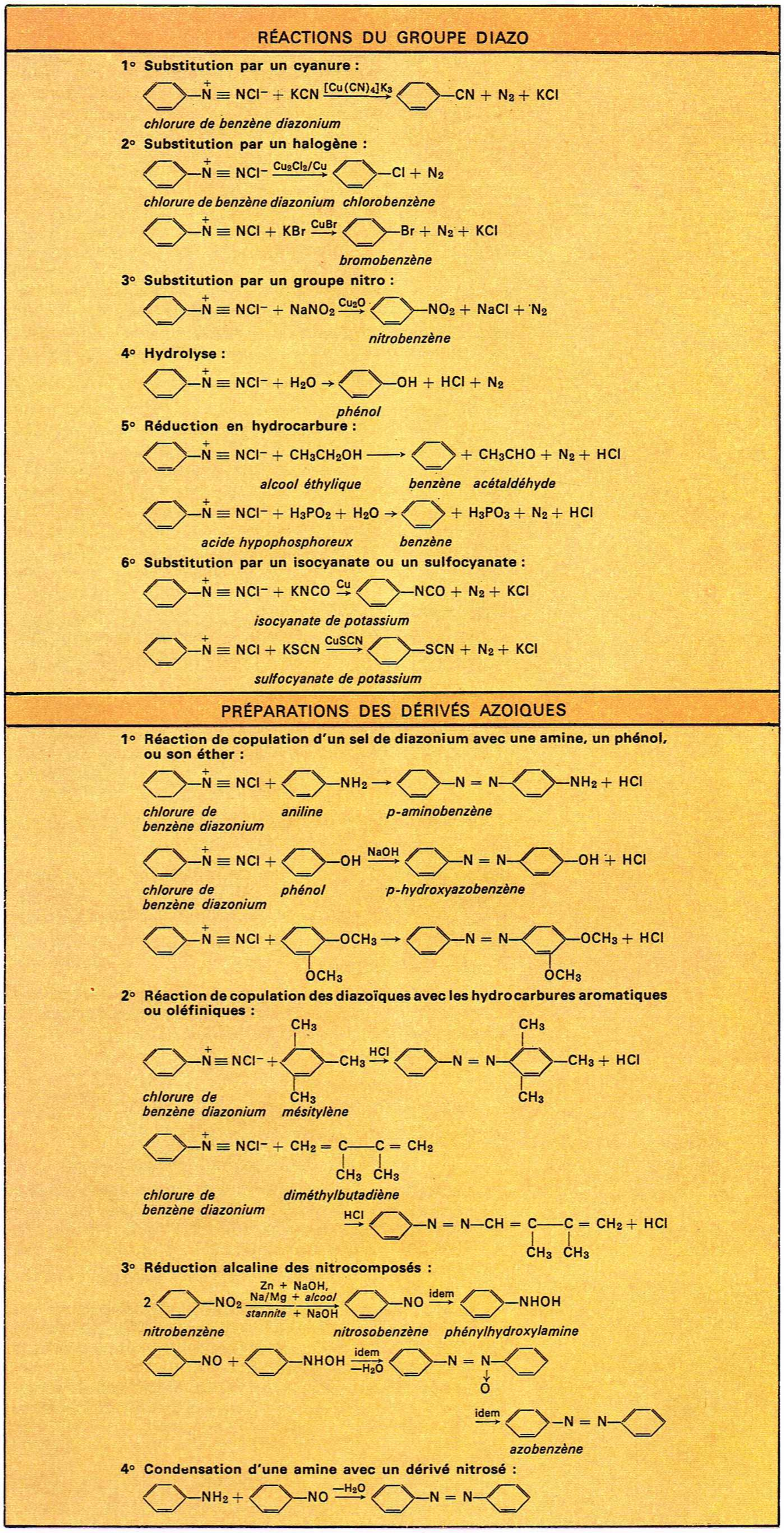

▲ *A gauche, les caractéristiques du* **trinitrotoluène** *ou* **T.N.T.** *ou* **tolite** *utilisé comme explosif.*

Ci-dessus, tableau des réactions du groupe **diazo**, *et schéma des diverses* **préparations des dérivés diazoïques.**

toxiques d'odeur très désagréable. On peut les considérer comme dérivant de l'hydrogène sulfuré par substitution d'un des deux hydrogènes par un radical hydrocarboné.

Ne formant pas de liaisons hydrogène, ils sont insolubles dans l'eau. Ils sont plus acides que les alcools et peuvent être neutralisés par les bases fortes. Ils sont oxydables par l'acide nitrique en acides sulfoniques :

$$R—SH + 3/2O_2 \rightarrow RSO_3H$$

et par l'hypo-iodite en disulfures :

$$2R—SH + NaOI \rightarrow R—S—S—R + H_2O + NaI.$$

Les pétroles bruts renferment des mercaptans en quantités variables. On s'en débarrasse par le procédé catalytique d'hydrodésulfuration qui consiste à les transformer en H_2S et paraffine correspondante. Il est ensuite relativement aisé de se débarrasser de l'hydrogène sulfuré formé, en le transformant en soufre.

Sulfures d'alcoyle ou thioéthers

Ces composés, de formule R—S—R, correspondent aux éthers R—O—R, d'où leur nom, et peuvent être considérés comme dérivant de l'hydrogène sulfuré.

Ils sont oxydables en sulfoxydes et en sulfones. On peut les préparer par action d'un halogénure d'alkyle sur un sulfure alcalin. On les rencontre dans les pétroles bruts en même temps que les mercaptans; on les élimine par hydrodésulfuration. Il existe aussi les *disulfures :*

R—S—S—R.

Sulfoxydes et sulfones

Ces composés peuvent être formés par oxydation des sulfures par l'acide nitrique, l'eau oxygénée, etc. :

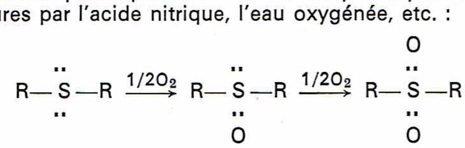

sulfoxyde *sulfone*

Parmi les sulfoxydes, le **diméthylsulfoxyde :**

$$CH_3—SO—CH_3$$

est un excellent solvant des hydrocarbures aromatiques.

Les **sulfolanes** sont des sulfones cycliques obtenues par action de SO_2 sur des diènes conjugués, suivie d'hydrogénation.

Acides sulfoniques

Ils sont caractérisés par le groupement fonctionnel $—SO_3H$. On peut les considérer comme résultant de la substitution dans l'acide sulfurique d'un OH par un groupement R :

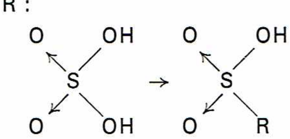

Ce sont des acides forts dont la force est comparable à celle des acides minéraux. Ils donnent des sels, des chlorures d'acides (chlorures de sulfonyle) et des esters. Ils sont utilisés en synthèse organique et chaque fois que l'on désire un acide organique fort. On les utilise aussi comme catalyseurs.

L'**acide benzène sulfonique,** $C_6H_5—SO_3H$, est obtenu par action directe de l'acide sulfurique sur le benzène. C'était le point de départ de l'ancienne synthèse du phénol par fusion alcaline.

L'**acide dodécylbenzène sulfonique** sous forme de sel de sodium ($C_{12}H_{25}—C_6H_4—SO_3Na$) est une base pour détergents.

Sulfonamides

Ce sont des amides d'acides sulfoniques, de formule : $R—SO_2—NH_2$. Les *sulfamides,* médicaments puissants contre les streptocoques, sont des sulfonamides. C'est le cas du **sulfanilamide :** $NH_2—C_6H_4—SO_2—NH_2$.

Composés halogénés

Ce sont des composés aliphatiques, alicycliques ou aromatiques dans lesquels un ou plusieurs atomes d'hydrogène ont été substitués par un halogène (F, Cl, Br ou I). Les plus importants sont les dérivés chlorés.

On désigne les composés halogénés par le nom de l'hydrocarbure correspondant, précédé du préfixe *chloro, bromo, iodo* ou *fluoro;* on peut encore les nommer comme s'il s'agissait de sels de l'hydracide correspondant. Ainsi C_2H_5Br est le **bromo-éthane** ou le **bromure d'éthyle.**

On les prépare par action directe de l'halogène sur l'hydrocarbure, ou par action de l'hydracide sur un alcool, ou par addition d'halogènes ou d'hydracides à des oléfines ou des acétyléniques ou des aromatiques.

Propriétés physiques. Les dérivés halogénés sont insolubles dans l'eau; les températures d'ébullition des dérivés chlorés sont voisines de celles des hydrocarbures correspondants, celles des dérivés bromés sont plus basses et celles des dérivés iodés encore plus basses.

Propriétés chimiques. Si l'on compare des produits de même masse moléculaire, les dérivés halogénés sont très réactifs et constituent des intermédiaires importants en synthèse organique (synthèse d'alcools, d'éthers, de nitriles, etc.).

Composés halogénés aromatiques

On les obtient par action directe de l'halogène sur l'hydrocarbure. Lorsqu'un halogène a substitué un hydrogène, il oriente les substitutions ultérieures en ortho et en para. Ainsi, en présence de chlorure ferrique, on obtient par chloration du benzène les produits suivants :

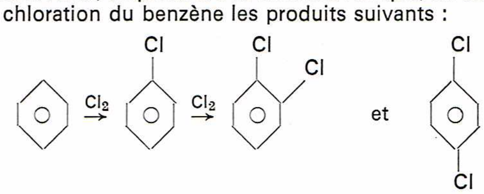

monochlorobenzène *ortho-* et *para-dichlorobenzène*

De même, la chloration du toluène donne un mélange d'**ortho-** et de **parachlorotoluène.** Mais, si l'on expose le toluène à la lumière, la substitution se fait sur le groupe méthyle, et l'on obtient le **chlorure de benzyle,** le **chlorure de benzylidène** et le **chlorure de benzylidine :**

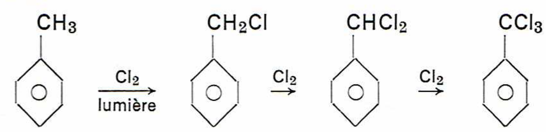

toluène *chlorure de benzyle* *chlorure de benzylidène* *chlorure de benzylidine*

De même, en présence de radiations lumineuses de courte longueur d'onde, la chloration du benzène suit un cours différent de celle qui se fait catalytiquement en présence de chlorure ferrique. Le benzène fixe six atomes de chlore, et il se forme l'**hexachlorocyclohexane :**

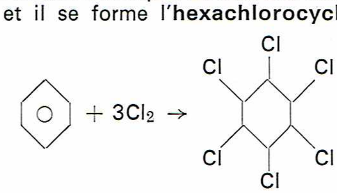

En fait, il existe neuf stéréo-isomères de ce composé selon les positions respectives des atomes d'hydrogène et de chlore de part et d'autre du cycle cyclohexanique. Le pouvoir insecticide du produit est dû uniquement à l'isomère γ :

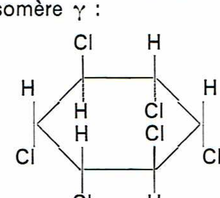

γ *hexachlorocyclohexane*

Cet isomère actif est présent dans le mélange des neuf stéréo-isomères à une concentration qui ne dépasse pas 18 %. Il est vendu sous le nom de *Gammexane.*

Composés halogénés aliphatiques

On les prépare par action de l'hydracide sur un alcool, par action de l'halogène sur un hydrocarbure saturé ou par action d'un hydracide sur un hydrocarbure oléfinique ou acétylénique.

Le **chlorure de méthyle**, CH_3Cl, est préparé par action de l'acide chlorhydrique sur le méthanol ou par chloration du méthane. C'est un gaz (de point d'ébullition — 24 °C) utilisé dans les dispositifs de réfrigérateur, et c'est un agent de méthylation puissant.

Le **chlorure d'éthyle**, $CH_3{-}CH_2Cl$, est obtenu par action de l'acide chlorhydrique sur l'éthanol ou par addition d'acide chlorhydrique à l'éthylène. On l'utilise pour la synthèse du *plomb tétraéthyle* :

$$4C_2H_5Cl + PbNa_4 \cdot 3Pb \rightarrow Pb(C_2H_5)_4 + 4NaCl + 3Pb.$$

Dérivés chlorés du méthane

La chloration du méthane par le chlore, à la lumière, ou thermiquement, fournit quatre dérivés chlorés utilisés comme solvants et comme agents de synthèse : le **chlorure de méthyle**, le **chlorure de méthylène**, le **chloroforme** et le **tétrachlorure de carbone** :

$CH_4 + Cl_2 \rightarrow CH_3Cl + HCl$ *chlorure de méthyle*

$CH_3Cl + Cl_2 \rightarrow CH_2Cl_2 + HCl$ *chlorure de méthylène*

$CH_2Cl_2 + Cl_2 \rightarrow CHCl_3 + HCl$ *chloroforme*

$CHCl_3 + Cl_2 \rightarrow CCl_4 + HCl$ *tétrachlorure de carbone*

Dérivés chlorés de l'éthylène

Par addition de chlore à l'acétylène en présence de chlorure ferrique suivie d'élimination d'acide chlorhydrique par la chaux, on fabrique industriellement une série de composés chlorés à deux atomes de carbone dont certains sont des solvants importants :

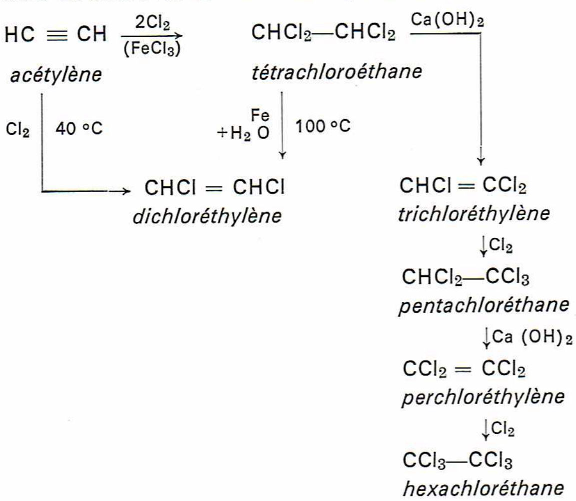

Composés fluorés

Les composés fluorés ne peuvent pas être obtenus par action directe du fluor sur les hydrocarbures, car cette réaction, très violente, conduit le plus souvent à une destruction de la molécule. On fabrique, par action de l'acide fluorhydrique sur les dérivés chlorés, des composés chlorofluorés appelés **fréons**. Ainsi, le **dichlorodifluorométhane** ou **fréon 12** est obtenu à partir du tétrachlorure de carbone :

$$CCl_4 + 2HF \rightarrow CCl_2F_2 + 2HCl.$$

De même, le **chlorodifluorométhane** est obtenu à partir du chloroforme :

$$CHCl_3 + 2HF \rightarrow CHClF_2 + 2HCl.$$

C'est à partir de ce composé que l'on prépare le **tétrafluoroéthylène**, monomère du téflon.

Enfin, le **fréon 114**, $CClF_2{-}CClF_2$, obtenu à partir d'hexachloroéthane est un fluide utilisé dans les réfrigérateurs pour la production de froid.

Composés polyfonctionnels

Nous classerons sous cette rubrique les composés organiques présentant dans leur molécule deux fonctions différentes, les composés ayant deux ou plus de deux fonctions identiques (diols, diacides, etc.) ayant été étudiés avec les fonctions simples.

Aldéhydes acides et cétoacides

Parmi les acides cétocarboxyliques, il faut citer comme particulièrement important : l'**acide pyruvique**, $CH_3{-}CO{-}COOH$, intermédiaire dans la fermentation alcoolique du sucre, et l'**acide acétylacétique**, $CH_3{-}CO{-}CH_2{-}COOH$, qui est instable et tend à perdre de l'anhydride carbonique pour se transformer en acétone. Ses esters, par contre, sont stables, en particulier l'*acétylacétate d'éthyle* que l'on prépare par condensation de l'acétate d'éthyle en présence d'éthylate de sodium :

$$2CH_3{-}COOC_2H_5 \xrightarrow{C_2H_5ONa} CH_3{-}CO{-}CH_2{-}COOC_2H_5 + C_2H_5OH.$$

C'est un composé très réactif qui peut se présenter sous deux formes tautomères :

$$CH_3{-}CO{-}CH_2{-}COOC_2H_5 \rightleftharpoons CH_3{-}\underset{\displaystyle OH}{\underset{|}{C}} = CH{-}COOC_2H_5.$$

De ces deux formes, la forme énolique qui renferme une double liaison est la plus réactive. La réaction de condensation alcaline de l'ester acétylacétique et d'un chlorure d'alkyle suivie de la scission acide ou basique du produit obtenu constitue une méthode importante de synthèse des cétones et autres substances organiques à usage pharmaceutique :

$$CH_3{-}CO{-}CH_2{-}COOC_2H_5 \xrightarrow[+RX]{(Na)}$$

$$R{-}CH\ (CO_2C_2H_5)\ COCH_3 \xrightarrow[2)\ H_3O^+]{1)\ OH^-} R{-}CH_2{-}CO{-}CH_3$$

Aminoalcools

Ces composés possèdent une fonction amine et une fonction alcool. Ils ont une importance assez grande en biochimie. On peut les préparer à partir de dérivés du glycol :

$$HOCH_2{-}CH_2Cl + R_3N \rightarrow HOCH_2{-}CH_2\overset{+}{N}R_3Cl^- \xrightarrow{-RCl} HOCH_2{-}CH_2NR_2.$$

Parmi les plus importants aminoalcools, l'**éthanolamine** ou monoéthanolamine, la **diéthanolamine** et la **triéthanolamine** sont des solvants d'extraction de l'hydrogène sulfuré dans les procédés de désulfuration du pétrole :

$H_2N{-}CH_2{-}CH_2OH$
monoéthanolamine

$HN(CH_2{-}CH_2OH)_2$
diéthanolamine

$N(CH_2{-}CH_2OH)_3$
triéthanolamine

L'**alcool diméthylaminoéthylique** ;

$$HOCH_2{-}CH_2N\ (CH_3)_2,$$

est utilisé comme anesthésique et comme remplaçant de la cocaïne.

Acides-alcools

Ces composés renferment à la fois un groupement carboxylique et un groupe hydroxy, selon la position du carbone porteur de la fonction alcool par rapport à la fonction acide ; on distingue les α, β, γ hydroxyacides. Les plus importants sont les α et les γ. Au premier groupe appartient l'**acide lactique** ou **acide α hydroxypropionique** qui peut se cycliser par estérification de deux molécules. Il possède en outre un carbone asymétrique :

$$CH_3{-}\overset{*}{C}H(OH){-}COOH + HO{-}\overset{*}{C}H(CH_3){-}COOH \rightarrow \text{(lactide : cycle } CH_3{-}CH{-}CO{-}O / O{-}CO{-}CH{-}CH_3)$$

Les γ **hydroxyacides** sont plus difficiles à isoler comme tels, car ils fournissent facilement une lactone par estérification intramoléculaire :

▼ *Les deux formes stéréo-isomères de l'acide* lactique *ou* acide α hydroxypropionique *(en noir, le carbone ; en blanc, l'hydrogène ; en rouge, l'oxygène).*

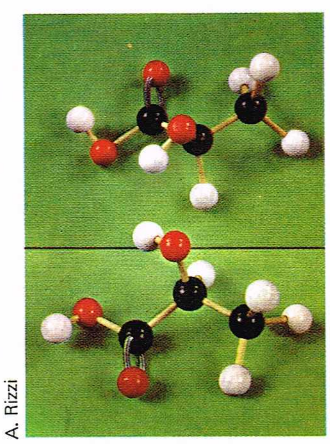

A. Rizzi

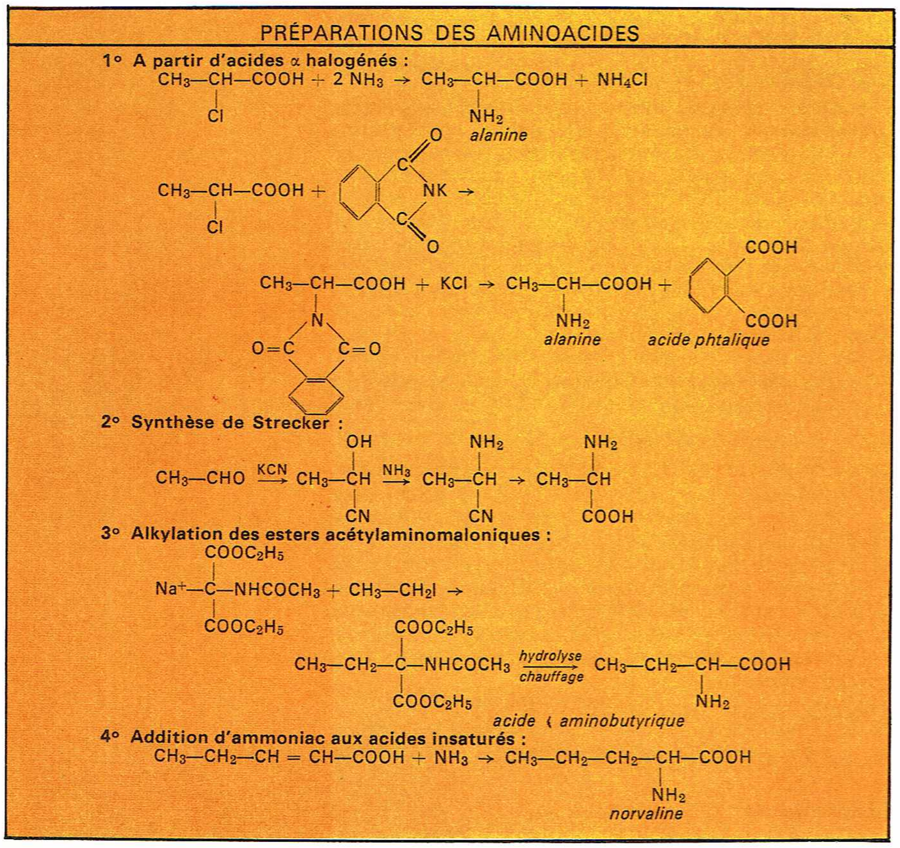

▲ *Schéma des diverses* **préparations des aminoacides.**

▼ ***Tableau des principaux*** **aminoacides** ***; ce sont des composés biologiques très importants puisqu'ils entrent dans la composition des protéines.***

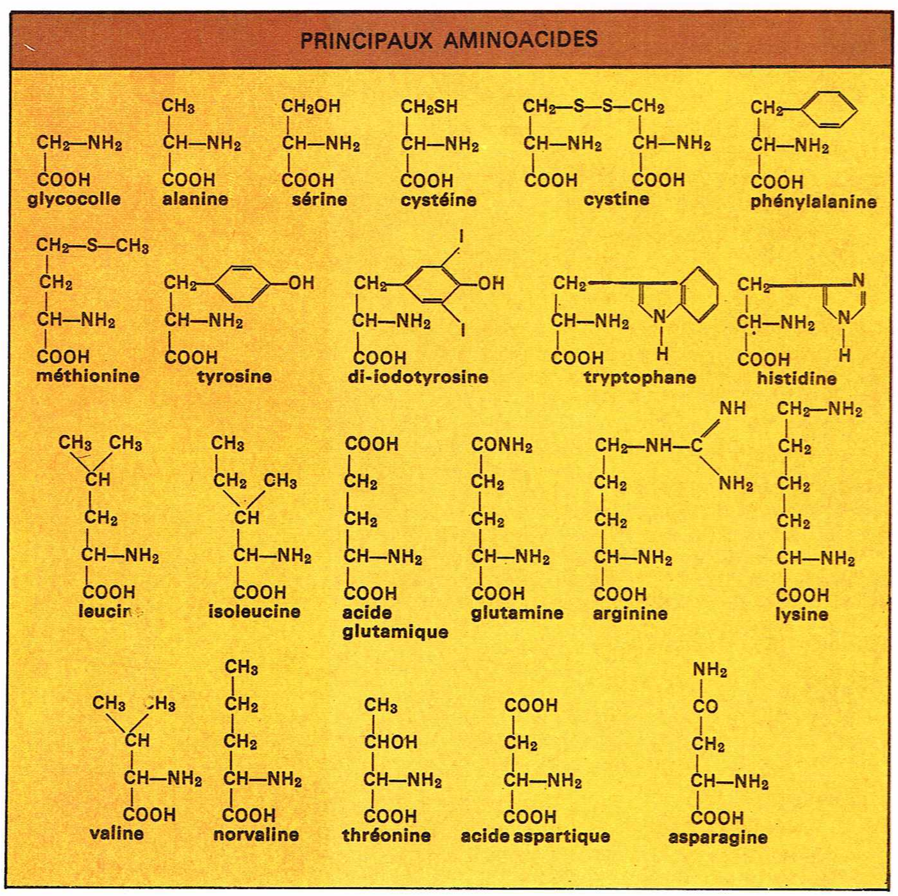

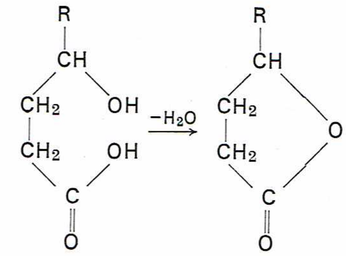

γ *hydroxyacide* *lactone*

Aminoacides

Ce sont des composés biologiques très importants, puisqu'ils entrent dans la composition des protéines. Leur molécule comporte un groupe amino et un groupe carboxylique fixés sur le même atome de carbone. Leur formule générale est donc :

$$R{-}CH(NH_2){-}COOH$$

En fait, on sait qu'ils ont une structure dipolaire, et on devrait les représenter par la formule :

$$R{-}CH(\overset{+}{N}H_3){-}CO_2^-$$

Mais le proton s'échange de façon rapide entre les groupes CO_2^- et NH_3^+, et les deux représentations sont valables. En raison de leur caractère dipolaire, ces composés ont des points de fusion relativement élevés. Ils sont assez solubles dans l'eau. Ce sont des acides très faibles, mais leur acidité est cependant beaucoup plus élevée que celle des sels d'amines aliphatiques en raison de l'effet électro-attracteur du groupe carboxylique.

Pour chaque aminoacide existe, en solution aqueuse, l'équilibre suivant :

$$H_3\overset{+}{N}{-}CH(R){-}CO_2^- + H_2O \rightleftharpoons H_2N{-}CH(R){-}CO_2^- + H_3O^+$$

Le point isoélectrique est le pH pour lequel la solution aqueuse renferme le maximum de formes dipolaires.

Les synthèses d'aminoacides sont très nombreuses; elles partent soit d'acides α halogénés, soit d'aldéhydes (synthèse de Strecker), soit du dérivé acétylaminé de l'acide malonique, soit enfin de l'addition d'ammoniac à un acide insaturé. On peut aussi isoler des protéines naturelles une vingtaine d'aminoacides. D'autres aminoacides comme la **citrulline,** $H_2N{-}CONH(CH_2)_3CH(NH_2)COOH$, et l'**ornithine,** $H_2N(CH_2)_3CH(NH_2)COOH$, ont été isolés de composés naturels mais ne semblent pas prendre part à l'édification des protéines.

La séparation et l'identification des aminoacides constitutifs des protéines, de l'albumine et des virus sont une opération très délicate qui demande des techniques particulièrement élaborées et des réactifs spéciaux. On utilise en particulier la chromatographie sur papier et l'électrophorèse, qui ne nécessitent que de très petites quantités de produit de départ.

Les *polypeptides* sont des composés formés par la condensation de plusieurs aminoacides suivant la réaction :

$$H_2N{-}CH_2{-}COOH + H_2N{-}CH(CH_3){-}COOC_2H_5 \rightarrow H_2N{-}CH_2{-}CO{-}NH{-}CH(CH_3){-}COOC_2H_5 + H_2O$$

Théoriquement, tous les aminoacides connus peuvent se combiner de cette façon dans toutes les combinaisons possibles. Avec 10 aminoacides différents, on peut ainsi former plus de 3 600 000 polypeptides divers. Certains

de ces polypeptides de synthèse sont similaires par leurs propriétés aux albumines naturelles.

Le chimiste sait synthétiser des polypeptides issus de plus de 18 aminoacides différents, mais les protéines naturelles sont plus complexes encore. Si l'on simplifie la question, les protéines devraient avoir la structure de polyamides, mais certains aminoacides ont plus d'un groupement carboxylique, et d'autres plus d'une fonction amine. De plus, on sait que les chaînes d'aminoacides peuvent être reliées entre elles par des ponts disulfure grâce au maillon cystine de la molécule. Les chaînes de restes aminoacides liés grâce aux groupements carboxyle et amino par des liaisons amides sont appelées des peptides, et la liaison est la *liaison peptidique*.

Tous les aminoacides, à l'exception du **glycocolle,** $NH_2—CH_2—COOH$, possèdent un carbone asymétrique et peuvent donc manifester une activité optique.

On synthétise industriellement des aminoacides pour supplémenter la nourriture des animaux et de l'homme. C'est ainsi que l'on fabrique le **tryptophane,** la **lysine,** la **méthionine.** Le **glutamate monosodique** est utilisé pour exalter la saveur des aliments.

Glucides

Les glucides sont des composés aldéhydiques ou cétoniques polyhydroxylés ou des composés qui produisent ces structures par hydrolyse. Le terme d'hydrate de carbone leur a été donné, car, en général, leur formule peut se mettre sous la forme $C_n(H_2O)_n$.

Les plus simples des glucides sont appelés *sucres* ou *saccharides;* leurs noms se terminent par *ose* (glucose, maltose, etc.). Tous les sucres ayant cinq atomes de carbone sont groupés sous la rubrique *pentoses,* tous les sucres à six carbones sont des *hexoses.* On distingue en outre les *sucres aldéhydiques* (aldoses) des *sucres cétoniques* (cétoses).

Monosaccharides

On distingue les monosaccharides à fonction aldéhyde et ceux à fonction cétone. Ces composés ont des carbones asymétriques qui définissent de nombreux isomères optiquement actifs. On trouve les monosaccharides à l'état libre dans certains fruits et combinés dans les polysaccharides, dans l'amidon, la cellulose, les glucosides et les tanins. Ce sont des solides à caractère neutre, facilement solubles dans l'eau, de saveur plus ou moins sucrée. Tous les composés naturels présentent une activité optique. Ils peuvent exister sous formes α ou β, c'est-à-dire sous formes cycliques à cinq ou à six atomes analogues au furanne et au pyranne et que l'on appelle *formes furannique* et *pyrannique.* L'existence de ces différentes formes est la cause d'une anomalie dans le phénomène de déviation de la lumière polarisée que l'on appelle la *mutarotation* et qui résulte de la transformation d'un isomère optique cyclique en un autre, en passant par l'isomère non cyclique.

Chimiquement, les monosaccharides qui renferment les fonctions aldéhyde ou cétone sont des réducteurs et donnent les réactions caractéristiques du groupement C = O. Les plus importantes réactions sont celles que donne la phénylhydrazine qui fournit des osazones cristallisées, jaunes, utilisées pour identifier les sucres. On utilise aussi la phénylhydrazine pour passer d'un sucre aldéhydique à un sucre cétonique. Les groupements hydroxyles des sucres peuvent être estérifiés ou méthylés. Les bases alcalines concentrées décomposent les solutions de sucre en provoquant leur brunissement. Les acides minéraux à chaud agissent comme déshydratants et transforment les sucres en dérivés du furfurol.

Il existe des méthodes chimiques permettant d'allonger ou de raccourcir la chaîne hydrocarbonée des monosaccharides, ou de les transformer d'aldoses en cétoses, ou *vice versa.*

Les sucres à 5 atomes de carbone les plus importants sont le L-arabinose, le D-ribose, le désoxy-2 D-ribose et le D-xylose; ce sont des *aldopentoses.*

Les sucres à 6 atomes de carbone les plus importants sont le D-glucose, le D-fructose, le D-galactose et le D-mannose; ce sont des *aldohexoses,* sauf le D-fructose qui est un *cétohexose.*

Le **D-glucose** est de loin le monosaccharide le plus important; on le désigne parfois sous le nom de **dextrose.**

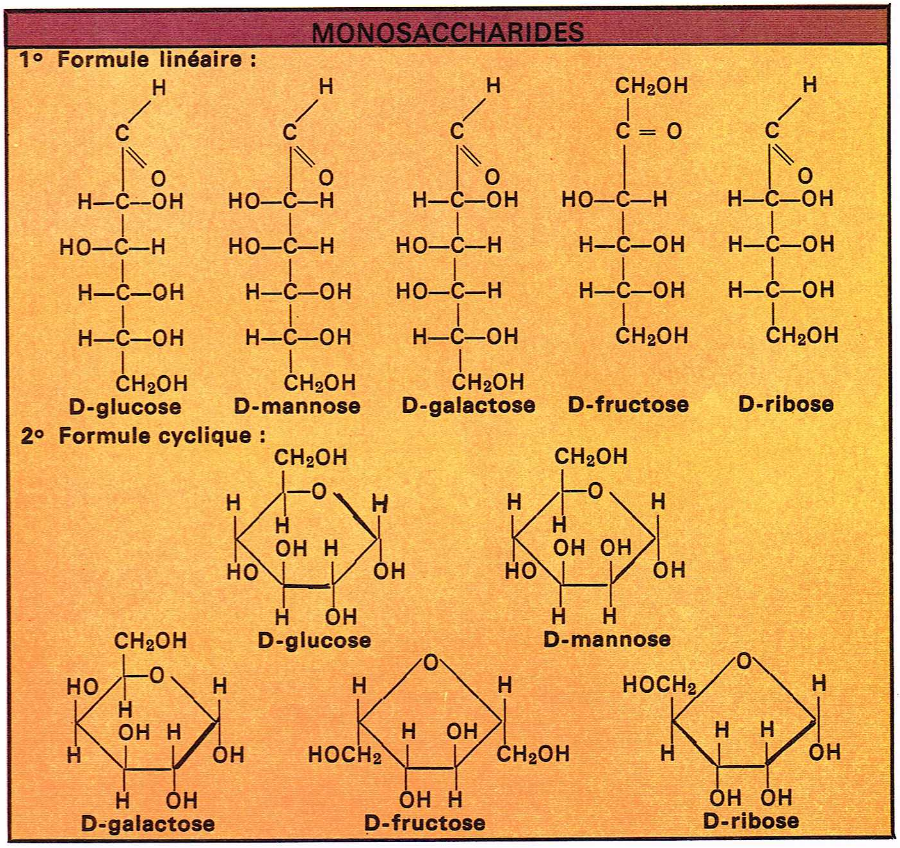

▲ *Tableau des* monosaccharides : *ce sont des glucides que l'on trouve à l'état libre dans certains fruits et combinés dans les polysaccharides, l'amidon, les tanins, etc.*

▼ *Ci-dessous, les différentes formes du* glucose *qui sont la cause d'une anomalie dans le phénomène de déviation de la lumière polarisée que l'on appelle la* mutarotation. *En bas, dans la marge,* glucose *photographié en lumière polarisée.*

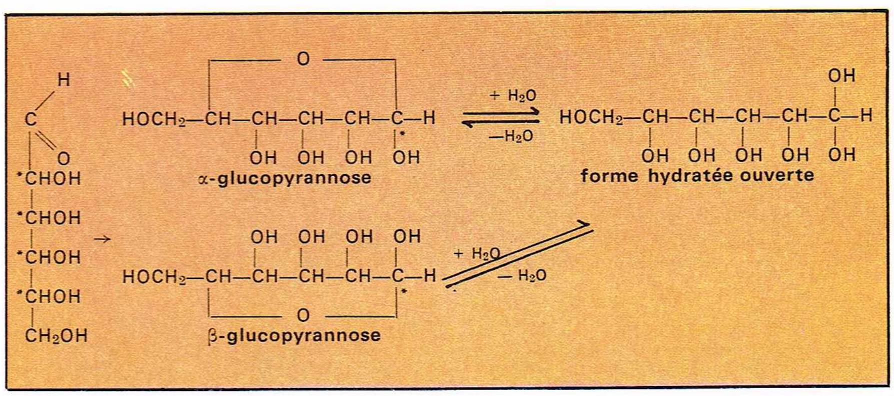

On le trouve à l'état libre dans les fruits, le miel, le sang de l'homme et des animaux, et à l'état combiné dans l'amidon, la cellulose, le saccharose, etc. Le glucose étant un aldose, il présente entre sa fonction alcool et sa fonction aldéhyde terminales 4 carbones asymétriques porteurs de fonctions alcool secondaire. On peut donc prévoir l'existence de $2^4 = 16$ isomères optiques. Tous sont connus.

Le **D-galactose** est présent dans un disaccharide, le lactose, que l'on trouve dans le lait, ainsi que dans divers polysaccharides.

Le **D-fructose** ou sucre de fruits est présent dans de nombreux fruits et dans le miel. C'est, avec le glucose, un des constituants du saccharose ou sucre de canne. Ses solutions faisant tourner à gauche le plan de la lumière polarisée, on l'appelle aussi **lévulose.**

Polysaccharides

On distingue les *oligosaccharides,* formés par la condensation de 2 à 9 unités monosaccharides, et les *polysaccharides de haute masse moléculaire.* On trouve aussi

A. Rizzi

TABLEAU RÉCAPITULATIF DU COMPORTEMENT CHIMIQUE DES MONOSACCHARIDES

1° Oxydation modérée :

$CH_2OH—(CHOH)_4—CHO \xrightarrow{O_2} CH_2OH—(CHOH)_4—COOH$ *acide gluconique*

2° Oxydation brutale :

$CH_2OH—(CHOH)_4—CHO \xrightarrow{HNO_3} HOOC—(CHOH)_4—COOH$ *acide saccharique*

3° Réduction :

$CH_2OH—(CHOH)_3—CO—CH_2OH \xrightarrow{Na/Hg} CH_2OH—(CHOH)_4—CH_2OH$ *polyalcool*

4° Action des acides :

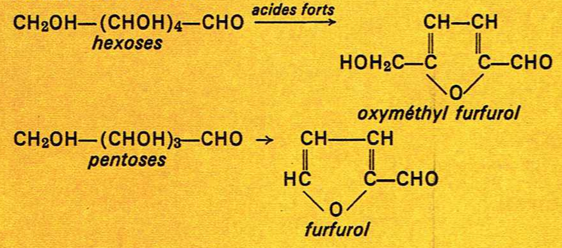

5° Transformation d'un aldose en cétose :

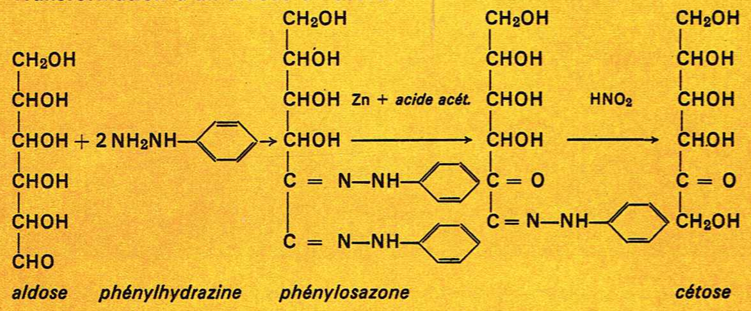

6° Transformation d'un cétose en aldose :

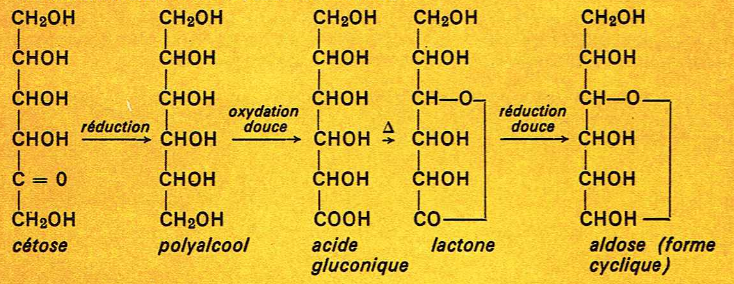

7° Raccourcissement de chaîne (réaction de Ruff) :

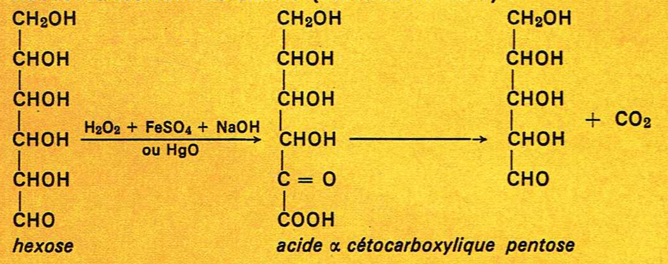

8° Allongement de la chaîne (méthode de Killiani et Fischer) :

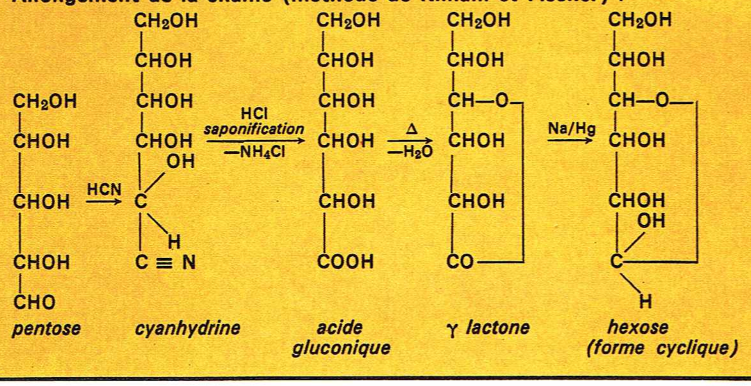

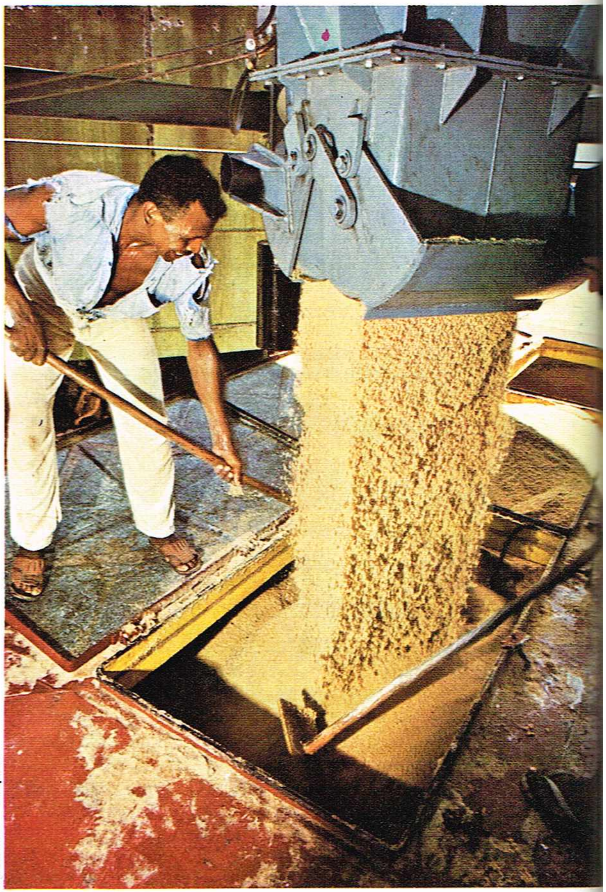

Barbosa - Rapho

à l'état naturel des sucres combinés avec d'autres composés (composés hydroxylés, bases azotées), et que l'on appelle *glucosides.*

Oligosaccharides

Le **saccharose** est un disaccharide particulièrement abondant dans la canne à sucre et dans la betterave sucrière. On l'extrait à l'eau, et la solution est traitée par la chaux, l'excès de chaux étant éliminé par le gaz carbonique. On filtre et on évapore le jus sucré. On obtient ainsi un sucre impur qui, redissous, traité par le charbon actif et reprécipité, donne le sucre comestible blanc. Les eaux mères de la cristallisation fournissent la mélasse, qui contient encore du sucre et des substances azotées. On peut encore récupérer du sucre en le précipitant sous forme de saccharate de strontium, le résidu étant utilisé pour la nourriture des bestiaux. On peut aussi distiller la mélasse pour obtenir le rhum.

Le **maltose** est un disaccharide formé de deux molécules de glucose. On le trouve dans le malt (l'orge germée) mais il peut aussi être obtenu par hydrolyse enzymatique de l'amidon. L'hydrolyse acide ou enzymatique du maltose fournit deux molécules de glucose. Le maltose réduit la liqueur de Fehling et contient donc un groupe aldéhydique libre.

Le **lactose** est un disaccharide réducteur comme le maltose qui, par hydrolyse acide ou enzymatique, fournit une molécule de galactose et une molécule de glucose. On le trouve dans le lait des Mammifères à la teneur d'environ 5 %.

Parmi les trisaccharides, on peut citer le **raffinose,** que l'on trouve en petites quantités dans les betteraves. Il est formé de D-glucose, de D-fructose et de D-galactose.

Polysaccharides de haute masse moléculaire

Ce sont des composés dont la masse moléculaire peut aller de plusieurs dizaines de mille à plusieurs millions et qui, par hydrolyse, fournissent des monosaccharides. On les trouve essentiellement dans les plantes, où ils constituent des substances de réserve ou entrent dans la composition de tissus de soutien. Ils sont insolubles dans l'eau et sont attaqués par les acides et les bases qui les solubilisent, mais en les décomposant. Ils ne présentent pas la saveur sucrée des mono- et des disaccharides.

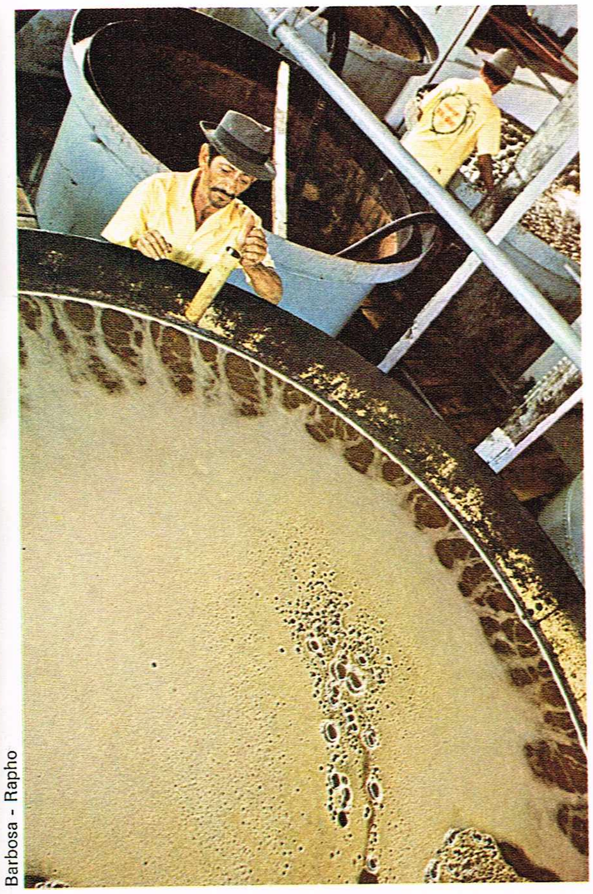

Barbosa - Rapho

◄▲ *Page ci-contre à droite, et ci-dessus, deux phases du traitement de la canne à sucre, dont on extrait en abondance le* **saccharose.**

◄ *Page ci-contre, à gauche, tableau récapitulatif du* **comportement chimique des monosaccharides.**

▼ *Formes linéaires et cycliques de deux* **oligosaccharides** *(polysaccharides), le* **saccharose** *et le* **gentiobiose**, *qui sont des disaccharides.*

RÉACTIONS DU GROUPE CARBONYLE DES GLUCIDES

1° Action de l'hydroxylamine :

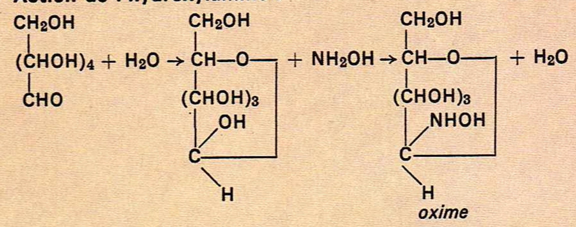

2° Action de la phénylhydrazine :

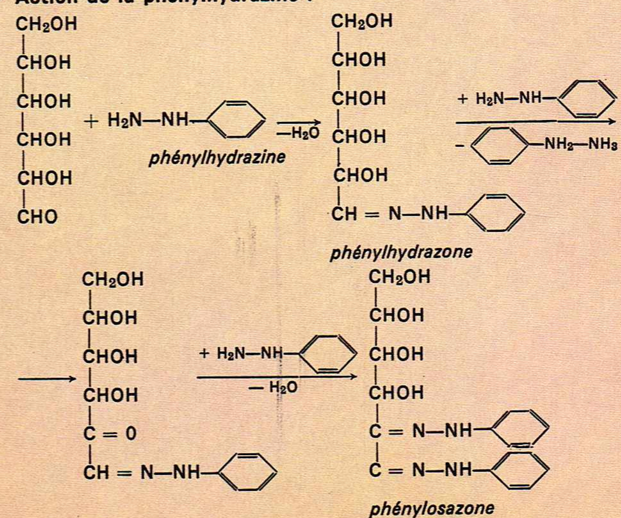

RÉACTION DU GROUPE HYDROXYLE DES GLUCIDES

Estérification

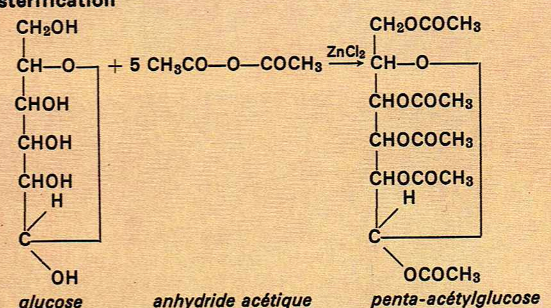

▲ *Tableau des réactions du* **groupe carbonyle** *et de la réaction du* **groupe hydroxyle** *des glucides.*

POLYSACCHARIDES : FORMES LINÉAIRE ET CYCLIQUE

1° Sucres du type saccharose :

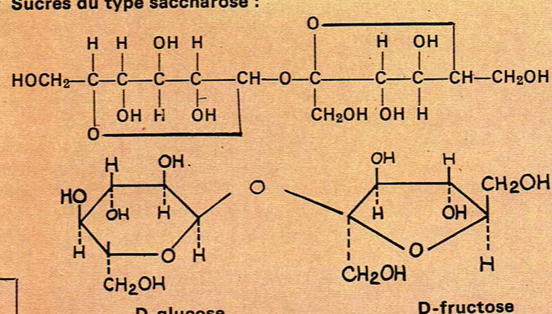

2° Sucres du type gentiobiose :

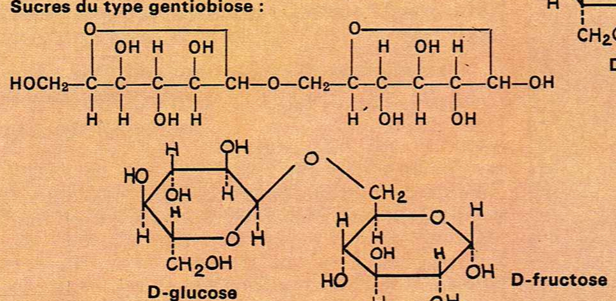

▶ *Grains d'*amidon *de pomme de terre vus en lumière polarisée.*

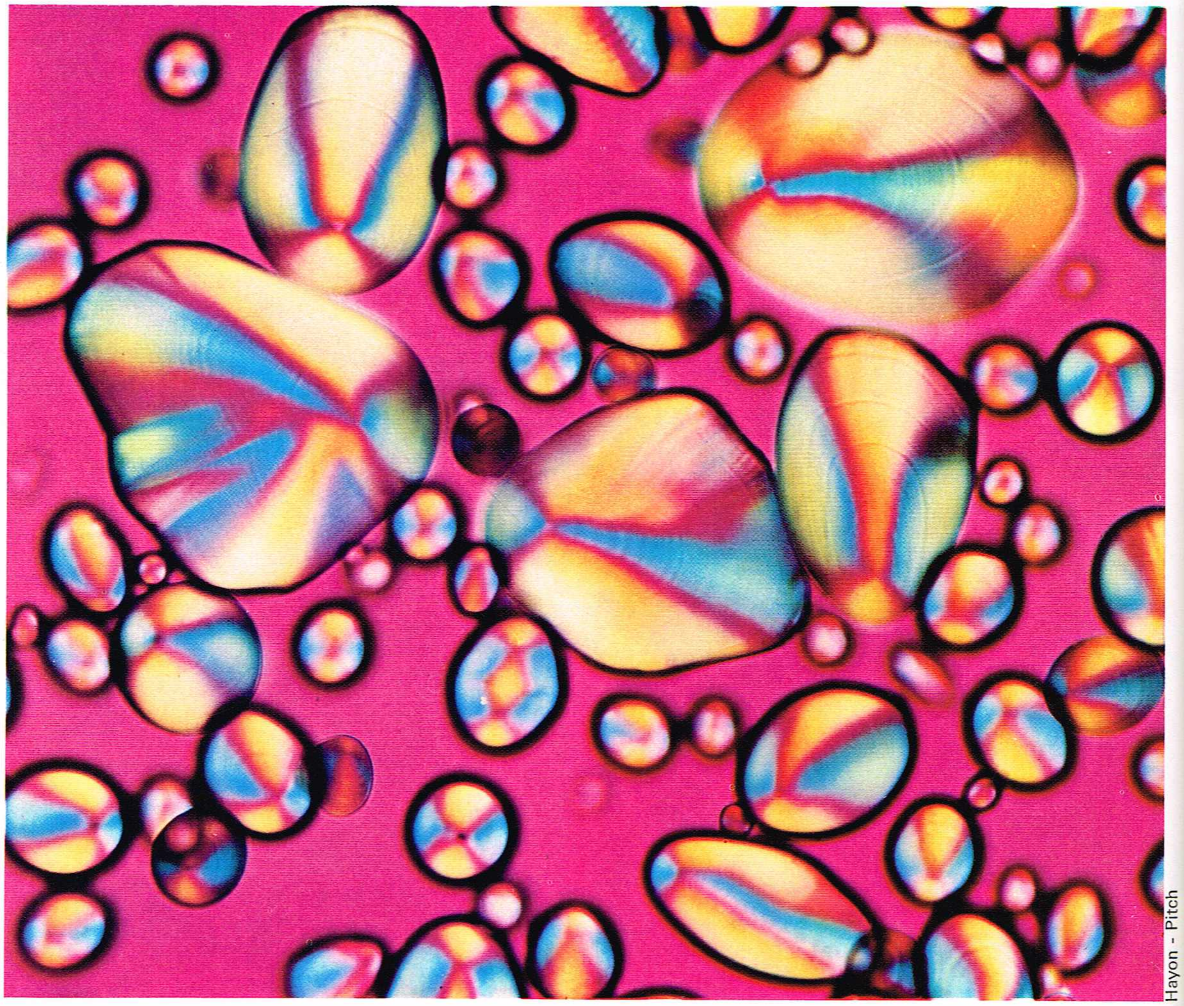
Hayon - Pitch

L'**amidon** est le polysaccharide le plus important pour la réserve en sucres des végétaux. Il est formé par photosynthèse et s'accumule dans les graines, les racines et les fibres végétales. Il donne dans l'eau une solution colloïdale qui se colore en bleu intense en présence d'iode. Les acides dilués le scindent en D-glucose. La composition chimique de l'amidon varie suivant son origine végétale, mais tous les amidons renferment deux polysaccharides dérivés du glucose, mais de structure différente ; l'un a une structure linéaire, c'est l'*amylose*, l'autre une structure ramifiée, l'*amylopectine*. Industriellement, on prépare l'amidon à partir des pommes de terre, du blé, du maïs, du riz, etc.

Le **glycogène** est la réserve d'hydrates de carbone des animaux. C'est une substance voisine de l'amidon, qui ressemble plus à l'amylopectine qu'à l'amylose.

Parmi les autres polysaccharides de réserve des végétaux, citons l'**inuline** (chaînes de β fructofurannose) dont l'hydrolyse fournit surtout du fructose et un peu de glucose.

La **cellulose** est un polysaccharide de masse moléculaire supérieure à 1 000 000, que l'on trouve dans les parois des cellules végétales. Il est formé d'unités glucose liées en 1,4 par des jonctions β *(unités cellobiose)* :

▼ *Formule cyclique de la* cellulose.

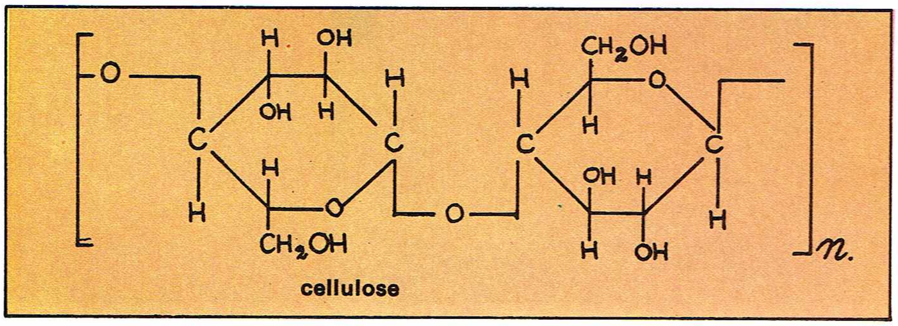

La cellulose la plus pure se trouve dans la fibre de coton, qui en renferme 98 %, mais on en trouve aussi dans le bois, dans les feuilles, etc.

C'est un solide blanc, insoluble dans presque tous les solvants. Le seul solvant de la cellulose est l'oxyde de cuivre ammoniacal. L'hydrolyse acide de la cellulose à chaud fournit un produit contenant des molécules de glucose.

La principale source industrielle de cellulose est le bois. On la prépare en extrayant la lignine qui relie entre elles les fibres cellulosiques. Cette opération peut être effectuée par de la soude, par des bisulfites d'ammonium, de magnésium ou de calcium, ou encore par un mélange de soude et de sulfure de sodium. Il existe différents types de celluloses dont les applications sont différentes les unes des autres : on les nomme α, β et γ-*cellulose*. L'α-cellulose est la plus résistante aux acides et aux bases.

On tire de la cellulose des produits d'un grand intérêt économique. Une de ses applications les plus importantes est la fabrication du papier. On l'utilise aussi pour faire des fibres synthétiques : la fabrication de la rayonne de viscose est fondée sur la réaction des groupements hydroxyles de la cellulose avec le sulfure de carbone en présence de soude pour donner des xanthates solubles dans l'eau :

$$ROH + CS_2 + NaOH \rightarrow \left[RO{-}\overset{\displaystyle S \atop \|}{C}{-}S^-\right] Na^+ + H_2O$$

alkylxanthate de sodium

La solution de xanthate est passée au travers de fins orifices, et, à la sortie, les filaments obtenus sont traités par du sulfate acide de sodium qui reprécipite la cellulose :

$$\left[RO{-}\overset{\displaystyle S \atop \|}{C}{-}S^-\right] Na^+ + NaHSO_4 \rightarrow ROH + CS_2 + Na_2SO_4$$

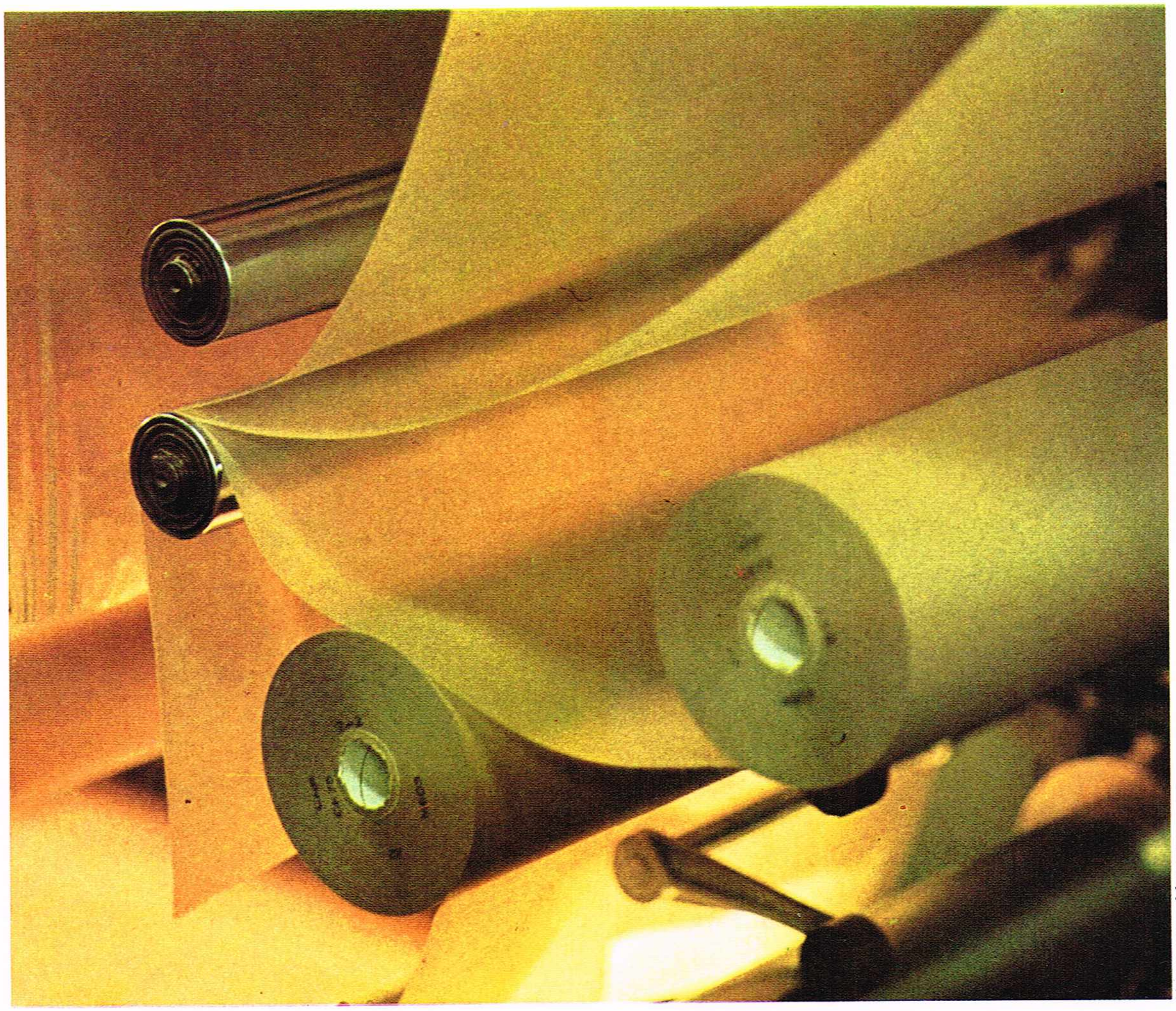

◄▼ *Une des applications les plus importantes de la* **cellulose** *est la fabrication de papier : ci-contre, le produit fini ; ci-dessous, une cuve contenant la pâte à papier.*

Par un procédé voisin, on peut obtenir la Cellophane. Lorsque l'on traite la cellulose par l'anhydride acétique, on obtient le triacétate de cellulose qui est une matière plastique. La solution de ce polymère dans le chlorure de méthylène peut être filée, et l'on obtient les fibres d'acétate de cellulose. L'acétate de cellulose en feuilles est utilisé comme film support des émulsions photographiques.

En traitant la cellulose par de l'acide nitrique, on obtient les *nitrocelluloses* utilisées dans la fabrication d'explosifs.

Parmi les *polysaccharides complexes,* on peut citer les **pectines** des fruits, l'**acide alginique,** différentes **gommes** et **mucilages** de certaines plantes. La **chitine,** constituant principal de la carapace des Insectes et des coquilles des Crustacés, est aussi un polysaccharide renfermant de l'azote.

Hétérocycles

Ce sont des composés cycliques dont un ou plusieurs atomes du cycle sont différents des autres. Les plus importants d'entre eux ont un caractère aromatique et sont formés de cycles à 5 ou à 6 éléments. Les éléments les plus fréquents intervenant comme hétéroatomes sont l'oxygène, l'azote et le soufre.

Composés hétérocycliques penta-atomiques à un seul hétéroélément

Groupe du furanne

Le **furanne,** malgré la présence de deux doubles liaisons dans sa molécule, est difficilement réductible. Les halogènes, au lieu de donner des réactions d'addition, substituent les hydrogènes. Ce comportement particulier résulte de la distribution électronique dans le cycle qui fait que le furanne se comporte comme le benzène. Les quatre électrons des deux doubles liaisons et le doublet électronique de l'oxygène sont délocalisés dans le cycle.

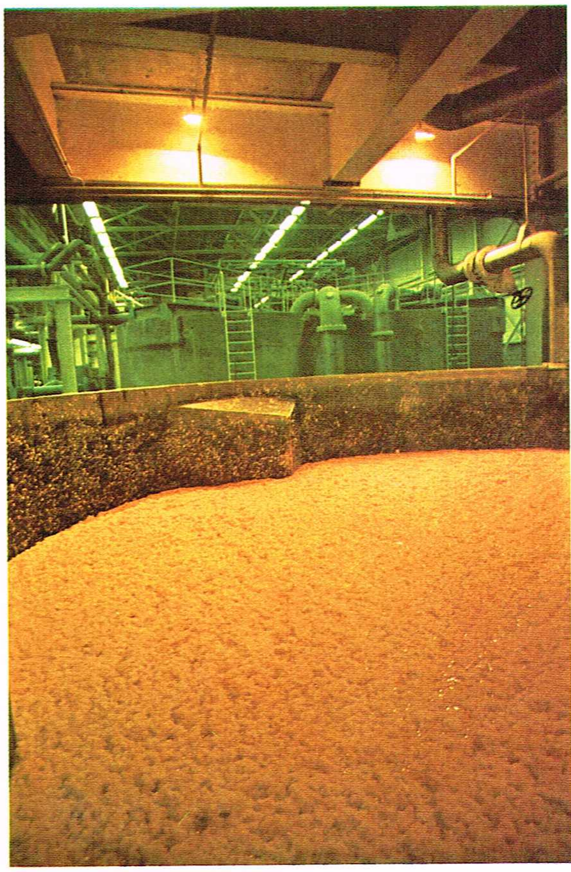

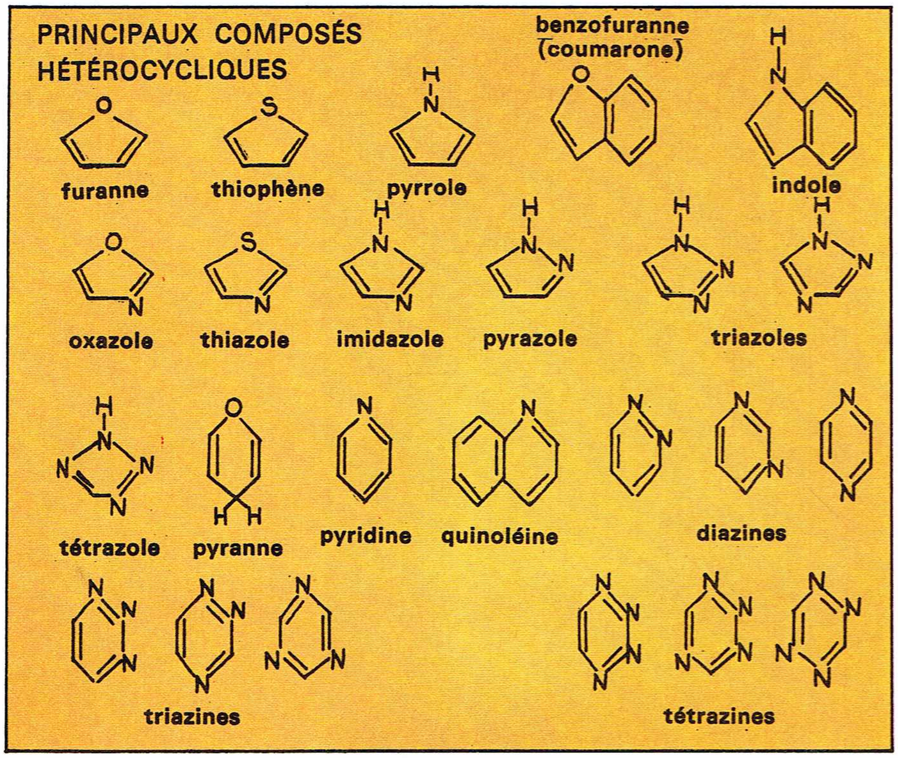

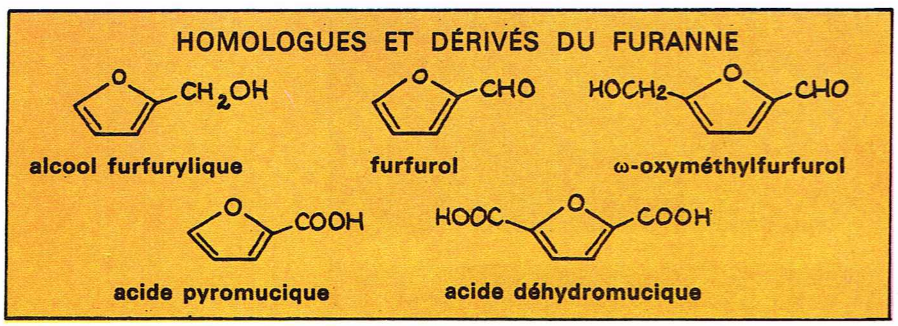

▲ *En haut, formules cycliques des principaux* composés hétérocycliques; *ils sont nombreux et peuvent contenir de l'oxygène, du soufre ou de l'azote. Ci-dessus, formules des* homologues et dérivés du furanne.

Parmi les dérivés les plus importants du furanne, le **furfural** (ou furfuranne) est l'aldéhyde que l'on obtient par déshydratation des pentosanes de certains végétaux (maïs, blé, etc.). C'est un excellent solvant utilisé dans le raffinage des huiles minérales. C'est aussi le point de départ de la synthèse industrielle du **furanne,** du **tétrahydrofuranne** et de l'**alcool tétrahydrofurfurylique.** C'est aussi le point de départ d'une synthèse industrielle possible du Nylon. Dans le groupe du furanne, on peut aussi citer la **coumarone,** utilisée pour la préparation de résines synthétiques.

Groupe du thiophène

Le **thiophène** se trouve mêlé à titre d'impureté aux hydrocarbures, et en particulier au benzène, d'où il est difficile de l'éliminer en raison de sa similitude avec ce dernier. Il présente, en effet, un caractère aromatique très accusé et peut être nitré, sulfoné, halogéné comme le benzène.

Groupe du pyrrole

L'hétéroatome du **pyrrole** est l'azote. On l'extrait du goudron de houille. Son noyau entre dans la constitution de nombreux produits biologiques essentiels (hémoglobine, chlorophylle, bilirubine, etc.), et dans certains colorants et alcaloïdes d'importance notoire. On peut le préparer par réduction de la succinimide :

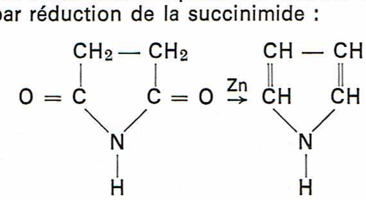

succinimide *pyrrole*

Fraîchement distillé, le pyrrole est une huile incolore qui brunit à l'air en se polymérisant. Ce n'est pas une base, malgré la présence de son atome d'azote. Au contraire, l'hydrogène du groupement N—H est acide et peut être substitué par un métal. Le pyrrole est difficilement réductible et présente des réactions chimiques analogues à celles du phénol. Il donne les réactions de substitution électrophiles comme la nitration, la sulfonation, la réaction de Gattermann qui conduit à un aldéhyde (par action de CO + HCl), l'acylation de Friedel et Crafts, etc. Les hydrogènes de son noyau sont facilement substituables par des halogènes.

L'**indole** est un dérivé important du pyrrole; il entre dans la structure des colorants indigo.

Composés hétérocycliques penta-atomiques à deux hétéroatomes ou plus.

Ils sont assez nombreux et peuvent contenir de l'oxygène, du soufre ou de l'azote. Leurs propriétés, très variables avec les différentes structures, ne permettent pas de faire des groupes homogènes. Il serait trop long de les décrire tous.

Le **thiazole** entre dans la constitution de la pénicilline, important antibiotique produit par fermentation du *Penicillium notatum.*

L'**imidazole** fait partie de la formule de l'histidine, aminoacide présent dans les protéines.

De la structure du **pyrazole** et de son dérivé, la **pyrazolone,** dérivent certains colorants, et aussi l'**antipyrine** et le **Pyramidon** (fébrifuge, antinévralgique et antirhumatisant très utilisé).

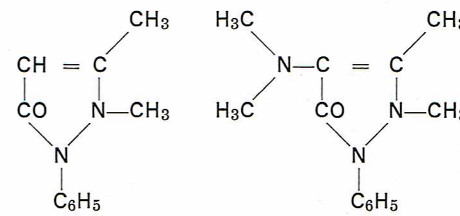

antipyrine ® *Pyramidon ®*

Le noyau du tétrazole, qui renferme quatre atomes d'azote, entre dans la formule du **cardiazole,** produit pharmaceutique utilisé comme cardiotonique.

Composés hétérocycliques hexa-atomiques à un seul hétéroatome

Le principal hétérocycle azoté est la **pyridine.** C'est un liquide qui bout à 115 °C, qui est soluble dans l'eau en toutes proportions, et dont l'odeur est celle que dégagent les os que l'on calcine. On l'extrait du goudron de houille. Les propriétés chimiques de la pyridine sont semblables à celles du benzène. C'est une base organique plus faible que les amines aliphatiques mais un peu plus forte que l'aniline. On l'utilise comme solvant.

Parmi les composés naturels dérivant de la pyridine, on peut citer la **nicotine,** l'**acide nicotinique** (facteur antipellagreux), et la **pyridoxine (vitamine B_6)** :

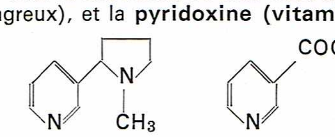

nicotine *acide nicotinique*

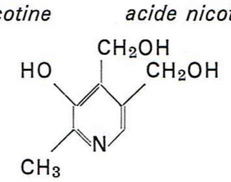

pyridoxine

La **pipéridine** est le produit d'hydrogénation de la pyridine; c'est une amine secondaire cyclique, plus basique que la pyridine. C'est un accélérateur de la vulcanisation du caoutchouc.

Parmi les homologues de la pyridine, on peut citer la **mono-** et la **diméthylpyridine.**

La **quinoléine** et l'**isoquinoléine,** composés pyridiniques bicycliques, sont des constituants essentiels de certains colorants et alcaloïdes.

Composés hétérocycliques hexa-atomiques à plusieurs hétéroatomes

Les plus importants dérivent de la **pyrimidine** et de la **purine.** La purine comporte deux noyaux hétérocycliques, l'un hexa-atomique pyrimidique, l'autre penta-atomique imidazolique, et peut exister sous deux formes tautomères :

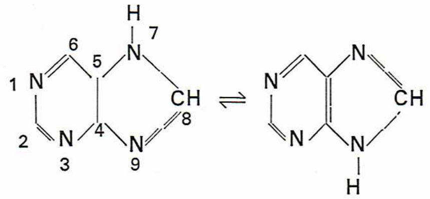

Les dérivés aminés et hydroxylés de la purine accompagnent la pyrimidine dans les produits d'hydrolyse des acides nucléiques. L'**adénine** est l'**amino-6 purine;** l'**hypoxanthine** est l'**hydroxy-6 purine;** la **guanine** est l'**amino-2 hydroxy-6 purine,** et la **xanthine,** la **dihydroxy-2,6 purine.**

L'**acide urique** est la **trihydroxy-2,6,8 purine.** On le trouve dans le sang et dans l'urine; c'est lui qui provoque des calculs urinaires. Les cristaux de son sel monosodique, en se déposant au niveau des articulations, sont la cause de la goutte. Ce sont surtout les produits du métabolisme des Oiseaux et des Reptiles qui renferment de l'acide urique. Le guano en renferme 25 %.

La **théobromine,** la **théophylline** et la **caféine** que l'on trouve dans le café, le thé et le cacao sont encore des dérivés de la purine.

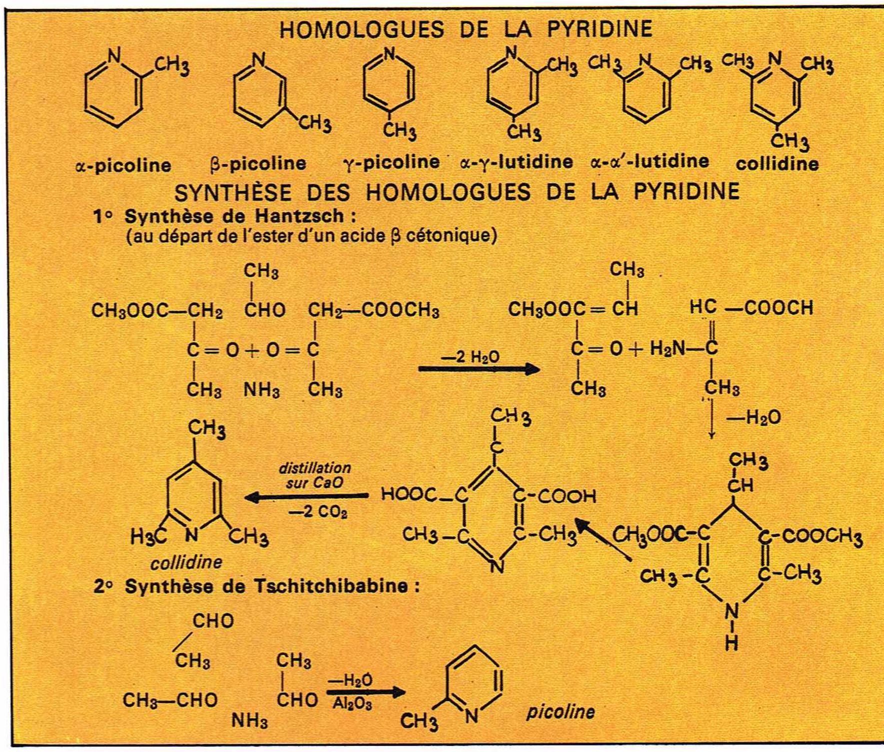

▲ *Tableau des* **homologues de la pyridine,** *principal hétérocycle azoté, et leurs différentes synthèses.*

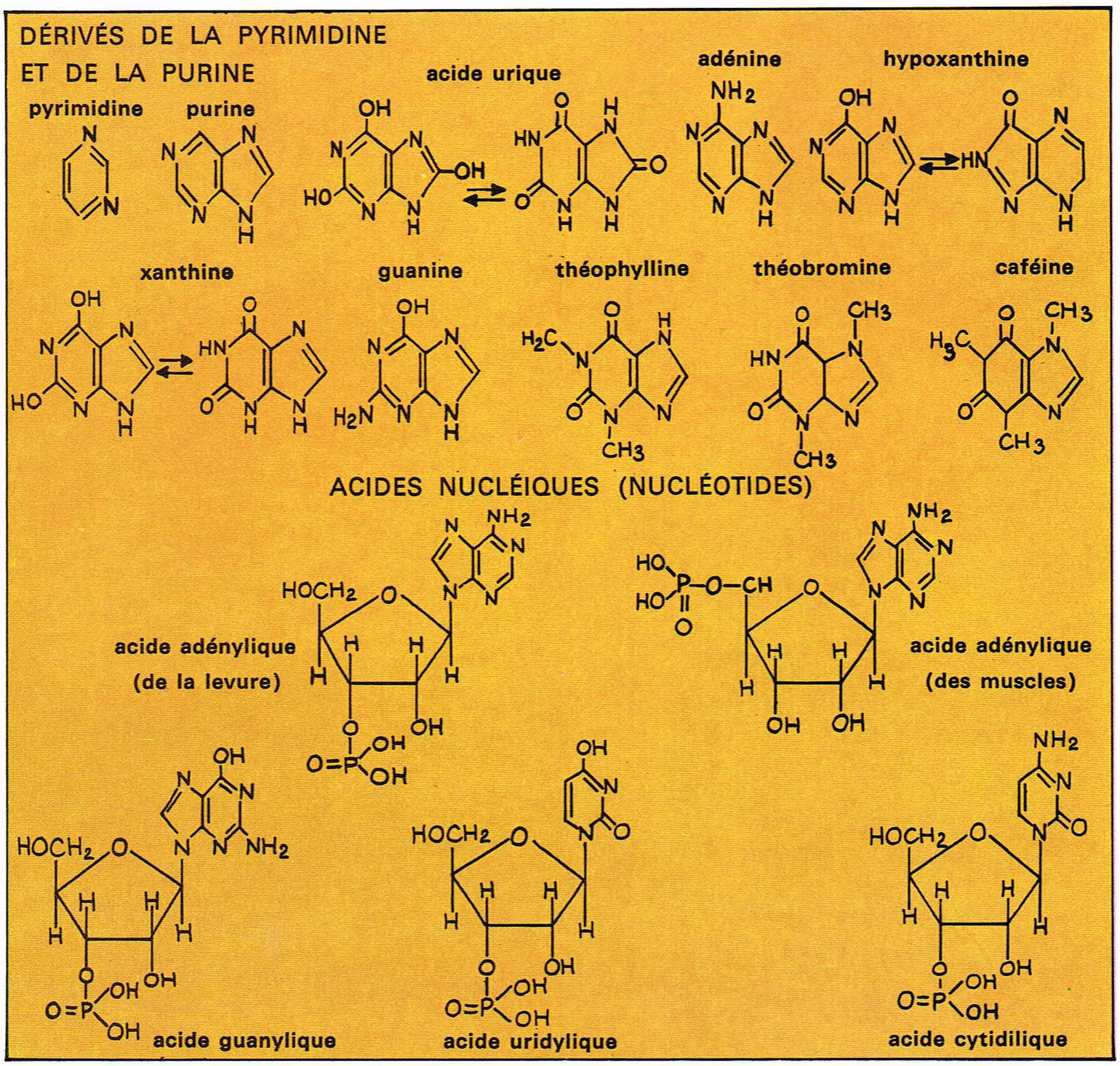

◀ *En haut, formes cycliques de quelques dérivés de la* **purine** *et de la* **pyrimidine** *; en bas, des acides* **nucléiques** *(nucléotides) composés d'un hétérocycle azoté purique ou pyrimidique, d'un sucre (ribose ou désoxyribose) et d'une molécule d'acide phosphorique.*

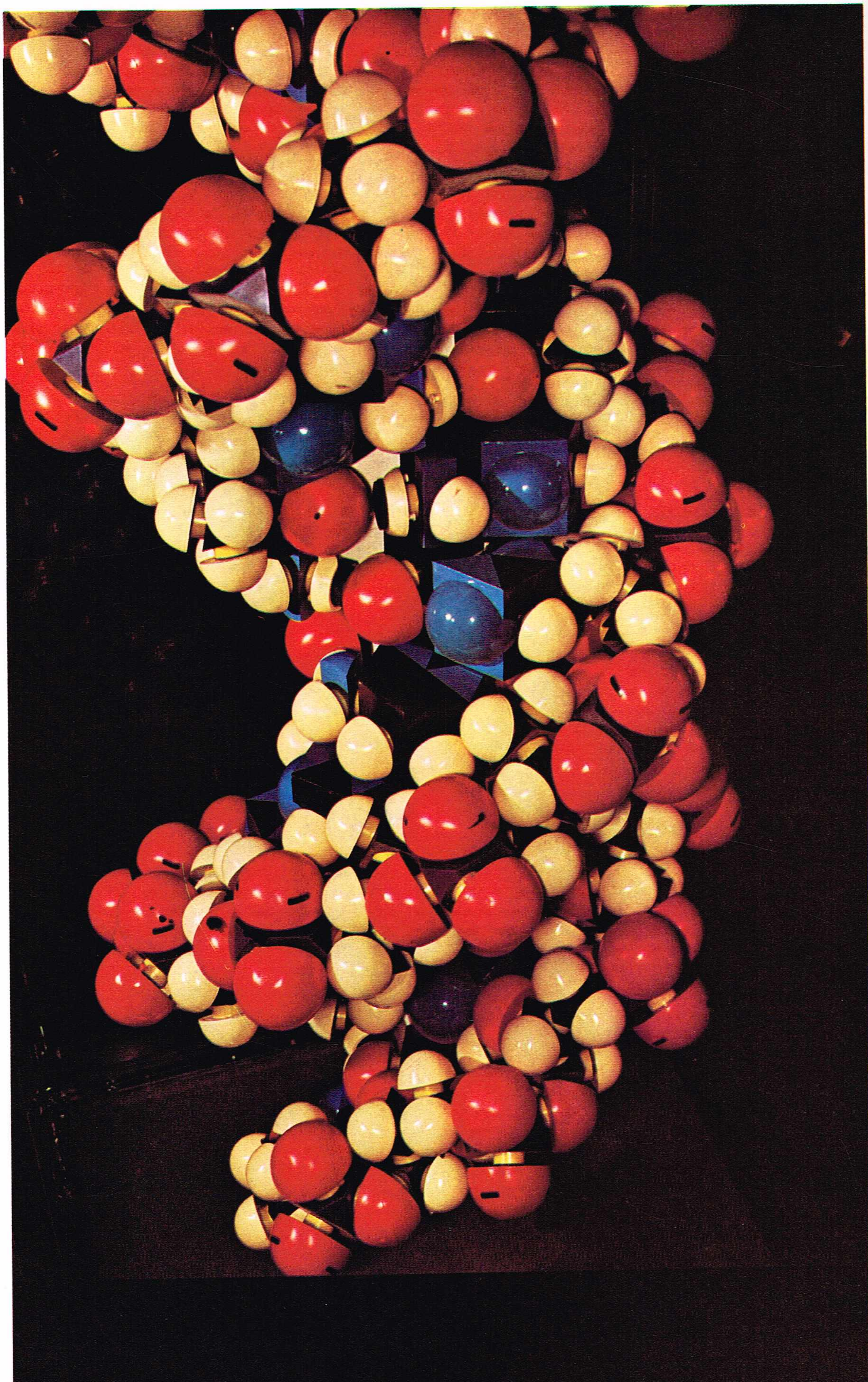

Corson - Fotogram

▶ *Modèle de la molécule d'ADN (acide désoxyribonucléique) : c'est une double hélice de deux chaînes polynucléotidiques reliées par des « ponts » hydrogène.*

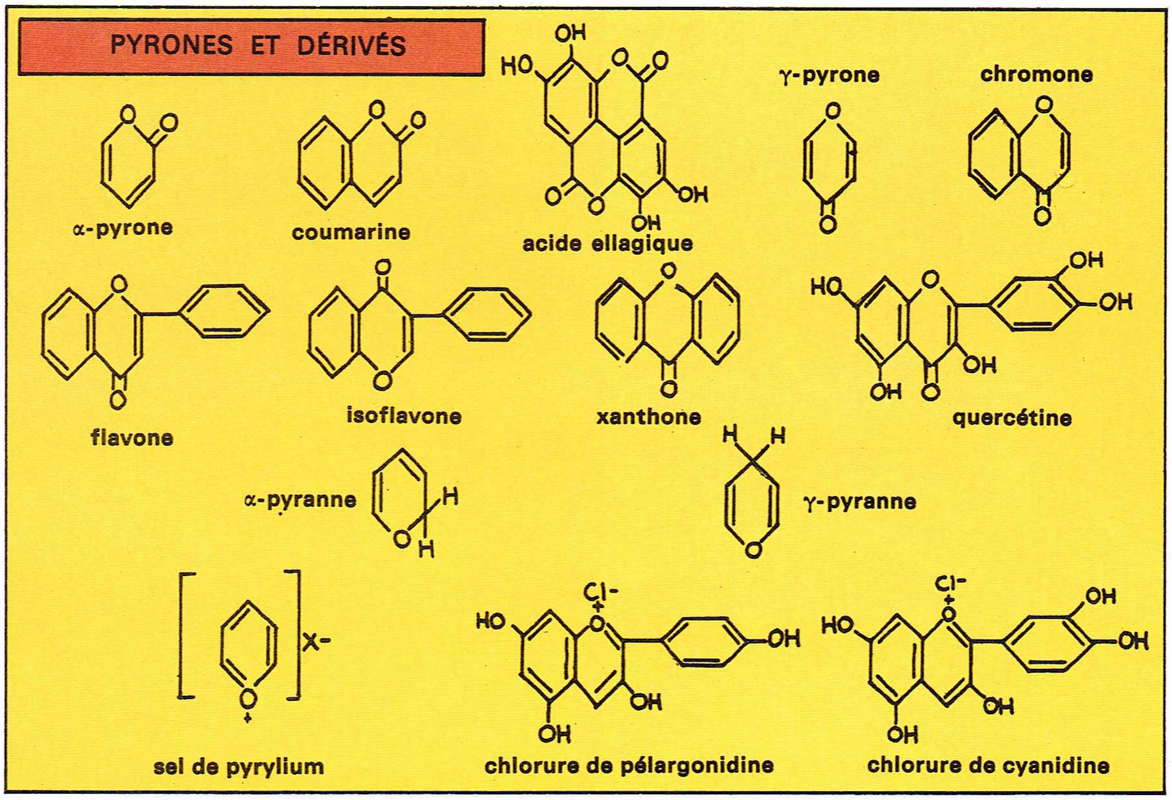

◄ *Formes cycliques de quelques* pyrones *et de leurs dérivés.*

Les **acides nucléiques** sont composés de sous-unités structurales ou *nucléotides*. Les nucléotides sont composés d'un hétérocycle azoté purique ou pyrimidique, d'un sucre à cinq atomes de carbone (pentose) et d'une molécule d'acide phosphorique.

Il existe deux types principaux d'acides nucléiques : les *acides ribonucléiques* (ARN) et les *acides désoxyribonucléiques* (ADN). Dans les premiers, les bases azotées sont l'adénine, la guanine, la cytosine et l'uracile; le sucre est le ribose. Dans les seconds, l'uracile est remplacé par la thymine, et le sucre est le désoxyribose, un dérivé réduit du ribose. Les nucléotides sont unis par des liaisons diesterphosphoriques, formant ainsi de longues chaînes. Grâce à Watson, on sait que l'acide désoxyribonucléique, qui porte l'information nécessaire à la direction de la croissance et de la reproduction de la cellule (code génétique), est une double hélice de deux chaînes polynucléotidiques reliées par des « ponts » hydrogène.

Pyrones

Ces composés appartiennent au groupe des hétérocycles mais sont généralement traités avec les aromatiques en raison de l'importante délocalisation électronique par recouvrement π des orbitales des doubles liaisons de l'oxygène du cycle et du carbonyle. Elles doivent leur importance à leurs dérivés que l'on rencontre dans les composés naturels.

Ainsi, l'α-**pyrone** entre dans la constitution de stupéfiants, de médicaments et de colorants. La **coumarine (benzo α-pyrone)** se trouve dans le trèfle.

Les dérivés de la γ-**pyrone** sont plus nombreux. Les **chromones** (dérivés de la benzo γ-pyrone) se trouvent dans les pigments du règne végétal. La **flavone,** l'**isoflavone** et la **xanthone** constituent le squelette de base de certains colorants végétaux, contenus en particulier dans le bois de campêche. Les **anthocyanes** sont des dérivés de la flavone comportant dans leur molécule un groupe glucosidique. Ces pigments confèrent aux fleurs et aux fruits leurs couleurs.

Indigo

C'est un colorant naturel important qui entre dans le groupe des hétérocycles. On le trouve dans certains végétaux sous forme d'**indican** qui est un glucoside de l'hydroxy-3 indole. L'hydrolyse de l'indican fournit l'indoxyle (hydroxy-3 indole) qui s'oxyde ensuite à l'air pour donner l'**indigo** :

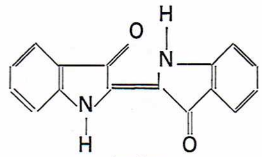

indigo

Quinones

L'oxydation de l'**hydroquinone** et de la **pyrocatéchine** conduit à deux composés : la **para-** et l'**ortho-benzoquinone** :

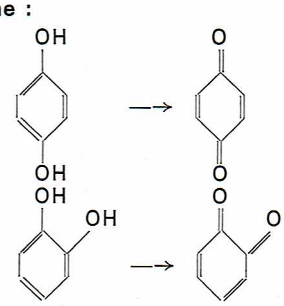

Bien que n'ayant plus la structure aromatique du noyau benzénique, les quinones ont une stabilité supérieure à celle de dicétones cycliques. Ce sont des solides jaunes, volatils, d'odeur forte, et possédant des propriétés oxydantes. Les quinones peuvent être réduites en **diphénols** correspondants :

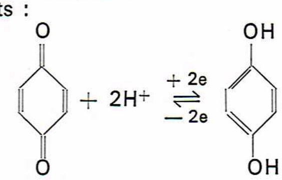

En fait, le système d'oxydoréduction décrit ci-dessus se complique de l'existence d'un complexe de transfert de charge entre une mole de quinone et une mole d'hydroquinone; c'est la **quinhydrone.** Le système quinone-hydroquinone trouve une application comme révélateur photographique. Le développement de l'image consiste en une réduction des particules de bromure d'argent activées par la lumière :

▼ *L'*hydroquinone *est souvent utilisée pour ses propriétés antioxydantes, mélangée à diverses substances (ici à une résine méthacrylique).*

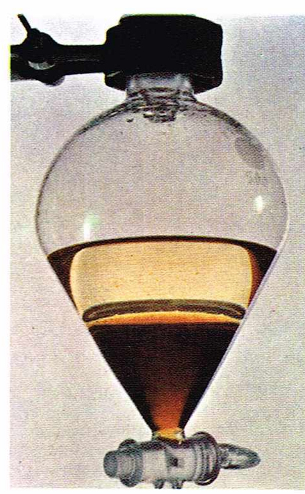

P. Castano

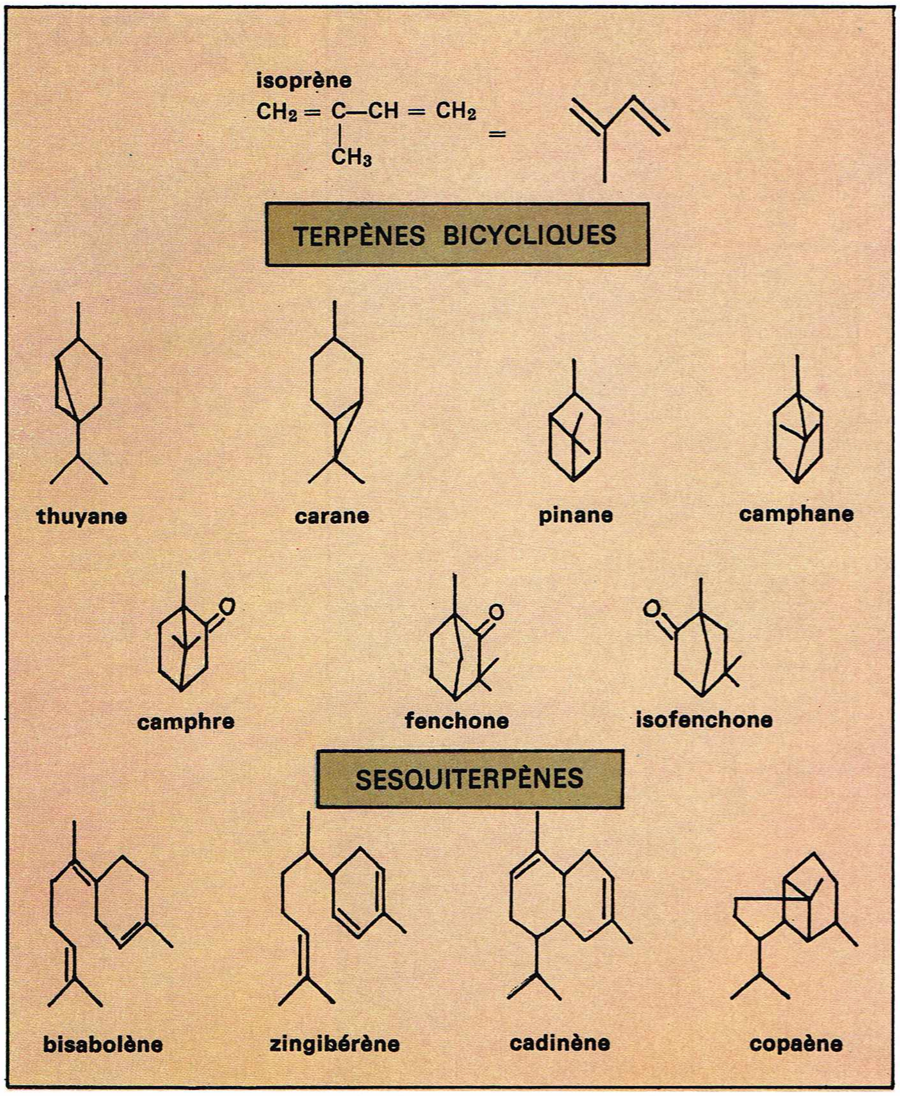

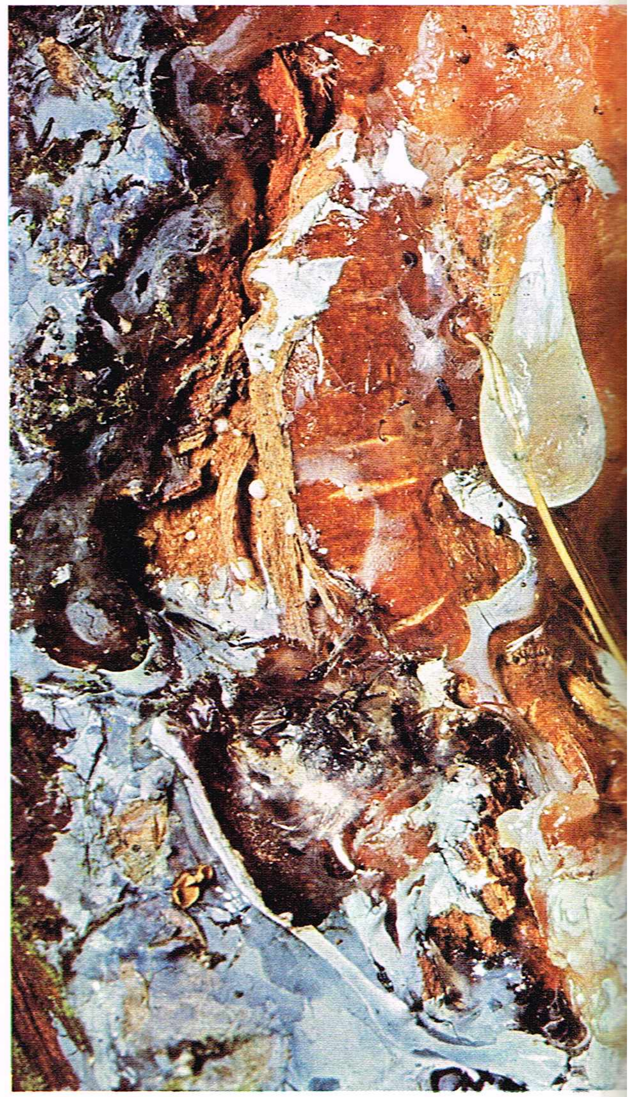

▲ *Formules cycliques de quelques* terpènes bicycliques *et* sesquiterpènes*; ce sont des composés organiques considérés comme dérivant de la polymérisation de l'*isoprène.

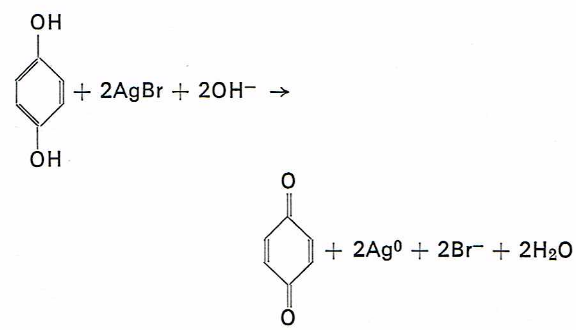

La **naphtoquinone**, que l'on peut obtenir par oxydation du naphtalène, est un intermédiaire important pour la préparation des colorants, ainsi que l'anthraquinone, qui résulte de l'oxydation nitrique de l'anthracène :

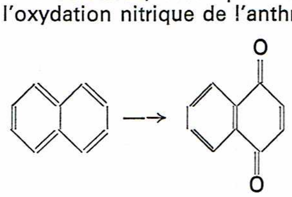

et :

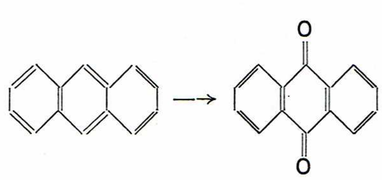

Terpènes - Terpénoïdes

Les terpènes sont des composés organiques caractérisés par la répétition d'un motif unitaire à 5 atomes de carbone qui les fait considérer comme dérivant de la polymérisation de l'isoprène :

$$CH_2 = \underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{C}}—CH = CH_2.$$

Lorsque, sur le terpène répondant à cette définition, sont fixées des fonctions (alcool, cétone, etc.), on le classe dans les *terpénoïdes.*

Les terpénoïdes sont divisés en différents groupes selon le nombre d'unités isopréniques qui les composent. On distingue les hémiterpénoïdes (C_5), les monoterpénoïdes (C_{10}), les sesquiterpénoïdes (C_{15}), les diterpénoïdes (C_{20}), etc.

Les *terpènes* (composés en C_{10}) sont des hydrocarbures volatils présents dans de nombreuses essences végétales; on les utilise en particulier en parfumerie. A ces terpènes vrais, il faut ajouter les alcools, aldéhydes, cétones et autres composés qui en dérivent. Parmi les terpènes les plus importants, on peut citer le **pinène,** principal constituant de l'essence de térébenthine, et le **camphre,** utilisé comme plastifiant et pour la synthèse de certains insecticides. Certains monoterpènes acycliques peuvent, en se cyclisant, se transformer en hydrocarbures aromatiques qui s'oxydent ensuite en phénols.

Les *sesquiterpènes* (composés en C_{15}) ont des structures aliphatiques, mono- ou polycycliques. Parmi les non-cycliques on peut citer le **farnésol,** dans les monocycliques le **bisabolène,** dans les bicycliques le **cadinène,** et dans les tricycliques l'α-**santalène.**

J.-P. Bourret - Pitch

◀ ***L'acide abiétique** est un acide résinique résultant de l'isomérisation de la colophane (résine de pin), sous l'effet de la chaleur.*

Parmi les *diterpènes* (composés en C_{20}), le **phytol** entre dans la constitution de la molécule de chlorophylle ; la **vitamine A** est constituée par une chaîne isoprénique fixée à un noyau β-ionone. Les **acides agathique** et **abiétique** sont des acides résiniques, le dernier résultant de l'isomérisation de la colophane (résine de pin) sous l'effet de la chaleur.

Parmi les *triterpènes* (composés en C_{30}) le **squalène** est extrait de l'huile de foie de requin, et l'**ambréine,** l'un des composants de l'ambre gris, est produit par le *spermaceti.*

A la catégorie des *tétraterpènes* (composés en C_{40}) appartiennent les colorants caroténoïdes, qui comprennent le **lycopène** (rouge), colorant des tomates, le **carotène** (jaune), colorant des carottes, et dont la structure s'apparente à celle de la vitamine A, la **zéaxanthine,** colorant jaune du maïs, la **fucoxanthine,** colorant des Algues, l'**astacine,** colorant des Crustacés, la **crocétine,** l'**auroxanthine,** etc.

Le **caoutchouc naturel** est un polyterpène acyclique de formule brute $(C_5H_8)_n$. Il résulte de la coagulation du latex de l'arbre à caoutchouc *(Hevea brasiliensis).* Sa formule développée :

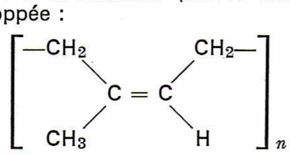

correspond à la polyaddition en 1,4 de molécules d'isoprène. La chaîne hydrocarbonée étant toujours en position cis par rapport à la double liaison, il s'agit du polyisoprène 1,4 cis. La *guttapercha* et le *balata* sont constitués par du polyisoprène 1,4 trans et n'ont pas les

N. Cirani

◀ *Détail de l'exploitation d'un arbre à caoutchouc (du genre **Hevea**) ; une coupelle collecte le **latex** qui sourd des incisions pratiquées sur l'écorce.*

▶ *Une des étapes de l'utilisation du* **latex** *pur : la mise en plaque (Ceylan).*

M. Sester - Pitch

propriétés élastomériques du caoutchouc naturel. L'hévéa ne synthétise pas son latex en partant d'isoprène, mais les chimistes ont pu, par polymérisation stéréorégulière de ce diène, obtenir industriellement un polyisoprène 1,4 cis en tout point semblable au caoutchouc naturel. A cause de la présence de doubles liaisons dans sa molécule, le polyisoprène est sensible à l'oxydation et se dégrade progressivement à l'air. On le stabilise avec des antioxydants. Par ailleurs, ses propriétés élastiques, en particulier son allongement et sa résistance à la traction, sont obtenues grâce à la vulcanisation, ou traitement par le soufre à chaud. Dans de nombreux usages, le caoutchouc naturel a été remplacé par des caoutchoucs synthétiques.

▼ *Une des étapes du traitement industriel du* **latex.**

L. Ionesco - Réalités

Composés cycliques

Cycloheptane et dérivés

Ce sont des composés difficiles à synthétiser et sans utilisations, cependant certains d'entre eux présentent un certain intérêt théorique, c'est le cas de l'**azulène.** C'est un composé bicyclique, isomère du **naphtalène** dans lequel il se transforme par chauffage à l'abri de l'air au-dessus de 350 °C :

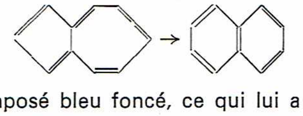

C'est un composé bleu foncé, ce qui lui a valu le nom d'azulène.

Tropolones

Ce sont des composés à caractère aromatique non benzénique présentant un cycle à 7 atomes de carbone. Ils ont été, à l'origine, extraits de produits naturels. Ainsi, l'essence du cèdre de Formose renferme de l'**isopropyl-4 tropolone.** La **tropolone** elle-même est un cycloheptatriène sur lequel sont fixées sur deux carbones voisins une fonction cétone et une fonction alcool. On peut la préparer avec un faible rendement par oxydation du tropilidène par le permanganate de potassium en milieu alcalin.

Cyclo-octane et dérivés

On peut synthétiser des cycles à 8 atomes de carbone soit à partir d'acétylène, soit à partir de butadiène. La synthèse de Reppe du **cyclo-octatétraène** consiste à faire réagir l'acétylène vers 50 °C en présence d'un catalyseur à base de nickel :

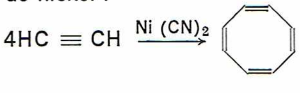

C'est un composé jaune intense qui, bien qu'ayant une structure rappelant celle du benzène, n'a pas de caractère aromatique. Sa formule n'est pas plane, et deux liaisons non adjacentes peuvent être suffisamment voisines l'une de l'autre dans l'espace pour former un complexe avec les métaux de transition. C'est par des catalyseurs du type Ziegler-Natta, semblables à ceux qui permettent la polymérisation stéréorégulière du butadiène, que l'on peut doubler ce dernier en **cyclo-octadiène-1,5**

$$2CH_2 = CH—CH = CH_2 \xrightarrow[\text{du titane}]{\text{complexe}}$$ 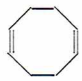

Cyclododécane et dérivés

Certains catalyseurs à base de complexes du nickel permettent de former un cycle à 12 atomes de carbone comme le **cyclododécatriène-1, 5, 9** à partir du butadiène :

$$3CH_2 = CH—CH = CH_2 \xrightarrow[\text{du nickel}]{\text{complexes}}$$ 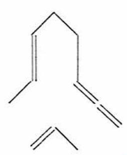

cyclododécatriène-1, 5, 9

L'hydrogénation de ce cycle conduit au **cyclododécane** qui est le point de départ de la synthèse du Nylon 12 en passant par le lauryllactame.

Composés cycliques supérieurs

Les **annulènes** sont des polyènes cycliques conjugués à nombre important d'atomes de carbone. Une méthode élégante pour obtenir l'annulène à 18 atomes de carbone consiste à cycliser trois molécules d'hexadiyne-1,5, à isomériser et à hydrogéner les triples liaisons du cycle en liaisons doubles.

Les composés organométalliques

Ce sont des substances organiques possédant des liaisons carbone-métal. Leur importance est due à leurs grandes possibilités réactionnelles et à leur utilisation comme catalyseurs. La réactivité des composés organométalliques dépend de la nature plus ou moins ionique de la liaison métal-carbone. Cette liaison est pratiquement ionique dans l'acétylure de sodium ; elle est covalente dans le plomb tétraéthyle.

Les organo-alcalins

Les organo-alcalins sont préparés par action d'un halogénure organique sur le métal lui-même. C'est ainsi que l'on prépare le **butyl-lithium** :

$$C_4H_9—Br + 2Li \rightarrow C_4H_9Li + LiBr.$$

On opère en général dans l'éther. Il faut éviter la présence d'eau ou d'autres composés protoniques susceptibles de décomposer l'organo-alcalin. On peut aussi substituer un hydrogène « acide » d'un hydrocarbure par le métal d'un organo-alcalin moins acide. C'est ainsi que l'on prépare le **benzyl-sodium** :

$$C_6H_5—CH_3 + R—Na \rightarrow C_6H_5CH_2Na + RH.$$

Les organosodiques et les organolithiens sont utilisés comme catalyseurs de polymérisation des diènes conjugués.

Les organomagnésiens

Les composés organomagnésiens, encore appelés réactifs de Grignard, du nom de celui qui les a découverts (prix Nobel en 1912), sont des composés mixtes organiques et halogénés du magnésium. On les obtient par action d'un halogénure organique en solution dans l'éther sur du magnésium en tournures :

$$RX + Mg \xrightarrow{\text{éther}} RMgX.$$

L'éther n'est pas un solvant totalement inerte dans la réaction ; ses molécules sont coordonnées au magnésium par l'intermédiaire des doublets électroniques libres sur l'oxygène.

Les réactions des réactifs de Grignard sont très nombreuses. Ils réagissent avec les composés à hydrogène mobile (alcools, acétylène, amines, etc.). Ils s'additionnent aux groupements carbonyles des aldéhydes et des cétones. Ainsi, l'addition aux aldéhydes suivie d'hydrolyse fournit des alcools secondaires :

$$RMgX + R'—CHO \rightarrow RR'CHOMgX \rightarrow RR'CHOH.$$

Ils s'additionnent aux nitriles, et l'hydrolyse de leur produit d'addition conduit à une cétone en passant par l'imine, etc.

RÉACTIONS DES ORGANOMAGNÉSIENS

1° Préparation du réactif :

$$CH_3X + Mg \rightarrow CH_3MgX$$

2° Synthèses d'hydrocarbures à partir d'alcools, dérivés halogénés, etc. :

a) $CH_3MgX + CH_3OH \rightarrow CH_3—CH_3 + MgX(OH)$

b) $CH_3MgX + CH_2 = CH—CH_2X \rightarrow CH_2 = CH—CH_2—CH_3 + MgX_2$

c) $CH \equiv CH + C_2H_5MgX \rightarrow CH \equiv C—MgX + CH_3—CH_3$

$CH \equiv C—MgX + CH_3X \rightarrow CH \equiv C—CH_3 + MgX_2$

3° Synthèse des acides :

$$CH_3MgX + CO_2 \rightarrow CH_3—C(=O)—OMgX \xrightarrow{H_2O} CH_3—C(=O)—OH + MgX(OH)$$

4° Synthèse des alcools à partir d'aldéhydes, cétones ou esters :

$$CH_3MgX + CH_3—C(=O)—H \rightarrow CH_3—CH(OMgX)—CH_3 \xrightarrow{H_2O} CH_3—CH(OH)—CH_3 + MgX(OH)$$

5° Synthèse d'alcools à partir d'époxydes :

$$CH_3MgX + CH_2—CH_2 (—O—) \rightarrow CH_3—CH_2—CH_2—OMgX \xrightarrow{H_2O} CH_3—CH_2—CH_2OH + MgX(OH)$$

◀ *Schéma des diverses* **réactions des organomagnésiens.**

Les organo-aluminiques

Ils doivent leur importance industrielle actuelle aux travaux de K. Ziegler. Ce sont des trialkylaluminiques comme l'**aluminium triéthyle** ou des chloroalkylaluminiques comme le **chlorodiéthylaluminium** et le **dichloroéthylaluminium.** Ce sont des composés électroniquement déficients qui peuvent exister sous forme de dimères, par exemple le **chlorodiméthylaluminium :**

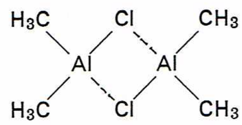

ou qui peuvent se coordiner avec certains solvants comme les éthers :

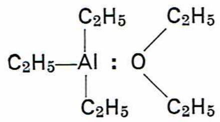

Les alkylaluminiques, de faible masse moléculaire, sont spontanément inflammables à l'air; ils réagissent violemment avec l'eau et avec l'oxygène.

Ils peuvent fixer plusieurs molécules d'éthylène pour former des alkylaluminiques supérieurs :

$$AlR_3 + 3nCH_2 = CH_2 \rightarrow Al[(CH_2{-}CH_2)_n\ R]_3$$

Par chauffage, ces alkylaluminiques à longue chaîne fournissent une oléfine à $2n + 2$ atomes de carbone et régénèrent l'alkylaluminique. Ce processus, découvert par K. Ziegler, est utilisé industriellement pour la synthèse d'oléfines à chaîne linéaire et à nombre pair d'atomes de carbone. Si l'alkylaluminique à longue chaîne est traité par l'oxygène, il se forme un alcoolate d'aluminium, qui, hydrolysé, fournit un alcool linéaire et de l'alumine :

$$Al\ [(CH_2{-}CH_2)_n\ CH_2{-}CH_3]_3 + 3/2O_2 \rightarrow Al\ [O\ (CH_2{-}CH_2)_n\ CH_2{-}CH_3]_3$$
$$\downarrow H_2O$$
$$Al\ (OH)_3 + 3HO\ (CH_2{-}CH_2)_n{-}CH_2{-}CH_3$$

Les organo-aluminiques sont aussi utilisés pour la préparation de catalyseurs de polymérisation stéréospécifique des oléfines et des diènes conjugués (catalyseurs Ziegler-Natta). Dans ce cas, ils sont associés dans des complexes avec certains métaux de transition comme le titane, le nickel, le vanadium, etc.

Plomb tétraéthyle et plomb tétraméthyle

Ces deux composés organométalliques sont utilisés comme agents antidétonants dans les essences. On les prépare par action du chlorure d'éthyle (ou de méthyle) sur l'alliage plomb-sodium :

$$4C_2H_5Cl + 4PbNa \rightarrow (C_2H_5)_4\ Pb + 4NaCl + 3Pb.$$

Ces organométalliques ne sont pas additionnés seuls à l'essence, mais avec du dibromo-éthane (éthyl fluid), la fonction du dibromo-éthane étant de solubiliser les oxydes de plomb qui se forment au moment de la combustion de l'essence et qui seraient néfastes pour le moteur.

Parmi les autres composés organométalliques, on peut citer le **chlorure d'éthylmercure,** qui présente des propriétés fongicides.

BIBLIOGRAPHIE

CRAM D.J. et HAMMOND G.S., *Chimie organique,* Gauthier-Villars, Paris, 1965. - GOULD E.S., *Mechanism and Structure in Organic Chemistry,* Holt-Rinehart et Winston, 1960. - JONES D.G., *Chemistry and Industry,* Clarenton Press, Oxford, 1967. - LOZAC'H N., *la Nomenclature en chimie organique,* Paris, 1967. - ROBERTS J.D. et CASERIO M.C., *Chimie organique moderne,* Édiscience, Paris, 1968. - ROCHOW E.G., *Organometallic Chemistry,* Reinhold, New York, 1964. - ROCHOW E.G., FLECK G., BLACKBURN T.R., *Chemistry Molecules that Matter,* Hold, Rinehart et Winston, New York, 1974. - SAMUEL D.M., *Industrial Chemistry, Organic,* The Royal Institute of Chemistry, London, 1972.

ANALYSE CHIMIQUE

L'*analyse chimique* est la décomposition d'une substance en ses constituants. Mais, plus communément, on emploie ce terme pour désigner l'ensemble des procédés auxquels il est nécessaire de soumettre une substance de composition inconnue pour en identifier les éléments constitutifs et déterminer les quantités de chacun d'eux. Mais l'analyse chimique est appelée à résoudre d'autres problèmes, comme la détection de la présence d'une substance donnée dans une solution, un solide ou un gaz, la détermination des quantités d'impuretés ou d'eau dans un échantillon, etc.

L'analyse chimique est donc une étape obligatoire dans l'étude d'un composé; elle s'impose de manière absolue dans toutes les branches de l'industrie chimique. Aussi les grandes et les moyennes entreprises chimiques ainsi que les laboratoires de recherche possèdent-ils pratiquement toujours un service d'analyse. Il existe en outre des laboratoires spécialisés, auxquels les petits établissements et les particuliers confient leurs analyses.

La *chimie analytique* étudie les procédés d'analyse, leurs applications aux différents problèmes, les erreurs inhérentes à chacun d'eux, et les instruments qu'il convient d'utiliser. Des analyses spéciales, comme celles relatives à certaines matières premières et à certains produits industriels, sont généralement du domaine de la chimie appliquée.

Laissant de côté les méthodes d'analyse qui relèvent d'une haute spécialisation, nous décrirons ici, dans ses lignes essentielles, l'analyse chimique et donnerons un aperçu de son développement actuel.

Parmi les problèmes qui se présentent au spécialiste de l'analyse chimique, deux revêtent une importance fondamentale : la détermination de la *nature* des éléments qui entrent dans la composition d'un échantillon et la détermination de la *quantité* de chacun d'eux. Aussi distingue-t-on tout naturellement l'**analyse qualitative** et l'**analyse quantitative.** Nous consacrerons à chacune de ces branches un développement séparé, tout en rappelant que, de nos jours, de nombreux instruments ou procédés d'analyse permettent des déterminations qualitatives et quantitatives presque simultanées.

Analyse qualitative

L'analyse qualitative a pour but de déterminer les éléments qui entrent dans la composition de l'échantillon examiné. Mais les modes de combinaison des éléments sont très divers; c'est la raison pour laquelle on a mis au point des procédés analytiques permettant l'identification d'un certain nombre d'ions et de molécules simples. Ainsi, en présence d'un échantillon de phosphate de magnésium et d'ammonium hexahydraté, $Mg(NH_4)PO_4 \cdot 6H_2O$, contenant les éléments magnésium, azote, phosphore, oxygène et hydrogène, on ne procède pas à l'identification de ces éléments, mais à celle du cation Mg^{++}, de l'anion PO_4^{---} et des molécules d'eau et d'ammoniac. Ainsi, en identifiant seulement quatre espèces chimiques au lieu de cinq éléments, il est possible d'avoir une idée beaucoup plus complète de la nature de l'échantillon.

Il convient toutefois de noter que, dans ce type d'analyse, on ne peut distinguer un échantillon constitué de sulfate de potassium et de carbonate de sodium d'un autre contenant du carbonate de potassium et du sulfate de sodium. Dans les deux cas, en effet, nous identifierons les cations sodium et potassium et les anions sulfate et carbonate, mais nous ne serons absolument pas en mesure de préciser comment ceux-ci sont combinés entre eux.

Les méthodes classiques d'analyse qualitative comprennent une série d'essais par voie sèche et par voie humide.

Les *essais par voie sèche* constituent les essais préliminaires, que l'on effectue sur la substance telle quelle; ils consistent à étudier le comportement de l'échantillon au chauffage (en présence ou non de carbone), à observer les éventuelles colorations que l'échantillon donne à la flamme, etc.

Les *essais par voie humide* exigent, en revanche, la dissolution de la substance, dans l'eau ou dans des acides,

ou la décomposition de celle-ci ; en général, une analyse systématique complète comporte la préparation de deux solutions, l'une acide pour la recherche des cations, l'autre basique pour celle des anions. L'analyse de la solution acide s'effectue selon un schéma dont les grandes lignes sont codifiées *(procédé systématique)*, qui conduit à séparer les cations en groupes analytiques distincts, chaque groupe étant ensuite traité de manière différente lors des réactions d'identification de chaque composant. Ce procédé, qui comporte plusieurs variantes, est aujourd'hui relativement peu employé, sauf à des fins didactiques, mais il possède le mérite indiscutable de grouper de nombreuses réactions caractéristiques, susceptibles de se révéler utiles, même en dehors du contexte systématique.

Dans l'analyse qualitative, l'idéal serait de disposer, pour chaque élément, de réactions caractéristiques rapides, se produisant toujours en présence de l'élément considéré et jamais en présence des autres *(réactions spécifiques)*. Certaines de ces réactions d'identification peuvent être obtenues avec des réactifs organiques ; en particulier, on utilise souvent des indicateurs en papier, qui prennent une coloration précise en présence de certains ions. Cette « spécificité » doit s'accompagner d'une « sensibilité » élevée, c'est-à-dire que la réaction doit se produire même en présence de très petites quantités d'éléments ou d'ions.

Généralement, les réactions les plus caractéristiques, donc les plus utiles, sont celles qui se produisent avec formation de précipités, avec apparition d'une coloration, ou encore avec dégagement de gaz facilement identifiables (par exemple à l'odeur).

Analyse par voie sèche

Les essais analytiques par voie sèche, qui, comme nous l'avons dit, n'impliquent pas la mise en solution de la substance, ne sont pas systématiques. Ils présentent néanmoins un grand intérêt, car ils permettent l'identification d'un grand nombre de substances, même présentes en très petites quantités, avec une rapidité remarquable et souvent une grande sensibilité ; en outre, ils donnent des indications utiles pour la mise en œuvre du procédé systématique de l'analyse. Par conséquent, les essais par voie sèche sont presque toujours effectués au début d'une analyse qualitative. Les principaux (dont quelques-uns sont intéressants aussi pour la détection de certains minéraux) sont les essais en tube fermé (avec ou sans addition de réactifs), en tube ouvert, à la flamme, avec des perles, ou sur charbon.

Essais en tube fermé

Un peu de la substance à étudier placée dans un *tube de verre* est chauffée lentement. Il peut se produire des modifications physiques significatives de la substance : la fusion, par exemple, peut être l'indice de la présence de sels de métaux alcalins ; la carbonisation se produit lorsque des substances organiques sont présentes. Certaines modifications de couleur peuvent avoir également une valeur indicative. Le dégagement de vapeur d'eau, qui se condense sur les parois froides vers l'extrémité supérieure de l'éprouvette, indique la présence de sels hydratés.

Il peut y avoir aussi dégagement de gaz, tels que l'oxyde de carbone, l'anhydride sulfureux, l'ammoniac, l'hydrogène sulfuré, tous incolores, et dont quelques-uns sont identifiables par des essais spécifiques, d'autres simplement à l'odeur. Parmi les gaz colorés susceptibles de se dégager, on trouve le bioxyde d'azote et le brome, de couleur rouge foncé, l'iode, de couleur violette.

Il existe aussi des substances qui se subliment sur les parois froides : par exemple, un sublimé blanc peut indiquer la présence de sel d'ammonium, de mercure ou des trioxydes d'arsenic et d'antimoine ; un sublimé jaune-orangé est dû généralement à la présence de soufre ou de trisulfure d'arsenic ; des sublimés gris ou noirs indiquent la présence de mercure, d'arsenic, d'antimoine, d'iode (qui donne en outre des vapeurs violettes), à l'état élémentaire.

Essais en tube ouvert

Par *tube ouvert*, on entend un tube coudé à angle obtus et dont les deux extrémités sont ouvertes. Les réactions qu'on y observe, en le chauffant, sont les mêmes que celles que nous venons d'indiquer, mais la forme du tube provoque à l'intérieur de celui-ci un courant d'air, qui agit comme oxydant. Cet essai est particulièrement adapté pour l'identification de gaz, alors que les essais en tube fermé sont supérieurs en ce qui concerne la formation de sublimés ; toutefois, certains sublimés peuvent être reconnus, même au moyen d'un essai en tube ouvert.

Essais à la flamme

Pour la réalisation de ces essais particulièrement importants, on utilise un *bec Bunsen*, alimenté au gaz de ville ; le bec Bunsen peut fonctionner en brûlant un courant de gaz (flamme réductrice), ou bien, lorsqu'on désire des températures plus élevées, un courant de gaz et d'air, ce dernier étant introduit par une ouverture spéciale pratiquée à la base de l'instrument (flamme oxydante). La chaleur de la flamme provoque l'excitation thermique de certains éléments, qui, en revenant à l'état initial d'énergie, émettent des radiations lumineuses de longueur d'onde caractéristique, ce qui peut donner à la flamme une coloration particulière, très utile pour la détermination qualitative (mais aussi quantitative) des éléments.

Pour l'exécution pratique de l'expérience, on utilise un mince *fil de platine*, soudé à l'extrémité d'une baguette de verre. On trempe le fil dans une solution concentrée d'acide chlorhydrique, puis on s'en sert pour recueillir un peu de substance, qu'on porte sur la flamme. Celle-ci prendra des colorations caractéristiques : elle sera d'un jaune intense et persistant pour le sodium, d'un violet clair pour le potassium et l'ammonium, d'un rouge présentant des tonalités légèrement différentes pour le lithium, le strontium et le calcium, verte pour le bore, vert-bleu pour le cuivre, vert jaunâtre pour le baryum, bleu livide pour l'antimoine, l'arsenic, le plomb, et le mercure.

T. Poggio

▲ ***Exemple de recherche des iodures ; l'addition d'un oxydant (ici de $K_2Cr_2O_4$) et le chauffage provoquent la sublimation de l'iode, qui se manifeste par l'apparition d'une coloration violet foncé.***

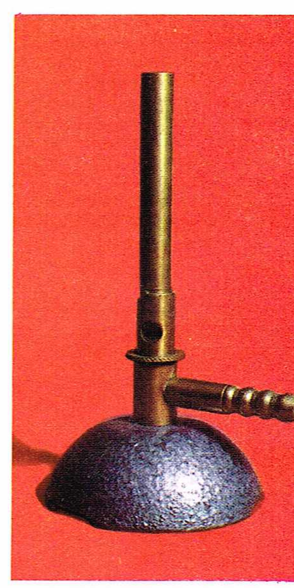

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▼ ***Un* bec Bunsen *(musée d'Histoire naturelle de Milan).***

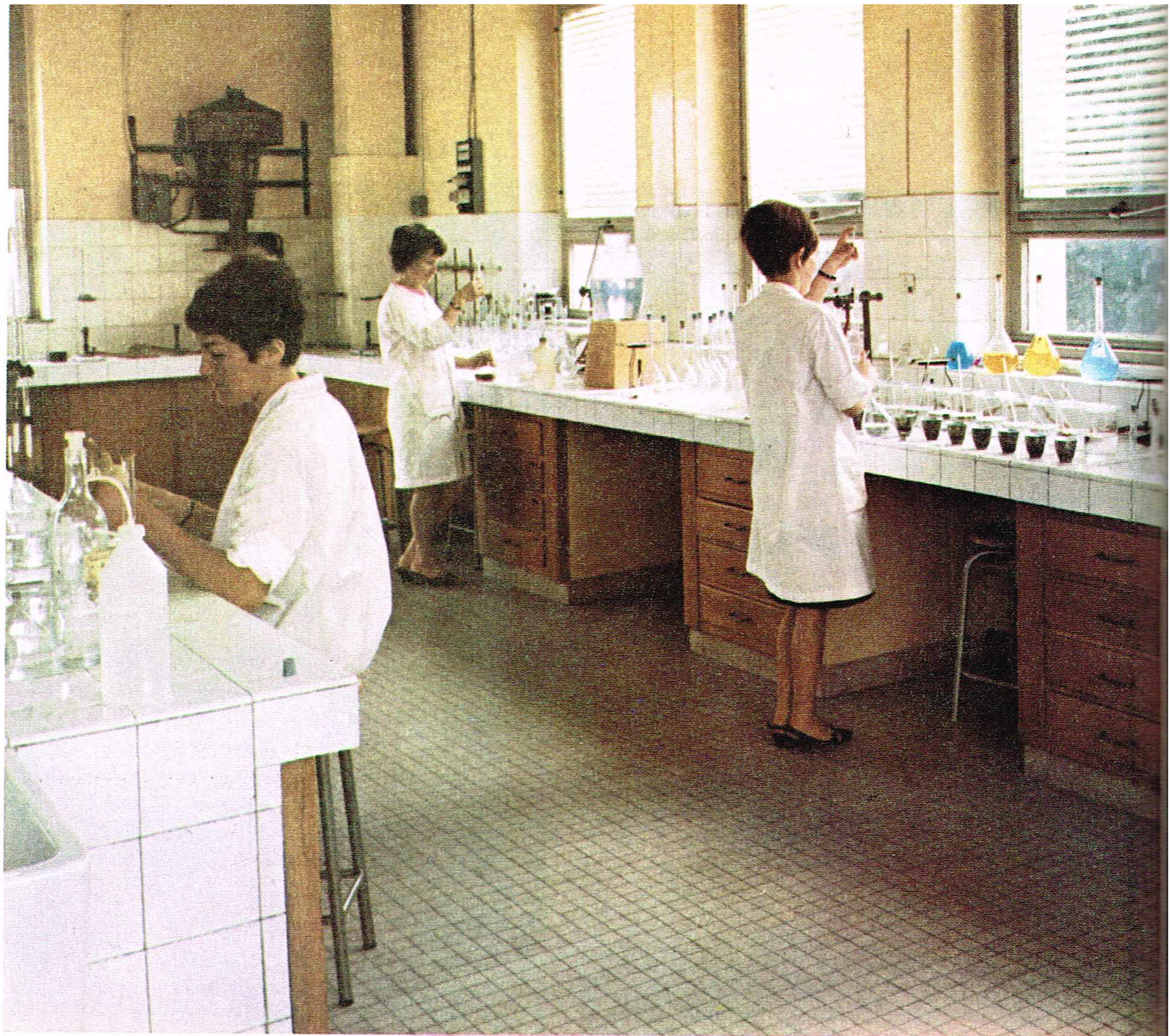

C.N.R.S.

▶ *Laboratoire de recherches pétrographiques et géochimiques : ici, analyse chimique des roches par les méthodes de la* voie humide.

L'extrême sensibilité de ces essais fait même apparaître les colorations caractéristiques d'éléments présents uniquement à l'état de traces ou d'impuretés ; cela est particulièrement valable pour le sodium, dont la flamme est très intense et persistante.

Essais avec les perles

Certains sels, plus particulièrement le borax et le phosphate monoacide de sodium et d'ammonium, se transforment, par fusion partielle à la flamme, en de nouveaux sels qui forment des masses sphériques vitreuses, incolores et transparentes, appelées *perles*. En présence de certaines substances, ces perles prennent des colorations caractéristiques, utilisées pour l'identification de quelques éléments chimiques.

Pour exécuter l'essai, il faut d'abord former la perle, en faisant fondre, à l'extrémité du fil de platine, recourbé en forme d'anneau, un peu de borax ou de phosphate. On refroidit la perle, on y dépose une très petite quantité de la substance à examiner et on la fait fondre à nouveau à la flamme oxydante ou réductrice (les essais à la flamme oxydante sont plus faciles et plus révélateurs), en ajoutant éventuellement des réactifs particuliers. La perle prend une coloration vert-bleu pour le cuivre, jaune (au borax) ou verte (au phosphate) pour le chrome, violette pour le manganèse, jaune brunâtre pour le fer, bleue pour le cobalt, rouge-violet pour le nickel. Mais un excès de substance provoque le dépôt d'oxydes métalliques à la surface, et la couleur devient trop foncée pour pouvoir être reconnue avec certitude.

Essais sur charbon

Pour ce type d'essais, on utilise des *tablettes de charbon de bois*, très poreuses ; la substance mélangée avec du carbonate de sodium, qui agit comme fondant, est placée dans un creux du charbon ; sur la flamme, le charbon opère la réduction des substances fondues, qui se rassemblent en sphérules, en paillettes ou en auréoles, tandis que les fractions infusibles forment des scories. On rend la flamme plus chaude en y insufflant de l'air à l'aide d'une mince canule métallique. On peut utiliser des flammes oxydantes ou réductrices. Une certaine expérience et, souvent, des essais de comparaison avec des substances connues sont nécessaires pour une appréciation correcte des résultats.

Analyse par voie humide

Après avoir mis en solution la substance à examiner, on procède, comme nous l'avons déjà indiqué, à la recherche des anions et à celle des cations, cette dernière ayant une importance prédominante.

Recherches des cations

Le procédé systématique consiste à précipiter les cations par groupes en utilisant des réactifs appropriés (dits *réactifs de groupe*), dans un ordre étudié, de telle manière que chaque agent précipitant puisse être éliminé après la précipitation du groupe qu'il sert à identifier, évitant ainsi qu'il ne gêne la poursuite de l'analyse. Les réactifs précipitants et les groupes dans lesquels sont répartis les cations sont donnés dans le tableau suivant :

Groupe I : Pb (II), Hg (I), Ag (I). Réactif : *acide chlorhydrique*.
Groupe II : Pb (II), Hg (II), Bi (III), Cu (II), Cd (II), As (III), Sb (III), Sn (II).
Réactif : *hydrogène sulfuré* (libéré *in situ* par chauffage du thioacétamide).
Groupe III : Fe (III), Al (III), Cr (III), Mn (II).
Réactif : *hydroxyde d'ammonium*.
Groupe IV : Mn (II), Zn (II), Co (II), Ni (II).
Réactif : *sulfure d'ammonium*.
Groupe V : Ba (II), Sr (II), Ca (II).
Réactif : *carbonate d'ammonium*.
Groupe VI : Mg (II), K (I), Na (I), Li (I) et NH_4^+.

Ce dernier groupe n'exige pas de réactifs spéciaux, car il constitue le résidu des réactions précédentes ; il est rarement analysé à ce stade ; les différents cations qui en font partie sont habituellement recherchés par voie sèche.

Pour la dissolution de l'échantillon, on utilise, dans l'ordre : l'eau, l'acide chlorhydrique dilué, puis l'acide nitrique ou l'eau régale. Si, après ces traitements, il subsiste un résidu non dissous, celui-ci est décomposé,

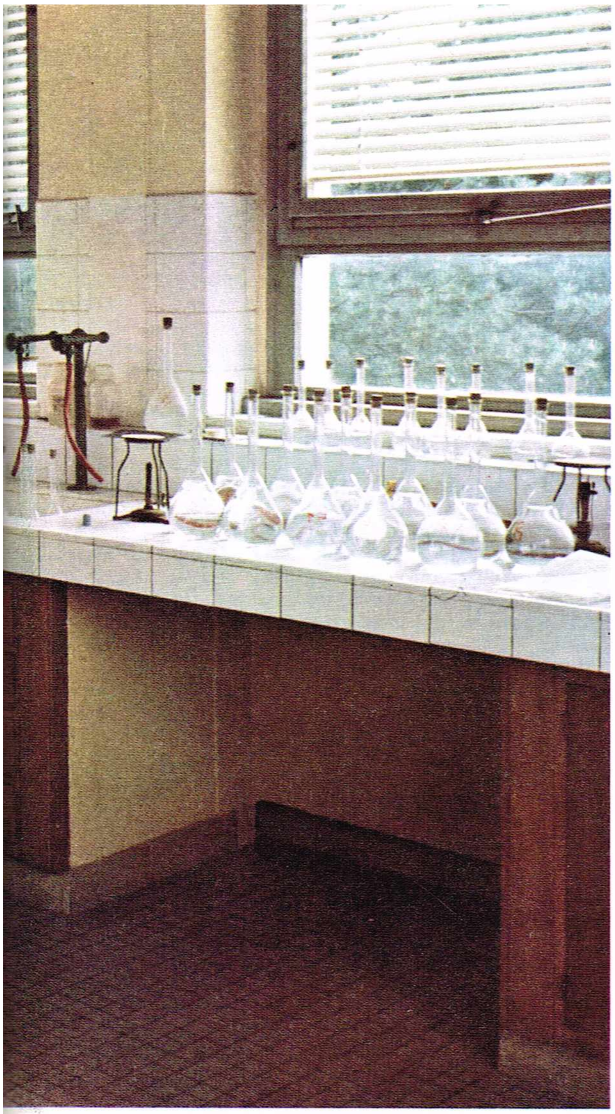

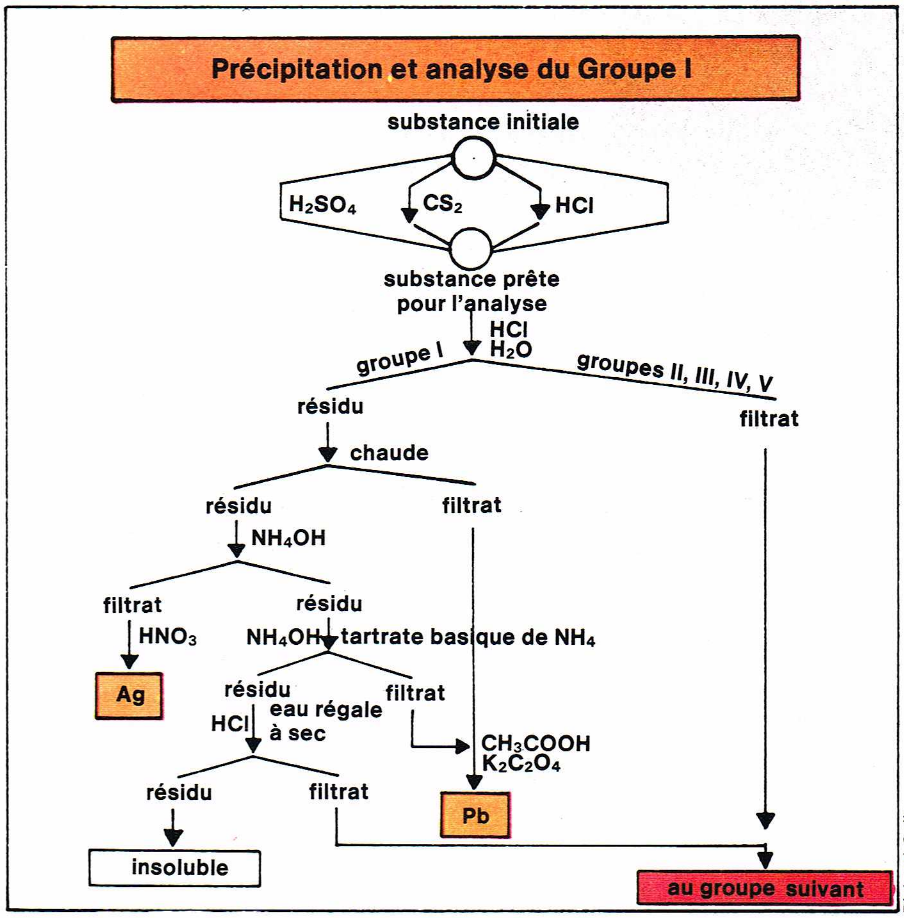

Richard Colin

▲ *Schéma illustrant la recherche des cations du* groupe I.

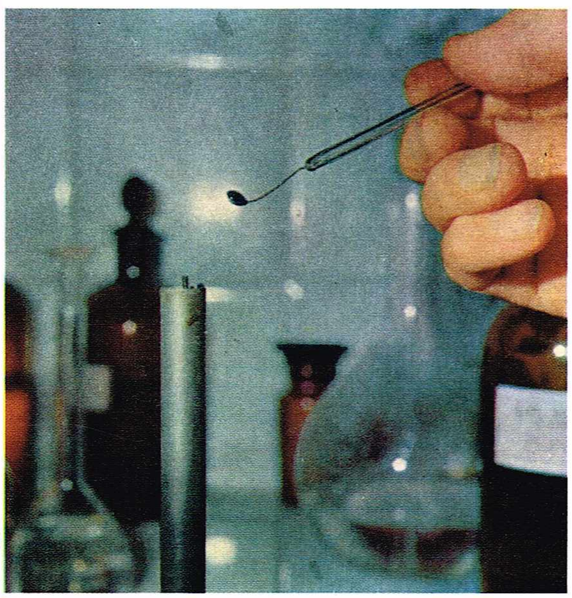

T. Poggio

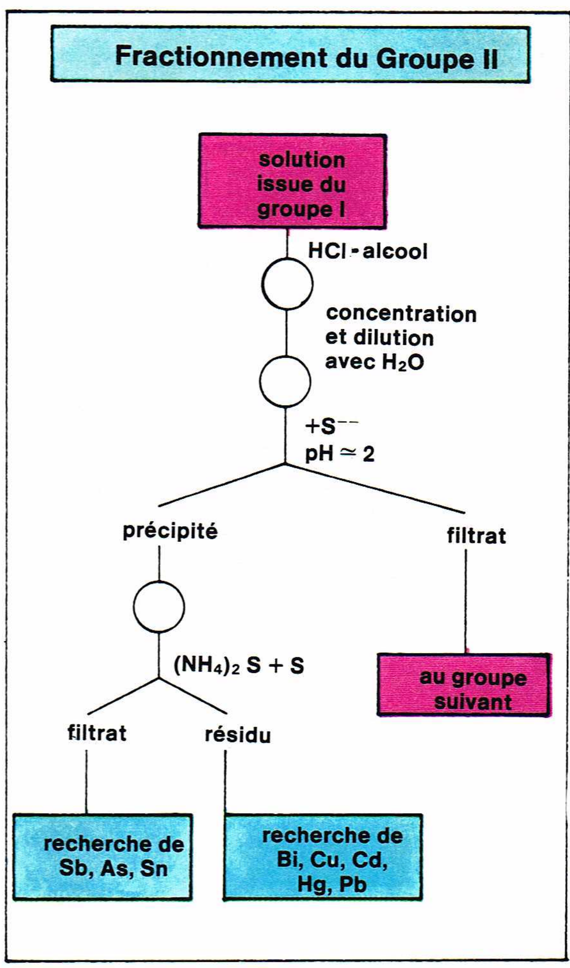

Richard Colin

◄ *A gauche, parmi les nombreuses méthodes de l'analyse qualitative par voie sèche, on compte les essais avec les perles. Cette photographie illustre un exemple d'essai avec perles de borax; la coloration bleue de la perle révèle la présence de cobalt. A droite, schéma illustrant le fractionnement des cations du* groupe II.

puisqu'il ne peut être porté en solution d'une autre manière. D'éventuelles substances organiques et des dérivés du cyanogène perturbent le bon déroulement de l'analyse et doivent donc être détruits avant cette opération.

La solution ainsi obtenue est traitée successivement par les réactifs de groupe; à chaque stade, le précipité est séparé par filtration ou centrifugation (cette dernière est préférable si la technique suivie est celle de la semi-microanalyse, qui exige peu de substance).

Précipitation des groupes analytiques

● *Groupe I*. En traitant le mélange examiné par l'acide chlorhydrique aqueux, on obtient la dissolution complète, sauf pour les cations du groupe I et pour l'éventuel résidu insoluble, qui est traité à part.

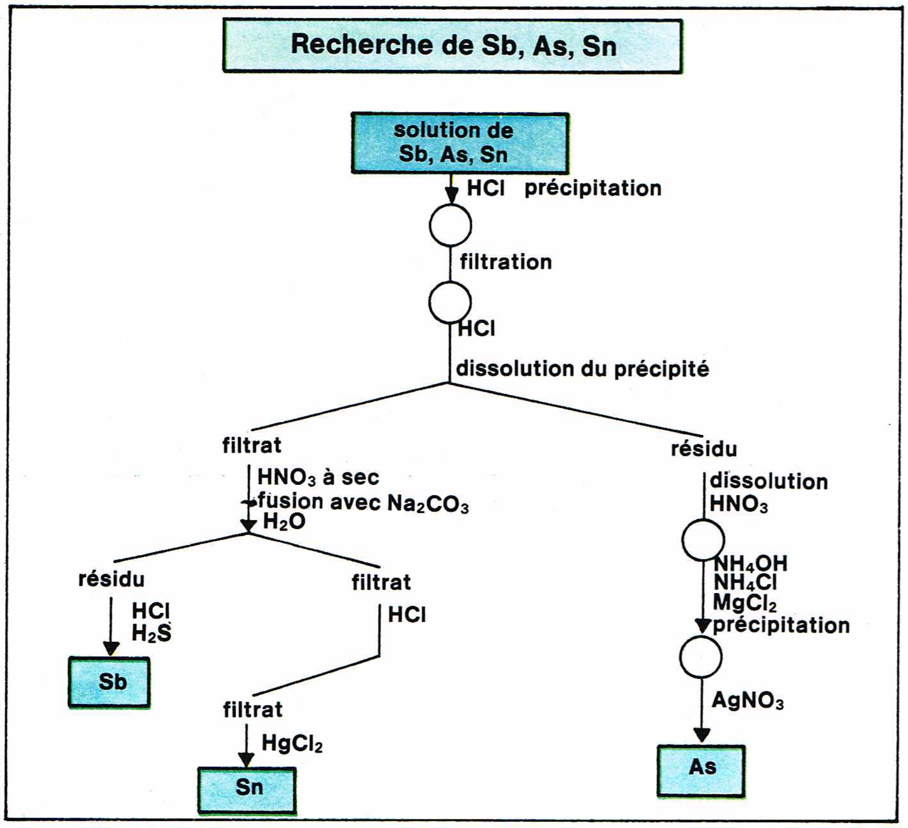

Richard Colin

• *Groupe II*. La précipitation du groupe II est une des opérations les plus délicates du procédé, puisque son issue dépend étroitement du pH de la solution, qui doit être bas, afin de ne pas provoquer la précipitation des sulfures solubles dans les acides (ceux du groupe IV), mais pas trop, sinon la précipitation ne serait pas quantitative pour les sulfures du groupe II. On débute généralement à pH 0,5, pour atteindre progressivement pH 2 afin de s'assurer que la précipitation est complète ; la mesure du pH s'effectue à l'aide de *papiers indicateurs*. Au lieu de l'hydrogène sulfuré, qui est un gaz toxique, on préfère employer le thiocétamide, réactif organique qui, par chauffage, se décompose facilement en formant *in situ* de l'hydrogène sulfuré. Les précipités ont une couleur légèrement différente de celle obtenue avec l'hydrogène sulfuré. Le thioacétamide est facilement oxydé par l'acide nitrique, avec formation de soufre, et il est facile de l'éliminer avant la poursuite de l'analyse.

En présence de chromates, de permanganates et d'autres substances fortement oxydantes, il peut se former du soufre durant la précipitation du groupe II ; dans ce cas, il convient de réduire d'abord ces substances et de n'ajouter le thioacétamide qu'ensuite. Dans le groupe II précipitent le mercure, le plomb, le bismuth, le cuivre, le cadmium, l'arsenic, l'antimoine et l'étain.

• *Groupe III*. Après avoir réalisé la précipitation du groupe II et éliminé l'excès de thioacétamide, on précipite le groupe III par l'hydroxyde d'ammonium en présence d'une certaine quantité de chlorure d'ammonium, pour empêcher la précipitation du magnésium éventuellement présent. Mais, dans ces conditions, on empêche aussi la précipitation du manganèse (II) ; il faut cependant en effectuer la recherche et la séparation dans le groupe, puisque, par suite de l'oxydation à l'air, une partie de celui-ci peut précipiter comme hydroxyde de manganèse (III) : MnO(OH).

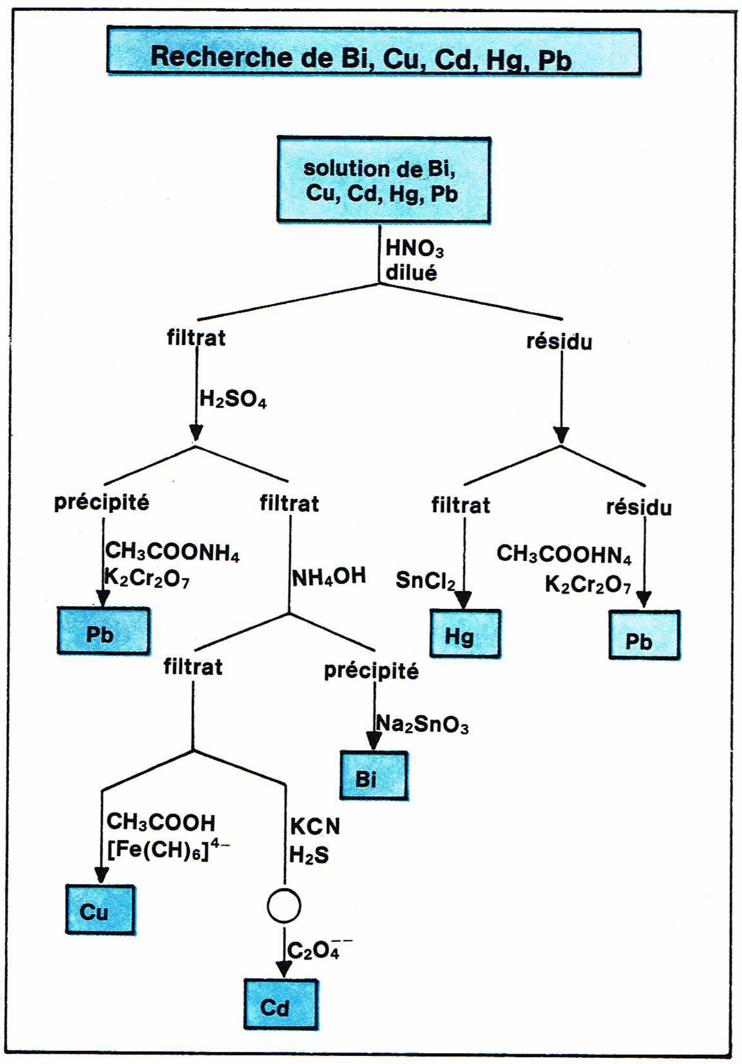

Richard Colin

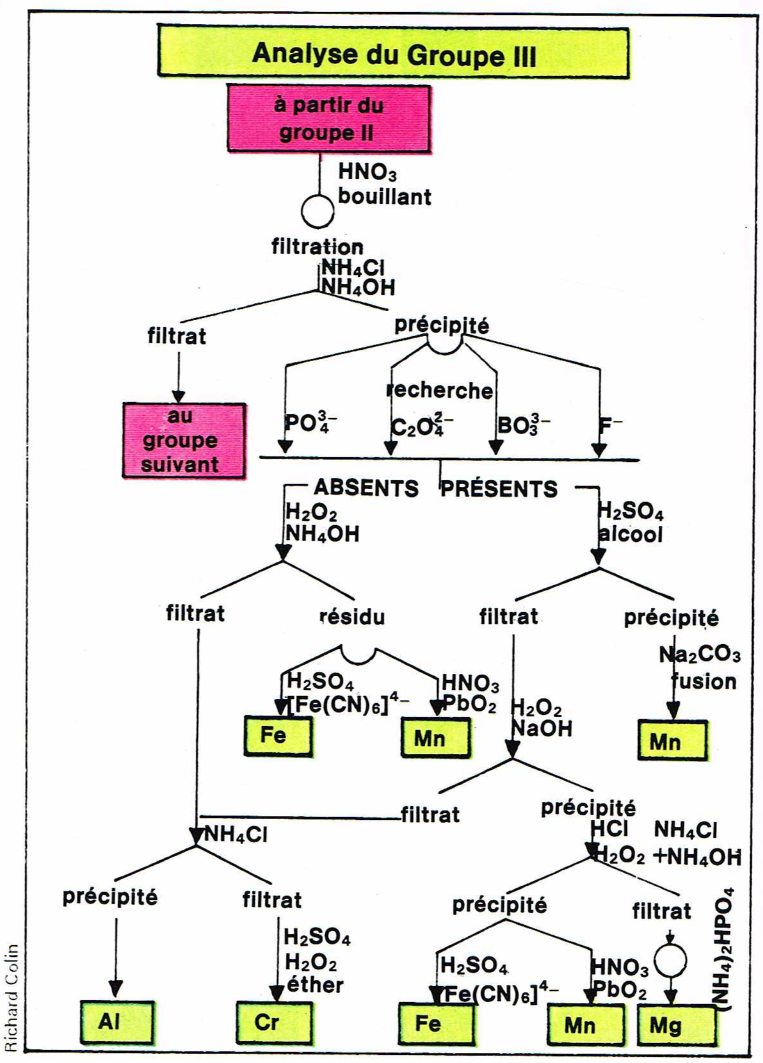

Richard Colin

Richard Colin

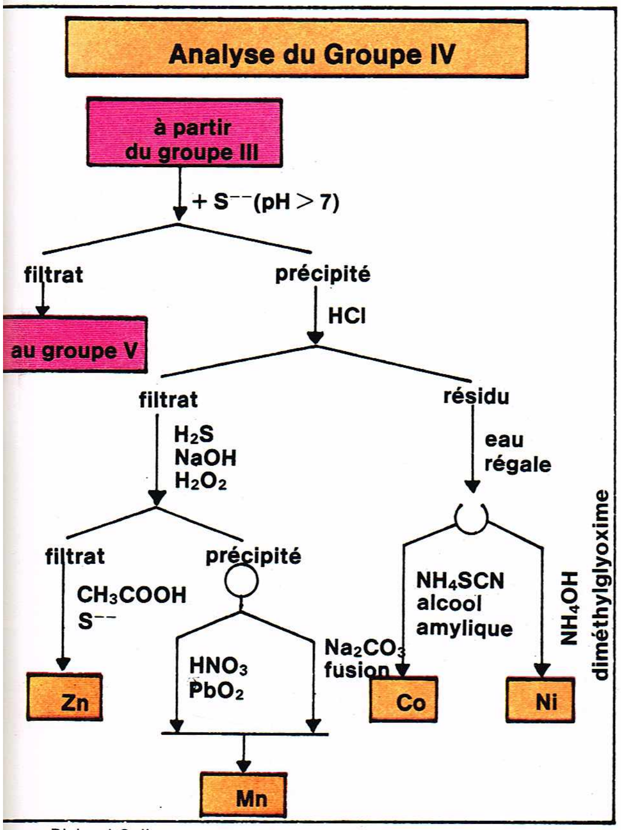

Richard Colin

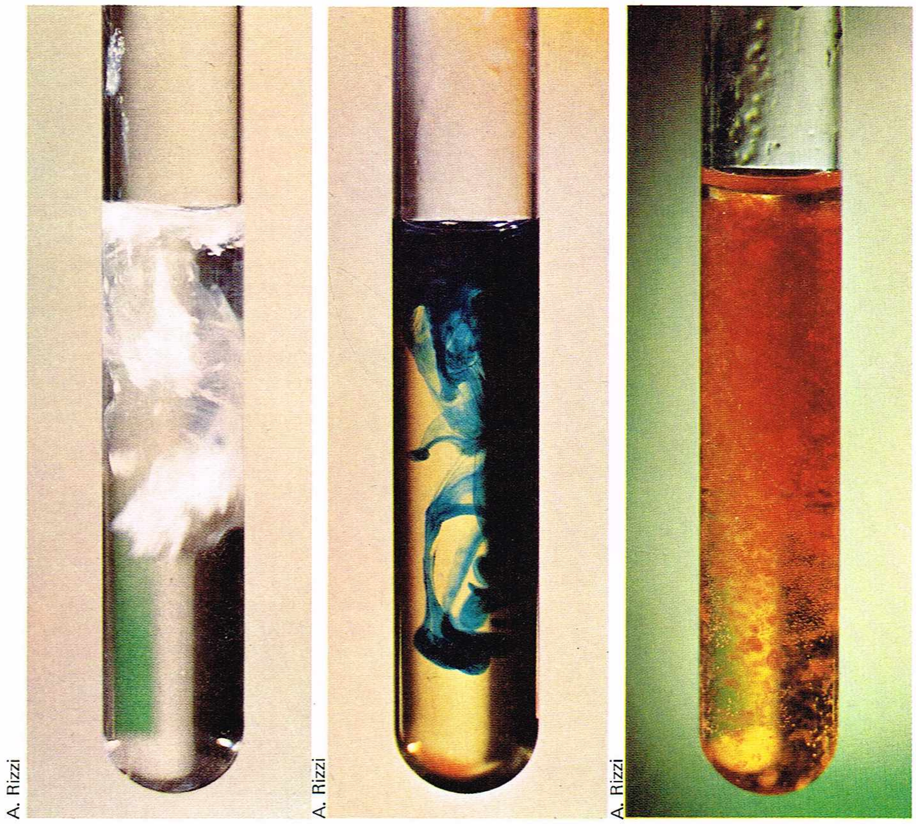

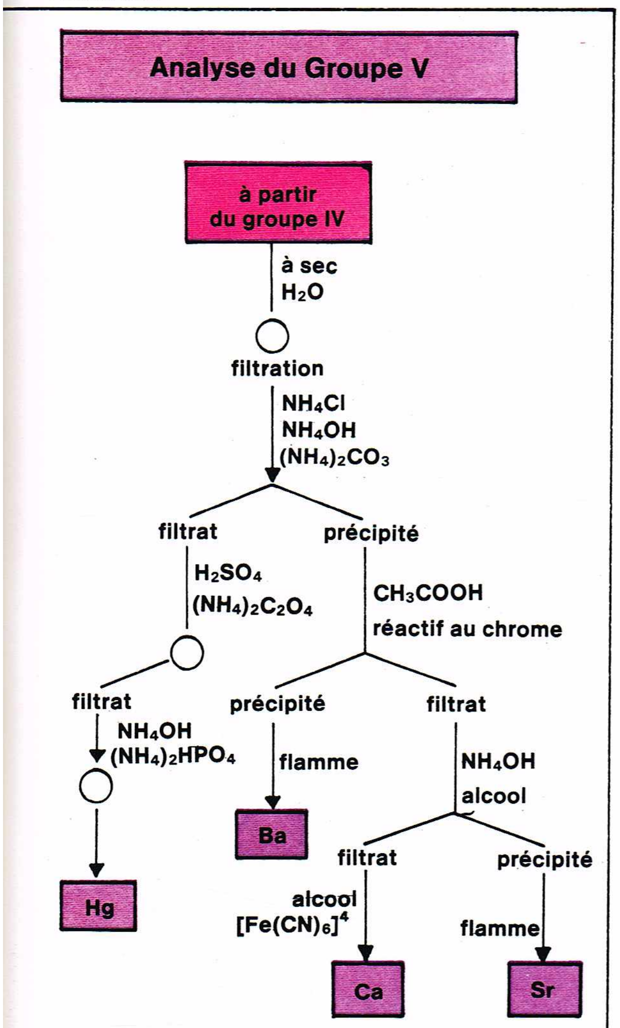

Lorsque la solution contient des chlorures, des phosphates, des borates ou des oxalates, les sels correspondants de calcium, strontium, baryum et magnésium, qui sont peu solubles en milieu basique, peuvent précipiter; de ce fait, il faut faire précéder l'analyse du groupe par un traitement à l'acide sulfurique et à l'alcool, afin de transformer le calcium, le strontium et le baryum en sulfates pratiquement insolubles dans ce milieu hydro-alcoolique. Ces sels sont ensuite décomposés et analysés à part. En revanche, dans le groupe III, on recherche le magnésium, dont le sulfate est soluble.

- *Groupe IV.* La solution basique provenant du groupe III est traitée à chaud par le sulfure d'ammonium; on réalise ainsi la précipitation du groupe IV, constitué des sulfures de zinc, de manganèse, de cobalt et de nickel, que le chauffage rend plus facilement filtrables.
- *Groupe V.* Le groupe V est précipité par le carbonate d'ammonium en présence de chlorure d'ammonium; le précipité, constitué des carbonates de baryum, de strontium et de calcium, n'est pas quantitatif, bien qu'il soit suffisant aux fins de l'analyse. Puisqu'un excès de chlorure d'ammonium rend difficile la précipitation de ce groupe (alors qu'il a pour but d'empêcher la précipitation du magnésium), il faut faire évaporer la solution provenant du groupe IV, calciner le résidu, l'allonger à l'eau acidulée et y ajouter la quantité voulue de chlorure d'ammonium. Ainsi, les carbonates recherchés demeurent non dissous.
- *Groupe VI.* Le groupe VI comprend les ions des métaux alcalins : l'ammonium et le magnésium; après avoir éliminé, par l'oxalate d'ammonium, les traces des métaux alcalino-terreux encore présents, on précipite

◀ *Page ci-contre, en haut, schéma des méthodes de recherche des cations Sb, As, Sn* (groupe II); *en bas, à gauche, schéma des méthodes de recherche des cations Bi, Cu, Cd, Hg, Pb* (groupe II).

◀ *Page ci-contre, en bas, à droite, schéma des méthodes d'analyse du* groupe III.

◀ *Ci-contre, en haut, schéma des méthodes d'analyse du* groupe IV. *Ci-contre, en bas, schéma des méthodes d'analyse du* groupe V.

▲ *Trois types de précipités obtenus lors de l'analyse chimique.*
A gauche, formation d'un précipité de AgCl, *blanc « caséeux » : l'argent est précipité si complètement que cette réaction peut être utilisée en analyse quantitative.*
Au centre, réaction de précipitation du bleu de Prusse : *la formation de ce complexe, contenant des ions ferreux et ferriques intensément colorés en bleu, est utile pour la recherche qualitative des ions du fer (le bleu de Prusse est également utilisé comme pigment).*
A droite, formation d'hydroxyde ferrique; *à noter que ce précipité a un aspect qui n'est ni granuleux ni cristallin. Il s'agit, en effet, d'un précipité colloïdal, qui doit être chauffé pour donner des résultats quantitativement valables. La réaction est utile en analyses qualitative et quantitative.*

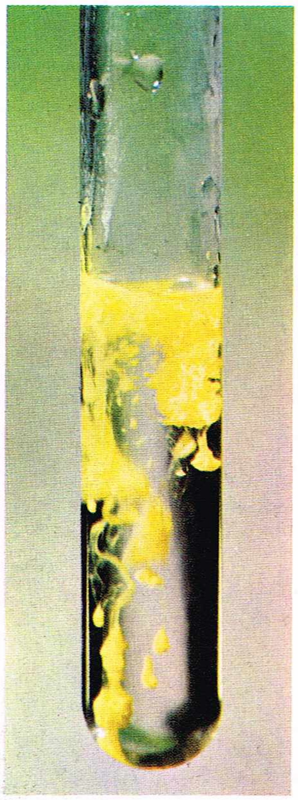

A. Rizzi

▲ **Précipitation du chromate de plomb;** ***les précipitations des chromates, de couleur jaune intense, des métaux alcalino-terreux et de quelques autres éléments sont utilisées à des fins analytiques.***

le magnésium comme phosphate de magnésium ammoniaqué : les métaux alcalins et l'ammonium sont recherchés par des essais à part.

Détermination des cations

La détermination de la présence des cations dans les différents groupes ainsi isolés se fait alors selon le procédé systématique, comme le montrent les schémas d'analyse des différents groupes reproduits ci-contre.

Recherche des anions

Dans la plupart des cas, il est préférable d'effectuer en premier lieu la recherche des anions, puisque la présence de certains d'entre eux entraîne des modifications dans le procédé de recherche des ions métalliques. La recherche des anions se fait en suivant un schéma beaucoup moins systématique que celui qui guide la recherche des cations; quelques-uns sont même recherchés directement sur la substance, tandis que d'autres nécessitent la préparation d'une solution appropriée, d'où sont éliminés tous les cations des métaux lourds par double décomposition avec des carbonates de métaux alcalins.

– Directement sur la substance, on recherche, par voie sèche, les **acétates :** en ajoutant du sulfate acide de potassium et quelques gouttes d'eau, on provoque le dégagement d'acide acétique, reconnaissable à l'odeur.

Les **borates** sont identifiés par addition d'acide sulfurique et d'alcool méthylique à la substance : les vapeurs d'alcool sont enflammées, et, si elles donnent une flamme aux reflets verts, cela indique la présence de borates.

Les **sulfures** et les **sulfites** sont recherchés en acidifiant la substance et en la chauffant de manière à provoquer le dégagement d'hydrogène sulfuré et d'anhydride sulfureux, reconnaissable à l'odeur ou au moyen de papier approprié.

La présence de **carbonates** est mise en évidence par la dissolution de la substance dans l'eau acidulée et le dégagement, après chauffage, de gaz carbonique. Ce gaz, en barbotant dans une solution de chlorure de baryum, donne un précipité blanc de carbonate. Un autre essai relatif aux carbonates, non décisif mais souvent utile, est celui qui consiste à acidifier la substance par l'acide acétique et à observer une éventuelle effervescence.

Les **fluorures** sont mis en évidence par l'acide sulfurique : s'ils sont présents, la solution obtenue coule mal sur le verre.

– La solution alcaline se prépare en faisant bouillir longtemps le mélange à analyser, additionné d'eau et de carbonate de sodium. La fraction non dissoute est séparée par filtration. La présence de **permanganates** donne une coloration violette à la solution; on les réduit par l'alcool éthylique, qui provoque la précipitation de MnO(OH), que l'on sépare. Pour la recherche des différents anions, on prélève quelques millilitres à la fois, et l'on acidifie avec précaution, car le dégagement de gaz carbonique provoque l'effervescence. Si l'addition de l'acide entraîne la formation de précipité, il faut filtrer avant de poursuivre.

Après acidification à l'acide nitrique, on recherche les **phosphates,** qui donnent un précipité jaune avec le molybdate d'ammonium; toutefois, s'il y a présence d'arsenic et de silice, la recherche des phosphates est effectuée selon une autre méthode. Après acidification par l'acide chlorhydrique, on traite la solution par de l'ammoniaque et un mélange magnésien; le précipité obtenu est redissous à l'acide chlorhydrique, et on précipite alors l'arsenic éventuellement présent sous forme de trisulfure; la solution résiduelle est réduite à sec et traitée par l'acide nitrique dilué.

Les **arsénites** sont recherchés sur le filtrat obtenu après traitement par un mélange magnésien, en utilisant le thioacétamide. La silice donne aussi un précipité avec le réactif molybdique.

Dans la même solution alcaline, acidifiée par l'acide chlorhydrique, on recherche les **borates** à l'aide d'un papier de curcuma (mais cet essai est peu sûr) et les **sulfates** par addition de chlorure de baryum.

Les **chlorures** sont recherchés après élimination des sulfocyanures et des ferrocyanures éventuellement présents, en précipitant le tout avec du nitrate d'argent et en désagrégeant le précipité par le carbonate sodio-potassique; le solide ainsi obtenu est dissous dans l'acide nitrique et additionné de nitrate d'argent. L'éventuel précipité indique la présence de chlorures; s'il se dissout dans le carbonate d'ammonium et reprécipite par acidification par l'acide nitrique, la présence de chlorures est certaine.

Si la solution alcaline a une coloration jaune, on effectue la recherche des **chromates,** en acidifiant par l'acide sulfurique et en traitant par l'éther et l'eau oxygénée (coloration bleue, fugace), ou bien par l'alcool éthylique à chaud (coloration verte et précipité vert en milieu alcalin) : en acidifiant par l'acide acétique et en traitant par l'acétate de plomb, on a un précipité jaune soluble dans l'hydroxyde de sodium.

En acidifiant la solution par l'acide sulfurique et en ajoutant du chloroforme (qui décante sous la solution aqueuse) et de l'eau de chlore, une coloration violette indique la présence d'**iodures,** et une coloration orangée la présence de **bromures.**

En additionnant de l'acide sulfurique dilué et du sulfate ferreux, une coloration brune indique la présence de **nitrites.** Ces derniers peuvent être éliminés d'une fraction de la solution (destinée à la recherche des nitrates) par traitement à chaud en présence d'urée et d'acide sulfurique dilué; en ajoutant ensuite du sulfate ferreux et de l'acide sulfurique concentré, la formation d'une coloration brune indique la présence des **nitrates.**

Les **oxalates** se recherchent en acidifiant par l'acide acétique et en ajoutant une solution saturée de sulfate de calcium; le précipité d'oxalate de calcium, dissous dans l'acide sulfurique dilué, décolore à chaud une solution de permanganate de potassium.

Il est parfois nécessaire d'effectuer aussi la recherche des **tartrates** et des **citrates.**

Analyse du résidu insoluble

La fraction de l'échantillon qui n'a pas été solubilisée lors du traitement préliminaire destiné à l'analyse des cations est généralement décomposée par fusion avec des réactifs solides. Puisqu'un procédé systématique ne convient pas ici, avant de réaliser la décomposition, il faut identifier le résidu par des essais sur des petites quantités de substances et procéder ensuite aux analyses les plus appropriées, sur la base des résultats de la recherche préliminaire.

Résidus insolubles blancs

Parmi les résidus insolubles blancs les plus communs, on compte le bioxyde d'étain, l'alumine, les sulfates de calcium, de strontium et de baryum, la silice, les silicates alcalino-terreux et le bioxyde de titane.

Le **bioxyde d'étain** peut se décomposer avec des alcalis caustiques, le cyanure de potassium, ou bien avec un mélange de carbonate de sodium et de soufre; l'**alumine** avec du sulfate acide de potassium, ce qui permet d'obtenir du sulfate d'aluminium soluble. Les **sulfates de calcium,** de **strontium** et de **baryum** peuvent être identifiés par la coloration qu'ils confèrent à la flamme du bec Bunsen lorsqu'ils sont imbibés d'acide chlorhydrique. Ils sont décomposés avec un mélange de carbonate de sodium et de potassium : les cations se transforment en carbonates insolubles correspondants, qui sont analysés comme dans le groupe V, tandis que les sulfates, rendus solubles, sont recherchés selon la méthode déjà décrite. On recherche la **silice** directement sur la substance, ou sur le résidu insoluble, en le traitant dans un creuset en plomb avec du fluorure de calcium et de l'acide sulfurique concentré; si elle est présente, en couvrant le creuset avec un verre mouillé, on y observe un dépôt blanc gélatineux.

Résidus insolubles colorés

Parmi les résidus insolubles colorés, les principaux sont le charbon et la chromite (noirs), le sesquioxyde de chrome (vert), le soufre et le chromate de plomb (jaune).

Le **sesquioxyde de chrome** est décomposé par un mélange de carbonate de calcium et de nitrate de potassium, alors que, pour la **chromite** (composée de fer et de chrome), on utilise du sulfate acide de potassium et, pour le **chromate de plomb,** du carbonate de sodium et de potassium. Le **charbon** se reconnaît au fait qu'il brûle complètement, à la soufflerie (dispositif fournissant une grande quantité d'air sous faible pression), sans laisser de résidus; il en est de même pour le **soufre,** qui, en outre, se révèle soluble dans le sulfure de carbone.

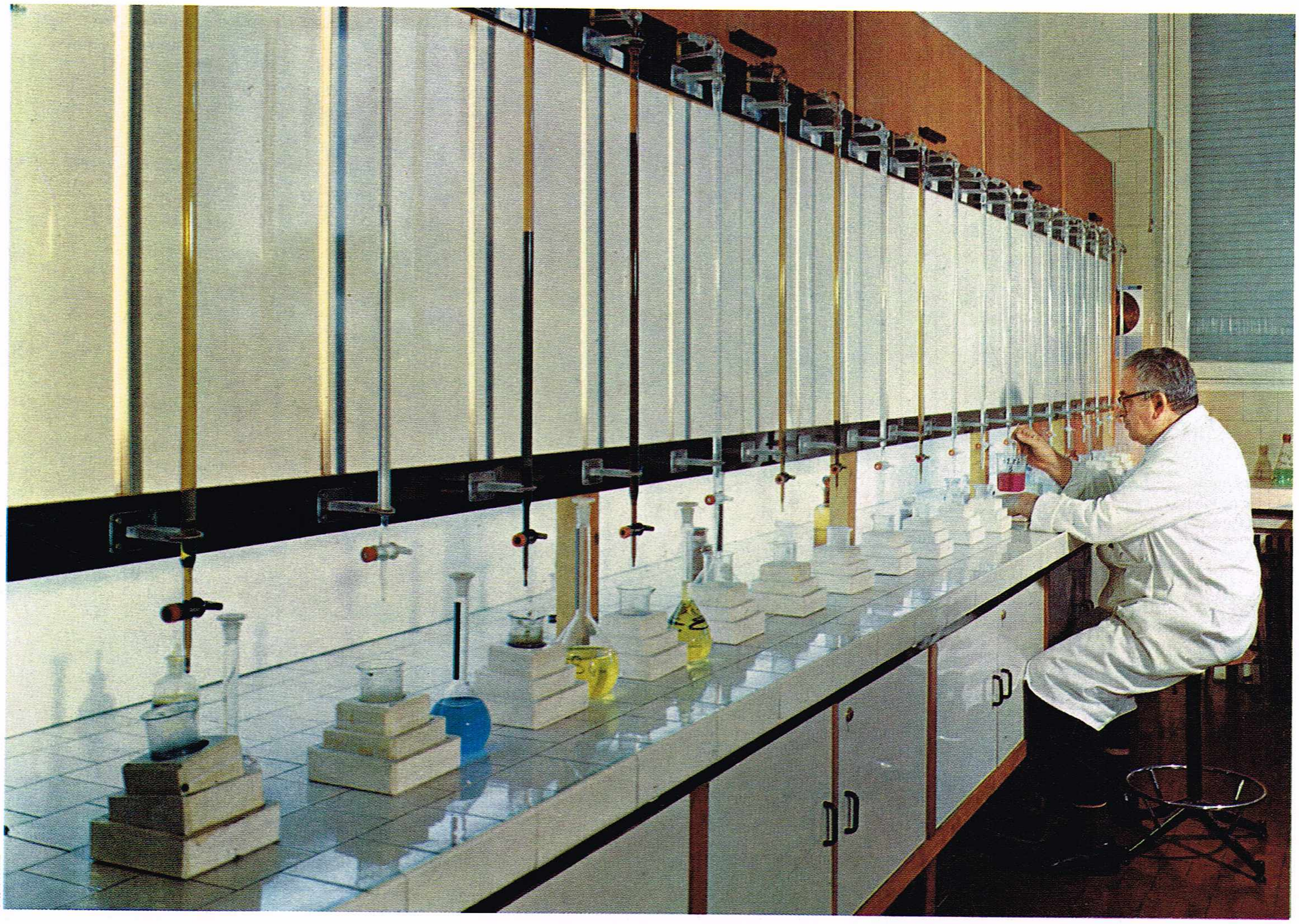

A. Rizzi

Analyse quantitative

L'analyse quantitative a pour but, comme nous l'avons déjà dit, de déterminer la quantité d'un ou de plusieurs constituants dans un composé ou un mélange, le plus souvent de composition qualitative connue; les résultats sont habituellement exprimés en pourcentages de la quantité d'échantillon. Puisque les problèmes auxquels s'applique l'analyse quantitative sont très nombreux, il est évidemment impossible de donner des critères généraux, par exemple en ce qui concerne la précision de l'analyse; ainsi, pour déterminer la quantité d'impuretés nuisibles dans un certain métal, il sera suffisant de préciser que celles-ci ne doivent pas dépasser une certaine limite maximale, tandis que cela ne sera pas suffisant lorsqu'il s'agira de déterminer le pourcentage exact d'un élément en traces dans un échantillon donné. Les méthodes diffèrent donc selon les cas.

Les méthodes chimiques de l'analyse quantitative sont l'**analyse volumétrique,** qui se fonde sur l'emploi de solutions titrées (c'est-à-dire de concentration connue), d'acides, de bases, de substances oxydantes ou réductrices, de substances complexantes et précipitantes, et l'**analyse gravimétrique,** qui atteint le même but par la formation et la pesée de précipités. Il existe par ailleurs d'autres méthodes d'analyse, fondées sur l'emploi de colorimètres, de spectrophotomètres, de potentiomètres, etc. (voir le chapitre de l'*Analyse instrumentale*).

Les instruments de base de l'analyse quantitative sont la balance de précision et la burette.

La *balance de précision,* qui peut comporter un (dans les modèles les plus récents) ou deux plateaux, a bénéficié d'un grand nombre de perfectionnements, et possède aujourd'hui une sensibilité qui peut atteindre le dixième de milligramme. Elle doit être maintenue à l'abri de la

A. Rizzi

▲ *Appareillage de laboratoire constitué d'une* **série de burettes;** *la burette est l'un des instruments de base qu'utilise, depuis très longtemps,* **l'analyse volumétrique** *(ou par titrage).*

◄ *Un modèle récent* **de balance de précision;** *il s'agit d'un des instruments les plus utiles dans l'*analyse quantitative.

▶ ***Trois moments du titrage par le permanganate de potassium d'une solution de sulfate ferreux (réaction d'oxydoréduction).***

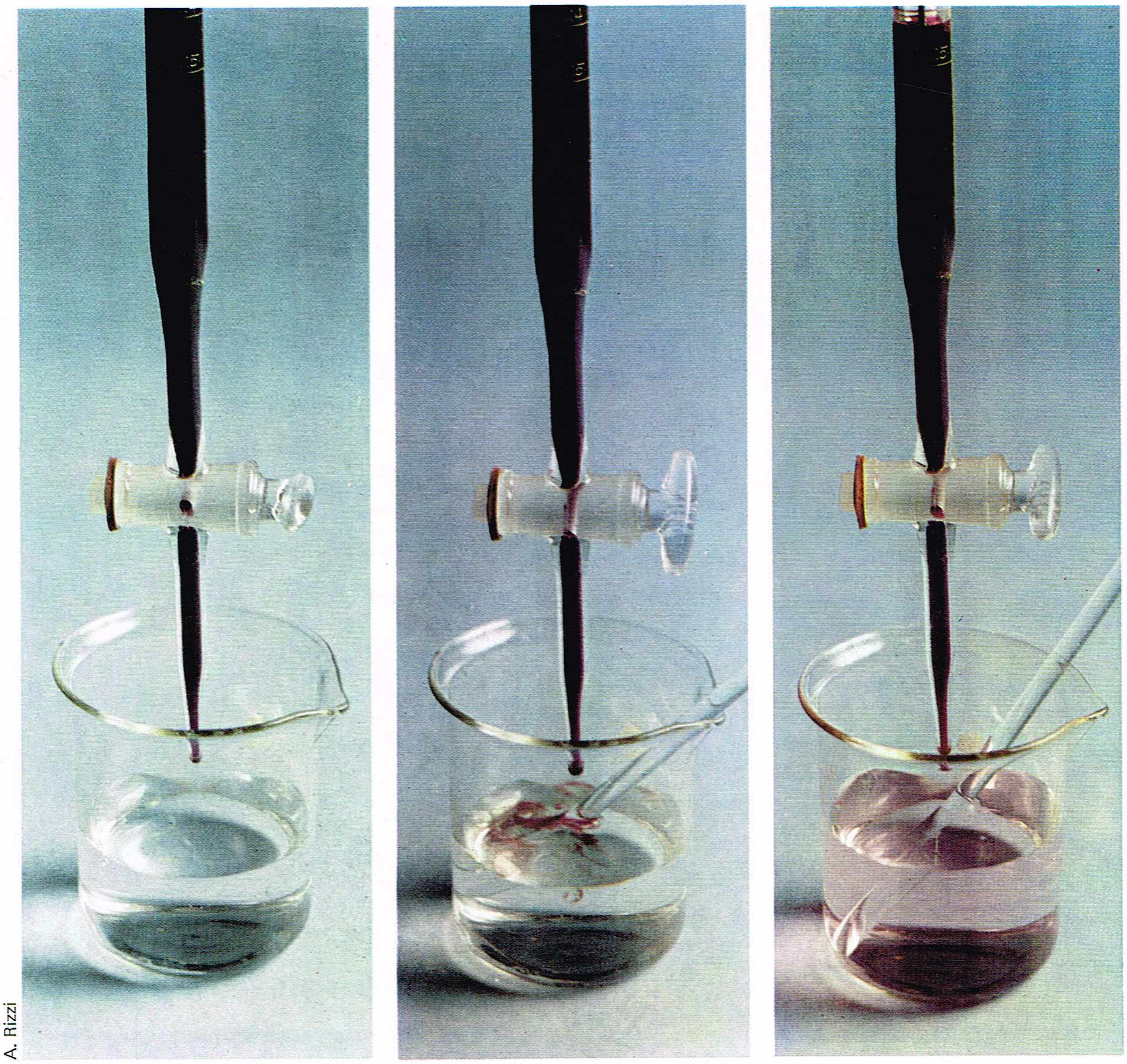

A. Rizzi

poussière et surtout de l'humidité ; à cet effet, on place souvent dans l'enceinte de protection des substances déshydratantes.

La *burette* est un tube de verre, parfaitement calibré, gradué, de capacité variable, fermé à son extrémité inférieure par un robinet qui permet de faire couler le liquide à la vitesse désirée. Les burettes doivent être maintenues toujours propres et sèches, disposées verticalement, et le robinet graissé.

D'autres instruments fréquemment utilisés sont les *fioles jaugées* et les *pipettes graduées,* c'est-à-dire portant, les premières sur le col, les secondes sur le tube, des marques indiquant jusqu'à quel point il faut les remplir pour avoir le volume désiré. Si nécessaire, tous ces récipients peuvent être étalonnés avec une grande précision par double pesée (on les pèse d'abord vides, puis remplis d'un liquide approprié, eau ou mercure). Dans certains cas, il est nécessaire de tenir compte du fait que les liquides se dilatent lorsque la température augmente.

Pour les opérations nécessitées par l'analyse quantitative, on utilise de l'eau distillée ou, presque toujours, de l'eau désionisée, c'est-à-dire privée des ions qui pourraient fausser l'analyse. Pour la préparation de l'eau désionisée, on utilise aujourd'hui des colonnes remplies de résines échangeuses d'ions, dans lesquelles on fait passer l'eau à traiter ; à la sortie se trouve un appareil qui mesure la conductibilité de l'eau, et qui permet ainsi de contrôler la bonne qualité du produit et d'indiquer éventuellement que les colonnes sont à remplacer. Il est à noter que les résines, qui ont une faible solubilité, peuvent fausser les données des analyses dans lesquelles on utilise du permanganate.

Analyse volumétrique

Dans l'analyse volumétrique (ou *analyse par titrage*), on emploie des solutions titrées (solutions dont la concentration est parfaitement connue), que l'on prépare en pesant avec précision la substance, aussi pure que possible, que l'on dissout dans le volume d'eau approprié ; les solutions préparées avec des réactifs qui ne seraient pas très purs peuvent être titrées en utilisant d'autres solutions pures, que l'on fait réagir avec elles. Parmi les principales applications de l'analyse volumétrique, rappelons l'*alcalimétrie,* qui consiste à déterminer la quantité de bases présentes dans une solution en titrant un volume connu de celle-ci par une solution d'un acide à une concentration connue. La fin de la réaction est signalée par des *indicateurs,* substances qui ont la propriété de changer de couleur en fonction du pH. La réaction qu'on exploite est la *neutralisation acide-base,* qui conduit à la formation d'un sel et d'eau. Connaissant la normalité de l'acide et le volume de solution acide employée, connaissant aussi le volume de la solution basique de normalité inconnue, la *normalité de la base* s'obtient à l'aide de la simple relation :

$$N_aV_a = N_bV_b$$

où V_a et V_b sont les volumes, connus, des deux solutions acide et basique, N_a et N_b les normalités de l'acide et de la base.

Un principe analogue sert de fondement à l'*acidimétrie,* qui consiste à déterminer la quantité d'un acide présent dans une solution en le titrant au moyen d'une base de concentration connue.

Une autre application de l'analyse volumétrique est l'*oxydoréductimétrie,* qui exploite les réactions d'oxydo-

réduction, en particulier celles qui se produisent avec changement de coloration. Par exemple, l'ion permanganate, en milieu acide, est réduit en ion Mn^{++}. En partant du permanganate de potassium, la transformation se fait avec virage de la coloration du violet intense au rose très pâle. Ainsi, si on laisse couler du permanganate de titre connu dans la solution de concentration inconnue d'un réducteur, comme un oxalate, un sel ferreux, etc., il y a décoloration tant que le réducteur n'a pas entièrement réagi ; la première goutte de réactif titrant en excès colorera en violet pâle la solution, indiquant ainsi la fin de la réaction.

Un autre oxydant utilisé est le bichromate de potassium, mais, puisque, avec celui-ci, il est difficile de saisir visuellement le virage indiquant la fin de la réaction, on détermine le point d'équivalence à l'aide de mesures de conductibilité.

Le thiosulfate de sodium est très utilisé en oxydoréductimétrie. Il sert à déterminer l'iode libre (ou libéré par un iodure en présence d'oxydants) dans une solution.

Récemment, la *complexométrie* a pris une notable importance ; c'est une branche de l'analyse volumétrique qui utilise des substances capables de donner des complexes avec des cations métalliques, afin de titrer les solutions de ces derniers ; il est intéressant de noter que, souvent, avec la même solution de complexant, on peut titrer plusieurs ions métalliques. Le complexant le plus employé est l'E. D. T. A. (acide éthylène-diamine-tétracétique), dont le sel bisodique est suffisamment soluble pour permettre la préparation de solutions de titres connus. Le principe sur lequel repose l'analyse est le suivant : on ajoute un indicateur capable de donner un complexe coloré avec le cation que l'on veut doser (citons, entre autres, la *murexide* et l'*ériochrome*), puis, lentement, la solution d'E. D. T. A., qui complexe le cation et déplace, à la fin, l'indicateur, lequel, une fois libre, prend une coloration différente de celle qu'il avait quand il était lié dans le complexe. Donc, même dans ce cas, la fin du dosage est indiquée par un changement de couleur.

Dans certains cas, on peut aussi effectuer des *analyses par précipitation ;* par exemple, pour titrer une solution contenant des ions Ag^{+}, il est possible d'utiliser une solution d'ions thiocyanure SCN^{-}. On obtient un précipité d'AgSCN, blanc. La fin de la réaction est détectée en ajoutant une petite quantité d'ions Fe^{+++}, qui jouent le rôle d'indicateurs. En effet, lorsque tout l'argent a été soustrait par précipitation, un excès d'ions SCN^{-} est indiqué par une intense coloration rouge, due à la formation de thiocyanure ferrique.

Les méthodes d'analyse volumétrique que nous venons de décrire permettent aussi d'effectuer des *séparations :* on appelle séparation le dosage simultané de plusieurs ions dans la même solution. En alcalimétrie, par exemple, pour les ions HCO_3^{-} et CO_3^{--}, on peut utiliser plusieurs indicateurs (phénolphtaléine et méthylorange), dont le virage se produit à des pH différents, correspondant à la neutralisation des diverses espèces présentes en solution.

▼ Batterie de distillation sous pression réduite pour le dosage de l'ammoniac (Centre de pédologie - Nancy).

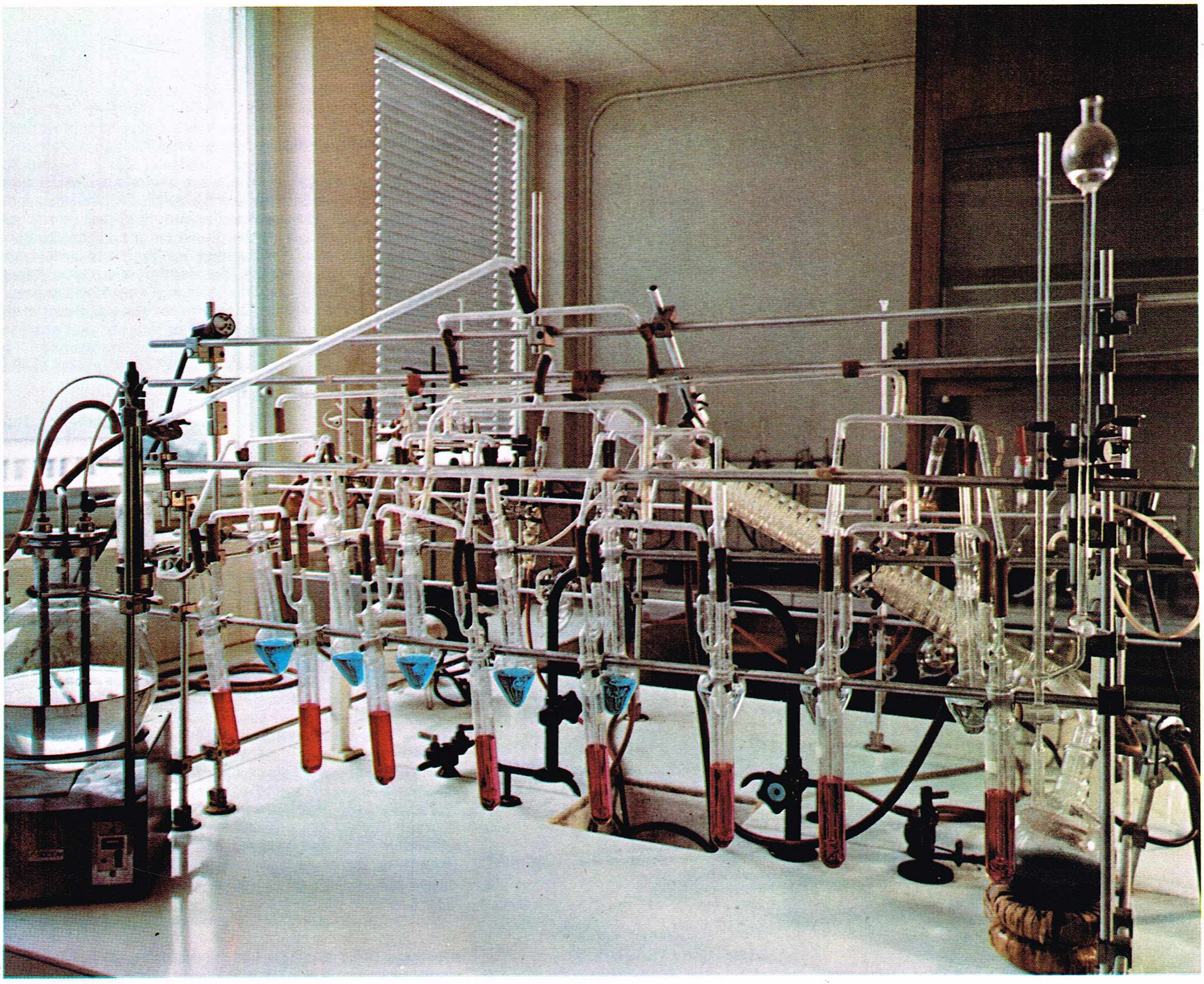

C.N.R.S.

▶ *L'analyse* gravimétrique *consiste en l'obtention d'un précipité; une fois la précipitation réalisée, la* filtration *du précipité est effectuée soit à l'aide de filtres en papier spécial, soit à l'aide de buchners.*

Ugine-Kuhlmann

▶ *Page ci-contre,* appareillage de chromatographie sur colonne *utilisé dans un laboratoire de chimie des substances naturelles.*

▼ *Un* four à « moufles »; *cet instrument est utilisé pour porter à haute température (ou calciner) des substances destinées le plus souvent à l'analyse gravimétrique.*

A. Rizzi

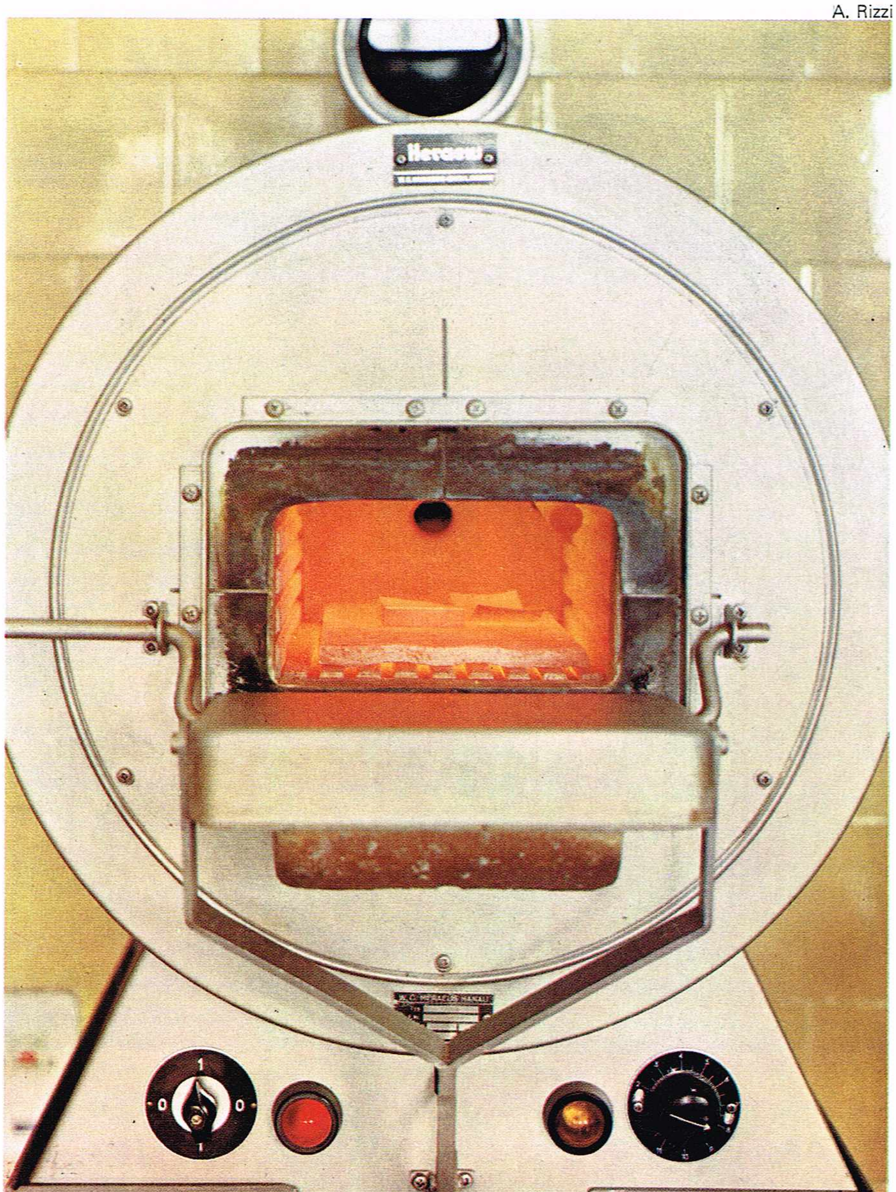

Analyse gravimétrique

Ce type d'analyse consiste en une série d'opérations visant à isoler un ion par précipitation de celui-ci en un composé pur, stœchiométriquement défini, dont on effectue la pesée. A l'aide d'une simple règle de trois, on détermine alors la quantité de l'ion présente dans l'échantillon. Par exemple, l'ion sulfate peut être déterminé par formation de sel de baryum. Les méthodes gravimétriques ont le défaut d'être trop longues et d'exiger un travail très minutieux pour la bonne réussite de l'analyse.

La précipitation revêt une grande importance : le composé, qui doit avoir un produit de solubilité faible, ne doit pas, autant que possible, contenir d'impuretés (par exemple, d'autres ions en solution) et doit être stable à la chaleur afin de pouvoir être calciné, ou tout au moins séché, sans subir de décomposition. La précipitation se fait habituellement à chaud, en portant la solution à l'ébullition; on retire alors la source de chaleur, on ajoute le réactif précipitant, goutte à goutte ou rapidement selon les cas, en agitant la solution. Le récipient le mieux adapté à ce type de réaction est le *becher* (plus rarement, lorsque des solutions fortement alcalines risqueraient d'attaquer le verre, on utilise une *capsule de porcelaine*). Pour assurer une précipitation complète, on ajoute un léger excès du réactif précipitant. Les précipités colloïdaux d'hydroxydes peuvent être filtrés même à chaud, les cristallins de préférence à froid, puisque, à chaud, ils sont généralement trop solubles. Pour éviter la formation de cristaux trop fins, qui peuvent passer à travers le filtre, on fait en sorte que la précipitation se produise lentement, en solution diluée, à chaud, ou bien, une fois la précipitation réalisée, on chauffe au bain-marie.

La *filtration* du précipité est effectuée à l'aide de *filtres en papier spécial* ayant une faible teneur en cendres, habituellement inférieure à la limite de sensibilité de la balance. Il faut naturellement recueillir tout le précipité, sans pertes, opération pour laquelle le becher est justement le récipient adéquat, puisqu'il permet l'utilisation d'une pissette pour chasser les particules qui seraient restées collées aux parois.

Pour certains précipités, on peut aussi utiliser des *creusets filtrants* comportant une cloison poreuse en verre ou en porcelaine; dans ce cas, l'opération est rendue plus rapide par l'emploi d'une pompe à eau. Les creusets,

préalablement tarés (c'est-à-dire pesés vides avec une grande précision avant l'analyse), sont pesés avec le précipité, après chauffage, à la balance de précision. Les précipités doivent être soigneusement lavés, sur le filtre, de manière à être débarrassés des impuretés les plus solubles. Les précipités colloïdaux, qui retiennent plus facilement des ions étrangers, doivent être lavés de nombreuses fois à l'eau chaude, et les précipités cristallins à l'eau froide, afin d'éviter leur redissolution partielle. Si le précipité est assez soluble, le lavage est effectué avec une solution aqueuse contenant un ion commun au précipité ou avec un mélange d'eau et d'alcool, ou avec de l'alcool et de l'éther.

Ensuite, le précipité est séché en plaçant l'entonnoir contenant le filtre et la substance dans une *étuve* à une température un peu supérieure à 100 °C; cette opération provoque l'évaporation de l'eau et évite que, dans la calcination qui suit, ne se produisent des projections de substance. Enfin, filtre et précipité sont placés dans un creuset de porcelaine taré (un creuset taré peut servir pour plusieurs analyses, si l'on contrôle de temps en temps le tarage). On brûle le filtre à part, et on laisse tomber le résidu charbonneux dans le creuset; on procède à la calcination sur un bec Bunsen ou sur d'autres lampes à gaz plus puissantes, en commençant à chauffer avec précaution pour éviter que le creuset ne se fende. En général, la calcination est répétée jusqu'à ce que deux pesées successives du creuset donnent des résultats pratiquement identiques. Pour cette opération, on utilise aussi de petits *fours électriques* (four à *moufles*). Pour peser, il faut retirer le creuset de la flamme (en utilisant des pinces métalliques aux pointes préalablement rougies, ce qui évite de provoquer la cassure du creuset) et le faire refroidir à l'intérieur d'un dessiccateur. Ainsi, l'abaissement de température est effectué dans un milieu autant que possible privé de vapeur d'eau, car celle-ci aurait tendance à être absorbée par la substance.

Au moyen de méthodes gravimétriques et volumétriques combinées, il est possible d'analyser plusieurs espèces présentes dans la même substance ou solution échantillon, réalisant ainsi des séparations quantitatives. Il est évident que ces opérations, comme du reste l'analyse qualitative systématique, sont très longues et ne conviennent pas toujours aux exigences modernes de l'analyse; aussi cherche-t-on à remplacer ces méthodes par des déterminations fondées sur l'emploi d'instruments, plus ou moins perfectionnés.

Analyse instrumentale

Nous allons aborder la description des principaux instruments modernes d'analyse, en tenant compte du principe sur lequel repose le fonctionnement de ceux-ci.

Chromatographie

La chromatographie, dans ses formes multiples *(chromatographie sur papier, sur colonne, en couche mince, chromatographie en phase gazeuse)*, est une des méthodes qui se prêtent le mieux à la séparation de mélanges, même très complexes. Le principe fondamental sur lequel elle repose est le même pour les différents types de chromatographie : on laisse le mélange à examiner, dissous dans un solvant, s'adsorber sur différents substrats, habituellement finement divisés afin de présenter une grande surface active. Ces substrats agissent en retenant de manière différente, ou, plus précisément, avec une force différente, les divers composants de la substance.

Chromatographie sur colonne

La chromatographie sur colonne, connue depuis le début de ce siècle, fut très employée pour la séparation de mélanges de colorants végétaux. Pour sa mise en œuvre, on utilise une colonne de verre présentant un étranglement à sa partie inférieure et remplie d'un adsorbant approprié, qui peut être de la silice plus ou moins finement broyée, de l'alumine, un sucre, du charbon activé, etc. Après la mise en place de l'adsorbant, on introduit par l'extrémité supérieure de la colonne la solution à séparer, on ajoute le solvant, et on en provoque la migration vers la sortie; puisque, comme nous l'avons dit, le pouvoir adsorbant de la colonne varie pour les diffé-

C.N.R.S.

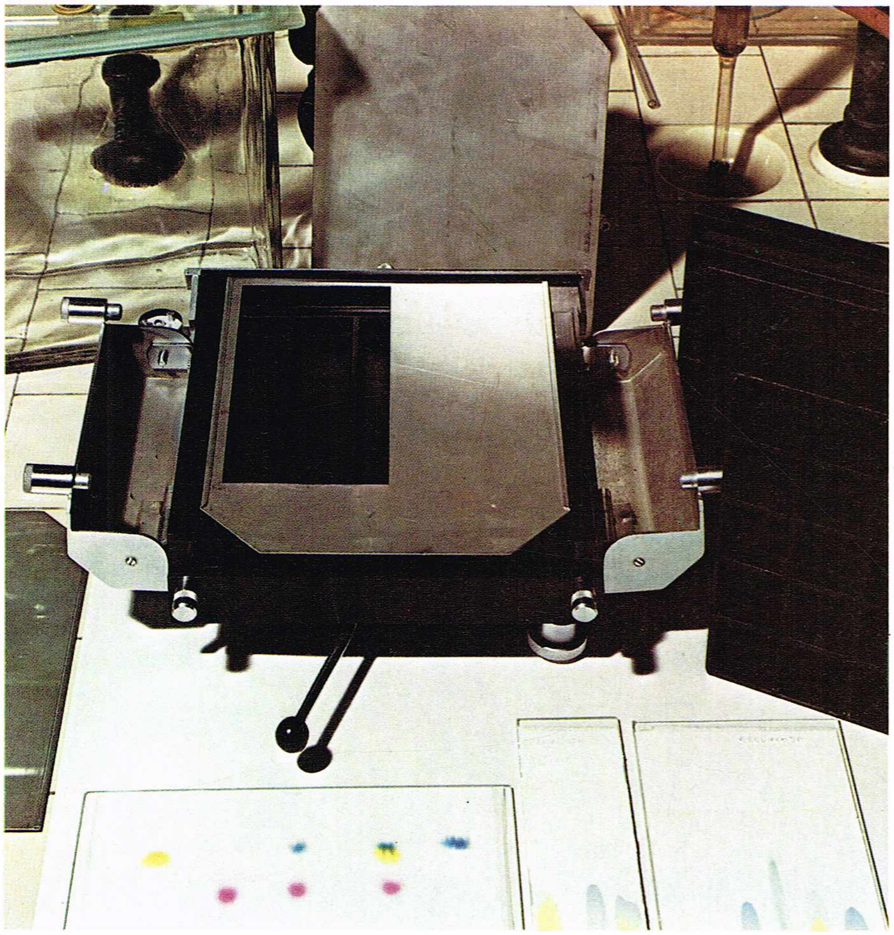

A. Rizzi

▲ **Chromatographie en couche mince :** ***au premier plan, lamelle développée; au fond, l'appareillage pour l'étalement de la couche et une cuvette pour le développement des lamelles.***

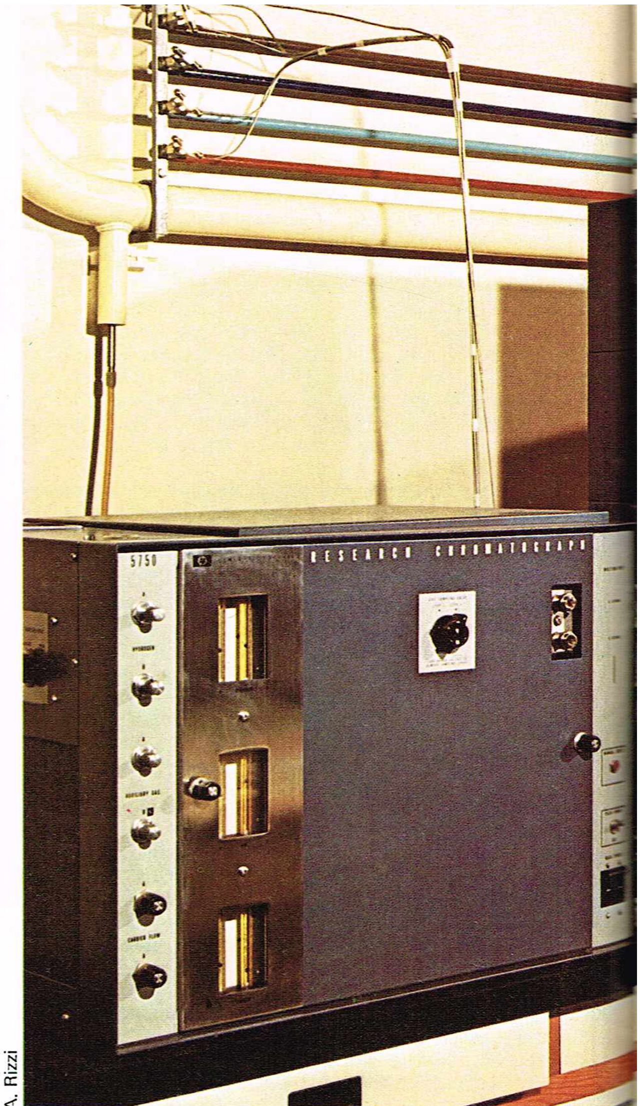

A. Rizzi

rentes molécules présentes dans l'échantillon, les constituants du mélange se fractionnent en formant, le long de la colonne, des anneaux ou des bandes, plus ou moins espacés, et identifiables par leur couleur à la lumière solaire ou, très souvent, à la seule lumière ultraviolette. Il est généralement facile d'éluer séparément les différentes bandes de la colonne en employant des solvants appropriés ; ainsi, chaque fraction peut être recueillie et analysée séparément.

En jouant sur la nature de l'adsorbant et des éluants, on peut réaliser de très nombreuses séparations. Par exemple, en effectuant cette opération sur des résines appropriées, on peut séparer des mélanges de composés des terres rares, généralement très difficiles à purifier ; de même, il est possible de séparer des mélanges d'amino-acides ou d'autres composés organiques.

Chromatographie sur papier et en couche mince

La chromatographie sur papier et la chromatographie en couche mince se fondent sur un principe très semblable ; l'absorption s'opère non plus dans une colonne mais sur du papier spécial ou sur des lamelles de verre, recouvertes d'une mince couche de silice, d'alumine, de cellulose, de talc, etc. Les « taches » de la substance à analyser sont déposées à une extrémité de la bande du papier ou de la lame, que l'on plonge ensuite dans un solvant convenable ; celui-ci, par capillarité, entraîne différemment les différents constituants. Lorsque le solvant a atteint une hauteur déterminée, on peut couper la partie de la bande de papier qui contient la substance qui intéresse, ou racler la couche mince, et récupérer les substances isolées en les traitant avec des solvants adéquats. Dans certains cas, ces séparations sont meilleures que celles obtenues sur colonne ; en outre, ces méthodes permettent de manipuler des quantités d'à peine quelques milligrammes de substance, avec des résultats étonnamment probants.

L'une des méthodes qui permettent d'identifier qualitativement les composés isolés est la *mesure du* R_F (du latin *ratio frontis*), ou rapport entre le chemin parcouru par la substance et celui qui sépare le point de départ du front du solvant ; pour un certain type de mélange, de support et de température, une substance donnée a un R_F bien défini, qui permet d'en déterminer la nature. Notons cependant que cette mesure est assez délicate.

On peut également effectuer des déterminations quantitatives sur de très petites fractions de substances par *voie densitométrique* (c'est-à-dire en mesurant l'intensité de couleur des différentes taches, exposées à une source lumineuse constante).

Chromatographie en phase gazeuse

La chromatographie en phase gazeuse, plus récente que les autres méthodes (à l'exception de la chromatographie en couche mince), est aujourd'hui appliquée à la résolution de très nombreux problèmes ; elle a donné des résultats excellents, se révélant souvent irremplaçable. Elle permet l'analyse de mélanges de gaz et même de substances solides et liquides susceptibles d'être évaporées sans subir de décomposition à des températures relativement élevées. Les hydrocarbures, par exemple, jouissent de cette propriété, ce qui explique l'utilisation massive de la chromatographie en phase gazeuse dans l'industrie du pétrole. Cette méthode a même permis d'analyser des mélanges d'essences rares, à tel point que l'un des premiers chromatographes préparatifs (c'est-à-dire permettant la récupération des différentes fractions du mélange analysé) fut employé par les parfumeurs parisiens.

Le *chromatographe en phase gazeuse* est constitué du système d'injection de la substance à analyser, de la colonne, d'un système d'analyse et d'un système d'enregistrement. Dans les chromatographes préparatifs, on trouve aussi un dispositif, généralement automatique, pour la récupération des fractions.

On fait passer dans la colonne un courant de gaz inerte (azote, hélium, etc., selon les cas) et on introduit ensuite l'échantillon à examiner ; s'il s'agit d'un gaz, l'introduction se fait à l'aide d'un tube spiralé et étalonné dans lequel on a pratiqué le vide ; s'il s'agit d'un liquide ou d'un solide dissous dans un solvant approprié, on injecte la solution au moyen d'une seringue à travers une membrane en

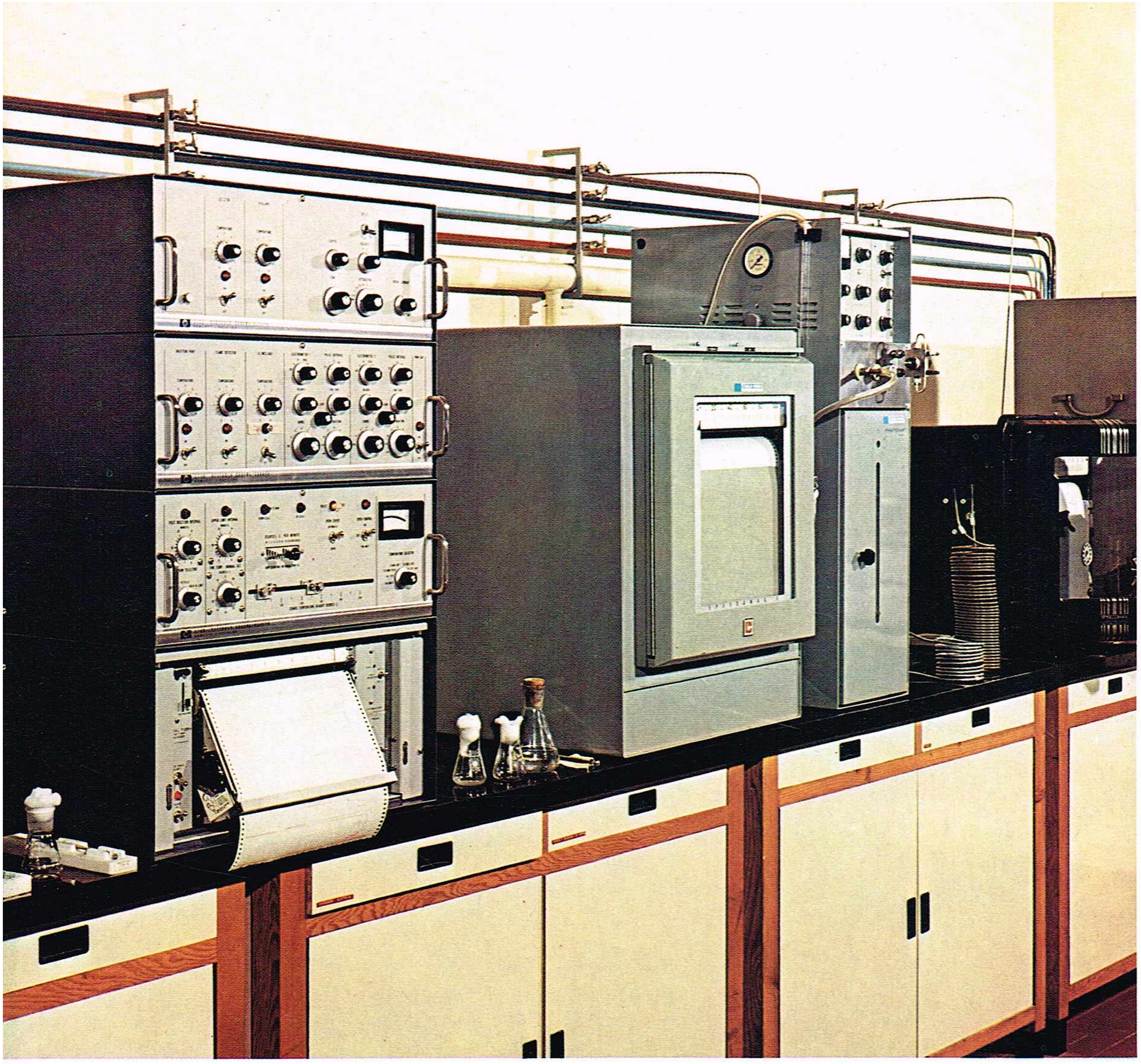

◀ *Appareillage de* chromatographie en phase gazeuse.

A. Rizzi

caoutchouc spécial. La chambre d'injection est maintenue à une température telle que l'évaporation de l'échantillon se fasse dans le temps le plus court compatible avec la stabilité thermique du produit étudié.

L'échantillon vaporisé est entraîné par le flux de gaz inerte le long de la colonne remplie d'un adsorbant solide *(chromatographie gaz-solide)* ou d'un support inerte recouvert d'un liquide à très faible tension de vapeur *(chromatographie gaz-liquide)*. La colonne doit être maintenue à une température constante, convenablement choisie. Les substances vaporisées se répartissent entre la phase gazeuse mobile et la phase solide ou liquide fixe (phase stationnaire) en fonction de leurs caractéristiques et de celles de l'adsorbant; elles sont ainsi divisées en plusieurs fractions, qui parviennent séparément au système d'analyse.

Il existe plusieurs types de systèmes d'analyse (pont de Wheatstone, filaments, flamme, etc.), adaptés à différents usages; on obtient des diagrammes présentant des pics séparés; en effet, la sortie d'une substance de la colonne est traduite par l'analyseur par un pic que l'enregistreur trace sur le rouleau de papier qui tourne à vitesse constante. En fonction de la distance du pic par rapport au début du graphique, distance proportionnelle au temps écoulé depuis le moment de l'injection, et par comparaison avec des échantillons connus, il est possible de déterminer la nature de la substance qui a donné naissance au signal; l'aire de chaque pic du diagramme est, en outre, proportionnelle à la quantité de la substance correspondante, et il est donc possible d'effectuer aussi des analyses quantitatives.

Dans les chromatographes préparatifs, à la sortie de la colonne, outre le système d'analyse, il existe une série de récipients destinés à recueillir les différentes fractions. Comme les quantités qui peuvent être analysées à chaque fois sont très petites (de l'ordre de 0,1 à 10 dix-millièmes de litre), ces appareils sont dotés d'un dispositif réalisant automatiquement les injections successives de l'échantillon et la collecte des fractions.

Certains chromatographes offrent aussi la possibilité de programmer une variation très progressive de la

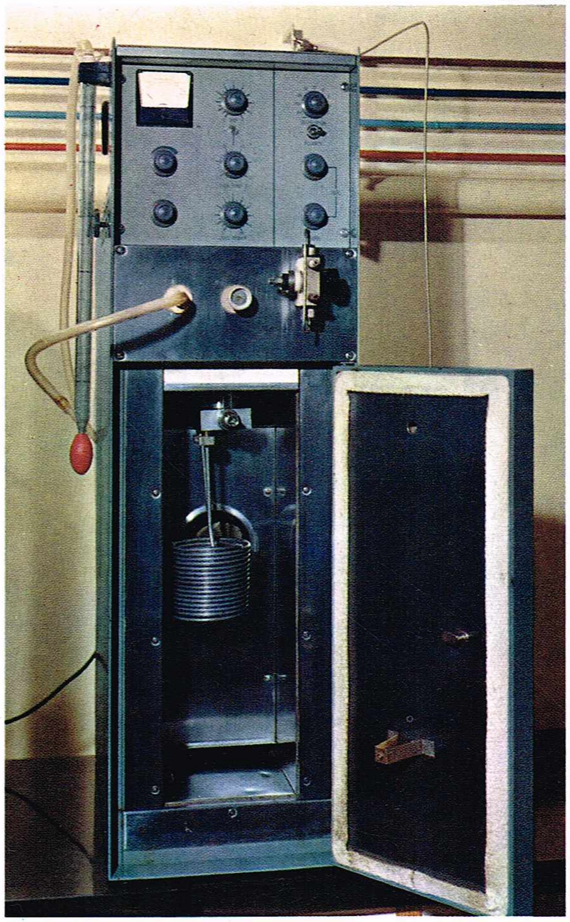

◀ *Détail d'un* **chromatographe en phase gazeuse de type analytique;** *le four est ouvert et on peut y voir la colonne (le tube métallique en spirale) à l'intérieur de laquelle se produit la séparation des corps analysés.*

Midi Libre

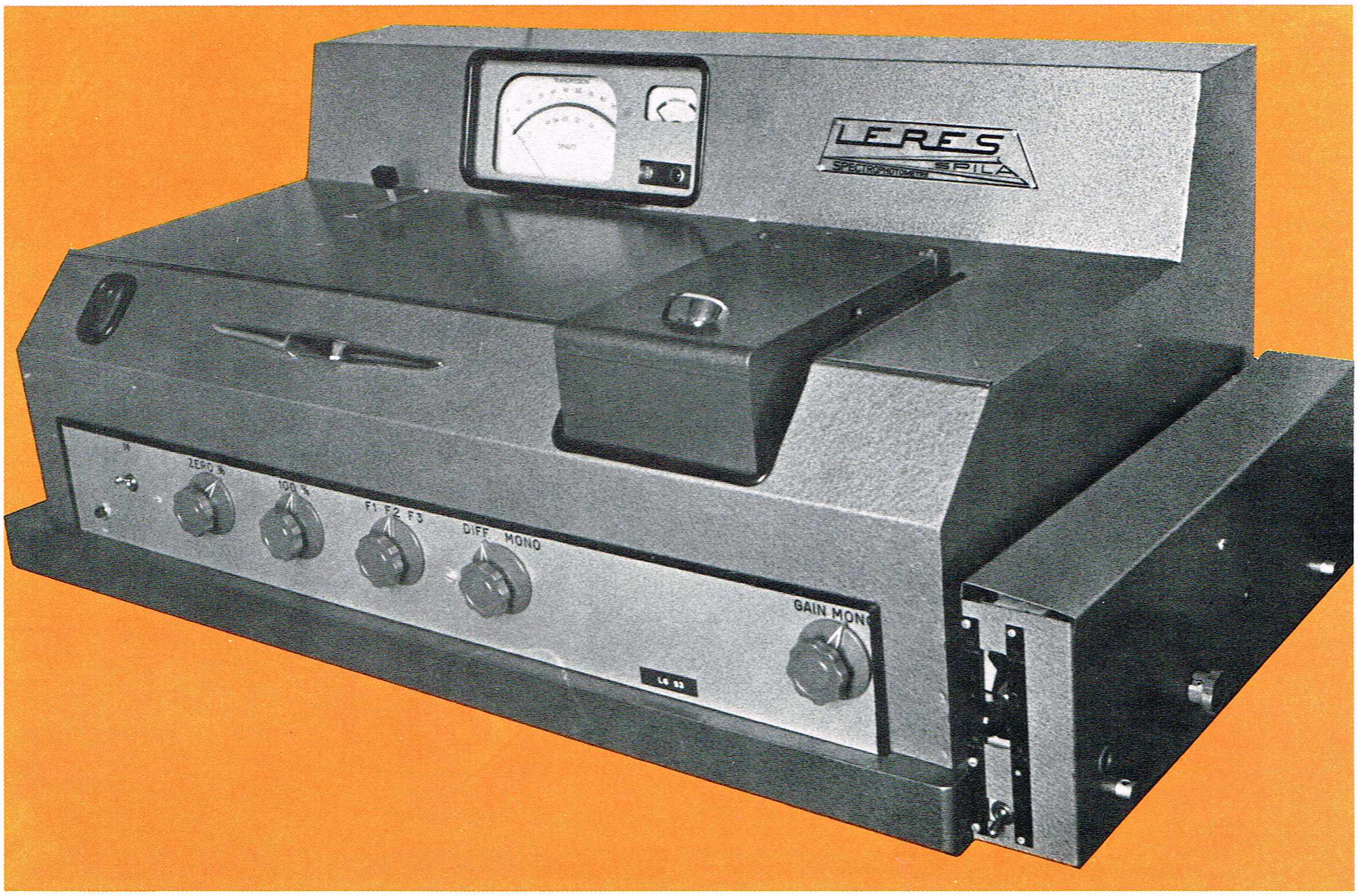

▲ *Un* **spectrophotomètre** *travaillant en* **visible et UV;** *ce type d'appareil, très perfectionné, permet des dosages colorimétriques et l'enregistrement automatique des spectres.*

température des colonnes, de manière à permettre l'analyse de mélanges contenant des substances volatiles et d'autres très peu volatiles *(instruments à température programmée).*

Colorimétrie

Les instruments qui mesurent l'émission ou l'absorption de radiations lumineuses par une substance sont d'un grand intérêt pour la chimie analytique. Parmi ceux-ci, les plus simples sont les colorimètres, employés dans la méthode d'analyse quantitative appelée *analyse colorimétrique.* L'emploi de ces instruments est fondé sur le fait que l'intensité d'un faisceau de rayons lumineux diminue en traversant une certaine épaisseur de solution colorée, d'après la *loi de Beer-Lambert,* qui lie l'intensité de la lumière à la concentration de la solution examinée, et qui s'exprime par la relation :

$$I = I_0 \cdot e^{-ksc}$$

où I et I_0 sont les intensités respectives de la lumière qui a traversé une certaine épaisseur de solution et de la lumière ayant traversé la même épaisseur de solvant, s l'épaisseur de la solution, c la concentration de la substance colorée, et k une constante.

Ce système de détermination des concentrations peut être suivi en comparant, à l'œil nu, l'éprouvette contenant la solution examinée avec une série de solutions échantillons contenant différentes concentrations de la même substance; cette manière de procéder est peu précise, mais peut être d'une grande utilité.

En revanche, les résultats que l'on obtient avec les *colorimètres* sont bien plus précis. En pratique, ceux-ci sont constitués d'une source lumineuse, d'intensité constante; on fait passer le rayon lumineux à travers une cuvette en matériau transparent, d'abord remplie d'eau pure, puis de la substance à examiner. Avec une cellule photoélectrique, on détermine l'intensité de la lumière qui traverse la cuve, et, au moyen de calculs simples, il est possible d'évaluer la concentration de la substance dans l'échantillon. Mais, même dans ce cas, il est nécessaire d'étalonner l'instrument, c'est-à-dire d'effectuer des essais avec des échantillons de concentrations connues, en inscrivant sur un graphique la valeur du rapport I/I_0, appelé *transmittance,* en fonction des concentrations; le diagramme permet d'obtenir facilement la donnée désirée.

Spectrophotométrie

On peut obtenir des résultats encore plus précis que ceux que nous venons de décrire en utilisant, à la place de la lumière blanche, une lumière monochromatique et en mesurant, non plus le taux de transmission, mais la *densité optique,* c'est-à-dire $\log I_0/I$. Ce principe est appliqué surtout à certains instruments, les spectrophotomètres, qui travaillent en lumière ultraviolette ou infrarouge.

Spectrophotométrie d'absorption dans l'ultraviolet

De nombreux sels minéraux incolores ou peu colorés présentent de fortes absorptions dans le domaine de l'*ultraviolet,* de même que nombre de substances organiques, également incolores; un spectre UV peut donner des indications sur la nature des substances et sur leur concentration, selon le mode opératoire suivi. Si l'on dispose d'un instrument capable d'émettre des radiations UV de différentes longueurs d'onde, il est possible de déterminer dans quelles régions du spectre UV la substance absorbe; le spectre ainsi obtenu, c'est-à-dire le graphique sur lequel sont reportées, en abscisses, les longueurs d'onde, et, en ordonnées, la densité optique, donne des indications importantes sur la nature de la substance examinée. En opérant, en revanche, à longueur d'onde constante et en se servant également dans ce cas de courbes d'étalonnages appropriées, il est possible d'effectuer des déterminations quantitatives sur la solution étudiée.

Spectrophotométrie d'absorption dans l'infrarouge

De la même manière, on peut utiliser à des fins d'analyse les *spectrophotomètres dans l'infrarouge* (IR) ; ils se prêtent surtout à l'examen des substances organiques. L'absorption d'énergie est liée, dans ce cas, à certains mouvements relatifs des atomes. En effet, les atomes ne sont pas rigoureusement fixes les uns par rapport aux autres, mais peuvent accomplir de petits mouvements, qui provoquent la déformation de la molécule en diminuant sa symétrie originelle; par exemple, deux atomes peuvent se rapprocher ou s'éloigner le long de l'axe de liaison, ou bien présenter des mouvements de torsion et de déformation par rapport à ce même axe. Ces mouvements vibratoires se produisent selon des fréquences bien précises, c'est-à-dire à des longueurs d'onde caractéristiques pour chaque groupe, ou mieux pour chaque type de mouvements réciproques d'un ensemble d'atomes donnés (ainsi, on parle de *fréquence de stretching* ou de *bending* ou de *rocking* pour le groupe C—H, ou CH_2 ou CO, CN, etc.).

Un certain groupe fonctionnel, par exemple, le carboxyle —COOH d'un acide, l'oxhydrile —OH d'un alcool, etc., absorberont dans des régions déterminées de l'IR. C'est pourquoi, en enregistrant le spectre d'une substance (c'est-à-dire en reportant sur un graphique la transmission par rapport aux longueurs d'onde), on peut, à partir des pics d'absorption que celui-ci présente, reconnaître, du moins en partie, les groupes fonctionnels que la substance possède. En opérant à une longueur d'onde donnée, et à l'aide de courbes d'étalonnage particulières, on peut même effectuer des analyses quantitatives.

Beaucoup de spectrophotomètres actuels, tant UV qu'IR, très perfectionnés, permettent la réalisation de diverses expériences, outre l'enregistrement automatique des spectres. Comme source lumineuse, on emploie généralement une lampe appropriée; un prisme ou un réseau de diffraction décompose le faisceau incident dans les différentes longueurs d'onde qui forment son spectre. L'optique de ces instruments est particulièrement délicate et coûteuse, puisqu'elle emploie des matériaux spéciaux

▼ *Un* **spectrophotomètre dans l'infrarouge**; *ce type d'appareil se prête surtout à l'examen des substances organiques.*

A. Bommer - Centre de Recherches sur les macromolécules du C.N.R.S.

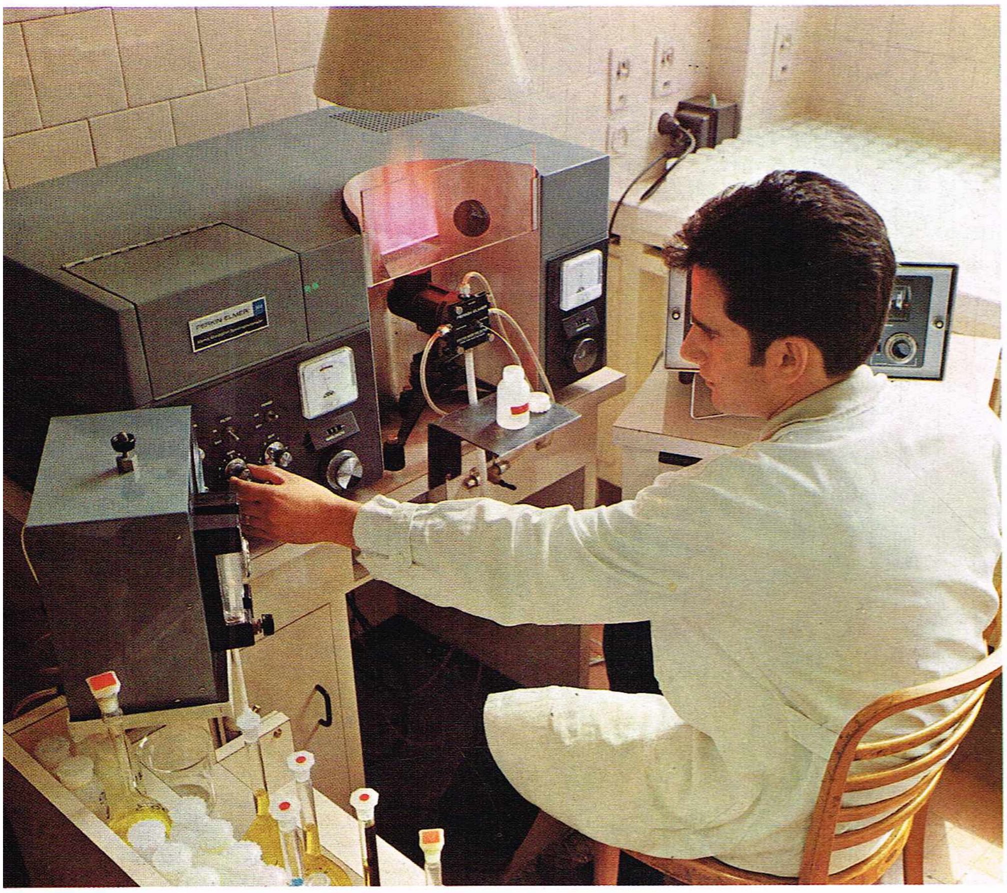

A. Rizzi

▲ ***Vue d'ensemble d'un* spectrophotomètre à absorption atomique ; *cet instrument est utile pour l'analyse quantitative des métaux.***

A. Rizzi

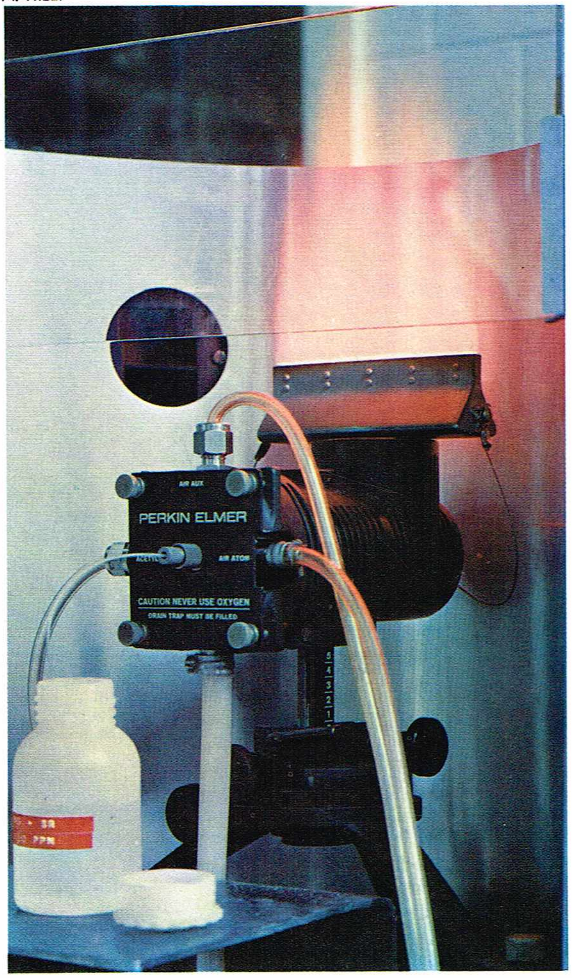

▶ ***Détail du* spectrophotomètre à absorption atomique *illustré ci-dessus ; la zone de la flamme est colorée par des sels de lithium.***

(en général des sels minéraux comme le bromure de potassium ou le chlorure de sodium pour l'IR, le quartz pour l'UV) transparents aux radiations utilisées.

Spectrophotométrie d'émission

Nous avons étudié jusqu'à présent les méthodes qui reposent sur l'*absorption de radiations* par les solutions ou les substances solides. Il nous reste à examiner les méthodes fondées sur l'*émission de radiations* lumineuses, qui ne sont pas les moins importantes, surtout dans le domaine industriel et métallurgique.

Dans l'analyse qualitative, nous avons déjà eu l'occasion d'observer que certains métaux alcalins et alcalino-terreux peuvent être identifiés par la coloration qu'ils confèrent à la flamme d'un bec Bunsen ; dans ces conditions, les électrons sont excités par l'énergie thermique et passent immédiatement du niveau fondamental à un niveau plus élevé d'énergie. Dans un deuxième temps, ils perdent cet excès d'énergie et le réémettent sous forme de radiations lumineuses de longueur d'onde caractéristique. Ces radiations varient d'un élément à l'autre et dépendent de la structure électronique des atomes. C'est sur ce principe qu'est fondée la *spectrophotométrie d'émission,* principe qui, dans certaines conditions, est valable même pour des éléments non excités par la flamme d'un bec Bunsen. Il s'ensuit que la spectrophotométrie d'émission, dans ses différentes applications, est très employée.

Dans le cas où la source d'énergie est constituée par l'*arc voltaïque,* ou arc électrique, celui-ci est produit entre deux électrodes ; celles-ci sont constituées de charbon si la substance à examiner ne conduit pas l'électricité (l'échantillon est alors placé dans une cavité pratiquée à l'extrémité d'une des deux électrodes), ou du matériau même qui fait l'objet de l'étude s'il s'agit d'un bon conducteur, par exemple un alliage métallique. La lumière émise, dispersée au moyen d'un prisme de quartz, est dirigée sur une plaque photographique. On obtient ainsi le *spectre* de la substance, sous forme de raies plus ou moins minces et plus ou moins intenses ; du nombre de raies et de leur position on déduit la composition qualitative de l'échantillon, tandis que les quantités des divers éléments sont déterminées à l'aide d'un photomètre et d'une courbe d'étalonnage appropriée.

Cette méthode n'est pas très précise, mais elle est très utile dans les analyses en série ; en outre, elle est utilisée en minéralogie et en pétrographie. Des instruments automatiques très perfectionnés peuvent être employés en continu pour suivre la production d'aciers spéciaux ou d'autres alliages ; leur coût élevé limite leur utilisation aux entreprises et laboratoires importants.

La *spectrophotométrie de flamme,* très intéressante, utilise comme source d'énergie une flamme, généralement oxyacétylénique et réglée de manière à obtenir une intensité aussi constante que possible. Elle permet la détermination quantitative des éléments qui sont excitables par la flamme, comme les alcalins et les alcalino-terreux, le bore et le cuivre, et notamment le rubidium, le césium et le potassium, dont les sels sont extrêmement solubles et ne se prêtent pas aux opérations habituelles de l'analyse gravimétrique. Là aussi, la lumière émise est décomposée par un prisme, et les mesures portent sur les raies les plus caractéristiques de chaque élément.

Spectrophotométrie d'absorption atomique

La spectrophotométrie d'absorption atomique a pris de nos jours une grande importance ; elle aussi utilise comme moyen d'excitation une flamme oxyacétylénique. Mais, dans ce cas, au lieu de la lumière émise par les atomes excités (qui constituent une partie infime de l'ensemble des atomes présents), on utilise la lumière absorbée par les atomes qui se trouvent à l'état fondamental d'énergie. Une lampe spéciale émet la lumière, que l'on fait passer à travers la flamme oxyacétylénique ; la mesure de la quantité de lumière absorbée par l'élément présent dans l'échantillon introduit dans la flamme permet de déterminer le pourcentage de celui-ci. Ce système est très rapide et remarquablement sensible. En effet, capable de mesurer même quelques parties par million, il permet, par exemple, de déceler la présence d'éléments à l'état de traces dans les minéraux. Cette méthode se prête très bien à l'analyse de la teneur en un même élément dans une série d'échantillons.

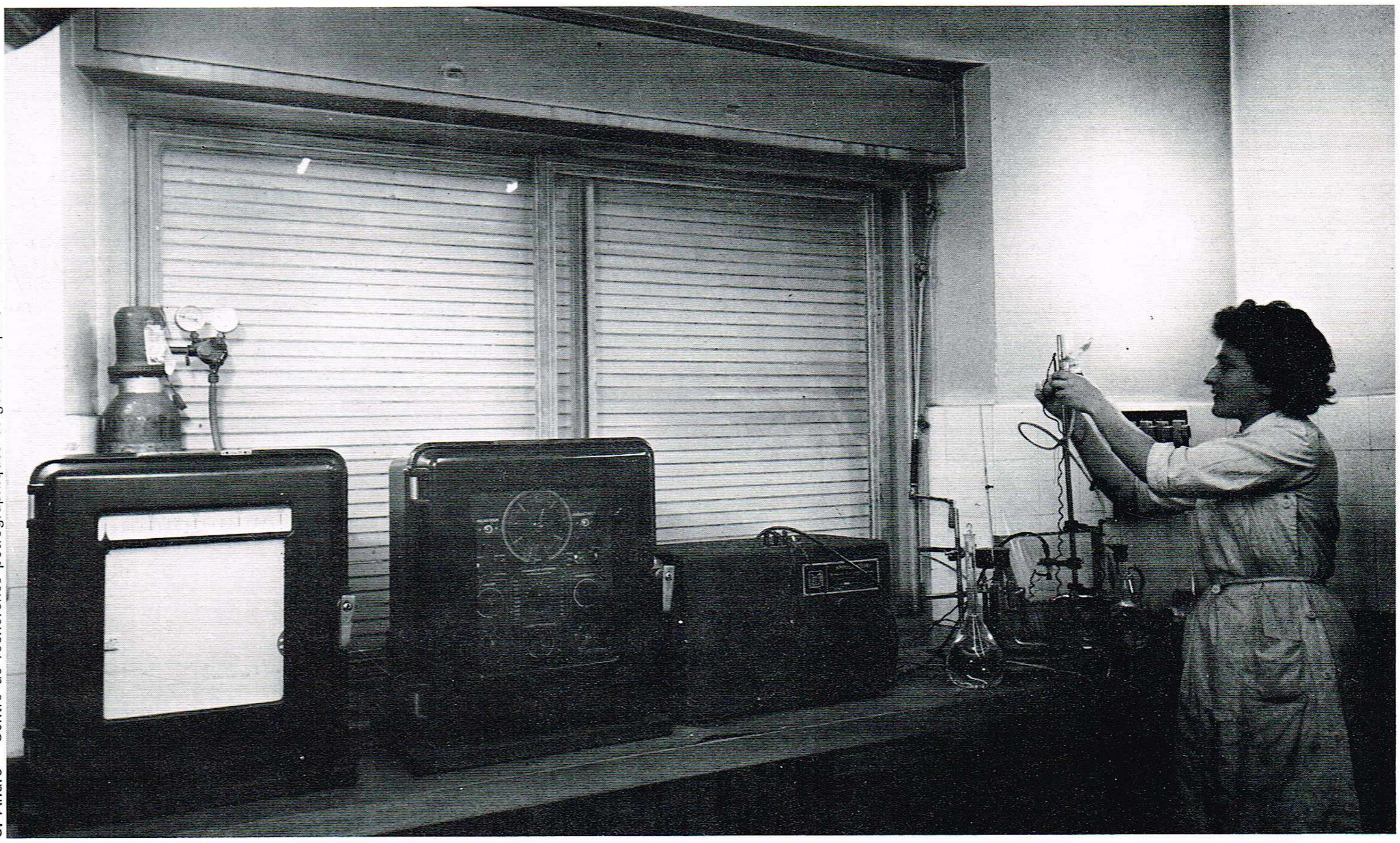

C. André - Centre de recherches pétrographiques et géochimiques du C.N.R.S.

▲ *Laboratoire d'analyse quantitative des silicates par voie humide; ici, le* **polarographe de Meci** *pour le dosage des traces de certains métaux.* **L'analyse polarographique** *est une des techniques électrochimiques les plus importantes.*

Méthodes électrochimiques

Le principe de nombreux instruments d'analyse est fondé sur des phénomènes électrochimiques; destinés surtout à l'exécution de titrages de solutions, on range ces instruments parmi les systèmes classiques de l'analyse volumétrique.

Titrage potentiométrique

Pour effectuer un titrage potentiométrique, on place deux électrodes dans la solution à titrer : l'une est l'électrode de référence, l'autre est appelée électrode indicatrice. La nature de cette dernière dépend du type de réaction qui se produit au cours du titrage. On suit l'évolution de la différence de potentiel entre les deux électrodes durant le titrage : une élévation soudaine, ou une baisse, marque le point de virage. Aujourd'hui, certains de ces instruments sont automatiques : une brusque variation actionne un dispositif qui ferme automatiquement la burette, permettant ainsi à l'analyste de vaquer, pendant ce temps, à d'autres occupations.

Les titrages potentiométriques présentent deux avantages par rapport aux titrages à l'aide des indicateurs habituels : ils sont généralement plus précis, et surtout ils peuvent être utilisés pour les solutions fortement colorées, l'emploi d'un indicateur de virage étant dans ce cas impossible.

Titrage conductimétrique

On introduit dans la solution à étudier deux électrodes de platine platiné (c'est-à-dire recouvertes de platine finement divisé). On mesure la conductibilité (ou la résistivité) de la solution, et cela plusieurs fois au cours du titrage. Une brusque variation du tracé marque le point final. Ce titrage est toutefois moins précis que celui qui se fonde sur l'emploi d'indicateurs ou que la méthode potentiométrique. Cependant, lorsqu'il s'agit de titrer des acides très faibles, cette méthode est la seule qui offre des résultats satisfaisants. Elle se révèle aussi très utile dans le cas de solutions colorées; le titrage conductimétrique est préféré au titrage potentiométrique lorsqu'on ne dispose pas d'électrodes indicatrices satisfaisantes.

Dans les titrages conductimétriques usuels, on emploie un courant d'une fréquence d'environ 1 000 cycles par seconde. Dans les titrages à haute fréquence (10^6 hertz), il est possible de disposer les électrodes en dehors de la solution étudiée, sur les côtés opposés du becher qui la contient. Les courbes de titrage ainsi obtenues présentent un aspect différent des tracés habituels, mais, dans ce cas aussi, le point final est marqué par un net changement de la pente de la courbe.

Par rapport aux méthodes volumétriques traditionnelles, les méthodes plus récentes présentent un avantage : il n'est plus nécessaire d'éviter soigneusement de dépasser la neutralité. Ajouter un excès de substance titrante n'est plus une erreur à éviter, mais une opération que l'on accomplit toujours. C'est à partir du tracé obtenu que l'on mesure la concentration.

Polarographie

La polarographie ou analyse polarographique est une des techniques électrochimiques les plus importantes; dans les polarographes, une des électrodes (l'électrode négative) est constituée par du mercure contenu dans un récipient approprié et qu'on laisse s'égoutter dans la solution, à la vitesse de 20 à 30 gouttes par minute, à travers un tube capillaire plongeant dans la solution. Le mercure qui se rassemble au fond du récipient peut être relié au pôle positif du générateur. Si l'électrode positive est une électrode au calomel, ce n'est que mieux.

On augmente progressivement la force électromotrice entre les deux électrodes, tout en lisant fréquemment l'intensité de courant qui traverse la solution. On porte sur un graphique l'intensité lue en fonction de la force électromotrice; on note généralement des paliers sur le graphique; chacun de ceux-ci correspond à une espèce présente dans la solution et susceptible d'être réduite. Chaque palier est donc caractéristique d'une certaine substance; en outre, sa hauteur est proportionnelle à la concentration du soluté qui est réduit. Ainsi, la polarographie, comme certaines des méthodes déjà citées, permet d'effectuer simultanément des recherches qualitatives et quantitatives sur la même solution.

Les méthodes polarographiques exigent des instruments assez délicats et, de plus, une certaine expérience

▶ *Un* spectromètre R. M. N. ; *la résonance magnétique nucléaire est plus une méthode d'identification des structures moléculaires organiques qu'une méthode d'analyse de routine.*

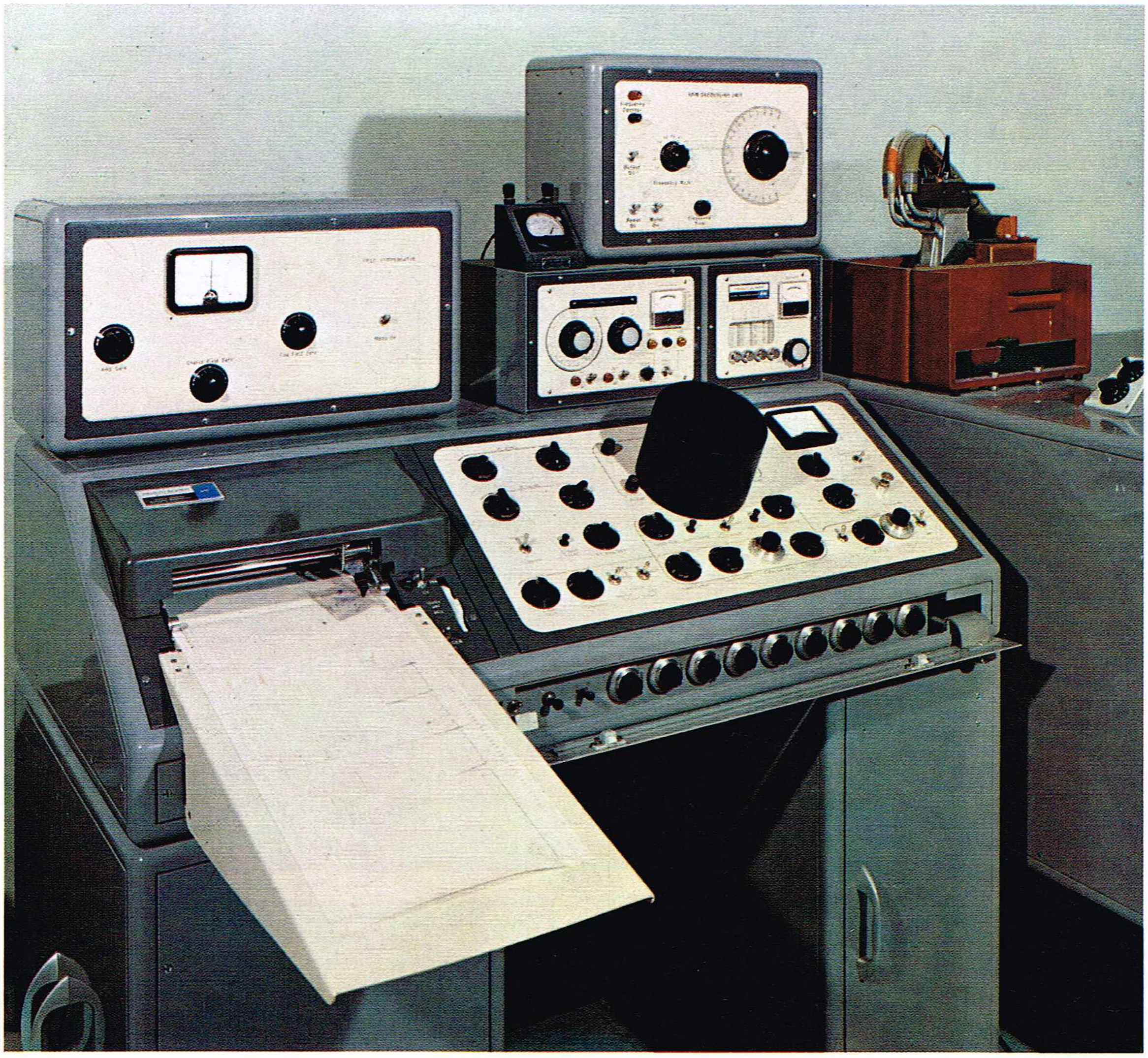

A. Rizzi

de la part de l'opérateur. Des calculs, parfois complexes, sont nécessaires pour l'interprétation des données; aussi la polarographie est-elle appliquée de préférence à certains problèmes particuliers qui ne peuvent être résolus autrement. En outre, elle fournit des résultats généralement moins précis que les opérations gravimétriques et volumétriques normales, sauf lorsqu'il s'agit de déterminer des éléments à l'état de traces. De là, l'emploi de la polarographie dans les analyses de minéraux.

Rappelons enfin que la technique polarographique est utilisée aussi pour reconnaître le point final dans les *titrages ampérométriques* (par lesquels on mesure l'intensité qui traverse la solution).

▼ *Le* spectre R. M. N. *de l'alcool éthylique.*

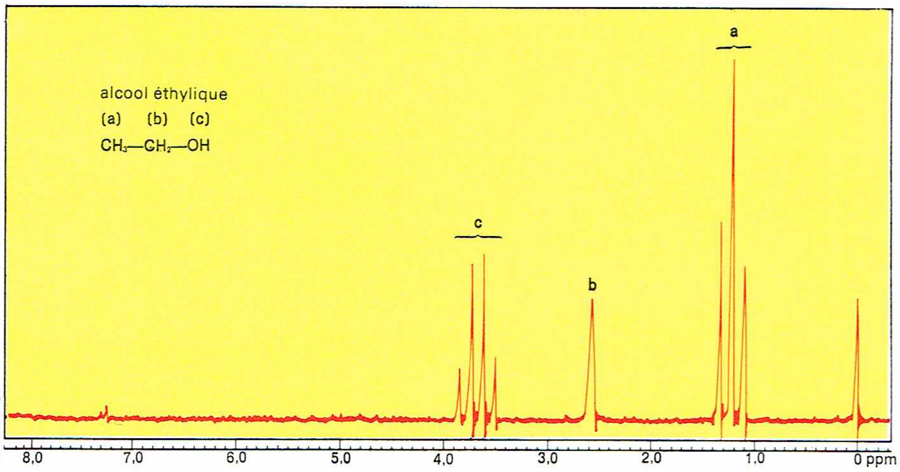

I.G.D.A.

Résonance magnétique nucléaire (R. M. N.)

Son principe est fondé sur le fait que certains noyaux atomiques sont magnétiques et, par conséquent, s'orientent lorsqu'ils sont placés dans un champ magnétique. La spectroscopie R. M. N. consiste à mesurer l'énergie nécessaire pour modifier l'alignement des noyaux dans un champ magnétique.

Le nombre des atomes dont le noyau est magnétique est très élevé (H, ^{13}C, ^{15}N, ^{19}F, etc.). Pratiquement, la résonance magnétique nucléaire est utilisée avec l'hydrogène, et aussi avec le ^{19}F et le ^{31}P. En fait, dans la majorité des cas, lorsqu'on ne précise pas, on considère les spectres R. M. N. de l'hydrogène ^{1}H. Sans entrer dans le détail de cette technique d'identification, très précieuse en chimie organique, on peut dire qu'elle permet d'établir pour chaque composé une véritable fiche d'identification. Chaque hydrogène, selon son environnement, peut être mis en évidence. Ainsi, dans le cas classique de la molécule d'éthanol (CH_3—CH_2OH), on peut identifier les H du groupe méthyle (CH_3), ceux du groupe méthylène (CH_2) et celui de l'hydroxyle (OH).

La R. M. N. est plus une méthode d'identification des structures moléculaires en chimie organique qu'une méthode d'analyse de routine. Elle a rendu des services très grands dans la recherche en chimie organique.

Spectrométrie de masse

La spectrométrie de masse consiste à bombarder par un faisceau d'électrons de moyenne énergie, sous vide poussé, les molécules à analyser. On identifie ensuite les particules chargées résultant de la fragmentation en ions de la molécule d'origine. Les spectromètres de masse du

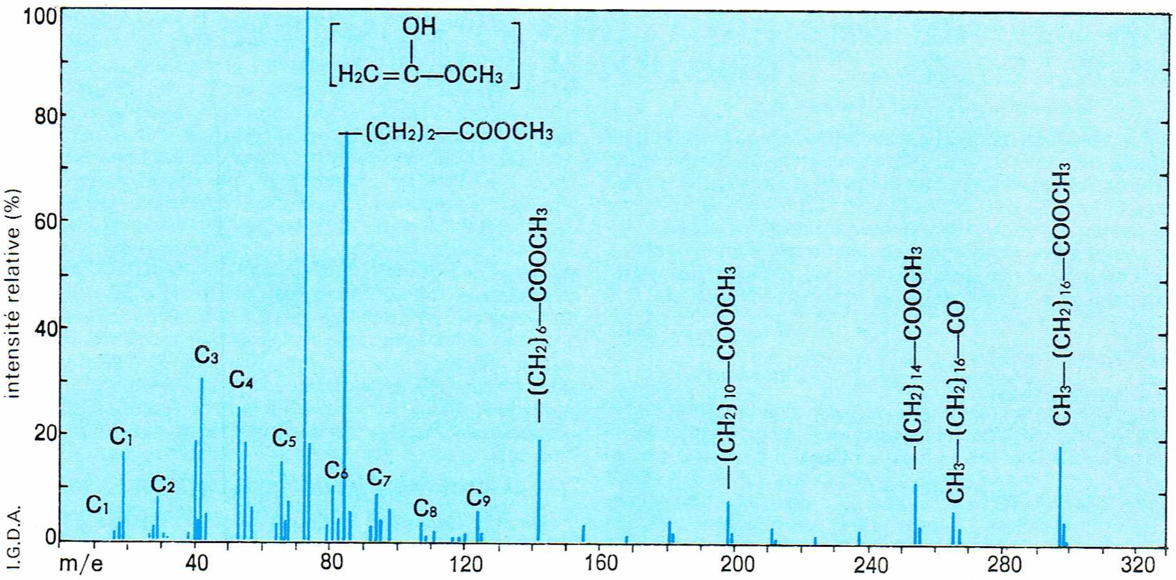

◀ *Le spectre de masse du stéarate de méthyle. La spectrométrie de masse consiste à bombarder par un faisceau d'électrons de moyenne énergie, sous vide poussé, les molécules à analyser.*

commerce analysent en fait les particules chargées positivement. La molécule, à partir d'un ion moléculaire, se scinde en un certain nombre de fragments ionisés, dont l'ensemble constitue le *spectre de masse*. Tous les ions formés sont dispersés et focalisés au moyen de champs électromagnétique et électrostatique. Les particules de même rapport m/e (m étant leur masse, et e la charge de l'ion) se focalisent suivant des paraboles ; à chaque parabole correspond une masse. On mesure les rapports d'abondance des ions ayant même rapport m/e.

Autres méthodes d'analyse

Il faudrait encore citer les méthodes permettant d'analyser ou d'identifier les corps par **analyse thermique différentielle** ou par **calorimétrie différentielle.**

Enfin, il n'est guère d'applications importantes de la chimie (matières plastiques, élastomères, détergents, etc.) qui, outre les méthodes « classiques » que nous venons de décrire, ne soient obligées d'avoir recours à des *techniques spécifiques d'identification ou de dosage*. Il est donc impossible de passer en revue toutes les méthodes d'analyse utilisées par les chimistes, et nous limiterons cette description aux méthodes les plus importantes que nous venons d'étudier.

BIBLIOGRAPHIE

BELLAMY L. J., *The Infrared Spectra of Complex Molecules,* Wiley, New York, 1958. - BELLAMY L. J., *Spectroscopie d'absorption appliquée aux composés organiques,* Dunod, Paris, 1967. - CHARLOT G., *Chimie analytique quantitative : I. Méthodes chimiques et physico-chimiques ; II. Méthodes sélectionnées d'analyse chimique des éléments,* Masson, Paris, 1974. - REILLEY C., *Experiments for Instrumental Methods (a Laboratory Manual),* Mac Graw Hill, London, 1961. - SILVERSTEIN R. M., BASILER G. C., *Identification spectrométrique des composés organiques,* Masson, Paris, 1968. - SURRUGUE J., *Techniques générales du laboratoire de physique,* 2e éd., C. N. R. S., Paris, 1965.

Castano-Ciboldi

◀ *Un* **spectromètre de masse ;** *l'instrument analyse en fait les particules chargées positivement.*

INFLUENCE DES FACTEURS PHYSIQUES SUR LES RÉACTIONS CHIMIQUES

Les réactions chimiques sont influencées par un certain nombre de facteurs physiques comme la température, la pression et la concentration. Elles peuvent en outre être favorisées par la lumière ou d'autres radiations, par le passage d'un courant électrique, etc.

Le but de ce chapitre est de passer en revue l'influence qu'exercent sur la réaction chimique ces facteurs généralement mis à profit dans les processus industriels.

Influence de la chaleur - Thermochimie

Généralement, les réactions chimiques sont accompagnées d'effets thermiques : celles qui produisent de la chaleur sont dites *exothermiques,* celles qui en absorbent sont *endothermiques;* quelques rares réactions sont *athermiques,* c'est-à-dire qu'elles ont lieu sans absorption ni dégagement de chaleur. De même, la dissolution d'un solide dans un liquide et le passage d'un état d'agrégation de la matière à un autre (fusion, sublimation, évaporation, etc.) sont accompagnés d'échanges thermiques.

La mesure des quantités de chaleur cédées ou absorbées est l'objet de la *thermochimie;* les appareils utilisés pour la mesure sont le *calorimètre* et la *bombe calorimétrique.*

Le principe de base de la thermochimie est celui de la *conservation de l'énergie.* Des systèmes chimiques différents ont des contenus énergétiques différents. Il en résulte que l'énergie totale des produits d'une réaction peut différer de celle des réactifs. C'est la raison pour laquelle les réactions sont généralement accompagnées d'un dégagement de chaleur ou, au contraire, nécessitent une absorption de chaleur. Comme on l'a vu à propos de la thermodynamique, la mesure de la quantité de chaleur cédée ou absorbée durant une réaction est donnée par la variation, durant la transformation, de la fonction thermodynamique appelée enthalpie (désignée par la lettre H).

Comme l'enseigne le premier principe de la thermodynamique, l'énergie totale d'un système doit rester *constante;* en d'autres termes, les différentes formes d'énergie se transforment les unes dans les autres, ce qui s'exprime par la relation :

$$\Delta U = Q_P - P\Delta V$$

où ΔU est la variation d'énergie du système lors d'une transformation, Q_P la quantité de chaleur absorbée ou cédée lors de la transformation, et $P\Delta V$ le travail à pression constante (P est la pression, et V le volume). Cette relation peut s'écrire :

$$Q_P = \Delta U + P\Delta V$$

Si l'on considère une transformation chimique définie correspondant au passage d'un état A à un état B dont les énergies sont respectivement U_A et U_B, on a :

$$\Delta U = U_B - U_A \quad \text{et} \quad \Delta V = V_B - V_A$$

et la relation précédente peut s'écrire :

$$Q_P = (U_B - U_A) + P\,(V_B - V_A) = (U_B + PV_B) - (U_A + PV_A)$$

ou $Q_P = H_B - H_A = \Delta H$
avec $H = U + P\Delta V$

H est l'*enthalpie* (mais on l'appelle aussi le contenu thermique ou la fonction thermique à pression constante) et ne dépend que de l'état dans lequel se trouve le système et non de la manière dont le système a été amené à cet état. Lorsqu'une réaction chimique est accompagnée d'une variation de volume (c'est le cas des réactions où interviennent des gaz), l'effet thermique dépend du fait que la pression est maintenue constante ou pas. Généralement, on considère les réactions comme intervenant à la pression atmosphérique, et les effets thermiques de la réaction sont exprimés en termes de ΔH qui, dans ce cas, est la *chaleur de réaction.* Par convention, ΔH représente la chaleur absorbée dans la réaction, et la chaleur cédée par la réaction est désignée par $-\Delta H$.

En thermochimie, il est nécessaire d'indiquer l'état (solide, liquide ou gazeux) des réactifs et des produits, ainsi que l'effet thermique qui les accompagne. Ainsi, la combustion du carbone avec production de CO_2 et de chaleur s'écrit :

$$C\ (s) + O_2\ (g) \rightarrow CO_2\ (g)\ \Delta H = -94{,}03\ \text{kcal}$$

Cette notation exprime le fait que, lorsque 12 g de carbone solide réagissent avec 32 g d'oxygène gazeux à pression constante, il se forme 44 g d'anhydride carbonique gazeux, et l'enthalpie diminue de 94,03 kcal, c'est-à-dire que la réaction dégage 94,03 kcal.

Parfois, pour exprimer directement la production de chaleur par une réaction chimique, on l'écrit de la façon suivante :

$$C\ (s) + O_2\ (g) \rightarrow CO_2\ (g) + 94{,}03\ \text{kcal}$$

On considère alors en quelque sorte la chaleur dégagée comme un produit de la réaction.

Définitions

Avant d'aborder l'étude de la production de chaleur par une réaction chimique et de l'action de la chaleur sur les réactions chimiques, il est utile de rappeler quelques définitions.

Chaleur massique

Les corps diffèrent les uns des autres par la quantité de chaleur nécessaire pour produire une augmentation de température donnée dans une certaine masse de ces corps. Supposons que la quantité de chaleur Q fournie à un corps augmente sa température de ΔT. On nomme *capacité calorifique* du corps le rapport de la chaleur fournie à l'augmentation de température : $Q/\Delta T$.

Pour obtenir une valeur caractéristique du composé qui constitue le corps envisagé, on introduit la notion de *chaleur massique* qui est définie comme la capacité calorifique par unité de masse d'un corps constitué de ce composé : $Q/m\Delta T$. La *chaleur massique* est numériquement égale à la quantité de chaleur qui doit être fournie à l'unité de masse du corps pour augmenter sa température de 1 °C.

La *chaleur massique* est exprimée en joules par unité de masse et par degré. Cependant, dans de nombreuses mesures calorimétriques on rapporte la chaleur massique du composé étudié à celle de l'eau, liquide qui a été choisi pour définir la calorie. C'est la raison pour laquelle les chaleurs massiques sont parfois exprimées en calories.

On peut noter comme un fait expérimental que, pour beaucoup d'éléments à l'état solide, le produit de la chaleur massique par la masse atomique est toujours d'environ 6,3. Ceci constitue la *loi de Dulong et Petit.*

Chaleur de fusion

Si l'on fournit de la chaleur à un composé (qui ne soit pas de nature vitreuse), on observe au point de fusion que la température reste constante jusqu'à ce que tout le solide soit transformé en liquide et qu'elle continue de monter après cette fusion. Cela signifie que, à la température de fusion, il faut fournir au solide une certaine quantité de chaleur pour le faire passer à l'état liquide. Lorsque l'on rapporte la chaleur fournie pour la fusion à une mole du solide, on parle de *chaleur molaire de fusion.*

Inversement, lorsqu'un liquide se solidifie, il cède une quantité de chaleur égale à sa chaleur de fusion, et que l'on appelle la *chaleur de solidification.*

Chaleur d'évaporation (ou de vaporisation) et de sublimation

La *chaleur d'évaporation* est la quantité de chaleur par unité de masse que l'on doit fournir à une substance à sa température d'ébullition pour la transformer complètement dans sa forme gazeuse à cette température. Ainsi, l'évaporation (ou la vaporisation) de l'eau s'écrit :

$$H_2O\ (l) \rightarrow H_2O\ (g)\ \Delta H = 9{,}717\ \text{kcal}$$

La *chaleur de sublimation* est la quantité de chaleur par unité de masse pour le passage direct de l'état solide à l'état gazeux.

Chaleur de dissolution

La dissolution d'un gaz, d'un liquide ou d'un solide dans un liquide est un processus qui s'accompagne d'un

effet thermique. La dissolution peut fréquemment s'accompagner de phénomènes de solvatation (interaction de la substance avec le solvant) qui présentent aussi des effets thermiques. Pour cette raison, la mesure de la chaleur de dissolution est souvent très complexe. On note expérimentalement que la dissolution des gaz dans les liquides est toujours exothermique, la solution des liquides dans les liquides est généralement exothermique, et la dissolution des solides dans les liquides est soit exothermique, soit endothermique.

Chaleur de réaction

C'est la quantité de chaleur absorbée ou produite lors d'une réaction chimique. Il est important de se souvenir que la chaleur de réaction dépend de l'état physique des réactifs et des produits. Ainsi, si l'on considère la chaleur de formation de l'eau à partir de ses éléments pris à l'état gazeux, selon que l'eau formée est gazeuse ou liquide, on observe une différence de 9,717 kcal. Cela correspond dans le cas de la formation d'eau liquide à la chaleur de liquéfaction de la vapeur :

$$2\ H_2\ (g) + O_2\ (g) \rightarrow 2\ H_2O\ (g)\ \Delta H = -\ 115{,}60\ \text{kcal}$$
$$2\ H_2\ (g) + O_2\ (g) \rightarrow 2\ H_2O\ (l)\ \Delta H = -\ (115{,}60 + 9{,}717)\ \text{kcal}$$

Chaleur de formation

C'est la variation d'enthalpie qui résulte de la formation d'une mole d'un composé à partir de ses éléments pris à l'état standard, c'est-à-dire sous leur forme stable, à la température ordinaire et à la pression atmosphérique. Par convention, l'enthalpie de tous les éléments prise à 25 °C (298 °K) est égale à zéro ; il s'ensuit que l'enthalpie d'un composé est égale à sa chaleur de formation.

Si l'on connaît la chaleur de formation de toutes les substances qui participent à une réaction, il est possible de calculer l'effet thermique de celle-ci. Si l'on considère par exemple la combustion du méthane :

$$CH_4\ (g) + 2O_2\ (g) \rightarrow CO_2\ (g) + 2H_2O\ (l)$$

On sait que la chaleur de formation du méthane est de : — 17,9 kcal/mole, que l'oxygène est à l'état standard, que la chaleur de formation de l'anhydride carbonique est — 94,0 kcal/mole, et que la chaleur de formation de l'eau est — 68,3 kcal/mole, valeur qu'il faut multiplier par 2 puisqu'il se forme deux molécules d'eau. La chaleur de réaction est donnée par :

$$\Delta H = [-\ 94{,}0 + 2\ (-\ 68{,}3)] - (-\ 17{,}9) = -\ 212{,}7\ \text{kcal}$$

Cela signifie que la combustion d'une molécule de méthane libère 212,7 kcal.

De la même manière, on peut calculer la chaleur de formation d'un composé qui participe à une réaction lorsque l'on connaît la chaleur de réaction et la chaleur de formation de tous les autres composés qui y participent.

De plus, les chaleurs de formation qui ne peuvent pas être mesurées directement en étudiant la réaction de formation à partir des éléments peuvent être calculées indirectement, en raison du principe de l'additivité des chaleurs de réaction ; c'est la *loi de Hess*. Cette loi, qui est la plus importante en thermochimie, est fondée sur des considérations expérimentales et dit que l'effet thermique d'une réaction chimique est toujours le même, indépendamment du fait que la réaction a lieu en une seule étape ou en plusieurs. C'est une conséquence du premier principe de la thermodynamique.

Si l on fixe l'état initial et final du système en réaction, la variation de la quantité de chaleur est fixée et ne dépend pas du chemin parcouru pour aller de l'état initial à l'état final. Cela permet de calculer indirectement une chaleur de réaction, comme va l'illustrer l'exemple suivant : supposons que l'on veuille calculer la chaleur de formation du carbonate de calcium, c'est-à-dire l'effet thermique de la réaction :

$$Ca\ (s) + C\ (s) + 3/2\ O_2\ (g) \rightarrow CaCO_3\ (s)$$

Cette réaction offre beaucoup trop de difficultés pour être étudiée directement. Par contre, on connaît bien les trois réactions suivantes :

$$Ca\ (s) + 1/2\ O_2\ (g) \rightarrow CaO\ (s) + 151{,}85\ \text{kcal}$$
$$C\ (s) + O_2\ (g) \rightarrow CO_2\ (g) + 94{,}05\ \text{kcal}$$
$$CaO\ (s) + CO_2\ (g) \rightarrow CaCO_3\ (s) + 42{,}55\ \text{kcal}$$

Si l'on ajoute membre à membre les trois équations précédentes, on obtient :

$$Ca\ (s) + 3/2\ O_2\ (g) + C\ (s) + CaO\ (s) + CO_2\ (g) \rightarrow CaO\ (s) + CO_2\ (g) + CaCO_3\ (s)$$

dont l'effet thermique global est de 288,45 kcal. Comme on le voit, il suffit d'éliminer les composés qui figurent à la fois dans les deux membres de l'équation pour trouver la réaction que l'on désirait étudier.

Pour vérifier l'exactitude du résultat, on peut considérer une autre méthode. On passe cette fois par le carbure de calcium :

$$Ca\ (s) + 2C\ (s) \rightarrow CaC_2\ (s) + 15{,}0\ \text{kcal}$$
$$CaC_2\ (s) + 5/2\ O_2\ (g) \rightarrow CaCO_3\ (s) + CO_2\ (g) + 367{,}5\ \text{kcal}$$
$$94{,}05\ \text{kcal} + CO_2\ (g) \rightarrow C\ (s) + O_2\ (g)$$

En additionnant membre à membre et en éliminant dans chaque membre les composés identiques, on trouve :

$$Ca\ (s) + C\ (s) + 3/2\ O_2\ (g) \rightarrow CaCO_3\ (s) + 288{,}45\ \text{kcal}$$

résultat analogue au précédent.

Calorimétrie

La donnée que l'on mesure expérimentalement en thermochimie est, comme on vient de le voir, la quantité de chaleur qui accompagne la réaction ou le changement d'état ; les instruments qui permettent cette mesure sont les calorimètres.

Un *calorimètre* est constitué par un récipient plein d'eau (que l'on désignera par A), muni d'un thermomètre de précision et d'un agitateur, et dans lequel on immerge le récipient où l'on réalise la réaction.

Dans le cas des combustions, on utilise un appareil appelé *bombe calorimétrique*. C'est un récipient fermé, en acier. L'oxygène sous pression alimente la combustion que l'on déclenche par un courant électrique grâce à deux électrodes.

Le récipient A est à son tour situé dans un récipient B plus grand, plein d'eau maintenue à une température constante par un dispositif thermostatique. Entre les deux récipients, une couche d'air joue le rôle d'isolant thermique. On mesure expérimentalement l'augmentation de température de l'eau contenue dans le récipient A.

Un autre type de calorimètre est le *calorimètre à glace* dans lequel le récipient A contient de la glace à la place de l'eau. La chaleur dégagée par la réaction est mesurée en tenant compte de la quantité de glace qui a disparu et dont on connaît avec précision la chaleur molaire de fusion.

A. Rizzi

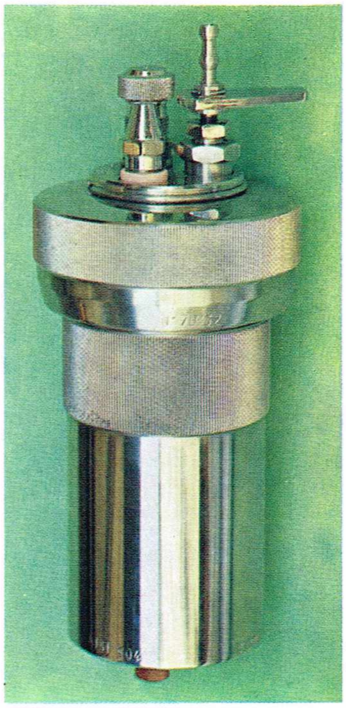

A. Rizzi

▼ *A gauche, le* **calorimètre de Berthelot-Mahier-Kröcker ;** *on voit nettement les thermomètres et le petit moteur actionnant l'agitateur. A droite, une* **bombe calorimétrique** *utilisée pour la mesure du pouvoir calorifique des substances combustibles.*

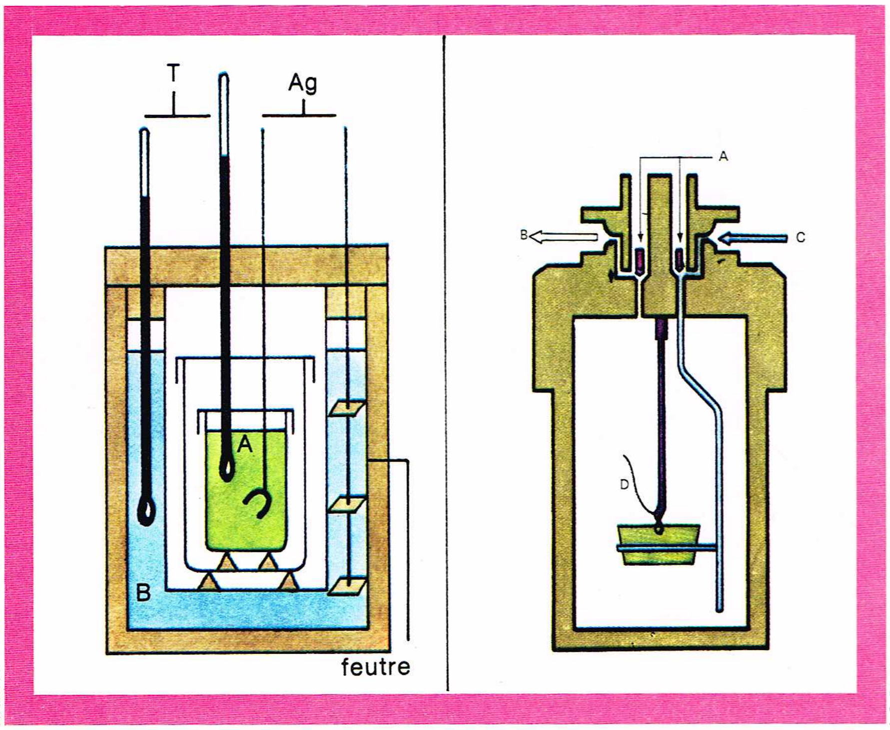

Richard Colin — I.G.D.A.

▲ *A gauche, schéma d'un* **calorimètre :** **T,** *thermomètres;* **Ag,** *agitateurs;* **A,** *le vase calorimétrique où s'effectue la réaction;* **B,** *récipient plein d'eau maintenue à une température constante. A droite, schéma d'une* **bombe calorimétrique** *fonctionnant sous vide :* **A,** *valvules;* **B,** *vide;* **C,** *oxygène;* **D,** *fil d'allumage.*

Dans tous les types de calorimètres, les pertes de chaleur à l'extérieur de l'appareil sont sinon complètement nulles, du moins pratiquement négligeables. On peut considérer qu'une partie de la chaleur dégagée par la réaction sert à augmenter la température des différentes parties du calorimètre (récipient, thermomètre, agitateur, etc.). Cette quantité de chaleur, qui dépend du calorimètre, peut être déterminée en réalisant dans le calorimètre la combustion d'une substance de pouvoir calorifique connu et en calculant la différence $\Delta T_A - \Delta T$, dans laquelle ΔT_A est l'augmentation de température que l'on devrait observer d'après la théorie, et ΔT la mesure réelle. La *valeur en eau d'un calorimètre,* pour chaque calorimètre, est une constante qui dépend de ses caractéristiques de construction et correspond à la quantité d'eau capable d'absorber la quantité de chaleur absorbée par l'appareil (récipient, agitateur, thermomètre, etc.).

Une des applications pratiques de la thermochimie est la mesure de la chaleur de combustion et du pouvoir calorifique des combustibles. Pour les solides et les liquides, on utilise généralement la *bombe calorimétrique de Mahler,* et on exprime le pouvoir calorifique en calories par gramme ou en kilocalories par kilogramme. Ces valeurs sont importantes pour déterminer la valeur commerciale des combustibles et leurs utilisations.

La mesure du pouvoir calorifique des gaz combustibles est en général plus complexe. On utilise dans ce cas le *calorimètre de Junkers,* qui est fondé sur le principe suivant : pour céder à de l'eau la chaleur de combustion d'un gaz dans l'air, il est nécessaire de faire passer les gaz de combustion dans un serpentin immergé dans une quantité d'eau donnée dont on mesure l'augmentation de température. Dans ce cas, le pouvoir calorifique est rapporté à 1 m^3 de gaz.

Réactions thermiques

Ainsi, la thermochimie permet de calculer la quantité de chaleur liée à une réaction chimique. Par ailleurs, la chaleur fournie à un système est un moyen simple de favoriser sa transformation chimique.

On sait qu'une élévation de la température exerce un effet favorable sur l'évolution d'un système. Une réaction qui se produit avec une vitesse V au voisinage de la température ambiante voit sa vitesse multipliée par 2 lorsque la température augmente de 10 °C (c'est le *coefficient de Van't Hoff*). Tous les systèmes métastables, même ceux dont la transformation s'accompagne d'un dégagement de chaleur, ont besoin pour réagir de recevoir une certaine quantité d'énergie, dite *énergie d'activation*.

Mais, si l'élévation de température accroît la vitesse d'une réaction, elle en modifie en même temps la constante d'équilibre. Dans le cas des réactions exothermiques, l'élévation de température peut réduire le degré d'avancement au point que l'activation thermique n'est pas souhaitable. L'activation d'une réaction par la chaleur, bien que théoriquement la plus simple, n'est pas toujours sans inconvénients. En effet, pour fournir des calories à une réaction chimique, le moyen le plus simple est de réaliser une autre réaction chimique : la *combustion*. Mais la calorie n'est pas gratuite, elle consomme du charbon, du gaz naturel, du pétrole, nécessite des brûleurs, des fours, etc. De plus, le rendement thermique est souvent médiocre par suite de pertes de calories pour le chauffage du milieu extérieur à la réaction.

On peut parfois coupler une réaction endothermique avec une réaction exothermique. Ainsi, dans certains procédés de synthèse de l'acétylène à partir d'hydrocarbures, on brûle une partie de la charge pour apporter les calories nécessaires à la réaction endothermique du cracking. De même, dans la production d'éthylène par steam-cracking du naphta, c'est le fuel-oil produit lors du cracking qui apporte aux fours de pyrolyse les calories nécessaires.

Une caractéristique importante des réactions purement thermiques est leur manque de sélectivité. En effet, lorsqu'un système peut donner lieu à plusieurs réactions, la chaleur active avec la même efficacité toutes les réactions possibles. C'est la raison pour laquelle la plupart des réactions chimiques industrielles utilisent des catalyseurs qui favorisent une réaction par rapport aux autres.

A. Rizzi

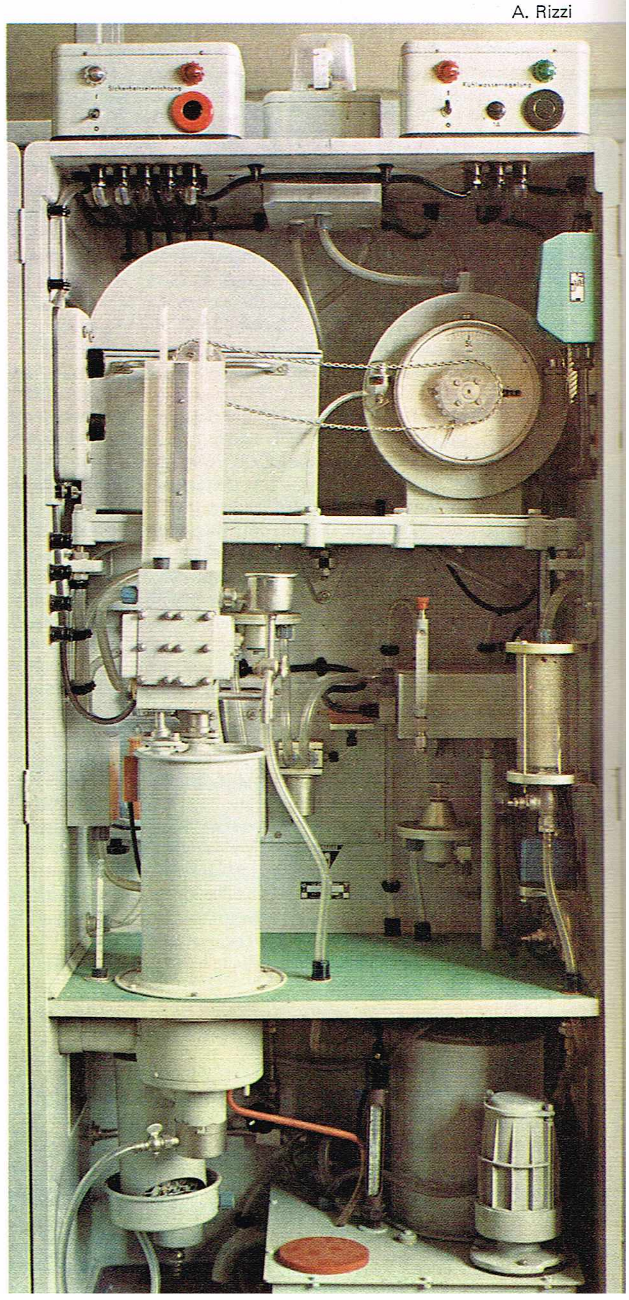

▶ *Modèle du* **calorimètre de Junkers;** *on l'utilise pour la mesure du pouvoir calorifique des gaz combustibles.*

Influence de la lumière - Photochimie

La lumière est un moyen très sélectif d'activer certaines réactions chimiques. Par ailleurs, certaines réactions s'accompagnent d'émission de radiations lumineuses. La photochimie étudie la production et l'absorption de radiations lumineuses par les réactions chimiques. Cette définition inclut des phénomènes divers comme la fluorescence, la phosphorescence, la chimioluminescence, et surtout la réaction chimique catalysée par la lumière, ainsi que les effets des radiations lumineuses sur la structure des substances chimiques.

Parmi ces réactions dites photochimiques, celle qui a la plus grande importance puisqu'elle est indispensable à la vie des plantes et des animaux est la *photosynthèse chlorophyllienne*. Pendant le jour, l'énorme énergie lumineuse qui nous vient du Soleil frappe la Terre et rend possible, grâce à l'intervention de la chlorophylle, la formation de substances à haut contenu énergétique que sont les glucides et l'oxygène moléculaire à partir des substances de bas contenu énergétique que sont l'anhydride carbonique et l'eau :

$$n\mathrm{H_2O} + n\mathrm{CO_2} \xrightarrow[\textit{chlorophylle}]{\textit{énergie lumineuse}} (\mathrm{CH_2O})_n + n\mathrm{O_2}$$

La première observation du phénomène photochimique remonte au XVIIIe siècle, lorsque S. Hales mit en évidence l'importance essentielle de la lumière pour la croissance des végétaux et que C. W. Scheele observa l'instabilité des sels d'argent à la lumière.

Un siècle plus tard, T. von Grutthus et C. A. Draper formulaient le principe que seule la lumière absorbée peut provoquer une transformation photochimique. Ce principe apparemment très simple est connu aujourd'hui sous le nom de *premier principe de la photochimie*. Il implique la nécessité de connaître le spectre d'absorption de la substance, c'est-à-dire sa capacité d'absorber les radiations en fonction de leurs longueurs d'onde, et de plus impose l'usage de sources fournissant la radiation adéquate.

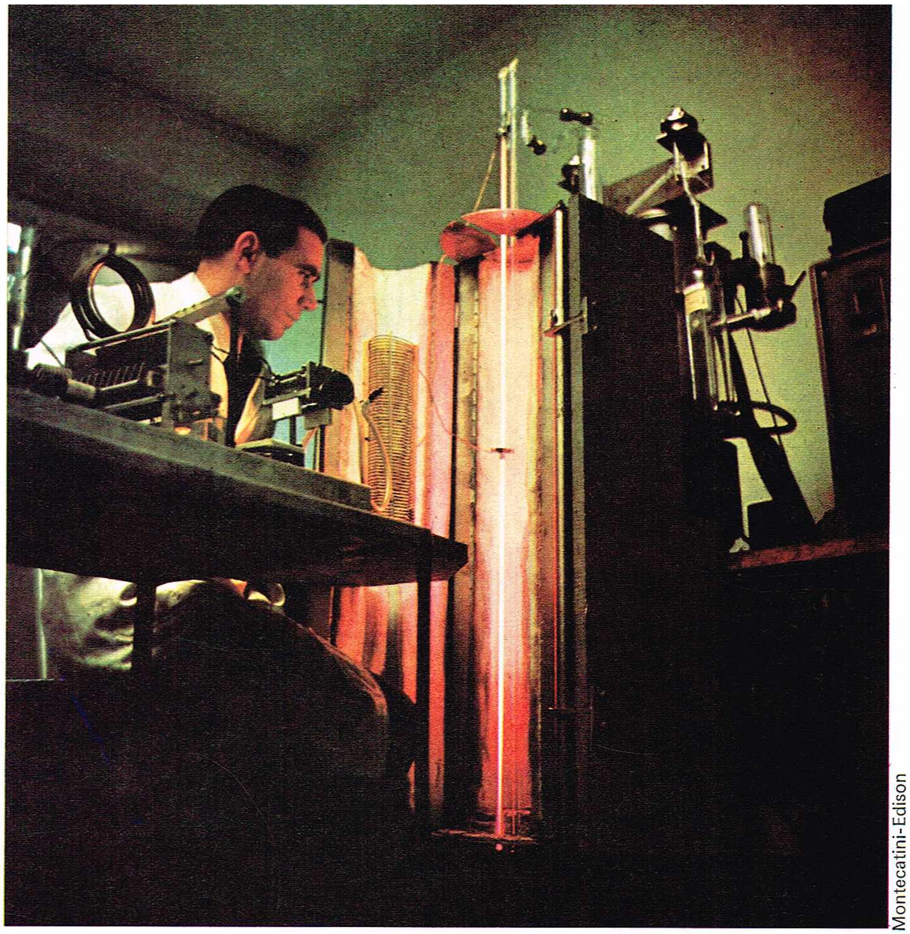

Montecatini-Edison

▲ *Remplissage d'un laser à gaz. L'utilisation des lasers en photochimie s'est récemment enrichie de nouvelles découvertes et d'applications pratiques.*

▼ *Étude sur la croissance des plantes et l'influence de la lumière ; ici, recherche sur la structure chimique du phytochrome (laboratoires Du Pont, centre de recherche expérimentale à Brandywine - Delaware).*

Launois-Rapho

▶ ***Diagramme des transitions électroniques :*** ***S°, état énergétique fondamental;*** ***S*, état singulet excité, obtenu par absorption d'énergie lumineuse selon* a *;*** ***T*, état triplet excité, obtenu à partir de S* avec émission de chaleur, selon* b *;* c, *fluorescence;*** d, ***phosphorescence;*** e, ***conversion interne.***

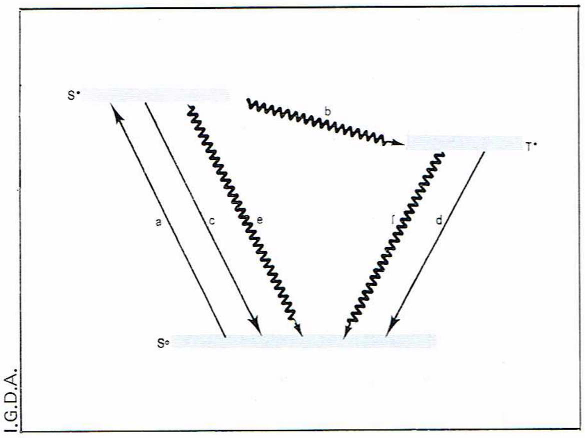

I.G.D.A.

Une étude systématique de l'effet de la lumière sur les réactions et sur les substances chimiques a été effectuée dans la première décennie du XXe siècle par les chimistes Ciamician, Silber et Paterno, mais le manque de connaissances théoriques en physique et en chimie et le faible développement des techniques expérimentales de laboratoire ne permettaient souvent pas de caractériser les produits de la réaction ni de comprendre leur mode de formation.

Aujourd'hui, grâce aux travaux sur la structure de l'atome et de la molécule et grâce à la théorie quantique, on sait que, lorsqu'une molécule est impliquée dans une réaction provoquée par la lumière, le premier acte de la réaction (processus primaire) est constitué par l'absorption d'un seul quantum de radiation : cela constitue le *deuxième principe de la photochimie.*

Le processus photochimique

Une réaction chimique se produit entre molécules de réactifs ayant une énergie supérieure à un certain niveau d'énergie nécessaire à la réalisation de la réaction. Souvent, en effet, les réactifs doivent être chauffés ou nécessitent la présence d'un catalyseur approprié.

Dans le cas des réactions photochimiques, l'énergie nécessaire à la réaction est fournie par une radiation lumineuse. Selon la théorie quantique, on a attribué à la lumière une nature corpusculaire en plus de son caractère ondulatoire classique. A chaque radiation de longueur d'onde λ est associé un photon (corpuscule ou quantité de lumière) qui transporte une quantité d'énergie E égale à :

$$E = h\frac{c}{\lambda} = h\nu$$

où h est la constante de Planck de valeur: $6{,}6 \cdot 10^{-27}$ erg.s, λ la longueur d'onde de la radiation, ν la fréquence de la radiation en s^{-1}, et c la vitesse de la lumière égale à $3 \cdot 10^{10}$ cm/s.

Une molécule possède une énergie propre E_{tot} qui comprend une énergie rotationnelle E_{rot}, une énergie vibrationnelle E_{vib}, et une énergie électronique $E_{élect}$ telles que :

$$E_{tot} = E_{rot} + E_{vib} + E_{élect}.$$

L'énergie rotationnelle et l'énergie vibrationnelle sont en relation avec les mouvements de la molécule et toutes les vibrations de ses atomes et des groupes d'atomes. L'énergie électronique dépend de la distribution des électrons dans les différents niveaux énergétiques autour du noyau. Si les électrons occupent le niveau énergétique le plus bas (ils sont à l'*état fondamental*), l'énergie électronique est minimale. Lorsqu'un photon entre en collision avec la molécule d'un composé, il lui cède son énergie en provoquant une augmentation de $E_{élect}$, grâce au passage d'un électron d'un niveau d'énergie fondamental à un niveau d'énergie supérieur *(état excité)*. La durée de ce transfert d'énergie est si brève que, pendant ce temps, la position des noyaux des atomes de la molécule n'est pas modifiée *(principe de Franck-Condon)*.

La différence d'énergie entre le niveau électronique excité et le niveau fondamental est égale à l'énergie du photon :

$$E_{état\ excité} - E_{état\ fondamental} = E_{photon} = h\nu \quad (1)$$

Les radiations utilisées pour provoquer les réactions photochimiques se situent dans l'ultraviolet (2 000-4 000 Å) et le visible (4 000-7 000 Å).

Pour donner une idée de l'énergie mise en jeu, si l'on considère une mole de substance, elle contient $6{,}02 \cdot 10^{23}$ molécules réelles et absorbe, en conséquence, l'énergie d'autant de photons. Cette quantité d'énergie est un *einstein*.

De l'équation $E = h\nu$, valable pour un photon, en tenant compte de la valeur numérique des différentes constantes, on tire que, pour une radiation de 7 000 Å de longueur d'onde, 1 einstein correspond à 40,8 kcal/mole et que, pour une radiation de 2 000 Å, il correspond à 143 kcal/mole. La relation énergétique imposée par l'équation (1) est une condition nécessaire mais non suffisante pour garantir l'absorption d'un photon par une molécule. D'autres conditions dictées par la mécanique quantique doivent être respectées. Dans la plupart des molécules à l'état énergétique fondamental, les électrons occupent les orbitales par paires de façon que leurs spins soient opposés. Cette disposition est l'*état fondamental* S° représenté par le symbole $\uparrow\downarrow$ dans lequel chaque flèche représente un électron avec son sens de spin.

Lorsqu'une radiation provoque le saut d'un électron d'un niveau fondamental S° à un niveau excité, l'électron doit conserver son spin, et l'état excité doit encore être un état singulet S* :

$$S^\circ \xrightarrow{h\nu} S^*$$

graphiquement

$$\uparrow\downarrow \xrightarrow{h\nu} \begin{matrix}\uparrow \\ \downarrow\end{matrix}$$

état fondamental S° *état excité* S*

Au contraire, le saut d'un électron avec inversion de spin de façon que, dans l'état excité, les deux électrons aient des spins parallèles, a une probabilité nulle (prohibé) ; c'est l'état triplet T* :

$$S^\circ \xrightarrow{h\nu} T^*$$

graphiquement :

$$\uparrow\downarrow \xrightarrow{h\nu} \begin{matrix}\downarrow \\ \downarrow\end{matrix}$$

état fondamental S° *état excité* T*

Une molécule qui a absorbé un quantum de radiation reste dans l'état électronique excité pendant un temps extrêmement court (de l'ordre du dix-millionième ou du cent-millionième de seconde), après quoi, l'énergie absorbée se dissipe d'une des trois manières suivantes : par émission d'énergie thermique, par émission d'énergie de radiation, par transformation chimique.

— *Émission d'énergie thermique*. Dans ce cas, l'énergie absorbée est transformée en chaleur et dissipée par chocs avec les molécules voisines. Ce processus est extrêmement important, car il peut soit permettre de passer de l'état singulet excité S* à l'état fondamental S° avec émission de chaleur, soit permettre de passer de l'état excité S* à l'état triplet T* avec émission de chaleur

$$S^* \rightarrow T^* + \text{chaleur}$$

Or, il est impossible d'atteindre cet état triplet directement par absorption d'un photon, comme on l'a vu plus haut.

— *Émission d'énergie lumineuse*. La radiation absorbée par une molécule peut être restituée telle quelle dans un état singulet, et c'est le *phénomène de fluorescence*. Au contraire, si l'émission se fait par un état triplet, c'est le *phénomène de phosphorescence*. Dans le langage courant, les deux termes fluorescence et phosphorescence sont souvent confondus et considérés comme synonymes; en réalité, il s'agit de phénomènes d'origines différentes.

— *Réaction chimique*. Une molécule dans un état électronique excité peut avoir absorbé suffisamment d'énergie pour provoquer la rupture d'une ou de plusieurs liaisons et former des molécules plus petites. L'énergie fournie est dissipée sous forme d'énergie de craquage. C'est un aspect pratique de la photochimie, intéressant pour les possibilités de synthèses au laboratoire et dans l'industrie. En comparaison des réactions provoquées

par la chaleur, les réactions photochimiques présentent la caractéristique d'être plus sélectives. Alors que, thermiquement, l'énergie est fournie à l'ensemble de la molécule, avec une radiation de longueur d'onde appropriée, il est possible de ne céder l'énergie qu'à un seul électron d'une liaison ou à un groupe d'atomes de la molécule et de provoquer ainsi la seule réaction désirée. De plus, alors que les produits d'une réaction sont déterminés principalement par la structure électronique des réactifs, il est possible d'atteindre par voie photochimique des produits non accessibles par d'autres voies.

Sources de radiations et appareils utilisés en photochimie

Comme source d'irradiation, on utilise habituellement une *lampe à vapeur de mercure* qui émet un spectre discontinu comme c'est indiqué dans la figure ci-contre, sur laquelle on a porté en abscisses la longueur d'onde en angströms et en ordonnées les potentiels en millivolts. Le spectre de la figure est celui d'une lampe à pression moyenne (1 atm) qui émet environ $14 \cdot 10^{19}$ photons par seconde.

Les réactions sont conduites dans des récipients en verre transparent. Le graphique ci-contre, en bas, donne la relation entre la transparence du verre et la longueur d'onde de la radiation pour les deux types les plus utilisés de matériau (le quartz et le Pyrex). On utilise le Pyrex lorsqu'il n'est pas nécessaire d'utiliser des longueurs d'onde inférieures à 3 000 Å, et le quartz pour l'intervalle compris entre 2 000 et 3 000 Å. S'il est nécessaire d'utiliser des radiations comprises dans un petit intervalle de longueur d'onde, on peut employer des filtres.

Rendement quantique

L'efficacité d'un processus photochimique est exprimée en termes de rendement quantique Φ :

$$\Phi = \frac{\text{nombre de molécules ayant réagi}}{\text{nombre de photons absorbés}}$$

Si, pour chaque photon absorbé, la molécule donne lieu à une réaction photochimique, le rendement quantique du processus est égal à l'unité. Ce cas est très rare, en général le rendement quantique est inférieur à 1.

Le nombre de molécules qui réagissent est mesuré par les techniques analytiques habituelles, et le nombre de photons absorbés par un actinomètre. Les actinomètres sont de deux types, soit physique, soit chimique.

Les *actinomètres physiques* sont utilisés principalement pour mesurer les radiations visibles. Ils sont constitués par une thermopile et un galvanomètre. La thermopile mesure l'énergie du faisceau lumineux convertie en chaleur. La chaleur libérée produit une force électromotrice (f. e. m.) dans un thermocouple dont une soudure est maintenue à l'obscurité. La f. e. m. engendrée est mesurée avec précision grâce à un galvanomètre ou à un microvoltmètre à haute impédance.

Les *actinomètres chimiques* sont utilisés de préférence pour mesurer les intensités des radiations ultraviolettes. Ils sont constitués par une solution d'une substance chimique qui absorbe la radiation employée et subit alors une transformation chimique bien déterminée. La substance qui se prête le mieux à ce but est le ferrioxalate de potassium qui, sous l'action des radiations ultraviolettes, se décompose en ferro-oxalate de potassium. La quantité de sel ferreux formé est dosée facilement par voie spectrophotométrique.

Réactions photochimiques

Malgré la sélectivité de son action, la lumière est un moyen d'activation des réactions encore peu utilisé industriellement. Les principales réactions photochimiques industrielles sont des chlorations. Ainsi, par chloration photochimique du méthane, on peut obtenir du **chlorure de méthyle**, du **chlorure de méthylène**, du **chloroforme** et du **tétrachlorure de carbone** :

$$CH_4 + Cl_2 \rightarrow CH_3Cl + HCl \rightarrow CH_2Cl_2 \rightarrow CHCl_3 \rightarrow CCl_4$$

Le mécanisme de cette réaction est un mécanisme en chaîne initié par la transformation, sous l'influence de la lumière, d'une molécule de chlore, en deux radicaux Cl. :

$$\left.\begin{array}{ll} Cl{-}Cl & \rightarrow Cl. + Cl. \\ Cl. + CH_4 & \rightarrow HCl + CH_3. \\ Cl{-}Cl + CH_3. & \rightarrow CH_3Cl + Cl. \end{array}\right\} \text{initiation}$$

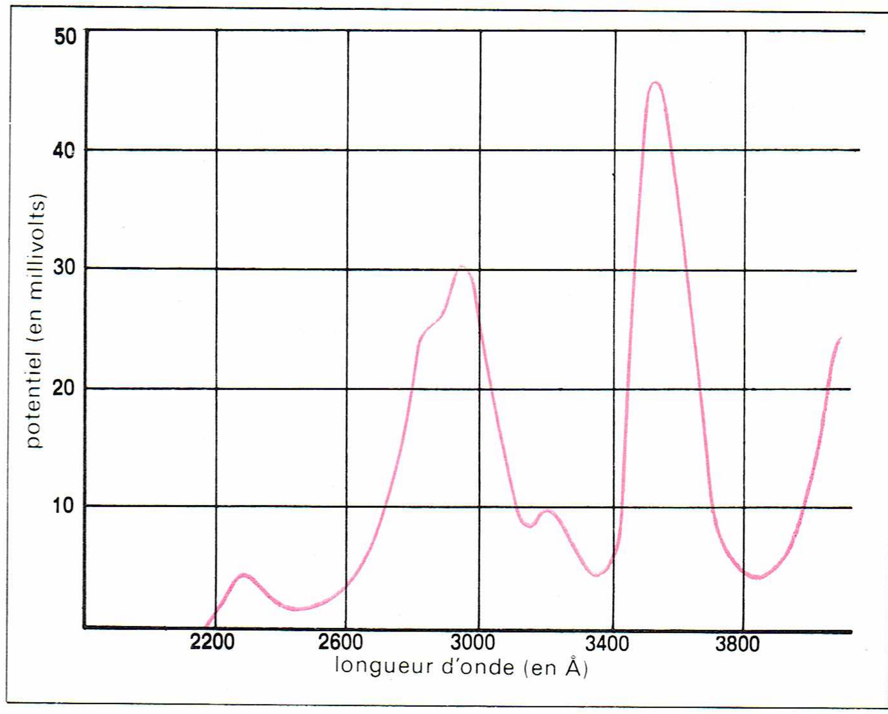

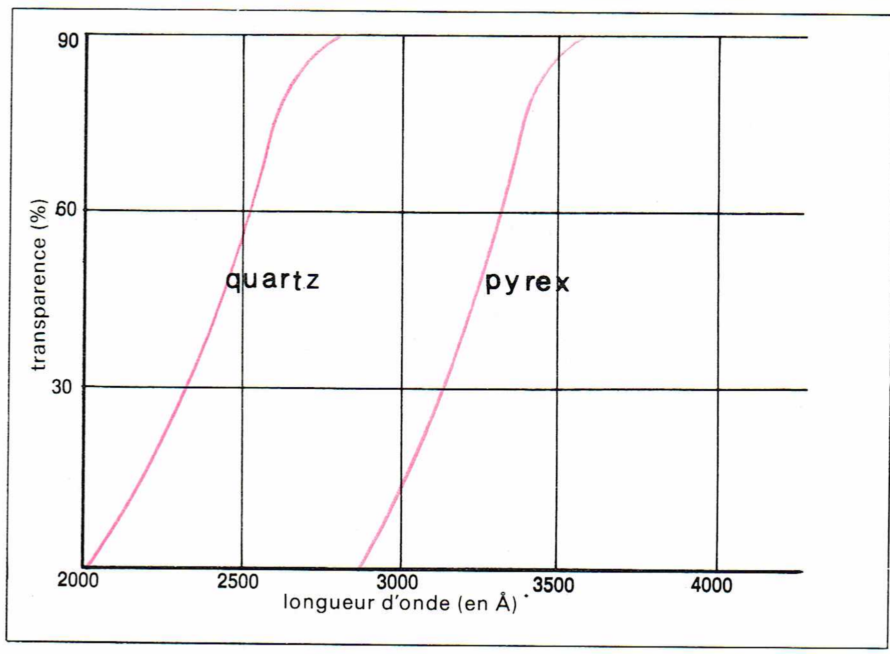

▲ ***Diagrammes représentant le spectre d'émission d'une lampe à vapeur de mercure (en haut) et la « transparence » aux rayons ultraviolets du verre (Pyrex) et du quartz.***

$$\left.\begin{array}{ll} Cl. + CH_4 & \rightarrow HCl + CH_3. \\ CH_3. + Cl_2 & \rightarrow CH_3Cl + Cl. \end{array}\right\} \text{propagation}$$

$$\left.\begin{array}{ll} Cl. + Cl. & \rightarrow Cl_2 \\ Cl. + CH_3. & \rightarrow CH_3{-}Cl \\ CH_3. + CH_3. & \rightarrow CH_3{-}CH_3 \end{array}\right\} \text{rupture}$$

La chloration photochimique du benzène permet d'obtenir les isomères de l'**hexachlorocyclohexane**, dont l'un, l'isomère γ, a un pouvoir insecticide important. Le produit est commercialisé sous le nom de **Gammexane** (ou Lindane). Dans ce cas, il s'agit d'une réaction d'addition, et non de substitution comme la précédente :

$$C_6H_6 + 3Cl_2 \xrightarrow{h\nu}$$

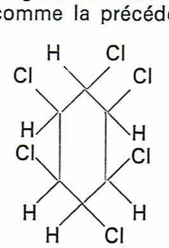

▶ *Réaction de transformation de l'ergostérol en* **ergocalciférol** *ou* **vitamine D₂** *sous l'effet d'irradiation lumineuse.*

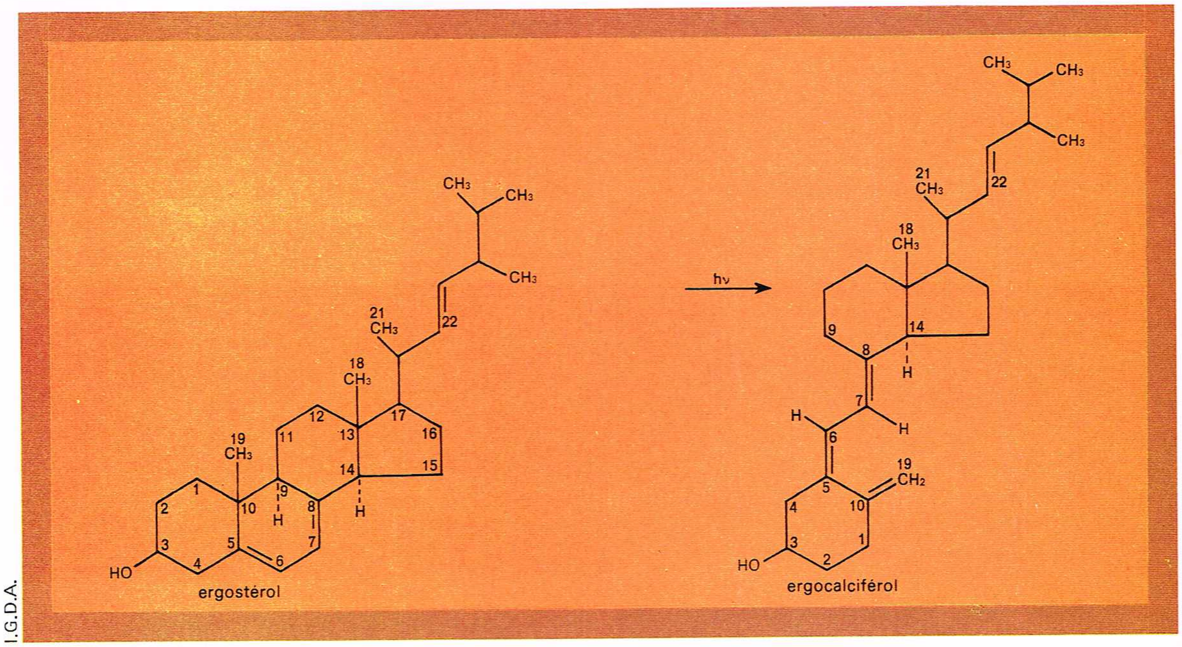

I.G.D.A.

On utilise aussi la lumière pour la synthèse photochimique du **caprolactame,** monomère du Nylon-6. Le cyclohexane est transformé en oxime de la cyclohexanone par action du chlorure de nitrosyle sous l'influence de radiations de longueur d'onde inférieure à 5 000 Å.

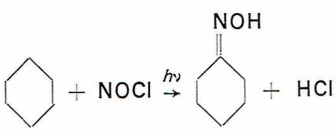

L'oxime de la cyclohexanone est ensuite transformée en caprolactame par transposition de Beckmann.

De même, en partant de cyclododécane obtenu par trimérisation du butadiène suivie d'hydrogénation, on peut obtenir le **lauryllactame,** monomère du Nylon-12.

Parmi les réactions chimiques, en plus de l'assimilation chlorophyllienne déjà citée, il existe d'autres réactions importantes. Parmi celles-ci, on mentionnera la synthèse de la vitamine D_2 qui résulte de l'irradiation de l'ergostérol.

Radiochimie

La radiochimie ou chimie sous radiations concerne l'utilisation de radiations à haute énergie pour activer les réactions chimiques. A la différence de l'activation photochimique qui, par absorption d'un photon, conduit à un état excité, l'activation radiochimique conduit à une *ionisation de la molécule.*

Les radiations les plus couramment utilisées sont celles émises par les réactions nucléaires (neutrons, rayons α, β et γ) ou leurs analogues produites artificiellement (rayons X, électrons accélérés, etc.). Les sources de rayonnements α et les générateurs de rayons X furent utilisés dès les débuts de la radiochimie, c'est-à-dire vers 1942. C'est en effet à cette date que la première pile atomique et les premiers générateurs d'électrons accélérés Van de Graaff mirent au service du chimiste un moyen de modifier l'état chimique de la matière : l'*énergie ionisante.* Actuellement, les sources de radiation les plus utilisées sont le cobalt 60 (période 5,3 ans, émetteur de deux photons de 1,17 et 1,33 MeV) et des accélérateurs de particules chargées comme le cyclotron, l'accélérateur linéaire et le générateur Van de Graaff.

Toutes les interactions de radiations ionisantes avec la matière conduisent à la formation d'ions positifs et d'électrons libérés ou d'espèces excitées.

On écrit les réactions radiochimiques comme suit :

$$A \rightsquigarrow A^+ + e^- \quad \text{ou } A^*$$

La flèche en zigzag indique l'intervention d'une radiation ionisante.

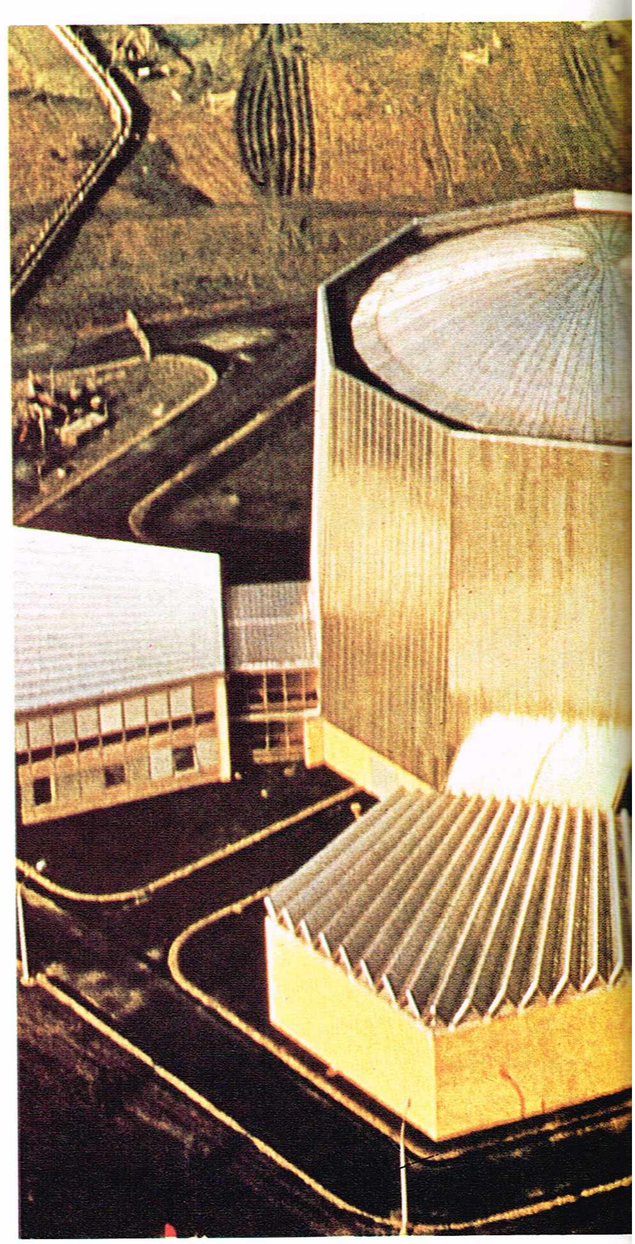

▶ *Vue d'ensemble du* **réacteur nucléaire** *de Saluggia (Italie) : la tour, au centre, contient le réacteur Sorin.*

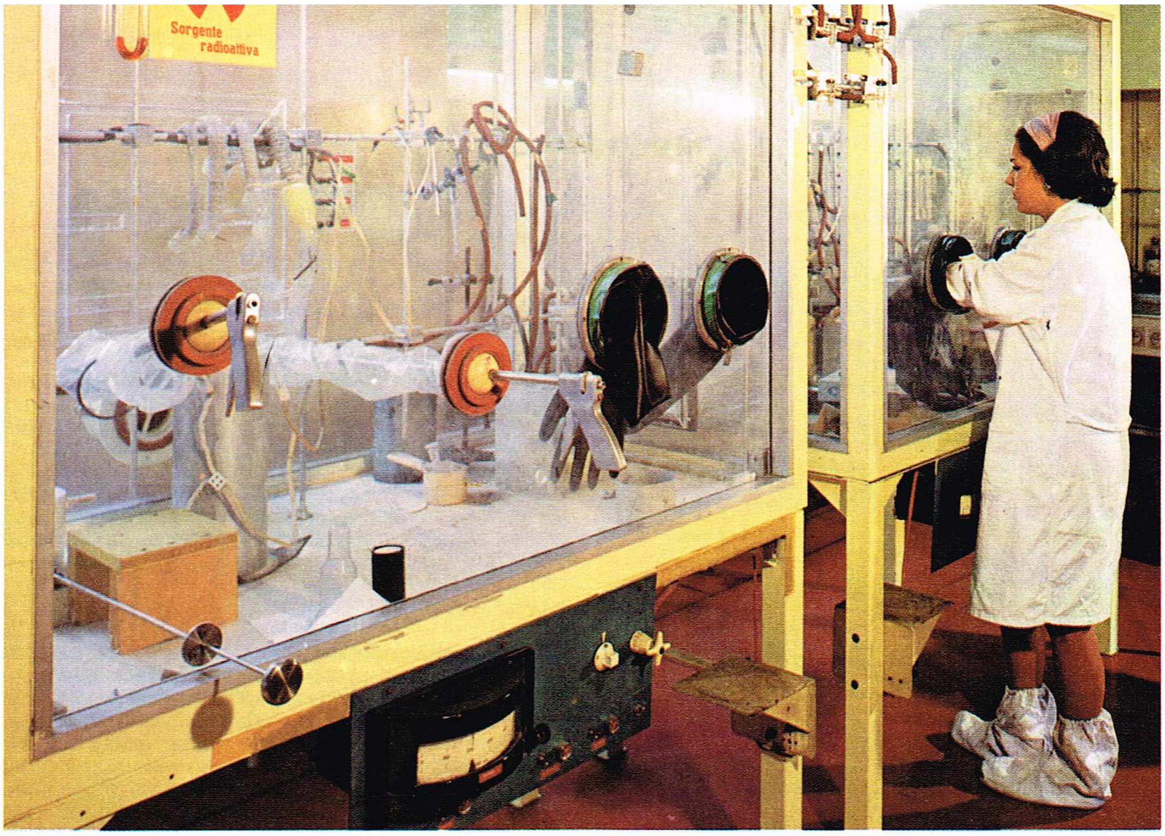

A. Rizzi

◀ « Gloves-boxes » *ou chambres à gants, dans un laboratoire où sont manipulées des substances radio-actives; c'est une des méthodes les plus utilisées pour la protection contre les radiations.*

S. Boroli

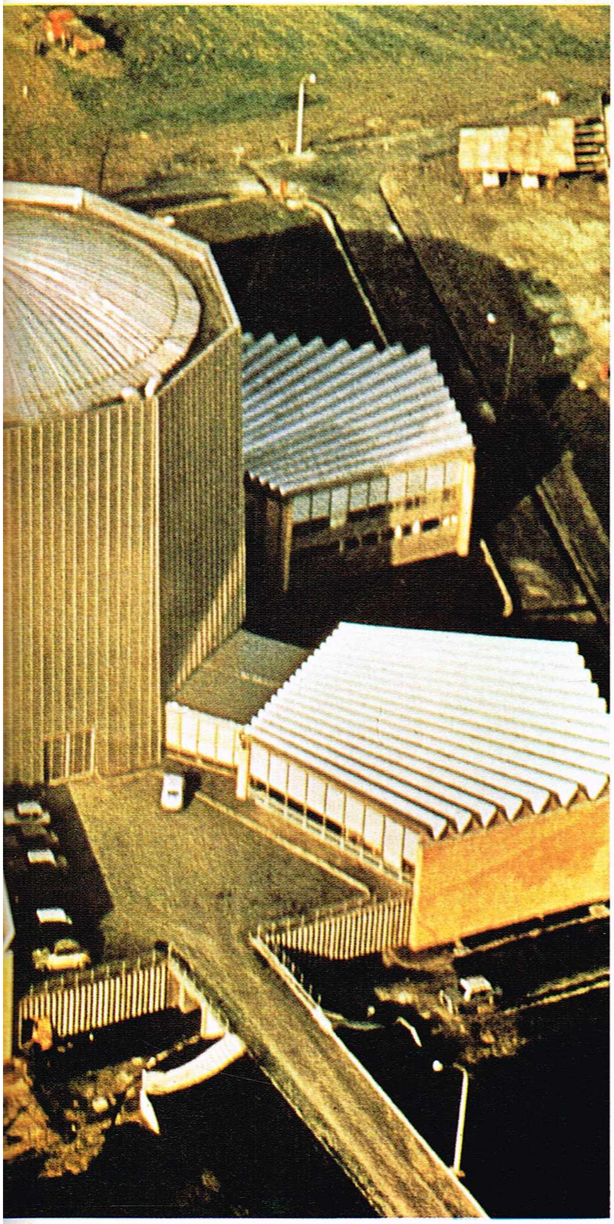

Si la quantité d'énergie est suffisante, la molécule peut se décomposer immédiatement en un radical et un ion radical :

$$A \rightsquigarrow B^{+} + C + e^{-}$$

où B et C représentent des fragments radicalaires de la molécule d'origine, dont un est chargé.

Si l'électron éliminé n'est pas capturé par une autre molécule, il peut se recombiner pour neutraliser la molécule d'origine ou une autre molécule positive. Le processus secondaire de recapture de l'électron peut laisser la molécule dans un état hautement excité :

$$A^{+} + e^{-} \longrightarrow A^{*}$$

S'il n'existe pas dans le milieu des causes de dissipation de l'excès d'énergie de la molécule excitée, il apparaît une dissociation qui conduit soit à des ions, soit à des produits moléculaires, soit à des radicaux libres. Les radicaux et les ions ainsi formés peuvent participer à des réactions chimiques ultérieures avec les schémas réactionnels classiques des réactions radicalaires ou ioniques.

Rendements radiochimiques

Pour les processus radiochimiques, l'unité de radiation absorbée est le *rad :*

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ ergs/g}$$

Le rad indique l'absorption d'une quantité définie de radiation γ, X, α ou β, par une masse donnée de produit.

Ainsi, une dose absorbée d'un certain nombre de rads s'exprime de la même manière, qu'elle soit appliquée à une quantité de produit faible ou importante. Pour comparer l'efficacité de différents processus radiochimiques, on doit exprimer la conversion chimique par unité de radiation absorbée. L'interaction de radiations de haute énergie avec la matière produit des espèces actives dans le système par un mécanisme qui n'implique pas, en général, le transfert de l'énergie du photon directement en énergie de l'ion.

Pour résoudre le problème de la détermination du rendement d'une réaction radiochimique, on a introduit la notion de *valeur de G :* G est défini comme étant le nombre de molécules ayant réagi pour 100 eV d'énergie absorbée.

On voit facilement que le poids de produit obtenu par kilowatt-heure d'énergie radiante absorbée est proportionnel au produit $G \times M$ où M est la masse moléculaire du produit. Ainsi, les réactions qui peuvent bénéficier de façon pratique de la radiochimie sont celles dans lesquelles on peut attendre un effet important à partir de peu de réactions d'initiation. C'est le cas des réactions en chaîne, plus particulièrement des réticulations, dont l'influence sur la variation des propriétés physiques est grande. Par ailleurs, dans les macromolécules, la valeur de M étant élevée, l'effet est particulièrement notable.

▶ *Page ci-contre, électrolyse d'une solution de NaCl : à l'anode (fil rouge), le tournesol change de couleur, il y a dégagement de chlore gazeux; à la cathode (fil bleu), la phtaléine rougit, il y a dégagement d'hydrogène gazeux et formation d'ions OH^-.*

Applications de la radiochimie

Parmi les possibilités d'applications de la « chimie sous radiation », on peut citer l'addition d'acide bromhydrique à l'éthylène pour la production du bromure d'éthyle. C'est le procédé Dow qui utilise une source de cobalt 60 de 2 000 curies. La chaîne de réactions est la suivante :

$HBr \rightsquigarrow H\cdot + Br\cdot$ *initiation*

$Br\cdot + C_2H_4 \rightarrow C_2H_4Br\cdot$
$C_2H_4Br\cdot + HBr \rightarrow C_2H_5Br + Br\cdot$ } *propagation*

On peut aussi effectuer la sulfochloration des paraffines ainsi que la sulfoxydation permettant de synthétiser des détergents biodégradables.

Mais c'est dans le domaine de la chimie macromoléculaire que la radiochimie a eu jusqu'à maintenant le plus grand succès. On peut citer comme industriellement possible la polymérisation du trioxane en polyformaldéhyde et la polymérisation de l'éthylène.

En fait, c'est surtout dans le domaine du cross-linking (en français : réticulation; formation d'un réseau à partir de macromoléculaires linéaires) et de la greffe de polymères que la chimie sous radiation a eu quelque intérêt pratique. Alors que le cross-linking s'accompagne toujours de réactions de dégradation dans les polymères 1,1 disubstitués comme le polyméthacrylate de méthyle, le polyisobutylène, etc., dans le cas de l'irradiation du polystyrène, du polyéthylène et d'autres polyoléfines c'est la réaction pratiquement unique qui améliore les propriétés mécaniques du produit.

Si l'irradiation est effectuée en présence d'air, il peut se produire une oxydation en surface, et les peroxydes formés peuvent ensuite être décomposés et servir à une réaction de greffage. On peut ainsi fixer sur un polymère une couche d'un autre polymère.

Malgré son grand intérêt théorique, ce mode d'activation des réactions chimiques, qui entre en concurrence avec des moyens purement chimiques, n'a pas encore eu un essor aussi grand que celui que l'on escomptait au cours de la dernière décennie.

Électrochimie

L'électrochimie s'intéresse aux réactions chimiques qui produisent ou qui consomment de l'énergie électrique. C'est le cas des piles et des accumulateurs, des dispositifs électriques producteurs de hautes températures pour les réactions chimiques (électrométallurgie, électrothermie), de l'électroplating, etc.

En plus de ces applications pratiques, l'électrochimie concerne les recherches sur les électrolytes, l'ionisation des solutions aqueuses et non aqueuses et des sels fondus, et sur la corrosion des métaux. L'électro-analyse peut être considérée comme une branche de l'électrochimie, et l'électrobiologie est un chapitre essentiel de la biologie qui concerne l'incidence de l'électrochimie sur les réactions vitales.

L'électrochimie moderne a débuté par la découverte d'éléments électriques qui, réunis en piles, produisent, par une réaction chimique à l'intérieur des éléments, de l'électricité dans le circuit extérieur. Cette découverte a été faite par Volta en 1799. Ces éléments, parfois appelés éléments voltaïques, sont plus souvent appelés éléments galvaniques du nom de Galvani qui avait étudié, quelques années auparavant, la production du courant électrique par la jonction de métaux différents.

L'électrolyse

La compréhension du fonctionnement des piles et des accumulateurs suppose la connaissance de l'électrolyse. Rappelons que les acides, les bases et les sels se dissolvent dans certains solvants, et plus particulièrement dans l'eau, et se dissocient plus ou moins complètement en ions. Ces substances sont des *électrolytes,* et leurs solutions conduisent le courant électrique entre deux électrodes immergées. L'électricité est transportée d'une électrode à l'autre par les ions qui se déplacent dans la solution grâce à la différence de potentiel. Outre le transport d'électricité, il existe entre les deux électrodes un transport de matière que l'on peut vérifier par pesée, dans le cas des électrodes métalliques. Les ions se déchargent aux électrodes, et, après passage du courant électrique, le système est différent de ce qu'il était au départ. On peut donc définir l'électrolyse comme une transformation chimique provoquée par le passage d'un courant électrique continu.

On peut considérer que l'électrode positive (anode) a tendance à acquérir des électrons, donc à attirer les ions négatifs, et que l'électrode négative (cathode) a tendance à céder des électrons aux ions positifs. Le mouvement des ions, à cause de la différence de potentiel, et leur neutralisation aux électrodes expliquent le passage des électrons de la cathode à l'anode et, par conséquent, le passage du courant électrique dans la solution. La cession des électrons de la cathode aux ions correspond à une réaction de *réduction,* alors que le transfert des électrons des ions à l'anode est une *oxydation.* L'électrolyse correspond donc à un *processus d'oxydoréduction.*

▼ *Le centre nucléaire de Chinon (vallée de la Loire, France).*

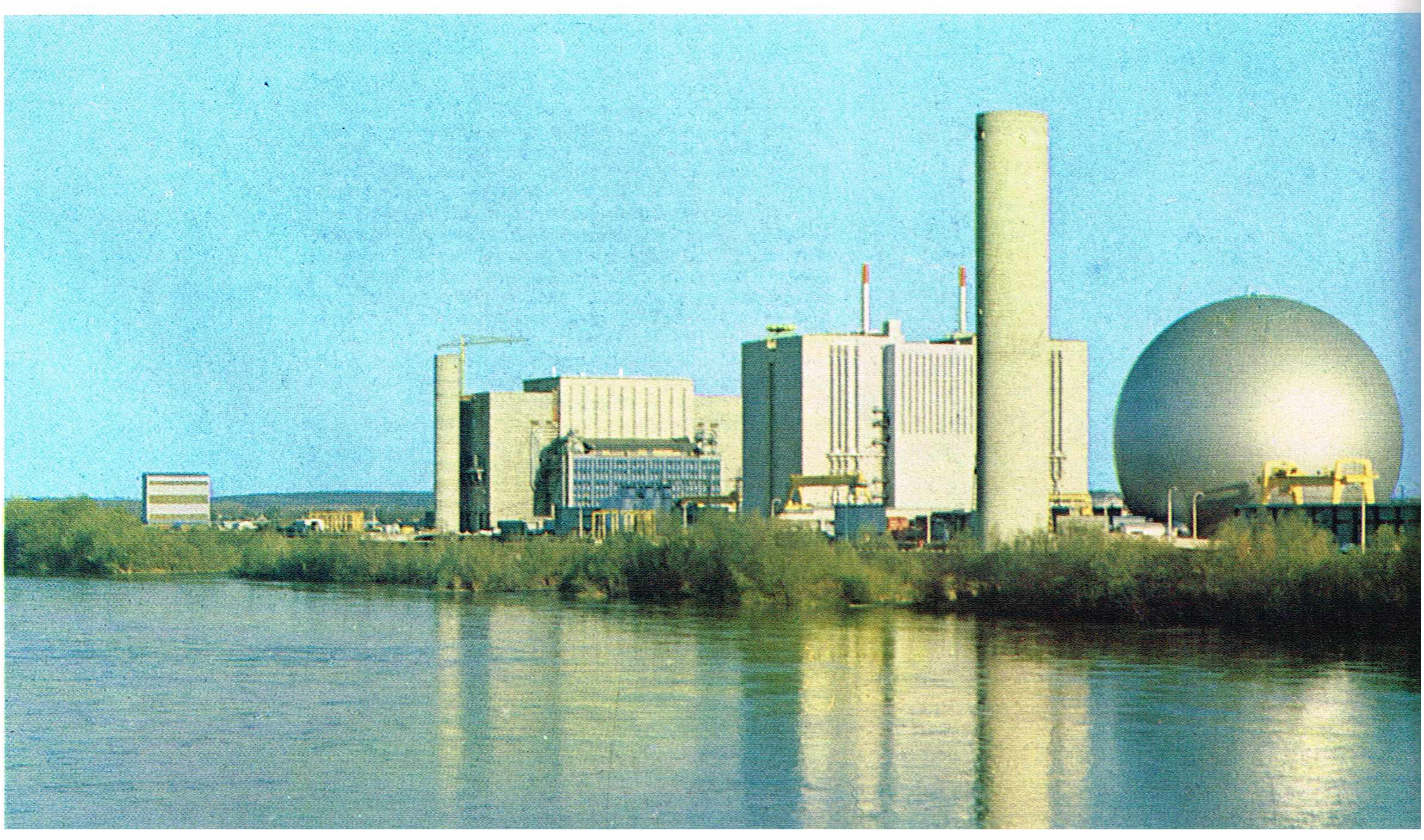

Si l'on considère à titre d'exemple l'électrolyse d'une solution aqueuse de chlorure de sodium NaCl, à l'anode il se produit la réaction suivante :

$$2Cl^- \rightarrow Cl_2 + 2e^-$$

avec dégagement de chlore gazeux. A la cathode se produit la réaction de décomposition de l'eau :

$$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$$

avec dégagement d'hydrogène gazeux. La réduction des ions sodium selon la réaction suivante n'a pas lieu :

$$Na^+ + e^- \rightarrow Na$$

L'ensemble des réactions provoquées par le passage de courant électrique continu dans une solution de NaCl peut alors s'écrire :

$$2\,Na^+ + 2\,Cl^- + 2\,H_2O \rightarrow Cl_2 + H_2 + 2\,OH^- + 2\,Na^+$$

Il s'est dégagé du chlore et de l'hydrogène gazeux alors que la solution, initialement neutre, est devenue basique par formation d'ions OH^-. En concentrant la solution qui a subi l'électrolyse, de la soude (NaOH) précipite, et c'est une méthode pour préparer la soude à partir de chlorure de sodium.

L'électrolyse trouve d'autres applications dans l'industrie chimique. C'est le cas de la production de l'eau oxygénée, du raffinage de nombreux métaux, parmi lesquels le cuivre et l'aluminium, du dépôt de certains métaux sur d'autres (chromage, nickelage, argenture, dorure, etc.).

L'électrolyse est exprimée quantitativement par les lois de Faraday. Selon la *première loi de Faraday,* la masse de substance déposée à l'électrode est proportionnelle à la quantité d'électricité qui a traversé cette électrode (et, par conséquent, qui a traversé la solution). Supposons que sur une électrode se produise la neutralisation d'un ion positif :

$$X^+ + e^- \rightarrow X$$

il apparaît comme évident que le nombre des ions déchargés sur l'électrode est égal au nombre d'électrons fournis au système. Le courant électrique étant en fait un courant d'électrons, il en résulte que la quantité de matière déposée est proportionnelle à la quantité d'électricité fournie.

La *seconde loi de Faraday* précise qu'une quantité d'électricité égale à 96 479 coulombs provoque à la cathode le dépôt d'une valence-gramme d'un métal quelconque ou le dégagement de 1,008 g d'hydrogène. Cette quantité d'électricité permet par exemple le dépôt de 107,88 g d'argent; elle est appelée *constante de Faraday* ou *équivalent électrochimique*.

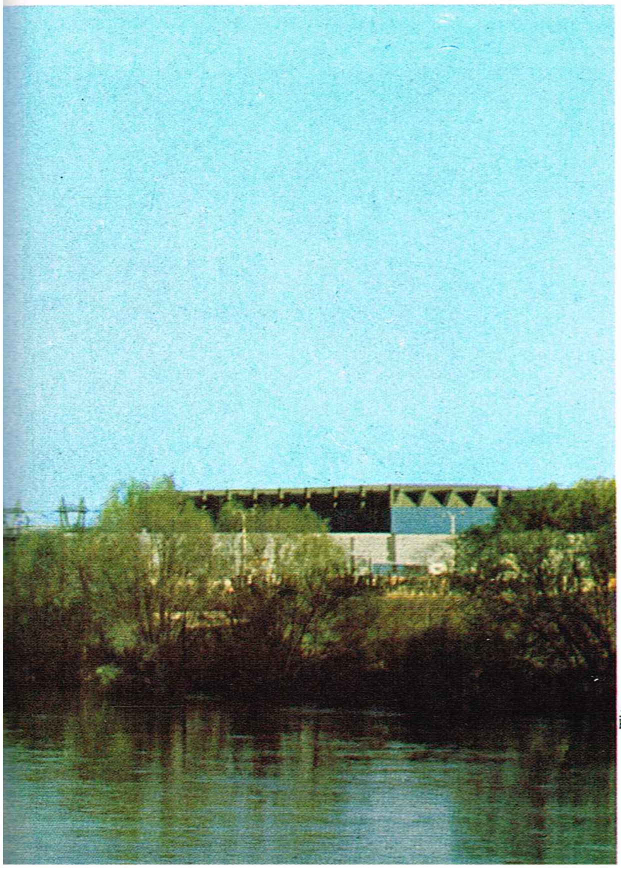

Titus

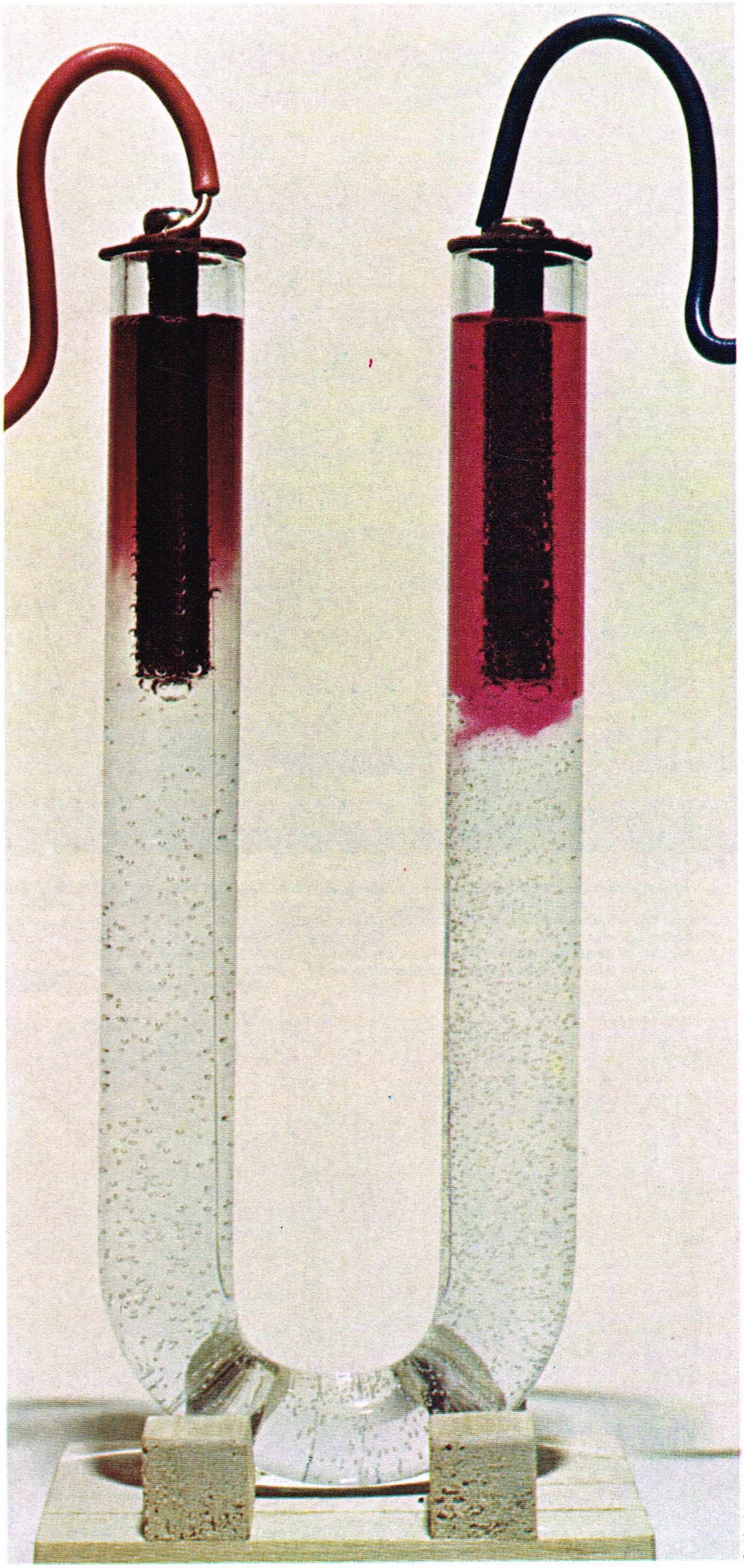

C. Nuridsany

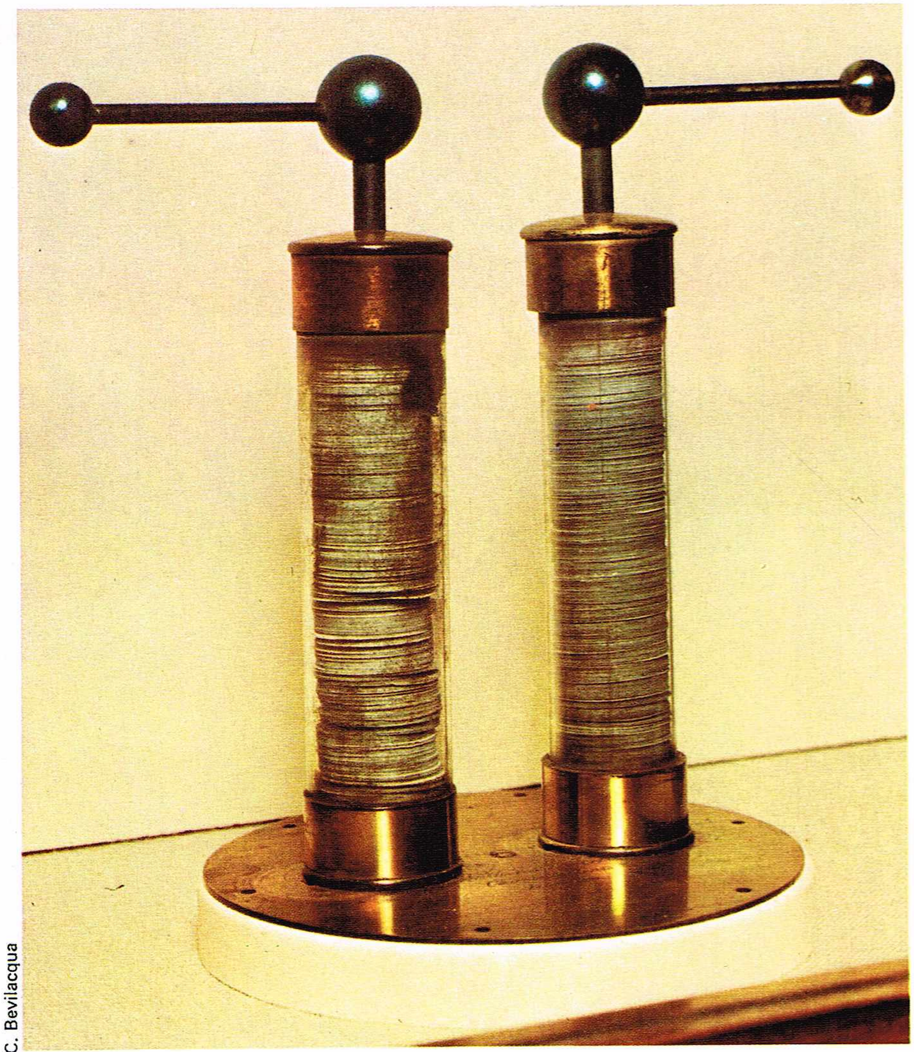

C. Bevilacqua

▲ *Un « ancêtre » des piles actuelles, celle de Zamboni (1812) dérivée de la* **pile Volta** *(British Museum - Londres).*
▼ *A gauche, un modèle artisanal de la* **pile Daniell***, avec ses semi-éléments de cuivre (à gauche) et de zinc, en évidence. A droite, schéma théorique de la même pile (les petites flèches indiquent le sens du cheminement des électrons) : le cuivre (+) cède des électrons; le zinc (—) capte des électrons.*

Les piles et les accumulateurs

Nous venons de voir comment il est possible de provoquer une réaction d'oxydoréduction en fournissant du courant électrique. Dans de nombreux cas, ce processus peut être réversible : il est alors possible d'utiliser une réaction d'oxydoréduction pour obtenir du courant électrique. C'est sur ce principe que se fonde le fonctionnement des piles et des accumulateurs.

Dans une réaction d'oxydoréduction, les électrons passent du réducteur à l'oxydant. Pour exploiter ce phénomène de sorte qu'il se produise de l'énergie électrique, il faut séparer la solution de l'oxydant de celle du réducteur et relier ces solutions par un conducteur métallique externe. Les compartiments dans lesquels se produisent les réactions d'oxydation et de réduction ne doivent pas être séparés par une membrane ou une paroi imperméable, mais par une cloison poreuse qui permette un passage lent des ions de la solution et évite ainsi aux ions de rester concentrés autour de l'électrode où ils se forment.

Un exemple pratique est fourni par la pile Daniell, dans laquelle un semi-élément est constitué par une lame de zinc immergée dans une solution de sulfate de zinc, l'autre semi-élément étant constitué par une lame de cuivre immergée dans une solution de sulfate de cuivre. Au niveau du premier semi-élément se produit l'oxydation du zinc :

$$Zn \rightarrow Zn^{++} + 2e^-$$

et le zinc qui constitue l'électrode passe graduellement en solution en même temps qu'il se libère des électrons qui, par le circuit externe, se dirigent vers l'autre électrode. Là se produit la réduction du cuivre :

$$Cu^{++} + 2e^- \rightarrow Cu$$

Ainsi, les ions cuivre en solution se déposent sur l'électrode où ils sont réduits par les électrons.

D'une façon générale, dans la solution, les ions zinc et les ions cuivre se dirigent vers la cathode, les ions sulfate vers l'anode. La cloison poreuse n'empêche pas ce mouvement mais évite que les deux solutions ne se mélangent trop rapidement et que les ions Cu^{++} ne viennent directement au contact de l'électrode de zinc pour y acquérir les électrons nécessaires à leur réduction. Le processus serait alors :

$$Zn + Cu^{++} \rightarrow Zn^{++} + Cu$$

On peut observer le passage du courant tant qu'il existe des ions cuivre en solution, ou tant que l'électrode de zinc ne s'est pas dissoute. Très fréquemment, au lieu d'utiliser des électrodes métalliques qui participent à la réaction, on utilise des électrodes inertes (par exemple, de platine ou de carbone).

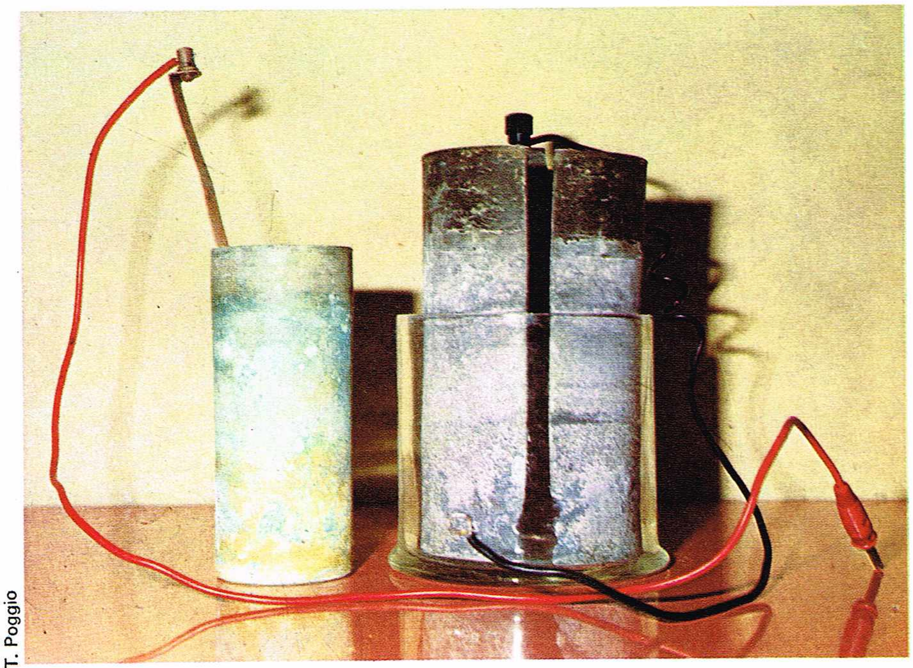

T. Poggio

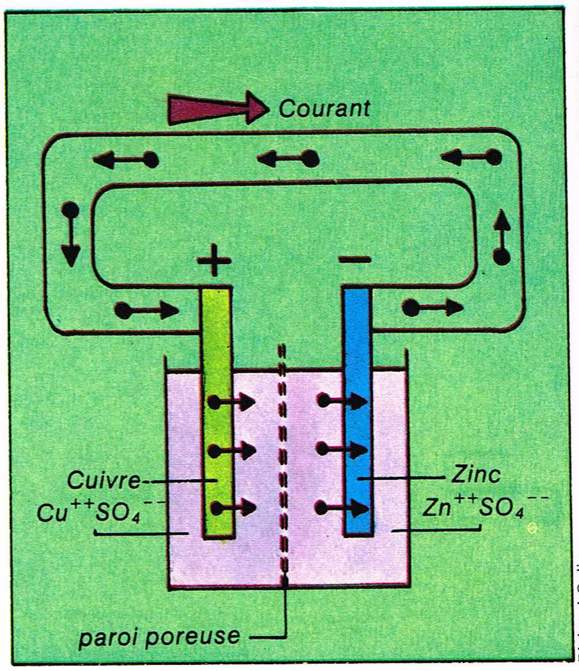

Richard Colin

Les piles

Le choix d'une pile est dicté par trois facteurs principaux :

— la tension que l'on peut obtenir à ses bornes,
— la facilité de construction et de manipulation,
— la tendance au phénomène de polarisation (qui a un effet négatif sur le rendement). Ce phénomène de polarisation peut être dû à la formation sur une électrode d'une couche de gaz qui augmente la résistance et tend à engendrer une force électromotrice en sens inverse.

La **pile de Volta** est constituée par une solution diluée d'acide sulfurique dans laquelle sont immergées deux électrodes, respectivement en cuivre (positive) et en zinc (négative). La réaction dégageant de l'hydrogène provoque une polarisation. On obtient une tension d'environ 1 volt.

La **pile Daniell** peut être réalisée pratiquement en utilisant deux récipients cylindriques concentriques. Le récipient interne poreux renferme l'électrode de cuivre. Elle ne présente pas le phénomène de polarisation, puisqu'il ne s'y dégage pas d'hydrogène, mais la paroi poreuse est la cause d'une résistance interne élevée. On obtient une tension d'environ 1,1 volt.

La **pile Bunsen** n'est pas très différente de la pile Daniell, mais, à la place de sulfate de cuivre, elle contient de l'acide nitrique, qui est un dépolarisant énergique, et l'électrode de cuivre, qui serait attaquée par l'acide, est remplacée par une électrode de carbone qui constitue l'électrode positive. Cette pile peut fournir une tension de 1,8 volt, mais elle dégage des vapeurs nitreuses nocives.

La **pile Leclanché** contient comme électrolyte une solution de chlorure d'ammonium. L'électrode positive en carbone est immergée dans un récipient contenant du bioxyde de manganèse (dépolarisant) rendu humide pour qu'il soit conducteur. L'électrode négative en zinc est immergée dans la solution du chlorure d'ammonium. La pile Leclanché peut fournir une tension de 1,5 volt, mais sa résistance interne élevée et l'efficacité relative du dépolarisant font que le courant fourni est faible et de courte durée. Les piles sèches du commerce sont fondées sur ce principe, mais le chlorure d'ammonium est absorbé sur de la sciure, de la gélatine ou du chlorure de magnésium, et, comme dépolarisant, à la place du bioxyde de manganèse, on peut utiliser de l'oxygène adsorbé sur du charbon actif.

La **pile Grenet** contient une solution d'acide sulfurique (22 %) et de bichromate de potassium (17 %) agissant comme dépolarisant. Dans cette solution sont immergées deux électrodes de charbon (positives), et, entre celles-ci, on interpose une électrode de zinc, que l'on enlève lorsque la pile ne fonctionne pas. La tension aux bornes est d'environ 2 volts.

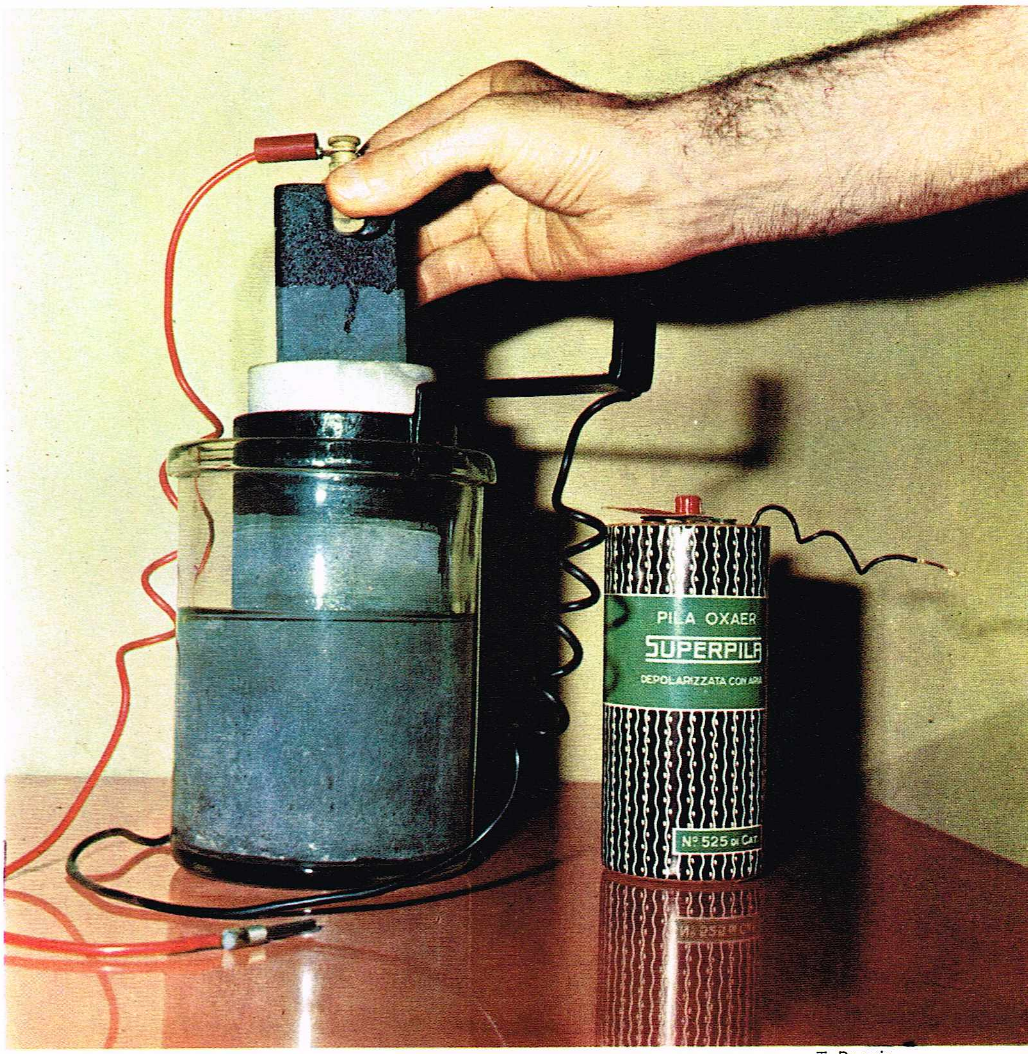

T. Poggio

▲ *Deux modèles de la* pile Leclanché *(dans laquelle l'électrode positive est constituée de carbone, et l'électrode négative de zinc) : à gauche, le modèle classique dans un becher; à droite, un type utilisé actuellement.*

La **pile Weston** est une pile-étalon qui fournit une tension de 1,018 6 volt à 20 °C. On peut la représenter par la formule :

$$Hg \,/\, Hg_2SO_4 \,//\, CdSO_4 \,/\, Cd$$

qui évite une longue description.

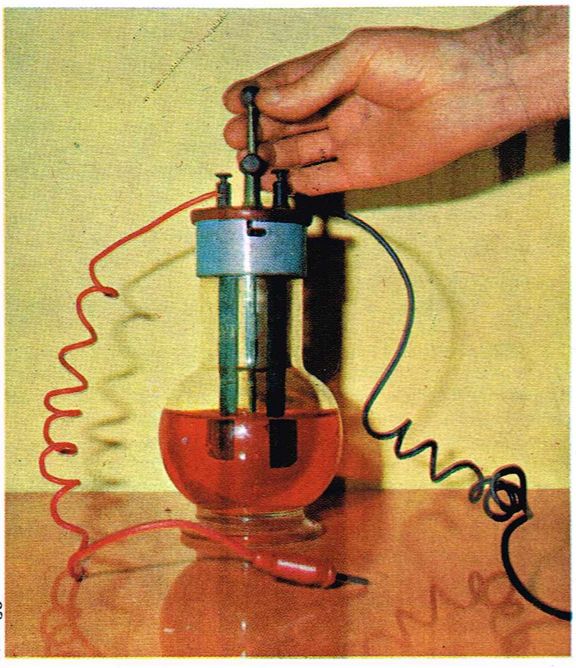

T. Poggio

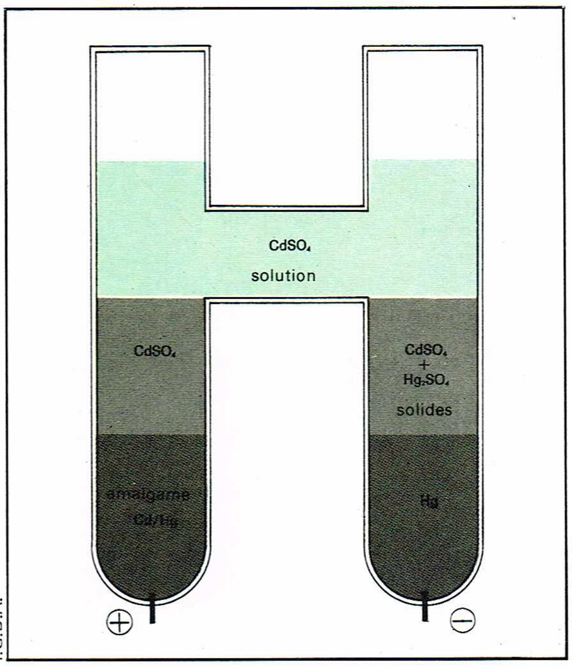

I.G.D.A.

◀ *A gauche, la* pile Grenet : *on voit nettement, immergées dans la solution, les deux électrodes de charbon (positives), et, entre celles-ci, l'électrode en zinc (négative). A droite, schéma d'une* pile Weston.

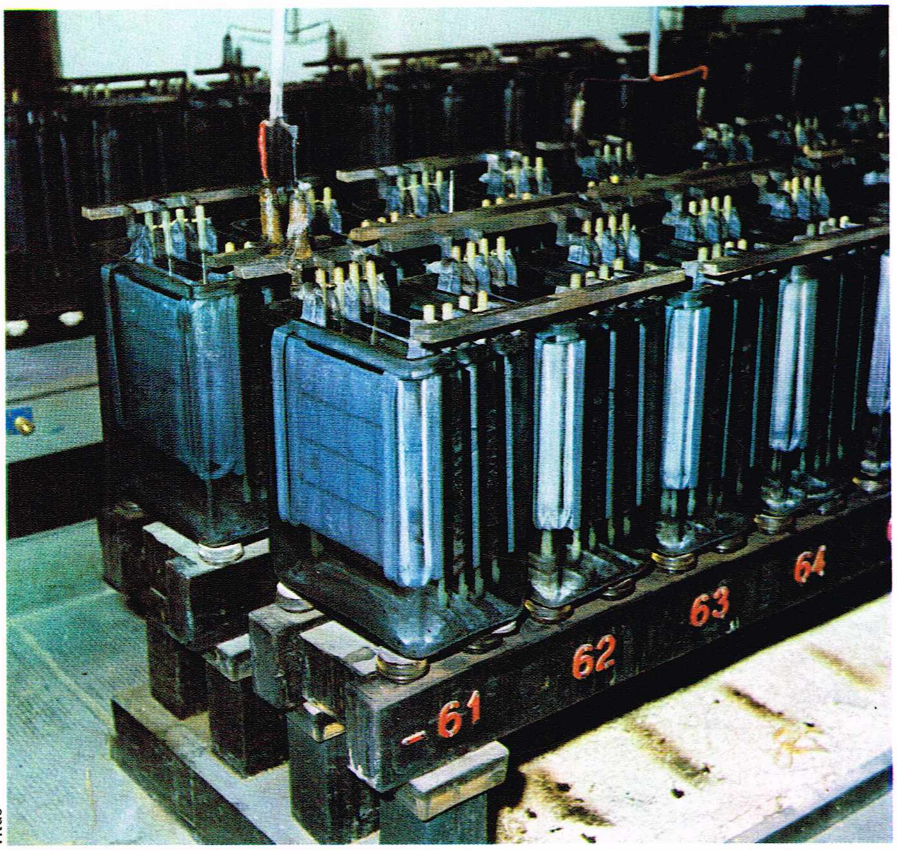

Titus

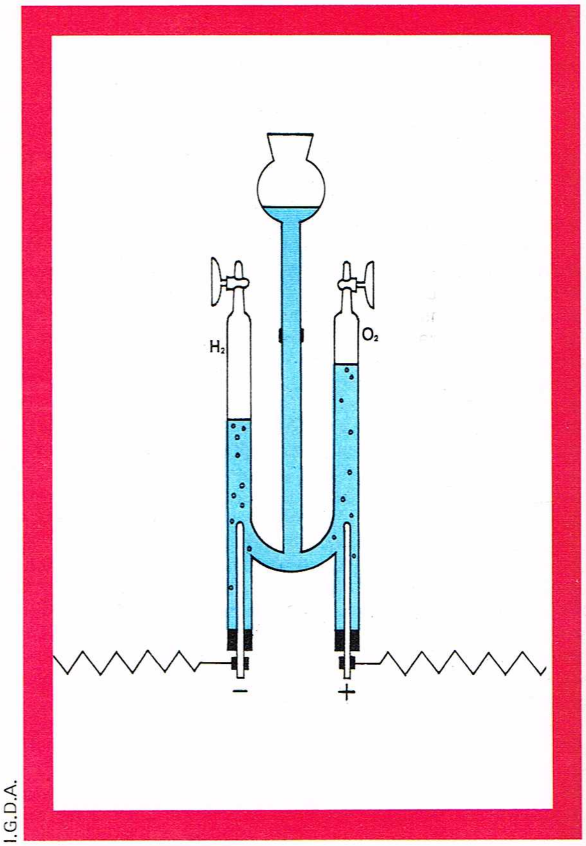

I.G.D.A.

▲ *A gauche, une* batterie d'accumulateurs. *A droite, représentation schématique d'un* électrolyseur *utilisé pour la décomposition électrolytique de l'eau. Lorsque le courant est interrompu l'électrolyseur peut fonctionner, durant de brefs moments, en* pile à gaz.

Les **piles à gaz** et les **piles à concentration** sont des piles d'un type particulier. Un exemple de pile à gaz est donné par l'*électrolyseur*, destiné à l'électrolyse de l'eau, et qui fournit de l'oxygène et de l'hydrogène. Si l'on interrompt le passage du courant, on peut vérifier expérimentalement l'existence d'une force contre-électromotrice due à la redissolution des deux gaz et à l'existence de la pile suivante :

$$H_2 / H^+ // H_2O / O_2$$

Une pile à concentration est constituée par deux électrodes du même métal immergées dans deux solutions contenant les ions de ce métal à deux concentrations différentes et séparées par une cloison poreuse. La valeur de la différence de potentiel peut être déterminée par l'équation de Nernst (voir plus loin).

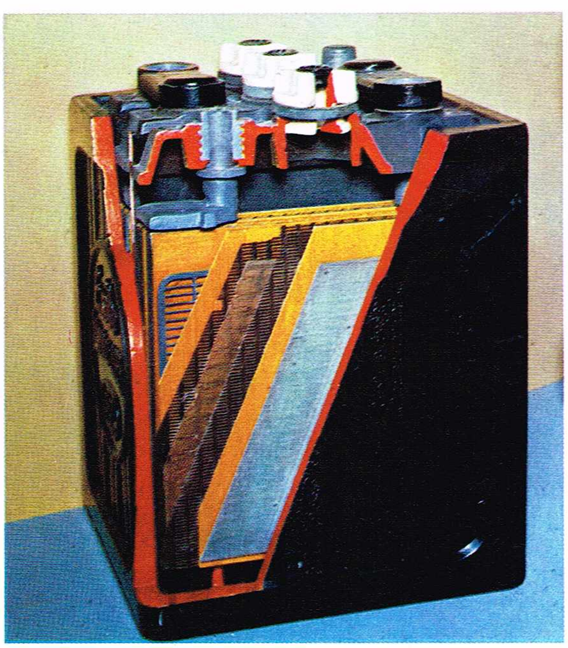

C. Bevilacqua

▶ *Une* batterie *d'automobile (1938) montrant partiellement le montage en série de trois* accumulateurs au plomb *(British Museum, Londres).*

Les accumulateurs

Ce sont des *piles réversibles* capables de retrouver après usage leurs conditions de départ, lorsque de l'énergie électrique leur est apportée de l'extérieur. On utilise deux types principaux d'accumulateurs.

Dans les **accumulateurs au plomb,** l'électrode positive est constituée par une plaque de plomb recouverte d'une couche de bioxyde de plomb, PbO_2, alors que l'électrode négative est une plaque de plomb poreux. L'électrolyte est constitué par une solution d'acide sulfurique à 38 % en masse. On obtient une tension d'environ 2 volts. Les batteries utilisées dans les automobiles sont capables de fournir 6 ou 12 volts et sont formées de trois ou six de ces éléments montés en série.

Examinons les réactions qui se produisent à la décharge et lors de la charge de la batterie.

Pendant la *décharge,* on a :

— au pôle positif :

$$PbO_2 + H_2SO_4 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow PbSO_4 + 2H_2O$$

— au pôle négatif :

$$Pb + SO_4^{--} \rightarrow PbSO_4 + 2e^-$$

Pendant la *charge,* il se reforme aux électrodes les constituants initialement présents :

— au pôle positif :

$$PbSO_4 + 2H_2O \rightarrow PbO_2 + H_2SO_4 + 2e^- + 2H^+$$

— au pôle négatif :

$$PbSO_4 + 2e^- \rightarrow Pb + SO_4^{--}$$

L'**accumulateur Edison au ferro-nickel** est plus léger, mais sa capacité est plus faible, et il ne fournit qu'une tension de 1,2 volt. L'électrolyte est l'hydroxyde de potassium, et les électrodes positive et négative sont constituées respectivement par de l'oxyde de nickel, NiO, et de l'oxyde de fer, FeO.

Potentiel d'oxydation

Nous venons de voir que la réaction d'oxydoréduction qui se produit dans une pile peut être considérée comme deux demi-réactions séparées et que la liaison entre les deux semi-éléments de la pile est assurée par un conducteur extérieur. Lorsque cette connexion extérieure fait défaut, la pile ne fournit pas de courant, mais il subsiste

entre les deux semi-éléments une tendance au passage des électrons de l'un à l'autre, si bien qu'il s'établit une différence de potentiel entre les deux électrodes.

Si l'on mesure cette différence de potentiel, par exemple avec un voltmètre, on constate qu'elle dépend des substances présentes dans chaque élément galvanique, c'est-à-dire de la nature des électrodes et de la nature ainsi que de la concentration de la solution.

Si l'on pouvait connaître le potentiel à attribuer à chaque semi-élément, on pourrait connaître quelle différence de potentiel s'établirait entre deux de ceux-ci, et, par conséquent, quelle serait la tension fournie par la pile qu'ils constitueraient. Une valeur relative des potentiels des différents semi-éléments peut être obtenue en utilisant une référence constante et en établissant un contact avec le même semi-élément-étalon qui est l'*électrode à hydrogène*. Cela permet d'établir une échelle de potentiel des différents semi-éléments. La réaction qui se produit dans l'électrode à hydrogène est la suivante :

$$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$$

Elle a lieu sur une électrode inerte, par exemple de carbone ou de platine poreux, immergée dans une solution acide (renfermant donc des ions H^+) ; on fait passer de l'hydrogène gazeux sur l'électrode. Par convention, on assigne à cette électrode le potentiel zéro lorsqu'elle est à l'état standard, c'est-à-dire lorsque la température est de 25 °C, la pression d'hydrogène gazeux de 1 atmosphère et la concentration des ions H^+ égale à 1 mole pour 1 000 g de solvant; ce moyen d'exprimer la concentration est indépendant de la température. Il serait plus rigoureux de dire qu'à l'état standard, toutes les substances doivent avoir une activité égale à l'unité, mais, en première approximation, il est permis d'utiliser la concentration si les solutions sont diluées.

Pour mesurer le potentiel d'un semi-élément, on forme une pile avec celui-ci et l'électrode à hydrogène, et on les relie à l'extérieur par un voltmètre. Si, par exemple, on relie à une électrode à hydrogène un élément dans lequel a lieu la réaction d'oxydation du zinc :

$$Zn \rightarrow Zn^{++} + 2e^-$$

le voltmètre indiquera la valeur de 0,76 volt si les ions zinc sont à la concentration unitaire. Cette valeur représente la tendance du zinc à s'oxyder. Les potentiels rapportés à l'électrode d'hydrogène sont les potentiels d'oxydation. Lorsque les semi-éléments ne sont pas à l'état standard, les potentiels sont différents, et la déviation est fournie par l'équation de Nernst.

Il existe des électrodes de référence autres que l'électrode à hydrogène; c'est le cas de l'*électrode au calomel* et de l'*électrode à quinhydrone*.

Le potentiel d'oxydation mesuré à l'état standard est indiqué par E°; c'est, pour une semi-réaction simple, une mesure quantitative de sa tendance à se produire. Les E° de deux semi-réactions peuvent s'additionner algébriquement. On peut ainsi déterminer la possibilité d'une réaction complexe de se produire dans le sens où elle est écrite ou non. Si la somme algébrique des deux E° est positive, la réaction a lieu spontanément.

Nous avons vu que, pour la réaction :

$$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$$

si E° = 0, le E° de la réaction écrite en sens inverse est encore égal à 0.

En revanche, si l'on inverse le sens de la réaction d'oxydation du zinc et que l'on considère la réaction :

$$Zn^{++} + 2e^- \rightarrow Zn \ (s)$$

le E° devient — 0,76 volt, c'est-à-dire garde la même valeur absolue, mais change de signe (cela signifie que la réaction de réduction a peu tendance à se produire). Le signe du potentiel normal d'une semi-réaction peut donc être différent suivant le sens où elle est écrite.

Si l'on désire savoir dans quel sens évolue une réaction d'oxydoréduction, on tient compte du signe de E°.

Par exemple, la réaction :

$$3\,Br_2 + 2\,Cr^{+++} + 7\,H_2O \rightarrow Cr_2O_7^{--} + 14\,H^+ + 6\,Br^-$$

est la somme des deux semi-réactions suivantes :

$$2\,Cr^{+++} + 7\,H_2O \rightarrow Cr_2O_7 + 14\,H^+ + 6e^- \qquad E° = -1,33\ V$$

$$Br + 2e^- \rightarrow 2\,Br \qquad E° = +1,07\ V$$

La somme des deux E° donne — 0,26 volt, ce qui signifie que la réaction aura tendance à se produire en sens contraire de celui où elle est écrite ci-dessus.

Dans la plupart des cas, on ne peut pas parler de potentiel à l'état standard (ou normal), mais simplement de *potentiel de la réaction*, que l'on indique par E et qui est relié à E° par l'*équation de Nernst :*

$$E = E° - \frac{RT}{nF} \ln \frac{\text{concentration de l'espace de droite}}{\text{concentration de l'espace de gauche}}$$

où T est la température absolue en degrés Kelvin, R la constante des gaz, F la constante de Faraday (96 479 coulombs), n le nombre d'électrons impliqués dans le processus, et ln les logarithmes naturels.

Pour exprimer la concentration des réactifs, on utilise la *molalité* qui, pour des solutions assez diluées, n'est pas très différente de la molarité.

Au moyen de ces considérations, on peut établir les valeurs des potentiels normaux des différents éléments par rapport à l'hydrogène et construire ainsi une série électrochimique des éléments. Celle-ci a une grande importance pour la compréhension et la prévision de nombreux phénomènes chimiques.

Piles à combustible

Une pile à combustible est un générateur électrochimique qui transforme directement l'énergie chimique d'un combustible en énergie électrique. En tant que transformateur d'énergie, une pile à combustible fait le même travail qu'une pile galvanique, mais sa conception est très différente. En effet, une batterie conserve ses réactifs à l'intérieur de chaque élément, et on la régénère par des recharges périodiques. Une pile à combustible est alimentée en réactifs lorsqu'on désire la faire fonctionner; en dehors de ces périodes, les réactifs sont stockés à l'extérieur de la pile. De plus, alors que les électrodes des piles classiques sont consommées, celles des piles à

▼ Pile à combustible : ***schéma et principe de la*** **pile hydrogène-oxygène.**

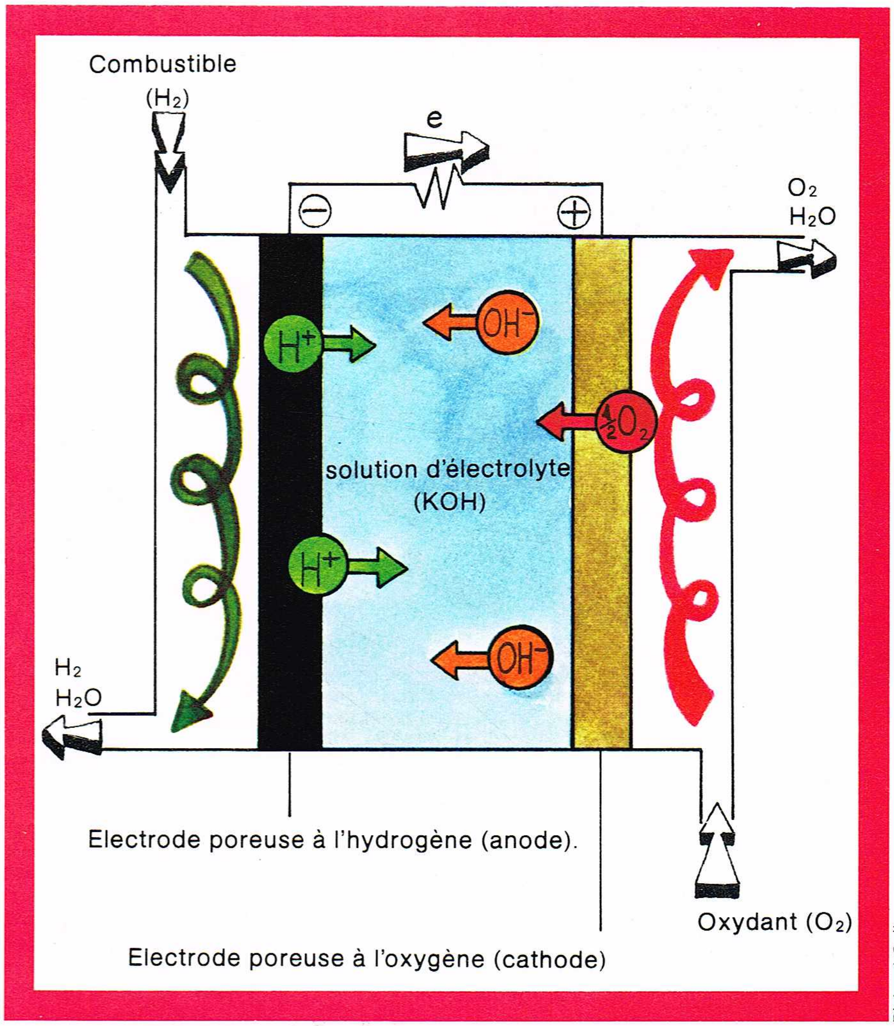

Richard Colin

Centre d'électrolyse et d'électrophorèse du C.N.R.S.

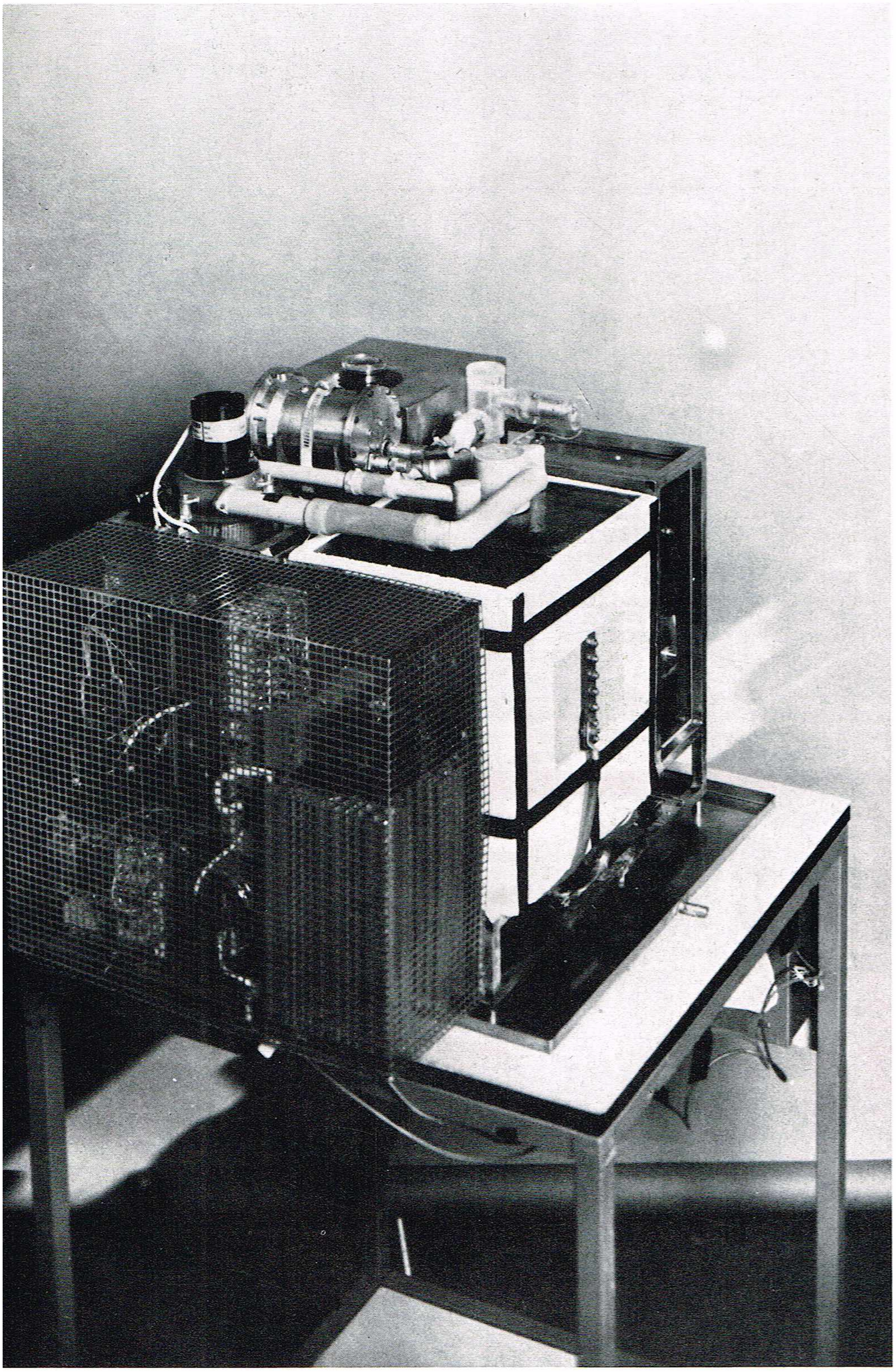

▲ **Pile à combustible hydrogène-air,** ***d'une puissance maximale de 1,3 kW.***

combustible restent chimiquement et physiquement inchangées (au moins théoriquement), car elles n'interviennent que comme catalyseurs des réactions d'oxydoréduction.

Le schéma de principe d'une pile à combustible peut être fourni par la *pile hydrogène-oxygène*. Le générateur est constitué de deux électrodes séparées par un électrolyte.

A l'anode, le combustible (ici l'hydrogène) se dissocie et réagit avec des ions hydroxyles en produisant des électrons :

$$H_2 \rightarrow 2\,[H]$$
$$[H] + OH^- \rightarrow H_2O + e^-$$

à la cathode, l'oxygène prélève des électrons pour former des ions OH^- selon l'équation :

$$1/2\ O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2\ OH^-$$

Lorsque les deux électrodes ne sont pas réunies par un circuit extérieur, la production d'électrons à l'anode et leur capture à la cathode conduisent à un état d'équilibre qui correspond à un certain voltage.

Si la pile était parfaite, c'est-à-dire si le système était parfaitement réversible, le travail utile maximal que l'on pourrait recueillir, soit W, devrait être égal à la variation d'enthalpie ΔG liée à la réaction. Ce travail correspondant au déplacement des électrons dans le circuit extérieur entre les potentiels E_A et E_C de l'anode et de la cathode, si la réaction produit *n* électrons, ce travail s'exprime par :

$$W = nF\,(E_C - E_A)$$

où F est la constante de Faraday.

Pour la réaction :

$$H_2\ (g) + 1/2\ O_2\ (g) \rightarrow H_2O\ (l)$$

$-\Delta G = 56{,}57$ kcal/mole, à la température et à la pression normales, donc :

$$E_C - E_A = \frac{56{,}57 \times 4{,}185}{2 \times 96\,479} = 1{,}23 \text{ volt}$$

en prenant comme équivalent mécanique de la chaleur: 4,185 joules pour 1 calorie.

Donc, la tension maximale d'une pile à hydrogène-oxygène serait de 1,23 volt. En fait, le fonctionnement d'une pile à combustible n'est jamais idéal, et le rendement est abaissé à cause de la *polarisation*. Ce phénomène de polarisation a pour origine la résistance électrique de l'électrolyte entre l'anode et la cathode, les phénomènes de transferts de masses vers les sites où se produisent les échanges électroniques, et la cinétique de ces échanges électroniques.

On conçoit que les électrodes constituent un point très important dans la mise au point de piles à combustible. Cependant, la pile hydrogène-oxygène n'est qu'un cas particulier des nombreuses piles à combustible que l'on peut imaginer et dans lesquelles on peut faire varier le combustible, le comburant, l'électrolyte et les électrodes. Les électrodes elles-mêmes peuvent donner lieu à de nombreuses variantes selon la nature du support (métal précieux, nickel, cuivre, cobalt, carbone, tantale, niobium) et du catalyseur qui y est fixé (platine, argent, nickel, cobalt, phtalocyanines, etc.). En ce qui concerne les combustibles, un certain nombre de composés peuvent être utilisés; on retiendra ici l'*hydrazine*, le *méthanol*, l'*hydrogène*, l'*ammoniac* et les *hydrocarbures*. L'hydrazine, dont le prix est élevé par rapport aux quatre autres combustibles, n'a pas été retenu dans les développements actuels, l'ammoniac doit être stocké sous forme gazeuse sous pression ou dilué à 34 %, l'emploi d'hydrocarbures ou de méthanol entraîne la formation de gaz carbonique qui exclut l'utilisation d'un électrolyte alcalin qu'il faudrait régénérer après sa neutralisation par CO_2.

Reste l'hydrogène, qui, malgré certains défauts connus (poids du réservoir de stockage sous pression, prix actuellement élevé, problèmes de sécurité), se présente cependant comme le combustible idéal (aucune toxicité puisque sa combustion ne produit que de l'eau).

Les piles à combustible ont été utilisées dans le domaine spatial (capsules Gemini et Apollo), mais on peut les utiliser aussi dans les sous-marins à usages scientifiques (laboratoires d'observation sous-marine, transmissions et télécommunications sous-marines, etc.). Bien que les utilisations soient nombreuses et variées, les applications terrestres n'ont pas encore trouvé une large diffusion; beaucoup de détails technologiques restent à mettre au point pour que cette nouvelle source d'énergie se développe.

BIBLIOGRAPHIE

BLACKBURN T.R., *Equilibrium : a Chemistry of Solutions*, Holt, Rinehart et Winston, New York, 1969. - CALVERT J.G. et PITTS J.N. Jr., *Photochemistry*, Wiley and Sons, New York, 1966. - HAISSINSKY M., *Actions chimiques et biologiques des radiations*, Masson & Cie, Paris, 1970. - KING E.S., *How Chemical Reactions Occur*, Benjamin, New York, 1963.

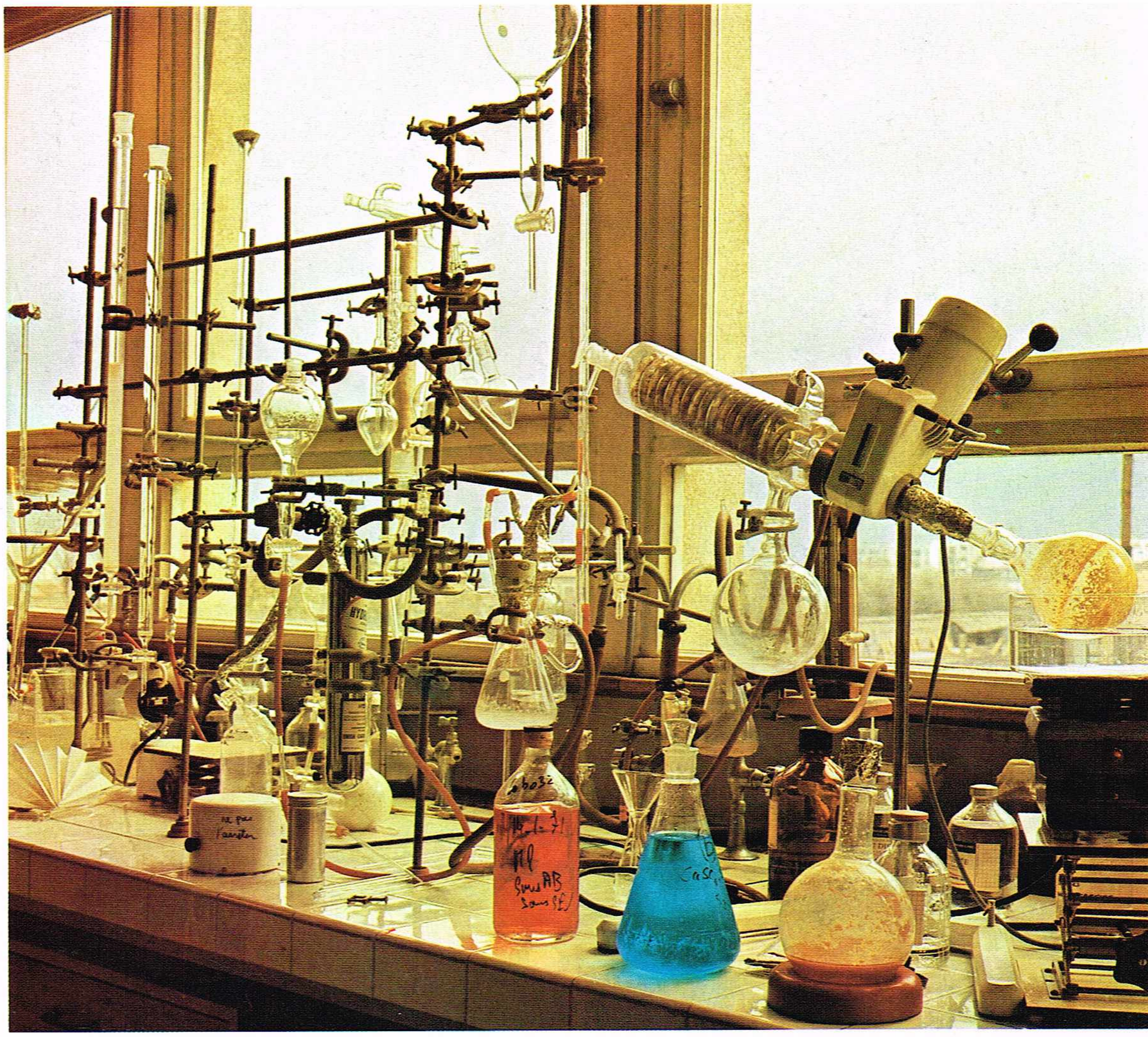

◀ *En chimie, l'appareillage de laboratoire est le plus souvent en verre, comme l'illustre cette photographie prise dans un laboratoire de Villejuif.*

Raphc

L'APPAREILLAGE EN CHIMIE

Les réactions chimiques nécessitent un appareillage dont la première qualité est de résister aux réactifs et aux produits pour lesquels il est fait et, par ailleurs, de permettre un contrôle des différents paramètres de la réaction. On distingue l'appareillage de laboratoire des installations industrielles. Dans le premier cas, il s'agit de traiter de petites quantités de substance, sans souci particulier de la rentabilité de l'opération mais en cherchant à observer le plus possible ce qui se passe dans le réacteur. Dans le cas des installations industrielles, un certain nombre de contraintes apparaissent : production en quantité très importante, coût de production le plus bas possible, sécurité, protection de l'environnement, etc.

Nous traiterons très brièvement ces deux aspects de la chimie ; leur importance, en particulier dans le cas des installations industrielles, demanderait évidemment un développement beaucoup plus long que celui que nous allons leur consacrer.

Le petit appareillage de laboratoire

L'appareillage de laboratoire est le plus souvent en verre, sauf pour les réactions ayant lieu sous des pressions élevées ou pour les réactions dans lesquelles le verre serait attaqué (par l'acide fluorhydrique, par exemple). Le verre le plus utilisé est le *verre Pyrex* qui résiste très bien aux chocs thermiques. Les réacteurs dans lesquels on effectue les opérations chimiques sont de formes et de dimensions très variées, depuis les tubes à essais, simples tubes dans lesquels on réalise des mélanges de liquides et de solides pour observer des réactions de précipitation, coloration, dissolution, jusqu'aux réacteurs les plus élaborés, aux multiples fonctions.

Les récipients dans lesquels on effectue les réactions sont de forme sphérique (*ballons* à un ou plusieurs cols), conique *(erlenmeyers)*, cylindrique *(bechers)*. Les récipients dans lesquels on doit effectuer des évaporations sont cylindriques et de forme plate *(cristallisoirs)*.

La condensation des vapeurs est réalisée dans des *réfrigérants,* tubes à deux enveloppes entre lesquelles se fait une circulation d'eau qui assure le reflux, ou la condensation dans un autre récipient, selon que le réfrigérant est ascendant ou oblique.

Le chauffage des réacteurs (ballons, bechers, erlenmeyers, etc.) peut se faire grâce à la flamme d'un *bec Bunsen,* mais on utilise le plus souvent des *calottes* ou des *jaquettes chauffantes* dans lesquelles l'élévation de température est créée par une résistance chauffante. On peut aussi maintenir un réacteur à température constante en l'immergeant dans un *bain thermostatique* ou en faisant circuler, dans une double enveloppe externe, un liquide maintenu à température constante.

Le refroidissement des réacteurs peut, selon le niveau thermique auquel on désire se maintenir, être effectué par circulation d'eau froide, de saumure, ou par immersion dans un mélange d'acétone et de carboglace ou dans l'air liquide.

La mesure des volumes liquides est effectuée grâce à des *pipettes,* tubes de verre munis d'un renflement et dans lesquels on prélève entre deux traits un volume connu. On utilise aussi des récipients en verre gradué, de formes diverses : les *fioles jaugées,* dont la contenance se trouve dans sa quasi-totalité dans la base du récipient, présentent un tube muni d'une graduation : ces fioles permettent de mesurer avec précision un volume déterminé de liquide : 50, 100, 250, 500, 1 000 cm^3, etc. ; les *burettes*

A. Rizzi

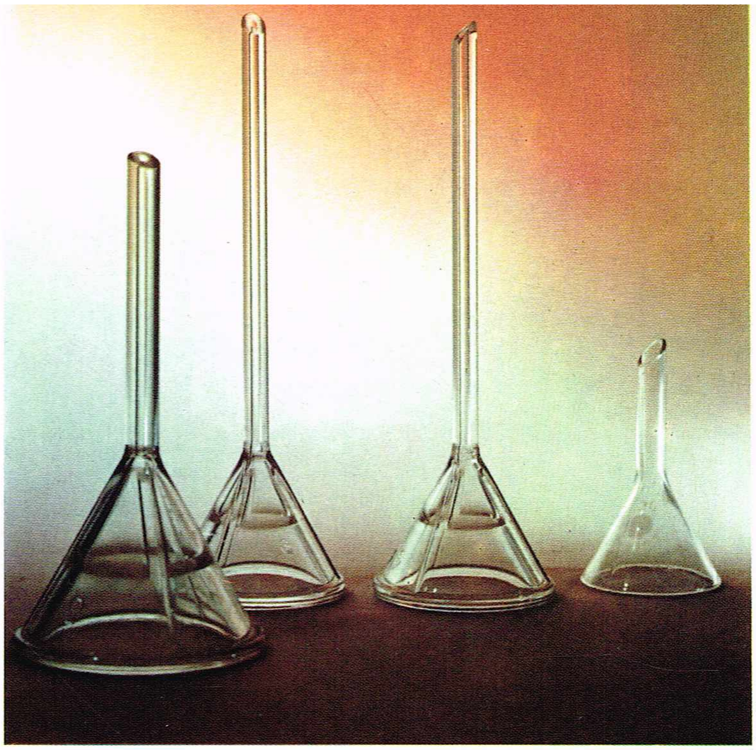

A. Rizzi

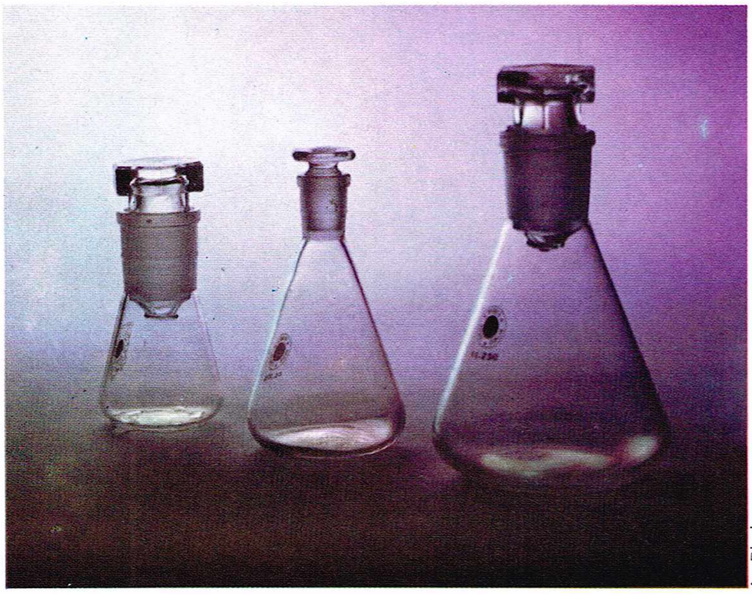

A. Rizzi

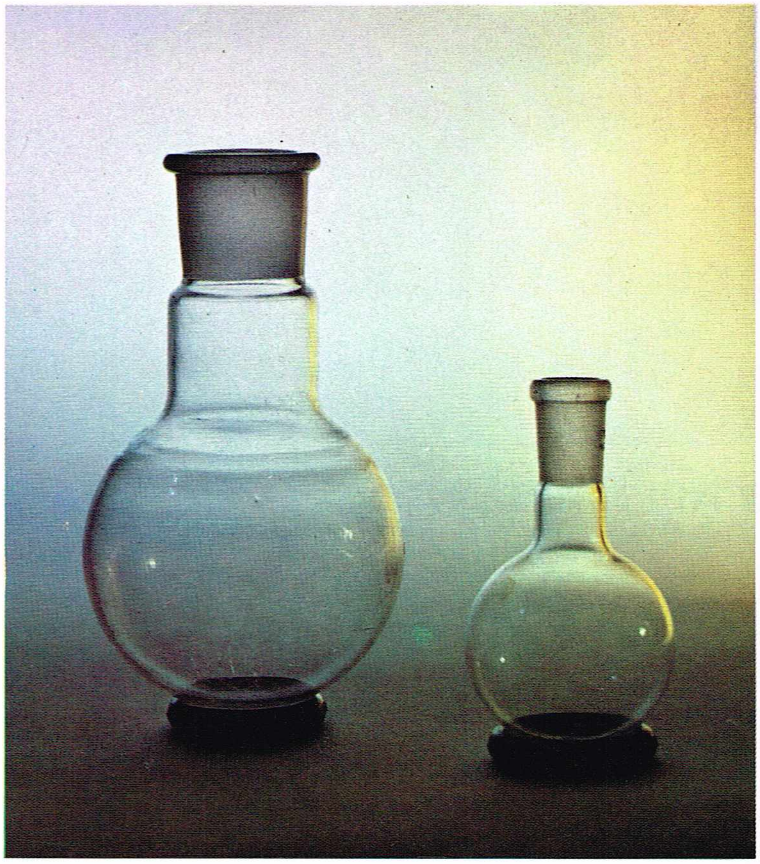

A. Rizzi

▲ *En haut, une série de* fioles jaugées *permettant de mesurer avec précision un volume déterminé de liquide. Ci-dessus, quelques types d'*erlenmeyers*, récipients coniques où s'effectuent les réactions.*

▶ *En haut, quelques* entonnoirs *à queue courte ou longue, pour la filtration. Ci-contre, deux modèles de* ballons *à fond rond.*

▼ *A gauche, divers* bechers *de forme cylindrique. A droite, une série de* tubes à essais*, dans lesquels on réalise des mélanges de liquides et de solides pour observer des réactions de précipitation, coloration, dissolution, etc.*

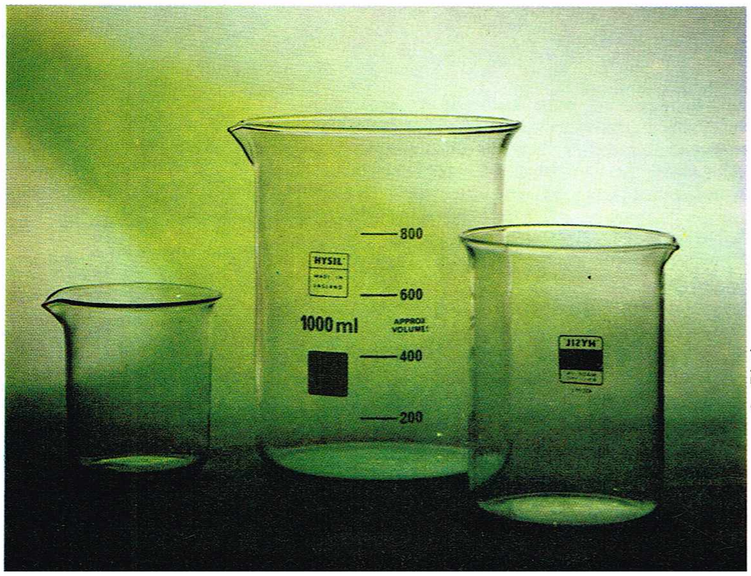

A. Rizzi

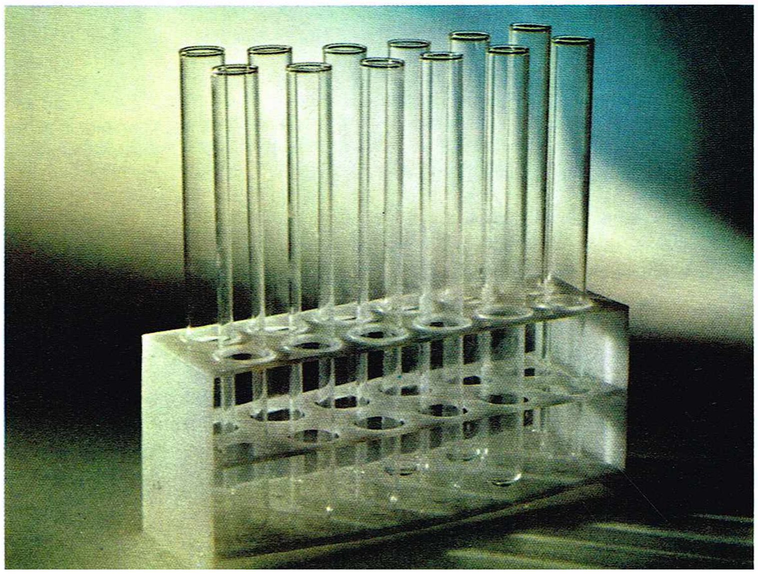

A. Rizzi

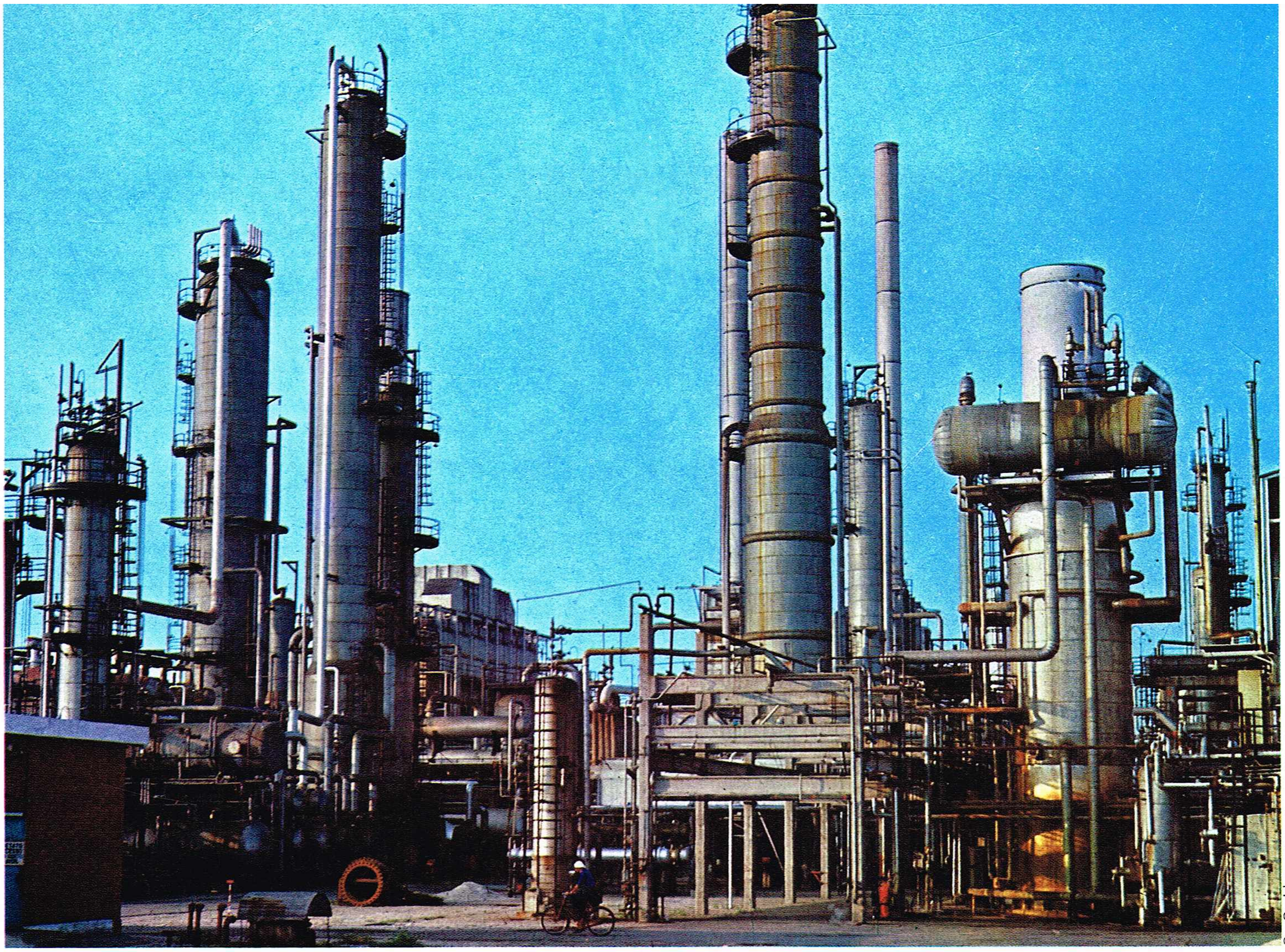

O. Geddo

▲ ***Les raffineries de pétrole (ici, Sarpom, Italie) illustrent bien la complexité d'une installation chimique industrielle.***

sont des tubes gradués munis à leur partie inférieure d'un robinet en verre rodé, et qui permettent de mesurer avec exactitude le volume de liquide qui s'est écoulé hors de la burette.

Les filtrations se font soit sur des *entonnoirs en verre* munis de filtre en papier, soit sur un récipient en porcelaine (appelé *buchner*) doté de perforations et relié à un système d'aspiration sous vide. On pose un papier-filtre sur le récipient en porcelaine et on aspire le liquide en faisant le vide dans le récipient qui le supporte. On peut aussi filtrer avec des *filtres-presses* de laboratoire qui sont la réplique en petite dimension des filtres-presses industriels.

Bien d'autres appareils sont nécessaires au bon fonctionnement d'un laboratoire, tels les *pissettes* pour projeter de l'eau distillée (ou autre solvant) sur un précipité ou dans un tube à essais, les *agitateurs*, en verre ou en métal de formes variées qui permettent d'agiter les liquides ou les suspensions, les *manomètres à mercure* pour la mesure des pressions, les *trompes à eau* ou les *pompes à vide* pour créer le vide dans des récipients, etc.

Il est hors de propos de tenter ici une description des multiples appareils en verre utilisés au laboratoire. Certains « montages », fruits de l'imagination du chercheur, ne sont pas achetés dans le commerce, mais réalisés sur place par travail du verre. Les différentes parties de ces « montages » sont reliées entre elles par des rodages normalisés de forme conique ou sphérique qui assurent à l'ensemble une certaine souplesse en même temps qu'une excellente étanchéité.

L'avantage de ces récipients et appareils en verre est de permettre une observation directe de la réaction qui s'y produit; par ailleurs, ils sont facilement manipulables, démontables, nettoyables et ne posent pas les problèmes de corrosion que poseraient les appareils métalliques. Cependant, dès qu'il s'agit de produire des quantités très importantes de produits, le verre doit céder la place aux métaux. Il n'est cependant pas totalement exclu de la pratique industrielle, et, lorsqu'il s'agit de fabriquer des produits de grande valeur et en quantités relativement faibles, on s'adresse encore au verre, ainsi que pour les réacteurs utilisés en photochimie industrielle.

L'appareillage industriel

Lorsque l'on regarde une installation chimique industrielle, on est confondu par sa complexité apparente, plus particulièrement lorsqu'il s'agit d'une raffinerie de pétrole. On y voit des kilomètres de tubes de tous diamètres, des centaines, sinon des milliers de vannes, de raccords, de régulateurs de température et de pression, et évidemment d'immenses tours verticales de tailles et d'agencements divers. En réalité, il n'existe qu'un nombre relativement faible de types d'appareils de base construits pour remplir des fonctions déterminées, fonctions qui sont celles que les chimistes étudient au laboratoire avant l'industrialisation du procédé; il s'agit, par exemple, de la distillation, de la filtration, du broyage, de l'agitation, etc., A ces fonctions correspondent les « unit-operations », définies aux États-Unis au début du siècle lorsque fut créé le « Chemical Engineering ».

Les appareils remplissant ces fonctions peuvent être groupés en un certain nombre de catégories :

— réacteurs : autoclaves et grignards,
— colonnes : de distillation et d'absorption,
— évaporateurs et cristalliseurs,
— épurateurs, décanteurs et filtres,

pour ne citer que les principales.

Réacteurs

Ce sont les appareils dans lesquels on réalise la transformation chimique elle-même. Étant donné la grande diversité des réactions chimiques, le nombre de types de réacteurs est très grand.

— Une première distinction peut être faite entre les réacteurs où l'opération est **continue** et ceux où elle est **discontinue.**

En ce qui concerne les réacteurs à **marche continue,** on peut distinguer les *réacteurs tubulaires,* dans lesquels la concentration des réactifs évolue le long du tube (réacteurs à gradient), des *réacteurs parfaitement agités,* où la concentration est uniforme en tout point de l'appareil. Entre le réacteur à gradient et le réacteur parfaitement agité se situent les *réacteurs étagés*.

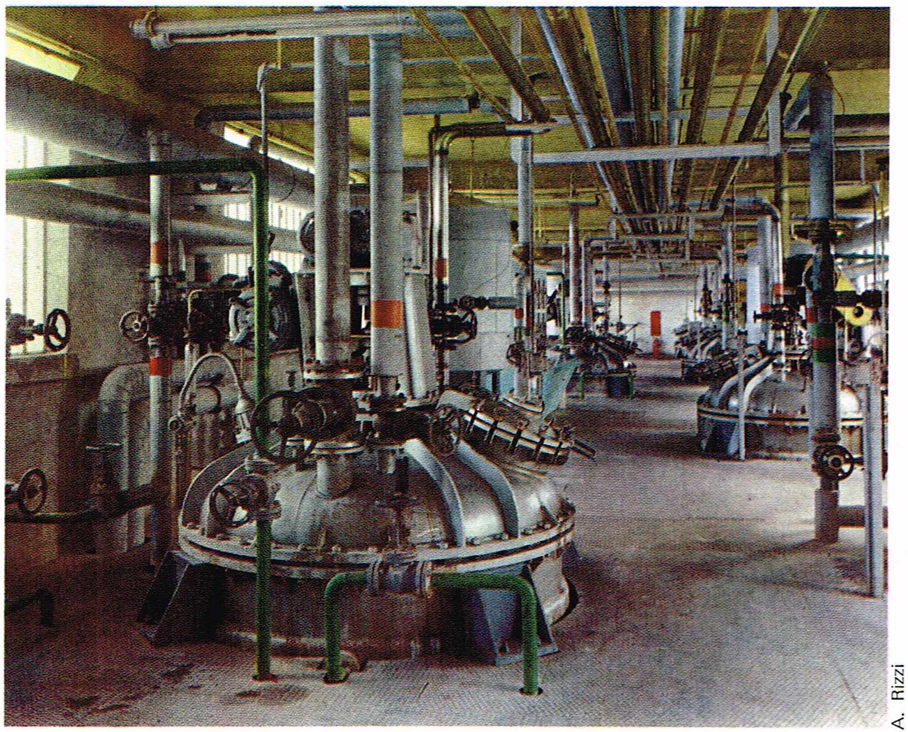

A. Rizzi

▲ ***Les* réacteurs *sont des appareils dans lesquels on réalise la transformation chimique elle-même ; ici, production de résines de polystyrène.***

Parmi les réacteurs à **marche discontinue**, on peut citer les *autoclaves*, qui permettent d'opérer sous pression, et les *grignards*, que l'on utilise à la pression atmosphérique ou sous faibles pressions.

— Par ailleurs, on distinguera les réacteurs dans lesquels la phase réactionnelle est **homogène** (qu'il s'agisse d'un liquide ou d'un gaz) de ceux dont le contenu est **hétérogène**, avec toutes les possibilités qu'offrent les trois phases gaz, liquide et solide.

Autoclaves

Ces réacteurs sont constitués, le plus souvent, de cuves en acier munies d'un couvercle et d'un dispositif de fermeture étanche. Ce couvercle particulier permet en outre l'observation de ce qui se passe dans le réacteur grâce à des regards, et il comporte un certain nombre de dispositifs permettant de faire passer la tige d'un agitateur, un thermocouple, des tuyaux d'alimentation et de vidange, etc. Lorsque ce type de réacteur est construit pour travailler sous forte pression, il porte le nom d'*autoclave*.

Dans un **autoclave** type, le couvercle, maintenu sur la cuve par des brides et des boulons, comporte en son centre un dispositif d'agitation dont le but est d'assurer un mélange intime des réactifs. On y trouve aussi des tubulures permettant l'introduction des réactifs et le soutirage des produits, une soupape de sécurité, un manomètre et un thermomètre. Le chauffage est généralement obtenu par de la vapeur qui circule dans une double enveloppe, mais on peut aussi utiliser des résistances électriques, de l'eau chaude, des gaz chauds, etc. Les autoclaves sont construits en aciers alliés forgés. Ils peuvent résister jusqu'à des pressions de 1 000 atmosphères à des températures d'environ 500 °C.

Le calcul de l'épaisseur de la paroi d'un autoclave est relativement simple ; il est donné par la formule :

$$S = \frac{P \cdot D}{2\sigma} \cdot y$$

où P représente la pression interne, D le diamètre de l'autoclave, σ la charge de rupture à la traction, et y un coefficient de sécurité qui doit tenir compte de facteurs pouvant intervenir à l'insu de l'opérateur.

Cette formule est valable pour des autoclaves à parois relativement peu épaisses. Si l'on considère les autoclaves travaillant à forte pression et dont les parois sont épaisses, le calcul devient plus complexe et doit tenir compte de différents facteurs de sollicitation sur la face interne et sur la face externe de l'appareil, des tensions radiales et tangentielles, du gradient de température entre les deux surfaces (et donc de la notable tension d'origine thermique qui en résulte). Le fond, le couvercle, les boulons doivent être dimensionnés après calcul des contraintes auxquelles ils seront soumis.

Pour les autoclaves d'une certaine épaisseur de parois et susceptibles de souffrir d'une corrosion notable, on utilise des aciers plaqués constitués d'une plaque d'acier qui représente l'élément résistant aux forces mécaniques, et d'une fine feuille d'un métal résistant à la corrosion (nickel, alliages de titane, tantale), cette feuille inaltérable étant laminée en même temps que le métal de base auquel elle adhère étroitement. On obtient ainsi à la fois une excellente résistance mécanique et une excellente résistance à la corrosion.

Grignards

Les **grignards** sont conçus comme les autoclaves, mais, comme ils n'ont pas à résister à des pressions élevées, leur construction est beaucoup plus légère. Ils ne présentent pas de problèmes particuliers de construction, sinon ceux qui sont liés au chauffage de l'appareil.

Réacteurs parfaitement agités

Dans la pratique industrielle, on utilise des réacteurs parfaitement agités, qui sont en fait de simples récipients cylindriques munis d'un dispositif d'agitation interne efficace. Ces réacteurs se distinguent le plus souvent les uns des autres par leur système d'agitation et par leur mode de chauffage ou de refroidissement. En ce qui concerne l'agitation, on utilise, le plus souvent, un dispositif rotatif : les *ailettes*, fixées en bout de l'axe et ayant pour rôle de brasser le liquide, le gaz ou le solide, sont de tailles et de formes très variables. En ce qui concerne les transferts de chaleur, ils peuvent se faire à travers la paroi, le réacteur étant muni d'une double jaquette, ou par un serpentin plongeant dans le milieu réactionnel. On peut, lorsque le refroidissement ou le chauffage par double enveloppe ou par serpentin n'est pas suffisant, faire passer, grâce à une pompe, le fluide réactionnel dans un échangeur externe.

Réacteurs tubulaires

Il s'agit, comme leur nom l'indique, de simples tubes. Ceux-ci peuvent être disposés dans un four et chauffés au moyen de brûleurs à gaz ou à fuel ; c'est le cas, par exemple, des réacteurs de cracking thermique et de steam-cracking des hydrocarbures. Lorsque le réacteur tubulaire traite deux phases fluides, il correspond alors aux colonnes à contre-courant que l'on utilise pour faire absorber un gaz par un liquide, ou pour l'extraction liquide-liquide. Pour favoriser les contacts entre les phases, ces colonnes sont munies de plateaux dont on parlera à propos des colonnes à distiller, ou de « remplissages » divers,

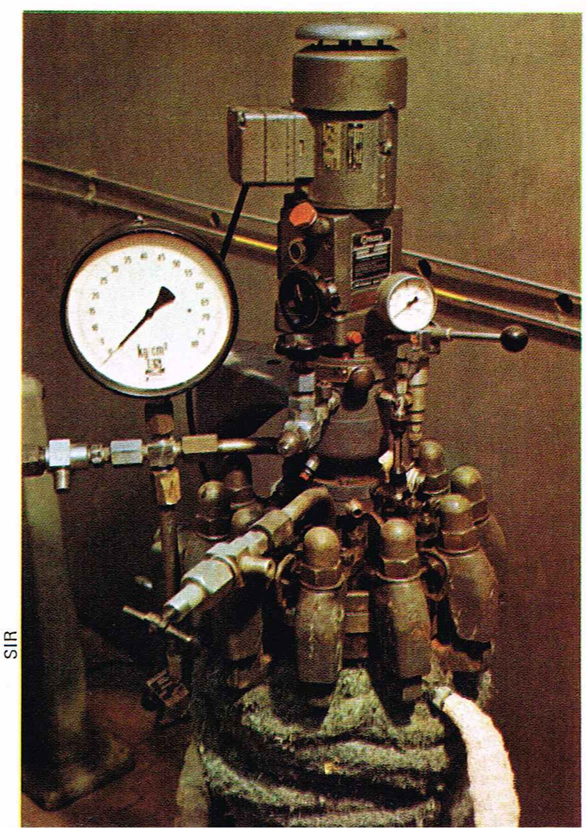

SIR

▶ ***Couvercle d'un* autoclave *type comportant en son centre un dispositif d'agitation, une soupape de sécurité, un manomètre, un thermomètre, etc.***

en céramique, en acier ou en porcelaine (anneaux de Raschig, de Lessing, selles de Berl, etc.).

Réacteurs catalytiques

Dans ces réacteurs, la phase fluide (liquide ou gaz) doit entrer en contact avec la phase solide qui constitue le catalyseur. On distingue trois types principaux de réacteurs catalytiques : les réacteurs à lit fixe, à lit mobile et à lit fluidisé.

Dans les **réacteurs à lit fixe,** le catalyseur, sous forme de particules sphériques ou cylindriques de 0,1 à 1 cm de diamètre, est maintenu fixe à l'intérieur du réacteur. Les réactifs à transformer passent au travers de ce lit catalytique, et les produits en sortent, les grains de catalyseur demeurant à leur place primitive.

Les **réacteurs à lit mobile** ont un lit de catalyseur en mouvement : cela signifie que le catalyseur s'écoule de haut en bas sous l'action de son poids, alors que les réactifs circulent dans le sens inverse (ou dans le même sens). Dans un tel dispositif, on comprend l'importance que prend la résistance du catalyseur à l'attrition, c'est-à-dire à l'usure des grains de catalyseur par frottement les uns contre les autres.

La technique du **lit fluidisé,** dans laquelle le catalyseur en particules très fines est rendu fluide par entraînement avec les réactifs, possède tous les avantages du lit fluide, et de nombreux procédés catalytiques adoptent actuellement ce dispositif.

Colonnes

Colonnes à distiller

Rappelons que, lorsqu'un mélange homogène de deux composés liquides A et B émet une vapeur, dans les conditions d'équilibre, la composition de la vapeur émise est différente de celle du mélange liquide qui lui a donné naissance. Elle est plus riche en composé le plus volatil. Si l'on condense cette vapeur, le liquide obtenu sera enrichi en l'un de ses constituants initiaux (le plus volatil). Cette simple opération n'est pas suffisante pour séparer deux constituants d'un mélange, mais, si on la reproduit de nombreuses fois, on peut parvenir à la séparation de A et de B : c'est le principe de la **distillation fractionnée.**

Le simple enrichissement en constituant léger par chauffage et condensation sur une paroi froide est un « flash ». Le principe de la distillation consiste à réaliser une succession de flashes pour obtenir, à partir d'une séparation initiale, un enrichissement en fractions légères de la phase vapeur dans une section appelée *section de rectification,* et, au contraire, procéder à un enrichissement en lourds de la phase liquide dans une autre section appelée *section d'épuisement.* Industriellement, cette succession de flashes est réalisée sur des *plateaux* à l'intérieur d'une colonne dans laquelle on réalise un contre-courant entre le liquide descendant et la vapeur ascendante.

Le liquide qui descend provient d'une part de la charge, et d'autre part du reflux liquide renvoyé en tête de colonne. La vapeur provient de la charge et du rebouilleur dans lequel une partie du liquide de fond est revaporisée.

Les colonnes à distiller industrielles sont constituées par un grand cylindre d'acier vertical à l'intérieur duquel sont disposés des plateaux horizontaux qui assurent le contact entre les vapeurs ascendantes et le liquide descendant. Le liquide séjourne sur ces plateaux jusqu'à une hauteur déterminée par un trop-plein qui débouche sur le plateau inférieur. Les vapeurs sont dispersées au travers du liquide au moyen de petites cheminées recouvertes par une capsule sphérique. Cette description correspond à ce que l'on appelle la *colonne à plateaux,* mais bien d'autres dispositifs ont été proposés pour assurer le contact le plus intime possible entre les vapeurs et le liquide. On citera, à titre d'exemple, les *plateaux perforés à déversoir,* les *plateaux à clapet (valve tray), à jet directionnel (jet tray),* etc. Pour les colonnes de petit diamètre, on utilise, à la place des plateaux, des garnissages de nature très diverse : anneaux de Raschig, chaînes métalliques, billes de verre, petits tubes très courts, etc.

L'efficacité d'une colonne à distiller dépend de son isolation thermique et des moyens de contact liquide-vapeur ; elle est déterminée par le nombre de plateaux théoriques. On appelle *plateau théorique* tout dispositif de contact qui produit le même degré de séparation qu'une distillation simple. Ainsi, une colonne qui produit la même séparation que 10 distillations simples successives est dite à 10 plateaux théoriques. On utilise industriellement des colonnes ayant jusqu'à 50 et même 100 plateaux théoriques.

Les facteurs principaux déterminant la qualité de la séparation sont le *rapport des volatilités* des composés à séparer, le *nombre de plateaux théoriques* et le *taux de reflux.* Ce dernier est le pourcentage de liquide ramené en tant que reflux au produit à éliminer ou encore le rapport du reflux descendant aux vapeurs montant dans la colonne.

Dans les distillations que nous venons de décrire, on introduit la totalité du liquide de tête dans le condenseur jusqu'à ce que la charge soit pratiquement totalement distillée. C'est la **distillation en « batch »** ou **en discontinu.**

Mais, le plus souvent, on opère industriellement **en continu,** et la charge est introduite en un certain point de la colonne, de sorte qu'une partie est volatilisée, et le reste descend avec le reflux. Le composant le plus volatil est concentré en tête de colonne et éliminé dans

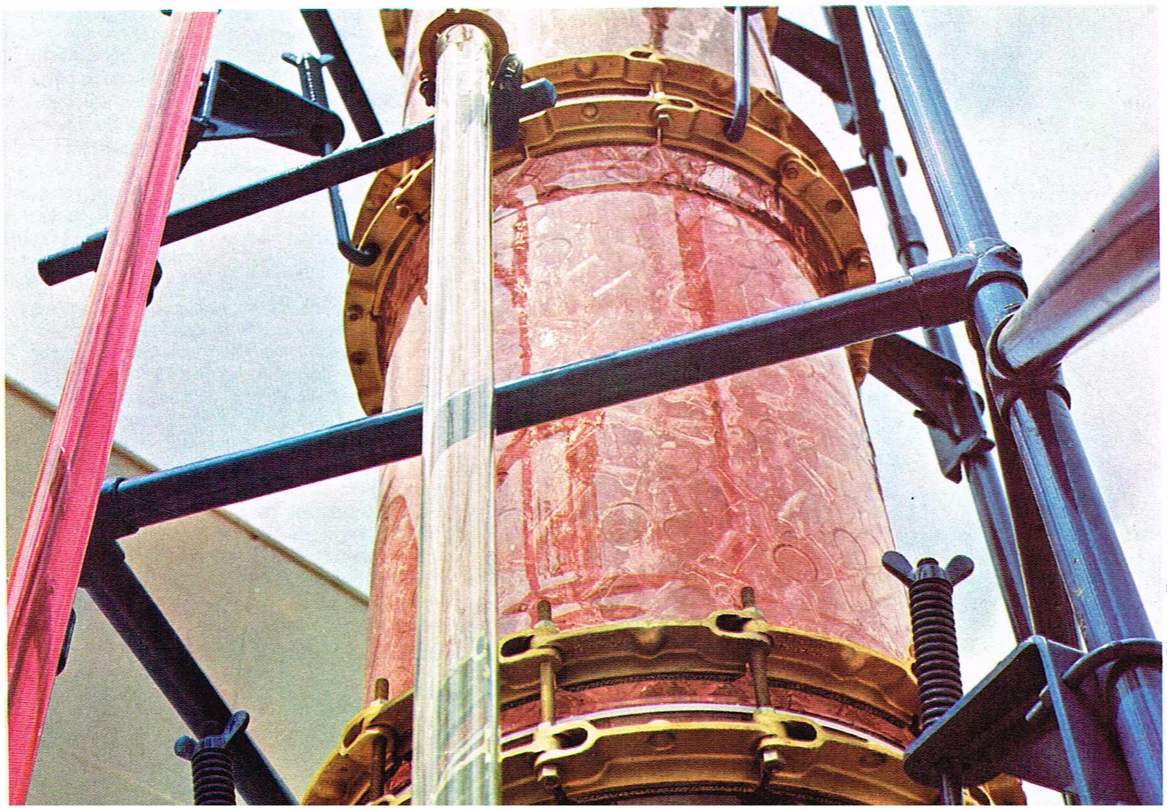

Corson-Fotogram

◀ *Une* **colonne à distiller** *industrielle est constituée par un grand cylindre vertical, à l'intérieur duquel sont disposés des plateaux horizontaux qui assurent le contact entre les vapeurs ascendantes et le liquide descendant.*

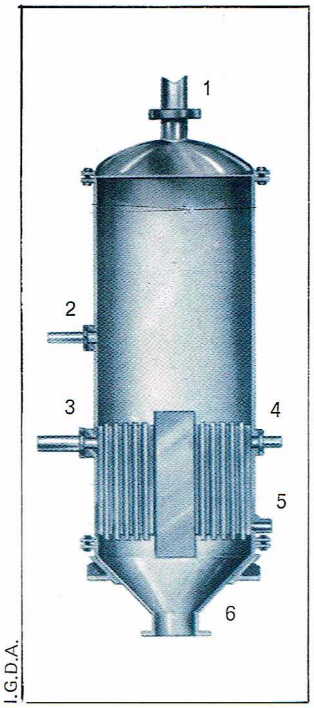

▲ ***Représentation schématique d'un* évaporateur vertical à tubes :** *1, sortie de vapeur; 2, alimentation; 3, entrée de vapeur; 4, sortie d'air; 5, condenseur; 6, sortie de la solution concentrée.*

▼ **Batterie d'évaporateurs** *alimentés par trois liquides à point d'ébullition décroissant et permettant de notables économies dans les calories à fournir.*

le condenseur. Les parties les moins volatiles peuvent être soutirées de la base de la colonne ou du rebouilleur. On peut aussi soutirer des fractions intermédiaires en différents points de la colonne, mais celles-ci ne sont jamais très pures et doivent être redistillées.

La **distillation sous vide** est utilisée pour séparer les composants d'un mélange qui se décomposerait sous l'influence de la chaleur nécessaire à la distillation atmosphérique. C'est le cas de la distillation des fractions lourdes du pétrole brut.

L'entraînement à la vapeur, ou **distillation à la vapeur,** comporte le passage de vapeur dans la cuve de distillation, au cours de la distillation, ce qui réduit la température à laquelle il est nécessaire de porter le liquide.

Colonnes d'absorption

Comme leur nom l'indique, les **colonnes d'absorption** sont utilisées pour absorber les composés d'un mélange gazeux. Elles sont construites sur le même principe que les colonnes à distiller à remplissage. Le mélange gazeux à traiter est introduit à la base, et du sommet de la colonne s'écoule un liquide ayant un pouvoir solvant sélectif pour le constituant que l'on désire éliminer du mélange gazeux. Le remplissage est constitué d'un solide inerte dont la forme et le volume assurent le meilleur contact avec la plus faible perte de charge. Les colonnes à remplissage sont utilisées pour l'extraction par des solvants sélectifs de certains constituants de solutions, pour l'humidification ou le rafraîchissement de l'air ou d'un gaz quelconque par introduction d'une quantité connue d'humidité, pour dessécher des gaz (dans ce cas, du charbon actif, un gel de silice, de l'alumine, des tamis moléculaires constituent la substance absorbante), pour laver les fumées ou les gaz, pour décolorer les huiles, etc.

Tous ces appareils sont en fait relativement complexes puisqu'ils doivent être dotés de dispositifs, pour récupérer les gaz absorbés, régénérer l'absorbant, le remplissage, le liquide ou le solvant sélectif, et aussi récupérer éventuellement les calories formées.

Évaporateurs et cristalliseurs

Évaporateurs

Les différents types d'évaporateurs ou de concentrateurs ont pour but de séparer par apport de chaleur, partiellement ou totalement, un solvant volatil d'un corps dissous non ou peu volatil.

Les **évaporateurs verticaux** sont surtout adaptés aux solutions qui cristallisent facilement ou donnent facilement un dépôt solide lors de leur concentration. Comme les températures d'ébullition des solutions augmentent avec la concentration et dépendent de la pression, cela pose des problèmes technologiques dans la construction des évaporateurs. Il est nécessaire, pour l'économie de l'exploitation, que la différence de température entre la zone de chauffage et la zone d'ébullition ne soit que de quelques degrés Celsius. Pour favoriser ces transferts de chaleur on augmente la circulation de la solution, soit par convection propre (évaporateur Robert à tube central), soit par circulation forcée à l'aide de pompes (évaporateur Svenson). On peut aussi diminuer la consommation de vapeur en réalisant l'évaporation dans plusieurs corps (évaporateurs à double, triple effet, etc.).

Les **évaporateurs à couche mince** ou **à film tombant** sont de conception plus moderne. Ils sont cylindriques et chauffés par l'extérieur, et la solution ruisselle sur la paroi interne. Ces appareils sont utilisés pour les évaporations rapides de produits sensibles à la chaleur. En effet, le temps de contact dans l'appareil est relativement court, le gradient de température dans la couche mince est faible, et les transferts de chaleur sont excellents.

Les évaporateurs peuvent être disposés en batteries, comme l'indique le schéma ci-dessous, dans lequel on a imaginé que l'on devait évaporer d'une solution : de l'eau dans le premier évaporateur, de l'alcool éthylique dans le second, et de l'alcool méthylique dans le troisième. Ce principe trouve des applications pratiques. En effet, une vapeur condensée à une certaine température et à une certaine pression peut faire bouillir une autre solution ayant normalement un point d'ébullition supérieur, à condition que ce dernier soit abaissé : cela est réalisé en abaissant la pression. On fait ainsi de notables économies dans les calories d'évaporation à fournir.

Cristalliseurs

Ce sont des appareils qui permettent de séparer un soluté à l'état solide de la solution qui le contenait dissous. Cette séparation peut être réalisée par concentration de la solution et évaporation du solvant, ou en refroidissant la solution; dans ce cas, la solubilité diminuant avec la température, le soluté cristallise en partie. Le système de cristallisation choisi dépend beaucoup des caractéristiques de solubilité du soluté, de la facilité de séparation de celui-ci, de la dimension des cristaux désirés, de la forme de la cristallisation, etc.

Il existe divers types de cristalliseurs dans lesquels la **cristallisation** est obtenue **par refroidissement.** Le type le plus simple à fonctionnement discontinu consiste en un récipient refroidi par de l'eau ou de la saumure. La solution qui se refroidit laisse déposer le soluté que l'on récupère par décantation ou par filtration. Les types plus modernes, tels ceux qui fonctionnent en continu, sont refroidis par un fluide qui circule dans une double enveloppe.

Les appareillages pour la **cristallisation par évaporation et concentration** sont identiques aux évaporateurs décrits précédemment. Ils sont conçus pour rendre l'opération la plus économique possible et pour la «récolte» des cristaux et des eaux mères.

Filtres, épurateurs et décanteurs

Ce sont des appareils qui permettent la séparation de particules solides, généralement de faible taille, dispersées dans une masse liquide ou gazeuse.

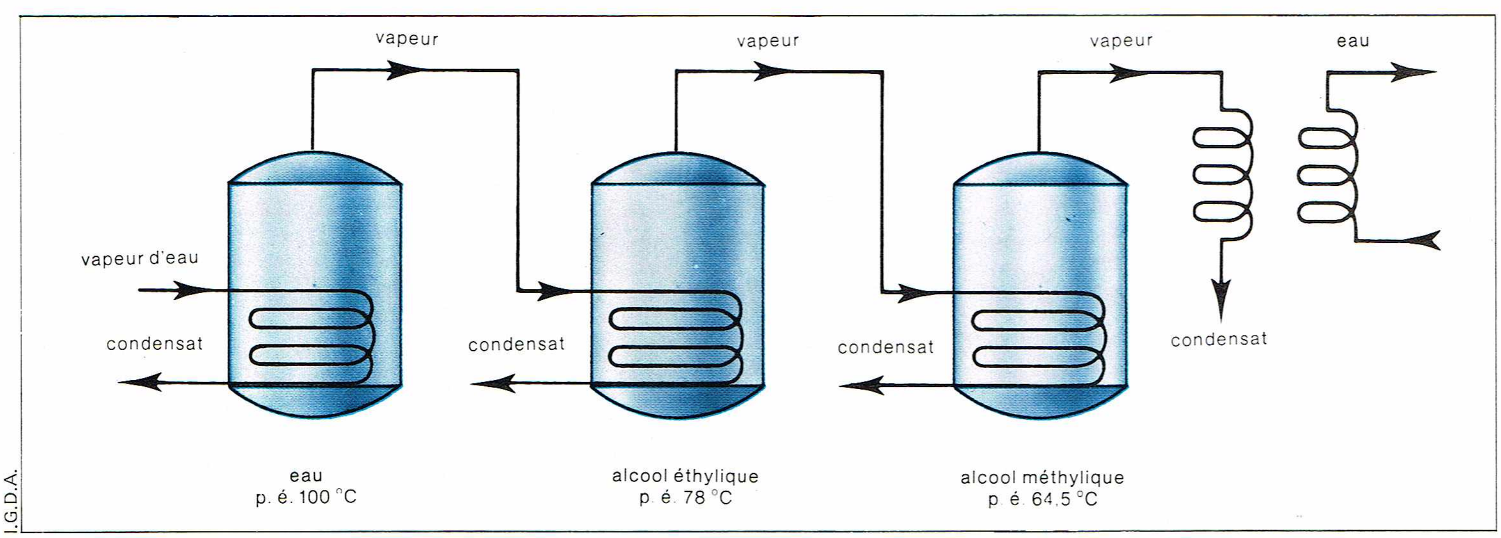

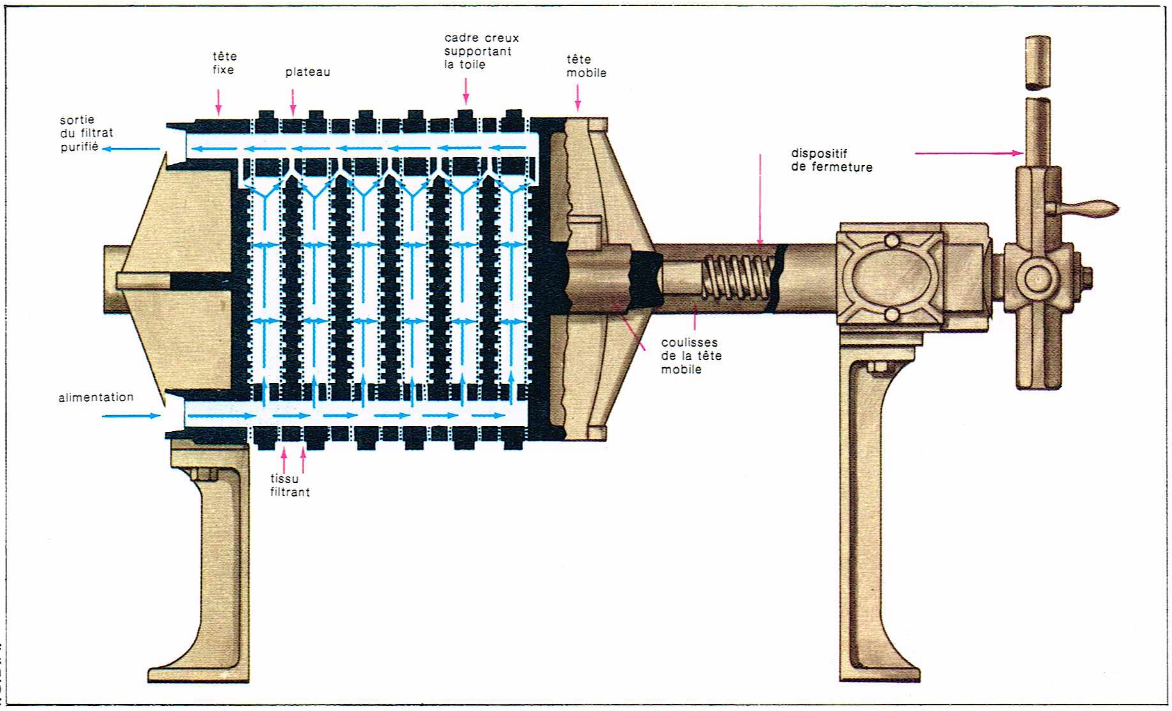

I.G.D.A.

◀ ***Représentation schématique d'un*** **filtre-presse**; ***c'est un appareil très utilisé dans les industries alimentaire et pharmaceutique.***

▼ ***Installations de* cyclones *servant à l'épuration (dépoussiérage) de l'air au cours du refroidissement de certains produits chimiques.***

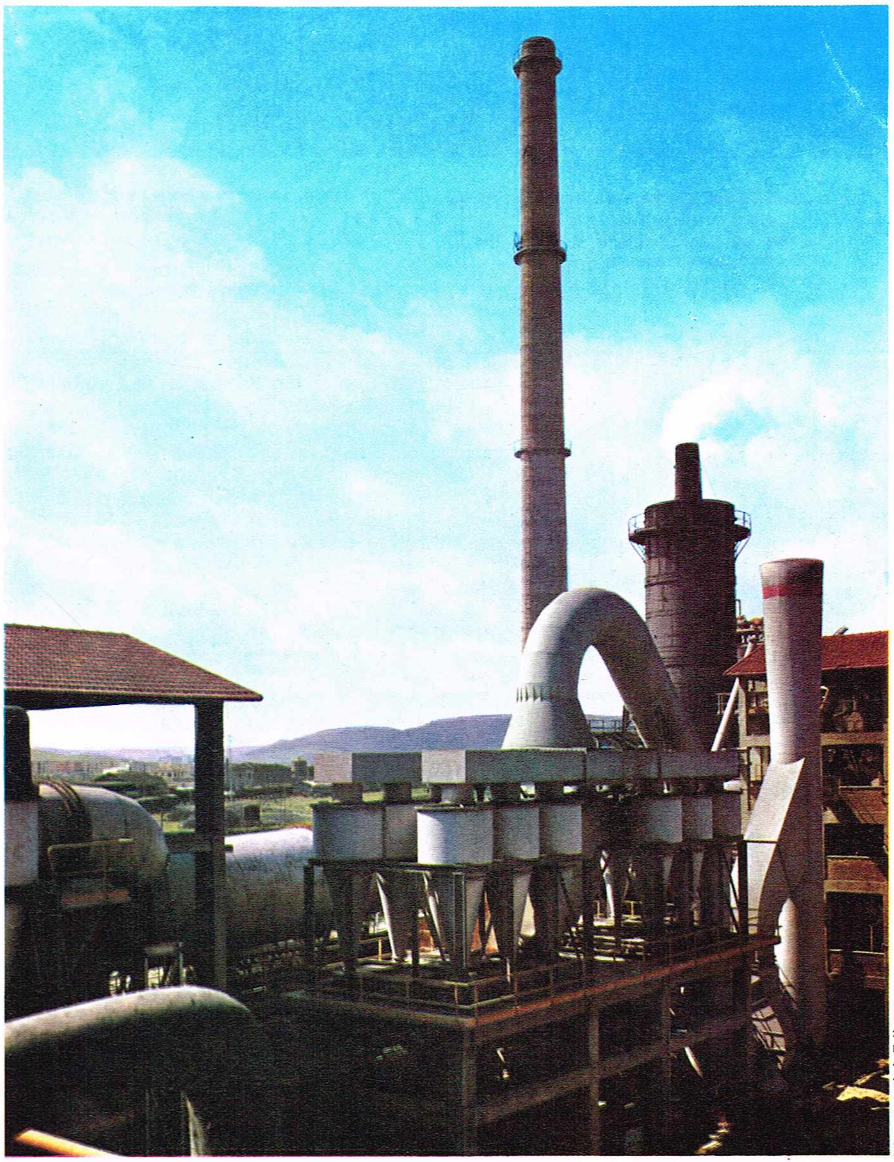

Montecatini-Edison

Filtres

La filtration consiste dans le passage de la suspension au travers d'un milieu filtrant adéquat capable de retenir par action physique, et plus rarement chimique, les particules solides. Le milieu filtrant est constitué par les particules solides, elles-mêmes déposées sur un support qui peut être, selon les cas, des feuilles de papier spécial, des tissus, des toiles métalliques, du sable, des graviers, etc. Pour faciliter l'opération et augmenter la vitesse de passage du liquide, qui dépend de la perte de charge dans les canaux du milieu filtrant, on exerce une aspiration sur le filtre, ou on augmente la pression sur le liquide à filtrer. La filtration continue ou discontinue est utilisée lorsque l'on désire traiter des liquides ou des gaz (la purification d'un gaz pour en éliminer les particules solides en suspension s'opère de façon analogue, généralement au travers de tissus métalliques très fins). Il s'agit en général de traiter des liquides ou des gaz ayant une très petite teneur en solide, en particulier lorsque les particules de solides ont une faible vitesse de sédimentation.

Un type particulier et très important de filtre est le **filtre-presse,** très utilisé dans les industries alimentaires et pharmaceutiques. Il est constitué par une succession alternée de cadres et de plateaux supportés par des rails et maintenus jointifs par pression. Les plateaux sont des plaques métalliques dont les faces sont gaufrées et recouvertes de toile filtrante. Les cadres ont pour but de maintenir un certain écartement entre les plateaux successifs et de donner naissance à un volume dans lequel on introduit le liquide à filtrer. Le filtrat traverse la toile déposée sur les cadres, s'écoule par les rainures des plateaux et rejoint le collecteur d'évacuation. Les particules solides, retenues par la toile, s'accumulent dans l'espace compris entre deux plateaux et forment ce que l'on appelle un gâteau.

Lorsque les espaces entre les plateaux sont remplis de solide, les gâteaux sont recueillis en faisant cesser la pression exercée sur les cadres et les plateaux. Il s'agit d'une opération discontinue assez longue et demandant beaucoup de main-d'œuvre.

Une variante du filtre-presse est le **filtre à enceinte sous pression.** Un certain nombre de plaques couvertes d'un tissu filtrant sont placées dans une calandre hermétique. La charge est envoyée sous pression dans la calandre et le filtrat évacué par un collecteur. Lorsque le gâteau s'est accumulé entre les plaques en quantité suffisante, on insuffle à l'intérieur des plaques un gaz comprimé, ce qui décolle le gâteau que l'on peut récupérer en ouvrant la calandre.

Mais les filtres les plus adaptés aux grandes productions sont les **filtres rotatifs** ou **filtres à tambour** du type

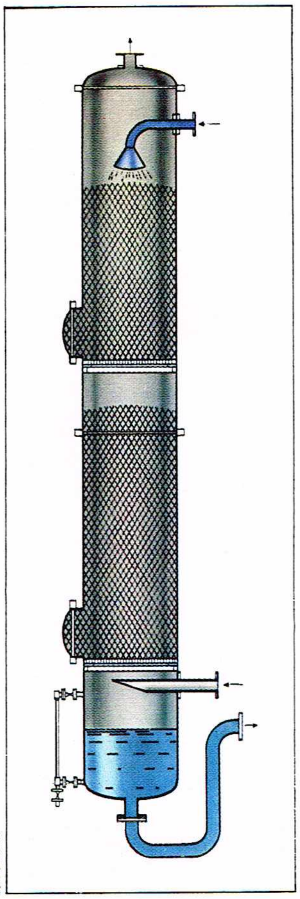

I.G.D.A. — Photothèque groupe TOTAL

▲ *Ci-dessus, dans la marge, représentation schématique d'une* **tour de lavage** *à injection de liquide.*
A droite, une **tour de réfrigération** *de la raffinerie des Flandres.*

▼ *Coupe schématique d'une* **centrifugeuse** *; sous l'effet de la force centrifuge, on récupère sur ses parois les particules solides.*

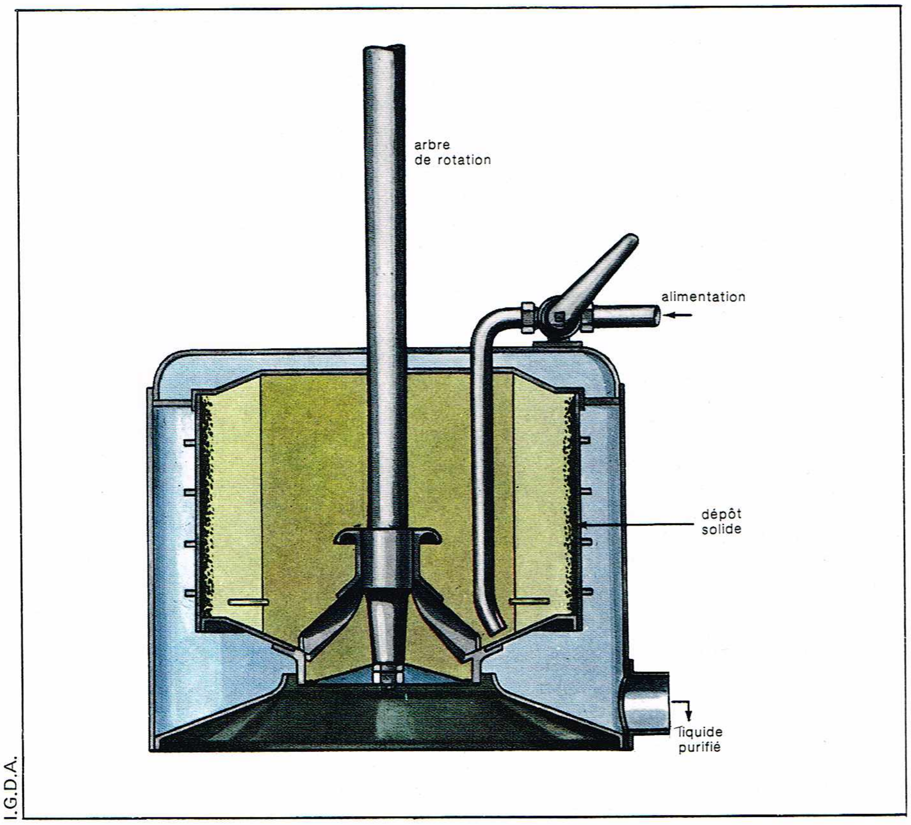

I.G.D.A.

des filtres Dorr. Ils sont constitués par un tambour cylindrique horizontal tournant, dont la surface latérale est formée d'un treillis métallique recouvert d'une toile filtrante. Ce tambour est divisé en secteurs longitudinaux par des cloisons radiales; ces secteurs correspondent aux opérations menées simultanément dans l'appareil : filtration, lavage, séchage, et décollage du gâteau. Le tambour est enfermé dans une enceinte métallique, dans laquelle on introduit le produit à filtrer. A l'intérieur du tambour, des conduites recueillent le liquide aspiré à travers les secteurs filtrants et débouchent sur une couronne percée d'orifices et solidaire du tambour. Dès que le secteur filtrant a été évacué du liquide filtré, il émerge et se trouve arrosé de solvant pour laver le gâteau; après décrochage du gâteau par une arrivée de gaz inerte, un couteau racleur arrache finalement le gâteau et l'envoie sur une vis d'Archimède pour être évacué.

Dans le cas des gaz, on utilise des appareillages très divers, le plus simple consistant à faire passer le courant gazeux sur un réseau ou un tissu. Mais on utilise surtout les **filtres électrostatiques,** dans lesquels le courant gazeux est envoyé à travers un champ électrostatique intense. Les particules solides sont électrisées et attirées par les électrodes qui ont fourni le champ.

Épurateurs

Les **cyclones** sont des réservoirs tronconiques dans lesquels le courant gazeux pénètre à forte vitesse par le sommet et tangentiellement. La force centrifuge envoie les particules solides vers la paroi, puis le gaz, débarrassé de solide, remonte dans la partie centrale avec un mouvement hélicoïdal concentrique à celui du gaz entrant. Il est évacué par la cheminée supérieure.

Dans les **tours de lavage,** il ne se produit pas de filtration, mais on injecte un liquide pulvérisé en fines gouttelettes capables de faire descendre la plus grande partie des particules solides.

Décanteurs

Les **chambres de décantation** sont constituées par de grandes chambres munies de nombreux panneaux verticaux qui obligent le courant gazeux à parcourir un

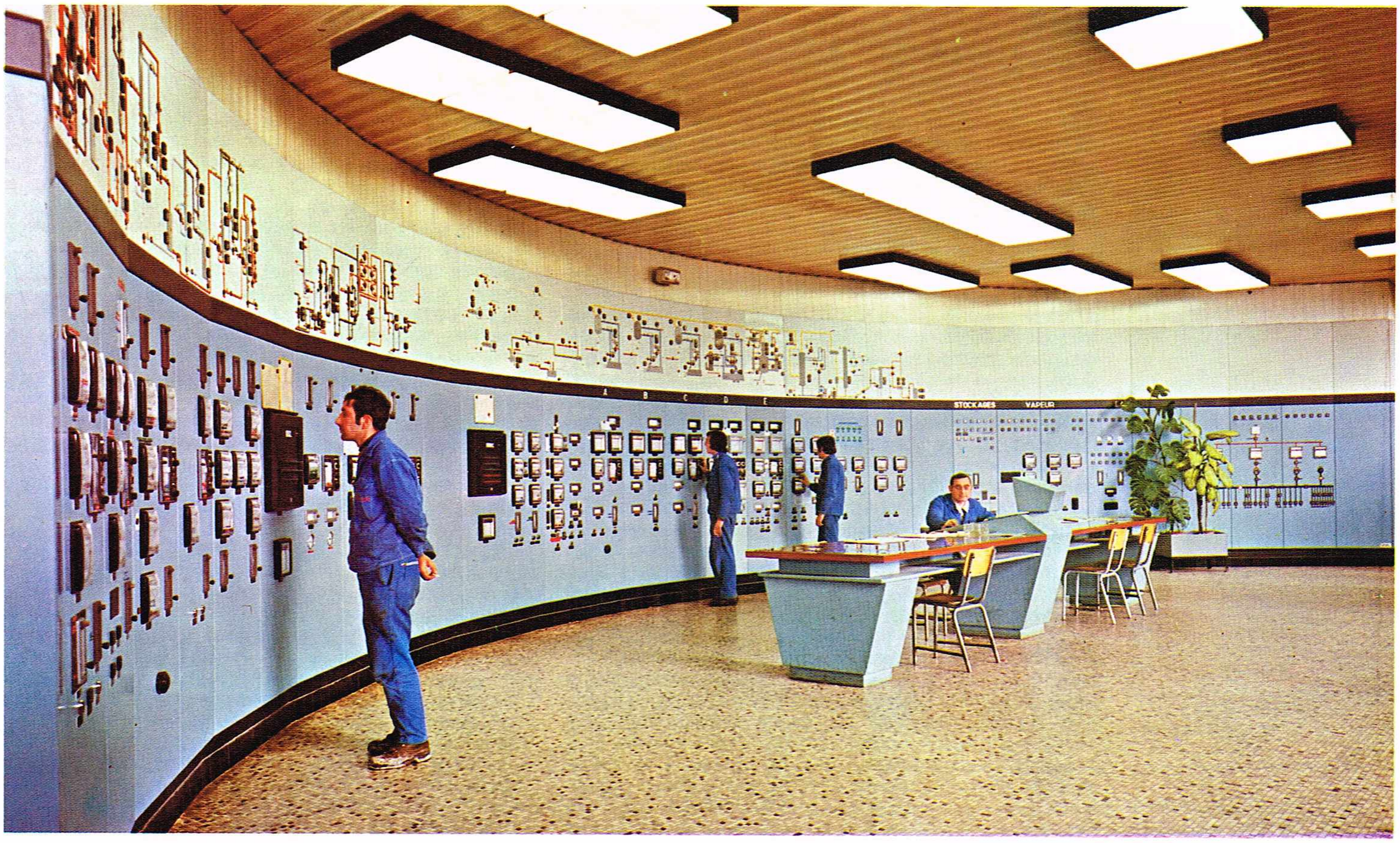

C. Bazin - Ugine-Kuhlmann

▲ *Vue générale d'une* ***salle de contrôle,*** *permettant de surveiller, en un même lieu, l'ensemble des données fournies par les différents dispositifs de contrôle disséminés dans une unité industrielle.*

trajet très tortueux. Les particules solides soumises à une force centrifuge importante se heurtent contre le fond ou les parois de l'appareil et se séparent du courant gazeux. Actuellement, ces installations sont tombées en désuétude, car leurs dimensions sont trop élevées.

Les **décanteurs** sont des appareils qui servent à séparer un solide présent en suspension sous forme de fines particules sous la seule influence de la gravité. Il s'agit de récipients de forme et de taille variables dans lesquels la décantation s'opère avec le temps sous l'effet de la gravité. On peut accélérer le phénomène de décantation en utilisant la force centrifuge. Il s'agit alors des *centrifugeuses*.

Autres appareils

En plus de ces appareils permettant de réaliser la réaction chimique et de séparer les produits de la réaction, toute installation chimique doit comporter des **pompes** pour la circulation des liquides, des **compresseurs** pour porter les produits gazeux à leur pression d'utilisation, des **turbines à vapeur ou à gaz** pour la production d'énergie, des **éjecteurs** pour créer ou maintenir un vide dans certains appareillages, et bien d'autres appareils qu'il serait trop long de décrire ici.

Par ailleurs, dans un schéma de fabrication, on constate que certaines unités nécessitent des quantités importantes d'énergie calorifique alors que d'autres, au contraire, sont productrices d'énergie calorifique. On s'efforce donc, pour économiser cette énergie et rentabiliser l'opération, de récupérer les calories produites pour chauffer les appareils qui nécessitent un apport de calories. L'équipement de récupération est constitué par des **échangeurs de chaleur**.

Par ailleurs, on sait qu'en raison des difficultés de transfert de chaleur, le rendement de la récupération thermique est rarement supérieur à 50 %. On fait donc appel à des fluides auxiliaires chauds ou froids pour compléter le bilan thermique : on fait appel en général à l'air ou à l'eau, mais on peut aussi employer des liquides permettant un chauffage à un niveau thermique élevé. Il s'agit des « dowtherms ». Dans les **réfrigérants,** on refroidit un effluent par un fluide auxiliaire. Les condenseurs permettent la condensation et le refroidissement d'une vapeur au sommet d'une colonne à distiller.

Les **rebouilleurs** sont des appareils qui assurent une vaporisation partielle des produits se trouvant au bas de la tour à distiller grâce à la circulation d'un fluide chaud.

Enfin, les installations industrielles importantes fonctionnant en marche continue doivent être dotées de dispositifs assurant automatiquement le contrôle et la régulation des différents paramètres de la marche de l'opération (températures, pressions, débits, niveaux, etc.). Parfois, on regroupe en un même lieu, appelé **salle de contrôle,** l'ensemble des données fournies par les dispositifs de contrôle disposés dans l'ensemble de l'unité industrielle. Un très petit nombre d'opérateurs peuvent ainsi surveiller la marche d'unités productrices de centaines de milliers de tonnes de produit, annuellement. C'est le cas, par exemple, des raffineries. On peut enfin programmer la marche d'une installation et, au moyen d'un ordinateur qui analyse à tout instant les données de l'ensemble des contrôleurs de températures, débits, pressions, etc., assurer une régulation automatique de l'ensemble.

A tous ces impératifs dictés par les exigences de la transformation chimique à réaliser en grand tonnage, il faut ajouter les exigences de la *sécurité,* de la *protection de l'environnement,* qui amènent à définir de nouveaux dispositifs qui, associés aux appareillages de production, en diminuent les risques sans en affecter le rendement.

Toute cette « architecture industrielle » est étudiée dans les sociétés d'engineering, par des ingénieurs et des techniciens qui, en plus de solides connaissances en chimie, doivent connaître la construction des appareillages que nous venons de décrire très sommairement.

BIBLIOGRAPHIE

FOUST, WENZEL, CLUMP, MAUS, ANDERSEN, *Principles of Unit Operations,* 3e édition, John Wiley and Sons, New York ,1964. - GROGGINS P. H., *Unit Processes in Organic Synthesis,* Chemical Engineering Series, Mac Graw-Hill, 1952. - SURUGUE J., *Techniques générales du laboratoire de physique*, C. N. R. S., Paris.

LES APPLICATIONS DE LA CHIMIE MODERNE

Qu'il s'agisse de produire de l'énergie pour se chauffer, se déplacer ou s'éclairer, qu'il s'agisse de fabriquer des matériaux de synthèse rivalisant avec la laine, le coton ou le caoutchouc, que l'on parle de médicaments, d'insecticides, d'engrais, d'aliments de synthèse, de la conquête de l'espace, de la photographie, de la télévision, etc., enfin de tous les « secteurs » de l'activité humaine, la chimie intervient partout.

Dans les chapitres précédents, nous avons décrit la matière, ses principales transformations chimiques et les moyens pour les réaliser. Nous allons maintenant décrire quelques grands domaines d'application de la chimie. Dans chacun de ces domaines, on recherche en général une propriété principale (souvent associée à des propriétés complémentaires), et les produits chimiques qui répondent à ces exigences sont caractérisés par des structures moléculaires particulières qui leur permettent de manifester la propriété recherchée.

D'une façon idéale, la recherche d'un composé chimique susceptible de répondre aux exigences d'une application donnée devrait résulter de la connaissance exacte des relations qui lient les propriétés d'un corps à sa structure. En fait, beaucoup des *relations propriétés-structure* établies à l'heure actuelle n'ont été mises en évidence qu'après la découverte fortuite d'une application. Il n'en reste pas moins vrai que la connaissance des propriétés liées à la structure d'un composé oriente chaque jour les recherches effectuées en chimie appliquée. Ainsi, si l'on désire un produit solide doté de propriétés mécaniques, on sait que l'on devra s'adresser à un composé macromoléculaire. Si ce composé doit être doté de propriétés élastomériques, ses chaînes macromoléculaires devront être très mobiles. S'il doit avoir une bonne résistance à l'oxydation, on devra éviter les doubles liaisons dans ses chaînes. Par contre, si l'on désire un composé très volatil, on devra rechercher des masses moléculaires très faibles, et s'il doit être soluble dans l'eau, on recherchera des produits porteurs de groupes OH, etc. Ainsi, les relations propriétés-structure déterminent la recherche appliquée, mais elles ne sont pas encore suffisamment développées pour permettre d'assigner à une application donnée la formule précise d'un composé.

Dans de nombreuses applications de la chimie, bon nombre de facteurs interviennent, indépendamment de la structure moléculaire, pour dicter l'emploi de telle ou telle molécule. Il s'agit, dans les produits de grande consommation, du prix de revient, par exemple. Dans d'autres cas, ce sont les exigences de lutte contre la pollution, de protection de l'environnement et de protection de la santé des travailleurs qui déterminent parfois les propriétés physico-chimiques du produit.

La recherche appliquée en chimie doit en outre suivre l'évolution d'autres techniques lorsqu'elle ne les précède pas. Si l'on prend l'exemple des essences utilisées dans les véhicules automobiles, autrefois, lorsque les taux de compression des moteurs étaient faibles, certaines coupes de distillation du pétrole brut pouvaient convenir, puis, à mesure du progrès dans les moteurs, le taux de compression augmentant, il a fallu augmenter la qualité antidétonante de l'essence, c'est-à-dire augmenter son indice d'octane ; ce fut la « course à l'octane », jusqu'à ce que de nouvelles contraintes résultant de la lutte antipollution obligent à de nouvelles modifications de la composition de l'essence.

La recherche appliquée ne peut, à l'heure actuelle, ignorer les découvertes de la chimie fondamentale. Il n'existe pas, d'une part, une recherche pure, et, d'autre part, une sorte d'art culinaire plus ou moins déprécié, mais une connaissance chimique qui progresse sans cesse et dont le but est soit d'établir des relations propriétés-structure, soit de synthétiser de nouvelles substances au lieu de se donner pour objectif de répondre aux exigences immédiates de notre civilisation.

Nous allons passer en revue quelques grandes applications de la chimie en les prenant dans un ordre qui ne correspond ni à une classification déterminée ni à une hiérarchie d'importance. Si l'on se rapporte au tonnage produit, certes, les carburants et les combustibles devraient être en tête ; par contre, si l'on considère l'importance pour la santé de l'homme, les médicaments et les pesticides, bien que correspondant à des tonnages beaucoup plus faibles, sont d'une importance sur laquelle il n'est pas nécessaire d'insister.

▼ Tableau récapitulatif de l'activité d'un complexe pétrochimique reposant sur le* steam cracking*, opération de base s'effectuant sur un produit de première distillation, ici le naphta.

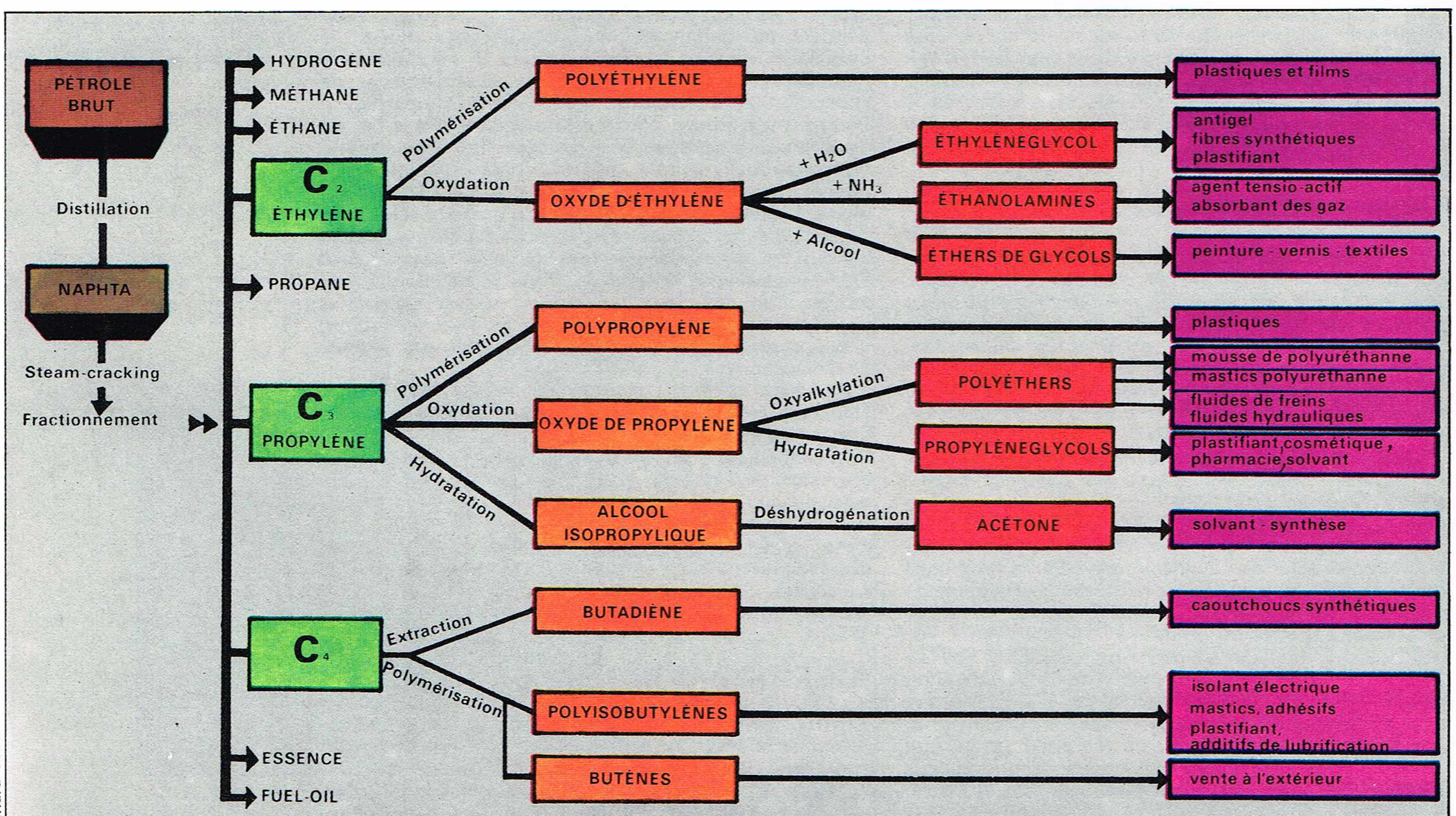

Richard Colin

LE RAFFINAGE DU PÉTROLE BRUT

Les carburants et les combustibles liquides et gazeux ainsi que les lubrifiants dont nous parlerons plus loin, la paraffine solide, les bitumes et le coke, sont issus d'un ensemble de procédés qui constitue le raffinage du pétrole.

Le raffinage du pétrole brut (débarrassé de l'eau salée qu'il entraîne) commence par la distillation à la pression atmosphérique qui le sépare en différentes *coupes :* gaz et essences légères, essences lourdes, kérosène, gas-oil. Le résidu de la colonne de distillation atmosphérique est ensuite envoyé dans la colonne de distillation sous vide qui fournit en tête un gas-oil lourd et laisse en fond de colonne un résidu appelé résidu sous vide. Ainsi, les fractions de première distillation ou fractions « straight run » sont ajustées pour correspondre approximativement aux usages auxquels elles seront destinées (essences, kérosènes, gas-oil, etc.), mais les quantités relatives des différentes fractions ne correspondent pas toujours aux besoins du marché, et leurs propriétés physico-chimiques ne sont pas exactement appropriées aux usages auxquels on les destine.

C'est pour cette raison qu'aux opérations de séparation que nous venons de voir, il faut ajouter des opérations de conversion et de finition (épuration, stabilisation).

Les *opérations de conversion* consistent à modifier, parfois profondément, la composition chimique des coupes. Au premier plan de ces opérations, se trouve le *cracking* qui permet, à partir de fractions trop lourdes, de faire des essences. Le cracking peut être purement thermique *(cracking thermique)* ou catalytique *(cracking catalytique)*. On peut utiliser le cracking pour diminuer la viscosité d'une coupe pétrolière par un craquage léger de ses molécules *(visbreaking) ;* on peut au contraire pousser le craquage jusqu'à obtenir du coke *(coking)*. Enfin, certains craquages peuvent être effectués en présence d'hydrogène *(hydrocracking)*. Au contraire, à partir d'hydrocarbure gazeux léger, on peut, par *polymérisation* ou par *alkylation,* obtenir des essences, ces opérations augmentent la masse moléculaire moyenne au lieu de la diminuer. Ces différentes opérations permettent, en modifiant la répartition par volatilité des coupes issues de la distillation, d'adapter les produits à la demande du marché.

D'autres opérations de raffinage ont pour effet, sans modifier la masse moléculaire, de faire varier le rapport C/H des hydrocarbures. Parmi celles-ci, le *reforming* est un procédé chimiquement complexe dans lequel les paraffines sont déshydrogénées et cyclisées en aromatiques, les naphtènes étant simplement déshydrogénés en aromatiques.

Enfin, l'*isomérisation* consiste, sans changer ni la masse moléculaire, ni le rapport C/H, à modifier le squelette hydrocarboné avec comme résultat, par exemple, une modification de l'indice d'octane.

La raffinerie comporte en outre des installations destinées à des traitements d'épuration et de finition au cours desquels on élimine, par des traitements physiques ou par des réactions chimiques, certains constituants indésirables. C'est ainsi que la *« stabilisation »* des essences consiste à en éliminer les fractions gazeuses, l'*hydrodésulfuration* à éliminer le soufre des distillats, etc.

Le cracking thermique

C'était le procédé utilisé avant la Seconde Guerre mondiale pour la production d'essence. En France, il a été progressivement abandonné au profit du cracking

▼ Schéma général, simplifié, des installations servant au raffinage du pétrole brut.

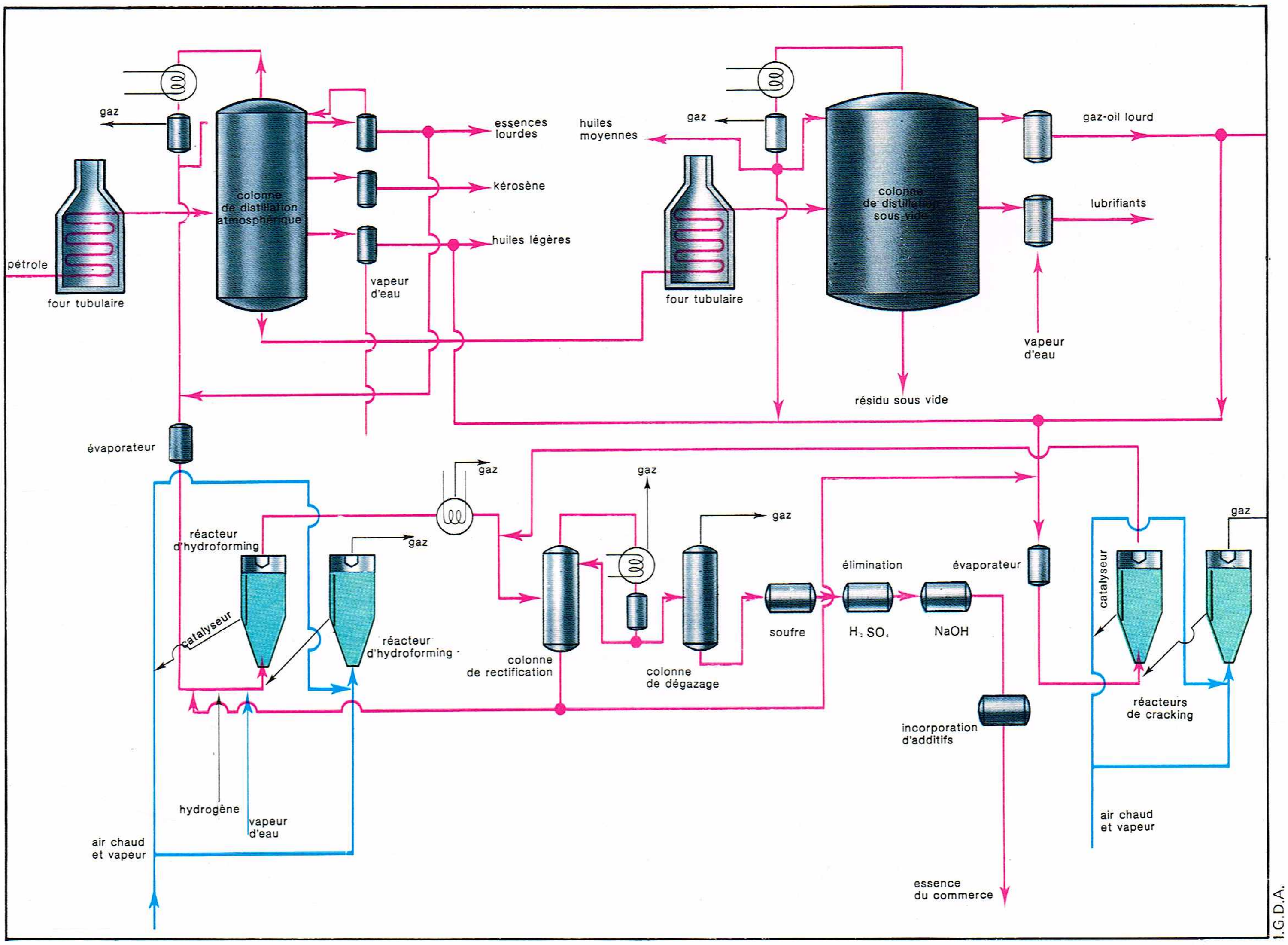

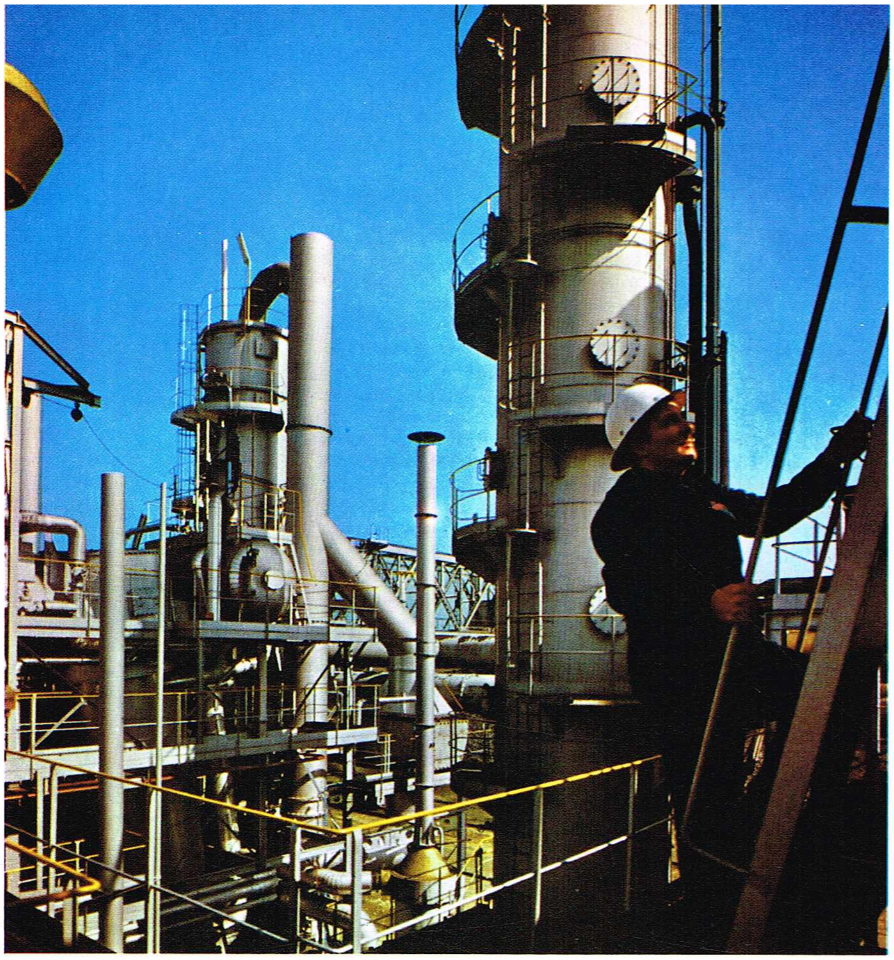

Montecatini-Edison

▲ ***Unités de* reforming catalytique *pour la production d'essence à partir des distillats du pétrole.***

▼ ***Représentation schématique du procédé de* cracking catalytique en lit fluidisé.**

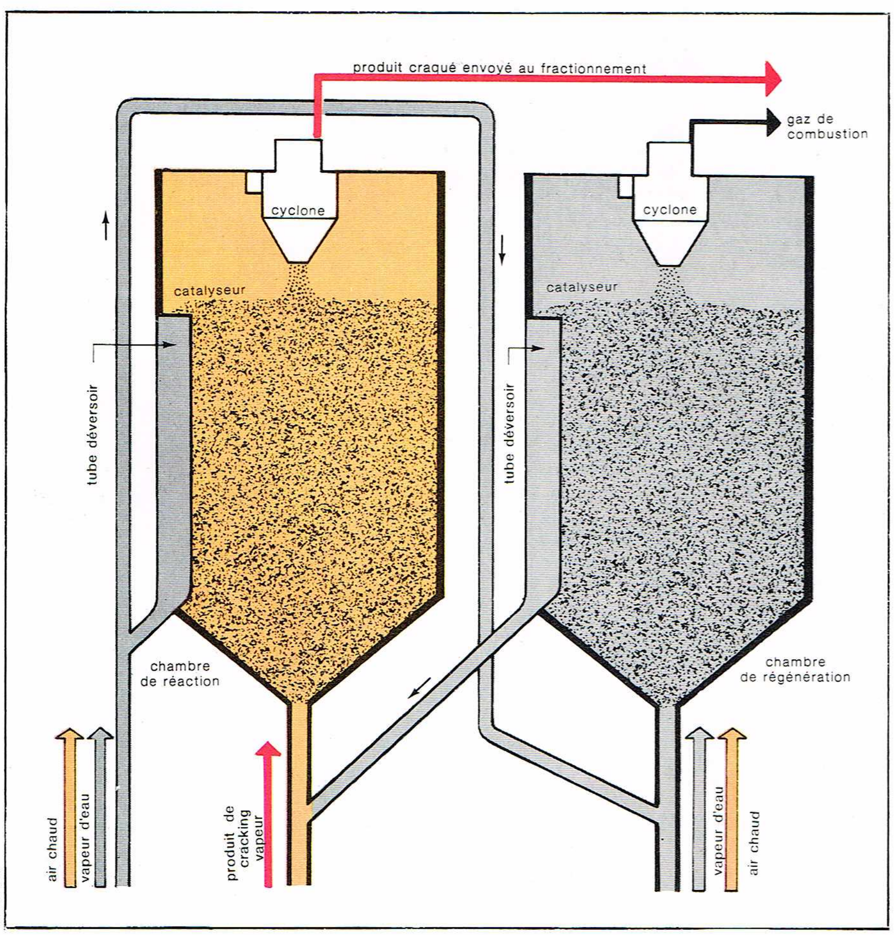

I.G.D.A.

catalytique, qui a l'avantage de fournir des essences d'indice d'octane plus élevé. Actuellement, on utilise en France comme cracking thermique le *visbreaking*, qui a pour but de diminuer la viscosité des résidus de distillation atmosphérique dans le dessein d'en obtenir des fuels ou des charges de cracking catalytique. Cette opération a lieu entre 450 et 500 °C et sous 5 à 20 atmosphères. La cokéfaction (coking) a pour but de transformer des résidus lourds en distillats plus légers et en coke. On forme en général de 20 à 30 % de coke, et l'on obtient en même temps de l'essence (15 à 20 %). On opère à la pression atmosphérique vers 500-550 °C.

Le cracking catalytique

C'est un ingénieur français, Houdry, qui substitua dans les opérations de cracking l'action d'un catalyseur à celle de la pression. Exploité à l'échelle industrielle depuis 1936, ce procédé est le principal fournisseur d'essence automobile.

Les catalyseurs utilisés à l'origine étaient des argiles et des silico-alumines naturelles; depuis on a utilisé des silico-alumines synthétiques et, depuis une dizaine d'années, on utilise des alumino-silicates, appelés zéolithes. Ces catalyseurs, outre leur action sur les scissions de liaisons conduisant au cracking, exercent une action isomérisante sur les paraffines formées et confèrent donc au produit un excellent indice d'octane. Le cracking catalytique est effectué entre 450 et 500 °C à la pression atmosphérique.

Les charges utilisées sont en général soit des gas-oils lourds, soit des charges analogues provenant d'opérations de visbreaking ou de cokage. On doit sélectionner les coupes de manière à obtenir le moins possible de coke, mais il s'en forme malgré tout, ce qui impose des opérations périodiques de régénération, au cours desquelles le coke déposé sur le catalyseur est brûlé dans un courant d'air.

Dans les premières installations, le cracking et la régénération étaient effectués dans la même installation avec un *lit fixe de catalyseur*. Depuis, on a introduit la technique du *lit catalytique mobile*. La charge et les produits de recyclage sont introduits préchauffés dans le réacteur où ils rencontrent le catalyseur solide qui descend par gravité d'une trémie placée à la partie supérieure de l'unité; les produits de cracking sont éliminés du réacteur. Dans le même temps, le catalyseur est dirigé vers le régénérateur, où le coke est éliminé par combustion avec de l'air dilué par un gaz inerte. Le catalyseur régénéré est élevé par un courant d'air au sommet de l'appareil et envoyé dans le réacteur, et ainsi de suite. C'est le *procédé « Airlift »*.

Un autre procédé utilise un *lit catalytique fluide* de particules de catalyseur très fines de quelques dizaines de microns de diamètre. La charge maintient cette poudre catalytique à l'état d'un fluide maintenu dans le réacteur. Au sommet de l'appareil, un cyclone permet de séparer les gaz craqués de la poudre catalytique. Les gaz sont envoyés au fractionnement. Le catalyseur s'écoule du fond du réacteur vers un régénérateur où de l'air introduit pour brûler le coke sert de gaz porteur; le catalyseur régénéré repart au réacteur, et ainsi de suite.

L'hydrocracking

C'est un craquage réalisé sous pression d'hydrogène (de 50 à 150 kg) et, suivant la charge, à des températures oscillant entre 250 et 400 °C. Contrairement aux crackings thermique ou catalytique qui produisent des oléfines en même temps que des paraffines, l'hydrocracking ne fournit pas d'oléfines. De plus, on réalise une hydrogénation partielle des aromatiques, ce qui a pour effet de supprimer la formation de coke. Selon la nature de la charge (naphtas lourds ou coupes de distillation sous vide), l'hydrocracking est orienté vers la production de distillats moyens ou vers l'obtention d'essences. L'hydrocracking fournit plus de produits liquides que le cracking catalytique. Le catalyseur utilisé (oxyde de molybdène déposé sur de l'alumine acide) réalise en même temps l'hydrodésulfuration de la charge.

L'hydrocracking est une opération onéreuse, car très forte consommatrice d'hydrogène (de 200 à 700 m³ par mètre cube de charge). Elle n'est réalisable que couplée avec une installation productrice d'hydrogène à partir de naphta ou de gaz naturel.

Le reforming catalytique

C'est le procédé par lequel on augmente l'indice d'octane des essences en transformant les paraffines et les naphtènes en hydrocarbures aromatiques.

Le reforming se fait sous une pression d'hydrogène de l'ordre de 20 bars et à des températures de 480 à 550 °C selon la charge et l'indice d'octane désiré. Le catalyseur est constitué par du platine déposé sur un support à caractère acide, le plus souvent des alumines. Récemment, on a mis au point des catalyseurs bimétalliques dans lesquels on ajoute au platine un autre métal comme le rhénium ou l'iridium. Malgré la pression d'hydrogène dont le but est d'éviter la formation de coke, celui-ci se dépose et recouvre progressivement le catalyseur que l'on doit régénérer tous les 6 à 9 mois.

La « durée de vie » du catalyseur est de 2 à 3 ans. Le coût élevé du catalyseur a suscité beaucoup de travaux pour augmenter sa longévité et diminuer la durée qui s'écoule entre deux régénérations. Un nouveau procédé permet la régénération du catalyseur en continu. Le reforming fournit, après élimination des hydrocarbures légers, une essence à haute teneur en hydrocarbures aromatiques et d'indice d'octane élevé (supérieur à 90). Par ailleurs, l'effluent du reforming trouve une application dans la préparation d'hydrocarbures aromatiques destinés à la pétrochimie (benzène, toluène, xylènes).

D'autres opérations de raffinage n'ont pas l'importance de la distillation, du cracking et du reforming ; elles interviennent cependant dans certaines raffineries pour modifier la composition des hydrocarbures et produire des carburants ou des combustibles.

L'alkylation

C'est l'opération par laquelle on réalise la synthèse d'hydrocarbures paraffiniques ramifiés, par action de l'isobutane sur une oléfine légère. Le produit de la réaction catalytique effectuée en présence d'acide sulfurique ou fluorhydrique est un « alkylat » à haut indice d'octane.

L'isomérisation

Elle consiste, en présence d'un catalyseur et le plus souvent sous pression d'hydrogène pour éviter le cracking, à transformer les paraffines normales ou peu ramifiées en paraffines ramifiées à haut indice d'octane.

Élimination des éléments corrosifs et polluants

La raffinerie, enfin, doit effectuer sur les produits qu'elle fabrique par les procédés que nous venons de décrire un certain nombre d'opérations d'épuration et de finition.

En effet, les coupes hydrocarbonées, de par leur origine, peuvent renfermer des éléments corrosifs ou des composés soufrés, azotés ou oxygénés responsables de mauvaises odeurs, de pollution lors de la combustion, d'empoisonnement des systèmes catalytiques, etc.

Un constituant gazeux particulièrement désagréable lorsqu'il est présent dans les fractions légères est l'hydrogène sulfuré (H_2S) ; on l'élimine par absorption chimique dans des solutions d'éthanolamines. On libère ensuite, par chauffage, la solution de l'H_2S absorbé, et l'on recycle la solution d'éthanolamine à l'absorbeur. L'hydrogène sulfuré recueilli est transformé en soufre, puis en acide sulfurique.

Les mercaptans, composés particulièrement nauséabonds, doivent être éliminés des essences à cause de leur mauvaise odeur, et aussi pour éviter, lors de la combustion de l'essence, une pollution par le soufre. On se débarrasse de ces mercaptans en les transformant en disulfures par un procédé d'oxydation catalytique (procédé Mérox). On élimine ensuite les disulfures formés (Mérox extractif).

L'hydrodésulfuration

C'est une méthode catalytique permettant d'éliminer le soufre contenu dans les fractions hydrocarbonées. Il se forme de l'hydrogène sulfuré que l'on élimine ensuite par absorption chimique. D'une façon plus générale, on désigne sous le vocable d'*hydrotraitements* tous les traitements catalytiques en présence d'hydrogène qui permettent de débarrasser les produits du raffinage des hétéroéléments indésirables et des composés insaturés susceptibles en se polymérisant de donner naissance à des gommes.

Outre les carburants et les combustibles, le raffinage du pétrole fournit des lubrifiants, dont il sera traité dans un chapitre suivant, et des bitumes. Les bitumes sont des résidus de la distillation sous vide. On les utilise rarement comme tels. Ils subissent une oxydation à l'air appelée « soufflage » qui permet de les rendre plus élastiques et moins sensibles à la température.

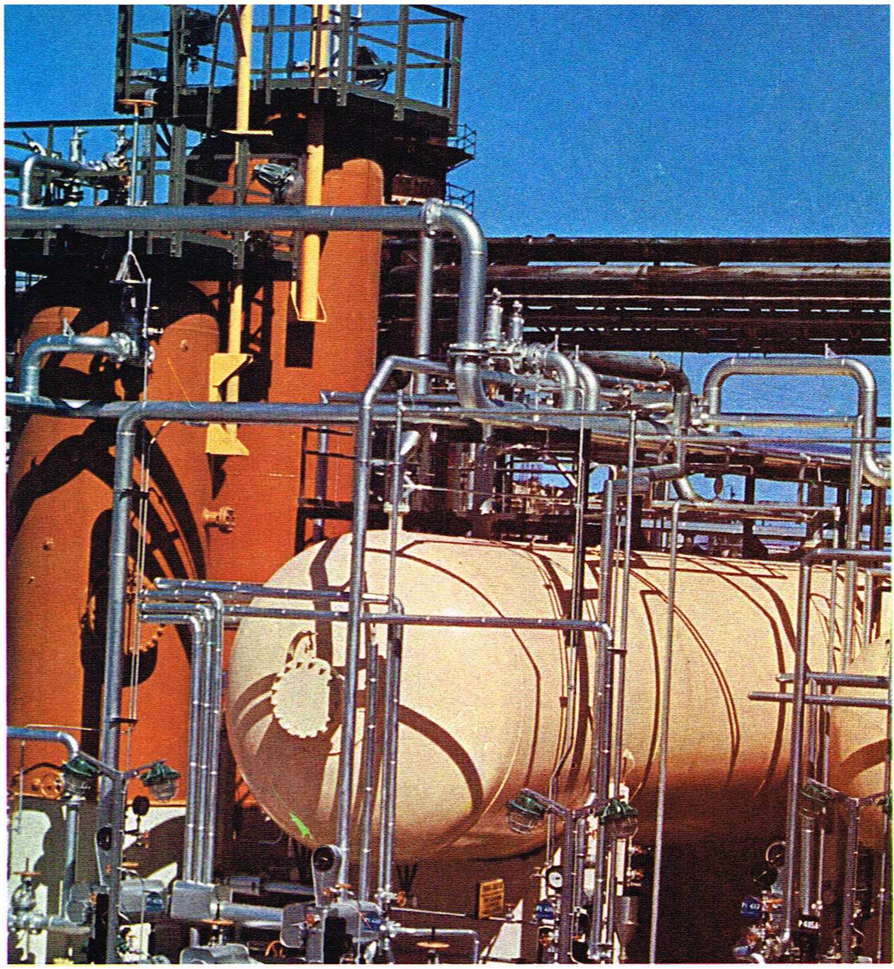
Photothèque groupe TOTAL

▲ *Installation* **Mérox** *pour l'élimination des mercaptans en raffinerie.*

BIBLIOGRAPHIE

GOLDSTEIN R. F., *The Petroleum Chemical Industry*, Spon, London, 1968. - WUITHIER P., *le Pétrole, Raffinage et Génie chimique*, Éditions Technip, Paris, 1972.

▼ *Représentation schématique d'une installation de production d'essences par* **alkylation.**

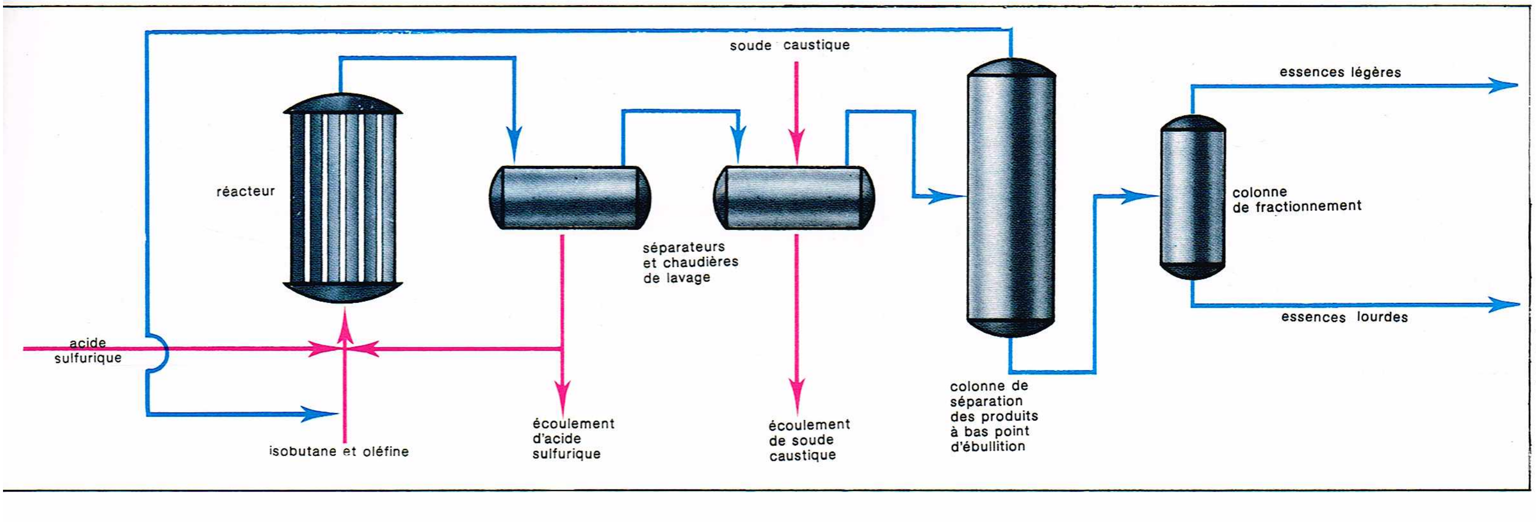

I.G.D.A.

▶ *A gauche,* le Pétrole, *enluminure tirée du manuscrit de J. Cuba,* le Jardin de santé *(1501). A droite, appareil de Pensky-Martens servant à la détermination de la* température d'inflammation *(flash point) des fuels domestiques* et *lourds.*

Bulloz

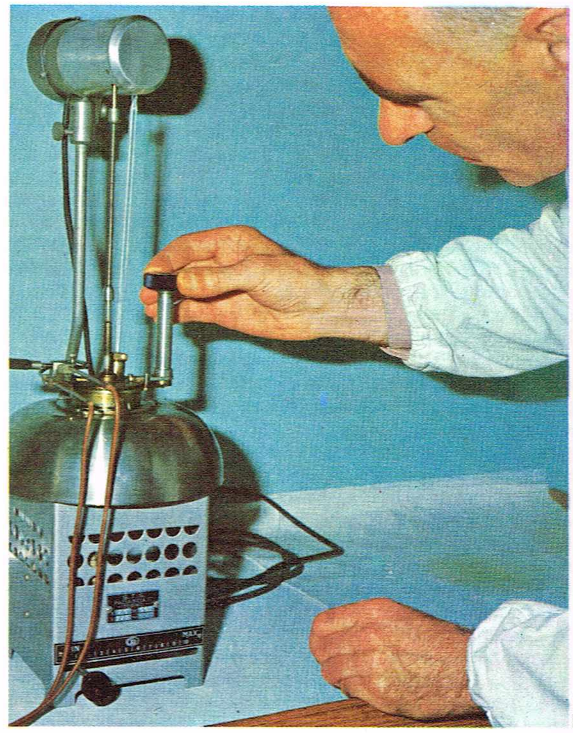

Titus

LES COMBUSTIBLES

Autrefois, le terme de combustible était exclusivement réservé à des substances qui, chauffées à l'air, s'enflamment et continuent de brûler avec production de chaleur utilisable, soit directement pour le chauffage, soit pour sa transformation en d'autres formes d'énergie.

Les combustibles primaires sont : le bois, la tourbe, les lignites, les charbons, les pétroles, les gaz naturels, et les déchets animaux et végétaux.

Actuellement encore, lorsque l'on parle de combustibles, on désigne essentiellement ceux que l'on vient de citer, et surtout le pétrole et les gaz naturels, ainsi que les charbons. Cependant, le développement de la science ayant permis de tirer de l'énergie d'autres réactions chimiques que la combustion ainsi que de la fission nucléaire et de la fusion atomique, on parle de combustible pour les mélanges chimiques utilisés dans la propulsion des fusées et aussi de combustibles nucléaires. Nous nous limiterons aux combustibles « classiques » en remarquant qu'ils sont tous carbonés et issus de la matière vivante animale ou végétale. On distingue les **combustibles fossiles** (charbon, pétrole, gaz naturel, etc.) des **combustibles non fossiles** constitués par des sources de carbone régénérables (bois, déchets végétaux, etc.).

La valeur économique d'un combustible dépend de son coût d'extraction, de transport, de stockage, des frais d'investissement et d'entretien de l'installation de combustion, de la facilité d'élimination des déchets de la combustion et de leur absence de toxicité sur l'environnement. Mais la première qualité d'un combustible est constituée par l'ensemble de ses qualités au niveau du brûleur de l'installation.

Il s'agit en premier lieu de son *pouvoir calorifique,* défini comme la quantité de chaleur dégagée par la combustion d'une quantité unitaire de combustible exprimée en kg pour les combustibles solides et liquides, et en m^3 mesurés dans les conditions normales, c'est-à-dire sous pression atmosphérique et à 0 °C, pour les gaz.

Il existe deux expressions du pouvoir calorifique : le *pouvoir calorifique supérieur,* qui considère que tous les produits de la combustion sont à la température ambiante, et pour lequel l'eau est donc produite à l'état liquide; et le *pouvoir calorifique inférieur,* dans lequel l'eau formée est à l'état gazeux. La différence entre les deux valeurs est due à la vaporisation de l'eau : H_2O liquide $\rightarrow$ H_2O vapeur qui consomme 10 800 cal/mole (chaleur d'évaporation). Ainsi, le pouvoir calorifique inférieur du méthane est de 8 500 kcal/m^3, et son pouvoir calorifique supérieur de 9 500 kcal/m^3. Évidemment, lorsque la combustion ne dégage pas d'eau, ce qui serait le cas, par exemple, de la combustion de l'oxyde de carbone, il n'existe qu'une seule valeur du pouvoir calorifique.

Le pouvoir calorifique est déterminé expérimentalement à l'aide de calorimètres (bombe calorimétrique de Mahler pour les combustibles solides et calorimètre de Junkers pour les gaz).

En dehors de leur pouvoir calorifique, qui doit être le plus élevé possible, les combustibles doivent posséder un certain nombre de propriétés, qui diffèrent selon qu'il s'agit de gaz, de liquides ou de solides. Ainsi, les combustibles gazeux doivent répondre à certaines spécifications relatives à leur composition et à leur température de rosée. Les fuels domestiques et lourds doivent être caractérisés par une certaine température d'inflammation (flash point), un point de trouble, une viscosité, etc. Les combustibles solides sont caractérisés par leur teneur en cendres, en matières volatiles, la taille de leurs particules, leur aptitude à être broyés, etc.

La demande croissante en énergie des dernières décennies a été satisfaite surtout par les combustibles fluides (pétrole et gaz) plutôt que par les combustibles solides.

Les réserves mondiales en charbon sont beaucoup plus importantes que les réserves en pétrole brut. On admet qu'au rythme de la consommation actuelle, les réserves actuellement connues de pétrole brut seraient épuisées vers 2100; par contre, au rythme actuel de la consommation en énergie, le charbon offre des réserves, très inégalement accessibles, pour quelques milliers d'années.

Combustibles solides

Le bois

La partie organique du bois est constituée d'environ 2/3 de *cellulose* $(C_6H_{10}O_5)_n$ et d'un peu moins de 1/3 de *lignine* à structure aromatique complexe. Le bois renferme en outre beaucoup d'*eau* puisqu'un bois stocké à l'air libre peut renfermer environ 15 % d'humidité.

La composition élémentaire de la partie organique est d'environ : C = 50 %, O_2 = 40 %, H = 6 % et N = 4 %.

Chimiquement, tous les bois sont équivalents, et leur comportement comme combustible ne dépend que de leur porosité et de leur teneur en eau. Leur pouvoir calorifique se situe entre 4 000 et 4 500 kcal/kg pour un bois bien sec. En dehors du fait qu'il laisse peu de cendres (3 % au maximum), le bois présente par rapport au charbon l'avantage de ne produire que des fumées pures, exemptes en particulier de soufre. Malgré ces qualités, l'importance industrielle du bois comme combustible est pratiquement

▶ *Page ci-contre, en haut,* le parc à charbon, *la grande roue et le tamis sont les éléments classiques de l'environnement d'une* centrale thermique *(ici, centrale thermique de Vaires-France). En bas, vue extérieure d'un four électrique utilisé pour la* production de coke *sidérurgique à partir des* houilles à courtes flammes.

nulle. Seule, sa distillation sèche en l'absence d'air, qui, pour 100 kg de bois, fournit environ 30 kg de charbon de bois, 25 kg de gaz ($CO + CO_2$), ainsi que des produits organiques liquides (acide acétique, acétone, méthanol), présente un intérêt (surtout pour le charbon de bois).

La tourbe

La tourbe est le produit primaire de la décomposition des arbustes et des plantes marécageuses ; elle est très pauvre en composés combustibles ; elle peut contenir jusqu'à 30 % de terreau, substance organique non décomposée, et jusqu'à 95 % d'eau d'imprégnation. La composition chimique et le pouvoir calorifique du produit déshydraté sont voisins de ceux du bois. Industriellement, la tourbe a peu de valeur, et on ne l'utilise que dans des régions comme le bassin de Moscou où la facilité de sa collecte compense ses faibles qualités de combustible.

Le lignite

C'est le produit de la décomposition de plantes initiée antérieurement à la tourbe. Il est composé de 65 à 75 % de carbone, environ 5 % d'hydrogène, le reste étant de l'oxygène. Les produits les plus récents (**lignite xyloïde**), avec un degré faible de décomposition, conservent encore l'aspect du bois et ont un pouvoir calorifique de 4 000 à 6 000 kcal/kg, alors que les produits plus anciens (**lignite picea**), compacts, de couleur noire, ressemblant beaucoup au charbon, ont un pouvoir calorifique de 5 000 à 7 000 kcal/kg. La teneur en cendres des lignites va de 5 à 15 et même 25 %. On utilise les lignites comme combustibles bon marché dans des installations spécialement prévues pour leur emploi.

La houille

La houille est un produit de décomposition plus avancée encore. Elle contient 75 à 90 % de carbone et 5 % environ d'hydrogène, le reste étant de l'oxygène. La composition et les caractéristiques de ce charbon fossile sont très variables ; on distingue : la houille grasse, maigre, à longues flammes et à courtes flammes.

— La **houille grasse**, après distillation, produit un coke compact et résistant aux chocs.

— La **houille maigre** donne au contraire un coke friable.

— La **houille à longues flammes** renferme plus de 25 % en poids de substances volatiles (hydrocarbures et hydrogène obtenus par chauffage dans un creuset fermé).

— Les **houilles à courtes flammes** contiennent moins de 25 % en poids de substances volatiles.

— Il existe enfin les **houilles sèches**, riches en substances volatiles, et fournissant un résidu pulvérulent.

Les houilles à courtes flammes sont surtout utilisées pour la production du coke sidérurgique. Le pouvoir calorifique de la houille se situe entre 7 000 et 8 000 kcal/kg. La houille grasse à longues flammes est utilisée pour l'obtention par distillation du gaz d'éclairage.

L'anthracite

C'est un produit de décomposition complète du bois, renfermant environ 95 % de carbone, 2 à 3 % d'hydrogène, le reste étant de l'oxygène. Son pouvoir calorifique varie de 8 000 à 9 500 kcal/kg.

Le métaldéhyde

Plus communément appelé « méta », c'est un combustible solide très différent des précédents. C'est un polymère de synthèse obtenu en traitant, à basse température, l'acétaldéhyde CH_3—CHO par l'acide chlorhydrique. Sa formule brute est $(CH_3—CHO)_4$. C'est un solide, que l'on peut comprimer en pastilles. Plus agréable à manipuler que l'alcool grâce à sa forme solide en plaquettes, il a été supplanté par l'usage du butane en bouteilles pour des utilisations comme le camping.

Combustibles liquides

Pétrole brut

Parmi les combustibles liquides, le plus important est à coup sûr le pétrole. D'après les théories actuellement admises, il proviendrait de la décomposition au cours des âges géologiques d'animaux marins microscopiques du type de l'actuel plancton, qui se seraient décomposés

Parimage

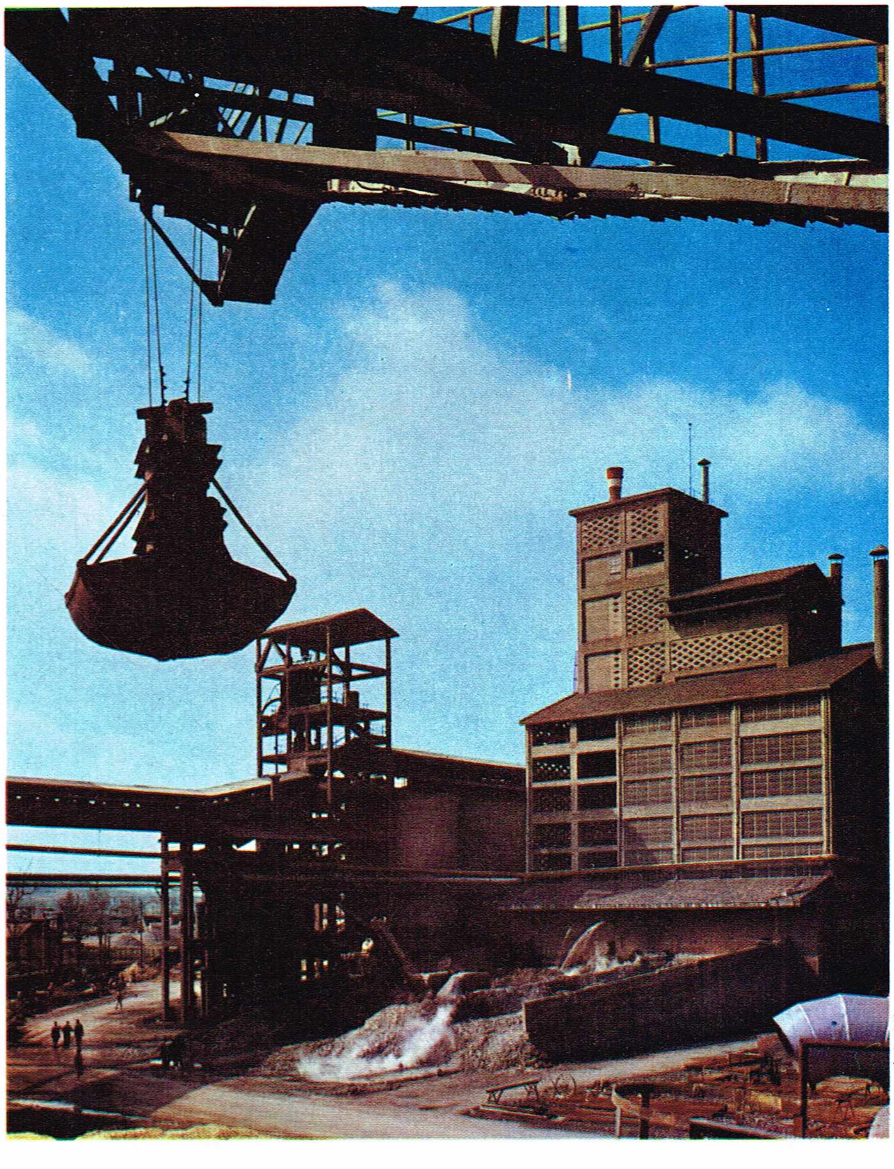

Montecatini-Edison

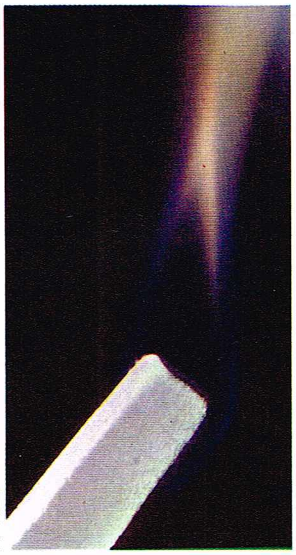

A. Rizzi

▲ *Le* **métaldéhyde** *ou « méta » est un polymère solide de l'acétaldéhyde, utilisé comme combustible.*

dans des conditions particulières de température et de pression, le produit liquide de cette décomposition ayant été retenu dans certaines formations géologiques appropriées. De même qu'actuellement la faune et la flore sont différentes d'un lieu à l'autre de notre planète, de même, aux ères où a commencé à se former le pétrole, les répartitions des espèces variaient grandement d'un point à l'autre de la planète. Il en résulte que, selon leur origine, les pétroles bruts ont des compositions très différentes. C'est ainsi que les bruts de Pennsylvanie renferment plus de 75 % de paraffines normales et ramifiées, certains bruts russes et les bruts vénézuéliens plus de 70 % de naphtènes (ou cyclanes), et qu'il existe des bruts qui sont plus paraffiniques que naphténiques, ou *vice versa,* ainsi que des bruts à haute teneur en aromatiques. Il n'existe pas dans les pétroles bruts d'autres hydrocarbures que les **paraffines,** les **naphtènes** et les **aromatiques.** Par contre, on y trouve (en quantités variables selon les origines) des composés organiques, de l'oxygène, de l'azote et du soufre. Ces derniers causent des problèmes de pollution lors de la combustion. On conçoit donc que la valeur d'un brut dépende de sa teneur en soufre, les procédés industriels d'élimination du soufre étant coûteux. La teneur en soufre des pétroles bruts peut aller de 0,05 à plus de 4 %. Les bruts très sulfureux de Safanya (Arabie Séoudite), du Koweit, de la zone neutre ou du Venezuela sont plus coûteux à traiter que les bruts algériens ou libyens. Cependant, ils ont un rendement supérieur en fuel lourd. En effet, le pétrole brut n'est pas utilisé directement comme combustible, mais il subit en raffinerie un certain nombre de traitements physiques et chimiques qui visent à en extraire des combustibles liquides et gazeux, mais aussi des carburants, des huiles de graissage, des cires paraffiniques, des bitumes, du coke, etc.

Après son extraction du sol par des forages terrestres ou sous-marins, le pétrole brut arrive dans la raffinerie où il est débarrassé de l'eau salée qu'il contient. Cette opération se fait par décantation et par traitement électrostatique. Puis il est soumis à une distillation à la pression atmosphérique qui sépare en tête de colonne les gaz de raffinerie ayant 1 à 4 atomes de carbone et une essence distillant jusqu'à 180 °C, puis le kérosène distillant entre 180 et 240 °C, un gas-oil léger (240 à 320 °C), un gas-oil lourd (320 à 365 °C) ; il reste en fond de colonne un résidu lourd appelé résidu atmosphérique qui, ne pouvant plus être distillé à la pression atmosphérique sans être décomposé, est envoyé dans une colonne de distillation sous vide.

La *coupe essence + gaz* est envoyée dans une installation appelée « gas plant » où elle est fractionnée en fuel-gas, propane et butane, et en essences légère et lourde. L'essence lourde est ensuite traitée dans l'unité de reforming catalytique.

Le *kérosène,* après traitement catalytique de désulfuration, sert à la préparation des carburéacteurs (carburants pour propulseurs à réaction) ; c'est l'ancien pétrole lampant, que l'on utilisait autrefois pour l'éclairage.

Les *coupes gas-oil léger* et *lourd* doivent aussi être désulfurées et permettent, par mélange, de préparer le gas-oil moteur, le fuel-oil domestique et d'autres fuels lourds à usages industriels.

Dans la distillation sous vide, le *résidu de la distillation atmosphérique* est à nouveau fractionné en coupes qui serviront à préparer des gas-oils et des fuels ou à fabriquer des huiles lubrifiantes, ou à constituer une charge pour l'opération de cracking catalytique producteur d'essence. Enfin, l'ultime résidu est utilisé pour les bitumes.

Selon l'origine du pétrole brut traité, la distillation peut fournir des quantités variables d'essence, de kérosène, de gas-oil, etc. Par ailleurs, mis à part le soufre qu'il faut éliminer, les différents combustibles liquides que l'on tire de la distillation du pétrole doivent subir des traitements divers pour répondre aux usages auxquels ils sont destinés.

Pour réduire la quantité de fractions lourdes et augmenter en même temps la quantité d'essences, on procède au *cracking.* Cette opération consiste, sous l'influence de la chaleur seule *(cracking thermique)* ou en présence de catalyseurs *(cracking catalytique),* à scinder les grosses molécules en molécules de plus faible masse moléculaire, donc à produire des essences et aussi des gaz, à partir de fractions lourdes. Dans le cracking, il se forme des hydrocarbures oléfiniques qui n'existent pas dans le brut, et, par ailleurs, les paraffines issues du cracking catalytique ont une structure ramifiée. Cela contribue à donner à l'essence formée une excellente résistance à la détonation, c'est-à-dire un bon indice d'octane.

Un autre procédé de raffinage permet d'améliorer la qualité des essences ; c'est le *reforming,* dans lequel les hydrocarbures paraffiniques et naphténiques sont transformés en hydrocarbures aromatiques dont l'indice d'octane est excellent.

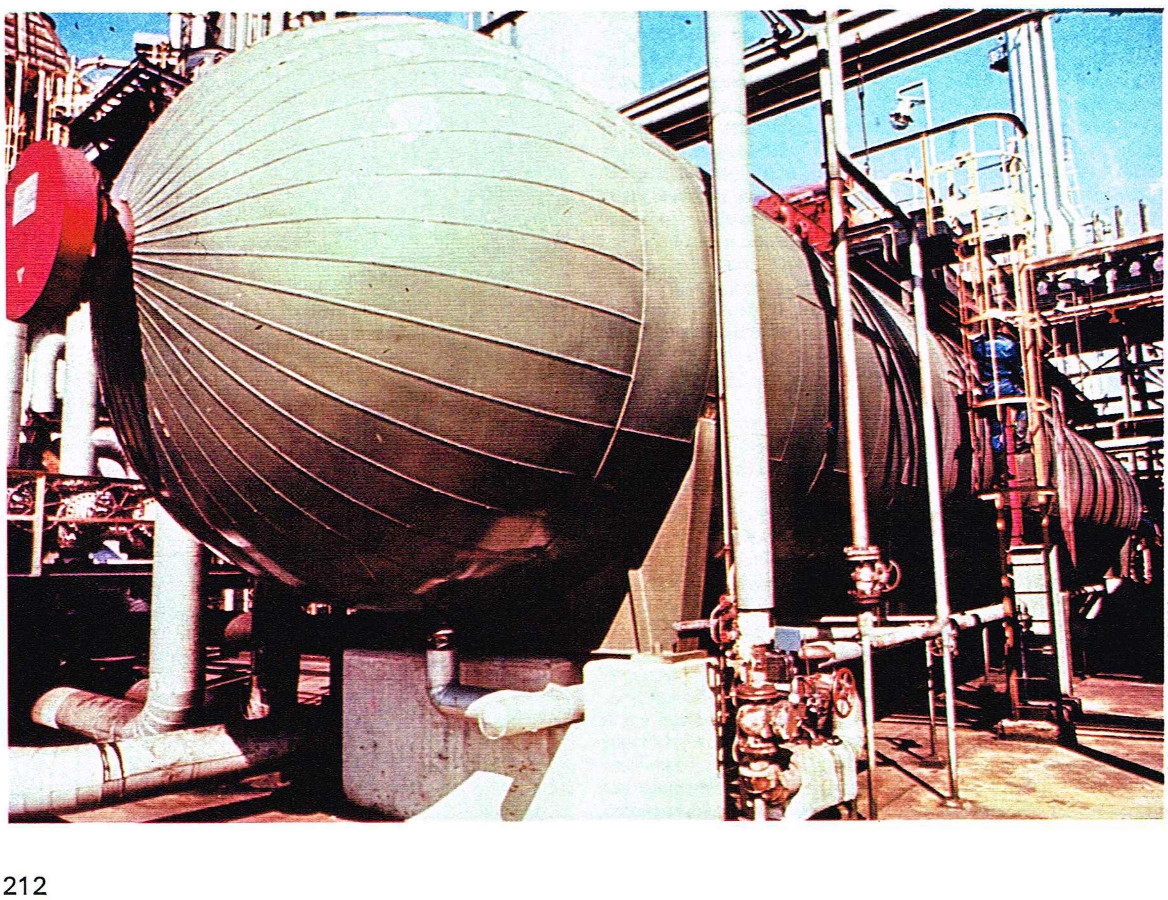

Photothèque groupe TOTAL

▶ *Après son extraction du sol, le pétrole brut arrive dans la raffinerie, où il est débarrassé de l'eau salée qu'il contient ; ici, un* **dessaleur.**

◀ *Unité de synthèse du* **méthanol.**

C. Bazin - Ugine Kuhlmann

Hydrocarbures de synthèse

Dans le chapitre des combustibles liquides, il faut mentionner le *procédé Bergius* d'hydrogénation du charbon. Il consiste à soumettre du charbon finement dispersé dans une huile lourde à l'action de l'hydrogène à 450 °C sous une pression de 300 atmosphères et en présence d'un catalyseur. La dispersion obtenue est ensuite soumise à la distillation, et l'on obtient de l'essence légère, une huile intermédiaire et une huile lourde, ces dernières fractions pouvant être réhydrogénées et transformées en fractions plus légères, ou encore utilisées comme milieu de suspension du charbon. Ce procédé est actuellement abandonné.

Une autre méthode mise au point par les Allemands au cours de la dernière guerre est la *synthèse de Fischer-Tropsch*. Elle consiste à faire réagir à 200 °C et à la pression atmosphérique un mélange d'oxyde de carbone et d'hydrogène en présence d'un catalyseur approprié. On obtient un mélange d'hydrocarbures paraffiniques et oléfiniques, qui, fractionné et raffiné, peut fournir une essence analogue à celle qui dérive du pétrole brut. Ce procédé est actuellement très peu utilisé dans le monde; une unité fonctionne en Afrique du Sud à Sasolburg.

Alcool et benzène

Parmi les combustibles liquides, il faut signaler le **méthanol**, CH_3OH, et l'**éthanol**, C_2H_5OH, qui brûlent suivant les réactions :

$$2CH_3OH + 3O_2 \rightarrow 2CO_2 + 4H_2O$$
$$C_2H_5OH + 3O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O$$

Ils ont un pouvoir calorifique qui n'est pas très élevé, mais on les a utilisés cependant pendant un temps (surtout l'alcool éthylique) comme carburants, ainsi qu'en mélange avec l'essence pour les carburants de compétition. Actuellement, la facilité relative d'obtention du méthanol à partir d'oxyde de carbone et d'hydrogène et le coût sans cesse croissant du pétrole brut posent à nouveau le problème de l'intérêt de l'incorporation d'une certaine quantité (10 à 15 %) de méthanol dans l'essence, mais cette quantité ne devrait pas dépasser le pourcentage indiqué ci-dessus en raison des risques de démixtion (séparation sous l'influence de petites quantités d'eau du mélange essence-méthanol en deux phases non miscibles).

Le **benzène** (C_6H_6) est aussi un bon combustible; il brûle selon la réaction :

$$2C_6H_6 + 15O_2 \longrightarrow 12CO_2 + 6H_2O$$

Le benzène commercial contient une certaine quantité d'homologues supérieurs. Il a été utilisé comme carburant en Allemagne, soit seul, soit mélangé avec de l'essence.

Il n'est plus utilisé actuellement comme combustible, car son faible rapport H/C le fait brûler avec une flamme fuligineuse, et sa manipulation est dangereuse pour la santé (benzolisme).

Combustibles gazeux

On distingue les combustibles gazeux naturels (gaz naturels, gaz associés aux gisements de pétrole) des combustibles gazeux synthétiques, que l'on obtient le plus souvent à partir du charbon. L'avantage des combustibles gazeux est leur facilité de transport par gazoducs ou sous forme de « bouteilles » de gaz comprimé. Un autre avantage des gaz sur les liquides est que leur flamme est plus lumineuse et aussi plus calorifique.

Le gaz naturel

Dans les gisements de pétrole, le gaz qui accompagne le pétrole liquide dans une roche magasin occupe la partie supérieure de la cavité; il arrive aussi que le gaz naturel

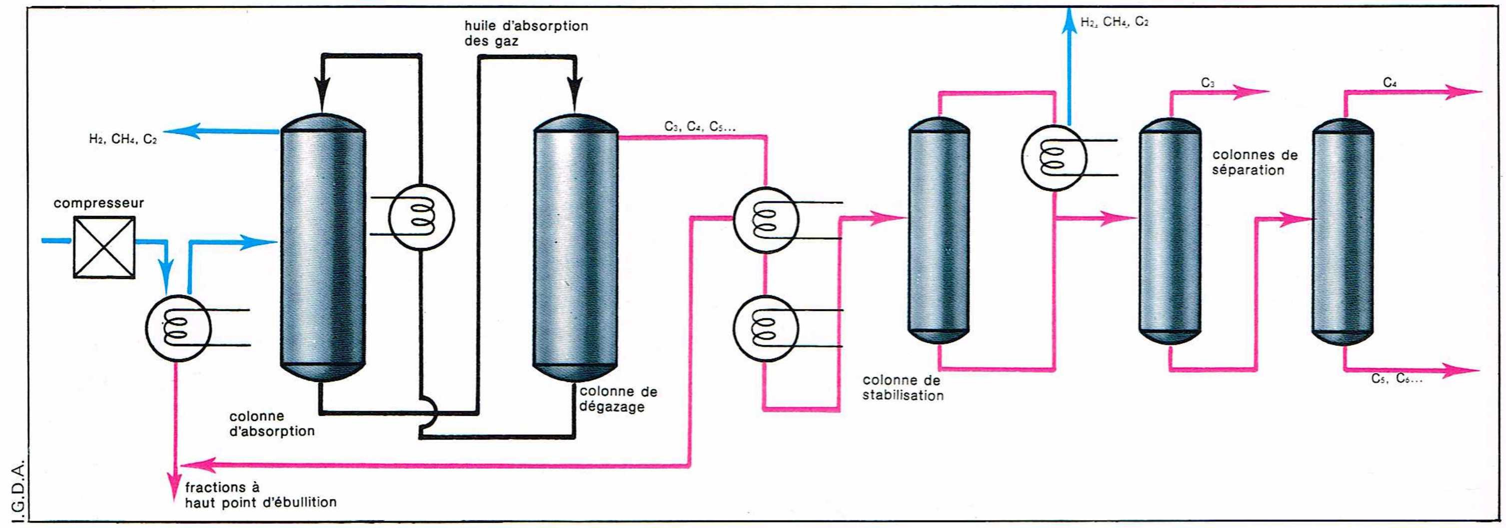

▲ ***Schéma des installations pour la séparation des gaz de raffinerie (les symboles C_2, C_3, C_4, etc., ont été utilisés pour indiquer, plus simplement, les hydrocarbures, respectivement, à 2, 3, 4, etc., atomes de carbone dans la molécule).***

soit seul, parfois accompagné de gouttelettes de pétrole dispersées : il s'agit alors d'un gisement de gaz.

Le gaz naturel est constitué essentiellement de **méthane** en proportions variables selon les gisements. Ainsi, le gaz de Lacq renferme 69 % de méthane, celui de Meillon-Saint-Faust 78 %, celui de Hassi R'Mel (Algérie) 83,5 %, et celui de Groningue (Pays-Bas) 81 %. Il renferme aussi de l'**éthane**, du **propane** et du **butane**, de l'**azote**, du **gaz carbonique** et parfois de l'**hydrogène sulfuré**. Cette teneur en hydrogène sulfuré peut être importante ; c'est le cas du gaz de Lacq qui en renferme 15 %, et de celui de Saint-Faust (6 %). Après épuration, les gaz naturels livrés à la consommation renferment 81 à 97 % de méthane.

Le pouvoir calorifique du gaz naturel est excellent. Ainsi, le pouvoir calorifique des gaz naturels distribués en France est de 9,6 thermies/m³ pour le gaz d'Aquitaine, 10,6 th/m³ pour le gaz de Hassi R'Mel et 8,4 th/m³ pour le gaz de Groningue. Le gaz naturel présente sur le gaz manufacturé obtenu à partir de la houille ou du pétrole l'avantage d'un pouvoir calorifique deux fois plus grand (le pouvoir calorifique du gaz manufacturé est de 4,5 th/m³). De plus, le gaz naturel n'est pas toxique, puisqu'il ne contient pas d'oxyde de carbone ; il est inodore, et, pour en détecter les fuites qui pourraient provoquer des explosions, on l'odorise avec des traces de mercaptan.

Le gaz naturel est distribué par un réseau de gazoducs qui permet d'alimenter les grands centres pour les besoins industriels et ménagers.

Les gaz de pétroles liquéfiés ou G. P. L. (L. P. G. en anglais)

Ce sont essentiellement le propane et le butane. On connaît les bouteilles de butane qui, depuis 1932, en France, permettent d'utiliser du gaz en des lieux où le gaz de ville (ou le gaz naturel) n'est pas distribué. Il existe aussi le propane. Ces deux gaz ont un très fort pouvoir calorifique (butane : 30 th/m³ ; propane : 23 th/m³). Ils sont livrés en bouteilles mais aussi en réservoirs plus importants, évitant la batterie de bouteilles. On livre en outre comme combustible gazeux un mélange d'air et de propane appelé air propané. Le propane et le butane sont extraits par distillation des gaz de raffinerie.

Les combustibles gazeux de synthèse sont obtenus à partir de combustibles solides ou liquides, par décomposition thermique, par réaction avec la vapeur d'eau à haute température ou par oxydation partielle.

Les gaz provenant de la gazéification de la houille

Selon le moyen de gazéification choisi, on peut obtenir un gaz pauvre, ou gaz de générateur, du gaz à l'eau, du gaz de synthèse, ou un gaz riche.

Le *gaz pauvre* est obtenu par gazéification au moyen d'air, ou d'air et de vapeur d'eau.

Le *gaz à l'eau* est obtenu par action de la vapeur d'eau sur le charbon. Cette réaction peut se faire de deux façons :

$$C + H_2O \rightarrow CO + H_2 - 30\,000 \text{ cal}, \quad (1)$$

qui a lieu à 900 °C ;

$$C + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 2H_2 - 20\,000 \text{ cal}, \quad (2)$$

qui a lieu à 600 °C.

En pratique, à une température intermédiaire, les quatre espèces gazeuses présentes peuvent encore réagir selon :

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 + 12\,000 \text{ cal} \quad (3)$$

La réaction (1) est la plus intéressante du point de vue de la production d'un gaz combustible ; par ailleurs, la réaction (2) qui se produit à trop basse température est difficile à régler. En fait, le procédé consiste à faire brûler le carbone pendant un certain temps, à interrompre l'arrivée d'air et à envoyer de la vapeur d'eau qui réagit selon (1) jusqu'à ce que, la température diminuant trop et laissant apparaître la réaction (2), on envoie à nouveau de l'air, en coupant l'arrivée de vapeur, et ainsi de suite. On opère la réaction de combustion avec un défaut d'air pour faire le plus possible de monoxyde de carbone. Le gaz à l'eau ainsi produit est impur ; il renferme de l'oxygène, de l'azote et du gaz carbonique. Son pouvoir calorifique est faible et d'environ 3 000 kcal/m³. Le gaz à l'eau que l'on

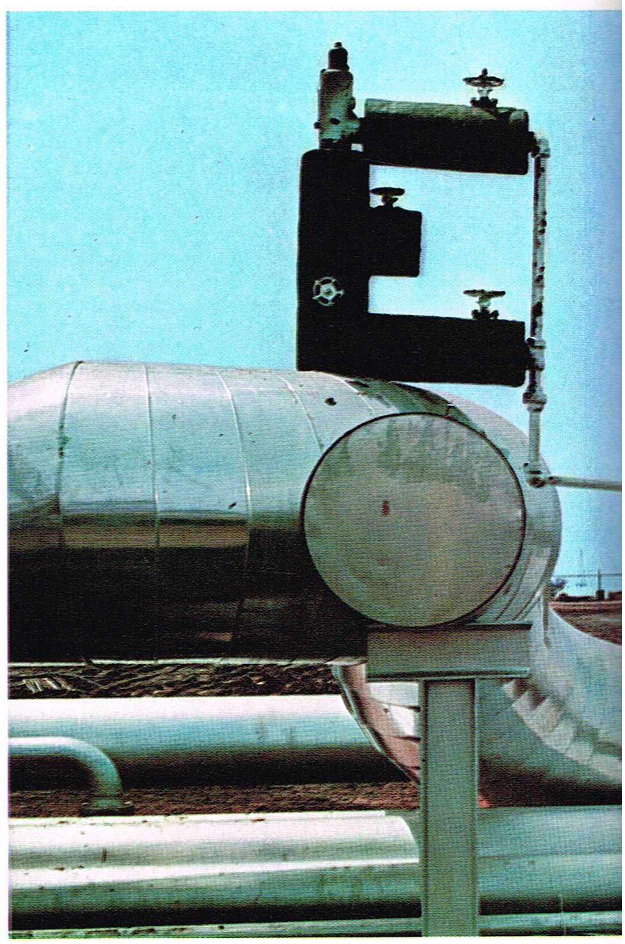

▶ ***Le gaz naturel est distribué par un réseau de gazoducs ; ici, installations au Venezuela (lac de Maracaibo).***

obtient en favorisant principalement la réaction (2), n'a pas d'intérêt comme combustible mais présente un intérêt pour la production d'hydrogène après élimination du CO_2 dans des solutions aqueuses alcalines.

Le gaz à l'eau est le mélange de départ de différentes synthèses après modification du rapport des quantités de ses constituants et une purification appropriée. C'est alors le *gaz de synthèse*.

On peut aussi produire des *gaz riches* à haut pouvoir calorifique utilisés comme gaz de ville, par exemple en opérant la gazéification sous pression, et ensuite la méthanation ou la carburation du mélange. La gazéification sous pression diminue fortement les quantités de CO et H_2 formées au profit des quantités de CH_4, CO_2, et H_2O. Comme il est aisé d'éliminer la vapeur d'eau par condensation et le CO_2 par absorption, on obtient un gaz à fort pouvoir calorifique.

Le gaz naturel de substitution (S. N. G. en anglais)

Il s'agit de fabriquer à partir de charbon ou d'hydrocarbures pétroliers (L. P. G., naphta, pétrole brut éventuellement) un gaz à haut pouvoir calorifique, essentiellement formé de méthane et substituable au gaz naturel. Le rapport atomique H/C étant de 4/1 dans le méthane, d'environ 2/1 dans les hydrocarbures liquides et de moins de 1 dans le charbon, on doit, pour réaliser la transformation envisagée, soit éliminer l'excès de carbone, soit ajouter de l'hydrogène dans le procédé que l'on adoptera.

Pour éliminer le carbone en excès, on le fait réagir sur de la vapeur d'eau. Une partie réagit en donnant du CO_2 que l'on peut facilement éliminer, et le carbone restant réagit avec l'hydrogène pour donner du méthane. Cette solution est utilisée dans le cas des naphtas ou des L. P. G. Le naphta vaporisé est désulfuré, on y introduit de la vapeur, et le mélange passe dans une série de réacteurs où il se convertit en méthane et en CO_2. L'autre possibilité, c'est-à-dire l'addition d'hydrogène, est mise à profit dans la gazéification des hydrocarbures plus lourds et du charbon.

On peut enfin gazéifier le charbon en présence d'oxygène et procéder à la méthanation du CO et de l'hydrogène formés.

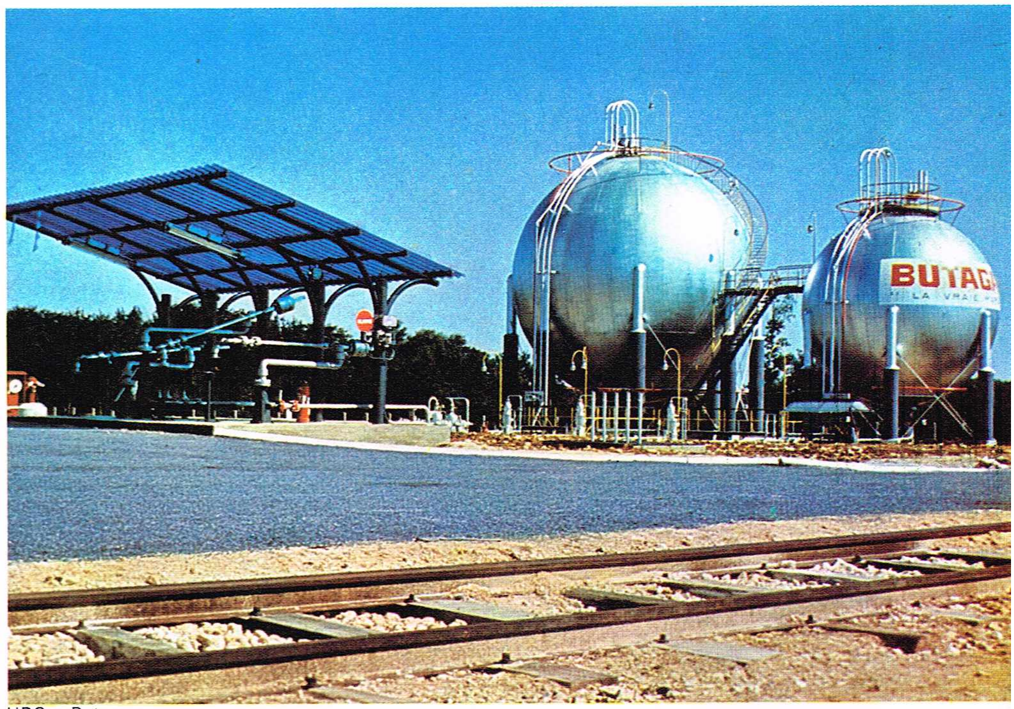

URG - Butagaz

▲ ***Sphères de stockage de butane et station d'emplissage pour le transport en vrac.***

L'hydrogène

C'est un combustible gazeux qui peut, dans l'avenir, trouver de nombreuses applications. Actuellement, c'est un sous-produit de la fabrication du coke, du steam-cracking, mais surtout du reforming catalytique. On peut envisager de le produire par électrolyse de l'eau, à condition que l'énergie électrique d'origine nucléaire permette de rendre cette opération économique dans l'avenir.

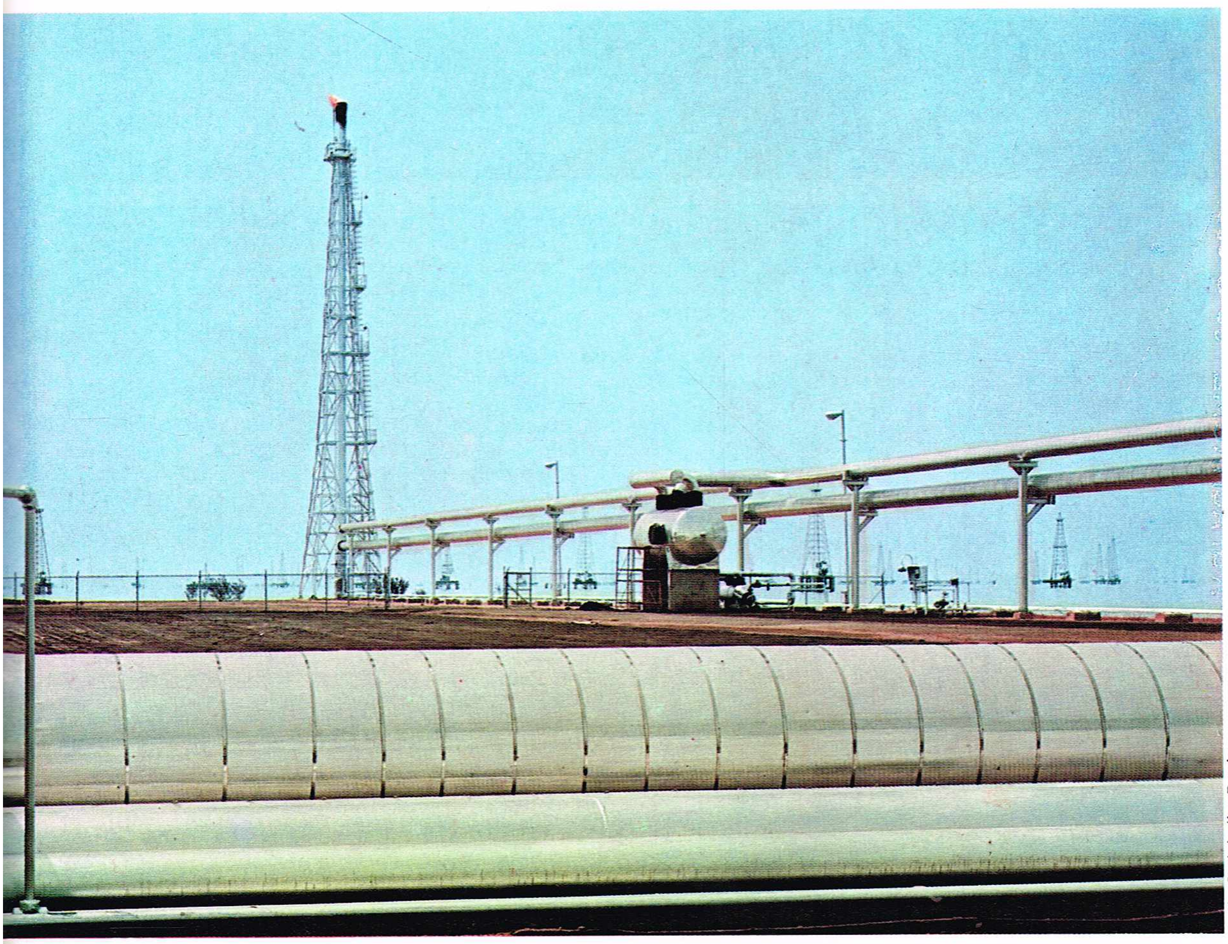

G. de Steinheil - Rapho

Olympia

▲ *Dans certaines compétitions automobiles internationales, on a utilisé et l'on utilise encore dans des pays autres que la France des* **carburants spéciaux.**

LES CARBURANTS

Les *carburants* sont des combustibles qui, en se combinant à un comburant approprié (le plus souvent l'oxygène), fournissent l'énergie nécessaire au fonctionnement d'un moteur (moteur à explosion ou moteur Diesel).

Le carburant devient un *propergol* si le comburant n'est plus l'oxygène atmosphérique mais un composé chimique emporté dans le véhicule. Dans ce cas, l'énergie mécanique est produite par la poussée des gaz de combustion éjectés à forte vitesse.

Dans les carburants, comme dans les combustibles en général, l'oxydation conduit à des molécules très simples et moins riches en contenu énergétique que le produit de départ, la différence d'énergie étant libérée pendant le processus.

Le carbone est oxydé en CO_2 (ou en CO si l'oxygène est utilisé en quantité insuffisante), l'hydrogène est oxydé en eau, l'azote reste généralement à l'état d'azote élémentaire et fournit peu d'oxydes d'azote NO, NO_2, ..., le soufre est transformé en SO_2.

Par exemple, les réactions de combustion de l'iso-octane et de l'alcool éthylique s'écrivent comme suit :

$$2C_8H_{18} + 25O_2 \longrightarrow 16CO_2 + 18H_2O$$
$$C_2H_5OH + 3O_2 \longrightarrow 2CO_2 + 3H_2O$$

Ce qui permet de faire la distinction entre les combustibles et les carburants, c'est la modalité physique de la combustion et l'utilisation que l'on fait de l'énergie fournie par la réaction chimique d'oxydation. Certains auteurs restreignent le terme de carburant à des combustibles utilisés pour le fonctionnement des moteurs à combustion interne à étincelles, ce qui réduit les carburants à l'essence automobile et aux gaz liquéfiés. Les Anglo-Saxons ne font pas la distinction et désignent par le même mot « fuel » ce que nous appelons combustibles et carburants.

L'essence

L'essence pour automobiles telle qu'elle est vendue par les pompistes est un mélange d'hydrocarbures et d'additifs divers. Les hydrocarbures que l'on trouve dans l'essence ne sont pas uniquement ceux que l'on trouve dans la fraction de distillation du pétrole brut, mais aussi des hydrocarbures résultant de procédés de raffinage comme le cracking et le reforming ainsi que de la polymérisation, l'isomérisation, l'alkylation, etc. Les exigences des moteurs actuels ne permettent pas, en effet, d'utiliser une essence de distillation directe du brut.

Les essences doivent posséder un certain nombre de caractéristiques, dont les plus importantes sont les suivantes : la masse volumique, la courbe de distillation et la pression de vapeur, la teneur maximale en soufre, la teneur en gommes ou en hydrocarbures susceptibles d'en former, l'indice d'octane, la teneur en plomb et en additifs divers.

— La *masse volumique* de l'essence a évidemment une grande importance sur le fonctionnement du carburateur, donc sur la richesse du mélange. Si la masse volumique de l'essence variait avec les livraisons, il serait nécessaire d'agir sans cesse sur le poids du flotteur des carburateurs à niveau constant et sur le diamètre du gicleur principal. En France, la législation impose une valeur maximale à la masse volumique qui est pour les essences ordinaires de 0,765 kg/l et pour les supercarburants de 0,770 kg/l à 15 °C.

— Les caractéristiques des essences en ce qui concerne leur *volatilité* sont la *courbe de distillation* et la *pression de vapeur*.

Pour obtenir une combustion correcte, le mélange doit, au moment où jaillit l'étincelle, avoir une composition convenable. Or, à froid, la vaporisation de l'essence est incomplète, et seules les fractions les plus légères parviennent dans la chambre de combustion ; pour remédier aux inconvénients des départs à froid, des dispositifs dits *starters* permettent d'injecter plus d'essence que le taux introduit en fonctionnement normal. De plus, on sait que l'on trouve dans le commerce des bombes permettant d'introduire, pour faciliter les démarrages par temps froids, un composé combustible très volatil et facilement inflammable. L'essence doit donc avoir des constituants légers, mais le fonctionnement à température élevée impose au contraire une limite supérieure à la volatilité des fractions légères. Un phénomène qui oblige dans une certaine mesure à limiter la volatilité de l'essence est le givrage du carburateur. Lorsque le moteur tourne au ralenti, le refroidissement dû à la vaporisation des hydrocarbures légers peut provoquer la formation de cristaux de glace à partir de l'eau présente dans l'air aspiré par le moteur. On peut remédier à cet inconvénient soit en diminuant la volatilité de l'essence, soit en y ajoutant des antigivres.

Le fonctionnement d'un moteur à température ambiante élevée exige de l'essence de nouvelles qualités pour éviter deux types d'incidents : la formation de tampon de vapeur et la percolation à l'arrêt ou au ralenti.

Le tampon de vapeur ou « vapor lock » est dû à la formation de bulles de gaz dans les canalisations amenant l'essence, ces bulles gazeuses ayant pour effet de réduire le débit d'essence. Les caractéristiques de volatilité du carburant sont évidemment importantes dans l'apparition de cet incident qui peut aller jusqu'à l'arrêt du moteur.

La percolation se produit par temps chaud après un arrêt. Le carburateur, qui n'est plus refroidi, voit sa température s'élever au-dessus de sa température normale de fonctionnement. Une partie de l'essence contenue dans la cuve se trouve vaporisée et se répand dans la tubulure d'admission du moteur. On a alors trop d'essence dans la tubulure d'admission et pas assez de carburant dans la cuve du carburateur à niveau constant. Le démarrage du moteur devient dans ces conditions très difficile.

Les fractions lourdes des essences doivent aussi être prises en considération pour la consommation, l'encrassement du moteur essentiellement dû aux fractions lourdes, la dilution de l'huile de graissage du moteur, etc.

Ainsi, une essence est véritablement caractérisée par une courbe de distillation, et, par exemple, pour un supercarburant ou une essence ordinaire, les spécifications sont les suivantes : 10 % en volume doivent distiller au plus à 70 °C, 50 % au plus à 140 °C, 95 % au plus à 195 °C, et le point final doit être inférieur ou égal à 205 °C. De plus, la pression de vapeur des fractions légères mesurée à 37,8 °C (pression de vapeur Reid, qui se mesure en présence d'air et non dans le vide) doit avoir une valeur déterminée : $\leqslant$ 0,8 bar en hiver et $\leqslant$ 0,65 bar en été.

Par ailleurs, les essences doivent avoir des caractéristiques qui assurent une bonne carburation et qui évitent les phénomènes de cliquetis, de préallumage, de grondement (rumble), etc.

Ces caractéristiques peuvent être atteintes soit en jouant sur la composition chimique de l'essence, soit en utilisant des additifs appropriés.

Les qualités antidétonantes d'une essence sont caractérisées par l'indice d'octane. L'*indice d'octane* d'un carburant est, par définition, le nombre entier le plus proche possible du pourcentage en volume d'iso-octane dans le mélange iso-octane-heptane normal, dont les caractéristiques antidétonantes sont équivalentes à celles du carburant étudié, lorsqu'on les compare suivant les méthodes standards. Ces méthodes standards correspondent à des conditions de fonctionnement bien déterminées sur un moteur C. F. R.

L'iso-octane ou triméthyl-2,2,4 pentane a par définition un indice d'octane de 100, et l'heptane normal un indice d'octane égal à 0. Lorsque les qualités antidétonantes du produit à étudier sont supérieures à celles de l'iso-octane, on utilise une échelle prolongée dans laquelle le carburant de référence est l'iso-octane additionné de plomb tétraéthyle.

On peut encore augmenter l'indice d'octane d'un carburant en lui ajoutant des additifs antidétonants. Bon nombre de produits améliorent, lorsqu'on les ajoute à l'essence, l'indice d'octane de celle-ci. On ne citera ici que l'*aniline*, la *monométhylaniline*, l'*éther isopropylique*, etc. Mais ces produits présentent des inconvénients divers (prix de revient trop élevé, insolubilité à froid, nécessité de les utiliser en concentration élevée, etc.).

Les composés organo-métalliques et plus particulièrement ceux du fer et du plomb sont les plus efficaces. Le *fer pentacarbonyle* a été utilisé en Allemagne pendant la dernière guerre, mais les plus utilisés, pour ne pas dire les seuls antidétonants utilisés actuellement, sont le *plomb tétraéthyle*, ainsi que le *plomb tétraméthyle*. Lors de la combustion, l'alkyl plomb règle la concentration en peroxydes dans le mélange et brûle lui-même en donnant des oxydes de plomb insolubles et qui seraient nuisibles au bon fonctionnement du moteur. On ajoute donc au

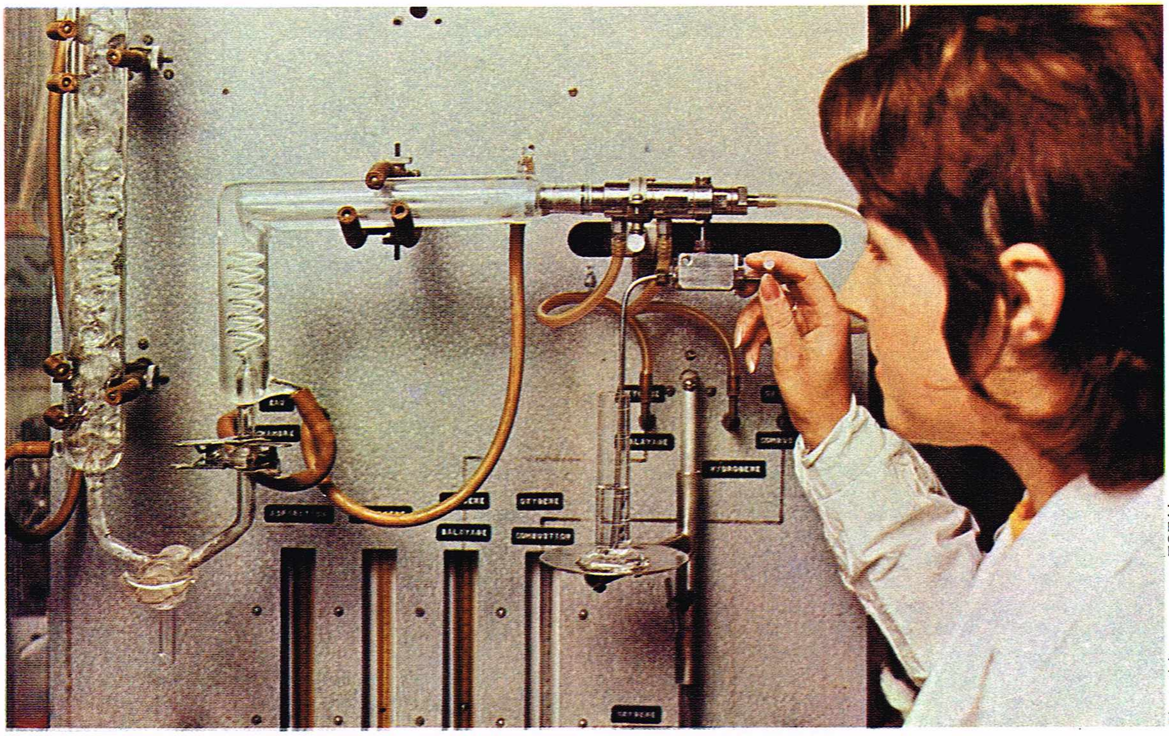

Photothèque groupe TOTAL

◀ *Appareil* **Wickbold** *de mesure de la* **teneur en soufre** *des essences.*

Photothèque groupe TOTAL

▲ *Les spécifications des carburants pour l'aviation sont sévères; ici, ravitaillement sur l'aéroport d'Orly.*

plomb tétraéthyle et tétraméthyle un produit d'entraînement de ces oxydes qui est un mélange de *dibromure* et de *dichlorure d'éthylène*. On ne connaît pas de produit similaire solubilisant les oxydes de fer et qui aurait pu permettre de continuer à utiliser le fer pentacarbonyle comme antidétonant. L'emploi du plomb présentant des inconvénients malgré les précautions prises, on a limité en France sa teneur à 0,64 gramme par litre d'essence (ordinaire ou super).

Les essences doivent présenter d'autres caractéristiques:
— la *stabilité :* un carburant ne doit pas, au stockage, donner lieu à la formation de gommes résultant de la polymérisation sous l'influence de l'oxygène de l'air de certaines oléfines instables; on combat cette tendance en ajoutant à l'essence des antioxydants;
— la *teneur en soufre :* elle doit être aussi basse que possible pour des raisons de pollution;
— la *couleur :* elle est imposée par l'administration (on colore le carburant ordinaire en rouge pour éviter les fraudes qui consisteraient à le commercialiser comme du super);
— l'*odeur :* elle ne doit pas être trop désagréable;
— les *additifs divers :* certains additifs ajoutés aux essences par la société qui commercialise les carburants ont pour effet d'éviter l'oxydation, de désactiver les métaux qui catalysent la formation de gommes, d'éviter la corrosion et l'usure, d'éviter la formation de dépôts carbonés (additifs détergents), de glace (additifs antigivre), de lubrifiants de hauts de cylindres, etc.

Les essences, en raison de l'augmentation sans cesse en progrès du nombre des véhicules, principalement dans les zones urbaines, posent des problèmes de pollution atmosphérique. Une essence, étant essentiellement constituée d'hydrocarbures, ne devrait, théoriquement, lors de sa combustion produire que de l'anhydride carbonique (CO_2) et de l'eau. En fait, comme, pour des raisons de rendement, les moteurs actuels fonctionnent avec des mélanges riches (c'est-à-dire présentant un excès d'hydrocarbure par rapport à l'oxygène), il se forme aussi de l'oxyde de carbone. De plus, il passe dans le tuyau d'échappement des hydrocarbures imbrûlés dus à une mauvaise combustion et à l'inévitable couche limite qui, au voisinage de la paroi du cylindre, ne subit pas de combustion. En outre, l'azote de l'air peut, à la faveur des températures élevées qui règnent dans le moteur, se combiner à l'oxygène. Il se forme de l'oxyde nitrique NO qui, rejeté à l'atmosphère, se transforme en bioxyde NO_2 (et en acides nitreux et nitrique). Enfin, les particules d'oxyde de plomb résultant de la combustion du plomb tétraéthyle et du plomb tétraméthyle constituent d'autres polluants. En dehors des produits de la combustion, les essences peuvent être polluantes par les vapeurs qu'elles émettent par le réservoir, le carburateur, etc.

Un certain nombre de réglementations ont été mises en vigueur au cours des dernières années pour limiter la pollution de l'air par les essences; ainsi, aucun véhicule ne doit émettre dans l'atmosphère de gaz de carter, et les émissions de gaz d'échappement sont contrôlées; seules

les évaporations au niveau du réservoir et du carburateur ne sont pas réglementées.

En outre, des dispositifs appelés « pots catalytiques », dont l'emploi généralisé est à l'étude, peuvent être disposés sur le circuit d'échappement pour purifier les gaz (transformation du CO en CO_2, combustion des hydrocarbures imbrûlés, etc.). On cherche enfin à produire des essences sans plomb tétraéthyle dont l'indice d'octane resterait au niveau actuel.

Les combustibles pour moteurs Diesel

Les combustibles utilisés dans les moteurs à allumage par compression doivent présenter des caractéristiques très différentes des carburants pour moteur à explosion par étincelle.

Parmi les combustibles utilisés en France, le gas-oil moteur est utilisé pour l'alimentation des moteurs Diesel rapides, et les fuel-oils provenant des raffineries sont destinés à l'alimentation des très gros moteurs Diesel.

Comme pour les essences, les combustibles Diesel doivent avoir un certain nombre de spécifications.

— La *masse volumique* doit, pour les gas-oils, être comprise entre 0,810 et 0,890 kg/l à 15 °C.

— La *volatilité* et plus généralement la courbe de distillation sont aussi très importantes, la volatilité jouant en effet un rôle important dans la formation du brouillard, dans la chambre de combustion du moteur au moment de l'inflammation.

— La *viscosité* doit avoir aussi une valeur déterminée pour la facilité de pompage dans le réservoir et pour la pulvérisation des jets de combustible.

— La *teneur en soufre* doit être basse (0,7 % au maximum pour le gas-oil) et nécessite une opération de désulfuration.

— Le *point d'écoulement* doit être bas (— 12 °C en hiver et — 7 °C en été) pour éviter le colmatage des filtres par les cristaux de paraffines qui se forment par temps froid.

— Mais la caractéristique principale d'un combustible Diesel est son *indice de cétane*. Il mesure son aptitude à s'enflammer dans la chambre de combustion du moteur à compression. Il s'agit, comme pour l'indice d'octane, de comparer sur un moteur C. F. R. Diesel normalisé le comportement du gas-oil avec des mélanges de référence de cétane (n hexadécane) correspondant à l'indice 100 et d'α méthylnaphtalène correspondant au niveau 0. Ainsi, les hydrocarbures paraffiniques linéaires ont un excellent indice de cétane, alors que leur indice d'octane est très faible. Cela n'est pas surprenant puisque, dans les moteurs Diesel, le combustible doit s'enflammer rapidement après pulvérisation dans la chambre de combustion, alors que, dans les moteurs à étincelles, la combustion dans le cylindre doit être progressive.

Bien d'autres caractéristiques du combustible Diesel sont à prendre en considération : l'indice *diesel* qui caractérise le gas-oil par sa densité et son point d'aniline (température de miscibilité d'un mélange d'aniline et de combustible à volumes égaux), la *teneur en cendres*, le *résidu de carbone*, le *point éclair* (température d'inflammation du produit), l'*indice d'acide*, etc. Bon nombre d'additifs permettent d'améliorer ces qualités.

Les carburéacteurs

Le développement de l'aviation à réaction qui utilise encore comme moyen de propulsion des turbines à gaz (turbopropulseurs, turboréacteurs, statoréacteurs), a donné une importance très grande à la coupe C_{10}-C_{14} de distillation du pétrole brut. Cette coupe, autrefois commercialisée sous le nom de pétrole lampant, est le **kérosène**. Les deux carburéacteurs employés en France sont le **TR 0** qui correspond à une coupe kérosène distillant entre 165 et 240 °C, et que l'on utilise dans l'aviation commerciale, et le **TR 4**, distillant de 70 à 240 °C, et qui est réservé à l'aviation militaire.

L'utilisation à haute altitude de ces carburants impose des spécifications extrêmement rigoureuses.

— Ainsi, plus que dans les autres carburants, la *densité* a une importance particulière. On a intérêt à utiliser un carburéacteur de densité la plus élevée possible pour transporter le maximum d'énergie dans un volume donné et augmenter ainsi le rayon d'action de l'avion.

— La teneur en aromatiques doit être inférieure à 15 % (en volume) pour limiter la formation de dépôts de carbone. La tendance à former des dépôts de carbone est indiquée par le *point de fumée* qui doit être le plus élevé possible.

— Le *point de congélation* doit être tel qu'aux températures qui règnent aux altitudes élevées, il n'apparaisse pas de trouble dans le carburant ou de cristaux susceptibles d'obstruer les canalisations. Ce point de congélation est fixé à — 40 °C pour le TR 0 et — 60 °C pour le TR 4.

— La *teneur en eau*, bien que faible dans les hydrocarbures, n'est pas négligeable et peut aussi, à haute altitude, être cause d'obstruction de canalisations; cette teneur doit donc être très faible.

— Un autre facteur important dans les carburéacteurs est la *stabilité thermique*. En effet, aux vitesses supersoniques, la température atteinte par les superstructures peut être très élevée; c'est ainsi qu'à Mach 3,5 elle peut atteindre 350 °C. Dans ces conditions, les hydrocarbures les moins stables thermiquement peuvent subir une décomposition. Du reste, un des problèmes posés par les vols supersoniques envisagés pour l'avenir consiste à trouver un combustible thermiquement plus stable. L'hydrogène est l'un de ceux que l'on envisage.

Il faut évidemment ajouter à ces quelques problèmes spécifiques des carburéacteurs ceux, plus généraux, de la pollution par le soufre, de la corrosion, etc.

Les carburants pour moteurs à deux temps

Dans la quasi-totalité des moteurs à deux temps, le graissage se fait grâce à de l'huile mélangée à l'essence dans la proportion de 2 à 6 % en volume. Alors que le mélange est homogène lorsqu'il est dans le réservoir, on doit assister dans le moteur à une séparation de l'huile qui doit former sur les parois une pellicule apte à assurer la lubrification piston-cylindre, bielles et vilebrequin. Les caractéristiques de volatilité de l'essence sont donc importantes pour qu'au contact des pièces chaudes du carter, l'essence puisse se volatiliser, mais que le plus faible pourcentage possible d'huile se volatilise.

En revanche, contrairement aux moteurs à quatre temps, l'exigence en indice d'octane des carburants pour moteurs deux-temps est très faible. Des essences à indice d'octane voisin de 60 seraient suffisantes, d'autant plus que le plomb a une influence importante sur la formation de dépôts dans le pot d'échappement.

Les essences d'aviation

Les essences pour avions utilisant des moteurs à piston ne sont pas dans le principe différentes des essences automobiles, mais leurs spécifications, pour des raisons de sécurité, sont encore plus sévères que celles des essences auto.

On classe ces essences d'après leur *indice d'octane :* celui-ci peut aller jusqu'à 91-96 pour l'aviation légère et de moyenne puissance; au-delà, c'est-à-dire pour l'aviation moyen-courrier et long-courrier, on doit, pour obtenir des indices d'octane de 100 ou 115, soit ajouter à l'essence ordinaire des mélanges hydrocarbonés à haut indice d'octane provenant de réactions comme la polymérisation, l'alkylation ou l'isomérisation, soit utiliser des essences de reforming catalytique, riches en hydrocarbures aromatiques.

Les carburants spéciaux

Dans les compétitions automobiles, on a utilisé jusqu'en 1958 des carburants spéciaux, le plus souvent à base d'alcool méthylique ou d'alcool éthylique. En France, depuis cette date on utilise des carburants du commerce ou ayant deux à trois points d'indice d'octane en plus de ceux-ci. Cependant, dans certaines compétitions internationales, on utilise encore des mélanges spéciaux qui peuvent contenir du méthanol, de l'éthanol, du benzène ou du toluène, des composés nitrés, de l'huile de ricin, qui améliore la lubrification des cylindres, etc.

BIBLIOGRAPHIE

JOHNSON A. J., *Fuels and Combustion Handbook*, New York, 1951. — MAUSS F., *les Combustibles liquides; Spécifications, Réglementations, Utilisations,* éditions Technip, Paris, 1963. — WEISSMANN J. et coll., *Carburants et combustibles pour moteurs à combustion interne,* éditions Technip, Paris, 1970.

LES LUBRIFIANTS

Ce sont des substances employées pour diminuer les frottements entre des surfaces en mouvement l'une contre l'autre. Les lubrifiants sont indispensables au fonctionnement de la plus petite montre-bracelet et aux plus grandes turbines génératrices d'énergie.

La lubrification (ou graissage) est restée longtemps empirique, puis, avec les progrès de l'automobile et du raffinage des pétroles, on a mis sur le marché des lubrifiants scientifiquement adaptés à la fonction qu'ils devaient remplir. Enfin on a mis au point des lubrifiants de synthèse, apportant les propriétés de lubrification que les lubrifiants naturels ou minéraux ne pouvaient apporter.

Les fonctions que doit remplir un lubrifiant peuvent s'énumérer ainsi : réduire les frottements, combattre l'usure et la corrosion des organes de la machine à graisser, évacuer en partie les calories (en particulier dans les moteurs à combustion interne), contribuer à parfaire l'étanchéité aux gaz et aux liquides, enfin, évacuer les « déchets » du fonctionnement de l'appareil.

On peut classer les lubrifiants de différentes façons. Tout d'abord, ils peuvent être solides, liquides, ou gazeux. De plus, ils peuvent être naturels (c'est-à-dire d'origine végétale, animale, ou minérale) ou synthétiques.

Lubrifiants naturels

Parmi les produits d'**origine végétale,** on peut citer : la *colophane,* les *résines* et les *cires végétales* qui sont solides, les huiles siccatives *(huile de lin)* ou semi-siccatives *(huile de coton* ou de *colza)* ou non siccatives *(huile d'arachide* ou *d'olive)* qui sont liquides, enfin l'*huile de palme,* l'*huile de coprah* ou de *coco* qui sont pâteuses ou plastiques.

Qu'il s'agisse des corps gras (esters de la glycérine) ou de la colophane, les lubrifiants d'origine végétale sont saponifiables. Ce sont des esters d'acides gras, et les groupes carboxyle ont une affinité pour les surfaces métalliques. Cependant, ces lubrifiants ont une stabilité thermique inférieure à celle des lubrifiants minéraux et sont beaucoup plus oxydables, le plus souvent à cause des doubles liaisons qu'ils renferment. C'est en raison de cette sensibilité à l'oxydation que l'on n'utilise plus l'huile de ricin dans les moteurs. Par contre, cette huile végétale présente des avantages lorsqu'elle doit être en contact avec du caoutchouc (synthétique ou naturel), en raison de sa faible solubilité dans les hydrocarbures et de son faible pouvoir gonflant pour les polymères de types hydrocarbonés.

Parmi les lubrifiants d'**origine animale,** on peut citer la *stéarine,* la *cire d'abeille,* l'*huile de lard,* l'*huile de pied de bœuf, de mouton, de cheval,* les *suifs,* la *graisse de laine,* la *cire de suint,* la *glycérine* et la *lanoline* et les *huiles de poisson* et *de spermaceti.*

Enfin, parmi les lubrifiants d'**origine minérale,** on distinguera les lubrifiants solides tels que le *talc,* le *graphite,* le *soufre* et le *sulfure de molybdène,* les lubrifiants liquides tels que l'*huile de goudron de houille* (huiles anthracéniques), les *huiles de schistes,* les *huiles de pétrole* et l'*eau.* Parmi les lubrifiants minéraux pâteux, on citera le *pétrolatum* raffiné et la *vaseline.*

On constate que les lubrifiants d'origine naturelle (organique ou minérale) sont extrêmement nombreux et de nature variée. Ils n'ont pas suffi cependant pour répondre aux exigences sans cesse croissantes des techniques modernes, et il a fallu soit les améliorer grâce à des additifs, soit réaliser des molécules toutes nouvelles pour obtenir les qualités de lubrification requises. Le développement de l'automobile et de l'aviation a donné aux lubrifiants un essor considérable, mais en restant dans le domaine classique des lubrifiants pétroliers. C'est le développement plus récent de techniques avancées comme l'aviation supersonique, les véhicules de l'espace, les nouveaux générateurs d'énergie, qui a obligé à mettre au point des composés lubrifiants aptes à résister aux conditions extrêmes de température, de pression et aux rayonnements.

Les huiles minérales

Ce sont des lubrifiants liquides issus du pétrole et, par conséquent, constitués essentiellement d'hydrocarbures. Il en existe une gamme très étendue correspondant à la diversité des emplois auxquels on destine ces huiles. On distinguera, par exemple, les **huiles moteurs,** les plus répandues, destinées à la lubrification des moteurs d'automobiles, les **huiles machines** dans lesquelles on distingue les **huiles spindle** pour mécanismes de précision (horlogerie, broches de filature, paliers), les **huiles**

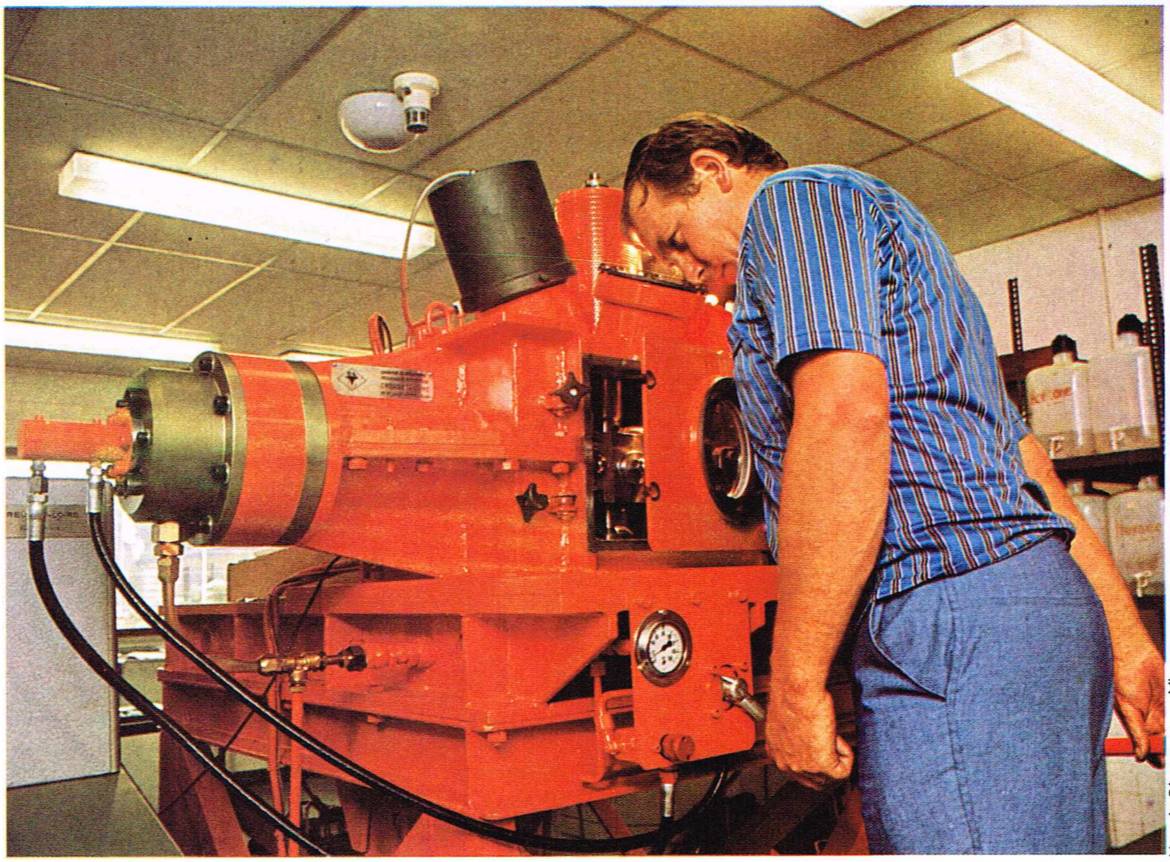

▶ *Les progrès technologiques et de chimie appliquée ont mis au point des lubrifiants scientifiquement adaptés à chaque fonction. Ici, laboratoire d'essai des huiles moteurs.*

Hervé Gloaguen - Viva

isolantes pour transformateurs, les **huiles noires** (huiles de qualité inférieure obtenues par mélange de résidus lourds, de paraffines, de poix ou de colophane) utilisées pour les usages grossiers (essieux de wagons, etc.), les **huiles de vaseline** utilisées en pharmacie après purification poussée et les **huiles de coupes** utilisées pour le travail des métaux.

Les huiles moteurs

Parmi les nombreuses fonctions que doit remplir une huile pour moteur automobile, la lubrification, qui réduit l'usure des pièces métalliques en contact, demande une qualité primordiale, à savoir un certain *degré de viscosité* et le maintien de cette viscosité avec la température. Or, le pétrole brut est un mélange complexe d'hydrocarbures et d'autres composés organiques, et la préparation d'une huile nécessite un traitement très soigneux de ce mélange pour en extraire les composés ayant les propriétés requises.

Parmi les hydrocarbures, les paraffines sont les plus aptes à répondre aux besoins de la lubrification, mais elles présentent un inconvénient majeur, celui d'avoir un point de congélation très élevé qui leur enlève toute propriété satisfaisante à froid. On constate une diminution de l'aptitude à cristalliser, donc un abaissement du point de congélation des paraffines, lorsque celles-ci ont sur leur chaîne principale quelques ramifications, à condition qu'elles ne soient pas trop nombreuses. Ces ramifications ont cependant un effet défavorable sur l'indice de viscosité. Les cycles saturés ou insaturés fixés sur la chaîne paraffinique diminuent aussi la température de congélation et l'indice de viscosité. Le but du raffinage est de sélectionner ces structures et d'éliminer les composés responsables des phénomènes de dégradation des huiles (composés aromatiques, azotés ou oxygénés).

Outre la viscosité de l'huile à la température ambiante, sa variation avec l'élévation de température est extrêmement importante pour le bon fonctionnement des moteurs. En effet, à l'arrêt, le moteur est à la température ambiante, et la viscosité de l'huile est élevée, mais plus ou moins selon qu'il s'agit de l'été ou de l'hiver et suivant les régions, puis, lorsque le moteur a atteint son régime, la température de l'huile dans le carter se stabilise entre 80 et 100 °C, mais elle peut atteindre 200 °C dans le film qui lubrifie les cylindres. La viscosité des hydrocarbures n'étant pas constante avec la température, il faut trouver un compromis qui va consister à rechercher les mélanges d'hydrocarbures dont la viscosité varie le moins possible avec la température. Cette qualité de moindre variation de la viscosité avec la température est exprimée par l'*indice de viscosité*. Cet indice, comme l'indice d'octane pour les carburants, compare l'huile à deux « huiles-étalons » : la première est une huile (H) de Pennsylvanie, très paraffinique, à laquelle on a affecté l'indice 100 et qui présente avec la température une faible variation de viscosité; la seconde est une huile (L) du Gulf-Coast, de nature très naphténique, dont la variation de viscosité avec la température est très importante. Son indice est par convention égal à 0.

Par ailleurs, on a caractérisé ces huiles de base par leur *indice de viscosité à* 100 *et* 210 °F. On a déterminé la différence $D = L - H$ qui représente la différence de viscosité à 100 °F de deux huiles de chaque famille ayant la même viscosité à 210 °F.

La détermination de la viscosité d'un échantillon d'huile commerciale commence par une mesure de sa viscosité à 100 °F et à 210 °F. On recherche ensuite dans des tables les huiles-étalons ayant la même viscosité V que l'échantillon à 210 °F, et on relève simultanément leurs viscosités L et H (ou L et D) à 100 °F.

Par définition, l'*indice de viscosité* est égal à :

$$\text{I.V.} = \frac{L - V}{D} \cdot 100$$

Un indice de viscosité voisin de 100 correspond à une huile d'excellente qualité.

Les moteurs d'automobiles ou d'avions demandent évidemment des huiles ayant d'excellents indices de viscosité. Par contre, les moteurs à essence ou les moteurs Diesel fixes, qui tournent à régime permanent, peuvent se contenter d'huile à bas indice de viscosité. On doit alors utiliser pour les démarrages des moyens très efficaces pour vaincre la viscosité de l'huile à basse température.

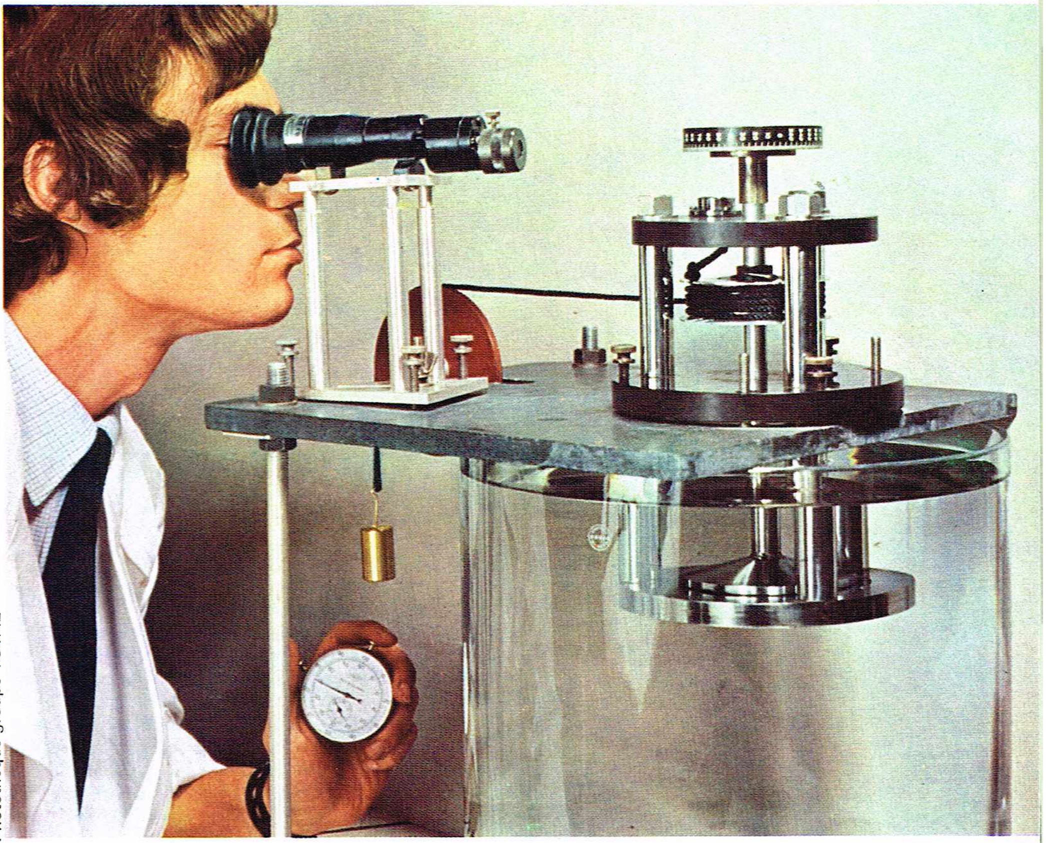

Photothèque groupe TOTAL

▲ *La qualité primordiale d'une huile pour moteur automobile est son* **degré de viscosité** *et le maintien de celle-ci avec la température* **(indice de viscosité).** *Ici, un microviscosimètre à plaques, servant à la mesure de la viscosité.*

▼ *Étude de la viscosité d'une huile soumise à diverses pressions.*

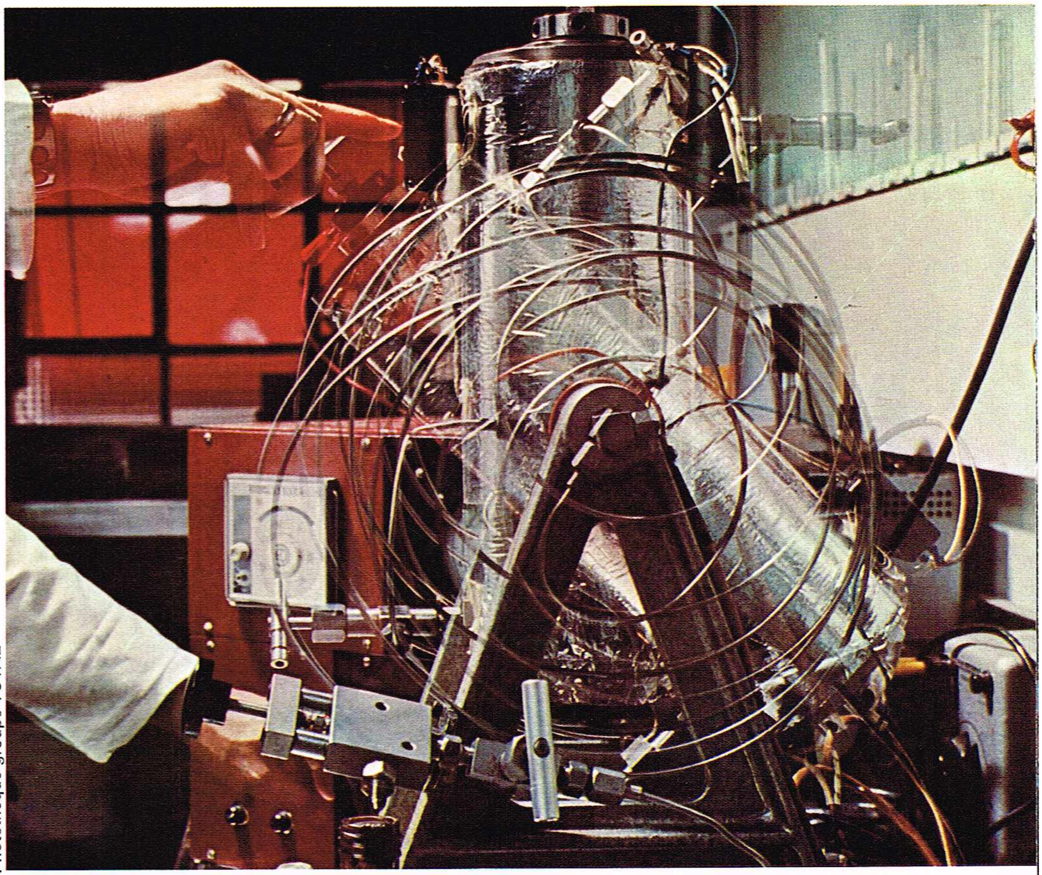

Photothèque groupe TOTAL

Les huiles multigrades (que l'on peut utiliser en toutes saisons) sont caractérisées par un indice de viscosité élevé, c'est-à-dire que leur viscosité varie peu avec la température.

Le raffinage des huiles minérales comporte de nombreuses opérations. La distillation sous vide du résidu atmosphérique fournit un certain nombre de coupes qui dépend des types d'huiles recherchés : ce sera, par exemple, une fraction légère qui conduira aux huiles multigrades 10 W 30 ou 10 W 40 (les nombres suivis de la lettre W correspondent à des huiles que l'on utilise sous climat froid ; lorsque les nombres ne sont pas suivis de la lettre W, ils correspondent à des huiles que l'on utilise sous des climats tempérés et chauds), un distillat moyen qui donnera des huiles moteurs classiques et un résidu sous vide qui, après désasphaltage au propane, constituera la base Bright Stock.

Ces coupes doivent ensuite subir des traitements pour améliorer leurs qualités assez médiocres. Il s'agit d'abord d'une extraction au solvant pour augmenter l'indice de viscosité et réduire la teneur en carbone, en soufre et en azote, puis un déparaffinage, enfin un traitement de finition à la terre ou par hydrogénation.

Le désasphaltage consiste à précipiter, par addition de propane, les hydrocarbures très lourds, polycycliques, qui, par ailleurs, renferment des teneurs non négligeables en soufre, azote, oxygène, métaux, etc.

L'extraction par solvant a pour but d'éliminer des fractions lubrifiantes les hydrocarbures ayant de mauvaises caractéristiques de viscosité. Le solvant le plus utilisé est le furfurol.

Le déparaffinage a pour objectif d'éliminer les paraffines normales et, plus généralement, les hydrocarbures responsables du point de congélation trop élevé de l'huile. Cette opération se fait en ajoutant un solvant de l'huile dans lequel les paraffines normales peuvent cristalliser, et en opérant entre — 10 et — 25 °C. Le solvant utilisé pour effectuer le déparaffinage est un mélange de méthyléthylcétone et de toluène.

Les hydrocarbures extraits aux solvants sont ensuite blanchis à l'acide sulfurique et constituent ce que l'on appelle la *paraffine,* mélange d'hydrocarbures paraffiniques linéaires dont le point de fusion va de 40 à 65 °C. Lorsque l'opération est effectuée sur une fraction plus lourde, on obtient à la place de la paraffine le *pétrolatum.* La paraffine est utilisée pour la protection des aliments, pour la fabrication du papier et du carton paraffiné, etc. ; le pétrolatum est utilisé pour la fabrication de la vaseline, de cires diverses, de cirages, etc.

L'huile, débarrassée de ses paraffines cristallisables, n'est pas encore apte à l'emploi ; en particulier, elle est très colorée. On lui fait subir un traitement de finition qui consiste soit à la traiter par une terre activée, soit à l'hydrogéner partiellement (hydrofinishing).

Une huile minérale obtenue à partir d'un résidu de distillation atmosphérique par les opérations ci-dessus n'a pas encore toutes les qualités requises pour l'utilisation dans un moteur ; on lui adjoint des additifs divers, dont les plus importants sont :

— les *additifs de détergence :* ce sont des composés qui confèrent à l'huile des propriétés de solubilisation vis-à-vis des dépôts charbonneux et des produits d'oxydation ;

— les *inhibiteurs de corrosion :* ce sont des antioxydants qui évitent la dégradation de l'huile par oxydation au contact de l'air ;

— les *additifs de congélation (pour point depressant) :* ils évitent que l'huile ne fige à basse température ;

— les *additifs anti-usure* et *extrême-pression :* ces additifs évitent l'usure lorsque les pressions sont élevées et les vitesses lentes ;

— les *additifs de viscosité (viscosity improvers) :* ce sont ces derniers qui ont eu la croissance la plus rapide au cours de ces dernières années. Ce sont des polymères compatibles avec l'huile et qui confèrent à celle-ci la propriété de ne pas voir sa viscosité varier trop fortement avec la température. De telles huiles sont les huiles multigrades. Parmi ces polymères, on peut citer les polyoléfines (polyisobutène, copolymère éthylène-propylène) et les polyesters (polyacrylates, polyméthacrylates).

Les graisses

Ce sont des lubrifiants semi-solides obtenus par addition d'un agent épaississant à un lubrifiant liquide. L'agent épaississant est le plus souvent un savon métallique, et le lubrifiant liquide a une origine très variable. C'est généralement une huile de graissage, sauf pour certaines applications à haute température qui nécessitent des huiles de synthèse. Les savons les plus utilisés sont des savons de lithium, de calcium, de sodium, de potassium ou d'aluminium. Comme dans le cas des huiles minérales, on améliore les propriétés des graisses en leur incorporant des additifs : des additifs antirouille, antioxydant, extrême-pression, des composés augmentant l'adhésivité, l'aspect « filant » de la graisse, enfin des colorants.

Selon leur utilisation, on distingue les **graisses pour roulements,** les **graisses châssis,** les **graisses pour hautes températures** dans lesquelles on incorpore du

▼ *A gauche,* **huile de synthèse multigrade** *mise au point par la C. F. R. en 1974. A droite, traitement de* **déparaffinage** *des huiles : batterie de filtres.*

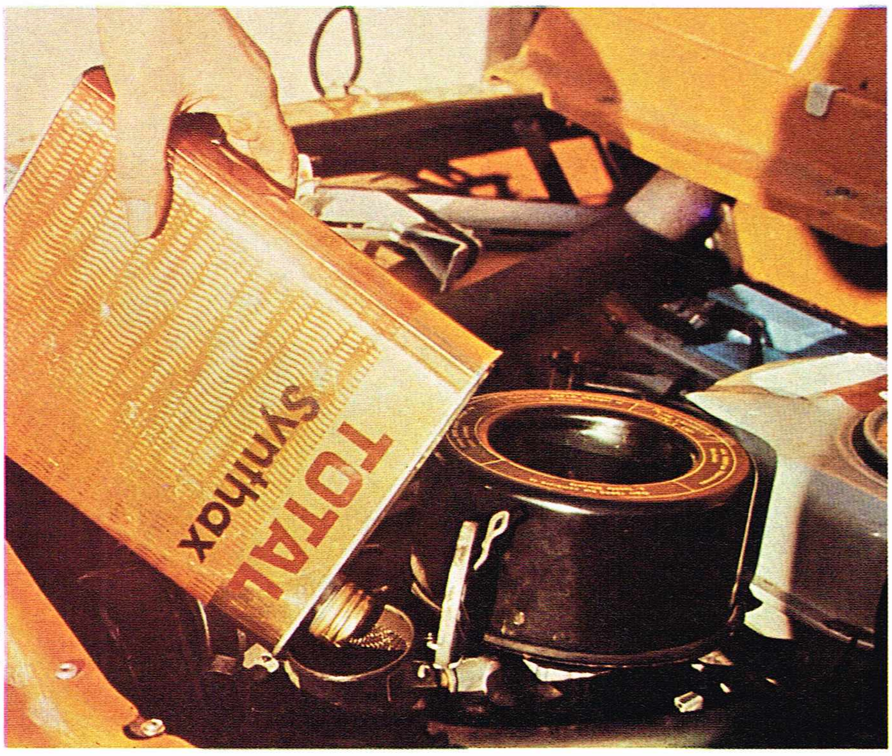

Photothèque groupe TOTAL

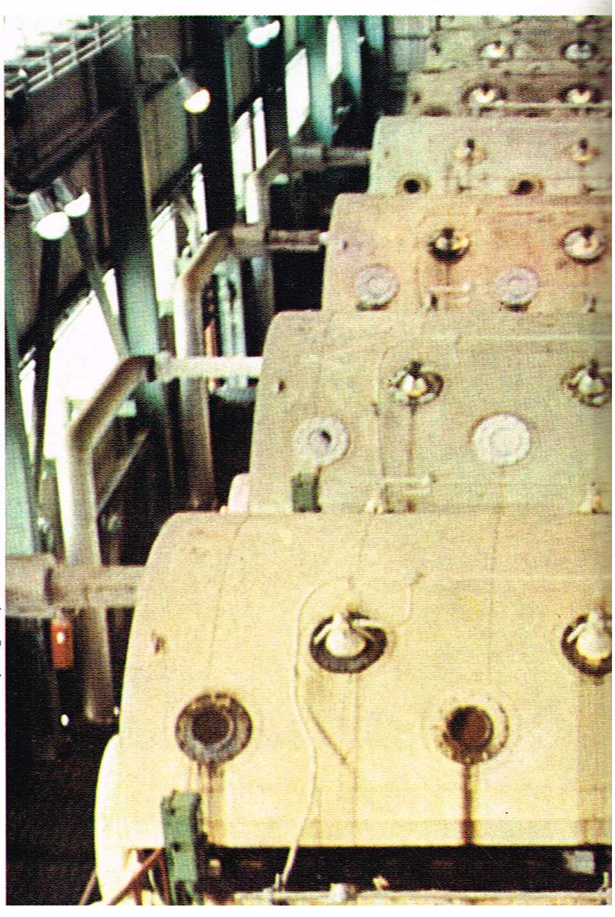

Photothèque groupe TOTAL

graphite ou du bisulfure de molybdène, les **graisses résistant aux agents chimiques** (graisses de silicones, graisses fluorocarbonées), etc.

Les graisses au savon de calcium sont les plus courantes ; on les utilise en général à température relativement basse pour les roulements, cardans, pompes à eau, etc. Les graisses au sodium sont utilisées pour les châssis de voitures, les roulements à billes ou à aiguilles tournant à grande vitesse. Les graisses à l'aluminium sont surtout utilisées pour le graissage des cardans. Enfin, les graisses au lithium sont utilisées pour l'aviation.

On peut, dans certaines graisses spéciales, remplacer le savon métallique par des épaississants minéraux tels que les silices colloïdales et certaines argiles modifiées. Parmi ces dernières, les bentonites rendues organophiles et sans affinité pour l'eau par un traitement aux amines à longue chaîne sont très utilisées pour certaines graisses devant travailler à haute température.

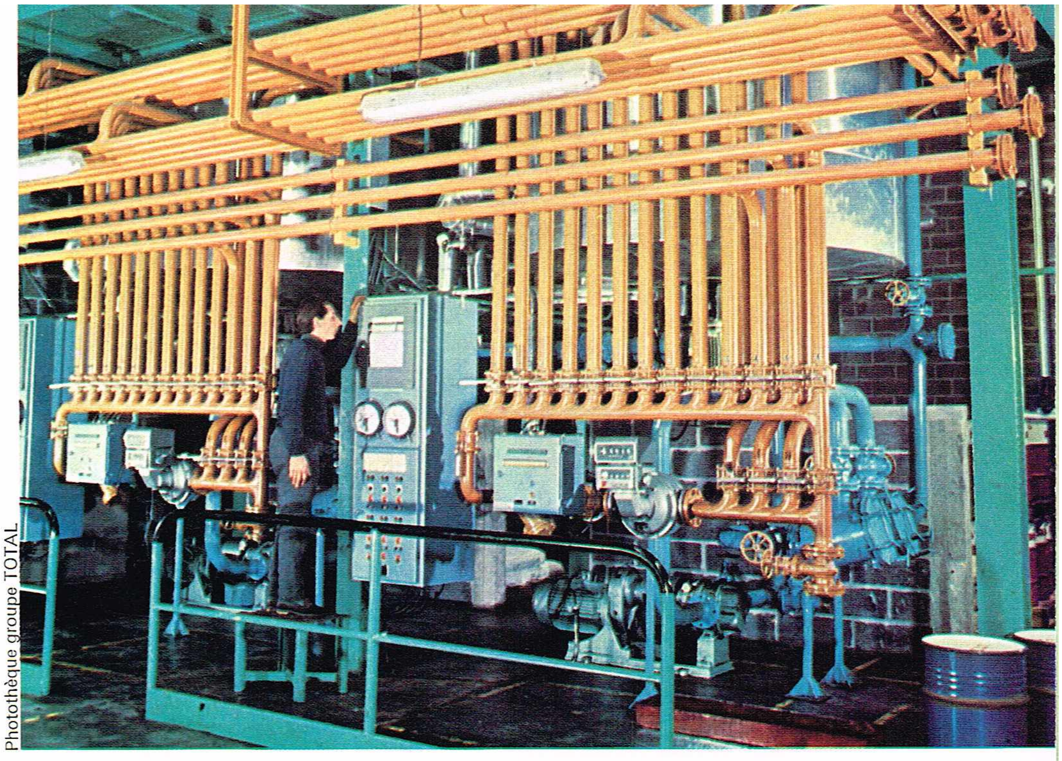

Photothèque groupe TOTAL

▲ ***Installations pour la fabrication des graisses : ici, sélection des huiles entrant dans la composition des graisses.***

Les lubrifiants synthétiques

Pour répondre à certaines exigences que les lubrifiants naturels ne sont pas en mesure de satisfaire, on a été amené à synthétiser des molécules apportant, outre la propriété lubrifiante, telle ou telle autre propriété.

Polyglycols

De formule générale $R—O(CH_2—CHR'O)_xR''$, dans laquelle R, R' et R'' sont soit de l'hydrogène, soit un radical alkyle, ils sont utilisés dans l'industrie textile en raison de leur solubilité dans l'eau. On les utilise aussi comme fluides hydrauliques et dans le travail des métaux. Leur grande hygroscopicité nécessite de leur adjoindre un additif antirouille lorsqu'ils sont en contact avec des métaux oxydables.

Polyphényléthers

Les polyphényléthers, dans lesquels des cycles benzéniques sont liés en position méta par des ponts oxygène ($—C_6H_4—O—C_6H_4—O—C_6H_4$), sont caractérisés par une grande résistance à la chaleur et aux radiations, mais ils ont un point d'écoulement élevé et de faibles indices de viscosité. Par ailleurs, leur prix élevé en limite l'emploi à des usages très particuliers.

Esters de diacides

Depuis la dernière guerre mondiale, les esters ont été utilisés comme lubrifiants de synthèse pour remplacer l'huile minérale qui faisait défaut surtout en Allemagne. Depuis 1969, on utilise dans certaines huiles moteurs des mélanges d'huiles minérales et d'esters de diacides. Les diacides les plus utilisés sont les acides adipique, triméthyl adipique azélaïque, et sébacique, et comme alcools on emploie l'heptanol, sous-produit de la fabrication du Nylon 11, et certains alcools de synthèse OXO. Le pouvoir lubrifiant de ces esters est supérieur à celui des huiles minérales, et ils ont des points d'écoulement pouvant atteindre — 60 °C. Les principaux utilisateurs de ces lubrifiants sont les aviations civiles et militaires.

Esters de polyols

Ils sont obtenus par estérification d'un polyol (le pentaérythritol et d'autres diols et triols à structure très ramifiée) par un monoacide. Ces lubrifiants ont des caractéristiques moins bonnes que celles des précédents en raison de leur structure très ramifiée ; en particulier, leur indice de viscosité est moins élevé ; par contre, leur stabilité thermique est excellente.

Esters des acides phosphorique et silicique

Ils ont pour principal avantage une excellente résistance au feu ; par contre, leur principal inconvénient est leur hydrolyse facile. On les utilise comme fluides hydrauliques devant opérer dans un domaine assez large de températures (aviation).

Silicones ou siloxanes

Ce sont des polymères dont la chaîne principale est constituée par une alternance d'atomes de silicium et

▼ ***Une des étapes de la fabrication des graisses : la graisse est broyée, puis filtrée et désaérée.***

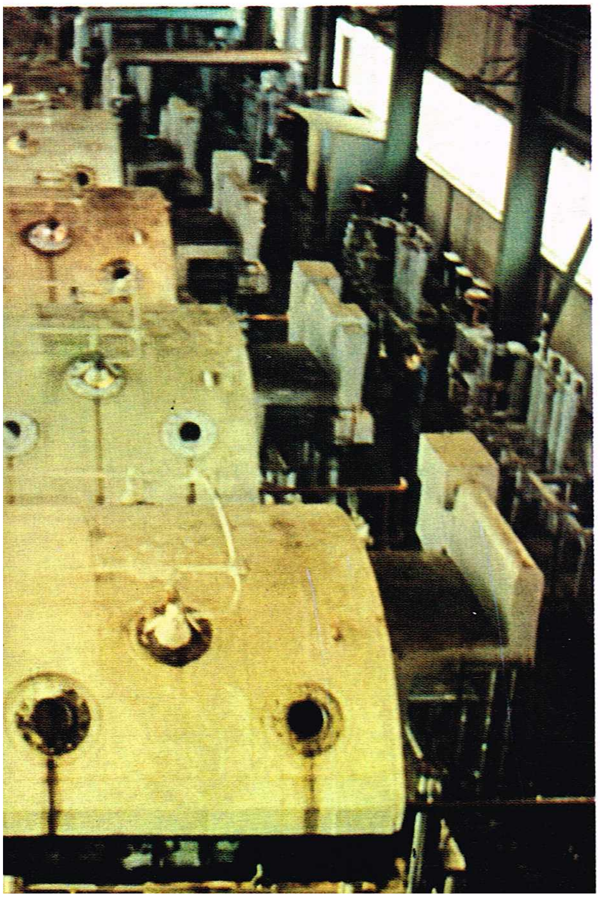

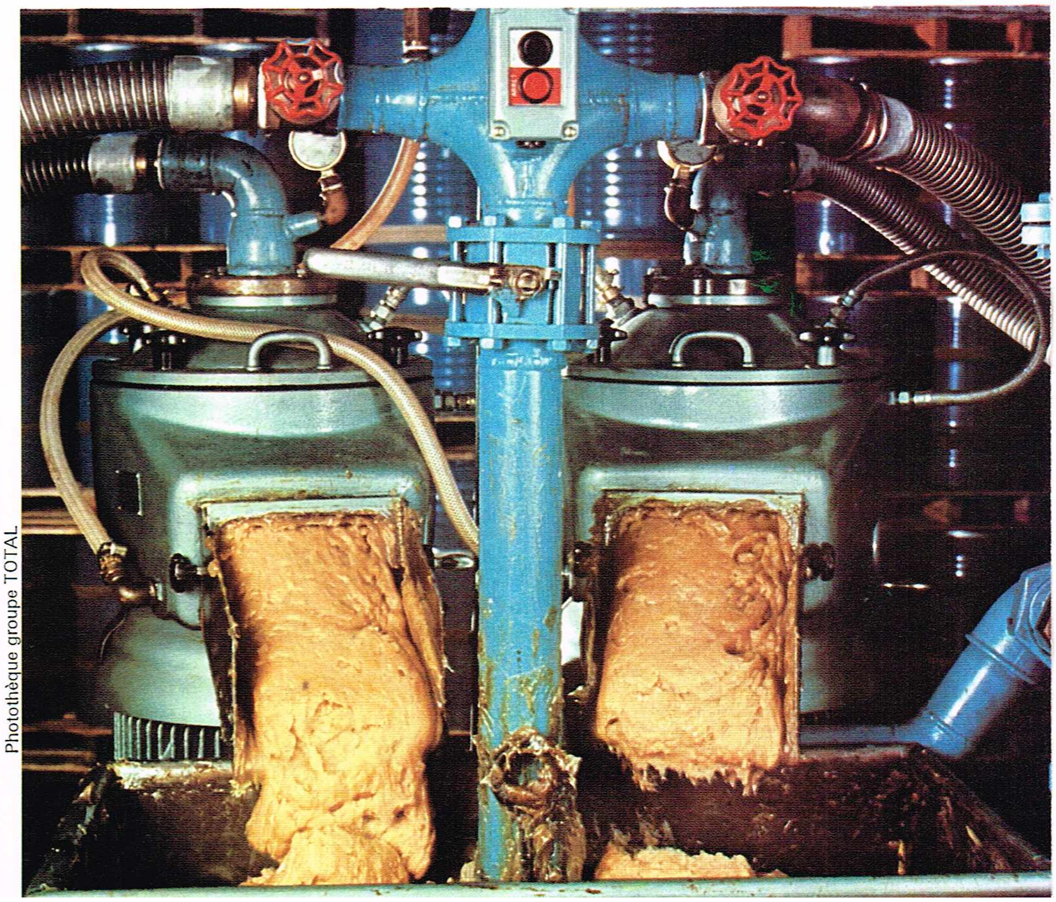

Photothèque groupe TOTAL

d'oxygène, les atomes de silicium portant en outre des groupements alkyle (polyméthylsilicones) ou phényle et alkyle (polyméthylphénylsilicones), ou fluoroalkyle (silicones fluorées).

La préparation très laborieuse des silicones par rapport aux autres polymères justifie leur prix beaucoup plus élevé. On doit d'abord préparer le silicium par réduction de la silice, puis, en faisant réagir un halogénure d'alkyle sur le silicium, préparer un organochlorosilane, par exemple :

$$Si + 2CH_3Cl \rightarrow (CH_3)_2SiCl_2...$$

L'hydrolyse de ce *chlorosilane* le transforme en *hydroxysilane* ou *silanol* $(CH_3)_2Si(OH)_2$; finalement, la polycondensation, avec élimination d'eau, conduit au *siloxane* ou *silicone*.

Les lubrifiants à base de silicones, en particulier les polyméthylsilicones, se caractérisent par des points d'écoulement très bas, une faible volatilité et une faible tension superficielle. Ils résistent bien à la chaleur ainsi qu'à l'oxydation, ils ont les meilleures propriétés viscosité-température de tous les lubrifiants et peuvent être très fortement comprimés sans se solidifier. Les silicones fluorées ajoutent à ces qualités celle de résister aux acides. Les silicones trouvent leurs principales applications dans la lubrification de certains mécanismes de précision. Ces lubrifiants sont, en outre, compatibles avec les caoutchoucs et les matières plastiques.

Les graisses aux silicones sont des huiles de silicones épaissies par des savons au lithium ; on peut les utiliser jusqu'à 200 °C.

Sans prétendre donner la liste complète des lubrifiants synthétiques actuellement connus, on peut encore citer les hydrocarbures halogénés (chlorés ou fluorés). Ce sont des produits très stables à l'oxydation et à la chaleur, mais dont les relations viscosité-température sont assez mauvaises. Les polymères chlorofluorés obtenus par polymérisation du chlorotrifluoroéthylène sont des lubrifiants particulièrement intéressants pour leur inertie chimique et leur stabilité à la chaleur. On les utilise comme lubrifiants pour les compresseurs d'oxygène, pour les pompes de liquides corrosifs ainsi que dans certaines applications aérospatiales.

D'une façon générale, les lubrifiants de synthèse sont actuellement utilisés pour des applications très particulières, exigeant une ou plusieurs propriétés exceptionnelles que ne possèdent pas les lubrifiants naturels ou semi-synthétiques comme les huiles minérales.

Lubrifiants solides

La plupart des machines sont parfaitement bien lubrifiées lorsque les pièces métalliques en mouvement sont séparées les unes des autres par un film continu de lubrifiant liquide. Cependant, dans certains dispositifs mécaniques, les surfaces en contact sont chargées à un point tel que le film de lubrifiant peut être interrompu. On a alors recours à un lubrifiant solide.

Cette lubrification peut consister en un traitement en surface de la pièce métallique. De nombreux types de traitements chimiques ou thermochimiques permettent de modifier suffisamment la nature de la surface pour en favoriser le glissement.

Ce traitement de surface n'exclut pas l'utilisation d'un lubrifiant liquide. Mais on peut aussi utiliser des solides lorsque les pressions et les températures excluent totalement la mise en œuvre d'un film liquide.

Les lubrifiants solides réduisent les frottements de deux façons : soit grâce à un glissement aisé de leurs plans moléculaires en raison de leur structure lamellaire, soit grâce au cisaillement facile d'un matériau mou.

Parmi les lubrifiants à structure lamellaire, on peut citer comme étant les plus utilisés : le graphite et le bisulfure de molybdène.

Graphite

Le graphite naturel est une variété du carbone dont les cristaux se présentent sous la forme d'un empilement de feuillets séparés par une distance de 3,37 angströms. Dans chaque feuillet, les atomes de carbone sont disposés en hexagones réguliers de 1,4 Å de côté.

Le graphite n'est attaqué ni par les bases, ni par les halogènes, ni par les composés halogénés. Les acides sont sans action sur lui, sauf les acides nitrique et sulfurique concentrés, au-dessus de 120 °C. Son oxydation à l'air commence vers 550 °C. Son domaine d'emploi, pour des pièces exposées à l'air, s'étend de — 100 à + 550 °C. La résistance à l'écrasement d'un film de graphite est supérieure à la limite de fluage des métaux sous charge. Par ailleurs, les propriétés antigrippantes du graphite sont remarquables. Par contre, le coefficient de frottement du graphite croît avec la vitesse, ce qui en exclut l'emploi pour des vitesses élevées. Enfin, le graphite doit être utilisé en présence d'humidité ; dans l'air sec, le graphite devient légèrement abrasif et altère le poli des surfaces.

Bisulfure de molybdène

Le bisulfure de molybdène (MoS_2) a, comme le graphite, une structure lamellaire. On l'utilise en dispersion dans des lubrifiants pétroliers et dans certaines huiles de synthèse. On l'emploie aussi comme lubrifiant sec. A l'air, au-dessus de 500 °C, le bisulfure de molybdène s'oxyde en trisulfure, qui est assez abrasif, et en anhydride sulfureux. Le domaine d'emploi du bisulfure de molybdène est situé entre — 150 et + 420 °C pour des pièces en contact avec l'air. Il est pratiquement inattaqué par la plupart des composés chimiques.

Sulfures et séléniures de tungstène

Les sulfures et les séléniures de tungstène ont des limites supérieures de résistance à l'oxydation très élevées. Ils peuvent être utilisés sous des vides très poussés jusqu'à 1 300 °C.

Autres lubrifiants minéraux solides

D'autres composés minéraux à structure non lamellaire peuvent être utilisés dans certains cas particuliers ; citons le **talc**, la **bentonite**, le **monoxyde de plomb**, et des métaux mous comme le **plomb**, l'**indium** et l'**étain**.

Lubrifiants organiques solides

Parmi les lubrifiants organiques solides, on peut citer les **savons métalliques** et surtout certains polymères cristallins comme le **téflon**, le **polyéthylène** ou les **Nylons**. Les matières plastiques peuvent être utilisées en pièces massives ou comme matière d'imprégnation de métaux frittés, ou encore en couches déposées sur les métaux à lubrifier.

Les températures extrêmes d'utilisation sont variables en fonction du plastique utilisé, mais toujours inférieures à celle des lubrifiants solides minéraux. Ces températures se situent aux environs de 250 à 300 °C pour le téflon, qui, par ailleurs, peut être utilisé jusqu'à — 250 °C.

Les lubrifiants pour hautes températures

Dans certaines applications où il est souhaitable d'utiliser un lubrifiant liquide à des températures supérieures à 260 °C, on peut utiliser des métaux liquides comme l'**alliage sodium-potassium**, le **potassium**, le **rubidium** ou le **mercure**.

L'alliage sodium-potassium est liquide à la température ordinaire ; il est constitué de 77 % de sodium et de 23 % de potassium (en masse). On peut l'utiliser dans une gamme de températures assez étendue, cependant il s'oxyde très facilement et ne peut être utilisé que dans des dispositifs clos, sous vide ou sous gaz inerte.

On utilise aussi le **verre** comme lubrifiant dans certaines applications comme le travail des métaux à chaud et, en particulier, l'extrusion de l'acier.

Les lubrifiants gazeux

Les gaz peuvent être utilisés comme lubrifiants. On a utilisé par exemple l'**hydrogène**, l'**hélium**, l'**azote**, l'**oxygène**, l'**hexafluorure d'uranium**, l'**air**, etc. La caractéristique la plus importante des gaz est que leur viscosité, et par conséquent leur capacité à engendrer une pression hydrodynamique, augmente avec la température, au contraire de ce qui se passe pour les liquides. Malheureusement, la viscosité des gaz est très faible par rapport à celle des liquides.

BIBLIOGRAPHIE

BRAITHWAITE E. R., *Lubrication and Lubricants*, New York, 1967. - GROFF J., *A.B.C. du graissage*, Éditions Technip, Paris, 1961. - LEFÈVRE R., *Graissage et tribotechnique, tome I. Les Lubrifiants et le processus de graissage*, Éditions Technip, Paris, 1975.

LES ANTIGELS

Un antigel est une substance qui, ajoutée à un liquide (l'eau dans la majorité des cas), abaisse le point de fusion de celui-ci, et par conséquent les risques de le voir se solidifier sous l'influence d'une diminution de la température.

La majeure partie des antigels est utilisée dans les moteurs de voiture pour éviter le gel de l'eau employée comme liquide de refroidissement du moteur, mais les antigels trouvent de nombreuses autres applications; pour n'en citer que quelques-unes, on mentionnera les dispositifs de chauffage par circulation d'eau, les fluides dégivrants, les dispositifs réfrigérants, les systèmes hydrauliques, etc.

Bien que, fondamentalement, de nombreux composés soient susceptibles d'être utilisés comme antigels, les deux principaux sont l'**éthylène glycol** ou **glycol** et l'**alcool méthylique**. C'est de beaucoup le glycol qui a le marché le plus important, grâce à l'industrie automobile.

On sait que les moteurs à combustion interne ne transforment en énergie mécanique qu'une partie de l'énergie libérée par la combustion, la majorité de cette énergie de combustion étant perdue sous forme d'énergie calorifique. Cette énergie calorifique doit être éliminée, et c'est le rôle du circuit de refroidissement d'évacuer, grâce à la circulation d'une certaine masse d'eau qui se refroidit dans le radiateur, ces calories indésirables. Ainsi, l'eau qui circule dans une double enveloppe autour des cylindres va se refroidir dans le radiateur, qui est en fait un échangeur de chaleur avec l'air ambiant; la pompe à eau permet d'activer cette circulation. L'ensemble de ce dispositif de refroidissement est maintenu sous une légère surpression.

Pour remplir efficacement son rôle, l'antigel doit posséder un certain nombre de caractéristiques. La principale, évidemment, est de permettre un abaissement de la température de congélation de l'eau tel que, par les températures les plus basses des hivers les plus rigoureux, aucun risque de gel n'apparaisse. Mais il doit en même temps ne pas trop diminuer la capacité de refroidissement de l'eau. De plus, il doit ne pas avoir d'action corrosive sur le système de refroidissement, ne pas attaquer ou faire gonfler les durites en caoutchouc, ne pas avoir d'odeur désagréable, ne pas attaquer la peinture du véhicule, enfin être bon marché et pouvoir être utilisé pendant au moins un an. De telles exigences ont fait disparaître du marché les premiers antigels.

Le glycérol (ou glycérine), par exemple, a dû être abandonné à cause de la viscosité trop élevée qu'il confère au liquide de refroidissement lorsqu'on utilise la concentration nécessaire à la protection du système à très basses températures. De même, les alcools éthylique et isopropylique, le diéthylène glycol et le propylène glycol ont été rejetés à cause de leur efficacité trop faible en regard de leur prix. De plus, dans le cas du propylène glycol, il est difficile de vérifier aisément la teneur en antigel par la simple mesure de la densité au densimètre, car la densité de cette substance est très voisine de celle de l'eau. Enfin, le diéthylène glycol attaque les peintures. Le méthanol ayant une température d'ébullition assez basse, c'est finalement l'éthylène glycol qui reste l'antigel de choix pour l'eau des circuits de refroidissement des voitures.

Additifs pour antigels

Bien que le glycol, comme d'autres composés hydroxylés, soit peu corrosif vis-à-vis des métaux usuels qui constituent le circuit de refroidissement des automobiles, ses solutions dans l'eau peuvent devenir corrosives. On ajoute alors des *inhibiteurs de corrosion* qui, à la dose de 1 à 4 %, protègent le métal en le recouvrant d'un film protecteur. Ces composés sont de natures diverses : borates, phosphates, nitrites, sel de sodium du mercaptobenzothiazole, etc., pour citer quelques composés minéraux ou organiques solubles. Mais on peut aussi utiliser des huiles insolubles dans l'eau (huiles minérales ou végétales, huiles sulfonées, etc.) qui protègent le métal en le recouvrant d'un film d'huile.

Par ailleurs, dans certaines circonstances (fuite d'air ou de gaz dans le circuit de refroidissement, présence de traces de rouille ou salissures), la présence d'antigel dans l'eau de refroidissement peut favoriser la formation de mousse. On ajoute donc des *additifs antimousse*, tels les alcools gras à longue chaîne, les silicones, des polyglycols, etc.

Enfin, le glycol peut contribuer à favoriser les fuites au niveau de certains raccordements inévitables du circuit de refroidissement. Pour éviter cet inconvénient, on utilise des *agents antifuites* qui agissent en mouillant de préférence les surfaces métalliques. On peut encore ajouter au liquide antigel des *agents « bouche-fuites »* qui peuvent être des microsphères de polystyrène de 1 à 500 μm de diamètre, de l'amiante, etc.

Le contrôle de la teneur en glycol de l'eau de refroidissement est très aisé : il suffit de déterminer grâce à un densimètre la densité de « l'eau » prélevée dans le radiateur, et, en tenant compte de la température de l'eau prélevée, de déterminer grâce à des tables la teneur en glycol.

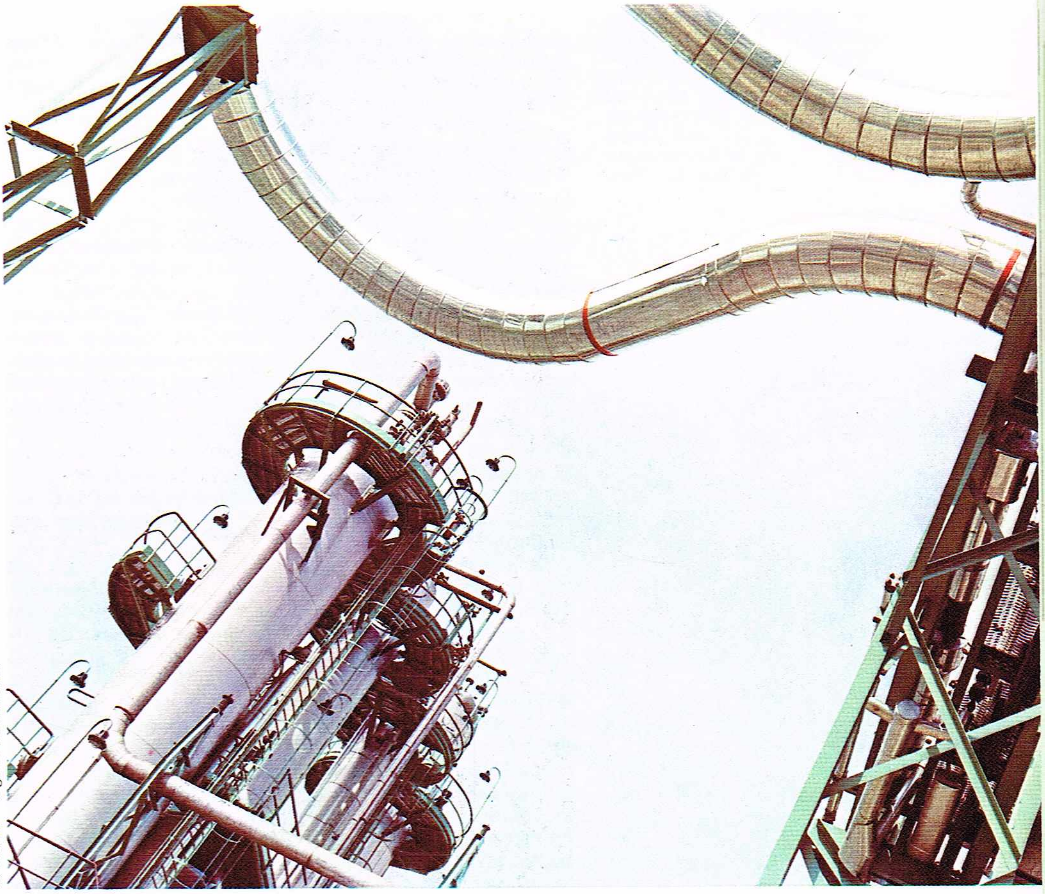

C. Bazin - Ugine Kuhlmann

▲ ***Parmi les divers** antigels en usage, le glycol a le marché le plus important, grâce à l'industrie automobile. Ici, tours de rectification dans une unité industrielle de fabrication du glycol.*

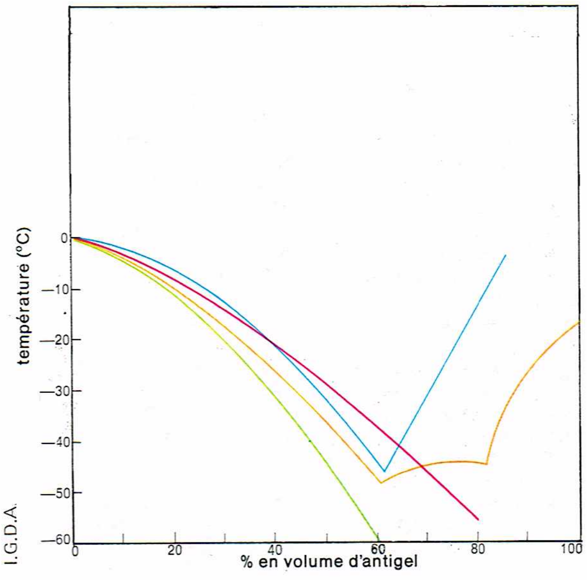

I.G.D.A.

◀ ***Graphique indiquant les variations de températures de congélation en fonction des concentrations dans l'eau de différents antigels : en orangé, l'éthylène glycol ; en vert, l'alcool méthylique ; en rouge, l'alcool éthylique ; en bleu, le glycérol.***

▶ *Les polymères souples comme certains* **vinyliques** *trouvent leurs principaux emplois dans la fabrication de feuilles et de films destinés à l'emballage. Ici, une étape de la fabrication de ces feuilles.*

Une concentration de 33 % en volume de glycol dans l'eau permet de protéger le circuit de refroidissement jusqu'à — 18 °C; lorsque la concentration en glycol atteint 50 % en volume, la protection descend jusqu'à — 37 °C.

Autres applications des antigels

Si les moteurs d'automobiles utilisent pratiquement exclusivement le glycol comme antigel, d'autres applications peuvent employer des antigels différents. C'est ainsi que, dans certaines installations industrielles de synthèse chimique, on utilise des *saumures,* c'est-à-dire des solutions de sels minéraux. On utilise aussi ces saumures dans les patinoires et pour faire fondre la neige et le verglas. Les trois sels les plus employés sont le **chlorure de sodium,** dont l'eutectique (mélange dont la température de fusion est constante) correspondant à 23 % dans l'eau permet d'atteindre — 21 °C, le **chlorure de magnésium** (eutectique à 21 %), qui permet d'atteindre — 30 °C, enfin le **chlorure de calcium,** dont l'eutectique correspond à la température de — 46 °C; en fait, on se limite à — 40 °C pour éviter les précipitations de sels qui conduiraient au bouchage des installations.

Le principal inconvénient des solutions de sels est leur action corrosive due à leur nature électrolytique. Toutes les tentatives faites pour rendre les saumures non corrosives (addition de bichromate de sodium, de tripolyphosphates, etc.) n'ont pas permis de supprimer cet inconvénient. C'est la raison pour laquelle, dans les installations industrielles, comme dans les automobiles, on se sert également des composés hydroxylés. Ainsi, pour éliminer la glace qui se forme dans les tubes de refroidissement des installations de conditionnement d'air, on emploie des solutions de glycol. Dans les usines alimentaires ayant besoin de fluides pour la réfrigération, on préfère plutôt le propylène glycol, en raison de sa très faible toxicité. Le glycol est utilisé aussi pour éviter le gel des fluides hydrauliques aqueux pour les presses, les monte-charge, etc.

En aviation, pour enlever la glace et le givre qui se forment sur le fuselage et les ailes, on se sert en général des mélanges d'*alcools* et de *glycols.* On utilise de l'**alcool isopropylique,** de l'**éthylène glycol** et du **propylène glycol.** Pour éliminer la glace déposée l'hiver sur les pare-brise et les vitres arrière des automobiles, on utilise des fluides dégivrants en bombes d'aérosols. Ce sont généralement des alcools légers **(alcool méthylique, propylique** et **isopropylique)** et des glycols **(éthylène glycol** et **propylène glycol).**

Signalons enfin que l'on ajoute en hiver des antigels à l'essence **(méthanol, alcool isopropylique, éthanol)** pour éviter le givrage.

Le chlorure de sodium ou le chlorure de calcium que l'on répand l'hiver sur les routes pour faire fondre la neige ou le verglas sont des antigels à bon marché.

BIBLIOGRAPHIE

CURME G. O. et JOHNSTON F., *Glycols,* Reinhold New York, 1952.

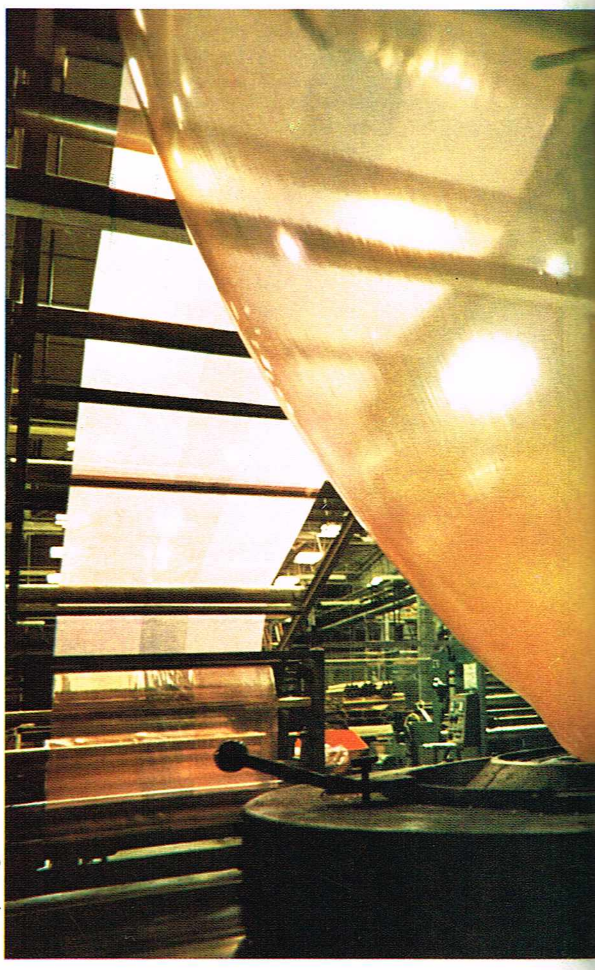
Barbey-Magnum

LES MATÉRIAUX POLYMÉRIQUES OU MACROMOLÉCULES

Nous étudierons dans ce chapitre les matières plastiques, les fibres synthétiques et les caoutchoucs synthétiques.

Polymères et polymérisation

Les **polymères** sont des molécules de haute masse moléculaire, constituées par la répétition d'unités simples de faible masse moléculaire, liées entre elles par des liaisons covalentes. L'unité qui se répète dans la chaîne polymérique, comme les maillons d'une chaîne réelle, a une structure très voisine de celle de la petite molécule qui donne naissance au polymère et que l'on appelle le **monomère.**

▼ *Représentation schématique, simplifiée, d'une installation de fabrication de* **polychlorure de vinyle** : **A,** *introduction du chlorure de vinyle (monomère);* **B_1, B_2** *colonnes de lavage;* **C,** *bassin de décantation;* **D,** *colonne de purification;* **E,** *réacteur de polymérisation;* **F,** *séparation du polymère et du monomère n'ayant pas réagi;* **G,** *colonne d'homogénéisation;* **H,** *séchoir et cyclone de séparation.*

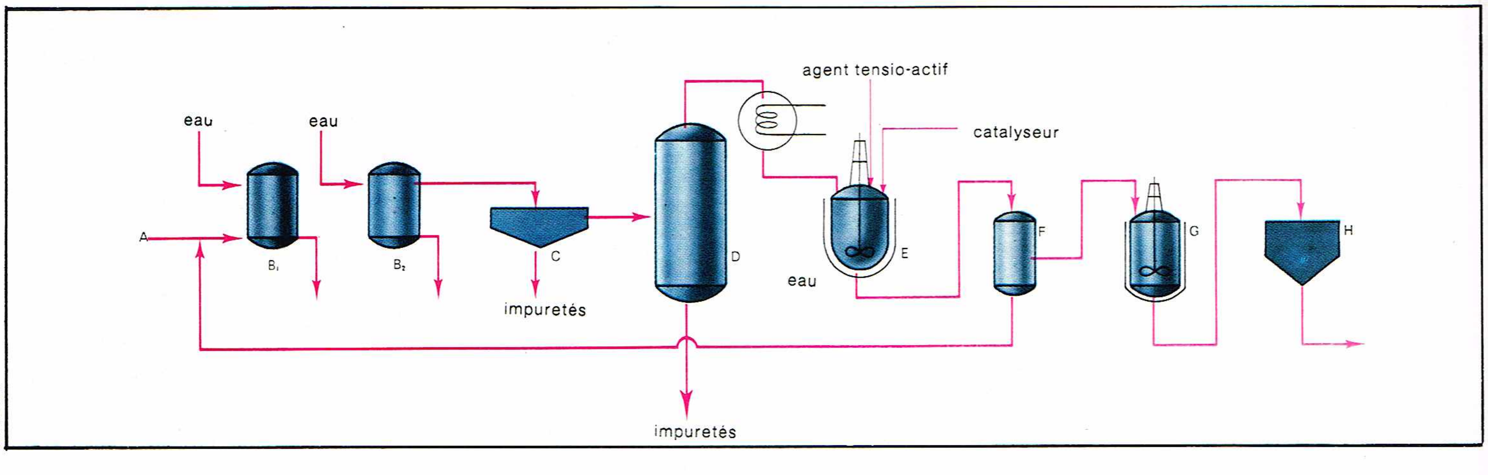

I.G.D.A.

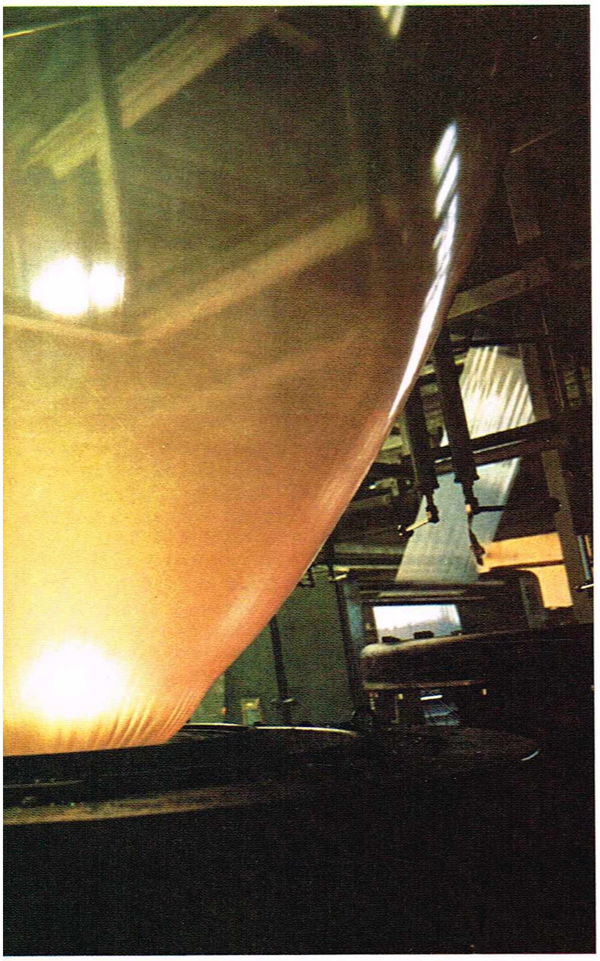

Le nombre d'unités qui se répètent dans une chaîne polymérique est le *degré de polymérisation*. De ce degré de polymérisation, connaissant la masse moléculaire de l'unité monomérique, on peut déterminer la *masse moléculaire* du polymère. Le degré de polymérisation peut aller de quelques unités (dimère, trimère, tétramère) jusqu'à un nombre d'unités correspondant à des masses moléculaires pouvant dépasser 1 million. Lorsqu'il s'agit de quelques monomères liés ensemble, on a affaire à des **oligomères** sans propriétés mécaniques et très souvent liquides. Au contraire, la jonction de nombreuses unités monomères peut conduire à des **hauts polymères** ou **macromolécules** qui peuvent acquérir des propriétés rhéologiques les désignant pour un emploi comme matériau plastique, élastique ou filable. Parmi les polymères de haute masse moléculaire, on distingue les *polymères naturels* et les *polymères synthétiques*.

Les polymères synthétiques sont obtenus par addition les unes aux autres de très nombreuses molécules de monomères insaturés ; il s'agit de la *polyaddition*, c'est par exemple le cas de la préparation du polychlorure de vinyle :

$$n\mathrm{CH_2 = CH{-}Cl} \longrightarrow (\mathrm{-\,CH_2{-}\underset{\displaystyle |\atop\displaystyle Cl}{CH}{-}})_n$$

Le second mode d'obtention d'un polymère consiste à lier entre eux un grand nombre de monomères en éliminant par une réaction de condensation une petite molécule, le plus souvent l'eau. C'est par exemple le cas de la synthèse du Nylon 66 par *polycondensation* de l'acide adipique et de l'hexaméthylènediamine :

$$\mathrm{HOOC{-}(CH_2)_4{-}COOH + H_2N{-}(CH_2)_6{-}NH_2 \rightarrow}$$
$$\mathrm{-NHOC{-}(CH_2)_4{-}CO{-}NH{-}(CH_2)_6{-}NHOC...}$$

Dans le cas de la polyaddition de monomères à double liaison du type $\mathrm{CH_2 = CH{-}R}$, dits monomères vinyliques, on peut imaginer deux types d'addition : l'*addition tête à queue*, dans laquelle le substituant R se trouve sur des atomes de carbone non contigus :

$$\mathrm{-CH_2{-}\underset{R}{CH}{-}CH_2{-}\underset{R}{CH}{-}CH_2{-}\underset{R}{CH}{-}}$$

et l'addition *tête à tête* ou *queue à queue*, où les substituants R sont placés sur des carbones contigus.

$$\mathrm{-CH_2{-}\underset{R}{CH}{-}\underset{R}{CH}{-}CH_2{-}CH_2{-}\underset{R}{CH}{-}\underset{R}{CH}{-}CH_2{-}}$$

Ce type d'enchaînement existe à l'état pur, mais surtout sous forme de disposition statistique des monomères.

On peut distinguer les **homopolymères** des **copolymères.** Dans les premiers, une seule espèce de monomère entre en jeu. Dans les seconds, il peut s'agir de deux ou de plus de deux monomères. Ainsi, le S.B.R., qui est le caoutchouc synthétique utilisé pour les pneus, est un copolymère de styrène et de butadiène.

Il existe plusieurs types de copolymérisation ; si l'on désigne par X et Y deux monomères différents, on distinguera :

— les *copolymères alternés :*

—X—Y—X—Y—X—Y—X—Y—X—Y—X—Y—

— les *copolymères statistiques :*

—X—X—Y—Y—Y—Y—X—X—X—Y—X—Y—X—X—
Y—Y—Y—X—

— les *copolymères à blocs* ou *copolymères séquencés :*

—X—X—X—X—X—Y—Y—Y—Y—Y—Y—X—X—X—

— enfin, les *copolymères greffés :*

```
X—X—X—X—X—X—X—X
   |         |
   Y         Y
   |         |
   Y         Y
   |         |
   Y         Y
```

Dans les polymères linéaires dans lesquels les chaînes macromoléculaires ne sont pas liées les unes aux autres par des liaisons chimiques, les forces de cohésion du type des forces de Van der Waals, les liaisons hydrogène et les associations dipolaires créent des attractions mutuelles entre les macromolécules.

Lorsque l'on élève la température, l'agitation thermique des molécules de polymère devient plus importante que les forces de cohésion, et le plastique se déforme, il fond, et peut être extrudé, coulé, moulé, etc. Il s'agit de **polymères thermoplastiques.** Par ailleurs, si les forces d'attraction ne sont pas trop élevées, ces polymères peuvent être solubles dans certains solvants. La solution peut alors être employée pour faire des feuilles, des films, des revêtements et des fils. Il est possible de diminuer les forces de Van der Waals entre les chaînes de polymère en leur fixant des ramifications susceptibles de les éloigner les unes des autres. Ainsi, l'acétylation de la cellulose conduit à des acétates de cellulose thermoplastiques et solubles dans les solvants organiques.

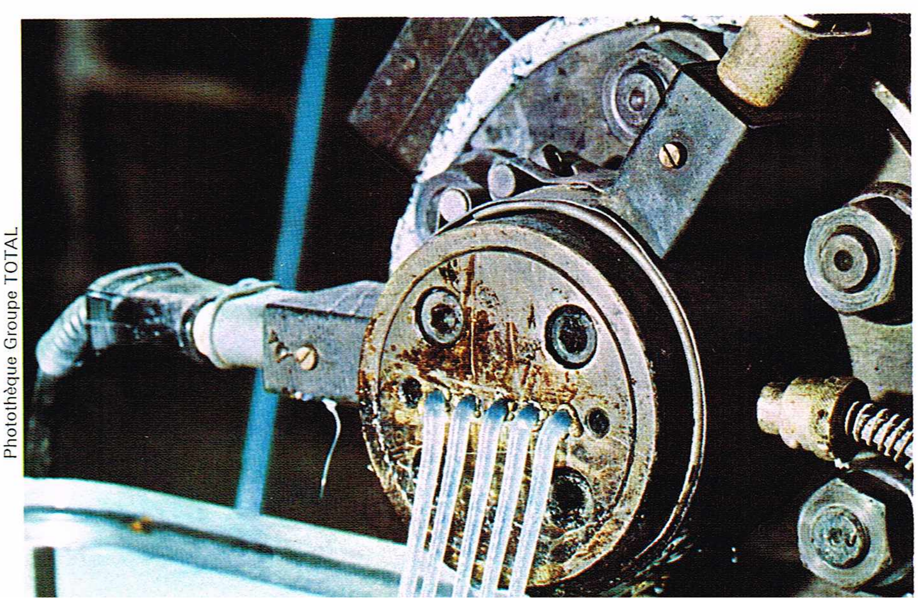

▼ ***Une étape du traitement de* polymères thermoplastiques *; ici, extrusion du* P. E. G. *(polyéthylène greffé) effectué au laboratoire des plastiques et élastomères de Gonfreville.***

Photothèque Groupe TOTAL

Au contraire, on cherche à augmenter les forces de Van der Waals dans le cas des fibres synthétiques, pour en augmenter la résistance à la traction. Dans ce cas, un étirement de la fibre a pour effet de rapprocher les chaînes macromoléculaires les unes des autres, et donc d'augmenter les forces de Van der Waals.

Certaines macromolécules ont leurs chaînes reliées les unes aux autres en de nombreux points par des liaisons chimiques. Le réseau ainsi formé rend le polymère infusible et insoluble. On dit que le **polymère** est **réticulé** ou **rétifié,** et, les liaisons entre chaînes étant appelées *cross-links* en anglais, on dit parfois que le **polymère** est **cross-linké.**

Les polymères thermoplastiques à chaînes isolées peuvent, sous l'influence de la chaleur, devenir partiellement cross-linkés grâce à des liaisons chimiques établissant des jonctions de part en part sur les chaînes. Si ces liaisons sont assez nombreuses, le polymère devient de plus en plus dur à mesure qu'on le chauffe, et cela de façon irréversible. On dit alors que le **polymère** est **thermodurcissable.** Dans le cas des élastomères, pour éviter un glissement excessif des chaînes les unes sur les autres, on les relie par un nombre limité de liaisons chimiques, le plus souvent grâce à des atomes de soufre. C'est la *vulcanisation,* dont l'effet le plus important est d'augmenter la résistance à la rupture.

Les principaux mécanismes de polymérisation

Les polyadditions sont catalysées par des acides, par des bases ou initiées par des générateurs de radicaux libres. Toutes ces polymérisations passent par trois étapes : l'*initiation,* la *propagation* et la *rupture.*

Polymérisation cationique

C'est le mécanisme de polymérisation qui entre en jeu chaque fois que l'on utilise un acide pour catalyser la polymérisation d'une oléfine. Par exemple, dans la polymérisation de l'isobutène en caoutchouc butyl en présence de chlorure d'aluminium, l'initiation consiste en l'addition d'un proton à l'isobutène :

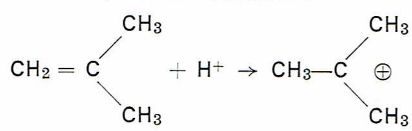

isobutène *tertiobutyle*

Le *carbocation* tertiobutyle formé s'additionne à son tour à une autre molécule d'isobutène :

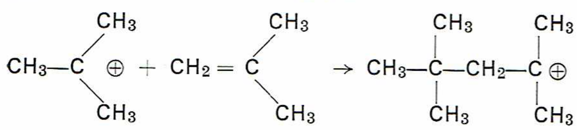

et ainsi de suite ; la chaîne polymérique croît tant que son extrémité est activée par la présence du carbocation.

En fait, des réactions de *rupture de chaîne* limitent la masse moléculaire. Elles consistent soit en un transfert de la charge au catalyseur ou à une autre molécule, soit en la perte d'un proton avec formation d'une oléfine.

Ainsi, si la polymérisation de l'isobutène s'arrête au stade du dimère, ou forme après élimination d'un proton deux iso-octènes :

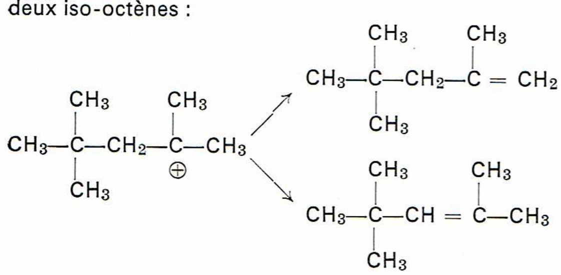

Dans le cas pris ici comme exemple, la température a une grande influence sur les vitesses relatives de propagation et de rupture de chaîne, et, si l'on désire obtenir une macromolécule (caoutchouc butyl), on devra opérer à très basse température (— 100 °C) pour limiter les réactions de rupture. Par contre, on s'arrêtera facilement au dimère en opérant vers + 100 °C.

Les catalyseurs employés dans la polymérisation cationique sont soit des *acides de Brönsted* (acides sulfurique, phosphorique, etc.), soit des *acides de Lewis.*

Polymérisation anionique

La polymérisation anionique a été pratiquée à l'échelon industriel bien avant que l'on en connût le mécanisme intime. C'est en effet par un mécanisme anionique que la polymérisation du butadiène par le sodium est effectuée, et c'est le procédé que les Allemands ont utilisé durant la dernière guerre pour la synthèse du Buna.

Ici, c'est un *carbanion,* et non un carbocation, qui constitue l'extrémité active de croissance de la chaîne. En plus du sodium déjà cité, on peut ajouter parmi les catalyseurs de polymérisation anionique d'autres métaux alcalins tels que le *lithium* ou le *potassium,* des *composés organo-alcalins* (butyl-lithium), des *métaux alkyles* (complexe naphtalène-sodium) ou les *réactifs de Grignard.*

Un cas particulier de polymérisation anionique est celui des *« polymères vivants ».* Dans une polymérisation anionique, l'étape de rupture ne comporte que des transferts, et non des éliminations de H^+. Si l'on opère dans des milieux particulièrement purs où le transfert ne peut pas se faire sur une molécule étrangère, il n'y aura pas de rupture de chaîne. On pourra, connaissant la concentration en initiateur (naphtalène-sodium, par exemple) dans le monomère (styrène, par exemple) prévoir la masse moléculaire du produit obtenu. On pourra même, lorsque tout le monomère aura été consommé, ajouter un autre monomère et réaliser des copolymères séquencés, etc. Le « polymère vivant » en croissance est « tué » par addition d'eau ou d'alcool. La caractéristique essentielle de ces polymères est la courbe très étroite de répartition de leurs masses moléculaires : on dit qu'ils sont *monodispersés.* Malgré ses grandes qualités, ce type de polymérisation n'a pas encore eu les applications industrielles que connaissent les polymérisations cationiques et radicalaires.

Polymérisations radicalaires

Dans ce cas, la chaîne est initiée par un radical libre qui peut provenir de la molécule de monomère, activée thermiquement ou photochimiquement. Le plus souvent, on initie la réaction par des générateurs de radicaux libres (peroxydes organiques, diazoïques, etc.). L'initiation de la chaîne se fait par addition d'un radical R. à l'oléfine :

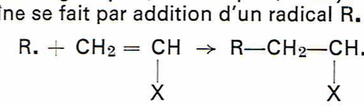

La propagation de la chaîne résulte ensuite de l'addition du radical formé à une nouvelle molécule de monomère, et ainsi de suite :

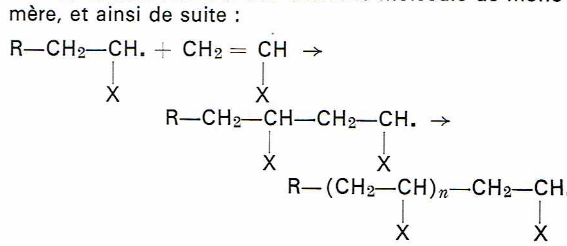

La terminaison de la chaîne peut se faire par toute réaction entraînant une recombinaison ou une dismutation des radicaux libres.

Par ailleurs, il peut y avoir transfert de l'activation radicalaire de la chaîne en croissance à d'autres molécules du milieu en polymérisation (solvant, monomère, chaîne macromoléculaire déjà formée, etc.). Il en résulte un abaissement de la masse moléculaire. Cela est mis à profit dans l'utilisation de régulateurs de polymérisation qui ont pour effet de maintenir la masse moléculaire à un niveau donné. Parmi les régulateurs utilisés, on peut citer les *mercaptans aliphatiques.* Mais le transfert de l'activation par un radical libre peut se faire sur une chaîne de polymère. Dans ce cas, il se greffe sur la chaîne principale des ramifications qui sont des chaînes polymériques résultant de la croissance sur le radical formé. Ces chaînes latérales ont un effet certain sur la densité du polymère et sur certaines de ses propriétés.

Polymérisations par complexes de coordination

Un certain nombre de complexes de coordination de métaux de transition permettent de polymériser les oléfines et les diènes conjugués. Leur caractéristique principale est de conduire à un enchaînement régulier dans l'espace des unités monomériques, donc à des *polymères stéréoréguliers*. On dit que ces catalyseurs sont *stéréospécifiques*.

Ce furent K. Ziegler, en Allemagne, et G. Natta, en Italie, qui mirent au point ces nouveaux catalyseurs et qui obtinrent pour cette découverte le prix Nobel de chimie en 1963. Il s'agit de catalyseurs formés *in situ* par action d'un sel de métal de transition sur un organo-métallique réducteur, le plus souvent un organo-aluminique. Par exemple, la réduction du tétrachlorure de titane ($TiCl_4$) par le triéthylaluminium $Al(C_2H_5)_3$ conduit à un complexe capable de polymériser les oléfines et les diènes conjugués.

La stéréosélectivité de ces catalyseurs et leur activité remarquable sont dues au fait que le monomère, activé dans la sphère de coordination du complexe, ne peut se lier au monomère précédemment inclus dans la chaîne polymérique que dans une position bien déterminée. Dans ce type de catalyse, l'activation de la réaction se fait au niveau de la liaison carbone-métal qui lie le dernier monomère entrant au catalyseur et non à l'extrémité de la chaîne. On a pu dire que, dans ces catalyseurs stéréospécifiques, la chaîne polymérique croît au niveau du complexe activant comme un cheveu sur un crâne. On conçoit que, si l'on pouvait être maître de l'encombrement stérique régnant autour du métal de transition, on pourrait à volonté réaliser telle ou telle structure polymérique.

Actuellement, un certain nombre de polymères réguliers ont pu être synthétisés, et même industrialisés pour certains d'entre eux. Le polyéthylène linéaire, c'est-à-dire dépourvu de tous branchements latéraux, a pu être synthétisé par K. Ziegler à la température et à la pression ordinaires. Puis, grâce aux travaux de G. Natta, on a pu synthétiser des polyoléfines stéréorégulières. Ce fut le cas du polypropylène. On remarque, lorsque l'on écrit la formule du polypropylène, qu'il existe dans la chaîne un atome de carbone sur deux qui est asymétrique :

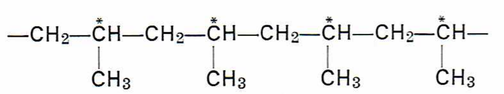

Ces carbones asymétriques peuvent être disposés de façon régulière, soit tous identiques, avec les groupements CH_3 dirigés au-dessus du plan moyen de la chaîne principale — il s'agit du polypropylène **isotactique** — soit alternativement au-dessus et en dessous du plan de la chaîne — c'est le polypropylène **syndiotactique**. L'absence totale de régularité des carbones asymétriques de la chaîne principale conduit au polypropylène **atactique**.

Si l'on suppose la chaîne principale dans un plan, les polymères iso-, syndio- et atactiques peuvent être représentés comme le montre la figure ci-contre.

De même, la polymérisation stéréorégulière de diènes conjugués peut conduire aux enchaînements suivants :

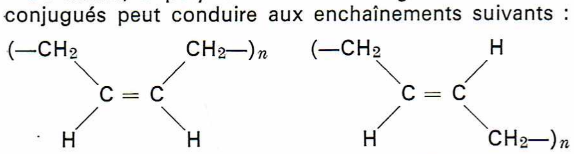

polybutadiène-1,4 cis *polybutadiène-1,4 trans*

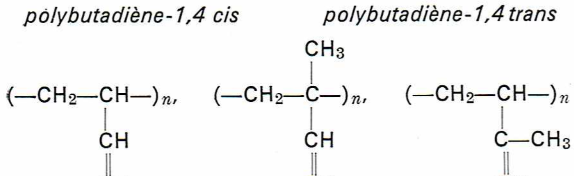

polybutadiène-1,2 *polyisoprène-1,2* *polyisoprène-3,4*

La plupart de ces polymères stéréoréguliers ont pu être synthétisés grâce aux catalyseurs complexes de coordination. Certains d'entre eux, comme le polyisoprène-1,4 cis, qui correspond à la liaison en 1,4 dans laquelle toutes les doubles liaisons de la chaîne sont en cis, correspondent exactement à la structure des produits naturels. Le polyisoprène-1,4 cis a la structure du caoutchouc naturel.

Malgré leurs nombreux avantages sur les catalyseurs ioniques ou radicalaires, les complexes de coordination présentent l'inconvénient d'être très sensibles aux impuretés, et plus particulièrement aux agents protoniques. Ces polymérisations exigent donc des monomères d'une pureté très élevée.

Les conditions de polymérisation

Les réactions de polyaddition sont fortement exothermiques et conduisent, à partir d'un monomère gazeux ou liquide, à un produit solide. Leur mise en œuvre implique donc des techniques particulières visant à éliminer le plus efficacement possible les calories du milieu réactionnel et à recueillir le plus aisément possible le solide formé.

La technique, en théorie la plus simple, consiste à opérer « *en masse* », c'est-à-dire sans solvant. Cette

▼ ***Représentation schématique des* polymères iso-, syndio- et atactiques.**

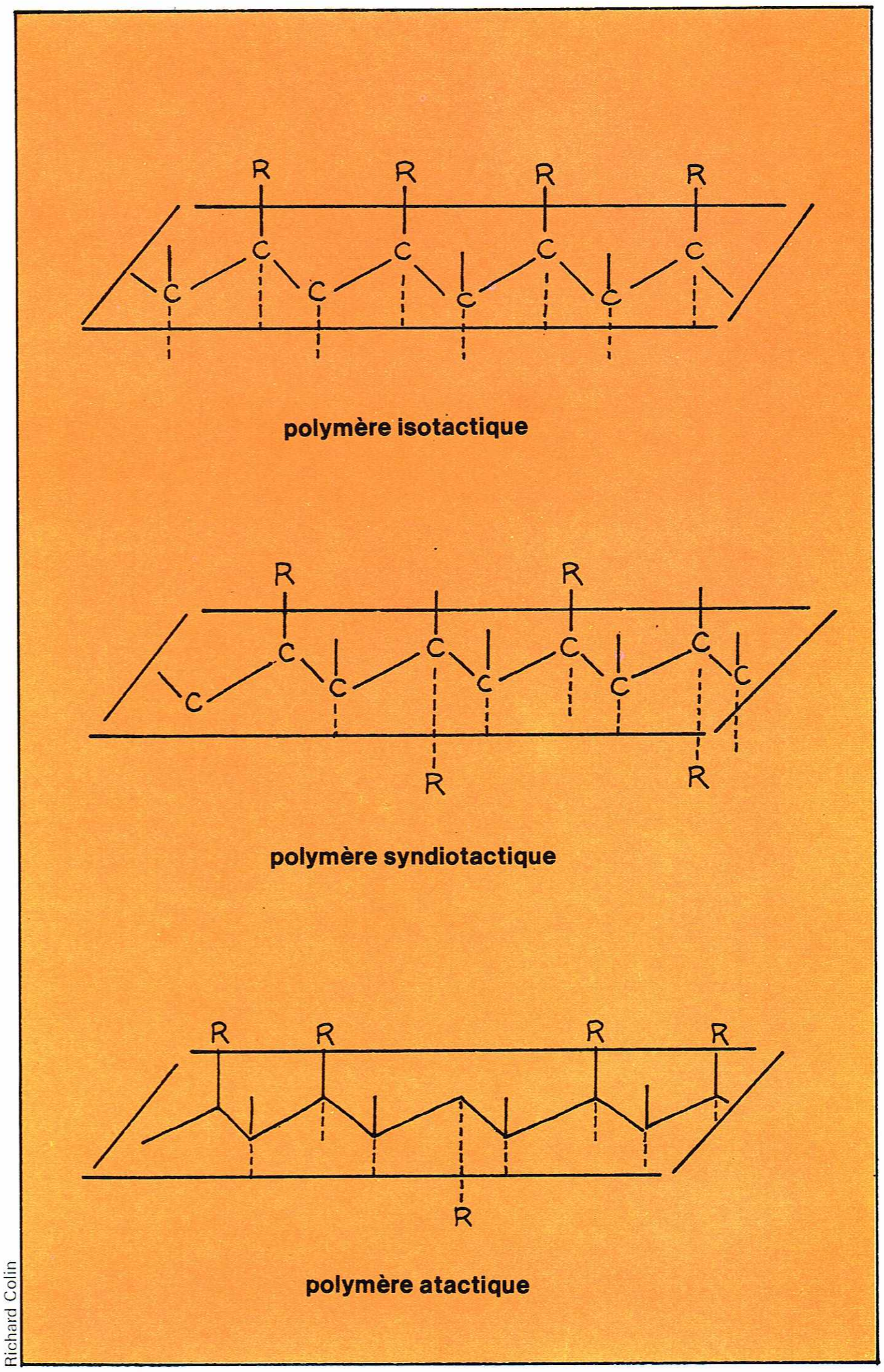

Richard Colin

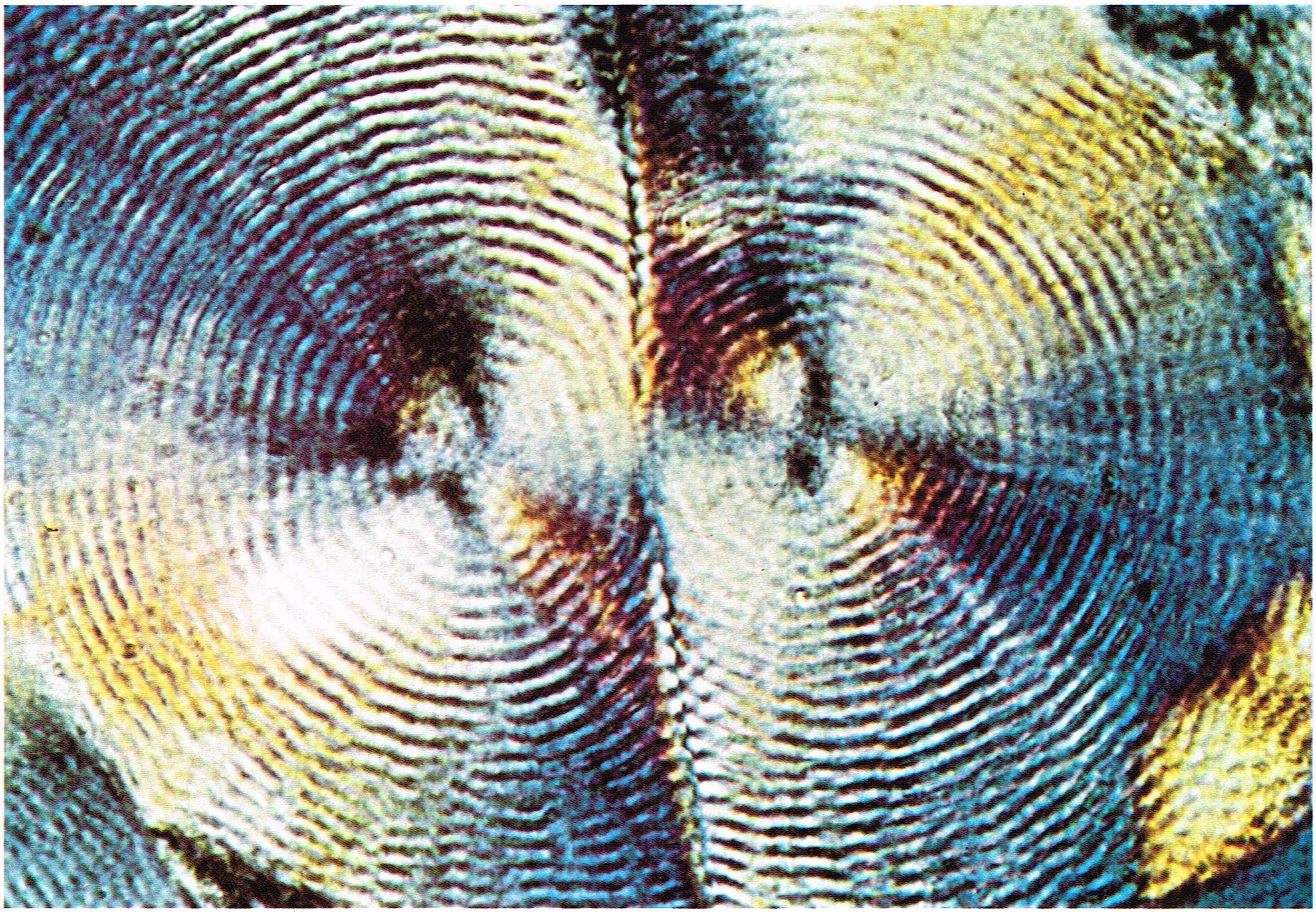

Centre national de la recherche scientifique

▲ ***Sphérolites annelés de* polyéthylène *(microphotographie en nicols croisés et en lumière polarisée).***

technique est surtout applicable lorsque l'exothermicité de la réaction n'est pas trop élevée et pour de petites pièces que l'on forme directement dans un réacteur qui est en même temps un moule. Par cette technique on peut aussi opérer en limitant la conversion en polymère et en l'éliminant en continu du milieu réactionnel. Cette technique nécessite évidemment une agitation, des moyens efficaces de séparation du polymère et de recyclage du monomère.

On peut aussi opérer *en solution.* Cette technique a l'avantage de faciliter l'évacuation des calories, mais elle présente l'inconvénient de l'élimination du solvant du polymère formé. L'élimination totale du solvant et son recyclage sont des opérations coûteuses.

Lorsque l'agent d'activation le permet (c'est le cas pour les polymérisations radicalaires initiées par des peroxydes), on peut opérer *en suspension* ou *en émulsion dans l'eau.* Dans ce cas, l'eau, grâce à sa grande capacité calorifique, évacue aisément les calories de la réaction, et le polymère est facilement récupéré sous forme solide. Dans certains cas, l'émulsion de polymère est directement utilisable. Les inconvénients de cette technique sont une contamination plus ou moins grande par l'agent émulsifiant et par les divers stabilisants qu'il est nécessaire d'ajouter pour maintenir une suspension ou une émulsion stables. Un cas particulier de la polymérisation en suspension est la *polymérisation en perles,* où les globules de monomères en suspension ont un diamètre de l'ordre du millimètre.

Avant d'aborder la description des principales macromolécules de synthèse, il est important de signaler que les polymères recueillis à la sortie du réacteur ne sont pas utilisables comme tels. Ils doivent être soumis à un certain nombre de traitements physiques et chimiques destinés à en améliorer les propriétés mécaniques, à les stabiliser vis-à-vis de l'oxydation, ou encore à les renforcer, etc.

Les matières plastiques

Les matières plastiques de polyaddition

Les polyoléfines

Polyéthylène

Le *polyéthylène* résulte de la polymérisation de l'éthylène. Il existe deux procédés principaux.

Le *procédé à haute pression* fournit le *polyéthylène haute pression,* encore appelé *polyéthylène basse densité* (L. D. P. E. = Low Density Polyethylene). Il s'agit d'un polymère branché, obtenu à très haute pression (1 000 à 3 000 atm) et à haute température (250 °C). Des traces d'oxygène sont utilisées pour initier la polymérisation radicalaire par formation de peroxydes. Le polyéthylène est un polymère partiellement cristallin qui fond à 115 °C et dont la densité est de 0,91-0,94. Cette densité, plus faible que celle du polyéthylène à chaîne régulière que l'on obtient à basse pression, est due à l'existence de branchements latéraux qui ne permettent pas aux chaînes d'être retenues par des forces de cohésion élevées. Le polyéthylène basse densité a des propriétés mécaniques qui le situent entre des polymères rigides comme le polystyrène et des polymères souples comme les vinyliques. Ses principaux emplois sont la fabrication de feuilles et de films destinés à l'emballage, à la protection de certains aliments, à l'agriculture, etc. On en fait des objets moulés par injection, des isolants pour fils et câbles électriques, des revêtements, des bouteilles et des tuyaux.

Le *polyéthylène haute densité* est obtenu à *basse température* et à *la pression ordinaire,* en présence de catalyseurs du type Ziegler-Natta. Il est fortement cristallin, et sa densité est de 0,95-0,97, d'où son nom de polyéthylène haute densité (H. D. P. E. = High Density Polyethylene). On l'utilise surtout en moulage par injection. On en fait des bouteilles, des tuyauteries et aussi des fibres.

Polypropylène

Le polypropylène est une polyoléfine dont le développement est relativement récent et qui doit aux catalyseurs de Ziegler-Natta d'avoir été synthétisée. Il est en effet impossible par voie radicalaire ou ionique d'obtenir un polymère du propylène de haute masse moléculaire. Le polypropylène commercial est le polymère isotactique. La présence de groupements méthyle tous les deux atomes de carbone de la chaîne principale augmente par rapport à l'éthylène son aptitude à la dégradation en présence de lumière et à la chaleur; on doit donc y adjoindre des antioxydants. On peut fabriquer à partir de polypropylène des pièces moulées par injection ou par soufflage. On en fait en particulier des bouteilles. On peut aussi en faire des films. Il peut être extrudé sous forme de tuyaux, mais ce qui le différencie le plus du polyéthylène est la possibilité d'en faire des fibres ou des filaments utilisés pour les tapis, les brosses, les cordages, etc. C'est le plus léger des polymères; sa densité est de 0,90.

Polystyrène

Le polystyrène résulte de la polymérisation du styrène par un processus radicalaire en suspension ou en masse, en présence d'un peroxyde. Il s'agit d'un polymère atactique. On peut préparer grâce aux catalyseurs Ziegler du polystyrène isotactique, mais ce polymère présente peu d'avantages par rapport au précédent malgré sa température de fusion cristalline élevée (240 °C). En effet, le polystyrène atactique du commerce ou isotactique a le défaut d'être cassant. Il doit cette fragilité au fait que sa température de transition vitreuse est de 80 °C. A cette température, les molécules, dans un état vitreux et donc cassant, se transforment en une structure plus ordonnée, et à la température de fusion cristalline, les parties ordonnées, donc cristallines, du polymère fondent; mais comme on utilise le plus souvent ce polymère en dessous de sa température de transition vitreuse, il est cassant, et, d'autre part, il subit à cette température une transformation qui interdit, par exemple, de l'utiliser dans l'eau bouillante ou de le stériliser.

Ce matériau plastique est, malgré cet inconvénient, très utilisé pour toutes les applications où les pièces moulées ne nécessitent pas une grande résistance aux chocs, à la flexion ou à la température. On en fait en particulier des boîtiers, des pièces d'appareils électroménagers, des jouets et d'autres articles qui bénéficient du prix de revient assez bas de ce polymère. Mais on peut conférer au polystyrène une certaine résistance à la chaleur et au choc en le copolymérisant avec d'autres monomères. Ainsi, la copolymérisation du styrène avec 30 % d'acrylonitrile fournit un produit qui résiste à la déformation jusqu'à 90-92 °C et dont la résistance au choc est aussi supérieure. On fabrique aussi des terpolymères acrylonitrile-butadiène-styrène qui sont des copolymères de styrène et d'acrylonitrile modifiés par un élastomère de butadiène et désignés par le sigle ABS. D'autres monomères sont susceptibles de modifier les propriétés du polystyrène, citons par exemple le méthacrylate de méthyle qui confère au polystyrène une meilleure résistance aux agents atmosphériques. La copolymérisation avec de l'anhydride maléique fournit un copolymère résistant aux solvants et à la chaleur. Outre les multiples modifications que l'on peut faire subir au polystyrène en formant des copolymères, on peut préparer du *polystyrène expansé* en soufflant un gaz inerte dans une masse de polymère fondu. Ce produit, très léger, est un excellent matériau pour l'isolation thermique et phonique et pour l'emballage d'appareils délicats.

Dans la gamme des produits que l'on peut obtenir à partir de styrène, on peut aussi réaliser la copolymérisation du styrène avec le divinylbenzène :

$$CH_2 = CH—C_6H_4—CH = CH_2.$$

Il suffit de très peu de cette substance (quelques %) pour obtenir un produit réticulé devenu insoluble, non thermoplastique, dur et cassant. Par sulfonation ultérieure, on obtient une résine qui, sous forme de petites sphères, est utilisée comme *résine échangeuse d'ions*.

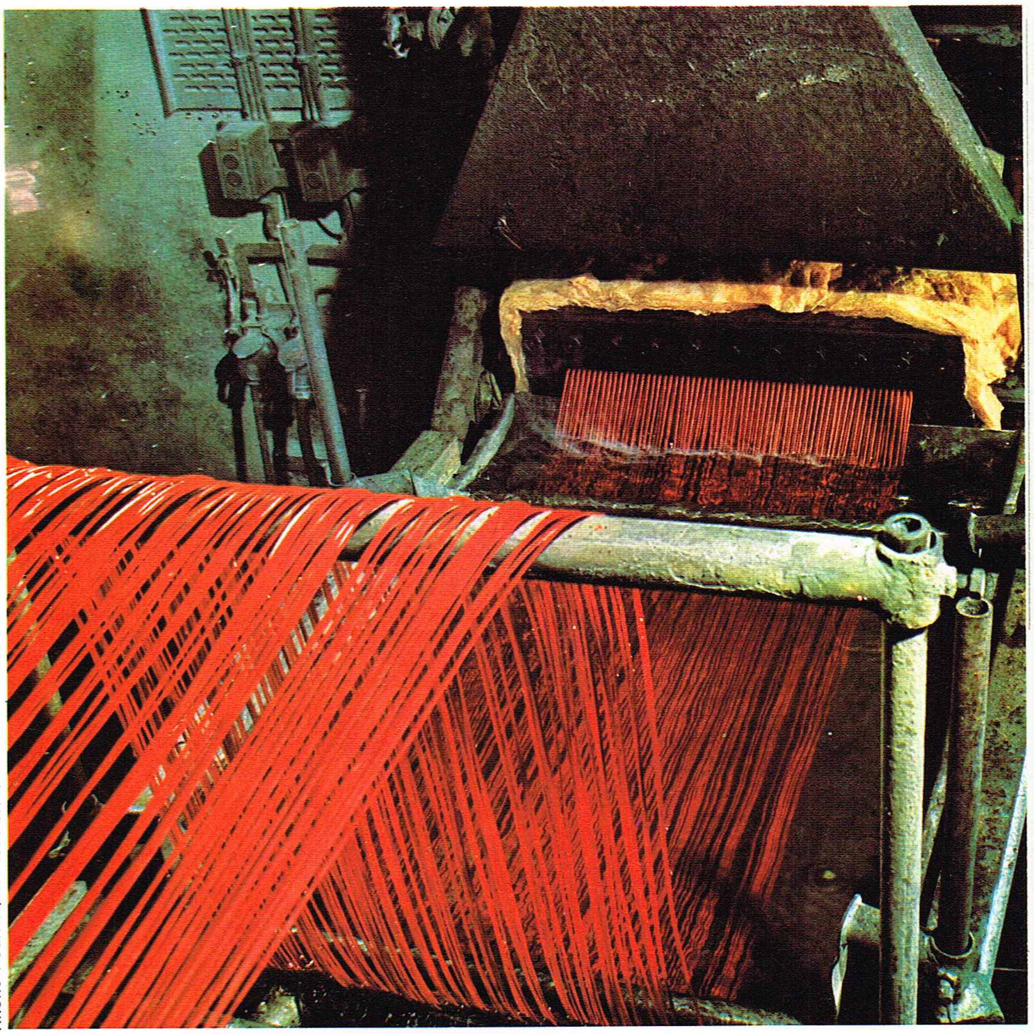

Rhône-Poulenc, service A.T.C.

▲ ***Le polystyrène** résulte de la polymérisation du styrène par un processus radicalaire en suspension ou en masse, en présence d'un peroxyde. Ce matériau plastique est utilisé pour toutes les applications ne nécessitant pas une grande résistance aux chocs, à la flexion ou à la température.*

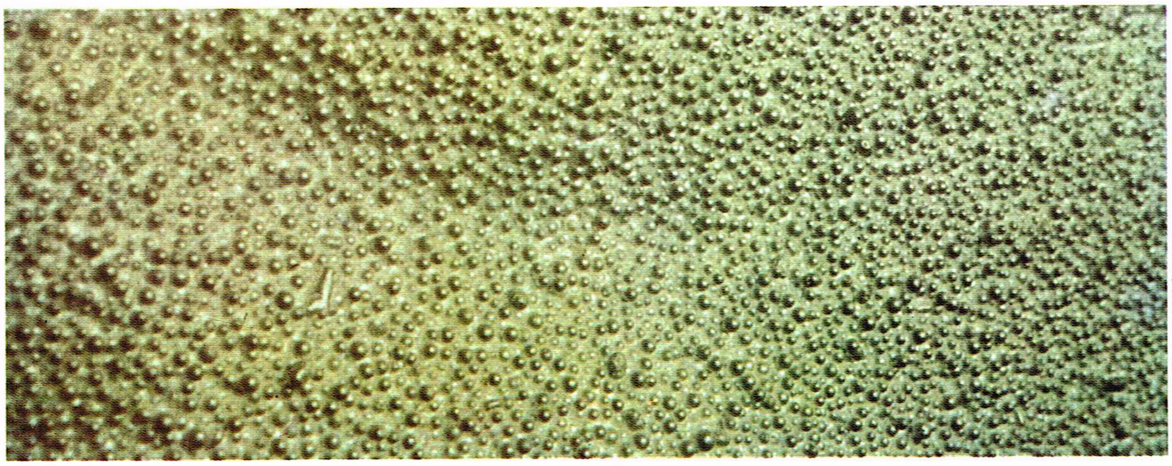

C. Bazin - Ugine Kuhlmann

◀ **Polystyrène pré-expansé :** *on peut préparer du polystyrène expansé en soufflant un gaz inerte dans la masse de polymère fondu.*

C. Bazin - Ugine Kuhlmann

▶ *Le* polychlorure de vinyle *est utilisé en moulage et en extrusion ; ici, des bouteilles en* P. V. C. *pour le conditionnement de certains liquides.*

Les polymères vinyliques

Ce sont des polymères formés par la polyaddition de monomères présentant le groupement vinyle $CH_2 = CH—$ lié à un groupement non hydrocarboné. Le plus important d'entre eux, par les tonnages de production actuelle, est le polychlorure de vinyle.

Polychlorure de vinyle

Le polychlorure de vinyle est obtenu par polymérisation radicalaire du chlorure de vinyle $CH_2 = CH—Cl$. On le désigne parfois par le sigle P. V. C. qui correspond aux trois premières lettres de son nom anglais : Polyvinyl Chloride.

Le monomère est un gaz qui bout à — 14 °C; la polymérisation peut s'effectuer soit en suspension, soit en émulsion, soit en solution.

Dans la polymérisation en suspension, on disperse dans de l'eau des particules sphériques du monomère de dimension assez importante (de l'ordre du millimètre). Le produit après polymérisation et séchage est constitué par des granules.

Lorsque l'on opère en émulsion (grâce à l'emploi d'agents émulsifiants), le polymère après séchage est constitué par une poudre fine.

En solution, le monomère se transforme en polymère ; celui-ci est commercialisé en solution, ou on élimine le solvant pour recueillir le polymère qui est séché et transformé en pastilles.

Le polychlorure de vinyle est un polymère peu cristallin en raison de la nature non régulière de sa structure moléculaire. Il est relativement instable à la chaleur et à la lumière et nécessite des agents stabilisants. Sa décomposition thermique libérant de grandes quantités d'acide chlorhydrique, il pose des problèmes pour l'incinération des ordures ménagères.

Il existe plusieurs types de polychlorure de vinyle : le *P. V. C. rigide* ou *non plastifié* et le *P. V. C. plastifié*, beaucoup plus souple. Dans le P. V. C. plastifié, on ajoute au polymère un ester comme le phtalate d'octyle ou le phtalate d'éthylhexyle, qui, en éloignant les chaînes polymériques les unes des autres, rendent le polymère plus souple. Le polychlorure de vinyle existe aussi sous forme de copolymères avec l'acétate de vinyle ou le chlorure de vinylidène.

Le polychlorure de vinyle est utilisé en moulage et en extrusion. Il est employé pour faire des tubes pour le passage des câbles souterrains, pour réaliser des disques phonographiques, des tuyaux d'arrosage, des tissus imperméables, des revêtements de sols, et aussi pour faire des bouteilles pour le conditionnement de certains liquides.

Polyacétate de vinyle

Le polyacétate de vinyle est obtenu par polymérisation radicalaire en masse, en solution, en suspension ou en émulsion, de l'acétate de vinyle :

$$n\,CH_3—COO—CH = CH_2 \rightarrow (—\underset{\underset{\underset{\underset{\large CH_3}{|}}{C=O}}{|}}{\underset{O}{\overset{}{CH}}}—CH_2—)_n$$

Le polymère est utilisé pour la fabrication de peintures, sous forme d'émulsions dans l'eau. On l'utilise aussi dans les adhésifs. C'est aussi le point de départ de la fabrication de deux polymères que l'on ne peut pas obtenir directement : l'*alcool polyvinylique* et l'*acétal polyvinylique*.

▼ *A gauche, objets en* Plexiglas, *nom commercial du* polyméthacrylate de méthyle, *dont la principale propriété est la transparence. A droite, application du* P. V. C. *par fluidisation.*

I.G.D.A. - Martini

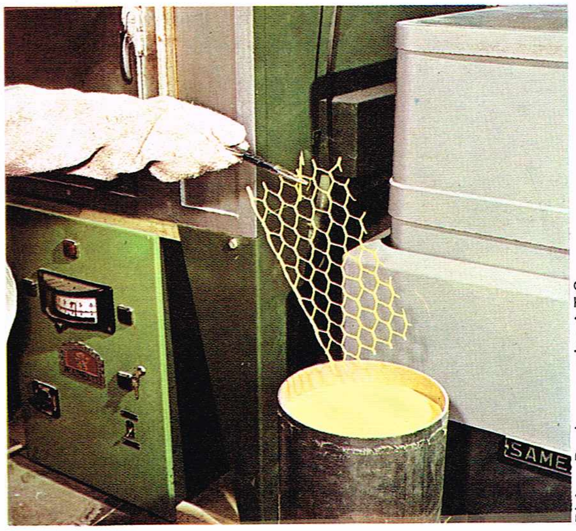

Rhône-Poulenc, service A.T.C.

L'*alcool polyvinylique* est obtenu par alcoolyse du polyacétate de vinyle :

$$(\text{—CH}_2\text{—CH(O—CO—CH}_3)\text{—})_n + n\,\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow (\text{—CH}_2\text{—CH(OH)—}) + n\,\text{CH}_3\text{—C(=O)—O—CH}_3$$

L'alcool polyvinylique n'est pas thermoplastique ; il se décompose au moment de la fusion par perte d'eau. A ce titre, il est utilisé comme agent épaississant dans différentes émulsions. On peut aussi utiliser l'alcool polyvinylique pour faire des fibres textiles. Le polymère est filé à partir d'une solution aqueuse et immédiatement traité par une solution acide contenant du formol. La formation de groupes formal par réaction du formol sur deux fonctions alcool voisines a pour effet de rendre le polymère insoluble. Il suffit que le tiers environ des groupements OH subissent cette réaction pour que la fibre devienne totalement insoluble. Cependant, cette fibre conserve pour l'eau une grande affinité qui lui assure des applications voisines de celles du coton.

Un autre débouché de l'alcool polyvinylique est la fabrication d'*acétals polyvinyliques,* et en particulier du *polyvinylbutyral.* Ce polymère est obtenu en traitant l'alcool polyvinylique par le butyraldéhyde en présence d'acide sulfurique : par réaction avec deux fonctions alcools voisines, il se forme un acétal cyclique :

$$(\text{—CH}_2\text{—CH(OH)—CH}_2\text{—CH(OH)—})_n + n\,\text{C}_3\text{H}_7\text{CHO} \rightarrow (\text{—CH}_2\text{—CH—CH}_2\text{—CH—})_n \text{ (les deux O reliés par CH—C}_3\text{H}_7)$$

Le polyvinylbutyral est utilisé dans la fabrication des vitres de sécurité pour l'automobile. On interpose une pellicule de ce polymère entre deux feuilles de verre et on presse en chauffant pour assurer l'adhésion parfaite.

Les résines acryliques

Il s'agit de composés polymériques pouvant avoir des propriétés très différentes les unes des autres (matières plastiques transparentes, fibres textiles, revêtements, huiles synthétiques). Le point commun est le monomère qui dérive de l'acide acrylique : $\text{CH}_2 = \text{CH—COOH}$. On distinguera :

— les acrylates $\text{CH}_2 = \text{CH—COOR}$

— les méthacrylates $\text{CH}_2 = \text{C(CH}_3\text{)—COOR}$

— et l'acrylonitrile $\text{CH}_2 = \text{CH—C} \equiv \text{N}$.

Polyacrylonitrile

Le polymère de l'acrylonitrile est surtout utilisé comme fibre textile, ainsi que nous le verrons plus loin. En copolymérisation avec le styrène seul ou avec le styrène et le butadiène, il donne des matières plastiques (résines de polystyrène modifiées ou résines ABS), comme on l'a vu précédemment. On le retrouvera aussi dans les élastomères (caoutchouc nitrile).

Polyméthacrylate de méthyle

C'est un plastique transparent, incolore, obtenu par polymérisation en masse ou en suspension en présence de peroxydes ou d'initiateurs diazoïques. C'est un polymère atactique et amorphe. On sait préparer les structures iso- et syndiotactiques, mais elles n'ont pas d'application industrielle. La principale propriété du polyméthacrylate de méthyle (commercialisé sous le nom de Plexiglas) est sa transparence et son absence totale de coloration. Une autre de ses propriétés, mais qui n'a pas d'application pratique, est que la chaleur le dépolymérise avec régénération du monomère. Il a de bonnes propriétés mécaniques et thermiques, mais son principal défaut est sa faible résistance à l'abrasion.

L'automobile utilise beaucoup de ce polymère pour les feux de position et de signalisation, et les cadrans de tableau de bord. On l'utilise aussi pour des panneaux décoratifs, pour l'éclairage intérieur, etc.

On utilise le méthacrylate de méthyle en copolymérisation avec le styrène ou l'α-méthylstyrène pour obtenir des matières plastiques de qualités intermédiaires entre ces deux types de polymères mais moins chères que le polyméthacrylate de méthyle.

Polycyanoacrylate de méthyle

Le cyanoacrylate de méthyle $\text{CH}_2 = \text{C(CN)—COOCH}_3$ est utilisé comme adhésif très puissant. Lorsque l'on applique entre deux pièces à coller une mince couche de ce monomère, sous l'influence catalytique de l'humidité, il polymérise et crée entre les deux surfaces en contact des forces de cohésion extrêmement élevées.

Les autres matières plastiques de polyaddition

Les polymères peuvent résulter de la polyaddition de composés à double liaison carbone-oxygène, d'époxydes, ou de lactames.

Polyoxyméthylène ou polyformaldéhyde

Le polyoxyméthylène est une résine partiellement cristalline obtenue par polymérisation de l'aldéhyde formique :

$$n\,\text{HCHO} \rightarrow (\text{—CH}_2\text{—O—})_n$$

Le mécanisme de la polymérisation est anionique, les catalyseurs sont nombreux (amines, phosphines, etc.), et le polymère doit être stabilisé par action de l'anhydride acétique qui, en acétylant ses groupes terminaux, évite la dépolymérisation du produit avec régénération du monomère. C'est un polymère d'une très grande dureté, d'une grande stabilité dimensionnelle, ayant en outre une excellente résistance à l'abrasion et à la corrosion, et qui peut remplacer les métaux dans certaines applications. Il est commercialisé sous le nom de résine Delrin.

Polyoxyde d'éthylène

On l'obtient par polymérisation de l'oxyde d'éthylène en présence de catalyseurs acides :

$$n\,\text{CH}_2\text{—CH}_2\text{ (pont O)} \rightarrow (\text{—O—CH}_2\text{—CH}_2\text{—})_n$$

C'est un polymère thermoplastique, ayant d'excellentes propriétés mécaniques, et soluble dans l'eau. On utilise ce polymère dans les applications où la solubilité dans l'eau doit être associée à l'aptitude à former des films ou à épaissir un milieu liquide. On l'utilise comme épaississant et stabilisant dans les pâtes et les adhésifs.

Polylactames

Nous verrons ces polymères dans le chapitre des fibres synthétiques. Le cycle lactame s'ouvre sous l'influence d'une base et donne un polyamide. La réaction, d'une manière générale, peut s'écrire :

$$n\left[\begin{matrix}\text{C} = \text{O}\\ |\\ \text{NH}\end{matrix}\right. \longrightarrow (\text{—CO——NH—})_n$$

Les matières plastiques de polycondensation

Les matières plastiques de polycondensation résultent d'une réaction entre groupes terminaux de monomères difonctionnels avec l'élimination d'une molécule d'eau. En général, on utilise deux types de monomères, l'un et l'autre comportant deux groupes terminaux identiques. Mais on peut utiliser un seul monomère dont les deux extrémités portent des fonctions différentes. Si les deux monomères ne comportent que les deux fonctions réactives de leurs extrémités, le polymère est linéaire, mais si l'un au moins des monomères comporte plus de deux groupements réactifs, il peut se produire des réticulations entre chaînes.

Il existe de nombreuses matières plastiques que l'on peut obtenir par polycondensation ; nous n'en traiterons que quelques exemples.

▶ *Unités de fabrication des matières premières pour mousses de* **polyuréthannes.**

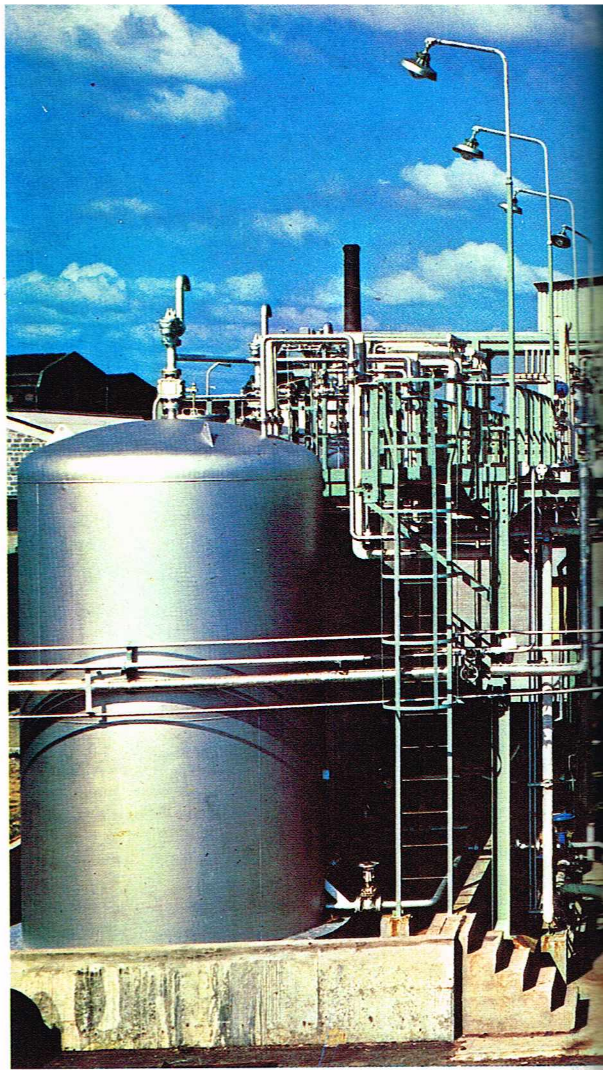

Les résines phénoliques

Elles sont produites par la polycondensation du phénol et du formol catalysée par les acides ou par les bases. Ce sont des résines thermodurcissables. Dans un premier temps, la polycondensation conduit à une chaîne linéaire où des positions libres sur les noyaux benzéniques en ortho et en para permettent une réaction ultérieure avec le formol. On peut charger ces résines avec des pigments, des charges diverses, et il est en outre possible d'opérer leur polycondensation en deux étapes, grâce à l'addition d'hexaméthylènetétramine. Dans une première étape, le formol libre réagit avec le phénol, puis l'addition d'hexaméthylènetétramine permet la réticulation grâce au formol qu'elle libère par chauffage.

Les résines formo-phénoliques sont utilisées pour la fabrication d'objets moulés divers. On peut encore améliorer leurs propriétés en leur ajoutant des charges diverses comme la fibre de verre, l'amiante, etc. On a proposé l'utilisation des résines formo-phénoliques pour le revêtement des cônes de fusées, qui, au moment du retour dans l'atmosphère terrestre, subissent, pendant une durée très brève, des élévations de température très importantes. La plupart des matériaux thermorésistants ne tiennent pas à ces températures, les céramiques fondent, les métaux se vaporisent; par contre, ces polymères, en se décomposant, créent un écran protecteur contre les radiations thermiques.

On utilise aussi, et c'est là une de leurs principales applications, les résines phénol-formol comme colles et adhésifs. On les utilise en particulier pour le bois contreplaqué et pour les panneaux en aggloméré.

Les résines urée-formol et mélamine formol

Ces polymères, parfois groupés sous le nom d'*amino-résines*, sont les produits de réaction de l'urée, ou de la mélamine avec le formol.

Dans le cas de l'urée, la polycondensation donne un réseau tridimensionnel :

$$CO(NH_2)_2 + 2HCHO \rightarrow \text{—NH—CO—}\underset{\substack{|\\ CH_2\\ |}}{\text{N}}\text{—}CH_2\text{—}$$

avec de la mélamine (trimère de la cyanamide), on a :

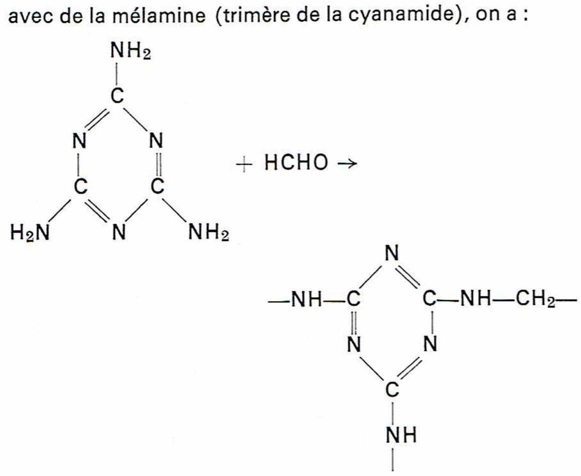

Ces matières plastiques présentent sur les résines formo-phénoliques l'avantage d'être incolores et de pouvoir être teintées grâce à des pigments appropriés. Leurs propriétés mécaniques sont supérieures à celles des résines formol-phénol. On les utilise surtout pour faire des objets moulés.

Les polyuréthannes

Ce sont des polymères caractérisés par le groupement :

$$\text{—NH—}\overset{\substack{O\\ \|}}{C}\text{—O—}$$

qui se forme lorsque l'on fait agir un di-isocyanate sur un glycol :

$$n\,O = C = N\text{—}X\text{—}N = C = O + n\,HO\text{—}Y\text{—}OH \rightarrow (\text{—OCONHXNH—COOY—})_n$$

Ces polymères peuvent conduire à des fibres, des élastomères et des mousses. Les mousses de polyuréthannes sont formées en incorporant de l'eau au moment de la polymérisation. L'eau réagit sur l'acide carbamique formé intermédiairement, et il se dégage du gaz carbonique qui transforme la masse du polymère en une mousse légère et souple. On peut, selon le type de polymère utilisé et l'importance de la réticulation, obtenir des mousses souples ou rigides. Les mousses de polyuréthanne souples trouvent des applications de plus en plus nombreuses dans les coussins, banquettes de voitures, etc. Les mousses rigides sont utilisées pour l'isolement thermique, pour augmenter la flottabilité des embarcations, etc.

Les polymères de silicones

Ce sont des polymères dont la chaîne principale est formée de liaisons siloxane : —Si—O—Si— analogues à celles que l'on trouve dans les silicates. Cette analogie explique la tenue des silicones à la chaleur. Sur les atomes de silicium sont fixés des groupements hydrocarbonés, le plus souvent méthyle ou phényle. Les mono-

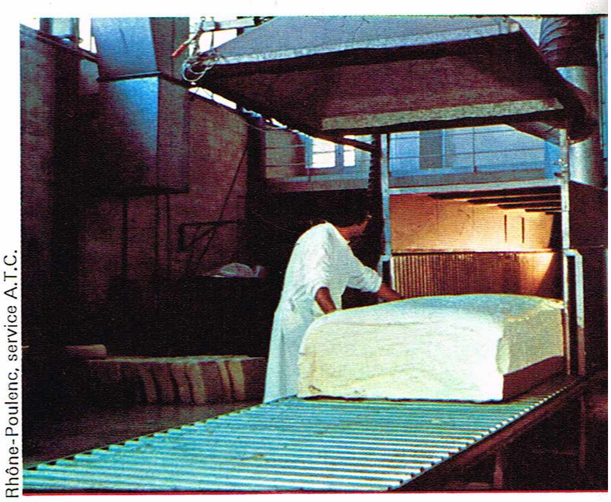

Rhône-Poulenc, service A.T.C.

▶ ***Atelier des applications de* polyuréthannes*; ces polymères peuvent conduire à des fibres, des élastomères et des mousses. Ici, un bloc de polyuréthanne.***

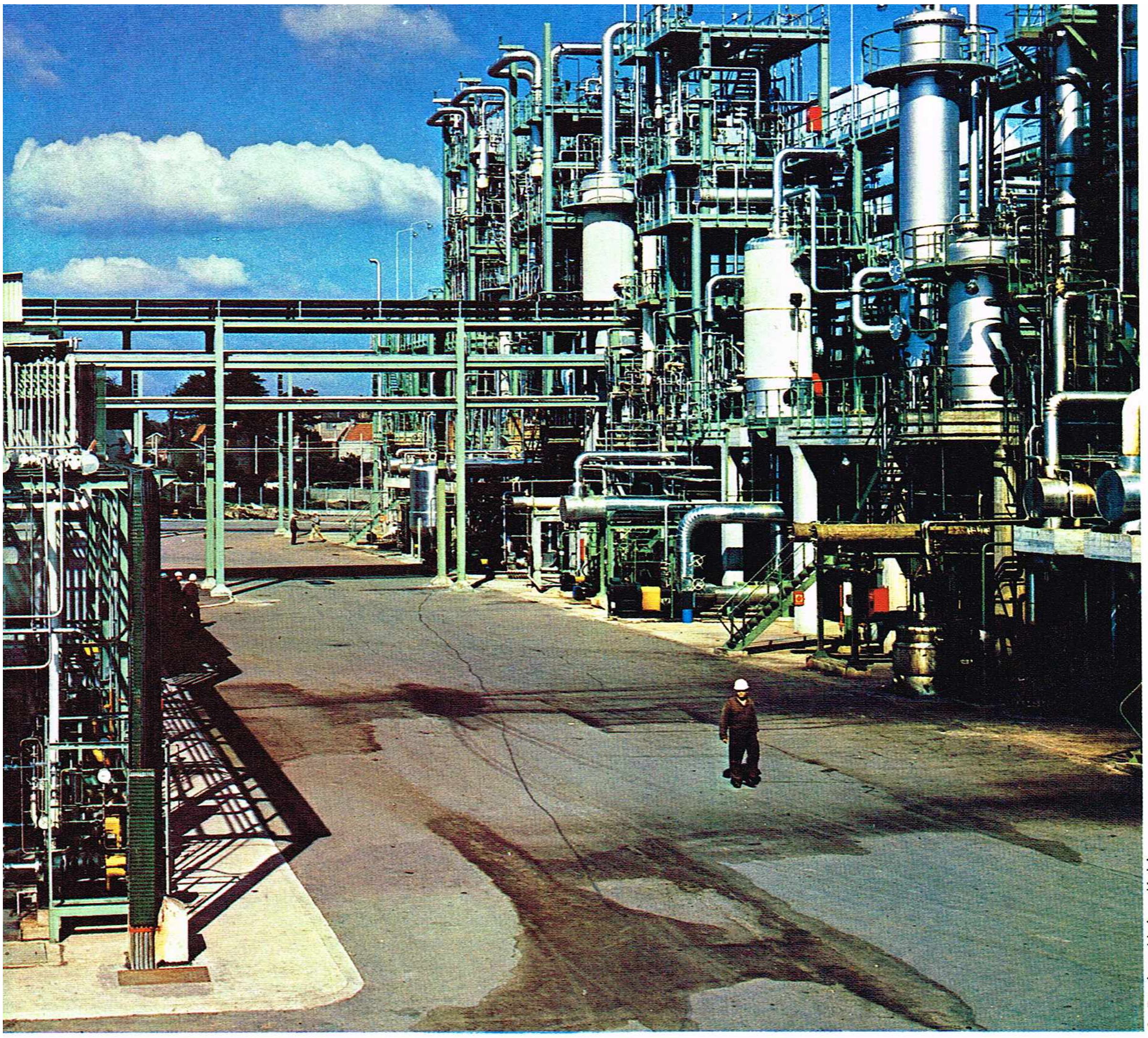

C. Bazin - Ugine Kuhlmann

mères des silicones sont des chloro-organosilanes du type R_2SiCl_2; on utilise aussi, pour bloquer les chaînes et stabiliser les masses moléculaires R_3SiCl et pour créer des branchements et des réticulations, $RSiCl_3$. La synthèse de ces monomères est très onéreuse, bien que partant d'un matériau bon marché, le sable (SiO_2). La silice doit être d'abord transformée en silicium à la température de l'arc électrique, puis le silicium transformé en alkylchlorosilane, soit directement à 250 °C en présence de catalyseur par action de CH_3Cl, soit, dans le cas des phénylchlorosilanes, en passant par les composés organomagnésiens. On distingue les huiles de silicones obtenues par hydrolyse des diméthylchlorosilanes et polycondensation des diméthylsilanediols résultants :

$$Cl{-}\underset{CH_3}{\overset{CH_3}{Si}}{-}Cl \xrightarrow{H_2O} HO{-}\underset{CH_3}{\overset{CH_3}{Si}}{-}OH$$

$$\rightarrow CH_3{-}\underset{CH_3}{\overset{CH_3}{Si}}{-}O{-}\left[{-}\underset{CH_3}{\overset{CH_3}{Si}}\;O{-}\right]_n{-}\underset{CH_3}{\overset{CH_3}{Si}}{-}CH_3$$

Les chaînes sont stabilisées aux extrémités par des triméthylchlorosilanes. Ces huiles résistent à plus de 200 °C, et leur viscosité varie peu avec la température. On les utilise aussi comme agents antimousse et comme agents de démoulage. Par addition de savons métalliques, on en fait des graisses. Les élastomères de silicone ont la même structure moléculaire que les huiles, mais leur masse moléculaire est plus élevée. Ces élastomères conservent leur élasticité jusqu'à environ — 100 °C. On les renforce parfois par de la silice en poudre. Les résines de silicones, réticulées par chauffage entre 150 et 250 °C, peuvent supporter en continu des températures de 180 °C, et pendant quelques instants des températures atteignant 350 °C. On les utilise comme isolants électriques, on en fait des peintures et des vernis, enfin on les utilise comme agents hydrofuges, pour les tissus par exemple.

Les polycarbonates

Ce sont des polyesters obtenus par action du phosgène sur le bisphénol A, en présence de soude ou de pyridine :

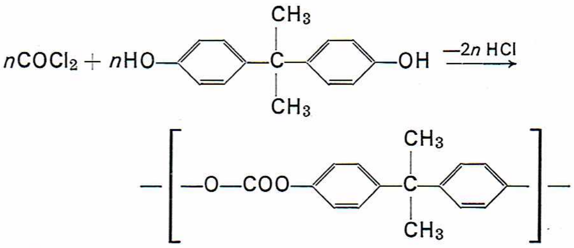

Ce sont des résines thermoplastiques transparentes ayant une bonne résistance aux chocs et à la chaleur, une bonne stabilité dimensionnelle et qui sont self-extinguibles. On en fait surtout des pièces mécaniques, et on les utilise dans l'industrie électrique.

▼ ***Les élastomères de silicone conservent leur élasticité jusqu'à environ — 100 °C. On les utilise comme isolants électriques, agents hydrofuges, etc. ; on les façonne également en moules.***

Rhône-Poulenc, service A.T.C.

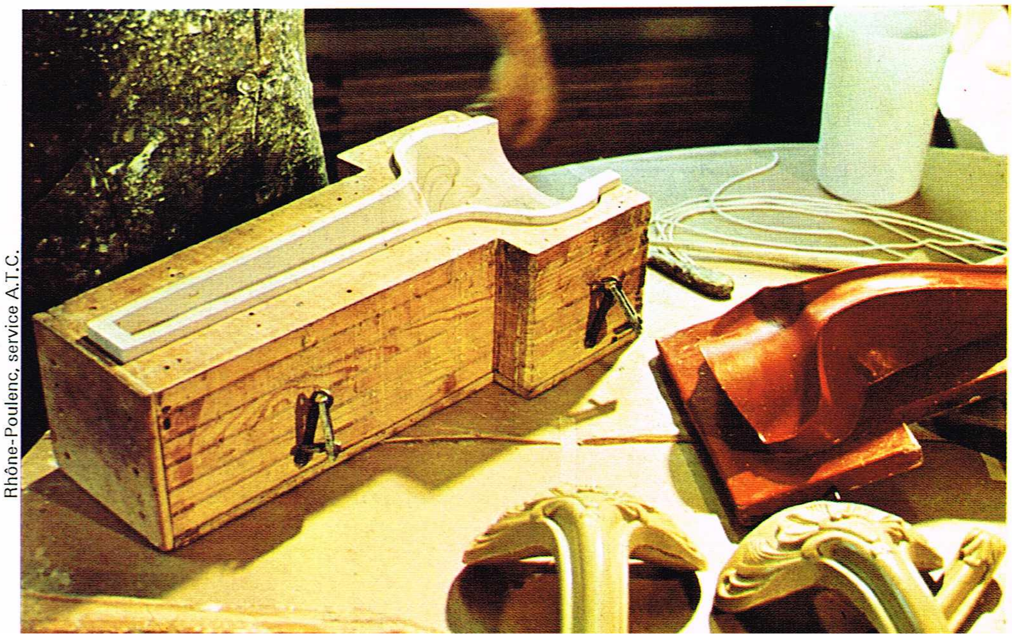

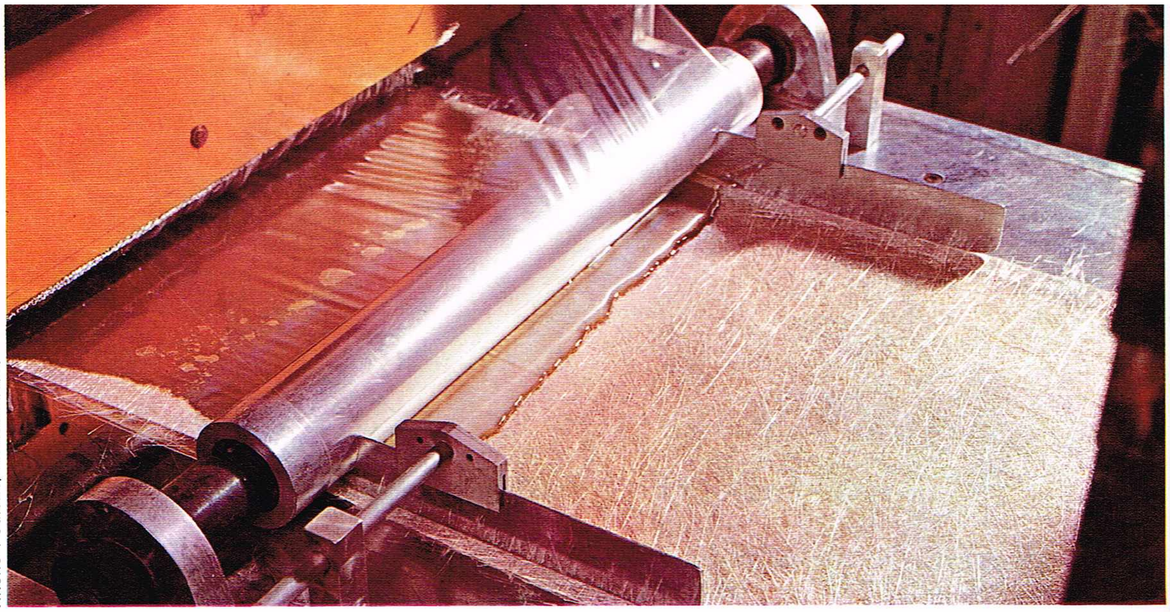

Rhône-Poulenc, service A.T.C.

▶ *Atelier pilote de* polyester *stratifié préimprégné.*

Rhône-Poulenc, service A.T.C.

▶ *Les* résines polyesters *sont généralement renforcées par la fibre de verre et ont permis la création d'un matériau nouveau qui réunit l'inaltérabilité de l'acier inoxydable, la légèreté de l'aluminium et la translucidité du verre : on en fait des toitures, des carrosseries, des coques de bateaux, etc.*

Les résines époxydes

Ce sont des polyéthers mais elles doivent leur nom à l'un des monomères qui leur donne naissance, l'*épichlorhydrine* $Cl{-}CH_2{-}CH{-}CH_2$ (les deux derniers carbones reliés par un O) qui est un époxyde ; l'autre monomère est le *bisphénol A*.

On utilise un excès d'épichlorhydrine et on opère en milieu basique. On obtient un produit du type :

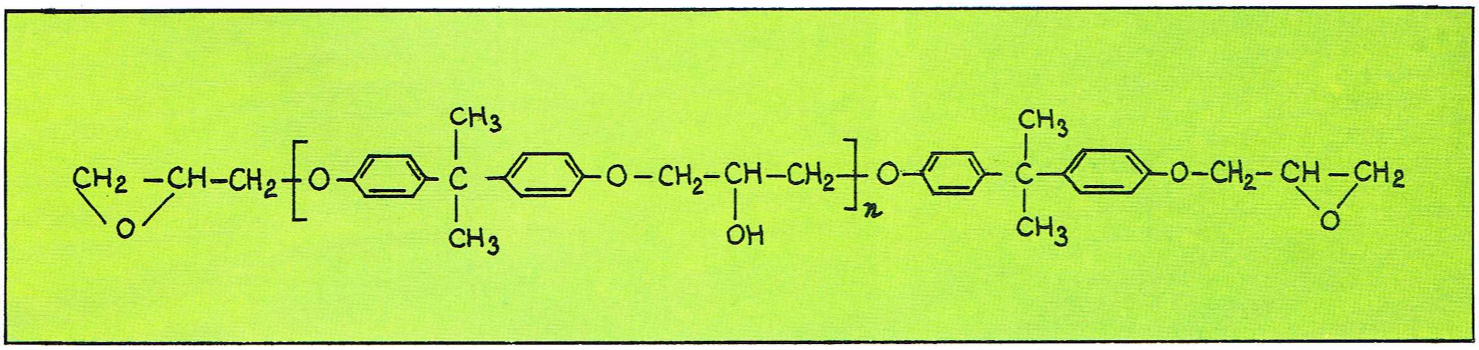

Richard Colin

▼ *Formule linéaire d'une* résine époxyde.

Selon la valeur de *n*, il s'agit d'un liquide visqueux ou d'un solide à haut point de fusion. Ces résines peuvent être réticulées et rendues infusibles et insolubles par l'addition d'amines et de polysulfures de basse masse moléculaire (résines Araldite, Épikote, Épon, etc.). On les utilise comme adhésifs et comme matière plastique chargée avec de la laine de verre dans les installations électriques, par exemple.

Les résines polyesters

Ce sont des matières plastiques résultant de la polycondensation d'un diacide avec un diol. On distingue les polyesters linéaires thermoplastiques, les polyesters linéaires insaturés, et par conséquent réticulables, enfin, les polyesters tridimensionnels.

Dans la première catégorie, on peut citer le polytéréphtalate d'éthylène glycol dont il sera question à propos des fibres textiles et qui résulte de l'action du téréphtalate de méthyle sur le glycol. On en fait des films extrudés qui, refroidis rapidement et ensuite orientés dans deux directions, ont d'excellentes propriétés mécaniques. On les utilise dans les bandes magnétiques.

Les polyesters insaturés résultent de l'utilisation de diacides insaturés comme l'anhydride maléique. On réalise une solution dans le styrène d'un polyester insaturé, par exemple, un polymaléate, polyphtalate d'éthylène glycol. On réalise ensuite la copolymérisation des groupements non saturés du polyester avec le styrène, et cela grâce à l'addition d'un peroxyde. Cette polymérisation peut être réalisée à la température ordinaire en ajoutant du naphténate de cobalt.

Ces polyesters sont généralement renforcés par de la laine de verre ou des tissus de verre. On les utilise dans l'automobile, pour réaliser des coques de bateaux de petite taille, etc.

Les polyesters tridimensionnels sont obtenus par polycondensation de polyols et de polyacides, dont au moins l'un des deux est porteur de plus de deux fonctions.

Les résines glyptal ou glycérophtaliques

Elles sont obtenues par polycondensation de la glycérine avec l'anhydride phtalique. On utilise ces résines dans les peintures dites glycérophtaliques. Les résines glycérophtaliques sont voisines des *résines alkydes*, dans lesquelles, outre la glycérine et l'anhydride phtalique, on trouve comme monomères d'autres diacides, tels les acides isophtalique, maléique, adipique, succinique, et d'autres polyalcools comme le pentaérythritol.

Les fibres textiles

Les textiles obtenus par voie chimique comprennent les textiles artificiels et les textiles synthétiques.

Les textiles artificiels

Les *textiles artificiels* sont obtenus à partir d'un produit naturel, la cellulose, que l'on modifie chimiquement ou que l'on régénère pour l'obtenir sous une forme filable.

Viscose

On désigne sous ce nom des fils continus, également appelés **rayonne**, ou discontinus **(fibranne)**, en cellulose régénérée par le procédé viscose. Dans ce procédé, la cellulose traitée par la soude (alcali-cellulose) est ensuite traitée par du sulfure de carbone. Il se forme un produit soluble dans un excès de soude : le *xanthate de cellulose*. Cette solution passe à travers une filière et arrive dans un bain acide qui provoque la régénération de la cellulose sous forme de filaments.

Acétate de cellulose

On désigne sous le nom d'acétate des fils continus à base d'acétate de cellulose soluble dans l'acétone. Ces fils sont obtenus en traitant la cellulose par l'anhydride acétique, puis en faisant subir à l'acétate une hydrolyse partielle pour rendre le produit soluble dans l'acétone. La solution d'acétate de cellulose dans l'acétone est envoyée au travers des orifices d'une filière dans une chambre d'évaporation pour en éliminer l'acétone.

Triacétate de cellulose

Le triacétate de cellulose est obtenu par estérification complète de la cellulose par l'anhydride acétique. Le filage se fait alors à sec.

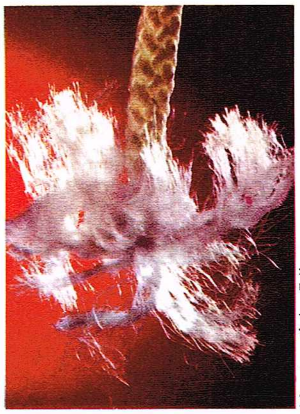

Montecatini - Edison

▲ *Corde tressée en fils de* **rayonne.**

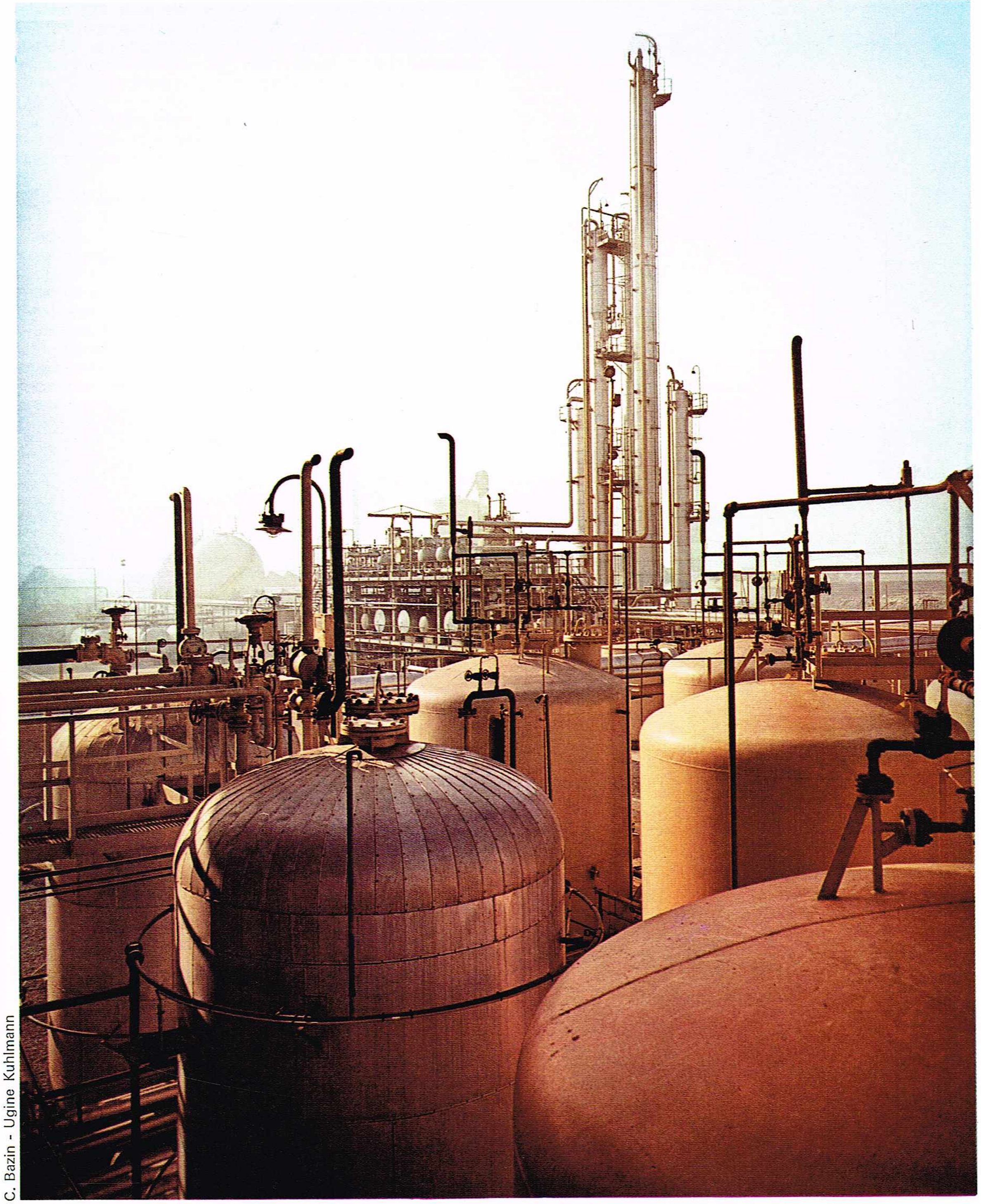

C. Bazin - Ugine Kuhlmann

◀ *Réacteurs de fabrication* **des polyéthers;** *on utilise ces résines comme adhésifs et comme matières plastiques.*

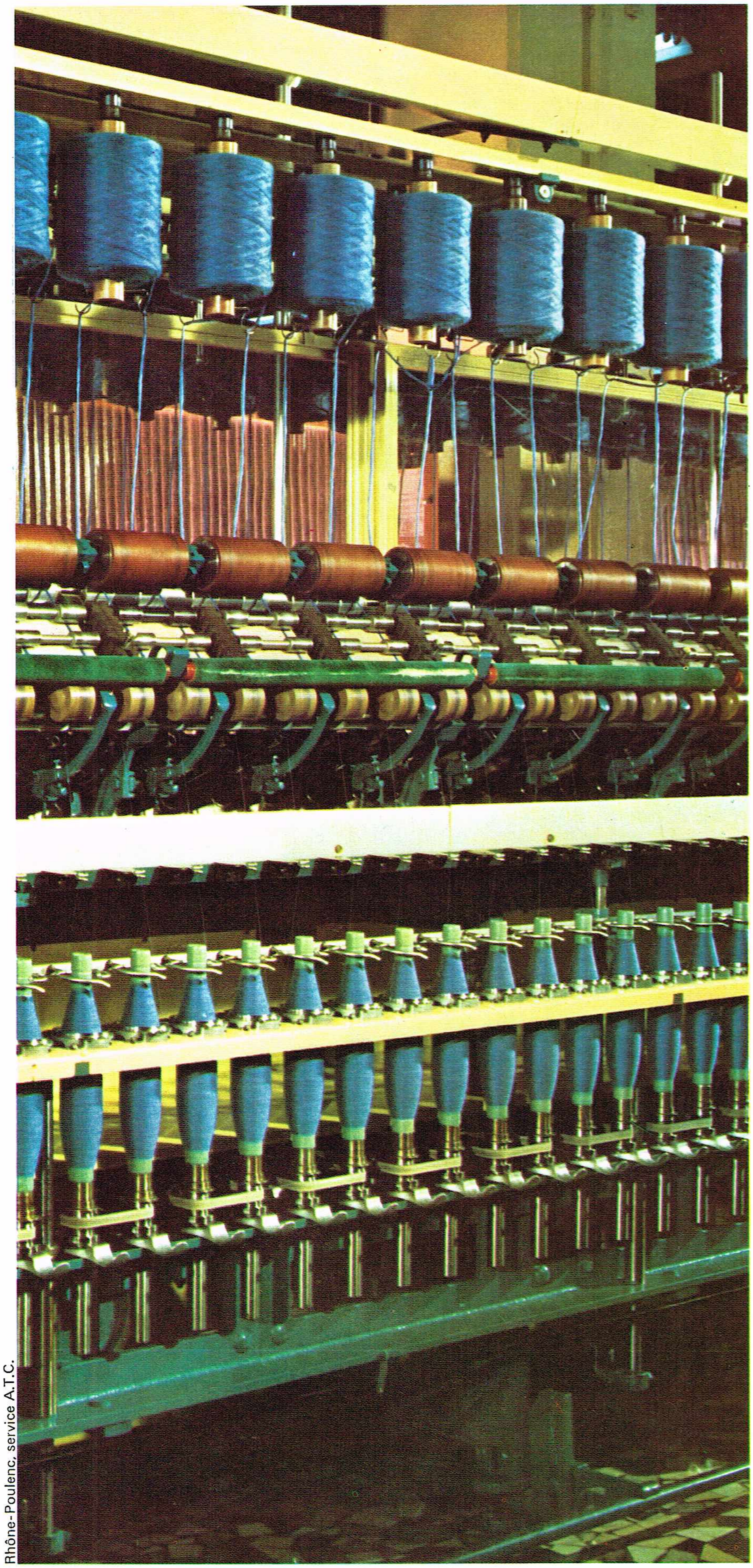

Rhône-Poulenc, service A.T.C.

Les textiles synthétiques

Fibres acryliques

Ce sont des fibres à base de polyacrylonitrile. D'autres monomères comme l'acétate de vinyle, le chlorure de vinyle ou de vinylidène sont copolymérisés avec l'acrylonitrile qui est le monomère majoritaire (85 % environ). La polymérisation de l'acrylonitrile se fait en solution dans l'eau grâce à un initiateur rédox. Le polymère précipite sous forme de poudre. Des solvants énergiques comme le diméthylformamide ou le sulfolane sont nécessaires pour dissoudre ce polymère et permettre son filage. Les fibres de polyacrylonitrile sont très résistantes, relativement insensibles à l'humidité et inattaquées par les produits chimiques, les Insectes, les Champignons. L'homopolymère de l'acrylonitrile donne des fibres ressemblant à la laine (Orlon, Crylor, Dralon, etc.). On l'utilise aussi dans les applications où son insensibilité à l'humidité et à la lumière le désigne particulièrement (rideaux, tentes, tissus d'ameublement). Par chauffage de fibres de polyacrylonitrile à l'air, on peut obtenir des fibres résistant à des températures voisines de 600 °C. La structure du polymère issu de la pyrolyse serait la suivante :

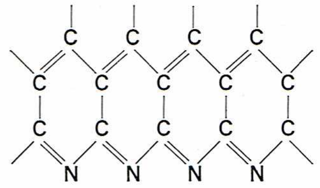

Chlorofibres

Ce sont des fils continus et des fibres discontinues fabriquées à partir de polychlorure de vinyle. Le filage se fait par dissolution du polychlorure de vinyle dans un solvant, passage dans une filière et évaporation du solvant. Le solvant utilisé est un mélange de sulfure de carbone et d'acétone. Les tissus en chlorofibre (Rhovyl, Clevyl, etc.) sont ininflammables et résistent bien aux agents chimiques (on les utilise comme tissus filtrants, blouses de laboratoire, tissus d'ameublement). Généralement, ces tissus ont une mauvaise tenue au-dessus de 80 °C, sauf certaines qualités traitées pour résister jusqu'à 100 °C.

Polyamides

Il s'agit de fibres synthétiques caractérisées par la présence dans leurs chaînes macromoléculaires de fonctions amides —CO—NH— séparées par un nombre variable de groupements $—CH_2—$ selon les monomères qui leur ont donné naissance. Les polyamides peuvent être obtenus par polycondensation d'un diacide avec une diamine ou par polyaddition d'un lactame.

Nylon 66

On l'obtient par polycondensation de l'acide adipique avec l'hexaméthylène diamine :

$$n\,HOOC—(CH_2)_4—COOH + n\,H_2N—(CH_2)_6—NH_2 \rightarrow (—CO\,(CH_2)_4—CO—NH—(CH_2)_6—NH—)_n$$

On prépare d'abord le sel du diacide et de la diamine, on le met en solution dans l'eau et on le porte dans un autoclave dont on augmente la température pour chasser l'air et l'eau. On opère la condensation à la pression atmosphérique à 280 °C. Le Nylon est extrudé à la base du réacteur grâce à une surpression d'azote. L'extrusion du polymère fondu à travers les orifices d'une filière donne des filets liquides qui se solidifient par refroidissement à l'air.

Le Nylon est caractérisé par une considérable résistance à la traction, qui peut atteindre 90 kg/mm². Il résiste à l'usure. Il résiste bien aux alcalins. On l'utilise pour de nombreux tissus, on en fait des cordages, des filets de pêche et des toiles pour les pneus.

Nylon 6

On l'obtient par polyaddition du caprolactame. Ses propriétés sont assez voisines de celles du Nylon 66, bien qu'il fonde plus bas. Le point de fusion cristalline du Nylon 66 est 250 °C, celui du Nylon 6 est 215 °C.

Nylon 11

Le Nylon 11 ou Rilsan est fabriqué à partir de l'huile de ricin qui est très riche en acide ricinoléique. Par craquage

thermique de cet acide, on forme de l'heptanal (ou œnanthol) et de l'acide undécylénique. Ce dernier, en présence de peroxydes, additionne l'acide bromhydrique en sens inverse de celui que fixe la règle de Markownikoff :

$$CH_2 = CH—(CH_2)_8—COOH + BrH \rightarrow BrCH_2—(CH_2)_9—COOH$$

On traite enfin l'acide bromo-undécanoïque par l'ammoniac :

$$BrCH_2—(CH_2)_9—COOH + NH_3 \rightarrow H_2N—(CH_2)_{10}—COOH + HBr$$

La polycondensation se fait par chauffage direct de l'aminoacide vers 220 °C. Ce type de Nylon est moins sensible à l'eau que les autres Nylons, en raison de son caractère plus paraffinique. Son point de fusion cristalline n'est que de 185 °C.

Polyesters

La polycondensation de l'acide téréphtalique avec l'éthylène glycol donne une fibre synthétique qui a été inventée en Angleterre par I. C. I. en 1950 et lancée sous la marque Térylène. En France, le polytéréphtalate d'éthylène glycol est commercialisé sous le nom de Tergal.

L'acide téréphtalique étant difficile à purifier, on préfère utiliser le téréphtalate de méthyle et réaliser la transestérification avec le glycol :

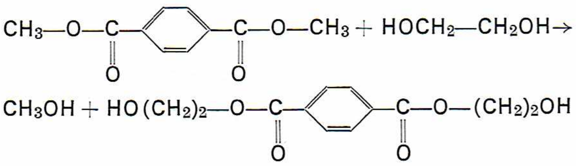

C'est ce téréphtalate de diβ-hydroxyéthyle qui, chauffé ensuite vers 280 °C, fournit le polymère avec élimination de glycol.

Les caoutchoucs synthétiques

Alors que les matières plastiques et les fibres synthétiques sont constituées de macromolécules rigides et très souvent cristallines, les élastomères doivent être formés de molécules amorphes à l'état non étiré et doivent être utilisés au-dessus de leur température de transition vitreuse. Par ailleurs, un certain degré de réticulation entre les chaînes est nécessaire pour éviter un glissement excessif des chaînes qui conduirait à la rupture. On réalise ce faible degré de réticulation par le procédé de vulcanisation.

La plupart des caoutchoucs synthétiques sont obtenus par polymérisation de diènes conjugués (polydiènes).

Caoutchouc naturel

Le caoutchouc naturel extrait de l'*Hevea brasiliensis* a la structure du polyisoprène cis 1,4, bien que l'arbre ne parte pas d'isoprène pour synthétiser son latex.

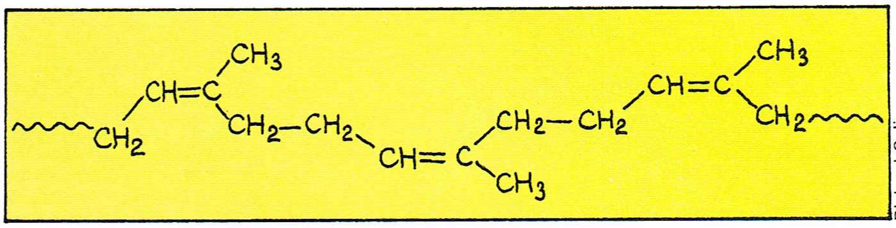

Richard Colin

▲ *Structure* **du polyisoprène cis 1,4,** *ou caoutchouc naturel.*

Grâce aux doubles liaisons subsistant dans la chaîne, on peut réaliser, à chaud en présence d'accélérateurs, la vulcanisation par le soufre. Dans la vulcanisation, selon les « recettes » utilisées, on emploie de 0,5 à 5 parties de soufre pour 100 parties de monomère (en masse). Si l'on utilise une quantité de soufre plus grande (30 à 50 %), on obtient une matière plastique non élastique et au contraire dure et rigide, c'est l'*ébonite*.

◀ *Page ci-contre, l'usine Rhône-Poulenc-Textile de Lyon-Vaise file des* **textiles artificiels** *et* **synthétiques.**

Rhodiacétate

◀ *Filature* **de fibres polyamides.** *Le filage s'opère par extrusion : le polymère, à l'état solide, est porté à sa température de fusion (300 °C), puis est extrudé à travers une filière.*

Le développement des catalyseurs stéréospécifiques découverts par K. Ziegler et G. Natta a permis de synthétiser le polyisoprène cis 1,4 et, par conséquent, de reproduire les qualités du caoutchouc naturel. Le catalyseur utilisé pour la synthèse du polyisoprène est le produit de réduction du tétrachlorure de titane par un alkylaluminique, mais on peut aussi utiliser le butyllithium.

La polymérisation de l'isoprène en trans 1,4 ne conduit plus à un élastomère mais à une résine dont la structure moléculaire correspond à la *gutta-percha* ou au *balata*. On peut réaliser des élastomères de synthèse à partir d'un monomère plus facilement accessible que l'isoprène, il s'agit du butadiène.

S. B. R. (ou Styrene Butadiene Rubber)

Le S. B. R. (ou Styrene Butadiene Rubber) est le plus important des élastomères dérivant du butadiène. Son développement a commencé aux États-Unis durant la Seconde Guerre mondiale où il était fabriqué sous le nom de G. R. S. (Government Rubber Styrene). Il s'agit d'un copolymère du butadiène et du styrène obtenu par polymérisation en émulsion. Il ne s'agit donc pas d'un polymère stéréorégulier, mais d'un polymère où la statistique a présidé à la répartition dans une même chaîne de polybutadiène 1,4 cis, 1,4 trans, 1,2, et de polystyrène.

Le S. B. R. n'a pas toutes les qualités du caoutchouc naturel ; il présente une résilience (absence de déformation rémanente après élongation) et une résistance à l'échauffement plus faibles. Sa résistance à l'ozone est supérieure à celle du caoutchouc naturel. Le S. B. R. est un excellent élastomère pour les pneus d'automobiles. Pour les pneus de camions ou d'avions, sa résistance à l'échauffement est trop faible et lui fait préférer d'autres caoutchoucs. Mais le S. B. R. n'est pas uniquement utilisé pour la fabrication des pneus, on en fait de nombreux objets (semelles de chaussures, courroies, objets extrudés, isolants électriques, etc.).

Caoutchouc nitrile

Il s'agit d'un copolymère du butadiène et de l'acrylonitrile, préparé en émulsion par des techniques similaires à celles du S. B. R. Le caoutchouc nitrile est particulièrement désigné dans les applications qui nécessitent une résistance aux hydrocarbures (essence, pétrole brut, etc.). On l'utilise pour les tubulures devant conduire de l'essence, les réservoirs de combustible hydrocarboné, etc.

Polybutadiène cis 1,4

Il s'agit d'un élastomère obtenu par polymérisation stéréorégulière du butadiène. Il n'a pas toutes les qualités du caoutchouc naturel ni du polyisoprène, mais il est intéressant en mélange avec le caoutchouc naturel. On le polymérise par les catalyseurs Ziegler-Natta. Sa structure est celle du caoutchouc naturel sans groupements méthyle sur les doubles liaisons de la chaîne :

▶ *Structure linéaire* **du polybutadiène cis 1,4.**

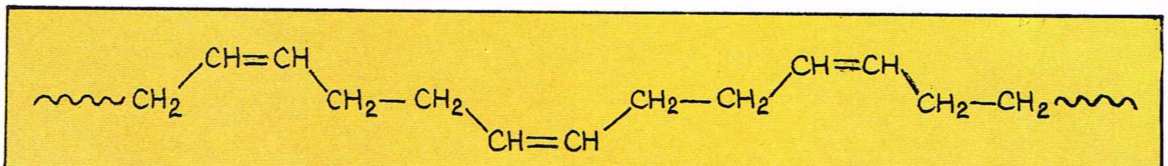

Mais il n'est pas nécessaire d'utiliser des diènes conjugués (butadiène ou isoprène) pour obtenir des élastomères. Il existe des polyoléfines dont les propriétés sont celles d'élastomères. La condition nécessaire pour qu'une polyoléfine soit un élastomère est que sa chaîne soit suffisamment souple et que son aptitude à cristalliser ne se manifeste qu'à l'allongement. Ainsi, le polymère de l'isobutène est un élastomère.

Caoutchouc butyl

Le caoutchouc butyl est obtenu par polymérisation cationique de l'isobutène en présence de chlorure d'aluminium vers — 100 °C. Les polymères de basse masse moléculaire sont utilisés comme adhésifs. Les polymères de haute masse moléculaire ne pouvant être vulcanisés par le soufre, comme les élastomères de diènes, on doit y ajouter au moment de leur polymérisation une petite quantité (1,5 à 4,5 %) d'isoprène dont les doubles liaisons résiduelles permettent l'action du soufre. C'est ainsi que le caoutchouc butyl est obtenu. Sa principale qualité est son imperméabilité aux gaz, et en particulier aux gaz constituant l'air, d'où son emploi dans la fabrication des chambres à air. Il doit en outre être stabilisé, car il est très sensible à la chaleur et à la lumière. On l'utilise aussi pour l'isolement des fils et des câbles électriques.

E. P. D. M. (ou Ethylene-Propylene Diene Modified)

L'E. P. D. M. est un copolymère éthylène-propylène avec une petite quantité d'un diène destiné à en permettre la vulcanisation. D'où son nom (Ethylene-Propylene Diene Modified). Les catalyseurs utilisés sont des complexes du type Ziegler-Natta. Alors que le polyéthylène seul ou le polypropylène seul sont des polymères cristallins, leur copolymérisation par un système soluble fournit un produit amorphe et à propriétés élastomériques. La polymérisation ne laissant pas subsister d'insaturation, on doit, comme dans le cas du caoutchouc butyl, ajouter un diène. Ce diène ne peut être ni l'isoprène ni le butadiène, car, en présence des systèmes Ziegler-Natta, ils ne seraient pas copolymérisés avec les oléfines, on utilise des diènes particuliers, tel le cyclo-octadiène-1,5, qui permettent la vulcanisation ultérieure par leur double liaison restante. La grande qualité de l'E. P. D. M. est sa forte résistance à l'oxydation. Il s'agit d'un polymère récent, dont les applications se développent chaque année.

Néoprène

Il s'agit d'un élastomère obtenu par polymérisation en émulsion du chloroprène (chloro-2 butadiène-1,3). On obtient le monomère par addition d'acide chlorhydrique au divinyl acétylène ou par addition de chlore au butadiène suivie de déchlorhydratation. La vulcanisation du néoprène se fait par simple chauffage. La résistance du néoprène aux hydrocarbures est excellente mais inférieure à celle du caoutchouc nitrile. Les propriétés dynamiques de ce caoutchouc sont supérieures à celles de tous les autres, sauf le caoutchouc naturel. Il résiste bien aux intempéries et à l'ozone. C'est donc un élastomère excellent, mais il est défavorisé dans les applications de grand tonnage par son prix plus élevé que celui des autres élastomères.

Il faudrait ajouter, pour être complet, tous les traitements que l'on doit faire subir aux élastomères pour les rendre aptes aux applications auxquelles on les destine. En effet, la gomme brute n'a pas en général de bonnes propriétés, et, au moment de la vulcanisation, on doit mélanger dans un appareil spécial (Banbury), outre le soufre, un accélérateur de vulcanisation, un régulateur de vulcanisation, un antioxydant, etc. De plus, on renforce les caoutchoucs avec du carbone finement divisé appelé « carbon black », et on les « étend » par addition d'huile minérale.

LES DÉTERGENTS

Ce sont des composés organiques appartenant à une famille plus large de composés chimiques, les *agents tensio-actifs*. Il s'agit de produits ayant la propriété de se concentrer aux interfaces, de s'étendre et de s'orienter pour former un film continu. Cette propriété amène à la réduction de la tension superficielle, d'où la formation de mousses, et on utilise ces composés pour toutes les opérations ménagères ou industrielles où il s'agit d'éliminer, en milieu aqueux, les salissures présentes sur toute forme de support.

Le détergent connu depuis l'Antiquité est le *savon*. Il s'agit des sels de sodium (ou de potassium) d'acides gras résultant de la saponification des huiles et des graisses. Les savons présentent des inconvénients : ainsi, lors-

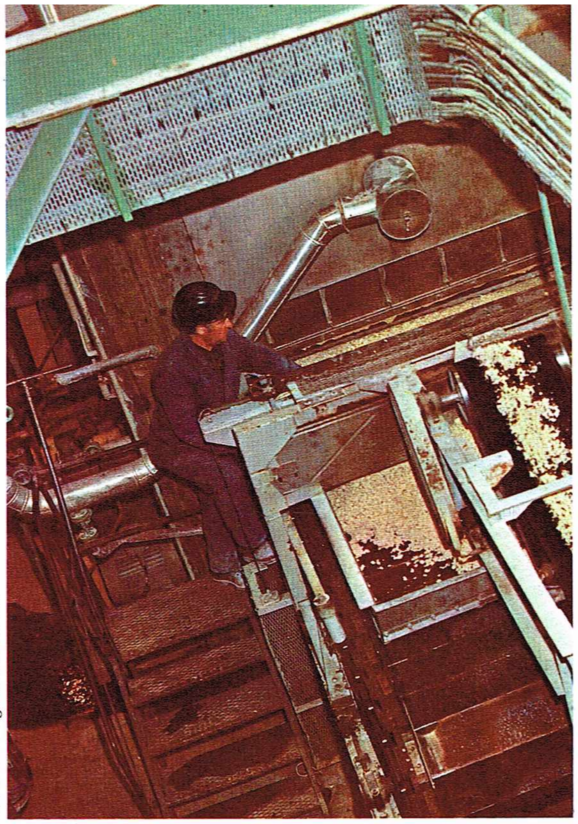

C. Bazin - Ugine Kuhlmann

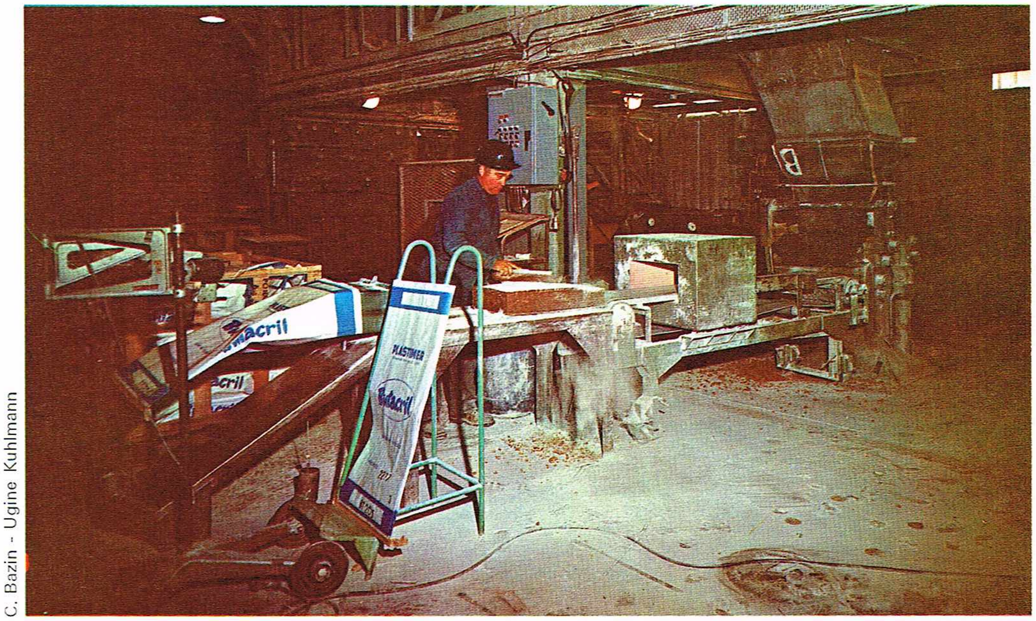

C. Bazin - Ugine Kuhlmann

▲ ***Fabrication de* caoutchouc synthétique :**
à gauche, entrée du tunnel de séchage;
à droite, le produit fini.

qu'on les utilise dans des eaux dures, ils précipitent sous forme de sels de calcium et de magnésium ; par ailleurs, leur production industrielle, tributaire de matières animales ou végétales dont l'approvisionnement et les prix sont très variables, a favorisé le développement de détergents synthétiques. Dès le début du XXe siècle, on avait utilisé des sulfates d'alcools gras à longue chaîne comme succédanés du savon, mais c'est essentiellement pendant et après la Seconde Guerre mondiale que, devant l'essoufflement relatif de l'industrie savonnière malgré le procédé continu lancé en 1934, devant la pénurie d'alcools et d'acides gras, la pétrochimie prit un essor considérable dans ce domaine avec la fabrication de nouvelles matières de base : alkylbenzènes, alkylphénols et alcools gras de synthèse.

En 1948, la première unité de production industrielle d'alkylats fonctionna aux États-Unis, et depuis, des efforts considérables ont été mis en œuvre pour la recherche et la mise au point de détergents de toutes sortes nécessités par les progrès de la technique et l'amélioration du niveau de vie.

La production de savons a très rapidement régressé en faveur de celle des détergents synthétiques. Il faut cependant noter que, pour l'hygiène corporelle, les savons n'ont pas été remplacés par les détergents synthétiques.

Un détergent, naturel ou synthétique, est constitué par une molécule comprenant deux parties. L'une à *caractère hydrophobe* (le plus souvent une chaîne hydrocarbonée), l'autre à *caractère hydrophile,* constituée par une fonction polaire ou ionique. La mise en solution de telles molécules débute par la formation d'une solution vraie dans laquelle les molécules du détergent sont isolées. Puis, à mesure de l'addition de détergent à l'eau, les molécules ne pouvant plus se dissoudre sont repoussées vers la surface du liquide. Il se forme une couche monomoléculaire de molécules orientées. Si l'on ajoute encore du détergent, les molécules se groupent en agrégats appelés micelles. Ces micelles peuvent présenter des formes variées selon les conditions du milieu (micelles sphériques, lamellaires, en bâtonnets, etc.). La concentration à partir de laquelle se forment ces micelles est la *concentration micellaire critique*. Plus cette concentration est basse, plus le détergent est efficace. Les molécules de graisses sont incluses dans des micelles de détergent et peuvent ainsi être éliminées des surfaces où elles constituent des salissures.

Lorsque les eaux de lavage contenant des détergents sont envoyées dans les égouts, elles sont diluées, elles passent en dessous de la concentration micellaire critique ; les molécules de corps gras, d'une part, les molécules de détergents, d'autre part, sont diluées moléculairement. Les matières grasses sont dégradées par les Bactéries, les détergents ne le sont pas toujours totalement. En particulier, les premiers détergents à base d'alkylphénol n'étaient que partiellement dégradés ; ils n'étaient pas biodégradables. Étant donné la consommation importante de détergents dans les pays développés, on a assisté à une véritable pollution de nos rivières par des mousses, avec des conséquences parfois tragiques et toujours désagréables. Il a donc fallu mettre au point de nouvelles formules de composés tensio-actifs pouvant être décomposés en quasi-totalité par les Bactéries et autres micro-organismes vivant naturellement dans les cours d'eau.

Principaux groupes de détergents

Sans passer en revue tous les détergents industrialisés, on peut les classer en quatre groupes et donner pour chacun de ces groupes les principaux représentants actuels.

Les détergents anioniques

Ils sont constitués par une longue chaîne hydrocarbonée à l'extrémité de laquelle est fixé un groupe hydrophile anionique, le plus souvent un groupe sulfate $—O—SO_3^-$ ou sulfonate $—SO_3^-$, ou carboxylate $—\underset{\underset{O}{\|}}{C}—O^-$. Les savons sont des détergents anioniques naturels. Ainsi, le **stéarate de sodium** a pour formule :

$$CH_3—(CH_2)_{16}—COO^-Na^+$$

Les sulfates d'alcools gras sont des esters sulfuriques d'alcools linéaires à longue chaîne, par exemple :

— le **laurylsulfate de sodium :**

$$CH_3—(CH_2)_{10}—CH_2—O—SO_3^-Na^+$$

— les **alkylbenzène sulfonates de sodium :**

$$CH_3\,(CH_2)_{10}\,CH_2—C_6H_4—SO_3^-Na^+$$

— les **sulfonates d'α oléfines :**

$$CH_3\,(CH_2)_n—CHOH—CH_2—SO_3^-Na^+$$

— les **sulfates de polyéthoxyalcools :**

$$R—CH_2—O—(CH_2—CH_2—O)_n\,CH_2OSO_3^-Na^+$$

pour ne citer que les plus importants des détergents anioniques. Parmi les anioniques, les plus importants sont actuellement les alkylbenzène sulfonates linéaires et les sulfates d'alkyle.

Les détergents cationiques

Ce sont tous des sels d'ammonium quaternaire. Ils présentent, en plus de leurs propriétés détergentes, des propriétés bactéricides et fongicides qui les font employer dans les hôpitaux. Ils sont incompatibles avec les détergents anioniques. On citera parmi les plus importants :

— les **sels d'ammonium quaternaires** de la forme :

$$R\overset{+}{N}(CH_3)_3\ Cl^-$$
$$R_2\overset{+}{N}(CH_3)_2\ Cl^-$$
$$R_3\overset{+}{N}CH_3Cl^-$$

— ou les **sels de benzylammonium** tels que :

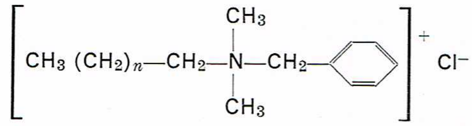

Les détergents non ioniques

Ils sont constitués par une chaîne hydrocarbonée sur laquelle sont fixés des groupements polaires. Ces détergents sont compatibles avec les anioniques et les cationiques et sont insensibles au pH du milieu. Dans cette classe assez riche en produits divers, on citera :

— les **alcools gras polyéthoxylés :**

$$R—CH_2—O—(CH_2—CH_2O)_n—CH_2—CH_2OH$$

— les **alkylphénols polyéthoxylés :**

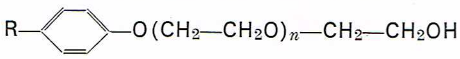

où R est C_8H_{17} ou C_9H_{19}, et n est compris entre 1 et 80 ;

— les **esters d'acides gras**, par exemple, le **monostéarate d'éthylène-glycol :**

$$CH_3—(CH_2)_{16}—\overset{\overset{\large O}{\|}}{C}—OCH_2—CH_2OH$$

Les détergents amphotères

Ils sont constitués par une chaîne hydrocarbonée porteuse d'un azote quaternaire et d'un groupement anionique. Ils sont donc à la fois anioniques et cationiques et sont compatibles avec ces deux types de détergents. Ils donnent une mousse abondante et ne sont pas irritants pour la peau. On citera :

— les **aminoacides ;**
— et les **alcoyl diméthylbétaïnes :**

$$CH_3\,(CH_2)_n—CH_2—\overset{+}{N}(CH_3)_2—CH_2—COO^-$$

De tous ces détergents, les plus importants, en ce qui concerne les tonnages produits, sont les anioniques (environ 70 %) ; viennent ensuite les non ioniques (environ 25 %), puis les cationiques (5 %), enfin les amphotères (1 %).

Les formulations

Les détergents en poudre, que l'on connaît bien, renferment relativement peu d'agent tensio-actif mais doivent comporter un certain nombre de produits organiques ou minéraux destinés à renforcer l'action du détergent de base ou à lui apporter certaines propriétés qui lui manquent.

On peut admettre qu'une poudre détergente vendue pour les travaux de lavage du linge renferme de 10 à 30 % en masse de tensio-actif (seul ou en mélange), de 20 à 60 % de composés minéraux, le plus souvent des polyphosphates destinés à complexer les cations alcalino-terreux de l'eau, de 5 à 15 % d'inhibiteurs de corrosion, de 0,5 à 3 % d'agents « antiredéposition », de 0 à 5 % de stabilisateurs d'émulsions, des azurants optiques, des parfums et parfois des charges inertes ayant pour but d'en faciliter la manipulation.

Il s'agit donc de produits dont les bases sont très variées et les formulations très diverses pour satisfaire aux besoins extrêmement nombreux. Par ailleurs, les détergents synthétiques ont déjà dû s'adapter aux exigences de la lutte antipollution et aux progrès des machines à laver.

C'est ainsi que les premiers détergents fabriqués en gros tonnage, les *alkylbenzène sulfonates de sodium*, se sont révélés rapidement indésirables en raison de leur difficulté de biodégradation. N'étant pas détruits par les micro-organismes au fil des eaux des rivières, ils se rassemblaient en surface et formaient des mousses abondantes. On a pu montrer que la non-biodégradabilité de ces produits était due à la structure très branchée de leur chaîne alkyle. En effet, le mécanisme biologique de la dégradation des hydrocarbures par les micro-organismes est tel qu'il ne peut pas se poursuivre si la chaîne comporte des ramifications. Le processus d'oxydation, qui débute à l'extrémité de la chaîne, s'arrête au niveau des carbones tertiaires et surtout quaternaires. Si la ramification se trouve en un point tel que la longueur de la chaîne restante confère encore au produit des propriétés tensio-actives, le résidu forme des mousses. Sinon, sa dégradation, bien que lente, peut se poursuivre sans apparition de mousse. Pour remédier à cet inconvénient, on a remplacé les chaînes ramifiées (tétramère du propylène) par des chaînes linéaires formées à partir d'oléfines linéaires obtenues par le procédé Ziegler, ou par des paraffines normales extraites aux tamis moléculaires de certaines coupes pétrolières. En France, depuis le 25 décembre 1970, un décret entré en application le 1er octobre 1971 précise que les détergents anioniques contenus dans les produits de lavage et de nettoyage doivent être biodégradables à 80 % au minimum.

En ce qui concerne les polyphosphates utilisés comme agents séquestrants (composés chimiques qui, en formant avec certains ions métalliques des complexes solubles stables, les soustraient aux réactions chimiques indésirables qu'ils pourraient provoquer dans le milieu où ils se trouvent) du calcium et du magnésium, on leur a reproché de contribuer dans certaines régions à l'eutrophisation des lacs ; on les a même interdits dans certains États des États-Unis. Le résultat de cette eutrophisation est une prolifération exagérée des Algues et autres plantes aquatiques, avec les conséquences que cela peut avoir sur l'écologie. On a tenté de remplacer les polyphosphates par un composé complexant, l'acide nitrilotriacétique (N. T. A.), mais son action cancérigène a dû le faire abandonner ; on a ensuite proposé l'acide citrique, mais sa synthèse est encore très onéreuse, et bien d'autres produits sont en cours d'examen.

En ce qui concerne les machines à laver le linge, non seulement le doublement de leur nombre a obligé à mettre au point rapidement des formules détergentes, mais le passage des machines à panier vertical aux actuelles machines à tambour horizontal a obligé à modifier les formulations, ce dernier type de machine ne tolérant pas les produits trop moussants.

Les détergents, très utilisés pour les emplois ménagers, trouvent aussi des applications industrielles diverses dont l'importance est loin d'être négligeable.

Les détergents anioniques sont utilisés dans les emplois ménagers sous forme de poudres et de liquides et sont destinés au lavage, au blanchiment et au nettoyage. Dans l'industrie textile, on utilise des surfactants (substances qui présentent une concentration plus forte aux interfaces que dans la masse, en solution aqueuse) anioniques pour le lavage de la laine brute ou désuintage, pour le filage, pour le mercerisage du coton, etc.

Dans l'industrie mécanique, ils sont utilisés pour le nettoyage des surfaces métalliques, et dans la préparation et la stabilisation des huiles de coupe et des huiles solubles nécessaires à l'usinage des pièces métalliques.

Les tensio-actifs cationiques sont utilisés dans l'industrie textile comme adoucissants. Ils servent dans la préparation des asphaltes pour revêtements routiers. Ils possèdent des propriétés insecticides et bactéricides et sont employés en agriculture.

Les non ioniques sont utilisés aussi dans l'industrie textile. Ils sont plus efficaces que les précédents sur les fibres synthétiques que sur les fibres naturelles. On les utilise aussi en papeterie, dans les industries alimentaires, dans la fabrication du caoutchouc synthétique (polymérisation en émulsion), etc.

BIBLIOGRAPHIE

BILLMEYER F.W., *Textbook of Polymer Science,* New York, 1962. - CHAMPETIER G., *Chimie macromoléculaire,* Paris, 1971. - CHAMPETIER G. et MONNERIE L., *Introduction à la chimie macromoléculaire,* Paris, 1969.

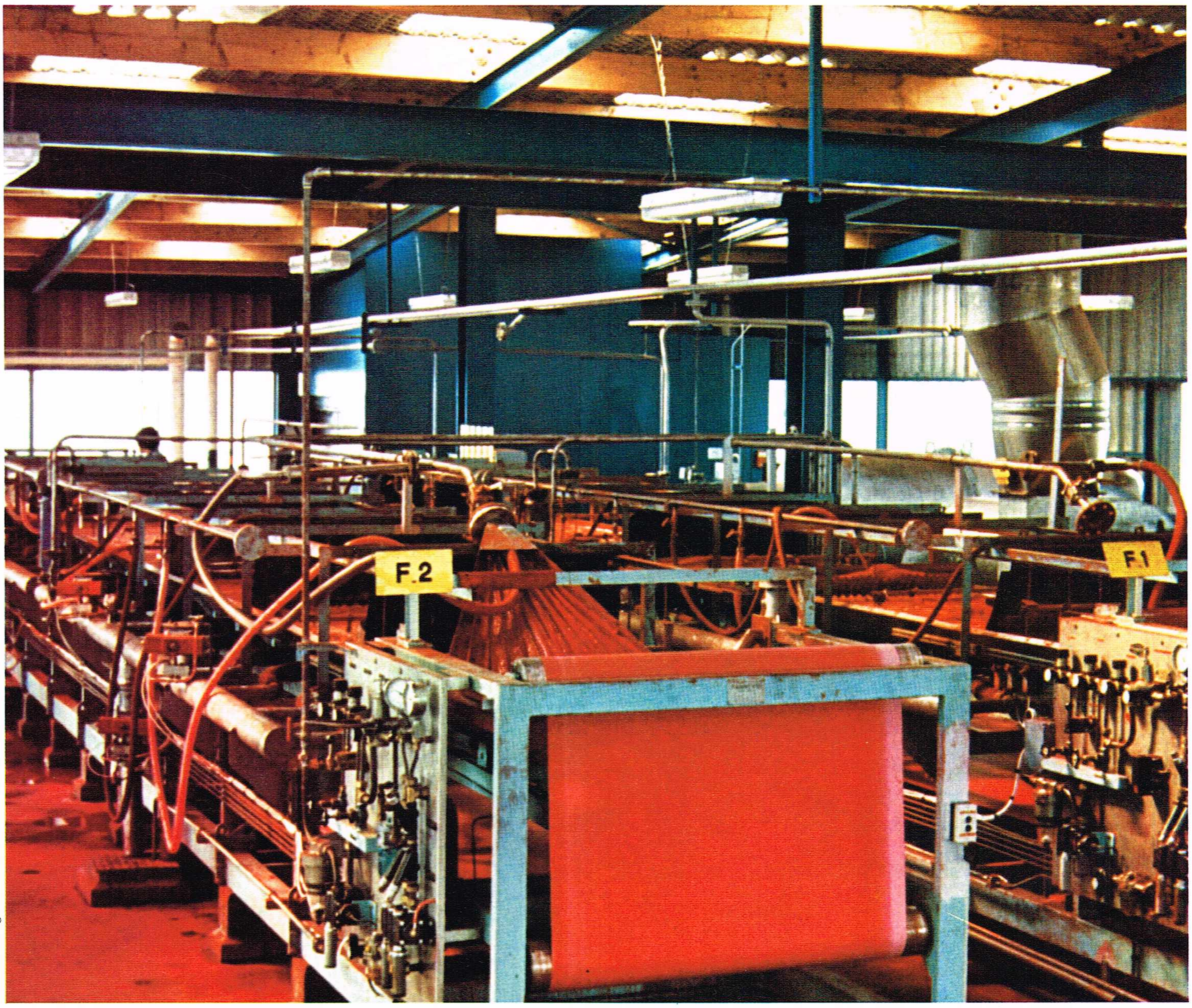

C. Bazin - Ugine Kuhlmann

▲ *Fabrication de pigments pour encres d'imprimerie; ici, fabrication en continu du rouge rubis.*

LES COLORANTS ET LA TEINTURE

La beauté et la multitude des couleurs dans la nature ont depuis toujours incité l'homme à décorer et colorier tous les objets de son entourage selon ses goûts. Si l'objet présente une surface invariable, les matières colorantes, pigments minéraux insolubles dits *couleurs,* peuvent y être appliquées avec un simple liant. Par contre, pour les textiles, dont les fibres sont souples, le *colorant* doit être fixé solidement (de préférence par une liaison chimique) sur chaque fibre. De ce fait, les pigments minéraux insolubles (suie, ocre, craie, terres...) conviennent difficilement. Non seulement le choix du colorant est important pour obtenir une teinture présentant une bonne tenue à la lumière, au lavage et au frottement, mais aussi la façon de teindre les fibres, variable avec la nature du textile.

Depuis la plus haute antiquité jusqu'au milieu du siècle dernier, l'homme utilisait soit des colorants végétaux provenant de fruits, de fleurs, de feuilles (l'*indigo*), d'écorces, de racines (l'*alizarine,* extraite de la racine de garance cultivée en Alsace et en Provence), de galles, soit des colorants issus du règne animal : extraits de plumes, d'insectes (le *rouge carmin,* provenant d'une cochenille), d'escargots marins (la *pourpre de Tyr*)...

Avec la naissance de l'industrie chimique à partir de 1850, apparurent les premiers colorants synthétiques, plus faciles à isoler, mieux adaptés aux différents textiles, plus stables que les colorants naturels à la lumière et aux détergents.

Pratiquement, tous ces colorants sont des dérivés des hydrocarbures aromatiques (benzène, toluène, naphtalène, anthracène...) que l'on trouve dans les goudrons de distillation sèche de la houille (résidus de la fabrication du coke et du gaz d'éclairage). Mais depuis la Seconde Guerre mondiale, le charbon en tant que matière première de l'industrie chimique a fait place au pétrole brut, dont certains gisements (Bornéo) étaient très riches en carbures aromatiques. Actuellement, la pétroléochimie est capable de transformer tous les pétroles en dérivés aromatiques. Ceux-ci subissent alors une longue série de transformations chimiques : sulfonation, nitration, amination, alcoylation, oxydation et réduction catalytiques, hydroxylation, diazotation, etc., pour obtenir les colorants désirés.

La production mondiale de colorants avoisine les 500 000 tonnes. Environ 2 000 colorants différents sont actuellement utilisés. Et si l'on admet que sur 100 colorants préparés au laboratoire, un seul est exploité commercialement, on peut évaluer les efforts énormes qui ont été fournis par les différentes industries dans la course aux nouveaux colorants...

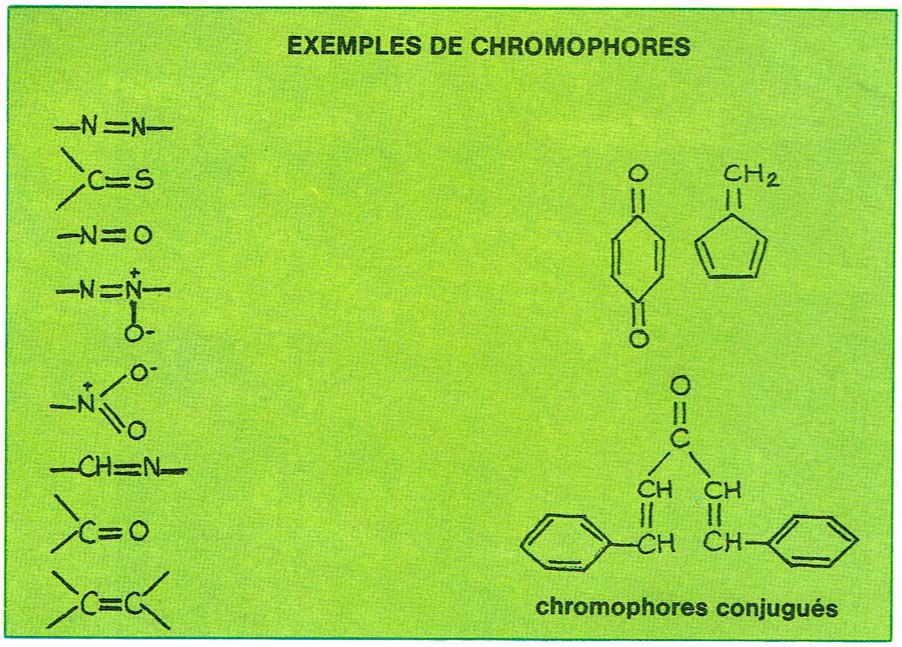

Richard Colin

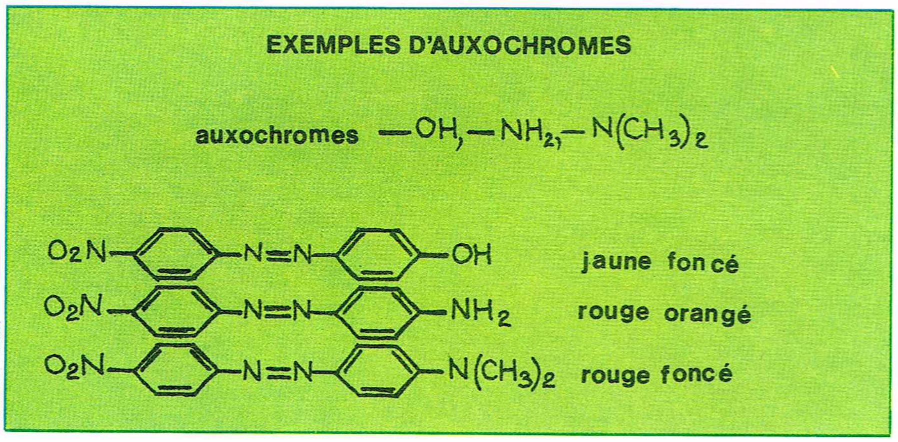

Richard Colin

▲ *En haut, exemples des groupes fonctionnels insaturés appelés* chromophores. *Ci-dessus, exemples de groupes* auxochromes.

La relation entre la couleur et la structure d'un colorant a préoccupé de nombreux chercheurs. La couleur d'une substance est due à l'absorption sélective, par les électrons π de la molécule, de quanta de lumière. Cette absorption d'énergie, bien spécifique à chaque molécule, se traduit par la disparition d'une radiation dans le spectre de la lumière blanche, d'où la *couleur* du colorant. Ce phénomène est appelé spectre d'absorption. Des théories empiriques ont vu le jour pour expliquer la longueur d'onde d'absorption d'un colorant, mais elles ne s'appliquent qu'à des séries homogènes et très restreintes de colorants.

De nos jours, grâce aux calculs de mécanique quantique effectués par les ordinateurs, la détermination de la couleur d'une substance peut se faire avec un certain succès. Il suffit de connaître les interactions entre les électrons π et les différents atomes de la molécule. Une accumulation de doubles liaisons conjuguées (alternées avec des liaisons simples) et de groupes fonctionnels insaturés, appelés chromophores, conduit à des longueurs d'onde d'absorption élevée. Ce déplacement des longueurs d'onde vers le rouge (les colorants bleus absorbent dans le rouge) est appelé effet bathochrome. Inversement, un déplacement de la longueur d'onde d'absorption vers le bleu (les colorants jaunes absorbent dans le bleu) est un effet hypsochrome.

Ces déplacements peuvent aussi être provoqués par des groupes auxochromes. Ceux-ci ont d'ailleurs la propriété d'être salifiables, tout comme les auxochromes —COOH et —SO_3H qui permettent la dissolution du colorant dans le bain de teinture basique ou acide. Selon la structure chimique de la fibre textile, il est nécessaire de faire appel à tel ou tel colorant portant un groupe auxochrome pouvant réagir sur une fonction de la fibre.

Les principales familles de colorants

Le premier colorant synthétique a été découvert fortuitement par le chimiste anglais W. Perkin qui essayait de préparer de la quinine. C'était la *pourpre d'aniline* ou *mauvéine,* colorant basique qui teignait la laine et la soie en violet avec une brillance extraordinaire. Le coton nécessitait l'usage d'un mordant tel que le tanin. Perkin comprit immédiatement l'ampleur de sa découverte et fit construire une usine pour préparer industriellement ce premier colorant.

Trois ans plus tard (1859), le chimiste lyonnais Verguin obtint un autre colorant synthétique : la *fuschsine* rouge, qui détrôna rapidement la *mauvéine.*

Dérivés du triphénylméthane

Cette *fuchsine,* aussi appelée *rosaniline,* est obtenue par action de l'aniline sur l'ortho- et la paratoluidine en présence de nitrobenzène. Tout comme la *mauvéine,* c'est un colorant basique qui teint bien la laine et la soie mais nécessite du tanin pour se fixer sur le coton et donner des coloris brillants et vifs, malheureusement peu stables à la lumière. L'introduction dans cette molécule d'un ou de plusieurs groupes —SO_3H transforme la *fuchsine* en un colorant acide : le *violet acide.* Les composés de cette classe sont très nombreux : le *violet cristallisé,* le *vert malachite* et le *bleu victoria B* utilisé dans la préparation de l'encre bleue. Comme tous ces colorants étaient des dérivés de l'aniline, on les appela **colorants d'aniline.** Par condensation du phénol sur l'anhydride phtalique en présence de chlorure de zinc, on isole la *phénolphtaléine,* tête de file de nombreuses autres phtaléines, qui, à cause de leur salification facile, changent facilement de couleur et sont donc utilisées comme indicateurs colorés de pH. L'*auramine,* un des rares colorants de la série des diphénylméthanes, a été utilisée pour teindre le papier en jaune intense, malgré sa mauvaise tenue à la lumière.

Colorants du xanthène

Les colorants de la famille du *xanthène* sont des colorants basiques, donnant des tons très brillants mais présentant une tenue médiocre à la lumière. La *fluorescéine,* trouvée par A. Bayer en 1871, teint la laine et la soie en jaune. L'*éosine A* a été largement employée dans les encres rouges, alors que le *mercurochrome* s'est distingué par ses propriétés désinfectantes.

Cyanines

Les cyanines forment un groupe de près de 30 000 colorants différents. Ils n'ont aucune valeur pour l'industrie textile à cause de leur prix de revient très élevé et de leur grande sensibilité à la lumière et aux acides. Leur importance provient de leur pouvoir de sensibilisation du bromure d'argent des couches photographiques, qui sont normalement sensibles au bleu et à l'ultraviolet, à des longueurs d'onde plus grandes. Cette propriété, mise en évidence pour la première fois par H. Vogel en 1873, est appelée la sensibilisation chromatique. La photographie en couleurs n'a été possible que grâce à la chromatisation du bromure d'argent par les colorants de cette famille.

Parmi les plus anciennes cyanines connues, il faut citer la *cyanine* (bleue), l'*isocyanine* (violette), la *pseudocyanine* (rouge) et le *pinacyanol* (violet). Ces colorants dérivent du noyau quinoléine, mais de nombreux autres hétérocycles ont été brevetés.

Anthraquinones

Cette classe contient de nombreux colorants ayant une très grande importance commerciale. L'*alizarine,* jadis extraite des racines de la garance, est une anthraquinone naturelle. Elle fut synthétisée au laboratoire pour la première fois en 1868 par C. Graebe et H. Liebermann et fabriquée industriellement par la BASF, dès 1871.

Le produit de base de tous les colorants de cette famille est l'anthraquinone, obtenue par action du benzène sur l'anhydride phtalique en présence de chlorure d'aluminium. L'introduction de substituants sur cette molécule permet d'adapter le colorant à toutes les formes de teinture : teinture sur mordant, colorants acides, colorants de dispersion, colorants de cuve, pigments insolubles, colorants réactifs.

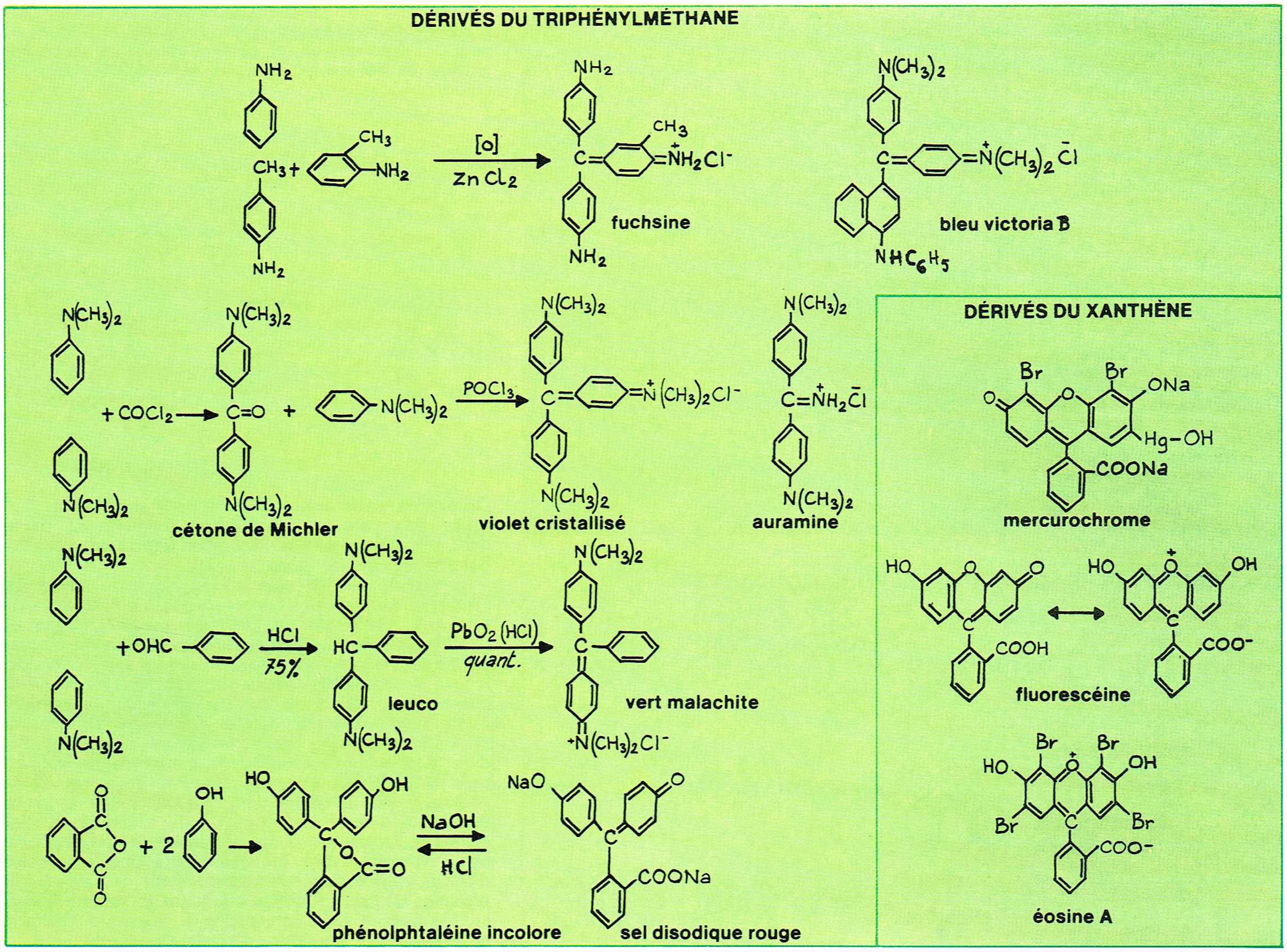

Richard Colin

▲ *Tableau des dérivés du* triphénylméthane *et du* xanthène.

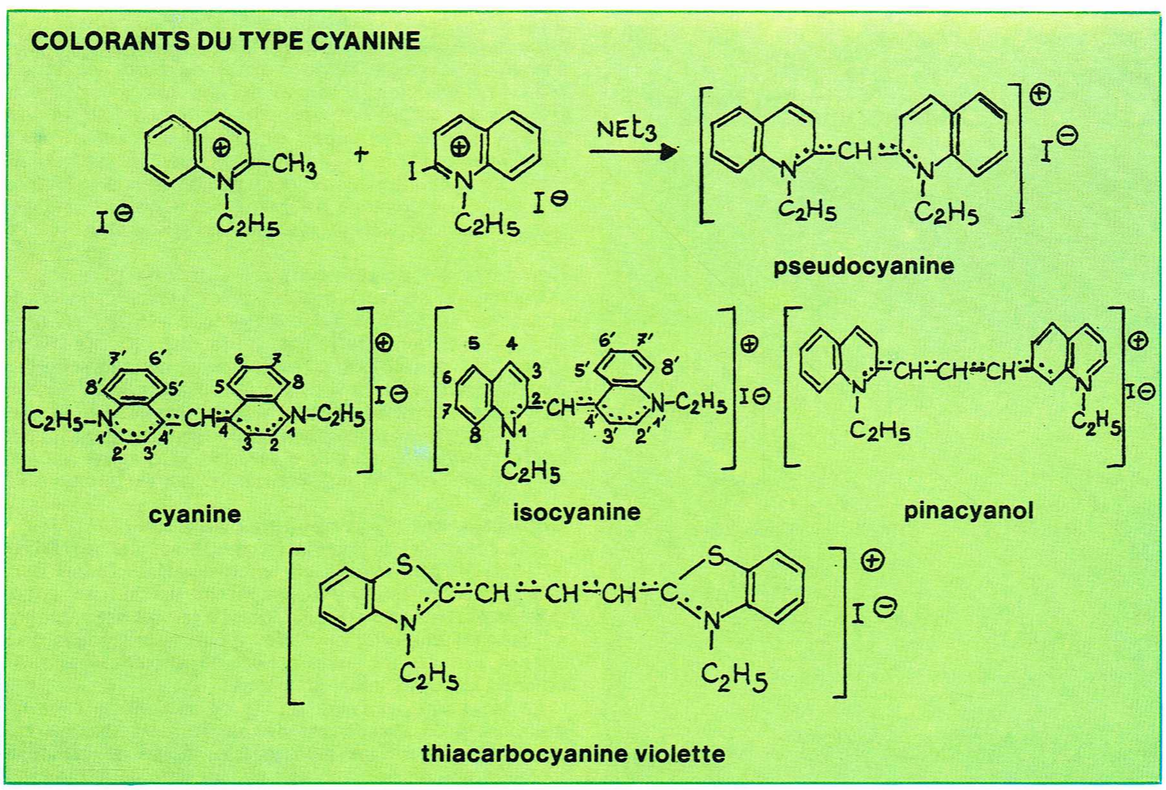

Richard Colin

◀ *Quelques colorants du type* cyanine.

▶ *Structure probable de la laque.*

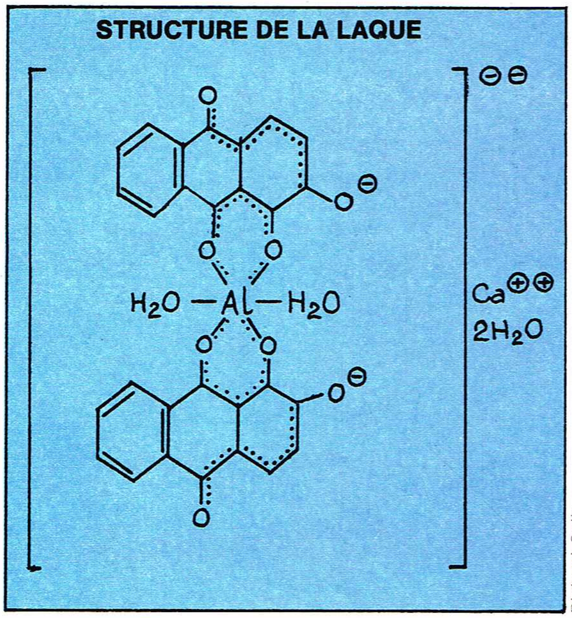

Richard Colin

▼ *Ci-dessous, obtention d'un* colorant anthraquinonique pour mordant : le bleu d'alizarine. *En bas, obtention de* colorants anthraquinoniques sulfonés : *le* rouge d'alizarine S *et le* saphirol d'alizarine A.

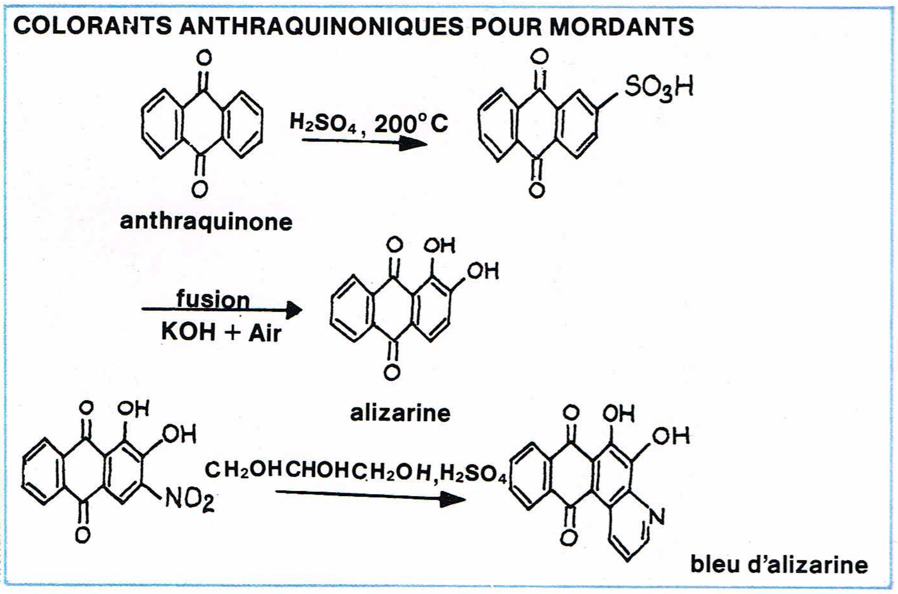

Richard Colin

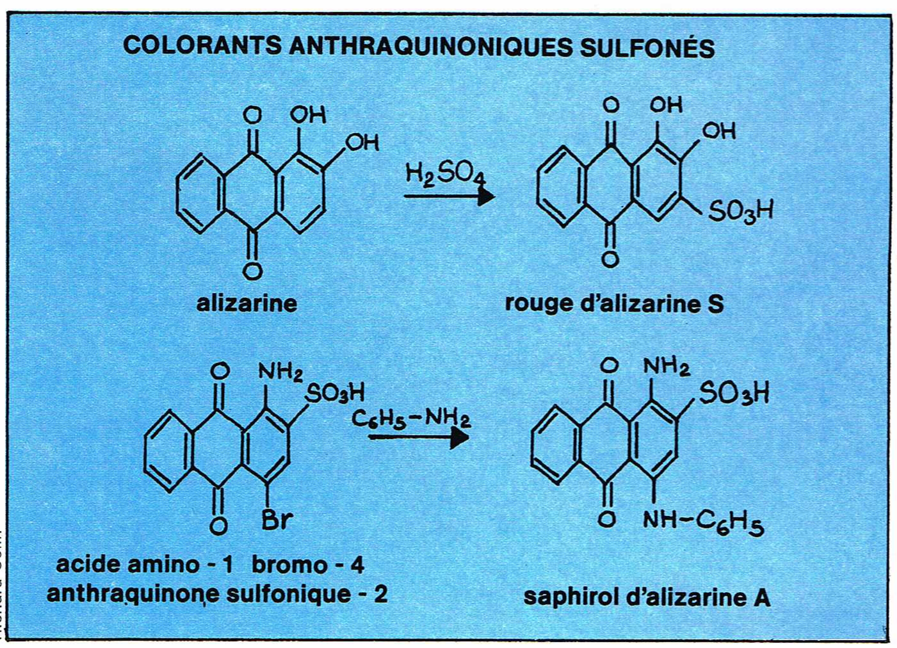

Richard Colin

Avec des substituants auxochromes, on obtient une grande variété de teintes allant du jaune au brun et au vert. Ces colorants ont en général une bonne tenue à la lumière et au lavage. Certains résistent très bien au chlore.

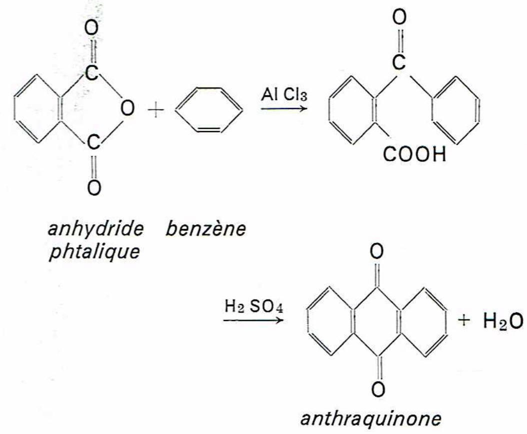

Richard Colin

Colorants anthraquinoniques pour mordants

Les polyhydroxyanthraquinones qui ont au moins deux groupes hydroxyles en position *ortho* sont utilisables dans la teinture sur mordant.

Le représentant le plus ancien de cette classe est l'*alizarine,* donnant des teintes rouges à reflets bleus sur le coton. L'alizarine est préparée par sulfonation de l'*anthraquinone* par l'oléum suivie d'une fusion alcaline oxydante. Ce colorant insoluble dans l'eau donne des laques avec le sel métallique du mordant. La couleur de ces laques dépend du sel : rouge avec l'aluminium, brune avec le chrome, violette avec le fer. On procède ainsi à la teinture du coton : la fibre est d'abord gonflée dans une solution aqueuse de carbonate de sodium, puis traitée à chaud par une émulsion de ricinoléate de sodium et enfin par le mordant (par exemple une solution de sulfate d'aluminium dans l'acide acétique). L'acide en excès est neutralisé par un lait de chaux. Les fibres ainsi préparées sont plongées dans une suspension d'alizarine dans une solution d'acétate de calcium. La présence de calcium donne à la laque formée un brillant supplémentaire. La structure de la laque est probablement celle que nous donnons en schéma ci-contre, en haut.

Parmi les dérivés de l'alizarine, il faut citer le *bleu d'alizarine* obtenu par action de la glycérine sur la nitro-3 alizarine en milieu sulfurique, alors que le *vert d'alizarine* s'isole de la même façon à partir de nitro-4 alizarine. Mais les difficultés d'emploi de ces colorants dans la teinture du coton ont beaucoup diminué leur intérêt. Récemment, ils ont connu cependant un certain regain dans la coloration de l'aluminium anodisé (aluminium traité par oxydation anodique en vue de créer à sa surface une couche protectrice d'alumine de 10-20 μm d'épaisseur ; cette couche peut adsorber des colorants).

Colorants anthraquinoniques sulfonés

De même structure que les colorants précédents, ils possèdent un groupe acide sulfonique —SO_3H en plus. Si l'anthraquinone de départ porte des groupes —OH, on obtient des colorants acides pour mordants utilisés dans la teinture de la laine : *rouge d'alizarine S.* Mais la plupart des anthraquinones acides dérivent de la diamino-1,4 anthraquinone pour donner des verts ou des bleus comme le *saphirol d'alizarine A* préparé à partir d'acide amino-1 bromo-4 anthraquinone sulfonique-2.

Colorants anthraquinoniques de cuve

Les colorants de cuve sont des colorants insolubles qui doivent être réduits en leuco-dérivés solubles pour être utilisés en teinturerie ; en milieu alcalin, ces leuco-dérivés passent en solution. L'objet à teindre est imprégné de cette solution. Par oxydation à l'air ou au moyen d'un agent oxydant, les leuco-dérivés régénèrent ensuite le colorant de cuve initial sur l'objet.

La réduction par l'hydrosulfite de sodium de l'anthraquinone et de ses dérivés donne des sels solubles qui peuvent se fixer facilement sur les fibres de cellulose. L'oxydation soit par l'air, soit par du perborate, régénère

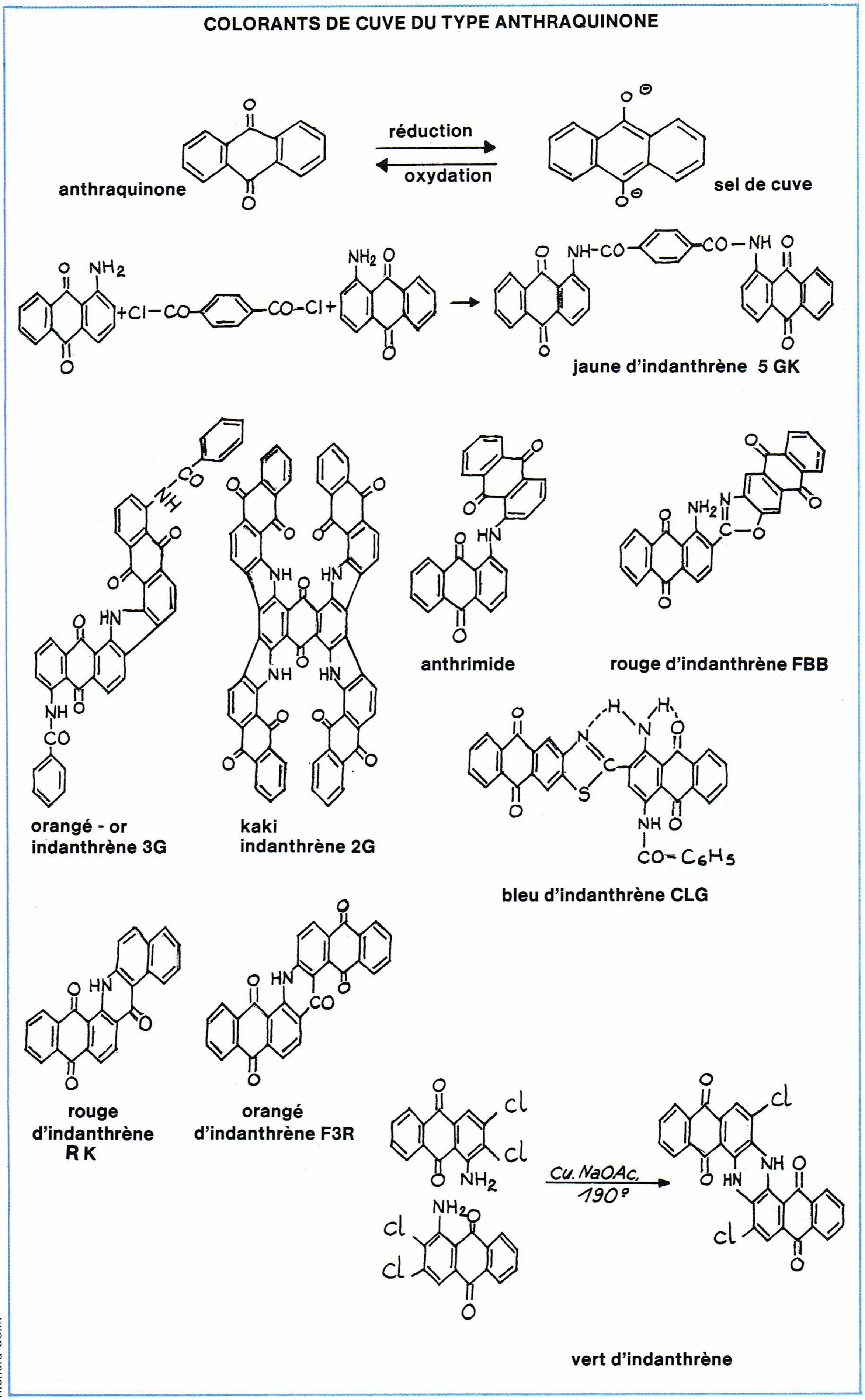

Richard Colin

◀ *Colorants de cuve dérivés de l'*anthraquinone.

▶ *Schéma de synthèse de l'*indigo.

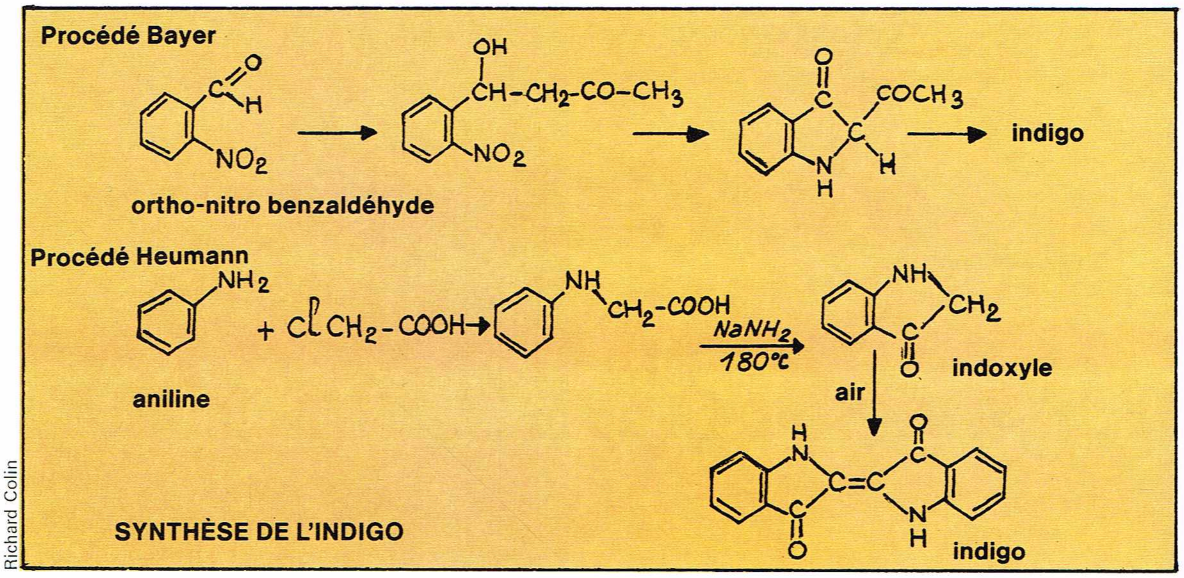

▶ *Obtention de l'*indigo. *Types de* colorants indigoïdes.

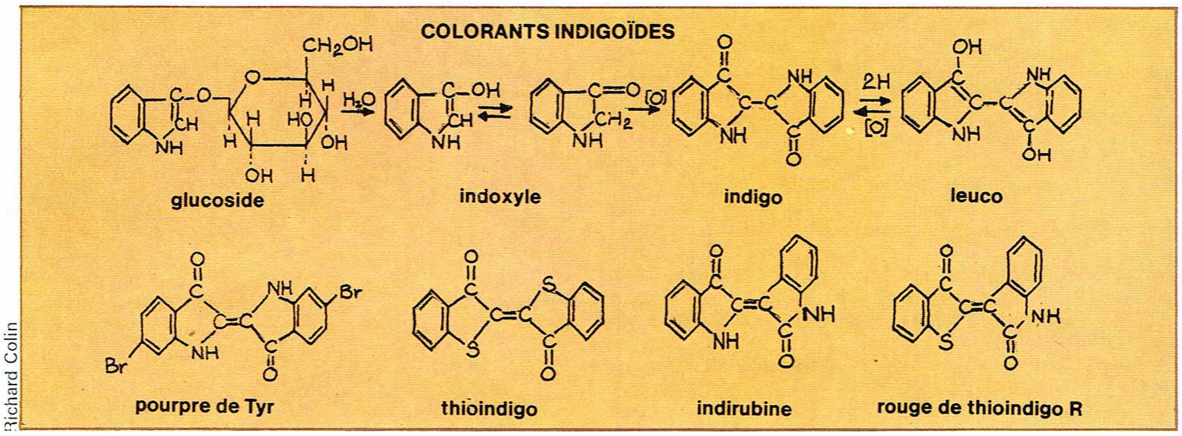

▼ *Colorants anthraquinoniques de cuve dérivés de l'*anthrone.

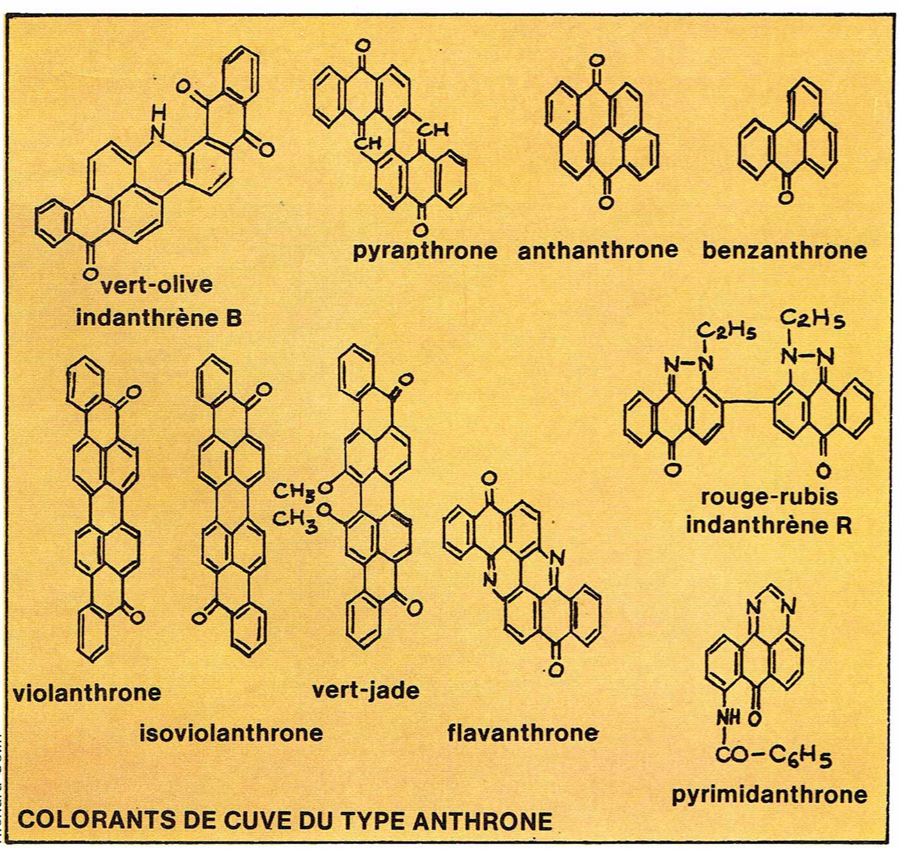

l'anthraquinone insoluble de départ. Ces colorants de cuve donnent toutes les teintes jaunes, kaki, vertes ou bleues, à l'exception des rouges. Malheureusement les jaunes ont tendance à catalyser la décomposition de la cellulose par la lumière. Mais les autres teintes présentent une bonne stabilité à la lumière, et, quoique d'un pouvoir tinctorial inférieur à celui des colorants azoïques, ils sont très utilisés. On distingue les dérivés de l'anthraquinone et ceux de l'anthrone.

— Les *dérivés de l'anthraquinone* sont de plusieurs types.

Ainsi, les acylaminoanthraquinones sont préparées par action d'un chlorure d'acide aromatique (chlorure de benzoyle ou chlorure d'acide isophtalique) sur une amine anthraquinonique. Le *jaune d'indanthrène* 5*GK* est un colorant de cette classe. Une amino-anthraquinone peut également réagir sur une anthraquinone halogénée pour former une *anthrimide* orangée, rouge, bordeaux ou grise. Si l'anthrimide est du type 1, l'on peut effectuer une hétérocyclisation grâce au chlorure d'aluminium et obtenir un diphthaloylcarbazole comme l'*orange or indanthrène* 3*G* et surtout le *kaki indanthrène* 2*G* qui sert à teindre les uniformes militaires et les toiles de tente.

Mais une anthraquinone peut être également associée à un hétérocycle comme l'oxazole *(rouge d'indanthrène FBB)* ou comme le thiazole *(bleu d'indanthrène CLG)*. Cette catégorie de colorants présente une très bonne tenue au chlore, due probablement à l'existence de liaisons hydrogène.

Les indanthrones sont des colorants de cuve à chaud, bleus ou verts, très stables à la lumière mais ayant une mauvaise tenue au chlore.

Enfin des colorants qui présentent une bonne tenue générale, sauf au carbonate, sont le *rouge d'indanthrène RK* et l'*orange d'indanthrène F3R*, deux représentants du sous-groupe des phtaloylacridones ou anthraquinonéacridones.

— Les *dérivés de l'anthrone* peuvent également être classés dans plusieurs sous-groupes.

Les benzanthrones, avec par exemple le *vert olive indanthrène B,* sont très stables à la lumière et au lavage. Le sous-groupe des anthrapyrimidines contient des jaunes très stables comme le *jaune d'indanthrène 4GK*.

Les pyrazoloanthrones (avec le *rouge rubis d'indanthrone R*) teignent bien le coton. La cyclisation du diacide dinaphtyl-1,1′ dicarboxylique-8,8′ conduit à l'anthanthrone, dont seuls les dérivés halogénés ont une importance en tant que colorants.

La pyranthrone est vendue sous le nom d'*orange or d'indanthrène G5*. C'est un colorant de cuve à chaud, de bonne stabilité générale mais qui provoque la décomposition des fibres. Le *jaune d'indanthrène G2* est une flavanthrone qui a une bonne affinité pour les fibres, une bonne stabilité à la lumière mais une mauvaise tenue au carbonate.

Enfin les violanthrones (dibenzanthrones) et isoviolanthrones (isodibenzanthrones) s'obtiennent facilement par fusion alcaline des benzanthrones. Ce sont des colorants bleu foncé, utilisés dans l'impression, très stables en général sauf à la chaleur du fer à repasser. Le *vert jade calédon* est le plus beau des colorants verts de cuve; c'est une violanthrone disubstituée par des groupes méthoxy.

Colorants indigoïdes

L'*indigo* existe sous une forme leuco (incolore) dans un glucoside de certaines plantes : *Indigofera tinctoria* et *Isatis tinctoria* des Indes et de Java. L'indoxyle extraite de ces plantes servait à imprégner les tissus : par oxydation à l'air, l'*indigo* bleu précipitait. Tout comme l'alizarine, ce colorant revêtait durant tout le Moyen Age une importance capitale et donnait lieu à un commerce florissant. A. Bayer établit sa constitution en 1870 et le synthétisa à partir d'ortho nitrobenzaldéhyde. Mais la transposition industrielle de cette synthèse se révéla peu économique. Aussi K. Heumann, en 1897, mit au point pour le compte de la BASF une nouvelle méthode de synthèse de l'indigo à partir d'acide anthranilique et d'acide monochloracétique avec un rendement de 90 %.

La *pourpre antique* est un autre représentant de la famille des indigoïdes. Ce colorant connu depuis l'Antiquité par les peuples méditerranéens était extrait d'un Mollusque marin : *Murex brandaris*. Les Indiens du Mexique extrayaient ce même colorant d'un autre Mollusque : *Purpura aperta*. La sécrétion de ces escargots était la forme leuco du colorant; elle était utilisée telle quelle pour teindre le coton. Par oxydation à l'air, il se formait la *pourpre*. Il s'agit du dérivé dibromo-6,6′ de l'indigo.

Depuis l'avènement de la chimie moderne, son importance a décru considérablement, car d'autres colorants rouges ont pu être fabriqués plus économiquement. Tous ces colorants indigoïdes sont d'excellents colorants de cuve : leur forme leuco est soluble dans les bains de teinture, ils se fixent bien sur la laine et sur le coton (mais pas sur la soie) où ils se réoxydent en colorant. Leur tenue à la lumière est excellente. L'affinité de ces colorants envers le coton peut être augmentée par halogénation (Cl ou Br) du colorant.

Le groupe NH de l'indigo peut être remplacé par un atome de soufre : c'est le *thio-indigo,* colorant rouge se réduisant facilement en leuco. D'une façon générale, ces colorants sont plus résistants à la lumière et aux détergents que les indigos. Les indigos dissymétriques s'obtiennent facilement par fixation des deux hétérocycles l'un à l'autre : l'*indirubine* et le *rouge de thio-indigo* en sont des exemples. Si le premier est un sous-produit de la synthèse de l'indigo et n'a pas d'importance en teinture, le second est un bon colorant de la laine, et non du coton.

Colorants au soufre

Sous le terme colorants au soufre, on entend un groupe assez complexe de colorants de structures différentes, dont certaines n'ont d'ailleurs pas été complètement établies. La plupart se préparent par chauffage de différentes amines aromatiques avec du soufre à une température comprise entre 160 et 200 °C pendant plusieurs heures. D'autres subissent cette sulfuration à une température plus basse dans un solvant comme l'éthanol en présence de polysulfures de sodium. Ces colorants se caractérisent par leur solubilité dans les solutions aqueuses de sulfure de sodium, ce qui permet leur fixation sur les fibres de cellulose sous une forme réduite. Tout comme pour les colorants de cuve, le colorant se forme par oxydation à l'air. Les colorants au soufre se distinguent des autres colorants par leur prix de revient très bas et une bonne tenue générale, sauf au chlore. L'atome de soufre est introduit dans la molécule soit pour donner un hétérocycle chromophore (thiazole, thiazone, thianthrène...), soit pour constituer une liaison —S—S— (qui se réduit facilement comme la cystine du cheveu lors d'une permanente), ou pour former des polysulfures. Malheureusement, ces derniers s'oxydent lentement à l'air en acide sulfurique qui détruit le textile.

La classification de tous ces colorants ne peut se faire selon leur structure mais selon la nature du composé chimique de départ :

— les amines et dérivés nitrés aromatiques, qui donnent des jaunes, orangés, bruns et olives ; ex. : *jaune immédial ;*

— les phénols, nitrophénols et aminophénols à la base de colorants bruns, verts et noirs. Ex. : *noir au soufre T,* très solide et bon marché ;

— les nitro- et amino-naphtalènes, peu importants ;

— les indophénols, qui teignent la cellulose en bleu et vert vifs. Leur structure correspond à celle d'une thiazone ;

— les azines enfin fournissent des colorants rouge-brun et rouge-violet utilisés pour l'impression du papier et des cuirs.

Colorants azoïques

Cette importante classe de colorants est caractérisée par la présence d'un ou de plusieurs groupes azoïques —N = N— dans la molécule. C'est un groupe chromophore, surtout s'il est associé à plusieurs cycles aromatiques. Les teintes obtenues dépendent de la nature et de la position des substituants. Ainsi, plus de 100 000 colorants azoïques ont été préparés, mais seuls quelques centaines se sont révélés très intéressants pour leurs tenues bien que celles-ci soient en règle générale plus faibles que celles des colorants anthraquinoniques. Mais leur préparation industrielle étant très simple et économique, et la teinture des tissus courants ne nécessitant pas une tenue excellente, les colorants azoïques représentent la classe la plus importante avec 50 % de tous les colorants synthétiques.

▼ ***Structures de différents** colorants au soufre.*

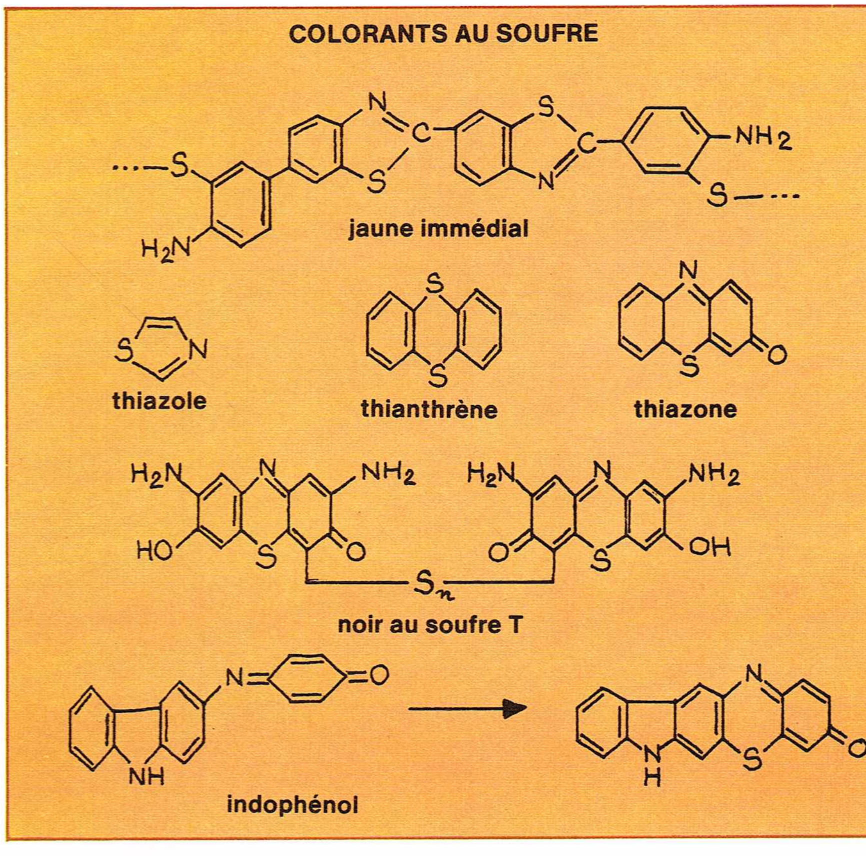

Richard Colin

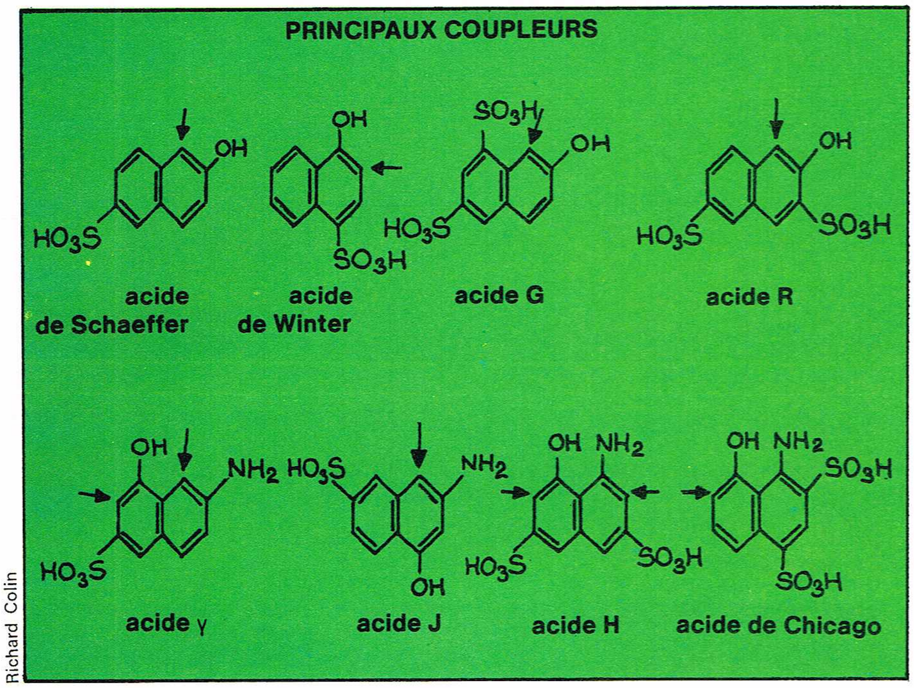

Richard Colin

▲ ***Structures des principaux*** **coupleurs.**

La réaction de diazotation a été découverte par P. Griess en 1858. Elle consiste à faire réagir à froid l'acide nitreux sur une amine aromatique selon le schéma :

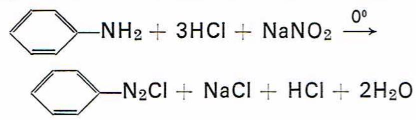

Le produit de cette réaction (chlorure de diazonium) s'additionne facilement sur un phénol ou une autre amine aromatique ; c'est la *copulation :*

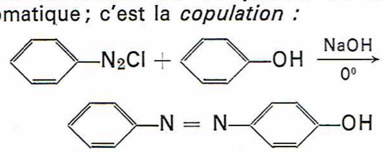

Le coupleur peut être un phénol substitué ou non, mais la plupart du temps, et pour avoir des teintes plus profondes, on préfère des dérivés (principalement avec —SO_3H) du naphtol. La position de la réaction de copulation du sel de diazonium sur le naphtol est indiquée par une flèche sur le schéma ci-dessus.

Les colorants azoïques sont regroupés en quatre familles : monoazoïques, bisazoïques, polyazoïques et hétérocycloazoïques, d'après le nombre de groupes —N = N— présents dans la molécule. Dans ces familles, on distingue plusieurs groupes correspondant aux diverses propriétés et utilisations des colorants : colorants insolubles, colorants de développement, colorants solubles.

Les *colorants insolubles,* métallés ou non, sont principalement utilisés en dispersion dans les fibres synthétiques préalablement gonflées à chaud. Parmi ces colorants insolubles dans l'eau, il faut signaler les colorants azoïques lipophiles, c'est-à-dire solubles dans les graisses et les huiles. On les utilise pour colorer en jaune, rouge ou brun les cirages, bougies, graisses industrielles, peintures à l'huile, l'essence, les matières plastiques...

Comme l'indique leur nom, les *colorants de développement* sont « développés », c'est-à-dire formés sur la fibre au moment de la copulation du sel de diazonium sur un naphtol.

Enfin, les *colorants solubles* peuvent être basiques, acides, métallisables, à mordants, directs (ou substantifs) ou réactifs.

Colorants monoazoïques

Les colorants monoazoïques basiques ont été les premiers à être utilisés : la *chrysoïdine* (1875), obtenue à partir d'aniline et de métaphénylène diamine, le *jaune d'aniline* et le *jaune beurre* entrant dans la composition de la cire à parquet. Ces colorants pour laine et soie ne présentent qu'une très faible tenue à la lumière, d'où leur rapide déclin après la découverte de colorants plus stables. Par contre, cette tenue est excellente dans les polyacrylonitriles.

L'*orangé I,* l'*orangé II* et le *rouge solide* appartiennent au groupe des colorants monoazoïques acides qui ont la faculté de teindre uniformément les fibres à groupes basiques libres : laine, soie, polyacrylonitriles modifiés, polyamides... Leur solidité à la lumière est excellente.

Certains colorants de structure bien adaptée peuvent donner des complexes (chélates ou laques) avec des sels métalliques. Ils doivent posséder un groupe —OH en *ortho* (ou au voisinage) d'un groupe —COOH, —NO, —N = N—, —CH = N—, —C = O. Le complexe métallique se forme sur la fibre, le mordant portant le métal : chrome, fer, cobalt, aluminium. Du fait de leur insolubilité, ils ont une excellente tenue au lavage. La structure générale de ces colorants est dérivée de l'acide salicylique *(jaune d'alizarine).* Normalement, la formation du complexe se fait en deux étapes successives, mais elle peut être effectuée en une seule (colorants métachromes) : le colorant et le mordant sont mis simultanément dans le bain de teinture. Le colorant peut aussi être métallé au départ. Dans ces conditions, il est nécessaire de lui conférer une certaine solubilité dans l'eau par l'introduction de groupes —SO_3H (colorants *palatine* d'I. G. Farben) ou de groupes —SO_2NH_2 (*cibalan* de Ciba).

Par colorant direct ou substantif on entend un colorant capable de teindre la cellulose sans l'intermédiaire de mordant. Les molécules de colorant (qui doivent être

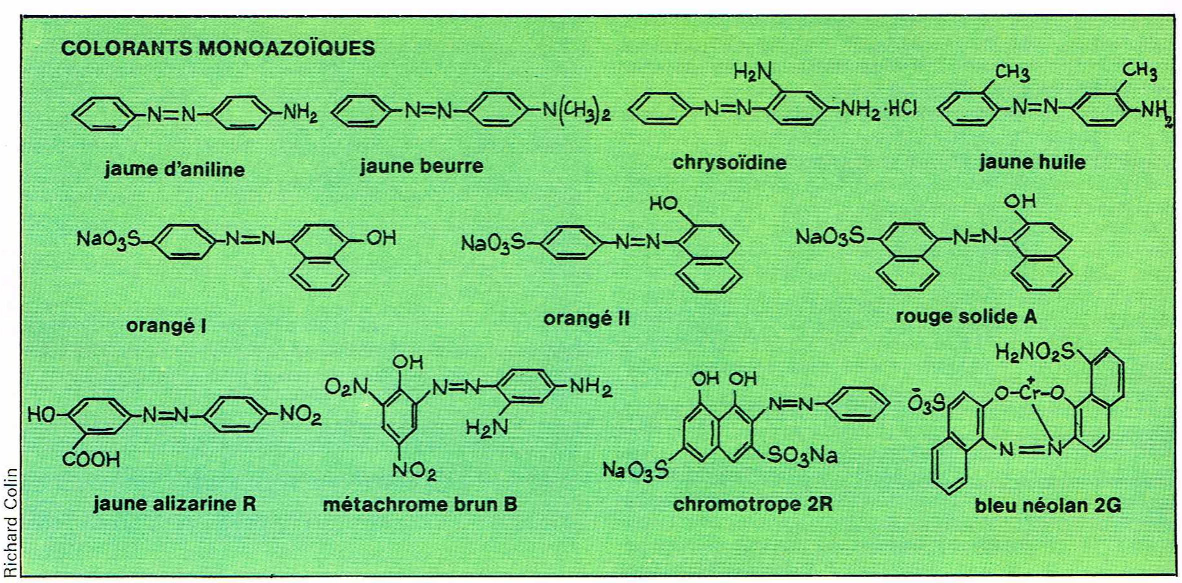

Richard Colin

▶ ***Structures des*** **colorants monoazoïques.**

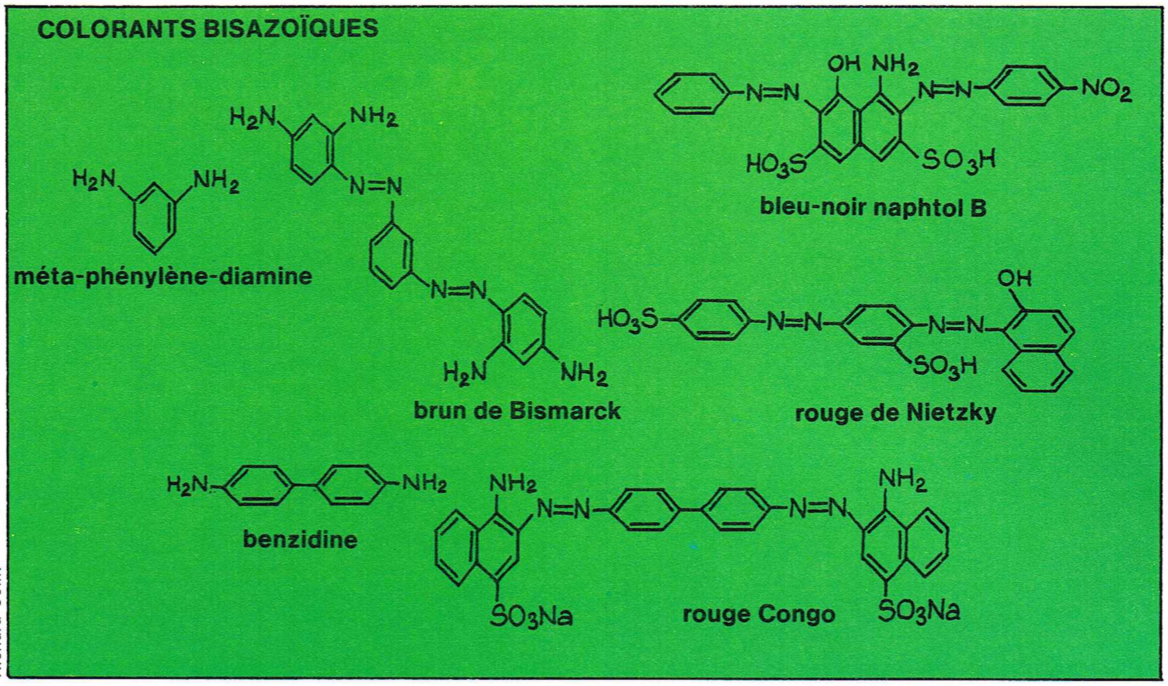

◀ *Structures des* colorants bisazoïques.

planes) s'adsorbent sur les fibres en couches monomoléculaires capables de former des agrégats avec d'autres molécules de colorants. Ces agrégats sont trop volumineux pour s'échapper d'entre les fibres.

Les colorants réactifs n'ont été découverts que vers 1920. Ils possèdent un ou deux groupes très réactifs (atome de chlore labile) qui peuvent s'additionner facilement sur les fonctions —OH de la cellulose ou —NH— de la laine pour donner des liaisons covalentes très stables, d'où une excellente tenue au lavage de ces teintures. Le groupe réactif le plus utilisé est le chlorure de cyanuryle. On obtient ainsi des tonalités plus brillantes qu'avec les colorants directs, ce qui a sérieusement diminué l'intérêt de ces derniers. Exemple de colorant de ce groupe : l'*orangé brillant procion GS.*

Colorants bisazoïques

Leur préparation peut être envisagée de plusieurs façons :

— à partir d'un coupleur ayant deux positions réactives sur lesquelles viennent se fixer deux molécules de sel de diazonium identiques ou non : *bisazoïques primaires ;*

— par diazotation d'un colorant monoazoïque portant une fonction $—NH_2$ libre suivie d'une copulation : *bisazoïque secondaire.*

Les colorants bisazoïques basiques dérivent pour la plupart de la métaphénylène diamine et de ses dérivés. Les plus connus sont le *brun de Bismarck* et le *rouge de Janus.*

Les colorants bisazoïques acides peuvent être primaires ou secondaires. Les plus importants dérivent de l'acide H comme le *bleu-noir naphtol B.* Le *rouge de Nietzky* (ou *Biebrich*) est un colorant secondaire teignant la laine en rouge avec des reflets bleus. Ses tenues sont relativement bonnes.

Les colorants bisazoïques métallés sont relativement peu nombreux. Dérivant de l'acide salicylique, ils sont jaunes si leur structure est symétrique *(citronine de chrome R)* ou rouges et même noirs dans les autres cas *(noir diamant F).*

Les colorants les plus importants de ce groupe appartiennent à la catégorie des substantifs. De préparation relativement simple, ils ne sont pas chers et teignent bien le coton en présence de sulfate de sodium. Ils sont donc très utilisés malgré leur faible tenue à la lumière et au lavage. Beaucoup de ces composés dérivent de la benzidine, et leur teinte varie du jaune au rouge et au noir. Le colorant le plus connu de ce groupe est le *rouge Congo.* Ces colorants bisazoïques deviennent plus stables si, possédant une fonction $—NH_2$ libre, ils réagissent avec le phosgène qui les réunit par un pont :

Col—NH—CO—NH—Col.

▼ *Structures de quelques colorants* tri- *et* polyazoïques.

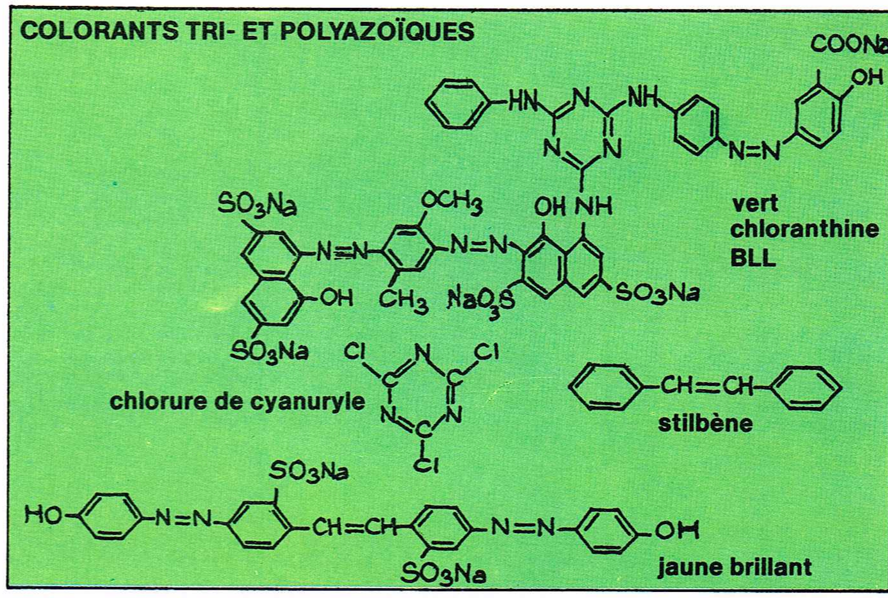

Colorants tri- et polyazoïques

Les principaux colorants triazoïques utilisés en teinture sont des colorants directs qui permettent d'obtenir des teintes n'existant pas pour les colorants mono- et bisazoïques, le vert par exemple. Les teintes vertes sont obtenues par la combinaison (par liaison chimique) d'un colorant jaune avec un colorant bleu.

▼ *Combinaison d'un colorant jaune et d'un colorant bleu pour l'obtention d'une teinte verte.*

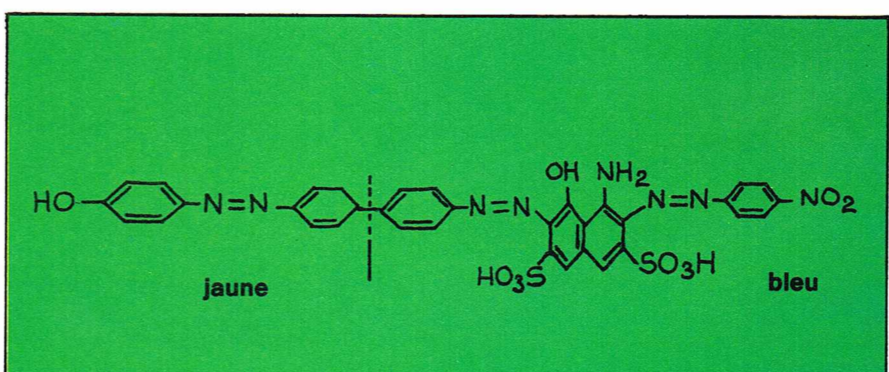

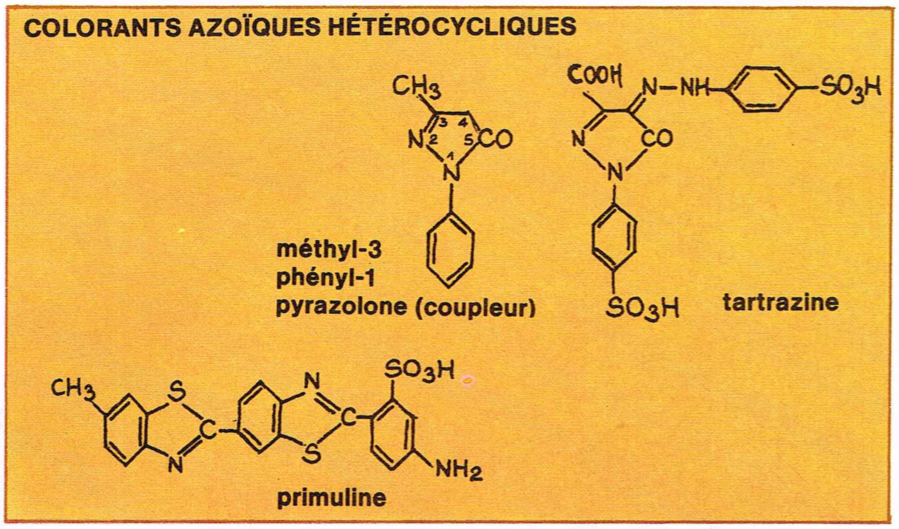

▲ *Structures de deux* colorants azoïques hétérocycliques, *la* tartrazine *et son coupleur, et la* primuline.

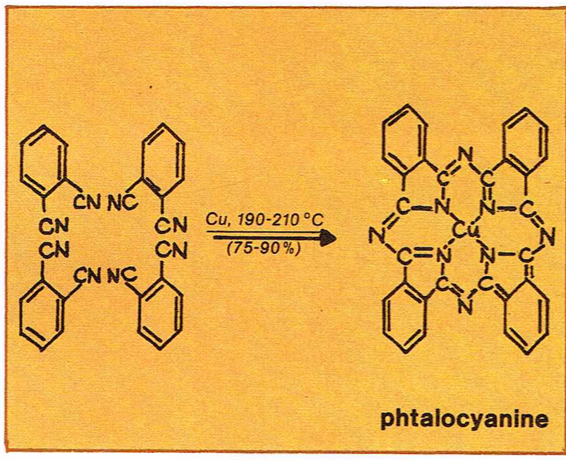

▶ *Structure de la* phtalocyanine de cuivre.

Cette combinaison peut être obtenue soit par une succession de diazotations et de copulations, soit par condensation avec un composé polyréactif comme le phosgène ou le chlorure de cyanuryle. Les colorants *chlorantines* très brillants sont de ce type.

Les colorants tétrazoïques sont bien moins brillants. Très solides à la lumière et au lavage, ils sont utilisés principalement dans l'industrie du cuir.

Dans ce groupe de colorants il faut inclure les dérivés bisazoïques du stilbène, colorants substantifs du coton, très stables à la lumière mais peu au lavage. Les teintes vont du jaune à l'orangé *(jaune brillant)*. En général, ils s'obtiennent par une bis-diazotation de l'acide diamino-4,4′ stilbène disulfonique-2,2′ suivie d'une copulation avec deux phénols ou naphtols.

Colorants azoïques hétérocycliques

La méthyl-3 phényl-1 pyrazolone-5 est un excellent coupleur donnant de nombreux colorants jaunes comme la *tartrazine* utilisée dans la teinture du cuir, du papier, du savon, des aliments et en imprimerie. Notons que son nom dérive de l'acide tartrique (important sous-produit de la vigne), à partir duquel elle se prépare très facilement. D'autres hétérocycles, tel le thiazole, ont également été utilisés. Parmi ceux-ci, la primuline permet des réactions de diazotation et de copulation. Les colorants rouges obtenus ont une mauvaise tenue à la lumière.

Les phtalocyanines

Les *phtalocyanines* représentent un groupe important de substances colorées insolubles dans l'eau et dans la plupart des solvants usuels. C'est en 1927 que les chimistes Diesbach et von der Weid avaient observé la formation d'un colorant bleu foncé par chauffage de l'ortho-dibromobenzène avec du cyanure de cuivre dans la pyridine. La structure de cette phtalocyanine de cuivre ne fut éclaircie que bien plus tard : elle ressemble à celle de la porphyrine contenue dans la chlorophylle et dans l'hémoglobine du sang. Ce colorant est remarquablement stable vis-à-vis de la plupart des réactifs chimiques (soude et acides forts). La couleur de la phtalocyanine dépend de sa forme cristalline et de la nature du métal complexé : la phtalocyanine de plomb est jaune verdâtre, celles de nickel, de cobalt et de cuivre sont bleues. Si le noyau benzénique porte des atomes de chlore, on obtient une série de colorants verts très brillants.

Ces phtalocyanines peuvent être utilisées sans leur atome de métal ; elles peuvent être diazotées en colorant azoïque ou substituées par des groupes $—SO_3H$ ou —COOH pour leur donner une certaine solubilité dans l'eau. La fabrication des encres, des peintures à l'huile, des vernis et laques sont les principaux débouchés de ces pigments.

Les fibres textiles

On distingue quatre grands groupes de fibres textiles :
— les fibres végétales (coton, chanvre, jute, lin) ;
— les fibres animales (laine, soie) ;
— les fibres semi-synthétiques (acétate de cellulose, rayonne, viscose, caséine, etc.) ;
— les fibres synthétiques : polyamides (Nylon, Rilsan),
polyuréthannes (Lycra),
polyesters (Tergal),
polyacrylonitriles (Dralon, Orlon),
chlorure de polyvinyle (Rhovyl),
polyènes (Meraklon).

Selon la structure chimique de la fibre textile, il est nécessaire d'utiliser telle ou telle famille de colorants avec telle ou telle méthode de teinture.

Les fibres végétales

Elles sont toutes à base de cellulose, macromolécule naturelle très riche en groupes —OH hydrophiles. De ce fait, le coton ne peut pas être teint avec des colorants acides ou basiques pour lesquels les fonctions —OH n'ont aucune affinité. Seuls les colorants portant des groupes réactifs vis-à-vis des —OH peuvent être utilisés. Mais un mordançage du coton par le tanin rend l'utilisation de colorants basiques possible. Un autre procédé consiste à précipiter le colorant dans la fibre : colorants azoïques à développement, colorant de cuve, colorant au soufre dissous dans une solution de sulfure de sodium. La teinture du lin et du chanvre est plus difficile à cause de la faible diffusion des colorants entre ces fibres. Par contre, le jute, légèrement plus acide, accepte bien les colorants basiques.

Les fibres animales

Les protéines contiennent des groupes $—NH_2$ et —COOH libres pouvant fixer des colorants acides ou basiques. Les fonctions $—NH_2$ et —NH— peuvent aussi donner des liaisons covalentes très solides avec de nombreux colorants réactifs. Les colorants directs ou substantifs teignent bien la laine en bains acides ou alcalins. Si les colorants de cuve sont moins utilisés actuellement, le mordançage par les sels métalliques (aluminium, fer, chrome, cuivre) de la laine et de la soie est une technique très utilisée avant, après ou pendant la teinture. Les plus beaux noirs sont obtenus par un mordançage au chrome.

Les fibres semi-synthétiques

On distingue celles qui sont hydrophiles et se teignent comme le coton, et celles qui sont imperméables à l'eau (acétate de cellulose). Pour ces dernières, il faut introduire le colorant dans la fibre en solution avant filage ou bien utiliser le léger pouvoir solvant de la fibre gonflée pour dissoudre certains colorants dispersés dans le bain de teinture.

Les fibres synthétiques

La teinture de celles-ci est difficile en raison de l'absence de groupes réactifs. On introduit le colorant dans la fibre avant filage, ou bien on utilise des colorants plastosolubles dispersés dans des bains portés à 80 ou 130 °C. De cette façon seulement on aboutit à des teintures présentant une excellente tenue à la lumière, au lavage et au frottement.

La teinture

Un tissu coloré doit être lavable, c'est-à-dire que ses colorants doivent avoir une bonne tenue au lavage. Donc un bon colorant textile sera celui qui pénétrera, par absorption et diffusion, dans la fibre pour s'y ancrer par liaison chimique ou insolubilisation. De ce fait, la constitution chimique et physique des fibres est déterminante quant au choix du procédé de teinture. La majorité des teintures se fait en milieux aqueux ; il est donc important de connaître le comportement des fibres textiles envers l'eau.

Toutes les fibres naturelles ou artificielles sont constituées de macromolécules provenant de l'union de nombreuses molécules simples. A certains endroits, les macromolécules de plusieurs fibres peuvent s'unir par des liaisons hydrogène pour former des *cristallites* ou *micelles* ordonnées et orientées selon l'axe principal de la fibre. Ces micelles sont séparées les unes des autres par des *zones de désordre*. Les molécules de colorant ne peuvent passer entre les macromolécules des micelles et ne peuvent non plus s'y fixer. La fibre est dite hydrophile lorsqu'elle absorbe des molécules d'eau dans les zones de désordre, ce qui provoque le gonflement de celles-ci et facilite la pénétration des grosses molécules de colorant. Mais le degré de gonflement d'une fibre dépend de sa composition. Ainsi, la rayonne absorbe jusqu'à 100 % de son poids en eau, le coton 50 %, l'acétate de rayonne 20 % et les fibres synthétiques de 4 à 5 %. L'absorption du colorant à la surface de la fibre dépend de plusieurs facteurs : pour vaincre la répulsion électrostatique entre le colorant substantif et la surface de la fibre, il est nécessaire d'ajouter un électrolyte fort (généralement acide) dans le bain de teinture. La diffusion ou migration du colorant à l'intérieur de la fibre est favorisée par le gonflement de la fibre, de préférence à chaud. A ce stade, il se produit une réaction chimique de liaison entre le colorant et la fibre. Et celle-ci peut revêtir plusieurs aspects selon que l'on a formation de liaisons covalentes (avec les colorants réactifs), de liaisons ioniques (laine, soie, Nylon) ou des liaisons hydrogène avec les groupes —OH de la cellulose. Dans ce dernier cas, la molécule de colorant doit être aussi longue et plane que possible afin de former un maximum de liaisons.

C. Bazin - Ugine Kuhlmann

▲ ***La constitution chimique et physique des fibres est déterminante quant au choix du procédé de teinture : ici, essais de teintures au Praxitest.***

C. Bazin - Ugine Kuhlmann

◀ ***Essai d'application de la teinture sur écheveaux.***

Perrucchetti

Teinture par colorants de cuve

La teinture en cuve est connue depuis fort longtemps. C'était la seule technique permettant de teindre le coton en bleu avec l'*indigo*. La molécule d'indigo peut accepter deux atomes d'hydrogène pour se transformer en dérivé *leuco* incolore et soluble dans les solutions alcalines diluées. A ce stade, le dérivé *leuco* présente une bonne affinité pour le coton sur lequel il se fixe. L'étoffe est ensuite sortie de la cuve de teinture et laissée à l'air où le *leuco* s'oxyde en *indigo bleu*. Du fait de son insolubilité, le colorant reste fixé entre les macromolécules de la fibre et résiste au lavage. Comme réducteur on utilise principalement l'hydrosulfite de sodium $S_2O_4Na_2$ alors que le sulfure de sodium sert à solubiliser les colorants au soufre. L'importance industrielle de ce type de colorant a beaucoup diminué avec la découverte des colorants du type *indanthrone* de structure quinonique : la quinone colorée (les principaux colorants sont bleus) peut être réduite (réduction) en hydroquinone (forme *leuco* soluble) qui peut se réoxyder réversiblement en colorant insoluble :

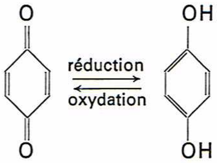

La teinture sur mordant

La teinture sur mordant était utilisée depuis très longtemps pour teindre le coton et d'autres tissus en jaune, en rouge ou en violet avec l'*alizarine*. On obtenait son complexe alumino-calcique (nommé *rouge turc*) selon un processus fort compliqué (jusqu'à 15 opérations successives, dont : traitement à l'huile d'olive rance contenant du calcaire, puis avec une solution de sulfate d'aluminium, traitement par la vapeur, etc.), qui demandait fréquemment plusieurs mois. On préfère utiliser aujourd'hui un excellent agent de dispersion (qui n'est pas un savon) : l'*huile de rouge turc :*

$$CH_3(CH_2)_5\underset{\displaystyle |\atop \displaystyle OSO_3H}{CH}CH_2CH = CH(CH_2)_7COOH$$

qui permet de réduire la durée de la teinture à cinq jours seulement.

Les colorants à mordant possèdent des groupes —OH et —COOH qui peuvent fixer un ion métallique en formant une « laque » insoluble. L'imprégnation des tissus par le mordant s'effectue en deux étapes : trempage dans une solution de tanin, puis dans une solution de tartrate d'antimoine où le tanin est insolubilisé et peut alors former des laques avec les colorants basiques solubles.

Teinture avec des colorants acides ou basiques

Les colorants acides contiennent des groupes —SO_3H et teignent directement la laine en bain acide (acide sulfurique ou acide acétique). La montée du colorant sur la soie est moins bonne, et le coton ne l'accepte pas. Par contre, les colorants basiques, qui contiennent des fonctions azotées, teingent directement la soie et moins bien la laine en bain neutre.

▼ A gauche, appareillage de teinture « en corde » pour tissu à maille. A droite, procédé de teinture « en filet », avec essoreuse, par centrifugation.

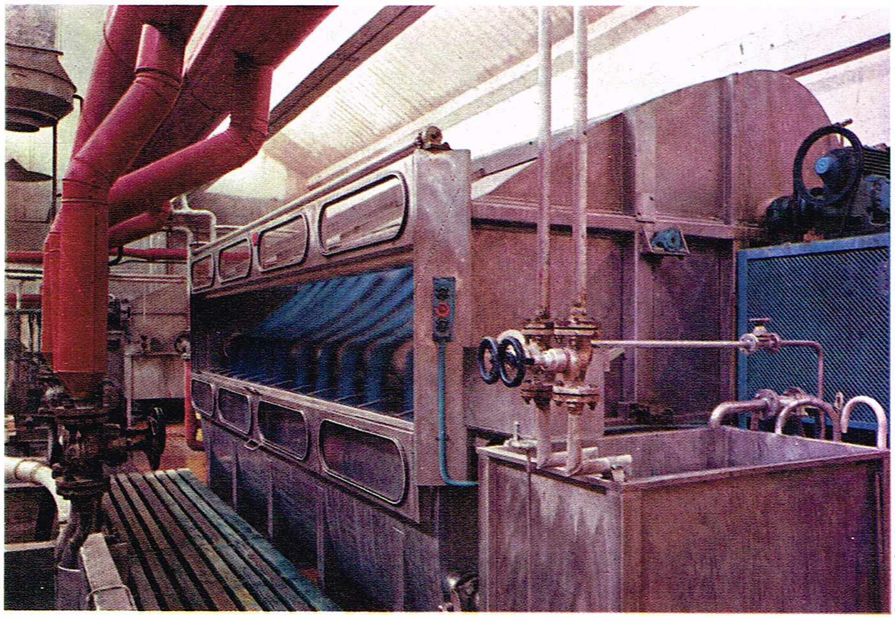

C. Dani

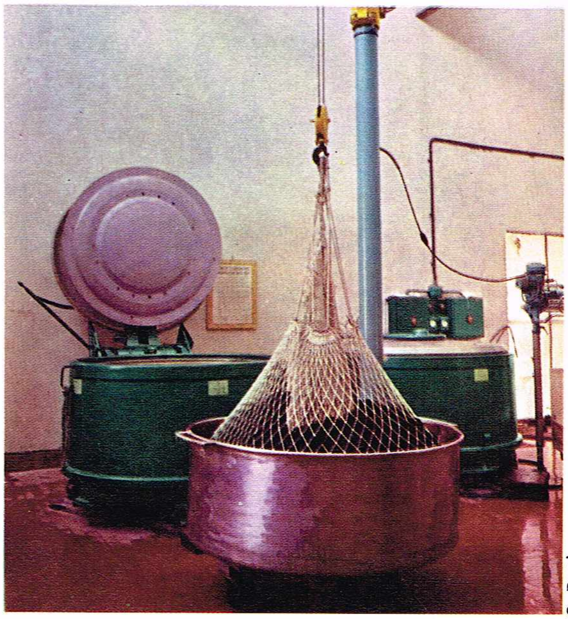

C. Dani

Teinture avec les colorants substantifs

Par colorants substantifs on entend ceux qui sont capables de se fixer directement sur la fibre. Ils ont une importance particulière pour le coton qui, à la différence de la laine et de la soie, ne possède pas de groupe fonctionnel capable de salifier un colorant. Donc la molécule de colorant substantif doit pouvoir se fixer sur le coton au moyen de liaisons hydrogène. De ce fait, comme nous l'avons déjà indiqué, la molécule de colorant doit être allongée et plane pour pouvoir former un maximum de liaisons, seule condition pour obtenir une teinture relativement stable. Évidemment, la quantité de colorant absorbée par la fibre peut être augmentée par addition de sel (relargage) au bain de teinture. Le *rouge Congo* découvert par Bottiger, en 1884, convient à ce type de traitement malgré sa faible stabilité et sa grande sensibilité aux acides (il est utilisé comme indicateur coloré de pH).

Teinture avec formation de colorant sur la fibre

Une excellente méthode pour appliquer les colorants azoïques sur le coton fut brevetée en Angleterre en 1880 : elle consistait à immerger le coton dans une solution alcaline d'un phénol, et à ajouter ensuite une solution, refroidie par un mélange glace-sel, d'un sel de diazonium. Le colorant azoïque se forme ainsi directement sur la fibre où il reste solidement fixé. Ces colorants azoïques sont appelés « à la glace ». Un procédé inverse fut appliqué, dès 1887, pour le *rouge de primuline :* le coton est trempé dans une solution d'amine aromatique qui est ensuite diazotée puis développée (copulation) par immersion dans un bain de phénol.

Parmi la multitude de colorants développés sur la fibre, il faut signaler un petit, mais très important, groupe de colorants obtenus par oxydation d'amines aromatiques sur la fibre : les colorants de développement aziniques. Le plus important de cette série est le *noir d'aniline,* obtenu par Lightfoot en 1863 : on trempe le coton dans un bain contenant du chlorhydrate d'aniline, du chlorate de sodium (oxydant), et du vanadate d'ammonium comme catalyseur. Par séchage à 60 ou 100 °C, on obtient une teinte vert bouteille foncé par la formation d'un composé intermédiaire : la *pernigraniline.* Dans un second bain contenant du chlorhydrate d'aniline, du bichromate de sodium et de l'acide sulfurique dilué, on complète l'oxydation de l'aniline en un magnifique colorant noir qui a trouvé de nombreuses applications. Mais sa constitution chimique est encore sujette à discussion. Le *brun de paramino,* connu depuis 1904, est préparé à partir de paraphénylènediamine ; il est très utilisé dans la teinture des fourrures.

L'impression des tissus

L'impression d'un tissu consiste à teindre celui-ci avec plusieurs colorants selon un motif bien déterminé.

L'impression *batik,* connue depuis fort longtemps par les peuples d'Orient, consiste à déposer sur le tissu, et selon le dessin voulu, une couche de cire imperméable au bain de teinture. Après teinture du reste de l'étoffe, cette cire est éliminée soit par la chaleur, soit à l'aide d'un solvant. Évidemment, on peut appliquer ce procédé plusieurs fois successivement, mais il est très long. C'est un procédé dit « à réserve ».

L'impression « au rouleau » consiste à graver un cylindre de cuivre pour former des creux qui pourront contenir le colorant sous forme de pâte épaisse. Après report de cette pâte sur le tissu et passage sur un cylindre chauffant qui accélère la migration du colorant dans la fibre, le tissu peut repasser sur un second cylindre de colorant, et ainsi de suite, à raison de 10 à 40 mètres par minute. Une variante consiste à utiliser des pigments du type de la phthalocyanine en suspension dans un hydrocarbure avec une résine thermodurcissable et une résine plastifiante. Par chauffage, le pigment reste « collé » sur la fibre. Si l'impression au rouleau convient particulièrement bien aux colorants substantifs et réactifs, on peut aussi l'utiliser pour les colorants de cuve : les réserves du cylindre contiennent le colorant réduit et le tissu ainsi imprimé passe dans un bain oxydant. Afin de rendre ces colorants réduits encore plus solubles dans l'eau, on peut estérifier les fonctions —OH par l'acide sulfurique en $—OSO_3Na$. Ces esters s'hydrolysent dans les bains oxydants ; de cette façon on peut obtenir des teintes pastel très régulières.

Les colorants de développement servent également à l'impression : tout le tissu est imprégné soit d'une solution de naphtol, l'amine diazotée étant appliquée au

◄ *Page ci-contre, en haut, procédé artisanal de teinture d'écheveaux dans un quartier de Marrakech (Maroc).*

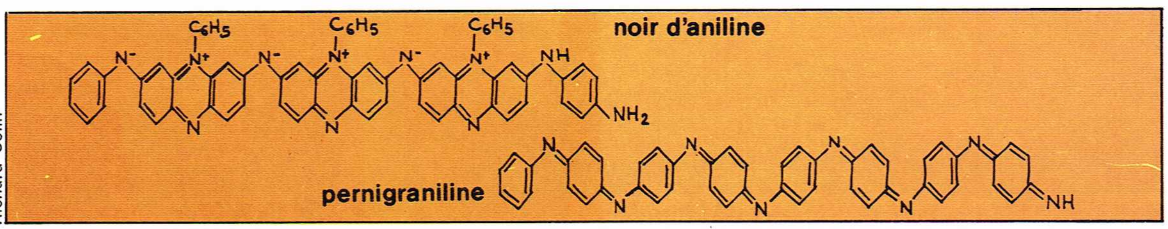

Richard Colin

C. Dani

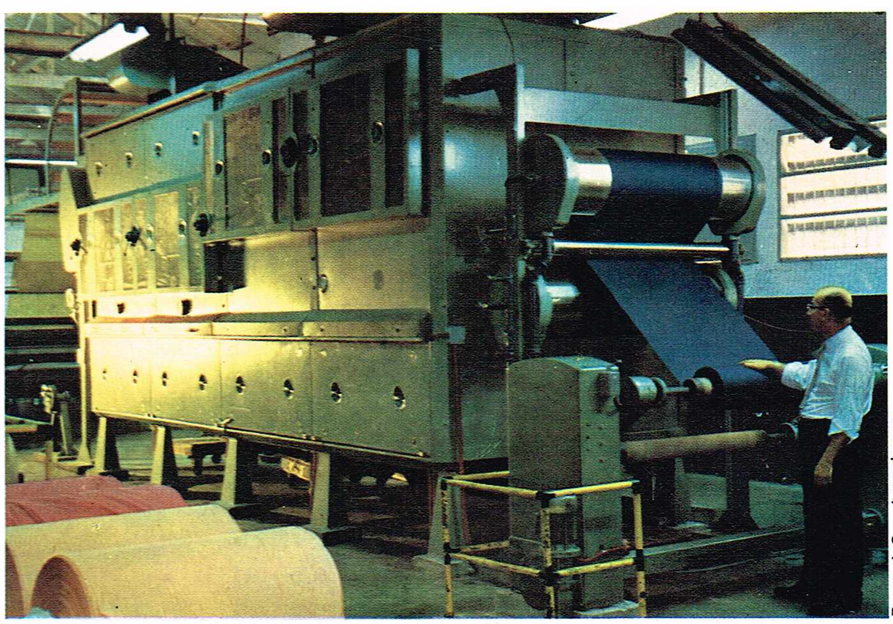

Bayer A.G. - Leverkusen

▼ *A gauche, séchoir pour tissu à maille, à cycle intermittent. A droite, sortie du tissu, après fixage à chaud du colorant, dans une unité de teinture en continu.*

rouleau gravé, soit d'une solution d'amine diazotée, le naphtol étant imprimé au rouleau.

Une technique analogue est utilisée pour les colorants à mordant : le tissu est imprimé avec une pâte contenant le colorant et le mordant ; la teinte est développée et fixée grâce au passage sur un cylindre chauffant.

L'impression par corrosion consiste à réduire localement, selon le motif désiré, un colorant azoïque. On applique sur le tissu teint uniformément une pâte d'hydrosulfite de sodium grâce au cylindre gravé. Il se forme une amine incolore qui est éliminée par lavage en laissant une zone blanche de corrosion. Par contre, les colorants de cuve donnent dans ces conditions un dérivé leuco réoxydable : il faut alors l'estérifier (bloquer) par le chlorure de benzyle.

Tenues de la teinture

Les tissus colorés doivent convenir à certaines exigences selon leur usage et leur destination. Il va de soi qu'un tissu pour parasol devra avoir une bonne tenue à la lumière, alors que celui destiné à la confection des chemises devra garder ses qualités au lavage, et que les tissus de doublure devront montrer une bonne tenue au frottement et à la sueur. Parmi toutes ces exigences d'utilisation, il faut citer les plus importantes.

— La teinture d'un tissu doit être homogène, de façon à présenter une teinte bien uniforme, ce qui n'est pas toujours le cas des colorants au soufre.

— Une mauvaise tenue à la lumière peut se traduire par deux effets : décoloration et destruction du colorant ou destruction de la fibre à cause du colorant qui joue le rôle de catalyseur photochimique par l'énergie lumineuse qu'il peut accumuler.

— Un bon colorant doit être insoluble dans l'eau pour ne pas être éliminé par simple lavage (dissolution et effet mécanique du lavage). L'eau de mer ne convient pas à certains colorants.

— La tenue au chlore est de rigueur pour la majeure partie du linge de maison.

— Certains colorants sont sensibles aux acides ou aux bases. L'utilisation de savons basiques est alors à proscrire.

— Enfin certains colorants se décomposent à l'air : c'est le cas des colorants au soufre qui peuvent donner de l'acide sulfurique qui détruit la fibre.

Usages particuliers de certains colorants

Si les industries de la teinture et de l'impression sont les plus gros consommateurs des colorants de synthèse, d'autres secteurs les utilisent en de nombreuses applications.

Ainsi, les biochimistes se servent de colorants substantifs pour colorer sélectivement certaines parties des préparations microscopiques. Les chimistes, de leur côté, utilisent de nombreux colorants dérivés de la *phénolphtaléine* ou de colorants azoïques *(rouge Congo)* comme indicateurs de pH. Selon la concentration en protons d'une solution (acidité), ces colorants changent de couleur, ce qui permet le dosage des acides et des bases.

▼ ***Formules du*** **bleu** ***et du rouge trypan, colorants utilisés notamment pour la lutte contre les Protozoaires.***

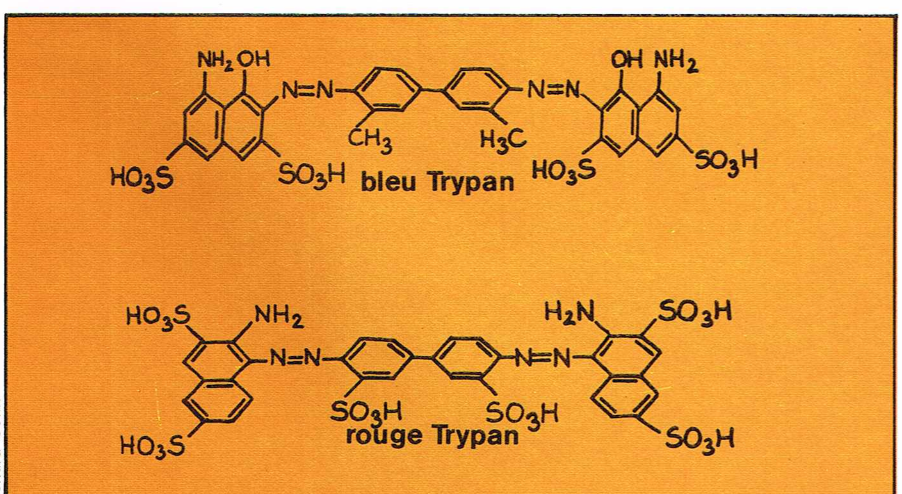

Richard Colin

La *fluorescéine* et l'*éosine,* du groupe du triphénylméthane, servent à la coloration des eaux en vue de la connaissance du tracé souterrain des rivières.

La pharmacopée contient plusieurs colorants ayant des propriétés antibiotiques *(cyanines),* pour la lutte contre les Protozoaires *(bleu* et *rouge trypan),* anthelminthiques *(cyanines),* comme désinfectants *(bleu de méthylène),* etc.

L'industrie photographique moderne a un grand besoin de colorants :

— colorants sensibilisateurs (*cyanines* exclusivement) ;

— colorants filtres (couches-filtres, masques, filtres optiques) ;

— colorants coupleurs (colorants développés *in situ* du type azométhinique) ;

— colorants images : Technicolor, Dye transfer, Polacolor.

En plus de toutes ces applications, les colorants à usage alimentaire ont pris une extension considérable avec l'accroissement des aliments en conserve. Malheureusement, les colorants naturels de ces aliments ne résistent pas à la cuisson et à la conservation, au détriment de l'aspect appétitif de ceux-ci. On utilise donc des colorants sous le contrôle d'une réglementation très sévère.

Enfin il ne faut pas oublier l'important usage des colorants du type azométhinique dans la teinture des cheveux.

▶ ***Essais d'encres pour imprimerie.***

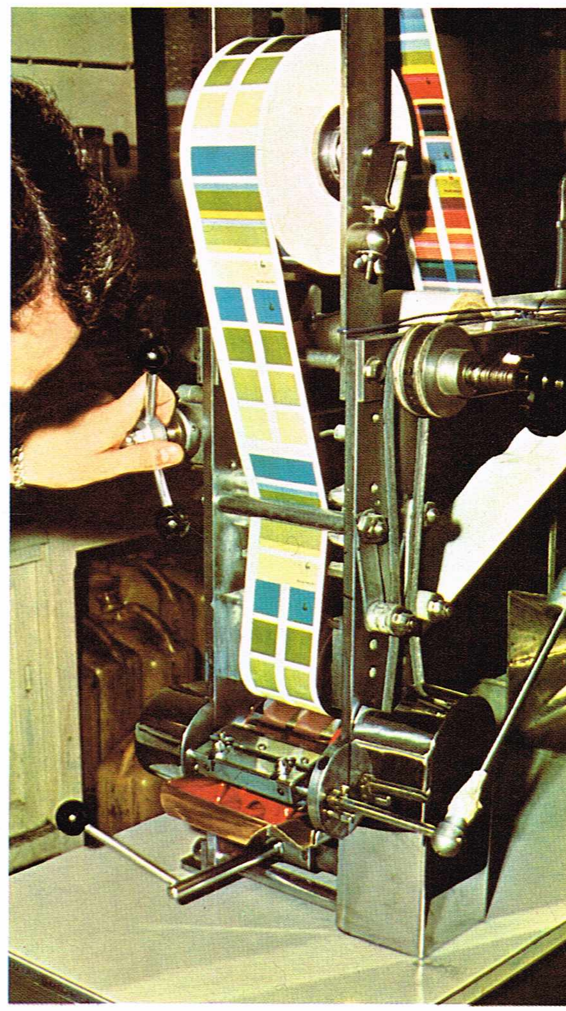

C. Bazin - Ugine Kuhlmann

BIBLIOGRAPHIE

GORE T. et JOSHI B., *Chemistry of Natural and Synthetic Colouring Matters,* Academic Press, New York, 1962. - GRIGNARD V., *Traité de chimie organique,* Masson, Paris, 1954. - SCHWEIZER H., *Künstliche Organische Farbstoffe und ihre Zwischenprodukte,* Springer Verlag, Berlin, 1964. - VENKATARAMAN K., *The Chemistry of Synthetic Dyes,* Academic Press, New York, 1952.

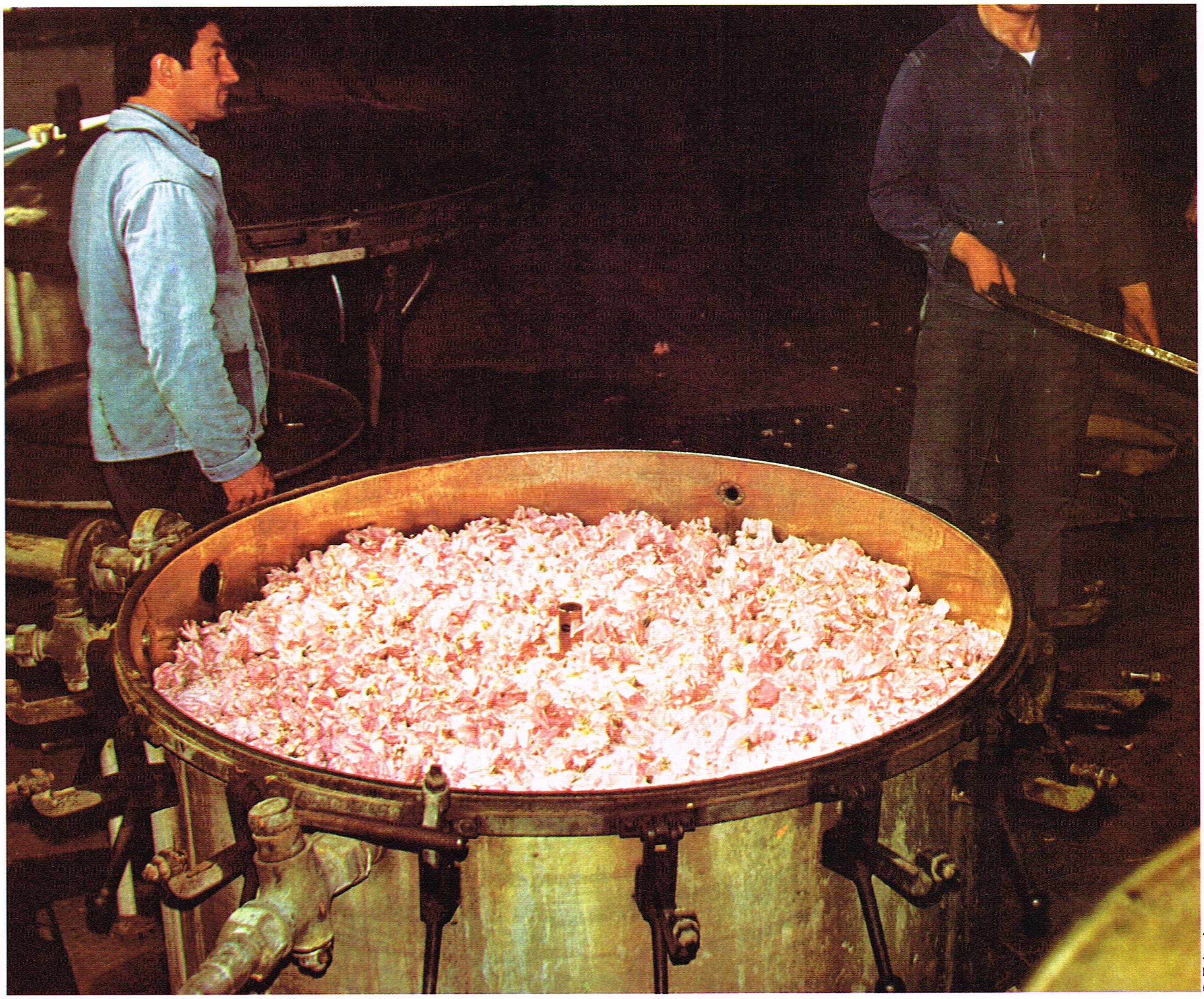

P. Teisseire

▲ *Fabrication de l'essence concrète de rose de Grasse* **(Rosa centifolia).**

QUELQUES ASPECTS CHIMIQUES DES PARFUMS

La femme qui, d'un geste précis, passe un doigt parfumé derrière son oreille ou qui vaporise sur elle son parfum préféré ne soupçonne pas la somme de travaux et de connaissances chimiques qu'a nécessitée la confection de ce parfum. Il en est de même lorsque, transformée en ménagère, elle utilise des détergents ou tout autre article de ménage parfumés; également, lorsque la plupart d'entre nous utilisons une eau de toilette, ou bien lorsque nous nous lavons les mains avec une savonnette parfumée.

Tous ces parfums, qui ne se différencient la plupart du temps que par leur prix de revient, sont constitués d'un mélange harmonieusement équilibré de produits odorants naturels et synthétiques.

Produits odorants naturels

Les produits naturels sont constitués par des dérivés de **produits végétaux** tels que les huiles essentielles et les produits d'extraction par les solvants volatils; des **produits d'origine animale** sont également utilisés, tels que le musc, l'ambre ou la civette.

Les *huiles essentielles* sont obtenues par entraînement à la vapeur d'eau (hydrodistillation) de différents matériaux végétaux tels que fleurs, feuilles, tiges ou plantes entières. Elles peuvent être également obtenues par expression, c'est le cas des fruits de *Citrus* en général (orange, citron, bergamote, limette, etc.).

On connaît actuellement plus de 2 000 huiles essentielles, dont près de 200 font l'objet de transactions commerciales internationales importantes. Une centaine d'entre elles sont d'un usage courant; parmi elles, une trentaine sont obtenues annuellement en quantités comprises entre 100 et 1 000 tonnes. Une dizaine de ces huiles essentielles servent de matières premières pour d'importantes synthèses.

Plus de 90 % de ces huiles essentielles sont constituées principalement par des *terpénoïdes,* parmi lesquels on trouve des hydrocarbures, des alcools, des aldéhydes, des cétones, des oxydes, des acides, des esters, des lactones, etc.

Parmi ces terpénoïdes, les plus abondants sont les *mono-* et les *sesquiterpénoïdes;* on y trouve également quelques hémiterpénoïdes et quelques diterpénoïdes.

Tous ces composés peuvent être considérés comme résultant formellement de la condensation de deux ou de plusieurs unités isopréniques. Cette règle est due à O. Wallach, qui est le véritable fondateur de la chimie des terpénoïdes (prix Nobel de chimie 1910); elle a été ultérieurement précisée par R. Robinson (prix Nobel 1947), et largement généralisée par L. Ruzicka (prix Nobel 1939).

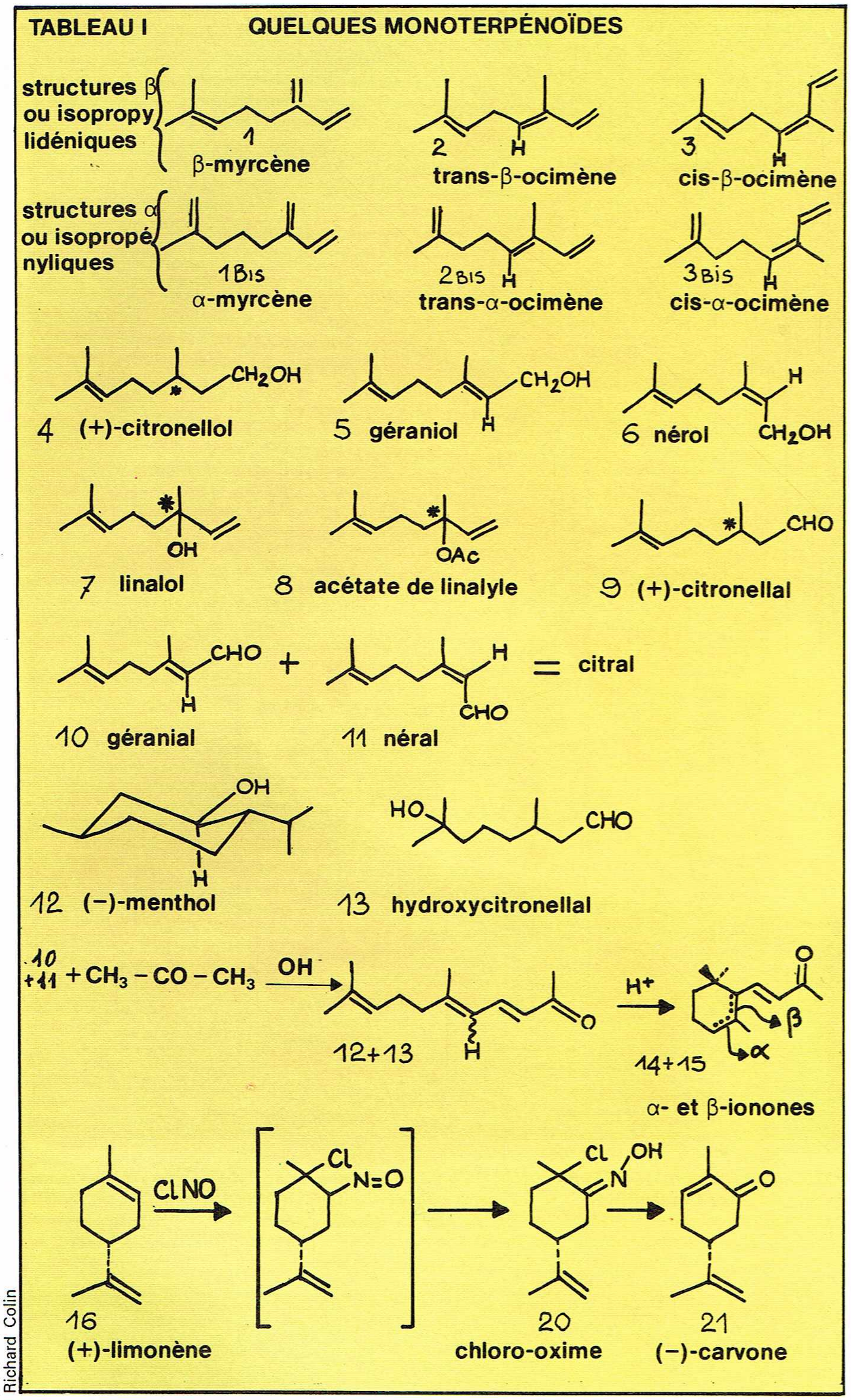

Richard Colin

▲ **Tableau I :** ***structures de quelques*** **monoterpénoïdes.**

Étude succincte des terpénoïdes

Monoterpénoïdes

Parmi les hydrocarbures monoterpéniques aliphatiques (tabl. I), les plus importants sont le *myrcène 1* et les *ocimènes 2* et *3*. La détermination de la structure de ces hydrocarbures, des ocimènes notamment, a fait l'objet de travaux très importants et de controverses passionnées en ce qui concerne la position de la double liaison isolée. En effet, les structures *1, 2* et *3* sont appelées β ou isopropylidéniques, les structures *1 bis, 2 bis* et *3 bis* sont appelées α ou isopropényliques. Les méthodes spectroscopiques modernes ont tranché définitivement cette controverse, et actuellement on sait que tous les composés naturels possèdent la structure β. Les structures α sont obtenues par synthèse ou sont des « artefacts » résultant de traitements chimiques des premiers.

Nous verrons que le β-myrcène *1* a une importance industrielle considérable ; de leur côté, les cis- et trans-β-ocimènes *3* et *2* jouent un rôle olfactif important dans les huiles essentielles de lavande, lavandin, géranium, néroli et basilic, notamment.

A côté de ces carbures, on trouve des alcools, dont les principaux sont le *citronellol 4*, le *géraniol 5* et le *nérol 6*. Ces deux derniers alcools présentent le même type d'isomérie géométrique que celui rencontré dans les β-ocimènes. Le géraniol se trouve dans l'essence de citronnelle et de palmarosa. Le citronellol *4* possède un carbone asymétrique ; on le rencontre sous la forme lévogyre (parfois appelée improprement rhodinol) dans les essences de rose et de géranium ; la forme dextrogyre se trouve dans la citronnelle.

Un autre alcool très important est le *linalol 7* qui, avec son acétate *8*, constitue plus de 80 % de la composition d'un grand nombre d'essences : lavande, lavandin, sauge sclarée, bergamote, néroli, petit-grain, bois de rose, coriandre, etc. Il se présente également soit sous la forme gauche, la plus répandue, soit sous la forme droite.

Les aldéhydes correspondant à ces différents alcools sont le *citronellal 9*, que l'on rencontre dans les essences de citronnelle et d'*Eucalyptus citriodora*, le *géranial 10* et le *néral 11*, désignés généralement sous le nom collectif de *citral*, et qui sont les constituants principaux des essences de lemongrass et de *Litsea cubeba*.

Le (+)-citronellal, peu utilisé en soi, sert de matière première à la fabrication du (—)-*menthol* de synthèse *12*, constituant fondamental des essences de menthe, ainsi qu'à un produit de synthèse pure, l'*hydroxycitronellal 13* possédant une très fine odeur florale du type lilas et muguet.

De son côté, le *citral 10 + 11* sert à la préparation d'une importante série de composés à odeur de violettes, les α- et β-*ionones 14* et *15*, ainsi qu'aux méthyl-ionones. Les premières sont obtenues par condensation du citral avec l'acétone en milieu alcalin ; on obtient ainsi par une réaction d'aldolisation et de crotonisation des *pseudo-ionones 12* et *13*. Ces dernières sont cyclisées en α- et β-*ionones 14* et *15* par un traitement en milieu acide concentré. Les méthyl-ionones sont obtenues de façon analogue en remplaçant l'acétone par la méthyléthylcétone ; leur odeur est du type boisé plutôt que floral.

Parmi les hydrocarbures monoterpéniques monocycliques, il faut citer le *limonène 16*, dont la forme racémique est appelée *dipentène 4*. Le (+)-limonène est le constituant majeur des essences d'orange et de citron.

Il peut être obtenu synthétiquement soit sous forme racémique par pyrolyse de l'α-*pinène 17*, soit sous forme optiquement active par pyrolyse du β-*pinène 18*. Ces deux derniers composés sont des hydrocarbures terpéniques bicycliques extraits des essences de térébenthine, dont les plus abondantes fournissent les pinènes gauches. La pyrolyse du (—)-β-pinène conduit au (—)-limonène.

L'hydrogénation des (—)-α et β-pinènes fournit le (—)-*cispinane 19*, dont la pyrolyse conduit au (—)-dihydromyrcène *22*. Ce dernier, dans des conditions technologiques déterminées, fournit le (+)-citronellol *4*, le (+)-citronellal *9*, l'hydroxycitronellal *13*, etc. De même, la pyrolyse du β-pinène fournit le myrcène qui, par l'intermédiaire d'un dérivé chloré, fournit, suivant les conditions, le géraniol, le nérol, le linalol, l'α-terpinéol *23* ou le myrcénol *24*. On comprend ainsi toute l'importance industrielle que présente le myrcène.

Toutes ces réactions sont résumées de façon très schématique dans le tableau II. Elles représentent partiellement l'aspect moderne de la chimie des pinènes.

Il en existe un autre, beaucoup plus ancien, toujours fort utilisé, et qui débuta par la synthèse du camphre, réalisée en France par Berthelot en 1858. Ce deuxième aspect utilise les réactions acido-catalysées des α- et β-pinènes mettant en œuvre plusieurs transpositions de Wagner-Meerwein. Le tableau III schématise très succinctement l'obtention industrielle du *bornéol 25*, de l'*isobornéol 26* et du *camphre 27*. Les réactions indiquées dans la partie droite du tableau ne sont pas utilisées industriellement à cause de leur prix de revient trop élevé.

Parmi les monoterpénoïdes, il nous faut également signaler l'importance de la *carvone 21*, qui se présente sous la forme dextrogyre dans l'essence de carvi et sous la forme lévogyre dans l'essence de menthe crépue. On a montré actuellement de façon irréfutable que l'odeur des

TABLEAU II ASPECTS MODERNES DE LA CHIMIE INDUSTRIELLE DES PINÈNES

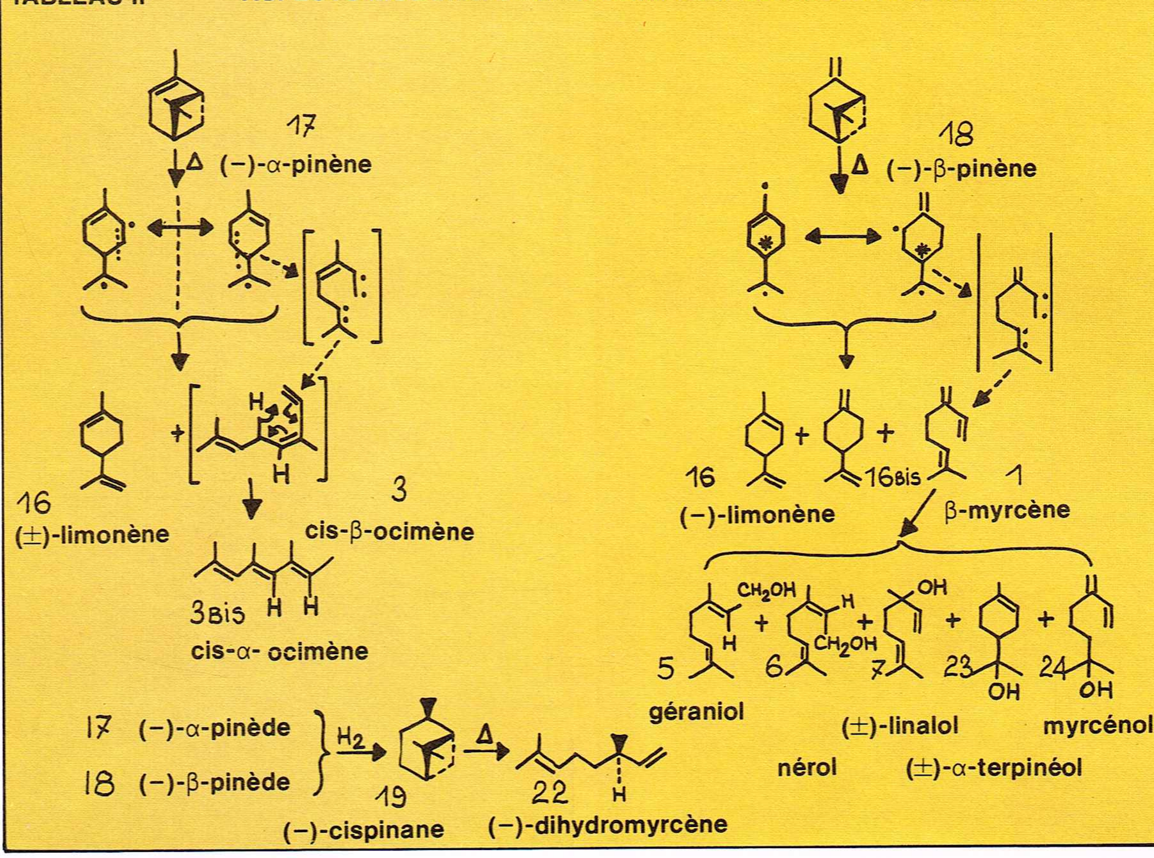

Richard Colin

◀ Tableau II : aspects modernes *de quelques réactions de la chimie industrielle des pinènes.*

▼ Tableau III : aspects traditionnels *de la chimie industrielle des pinènes.*

TABLEAU III ASPECTS TRADITIONNELS DE LA CHIMIE INDUSTRIELLE DES PINÈNES

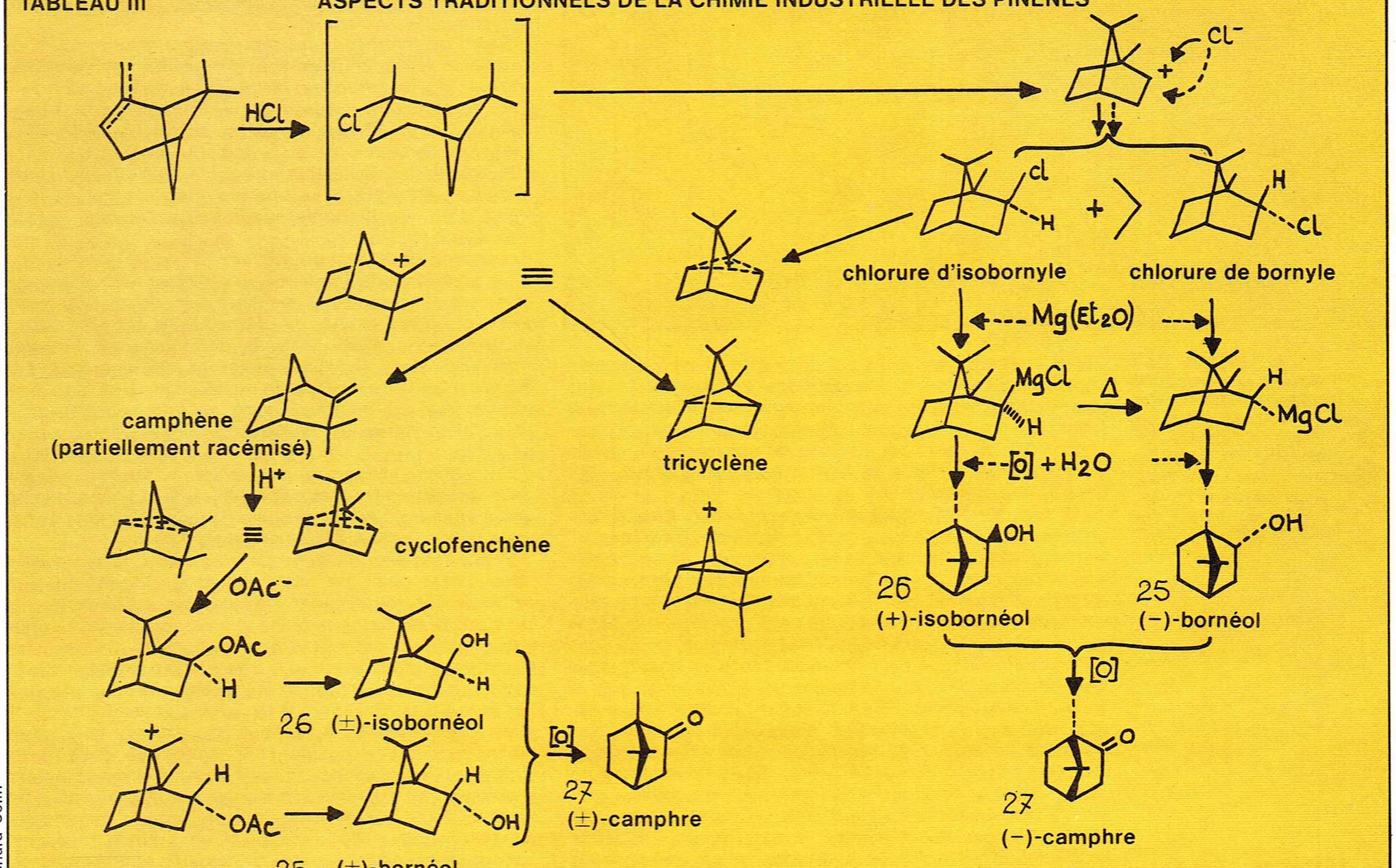

Richard Colin

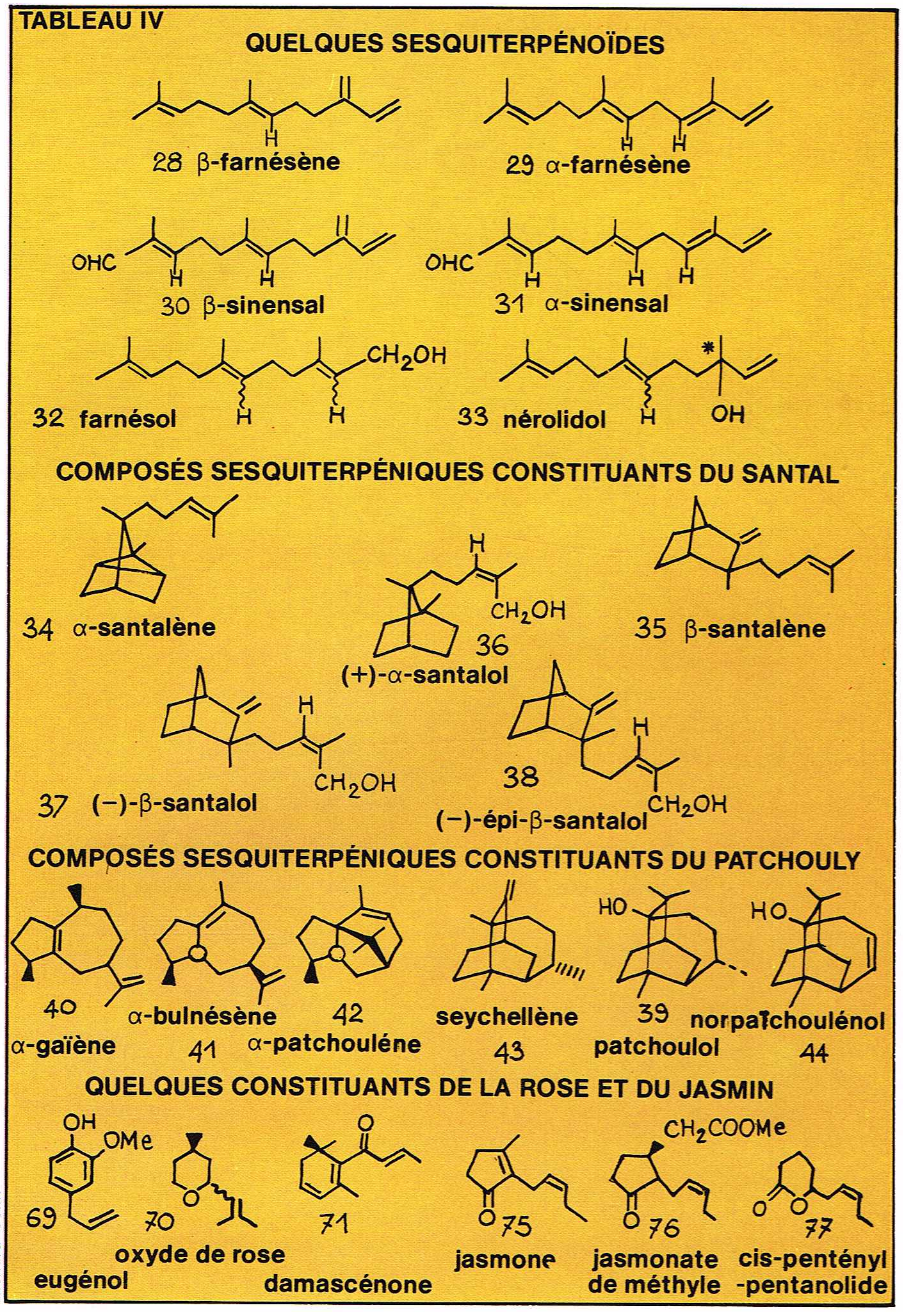

Richard Colin

▲ ***Tableau IV : structures de quelques sesquiterpénoïdes et de leurs principaux composants.***

deux antipodes optiques est différente. C'est la carvone gauche qui possède l'importance industrielle la plus grande. Elle peut être obtenue systématiquement à partir du (+)-limonène, par l'intermédiaire de la chloro-oxime *20,* préparée par addition du chlorure de nitrosyle ClNO (Tilden, 1860) et hydrolyse subséquente.

Sesquiterpénoïdes

Si l'on connaît actuellement environ 200 monoterpénoïdes (à l'exclusion du groupe des iridoïdes généralement inodores) répartis en une quinzaine de squelettes différents, en revanche, les sesquiterpénoïdes forment un groupe de plus de 1 000 composés répartis en une centaine de squelettes. Il n'est donc pas envisageable de les analyser dans le cadre de cette monographie.

Les sesquiterpènes aliphatiques sont les homologues isopréniques des monoterpénoïdes. C'est ainsi que le *β-farnésène 28* est l'homologue du myrcène; l'*α-farnésène 29,* celui du trans β-ocimène. Au β-farnésène correspond un aldéhyde, le *β-sinensal 30*; à l'α-farnésène correspond l'*α-sinensal 31.* Ces deux aldéhydes sont d'importants constituants des essences d'orange.

En ce qui concerne les alcools sesquiterpéniques aliphatiques, les plus répandus sont le *farnésol 32* et le *nérolidol 33.* On les rencontre dans les essences de néroli, de rose, de cabreuva, de *Melaleuca viridiflora,* dans les concrètes de rose et de jasmin (une *essence concrète* est un produit solide ou semi-solide résultant du traitement des matières premières végétales par des dissolvants volatils, généralement l'hexane ou le benzène, suivi de l'élimination de ces dissolvants par distillation). La présence d'une double liaison supplémentaire implique que le nérolidol présente deux isomères géométriques présentant chacun deux antipodes optiques. Quant au farnésol, il présente quatre isomères géométriques.

Principales essences à constituants sesquiterpéniques

Parmi les produits largement utilisés par la parfumerie, on trouve les trois essences suivantes, qui ne sont pratiquement constituées que par des sesquiterpénoïdes ; il s'agit du *santal,* du *patchouli* et du *vétiver.* Nous allons en indiquer les principaux constituants (tableaux IV et V).

Essence de bois de santal

L'essence de bois de santal, obtenue à partir d'arbres poussant aux Indes et en Chine, renferme environ 90 % d'un mélange d'α- et de *β-santalols.* Outre ces alcools, on y rencontre en particulier l'α- et le *β-santalènes 34* et *35,* ainsi que de petites quantités des aldéhydes et des acides correspondant aux santalols.

Le mélange des santalols naturels est constitué par environ 70 % de (+)-α-santalol *36,* 20 % de (—)-β-santalol 37 et 10 % de (—)-épi-β-santalol *38.*

Le β-santalène est le premier sesquiterpène pour lequel Semmler ait proposé une structure exacte en 1910. La synthèse de tous ces composés a été réalisée en laboratoire, mais pour l'instant aucune synthèse industrielle économique n'a encore été réalisée.

L'essence de bois de santal possède une très fine odeur boisée et poudrée.

Essence de feuilles de patchouli

Comme la précédente, l'essence de feuilles de patchouli est connue et utilisée depuis très longtemps. Mais alors que dans le santal presque tous les constituants sont odorants, dans l'essence de patchouli pratiquement 95 % de ces constituants sont inodores ! Il s'agit d'un mélange complexe de carbure sesquiterpénique et d'un alcool tricyclique, le *patchoulol 39.*

Parmi les hydrocarbures représentant environ 45 % de l'essence, les principaux sont l'*α-gaïène 40,* l'*α-bulnésène 41,* l'*α-patchoulène 42* et le *seychellène 43.*

Le patchoulol a été isolé pour la première fois à l'état pur par Gal en 1869 ; il constitue environ 40 à 45 % de l'essence. Sa structure n'a été définitivement établie qu'en 1963. Mais le principal responsable de l'odeur du patchouli n'a été isolé, et sa structure établie, qu'en 1970. Il s'agit d'un alcool norsesquiterpénique appelé *norpatchoulénol 44.*

Essence de racines de vétiver

Le problème de l'essence des racines de vétiver est plus complexe que celui des deux précédents. D'abord, il existe plusieurs variétés de vétiver. Celle qui est presque exclusivement utilisée dans la parfumerie est *Vetiveria zizanoides Stapf,* Graminée poussant à Haïti, à Java, à la Réunion, au Brésil et en Inde méridionale. Une deuxième variété, *Vetiveria nigritana Benth,* est originaire d'Angola. La dernière variété est le *Khus,* qui pousse dans le nord de l'Inde.

Par ailleurs, l'essence de vétiver, contrairement aux deux précédentes, n'est pas utilisée uniquement pour elle-même, mais est susceptible de subir différents traitements conduisant à des « spécialités ».

Enfin, l'essence de *Vetiveria zizanoides,* la seule dont nous dirons quelques mots, présente une composition extrêmement complexe et presque tous ses constituants sont odorants. Ils se rattachent à cinq principaux squelettes sesquiterpéniques : l'*érémophilane,* le *zizaane,* l'*eudesmane,* le *vétispirane* et le *cyclocopacamphane.* Cette essence est caractérisée par la présence de deux cétones, l'α- et la *β-vétivone,* dont la teneur moyenne est de 15 % mais atteint parfois 25 %. Toutefois, ce sont les alcools qui occupent une position privilégiée (60 à 65 % de l'essence) ; leur acétylation fournit un mélange complexe d'acétates fort apprécié des parfumeurs. Ces alcools sont nombreux, et leurs structures ne sont pas encore complètement élucidées. Sur le tableau V, nous avons représenté les structures certaines des principaux constituants de l'essence de *Vetiveria zizanoides.*

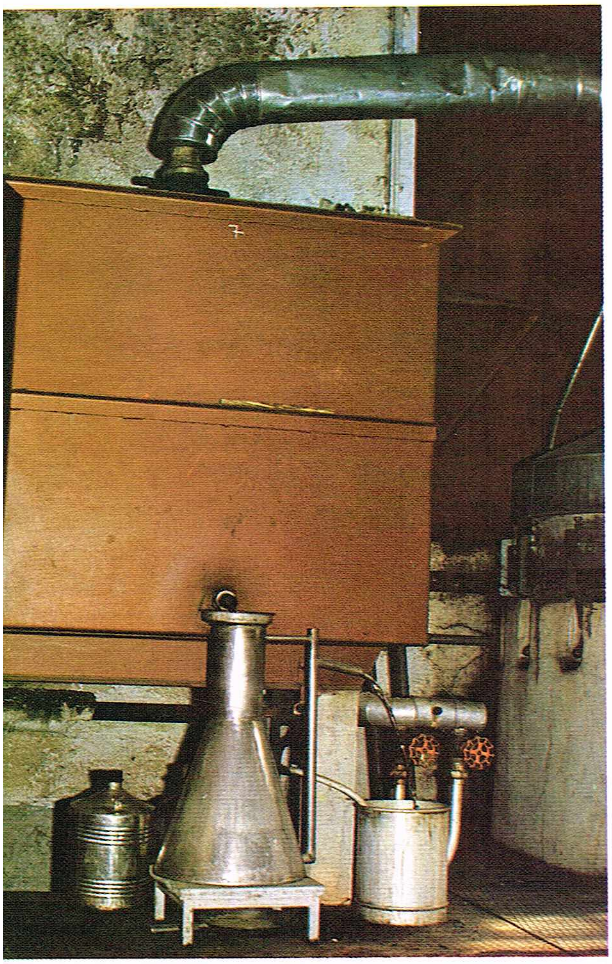

P. Teisseire

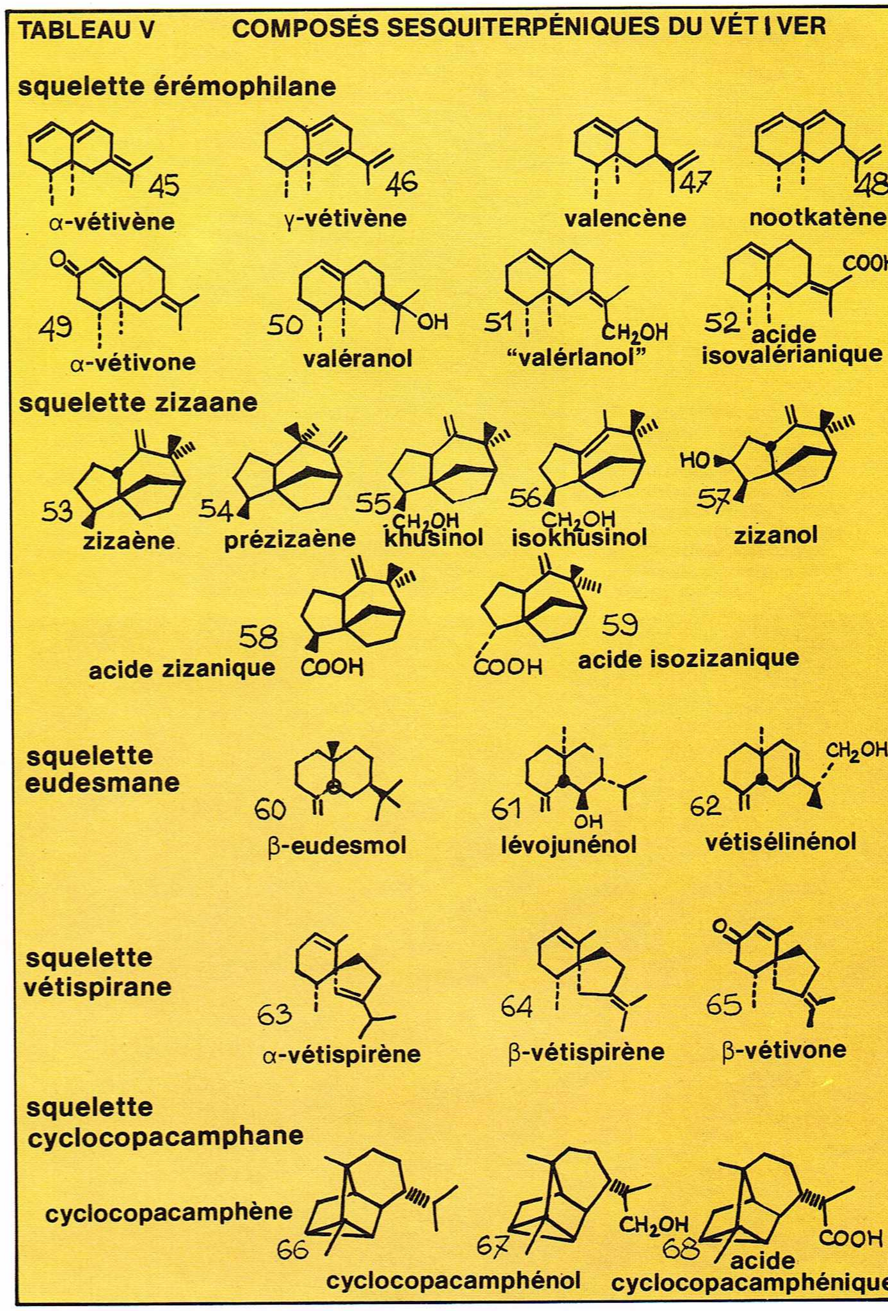

Richard Colin

◄▲ *A gauche, stade de l'obtention d'une* **huile essentielle** *sortant du condenseur. Ci-dessus,* **tableau V** *: structures certaines des principaux constituants de l'essence de* **Vetiveria zizanoides.**

Substances naturelles à odeur florale

Bien que tous les produits dont nous venons de parler soient importants pour l'élaboration d'un parfum, il ne saurait être de beaux parfums sans note rosée ou jasminée. Ces notes peuvent être apportées par les essences concrètes ou absolues de rose et de jasmin pour les parfums dits « de luxe » ou « couture » (les *essences absolues,* ou *Absolues,* résultent du traitement par l'alcool éthylique des essences concrètes; la suspension ainsi obtenue est filtrée, et le filtrat est privé de l'alcool par distillation). Toutefois, ces odeurs sont toutes aussi importantes pour l'élaboration de parfums à prix beaucoup plus modestes, utilisés pour confectionner des eaux de Cologne, de toilette, ainsi que dans celle des parfums pour les cosmétiques en général. Il est donc de première importance de connaître la composition chimique de ces deux produits, dont les prix actuels dépassent plusieurs milliers de francs. En connaître la composition chimique, c'est être en mesure d'essayer de reproduire ces produits à l'aide de composés définis synthétiques et d'en obtenir ainsi des reproductions qui, bien que caricaturales, fourniront aux parfumeurs des éléments indispensables à des prix de revient infiniment plus modestes.

Essences de rose

En ce qui concerne la rose, nous avons déjà rencontré plusieurs constituants fort importants : le (—)-*citronellol,* le *géraniol,* le *nérol,* le *linalol;* tous ces alcools ont des odeurs rosées avec des inflexions différentes. A ces constituants, il faut ajouter leurs acétates, mais surtout l'alcool phényléthylique qui en est le constituant le plus important, le *farnésol,* des traces d'*eugénol 69* et son éther méthylique, etc.

Ces constituants concernent les essences concrètes de rose, principalement obtenues à partir de la variété *Rosa centifolia* qui croît dans la région de Grasse et au Maroc. Les essences distillées de rose, de leur côté, sont obtenues à partir de la variété *Rosa damascena* qui pousse en Bulgarie et en Turquie. Dans ces dernières, la proportion des constituants ci-dessus est totalement différente, notamment en ce qui concerne celle de l'alcool phényléthylique qui y est très faible. Par ailleurs, on y rencontre des constituants spécifiques tels que les *oxydes de rose 70* et la *damascénone 71.*

Essences de jasmin

De leur côté, les essences concrètes de jasmin sont obtenues à Grasse, en Italie, en Espagne, en Égypte et en Algérie à partir de la variété *Jasminum grandiflorum* ou jasmin royal. L'essence absolue renferme environ 30 à 35 % d'un mélange de diterpénoïdes aliphatiques *(isophytol 72, phytol 73, géranyllinalol 74)* et d'*acétate de phytyle.* Ces composés sont inodores mais jouent un rôle très important dans l'emploi des absolues jasmin en parfumerie.

Ensuite, les constituants les plus importants sont l'*acétate de benzyle* (20 %), l'*alcool benzylique,* le *linalol* et le *benzoate de benzyle;* les teneurs en ces trois substances atteignent ou dépassent 10 %.

On y trouve également le *nérolidol,* la *jasmone 75,* le *jasmonate de méthyle 76,* le *cis-penténylpentanolide 77,* ainsi que des traces d'*anthranilate de méthyle,* de *N-méthyl anthranilate de méthyle,* d'*indole,* à côté de très nombreux constituants importants sur le plan olfactif mais non encore identifiés.

▶ *Atelier de synthèse de la* méthyl hepténone.

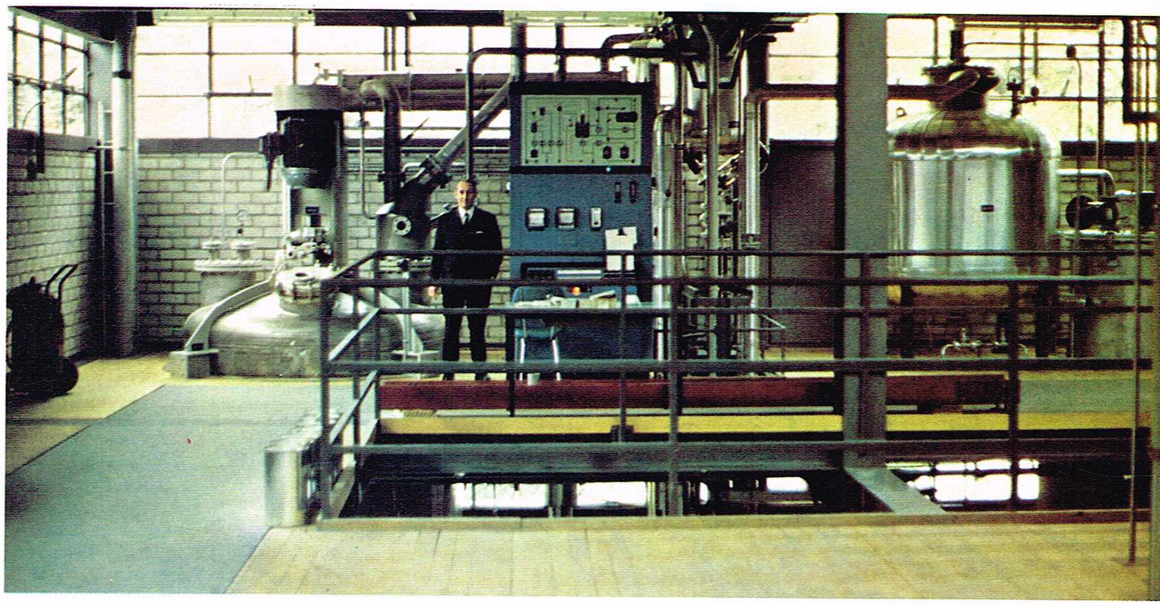

P. Teisseire

▼ Tableau VI : *schéma de la synthèse industrielle totale des* terpénoïdes aliphatiques.

TABLEAU VI

SYNTHÈSE INDUSTRIELLE TOTALE DES TERPÉNOÏDES ALIPHATIQUES

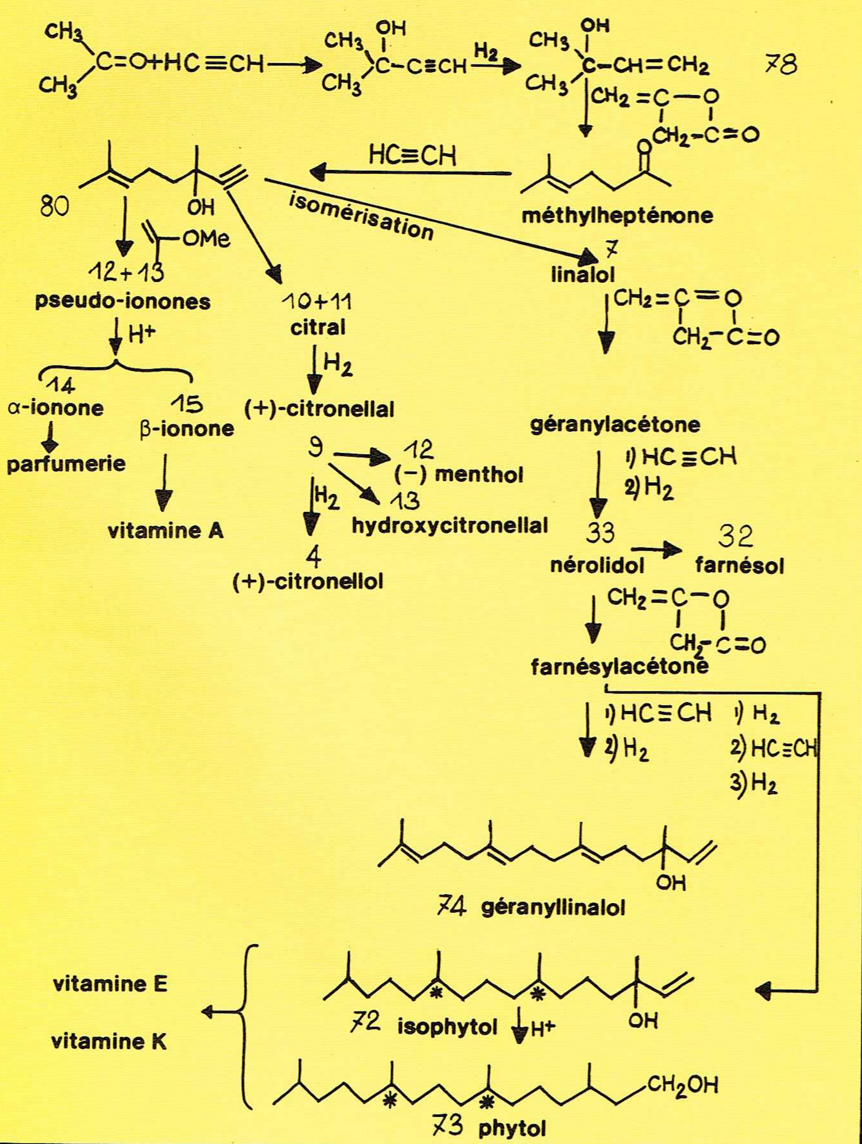

Richard Colin

Produits odorants synthétiques

Synthèse industrielle des terpénoïdes aliphatiques

Tout ce qui précède montre l'importance qualitative et quantitative des terpénoïdes aliphatiques pour l'industrie de la parfumerie. Il était donc indispensable à cette dernière, afin d'éviter les contraintes dues aux fluctuations et les spéculations inhérentes aux marchés des produits naturels, d'être maître de la synthèse totale de ces substances.

Par ailleurs, ces terpénoïdes sont également indispensables à la grande industrie pharmaceutique internationale (Hoffmann-La Roche, B. A. S. F., Rhône-Poulenc). En effet, la fabrication des vitamines E et K implique la synthèse du phytol ou de l'isophytol ; celle de la vitamine A utilise la β-ionone, dérivant du citral comme matière première. Or, la production totale des essences de lemongrass génératrices de citral est de l'ordre de 2 000 tonnes/an, alors que la production mondiale de vitamine A est de plusieurs milliers de tonnes/an.

La synthèse totale de ces terpénoïdes est schématisée dans le tableau VI. Ce type de synthèses est généralement appelé « synthèses acétyléniques ». L'examen du tableau VI illustre cette appellation.

Synthèses diverses

Dans le cadre de la synthèse totale, signalons que plusieurs centaines de substances odorantes synthétiques autres que celles dont nous avons eu l'occasion de parler sont fabriquées annuellement par l'industrie de la parfumerie. Par ailleurs, des milliers de substances nouvelles sont également synthétisées dans les laboratoires de recherche de cette industrie afin d'enrichir de nouvelles notes odorantes la palette du parfumeur.

Nous avons parcouru à une vitesse vertigineuse ce large panorama parfumé au cours duquel certaines odeurs ont retenu plus particulièrement notre attention, en éclipsant d'autres qui, certes, sont également fort importantes. Toutefois, notre objectif n'était pas d'être exhaustif mais plutôt d'illustrer quelques aspects chimiques des parfums et de montrer ainsi la grande complexité chimique qui se cache derrière ce mot, *« parfum »*.

BIBLIOGRAPHIE

GUENTHER E., *The Essential Oils* (6 volumes), Van Nostrand Reinhold & C°. — Sir John SIMONSEN, *The Terpenes* (5 volumes), Cambridge University Press. — ARCTANDER S., *Perfume and Flavor Chemistry* (2 volumes), Montclair N. J. (U.S.A.). — NAVES Y. R., *Technologie et chimie des parfums*, Masson. — TEISSEIRE P., *la Chimie des substances odorantes* (en préparation), P.U.F.

INDUSTRIE DU VERRE

Les verres sont des substances amorphes qui, à l'isotropie des liquides, associent la cohésion des solides. On a pu les considérer comme des liquides de viscosité élevée, ne présentant pas, de ce fait, un point de fusion bien défini; lorsqu'on les chauffe, leur viscosité diminue, et ils deviennent d'abord pâteux, puis fluides.

La courbe température-temps que fournit l'analyse thermique des verres ne présente pas de palier comme dans le cas des alliages, dans des intervalles plus ou moins grands de température, mais une allure presque linéaire, d'où la comparaison que l'on peut faire avec des liquides surfondus, dans lesquels se produit une augmentation considérable de la vitesse des déplacements moléculaires.

A la température ambiante, les verres ne sont pas dans un état d'équilibre thermodynamique, mais sont potentiellement instables par rapport à l'état cristallin. Cette tendance à cristalliser (ou à se dévitrifier) a une grande importance pratique dans l'industrie du verre.

Chimiquement, plusieurs substances sont aptes à donner des verres; parmi les verres constitués d'un seul composé, rappelons le verre soluble (silicate de sodium) et le verre de quartz (silice pure); mais, en général, le verre est le résultat de la fusion de plusieurs constituants (silicates, borates, phosphates métalliques, etc.).

Matières premières

Pour qu'il y ait formation de verre, il faut que les composants du mélange aient une vitesse de cristallisation faible. Cette condition est satisfaite par les anhydrides et les sels correspondants. On utilise donc différents composés chimiques, choisis en fonction des caractéristiques du produit désiré. Parmi les principaux composants, on compte : la *silice*, SiO_2, utilisée généralement comme composant de base, le *calcaire*, la *dolomie*, la *soude* et les *déchets de verre*. Outre les sables siliceux, généralement des quartzites ou des types de sables présentant des infiltrations kaoliniques, on utilise, pour favoriser la fusibilité, le carbonate de calcium et le sulfate de sodium, qui permettent en outre de maintenir la viscosité dans un certain intervalle, ce qui prolonge la période durant laquelle le travail est possible.

L'action de la silice et des fondants est complétée par l'addition de stabilisants, sous forme d'oxydes basiques. L'emploi de l'oxyde de magnésium constitue un apport utile pour le travail mécanique du verre; son très faible coefficient de dilatation thermique en augmente considérablement la résistance aux variations de température, tandis que ses caractéristiques chimiques tendent à élargir l'intervalle entre la température de fusion et la température de viscosité maximale.

▼ ***L'industrie produit de nombreux types de verres dont chacun possède des caractéristiques chimiques propres en fonction des emplois auxquels il est destiné : ici, fabrication de verre bombé.***

Carlos Santos-Rapho

Les déchets de verre sont utilisés comme fondants complémentaires ; leur fonction est de faciliter le processus de fusion par une préfusion facile, susceptible d'amorcer et d'améliorer la fusion des composés chimiques.

En agissant convenablement sur la composition chimique du mélange, on peut en modifier les propriétés physico-chimiques. L'augmentation de la teneur en SiO_2 a pour effet d'augmenter la dureté et la résistance du verre, mais lui confère en contrepartie une plus grande difficulté de fusion et entraîne une plus grande fragilité du produit. L'addition de quantités convenables de chaux, en remplacement de parties salines sodio-potassiques, réduit considérablement la fragilité du verre. Le sulfate de baryum améliore la souplesse et l'éclat du verre, tandis que l'oxyde de zinc en augmente la résistance mécanique. L'acide borique réduit le coefficient de dilatation thermique, l'alumine favorise la fusibilité et s'oppose à la dévitrification.

Les propriétés du verre peuvent également être modifiées en agissant d'une manière opportune sur les cycles thermiques. Un refroidissement rapide, en effet, confère au verre fragilité et dureté, alors qu'un refroidissement lent et ménagé en accroît l'élasticité. En outre, en ramollissant une masse fluide vitreuse au moyen de souffleurs spéciaux, puis en la refroidissant brusquement, on obtient un verre trempé possédant de très bonnes caractéristiques mécaniques et dont la cassure produit de très petits débris, ce qui rend ce matériau particulièrement adapté aux applications qui exigent une marge de sécurité élevée, comme les pare-brise d'automobiles.

▼ ***Matières premières pour la fabrication du verre dans une usine Saint-Gobain. Le mélange initial est composé de sable siliceux, de fondants, de stabilisants et d'agents d'affinage.***

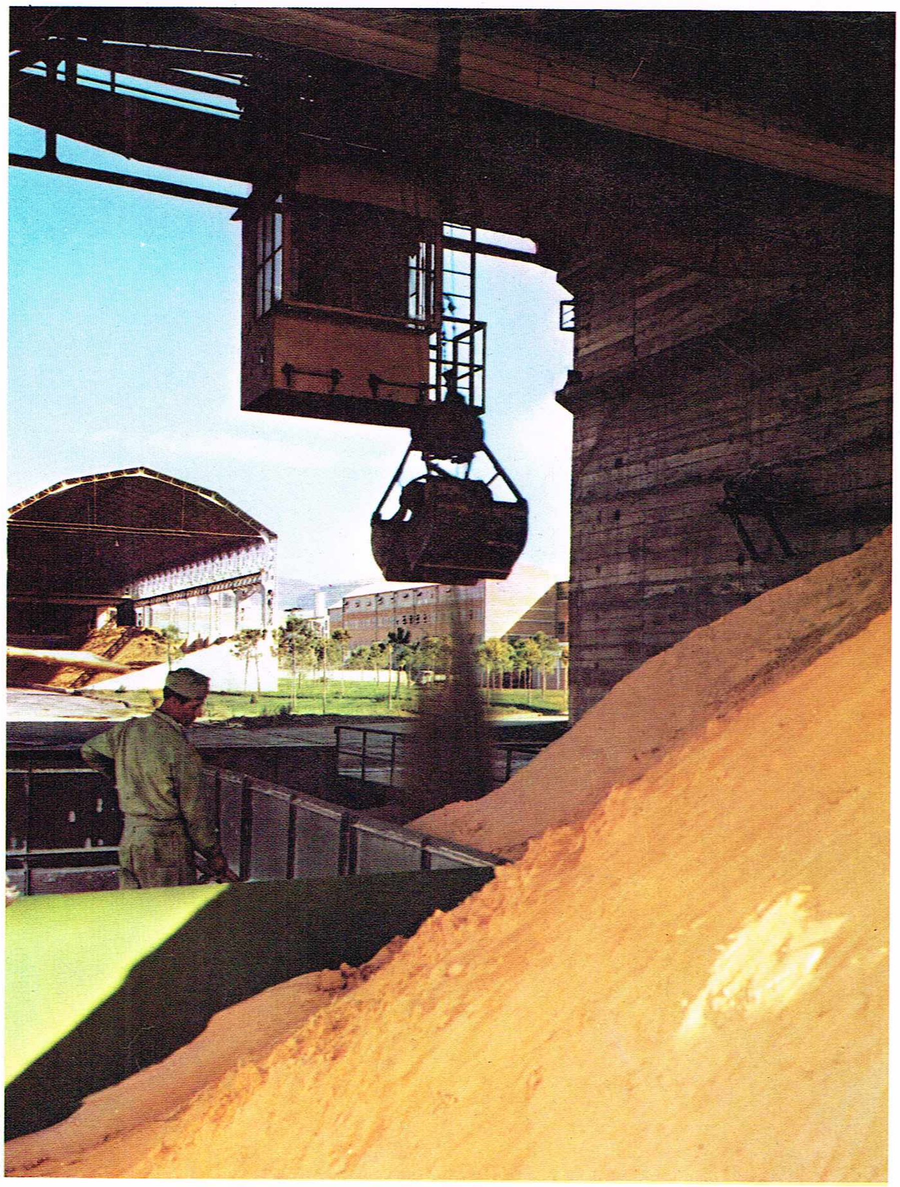

A. Ballo

Classification des verres

L'industrie produit de nombreux types de verres, dont chacun possède des caractéristiques chimiques propres en fonction des emplois auxquels il est destiné ; nous citerons quelques types parmi les plus importants.

Verre blanc ou verre ordinaire

Le verre blanc est employé pour la fabrication de miroirs ou de vitres ; il est constitué essentiellement de silicates de sodium et de calcium. Ce verre possède une bonne résistance à l'érosion par l'eau et à la corrosion en général.

Verre à bouteilles

C'est une composition analogue à la précédente du point de vue chimique, avec des additions substitutives de magnésium et d'aluminium. La coloration de ce verre est due à des particules ferreuses.

Verres spéciaux

On obtient les verres spéciaux en remplaçant des parties calcaires par des parties d'alumine et en ajoutant de l'anhydride borique à la silice. Utilisés en laboratoire, ils doivent présenter une grande inertie chimique et une sensibilité réduite aux fortes variations de température.

Verres teintés

La coloration de ces verres provient de l'addition d'oxydes métalliques colorants, dont le métal se sépare à l'état colloïdal. Il s'agit par exemple des oxydes de cobalt, de fer ferreux et de cuivre cuivrique pour le bleu, des oxydes de chrome, de cuivre et de fer pour le vert, de l'oxyde de cérium pour le jaune, etc. Pour les verres opale, on utilise des oxydes d'étain, de zirconium, certains sulfates, le fluorure de calcium et la chromite. La propriété de ce type de verre de diffuser la lumière est due à de microscopiques inclusions cristallines qui se forment durant le refroidissement du verre.

Cristal

De poids spécifique très élevé, dû essentiellement à la substitution de l'oxyde de calcium par l'oxyde de plomb et de l'oxyde de sodium par l'oxyde de potassium, ce verre est très fusible et présente un indice de réfraction élevé et un éclat remarquable ; le brillant et la transparence sont ses principales caractéristiques, qui en font un produit de valeur.

Verres d'optique

Dans ces verres, qui renferment du plomb et du potassium, l'anhydride borique a remplacé en partie l'anhydride silicique. Destinés généralement à la fabrication de lentilles très limpides, ils exigent un travail très soigné, réalisé au moyen de procédés très différents de ceux que l'on utilise pour les verres ordinaires.

Fibres de verre

Ce produit vitreux, d'une importance industrielle considérable, est travaillé sous forme de *laine de verre* ou de *fibres textiles ;* la première, composée de fibres courtes, est utilisée comme isolant thermique ou pour la fabrication de panneaux translucides et souples ; la seconde, à fibres longues ou continues, est filée puis tissée en panneaux spéciaux pour à l'industrie chimique et thermique.

Propriétés du verre

Viscosité

Pour faciliter le travail du verre, il faut pouvoir en contrôler parfaitement la viscosité. Si, dans le façonnage à la main ou le soufflage à la bouche, cette propriété physique n'est pas déterminante, elle devient, en revanche, essentielle dans le travail mécanique, puisque la viscosité doit être telle que la masse de verre fondu puisse s'adapter aux parois des moules et, dans le même temps, opposer une résistance convenable à l'action de l'air comprimé, qui joue le rôle du souffleur.

La viscosité du verre a, durant la fusion, une valeur relativement faible, qui devient très élevée lorsqu'on l'emploie sous forme d'élément pratiquement rigide. Entre ces deux extrêmes, il existe une valeur optimale de viscosité pour le façonnage, correspondant à une température déterminée et qui dépend de la composition du verre.

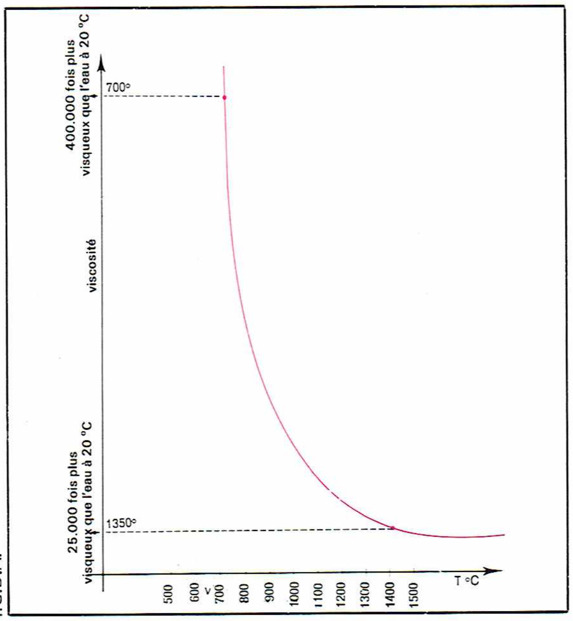

I.G.D.A.

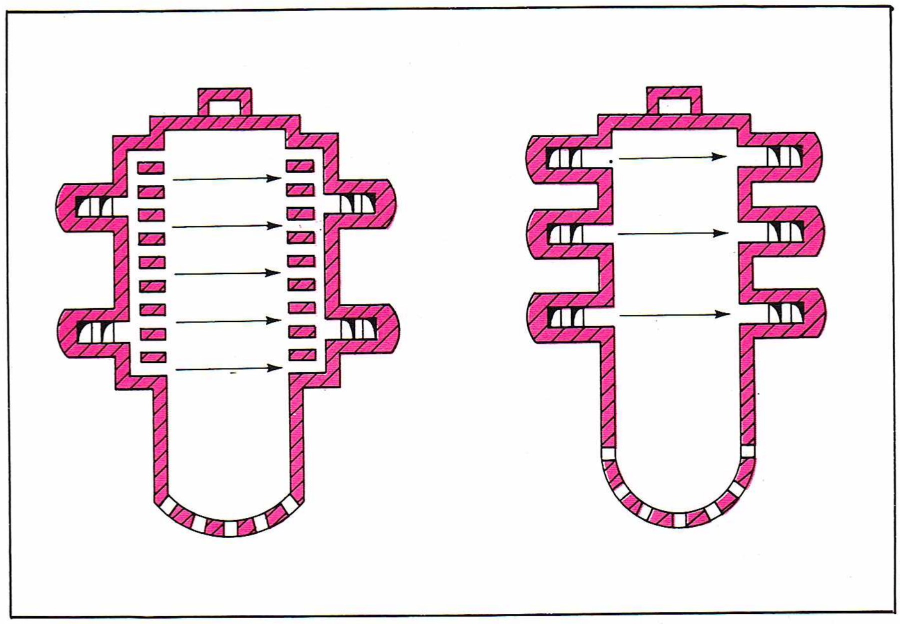

I.G.D.A.

▲ *A gauche, courbe de viscosité d'un verre. A droite, représentation schématique d'un* **four à bassin.**

Pour une composition chimique donnée, la variation de la viscosité en fonction de la température est définie par une courbe dont la connaissance est très importante, puisque chaque opération lui est liée de manière univoque. En effet, l'*affinage* (élimination des bulles de gaz du mélange) s'effectue à une viscosité de 10 poiseuilles (correspondant, pour des verres normaux, à environ 1 450 °C), la *braise* (opération au cours de laquelle le verre atteint le degré de viscosité permettant de le travailler), à une viscosité de 10^2 poiseuilles (environ 1 000 °C), tandis que le *début du travail* exige une viscosité égale à 10^4 poiseuilles (environ 850 °C).

Vers la fin de la courbe thermique débute l'intervalle de viscosité qui caractérise le passage du verre de l'état pâteux à son état solide définitif. On est conduit à déterminer cet intervalle pour des raisons techniques inhérentes aux exigences du travail et pour des raisons pratiques, afin d'éviter d'éventuels ramollissements ou des déformations de l'objet au cours de son utilisation.

Trempe et recuit

Lorsque la température diminue, le déplacement moléculaire des composés se réduit; par conséquent, un refroidissement brusque entraîne le durcissement des surfaces, laissant subsister à l'intérieur une masse douée d'une plasticité résiduelle, avec son champ de contraintes thermiques; si celles-ci sont importantes, elles peuvent provoquer la rupture du matériau. Il faut donc contrôler les phases de refroidissement en veillant à ce que celui-ci soit uniforme dans toute l'épaisseur. On procède habituellement à un refroidissement ménagé, dans des galeries où des variations par paliers de la température assurent automatiquement le contrôle de la phase de relaxation.

Dévitrification

La composition d'un verre a une grande influence sur sa réactivité et sur le phénomène chimique de dévitrification.

L'altération d'un verre peut être due soit à des causes externes (réactifs qui tendent à l'opacifier), soit à une cause interne, consistant en la lente recristallisation du verre, qui tend à prendre une forme plus stable; ce phénomène, plus ou moins important en fonction de la teneur du verre en SiO_2, est en rapport avec la tendance à la cristallisation des éléments qui le composent, tendance acquise au cours de la fusion.

La dévitrification en cours de fusion se produit à une température donnée et sous certaines conditions; en dehors du cas de certains verres spéciaux, elle constitue une cause d'affaiblissement et une imperfection indiscutable; aussi s'emploie-t-on à l'éviter soigneusement grâce à un contrôle strict. On la provoque à dessein uniquement dans le travail de certains verres spéciaux. Dans ce cas, on réalise la dévitrification en maintenant le verre dans un intervalle déterminé de température, jusqu'à ce qu'il atteigne l'état cristallisé; cette opération est facile avec certains types de verres dont la composition chimique est largement à base de produits kaoliniques, mais elle est très difficile avec d'autres verres, à cause de la viscosité croissante entraînée par certains constituants au cours de la trempe.

Si cette viscosité est très grande, la diffusion des cristaux est faible; à l'inverse, avec une viscosité réduite, on observe une diffusion rapide et par conséquent une vitesse élevée dans la formation des noyaux de cristallisation. Pour éviter ce phénomène, on fait en sorte que l'intervalle de température de recuit soit parcouru aussi rapidement que possible, ou, dans certains cas, on recourt à des additions d'alumine. Dans tous les cas, quelle que soit la composition vitreuse, on construit un diagramme de dévitrification, sur lequel figurent la température à laquelle le phénomène se produit et celle au-dessus de laquelle les formations cristallines qui se sont constituées se dissolvent en verre fondu.

Technique de fabrication du verre

Préparation du mélange

Le processus de fusion est précédé de la phase de préparation du mélange; la fusion permet d'obtenir une masse liquide caractérisée par des propriétés physico-chimiques particulières, qui, après solidification, demeurent inchangées dans le temps.

Les matériaux, convenablement analysés et dosés, sont finement broyés et acheminés vers le mélangeur par un convoyeur à bande. Le mélange se fait très rapidement, d'abord à sec, puis par voie humide, grâce à des vaporisateurs d'eau.

Fusion du verre

Le mélange compact est ensuite envoyé au four en même temps que les déchets de verre, au moyen d'une benne monorail qui décharge le matériau entre deux rouleaux tournants, une pelle circulaire à ailettes réglant le débit de chute. La fusion est réalisée dans des fours à creusets ou à bassin.

Les *fours à creusets* ou *à pots* sont utilisés presque exclusivement pour fondre des mélanges pour verres spéciaux. Les creusets ont une capacité d'environ 700-900 kg de verre, et leur forme est traditionnellement tronconique; ils peuvent être ouverts ou fermés, selon la qualité et la quantité de produit désirées. Pour le chauffage des creusets, on utilise habituellement des fours à réverbère, à gaz ou à fuel, capables d'atteindre rapidement les températures élevées nécessaires. La durée de la fonte varie de 14 à 28-30 heures et a, naturellement, un caractère intermittent.

▶ *Une des étapes de la fabrication du verre à l'usine B. S. N. de Givors.*

Les *fours à bassin,* destinés à des productions industrielles, ont des caractéristiques techniques très différentes. Ils sont constitués d'un bassin de régénération, de forme rectangulaire, tapissé intérieurement de voûtes indépendantes et divisé idéalement en trois zones distinctes : la *zone de fusion,* dans laquelle le mélange est chauffé à feu intense, la *zone d'affinage,* où la température est maintenue par convection ou par rayonnement, et la *zone de travail,* dans laquelle débute le refroidissement, en même temps que le façonnage.

La sole du four à bassin est constituée par un plan épais de plaques réfractaires, sous lesquelles sont ménagés des canaux traversés par des courants d'air, afin de maintenir le soubassement à une température contrôlée. Les parois, construites entièrement avec des blocs réfractaires aux caractéristiques thermiques très élevées, sont elles-mêmes ventilées extérieurement.

Ces fours utilisent divers systèmes de chauffage : au fuel, aux gaz de cokerie, etc. ; ils comportent presque toujours des régénérateurs, qui permettent de mieux utiliser la chaleur dégagée. L'emploi de l'électricité est plus récent ; on recourt à des électrodes mobiles entièrement immergées, en exploitant la résistance propre du verre fondu. Les fours à bassin utilisent la sole elle-même comme bassin de fonte et permettent une production non seulement continue, mais beaucoup plus importante que les fours à pots.

La demande croissante d'objets de verre a entraîné une augmentation progressive des dimensions des fours ; dans le même temps, la forme du bassin s'est allongée considérablement. En général, les fours à bassin actuels ont une largeur de 4-5 m et une longueur supérieure à 20 m. Ces fours peuvent travailler en continu ou par intermittence, en fonction du volume de production.

La *fusion* comprend trois stades : la fusion proprement dite, l'affinage et le repos. Au cours de la *phase de fusion proprement dite,* la masse tend à sécher, puis se forme un carbonate double de sodium et de calcium, lequel, réagissant avec la silice, dégage du CO_2 en donnant lieu à la formation des silicates de calcium et de sodium. La formation de ces produits a lieu à une température comprise entre 700 et 900 °C ; la température augmentant, les parties siliceuses résiduelles réagissent avec les silicates qui se sont formés, et la masse passe complètement à l'état fondu.

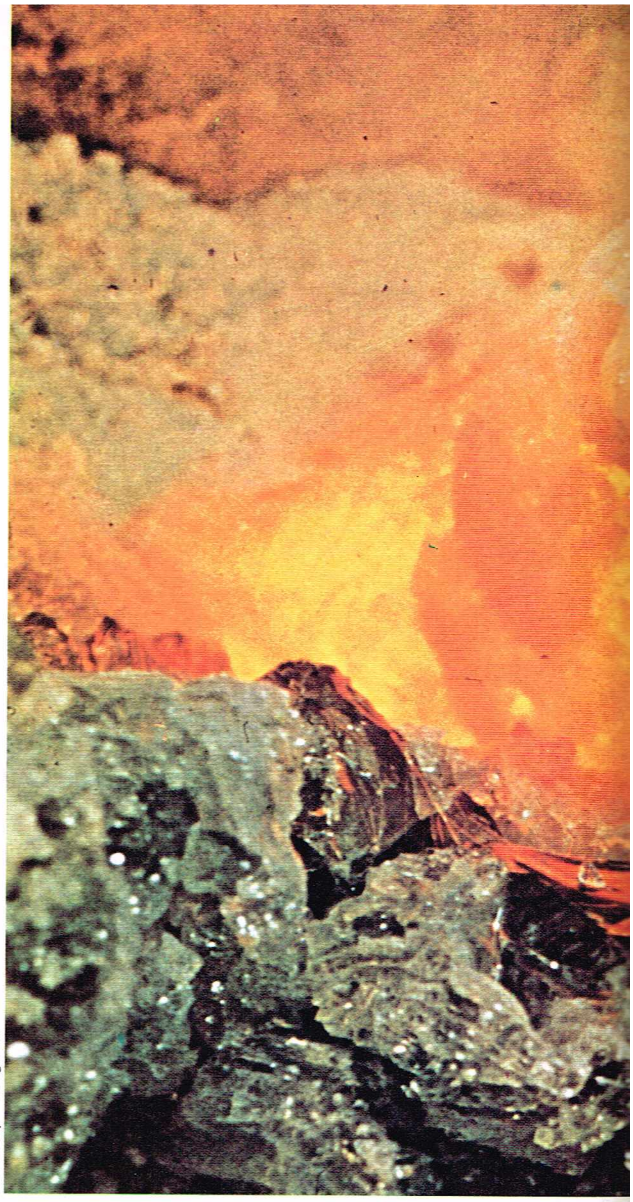

Ian Berry - Magnum

▼ **Four à bassin alimentant les chaînes de production de panneaux en fibres de verre (Vetreria Italiana Balzaretti Modigliani). Les fours de ce type permettent une production en continu ou par intermittence.**

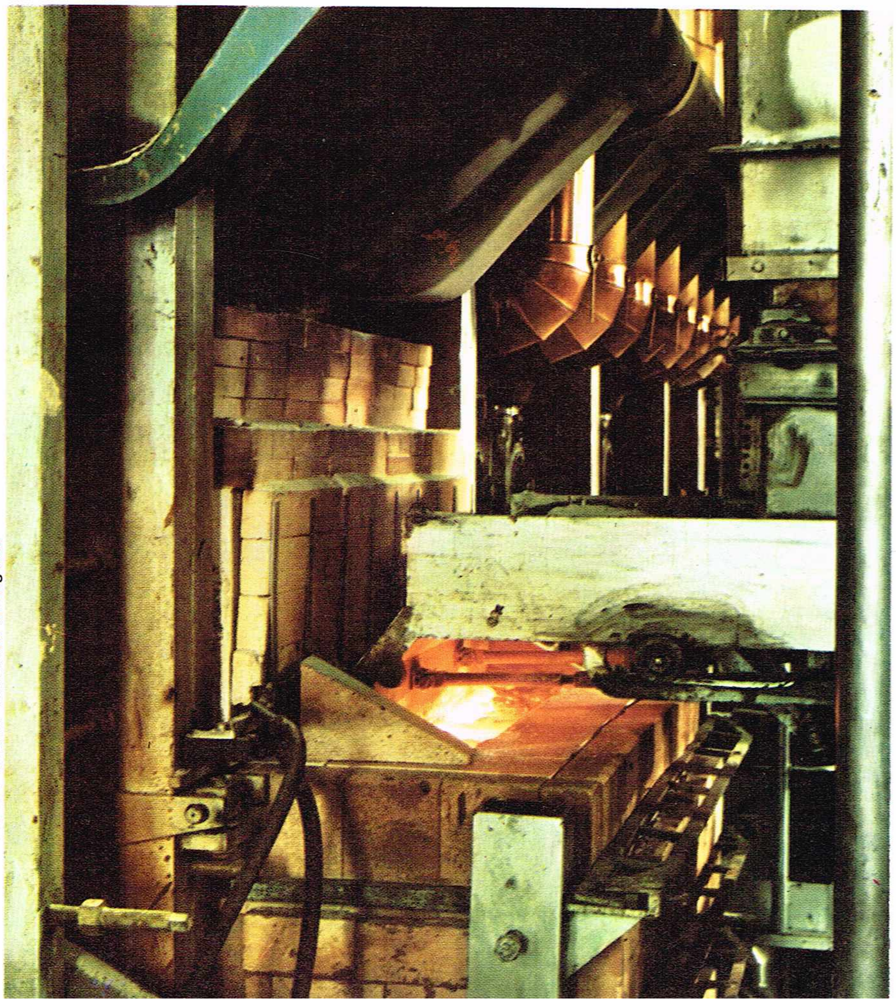

Vetreria Italiana Balzaretti Modigliani

Dans la *phase d'affinage,* la température est portée à 1 400-1 500 °C, afin d'obtenir une masse encore plus fluide et parfaitement homogène ; on ajoute, au besoin, de l'anhydride arsénieux, qui, non seulement, facilite l'écoulement du verre, mais tend à s'évaporer, provoquant un dégagement gazeux qui améliore le brassage de la masse.

Au stade suivant, on entre dans la *phase de repos,* au cours de laquelle la masse liquide devient limpide. Durant ces phases, les particules en suspension et les bulles de gaz affleurent à la surface, entraînant la formation d'une mousse qui a pour effet de protéger les parties supérieures du verre des impuretés constituées par les produits de la combustion ; ensuite, et avant le début du travail, cette mousse est soigneusement raclée.

Le processus que nous venons de décrire est caractérisé du point de vue physico-chimique par deux faits essentiels : la transformation et l'agrégation des éléments. Le processus de transformation, au cours de la phase de fusion, correspond à l'absorption maximale de chaleur ; le processus d'agrégation correspond à l'homogénéisation des propriétés physiques (conductibilité, dilatabilité, résistance mécanique, etc.) des divers constituants du mélange.

En outre, l'agrégation équivaut à un processus de polymérisation progressive ; dans le verre alcalin, ce processus se produit durant le passage de l'état fluide à l'état fragile, la croissance des polymères étant directement proportionnelle à la diminution de la température. Une fois les deux points thermiques atteints et dépassés, les ions sodium tendent à s'unir aux parties silico-calciques pour donner lieu à la formation de complexes moléculaires toujours plus grands, pour atteindre, à la température voulue, la composition physique définitive du verre.

La fonte des composés vitreux survient, d'après leur nature chimique, dans un intervalle de températures compris entre 900 et 1 400 °C.

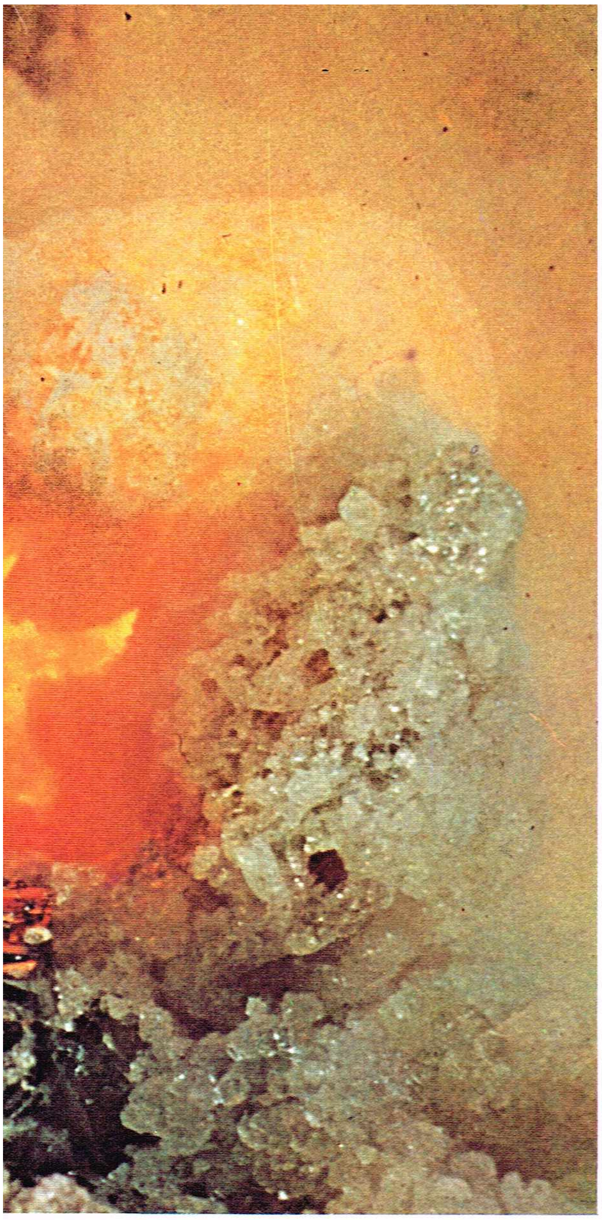

Foto Nat, C.O.I.

◀ ***Façonnage d'objets de verre par soufflage au moyen d'une canne.***

Nat's photo

◀ ***Prélèvement de verre fondu dans le four.***

Travail du verre

Un contrôle précis de la température est indispensable, puisque de celle-ci dépend le comportement du verre dans le façonnage tant manuel que mécanique. On fabrique généralement les objets creux et fins par soufflage, les objets gros et pleins par pressage, les plaques et les miroirs par laminage.

Travail par pressage

Cette méthode, qui est la plus ancienne parmi les méthodes manuelles, utilise des presses à main ou mécaniques et des moules en fer, chromés ou non, mais toujours à surface interne lisse et polie. Elle suppose une masse vitreuse de bonne fluidité. Cette méthode se combine avec le soufflage lorsqu'il faut réaliser des objets comportant des parties creuses.

Travail par soufflage

Il constitue un progrès par rapport au système précédent; l'outil essentiel est la canne à l'aide de laquelle l'ouvrier souffle dans une certaine quantité de magma fluide (paraison) prélevée dans la masse. Ce système, qui exige une grande dextérité, n'est plus utilisé par l'industrie verrière, mais survit uniquement pour des travaux artisanaux ayant un caractère artistique.

Travail des verres d'optique

Pour la fusion du mélange des verres d'optique, on utilise uniquement des fours à creusets, tapissés intérieurement de platine, pour éviter au maximum les déchets et obtenir un produit plus homogène. Une fois la fusion réalisée, on diminue la température en évitant un refroidissement trop lent, qui provoquerait la dévitrification, ou trop rapide, qui entraînerait inévitablement des tensions internes.

A la température ambiante, on brise le bloc verre-creuset et on place les débris obtenus dans des cassettes en matériau réfractaire en forme de plaques ou de prismes, que l'on fait recuire. Cela permet aux blocs de verre de s'adapter au moule et de prendre l'empreinte.

Après dégrossissage et polissage des surfaces, on soumet les verres à des essais interférométriques sévères. Les verres d'optique sont d'un coût très élevé, car ils nécessitent des matières premières de premier choix, un appareillage moderne et une main-d'œuvre spécialisée; un autre facteur qui influe sur le coût est l'énorme déchet de fabrication.

Travail par laminage

Dans ce procédé, qui est le plus perfectionné de la technique verrière moderne, la masse fluide est versée sur une plaque d'acier plane, animée de mouvements aptes à assurer la répartition uniforme de la masse sur la surface et à acheminer la couche ainsi formée entre deux cylindres tournants, qui la réduisent à l'épaisseur voulue. Pour empêcher que la plaque sortant des rouleaux ne se rétrécisse sur les bords, on la soumet à un étirage mécanique et à un refroidissement réalisé à l'aide de dispositifs spéciaux; la plaque demeure ainsi plane et d'égale épaisseur dans toute sa section.

Vetreria Italiana Balzaretti Modigliani

▲ ***Atelier de moulinage du verre textile. Les fibres de verre sont utilisées comme matériau isolant, comme charges renforçantes pour plastiques ou encore dans l'industrie textile.***

Parmi les systèmes de laminage, citons le *procédé Fourcault,* dans lequel le verre fondu passe à travers la fente d'une nacelle réfractaire *(débiteuse)* plongeant dans le magma. La plaque sort par le haut d'un mouvement continu, entraînée par une série de rouleaux revêtus d'amiante, le long d'une cheminée qui joue le rôle de tunnel de recuit et de refroidissement. La plaque ainsi obtenue n'a pas subi d'étirage et présente une pression uniforme, donc l'effet de contraction est presque nul.

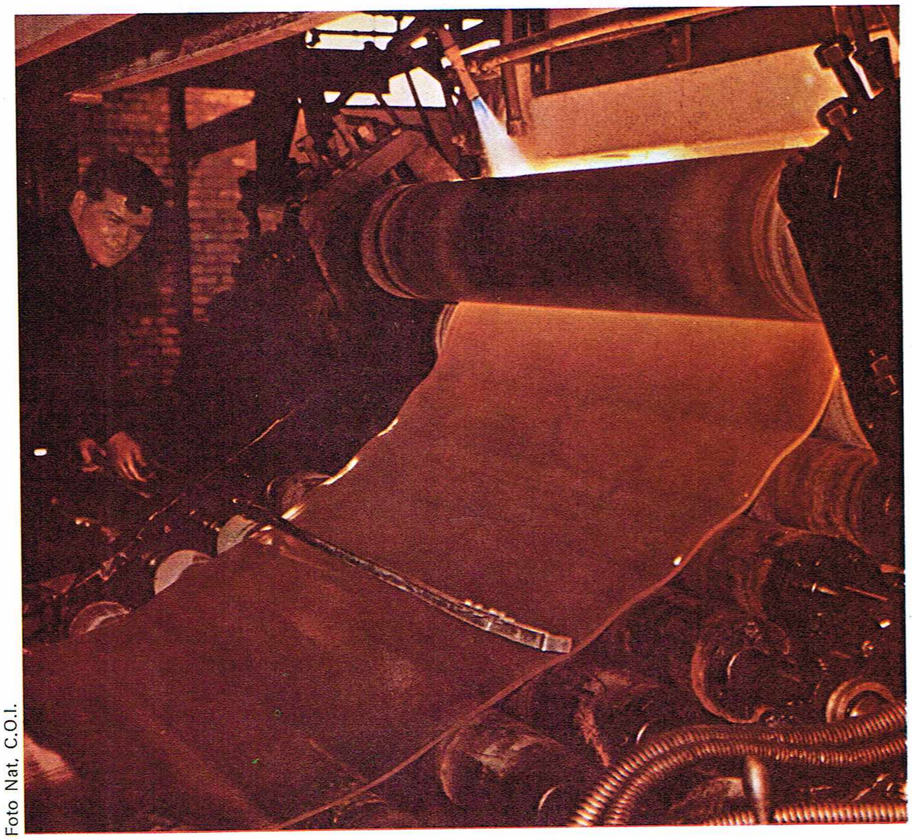

Foto Nat, C.O.I.

Les installations, très complexes, permettent une production en continu; le niveau de la masse vitreuse est maintenu constant dans le bassin de puisage par l'arrivée dosée du magma fondu, à température uniforme et contrôlée; la formation du ruban se fait selon un cycle thermique minutieusement réglé et respectant les phases prévues de recuit et de refroidissement.

La plaque de verre est ensuite soumise au *planage,* opération qui consiste à rendre les deux faces planes et parallèles au moyen de meules abrasives et de sable humide; ensuite, à l'aide de brosses en feutre et d'oxyde de fer, on donne au matériau sa transparence et son éclat. Dans les installations verrières modernes, les opérations de *lustrage* ainsi que toutes les opérations successives, jusques et y compris le découpage aux dimensions voulues, s'effectuent automatiquement sur la plaque disposée sur des plateaux rectangulaires, entraînés dans un mouvement continu.

Travail des fibres textiles

Le verre employé pour l'obtention de ce produit est normalement du type sodio-calcique, et le mélange subit une préparation spéciale en vue de cette utilisation.

Un disque tournant à grande vitesse reçoit en son centre un filet de verre fluide sortant d'un orifice situé à la partie inférieure d'un petit four électrique. La force centrifuge étale le verre fondu sous forme de gouttelettes qui, freinées par le frottement de l'air, s'étirent en fils très minces, donnant naissance à une couche continue de laine de verre.

Sur le fond du petit four de fusion est appliquée une filière, d'où sortent de nombreux filaments vitreux, qui sont bobinés et étirés par un tambour tournant ou au moyen d'un éjecteur à vapeur. Ce système permet d'obtenir des fibres de verre très fines, qui, tissées, trouvent de larges applications dans de nombreux domaines. Ces fibres ont de très bonnes caractéristiques mécaniques et présentent une analogie de structure avec certaines fibres végétales; leur résistance à la traction est dix fois supérieure à celle d'un verre ordinaire.

BIBLIOGRAPHIE

PIGANIOL P., *le Verre, son histoire, sa technique,* Paris, 1965. - SCHOLZE H., *le Verre,* traduction de J. Le Du, Paris, 1969.

ÉMULSIONS SENSIBLES POUR LA PHOTOGRAPHIE

Les procédés aux halogénures d'argent liés par de la gélatine dominent largement le monde de la photographie, grâce à leurs taux de sensibilité encore inégalés. Cependant, les difficultés de fabriquer un produit constant à partir d'éléments peu inertes comme la gélatine ont conduit les fabricants à rechercher d'autres systèmes photosensibles, connus sous le nom de « procédés non argentiques ». Dans ce chapitre, après avoir passé en revue les principaux procédés ayant trouvé une application industrielle, les systèmes argentiques noir-blanc et couleurs seront détaillés.

Processus fonctionnel des différents procédés

A partir des lois de Grotthus-Draper et d'Einstein, on sait qu'une réaction photochimique sera provoquée par l'absorption d'un quantum d'énergie lumineuse par la molécule photosensible qui passera de l'état fondamental à l'état activé :

$$M + h\nu \rightarrow M^*$$

La désactivation de cette molécule peut être obtenue de différentes façons : par émission de chaleur, par émission de lumière et par réaction chimique. C'est ce dernier processus qui sera utilisé en photographie. L'énergie absorbée est utilisée pour rompre une liaison, les réactions qu'entraîne cette rupture correspondent à des variations des propriétés photométriques des corps (transparence, diffusion ou couleur) qui permettront de distinguer les zones ayant été exposées à la lumière et de former ainsi une image.

Procédés de chimie minérale

Dans tous les cas, l'énergie lumineuse provoque une réaction d'oxydoréduction.

Procédés aux sels d'argent

Pour l'étude des procédés aux sels d'argent, se reporter au chapitre des *Procédés classiques aux sels d'argent.*

Procédés aux sels de fer

On utilise par exemple le chlorure ferrique :

$$2(Fe^{+++} + 3Cl^-) + h\nu \rightarrow 2(Fe^{++} + 2Cl^-) + Cl_2^0$$

On peut former des colorants avec les ions Fe^{+++} non insolés; on obtient alors une image positive en trempant l'épreuve dans une solution de ferrocyanure de potassium; c'est le procédé du tirage des « bleus ». Si on veut une image négative, on utilise le pouvoir réducteur des ions Fe^{++} en les faisant réagir sur du nitrate d'argent.

Colloïdes bichromates

Le bichromate de potassium est sensible aux radiations ultraviolettes :

$$Cr_2O_7^{--} + h\nu \rightarrow CrO_4^{--} + CrO_3$$

en présence d'un colloïde réducteur, et

CrO_3 + colloïde réducteur $\rightarrow$ Cr_2O_3 + colloïde oxydé.

L'oxyde chromique formé tanne le colloïde (gélatine) en formant des liaisons multiples et le rend insoluble. On élimine la gélatine non tannée par dépouillement à l'eau tiède. L'image formée est utilisée de plusieurs façons :

— par coloration directe de la gélatine : procédé au charbon et hydrotypie;

— par gravure : la gélatine tannée résiste aux acides; sur un support métallique, on peut donc photograver les métaux aux endroits non insolés; les applications sont la typogravure et l'héliogravure;

— la gélatine tannée est hydrophile; si le support est lipophyle, on peut réaliser un encrage sélectif : c'est l'offset.

Procédés en chimie organique

Les réactions sont des réactions de photodégradation, de photopolymérisation et de photoréticulation.

Photodégradation

On utilise les procédés aux sels diazoïques; ces sels se décomposent à la lumière :

$$R{-}N = N{-}X + h\nu \rightarrow R{-}X + N_2\nearrow$$

● *Diazotypie*

La réaction est irréversible, car l'azote s'évapore; le composé formé R—X est incapable de réagir avec les coupleurs inclus dans l'émulsion, alors qu'aux endroits non insolés, on peut obtenir la réaction suivante en milieu alcalin :

$$\underset{}{R{-}N = N{-}X} + \underset{\textit{copulant}}{R'{-}H} \rightarrow \underset{\textit{colorant}}{R{-}N = N{-}R'} + \underset{\textit{acide}}{HX}$$

Pour neutraliser l'acide formé, on développe habituellement aux vapeurs d'ammoniac. Applications : tous les procédés diazos, tirage de plans, de calques, microfilm, etc.

● *Procédés vésiculaires*

On utilise directement l'azote formé par la décomposition des diazoïques. Sur un support transparent ou noir, l'émulsion est constituée d'une couche de résine thermoplastique contenant les sels diazoïques; on développe en chauffant; l'azote gazeux se concentre en petites bulles qui, par leur indice de réfraction différent de celui de la résine, forment des images par diffusion. Ces images seront utilisables dans des conditions optiques très précises. Applications : microfilms, copies de film pour la télévision, images cathodiques.

Photopolymérisation

A partir de réactions photochimiques de sels de fer, de sels d'argent, de sels d'uranyle ou d'activateurs organiques, on provoque des réactions de polymérisation, par exemple avec l'acrylamide :

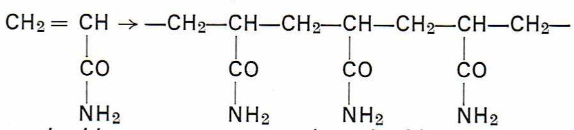

acrylamide *polyacrylamide*

Le polymère formé est insoluble. Inversement, on peut inhiber une polymérisation par exposition.

Photoréticulation

Le cas le plus connu est celui du bitume de Judée; certains composés, tels les dérivés de l'acide cinnamique, peuvent se condenser entre eux ou avec un polymère pour insolubiliser celui-ci.

Procédés divers

On peut citer également d'autres procédés, tels les procédés mercurodiazoïques, les procédés de photodécoloration ou les verres photosensibles. Par ailleurs, certains procédés photographiques très importants sont purement physiques : l'électrophotographie, les photoplastiques, etc.

Les procédés classiques aux sels d'argent

On utilise les halogénures d'argent photosensibles; on aura par exemple :

$$Br^- + Ag^+ + h\nu \rightarrow Br^o + \text{Ag métallique}$$

Après exposition, cet argent métallique se retrouve en très faibles quantités (image latente); l'exposition sera donc suivie d'un traitement chimique qui amplifiera le phénomène. Dans les systèmes noir-blanc, l'image finale sera constituée par des grains d'argent; dans les systèmes couleurs, on pourra mettre en présence un coupleur qui, en liaison avec l'oxydoréduction d'un réducteur chromogène et du sel d'argent, formera des colorants; on pourra également utiliser l'argent pour détruire des colorants existant dans l'émulsion.

Constitution des couches

On distingue trois éléments principaux : le support, l'émulsion et les couches annexes.

Les supports transparents

● *Supports cellulosiques*

Le support ininflammable ordinaire est souvent un mélange de diacétate et de triacétate de cellulose : R—O—CO—CH_3. D'autres esters de cellulose sont de plus en plus utilisés, notamment pour les rollfilms : l'acétobutyrate et l'acétopropionate de cellulose; l'épaisseur de ces supports varie de 0,09 à 0,20 mm.

● *Supports non cellulosiques*

Les caractéristiques physiques des supports cellulosiques, en particulier leur faible résistance mécanique et leur médiocre stabilité dimensionnelle, leur font

◀ ***Page ci-contre, en bas, préparation* de plaques de verre *par* laminage direct.**

Boyer - Viollet

▲ *Le physicien français,* **Nicéphore Niepce** *(1765-1833) connu pour ses travaux relatifs à la photographie.*

préférer des supports non cellulosiques, notamment les téréphtalates de polyéthylène (sous diverses appellations), les polycarbonates et des polystyrènes. L'épaisseur de ces supports varie de 0,18 à 0,06 mm; la résistance à la rupture est double, et la stabilité dimensionnelle de 4 à 5 fois supérieure à celle du triacétate.

Les supports opaques

Les supports « papier » sont essentiellement constitués par un enchevêtrement de fibres de cellulose. On utilise des papiers de masse allant de 50 à 250 g/m². Les papiers utilisés doivent présenter certaines qualités particulières : bonne planéité, résistance mécanique à l'état mouillé et inertie vis-à-vis de l'émulsion. La perméabilité de ces papiers pose de nombreux problèmes lors des traitements. Pour imperméabiliser le système, deux techniques sont en cours de développement : la première consiste à mettre l'ensemble émulsion et support en sandwich entre deux couches de résine; c'est la technique « RC »; la deuxième consiste à remplacer le papier par un support en matière plastique blanche et diffusante.

L'émulsion

L'émulsion est constituée essentiellement par une dispersion d'halosels d'argent (AgCl, AgBr, AgI) dans de la gélatine.

● *La gélatine*

C'est une protéine; elle est constituée de molécules en provenance d'aminoacides qui forment entre eux des chaînes de polypeptides. La liaison est réalisée par les groupes acides et basiques; on obtient une chaîne du type :

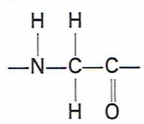

comprenant en général de 300 à 500 unités.

La gélatine est amphotère; on trouve en bout de chaîne des groupes NH_2 et COOH. Les gélatines photographiques ont leur point isoélectrique situé entre les pH 4,7 et 5,2. Cette gélatine, constituée par un mélange de provenance diverse, contient des substances secondaires, tels des sensibilisateurs sulfurés, des inhibiteurs de voile, etc.

● *Les halogénures d'argent*

Ils se présentent sous forme de fins cristaux, les « grains », qui représentent 30 à 40 % du poids de l'émulsion. Les émulsions rapides contiennent essentiellement du bromure d'argent et quelques % d'iodure d'argent. Ces cristaux ont une structure interne de type cubique à face centrée; les faces des cristaux sont généralement de type octaèdre; la forme finale varie beaucoup : sphère, aiguille, tablettes hexagonales ou triangulaires. Ces tablettes présentent une orientation prépondérante par rapport au support : 90 % ont une inclinaison inférieure à 45°. Dans 90 % des cas, la dimension des grains varie entre 0,1 et 5 µm. Chaque grain est une unité de formation d'image et de développement. En première approximation, la sensibilité des grains croît avec leur dimension et le nombre de grains développables augmente avec le taux d'exposition. La variété de dimension des grains et leur nombre sont donc d'une importance pratique considérable pour les films courants de prise de vue; le nombre de grains par cm³ varie de 15 à $55 \cdot 10^9$.

● *Les autres constituants*

L'émulsion contient des produits secondaires, notamment ceux en provenance de la gélatine. On en utilise certains comme les sensibilisateurs sulfurés, on essaie d'en éliminer d'autres indésirables; d'autre part, on rajoute de nombreux autres constituants.

— *Les sensibilisateurs chromatiques.* Les halogénures d'argent ne sont sensibles qu'aux radiations lumineuses situées entre 200 et 530 nm, or la zone visible correspond aux radiations ayant des longueurs d'onde de 400 à 700 nm, il faut donc sensibiliser les films dans la zone correspondante. On va ajouter des colorants sensibilisateurs qui vont permettre l'absorption de ces radiations. Pour que ce colorant soit efficace, il devra remplir trois conditions : avoir une absorption monochromatique, être fortement adsorbé par les cristaux d'halogénure, enfin transmettre l'énergie reçue au cristal; on aura :

$$\text{colorant} + h\nu \rightarrow \text{colorant activé}$$
$$\text{colorant activé} + AgBr \rightarrow AgBr \text{ activé} + \text{colorant}$$
$$AgBr \text{ activé} \rightarrow Ag^+ + Br^o + e^-$$

On connaît actuellement environ 30 000 colorants essayés; seul le groupe des cyanines est efficace. Les cyanines peuvent être classées en trois séries mésomères : amidinium, carboxy et amidique. La longueur d'onde absorbée dépend de la longueur de la chaîne du système mésomère π. Plus elle sera longue, plus la longueur d'onde absorbée sera grande; citons par exemple :
la thiacyanine : 452 nm; la thiacarbocyanine : 557 nm; la thiadicarbocyanine : 640 nm; et la thiatricarbocyanine : 760 nm.

— *Les autres sensibilisateurs.* Ce sont des composés qui permettent d'augmenter la sensibilité globale des émulsions. On utilise des composés soufrés qui forment des sulfures d'argent, des sels métalliques (d'or), des sels stanneux, etc.

— *Les coupleurs.* Les coupleurs sont des formateurs de colorant; ce sont soit des phénols, soit des composés à groupe méthylène réactif (NH_2). Dans les émulsions couleurs, ils permettent d'obtenir dans les trois couches sensibles au bleu, au vert et au rouge des couleurs, respectivement : jaune, magenta et cyan. Ces coupleurs doivent présenter certaines qualités, il ne faut surtout pas qu'ils diffusent dans les couches adjacentes. Pour corriger les défauts des couleurs formées, on peut les colorer (masques) ou utiliser des coupleurs inhibiteurs (correction interimage entre les couches).

Couches annexes

● *Substratum*

C'est une couche de liaison entre le support et l'émulsion. Dans le cas des supports « papier », elle sert également de réflecteur-diffuseur de lumière en masquant les défauts de structure du support (on utilise du sulfate de baryum en suspension dans de la gélatine).

● *Couche antihalo*

Elle est constituée par des éléments absorbant les rayons réfléchis au sein du film. Cette couche peut être disposée entre l'émulsion et le support, ou bien derrière celui-ci; on pourra également incorporer des éléments absorbants dans le support.

● *Couches diverses*

Ce sont soit des intercouches, soit des surcouches colorées ou non. Elles permettent de protéger le film de l'abrasion, de l'électricité statique ou de certaines radiations (UV par exemple).

Fabrication des films

Fabrication des supports

Pour les supports en esters de cellulose, on part de la pâte de bois ou de linters de coton. Après une préparation au chlore, on acétyle, puis on malaxe. L'ester est obtenu par précipitation; cet ester est ensuite mélangé à des plastifiants et des solvants volatils pour former un collodion, qui est ensuite étalé sur une surface polie (tambour ou tapis sans fin) et séché.

Dans le cas des supports non cellulosiques, la matière première est extrudée et étirée dans les deux sens; cette opération très délicate donne l'essentiel des caractéristiques physiques de ce type de support.

Fabrication de la gélatine

La gélatine est préparée à partir d'os et de peaux d'animaux. Après nettoyage et traitement aux acides pour éliminer les minéraux, l'osséine et les peaux lavées sont traitées au lait de chaux qui hydrolyse le collagène et solubilise l'albumine et les graisses. Après neutralisation et lavage, on opère une cuisson à l'eau. On pratique alors des extraits; seuls les premiers extraits sont utilisables en photo. Ces extraits sont ensuite gélifiés et préparés sous forme de poudre ou d'écailles.

Préparation de l'émulsion

On obtient les halosels par des réactions de précipitation :

$$AgNO_3 + KBr \rightarrow \underset{\downarrow}{AgBr} + KNO_3$$

Comme on utilise des solutions concentrées, la préparation se fait en présence de gélatine qui permet la suspension et évite la coalescence des particules d'halogénure. La vitesse de précipitation est très importante : si le nitrate est versé rapidement avec une grande agitation, on obtient de petits cristaux et donc un film lent et contrasté; au contraire, si la réaction est lente, les cristaux se forment en se cristallisant autour des éléments déjà existants; on aura ainsi moins de grains mais certains

seront très gros, d'où une émulsion rapide et peu contrastée. La concentration en gélatine est également un élément déterminant dans la précipitation.

Ensuite, l'émulsion est maintenue dans des conditions de température (vers 40-70 °C) et d'agitation bien définies : c'est la *maturation physique*. On obtient ainsi une augmentation de la sensibilité par coalescence et par grossissement des gros grains aux dépens des petits (maturation d'Ostwald). Après cette opération, l'émulsion est gélifiée par ajout de gélatine et refroidissement brutal ; elle est alors découpée en nouilles pour être lavée. Ce lavage élimine les excès d'halogènes et d'autres sels (ammoniaqués, etc.).

L'émulsion est refondue par élévation de température et agitation ; on procède alors à la *maturation chimique* en ajoutant des sensibilisateurs généraux et des colorants sensibilisateurs chromatiques ainsi que des composés divers tels que des agents tannants, des fongicides, et des plastifiants pour l'étendage.

Étendage

L'étendage ou coulage de l'émulsion sur son support est réalisé par trempage, par buses ou par rouleaux transfert. La vitesse de défilement du support (de 6 à 30 m/mn), la viscosité de l'émulsion, la température (de 32 à 40 °C) et les tensions superficielles déterminent l'épaisseur de la couche. Après séchage définitif, les rouleaux de film (d'environ 1,4 m de large) sont conditionnés et emballés. Les emballages doivent être inertes vis-à-vis de l'émulsion. Le produit fini est contrôlé par sensitométrie.

Exposition et traitement

Image latente

Les différentes théories sur l'image latente restent très controversées ; celles de Gurney et Mott ainsi que celle de Mitchell semblent les plus plausibles : le réseau cristallin d'halogénure d'argent avec ses défauts de structure (dislocations ; défauts ponctuels de type Frenkel ou Schottky) et ses impuretés (notamment des composés sulfurés) est un semi-conducteur ; l'ion photosensible est l'ion brome ; on a :

$$Br^- + h\nu \rightarrow Br^o + e^-$$

la réaction est irréversible en présence de gélatine qui capte Br^o ; le photoélectron e^- éjecté migre dans le cristal par la bande de conduction « O » ; il est attiré par des pièges (trous positifs ou germes de sensibilité) où se trouvent des ions Ag^+ interstitiels qui ont eux-mêmes migré ; on a alors :

$$e^- + Ag^+ \rightarrow \text{Ag métallique}$$

Plusieurs ions Ag^+ se rassemblent sur les germes et captureront des électrons. L'image latente (invisible à l'œil) est donc constituée d'argent métallique fixé sur ces centres de sensibilité ; cet argent réduit possède des vertus catalytiques particulières que l'on utilisera lors du traitement. L'image latente est relativement fugace, ses variations dépendent des conditions de conservation des films entre l'exposition et le traitement.

Théorie du développement

L'image latente est donc trop faible pour pouvoir être utilisée directement, aussi le développement, opération chimique d'oxydoréduction, va continuer et amplifier ($\times 10^6$ à $\times 10^9$) l'action de la lumière. Cette transformation va s'amorcer autour de chaque germe d'image latente.

L'image obtenue en noir-blanc sera constituée par des amas de grains d'argent. La réaction générale de développement est :

$$\text{réducteur} + Ag^+ \rightarrow \frac{Ag^+ + e^-}{\text{Ag métallique}} + \text{réducteur oxydé}$$

Le développement a lieu en milieu aqueux, les écarts de potentiel entre réducteur et oxydant doivent être d'environ 0,08 volt ; à 18 °C, le potentiel Ag est $\leqslant$ à 0,202 volt.

Pour alimenter la réaction en ions Ag^+, on doit dissoudre ceux-ci à partir de la phase cristalline : c'est le *développement chimique*. On peut également introduire directement les ions Ag^+ dans les bains, c'est alors le *développement physique*.

Dans les systèmes couleurs, on procède à un *développement chromogène :* le réducteur oxydé va se combiner avec un coupleur pour former un colorant réduit (leuco) ; la réaction globale est :

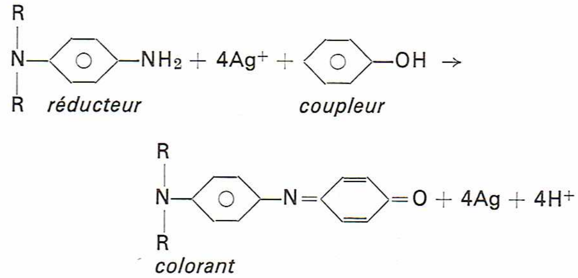

Après développement, on obtient donc aux endroits exposés soit une densité argentique (en noir-blanc), soit cette densité avec des molécules de colorant (dans les films couleurs).

Substances révélatrices

Les réducteurs pouvant réduire les halosels d'argent, c'est-à-dire ceux qui sont adsorbables à la surface des cristaux et ceux qui présentent un potentiel correct, sont relativement nombreux. Pour être utilisés pratiquement, ils doivent présenter d'autres qualités : solubilité, conservation, produits d'oxydation non colorés, faible toxicité, fabrication simple, etc. Seuls quelques développateurs aromatiques ou cycliques sont utilisés : par exemple, des phénols, des amines et des aminophénols. Tous ces composés possèdent au moins deux fonctions ; seules les positions ortho (1,2) et para (1,4) sont utilisables.

Le mécanisme de la réduction transforme les phénols en quinones ou semi-quinones :

$$OH{-}C_6H_4{-}OH \rightarrow (O{=}C_6H_4{=}O)^{--} + 2H^+$$

$$(C_6H_4O_2)^{--} + 2Ag^+ \rightarrow C_6H_4O_2 + 2Ag$$

$$\text{et } 2H^+ + 2Br^- \rightarrow 2HBr$$

Les principaux développateurs-réducteurs sont :

— *le diaminophénol* ou chlorhydrate de 2,4 diaminophénol ;

— *la phénidone* ou 1-phényl-3 pyrazolidone :

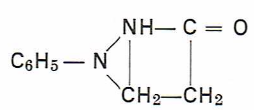

— *le génol* ou sulfate de paraméthylaminophénol :

$$OH{-}C_6H_4{-}NHCH_3(0{,}5\ H_2SO_4)$$

— *l'hydroquinone* ou paradiphénol : $OH{-}C_6H_4{-}OH$

— *la paraphénylènediamine* : $NH_2{-}C_6H_4{-}NH_2$, connue pour ses développements « grains fins » en noir-blanc (dans certaines conditions de pH) ; elle est utilisée, ainsi que ses dérivés, dans les traitements chromogènes. Les coupleurs associés sont, par exemple : un naphtol dans la couche sensible au rouge pour obtenir un colorant cyan ; un pyrazolone dans la couche sensible au vert (pour un colorant magenta) et un composé cétométhylénique pour obtenir du jaune dans la couche sensible au bleu.

Révélateurs (bains de développement)

Pratiquement, ces bains comportent cinq composés principaux :

— un réducteur organique révélateur (2 à 10 g/l) ;

— une substance alcaline qui maintient le potentiel redox et neutralise les acides formés : soude, carbonate de sodium, borax ;

— un préservateur d'oxydation qui retarde la formation des quinones par oxydation aérienne ;

— un solvant des halogénures qui alimente la réaction en ions Ag^+ ; le plus souvent, le sulfite de sodium ($S_2O_3Na_2$) remplit ces deux dernières fonctions ;

— un antivoile qui évite le développement des zones non exposées ; par exemple, le benzotriazol ou le bromure de potassium ;

— on trouve souvent d'autres composés annexes : agent anticalcaire, agent mouillant, etc.

Archives photographiques, Paris

▲ ***Le physicien français* Louis Ducos du Hauron *(1837-1920) dont les travaux sont à l'origine des films couleurs modernes.***

▶ *Miniature du* **Theatrum sanitatis** *représentant la préparation de la thériaque dans une pharmacie du XIV[e] siècle. La thériaque était un électuaire renfermant un très grand nombre d'ingrédients et utilisé contre les morsures de serpents venimeux.*

Bains secondaires

Après le développement, les halosels non utilisés et certains éléments formés (l'argent métallique pour les films couleurs) sont nuisibles à l'aspect de l'image. Il faut donc les éliminer; c'est le rôle des bains de blanchiment et de fixage. D'autres bains permettent : de tanner l'émulsion (par des aluns ou des aldéhydes), de stabiliser les colorants, ou d'éliminer des colorations secondaires. Enfin les rinçages et les lavages intermédiaires évitent es pollutions par élimination des sels solubles; ces lavages sont d'une très grande importance pratique.

● *Bains de blanchiment*

Dans les traitements inversibles noir-blanc, on rend soluble l'argent en formant des sulfates avec une solution acide de bichromate de potassium :

$$Cr_2O_7K_2 + 6Ag + 7H_2SO_4 \rightarrow 3Ag_2SO_4 + K_2SO_4 + Cr_2(SO_4)_3 + 7H_2O$$
(soluble)

Dans les traitements couleurs, un blanchiment acide est inutilisable, car il détruirait les colorants, aussi on réhalogène l'argent métallique formé pour le dissoudre plus tard par fixage; on peut réhalogéner avec du ferricyanure de potassium (entre pH7 et 9) ; on a :

$$Ag + [Fe(CN)_6]^{3-} \rightarrow Ag^+ + [Fe(CN)_6]^{4-}$$
$$4Ag^+ + [Fe(CN)_6]^{4-} \rightarrow Ag_4Fe(CN)_6$$
$$\text{et } Ag_4Fe(CN)_6 + 4Br \rightarrow 4AgBr + [Fe(CN)_6]^{4-}$$

● *Bains de fixage*

On utilise généralement le thiosulfate de sodium (« hyposulfite ») ou d'ammonium pour former un complexe argent soluble :

$$mAg^+ + nS_2O_3^{--} \longrightarrow [Ag_m(S_2O_3)_n]^{(2n-m)-}$$

la réaction est rendue irréversible par excès de thiosulfate et par agitation; dans les traitements couleurs, on peut combiner le fixage et le blanchiment en un seul bain.

Autres procédés argentiques

Inversion transfert

Dans ces systèmes, le négatif et une surface positive sont mis en contact direct lors d'un développement monobain. L'image argentique développée reste fixée sur la surface négative, alors qu'aux endroits non exposés, les sels d'argent ou les colorants vont pouvoir diffuser sur la surface positive. Dans les systèmes noir-blanc, la couche positive contient des germes de développement physique. Dans les systèmes couleurs, les colorants jaune, magenta et cyan déjà présents dans le film lors de l'exposition contiennent une molécule d'hydroquinone. Aux endroits où l'image argentique est développée (image négative), l'hydroquinone, transformée en quinone, se fixe sur la gélatine en fixant le colorant. Aux endroits non exposés, les colorants peuvent migrer sur la couche positive qui est mordancée.

Applications : photo instantanée ; photo spatiale (sondes automatiques).

Destruction de colorants par image argentique

Des colorants azoïques sont réduits par l'argent en présence de composés soufrés comme la thio-urée :

$$R{-}N = N{-}R' + 4Ag + 12\ \text{thio-urée} + 4H_2O \rightarrow R{-}NH_2 + R'{-}NH_2 + 4H_2O + 4\,[Ag(\text{thio-urée})_3]$$

La réduction se fait en milieu acide, le complexe Ag formé est soluble. Les colorants sont détruits aux endroits exposés; le système est donc autopositif. L'avantage principal du procédé est l'excellente stabilité des colorants par rapport à celle des colorants azométhiniques utilisés dans les procédés chromogènes; mais ces systèmes sont peu rapides.

Applications : positif couleurs pour tirer des diapositives.

BIBLIOGRAPHIE

GLAFKIDES P., *Chimie et physique photographiques*, Montel. - KOWALISKI P., *Théorie photographique appliquée*, Masson.

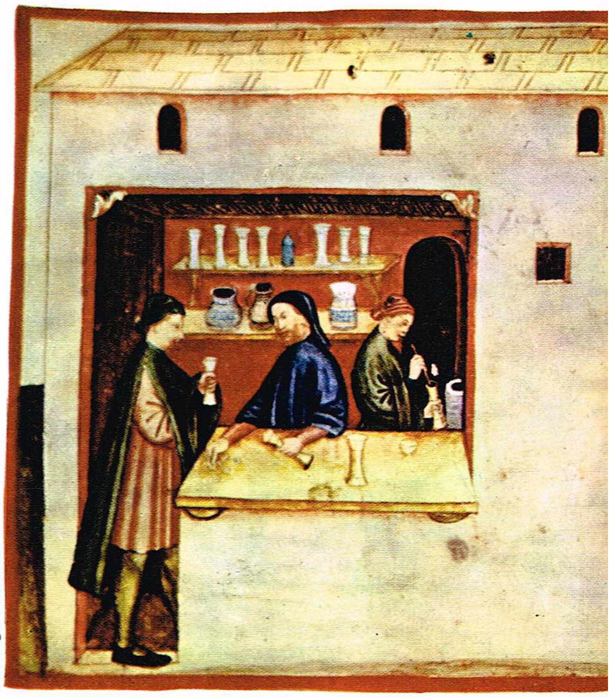

Rassegna Medica

LA TOXICOLOGIE

La toxicologie est la discipline qui étudie les poisons, leur nature, leurs effets, leurs mécanismes d'action, ainsi que la prévention des intoxications et leur traitement. C'est une science appliquée dont l'importance croît chaque jour davantage et intéresse les domaines les plus divers.

On est amené à définir ce qu'est un *poison :* c'est une substance qui, après pénétration dans l'organisme en dose élevée (prise en une fois ou en plusieurs fois très rapprochées), ou par petites doses très répétées, provoque de façon passagère ou durable des troubles pouvant entraîner la mort. Ces troubles sont appelés *intoxications.*

On distingue donc deux formes de toxicité : la *toxicité aiguë* ou *subaiguë,* liée à l'absorption, en courts espaces de temps, de doses relativement fortes de poisons, et la *toxicité chronique* ou à long terme, résultant de la prise, souvent renouvelée, de quantités même très faibles de substances.

La toxicité d'un produit est liée à de nombreux **facteurs.** Il est bien sûr évident que la nocivité est en rapport direct avec la *dose absorbée :* « la dose fait le poison », mais le problème se complique en raison de l'effet cumulatif de certaines substances. D'autres facteurs interviennent directement; ce sont l'*espèce animale* (le lapin est très résistant à l'atropine, le chat très sensible au phénol), la *race,* le *sexe,* l'*âge* et l'*état physique général* du sujet. En revanche, les facteurs liés à la *susceptibilité individuelle* échappent à toute classification. De plus, il faut signaler l'influence de l'existence d'une administration antérieure de la substance, entraînant soit une résistance particulière à ce toxique, phénomène connu sous le nom de mithridatisme, soit, au contraire, une intolérance acquise au toxique, le sujet étant « sensibilisé ».

Il est important de quantifier la toxicité d'un produit. On l'exprime le plus souvent par sa **dose létale 50 (D. L. 50),** qui représente la dose en milligrammes par kilogramme de masse de l'animal considéré qui entraîne la mort de 50 % des individus composant le lot d'expérience, en précisant la voie d'administration. On calcule parfois la **D. L. 10** et la **D. L. 100.** Compte tenu des variations de toxicité évoquées ci-dessus, la détermination de ces D. L. doit être réalisée sur des espèces animales et par des voies d'introduction différentes.

Les causes d'intoxication sont très diverses et le plus souvent accidentelles.

— Il existe des *intoxications provoquées par des aliments avariés, toxiques ou contaminés.*

— Les *intoxications domestiques* sont fréquentes; les journaux relatent souvent des cas d'intoxications à l'oxyde de carbone, présent dans le gaz d'éclairage

ou produit par des poêles au tirage défectueux, ou encore par des moteurs à explosion; les insecticides peuvent se révéler extrêmement toxiques s'ils sont employés sans précautions; de nombreux cosmétiques, fabriqués par des industriels sans scrupules ou insuffisamment avertis, renferment des substances dangereuses; des réglementations très strictes sur les additifs alimentaires et désormais sur les produits cosmétiques sont en vigueur en France pour éviter les erreurs et les abus.

— Les *intoxications professionnelles* constituent un chapitre à part du fait de leur importance et de leur fréquence, malgré des dispositions légales nombreuses et sévères prises par tous les pays industrialisés. Les intoxications chroniques sont particulièrement courantes chez les ouvriers travaillant dans les ateliers de galvanoplastie, de décapage, et plus généralement dans l'industrie chimique chez les ouvriers travaillant le plomb, le mercure, etc. En France, une liste officielle reconnaît comme professionnelles un certain nombre de maladies survenant chez des travailleurs (tableau des maladies professionnelles donnant droit à réparation).

— Il existe aussi des *intoxications médicamenteuses,* dues à l'administration à trop forte dose de médicaments, ou plus rarement à des traitements trop prolongés (digitaline).

— De plus sont rencontrées les *intoxications criminelles,* rares, et les intoxications volontaires à but suicidaire.

Origine, structure chimique, mécanisme d'action des toxiques

Origine des toxiques

Les toxiques provenant de la chimie de synthèse (insecticides organophosphorés, solvants organiques, acides et bases) sont moins nombreux que les poisons existant dans la nature. Dans le règne minéral, on trouve divers métaux et métalloïdes toxiques, aussi bien sous forme de sels que d'éléments purs. Parmi ces derniers, citons : le plomb, le béryllium, l'arsenic, le cadmium et le phosphore. Dans le règne végétal, les plantes renferment de nombreux poisons mortels; outre les Champignons vénéneux (certaines amanites) et le seigle ergoté, un grand nombre de plantes produisent des toxiques (alcaloïdes, hétérosides). Citons par exemple la strychnine, l'atropine, les hétérosides de la digitale, etc. Les poisons d'origine animale proviennent de certaines espèces appartenant aux Reptiles, aux Insectes, aux Mollusques et aux Poissons.

Structure chimique des toxiques

La structure chimique des poisons revêt les formes les plus variées, des plus simples aux plus complexes : ions de métaux lourds, molécules de structure simple et de masse moléculaire infime, comme celle de l'acide cyanhydrique, molécules organiques plus complexes, comme celle de l'aconit, enfin molécules de masse moléculaire élevée, comme celle de certains poisons hémolytiques à structure polypeptidique, la plus ou moins grande complexité de structure n'ayant aucun rapport avec le degré de toxicité.

On commence à être mieux informé sur le mécanisme d'action et les effets physiologiques de ces substances. C'est au niveau de l'action sur les constituants cellulaires des tissus et les systèmes enzymatiques qu'ils supportent, que s'orientent les recherches modernes en toxicologie (plomb, toxines des amanites, etc.).

Lieu et mécanisme d'action des toxiques

Les toxiques peuvent être classés selon leur lieu d'action. Nombreux sont les toxiques qui agissent sur le *système nerveux;* certains ont pour point d'impact l'ensemble du système nerveux central, d'autres exercent une action élective sur certaines formations, comme le bulbe, la moelle épinière, les nerfs afférents et efférents, etc. Au niveau bulbaire, de nombreux poisons ont une action paralysante des centres respiratoires **(aconitine)** ou cardiaque **(solanine)**; d'autres ont une action excitante, telles la **picrotoxine** et l'**apomorphine.** Les hypnotiques, comme les **barbituriques,** les analgésiques, comme l'**opium,** les anesthésiques généraux, comme l'**éther** ou le **protoxyde d'azote,** exercent, quant à eux, une action toxique sur les centres cérébraux, avec retentissement possible au niveau de la conscience; en effet, on peut observer chez les cocaïnomanes une véritable destruction de la personnalité, accompagnée de fréquentes crises d'angoisse. Quant au système nerveux périphérique, les lésions qui l'intéressent sont provoquées essentiellement par les intoxications chroniques dues, par exemple, au **plomb,** à la **nicotine,** aux excès habituels d'**alcool.** Certains toxiques portent atteinte au système nerveux autonome, tels les **curares,** qui paralysent les plaques motrices, provoquant la paralysie générale et la mort par asphyxie.

L'*appareil digestif* est le siège d'atteintes fréquentes. Le foie, du fait de son rôle épurateur et métabolique, est souvent touché. Certains toxiques comme le **phosphore blanc** et l'**amanitine** agissent d'une manière très rapide, d'autres beaucoup plus lentement; tel est le cas des **solvants chlorés,** du **benzène** et de l'**alcool éthylique.** Certains poisons excitent les terminaisons nerveuses intestinales, occasionnant des diarrhées graves.

L'*appareil respiratoire* est lui aussi soumis aux attaques de nombreux toxiques irritants ou agissant sur les mécanismes de la respiration.

L'*épiderme* et les *muqueuses* sont sensibles à l'action d'un grand nombre de substances corrosives. En ce qui concerne l'œil et en particulier le nerf optique, l'action toxique peut s'exercer par voie générale; ainsi, l'**alcool méthylique** provoque des lésions du nerf optique pouvant entraîner la cécité.

P. Martini

▲ ***Un malmignathe, Latrodectes tredecimguttatus; sa morsure est en général très douloureuse mais non mortelle.***

Le *sang* peut subir des lésions toxiques directes, comme celles dues aux poisons hémolytiques qui provoquent l'éclatement des globules rouges, ou indirectes, par action de substances qui, en se combinant avec l'hémoglobine ou en la dénaturant, perturbent le mécanisme de transport de l'oxygène par le sang.

De nombreux poisons agissent sur *l'appareil cardio-vasculaire* en provoquant des modifications du rythme cardiaque **(digitaline)**, ou en lésant le myocarde.

L'*appareil rénal*, enfin, principale voie d'élimination des toxiques, en subit très souvent les méfaits.

Outre les actions électives que nous venons d'énumérer, beaucoup de toxiques exercent aussi des effets secondaires sur d'autres organes ou appareils, entraînant une aggravation du tableau clinique; cependant, ils peuvent se révéler utiles pour le diagnostic précoce de l'intoxication et parfois aussi pour les examens anatomo-pathologiques *post mortem*.

Le mécanisme de l'action physiologique et biochimique est souvent lié à la structure et au métabolisme du toxique. Ainsi, on a constaté que les métaux lourds inhibent des enzymes en bloquant des groupements thiols. D'autres substances agissent par action compétitive en se substituant à des agents métaboliques ayant une structure chimique analogue. Beaucoup de toxiques s'unissent de manière stable à des enzymes dont ils empêchent la fonction, soit directement, comme c'est le cas de l'**acide cyanhydrique** qui présente une forte affinité à l'égard de la cytochrome-oxydase, enzyme respiratoire intervenant dans les échanges d'oxygène au niveau cellulaire, soit par l'intermédiaire d'un dérivé métabolique, comme c'est le cas du **fluoroacétate** qui, dans le cycle de Krebs, entre en compétition avec l'acétate (métabolite normal) et est transformé en fluorocitrate, inhibiteur de l'aconitase.

▶ *Inflorescence de* **Digitalis purpurea**, *plante très toxique dont on utilise les feuilles. A forte dose, la digitaline est un poison agissant sur l'appareil cardio-vasculaire en provoquant des modifications du rythme cardiaque ou en lésant le myocarde.*

Diagnostic et traitement des intoxications

Diagnostic

Un diagnostic précoce du type d'intoxication et de la substance responsable est la condition essentielle pour un traitement efficace. Les différents éléments sur lesquels repose la recherche des causes d'une intoxication sont :

— l'*examen clinique*, fondé sur l'observation directe des symptômes que présente le patient ou sur la description de ces symptômes faite par des personnes averties; il est à la base, essentiellement, du diagnostic des intoxications dues à des substances à action rapide; l'interrogatoire du sujet, s'il est conscient, ou des personnes de son entourage peut, en outre, apporter des indications utiles (enquête épidémiologique) ;

— l'*examen anatomo-pathologique*, lorsque l'intoxication a été suivie de décès, qui interprète les résultats de l'autopsie ;

— les *analyses de laboratoire* portant sur les selles, les urines, le sang et le contenu gastrique ; elles permettent la mise en évidence des perturbations biologiques que les toxiques provoquent dans l'organisme et l'identification des agents responsables; cette dernière opération est rendue difficile du fait que les poisons subissent des transformations métaboliques dans l'organisme et ne sont plus retrouvés dans les milieux biologiques sous leur forme initiale. De plus, ils peuvent se trouver en quantité trop faible pour pouvoir être mis en évidence.

Traitement

En ce qui concerne le traitement des intoxications, on agira en évacuant ou en éliminant le poison de l'organisme, en le détruisant ou en le neutralisant, et en luttant par une thérapeutique symptomatique contre les effets qu'il provoque. Quand le toxique a été absorbé par voie orale et qu'il se trouve encore dans l'estomac, on peut provoquer les vomissements, si le sujet est conscient et si l'on est sûr qu'il ne s'agit pas d'intoxication par des substances caustiques. Le lavage d'estomac est le plus pratiqué : il consiste à introduire dans l'estomac une solution saline à l'aide d'un tube placé dans l'œsophage, et à l'évacuer ensuite. On peut accélérer éventuellement l'élimination du toxique par administration de purgatifs et de lavements dont le choix est lié à la nature du poison.

Si le toxique est gazeux ou volatil, on facilitera son élimination en pratiquant la respiration artificielle et on apportera de l'oxygène à l'organisme en réalisant l'oxygénothérapie simple ou associée à des substances accélérant le rythme respiratoire. Le sujet intoxiqué peut également être placé dans un caisson hyperbar dans lequel la pression en oxygène est de 2 atmosphères.

Si le toxique est passé dans le sang, il faudra recourir à des saignées, suivies de la transfusion d'un volume identique de sang, ou, si nécessaire, pratiquer une exsanguino-transfusion. Actuellement, dans les cas graves, on emploie l'élimination extra-corporéale à l'aide du rein artificiel.

Simultanément, l'emploi des *antidotes* revêt une importance particulière. Les antidotes sont des substances qui s'opposent à l'action du toxique, soit en se combinant avec lui ou en le transformant chimiquement *(antidotes physico-chimiques)*, soit en ayant une action pharmacologique opposée à celle du poison *(antidotes pharmacologiques)*. Les antidotes peuvent agir avant ou après passage du toxique dans la circulation générale.

Parmi ceux utilisés quand le poison est encore dans le tube digestif, citons :

— le *charbon actif* qui adsorbe les molécules du toxique, empêchant leur passage à travers la barrière intestinale; son action s'exerce dans un domaine très large; il est souvent associé aux solutions de lavage d'estomac.

— De nombreux produits qui agissent par précipitation des toxiques, tels : *l'eau albumineuse* à l'égard des métaux lourds, les *tanins* en présence d'alcaloïdes et d'hétérosides, les *agents sulfurants*.

— Des substances qui ont une action antiacide *(bicarbonate de sodium)* ou antialcaline *(eau boriquée)*.

— Un antidote polyvalent assez employé, l' « antidote universel », est constitué par le mélange de charbon actif, de tanin et de magnésie. A noter que le lait est à proscrire lors de toute intoxication.

Parmi les antidotes administrés après passage du toxique dans la circulation sanguine, nous pouvons citer : les *thiosulfates*, employés dans les intoxications dues aux cyanures et qui ont pour effet de transformer l'ion CN^-, toxique, en SCN^-, presque inoffensif; le *dimercapto-propanol (BAL)*, qui permet de combattre les intoxications dues aux métaux lourds; l'*E. D. T. A. calcique (diamino-tétracétate de sodium et de calcium)*, qui complexe le plomb, permettant ainsi son élimination.

Les antidotes pharmacologiques s'opposent à l'action du toxique d'une manière soit totale, soit partielle. Parfois l'action antagoniste est réciproque, chacune des substances se comportant comme un antidote à l'égard de l'autre : l'exemple typique est celui de l'acétylcholine et de l'atropine. En revanche, la strychnine, dont l'action est antagonisée par les curares, ne se comporte pas elle-même comme antagoniste à l'égard des curarisants.

Mais, même en présence d'une thérapeutique spécifique et à plus forte raison lorsque l'on n'en dispose pas, ou encore dans le cas de poly-intoxications, on préférera combattre les effets nocifs par un traitement symptomatique approprié mettant en œuvre tous les moyens modernes de réanimation (physiologiques et biologiques). Ces traitements sont réservés à des centres particulièrement équipés et sont très fréquemment les moins dangereux et les plus efficaces. L'exemple le plus démonstratif est celui du traitement du coma barbiturique, considéré comme une anesthésie dépassée.

Viola

◀ *L'Amanita muscaria renferme un poison, la muscarine, qui provoque une intoxication se manifestant par un syndrome nerveux.*

▼ *A gauche,* **l'Amanita pantherina** *est également un Champignon entraînant une intoxication qui donne lieu à un syndrome nerveux.*
A droite, **Amanita phalloides,** *dont l'ingestion provoque un empoisonnement le plus souvent mortel.*

Toxicologie spéciale

Les intoxications alimentaires

Les *Champignons* sont les grands pourvoyeurs de telles intoxications. Il nous faut rappeler aux utilisateurs que les méthodes empiriques, trop souvent employées pour reconnaître les Champignons vénéneux, sont absolument sans fondements. Les poisons renfermés dans les Champignons sont de natures très diverses, mais les intoxications qu'ils provoquent donnent lieu habituellement à des manifestations que l'on regroupe en trois grands syndromes : syndrome nerveux, syndrome phalloïdien et syndrome gastro-intestinal.

Viola

Viola

P. Martini

▲ *Une amanite mortelle :* **Amanita verna.**

Enfin la plupart des Champignons vénéneux renferment comme principes toxiques des substances résineuses fortement irritantes pour le tube digestif et qui, de ce fait, se comportent comme des purgatifs drastiques. Nous sommes alors en présence du tableau clinique du *syndrome gastro-intestinal :* vomissements, diarrhées, coliques douloureuses, toutes ces manifestations apparaissant quelques heures seulement après l'ingestion. La guérison survient normalement en 1 ou 2 jours.

Claviceps purpurea, un Champignon parasite du seigle, était autrefois responsable de fréquentes intoxications. En effet, ce Champignon provoque une intoxication appelée *ergotisme chronique,* qui se manifeste par des douleurs gastriques et intestinales, une gangrène sèche des membres et des troubles psychiques. Les contrôles qui s'exercent sur les Graminées ont fait disparaître ces risques d'intoxication. Les principes toxiques de l'ergot de seigle sont des alcaloïdes dont la structure de base rappelle celle de l'acide lysergique ; un grand nombre d'entre eux présente la structure suivante :

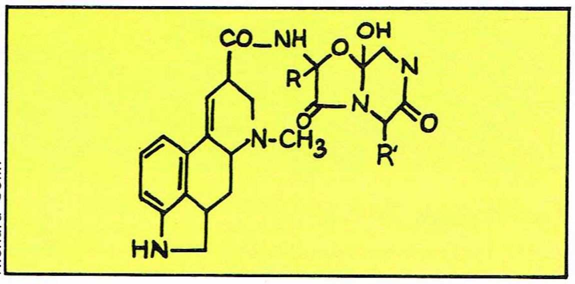

Richard Colin

On peut citer l'**ergotamine,** l'**ergotine** et l'**ergosine.**

Le *syndrome nerveux* est la conséquence de l'ingestion d'*Amanita muscaria* ou *Amanita pantherina,* dont les principes toxiques sont la **muscarine,**

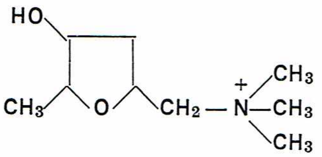

qui, en dehors des troubles gastro-intestinaux, provoque une dépression profonde du système nerveux central, et la **mycéatropine,** substance mal connue, de structure atropinique, qui entraîne, à l'inverse, une excitation du système nerveux central. Cette intoxication, rarement mortelle, relève d'un traitement non spécifique : lavage d'estomac, charbon.

Beaucoup plus redoutable et très souvent mortelle est l'intoxication due à *Amanita phalloides, Amanita verna* et *Amanita virosa ;* cette intoxication donne lieu au *syndrome phalloïdien,* d'apparition tardive (10 à 30 heures après l'ingestion) ; elle est caractérisée par des vomissements et une diarrhée sanglante devenant cholériforme. Après 1 ou 2 jours de rémission, la diarrhée réapparaît, associée à des crampes, une oligurie et de graves atteintes hépatiques, rénales et cardiaques ; la mort survient généralement par collapsus cardiaque. Le traitement met en œuvre des mesures de caractère général.

C.N.R.I. - P. Christol, Paris

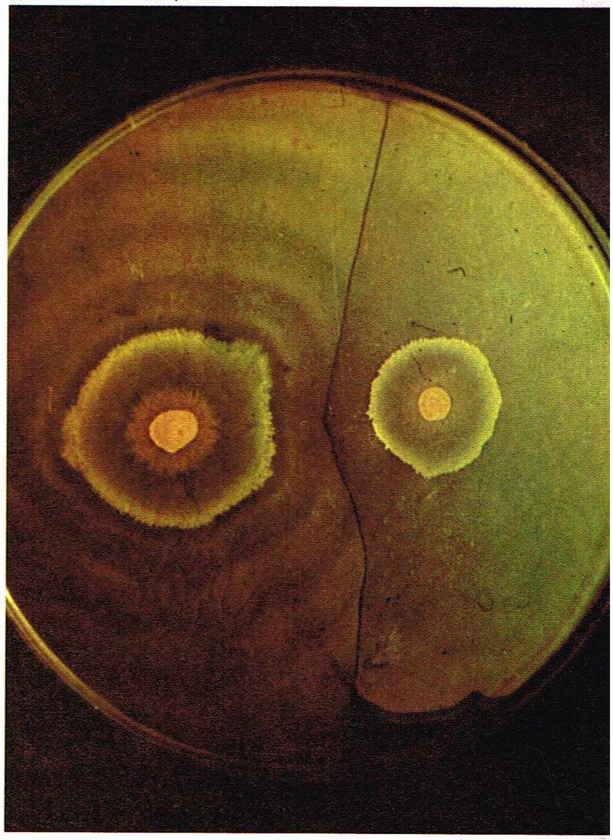

▶▼ *Ci-contre, culture de* **Proteus vulgaris** *en boîte de Pétri. Ci-dessous, une autre amanite mortelle :* **Amanita virosa.**

Viola

La grande ciguë *(Conium maculatum),* contenant un alcaloïde, la **conine,** provoque une intoxication caractérisée par une paralysie musculaire qui, lorsqu'elle atteint les muscles respiratoires, entraîne la mort par asphyxie. La petite ciguë, confondue avec le persil et le cerfeuil, présente une toxicité moindre.

Les **intoxications au plomb,** autrefois très fréquentes, sont aujourd'hui assez rares. Les causes sont très diverses ; en particulier, l'eau qui séjourne longtemps dans des réci-

pients en plomb ou dans des poteries recouvertes de vernis au plomb, peut en dissoudre de faibles quantités; les aliments en boîtes étamées peuvent absorber du plomb si l'étain contient des impuretés de plomb.

Les **aliments avariés**, de même que ceux qui contiennent encore des **germes virulents**, sont une cause fréquente d'intoxications. Dans le deuxième cas, il conviendrait plutôt de parler d'infection, mais il est habituel de ranger sous la dénomination de toxi-infections alimentaires les intoxications dues aux deux types d'aliments. Elles présentent soit une symptomatologie typiquement gastro-intestinale (due essentiellement à des bacilles du type salmonelles, comme le bacille d'Aertrike et le bacille de Gaertner, plus rarement *Proteus vulgaris* et quelques types de *Cocci*, comme l'entérocoque et le staphylocoque), soit une symptomatologie nerveuse, avec des troubles moteurs, des paralysies, d'ailleurs toujours accompagnées de troubles digestifs tels que diarrhées et vomissements; dans ce dernier cas, l'agent responsable est généralement le redoutable *Clostridium botulinum*.

Pour terminer, il faut mentionner les intoxications dues aux pratiques frauduleuses de certains fabriquants qui n'hésitent pas à utiliser des viandes avariées ou contaminées, notamment dans la préparation de produits de charcuterie, ou bien des additifs soit toxiques, soit en quantité trop élevée. Toutefois, une législation rigoureuse, qui interdit l'emploi de nombreuses substances, non seulement toxiques, mais même simplement nocives ou dont l'innocuité n'a pas été entièrement prouvée, jointe à un contrôle industriel sérieux et minutieux, tend à faire disparaître les cas d'intoxications graves. Le toxicologue a un rôle important à jouer dans ce contrôle alimentaire.

Les intoxications professionnelles

Elles sont malheureusement très nombreuses et très diverses, ce qui nous impose de nous limiter aux plus communes et aux plus dangereuses.

De nombreux métaux sont à l'origine de telles intoxications plus ou moins graves. Avant de consacrer un développement particulier aux métaux les plus nocifs et les plus importants du point de vue toxicologique, nous citerons quelques-uns d'entre eux : le **cadmium**, utilisé en fonderie et en galvanoplastie, le **béryllium**, le **thallium**, le **chrome**, sous forme de chromates, le **sélénium**, employé en métallurgie, l'**antimoine**, dangereux pour les fondeurs d'imprimerie, les ouvriers travaillant à la préparation de certaines peintures, etc., le **baryum**, très toxique, utilisé dans l'industrie des verreries, un dérivé du bore, l'**acide borique**, utilisé comme antifermentaire, etc.

Le **mercure** emprunte surtout la voie respiratoire, en raison de sa tension de vapeur élevée; à 20 °C, chaque mètre cube d'air saturé en vapeur de mercure (condition qui peut se réaliser dans des locaux fermés où l'on travaille du mercure métallique) contient environ 15 mg de mercure. Cette teneur est amplement suffisante pour provoquer des intoxications chroniques graves, qui se manifestent par des stomatites et de la diarrhée. Sont sujets à ce type de manifestations les mineurs et les ouvriers travaillant à la production de miroirs, de manomètres, de thermomètres et autres produits semblables.

Un tableau clinique analogue, mais avec un caractère de plus grande gravité, est celui de l'intoxication par le **plomb.** L'intoxication chronique par ce métal, ou *saturnisme,* constitue l'une des affections professionnelles les plus répandues et qui ont fait l'objet des études les plus poussées. Mais en revanche, l'intoxication aiguë est infiniment moins fréquente. Le saturnisme frappe les mineurs, les linotypistes, les ouvriers qui préparent des peintures au plomb et ceux qui sont employés à la fabrication des accumulateurs, etc. La voie d'introduction est essentiellement la voie pulmonaire (respiration de poussières de plomb). Les symptômes principaux du saturnisme sont la « colique saturnine », les « arthralgies saturnines », l' « encéphalopathie saturnine », qui s'accompagne de troubles psychiques, et la « paralysie saturnine », d'installation progressive, qui intéresse d'abord les doigts, puis gagne les membres, et atteint aussi les cordes vocales. L'évolution se déroule en phases discontinues; on observe des récidives même si le patient est éloigné des causes d'intoxication. Le traitement fait appel aux spasmolytiques au cours des coliques, et on utilise l'E. D. T. A. calcique comme antidote.

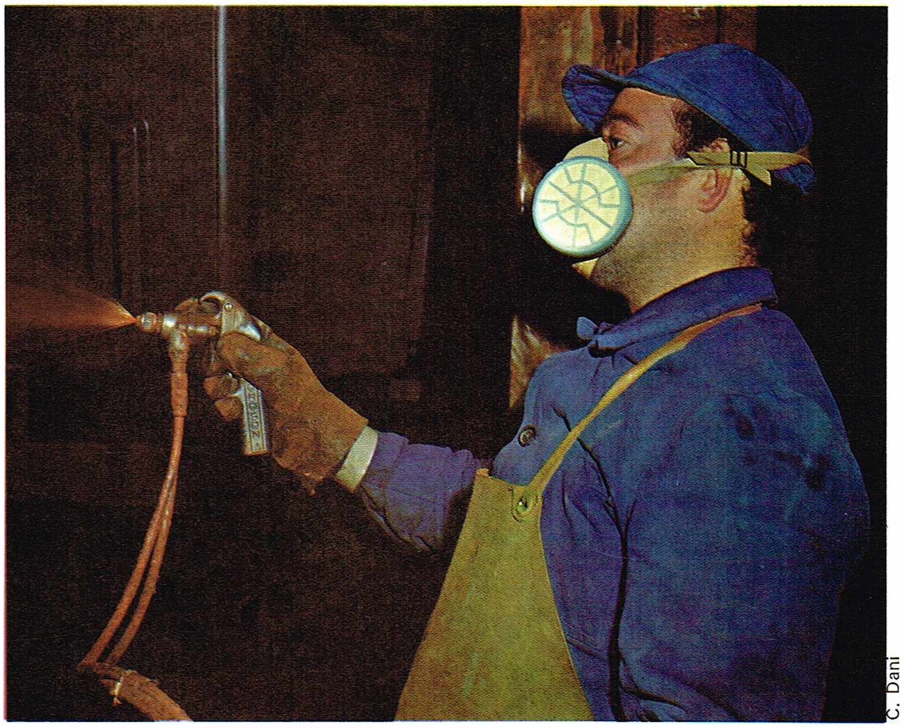

C. Dani

***▲▼ Dans la lutte contre les trop nombreuses* intoxications professionnelles,**
le port de masques et de vêtements de protection constitue une importante action préventive.

Ci-dessus, un peintre au pistolet muni de son masque de protection; ci-dessous, dans l'industrie chimique, en plus du masque et des vêtements protecteurs, certaines manipulations obligent à porter également des gants spéciaux.

Montedison

▶ *La vipère commune* **(Vipera aspis)** *est un des principaux serpents venimeux de nos pays. Son venin, constitué essentiellement par des toxalbumines, exerce une action toxique sur le système nerveux.*

P. Martini

L'**arsenic** occupe une place importante en toxicologie ; il est habituellement utilisé sous forme d'anhydride arsénieux As_2O_3. Il constitue un poison, tant sous forme d'élément que sous forme d'oxyde, pour la quasi-totalité des cellules, ce en quoi il diffère du phosphore, qui est toxique sous forme d'élément seulement. L'intoxication chronique se rencontre chez les ouvriers des industries extractives, les tanneurs et les fondeurs. Le meilleur antidote est le dimercaptopropanol ou BAL.

Le **phosphore** élémentaire se présente sous différentes formes allotropiques : il existe le phosphore blanc (dit aussi « jaune »), d'aspect cireux et onctueux, le phosphore rouge et le phosphore noir qui ne présente pas d'intérêt industriel. Le phosphore jaune est très toxique, et son emploi est interdit depuis 1906 (convention de Berne) pour la fabrication des allumettes au profit du phosphore rouge ou du sulfure d'antimoine, presque inoffensifs. Les ouvriers sujets à des intoxications chroniques présentent de graves lésions hépatiques et des troubles métaboliques, avec atteinte de l'état général. Une des caractéristiques de l'intoxication chronique est l'apparition de lésions osseuses au niveau des éléments squelettiques proches des voies respiratoires (vapeurs de phosphore). Le phosphore jaune est encore occasionnellement utilisé pour la préparation d'appâts destinés aux animaux nuisibles et pour d'autres emplois.

Les poudres de **silice** (quartz, amiante), lorsqu'elles sont suffisamment fines pour atteindre les alvéoles pulmonaires, provoquent, par inhalation prolongée (par exemple chez les mineurs, les sculpteurs, les sableurs), la *silicose,* qui est une fibrose pulmonaire chronique, s'accompagnant souvent de tuberculose. Les mesures à prendre sont exclusivement d'ordre prophylactique.

Des intoxications sont souvent provoquées par des gaz tels que le **chlore,** le **brome** et le **phosgène** ; ce dernier, utilisé comme arme chimique au cours de la Première Guerre mondiale, constitue aujourd'hui un important produit intermédiaire dans la synthèse de matières plastiques en raison de sa réactivité élevée. Les fuites accidentelles de ces gaz provoquent des intoxications aiguës, aux conséquences mortelles par suite de la paralysie du centre respiratoire et de la formation d'un œdème pulmonaire.

L'**hydrogène sulfuré,** H_2S, est une cause d'intoxication accidentelle en cas de fuites pour les ouvriers qui travaillent à sa production ainsi que pour le personnel affecté au nettoyage des égouts, des citernes et des fosses septiques. Il provoque à une certaine concentration dans l'air une perte de conscience et une mort rapide.

L'industrie chimique emploie un grand nombre de solvants qui, absorbés facilement par voie respiratoire, sont souvent à l'origine d'intoxications.

Le **sulfure de carbone,** CS_2, largement employé comme solvant dans la vulcanisation du caoutchouc, dans l'industrie des pesticides, etc., est responsable d'une intoxication chronique qui se manifeste par des polynévrites et des encéphalopathies.

Le **benzène** et, dans une moindre mesure, le **toluène** et le **xylène** provoquent des perturbations sanguines graves et des atteintes hépatiques.

Les hydrocarbures aliphatiques chlorés, **trichloréthylène, perchloréthylène, chloroforme,** connaissent actuellement une large utilisation. Ils provoquent de graves intoxications professionnelles chroniques s'accompagnant de manifestations neurologiques, de lésions hépatiques sévères, de lésions optiques, de céphalées.

Parmi les nombreux solvants, citons encore l'**aniline,** l'**acétone,** et les autres **cétones volatiles.**

Pour l'ensemble des produits volatils, gaz et solvants, les hygiénistes de divers pays proposent des *tables de concentrations maximales tolérables* (*M. A. C.,* maximum allowable concentration) dans les ambiances de travail pour 8 h par jour, 5 jours par semaine d'exposition. Les valeurs indiquées, qui sont révisables, constituent un seuil à ne pas dépasser. Malheureusement, de nombreux points de désaccord existent encore à l'échelon international, notamment entre hygiénistes américains et soviétiques. Le respect de telles normes est un facteur essentiel en vue de l'éradication de certaines maladies professionnelles où la prévention est capitale (benzolisme, par exemple).

Parmi les diverses substances responsables d'intoxications, l'**oxyde de carbone** tient une place importante, tant sur le plan domestique (fuites de gaz, poêles au tirage défectueux, moteurs à explosion fonctionnant dans des locaux fermés), que professionnel (garages, ouvriers

travaillant à certains fours, etc.). A une concentration de 0,4 % dans l'air, il peut provoquer des intoxications graves, et même la mort pour une exposition d'une heure. Danger d'autant plus grand que ce gaz est inodore. Les premiers symptômes de l'intoxication sont des céphalées, des vertiges et une impotence musculaire au niveau des membres inférieurs. Ensuite le sujet perd connaissance, un coma s'installe, et la mort survient par asphyxie. Cette dernière résulte d'une privation de l'organisme en oxygène, l'oxyde de carbone bloquant l'hémoglobine sous forme de carboxyhémoglobine stable. Le traitement des intoxications est fondé sur la pratique de la respiration artificielle, sur l'oxygénothérapie et la carbogénothérapie ($O_2 + CO_2$), auxquelles on associe des analeptiques respiratoires. Des transfusions sanguines et même des exsanguino-transfusions sont fréquemment réalisées. En cas de survie, on déplore souvent des séquelles nerveuses, le tissu nerveux étant le plus sensible au manque d'oxygène.

Intoxications médicamenteuses

Le surdosage d'un médicament, c'est-à-dire l'augmentation inconsidérée des doses prescrites de la part d'un malade qui nourrit l'espoir illusoire d'en augmenter l'efficacité, aboutit souvent à une intoxication. D'autres causes fréquentes sont la prise accidentelle d'un médicament à la place d'un autre, ainsi que la consommation par méprise (les enfants en étant les victimes principales) due à la confusion des médicaments avec des bonbons, par exemple (aspirine notamment). Selon les cas, on observe des intoxications aiguës ou chroniques. Les intoxications par les barbituriques sont fréquentes, de même que celles dues à l'usage inconsidéré de tranquillisants. On pourrait multiplier les exemples. Ce qu'il faut retenir est que, étant donné que presque aucun médicament n'est dépourvu de toxicité, le patient doit respecter la dose prescrite par le médecin et contrôlée par le pharmacien et doit laisser ces produits hors de la portée des enfants.

Intoxications dues aux morsures de serpents

Elles sont assez nombreuses de nos jours. Les principaux serpents venimeux de nos pays appartiennent au genre *Vipera (Vipera aspis, Vipera ammodytes, Vipera berus* et *Vipera ursinii)*. Le venin de ces serpents est constitué essentiellement par des toxalbumines inoffensives par voie gastrique mais provoquant en dehors des phénomènes locaux, des atteintes du système nerveux central. La mortalité est d'environ 0,5 %, mais précisons que la sensibilité au poison est très variable d'un individu à l'autre. L'intervention d'urgence vise essentiellement à éliminer le venin au niveau de la piqûre (succion à l'aide d'une ventouse, de préférence à la succion buccale) et à retarder l'absorption du poison, au moyen d'un garrot posé en amont du point d'inoculation, pendant un temps très limité en raison du risque de nécrose. Le traitement spécifique est fondé sur l'administration d'analeptiques, et surtout d'un sérum antivenimeux polyvalent.

Intoxications volontaires à but suicidaire et intoxications criminelles

Parmi les poisons utilisés à des fins criminelles, l'arsenic, qui occupait autrefois une place de choix, est aujourd'hui pratiquement abandonné. Lui sont préférés des hétérosides et des alcaloïdes (digitaline, strychnine). Des substances très diverses sont également employées; citons les insecticides organophosphorés, type parathion et similaires. Le cyanure n'est pas parmi les toxiques les plus employés, car si la mort est rapide, une symptomatologie typique dénonce l'intoxication.

Dans le cadre des suicides, les toxiques les plus utilisés par les désespérés qui attentent à leurs jours sont très divers, depuis les acides et les alcalis jusqu'à l'essence, mais la plupart des suicides sont dus au gaz d'éclairage et surtout aux barbituriques absorbés à très fortes doses; ces derniers provoquent une dépression profonde de tout le système nerveux central, avec anesthésie, abolition des réflexes, coma, la mort survenant par arrêt respiratoire. Pour combattre ce type d'intoxication, on a recours à tous les moyens de réanimation artificielle.

Les armes chimiques

Rentrent dans cette catégorie les différents composés gazeux, liquides et solides susceptibles d'être utilisés comme armes de combat. On les classe en suffocants, sternutatoires, lacrymogènes, vésicants et toxiques du système nerveux.

Appartiennent aux *suffocants* le **chlore** et le **phosgène,** qui agissent en provoquant de graves inflammations des voies respiratoires supérieures et des bronches, et entraînent la mort par œdème pulmonaire.

Les *sternutatoires* provoquent tout d'abord l'éternuement et l'irritation du nez, puis des nausées violentes et une grave dépression physique et mentale, cette action étant temporaire. La **diphénylchloroarsine** est un exemple type de ces composés.

Les *lacrymogènes* irritent la membrane oculaire, provoquant une hypersécrétion de larmes; parmi les produits faiblement toxiques, citons la **chloroacétophénone,** $C_6H_5CO—CH_2Cl$.

Les *vésicants* entraînent des érythèmes et des phlyctènes, suivis de la destruction des tissus contaminés. Le principal composé de cette catégorie est l'**ypérite.** On a réalisé la synthèse de certaines substances de structure analogue, comme l'**azoto-ypérite** et la **léwisite.**

Les toxiques du système nerveux central ont été synthétisés à partir d'esters phosphoriques. Les plus redoutables sont le **Tabun,** le **Sarin** et le **Soman.** Ils agissent en bloquant l'activité de la cholinestérase, ce qui provoque des accumulations toxiques d'acétylcholine, entraînant des nausées suivies de convulsions, puis le coma. Ces toxiques n'ont jamais été utilisés. L'emploi éventuel de ces gaz, dont la formule est souvent inconnue pour des raisons de secrets militaires, poserait des problèmes dramatiques.

Longo

◀ *La péliade,* **Vipera berus,** *est également un serpent venimeux.*

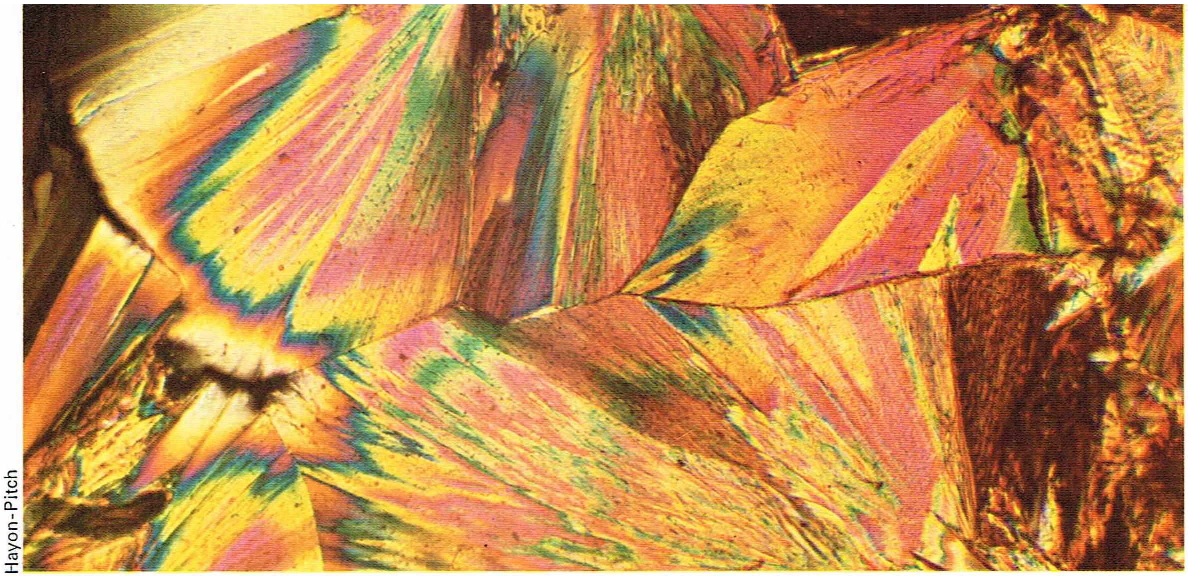

▶ *Cristaux de cocaïne observés en lumière polarisée : c'est le principal alcaloïde contenu dans les feuilles de coca.*

Hayon-Pitch

Toxicomanies (dépendances)

Un grand nombre de poisons sont absorbés volontairement pour les sensations qu'ils procurent, qu'il s'agisse de substances excitantes, de stimulants ou de stupéfiants. D'une manière générale, et lorsque l'usage de tels produits devient habituel, on peut parler de *toxicomanie,* terme auquel l'O. M. S. (Organisation mondiale de la santé) a substitué le terme de *dépendance* pour étendre à des habitudes de vie néfastes la même conception (éthylisme, tabagisme).

Un conditionnement psychique vis-à-vis de la drogue s'installe, et apparaît le phénomène de tolérance, qui oblige le toxicomane à augmenter les doses pour obtenir le même effet. On notera toutefois que l'intensité de ces réactions est variable selon le type de drogue. L'interruption brutale de l'usage de ces produits entraîne souvent des accidents de sevrage, ce qui impose de procéder à la désintoxication sous surveillance médicale et psychologique très stricte. Les drogues sont de nature très diverse, et leur toxicité varie. Nous allons citer quelques-unes d'entre elles.

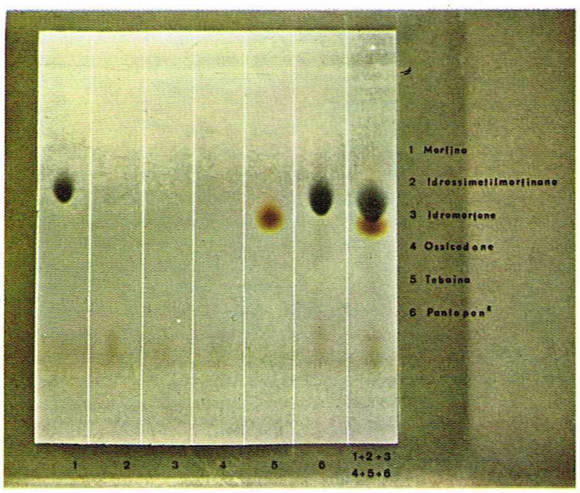

I.G.D.A.

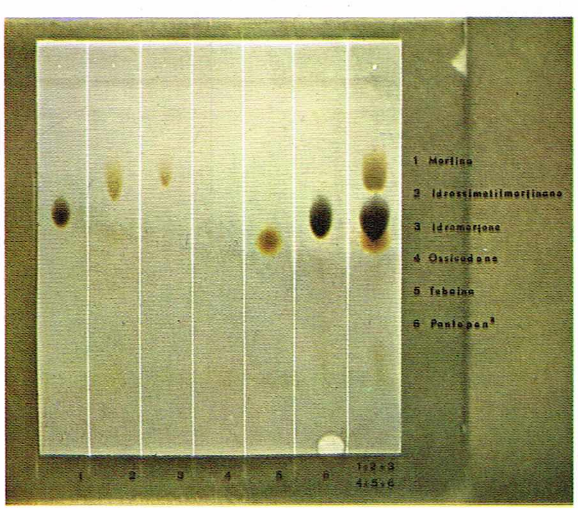

I.G.D.A.

▶ *Identification de composés de la* **morphine** *par la méthode de la chromatographie sur couche mince. Les chromatogrammes de l'illustration du haut ont été obtenus avec un réactif donnant une coloration verte avec les dérivés morphiniques. Les chromatogrammes de l'illustration du bas ont été obtenus à l'aide d'un réactif donnant une coloration rouge de nuance variable avec les dérivés de la morphine. Ces techniques sont largement employées en toxicologie et en médecine légale.*

On peut parler de dépendance alcoolique dans la mesure où l'**alcool** entraîne des phénomènes d'accoutumance et des accidents de sevrage provoquant une altération psychique, des troubles neurologiques et des atteintes hépatiques graves.

Le **hachisch** ou **marijuana,** que l'on extrait du chanvre indien, est une drogue fort répandue. Elle provoque un état particulier d'euphorie et des hallucinations agréables. On peut observer des lésions nerveuses pouvant aboutir à la folie. Il n'y a ni tolérance ni accidents de sevrage.

Le **diéthylamide de l'acide lysergique** ou **L. S. D.,** dont l'usage est répandu surtout aux États-Unis, est une drogue plus récente. Elle provoque une profonde dissociation des facultés intellectuelles et affectives, avec hallucinations et état d'apathie.

La **mescaline,** contenue dans le peyotl, Cactacée qui croît au Mexique, ainsi que d'autres substances (**psilocybine** et **psilocyne**) contenues dans des Champignons du Mexique provoquent des effets semblables.

Le groupe des stupéfiants « vrais » qui est envisagé maintenant comprend en premier lieu l'**opium** extrait du pavot, et fumé par plus de 400 millions de personnes dans le monde. On utilise uniquement dans les pays occidentaux un de ses alcaloïdes, la **morphine,** ainsi que ses dérivés et ses succédanés. La morphine possède des propriétés analgésiques intéressantes en médecine. Elle provoque un état psychique caractérisé par un détachement serein, tandis qu'à des doses plus élevées, elle provoque un état initial d'euphorie et d'hyperexcitabilité, suivi de somnolence et d'amoindrissement de la sensibilité physique. L'accoutumance s'installe rapidement, ce qui conduit à augmenter les doses, avec pour conséquence un épuisement physique général. Les accidents de sevrage sont particulièrement graves. Le malaise entraîné par l'état de manque est si profond qu'il conduit le morphinomane à se procurer de la drogue par n'importe quel moyen.

La **diacéthylmorphine** ou **héroïne** est probablement la plus dangereuse de toutes les drogues dérivées de la morphine; beaucoup plus active que cette dernière, elle possède une action euphorisante plus marquée; son usage répété provoque des troubles profonds du caractère. D'autres analgésiques (**péthidine, palfium**) possèdent des propriétés comparables.

La **cocaïne** est le principal alcaloïde contenu dans les feuilles de coca qui sont mâchées par les habitants du Pérou. Elle procure un choc « extatique » de très courte durée. La cocaïne ne crée ni dépendance physique, ni tolérance, mais une très forte dépendance psychique.

Nous avons décrit quelques drogues parmi les plus utilisées. Mais les drogués n'hésitent pas à employer des « cocktails », mélanges de plusieurs toxiques ayant un effet synergique. La toxicomanie reste un problème social grave, difficile à combattre, compliqué par des implications économiques internationales.

BIBLIOGRAPHIE

FABRE R. et TRUHAUT R., *Précis de toxicologie,* 1960. - MEUNIER R., *Toxicologie d'urgence,* Paris, 1972. - OLIVIER, *Traité de biologie appliquée,* tome 7. - PATTY F., *Industrial Hygien and Toxicology Interscience,* New York, 1962. - TRUHAUT R., *Pure and Applied Chemistry,* volume XXIV, 1970.

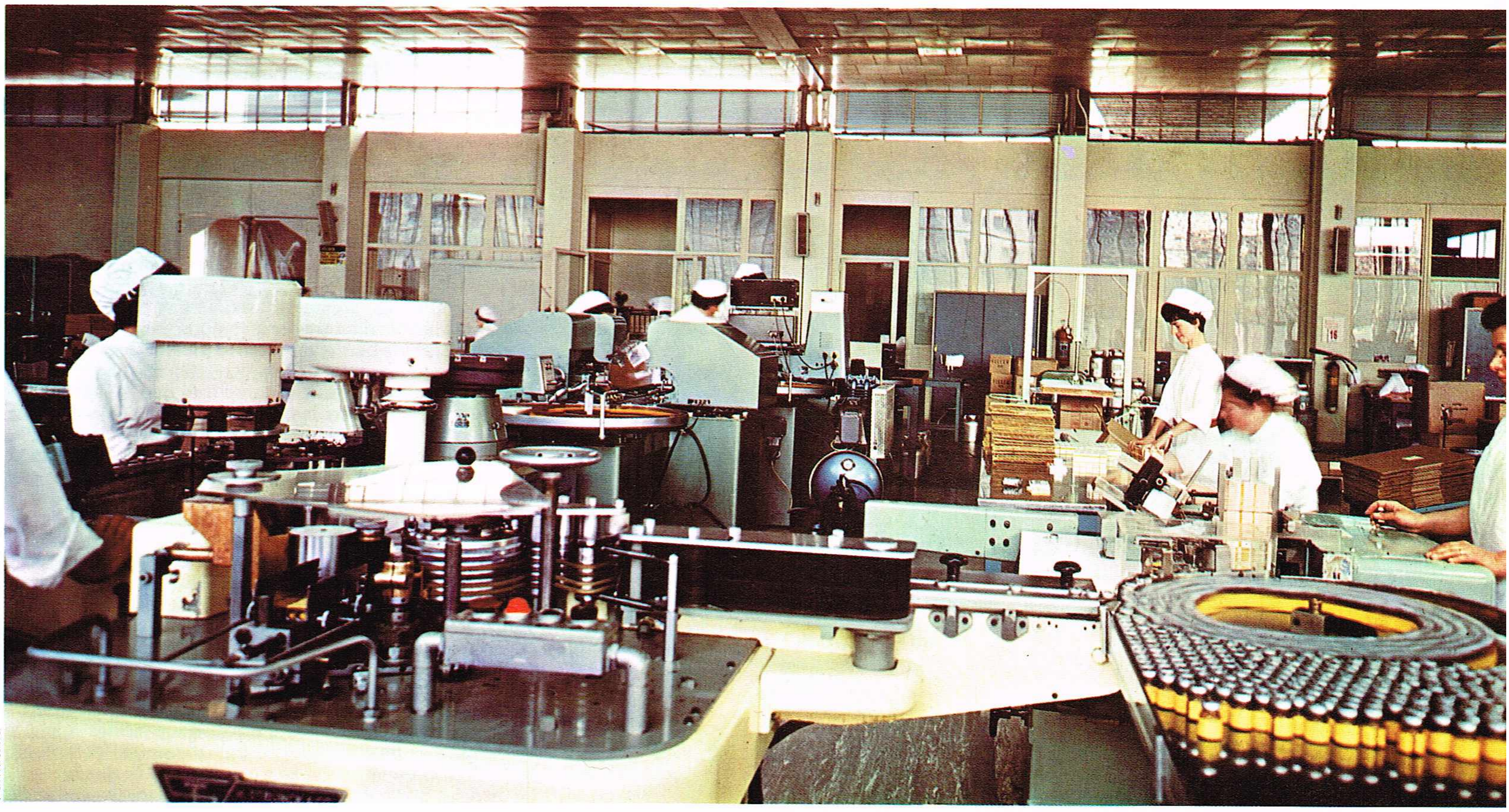

Farmitalia

▲ *Chaîne de fabrication de spécialités pharmaceutiques sous forme de comprimés et de dragées.*

PHARMACOLOGIE - CHIMIE PHARMACEUTIQUE*

Dès la plus haute antiquité, l'homme avait noté que certaines substances étaient capables d'influer favorablement non seulement sur le milieu extérieur, mais aussi sur son propre organisme. Ses efforts avaient toujours tendu à modifier les conditions du milieu dans lequel il vivait plutôt que de s'adapter lui-même à ce milieu par une action volontaire, plus ou moins consciente. Assez tôt, il s'aperçut qu'il était possible de modifier, grâce à la prise de certains remèdes, le comportement de son propre organisme, celui-ci étant considéré comme faisant partie du milieu extérieur, ce qui inscrit cette tentative dans la même démarche de pensée et d'action (la graisse animale, utilisée pour soulager la douleur d'une brûlure, fut peut-être le premier médicament utilisé par l'homme). Plus tard, il en vint à reconnaître les relations existant entre la nature de certains aliments et les modifications physiologiques consécutives à leur absorption.

C'est pourquoi, s'il faut entendre par pharmacologie l'étude des relations existant entre tel remède et les réactions qu'il provoque dans l'organisme, on peut affirmer que celle-ci est aussi ancienne que l'homme. En revanche, si l'on définit les disciplines pharmaceutiques comme un ensemble organisé de notions et de méthodes d'application, ce n'est que beaucoup plus tard que l'on pourra parler de pharmacologie.

Le *Pen Tsao,* ouvrage chinois qui semble remonter à plusieurs millénaires avant J.-C., constitue probablement la première tentative d'établissement d'un *corpus* recensant un certain nombre de médicaments de nature végétale et animale. Le *Yajurveda,* livre sacré de l'Inde primitive, et le *livre d'Hammourabi* (2500 av. J.-C.), issu des cultures protohistoriques d'Asie Mineure, contiennent des listes de prescriptions et de médicaments. Une importance particulière s'attache au *Papyrus d'Ebers* (1852 av. J.-C.), panaroma complet de la pharmacopée égyptienne ; on y trouve mention de certains médicaments comme la scille et le lotus, utilisés encore de nos jours.

Si l'on excepte le livre d'Hammourabi, tous ces documents nous montrent clairement qu'il existait des rapports

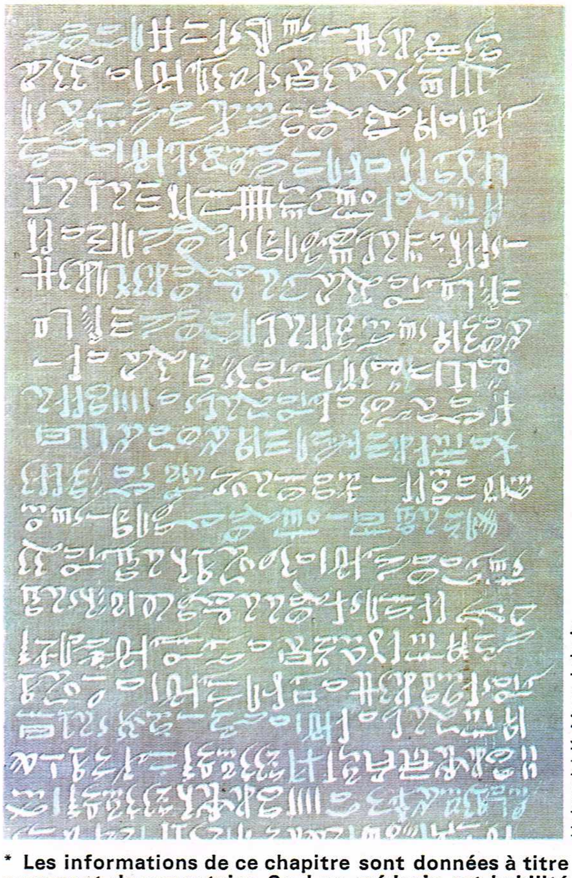

Université K. Marx. Leipzig

◀ *Détail du* **Papyrus d'Ebers** *(1852 av. J.-C.) : ce papyrus nous donne un panorama complet de la pharmacopée égyptienne.*

*** Les informations de ce chapitre sont données à titre purement documentaire. Seul un médecin est habilité à établir un diagnostic et instaurer un traitement. La rédaction de l'Encyclopédie Alpha des sciences et techniques décline toute responsabilité s'il était contrevenu à cette règle, même si des erreurs involontaires s'étaient glissées dans les pages qui suivent.**

C. Ciccione

▲ *Les origines de la pharmacologie se confondent avec celles des civilisations les plus anciennes. L'illustration ci-dessus montre une miniature arabe contenue dans le* Traité de la Thériaque, *de l'an 595 de l'Hégire (*Bibliothèque nationale, *Paris).*

Archives I.G.D.A.

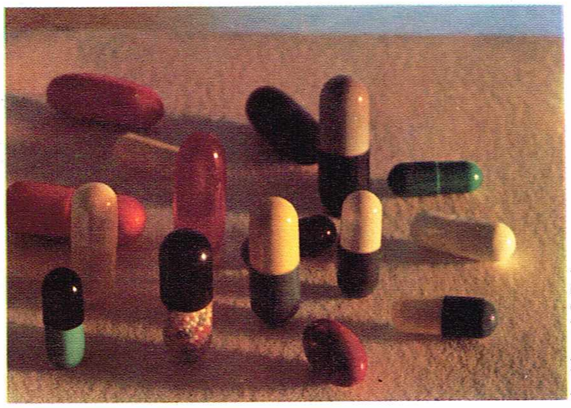

Archives I.G.D.A.

▶ **Cachets** *(en haut)* **et gélules** *(en bas). Les cachets sont utilisés surtout pour des médications antinévralgiques, antigrippales, etc. ; les gélules pour les produits à base de vitamines, d'antibiotiques, etc.*

très étroits entre l'art médical et l'art pharmaceutique, l'un et l'autre portant l'empreinte des choses sacrées. La médecine y apparait comme une manifestation de la divinité ou, dans le meilleur des cas, un moyen dont celle-ci se sert pour opérer la guérison, selon son bon plaisir. Il est symptomatique de constater que les Égyptiens, qui avaient pourtant de vastes connaissances dans les domaines de la chimie appliquée, de l'anatomie et de beaucoup d'autres sciences, considéraient comme profane l'art de l'embaumement et comme sacrées la médecine et la pharmacie. L'attribution de ce caractère sacré à la pharmacie empêchait sa diffusion et le développement de la recherche ; il en fut de même pour la médecine qui ne connut aucune évolution pendant des siècles.

Les Grecs, les premiers, modifièrent cette situation, sentant le besoin d'introduire la logique dans l'expérience ; une telle attitude permit d'accomplir de nombreux progrès.

Hippocrate formula la première théorie objective sur l'action pharmacologique : il supposait que la santé résultait d'un équilibre entre les quatre humeurs de l'organisme (sang, bile, lymphe, sucs digestifs) et que les médicaments étaient des substances capables de maintenir cet équilibre. Néanmoins, l'influence du sacré imprégnait encore la science.

Galien, médecin et philosophe romain dont le nom se retrouve dans les termes actuels de *pharmacie galénique,* développa les théories de son maître Hippocrate ; ses idées furent rassemblées par Dioscoride dans un traité intitulé *Sur la matière médicale*. A l'époque de l'Empire, l'art médical et l'art pharmaceutique commençaient à prendre chacun leur autonomie.

Nous avons jusqu'à présent parlé d' « art ». En effet, en dépit des progrès accomplis, l'exercice des professions médicales reposait toujours sur l'empirisme. Cet état de choses se perpétua pendant environ six siècles après la chute de l'empire romain ; au cours de cette période, le sacré s'empara de nouveau de la science naissante.

Ce n'est qu'en dehors du monde chrétien que des idées nouvelles se sont fait jour ; à cet égard, l'école persane a joué un rôle important, car, par son intermédiaire, les Arabes, qui exercèrent une profonde influence sur la culture occidentale, assimilèrent l'art médical gréco-romain et, conformément à leur esprit extraordinairement moderne, lui donnèrent un caractère entièrement laïc. On vit se multiplier le nombre des drogues employées (aloès, rhubarbe, camphre, valériane, colchique), ainsi que les méthodes de préparation (*élixir, julep* sont des vocables arabes).

Les croisades furent l'occasion d'un brassage culturel intense, grâce auquel le monde chrétien s'ouvrit à nouveau aux influences grecque et latine, et réassimila les éléments de l'art médical et pharmaceutique de l'Antiquité. C'est à cette époque que, en Italie, en France et en Espagne, naquit et se développa l'alchimie à mi-chemin entre la science et la magie, la première prenant le pas sur la seconde au fur et à mesure que les années passaient.

On arrive ainsi à Paracelse et à Lémery (XVI^{e} et XVII^{e} siècle), puis aux chimistes comme Glauber, Seignette et Béguin.

Enfin, au début du XIX^{e} siècle, la pharmacie s'affirme comme une véritable science : l'empirisme décline, les techniques de préparation des médicaments se perfectionnent. On s'intéresse de plus en plus aux remèdes d'origine végétale.

Redi et Malpighi introduisent dans la pharmacologie la méthode expérimentale, qui, seule, caractérise la véritable science. On assiste aux premières tentatives visant à isoler les *principes actifs* de la drogue, ce qui répond au besoin de disposer de médicaments d'action bien définie : au début du XIX^{e} siècle, sont isolés la morphine puis d'autres alcaloïdes, ainsi que des glucosides.

A partir du XIX^{e} siècle, une nouvelle méthode de recherche se développe, que l'on peut déjà qualifier de « méthode statistique », fondée exclusivement sur l'observation répétée des effets des différents médicaments sur les maladies ; on commence à étudier les effets secondaires des médicaments, d'abord sur l'organisme malade, puis sur l'individu sain. De l'individu considéré dans sa totalité, on passe bientôt à l'étude des différents organes, d'abord *in vivo,* puis *in vitro*.

La chimie accomplit de formidables progrès, entraînant la pharmacologie dans son sillage. Ehrlich ouvre l'ère de la *chimiothérapie,* qui utilise pour le traitement des

maladies, et spécialement des infections, des substances chimiques fortement toxiques pour les germes infectieux, mais inoffensives pour l'organisme : les arsénobenzols, les sulfamides et surtout les antibiotiques, qui ont révolutionné la médecine. La recherche fondamentale continue de se développer; on applique les méthodes de la physico-chimie à l'étude des effets des médicaments au niveau de la cellule et des constituants cellulaires.

Aujourd'hui, de nouvelles disciplines se développent, qui étudient la biodisponibilité, la pharmacocinétique et le devenir métabolique des médicaments.

Pharmacologie générale

Formes pharmaceutiques et voies d'administration

On peut définir les médicaments comme des substances administrées par différentes voies à un organisme animal dans un dessein thérapeutique. Le mot « médicament » n'est que la traduction partielle du terme grec « pharmakon », qui désigne tout à la fois les remèdes et les poisons.

La pharmacologie (terme dérivé directement du mot grec), dont la toxicologie s'est progressivement différenciée, étend son étude aux remèdes proprement dits et aux toxiques. D'ailleurs, la plupart des médicaments sont toxiques lorsqu'on les administre à une dose excessive; un exemple typique nous est offert par la strychnine, qui est l'un des plus puissants poisons connus, mais qui, à faible dose, est employée comme reconstituant.

Pour exercer leur action, les médicaments doivent pénétrer intimement l'organisme. Ils doivent pour cela, lorsqu'ils sont administrés par la bouche, traverser des membranes, particulièrement au niveau intestinal. C'est le processus important de l'*absorption*.

Les formes pharmaceutiques sous lesquelles se présentent les médicaments administrés par voie orale sont : le *cachet*, enveloppe de pain azyme dans laquelle on enferme un médicament le plus souvent en poudre; la *capsule* de gélatine molle; la *gélule*, forme modernisée et industrielle du cachet; le *comprimé*, constitué de poudres inertes mélangées aux principes actifs et agglomérées; les *pilules*; les *sirops* et les *potions*, liquides sucrés de goût agréable contenant des principes médicamenteux.

Le mode d'administration par voie orale est le plus commode et le plus employé. Toutefois, un certain nombre de médicaments sont détruits par les enzymes digestives ou sont mal tolérés par les muqueuses. On recourt quelquefois à une autre forme de présentation, les tablettes *sublinguales* que l'on fait dissoudre lentement dans la bouche; mais le plus souvent on recourt aux *comprimés gastrorésistants*, enrobés d'une couche d'acétophtalate de cellulose qui ne se dissoudra qu'au niveau intestinal.

Les médicaments, après avoir traversé la barrière intestinale, parviennent au foie par la veine porte et passent ensuite dans la circulation générale.

La voie rectale utilise les *suppositoires* dans lesquels le médicament est mélangé à un excipient qui fond ou se dissout dans le rectum.

La peau présente un faible pouvoir d'absorption; les médicaments qu'on utilise par application sur la peau, *onguents*, *pommades* et *crèmes*, sont destinés uniquement au traitement d'affections locales.

L'appareil respiratoire, qui offre une très large surface perméable aux gaz, constitue une voie de pénétration pour tous les médicaments qui se présentent sous forme de gaz ou de vapeur, voie empruntée notamment par les anesthésiques volatils, par les médicaments qui se présentent sous forme de dispersions de très fines particules *(aérosols)*. D'autres produits sont absorbés au niveau des bronches ou des voies aériennes supérieures, nez et pharynx (les cocaïnomanes, par exemple, absorbent leur drogue en l'aspirant sous forme de poudre très fine).

La muqueuse oculaire et la muqueuse vaginale ont des pouvoirs d'absorption élevés.

Nous venons d'évoquer différentes voies d'administration qui sont toutes des voies naturelles; on peut emprunter des voies « artificielles », au moyen de deux techniques, la scarification et surtout l'injection.

La *scarification* est une incision pratiquée au niveau de l'épiderme en vue de provoquer l'écoulement d'un peu de sang ou de sérosité, sur lesquels on dépose directement le médicament (vaccination antivariolique).

L'*injection*, en revanche, est l'une des techniques d'administration des médicaments les plus employées; on parle notamment de voie *sous-cutanée, intramusculaire, intraveineuse* selon que l'injection est pratiquée sous la peau, dans la masse musculaire ou dans une veine (en général la veine du pli du coude). Ces différentes voies d'administration, surtout la voie intraveineuse, permettent une absorption rapide du médicament; la stérilisation parfaite du matériel et celle de la zone d'inoculation s'imposent dans tous les cas. On choisit ce mode d'administration notamment dans les cas d'urgence, dans les traitements intensifs ou encore lorsque les principes actifs risqueraient d'être dénaturés dans l'appareil digestif.

Nous ne nous arrêterons pas sur certaines présentations pharmaceutiques qui sont pratiquement tombées en désuétude, tels les *cataplasmes*, les *décoctions*, les *infusions*, les *liniments*, les *électuaires*, les *tisanes*.

Diffusion des médicaments dans l'organisme ; métabolisation, élimination et accumulation

Une fois absorbés et éventuellement modifiés au niveau des voies digestives et du foie, les médicaments passent dans la circulation générale et se répartissent dans tout l'organisme. Mais leur répartition dans les différents organes est loin d'être uniforme. Par exemple, l'iode se fixe électivement sur la thyroïde, tandis que les médicaments liposolubles se fixent sur les tissus adipeux. Il est à noter qu'une concentration maximale dans un organe ne correspond pas forcément à une activité maximale sur ce même organe.

D'une manière générale, les médicaments se concentrent dans le foie et les reins : le foie est l'organe où se déroulent la plupart des réactions biochimiques, et les reins sont les principaux organes d'élimination.

La répartition d'un médicament dépend de la voie d'administration, des transformations métaboliques qu'il subit dans l'organisme, de son élimination et de l'élimination de ses métabolites.

▼ ***Mise en flacon de sirops.***

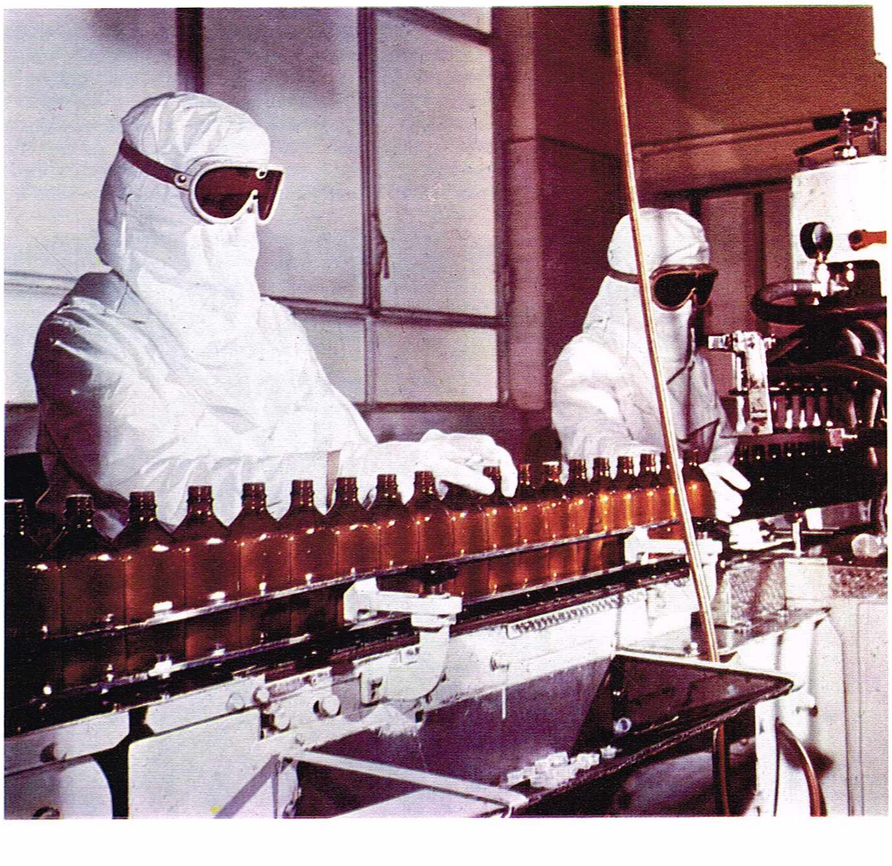

Carlo Erba

Quelques médicaments sont complètement transformés dans l'organisme en eau et gaz carbonique, tandis que d'autres ne sont que légèrement modifiés. Les transformations peuvent intéresser la quantité totale de médicament absorbée ou seulement une partie ; pour de nombreuses substances, la transformation s'arrête à un certain niveau (le benzène, par exemple, est oxydé en acide muconique). Les réactions chimiques qui se produisent au cours du métabolisme sont très diverses : oxydation, réduction, conjugaison, méthylation, acétylation, etc. Par exemple, les cyanures R—C ≡ N sont transformés en thiocyanates R—S—C ≡ N, beaucoup moins toxiques.

L'élimination des médicaments s'effectue par les urines, la sueur, les selles et les gaz expirés ; par ces mêmes voies sont éliminés les métabolites, ce qui conduit à des équilibres entre la vitesse d'absorption, la vitesse des biotransformations, et les vitesses d'élimination du médicament et de ses métabolites.

Les pharmaciens « calculent » la formulation des médicaments de telle sorte que leur concentration sanguine, résultant de tous les équilibres, s'établisse à une valeur optimale au regard de l'effet thérapeutique recherché.

Certains médicaments sont absorbés rapidement et éliminés lentement ; ces substances donnent lieu à une accumulation dans l'organisme, fait dont il faut tenir compte lors du traitement, surtout lorsqu'on administre des substances dont la dose toxique est proche de la dose thérapeutique.

Il existe aussi des médicaments dont l'absorption est très lente et l'élimination rapide ; pour ces derniers, il faut choisir une voie d'administration permettant une absorption immédiate.

Enfin, il existe des substances qui sont éliminées et réabsorbées à l'intérieur de l'organisme même, comme la phénolphtaléine tétraiodée, qui, éliminée par la bile, est réabsorbée par l'intestin, retourne au foie pour passer à nouveau dans la bile, et ainsi de suite (cycle entéro-hépatique).

De nombreuses substances sont éliminées par les glomérules du rein et réabsorbées par les tubules.

Après cette rapide description, voyons maintenant ce que l'on entend en pharmacologie par dose active. On appelle *dose active* la quantité de médicament (rapportée au poids corporel du patient) qui permet à la substance active d'exercer son action pharmacologique propre, sans provoquer de phénomènes toxiques. En effet, tous les médicaments sont toxiques au-delà d'une certaine dose ; leur emploi thérapeutique est d'autant plus sûr que la *dose thérapeutique* est éloignée de la *dose toxique*, qui provoque les premiers symptômes indésirables. Pour certains médicaments, la dose thérapeutique est presque égale à la dose toxique (par exemple, les antimitotiques), tandis que pour d'autres la dose thérapeutique et la dose toxique sont très éloignées (par exemple, la pénicilline).

La dose thérapeutique est généralement valable pour tous les individus de la même espèce et varie peu en fonction de la race, de l'âge et du sexe. Cependant, il existe des individus qui présentent une *hypersensibilité* à certains médicaments sans que ces dispositions puissent être décelées d'avance : chez ces sujets, l'administration de doses très faibles provoque des réponses physiologiques identiques à celles des doses normales (cet abaissement de la dose thérapeutique s'accompagne d'un abaissement de la dose toxique) ; chez certains, des doses même très réduites d'un médicament donné déclenchent des phénomènes d'*allergie*, souvent d'une extrême gravité.

Un autre phénomène qui caractérise la prise habituelle de certains médicaments est l'*accoutumance toxicomaniaque :* l'organisme ne peut plus se passer du médicament, à l'égard duquel il est devenu dépendant. L'accoutumance est à l'origine de différentes toxicomanies : morphinomanie, cocaïnomanie, toxicomanie aux barbituriques, aux tranquillisants ; elle explique les difficultés qu'éprouvent les sujets qui en sont atteints à se passer de leur drogue (syndrome de sevrage).

▼ ***Enregistrement des effets physiologiques d'un médicament à l'aide d'un* kimographe.**

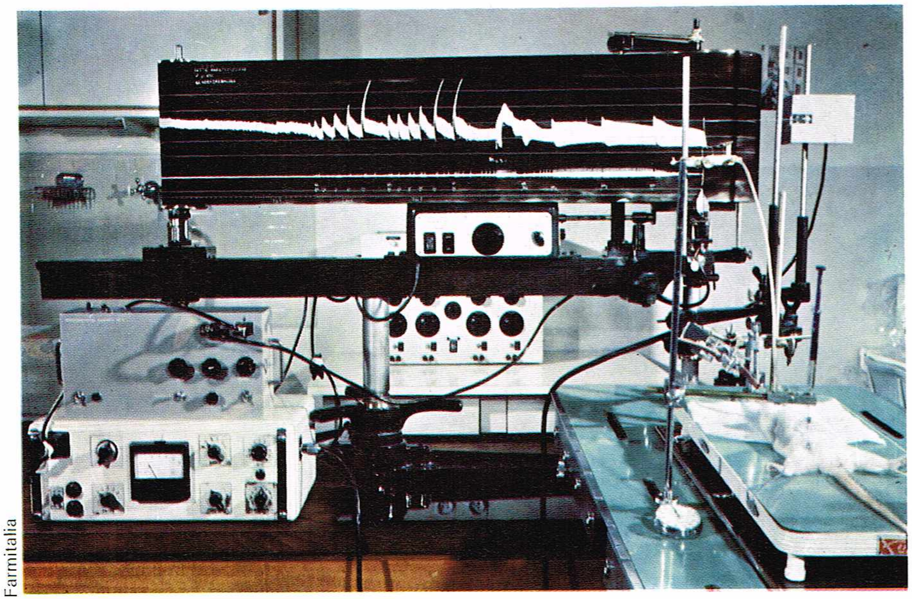

Farmitalia

Synergie et antagonisme

Il est rare qu'un médicament soit administré seul ; le plus souvent, il est associé à d'autres substances, d'action analogue ou opposée, et qui ont pour effet soit d'en renforcer, soit d'en contrarier l'action pharmacologique. Selon que deux médicaments voient leurs actions respectives potentialisées ou limitées, on parle de synergie ou d'antagonisme.

La **synergie** conduit à des applications pratiques très intéressantes, à tel point que la plupart des thérapeutiques actuelles sont des *thérapeutiques associées*. L'effet global est supérieur à la simple somme des effets particuliers de chacun des remèdes associés, ce qui permet notamment d'en réduire les doses.

L'**action antagoniste** que certains médicaments exercent à l'égard d'autres est mise à profit pour supprimer des effets secondaires indésirables, sans amoindrir l'action pharmacologique principale. Par exemple, l'éphédrine, médication utilisée dans le traitement de l'asthme, provoque certains effets secondaires tels qu'excitation psychique et insomnie, qui peuvent être combattus par l'association de barbituriques.

L'antagonisme est *indirect* ou *physiologique* lorsque les deux médicaments ont une action différente : par exemple, le chloral, médication hypnotique qui entraîne secondairement une hypotension par son action sur les centres vaso-moteurs bulbaires et spinaux, est antagonisé par l'adrénaline, qui provoque une vaso-constriction périphérique et rétablit ainsi la valeur normale de la pression sanguine.

L'antagonisme *direct* ou *compétitif* s'observe lorsque deux médicaments agissent sur le même mécanisme par des actions différentes : par exemple, l'histamine provoque la contraction des muscles lisses, tandis que les antihistaminiques inhibent cette action en agissant sur les mêmes structures. Un exemple classique nous est fourni par l'effet tétanisant de la strychnine, dû à l'excitation des synapses médullaires, effet qui peut être neutralisé par l'administration de curare, qui agit en aval, c'est-à-dire en paralysant les plaques motrices musculaires. On comprend facilement que l'antagonisme inverse n'est pas possible.

L'antagonisme médicamenteux est largement exploité dans le traitement des intoxications (voir *Toxicologie*). Cette forme particulière d'antagonisme est appelée *antidotisme ;* celui-ci s'exerce généralement par des actions chimiques directes sur le toxique lui-même. Par exemple, l'intoxication due à de nombreux alcaloïdes peut être combattue en précipitant ceux-ci dans le tube digestif par le tanin.

Pharmacologie spéciale

Nous allons décrire les principaux médicaments en les classant en *familles pharmacologiques,* qui rassemblent les substances possédant une action de base de même nature. Nous nous attacherons surtout aux propriétés pharmacologiques des différents produits et à leur emploi thérapeutique ; nous ne ferons, à l'occasion, que de brèves allusions aux méthodes de préparation ; le mécanisme d'action ne sera que sommairement envisagé.

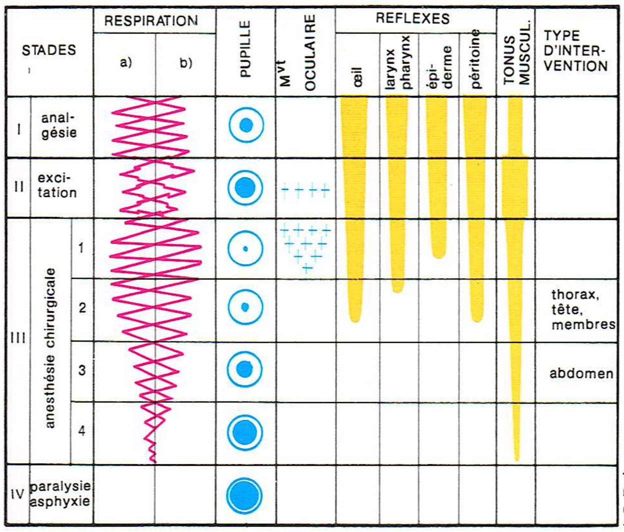

I.G.D.A.

◀ ***Graphique des effets de l'anesthésie sur l'organisme (dans la colonne « respiration », a = diaphragmatique; b = intercostale).***

Au sein d'une même famille, on sera amené à établir des sous-groupes, en fonction des analogies de structure existant entre les produits qui en font partie.

Les médicaments peuvent être d'*origine naturelle, synthétique* et *semi-synthétique*.

Un exemple de médicament d'origine naturelle nous est offert par la digitaline, glucoside cardiotonique isolé des feuilles de la digitale pourpre.

Les médicaments synthétiques sont préparés par combinaison chimique des molécules simples fournies par l'industrie; citons par exemple les barbituriques. Certains de ces médicaments existent aussi dans la nature, mais on préfère la synthèse industrielle, soit parce qu'elle est moins coûteuse, soit parce qu'elle permet d'obtenir des produits plus purs.

Les médicaments semi-synthétiques, enfin, sont obtenus au moyen d'opérations chimiques effectuées sur des substances naturelles. L'ampicilline, par exemple, est une pénicilline hémisynthétique préparée à partir de pénicilline naturelle.

Presque toutes les drogues naturelles sont d'origine végétale (alcaloïdes, glucosides), mais il en existe aussi de très importantes d'origine animale, notamment des hormones comme l'insuline.

Dépresseurs du système nerveux

Beaucoup d'intoxications, qu'elles soient mortelles ou non, entraînent une profonde dépression du système nerveux. Mais cette action est souvent recherchée dans un but thérapeutique, ce qui a conduit à la mise au point d'un grand nombre de médicaments agissant comme dépresseurs du système nerveux central. Ceux-ci doivent posséder trois caractéristiques : leur action doit être primitive, proportionnelle à la dose, et réversible.

Ces médicaments peuvent agir sur l'ensemble du système nerveux central ou bien uniquement sur certains centres. Dans le premier cas on parle de *narcotiques* (que l'on subdivise en *sédatifs,* s'ils ont simplement pour effet d'apaiser ou de modérer l'activité fonctionnelle exagérée d'un organe, en *hypnotiques,* s'ils provoquent un sommeil semblable au sommeil physiologique, en *anesthésiques,* s'ils induisent un sommeil beaucoup plus profond, s'accompagnant de la perte complète des réflexes, de l'abolition de la douleur et de la conscience) ; dans le deuxième cas, on parle de *dépresseurs sélectifs,* comme le sont, par exemple, les analgésiques, les antiépileptiques, etc.

Les anesthésiques généraux

Avec les progrès de la chirurgie, on a recherché de plus en plus activement des médicaments susceptibles de permettre au chirurgien d'intervenir sur un patient en état de relaxation totale et d'éviter à celui-ci les douleurs très violentes de l'intervention. Le premier produit utilisé fut le protoxyde d'azote, décrit dès 1799 par H. Davy, qui l'avait appelé *gaz hilarant;* puis, au cours de la décade 1840-50, on eut recours à l'éther éthylique et au chloroforme, auxquels firent suite les autres narcotiques volatils, jusqu'à l'adoption des nouveaux médicaments dérivés des barbituriques (Pentothal, etc.).

Un grand nombre d'anesthésiques généraux employés aujourd'hui sont administrés par voie veineuse, dissous dans l'eau, et présentent par rapport aux anesthésiques volatils de nombreux avantages.

Théories relatives à l'anesthésie

Des études très nombreuses et très approfondies ont été consacrées au mécanisme d'action pharmacologique des anesthésiques.

La première théorie relative à l'anesthésie se fondait sur la solubilité préférentielle des narcotiques dans les lipides, dont le système nerveux central est très riche ; mais elle se révéla inexacte, car s'il est vrai que beaucoup de narcotiques sont solubles dans les lipides, tous ne le sont pas ; par ailleurs, un grand nombre de substances liposolubles (par exemple le camphre) ne possèdent pas de propriétés narcotiques.

La constatation qu'il existe un rapport entre l'aptitude d'une substance à abaisser la tension superficielle et son pouvoir anesthésique a conduit à l'élaboration de la *théorie de Traube,* qui établit une relation entre l'effet anesthésique et la tensio-activité. Mais on peut objecter que tous les tensio-actifs ne sont pas narcotiques et *vice versa*.

On a pensé aussi à une action de coagulation réversible des colloïdes des cellules des ganglions nerveux, mais la floculation est un processus irréversible ; en outre, tous les narcotiques ne possèdent pas une action coagulante.

Des théories plus récentes trouvent leurs fondements dans l'observation de Warburg, selon laquelle les anesthésiques généraux provoquent une diminution de la consommation d'oxygène par le système nerveux central. Cette observation peut être interprétée de deux manières différentes : le médicament intervient au niveau de l'oxydation des substrats ; le médicament déprime directement l'activité des cellules et détermine ainsi un abaissement des besoins d'énergie, donc une économie d'oxygène. Quastel a confirmé la première hypothèse, Mac Ilvain la seconde. On penche actuellement pour l'interprétation de Mac Ilvain et on admet que le médicament agit en déprimant l'activité de la cellule nerveuse. Ce n'est que pour des doses beaucoup plus élevées que celles qu'on utilise normalement qu'il y aurait aussi une action directe du médicament sur les systèmes d'oxydation des substrats, conformément à ce qu'affirme Quastel.

Principaux anesthésiques généraux

L'anesthésie générale passe par trois stades ; au cours de la période d'induction, on observe différentes manifestations d'excitation, comme une augmentation du tonus musculaire, une tachypnée et parfois même des convulsions. Cette phase, qui peut être dangereuse, est écourtée ou supprimée par l'administration de sédatifs *(préanesthésiques)* comme la morphine ou d'autres produits semblables, de tranquillisants ou d'anesthésiques de base (Évipan, thiobarbituriques), utilisés comme inducteurs de l'anesthésie. On parvient enfin à la perte des réflexes et parfois aussi à la relaxation musculaire, que l'on peut accentuer en utilisant des curarisants ; le malade est alors prêt pour l'intervention. Si l'on administre des doses trop élevées d'anesthésique, on provoque une dépression profonde de toutes les fonctions nerveuses, suivie de l'arrêt de la respiration, puis de l'arrêt cardiaque ; pour éviter la mort du patient, il faut recourir à la respiration artificielle, au massage cardiaque et éventuellement à des excitants bulbaires.

Un anesthésique général devrait posséder les propriétés suivantes : induction rapide du sommeil ; absence de la phase initiale d'excitation ; faible influence sur le bulbe, dont la dépression provoque la paralysie respiratoire ; absence d'effets secondaires immédiats ou à distance ; possibilité d'un réveil rapide ; élimination rapide et complète ; absence d'inflammabilité et d'explosibilité. Aucune substance ne présente toutes ces propriétés, mais chaque médicament offre ses caractéristiques propres, en fonction desquelles l'anesthésiste choisit le produit le plus adapté au cas clinique. Nous allons donner ci-après la description de quelques anesthésiques généraux.

Éther éthylique, $CH_3—CH_2—O—CH_2—CH_3$; point d'ébullition 35 °C. L'éther éthylique provoque, par inhalation, une anesthésie profonde, avec une concentration de 3,5 à 4,5 % dans l'air alvéolaire et de 135 à 160 mg/l dans le sang. Une concentration

d'environ 190 mg entraîne l'arrêt respiratoire. Il doit être utilisé pur ; du fait d'une certaine tendance à s'altérer (formation d'un peroxyde explosif) on doit le conserver à l'abri de la lumière, dans des récipients fermés. Il est contre-indiqué chez les patients souffrant de maladies pulmonaires chroniques, car il irrite les muqueuses respiratoires en provoquant une hypersécrétion glandulaire, qui est souvent cause de complications broncho-pulmonaires.

Chloroforme, $CHCl_3$; point d'ébullition 60 °C. Comme l'éther et pour des raisons comparables (transformation en phosgène, qui est très toxique), il doit être conservé dans un récipient fermé et à l'abri de la lumière. La concentration nécessaire dans l'air inhalé pour obtenir une anesthésie profonde est de 0,2 à 1,5 % ; une concentration de 2 % entraîne l'arrêt respiratoire (les concentrations sanguines correspondantes sont de 10-20 mg/l à 25 mg/l). Le chloroforme est plus toxique mais beaucoup plus actif que l'éther, sur lequel il présente aussi l'avantage de comporter une période d'induction beaucoup plus courte. Il irrite davantage les muqueuses, mais le danger de complications pulmonaires est beaucoup plus réduit en raison des doses plus faibles auxquelles il est employé. Il est absolument contre-indiqué chez les patients présentant des affections hépatiques, car il est toxique pour le foie. S'il est administré pendant plus de 45 à 60 minutes, il peut provoquer un état de prostration susceptible de se prolonger plusieurs jours après le réveil. Pour toutes ces raisons, et bien qu'il soit supérieur à l'éther, le chloroforme n'est plus employé.

Trichloréthylène, $ClCH = CCl_2$. Il est habituellement employé avec le protoxyde d'azote, en raison de sa propriété d'induire une anesthésie rapide.

Éther vinylique, $CH_2 = CH—O—CH = CH_2$. Il est beaucoup plus efficace et plus rapide que l'éther éthylique, mais aussi beaucoup plus toxique (contre-indiqué chez les patients présentant une insuffisance rénale ou hépatique) ; par conséquent, on l'emploie pour des anesthésies de courte durée, mais néanmoins profondes.

Éthylène, $CH_2 = CH_2$; gazeux. D'effet très rapide (5 ou 6 inhalations suffisent pour entraîner la perte de conscience), il ne provoque pas une anesthésie aussi profonde que celle de l'éther éthylique ou du chloroforme, mais plus profonde que celle du protoxyde d'azote. Sa toxicité est très faible. On l'emploie en obstétrique, mélangé à l'air dans une proportion de 10-20 %. Le réveil est rapide et les effets secondaires (nausées, vomissements) sont plus modérés qu'avec l'éther et le chloroforme. Il est peu utilisé en chirurgie thoracique et abdominale en raison de son action anesthésique incomplète.

Cyclopropane, CH_2 / $CH_2—CH_2$ (cycle) ; gazeux. Un mélange d'air et de cyclopropane à 20-30 % permet d'obtenir une concentration sanguine de 15-17 % de produit, avec un effet anesthésique dont la vitesse d'installation est intermédiaire entre celle de l'éther et celle de l'éthylène ; au taux de 3-5 %, le cyclopropane possède une action simplement analgésique. Le réveil est assez rapide. Le produit ne présente pas de toxicité pour le foie ni d'action irritante pour les muqueuses ; en revanche, un spasme de la glotte et des troubles postopératoires sont fréquemment à redouter, surtout à la suite d'interventions de longue durée. Le cyclopropane est employé surtout en chirurgie thoracique, rénale et hépatique.

Protoxyde d'azote (gaz hilarant), N_2O ; gazeux. Un temps d'induction très court et l'absence totale de toxicité sont les principales qualités de ce produit. Pour que l'effet anesthésique soit satisfaisant, il faut administrer le protoxyde d'azote sous pression, en mélange avec l'oxygène. Il ne procure pas un bon relâchement musculaire.

Thiobarbituriques. Le *Pentothal,* le *Kemithal* et le *Surital* sont les dérivés les plus importants de l'acide thiobarbiturique (provenant de la combinaison de la thio-urée et de l'acide malonique). L'anesthésie est très rapide et profonde (la perte de connaissance survient en quelques secondes). On utilise ces produits sous forme de solutions à 2-5 %, à des doses de 2 à 5 cm^3, injectées par voie intraveineuse en environ 15 secondes. Par rapport à l'anesthésie gazeuse, l'anesthésie intraveineuse présente des avantages indiscutables : elle est moins agressive, moins irritante pour les muqueuses et beaucoup plus agréable pour le patient ; en outre, on évite les complications pulmonaires. Les inconvénients sont une relaxation musculaire incomplète (ce qui conduit à les associer à d'autres narcotiques à faibles doses ou à des curarisants) et une certaine action dépressive sur la respiration. Leur action est de très courte durée, mais l'administration de nouvelles doses procure une anesthésie plus durable. Le facteur principal qui limite l'emploi des anesthésiques par voie intraveineuse est lié à la vitesse d'élimination du médicament. Avec ces substances, l'anesthésiste n'est pas en mesure d'interrompre rapidement l'anesthésie, ce qu'il peut faire en revanche avec les anesthésiques gazeux administrés par voie pulmonaire.

Hypnotiques et narcotiques

Les hypnotiques et les narcotiques sont eux aussi des dépresseurs du système nerveux central. Le sommeil obtenu avec les hypnotiques diffère du sommeil provoqué par les anesthésiques uniquement par sa profondeur, comme le prouve le fait que plusieurs substances possèdent une action anesthésique à faible dose et une action hypnotique à dose élevée.

L'usage prolongé entraîne, pour un certain nombre d'hypnotiques, le phénomène de l'accoutumance toxicomaniaque.

Pour être utilement employé en thérapeutique, un hypnotique doit répondre à plusieurs critères : ne pas provoquer un état d'excitation initiale, ne pas entraîner un mauvais réveil, posséder une grande souplesse de posologie, ne pas entraîner d'accoutumance.

Un exemple d'hypnotiques utilisés aujourd'hui est constitué par les barbituriques.

Barbituriques. Ils dérivent tous de l'*acide barbiturique* et de l'*acide thiobarbiturique.* Ces « acides » sont obtenus par condensation de l'urée (ou thio-urée) et de l'acide malonique (ou de ses dérivés, pour les médicaments dont nous parlerons bientôt). Ils furent découverts au début du XX[e] siècle à l'occasion de travaux portant sur les propriétés du paraldéhyde.

Les barbituriques constituent aujourd'hui des hypnotiques très répandus et efficaces, à tel point que leur emploi s'est dangereusement développé ; en effet, ils peuvent donner lieu à des intoxications chroniques et à des phénomènes d'accoutumance.

Nous laisserons de côté les dérivés de l'acide thiobarbiturique, qui, en raison de leur action très rapide, suivie d'une élimination presque aussi rapide, ne sont utilisés qu'en anesthésiologie, pour nous occuper des médicaments dérivés de l'acide barbiturique, employés soit comme hypnotiques soit comme antiépileptiques.

L'acide barbiturique ne possède par lui-même aucune action hypnotique : cette action apparaît seulement lorsque les deux atomes d'hydrogène liés au carbone de l'unique radical méthylène (carbone n° 5) sont remplacés par des groupements organiques de type alcoyle ou aryle ; l'effet hypnotique augmente avec la longueur de la chaîne des substituants jusqu'à six atomes de carbone ; au-delà, des effets convulsivants apparaissent. La présence de substituants contenant des groupements non saturés renforce l'effet hypnotique et augmente la toxicité ; en substituant un des groupements alcoyle par un groupement phényle, on obtient des médicaments anticonvulsivants, mais la substitution du deuxième groupe fait disparaître l'effet hypnotique et augmente considérablement la toxicité. Tous ces produits procurent un sommeil de type physiologique, comme le démontrent aussi les tracés électro-encéphalographiques.

Les barbituriques se divisent en quatre groupes :

— les *barbituriques à action lente* (par exemple le Véronal) sont métabolisés très lentement et sont éliminés essentiellement par voie urinaire. Ils possèdent une action prolongée et procurent un sommeil long et régulier. Le réveil est suivi d'une période de somnolence. L'effet hypnotique se manifeste au bout d'une heure environ ;

— les *barbituriques à action de durée moyenne* (par exemple le Nembutal) sont eux aussi caractérisés par une période d'induction d'une ou deux heures, suivie d'un sommeil de huit-dix heures et d'une période de somnolence, après le réveil, de plus courte durée. Ils sont partiellement métabolisés par le foie. Ces deux types de produits sont administrés par voie orale ou intramusculaire ;

— les *barbituriques à action rapide* (par exemple l'Évipan) sont administrés par voie intramusculaire ou intraveineuse ; la période d'induction est courte et le som-

meil dure de quatre à six heures. Les composés appartenant à cette catégorie subissent rapidement, au niveau du foie, une destruction du noyau alicyclique, ce qui explique la courte durée de leur action ;

— les *barbituriques à action ultra-rapide* ont déjà été étudiés.

Les barbituriques élèveraient le seuil d'excitabilité, probablement au niveau des synapses. Ils agissent sur le système nerveux central dans son ensemble, et plus spécialement sur le cortex cérébral et la formation réticulée du mésencéphale, régions impliquées dans le mécanisme du sommeil physiologique.

Autres hypnotiques. Un certain intérêt s'attache encore au chloral hydraté, mais le paraldéhyde est pratiquement abandonné.

On peut signaler l'*uréthanne*, les *éthylsulfones*, les dicétopipéridines, et le 3-méthyl-pentynol moins actif que les barbituriques, peu toxique, mais comportant cependant quelques effets secondaires.

Anticonvulsivants

Les anticonvulsivants sont utilisés principalement dans le traitement de l'épilepsie (dans l'épilepsie, l'électro-encéphalogramme du malade montre une série de rythmes anormaux) et de la maladie de Parkinson.

Les *antiépileptiques* dépriment les fonctions motrices sans déprimer l'appareil sensoriel, comme le font les anesthésiques et les hypnotiques. Dans ce domaine, les curarisants constituent un appoint utile.

Il semble que les *antiparkinsoniens* abaissent l'excitabilité du cortex cérébral de manière à le rendre insensible aux rythmes anormaux.

Comme exemples d'antiépileptiques, on peut citer les dérivés barbituriques (*ex.* l'acide N-méthyl-5,5-diéthyl-barbiturique) ou des corps semblables (par exemple le 5-phényl-5-éthylène-hydropyrimidine-4,6-dione), les dérivés hydantoïniques (par exemple la diphénylhydantoïne) et les dérivés oxazoliniques (par exemple le 3,5,5-triméthyloxazolidine-2,4 dione). La comparaison des formules de ces composés montre des structures assez semblables.

Parmi les antiparkinsoniens, citons la *prophénamine*, et surtout la dihydroxyphénylalanine (DOPA).

Analgésiques

De nombreux états pathologiques s'accompagnent de manifestations douloureuses, que le médecin s'emploie à soulager. Indépendamment de toute considération sur l'utilité de la douleur, celle-ci engendre des phénomènes secondaires qui contribuent à aggraver l'état du patient et qui font obstacle à un traitement efficace. D'où l'utilité des analgésiques. Mais il convient de préciser que ces produits doivent être pris sous stricte surveillance médicale, du fait qu'ils comportent des risques d'intoxication et d'accoutumance non négligeables.

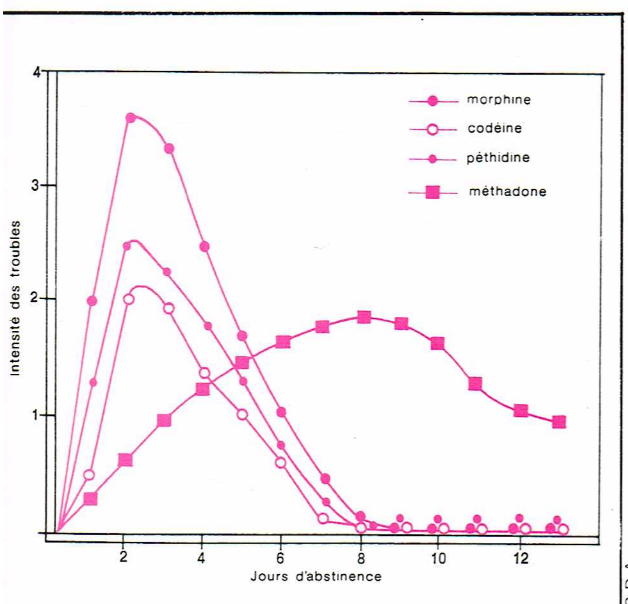

I.G.D.A.

◀ *Diagramme comparatif de l'intensité des différents troubles consécutifs au sevrage des morphinomanes en fonction de la durée de l'abstinence :* **1**, *légers ;* **2**, *modérés ;* **3**, *marqués ;* **4**, *graves (d'après Vogel, Isbell et Chapman).*

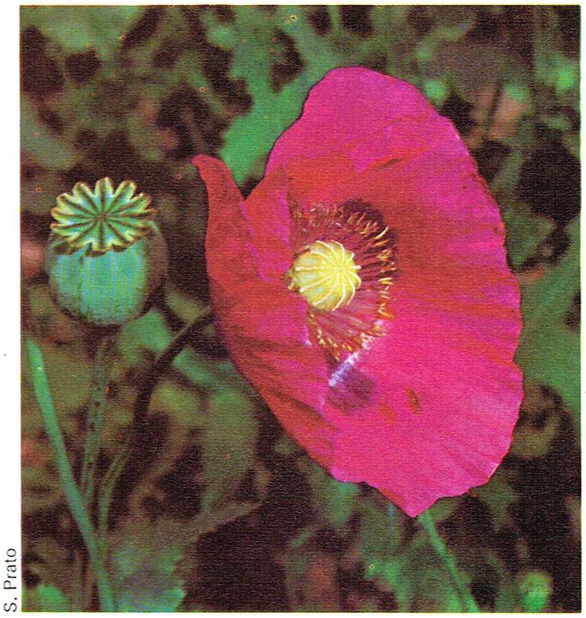

S. Prato

S. Prato

▲ *La fleur (à gauche) et la capsule (à droite) de* **Papaver somniferum** *; on remarquera sur la capsule les incisions à travers lesquelles exsude le latex.*

Nous classerons les analgésiques en groupes en nous basant sur leur origine ou sur l'existence de certaines caractéristiques communes.

Alcaloïdes de l'opium. L'emploi du latex que l'on fait exsuder des capsules vertes de *Papaver somniferum* est connu depuis des millénaires ; il a été décrit par Galien et bien d'autres, et l'on peut dire que l'opium a, de tous temps, procuré à l'humanité de grands bienfaits, en dépit du rôle néfaste qu'il a joué dans la diffusion des toxicomanies. L'opium contient une vingtaine d'alcaloïdes, dont un grand nombre exercent une action dépressive sur le système nerveux central ; les seuls alcaloïdes qui connaissent un large emploi sont la morphine et la codéine.

La *morphine* est probablement le plus important.

L'effet principal de la morphine est une action analgésique sur n'importe quel type de douleur, avec une élévation du seuil de perception de la douleur et des effets narcotiques secondaires. La morphine ne possède pas d'autres effets secondaires sur le système nerveux, sauf une stimulation discrète de certaines formations nerveuses, variables d'une espèce à l'autre ; ainsi, chez la souris blanche, on observe l'érection de la queue, réaction qui est d'ailleurs utilisée comme test d'identification (phénomène de Straube).

La morphine provoque d'autres effets secondaires de vomissements et de transpiration intense et au niveau de la respiration et de l'activité du tube digestif (constipation).

Elle entraîne rapidement des phénomènes d'accoutumance, ce qui oblige à augmenter progressivement les doses thérapeutiques et risque d'amener à un état de dépendance complète tant psychique que physique.

La morphine est administrée sous forme de chlorhydrate, par voie intramusculaire (de 5 à 20 mg jusqu'à cinq fois par jour), ou par voie orale à raison de 20 à 50 mg en doses filées, sous forme de préparation galénique *(Laudanum) ;* elle est éliminée par les urines (deux tiers environ en 24 heures) telle quelle, et, par la bile, combinée à l'acide glycuronique.

La *codéine* est surtout employée pour calmer la toux : elle agit électivement sur les centres nerveux correspondants (doses de 15-20 mg, uniquement par voie orale) ; la codéine est préparée par méthylation de la morphine.

Signalons également la *codéthyline* et la *morpholinoéthylmorphine,* antitussifs d'usage courant.

Alcaloïdes morphinomimétiques. L'*héroïne* (diacétyl-morphine) est obtenue par acétylation de la morphine. Elle est beaucoup plus active que la morphine, mais également beaucoup plus toxique, et son emploi est interdit actuellement.

L'*apomorphine,* obtenue en traitant la morphine par l'acide sulfurique, est employée comme émétique.

La *nalorphine* possède une action antagoniste vis-à-vis de la morphine. Le remplacement du radical méthyle de

la morphine par le radical allyle $—CH_2—CH=CH_2$ entraîne la perte des propriétés analgésiques et narcotiques. Mais la nalorphine supprime pratiquement les effets de la morphine, et est employée dans le traitement des intoxications aiguës par la morphine.

Analgésiques de synthèse. Le *lévorfanol (3-hydroxyméthylmorphinane)* est environ cinq fois plus actif que la morphine, dont il possède aussi les effets secondaires. Sa structure est semblable à celle des alcaloïdes du type de la morphine, mais le noyau contenant l'oxygène fait défaut.

La *péthidine* est beaucoup moins active que la morphine. Le *méthadone* de structure semblable à celle de la substance précédente est utilisé dans le traitement de la morphinomanie.

Analgésiques antipyrétiques. De nombreuses substances sont douées d'une action analgésique et antipyrétique. Ces composés possèdent souvent une action antirhumatismale, antigoutteuse et anti-inflammatoire. Ces actions sont amplement exploitées dans toutes les manifestations rhumatismales.

Font partie de ce groupe :

1 - les *dérivés de l'acide salicylique :* le salicylate de sodium, le salicylate de méthyle, l'acide acétylsalicylique connu sous le nom d'Aspirine;

2 - les *dérivés de l'acétanilide,* comme l'*acétyl-paraphénétidine* ou *phénacétine,* sont plus toxiques que les médicaments de la classe précédente; le *paracétamol* s'en rapproche;

3 - les *dérivés de la pyrazolone,* comme l'*Antipyrine* et le *Pyramidon* (aminophénazone);

4 - l'*acide phénylquinolinecarbonique* ou *Atofan* utilisé comme antigoutteux.

Anesthésiques locaux

Un grand nombre d'agents physiques et chimiques (le froid, le courant électrique, certaines substances phénoliques, etc.) bloquent la transmission de l'influx dans les fibres nerveuses. Dans un premier temps, les anesthésiques locaux bloquent la conduction des stimuli douloureux, puis suppriment toute forme de sensibilité; selon le produit et le mode d'administration, le blocage se produit au niveau des terminaisons neuronales, des synapses ganglionnaires et des jonctions myoneurales des muscles squelettiques.

Les anesthésiques locaux furent introduits en thérapeutique vers 1880 avec la **cocaïne**; différents produits de synthèse s'ajoutèrent rapidement à cet alcaloïde. On les utilise en applications superficielles sur les muqueuses *(anesthésie de surface),* ou bien en injections locales *(anesthésie par infiltrations),* ou bien encore par application directe sur les nerfs *(anesthésie tronculaire)* ou au niveau du point d'émergence du nerf rachidien intéressé *(rachianesthésie).*

En raison de l'action vasodilatatrice que possèdent presque tous les anesthésiques locaux, à l'exception de la cocaïne, on associe généralement à ces substances des vasoconstricteurs, tels que l'adrénaline, pour en retarder la diffusion.

La cocaïne exerce en outre une action nette sur le système nerveux central et provoque une excitation psychomotrice assez intense, qui s'accompagne d'une sensation d'euphorie, suivie d'un état de dépression.

L'accoutumance consécutive à l'emploi prolongé de la cocaïne conduit à l'augmentation progressive des doses et crée un état de dépendance, aboutissant rapidement à une véritable déchéance mentale et physique, avec les conséquences familiales et sociales que l'on devine. Le sevrage du cocaïnomane est moins difficile que celui du morphinomane, mais doit être pratiqué dans des établissements spécialisés.

La cocaïne n'est utilisée que comme anesthésique de contact, en application sur les muqueuses, surtout sur les muqueuses oculaires (collyres).

La **novocaïne,** ou **procaïne,** est plus employée : elle possède des propriétés anesthésiques tout à fait remarquables, sans entraîner l'accoutumance. Il existe toutefois des cas (un sur cinq mille environ) où l'injection du médicament est suivie d'un collapsus cardiovasculaire brutal. La novocaïne est peu active comme anesthésique de contact et, par conséquent, est utilisée en injections locales ou spinales. Pour les anesthésies locales, on emploie des solutions à 2 %, tandis que pour les anesthésies spinales, on injecte des doses de 80-160 mg de produit.

La **xylocaïne,** ou **lidocaïne,** est beaucoup plus efficace, mais un peu plus toxique que la novocaïne; la **percaïne** est encore plus efficace, mais plus toxique.

Citons encore le **chlorure d'éthyle,** corps qui possède un point d'ébullition très bas (12 °C) et qui, vaporisé sur l'épiderme, s'évapore très rapidement et provoque ainsi un refroidissement intense, entraînant une analgésie passagère et peu profonde.

Tranquillisants

Les tranquillisants ou neuroplégiques sont des dépresseurs du système nerveux. A la différence des hypnotiques, ils ne provoquent pas le sommeil. L'effet de ces produits peut se définir comme un effet d'apaisement s'accompagnant d'une euphorie modérée, exempte de tout phénomène hallucinatoire.

La **réserpine,** alcaloïde naturel extrait des racines de *Rauwolfia serpentina,* a trouvé un large emploi dans le traitement de nombreuses psychoses, dont la schizophrénie, et aussi dans celui de l'hypertension artérielle.

La **chlorpromazine** dérive des phénothiazines, important groupe de substances qui trouvent des applications dans de nombreux domaines thérapeutiques. C'est le plus employé des neuroplégiques en raison des nombreux effets secondaires utiles dont il est doué : action antipyrétique, hypnotique, antiémétique et antihistaminique; la chlorpromazine est un puissant sédatif qui ne déprime pas les fonctions sensorielles et la conscience. On l'administre par voie orale (de 25 à plus de 200 mg par jour); elle est lentement métabolisée par le foie. On l'emploie surtout en psychiatrie dans le traitement de la schizophrénie et des névroses, ainsi que dans les manifestations psychiatriques de l'alcoolisme chronique.

Les **dérivés carbamiques** ou **méprobamates** sont essentiellement utilisés dans le traitement des états anxieux d'intensité modérée.

On utilise surtout le *méthylpropylpropanedioldicarbamate* qui possède une action sédative et provoque aussi une remarquable relaxation musculaire; la dose quotidienne peut atteindre 1,5-2 g. Administrés eux aussi par voie orale, ces neuroplégiques sont lentement métabolisés (ils sont généralement éliminés en combinaison avec l'acide glycuronique). De nombreux autres tranquillisants, qui ne seront pas cités ici, ont vu le jour ces dernières années.

Il faut dénoncer vigoureusement l'abus très répandu des tranquillisants, pris trop souvent sans contrôle médical.

Stimulants du système nerveux central

Presque toutes les substances qui stimulent le système nerveux central sont douées d'effets secondaires indésirables, tant sur le système nerveux (la phase d'excitation est souvent suivie d'une phase de dépression profonde) que sur d'autres appareils ou organes. Tous les médicaments qui exercent une action de stimulation sont désignés sous le nom générique d'*analeptiques* (analeptiques respiratoires, cardiaques, etc.). Nous ne décrirons ici que quelques exemples de ces médicaments.

La **strychnine,** poison violent (30 mg de nitrate de strychnine peuvent provoquer la mort), a été longtemps employée en thérapeutique en raison de ses multiples propriétés. Il s'agit d'un alcaloïde naturel extrait des graines de la noix vomique et d'autres plantes semblables; elle répond à la formule $C_{21}H_{22}N_2O_2$.

A faible dose (5 mg au maximum deux fois par jour), la strychnine a été employée dans les paralysies périphériques d'origine infectieuse ou rhumatismale; à des doses encore plus réduites et associée à d'autres substances, elle exerce une action tonique générale et stimule l'appétit. L'intoxication à la strychnine apparaît pour des doses supérieures à 15-20 mg et se manifeste par des convulsions suivies de paralysies; la mort survient par paralysie des centres respiratoires. L'intoxication par la strychnine est combattue au moyen des barbituriques, associés parfois au curare et au chloral hydraté.

La **picrotoxine** est constituée par un mélange équimoléculaire de picrotoxinine et de picrotine.

A la différence de la strychnine, la picrotoxine n'agit pas sur la moelle mais sur le cerveau; on l'a employée dans les intoxications dues à des dépresseurs nerveux, comme

les barbituriques, le chloral hydraté, les anesthésiques, etc.

Le **Cardiazol** (pentaméthyltétrazol) agit sur les centres médullaires et est employé comme analeptique respiratoire et cardiaque. En psychiatrie, il est employé pour provoquer des chocs.

La **Coramine** *(diéthylnicotamide)*, dont la formule se caractérise par la présence d'un cycle pyridique, est utilisée comme analeptique respiratoire et cardiaque ; elle est administrée par voie orale ou, avec une efficacité nettement supérieure, par voie intraveineuse. La dose est de 250 mg ou plus.

Le **camphre** agit sur tout le système nerveux. Du point de vue chimique, il montre une structure terpénique comportant un groupement cétonique. Aux injections d'huile camphrée, on préfère maintenant l'utilisation de solutions aqueuses injectables de camphosulfonate de sodium.

Caféine et substances semblables.

La *caféine*, la *théobromine* et la *théophylline* sont chimiquement très voisines ; on les trouve respectivement dans les grains de café, de cacao et dans les feuilles de thé. Elles exercent une action stimulante sur le cortex cérébral accompagnée d'une stimulation de l'appareil cardio-vasculaire et d'une augmentation de la diurèse. On les utilise à la dose d'environ 200 mg ou plus.

Amphétamines

Les produits de ce groupe exercent sur les activités mentales une action stimulante très intense, qui se traduit par une plus grande capacité de travail intellectuel, une atténuation de la fatigue, une sensation d'euphorie. On doit déplorer trop fréquemment la prise spontanée d'amphétamines, sans prescription ni contrôle médical, qui aboutit souvent à l'accoutumance toxicomaniaque. Les amphétamines, telles que l'*Ortédrine*, la *Sympamine* ou *Benzédrine*, sont employées pour le traitement des états de grande fatigue nerveuse, des états dépressifs. Dose : 5 à 20 mg (sous forme de phosphate) par voie orale.

Produits actifs sur le système nerveux autonome

Parmi les produits agissant sur le système nerveux autonome (voir chapitre *Système nerveux* dans le volume II de Biologie), on distingue : les *sympathomimétiques* ou *adrénergiques*, qui stimulent les fibres adrénergiques (c'est-à-dire le système sympathique) ; les *parasympathomimétiques* ou *cholinergiques*, qui stimulent les fibres cholinergiques (c'est-à-dire le système parasympathique) ; les *sympatholytiques* ou *adrénolytiques*, qui inhibent les effets de l'adrénaline, c'est-à-dire bloquent le sympathique sans modifier le parasympathique ; les *parasympatholytiques*, qui inhibent le système parasympathique ; les *gangliomimétiques*, qui agissent d'abord comme stimulants puis comme dépresseurs sur les ganglions nerveux (ces produits, dont le représentant principal est la *nicotine*, n'ont pratiquement pas d'application thérapeutique) ; les *ganglioplégiques*, qui exercent une action inhibitrice sur les ganglions, présentent un intérêt thérapeutique considérable.

Sympathomimétiques ou adrénergiques

Ils exercent une action vasoconstrictrice sur les vaisseaux de tout calibre ; en provoquant une rapide et fugace élévation de la pression sanguine, ils accélèrent le débit circulatoire (action directe sur le myocarde) et stimulent directement le cœur ; ils possèdent aussi une action spasmolytique et une action stimulante sur le système nerveux central. Un effet caractéristique des sympathomimétiques est la dilatation pupillaire.

L'**adrénaline** est le plus puissant hypertenseur utilisé ; elle possède aussi une action bronchodilatatrice remarquable. On l'emploie exceptionnellement en cas d'arrêt cardiaque (par exemple au cours de l'anesthésie) en injection intracardiaque. Associée aux anesthésiques locaux, elle en retarde la résorption, à cause de son effet vasoconstricteur. Naturellement, l'adrénaline est contre-indiquée chez les hypertendus et chez les sujets atteints de maladies cardiaques.

La **noradrénaline** a été employée à la place de l'adrénaline comme analeptique circulatoire ; en effet, elle ne possède pas l'activité dangereuse de l'adrénaline sur le myocarde.

Archives I.G.D.A.

▲ ***Rameau feuillu d'un camphrier* (Laurus camphora) *; la drogue est obtenue par distillation du bois.***

L'**éphédrine** est un alcaloïde naturel, très proche chimiquement de l'adrénaline, dont elle possède toutes les propriétés pharmacologiques, avec toutefois des effets moins intenses mais plus durables ; elle exerce en outre une action stimulante sur le système nerveux central. Elle est largement employée dans le traitement des sinusites et des affections similaires.

La distinction entre récepteurs adrénergiques α et β a permis de moduler l'action des sympathomimétiques.

Parmi les nombreux médicaments de synthèse employés aujourd'hui en thérapeutique, citons l'**isopropylnoradrénaline**, le **méthylaminoéthanolphénolol** et son homologue le **méthylaminopropylphénolol**, la **naphtylméthylimidazoline (Privine)**.

Sympatholytiques ou adrénolytiques ou antiadrénergiques

Leur emploi thérapeutique est assez limité. Il existe des sympatholytiques naturels (alcaloïdes du seigle ergoté) et synthétiques.

La structure chimique de ces médicaments est très variable, mais on trouve dans tous un groupe amine tertiaire ; il s'agit de dérivés de l'*acide lysergique*. La plupart de ces substances exercent aussi une action psychique : le **diéthylamide de l'acide lysergique (L.S.D.)** provoque des troubles psychiques, même à des doses très faibles (1/2 γ) ; il n'est pas employé en thérapeutique.

Les **alcaloïdes du seigle ergoté** trouvent un emploi en obstétrique (ils provoquent la contraction de l'utérus et l'arrêt des hémorragies du *post-partum*). Ces produits sont également employés dans le traitement des migraines.

▼ ***Le seigle ergoté présente des sclérotes volumineux, produits par le champignon* (Claviceps purpurea), *dans les épis de la céréale.***

Archives I.G.D.A.

Archives I.G.D.A.

▲ *Partie de plante avec fleur et fruit (baie) de la belladone* **(Atropa belladonna)** *qui renferme de* **l'atropine.**

Archives I.G.D.A.

▲ *Fleurs de jusquiame* **(Hyosciamus niger) ;** *cette Solanacée renferme de* **l'hyosciamine.**

Parasympathomimétiques ou cholinergiques

Ce sont des médicaments qui stimulent le système parasympathique ; on peut les classer en substances *cholinomimétiques* (esters de la choline), douées d'une action semblable à celle de l'acétylcholine (appartiennent à cette catégorie les alcaloïdes naturels à action cholinergique) et en *inhibiteurs de la cholinestérase,* qui est l'enzyme qui détruit rapidement l'acétylcholine dans l'organisme.

— Parmi les substances du premier groupe, citons l'**acétylcholine,** qui provoque une hypotension intense et fugace ; elle n'est pas utilisée en thérapeutique, mais on recourt à quelques-uns de ses dérivés, comme l'**acétyl-β-méthylcholine** et la **carbaminoylcholine.** Ces substances sont administrées par voie intramusculaire (dose de 5 à 200 mg), en vue d'obtenir une vasodilatation rapide et une chute importante de la pression artérielle.

Les alcaloïdes naturels à action cholinergique agissent sur les jonctions post-ganglionnaires cholinergiques en provoquant une action de type muscarinique ; citons la **pilocarpine** et la **muscarine,** l'une et l'autre sans intérêt thérapeutique.

— En revanche, les anticholinestérasiques connaissent des emplois thérapeutiques importants. Rappelons l'**ésérine** et la **néostygmine ;** la première est une substance naturelle employée depuis longtemps, la seconde un produit de synthèse. On les emploie comme myotiques sous forme de collyres (traitement du glaucome) et dans les atonies gastro-intestinales.

Ces médicaments inhibent l'enzyme de manière réversible. En revanche, il existe des substances qui inactivent de manière irréversible la cholinestérase : il s'agit de dérivés organophosphorés ; parmi ces derniers, le **di-isopropylfluorophosphate** est employé, à très faible dose, dans le traitement du glaucome.

Parasympatholytiques ou cholinolytiques

Ces médicaments bloquent les récepteurs des terminaisons nerveuses cholinergiques. Leur action s'oppose donc à celle de l'acétylcholine et des médicaments acétylcholinomimétiques.

A ce groupe des alcaloïdes naturels employés depuis longtemps en thérapeutique appartiennent l'**atropine,** l'**hyoscyamine** et la **scopolamine.** Ces substances dérivent de l'*acide tropique* et possèdent des formules très voisines. Elles possèdent une action antagoniste (et réversible) à l'égard des médicaments parasympathomimétiques.

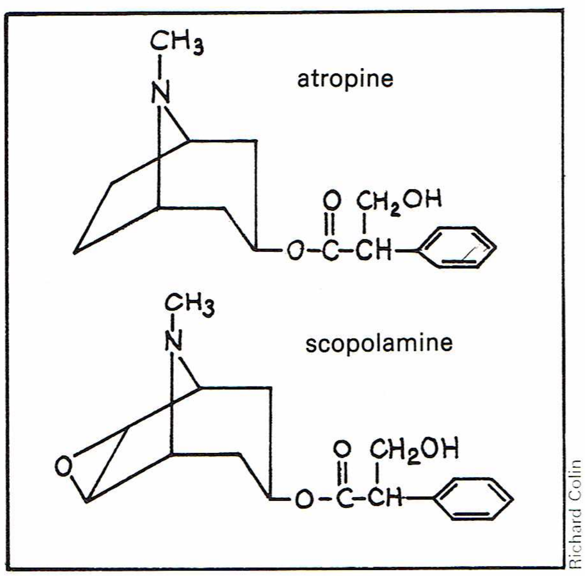

▶ *Formules de deux* **alcaloïdes naturels : l'atropine** *et la* **scopolamine,** *médicaments* **parasympatholytiques.**

L'atropine stimule le système nerveux central, mais elle n'est pas employée en thérapeutique dans ce sens, tandis que la scopolamine est un sédatif, utilisé notamment comme pré-anesthésique ; on l'emploie également dans certaines formes de psychose et dans le *delirium tremens.* L'atropine est employée pour l'examen du fond d'œil.

Un grand nombre de produits de synthèse présentant une structure et une action semblables à celles des alcaloïdes naturels ont été récemment mis au point.

Ganglioplégiques

Comme nous l'avons déjà mentionné, ces substances agissent en bloquant la transmission de l'influx nerveux au niveau de tous les ganglions de tout le système nerveux autonome.

Parmi les ganglioplégiques, on compte de nombreuses bases ammonium quaternaire ; on les emploie dans le traitement de l'hypertension : par leur action vasodilatatrice, elles provoquent une diminution de la résistance vasculaire périphérique. Mais ces substances ralentissent l'activité du tube digestif et des voies urinaires. On les administre par voie orale (à des doses pouvant atteindre 1 g), par voie intramusculaire ou intraveineuse à la dose de 25-100 mg, dans le traitement de l'hypertension, des affections vasculaires périphériques (athérosclérose) et dans certains types d'ulcères. Citons le **bromure** (ou **chlorure**) de **tétraéthylammonium** $[N(CH_2{-}CH_3)_4]^+ Br^-$, aujourd'hui peu employé et remplacé par le **pentaméthonium** ($n = 5$) et l'**hexaméthonium** ($n = 6$) :

$$[(CH_3)_3N{-}(CH_2)_n{-}N(CH_3)_3]^{2+},\ 2Br^-$$

et par d'autres médicaments, comme le **camphosulfonate de trimétaphan** (ou **Arfonad**), corps qui n'est toutefois pas constitué d'une base ammonium quaternaire, mais d'un sel sulfonium.

Curarisants

Les curarisants empêchent la transmission de l'influx nerveux au muscle strié au niveau des jonctions myoneurales. La réponse musculaire par stimulation du nerf disparaît, mais elle subsiste par stimulation directe du muscle.

Les curarisants, à forte dose, provoquent une intoxication rapide s'accompagnant de paralysies des muscles (dans l'ordre : paralysie des muscles de l'œil, puis de ceux de la face, de la tête, des membres, de l'abdomen, du thorax et du diaphragme ; la mort survient alors par paralysie respiratoire, mais on peut la conjurer en prolongeant la respiration artificielle jusqu'à la disparition de la paralysie, qui est réversible) ; à faible dose les curarisants sont employés en thérapeutique comme myorelaxants. On les utilise comme adjuvants de l'anesthésie, en vue d'obtenir un relâchement musculaire complet, particulièrement utile dans les interventions au niveau de l'œil, en chirurgie orthopédique et abdominale.

Les curarisants se distinguent en *pachycurares* et *leptocurares ;* le mécanisme d'action de ces deux catégories de substances est différent : les premiers, en effet, agissent comme *compétiteurs de l'acétylcholine,* les seconds *en provoquant la dépolarisation de la plaque nerveuse.* Cela explique que les anticholinestérasiques dépriment l'activité des premiers et renforcent celle des seconds. Chimiquement, presque tous les curarisants, ainsi que de nombreux ganglioplégiques, sont des ammoniums quaternaires ; tous renferment un atome d'azote tertiaire ou quaternaire.

Pachycurares

Appartient à ce groupe la drogue qui a donné son nom à toute la classe, c'est-à-dire le **curare,** extrait aqueux obtenu à partir de plantes (Ménispermacées) et utilisé de très longue date par les Indiens de certaines tribus des forêts de l'Amérique du Sud.

L'extrait renferme un grand nombre de principes actifs, variables en nombre et en composition selon la provenance de la plante et la méthode de préparation ; ce sont des alcaloïdes contenant le plus souvent un atome d'azote quaternaire ; le plus connu en est la **tubocurarine,** que l'on administre par voie parentérale, puisqu'elle est inactive par voie orale. On emploie la **d-tubocurarine** cristallisée, obtenue à partir d'extraits aqueux ; elle agit sélectivement sur les plaques nerveuses des muscles squelettiques. L'action d'une dose thérapeutique se manifeste en quelques minutes seulement (lorsque le produit est administré par voie intraveineuse) et dure environ une demi-heure.

Parmi les pachycurares obtenus par synthèse, citons la **gallamine** et le **benzoquinonium ;** ce dernier, en particulier, semble présenter une action intermédiaire entre celle des pachy- et des leptocurares. Citons encore des dérivés semi-synthétiques de la tubocurarine, comme la **diméthyltubocurarine.**

Leptocurares

Le **décaméthonium** a une composition très semblable à celle des deux ganglioplégiques déjà cités, le penta- et l'hexaméthonium, dont il ne diffère que par la longueur de la chaîne méthylénique, constituée par dix atomes de carbone. Son action est plus rapide et plus intense que celle de la tubocurarine, et emprunte en outre un mécanisme totalement différent. La dose thérapeutique, administrée par voie intraveineuse, est de 1 à 5 mg.

La **succinylcholine** est employée en raison de son effet rapide (survenant deux minutes après l'administration par voie intraveineuse d'une dose d'environ 20 mg) et de très courte durée (il disparaît généralement au bout de trois minutes). Mais ce médicament, dans des cas rares, est responsable de très graves accidents.

Expectorants

On appelle expectorants les médicaments qui, en augmentant la sécrétion des glandes muqueuses des voies respiratoires (trachée, bronches), évitent les désagréments de la toux sèche et renforcent l'efficacité des mécanismes d'expulsion. Ils provoquent une sédation de l'irritation et réduisent la fréquence des quintes de toux. La plupart des spécialités pharmaceutiques possédant ces propriétés renferment aussi des dépresseurs des centres bulbaires de la toux (par exemple, la codéine).

On peut citer le **chlorure d'ammonium,** NH_4Cl (administré à des doses pouvant atteindre 5 g par jour), l'**ipecacuanha,** drogue extraite des racines de *Cephaelis ipecacuanha* et qui entre dans la composition du sirop de Desessartz, encore employé aujourd'hui, la **terpine** et plusieurs composés de synthèse.

Laxatifs

Ce sont les produits dont l'emploi indiscriminé est probablement le plus largement répandu. Ils provoquent à la longue des irritations intestinales. Les laxatifs peuvent être divisés en plusieurs groupes.

Les **dérivés de l'anthraquinone** sont contenus dans des drogues extraites des racines, des feuilles ou des écorces de différentes plantes, parmi lesquelles la *rhubarbe*, le *cascara* et l'*aloès*.

La **phénolphtaléine** et l'**huile de ricin** sont des composés dangereux qui agissent en irritant la muqueuse intestinale et même, dans certains cas, les plexus nerveux du sympathique innervant l'intestin, ce qui a pour effet d'accélérer le péristaltisme.

Les **sels de magnésium** constituent un autre groupe de laxatifs dits *salins*. Le *sulfate hydraté* $MgSO_4.7H_2O$ est appelé aussi *sel anglais*; le *citrate* $Mg_3\ (C_6H_5O_7)_2.H_2O$ entre dans la composition de la *limonade citromagnésienne*.

Les **sels de sodium,** le *sulfate* $Na_2SO_4.10H_2O$ et le *phosphate monoacide* $Na_2HPO_4.7H_2O$, agissent en attirant l'eau dans l'intestin par action osmotique, ce qui a pour effet de fluidifier les matières fécales.

L'**agar-agar,** la **gomme tragacantha,** la **méthylcellulose** et d'autres produits analogues possèdent la propriété de gonfler en présence d'eau. Ils augmentent la masse fécale et l'efficacité du péristaltisme intestinal.

La **vaseline** agit comme un simple lubrifiant.

Citons encore les sels biliaires et de nombreux produits de synthèse.

Désinsectisants et antiparasitaires

L'homme peut devenir l'hôte de différents types de parasites, internes (surtout vers intestinaux) ou externes (puces, punaises, etc.). La distinction entre, d'une part les désinsectisants et les antiparasitaires, et, d'autre part les anti-infectieux chimiothérapiques, s'établit de manière purement conventionnelle, uniquement sur la base des dimensions des parasites. Si ceux-ci sont de dimension microscopique, comme les bactéries, les spores, etc. (et présents en très grande quantité), on parle d'*infection*, et le traitement fait appel aux *anti-infectieux chimiothérapiques*; en revanche, si les parasites sont peu nombreux et de dimension macroscopique, on parle d'*infestation,* et les médicaments auxquels on recourt sont dits *désinsectisants* pour les infestations externes, et *antiparasitaires* pour les infestations internes, intéressant surtout l'intestin.

Parmi les désinsectisants, citons le **dichlorodiphényltrichloréthane** ou **D.D.T.** C'est un produit très toxique pour les insectes et peu pour les vertébrés (dose léthale pour l'homme : 30 g), mais l'usage prolongé de D.D.T. provoque chez les insectes des phénomènes d'adaptation et de résistance. On connaît la concentration progressive du D.D.T. au long des chaînes écologiques, due à sa liposolubilité, qui incite à en restreindre l'emploi.

L'**hexachlorocyclohexane** est plus actif et plus toxique pour l'homme que le D.D.T.; cette substance est

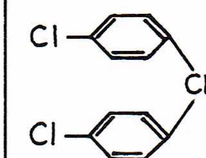

dichlorodiphényl trichloréthane (D.D.T.)

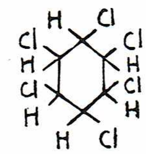

hexachlorocyclohexane

Richard Colin

▲ *Formules de deux* **désinsectisants** : *le* **dichlorodiphényl-chloréthane,** *toxique pour les insectes et peu pour les vertébrés;* **l'hexachlorocyclohexane,** *plus toxique pour l'homme que le précédent.*

Archives I.G.D.A.

S. Prato

▼ *A gauche, un pin mugho* (Pinus mugho) *portant des strobiles; du bois et de l'écorce de ce conifère, on extrait la térébenthine, tandis que les feuilles permettent de préparer un* balsamique. *A droite, pied de fougère mâle* (Driopteris filix-mas)*; on prépare à partir de ses racines des* médicaments anthelminthiques.

également utilisée dans le traitement de la gale et des infestations par les poux. Le **pyrèthre** est utilisé contre les puces.

Les anthelminthiques sont des antiparasitaires destinés à lutter contre les vers intestinaux.

Contre le tœnia, on utilise la **poudre de fougère mâle,** obtenue à partir du rhizome de *Dryopteris filix-mas,* plante spontanée dans les pays d'Europe à climat tempéré. On l'administre, après évacuation intestinale, à la dose de 5 g sous forme de poudre (dose pour adulte), par voie orale ; peu ou pas du tout absorbée par la paroi intestinale, la poudre de fougère mâle a un effet paralysant sur le parasite, qui est expulsé ensuite par administration d'un purgatif **non huileux.** Elle est assez toxique pour l'homme ; les principes actifs sont dérivés de l'*acide filicique*.

Un autre produit très actif à l'égard du tœnia est la **pelletierine,** elle aussi assez toxique. La dose est d'environ 0,3 g ; on administre ensuite un purgatif salin. On l'extrait de l'écorce du grenadier.

La **santonine** (principe actif du *«semen contra»*) est très active contre de nombreux nématodes (tels que les ascaris et les oxyures), mais est également assez toxique à l'égard de l'hôte (la dose pour adulte est de 2 à 6 g).

L'**huile de chénopode,** dont le principe actif est l'*ascaridol,* paralyse les ascaris, les ankylostomes, les oxyures et les tœnias, mais il s'agit d'une substance très toxique.

La **pipérazine** est, en revanche, pratiquement atoxique et très bien tolérée. On l'utilise contre les oxyures et les ascaris, surtout en pédiatrie.

La **diéthylcarbamazine** est employée pour combattre la filariose ; elle est active aussi à l'égard d'autres parasites.

Une substance qui possède un large champ d'action (surtout contre les ascaris, mais aussi contre les ankylostomes, les trichocéphales et certains types de tœnias) est l'**hexylrésorcinol** que l'on emploie à la dose de 1 g, suivie de l'administration d'un purgatif salin.

Désinfectants

On appelle désinfectants les substances qui, douées d'un pouvoir bactéricide élevé, sont employées en usage externe pour la destruction des germes pathogènes. On peut classer les désinfectants en *bactéricides* et *bactériostatiques,* selon qu'ils provoquent la mort des bactéries ou en empêchent seulement la prolifération. Mais souvent ces deux effets sont indissociables.

Certains désinfectants sont employés sur la peau et les muqueuses, les autres sont destinés à la désinfection des locaux ou des objets, ou bien sont destinés à rendre l'eau potable.

A la première catégorie appartiennent le phénol, certains alcools, l'acide borique, certains dérivés de l'iode, du chlore et du mercure, l'eau oxygénée, les nitrofurannes, les désinfectants détergents et plusieurs produits organiques halogénés.

Le **phénol** a une grande importance historique. L'activité antibactérienne des désinfectants est exprimée encore de nos jours par la concentration minimale de phénol qui provoque le même effet (coefficient phénol). Quelques dérivés du phénol sont employés pour stériliser des locaux et des objets, tandis que le phénol a été abandonné en raison de sa toxicité et de son action nécrosante sur les tissus.

Parmi les alcools, l'**alcool éthylique,** $CH_3—CH_2OH$, est largement employé. Il est parfaitement toléré par la peau et par les muqueuses, n'est pas toxique et son prix de revient est très faible. Son seul inconvénient réside dans son pouvoir antiseptique peu élevé, surtout à l'égard des spores. Il est totalement inactif dans les infections à risque tétanique (blessures souillées de terre, etc.).

L'**acide borique** exerce une faible action bactériostatique, et il est préconisé en solution à 1 % pour la désinfection oculaire.

Les **chloramines** sont des substances organiques chlorées qui libèrent lentement le chlore (sous forme d'acide hypochloreux) selon la réaction schématique suivante :

$$>N—Cl + H—OH \longrightarrow\ >N—H + HClO ;$$

leur action antiseptique est efficace et durable ; ces dérivés possèdent également un pouvoir germicide élevé. Citons la *chloramine T* et la *dichloramine T*.

L'**iode** est employé en solution dans l'alcool ou dans l'eau en présence d'iodure de potassium ; son pouvoir bactéricide élevé en fait un produit très répandu. Il présente l'inconvénient de posséder un fort pouvoir colorant qui peut être évité par l'usage de combinaisons organiques.

L'**eau oxygénée,** H_2O_2, dégage spontanément de l'oxygène (avec effervescence en présence de catalase, enzyme contenue dans de nombreux tissus, par exemple dans le sang), exerçant ainsi, outre une action bactéricide assez marquée, une action mécanique de nettoyage. L'eau oxygénée est employée en mélange à 3,5 % avec l'eau distillée stabilisée par de faibles additions de produits tels que l'acide borique ; ce mélange est appelé eau oxygénée « à dix volumes » (ce qui signifie qu'un litre de solution est capable de dégager dix litres de gaz mesurés dans des conditions normales).

Parmi les **nitrofurannes,** le **nitrofurazone** est employé comme principe actif dans des pommades.

Les désinfectants doués d'un pouvoir détergent sont souvent des composés dits amphotères, tels que le **lauryl sulfate de sodium** et le **chlorure de benzalkonium,** dont la molécule comprend une fraction lipophile et une fraction hydrophile. Ces molécules ont tendance à se déposer à l'interface membrane cellulaire externe-liquides environnants aqueux, qui jouent le rôle de véhicule pour le médicament. On obtient ainsi une double action : action mécanique, tendant à séparer les bactéries de leurs substrats, et action chimique, qui bloque les échanges entre la bactérie et le milieu externe, puisque le désinfectant recouvre une grande partie de la surface externe du germe.

Citons encore les **crésols,** homologues supérieurs du phénol, mélangés avec un poids égal de savon de potasse ; ils sont rendus solubles dans l'eau et employés sous le nom de *lisol*. Le formaldéhyde $\mathrm{HC}\genfrac{}{}{0pt}{}{/\!\!/\mathrm{O}}{\backslash\mathrm{H}}$ est employé, dissous dans l'eau, sous le nom de **formaline ;** le **chlorure de mercure** ou **sublimé corrosif,** $HgCl_2$, très toxique et irritant, fut employé autrefois pour la désinfection corporelle. Enfin, pour la désinfection de l'eau potable, on emploie le **chlore** Cl_2 et le **bioxyde de chlore** ClO_2, que l'on fait barboter directement dans l'eau des canalisations. Pour un usage extemporané, on recourt souvent à un produit tel que la **carboxydichloramide** (5-10 mg/l sont suffisants pour rendre l'eau potable environ une heure après la dissolution).

Antihistaminiques

Ce sont des médicaments agissant comme compétiteurs de l'*histamine,* amine de structure relativement simple provenant de l'*histidine,* qui est un acide aminé essentiel, par décarboxylation opérée par les bactéries du tube digestif et par une enzyme spécifique, l'histidine-décarboxylase, présente dans les tissus. L'histamine exerce un effet vasodilatateur puissant sur les petites artères et provoque ainsi une chute de la pression artérielle ; elle entraîne en outre une contraction énergique des muscles lisses et des muscles des glandes excrétrices de l'estomac.

L'administration par injection d'une dose importante d'histamine (le produit est inactif par voie orale) peut entraîner la mort par bronchoconstriction associée aux autres troubles déjà cités. Il est très intéressant de noter que les manifestations de ce choc sont en tous points semblables à celles du choc anaphylactique, ce qui conduit à penser que ce dernier est provoqué par une libération massive d'histamine.

Les antihistaminiques s'opposent à presque tous les effets provoqués par l'histamine : asthme allergique, rhume des foins, dermatites allergiques (urticaire, prurit, eczéma, piqûres d'insectes). Administrés par voie orale, à des doses pouvant atteindre 200 mg par jour, ils agissent au bout d'une demi-heure au maximum, et leur action persiste pendant plus de six heures. Les effets secondaires des antihistaminiques sont la somnolence, plus rarement des migraines et des troubles gastriques.

▶ Page ci-contre, tableau de quelques antihistaminiques appartenant aux trois formes fondamentales citées dans le texte.

Tous les antihistaminiques, à quelques exceptions près, présentent une structure chimique semblable, dérivée des trois formes fondamentales suivantes :

$R_1—O—(CH_2)_2—N\langle^{R_2}_{R_3}$ dérivés dialkylaminoéthoxy- ;

$^{R_1}_{R_2}\rangle N—(CH_2)_2—N\langle^{R_3}_{R_4}$ N, N, tétraalkyléthylène diamine ;

$R_2—\overset{R_1}{\underset{R_3}{C}}—(CH_2)_2—N\langle^{R_4}_{R_5}$ dialkylaminoalkyles.

Les chaînes méthyléniques peuvent parfois se cycliser.

Anticoagulants

Lorsque du sang s'écoule à travers une blessure, il se coagule au bout d'un certain temps. Ce processus s'accomplit à la suite d'une série longue et complexe de réactions physico-chimiques (voir le chapitre *Principaux constituants de la cellule vivante,* dans le volume I de Biologie).

Parmi les anticoagulants, on citera : les **dérivés de l'héparine,** qui agissent en inhibant la transformation du thromboplastinogène en thromboplastine et de la prothrombine en thrombine ; les **dérivés de la coumarine,** qui inhibent la formation de la prothrombine.

L'**héparine** est extraite des poumons des animaux de boucherie. Son dosage est effectué par des méthodes biologiques. On l'administre par voie parentérale, à la dose de 5 000 unités biologiques environ ; elle agit au bout de dix minutes au maximum, mais son action ne dure que quelques heures.

Parmi les dérivés coumariniques, citons le **dicoumarol,** qui est un produit de synthèse. Son action se manifeste au bout de douze heures, atteint sa valeur maximale soixante-douze heures après et disparaît après environ quatre jours. On l'administre par voie orale, à la dose initiale de 200 mg, puis à des doses variant de 25 à 200 mg par jour.

Le nombre de médicaments d'action analogue ou semblable à celle de l'héparine est très grand. Les indications en sont les thromboses de toute nature, puisque le médicament s'oppose à l'accroissement du thrombus et prévient le risque de rechute, les embolies, les infarctus, les phlébites, etc. Dans ces dernières indications, on préfère les dérivés coumariniques ; pour réduire les risques de thrombose lors des transfusions et des interventions chirurgicales, on prescrit en revanche des dérivés hépariniques.

Signalons l'existence de substances antagonistes de l'héparine, par exemple le **sulfate de protamine,** qui rétablissent une coagulabilité normale.

Diurétiques et médicaments du rein

Diurétiques

On recourt aux diurétiques dans le traitement de la rétention hydrique et saline, responsable d'œdèmes et d'hypertension artérielle. La rétention peut relever de plusieurs causes, aussi parle-t-on d'œdèmes cardiaques, gravidiques, hépatiques, rénaux, cortisoniques, etc.

Diurétiques mercuriels

Le **calomel,** Hg_2Cl_2, utilisé déjà par Paracelse, avait cédé la place à des composés organiques beaucoup moins toxiques, dont la découverte dérive historiquement de la recherche de médications antisyphilitiques.

Le mécanisme d'action des médicaments de ce type semble lié à l'inactivation des enzymes qui président à la réabsorption tubulaire.

Ces médicaments, au demeurant assez dangereux, sont pratiquement abandonnés de nos jours.

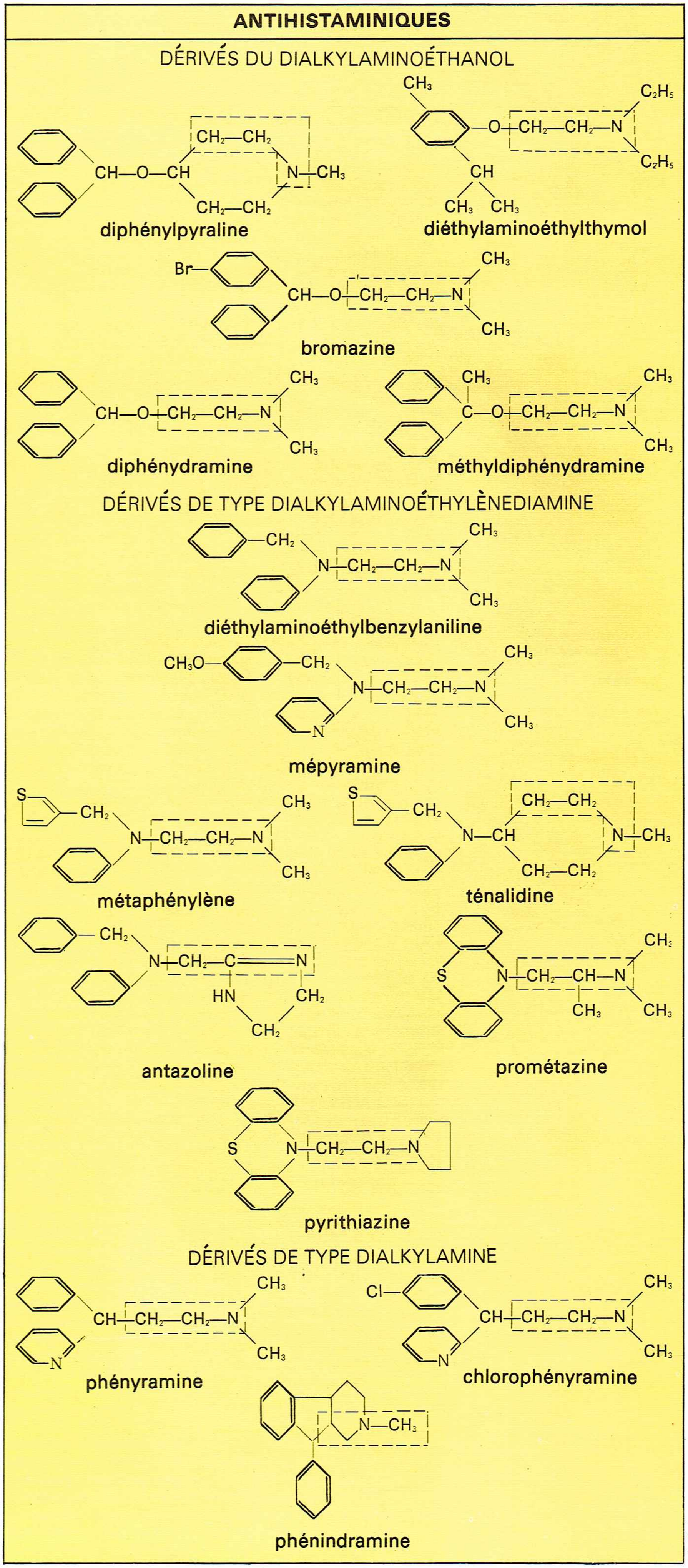

I.G.D.A.

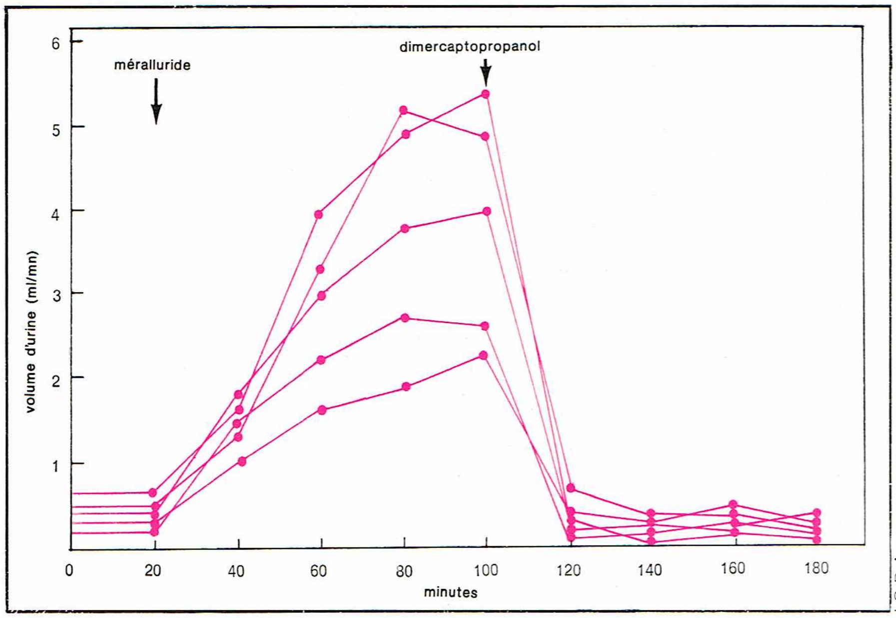

I.G.D.A.

▲ *Diagramme illustrant l'inhibition par le dimercaptopropanol de la diurèse provoquée chez le chien par les* **diurétiques mercuriels** *(dans ce cas, le méralluride est administré à la dose de 0,1 ml/kg).*

Xanthines

Nous avons déjà cité la caféine, la théophylline et la théobromine parmi les analeptiques; de ces trois substances, la **théophylline** et un peu moins la **théobromine** sont employées aussi comme diurétiques. Leur action dérive de l'augmentation du débit cardiaque, qui a comme conséquence l'augmentation de la filtration glomérulaire, et d'un mécanisme inhibiteur de la réabsorption de l'eau et des sels par le tubule. La théophylline est prescrite à des doses variables, jusqu'à 2 g par jour (en mélange avec environ 1/4 d'éthylène-diamine $H_2N—CH_2—CH_2—NH_2$: *aminophylline*) par voie intraveineuse.

Diurétiques osmotiques

Si la concentration plasmatique d'une substance à seuil bas augmente, même dans une faible proportion, cette substance est immédiatement filtrée par le glomérule et n'est pratiquement pas réabsorbée par le tubule, ce qui entraîne une élimination d'eau et de sels par effet osmotique. Des doses massives de médicaments (8-10 g par jour) sont nécessaires pour produire un tel effet; par conséquent, un diurétique agissant par action osmotique, outre un seuil bas, doit posséder certaines caractéristiques : absence totale de toxicité, absorption facile par voie orale, absence de métabolisation par l'organisme. On a employé quelques sels de potassium tels que le **nitrate,** KNO_3, et l'**urée,** $CO(NH_2)_2$, qui est un composant normal de l'urine. Le **sorbitol** et le **mannitol** sont les plus employés; on les administre par voie intraveineuse.

Diurétiques acidifiants

L'abaissement du pH des liquides organiques provoque un effet diurétique.

Les sels utilisés à cet effet sont peu nombreux et se réduisent pratiquement au **chlorure de calcium** et au **chlorure d'ammonium,** l'un et l'autre administrés par voie orale à des doses assez élevées. Le premier cède à l'organisme un surplus d'ions Cl^- par suite d'une hydrolyse acide, le cation Ca^{++} étant précipité sous forme insoluble dans l'intestin; dans le second, le cation NH_4^+ est métabolisé en urée non ionisée.

Ils sont exclusivement employés pour renforcer l'action de certains diurétiques.

Diurétiques inhibiteurs de l'anhydrase carbonique

L'anhydrase carbonique est une enzyme présente dans le rein et qui transforme immédiatement l'anhydride carbonique issu du métabolisme normal des cellules épithéliales du tubule en acide carbonique; elle déplace vers la droite l'équilibre :

$$H_2O + CO_2 \rightleftharpoons HCO_3^- + H^+;$$

les ions H^+ sont éliminés dans le tubule, qui provoque la transformation du phosphate disodique provenant du glomérule en phosphate monosodique et Na^+, selon la réaction :

$$Na_2HPO_4 + H^+ \rightarrow NaH_2PO_4 + Na^+.$$

Le phosphate est éliminé par les urines, l'ion Na^+ est réabsorbé et passe dans le sang. Si l'on entrave la formation d'acide carbonique, l'équilibre cité se réalise par l'intermédiaire d'autres acides non réabsorbés, et on assiste à la perte d'une certaine quantité de sels de sodium, plus importante que la normale, avec comme conséquence l'excrétion d'un plus grand volume d'eau, nécessaire pour la formation d'une solution isotonique.

On a employé dans ce dessein l'**acétazolamide,** administrée par voie orale à des doses atteignant 500 mg par jour.

Thiazidiques

Les diurétiques inhibiteurs de l'anhydrase présentent les graves inconvénients de provoquer une perte dangereuse d'ions K^+ ainsi qu'une acidose consécutive à l'élimination augmentée des bicarbonates dans l'urine.

Les thiazidiques, qui sont des diurétiques actuellement très employés, permettent d'éliminer tous ces inconvénients. En plus, ce sont souvent des inhibiteurs de l'anhydrase carbonique, qui entraînent une perte d'ions bicarbonates; toutefois, l'acidose n'apparaît que pour des doses très élevées de médicament. Parmi les diurétiques nouvellement apparus, citons encore l'**acide éthacrynique,** d'un emploi très étendu.

Antidiurétiques à action sélective

Notons dans les formules chimiques du **probénécide** et de la **caronamide** la présence d'un groupe sulfonamide comme dans l'acétazolamide. Utilisé au début pour abaisser la *clairance* de la pénicilline, le probénécide a été employé dans la cure de la goutte chronique, puisqu'il empêche la réabsorption de l'acide urique à travers les tubules, entraînant par conséquent son élimination rapide.

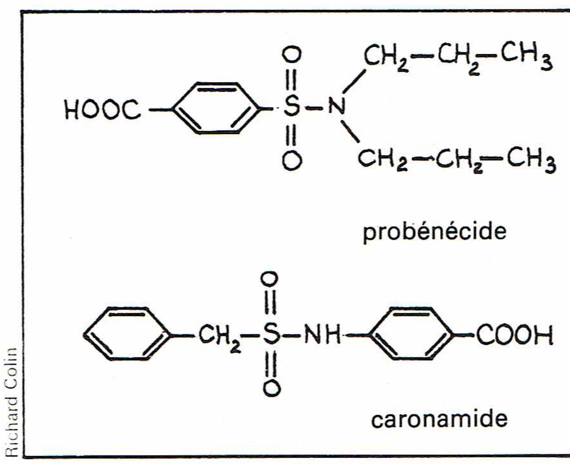

Richard Colin

▶ *Formules de deux* **antidiurétiques à action sélective :** *le* **probénécide** *et la* **caronamide.**

Antianémiques

Dans les *anémies hypochromes* ferriprives, on utilise essentiellement le **fer,** élément présent à une faible concentration (moins de 0,1 %) dans l'organisme humain mais indispensable pour les processus vitaux puisqu'il fait partie de la molécule de l'hémoglobine, constituant essentiel des globules rouges qui assure le transport de l'oxygène par le sang. L'absorption du fer est un phénomène très complexe : il se crée dans l'organisme un équilibre entre le fer absorbé, le fer circulant et le fer « de réserve ». La quantité de fer nécessaire est largement fournie par les aliments, sauf dans certains cas particuliers : carence d'apport, hémorragies, allaitement trop prolongé; dans tous ces cas, l'administration de composés de fer bivalent rétablit rapidement le taux d'hémoglobine et stimule directement le mécanisme hématopoïétique. Aussi utilise-t-on ces produits dans le traitement de l'anémie essentielle et de la chlorose.

Nous avons employé le terme générique de *« fer »*, mais il conviendrait plutôt de parler de l'équilibre des *ions* Fe^{2+} et Fe^{3+} présents dans différents types de molécules organiques. Les composés le plus communément employés sont le **sulfate**, le **carbonate**, le **gluconate**, le **lactate** et l'**ascorbate** ferreux, administrés par voie orale.

Dans les *anémies hyperchromes* (surtout l'*anémie pernicieuse*), on emploie en revanche les **cobalamines**, groupe de substances contenant du cobalt dans une molécule chimique très complexe (présentant une parenté de structure de base avec de nombreuses substances organiques importantes, comme l'hémoglobine et la chlorophylle) ; on trouve dans cette molécule quatre groupements pyrroliques et un groupement cyanhydrique uni par l'intermédiaire d'une liaison phosphore à une molécule de ribose et une molécule d'un dérivé benzimidazole.

Parmi les cobalamines, la plus importante est la **cyanocobalamine** ou **vitamine B_{12}**, apportée à l'organisme par différents aliments, surtout le foie. Si la vitamine B_{12} est apportée par voie buccale, son absorption ne s'effectue qu'en présence de « facteur intrinsèque », sécrété par le fundus gastrique. L'anémie pernicieuse de Biermer est une maladie provoquée par le défaut d'assimilation de la vitamine B_{12} dû à l'absence de « facteur intrinsèque ». On la traite par administration continue de très faibles quantités de vitamine B_{12} en injections intramusculaires.

L'**acide folique** (vitamine du groupe B présente en grande quantité dans les feuilles d'épinard — c'est la vitamine de Popeye !) exerce une action analogue par certains aspects à celle de la vitamine B_{12} ; facteur lui aussi essentiel de la croissance et de l'hématopoïèse, on l'emploie dans certains types d'anémie.

La carence en **vitamine C** peut également donner lieu à des manifestations anémiques : la vitamine C est employée comme adjuvant dans le traitement des différentes formes d'anémie.

Cholérétiques et cholagogues

Le foie est la plus importante des glandes de l'organisme. Il a pour rôle d'élaborer de nombreux produits intermédiaires du métabolisme, de stocker certaines substances, surtout les glucides, et de contribuer à la fonction d'élimination des déchets organiques à travers la bile, acheminée vers la vésicule biliaire (qui fonctionne comme un réservoir) et, de celle-ci, dans l'intestin.

Les **cholagogues** sont des médicaments qui provoquent l'évacuation du contenu de la vésicule biliaire ; les **cholérétiques**, en revanche, stimulent la sécrétion biliaire. Ces derniers sont utilisés surtout dans le traitement des insuffisances hépatiques chroniques et secondairement dans les dyspepsies et les allergies d'origine gastro-intestinale. On utilise souvent comme cholérétique la bile elle-même, séchée et purifiée, ou bien ses composants actifs, les acides biliaires, tels que l'**acide déhydrocholique.**

Plusieurs autres drogues possèdent une action cholérétique ou cholagogue : l'**extrait de boldo**, le **curcuma**, dont le rhizome contient une huile essentielle renfermant certains principes actifs, et l'extrait des feuilles de la tige d'artichaut, dont le principe actif est l'**acide 1,4-dicaféilquinique**, doué, comme beaucoup d'autres cholagogues, d'une certaine action diurétique.

Hormones et médications substitutives

Les hormones sont des régulateurs biologiques, sécrétées par des organes spéciaux, les glandes endocrines. L'activité de chacune des glandes endocrines est gouvernée par l'hypophyse et se trouve aussi en rapport avec le système nerveux, surtout le système autonome.

La science qui étudie les hormones et leurs actions, antagonistes ou synergiques, est l'endocrinologie. Nous n'envisagerons ici que quelques hormones qui trouvent des applications dans le domaine thérapeutique. Par conséquent, nous ne ferons que citer certaines familles d'hormones qui, bien que très importantes du point de vue physiologique, ne présentent pas un intérêt égal du point de vue pharmacologique.

Insuline et substances d'action semblable

L'**insuline** est une des hormones sécrétées par la partie endocrine du pancréas (îlots de Langherans). Chimiquement, il s'agit d'un polypeptide constitué de l'association de 51 acides aminés, variant légèrement selon les espèces animales. Dans la formule de structure de l'insuline, on note deux chaînes polypeptidiques, reliées par deux ponts disulfures (—S—S—), dont l'importance est bien connue dans les processus biochimiques ; un troisième pont (—S—S—) ferme un cycle. Il existe aussi plusieurs groupements acides (—COOH), basiques (amines), et alcools libres. La protéine (PM 5 734) tend à s'assembler en micelles ayant un PM égal à environ 35 000, qui floculent facilement, surtout en présence de sels de zinc (c'est la méthode de préparation du médicament à partir du pancréas de bovins et de porcins).

Son action est typiquement hypoglycémiante : administrée par voie sous-cutanée (si on l'administre par voie orale, elle est complètement détruite par les protéases digestives), elle provoque un abaissement rapide de la concentration en glucose dans le sang ; l'absence de sécrétion d'insuline détermine une glycémie élevée et l'apparition d'une maladie appelée *diabète sucré*, ou plus simplement *diabète*.

L'insuline trouve son emploi thérapeutique dans le traitement du diabète ; elle est administrée à des intervalles réguliers de quelques heures sous forme d'insuline-zinc, ou bien de préparations à action prolongée (c'est-à-dire libérant lentement l'insuline) dont l'exemple typique est l'insuline protamine-zinc. Le traitement doit être poursuivi pratiquement pendant toute la vie. L'abaissement brutal de la glycémie, provoqué par une dose trop forte d'insuline, entraîne des convulsions et un coma hypoglycémique.

Dans certaines formes de diabètes légers de l'adulte, on préfère à l'insuline des médicaments récemment synthétisés qui présentent l'avantage de pouvoir être administrés par voie orale ; il s'agit de certains **sulfamides, sulfonyl urées**, et aussi de **biguanides.** Leur mécanisme d'action est différent de celui de l'insuline ; ces substances sont actives uniquement si le pancréas est au moins partiellement fonctionnel, car elles stimulent la sécrétion interne de la glande.

Hormones corticosurrénales

Ces hormones sont sécrétées par le cortex des glandes surrénales ; leur production est très faible puisqu'elle ne dépasse pas quelques milligrammes par jour, mais l'importance de ces hormones est capitale : l'ablation des glandes surrénales entraîne rapidement la mort. On a isolé et étudié dans leur composition plus d'une dizaine d'hormones différentes ; dans leur structure, on trouve toujours le même noyau cyclopentanophénanthrénique comportant 17 atomes de carbone, que nous avons déjà rencontré dans d'autres composés, auxquels sont unis quelques radicaux méthyle et une chaîne plus longue, une double liaison, deux fonctions cétones (sur un seul noyau) et une fonction alcool. L'action physiologique de ces hormones s'exerce dans trois domaines : le métabolisme de l'eau et des sels, le métabolisme des glucides et des protéines, les caractères sexuels.

Les hormones actives sur le métabolisme de l'eau et des sels sont la **désoxycorticostérone** et l'**aldostérone ;** sur le métabolisme glucidique et protéique, la **corticostérone**, la **11-déshydrocorticostérone**, la **cortisone** et l'**hydrocortisone (cortisol)**, enfin, dans le domaine sexuel, l'**androstérone** et la **progestérone** (voir *Hormones sexuelles*).

A côté des hormones naturelles, rappelons les dérivés synthétiques et semi-synthétiques, comme le **fluorohydrocortisone**, la **prednisone** *(delta-1-cortisone)* et le **prednisolone** *(delta-1-hydrocortisone)*.

Ces médicaments sont doués d'une action anti-inflammatoire puissante ; en outre, ils modèrent les réactions de l'organisme aux conditions défavorables qui provoquent les phénomènes allergiques et les phénomènes d'intolérance. On les emploie surtout dans de nombreuses manifestations rhumatismales, dans l'arthrite, dans les maladies du collagène, dans les dermatites, etc. Après la cortisone, l'hydrocortisone, la fluorohydrocortisone, la prednisone et la prednisolone, ont été mises au point de

HORMONES SEXUELLES

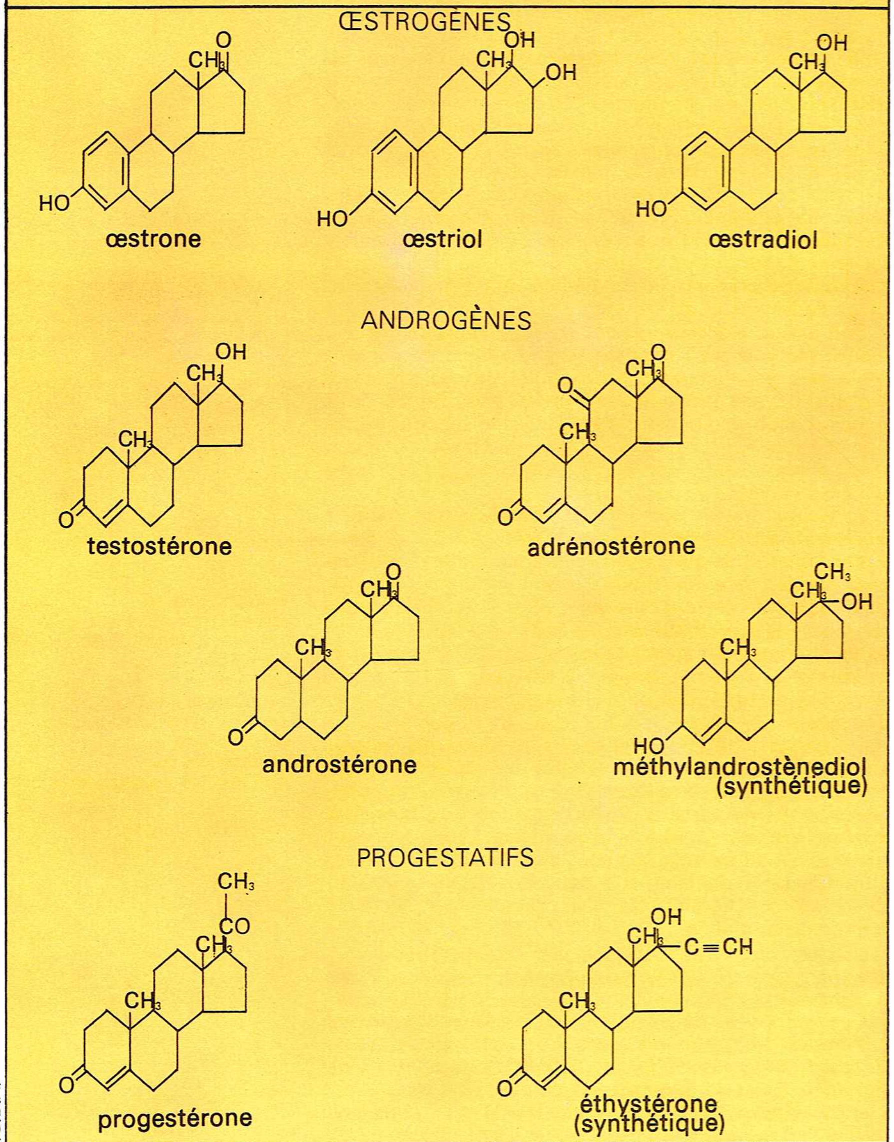

▲▶ Ci-dessus, tableau des principales hormones sexuelles : œstrogènes, androgènes et progestatifs. A droite, formule du **diéthylstilbœstrol.**

nombreuses molécules, actives à faible dose, ce qui permet de réduire les doses et de limiter les effets secondaires indésirables.

Les principaux effets secondaires sont : les troubles du métabolisme hydrosalin (rétention de Na^+ et fuite de K^+) avec les œdèmes qui en sont la conséquence, l'hypertension, l'insuffisance du myocarde, les myasthénies, l'ostéoporose et les perturbations du cycle menstruel.

Hormones sexuelles

Les glandes sexuelles (ovaires et testicules) sécrètent les hormones qui, d'une part, influencent le fonctionnement des organes sexuels et déterminent les caractères sexuels secondaires, et, d'autre part, interfèrent dans l'équilibre hormonal de l'organisme. Selon une erreur fort répandue, les hormones sexuelles seraient différentes selon le sexe; en réalité, ce qui change est la quantité relative des différentes hormones et non la qualité.

Les hormones sexuelles se divisent en *androgènes, œstrogènes* et *progestatifs;* les premières possèdent une action virilisante, les secondes féminisantes, les troisièmes agissent sur le déroulement de la grossesse. Elles sont toutes chimiquement semblables, avec une structure voisine de celle des hormones corticosurrénales.

Œstrogènes

Les principales hormones sécrétées par les ovaires sont : l'*œstradiol, l'œstriol* et *l'œstrone,* dont les molécules comportent toutes 18 atomes de carbone et un cycle aromatique. C'est l'œstradiol qui est reconnu comme l'hormone principale.

On les administre par voie intramusculaire ou, uniquement en ce qui concerne l'œstriol, par voie orale. On administre également par voie orale l'*éthinylœstradiol* semi-synthétique. Les doses sont de l'ordre de quelques microgrammes par jour.

On recourt aussi à des médicaments possédant une structure chimique assez différente de celle des hormones, comme le *stilbestrol,* qui présentent l'avantage d'être efficaces par voie orale.

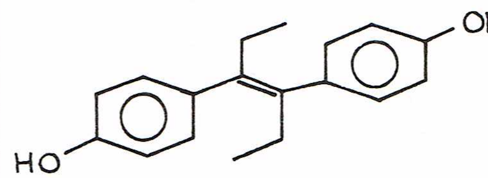

diéthylstilboestrol

Androgènes

Les androgènes possèdent une structure à 19 atomes de carbone. Ces hormones, sécrétées principalement par les testicules et en partie par les glandes surrénales, sont : la *testostérone,* l'*adrénostérone,* l'*androstérone.* La plus employée en thérapeutique est la testostérone, souvent après estérification du radical —OH en 17 par un acide organique, comme l'acide propionique.

On les administre par voie intramusculaire à la dose de 5 à 10 mg tous les deux ou trois jours dans le traitement des troubles consécutifs à une insuffisance hormonale : impuissance, oligospermie, stérilité; la 17α-méthyltestostérone peut être administrée par voie orale.

Les **anabolisants protéiniques** sont des analogues des androgènes dont on a cherché à exalter l'effet sur le métabolisme protidique : par exemple, le *méthylandrostènediol* et la *déhydro-isoandrostérone.*

Progestatifs

Les hormones progestatives sont utilisées dans le traitement de la stérilité, de l'avortement habituel et de certains troubles menstruels. Outre la *progestérone,* hormone naturelle, on recourt à l'*éthystérone,* préparée par synthèse. En raison de leur propriété d'inhiber l'ovulation, ces hormones sont préconisées comme moyen anticonceptionnel (en association avec des œstrogènes).

Hormones thyroïdiennes

La glande thyroïde sécrète la triodothyronine et la thyroxine, dérivés de la tyrosine.

L'hormone thyroïdienne influe directement sur le métabolisme des protides, des lipides et des glucides, dont elle active le catabolisme. L'absence ou l'insuffisance de sécrétion de thyroxine entraîne un ralentissement du métabolisme et l'apparition d'une asthénie générale, constituant le myxœdème, qui s'accompagne très souvent d'un goitre de compensation.

Chez l'enfant, l'insuffisance thyroïdienne détermine le crétinisme et des troubles du développement somatique. Pour combattre l'insuffisance thyroïdienne, on administre de la poudre de thyroïde, de bœuf ou de porc, ou de la thyroxine synthétique. Il s'agit d'une thérapeutique substitutive au long cours et toujours sous contrôle médical.

Médications antithyroïdiennes

L'hyperfonctionnement thyroïdien est à l'origine d'un syndrome connu sous le nom de *maladie de Basedow,* qui se caractérise par une augmentation exagérée du métabolisme de base, de la pression artérielle, une hyperexcitabilité nerveuse et un tremblement permanent.

Il existe de nombreuses substances qui modèrent l'activité thyroïdienne. Du point de vue pharmacologique, les plus importantes sont les dérivés du *thio-uracile,* que l'on emploie aussi pour normaliser le fonctionnement thyroïdien.

Le premier médicament employé a été la **thio-urée ;** sont venus ensuite le **thio-uracile** et le **méthylthio-uracile ;** aujourd'hui, on emploie surtout le **propylthio-uracile,** l'**iodothio-uracile** et le **mercapto-imidazole.**

Vitamines

Le critère que nous suivrons pour l'étude des vitamines sera le même que celui que nous avons adopté dans les chapitres précédents et qui nous conduira sur la base de leur action physiologique. Les vitamines sont des substances naturelles (que l'on sait préparer aujourd'hui synthétiquement), possédant des structures chimiques et des actions biologiques très diverses, mais ayant en commun la caractéristique d'être indispensables à la vie. L'organisme n'est pas capable de synthétiser les vitamines, qui doivent lui être apportées par l'alimentation. Les doses nécessaires sont faibles. Les surdosages peuvent provoquer des troubles (hypervitaminoses).

On a l'habitude de désigner les vitamines par des lettres alphabétiques et de distinguer les vitamines *liposolubles* (vitamines A, D, E, K, F) et les vitamines *hydrosolubles* (toutes les autres).

Vitamines A_1 et A_2, provitamine A

Les vitamines A_1 et A_2 (cette dernière moins active) se rencontrent en quantité importante dans le foie de certains poissons et dans les légumes verts. Ces derniers renferment en abondance certains pigments *(provitamines)*, surtout le **carotène,** qui sont facilement transformés en vitamine dans l'organisme.

La vitamine A assure l'intégrité et le fonctionnement de tous les tissus épithéliaux. L'avitaminose A entraine la kératinisation de ces tissus, avec comme conséquence des risques d'infection accrus, surtout au niveau de la cornée et de la conjonctive *(xérophtalmie)*. Un symptôme précoce de carence en vitamine A est l'*héméralopie,* baisse excessive de l'acuité visuelle aux faibles éclairements. On combat de telles manifestations en administrant de la vitamine A, soit pure soit sous forme d'huile de foie de morue, où elle est associée à la vitamine D.

Vitamines D

C'est un groupe de substances qui sont généralement introduites dans l'organisme sous forme de provitamines comme l'**ergostérol,** qui, sous l'action des rayons ultraviolets, se transforme en **vitamine D_2** ou *calciférol,* très rare dans la nature, et le **7-déhydrocholestérol,** qui, de même, peut se transformer en **vitamine D_3,** ou *cholécalciférol,* identique à la vitamine naturelle.

Les vitamines D règlent le métabolisme du calcium et du phosphore ; elles sont donc responsables de la formation du phosphate tricalcique, qui constitue la charpente de l'os. Ces actions expliquent le rôle des vitamines D (que l'on administre par voie orale) dans la prévention et le traitement du rachitisme, dans les décalcifications osseuses des adultes et dans la consolidation des fractures. Comme nous l'avons déjà dit, des doses trop élevées de vitamine D peuvent être toxiques.

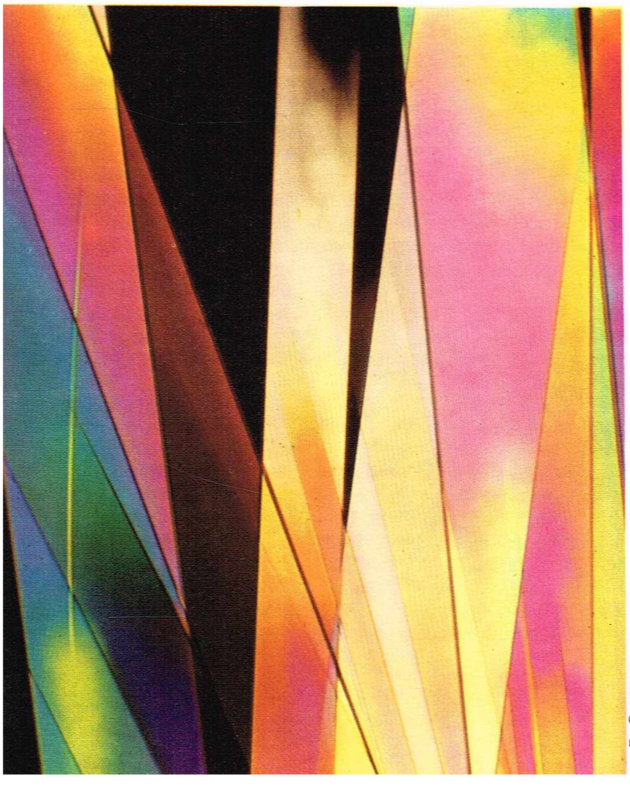

P. Castano

◄ ***Cristaux de*** **vitamine B_1** ***photographiés en lumière polarisée.***

Vitamines K

Elles sont élaborées par la flore intestinale des mammifères. Elles conditionnent la production de la prothrombine par le foie (voir *Anticoagulants*). Leur absence est responsable de l'apparition d'hémorragies.

De nombreuses substances sont actives sous forme de vitamine K. Les plus importantes sont les **vitamines K_1** et **K_2** ; parmi les préparations synthétiques possédant une action vitaminique K, citons la **ménadione.** Tous les composés appartenant à ce groupe possèdent une structure chimique très proche.

On les emploie en thérapeutique sous forme hydrosoluble administrable par voie orale, dans les hypoprothrombinémies consécutives aux défauts d'absorption de vitamine K (absence de bile, certaines maladies intestinales) ou bien pour rétablir le taux normal de vitamine K, abaissé par suite de la destruction de la flore microbienne intestinale (traitements par les sulfamides, les antibiotiques, etc.).

Rassegna Medica

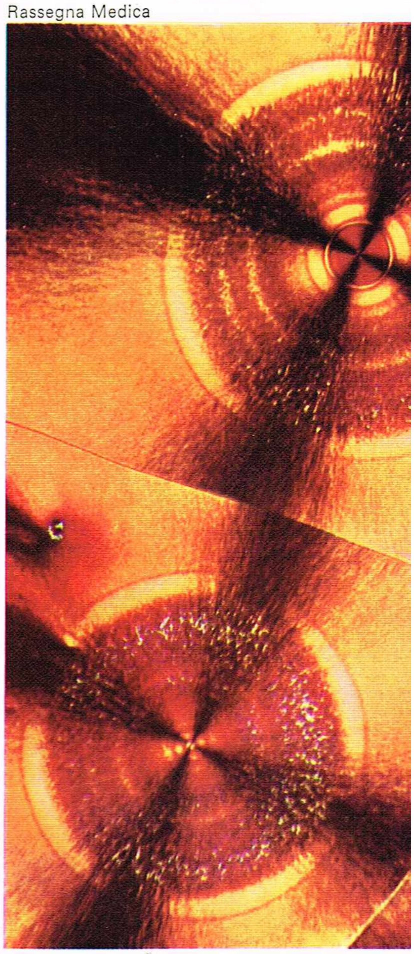

▲ ***Cristaux de*** **vitamine C** ***photographiés en lumière polarisée.***

Vitamines du groupe B

Le **groupe B** comprend différents principes actifs, hydrosolubles, dont quelques-uns sont indispensables à l'organisme humain, tandis que d'autres sont seulement utiles. Les facteurs vitaminiques B abondent dans presque toutes les céréales crues.

La **vitamine B_1** *(thiamine, aneurine),* estérifiée par l'acide phosphorique, intervient dans le métabolisme glucidique au niveau de la décarboxylation des acides alpha-cétoniques.

La carence en cette vitamine provoque des troubles nerveux, des polynévrites, des douleurs musculaires ; aussi est-elle utilisée dans le traitement de ces manifestations et dans les autres formes de carence.

La **vitamine B_2** *(riboflavine) :* son ester phosphorique joue le rôle de transporteur d'hydrogène. Le transport de l'hydrogène est assuré par l'oxydoréduction du système diénique, présent dans les hétérocycles azotés.

La vitamine B_2 est essentielle pour les métabolismes glucidique et protidique ; sa carence entraîne des crampes, des kératites et autres dermatoses, une asthénie musculaire et, dans les formes graves, le béri-béri. Elle est administrée par voie orale, à la dose de 4 à 6 mg par jour.

La **vitamine B_6** est un coenzyme des décarboxylases et des transaminases.

La carence en vitamine B_6 provoque des dermatites, une dégénérescence du foie et d'autres effets de moindre importance. Elle est utilisée en association avec d'autres vitamines du groupe B, sous forme de *chlorhydrate de pyridoxine,* à la dose de 10 mg par jour.

Nous avons déjà parlé de la **vitamine B_{12}** en tant que facteur antianémique (voir *Antianémiques*). Font également partie du groupe B, mais sont moins importants du point de vue thérapeutique, l'**acide pantothénique,** l'**acide folique,** l'**acide para-aminobenzoïque,** la **biotine,** la **choline** et le **méso-inositol.** Au même groupe appartient encore la **vitamine PP** *(nicotinamide)* qui, liée à l'acide phosphorique, au ribose et à l'adénine, fait partie des *coenzymes respiratoires.*

La carence en vitamine PP, due souvent à des régimes pauvres en farine de blé et riches en farines de maïs ou de seigle, provoque la pellagre, affection grave qui était autrefois assez répandue.

Vitamine C (acide L-ascorbique)

La **vitamine C** est très largement présente dans la nature. Seuls quelques mammifères (singe, cobaye, homme) sont incapables d'en faire la synthèse. Les quantités de vitamine C dont l'homme a besoin sont sensiblement supérieures à celles des autres vitamines : 50 à 100 mg par jour.

La vitamine C, qui joue un rôle de transporteur d'hydrogène, est indispensable pour un très grand nombre de processus biochimiques. Sa carence provoque le scorbut. On recourt à la vitamine C dans un très grand nombre d'autres indications, mais son efficacité est douteuse : les doses habituelles dépassent 1 g par jour.

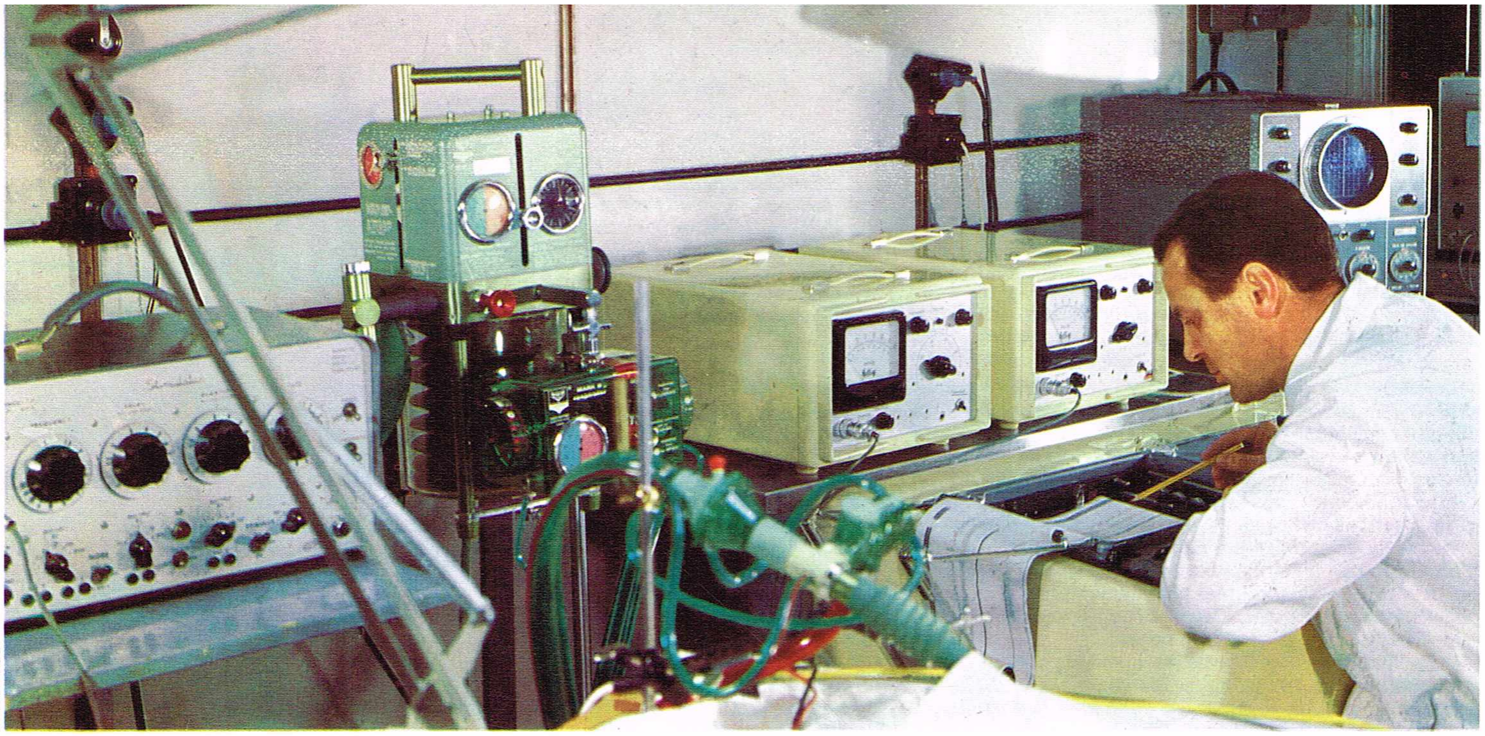

Carlo Erba

▲ *Appareil destiné à l'étude de l'activité des médicaments sur la circulation coronarienne et sur l'activité cardiaque.*

Médicaments du cœur

Nous groupons, dans ce chapitre, différentes familles de médicaments possédant des effets très divers, mais ayant en commun la particularité d'agir principalement sur le cœur.

La propriété essentielle du muscle cardiaque réside dans sa capacité de se contracter spontanément, c'est-à-dire sans l'intervention du système nerveux. Ces mouvements rythmiques sont commandés par le système nerveux intrinsèque du cœur, le *tissu nodal.* C'est du nœud sinusal que part l'« impulsion » qui se propage à tout le muscle cardiaque. Mais le fonctionnement du cœur est également influencé par une double innervation parasympathique et sympathique; la première ralentit les mouvements cardiaques, la seconde les accélère.

Nous donnons ci-après la définition de quelques termes qui reviendront souvent dans ce chapitre et qu'il est important de bien comprendre. Le *bathmotropisme* définit la capacité du cœur à engendrer des impulsions et à répondre à des stimulations. *L'inotropisme* est la force de contraction. Le *chronotropisme* est la fréquence des contractions. Le *dromotropisme* est la conductibilité des impulsions : un dromotropisme bas correspond à un allongement de la « période réfractaire » des faisceaux de conduction.

Les médicaments à visée cardiaque se divisent en *cardiotoniques* (ou *digitaliques,* du nom du médicament le plus employé) et *cardiomodérateurs.*

▼ *Tableau des principaux médicaments* **cardiotoniques** *ou* **digitaliques.**

MÉDICAMENTS CARDIOTONIQUES

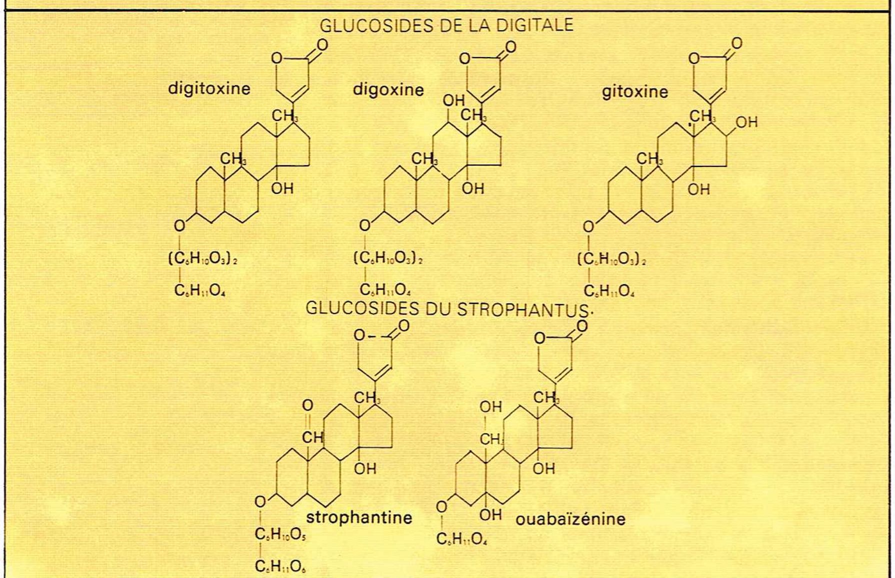

I.G.D.A.

Cardiotoniques ou digitaliques

Cette très importante famille de médicaments comprend principalement la digitaline, le strophantus et la scille.

La plus importante de ces substances est la **digitaline,** médicament de tous les dysfonctionnements cardiaques qui se caractérisent par une diminution de la force de contraction du myocarde, dont la conséquence est une oxygénation insuffisante de l'organisme. L'action de la digitaline est liée à ses remarquables propriétés : très net inotropisme positif et importante action chronotrope négative. Donc, la digitaline, en augmentant la force de contraction et en diminuant simultanément la fréquence des battements cardiaques, améliore la chasse cardiaque. Elle exerce aussi une action dromotrope négative (allongement de la conductibilité), qui est exploitée thérapeutiquement dans les arythmies auriculaires. Enfin, la digitaline possède une action bathmotrope positive (augmentation de l'excitabilité du ventricule), laquelle, lorsqu'elle atteint des valeurs trop élevées, entraîne la fibrillation ventriculaire et la mort.

Les digitaliques sont doués d'une toxicité élevée : quelques centigrammes à peine sont suffisants pour provoquer la mort; en outre, ils sont métabolisés très lentement et demeurent actifs pendant plusieurs jours. Cela entraîne des risques d'accumulation si les prises ne sont pas suffisamment espacées : on note alors une bradycardie importante (jusqu'à 40 pulsations par minute), suivie d'arythmie, de tachycardie arythmique s'accompagnant de nombreuses extrasystoles et enfin de la fibrillation ventriculaire et de la mort. Des nausées et des vomissements accompagnent toujours l'intoxication par les digitaliques (poudre, infusion, teinture). Leurs effets s'accompagnent normalement d'une augmentation de la diurèse.

La drogue est extraite des feuilles séchées de *Digitalis purpurea* ou de *Digitalis lanata;* les principes actifs sont des hétérosides dont la fraction non glucidique, appelée *aglycone,* présente une structure stéroïdique.

La **digoxine** est administrée sous forme de préparation galénique ou sous forme de glucoside cristallisé; on utilise aussi bien la voie parentérale que la voie orale, puisqu'elle est rapidement assimilée. Les doses habituelles sont au maximum de 1 mg de glucoside réparti dans les vingt-quatre heures; dans les traitements d'entretien, on administre 0,1-0,2 mg. Tout traitement doit être immédiatement interrompu dès que les premiers symptômes d'intoxication apparaissent.

Le **strophantus** est une drogue constituée par les graines de certaines espèces de plantes africaines; du point de vue chimique, les principes actifs sont proches de ceux de la digitale. Ils possèdent les mêmes effets pharmacologiques, mais sont doués d'une action beaucoup plus rapide (quelques minutes seulement après l'administration) et moins durable (trois jours). Rapidement éliminés, ils n'entraînent pas de phénomène d'accumulation, ce qui constitue un avantage appréciable. Dans le traitement d'attaque, on emploie les glucosides cristallisés (0,5 mg, administré par voie intraveineuse).

Cardiomodérateurs

Ce sont des médicaments capables de s'opposer aux phénomènes de fibrillation (surtout de fibrillation auriculaire) ou de normaliser le rythme cardiaque perturbé. La fibrillation est un état pathologique caractérisé par le fait que les fibres cardiaques se contractent séparément au lieu de se contracter simultanément. Les substances utilisées possèdent souvent des effets à la fois antifibrillants et antiarythmisants. Le mécanisme d'action des substances appartenant à cette famille est obscur.

Nous décrirons ici uniquement les sédatifs cardiaques les plus importants.

La **quinidine** possède une formule chimique identique à celle de la *quinine,* dont elle est l'isomère dextrogyre; mais ses applications thérapeutiques sont tout à fait différentes. La quinidine corrige la fibrillation auriculaire, la tachycardie auriculaire, les extrasystoles et les autres arythmies d'origines diverses grâce à son action bathmotrope négative, inotrope négative et dromotrope négative. Elle peut donner lieu à des phénomènes d'accumulation et provoquer des intolérances. On l'administre généralement par voie orale, sous forme de sulfate, à des doses de 0,2-0,3 g, espacées de quelques heures.

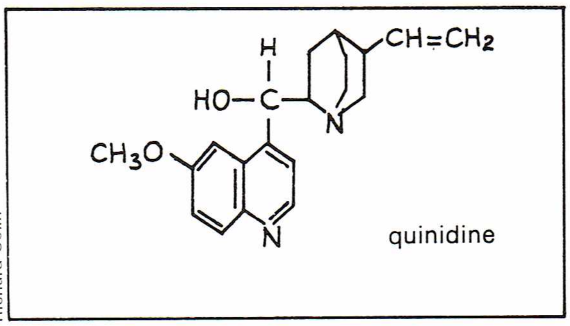

◄ ***Formule de la* quinidine, *sédatif cardiaque.***

La **procaïnamide** est un dérivé de la *procaïne,* anesthésique local dont les propriétés cardiomodératrices étaient connues depuis longtemps, mais qui ne pouvait être employée à cause de son métabolisme trop rapide; en remplaçant un groupement ester par un groupement amide, l'hydrolyse est fortement ralentie sans que l'action pharmacologique sur le cœur soit modifiée.

Son action pharmacologique est tout à fait semblable à celle de la quinidine; on l'administre par voie orale à la dose de 0,25 g deux à quatre fois par jour.

Spasmolytiques et hypotenseurs

Les médicaments que nous groupons sous ce titre, bien qu'ils soient employés dans des indications fort différentes, possèdent en commun la propriété de relâcher la musculature lisse. Cet effet appliqué aux vaisseaux sanguins provoque une hypotension; appliqué à l'ensemble de la musculature lisse, il explique les propriétés spasmolytiques. Il est évident que, selon qu'un organe voit son fonctionnement stimulé par le vague ou par le sympathique, les médicaments parasympatholytiques dans le premier cas, ou adrénolytiques dans le second, auront une action spasmolytique; en outre, les ganglioplégiques sont souvent utilisés comme hypotenseurs.

Spasmolytiques

Nous traiterons ici uniquement des médicaments spasmolytiques utilisés surtout pour combattre les spasmes artériels, notamment au niveau des vaisseaux coronariens.

La **papavérine** et les autres alcaloïdes de même nature, dérivés de l'opium ou préparés par synthèse, exercent une puissante action vasodilatatrice sur les artères coronaires, mais aussi sur le système artériel en général, ce qui entraîne une hypotension secondaire. La papavérine connaît un très large champ d'applications dans tous les cas de spasme de la musculature lisse, coliques abdominales, coliques spasmodiques et dans le traitement de fond de l'angine de poitrine. Elle est également utile pour combattre les migraines liées à des spasmes des artères cérébrales. Elle ne provoque aucune accoutumance.

La **khelline** est le principe actif contenu dans les fruits de *Ammi visnaga ;* elle possède une action vasodilatatrice remarquable, notamment au niveau des artères coronaires. Aussi l'emploie-t-on dans le traitement de l'angine de poitrine.

Les *nitrites,* beaucoup de *nitrates organiques* et d'*esters nitreux organiques* possèdent un effet relaxant sur l'ensemble de la musculature lisse, mais surtout sur la musculature artérielle. L'effet thérapeutique le plus important se manifeste au niveau des coronaires : sous l'action des nitrites, des nitrates organiques et des esters de l'acide nitreux, le débit sanguin coronarien augmente notablement, tandis que la pression artérielle générale diminue.

Les médicaments les plus employés sont le **nitrite d'amyle** ($CH_3—(CH_2)_3—CH_2ONO$), la **nitroglycérine** ($CH_2ONO_2—CHONO_2—CH_2ONO_2$), la **Métamine** (*triéthanolaminetrinitrate-phosphate),*
($N(CH_2—CH_2—ONO_2)_3H_3PO_4$).
Les deux premiers sont doués d'une action rapide (moins de 60'') et courte (5 mn) ; le troisième a une action lente (5-10 mn) et plus durable (plusieurs heures).

Hypotenseurs et anti-hypertenseurs

Nous avons vu que les médicaments de type myolytique (c'est-à-dire les spasmolytiques doués d'une action directe sur les muscles lisses) possèdent un effet hypotenseur; cependant, pour pouvoir être utilisés dans le traitement de l'hypertension artérielle, ils doivent posséder une action de longue durée, être dépourvus de toxicité, ne pas donner lieu à des phénomènes d'accoutumance ni d'accumulation. Les adrénolytiques, les alcaloïdes de *Rauwolfia serpentina* (dont le principe actif est la **réserpine**), les ganglioplégiques, médicaments que nous avons déjà eu l'occasion de citer, sont utilisés dans le traitement de l'hypertension artérielle. Pour compléter cette liste, nous parlerons ici des alcaloïdes du vératre, de l'hydralazine de l'α-méthyldopa et de la clonidine.

L'**hydralazine** et la **dihydralazine** diminuent partiellement le tonus des centres cérébraux qui règlent la pression artérielle, mais agissent aussi partiellement de manière directe sur les fibres musculaires atérielles. On les utilise par voie orale, à la dose de 50 mg par jour, dans le traitement de l'hypertension essentielle; elles possèdent une action relativement lente et prolongée. Dans les traitements au long cours, elles peuvent donner lieu à des phénomènes toxiques.

Les graines et les racines de plusieurs plantes appartenant au genre *Veratrum* (famille des Liliacées) renferment différents alcaloïdes stéroïdiques; quelques-uns d'entre eux exercent une action hypotensive très nette ainsi qu'une action typique, dite action « vératrinique » sur les cellules musculaires striées. Un des effets secondaires indésirables de ces produits est de provoquer souvent des vomissements.

La **guanéthidine** et l'**α-méthyldopa** agissent sur le système nerveux sympathique. Selon des mécanismes variables, elles provoquent une diminution de la production de catécholamines au niveau des terminaisons nerveuses sympathiques, et entraînent par là même une réduction du tonus vasculaire et une chute de la pression artérielle. La guanéthidine est administrée à la dose de 10 mg par jour; elle peut provoquer une hypotension orthostatique, tandis que l'α-méthyldopa est administrée à la dose de 250 mg deux fois par jour.

La **clonidine** est un antihypertenseur puissant, et de maniement assez délicat. Son mécanisme d'action est très mal élucidé et il est prescrit à la dose de 150 à 450 microgrammes par jour dans les cas sévères.

Parmi les médications de l'hypertension artérielle, rappelons les *thiazidiques,* que nous avons déjà cités (voir *Diurétiques*) ; l'action hypotensive de ces produits ne semble pas être une conséquence de leur action diurétique, mais le résultat d'une action directe sur les vaisseaux. Les thiazidiques (et surtout l'**hydrochlorothiazide**) sont aujourd'hui largement utilisés dans le traitement d'attaque d'hypertensions relativement modérées, mais sont surtout administrés en association avec les autres hypotenseurs décrits ci-dessus.

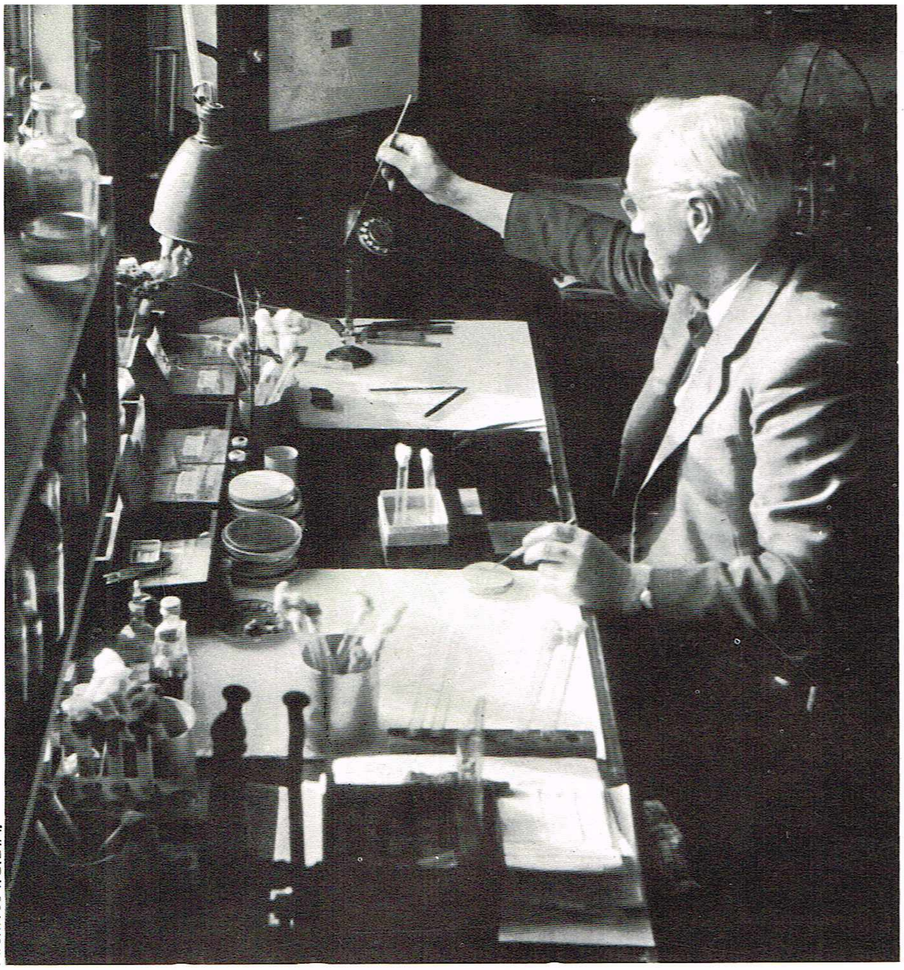

Archives I.G.D.A.

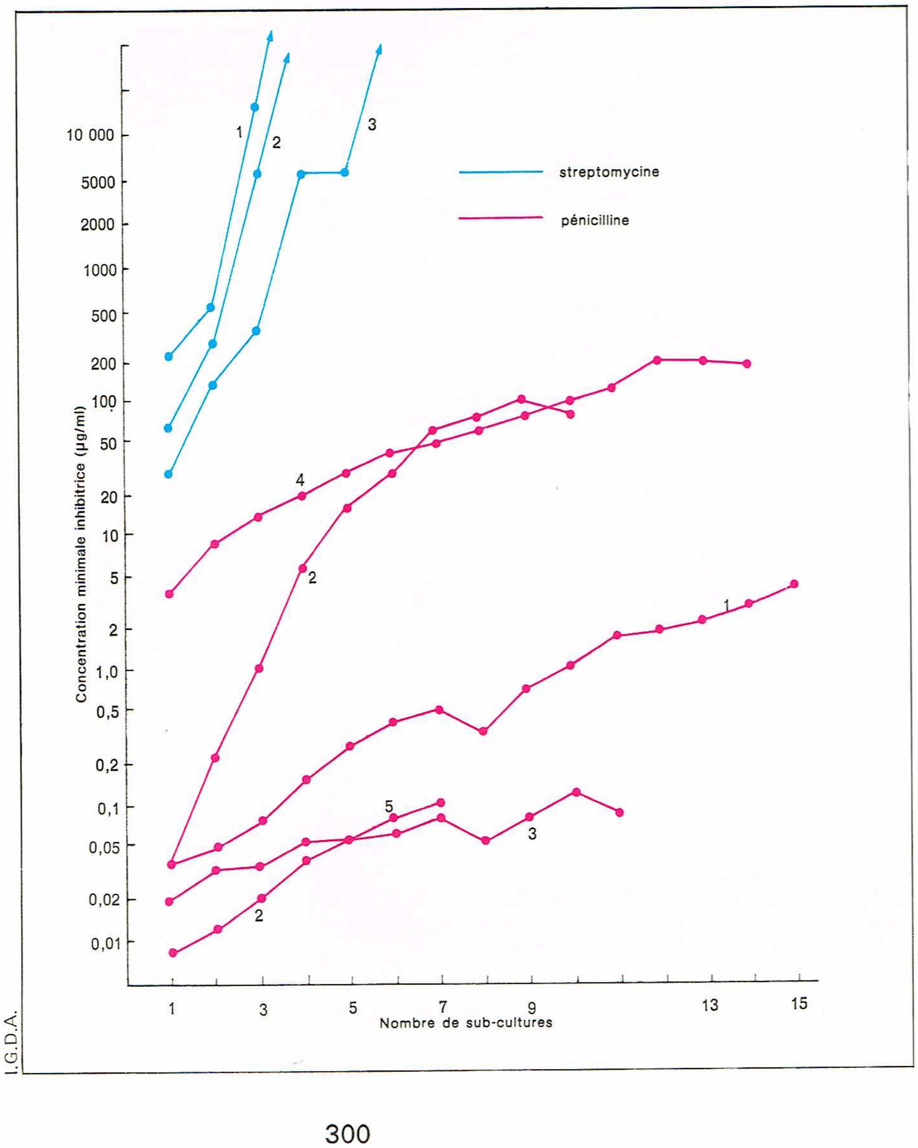

I.G.D.A.

Chimiothérapie

Par chimiothérapie, on entend la « destruction sélective, au moyen d'agents chimiques, d'organismes pathogènes à l'intérieur du corps qui les abrite ».

La notion de sélectivité exclut de cette définition la catégorie des désinfectants; en effet, les désinfectants exercent une action destructrice tant sur les cellules pathogènes que sur celles de l'hôte, et cela dans une égale mesure. En fait, tous les agents chimiothérapiques manifestent eux aussi une certaine toxicité à l'égard de certains types de cellules de l'hôte, mais dans une mesure bien moindre qu'à l'égard des agents pathogènes. Nous reviendrons bientôt sur cette notion fondamentale.

Par contre, cette définition englobe les antiparasitaires, auxquels nous avons consacré un paragraphe spécial, puisque nous réservons le terme d' « agents chimiothérapiques » aux médicaments actifs contre les « infections » provoquées par des parasites unicellulaires ou de dimension encore plus réduite (rickettsies et virus). Le domaine d'action des agents chimiothérapiques est donc aussi vaste que celui des maladies infectieuses. Ces médicaments anti-infectieux seront regroupés en fonction de leur emploi thérapeutique prédominant (par exemple, antipaludéens, antituberculeux, etc.) ou bien (à cause du large domaine d'action propre à quelques-uns d'entre eux) en fonction de leur structure chimique (par exemple, sulfamides et produits arsenicaux) ou de leur origine (par exemple, antibiotiques). Mais avant de décrire les différentes classes de médicaments, nous allons donner un bref aperçu historique de la chimiothérapie.

On ne connaissait au début du siècle que trois véritables agents chimiothérapiques, le mercure, pour le traitement de la syphilis, la poudre d'écorce de quinquina, pour le traitement du paludisme, et l'ipecacuanha, pour la dysenterie amibienne. Cela pouvait paraître surprenant si l'on tient compte des très grands progrès réalisés par la médecine dans les dernières années du XIX[e] siècle; en réalité, de très grands savants, comme Pasteur, avaient orienté la recherche vers la prévention et le traitement des maladies infectieuses au moyen de vaccins et de sérums, et ce n'est que lorsque cette page fut tournée que l'attention commença à se tourner vers la « chimie thérapeutique ».

Paul Ehrlich (1854-1915) nota que certains colorants se fixent davantage sur les bactéries que sur les cellules de l'hôte; il eut alors l'idée de synthétiser un colorant susceptible de se fixer essentiellement sur les cellules pathogènes. Il était erroné de croire qu'il fallait un colorant, mais cela conduisit à la découverte, en 1909, du 3′-3′-*diamino*-4.4′-*dioxyarsénobenzène* **(Salvarsan, Arsfenamine)**, actif contre *Treponema pallidum*, agent pathogène de la syphilis chez l'homme. Ce médicament détrônait le mercure, dont l'indice thérapeutique était trop bas.

Pour chaque agent chimiothérapique, on donne un indice thérapeutique qui en définit l'efficacité : c'est le rapport de la dose léthale moyenne à la dose thérapeutique efficace moyenne, exprimées toutes les deux en mg/kg de poids corporel; $\frac{DL_{50}}{DT_{50}} = IT$ (ou IC, c'est-à-dire indice chimiothérapique). Plus la dose léthale est élevée et la dose thérapeutique faible, plus la sécurité d'emploi du médicament est grande.

On observe souvent le phénomène de la chimiorésistance, qui constitue l'une des limitations fondamentales à l'emploi des agents chimiothérapiques.

Après avoir réalisé la synthèse du Salvarsan, Ehrlich en améliora les qualités thérapeutiques et en réduisit la toxicité en synthétisant le **Néo-salvarsan** (1912).

En 1920 fut commercialisée la **Germanine** (Bayer 205), active contre la maladie du sommeil; en 1926 et 1930, la **plasmoquine** et l'**Atébrine,** antipaludéens qui, avec la quinine, ont grandement contribué à la lutte contre le paludisme.

Les sulfamides font leur apparition en 1934; le premier a été le **Prontosil,** suivi bientôt par beaucoup d'autres. La préparation du sulfamide ne put bénéficier d'un brevet, ce qui contribua à la très rapide diffusion des médicaments appartenant à cette famille (obtenus en remplaçant un ou deux hydrogènes du groupement SO_2—NH_2 par des substituants tels que la pyridine ou la guanidine, etc.).

Les sulfamides constituent encore de nos jours une des familles chimiothérapiques les plus importantes. Ils sont actifs dans un très grand nombre d'infections et sont doués d'une faible toxicité. Les découvertes de la **sulfapyridine** (1938), du **sulfathiazol** (1940) et de la **sulfadiazine** (1941) constituent autant d'étapes fondamentales dans l'évolution de la chimiothérapie.

Enfin, ce fut l'avènement des antibiotiques. Les premières observations concernant la **pénicilline** remontent à 1928 (Fleming), mais il faudra attendre l'année 1941 pour que ce corps connaisse des applications thérapeutiques; à la pénicilline s'ajoutèrent en 1947-1948 la **streptomycine**, l'**auréomycine**, le **chloramphénicol**. Les avantages de cette nouvelle classe de médicaments sont : une activité très élevée, un spectre d'action large et, en général, une toxicité faible. Leur apparition éclipsa les sulfamides; cependant, on devrait tendre aujourd'hui à les employer avec une plus grande réserve, en raison surtout des phénomènes de résistance qu'ils engendrent.

Au cours des dernières années, la recherche scientifique a permis de produire de nouveaux sulfamides « à dosage faible », un grand nombre d'antibiotiques nouveaux, ainsi que les nitrofurannes, très actifs dans le traitement des infections des voies urinaires.

Des progrès importants ont été également accomplis dans les hypothèses sur le mécanisme d'action des agents chimiothérapiques, hypothèses dont certaines ont déjà reçu une confirmation partielle.

La plupart des agents chimiothérapiques agissent en bloquant le métabolisme des germes pathogènes. Ils interviendraient en arrêtant la chaîne enzymatique soit par blocage de certains groupement actifs ou de certains coenzymes, soit par substitution compétitive.

Arrêtons-nous un moment sur le phénomène de la chimiorésistance, qui présente un intérêt théorique et pratique fondamental. Par chimiorésistance on entend le pouvoir caractéristique d'un grand nombre de germes pathogènes de subir des modifications les rendant capables de résister aux médicaments; il s'ensuit que des doses initialement léthales pour un germe donné sont ensuite parfaitement tolérées par celui-ci. Un tel phénomène s'observe tant *in vitro* qu'*in vivo*. On suppose que deux mécanismes interviennent simultanément. D'une part, l'agent chimiothérapique agit sur une « population statistique » : or, à l'intérieur de cette population certains individus subissent des mutations qui les rendent insensibles au médicament; ces individus, devenus résistants, donnent naissance à des souches insensibles dont le développement n'est plus entravé par les souches sensibles, car celles-ci ont été détruites. On voit ainsi se développer une population bactérienne semblable à la première, mais insensible à l'agent chimiothérapique. D'autre part, il est pratiquement démontré que les germes « apprennent » à métaboliser le médicament de manière à éviter son action toxique; ce processus présente de nombreuses analogies avec celui de l'accoutumance, dont nous avons déjà parlé. Dans certains cas, à la suite d'administrations répétées, il s'instaure une véritable « habitude » du germe à l'égard du médicament, à tel point que l'on peut observer de véritables phénomènes d'abstinence de la part des cultures bactériennes lorsque l'administration du médicament est momentanément suspendue. On rencontre même des antibiotiques qui sont des facteurs de croissance pour certaines souches bactériennes. Pour éviter l'apparition des phénomènes de résistance, on recourt généralement à l'emploi de doses élevées, sûrement toxiques pour les germes, et à l'association de deux ou plusieurs agents chimiothérapiques, afin de réduire au minimum la population résistante.

Composés arsenicaux

L'importance de ces substances est plus historique qu'actuelle. Les composés arsenicaux possèdent un spectre d'action assez limité, puisqu'ils ne sont efficaces que contre les tréponèmes (connus plus généralement sous le nom de spirochètes), les trypanosomes et certains types d'amibes. On peut donc les définir comme des antiprotozoaires possédant aussi une action efficace à l'égard des spirochètes, que l'on peut situer à un niveau intermédiaire entre les bactéries et les protozoaires. Ces produits ont contre eux une toxicité élevée; bien que nettement plus faible par rapport aux produits initiaux, celle-ci demeure leur défaut principal.

Le mécanisme d'activité réside probablement dans la réaction entre les groupes thiols (—SH) de certaines protéines enzymatiques du protoplasme du protozoaire avec l'arsenic trivalent. Dans les traitements prolongés, on observe parfois des accidents cutanés, hépatiques, rénaux, cérébraux; ces composés possèdent une toxicité typique vis-à-vis du nerf optique, pouvant entraîner la cécité.

On emploie encore la **triparsamide** ou *p-arséniate sodique de phénylglycylamide*, très active dans la maladie du sommeil *(Trypanosoma gambiense)* et dans certains cas de syphilis nerveuse; la dose est de 1 à 3 g une fois par semaine en traitement prolongé. La **carbazone** possède une action amœbicide intense aussi bien vis-à-vis des amibes libres que des amibes enkystées dans l'intestin, mais non contre les amibes installées dans les organes.

Nous ne ferons que citer les **composés de l'antimoine** et **du bismuth** qui ne sont utilisés aujourd'hui que dans certains cas très isolés.

Autres médicaments actifs contre les protistes

Le fait que les trypanosomes consomment une grande quantité de glucose au cours de leur métabolisme a conduit à effectuer des recherches sur des substances hypoglycémiantes. Ces recherches ont abouti à la découverte de certaines *diamidines aromatiques* douées de propriétés curatives dans les leishmanioses, dans les infections à blastomycètes et à trypanosomes (maladie du sommeil), bien que leur mécanisme d'action ne soit pas celui qu'on avait prévu. On les administre par voie gastro-intestinale ou parentérale.

On citera la **Stilbamidine**, la **propamidine** et la **pentamidine**; les deux dernières, surtout la pentamidine, possèdent l'avantage d'être plus stables et moins toxiques.

Antipaludéens

Le paludisme atteint deux cents à trois cents millions d'individus dans le monde; la mortalité est d'environ 1 %, ce qui signifie qu'au moins deux millions de personnes meurent chaque année des suites directes ou indirectes de cette maladie. Pour combattre ce fléau, on a entrepris de grands travaux d'assainissement des marécages; d'importants moyens ont été également mis en œuvre pour la désinsectisation des zones habitées par *Anopheles maculipennis*, vecteur du plasmode du paludisme; enfin, on a mis au point un grand nombre de médicaments antipaludiques.

On connaît quatre espèces de plasmodes : *Plasmodium vivax* et *P. ovale*, responsables de la fièvre tierce, qui se caractérise par des accès de fièvre tous les deux jours; *P. malariae*, responsable de la fièvre quarte, caractérisée par des accès fébriles tous les trois jours; *P. falciparum*, responsable de la forme maligne ou tropicale, qui est la plus grave.

Le cycle vital complet du parasite pathogène s'accomplit à travers l'homme et le moustique. Chez l'homme, à la suite de l'inoculation par la piqûre d'un moustique femelle, il se produit un cycle de développement asexué dans les tissus, puis un second cycle, toujours asexué, dans le sang, où les parasites se développent à l'intérieur des globules rouges, dont ils provoquent la lyse : c'est à ce moment que se produit la crise fébrile puis le cycle recommence. Au cours du développement dans les globules rouges, des gamétocytes, sexués, naissent (microgamétocytes mâles et macrogamétocytes femelles), mais ceux-ci ne se développent pas à l'intérieur de l'organisme humain. Lorsque l'homme est piqué par un anophèle, les gamétocytes passent dans l'organisme du moustique, où ils se développent selon un cycle sexué, qui aboutit à la formation de sporozoïtes, lesquels se logent dans les glandes salivaires du moustique. Ils sont à nouveau inoculés à l'homme, et le cycle recommence.

L'action des antipaludéens est généralement strictement spécifique et s'exerce en un point précis du cycle asexué. Il est relativement facile d'obtenir des médicaments d'une efficacité absolue contre *Plasmodium falciparum*, puisque le cycle de développement de celui-ci ne comporte qu'une courte phase extraérythrocytaire (au cours de laquelle le parasite est hors d'atteinte du médicament), tandis que les autres formes possèdent un véritable cycle extraérythrocytaire; de ce fait, le malade abrite en permanence des parasites (mérozoïtes) fixés dans les tissus, ce qui explique les rechutes fréquentes.

◀ *Page ci-contre, en haut,* **Alexander Fleming** *dans son laboratoire; c'est à lui que l'on doit la découverte de la* **pénicilline**, *le premier des antibiotiques.*

◀ *Page ci-contre, en bas, diagramme illustrant la chimiorésistance de certains germes à la pénicilline et à la streptomycine* (in vitro) : *1, streptocoque groupe B; 2, staphylocoque doré; 3, streptocoque groupe A; 4, entérocoque; 5, pneumocoque type 3.*

Le médicament le plus ancien (il a été importé des « Indes », c'est-à-dire d'Amérique du Sud, vers 1600) est le **quinquina,** constitué par la poudre de l'écorce de différents arbres du genre *Cinchona*. Le principe actif est un alcaloïde, la **quinine,** que l'on trouve également dans l'écorce de ces plantes en même temps que d'autres principes ne possédant pratiquement pas d'action thérapeutique. Cet alcaloïde est un poison protoplasmique possédant un pouvoir schizonticide marqué (il tue les parasites dans la phase asexuée qui se déroule dans le sang).

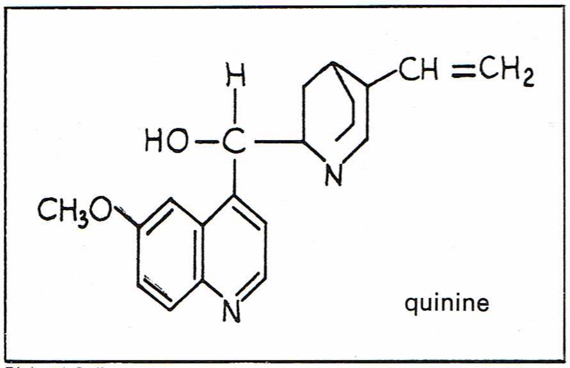

Richard Colin

▶ *Formule de la* **quinine,** *principe actif du quinquina, qui est l'antipaludéen le plus ancien. La quinine est un stéréo-isomère de la quinidine (voir page 299).*

On l'administre par voie orale, à la dose de 0,5-1 g par jour, non seulement à titre curatif, mais aussi préventif, afin d'en réaliser la concentration maximale dans le sang au moment où les parasites, sortis des hématies, se trouvent dans la phase amœboïde et sont plus vulnérables. Les formes les plus employées sont essentiellement le sulfate et le chlorhydrate de quinine.

Quelques-uns parmi les plus importants antipaludéens de synthèse conservent dans leur molécule le squelette fondamental de la quinine, c'est-à-dire la *structure quinoléinique*.

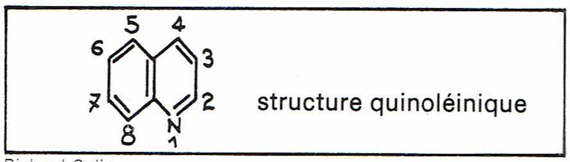

Richard Colin

▶ *La* **structure quinoléinique,** *squelette fondamental de la quinine.*

Telles sont les amino-4-quinoléines, dont la plus importante est la **chloroquine,** et les amino-8-quinoléines, dont la **primaquine** offre une importance comparable à la substance précédente.

La primaquine est très active contre les formes asexuées mais extraérythrocytaires ; elle est gaméticide dans toutes les formes de paludisme et constitue le médicament le plus employé dans le traitement de la fièvre tierce bénigne ; la cure (à la dose de 10-20 mg par jour, sous forme de phosphate) doit être poursuivie pendant deux semaines. Elle est souvent associée à la chloroquine, en raison des remarquables propriétés schizonticides de ce corps ; la dose de chloroquine (sous forme de biphosphate) est d'environ 2,5 g répartis sur trois jours et administrés par voie orale. La chloroquine et la primaquine ont une toxicité faible, tandis que leur activité, surtout en ce qui concerne la chloroquine, est très élevée. En associant, dans l'esprit, une molécule de primaquine et une molécule de chloroquine, on obtient une molécule nouvelle, la **quinacrine,** préparée en 1932 et encore utilisée. Ce corps possède une action schizonticide analogue à celle de la quinine, autrement dit, il provoque la sédation des accès fébriles mais ne guérit pas la maladie. Faiblement toxique, la quinacrine est administrée à la dose de 200 mg par jour, par voie orale, à titre curatif et préventif des accès fébriles.

Un autre antipaludéen important est la **Paludrine,** que sa formule chimique situe parmi les dérivés de la guanidine. La Paludrine possède un pouvoir schizonticide intense ; elle est active aussi bien sur les formes intra- qu'extraérythrocytaires et aussi contre les formes sexuées qui ne sont pas contaminantes pour le moustique. Très peu toxique, on l'administre, par voie orale, à une dose voisine de 100 mg par jour à titre prophylactique, et de 300 mg par jour dans le traitement de la crise aiguë.

Amœbicides

On connaît plusieurs types de dysenteries, mais la forme la plus grave est sans doute l'amibiase intestinale ou dysenterie amibienne, provoquée par un rhizopode, *Entamoeba histolytica,* qui se présente sous deux aspects : trophozoïte et kyste. L'infection, à point de départ intestinal, essaime ensuite dans différents organes ; elle peut ne donner lieu à aucun trouble, mais aboutit souvent à la forme dysentérique. Pour le traitement des seules formes intestinales, on utilise la **carbazone** (déjà citée) et certains antibiotiques **(tétracyclines** et **bacitracine),** dont nous traiterons plus loin, tandis que, pour l'éradication des parasites localisés dans les organes internes, on administre la chloroquine, comme adjuvant, et le principe actif de la racine d'ipecacuanha, l'**émétine,** qui possède une action amœbicide spécifique. On l'administre sous forme de chlorhydrate, par voie sous-cutanée, à la dose d'environ 10 mg par kg de poids, dose qu'il ne faut pas dépasser en raison de la toxicité élevée de cette substance.

Sulfamides

Nous allons passer d'une famille « thérapeutique » à une famille « chimique » dont les composants, qui présentent de très grandes analogies chimiques, ont un domaine d'action très vaste. Du point de vue chimique, les sulfamides sont tous des dérivés du *sulfanilamide,* qui est l'amide de l'acide sulfanilique, c'est-à-dire de l'acide paraaminobenzènesulfonique.

Pour le chimiste, il est très intéressant de noter que seules les substances dont les groupements amine et sulfonamide sont en position *para* possèdent une activité, tandis que les composés en *méta* et *ortho* sont totalement inactifs.

Un des hydrogène de la fonction amide est souvent substitué par un ensemble hétérocyclique, la fonction amine demeurant libre.

Le spectre d'action des sulfamides antibactériens est très vaste. Les sulfamides sont actifs sur les cocci- et diplocoques Gram positifs, les diplocoques et les bacilles Gram négatifs, certains gros virus ; leur action est plus marquée contre le streptocoque hémolytique, de nombreuses souches de staphylocoques, le pneumocoque, le méningocoque, le gonocoque et bien d'autres, comme *Bacillus anthracis, Klebsiella granulomatis, Neisseria gonorrhoeae, Pasteurella paestis* et *Vibrio cholerae ;* en revanche, ils sont peu actifs vis-à-vis des *Clostridium,* des entérocoques et autres. Enfin, sont insensibles à leur action les tréponèmes, les rickettsies, les protozoaires et les virus.

En conséquence, les sulfamides sont largement employés dans le traitement de la dysenterie bacillaire (provoquée par *Shigella dysenteriae*), dans la méningite à méningocoque, dans de nombreuses affections oculaires, par exemple le trachome, dans le chancre mou *(Haemophilus ducreyi)* et dans diverses affections des voies urinaires *(Proteus vulgaris, Aerobacter aerogenes).*

Les sulfamides se révèlent également très utiles associés avec des antibiotiques de différents types, par exemple dans le traitement de nombreuses affections à staphylocoques, d'un grand nombre de formes de méningites et pneumonies à pneumocoque et à *Klebsiella pneumoniae,* des otites et des mastoïdites, de l'érysipèle, des péritonites, des septicémies, de différentes formes d'affections intestinales (par exemple, celles dues à *Escherichia coli*), des actinomycoses *(Actinomyces bovis),* de la peste bubonique *(Yersinia pestis),* la fièvre de Malte (différents types de *Brucellae*), du choléra *(Vibrio cholerae)* et du chancre syphilitique.

A une faible concentration, les sulfamides exercent une action bactériostatique, tandis qu'à une concentration élevée, ils exercent aussi une action bactéricide, qui dépend toutefois de l'importance de la population bactérienne. L'effet bactéricide s'exerce surtout lors de la phase de prolifération ; aux fins thérapeutiques, c'est la concentration sanguine en sulfamides qui est importante.

Leur activité thérapeutique se caractérise par des indices thérapeutiques très élevés (ce qui correspond à une toxicité très faible) ; on note cependant avec une certaine fréquence des manifestations d'intolérance sans gravité, telles que nausées, vomissements, céphalées, etc. ; beaucoup plus grave est le phénomène de la cristallurie qui peut parfois survenir et qui est la précipitation de

cristaux de sulfamides, peu solubles, dans les tubules rénaux, entraînant un blocage rénal pouvant aboutir à la mort; l'alcalinisation des urines augmente la solubilité des sulfamides. Autre inconvénient : ils engendrent facilement la chimiorésistance des germes, résistance parfois croisée entre différents constituants du groupe, à tel point que certaines maladies (comme la gonococcie) ne sont plus traitées par les sulfamides.

En traitement d'attaque, on utilise des doses élevées (comme pour les antibiotiques) afin d'obtenir des résultats sûrs. La voie normale d'administration est la voie orale ; le temps d'assimilation et le pourcentage de produit assimilé dépendent du type de substance. Certains médicaments ne sont pratiquement pas absorbés et sont, de ce fait, utilisés uniquement pour le traitement d'affections intestinales **(sulfaguanidine) ;** les autres passent dans la circulation sanguine avec une vitesse variable : ainsi, on note une concentration maximale dans le sang deux heures après l'administration pour la sulfadiméthyne, six heures après pour la sulfadiazine. Dans le sang, une fraction du médicament se fixe de manière instable à certaines protéines, tandis qu'une autre fraction est acétylée sur le radical amine dans le foie. L'élimination s'effectue par voie urinaire, en un temps qui varie de quelques heures à quelques jours. Certains produits qui se caractérisent par une élimination plus rapide, comme le **sulfa-isooxazol,** sont employés comme désinfectants des voies urinaires. La dose oscille autour de 6 g par jour, administrés en comprimés de 0,5 g pendant plusieurs jours; la concentration sanguine doit varier entre 5 et 20 mg/ml.

Les premiers sulfamides utilisés ont été la **sulfapyridine,** abandonnée à cause de ses effets secondaires, et le **sulfathiazol.** On découvrit ensuite la **sulfadiazine,** la **sulfamérazine** et la **sulfaméthazine.**

Plus récemment, on a mis au point ce qu'on appelle les *sulfamides à action prolongée* ou *sulfamides retard,* qui se caractérisent essentiellement par une absorption rapide et surtout par une élimination lente. Ces composés **(sulfaméthoxypyridazine** et **sulfaphénylpyrazole)** permettent des traitements avec une seule prise quotidienne.

Les sulfamides actifs contre les infections intestinales constituent un groupe à part : ce sont le **succinylsulfathiazol** et le **phtalylsulfathiazol.** Ces corps ne sont pas absorbés, mais subissent, dans le tube digestif, une lente scission qui aboutit à la séparation du groupement acide et à la restauration du groupement amine et de l'activité chimiothérapique. La **sulfaguanidine** est également réservée à l'usage intestinal.

Les sulfamides de ce dernier groupe sont administrés en même temps que les vitamines B et K, élaborées normalement par la flore intestinale, que ces sulfamides détruisent.

On possède maintenant suffisamment de données pour asseoir une *théorie du mécanisme d'action antibactérienne* des sulfamides. On sait que les sulfamides sont des analogues structuraux de l'acide paraaminobenzoïque. Ils empêchent, par inhibition compétitive avec ce dernier, la synthèse de l'acide folique, lequel est indispensable à la formation des bases puriques entrant dans la composition des nucléoprotéines et pour les réactions de transméthylation.

Nitrofurannes

Les nitrofurannes sont des composés dont la formule comprend un noyau furanne substitué par un groupement nitré ($—NO_2$) en position 2 et une chaîne latérale de nature variable en position 5. Ces produits, récemment synthétisés, sont doués d'un pouvoir bactéricide élevé vis-à-vis des bacilles Gram positifs et Gram négatifs. On les utilise comme désinfectants des voies urinaires, administrés par voie orale (environ 10 mg/kg par jour).

Les nitrofurannes sont indiqués dans le traitement des infections par *Escherichia coli,* par *Proteus vulgaris* et *Pseudomonas aeruginosa,* surtout lorsque les autres agents chimiothérapiques se sont révélés inefficaces, puisque ces composés agissent sur le métabolisme bactérien d'une manière probablement toute différente.

Antibiotiques

Regroupés par quelques auteurs sous le vocable plus approprié d'« antibactériens d'origine microbienne », les antibiotiques sont en effet des substances élaborées par des micro-organismes et possédant le pouvoir d'inhiber le développement ou de tuer les cultures d'une ou plusieurs souches d'autres bactéries ou micro-organismes, notamment de souches responsables de maladies infectieuses chez l'homme ou les animaux. Certains micro-organismes sont capables d'inhiber le développement de certains autres. Ce phénomène, auquel on a donné le nom d'*antibiose* par opposition à *symbiose,* est à l'origine du terme « antibiotique » qui sert à définir des substances douées d'un tel effet.

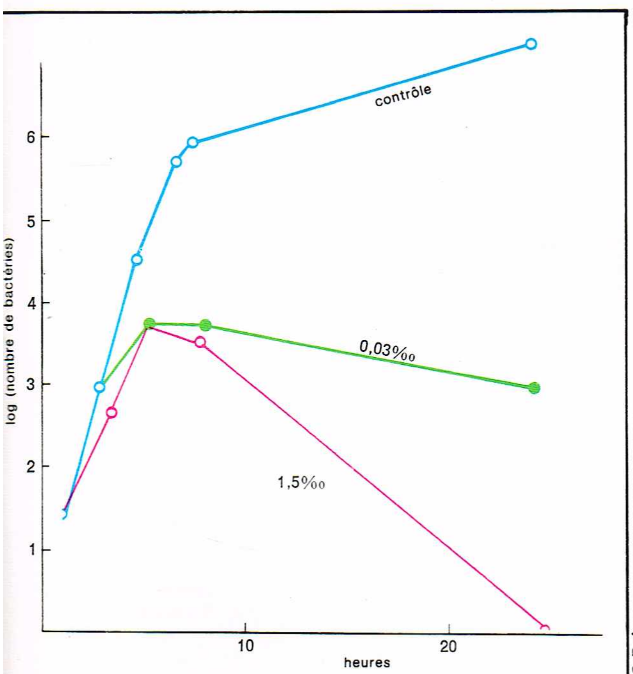

I.G.D.A.

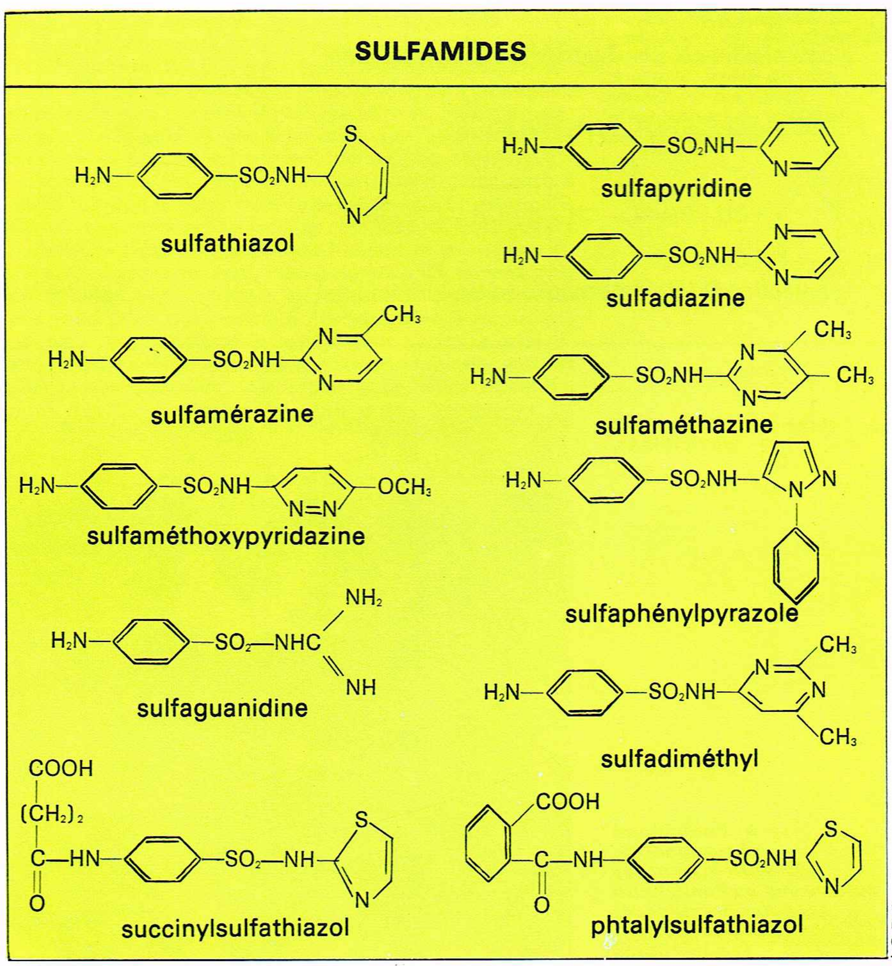

I.G.D.A.

▼ *A gauche, diagramme illustrant l'action sur le streptocoque du* **sulfanilamide** *utilisé en concentrations diverses (mg/100 ml). A droite, tableau des principaux* **sulfamides.**

PÉNICILLINES

PÉNICILLINES NATURELLES

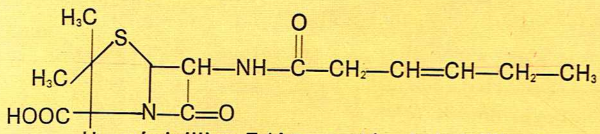

pénicilline F (Δ2-penténylpénicilline)

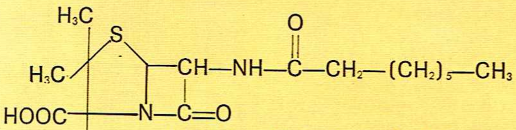

pénicilline K (n-heptylpénicilline)

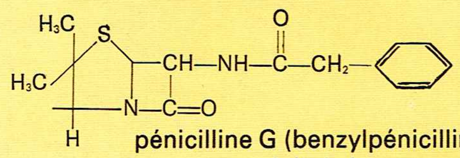

pénicilline G (benzylpénicilline)
produit de base

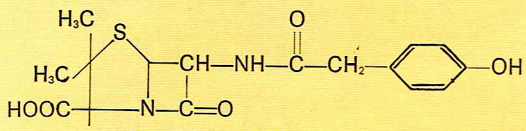

pénicilline X (P- -hydroxybenzylpénicilline)

PÉNICILLINES SEMI-SYNTHÉTIQUES

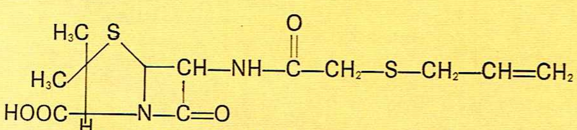

pénicilline O (alkylmercaptométhylpénicilline)

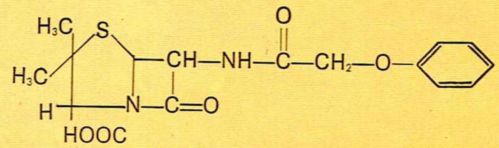

pénicilline V (phénoxyméthylpénicilline)

PÉNICILLINES RETARD

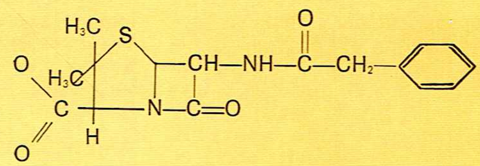

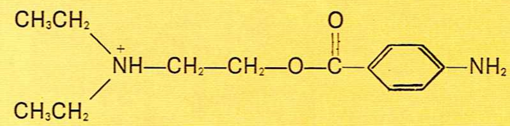

pénicilline G procaïnique
(sel de la pénicilline G avec la procaïne)

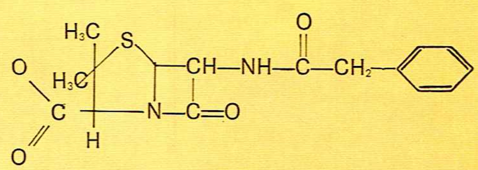

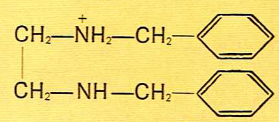

Bicilline
(sel de la pénicilline G avec N,N'-dibenzyléthylènediamine)

I.G.D.A.

▲ *Tableau des différentes* pénicillines.

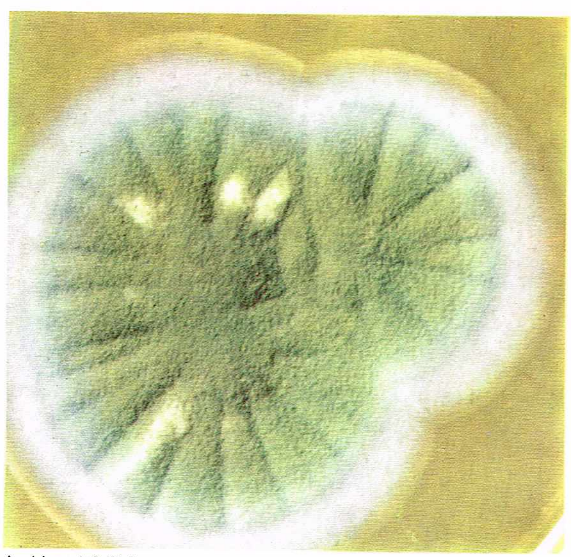

Archives I.G.D.A.

▶ Penicillium chrysogenum. *En enrichissant les cultures de ce* Penicillium *avec des précurseurs appropriés, on obtient la* pénicilline.

La plupart des antibiotiques sont préparés, encore de nos jours, au moyen de cultures de micro-organismes appropriés sur des milieux spéciaux ; en modifiant légèrement les milieux de culture, en fournissant des substances de base légèrement différentes, on obtient des antibiotiques d'une même souche mais qui diffèrent par quelques détails secondaires, qui laissent intacte la structure active, porteuse des propriétés chimiothérapiques ; seuls sont modifiés des groupements fonctionnels non essentiels ou des chaînes latérales, ce qui aboutit à l'élaboration de produits plus facilement absorbés et moins toxiques. C'est pour ces mêmes raisons que de nombreux antibiotiques actuels sont préparés par hémisynthèse, c'est-à-dire en modifiant par voie chimique des substances obtenues par voie fermentaire. Le seul antibiotique initialement isolé des cultures et produit aujourd'hui par synthèse, en raison de sa structure simple, est le chloramphénicol. Pour les cultures, on utilise différentes espèces d'actinomycètes et de moisissures ainsi que certaines bactéries.

Par rapport aux sulfamides, les antibiotiques présentent des structures chimiques très variées, ce qui laisse deviner des mécanismes d'action fondamentalement différents. L'action des antibiotiques s'exerce dans un domaine thérapeutique très large, qui recouvre presque entièrement

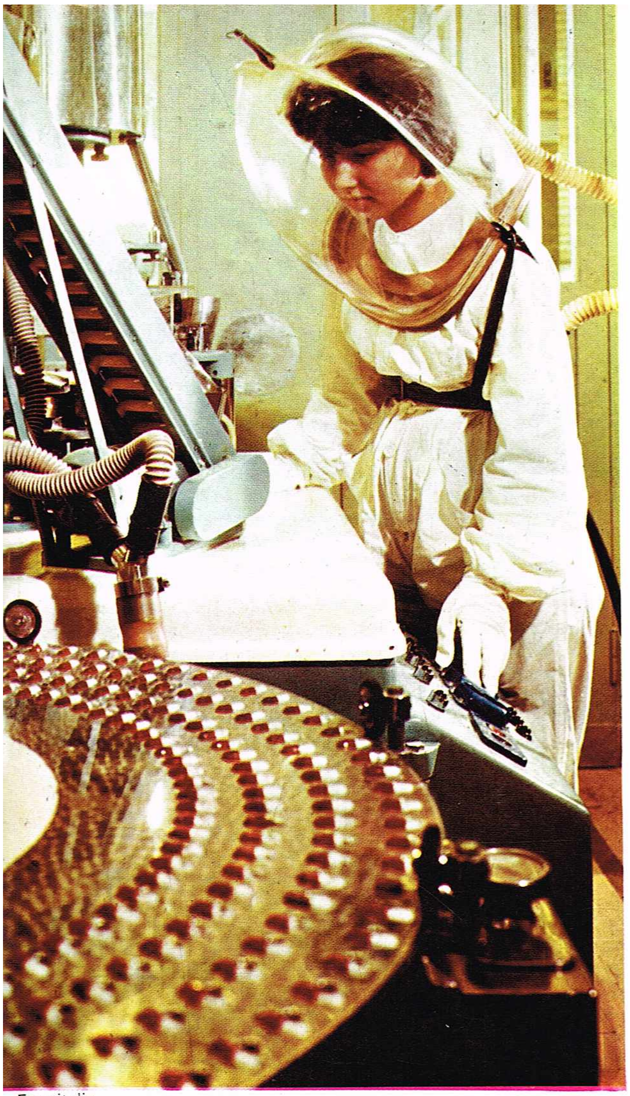

Farmitalia

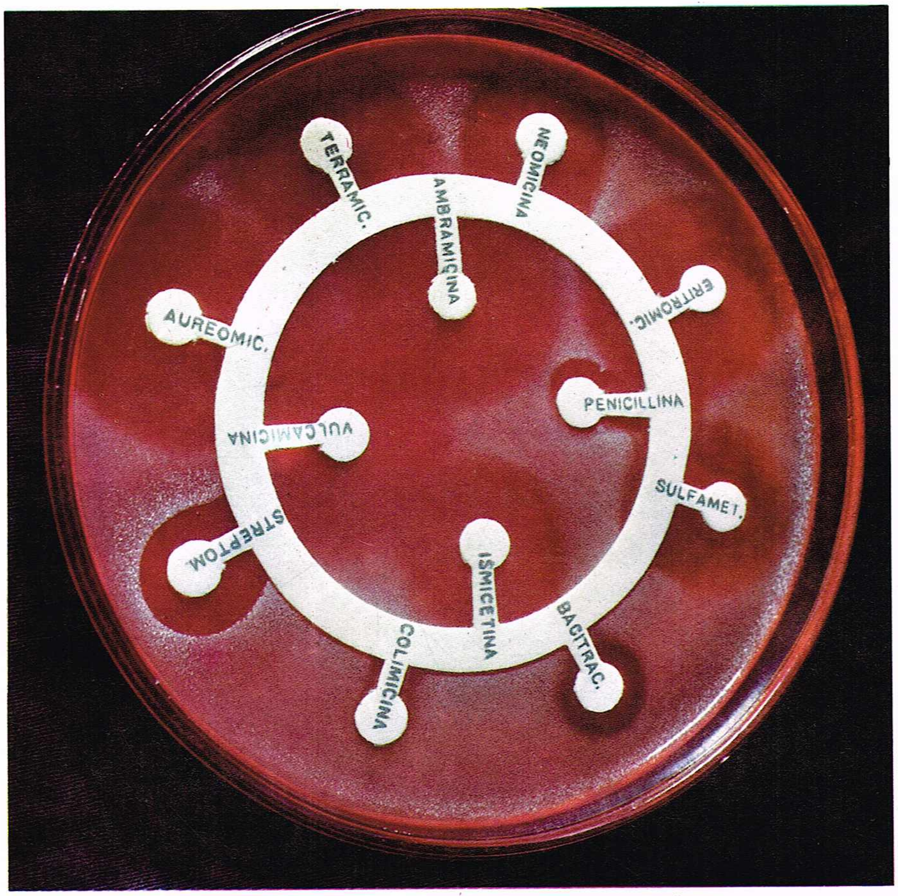

Archives I.G.D.A.

▲ *A gauche, préparation de gélules d'***Ampicilline***, pénicilline semi-synthétique à large spectre d'action. A droite, boîte de Pétri montrant les zones d'inhibition de différents antibiotiques.*

celui des sulfamides et s'étend aussi à d'autres maladies qui, jusqu'à la découverte de ces médicaments, n'étaient pas curables, sinon de manière symptomatique. Certains antibiotiques manifestent des activités antiprotozoaires, antimycotiques et même, modérément, antinéoplasiques (par exemple, l'actinomycine). Cependant, certaines infections à leishmanies, à trypanosomes et à sporozoaires (par exemple la malaria et la maladie du sommeil) restent exclues du champ d'action des antibiotiques. Isolément considérés, les différents antibiotiques peuvent avoir un spectre d'action relativement étroit (par exemple, l'érythromycine n'est active que vis-à-vis des germes Gram positifs) ou bien aussi vaste que celui de la famille tout entière (par exemple, le chloramphénicol).

La principale voie d'administration est la voie intramusculaire, suivie par la voie orale. En fonction de l'antibiotique et de la maladie à traiter, on peut utiliser parfois la voie intraveineuse ou intrarachidienne. La métabolisation et l'élimination dépendent de la nature du médicament.

Une antibiothérapie efficace doit viser à maintenir à l'endroit de l'infection une concentration suffisante de substance active.

Le fait de savoir que tel antibiotique est actif *in vitro* sur le germe à éliminer (antibiogramme) est nécessaire mais non suffisant pour établir un traitement rationnel. Encore faut-il savoir si le métabolisme de l'antibiotique permet à ce dernier d'atteindre les germes dans une localisation déterminée (par exemple, un antibiotique ne traversant pas la barrière méningée sera absolument inefficace contre un germe sensible responsable d'une méningite, en cas d'administration par voie générale).

Ces médicaments ont généralement une activité bactériostatique mais quelques-uns aussi une action bactéricide ; la toxicité est souvent très faible ou pratiquement absente, avantage qui trouve sa contrepartie dans une chimiorésistance d'installation facile ; naturellement, celle-ci dépend non seulement du médicament mais aussi du germe pathogène traité.

Le premier antibiotique, dans l'ordre chronologique, et probablement aussi dans l'ordre d'importance, est la **pénicilline,** constituée d'un mélange de substances semblables élaborées par certaines souches de *Penicillium notatum* et *Penicillium chrysogenum*. Les différentes pénicillines présentent des structures chimiques très voisines qui ne diffèrent que par la chaîne latérale.

La plus importante et la plus largement employée est la **pénicilline G.** Elle doit être dissoute extemporanément, car elle est peu stable en solution ; on l'administre essentiellement par voie intramusculaire en raison de son absorption médiocre par voie orale (un autre inconvénient de ce produit est son élimination trop rapide).

On a mis au point des *pénicillines retard,* caractérisées par le fait que la pénicilline (qui est un acide) est amidifiée par des amines diverses. Ces composés sont lentement hydrolysés dans l'organisme et libèrent la pénicilline G, qui est le composant actif. Pour obtenir un effet retard, on a utilisé aussi des composés tels que le **caronamide** et le **probénécide,** qui retardent l'excrétion de la pénicilline par voie rénale, principale voie d'élimination. La pénicilline G est parfaitement adaptée comme topique, sur des plaies, des blessures, des abcès superficiels et, enfin, pour des injections locales. Les doses habituelles de pénicilline sont de quelques millions d'unités par jour, administrées par voie intramusculaire, réparties en plusieurs injections lorsqu'il s'agit de la pénicilline G.

Les plus importantes des pénicillines utilisées actuellement, qualitativement et quantitativement, sont hémisynthétiques. Elles sont préparées dans le quadruple but d'élargir le spectre microbien, d'obtenir des produits actifs *per os,* de diminuer les phénomènes d'allergie et d'accroître la résistance à la pénicillinase. Parmi celles-ci, l'**Ampicilline** est de loin la plus utilisée.

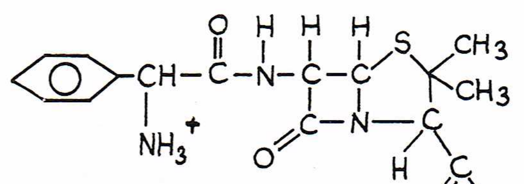

Ampicilline

Richard Colin

◀ *Formule de l'***Ampicilline** *; c'est, de loin, la pénicilline la plus utilisée.*

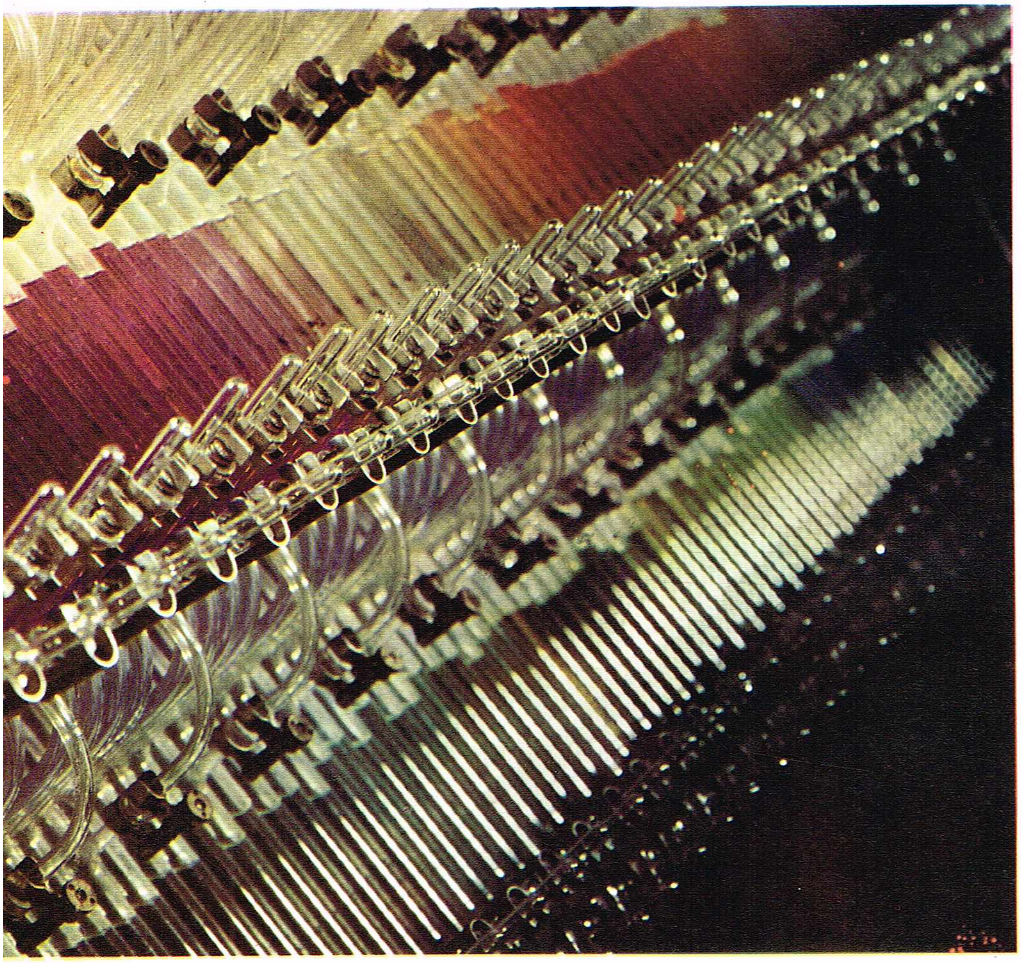

Rassegna Medica

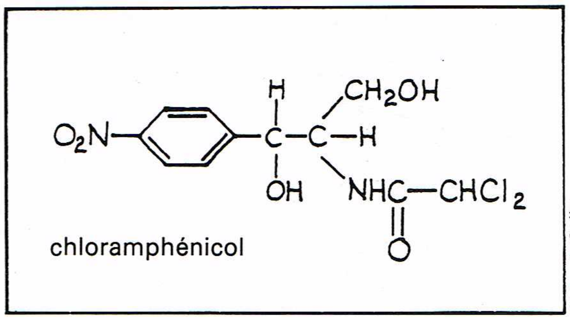

Richard Colin

▲ *A gauche, détail d'un* appareil de Graig *à contre-courant pour la préparation des antibiotiques. Cet appareil permet la séparation de substances possédant des caractéristiques physico-chimiques très voisines, et en particulier, d'antibiotiques appartenant à la même classe. On peut ainsi isoler des composés dont les molécules ne présentent que de très légères différences de structure. A droite, en haut, formule du* chloramphénicol, *antibiotique important en raison de son large spectre d'action et de sa toxicité relativement faible.*

▶ *Ci-contre, formules de trois tétracyclines à action analogue :* l'Auréomycine, *la* Tétracycline *et la* Terramycine.

La concentration sanguine active est d'environ 1 U.I./cm^3, mais elle dépend dans une large mesure du type d'infection, de l'apparition d'une résistance (relativement fréquente, comme nous l'avons déjà dit, etc.).

En traitement oral, on recourt à la **pénicilline V,** semi-synthétique, obtenue en introduisant dans les cultures de *Penicillium chrysogenum* des aliments appropriés.

Les pénicillines sont très efficaces dans le traitement des pneumonies à pneumocoques, de la gonococcie, de la syphillis (dans ce cas, on n'observe pas de phénomènes de résistance), de la gangrène gazeuse, de l'actinomycose.

De structure proche des pénicillines, les **Céphalosporines** sont apparues en thérapeutique vers les années 1960. Leur spectre est assez semblable à celui des pénicillines. Leur principal avantage réside dans le moindre risque d'allergie qu'elles présentent.

Le **chloramphénicol** est un antibiotique important, en raison de son large spectre d'action, de son activité élevée, de sa toxicité relativement faible et de la rareté des phénomènes de résistance ; il est donc largement utilisé en thérapeutique. On l'obtient à partir de cultures de *Streptomyces venuzuelae,* mais on le produit aujourd'hui synthétiquement, à un prix économique. Dans le chloramphénicol (D(—)—thréo, 2—dichloracétamide—1*p*—nitrophényl1, 3—propanediol), la présence de deux atomes de carbone asymétriques donne quatre formes optiquement actives, mais seule la forme thréo-lévogyre est active pharmacologiquement et le produit de synthèse, racémique, doit être séparé en ses deux composants.

Le chloramphénicol a un large spectre d'action contre les bacilles Gram positifs et négatifs, les rickettsies, les spirochètes et quelques gros virus ; par conséquent, il a les mêmes emplois que la pénicilline et agit contre les germes pénicillinorésistants (rickettsies, virus, staphylocoques résistant aux pénicillines). Il est employé dans le traitement de la typhoïde, dont il constitue le médicament d'élection, contre la brucellose, la syphilis et toutes les maladies dont les germes sont devenus pénicillino-résistants.

On l'administre par voie orale (à la dose de 50 mg/kg/jour) en prises séparées généralement par un intervalle de six heures. L'absorption est à peu près totale et l'élimination s'effectue par les voies biliaires avec réabsorption intestinale ; la plus grande partie du médicament est ainsi éliminée uniquement par voie urinaire. Le chloramphénicol a provoqué des accidents mortels d'agranulocytose et d'aplasie médullaire ; son utilisation doit donc être strictement surveillée.

Les **tétracyclines** possèdent une structure chimique dérivée d'un squelette fondamental unique (structure naphtacénique). Comme le chloramphénicol, ce sont des antibiotiques à large spectre d'action, puisqu'elles sont actives sur un grand nombre de germes pathogènes, bacilles Gram positifs et négatifs, bactéries et cocci de nombreuses familles, spirochètes, rickettsies, certains gros virus, certains types de champignons (actinomycètes), certains protistes (par exemple l'amibe) et certains vers parasites (oxyures). Le spectre d'action, très voisin de celui du chloramphénicol, est toutefois plus large.

Il peut s'instaurer une résistance croisée entre les différentes tétracyclines connues. La toxicité est modérée, mais on observe des phénomènes d'intolérance. Les trois composés, l'**Auréomycine,** la **Tétracycline,** la **Terramycine,** exercent une action analogue.

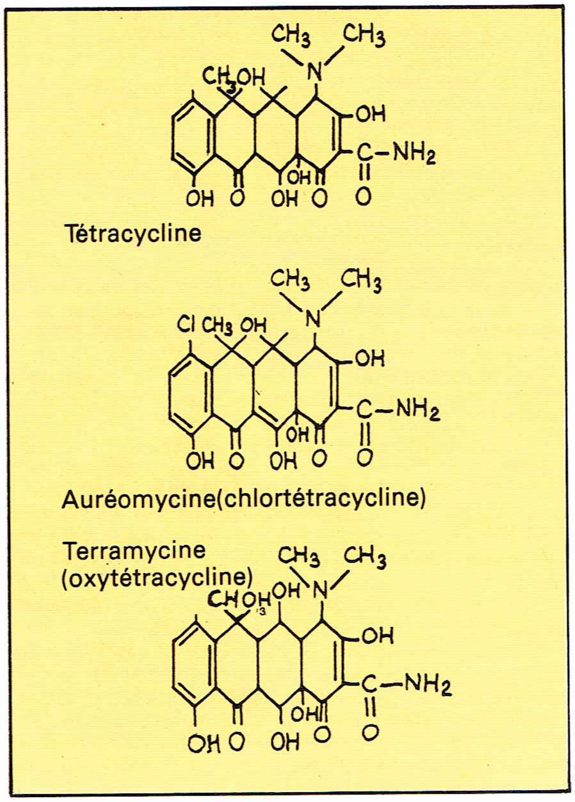

Richard Colin

On les administre par voie orale, en capsules de 250-750 mg toutes les six heures. Les indications de la tétracycline sont les mêmes que celles que nous avons indiquées pour le chloramphénicol. En outre, elles sont efficaces

dans la gangrène gazeuse, l'actinomycose, la diphtérie et le tétanos, la coqueluche, le typhus, la dysenterie bacillaire, la fièvre de Malte, le choléra, la peste bubonique, les leishmanioses et la dysenterie amibienne. Elles sont contre-indiquées chez la femme enceinte.

La **tyrothricine** est élaborée par *Bacillus brevis;* elle se compose de deux éléments actifs, la *gramicidine* et la *tyrocidine,* toutes les deux à structure polypeptidique. Le spectre d'action est analogue à celui de la pénicilline, mais sa haute toxicité limite l'emploi de cet antibiotique à des applications topiques (pommades) dans les infections de la peau et des muqueuses, et à un usage local contre certaines affections des voies aériennes supérieures, sous forme de pastilles par exemple.

Les **polymyxines** sont des polypeptides; on en connaît cinq, élaborées par *Bacillus polymyxa* et désignées par les lettres A, B, C, D, E. Elles ne possèdent qu'une action bactéricide et uniquement contre les bacilles Gram négatifs; elles sont totalement inactives vis-à-vis des bacilles Gram positifs. On les administre par voie intramusculaire et leur élimination est assez lente; toutefois, dans le traitement des infections intestinales, l'administration a lieu par voie orale. Elles possèdent une certaine toxicité sur le système nerveux et le rein. On les utilise dans le traitement de la méningite grippale, des infections sanguines à bacilles Gram négatifs, dans les infections urinaires par *Escherichia coli* et *Aerobacter aerogenes,* dans la dysenterie bacillaire, le typhus et surtout dans les infections des voies urinaires provoquées par *Pseudomonas aeruginosa,* qui répondent mal à tous les autres antibiotiques.

L'**érythromycine** est élaborée par *Streptomyces erythreus.* Elle exerce une action semblable à celle de la pénicilline, sa tolérance est excellente, sa toxicité faible, mais on note facilement des phénomènes de résistance. Comme la pénicilline, elle est employée dans le traitement d'infections dues à des souches pénicillinorésistantes et, à la différence de la pénicilline, dans la trypanosomiase et dans la toxoplasmose, avec des résultats non entièrement satisfaisants.

On l'administre par voie orale, à la dose de 300 mg 4 fois par jour.

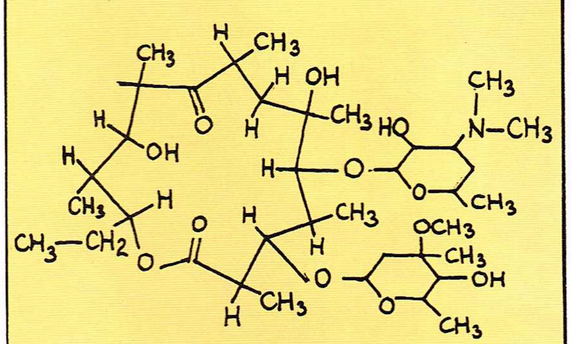

érythromycine

Richard Colin

◀ **Formule de l'érythromycine; sa tolérance est excellente, sa toxicité faible.**

Antibiotiques antituberculeux

La science moderne a permis de vaincre presque complètement le fléau social qu'était la tuberculose, ou tout au moins d'en réduire les dimensions à celles d'une maladie certes grave mais que l'on peut soigner avec succès. L'avènement des chimiothérapiques, en effet, a entraîné une baisse spectaculaire de la mortalité.

A cause de certaines caractéristiques particulières (faible perméabilité de la membrane cellulaire, faible vitesse de reproduction), *Mycobacterium tuberculosis* n'est attaqué que par quelques médicaments spécifiques; quelques-uns d'entre eux sont des antibiotiques, et nous allons les décrire ci-après, d'autres ne le sont pas, et nous en traiterons plus loin. Alors que les antibiotiques antituberculeux ont un spectre d'action plus large, l'activité des autres chimiothérapiques antituberculeux est hautement spécifique.

La **streptomycine** est élaborée par *Streptomyces griseus.* En transformant le groupement $-C\genfrac{}{}{0pt}{}{\diagup H}{\diagdown\!\!\diagdown O}$ du noyau pentagonal en un groupement $-CH_2OH$, on obtient la dihydrostreptomycine, qui offre quelques avantages, par exemple une plus grande stabilité; on emploie souvent des préparations constituées par un mélange de streptomycine et de dihydrostreptomycine. Le spectre d'action englobe les germes Gram positifs, plus les mycobactéries de la lèpre et de la tuberculose. Les phénomènes de résistance sont fréquents.

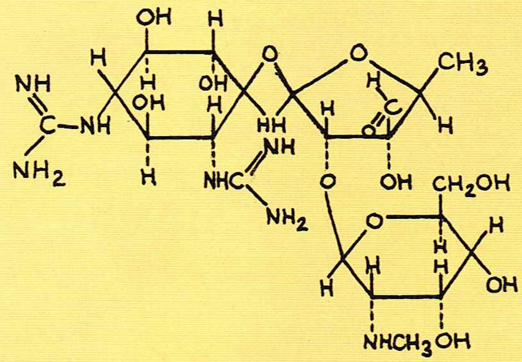

streptomycine

Richard Colin

◀ **Formule de la streptomycine; son spectre d'action englobe les germes Gram positif et les mycobactéries de la lèpre et de la tuberculose.**

La streptomycine possède une action bactériostatique assez satisfaisante, et, à doses élevées, une action bactéricide. On l'administre par voie intramusculaire, puisqu'elle est faiblement absorbée par les muqueuses gastro-intestinales, à la dose de 0,2-0,5 g par jour, en cinq ou six prises, sous forme de sulfate de streptomycine et/ou de dihydrostreptomycine; normalement, les deux corps sont associés dans le traitement. Elle est relativement toxique, en particulier vis-à-vis du nerf auditif et vestibulaire, ce qui peut provoquer des phénomènes d'hypoacousie et des troubles de l'équilibre.

La **viomycine** a une structure polypeptidique, où l'on observe des groupes guanidine $-NH-C\genfrac{}{}{0pt}{}{\diagup\!\!\diagup NH}{\diagdown NH_2}$ présents aussi dans la streptomycine. La fréquence des phénomènes de résistance et leur rapide apparition sont comparables à celles de la streptomycine. Son action, de mécanisme inconnu, s'exerce typiquement sur le bacille tuberculeux. Elle est employée, à cause de sa toxicité, uniquement lorsqu'on ne peut utiliser d'autres agents chimiothérapiques; on l'administre uniquement par voie intramusculaire, sous forme de sulfate.

La **rifampycine,** nouvellement apparue, est largement employée.

Chimiothérapiques antituberculeux

L'**isoniazide** est l'hydrazide de l'acide isonicotinique. Son activité est très élevée uniquement à l'égard des mycobactéries (action bactériostatique et bactéricide); sa toxicité est faible et son absorption par voie gastro-intestinale assez bonne (dose : 150 mg/jour). A côté de ses remarquables propriétés, on note l'inconvénient d'une résistance d'apparition facile, raison pour laquelle l'isoniazide est utilisée dans le traitement d'attaque et est ensuite associée à la streptomycine et aux autres agents chimiothérapiques.

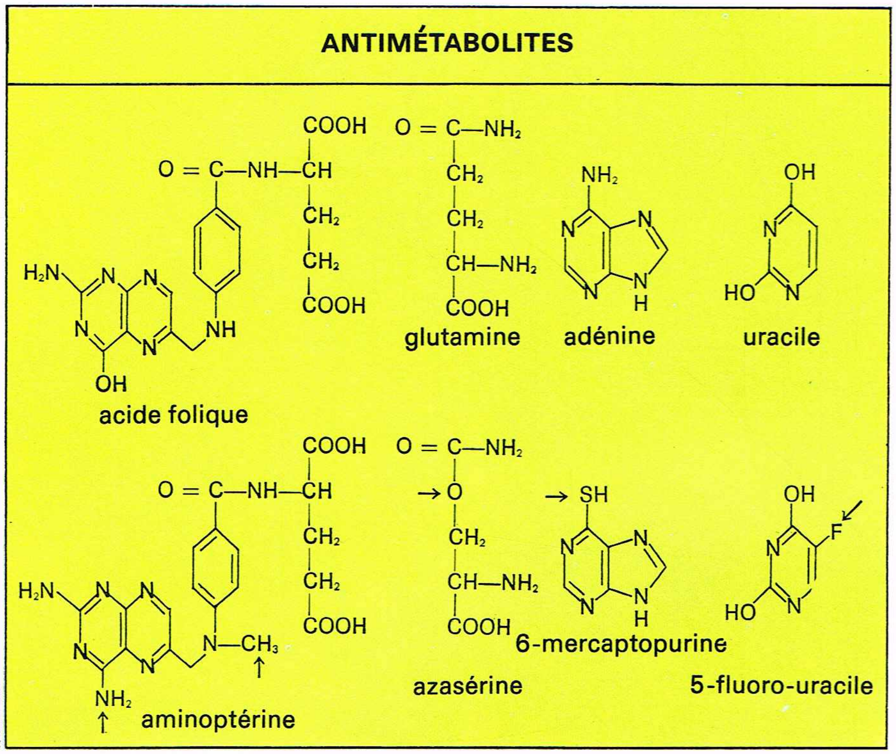

I.G.D.A.

▲ *Tableau des principaux* **antimétabolites.** *En haut, les métabolites ; en bas, les médicaments : les flèches indiquent les endroits des molécules qui sont modifiés pour passer du métabolite au médicament.*

L'**acide para-aminosalicylique** (P.A.S.) est moins actif que la streptomycine et l'isoniazide, mais possède le grand avantage d'une très faible toxicité ; non seulement il ne provoque pas facilement de résistance, mais retarde l'apparition de celle-ci à l'égard de la streptomycine et de l'isoniazide. Il a été très utilisé (administré par voie orale en 4 ou 5 doses journalières de 2-4 g) sous forme de sel de sodium ou de calcium, en association avec les autres médicaments. Son action est hautement spécifique à l'égard des mycobactéries tuberculeuses. Le mécanisme d'action est semblable à celui des sulfamides, puisque ce médicament intervient probablement dans le métabolisme de l'acide *p*—amino-benzoïque.

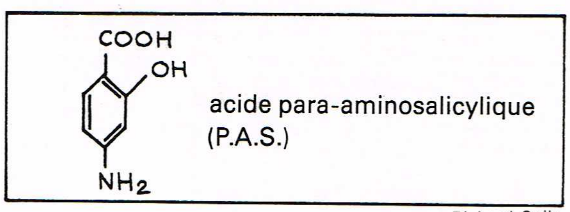

Richard Colin

▶ *Formule de l'*acide para-aminosalicylique (P.A.S.) *dont l'action est hautement spécifique à l'égard des mycobactéries tuberculeuses.*

L'**éthambutol** est l'isomère dextrogyre du dihydroxyméthyl 3-8 diaza 4-7 décane. C'est un antituberculeux majeur donnant lieu à relativement peu de phénomènes de résistance, bien toléré et provoquant très rarement des signes de toxicité oculaire. Il est utilisé à la dose de 1 à 2 g par jour, le plus souvent associé à d'autres antituberculeux et en particulier l'isoniazide.

Le traitement typique de la tuberculose pulmonaire est constitué par l'administration au long cours d'associations d'isoniazide, de rifampycine et d'éthambutol.

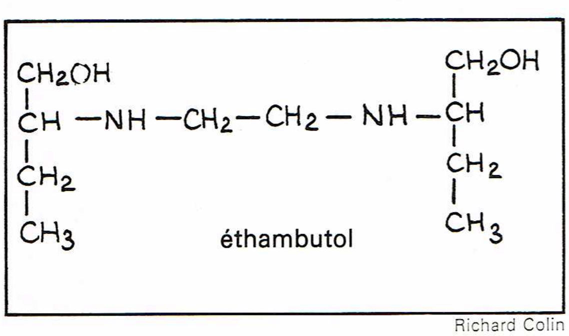

Richard Colin

▶ *Formule de l'*éthambutol *; c'est un antituberculeux majeur, bien toléré et provoquant très rarement des signes de toxicité oculaire.*

Antimitotiques

On range habituellement parmi les agents chimiothérapiques les médicaments avec lesquels on tente de traiter les néoplasies ; ces substances devraient être dotées d'une activité sélective à l'égard des cellules cancéreuses et être inoffensives pour les cellules normales. Ce qui caractérise les formations tumorales est la rapidité avec laquelle les cellules se multiplient, rapidité d'autant plus grande que la forme néoplasique est plus maligne. En conséquence, l'intérêt des pharmacologues s'est toujours tourné vers l'étude d'antibiotiques susceptibles d'exercer leur action uniquement ou essentiellement sur les cellules néoplasiques. Mais la division cellulaire est un processus très complexe et très délicat, ce qui explique le fait que de nombreuses substances aux mécanismes d'action fort différents aient pu montrer une certaine activité antimitotique.

Le premier groupe de substances comprend les **antimétabolites,** très semblables aux métabolites indispensables à la vie de la cellule. De ce fait, ils sont susceptibles de remplacer ces derniers par substitution compétitive, bloquant ainsi le développement cellulaire. Ces substances ont pour inconvénient une faible spécificité : en effet, elles provoquent des dommages considérables à toutes les cellules de l'organisme en phase de multiplication active, et souvent ces dommages sont plus graves que le bénéfice attendu de la réduction de la néoplasie.

Un deuxième groupe de substances est constitué par les **agents alkylants** *(moutardes à l'azote)*. Ces composés agissent en dénaturant l'A.D.N., rendant impossibles la duplication et, par conséquent, la mitose. Mais leur action n'est pas spécifique et ils se révèlent léthaux pour toutes les cellules qui, comme les cellules néoplasiques, sont en phase de multiplication active ; on les emploie surtout dans les néoplasies touchant les ganglions lymphatiques et les organes hématopoïétiques ; les graves dommages qu'ils entraînent pour les tissus normaux de l'organisme en limitent les possibilités d'application. Les **nitroso-urées** sont également utilisées (C.C.N.U., D.C.N.U.).

Parmi les antimitotiques, on compte quelques **alcaloïdes,** aux structures diverses ; tous, dans une plus ou moins grande mesure, bloquent la multiplication cellulaire. Le plus anciennement connu est la **colchicine** (alcaloïde du colchique) ; mais, en dépit des nombreuses tentatives faites, cet alcaloïde ne présente aucun intérêt dans le traitement des néoplasies à cause de sa toxicité élevée. La **podophyllotoxine,** alcaloïde de *Podophyllum peltatum,* parvient à inhiber le développement de tumeurs expérimentales chez l'animal, mais les conclusions de ces expériences ont été jusqu'à présent décourageantes. Parmi les composés plus récents, la **vinblastine** et la **vincristine,** extraites de la pervenche de Madagascar *(Catharanthus roseus)*, ont montré une certaine activité dans différentes formes de leucémies. L'**ellipticine** est un autre alcaloïde actif.

Au nombre des composants d'origine naturelle, citons encore quatre antibiotiques : l'**actinomycine D,** la **mitomycine C,** la **bléomycine** et la **rufochromomycine.** Les expériences de laboratoire ont démontré une certaine activité antimitotique, mais la toxicité de ces substances est très élevée, ce qui limite les possibilités d'application thérapeutique.

Un dernier groupe est constitué par les **hormones stéroïdes.** On sait que les hormones modifient le développement des différents tissus, et on a tenté d'utiliser cet effet dans le cas des tissus néoplasiques. Ainsi, par exemple, les œstrogènes se révèlent efficaces contre le cancer de la prostate et les cancers mammaires de la post-ménopause, tandis que, dans la période qui précède la ménopause, ils auraient plutôt tendance à accélérer le développement des cancers du sein. Les androgènes sont efficaces dans 20 % des cas de cancer du sein, mais ils peuvent parfois en accélérer le développement ; les progestatifs à forte dose ralentissent, dans 25 % des cas, le développement des cancers utérins. Les corticostéroïdes de la surrénale se sont révélés parfois utiles dans le traitement des leucémies et des néoplasies des ganglions lymphatiques.

En conclusion, la pharmacologie des antimitotiques explore aujourd'hui un domaine assez vaste, et fournit à la thérapeutique un moyen d'action très important qui vient améliorer le pronostic des cancers hématologiques ainsi que des tumeurs solides en prenant le relai de la chirurgie, de la radiothérapie et de l'immunothérapie.

ENCYCLOPÉDIE DES SCIENCES

TECHNOLOGIE

I

GRANGE BATELIÈRE

LEXIQUE DE TECHNOLOGIE (ÉNERGIE)

SUPPLÉMENT AU VOLUME XVI DE LA GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

ABRÉVIATIONS

adj.	adjectif	*n.*	nom	*syn.*	synonyme
ex.	exemple	*par ext.*	par extension	*v.*	verbe

A

abaque. *n.* Graphique permettant de résoudre des calculs ou de trouver des coefficients.

acier trempé. Acier qui a subi l'opération de la trempe (voir ce mot).

adiabatique. *adj.* Se dit d'une transformation d'un système qui s'effectue sans échange de chaleur avec l'extérieur. Ainsi, le cycle théorique d'un moteur comporte une ou plusieurs transformations adiabatiques.

admission. *n.* Phase du cycle d'un moteur à explosion correspondant à l'entrée des gaz dans le cylindre.

adsorption. *n.* Rétention d'un gaz ou d'un liquide à la surface d'un solide, lequel est qualifié d'*adsorbant*. Fixer par adsorption = *adsorber*.

aérobie. *adj.* 1° Se dit d'un être vivant dont l'existence exige la présence d'oxygène. 2° Un moteur *aérobie* est un moteur qui utilise l'oxygène comme comburant (voir ce mot).

aéromagnétisme. *n.* Prospection aérienne des variations du magnétisme terrestre.

aérosol. *n.* Suspension dans un gaz de particules très fines.

affréteur. *n.* Celui qui loue un navire (celui qui le donne en location étant le *fréteur*).

agent polluant. Facteur (matière, rayonnement, chaleur...) contribuant à rendre malsain un milieu et à en perturber l'équilibre écologique.

aimant permanent. Barreau d'oxyde de fer ou d'acier qui a la propriété d'attirer le fer. Les bobines ont la même propriété quand elles sont traversées par un courant.

alésage. *n.* 1° Régularisation très précise du diamètre intérieur d'un tube. 2° Dans un moteur, l'alésage d'un cylindre est le diamètre intérieur de ce dernier.

aliphatique. *adj.* Se dit des corps organiques acycliques (ou à chaînes ouvertes).

âme. *n.* Centre, noyau ; armature en fer.

ampère. *n.* Unité d'intensité du courant électrique. Intensité du courant dans deux fils électriques parallèles, rectilignes, distants de 1 mètre dans le vide, et produisant entre ces deux fils une force de $2 \cdot 10^{-7}$ newton. Symbole : A.

anaérobie. *adj.* 1° Qualifie un être pouvant vivre en l'absence d'oxygène. 2° Un moteur *anaérobie* n'utilise pas l'oxygène de l'air. Il peut fonctionner en dehors de l'atmosphère.

anhydride. *n.* Corps qui, en se combinant avec l'eau, peut donner naissance à un acide.

anion. *n.* Atome ou édifice polyatomique qui a reçu une ou plusieurs charges négatives et qui par conséquent est chargé négativement.

anticlinal. *n.* En géologie, se dit de la partie convexe d'un pli simple.

arbre à cames. Mécanisme utilisé pour commander la levée des soupapes ou la mise en route des pompes d'injection. Arbre à cames en tête : arbre à cames au-dessus du moteur.

arbre-manivelle. Voir *vilebrequin*.

argon. *n.* Corps simple, gazeux, incolore, qui constitue environ le centième de l'atmosphère terrestre.

aromatique. *adj.* Qui a une odeur. En chimie, hydrocarbures aromatiques : famille d'hydrocarbures dérivés de benzène et comportant au moins un noyau benzénique.

athermique. *adj.* Une réaction qui, pendant son déroulement, n'absorbe ni ne dégage de chaleur est athermique.

atomiseur. *n.* Appareil servant à la pulvérisation des liquides.

attelage. *n.* Système bielle-manivelle.

aubage. *n.* Distributeur fixe dans une turbine à vapeur. Syn. : *tuyère*.

aube. *n.* Partie d'une roue hydraulique sur laquelle s'exerce la force motrice de l'eau.

B

balai. *n.* En électrotechnique, le balai désigne une masse de charbon aggloméré servant de contact entre une pièce fixe et une pièce mobile. Voir *collecteur*.

bar. *n.* Unité de mesure de la pression, le bar vaut 750 mm de mercure. Voir *tableau des unités* en fin de lexique.

barbotage. *n.* Passage d'un gaz à travers un liquide. Le barbotage est utilisé pour laver des fumées.

barge. *n.* Péniche sans moteur et sans cabine, sorte de bateau-cuve poussé à l'arrière (souvent par groupe de deux ou quatre) par un bateau-moteur indépendant, appelé pousseur.

barril. (U.S.). Unité de volume équivalent à $158{,}98 \cdot 10^{-3}$ m^3. Symbole : b.b.l.

benzène. *n.* Hydrocarbure cyclique de formule brute C_6H_6 ; liquide incolore, volatil, combustible.

benzol. *n.* Mélange de benzène, de toluène et de xylènes, extrait des goudrons de houille. Le benzol peut être utilisé comme carburant dans un moteur à explosion.

bielle. *n.* Pièce reliant deux pièces mobiles auxquelles elle est reliée par des articulations. Dans un moteur à explosion, la bielle sert à transmettre l'effort moteur reçu par le piston (voir *bielle-manivelle* et *piston*). La bielle d'accouplement sert à répartir l'effort moteur entre des essieux accouplés.

bielle-manivelle. *n.* Système permettant de transformer un mouvement rectiligne alternatif en un mouvement circulaire uniforme et réciproquement. L'ensemble bielle-manivelle s'appelle aussi *attelage*.

bilan différentiel de l'énergie. Conditions différentielles que doit satisfaire une équation de distribution de l'énergie dans le temps et dans l'espace.

biseau stratigraphique. En géologie, extrémité d'une couche sédimentaire en contact avec un socle ancien de pente différente.

bitume. *n.* Mélange d'hydrocarbures naturels, ou pyrogènes, entièrement solubles dans le sulfure de carbone. Dans le langage courant, désigne à la fois des produits contenus dans les roches asphaltiques naturelles et le résidu du raffinage du pétrole.

bobinage. *n.* Fil électrique isolé, enroulé en spire serrée sur un cylindre ou un tore. Le bobinage dans lequel circule un courant est un inducteur. On dit aussi *bobine*.

bobine. *n.* Cylindre sur lequel sont enroulés un ou plusieurs bobinages. Ce bobinage lui-même.

bobine d'allumage. Petite bobine d'induction utilisée pour l'allumage du carburant dans un moteur à explosion. La bobine d'allumage fournit du courant haute tension.

bouilleur. *n.* En technologie : 1° Cylindre métallique disposé en dessous d'une chaudière pour augmenter la surface de chauffe. 2° Réacteur nucléaire de petites dimensions, dans lequel la matière active est un sel d'uranium dissous dans l'eau ordinaire.

brai. *n.* Résidu pâteux de la distillation de la houille ou du pétrole.

brûleur. *n.* Appareil où se produit le mélange du combustible avec l'air. Les flammes se forment à la sortie du brûleur.

buse. *n.* Extrémité d'un tuyau. Dans un carburateur, la buse est un tuyau étranglé entourant le gicleur et où s'opère le mélange air-essence.

B.W.R. (boiling water reactor). Réacteur dans lequel le refroidissement est obtenu par vaporisation d'eau à 280 °C sous 70 bars. Voir *tableau* en fin de lexique.

C

caboteur. *n.* Bateau assurant une navigation marchande le long des côtes, et spécialement entre les ports d'un même pays.

caesium ou **césium.** *n.* Métal rare, de numéro atomique 55, ayant des propriétés voisines de celles du potassium.

calandre. *n.* Dans un échangeur à faisceau, garniture dans laquelle est placé un faisceau de tubes. Le fluide chauffant circule dans la calandre à l'extérieur des tubes du faisceau dans lesquels circule le fluide chauffé.

calfater. *v.* Mettre de l'étoupe et, par dessus, du suif, du goudron ou du bitume dans les joints, trous et fentes de la coque d'un bâtiment.

calorie. *n.* Unité de quantité de chaleur. Énergie nécessaire pour élever de 1 °C la température de 1 g d'eau à 15 °C sous pression atmosphérique normale. Symbole : cal.

calorifique. *adj.* Qui donne de la chaleur.

came. *n.* Roue pourvue d'une saillie ou d'une encoche, destinée à transmettre ou à commander le mouvement d'une machine. Dans le moteur à explosion, la came commande l'ouverture et la fermeture des soupapes d'échappement et d'admission par l'intermédiaire des culbuteurs.

capacité. *n.* Quotient de la charge d'un condensateur par la différence de potentiel entre ses armatures.

capacité d'un accumulateur. Pour un élément dont la différence de potentiel est connue, on exprime la capacité en ampère-heure. La *capacité énergétique* est égale à la capacité en ampère-heure multipliée par la d.d.p. *Ex. :* 15 Ah sous 2 V de tension correspondent à 30 Wh d'énergie.

capacité calorifique massique. Énergie calorifique nécessaire pour élever de 1 °C une unité de masse d'un corps. La capacité calorifique massique indique l'aptitude d'un corps à stocker la chaleur. Elle est variable avec la température du corps.

capital génétique. En biologie, cette locution désigne les informations ou caractéristiques qui sont transmises de génération en génération par les gènes. Pour une machine, le *capital génétique* représente l'ensemble des plans et informations qui permettent de la construire.

carbochimie. *n.* Chimie industrielle des produits issus de la houille.

carboduc. *n.* Conduite servant à transporter du charbon broyé en suspension dans l'eau.

carburateur. *n.* Appareil servant à préparer le mélange de comburant et de carburant dans un moteur.

carburéacteur. *n.* Carburant pour moteur à réaction ou turbine à gaz d'aviation.

carneau. *n.* Ouverture pratiquée dans l'enveloppe d'un four de manière à permettre la sortie des fumées dans la cheminée.

carter. *n.* Enveloppe protectrice des organes d'un moteur. Le carter est souvent supporté par la partie inférieure du bloc cylindre.

catalyse. *n.* Augmentation de la vitesse d'une réaction chimique par adjonction d'un corps *(catalyseur)* qui n'est pas modifié pendant la réaction.

cation. *n.* Atome ou édifice polyatomique qui a perdu une ou plusieurs charges négatives et qui a par conséquent une charge positive.

centrale plutonigène. Centrale qui produit du plutonium.

cerdoristique. *n.* Analyse des coûts en technologie. Ce terme a été introduit par Ampère.

cétane. *n.* Hydrocarbure saturé ($C_{16}H_{34}$) de faible délai d'inflammation. L'*indice de cétane* mesure l'aptitude d'un combustible Diesel à s'enflammer dans la chambre de combustion du moteur à compression, par rapport à des mélanges de référence de cétane (correspondant à l'indice 100) et d'α méthylnaphtalène (correspondant à l'indice 0).

chaland. *n.* Bateau non ponté destiné au transport des marchandises sur les rivières ou canaux.

chaleur de condensation. Chaleur libérée lors de la condensation d'une vapeur.

chaleur latente de changement d'état. La chaleur latente de changement d'état d'un corps à la température *t* est la quantité de chaleur nécessaire pour faire passer l'unité de masse de ce corps de l'état 1 à l'état 2 à cette température, la pression restant constamment égale à la pression d'équilibre des phases 1 et 2 à la température *t*.

chaleur massique. Quantité de chaleur à fournir à l'unité de masse d'un corps pour élever sa température de 1 °C. Dans le cas des gaz, on distingue la chaleur massique volumique, qui est la chaleur massique à volume constant, de la chaleur massique à pression constante.

champ de force. En physique, un champ est une portion d'espace ou s'exerce une action physique. Le champ de la force « pesanteur » est le champ de l'attraction terrestre.

changement de phase. Changement d'état d'une matière. *P. ex. :* passage de l'état liquide à l'état gazeux.

charbon en lit fluidisé. Couche de charbon pulvérisé.

chaudière sans faisceau. Chaudière dont les parois de la chambre de combustion sont tapissées de tubes remplis d'eau, jointifs, chauffés directement par le rayonnement.

chemise. *n.* Dans un moteur, garniture intérieure du cylindre dans laquelle glisse le piston.

chicane. *n.* Passage en zigzag ménagé à travers un obstacle. Des chicanes sont souvent utilisées dans les sorties vers l'atmosphère de gaz sous pression.

chute ohmique. Chute de tension entre les bornes d'une résistance électrique (U = RI).

cinématique. *n.* Étude des mouvements des corps, abstraction faite des forces qui les produisent.

cinétique. *adj.* Qui concerne le mouvement. L'énergie cinétique d'un corps en mouvement (par rapport à un repère donné) est égale à la moitié du produit de sa masse par le carré de sa vitesse.

circulation mécanique. Circulation d'un fluide obtenue par une pompe ou un ventilateur. Syn. de *circulation forcée,* opposée à *circulation naturelle.*

circulation naturelle. Déplacements d'un fluide provoqués par la différence de masse volumique entre le fluide chaud et le fluide froid.

claveter. *v.* Fixer au moyen d'une cale amovible.

coaxial. *adj.* Qui a le même axe qu'un ou plusieurs autres corps.

co-courant. Écoulement de deux ou plusieurs fluides dont les courants sont parallèles.

coefficient d'absorption (d'un rayonnement). Rapport du rayonnement absorbé par un corps au rayonnement total incident. Le coefficient d'absorption dépend de la qualité des rayons incidents.

coefficient d'émission (d'un rayonnement). Rapport de l'intensité énergétique émise par un corps donné à une température donnée à celle qui serait émise par un corps noir à la même température. Le coefficient d'émission dépend de la température du corps. Souvent noté α, s'exprime en W/m².

coefficient de transfert (thermique). Coefficient permettant de calculer le flux thermique entre une source froide et une source chaude, connaissant la différence de température entre les deux sources. Souvent noté U. Le coefficient de transfert thermique s'exprime en W/m² · °C.

coefficient de transmission (d'un rayonnement). Rapport entre le rayonnement incident et le rayonnement qui traverse un corps. La transmission dépend de la longueur d'onde du rayonnement incident.

cœur. *n.* Dans une centrale nucléaire le cœur est le siège des réactions nucléaires.

coffinite. *n.* Un des minerais de l'uranium.

coke. *n.* Combustible obtenu par distillation de la houille en vase clos.

collecteur. *n.* En électrotechnique le collecteur désigne la partie mobile d'une dynamo qui est en contact avec un (ou plusieurs) balai fixe.

comburant. *adj.* et *n.* Se dit d'un corps qui, par combinaison avec un autre, amène la combustion de ce dernier.

combustion. *n.* Ensemble des phénomènes produits lorsqu'un corps se combine avec l'oxygène.

composition spectrale. La lumière est formée d'un ensemble de rayons de longueurs d'onde différentes. La composition spectrale est définie par l'intensité de chaque rayon.

compresseur. *n.* Appareil servant à comprimer un gaz. Notamment, appareil servant à liquéfier les vapeurs issues d'une turbine.

compression. *n.* Phase du cycle d'un moteur à explosion. Après l'admission, les soupapes sont fermées et le piston comprime le mélange de carburant et de comburant.

concasseur. *n.* Appareil servant à broyer une substance en éléments grossiers.

concentration. *n.* Teneur d'un solvant en matière dissoute. La concentration d'un soluté est dite élevée quand elle est proche de la saturation.

condensat. *n.* Liquide formé à la suite de la condensation d'une vapeur.

condensateur. *n.* Appareil servant à emmagasiner une charge électrique.

condenseur. *n.* Appareil servant à condenser la vapeur.

condition optimale de fonctionnement. Le meilleur fonctionnement pour un coût donné; ou le meilleur coût de fonctionnement pour un objectif donné.

conductance. *n.* Inverse de la résistance électrique. L'unité de conductance est le mho, appelé parfois siemens.

conduction thermique. Transmission de la chaleur de proche en proche sans déplacement de matière. S'il y a déplacement de matière, on parle de *convection* (voir ce mot).

conductivité thermique. Voir *conduction thermique.*

conteneur. *n.* Caisse de dimensions normalisées pour le transport de marchandises. Dit aussi *container.*

contrainte d'extension d'un ressort. Force supportée par unité de surface de la section du métal constituant le ressort. *Contrainte limite d'extension :* contrainte maximale qui peut être supportée par le ressort sans déformation permanente.

contre-courant. Écoulement de deux fluides dont les courants sont parallèles mais de sens opposés.

convection. *n.* Mouvement pris par un fluide sous l'influence d'une variation de température. La convection d'un fluide dans un insolateur permet de récupérer l'énergie thermique. La convection est *forcée* lorsqu'on utilise un accélérateur pour faire circuler le fluide plus rapidement.

conversion bio-énergétique. Conversion de l'énergie par des processus biologiques. *Ex. :* photosynthèse, fermentation méthanique...

conversion électromécanique. Conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique ou réciproquement.

conversion de l'énergie. Changement de forme de l'énergie, *p. ex. :* conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique.

convertisseur électrique. Appareil dont la fonction est de transformer la fréquence et la tension du courant.

corps gris. Corps qui réfléchit aussi bien toutes les radiations. Il absorbe ou émet aussi bien tous les rayonnements, indépendamment de leur longueur d'onde.

corps noir. Absorbeur parfait de toutes les radiations thermiques quel que soit leur angle d'incidence. Des matières dont le coefficient d'absorption des radiations thermiques est élevé sont utilisées comme absorbeur dans les capteurs solaires (peintures noires, oxyde de cuivre).

corps opaque. Corps qui ne transmet pas les rayonnements.

corps radio-actifs. Nom donné aux corps dont les atomes peuvent se désintégrer en émettant des rayons α, β, γ.

corrélation. *n.* Relation réciproque entre deux choses. En statistiques, liaison entre deux variables aléatoires.

corrosif. *adj.* Se dit d'un liquide ou d'un gaz qui ronge les corps avec lesquels il est en contact.

couche limite. Zone d'écoulement d'un fluide, proche de la surface de la conduite, où l'écoulement reste laminaire. L'épaisseur de la couche limite dépend de la vitesse d'écoulement du fluide et de la rugosité de la paroi.

coulomb. *n.* Unité de quantité d'électricité équivalant à la quantité d'électricité transportée en 1 seconde par un courant de 1 ampère. Symbole : C.

couple électromagnétique. La force magnétique appliquée aux conducteurs répartis sur le périmètre du rotor se traduit par un couple mécanique agissant sur l'arbre qui lui est solidaire.

couplemètre. *n.* L'effet de deux forces parallèles, mais de sens contraires, qui agissent en deux points (symétriques) d'un solide est mesuré au moyen d'un couplemètre.

courants de Foucault. Courants électriques induits dans des masses métalliques placées dans des champs magnétiques variables.

court-circuit. *n.* Mise en relation directe (ou par un conducteur) de deux points de potentiel différent.

coussinet. *n.* Dans une machine, pièce cylindrique en métal doux dans laquelle peut tourner un arbre mobile.

craquage. *n.* Procédé de raffinage qui modifie la composition d'une fraction pétrolière par l'effet de la chaleur, de la pression, et parfois d'un catalyseur. Le mot *cracking* est parfois employé pour craquage.

créosote. *n.* Liquide incolore, d'odeur forte, caustique, extrait du goudron par distillation, et employé comme antiseptique.

croissance exponentielle. Se dit d'un accroissement qui, par unité de temps, est égal à la valeur déjà atteinte multipliée par une constante. Les accroissements ne sont donc pas constants comme dans le cas d'une *croissance linéaire* mais augmentent rapidement avec le temps.

cryogène. *adj.* Se dit d'un mélange réfrigérant.

cryogénie. *n.* Production de basses températures.

culasse. *n.* Couvercle fermant la partie supérieure des cylindres dans un moteur à explosion.

culbuteur. *n.* Dans un moteur à explosion, pièce assurant la commande des soupapes. La came agit sur le culbuteur pour ouvrir ou fermer les soupapes d'admission et d'échappement.

curie. *n.* Unité d'activité radionucléaire correspondant à un nombre de désintégrations de $3{,}7 \times 10^{10}$ par seconde. Symbole : Ci (voir *tableau des unités* en fin de lexique).

cyanamide calcique. Engrais azoté calcique.

cycle d'une batterie ou **d'un accumulateur.** Décharge à 80 % d'une batterie en un nombre d'heures déterminé et recharge. Le nombre de cycles réalisés sans que les qualités de l'accumulateur soient notablement modifiées est une bonne indication de la durée de vie de l'accumulateur.

cycle d'un moteur. Succession des opérations nécessaires au fonctionnement d'un moteur.

cylindre. *n.* Dans un moteur à explosion, pièce dans laquelle se meut le piston.

D

débit massique. Pour un fluide, masse circulant par unité de temps.

déca. Préfixe qui, placé devant une unité, la multiplie par 10. *P. ex. :* un décanewton = dix newtons.

déclencheur ampèremétrique. Appareil qui déclenche mécaniquement un rupteur, en fonction de l'intensité du courant qui le traverse.

déformation angulaire. Déformation, mesurée par un angle, qui se produit lorsqu'un ressort est soumis à des couples de torsion.

degré hygrométrique. Teneur de l'air en vapeur d'eau. Le degré hygrométrique varie avec la température.

dépression (d'un fluide). Affaiblissement relatif de la pression qui contribue à créer une aspiration.

détente. *n.* Augmentation du volume occupé avec diminution de la pression d'un gaz. Dans un moteur à explosion, la détente se fait après l'explosion. C'est pendant cette phase que le piston transmet une force qui entraîne le vilebrequin.

détonation. *n.* Combustion très rapide d'un mélange comburant-carburant. La vitesse de combustion dépend des proportions du mélange. Un mélange détonant est un mélange dont les proportions sont telles qu'il explose.

deutérium. *n.* Isotope de masse 2 de l'hydrogène.

diagenèse. *n.* Ensemble des phénomènes assurant la transformation d'une roche meuble en roche cohérente.

diagramme. *n.* Courbe représentant les variations d'un phénomène.

diagramme entropique. Diagramme où la température est représentée en ordonnée et l'entropie en abscisse. Le cycle de Carnot est représenté par un rectangle sur un diagramme entropique.

diamètre hydraulique (d'un ou plusieurs tubes). Rapport entre le volume occupé par le fluide dans le (ou les) tube(s) et la surface totale mouillée par le fluide.

diaphragme. *n.* Paroi mince séparant deux parties d'un mécanisme; dans le cas d'une turbine à diaphragmes, un diaphragme sépare deux étages successifs mais laisse passer l'arbre en son centre.

diélectrique. *adj.* Qui concerne les mauvais conducteurs de l'électricité. La constante diélectrique qui caractérise les isolants est un coefficient considéré par rapport au vide.

diffraction. *n.* Phénomène dû aux déviations que subissent les rayonnements, thermiques notamment.

diffusion. *n.* Transformation d'un rayonnement qui a une direction déterminée en un rayonnement diffus.

dimension critique ou **masse critique.** C'est la masse de matière fissile nécessaire pour qu'une réaction en chaîne puisse se développer.

disjoncteur. *n.* Interrupteur automatique de courant fonctionnant lors d'une variation anormale de l'intensité ou de la tension.

disque d'une turbine. L'arbre du rotor d'une turbine présente des disques qui portent les aubages. Il y a un disque par étage de la turbine.

dragline. *n.* De l'anglais, *drag :* herse, *line :* câble. Matériel mixte de terrassement se composant d'un ou plusieurs godets racleurs articulés.

ductilité. *n.* Propriété qu'a un corps de pouvoir être étiré sans se rompre.

durabilité. *n.* Qualité de ce qui est durable. Les essais de durabilité de pièces ou appareils conduisent à déterminer la durée de vie par des tests de vieillissement.

dynamique. *n.* Partie de la mécanique qui étudie les relations entre les forces et les mouvements.

dynamomètre. *n.* Instrument qui sert à mesurer l'intensité des forces.

E

eau lourde. Oxyde de deutérium (D_2O) ; liquide analogue à l'eau ordinaire (H_2O), qui est employé comme modérateur dans certaines piles atomiques.

ébullition. *n.* Phénomènes qui se produisent au moment où un corps passe de l'état liquide à l'état gazeux.

ébullition intranucléaire. Se dit lorsque les bulles de vapeur qui se forment dans une partie du liquide ne parviennent pas à la surface ; la vapeur des bulles est réabsorbée par le liquide.

ébullition nucléée. Phase de l'évaporation d'un liquide pendant laquelle les bulles viennent crever à la surface.

échangeur de chaleur. Appareil dans lequel circulent deux fluides à températures différentes ; l'un s'échauffe et l'autre se refroidit.

échangeur tubulaire aileté. Échangeur formé de tubes munis d'ailettes dont la fonction est d'augmenter la surface d'échange avec l'extérieur.

échappement. *n.* Dernière phase du cycle d'un moteur : le piston comprime les gaz brûlés qui s'échappent à travers le pot d'échappement.

écologie. *n.* Partie de la biologie qui étudie les rapports des êtres avec leur milieu naturel. Comme toutes les formes de vie dépendent les unes des autres, la rupture d'un équilibre écologique menace toutes les formes de vie à la fois.

économiseur. *n.* Dispositif qui réchauffe l'eau d'alimentation d'une chaudière jusqu'à une température proche de celle de vaporisation, en utilisant la chaleur des fumées qui quittent la chaudière.

écoulement diphasique. Écoulement de deux phases (liquide et vapeur) dans un tube.

écoulement laminaire. Régime d'écoulement d'un fluide, qui s'effectue par glissement des couches (ou des filets) de fluide les unes sur les autres sans échange de particules entre elles. Opposé à *écoulement turbulent.*

écoulement turbulent. Régime d'écoulement d'un fluide tel que les particules du fluide sont animées d'un mouvement tourbillonnant. S'oppose à *écoulement laminaire*.

effet Joule. Transformation d'une énergie non thermique en énergie thermique. *P. ex. :* transformation d'un travail en chaleur.

effet de serre. Cet effet est réalisé en plaçant un absorbeur de couleur sombre derrière une matière transparente qui laisse passer la lumière mais empêche les pertes thermiques par convection.

effet de taille. Les coûts unitaires de production diminuent théoriquement quand la capacité des installations de production augmente. C'est ce qu'on appelle l'effet de taille.

effluent. *n.* Liquide ou gaz qui s'écoule. Effluents d'une usine : déchets fluides qui en sortent.

élasticité. *n.* Propriété qu'ont certains corps de reprendre leur forme quand la force qui les déformait a cessé d'agir.

élastique. *adj.* En économie, se dit d'une variable dont les variations dépendent de celles d'une autre variable.

électrogène. *adj.* Qui produit de l'électricité. Usage électrogène : utilisation d'une énergie primaire pour produire de l'électricité.

électropathologie. *n.* Science des maladies dues à l'électricité.

électrostatique. *adj.* Se dit des phénomènes qui concernent l'attraction ou la répulsion de charges électriques.

émanométrie. *n.* Étude de la désintégration du radium, thorium ou actinium par la mesure de leur émanation gazeuse (radon, thoron, actinon).

embiellage. *n.* Mécanisme permettant de transmettre et de transformer un mouvement.

embrayage. *n.* Mécanisme permettant d'établir la communication entre un moteur et les organes qu'il doit mettre en mouvement.

endothermique. *adj.* Une réaction est endothermique quand son déroulement provoque l'absorption d'une quantité de chaleur.

énergie fossile. Énergie sous diverses formes (pétrole, charbon, lignite...) résultant de la transformation de matière organique. La photosynthèse est à l'origine de la formation d'énergie fossile à partir d'énergie solaire.

énergie potentielle d'élasticité. Énergie accumulée par un corps élastique, équivalant au travail fourni lors du déplacement du point d'application de la force agissant sur le corps élastique.

énergie primaire. A proprement parler, seules les énergies solaires, gravitationnelles et nucléaires sont des énergies primaires. On considère aussi que des énergies transformées, mais non par l'homme, sont des énergies primaires (fuel, vent...).

énergie rayonnante. Énergie du rayonnement. Ce n'est pas une énergie thermique, mais elle est convertie en énergie thermique quand le rayonnement est absorbé par de la matière.

engrenage à chevrons. Engrenage formé de deux parties hélicoïdales de sens contraires.

engrener. *v.* Mettre en liaison deux roues dentées d'un engrenage.

enrichi. *adj.* Se dit de l'uranium dont on a augmenté la teneur en matériau fissile.

enroulement. *n.* Voir *bobinage*.

éolienne. *n.* Moteur actionné par le vent. Une éolienne électrique ou aérogénérateur transforme l'énergie cinétique du vent en électricité.

éponte. *n.* Terrain stérile qui borde et délimite un filon.

essieu. *n.* Pièce de métal portant une roue à chaque extrémité et supportant le poids du véhicule.

état (d'un système). Situation dans laquelle un système se trouve à un moment donné. La connaissance de l'état d'un système et des actions qui agiront sur lui permet de prévoir son état futur.

éthanol. *n.* Corps chimique dérivé de l'éthane (C_2H_6).

éthylène. *n.* Hydrocarbure gazeux incolore (C_2H_4) obtenu en déshydratant de l'alcool.

étude macroscopique d'un système. Étude de l'ensemble d'un système sans s'attacher au fonctionnement de telle ou telle partie du système.

évaporateur. *n.* Machine ou partie d'une machine servant à vaporiser un liquide.

évaporateur à double effet. Évaporateur dans lequel la chaleur de condensation de la vapeur est utilisée pour vaporiser un autre liquide.

évent. *n.* En technologie, chacun des orifices ménagés dans un moule de fonderie pour laisser échapper les gaz.

excavateur. *n.* Appareil servant à creuser une fouille (un trou important).

exothermique. *adj.* Une réaction est exothermique quand une certaine quantité de chaleur se dégage lors de sa réalisation.

F

facteur de charge. Le facteur de charge d'une centrale électrique est le rapport de la puissance appelée par la puissance installée. Le rendement augmente quand le facteur de charge se rapproche de 1.

fertile. *adj.* Se dit d'un corps qui peut être transformé en matière fissile. C'est le cas de l'uranium 238.

feuillard. *n.* Bande de fer large et très mince.

film de condensat. Faible épaisseur de fluide condensé sur une paroi.

film de vapeur. Un film de vapeur peut se former entre un liquide et une paroi fortement chauffée.

filonien. *adj.* En forme de filon.

fissile. *adj.* Susceptible de subir une fission.

fission. *n.* Éclatement d'un noyau d'atome lourd (uranium, plutonium...) en deux ou plusieurs fragments, déterminé par un bombardement de neutrons et libérant une énorme quantité d'énergie.

flèche d'un ressort. 1° Déformation d'un ressort due à l'action d'une contrainte. 2° Déformation correspondant à la contrainte limite.

flexibilité. *n.* Inverse de la rigidité.

flexion. *n.* Déformation d'un solide soumis à des forces agissant dans son plan de symétrie ou disposées symétriquement deux à deux par rapport à ce plan.

flottation. *n.* Procédé de séparation d'un mélange de corps broyés, utilisant la différence de tension superficielle de ces corps lorsqu'ils sont dans l'eau.

flotteur. *n.* Corps léger flottant sur le carburant dans la cuve d'un carburateur. Le flotteur porte le pointeau qui sert à bloquer l'arrivée de carburant quand le niveau normal est atteint.

fluide frigorifique. Fluide dont l'évaporation est utilisée pour produire des frigories (absorber des calories).

flux massique. Masse circulant par unité de temps. L'unité de flux massique est le kg/s. Syn. : *débit massique*.

force centrifuge. Force qui tend à éloigner du centre une masse animée d'un mouvement circulaire autour de ce centre.

fossé d'effondrement. Compartiment de l'écorce terrestre affaissé entre deux failles voisines ou entre deux faisceaux de failles (syn. : *fossé tectonique, graben*).

fréquence. *n.* Nombre de vibrations d'un phénomène périodique par unité de temps. L'unité de fréquence est le hertz qui correspond à une vibration par seconde.

fret. *n.* Rémunération due par l'affréteur (expéditeur de marchandises) à celui qui effectue le transport de marchandises.

frigorie. *n.* Unité calorifique équivalant à une kilocalorie négative. Symbole : fg.

$$1 \text{ frigorie} = -4{,}1855 \cdot 10^3 \text{ J}$$

fuel-oil. *n.* Combustible liquide dérivé du pétrole, obtenu par mélange de produits résiduaires et de produits intermédiaires de raffinage.

fusible. *n.* Partie d'un circuit électrique susceptible de devenir non conducteur en cas d'augmentation trop forte de l'intensité du courant. Le fusible est utilisé pour éviter la détérioration du matériel à la suite d'un court-circuit.

fusion. *n.* Union de plusieurs atomes légers (hydrogène, lithium) donnant des atomes plus lourds et un grand dégagement d'énergie. Une température extrêmement élevée est nécessaire pour réaliser la fusion.

G

gallon. *n.* Unité de volume équivalant à $4{,}546 \cdot 10^{-3}$ m³.

gazéification. *n.* Transformation en gaz combustibles de produits contenant du carbone.

gazoduc. *n.* Canalisation pour le transport à longue distance de gaz naturel ou de gaz de cokerie.

gazomètre. *n.* Réservoir pour emmagasiner le gaz et pour le distribuer sous pression constante.

géothermie. *n.* Chaleur interne de la Terre.

gicleur. *n.* Orifice calibré servant à limiter le débit d'un fluide dans le carburateur.

giga. Préfixe qui, placé devant une unité, la multiplie par 10^9. *Ex. :* un gigawatt (GW) = 1 milliard de watts.

goujon. *n.* Cheville servant à assembler certaines pièces de construction ou de machines.

gradient de composition. Vecteur exprimant la variation dans l'espace de la composition d'un mélange.

gradient géothermique. Taux de variation de la température de la croûte terrestre en fonction de la profondeur.

graphite. *n.* Carbone naturel ou artificiel cristallisé, presque pur, gris-noir, tendre et friable.

gravimétrie. *n.* En physique, mesure de l'intensité du champ de la pesanteur. En chimie, analyse quantitative chimique effectuée par pesée. En minéralogie, méthode de séparation par densité des constituants d'un mélange.

gravité. *n.* Attraction terrestre exercée sur les corps.

grisou. *n.* Gaz inflammable composé en grande partie de méthane. Le mélange de grisou et d'air explose au contact d'une flamme (coup de grisou dans les mines de charbon).

H

haveuse. *n.* Machine pour exécuter la coupure pratiquée dans le front d'abattage d'une mine.

hélice d'aspiration. Hélice utilisée pour envoyer de l'air dans un échangeur.

hélicoïdal. *adj.* En forme d'hélice.

hélium. *n.* Corps simple gazeux, de numéro atomique 2, de densité 0,138, découvert dans l'atmosphère solaire, et qui existe en petite quantité dans l'air; très léger et ininflammable, il est utilisé pour gonfler les ballons.

heptane. Voir *indice d'octane.*

hexaphasé. *adj.* Se dit d'un courant qui comporte six phases.

humique. *adj.* Se dit d'une activité ou d'une substance que l'on trouve dans l'humus.

hydrate. *n.* Combinaison de l'eau avec une substance.

hydrazine. *n.* Composé basique de formule $H_2N\text{-}NH_2$.

hydrocarbure cyclique. Combinaison de carbone et d'hydrogène dont la molécule contient une chaîne fermée.

hydrure. *n.* Composé de l'hydrogène avec un autre corps simple.

hyperboloïde de révolution. 1° Surface engendrée par une hyperbole tournant autour de l'un de ses axes. 2° Solide limité par la surface définie précédemment.

hystérésis. *n.* Retard dans l'évolution d'un phénomène physique par rapport à un autre.

I

igné, ée. *adj.* Qui est de feu, qui a les qualités du feu.

impédance. *n.* Quotient de la tension efficace par l'intensité efficace d'un courant alternatif.

inconel. *n.* Alliage contenant du nickel. L'inconel 600 (nickel - chrome - fer) a une résistance mécanique élevée jointe à une excellente résistance à la corrosion chimique. Il est utilisé pour les pièces de four et supporte les hautes températures. L'inconel 718 (nickel - molybdène - aluminium) est utilisé pour les pièces d'avion et les roues de turbine.

indice de cétane. Voir *cétane.*

indice d'octane. Indice servant à mesurer la valeur antidétonante d'un carburant. L'octane (C_8H_{18}) a pour indice 100, l'heptane (C_7H_{18}) 0.

inducteur. *n.* Aimant permanent ou bobinage servant à créer un flux magnétique. Le flux d'induction créé par un électro-aimant varie avec le courant circulant dans le bobinage.

induction électromagnétique. Production de courant électrique dans un circuit par suite de la variation du flux magnétique (ou flux d'induction) qui le traverse.

infiniment allongé. Les modèles théoriques utilisant une dimension infiniment allongée sont utilisés pour décrire le fonctionnement de systèmes tels qu'une de leurs dimensions soit beaucoup plus grande que les autres. Le modèle d'un cylindre « *infiniment allongé* » est utilisé quand la longueur du cylindre est beaucoup plus grande que son diamètre.

infrastructure. *n.* Base matérielle d'une société (situation géographique, économie...) ; s'oppose à superstructure. Infrastructure d'importation : moyens matériels permettant l'importation (ports, pipe-lines...).

inhiber. *v.* Mettre un frein à l'activité. L'adjonction d'une substance inhibante pour une réaction permet de ralentir ou d'empêcher cette réaction. *P. ex. :* l'adjonction de plomb tétraéthyle dans l'essence permet d'empêcher la détonation dans le moteur (mais les résidus d'échappement qui contiennent du plomb sont alors toxiques).

injection. *n.* Action d'introduire sous pression. Dans un moteur à injection le carburant est injecté directement dans les cylindres au sein desquels se fait la carburation.

in situ. Locution signifiant « dans l'endroit même ». Plus spécialement employée en minéralogie.

insolateur. *n.* Partie d'un système de captation de l'énergie solaire qui est exposée aux rayons solaires et transforme l'énergie rayonnante en énergie thermique. Syn. de *capteur solaire.*

intensité efficace (d'un courant alternatif). Intensité d'un courant continu qui cède à une même résistance la même puissance calorifique que le courant alternatif considéré.

intérêts intercalaires. Intérêts des sommes engagées pour une construction, courant jusqu'à la date d'achèvement des travaux.

interface. *n.* Couche de séparation entre deux produits non miscibles.

inversion. *n.* De nombreux moteurs électriques peuvent fonctionner en générateur de courant, c'est-à-dire produire de l'électricité à partir d'énergie mécanique. Il s'agit d'une inversion de conversion.

ionisation. *n.* Production d'ions (particules chargées électriquement) dans un gaz ou un électrolyte.

isentrope. *adj.* 1° Se dit de deux états qui ont la même entropie. 2° Courbe des points de même entropie. 3° Transformation isentropique d'un système : transformation que ne modifie pas l'entropie du système.

isochore. *adj.* Se dit d'une transformation d'un système à volume constant.

isomérisation. *n.* Transformation d'une molécule pour former une molécule de même composition chimique et de même masse moléculaire, mais dont la structure et les propriétés chimiques diffèrent.

isotherme. *adj.* Se dit d'une transformation qui s'effectue à température constante. Courbe isotherme : courbe joignant les points d'égale température.

J - K

joule. *n.* Unité de travail. Travail d'une force de 1 newton dont le point d'application se déplace de 1 mètre dans la direction de la force.

jupe d'un piston. Surface latérale d'un piston, qui assure son guidage à l'intérieur d'un cylindre (Syn. : *fourreau*). La jupe (du piston) coulisse dans la chemise (du cylindre).

kérosène. *n.* Liquide pétrolier, distillant entre 150 et 300 °C, obtenu comme intermédiaire entre l'essence et le gas-oil à partir du pétrole brut.

kilotonne. *n.* Unité servant à mesurer la puissance d'une explosion en la comparant à l'énergie produite par mille tonnes de trinitrotoluène (T.N.T.). Symbole : kt.

L

laminage de la vapeur. Chute de la pression de la vapeur à la suite de son passage à travers un orifice étroit.

laminoir. *n.* Machine comportant des couples de cylindres entre lesquels passe une matière dont on veut réduire l'épaisseur.

laser. *n.* Appareil servant à produire des éclairs intenses de lumière cohérente, utilisé en télécommunication, biologie, médecine.

latent. *adj.* Se dit de ce qui n'est pas apparent. Chaleur latente (de vaporisation, de fusion...) : quantité de chaleur mise en jeu par un changement d'état effectué à température constante.

lentille de sable. Sable accumulé en forme de lentille dans le sol.

lignite. *n.* Roche combustible contenant 70 % de carbone, ayant souvent l'aspect du bois fossile.

limite d'élasticité d'un matériau. Valeur limite au-delà de laquelle la force agissant sur un matériau produit une déformation permanente.

liquéfaction. *n.* Passage, pour un corps, de l'état gazeux à l'état liquide. Voir *condensation.*

liqueur noire. Résidus polluants de l'industrie papetière.

lit à structure granulaire. Couche de particules solides de forme granulaire. Les transferts de chaleur dans un lit à structure granulaire dépendent du diamètre des particules.

lixiviation. *n.* Extraction des matières solides d'un mélange à l'aide de dissolvants appropriés.

longueur d'onde. Distance entre deux points consécutifs de même phase d'un mouvement ondulatoire.

lubrification. *n.* Action de graisser un mécanisme pour faciliter son fonctionnement.

lumière. *n.* Orifice d'entrée et de sortie des gaz dans le cylindre d'un moteur.

luminance. *n.* Quotient de l'intensité lumineuse émise par une surface, par l'aire apparente de cette surface, pour un observateur lointain.

luxmètre. *n.* Appareil servant à mesurer l'intensité de la lumière.

M

magnésiothermie. *n.* Méthode de réduction d'oxyde ou de fluorure métallique utilisant le magnésium.

magnétisme. *n.* Partie de la physique concernant les propriétés des aimants.

magnéto. *n.* Génératrice de courant électrique où le courant d'induction est produit dans un bobinage tournant dans le champ magnétique créé par un aimant. La magnéto permet à un moteur à explosion de tourner même quand la batterie ne peut plus fournir de courant.

magnétométrie. *n.* Mesure des grandeurs magnétiques. Étude des composantes du champ magnétique terrestre.

mandrin. *n.* Outil pour percer, pour emboutir une pièce, pour agrandir ou égaliser un trou.

maneton. *n.* Articulation démontable qui fait partie de la manivelle et qui réunit la tête de bielle et la manivelle.

manivelle. *n.* Levier coudé à angle droit, à l'aide duquel on imprime un mouvement de rotation continu à l'arbre sur lequel il est fixé.

masse linéique. Masse par mètre linéaire.

masse moléculaire. Somme des masses atomiques des éléments qui constituent la molécule d'un corps.

méga. Préfixe placé devant une unité et signifiant qu'on la multiplie par 10^6. *P. ex. :* 1 mégawatt (MW) = 1 million de watts.

métamorphose. *n.* Changement d'une forme en une autre.

méthanier. *n.* Navire conçu pour transporter du gaz naturel liquéfié.

méthanol. *n.* Composé dérivé du méthane de formule CH_3OH. Syn. : *alcool méthylique.*

meule. *n.* Corps solide de forme circulaire qui agit par abrasion.

micro-organisme. *n.* Organisme microscopique, végétal ou animal.

micropore. *n.* Interstice microscopique qui sépare les molécules d'un corps.

milieu alcalin. Milieu basique. Alcali est un synonyme de soude.

minéralisation. *n.* 1° Transformation d'un métal en minerai. 2° Transformation d'une substance non minérale par dépôt de minéraux sur la structure originelle.

miscible. *adj.* Qui peut former avec un autre corps un mélange homogène.

modérateur. *n.* Matière utilisée dans le cœur d'un réacteur nucléaire pour ralentir la réaction en chaîne.

module d'élasticité. Quotient de la force (ou du couple) agissant sur un corps par la déformation obtenue.

module d'une roue dentée. Quotient du diamètre de la roue par le nombre de dents.

molybdène. *n.* Métal (Mo) de numéro atomique 42, blanc, dur, cassant et peu fusible. On l'utilise pour fabriquer les aciers ferritiques.

moment d'inertie. Intégrale du produit de chaque élément de masse de ce corps par le carré de la distance de cet élément à un axe fixe appelé axe d'inertie.

monochromatique. *adj.* Se dit d'un rayonnement qui ne comporte qu'une seule longueur d'onde.

monoclinal, e, aux. *adj.* En géologie, se dit d'une structure où les couches appartiennent à un seul et même flanc de pli.

monophasé. *adj.* Se dit des courants alternatifs simples ainsi que des appareils produisant ou utilisant ces courants. S'oppose à *polyphasé*.

montage en parallèle. Montage de plusieurs récepteurs dont les bornes de même nom sont réunies électriquement. Opposé à *montage en série*.

montage en série. En électricité le montage en série se dit de plusieurs conducteurs (générateurs ou récepteurs) dont les bornes de noms contraires sont réunies électriquement, et qui sont parcourus par la même intensité de courant.

morphogenèse. *n.* Manière dont les formes sont créées.

moteur à combustion externe. Se dit d'un moteur où une chaudière chauffe au préalable un fluide caloporteur qui est ensuite utilisé pour produire l'énergie mécanique dans le moteur.

moteur à combustion interne. Moteur dans lequel l'énergie fournie par un fluide combustible est directement transformée en énergie mécanique.

moteur Diesel. Moteur à combustion interne, consommant des huiles et fonctionnant par auto-allumage du combustible injecté dans de l'air fortement comprimé. Un moteur semi-diesel fonctionne avec un taux de compression moins élevé mais nécessite un allumage électrique.

moteur stationnaire. Moteur qui reste en place. Pour ce type de moteur le critère rendement est privilégié par rapport au critère puissance massique.

moteur statique. Moteur qui ne comporte aucune pièce en mouvement. Il existe des moteurs statiques aérobies, statiques anaérobies, statiques à propulsion non chimique.

moteur synchrone. Moteur électrique dont la vitesse constante est déterminée par la fréquence du courant alternatif qui l'alimente.

mouvement aléatoire de particule. Expression pour désigner un mouvement tel qu'il n'est pas possible de connaître la trajectoire de la particule.

multiplicateur de vitesse. Système de transmission, tel que la vitesse de rotation à la sortie est supérieure à la vitesse de rotation à l'entrée. Syn. : *démultiplicateur*.

N

naphta. *n.* Hydrocarbure dont le point d'ébullition est compris entre 100 et 210 °C, obtenu à partir du pétrole ou du charbon. Généralement le naphta de pétrole est obtenu entre l'essence et le kérosène.

naphtalène. *n.* Hydrocarbure aromatique ($C_{10}H_8$) formé de deux noyaux benzéniques accolés. Naphtaline : naphtalène impur.

nappe phréatique. Nappe d'eau souterraine alimentant les sources.

neurotoxique. *adj.* Se dit d'un produit qui attaque le système nerveux.

neutrino. *n.* Particule subatomique de masse très petite et dénuée de charge électrique.

neutron. *n.* En physique, ce nom désigne un élément constitutif de l'atome qui est neutre électriquement.

newton. *n.* Unité de force. Force nécessaire pour communiquer à une masse de 1 kilogramme une accélération de 1 mètre par seconde carré. Symbole : N.

nominal. *adj.* Qui se fait en désignant les noms. Conditions nominales de fonctionnement : conditions de fonctionnement type qui sont nommément désignées (ou conditions types précises dont on suppose qu'elles sont connues).

normalisation. *n.* Ensemble de règles techniques résultant de l'accord des producteurs et des usagers, ou de la puissance publique, et visant à spécifier et unifier les caractéristiques de matériaux ou de machines, dans tous les domaines d'activités.

noyau. *n.* En électricité, partie d'un circuit magnétique sur lequel sont mis en place les enroulements du bobinage.

O

octane. *n.* Hydrocarbure saturé (C_8H_{18}), peu détonant, existant dans l'essence de pétrole. Voir *indice d'octane*.

off-shore. Désigne l'exploitation des gisements de matières premières (principalement pétrole et gaz naturel) qui est réalisée en pleine mer.

oléfines. *n.* Hydrocarbures éthyléniques de formule générale C_nH_{2n}, obtenus par craquage du méthane à la vapeur.

onduleur. *n.* Appareil transformant le courant électrique continu en courant alternatif. Certains onduleurs transforment le courant continu en courant alternatif sinusoïdal.

orogénie. *n.* Étude des dislocations de l'écorce terrestre.

oxydant. *adj.* Se dit d'un corps qui peut en oxyder d'autres, c'est-à-dire qui peut gagner des électrons lors d'une réaction chimique.

oxyde de carbone. Composé d'un atome d'oxygène avec un atome de carbone. L'oxyde de carbone est dangereux.

P

paléochenal, *n.* Chenal fossile.

paléogéographie. *n.* Science qui a pour objet l'étude de la répartition des mers et des continents au cours des époques géologiques.

paléorécif. *n.* Récif fossile.

pas d'une roue d'engrenage. Quotient de la circonférence de la roue par le nombre de dents.

pasteurisation. *n.* Opération dont le but est de détruire les germes pathogènes d'un aliment tout en conservant les vitamines. On peut la réaliser en portant l'aliment à une température inférieure à 100 °C pendant un certain temps.

pechblende. *n.* Oxyde d'uranium naturel, le plus important des minerais d'uranium, dont on extrait aussi le radium. Syn. : *péchurane et uraninite*.

période. *n.* La période d'un corps radio-actif est l'intervalle de temps nécessaire pour que sa radioactivité diminue de moitié.

perte de charge. Diminution de la pression d'un fluide circulant dans une tuyauterie. Différence du potentiel « pression » entre l'entrée et la sortie.

pétrographie. *n.* Étude de la formation et de la composition minéralogique des roches.

phase. *n.* 1° Toute partie homogène d'un mélange. 2° En phase : se dit de deux phénomènes périodiques qui varient de la même façon à tout instant.

phénol. *n.* Dérivé oxygéné du benzène que l'on extrait des huiles fournies par le goudron de houille. C'est un poison dont l'antidote est le sucrate de chaux.

phosphate. *n.* Sel de l'acide phosphorique.

photométrie. *n.* Mesure de l'intensité lumineuse.

photosynthèse. *n.* Synthèse d'un corps chimique, de substances organiques (glucides) à l'aide de l'énergie lumineuse, par les végétaux chlorophylliens. Toutes les énergies fossiles ont été produites par la photosynthèse.

pignon. *n.* La plus petite des roues dentées d'un couple d'engrenage cylindrique ou conique.

pile biochimique. Appareil produisant de l'énergie électrique grâce à l'action de micro-organismes sur des substances organiques.

pile à combustible. Cellule électrochimique qui produit une énergie électrique à partir de l'énergie chimique d'un combustible courant et d'un comburant qui est en général l'oxygène. *Ex.* : pile hydrogène-oxygène.

piston. *n.* Disque cylindrique, à frottement doux, se déplaçant dans le cylindre. Dans un moteur à explosion, le piston reçoit la poussée des gaz et la transmet à la bielle.

placer. *n.* Nom donné, en Californie et en Australie, aux lieux où l'on trouve de l'or.

planning. *n.* Plan détaillé et parfois chiffré définissant l'organisation rationnelle d'un travail.

plaque. *n.* Élément constitutif d'un accumulateur. La puissance électrique disponible dépend de la surface des plaques de l'accumulateur. Les batteries, dites de démarrage, qui doivent fournir une forte intensité pendant une courte période, ont une grande surface de plaque pour un poids de matière relativement faible par rapport aux batteries dites « fixes ou semi-fixes ».

plasma. *n.* État de la matière tel que les noyaux sont séparés de leur enveloppe électronique.

plutonium. *n.* Métal de numéro atomique 94, obtenu dans les piles à uranium. Il peut être utilisé pour fabriquer les bombes atomiques.

pneumoconiose. *n.* Affection chronique du poumon due à l'inhalation de poussières et particules solides.

pointeau. *n.* Tige conique supportée par le flotteur du carburateur, qui sert à régler le niveau de carburant dans la cuve du carburateur.

polarisation. *n.* Établissement d'une différence de potentiel entre deux conducteurs.

pôle. *n.* Chacune des extrémités d'un générateur ou d'un récepteur électrique, utilisées pour les connexions au circuit extérieur. Unipolaire : qui a un seul pôle. Multipolaire : qui a plusieurs pôles.

pollution thermique. Élévation de température d'un milieu provoquant la perturbation des équilibres écologiques.

polymérisation. *n.* Union de plusieurs molécules identiques pour former une molécule plus grosse.

polyphasé. *adj.* Se dit d'un système de *n* grandeurs sinusoïdales de même fréquence et déphasées l'une par rapport à l'autre de $\frac{2\pi}{n}$. Courant électrique triphasé : système de trois courants monophasés décalés l'un par rapport à l'autre de 1/3 de période.

pondérer. *v.* Modifier la valeur de certaines grandeurs.

pont roulant. Appareil de levage à champs d'action parallélépipédiques.

positon. *n.* Électron positif.

pouvoir calorifique. Capacité d'un combustible à fournir de l'énergie thermique.

pouvoir émissif. Aptitude d'une surface à émettre des rayons thermiques. Le pouvoir émissif varie suivant les différents corps et suivant la température. Syn. : *émissivité.*

pouvoir émissif monochromatique. Aptitude d'une surface à émettre un rayon d'une longueur d'onde déterminée.

pousseur. *n.* Bateau à moteur assurant le poussage d'un ou plusieurs chalands. Le pousseur consomme moins d'énergie que le remorqueur car les remous provoqués par l'hélice ne freinent pas les chalands.

précipitation. *n.* Dépôt qui se forme lors de l'apparition d'un corps chimique non soluble dans un solvant.

presse-étoupe. *n.* Dispositif empêchant un fluide sous pression de s'échapper par les interstices d'un joint.

pression hydrostatique. Pression résultant du poids d'une colonne d'eau.

pressuriser. *v.* Maintenir à l'intérieur une pression supérieure à la pression extérieure. Les réacteurs à eau pressurisée utilisent l'eau sous pression comme fluide de refroidissement. L'eau pressurisée à 155 bars ne bout pas à 320 °C.

primage. *n.* (mot anglais) Entraînement d'eau par la vapeur produite dans une chaudière.

primaire. *n.* Bobinage où circule un courant électrique qui crée un flux d'induction. Primaire d'une bobine d'allumage ou d'un transformateur, par exemple.

propergol. *n.* Type de corps dont la réaction chimique dégage une grande quantité d'énergie sans utiliser l'oxygène de l'air. Les moteurs à combustion anaérobies utilisent des propergols.

propulseur thermo-électrique. Moteur à combustion externe dont la chaudière associée est un arc électrique.

psychromètre. *n.* Appareil servant à mesurer le degré hygrométrique de l'air.

puissance active. Produit de la différence de potentiel par l'intensité efficace. Syn. : *puissance efficace.*

puissance appelée. Puissance débitée par une centrale sur le réseau de consommation. La puissance appelée varie avec le temps.

puissance installée. Puissance maximale que peut fournir une centrale. Syn. : *puissance nominale.*

puissance massique. Puissance d'un moteur par unité de poids de ce moteur. Les moteurs à forte puissance massique peuvent être utilisés pour l'aviation. Les moteurs à faible puissance massique sont souvent stationnaires.

puissance nominale. Puissance qui est fournie aux conditions nominales de marche. Voir *nominal.*

puissance du rayonnement sur une surface. Unité SI : watt par mètre carré (W/m^2). Calorie heure par centimètre carré.

$$1\ cal/h/cm^2 = 0{,}1163\ W/m^2\ (cal/h/cm^2).$$

Btu par heure par pied carré

$$1\ Btu/h/ft^2 = 3{,}13\ W/m^2\ (Btu/h/ft^2).$$

P.W.R. (pressurized water reactor). Réacteur à eau pressurisée. Le refroidissement est obtenu en faisant circuler de l'eau pressurisée à 155 bars environ qui ne bout pas à 320 °C. Voir *tableau* en fin de lexique.

pyrogénation. *n.* Réaction chimique produite par l'action de la chaleur.

pyrolyse. *n.* Décomposition d'un corps obtenue par chauffage sans action chimique.

pyromètre. *n.* Instrument de mesure des hautes températures.

Q - R

quantité de mouvement. Produit de la masse d'un corps par sa vitesse.

radial. *adj.* Disposé suivant un rayon. Dans une turbine radiale, la vapeur s'écoule suivant un rayon perpendiculaire à l'axe de la turbine.

radiométrie. *n.* Mesure des rayonnements émis par l'uranium et ses descendants.

rapport de réduction. Rapport entre les vitesses de rotation à l'entrée et à la sortie d'un engrenage.

ratio. *n.* Nom latin passé en anglais puis en français. Signifie rapport.

rayonnement diffus. Rayonnement constitué de rayons allant dans plusieurs (ou dans toutes) les directions. Un rayonnement complètement diffus ne peut pas être concentré par des procédés optiques.

rayonnement thermique. Rayonnement dont la longueur d'onde est comprise entre 0,2 μm et 100 μm. Son absorption par un corps provoque l'échauffement de celui-ci. Il comprend les infrarouges, la lumière visible et une partie des ultraviolets.

rayons cosmiques. Rayons de haute énergie provenant à la fois du Soleil, de l'espace interstellaire et des Galaxies.

rayons gamma (γ). Radiations émises par des corps radio-actifs, de longueur d'onde inférieure à celle des rayons X, donc plus pénétrantes. Leur action physiologique est puissante. Les radiations cosmiques contiennent des rayons γ.

rebouilleur. *n.* Appareil où la vapeur condensée est revaporisée.

récepteur. *n.* Appareil consommant du courant électrique.

récepteur d'un moteur électrique. Appareil utilisant l'énergie mécanique produite par le moteur.

réchauffeur d'air. Appareil situé après l'économiseur (sur le parcours des fumées) et qui utilise la chaleur des fumées pour réchauffer l'air avant de l'envoyer dans le foyer.

récupérateur de chaleur. Échangeur où la chaleur des effluents est utilisée pour préchauffer les fluides entrants.

redresseur. *n.* Appareil dans lequel le courant alternatif est transformé en courant unidirectionnel.

réducteur. *adj.* 1° En chimie : un corps réducteur est un corps qui peut céder des électrons. 2° En mécanique, se dit d'un mécanisme qui diminue la vitesse de rotation d'un arbre.

reformage. *n.* Raffinage d'une essence dont la composition est modifiée par l'effet de la température et de la pression. Le mot reforming est encore employé pour reformage.

réfractaire. *n.* et *adj.* Qui résiste à de très hautes températures.

réfrigération. *n.* Abaissement artificiel de la température; production de froid. La réfrigération est produite par évaporation.

régime stationnaire. Régime d'un système dont les relations avec l'extérieur sont constantes.

régime variable. Régime d'un système dont les relations avec l'extérieur (et notamment les entrées) sont variables.

registre. *n.* En technologie, mécanisme réglant le débit d'un fluide.

réluctance. *n.* Rapport entre la force magnétomotrice d'un circuit magnétique et le flux d'induction qui le traverse.

répulsion. *n.* Résultat des forces qui tendent à éloigner deux corps l'un de l'autre. Deux parties aimantées de même polarité se repoussent.

réserve économique. Quantité d'un minerai qu'il est possible d'extraire à un coût inférieur à un prix donné (seuil critique).

réserves récupérables. Total du minerai existant et connu, tel qu'il existe une technologie permettant de l'extraire à un coût situé en deçà d'un seuil fixé.

résistance d'encrassement. Résistance supplémentaire aux flux thermiques qui sont dus à l'encrassement.

résistivité. *n.* Caractéristique électrique d'une substance conductrice; elle est égale à la résistance d'un cylindre de cette substance de longueur égale à l'unité et de section égale à l'unité. Elle se mesure en ohm mètre (ou ohm mètre carré par mètre).

résonance. *n.* Grande augmentation de l'amplitude d'une oscillation sous l'influence d'impulsions régulières de même fréquence.

ressort de tarage. Le ressort de tarage permet de maintenir un orifice fermé jusqu'à ce que la pression dépasse un certain niveau.

rhéostat. *n.* Résistance variable qui, placée dans un circuit électrique, permet de modifier l'intensité d'un courant.

rhyolite. *n.* Roche éruptive voisine du granite.

rigidité d'un ressort. Rapport de la variation de la charge appliquée à la variation de la flèche conséquente à cette variation de charge.

rotor. *n.* Ensemble tournant dans les constructions mécaniques et électromécaniques. S'oppose aux parties fixes *(stator).* Le rotor d'une turbine est une masse mise en mouvement par le fluide en écoulement.

rupteur. *n.* Dispositif destiné à interrompre l'alimentation du circuit primaire de la bobine d'allumage, de façon que la haute tension soit débitée par le circuit secondaire à des moments précis.

S

salpêtre. *n.* Nom usuel du nitrate de potassium. Il se forme sur les murs et le sol dans les régions humides et tempérées. On pense que ce sont les Chinois qui l'ont utilisé la première fois pour fabriquer de la poudre.

schiste. *n.* Nom général des roches à texture feuilletée pouvant se diviser en lames.

secondaire. *n.* Bobinage où un courant électrique se crée sous l'effet d'une variation du flux d'induction. Secondaire d'une bobine d'allumage ou d'un transformateur de courant.

sectionneur. *n.* Appareil qui rompt la continuité d'un circuit électrique. Utilisé pour la sécurité mais ne fonctionne qu'à vide.

sédiment. *n.* Dépôt des matières dissoutes ou suspendues dans un liquide.

segment. *n.* Anneau élastique utilisé pour assurer l'étanchéité entre les deux parties du cylindre séparées par le piston.

semi-conducteur. Corps conduisant imparfaitement le courant électrique (dans un seul sens).

sismicité ou séismicité. *n.* Fréquence des tremblements de terre en un lieu donné.

sodium. *n.* Métal de numéro atomique 11, de densité 0,97, fondant à 98 °C. Il réagit violemment avec l'eau, c'est pourquoi l'irruption d'eau dans le sodium peut provoquer une explosion.

solubilité. *n.* Aptitude d'un corps à se dissoudre dans un solvant.

soluté. *n.* Corps dissous dans un liquide appelé solvant.

solution colloïdale. Qui a l'apparence de la colle de gélatine et ne peut être dialysée.

soufflage. *n.* Le soufflage de l'air (ou du comburant) dans une chaudière est assuré par un ventilateur. Le tirage et le soufflage doivent se compenser.

source de chaleur. Les machines thermiques fonctionnent avec deux sources de chaleur : la source chaude qui fournit des calories et la source froide qui absorbe des calories (ou fournit des frigories).

source de chaleur interne. Se dit d'une source de chaleur interne à un système étudié.

soutirage de vapeur. Utilisation de vapeur ayant déjà converti en travail une partie de son énergie thermique pour réchauffer l'eau d'alimentation.

statique. *n.* Branche de la mécanique qui a pour objet l'équilibre des systèmes de forces.

statique. *adj.* Qui demeure au même point (par opposition à dynamique).

stator. *n.* Partie fixe dans une machine qui comporte des pièces tournantes.

stellite. *n.* Série d'alliages contenant du cobalt, du chrome, du tungstène et du molybdène dans des proportions variables. Ces alliages très durs peuvent être utilisés pour protéger des surfaces soumises à l'usure.

stœchiométrie. *n.* Partie de la chimie qui étudie les rapports ou proportions suivant lesquels les corps réagissent.

stratigraphie. *n.* Partie de la géologie qui étudie les couches de l'écorce terrestre afin d'établir leur ordre normal de superposition et leur âge relatif.

stylistique. *n.* Étude des procédés de style. En linguistique, le style est la manière d'écrire vue sous le double point de vue du respect des règles et de l'art. En technologie, citons simplement l'exemple du style « rétro ».

subsidence. *n.* Lent mouvement d'affaissement de certaines parties de l'écorce terrestre sous le poids des dépôts sédimentaires et sous l'action de déformations.

supraconducteur. *n.* Se dit d'un métal qui a une résistivité presque nulle au-dessous d'une certaine température.

surchauffe. *n.* Opération consistant à chauffer la vapeur saturée, et qui permet d'augmenter la pression de la vapeur. Sur certaines turbines la surchauffe est réalisée pendant la détente.

surchauffeur. *n.* Partie d'une chaudière où la vapeur saturée précédemment produite est réchauffée au-dessus de la température de saturation, en vue d'augmenter son enthalpie.

surface sans flux. Surface qui n'émet pas de rayonnement thermique. Couple de surfaces tel que le débit net de chaleur rayonné entre les deux surfaces est nul.

surrégénérateur. *n.* Type de centrale nucléaire qui consomme peu d'uranium et produit des matières fissiles qui peuvent être réutilisées dans un autre surrégénérateur.

surtension. *n.* Tension électrique supérieure à la normale pouvant exister, en service normal, entre deux parties conductrices.

syénite. *n.* Sorte de roche granitique.

syntaxe. *n.* En linguistique, il s'agit de la manière dont les mots sont disposés dans une phrase qui a une signification. En technologie, il s'agit de la manière d'arranger les éléments d'une machine pour que celle-ci fonctionne.

système. *n.* Ensemble de corps considérés séparément de leur environnement.

T

tachymètre. *n.* Appareil servant à mesurer la vitesse.

tanker. *n.* Navire dont la coque elle-même est un réservoir et qui sert à transporter le pétrole.

techne. Premier élément de composition d'un mot introduisant l'idée de technique. *Ex. :* technologie, science des techniques.

tectonique. *n.* Partie de la géologie qui étudie les déformations des terrains, sous l'effet des forces internes, postérieurement à leur mise en place.

tellurure. *n.* Combinaison du tellure (numéro atomique 92) avec un autre élément.

température de saturation. Étant donné une vapeur, la température de saturation est la température minimale à laquelle peut être portée la vapeur sans qu'il y ait condensation.

température thermodynamique. Température en degrés Kelvin ou échelle absolue de température.

tensio-actif. Un produit chimique tensio-actif modifie les forces de tension surperficielle. Peut être utilisé pour faire des émulsions ou des flottations.

tension. *n.* En électricité, différence de potentiel; se mesure en volts. En thermodynamique, tension de vapeur = pression de vapeur.

terminal. *n.* Point d'aboutissement d'un pipe-line aménagé pour le déchargement des pétroliers près d'un littoral.

thaumaturgique. *adj.* Se dit d'une action qui tient du miracle.

thermie. *n.* Unité de quantité de chaleur. Énergie nécessaire pour élever de 1 °C la température d'une tonne d'eau à 15 °C sous pression atmosphérique. Voir *tableau des unités* en fin de lexique.

thermodiffusion. *n.* Diffusion de la chaleur dans un corps. Dépend de sa capacité calorifique et de sa conductibilité thermique.

thermodynamique. *n.* Étude des relations entre les phénomènes mécaniques et les phénomènes thermiques.

thermogène. *adj.* Qui produit de la chaleur. Usage thermogène : utilisation d'une énergie primaire pour produire de la chaleur.

thermomécanique. *adj.* Se dit des forces produites à partir de la chaleur.

thorium. *n.* Métal rare de numéro atomique 90, blanc, cristallin, de densité 12,1 et fondant vers 1 700 °C.

timbre d'une chaudière. Pression maximale qu'elle peut admettre sans danger. S'exprime en bars.

tirage. *n.* Aspiration des gaz brûlés d'une chaudière. Dans les grosses ou moyennes chaudières le tirage est assuré par un ventilateur.

titane. *n.* Métal de numéro atomique 22, blanc, dur, de densité 4,5, fondant à 1 800 °C, qui par ses qualités se rapproche du silicium et de l'étain. Symbole : Ti.

titre d'une solution. Rapport de la masse du corps dissous à la masse de la solution. *Titre d'une vapeur humide :* rapport entre la masse de vapeur et la masse totale de fluide.

tonne équivalent charbon. Quantité d'énergie correspondant à l'énergie disponible dans une tonne de charbon. Symbole : T.E.C.

tonne équivalent pétrole. Quantité d'énergie correspondant à l'énergie disponible dans une tonne de pétrole. Symbole : T.E.P.

torique. *adj.* Qui a la forme d'un tore, c'est-à-dire d'un solide de révolution engendré par un cercle tournant autour d'une droite située dans son plan mais ne passant pas par son centre.

topographie. *n.* Représentation sur un plan des formes d'un terrain avec tous les détails naturels ou artificiels qu'il porte.

torsion. *n.* Déformation subie par un solide sous l'action de deux couples opposés agissant dans des plans parallèles; chaque section du solide subissant une rotation par rapport à une section voisine.

tour de réfrigération. Appareil dans lequel un liquide est vaporisé. Le changement de phase se fait en absorbant des calories donc en produisant des frigories.

tourillonner. *v.* Tourner autour d'un pivot. Tourillon : pivot métallique autour duquel une pièce peut tourner.

trachyte. *n.* Classe feldspathique de roches volcaniques à pâte grossière.

transformation. *n.* Qui change la forme. Dans le chapitre *Transformation de l'énergie,* transformation de l'énergie signifie qui change les caractéristiques de l'énergie mais non la forme (thermique, électrique, rayonnante...).

transistor. *n.* Dispositif à semi-conducteur souvent à base de silicium qui, au même titre qu'un tube électronique, peut amplifier des courants électriques et assumer des fonctions de modulation.

transuranien. *adj.* Se dit des éléments chimiques de numéro atomique supérieur à celui de l'uranium (92). Il n'existe pas d'éléments transuraniens dans la nature.

trémie. *n.* Sorte de réservoir en forme de pyramide quadrangulaire tronquée et renversée. La trémie de chargement possède une ouverture sur le fond, ce qui permet de charger un véhicule passant en dessous.

trempe. *n.* Opération de traitement thermique qui consiste, par le refroidissement rapide d'un produit métallurgique, à maintenir à température ambiante soit une structure stable à chaud, soit une structure dérivée de cette dernière.

tritium (parfois **tritérium**). *n.* Isotope de masse 3 de l'hydrogène. Le noyau du tritium contient un proton et deux neutrons.

turbine. *n.* Moteur composé d'une roue mobile qui transforme en énergie mécanique l'énergie cinétique d'un fluide.

turbine à action. Turbine dans laquelle la vapeur est détendue dans un distributeur fixe.

turbine à circuit fermé. Le fluide utilisé reste à l'intérieur du système chaudière plus turbine et accomplit plusieurs cycles.

turbine à circuit ouvert. Un liquide est pompé, puis vaporisé. Après la détente il n'est pas réutilisé dans la turbine.

turbine à réaction. Turbine dans laquelle la vapeur est détendue dans le distributeur fixe et dans la roue mobile.

turbocompresseur. *n.* Compresseur rotatif centrifuge à haute pression, constitué d'une ou plusieurs roues à aubes montées en série sur le même arbre.

turbogénérateur. *n.* Générateur de courant électrique qui transforme l'énergie cinétique d'un fluide au moyen d'une turbine.

turbopropulseur. *n.* Propulseur composé d'une turbine à gaz, entraînant une ou plusieurs hélices par l'intermédiaire d'un réducteur (ne pas confondre avec turboréacteur).

tuyère. *n.* Élément de canalisation profilé, destiné à imposer à un fluide en écoulement une augmentation de vitesse.

U

ultracentrifugation. *n.* Centrifugation à un régime de rotation très élevé (plus de 60 000 tours/mn). Ce procédé est utilisé pour séparer des corps de densité très voisine.

uraninite. Voir *pechblende.*

uranium. *n.* Métal de numéro atomique 92, de densité 18,7. L'atome d'uranium peut subir une fusion en libérant de l'énergie lorsqu'il est irradié par des neutrons.

uranium enrichi. L'uranium naturel est composé de deux isotopes : uranium 235 et uranium 238. Enrichir l'uranium revient à augmenter la teneur en matière fissile (U 235).

V

valence. *n.* Propriété caractérisant les corps simples et qui représente le nombre d'atomes d'hydrogène pouvant se combiner à un atome du corps.

vapeur humide. Vapeur qui contient des gouttelettes de liquide.

vapeur saturée. A une pression et une température données, le volume occupé par une vapeur saturée d'un corps ne peut pas contenir une quantité supplémentaire de ce corps sous forme gazeuse.

vapeur sèche. Vapeur qui se trouve à une température supérieure à la température de saturation.

vaporisation. *n.* Transformation d'un liquide en vapeur. La vaporisation est un changement d'état qui absorbe de l'énergie : chaleur latente de vaporisation.

variation linéaire. Se dit quand il existe un coefficient constant de proportionnalité entre deux variables. *P. ex.,* le coefficient U varie linéairement en fonction de T signifie que $U = kT$ où k est constant.

vecteur énergétique. Se dit de ce qui transporte l'énergie. L'hydrogène, le gaz, le pétrole... sont des vecteurs d'énergie. Par extension du sens, les pipelines, les fils électriques peuvent être considérés comme des vecteurs énergétiques.

vilebrequin. *n.* Arbre qui transforme le mouvement rectiligne alternatif de l'ensemble piston-bielle, en un mouvement circulaire.

viscosité. *n.* Résistance d'un fluide à l'écoulement uniforme et sans turbulence.

viscosité cinématique. Rapport entre la viscosité dynamique d'un fluide et sa masse volumique.

viscosité dynamique. Le rapport entre la force tangentielle de viscosité engendrée sur un élément de surface séparant deux couches de fluide et cet élément de surface est proportionnel au gradient de vitesse entre les deux couches de fluide. Le coefficient de proportionnalité est la viscosité dynamique.

vitesse relative. Vitesse d'un objet par rapport à un observateur mobile. Le vecteur vitesse relative est égal au vecteur vitesse absolue moins le vecteur vitesse de l'observateur.

vitrification. *n.* Action de fondre les matières qui après refroidissement présentent la transparence et l'éclat du verre.

volatil. *adj.* Capable de s'évaporer.

volt. *n.* Unité de différence de potentiel. Le volt est la différence de potentiel qui existe entre deux points d'un fil conducteur parcouru par un courant constant de 1 ampère, lorsque la puissance dissipée entre ces deux points est de 1 watt. Symbole : V.

W - Z

watt. *n.* Unité de puissance équivalant à la production de 1 joule par seconde. Symbole : W.

weber. *n.* Unité de flux magnétique. Voir *tableau des unités* en fin de lexique. Symbole : Wb.

zone de desserte. Zone qui est desservie par une installation déterminée. *Ex. :* zone de desserte d'une raffinerie, d'une installation portuaire...

zone de radiation. Partie de la chaudière où les échanges thermiques se font surtout par radiation. Plus la chaudière travaille à température élevée, plus la zone de radiation est importante.

TABLEAU DE DIFFÉRENTS TYPES DE RÉACTEURS

	Spectre neutronique	Modérateur	Caloporteur	Combustible	Utilisation
UNGG	Thermique	Graphite	CO_2	U naturel	Électrogène
HTR	Thermique	Graphite	He	U enrichi	Électrogène Chaleur de procédé
GCFR	Rapide	—	He	U enrichi Pu	Électrogène Calogène
PWR	Thermique	H_2O	H_2O	U enrichi	Électrogène - Propulsion navale - Calogène
BWR	Thermique	H_2O	H_2O	U enrichi	Électrogène Calogène
LMFBR	Rapide	—	Na liquide	Pu	Électrogène Calogène

ABRÉVIATIONS

UNGG - Réacteur à uranium naturel graphite gaz.
HTR - (High temperature reactor) Réacteur à haute température.
GCFR - (Gas cooled fast reactor) Réacteur rapide refroidi par gaz.
PWR - (Pressurized water reactor) Réacteur à eau pressurisée.
BWR - (Boiling water reactor) Réacteur à eau bouillante.
LMFBR - (Liquid metal fast breeder reactor) Réacteur rapide surrégénérateur à métaux liquides.
HWR - (Heavy water reactor) Réacteur à eau lourde.
AGR - (Advanced gas reactor) Réacteur à gaz avancé.
SGHWR - (Steam generating heavy water reactor) Réacteur à eau lourde producteur de vapeur (Grande-Bretagne).
MSBR - (Molten salt breeder reactor) Réacteur surrégénérateur à sels fondus.

Multiples décimaux des unités			Sous-multiples décimaux des unités		
10^1	déca	da	10^{-1}	déci	d
10^2	hecto	h	10^{-2}	centi	c
10^3	kilo	k	10^{-3}	milli	m
10^6	méga	M	10^{-6}	micro	μ
10^9	giga	G	10^{-9}	nano	n
10^{12}	téra	T	10^{-12}	pico	p

T. E. P. Tonne équivalent pétrole*. **T. E. C.** Tonne équivalent charbon*. **1 bbl** = 1 barrel = 1 baril = 259 l.

Coefficients d'équivalence usuels :

1 **T. E. P.** = 1,5 **T. E. C.** = 4,5 MWh
Pour le gaz : 1 000 thermies **P. C. S.** = 0,1 **T. E. P.**
(**P. C. S.** signifie : pouvoir combustible supérieur)

Ordre de grandeur :

Une centrale nucléaire de 1 000 MW fonctionnant 80 % du temps marche 6 200 h dans une année et produit donc 1 000 × 6 200 = 6 200 000 MWh soit 6,2 TWh (térawatt/heure), ce qui équivaut à 1 400 000 **T. E. P.**

**Voir définition dans le lexique.*

UNITÉS DE MESURE

Grandeur	Dénomination	Symbole	Équivalences	Dimension
Longueur	mètre mille	m	 1 852 m	L
Aire	mètre carré	m^2		L^2
Volume	mètre cube litre stère	m^3 l st	 10^{-3} m^3 1 m^3	L^3
Masse	kilogramme tonne	kg t	 10^3 kg	M
Temps	seconde	s		T
Fréquence	hertz	Hz		T^{-1}
Vitesse	mètre par seconde nœud	m/s	 1 mille par heure	LT^{-1}
Accélération	mètre par seconde carrée	m/s^2		LT^{-2}
Force	newton dyne	N dyn	 10^{-5} N	LMT^{-2}
Énergie, travail ou quantité de chaleur	joule erg watt-heure calorie thermie frigorie	J Wh cal th fg	 10^{-2} J 3 600 J 4,1855 J $4{,}1855 \times 10^6$ J $-4{,}1855 \times 10^3$ J	L^2MT^{-2}
Puissance	watt cheval-vapeur	W ch	 735 W	L^2MT^{-3}
Pression	pascal bar atmosphère centimètre de mercure	Pa atm. cm Hg	 10^5 Pa 1,013 25 bar 1 bar = 75 cm Hg	$L^{-1}MT^{-2}$
Viscosité (dynamique)	poiseuille poise	Pl Po	 10^{-1} Pl	$L^{-1}MT^{-1}$
Intensité de courant électrique	ampère	A		A
Force électromotrice et différence de potentiel	volt	V		$ML^2T^{-3}A^{-1}$
Résistance électrique	ohm	Ω		$ML^2T^{-3}A^{-2}$
Quantité d'électricité	coulomb	C		AT
Intensité de champ électrique	volt par mètre	V/m		$MLT^{-3}A^{-1}$
Flux magnétique	weber	Wb		$ML^2T^{-2}A^{-1}$
Température	degré Kelvin degré Celsius	°K °C	t (°C) = T (°K) — 273	
Intensité lumineuse	candela	cd		
Flux lumineux	lumen	lm		
Éclairement	lux	lx		
Luminance	candela par m^2	cd/m^2		
Activité nucléaire	$seconde^{-1}$ curie	s^{-1} Ci	 $3{,}7 \times 10^{10}$ s^{-1}	
Quantité de rayonnement X ou γ	rœntgen	R		

INDEX DES NOMS CITÉS

Les références sont données par l'indication du numéro de la page où se trouve le terme, suivi le cas échéant, des lettres *a* et *b* se rapportant respectivement à la colonne de gauche et à la colonne de droite de chaque page.

Les références sont données, pour les illustrations, par le numéro de la page en caractères gras et, pour le texte, par le numéro de la page en caractères maigres pour une simple citation, et en italique pour un développement plus complet.

Pour les différentes variantes se rattachant à un même terme, un astérisque indiquera le renvoi à ce dernier. *Ex.:*
cellule photovoltaïque
* photopile
photopile (cellule photovoltaïque) **50**

S

T

U - V

W - Y - Z

Imprimé en Italie

GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

TECHNOLOGIE I

GRANGE BATELIÈRE, ÉDITIONS ATLAS, PARIS - ÉDITIONS KISTER, GENÈVE
ÉDITIONS ÉRASME, BRUXELLES-ANVERS

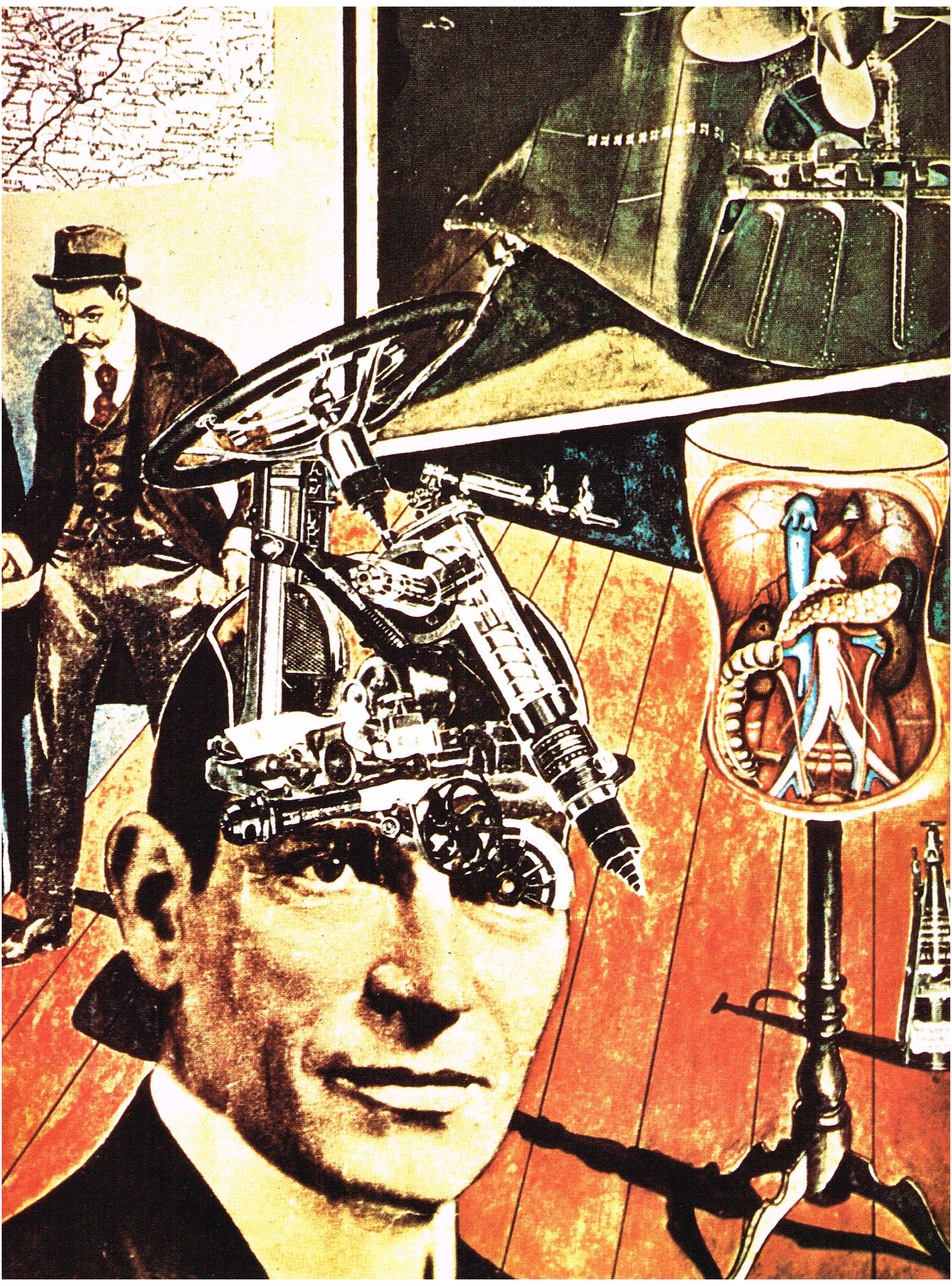

Publiée sous le haut patronage de :
Messieurs les professeurs :
Jean DORST, membre de l'Institut,
Charles FEHRENBACH, membre de l'Institut,
Roger HEIM, membre de l'Institut,
Monsieur l'amiral André JUBELIN,
Messieurs les professeurs :
Pierre LÉPINE, membre de l'Institut,
Louis LEPRINCE-RINGUET, de l'Académie française,
Jean-François LEROY, professeur au Muséum national d'histoire naturelle,
Henri NORMANT, membre de l'Institut,
Monsieur Jacques PICCARD, docteur ès sciences h.c.

Réalisation	IDÉES ET ÉDITIONS 16, avenue de Friedland, 75008 Paris.
Comité de direction	Simone DEVAUX, Uberto TOSCO.
Rédaction	Françoise MENU, Monique LIONS-GENTIL, Vanina DORÉ, Marie-Noëlle PAILLETTE.
Recherche de l'illustration	Mathilde RIEUSSEC.
Mise en pages	Tito TOPIN et Serge BROCHE.
Illustrations techniques	Richard COLIN.
Coordinateur des dessins	Mario LOGLI.
Fabrication	Sylvia COLIN, Jocelyne TÉPÉNIER.
Directeur de la publication	B. BOSC.

Les schémas portant la référence Richard Colin
ont été réalisés d'après des croquis fournis par les auteurs.

Dans ce volume :

Moderna Museet, Stockholm

Ont collaboré à ce volume :

pour l'introduction :

G. DENIELOU.

pour l'énergie, physique et historique :

J.-F. CHRÉTIEN, pour l'historique.

P. GAILLARD, pour l'énergie chimique ; l'énergie nucléaire et la physique nucléaire.

B. MICHAUX, pour qu'est-ce que l'énergie ? et pour les unités et la mesure de l'énergie.

pour l'évaluation des ressources énergétiques de la planète :

L. CAIGNAULT, pour les ressources d'origine solaire fossiles, les ressources d'origine mécanique, les ressources en énergie nucléaire, les réserves mondiales.

L. REYNES, pour les ressources d'origine solaire non fossiles et pour la conclusion - Club de Rome.

pour la conversion de l'énergie :

L. REYNES.

pour la transformation de l'énergie :

J. DEBOUT, pour la transformation d'énergie mécanique en énergie mécanique.

J. GUÉNARD, pour la transformation d'énergie électrique en énergie électrique.

L. REYNES, pour la nécessité de la transformation d'énergie.

A. ZOULALIAN, pour la transformation d'énergie thermique en énergie thermique.

pour la distribution de l'énergie :

L. CAIGNAULT, pour la distribution de l'énergie chimique.

J. GUÉNARD, pour la distribution de l'énergie électrique.

pour le stockage de l'énergie :

L. CAIGNAULT, pour le stockage d'énergie chimique.

J. GUÉNARD, pour le stockage d'énergie électrique.

A. ZOULALIAN, pour le stockage d'énergie thermique.

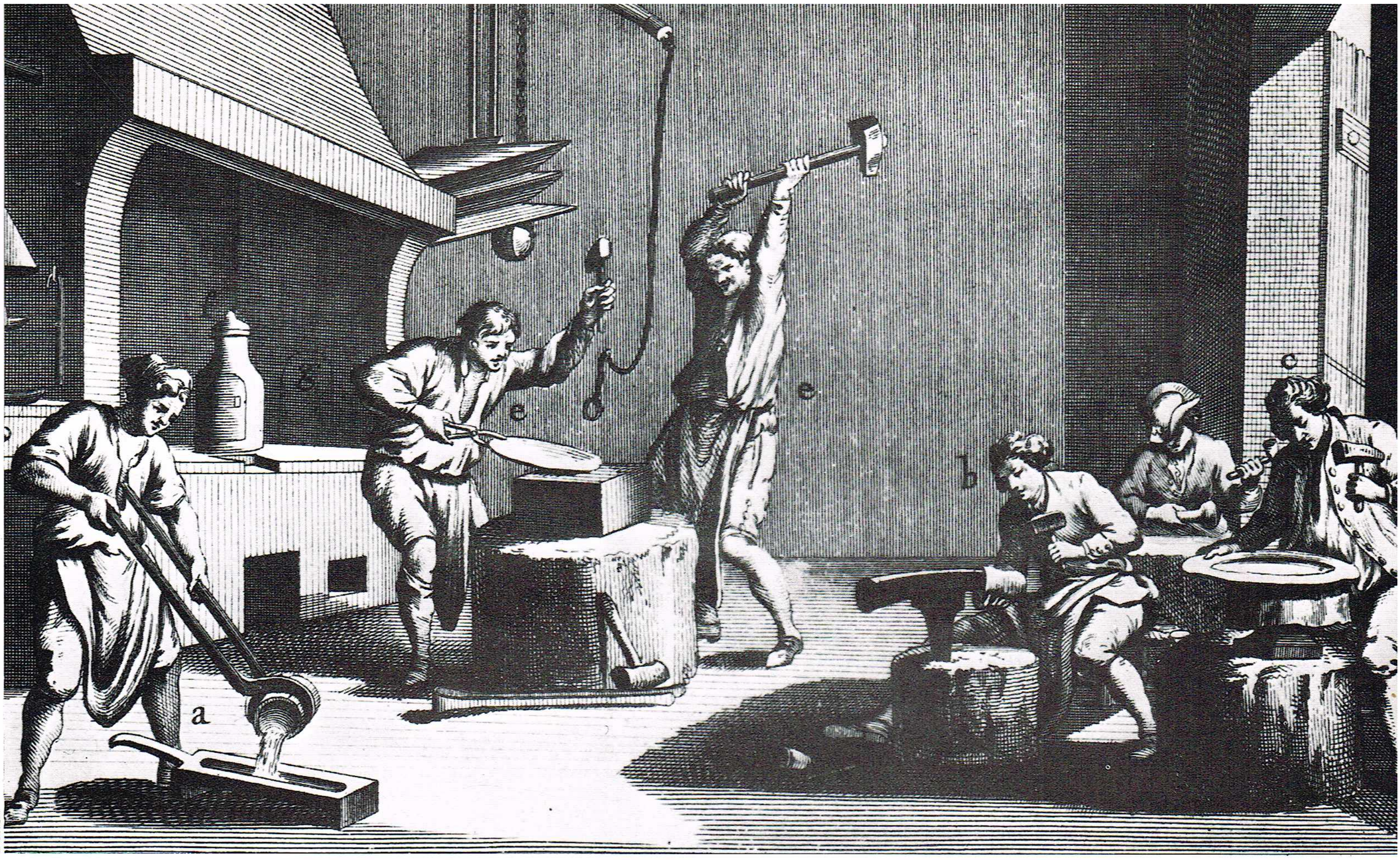

Bulloz

LA TECHNOLOGIE

▲ *On peut voir dans l'Encyclopédie de D'Alembert une entreprise prophétique : elle représente en effet la première tentative faite pour familiariser l'homme avec ses procédés et ses produits. Dans la préface, d'Alembert (1717-1783) montre l'esprit humain marchant à la conquête successive de toutes les connaissances et esquisse déjà le progrès des sciences. Ici, une planche de l'Encyclopédie, « Orfèvre grossier ».*

Naissance et statut de la technologie

Plus qu'une technique, moins qu'une science : voilà la définition donnée de la technologie par une grande encyclopédie, qui ne fait, en l'occurrence, qu'enregistrer approximativement l'opinion courante, celle de l'homme de la rue. Au rebours, l'université de Compiègne propose « sa » définition officielle de la technologie : « C'est le nom de la science quand elle prend pour objet les produits ou les procédés de l'industrie humaine... »

Alors, la technologie est-elle une science? Au plan strictement grammatical, la définition de Compiègne se tient parfaitement. Nous sommes en face d'une « logie » qui fait nombre avec la psycho-logie, la géo-logie ou l'étho-logie, tous avatars de la science lorsqu'elle applique ses méthodes et son esprit à des objets différents, savoir : l'âme, la Terre ou le comportement.

Certes, tel est le prestige de la connaissance que le suffixe « logie » est parfois utilisé de façon un peu inflationniste. Un Institut universitaire de technologie ferait sans doute mieux de s'intituler plus modestement Institut universitaire de technique. Car il n'y a rien de honteux à enseigner un savoir-faire. Mais pharmacologue fait plus chic que pharmacien, etc.

Que la « techné » puisse être l'objet d'une activité rationnelle, tant au plan de son enseignement que de la recherche, n'est pas une idée neuve. En fait, dès l'aube de la révolution industrielle, nombreux étaient les bons esprits qui en étaient conscients. Comment ne pas évoquer ici les admirables encyclopédistes français, véritables pères fondateurs de la technologie? Comment ne pas évoquer la mémoire de Beckmann qui, à Göttingen, en 1777, a peut-être le premier fait usage du mot même de technologie? A quand une traduction française complète de cet ouvrage : Anleitung zur Technologie und zur Kenntniss der Handwerke, Fabriken und Manufacturen, vornehmlich derer, die mit der Landwirtschaft, Polizey und Cameralwissenschaft in nächster Verbindung stehn, nebst Beyträgen zur Kunstgeschichte. (Introduction à la technologie et à la connaissance des artisanats, des usines et manufactures, de celles en particulier qui sont en étroite liaison avec l'agriculture, la police et l'économie politique; contributions à l'histoire de l'art.)

Texte de Beckmann (1777)

« La technologie est la science qui enseigne la transformation et le traitement des produits naturels ou la connaissance des métiers. Au lieu qu'on montre seulement, dans les ateliers, comment on doit suivre les instructions et les habitudes du maître pour fabriquer la marchandise, la technologie enseigne d'une manière approfondie et selon un ordre systématique comment trouver les moyens d'atteindre ce but final à partir de principes véritables et d'expériences sûres, et comment expliquer et tirer parti des phénomènes qui apparaissent pendant le traitement. »

La technologie : Ampère

Pour approprier les corps aux divers usages auxquels ils sont destinés, il faut leur faire subir diverses transformations; par exemple, changer successivement la laine en fils, en draps, en habits; un lingot d'acier en ressorts, en instruments tranchants; les substances alimentaires en mets qui puissent flatter notre goût; un sable grossier en verre et en cristaux, etc.; il faut les transporter des lieux où ils sont en abondance dans ceux où la consommation les réclame, les conserver jusqu'au moment de les livrer au consommateur. Des instruments et des machines sont nécessaires pour opérer ces transformations. Or la connaissance des procédés par lesquels on les opère, des instruments ou des machines qu'on y emploie, constitue une science du troisième ordre, que j'appelle *technographie*, de τεχνη, *art*.

Cerdoristique industrielle. Il ne suffit pas de connaître les procédés, les machines, tous les instruments employés dans les arts; il faut encore qu'on sache se rendre compte des profits et des pertes d'une entreprise en activité et prévoir ce qu'on peut attendre d'une entreprise à tenter.

Pour cela il faut calculer exactement, dans les deux cas, les mises de fonds nécessaires soit pour les locaux et appareils convenables, soit pour l'achat des matières premières et la main-d'œuvre; il faut apprendre à connaître les qualités diverses et les prix relatifs de ces matières premières, celui qu'elles acquièrent par les transformations qu'on leur a fait subir. Mille autres circonstances analogues doivent être prises en considération, et de toutes les recherches de ce genre se compose une science du troisième ordre, à laquelle je donne le nom de *cerdoristique industrielle*, de κερδοζ, *gain, profit*, οριζω, *je détermine*. A cette science appartient évidemment l'*art de tenir les livres*, au moyen duquel un industriel peut à tout instant se rendre compte de ses profits ou de ses pertes.

Économie industrielle. Tant que, dans l'étude des procédés des arts, l'homme se borne à ces deux sciences du troisième ordre, il n'apprend qu'à répéter ce qu'on fait dans le lieu qu'il habite, il reste sous le joug de la routine. Pour que l'industrie puisse faire des progrès, il est nécessaire de comparer les procédés, les instruments, les machines, etc., usités en différents temps et en différents lieux. Cette comparaison peut se faire de deux manières : la première consiste à comparer les résultats qu'ils donnent, tant sous le rapport de la perfection des produits obtenus que sous celui des frais qu'exigent l'emploi de ces procédés ou de ces instruments, la construction de ces machines, etc., pour juger quels sont les plus avantageux et en déduire des lois générales qui puissent diriger dans une entreprise industrielle. C'est par des comparaisons de cette espèce qu'on a découvert et démontré, par exemple, les avantages de la division du travail pour obtenir les produits les plus économiques, c'est-à-dire réunissant les conditions les plus favorables au producteur et au consommateur. C'est à cette science que je donne le nom d'*économie industrielle*.

Physique industrielle. Par ce mode de comparaison, purement empirique, il faudrait souvent faire beaucoup de dépenses en essais de procédés, en constructions d'instruments ou de machines, pour n'arriver qu'à des résultats qui tromperaient les espérances qu'on aurait conçues. Il est un autre mode de comparaison, qui consiste à s'aider des connaissances de physique générale acquises précédemment, à étudier les phénomènes qui se passent dans les transformations que les arts font subir aux corps, à remonter à leurs causes, à prévoir ainsi les résultats qu'on peut attendre des nouveaux procédés et des nouvelles machines, avant d'en faire l'essai. Cette application de la théorie à la pratique a un autre avantage : la connaissance des causes peut seule conduire à perfectionner les procédés connus, à en inventer de nouveaux, et à faire également prévoir dans ces deux cas le succès qu'on peut espérer. Tel est l'objet de la *physique industrielle*. C'est à cette science que la plupart des arts doivent leurs progrès et les perfectionnements qu'ils ont atteints. Ainsi, par exemple, depuis des siècles, on blanchissait les toiles en les exposant à l'air et à la rosée. L'illustre Berthollet chercha la cause de ce phénomène; il découvrit que c'est l'oxygène de l'atmosphère qui brûle et détruit la matière colorante; il remplaça cet oxygène de l'air par celui que le chlore dégage de l'eau et parvint à décolorer en quelques instants ces mêmes toiles dont le blanchiment, par les procédés ordinaires, aurait exigé plusieurs mois.

Classification

Ces quatre sciences embrassent tout ce qu'il nous est donné de connaître relativement à leur objet spécial, les procédés par lesquels nous transformons les corps pour les approprier à nos besoins ou à nos jouissances. J'en composerai une science du premier ordre, la TECHNOLOGIE. Dans les deux premières, on n'emploie que des procédés usités, et je donnerai à leur réunion le nom de TECHNOLOGIE ÉLÉMENTAIRE; les deux autres ont un autre but : on y compare tous les procédés qui peuvent être employés, pour choisir les plus avantageux; seulement, dans la première, cette comparaison est fondée uniquement sur les résultats obtenus, et dans la seconde, sur ceux que la théorie nous fait prévoir. C'est pourquoi je désignerai sous le nom de TECHNOLOGIE COMPARÉE la réunion de ces deux sciences du troisième ordre. L'analogie m'avait d'abord porté à donner à cette science du second ordre, qui en résulte, le nom de *technognosie ;* mais cette expression déduite de γνωσιζ, *connaissance*, ne m'a pas semblé devoir s'appliquer à une science où l'on n'étudie pas les corps pour les *connaître*, mais pour en retirer l'utilité qu'ils peuvent nous procurer. Les deux sciences du troisième ordre qui y sont comprises, ayant également pour objet de choisir entre les différents procédés qu'on peut suivre pour atteindre un même but, supposent toutes deux la comparaison de ces divers procédés, et c'est pour cela que l'expression de technologie comparée convient à la science du second ordre qui les réunit.

Le tableau suivant représente les divisions de la technologie.

Science du 1er ordre	*Sciences du 2e ordre*	*Sciences du 3e ordre*
TECHNOLOGIE	TECHNOLOGIE ÉLÉMENTAIRE	Technographie
		Cerdoristique industrielle
	TECHNOLOGIE COMPARÉE	Économie industrielle
		Physique industrielle

Nous serions coupables aussi de priver les lecteurs de cette collection des réflexions si profondes et si élaborées du génial Ampère qui, avec raison, faisait de la technologie une science de premier ordre, même si sa « cerdoristique » a été quelque peu oubliée...

Ainsi l'histoire des idées rencontre-t-elle l'étymologie pour reconnaître le droit de la technologie à sa place dans la classification des sciences. Il faut bien dire que ce droit n'est pas aisément admis par tous. Pour un François Jacob qui n'hésite pas à dire : « La biologie n'est que la technologie du vivant (comme la technologie est la biologie des machines) », combien de bons esprits sont encore prisonniers de la vieille idée de science « appliquée », et oublient le solennel avertissement de Pasteur : Ne séparez jamais la science de ses applications. *Bien sûr, comme la biologie, la techno-*

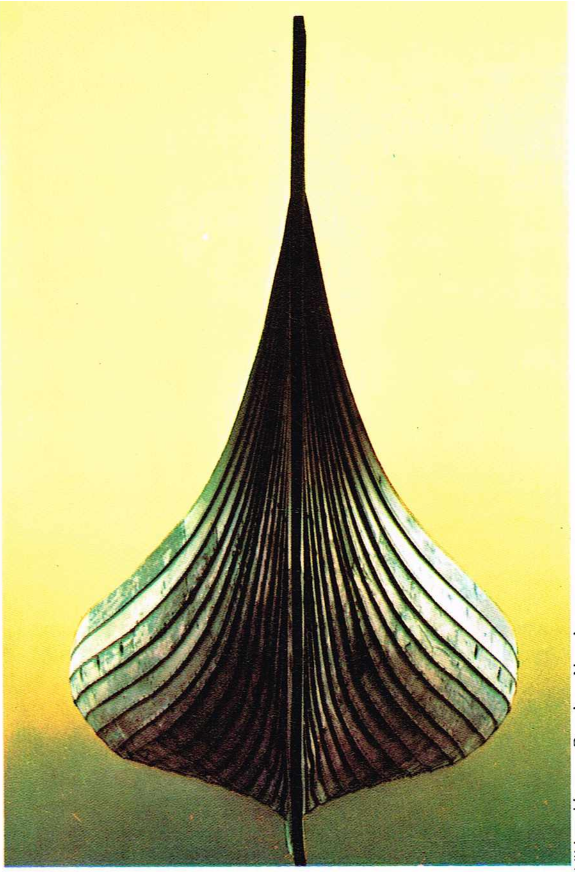

Vikingskipene, Bygdoy, Norvège

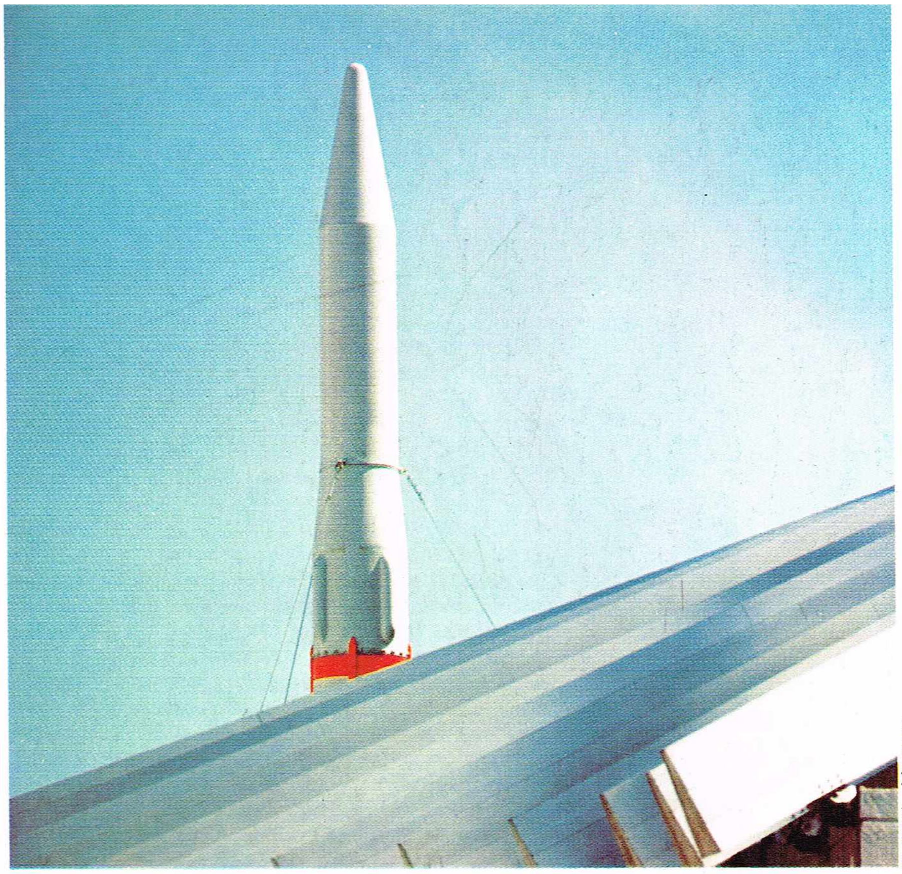

R. Burri - Magnum

Nuridsany et Pérennou

R. Burri - Magnum

▲ Pureté de la ligne : *la pureté de la ligne manifeste l'existence de lois simples et rend l'objet signifiant, intelligible et fonctionnel. Les mécanismes mis en jeu pour aboutir sont pourtant différents.*

En haut à gauche, le bateau des Vikings : l'Océan et la mort ont fait de la fibre un polynôme, non la raison.
A droite, la fusée Diamant *: fruit d'un travail d'équipe et d'investissements importants.*
Ci-dessus, à gauche, la nature : plante décorative et fonctionnelle (carnivore).
Les sucs digestifs contenus au fond de l'urne sont protégés de la pluie, qui les diluerait, par un couvercle incliné faisant office de toit.
A droite, les caryatides de l'Érechthéion (Athènes). Il n'est pas jusqu'à l'architecte qui ne puisse dire : « Mon temple fonctionne. »

logie est une science coincée, *qui doit se battre pour faire admettre sa spécificité : la science du vivant est en relation conflictuelle avec, sur sa gauche, la physique et la chimie ; sur sa droite, la médecine et l'agriculture. Les tentatives réductionnistes ne manquent pas, qui caressent l'espoir d'enlever toute pertinence aux concepts propres de la biologie. Au rebours, ils ne sont pas rares ceux qui, au fond d'eux-mêmes, doutent profondément que l'activité des biologistes puisse atteindre au mystère de la personne.*

Eh bien ! il en est de même pour la technologie : elle aussi, pressée entre ce qu'Ampère appelle la physique industrielle, d'une part, et, d'autre part, l'industrie ou l'agriculture. Combien cherchent à ramener la locomotive à vapeur soit à la thermodynamique, soit aux lois économiques du marché ? Oubliant qu'une locomotive qui marche ne doit quasiment rien ni à Carnot ni à Marx (ou Keynes ou tout autre).

C'est que, comme il arrive souvent, c'est la technologie appliquée *qui a lancé la technologie tout court. Nous avons tout à l'heure évoqué Pasteur. Chacun sait que la conserve — voire la « pasteurisation » — étaient antérieures à Pasteur. Les admirables succès de la technique humaine n'ont pas attendu les penseurs de cette technique. En fait, ils les ont précédés.*

Considérez ce vaisseau des Vikings. Comment ne pas y voir une mathématique flottante ? Ne paraît-il pas dessiné par un ordinateur ? Chacune de ses lisses, chacun de ses couples semble obéir à quelque loi algébrique simple. Le polynôme se cache sous la fibre. Et sans doute est-ce vrai ? Mais que le lecteur veuille bien imaginer un instant la vie — et la mort — de tous ces grands marins du Nord ? Combien sont-ils qui, selon le mot du poète, « Dans le sombre Océan se sont évanouis » ? Seuls ont été copiés — et améliorés — les bateaux qui sont revenus à bon port. Un dur processus de sélection naturelle a fait ces merveilles, enfants de l'Océan et de la mort, plus que de la raison. Le temps, jouant sur le double registre du hasard et de la nécessité, a engendré ces lignes aussi pures que celles de la coquille ou celles du temple.

Au rebours, considérez un instant l'opération Apollo. *Le temps était fixé. L'échec inacceptable. La raison seule pouvait affronter le double défi du planning et de la sûreté pour engendrer aussi des formes pures. La technologie obtenait sur la Lune ses lettres de noblesse.*

La distance physique et les conditions extrêmes du cosmos engendrent une distance intellectuelle entre l'homme et ses produits. Après les premiers pas d'Anderson sur la Lune, on ne peut plus regarder une brouette comme avant. *Et la « retombée »* principale *d'une entreprise à bien des égards absurde est justement de l'ordre du quotidien. Voici que nos produits, voici que nos procédés nous apparaissent comme pensables, encore que — jusqu'ici — impensés. Il ne s'agit pas là d'une simple réflexion philosophique. Imaginez la situation d'un ingénieur du projet* Apollo *qui, une fois le succès de la* N. A. S. A. *assuré, trouve un emploi dans une entreprise de chauffage central (ou d'engrais, ou de machines-outils...). Il est accoutumé à une analyse des problèmes parfaitement cartésienne. Il remet nécessairement en cause les habitudes (séculaires) de la profession. Des conflits sont probables — mais sans doute fructueux.* Une vue radicalement nouvelle de la technique *s'impose peu à peu.*

En allant sur la Lune, l'homme ne s'est pas rapproché des étoiles : il s'est éloigné de ses produits. Il s'est éloigné de lui-même. Il était temps.

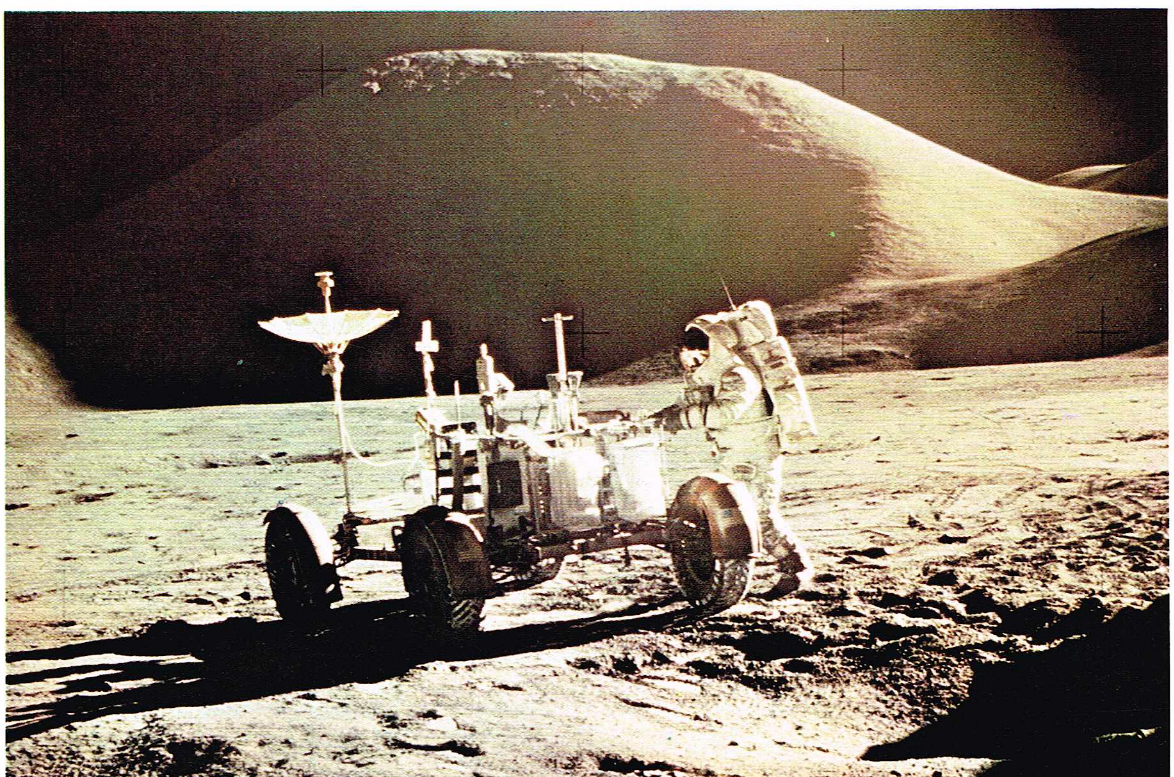

Parimage - Camera Press

▶ Alors qu'il a fallu des centaines d'années pour aboutir à la perfection d'un bateau comme celui des Vikings, quelques années seulement ont abouti au résultat immédiat et sans échec possible : la voiture lunaire.

Ernst Haas - Magnum

Le règne machinal et la technosphère

Ainsi donc, si la technologie a bien le statut d'une science fondamentale, il nous faut reconnaître qu'elle n'existe encore guère. Nous serions bien en peine de citer le nom de quelques grands technologues, au moins de purs technologues.

L'immense complexité des produits de l'industrie humaine avec ses genres, ses espèces, ses familles, ses variétés n'est même pas encore classée. La technologie attend son Linné. Cependant, les rapprochements entre les êtres biologiques et les objets ou les machines ne manquent pas. Pris individuellement, ils peuvent paraître superficiels; pris collectivement, ils deviennent impressionnants. A la patte répond la roue; à l'oiseau, l'avion; au cerveau, l'ordinateur; au système nerveux, tous les câblages; aux systèmes digestif et circulatoire, toutes les tuyauteries. Croyez-vous que ce soit par hasard

De Andrade - Magnum

Snark International

▲◀ *L'avion n'est pas la copie de l'oiseau; ceux qui ont essayé dans cette voie ont échoué. Sa ressemblance avec lui n'en est que plus troublante.*

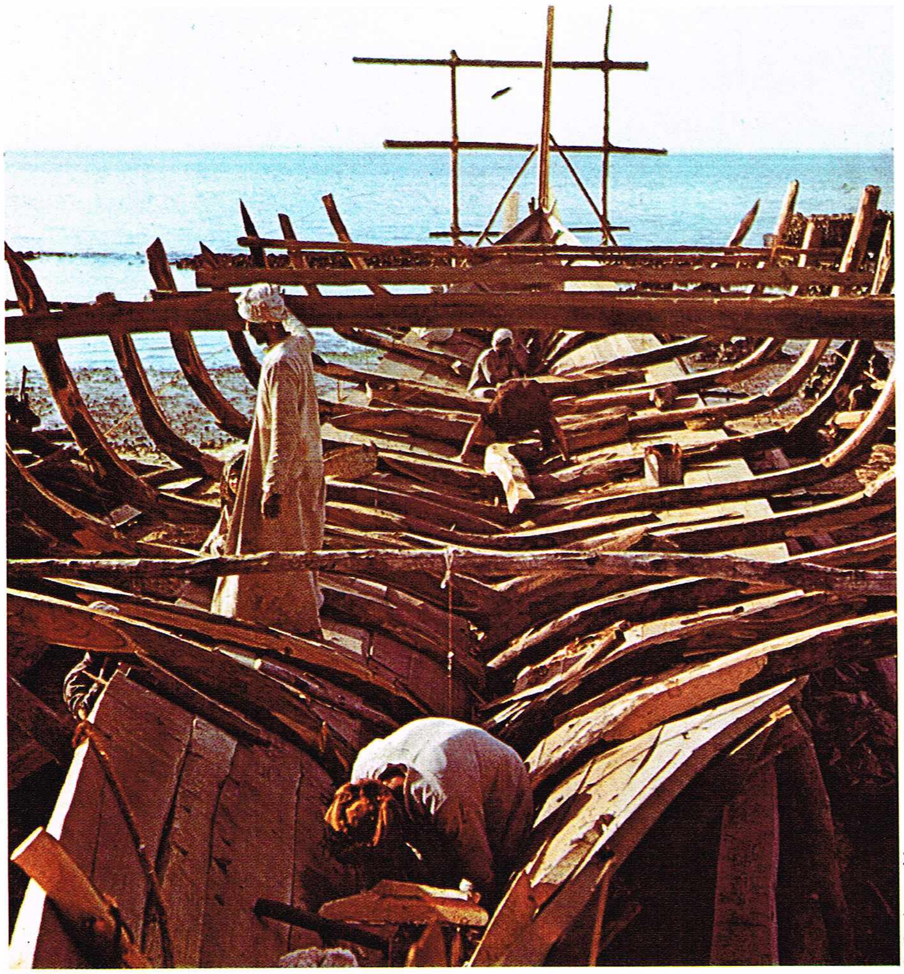

G. Rodger - Magnum

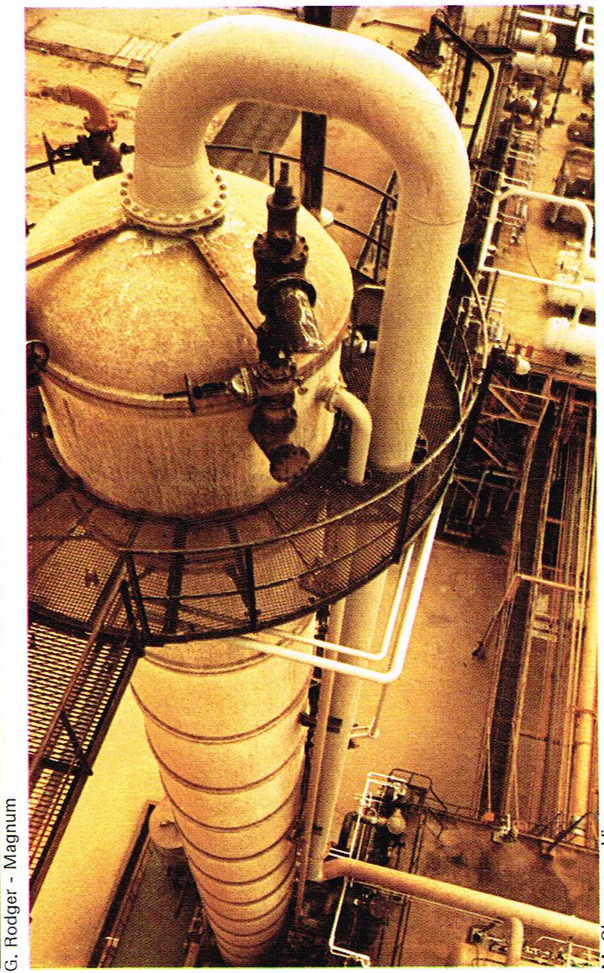

M. Gloaguen - Viva

▲▶ Qu'il s'agisse de charpente ou de tuyauterie (ci-dessus), les possibilités ne sont pas infinies. Toutes les formes ne sont pas possibles. La biologie (ci-contre, à gauche) est la technologie du vivant.

▶ Ci-contre, à droite, en technologie, la signification, c'est le fonctionnement. La locution filtre est décomposable en éléments organisés; elle peut être à son tour un élément simple d'un ensemble de niveau supérieur (centrale, etc.).

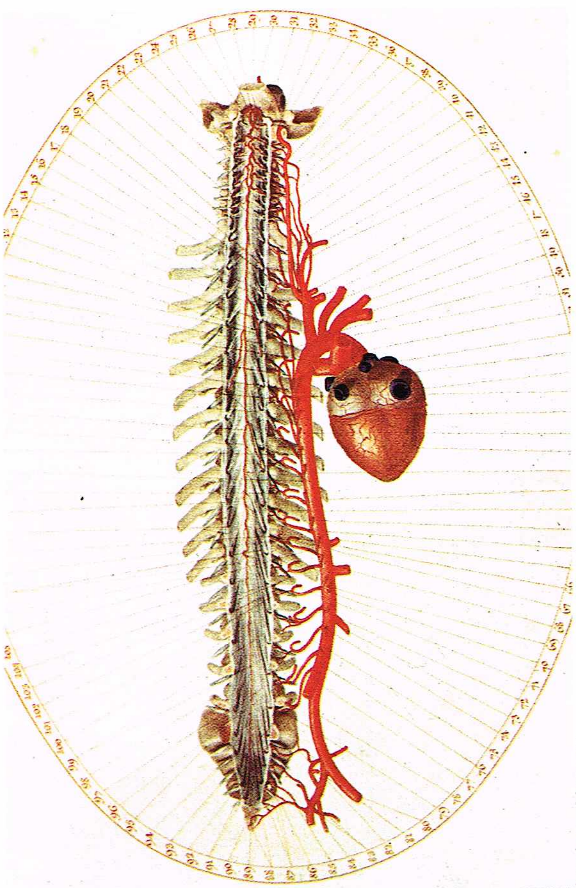

E. Lessing - Magnum

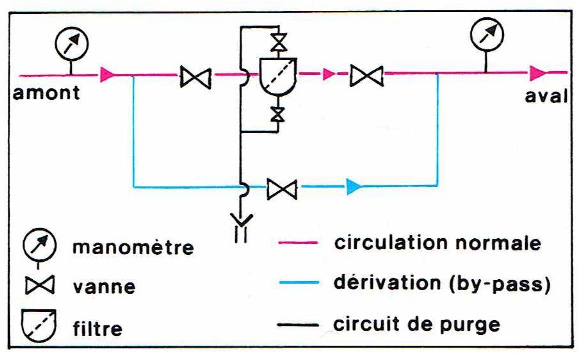

que l'on parle de l'alimentation d'un moteur? De la même façon, à l'anatomie répond le descriptif des machines; à la physiologie, leur fonctionnement.

Certes, les machines n'ont ni sexe ni famille. Elles ont cependant des générations. La différence profonde avec les êtres vivants est que leur organisation n'est pas cellulaire et que leur capital génétique est extérieur à la machine. On retrouve bien à l'intérieur des portes d'une armoire électrique le schéma de câblage de cette armoire : on n'y retrouve pas la totalité des plans de fabrication. De la même façon, les instructions de fonctionnement sont pour leur plus grande partie obtenues dans des documents — dont la nature est d'ailleurs proche des documents nécessaires à la construction ou au montage.

Le capital génétique externe est caractéristique du règne machinal. Il n'est pas interdit, au moins à titre d'excitation de notre imagina-

tion, de penser l'homme lui-même comme le chromosome de ses machines. *Il est vrai que, bien souvent, le dynamisme interne de la croissance des machines et de leur développement paraît davantage obéir à ses lois propres qu'à la volonté de l'homme. Ainsi la technologie, comme discours rationnel sur les produits de l'homme, commence-t-elle par relativiser le rôle même de l'homme rationnel.*

Il y a plus : lorsque l'on compare une automobile japonaise à une automobile américaine ou européenne, il est difficile de ne pas être frappé à la fois par leur similitude et par leur différence. Comment ne pas évoquer les similitudes et les différences entre l'écureuil américain et l'écureuil européen ? Visiblement, les objets et les machines ne sont pas indépendants entre eux. C'est la charge par essieu des gros camions qui va parfois déterminer la taille ou la forme d'un réacteur nucléaire par le biais des limitations de transport de tel ou tel de leurs auxiliaires. Machines et objets ont une écologie. *Chaque produit est déterminé, mais ce n'est pas seulement par les lois du marché, comme un économisme abusif veut nous le faire croire. En fait, la nouvelle machine s'insère dans une véritable niche écologique. Elle se développe et meurt comme une espèce.*

On n'en finirait pas de méditer sur les profondes analogies entre le règne machinal et le règne vivant. Mais la technologie entretient des rapports avec tant d'autres sciences !

La linguistique est peut-être le cas le plus évident. Pour celui qui a fréquenté les machines, celles-ci apparaissent comme de véritables discours dont la signification serait le fonctionnement. Les éléments des machines ont une existence autonome comme les mots, et, cependant, sont regroupés en sous-ensembles comme des phrases. Il y a une grammaire technique comme il y a une syntaxe et une stylistique technologiques. Considérez, par exemple, un filtre dans une installation industrielle ; assez généralement, ce filtre, devant être visité, sera pourvu d'une vanne amont et d'une vanne aval. Un by-pass permettra à l'installation de fonctionner même lorsque le filtre est bouché ou démonté. Un manomètre indiquera la pression amont, la pression aval. Une purge permettra de le vider. Parfois, une soupape de sûreté viendra le protéger. L'ensemble de tous ces mots formera une locution « filtre » à la fois aussi complexe et aussi simple qu'une expression comme « n'est-ce pas », ou « dorénavant ». Les fautes de construction ou de conception ressemblent beaucoup aux fautes de grammaire. Souvent, elles n'empêcheront pas le fonctionnement (la signification) ; parfois, au contraire, elles entraîneront l'impossibilité complète de fonctionnement (le contresens).

A des niveaux de structure plus élevés, un bon ingénieur est capable de reconnaître une machine anglaise d'une machine allemande, même lorsque les plaques signalétiques ont été démontées.

Alors, qu'est-ce qui détermine la forme des machines ou des objets ? Telle est sans doute la première et la plus fondamentale des questions de la technologie. Il n'est évidemment pas dans notre intention d'y répondre ici, mais seulement de montrer la complexité du problème.

Interviennent nécessairement dans la réponse :

— Les lois physiques : tout le monde comprend que l'avion « dépend » de la gravité ou de l'aérodynamique.

Collection Le Minotaure

▲ ***Les machines meurent aussi... Illustration extraite de*** **Minotaure** ***n° 10, 1937.***

Roger Viollet

◀ ***Fer à vapeur, 1919. Plus qu'un outil, déjà une une machine, mais compagnon paisible et familier.***

▶ ***Descartes :* le Discours de la méthode, *1637.***

— L'homme lui-même est à de nombreux titres :

- *utilisateur sans doute : les poignées sont faites non seulement par la main de l'homme mais pour la main de l'homme ;*
- *constructeur, ouvrier ;*
- *mais plus profondément encore concepteur. Et c'est sans doute là que les analogies biologiques évoquées plus haut ne conviennent plus. Les machines sont, avant tout,* pensables. *Leur structure reproduit dans l'acier, le bois ou le plastique une structure de notre* esprit. *Même si nous savions le construire, il est probable que nous n'aurions jamais pu* concevoir *un œil. Aussi une des voies les plus prometteuses de la technologie est-elle l'étude fine de la psychologie professionnelle de l'ingénieur concepteur.*

— Les autres machines, comme nous l'avons indiqué, dans le cadre à la fois d'une écologie et d'une génétique, d'une histoire peut-être.

Texte de Descartes (1637)

Je m'avisai de considérer que souvent il n'y a pas tant de perfection dans les ouvrages composés de plusieurs pièces, et faits de la main de divers maîtres, qu'en ceux auxquels un seul a travaillé. Ainsi voit-on que les bâtiments qu'un seul architecte a entrepris et achevés ont coutume d'être plus beaux et mieux ordonnés que ceux que plusieurs ont tâché de raccommoder en faisant servir de vieilles murailles qui avaient été bâties à d'autres fins. Ainsi ces anciennes cités qui, n'ayant été au commencement que des bourgades, sont devenues par succession de temps de grandes villes, sont ordinairement si mal compassées, au prix de ces places régulières qu'un ingénieur trace à sa fantaisie dans une plaine, qu'encore que, considérant leurs édifices chacun à part, on y trouve souvent autant ou plus d'art qu'en ceux des autres, toutefois, à voir comme ils sont arrangés, ici un grand, là un petit, et comme ils rendent les rues courbées et inégales, on dirait plutôt que c'est la fortune que la volonté de quelques hommes usant de raison qui les a ainsi disposés.

Claude Nuridsany

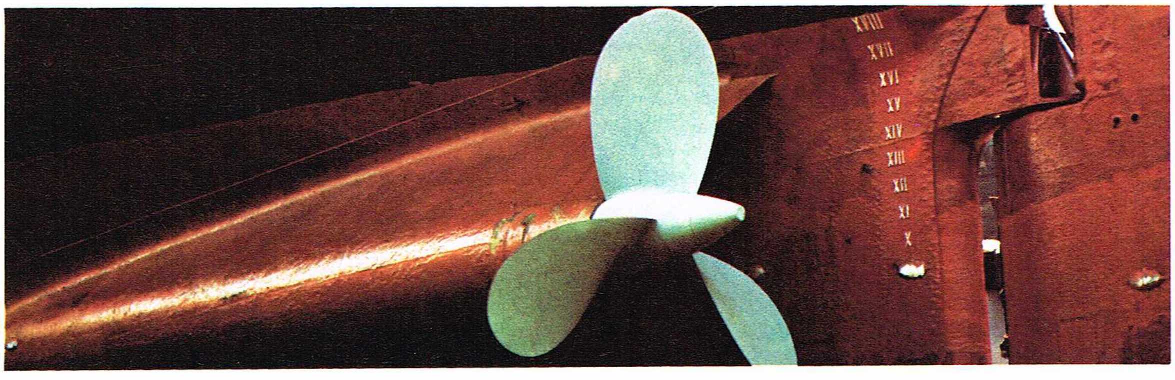

G. Costa

▶ ***Fruit d'érable (en haut) :* chaque graine est dotée d'une large aile-membrane, légèrement hélicoïdale, qui agit comme la pale d'une hélice (en bas) et favorise la dissémination au loin.**

1876 : le tour de France par deux enfants

XXIII. — Les moyens que l'homme emploie pour mettre en mouvement ses machines. — Un ouvrier inventeur.

La prétendue baguette des fées était moins puissante que ne l'est aujourd'hui la science des hommes. Julien avait écouté de toutes ses oreilles le récit d'André.

— Mais pourtant, dit-il, ces machines ne peuvent pas aller toutes seules. Bien sûr, il y avait quelque part des ouvriers que tu n'as pas vus, et qui les mettaient en mouvement, comme le rémouleur quand il fait tourner sa roue de toutes ses forces.

— Je t'assure, Julien, qu'il n'y avait pas d'ouvriers à remuer les machines, et cependant elles ne s'arrêtaient pas une minute.

— Alors, dit la mère Gertrude gaîment, cela ressemblait à un conte de fée

Cent ans plus tard : Histoire de France

L'agitation, le bruit entraînent surmenage nerveux et maladies graves. Il n'y a jamais eu autant de maladies nerveuses et mentales, de maladies du cœur et des vaisseaux et (quoi qu'on en dise) jamais autant de cancers.

Le progrès des sciences et des techniques a permis de vaincre certaines misères et certaines maladies. Il en a fait naître ou répandre bien d'autres. Les pouvoirs publics, jusqu'ici, interviennent peu. Cependant *le danger est grave, de plus en plus grave*. Chacun d'entre nous doit et peut s'appliquer à le dénoncer, à le combattre, à le conjurer.

◄ En haut, extrait d'un manuel d'enseignement en 1876 :* le Tour de la France par deux enfants, *G. Bruno, Édition du centenaire, Belin, 197? ; en bas, extrait d'un manuel en 1976,* Histoire de France, *M. et C. Chaubanges, Delagrave. Le progrès, d'abord conte de fées, voici qu'on le présente maintenant comme un cauchemar.

— L'économie, bien sûr, quoique à un degré sans doute moindre que le public ne le croit.

— Enfin sans doute des lois propres à toute morphogenèse. *Car, dans l'évolution des formes, on rencontre inévitablement un mélange de continu et de discontinu. Si on trouve en effet des moteurs à explosion plus ou moins gros, plus ou moins longs, des cylindres plus ou moins « carrés », on ne saurait passer* de façon continue *de ce moteur à la turbine à gaz ou au moteur Wenkel. Aussi, donc, si le nombre de moteurs de propulsion possibles fonctionnant aux hydrocarbures est évidemment infini, qu'en est-il des types de solutions possibles ? Comment en aborder l'inventaire ? Est-il possible de passer du* brain storming *ou de la « créativité » à une systématique raisonnable de l'invention ? La création en matière de technique restera-t-elle toujours une forme d'art ?*

Technologie et politique

L'absence d'une technologie ou tout au moins le retard de son développement par rapport aux autres sciences est le signe le plus manifeste que l'homme n'a pas encore maîtrisé ses propres produits, qu'il ne domine pas sa croissance.

Quel que soit le jugement que l'on puisse porter sur l'organisation politique de l'Antiquité ou du Moyen Age, il semble bien que la compétence de tous en matière de vie quotidienne était plus considérable qu'aujourd'hui. Lorsque l'on discutait d'un droit de chasse, de la construction éventuelle d'un pont, d'une plantation de luzerne, tout le monde savait de quoi il s'agissait. Même si tout le monde n'avait pas son mot à dire, tout au moins avait-on une opinion. Aujourd'hui, lorsqu'il s'agit d'implanter un train à grande vitesse entre Paris et Lyon ou

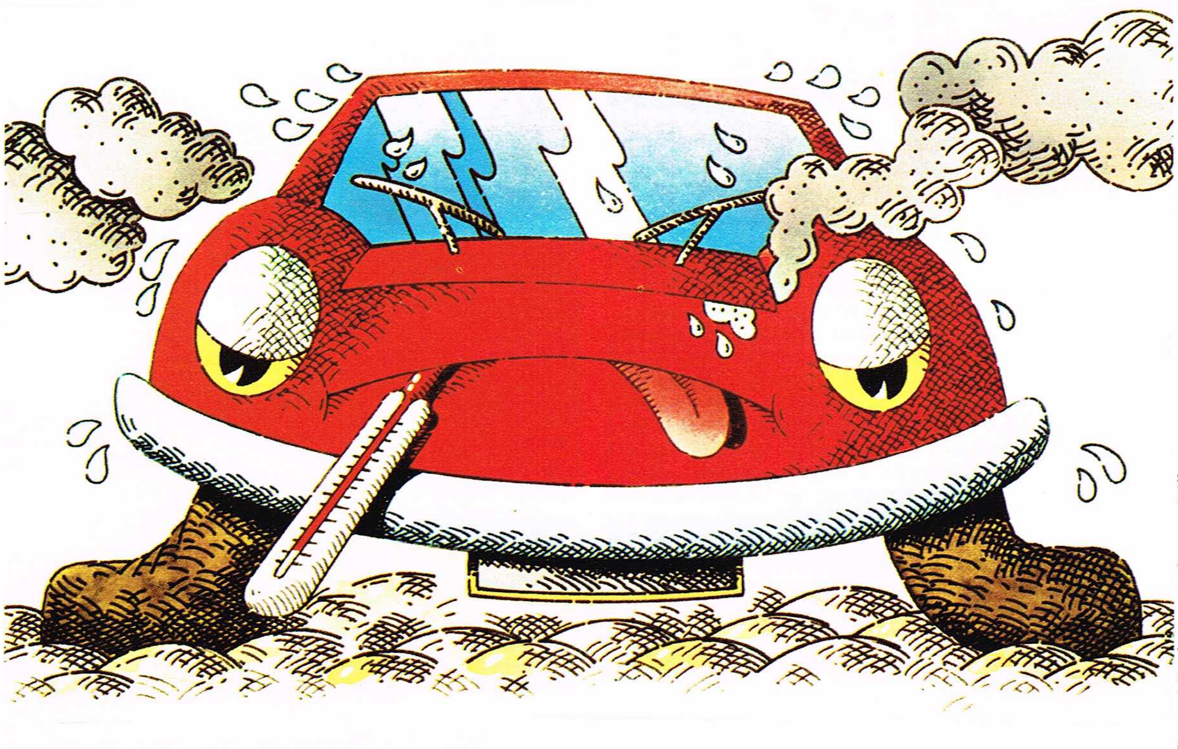

Bernard Bonhomme - Agence Bélier

***◄ Il se crée des liens affectifs entre l'homme et la voiture au point qu'il lui donne figure humaine et s'inquiète de la voir souffrir. Ici, une annonce publicitaire conçue par l'agence Bélier :* « Quand j'ai des vapeurs, j'appelle Touring Secours. »**

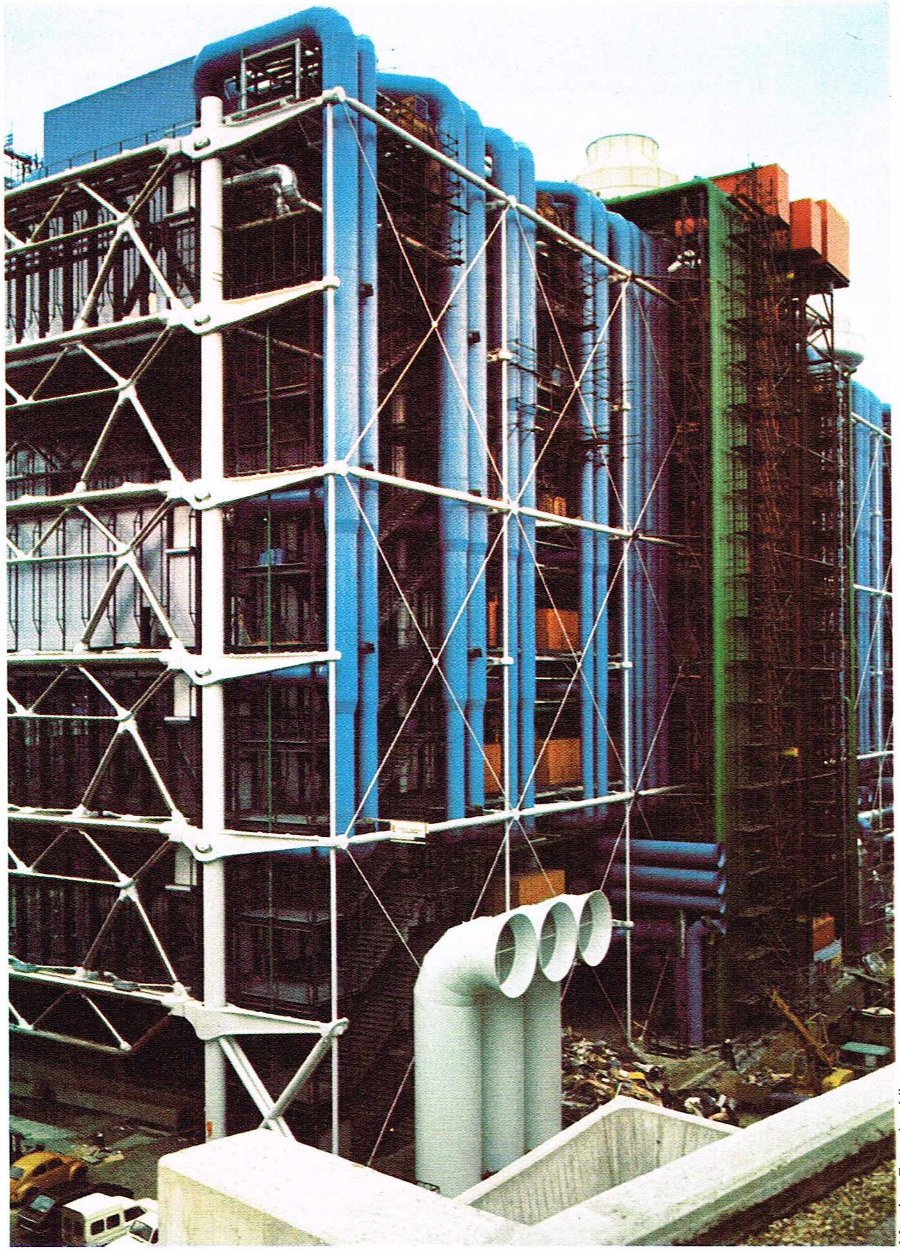
Martine Franck - Viva

▲ ***On peut voir dans le centre Georges Pompidou une tentative de synthèse et de réunification entre la technologie et la culture. Ce n'est sans doute pas par hasard que cet aspect de raffinerie a été attribué à un centre culturel; las d'être divisé entre culture et industrie, l'homme cherche à retrouver l'unité de l'esprit.***

une centrale nucléaire à Ploudalmézeau, en fait, le citoyen n'est pas en mesure d'apprécier les conséquences de la décision, que ce soit pour l'assumer ou la contester. Cette incompétence est d'ailleurs celle de ses élus qui ne sont pas plus éduqués que lui en la matière. Voilà, direz-vous, le procès classique de la technocratie. Sans doute, mais ce procès n'est pas exactement celui que l'on croit : on range en effet sous le nom de technocrates deux catégories de personnes bien différentes. Celles qui, n'ayant pas la compétence, sont amenées par le pouvoir qui leur a été conféré à décider de ce qu'elles ignorent. Et d'autre part, celles qui, par leur compétence technique, sont amenées à usurper un pouvoir qu'elles n'ont pas démocratiquement reçu. En fait, l'existence de ces deux catégories de personnes traduit simplement le décalage profond qui s'est opéré entre l'éducation que nous recevons, notre culture et le monde dans lequel nous vivons. L'absence d'une véritable éducation technologique, d'un humanisme des *machines, est le fondement de la technocratie. Il est tout à fait vain d'essayer de multiplier les contrôles et les consultations, si, dès l'école, on ne crée pas une familiarité plus grande entre l'homme et ses produits. On peut dire sans hésiter que la* technocratie est l'état politique d'un pays où l'éducation technologique est insuffisante. *Nous disions plus haut que la technologie n'avait pas encore trouvé son Linné. Elle n'a pas encore eu son Virgile non plus, et les* Géorgiques *techniques sont toujours à écrire. De ce point de vue, une entreprise comme la présente Encyclopédie est certainement une œuvre de salut politique.*

Mais il faut aller plus loin. Sur un globe où le poids de l'homme l'emporte de plus en plus sur celui de la nature, la compréhension générale des choses passe de plus en plus par l'intelligibilité de ses produits. Jadis, le mystère était dans l'arc-en-ciel, dans la grêle ou dans les étoiles. Les « météores » étaient étranges. On peut se demander si aujourd'hui ce ne sont pas nos automobiles, nos ordinateurs, qui nous sont étranges. Des mouvements antiprogressistes, antiscience, voire millénaristes, nous menacent justement en raison du retard pris par la technologie sur la technique et sur l'industrie. Qu'on le veuille ou non, le monde de l'industrie reste encore une sous-culture, et son langage n'a pas encore envahi le langage quotidien. Imaginez-vous un homme parlant de sa femme et s'écriant « Elle a une drôle de fonction de transfert! » Pourtant, une telle image n'aurait rien que de très naturel, mais l'imperméabilité de deux mondes la rend parfaitement absurde. Un peu comme ce cours du théologien Harvey Cox sur « la Vierge et la dynamo » : le rapprochement cocasse des deux noms avait sans doute pour but de nous faire méditer sur cette dichotomie de notre culture. Peut-être faudrait-il oser parler ici des religions et des techniques? L'embarras des théologiens devant les objets ou les usines est flagrant. Ils n'étaient pas si embarrassés avec les animaux. La Genèse leur fournissait des images tout à fait rassurantes. Saint François d'Assise prêchait les oiseaux. S'il revenait aujourd'hui, peut-être prêcherait-il les machines.

GUY DENIELOU.

L'université de technologie de Compiègne

Créée en 1972, l'université de technologie de Compiègne (U.T.C.) est la première en France qui ait pour dominante la technologie. Sa naissance visait à combler le vide subsistant dans l'enseignement supérieur après l'introduction de la technologie dans le secondaire et l'ouverture d'instituts spécialisés ne couvrant que le premier cycle : les I.U.T.

Université au recrutement national, l'U.T.C. est essentiellement une école d'ingénieurs qui prépare au diplôme dans les trois domaines du génie biologique, du génie chimique et du génie mécanique. Ses enseignements de troisième cycle soutiennent la recherche qui prend également pour thème la technologie dans l'acception la plus générale du terme.

L'U.T.C. doit à son caractère expérimental quelques particularités : conseil comprenant des membres représentant l'industrie et les grandes administrations, nommés par le secrétariat d'État, admission non automatique des étudiants après le baccalauréat, alternance entre les études universitaires et les périodes de travail en milieu professionnel...

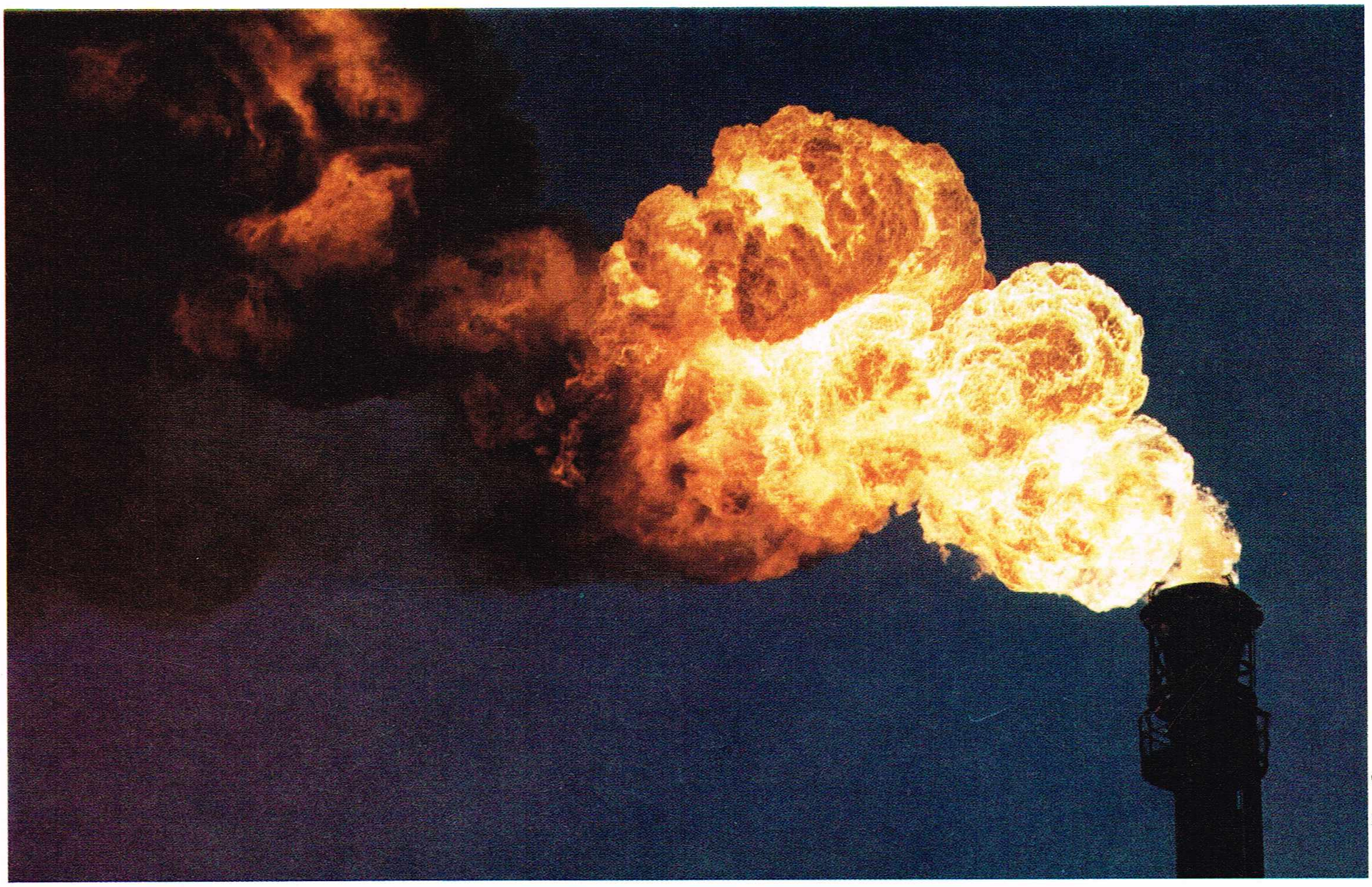

Photo Marc Garanger

▲ *La torche de brûlage symbole de la production d'énergie au XXe siècle.*

Bulloz

◀ **Age de fer — Caïn — le Matin — le Travail,** ***de Gustave Moreau (1886). Pendant longtemps, les hommes n'ont disposé que de leurs propres forces musculaires, de celles de certains animaux, de la force du vent et des eaux*** **(Musée Gustave Moreau - Paris).**

L'ÉNERGIE : PHYSIQUE ET HISTORIQUE

Qu'est-ce que l'énergie?

La notion d'énergie est, en physique, une notion fondamentale. Il est donc important d'arriver à en décrire les différents aspects afin de la bien définir. Ce sera l'objet de ce chapitre.

Le mot « énergie » est la traduction française de ἐνέργεια, mot formé de ἐν qui veut dire « dans » et ἔργον signifiant « travail ». Étymologiquement, énergie signifie donc « capacité de réaliser un travail ». C'est effectivement à partir du travail mécanique que ce concept a été introduit en physique. Cette définition est fort incomplète et nous la préciserons au cours de cet exposé par l'étude de formes d'énergie très différentes de l'énergie mécanique.

Avant d'en venir à une étude relativement détaillée des diverses formes d'énergie connues et de leurs relations, nous allons, après un rapide historique de la question, indiquer quelques-uns des caractères généraux de la grandeur appelée énergie.

Si la notion de travail est censée remonter à la fermeture du jardin d'Éden à nos premiers parents, la définition du travail mécanique est plus récente : il s'agit là de l'intégrale, le long de la courbe parcourue, du produit scalaire de la force par les déplacements élémentaires. C'est Galilée qui remarqua le premier que, lors de l'utilisation d'un palan, le produit de la force appliquée par la distance demeure constant, bien que ces deux facteurs puissent varier.

C'est également au XVIIe siècle que fut introduit le concept de force vive *(vis viva)*, c'est-à-dire d'énergie cinétique (ce nom ne lui fut donné qu'à partir du XIXe siècle). Cette notion traduit la constatation qu'un corps en mouvement est susceptible de produire un certain travail par suite d'une modification de son mouvement;

▶ *La photo historique de l'accélérateur de protons Cockroft-Walton (accélérateur électrostatique) 1932.*

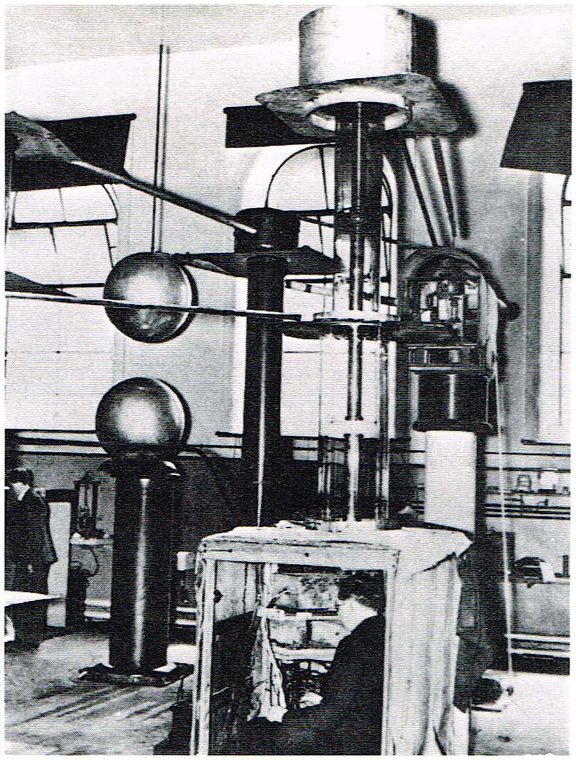

Snark International

au XIXe siècle, apparaît la notion d'énergie potentielle : cette énergie est due à la position du corps considéré dans un champ de forces.

L'existence d'une correspondance entre travail mécanique et chaleur, connue expérimentalement depuis fort longtemps (frottement de deux morceaux de bois afin d'allumer un feu), n'a fait l'objet d'expériences scientifiques qu'à partir du XVIIIe siècle : sir Benjamin Thomson, comte Rumford, directeur de l'arsenal de Munich, démontra que le forage d'une âme de canon avec une mèche mal affûtée permettait (en deux heures et demie) de porter à ébullition treize litres d'eau. D'autres expériences furent conduites par l'ingénieur français G. A. Hirn au XIXe siècle; il réalisait par calorimétrie la mesure de l'élévation de température d'un morceau de plomb écrasé par un cylindre de fer d'énergie connue. Finalement, c'est le physicien écossais James Prescott Joule qui, de 1843 à 1878, établit de manière concluante l'équivalence de la chaleur et du travail en évaluant quantitativement la relation entre les unités dans lesquelles étaient mesurées ces deux grandeurs. Les effets mécaniques des phénomènes électriques font également partie de l'expérience ancestrale de l'homme : la foudre fut toujours un attribut de la colère divine. L'étude de ces phénomènes fut longtemps freinée par l'absence de sources électriques facilement utilisables; toutefois, la tribo-électricité (électricité produite par frottement) donna lieu à des expériences dès le XVIe siècle (William Gilbert, médecin de la reine Élisabeth). Au XVIIIe siècle, à l'aide de machines électrostatiques et des premiers condensateurs (bouteilles de Leyde), de nombreuses études furent faites, mettant en évidence les réactions très mécaniques (sauts et contorsions) de sujets humains à l'application de l'électricité. Galvani (1737-1798) constata que des cuisses de grenouille fraîches suspendues à un crochet de cuivre réagissaient violemment au contact d'un balcon de fer : les conclusions qu'en tira Volta le conduisirent à l'invention de la pile électrique en 1800. Ce générateur, ainsi que l'accumulateur, inventé en 1859 par G. Planté, permirent alors une étude scientifique du courant électrique et de ses divers effets, en particulier thermique et mécanique. L'énergie du courant électrique put ainsi être reliée aux énergies thermiques et mécaniques. Coulomb (1736-1806) en découvrant la loi régissant l'interaction de deux ou plusieurs charges immobiles avait déjà permis de traduire en termes d'énergie potentielle le travail récupérable sur ces charges.

C'est aux Chinois que nous devons, semble-t-il, les premiers travaux sur l'utilisation directe de l'énergie fournie par une réaction chimique à des effets de propulsion mécanique : un tube de bambou, bourré convenablement d'un mélange de charbon, de soufre et de salpêtre, constitue une fusée. Ce principe a connu au cours des âges un développement considérable en raison des tendances guerrières de l'humanité : on ne manque donc pas de documents concernant la relation entre composition du mélange, qualité de l'explosion et portée ou efficacité du projectile. Cette ligne de recherches aboutit à la poudre sans fumée de Vieille (1884) et à la dynamite de Nobel. Il y a donc ici équivalence reconnue entre énergie présente potentiellement dans un mélange chimique susceptible de réagir et énergie thermique (chaleur) et mécanique (propulsion ou effets destructeurs). Le moteur à explosion (N. A. Otto - 1876, Diesel - 1892) constitue une application plus pacifique de la combustion à la production de travail. Enfin, la pile de Volta, citée plus haut, met en évidence la production d'énergie électrique à partir d'une réaction chimique, tandis que le passage d'un courant dans un accumulateur au plomb modifie la composition chimique de ce dernier. L'énergie ainsi emmagasinée sous forme chimique est d'ailleurs récupérable par la suite sous forme électrique. La modification de l'état chimique d'un liquide par suite du passage d'un courant électrique, ou électrolyse, avait été étudiée quantitativement par Faraday (1791-1867). Enfin, la relation entre la quantité de travail effectué par un homme ou un animal et l'abondance de la nourriture qui lui est nécessaire a fait l'objet de nombreuses études de la part des physiologistes, mettant ainsi en évidence dans un domaine différent l'équivalence entre énergie mécanique et énergie chimique.

L'énergie transportée par des radiations solaires est certainement la plus anciennement connue de l'homme. Son effet thermique est évident. Et si l'étude de la photosynthèse (fabrication de glucides par les plantes vertes sous l'effet de l'ultraviolet solaire à partir du gaz carbonique de l'air) est relativement récente, il est connu depuis longtemps que ce type de plante demande pour se développer une certaine quantité de lumière. C'est le physicien écossais James Clerk Maxwell (1831-1879) qui détermina les équations représentant correctement les phénomènes électriques et magnétiques. Ces équations permirent de prévoir la propagation d'énergie au moyen d'une onde électromagnétique. L'existence de ces ondes fut mise par la suite en évidence par Hertz, qui leur a laissé son nom, en 1888. Leur utilisation pratique pour la transmission d'informations à distance, qui a connu le développement que l'on sait, remonte aux travaux de Marconi qui établit les premières liaisons radiotélégraphiques à longue distance (Manche, 1889; Atlantique, 1901). Dans le domaine des radiations de courte longueur d'onde (1 Å), Röentgen découvrit en 1895 les rayons X. Sir William Crookes en Angleterre et W. D. Coolidge aux États-Unis mirent au point des tubes émetteurs de rayons X. Enfin, la découverte en 1896 par Becquerel de la radio-activité des sels d'uranium et l'obtention par P. et M. Curie du radium permirent la mise en évidence et l'étude des radiations nucléaires. Le fait que ces radiations, tout comme les rayons X, impressionnent la plaque photographique montre que l'énergie qu'elles transportent est susceptible d'effets chimiques directs.

L'énergie nucléaire est la forme d'énergie dont la connaissance et l'utilisation sont les plus récentes, mais n'est certes pas la moins importante. A partir de la constatation faite par Becquerel de l'émission spontanée d'énergie par certains éléments, lord Rutherford (1871-1937) mit au point un modèle de la structure de l'atome; un noyau chargé positivement est entouré d'électrons négatifs qui gravitent autour. C'est également lui qui montra que la radio-activité naturelle est due à une cassure spontanée de noyaux lourds instables. A la suite de ces travaux fut mis au point le premier accélérateur de particules (sir J. Cockroft) suivi d'un grand nombre d'appareils de types variés ayant tous pour but de produire artificiellement la désintégration de noyaux stables : il s'agit alors de radio-activité artificielle. Au cours de ces transformations, il y a émission de particules diverses, et en particulier de neutrons (découverts en 1932 par J. Chadwick). O. Hahn mit en évidence en 1939 la cassure de l'uranium 238 en deux noyaux de masses à peu près égales après capture d'un neutron. Cette cassure ou « fission » libère des neutrons qui peuvent à leur tour aller briser d'autres noyaux d'uranium, donnant lieu dans des conditions favorables à une réaction en chaîne. La première réalisation expérimentale importante utilisant ce phénomène fut la pile de Fermi qui divergea (commença à fonctionner) le 2 décembre 1942. Le plutonium fabriqué par cette pile fut utilisé à la réalisation des premières bombes américaines à fission. Les recherches se poursuivirent alors à la fois dans le domaine des applications

pacifiques de l'énergie de fission et vers l'utilisation de l'énergie encore plus importante récupérable lors de la fusion de deux noyaux d'isotopes de l'hydrogène (deutérium ou tritium) pour former un noyau plus lourd (isotope de l'hélium). Ces recherches aboutirent à la mise au point sous la direction du professeur E. Teller de la bombe thermonucléaire (dite H) à fusion. Elles se poursuivent aujourd'hui dans le domaine de la fusion contrôlée.

L'évolution des idées en ce qui concerne les différents phénomènes dont nous venons de parler montre qu'au cours d'une étude de plus en plus poussée, on est arrivé à mettre en évidence la conversion d'une forme d'énergie dans une autre, et à la chiffrer. Cet historique montre à quel point la définition première et strictement mécanique que nous avons donnée était restrictive. Il indique que de très nombreux phénomènes mettent en jeu une même grandeur que nous appelons énergie et que nous connaissons sous diverses formes. Nous allons maintenant essayer de préciser quelques-uns des caractères généraux de l'énergie.

La première caractéristique de l'énergie, qui ressort immédiatement de ce que nous venons de voir, est son *aspect multiforme :* on ne peut mettre en évidence une forme d'énergie qu'en la transformant au cours d'un processus physique en une autre forme d'énergie déjà connue. C'est par cette méthode que l'on a pu établir des relations quantitatives entre les différentes formes d'énergie. Ainsi, Joule utilisait le travail mécanique effectué par un poids pour brasser de l'eau. Mesurant le travail du poids et l'élévation de température de l'eau dont il connaissait la masse, il lui était alors possible d'établir la relation entre unité de travail (énergie mécanique) et de chaleur (énergie calorifique).

L'intérêt du concept d'énergie en physique vient du fait qu'au cours des différentes transformations qu'elle peut subir, l'énergie se conserve. Ceci est une loi fondamentale de la physique et nous allons essayer de la préciser. Nous savons qu'un système de corps ne possédant que de l'énergie mécanique peut la posséder sous forme d'énergie cinétique et/ou potentielle. La somme de ces deux énergies demeure alors constante si le système est isolé (c'est-à-dire ne reçoit ni ne fournit à l'extérieur aucun travail). Un exemple classique d'un tel système est constitué par l'ensemble formé par la Terre et un pendule simple (corps pesant de faibles dimensions fixé à l'extrémité d'un fil). Le pendule a pour position d'équilibre la verticale du point où il est fixé. Le pendule, écarté de sa position d'équilibre, est abandonné sans vitesse initiale. A cet instant, toute son énergie est sous forme potentielle. Au fur et à mesure de sa course, sa vitesse augmente, et donc son énergie cinétique, tandis que son énergie potentielle diminue. Au point le plus bas de sa course, l'énergie cinétique est maximale et l'énergie potentielle minimale. A partir de cet instant, le pendule va remonter, donc gagner de l'énergie potentielle, mais sa vitesse va diminuer. On constate que, si les frottements sont suffisamment faibles, le pendule atteint son niveau de départ avant de repartir à nouveau. Il y a donc eu transformation d'énergie potentielle en énergie cinétique, puis retransformation, et la quantité d'énergie retrouvée à la fin de l'opération est identique à celle du début. Il y a eu conservation de l'énergie pour ce système mécanique isolé. Cette loi semble mise en défaut dans le cas où les frottements sont importants, et chacun sait qu'ils sont responsables de l'arrêt du mouvement. Cependant, au cours du frottement, est apparue une certaine quantité de chaleur. Nous pouvons donc continuer à considérer qu'il y a eu conservation de l'énergie à condition d'inclure dans le terme énergie la chaleur en sus de l'énergie mécanique. C'est ainsi que nous pourrons généraliser la loi de conservation de l'énergie en fonction des transformations qui se produisent dans le système en considérant les formes d'énergie les plus variées.

De la conservation de l'énergie (prise au sens large) dans un système isolé, nous pouvons tirer deux conclusions importantes. L'Univers étant par nature un système isolé, nous pouvons affirmer que la quantité totale d'énergie existant dans la nature, sous quelque forme que ce soit, demeure constante au cours du temps. La deuxième conséquence est l'impossibilité de construire un moteur à mouvement perpétuel. Cet appareil, qui fit l'objet de nombreuses recherches au XVII^e siècle, serait tel qu'il pourrait retourner à son état initial sans apport extérieur d'énergie après un certain nombre de transformations, et avoir cependant fourni du travail au milieu extérieur. Ce serait évidemment idéal du point de vue de l'économie de l'énergie, mais contraire à la loi de conservation qui postule que, si le système garde une énergie constante, il est isolé.

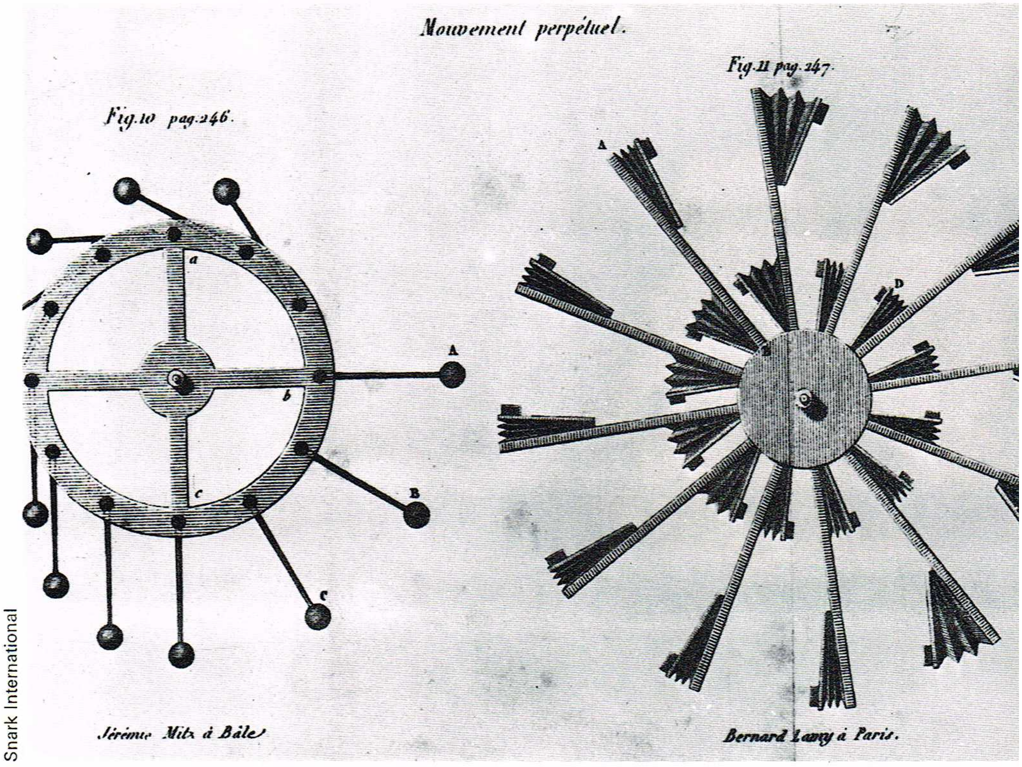

▲ ***Planche sur l'étude d'un mouvement perpétuel extraite du* Manuel chronométrique *de Firmin Didot.***

La conservation de l'énergie n'entraîne toutefois pas une conservation de l'énergie utilisable : en effet, les différentes formes d'énergie ne sont pas toutes également favorables. On assiste dans tous les processus de transformation à une certaine dégradation de l'énergie, une partie de l'énergie mise en jeu n'étant pas utilisée. Il y a donc fuite d'énergie, en général sous forme de chaleur (voir l'exemple du frottement donné plus haut). Nous examinerons ce problème plus en détail dans le cadre de l'étude de l'énergie calorifique.

Un dernier aspect de l'énergie est que, sous ses diverses formes, elle dépend en général de deux facteurs pouvant varier indépendamment. Ainsi, le même travail peut être fourni par un poids élevé travaillant sur une faible distance, ou un corps moins lourd déplacé sur une grande distance. De même, une quantité de chaleur donnée se traduira par une faible élévation de température d'une masse liquide importante et par un réchauffement sensible d'une plus faible quantité. En électricité, nous constatons qu'un courant de faible intensité sous un potentiel élevé a les mêmes effets thermiques qu'un fort courant sous une tension réduite (à condition de tenir compte du temps de passage). Ces variables appartiennent à deux groupes : les variables intensives et extensives. Nous les définirons plus précisément en ce qui concerne la chaleur.

Enfin, nous pouvons à présent préciser la relation entre énergie et travail : le travail est ce qui peut apparaître lors d'une modification de l'état d'énergie d'un système. Il est fourni à l'extérieur si l'énergie du système diminue, donné par l'extérieur dans le cas contraire. La rapidité avec laquelle le transfert d'énergie s'effectue est caractérisée par une grandeur appelée puissance : c'est le quotient de la quantité d'énergie mise en jeu par le temps mis pour transférer cette énergie. Cette grandeur est utile pour chiffrer l'utilité relative d'un dispositif de transfert d'énergie.

Au terme de cette étude préliminaire, nous avons montré que différents phénomènes mettent en jeu une même grandeur, appelée énergie, susceptible de se manifester sous des formes très diverses. Nous avons précisé un certain nombre des caractères généraux de cette grandeur et constaté qu'il était difficile, sinon impossible de définir l'énergie en soi, puisqu'on ne peut l'observer que dans les effets qu'elle produit. C'est pourquoi nous allons maintenant revenir à une étude plus détaillée des formes d'énergie que nous avons citées plus haut. Cette étude nous permettra de préciser la notion d'énergie et d'expliquer les équivalences entre ses différentes formes constatées précédemment.

J.N. Reichel - TOP

▲ *En métallurgie, les traitements thermiques appliqués aux métaux et aux alliages permettent d'obtenir des propriétés mécaniques bien définies.*

Énergie mécanique

L'énergie mécanique possédée par un corps ou un ensemble de corps se présente sous deux formes : l'énergie cinétique, liée à l'état de mouvement de ce corps, et l'énergie potentielle, dépendant de la position de l'objet considéré dans un champ de forces donné (pesanteur par exemple).

L'énergie cinétique est par définition égale à la moitié du produit de la masse du corps considéré par le carré de sa vitesse :

$$E_c = 1/2\ mv^2$$

L'énergie potentielle se définit de la manière suivante : admettons qu'un corps se déplace d'un point A à un point B dans une région de l'espace dans laquelle règne un champ de forces tel que le travail de ces forces quand elles déplacent le corps de A en B ne dépende que de A et B et non du chemin parcouru (forces conservatives), alors

$$W_{AB} = E_p\ (A) - E_p\ (B)$$

où W_{AB} est le travail des forces déplaçant le corps de A en B et où E_p est une fonction de la position du corps dans l'espace, appelée énergie potentielle du corps. La définition que nous venons de donner présuppose que l'on puisse définir un point origine 0 tel que son énergie potentielle soit nulle. Mais nous ne changeons rien à la valeur du travail en ajoutant ou retranchant la même valeur à E_p (A) et E_p (B), c'est-à-dire en prenant une autre origine pour la fonction E_p. L'énergie potentielle n'est donc définie qu'à une constante additive près. Ceci n'est nullement gênant, dans la mesure où elle n'intervient que par sa différence : en effet, le travail d'un corps tombant de 10 cm sous l'effet de la pesanteur dans une pièce située au 2^e étage d'un bâtiment est le même, que l'on considère le zéro d'énergie potentielle au niveau du plancher ou au niveau du sol. Le niveau d'énergie potentielle nulle sera donc choisi dans chaque cas en fonction de la commodité de traitement du problème envisagé. L'énergie potentielle est souvent prise comme nulle à l'infini (cas d'un corps dans un champ électrostatique, ou d'un satellite dans la zone d'attraction d'un astre). Quand un corps en mouvement perd ou gagne de la vitesse, un certain travail peut être récupéré ou doit lui être fourni; il y a modification de l'énergie cinétique. La relation entre ces quantités est donnée par le théorème de l'énergie cinétique : *Le travail effectué par la force de A en B est égal à la différence d'énergie cinétique du corps entre les points A et B :*

$$W_{AB} = E_{cB} - E_{cA}$$

La somme de l'énergie potentielle et de l'énergie cinétique d'un corps est appelée énergie mécanique totale de ce corps (elle n'est donc définie comme l'énergie potentielle qu'à une constante près). Cette énergie mécanique totale se conserve dans un système isolé (exemple du pendule cité précédemment). Il ne peut donc y avoir que transformation d'énergie potentielle en énergie cinétique, et *vice versa*, dans un tel système (en l'absence de frottements). Un corps matériel placé dans un champ de forces conservatives tend à occuper des positions bien déterminées, dites positions d'équilibre, telles que son énergie potentielle soit minimale. L'équilibre est dit stable si le corps écarté de cette position y revient, instable s'il continue à s'en éloigner. L'étude de l'énergie mécanique ne met en jeu que des observations macroscopiques, c'est-à-dire faites sur des systèmes ou corps de dimensions importantes : cela explique ses limitations, mais aussi le fait que c'est la première forme d'énergie ayant donné lieu à une étude développée.

Énergie calorifique

Nous allons au cours de l'étude de cette forme d'énergie, qui est l'objet de ce que l'on appelle la thermodynamique, aborder successivement les points de vue macroscopique et microscopique.

Du point de vue macroscopique, l'étude d'un système revient à le caractériser par un certain nombre de variables aisément mesurables. Les variables permettant de définir l'état du système ne sont généralement pas indépendantes, mais liées par des relations, appelées fonctions d'état et dont la connaissance permet de définir l'état du système. Dans l'étude des différentes fonctions d'état utilisées en thermodynamique, nous verrons intervenir énergie calorifique, travail, pression et volume.

La première fonction d'état importante est l'énergie interne du système U. Elle est définie de la manière suivante. Si un système passe d'un état d'équilibre A à un état d'équilibre B en échangeant avec l'extérieur du travail W et de la chaleur Q, on écrit :

$$U\ (B) - U\ (A) = (W + Q)_{AB}$$

L'importance de cette fonction d'état vient de la propriété suivante : « la somme W + Q ne dépend pas du mode de transformation faisant passer le système de A à B, mais seulement des états initial A et final B ». Cet énoncé est connu sous le nom de *principe de l'état initial et de l'état final*. Cette propriété de l'énergie interne rappelle celle de l'énergie mécanique totale dont elle apparaît comme une sorte de généralisation prenant en compte les échanges de chaleur.

A partir de l'énergie interne peuvent être définies d'autres fonctions d'état adaptées au système étudié : pour un fluide, une fonction d'état importante est l'enthalpie :

$$H = U + PV$$

Une autre fonction d'état importante et sur la signification de laquelle nous reviendrons par la suite est la fonction entropie définie par :

$$S\ (B) - S\ (A) = \int_A^B \frac{dQ}{T}$$

(intégrale de l'état A à l'état B du quotient de la quantité de chaleur échangée à chaque instant avec l'extérieur par la température absolue à laquelle se fait cet échange). La variation de chacune de ces fonctions d'état ne dépend que de l'état A et de l'état B. Il en résulte que toute combinaison linéaire de ces fonctions est elle-même fonction d'état. C'est ainsi que l'on peut également définir l'énergie libre (fonction de Helmholtz)

$$F = U - TS$$

et l'enthalpie libre (fonction de Gibbs)

$$G = H - TS$$

A cette occasion, nous allons préciser la notion de *variables intensives* et *extensives*. On constate que les fonctions d'état citées plus haut sont en fait des indicateurs de l'état d'énergie du système. Ces expressions apparaissent toujours en dernière analyse comme un produit de deux facteurs. L'un de ces facteurs joue le rôle de variable de grandeur ou de position (extensive), l'autre de facteur de tension (intensive). Ces deux groupes se distinguent par le fait que les variables intensives ne sont pas additives, alors que les variables extensives le sont. Aussi, lors de la réunion de deux systèmes identiques, la variable extensive double, alors

que l'intensive est inchangée. L'application de ce critère à l'énergie mécanique mise en jeu dans une détente W = PV permet d'affirmer que le volume est extensif et la pression intensive. Pour l'énergie calorifique, la variable intensive est la température absolue T, la variable extensive, l'entropie S.

Après ces quelques aperçus des règles régissant l'étude macroscopique d'un système, il est intéressant de se pencher sur le même problème **du point de vue microscopique.** L'un des éléments de preuve de l'hypothèse moléculaire a été l'étude du mouvement brownien. On appelle ainsi le mouvement incessant de petites particules solides en suspension dans un fluide sous l'action de chocs moléculaires. Ce mouvement met en évidence un mouvement des molécules. Par ailleurs, ces molécules étant très nombreuses et animées de mouvements aléatoires, l'étude de leur mouvement doit se faire par des méthodes statistiques. On peut montrer par ces méthodes que l'énergie cinétique moyenne de chaque particule d'un ensemble interagissant mécaniquement est la même et ne dépend pas de la masse de la particule (théorème d'équipartition). Or, on constate que le mouvement brownien augmente avec la température absolue, et ce linéairement. On en conclut donc que l'énergie cinétique d'agitation des molécules est proportionnelle à la température absolue. Ceci est fondamental, et permet d'affirmer que l'énergie calorifique fournie à un système (en l'occurrence gaz ou liquide, mais cela reste valable pour les solides) apparaît sous forme d'une augmentation de l'énergie cinétique de ses molécules. Ainsi se trouve établie directement l'équivalence entre énergie calorifique et énergie mécanique démontrée expérimentalement par Joule. Par ailleurs, il est alors possible de traiter les problèmes thermodynamiques en utilisant les résultats de la mécanique statistique en les appliquant à ces problèmes particuliers. D'où le développement des statistiques thermodynamiques, Maxwell-Boltzmann, Fermi-Dirac et Bose-Einstein.

Cette conception microscopique va permettre de préciser la fonction entropie introduite plus haut. En effet, l'énergie cinétique possédée par les molécules peut être soit ordonnée, soit désordonnée. Dans le premier cas, cette énergie est récupérable sous forme de travail mécanique; dans le second, elle apparaît uniquement sous forme de chaleur : ainsi, au cours d'un travail mécanique, la chaleur due au frottement correspond à un passage de l'ordre au désordre. La fonction entropie, liée à la quantité de chaleur mise en jeu dans les processus, correspond en fait à une mesure du désordre moléculaire. Ceci explique que cette fonction soit croissante dans tous les processus naturels. Nous pouvons également maintenant expliquer la nécessité de posséder deux sources de chaleur pour pouvoir transformer la chaleur en travail (ce principe, dit principe de Carnot, régit tous les moteurs thermiques). En effet, il apparaît que, pour ordonner le mouvement moléculaire et pouvoir récupérer du travail, il faut créer un sens au mouvement, donc un flux d'énergie, d'où la nécessité de deux sources à températures différentes.

Énergie électrique

Nous allons considérer deux de ses formes, l'énergie d'une distribution de charges et l'énergie due à un courant.

Entre deux ou plusieurs charges ponctuelles existent des forces. Leur forme est donnée par la loi de Coulomb : *Les forces exercées l'une sur l'autre par deux charges électriques ponctuelles sont égales et opposées, dirigées suivant la droite qui les joint, proportionnelles aux deux charges et inversement proportionnelles au carré de leur distance. Elles sont répulsives si les deux charges sont de même signe, attractives autrement.*

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{qq'}{r^2} \quad \text{où} \quad \varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi\, 10^9}\ \text{SI}$$

dans le vide et l'air.

Cette relation permet de calculer la force subie par une charge en présence de *n* autres charges : il suffit d'ajouter les forces agissant sur la charge de la part de chacune des autres charges. Cette force ne dépend en fait que de deux éléments, la charge de la particule qui nous intéresse et sa distance à toutes les autres charges qui sont connues. On dit alors que la force est le produit de la charge par le vecteur champ électrique, force subie par la charge unité placée dans la position considérée : $\vec{F} = q\vec{E}$, et pour une charge isolée, le champ créé à la distance *r* sera $E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{r^2}$

Il apparaît donc que l'énergie électrique d'une charge *immobile* dans un champ électrique est de l'énergie potentielle. Le travail récupérable lors d'un déplacement entre deux points est égal à l'intégrale le long du chemin suivi du produit scalaire de la force par l'élément de distance. La charge étant constante, cette énergie est égale au produit de cette charge par l'intégrale du vecteur champ électrique sur le même chemin. Cette dernière quantité est appelée différence de potentiel entre les deux positions, initiale et finale. L'énergie peut donc se mettre sous la forme du produit charge-potentiel. Elle est définie, comme le potentiel, à une constante additive près. La charge apparaît comme une grandeur extensive, le potentiel comme une grandeur intensive. Ces résultats peuvent être étendus au cas de charges non isolées à condition de considérer les densités de charge, linéique, en surface ou en volume. C'est ainsi que, dans un condensateur (dispositif comprenant deux armatures métalliques séparées par un isolant ou diélectrique), la matière isolante emmagasine une charge Q = CV où V est le potentiel et C la capacité, coefficient dépendant de la forme et des dimensions du condensateur. Son énergie est alors $1/2\ QV = 1/2\ CV^2$. De même, on démontre grâce aux définitions exposées plus haut que la densité d'énergie dans un diélectrique au sein duquel règne un champ $\vec{E}$ est égale à $\varepsilon E^2/2$ où ε est la constante diélectrique du milieu (ε_0 pour le vide et l'air).

L'énergie mise en jeu dans un courant peut être cause d'effets thermiques (effet Joule) ou d'effets mécaniques si le conducteur se trouve placé dans un champ magnétique.

Dans un conducteur métallique, les électrons sont libres de se déplacer, et ce d'autant plus aisément que la résistance de ce conducteur est moins grande. Ils se déplacent au milieu d'un réseau cristallin constitué d'ions positifs. Si l'on applique aux extrémités du conducteur une différence de potentiel, le champ créé exerce sur les électrons une force qui les met en mouvement. Au cours de ce mouvement, il se produit des chocs avec les ions du réseau, et les électrons cèdent une partie de leur énergie cinétique au réseau : cette énergie apparaîtra sous forme d'agitation thermique, donc de chaleur. L'énergie libérée est proportionnelle au nombre de charges qui passent et au potentiel. D'où W = QV. On

E. Lessing - Magnum

◀ ***Moteur électrique inventé par l'Autrichien Johann Kravogz (musée des Techniques, Vienne).***

peut alors introduire la grandeur intensité égale au nombre de charges passant en une section par unité de temps : $I = Q/t$. Le potentiel appliqué crée un courant dont l'intensité est d'autant plus grande que la résistance est faible. Ceci s'exprime par la loi d'Ohm $V = RI$. On en déduit que l'énergie calorifique libérée pendant un temps t par un courant I est $W = RI^2t$

Par ailleurs, une charge électrique se déplaçant avec une vitesse v dans un champ magnétique B subit une force normale à la vitesse et au champ et de grandeur $\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$. Un conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ verra donc ses électrons de conduction subir ce type de force et la subira lui-même, les électrons ne pouvant en sortir. Il y a donc ici création d'énergie mécanique utilisable à partir de l'énergie électrique. Ce type d'effet est utilisé dans les moteurs électriques.

Au plan microscopique, l'énergie électrique apparaît donc comme celle de particules, immobiles ou non, dans un champ de forces. Elle se réduit donc sous les aspects traités à l'énergie mécanique.

Énergie chimique

En dernière analyse, les édifices chimiques sont constitués d'atomes liés électriquement par les électrons de leur couche externe. Ces liaisons peuvent être de différents types : liaisons ionique, covalente, métallique, selon qu'il y a don d'électrons d'un atome à un autre (les deux devenant alors des ions chargés électriquement) ou mise en commun d'électrons. Dans le cas de la liaison métallique, les électrons de liaison se déplacent au sein d'un réseau formé par les ions métalliques (voir *Énergie électrique*). Dans tous les cas, le système obtenu est maintenu stable par des forces de nature électrostatique. De ce qui précède, on peut donc déduire que l'énergie chimique correspond à une énergie potentielle électrostatique.

Cette énergie peut être libérée par rupture des liaisons existantes. Il s'agit alors d'une réaction dite exothermique (qui fournit de la chaleur). L'énergie fournie par la destruction d'une molécule peut alors provoquer la rupture d'une autre et, dans des conditions favorables, une sorte de réaction en chaîne se produit jusqu'à épuisement du milieu réactif. Il faut en général un apport extérieur d'énergie pour faire démarrer la réaction. La partie de l'énergie qui n'est pas utilisée à l'entretien de la réaction apparaît sous forme de chaleur. L'exemple type de ce genre de réaction est la combustion vive : un feu doit être allumé, puis s'entretient jusqu'à épuisement du combustible en fournissant de la chaleur au milieu extérieur. La chaleur produite dans ces réactions peut d'ailleurs être convertie en énergie mécanique (moteurs à explosion, armes à feu). Une forme plus sophistiquée d'utilisation de cette énergie est la pile à combustible, où l'énergie de réaction d'oxygène et d'hydrogène gazeux est directement convertie en énergie électrique. Il en est de même dans les piles hydroélectriques.

▼ *Moteur propulseur, de type alternatif à combustion interne : un exemple de convertisseur d'énergie chimique en énergie mécanique.*

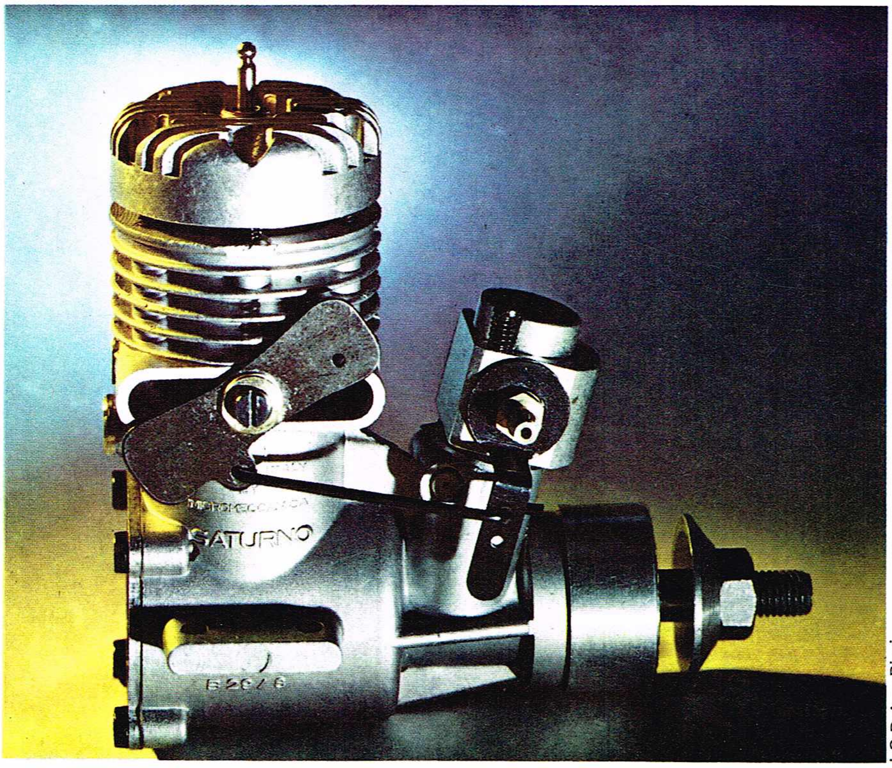

I.G.D.A. - Rizzi

L'énergie chimique apparaît donc comme une énergie stockée dans les corps sous forme électrique. Elle peut être présente naturellement et libérable par réaction comme il vient d'être dit. On peut aussi modifier les liaisons dans certains systèmes en apportant une certaine quantité d'énergie que l'on emmagasine ainsi sous forme chimique en vue d'une utilisation ultérieure. C'est ce qui se passe lors de la charge d'un accumulateur. La modification de la nature des plaques par passage d'un courant électrique est réversible, ce qui permet de récupérer une partie de l'énergie emmagasinée.

Énergie rayonnante

On appelle ainsi l'énergie transportée par les ondes électromagnétiques. L'existence de ce type d'ondes a été prévue à partir des équations de Maxwell et démontrée par les expériences de Hertz. Une onde électromagnétique correspond à la propagation à travers l'espace d'un champ électrique et d'un champ magnétique croisés. La propagation s'effectue dans le vide à la vitesse de la lumière, les champs étant en opposition de phase et ayant pour fréquence celle de l'onde. On montre alors que la densité d'énergie transportée par une telle onde est égale au flux d'un vecteur appelé *vecteur de Poynting*, égal au quotient par la perméabilité magnétique μ du milieu de propagation du produit vectoriel des champs électriques et magnétiques :

$$\vec{P} = \vec{E} \wedge \vec{B}/\mu$$

L'importance de ces ondes est due au fait qu'elles rendent possible la propagation d'énergie sans aucun support matériel. Elles sont responsables de l'équilibre énergétique de l'Univers.

Si la conception exposée ci-dessus permet d'expliquer nombre de phénomènes liés à ces ondes tels la diffraction, les interférences et la diffusion de ces ondes, elle est insuffisante pour en interpréter d'autres : effet photoélectrique (arrachement d'électrons à une surface métallique éclairée) ou effet Compton (conservation de la quantité de mouvement dans le cas d'un électron se déplaçant sous l'action d'une radiation électromagnétique). Pour expliquer ces phénomènes, il est nécessaire de faire appel à une nouvelle représentation du rayonnement (théorie quantique de Max Planck) : une onde électromagnétique est composée de particules appelées photons présentant les caractéristiques suivantes. La masse du photon est évanescente (quasi nulle), sa vitesse dans le vide est égale à celle de la lumière, et son énergie et sa quantité de mouvement sont liées à la fréquence ν de l'onde à laquelle il est associé par les deux relations suivantes :

$$E = h\nu \qquad \mathbf{p} = h\nu/c$$

(h constante de Planck $6{,}62 \cdot 10^{-34}$ SI)

On peut expliquer dans cette représentation qu'un atome passant d'un état d'énergie à un autre par saut électronique émette (ou absorbe) une énergie bien définie sous forme d'une radiation de fréquence déterminée et égale à :

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

Cette dualité onde-corpuscule, une fois admise, a permis de traiter les différents problèmes liés aux ondes électromagnétiques et à leur interaction avec la matière.

Énergie nucléaire

L'énergie nucléaire est par définition l'énergie liée au noyau atomique. Cette énergie peut se déterminer à partir d'une relation introduite par Einstein et établissant l'équivalence de la masse et de l'énergie. Cette relation,

qui permet de déterminer une valeur absolue de l'énergie interne d'un système, postule que l'énergie d'une particule est égale au produit de sa masse par le carré de la vitesse de la lumière : $E = mc^2$.

Cette relation a pu être vérifiée expérimentalement par ses conséquences. En effet, elle sous-entend la possibilité de produire de l'énergie par destruction de matière, ou, au contraire, la création de matière à partir d'une quantité d'énergie suffisante. Or les deux phénomènes ont été observés. Anderson a réussi à constater la création de paires électron-antiélectron à partir de rayonnements γ de haute énergie (rayons cosmiques). De même, la rencontre de deux antiparticules conduit à leur annihilation avec émission d'un photon d'énergie équivalente à leur masse. L'énergie mise en jeu est extrêmement importante (le coefficient c^2 étant égal à $9 \cdot 10^{16}$ SI).

La relation d'Einstein permet d'expliquer la libération d'énergie lors des processus de fission et de fusion. On constate que, lors de la rupture d'un noyau lourd, la somme des masses des noyaux plus légers auxquels il donne naissance est toujours supérieure à la masse du noyau initial. Le défaut de masse en question correspond à l'énergie de liaison du noyau lourd. C'est cette énergie que l'on récupère sous forme thermique au cours de la fission.

De la même manière, il est possible de produire de l'énergie par création d'un noyau lourd à partir de deux noyaux légers (isotopes de l'hydrogène). Ce processus, appelé fusion, sera étudié en détail dans le chapitre consacré à l'énergie nucléaire.

Ces phénomènes se rencontrent dans la nature et présentent une grande importance. L'énergie du Soleil et des étoiles résulte de processus de fusion, tandis que la désintégration des roches radio-actives semble responsable pour une part de l'entretien de la chaleur interne du globe terrestre.

L'ensemble des considérations précédentes concernant les différentes formes d'énergie ne permet pas d'avoir une définition pleinement satisfaisante de la grandeur énergie. Toutefois, un certain nombre de caractéristiques importantes peuvent en être dégagées. Tout d'abord, l'unicité de l'énergie est amplement prouvée par les possibilités de transformation d'une forme en l'autre. Par ailleurs, l'énergie interne d'un système peut être chiffrée absolument, la relation d'Einstein permettant de tenir compte de l'énergie de masse. Enfin, la théorie quantique montre que, du point de vue microscopique, l'énergie d'un système ne varie pas continûment au cours de ses échanges avec l'extérieur, mais bien par sauts (quanta d'énergie). En conclusion, l'utilité fondamentale de cette notion est la possibilité de définir de manière très claire l'état d'un système, et son mode d'interaction avec le milieu ambiant. L'énergie elle-même apparaît comme une abstraction mathématique, liée à différentes lois de conservation dans l'Univers, mais dont l'utilité réside dans la connaissance des propriétés qui lui sont attachées. De ce point de vue, c'est un outil très puissant de connaissance en physique.

Les unités et la mesure de l'énergie

La grandeur énergie que nous avons tenté de définir préalablement est une grandeur mesurable. Il est donc nécessaire de définir les unités servant à la caractériser sous ses diverses formes. C'est là l'objet de la première partie de cet exposé. Nous donnerons ensuite quelques indications sur les méthodes permettant cette mesure.

L'unicité de l'énergie a été mise en évidence : en bonne logique, il s'ensuit la possibilité de n'utiliser à sa mesure qu'une seule unité. Toutefois, étant donné la diversité de ses formes et pour des raisons de commodité, nous rencontrerons en fait un grand nombre d'unités, introduites historiquement au cours de l'étude des énergies décrites plus haut.

L'unité fondamentale d'énergie, admise par le système international d'unités, est le **joule** : c'est le travail effectué par une force de 1 newton déplaçant son point d'application de 1 mètre dans sa propre direction (le système international admet 6 unités de base : mètre, kilogramme masse, seconde, ampère, degré Kelvin, candela). Dans le système CGS (centimètre, gramme, seconde), l'unité d'énergie est l'**erg** (1 erg = 10^{-7} J). Une autre unité, moins utilisée, est le **kilogrammètre** : travail fourni par une force de 1 kilogramme-force déplaçant son point d'application de 1 mètre dans sa direction (1 kgm = 9,81 J).

Les unités de puissance correspondantes sont le **watt** (joule par seconde) et l'**erg par seconde.** On utilise également pour les moteurs le **cheval-vapeur** (ch) 1 ch = 736 W = 75 kgm/s. Ces unités sont celles que l'on utilise à la mesure des énergies et puissances mécaniques. Toutes les autres unités sont convertibles dans les systèmes indiqués.

Les unités propres aux diverses formes d'énergie sont dites hors système, et sont utilisées par suite de leur bonne adaptation à la mesure des grandeurs particulières considérées. L'unité de base des mesures d'énergie calorifique est la **calorie** (cal) : c'est la quantité de chaleur qu'il faut fournir à 1 gramme d'eau pure pour porter sa température de 14,5 °C à 15,5 °C. Les multiples de cette unité sont la **kilocalorie** ou grande calorie (1 kcal = 1 000 cal) et la mégacalorie ou **thermie** (1 th = 10^6 cal). On utilise également dans l'industrie la **millithermie** (mth) qui est donc égale à une grande calorie. L'industrie frigorifique, traitant de quantités de chaleur enlevées, emploie la **frigorie** (fg). Une frigorie est égale à une kilocalorie négative. Joule a établi l'équivalence de la chaleur et du travail en mesurant la quantité de chaleur associée à un travail d'un joule, soit 4,1855 joules par calorie. L'ensemble de ces unités est donc convertible en joules, seule unité légale de quantité de chaleur. Le Royaume-Uni utilise le *B. t. u.* (British thermal unit) qui est égal à 252 calories (1 055 J).

L'énergie électrique est mesurée en **watts-heure.** Cette unité correspond à l'énergie développée par une puissance de 1 watt pendant une heure. Elle est donc égale à 3,6 kilojoules (3 600 joules). On utilise également le **kilowatt-heure** (kWh). Les compteurs électriques d'installations sont gradués dans cette unité.

L'énergie chimique, se manifestant surtout lors de sa transformation en chaleur ou travail, se mesurera dans les unités qui caractérisent ces deux sortes d'énergie, c'est-à-dire en calories (ou kilocalories) ou en joules. En chimie, l'énergie thermique récupérable lors de la destruction d'un corps est fréquemment rapportée à une mole (6,02 10^{23} atomes, ou molécules) de ce corps. On chiffre alors les énergies en kilocalories par moles d'atomes ou de molécules.

Le problème de la mesure se complique lors de l'étude de l'énergie rayonnante transportée par un faisceau lumineux : en effet, l'énergie émise par une source lumineuse et reçue par un observateur dépend de la direction d'observation et n'est pas la même dans les différentes longueurs d'onde susceptibles d'être émises par la source. La mesure des effets lumineux fait l'objet de la photométrie visuelle. Pour une lumière de constitution spectrale donnée, la puissance transportée est mesurée par le flux lumineux. L'unité de flux lumineux est le **lumen** : c'est là le flux rayonné par une source d'intensité 1 candela dans un angle solide de 1 stéradian. L'intensité de la source (puissance totale rayonnée) est mesurée en **candelas** (cd) : soixantième partie de l'intensité lumineuse d'un centimètre carré de la surface d'un corps noir porté à la température de fusion du platine (2 046 °K). L'intensité par unité de surface ou luminance est mesurée en **nits** (cd/m^2). Le flux reçu par un écran (puissance reçue) a pour unité le **lux** : éclairement d'une surface de 1 m^2 recevant un flux de 1 lumen uniformément réparti (ou encore éclairement d'une surface disposée normalement à un mètre d'une source de 1 candela). Ces unités sont des unités de puissance et on passera à l'énergie en tenant compte du temps d'émission. Toutefois, l'assimilation flux-puissance n'a de sens que pour une lumière de composition spectrale donnée. En effet, la proportionnalité entre les unités de photométrie visuelle citées plus haut et les unités énergétiques est variable avec la longueur d'onde de la lumière considérée. C'est pourquoi s'est développée une photométrie énergétique dans laquelle on transforme préalablement la lumière en chaleur. Les unités utilisées sont alors celles qui mesurent l'énergie thermique.

Les physiciens nucléaires ont introduit pour la mesure de l'énergie des particules une unité appelée **électron-volt** (eV) : c'est l'énergie cinétique acquise par un électron accéléré sous une différence de potentiel

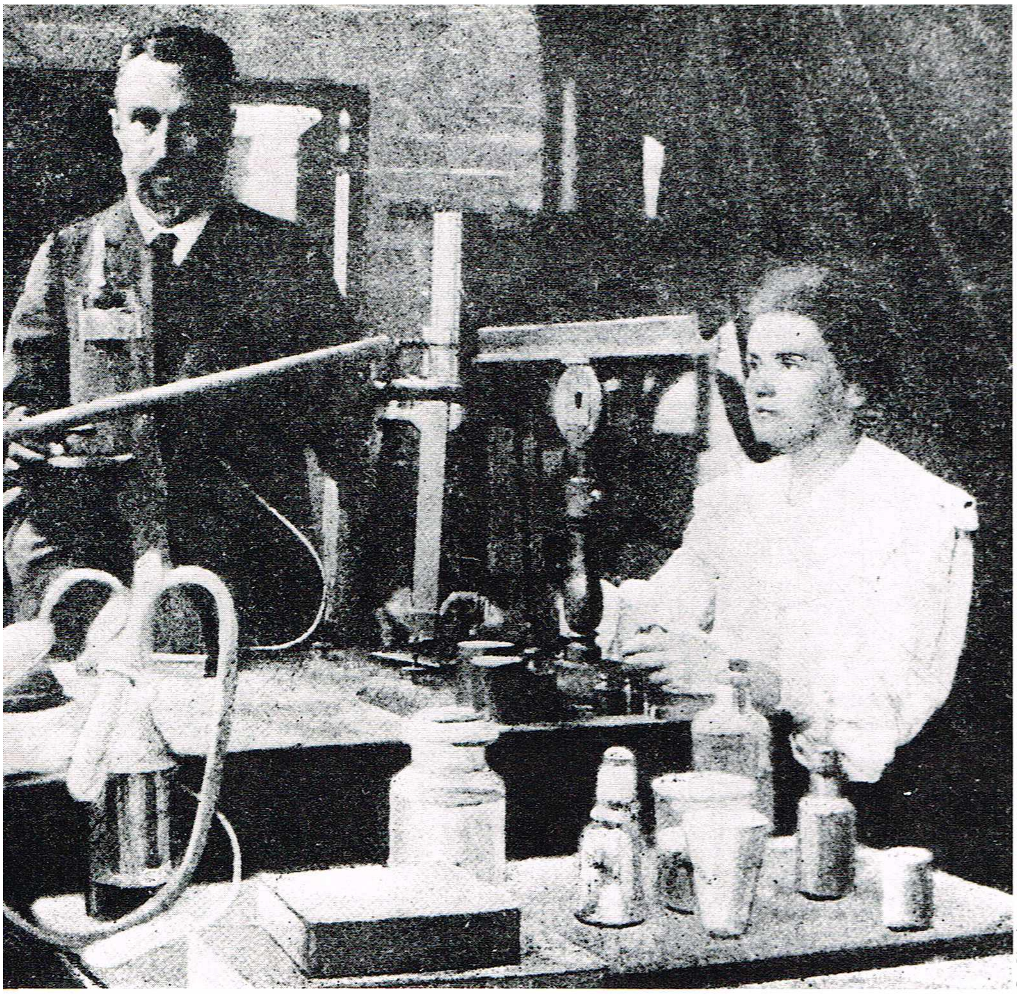

C. Ciccione

▲ Pierre et Marie Curie *dans leur laboratoire.*

▶ *Page ci-contre, figure 1 : l'atome de sodium qui contient un seul électron sur la couche périphérique* M, *le cède à l'atome de chlore et devient un ion* Na^+ *alors que l'atome de chlore qui gagne un électron sur sa couche* M *devient* Cl^-. *La configuration électronique des ions ainsi formés est celle des gaz rares : l'ion* Cl^- *a pris la configuration de l'argon et l'ion* Na^+ *celle du néon. Figure 2. Schématisation des liaisons covalentes :* a) *liaison simple pour H ou Cl. Les points représentant les électrons des couches externes; les symboles H, Cl ou O, les noyaux et les électrons des couches internes; le tiret, la paire d'électrons de liaison. Cette paire appartient à l'environnement électronique des deux atomes. L'atome Cl a sept électrons périphériques dont l'un est célibataire, l'apport d'un autre électron lui donne une configuration avec quatre paires d'électrons et une couche externe saturée qui est celle de l'argon;* b) *double liaison simple pour* H_2O; c) *liaison double pour* O_2.

de 1 volt. Cette énergie est donc égale à $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ joule. On utilise fréquemment ses multiples, le **méga-électron-volt** (1 MeV $= 10^6$ eV) et le **giga-électron-volt** (1 GeV $= 10^9$ eV). Les pays anglo-saxons donnent à cette dernière unité le nom de **billion d'électrons-volts** ou BeV. C'est la raison pour laquelle le synchrotron de 6 GeV de l'université de Berkeley aux États-Unis est appelé bevatron.

D'autres unités ont été introduites qui sont liées à l'énergie produite ou reçue au cours de la désintégration radio-active.

L'activité d'une source (nombre de désintégrations par seconde) se mesure en **curies** (activité d'une source produisant $3{,}7 \cdot 10^{10}$ désintégrations par seconde). La connaissance de cette activité permet la détermination de l'énergie rayonnée par la source si l'on connaît l'énergie par désintégration. L'effet d'ionisation produit par le rayonnement nucléaire est mesuré en **röentgens** (R) : quantité de rayonnement produisant dans 0,001 293 g d'air une quantité d'électricité égale à $1/(3 \cdot 10^9)$ coulomb (1 unité CGS). Enfin, le **rem** mesure l'effet biologique produit par une irradiation. A énergie égale, cet effet peut varier. Cette unité mesure donc non point l'énergie transportée par le rayonnement, mais celle absorbée par le milieu vivant.

Après avoir dressé la liste des unités les plus couramment utilisées à la mesure de l'énergie sous les diverses formes précédemment décrites, il est intéressant d'étudier les *méthodes* permettant de mesurer la grandeur énergie. Pour cela, il faut se remémorer les caractéristiques de l'énergie telles que nous les avons définies dans le chapitre précédent. Il est apparu que l'énergie pouvait être considérée comme le produit de deux variables, intensive et extensive : *une première voie de mesure* consiste donc à déterminer séparément et simultanément les valeurs des deux variables, mises en jeu au cours d'un transfert d'énergie : leur produit fournira le résultat cherché; *une deuxième voie* fait appel à la détermination de la puissance mise en jeu et du temps pendant lequel elle est mise en jeu : la mesure des énergies se ramène alors à celle des puissances. *Enfin*, nous avons vu que les formes d'énergie sont convertibles entre elles. Il sera donc possible par une troisième voie de mesurer une énergie en la convertissant préalablement en une énergie pour laquelle on dispose d'une méthode de mesure éprouvée (à condition toutefois de s'assurer que la conversion se fait sans pertes).

La mesure de l'énergie mécanique fait souvent appel à la première méthode : on mesure les forces et couples (dynamomètres et couplemètres) et les déplacements. On en déduit le travail effectué. La mesure de l'énergie cinétique peut s'effectuer par transformation en énergie potentielle comme dans le cas du pendule balistique. On peut également convertir l'énergie mécanique en énergie thermique et mesurer ainsi cette dernière : c'est là le principe des expériences de Joule et de Hirn.

L'énergie thermique est généralement mesurée par détermination de l'élévation de température d'un corps de masse et de chaleur massique connues auquel on communique la quantité de chaleur à mesurer. C'est là encore une application de la première méthode indiquée plus haut.

L'énergie électrique peut être déterminée par mesure de la puissance mise en jeu (wattmètre) et mesure du temps de passage du courant. On peut également la convertir en énergie thermique par effet Joule et mesurer (calorimétrie) la quantité de chaleur produite. Enfin, les compteurs d'installation (compteurs Elihu Thomson), par exemple, utilisent les effets magnétiques (conversion électromécanique) du courant et mesurent le travail mécanique produit. Il est également possible de déterminer la quantité d'énergie transportée par un courant en mesurant ses effets chimiques (électrolyse).

L'énergie chimique est convertie en énergie calorifique (combustion), mécanique (moteur à explosion, arme à feu) ou électrique (pile et accumulateurs) et mesurée comme telle.

Les mesures absolues d'énergie rayonnante lumineuse se font par conversion de cette énergie en chaleur, puis en énergie électrique (bolomètre, cellules photo-électriques). On peut également utiliser la conversion de l'énergie des photons en énergie potentielle mécanique (radiomètre de Crookes pour la mesure de la pression de radiation).

L'énergie nucléaire est mesurée à partir de ses effets thermiques ou électriques (ionisation). L'énergie de masse se déduit immédiatement de la mesure de cette dernière grâce à la relation d'Einstein $E = mc^2$.

Il apparaît donc que la troisième méthode est très largement utilisée. Elle permet de se ramener à la mesure d'énergies (mécanique, thermique et électrique) facilement mesurables par l'une des deux autres méthodes.

L'énergie chimique

La forme d'énergie appelée énergie chimique est liée à la nature et à la composition des diverses substances qui nous entourent. Une substance quelconque est généralement formée de molécules toutes identiques s'il s'agit d'un corps pur ou différentes, dans des proportions plus ou moins variables, s'il s'agit d'un mélange. La structure de ce corps, son état dépendent des interactions qui existent entre chacune des molécules. Les molécules sont elles-mêmes constituées d'atomes, identiques dans le cas d'un corps simple (O_2,H_2, etc.), différents pour un corps composé.

La composition de ces molécules, leur stabilité ou leur fragilité dépend des liaisons interatomiques. Il importe donc d'être en mesure de déterminer la nature de ces liaisons. Celles-ci dépendent de la structure de l'atome, de la nature des interactions. Or, on sait maintenant qu'un atome est constitué d'un noyau (que le chimiste peut considérer comme étant sans structure) et d'un ensemble d'électrons. L'interaction électron-noyau n'est autre que l'interaction électromagnétique classique, celle qui s'exerce entre deux particules de charges opposées. Il s'ensuit par conséquent que les interactions atomiques et les interactions moléculaires sont elles-mêmes dues à cette interaction fondamentale qu'est l'interaction électromagnétique.

L'énergie chimique qui est emmagasinée dans les molécules peut être à ce titre considérée comme une énergie électrique. Lors d'une réaction chimique, qui est *une redistribution d'atomes en d'autres molécules*, il y a modification de la structure de ces molécules, donc de leur énergie électromagnétique potentielle. Cette variation peut apparaître sous diverses formes thermiques, mécaniques, etc., mais également directement sous forme électrique dans le cas des générateurs électrochimiques.

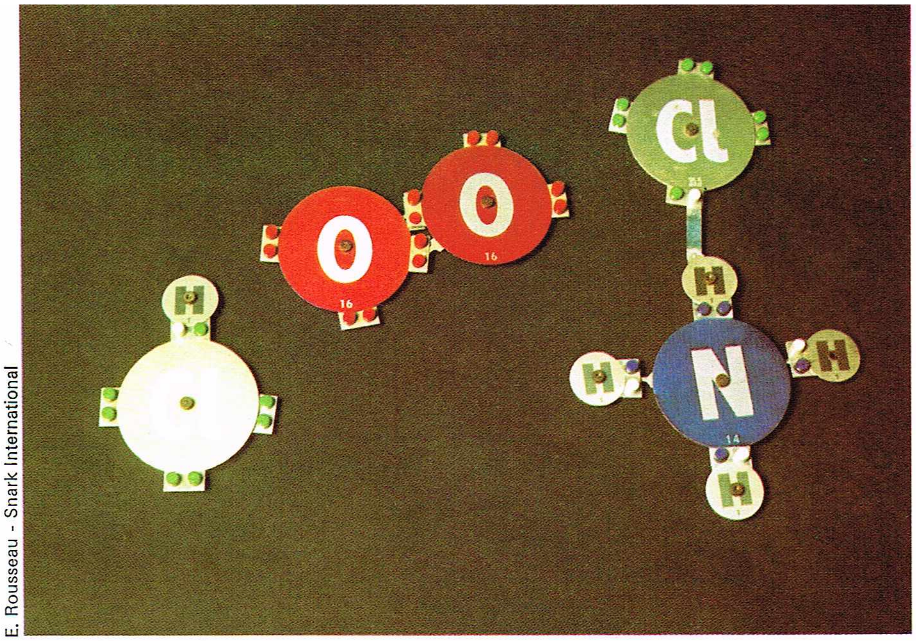

E. Rousseau - Snark International

▲ ***Quelques modèles de molécules schématisant les liaisons interatomiques responsables, lors de la dissociation et de la réassociation des molécules, de l'énergie chimique.***

Les liaisons chimiques

La structure atomique, que nous supposons connue, ainsi que la classification périodique des éléments, permet d'expliquer les règles d'assemblage des atomes pour former des molécules. Plusieurs atomes s'uniront pour former une molécule si, par suite d'une nouvelle répartition des charges électroniques, l'énergie de la molécule est inférieure à la somme des énergies des atomes isolés. La molécule a emmagasiné une certaine quantité d'énergie, énergie qu'il faudra fournir pour briser cette molécule et restituer les atomes qui la constituent. Cette énergie d'interaction atomique est mise en évidence au cours d'une réaction chimique d'échange au cours de laquelle il y a dissociation de molécules, puis réassociation. C'est cette énergie que l'on appellera *énergie chimique*. On distingue généralement trois types de liaisons, les liaisons ionique, covalente et métallique.

Liaison ionique

Si la réaction de deux atomes neutres mis en présence se traduit au niveau des couches externes, ou couches de valence, par un transfert d'électrons d'un atome à l'autre, on dit que la liaison qui s'est établie pour former la molécule est une liaison ionique ou électrovalente. L'atome A qui a donné l'électron prend une charge positive et devient le cation A^+, l'atome B qui a reçu l'électron prend une charge négative et devient l'anion B^-. Un électron de l'atome A participe alors à l'environnement électronique de l'atome B, entre les ions A et B s'exercent des forces électrostatiques internes qui permettent la formation d'agrégat solide généralement de structure cristalline. La *figure* 1 schématise la formation d'une molécule de chlorure de sodium (Cl Na).

Les liaisons ioniques ne peuvent s'établir qu'entre atomes à faible potentiel d'ionisation (éléments des première et deuxième colonnes de la classification périodique) et atomes à forte affinité électronique (éléments des sixième et septième colonnes de la classification périodique).

Liaison covalente

La liaison ionique ne peut, bien sûr, expliquer la formation de molécules telles que H_2 ou N_2 non plus que celles de nombreuses molécules organiques. G. N. Lewis, en 1916, a été amené à supposer que deux atomes (différents ou identiques) pouvaient mettre en commun des électrons célibataires pour former une ou plusieurs paires d'électrons (doublets). Ce processus devrait permettre aux atomes liés d'atteindre la configuration électronique stable des gaz rares, due à la présence d'une couche électronique externe complète. La liaison n'affecte pas les électrons des couches profondes. Le cas le plus simple de liaison covalente est celui des molécules diatomiques constituées par deux atomes identiques, par exemple H_2, Cl_2, etc. La liaison covalente peut être formée non seulement avec une seule paire d'électrons, comme dans les exemples cités *(liaison simple)*, mais aussi avec deux ou trois paires d'électrons, et les liaisons correspondantes sont alors appelées liaison double ou triple (*fig.* 2). Ainsi, les molécules O_2 et C_2H_4 correspondent à une liaison double.

La liaison covalente se manifeste ordinairement entre deux atomes de même espèce ou tout au moins très semblables entre eux. Cette liaison est extrêmement fréquente dans les composés organiques. La liaison covalente confère aux substances qui la contiennent les caractéristiques suivantes : elles sont *facilement fusibles et volatiles*, tout au moins tant que la masse moléculaire ne dépasse pas certaines limites, et elles ne conduisent pas le courant à l'état fondu ou en solution. Les molécules ainsi formées sont le plus généralement des molécules « polaires », la polarité étant due à la déformation du nuage électronique autour des noyaux, déformation qui peut être d'autant plus importante que les atomes qui forment la molécule ont des masses qui diffèrent sensiblement.

Liaison métallique

Cette liaison est assez complexe. Elle peut exister à l'état solide ou liquide. Les éléments à caractère métallique n'ont généralement que 1 ou 2 électrons périphériques, or l'expérience montre que ces métaux ont une structure simple, dense, et que chaque particule est entourée par 6 ou 8 particules. Ces résultats excluent la possibilité d'une liaison covalente, puisqu'il n'y a que 1 ou 2 électrons périphériques. Les propriétés physiques (point d'ébullition élevé, grande conductibilité électrique) excluent que les forces intermoléculaires puissent expliquer la cohésion du solide. En fait, on considère qu'il se forme un agglomérat polynucléaire important, les électrons périphériques participant à plusieurs liaisons (8 par exemple dans le cas du sodium qui a un électron périphérique). Les électrons, au lieu d'être localisés, forment en commun un nuage d'électrons, nuage qui peut être mis en mouvement par un champ électrique. Le métal a une bonne conductivité électrique, mais il

fig 1

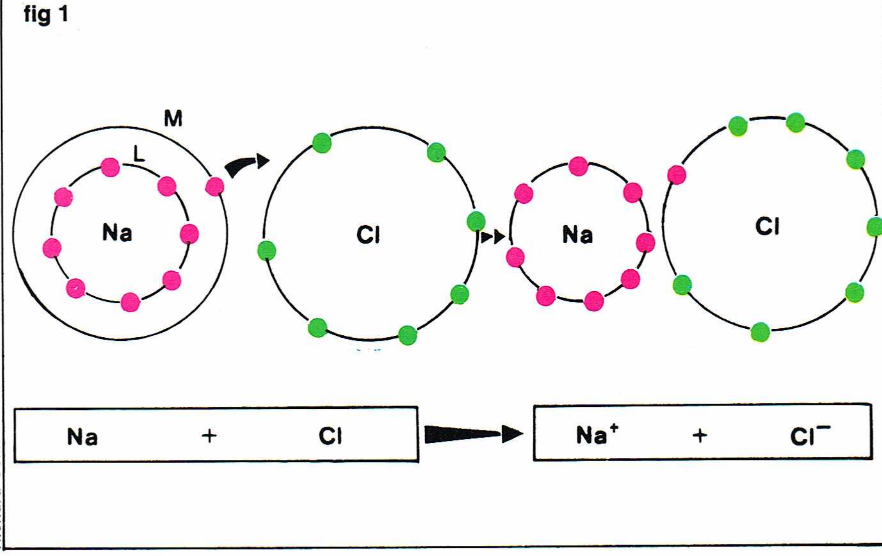

Richard Colin

fig. 2

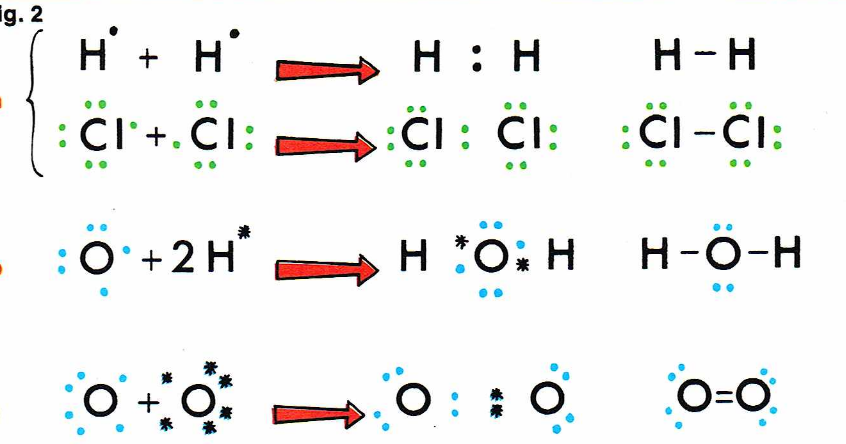

Richard Colin

est difficile d'arracher un électron au métal, puisque l'ensemble des ions positifs exerce sur les électrons des forces attractives. La grande conductibilité thermique des métaux est également due à l'existence de ce nuage d'électrons mobiles.

La liaison métallique est un peu moins forte que la liaison covalente, aussi un solide métallique a-t-il une bonne ductilité et une bonne malléabilité.

Interactions moléculaires

A côté des forces assurant la cohésion des atomes à l'intérieur d'une molécule, il existe des forces, appelées forces de Van der Waals, qui s'exercent entre les molécules. Ces forces, si elles ne peuvent être considérées en toute rigueur comme des liaisons chimiques, n'ont pas une origine différente. Elles résultent des combinaisons des forces de Coulomb entre les noyaux et les électrons, et elles consistent en des attractions et des répulsions. Les répulsions sont dues au nuage électronique, les attractions peuvent s'expliquer différemment selon la nature des molécules, plus précisément selon leur polarité. Ce sont ces interactions, leur intensité en particulier, qui sont responsables de la structure de la matière et des différents états dans lesquels elle peut se trouver à une température donnée.

Réactions chimiques

Une réaction chimique est un processus au cours duquel il y a transformation de matière. Par exemple, la combustion du bois est une réaction chimique dans laquelle le bois et l'oxygène de l'air se combinent pour donner de la vapeur d'eau, du dioxyde de carbone, etc. Il y a beaucoup d'autres exemples de réactions chimiques, parmi lesquelles on pourrait citer la corrosion, le durcissement du ciment, la fermentation, le développement de l'image latente se trouvant sur un film photographique exposé, etc. Il est à noter que le nombre d'atomes d'une espèce considérée est conservé au cours de la réaction. L'explication du mécanisme des réactions chimiques doit être recherchée dans la structure des molécules et donc des atomes des éléments mis en présence.

En effet, dans une molécule, les atomes sont liés par l'intermédiaire des électrons. Dans une réaction chimique, ces liaisons sont brisées par un apport d'énergie, et, simultanément ou non, de nouvelles interactions se développent, créant de nouvelles liaisons avec un dégagement d'énergie. Si l'énergie absorbée au cours de la rupture de liaison excède l'énergie dégagée au cours de la formation des nouvelles liaisons, globalement la réaction chimique absorbera de l'énergie. Elle sera dite endothermique. Dans le cas contraire, il y aura un dégagement d'énergie, la réaction sera dite exothermique. Dans quelques cas particuliers, les deux énergies peuvent s'équilibrer, la réaction sera dite *athermique*.

L'énergie échangée au cours de la réaction chimique est le plus souvent *thermique :* il y a alors absorption ou dégagement d'une quantité de chaleur.

Mais elle peut être également *électrique :* c'est, par exemple, le cas de l'électrolyse, processus dans lequel une réaction chimique (une oxydoréduction) se produit sous l'effet d'un courant électrique, ou encore le cas de piles, accumulateurs ou piles à combustibles dans lesquels une réaction d'oxydoréduction se traduit par la création d'un courant dans un circuit extérieur. Ce type de réaction est particulièrement intéressant, car il permet de mettre en évidence plus directement la nature électronique des liaisons chimiques, et il relie directement énergie chimique et énergie électrique.

Elle peut être *mécanique :* c'est le cas des réactions chimiques se produisant avec changement de volume.

Elle peut être *rayonnante :* c'est par exemple le cas de la décomposition des sels d'argent qui s'opère par absorption lumineuse. Dans ce type de réaction, un photon d'énergie bien déterminée est absorbé par la molécule et l'énergie qu'il lui cède sert à briser la liaison. De telles réactions sont appelées *photochimiques*.

Si une réaction endothermique ne peut se produire que par apport d'énergie thermique, les réactions exothermiques ou athermiques ne se produisent pas nécessairement spontanément, mais il faut généralement faire un apport initial d'énergie afin d'activer la réaction. Cette énergie d'activation peut elle-même être apportée à l'aide d'une autre réaction chimique exothermique. Considérons par exemple, la combustion d'un morceau de bois. Celui-ci, bien qu'étant au contact de l'oxygène de l'air, ne s'enflamme pas spontanément. Il faut, pour ce faire, apporter en un point, avec une allumette par exemple, une quantité de chaleur, c'est-à-dire une énergie suffisante pour que la réaction débute. Dès que la réaction a débuté, elle se poursuit. L'apport de cette énergie d'excitation se conçoit très bien dans la mesure où toute réaction chimique de réarrangement nécessite au préalable une rupture des liaisons. Cette rupture de liaison se fait lors du choc des molécules si l'énergie cinétique des molécules est assez élevée, c'est-à-dire si la température du milieu est assez grande. Lors de la recombinaison, il y a dégagement d'énergie cinétique pour les molécules issues de la réaction, donc d'énergie thermique pour le système. Les molécules peuvent à nouveau briser les molécules et permettre ainsi la propagation de la réaction. La propagation d'une réaction, quelle que soit sa nature, dépend d'un grand nombre de facteurs, en particulier la nature des réactifs, leur concentration, la température, la pression, etc.

Certaines réactions sont très lentes, d'autres, au contraire, très rapides; certaines peuvent présenter un caractère explosif. La combustion qui a lieu dans un moteur dit « à explosion » entre le combustible et l'air est certes très rapide mais elle l'est moins que dans la réaction chimique qui se produit dans des substances dites explosives comme la dynamite. Notons que, dans le cas du moteur à explosion, la combustion fait apparaître un dégagement de chaleur élevé et rapide qui correspond donc à une augmentation de pression, qui permet au gaz de repousser le piston. Il y a donc transformation de l'énergie chimique en énergie thermique (qui en fait, au niveau microscopique, est de l'énergie cinétique), puis transformation de cette énergie thermique en énergie mécanique.

Les générateurs électroniques

Les piles électriques, les accumulateurs et les piles à combustible possèdent la propriété de fournir directement de l'électricité à partir de réactions chimiques. Ils sont une illustration de la nature électronique des liaisons chimiques. Ces trois générateurs électrochimiques sont fondés sur les réactions d'oxydoréduction. Dans ces réactions, il y a simultanément une réaction d'oxydation, c'est-à-dire une réaction au cours de laquelle une substance perd des électrons et une réaction de réduction au cours de laquelle une autre substance gagne des électrons. La substance qui perd des électrons est appelée réducteur, celle qui en gagne est appelée oxydant. Il faut noter qu'il y a toujours simultanément une réaction d'oxydation et une réaction de réduction. Ces réactions sont réalisées entre deux électrodes baignant dans un électrolyte. Sur l'une des électrodes, la cathode, un oxydant est réduit grâce à un apport d'électrons, tandis que simultanément, sur l'autre électrode, l'anode, un réducteur est oxydé en libérant des électrons. Il y a donc transfert d'électrons d'une électrode vers une autre électrode et, si ces deux électrodes sont fermées sur un circuit extérieur, passage d'un courant. Que les électrodes soient fermées ou non sur un circuit extérieur, il y a création d'une différence de potentiel entre les deux électrodes. Si les électrodes ne sont pas fermées sur un circuit extérieur, la différence de potentiel entre les deux électrodes ne dépend que de la nature chimique des réactifs et plus particulièrement de l'énergie libérée lors du passage d'un électron d'une électrode à l'autre. Si les électrodes sont fermées sur un circuit extérieur, la différence de potentiel sera diminuée de la perte de tension due à la résistance interne du générateur.

On distingue généralement trois types de générateurs électrochimiques. Les piles ou générateurs primaires qui transforment leur énergie chimique en énergie électrique sans avoir la possibilité de revenir à leur état initial, les accumulateurs ou générateurs secondaires qui peuvent, une fois faite leur transformation énergie chimique-énergie électrique, revenir à leur état initial en subissant les réactions inverses si on leur fournit l'énergie électrique nécessaire, et les piles à combustible qui fonctionnent grâce à un apport permanent de réactifs aux électrodes.

Énergie nucléaire - Physique nucléaire

Partie centrale de l'atome, le noyau atomique a fait l'objet depuis une cinquantaine d'années de très nombreuses études et donné naissance à un nouveau type de physique, la « physique nucléaire ». Les physiciens nucléaires, sans être arrivés au terme de leurs recherches, ont à leur disposition un certain nombre de modèles qui permettent de décrire pour l'essentiel les caractéristiques des noyaux. Outre l'intérêt scientifique proprement dit, le noyau s'est révélé, et ceci dès 1940, une source possible d'énergie considérable appelée « énergie nucléaire » dont les réacteurs nucléaires à fission, les générateurs isotopiques d'énergie, voire les bombes nucléaires à fission ou les bombes thermonucléaires sont l'illustration (voir les chapitres de *Physique* correspondants).

Sources radio-actives d'énergie

Les isotopes radio-actifs constituent à l'heure actuelle des sources d'énergie courantes, fiables, et de longue durée. En effet, un gramme de radio-élément constitue à la fois un grand réservoir d'énergie et une très faible source d'énergie. Toutes les applications énergétiques des sources radio-actives découlent de cet apparent paradoxe. L'énergie est essentiellement libérée sous forme d'énergie cinétique par le rayonnement émis et par le recul des noyaux. La puissance P donnée par une source de 1 gramme d'un isotope de masse atomique M et de période T_a (en années) et émettant un rayonnement d'énergie E s'exprime sous la forme :

$$P = 2\,125 \frac{E}{MT_a} \text{ en watts}$$

l'énergie totale contenue dans cet échantillon est :

$$W = 26\,800 \frac{E}{M} \text{ en kWh}$$

La puissance décroît comme l'activité, et la moitié de l'énergie est délivrée en une période. Plus la période sera grande, plus la puissance délivrée sera faible, et la source aura une longue durée de vie. Remarquons par exemple que l'énergie contenue dans 1 gramme de $^{238}_{94}Pu$ représente l'équivalent de 620 kWh, soit un millier de batteries d'automobiles classiques. L'énergie libérée sous forme de chaleur peut être convertie en électricité, à l'aide d'un thermocouple par exemple. Ainsi, depuis quelques années, certains stimulateurs cardiaques utilisent l'énergie fournie par une source de $^{238}_{94}Pu$.

De même, lors des missions *Apollo*, des générateurs isotopiques du même type, mais de plus forte puissance, ont été utilisés soit pour alimenter en énergie les nombreux appareils laissés en place sur le sol lunaire, soit pour réchauffer, pendant les nuits lunaires, les instruments sensibles au froid.

Signalons enfin que la chaleur dégagée dans les couches terrestres profondes serait due à la radio-activité.

Réactions nucléaires

L'étude d'un objet quelconque nécessite que l'on entre en rapport avec lui. Un moyen très simple d'entrer en rapport avec les objets stables qui nous entourent et dont les dimensions sont à notre échelle, est de les éclairer et de les regarder. L'exploration par diffusion d'un rayonnement sur l'objet est une méthode générale d'étude. Il faut, pour l'appliquer, disposer d'une source de rayonnement et être en mesure de détecter le rayonnement diffusé par l'objet et de l'analyser. C'est là tout le principe des réactions nucléaires, moyen essentiel de l'investigation des noyaux.

Mais on sait qu'un objet ne peut être observé à l'aide d'un rayonnement que si sa longueur d'onde est inférieure aux dimensions de l'objet. En ce sens, la lumière naturelle ne permet pas d'observer des objets dont la dimension est inférieure à $0{,}5 10^{-6}$ m. La mécanique ondulatoire de De Broglie a permis d'associer à un flux de particules de masse m et de vitesse v une longueur d'onde $\lambda = h/mv$, longueur d'onde qui sera donc d'autant plus petite que la masse et la vitesse du projectile seront grandes. Les faits suggèrent donc le remplacement de la lumière par des particules lourdes auxquelles on a donné une vitesse suffisante. De plus, si l'on veut étudier la structure d'un noyau, il faut pouvoir éventuellement la modifier, pouvoir arracher un nucléon ou un groupe de nucléons à ce noyau, le « casser »... Il faut donc pouvoir projeter sur ces noyaux des projectiles, qui ne sont autres que d'autres noyaux, possédant une énergie cinétique élevée. Ceci est fait à l'aide d'accélérateurs de particules qui utilisent les propriétés électrostatiques des noyaux.

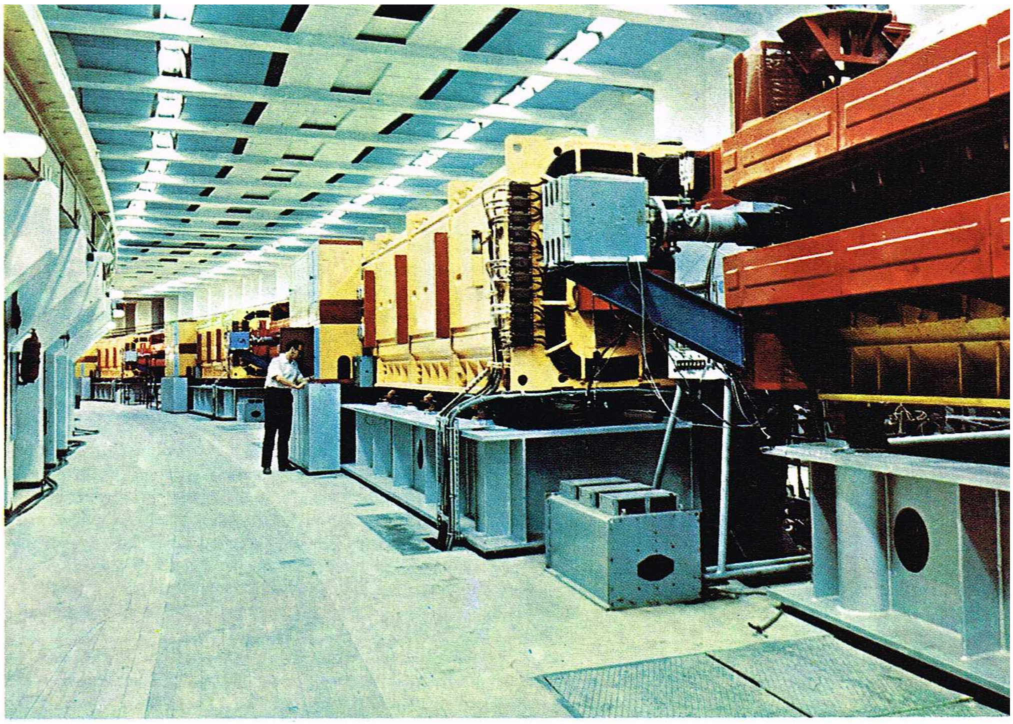

Photo Novosti

▲ ***Détail du protosynchrotron de Serpukhov (U.R.S.S.) d'une énergie de 70 BeV, mis en service en 1967.***

S'il est évident qu'une réaction nucléaire permette d'obtenir des informations très précieuses sur le noyau, il faut néanmoins extraire des informations, « décoder » le message nucléaire.

Lorsqu'un noyau projectile atteint un noyau cible, divers processus sont possibles : le noyau projectile peut laisser le noyau cible intact et être seulement dévié de sa trajectoire, on dit qu'il y a diffusion élastique ; il peut ne pas modifier la composition du noyau, mais modifier sa structure et la laisser dans un état excité, il y a alors diffusion inélastique. Il peut capturer un nucléon du noyau cible ou, au contraire, lui laisser un nucléon, etc. Bien d'autres processus sont possibles, chacun d'eux est caractérisé par une certaine probabilité de se produire que l'on appelle encore « section efficace » : c'est l'étude détaillée de ces sections efficaces, en fonction des noyaux cibles, projectiles, de leur énergie cinétique, etc., qui permet d'obtenir de précieux renseignements sur la structure nucléaire.

Il faut noter qu'une réaction nucléaire est au noyau ce qu'une réaction chimique est à la molécule. Alors que, dans le premier cas, il y a échange de nucléons, dans le second, il y a échange d'atomes. Une différence essentielle provient des énergies mises en jeu. Alors qu'elles sont peu importantes au cours d'une réaction chimique, faibles en tout cas devant l'énergie de masse, il n'en est pas de même pour une réaction nucléaire qui permet une vérification expérimentale précise de la relation d'équivalence masse-énergie $\Delta E = mc^2$.

En effet, lors d'une réaction nucléaire, il y a redistribution des nucléons à travers plusieurs noyaux, donc modification des énergies de liaison et des énergies de masse des noyaux. L'énergie totale étant conservée au cours de la réaction, cette modification d'énergie de masse doit se traduire par la modification de l'énergie cinétique des noyaux qui ont interagi. Ce que l'on observe en mesurant l'énergie cinétique des particules issues de la réaction, l'énergie cinétique des particules initiales étant connue généralement. On appelle chaleur de réaction Q la différence de la somme des masses des noyaux avant réaction et de la somme des masses des noyaux après réaction. Cette chaleur de réaction est égale à la différence de la somme des énergies cinétiques des produits de réaction et de la somme des énergies cinétiques des noyaux qui ont provoqué la réaction. Les chaleurs de réactions dépendent, bien sûr, de chaque réaction mais elles sont de l'ordre du MeV.

Fission nucléaire

Il y a fission d'un noyau (généralement lourd) lorsque ce noyau se scinde en deux noyaux de masse voisine, la fission peut être spontanée, mais c'est un processus assez rare, les constantes radio-actives sont très faibles, ou induites lors d'une réaction nucléaire avec une particule légère incidente. La découverte de la fission est due à O. Hahn et F. Strassman en 1939. Son utilisation pour la production d'énergie a été proposée par F. Joliot-Curie. La *figure* 3, indiquant la variation moyenne d'énergie de liaison par nucléon, permet de voir qu'un tel processus est énergétiquement possible et peut libérer une énergie considérable. Dans la région de l'uranium (A ~ 240), l'énergie de liaison par nucléon est d'environ 7,6 MeV tandis que, dans la région A ~ 120, elle est en moyenne de 8,45 MeV. Si un noyau lourd se scinde en deux, il y aura production sous diverses formes d'une énergie de 240 (8,45 — 7,6) ≃ 200 MeV. D'autre part, compte tenu de la plus grande proportion de neutrons que l'on trouve dans les noyaux lourds, il y aura lors de la fission soit émission d'un certain nombre de neutrons, soit transformation de neutrons en protons par émission β^- des noyaux résiduels. Par exemple, lors d'une fission induite par des neutrons thermiques (neutrons dont l'énergie est celle communiquée par le milieu ambiant, soit environ 0,025 eV) sur $^{235}_{92}U$ (*fig.* 4). Il y a formation d'un noyau $^{236}_{92}U$ dans un état excité qui se scinde en deux noyaux de masse intermédiaire, quelques neutrons étant émis. Les noyaux résiduels ne sont pas toujours les mêmes. La fission peut se faire de diverses façons. La *figure* 5 représente la distribution des produits de fission. Le nombre de neutrons produits dépend de chaque processus. Il est en moyenne de 2,47 pour la fission de $^{235}_{92}U$ par des neutrons thermiques. L'excès de neutrons rend chaque fragment radio-actif. Il est à noter que les deux fragments n'ont pas des masses voisines, la fission n'est pas symétrique, les masses les plus probables se situant aux environs de A = 90 et A = 135.

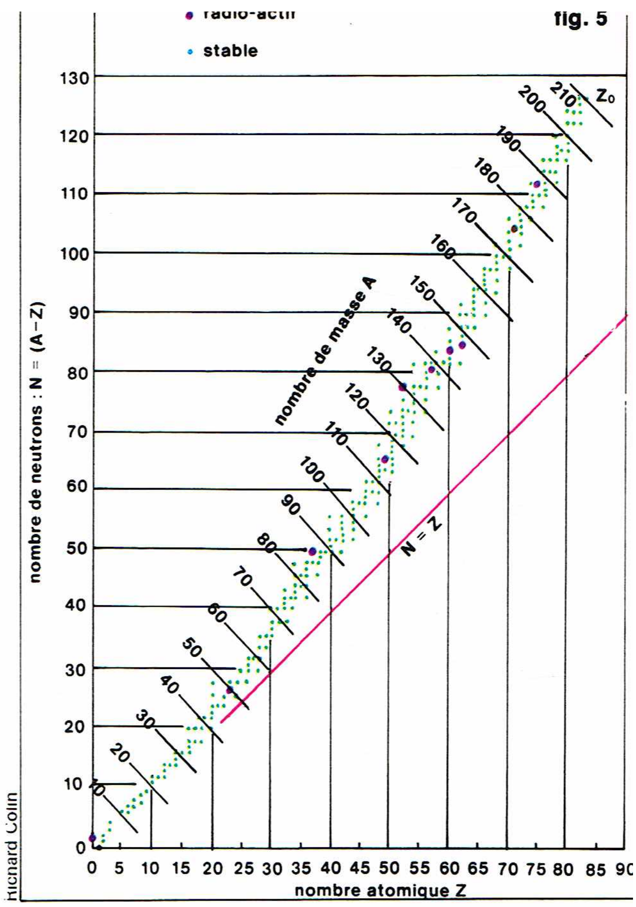

▶ *Figure 5 : diagramme des noyaux stables existant dans la nature.*

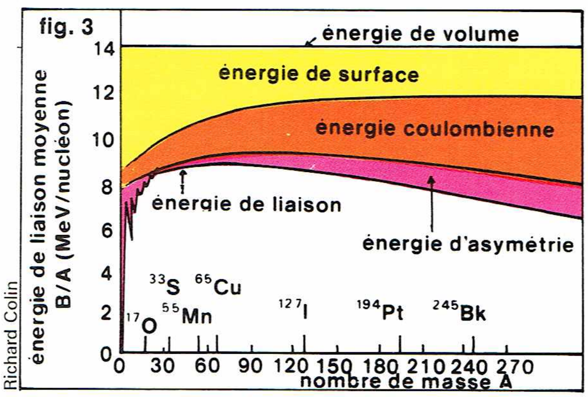

▶ *Figure 3 : représentation graphique montrant que — en moyenne, l'énergie de liaison par nucléon est d'environ 8 MeV, énergie bien supérieure à l'énergie de liaison d'un électron autour d'un noyau (environ 10^6 fois); — l'énergie de liaison par nucléon est maximale au voisinage de A = 56. Pour les noyaux lourds (A > 100), ΔE/A est inférieur à 8,6 MeV et décroît régulièrement, ce qui signifie que les nucléons sont moins liés et qu'il faudra fournir relativement moins d'énergie pour briser ces noyaux. Pour les noyaux plus légers, ΔE/A décroît également régulièrement à l'exception de quelques noyaux dont le nombre de masse est multiple de 4.*

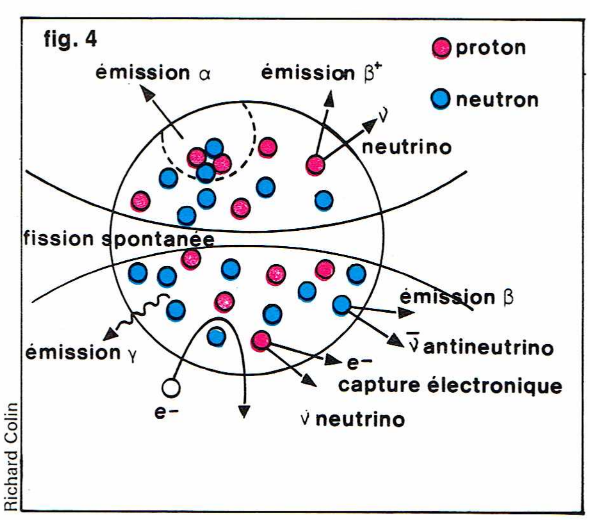

▶ *Figure 4 : divers processus de désintégration du noyau.*

Production d'énergie à partir de la fission - Principe des réacteurs nucléaires

La fission de l'uranium présente deux particularités permettant son exploitation pour la production industrielle d'énergie.

— Elle fournit une quantité importante d'énergie, essentiellement sous forme d'énergie cinétique des fragments de fission.

— Elle produit des particules identiques à celles nécessaires pour produire la réaction et en nombre supérieur. Chaque réaction de fission absorbe un neutron mais en produit en moyenne 2,5. Il y a donc une augmentation du nombre de neutrons dans le milieu, ce qui conduit à une réaction en chaîne.

En effet, si, à chaque génération, le flux de neutrons est multiplié par k, le flux total sera égal à :

$$1 + k + k^2 + ... + k^n$$

si k est supérieur à 1, on aura une réaction en chaîne. C'est sur ce principe de réactions en chaîne que sont fondés les réacteurs nucléaires ou les bombes nucléaires à fission appelées improprement bombes atomiques. Ce coefficient k est toujours néanmoins inférieur au nombre moyen de neutrons émis lors d'une fission. En effet, tous les neutrons émis lors d'une fission n'induisent pas eux-mêmes une fission. Ces neutrons peuvent par exemple :

— être absorbés par un élément du milieu lors d'une réaction de capture, qui n'est pas suivie de fission;

— s'échapper du milieu fissile, la probabilité en est d'autant plus grande que le volume fissile est faible.

Pour que le facteur k soit supérieur à 1, la masse de matériau fissile doit donc avoir une dimension minimale dite *critique*, dépendant de sa constitution.

Si $k < 1$, les réactions en chaîne ne pourront se développer.

Si $k > 1$, les réactions en chaîne sont divergentes, le nombre de neutrons et le nombre total de fission augmentant exponentiellement.

Si $k = 1$, le réacteur est dit critique ou auto-entretenu, il fonctionne à une puissance constante limitée par la capacité d'extraction de la chaleur produite.

Pour faire démarrer un réacteur nucléaire, on le met dans des conditions légèrement surcritiques dans lesquelles des chaînes divergentes sont amorcées par des neutrons provoquant de la fission spontanée. Quand la puissance atteint la valeur voulue, on stabilise le fonctionnement en ramenant la réactivité k à la valeur 1, ce qui se fait à l'aide de barres de contrôle qui sont constituées de matériaux qui peuvent absorber les neutrons et que l'on introduit plus ou moins dans le cœur du réacteur.

Le premier réacteur nucléaire à avoir fonctionné fut celui mis au point par Fermi à Chicago et qui divergea le 2 décembre 1942.

Les bombes nucléaires à fission

Dans un réacteur, l'énergie libérée est contrôlée à l'aide de barres de contrôle de telle sorte que la réactivité k reste égale à 1. Si ce facteur est supérieur à 1, la réaction en chaîne se développe rapidement et il y a explosion. La bombe nucléaire à fission n'est pas autre chose qu'un petit réacteur à très fort coefficient de multiplication ; de plus, il faut que le temps qui sépare une génération de la suivante soit aussi court que possible (10^{-8} s), ce qui impose un combustible pur (235 U ou 239 P).

La fusion nucléaire

La fusion nucléaire est une réaction nucléaire résultant de la collision de deux noyaux atomiques légers suivie d'un réarrangement des nucléons qui les constituent pour former un noyau plus lourd. Comme l'indique la courbe moyenne donnant l'énergie de liaison par nucléon, ces réactions de fusion se produisent avec un dégagement d'énergie, puisque le noyau résultant de la fusion est généralement plus stable.

La fusion de deux noyaux de deutérium et de tritium qui s'exprime par la formule ci-dessous donne lieu à un dégagement d'une énergie de 17,6 MeV :

$$d + t \rightarrow \alpha + n + 17{,}6 \text{ MeV}$$

Cette énergie est considérable. En effet, la fusion d'un mélange en part égale de deutérium et de tritium pourrait libérer une énergie d'environ $2 \cdot 10^{24}$ MeV ou encore de $1{,}6 \cdot 10^{11}$ joules, énergie quatre à cinq fois supérieure à celle dégagée lors de la fission de 1 g de $^{235}_{92}U$.

L'intérêt que l'on porte à l'étude des réactions de fusion tient à ce que l'on espère pouvoir, dans l'avenir, employer ce type de réaction pour la production d'énergie industriellement utilisable. L'élément essentiel que l'on espère pouvoir utiliser est le deutérium que l'on peut trouver en quantité pratiquement illimitée, puisque l'eau naturelle contient environ en poids 1/6 000 d'eau lourde. Si donc on parvenait à produire, maîtriser et contrôler la fusion d'atomes de deutérium, le problème de l'épuisement futur des gisements de combustibles fossiles conventionnels serait résolu. Dans la nature, de telles réactions sont à l'origine de la production d'énergie dans le Soleil, et d'une façon plus générale dans les étoiles.

La fusion nucléaire contrôlée

De nombreux problèmes restent cependant à résoudre pour récupérer ainsi de grandes quantités d'énergie, dues pour l'essentiel à la nature de l'interaction nucléaire. En effet, les forces nucléaires qui assureront la cohésion du nouveau noyau résultant de la réaction de fusion ont un rayon d'action faible vis-à-vis des forces de répulsion électrostatique qui constituent un obstacle au rapprochement des deux noyaux initiaux. Le problème est donc de communiquer aux noyaux que l'on veut réunir une énergie suffisante pour qu'ils puissent vaincre la répulsion électrostatique. Celle-ci dépend bien sûr des noyaux initiaux, elle est minimale si ceux-ci sont des isotopes de l'hydrogène (0,15 MeV environ pour la fusion deutérium-tritium). Pour communiquer cette énergie cinétique aux noyaux fusibles, on utilise l'agitation thermique. Il faut donc porter le mélange de nucléides destinés à fusionner à très haute température (une énergie cinétique de 0,01 MeV correspond à une température de $1{,}16 \cdot 10^8$ °K). L'énergie des chocs dus à l'agitation thermique peut suffire à provoquer les premières fusions. L'énergie cinétique des noyaux produits au cours de ces premières fusions est transmise à l'ensemble, augmentant ainsi la température, c'est-à-dire l'agitation globale des noyaux, donc les chances de nouvelles fusions. C'est donc grâce à l'agitation thermique que les réactions de fusion se trouvent naturellement entretenues, d'où le nom de *réaction thermonucléaire*. (Il faut noter que le principe d'amorçage et d'entretien de ces réactions de fusion est tout à fait semblable à celui d'une simple réaction chimique, par exemple une combustion.) Or, à ces températures, les noyaux sont libérés de leur enveloppe électronique et la matière est à l'état de *plasma*. Ce plasma ne peut être contenu comme un gaz ou un liquide dans une enceinte, mais il doit être maintenu isolé dans l'espace loin des parois. En effet, même si celles-ci pouvaient supporter de très hautes températures, elles constitueraient une source de refroidissement empêchant l'auto-entretien des réactions de fusion. En confinant le plasma dans un champ magnétique, on peut empêcher les particules d'aller frapper les parois de l'enceinte du réacteur à fusion et maintenir une densité suffisante pour que les réactions de fusion entre les noyaux soient assez nombreuses et libèrent plus d'énergie qu'il n'en a fallu pour amorcer la réaction. Les dispositifs de confinement de plasma, actuellement étudiés, utilisent des techniques diverses ; l'un des plus prometteurs semble être le dispositif Tokamak mis au point par L. Artsimovitch à l'institut Kurchatov près de Moscou.

Doisneau - Rapho

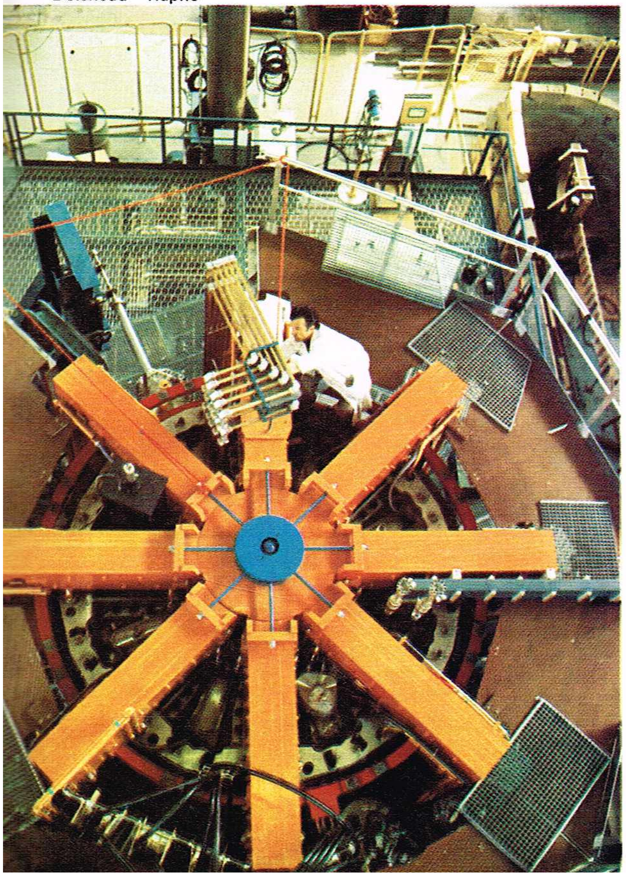

U.S. Army

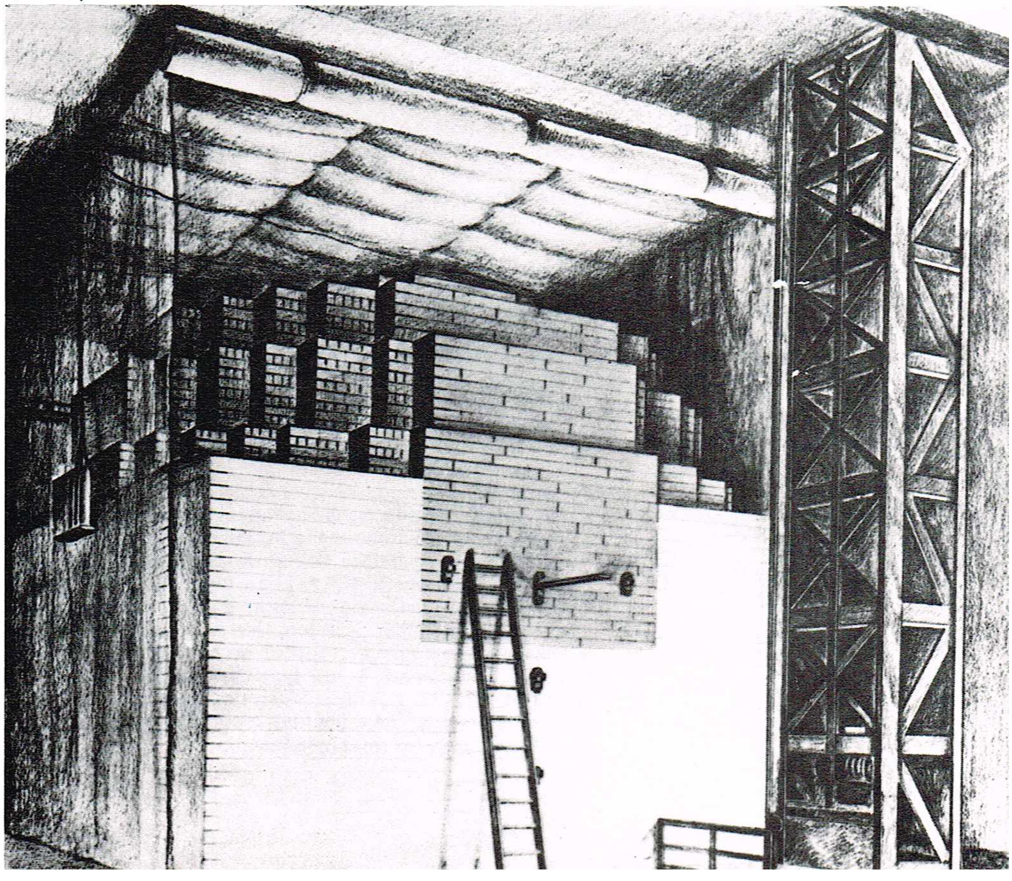

▼ *A gauche, le* Tokamak *: dispositif expérimental de fusion thermonucléaire contrôlée utilisant la technique de confinement de plasma. A droite, gravure reproduisant la pile de Fermi qui divergea à Chicago le 2 décembre 1942.*

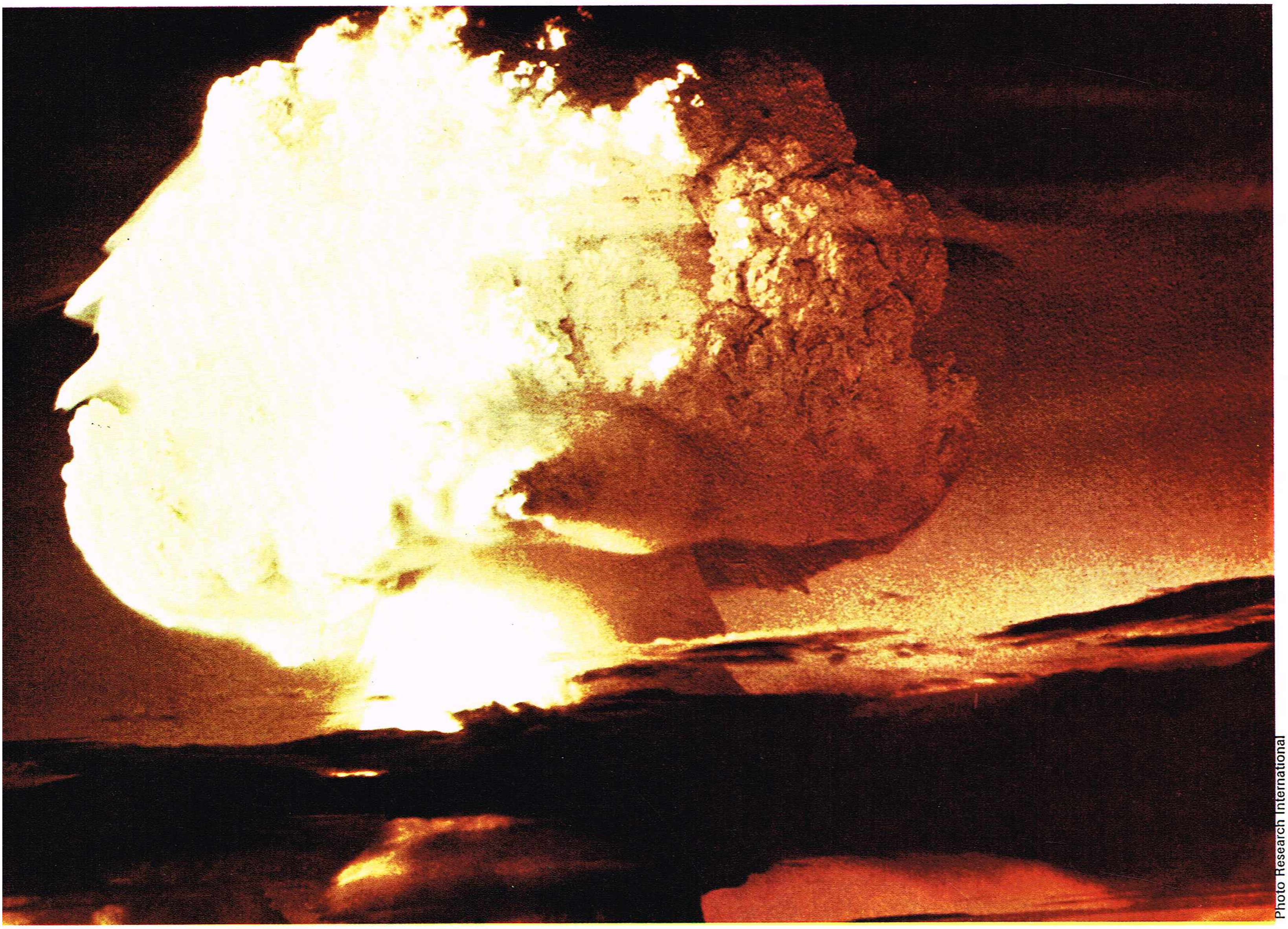

Photo Research International

▲ *Explosion de la première bombe thermonucléaire, en 1952, aux îles Marshall.*

L'énergie thermonucléaire dans les étoiles et le Soleil

Si l'homme ne sait pas encore maîtriser la fusion thermonucléaire, c'est pourtant de beaucoup l'énergie la plus abondamment libérée dans l'Univers. Le Soleil comme les étoiles sont le siège de réactions thermonucléaires permanentes. Les théories couramment admises concernant la naissance des étoiles supposent qu'une étoile naît lorsqu'une certaine quantité de masse interstellaire parvient à s'isoler en se contractant sous l'action de son propre champ gravitationnel. Cette contraction s'accompagne d'un échauffement du gaz au centre de l'étoile. La température et la densité peuvent alors être suffisantes pour que la fusion des protons commence à s'y produire, se développe et donne comme produit final des noyaux d'hélium. Durant la période de combustion de l'hydrogène, la contraction gravitationnelle de l'étoile s'arrête, sa température se stabilise entre 10 et 30 millions de degrés selon la masse de l'étoile. Lorsque l'hydrogène est épuisé, les réactions thermonucléaires s'arrêtent et la contraction gravitationnelle reprend jusqu'à ce que l'élévation de température soit suffisante pour que l'hélium brûle à son tour ($2\ 10^8$ °K). Le cycle de l'hélium étant fini, il y a ensuite combustion d'éléments plus lourds, carbone, oxygène... La température augmente avec la masse du combustible ; chacun de ces cycles de combustibles correspond à un type particulier d'étoiles, les étoiles dites de « la séquence principale » pour la fusion de l'hydrogène, les « géantes rouges » pour la fusion de l'hélium, puis les supergéantes, etc.

Le Soleil est une étoile jeune qui appartient à cette première catégorie. Au centre du Soleil, on estime que la température est de l'ordre de 20 millions de degrés, sa densité d'environ 10^{27} électrons par cm^3, la pression de 10^{11} atmosphères. A chaque seconde, 570 millions de tonnes d'hydrogène sont consommées, ce qui, compte tenu de la masse du Soleil, lui donne une durée de vie de 10^{10} ans environ pour le cycle hydrogène.

Bombes H ou bombes thermonucléaires

Les bombes H ou bombes à hydrogène utilisent la fusion thermonucléaire. Le principe de ces bombes, mises au point à partir de 1950, est simple. Un mélange de deutérium (^2_1H), tritium (^3_1H) et lithium (^6_3Li) est porté, en très peu de temps (environ 1 microseconde), à très haute température par l'explosion d'une petite bombe à fission, qui joue le rôle de l'allumette. L'inertie des noyaux fussibles suffit à les maintenir confinés et un certain nombre de réactions thermonucléaires se produisent.

Les bombes H développent des énergies énormes ; alors que la puissance des bombes à fission est limitée, celle des bombes à fusion ne l'est pas, car une fois la réaction amorcée et l'énorme température atteinte, les noyaux fussibles continuent d'entrer en réaction, même s'ils se dispersent. Outre la puissance, une caractéristique importante des bombes H est, contrairement aux bombes à fission, la non-production de noyaux radio-actifs à longue durée de vie. C'est ce qu'on appelle une « bombe propre ».

Historique

L'énergie humaine

Dans les premiers temps de son évolution, l'homme ne disposait que de sa seule énergie physique pour assurer sa survie au sein d'une nature hostile où se manifestait la capacité énergétique de l'Univers. Observant avec frayeur les effets de la force des eaux et du vent, les immenses incendies allumés par la foudre, l'homme, impuissant à maîtriser ces énergies naturelles qui se déchaînaient librement, a commencé par améliorer les conditions d'utilisation de son potentiel énergétique.

Dès l'époque paléolithique, l'être humain s'est manifesté comme un faiseur d'outils, selon le mot de Benjamin Franklin. Cette faculté particulière le différenciait des autres créatures vivantes qui peuplaient alors la Terre. Les objets rudimentaires qu'il fabriquait, à partir de branches ou de pierres ramassées sur le sol, complétaient ses mains, donnaient plus d'efficacité à ses gestes lorsqu'il avait à lutter contre les animaux soit pour se nourrir, soit pour se défendre. Peu à peu, ces outils primitifs devinrent plus élaborés, l'homme sut tirer profit des observations qu'il faisait pour concevoir des instruments, qui ne furent plus seulement un prolongement de son bras, mais qui lui permirent de multiplier la puissance de ses muscles.

L'apparition de ces premiers outils diminua l'effort que l'être humain devait fournir pour la cueillette et la chasse, essentielles à sa nourriture. L'économie d'énergie ainsi réalisée alla en augmentant au fur et à mesure que les techniques se perfectionnèrent, et permit à l'homme de se consacrer à d'autres tâches et, en libérant son esprit, de tirer profit de l'observation expérimentale de son environnement.

La légende veut que la conquête du feu soit l'élément initiateur du développement de l'humanité. Le rapt du feu qui, dans les mythes primitifs, est la cause des tourments mais aussi du pouvoir de l'homme, a sans doute été un profond stimulant pour l'intelligence de l'être humain, mais il semble plus réaliste de penser que la connaissance du feu fut une conséquence des constatations que firent les premiers artisans en façonnant des pièces de silex ou en frottant l'un contre l'autre deux morceaux de bois.

L'ingéniosité technique et la découverte du feu ont permis à l'homme d'agir sur son environnement ; le feu, en particulier, lui donne la possibilité de transformer les matériaux. C'est donc la capacité d'employer les deux premières formes d'énergie dont elle a pu disposer qui a apporté à l'humanité les armes qui devaient lui permettre de dominer le monde.

Pendant plusieurs siècles, en dépit de l'évolution des techniques et des connaissances sur les phénomènes naturels, l'énergie humaine resta le moyen principal de production du travail. L'exploitation d'autres sources d'énergie comme l'énergie éolienne ou l'énergie hydraulique fut possible techniquement très tôt. Le premier usage de la force du vent, probablement associé à l'invention de la voile, se perd dans la nuit des temps, et l'on peut penser que l'homme primitif sut employer à certains travaux la puissance du courant de certaines rivières.

Les Égyptiens, les Grecs et les civilisations orientales anciennes ont fait preuve d'un génie inventif qui leur ont fait pressentir les possibilités offertes par les sources d'énergie que nous connaissons actuellement. Nous parlerons plus loin de certaines des découvertes de l'Antiquité qui, tombées dans l'oubli pendant longtemps, paraissent maintenant prémonitoires. A quoi peut-on attribuer cette stérilité relative des inventions de l'Antiquité, en particulier de la civilisation grecque ? D'une façon générale, les réalisations techniques des Anciens servirent plus à assouvir la curiosité scientifique ou à augmenter la puissance guerrière qu'à diminuer le travail humain. Cela tient probablement au fait que la société antique disposait avec l'esclavage d'une source importante d'énergie. La suppression de l'esclavage paraissait alors impossible et les Anciens, jusqu'à la fin de l'Empire romain, ont considéré l'esclavage comme normal. La nécessité d'envisager le recours à l'emploi intensif d'autres sources d'énergie ne se justifiait donc pas à leurs yeux. Les Romains poussèrent à l'extrême cette conception en étendant sans mesure l'esclavage au fur et à mesure de leur conquête, faisant ainsi main basse sur le potentiel énergétique des autres nations. Les excès de Rome et l'avènement du christianisme entraînèrent une réflexion sur le rôle de l'esclave qui fit peu à peu prendre conscience du caractère inacceptable de la condition servile. Cette première crise de l'énergie, prélude à la décomposition de l'ordre romain, est un des facteurs qui ont entraîné la régression sur le plan des connaissances scientifiques et techniques que l'on a connue par la suite.

Une source d'énergie importante : l'animal

On a tendance à négliger à l'heure actuelle le rôle important tenu par les animaux de trait en tant que source d'énergie susceptible d'accomplir un travail mécanique. Pourtant la bête de somme reste encore, dans certains pays en voie de développement, le moteur essentiel des outils agricoles ou des moyens de transport.

Photo Ballo

◄ *La société antique disposait avec l'esclavage d'une source importante d'énergie. Ici, un bas-relief représentant un navire de guerre chargé de défendre les routes commerciales des Phéniciens, qui, vers la fin du XIe siècle av. J.-C., dominaient la Méditerranée occidentale.*

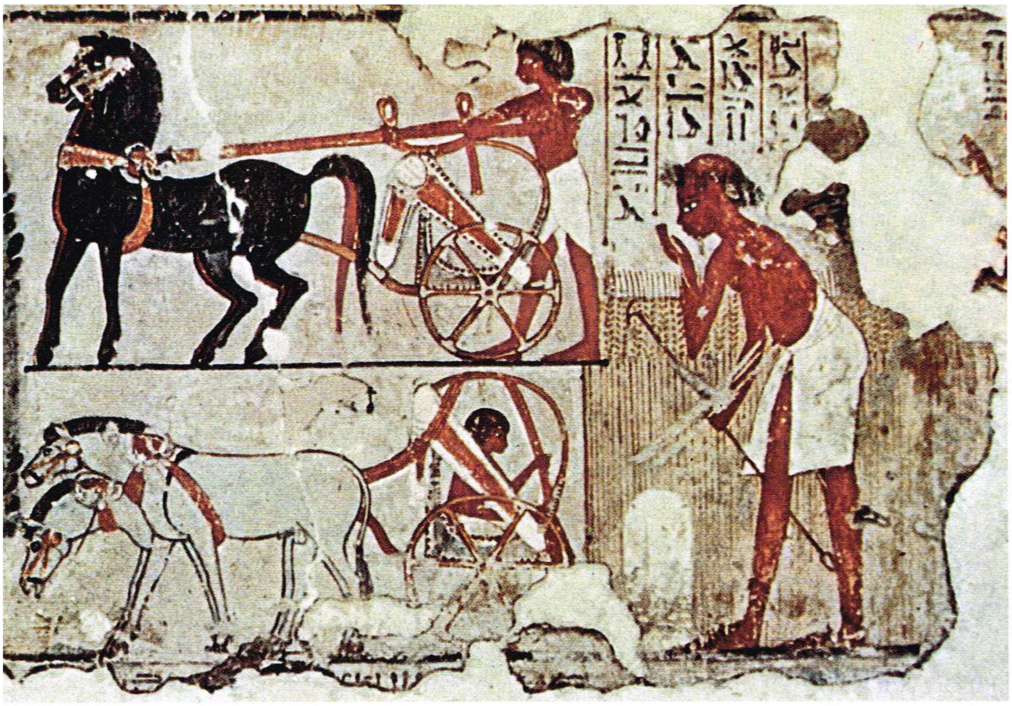

Snark International

▲▼ *Les représentations anciennes des véhicules tirés par des animaux montrent l'évolution des procédés d'attelage : en haut, sur cette fresque picturale égyptienne représentant l'impôt sur les récoltes, une bande de cuir enserre le cou du cheval ; en bas, sur ce frontispice d'un manuscrit du XVI^e siècle, on observe la forme moderne d'attelage qui libère la gorge de l'animal.*

Bulloz

Les forces animales n'ont servi pendant les premiers temps historiques que de complément à l'énergie humaine ou bien ont été employées à l'exécution de tâches particulières (tirer les chars de guerre par exemple). L'examen des représentations anciennes de véhicules tirés par des animaux montre que les procédés d'attelage utilisés dans l'Antiquité ne permettaient pas d'obtenir de l'animal un effort considérable : une bande de cuir souple lui enserrait le cou, gênant ainsi considérablement sa respiration. La diminution du potentiel énergétique humain, liée à la disparition de l'esclavage mais aussi aux ravages des guerres qui dévastèrent le monde, a incité à l'étude de l'amélioration du rendement de l'énergie animale, ainsi d'ailleurs que des autres sources d'énergie connues à l'époque. Vers la fin du X^e siècle, on voit apparaître la forme moderne de l'attelage qui libère la gorge de l'animal et lui permet d'exercer son effort dans de meilleures conditions. L'Asie semble avoir connu dès le III^e siècle une technique d'attelage plus élaborée que la technique ancienne.

Cette invention fut suivie d'autres qui en multiplièrent les effets : l'attelage en file qui semble inconnu de l'Antiquité fut mis au point et systématiquement appliqué au Moyen Age. Les améliorations apportées aux routes et aux véhicules contribuèrent à l'amélioration des conditions d'utilisation de l'énergie animale qui resta, en particulier dans l'agriculture, la source principale du travail mécanique pendant plusieurs siècles.

Le vent et l'eau

Le premier moteur qui ne fut pas un être vivant et qui utilisait donc une source d'énergie naturelle autre que l'homme ou l'animal, fut la voile. On ne sait pas qui a eu un jour l'idée ingénieuse de tendre un morceau de toile au-dessus de son esquif pour capter les forces du vent. La plus vieille représentation de la voile que l'on connaisse est un dessin égyptien, vieux de cinq mille ans, où une voile rectangulaire est montée sur un mât placé à l'arrière du navire. En dépit de cela, il semble que pendant très longtemps la voile fut plus un moteur auxiliaire et que l'énergie motrice la plus employée resta celle des bras des rameurs.

La domestication de la force motrice du vent pour d'autres usages que la propulsion des bateaux ne débuta véritablement qu'au Moyen Age, et les premiers moulins à vent n'apparurent qu'au XII^e siècle. Il est vrai que le problème technique qu'ils posaient était difficile à résoudre pour l'époque : il fallait en effet trouver un système qui permette de présenter constamment les ailes au vent. Les plus anciens moulins à vent tournaient tout entiers autour d'un pivot central fixé au sol.

Le perfectionnement de la construction navale et des techniques de gréements assura un développement de la propulsion à voile qui resta jusqu'à l'avènement de la machine à vapeur sans concurrence. Maintenant les moulins à vent ont disparu de nos campagnes et la voile ne sert plus qu'aux plaisanciers, qui préfèrent utiliser le vent plutôt que les moteurs bruyants et polluants pour profiter des joies de la navigation. Néanmoins, l'exploitation de l'énergie éolienne va peut-être connaître un certain renouveau devant les problèmes posés par la demande croissante d'énergie, alors que les ressources en combustibles diminuent. En particulier, l'étude de la production d'électricité à partir d'éoliennes identiques à celles que l'on a utilisées dans le passé pour pomper l'eau des puits profonds se développe, car elle permet d'envisager la fourniture d'électricité dans des pays déshérités où l'absence de houille blanche et de ressources pétrolières rend difficile l'installation de centrales thermiques ou hydrauliques.

Un siècle avant Jésus-Christ, un artisan habile eut l'idée de construire une roue à aubes horizontale qui, placée dans le lit d'un cours d'eau, se mit à tourner sous l'action du courant. Il suffisait d'y associer une meule pour que le grain fût moulu sans effort. Ce dispositif, appelé la roue normande, est le prototype de tous les moulins à eau et le précurseur des turbines hydrauliques modernes qui sont l'élément essentiel des centrales hydro-électriques. Jusqu'alors, le meulage du grain se faisait à l'aide d'une meule tournante mue par l'homme, le cheval ou l'âne, et l'invention du moulin à eau apparut comme un facteur important de libération, car le travail

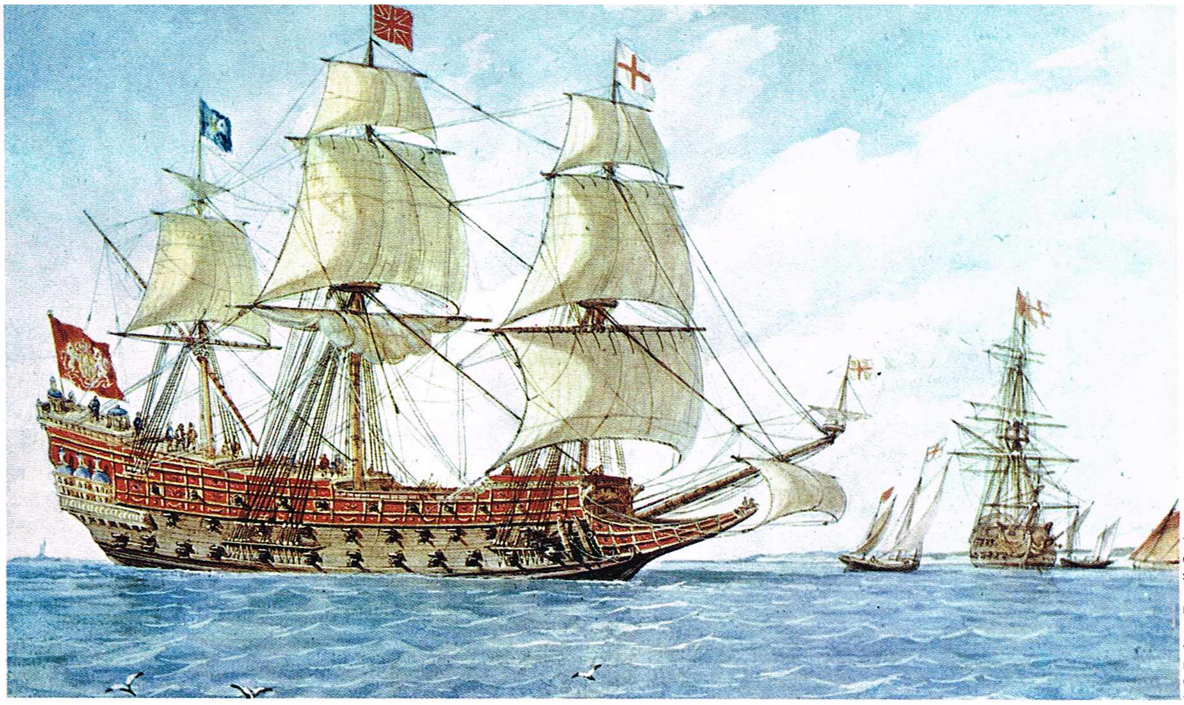

I.G.D.A. - Dagli Orti

◀ *Le perfectionnement de la construction navale et des techniques de gréements assura à la propulsion à voile un règne sans concurrence jusqu'à la machine à vapeur. Ici, le Souverain des mers, navire anglais lancé en 1637, était le plus grand et le plus armé des bateaux de guerre de son temps (Musée naval, Madrid).*

consistant à moudre le grain était considéré comme un des plus durs et des plus monotones. Le poète grec a chanté le moulin à eau dans des termes très élogieux.

La transformation de la roue normande en roue vitruvienne (du nom de l'architecte romain Vitruve), qui n'est plus placée horizontalement dans le lit du courant mais mise verticalement, eut lieu au cours du Ier siècle avant l'ère chrétienne. Cette roue connut une succession de perfectionnements qui en améliorèrent le rendement et permirent de l'adapter aux différents types de cours d'eau.

L'énergie hydraulique fut très utilisée jusqu'à l'avènement de la machine à vapeur, non seulement pour moudre le grain, mais aussi pour actionner les machines à scier le bois, les pressoirs, etc. Source d'énergie d'un emploi facile, plus stable que le vent, ne coûtant rien, elle présentait quelques inconvénients qui limitèrent son champ d'applications : la puissance prélevée sur le courant est très faible, le mouvement obtenu est souvent très lent, il n'est pas possible de transmettre cette énergie sur des distances assez grandes, ce qui impose à l'utilisateur de s'implanter à quelques mètres du bord de la rivière. C'est seulement dans le deuxième tiers du XIXe siècle, quand fut mise au point la turbine à eau que nous connaissons actuellement et que l'on sut aménager les chutes d'eau pour répondre au besoin de l'industrie électrique, que les possibilités énergétiques de l'eau furent véritablement exploitées.

Si les moulins à eau ne sont plus que des curiosités touristiques dans les pays qui ont atteint un haut degré de technicité, ils sont encore d'un emploi assez répandu dans certaines régions du monde, l'Asie par exemple.

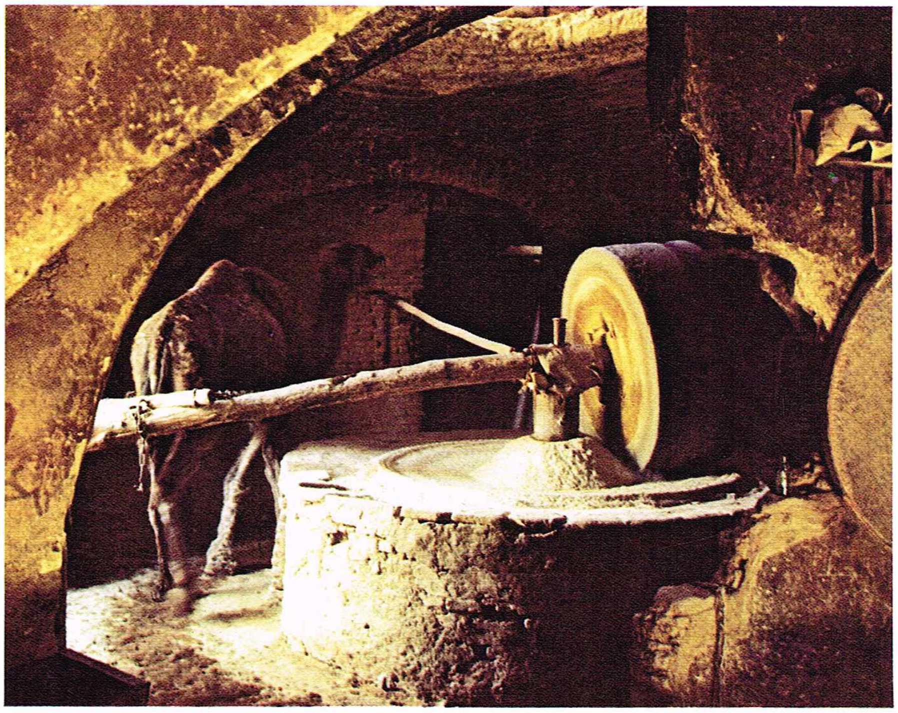

Roland Michaud - Rapho

▼◀ *Le meulage du grain (en haut, en Iran) ou la noria (ci-contre, au Turkestan) ont traversé les âges jusqu'à nos jours ; dans certains pays le progrès n'a porté que sur le remplacement de l'homme par le chameau, l'âne ou le cheval.*

Roland Michaud - Rapho

J. Nance - Magnum

▲ *Le feu, connu dès les premiers âges de l'humanité, n'utilisa jusqu'au XVIIIe siècle que le bois comme combustible essentiel.*

De la conquête du feu à la machine à vapeur

Le feu fut connu dès les premiers âges de l'humanité ; il fut utilisé très tôt pour la cuisson des aliments et le chauffage, mais aussi pour la cuisson des poteries et le travail du métal. Si l'on s'en tient à la première définition de l'énergie : capacité d'effectuer un travail mécanique ; l'énergie thermique ne fut employée que très tardivement, après de nombreux tâtonnements. La correspondance entre le travail mécanique et la chaleur était connue expérimentalement dès l'Antiquité, mais son étude scientifique n'a réellement débuté que vers le début du XVIIIe siècle. Pourtant, l'ingéniosité grecque est à l'origine du premier dispositif connu fonctionnant à la vapeur : l'éolipile d'Héron d'Alexandrie. On cite souvent comme invention annonciatrice de la turbine à vapeur la machine de Branca, mécanicien et architecte italien, qui imagina sa machine aux environs de 1629. Ces inventions, quoique spectaculaires, restèrent isolées et ne semblent pas avoir incité les chercheurs à se pencher sur cette possibilité de conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique. En 1685, sir Samuel Morland, maître mécanicien du roi Charles II, écrit dans un rapport : « Lorsque l'eau est vaporisée par le feu, la vapeur ainsi obtenue occupe un espace beaucoup plus grand que l'eau, et, plutôt que de rester emprisonnée, elle fait exploser la pièce d'artillerie dans laquelle elle est confinée. Mais si l'on sait comment la dominer, elle accepte de travailler sans regimber comme un cheval docile et peut ainsi être d'une grande utilité pour le genre humain. » Ces paroles prophétiques, qui annonçaient la machine à vapeur, furent énoncées quelques années avant que fût réalisée la pompe à vapeur de Savery, dont nous reparlerons plus loin.

On peut se poser la question de savoir pourquoi les possibilités de l'énergie thermique ont été si mal employées pendant si longtemps. Une des raisons essentielles est sans doute liée au fait que l'étude scientifique de la chaleur fut longue et difficile. Les méthodes de mesure de la température qui sont indispensables à la conduite des sources de chaleur ne sont connues que depuis deux siècles. Plusieurs physiciens se sont pourtant intéressés à ce problème : Galilée réalisa au début du XVIIe siècle un instrument, baptisé thermoscope, permettant de mesurer des différences de température. Cet appareil, fondé sur les variations du niveau d'un liquide contenu dans un tube en fonction de la dilatation du gaz contenu dans une ampoule solidaire du tube, fut sans doute le point de départ des travaux de Rey, qui aboutirent à l'invention du premier thermomètre. Il ne restait plus qu'à définir une échelle de températures à partir d'un point haut et d'un point bas, ce qui fut l'œuvre de Fahrenheit, perfectionnée vers 1742 par le Suédois Celsius.

L'équivalence entre la chaleur et le travail mécanique fut établie de façon définitive par le physicien écossais Joule seulement en 1848, alors que la correspondance entre le mouvement et la chaleur avait déjà été perçue bien avant par certains savants qui s'opposaient ainsi aux caloristes, dont la théorie reposait sur la croyance que la chaleur était un fluide invisible qui traversait les corps lorsqu'ils étaient chauffés et disparaissait lorsqu'ils se refroidissaient. Dès 1620, sir Francis Bacon avait écrit : « L'origine de la chaleur, c'est le mouvement et rien d'autre. » Les physiciens Boyle et Hooke étaient du même avis. Mais pour que ces conceptions prennent l'avantage sur les théories caloristes, il a fallu attendre les expériences de Benjamin Thompson, comte de Rumford, qui montra « à l'émerveillement de tous » que la chaleur libérée lors du forage d'un canon en cuivre permettait de faire bouillir de l'eau sans feu. Les réflexions que lui inspirèrent ces observations expérimentales le conduisirent à repousser l'idée de l'existence du fluide calorique. Ce sont finalement les travaux de Mayer et ceux de Joule qui, en mettant clairement en évidence l'équivalence des diverses formes d'énergie, et tout particulièrement des énergies thermique et mécanique, ont conduit à la définition moderne de l'énergie.

Comme nous l'avons vu plus haut, c'est seulement à la fin du XVIIe siècle que la conversion de la chaleur en travail mécanique fut réalisée de façon pratique. En 1698, l'ingénieur militaire Thomas Savery mit au point la première pompe à vapeur viable, qui était destinée au pompage de l'eau au fond des puits de mine, et que l'on appela pour cela *l'Ami du mineur*. Elle fut perfectionnée vers 1712 par l'Anglais Thomas Newcomen. Quelques années auparavant, le Français Denis Papin s'était passionné pour l'étude des possibilités de la vapeur et avait inventé la marmite à pression ainsi que la première soupape de sûreté connue. En 1690, en combinant l'utilisation du vide par condensation avec le mécanisme piston-cylindre, il inventa la première véritable machine thermique. La machine de Newcomen, dont les utilisations étaient les mêmes que celle de Savery, présentait sur celle de Papin l'avantage de pouvoir fournir un travail effectif et de répondre à un besoin pressant qui était celui de pomper l'eau dans les puits de mine de plus en plus profonds. Les machines à feu de Newcomen se répandirent très vite, puisqu'on en comptait une centaine en Angleterre vers 1769.

L'inconvénient majeur des pompes à vapeur de Newcomen était d'exiger pour fonctionner des quantités énormes de charbon. Il fallait en effet alternativement chauffer puis refroidir le cylindre pour assurer la condensation de la vapeur. Sans l'ingéniosité de James Watt, alors mécanicien de laboratoire à l'université de Glasgow, il est probable que le rendement excessivement faible de ces premières machines à vapeur aurait eu pour

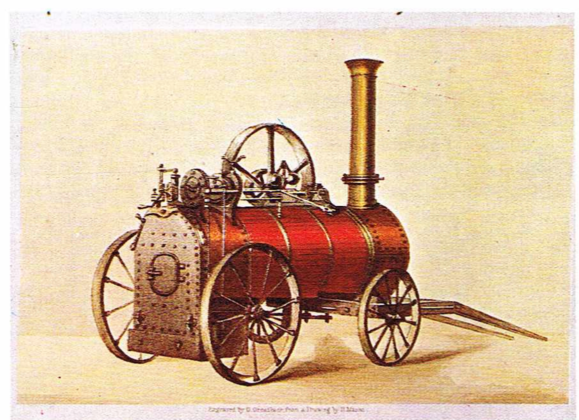

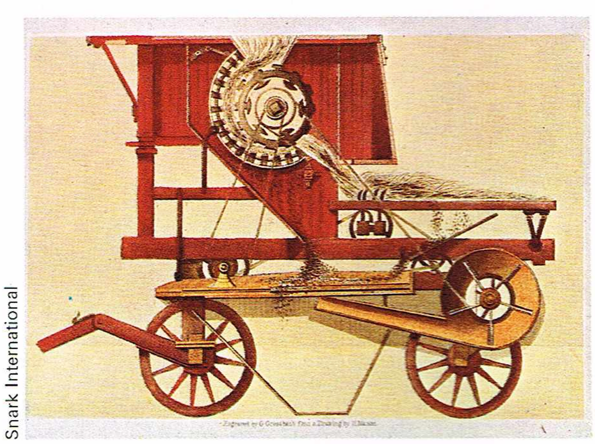

Snark International

▶ **Savery, Papin, Newcomen, Watt,** *ces noms ont présidé à la naissance et à l'expansion de la machine à vapeur, véritable révolution du XIXe siècle.*

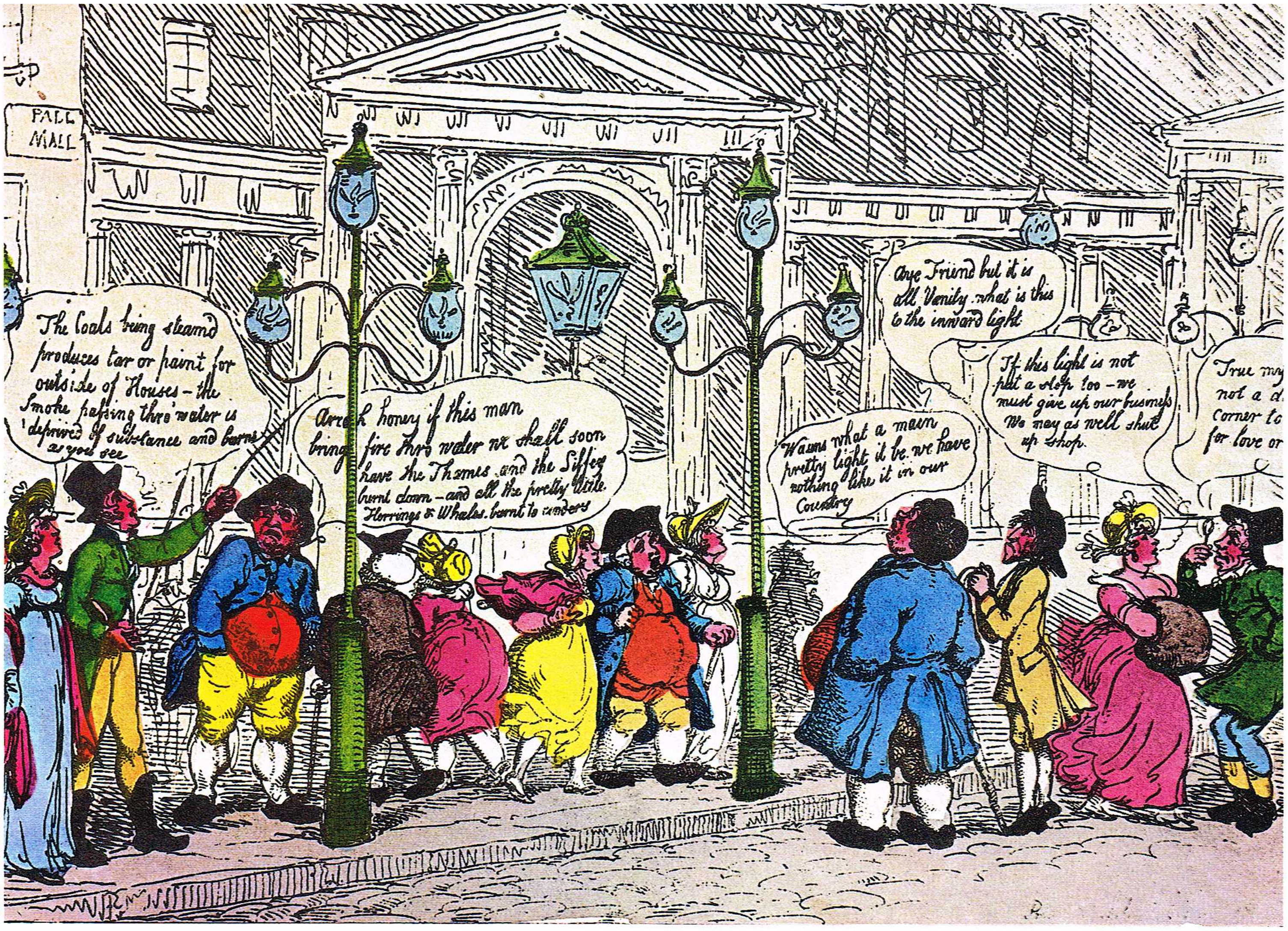

Snark International

conséquence de freiner considérablement le développement de l'utilisation de l'énergie thermique en tant qu'énergie industrielle. En 1765, Watt inventa le condenseur et réalisa sa propre machine qui fut le point de départ de l'expansion prodigieuse de la machine à vapeur.

▲ ***Première apparition de l'éclairage de ville au gaz à Pall Mall (1809), vue par un journal anglais de l'époque (British Museum).***

▼ ***Machine à vapeur à balancier, construite vers 1785 sous brevet de* Watt.**

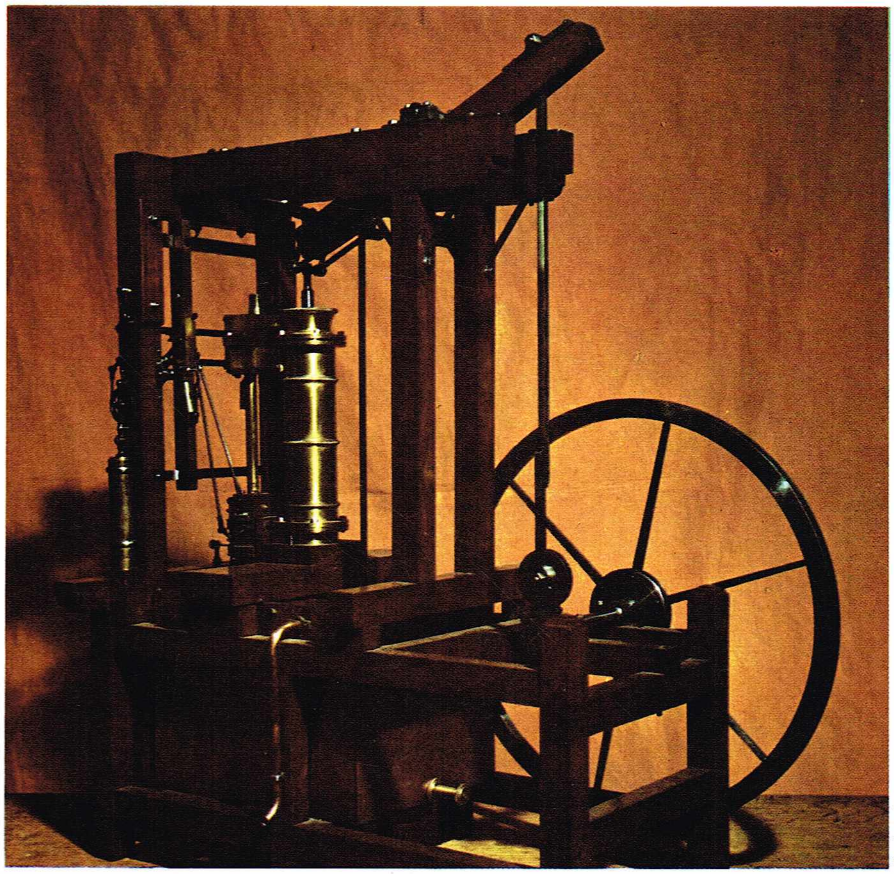
Nat's photo

Du bois au pétrole

Au cours des siècles, les combustibles employés pour l'alimentation du feu n'ont pas été constamment les mêmes. Il est probable que le premier feu aperçu par l'homme était le brasier allumé par la foudre au cœur de la forêt ou bien le résultat de l'étincelle produite par le choc de deux silex sur un petit tas de paille sèche. Les combustibles végétaux, et tout particulièrement le bois, ont eu pendant très longtemps un rôle prépondérant. Le bois, tout en servant de matériau de construction, a été jusqu'au XVIIIe siècle l'élément combustible essentiel aussi bien pour les usages domestiques que pour les nécessités industrielles. Actuellement, la part du bois dans l'énergie totale consommée est très faible : le charbon de terre d'abord, puis le gaz naturel et le pétrole l'ont remplacé pour presque toutes les utilisations.

Le charbon de terre est déjà connu au Moyen Age, mais ce sont les combustibles d'origine végétale ainsi que le charbon de bois qui sont couramment employés pour les applications industrielles de l'époque, c'est-à-dire principalement le traitement des minerais et la métallurgie en général. Les premières utilisations de la houille virent le jour en Angleterre où le charbon était particulièrement accessible.

Le gaz naturel et le pétrole sont connus depuis les temps les plus anciens : la Bible rapporte que Noé se servit de bitume pour calfater l'arche, et la suprématie maritime des Phéniciens a probablement été due en partie à l'emploi de ce même bitume. On trouve dans un ouvrage traitant des réalisations de la civilisation égyptienne la description d'une lampe dont la flamme alimentée par du pétrole naturel brûlait sans fin. A la même époque, les Chinois utilisaient la combustion du gaz naturel pour extraire le sel de la saumure. Pourtant, en dehors de quelques applications très particulières, le gaz naturel et le pétrole furent essentiellement employés à des fins thaumaturgiques. On se contentait alors des

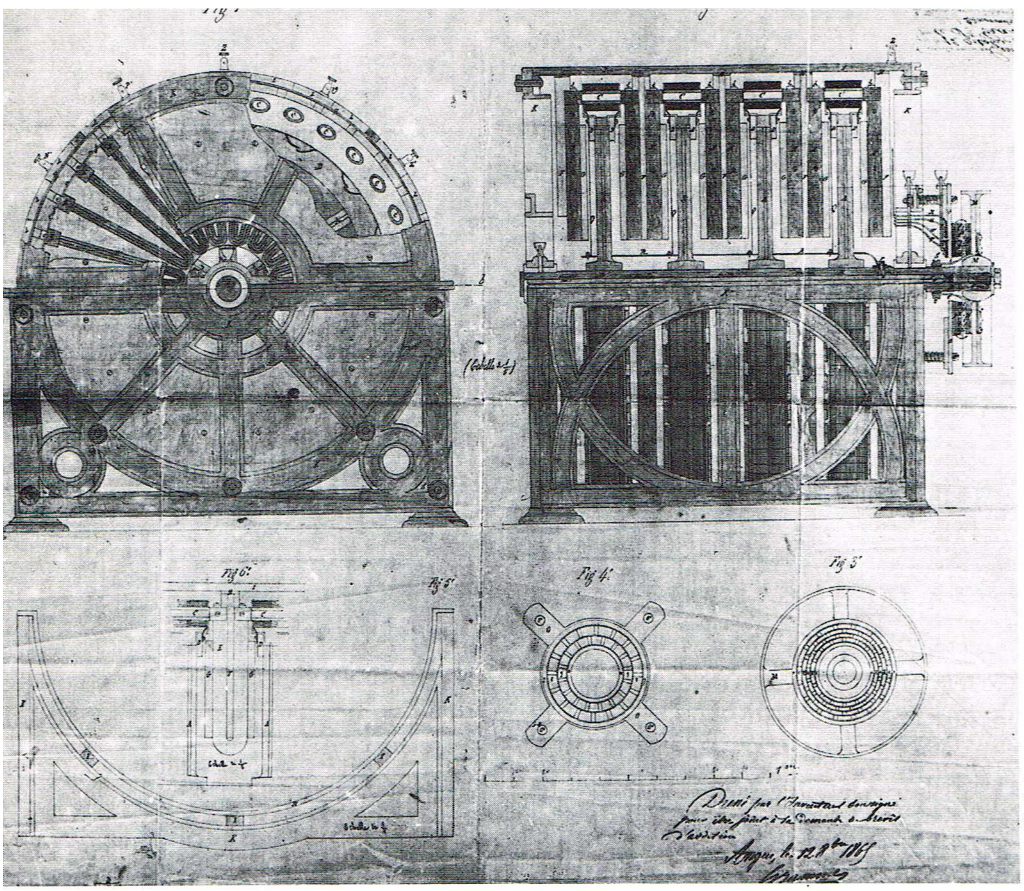

Roger Viollet

Snark International

suintements et dégagements naturels. C'est seulement au milieu du XIXe siècle, quand on eut redécouvert les méthodes de distillation permettant d'obtenir du pétrole lampant, ce qui eut pour effet d'accroître considérablement la demande, que l'intérêt pour le potentiel commercial que pouvait représenter le pétrole commença à s'éveiller et que la recherche et l'exploitation du pétrole sous-terrain commencèrent à se répandre. Aux États-Unis, jusqu'en 1885, on exploitait seulement les faibles quantités qui suintaient directement du sol aux environs d'Oil Creek pour les vendre en vue d'applications médicales. Edwin L. Drake, chef de train en retraite, fut chargé par la Seneca Oil Company de lancer les premières recherches de pétrole par forage. Aidé d'un assistant, il construisit le premier derrick près de Titusville en Pennsylvanie. Ce puits produisit 40 litres de pétrole par jour à partir du 27 août 1859. Dès le lendemain, on assista à un phénomène identique à celui qu'avait déclenché dix ans auparavant la découverte de gisements aurifères : la ruée vers l'or noir.

En fait, l'extraction du pétrole brut ne démarra réellement qu'au tout début du XXe siècle au moment où la croissance de la production charbonnière, qui avait été très rapide entre 1850 et 1900 (décuplement en cinquante ans), commençait à se ralentir. La progression de la production mondiale en pétrole fut encore plus rapide, puisqu'elle décupla en quarante ans. Le charbon reprit une place importante dans la production mondiale de produits énergétiques avec le développement des industries soviétique et chinoise.

Naissance et développement de l'électricité

Alors que la capacité de l'énergie hydraulique, éolienne ou calorifique de fournir un travail mécanique fut perçue assez tôt, même si les applications pratiques mirent longtemps à se développer, l'électricité, dont certaines manifestations furent observées dès l'Antiquité, resta pendant plusieurs siècles essentiellement une curiosité scientifique. Les propriétés électrostatiques de l'ambre étaient connues des Égyptiens, et c'est probablement là que l'on doit chercher les origines des connaissances du Grec Thalès à ce sujet. Le Moyen Age étudia, lui aussi, l'aptitude de l'ambre frotté à attirer les corps légers, ainsi que certaines des propriétés de l'aimant. Il a néanmoins fallu attendre le XVIe siècle pour que les phénomènes électriques soient l'objet d'expériences scientifiques, en particulier de la part de William Gilbert, médecin de la reine Élisabeth Ire d'Angleterre. Vers 1650, Otto de Guericke construisit la première machine électrostatique constituée d'un globe de soufre monté sur un axe en bois actionné par une manivelle. Un frottoir en drap était appliqué contre le globe. Otto von Guericke avait ainsi réalisé le premier générateur d'électricité statique.

En 1785 et 1786, le physicien français Charles Coulomb établit les lois qui régissent l'interaction de deux ou plusieurs charges. Benjamin Franklin neutralisa les effets dangereux de la foudre, seule source d'électricité puissante à cette époque, en inventant le paratonnerre, mais il ne réussit malheureusement pas à la domestiquer. En fait, jusque dans les premières années du XIXe siècle, l'électricité demeura essentiellement une curiosité de laboratoire permettant de réaliser des expériences spectaculaires. La puissance des premières machines statiques ne pouvait conduire à cette époque à la moindre tentative d'application industrielle, en dépit des perfectionnements qui furent apportés à la première machine de Guericke par divers physiciens, dont Ramsden.

Après avoir été le premier à observer les effets du courant électrique sur une grenouille fraîchement disséquée, le professeur italien d'anatomie Luigi Galvani réalisa des expériences sur l'électricité qui le conduisirent à des conclusions erronées mais qui servirent de point de départ à un autre professeur italien, Alessandro Volta, pour démontrer que l'action de l'humidité sur deux métaux différents produisait un courant électrique. Il venait ainsi d'inventer la pile électrique. Bien que cela n'apparût pas de façon évidente aux yeux des contemporains, la pile de Volta convertissait l'énergie chimique en énergie électrique. Cette découverte déclencha toute une série d'études sur l'électricité qui permirent l'établissement des lois qui gouvernent le comportement

◀ *Expérience de* **Franklin** *en 1752, à partir de laquelle il inventa le paratonnerre.*

du courant électrique, les propriétés du magnétisme, l'action réciproque du courant et des aimants, etc. Parallèlement, de nombreux chercheurs tentaient de mettre au point des générateurs d'électricité plus puissants que la pile de Volta soit en perfectionnant celle-ci, soit en utilisant les lois de l'électromagnétisme qui avait été étudiées par Œrsted en 1820 à l'université de Copenhague. C'est ainsi que Michael Faraday réussit à fabriquer une machine produisant de l'électricité à partir du champ magnétique d'un aimant. Ce premier appareil fut perfectionné par le constructeur français Hippolyte Pixii qui conçut la première génératrice électrique réellement utilisable. Les recherches qui tendaient à suivre la voie ouverte par Volta aboutirent à la réalisation des accumulateurs qui offrent l'avantage d'être susceptibles d'emmagasiner l'énergie en période d'excédent pour la restituer en période de pénurie : ce fut pour une grande part l'œuvre de Gaston Planté.

Le premier moteur à usage industriel fut conçu, en 1837, par un forgeron américain, Thomas Davenport, pour actionner ses machines-outils ; mais c'est l'ouvrier belge Zénobe-Théophile Gramme, qui, inventant et fabriquant la première dynamo (du grec *dunamis :* énergie), ouvrit réellement la voie à l'expansion de l'utilisation de l'énergie électrique. La dynamo Gramme est une machine réversible : elle fournit de l'électricité à partir d'un travail mécanique, mais inversement elle peut, si on lui assure une alimentation en courant électrique convenable, produire un travail mécanique. Cette propriété importante n'a d'ailleurs été mise en évidence qu'à l'occasion d'un incident lors de l'exposition de Vienne en 1873. L'invention de l'alternateur, dernière étape vers les générateurs électriques modernes, est encore l'œuvre de Gramme en 1877.

L'apparition de l'électricité marque un tournant important dans l'histoire des rapports de l'homme avec l'énergie. Contrairement aux autres formes d'énergie qui avaient été exploitées jusqu'alors, l'électricité peut être transportée sur de longues distances (l'invention du transformateur statique qui permet d'assurer ce transport dans des conditions acceptables sur le plan du rendement est le fruit des travaux de Marcel Depres et date de 1881) et elle permet de distribuer l'énergie en fonction des besoins à tous les utilisateurs possibles soit pour les usages domestiques, soit pour les travaux industriels : produite elle-même à partir d'un travail mécanique ou bien d'une réaction chimique, elle peut fournir de la chaleur par effet Joule, entraîner un moteur, permettre l'électrolyse d'un corps, etc. L'énergie électrique va donc connaître un développement extraordinairement rapide durant les trente dernières années du XIXe siècle.

Seules, à cette époque, la machine à vapeur et la machine hydraulique étaient susceptibles de produire une quantité d'énergie mécanique suffisante pour produire de l'électricité de telle sorte que l'on pût répondre à la demande. Plus tard viendront s'ajouter le réacteur nucléaire, l'énergie solaire et la force des marées.

L'utilisation de la force du courant des rivières est très ancienne, comme en témoignent les vieux moulins en ruine que l'on trouve au bord des rivières. L'inconvénient de ces machines, nous l'avons vu, était de n'avoir qu'une très faible puissance, puisqu'une très faible partie seulement de l'énergie des cours d'eau était prélevée, et d'imposer l'implantation des industries utilisatrices à quelques mètres seulement de la rive.

En 1830, l'ingénieur Benoît Fourneyron remporta le premier prix d'un concours organisé par la Société d'encouragement pour l'industrie nationale pour améliorer la roue hydraulique en présentant la première turbine à eau. Il perfectionna son invention constamment, mais l'intérêt qu'elle présentait comme moteur fut éclipsé par la machine à vapeur jusqu'en 1880, date à laquelle la demande d'électricité devint très forte à la suite des résultats spectaculaires obtenus par Thomas Edison qui avait mis au point la lampe à incandescence mais, surtout, qui avait résolu bon nombre de problèmes posés par la distribution et le contrôle d'utilisation de l'électricité en créant la centrale de Pearl Street dans un quartier du bas Manhattan. Cette centrale, équipée de dynamos d'une puissance de 100 kW qui fonctionnaient grâce à des machines à vapeur à piston, fut inaugurée le 4 septembre 1882. Ce jour-là, cinq mille lampes s'allumèrent dans les magasins et les maisons des environs.

En 1868, un papetier nommé Berges réussit à aménager une chute d'eau de 200 mètres, apportant ainsi une solution au problème que posait la faible puissance que l'on tirait jusque-là des cours d'eau. Le premier turbo-générateur fut mis en service sur les chutes du Niagara en 1895. Sa puissance était d'environ 5 000 ch. L'hydroélectricité, qui emploie la « houille blanche », ne cessa de se développer depuis mais ne remplaça pas l'électricité d'origine thermique. La construction d'une centrale hydro-électrique nécessite un investissement très important au départ pour la réalisation d'ouvrages d'art volumineux et coûteux. Par contre, les frais d'exploitation sont généralement modiques.

Parallèlement aux travaux qui amenèrent à la réalisation de la turbine hydraulique, des recherches étaient entreprises pour améliorer la machine thermique à piston de James Watt. En 1880, un ingénieur suédois, Carl-Patrick de Laval, avait réalisé une machine que l'on peut considérer comme une turbine à vapeur utilisable industriellement.

◀ *Page ci-contre, en haut, dessin envoyé par* **Gramme** *à l'appui d'une demande de brevet d'invention de la machine magnéto-électrique (Angers, 1865). En bas, la distribution et le contrôle d'utilisation de l'électricité mis au point par* **Thomas Edison** *; l'énergie électrique pénètre alors la vie quotidienne des utilisateurs. Ici, une rue de Broadway vers 1893.*

▶ *Dessin original de la machine à vapeur de l'architecte italien* **G. Branca.**

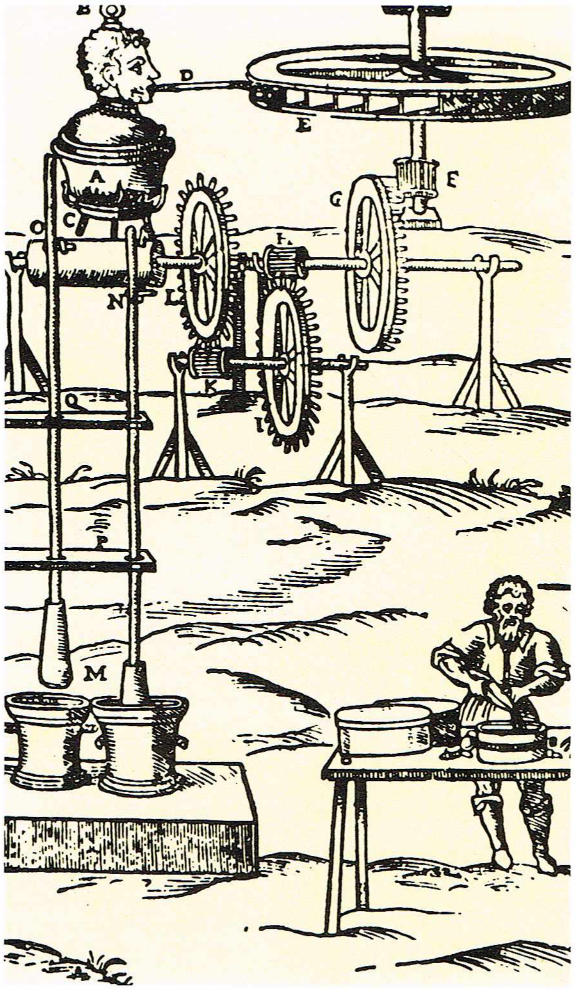

Archives I.G.D.A.

Le principe adopté est identique à celui que proposait en 1629 l'architecte italien Giovanni Branca : une chaudière de bronze envoie la vapeur sur une roue à aubes qui actionne deux pilons par l'intermédiaire d'un système d'engrenages. Entre 1880 et 1900, Laval perfectionna sa machine mais l'Anglais Parsons mit au point la turbine à réaction qui s'avéra être un appareil beaucoup plus puissant. Vers 1900, vint s'ajouter la turbine mise au point par l'ingénieur Rateau.

Si le XIX^e siècle fut essentiellement le siècle de la vapeur, on peut considérer que le XX^e fut celui de l'électricité qui modifia considérablement le mode de vie et les habitudes. Elle donna à chacun la possibilité d'utiliser pour une multitude d'usages une énergie qui lui permettait d'économiser ses muscles.

L'âge de l'atome

En 1905, un jeune employé du service des brevets d'invention de Zurich tout frais émoulu de l'Institut polytechnique, Albert Einstein, publia une série d'articles scientifiques dont l'un, *De l'électrodynamique des corps en mouvement*, contenait les éléments essentiels de la théorie de la Relativité dont les conséquences sur l'histoire de la science mais aussi sur celle de l'énergie furent capitales. Nous n'allons pas traiter ici de la Relativité dans son ensemble, mais nous allons étudier ses implications dans le domaine de l'énergie.

Les physiciens de l'époque admettaient deux principes fondamentaux : la conservation de l'énergie et la conservation de la masse. Toute variation de masse était considérée comme la conséquence d'une action d'origine mécanique ou chimique. Or Einstein affirmait que la vitesse d'un corps a une influence sur sa masse et que, pour des vitesses très élevées proches de la vitesse maximale possible, c'est-à-dire la vitesse de la lumière, la masse augmentait considérablement en tendant vers une valeur infinie. A partir de ces conclusions, Einstein sauta un pas particulièrement important en affirmant que la masse est l'équivalent de l'énergie, ce qui implique que l'augmentation ou la diminution de l'énergie sont toujours associées à une variation de masse généralement imperceptible, tout au moins par les moyens d'observations existant à l'époque. Par exemple, lorsque de l'énergie sous forme de chaleur est transmise à un corps, sa masse doit augmenter. Il est curieux de noter que cela rejoint les opinions des caloristes du XVIII^e qui associaient une augmentation de poids à une élévation de température à cause du passage du fluide calorique à l'intérieur de la matière.

Le rapport qu'il avait ainsi établi entre masse et énergie suggéra à Einstein qu'une conversion directe masse-énergie était possible, mais les moyens à mettre en œuvre pour réaliser cette conversion ne pouvaient être même imaginés à l'époque où furent publiées ses conclusions.

Les réactions des contemporains furent, comme on peut s'en douter, très vives; néanmoins la solidité et la rigueur des arguments présentés par Einstein arrivèrent à convaincre peu à peu les physiciens et, en 1932, la découverte du positon par C. D. Anderson lors d'une expérience sur les rayons gamma confirma la théorie de l'équivalence entre la masse et l'énergie.

L'ère de l'énergie atomique venait de commencer. Si tous les savants furent convaincus de la validité des conclusions d'Einstein, personne ne voyait quel pouvait être le procédé qui permettrait de tirer l'énergie de la matière. Pourtant les travaux de recherche sur la constitution intime de la matière avançaient très rapidement. En 1935, le prix Nobel de physique fut décerné à l'Anglais Chadwick pour la découverte du neutron et, en 1938, l'Allemand Otto Hahn, utilisant les neutrons, réalisa la première fission de l'atome d'uranium. Le but de son expérience était l'obtention d'éléments plus lourds, mais en fait la réaction produisit du baryum qui est plus léger. C'est O. E. Frisch et Lise Meitner qui expliquèrent l'année suivante les résultats des expériences de Hahn en suggérant que la fission de l'uranium donne deux noyaux de masses voisines. La masse qui manque à la fin de la réaction a été transformée en énergie.

Von Halban, Joliot et Kowarski montrèrent en 1939 que la fission de l'uranium s'accompagne de libération de neutrons rendant possible une réaction en chaîne.

L'expérience décisive eut lieu en 1942 sur le stade de l'université de Chicago où Enrico Fermi, exilé aux États-Unis (après son refus d'exécuter le salut fasciste lors de la cérémonie de remise du prix Nobel qui lui fut attribué en 1938 pour ses travaux sur les neutrons et plus spécialement les neutrons lents), démarra la première réaction en chaîne d'une véritable pile atomique. Le combustible était constitué d'uranium inséré dans un bloc de graphite qui devait ralentir les neutrons produits lors de la réaction, Fermi ayant observé que les neutrons lents étaient plus efficaces que les neutrons rapides pour casser les noyaux d'uranium. Pour que l'énergie ainsi produite ne soit pas libérée avec une trop grande brutalité, il est nécessaire de pouvoir contrôler le processus de réaction en chaîne. Cela fut réalisé en introduisant un élément, absorbant les neutrons, dans le cœur du réacteur.

Le problème de l'utilisation de l'énergie nucléaire n'était pas pour autant résolu : le combustible utilisé était un métal rarissime à l'époque réservé aux expériences des physiciens de la matière. De plus, l'uranium naturel utilisé par Fermi était faiblement radio-actif et la masse de combustible nécessaire était extrêmement élevée (7 tonnes pour le premier réacteur). On connaissait l'existence de l'uranium 235 hautement radio-actif, mais les techniques permettant de l'isoler étaient encore loin de voir le jour.

L'un des facteurs prépondérants qui ont aidé au développement des applications de l'énergie nucléaire est la coïncidence de ces découvertes avec la Seconde Guerre mondiale. En juillet 1940, Albert Einstein écrivit une longue lettre au président des États-Unis pour l'informer des possibilités offertes par la fission de l'atome. A la suite de l'expérience de Fermi qui mit en évidence la possibilité de réaliser une réaction en chaîne, des investissements considérables furent débloqués pour la réalisation du projet Manhattan qui devait aboutir à la bombe atomique.

L'une des conséquences importantes du projet Manhattan fut la mise au point de procédés de séparation des deux isotopes de l'uranium permettant d'isoler l'ura-

Novosti

nium 235. Mais, pour réaliser la bombe qui devait détruire Nagasaki, on utilisa un corps qui venait d'être découvert par Seaborg : le plutonium. Pour produire celui-ci, les Américains utilisèrent des piles copiées sur celle de Fermi où l'uranium naturel bombardé par les neutrons produisait ce nouveau corps plus fissile que l'uranium 235. Par la suite, le plutonium allait être l'élément combustible de la dernière génération des réacteurs, les surrégénérateurs.

Contrairement à ce que l'on recherche dans une pile, la libération d'énergie d'une bombe doit être aussi brutale que possible. Il fallait donc trouver le moyen de concentrer brutalement la masse critique pour que se déclenchât automatiquement la réaction en chaîne et qu'elle se poursuivît ensuite sans contrôle. Ce problème fut résolu en entourant le cœur de la bombe séparé en plusieurs morceaux de charges d'explosifs conventionnels qui, au moment de l'explosion, rapprocheraient les fragments de matériau fissile.

La première bombe nucléaire explosa dans le désert d'Alamogordo le 16 juillet 1945 et, le 6 août 1945, Hiroshima était détruite.

Après la guerre, les travaux réalisés grâce au projet Manhattan servirent à la mise en route de la construction des premiers réacteurs nucléaires destinés à la production d'électricité. Plusieurs types de réacteurs ont été mis au point. Ils fonctionnent tous en général sur le même principe, mais ils se différencient par le matériau combustible qu'ils utilisent : le fluide qui prélève les calories émises par le cœur du réacteur fait fonctionner une turbine à vapeur, elle-même entraînant un générateur d'électricité, le modérateur de neutrons, etc. Selon leurs possibilités techniques, les différents pays qui ont construit les premiers réacteurs nucléaires se sont orientés vers une filière ou vers une autre. A l'heure actuelle, un certain nombre d'entre elles ont été, sinon abandonnées, du moins mises en sommeil au profit de celles qui ont permis d'obtenir de l'énergie électrique à un prix comparable à celui de l'électricité issue des centrales thermiques ou hydrauliques. La brutale augmentation des prix du pétrole et des matières premières depuis 1973 donne une accélération nouvelle au développement des centrales nucléaires de puissance bien que la part de l'énergie mondiale qu'elles fournissent soit encore relativement faible.

L'énergie nucléaire présente par rapport aux autres formes modernes d'énergie l'avantage de ne pas nécessiter d'oxygène, contrairement à ce qui se passe lors de la combustion du pétrole ou du charbon. Si l'on peut envisager pour l'avenir des réacteurs nucléaires assurant la propulsion des automobiles, il existe une application spectaculaire de cette forme d'énergie qui utilise l'avantage dont nous venons de parler et le fait que, contrairement aux centrales hydro-électriques, le réacteur nucléaire est totalement autonome : c'est le sous-marin atomique, dont le premier exemplaire fut lancé le 21 janvier 1954. Depuis, beaucoup de ces navires circulent dans les mers du globe.

On ne peut pas séparer l'énergie nucléaire due à la fission des atomes d'uranium ou de plutonium de celle qui est due à la fusion. Bien que cette source d'énergie soit encore loin d'être suffisamment maîtrisée pour donner lieu à des applications pacifiques, il y a tout lieu de penser qu'elle connaîtra un grand développement dans un avenir proche. Si la théorie de la fusion commence à être assez bien connue, les températures mises en jeu lors de sa réalisation sont à un niveau tel qu'il n'est pas possible de trouver un récipient où elle puisse se produire en toute sécurité, mais l'utilisation de techniques de confinement par un champ magnétique permet de conserver de grands espoirs quant à l'avenir de cette forme d'énergie, d'autant plus que le combustible qu'elle utilise, l'hydrogène, se trouve en quantité illimitée dans l'air, dans l'eau et dans la terre. Comme dans le passé, l'exploitation d'une forme nouvelle d'énergie se heurte à des difficultés technologiques qui empêchent de contrôler l'énergie de fusion et qui en ont donc limité les applications pratiques à la réalisation de la bombe thermonucléaire, dont le premier exemplaire a explosé en novembre 1952 sur l'atoll d'Eniwetok.

▲ ***En 1932,* Anderson *confirme la théorie de la* Relativité *d'*Einstein *: l'ère de l'énergie atomique venait de commencer ; la technologie du XXe siècle s'emploie à lui trouver les plus utiles applications. Ici, le navire brise-glace soviétique* Lénine *à propulsion atomique.***

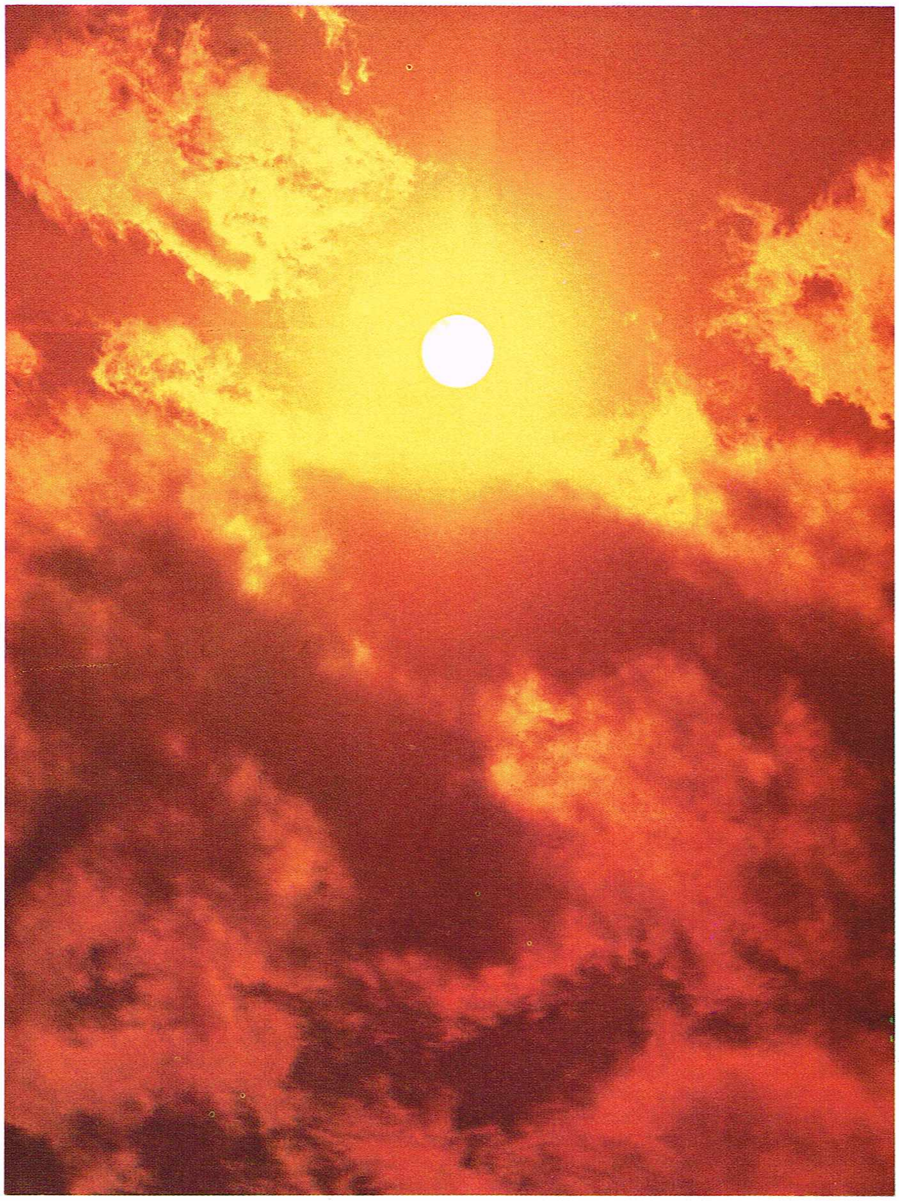

Photo Marc Garanger

▲ *Le Soleil, source d'énergie inépuisable à l'échelle de l'humanité.*

Le Soleil, la mer et d'autres

Dans ce qui précède, nous n'avons pas parlé de nombreuses autres formes d'énergie que chacun connaît pourtant : l'énergie solaire, l'énergie des marées, l'énergie du rayon laser et d'autres encore. La raison principale est que, sur le plan historique, ces diverses sources ont eu peu d'influence sur le développement de la civilisation, ou, beaucoup plus souvent, commencent à peine à être utilisées. Nous nous proposons néanmoins de voir pour un certain nombre d'entre elles les raisons qui ont empêché qu'elles ne se développent.

Dès son apparition sur la Terre, l'homme a été sensible à l'action des rayons du **Soleil,** il est même probable que l'analogie entre les effets du feu et ceux du Soleil lui apparurent rapidement. Mais, si le Soleil est une source d'énergie indispensable à la vie sur la Terre, maîtriser sa puissance est techniquement très difficile. Chacun connaît l'histoire probablement apocryphe qui décrit comment Archimède, à l'aide d'un jeu de miroirs qui captaient les feux du Soleil, incendia la flotte ennemie dans le port de Syracuse. Elle montre que les Anciens étaient conscients des possibilités offertes par l'exploitation de cette source d'énergie inépuisable. Pourtant, en dehors de son utilisation directe pour l'évaporation qui permet de recueillir le sel dans les marais salants, on ne trouve pas dans le cours de l'histoire d'applications de l'énergie solaire à des fins industrielles. La puissance émise par le Soleil nous arrive de manière diffuse et, pour la transformer en source de puissance effective, il faut la capter et la concentrer comme l'avait fait Archimède. En fait, bien que la technique apparaisse simple dans son principe, elle est complexe et onéreuse si l'on veut obtenir une quantité d'énergie suffisante pour que son exploitation puisse être sérieusement envisagée. De plus, le Soleil n'illumine la Terre que pendant le jour, et l'intensité des rayons qui atteignent la Terre dépend des conditions atmosphériques. Il a donc fallu attendre le XXe siècle pour que la technologie atteigne un niveau de développement suffisant et que cette énergie puisse être employée pour certaines applications : batteries solaires des véhicules spatiaux, four solaire permettant d'atteindre ponctuellement des températures très élevées, ou bien encore pompe fonctionnant à l'énergie solaire pour l'alimentation en eau de certains pays d'Afrique où le Soleil est abondant mais où les autres sources d'énergie sont peu nombreuses.

La **houille verte** (force motrice des marées) n'a jamais été réellement exploitée avant que ne soient réalisées après beaucoup d'études et d'hésitations, les usines marémotrices, dont la plus connue est celle de la Rance en France. Là encore, la mer est une source d'énergie puissante mais capricieuse, et la maîtrise de cette énergie nécessitait au préalable une maîtrise totale de l'énergie hydraulique dont nous avons vu qu'elle ne fut réellement acquise qu'à la fin du XIXe siècle et au début du XXe.

Ce qui différencie le XXe siècle des siècles qui l'ont précédé est que l'étude rationnelle de ces sources d'énergie et de leurs possibilités n'a pas été négligée, et il est possible que, dans l'avenir, l'exploitation de l'énergie des marées se fasse à une échelle beaucoup plus importante. Néanmoins il paraît plus réaliste de la considérer actuellement plutôt comme une énergie d'appoint.

Le **laser** dont la découverte est très récente mais dont les utilisations comme source d'énergie sont déjà très nombreuses dans les domaines les plus variés, doit surtout être considéré comme un moyen de transporter sans perte de fortes impulsions d'énergie à des distances importantes.

Enfin, pour conclure, il faut faire allusion à l'**énergie chimique,** dont nous n'avons pas parlé jusqu'à maintenant, alors que c'est la forme principale de l'énergie dont nous disposons : elle est à l'origine de l'énergie humaine et de l'énergie animale en transformant les aliments en muscles, elle est à la base de l'énergie thermique puisque la combustion du pétrole ou du charbon n'est en fait qu'une réaction chimique. Les applications directes de l'énergie chimique sont peu nombreuses, sauf en ce qui concerne l'usage de la poudre à canon inventée par les Chinois il y a fort longtemps et qui fut importée en Europe beaucoup plus tard. La poudre sert bien évidemment surtout pour les applications militaires, mais on a vu après la Seconde Guerre mondiale se développer un certain nombre de procédés de mise en forme ou d'assemblage de matériaux particuliers utilisant l'explosion d'une charge de poudre.

La pile de Volta peut être considérée comme un convertisseur d'énergie chimique en énergie électrique. De même, la pile à combustible où l'énergie de réaction d'oxygène et d'hydrogène est directement convertie en énergie électrique.

Conclusion

Dans tout ce qui précède, on a tenté en premier lieu de donner une définition satisfaisante de l'énergie, puis d'en citer les diverses formes connues actuellement, et enfin de montrer comment l'homme a peu à peu conquis l'énergie pour assurer sa domination sur l'Univers.

L'énergie qui s'exprime dans le souffle du vent ou dans le mouvement de la mer fait sentir de façon très directe son influence sur nous. De même, nous sommes sensibles à la chaleur des rayons du Soleil ou à l'action du courant électrique. L'interaction de ces sources d'énergie avec notre corps n'est pas la même et n'a pas les mêmes effets, pourtant derrière ces manifestations si dissemblables se cache une grandeur unique, l'énergie. Selon le sens que l'on donne à ce mot, l'énergie peut être considérée avant tout comme une abstraction mathématique permettant de décrire les lois constatées expérimentalement dans l'Univers ou bien comme l'origine de toutes les forces dont nous observons les effets.

La notion d'énergie permet de comprendre pourquoi la chaleur et le travail mécanique sont transformables

l'un dans l'autre, mais ce que nous voyons, ce ne sont pas les effets de l'énergie thermique ou de l'énergie mécanique, mais ceux de la chaleur et des forces. La confusion entre le concept physique d'énergie et la nature des sources qui permettent de produire une des formes de cette énergie unique est encore fréquente.

Le vent, le Soleil, le courant des rivières, la marée, le charbon, le pétrole, l'atome, autant de sources que nous connaissons et dont nous savons tirer cette énergie dont nous avons besoin pour survivre. Ces sources sont nombreuses, certaines sont presque inépuisables comme le vent ou le Soleil, d'autres au contraire ne pourront pourvoir indéfiniment à nos besoins. De plus, toutes n'ont pas la même rentabilité, et la disparition d'une source importante ou même simplement son appauvrissement, alors que la demande en énergie ne fait que croître, risque de nous plonger dans une situation dramatique. C'est pourquoi il est important que le XXe siècle n'ait pas rejeté dans l'ombre des techniques de production d'énergie difficiles (énergie solaire par exemple ou fusion nucléaire) ou désuètes (énergie éolienne).

Y a-t-il des formes d'énergie que nous ne connaissons pas ? Si cette question avait été posée il y a par exemple 200 ans, quelle aurait été la réponse ? Même à une époque plus récente, après que l'équivalence entre les diverses formes d'énergie a été établie, il n'est pas certain que la réponse soit affirmative, et pourtant l'énergie nucléaire a manifesté en peu de temps sa puissance et a pris une importance considérable parmi les sources d'énergie exploitables pour produire de l'électricité. Nous ne reconnaissons la présence de l'énergie qu'à ses effets, aussi pouvons-nous nous poser la question différemment : observons-nous des phénomènes qui pourraient être une manifestation d'une source d'énergie inconnue ? Oui, certainement. Nous constatons parfois des phénomènes qui ne correspondent pas à ce que nous attendions, mais la plupart du temps l'explication se trouve dans ce que nous connaissons.

On peut faire allusion, bien qu'il ne s'agisse pas là, tout au moins actuellement, de domaines qui soient couramment l'objet d'études scientifiques, aux manifestations de pouvoirs paranormaux qui sont généralement le fait d'individus qu'aucune caractéristique particulière ne désigne à l'attention mais qui sont capables d'avoir sur les objets une influence directe sans les toucher ; en d'autres termes de transmettre de l'énergie mécanique à distance. Bien entendu, il faut être extrêmement prudent devant ces expériences destinées à mettre en évidence cette forme particulière de l'énergie humaine, mais il ne faut pas rejeter sans examen, en se contentant de nier leur existence, les observations faites à ce sujet. Un certain nombre d'éléments pourraient être vérifiés sans que cela pose de difficultés particulières : par exemple, les éprouvettes métalliques tordues par Uri Geller sans qu'il y ait eu contact pourraient être examinées pour déterminer si l'on a affaire à un mode particulier ou non de déformation.

Il y a quelques années, l'hypothèse que le cosmos était une source inépuisable d'énergie avait été avancée par un Français qui proposait des expériences qui devaient selon lui mettre en évidence la possibilité de recueillir sur notre planète les effets de cette source d'énergie immense. Très récemment, un groupe de physiciens a pu réaliser les expériences proposées, malheureusement elles n'ont pas donné les résultats attendus et l'énergie du cosmos, si elle existe, restera encore longtemps inaccessible.

Pour revenir à des considérations peut-être un peu plus scientifiques, il n'est pas possible d'affirmer que nous connaissons actuellement toutes les sources d'énergie, cela serait extrêmement présomptueux et témoignerait d'un manque d'optimisme certain quant au futur de l'être humain, néanmoins nous pouvons dire que la notion d'énergie en tant que grandeur physique et sa relation avec les phénomènes observables sur la Terre depuis que l'homme est en mesure de les constater sont devenues depuis quelques années claires et précises. Nous savons comment on peut caractériser une forme nouvelle d'énergie : elle doit être convertible en une autre forme d'énergie. Si une source inconnue d'énergie venait à se révéler, nous la reconnaîtrions, ce qui n'implique pas que nous serions en mesure de l'exploiter et de la plier à nos exigences.

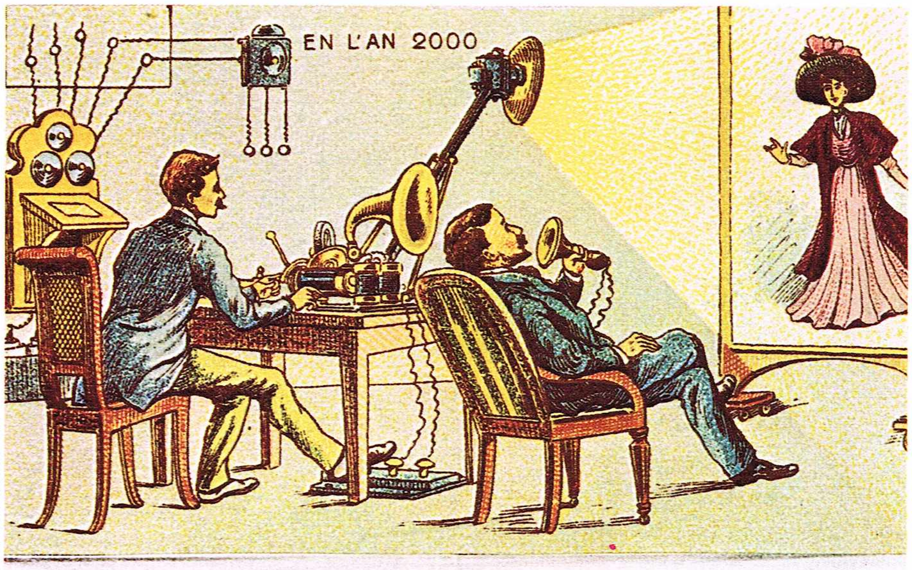

Snark International

▲ *Quand la réalité dépasse la fiction... L'audio-visuel en l'an 2000, gravure d'anticipation de la fin du XIXe siècle.*

Snark International

◀ *Utilisé au VIIe siècle par les Byzantins qui en gardaient jalousement le secret, le feu grégeois était une composition incendiaire à base de salpêtre et de matières bitumineuses qui brûlait même au contact de l'eau (manuscrit byzantin, Bibliothèque nationale, Madrid).*

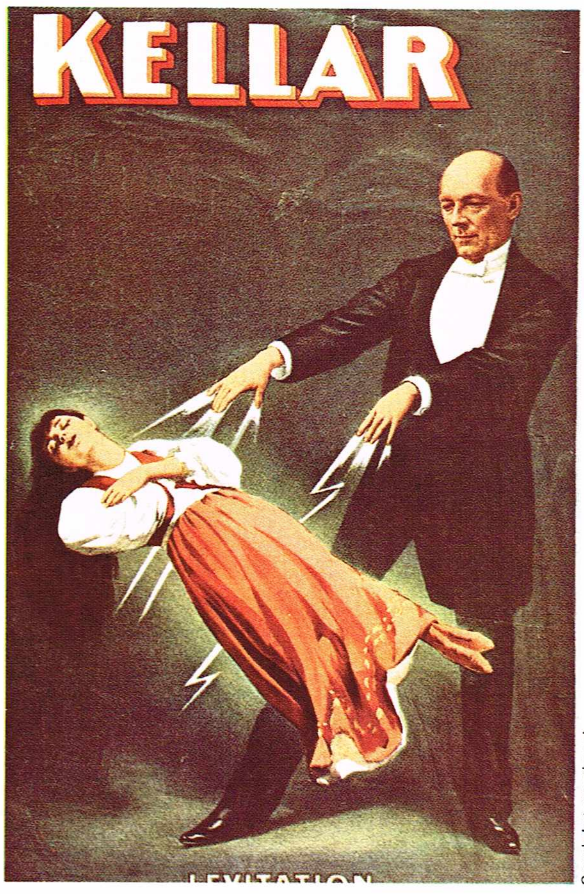

Snark International

◀ *La manifestation de phénomènes paranormaux mettant en évidence une forme particulière de l'énergie humaine a toujours intrigué : ici, une affiche du XIXe siècle illustrant « improprement » le phénomène dit de lévitation qu'il faudrait nommer ici télékinésie.*

ÉVALUATION DES RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES DE LA PLANÈTE

L'énergie dont nous pouvons disposer a quatre origines :
— le rayonnement solaire ;
— la chaleur souterraine qui provient essentiellement de la radio-activité naturelle des roches ;
— les forces d'inertie qui résultent des phénomènes gravitationnels du système solaire ;
— les réactions nucléaires de fission ou de fusion.

On peut donc dire, d'une façon générale, que nos ressources énergétiques sont constituées par des réserves naturelles d'énergie dont l'origine appartient à l'une des catégories ci-dessus.

— L'énergie solaire est produite à chaque instant au cœur du Soleil par des réactions de fusion nucléaire et rayonnée dans l'espace sous la forme d'ondes électro-magnétiques. C'est ce rayonnement capté par la Terre qui a permis l'évolution biochimique de notre planète. Les déchets organiques, végétaux ou animaux, dont la fossilisation a permis la constitution des réserves de charbon et de pétrole que nous connaissons aujourd'hui, n'auraient pas pu être produits sans le rayonnement solaire. Il faut donc ranger toutes nos énergies fossiles sous la rubrique « solaire ». Pour marquer cette différence entre l'énergie reçue aujourd'hui en provenance du Soleil et l'énergie solaire de jadis, « mise en conserve » dans le charbon ou le pétrole, nous diviserons l'étude des ressources d'énergie solaire en deux parties : les ressources non fossiles et les ressources fossiles.

— L'énergie en provenance de la chaleur souterraine est appelée « énergie géothermique ». L'extraction de cette énergie peut être « naturelle » ou « artificielle » suivant le degré de complexité des technologies mises en œuvre.

— Les forces d'inertie dues à la gravité sont des forces de nature mécanique. Cette énergie est difficile à capter. La possibilité la plus notable et la plus connue consiste dans l'utilisation des marées, dans les usines marémotrices.

— On examinera enfin les ressources permettant la mise en œuvre de l'énergie d'origine nucléaire, soit par l'utilisation de réactions de fission ou de fusion.

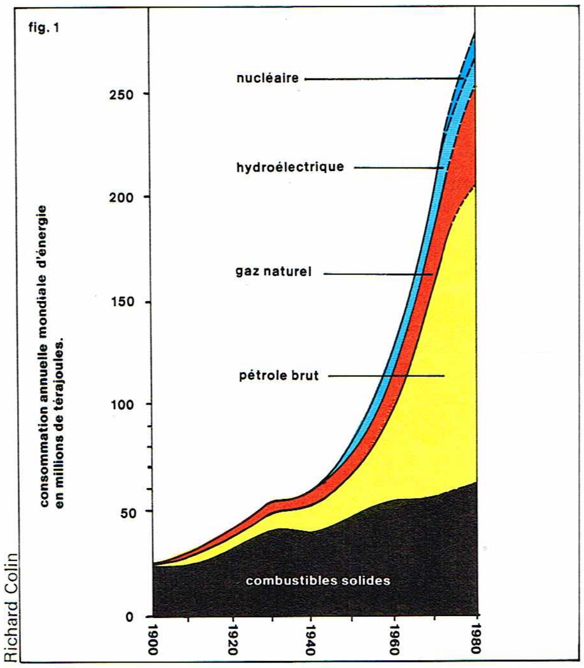

▶ *Figure 1 : représentation graphique de la modification d'utilisation des ressources énergétiques au XXe siècle.*

Pendant des millénaires, les hommes ont vécu sur l'énergie solaire : ils n'avaient en effet à leur disposition que leurs propres forces musculaires, celles des animaux de trait, le vent et les eaux courantes, pour satisfaire les besoins mécaniques, le bois étant pratiquement la seule source d'énergie thermique. Il en est encore ainsi aujourd'hui dans de nombreux pays en voie de développement : En Asie par exemple, plus d'un milliard d'hommes ne connaissent guère que les animaux pour tirer les outils agricoles, puiser l'eau ou moudre le grain. Dans le monde entier, près de la moitié de la population dépend de ressources énergétiques d'origine végétale : bois, déchets agricoles, etc.

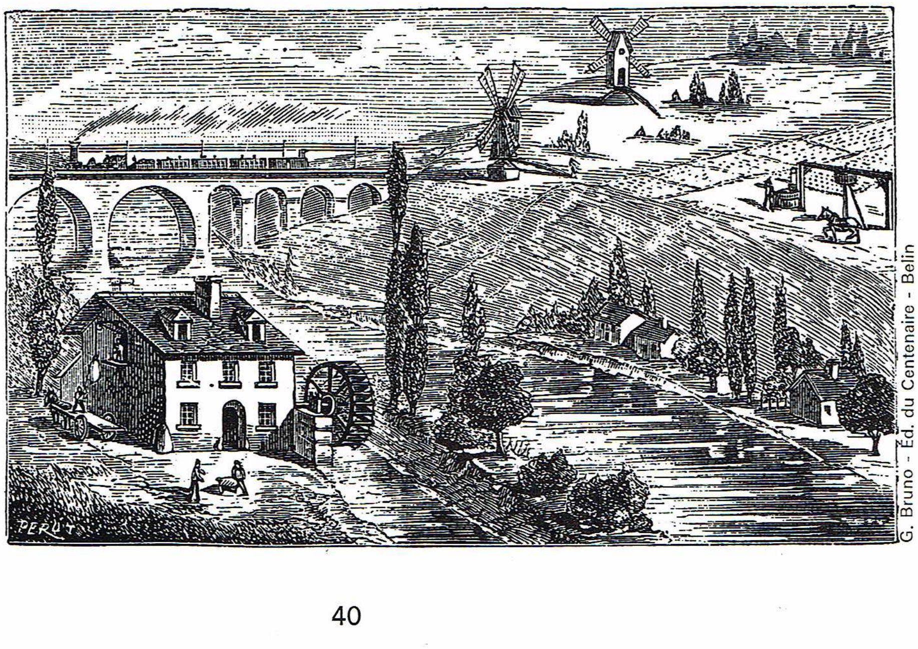

▼ ***Extrait du* Tour de la France par deux enfants *(1877, édition du centenaire, Belin, 1977), une illustration qui récapitule les principales forces motrices que l'homme utilise : l'animal, l'eau, le vent, l'électricité et enfin « la grande force de la vapeur qui fait mouvoir tant de machines et de locomotives ».***

Cette situation s'est modifiée au XVIIIe siècle avec l'utilisation progressive du charbon à la fois comme source d'énergie thermique et source d'énergie mécanique par l'intermédiaire de la machine à vapeur. Cette mutation commença d'abord en Grande-Bretagne pour toucher ensuite la France, l'Allemagne et les États-Unis. La production de charbon augmenta rapidement au cours du XIXe siècle (20 millions de tonnes en 1800, 100 millions de tonnes en 1850, et 500 millions de tonnes en 1890). Au début du XXe siècle, la venue de nouveaux producteurs, ajoutée à l'activité croissante des puissances charbonnières, permet à l'économie mondiale de franchir une production d'un milliard de tonnes. En 1960, le charbon occupe, et de loin, la première place comme source d'énergie (charbon 95 %, pétrole 4 %, hydraulique 1 %).

En 1977, nous dépendons toujours beaucoup des combustibles fossiles mais des glissements importants se sont produits, comme suite à une augmentation rapide de l'utilisation du pétrole brut et du gaz. Le nucléaire commence à apparaître, mais les effets des programmes en cours dans de nombreux pays du monde ne se feront pas sentir avant une dizaine d'années. Il faut donc retenir qu'à l'échelle mondiale nous dépendons en matière d'énergie, pour longtemps encore, des combustibles fossiles. Ces ressources n'étant pas renouvelables, et même si des divergences sur l'importance des réserves existent, tous les experts sont en accord pour prédire l'épuisement des gisements au cours du XXIe siècle. Le pétrole et le gaz s'épuiseront les premiers (on annonce la fin prochaine du gisement de Lacq en France). Le charbon résistera davantage, étant donné ses ressources considérables, mais il n'est pas certain que de difficiles problèmes de rentabilité ne viennent limiter les perspectives de cette forme d'énergie.

Face à cette échéance inéluctable, deux voies conduisant vers des sources d'énergie inépuisables nous sont proposées aujourd'hui : la voie du nucléaire qui passe par l'étape actuelle des réacteurs à fission, puis demain par celle des surrégénérateurs, pour aboutir enfin à la fusion qui éclipsera alors les autres modes de production utilisant l'énergie nucléaire ; l'autre voie est celle qui conduit à l'utilisation massive de l'énergie solaire sous toutes ses formes, revenant ainsi, par un juste retour des choses, selon les écologistes, à la situation initiale de l'humanité qui tirait toutes ses ressources énergétiques du Soleil.

Roland Michaud - Rapho

▲ *Plus d'un milliard d'hommes ne connaissent encore que les animaux pour tirer les outils agricoles, puiser l'eau ou moudre le grain... Ici, un attelage en Anatolie (Turquie orientale).*

Sans vouloir prédire l'avenir, on peut avancer que dans le monde de demain les différentes formes d'énergie (*fig.* 1) seront plus complémentaires que concurrentes. L'époque où de simples critères économiques permettaient à la forme d'énergie la moins chère de supplanter toutes les autres semble révolue. De nouveaux facteurs, et en particulier celui de l'indépendance énergétique recherchée aujourd'hui par tous les pays, conduisent à la diversification. Nous ne sommes plus dans une situation où chaque forme d'énergie prenait place dans une file d'attente en attendant son heure. La crise actuelle a bouleversé cette situation et redonné toutes leurs chances aux différentes formes d'énergie. Énergies d'aujourd'hui qui s'épuisent, énergies oubliées qui reviennent au premier plan, énergies de demain qui restent à maîtriser, nul ne doute à présent que nous aurons à coexister avec elles toutes, pour le plus grand profit de l'humanité.

Ressources d'origine solaire, non fossiles

Le Soleil est le siège de réactions thermonucléaires de fusion. Au cours de ces réactions, l'hydrogène se transforme en hélium, avec un intense dégagement de chaleur. Au cœur de l'astre, la température dépasse 100 millions de degrés centigrades, la température superficielle n'étant que de 6 000 °C environ.

Le Soleil rayonne une quantité considérable d'énergie dont une partie atteint notre planète. Le flux énergétique dans l'espace planétaire, à une distance de l'ordre de celle de la Terre au Soleil, est de 0,14 W/cm^2. La quantité d'énergie captée par la surface apparente de la Terre est considérable : 170 000 milliards de kW/h. On s'en rendra mieux compte en notant que l'énergie reçue dans une journée représente plus de 10 000 fois la totalité de l'énergie consommée sur la Terre pendant le même laps de temps. On pourrait dire aussi que la quantité d'énergie que le Soleil nous envoie chaque année est plus de cinq fois supérieure à l'énergie contenue dans la totalité de nos réserves en combustibles fossiles et en combustibles nucléaires fissiles.

Il faut constater aussi le peu d'usage que nous faisons de cette énergie solaire en dehors de celui qui résulte de ses actions naturelles : le cycle des pluies (usines hydro-électriques), le vent (navigation et éoliennes), la photosynthèse (forêts, agriculture) et l'échauffement

▼ *Le Soleil est le siège de réactions thermonucléaires de fusion au cours desquelles il se produit un intense dégagement de chaleur : au cœur de l'astre, la température dépasse 100 millions de degrés centigrades.*

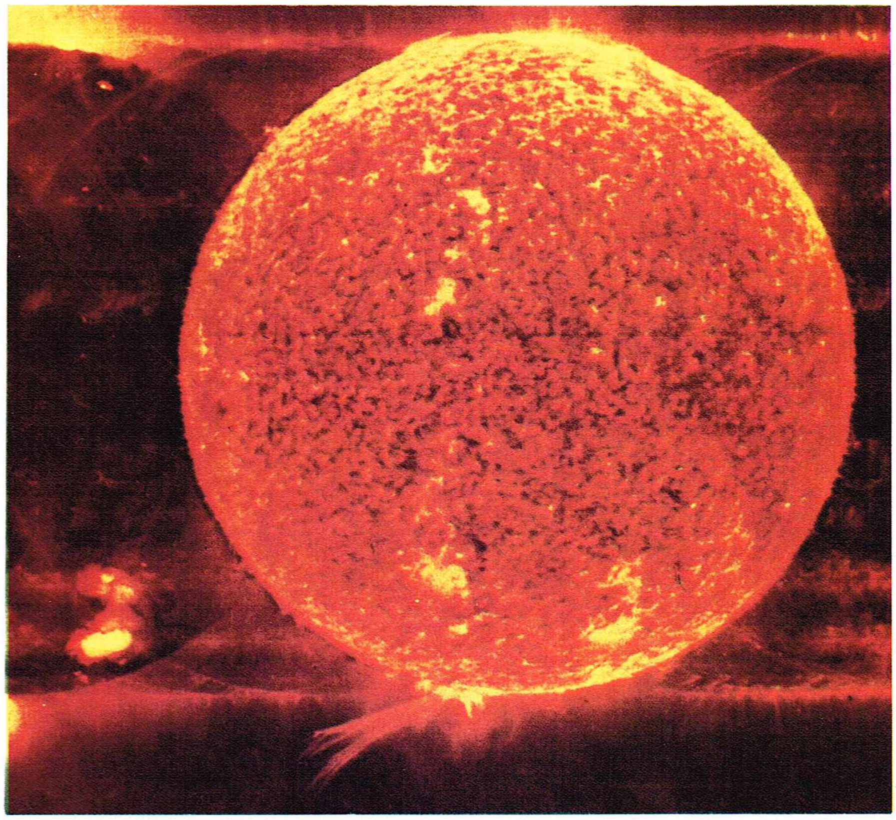

Parimage - Camera Press

(marais salants). En fait, l'homme s'est simplement contenté jusqu'à aujourd'hui de tirer parti des phénomènes naturels (pluies et vents) et d'utiliser ces capteurs élaborés d'énergie solaire que sont les végétaux. Ceci explique pourquoi, chez les peuples anciens, le Soleil, reconnu comme source de toute vie, était adoré lui-même comme dispensateur de chaleur et de lumière, quand il n'était pas personnifié pour faire l'objet d'un culte. Ce faisant, on n'utilise qu'une fraction très faible de l'énergie fournie par le Soleil (de l'ordre de quelques %).

On pourra s'étonner aujourd'hui de cette situation, d'autant plus que les qualités de cette forme d'énergie la rendent particulièrement attrayante. Elle est en effet :

— inépuisable, à l'échelle de l'humanité;
— gratuite, à la production et à la distribution;
— non polluante, car sans bruit, ni déchets;
— universelle, car distribuée partout.

Pourtant l'énergie solaire n'est pas en mesure de régler tous les problèmes liés à notre approvisionnement énergétique. Des tares congénitales pèsent sur elle :

— sa dilution, d'où la nécessité de disposer de grandes surfaces de collecte;
— son intermittence, due au cycle journalier, au rythme des saisons et à la nébulosité variable du ciel;
— les coûts des systèmes de captage, dont certains sont encore trop élevés pour permettre un développement rapide de ce type d'énergie.

Toutes ces difficultés de mise en œuvre de l'énergie solaire expliquent pourquoi l'utilisation de ce type d'énergie est restée confinée à des usages très ponctuels, ceux justement où elle pouvait rentrer en compétition techniquement et économiquement avec les autres formes d'énergie.

Comment l'augmentation brutale du prix de l'énergie et les perspectives, certes encore lointaines mais certaines, d'épuisement des réserves traditionnelles d'énergie, vont-elles modifier la place de l'énergie solaire dans l'approvisionnement énergétique du monde ?

On examinera tout d'abord le cas de l'énergie récupérée par des *effets solaires indirects*. Il s'agit essentiellement de l'énergie hydraulique, de l'énergie éolienne et de l'énergie thermique des mers. L'homme est ici confronté à des phénomènes naturels sur lesquels il n'a pas de prise. De nombreux pays néanmoins s'organisent pour tirer le meilleur parti de ces ressources.

Reste ensuite l'utilisation du *rayonnement solaire direct*. Ce rayonnement peut être transformé en chaleur, en électricité ou par photosynthèse en combustibles d'origine biologique (bois, déchets agricoles et une grande part des ordures ménagères). C'est dans cette utilisation directe du rayonnement solaire que les espoirs sont les plus grands. Des applications très diverses existent déjà aujourd'hui et l'on se préoccupe partout de les développer. Cette forme d'énergie est sans nul doute appelée à jouer un rôle important dans les décennies à venir comme énergie d'appoint.

L'énergie solaire ne peut être utilisée que dans un cycle diurne, le jour seulement. Se posent alors des problèmes de stockage pour assurer une production continue.

La réalisation de grandes centrales solaires, productrices d'électricité, reste encore du domaine de l'avant-projet. Aucune réalisation prototype à une échelle industrielle n'existe, et des efforts importants restent à faire pour démontrer les possibilités techniques et économiques de ces réalisations.

Notons enfin, avant de rentrer dans le détail des différentes possibilités d'utilisation de l'énergie solaire, que la notion traditionnelle de ressources ne s'applique pas ici, étant donné le caractère inépuisable de la source énergétique. On utilise quelquefois le terme de ressources renouvelables. En fait, ce type d'énergie nous est imposé, que l'on soit utilisateur ou non. Le seul problème alors est de savoir quelle est la fraction récupérable à des conditions technico-économiques satisfaisantes de la totalité de l'énergie ainsi dispensée.

Énergie solaire indirecte

Nous allons examiner successivement l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne et l'énergie thermique des mers. Les deux premières formes de cette énergie sont utilisées depuis des temps très anciens; l'énergie thermique des mers reste encore dans le domaine des projets.

Énergie hydraulique

Parmi toutes les sources d'énergie, l'énergie hydraulique a des caractères qui lui sont propres. Les usages d'une réserve d'eau sont multiples : un barrage peut servir à fabriquer de l'électricité, mais il peut servir aussi à contrôler les crues d'une rivière, à faciliter la navigation, à constituer des réserves pour l'irrigation ou la fourniture d'eau publique; il peut enfin permettre le développement d'activités de loisir par création d'un plan d'eau artificiel. D'autre part, contrairement à d'autres formes d'énergie, l'énergie hydraulique n'a pratiquement pas d'effets thermiques.

Principes de fonctionnement d'une usine hydraulique

Dans une telle usine, on transforme l'énergie potentielle de l'eau en énergie cinétique par son débit ou sa chute. Cette énergie cinétique est ensuite convertie en énergie mécanique par une turbine (anciens moulins), et enfin, dans les usines hydro-électriques, cette énergie est convertie en énergie électrique par un alternateur couplé à la turbine.

L'énergie totale est directement proportionnelle d'une part à la quantité d'eau P et d'autre part à la hauteur de chute H. L'énergie disponible E peut s'écrire théoriquement : $E = P \times H$. Pour reprendre les expressions données précédemment, P est ici la variable extensive, H la variable intensive. La même quantité d'énergie peut donc être obtenue par une petite quantité d'eau tombant d'une grande hauteur de chute (c'est le barrage de montagne avec des chutes s'exprimant en centaines de mètres) ou par une grande quantité d'eau tombant d'une faible hauteur (c'est l'usine « au fil de l'eau » où tout le débit du fleuve est turbiné sous quelques mètres de hauteur de chute).

Pour créer une usine hydraulique, il faut donc de l'eau, disponible en quantité suffisante, une hauteur de chute et des utilisateurs enfin à une distance pas trop grande, car on sait que l'énergie électrique se transporte sur une distance qui doit être inférieure à 1 000 km. On envisage aujourd'hui des solutions moins traditionnelles où l'électricité serait utilisée sur place pour fabriquer une nouvelle forme d'énergie (ammoniac par exemple) se transportant plus aisément.

E. Lessing - Magnum

▶ *Les usages d'une réserve d'eau sont multiples : un barrage peut servir à contrôler les crues d'une rivière, constituer des réserves pour l'irrigation ou la fourniture d'eau publique, ou fabriquer de l'électricité. Le modèle de la construction diffère selon qu'il s'agit d'un barrage de retenue ou de régulation (ci-contre), ou d'un barrage-réservoir comme le* Hoover Dam *qui barre le fleuve Colorado et forme le lac Mead.*

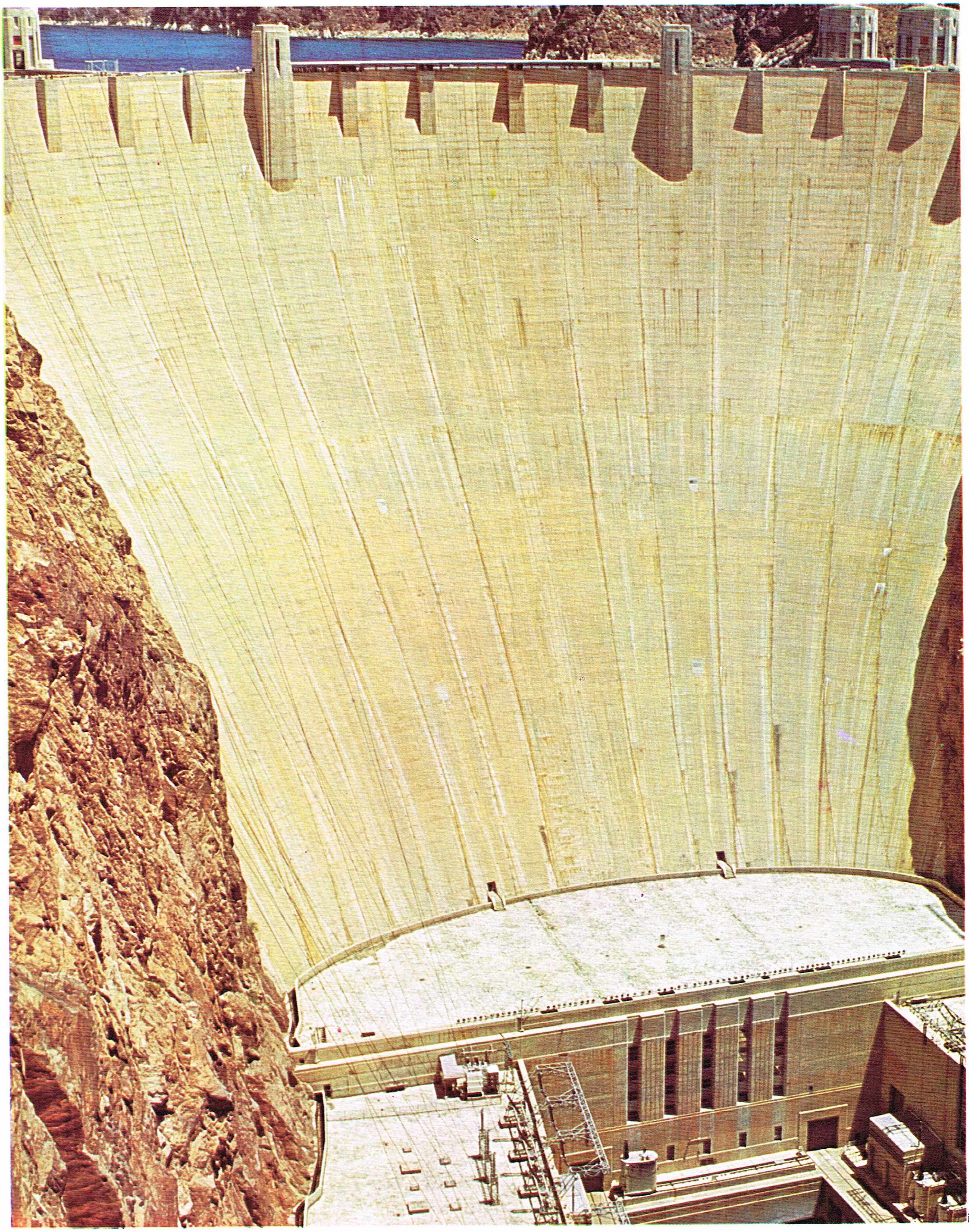

Titus

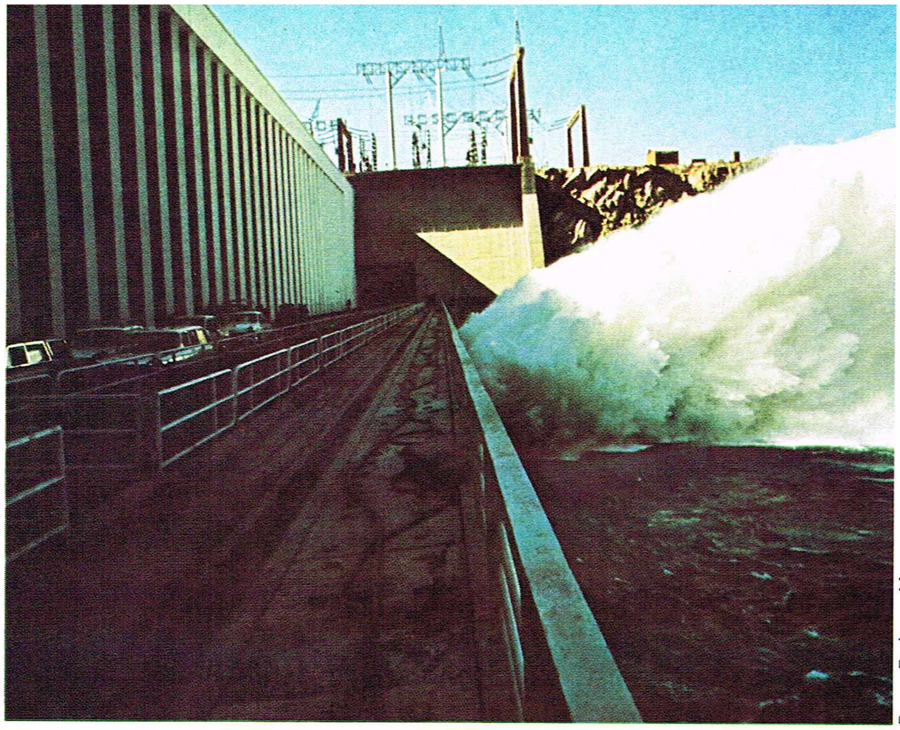

Bruno Barbey - Magnum

Les turbines tout d'abord ont un rendement de 85 à 90 %. Ensuite, la topographie n'est pas toujours favorable à l'établissement des barrages, et une autre partie du potentiel hydraulique est perdue. Enfin et surtout, les débits des cours d'eau sont non uniformes, ce qui empêche, pour des raisons économiques, leur captation totale. Si l'on veut utiliser les équipements 95 % du temps, on ne peut récupérer que 6 % de l'énergie totale. La puissance installée serait alors de 600 000 MW et la production de 4,6 $\times$ 10^6 GWh. Si l'on essaie de dimensionner les équipements pour le débit moyen, on peut récupérer alors 16 % de l'énergie totale, soit 12,5 $\times$ 10^6 GWh avec une puissance installée de 3 000 000 MW. Le facteur de charge des équipements serait alors de 50 % seulement.

Si l'on compare ces chiffres à ceux des réalisations actuelles, on notera qu'il est possible d'augmenter encore la participation de l'énergie hydraulique à la satisfaction de nos besoins. En effet, en 1974, la puissance mondiale installée était de 350 000 MW produisant une énergie de 1,3 $\times$ 10^6 GWh, soit 2 % de la consommation mondiale. Mais on est obligé de conclure que l'hydraulique, même en se développant sensiblement, ne peut jouer qu'un rôle mineur dans la production totale d'énergie.

▲ Barrage d'Assouan en Égypte; la productivité de ce barrage est inférieure à celle qui était attendue.

Évaluation de l'énergie récupérable

On estime à 400 000 km³ environ le volume d'eau des océans s'évaporant par an sous l'action de la chaleur du Soleil. Les 3/4 de ce volume d'eau reviennent dans les océans sous forme de pluie ; 100 000 km³ donc tombent sur la terre ferme sous forme de neige ou de pluie. Une grande partie de cette eau, 63 000 km³, est perdue par évaporation, ce qui laisse 37 000 km³ qui retournent vers les mers par les fleuves.

Si l'on estime à 800 m la hauteur moyenne des continents au-dessus du niveau de la mer, on calcule par application de $E = P \times H$ que l'énergie hydraulique annuelle totale des cours d'eau est environ de 80 $\times$ 10^6 GWh ou 290 $\times$ 10^6 TJ (térajoules). Cette quantité d'énergie n'est que légèrement supérieure à la consommation annuelle mondiale d'énergie actuelle, ce qui montre que cette source d'énergie inépuisable pourrait subvenir juste à nos besoins si on pouvait l'utiliser complètement. Ce n'est malheureusement pas le cas, et, pour différentes raisons, seule une faible fraction de ce potentiel hydraulique total peut être récupérée.

▼ Les chutes du Zambèze à Victoria. Les ressources hydrauliques se répartissent environ pour 30 % en Afrique, 30 % dans les deux Amériques, 33 % en Asie, 6 % en Europe occidentale et 1 % en Océanie.

Yan Berry : Magnum

Autres limitations du développement de l'énergie hydraulique

Nous avons vu qu'un certain nombre de facteurs techniques nous empêchaient de tirer parti au maximum du potentiel hydro-électrique. D'autres raisons vont encore limiter le développement de cette forme d'énergie.

Le facteur géographique tout d'abord : de nombreuses chutes se trouvent dans des régions isolées (Afrique, ou Amérique du Sud) où la production importante d'énergie électrique serait de peu d'utilité. Cette objection peut être levée, on l'a dit, par une conversion sur place de l'énergie électrique en une autre forme d'énergie, plus facilement transportable et utilisable pour les pays avoisinant le barrage.

L'autre facteur, qui sera sans doute plus limitatif, est celui de la protection de l'environnement. La création d'une retenue d'eau soulève en effet des problèmes très divers. Tout d'abord, les expropriations sont très mal supportées par les populations. Le public est d'autre part très sensibilisé aujourd'hui à la protection des sites. Le projet de barrer, par exemple, le fleuve Colorado, aux États-Unis, dans la région du Grand Canyon, a dû être abandonné, en raison de la volonté générale de conserver ce site unique au monde dans son état naturel.

De plus, le barrage des fleuves, qui paraît *a priori* plus facile, rencontre une autre difficulté. Très souvent, les meilleures terres agricoles sont situées dans les plaines alluvionnaires, justement le long des fleuves. La construction de barrages, même de faible hauteur de chute, inonde des terres de bonne qualité. Cette limitation jouera très certainement dans les régions très peuplées de l'est et du sud de l'Asie. Enfin d'autres raisons d'ordre écologique pèseront sur les futurs projets. L'opinion publique connaît bien à présent les effets surprenants et totalement imprévus du barrage d'Assouan en Égypte. La légendaire fertilité des rives du Nil a disparu avec la régularisation du cours du fleuve. Le limon bloqué dans le barrage doit être aujourd'hui compensé par des engrais chimiques. Une autre conséquence désastreuse de la stérilisation de l'eau qui s'écoule du barrage est la disparition de la pêche dans le delta du Nil. La régularisation du fleuve a causé la prolifération de parasites qui sont à l'origine d'une grave maladie (schistosomiase) dont les ravages se sont amplifiés depuis la mise en service du barrage. Enfin la productivité du barrage est inférieure à celle qui était attendue : le lac Nasser au fond poreux ne s'est pas étanché naturellement comme on l'espérait, et l'évaporation est beaucoup plus forte que prévue.

En conclusion, la création de grandes usines hydrauliques est reconnue aujourd'hui comme une entreprise difficile, dont les conséquences écologiques peuvent être très graves. Pour cette raison, certains pays comme la Suède ont choisi de renoncer définitivement à l'énergie hydraulique. De nouvelles usines seront très certainement construites dans le monde d'ici à l'an 2000. La production d'énergie hydraulique augmentera en valeur absolue, mais il y a tout lieu de penser que sa participation en valeur relative décroîtra sensiblement.

Énergie éolienne

Le vent a toujours été considéré dans le passé comme une source de puissance, sur terre comme sur mer. Mais il a rapidement été éliminé à la fin du siècle dernier pour la propulsion des navires et la fourniture d'électricité, d'abord par le charbon, ensuite par le pétrole et pour tous les usages directs par l'électricité elle-même.

Provenant des effets thermiques du rayonnement solaire direct, l'énergie éolienne fait donc partie des énergies aux sources inépuisables : le vent soufflera aussi longtemps que le Soleil brillera et que la Terre disposera d'une atmosphère. Cette forme d'énergie a donc les mêmes avantages que l'énergie solaire, mais malheureusement aussi les mêmes défauts : l'instabilité et la dilution. Elle est non seulement dispersée sur toute la surface de la terre mais également dans toutes les couches de l'atmosphère. De plus, les vents soufflent plus régulièrement dans le haut de l'atmosphère. La captation de toute l'énergie éolienne exigerait des surfaces actives en quantités considérables.

Description d'une machine éolienne

Les éoliennes se composent généralement d'une structure qui supporte la machine proprement dite. Celle-ci comprend une voilure, à pales fixes ou variables, montée sur un arbre horizontal qui est couplé au système récepteur. Le récepteur est en général une génératrice électrique; on peut également actionner directement un récepteur mécanique comme une pompe à eau.

La puissance de ces machines peut varier entre quelques dizaines de watts jusqu'à plusieurs centaines de kilowatts. Les problèmes techniques, tels que le choix de la tension (alternative ou continue), la régulation de la vitesse, la fiabilité des composants mécaniques et électriques, ne sont pas encore parfaitement résolus, ainsi que le problème de stockage de l'énergie produite en dehors des périodes de consommation.

Parmi les grosses machines construites, une des plus connues est celle de « Grandpa's KNDB » dans l'État du Vermont aux États-Unis. Le pylône support avait une hauteur de 30 m; le diamètre de l'hélice bipale était de 53 m. Cette machine, d'une puissance de 1 250 kW, a fonctionné de façon satisfaisante de 1941 à 1945. Pour alimenter en électricité une maison individuelle, il faudrait une machine d'une puissance de 5 à 10 kW, ce qui représente une hélice d'une dizaine de mètres de diamètre.

Alain Nogués - Sygma

▲ *L'énergie éolienne fait partie des énergies aux sources inépuisables : le vent soufflera aussi longtemps que le Soleil brillera et que la Terre disposera d'une atmosphère.*

Évaluation de l'énergie récupérable

On évalue la puissance du vent dans toute l'atmosphère à 300×10^{12} MW. L'énergie dissipée correspondante est de $2\,600 \times 10^{12}$ GWh/an. Seulement 1/4 de cette puissance est développée au-dessus des terres, ce qui est tout à fait considérable. Son exploitation totale couvrirait plus de 100 fois nos besoins actuels. Malheureusement cette énergie est pratiquement inaccessible, et la fraction utilisable dans des conditions techniques et économiques raisonnables serait de l'ordre de 1 à 20 millions de MW.

Développement de l'énergie éolienne

Même si certains projets de grande envergure ont été étudiés (300 000 éoliennes de 3 000 kW chacune couvrant les grandes plaines des États-Unis par exemple), cette forme d'énergie ne paraît pas capable de fournir les grosses quantités d'énergie dont les pays industrialisés ont besoin. En revanche, les machines éoliennes de petites et moyennes puissances peuvent jouer un rôle notable dans la satisfaction des besoins énergétiques de

▼ *Les machines éoliennes de petites et moyennes puissances peuvent jouer un rôle notable dans la satisfaction des besoins énergétiques de certains pays : ici, un « champ » d'éoliennes aux environs de Palma (Majorque).*

Photo Marc Garanger

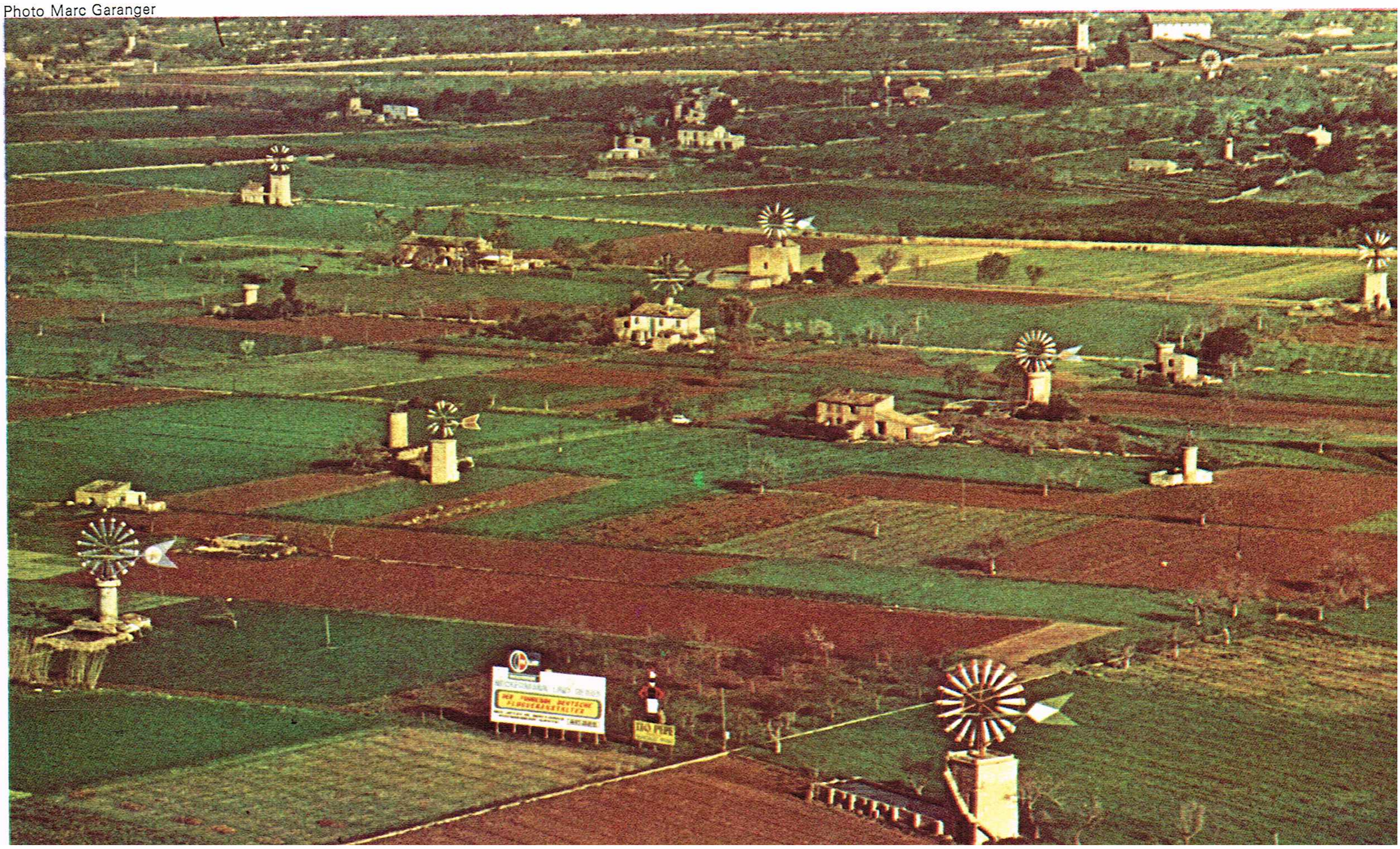

certains pays en voie de développement. Les éoliennes sont en effet parfaitement adaptées à la fourniture d'énergie mécanique ou électrique dans des régions isolées où la demande est faible. Un certain nombre d'habitations individuelles dans des pays comme la France pourraient être équipées de machines éoliennes. Le coût de ces machines est encore cependant trop élevé pour que l'on assiste à une croissance rapide de l'énergie produite à partir du vent.

Dans la voie des petites et moyennes machines, des études sont en cours dans de nombreux pays. De nouvelles solutions pour le stockage sont examinées. On s'intéresse également à la production d'électricité par des aérogénérateurs raccordés au réseau de distribution électrique, ce qui élimine le problème du stockage, crucial dans l'application individuelle.

Source abondante et inépuisable, l'énergie éolienne en raison des difficultés de captation restera selon toute vraisemblance globalement une énergie d'appoint; ce qui ne signifie pas que cette forme d'énergie soit condamnée à disparaître. Bien au contraire, on peut penser que l'énergie éolienne peut apporter une solution élégante et économique à la satisfaction de certains besoins énergétiques.

Avant de clore ce paragraphe sur l'énergie éolienne, il faut mentionner une autre possibilité de captage de cette forme d'énergie par le mouvement des vagues. Cette énergie de la houle, due au vent, ne doit pas être confondue avec l'énergie thermique des océans qui sera examinée ci-après. Certains spécialistes pensent à juste raison qu'il existe dans le mouvement de la houle des ressources qui méritent de retenir l'attention. Des projets ambitieux ont été envisagés. Compte tenu cependant des résultats décevants de quelques essais, les réalisateurs semblent découragés et pour l'instant on ne peut être que très réservé sur l'avenir de cette forme d'énergie.

Énergie thermique des océans

Une partie importante du rayonnement solaire est absorbée par les océans qui sont des capteurs naturels remarquables par leur taille. L'énergie solaire est alors transformée en chaleur, et des savants et des chercheurs se sont demandés comment cette énergie stockée dans les couches superficielles des océans pouvait être récupérée.

La France a joué un rôle de pionnier, puisque c'est le physicien J. d'Arsonval qui, en 1881, émit l'idée originale de récupérer l'énergie thermique des océans. En 1919, G. Claude construisit la première installation du genre à Cuba. D'une puissance très faible, cette réalisation avait échoué en raison de la mauvaise tenue mécanique des tuyauteries immergées en mer profonde. L'E. D. F. a montré que ce problème pouvait être résolu en relançant, en 1956, deux essais en Côte-d'Ivoire. Les études avaient été arrêtées à cette époque en raison de l'arrivée de l'énergie nucléaire que l'on entrevoyait comme imminente.

De nouvelles études de réalisation sont lancées aujourd'hui dans certains pays, en particulier aux États-Unis.

Description d'une « future » usine

L'eau superficielle des océans est chauffée par le Soleil et se déplace vers le pôle où elle est refroidie. Une partie de cette eau revient superficiellement en créant des courants froids, mais l'autre partie revient à contre-courant en dessous du courant chaud. Le *Gulf Stream* constitue un bon exemple de ce phénomène avec son gradient thermique vertical de 20 °C sur une hauteur de 1 000 m. Sur ce gradient thermique, il est possible de bâtir un cycle thermodynamique en utilisant bien évidemment un fluide de travail dont les caractéristiques d'ébullition soient compatibles avec les températures du

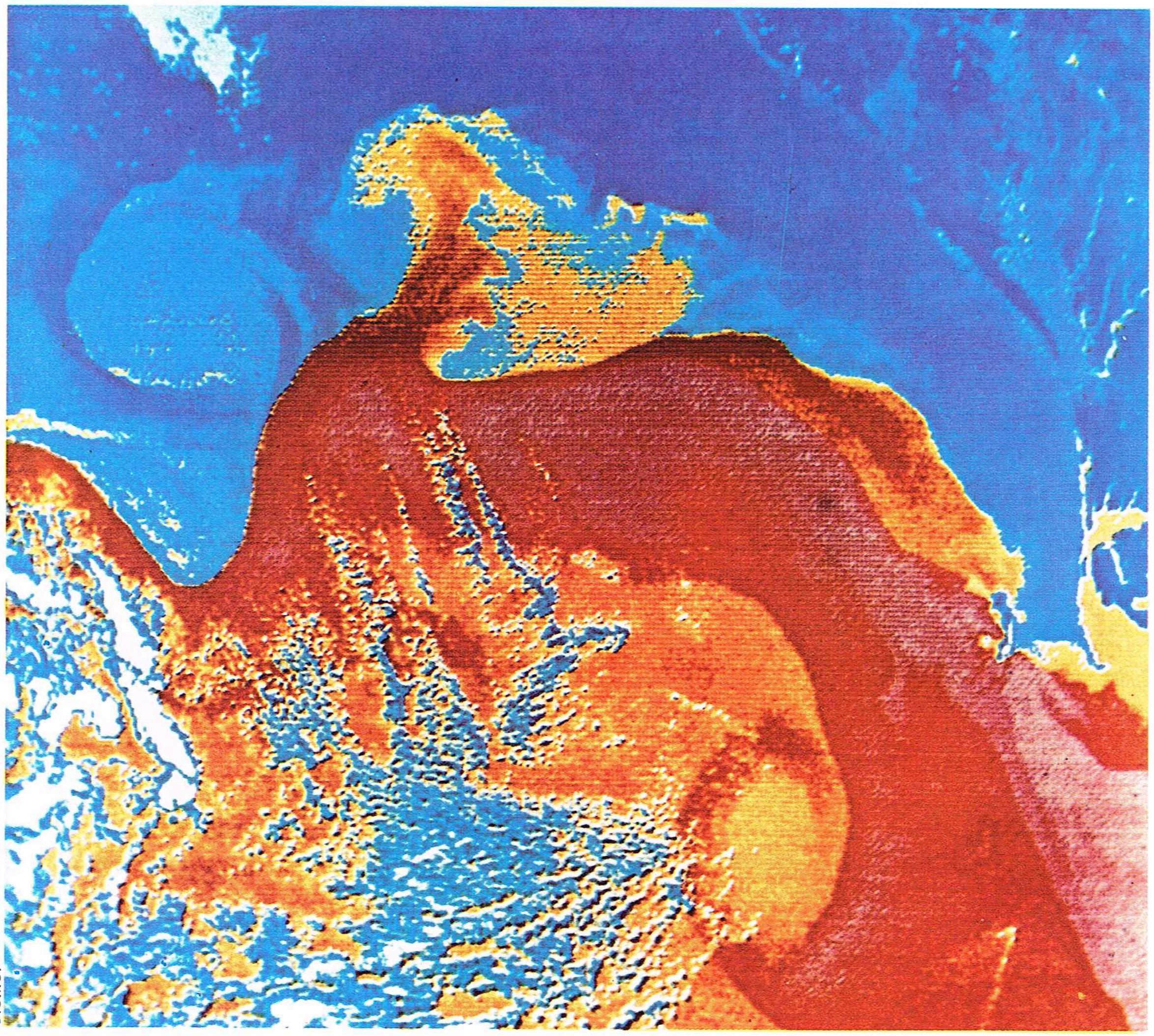

U.S.I.S.

▶ *Photographiés d'un satellite, les courants chauds et froids du Gulf Stream au large de la Floride (en haut, à gauche). On observera que les eaux très chaudes apparaissent en violet, en rouge et en différentes nuances d'orangé; les eaux plus froides en bleu, et les eaux très froides en blanc.*

cycle. Le fluide est alors vaporisé dans un échangeur placé dans la source chaude, la vapeur est alors détendue dans une turbine et le fluide retransformé en liquide par l'eau plus froide des profondeurs (*fig.* 2).

Les fluides utilisables pour ce type de cycle sont l'ammoniac, le propane ou le fréon. Une centrale fonctionnant suivant ce principe serait gigantesque, étant donné le rendement thermodynamique très faible du cycle.

Évaluation de l'énergie récupérable

On a estimé la puissance qui pourrait être extraite du *Gulf Stream* au large de la Floride. Le débit est de 2 200 km^3/jour avec un gradient vertical de température de 20 °C. Ces caractéristiques représentent une puissance de 21 millions de MW, soit une production annuelle de 180 millions de GWh. Cette source énergétique est considérable, puisqu'elle représente 30 fois la demande mondiale actuelle. D'autres sites pourraient être trouvés qui multiplieraient par 10 environ les chiffres ci-dessus. Pour différentes raisons, sites non favorables, difficultés de transport de l'énergie, on estime qu'à peine 1 % de cette ressource est récupérable.

Développement de l'énergie thermique des océans

L'utilisation de cette forme d'énergie est à l'étude. Certains pensent améliorer le rendement du cycle en utilisant le rejet d'eau chaude de centrales nucléaires pour améliorer la température haute, et des icebergs remorqués à proximité de l'usine pour abaisser la température de la source froide. Les influences écologiques de telles usines qui réchaufferaient les eaux froides du fond des mers restent encore à apprécier.

La difficulté de transport de l'énergie électrique pourrait être résolue par conversion sur place de l'énergie électrique produite. Il serait intéressant par exemple de fabriquer de l'eau douce ou de l'hydrogène par électrolyse de l'eau.

En conclusion, nous sommes encore devant une source d'énergie renouvelable mais dont les difficultés de captation rendent l'exploitation très hypothétique. On peut penser qu'aucun projet de grande envergure ne verra le jour avant l'an 2000.

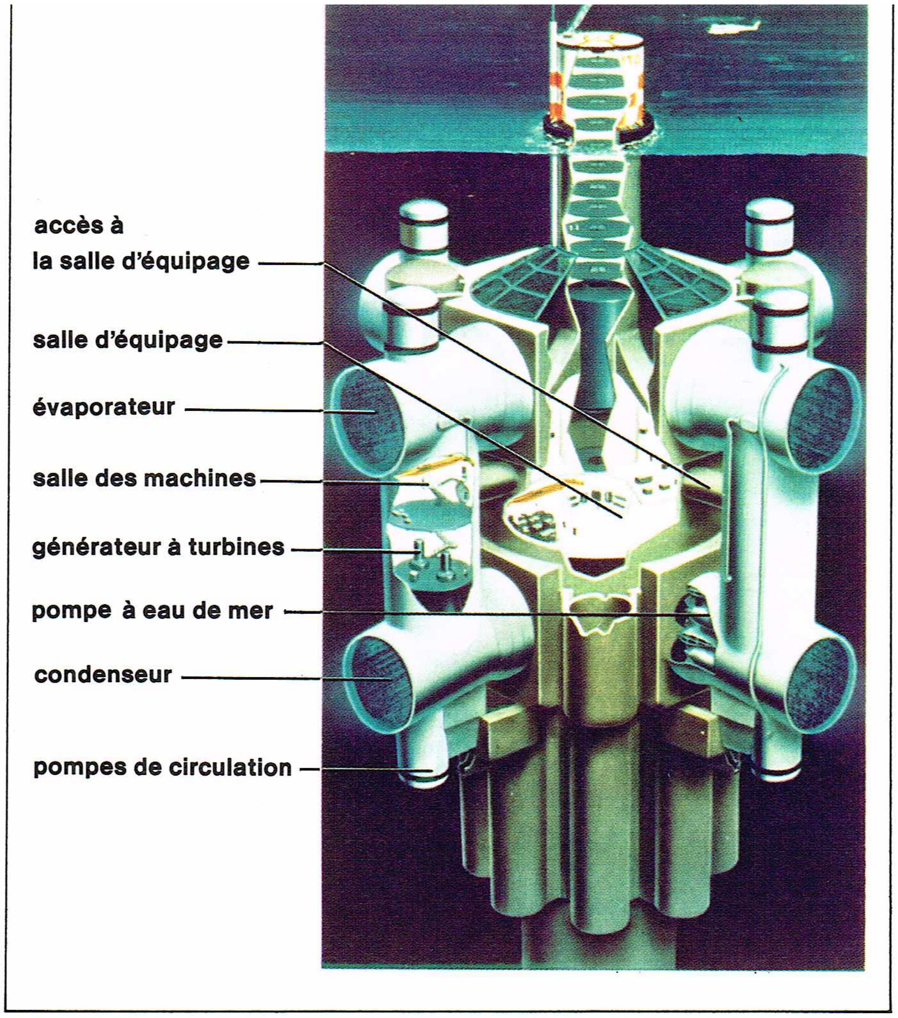

U.S.I.S.

▲ *Maquette d'un générateur conçu par Lockheed pour produire de l'énergie électrique à partir de l'énergie thermique des océans. Cette plate-forme de 300 000 tonnes et d'une hauteur équivalente à un immeuble de 150 étages ne dépasserait la surface de l'eau que d'une vingtaine de mètres et pourrait alimenter en électricité une ville de 100 000 habitants.*

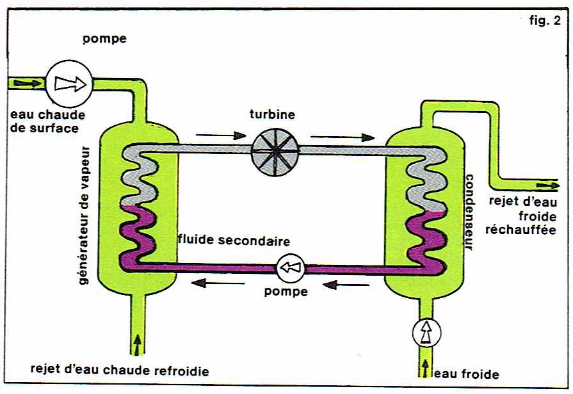

Richard Colin

◀ *Figure 2 : schéma d'une usine thermo-électrique utilisant l'énergie thermique des océans.*

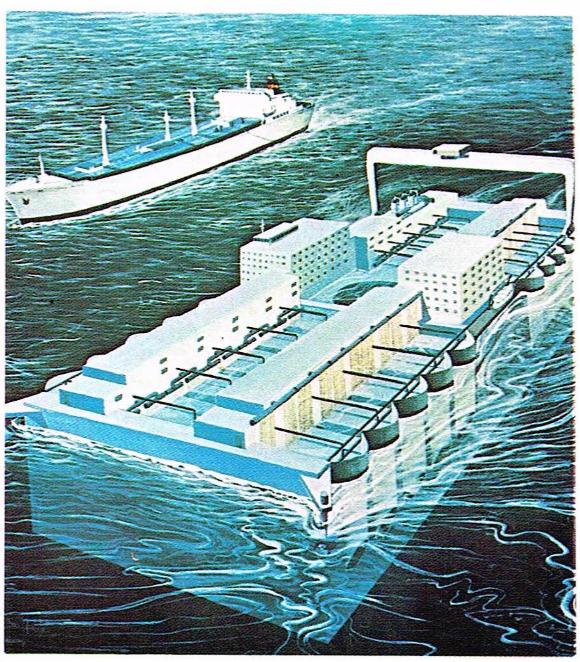

U.S.I.S.

◀ *Représentation d'une usine de fabrication d'ammoniac à partir de l'énergie des océans qui pourrait couvrir plus de 40 % des besoins en engrais de la production alimentaire des États-Unis. Le principe est fondé sur l'électrolyse des eaux tropicales, inépuisables sources d'hydrogène, celui-ci étant ensuite recombiné à l'azote atmosphérique pour obtenir de l'ammoniac. Les premières usines de ce type pourraient entrer en service en 1986.*

Énergie solaire directe

Le rayonnement solaire peut être utilisé de trois façons différentes si l'on considère le type de conversion d'énergie associé au captage de ce rayonnement. On peut en effet convertir le rayonnement solaire en énergie thermique, en énergie électrique ou en énergie chimique.

L'énergie disponible avant conversion est en un lieu donné toujours la même. Rappelons qu'une surface de 100 m^2 reçoit en moyenne 500 000 kcal pour une journée d'ensoleillement de 8 h. Il faudrait pour obtenir cette même chaleur brûler 80 kg de charbon ou 55 l d'essence. Après conversion, l'énergie disponible se trouve plus ou moins réduite selon le rendement de l'opération. Mais ce n'est pas ici la recherche d'un bon rendement qui fixe la conversion à utiliser, mais plutôt l'utilisation que l'on veut faire de cette énergie ou les possibilités de la technologie existante. Chaque fois que ce sera possible, on évitera les conversions multiples qui gaspillent l'énergie pour choisir une conversion simple : on transformera par exemple le rayonnement solaire en chaleur si l'on veut faire du chauffage.

Les trois types de conversion vont donc être successivement examinés.

Conversion en énergie thermique

La conversion se fait dans un capteur appelé aussi « insolateur ». Tous les corps exposés au rayonnement solaire absorbent, en fonction de leur couleur, plus ou moins de ce rayonnement et le transforment en chaleur. Cette énergie thermique est ensuite restituée à l'environnement selon les mécanismes habituels de transmission de la chaleur : conduction, convection ou rayonnement.

Tous les insolateurs, quel que soit leur type, ont un meilleur rendement s'ils utilisent l' « effet de serre ». La lumière piégée dans le collecteur est ainsi utilisée au maximum. De nombreux types d'insolateurs ont été imaginés, et il n'est pas possible de les décrire tous. On

▶ *L'énergie solaire directe peut être convertie en trois types d'énergie : thermique, électrique et chimique. Le captage du rayonnement dans le cas d'une conversion en énergie thermique se fait dans des* insolateurs *dont on voit ici une installation.*

P. Vanthey - Sygma

peut distinguer deux grandes familles : les insolateurs sans effet de concentration qui conviennent aux applications à basse température, et les insolateurs avec effet de concentration qui permettent les applications à haute température.

Insolateurs sans effet de concentration

Ces appareils sont le plus souvent de forme plane. Ils sont constitués d'une surface de couleur sombre destinée à être exposée au soleil derrière un vitrage qui permet l'effet de serre. La chaleur captée par l'insolateur est transmise à un fluide par convection, ou à un solide par conduction. Les appareils de ce type permettent d'atteindre sans difficultés particulières des températures maximales de 80 à 85 °C. Les applications déjà envisagées ou réalisées sont les suivantes :

— *Chauffe-eau à usages domestiques ou industriels*

Ce type d'appareil s'est développé très rapidement dans les pays à fort ensoleillement (Israël, Japon en particulier). Dans des pays tempérés comme la France, le rayonnement solaire peut ne pas être suffisant pendant une partie de l'année, et il est nécessaire de recourir à un chauffage mixte électro-solaire. Ces appareils permettent dans leurs applications industrielles de réchauffer d'autres fluides que l'eau.

— *Distillateur*

D'un principe identique à celui du chauffe-eau, le distillateur permet par évaporation et condensation de recueillir un fluide purifié : eau distillée à partir d'eau saumâtre par exemple.

— *Sécheur*

Des études de séchage solaire sont en cours dans certains pays africains. Les applications visent le séchage de produits agricoles (avec déshydratation partielle), de la viande, des briques, etc.

— *Chauffage des bâtiments*

Le bâtiment est équipé d'insolateurs en face sud ou en toiture. Le chauffage peut être assuré par rayonnement interne de parois ou par circulation d'air chaud ou d'eau chaude. Un chauffage d'appoint de type électrique doit être prévu. La complémentarité de l'énergie solaire et de l'énergie électrique dans l'habitat est évidente, car elles demandent toutes deux une très bonne isolation.

De nombreux prototypes de maisons solaires ont été construits en France et à l'étranger. Ces expériences ont montré que l'énergie solaire pouvait représenter pour le chauffage d'une maison de taille moyenne jusqu'aux 3/4 de l'énergie nécessaire au maintien d'une température de 20 °C. Pour obtenir de tels résultats, un bon isolement de la structure d'habitation est nécessaire. Le coût de la construction est donc supérieur, et les insolateurs, qui ne sont pas fabriqués en grande série, sont onéreux, ce qui augmente encore le coût d'investissement. Celui-ci doit être amorti en 3 ou 4 ans, et on peut penser que des programmes quantitatifs de construction solaire seront lancés dans différents pays dans un proche avenir.

Insolateurs avec effet de concentration

La concentration du rayonnement est effectuée à l'aide de miroirs. Les matériaux utilisés peuvent être divers : le verre argenté ou aluminé, l'aluminium, etc. Les formes sont paraboloïques pour concentrer le rayonnement en un point ou cylindro-paraboloïques pour le concentrer sur un collecteur linéaire.

Cet effet de concentration permet d'atteindre des températures très élevées. En revanche, il est nécessaire de bien orienter les miroirs en fonction du déplacement du Soleil, et des dispositifs de réglage, complexes et coûteux s'ils sont automatiques, doivent être prévus. Les applications sont les suivantes.

— *Cuisinière*

Ces appareils de construction simple munis d'un ou de plusieurs miroirs permettent d'atteindre des températures de 200 à 300 °C. Ils sont utilisés en Afrique pour la cuisson des aliments.

— *Réfrigérateur*

Le niveau thermique élevé, du fait de la concentration, permet de faire fonctionner tous les systèmes de réfrigération habituels pour produire de la glace ou faire du conditionnement.

— *Fours solaires*

On trouve des réalisations de tailles très diverses qui permettent de disposer, à des fins généralement scientifiques (on peut chauffer un échantillon sans le polluer), de températures allant de quelques centaines de degrés à plus de 4 000 °C.

De Sazo - Rapho

— *Moteur thermique*

La voie thermique peut être utilisée pour fabriquer de l'énergie mécanique, et éventuellement ensuite de l'énergie électrique en accouplant un générateur au moteur thermique.

Des réalisations intéressantes utilisant ce principe sont déjà en service dans certains pays d'Afrique et d'Amérique latine. Il s'agit généralement de pompes à pistons qui sont utilisées pour relever l'eau d'un puits ou d'un forage dans une nappe. Un cycle thermique utilisant un fluide convenable (butane par exemple) est établi entre une source chaude constituée par les insolateurs et une source froide constituée généralement par l'eau de la nappe que l'on veut pomper (*fig.* 3).

fig. 3

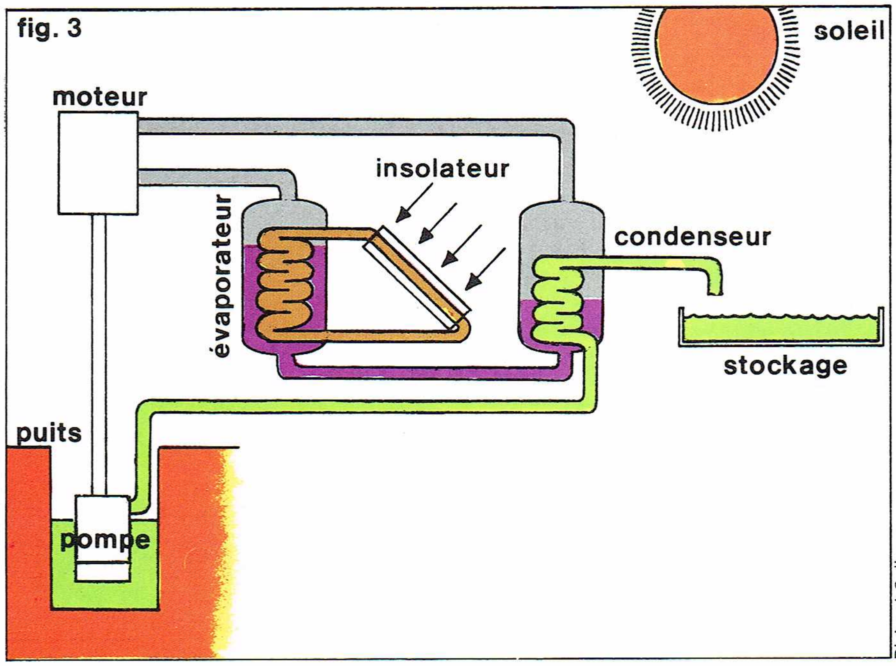

Richard Colin

▲ ***A gauche, une des premières maisons à chauffage solaire, présentée au Village de France de la Foire de Paris (1973) et dessinée par l'architecte français J. Michel.***

A droite, figure 3 : schéma de principe d'une installation de pompage solaire ; la source froide est constituée par l'eau pompée.

▼ ***Le four solaire d'Odeillo (Pyrénées, France).***

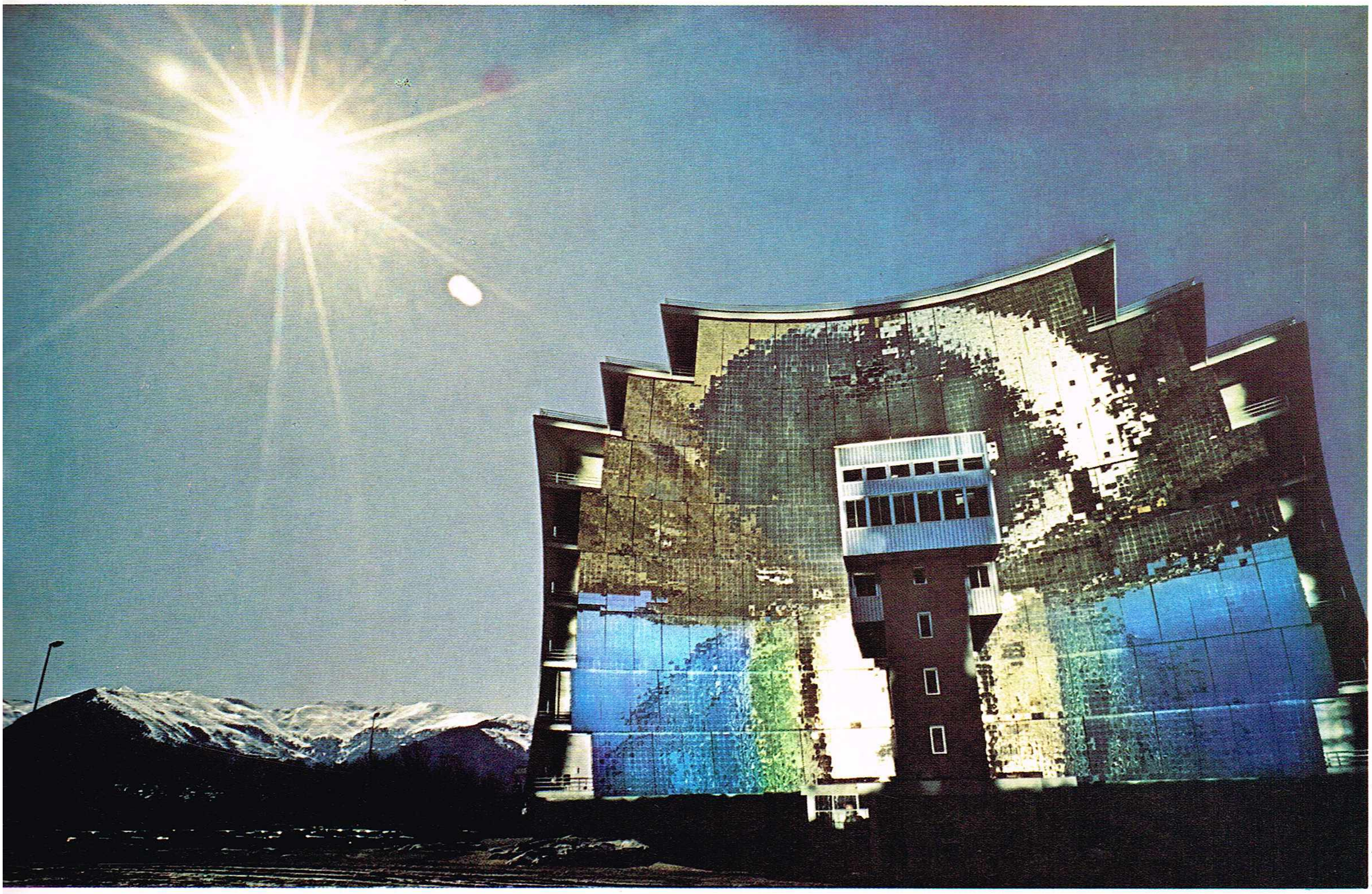

Martine Franck - Viva

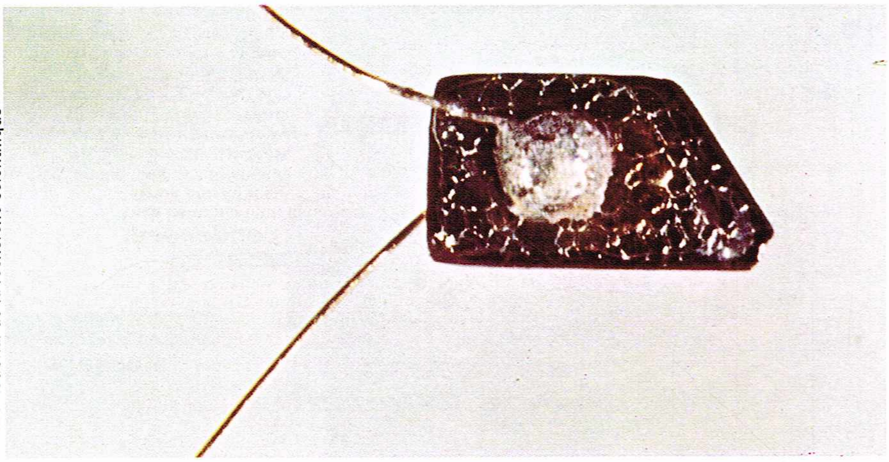

Laboratoire de physique du solide de Bellevue - Centre national de la recherche scientifique

On peut par ce moyen fabriquer de l'électricité, mais aucune installation d'envergure de ce type n'a été jusqu'à ce jour réalisée. Des projets sont en cours d'étude, mais la fiabilité technique et l'économie de telles réalisations comportent encore trop d'incertitudes pour que la décision de les construire soit prise.

L'énergie solaire étant intermittente, on sait qu'à tout système de captation, il faut associer une fonction de stockage pour satisfaire la demande de consommation en dehors des périodes de production. Dans l'utilisation thermique du rayonnement solaire, cette fonction « stockage » est en général facilement réalisée. L'eau chaude peut être conservée dans un ballon, l'eau pompée dans un bassin, le froid produit sous forme de glace, etc.

Conversion en énergie électrique

La cellule photovoltaïque ou photopile est une sorte de pile électrique qui ne produit du courant électrique que lorsqu'elle reçoit de la lumière et qui en fournit d'autant plus que l'éclairement est vif. C'est le mécanisme de l'effet photo-électrique qui est utilisé dans cet appareil.

Différents types de cellules ont été imaginés. Ces cellules sont l'objet de nombreuses applications : notamment, pour la mesure d'un flux lumineux dans les posemètres et comme détecteur de présence dans de nombreux usages industriels. Utilisées pour capter l'énergie solaire, les photopiles vont transformer le rayonnement reçu en énergie électrique. Elles ont été utilisées avec succès sur de nombreux satellites artificiels pour fournir le courant d'alimentation des appareils de bord.

Il est difficile d'extrapoler une centrale terrestre à partir de ces appareils qui ont été développés en vue d'applications stratégiques et pour lesquels les caractéristiques de rendement, de poids et de longévité primaient les considérations de coût. La mise au point de photopiles terrestres qui résistent en particulier aux agressions atmosphériques qui n'existent pas dans l'espace va demander encore des études. On pense néanmoins qu'il sera possible de construire des photopiles satisfaisantes à un coût raisonnable dans un délai de 5 ans. L'objectif est ambitieux, car c'est une réduction du prix actuel d'un facteur supérieur à 100 qu'il faut réaliser pour rendre l'énergie solaire compétitive avec les autres formes actuelles d'énergie.

Le rendement de ces photopiles est actuellement de 10 % environ et sera amélioré dans les années qui viennent (le rendement théorique est voisin de 25 %). La surface de 1 m^2, recevant en moyenne sous nos latitudes 200 W de rayonnement solaire, peut restituer si elle est recouverte de photopiles d'un rendement de 20 % une puissance de 40 W. C'est donc au moins une surface de 25 m^2 qui serait nécessaire pour produire 1 kW, et une centrale de 100 MW exigerait une surface minimale de 2,5 km^2.

Les surfaces neutralisées au sol par une centrale solaire sont relativement importantes, et le choix de sites propres à implanter une centrale solaire importante pourrait se révéler difficile. Pour éviter ces difficultés et profiter de plus du rayonnement solaire maximal qui existe au-dessus de l'atmosphère de la Terre, une firme américaine a imaginé de capter l'énergie du Soleil à l'aide d'une station orbitale. Le projet est d'envergure, et son exécution demande une maîtrise des techniques spatiales qui est encore loin d'être atteinte. Jugeons-en plutôt ! La surface de captage serait constituée de

▼ *Le satellite météorologique soviétique* **Météor** *« déployant » ses panneaux solaires constitués de petites cellules de silicium de 1 cm^2 de surface, et destinés, lors des missions de longue durée, à fournir, par conversion, l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement de ses appareils électroniques.*

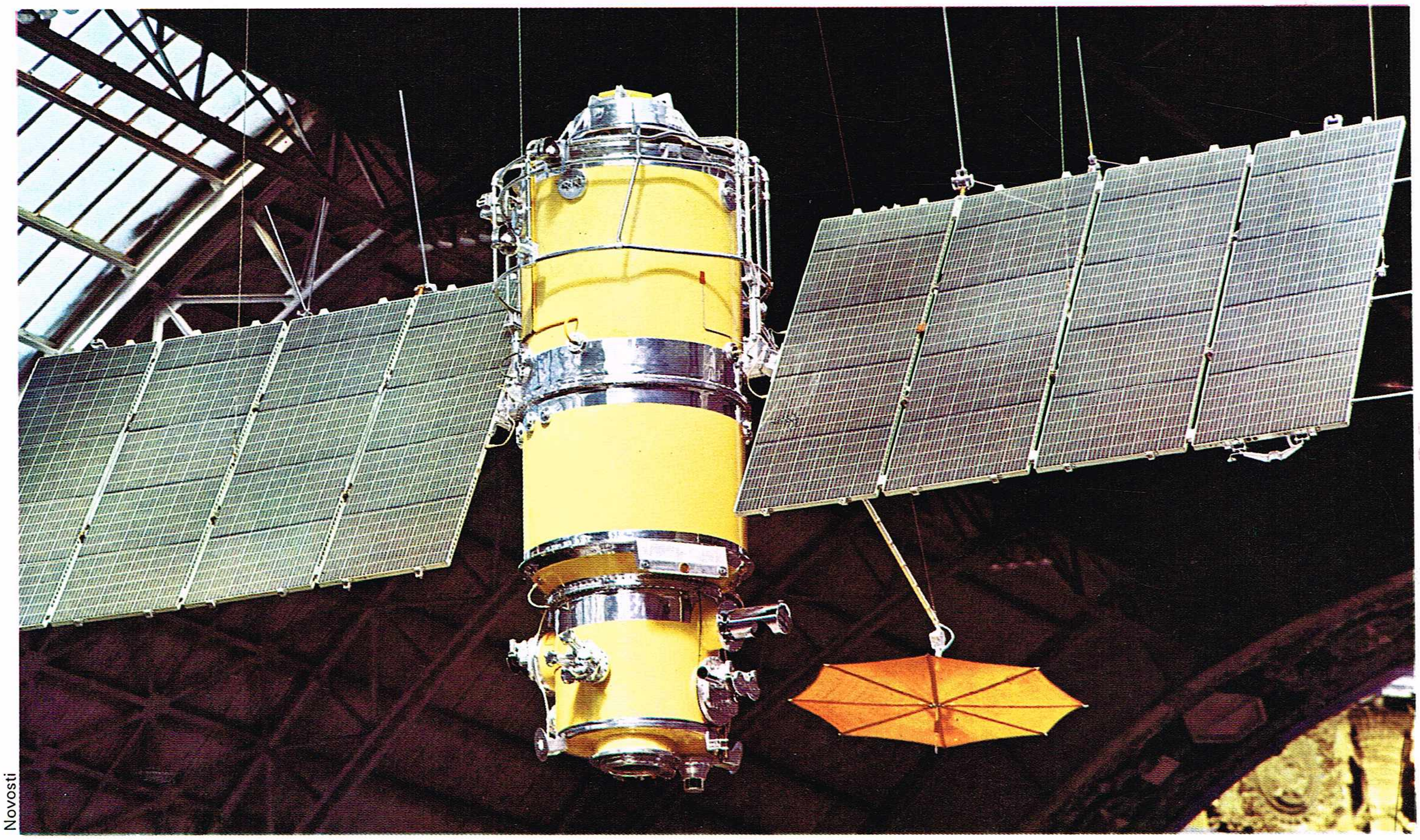

Novosti

2 carrés de 5 km de côté, soit une superficie totale de 50 km². Cette station serait mise sur orbite à 36 000 km de la Terre, ce qui en ferait un satellite stationnaire d'un poids de 10 000 t ; il exigerait pour son montage 500 vols de navette. La transmission de la puissance électrique se ferait au travers de l'atmosphère par micro-ondes de 2 500 mégahertz, peu absorbées. Il s'agit du projet Glaser de la firme Arthur D. Little.

Conversion en énergie chimique

Depuis quelque temps, on fonde des espoirs sur la conversion de l'énergie solaire en énergie chimique, ou photochimie. La photosynthèse est un des processus photochimiques essentiels pour le maintien de la vie végétale. C'est pourquoi on peut dire que les végétaux sont les premiers capteurs solaires. Le gaz carbonique et l'eau sont transformés en nouvelles cellules végétales (hydrates de carbone) et en oxygène par action du rayonnement solaire absorbé par les pigments des cellules vertes de la plante. L'énergie solaire est captée, puis transformée en énergie chimique stockable.

La photosynthèse joue un rôle primordial dans l'agriculture, mais les végétaux peuvent être produits également à des fins énergétiques. Il ne faut pas oublier que le bois a été pendant des millions d'années le seul combustible disponible. Il est encore très utilisé aujourd'hui. Si les combustibles d'origine végétale ne représentent aujourd'hui que 2 à 3 % de la consommation mondiale d'énergie, près de la moitié de la population mondiale dépend uniquement de ces ressources.

La croissance des végétaux est un phénomène très lent, et la plupart des recherches actuelles visent à accélérer le processus de photosynthèse. Les algues à croissance rapide sont particulièrement étudiées. Après séchage, effectué dans des fours solaires, on pourrait disposer de combustibles solides. Au lieu de sécher, on peut aussi par fermentation en extraire du gaz méthane (gaz des marais). D'autres possibilités existent, comme celle de fabriquer de l'alcool, qui est un excellent combustible liquide.

La conversion de l'énergie solaire en énergie chimique par l'intermédiaire des végétaux, appelée conversion bio-énergétique, paraît donc susceptible de se renouveler. Est-elle adaptée à une production massive d'énergie dans des conditions acceptables, en particulier à un coût compétitif ? La réponse à cette question doit être nuancée ; elle est sans doute positive si ce type de conversion est utilisé dans des pays en voie de développement ne disposant pas de ressources énergétiques traditionnelles.

Développement de l'énergie solaire

Les utilisations thermiques de l'énergie solaire immédiatement applicables devraient connaître dans l'habitat un développement important d'ici à la fin du siècle. On pense que 30 % à 35 % de l'énergie domestique pourraient être satisfaits en France par l'énergie solaire ; l'énergie domestique représentant 25 % de la consommation d'énergie nationale, le « solaire » pourrait assurer 10 % de notre consommation en l'an 2000. C'est un objectif réaliste mais néanmoins ambitieux, car il suppose des investissements importants et donc la mise en œuvre d'une politique délibérée.

Les applications électriques et bio-énergétiques ne connaîtront pas dans des pays comme la France de développements importants d'ici à la fin du siècle. Les procédés correspondants auraient en effet du mal à supplanter les procédés existants. La question se pose tout à fait différemment dans les pays du tiers monde qui ne disposent pas de ressources énergétiques, et ce sont les plus nombreux. Le financement de leur croissance est très préoccupant, car ils ne peuvent pas se procurer facilement les combustibles dont ils ont besoin, étant donné leurs coûts élevés payables en devises. Il apparaît donc que, pour ces pays, généralement très bien ensoleillés, l'énergie solaire constitue une source d'énergie très prometteuse.

Universelle, inépuisable et gratuite, l'énergie solaire, en dépit des difficultés liées à sa mise en œuvre, devrait s'imposer assez rapidement dans de nombreux pays en voie de développement.

Au-delà de l'an 2000, l'importance que prendra l'énergie solaire dans le monde est difficile à estimer aujourd'hui, car elle dépendra des percées technologiques dans les domaines de la conversion photo-électrique et de la conversion bio-énergétique (photosynthèse).

◄ Page ci-contre, en haut, utilisées pour capter l'énergie solaire, les photopiles transforment le rayonnement reçu en énergie électrique. Pour être rentable, ce type d'élément devrait coûter environ 5 dollars, or il en coûte actuellement 175. Seuls les vols spatiaux peuvent donc se permettre de l'utiliser.

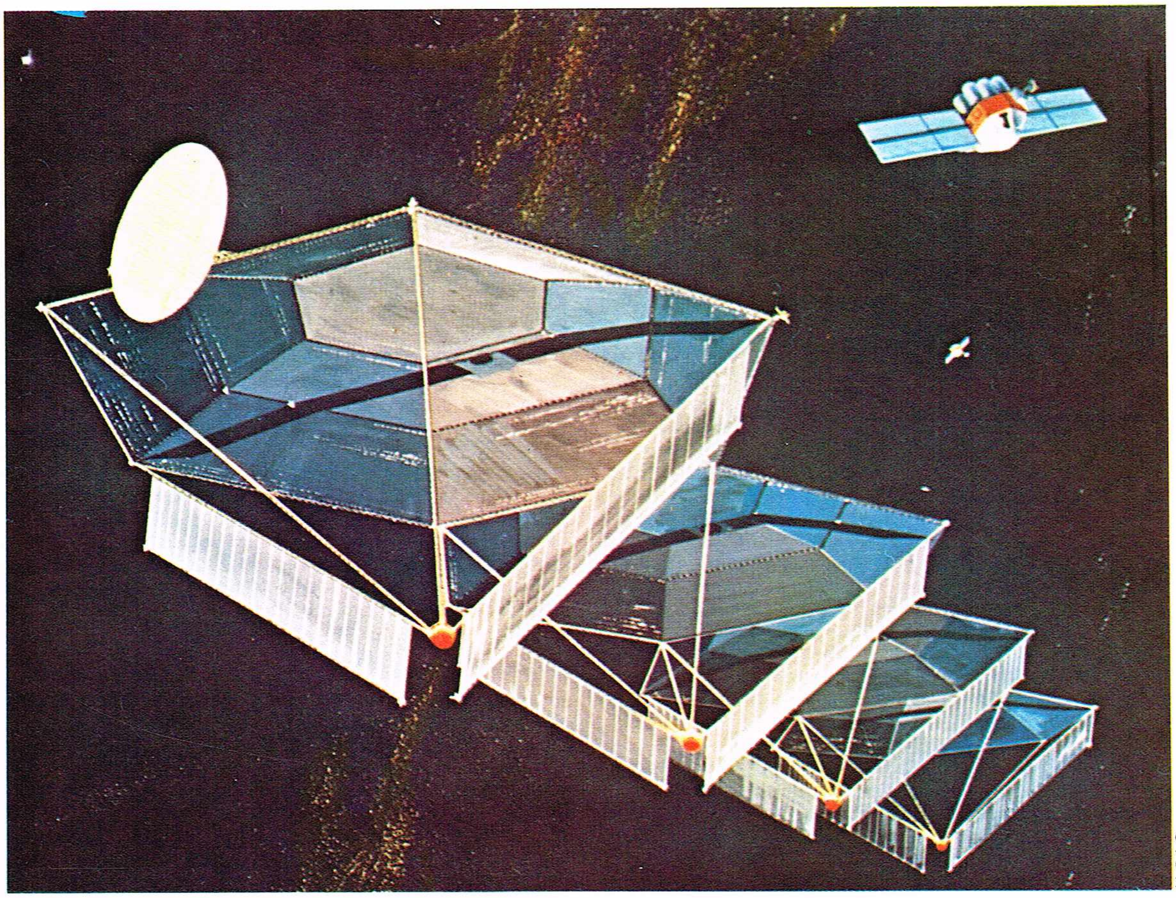

U.S.I.S.

◄ Maquette d'un projet de station orbitale destinée à capter l'énergie solaire au-dessus de l'atmosphère de la Terre.

▶ La mine de Saint-Nicolas, la Fonderie, la Raffinerie, *gravures de H. Gross, école allemande du XVI^e siècle.*

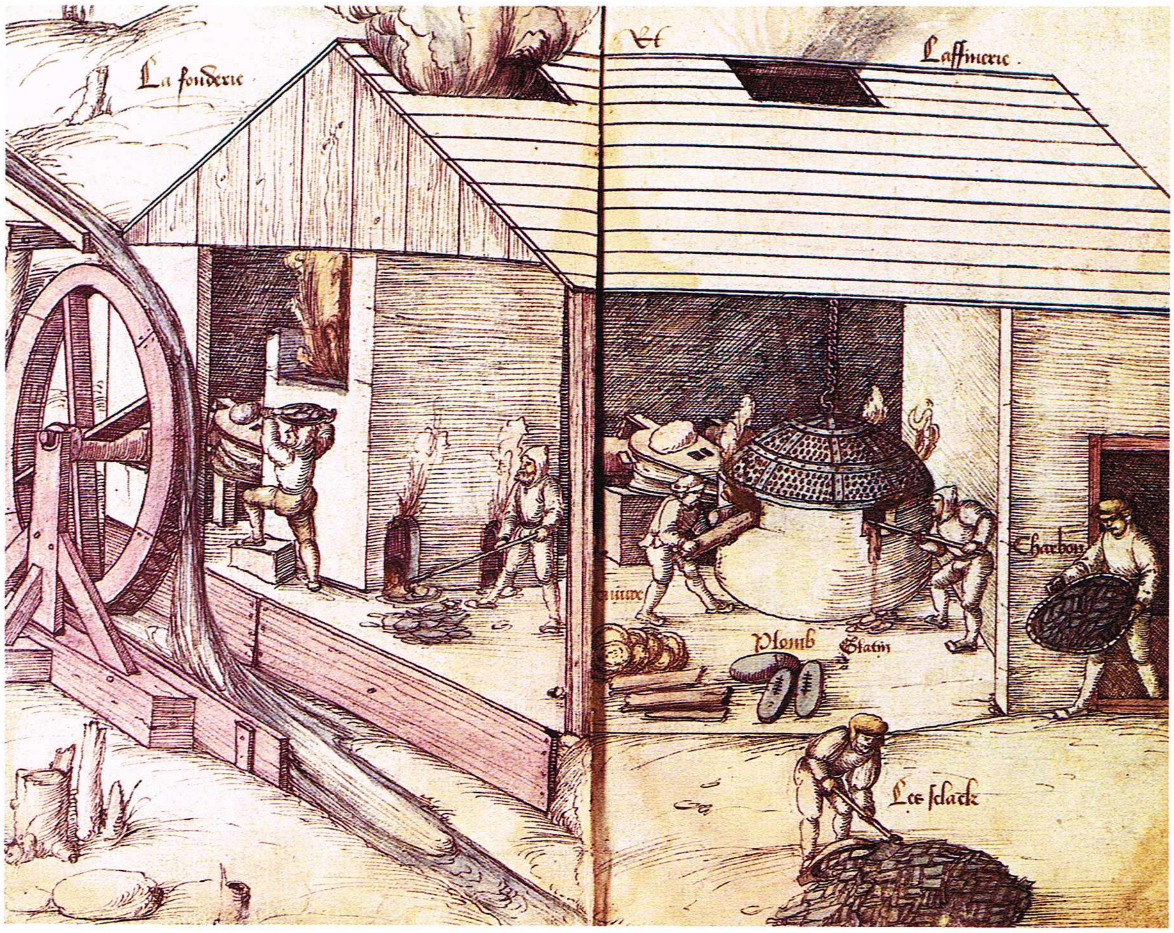

Bulloz

Ressources fossiles d'origine solaire

La première utilisation massive de matières énergétiques remonte à l'Antiquité avec le bois.

Le bois était utilisé pour l'exploitation des mines et pour la métallurgie. Les roches dures étaient abattues avec l'aide du feu : par suite de la dilatation différentielle des minéraux qui constituent les roches à haute température, celles-ci se désagrègent. L'arrosage de la roche chauffée provoque des contractions thermiques différentielles qui agissent dans le même sens.

Les besoins en bois du mineur et du métallurgiste ont contribué pour une part importante à la destruction des forêts, et ainsi à la disparition des communautés qui ont forgé leur prospérité sur les premières exploitations minières.

Si à cette époque on avait tenté d'évaluer les ressources énergétiques de la planète, on aurait vite conclu à un risque de pénurie certain à long terme, ou du moins empêchant toute croissance industrielle, car les forêts ne se reconstruisent pas assez rapidement.

Il a fallu attendre l'utilisation du charbon pour provoquer la révolution industrielle au XVIII^e siècle. Depuis les besoins d'énergie n'ont cessé d'augmenter. D'autres formes d'énergie, plus commodes, moins onéreuses, sont apparues, toujours pour permettre la croissance industrielle.

Les récents événements pétroliers ont conduit les pays industrialisés à adopter des mesures sévères d'économie d'énergie. La crainte de la pénurie est-elle justifiée ? La réponse à la question : manquerons-nous d'énergie à long terme ? est-elle la même si l'on se place au niveau mondial, à l'échelle d'un pays ou d'une région ? L'opinion peut s'inquiéter, car les énergies fossiles sont épuisables. En disposerons-nous suffisamment pour permettre de développer des sources d'énergie renouvelables ?

Nous allons essayer de répondre à ces questions en étudiant le problème des réserves d'énergie dans le monde, et d'analyser cette notion, car elle ne recouvre pas seulement un problème de quantités physiques.

Notions de gisement

Un **gisement** est une accumulation telle que son exploitation puisse être envisageable immédiatement ou dans un avenir pas trop éloigné. Cette définition est donc géologique et économique. On ne parlera que de « corps métallifères » lorsque l'on rencontrera une concentration en un élément supérieure à sa teneur moyenne dans l'écorce terrestre, mais que la rentabilité de son exploitation n'est pas prouvée.

Ainsi, une accumulation minérale considérée jadis comme pauvre peut devenir exploitable par suite de progrès technologiques concernant l'extraction, le traitement ou l'utilisation. Au contraire, une baisse des prix du marché peut compromettre fortement la rentabilité des mines.

Il y a donc, pour un gisement minéral, une *teneur exploitable inférieure limite ;* celle-ci varie pour chaque gisement, en fonction de son environnement géographique, géologique et économique.

La présence de plusieurs minéraux exploitables dans un même minerai peut garantir la rentabilité. Les formations aurifères du Rand en Afrique du Sud renferment aussi de l'uranium à très basse teneur qui ne peut être exploité indépendamment de l'or. L'exploitation des gisements liés à des roches intrusives du Sud-Ouest africain, dont les teneurs sont aussi très basses, n'est possible que parce qu'elle a lieu à ciel ouvert.

L'exploitabilité d'une concentration métallifère dépend non seulement de sa teneur en métal, mais aussi de la quantité totale de métal qu'elle contient.

Gisements métallifères : exemple de l'uranium

La formation d'un gisement résulte de plusieurs phénomènes géologiques : plutonisme, volcanisme et sédimentation sont générateurs de corps minéralisés ; altération météorique, érosion, métamorphisme, tectonique, circulation de l'eau font se déplacer et se concentrer par piégeage des minéralisations préalablement existantes, disséminées ou non. La formation d'un gisement d'uranium requiert la présence, par exemple, d'une préconcentration dans une roche ignée acide puis sa mobilisation

par l'eau qui, si les conditions sont favorables, conduit par piégeage à une concentration exploitable.

Dans la lithosphère, la teneur moyenne en uranium est de 3 à 4 parties par million (p. p. m.), mais l'éventail est très large selon les matériaux.

Les corps métallifères se rencontrent aussi bien dans les roches sédimentaires et métamorphiques que dans les roches volcaniques et plutoniques. On rencontre, dans les roches ignées acides, des teneurs en p. p. m. d'uranium assez élevées : 1 à 6 dans les granites et les syénites, 2 à 7 dans les rhyolites et les trachytes.

L'altération des sources primaires d'uranium a pour effet de le libérer sous forme hexavalente, stable en solution aqueuse. L'uranium a quatre valences possibles, les valences 4 et 6 étant les plus répandues. Après un déplacement plus ou moins grand, l'uranium est susceptible de se déposer avec certains sédiments ou de se fixer, sous des formes qui dépendent des conditions chimiques du milieu, dans tous les types de roches, y compris les formations sédimentaires non consolidées. Les teneurs en p. p. m. d'uranium sont de l'ordre de 1 à 13 dans les schistes, 1 à 80 dans les schistes carburés, 3 à 27 dans les bauxites, 1 à 350 dans les phosphates.

Ainsi, l'eau atmosphérique hydrothermale mobilisera l'uranium préconcentré dans la roche mère ignée acide ; il s'ensuit une dissémination qui peut conduire suivant le milieu récepteur à une surconcentration et, dans les cas favorables, à des gisements.

Les schistes bitumineux et les couches phosphatées correspondant à des conditions de dépôt en eau peu profonde représentent des volumes importants préconcentrés, sous forme de chalcolite.

En milieu continental, on observe une concentration dans des paléochenaux. L'uranium y a précipité, sous forme de *pechblende*, de *coffinite*, dans les zones réductrices et acides, riches en matières organiques par exemple (Colorado). On rencontrera de l'*uraninite* détritique dans les *placers* (or et uranium du Witwatersand), où l'accumulation est en grande partie mécanique, les minéraux les plus lourds étant piégés par un obstacle au ruissellement des eaux. Ces phénomènes peuvent se répéter au gré des crues, oxydation et reprécipitation provoquant un enrichissement.

L'eau, quelle que soit son origine (hydrothermale ou atmosphérique), emprunte préférentiellement les fractures de l'écorce terrestre. C'est pourquoi nombre de gisements d'uranium sont filoniens (Massif central, Vendée). Il est très difficile de déterminer si l'origine des accumulations est magmatique ou pas, d'autant qu'elles peuvent être remaniées et déplacées par des circulations postérieures. La nature des roches encaissantes pourra être favorable au dépôt.

Outre les *études géologiques* classiques communes à la prospection de tous les métaux : pétrographie, stratigraphie, sédimentologie, paléogéographie et étude structurale, la prospection de l'uranium est facilitée par des *méthodes géophysiques* propres : la radiométrie qui consiste à déceler le rayonnement émis par les descendants de l'uranium, l'émanométrie, mesure du rayonnement du radon. La prospection géochimique, grâce à l'étude des teneurs des eaux des sols et alluvions, permet de circonscrire les zones d'intérêt.

C. Raimond - Dityvon - Viva

▲ ***Exploitation du gisement d'uranium de Margnac (Haute-Vienne).***

Gisements de matières énergétiques fossiles

Ce schéma de la formation des gisements métallifères, d'une part, par dissémination de masses diffuses mais importantes, et d'autre part par concentrations locales successives pouvant conduire à des teneurs exploitables, peut se transposer dans ses grandes lignes aux gisements de matières énergétiques fossiles.

Pour le physicien, l'énergie est quelque chose qui se transforme; son utilisation est une transformation comportant une perte qualitative mais quantitativement équivalente. Dans l'écorce terrestre, l'énergie s'est transformée et concentrée sous forme chimique, plus ou moins selon les conditions de gisement.

L'énergie libérée par une matière combustible se mesure par son *pouvoir calorifique* en calories par kg, mais la qualité, donc la valeur de cette énergie, dépend de la température T à laquelle ces calories sont libérées, c'est-à-dire du travail que pourrait fournir une machine de Carnot entre la température T et la température ambiante.

Dans la croûte terrestre, on rencontre des matières combustibles ayant des pouvoirs calorifiques et des températures de combustion plus ou moins élevées, ainsi l'énergie y est-elle plus ou moins concentrée.

Ces matières sont toutes d'origine organique. Il y a donc une première concentration de l'énergie solaire par photosynthèse dans la matière organique. Pour former un gisement, ou plutôt une roche mère, il faut une accumulation locale de matière organique, par exemple le dépôt dans un milieu lagunaire ou dans des marécages acides (tourbières). Cette matière organique va subir une première décomposition sous l'influence de Bactéries anaérobies. Il y a donc là accumulation de matière énergétique à un niveau calorifique peu élevé.

Le niveau d'énergie de ce dépôt va augmenter dans la suite de l'évolution sédimentaire et orogénique de bassin. Lors de son enfouissement, cette matière va subir des transformations sous l'influence de l'augmentation de la pression et de la température en profondeur. Il y a là un deuxième appport énergétique mécanique et ther-

mique dont l'origine est profonde et résulte probablement des réactions radio-actives au sein de la croûte et du manteau.

Suivant les roches mères et les conditions initiales de dépôt, on assistera, sous l'influence de ce deuxième apport énergétique, à une transformation plus ou moins grande conduisant soit à des lignites et des charbons, soit à des hydrocarbures par craquage des macromolécules organiques en molécules plus simples. Dans ce deuxième cas, il n'y a pas concentration énergétique au sein même de la roche mais dissémination sous forme gazeuse ou liquide. Cette mobilisation peut là encore conduire par piégeage à la formation de gisements exploitables qui représentent une accumulation de matière suffisante d'un niveau d'énergie calorifique potentielle élevé.

On peut distinguer dans l'ensemble des roches combustibles, dérivant d'anciens êtres vivants, animaux ou végétaux :

— Les combustibles formés à partir d'organismes inférieurs, surtout aquatiques (plancton), dont la matière organique a une forte teneur en graisse et en protéines; ces combustibles ont subi la bitumisation : les *pétroles* et les *schistes bitumineux* en dérivent.

— Les charbons humiques, constitués essentiellement par des végétaux terrestres supérieurs, à forte teneur en hydrates de carbone, qui correspondent approximativement aux *charbons, lignites*, et *tourbes*. Il existe évidemment des termes de passage comme les *cannel-coals*, formés de spores et donnant 40 à 60 % de matière volatile, et les *bogheads* formés d'Algues, donnant 65 à 66 % de matière volatile.

Les gisements d'hydrocarbures

D'origine sédimentaire, les gisements d'hydrocarbures se rencontrent dans les bassins sédimentaires. Étant donné que ces hydrocarbures sont liquides ou gazeux, les gisements se rencontrent dans des roches poreuses et perméables dites *roches réservoirs*. Pour qu'il y ait accumulation, il faut un obstacle à l'écoulement de ces fluides.

Ce n'est que dans les structures susceptibles de piéger l'huile ou le gaz en quantité notable que l'on trouvera des gisements commercialisables. Ces *pièges* qui seront prospectés de façon systématique dans les bassins pétrolifères peuvent être de divers types.

— Le plus connu est sans doute l'*anticlinal* surmonté d'une couverture imperméable; là, les hydrocarbures sont bloqués dans leur circulation par la voûte formée par la couverture empêchant tout mouvement ascendant.

— Un autre type est celui du *monoclinal faillé;* les failles sont souvent remplies par des matériaux imperméables, ou elles peuvent, par suite du jeu de faille, mettre côte à côte deux couches de nature différente. Si, dans une série stratigraphique ayant un pendage uniforme, une couche imperméable surmonte une roche perméable, il y a un chemin préférentiel pour les liquides. Tout obstacle à l'écoulement, comme celui susceptible de se produire par le jeu d'une faille, provoquera une fermeture, et ainsi on aura là une structure piège favorable.

— D'autres pièges sont liés à la tectonique des *dômes de sel*. Là les dômes de sel imperméables forment la fermeture. En effet, les dépôts de sel, sous l'influence des contraintes mécaniques résultant de l'enfouissement

Areofilm Ltd

▶ *Vue aérienne d'un anticlinal; là, les hydrocarbures sont bloqués dans leur circulation par la voûte formée par la couverture imperméable.*

◀ *Un affleurement de pétrole en Irak.*

S.E.F.

et de mouvements tectoniques postérieurs à la mise en place de la série sédimentaire, subissent des déformations plastiques. Il s'ensuit des déformations pouvant provoquer dans les zones de moindre résistance l'intrusion de dômes de sel discordants par rapport à la série sédimentaire, et donc la possibilité de structure d'accumulation.

— D'autres pièges enfin peuvent être liés aux particularités stratigraphiques de la série : *lentilles de sable, biseau stratigraphique, paléorécifs,* etc.

Les gisements de gaz naturel

Le gaz naturel peut être défini comme la fraction des hydrocarbures extraite du sol qui est à l'état gazeux dans les conditions normales. Ce même gaz peut exister sous plusieurs formes selon les conditions de gisement.

— Le gaz peut être associé au pétrole. Dans les gisements où l'huile est sous-saturée, le gaz est entièrement dissous dans la phase liquide. La différenciation progressive des deux phases ne se fait que lors de la montée dans les tubes d› production ou plus tard dans les séparateurs. Tant que la pression interne du gisement reste supérieure à la pression de saturation, le gaz produit a une composition constante. Quand la pression est inférieure à la pression de saturation, l'huile est surmontée par un chapeau de gaz, le gaz libre. Au cours de la production, lorsque la pression baisse dans le réservoir, la solubilité des gaz plus légers diminue plus vite que celle des homologues supérieurs ; en conséquence, la composition du gaz récupéré varie. Il s'enrichit relativement en produit plus lourd.

— Le gaz naturel peut être totalement libre dans les conditions de gisement, même si dans certains cas les produits liquides apparaissent par condensation rétrograde au moment de la production. C'est le gaz non associé. Si le gaz donne lieu à condensation, on parle de *gaz riche* ou de *gaz humide*.

Les molécules d'hydrocarbures, qui composent les gaz naturels, sont plus légères que celles du pétrole. Le gaz devrait, dans une même série géologique, surmonter l'huile ; la probabilité relative de trouver du gaz diminuerait avec la profondeur. Cependant, si l'on considère que le gaz provient de matières organiques ayant subi une évolution plus longue et qui ainsi ont vu diminuer la masse moléculaire moyenne des hydrocarbures qui les composent, la probabilité relative de trouver du gaz augmente avec l'ancienneté des terrains et surtout avec la profondeur. C'est ce dernier critère qui l'emporte en général.

Les méthodes de prospection sont donc comparables à celles du pétrole. Une seule différence est notable : la perméabilité des terrains, qui est plus forte au gaz qu'à l'huile. Pour qu'il y ait gisement de gaz, il faut que la couverture soit particulièrement étanche. On met à profit dans la prospection géochimique la grande mobilité du gaz en dosant le gaz contenu dans les prélèvements systématiques d'échantillons de sol. Les cartes d'isoteneur obtenues par ce procédé fournissent alors, parfois, à la surface, une photographie du gisement ou des grands accidents qui l'affectent.

Prospection des hydrocarbures

La prospection de ces pièges nécessite, tout comme la prospection des gisements métallifères, une connaissance approfondie du bassin sédimentaire. Ceci suppose que des études sédimentologiques, stratigraphiques, paléogéographiques et structurales, etc., soient entreprises.

La géophysique apporte des compléments précieux aux études géologiques. La *magnétométrie,* c'est-à-dire la mesure de la susceptibilité magnétique des roches, renseigne quant à la structure profonde du bassin. Les prospecteurs utilisent l'*aéromagnétisme,* c'est-à-dire la

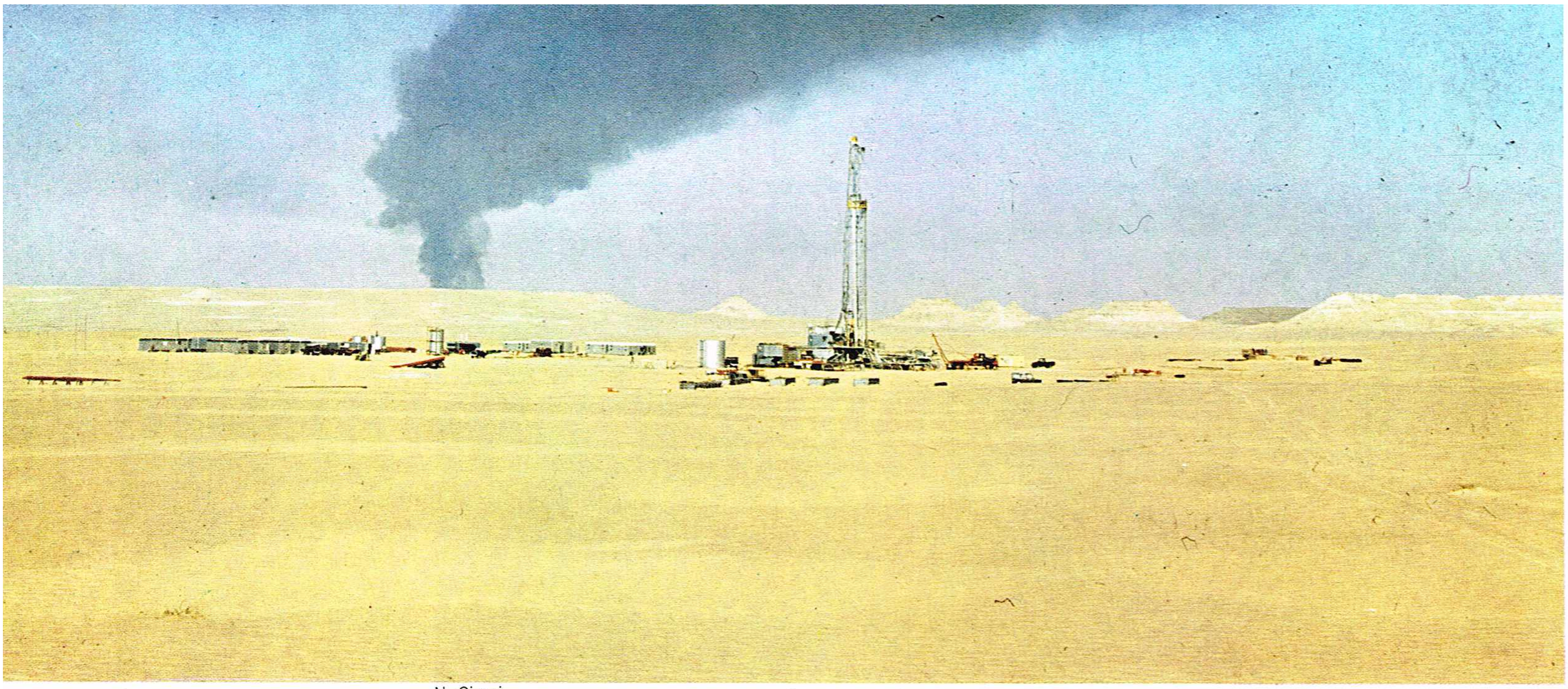

N. Cirani

▲ *Les forages d'exploitation, ici pour la recherche de pétrole dans le désert de Libye, apportent des renseignements géologiques complémentaires par l'étude des déblais, par les carottages et les mesures physiques effectuées dans les sondages.*

prospection aéroportée à partir d'avions équipés d'appareils de mesure permettant un quadrillage rapide et complet de la zone de recherche.

La *gravimétrie*, qui mesure la valeur de l'accélération de la pesanteur, renseigne sur la densité des roches et donc sur la structure en profondeur du bassin.

Mais la méthode la plus utilisée est la *sismique*. On provoque dans le sol un ébranlement qui se propage avec des vitesses différentes selon la nature des couches traversées. Ainsi, on observera, comme en optique, des phénomènes de réflexion et de réfraction. Les ébranlements réfléchis à l'interface, entre deux couches, sont captés par des géophones, puis analysés et traités, pour obtenir finalement une visualisation d'une coupe en profondeur le long du profil de tir. Cette méthode, très précieuse, est très employée. Elle représente 98 % des dépenses de géophysique engagées par les compagnies pétrolières. Notons qu'en mer c'est la seule qui soit à notre disposition alors que la géologie de terrain est impossible.

Toutes ces études débouchent sur une campagne de *forages d'exploration* au droit des structures jugées les plus intéressantes. Les forages d'exploration apportent des renseignements géologiques complémentaires par l'étude des déblais, par les carottages et les mesures physiques effectuées dans les sondages (diagraphies électriques, gammagraphies, etc.) ; il en résulte la connaissance soit de puits secs, soit de puits productifs.

Ce n'est pas parce qu'un puits est productif ou présente des indices de pétrole ou de gaz que l'on a pour autant découvert un gisement. D'autres forages doivent être entrepris pour délimiter l'extension et déterminer les conditions de gisement avant de prendre la décision de développer ce gisement.

C'est à ce niveau qu'il faut estimer la rentabilité potentielle du gisement qui permettra d'entreprendre les investissements en forage, l'installation de surface et d'évacuation de la production. Ces investissements varient d'un gisement à l'autre, suivant les caractéristiques physiques et économiques du champ pétrolier.

Dans des conditions difficiles ou pour des champs situés loin des centres de consommation, seuls les gros gisements permettront de financer les installations d'évacuation. Malheureusement, dans un bassin sédimentaire, il y a beaucoup plus de petits champs que de grands.

La découverte de champs importants dans une zone permettra le développement de champs de moindre taille au voisinage, car ceux-ci pouront être raccordés aux pipe-lines installés pour évacuer la production de grands champs.

Des champs de petite taille pourront aussi être développés s'ils sont situés dans les zones de consommation. Si, par contre, on se trouve loin du marché et dans des conditions difficiles, il faudra mettre en évidence des gisements plus importants. L'intérêt potentiel de ces zones est donc *a priori* moindre, car les gisements de grande taille sont plus rares, mais l'espoir de découverte d'un énorme champ subsiste toujours, bien que la probabilité de découverte soit plus faible.

La tourbe

Une tourbière n'est pas un simple marécage. La formation de tourbe nécessite deux bilans excédentaires : celui de la matière organique dont la production doit l'emporter sur la décomposition, et celui de l'eau, car le sol, malgré l'évapotranspiration, doit rester engorgé. L'eau est le facteur essentiel ; elle permet le développement des plantes hydrophiles. Sa stagnation rend le milieu asphyxiant. La base des plantes s'enfonce sans se décomposer, par suite de la pauvreté de plus en plus grande de l'eau en oxygène. La tourbe, milieu réducteur, fossilise parfaitement toutes les structures organiques qui y sont emprisonnées. Les débris de plantes mortes sont normalement détruits à l'air, mais noircissent sous l'eau, par l'action de micro-organismes.

Après une diagenèse modérée, biochimique et mécanique, il se forme une roche combustible renfermant entre 50 et 58 % de carbone : la tourbe. La tourbe a joué, jadis, un grand rôle économique : combustible médiocre mais abondant et bon marché, litière pour le bétail, amendement organique et même matériau de construction isolant.

Les méthodes anciennes d'exploitation artisanale respectaient le milieu en le rajeunissant. Nombre de fosses d'exploitation constituent des étangs ou des mares. Le mode d'exploitation actuelle s'accompagne d'un drainage, destructeur du milieu, dont l'utilisation ultérieure pour l'agriculture est souvent vouée à l'échec.

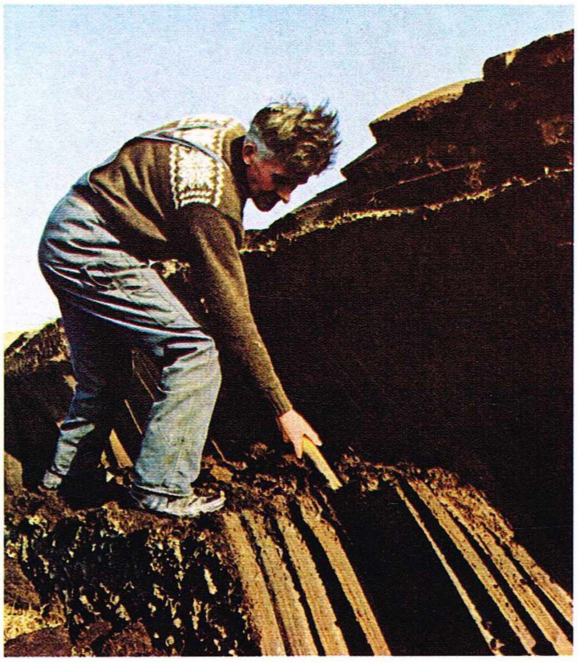

R. Tixador - TOP

▶ *Un gisement de tourbe.*

Cedri - Beaujard

▲ Mine de charbon dans la région de Lens (France).

Le charbon et le lignite

Il existe de nombreuses variétés de charbons, car les éléments végétaux qui les ont constitués étaient eux-mêmes variés. Ces éléments ont subi la *carbonification* qui se traduit d'un point de vue physico-chimique par un enrichissement relatif en carbone ; en même temps, il y a diminution des matières volatiles, diminution de l'hydrogène et de l'oxygène, et augmentation, jusqu'à un certain stade, du pouvoir calorifique.

Les pouvoirs calorifiques s'échelonnent de 8 550 kcal/kg (charbons bitumineux) à moins de 3 500 kcal/kg (lignite), et même beaucoup moins pour la tourbe dont nous ne tiendrons pas compte dans les statistiques.

Au XIX^e siècle, le charbon représentait l'unique combustible industriel connu. On comprend donc que ce soit celui dont on connaisse le mieux les réserves. Mais il subsiste des incertitudes quant aux réserves économiquement récupérables. La géologie du charbon est relativement simple et uniforme sur de vastes régions. C'est donc pour ce combustible que semble atteint le meilleur consensus quant aux évaluations des réserves, et les réévaluations sont plus rares et de moindre importance que pour les hydrocarbures liquides et gazeux.

Localisation des réserves

Les réserves mondiales totales effectivement récupérables dans les conditions économiques actuelles sont estimées à 700 milliards de tonnes, les réserves ultimes, c'est-à-dire les accumulations que l'on pense géologiquement pouvoir exister, à 10 800 milliards de tonnes ; les réserves prouvées représentent 1 300 milliards de tonnes. L'essentiel des réserves se trouve situé dans des pays économiquement développés (*tabl.* I).

Les réserves de combustible solide sont donc considérables. Exprimées en années de consommation actuelle, elles représentent 200 années pour les réserves récupérables, 475 pour les réserves prouvées et 3 500 pour les estimations des réserves ultimes ! Ces ratios réserves/production courante sont analogues pour les meilleures qualités (anthracites) : 198-494 années et les plus basses qualités (lignite et houille brune) : 194-415 années.

Tableau I
Estimation des réserves de charbon (World Coal, Novembre 1975)

Pays	Réserves économiquement récupérables (en milliards de tonnes) aux conditions de 1973	Réserves prouvées en milliards de tonnes
Amérique du Nord	188	379
Europe	79	301
Chine	101,3	200
Monde	700	1 300

◄ *Tableau I : estimation des réserves mondiales de charbon faite en 1975.*

Les combustibles solides constituent la seule source d'énergie fossile pour laquelle on dispose de ratios aussi élevés. Au cours des dix dernières années, on a constaté des évolutions très différentes entre les États-Unis et l'U. R. S. S. d'une part, et l'Europe et le Japon d'autre part. Ces deux derniers ont conduit des politiques de régression charbonnière. Les États-Unis et les pays de l'Est ont, au contraire, continué à développer leurs charbonnages. Le taux de croissance pour la période 1961-1972 est de 3,3 % aux États-Unis et 5,2 % en Europe orientale. La production mondiale est stabilisée depuis 1970 au niveau de 2 400 millions de TEC.

En fait, aux États-Unis et en U. R. S. S., on constate un développement encore plus rapide en volume. En effet, on exploite de plus en plus des combustibles fossiles à faible pouvoir calorifique, et ce, en raison des gains de productivité permis par la mécanisation et l'exploitation à ciel ouvert (55 % de la production américaine se fait en carrières).

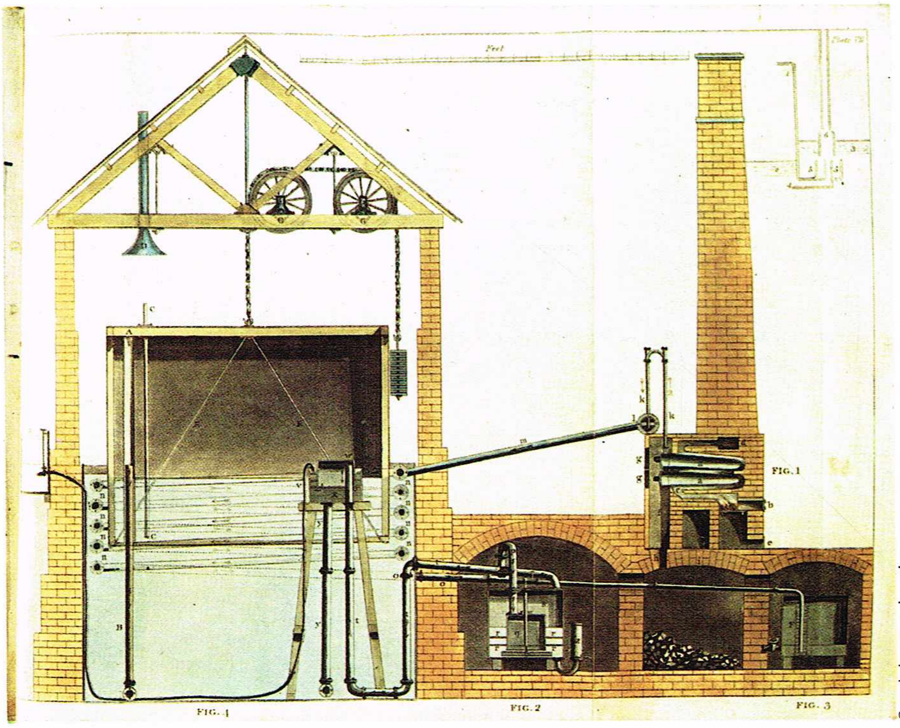

Snark International

▲ ***Gravure du XIX^e siècle (1819) expliquant un procédé de fabrication de gaz à partir du charbon.***

Utilisation du charbon

Aux XVIII^e et XIX^e siècles, le charbon était utilisé directement pour le transport (chemins de fer et bateaux à vapeur), indirectement pour la production de coke, servant à la fabrication de la fonte, et également à la fabrication de gaz de ville distribué aux foyers domestiques et à l'industrie.

Si, de nos jours, les deux premières utilisations sont en voie de disparition, la fabrication de gaz à partir de charbon pourrait, sous une autre forme, revenir à l'ordre du jour. Le déficit de gaz naturel des États-Unis pourrait être en partie comblé par la production d'un gaz riche de synthèse, contrairement au gaz pauvre, appelé aussi gaz à l'eau, dont la production a pratiquement disparu, même en Angleterre et en Allemagne.

En effet, les coûts de transport élevés condamnent à utiliser le charbon près des mines ou des ports d'importation. Gaz et pétrole de synthèse représentent la forme la moins onéreuse de véhiculer l'énergie. Actuellement, ces procédés deviennent concurrentiels grâce aux prix élevés du pétrole brut.

La production de coke n'a pas trop souffert de la concurrence pétrolière et gazière ; il n'y a pas là possibilité de substitution totale bien que l'on puisse utiliser du fuel-oil pour compléter la « mise au mille ». La production mondiale de coke est de l'ordre de 350 millions de tonnes obtenues par traitement d'environ 465 millions de tonnes de charbons bitumineux volatil et très volatil.

Les industries lourdes, sidérurgie, cimenterie, grosses consommatrices d'énergie, restent un débouché important pour le charbon. La production d'électricité thermique est un autre gros consommateur, particulièrement aux États-Unis. Là encore, on réalise une transformation permettant un transport et une utilisation beaucoup plus souples. On consomme donc le charbon de façon *ponctuelle* et *massive*. Cependant, le charbon ne pourra pratiquement pas concurrencer l'énergie nucléaire pour la production d'électricité.

Le charbon possède un coût marginal de production très supérieur à celui des énergies concurrentes ; les frais de main-d'œuvre sont très importants et les coûts de transport très élevés. Cependant, l'énormité de ces réserves et leur situation géographique dans des pays industriellement développés (elles sont donc utilisables sur place) sont des atouts importants. De plus, il s'agit d'une source de matière première pour la carbochimie, et l'on peut espérer pallier le goulot d'étranglement du transport par la gazéification.

Les délais de mise en production du charbon et du lignite sont tout à fait comparables à ceux des autres énergies (5 à 10 ans) et même, dans les cas favorables d'exploitation en carrière, inférieurs (18 mois) aux délais du nucléaire (7 ans) et du pétrole (5 ans et plus).

Le charbon est donc « l'énergie marginale » par excellence. On dispose de centaines d'années de production courante en réserves économiquement exploitables. On peut penser qu'il serait possible d'augmenter les productions à des rythmes moyens de 5 à 7 % sans rencontrer de difficultés, comme l'histoire l'a déjà prouvé.

Les goulots d'étranglement et les freins à la croissance se trouvent au niveau de la demande. Seules les techniques de gazéification et de liquéfaction du charbon permettront la croissance de l'industrie charbonnière.

▼ ***Exploitation d'un gisement de lignite à Arjuzanx (Landes).***

Lang - Rapho

Procédés de gazéification et liquéfaction

Gazéification

Les procédés, actuellement à l'étude aux États-Unis, en vue de la fabrication d'un gaz à haut pouvoir calorifique, sont les procédés Lurgi et Hygas.

- *Procédé Lurgi*

Au cours des 30 dernières années, on a construit 16 installations selon le procédé allemand Lurgi, qui a été récemment amélioré.

Le charbon, en lit fluidisé, est gazéifié à contre-courant, sous pression de vapeur et d'oxygène. Il s'agit de houille qui n'est pas susceptible d'être agglutinée. Les cendres sont évacuées par le fond du réacteur.

Le gaz brut, soutiré en tête, est lavé à l'huile pour éliminer le goudron, les huiles lourdes et les particules solides. Ce gaz est ensuite purifié et sa composition est ajustée, puis il est converti en méthane qui sera à nouveau purifié et déshydraté.

Les sous-produits sont : des goudrons, des fuels lourds, du naphta, de l'ammoniac, des phénols et du soufre. Ceux-ci contribuent à la rentabilité de l'opération.

- *Procédé Hygas*

Le procédé Hygas est développé par l'Institute of Gas Technology. Les essais des unités pilotes ont montré que ce procédé était techniquement réalisable, et il semblerait que sa rentabilité puisse être assurée.

Le charbon est gazéifié dans deux réacteurs en série à lit fluidisé, le premier à basse température, le second à température élevée. Les cendres résiduelles sont utilisées pour produire l'hydrogène injecté dans les réacteurs.

Le gaz est ensuite lavé à l'huile, purifié, ajusté, méthanisé et déshydraté.

Les sous-produits sont : du benzène, du fuel lourd, de l'ammoniac, du soufre et du dioxyde de soufre.

Le pouvoir calorifique du gaz est légèrement supérieur à celui du gaz obtenu par le procédé Lurgi. Cependant, ce procédé utilise des charbons dont la teneur en soufre est moins importante.

Liquéfaction

Les procédés de liquéfaction transforment le charbon en hydrocarbures liquides.

- *Procédé Consol synthetic fuel*

Le procédé Consol synthetic fuel produit du naphta et du fuel lourd. Les liquides sont extraits par un solvant qui permet également d'apporter de l'hydrogène aux produits d'extraction. L'hydrogène est obtenu à partir des cendres et sert à l'hydrotraitement du naphta.

Le naphta et le fuel lourd produits ont des teneurs en soufre faibles, permettant leur commercialisation. Le naphta produit peut ensuite être traité dans une unité de reformage, afin de fabriquer un carburant automobile à haut indice d'octane.

- *Procédé Koppers-Totzek*

Une autre solution consiste à produire du méthanol, il s'agit du procédé Koppers-Totzek.

Transport par carboduc

Pour supprimer le goulot d'étranglement du transport du charbon, on peut également utiliser la technique du carboduc. Le charbon finement broyé, en suspension dans l'eau, peut ainsi être transporté dans des conditions intéressantes vers les centres de consommation massive. Aux États-Unis, 17 carboducs importants sont en service. Le plus gros transporte annuellement 4,5 millions de tonnes sur une distance de 435 km.

En U. R. S. S., un projet est à l'étude pour la construction d'un carboduc sur une distance de 400 km. L'amélioration du transport se traduit par une économie de 12 %; pour l'ensemble des éléments de production de charbon et de production d'électricité, l'économie serait de 15 %. Par ailleurs, les carboducs n'altèrent en rien l'environnement et le mélange de charbon broyé dans l'eau donne une fumée plus propre. On envisage de construire des carboducs en matière plastique, ce qui devrait réduire les investissements nécessaires.

Il nous semble donc qu'au moins dans certains pays producteurs et gros consommateurs d'énergie comme les États-Unis et l'U. R. S. S., le charbon a encore devant lui un bel avenir.

Énergies primaires et secondaires

Les 5 sources principales d'énergie dite primaire (95 % de l'énergie consommée) sont : le charbon, le pétrole, le gaz, l'énergie hydraulique et l'énergie nucléaire, les deux dernières étant en quasi-totalité produites sous forme d'électricité.

On rangera l'électricité dans les énergies primaires quand elle est fournie par des installations hydrauliques ou nucléaires, dans les énergies secondaires lorsqu'elle est produite par des centrales à charbon ou à fuel. La distinction entre énergie primaire et énergie secondaire permet ainsi de ne pas comptabiliser deux fois certaines formes d'énergie dans le bilan énergétique d'un pays : l'électricité (secondaire) et le pétrole (primaire) qui a servi à la fabriquer par exemple. On peut donc représenter schématiquement dans le diagramme suivant les principaux cycles de transformation et d'utilisation de l'énergie.

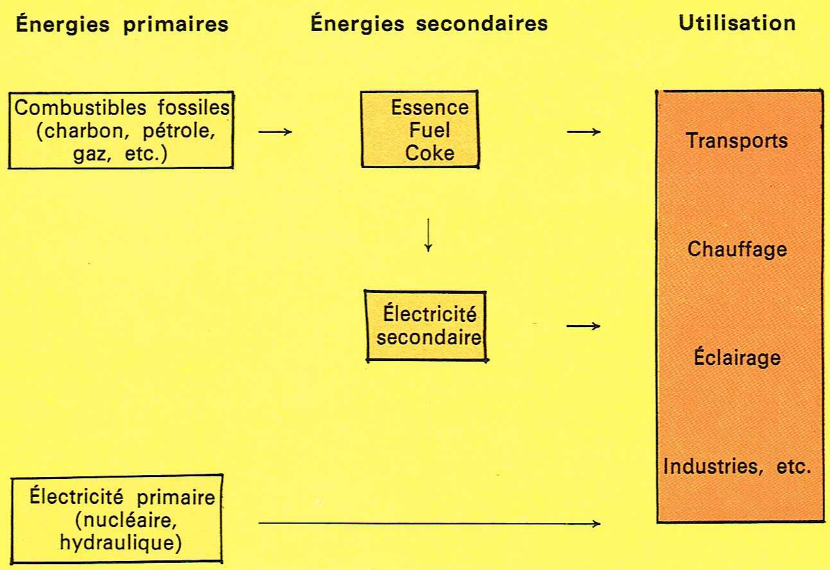

▲ ***Principaux cycles de transformation et d'utilisation de l'énergie.***

T.-E.P. : tonne équivalent pétrole
T.-E.C. : tonne équivalent charbon
1 bbl = 1 barrel = 1 baril = 159 l

Coefficients d'équivalence usuels :

1 T.E.P. = 1,5 T.E.C. = 4,5 MWh

Pour le gaz : 1 000 thermies P.C.S. = 0,1 T.E.P.
(P.C.S. signifie : pouvoir combustible supérieur)

Ordre de grandeur : une centrale nucléaire de 1 000 MW fonctionnant 80 % du temps, marche 6 200 h dans une année et produit donc 1 000 × 6 200 = 6 200 000 MWh soit 6,2 TWh (térawatt/heure), ce qui équivaut à : 14 000 000 T.E.P.

◀ ***Quelques symboles, unités et abréviations utilisés dans le texte.***

Delcourt - Rapho

La carbonisation

En 1874, Caron, en Écosse, découvrait que la houille pouvait être cokéfiée et constatait que le coke pouvait remplacer le charbon de bois dans les hauts fourneaux. Les sous-produits étaient brûlés. Ce n'est qu'en 1881, en Allemagne, que les premières cokeries à récupération furent installées. De nos jours, la distillation de la houille s'effectue à haute température (1 200 °C).

A partir d'une houille grasse, comportant 20 à 30 % de matières volatiles, on obtient par tonne de charbon : 700 à 800 kg de coke, 25 à 40 kg de goudron, 7 à 12 kg de benzol, 1,4 à 2,6 kg d'ammoniac donnant 6 à 10 kg de sulfate d'ammonium, 300 à 350 m^3 de gaz. Le chauffage des batteries de fours utilise environ 45 % du gaz distillé.

Le **coke** est destiné à la sidérurgie. Il sert également à fabriquer du *carbure de calcium*. Ce produit servant à produire l'acétylène et ses dérivés a joué un grand rôle dans le développement de l'industrie chimique. Il faut souligner que l'industrie du carbure de calcium permet aussi la production d'un engrais, la *cyanamide calcique*, après une réaction dite d'azotation, à partir de coke, de chaux et d'azote dans un four électrique.

Les **goudrons** sont distillés, soit pour la production de goudron routier, soit pour la production de brais et d'huile brute.

Les *brais* sont utilisés pour l'agglomération des charbons maigres, pour les enduits, peintures et vernis de protection.

Les *huiles brutes* sont fractionnées en diverses coupes dont on tire des produits de base pour l'industrie chimique, comme les *phénols*, employés pour préparer des produits pharmaceutiques, explosifs, matières colorantes et surtout résines et textiles synthétiques. On obtient également du *naphtalène* à partir duquel on fabrique les polyesters et les résines glycérophtaliques; la production insuffisante laisse la place à l'orthoxylène pétrolier pour la fabrication de l'anhydride phtalique.

Après élimination des goudrons on sépare du gaz de four les **benzols** par lavage aux solvants, à partir desquels on obtient le *benzène* dont la chimie est très développée (ce développement n'a été possible qu'à partir du benzène pétrolier). La plupart des dérivés du benzène servent à la fabrication des matières plastiques et textiles synthétiques.

Les gaz de four, depuis les travaux de Georges Claude, servent à la fabrication de l'**ammoniac.**

Exploitation du charbon

Exploitation à ciel ouvert

Les charbons bitumineux et les lignites allemands sont exploités à ciel ouvert. Les gisements ont conduit au développement de méthodes et de machines originales.

En général, une exploitation à ciel ouvert apparaît comme une gigantesque cuvette dont les bords sont découpés en gradins, certains dans le minerais, d'autres dans le stérile.

Le rapport du tonnage de matériaux stériles au tonnage de minerai est un facteur économique important. Ce rapport peut augmenter avec la valeur marchande du minerai, sans pouvoir dépasser la limite qui conduirait à un prix de revient plus élevé en découverte qu'en exploitation souterraine. Dans les exploitations américaines de charbon bitumineux, il est en moyenne de 20.

Un bilan économique à chaque profondeur permet de déterminer jusqu'où doit se poursuivre l'exploitation à ciel ouvert avant de céder la place à l'exploitation souterraine.

Dans la plupart des cas, le recours à l'explosif est nécessaire pour abattre les roches et pour débiter les blocs. Le tir d'abattage utilise des trous de mines sensiblement parallèles au front des gradins, lequel est presque toujours vertical. L'explosif travaille ainsi à proximité d'une surface de dégagement sur laquelle l'onde explosive se réfléchit, soumettant la roche à des contraintes de traction à laquelle elle résiste mal; la charge est plus concentrée à la partie inférieure, ainsi la partie supérieure s'effondre sous son propre poids.

Les gisements de charbon bitumineux américains sont en général constitués par des couches horizontales. L'exploitation en découverte progresse par tranchées parallèles; dans la tranchée en activité, le charbon est abattu à l'arrière, tandis qu'à l'avant des pelles ou des

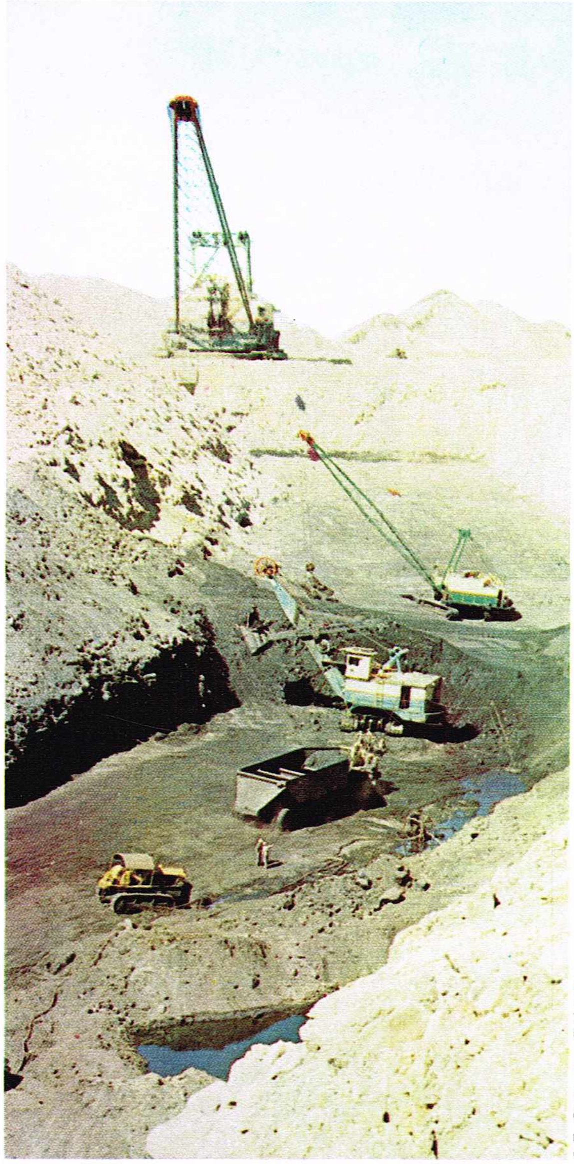

C.E. Ostman - Roberts

Montecatini - Edison

draglines géantes enlèvent les roches qui le recouvrent et les déposent directement à l'emplacement de la tranchée précédente.

Pour travailler en fouille, c'est-à-dire à l'enlèvement des terres à une cote inférieure à celle du plan qui supporte la machine, on utilise de préférence des draglines.

La puissance des machines s'apprécie par la capacité de leur godet et par la distance à laquelle elles déversent les déblais. Les plus grosses draglines ont des godets de 55 et même 65 m^3, et les flèches atteignent respectivement 83 et 75 m ; la plus grande atteint 95 m avec un godet de 160 m^3. La plus grosse pelle adaptée à un recouvrement de 30 m porte un godet de 135 m^3, qui déverse son chargement à 60 m ; sa masse totale dépasse 12 000 tonnes.

Les gisements de lignite allemands comportent des couches très puissantes, très irrégulières, mais à profondeur modérée dans des terrains dont la tenue serait peu favorable à l'exploitation souterraine. Ils sont exploités en découverte depuis la Première Guerre mondiale. L'outil d'abattage est une roue à godets, parfois une chaîne de godets.

Les matériaux abattus sont déversés sur des convoyeurs en série ; le lignite est chargé en train ou envoyé directement dans le parc d'une centrale. Le stérile est déversé par une épandeuse à convoyeur en dehors de la zone qui reste encore à exploiter.

L'ensemble de l'installation permet donc un travail en continu, et non plus cyclique comme c'est le cas des installations à pelles.

Comme pour les charbons bitumineux américains, l'échelle du matériel n'a cessé de grandir pour arriver à traiter des découvertes de 250 m de profondeur par gradins de 50 m de haut. La plus grosse machine en service en Allemagne, qui est mobile grâce à trois trains de quatre chenilles, est équipée d'une roue de 16 m de diamètre, portant 10 godets de 4 m^3, sa masse est de 7 350 tonnes et la puissance installée dépasse 9 000 kW. La machine débite plus de 10 000 m^3/h.

Pour servir ces énormes machines, on a construit des wagons de près de 100 m^3 de capacité et également des convoyeurs équipés d'une courroie de 2,60 m de large qui se déplace à 5 m/s.

Exploitation souterraine

Une mine comporte au moins deux puits verticaux d'accès au minerai. Un puits assure normalement une partie ou la totalité des fonctions suivantes : aérage, circulation du personnel, extraction des produits, transport du matériel et des fournitures, descente des remblais et l'exhaure (évacuation de l'eau). Les travaux miniers se développent dans les trois dimensions de l'espace.

Les plus beaux gisements souterrains de charbon dans le monde sont les plus réguliers, les moins affectés par les mouvements orogéniques. Ils sont formés de couches épaisses de 1,5 à 3 m, et de pendage modéré ; ils sont exploités par piliers abandonnés, à faible profondeur, ou par longue taille.

Des *piliers abandonnés* supportent le poids des terrains susjacents. Ces piliers protègent pendant la phase de dépilage contre l'éboulement du toit.

▲ A gauche, une exploitation à ciel ouvert apparaît comme une gigantesque cuvette dont les bords sont découpés en gradins ; ici, une mine de charbon à ciel ouvert dans le Queensland (Australie). A droite, usine de séparation des benzols à partir desquels on obtient le benzène.

◀ Page ci-contre, une cokerie dans la région de Douai (France) ; destiné à la sidérurgie, le coke sert également à la fabrication du carbure de calcium.

La technique de la *longue taille* est spécifique des charbonnages. Elle se développe à partir de deux galeries dans la couche, la voie de tête et la voie de base, distantes de 100 à 300 mètres.

Le chantier lui-même comporte deux ou trois allées de travail qui réunissent voie de tête et voie de base. Ces allées sont maintenues ouvertes par un soutènement, entre les vieux travaux et le front de taille. Elles servent à la circulation du personnel et des machines, et à l'alimentation du chantier en énergie. Elles contiennent les engins d'évacuation du charbon, en général des convoyeurs à chaînes.

Du côté « front », l'abattage enlève à chaque cycle une tranche de charbon correspondant au volume d'une nouvelle allée. Du côté « vieux travaux », le soutènement est récupéré pour être reposé au fur et à mesure de l'avancement, d'où en général foudroyage. On provoque un éboulement contrôlé dans le vide laissé par le minerai enlevé. Dans certains cas, les « vieux travaux » sont remblayés.

Pour abaisser le prix de revient, les chantiers sont mécanisés intégralement : abattage, soutènement et chargement.

L'abattage est effectué par une *haveuse* qui se déplace le long du front, parallèlement au convoyeur blindé. Des piles hydrauliques constituées par deux vérins portant un large chapeau maintiennent le toit au-dessus des allées de travail. En arrière, les terrains non soutenus sont foudroyés. Un vérin hydraulique porté par la pile, dit vérin de ripage, pousse le convoyeur vers le nouveau front. Lorsque le ripage du convoyeur est terminé, la pile est desserrée et tirée par le vérin à proximité du convoyeur, puis resserrée.

Aux conditions de travail difficiles s'ajoutent les dangers provenant du grisou, de la poussière, des incendies et des feux.

Le *grisou* est essentiellement du méthane, dont l'inflammation se propage avec violence lorsque la teneur est comprise entre 6 et 16 %.

La flamme peut se propager à travers les nuages de poussière de charbon en produisant de l'oxyde de

▶▼ Deux détails de l'aménagement du bassin de la Tronquie à la mine souterraine de Carmaux (Tarn) : ci-contre, le soutènement par vérins du toit au-dessus des allées de travail ; ci-dessous, la circulation du personnel par télésièges.

Mopy - Rapho

Mopy - Rapho

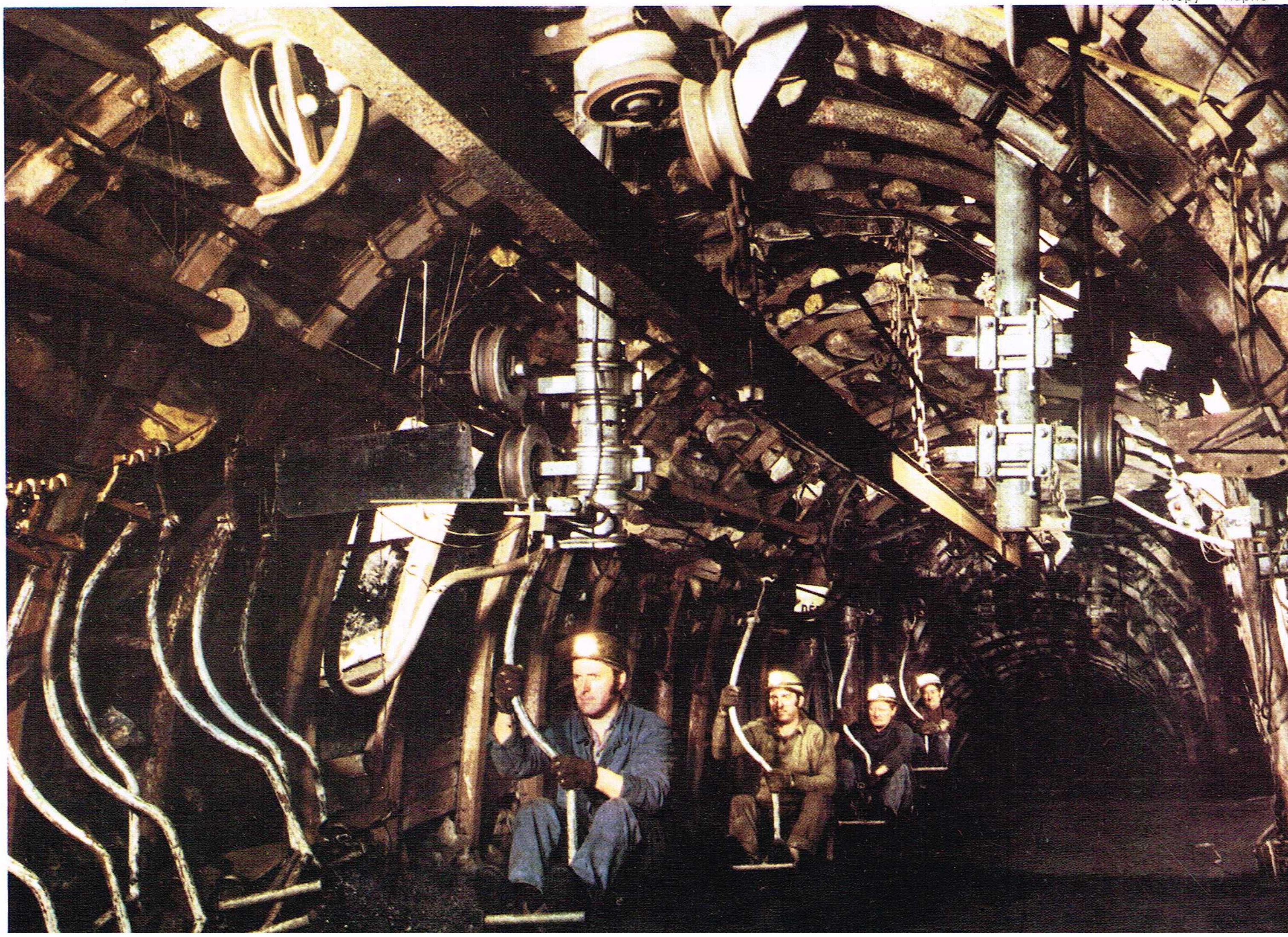

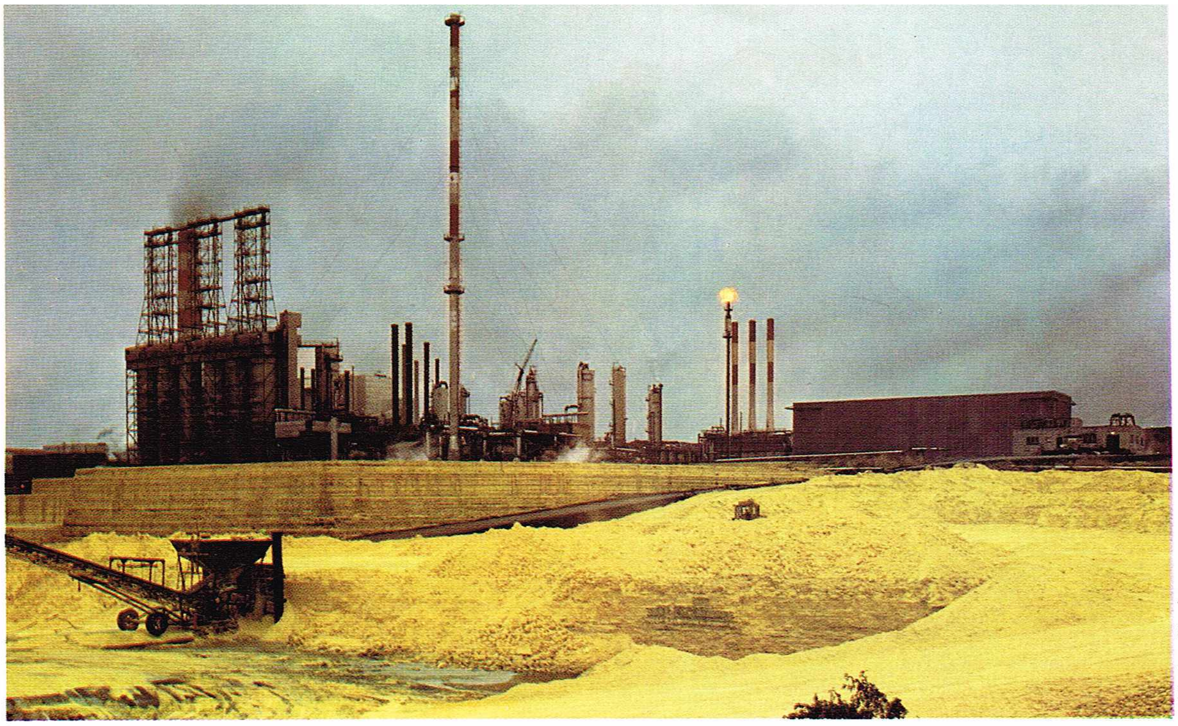

P. Koch - Rapho

◀ *Une usine de traitements des sables bitumineux dans la province d'Alberta au Canada avec, au premier plan, l'aire d'emmagasinage du soufre, produit de raffinage des sables imprégnés.*

carbone mortel. Les feux de minerai sont pour cette raison également très dangereux.

Le tragique bilan des grandes catastrophes collectives, depuis les 1 099 victimes du coup de poussière de Courrières en 1906, jusqu'aux 262 morts de l'incendie du puits de Marcinelle en 1956, est pour l'opinion publique l'expression même du danger constitué par les travaux souterrains. En fait, ce danger est limité par les efforts entrepris dans le domaine de la sécurité. L'heure du trajet du domicile au puits fait plus de morts que l'heure passée dans la mine.

Mais le danger est plus étendu. Pour un mort, les statistiques font apparaître 15 ou 20 invalidités permanentes et de nombreuses blessures légères. Aux accidents (éboulements, roulage, etc.) s'ajoute l'action des poussières sur les poumons du personnel, provoquant pneumoconioses et silicoses.

La rentabilité des mines souterraines est difficile à assurer dans ces conditions. On comprend aisément pourquoi les mines françaises sont en régression quand on sait que la géométrie du gisement est très tourmentée, et l'épaisseur des veines très faible.

Par contre, dans des conditions plus favorables, la production de charbon est concurrentielle. Les exploitations à ciel ouvert présentent d'énormes avantages techniques et également du point de vue de la sécurité d'exploitation.

Les schistes et les sables bitumineux

Les schistes et sables bitumineux désignent des roches contenant des matières organiques susceptibles d'être brûlées dans des installations thermiques (schiste d'Estonie) ou d'être traitées pour en extraire un liquide ou un gaz combustible.

Les caractéristiques et teneurs en matières organiques sont très variées : 400 litres d'huile par tonne de schiste traité en Estonie, 120 à 130 l/t au Colorado, 40 à 45 l/t dans le Bassin parisien.

C'est en France, en 1838, qu'est née la première exploitation mondiale de schiste. On a arrêté en 1955 l'exploitation d'Autun dont l'extension est limitée par les profondeurs qu'il faudrait atteindre.

La rentabilité, difficile à déterminer, de ces matériaux et les investissements énormes qu'ils nécessitent, car la valorisation n'est concevable que sur une grande échelle, font qu'ils n'ont pas fait l'objet d'une recherche systématique jusqu'en 1973.

Les sables bitumineux

Les plus grands gisements recensés se rencontrent en Angola, en Albanie, en Roumanie, en République malgache, en U. R. S. S., au Venezuela, à Trinité, au Canada et aux États-Unis. Seuls les gisements du Canada ont fait l'objet d'une cartographie complète et d'un début d'exploitation depuis 1967.

Les installations canadiennes n'ont réussi à équilibrer leur compte d'exploitation que depuis 1974.

La méthode d'extraction actuellement utilisée est celle du « nettoyage » à la vapeur et à l'eau chaude qui présente des inconvénients énormes pour l'environnement, car les eaux de traitement, chargées d'argiles et de fines poussières de sable, ne peuvent être rejetées dans les rivières.

Par contre, dans le nouveau procédé, dit d'« agglomération sphérique », développé dans la division de chimie du Conseil national de recherche du Canada, ce sont les argiles et les fines poussières qui sont agglomérées sous forme de sphères dures.

Il n'y a pratiquement qu'au Canada que l'on peut parler réellement de réserves récupérables. Ailleurs, les autres valeurs avancées correspondent plus vraisemblablement à des réserves en place et probables dans le cas de la Colombie et de la réévaluation vénézuélienne.

La conférence mondiale de l'énergie a donné les estimations suivantes (*tabl.* II) :

Tableau II

Estimation des réserves en sables bitumineux (Conférence mondiale de l'énergie, 1974)

Pays	Estimation (en millions de tonnes)
Amérique du Nord	
Canada (Alberta)	50 250
États-Unis	2 175
Autres	9
	52 434
Amérique du Sud	
Colombie	155 400 (?)
Venezuela	10 (réévaluées à 450 000)
Autres pays	
Madagascar	235
Roumanie	4
U. R. S. S.	4
Albanie	60

◀ *Tableau II : estimations des réserves mondiales de sables bitumineux faites par la Conférence mondiale de l'énergie, en 1974.*

Les schistes bitumineux

On connaît de nombreux gisements de « schistes » imprégnés. La production cumulée d'huile de schiste aurait été de 50 millions de tonnes jusqu'en 1960, époque où la concurrence pétrolière est devenue plus sévère.

Les plus importantes accumulations se trouvent aux États-Unis (Colorado, Wyoming et Utah), en U. R. S. S. (république d'Estonie), en Prusse orientale, en Chine, en Europe, au Brésil, au Zaïre, en Birmanie et en Thaïlande.

Il est très difficile de parler de réserves récupérables, car les procédés d'exploitation ne sont qu'au stade pilote.

L'effort de recherche actuelle se porte de plus en plus sur l'exploitation *in situ*. Cependant, il existe des procédés *ex situ* actuellement à l'épreuve aux États-Unis et au Brésil. Notons que l'U. R. S. S. et la Chine n'ont pas cessé d'exploiter leurs schistes car leurs gisements y sont particulièrement riches. On avance qu'une trentaine de millions de tonnes de schistes ont été traitées en 1975, soit 3 à 4 millions de tonnes d'huile (60 % de la production est brûlée comme du charbon). En Chine, il s'agit d'un gisement également charbonnier et l'on exploite les diverses couches à ciel ouvert.

Exploitation ex situ

Les procédés de traitement dérivent des recherches du Bureau of Mines.

● *Procédé NTU*

Dans le procédé NTU du Bureau of Mines, on réalise, en discontinu, une combustion à cocourant, dans un lit fixe, de schistes contenus dans l'unité. L'énergie nécessaire à la pyrogénation est fournie par la combustion du carbone résiduel déposé sur le schiste. Une partie du gaz effluent, épuré et recomprimé, peut être recyclé et injecté avec l'air pour participer à la combustion qui se fait de haut en bas. Cette technique ne permet qu'une médiocre récupération et exige de l'eau de refroidissement.

● *Procédé Union Oil*

Le procédé Union Oil fonctionne en continu. L'air qui sert de comburant au carbone résiduel est injecté en tête de l'unité. Le schiste brut est introduit par une pompe hydraulique à la base de l'unité et les couches sont éliminées à la partie supérieure. La roche est contenue dans un réservoir tronconique dont la petite section est fermée par ce que l'on appelle la « pompe à roche ». La charge de schistes est d'abord allumée à la surface supérieure du lit et l'injection d'air permet la propagation de la zone de combustion vers le bas. La pompe à roche est alors mise en route, et sa vitesse est ajustée de telle manière que le débit de schiste, à contre-courant de l'écoulement gazeux, assure la stabilisation de la zone de combustion à environ 60 cm au-dessous de la surface du lit de schiste.

Avant de quitter l'unité, le schiste est donc un peu refroidi par l'air injecté. La zone de pyrolyse se trouve au-dessous de la zone de combustion. Les vapeurs d'huile se condensent sur le schiste froid et sont récupérées dans la partie inférieure de l'installation. Ce procédé ne nécessite pas d'eau de refroidissement et s'adapte à une large gamme de dimensions de grains, mais il est nécessaire de traiter des schistes relativement riches.

● *Procédé Tosco*

Le procédé Tosco mis au point par The Shale Oil Corporation est une adaptation du *procédé suédois Aspeco*. La pyrogénation est réalisée dans un tambour, grâce à l'échange de chaleur entre le schiste et des billes d'alumine chauffées à l'extérieur de l'unité. Ce procédé devrait être étendu à l'échelle industrielle par Atlantic Richfield.

Le schiste, préchauffé par les gaz de combustion sortant de l'unité de chauffage des billes, circule dans le tambour de pyrolyse dans le même sens que les billes. Les vapeurs d'huile sont envoyées dans un système de dépoussiérage et de séparation. L'huile produite diffère peu de celle obtenue par le procédé de pyrogénation par combustion de gaz. Par contre, ce procédé fournit un gaz qui n'est pas dilué par les produits de combustion, et qui a donc un haut pouvoir calorifique.

La récupération est élevée et les débits sont importants pour un encombrement relativement faible. Cependant, cette méthode met en jeu des équipements mécaniques complexes pour assurer un broyage très fin des schistes et les qualités des billes. Enfin, le résidu est une poudre difficile à éliminer.

Exploitation in situ

Tous ces procédés laissent, après traitement, des déchets, et partant, posent des problèmes d'environnement. C'est pourquoi on se tourne de plus en plus vers la production *in situ*.

La première technique consiste à créer une porosité artificielle par fracturation à l'eau sous pression et à envoyer ensuite du sable pour assurer le soutènement des failles. On crée ainsi une perméabilité artificielle. On injecte de l'air pour assurer la combustion des schistes, allumés avec une résistance descendue dans les puits. La combustion se propage, provoquant la pyrolyse en avant du front de flamme ; l'huile peut alors sortir par d'autres puits, comme dans une exploitation pétrolière, après pompage et récupération des gaz ; le procédé est donc inspiré des méthodes thermiques de récupération assistée du pétrole. Il est, *a priori*, beaucoup plus difficile à mettre en œuvre et l'on peut douter de sa rentabilité à court terme.

On ne peut donc pas déterminer la richesse minimale permettant une exploitation rentable. On ne peut donc pas estimer les réserves récupérables en schistes bitumineux, il s'agit simplement de ressources identifiées (*tabl.* III).

Tableau III

Ressources identifiées et hypothétiques en schistes bitumineux (W. C. Culberston et J. K. Pitman USGS Professional Paper 820)

Continents	Ressources identifiées (en mégatonnes)		Ressources hypothétiques (en mégatonnes)	
Rendements en huile en l/kg	0,1-0,4	0,04-0,1	0,1-0,4	0,04-0,1
Afrique	15 500	faible		
Asie	14 000	2 170	310	575 000
Océanie	faible	160		
Europe	10 900	930	15 500	31 100
Amérique du Nord	60 600	232 000	50 800	246 000
Amérique du Sud	faible	124 000		497 000
Total mondial	101 000	359 260	66 610	1 349 100

▶ *Tableau III : ressources mondiales, identifiées et hypothétiques, en schistes bitumineux.*

Le pétrole

Les réserves

L'estimation des réserves de pétrole est très délicate. Classiquement, on distingue :

— les **réserves prouvées,** qui correspondent à des gisements connus et à des quantités récupérables avec une quasi-certitude ;

— les **réserves probables,** qui correspondent à ce que l'on espère récupérer à partir de gisements mis en évidence, mais dont l'importance n'est pas connue avec certitude ;

— les **réserves possibles,** qui correspondent à ce que l'on peut espérer découvrir dans des provinces pétrolifères reconnues ;

— les **réserves ultimes,** qui correspondent aux estimations d'experts géologues quant aux quantités existantes d'hydrocarbures.

Au niveau des réserves prouvées, il existe une grande disparité d'une publication à l'autre, au niveau même du total mondial : de 82 700 à 94 100 millions de tonnes au 1[er] janvier 1976.

Importance des réserves par rapport aux besoins

Le ratio traditionnel réserves prouvées/production courante ne rend évidemment pas à lui seul compte de l'importance des réserves par rapport aux besoins, car c'est aux besoins prévisibles, en fonction d'hypothèses de croissance de la consommation, qu'il faudrait en fait se référer. Mais là, les prévisions sont hautement aléatoires.

Par contre, on peut juger historiquement de la valeur de ce ratio. Pour ce faire, on peut réaliser un ajustement linéaire de la série chronologique des réserves prouvées et de celle de la production. Ces calculs ont été faits par l'Institut français du pétrole.

Ainsi, pour une période comprise entre 1944 et 1974, on trouve, avec une bonne estimation statistique, un ratio de près de 33 ans pour les séries publiées par *Oil and Gas Journal*. S'agit-il là d'un optimum de gestion ou d'une coïncidence statistique au niveau mondial ? La question reste difficile à résoudre et les études de l'évolution de ce ratio selon les zones géographiques mettent en évidence des divergences importantes. La tendance est à la baisse pour les pays producteurs, avec une stabilisation à un niveau compris entre 10 et 15 ans.

Marc Riboud - Magnum

▲ ***La production quotidienne moyenne de pétrole au Moyen-Orient est 300 fois supérieure à celle des États-Unis. Ici, une unité de production de pétrole dans l'île de Das (golfe Persique).***

Cette disparité est encore plus marquée quand on s'attache à la répartition des réserves suivant les zones géographiques. De plus, si l'on suit les séries chronologiques pour un même pays, on observe des variations extrêmement importantes.

Les chiffres publiés peuvent varier dans des rapports de 1 à 3 qui ne peuvent s'expliquer ni par la production, ni par la découverte de nouveaux gisements, mais par des réajustements qui traduisent une grande incertitude dans ce domaine. En fait, la définition des réserves est économique. Le taux de récupération par rapport à l'huile en place peut varier considérablement.

En effet, par les méthodes classiques d'exploitation, on ne récupère que 20 à 30 % de l'huile en place. Ce pourcentage peut être augmenté par des techniques de récupération assistée quand l'environnement technico-économique le permet. Nous reviendrons plus loin sur ce point, car l'enjeu est considérable.

De plus, la publication d'un chiffre de réserves a un contenu politique. Les intérêts ne sont pas les mêmes, du point de vue de la firme dont le but est de maximiser des bénéfices, et du point de vue d'un État producteur dont les préoccupations se situent à plus long terme et sur un plan macro-économique. Ainsi, une firme aura tendance à se satisfaire d'un ratio réserves/production (exprimé en années courantes de production) de 10 à 15 ans, alors qu'un État cherchera à avoir un ratio plus élevé.

Cependant, d'un point de vue micro-économique, toute production intervenant au-delà de la 10[e] année ne présente plus guère d'intérêt économique. Le comportement rationnel d'un producteur disposant de réserves est d'épuiser son stock en 10 ou 15 ans, pour rentabiliser ses investissements.

Donc, cette tendance s'explique par une volonté des producteurs à maximiser leurs bénéfices autant que par un épuisement des réserves. Cette stratégie aboutit à aligner la production sur le volume des réserves, quitte à imposer à cette production un rythme de croissance supérieur à celui de la demande globale d'énergie.

Ainsi, l'industrie pétrolière, disposant d'un ratio réserve/production supérieur à l'optimum de la firme et d'un coût marginal de développement très inférieur à celui des énergies concurrentes, a pu couvrir la quasi-totalité des besoins nouveaux, au détriment du charbon, de l'uranium, etc.

Mais, depuis 1970, le rythme de découverte est inférieur à celui de la production annuelle et il devient crucial de découvrir de nouvelles réserves. C'est pourquoi l'industrie s'oriente vers la recherche dans des conditions extrêmement difficiles, en mer du Nord et en Arctique par exemple.

Ce phénomène est exacerbé par la disparité des coûts techniques de production d'un champ à l'autre. Ceux-ci varient dans un rapport de 1 à 50 entre le Koweit et la mer du Nord septentrionale ou les zones arctiques.

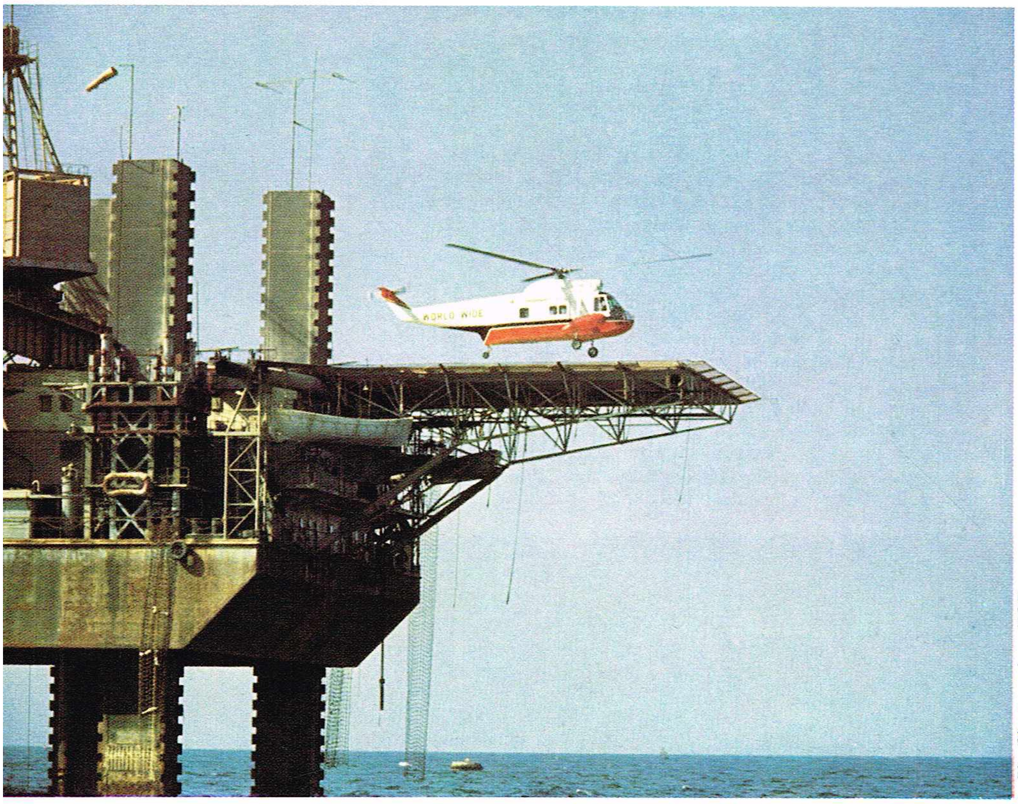

J.-Ph. Charbonnier - TOP

▲ *Une plate-forme de forage en acier dans l'émirat du Qatar (golfe Persique).*

▼ *La houle provoque des mouvements latéraux et un pilonnement qu'il faut atténuer par un « système compensateur de pilonnement », qui maintient la sonde au même niveau.*

Photothèque Total

Les raisons de cette disparité sont nombreuses :

— les *caractéristiques physiques* de chaque gisement : porosité, perméabilité, pression, mécanisme de production, etc. ;

— les *conditions géographiques :* climat, infrastructure routière, etc. ;

— les *conditions géologiques :* complexité sédimentologique et structurale, dureté des roches, type de piège, etc.

Ceci se traduit par des différences au niveau des débits de puits. La production quotidienne moyenne au Moyen-Orient est 300 fois supérieure à celle des États-Unis.

Ajoutons qu'aux États-Unis, il est possible de développer des champs d'importance plus faible, car ils se trouvent sur les lieux de consommation.

Les sociétés ont de plus tendance à choisir des rythmes de production inférieurs quand il s'agit de ressources se trouvant sur le territoire national, permettant ainsi un meilleur drainage et allant dans le sens de la conservation du patrimoine du pays.

Ce souci de trouver des sources d'approvisionnement politiquement plus sûres, ainsi que la nécessité de découvrir du pétrole, a conduit les sociétés à investir de façon massive depuis 1972 (21 720 M$ en 1974 par exemple) dans le secteur de l'exploration production.

La part des investissements dans ce secteur, par rapport aux investissements totaux des sociétés pétrolières, a subi une diminution de 1961 à 1971. Puis cette tendance s'est inversée pour atteindre 47,3 % en 1974, pour le monde non socialiste, et même 71 % aux États-Unis. Les États-Unis ont toujours favorisé la recherche pétrolière par une politique fiscale très favorable à ces investissements. Les soucis d'indépendance énergétique ne font que conforter cette politique.

Les coûts de production, particulièrement bas, du Moyen-Orient (0,15 dollar/baril) ainsi que l'énormité relative des réserves (57 % des réserves mondiales) sont sûrement à l'origine de la crise pétrolière actuelle. Bien que le ratio réserves/production soit supérieur à l'optimum économique d'une firme, il est passé, pour le Moyen-Orient, de 75 années de production courante en réserves en 1964 à 38 en 1973, et l'on a pris conscience qu'il ne s'agissait pas d'une ressource renouvelable. Par contre, l'euphorie de la période précédente, reposant sur des réserves importantes mais concentrées géographiquement, a permis au pétrole du Moyen-Orient de jouer un rôle directeur sur le marché mondial de l'énergie. Son prix lui permettait de se substituer aux autres formes d'énergie.

La recherche d'hydrocarbures se poursuit en mer et en Arctique. Chaque année, de nouveaux records techniques sont battus. En 1976, des forages d'exploration ont été menés à bien au large de la Thaïlande, par 1 000 mètres de profondeur d'eau. Au large de la Californie, un champ est exploité sous 259 mètres d'eau.

Cependant, ces conditions de travail difficiles influencent très fortement les coûts de production, et la rentabilité des champs est plus délicate à assurer. On doit donc trouver en mer des champs de plus grande taille afin de financer des coûts de forage et de développement 4 à 5 fois supérieurs à ceux d'un même gisement situé dans des conditions analogues mais à terre. Le financement des installations d'évacuation des terminaux vers la terre est particulièrement délicat.

En mer, la distance économique entre les champs est multipliée. Il est donc particulièrement difficile de profiter des pipe-lines construits pour de gros gisements, pour développer les petits gisements proches.

Malheureusement, dans un bassin pétrolier, il y a plus de petits gisements que de gros, et ce n'est pas parce qu'un forage d'exploration est positif que l'on a pour autant découvert un gisement d'intérêt commercial. De plus, les délais de mise en exploitation sont longs : il faut compter de 3 à 5 ans entre le premier forage et le début de la production, et davantage en mer comme l'a montré le développement des champs en mer du Nord.

L'exploitation en mer

La technologie de l'exploitation en mer évolue très rapidement. Les techniques diffèrent selon la profondeur d'eau.

Près des côtes, les supports de forage reposent sur le fond. Puis, quand la profondeur augmente, jusqu'à une

soixantaine de mètres, on utilise des *plates-formes de forage* dites *auto-élévatrices*. Ce sont des engins pourvus de grandes pattes en acier qui peuvent se rétracter pendant le transport, et reposent sur le fond pendant le forage. Ainsi, avec un même appareil, on peut forer plusieurs puits.

Au-delà, il faut utiliser des supports flottants : *bateaux de forage* et *plates-formes* dites *semi-submersibles*. Celles-ci sont maintenues à la surface par des flotteurs immergés pour atténuer l'effet des vagues. La houle provoque des mouvements latéraux, mais également un pilonnement qu'il faut éliminer pour que l'outil de forage puisse travailler dans des conditions satisfaisantes.

Ces mouvements de bas en haut sont atténués par « un système compensateur de pilonnement » qui maintient la sonde à un même niveau.

Les mouvements latéraux sont empêchés par un système d'ancrage. Cependant, quand la mer est trop forte, les systèmes classiques manquent de souplesse et risquent de rompre.

Un système d' « ancrage dynamique » a été développé et testé dans des conditions très difficiles, au Labrador par exemple. Au départ, ces systèmes ont équipé des bateaux de forage qui travaillent par des profondeurs d'eau plus grandes.

Les performances réalisées par le bateau de forage à positionnement dynamique le *Pélican* de la Compagnie française des pétroles ont prouvé l'efficacité de cette technique.

Des émetteurs placés sur le fond autour du trou envoient en permanence des signaux acoustiques à des récepteurs placés sur la coque du navire. Ces signaux donnent, avec une grande précision, la position du bateau par rapport à la tête du puits. Ils sont interprétés et analysés par un ordinateur qui met en marche des propulseurs auxiliaires. Ces derniers peuvent provoquer des mouvements du bateau dans toutes les directions, pour maintenir l'engin de forage à la verticale du trou. Des plates-formes semi-submersibles sont maintenant également équipées de ce système.

Pour développer les champs, on construit des plates-formes fixes, reposant sur le fond, à partir desquelles on effectue de 20 à 30 forages dirigés vers divers points du réservoir, dont le drainage est ainsi assuré.

Ces plates-formes sont réalisées soit en acier, soit en béton. Les plates-formes en béton reposent sur le sol marin par leur propre poids, ce qui suppose des études détaillées de génie civil. Les plates-formes en acier sont fixées sur le fond par des piliers battus sur lesquels sont fixés les montants de la structure.

Pour permettre de régulariser la production, il faut disposer d'un stockage. Celui-ci peut être incorporé dans les structures des plates-formes en béton ou construit indépendamment. Il s'agit d'énormes structures en béton entourées d'un mur brise-lames, percé d'une multitude de trous pour réduire l'énergie des vagues. On peut, de plus, y installer les appareils de traitement de la production.

La production est ensuite évacuée par pipe-line sous-marin jusqu'à la côte et en mer par des bouées de chargement de navires pétroliers.

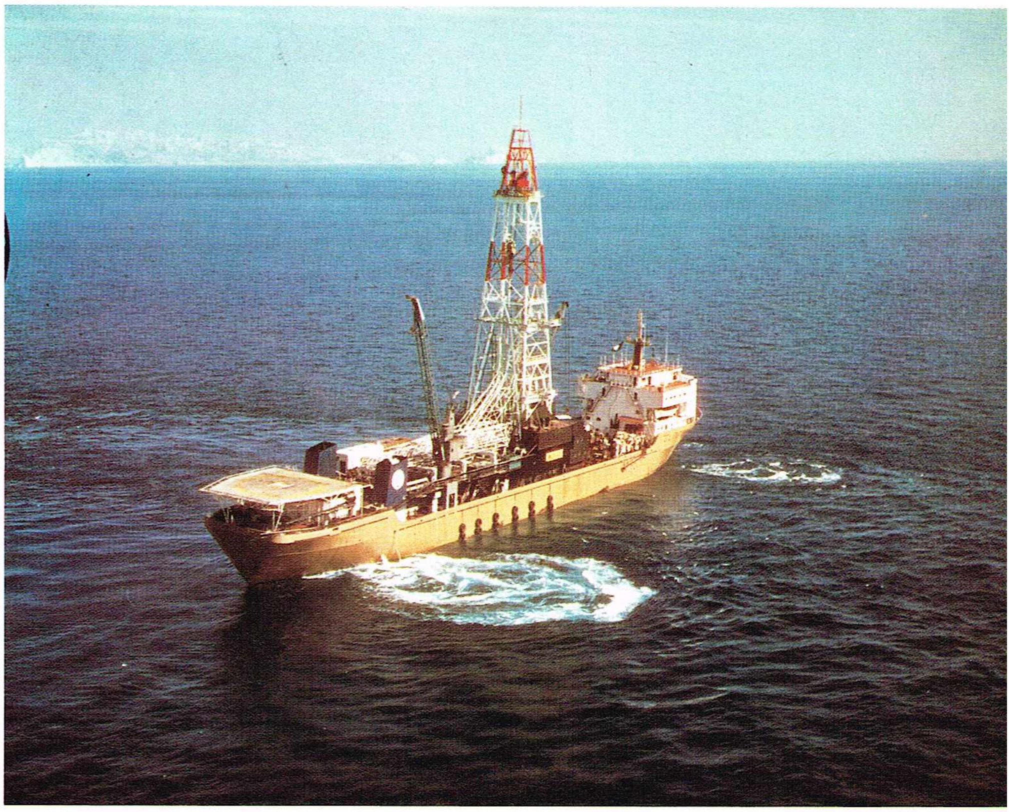

Photothèque Total

▲ ***Un système « d'ancrage dynamique » équipe le* Pélican *de la Compagnie française des pétroles et lui permet de forer par grande profondeur.***

Photothèque Total

◀ ***Structure en béton entourée d'un mur brise-lames.***

Photothèque Total

◀ ***Un stockage en mer.***

Par de plus grandes profondeurs d'eau, on est conduit à utiliser des stockages articulés par un cardan reposant sur le fond.

De même, des têtes de puits et des stockages entièrement sous-marins reliés à des pipes ou à des supports flottants de chargement en mer sont à l'épreuve pour permettre d'exploiter les gisements mis en évidence par grandes profondeurs.

L'exploitation en zone arctique

En 1968, la découverte en Alaska de l'énorme gisement de Prudhoe-Bay, qui, avec 9,6 milliards de barils, représente le quart des réserves de pétrole des États-Unis, a démontré l'intérêt de la recherche pétrolière dans ces zones inexploitées.

Les conditions y sont extrêmement difficiles. Des températures de — 40 °C y sont fréquentes. Il fait nuit du 1er novembre au 15 février. Des vents violents (20 à 80 km/h) balayent ces régions en permanence. De plus, l'équilibre de l'environnement y est très fragile. La faune et la flore doivent être protégées avec une attention particulière.

L'inexistence des moyens de communication entraîne des frais de logistique élevés (50 % du coût total environ). Une partie du matériel doit être transportée en avion. Le sol gelé en permanence pose des problèmes de génie civil nouveaux pour les forages. Les installations doivent être isolées par rapport au sol, donc reposent sur des pieux ou sur un socle de terre compactée.

Les premières centaines de mètres du forage sont équipées d'un double tubage. Dans cet espace annulaire est installé un équipement de refroidissement ou d'isolation thermique, car la chaleur dégagée par les fluides et boues de forage ferait dégeler et fluer le sol, compromettant ainsi la stabilité de l'ouvrage.

On utilise des fluides de forage spéciaux (mousses refroidies) pour accroître la vitesse de pénétration de l'outil. Ici comme en mer, la part relative du coût propre au sondage étant plus forte que dans les conditions normales à terre, il est important de diminuer au maximum le temps d'immobilisation du matériel.

De plus, le froid intense fragilise les aciers; il faut utiliser des générateurs de vapeur pour réchauffer les outils et le matériel tubulaire afin d'éviter la rupture.

La production en mer dans ces zones implique l'utilisation de technologies nouvelles, comme des plates-formes unipodes à l'épreuve des glaces, etc.

Il faut compter 3,5 millions de dollars par forage d'exploration dans les terres arctiques et presque 9 millions en mer Arctique contre 750 000 dollars à terre et 4 à 8 millions de dollars en mer du Nord.

Les coûts d'installations des pipes sont également très élevés et comparables aux coûts de construction des autoroutes urbaines.

▼ ***Le souci de trouver des sources d'approvisionnement politiquement plus sûres et la nécessité de découvrir du pétrole ont conduit les sociétés à favoriser la recherche des hydrocarbures en mer et en Arctique malgré les difficultés techniques et les investissements élevés.***

Photothèque Total

La récupération assistée

L'autre voie dans laquelle les compagnies se lancent pour augmenter leurs ressources en huile est celle de l'amélioration du coefficient de récupération.

Le taux de récupération moyen est de l'ordre de 25 %. Le taux de récupération naturel, c'est-à-dire la quantité correspondant aux forces de décompression élastique et d'expansion des gaz, n'est que de 10 %. Dans une deuxième phase, il faut utiliser des pompes, ou faire appel à des méthodes de récupération assistée.

● *Procédé par injection d'eau*

La plus ancienne méthode est celle de l'injection d'eau. Elle consiste à injecter de l'eau dans la nappe aquifère sous-jacente. Ainsi le gisement est maintenu en pression, et le balayage de l'huile par l'eau permet d'augmenter le taux de récupération de 5 à 10 %.

Cependant, on rencontre des difficultés; à cause du colmatage et de la corrosion due à l'eau, il faut prévoir une installation de déshuilage; l'exploitation est abandonnée quand la proportion d'eau est trop importante.

En effet, l'eau, qui ne se mélange pas à l'huile, a pour effet de pousser l'huile, mais également d'en « coincer » une partie dans les pores les plus fins de la roche; cette huile ne pourra plus être mobilisée à cause du jeu des forces de tension superficielle.

Pour accroître le balayage à l'échelle macroscopique, il faut augmenter la viscosité de l'eau en y ajoutant des polymères organiques, polyacryalamide ou polysaccharides par exemple.

Une autre solution consiste à augmenter le balayage à l'échelle microscopique en formant des micro-émulsions, c'est-à-dire des solutions colloïdales homogènes d'eau et de pétrole brut, stabilisées au moyen de tensio-actifs et d'alcool. Ainsi on solubilise une partie de l'huile piégée dans les micropores.

Le coût de ces additifs étant élevé, c'est un « bouchon » d'eau et de polymères ou d'eau et de tensio-actifs qui est injecté et ensuite poussé par de l'eau. Les tensio-actifs s'adsorbent sur les parois de la roche. Il faut donc pour les déplacer envoyer des solutions tampon, puis de l'eau pure. Ainsi, les diverses solutions sont mobilisées à travers le réservoir et le déclin de la production ralentit.

● *Procédé des déplacements miscibles*

Un autre grand type de procédé de récupération assistée est celui des déplacements miscibles. L'huile sera poussée par des produits qui ne forment pas d'interface, par exemple des bouchons d'hydrocarbures légers, ou par du gaz carbonique. Le gaz associé peut être réinjecté pour améliorer la récupération. Certains pays producteurs qui n'ont pas sur place un marché suffisant pour la production de leur gaz l'utilisent de cette façon. Une partie du gaz se dissout dans l'huile et abaisse la viscosité; ainsi sa mobilisation est améliorée.

Si l'on dispose d'une source de gaz carbonique importante à proximité, on peut aussi l'utiliser; cette méthode est à l'essai aux États-Unis, mais elle est difficilement généralisable, car le gaz carbonique coûte très cher à transporter.

Pour abaisser la viscosité, on peut également augmenter la température et même provoquer une pyrolyse de l'huile. L'injection de vapeur, bien qu'augmentant la température, n'a pas un rendement très bon. De plus, le coût de production de la vapeur est élevé, même si elle est injectée en alternance avec de l'eau.

● *Procédé Cofcaw*

Une autre méthode thermique est le procédé Cofcaw (Combination of Forward Combustion and Water Flooding). Elle repose sur la combustion *in situ*. L'huile est allumée en injectant de l'air et en descendant une résistance dans le puits. La zone de combustion se propage dans le réservoir. En avant de cette zone, l'élévation de température provoque une pyrolyse et donc une mobilisation des fractions légères de l'huile qui reste piégée dans la roche magasin. La combustion est contrôlée par l'injection d'air, et une meilleure répartition de la chaleur est assurée par une injection d'eau. Cette technique est développée sur des champs pilotes en Californie.

Grâce à l'augmentation des prix du brut, ces techniques deviennent rentables, du moins pour les pays producteurs et gros consommateurs. C'est pourquoi les gisements pilotes sont presque tous situés aux États-Unis et au Canada.

H. Gloaguen - Viva

▲ *L'industrie du raffinage est destinée à fournir tous les dérivés du pétrole dont un marché a besoin ; ici, la raffinerie Elf installée à Feysin (France).*

Cependant, certains pays producteurs, qui ont des plans ambitieux de développement industriel, dont le financement est assuré par les revenus pétroliers, seront aussi conduits à utiliser ces techniques (Iran, Venezuela, etc.).

Par contre, les émirats du golfe Persique et l'Arabie Saoudite n'ont pas les mêmes motivations, étant donné l'importance des réserves par rapport à leurs besoins.

Cependant, pour les gisements situés près des zones de consommation, l'espoir d'augmenter le taux de récupération de 25 à 50 % et même 60 % représente un enjeu qui n'est pas dédaignable.

Le raffinage

L'industrie du raffinage, située au point médian de la chaîne pétrolière, est destinée à fournir, par fractionnement ou recombinaison des éléments constitutifs des pétroles bruts, tous les dérivés du pétrole dont un marché a besoin.

Les produits

Les produits que l'on tire du pétrole sont très divers : on distingue les produits énergétiques et les autres. Les hydrocarbures combustibles sont utilisés pour leur commodité d'emploi et entrent dans le champ de la concurrence énergétique. Les autres répondent à d'autres soucis que de libérer des calories. C'est la nature même du produit qui répond à des applications que, le plus souvent, seule l'industrie pétrolière peut satisfaire.

● *Produits énergétiques*

La gamme des produits énergétiques s'étend depuis les gaz jusqu'aux fuels lourds.

— Les **gaz de pétrole** commercialisés sous forme gazeuse ou liquide (G. P. L.) sont les plus légers : *butane, propane*.

— L'**essence** est à la base de divers produits. L'une des utilisations majeures a été et demeure la fabrication des carburants pour les moteurs à combustion interne.

— Les **gas-oils** se sont développés à la suite de l'invention des moteurs Diesel qui sont utilisés pour la propulsion des véhicules lourds sur route et sur rail ou des navires.

— Le **fuel-oil domestique** est un gas-oil destiné à être brûlé pour le chauffage domestique et dans les petites et moyennes entreprises.

— Le **pétrole lampant** a presque disparu en Europe. Ce produit était normalement destiné à être brûlé dans une lampe à mèche.

— Les **carburéacteurs**, très voisins chimiquement, sont utilisés pour les moteurs à turbines, en particulier pour les avions à réaction.

— Les **fuel-oils** recouvrent un ensemble de produits de composition et de destination variables. On distingue le *fuel léger*, le *fuel lourd n° 1*, le *fuel lourd n° 2*. Pour respecter l'environnement, ces produits sont en général désulfurés et constituent la base de la fourniture

M. Delluc - Viva

▲ *La raffinerie B. P. à Dunkerque; l'implantation, ici dans le port d'importation, réduit au minimum les frais de transport de la matière première.*

d'énergie. Le *Bunker C* est un fuel lourd (résidu de distillation) destiné à être brûlé dans les navires en haute mer. La pollution éventuelle n'est pas prise en considération.

● *Produits non énergétiques*

Les produits non énergétiques sont très divers; on peut également les classer par leur densité qui correspond grossièrement à des propriétés particulières.

— Les **gaz** peuvent être récupérés des gaz de raffinerie ou de champ et craqués à la vapeur pour fournir de l'*éthylène*.

— Les **essences spéciales** sont des solvants organiques dont les propriétés sont utilisées dans l'industrie alimentaire pour extraire les huiles, en parfumerie, pour le nettoyage et la teinturerie, etc.

— Le **naphta** est à la base de pratiquement toute la pétrochimie européenne. Par vapocraquage, on obtient l'ensemble des produits recherchés pour la pétrochimie (*éthylène, propylène, butadiène, aromatiques*, etc.).

— Les **huiles** et les **graisses**, grâce à leur viscosité, sont recherchées pour la lubrification.

— Les **cires** et les **paraffines** sont produites lors du raffinage des huiles lubrifiantes; ce sont des corps solides qui entrent dans la composition d'isolants et de produits d'entretien.

— Les **bitumes**, première utilisation des hydrocarbures par l'humanité, sont le matériau de choix pour l'isolation et le revêtement des chaussées.

▼ *Unité de distillation du pétrole brut dans une raffinerie Total.*

Photothèque Total

Les problèmes du raffinage

Cette longue liste de produits montre que l'industrie du raffinage est complexe. Pour satisfaire aux nombreuses et différentes spécifications de tous ces dérivés et répondre à la demande du marché, le raffineur peut jouer sur quatre grands groupes de paramètres :

— les types de pétroles bruts utilisés et leurs caractéristiques techniques;

— les unités de traitement en raffinerie et leurs rendements en coupes intermédiaires ou en produits finis;

— les quantités de chacun des produits finis demandés par le marché actuel et probable;

— la taille et la position géographique des unités de traitement dont on peut disposer.

Le problème du raffinage est de combiner les moyens techniques de séparation (distillation, adsorption, absorption, extraction par solvant, cristallisation, etc.) et les procédés physico-chimiques et chimiques (craquage, reformage, déshydrogénation, polymérisation, isomérisation, etc.) afin de répondre à la demande en produits finis au moindre coût.

Le pourcentage de demandes de chaque produit varie beaucoup d'une zone géographique à l'autre. Le premier moyen consiste à jouer sur les coûts et propriétés des différents pétroles bruts disponibles sur le marché. La position géographique représente également un facteur de souplesse pour les grandes compagnies intégrées et multinationales.

Dans le monde, on peut distinguer trois sortes de raffineries en fonction de leur implantation.

— La première est constituée par les raffineries situées près des sources d'approvisionnement ou, pour les pays consommateurs, dans les ports d'importation. Ce choix, s'il réduit au minimum les frais de transport pour la matière première, ne tient pas compte des dépenses de mise en place des produits finis.

— La seconde regroupe les raffineries intermédiaires, situées entre les gisements et les marchés pour utiliser au mieux la flexibilité des sources de pétrole brut et des besoins. Ces raffineries correspondent le plus souvent à des ports de soutage importants.

— La dernière correspond aux raffineries implantées au voisinage d'un marché de consommation. Ce sont ces raffineries qui se sont développées le plus vite au cours des 20 dernières années.

La situation risque de changer parce que les pays producteurs ont la volonté de commercialiser des produits finis plutôt que du pétrole brut, car la valorisation de leurs ressources naturelles pourrait ainsi être augmentée.

Une solution pourrait consister à implanter dans les pays producteurs des raffineries de très grandes tailles mais simplifiées produisant naphta, gas-oil et fuel-oil lourds désulfurés. Ces produits semi-finis expédiés par navires vers les pays consommateurs seraient traités pour être adaptés aux exigences de chaque marché.

Pour ajuster la production à la demande, le raffineur dispose de tout l'arsenal technique des procédés. Ceci entraîne une grande complexité des raffineries, mais apporte une souplesse accrue.

Les sociétés seront ainsi amenées à utiliser des ordinateurs pour résoudre quatre grandes catégories de problèmes.

— Les études économiques d'ensemble qui fixent notamment les programmes d'investissements en fonction des perspectives d'évolution du marché.

— L'établissement des plans opérationnels de production, de raffinage, de transport et de distribution. On utilise là aussi des modèles mathématiques simulant la marche des unités et qui permettent de satisfaire à la demande en minimisant les coûts de traitement et de distribution.

— Le contrôle automatique de la marche des unités permettant un réglage très fin en fonction des variations des divers paramètres physiques.

— Les calculs d'ingénierie pour la construction des unités prévues par les programmes d'investissement. Il s'agit là de concevoir au mieux les unités répondant aux objectifs fixés.

Les techniques de raffinage

Nous ne détaillerons pas ici les divers procédés de raffinage, mais en indiquerons simplement les grandes lignes.

L'opération de base est la *distillation* qui permet de fournir les grandes « coupes ». Celles-ci servent ensuite de base aux produits finis, ou sont traitées pour obtenir des produits plus élaborés. C'est à ce niveau que l'on peut jouer le plus sur les qualités intrinsèques des divers pétroles bruts.

Les unités de conversion permettent de pallier une certaine rigidité dans les approvisionnements. La raffinerie peut soit être liée par des contrats à long terme, ou ne traiter que les pétroles bruts du groupe.

Si les déséquilibres temporaires entre les rendements de distillation et le marché peuvent être ajustés par le jeu des divers pétroles bruts, dans le cas d'un déséquilibre permanent, par exemple un marché très demandeur en essence, il faut utiliser des unités de conversion destinées à transformer des produits lourds en produits plus légers : c'est le cas aux États-Unis, par exemple.

Les *unités de craquage* fonctionnent à partir de distillats moyens ou lourds et produisent des essences.

Pour que les produits soient conformes aux spécifications en vigueur, on est amené à faire subir à certains produits des traitements de finition, par exemple la *désulfuration*, l'*adjonction d'additif*, etc.

La distillation produit deux coupes d'essences. La coupe la plus lourde est traitée par un *reformage catalytique* qui sert essentiellement à accroître l'indice d'octane de l'essence en vue de son utilisation comme carburant automobile. L'unité de reformage est donc un complément normal de la distillation.

Le raffinage est donc une technique complexe, utilisant un personnel peu nombreux mais spécialisé, nécessitant des investissements importants et dont la marge bénéficiaire est étroite (11 %).

L'*allure de marche*, c'est-à-dire le rapport entre la quantité de brut et la capacité nominale, est un facteur très important, car les frais fixes représentent 60 % du coût total. Les frais de traitements sont donc très sensibles à toute variation de l'allure de marche. Depuis la guerre du Kippour, celle-ci a particulièrement diminué, la rentabilité de toute la chaîne pétrolière est dans ce cas remise en question, surtout quand à ceci s'ajoute une hausse du prix du brut.

L'industrie du raffinage dépend en amont de l'approvisionnement en pétrole brut, et en aval du marché. Cela explique la nécessité pour l'industrie pétrolière de l'intégration verticale.

Les récents événements pétroliers tendent à détruire cette intégration, mais on peut penser qu'au-delà des préoccupations politiques, l'intérêt mutuel des pays consommateurs et des pays producteurs conduira à trouver un terrain d'entente harmonieux. Les coûts de traitement, de transport, de mise en place et de distribution sont élevés. L'industrie utilise un outil spécifique dont les contraintes économiques et techniques doivent être respectées sous peine de voir la rentabilité de l'ensemble de la chaîne pétrolière compromise.

La pétrochimie

Bien qu'il ne s'agisse pas d'utilisation énergétique des hydrocarbures, la pétrochimie représente une demande de produit pétrolier importante, environ 5 %, qui, dans les pays d'Europe, entre en concurrence avec la demande de carburant.

Les deux matières premières de base de la pétrochimie sont le **gaz** et le **naphta**, donc une coupe essence de la distillation atmosphérique.

Les procédés de base sont :

— Le *vapocraquage*, source principale des oléfines et dioléfines, mais aussi des aromatiques.

— Le *reformage catalytique*, dont le reformat à haut indice d'octane, destiné le plus souvent à la constitution des carburants automobiles, recèle une proportion importante d'aromatiques. Il y a donc pour ces produits concurrence entre leur valorisation comme constituant à haut indice d'octane des carburants, et leur valorisation en tant que produit de base de la pétrochimie. Cette concurrence est exacerbée par les mesures antipollution sur les carburants qui tendent à limiter leur teneur en plomb. Pour compenser la perte d'indice d'octane qui s'ensuit, il faut augmenter la teneur en aromatiques, qui sont également des produits polluants.

— Le *reformage à la vapeur*, qui opère une conversion des charges pétrolières en hydrogène et en gaz carbonique permettant par la suite la synthèse de l'ammoniac avec l'azote obtenu par distillation de l'air.

Nous ne décrirons pas ici les grands procédés de la pétrochimie (voir le volume de *Chimie*), mais cependant cette industrie, en pleine expansion, représente des besoins en hydrocarbures sans cesse en augmentation. Ajoutons de plus que les hydrocarbures trouvent sur ce marché une haute valorisation. Les produits finals sont de toutes sortes : solvants, explosifs, matières plastiques, fibres synthétiques, caoutchoucs synthétiques, engrais azotés, etc.

F. Hers - Viva

◀ Unité de vapocraquage en Hollande. Le vapocraquage est un des grands procédés de base de la pétrochimie ; il est la source principale des oléfines, des dioléfines et des aromatiques.

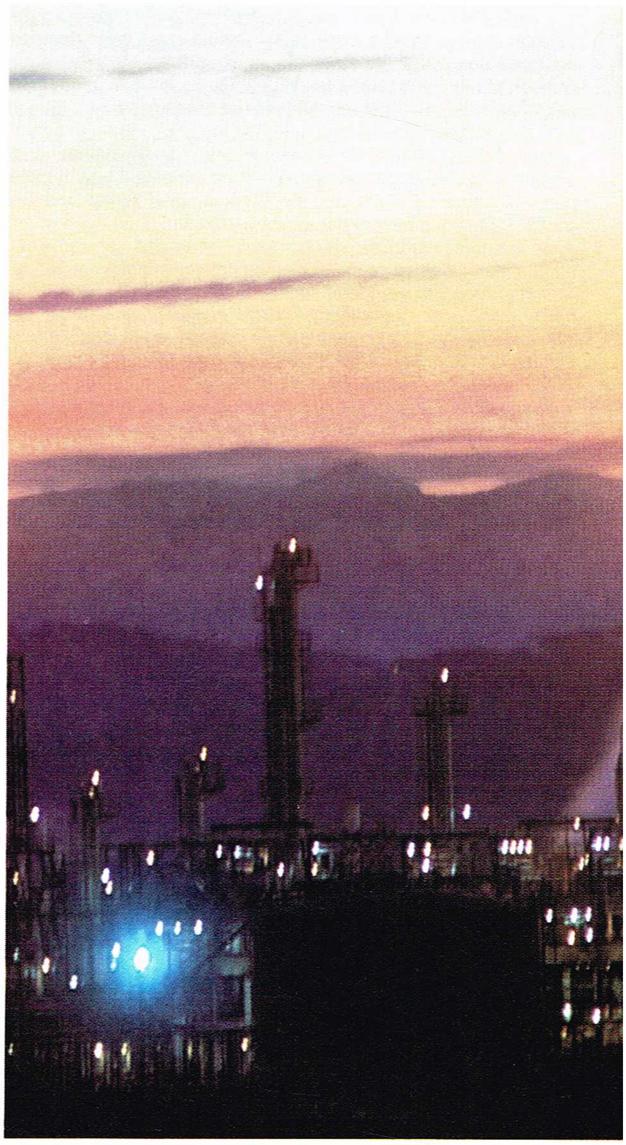

▲ *Le transport intercontinental du gaz nécessite la mise en place de chaînes de liquéfaction utilisant des navires spéciaux; ici, le méthanier* Descartes *dans le port du Havre.*

▶ *Ci-contre, au centre, le gaz de Lacq est à l'origine sur place d'un grand complexe industriel qui regroupe la centrale thermique d'Artix, une usine d'aluminium et diverses industries chimiques de production de méthanol, d'acétylène, d'ammoniac, de chlorure de vinyle, etc.*

▼ *Tableau IV : estimation des réserves mondiales de gaz (1974).*

Tableau IV
Estimation des réserves de gaz
(l'Industrie du gaz dans le monde, 1974)

Pays	Estimation (en milliards de m³)
Amérique du Nord	8 870
Amérique du Sud et centrale	2 050
Europe occidentale	4 540
Europe de l'Est et U. R. S. S.	18 940
Afrique	5 510
Moyen-Orient (dont Iran 7 650)	11 900
Asie et Océanie	2 730
Total mondial	54 540

Le gaz

L'incertitude sur le taux de récupération du gaz est plus faible, du moins en ce qui concerne les gisements de gaz non associés au pétrole pour lesquels il est en moyenne supérieur de 60 à 90 % à 70 % des réserves en place.

Par contre, les réserves sont fort mal connues. Dans les pays exportateurs de pétrole, une grande partie du gaz provient de gisements où il est associé à l'huile. On peut en particulier se demander si l'on doit considérer comme réserves récupérables les quantités de gaz réinjectées dans les champs afin d'améliorer la production d'huile.

La Conférence mondiale de l'énergie indique un chiffre de 52 532 milliards de m^3. *L'Industrie du gaz dans le monde* publiait pour 1974 la répartition donnée dans le *tableau* IV.

Sur la base de l'équivalence calorifique : 1 m^3 de gaz naturel = 9 thermies, on peut considérer que les réserves prouvées de gaz représentent 50 milliards de tonnes d'équivalent pétrole. Donc le gaz naturel, avec plus de la moitié des réserves d'huile, devrait jouer un grand rôle dans la couverture des besoins énergétiques mondiaux.

Cependant les coûts de transport sont 4 à 6 fois supérieurs à ceux du brut et il s'agit là d'un handicap majeur à sa commercialisation hors des zones développées.

Sur courte distance et à terre, on utilise des gazoducs, mais le transport intercontinental nécessite la mise en place de chaînes de liquéfaction utilisant des navires spéciaux.

En Amérique du Nord et en Europe, plus de 90 % de la production brute est commercialisée. Par contre, dans d'autres pays, plus de la moitié de la production est

H. Gloaguen - Viva

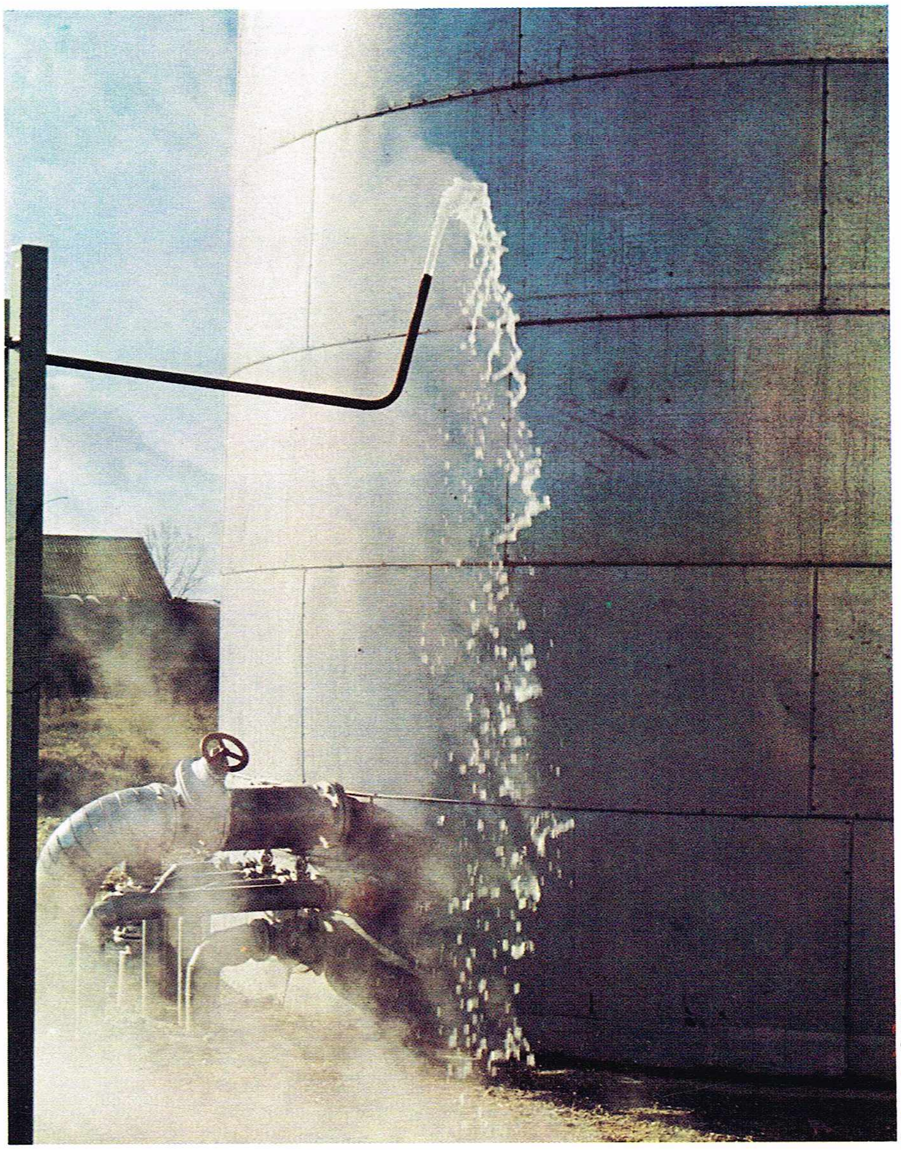

F. Proust - Sygma

brûlée à la torche ou réinjectée. Il y a là une source d'erreurs quant à l'estimation de la production, car on risque de compter plusieurs fois les volumes réinjectés.

Le potentiel gazier de l'Amérique du Nord n'a pas été correctement développé, car, pendant très longtemps, une tarification trop basse a conduit à stopper l'effort de recherche.

L'Europe occidentale, province gazière plus récente, dispose de réserves aux Pays-Bas et au Royaume-Uni et d'un potentiel important en mer du Nord, lequel n'a pas encore atteint son régime de croisière.

Partout ailleurs, il y a pléthore de gaz naturel. Ceci explique que des pays comme le Venezuela développent leur industrie chimique à partir du gaz naturel. Par craquage du méthane à la vapeur, on obtient des *oléfines*, bases de nombreux produits de synthèse. Ainsi le gaz naturel qui ne trouve pas sur place un débouché suffisant est hautement valorisé et transformé en produits susceptibles d'être exportés avec profit.

Ajoutons que, si l'industrie pétrolière et gazière ne génère que peu d'emplois, les industries chimiques en aval sont par contre un facteur de développement important.

Le gaz se substitue facilement aux combustibles liquides et présente même dans certains cas des avantages annexes importants pour l'utilisateur (souplesse d'emploi, propreté, etc.).

Son utilisation supposant une infrastructure de transport lourde implique une plus grande stabilité quant aux prix. Utilisateurs et producteurs sont solidaires pour le transport et l'écoulement, et les contrats d'approvisionnement sont signés pour des périodes longues.

La géothermie

Origine et caractéristique de la chaleur terrestre

Tout le monde sait que, dans la Terre, la température s'accroît avec la profondeur (en moyenne de 1 °C tous les 30 mètres). Ceci se traduit par un certain nombre de manifestations naturelles : volcans, geysers, sources chaudes, etc. La géothermie recouvre l'ensemble de ces phénomènes ainsi que leur utilisation.

Les isotopes radio-actifs contenus dans le manteau et la croûte terrestre suffisent à assurer le flux de chaleur observé qui correspond à une puissance de $3 \cdot 10^{10}$ kW. La quantité de chaleur totale contenue dans les deux premiers kilomètres de la croûte est estimée à environ $3 \cdot 10^{10}$ kcal, ce qui représente un potentiel énorme et des réserves énergétiques importantes, si l'on arrive à la mobiliser dans des conditions économiques acceptables.

L'homme a su, depuis longtemps, en tirer profit : thermalisme, production d'énergie mécanique et électrique, production de calories pour le chauffage. La Hongrie a joué dans ce domaine le rôle d'un précurseur.

On parle de *haute énergie* quand on utilise la vapeur pour produire de l'électricité et de *basse énergie* lorsque l'on utilise l'eau chaude pour le chauffage. Autour de 180 °C, la frontière entre ces deux domaines n'est pas très nette car on peut faire appel à des cycles thermodynamiques avec fluides intermédiaires pour produire l'énergie.

▲ La France offre un bon échantillonnage de gîtes géothermiques « basse énergie »; dans le Bassin parisien, notamment, les calcaires du Dogger forment un réservoir d'eau à 70 °C utilisée pour le chauffage domestique à Melun, Creil et Villeneuve-la-Garenne. Ici, l'usine géothermique de Melun.

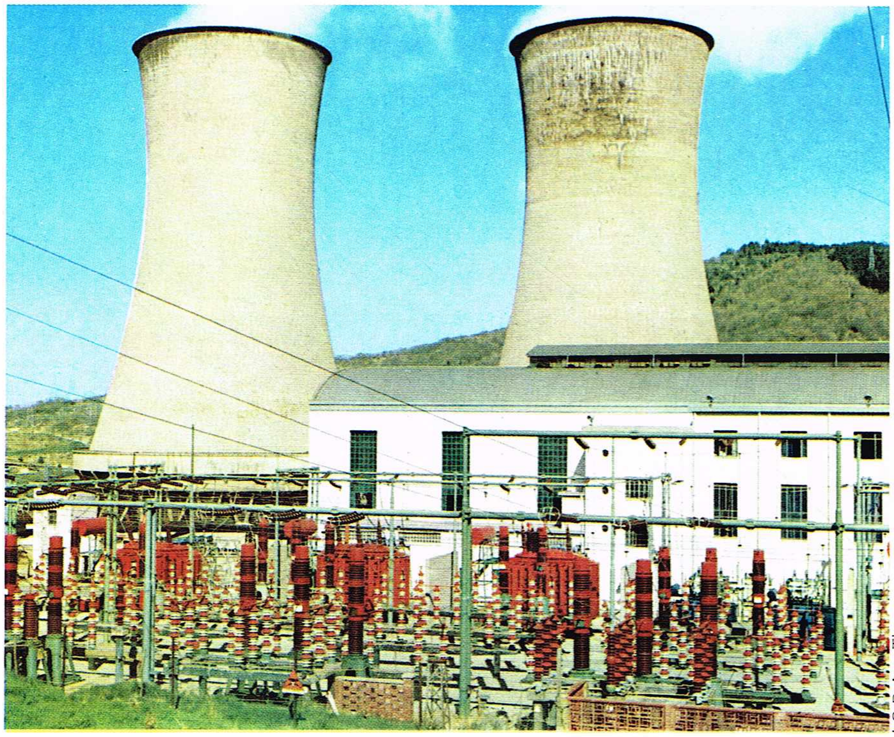

I.G.D.A. - Titus

▲ *Tours de refroidissement de la centrale électrique de Larderello en Toscane, dont la puissance installée est de 365 MW. Ce site géothermique est lié à la présence de soufflards dont la température est comprise entre 100 et 175 °C.*

▶ *Page ci-contre, en bas, l'exploitation « haute énergie », ici en Nouvelle-Zélande, nécessite des installations complexes et donc de gros investissements dont la rentabilité n'est assurée que par des utilisateurs locaux.*

Géothermie « basse énergie »

La France offre un bon échantillonnage des gîtes géothermiques « basse énergie ». L'inventaire en a été réalisé par le Bureau de la recherche géologique et minière (B. R. G. M.). C'est d'une manière générale dans les bassins sédimentaires, les fossés d'effondrement et les zones de subsidence que l'on rencontre des nappes aquifères profondes à une température suffisante.

Les calcaires du Dogger (Jurassique moyen), dans le Bassin parisien, forment un réservoir d'eau à 70 °C, sur une surface de 5 000 km^2 pour une profondeur de 2 000 mètres. Cette eau est utilisée pour le chauffage domestique à Melun, Creil et Villeneuve-La-Garenne.

La nappe de l'Albien, moins profonde (550-800 m) mais d'une température de l'ordre de 30 °C, est exploitée comme eau potable et pour le chauffage de la Maison de la radio.

Les niveaux gréseux du Permien et du Trias, à l'est et au sud du bassin, atteignent 70 °C vers 2 000 mètres.

Les sables du Lusagnet, dans la région de Toulouse, contiennent de l'eau à plus de 50 °C.

La limagne d'Allier et l'Alsace ont des gradients géothermiques irréguliers, car ce sont des fossés d'effondrement. On y rencontre donc localement des conditions plus favorables que dans les bassins sédimentaires. Dans la région de Pechelbronn, on enregistre 8,5 °C/100 mètres. Le réservoir est constitué par les grès bigarrés du Trias (180 °C à 1 800 mètres). A la base des formations sédimentaires de l'Allier, on rencontre des températures de 125 °C.

En Hongrie, zone de subsidence, les formations tertiaires du Pannonien constituent des réserves importantes (70 °C à 1 500-2 000 mètres). Le chauffage des serres et le thermalisme y sont très répandus. La ville de Szeged utilise la géothermie depuis 1962. Les conditions sont très favorables de par l'importance des réserves et la qualité de l'eau qui n'a pas besoin d'être réinjectée.

Géothermie « haute énergie »

▶ *Le Mexique est également un site géothermique « haute énergie »; la puissance électrique actuelle de de 78,5 MW sera portée, en 1980, à 458 MW.*

Les sites géothermiques à haute énergie sont liés aux phénomènes volcaniques actuels. L'usine de Larderello en Italie a une puissance installée de 365 MW, et celle de Monte Amiata de 25 MW. The Geyser en Californie représente 400 MW. Il est prévu pour les États-Unis une puissance de 958 MW en 1980. On compte également 202 MW en Nouvelle-Zélande, 78,5 MW au Mexique (458 MW en 1980), 118 MW au Japon (387 MW en 1980), 30 MW au Salvador, 38 MW en U. R. S. S. (140 MW en 1980). En Guadeloupe, à Bouillante, un gisement à 240 °C par 300-400 mètres est exploité (4 MW)...

En Islande, la puissance électrique installée est de 20 MW. La longueur de la saison de chauffe, 340 jours par an, est un facteur très favorable pour assurer la rentabilité des installations de chauffage. Ainsi, plus de 40 % de la population est chauffée par la géothermie. On y extrait de l'eau à 128 °C pour des profondeurs de forage entre 700 et 2 000 mètres.

Exploitation

Exploitation « basse énergie »

D'une manière générale, une installation géothermique comporte un « doublet » de forage. L'un d'eux sert à l'extraction de l'eau chaude qui est envoyée vers les échangeurs de température, l'autre à la réinjection de l'eau qui, de par sa salinité et son aggressivité, ne peut être utilisée directement.

Les échangeurs doivent donc être particulièrement résistants à la corrosion. Depuis l'expérience de Melun, on utilise des échangeurs au titane.

La puissance thermique d'un doublet est donc fonction du débit d'eau ; notons que la réinjection de l'eau permet de maintenir la nappe en pression. Les modèles de gisements développés à l'Institut français du pétrole montrent que, pour augmenter la puissance calorifique d'un doublet, il est plus intéressant d'abaisser la température de réinjection au maximum, plutôt que de doubler le débit. C'est pourquoi, en plus des échangeurs, on utilise des pompes à chaleur permettant de réinjecter de l'eau à 7 °C. Ce phénomène s'explique par l'importance des pertes thermiques par les épontes.

La durée de vie du gisement est peu affectée par cette faible température. En outre, cette grande consommation de calories géothermales permet de rentabiliser les investissements.

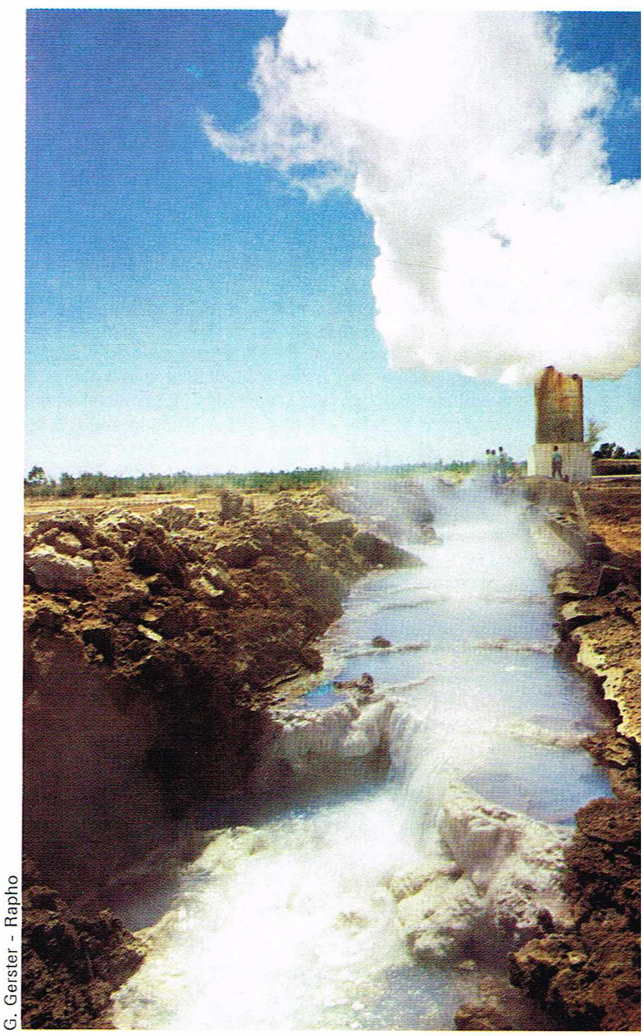

G. Gerster - Rapho

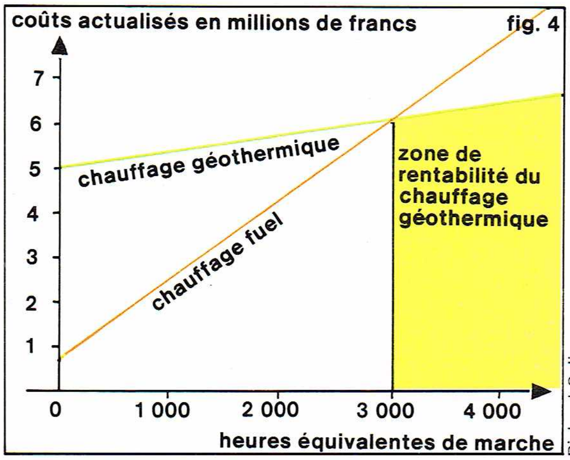

Richard Colin

Tableau V

Comparaison entre chauffages classique et géothermique

Répartition des frais	Chauffage classique	Chauffage géothermique
Coût d'installation pour 3 kth/h	600 000 F	5 000 000 F
Coût d'exploitation à la kth/h :		
P_1 (combustible)	50 F	—
P_2 (entretien, personnel)	15 F	10 F
P_3 (grosses réparations, renouvellement)	10 F	5 F

C'est sur ce principe que fonctionne l'installation de Creil.

Si la géothermie permet d'utiliser une énergie dont les frais d'exploitation sont faibles, il n'en demeure pas moins que les investissements sont bien supérieurs à ceux d'une installation classique.

Le tableau de comparaison entre un chauffage classique et un chauffage géothermique nous donne les valeurs de l'investissement et des frais d'exploitation à pleine puissance (*tableau* V). Si l'on construit les courbes de coût actualisé (11 % sur 20 ans) en fonction du nombre d'heures équivalentes de marche à pleine puissance, on constate que la rentabilité n'est assurée qu'à partir de 3 000 heures équivalentes (*fig.* 4).

La géothermie ne peut donc, à elle seule, assurer, dans des conditions de rentabilité suffisante, le chauffage de logements dont le nombre d'équivalence de marche à pleine puissance est d'environ 1 800 heures dans la région parisienne. Il faut donc utiliser la géothermie comme chauffage de base pour un grand nombre de logements.

Exploitation « haute énergie »

La production d'électricité nécessite des températures élevées. Les conditions d'exploitation diffèrent suivant la pression hydrostatique du réservoir. Si celle-ci est proche de la pression d'ébullition correspondant à la température du fluide, la vapeur se formera dans le réservoir et arrivera sèche à travers ce forage. Si la température est plus basse, le fluide peut monter dans le puits ; dès lors, la séparation des phases se produit en partie pendant la remontée. La vapeur entraîne l'eau plus froide, qui est corrosive, et doit donc être séparée avant d'être envoyée dans les turbines.

Dans un cas comme dans l'autre, la géothermie nécessite de gros investissements dont la rentabilité n'est assurée que par des utilisateurs locaux.

Les autres formes d'énergie ne se sont développées que par des sociétés qui s'appuient largement sur la collectivité (charbonnages, E. D. F.-G. D. F., sociétés pétrolières, etc.). La part relative des investissements est donc très importante, en particulier pour le chauffage domestique. Il est souhaitable qu'une part du risque géologique soit prise en charge par l'État, afin de permettre le développement de ces ressources « indigènes ».

Les ressources d'origine mécanique

Les ressources marémotrices, analogues aux ressources hydrauliques classiques, en diffèrent cependant par trois points essentiels : changement de sens du flux deux fois par jour, faiblesse de la hauteur de chute et corrosivité redoutable de l'eau de mer.

Si les installations de la Rance démontrent l'intérêt de ces ressources, il n'en demeure pas moins que les sites aménageables sont rares.

La Corée du Sud et l'Inde ont commencé quelques études. La Norvège présente des côtes dont le relief serait *a priori* propice, mais les hauteurs des marées sont trop faibles. Au Canada, la baie de Fundy connaît une des marées les plus fortes du monde, atteignant 16 mètres à l'équinoxe contre 13,5 m dans la Rance. Il y a là un site qui pourrait devenir rentable, étant donné les prix actuels des énergies concurrentes. La puissance installée serait d'environ 2 GW. En Argentine, la péninsule de Valdez offre un potentiel de 600 MW avec des turbines réversibles. La côte nord-ouest de l'Antarctique présente des hauteurs de marée suffisante (11 mètres).

Cependant, l'utilisation de tous les sites possibles dans le monde ne conduirait qu'à une puissance de 13 à 20 GW.

D'autres sites existent : la Firth de Soway et l'estuaire de la Severn, en Angleterre, la baie de Cook sur la côte méridionale de l'Alaska et une zone très importante de la mer Blanche en U. R. S. S.

▲ *A gauche, figure 4 : courbes de coûts actualisés en fonction du nombre d'heures équivalentes de marche pour un chauffage géothermique et un chauffage au fuel.*

A droite, tableau V : comparaison des valeurs de l'investissement et des frais d'exploitation entre un chauffage géothermique et un chauffage classique.

M. Serraillier - Rapho

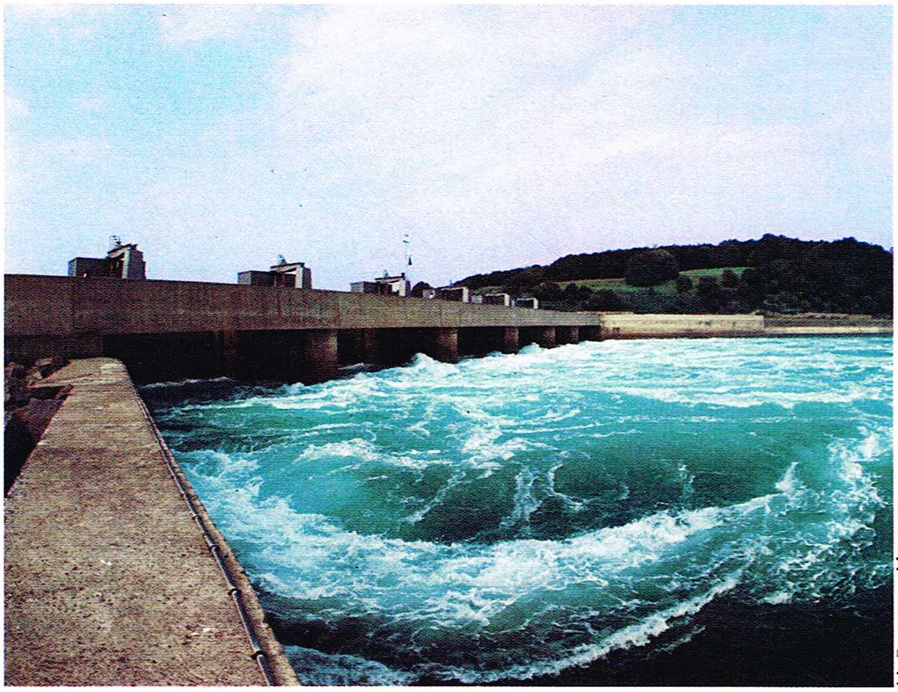

M. Durazzo - Magnum

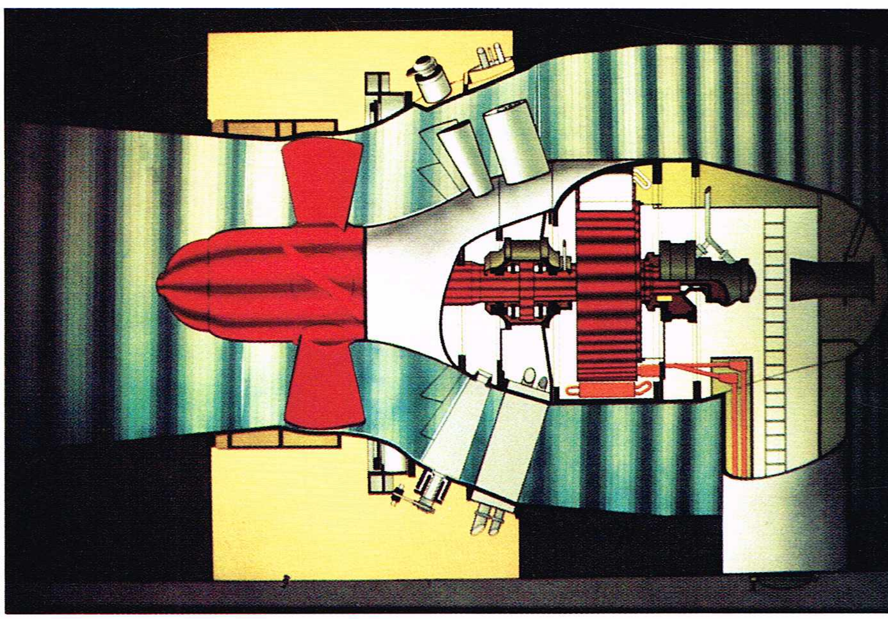

M. Durazzo - Magnum

▲ ***Les installations de la Rance, dont on voit, en haut, le barrage, et, ci-dessus, une représentation schématique des turbines, démontrent l'intérêt des ressources marémotrices comme source d'énergie appréciable, mais il reste que les sites aménageables sont rares.***

Si l'idée est physiquement très intéressante, malheureusement les réalisations ne sont pas à l'échelle du problème économique.

La qualité d'un site marémoteur dépend de trois facteurs : l'*amplitude de la marée* et donc la chute disponible, la *taille du réservoir* dont dépend la quantité d'énergie produite, la *longueur de barrage* à réaliser qui conditionne le coût des ouvrages.

L'amplitude de la marée étant variable tout au long de l'année, la puissance disponible l'est également. Les marées sont caractérisées schématiquement par un cycle de deux semaines : les marées de vive-eau, les marées de morte-eau. Il est donc difficile d'assurer un minimum de puissance garantie.

On peut, par exemple, turbiner entre deux bassins pour obtenir une puissance variable mais continue.

L'usine marémotrice de la Rance utilise un autre système.

Pendant les *marées de morte-eau*, on utilise un cycle à simple effet, car la chute est faible. Le turbinage ne s'effectue que dans un sens unique, celui du reflux car le rendement des machines est meilleur dans ce sens. De plus, on fait appel au pompage direct pour assurer un surremplissage du bassin en vue de stocker davantage d'eau et d'augmenter la chute.

Par contre, pour les *marées de moyenne et de vive-eau*, c'est-à-dire supérieures à 10 mètres, le flux et le reflux sont utilisés pour la production d'électricité. C'est le *cycle à double effet*, caractérisé par une production quasi continue.

A noter que du fait du turbinage inverse, le niveau maximal dans le bassin est plus bas que le niveau maximal côté mer. Pour la phase suivante d'exploitation en turbinage direct (bassin-mer), la chute et le stock sont réduits, mais le gain qu'apporte le turbinage inverse est très supérieur à cette perte.

Il est très difficile de faire coïncider la fourniture d'énergie avec les heures de pointe. Même avec les cycles les plus élaborés et en avançant ou retardant le turbinage, l'usine n'a pas encore assez de souplesse.

Une usine marémotrice ne peut éviter la construction d'une usine thermique que dans un réseau où il y a déficience d'énergie et non de puissance installée. Cependant, après sept années d'exploitation de l'usine de la Rance, on peut dire que sa disponibilité est remarquable, les objectifs de production sont atteints et l'exploitation se déroule sans problème majeur. Les marées offrent donc une source d'énergie appréciable mais dont l'intérêt n'est que régional.

L'énergie nucléaire

Pour la production d'énergie nucléaire, l'uranium et le thorium sont les deux matériaux fissiles que l'on peut employer. Actuellement, on utilise industriellement l'isotope naturel ^{235}U. A terme, il semble que l'on sera conduit à mettre au point des filières « thorium-^{233}U » dans les surrégénérateurs et les réacteurs convertisseurs à haute température.

Les réserves

Les réserves de thorium

La production mondiale est estimée à 1 000 t/an et les réserves récupérables, au seuil de 26 $/kg, sont évaluées à 1,7 million de tonnes.

La faiblesse du marché et l'importance des réserves connues n'ont pas favorisé une exploration systématique. Il n'est pas possible de compter le thorium comme réserve énergétique prouvée ; il s'agit là d'un potentiel probablement équivalent à celui de l'uranium et quasi illimité avec la mise au point des surrégénérateurs.

Les principales réserves de thorium (sous forme de monazite qui est un phosphate de terre rare et de thorium) sont situées au Brésil avec 1,1 Mt dans les États du Sud-Est, en Inde avec 0,3 Mt dans le Kerala, en Norvège avec 0,26 Mt dans le Telemark, au Canada avec 0,16 Mt (il s'agit d'un combiné uranium-thorium).

Les réserves d'uranium

Il s'agit de tonnes d'uranium « naturel » (composé de 99,3 % de ^{238}U et de 0,7 % de ^{235}U).

Dans le cas de l'uranium, le seuil critique de définition des réserves économiques est calculé en *dollars américains par livre anglaise* ($/£), mais, généralement, il s'agit d'un coût de production du « Yellow Cake », c'est-à-dire de U_3O_8.

L'uranium a vu ses prix très fortement revalorisés de 5 $/£ U_3O_8 en 1972 à 15 à 20 $/£ au milieu de 1975. De plus, le coût du minerai intervient assez peu dans le coût de production du kWh ; on peut donc considérer comme réserves prouvées les quantités d'uranium dont le coût est inférieur à 15 $/£ U_3O_8 (39 $/kg), et comme réserves supplémentaires celles dont le coût est inférieur à 30 $/£ U_3O_8.

L'accroissement des réserves en fonction du prix peut être considérable. Ainsi, l'US Atomic Energy Commission a estimé en 1971 qu'à 100 $/£, les États-Unis disposeraient de 17 millions de tonnes de U_3O_8, contre 1,6 million de tonnes à 15 $/£.

On peut avancer comme *réserves récupérables*, au seuil de 15 $/£ U_3O_8 (Conférence mondiale de l'énergie), 1 955 000 t. Pour les *réserves supplémentaires*, au seuil de 30 $/£ U_3O_8, 3,5 Mt semble un chiffre pessimiste. Les estimations publiées en juillet 1975 par André Giraud sont de 4,7 millions pour les réserves raisonnablement assurées au seuil de 30 $/£.

Les estimations sont d'une extrême fragilité et constituent sans doute un minimum. La géologie de l'uranium est complexe et l'exploitation des mines difficile.

En outre, il existe des quantités importantes d'uranium (dans les schistes, les phosphates et l'eau de mer) dont l'exploitation est très coûteuse et donc hypothétique.

On ne dispose pas d'estimation sérieuse pour les pays communistes. Les chiffres suivants ont été avancés :

80 000 à 270 000 t en U. R. S. S.
20 000 à 100 000 t en Chine
100 000 t en R. D. A.

Le *tableau* VI donne les réserves estimées par la Conférence mondiale de l'énergie en 1974.

Tableau VI

Réserves estimées en uranium à des coûts inférieurs à 39 \$/kg d'uranium contenu, soit 15 \$/£ U_3O_8 (Conférence mondiale de l'énergie, 1974)

Pays	Estimations (en tonnes d'uranium naturel)
États-Unis	730 000
Canada	308 000
Amérique du Nord	1 038 000
France	45 000
Espagne	7 000
Portugal	7 000
Suède	270 000
Autres pays	13 000
Europe occidentale	340 000
Afrique du Sud	264 000
Niger	50 000
Gabon	20 000
Autres pays	11 000
Afrique	345 000
Australie	160 000
Amérique latine	33 000
Asie	39 000
Monde non communiste	1 955 000

◄ *Tableau VI : estimation des réserves mondiales d'uranium faite à la Conférence mondiale de l'énergie, en 1974.*

Équivalence énergétique des réserves d'uranium

Les pouvoirs calorifiques inférieurs des combustibles « chimiques » fossiles nous permettent de déterminer des coefficients d'équivalence en ce qui concerne les usages thermiques primaires. Par contre, la comparaison est plus délicate avec les combustibles nucléaires.

Une équivalence n'est possible que s'il y a substitution et le coefficient n'est valable que pour cette substitution.

Pour les *usages électrogènes*, l'équivalence s'établira sur la base du kWh électrique; pour les *usages thermogènes*, l'équivalence s'établira sur celle du kWh thermique.

Si l'on se limite à la seule production d'électricité, il convient de fixer l'étape à laquelle on localisera la substitution.

Équivalence à la production : tant que la part de l'énergie nucléaire, dans le bilan primaire, ne dépasse pas 15 %, tout kWh d'origine nucléaire peut être considéré comme se substituant au niveau de la production à 1 kWh d'origine thermique et, par conséquent, permet d'économiser 0,230 kg de fuel-oil ou 0,350 kg de charbon.

Équivalence à la consommation : au-delà de la demande spécifique d'électricité, le kWh supplémentaire remplace une certaine quantité d'hydrocarbures liquides ou gazeux,

Pierre Jahan - CEA

Pierre Jahan - CEA

▲◄ *La géologie de l'uranium est complexe et l'exploitation des mines difficile. L'extraction du minerai peut se faire en mine souterraine (ci-dessus) ou à ciel ouvert (ci-contre) comme ici sur les gisements des Carpières en Vendée (France).*

F. Bibal - Rapho

▲ ***Prospection au compteur dans la mine d'uranium de Bessines (France). La France est un des deux pays en Europe occidentale, avec le Portugal, à avoir une production notable.***

ou même de charbon dans les usages thermiques finals. Pour les besoins du chauffage domestique et industriel, 1 kWh d'origine nucléaire ne se substitue plus qu'à 0,110 g de fuel-oil. Il y a donc là un risque de surestimer le rôle du nucléaire dans la satisfaction des besoins énergétiques futurs.

Une autre difficulté naît des différences de performances de chaque type de centrale nucléaire. Schématiquement, on peut admettre les consommations spécifiques annuelles suivantes :

— filière graphite gaz uranium naturel : 200 à 250 kg d'uranium/mégawattheure électrique (MWe) plus 600 kg/MWe pour le premier cœur;

— filière uranium naturel eau lourde (Candu) : environ 100 kg U/MWe plus 160 kg/MWe pour le premier cœur;

— filière uranium enrichi eau légère : 100 à 130 kg U/MWe plus 100 à 500 kg U/MWe pour le premier cœur;

— filière surrégénératrice : 5 à 6 kg U appauvri/MWe plus 1,5 kg Pu/MWe, plus 13 à 14 kg U appauvri/MWe, plus 3,5 kg Pu/MWe pour le premier cœur.

Suivant les différentes options possibles, l'équivalence énergétique de l'uranium peut varier de 1 à 8 pour les filières à neutrons lents et de 1 à 200 si les performances probables des surrégénérateurs sont prises en considération.

Une évaluation prudente fondée sur les centrales électrogènes à eau légère aboutit à l'équivalence :

1 tonne d'uranium naturel = 9 000 tonnes de pétrole (1 kWh = 0,230 kg de fuel-oil).

L'estimation actuelle représente donc environ 20 % des réserves de pétrole brut. Il s'agit probablement d'un minimum qui ne représente que 7 ans de production annuelle.

Si on compare ces réserves par rapport aux besoins prévisibles résultant des plans de développement accéléré, on peut craindre un épuisement des réserves vers 1990.

Ce manque apparent est atténué par les espoirs qu'engendre la mise au point des réacteurs surrégénérateurs. En effet, on pense qu'un surrégénérateur « brûle » en moyenne 30 à 60 fois moins d'uranium; ceci s'applique à la première charge. Le surrégénérateur fabrique plus d'éléments fissiles qu'il n'en consomme en transformant ^{238}U en plutonium qui est un combustible nucléaire. A terme, les centrales surrégénératrices permettraient de transformer un problème de ressources limitées en une question de capacité maximale installable, du moins si l'on fait abstraction de tout problème d'implantation ou de risque écologique. En principe, la demande d'uranium devrait donc passer par un maximum.

L'enjeu est considérable, car on pourrait disposer d'une source renouvelable d'énergie à très haut niveau. Cependant, il convient de ne pas cacher les difficultés de mise en œuvre.

Le temps de doublement du cœur est estimé entre 20 et 30 ans, ce qui, à la limite, permet de supporter une croissance illimitée pourvu que le taux de croissance n'excède pas 3 à 3,5 % par an.

Le développement des surrégénérateurs, à un rythme plus rapide, nécessite celui des centrales à neutrons lents plutonigènes. On calcule qu'il faut faire fonctionner pendant 10 ans une centrale à eau légère pour fournir le plutonium nécessaire au cœur d'un surrégénérateur de puissance équivalente. Le cœur est constitué d'éléments fissiles : uranium très enrichi ou plutonium. L'emploi de l'uranium très enrichi pose des problèmes de disponibilité et d'enrichissement.

Le fonctionnement requiert des éléments fertiles (uranium appauvri ou éventuellement thorium) en quantité importante et il peut se poser un problème de capacité maximale.

Il ne semble pas, de plus, que le problème du retraitement soit entièrement résolu. Cependant, il y va de l'utilisation de l'uranium appauvri sortant des usines d'enrichissement au retraitement des combustibles du cœur des surrégénérateurs en passant par le traitement et le recyclage de l'uranium et du plutonium contenu dans les barres de combustibles irradiés, car le plutonium peut être réutilisé (recyclé) également dans les piles à neutrons thermiques.

Au niveau de l'enrichissement, les usines américaines construites pour la Défense constituaient un potentiel considérable par rapport aux besoins eux-mêmes limités. La percée du réacteur nucléaire à eau ordinaire a fait que la situation est très différente de nos jours. Le projet « Eurodif » permettra à l'Europe d'avoir une certaine sécurité dans ses approvisionnements, mais temporairement les États-Unis peuvent retarder leur livraison d'uranium enrichi pour des raisons de concurrence.

De plus, ces achats sont assortis de conditions commerciales très contraignantes : versement important à la commande, révision semestrielle des barèmes, nécessité de s'engager 8 ans à l'avance et pour une durée d'une dizaine d'années de fonctionnement d'une centrale nucléaire déterminée.

A ces contraintes techniques s'ajoutent d'autres facteurs susceptibles de retarder la mise en œuvre des programmes nucléaires :

— les obstacles financiers sont considérables; étant donné l'ampleur des programmes, tout retard se traduira par des charges importantes à cause des intérêts intercalaires;

— les difficultés, pour trouver des sites où implanter des centrales, risquent d'être sérieuses, étant donné la sensibilisation du public à la protection de l'environnement : pollution thermique, problème de stockage des déchets radio-actifs, risques divers (malgré le rapport Rasmussen), etc.;

— le désir des puissances nucléaires d'empêcher la production d'armes nucléaires au départ de combustibles fournis dans le cadre du nucléaire pacifique créera des tensions politiques et des retards difficiles à évaluer.

Le traitement des minerais

La faiblesse des teneurs en uranium dans les minerais implique que l'on fasse un premier traitement afin d'assurer le transport de l'uranium dans des conditions économiquement acceptables.

C'est le traitement chimique du minerai qui est le plus employé, contrairement aux autres minerais de base que l'on sépare par gravimétrie et flottation. A partir du minerai, on élabore soit le métal, soit des sels au degré de pureté exigé pour l'alimentation des réacteurs.

Le traitement qui s'effectue à proximité des mines conduit à la fabrication d'un concentré intermédiaire qui peut titrer de 600 à 700 kilogrammes d'uranium par tonne lorsqu'il s'agit d'un *uranate de magnésie* ou de 400 kg/t lorsqu'il s'agit de *nitrate d'uranyle*. L'effet de concentration est en moyenne de 300 mais varie suivant les minerais de 100 à 2 000.

● *Broyage et concassage*

Après broyage et concassage, qui se font avec addition d'eau et selon un schéma classique, on procède à l'attaque par l'acide sulfurique de la pulpe ainsi préparée.

La *pulpe*, épaissie pour diminuer la consommation de réactif, est attaquée par l'acide sulfurique et un oxydant (chlorate de sodium) à environ 70 °C. L'uranium passe en solution sous forme de sulfate d'uranyle.

● *Lavage*

Puis, on procède à un lavage à contre-courant, dans des épaisseurs, pour éliminer sables et fines stériles. En définitive, on obtient une solution de sulfate d'uranyle titrant 300 à 500 milligrammes par litre.

● *Purification*

A partir de ce stade, il existe plusieurs méthodes pour éliminer les impuretés (silice, fer, alumine, etc.) et passer au stade de concentré final (uranate de magnésie ou nitrate d'uranyle).

On peut utiliser des résines échangeuses d'ion, fixant sélectivement l'uranium sous forme d'un complexe d'uranyle sulfaté. Par réextraction avec une solution d'acide sulfurique et de chlorure de sodium, on obtient une liqueur. En ajoutant de la chaux, on élimine le sulfate de chaux, puis, de la magnésie, on provoque la formation d'uranate de magnésie. Celui-ci, lavé, filtré et séché, a une teneur de 70 à 72 % en uranium.

La purification peut se faire suivant le même schéma général, mais en remplaçant les résines par des solvants, donc en phase entièrement liquide.

Une autre technique consiste à faire précipiter, après le lavage, un uranate de chaux qui est filtré, séché et repris à l'acide sulfurique ; l'adjonction de nitrate de chaux permet d'éliminer le sulfate de calcium et de passer au nitrate d'uranyle que l'on purifie par passage sur du tributylphosphate. La réextraction se fait à l'eau. On concentre ensuite par évaporation jusqu'à des teneurs de 400 g/l. Le concentré ainsi obtenu est plus pur que l'uranate de magnésie.

Bien sûr, il existe d'autres procédés : attaque carbonatée, électrolyse, etc., que nous ne décrirons pas ici.

La fabrication de l'uranium

A partir des concentrés d'uranium, on effectue une autre purification plus poussée pour obtenir « la pureté nucléaire ». Puis on élaborera le métal ou de l'hexafluorure pour alimenter les usines de diffusion gazeuse.

● *Purification poussée*

La purification poussée fait appel à la propriété du nitrate d'uranyle de se dissoudre dans certains solvants organiques, ce qui permet une séparation efficace de presque tous les autres éléments. On repassera, après extraction, aux solvants en phase solide par précipitation à l'ammoniac.

L'uranate d'ammonium obtenu est ensuite calciné à 400 °C dans un four continu à bande ; on obtient l'UO_3 sous forme d'écailles oranges.

Pour élaborer l'uranium métallique, on fabrique du tétrafluorure UF_4 très pur (98 % en UF_4). Cette préparation s'effectue dans un four qui fonctionne suivant la technique du *lit mobile*. L'agent de réduction est l'ammoniac gazeux, celui de fluoration est l'acide fluorhydrique. Cette grande pureté est nécessaire à la phase suivante de réduction en métal ou à celle de transformation en hexafluorure.

● *Réduction*

La réduction du tétrafluorure d'uranium se fait par *magnésiothermie*, le magnésium étant beaucoup moins cher que le calcium nucléairement pur. La réaction se fait à 650 °C dans un four électrique à cloche qui vient coiffer le creuset.

Service documentation CEA

▲ *L'élaboration de l'uranium métallique passe par la réduction du tétrafluorure d'uranium par magnésiothermie Ce traitement s'effectue à 650 °C dans un four électrique qui vient coiffer le creuset.*

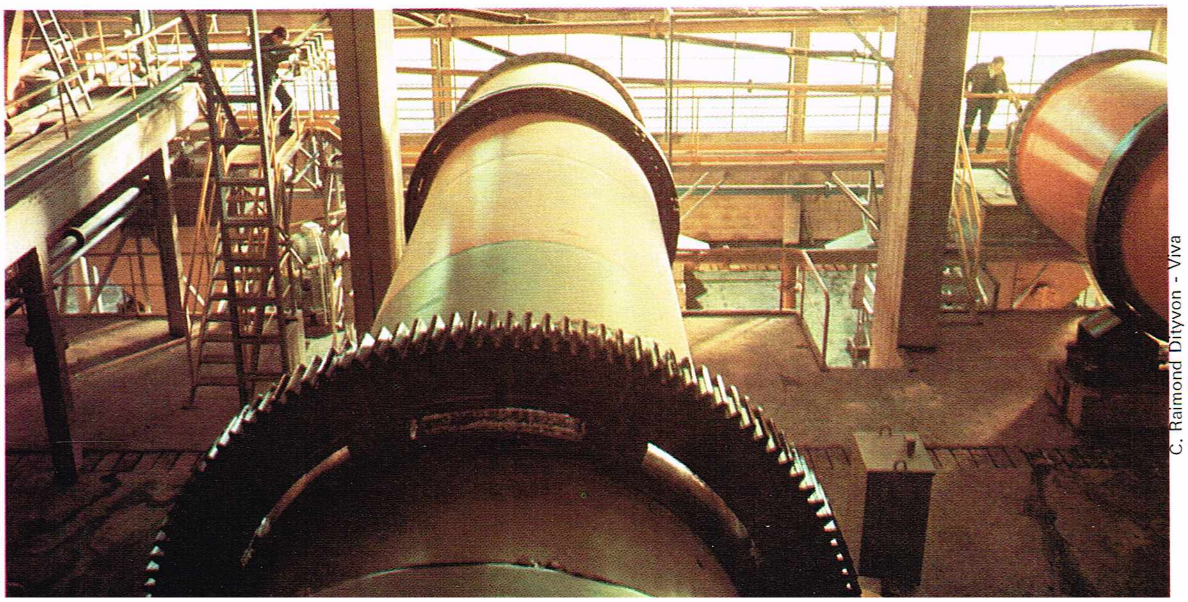

C. Raimond Dityvon - Viva

◀ *Ici à Bessines, le traitement chimique du minerai, extrait à la Crouzille, conduit à la fabrication des concentrés intermédiaires.*

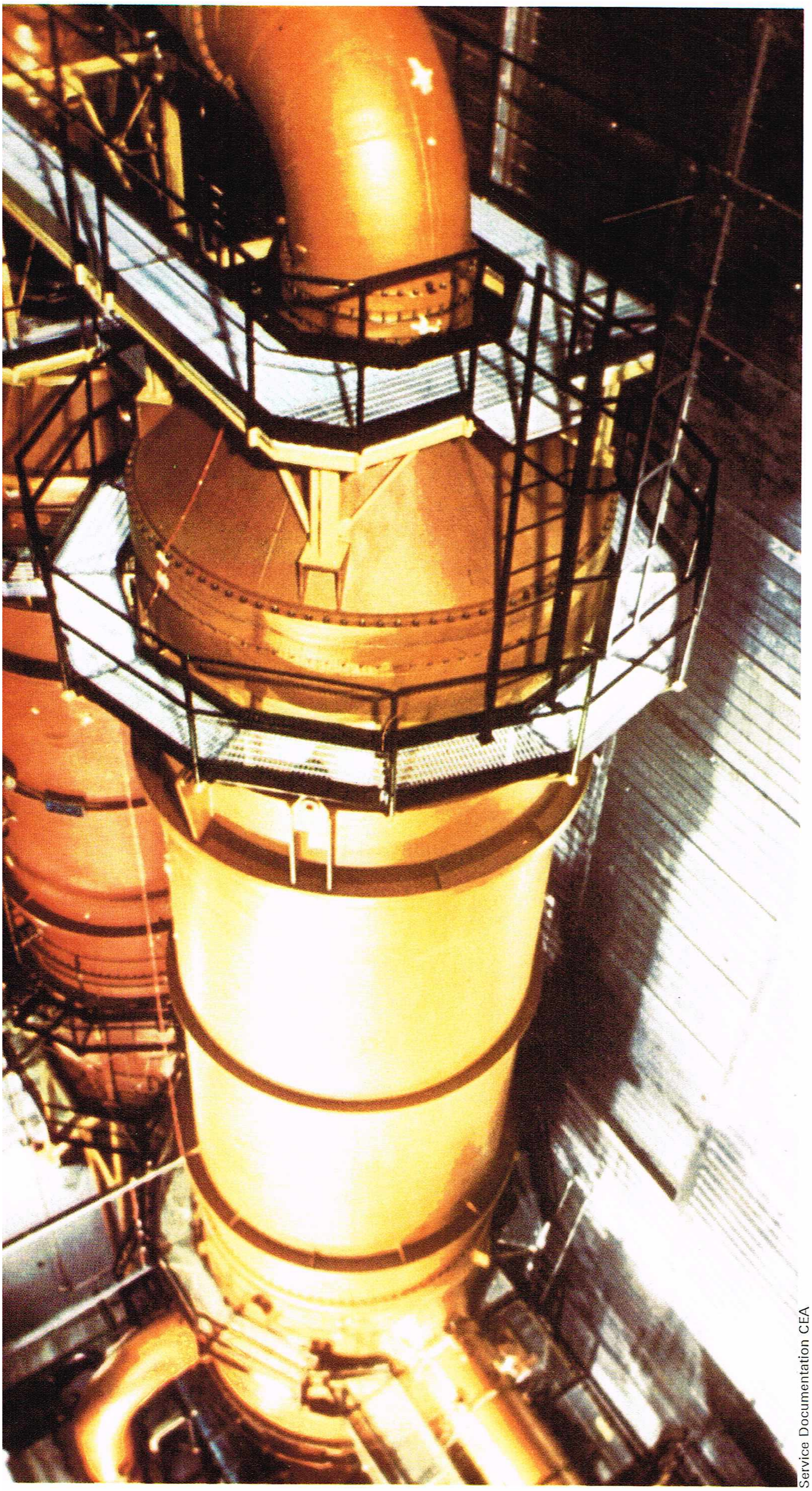

Service Documentation CEA

● *Fluoration*

La réaction de fluoration pour passer du tétrafluorure à l'hexafluorure se fait dans un réacteur à flamme alimenté en UF_4 broyé et en fluor préchauffé à 250-300 °C.

L'enrichissement de l'uranium

La séparation d'isotopes d'un même élément est une opération difficile parce qu'ils ont les mêmes propriétés chimiques et des propriétés physiques qui ne diffèrent que par la masse. Pour l'uranium, le problème est spécialement ardu puisque l'écart des masses (235 et 238) est à peine supérieur à 1 %.

Pour accroître la mobilité relative des molécules, il faut choisir un composé gazeux. L'hexafluorure UF_6 est stable et gazeux à 56 °C à la pression atmosphérique. Heureusement, il n'existe qu'un isotope naturel du fluor (masse 19).

Les usines à grande capacité utilisent le *procédé de diffusion gazeuse*. Lorsque l'on fait passer un mélange de deux gaz de masse différente à travers une paroi poreuse, le plus léger diffuse le plus vite. Le rapport des vitesses est égal à celui des racines carrées des masses moléculaires, soit, dans le cas de $^{235}UF_6$ et $^{238}UF_6$, égal à 1,004 3 seulement. Il faut donc faire circuler les gaz à travers un grand nombre de parois poreuses pour qu'il y ait modification notable de la teneur isotopique du gaz. Les produits sont dits « enrichis » ou « appauvris ». Les problèmes technologiques sont très aigus en raison de l'extrême réactivité de l'hexafluorure avec les composés hydrogénés.

Pour être efficaces, les pores des barrières doivent être inférieurs à 2 angströms et très nombreux (1 milliard par centimètre carré). La barrière doit être fine mais résistante à la différence de pression, à la corrosion des gaz, etc.

Les usines sont de grande taille, à cause du grand nombre d'étages nécessaires (4 000), et consomment beaucoup d'énergie pour les compresseurs.

Les usines ont surtout été construites pour des usages militaires (États-Unis, U. R. S. S., Grande-Bretagne, France, Chine). Avec le projet Eurodif, l'Europe s'est dotée d'une capacité civile internationale installée sur le site de Tricastin qui jouxte l'autre site de Pierrelatte.

L'autre procédé actuellement développé repose sur l'*ultracentrifugation*.

Le retraitement de l'uranium

Le retraitement est l'ensemble des opérations consistant à récupérer, dans les combustibles irradiés dans les réacteurs nucléaires, l'uranium et le plutonium qui y sont contenus, après les avoir séparés des produits de fission. Pour être recyclés, l'uranium et le plutonium récupérés doivent être obtenus avec une très grande pureté.

Les résidus sont stockés et confinés dans des récipients étanches après que les solutions aient été concentrées au maximum pour réduire le volume. Certains éléments des déchets ont des périodes longues, parfois plusieurs dizaines d'années. On étudie le stockage sous forme solide par évaporation et calcination en poussant le chauffage jusqu'à la vitrification des résidus. Ces derniers sont insolubles et les risques de contamination sont de beaucoup limités.

Les filières

Les différentes filières

Filière des réacteurs modérés au graphite et refroidis par un gaz

L'utilisation possible de l'*uranium naturel* comme combustible et d'un modérateur relativement facile à fabriquer à l'échelle industrielle explique le développement de ces réacteurs qui furent, au départ, utilisés pour la fabrication du plutonium à des fins militaires. La Grande-Bretagne et la France optèrent pour le refroidissement par un gaz (gaz carbonique sous forte pression), alors que les États-Unis utilisaient le refroidissement à eau.

La puissance par unité de masse de combustible (puissance spécifique) n'est pas très élevée, d'une part, parce que l'uranium métallique et sa gaine de magnésium

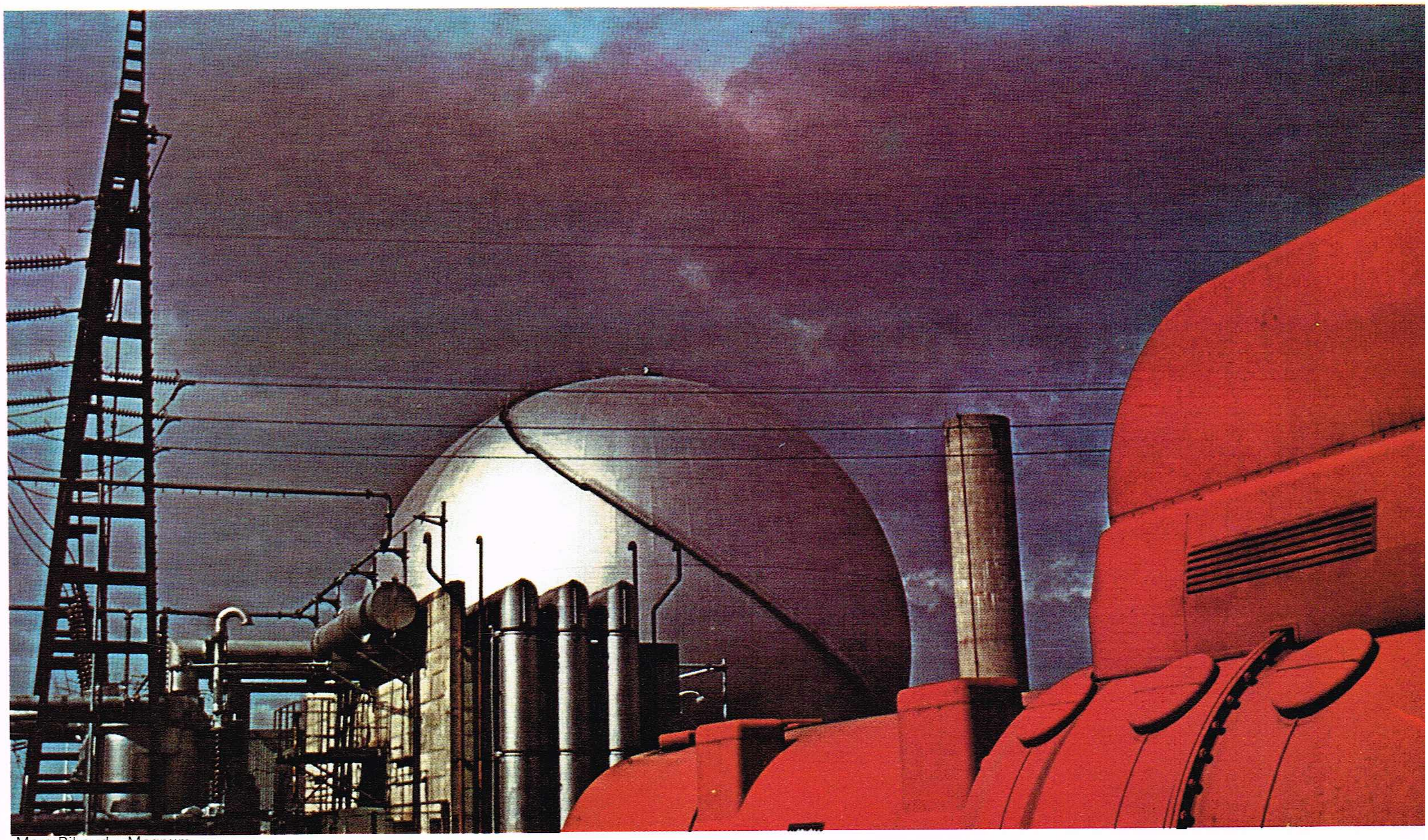

Marc Riboud - Magnum

▲ **Chinon,** *mise en service en 1967, appartient à la filière des réacteurs modérés au graphite et refroidis au gaz, et utilise de l'uranium naturel.*

ne supportent pas des températures trop élevées, d'autre part, parce que la faible réactivité disponible ne permet pas d'accroître la surface d'échange de chaleur entre le combustible et le réfrigérant.

En dépit d'un succès technique incontestable, cette filière n'est plus poursuivie avec l'option initiale de l'emploi d'uranium naturel. Le coût des investissements est prohibitif par rapport aux filières à uranium enrichi.

En Angleterre, une filière dérivée utilisant de l'*uranium enrichi* est développée.

Une autre version est celle des *réacteurs à haute température*. Afin d'améliorer la puissance spécifique et le rendement, le gaz carbonique qui réagit avec le graphite à haute température est remplacé par de l'hélium sous pression. Le gainage métallique est supprimé et l'élément combustible est formé de petites particules d'oxyde ou de carbure d'uranium enrichi enrobées de pyrocarbone et placées dans des boîtiers en graphite.

Outre leurs avantages intrinsèques, les réacteurs à haute température permettront l'utilisation du thorium et il serait possible de réaliser un cycle direct en faisant passer directement dans la turbine les gaz qui ont traversé le cœur.

Filière des réacteurs modérés à l'eau lourde

Cette filière utilise l'*uranium naturel;* le rendement est voisin de celui des filières graphite-gaz, mais la puissance spécifique est plus élevée.

La production d'eau lourde, excellent modérateur, nécessite des usines spécialisées dont le coût n'est pas comparable avec celui des usines d'enrichissement de l'uranium. La séparation est plus facile grâce à la grande différence de masse relative des isotopes de l'hydrogène (masses 1 et 2).

Ce type de réacteur n'est développé de façon industrielle qu'au Canada. Les économies réalisées pour préparer le combustible compensent l'investissement en eau lourde et la complexité du cœur.

Des compromis ont été recherchés en utilisant de l'*uranium légèrement enrichi* et le refroidissement par l'*eau ordinaire*.

Filières des réacteurs modérés à l'eau ordinaire

Ces piles utilisent de l'*uranium enrichi* et sont plus simples et de petites dimensions.

Une première application est celle des piles laboratoires et pour irradiation.

Le type le plus connu est celui de la *pile piscine* dont l'eau sert à la fois de modérateur, de réfrigérant et de protection. Alors que l'eau de ces piles est froide, il faut produire de la vapeur sous pression pour obtenir de l'énergie utilisable.

La première application de ce type de pile fut le moteur du sous-marin *Nautilus* aux États-Unis. Pour résister à la corrosion de l'eau chaude, on n'utilise plus, dans l'alliage à base d'uranium très enrichi qui constitue les plaques de combustible des piles piscines, l'aluminium mais le zirconium.

L'eau assure à la fois le rôle de modérateur et celui de réfrigérant, mais, pour le refroidissement, deux techniques sont en compétition : celle à *eau pressurisée (P. W. R.)* et celle à *eau bouillante (B. W. R.)*.

Filière de réacteurs à neutrons rapides

Ces réacteurs à neutrons rapides se distinguent des précédents par l'*absence de modérateur* et fonctionnent avec un combustible très enrichi comme première charge ou du plutonium. Ces réacteurs sont surrégénérateurs avec le cycle ^{238}U-^{239}Pu. Le facteur de surrégénération est de 1,1 à 1,4.

A la différence des autres filières, ces réacteurs consomment la totalité des noyaux fertiles (^{238}U). L'énergie qui peut être tirée des ressources mondiales d'uranium est ainsi considérablement augmentée. Cette filière aura donc une place privilégiée dans les développements futurs.

L'absence de modérateur permet un réacteur très compact, mais, pour extraire la chaleur, il faut une grande surface d'échange et un réfrigérant très efficace. Ce dernier ne peut être l'eau à l'état liquide qui ralentirait les neutrons, c'est le *sodium fondu* qui est généralement retenu, bien que son emploi soit très délicat.

La France, avec les réacteurs Phénix et Super-Phénix, est à la pointe de la technologie en ce domaine.

◀ *Page ci-contre, l'uranium que nous utilisons actuellement est enrichi aux États-Unis ou en Union soviétique; avec* **Eurodif,** *usine européenne d'enrichissement installée en France, cette dépendance tendra à disparaître à partir de 1980, date prévue de sa mise en service.*

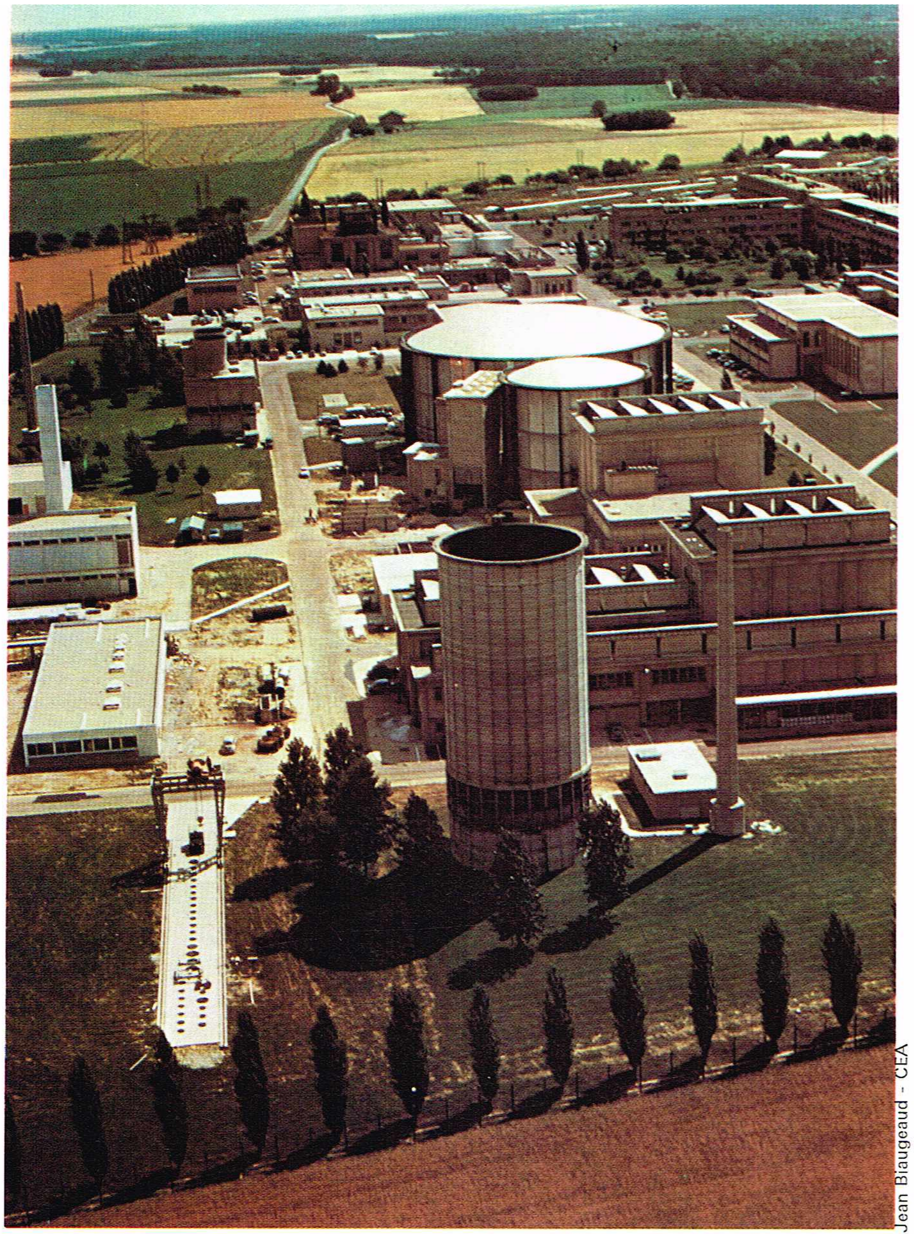

Jean Biaugeaud - CEA

▲▶ *Les piles expérimentales, ci-dessus* **EL2 et EL3** *à Saclay, et ci-contre,* **Zoé** *à Fontenay, n'ont pas démontré l'intérêt économique des filières à eau lourde.*

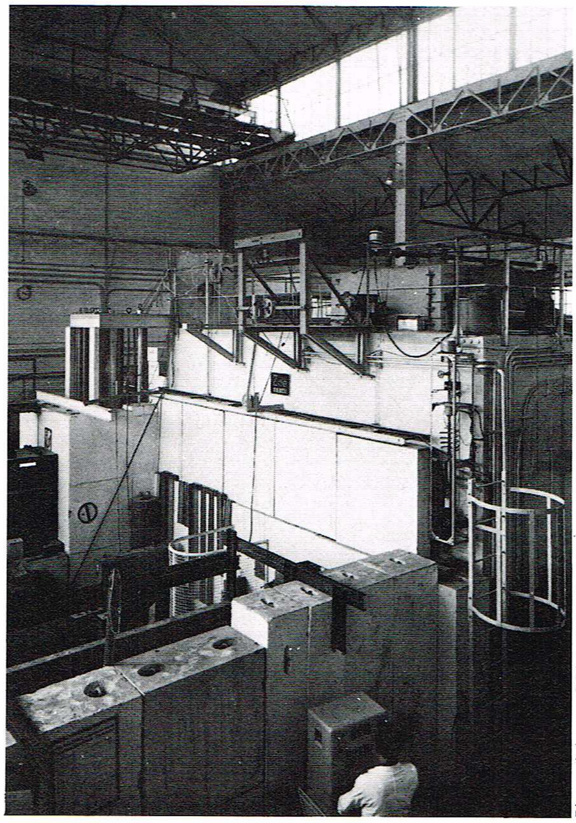

Pierre Jahan - CEA

Le choix de la filière nucléaire

Le manque de possibilité d'enrichissement a conduit la France à choisir, il y a 20 ans, une *filière à uranium naturel*. A l'époque, il ne s'agissait pas encore de fournir de l'électricité dans des proportions importantes pour assurer notre indépendance énergétique.

— L'eau ordinaire n'est pas compatible avec l'uranium naturel pour des raisons neutroniques.

— Les piles expérimentales Zoé à Fontenay, EL 2 et EL 3 à Saclay n'ont pas démontré l'intérêt économique des filières à eau lourde, de plus les difficultés d'approvisionnement en eau lourde ne sont pas un avantage quant au développement d'un programme industriel.

— L'emploi de l'hélium comme fluide de refroidissement a été envisagé mais son coût de fabrication et les difficultés techniques ont conduit à abandonner cette filière.

C'est donc vers la *filière des réacteurs modérés au graphite et refroidis par le gaz carbonique* que l'effort de la recherche s'est orienté. La voie a été ouverte, en 1956, à Marcoule, avec la mise en route des installations E. D. F. de récupération d'énergie des réacteurs du C. E. A.

Les premières tranches nucléaires ont été installées à Chinon ; c'étaient des prototypes : Chinon 1 en 1963 de 70 MW, Chinon 2 en 1965 de 210 MW, et Chinon 3 en 1967 de 480 MW.

Les centrales les plus élaborées sont celles de Saint-Laurent : Saint-Laurent 1 de 480 MW, mise en service en 1969 ; et Saint-Laurent 2 de 515 MW, mise en service en 1971.

Sur le même modèle, la centrale de Vandellos, en Espagne, à la réalisation de laquelle l'E. D. F. a participé, a été mise en service en mai 1972.

D'une conception différente en ce qui concerne les éléments combustibles, la centrale Bugey 1 a été mise en service en 1972.

Sur le plan technique, elle présente plusieurs avantages par rapport aux réacteurs modérés à l'eau ordinaire. Du point de vue de la sécurité, l'intégration de tout le circuit primaire (réacteurs, échangeurs, soufflantes, circuits de gaz carbonique) dans un caisson de béton précontraint est très intéressante pour la sûreté de l'installation vis-à-vis de l'environnement. De plus, des rejets d'effluents radio-actifs sont faibles.

En revanche, l'emploi d'un caloporteur gazeux entraîne de nombreuses sujétions, qui, si elles sont maîtrisées techniquement, compromettent cependant l'économie de la filière. La faible efficacité du fluide caloporteur exige de véhiculer des volumes très grands, et conduit donc à augmenter et à compliquer les surfaces d'échanges avec le combustible et aussi avec l'eau du circuit secondaire.

De plus, à puissance électrique égale, la masse du cœur est plus de 11 fois celle employée dans les réacteurs P. W. R. Les dimensions de cette chaudière sont donc très importantes et la construction d'usines de puissance supérieure sera très délicate.

Autre facteur désavantageux, la température de fonctionnement. Le combustible métallique se trouve dans des conditions très proches des limites technologiques de température. Il y a donc là un risque important en cas d'augmentation passagère et accidentelle de la température comme ce fut le cas à Saint-Laurent 1 en 1969. La gaine, en alliage de magnésium et de forme complexe, est fragile. De plus, ce combustible est instable à chaud en présence de gaz carbonique.

Il faut donc un système de détection de rupture de gaine. Ce système de surveillance est complexe, car, pour 500 MW, il y a quelque 3 000 canaux de combustible.

Le nombre d'éléments combustibles est très grand (45 000 pour 500 MW). Chaque année, il faut en remplacer 15 000, donc prévoir un déchargement en marche, autre facteur d'augmentation du coût et du risque. C'est la contrepartie à l'intégration dans un caisson en béton : le combustible est difficile d'accès.

L'utilisation de l'*uranium enrichi* ne présente pas les mêmes inconvénients. Le volume du combustible est fortement réduit. L'eau ordinaire sert à la fois de modérateur et de fluide caloporteur.

— L'oxyde d'uranium réfractaire est stable en présence d'eau. La température de fonctionnement est très inférieure aux limites technologiques de tenue des matériaux.

◀ *L'informatique au service de la sécurité des réacteurs : ici, la salle de contrôle de la centrale canadienne* **Bruce « B »**.

Le dispositif de détection de rupture de gaine est donc très simple.

— L'eau étant un bon fluide caloporteur, les gaines des éléments combustibles sont en tubes lisses très simples et remplacent les fines ailettes qui augmentaient la surface d'échange dans la filière graphite-gaz ; il en est de même pour les faisceaux du générateur de vapeur.

— La puissance de circulation du fluide primaire est diminuée ; le rendement électrique net est meilleur (0,33 au lieu de 0,30).

— Le combustible est renouvelé à l'arrêt, réacteur ouvert et sous eau, avec un appareil de manutention extrêmement simple.

Pour parvenir à un degré de sûreté au moins égal à celui du graphite-gaz, il faut installer une enceinte supplémentaire et, d'autre part, une centrale très élaborée de traitement des effluents radio-actifs.

De plus, à énergie égale, la quantité de combustible à retraiter est 7 fois moindre dans l'eau des centrales P. W. R.

La quantité de plutonium récupérée par kg de combustible retraité est au moins trois fois plus faible pour la filière graphite-gaz.

Le développement des surrégénérateurs à partir des réacteurs graphite-gaz aurait donc nécessité des surcoûts importants.

Les Anglais ont abandonné en 1964 cette filière pour la *filière à uranium enrichi-graphite-gaz* qui n'a pas donné les résultats escomptés et se sont tournés vers les réacteurs P. W. R.

En 1969, comme la plupart des pays industriels, l'E. D. F. a décidé de construire des *centrales à eau ordinaire*.

La première tranche a été celle de Fessenheim. En 1976 Bugey 2 a été mise en service, et, en 1977, Fessenheim 2. Le programme nucléaire accéléré depuis 1974 prévoit un rythme de 7 tranches (de 900 à 1 000 MW) engagées chaque année.

Le paiement des licences ne représente que 5 % du coût de la chaudière. Le seul pays ayant réussi à persévérer dans une filière purement nationale et à surmonter les difficultés du début est le Canada avec la filière à eau lourde.

L'adoption d'une filière largement développée présente l'avantage considérable de pouvoir bénéficier de l'expérience acquise dans les autres pays, tout en évitant les dépenses énormes d'études, d'essais de prototype, entraînées par le lancement d'une filière entièrement nouvelle.

Au 1er janvier 1976, les 49 tranches P. W. R. en exploitation dans le monde occidental (dont 31 aux États-Unis) représentaient 32,2 GW et avaient produit 461 TWh. Le nombre d'unités actuellement en construction et en commande est de 195, pour une puissance de 200 GW. Les États-Unis représentent la majeure partie de ce programme avec 122 tranches correspondant à 129 GW.

La sécurité des réacteurs

L'étude sur la sécurité des réacteurs a été effectuée sous l'égide de la Commission de l'énergie atomique des États-Unis, pour évaluer les risques que pouvait subir la population du fait d'accidents hypothétiques dans les centrales nucléaires commerciales du type actuellement utilisé. Cette étude a été effectuée sous la direction indépendante du professeur Norman C. Rasmussen du Massachusetts Institute of Technology. Les risques devaient être estimés et non mesurés, parce que, bien que plus de 50 centrales de ce genre soient actuellement en exploitation, il n'y a eu aucun accident nucléaire à ce jour. Les méthodes utilisées pour mettre au point ces estimations sont fondées sur celles qui ont été développées par le Département de la défense et l'Administration nationale de l'aéronautique et de l'espace (N. A. S. A.) au cours des dix dernières années.

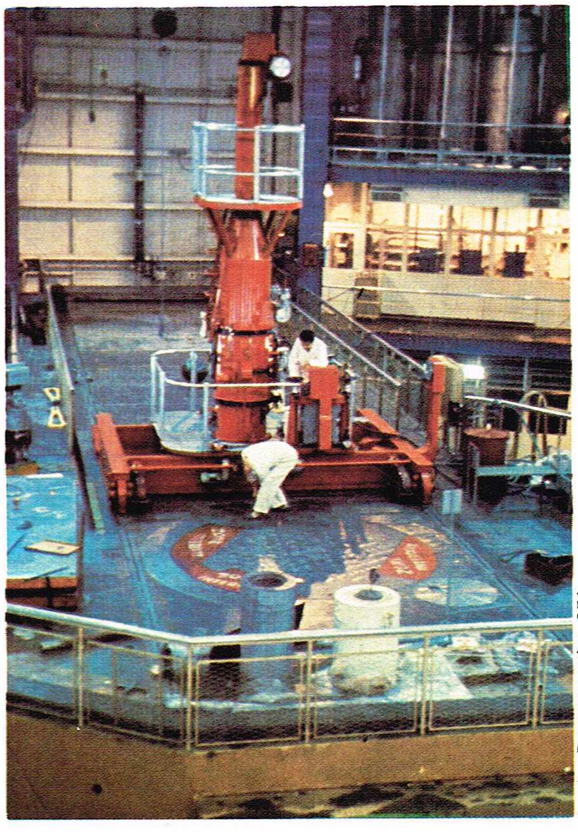

◀ *Déchargement des radio-éléments par le toit de EL3 à Saclay.*

Tableau VII

Coût de la production d'électricité (janvier 1976) en centimes de francs par kWh et en pourcentages

Coût moyen en centimes par kWh	Nucléaire P.W.R.		Fuel sans désulfuration		Fuel avec désulfuration	
Puissances	1 300 MW		700 MW		700 MW	
Amortissement de l'investissement de la centrale	3,66	50,1 %	2,41	20,6 %	2,41	18,9 %
Frais d'exploitation et d'entretien	1,49	20,4 %	1,49	12,7 %	1,49	11,6 %
Frais de combustible	2,15	29,5 %	7,80	66,7 %	8,90	69,5 %
Coût moyen total	7,30	100 %	11,70	100 %	12,80	100 %

▲ *Tableau VII : pourcentages et coûts de la production d'électricité en centimes de francs en kWh (janvier 1976).*

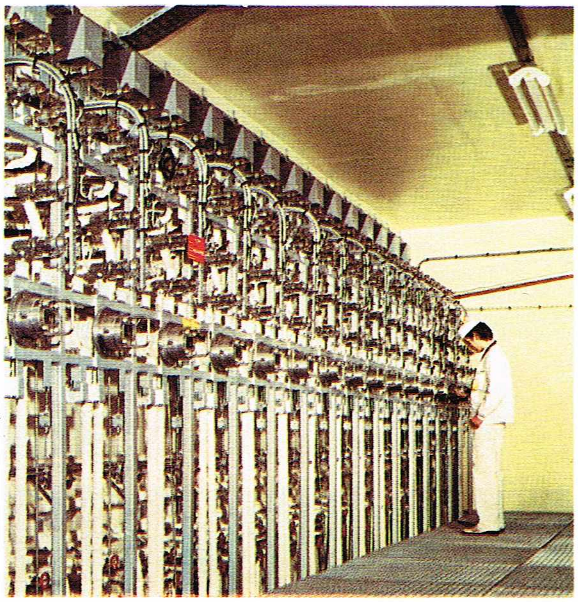

▶ *Système de détection de rupture de gaine équipant la centrale nucléaire de Bugey.*

Morceau - Photothèque E.D.F. SODEL

▼ *Tableau VIII : décomposition du coût du combustible dans le cas de l'utilisation de l'uranium (E. D. F., janvier 1976).*

Tableau VIII

Décomposition du coût du combustible uranium, en centimes de francs par kWh (E.D.F., janvier 1976)

Achat de l'uranium naturel à 15 \$/lb U_3O_8	1,03
Transformation de l'U en UF_6	0,06
Enrichissement en ^{235}U	0,85
Fabrication et transport	0,28
Retraitement et stockage des déchets	0,30
Récupération des matières nucléaires résiduelles dans le combustible usé (^{235}U, ^{238}U et Pu)	(— 0,41)
Total	2,11
Porté à 2,15 en 1985 (prix de l'U)	

L'objectif de l'étude était de faire une estimation réaliste de ces risques, et de les comparer aux risques non nucléaires auxquels la population et chaque personne en particulier sont déjà exposées. Ces informations devraient être d'une grande assistance pour déterminer l'utilisation future de l'énergie nucléaire en tant que source d'électricité.

La conclusion fondamentale de cette étude est que les risques causés au public du fait d'accidents potentiels dans les centrales nucléaires sont extrêmement faibles. Cette supposition est fondée sur les considérations suivantes.

— Les conséquences des accidents hypothétiques de réacteurs ne sont pas plus importantes, et, dans beaucoup de cas, sont beaucoup plus faibles que celles des accidents non nucléaires. Ces conséquences sont plus faibles que celles que des études précédentes, qui avaient délibérément surestimé les risques, laissaient supposer.

— La probabilité pour que se produisent des accidents de réacteurs est beaucoup plus faible que celle des accidents non nucléaires ayant des conséquences similaires. Tous les accidents non nucléaires examinés dans la présente étude, parmi lesquels les incendies, les explosions, les dégagements de produits chimiques toxiques, les ruptures de barrages, les chutes d'aéronefs, les tremblements de terre, les ouragans et les tornades, ont beaucoup plus de chances de se produire, et peuvent avoir des conséquences comparables ou supérieures à celles des accidents nucléaires.

Cependant cette étude ne suffit pas à diminuer l'impact psychologique sur la population de tout incident dans une centrale nucléaire. Récemment, nous avons pu constater qu'un incident mineur, dans une centrale nucléaire aux États-Unis, n'ayant entraîné aucune contamination, car il s'est produit en dehors de l'enceinte de sécurité, a eu les honneurs de la presse jusqu'en Europe. Il est à parier qu'un incident du même type, ou plus grave, dans une autre industrie n'aurait été mentionné que dans les journaux locaux.

Les données économiques sur l'utilisation de l'énergie nucléaire

Le coût de la production d'électricité

Sur le *tableau* VII sont comparés les coûts de production de l'électricité par les centrales nucléaires ou par les centrales à fuel (en janvier 1976).

Les puissances des centrales retenues pour la comparaison correspondent aux puissances optimales compatibles avec le réseau français en 1985. L'avantage économique du nucléaire en ce qui concerne la production d'électricité ne peut être contesté à ce niveau. Cependant, le problème est différent si l'on place la substitution au niveau de la consommation finale, car, pour l'instant, le transport de l'énergie électrique est très onéreux. Les techniques du transport à très haute tension ou par câbles supra-conducteurs qui devraient permettre de réduire ce poste sont encore loin d'être disponibles industriellement.

La part du combustible est d'environ 30 % pour le nucléaire contre plus des 2/3 pour les centrales thermiques. Du point de vue de ressources et des réserves d'uranium, l'industrie nucléaire a donc là un avantage.

La décomposition du coût du combustible

Le *tableau* VIII indique la décomposition du coût du combustible dans le cas de l'utilisation de l'uranium.

L'achat de l'uranium naturel représente donc 14,6 % du coût du kWh nucléaire pour un réacteur P. W. R. de 1 300 MW. Une augmentation du coût de l'extraction semble donc supportable, on augmenterait ainsi considérablement les réserves.

La contrepartie en est que les charges d'investissement sont de l'ordre du double de celles du thermique. De plus, comme il s'agit de technologies nouvelles, l'inflation sur ces charges est très grande : la hausse est de 125 % en 5 ans.

Tout retard d'origine technique lors de l'installation des usines se traduit par le jeu des intérêts intercalaires par des charges financières importantes.

Les réserves mondiales

Les considérations développées dans les chapitres précédents montrent combien la précision des chiffres avancés pour l'estimation des réserves prouvées est incertaine.

Aucune énergie renouvelable n'est encore utilisable sur une échelle suffisante pour la satisfaction des besoins mondiaux ; ceux-ci ne peuvent être couverts que par des ressources épuisables.

Les besoins à court et à moyen terme (20 à 30 ans) seront-ils satisfaits et la poursuite de l'expansion garantie ? Les réserves ultimes récupérables permettent-elles, à long terme, un relai progressif par une ou des énergies renouvelables ?

Faisons tout d'abord un tour d'horizon et une comparaison entre les divers types de réserves pour chaque énergie. Nous n'avons retenu que la distinction entre réserves prouvées, donc récupérables, aux conditions économiques actuelles, et réserves ultimes pour la couverture des besoins à long terme (*fig.* 5).

Les divergences d'un auteur à l'autre, et parfois même les contradictions d'une année à la suivante, nous incitent à la prudence. C'est pourquoi, au niveau des réserves ultimes, nous donnons une fourchette entre les estimations les plus pessimistes et les plus optimistes.

Dans le cas du charbon, l'énormité des réserves prouvées rend cette distinction inutile.

Pour les réserves d'uranium, la mise au point des réacteurs surrégénérateurs transforme le problème de ressources limitées en un problème de capacité maximale installable. Dans ce cas, il nous est apparu inutile de parler de réserves ultimes.

L'état de développement des techniques d'exploitation des sables et des schistes bitumineux ne nous permet pas de les ranger, ne serait-ce qu'en partie, dans les réserves prouvées. Il n'est pas du tout évident que les résultats prometteurs de certaines exploitations pilotes soient applicables à tous les gisements mis en évidence. Les incertitudes quant au taux de récupération sont encore trop grandes pour avancer des chiffres au niveau mondial.

A la vue de ce graphique (*fig.* 5), il apparaît qu'une énergie a un poids considérable : le charbon.

D'un point de vue global, la réponse aux questions que nous avons formulées quant à la couverture des besoins ne peut qu'être affirmative. En fait, il s'agit là d'un faux problème. C'est au niveau des substitutions et des concurrences énergétiques que l'on doit se poser cette question.

Les possibilités d'utilisation et de développement de telles ou telles ressources sont-elles fonction des réserves tant prouvées que potentielles ?

Le charbon, qui a permis le développement industriel, a été progressivement remplacé par les hydrocarbures parce que ceux-ci étaient produits à des coûts nettement inférieurs, et le fait que les réserves soient nettement supérieures à celles des combustibles liquides ou gazeux n'a eu aucune influence.

Le nucléaire, avant de démarrer réellement et d'avoir des perspectives de développement très importantes, a dû attendre les crises pétrolières de 1970-1974, donc le moment où son prix de revient est en fait devenu nettement compétitif.

Cependant n'oublions pas que l'essentiel du prix de revient du pétrole est représenté par la fiscalité. Il y a là un moyen de pression énorme pour contrecarrer le développement des autres ressources.

Pour pouvoir jouer un rôle important dans la substitution énergétique, une réserve doit simplement couvrir une part suffisante des besoins sur une longue période. Il y a donc un certain seuil de réserves qu'une ressource naturelle doit posséder pour jouer un rôle au niveau mondial.

Toutes les ressources naturelles satisfont à ce critère. Au-dessus de ce seuil, la notion de réserve est accessoire et les estimations n'ont pas besoin d'être précises. Il s'agit donc d'un problème économique et surtout politique.

Au niveau du pétrole, nous avons vu que le manque de diversification géographique des réserves concentrées pour 57 % au Moyen-Orient a entraîné la crise que nous connaissons. Il est donc capital de trouver de nouvelles zones de production pour diminuer la dépendance vis-à-vis des producteurs, ou par substitution diminuer notre

Bruno Barbey - Magnum

▲ *57% des réserves pétrolières sont concentrées au Moyen-Orient ; ici, le port pétrolier de Kharg, île des côtes de l'Iran sur le golfe Persique, exporte quotidiennement 5 millions de barils de pétrole brut.*

▼ *Figure 5 : diagramme des réserves mondiales d'énergie, en milliards de T. E. P., estimées en 1975.*

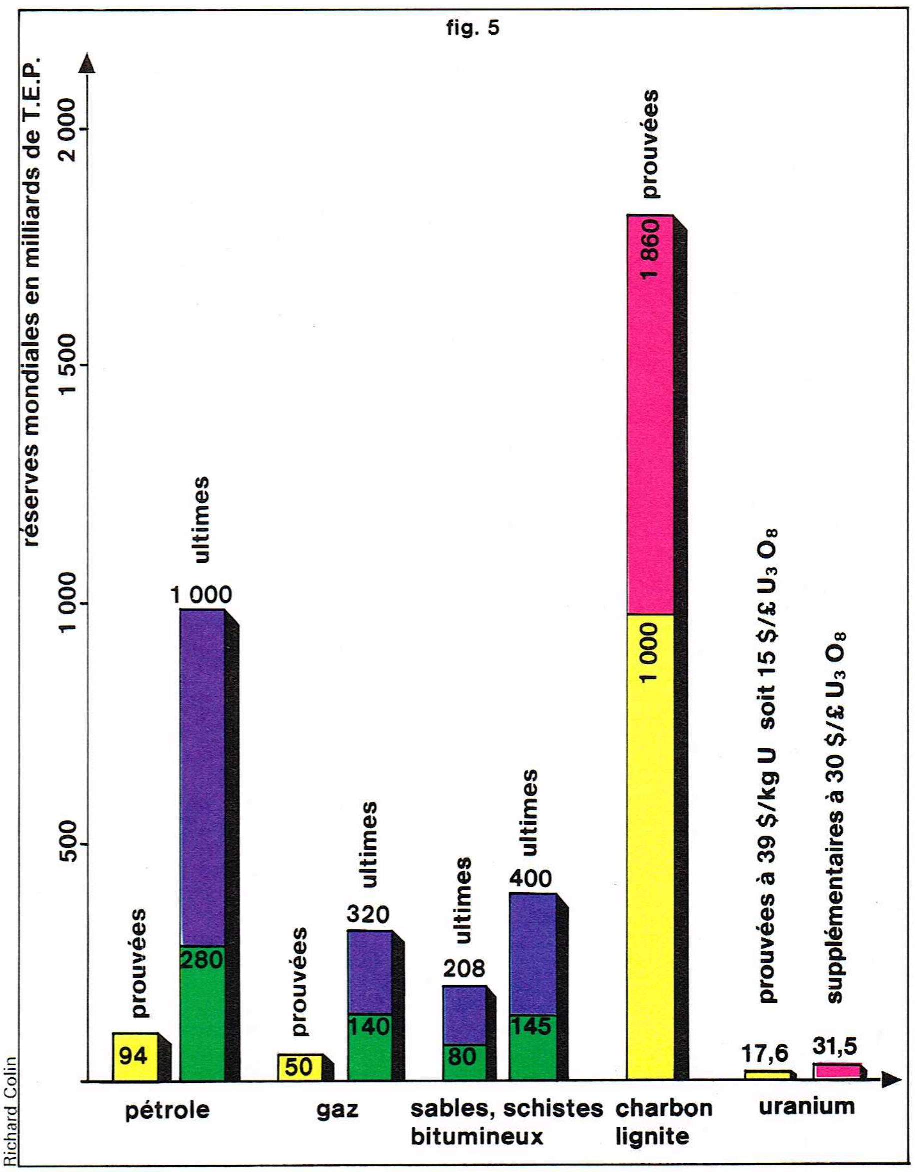

Richard Colin

Régions	Réserves totales (terre + mer)		dont réserves en mer		Ratio réserves/ production
	en millions de tonnes	en %	en millions de tonnes	en %	
Amérique du Nord	5 800	6,0	1 100	5,0	10,5
Amérique centrale et Amérique du Sud	5 100	5,5	2 200	10,0	23
Afrique	8 700	9,5	1 200	5,5	38,5
Moyen-Orient	53 200	57,0	13 000	60,0	54
Asie - Océanie	3 000	3,0	1 100	5,0	28,5
Europe occidentale	3 600	3,5	2 800	13,0	15
Monde non socialiste	79 400	84,5	21 400	98,5	37,5
Pays socialistes	14 700	15,5	300	1,5	25
Monde entier	94 100	100,0	21 700	100,0	35

Tableau IX
Estimation des réserves prouvées de pétrole au 1er janvier 1976 et ratio réserves/production

▲ ***Tableau IX : estimations des réserves prouvées de pétrole au 1er janvier 1976, et ratio réserves/production.***

consommation de pétrole par un effort délibéré de développement d'une autre énergie. C'est le cas pour le nucléaire en France.

Pour juger des possibilités réelles de diversification, deux facteurs sont importants :

— le ratio réserves/production ;

— l'appréciation des possibilités de renouvellement des réserves (*tabl.* IX).

Or, la découverte d'une nouvelle zone pétrolière importante reste un phénomène quasi imprévisible. Seules des indications de base peuvent être avancées à propos du potentiel que représentent les zones off-shore inexploitées.

La part de l'off-shore dans les réserves prouvées mondiales s'établit à 23 %. Au niveau du monde non socialiste, elle atteint 27 %.

A l'échelle mondiale, ce ratio se maintient aux alentours d'une trentaine d'années de production courante malgré le développement de la consommation (*tabl.* IX).

Au niveau régional, les écarts entre les différentes estimations et leur variation dans le temps empêchent toute conclusion simple.

La seule zone où le ratio réserves/production semble orienté à la hausse en longue période est l'Amérique du Sud. Cette évolution n'est pas imputable à des mesures de conservation puisque la production n'a cessé de croître, mais bien à la découverte de nouvelles réserves, principalement en Équateur et plus récemment au Mexique.

Partout dans les autres pays producteurs, la tendance était à la baisse jusqu'en 1973, et s'est inversée depuis.

En conclusion, les estimations de réserves semblent surtout utiles au niveau global, car elles permettent de supprimer toute crainte de pénurie, soit pour l'ensemble des sources existantes, soit pour chacune d'entre elles.

Les **coûts de production** sont un facteur important quant à la concurrence énergétique. Pour pouvoir les comparer, il faut se ramener à une unité équivalente, ici la *thermie,* ce qui pose le problème des coefficients de conversion et de la valeur des produits énergétiques que nous aborderons plus loin.

Le **montant des investissements** est également très important, car il rend compte des difficultés de mise en œuvre et pose le problème des disponibilités financières.

Étant donné la diversité du coût de production pour les raisons déjà exposées, nous ne donnerons ici que des fourchettes fixant simplement l'ordre de grandeur. Ces chiffres ne doivent donc pas être considérés comme absolus et précis, il s'agit d'estimations.

▶ ***Tableau X : coûts de production des différentes sources d'énergie fossiles en centimes de francs par thermie (c/th).***

Il ressort de l'étude du *tableau* X que le pétrole présente un avantage très net. Pour les pays producteurs (Afrique, Moyen-Orient), le coût est inférieur à 1 centime de franc par thermie. Ce coût n'est atteint que dans les cas défavorables de production en mer.

Seul le gaz produit aux États-Unis et en Europe, à partir de champs situés à terre, et les mines de charbon nord-américaines exploitées à ciel ouvert représentent des substituts possibles du point de vue des coûts de production.

Les coûts du gaz et du charbon sont, par contre, comparables à ceux du pétrole produit dans les zones de consommation. La diversification des sources d'approvisionnement peut donc se faire en utilisant les substitutions énergétiques, si l'on ne retient que ce critère.

Les schistes et sables bitumineux semblent, pour l'instant, n'être que faiblement compétitifs.

Tableau X
Coûts de production des différentes sources d'énergie fossiles en centimes de francs par thermie

Énergie	Coûts de production	
	valeurs inférieures	valeurs supérieures
Pétrole		
Moyen-Orient		
— à terre		
. ancien	0,06	0,12
. récent	0,15	0,35
— en mer		
. grands champs	0,20	0,35
. petits champs	0,50	0,70
Afrique		
— Libye (à terre)	0,15	0,5
— Algérie	0,5	0,7
— en mer	0,5	1,0
États-Unis		
— à terre	0,5	1
— en mer	1	1,7
— Alaska	1,5	2,4
Europe - mer du Nord		
— Zone nord	1,5	2,4
— Zone sud	0,9	1,4
Gaz		
États-Unis	0,4	1,5
Europe		
— à terre	0,25	0,7
— en mer du Nord		
. loin des côtes	1,2	2
. proche des côtes	0,5	0,9
Huiles lourdes		
États-Unis	1,7	3
Sables bitumineux	2,4	2,4
Schistes bitumineux	2,7	5
Charbon		
États-Unis		
— ciel ouvert	0,5	0,7
— mines souterraines	2	3
— moyenne	1,2	2
Europe	1,7	4
France	2,4	2,7

Par contre, les investissements nécessaires au développement des ressources énergétiques dans les pays consommateurs sont très importants (*tabl.* XI).

Là, la concurrence est beaucoup plus discutable. Les gains réalisés sur le transport ne compensent pas l'avantage sur les frais fixes que détient la production du pétrole du Moyen-Orient. Il s'agit là d'un choix politique pour assurer la sécurité des approvisionnements que les pays consommateurs sont amenés à faire.

Notons que nous avons raisonné en terme de *coûts* et non de *prix*. C'est-à-dire que nous n'avons pas tenu compte de la fiscalité des divers pays. Pour les pays de l'O. P. E. P., la fiscalité représente plus de 95 % du prix. Dans ces conditions, les récents événements pétroliers permettent, grâce à l'augmentation énorme des prix, de développer des ressources énergétiques dont l'intérêt était discutable.

Tableau XII
Pouvoirs calorifiques supérieurs et inférieurs en kcal/kg (Durier : Caractéristiques des carburants et combustibles, Technip)

Carburants / Pouvoirs calorifiques	Essence	Pétrole	Gas-oil	Fuel domestique	Fuel léger	Fuel lourd n° 1	Fuel lourd n° 2
Supérieurs	11 200	10 950	10 850	10 750	10 600	10 450	10 350
Inférieurs	10 500	10 300	10 200	10 100	10 100	9 850	9 750

▲ ***Tableau XII :** tableau comparatif des pouvoirs calorifiques supérieurs et inférieurs, en kcal/kg, pour différents carburants et combustibles.*

Tableau XI
Investissements des différentes sources d'énergie fossiles en francs par tonne-équivalent pétrole et par an

Énergie	Investissements	
	valeurs inférieures	valeurs supérieures
Pétrole		
Moyen-Orient		
— à terre		
. ancien	20	30
. récent	50	150
— en mer		
. grands champs	80	120
. petits champs	150	250
Afrique		
— Libye (à terre)	50	250
— Algérie	200	300
— en mer	150	500
États-Unis		
— à terre	200	400
— en mer	400	800
— Alaska	800	1 200
Europe - mer du Nord		
— Zone nord	800	1 200
— Zone sud	350	500
Gaz		
États-Unis	200	800
Europe		
— à terre	100	300
— en mer du Nord		
. loin des côtes	800	1 200
. proche des côtes	200	350
Huiles lourdes		
États-Unis	600	1 200
Sables bitumineux	800	1 200
Schistes bitumineux	1 000	2 000
Charbon		
États-Unis		
— ciel ouvert	250	500
— mines souterraines	600	800
— moyenne	500	700
Europe	500	1 000
France	600	700

◀ ***Tableau XI :** investissements des différentes sources d'énergie fossiles, en francs par tonne-équivalent pétrole et par an (F/T. E. P./an).*

Valeur des produits énergétiques

Pour le physicien, l'énergie est « quelque chose » qui se transforme (matière, rayonnement, travail, chaleur, etc.).

Pour l'économiste, il s'agit d'un bien dont l'utilité sociale ne peut s'appréhender uniquement par une grandeur physique. Les produits énergétiques ont une valeur qui est fonction de leurs utilisations, de la structure des moyens de distribution, du développement de la technologie, des substitutions possibles entre produits, etc.

Certes, on peut dire que dans chaque produit disponible sur le marché lors de son élaboration, on a incorporé, ou mieux investi, une certaine quantité d'énergie. Ceci est également vrai pour les produits énergétiques. On pourrait donc être tenté de se livrer à des **bilans énergétiques actualisés.** Cette étude, à elle seule, serait très imparfaite, car elle ignorerait l'utilisation que l'on fait de ces produits. Un même produit peut avoir des prix différents selon sa destination.

Partant du principe que les produits énergétiques actuels font partie de notre niveau de vie et que nous ne pouvons modifier brutalement l'utilisation que nous en faisons, essayons cependant de dégager quelques caractéristiques de ces produits. Auparavant, rappelons qu'en matière de concurrence énergétique, d'une manière générale, les facteurs importants sont :

— les coûts de production et, partant, l'estimation des réserves géologiques récupérables (pour les énergies fossiles) ;

— les coûts de transformation et de distribution ;

— la sécurité dans les approvisionnements ;

— les délais de mise en œuvre, compte tenu de l'environnement économique et technologique ;

— l'utilisation que l'on fait des divers produits.

Revenons sur ce dernier point qui, à nos yeux, est très important pour l'étude de la concurrence énergétique sur un marché donné.

Prenons l'exemple des carburants automobiles et des fuels. Le seul pouvoir calorifique qui caractérise l'énergie interne d'un combustible ne peut rendre compte de la valeur du produit ; certes, celui de l'essence est le plus élevé (*tabl.* XII).

Pour obtenir l'essence, il faut investir une quantité d'énergie plus grande ; par exemple, un réformage catalytique consomme 100 kg de fuel par tonne de charge et un craquage environ 70 kg, qui sont finalement transformés en énergie chimique.

Pour les produits pétroliers, on peut faire le **bilan moyen de l'énergie investie dans chaque produit,** en fonction des divers schémas de raffinage, des rendements des unités de traitement et éventuellement compter l'énergie incorporée dans les installations des unités (celle-ci est déjà comptabilisée dans le prix des matériaux).

Cependant, un naphta, un fuel peuvent être brûlés, transformés en carburants ou en produits pétrochimiques. Il y a concurrence entre les diverses utilisations et les diverses sources d'énergie. Il n'est pas possible de décider de la meilleure utilisation selon un seul critère.

Le **théorème de Carnot,** pour un économiste, peut se traduire de la manière suivante : *Tout produit énergétique qui peut fournir des calories à une température élevée devrait être utilisé en priorité à la production*

▶ *Quelques définitions utiles.*

Ressources
On utilise ce mot pour les matières premières qui ne sont pas susceptibles d'être renouvelées. Elles représentent la quantité totale disponible à la surface de la Terre de ces matières premières exploitables avec succès dans un avenir prévisible. On parle ainsi de ressources de charbon, de pétrole ou d'uranium. Ces ressources n'étant pas renouvelables, on peut évaluer une échéance d'épuisement à partir des prévisions concernant la consommation.

Ressources sûres
Pour un pays donné, on entend par ressources sûres celles dont l'exploitation n'est soumise à aucun aléa politique. En pratique, ce sont les ressources dont les gisements se situent sur le territoire national.

Dépendance énergétique
Le taux ou le degré de dépendance énergétique d'un pays est le rapport entre la quantité d'énergie importée (ressources non sûres) et la quantité d'énergie consommée (importations plus ressources nationales). A titre d'exemple, le taux de dépendance énergétique de la France était de 75 % en 1975; l'objectif du VII^e^ plan est de ramener ce taux à une valeur de 55 % environ en 1985, grâce au programme électronucléaire.

Prix de l'énergie
Il faut distinguer :
— les *prix internationaux,* qui s'établissent par rapport à une énergie de référence, hier le charbon, aujourd'hui le pétrole;
— les *prix nationaux,* propres à chaque pays, liés aux précédents sous réserve de taxes ou de subventions et qui, en influençant la consommation, permettent aux pays d'établir une politique énergétique.

Réserves
Le terme de réserve est employé dans un sens plus restrictif que celui de ressource. C'est la fraction correspondante des ressources qui ont été mesurées et que l'on suppose exploitable à un coût donné en utilisant la technologie disponible.
Si le prix de l'énergie augmente et si l'on consent la répercussion de cette augmentation sur l'extraction d'un combustible, les réserves de celui-ci sont alors plus grandes, car il devient possible d'exploiter des gisements plus pauvres dans des conditions économiquement rentables. On admet, par exemple, que le doublement du prix de l'énergie multiplie aujourd'hui par quinze environ les possibilités des gisements de charbon.

Combustibles fossiles
Certains combustibles proviennent de déchets organiques décomposés lentement au cours des âges géologiques sous l'action d'agents physiques et chimiques. On est donc en présence d'un processus de fossilisation, d'où l'expression « fossile » utilisée pour ces combustibles. On sait que les charbons ont une origine végétale, alors que le pétrole aurait une origine animale.

Combustibles synthétiques
Certains combustibles naturels, qui font donc partie des énergies primaires, peuvent être produits artificiellement par des procédés de synthèse. On peut fabriquer par exemple du pétrole ou du gaz à partir du charbon. Ces combustibles synthétiques appartiennent donc aux énergies secondaires.

Recyclage
Le recyclage de l'énergie est impossible. L'énergie se transforme tout en se dégradant jusqu'au moment où elle devient inutilisable. Il faut noter en revanche que la plupart des matériaux peuvent être recyclés : les métaux par exemple. Comme cette opération consomme bien souvent beaucoup moins d'énergie que l'élaboration initiale du matériau, le recyclage peut permettre des économies importantes d'énergie.

Énergies nouvelles
Les énergies dites nouvelles sont ainsi qualifiées, car on pense qu'elles sont en mesure de satisfaire à l'avenir une partie plus ou moins grande des besoins énergétiques. La plupart de ces énergies, comme l'énergie solaire, l'énergie éolienne et la géothermie, sont connues depuis très longtemps, mais leur utilisation ne s'est pas développée de façon significative jusqu'à aujourd'hui en raison des difficultés diverses liées à leur exploitation.

Ratio réserve / production courante
Ce rapport est évalué en années. Il indique le temps au bout duquel la réserve sera épuisée. Il suppose que la production des années à venir reste égale à la production annuelle actuelle.

d'énergie mécanique d'un travail, et ne devrait pas fournir des calories pour le chauffage domestique.

Ce théorème est d'autant plus valable pour la production d'électricité.

La chaleur de combustion du fuel peut être transformée en énergie électrique avec un rendement de 30 à 40 % qui ne peut être atteint par des sources d'énergie à température relativement basse.

Dans le même ordre d'idée, l'utilisation des énergies mécaniques gratuites et renouvelables (rivières, marées) est un merveilleux moyen de production de l'électricité, car elle évite une transformation d'énergie.

Par contre, pour le chauffage domestique et pour satisfaire les besoins nécessitant un apport de calories à faible température, il semble logique de vouloir utiliser en priorité des sources dites gratuites ou à basse énergie.

Autre illustration, celle de la *pompe à chaleur,* ou plutôt *pompe à entropie* qui, moyennant un travail, fait passer de la chaleur dans le sens inverse de l'écoulement naturel avec des coefficients de performance supérieurs à 1, et permet d'utiliser des sources d'énergie dites gratuites comme l'air ou l'eau d'une rivière.

L'eau de refroidissement des centrales nucléaires est un sous-produit que l'on peut utiliser pour le chauffage domestique, si son transport peut se faire dans des conditions économiques favorables. A l'inverse, l'hydrogène est un très bon combustible, susceptible d'emplois très divers, mais sa fabrication nécessite des températures de dissociation de l'ordre de 730 °C à 1 000 °C ou de passer par l'électrolyse. C'est un bon vecteur à haute énergie et, partant, un bon moyen de stockage.

La crise pétrolière

Ce serait une erreur que de faire remonter à la guerre du Kippour d'octobre 1973 les difficultés que connaît l'industrie pétrolière.

L'Organisation des pays exportateurs de pétrole a été créée le 14 septembre 1960. Sa première action a été d'augmenter les ressources fiscales des pays producteurs. Dès 1964, d'importantes modifications fiscales ont été apportées par les accords de Djakarta. Durant la période 1950-1970, les réserves du Moyen-Orient ont été décuplées, provoquant un profond bouleversement géographique en faveur du Moyen-Orient et également de l'Afrique.

Cette pléthore a entraîné une évolution à la baisse qui s'est inversée depuis 1970. En 1969 l'entrée en vigueur de la législation antipollution et de lois coûteuses sur la sécurité des mines de charbon aux États-Unis provoquait une hausse de ce produit sur le marché américain. La demande de l'industrie sidérurgique japonaise, étant supérieure aux substitutions vers le fuel à l'intérieur des États-Unis, contribua à consolider cette situation.

Les raffineries américaines axées vers la production de l'essence ne purent satisfaire la demande de fuel et les tensions se reportèrent sur le marché européen.

La tension des prix s'est répercutée sur le transport, par suite de la fermeture pendant plusieurs mois d'un pipe-line allant du golfe Persique à la Méditerranée.

Le pétrole étant transporté par des navires spécifiques, le taux de fret est très sensible à toute modification de la demande.

La crise se développe et s'amplifie notamment en Libye pour aboutir aux accords de Tripoli, et parallèlement aux accords de Téhéran en février 1971 pour les autres pays producteurs. C'est surtout au Japon et en Europe que les effets se sont fait sentir, car ces pays ne disposent pratiquement pas de production nationale.

La dévaluation officielle du dollar entraîne un nouvel accord complémentaire signé à Genève en janvier 1972.

Le système de la prise de participation des États producteurs dans les opérations des compagnies sur leur territoire s'est généralisé en octobre 1972 à New York.

A la veille de la guerre d'octobre 1973, les représentants des sociétés pétrolières et de l'O. P. E. P. s'étaient réunis à Vienne dans le dessein d'adapter les accords précédents à l'évolution de la situation énergétique. Le conflit entraîna la suspension de ces pourparlers. Le 16 octobre, les pays arabes producteurs publièrent unilatéralement une déclaration à Koweit comportant notamment :

— un embargo discriminatif suivant les pays, dont l'impact ne fut en réalité pas très grand du point de vue quantitatif, mais d'une portée réelle sur les consommateurs ;

— une modification des prix affichés, base sur laquelle est calculée la fiscalité.

La réunion de décembre 1973 à Téhéran entérina cette décision, fixant le prix affiché à 11,6 dollars par baril.

En septembre 1974 à Vienne, les pays de l'O. P. E. P. augmentèrent les pourcentages de redevance et d'impôt ; certains d'entre eux ont de plus nationalisé une partie des actifs des sociétés pétrolières, posant ainsi les problèmes de l'indemnisation, des garanties du partenaire minoritaire, du rachat du pétrole appartenant à l'État.

Ces décisions ont entraîné une grande complexité dans le calcul des prix et des coûts du pétrole brut, source d'interprétations divergentes pour chacune des parties intéressées.

Dans un dessein de simplification, en novembre 1974 le prix affiché a été abaissé de 0,40 $/bbl, soit 11,25 $/bbl. Mais la redevance est passée de 16,65 % à 20 % et l'impôt sur les bénéfices déjà fixé à 65 % est passé à 85 %. Au premier octobre 1975, les prix ont été de plus augmentés de 10 %.

Cette crise a eu les répercussions que l'on sait sur toutes les énergies de l'économie mondiale en général.

Bien qu'il soit très difficile de définir le prix exact du brut, on peut essayer de suivre depuis 1955 le prix de revient du pétrole appartenant en propre aux compagnies. Pour le pétrole de référence « Arabian Light », on peut déduire du prix affiché (P) le coût technique (C) et le montant des royalties (R), puis répartir l'impôt sur les bénéfices selon les diverses clefs (I) intervenues lors des accords successifs :

$$\text{Prix de revient} = R + C + I\,[P - (R + C)]$$

Ainsi, si l'on prend comme base 100 en 1955, on peut construire un indice d'évolution du prix de revient du pétrole brut.

Cet indice baisse de façon constante dans les années 1960 pour atteindre 94 en 1970. Puis, de 1970 à 1976, on assiste à une montée vertigineuse dont les paliers correspondent aux divers accords précédemment cités jusqu'à 933 (*fig.* 6 et 7).

Les prix du pétrole étant exprimés en dollars, il est légitime de les corriger de l'effet de l'inflation de cette monnaie. Pour ce faire, l'indice du coût de la vie aux États-Unis (publié par l'I. N. S. E. E.) a été utilisé.

On obtient ainsi un indice d'évolution de ce prix de revient de référence, exprimé en dollars constants. Cet indice enregistre un minimum de 65 en 1970 et augmente jusqu'à 435 en 1976.

Encore une fois, il ne s'agit là que d'un exemple retraçant l'évolution du prix de revient pour l'Arabian Light, pétrole de référence pour la fixation des prix O. P. E. P.

Il ne s'agit donc que d'un ordre de grandeur, ne tenant pas compte des variations d'un pétrole brut à l'autre, ni du prix de cession du « pétrole participation », ni des reventes entre compagnies et à l'intérieur des compagnies.

Mais il est impossible de se référer aux prix sur le marché libre correspondant à des opérations « spot », car ce marché porte sur des quantités marginales. Il se fait au coup par coup en fonction des cargaisons disponibles. Les prix y sont donc très sensibles aux fluctuations conjoncturelles.

Henri Bureau - Sygma

▲ *Vue générale de la Conférence préparatoire sur l'énergie, qui s'est tenue avenue Kléber à Paris, en octobre 1975.*

▼ *Figures 6 et 7 : diagrammes montrant l'évolution du prix de revient du pétrole brut de 1955 à 1976, pour l'Arabian Light, pétrole de référence pour la fixation des prix O. P. E. P.*

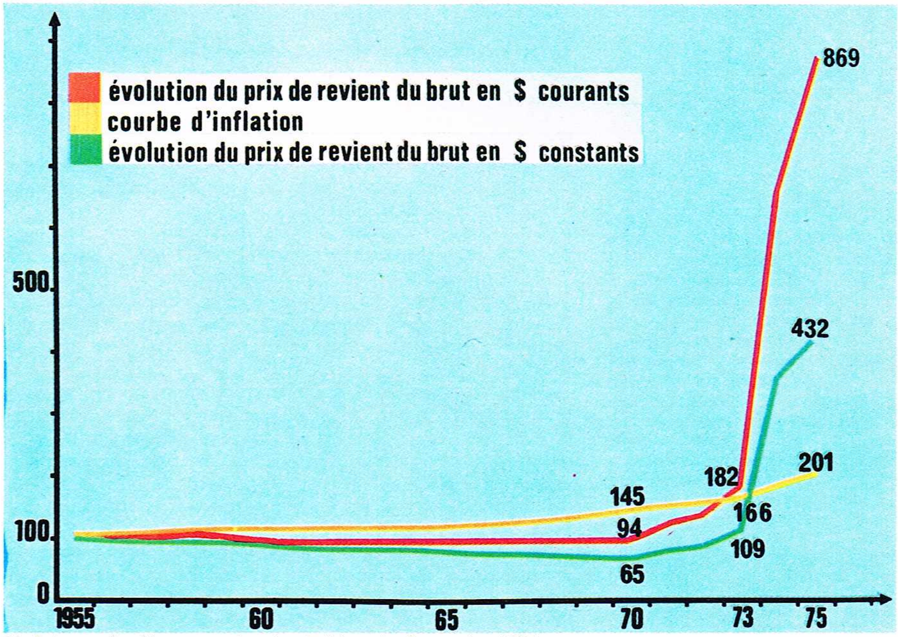

M. Robert - Conférence sur la crise de l'énergie, Septembre 1976

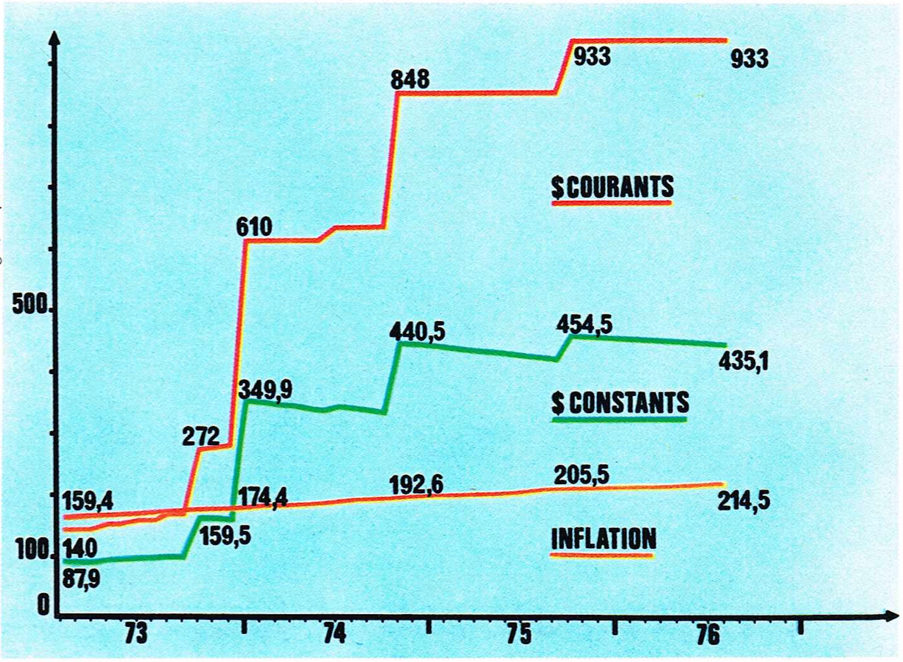

M. Robert - Conférence sur la crise de l'énergie, Septembre 1976

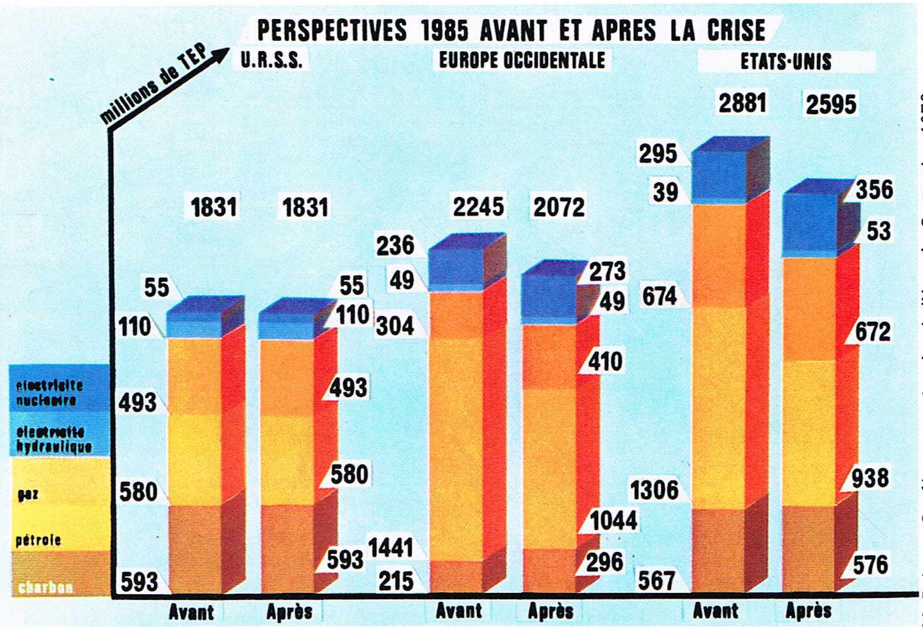

M. Robert - Conférence sur la crise de l'énergie, Septembre 1976

▲ *Figure 8 : diagramme des perspectives faites, à l'horizon de 1985, avant et après la crise de 1973.*

▼ *Ci-dessous, unités de soudage travaillant à la construction du gazoduc reliant les Pays-Bas à l'Italie et passant, ici, en Suisse. Au centre, l'équipement ultra-moderne d'une mine de charbon mise récemment en production par la Standard Oil à New Jersey; la crise pétrolière a modifié les politiques énergétiques des grands pays consommateurs et l'on assiste, aux États-Unis notamment, à une reprise intensive de l'exploitation de la houille.*

Les consommations énergétiques en 1985

La crise pétrolière récente a modifié les politiques énergétiques des grands pays consommateurs.

Pour mettre en évidence ce changement, nous pouvons opposer les prévisions faites, à l'horizon 1985, avant et après la crise de 1973 (*fig.* 8).

L'optimisme d'avant la crise prévoyait, pour l'Europe occidentale, une consommation de 2 245 millions de T. E. P. qui a été par la suite diminuée de 7,7 %.

En dehors de cette modification en valeur absolue, on assiste à une redistribution quant aux parts des diverses formes d'énergie devant satisfaire les besoins énergétiques.

Une reprise intensive de l'exploitation de la **houille** en Europe n'est pas facile, de par les problèmes de main-d'œuvre et les difficultés techniques d'exploitation des gisements européens. Cependant, la part du charbon passe de 9,5 % à 14,3 % avant et après la crise. On sera donc probablement conduit à importer du charbon des États-Unis ou de Pologne.

Si, pour des raisons de conservation de leurs ressources énergétiques nationales, les États-Unis en venaient à limiter ces approvisionnements, l'Europe se tournerait vers des pays producteurs tels que l'Australie, l'Afrique du Sud et éventuellement les pays socialistes. Cependant, les réserves considérables des États-Unis permettraient la satisfaction de leur demande intérieure ainsi que celle des importations européennes.

La part du **pétrole** a par contre baissé de 64 % à 50 %. Les réserves prouvées en mer du Nord, bien qu'allant chaque jour en augmentant, ne pourront, en aucun cas, satisfaire à cette demande, mais, en revanche, assureront l'indépendance énergétique de la Grande-Bretagne et de la Norvège. La zone située au nord du 62e parallèle semble également prometteuse, mais les conditions d'exploitation y sont très difficiles. L'utilisation du pétrole mettra l'Europe en position de dépendance vis-à-vis de l'extérieur.

Le **gaz naturel** est appelé à se substituer en partie au pétrole. Sa part passe de 13 % à 19,7 %. La réalisation de ces prévisions dépend largement des réserves disponibles dans les gisements de Groningue, mais également des gisements de la mer du Nord, Ekofisk, Frigg, etc.

Ces gisements serviront à maintenir un certain taux d'expansion, au-delà des années 1980. Mais cet objectif exige une infrastructure d'importation. C'est dans cette optique que se situent les projets de construction d'un gazoduc de Sibérie vers l'Europe et les chaînes de liquéfaction du gaz nord-africain. Des études sont également en cours pour voir s'il serait possible de transporter le gaz algérien par gazoducs en Italie.

Pour l'**hydraulique,** les grands sites ont déjà été aménagés et on ne pense guère construire que des centrales au fil de l'eau, donc de faible puissance et d'intérêt purement local.

La part du **nucléaire** passe de 10 % à 13 %. L'industrie, au prix d'un effort considérable, a réussi à démontrer la fiabilité d'un certain nombre de réacteurs. En outre, la fin de l'ère des combustibles fossiles à bon marché a mis en lumière un des avantages spécifiques de l'énergie nucléaire, à savoir la relative stabilité et le niveau relativement bas des coûts du combustible nucléaire.

Cependant, les prévisions supposent que les programmes ne seront pas retardés et même que la tendance actuelle s'inversera dans un avenir proche.

Consommation énergétique aux États-Unis

Aux États-Unis, le charbon est évidemment à la hausse. Sa part passe de 19,7 % à 22,2 %, alors que la demande globale d'énergie devrait baisser de 10 % (de 2 881 à 2 595 millions de T. E. P.). Le charbon est donc amené à jouer un rôle déterminant.

La crise pétrolière a eu pour effet un renversement de la tendance au ralentissement de l'activité de forage qui se manifestait depuis 1970. Cependant, la part du pétrole baisse considérablement d'une prévision à l'autre, de 45 % à 36 %, et ce bien que l'on attende pour 1977 la production de Prudhoe Bay. Ce gisement représente le

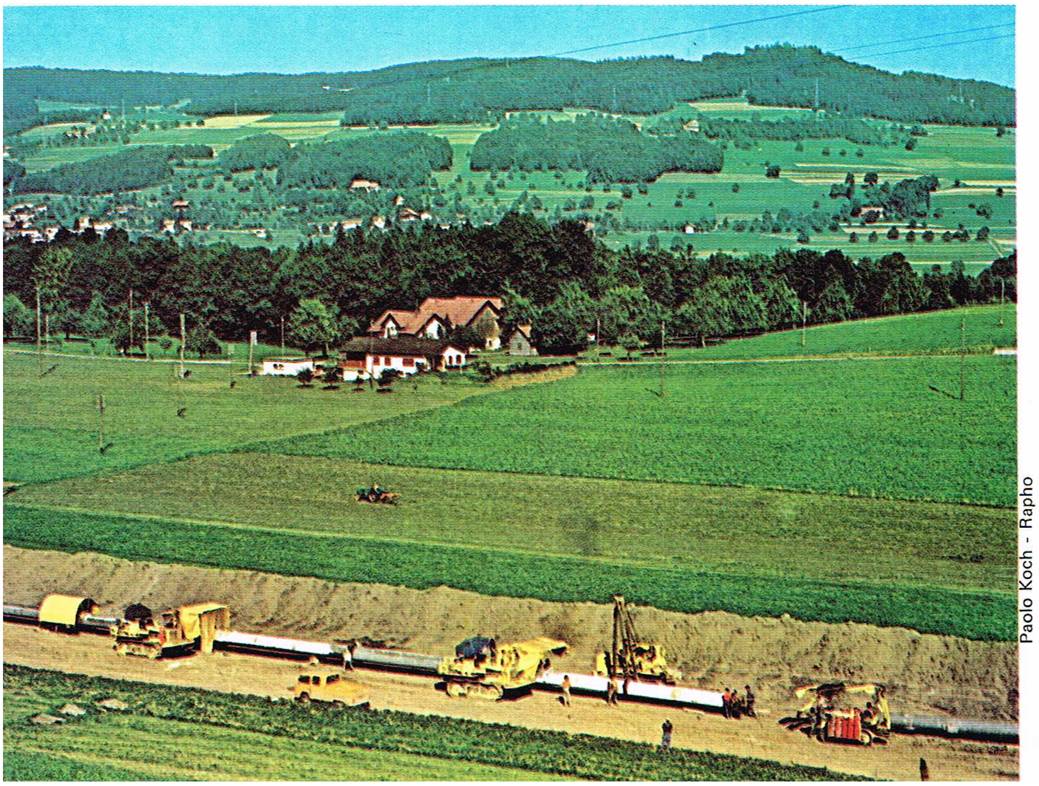

Paolo Koch - Rapho

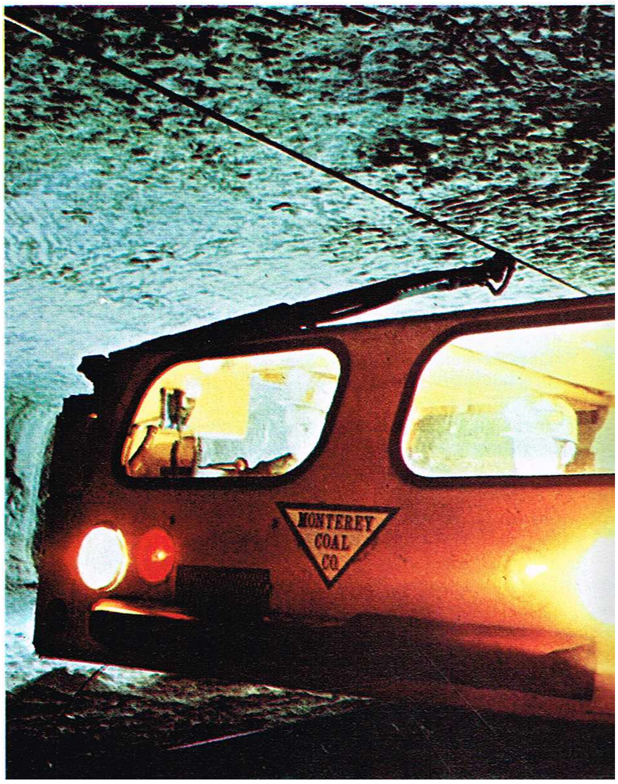

quart des réserves des États-Unis. Le projet « Indépendance » limite donc l'utilisation du pétrole brut.

Dans le cas des États-Unis, le relais n'est pas pris par le gaz naturel. Sa part passe de 23,4 % à 26 %. Cependant, à plus long terme, on peut espérer voir se développer le potentiel gazier de l'Alaska.

Consommation énergétique en U. R. S. S.

Les prévisions de l'U. R. S. S., par contre, n'ont pas été influencées par la crise. On ne peut que constater une consommation équilibrée : 32 % pour le charbon, 31,6 % pour le pétrole, 27 % pour le gaz, 6 % pour l'hydraulique et 3 % pour le nucléaire. Les plans quinquennaux ne sont pas affectés par les troubles du monde occidental.

Certes, ces prévisions ne seront peut-être pas réalisées, mais leur intérêt n'est pas de faire une prophétie, mais de guider l'action immédiate. Tout changement quant à la satisfaction des besoins énergétiques implique des changements structurels que l'on doit prévoir longtemps à l'avance pour respecter les délais de mise en place.

Consommation énergétique au Japon

La consommation énergétique du Japon est extrêmement dépendante de l'extérieur. La consommation finale du Japon est évaluée à 257 millions de T. E. P. pour l'année 1974.

La production nationale d'énergie primaire ne représente que 13 % des besoins. Elle provient pour 35 % du charbon. Les énergies nucléaire, hydraulique et géothermique représentent 58 % de l'énergie indigène. La production pétrolière est inexistante, cependant la consommation de pétrole n'a cessé de croître depuis 1960. Le total des besoins s'élevait à 29,16 millions de T. E. P. en 1960 pour atteindre 235,78 millions de T. E. P. en 1974, soit 70 % des besoins. Le Japon est donc extrêmement dépendant vis-à-vis de l'extérieur pour la couverture de ses besoins énergétiques. Le pétrole provient principalement du golfe Persique (205 Mt) et dans une moindre part d'Indonésie (30 Mt).

Il est donc essentiel pour ce pays de diversifier ses ressources. Cette politique de diversification se dirige vers l'Amérique du Sud. De récents contrats ont été passés avec le Venezuela pour l'importation de pétrole brut. Elle s'accompagne d'un dynamisme très grand pour l'exportation de produits industrialisés et de technologie. C'est en quelque sorte une fuite en avant qui n'est pas sans amener des tensions sociales et quelques déboires du point de vue de l'environnement.

Le seul pays de l'O. C. D. E. où la consommation de charbon ait augmenté, est le Japon, bien que les importations représentent 75 % des besoins.

Nous devons aussi remarquer que le Japon est le pays où l'on a enregistré la plus forte croissance de la consommation finale d'énergie entre 1960 et 1974.

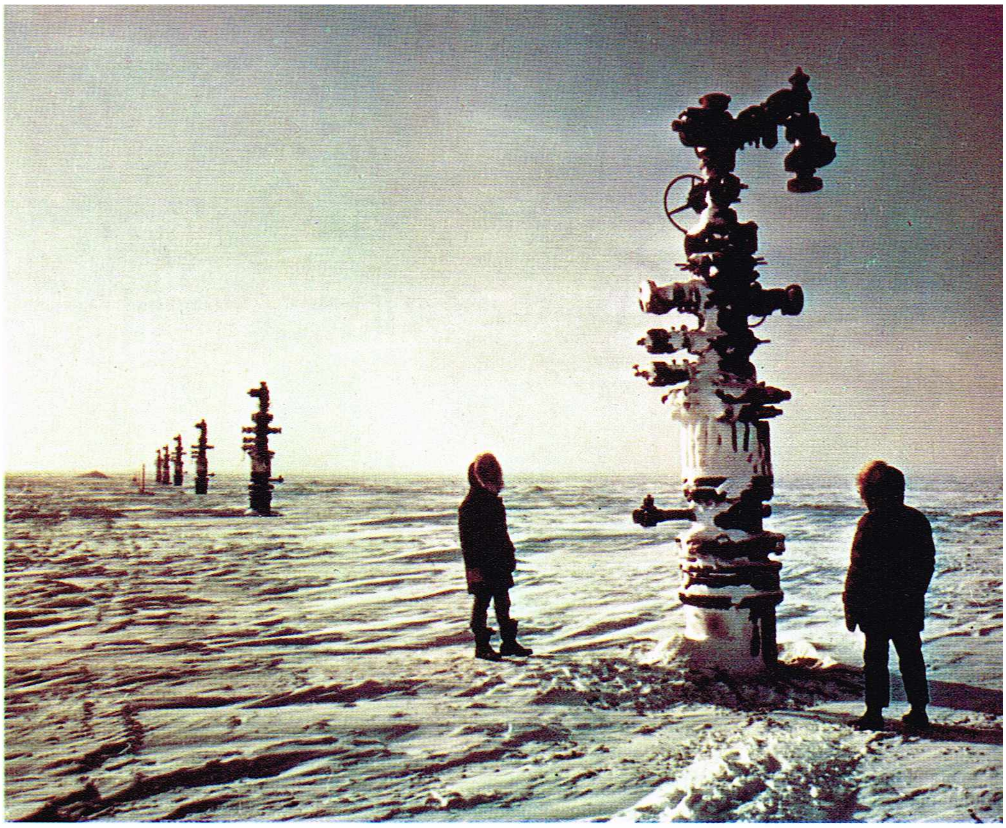

U.S.I.S.

▲ *Le gaz naturel est appelé à se substituer en partie au pétrole, c'est pourquoi les réserves de gaz naturel, même les plus difficiles à exploiter, comme ici au-delà du cercle Arctique, constituent un potentiel énergétique de relais à plus ou moins long terme.*

Consommation énergétique au Canada

La structure de la consommation au Canada est très différente, le Canada étant un pays producteur d'hydrocarbures.

Les exportations vers les États-Unis se montent à 43,5 millions de T. E. P. et sont compensées par des importations pour un montant équivalent. C'est une simple redistribution régionale, en fonction des marchés locaux, sans distinction de frontière.

Les réseaux de gaz font également abstraction des frontières, mais les exportations ne sont pas compensées par des importations. L'hydraulique et le nucléaire couvrent les besoins totaux en énergie pour 30 %. Si la part du charbon n'a cessé de décroître depuis 1960, c'est au détriment des importations, car la production nationale a enregistré un mouvement inverse. En 1974, la part du charbon dans les besoins totaux était de 7 %, couverte pour 83 % par la production nationale.

Le Canada semble donc dans une situation énergétique favorable. L'évolution de son ratio réserves d'hydrocarbures/production courante a enregistré une baisse de 1967 à 1972 pour se stabiliser aux environs de 15. La part des hydrocarbures est de 67,5 % dans la satisfaction des besoins en énergie.

La crise pétrolière a affecté le Canada, mais les efforts entrepris dans le domaine du nucléaire, la valorisation

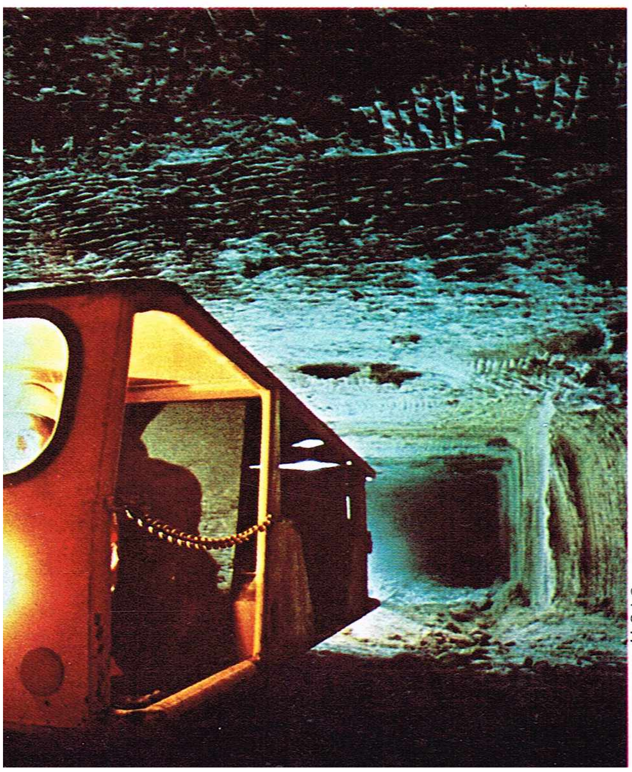

U.S.I.S.

Paolo Koch - Rapho

▼ *Ile artificielle de prospection pétrolière construite par le Canada en mer de Beaufort (océan Arctique).*

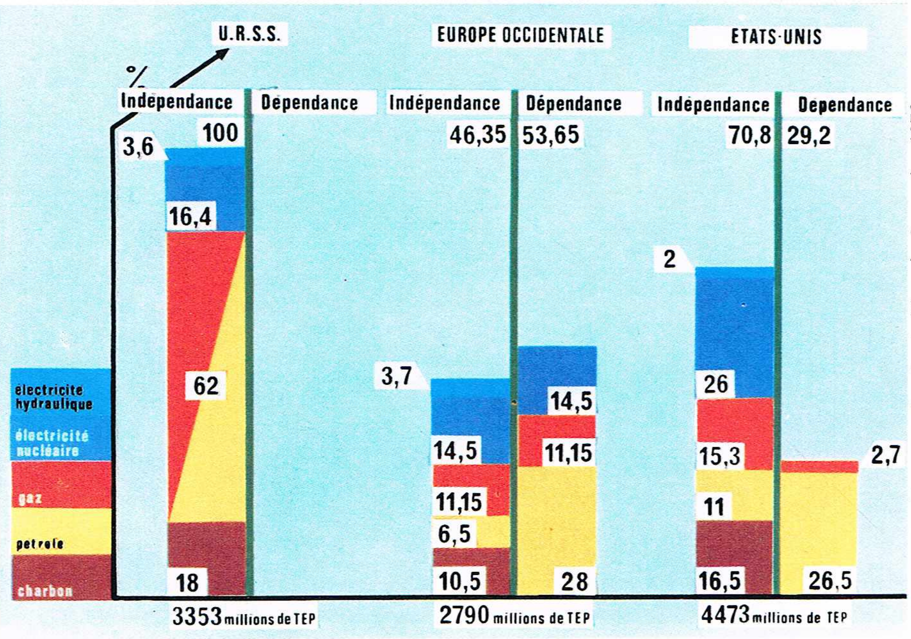

M. Robert - Conférence sur la crise de l'énergie, Septembre 1976

▲ ***Figure 9 :*** *schéma mettant en relief la position de dépendance dans laquelle se trouvent les pays industrialisés ; cette dépendance est d'environ 54 % pour les pays d'Europe occidentale.*

▼ ***Figure 10 :*** *schéma mettant en relief la dépendance de ces mêmes pays dans l'espoir de développements d'énergies nouvelles ; ce « pourcentage de dépendance » passe à 52 % pour les pays d'Europe occidentale.*

d'autres ressources abondantes, comme les sables bitumineux, et la prospection pétrolière en zone arctique doivent assurer à ce pays une indépendance énergétique satisfaisante.

Dépendance et indépendance énergétique

La crise énergétique pose le problème des approvisionnements en matières énergétiques et l'embargo décidé à Koweit par les pays arabes a mis en relief la position de dépendance dans laquelle se trouvent les pays industrialisés.

Nous reprendrons ici une estimation fournie par monsieur Robert, lors de sa conférence à Strasbourg en septembre 1976, en rappelant les difficultés inhérentes à cet exercice et qu'il ne s'agit que d'un schéma (*fig.* 9).

Pour l'**Europe**, on peut penser que le charbon, outre la production propre, offre une garantie suffisante dans les approvisionnements pour nous placer dans une position d'indépendance.

Le pétrole nous met en position de dépendance pour le tiers de notre consommation totale d'énergie à l'horizon 2000, et ce, malgré l'effort de recherche et de développement en mer du Nord.

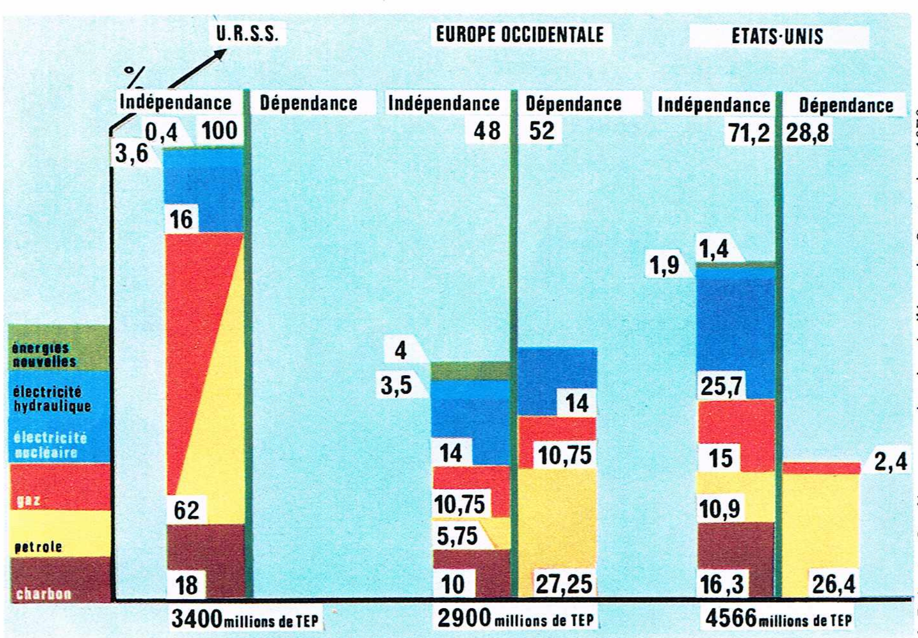

M. Robert - Conférence sur la crise de l'énergie, Septembre 1976

Le gaz naturel nous met dans une situation d'équilibre entre dépendance et indépendance pour les raisons évoquées plus haut.

Pour l'uranium, l'incertitude est grande, mais les besoins pour satisfaire aux plans de développement de l'énergie nucléaire le sont également ; il a donc été choisi la même répartition que pour le gaz.

L'énergie hydraulique, dont le potentiel ne peut guère être augmenté de façon notable, est par contre très intéressante du point de vue de l'indépendance.

De ce schéma, on peut conclure que nous dépendons pour 54 % environ de nos besoins. Les espoirs quant aux développements des énergies nouvelles (éolienne, solaire, géothermique), pour importants qu'ils soient en Europe (4 % de nos besoins) n'inversent pas cette position de dépendance. Le « pourcentage de dépendance » passe à 52 % (*fig.* 10).

Pour les **États-Unis**, la situation est très différente et leur dépendance résulte exclusivement du pétrole et un peu du gaz naturel, qui doit en grande partie prendre le relai. Notons que l'énergie nucléaire représente là un potentiel national qui devrait contribuer pour le quart des besoins. Les prévisions en ce qui concerne les énergies nouvelles sont plus modestes qu'en Europe.

L'**U. R. S. S.**, pays producteur d'énergie, semble par contre devoir être largement indépendante, l'énergie nucléaire ne représentant que 16,4 % et les hydrocarbures nationaux 62 %.

Le coût de l'indépendance énergétique

La politique des deux grands en matière énergétique apparaît de plus en plus clairement comme une politique de conservation des réserves de pétrole et de charbon situées sur leur sol.

Les États-Unis et les pays du COMECON s'approvisionnent sur le marché contrôlé par l'O. P. E. P. Dans ces conditions, les pays européens et en particulier la France sont obligés de poursuivre leurs programmes de développement du nucléaire et d'économie rigoureuse d'énergie.

Ceci se traduit par des augmentations de tarifs, de fiscalité, et par des efforts d'épargne, donc des réductions de la consommation. Si ces efforts ne sont pas faits, il s'ensuivra une augmentation de l'inflation et donc une détérioration du niveau de vie, tout en augmentant l'injustice sociale.

Selon le rapport de la commission de l'énergie du VII^{e} plan, les investissements énergétiques représentent 175 milliards de francs pour la période 1976-1980. Ce chiffre, selon la Banque de Paris et des Pays-Bas, est sous-estimé, car il ne tient pas compte des dépenses à engager pour la construction d'une deuxième usine d'enrichissement d'uranium, ni des dépenses du C. E. A. pour le retraitement du combustible à l'étranger, et la recherche pétrolière à l'étranger devrait dépasser le chiffre annoncé par le plan.

On arrive donc à une moyenne de 40 milliards par an, soit près de 13 % du total des investissements productifs français.

Les sociétés pétrolières et l'E. D. F. auront donc à dégager un auto-financement considérable sous peine de voir augmenter les emprunts à l'extérieur. Cette situation compromettrait la situation financière de ces sociétés et créerait également une tension très grave sur le marché financier français où les sommes prélevées rendraient impossible le financement des autres secteurs de l'économie.

La situation financière des sociétés pétrolières s'est détériorée. Le taux d'auto-financement est tombé de 65 % en 1971 à 41 % en 1975. L'augmentation du prix du pétrole a provoqué un accroissement considérable des charges de reconstitution des stocks qui a dû être financé par l'emprunt. Rappelons de plus que le risque inhérent à la recherche pétrolière oblige les sociétés à avoir un taux d'auto-financement considérable.

La crise n'est donc pas un événement mineur, et imposera aux pays consommateurs d'énergie un effort et une mobilisation de leurs forces pour assurer leurs besoins énergétiques. Il est à prévoir que la consommation des pays en voie de développement ira en augmentant très rapidement ; la consommation d'énergie par habitant variant approximativement comme le carré du produit national brut par habitant.

Consommation d'énergie et produit national brut (P. N. B.)

Il semblerait qu'il existe une liaison entre la consommation d'énergie par habitant et le P. N. B. par habitant, la consommation étant fortement croissante (*fig.* 11).

L'industrialisation explique cette relation dans son ensemble en ce sens que l'on rencontrera du côté des gros consommateurs les pays d'Amérique du Nord et d'Europe, et du côté des petits consommateurs les pays en voie de développement.

Cependant, à l'intérieur des groupes, on observe une dispersion importante autour de cette liaison. Le mode de vie et les productions nationales spécifiques doivent en être les raisons.

Ainsi, en 1972, les plus gros consommateurs d'énergie par habitant sont les Américains du Nord, avec plus de 10 000 kilos d'équivalent charbon par habitant pour un produit national brut d'environ 5 à 6 000 dollars par habitant.

La Suède, dont le P. N. B. par habitant est du même ordre de grandeur, a une consommation d'énergie de 6 000 K.E.C./habitant. La Suède, de ce point de vue, a des consommations comparables à l'Allemagne de l'Est, à la Belgique, à l'Allemagne de l'Ouest et à la Grande-Bretagne.

La France, dont le produit national brut par habitant est comparable à celui de l'Allemagne de l'Est, consomme moins d'énergie avec un peu plus de 4 000 K.E.C./habitant.

Les pays à économie planifiée sont relativement de gros consommateurs. Ils consomment, à P. N. B. par habitant égal, plus que les pays à économie de marché.

L'énergie est donc un facteur indispensable au développement économique. Les pays en voie de développement ont des consommations par habitant beaucoup plus faibles, variant entre 150 K.E.C./habitant et 1 500 K.E.C./habitant.

Le récent renchérissement de l'énergie pénalise extrêmement ceux qui ne sont pas exportateurs de matières énergétiques ou de matières premières qui ont enregistré des augmentations comparables. Il y a donc là un cercle vicieux inflationniste, car le prix de ces matières premières se répercute sur celui des technologies et produits finis exportables par les pays industrialisés. En effet, si, au cours d'une récession très forte, les pays industrialisés ont réussi à rétablir l'équilibre de leur commerce extérieur, la récession a diminué les importations d'énergie et de matières premières, ce qui a contribué à l'amélioration commerciale. Dès que la reprise s'est affirmée, le déficit est réapparu.

La recette globale des pays pétroliers, qui a été de 104 milliards de dollars en 1974, devrait atteindre 130 milliards en 1976 du fait de l'augmentation de la demande et de la hausse des prix.

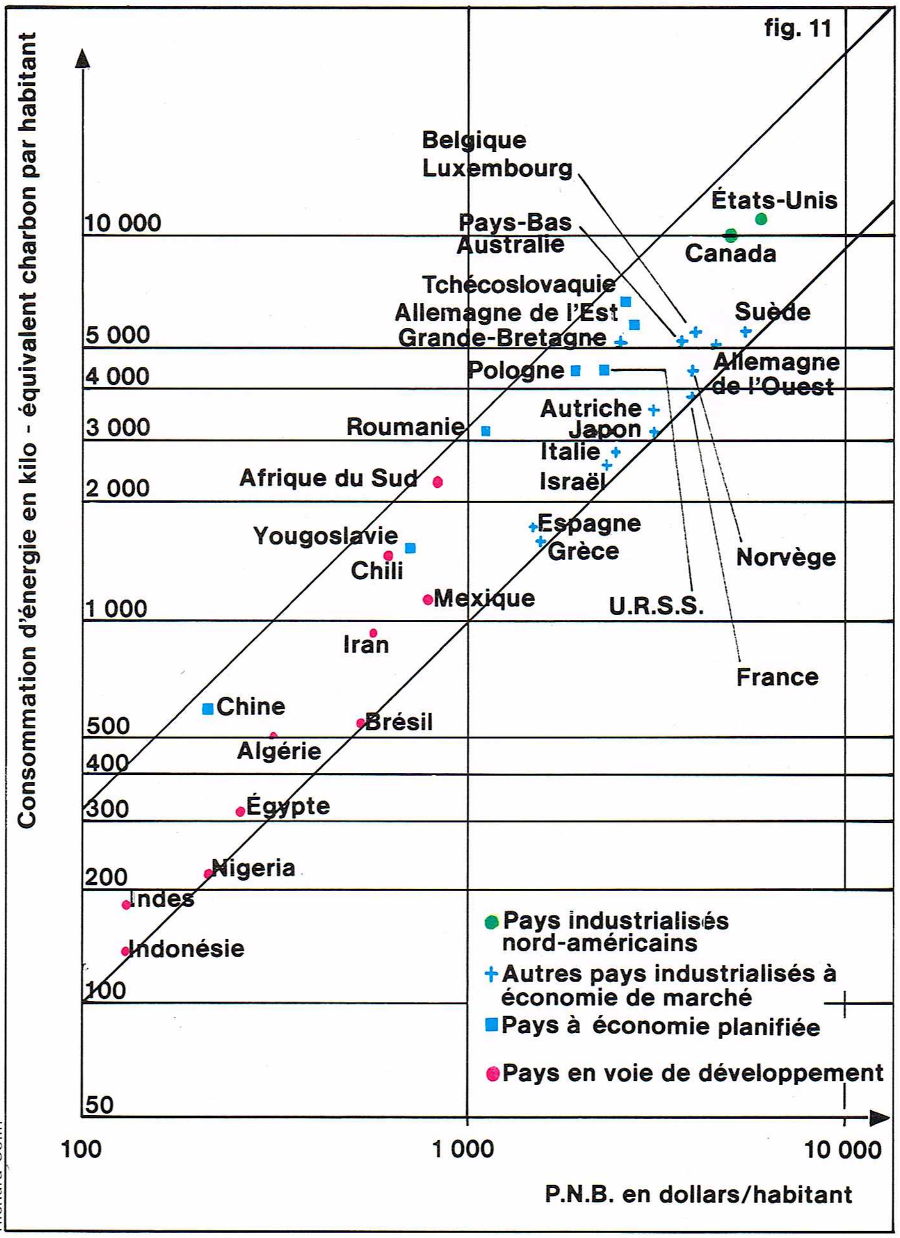

Richard Colin

▲ *Figure 11 : graphe montrant la liaison entre consommation d'énergie et P. N. B. par habitant (1972).*

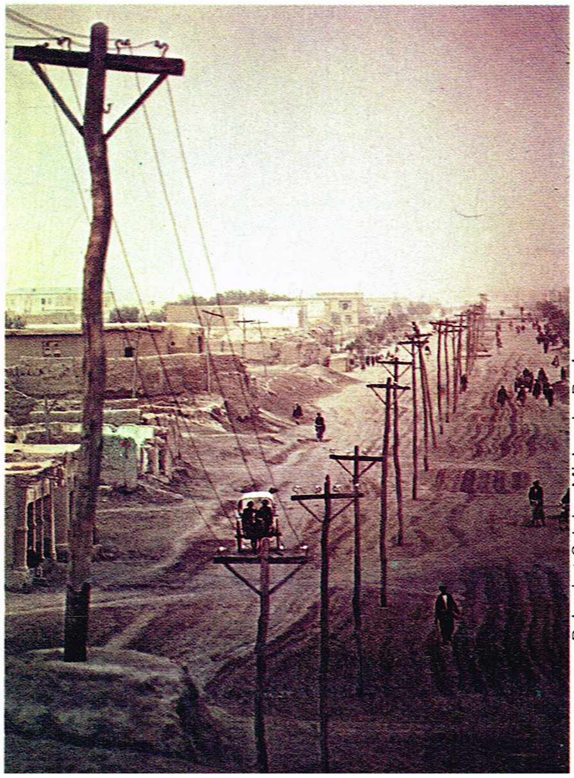

Roland et Sabrina Michaud - Rapho

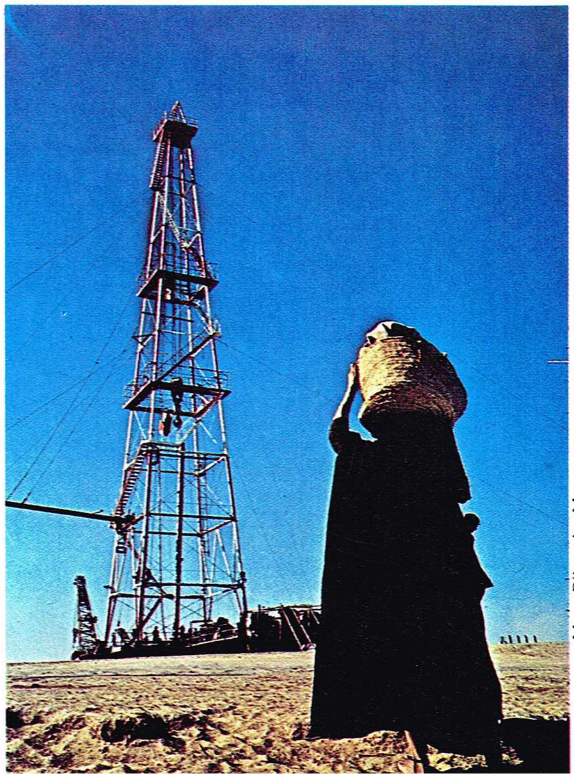

Marc Riboud - Magnum

◀ *A gauche, la rue principale d'un village d'Afghanistan, pays en voie de développement difficile, pénalisé par son manque de matières énergétiques et de matières premières ; à droite, un derrick au nord de Rumeila, en Irak ; ici, les besoins internes représentent plus de 50 % des revenus pétroliers.*

J.P. Laffont - Sygma

▲ ***Dépendance et indépendance : le salut pour beaucoup se trouve dans le nucléaire. Ici, le générateur atomique Cirus, à Trombay (Inde).***

Par contre, les importations de ces pays se développent mais à un taux ralenti par rapport à l'année précédente. Dans ces conditions, le déficit global des pays importateurs ne se réduira pas.

Le problème du sous-développement n'est pas uniquement financier, mais également une question d'infrastructure existante, les ports et voies d'accès pouvant dans certains cas être très rapidement engorgés.

Tous les pays producteurs ne peuvent absorber les revenus pétroliers. Il y a deux grands groupes de pays producteurs : les uns, dont les besoins internes représentent plus de 50 % des revenus pétroliers, les autres, compte tenu soit de la faible dimension de leur territoire, soit de leur population, soit de leurs ressources en dehors des hydrocarbures, disposent d'un surplus considérable.

Dans la première catégorie se trouvent : la Libye, l'Irak, le Nigeria, l'Algérie, l'Indonésie, l'Équateur.

Pour l'année 1974, ce surplus représente 58 milliards de dollars sur 104 milliards. La répartition des investissements à l'étranger par les pays membres de l'O. P. E. P. a été la suivante en 1974 :

— 10 à 11 milliards de dollars en bons du trésor aux États-Unis ;

— 6 à 7 milliards de dollars en Grande-Bretagne, répartis entre les fonds d'état, les dépôts dans les banques et les investissements immobiliers ;

— 5 à 7 milliards en prêts à l'Europe et au Japon ;

— 4 milliards de dollars d'investissements privés en Europe ;

— 4 milliards de dollars au Fonds monétaire international ;

— 2,5 milliards aux pays en voie de développement ;

— 21 à 23 milliards de dollars flottant sur le marché de l'eurodollar.

Ces fonds ne sont pas sans créer de fortes tensions sur le marché monétaire international, risquant de compromettre le redressement des pays consommateurs et d'augmenter le déficit des pays en voie de développement.

Les pays producteurs de l'O. P. E. P. sont des pays en voie de développement plus ou moins avancé. Ces pays n'ont pas intérêt à voir s'installer un désordre international qui compromettrait l'opportunité de développement qu'ils ont actuellement. Il apparaît nécessaire de voir s'établir une « coopération » allant au-delà du problème du pétrole et qui soit véritablement une coopération économique et technique dans l'intérêt mutuel.

L'idéal serait de voir s'installer un circuit triangulaire d'échanges entre les pays producteurs de pétrole qui prêteraient aux pays en voie de développement, ceux-ci en retourneraient les sommes aux pays industrialisés, en se procurant les biens d'équipement et le savoir-faire qui leur permettraient enfin de faire démarrer leur développement.

Ce système utopique ne pourrait se développer que si les pays producteurs recevaient des garanties financières que seuls les pays industrialisés pourraient offrir.

De plus, le transfert de la technologie ne peut se faire brutalement dans tous les secteurs industriels. Il est nécessaire d'implanter des technologies qui soient effectivement des facteurs de développement, génératrices d'emploi, et adaptées à l'environnement économique, à l'infrastructure et aux besoins spécifiques des classes les plus pauvres de ces pays.

Le commerce international porte pour une grande part sur les denrées alimentaires. Les États-Unis exportent chaque année des quantités énormes de blé. Pour certains pays producteurs de matières premières, le problème de l'indépendance se pose en termes d'importation de céréales, de viande, etc., ce qui est tout aussi crucial. Il serait souhaitable de trouver là aussi un terrain d'entente harmonieux, comme le souligne Perez Alfonso, l'un des fondateurs de l'O. P. E. P.

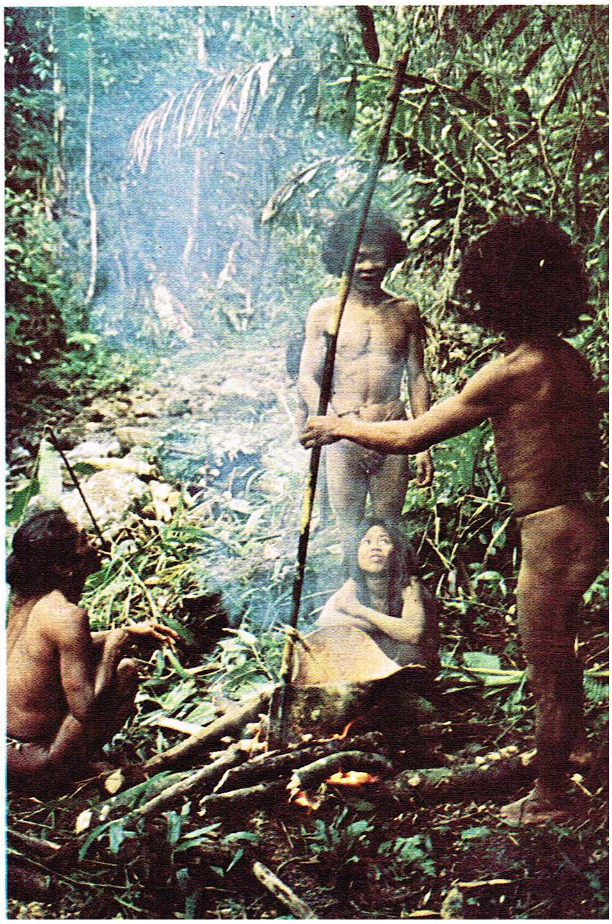

J. Nance - Magnum

▶ ***Avec le feu a commencé notre dépendance vis-à-vis de l'énergie.***

Mais si le bilan semble pouvoir s'équilibrer au niveau de la planète, dans les faits, c'est à l'échelle des nations que les échanges se produisent, et là l'individualité de chaque pays complique singulièrement le problème.

Conclusion

L'énergie est la clef de voûte des sociétés humaines. Toutes les civilisations primitives ont utilisé le feu comme source d'énergie. Celui-ci fut en effet le premier moyen trouvé par l'homme pour avoir de l'énergie à sa disposition, et avec le feu a commencé notre dépendance vis-à-vis de l'énergie. On voit toute l'importance du mythe de Prométhée, qui avait volé le feu aux dieux pour l'apporter aux hommes. L'histoire dit aussi qu'il leur enseigna toutes les connaissances marquant le début de la civilisation : art de construire, travail des métaux, l'écriture, la médecine, l'art de dompter les animaux, etc.

Cette dépendance de l'énergie a augmenté avec le développement de nos sociétés. Aujourd'hui, ces dernières consomment plus ou moins d'énergie, mais toutes en font usage. Les sources sont variées : pétrole, charbon, gaz, uranium ; les usages très divers : transport, chauffage, éclairage, activité industrielle. La soif d'énergie n'a d'égale que la volonté de développement. Pas de croissance sans un approvisionnement régulier et à prix raisonnable de l'énergie ; pas d'existence même, pour nos sociétés, sans énergie, tant celle-ci nous est devenue indispensable. Le mythe de Prométhée, liant énergie et civilisation, domine inéluctablement notre monde.

Le Club de Rome

Aux différentes questions posées par la croissance de nos sociétés, la réponse la plus frappante de ces dernières années est celle apportée par le Club de Rome (groupe international de personnalités de toutes cultures qui a été fondé en 1968 par Aurelio Peccei et dont le projet ambitieux est de contribuer à maîtriser le futur) en 1972 par la publication d'un rapport établi pour son compte par le MIT (Massachusetts Institute of Technology). Ce document, souvent appelé rapport Meadows, du nom de deux de ses auteurs, a été publié en français la même année dans un livre portant le titre *Halte à la croissance*. Une des conclusions qui ont retenu le plus l'attention du public était la prédiction du déclin des civilisations sous l'action simultanée de la surpopulation, de la pollution et de l'épuisement des matières premières, si aucun changement n'intervenait dans notre type et notre rythme de croissance.

L'énergie figurait bien évidemment au premier rang des accusés. La croissance de la consommation est en effet inévitable sous le double effet de l'augmentation de la population et de l'augmentation du niveau de vie. Le rapport rappelait à ce propos l'étroite corrélation existant entre la consommation d'énergie et le « produit national brut » par habitant.

D'autre part, la quasi-totalité de l'énergie utilisée aujourd'hui provient des combustibles fossiles (charbon, hydrocarbures et gaz naturel). Leur combustion rejette dans l'atmosphère des quantités considérables d'anhydride carbonique (CO_2). Les effets climatologiques et écologiques d'un accroissement important de la teneur de l'atmosphère en gaz carbonique seraient considérables. L'utilisation de l'énergie nucléaire n'entraîne pas ce type de pollution. En revanche, les centrales utilisant ce principe, en service aujourd'hui, ne sont pas sans conséquence sur l'environnement. Venant d'une source autre que le rayonnement solaire, leur chaleur réchauffe l'atmosphère. Cette « pollution thermique » peut, si elle est excessive et localisée sur des portions de rivières ou de plans d'eau (lacs ou mers), détruire la vie aquatique. La pollution thermique pourrait avoir une influence importante sur le climat si elle atteignait, à l'échelle de la planète, un pourcentage notable de l'énergie solaire.

L'énergie nucléaire engendre également un autre agent polluant : les déchets radio-actifs. Le recours au nucléaire étant encore faible, les conséquences de ces déchets sur l'environnement sont inexistantes. Le problème se poserait différemment à long terme si une croissance de la consommation énergétique forte et généralisée n'était assurée que par le nucléaire.

Enfin, si on considère à présent les ressources énergétiques, les perspectives à long terme ne sont guère réjouissantes. Comme nos ressources traditionnelles en combustibles fossiles et en uranium sont « non renouvelables », aucun niveau de réserves ne peut résister à une croissance exponentielle de la consommation d'énergie. Même une sous-estimation du simple au double de nos réserves ne ferait que retarder l'échéance fatale de quelques années.

Quelles formes prendrait cette échéance ?

Dans le rapport Meadows, on trouve plusieurs réponses, car, suivant les hypothèses retenues concernant le contrôle de la démographie, la lutte contre la pollution et le taux de recyclage des matières premières, les actions entreprises portant sur l'un ou sur plusieurs de ces points, les conclusions diffèrent. Mais, dans tous les cas où il n'y a pas de mesures énergiques et rapides de stabilisation, on aboutit à ce qui est appelé dans ce rapport un effondrement de la civilisation soit par pénurie de nourriture et de ressources naturelles, soit par effondrement de la production, soit par une croissance démesurée de la pollution. Les échelles de temps des courbes présentées dans le rapport sont peu précises mais permettent de situer la plupart des situations catastrophiques dans la deuxième moitié du XXI[e] siècle (*fig.* 12).

Le rapport du Club de Rome a maintenant cinq ans. Que s'est-il passé depuis sa parution ? Ce document a été évidemment très controversé, et après un long débat les experts admettent aujourd'hui que les modèles utilisés étaient trop simplistes pour pouvoir rendre compte de la complexité des phénomènes étudiés. Les conclusions étaient donc à tort extrêmement pessimistes. D'autre part, nous vivons aujourd'hui une réalité bien différente de celle qui était prévue. Il n'y a pas en effet de situation de pénurie de pétrole ; en revanche, les pays producteurs

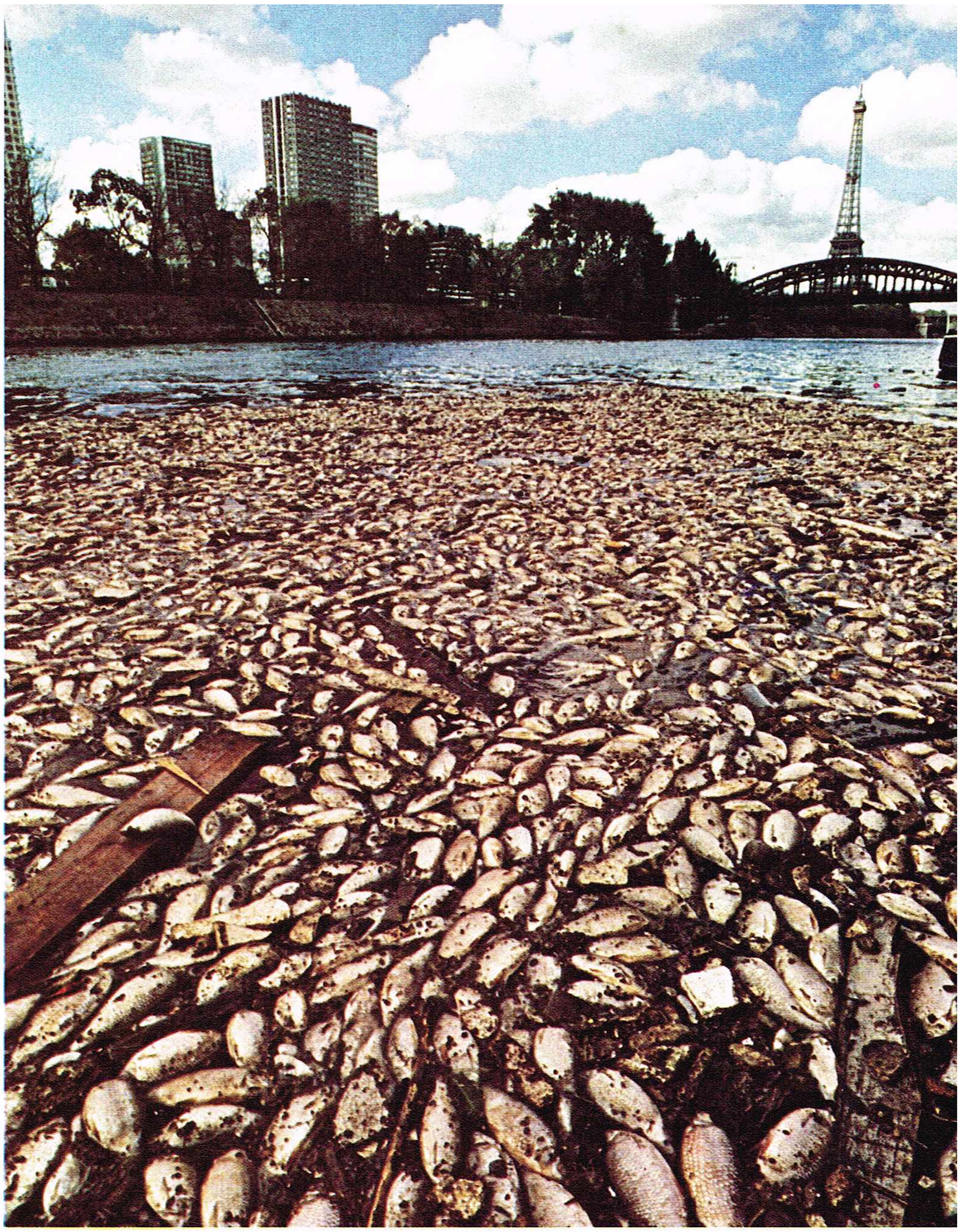

Charliat - Rapho

▲ ***Une des conclusions du rapport Meadows : la prédiction du déclin des civilisations sous l'action conjuguée de la surpopulation, de la pollution et de l'épuisement des matières premières. Ici, un banc de poissons morts sur la Seine, Paris, octobre 1976.***

▶ Figure 12 : diagramme-type de croissance non contrôlée inspiré des travaux du Club de Rome. La croissance alimentée par la démographie et l'élévation du niveau de vie entraîne une diminution rapide des ressources naturelles et une augmentation de la pollution. Sous ces deux effets, un renversement de tendance brutal intervient au milieu du XXIe siècle, qui a pour conséquences une chute rapide de la population et son appauvrissement. Les résultats diffèrent suivant les hypothèses de croissance retenues mais l'évolution se termine toujours, plus ou moins tôt, par un épuisement des ressources naturelles et une crise alimentaire qui décime la population par une augmentation du taux de mortalité.

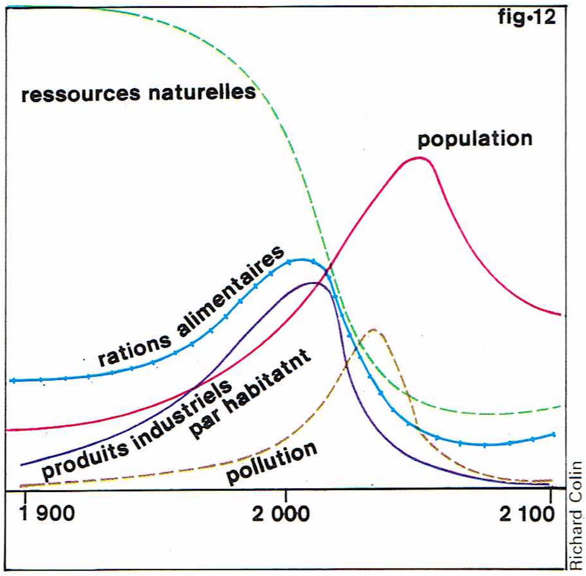

ont pris conscience de leur situation de monopole et limitent volontairement leur production tout en essayant de tirer parti au maximum de leurs ressources en augmentant les prix.

Est-ce à dire que le rapport du Club de Rome était inutile? Tout donne à penser au contraire qu'il a permis le basculement des idées sur la croissance. Dans le domaine qui nous préoccupe, il faut reconnaître que toutes les économies des pays développés avaient assis leur développement sur une énergie bon marché, principalement tirée du pétrole. Certains experts avaient attiré l'attention des gouvernements et des responsables sur la fragilité extrême de cette croissance, mais comment résister à la facilité? Les opinions publiques n'étaient pas préparées à remettre en question l'essor rapide de nos sociétés, et ce n'est pas un des moindres mérites du rapport du Club de Rome que d'avoir proposé l'arrêt de la croissance dans ses formes actuelles.

Menacées d'embargo sur le pétrole qui est devenu une « arme politique », entravées dans le développement du nucléaire par des revendications écologiques, ne pouvant encore compter massivement sur de nouvelles formes d'énergie, les économies mondiales risquent-elles à l'avenir de rencontrer des difficultés dans leurs approvisionnements énergétiques?

Manquerons-nous d'énergie ?

Cette question a deux volets : d'abord, comment va évoluer la consommation, ensuite quelles ressources mettre en regard? Signalons tout de suite que cet ajustement n'est pas seulement quantitatif, car chaque forme d'énergie n'est pas indifféremment mobilisable pour toutes les utilisations : à titre d'exemple, citons le cas de l'électricité qui n'a pour l'instant pénétré que fort peu les transports individuels.

Nous fixerons à cet examen trois étapes : 1985, 2000 et la fin du XXIe siècle (au-delà de 2050). Le choix de ces dates s'explique aisément. Lors de la révision des politiques énergétiques survenue après le renchérissement brutal du prix de pétrole, tous les États ont pris 1985 comme première étape. Sur une dizaine d'années en effet, il n'était pas possible de modifier sensiblement la demande, et il fallait donc rapidement mettre en place les besoins pour la satisfaire. Les dés sont donc jetés aujourd'hui pour 1985. Pour l'an 2000, des décisions restent à prendre, mais les dés sont connus. Il faut entendre par là que les moyens technologiques nécessaires pour infléchir la demande (économies d'énergie par exemple) ou pour la satisfaire (nucléaire par exemple) font appel à des technologies existantes aujourd'hui. Le degré d'utilisation de ces moyens, c'est-à-dire leur « diversification », reste encore à décider.

Nous verrons très certainement apparaître des technologies nouvelles avant la fin du XXe siècle, comme des centrales électrogènes utilisant la fusion, mais il s'agira encore de réalisations expérimentales, et leurs poids dans la production sera très faible. Au-delà de 2050, les sources d'énergie utilisées aujourd'hui seront en grande partie épuisées, et la production d'énergie sera assurée par des moyens nouveaux. C'est l'objectif des chercheurs dans le domaine énergétique d'étudier ces futurs moyens dans les 30 ans qui viennent (*fig.* 13).

Voyons donc d'abord les besoins. Les analyses diverses donnent les chiffres suivants en T.E.P. (tonne-équivalent pétrole) :

1985 : 10 milliards de T.E.P.
2000 : 15 à 20 milliards de T.E.P.
2050 : de 70 à 100 milliards de T.E.P.

On peut faire sur ces chiffres les commentaires suivants.

Les besoins 1985 sont connus et incompressibles; au-delà, ils sont plus difficiles à apprécier et sont donc donnés par des fourchettes. Jusqu'à l'an 2000, les pays riches resteront les principaux consommateurs d'énergie. Actuellement les pays en voie de développement consomment moins de 10 % du total, et cette proportion pourrait atteindre 30 % vers l'an 2000. En 2050, on prévoit qu'une stabilisation de la population mondiale (quelque 10 milliards d'habitants) sera intervenue et que la consommation devrait se situer vers 70 milliards de T.E.P. Cette valeur représente sans doute un ordre de grandeur de la limite de la consommation mondiale d'énergie, limite qui serait donc atteinte avant une centaine d'années. Le second rapport du Club de Rome donnait pour la même époque une consommation trois fois supérieure environ, valeur jugée aujourd'hui totalement irréaliste.

Voyons à présent les ressources et commençons par celles nécessaires à la couverture des besoins jusqu'à l'an 2000 dont on a vu qu'elles seraient en quasi-totalité mises en œuvre par des moyens technologiques au point, sinon expérimentés aujourd'hui.

Faute de pouvoir augmenter la part :

— du charbon (environ 20 %) parce que son extraction et sa mise à disposition ne sont plus acceptables économiquement pour de très nombreux usages;

— de l'hydraulique (quelques %) très limitée par les coûts d'investissements et les conséquences écologiques;

— du nucléaire qui restera longtemps encore limité à la production d'électricité et qui, de ce fait, ne pourra pas dépasser 20 % des besoins mondiaux cumulés d'énergie; la plus grande part des besoins énergétiques proviendra des hydrocarbures, qui devront fournir plus de 60 % des besoins pendant cette période d'une trentaine d'années. Les réserves actuelles en pétrole et gaz naturel permettent de tenir jusqu'en 1990. D'ici là, les industries pétrolières doivent trouver de nouvelles ressources, et nous verrons plus loin qu'elles ont toutes les chances d'y arriver. L'inconnu est surtout d'ordre économique. Cela signifie que le coût des hydrocarbures restera élevé ou continuera à croître. Mais cette croissance du coût du pétrole aura pour conséquence de rendre compétitives d'autres sources naturelles d'énergie non rentables aujourd'hui. Ce sont les gisements de pétrole que l'on considère comme épuisés après seulement un prélèvement de 30 % environ des ressources, ce sont les schistes bitumineux, ce sont les gisements de charbon à faible teneur, etc. Les réserves de combustibles fossiles sont vraiment très

▼ Figure 13 : introduction et substitution des différentes formes d'énergie primaire aux États-Unis. Ces différentes formes se remplacent progressivement les unes par les autres. L'introduction d'une énergie nouvelle (fusion ou/et solaire) en l'an 2000 entraînera la disparition progressive du gaz et du nucléaire.

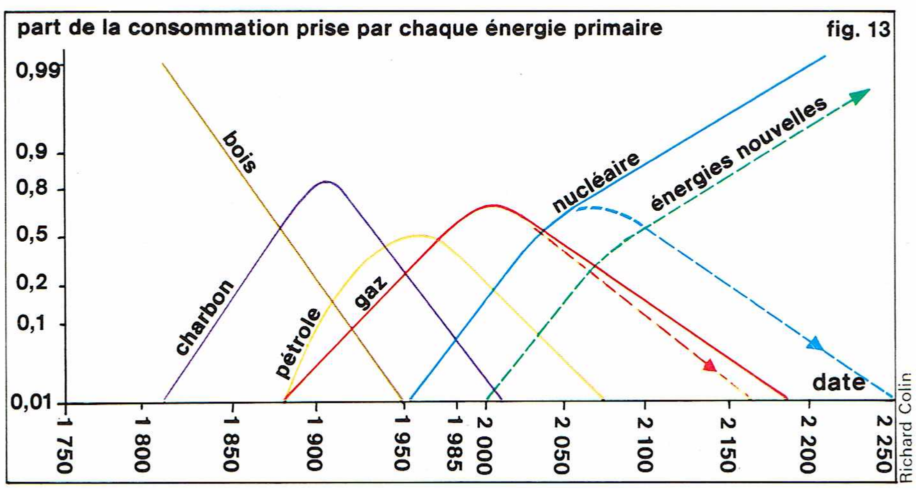

importantes et s'accroissent dès que l'on consent à monter les prix de revient.

Et le Soleil, dira-t-on? On connaît les caractéristiques de l'énergie dispensée par le Soleil, aussi largement distribuée que peu utilisée. Ses tares : faible quantité recueillie par m^2 et inconstance la destinent à un rôle d'énergie d'appoint. Avant l'an 2000, l'énergie solaire pourrait assurer 10 % de la couverture des besoins énergétiques, simplement dans les applications thermiques : chauffage et production d'eau chaude. Au-delà, on peut espérer utiliser davantage le rayonnement solaire par la mise en service de centrales solaires utilisant la voie thermique, par la production directe d'électricité (photopiles) et par la conversion bioénergétique (photosynthèse).

Que dire enfin du XXI^e siècle? Ce sera celui de la stabilisation, démographique et sans doute énergétique. Le nucléaire qui, dans sa forme actuelle, ne résisterait pas longtemps faute de réserves, aura trouvé un second souffle dans la technique des surrégénérateurs. Au-delà de cette étape, on pense aujourd'hui que soit la fusion sera maîtrisée, soit l'énergie solaire totalement domestiquée. Le prix de l'énergie restera élevé, mais les réserves deviendront alors quasi inépuisables. Dans cette évolution, le nucléaire devra d'abord se substituer progressivement aux combustibles fossiles dans la production d'électricité, et c'est ce qui commence à se faire en France et dans la plupart des pays industrialisés. Ensuite, l'électricité d'origine nucléaire remplacera dans certaines applications les combustibles traditionnels. Le chauffage électrique est aujourd'hui l'exemple le plus marquant de ces remplacements présents et futurs. Enfin, l'électricité d'origine nucléaire ou solaire éliminera complètement les combustibles fossiles comme source d'énergie primaire soit par production de chaleur directe, soit par fabrication synthétique de combustibles. Dans ces mutations, l'hydrogène jouera un rôle sans doute déterminant, car il se prête remarquablement aux conversions d'énergie et, étant un gaz, se transporte aisément.

Que répondre en conclusion à la question posée au début de ce paragraphe sur la pénurie d'énergie? On peut être optimiste sûrement à court terme, pour les dix ans qui viennent, un peu moins pour l'an 2000. On a vu en effet que les hydrocarbures resteront la source principale d'énergie pour la fin du XX^e siècle et même un peu au-delà. Cette situation laissera donc encore longtemps une situation de monopole aux pays producteurs. Mais ces pays ont besoin des ventes de leurs produits pétroliers pour assurer leur développement. Le problème n'est donc pas technique, mais politique. Il faut donc espérer que le marché des hydrocarbures fonctionnera sans à-coups. Mais, même dans cette hypothèse favorable, on sait que le rêve d'une énergie à profusion et bon marché se place dans le passé et non plus dans l'avenir. L'énergie est devenue une denrée précieuse, qu'il nous faut maintenant économiser avec soin.

A plus long terme, l'optimisme est réservé, car il nous faut préparer sans tarder les évolutions inéluctables qui vont se présenter, ce qui suppose de fantastiques recherches scientifiques et techniques.

La recherche aujourd'hui dans le domaine énergétique

La recherche aujourd'hui se porte tout d'abord sur les sources traditionnelles d'énergie, puisqu'on sait que celles-ci occuperont encore longtemps les premières places. Pour les hydrocarbures, il faut citer la recherche pétrolière indispensable, qui se développe principalement sous la mer (off-shore). On s'intéresse de plus à la récupération du pétrole laissé (à proportion de 70 %) dans les puits épuisés. L'exploitation des hydrocarbures contenus dans les sables ou schistes bitumineux commence à prendre un intérêt économique, et les réserves sont ici considérables.

L'exploitation des mines de charbon verra dans les années à venir d'importantes mutations : extraction automatique, gazéification du charbon au fond de la mine. La transformation du charbon en gaz ou en pétrole dans des usines de surface devrait démarrer en 1980.

Le nucléaire, on le sait, fait l'objet d'importantes recherches aussi bien dans les solutions aujourd'hui courantes — eau légère et enrichissement de l'uranium — que dans les surrégénérateurs.

Rapho

▲ ***Que dire enfin du XXI^e siècle? Ce sera celui de la stabilisation démographique et sans doute énergétique. Ici, une rue de Calcutta, aujourd'hui.***

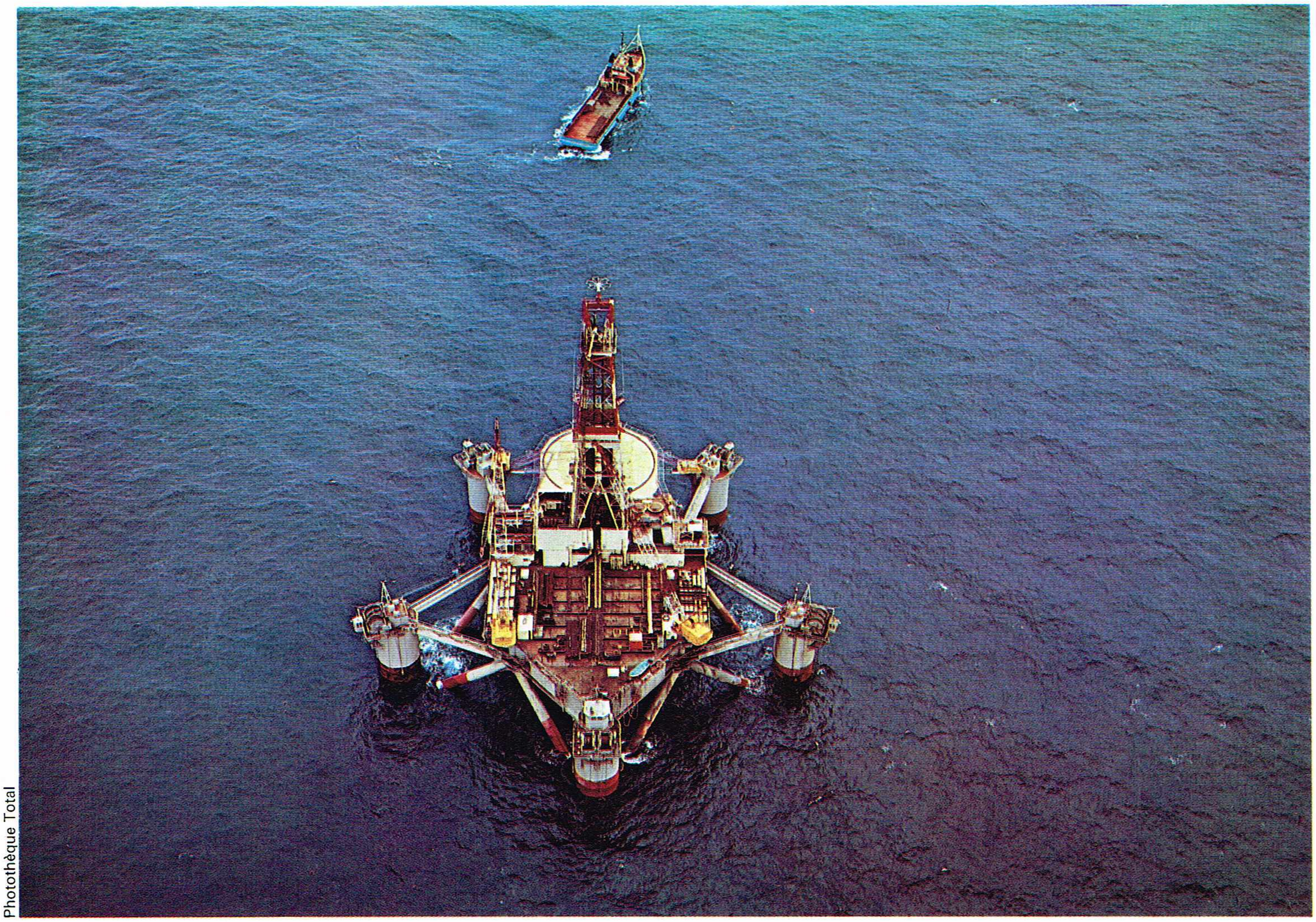

Photothèque Total

▲ *La recherche aujourd'hui se porte tout d'abord sur les sources traditionnelles d'énergie. La recherche pétrolière, notamment, se développe principalement sous la mer. Ici, une plate-forme de forage off-shore.*

L'énergie solaire commence à prendre une part notable des crédits de recherche. Le champ est immense, aussi grand que les espoirs qu'on peut nourrir au sujet de cette énergie.

Signalons pour mémoire la géothermie qui fait l'objet dans de nombreux pays de réalisations pilotes. Naturelle ou artificielle, la géothermie devrait se tailler une place non négligeable dans les énergies d'appoint.

Enfin, pour la fusion, source d'énergie pour le XXI[e] siècle, on en est encore au stade des études préliminaires, et la recherche est de ce fait activement poussée dans le cadre d'organisations internationales. Les objectifs actuels sont une centrale expérimentale en 1990, des réacteurs commerciaux en 2010-2020.

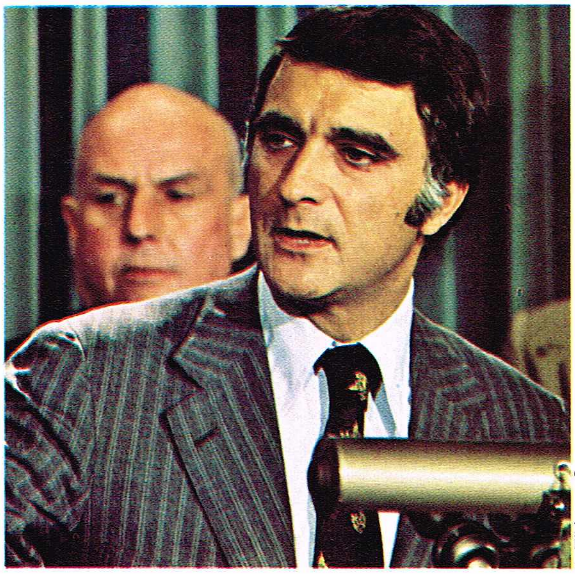

J. Tiziou - Sygma

▶ **Frank Zarb** *(au premier plan), administrateur de la* **Federal Energy Administration** *(Washington, U. S. A.), annonce la création d'une organisation chargée du développement commercial des sources énergétiques non conventionnelles (10 octobre 1975).*

Les recherches se poursuivent aussi très activement dans tout le domaine de l'électricité, qui sera dans le futur le vecteur énergétique prépondérant : transport (très haute tension, câbles supraconducteurs), stockage, distribution et applications nouvelles.

Signalons pour clore ce chapitre quelques projets ambitieux, malheureusement inaccessibles aujourd'hui dans l'état de notre technologie : récupération de l'énergie contenue dans l'atmosphère, utilisation de la rotation de la Terre et de son champ magnétique, absorption de l'énergie du rayonnement cosmique (neutrinos), captation de l'énergie solaire par un satellite à très haute altitude, d'une surface de 50 km^2 et transmettant vers la Terre l'énergie recueillie par micro-ondes électromagnétiques (projet Glaser), etc.

Toutes ces recherches, les plus traditionnelles comme les plus avancées, vont demander beaucoup de moyens tant humains que matériels. Une bonne coordination entre la recherche fondamentale, le développement technologique et les études industrielles est nécessaire. Une coopération internationale est hautement souhaitable. L'information très poussée du public est indispensable pour que nous puissions préparer et dominer notre avenir plutôt que le subir, car énergie et société sont, en douterait-on à présent, étroitement liées.

BIBLIOGRAPHIE

Enquête sur les ressources mondiales, 1974 : Conférence de Londres sur l'énergie. - *Energy and man,* I.E.E. Press. Inc, New York.

CONVERSION DE L'ÉNERGIE

Nécessité de la conversion de l'énergie

La notion d'énergie est aujourd'hui largement répandue dans le public. Chacun sait, depuis la crise de 1974, que l'énergie est la principale richesse économique. Produit de base, l'énergie se vend, se transporte, se stocke et se transforme. Sa valeur est périodiquement réévaluée. L'énergie est présente dans tous les détails de notre vie et sa disparition occasionnelle se traduit toujours par des conditions gênantes, sinon néfastes pour les populations.

Très utile pour comprendre notre monde physique, l'énergie reste, en dépit de ses aspects familiers et pratiques, une notion abstraite. Personne ne peut la voir, ni la toucher. On a déjà noté que c'est lors de ses transformations qu'elle se manifeste.

L'énergie et ses différentes formes

Lorsque l'on parle d'énergie, on fait appel à des notions souvent très différentes. Aussi est-il important de bien distinguer les différents aspects de l'énergie.

Le physicien considère que l'énergie se présente essentiellement sous deux formes : d'une part l'*énergie cinétique* ou énergie associée au déplacement d'un corps, et d'autre part l'*énergie potentielle* associée à la position d'un objet dans un champ de force (la pesanteur par exemple). Le véhicule en mouvement (énergie cinétique) et la masse d'eau d'un barrage hydraulique (énergie potentielle) peuvent illustrer ces deux formes de l'énergie.

L'économiste et l'homme politique s'intéressent davantage aux sources de l'énergie dite primaire. On sait que 99 % de l'énergie utilisée par l'homme aujourd'hui provient de cinq sources primaires : pétrole, gaz naturel, charbon, énergie hydraulique et énergie nucléaire.

L'ingénieur quant à lui s'intéresse surtout aux différentes formes que prend l'énergie au cours de ses transformations. On a vu que ces formes sont essentiellement au nombre de six : l'énergie mécanique, l'énergie électrique, l'énergie thermique, l'énergie chimique, l'énergie rayonnante et l'énergie nucléaire.

Ces différentes façons de considérer l'énergie ne sont pas contradictoires. Il est facile de montrer par exemple que les différentes formes d'énergie de l'ingénieur ne sont que des manifestations de l'énergie cinétique ou de l'énergie potentielle du physicien. L'énergie d'un gaz contenu sous pression dans une bouteille provient de l'énergie cinétique des molécules de ce gaz. La chaleur a également pour origine l'agitation des molécules ou des atomes du corps considéré. L'énergie produite ou absorbée pendant une réaction chimique provient du réarrangement des structures moléculaires, ce qui modifie l'énergie potentielle des électrons qui entrent en jeu dans la réaction.

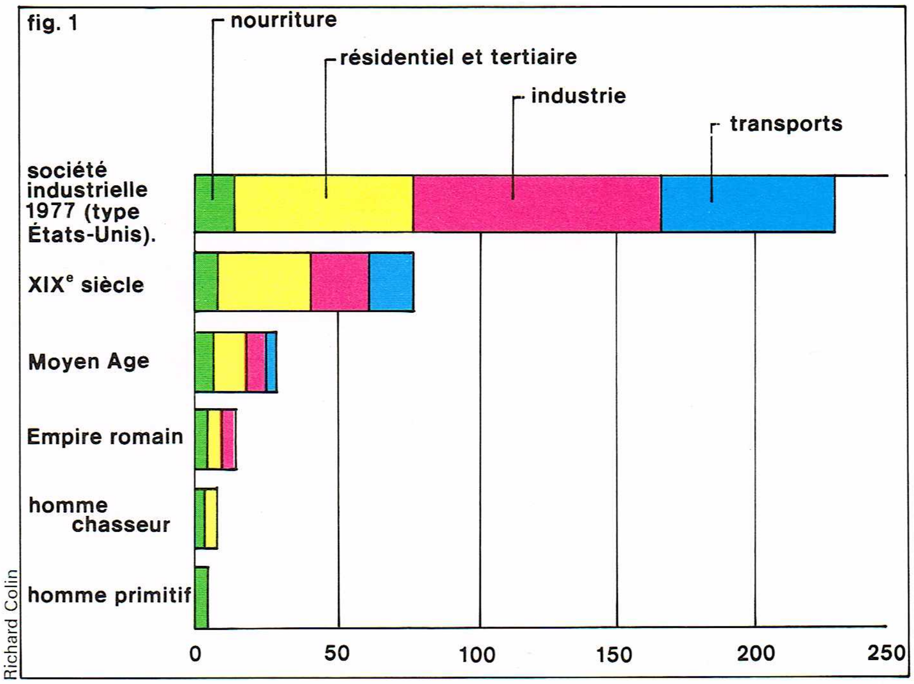

▲ *Figure 1 : évolution de la consommation énergétique à travers les âges (en 1 000 kcal par tête et par jour).*

On appelle conversion de l'énergie le passage d'une forme d'énergie à une autre. Les procédés de conversion sont du domaine de l'ingénieur et nous allons donc examiner comment les six formes d'énergie citées ci-dessus peuvent être converties d'une forme dans une autre. Mais il nous faut auparavant examiner un dernier aspect du problème de l'énergie : celui de ses utilisations.

Les différentes utilisations de l'énergie

Structure globale de la consommation d'énergie

La croissance de la consommation d'énergie a été examinée aux différentes étapes du développement de l'humanité (voir *fig.* 1).

L'homme primitif ne disposait en matière d'énergie que de sa seule nourriture, environ 2 000 kcal par tête et par jour. Cette valeur a été doublée avec l'utilisation du feu, et, grâce à l'agriculture, l'homme primitif a pu dépasser les 10 000 kcal par tête et par jour. Pendant la révolution industrielle, ce chiffre est monté à 70 000 kcal, pour dépasser aujourd'hui dans les pays très industrialisés 200 000 kcal par tête et par jour.

CAT - Cedri

◀ *L'homme primitif ne disposait en matière d'énergie que de sa seule nourriture, environ 2 000 kcal par tête et par jour.*

▶ *Figure 2 : prévision du bilan énergétique de la France en 1985 : 240 M. T. E. P. (mégatonne-équivalent pétrole).*

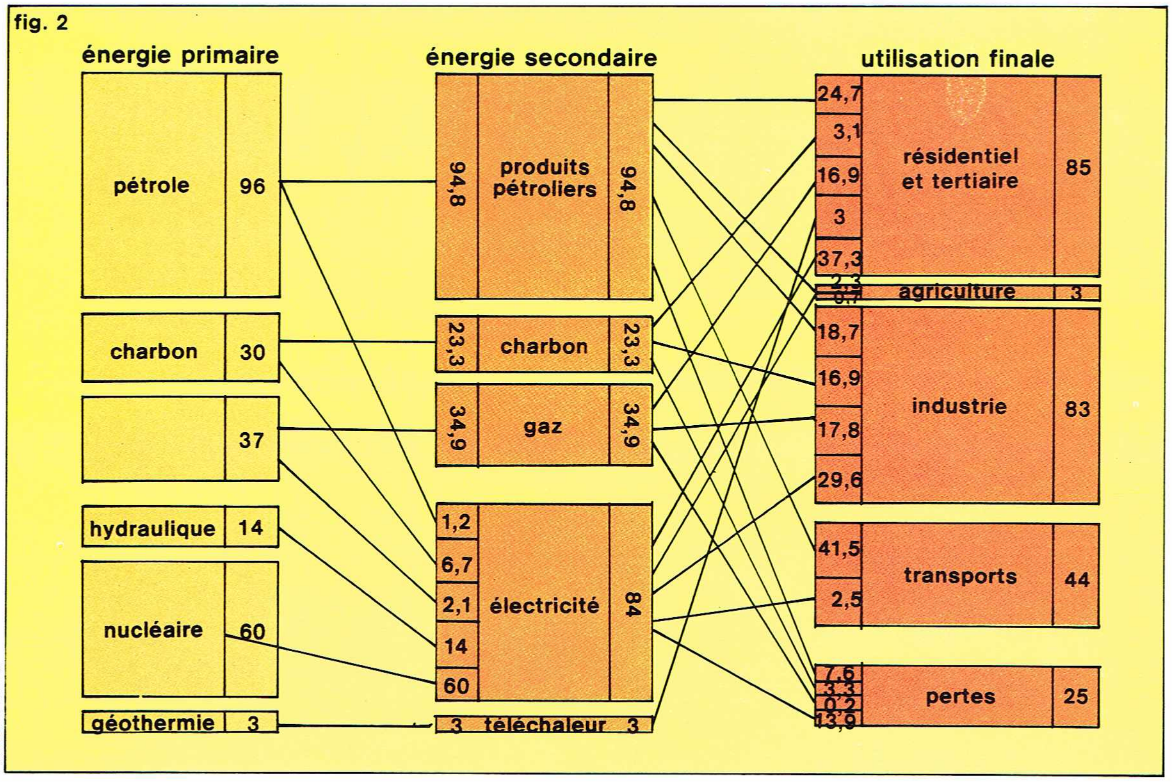

La croissance extrêmement rapide depuis un siècle de la consommation d'énergie a été alimentée essentiellement par la croissance industrielle et les transports. Aujourd'hui, en France, les grands secteurs d'utilisation de l'énergie que l'on peut ramener à trois sont, par ordre d'importance :

— l'*industrie*, qui a consommé en 1972 40 % de la totalité de l'énergie primaire ;

— le *secteur résidentiel et tertiaire* à usage domestique : 39 % ;

— les *transports* : 21 %.

La tendance que l'on constate aujourd'hui est celle d'une réduction de la consommation de l'industrie résultant d'une amélioration des rendements et du développement relatif plus rapide des deux autres secteurs de consommation, en particulier celui du résidentiel et du tertiaire.

Besoins spécifiques des secteurs de consommation

Si on examine à présent comment chaque secteur consomme l'énergie dont il a besoin, on s'aperçoit que chacun d'eux a des besoins spécifiques et que, pour les satisfaire, chaque secteur fait appel à différentes formes et à différentes sources d'énergie. Prenons le cas par exemple du secteur résidentiel et tertiaire qui a de gros besoins de chauffage. Pour satisfaire ces besoins, il sera fait appel à l'électricité, d'une part, et à tous les combus-

▶ *Tableau I : ce tableau présente les principales possibilités de conversion d'une forme d'énergie dans une autre, en indiquant pour chaque type de conversion le principe physique de base ou le convertisseur utilisés. A noter que l'énergie nucléaire, en raison de sa nature particulière, ne figure pas dans l'énergie d'arrivée.*

Tableau I
Conversion d'énergie

Énergie de départ / Énergie d'arrivée	Mécanique	Électrique	Calorifique	Chimique	Rayonnante
Mécanique		Tribo-électricité Piézo-électricité Dynamo Alternateur	Frottement Machines frigorifiques Pompes à chaleur	Réactions provoquées par compression	Triboluminescence
Électrique	Moteurs électr. Pompes à métaux liquides		Effet Joule	Électrolyse	Électroluminescence
Calorifique	Moteurs thermiques	Thermo-électricité		Réactions endothermiques (cracking)	Incandescence
Chimique		Piles Accumulateurs Piles à combustible	Réactions exothermiques (combustion en particulier)		Chimio-luminescence
Rayonnante	Radiomètre	Photo-électricité	Absorption	Photochimie : – photosynthèse – photographie – photolyse	
Nucléaire			Fission et fusion nucléaires	Transformation des éléments radio-actifs	Radio-activité naturelle et artificielle

Richard Colin

tibles habituels : fuel-oil, gaz naturel et charbon d'autre part. De plus, la géothermie et l'énergie solaire commencent à prendre place sur ce marché.

Il résulte de ces imbrications entre les besoins, les formes d'énergie utilisées pour les satisfaire et les sources primaires d'énergie auxquelles on a recours une situation complexe difficile à décrire. La *figure* 2 donne une image de ce que sera la situation française en ce domaine au milieu de la prochaine décennie.

Il faut noter que cette complexité est inévitable. Les sources d'énergie sont utilisées dans un marché concurrentiel. Chaque forme d'énergie a de plus ses avantages et ses inconvénients ainsi que chaque procédé de conversion. Il en résulte un grand nombre de possibilités qui sont présentées au choix des particuliers ou des entreprises. Cette situation permet à chacun de tirer parti au maximum de la richesse des moyens dans ce domaine de l'énergie au sein d'une nécessaire planification nationale destinée à éviter les abus et les gaspillages.

Conversions des énergies

On sait que chacune des six formes prises par l'énergie peut être convertie en principe en une quelconque des cinq autres formes. Ceci ne veut pas dire que toutes ces conversions sont équivalentes et aussi faciles à réaliser les unes que les autres. On verra au contraire qu'il en va très différemment.

Le *tableau* I montre toutes les conversions qu'il est théoriquement possible de faire. Il faut noter qu'une conversion, lorsqu'elle est possible, peut être réalisée en faisant appel à différents procédés. Chacun sait par exemple qu'il existe de nombreux types de moteurs à combustion interne transformant l'énergie chimique du combustible en énergie mécanique.

Critères de choix d'un système de conversion d'énergie

Comme nous venons de le voir, chaque utilisateur devra pour résoudre ses problèmes énergétiques faire un choix entre différents procédés de conversion. Pour le consommateur individuel, il lui faudra choisir par exemple entre une cuisinière électrique ou une cuisinière à gaz, entre un véhicule équipé d'un moteur à explosion et un véhicule équipé d'un moteur Diesel. Dans le premier de ces exemples, il doit choisir entre une conversion énergie chimique/énergie thermique ou une conversion énergie électrique/énergie thermique. Dans le second exemple, il doit, pour une même conversion énergie chimique/énergie mécanique, choisir entre deux types de convertisseurs.

Les critères de choix entre différents procédés de conversion ou différents convertisseurs seront, dès que les puissances et donc les consommations d'énergie se feront notables, d'ordre économique. C'est le coût global (investissement et frais de fonctionnement) qui sera le paramètre de choix. Dans ce coût pèseront lourdement le rendement de la conversion et le prix de l'énergie de départ. Mais d'autres considérations pourront également jouer un rôle important : les conditions d'exploitation, la compacité de l'installation, la facilité d'entretien, les conditions d'approvisionnement en énergie de départ, etc. Pour revenir à la cuisinière à gaz ou électrique, il est certain que beaucoup d'usagers choisissent leur modèle en fonction de leurs *habitudes* et non au vu de calculs économiques. Dans certaines applications industrielles interviennent assez souvent des considérations de *sûreté de fonctionnement* qui compliquent alors beaucoup le problème. Le choix des systèmes de conversion devient alors une question très difficile qui demande tout le savoir-faire de bureaux d'études spécialisés.

Examen des différents procédés de conversion

Au terme de cette introduction, le lecteur aura senti sans aucun doute toutes les difficultés qui apparaissent dès que l'on veut présenter les différents procédés de conversion et les convertisseurs qui les mettent en œuvre.

On ne peut classer en effet les convertisseurs à partir des utilisations, puisque chaque secteur d'utilisation utilise bien souvent les mêmes types de convertisseurs. Prendre comme éléments de classement les énergies primaires ou secondaires ne conviendrait pas davantage, puisqu'une même famille de convertisseurs est souvent à même d'utiliser des combustibles très différents. Énumérer les différents types de conversion dans une liste qui se voudrait exhaustive semblerait enfin donner à chaque conversion le même poids, ce qui est contraire à la réalité. Certaines conversions sont en effet très utilisées quotidiennement, alors que d'autres en sont encore au stade du développement ou même du laboratoire.

Pour tourner cette difficulté, il est proposé de structurer la description des différents convertisseurs d'énergie suivant trois axes principaux qui correspondent à différentes voies de développement de notre monde technologique. C'est ainsi que l'on examinera les conversions de ce qui a été appelé la « civilisation de la vapeur », ensuite celles de la « civilisation des transports » et de la « civilisation de l'électricité ».

On trouvera ci-après quelques remarques générales sur ces différentes étapes, avec une présentation de la « civilisation de l'hydrogène » que nous connaîtrons peut-être un jour. On essayera de corriger chemin faisant par des notes complémentaires les imperfections que ce plan laisse encore subsister.

Priorité technologique des transformations d'énergie primaire en énergie thermique : la « civilisation de la vapeur »

Rôle de l'eau dans le développement industriel

Il est banal d'insister sur le thème de l'eau « source de vie ». Sans eau, la vie n'aurait pu apparaître sur la Terre, s'y développer et s'y maintenir. Aujourd'hui, devant l'état de certaines de nos sources ou de nos rivières, nous mesurons l'importance du rôle de l'eau sur notre planète et les dangers que fait courir sa pollution.

Moins connues, sans doute, sont les qualités de l'eau comme fluide énergétique. L'eau possède en effet une chaleur spécifique (1 cal/g °C à 20 °C) et une chaleur de vaporisation très élevée (639 cal/g à 100 °C) bien supérieures à celles de la plupart des liquides. Cela lui permet de stocker sous forme de liquide et de vapeur de grandes quantités de chaleur qu'elle est ensuite susceptible de restituer. C'est de plus un excellent fluide de travail thermodynamique, même si son volume spécifique à basse température est élevé. Rappelons qu'un volume d'eau transformé en vapeur à la pression atmosphérique occupe un volume 1 700 fois plus considérable.

Si on ajoute à ces qualités le fait que l'eau est liquide aux conditions normales de température et de pression, qu'elle se manipule et se stocke sans difficulté, qu'elle existe en abondance à la surface du globe, on s'apercevra que l'eau et sa vapeur avaient toutes les qualités nécessaires pour permettre la réalisation de la plupart des rêves des thermiciens du XIX^e siècle et du XX^e siècle.

La vapeur qui a absorbé la chaleur de combustion, aux pertes près, dans un générateur appelé communément *chaudière* peut être utilisée soit comme fluide de chauffage, soit comme fluide de travail dans des machines thermiques. Les chaudières ont commencé par brûler du bois, ensuite du charbon, aujourd'hui du fuel, du gaz ou de l'uranium, mais de façon très générale, c'est sous forme de vapeur d'eau que la chaudière restituait et restitue encore aujourd'hui la chaleur provenant de la conversion d'énergie.

Est-ce à dire que la vapeur d'eau a acquis une place qui ne lui sera jamais contestée ? En fait, l'eau se trouve déjà écartée de tout le domaine des basses températures, car il existe d'autres fluides comme le fréon et l'ammoniac qui ont des caractéristiques beaucoup mieux adaptées aux cycles frigorifiques. De la même façon, elle ne peut pas lutter dans le domaine des hautes températures où ses caractéristiques de pression de vapeur sont très gênantes. A partir de 374 °C où la pression de la vapeur est de 220 bars, la vapeur d'eau se comporte comme un gaz. Si on compare cette situation à celle du sodium qui bout à la pression atmosphérique à 883 °C, on comprend aisément l'engouement pour le sodium comme

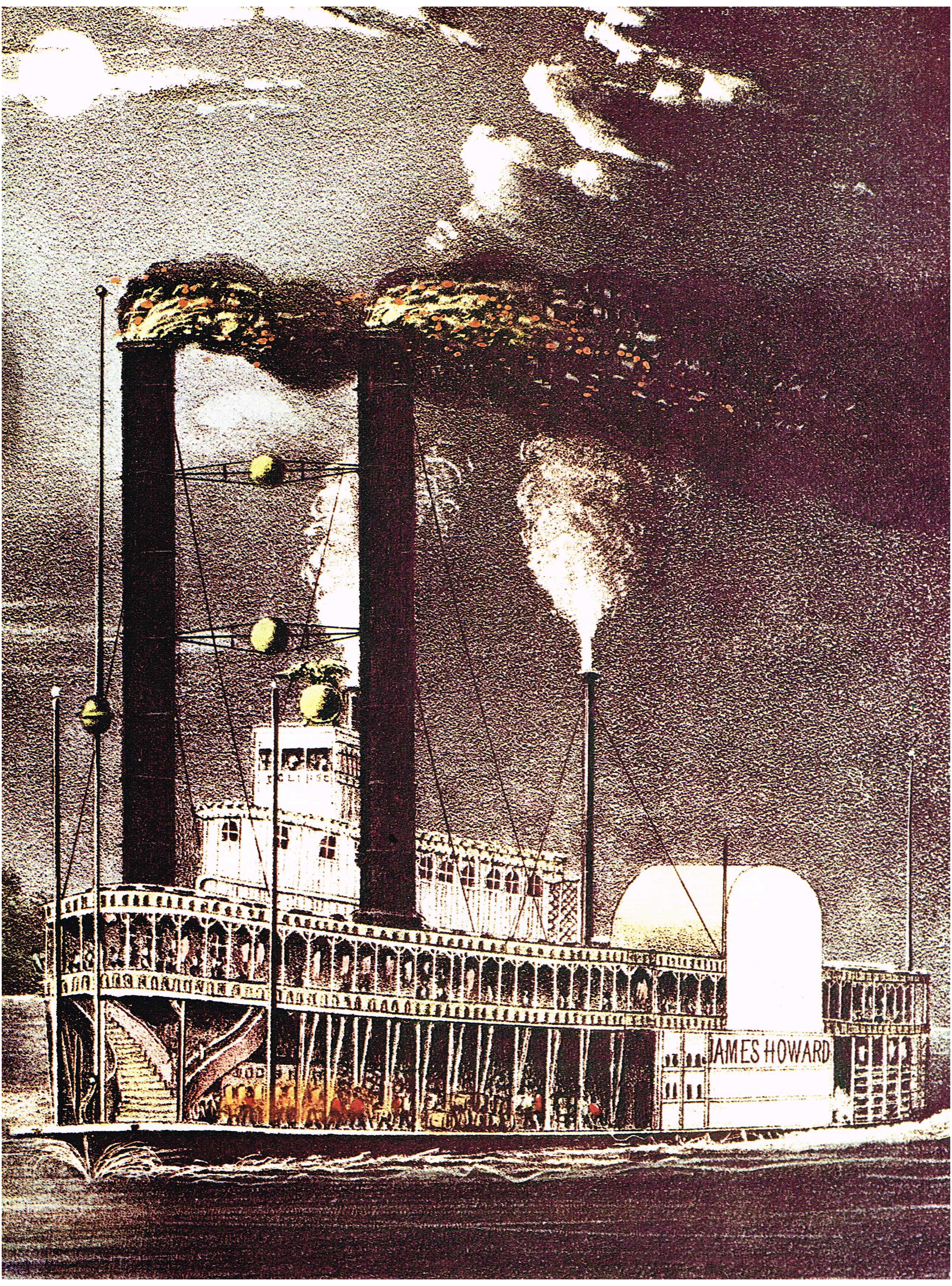
JAMES HOWARD

C. Raimond - Dityvon - Viva

◀ *Une centrale thermique près de Lens (Nord) : la production d'énergie électrique se fait ici à partir d'énergie thermique de combustion utilisant les déchets de la production charbonnière.*

fluide caloporteur dans certaines chaudières nucléaires (surrégénérateurs).

Parmi les concurrents, aussi bien dans les domaines thermomécaniques que purement thermiques, le plus sérieux est peut-être l'électricité. La traction électrique dans les transports par voies ferrées a tué les locomotives à vapeur; le chauffage électrique sous ses différentes formes est en train de remplacer les traditionnelles installations de chauffage central à eau chaude ou à vapeur.

Malgré les domaines interdits et ceux qui se ferment à elle, l'eau restera en bonne place pour longtemps encore dans les procédés de conversion qui mettent en jeu l'énergie thermique. Les centrales nucléaires d'aujourd'hui et de demain l'utilisent et l'utiliseront. Elle restera de plus le fluide pour transporter et échanger des calories dans la gamme moyenne de températures (20 à 210 °C). Ses caractéristiques physiques adaptées et une technologie d'un haut degré de perfectionnement sont ses meilleurs atouts.

Besoins en énergie thermique

La vapeur est utilisée principalement :

— pour le chauffage;

— pour la production d'énergie mécanique; elle est en outre utilisée pour quelques usages très spéciaux en pétrochimie.

Comme fluide chauffant, la vapeur généralement saturée est utilisée à des températures ne dépassant pas 210 °C, ce qui correspond déjà à une pression de 20 bars environ, car au-delà la pression devient excessive pour ce type d'application. Les opérations couramment effectuées appartiennent aux procédés du génie chimique ou biochimique :

— traitements physiques : séchage, évaporation, distillation;

— traitements chimiques : modification des vitesses de réaction;

— traitements biologiques : stérilisation, pasteurisation.

Cette vapeur basse pression peut enfin servir au chauffage des locaux.

Pour la production d'énergie mécanique, il est nécessaire d'augmenter les caractéristiques de la vapeur de façon à augmenter les rendements des cycles thermiques utilisés et on travaille le plus souvent en vapeur surchauffée à des pressions beaucoup plus fortes qu'en chauffage. Les moteurs qui transforment l'énergie thermique de la vapeur en énergie mécanique sont de deux types : les machines alternatives à piston et les turbines, ces dernières ayant aujourd'hui supplanté les premières. La gamme de puissance des générateurs de vapeur et des turbines associées va selon les applications de quelques MW à plus de 1 000 MW.

Il n'est pas facile de donner une évolution détaillée des besoins en énergie thermique d'un pays industrialisé comme la France; les statistiques habituellement publiées ne le permettent pas. Mais ces besoins sont très importants, la plus grande partie des combustibles fossiles étant destinée à des applications thermiques. Pour ne citer qu'un exemple, l'E. D. F. a brûlé en 1973 25,4 millions de tonnes de pétrole, ce qui représentait 22 % du pétrole importé en France cette année-là. On peut penser que c'est presque 50 % de l'énergie primaire consommée qui sont utilisés pour des applications thermiques.

Production de chaleur

Les appareils habituellement connus pour produire de la chaleur sont les *chaudières*. Elles sont constituées d'un *foyer* où le combustible est brûlé et d'une *surface de chauffe* qui permet de transférer la chaleur dégagée par la combustion à un liquide ou un gaz. Lorsque le fluide chaud produit par la chaudière est de la vapeur, on utilise aussi le terme de *générateur de vapeur*.

Les chaudières brûlent habituellement des combustibles fossiles, mais la terminologie a été étendue à l'énergie nucléaire. On emploiera donc le terme de *chaudière nucléaire* qui se compose d'un *réacteur* (assimilable au *foyer*) et de *générateurs de vapeur*. Lorsqu'une chaudière n'a pas de foyer et utilise des gaz ou des fumées produits ailleurs, on utilise alors le terme de *chaudière de récupération*.

On aura noté que les chaudières sont par définition des appareils dans lesquels s'effectue la conversion d'une certaine forme d'énergie (chimique, nucléaire, électrique ou rayonnante) en énergie thermique. Ce sont donc de véritables convertisseurs. Les appareils qui transforment de l'énergie thermique en énergie thermique portent d'autres noms : échangeurs, préparateurs, etc., et seront examinés ultérieurement au chapitre concernant les transformations d'énergie.

Ce chapitre consacré à l'énergie thermique portera donc sur les chaudières, dont le but essentiel, comme on l'a vu, est la production de vapeur : chaudières classiques d'abord, chaudières nucléaires ensuite.

Enfin seront décrits rapidement des convertisseurs thermiques utilisant l'énergie électrique ou l'énergie rayonnante du Soleil.

Priorité de la conversion thermomécanique : la « civilisation des transports »

La part d'énergie absorbée par le secteur des transports est tout à fait considérable puisqu'il représente les 2/5 du total de la consommation... On pourrait évidemment penser que cette énergie est dépensée en pure perte puisque les transports ne créent pas directement des biens réels. Il n'en est rien, car les transports sont absolument nécessaires au fonctionnement d'une société industrielle. Les matières premières comprenant en particulier l'énergie

◀ *Page ci-contre,* **le James Howard,** *navire à vapeur remontant le Mississippi en 1875.*

Snark International

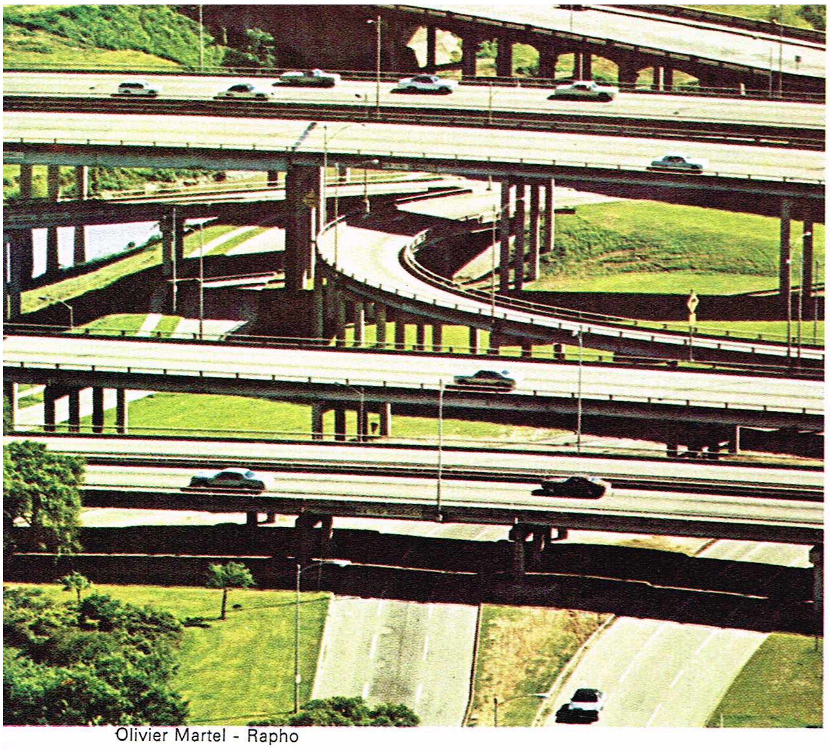

Olivier Martel - Rapho

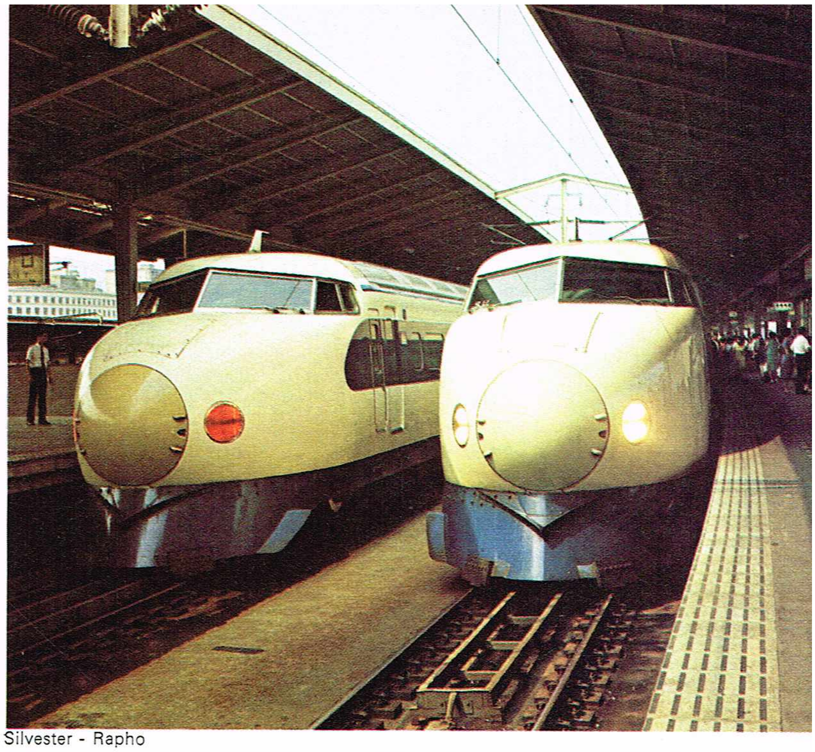

Silvester - Rapho

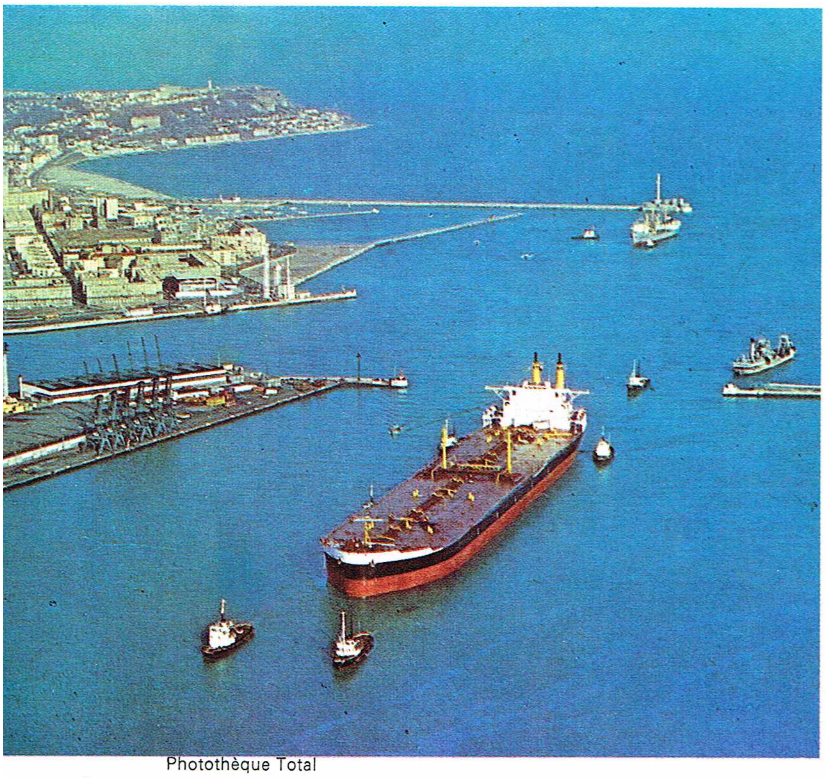

Photothèque Total

G. Gerster - Rapho

▲▼ ***Les moyens de transport sont nombreux et se classent habituellement en quatre grandes familles (ci-dessus) : route (Houston, Texas), fer (le train le plus rapide du monde, Japon), eau (pétrolier géant dans le port du Havre) et air (premier vol du Jumbo Jet, États-Unis).***
A ceci, il faut rajouter deux rubriques (ci-dessous) : celle des transports spéciaux (pipe-line pour l'eau, Qatar) et celle des transports urbains (métro de Milan, Italie).

Marc Riboud - Magnum

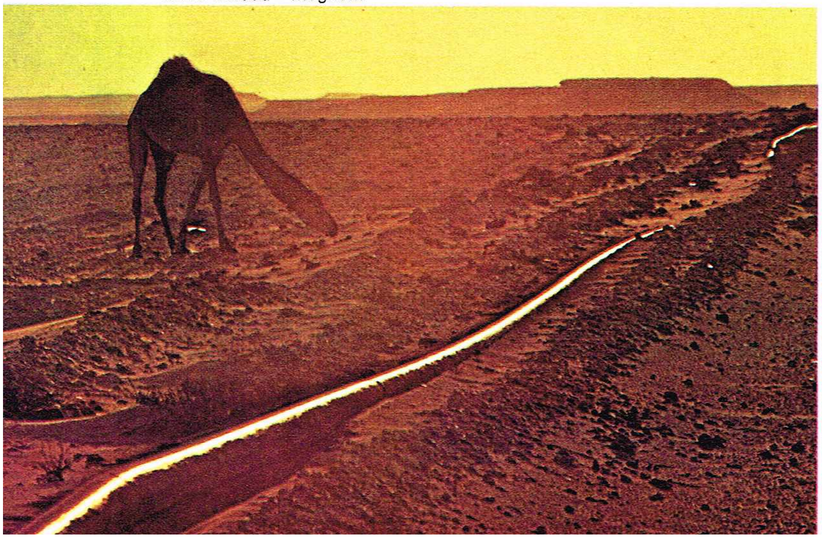

Photo M.M.

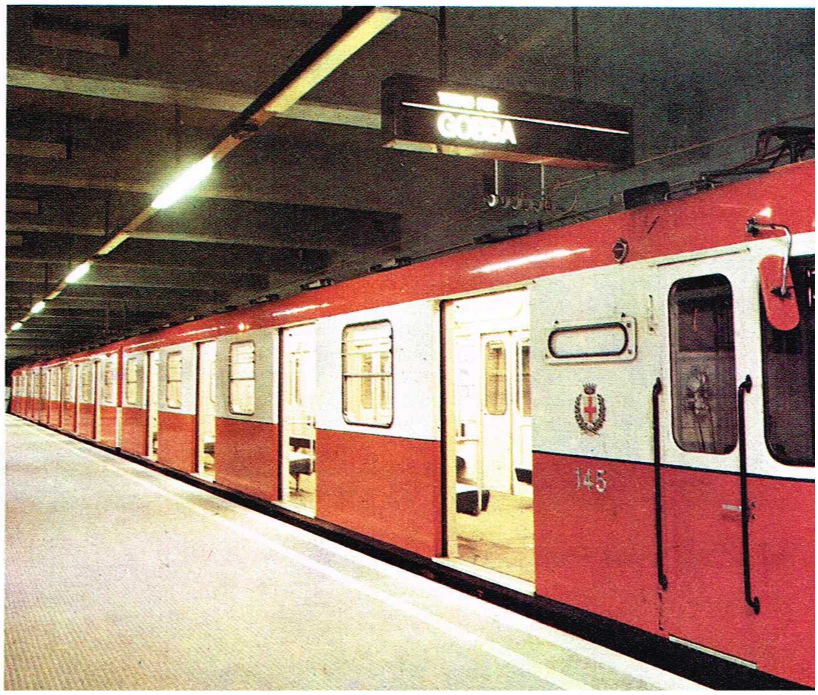

et la main-d'œuvre doivent être rassemblées dans les lieux de production et les produits doivent être acheminés par des réseaux de distribution vers les points de consommation. Une analyse plus fine du fonctionnement de nos sociétés montrerait qu'il existe différentes causes secondaires qui justifient également des moyens de transport très développés : citons la division du travail, la sous-traitance, la coopération internationale, etc.

Si les transports se sont développés d'une façon considérable depuis deux siècles, le besoin de déplacer les personnes et les biens existe depuis la plus haute antiquité. Au début, le seul moyen de locomotion était la marche à pied et le transport se faisait à dos d'homme, ce qui limitait les échanges. La lenteur des transports et leur précarité ont entraîné le développement des transports sur l'eau. Mais là encore, bien que l'usage de la voile soit apparu très tôt, la plupart des navires étaient des galères encore propulsées par l'énergie humaine.

L'invention du bât permit, en utilisant la traction animale, de développer les voies terrestres. On connaît aussi l'imagination des Romains pour bâtir les aqueducs ou des égouts pour le transport des fluides. Mais, par l'utilisation des seules forces humaines et animales, les techniques de transport ne pouvaient évoluer, ce qui explique que seuls les transports maritimes qui pouvaient disposer de l'énergie du vent aient connu au cours des siècles des développements notables.

L'arrivée de la machine à vapeur au XIXe siècle bouleversa les techniques de transport sur terre et sur mer. Avec le XXe siècle commença le règne de l'automobile et des transports routiers. Le transport aérien se développa très rapidement après la Seconde Guerre mondiale.

Dans ce prodigieux développement des transports, la contribution des différents moyens de locomotion a constamment évolué, mais, même si aujourd'hui la structure des moyens de transport se modifie encore, nous devons constater une augmentation persistante du trafic mondial.

Terminons cette introduction en remarquant que les réseaux de transport et les possibilités des moyens utilisés matérialisent un contrôle de l'espace géographique et qu'à ce titre ils participent à la puissance et au rayonnement des pays qui les possèdent.

Les transports sont donc un élément primordial des économies nationales. Leur importance dépasse de ce fait les frontières. Aujourd'hui, pour cette raison, il existe des instances internationales qui régissent et ordonnent l'exploitation de chacun des grands moyens de transport.

Les techniques de transport

Les moyens de transport sont nombreux. Ils sont aussi bien connus du public, tant leur usage est répandu dans nos sociétés modernes. Ils se classent habituellement en quatre grandes familles sous les appellations lapidaires : route, fer, eau et air. Pour être tout à fait complet, on peut inclure l'astronautique avec l'aéronautique, bien que les vols spatiaux se déroulent principalement en dehors de l'atmosphère, et il faut rajouter deux rubriques : celle des transports urbains qui forment une famille à part et celle des transports spéciaux dans lesquels on trouve les conduites, transport par bandes ou câbles, etc.

Comment participent, en France, ces différents moyens aux transports des personnes et des marchandises ? On trouvera pour les marchandises la réponse à cette question dans les *figures* 3 et 4.

On constatera que le transport aérien reste encore marginal. Pour les marchandises, le « fer » fait jeu égal avec la « route », ces deux moyens de transport assurant 80 % du trafic. Les transports fluviaux restent le parent pauvre, alors que le transport par pipe-line tient une place notable. Pour les personnes, la grande majorité des transports, soit 80 % environ, est assurée par la route. Notre époque est bien celle de l'automobile.

Les principales techniques utilisées par chacun des moyens de transport sont présentées dans le *tableau* II. Comme on le voit, il n'existe pas, exception faite de l'astronautique, de moteurs spécifiques à chacun des moyens de transport. Le moteur Diesel par exemple est utilisé aussi bien sur route, sur rail, que sur mer et canaux. C'est un type de moteur performant et économique dont les qualités d'adaptation lui permettent de trouver sa place aussi bien sur un camion que sur une locomotive

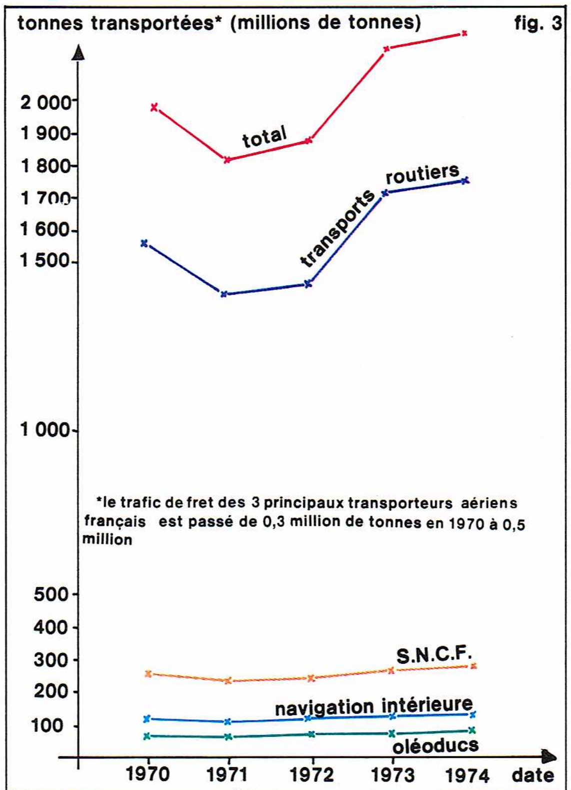

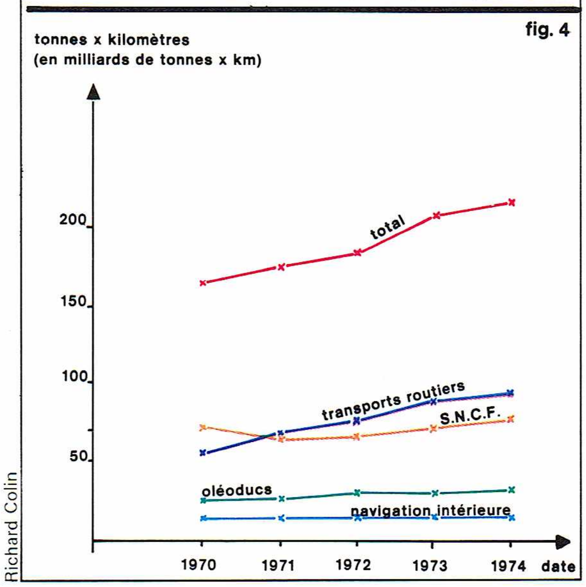

Richard Colin

◀ *Évolution en France, de 1970 à 1974, du transport des marchandises : tonnage (figure 3) et tonnes × kilomètres (figure 4).*

▼ *Tableau II : les principales techniques utilisées pour chacun des quatre grands moyens de transport, avec des ordres de grandeur sur les caractéristiques des moteurs utilisés.*

Tableau II

Type de transport	Véhicules	Charge utile	Types des moteurs utilisés	Puissance unitaire	Observations
Route	voitures légères autobus, autocars poids lourds	4 à 5 personnes 1 000 kg 60 personnes ⩽ 35 tonnes	moteurs à essence Diesels légers Diesels moyens Diesel de forte puiss. turbine à gaz	15 à 45 kW 30 à 45 kW 45 à 110 kW 150 à 300 kW > 250 kW	La turbine commence à concurrencer le Diesel pour les fortes puissances
Fer	motrices électriques motrices autonomes	1 000 personnes 1 000 à 5 000 tonnes	moteur électrique Diesel turbine à gaz	3 000 kW 1 500 à 2 500 kW 4 000 kW	La charge dépend considérablement des caractéristiques du réseau (pentes) et du nombre de motrices attelées
Eau	paquebots cargos vrac tankers	quelques centaines à 2/3 000 pers. 5 000 t à 500 000 t	Diesels marins turbines à vapeur	2 à 5 000 kW 3 à 30 000 kW	La machine à vapeur vapeur à piston subsiste encore pour des cas particuliers
Air	avions fusées	500 personnes (1) 50 t de fret masse satellite 130 t (2)	turboréacteur moteur fusée	poussée 2 t poussée/masse de l'ordre de 1,25	Jumbo Jet (1) pds. en charge de 352 t Fusée Saturne (2) pds. au départ de 2 740 t

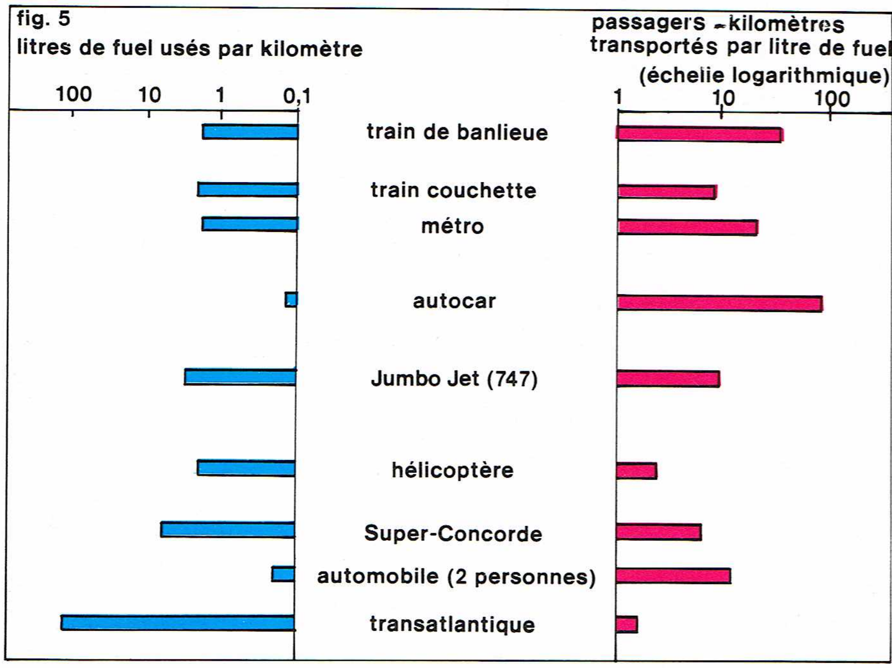

Richard Colin

▲ *Figure 5 : comparaison des différents moyens de transport des personnes exprimée en nombre de passagers-kilomètres transportés avec un litre de combustible. (Ce tableau montre que la mort du transatlantique, comme moyen de transport, était inéluctable).*

▼ *Figure 6 : comparaison des différents moyens de transport des marchandises exprimée en tonnes-kilomètres transportées avec un litre de combustible.*

ou un navire. On sait que certains constructeurs automobiles sont en train de l'introduire à grande échelle sur les voitures particulières.

On constatera également que la plupart des moteurs utilisés fonctionnent avec des combustibles provenant des sources d'énergie fossiles : essence, gas-oil, kérosène, etc., ce qui explique que le secteur des transports utilise dans la plupart des pays plus de 90 % de son énergie sous forme d'énergie fossile. Seuls pour l'instant les transports par fer ont adopté sur une grande échelle la propulsion électrique.

A la suite de ces deux observations : moteurs non spécifiques à un moyen de transport et importance des moteurs utilisant des combustibles d'origine fossile, nous étudierons essentiellement les convertisseurs thermomécaniques. Notons à ce sujet que les convertisseurs en question effectuent en fait une double conversion. L'énergie chimique du combustible est dans un premier temps convertie en énergie thermique, et celle-ci est ensuite convertie en énergie mécanique disponible alors pour la propulsion. Cette distinction est absolument nécessaire pour l'ingénieur qui a en charge l'étude du moteur. L'utilisateur d'une voiture constate simplement

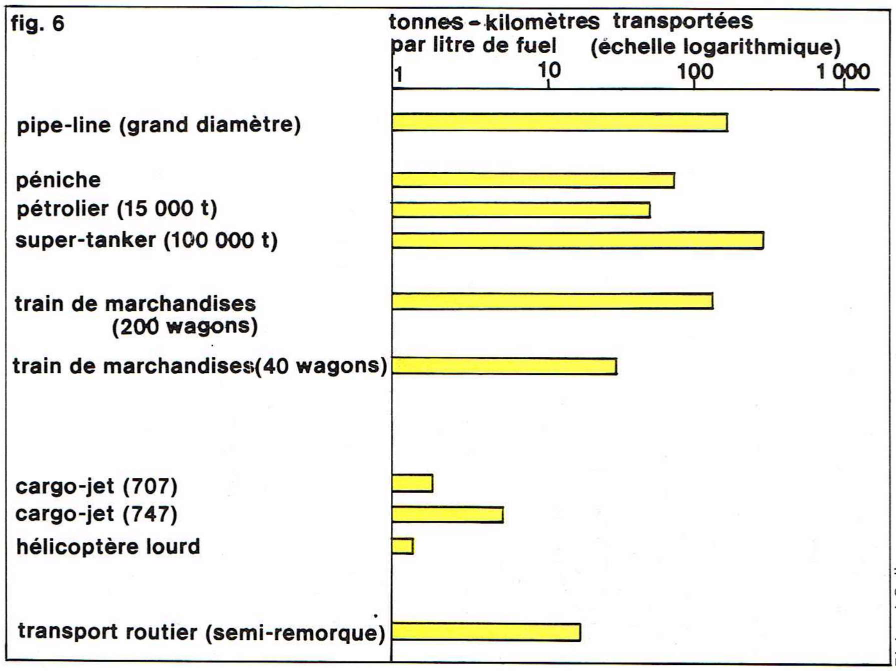

Richard Colin

que l'essence dont il a rempli son réservoir lui permet de faire rouler sa voiture.

Notons également que cette distinction entre énergie chimique et énergie mécanique n'est pas toujours nécessaire. Dans un moteur atomique de fusée, les particules en mouvement émises par le moteur assurent la propulsion par réaction. Il est préférable alors de retourner à la notion d'énergie cinétique du physicien qui confond alors énergie thermique et mécanique.

Économie des transports

Du fait de leurs multiples possibilités, les différents moyens de transport entrent en concurrence sur de nombreux marchés. Pour l'utilisateur, qu'il s'agisse de transport de personnes ou de marchandises, l'élément prépondérant du choix est évidemment le coût global de l'opération. Le coût réel d'un transport peut être difficile à évaluer si on veut prendre en compte d'autres éléments comme le temps de transport, le risque de retard ou la commodité.

On sera enclin à n'attacher que peu d'importance au coût de transport d'une marchandise si ce coût ne représente qu'une faible part de son prix de revient final ; ce coût sera en revanche très important pour des produits à faible valeur ajoutée comme certains matériaux bruts. Pour réduire le prix spécifique de transport, on cherchera alors à minimiser la part des coûts correspondants, ce qui conduit au gigantisme des superpétroliers, par exemple.

Jusqu'à présent, un des paramètres importants du coût était la dépense en capital correspondant à la part prise par les immobilisations dans le prix de revient du transport. L'augmentation du prix de l'énergie a modifié cet aspect du problème.

On trouvera sur la *figure* 5 une comparaison des différents moyens de transport des personnes, exprimée en nombre de passagers-kilomètres transportés avec un litre de combustible ; on voit l'avantage des transports par fer ou par bus sur les transports par voiture individuelle et avion. La *figure* 6 établit la même comparaison par des tonnes-kilomètres transportées avec un litre de combustible. L'économie de transport par superpétroliers, pipe-lines, transport par fer et à la rigueur par gros camions apparaît à l'évidence.

Ces comparaisons nous montrent que nos systèmes de transport se sont développés, surtout en ce qui concerne les transports de personnes, sans une forte préoccupation des économies de combustible. Il ne faut pas attendre de l'augmentation brutale du coût de l'énergie des modifications structurelles importantes de nos moyens de transport dans un proche avenir. Ce n'est pas en quelques années qu'il sera possible de modifier les moteurs des 150 millions de voitures qui roulent de par le monde. A long terme, il en sera différemment. Nos moyens de transport de la fin du siècle seront très différents de ceux que nous utilisons aujourd'hui. Parmi les facteurs d'évolution, il faudra compter avec les nécessaires économies d'énergie. On peut donc prédire une électrification d'une fraction du parc automobile, une amélioration du rendement des moteurs, le développement des transports en commun, la création de nouvelles voies fluviales et la construction de pipe-lines dans les prochaines décennies. Les technologies nouvelles ne feront sans doute leur apparition qu'à la fin du siècle. D'ici là, la tendance générale à l'accroissement de la demande de transports l'emportera de beaucoup sur les économies d'énergie réalisées, même si le coût de cette dernière continue à croître.

Priorité de la conversion électromécanique : la « civilisation de l'électricité »

Nous ne sommes plus en 1900 pour chanter les vertus de la fée « Électricité ». Nous savons tous aujourd'hui que l'électricité a joué un rôle capital dans le développement de nos sociétés industrielles et qu'en particulier, sans elle, notre vie quotidienne ne serait pas ce qu'elle est. Fluide invisible, l'électricité est partout présente pour répondre instantanément à nos besoins les plus divers.

Serait également inutile ici une histoire du développement de l'électricité. Il en existe de nombreuses, fort bien faites de surcroît. On y voit comment vingt-cinq siècles

M. Durazzo - Magnum

◀ *A la fin du siècle, nos moyens de transport seront très différents de ceux que nous utilisons aujourd'hui. Parmi les facteurs d'évolution : l'électrification d'une fraction du parc automobile, dont on voit ici un prototype (vue des batteries d'alimentation).*

ont été nécessaires pour que l'électricité, dont les manifestations naturelles, fracassantes et inexplicables, terrorisaient les Anciens, devienne sous nos mains et à notre volonté un fluide inoffensif et familier.

Le succès de l'électricité est dû à ses possibilités très grandes de conversion. Elle devient à la demande lumière, chaleur, énergie mécanique ou énergie chimique. Ses emplois sont donc très diversifiés : éclairage, chauffage, moteurs, électrolyse, accumulateurs, etc. Pour cette raison, il est intéressant de la distribuer largement, tant ses usages sont multiples.

Autre avantage : les conversions de l'électricité se font toujours avec un excellent rendement, ce qui signifie que les pertes sont très faibles ou nulles. Un moteur électrique nous restitue en énergie mécanique 90 % de l'énergie électrique qu'il a consommée. Le rendement est de 100 % pour une résistance de chauffage. Pour cette raison, on a toujours considéré l'électricité comme une énergie « noble », par opposition à d'autres formes d'énergie qui ne peuvent être converties sans pertes. Son prix, d'autre part, plus élevé que celui des combustibles fossiles quand ces derniers étaient bon marché ajoutait encore à cette image aristocratique attachée à cette forme d'énergie.

L'électricité régnait donc en maître sur des marchés spécifiques où sa place ne pouvait guère être contestée.

Cette situation aurait pu se maintenir encore longtemps si la crise de l'énergie n'avait bouleversé les données du problème. Le renchérissement brutal du pétrole qui a, en 1973, multiplié son prix par un facteur 4 en moins d'un an a permis le démarrage dans le monde entier de programmes importants de construction de centrales nucléaires. En 1976, en France, il coûte deux fois moins cher environ de fabriquer de l'électricité nucléaire que de l'électricité à partir du fuel.

Le recours au nucléaire ne sera peut-être pas dans les décennies à venir aussi important qu'on pouvait l'imaginer il y a quelques années. Le ralentissement de la croissance, la contestation nucléaire, la nécessité d'une diversification des sources d'énergie sont autant de raisons pour freiner le développement du nucléaire. Cependant nos économies s'appuieront de façon significative sur l'énergie nucléaire, pour la simple raison qu'on n'a pas trouvé pour les 20 à 30 ans qui viennent d'autre possibilité. L'énergie nucléaire ne pouvant être totalement récupérée que sous forme électrique, nous allons inéluctablement vers une société dont le fonctionnement et le développement reposeront de plus en plus sur l'électricité.

Ceci donne bien évidemment une grande importance à l'électricité, à ses différents procédés de conversion et en particulier à la conversion électromécanique, c'est-à-dire au passage d'énergie mécanique en énergie électrique et inversement. En effet, l'électricité est généralement obtenue à partir d'énergie mécanique. Que ce soit à l'aide d'une turbine à vapeur classique ou nucléaire, d'une turbine hydraulique, d'une turbine à gaz ou d'un Diesel, l'électricité est toujours produite à grande échelle par les alternateurs entraînés mécaniquement par des machines motrices. Ensuite, nos sociétés ont soif d'énergie mécanique pour leurs industries, leurs transports ou leurs services : l'électricité a pour ce type de conversion de nombreux atouts. Dans le paragraphe consacré à l'électromécanique, nous examinerons donc les différentes machines capables d'assurer ce type de conversion.

La « civilisation de l'hydrogène »

On a vu au paragraphe précédent que l'électricité nucléaire allait se substituer progressivement aux combustibles fossiles dans la mesure où cette forme d'énergie deviendrait progressivement plus économique.

Une pénétration massive de l'électricité en usage direct sur le marché énergétique va se heurter à diverses difficultés. Tout d'abord, l'électricité ne se stocke pas et son transport est onéreux par les investissements à consentir et les pertes en service. D'autre part, l'utilisation directe de réacteurs nucléaires ne paraît pas possible dans les technologies connues aujourd'hui. Dans le domaine des transports par exemple, on ne peut pas envisager l'emploi de réacteurs comme source de puissance pour de multiples raisons : masse critique du réacteur, blindages lourds et encombrants, considération de sûreté, etc.

Certains spécialistes se demandent donc jusqu'à quel point la stratégie actuelle pour une politique énergétique fondée sur l'emploi prédominant de l'électricité est vraiment la meilleure. Quelles solutions peut-on donner à ce problème ? Celle qui vient à l'esprit est de revenir à l'énergie chimique dont un des avantages est le stockage facile, en synthétisant des combustibles à l'aide de l'énergie nucléaire. Les options possibles sont l'accumulateur, la pile à combustible ou le moteur thermique.

De ces possibilités, on écarte aujourd'hui l'accumulateur dont le développement piétine. De nouvelles solutions ont bien été imaginées, mais leur mise en œuvre qui exige des matériaux coûteux et des produits chimiques dangereux ne promet pas à ce type de stockage de l'électricité sous forme chimique une très grande extension. Les accumulateurs garderont un rôle spécifique dans l'utilisation de l'énergie électrique et on peut penser que, même si dans une période intermédiaire il est fait appel à eux (véhicule électrique avec batteries par exemple), cette solution ne peut résoudre le problème du stockage temporaire de l'énergie sur une grande échelle.

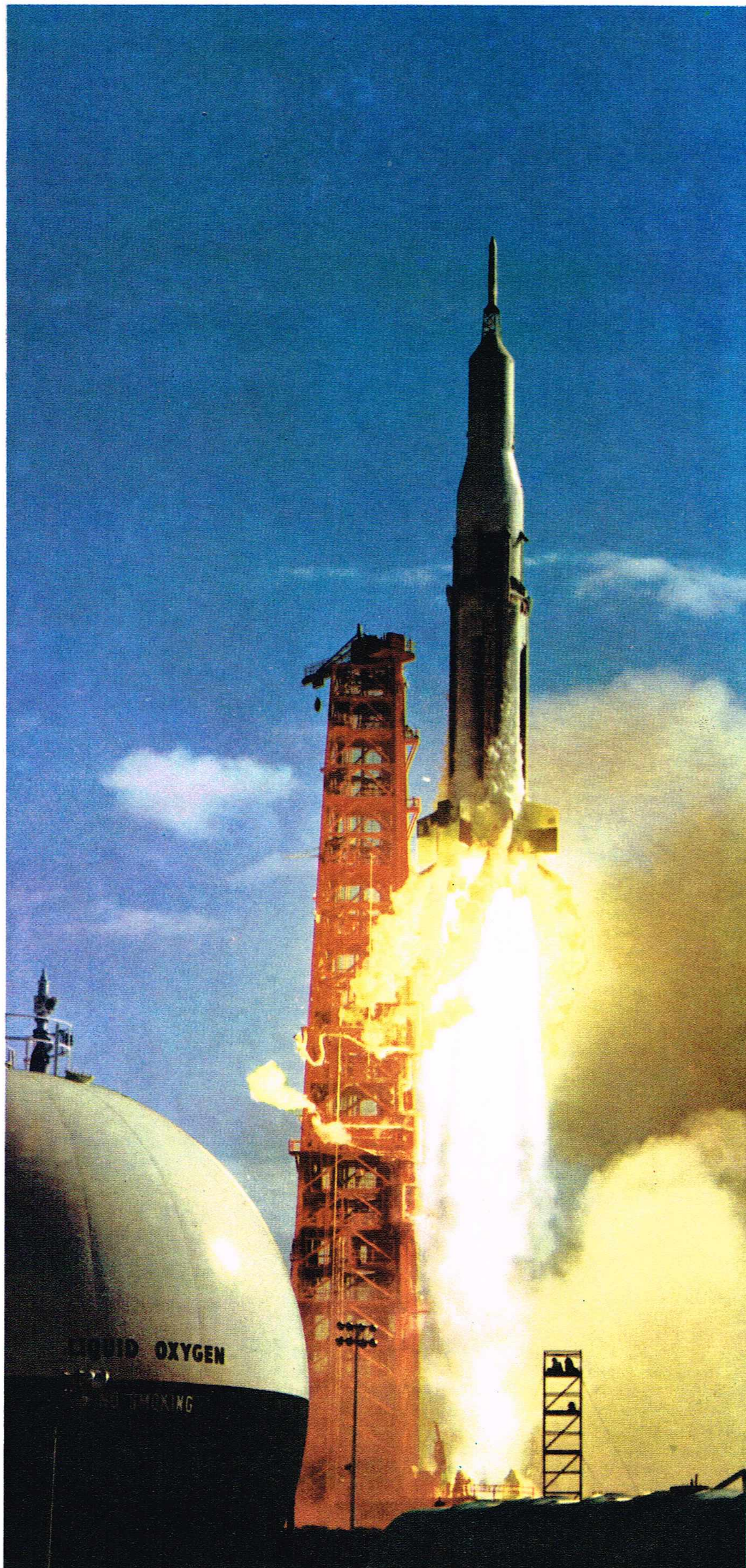

Archives Radaelli

Si on s'intéresse à présent aux combustibles eux-mêmes, la chimie nous indique qu'il faut faire appel aux éléments légers si on veut disposer d'un rapport de quantité d'énergie par unité de masse élevé, d'où l'intérêt porté à l'hydrogène.

On sait que l'hydrogène est le premier élément de la classification de Mendeleïev. C'est l'atome le plus simple qui est le plus répandu dans l'Univers. Sur terre, il est présent en quantité considérable comme élément constitutif de l'eau. C'est un gaz beaucoup plus léger que l'air dans un rapport 14. Pour cette raison, il a été utilisé pour gonfler des ballons mais tout le monde sait qu'il a été écarté de cet usage en raison de son inflammabilité qui en fait un gaz au maniement dangereux.

L'hydrogène se présente cependant comme un combustible idéal. En plus de son pouvoir calorifique très élevé par unité de poids, l'hydrogène a l'avantage considérable de ne donner que de l'eau comme produit de combustion. Comme on recherche pour l'avenir des combustibles fonctionnant dans des cycles fermés, on voit tout l'avantage de l'hydrogène : issu de l'eau, l'hydrogène brûlerait en ne libérant comme effluent que de la vapeur d'eau.

On imagine donc aujourd'hui toute une économie énergétique ayant comme vecteur principal l'hydrogène liquide. Extrait de l'eau par utilisation de l'électricité nucléaire, puis liquifié, l'hydrogène sous forme liquide serait distribué et stocké comme un combustible classique. Sa combustion avec l'oxygène dans des convertisseurs appropriés donnerait comme produit résiduel de l'eau qui retournerait aux égouts comme les eaux pluviales ou résiduaires. Il ne semble pas exister d'autres combustibles capables de brûler pour restituer leur énergie chimique sans décharger dans l'environnement des effluents nocifs. (Les accumulateurs présentent cet avantage de stocker de l'énergie chimique et de la restituer sans dégager d'effluent. Mais on a vu les limitations de ce type de convertisseurs.) L'ammoniac, qui est constitué comme on le sait de trois atomes d'hydrogène pour un atome d'azote (NH_3) serait lui aussi un combustible intéressant, mais il a l'inconvénient sur l'hydrogène de posséder une partie inerte d'azote qui donne après combustion des oxydes d'azote dont la présence n'est pas souhaitable.

L'idée d'utiliser l'hydrogène comme combustible n'est pas nouvelle. Malheureusement, son développement comme combustible synthétique de remplacement a été jusqu'à très récemment freiné par le coût très bas des hydrocarbures. On ne l'a donc utilisé que dans des cas très spécifiques où ses qualités le rendaient indispensable. Il est surtout employé aujourd'hui comme combustible dans des moteurs de fusées. On l'utilise également en grandes quantités comme matière première dans un grand nombre d'opérations chimiques. Son utilisation généralisée poserait bien évidemment des problèmes de production, de stockage, de transport et d'utilisation dans des convertisseurs dont la plupart restent à imaginer, mais on peut déjà avancer que les avantages de l'hydrogène le font considérer par de nombreux experts comme le combustible de remplacement des combustibles fossiles au début du siècle prochain.

Production d'énergie calorifique

Généralités

La production de chaleur utilise les principes et les lois de la thermique et de la thermodynamique qui ont déjà été décrits. Nous nous contenterons en début de ce paragraphe de rappeler quelques notions fondamentales sur :
— la transmission de la chaleur,
— les caractéristiques de la vapeur d'eau,
— les cycles thermodynamiques.

Transmission de la chaleur

Il existe 3 modes de transmission de la chaleur (*fig.* 7) :
— la conduction,
— la convection,
— le rayonnement.

Ces trois modes coexistent en général dans tout échange de chaleur.

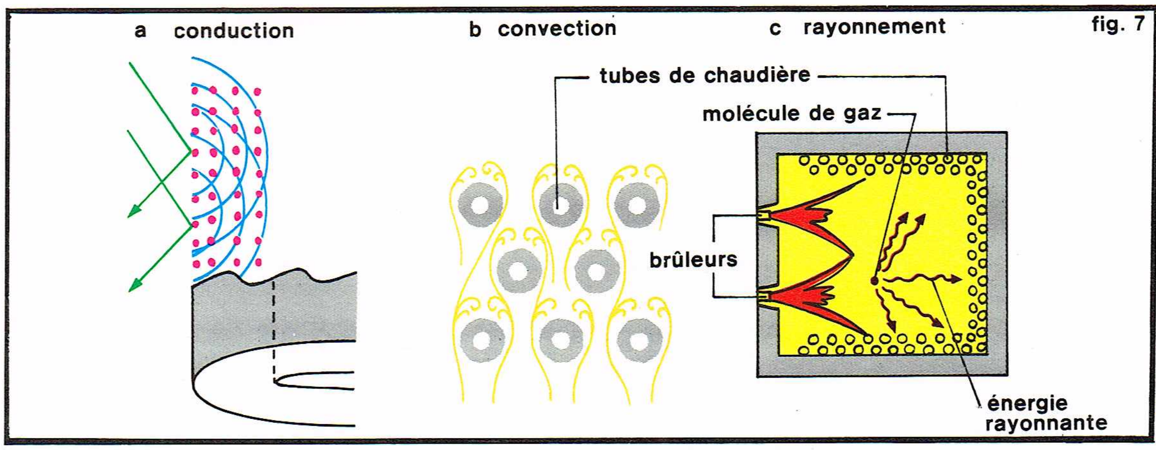

◀ *Figure 7 : trois modes de transmission de la chaleur.*
a) Conduction : *la chaleur se transmet à l'intérieur d'un corps par le mouvement des atomes et des molécules; la figure montre comment se propage, à l'intérieur d'un tube de chaudière, l'effet du choc de deux molécules de gaz.*
b) Convection : *après avoir échangé (perte ou gain) de l'énergie au contact d'un tube, les parties chaudes et froides du fluide se mélangent dans l'écoulement. Ce mélange, au cours duquel se font les échanges d'énergie, est le phénomène de convection.*
c) Rayonnement : *la chaleur est transmise à partir des atomes ou des molécules en interaction, dans toutes les directions, sous forme d'ondes électromagnétiques. Exemple : rayonnement dans un foyer de chaudière.*

On appelle *flux de chaleur* ou flux d'énergie calorifique la quantité de chaleur Q reçue ou émise par unité de temps :

$$\Phi = \frac{Q}{t}$$

Dans le système légal, le flux de chaleur s'exprime en joules par seconde (J/s), c'est-à-dire en watts (W). Les thermiciens qui préfèrent utiliser pour exprimer l'énergie calorifique la calorie (cal) ou la thermie (1 th = 10^6 cal) emploient comme unité de flux la millithermie par heure et par m² (1 mth/h/m² = 15,07 × 10^6 W/m²).

Conduction

Elle se produit à l'intérieur d'un corps ou au contact de deux corps. Elle est régie par la loi de Fourier :

$$Q = \lambda \frac{S}{e} (t_1 - t_2)$$

La quantité de chaleur Q transmise par unité de temps au travers d'une paroi d'épaisseur e est proportionnelle à :

— la surface d'échange S
— l'écart de température $t_1 - t_2$
— la nature du matériau constituant la paroi que l'on caractérise par un coefficient λ de conduction thermique. Ce coefficient s'exprime en mth/h · m · °C. Plus il est élevé, plus le matériau est bon conducteur de la chaleur.

Convection

La convection est la transmission de chaleur entre un fluide en mouvement et un solide. Ce mode de transmission qui implique un mouvement au sein même du fluide ne peut s'appliquer en conséquence qu'aux liquides et aux gaz.

Il existe différents modes de convection.

Convection naturelle : les mouvements du fluide sont déterminés uniquement par les variations de volume dues à l'échauffement ou au refroidissement des parties de ce fluide.

Convection forcée : le fluide est mis en mouvement par des pompes ou des ventilateurs.

On peut exprimer la loi de l'échange de chaleur par une expression similaire à celle qui régit la conduction :

$$Q = \alpha \cdot \frac{S}{e} (t_1 - t_2)$$

α est un coefficient de convection exprimé également en mth/h · m · °C mais sa détermination est très complexe, car de nombreux facteurs interviennent dans le phénomène de convection. Il est nécessaire de faire appel à la mécanique des fluides. Pour le calcul des installations, on utilise souvent des formules empiriques ou des résultats expérimentaux de constructions précédentes.

Rayonnement

Tout corps émet des radiations calorifiques. Un autre corps placé en regard du premier captera ces radiations et s'échauffera s'il est à une température inférieure au premier. Il y a alors transfert de chaleur du corps le plus chaud vers le corps le plus froid. Les lois du rayonnement sont assez différentes des lois relatives à la conduction et à la convection. Le milieu dans lequel se fait le rayonnement n'intervient pas comme agent transmetteur comme c'est le cas dans la convection.

L'émission de rayonnement calorifique est régie pour les corps noirs (corps parfaitement absorbants) par la loi de Stefan :

$$\Phi = \sigma \cdot ST^4$$

Φ est l'énergie rayonnée, S la surface du corps qui rayonne, T la température absolue du corps (en °Kelvin) et σ le coefficient de rayonnement.

L'absorption dépend de la surface offerte aux radiations, de la distance entre la source et le corps absorbant, et de la nature de la surface de réception. On sait qu'une surface noire mate absorbe la quasi-totalité du rayonnement. Une surface blanche en absorbe très peu. Les surfaces que l'on rencontre dans les foyers industriels sont des corps *gris* dont le facteur d'absorption est compris entre 0,8 et 0,95 (corps noir : 1).

On appelle *vapeur saturante* une vapeur en équilibre avec son liquide. Dans les conditions de saturation, il existe une relation entre la pression et la température de la vapeur. On connaît pour la vapeur d'eau la formulation approchée de Duperray :

$$p = \frac{(t)^4}{100}$$

p en bars, t en °C valable entre 100 et 200 °C.

La quantité de chaleur à fournir à 1 kg d'eau aux conditions de la saturation pour le transformer en vapeur dans les mêmes conditions est appelée *chaleur latente de vaporisation*.

Caractéristiques de la vapeur d'eau

On appelle *enthalpie* de la vapeur saturée à la température de saturation t °C la quantité de chaleur qu'il est nécessaire de fournir à 1 kg d'eau pris à la température de 0 °C pour l'amener à l'état de vapeur à la température t et à la pression de saturation correspondant à cette température. L'enthalpie est donc une chaleur totale repérée par rapport à un niveau thermique de 0 °C et peut donc être déterminée pour du liquide ou de la vapeur surchauffée. On trouve les valeurs de l'enthalpie dans des tables ou sur un diagramme, appelé diagramme de Mollier, très utilisé par les thermiciens (*tab.* III et *fig.* 8).

On appelle *vapeur humide* une vapeur qui contient en son sein des gouttelettes de liquide. On appelle *titre* d'une vapeur humide le rapport entre la masse de vapeur et la masse totale de fluide. Ce titre est souvent désigné par la lettre x. La vapeur sèche a comme titre $x = 1$. Un kilogramme de vapeur humide contenant 0,1 kg d'eau a un titre égal à 0,9.

Cycles thermodynamiques

Dans les anciennes installations de faible puissance, la vapeur d'eau était souvent rejetée après usage. Souvenons-nous de nos anciennes locomotives à vapeur. Dès que la puissance est importante, il devient indispensable de récupérer l'eau, et cette dernière décrit à l'intérieur de l'installation un *cycle fermé*.

L'eau, sous forme liquide ou vapeur, subit un certain nombre de transformations à la suite desquelles son état final se retrouve identique à son état initial.

On essaye dans toute la mesure du possible de se rapprocher de transformations *réversibles*. On entend par

◀ *Page ci-contre : freiné jusqu'à présent par le coût très bas des hydrocarbures, le développement de l'hydrogène comme combustible s'est limité à des utilisations très spécifiques et notamment à l'alimentation des moteurs de fusées. Ici, le lancement de la fusée* Saturne I, *le 16 février 1965 à cap Kennedy.*

▶ *Tableau III : enthalpie (en kJ/kg) et volume massique (en m³/kg) de la vapeur saturée et de la vapeur surchauffée.*

Tableau III

Enthalpie (en kJ/kg) et volume massique (en m³/kg) de la vapeur saturée et de la vapeur surchauffée

Pression absolue en bars	Vapeur saturée					Vapeur surchauffée											
						250 °C		300 °C		350 °C		400 °C		500 °C		600 °C	
	Température en °C	Enthalpie	Chaleur latente	Enthalpie du liquide	Volume massique	Enthalpie	Volume massique	Enthalpie	Volume massique	Enthalpie	Volume massique	Enthalpie	Volume massique	Enthalpie	Volume massique	Enthalpie	Volume massique
0,02	17	2 532	2 459	73	67,02	2 976	120,7	3 076	132,2	3 176	143,8	3 278	155,3	3 488	178,4	3 704	201,5
0,10	45	2 583	2 392	191	14,68	2 976	24,13	3 075	26,44	3 176	28,75	3 278	31,06	3 488	35,68	3 704	40,29
1	99	2 673	2 256	417	1,694	2 973	2,406	3 073	2,638	3 174	2,870	3 277	3,102	3 487	3,565	3 703	4,027
5	151	2 746	2 107	639	0,374	2 960	0,474	3 063	0,522	3 166	0,569	3 270	0,617	3 482	0,710	3 700	0,803
10	179	2 777	2 015	762	0,194	2 943	0,232	3 050	0,257	3 155	0,282	3 262	0,306	3 477	0,353	3 696	0,400
15	198	2 792	1 948	844	0,131	2 925	0,152	3 037	0,169	3 146	0,186	3 254	0,202	3 471	0,235	3 692	0,266
20	212	2 800	1 892	908	0,099	2 905	0,111	3 023	0,125	3 135	0,138	3 246	0,151	3 466	0,175	3 688	0,199
30	233	2 805	1 797	1 007	0,066	2 859	0,070	2 994	0,081	3 114	0,090	3 229	0,099	3 455	0,116	3 680	0,132
40	250	2 802	1 715	1 086	0,049	—	—	2 962	0,058	3 092	0,066	3 212	0,073	3 443	0,086	3 672	0,098
50	263	2 794	1 640	1 153	0,039	—	—	2 926	0,045	3 069	0,051	3 195	0,057	3 432	0,068	3 664	0,078
60	275	2 783	1 570	1 213	0,032	—	—	2 885	0,036	3 044	0,042	3 177	0,047	3 421	0,056	3 656	0,065
85	299	2 749	1 409	1 339	0,021	—	—	—	—	2 972	0,027	3 129	0,032	3 392	0,039	3 636	0,045
110	318	2 708	1 258	1 449	0,016	—	—	—	—	2 884	0,019	3 076	0,023	3 362	0,029	3 616	0,034
135	333	2 651	1 101	1 549	0,012	—	—	—	—	2 776	0,014	3 015	0,018	3 332	0,023	3 596	0,027
160	347	2 581	929	1 648	0,009	—	—	—	—	2 614	0,009	2 946	0,014	3 300	0,019	3 575	0,023
185	359	2 491	736	1 754	0,007	—	—	—	—	—	—	2 867	0,011	3 266	0,016	3 554	0,019
220	373	2 218	208	2 009	0,003	—	—	—	—	—	—	2 737	0,008	3 216	0,013	3 524	0,016

fig. 8

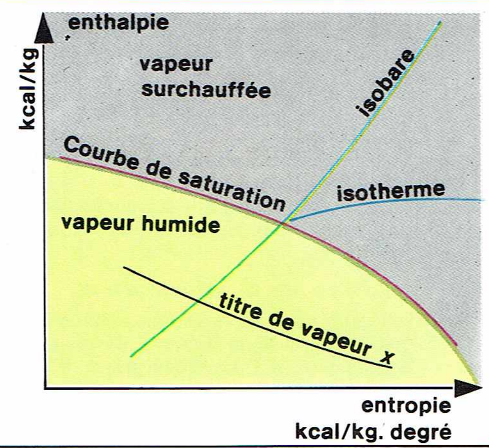

▶ *Figure 8 : diagramme de Mollier. Ce diagramme fait apparaître deux zones séparées par la courbe de saturation : zone de vapeur surchauffée à la partie supérieure ; zone de vapeur humide à la partie inférieure.*

là des transformations dans lesquelles le fluide évolue sans frottements et dans des conditions thermiques telles que les températures du fluide et des diverses sources de chaleur au moment des échanges calorifiques soient constamment égales. Les cycles réels présentent toujours des frottements et des différences de température aux points d'échange calorifique. Des exemples de cycles seront donnés ultérieurement dans le paragraphe concernant les moteurs thermiques.

Chaudières classiques

Une chaudière ou générateur de vapeur est un appareil destiné à transformer de l'eau en vapeur à une pression et à une température définies en fonction de l'utilisation à laquelle cette vapeur est destinée (*fig.* 9).

On désigne par chaudière classique les générateurs de vapeur pour lesquels l'apport calorifique provient de l'utilisation directe de la chaleur libérée par la combustion d'un combustible solide, liquide, ou gazeux.

L'apport calorifique peut provenir aussi d'un fluide en circulation chauffé ailleurs et qui cède ses calories à l'eau et à la vapeur. C'est le cas des générateurs de vapeur des chaudières nucléaires qui seront examinées dans le prochain paragraphe. Il ne sera pas traité ici des appareils, souvent de petite puissance, fonctionnant suivant ce principe : transformateur de vapeur, chaudières de récupération, etc.

Les chaudières classiques recouvrent un ensemble de matériels allant du petit générateur de 2 t/h de vapeur saturée sous quelques bars pour une teinturerie ou une coopérative laitière au générateur des centrales thermiques de l'E. D. F. de 700 MW produisant plus de 2 000 t/h à 542 °C de surchauffe.

Ces générateurs sont utilisés dans les domaines les plus divers :

— production de vapeur pour le chauffage ;

— production d'énergie et de vapeur pour les procédés dans les installations industrielles ;

— production d'énergie électrique dans les centrales thermiques ;

— propulsion des navires.

Il ne saurait être question de décrire tous les types de générateurs existants. Nous nous limiterons donc aux grands principes de construction en donnant des exemples pour les solutions les plus classiques.

Principales caractéristiques

Les performances d'une chaudière se définissent par les caractéristiques suivantes.

Débit de vapeur ou vaporisation, qui s'exprime en kg/h ou en t/h. Il se réfère en général à la marche normale en continu. Au-delà de ce régime de marche, un générateur peut supporter en général un fonctionnement en pointe de durée limitée.

Timbre, qui s'exprime en bars. C'est la pression de calcul de résistance mécanique des parties sous pression. Le règlement du Service des Mines définit la pression d'épreuve hydraulique en fonction du timbre (en général 1,5 le timbre).

Température de surchauffe exprimée en °C et la température de resurchauffe le cas échéant. Ces deux températures sont souvent voisines, car les faisceaux correspondants sont très voisins.

Rendement. Il est égal au rapport des calories utiles transmises à l'eau et à la vapeur sur les calories apportées par le combustible.

Une chaudière est généralement constituée de deux circuits.

Circuit air-gaz de combustion sur lequel on trouve successivement :
— les ventilateurs de soufflage,
— le réchauffeur d'air côté air de soufflage,
— le foyer avec ses brûleurs,
— l'économiseur et le réchauffeur d'air côté fumées,
— le traitement des fumées et la cheminée.

Circuit eau-vapeur sur lequel on trouve successivement :
— l'économiseur côté eau,
— les faisceaux vaporisateurs,
— les faisceaux surchauffeurs,
— les faisceaux resurchauffeurs.

Certaines parties nommées ci-dessus peuvent ne pas exister comme les faisceaux resurchauffeurs ou surchauffeurs. D'autres comme l'économiseur ou le réchauffeur d'air peuvent être indépendantes de la chaudière. Leur but est d'accroître le rendement. Ils n'existent que si une étude économique justifie leur installation.

Circuit air-gaz de combustion

Tous les matériels de ce circuit ont pour but de permettre la conversion de l'énergie chimique du combustible en énergie thermique. Le phénomène central est celui de la *combustion* qui prend place dans le foyer. Le combustible ou carburant est introduit dans ce foyer par des *brûleurs*, l'air qui apporte l'oxygène ou carburant est introduit par les *ventilateurs de soufflage*. En amont du foyer se trouve le circuit d'air de combustion et en aval le circuit des fumées qui se termine par la cheminée. Les appareils rencontrés dans certains cas sur le circuit des fumées tels que : économiseur, réchauffeur d'air et dépoussiéreur ne sont pas nécessaires à la combustion. Ils améliorent le rendement de la chaudière et la propreté des fumées rejetées à la cheminée.

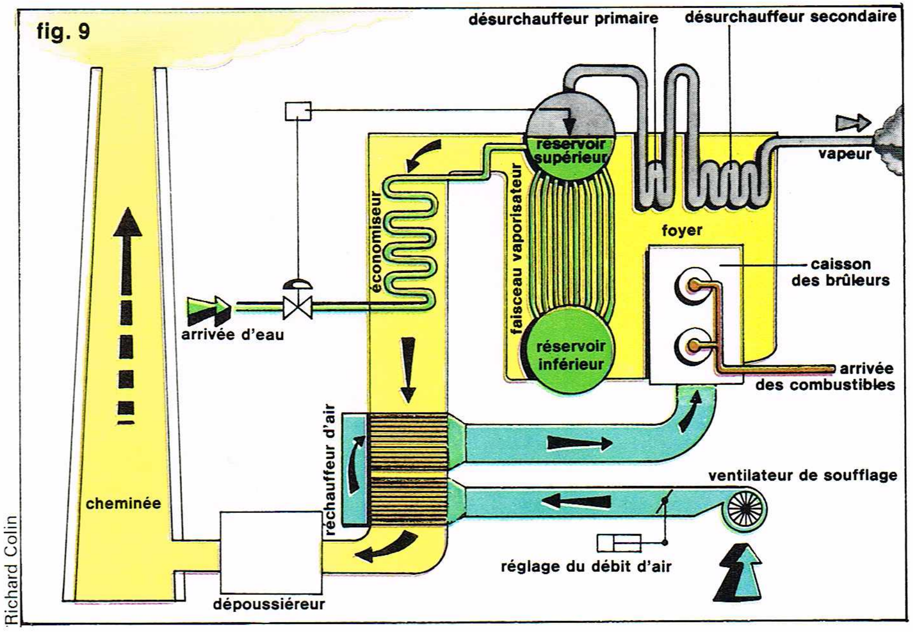

▲ *Figure 9 : représentation schématique d'une chaudière classique de forte puissance.*

Combustible et foyer

La combustion met en jeu des phénomènes physico-chimiques complexes qui ont été décrits par ailleurs. Nous nous limiterons ici à quelques aspects pratiques de cette question.

* *Combustibles*

Les combustibles les plus utilisés sont des combustibles liquides dérivés du pétrole, obtenus par mélange de produits résiduaires et de produits intermédiaires de raffinage. On les désigne sous les appellations de *mazout* ou de *fuel-oil*. Les autres combustibles utilisés sont soit des combustibles solides (charbon en particulier), soit des résidus industriels d'origine végétale, soit des sous-produits de fabrications industrielles tels que gaz de hauts fourneaux, gaz résiduaires de raffineries de pétrole, etc. Jusqu'en 1973, le bas prix du pétrole avait fait régresser les autres types de combustible, et en particulier le charbon. Ce mouvement semble s'être arrêté aujourd'hui.

Les qualités des combustibles liquides sont très variables selon le dosage des mélanges et l'origine des bruts. La réglementation française définit quatre produits, dans l'ordre de viscosité croissante et de prix décroissants :

— le fuel-oil domestique, destiné aux petits usages industriels et au secteur résidentiel et tertiaire ;

— le fuel-oil léger, utilisé pour des installations plus puissantes et comme combustible de mise en route dans de grosses installations ;

— les fuel-oils lourds n° 1 et n° 2 très visqueux. Le fuel-oil n° 2 est le plus couramment utilisé sur les installations importantes (centrales thermiques en particulier).

A l'inverse des fuel-oils domestique et léger, les fuel-oils n° 1 et n° 2 doivent être réchauffés vers 40 °C pour pouvoir être pompés et vers 120 °C environ pour que leur viscosité soit convenable pour la pulvérisation dans les brûleurs.

* *Foyer*

Le foyer a généralement la forme d'un caisson sur les parois duquel sont disposés le ou les brûleurs. Ce caisson est dimensionné en fonction de la longueur des flammes et de la puissance calorifique dégagée de façon à assurer une totale combustion sans projection de combustible sur les parois et sans échauffement excessif de ces dernières.

Contrairement aux chaudières anciennes qui comportaient des briquetages de foyer très développés destinés à obtenir de hautes températures absolument nécessaires à la combustion du charbon, les chaudières modernes à fuel ont la plus grande partie de leurs parois constituée par des faisceaux de tubes, appelés écrans, dans lesquels se vaporise l'eau.

Un foyer se caractérise par son volume et la surface des tubes directement exposés à la flamme. Il est intéressant aussi de connaître la charge thermique en calories par m^3 de foyer et par m^2 de surface directe.

Les températures atteintes dans le foyer se trouvent dans le domaine de 1 100 °C à 1 500 °C et la transmission de chaleur se fait principalement par rayonnement. Certaines chaudières, et c'est le cas des grandes centrales thermiques, n'utilisent pas le phénomène de convection pour la vaporisation de l'eau. Cette dernière s'effectue totalement dans les écrans de tube exposés au rayonnement. On les appelle pour ces raisons des *chaudières radiantes*.

La partie inférieure de la chambre doit permettre l'extraction des cendres. Elle a souvent la forme d'une trémie appelée *cendrier*.

* *Brûleurs*

Les brûleurs ont pour but de démarrer et d'entretenir la combustion en assurant un mélange intime et homogène du combustible avec l'air de combustion.

Leur conception est fonction du type de combustible utilisé (solide, liquide ou gazeux) et de leur disposition sur le foyer. Nous examinerons seulement les brûleurs à fuel-oil qui sont les plus répandus.

Le rôle du brûleur est donc d'assurer la *pulvérisation* du combustible qui doit être introduit dans la chambre

▼ ***Les trémies dépoussiéreuses de la centrale E. D. F. de Champagne-sur-Oise ; elles permettent l'extraction des cendres à la partie inférieure de la chambre de combustion.***

Photothèque E.D.F. - SODEL

▶ Vue extérieure d'un brûleur de la centrale de Champagne-sur-Oise; le rôle du brûleur est de démarrer et d'entretenir la combustion.

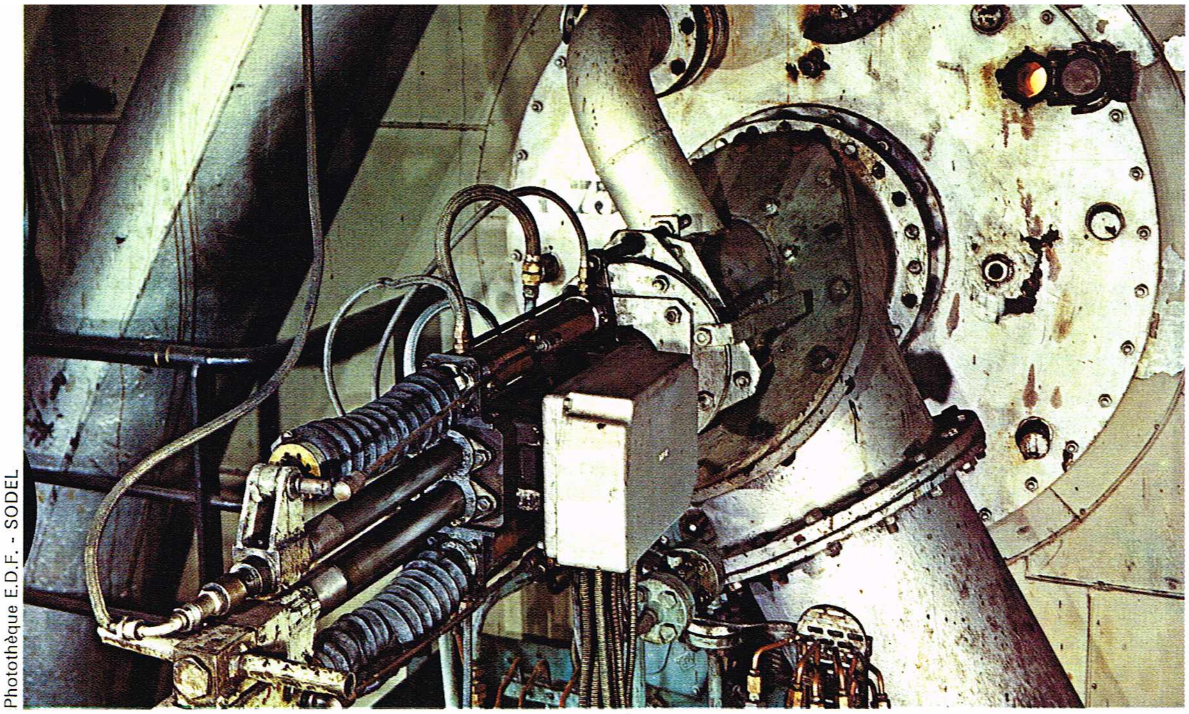

Photothèque E.D.F. - SODEL

▼ Ci-dessous, figure 11 : principe du brûleur *à* coupelle rotative. *En bas, figure 10; deux types de brûleurs* à pulvérisation mécanique : a) *à pulvérisation mécanique simple;* b) *à pulvérisation mécanique à retour.*

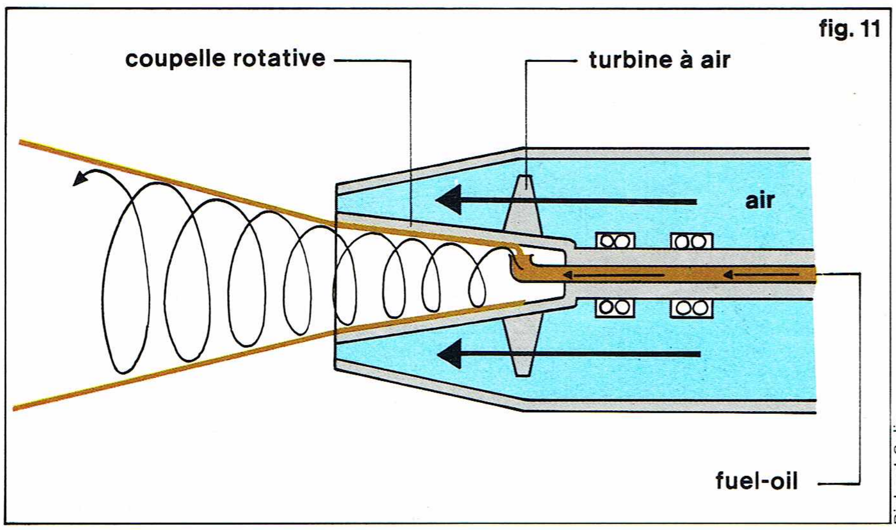

Richard Colin

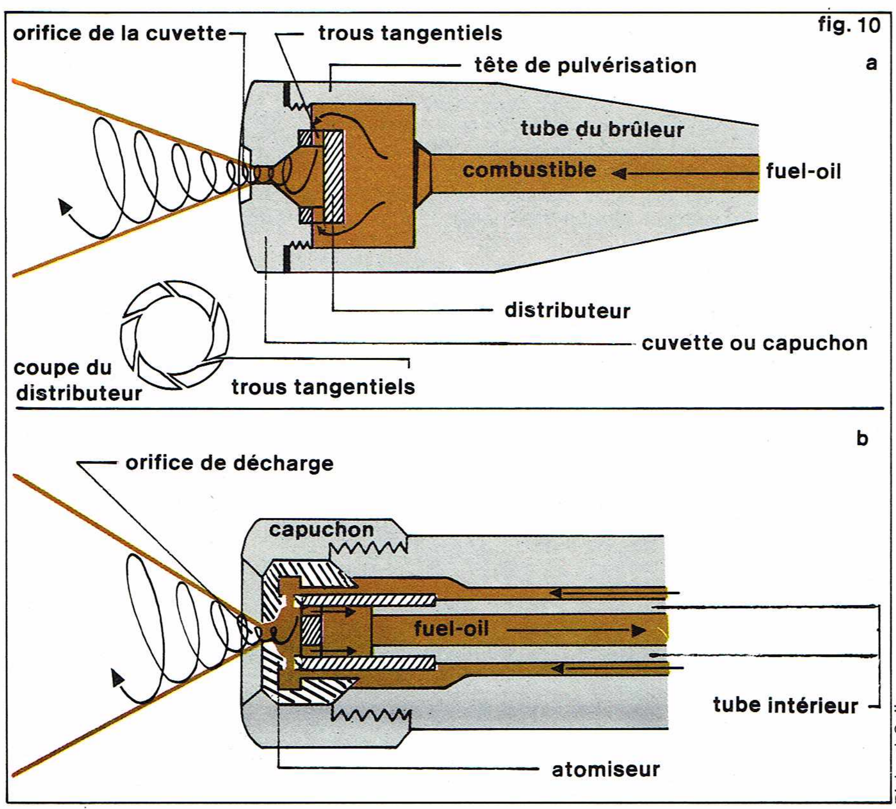

Richard Colin

de combustion en gouttelettes aussi fines que possible de façon à augmenter la surface de contact entre le fuel-oil et l'air.

La pulvérisation est obtenue par les trois procédés suivants :

— *Pulvérisation mécanique*

La pulvérisation est obtenue par refoulement du combustible liquide sous forte pression (au moins 7 bars) à travers l'orifice étroit du gicleur. Dans la tête du brûleur, le fuel-oil est mis en rotation par l'intermédiaire de canaux tangentiels dans une chambre de rotation; il est ainsi pulvérisé suivant un mouvement giratoire (*fig.* 10 a).

Ces brûleurs sont des appareils de précision qui exigent un entretien soigneux. Ils permettent d'obtenir de forts débits de pulvérisation avec une faible consommation d'énergie. Ils ont l'inconvénient de ne pas permettre le réglage du débit sur une plage importante. On règle donc la puissance par variation du nombre de brûleurs en service. En raison de ce manque de souplesse, on abandonne progressivement ce type de brûleurs au profit de procédés plus compatibles avec la conduite des installations modernes.

Pulvérisation mécanique à retour

Ces brûleurs fonctionnent suivant le principe de la pulvérisation mécanique mais ils comportent dans la chambre de détente un orifice de décharge relié à un circuit de retour du fuel-oil à l'aspiration des pompes de pulvérisation. En réglant l'ouverture de ce circuit de retour, on peut faire varier le débit d'injection dans la chambre de combustion dans un rapport de 1 à 6, tout en gardant la pleine pression pour la pulvérisation (*fig.* 10 b).

Ce procédé, qui apporte une solution acceptable au problème des variations de charge, présente les inconvénients de surdimensionner les groupes de pompage et de compliquer les circuits de combustible par les tuyauteries de retour.

— *Pulvérisation assistée par fluide auxiliaire*

Un fluide auxiliaire (air comprimé ou vapeur) apporte l'énergie cinétique nécessaire à la pulvérisation. C'est le procédé le plus employé, aussi bien sur les chaudières terrestres que marines, car il autorise de larges variations de débit (pouvant aller de 1 à 15), ce qui permet l'automatisation de la chaudière. La consommation de fluide auxiliaire est un inconvénient de ce mode de pulvérisation.

— *Pulvérisation par coupelle rotative*

La pulvérisation est obtenue dans ce type de brûleur par action combinée de la force centrifuge et de l'air. Le fuel-oil est amené dans le fond d'une coupelle tronconique tournant à grande vitesse (3 000 à 7 000 t/mn). De là, il progresse sous l'action de la force centrifuge jusqu'à l'extrémité de la coupelle d'où il est projeté tangentiellement à grande vitesse et pulvérisé par l'air de soufflage (*fig.* 11).

Ce procédé, qui n'exige pas de porter le combustible à une pression élevée, permet des variations de charge importantes (rapport 1 à 25). Les brûleurs sont simples mais ils posent des problèmes d'entretien, car il faut périodiquement nettoyer les coupelles. Ce type de brûleur a surtout été développé en Allemagne.

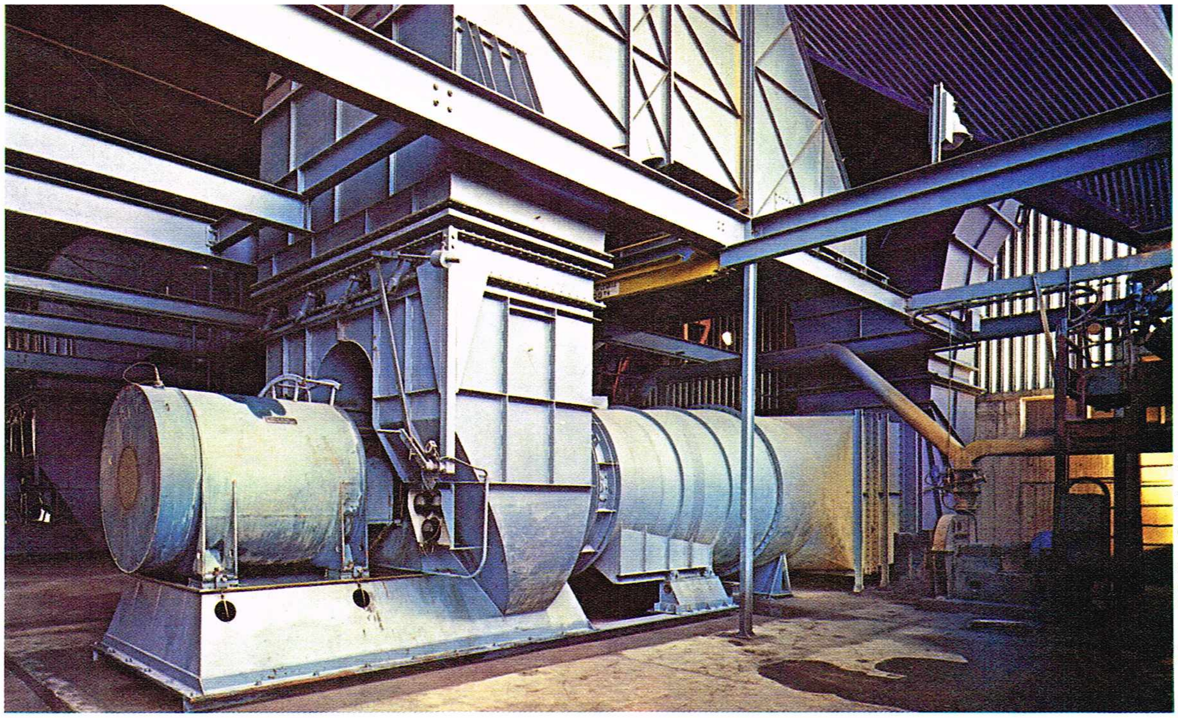

Photothèque E.D.F. - Sodel - Morceau

◀ **Ventilateur de soufflage** ***de la centrale thermique de Champagne-sur-Oise (Val-d'Oise) [2 × 250 MW]; cet appareil refoule dans le foyer l'air nécessaire à la combustion au travers d'un réchauffeur.***

Soufflage et réchauffage de l'air

Les générateurs de vapeur de grande puissance sont souvent équipés de ventilateurs de soufflage et de ventilateurs de tirage. Les premiers refoulent l'air atmosphérique dans le foyer au travers d'un réchauffeur d'air; les seconds aspirent les gaz de combustion pour les refouler a la cheminée. La chambre de combustion est alors en légère dépression.

La circulation de l'air et des fumées peut n'être assurée que par des ventilateurs de soufflage. Dans ce cas, la chambre de combustion se trouve en pression : on dit qu'elle est *pressurisée*.

Certains générateurs de vapeur enfin utilisent des ventilateurs de recyclage des fumées pour permettre, comme on le verra plus loin, le réglage de la température de la vapeur surchauffée.

* *Ventilateurs*

Ces appareils transforment, grâce à une roue à aubes entraînée en rotation, l'énergie mécanique fournie par un moteur en un déplacement de gaz sous faible pression (inférieure à une hauteur de 2,5 m d'eau). Ils seront décrits plus en détail dans le chapitre *Transformation d'énergie*.

Les ventilateurs des gros générateurs sont généralement prévus par paires de façon à limiter les conséquences d'une indisponibilité : 2 pour le soufflage et 2 pour le tirage par exemple, ces 4 ventilateurs permettant le fonctionnement à pleine puissance. L'indisponibilité de l'un d'entre eux entraîne une limitation de la puissance à 70 % environ de sa valeur normale.

L'énergie consommée par les ventilateurs est importante. Sur les centrales thermiques produisant du courant, elle peut représenter 1,5 % de l'énergie produite par l'alternateur. A titre d'ordre de grandeur, les tranches E. D. F. de 700 MW sont équipées de 2 ventilateurs de soufflage de débit unitaire 124,5 m^3/s et de puissance unitaire 5 000 kW.

Le réglage du débit d'air se fait suivant divers procédés :
— variation continue ou discrète de la vitesse,
— registres (qui introduisent une perte de charge variable),
— pales orientables.

* *Réchauffeurs d'air*

Le réchauffage de l'air de combustion permet de récupérer une partie de la chaleur contenue dans les fumées d'une part et favorise la combustion d'autre part.

La récupération de chaleur ne doit pas cependant être poussée trop loin si l'on veut éviter des risques graves de corrosion dus aux condensations acides dans les gaz de combustion. Il est donc prudent de ne pas descendre au-dessous d'une température correspondant à l'apparition de ces condensations. Cette température appelée température de rosée est comprise suivant les combustibles utilisés entre 100 et 150 °C.

Pour atténuer ces risques de corrosion, on peut placer à l'amont du réchauffeur d'air sur les fumées un réchauffeur d'air à vapeur qui échauffe l'air de soufflage à plus de 80 °C pour éviter d'avoir des tubes trop froids dans

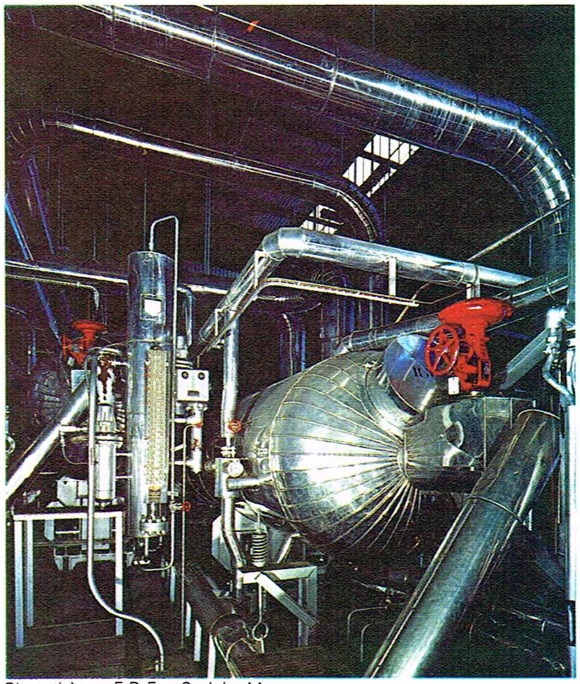

Photothèque E.D.F. - Sodel - Morceau

◀▼ ***Avant d'être introduit dans la chaudière, l'air de combustion, comme l'eau alimentaire, est réchauffé. Ci-dessous, en cours de montage, le rotor d'un réchauffeur d'air à régénération de type « Ljungström » qui utilise une partie de la chaleur contenue dans les fumées. Ci-contre, un réchauffeur d'eau haute pression, qui utilise la chaleur contenue dans la vapeur de soutirage de la turbine.***

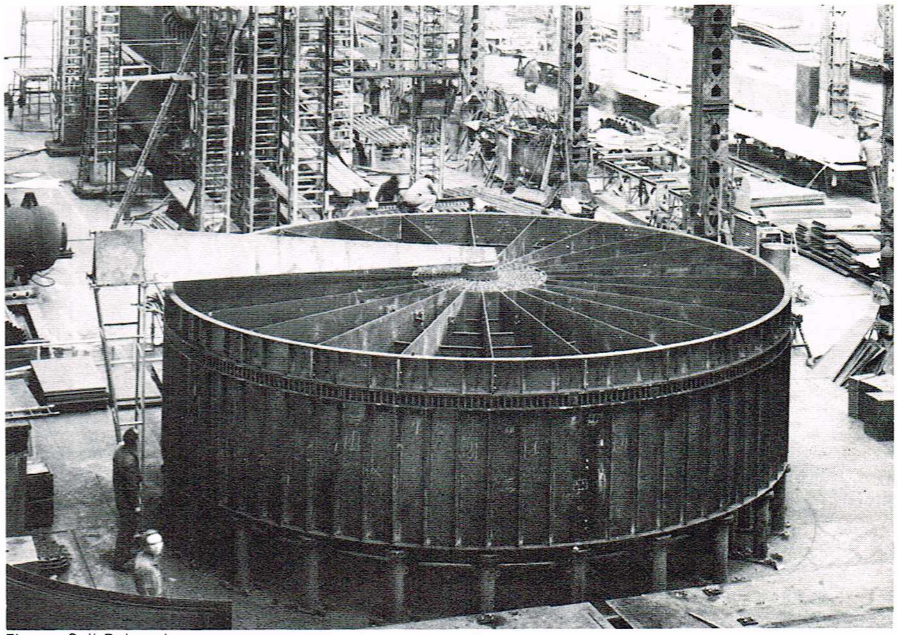

Fives - Cail Babcock

▶ *Figure 12 : principe du réchauffeur d'air de type* « Ljungström » (a) *et détail des tôles* (b).

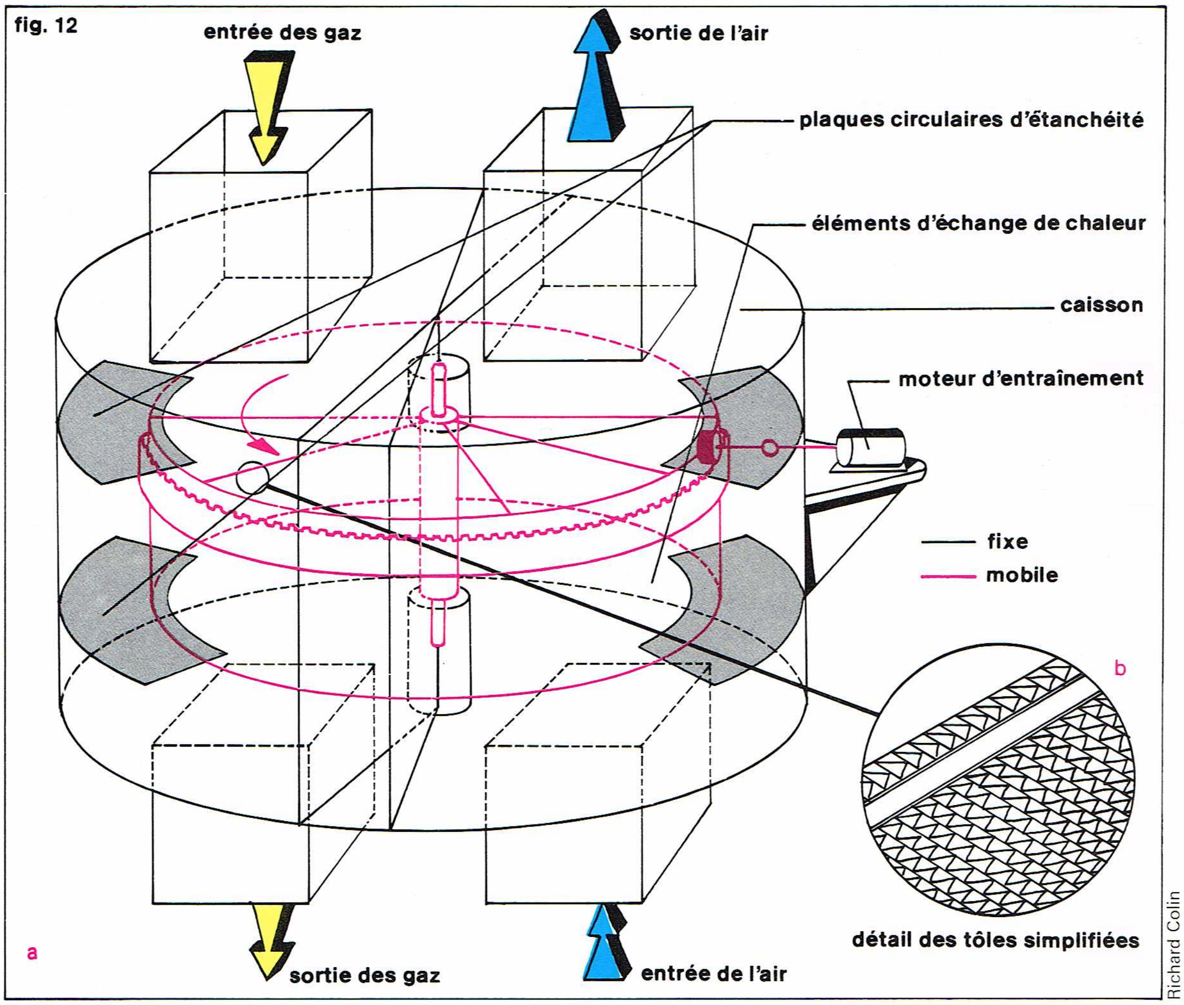

le réchauffeur à fumées. La vapeur utilisée est de la vapeur de soutirage et ce réchauffeur à vapeur contribue à l'amélioration du rendement du cycle.

Parmi les réchauffeurs d'air les plus utilisés, on trouve les types suivants.

— *Réchauffeurs d'air à tubes.* Ce sont les plus courants. Ils sont fondés sur le principe d'échange de chaleur au travers d'une paroi : plaques ou tubes. Dans le cas de faisceaux tubulaires, l'air de soufflage peut circuler à l'intérieur ou à l'extérieur de tubes. Les parties froides peuvent être construites en tube Pyrex, insensibles à la corrosion. On utilise aussi des tubes en fonte, compte tenu de la bonne résistance de ce matériau à la corrosion acide.

— *Réchauffeurs à régénération.* Ces réchauffeurs sont fondés sur le principe d'une accumulation de la chaleur des gaz de combustion dans une masse de métal pour être transférée ensuite vers le fluide à réchauffer, en l'occurrence l'air de soufflage. Les masses jouant le rôle d'accumulateur de chaleur, constitué en général par des empilements de tôles minces, sont mises en contact alternativement avec le fluide chaud et le fluide froid. Ces appareils semblent actuellement en faveur auprès des constructeurs de chaudières (*fig.* 12).

Dans les réchauffeurs de type « Ljungström », les paquets de tôle sont montés sur un rotor tournant, les gaines d'air de soufflage et de fumée étant fixes ; dans les réchauffeurs « Rothemühle », les éléments d'échanges de chaleur sont fixes et ce sont des éléments des gaines d'air de soufflage et de fumées qui sont entraînés en rotation.

— *Réchauffeurs d'air par fluide intermédiaire.* Dans ce type de réchauffeurs, il est fait appel à un fluide intermédiaire, eau ou liquide organique, pour transférer la chaleur des fumées à l'air de soufflage. Ces appareils sont par principe très étanches, contrairement aux réchauffeurs d'air par régénération qui exigent un entretien méticuleux si l'on veut limiter les fuites entre le fluide chaud et le fluide froid.

. Différents types de réchauffeurs ont été imaginés. La transmission de chaleur peut s'effectuer sans changement d'état du liquide de transfert ou au contraire avec vaporisation et condensation.

On ne décrira ici que le réchauffeur *Perkins* constitué d'éléments de tubes indépendants. Chacun de ces tubes comprend une partie horizontale placée dans le conduit de fumées suivie d'une partie inclinée vers le haut dans le circuit d'air de soufflage. Chaque tube est partiellement rempli d'eau et mis sous vide. L'eau se vaporise, côté fumées, dans la partie horizontale, et la vapeur produite passe dans la partie inclinée où elle se condense en réchauffant l'air de soufflage. L'eau de condensation s'écoule dans la partie horizontale pour y être à nouveau vaporisée (*fig.* 13). Ces tubes sont équipés de manchons ailetés pour améliorer les échanges thermiques avec l'air et les fumées. Les ailettes sont en acier sur l'air de soufflage et en fonte sur les fumées pour protéger les tubes de la corrosion acide.

▼ *Figure 13 : principe du réchauffeur d'air par fluide intermédiaire de type* « Perkins ».

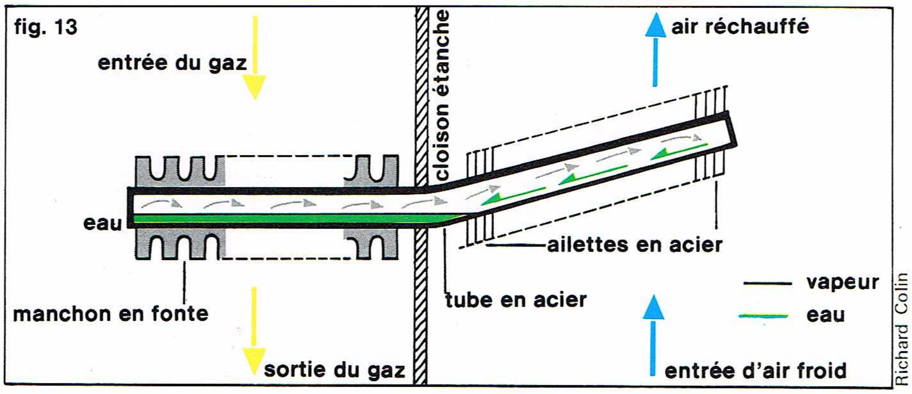

Tous les réchauffeurs d'air sur fumées, quel que soit leur type, peuvent être le siège de graves incendies. Ces appareils demandent donc un entretien soigneux (ramonage) ; ils sont généralement munis d'un système d'extinction à l'eau.

Circuit des fumées

Après les économiseurs et les réchauffeurs d'air, on trouve sur le circuit des fumées, avant la cheminée de rejet, des installations de dépoussiérage.

* *Dépoussiéreurs*

Ces installations permettent de réduire la quantité de poussières émises dans l'atmosphère, essentiellement des cendres volantes pour les générateurs de vapeur. La mise en place de dépoussiéreurs est réglementaire.

Le principe des différents types de dépoussiéreurs consiste toujours à imposer aux particules de poussières entraînées par le gaz de combustion une trajectoire qui les écarte du courant principal et qui les achemine vers une zone de collecte ou de dépôt, d'où elles sont évacuées (*fig.* 14).

Suivant la nature de la force utilisée pour agir sur les trajectoires des poussières, on distingue :

— *Les dépoussiéreurs mécaniques*

● *A sédimentation :* l'appareil est constitué par une chambre de décantation faisant seulement appel à la pesanteur pour éliminer les particules. Un élargissement du conduit de fumée est suffisant pour réduire la vitesse et permettre la chute des poussières durant le temps de passage des gaz dans la chambre. Ce procédé ne convient qu'aux petites chaudières et n'arrête que les grosses particules de poussières.

● *A inertie ou à chocs :* l'appareil de ce type combine l'effet de vitesse (augmentée par détente) et celui de brusques changements de direction des fumées.

● *A centrifugation :* les fumées entrent ici dans l'appareil, soit axialement, soit tangentiellement, et prennent un mouvement tourbillonnaire. Elles s'échappent par l'axe tandis que les poussières en suspension qui sont le siège d'une force centrifuge sont plaquées sur une paroi d'où elles tombent par gravité.

— *Les dépoussiéreurs hydrauliques*

Les appareils fonctionnant suivant ce principe sont en fait des laveurs de fumées qui opèrent un transfert de poussières d'une suspension gazeuse à une suspension liquide.

Le lavage peut se faire par barbotage ou par arrosage. Une des difficultés des dépoussiéreurs hydrauliques est l'humidification des fumées qui résulte de leur lavage et qui limite les conditions d'emploi de ce type d'appareil. On peut combiner ce principe avec celui du dépoussiéreur à inertie en retenant les poussières par des surfaces mouillées sur lesquelles elles viennent frapper.

— *Les dépoussiéreurs électriques*

Ici, on communique aux particules une charge électrique qui se déplace vers une surface réceptrice (*fig.* 15).

fig. 14

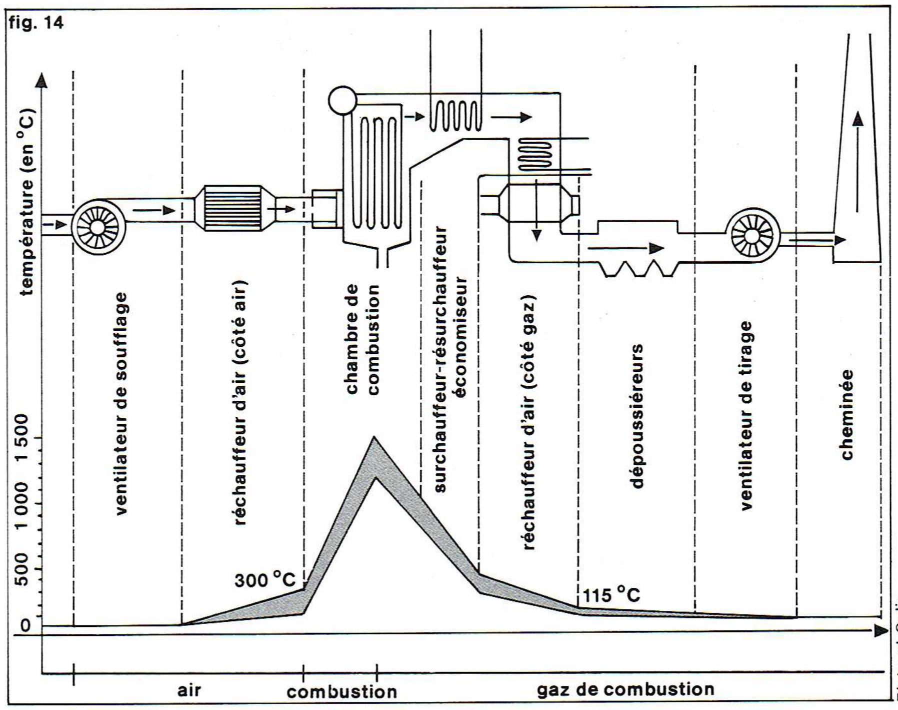

Richard Colin

▲ *Figure 14 :*
a) *représentation schématique de l'ensemble du circuit air-gaz d'une chaudière ;*
b) *variation de température à l'intérieur des différentes pièces de ce circuit.*

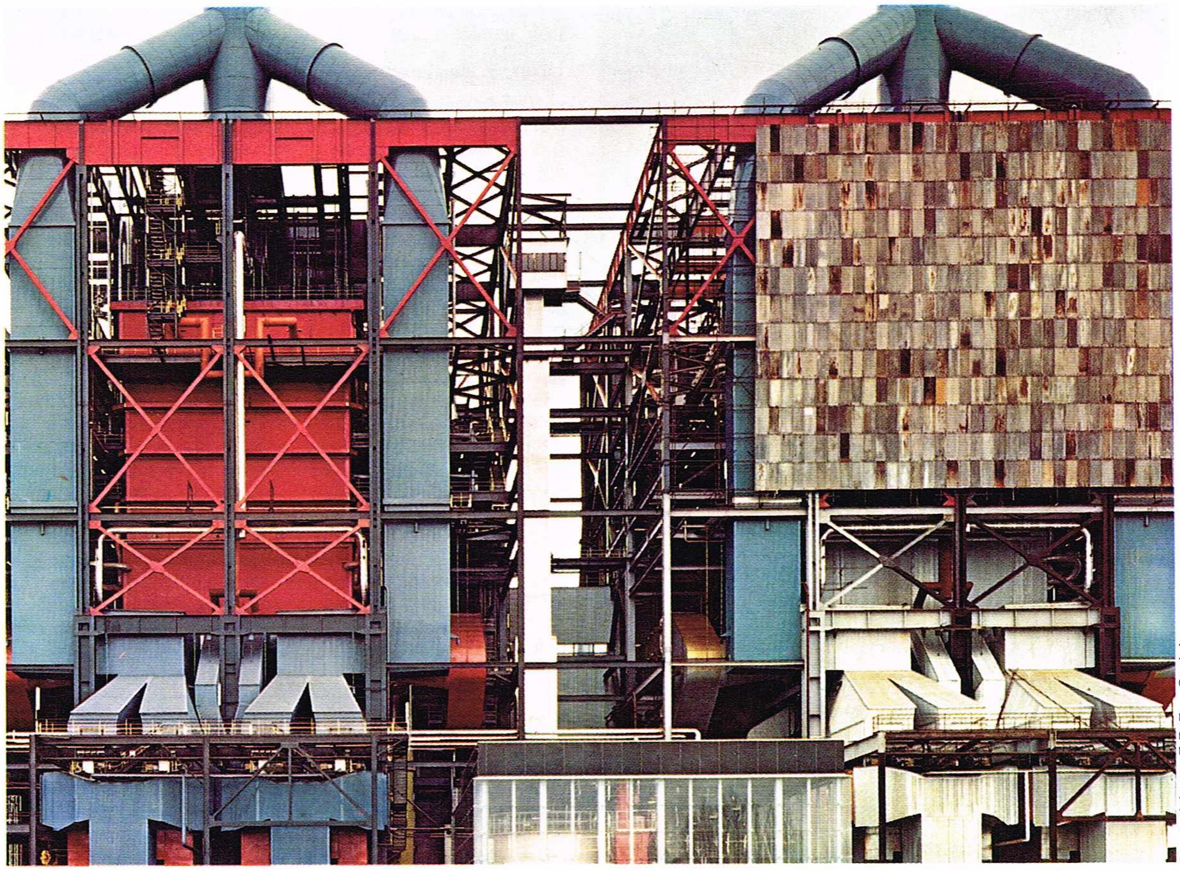

Photothèque E.D.F. - Sodel

◀ *La présence de dépoussiéreurs avant la cheminée sur le circuit des fumées d'une chaudière est obligatoire. Elle permet de réduire la quantité de poussières et surtout de cendres volantes rejetées dans l'atmosphère. Ici, les dépoussiéreurs des 4e et 5e tranches de la centrale thermique de Nantes Cheviré.*

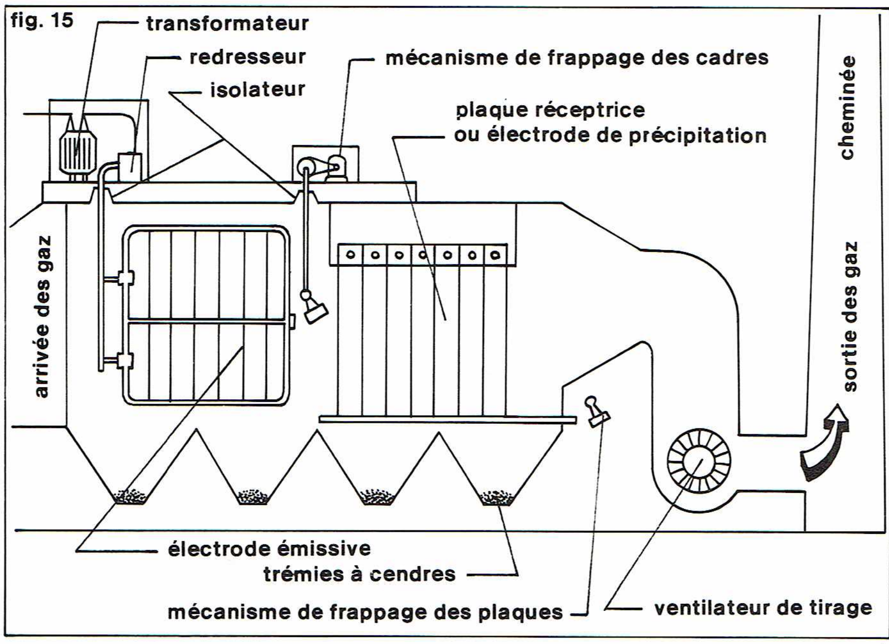

▲▼ *Figure 15 : représentation schématique d'un* dépoussiéreur électrique *(vue en élévation).*
Figure 16 : a) *représentation schématique de l'ensemble du circuit* eau-vapeur *d'une chaudière ;*
b) *variation de température à l'intérieur de différentes pièces de ce circuit.*

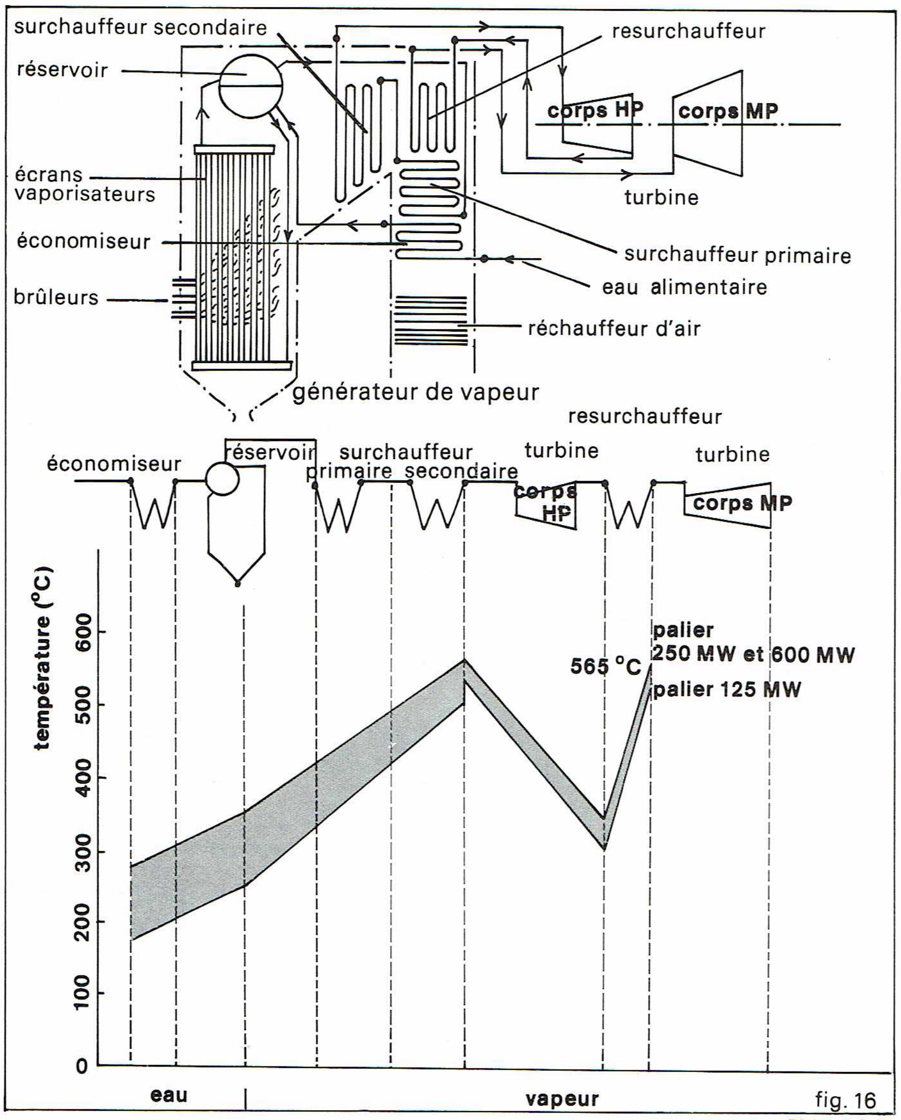

Richard Colin

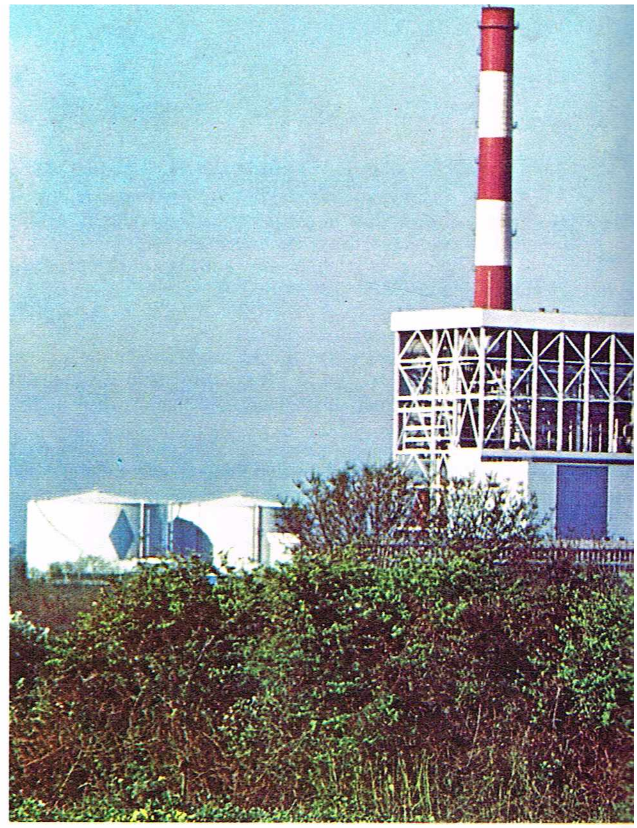

Les dépoussiéreurs de ce type ont un volume considérable parce que les fumées doivent y circuler à très faible vitesse. Ils sont composés d'un caisson, d'électrodes émissives alimentées en courant continu haute tension, d'électrodes de précipitation ou plaques réceptrices et de mécanismes de frappage dont le rôle est de « secouer » de manière cadencée les électrodes des deux types pour détacher les poussières et leur permettre ainsi de tomber dans des trémies à cendres.

* *Cheminées*

Les cheminées des générateurs de vapeur sont élevées de façon à permettre une grande dispersion des gaz de combustion et de leurs poussières résiduelles dans l'atmosphère. Leur hauteur atteint 250 m pour les dernières tranches E. D. F. de 600 ou 700 MW.

Ces cheminées, communes en général à plusieurs générateurs de vapeur, sont en béton ou en tôle. La brique, très usitée autrefois, n'est guère utilisée aujourd'hui.

Circuit eau-vapeur

L'eau d'alimentation de la chaudière, ou eau alimentaire, traverse, avant de ressortir sous forme de vapeur éventuellement surchauffée, un circuit comportant divers échangeurs constitués en grande partie par des faisceaux de tubes. Cet ensemble d'échangeurs a pour but de transférer de la façon la plus méthodique possible la chaleur créée par la combustion dans le foyer à l'eau alimentaire pour transformer cette dernière en vapeur.

On va donc rencontrer successivement l'économiseur, le réservoir, les faisceaux vaporisateur, surchauffeur et éventuellement resurchauffeur (*fig.* 16).

Économiseur

Avant son introduction dans le réservoir supérieur du générateur de vapeur, l'eau alimentaire subit un dernier réchauffage en traversant un échangeur de chaleur disposé sur le trajet des gaz de combustion. Cet échangeur est appelé *économiseur*, car il contribue essentiellement à l'amélioration du rendement en récupérant une partie des calories restées dans les gaz de combustion.

L'échange de chaleur se fait par convection. Les tubes d'eau, en acier pour tenir la pression généralement élevée, portent des manchons à ailettes de façon à améliorer l'échange thermique avec les fumées. Ces manchons sont généralement en fonte pour résister à la corrosion acide.

L'économiseur est dimensionné pour qu'en aucun cas il n'y ait vaporisation de l'eau dans cet échangeur.

Réservoir et ses accessoires - La circulation

Ce réservoir, appelé aussi *ballon*, est une enceinte dans laquelle se trouvent réunies la phase liquide et la phase vapeur de l'eau du générateur. On y trouve l'arrivée d'eau alimentaire, les arrivées de l'émulsion eau-vapeur en pro-

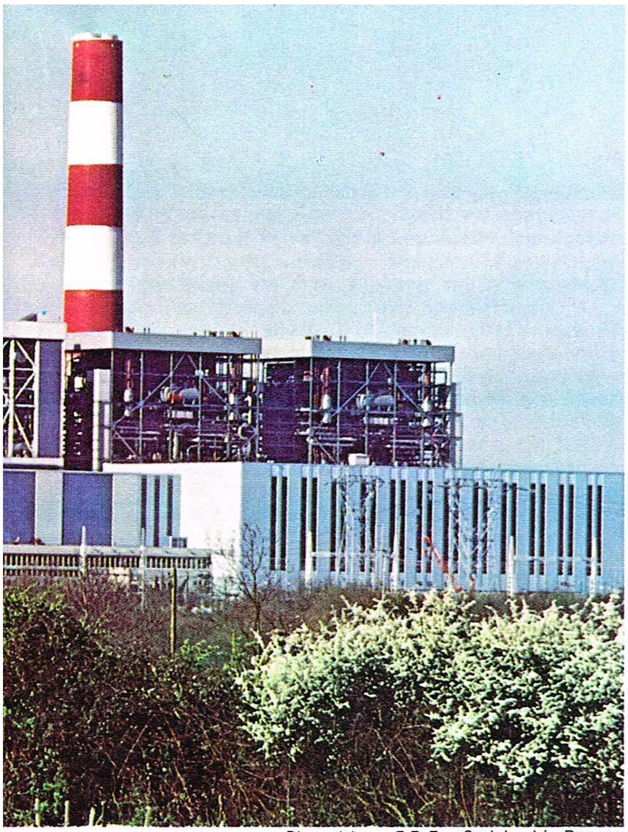

Photothèque E.D.F. - Sodel - J.L. Desnos

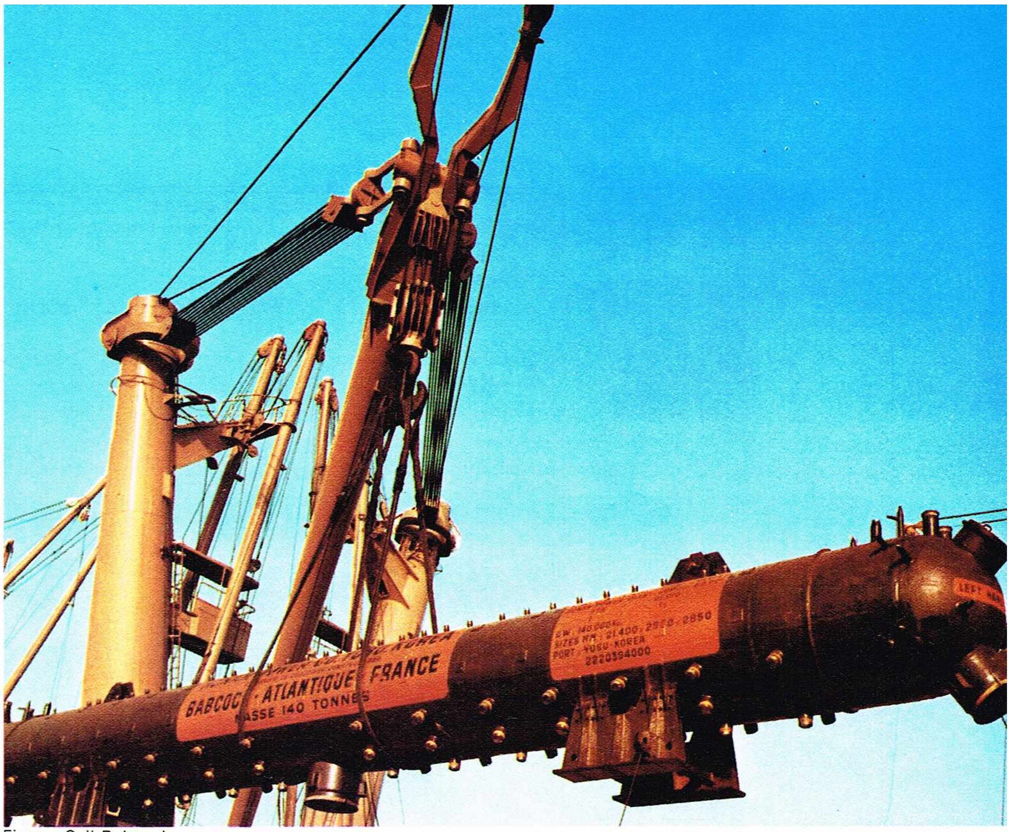

Fives - Cail Babcock

venance des faisceaux vaporisateurs, les départs d'eau vers ces mêmes faisceaux et les départs de la vapeur vers le surchauffeur. Il se trouve à la partie supérieure de la chaudière.

Il y a en permanence une circulation de l'eau et de l'émulsion. Cette circulation peut s'établir spontanément du fait de la différence de densité entre l'eau et l'émulsion, et on dit alors que la chaudière fonctionne en *circulation naturelle* (*fig.* 17a).

On peut aider cette circulation en intercalant une ou plusieurs pompes de circulation dans les tubes de descente d'alimentation des faisceaux vaporisateurs. On parle alors de *circulation contrôlée* ou *assistée* (*fig.* 17b).

Dans ces deux systèmes, la séparation de l'eau et de la vapeur se fait dans le ballon.

Il existe un troisième type de chaudières, dites à *circulation forcée*. Ces chaudières n'ont plus de réservoir ; elles sont constituées seulement des différents faisceaux disposés en série ou en série-parallèle. La pompe alimentaire refoule l'eau dans ces faisceaux où successivement elle se vaporise et se surchauffe. Ce sont des chaudières à passage unique *(once-through)* [*fig.* 17c].

Le réservoir d'une chaudière est un élément essentiel de celle-ci en raison de ses dimensions, de son poids, de son coût élevé et des délais importants de réparation ou de remplacement. Sa conception et sa construction sont en conséquence particulièrement soignées.

Son habillage externe et interne est complexe. Il comporte de nombreux bossages pour permettre le raccordement des soupapes de sûreté, des diverses tuyauteries principales d'arrivée et de départ d'eau, d'émulsion et de vapeur, des tuyauteries auxiliaires d'évent, de purge, d'injection de réactifs, de prise d'échantillons, etc., et enfin des appareils de mesure du niveau.

L'habillage interne est constitué par des écrans, destinés à guider la circulation des fluides, et par des épurateurs de vapeur. Les épurateurs de vapeur sont de deux types. On trouve d'abord les *séparateurs* qui effectuent une première séparation de l'eau et de la vapeur, ensuite les *sécheurs* qui éliminent de la vapeur l'eau restante.

Compte tenu du poids de ce réservoir, de toutes ses liaisons avec les différents faisceaux tubulaires, de sa localisation au point le plus haut de la chaudière, et de sa température de fonctionnement élevée, on conçoit bien que c'est un des éléments importants du générateur de vapeur.

Faisceaux vaporisateurs

Ces faisceaux sont, dans les chaudières modernes, constitués principalement par des écrans d'eau tapissant les parois de la chambre de combustion et donc exposés au rayonnement (chaudières radiantes) [*fig.* 18].

Ces faisceaux sont alimentés à partir du réservoir par des colonnes de descente d'eau extérieures au foyer. Ces

▲ A gauche, vue générale de la centrale thermique de Cordemais près de Nantes ; la présence de cheminées élevées (ici, environ 250 m) permet une grande dispersion des gaz de combustion. A droite, levage d'un réservoir de 140 tonnes destiné à l'aménagement d'une chaudière de 300 MW en Corée.

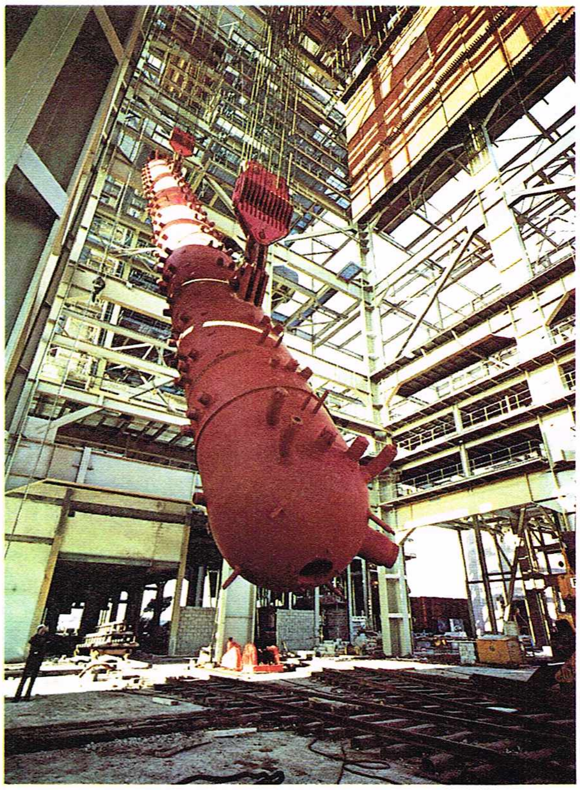

Photothèque E.D.F. - Sodel - Berenger

◀ Mise en place du réservoir (230 tonnes) de la chaudière au cours de l'installation de la centrale thermique d'Aramon (Gard) [2 × 700 MW].

▼ Figure 17 : la circulation de l'eau dans les chaudières ; a) circulation naturelle ; b) circulation contrôlée ou assistée ; c) circulation forcée (once-through).

fig. 17

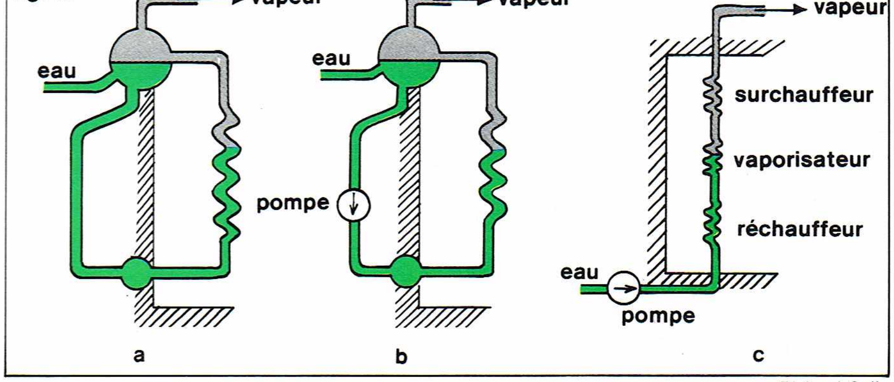

Richard Colin

▶ *Figure 19 : coupe transversale d'un réservoir supérieur d'un générateur de vapeur à circulation contrôlée.*

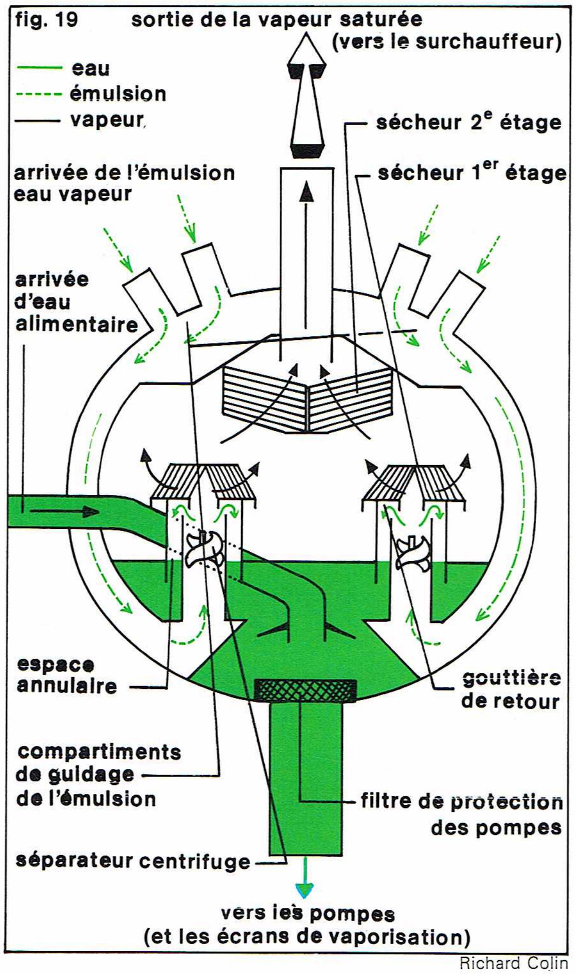

Richard Colin

▼ *Figure 18 : ce qui se passe dans un tube de chaudière.*

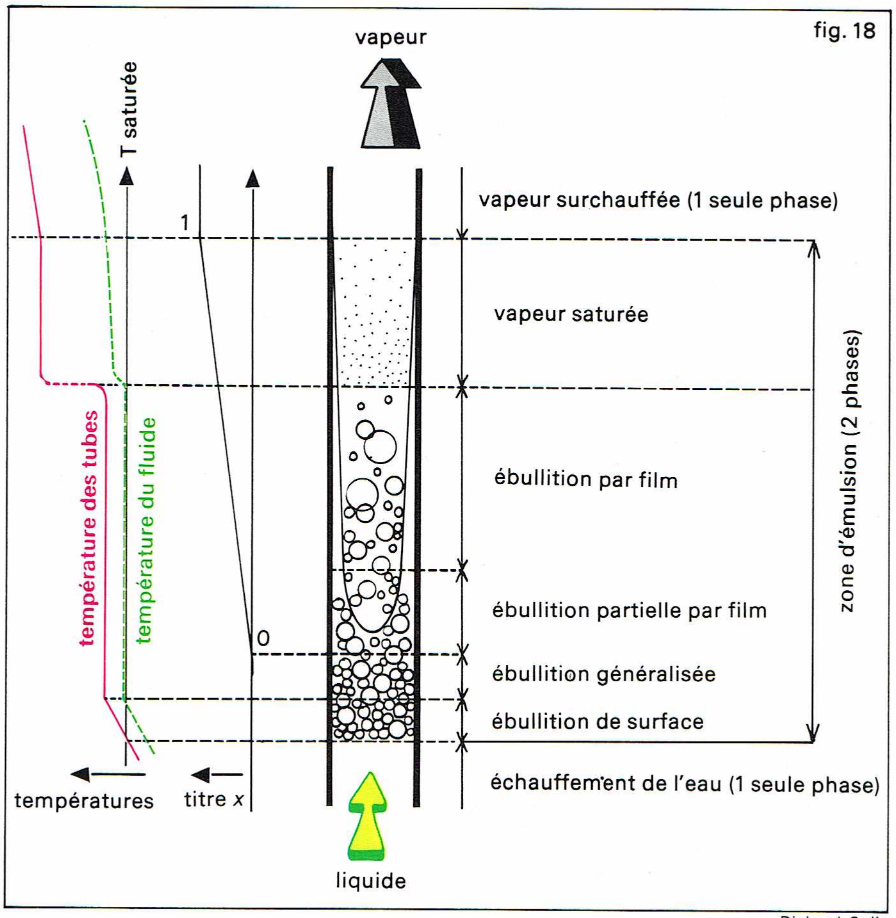

Richard Colin

colonnes alimentent des collecteurs inférieurs sur lesquels sont piqués les tubes. Sur les grandes chaudières, des collecteurs supérieurs réunissent les tubes et conduisent l'émulsion eau-vapeur dégagée dans ceux-ci vers le réservoir.

Surchauffeur et resurchauffeur

Les faisceaux surchauffeur et resurchauffeur sont traversés par les gaz de combustion qui sortent du foyer et sont donc soumis de ce fait aux températures les plus élevées.

Dans les tubes du surchauffeur circule la vapeur saturée en provenance du réservoir de la chaudière. Les tubes du resurchauffeur sont parcourus par de la vapeur déjà détendue dans une partie de la turbine. Le rôle de cet appareil sera explicité dans le chapitre traitant des turbines à vapeur.

La température élevée requise pour la vapeur surchauffée (amélioration du cycle thermodynamique) trouve sa limite dans la mauvaise tenue des métaux aux températures élevées. La température de 570 °C est une frontière qui est rarement dépassée dans les applications industrielles.

Matériaux

Le choix de l'acier des tubes des divers échangeurs rencontrés dans une chaudière dépend de la température du métal donnée par le calcul. Le problème est particulièrement ardu pour les faisceaux surchauffeur et resurchauffeur.

L'acier doux peut convenir jusqu'à 450 °C. Au-delà et jusqu'à 540 °C environ, on utilise des aciers « ferritiques » qui contiennent de faibles proportions de chrome et de molybdène (2,25 % Cr-0,5 % Mo par exemple). Au-delà de 540 °C, il faut utiliser des aciers « austénitiques » qui sont de véritables aciers inoxydables et qui contiennent une forte teneur de chrome (18 %) et de nickel (8 %).

Les supports de tubes de surchauffeur, moins bien refroidis que les tubes, fonctionnent à des températures bien supérieures et sont réalisés en alliages réfractaires constitués par des aciers fortement alliés Ni-Cr.

Les différents assemblages à réaliser sont effectués dans les chaudières modernes par soudure.

Problème de fonctionnement

L'exploitation des chaudières classiques soulève différents problèmes de fonctionnement parmi lesquels on peut citer :

Lecture et réglage du niveau

Ce problème existe dans toutes les chaudières qui ont un réservoir. La chaudière, dans ce cas, dispose d'un volant d'eau qui lui permet de fonctionner pendant un certain temps en cas de rupture de tube. Ce délai est mis à profit pour mettre la chaudière « bas les feux ».

Sur les chaudières modernes, le volant d'eau est faible et il est donc nécessaire de disposer de moyens de surveillance efficaces du niveau.

On trouve des appareils à lecture directe dont l'information est retransmise en salle de commande par un jeu de miroirs ou par télévision. Il existe aussi de nombreux types d'indicateurs à distance qui transmettent leur information par signaux électriques. Par mesure de sécurité, les installations comportent généralement plusieurs appareils de lecture de types différents.

Le maintien du niveau dans le réservoir est assuré par une régulation qui ouvre ou ferme à la demande la vanne d'alimentation. Ces régulateurs sont en général électriques et prennent en compte divers paramètres : niveau, débit d'eau entrant, débit d'eau sortant (régulation à trois éléments), de façon à anticiper sur les causes de déséquilibre.

Séparation de l'eau et de la vapeur

Cette séparation est réalisée dans le réservoir supérieur grâce à son habillage intérieur (*fig.* 19).

Des baffles séparent au mieux l'eau et la vapeur qui arrivent mélangées sous forme d'émulsion, avant de traverser les séparateurs et les sécheurs. Les séparateurs fonctionnent généralement suivant le principe du cyclone (centrifugation). Les sécheurs sont constitués très souvent par des plaques perforées constituant un chicanage où

la vapeur abandonne ses dernières traces d'humidité avant de quitter le réservoir.

Pour bien sécher la vapeur, il faut de la place, et l'on imagine bien que celle-ci soit très mesurée dans le coffre d'une chaudière. Un bon séchage de la vapeur est nécessaire, car l'eau entraînée peut être à l'origine d'une érosion importante; de plus elle emporte avec elle des corps dissous que l'on retrouve ensuite dans les réseaux et les appareils où la vapeur est utilisée. A titre d'exemple, si l'entraînement est de 1 gramme d'eau pour 1 kg de vapeur, ce qui est une excellente performance, l'effet cumulé est très important. Si on suppose qu'il s'agit d'une chaudière de 80 t/h fonctionnant avec une eau chargée de 400 mg/l de sels, la vapeur aura entraîné au bout d'une année pleine de marche 275 kg de sels environ.

On voit donc tout l'intérêt d'une bonne séparation de l'émulsion eau-vapeur dans le réservoir, d'une bonne régulation de niveau (un niveau trop haut favorise l'entraînement d'eau par la vapeur, qu'on appelle aussi *primage*) et d'un bon séchage de la vapeur.

Traitement des eaux de chaudières

Une eau de chaudière de mauvaise qualité fait courir à celle-ci de graves dangers. Non seulement, elle accentue les effets néfastes du primage, mais elle le provoque, car la séparation entre liquide et vapeur est fonction de la qualité de l'eau.

De plus, la présence d'oxygène entraîne des corrosions, donc des perforations de tubes et la présence de sels dissous incrustants favorise le phénomène bien connu d'entartrage qui peut conduire également, par surchauffe (coups de feu), à la rupture des tubes.

Le maintien de la qualité d'une eau de chaudière est donc un problème d'exploitation essentiel. L'effort se portera d'une part sur l'utilisation d'une eau d'appoint parfaitement pure et débarrassée d'oxygène. D'autre part, il faudra extraire périodiquement ou en continu de l'eau de la chaudière puisque celle-ci concentre les impuretés apportées par l'eau alimentaire. Il sera donc utilisé des traitements spécifiques pour éliminer l'oxygène et empêcher la formation de dépôts incrustants. Ces traitements consistent à ajouter des additifs dans l'eau d'appoint : par exemple, hydrazine pour éliminer l'oxygène, phosphates de soude pour éviter les dépôts.

Sécurité

Les chaudières présentent des risques d'accident dont on se protège par un certain nombre de dispositions rendues obligatoires en France par la réglementation du Service des Mines.

Une des dispositions essentielles concerne les soupapes de sûreté qui ont pour rôle d'éliminer toute surpression dans la chaudière au-delà du timbre : chaque chaudière doit en comporter au moins deux (*fig.* 20).

Les soupapes de sûreté utilisent presque toujours l'énergie de la vapeur pour assurer leur ouverture et leur fermeture. On en trouve de différents types : à contrepoids, à ressort ou à clapet pilote.

Une obligation importante du Service des Mines concerne les épreuves des générateurs de vapeur, avant la mise en service et ensuite tous les 10 ans, à une pression de 1,5 fois la pression du timbre.

Divers types de chaudières

Le passage de l'eau de l'état liquide à l'état vapeur se fait dans une chaudière en trois étapes : échauffement (économiseur), vaporisation et surchauffe. Si on demande à la chaudière de ne fournir que de la vapeur *saturée*, les deux premières étapes sont suffisantes.

Ces trois opérations physiques s'effectuent dans les chaudières modernes du fait des caractéristiques de vapeur élevées (pression et température) dans des appareils distincts. Cette séparation de fonctions, justifiée par le fait que l'eau passe par trois états différents : liquide, vapeur saturante, vapeur surchauffée, chacun assorti de conditions particulières de température et volume spécifique, se présente même dans les chaudières à passage unique et à circulation forcée *(once-through)*.

Les chaudières sont construites de façon à faire circuler de façon méthodique, c'est-à-dire à contre-courant, le fluide chauffé (circuit eau-vapeur) et le fluide chauffant (circuit air-gaz de combustion). Concevoir une chaudière consiste donc à imbriquer ces deux circuits : eau-vapeur et air-gaz de combustion, avec tous leurs appareils : échangeurs, foyers, ventilateurs, etc., de façon à favoriser au mieux les échanges de chaleur. Il faut en particulier mettre en contact, lors des échanges thermiques, des fluides dont les températures soient assez proches de façon à éviter les transformations « irréversibles » au plan de la thermodynamique. Dans cette perspective, le surchauffeur par exemple devrait être le premier à recevoir les gaz de combustion avec ensuite le vaporisateur, le réchauffeur d'eau et enfin l'économiseur (*fig.* 21).

L'histoire des chaudières obéit aux règles de développement des organismes vivants : évolution et mutation (*fig.* 22).

Au début du siècle, les caractéristiques de la vapeur étaient faibles : vapeur saturante de pression faible ou modérée, et les chaudières se présentaient comme des récipients clos dont la partie inférieure, remplie d'eau, était soumise au rayonnement de la combustion ou au contact des gaz. Pour augmenter la surface de chauffe, on multiplia ensuite le nombre des capacités (chaudières à bouilleur). On réalisa dans le même dessein des chaudières à foyers intérieur et extérieur. L'évolution conduisit ensuite à fabriquer des tubes de fumées intérieurs au bouilleur. La chaudière à foyer intérieur et à tube de fumées a atteint un raffinement technologique remarquable dans les locomotives à vapeur. On utilisa ensuite des tubes d'eau reliant un réservoir principal à plusieurs collecteurs, ce qui permit d'augmenter encore les surfaces d'échanges. En raison de l'augmentation des températures, les réservoirs et collecteurs furent ensuite sortis du foyer.

Les chaudières anciennes, surtout celles chauffées au charbon, avaient des foyers comportant des briquetages très développés. Ces parois réfractaires permettaient d'obtenir des températures de foyer élevées, favorables à la combustion des charbons. Avec l'emploi du fuel-oil et du gaz, la conception des chaudières a évolué vers des foyers constitués par des écrans de tubes vaporisateurs. Les réfractaires ont donc en partie disparu des

fig. 20

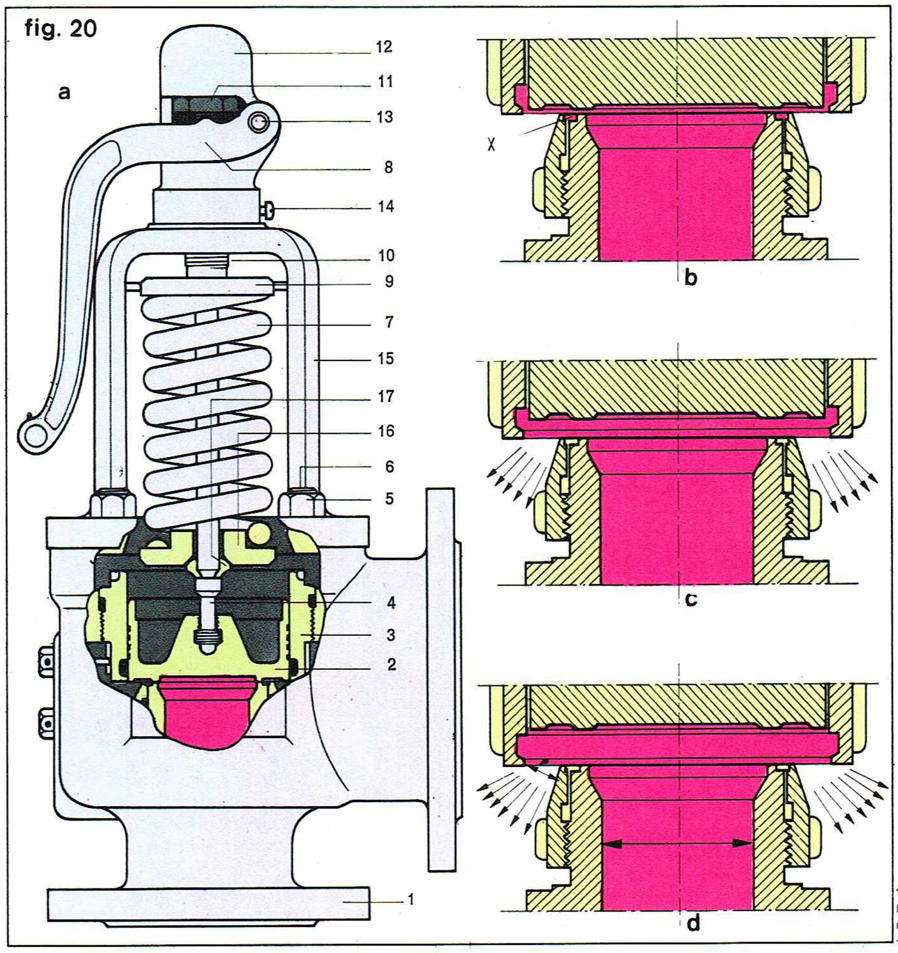

▲ *Figure 20 :*
a) ***schéma d'une* soupape de sûreté *avec un dispositif de tarage constitué d'un ressort de torsion : 1, corps de la soupape; 2, clapet; 3, anneau supérieur de réglage et guide du clapet; 4, tige de commande; 5, écrou; 6, goujon; 7, ressort; 8, levier à came; 9, plateau supérieur; 10, vis de calibrage; 11, écrou autobloquant; 12, chapeau; 13, axe de levier; 14, vis de serrage du chapeau; 15, armature; 16, plateau inférieur; 17, collier pour la tige de commande.***
b, c, d) ***principe de fonctionnement : lorsque la pression de vapeur atteint la pression de tarage, le clapet se soulève et la vapeur se répand dans la petite chambre annulaire (x); la force qui en résulte compense celle du ressort, lequel se comprime provoquant ainsi le soulèvement du clapet* (b) *qui découvre l'anneau de régulation supérieur; le fluide est contraint à se diriger vers le bas* (c) *; ceci crée une force de réaction supérieure à celle du ressort et le clapet rejoint alors le niveau supérieur* (d).**

▶ *Figure 21 : coupe longitudinale de la chaufferie de la 1re tranche de la centrale thermique à charbon pulvérisé de Loire-sur-Rhône près de Vienne (puissance : 250 MW, hauteur : 53,2 m, consommation de charbon : 900 000 t/an, débit de vapeur : 700 t/h).*

▶ *Page ci-contre, figure 22 ; évolution des chaudières : 1, à bouilleur et foyer extérieur ; 2, à bouilleur et foyer intérieur ; 3, à tubes de fumées intérieurs au bouilleur ; 4, à tubes inclinés et collecteurs longitudinaux ; 5, à tubes inclinés et collecteurs transversaux ; 6, à tubes inclinés et collecteur transversal avec mélangeur ; 7, à tubes verticaux ; 8, monotubulaire.*

▼ *Vue intérieure de la chambre de combustion de la centrale de Porcheville (près de Mantes-la-Jolie) [4 × 600 MW] au moment de sa construction.*

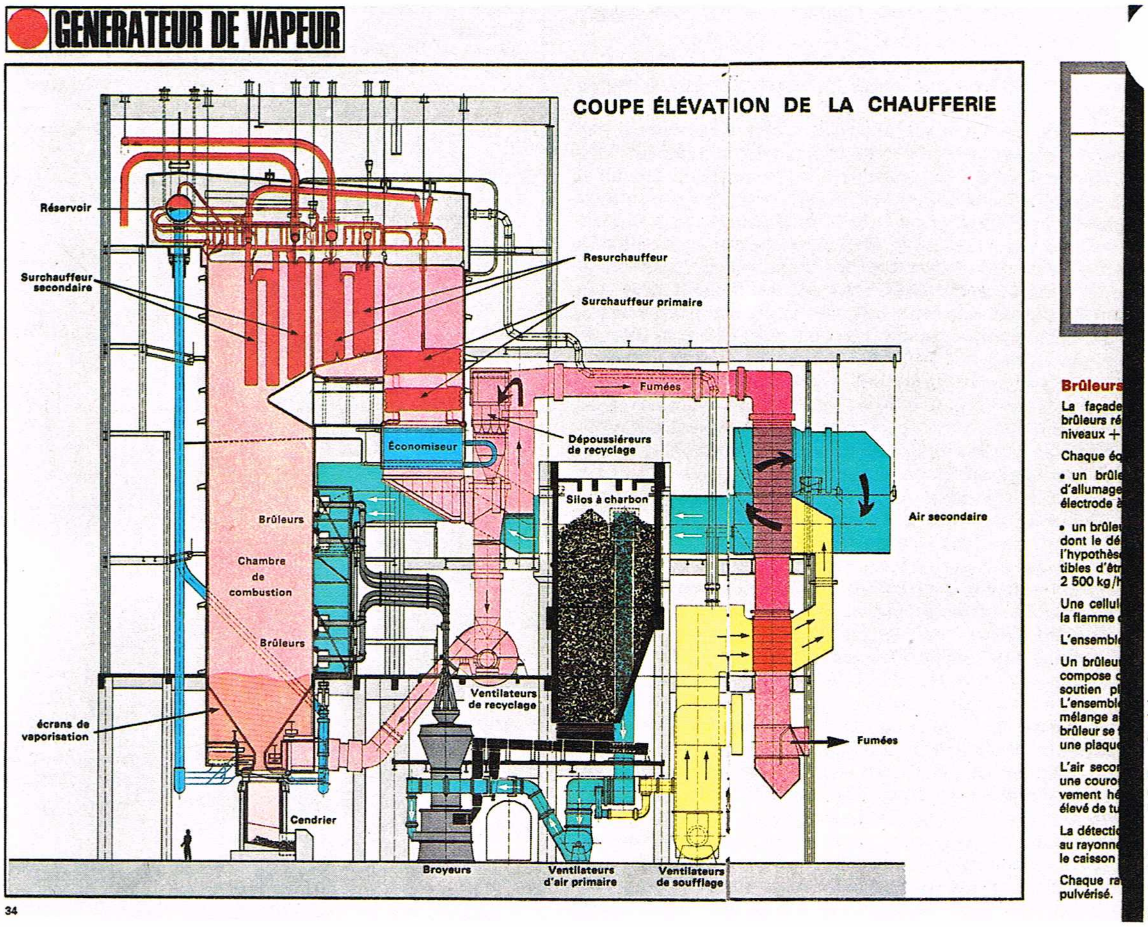

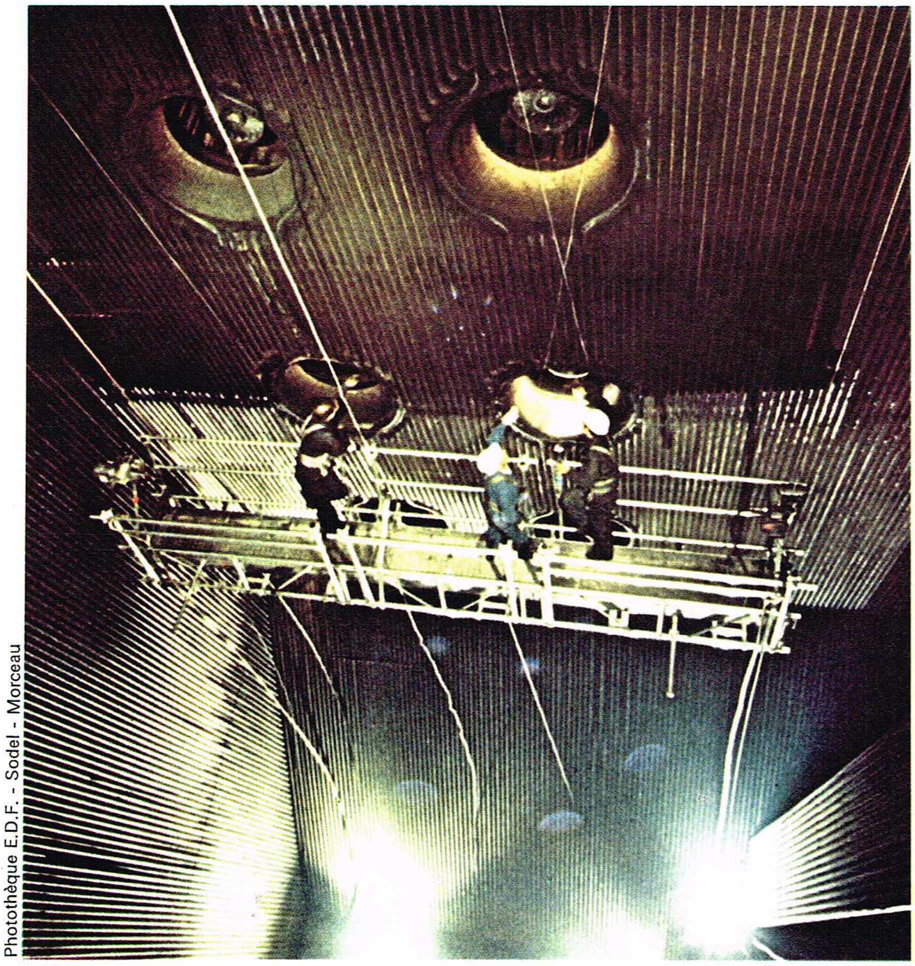

chaudières modernes au profit de l'endurance de ces dernières.

Entre les deux guerres, des progrès importants permirent d'accroître considérablement la pression et le débit des chaudières, grâce à l'emploi d'aciers spéciaux résistant mieux à la température et grâce à l'utilisation de la soudure à l'arc, en particulier dans la fabrication des réservoirs qui étaient auparavant assemblés par rivets.

Après la Seconde Guerre mondiale, les techniques américaines, qui avaient fait des progrès considérables pendant les conflits, ont inspiré la plupart des constructeurs européens dont la production avait été arrêtée. Les chaudières construites alors étaient tubulaires, soit à faisceaux de tubes droits peu inclinés reliés à un réservoir, soit à tubes cintrés (de façon à permettre les dilatations inégales) reliant plusieurs réservoirs. Ce dernier type de chaudière est aujourd'hui très utilisé pour les installations de grande puissance. Le nombre de réservoirs, par souci d'économie et de simplicité, a été réduit. Le foyer est constitué entièrement par des écrans d'eau (chaudières radiantes) ; il n'y a plus de réfractaire mais seulement une isolation calorifique.

La circulation naturelle est la règle pour les installations industrielles en raison de la simplicité qu'elle entraîne. Elle a fait ses preuves jusqu'à 165 bars et même au-dessus, mais elle exige des tubes de diamètre élevé, donc de forte épaisseur, pour tenir la pression, ce qui renchérit la chaudière. Certains constructeurs ont donc construit des chaudières à circulation contrôlée (la circulation étant aidée par une ou plusieurs pompes) ou des chaudières à circulation forcée à passage unique. Notons à ce propos que la circulation forcée est la seule solution possible pour les chaudières fonctionnant au voisinage ou au-dessus du point critique ($t = 374$ °C, P = 220 bars). Dans ces chaudières à circulation contrôlée ou forcée, on peut donc utiliser des tubes plus petits, et donc de moindre épaisseur.

Tous ces perfectionnements ne sont pas nécessaires pour les chaudières de caractéristiques plus modestes. Remarquons cependant que les petites installations largement utilisées dans l'industrie ont beaucoup bénéficié des progrès accomplis sur les grosses chaudières.

fig. 22

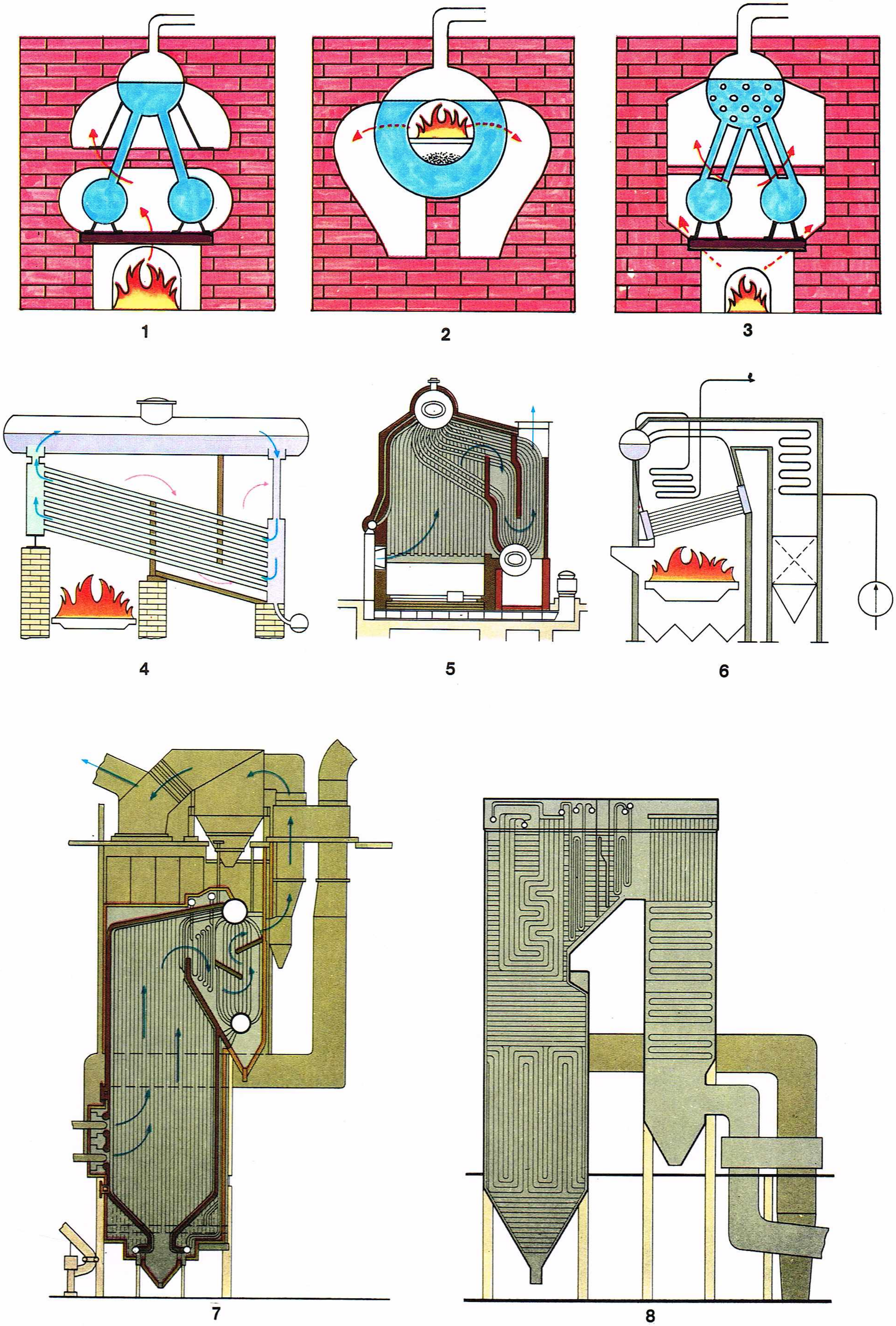

Chaudières nucléaires

Les chaudières classiques convertissent de l'énergie chimique en énergie thermique. Lorsque l'énergie de départ est l'énergie nucléaire pour la même énergie d'arrivée, l'énergie thermique, on utilise par analogie le terme de « chaudières » pour désigner ce type de convertisseurs.

Cette analogie entre *chaudières classiques* et *chaudières nucléaires* peut être poussée très loin. C'est dans le foyer qu'est entretenue la réaction de combustion. De la même façon, le *réacteur* sera le siège de la réaction nucléaire (*fig.* 23).

La principale réaction nucléaire utilisée aujourd'hui dans les réacteurs est, comme on le sait, la réaction de *fission* dont les agents sont les neutrons.

ÉNERGIE DE DÉPART	Combustibles	Réaction	Lieu de la conversion	ÉNERGIE D'ARRIVÉE
CHIMIQUE	fossiles	combustion	foyer	THERMIQUE
NUCLÉAIRE	nucléaires	fission	réacteur	

La différence essentielle entre les deux réactions, combustion et fission, est que, dans un foyer de chaudière, on introduit en continu et indépendamment le combustible d'un côté et l'oxygène (de l'air habituellement) de l'autre côté, dans un rapport approprié. Dans le réacteur au contraire, le combustible nucléaire est mis en place au préalable et le neutron, agent de la réaction et donc analogue à l'oxygène, est produit par la réaction elle-même. La production de neutrons est assurée par un mécanisme de « réaction en chaîne », et, en régime permanent, le nombre de neutrons produits est égal à celui des neutrons qui disparaissent.

La chaleur dégagée dans le cœur est extraite de celui-ci par un fluide dit réfrigérant ou caloporteur (qui transporte la chaleur). Ce fluide chaud peut être utilisé directement ou envoyé sur un transformateur qui va mettre cette énergie thermique sous une forme plus adaptée à l'utilisation que l'on veut en faire.

On a déjà vu que la vapeur d'eau (surchauffée ou non) était un fluide que les thermiciens savaient bien utiliser. Pour cette raison, les réacteurs sont très souvent associés à des générateurs de vapeur, qui, pour poursuivre l'analogie avec les chaudières classiques, se présentent comme des chaudières de récupération à foyer extérieur (réacteur).

Pour produire de l'énergie thermique bon marché, on est amené à construire des réacteurs de plus en plus puissants. Ces grosses quantités de chaleur sont difficilement utilisables directement, car dans l'état actuel de nos connaissances, l'énergie thermique se transporte mal sous forme de chaleur. On est donc amené à convertir cette chaleur en électricité pour pouvoir la distribuer sur les réseaux électriques existants.

L'énergie nucléaire « civile » passe donc aujourd'hui par la voie de l'électricité. Cette astreinte peut limiter le développement de cette forme d'énergie si on ne trouve

▼ Figure 23 : schéma général d'une centrale électrogène : dans le cas d'une centrale classique comme dans le cas d'une centrale nucléaire, le générateur de vapeur joue le même rôle.

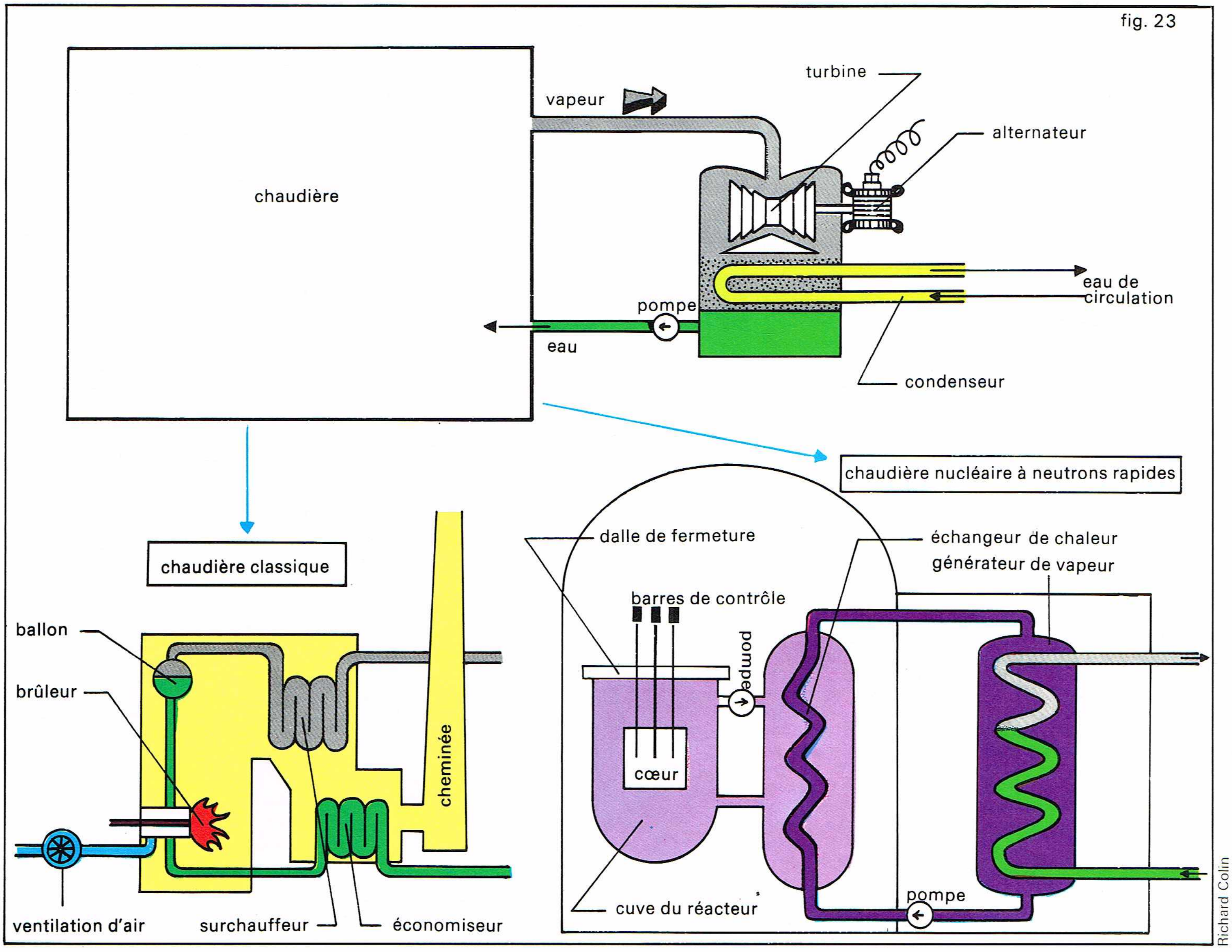

pas de nombreux débouchés à la chaleur nucléaire. Des recherches sont en cours dans les directions suivantes : utilisation pour le chauffage à basse température, application haute température dans les secteurs suivants : pétrochimie, dessalement, fabrication de combustibles synthétiques, et en particulier de l'hydrogène.

Compte tenu de cette conversion quasi systématique de l'énergie nucléaire en énergie électrique (avec une étape intermédiaire thermique), le lecteur pourra s'étonner que l'on n'ait pas présenté directement les centrales nucléaires électrogènes. L'examen séparé des chaudières nucléaires se justifie pour les raisons suivantes. Les chaudières nucléaires sont étudiées, construites et vendues en tant que telles; elles ont donc une réalité technique et commerciale. Cette réalité ne pourra que s'élargir avec les applications attendues de la chaleur nucléaire.

Anatomie d'un réacteur nucléaire

Le combustible nucléaire, disposé dans des assemblages, constitue le *cœur* du réacteur où il est mélangé avec un matériau dense (solide ou liquide), appelé modérateur, qui a la propriété de ralentir les neutrons et de permettre ainsi la fission.

On a vu en physique nucléaire que la fission pouvait aussi être entretenue avec des neutrons de haute énergie (ou neutrons rapides) tels qu'ils sont libérés après la fission d'un noyau. Dans ce cas, il ne faut pas les ralentir et le réacteur n'a pas besoin de modérateur.

On sait que les réacteurs fonctionnant avec des neutrons lents ou thermiques (car leur énergie correspond à celle de l'agitation thermique du milieu) sont appelés *réacteurs thermiques*, alors que les réacteurs utilisant les neutrons rapides sont appelés naturellement *réacteurs rapides*.

Ainsi, constitué de combustible et le cas échéant d'un modérateur, le cœur d'un réacteur est, pour reprendre l'expression des neutroniciens, un milieu multiplicateur où la réaction en chaîne va pouvoir prendre place. Pour extraire la chaleur dégagée, il faut irriguer le cœur par un fluide réfrigérant.

Un réacteur se présente donc schématiquement comme la réunion, au sein d'une même capacité qui peut prendre des formes très variées suivant le type de réacteurs (cuve, caisson, piscine, etc.), de trois éléments constitutifs fondamentaux : combustible, modérateur (sauf pour les réacteurs rapides) et réfrigérant.

Nous allons examiner à présent les divers matériaux qui peuvent être utilisés pour ces différentes fonctions.

Combustibles

Les combustibles nucléaires sont à base de matière fissile (c'est-à-dire susceptible de subir la fission) : l'uranium ^{235}U et le plutonium (*tableau* IV).

Seul l'uranium ^{235}U existe dans la nature, mélangé à l'uranium ^{238}U dans la proportion très faible de 0,7 %. On peut utiliser l'uranium soit sous la forme d'uranium naturel, soit sous la forme d'uranium enrichi. Dans ce cas, la proportion ^{235}U est plus élevée.

Le plutonium est un élément artificiel qui est fabriqué dans les réacteurs à partir de l'uranium ^{238}U. A noter qu'il est possible de fabriquer un autre élément fissile, isotope de l'uranium ^{233}U, à partir de l'élément thorium ^{232}Th. Cette possibilité n'a pas encore été exploitée industriellement sur une grande échelle.

Ces matériaux, uranium enrichi ou non et plutonium, peuvent être utilisés sous trois formes physico-chimiques différentes : métal, oxyde ou carbure.

Le combustible est enfermé dans des gaines étanches, de formes variables suivant le type de réacteur, qui retiennent les produits de fission et qui le protègent de toute agression externe, en particulier de la corrosion.

En conclusion, un combustible est défini par sa composition et son gainage, sa géométrie et ses caractéristiques fonctionnelles ou *performances*. Les plus classiques sont la *puissance spécifique* qui est la puissance thermique dégagée par 1 kg de combustible (unité : MW/kg) et le *taux de combustion* qui est l'énergie produite en mégawatts-jours (unité : MWj, puissance de 1 MW délivrée pendant 1 jour) par tonne de combustible. Afin de fixer les idées, remarquons que la fission complète de 1 g de matière fissile qui dégage une énergie de $2{,}3 \cdot 10^4$ kWh représente environ l'énergie correspondant à 1 MWj ($24 \cdot 10^3$ kWh).

Modérateurs

Les modérateurs doivent contenir obligatoirement des atomes légers, c'est-à-dire d'une taille aussi proche que possible de celle des neutrons, pour ralentir ces derniers en un nombre réduit de collisions. (L'échange d'énergie est d'autant meilleur en effet que les corps entrant en collision sont de masses voisines.) Il faut de plus que le modérateur ne soit pas un absorbant de neutrons. Il faut enfin que ce modérateur soit peu coûteux, commode à utiliser, stable et peu agressif chimiquement (*tab.* V).

Les gaz étant exclus, parce qu'ils sont trop peu denses, il ne reste que trois modérateurs vraiment utilisables dans des applications industrielles.

— *L'eau ordinaire* (H_2O) ou eau légère, par opposition à l'eau lourde, qui utilise l'hydrogène comme ralentisseur. Très bon marché, elle est malheureusement trop absorbante de neutrons pour permettre l'emploi de l'uranium naturel, mais, étant un bon fluide réfrigérant, elle peut être utilisée simultanément dans les fonctions de modérateur et de réfrigérant.

— *L'eau lourde* (D_2O) qui utilise comme ralentisseur l'hydrogène lourd ou deutérium. C'est du point de vue neutronique le meilleur modérateur. Handicap : son prix très élevé.

— *Le graphite*. Ce n'est pas un bon modérateur en raison du poids atomique du carbone qui est élevé (12, pour 1 à l'hydrogène et 2 au deutérium), mais c'est un bon matériau de construction, abondant et bon marché.

▼ En haut, tableau IV : caractéristiques des combustibles utilisés dans les réacteurs nucléaires et comparaison avec l'or et le fer. En bas, tableau V : caractéristiques des modérateurs employés pour ralentir les neutrons dans les centrales nucléaires.

Tableau IV
Caractéristiques des combustibles

Caractéristiques	Éléments fissiles			Éléments de comparaison	
	Uranium	Thorium	Plutonium	Or	Fer
Densité des différentes phases cristallines	α 19,04 β 18,11 γ 18,06	α 11,7 β 11,0	α 19,7 β 17,65 γ 17,2	19,3	7,86
Point de fusion (en °C)	1 132	1 750	640	1 063	1 535
Conductibilité thermique à 100 °C (en cal/cm/s · °C)	0,071	0,100	< 0,05	0,705	0,13

Tableau V Caractéristiques des modérateurs

Caractéristiques	Éléments modérateurs			Éléments de comparaison		
	Eau légère H_2O	Eau lourde D_2O	Graphite C	Hydrogène H	Deutérium D	Aluminium Al
Masse atomique ou moléculaire	18	20	12	1,008	2,02	27
Densité	1,0	1,10	1,6	0,009	0,018	2,7
Section efficace macroscopique de diffusion des neutrons σ_s (en barns/atome)	44,4	10,5	4,7	20,3	3,3	1,35
Paramètre de ralentissement ξ*	0,925	0,504	0,158	1,0	0,725	0,071
Section efficace macroscopique d'absorption thermique σ_a (en barns/atome ou molécule)	0,66	$36 \cdot 10^{-6}$	0,004 5	0,33	$2{,}5 \cdot 10^{-6}$	0,215
Pouvoir de modération $\frac{\sigma_s \cdot \xi}{\sigma_a}$	62	5 000	165	61	5 200	0,45

(*) ξ (sans unité) représente la perte moyenne logarithmique de l'énergie des neutrons par collision.

Tableau VI Caractéristiques des réfrigérants				
Caractéristiques	Gaz carbonique CO_2	Eau légère H_2O	Eau lourde D_2O	Sodium Na
Masse atomique	44	18	20	23
Densité ou masse spécifique	1,97 g/l	1	1,10	0,97
Point de fusion (en °C)	—	0	3,82	97,8
Chaleur latente de fusion (en cal/g)	—	532		27,5
Température d'ébullition (en °C)	— 78,5	100	101,4	892
Chaleur latente de vaporisation (en cal/g)	—	536	495	1 005
Capacité calorifique à 100 °C (en cal/g · °C)	0,2	1	~ 1	0,330 5
Conductivité thermique à 100 °C (en kcal/h · m °C)	0,02	0,58	0,55	72
(*) sublimation				

▲ *Tableau VI : caractéristiques des réfrigérants utilisés dans les centrales nucléaires.*

Réfrigérant

Les qualités demandées à ce fluide caloporteur sont les suivantes (*tableau* VI) :

— capacité et conductivité calorifiques élevées,

— stabilité chimique sous irradiation,

— pas de capture de neutrons et faible activation,

— pas d'agressivité chimique sur les gaines, le modérateur et les structures.

Les réfrigérants ayant fait l'objet d'applications industrielles sont essentiellement :

— *Gaz :* le gaz carbonique (CO_2) et l'hélium (He). Le premier est courant et bon marché, mais il devient corrosif à toute température. L'hélium est inerte et il jouit de bonnes qualités thermiques ; c'est malheureusement un gaz cher.

— *Eau lourde* et surtout *légère*. On a déjà vu que c'est un bon fluide caloporteur. Il faut malheureusement l'employer sous pression si l'on veut travailler à température élevée.

— *Matériaux liquides :* thermiquement, ce sont les meilleurs caloporteurs. Le sodium, aujourd'hui largement utilisé, semble promis à un bel avenir en dépit de sa réaction chimique avec l'eau.

Filières

Toute combinaison d'un modérateur et d'un caloporteur, et elles sont nombreuses, peut donner naissance à un type de réacteur qui sera en principe capable de brûler les différentes matières fissiles existantes. Ces combinaisons sont appelées filières, car chacune d'entre elles est susceptible d'engendrer toute une lignée de réacteurs, de principe de base identique, mais distincts par la puissance et la réalisation technologique (*tab.* VII).

A la naissance des premiers réacteurs, il y a plus de trente ans, on s'imaginait que le développement de l'énergie nucléaire se ferait au moyen de nombreuses filières. La réalité a été très différente. La mise au point d'une filière s'est révélée être une opération de grande envergure aussi bien dans les moyens techniques à mettre en place que dans les investissements industriels à consentir.

Aujourd'hui une seule filière s'est vraiment imposée :

— la filière *eau légère :* la plus grande partie des réacteurs en service ou en commande dans le monde entier appartiennent à cette filière (environ 85 %).

Deux filières ont fait l'objet d'un développement notable :

— la filière *graphite-gaz* développée surtout en France et en Grande-Bretagne. La construction des réacteurs de ce type s'est arrêtée en 1970 ;

— la filière *eau lourde*. Différents prototypes ont été réalisés en France et en Grande-Bretagne en particulier mais c'est seulement au Canada que cette filière connaît un développement notable.

Si l'on quitte le passé pour se projeter vers l'avenir, deux filières seulement sont en cours de développement :

— la filière *neutrons rapides* à sodium qui fait l'objet de réalisations importantes dans la plupart des grands pays industriels ;

Tableau VII
Caractéristiques des différentes filières industrielles ou potentielles

	Filières	GGUN	AGR	PWR	BWR	Eau lourde	HTR	Rapides
Cœur	Combustible	tube métallique	grappe d'oxyde enrichi à 2,5 %	oxyde enrichi à 3 à 5 %	oxyde enrichi à 1,5 à 3 %	oxyde naturel ou peu enrichi	carbure de thorium et d'uranium à 90 %	oxyde de plutonium et d'uranium à 20 %
	Gainage	Mg Zr	acier inoxydable	acier inoxydable ou Zircalloy	acier inoxydable ou Zircalloy	Zircalloy	graphite	acier inoxydable
	Modérateur	graphite	graphite	eau légère	eau légère	eau lourde	graphite	sans
	Caloporteur	CO_2	CO_2	H_2O	H_2O	CO_2 ou D_2O	He	Na
Caractéristiques thermiques	Pression du caloporteur (en bars)	25	40	150	70	60 ou 80	50	< 10
	Température du caloporteur (en °C)	200-400	300-700	280-320	280-310	CO_2 260/500 D_2O 250/300	400-750	400-600
	Puissance spécifique (en MW/t)	3,6	10	34	20	20	70	100
	Puissance volumique (en MW/m³)	1	2	100	50	15	10	1 000
	Rendement (en %)	30	41	33	32	30	40	40
Performances du combustible	Irradiation-rejet (en MWj/t)	5 000	7 000	30 000	25 000	15 000	80 000	> 60 000
	Temps-séjour (en réacteur/année)	3	7	3	4	3	6	2

▶ *Tableau VII : caractéristiques des principales filières de centrales nucléaires industrielles ou potentielles.*

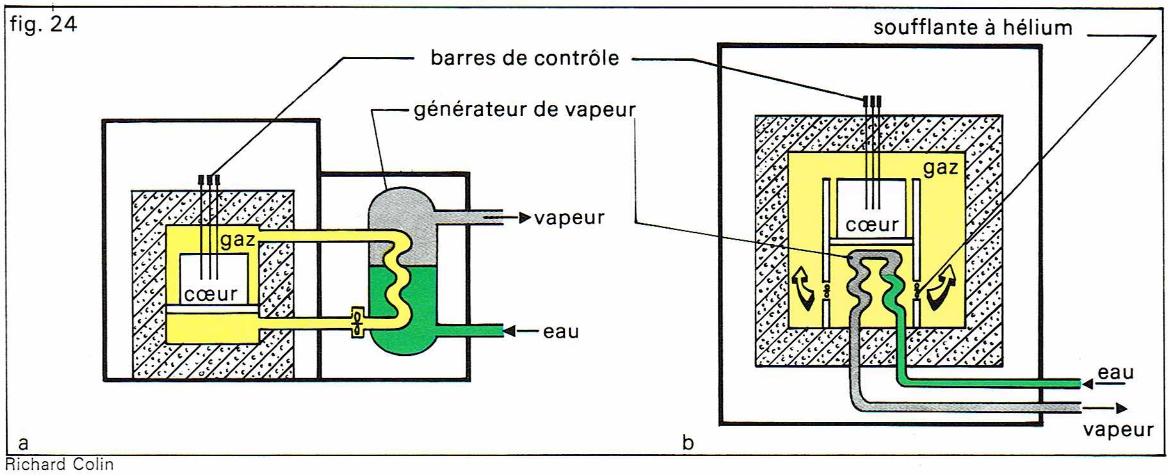

Richard Colin

◀ ***Figure 24 ; évolution des réacteurs à graphite-gaz :*** **a)** ***réacteur à circuit (Chinon par exemple) ;*** **b)** ***réacteur à échangeurs intégrés (Saint-Laurent - Bugey 1).***
▼ ***Ci-dessous, cartouche de combustible utilisé dans le réacteur nucléaire à graphite-gaz de Chinon ; la cartouche présente des ailettes favorisant les échanges thermiques par convection avec le gaz réfrigérant.***
En bas, machine de chargement pour le remplacement des cartouches de la centrale nucléaire à graphite-gaz de Saint-Laurent-des-Eaux.

— la filière *HTR (High Temperature Reactor)* ou *« haute température »* dont le but avoué est de promouvoir les applications de l'énergie nucléaire à haute température, aussi bien pour la production d'électricité par turbine à gaz (la vapeur d'eau serait abandonnée) que pour de nombreuses opérations dans les industries chimiques ou pétrochimiques.

Divers prototypes appartenant à cette filière ont été réalisés tant en Europe qu'aux États-Unis. On est obligé de constater cependant qu'aujourd'hui les divers programmes lancés marquent le pas.

Nous allons maintenant présenter différentes filières en insistant particulièrement sur les trois suivantes :

— « graphite-gaz », puisque cette filière a connu un développement important en France et a fait l'objet de plusieurs réalisations ;

— « eau légère », étant donné le succès que connaît actuellement cette filière dans le monde entier ;

— « neutrons rapides » au sodium, étant donné les espérances suscitées par ce type de réacteur et les efforts de développement français.

Chaudières « graphite-gaz » et dérivés

Le premier réacteur ayant fonctionné dans le monde (Chicago, 1943) appartenait à cette filière. Les États-Unis, ensuite, ont construit des réacteurs de ce type pour produire du plutonium destiné aux armements nucléaires (*fig.* 24).

C'est en France et en Angleterre que cette filière a été poussée industriellement pour la production d'électricité. Si l'on excepte les trois réacteurs de Marcoule (G1, G2 et G3) destinés à la production de plutonium « militaire », la France a construit entre 1960 et 1970 six réacteurs de ce type, totalisant une puissance nette de 2 300 MW. Durant cette même période, la Grande-Bretagne a mis en service un parc d'un type appelé *MAGNOX* représentant une puissance de 6 000 MW. Quelques unités supplémentaires ont été produites par ces deux pays à l'exportation.

Lors de la mise en service des centrales équipées par ces réacteurs, diverses difficultés ont conduit les Anglais à faire évoluer cette filière en utilisant de l'uranium enrichi à la place de l'uranium naturel qui était le combustible de cette filière. Le nouveau modèle a reçu le nom d'AGR *(Advanced Gas Cooled Reactor)*.

Les difficultés, dont les principales étaient la corrosion par le gaz carbonique et le coût plus élevé de ces réacteurs qui les pénalisait dans la vente à l'exportation, ont conduit ces deux pays à mettre un terme au développement de cette filière. On ne construit donc plus aujourd'hui de réacteurs de ce type dans le monde. Il faut noter cependant qu'en France, depuis 1972, la quasi-totalité de la production d'électricité nucléaire (7 à 10 % du total suivant les années) a été assurée par des réacteurs de ce type.

Description d'un réacteur « graphite-gaz »

Les trois éléments constitutifs du cœur sont :

— l'uranium naturel, comme combustible ;

— le graphite, comme modérateur ;

— le gaz carbonique sous pression, comme caloporteur.

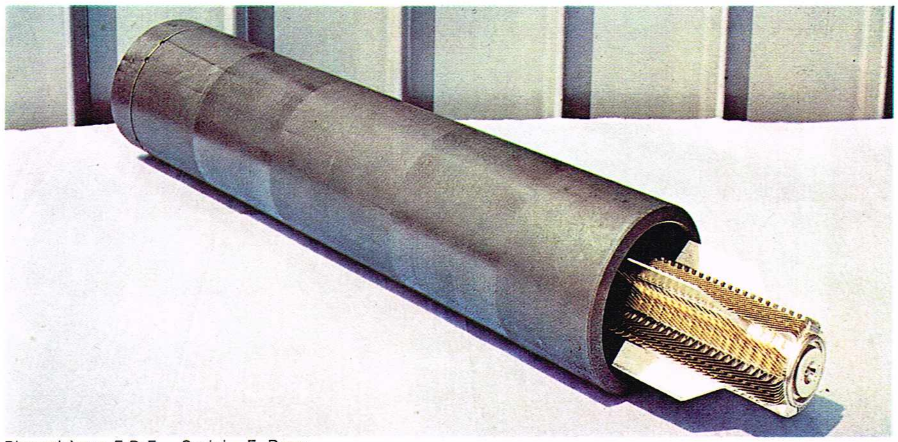
Photothèque E.D.F. - Sodel - F. Roux

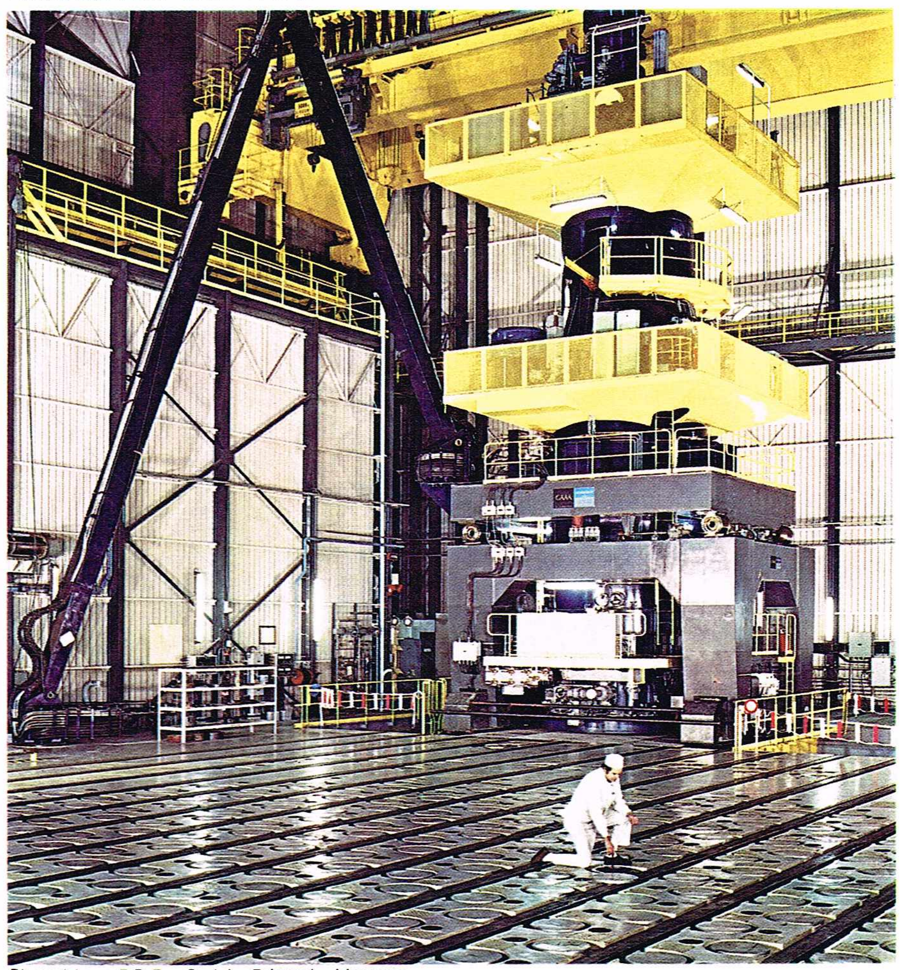
Photothèque E.D.F. - Sodel - Brigaud - Morceau

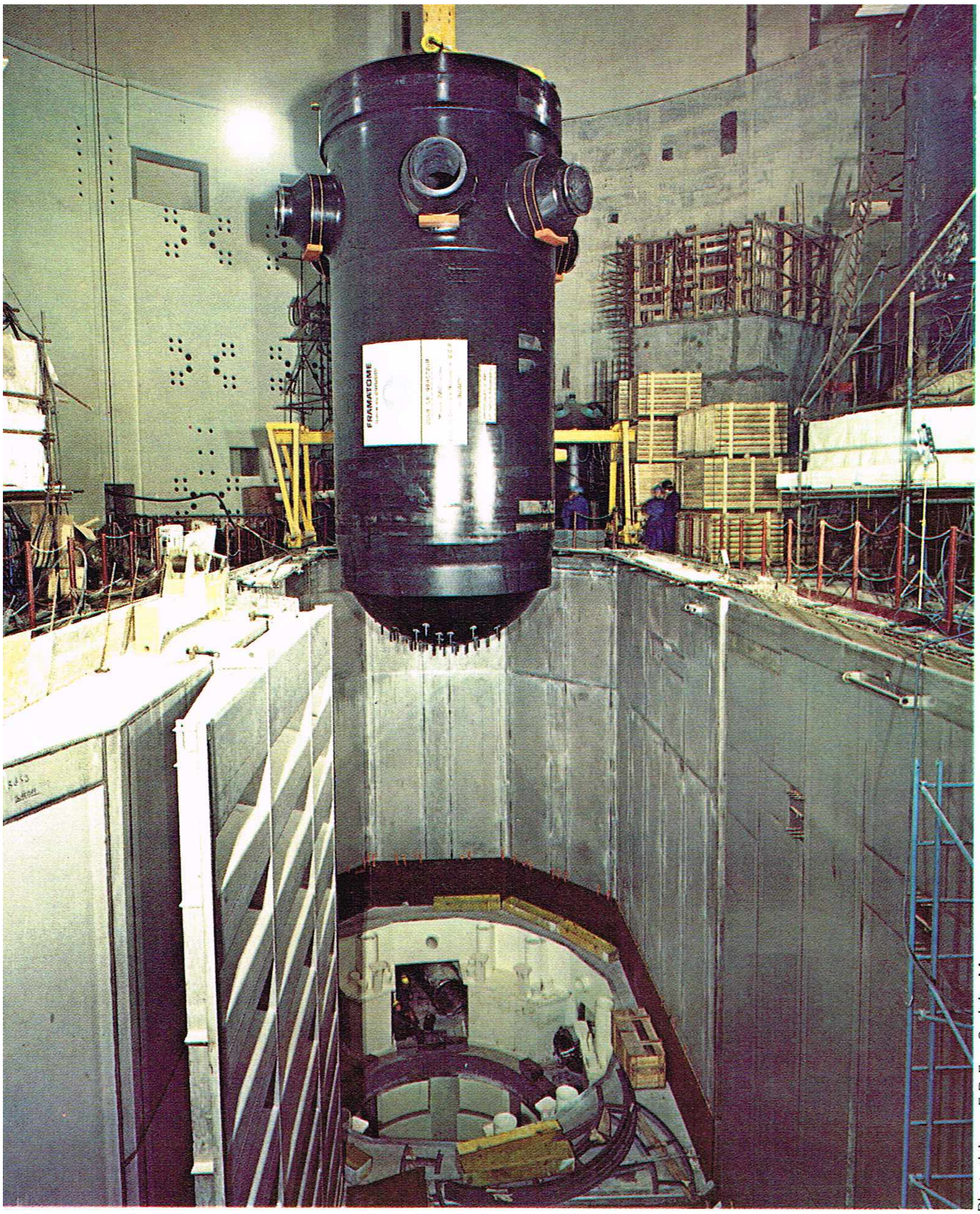

Photothèque E.D.F. - Sodel - Morceau

▲ *Mise en place de la cuve du réacteur PWR de Bugey 2. Cette cuve d'une masse de 260 tonnes a été réalisée entièrement en usine.*

▼ *Dans le cas des centrales à graphite-gaz, le caisson peut être soit métallique, comme celui de Bugey 1, soit en béton précontraint ; il est généralement fabriqué sur place.*

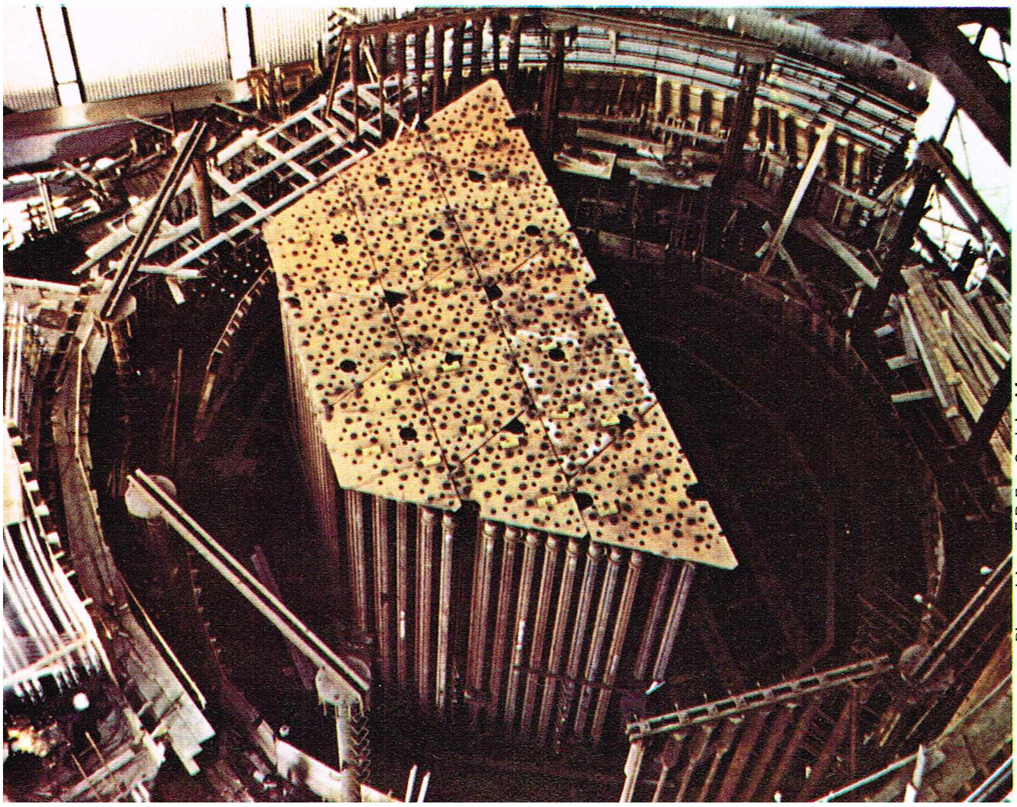

Photothèque E.D.F. - Sodel - Morceau

* *Combustible*

L'uranium naturel est utilisé sous forme métallique allié avec les divers matériaux pour améliorer ses caractéristiques mécaniques. L'emploi de l'uranium métal reste limité en température (600 °C maximum), car sous cette forme l'uranium est un matériau complexe du fait de ses changements de structure cristalline avec la température. La gaine de protection est réalisée en alliage de magnésium ou d'aluminium, matériaux peu absorbants de neutrons. Ces matériaux, par contre, tiennent mal en température.

Pour s'affranchir des problèmes liés à l'emploi de l'uranium métallique et de ces gainages, les Anglais, dans la filière AGR, ont utilisé l'uranium sous forme d'oxyde et des gaines en acier inoxydable, avec comme conséquence la nécessité d'enrichir l'uranium.

L'élément combustible se présente sous la forme de *cartouche* portant à l'extérieur de nombreuses ailettes pour favoriser les échanges thermiques par convection avec le gaz réfrigérant.

* *Modérateur*

C'est un empilement de blocs de graphite. C'est pour cette raison que les premiers réacteurs ont été baptisés « piles atomiques ». Cette appellation à la fois partielle et impropre (l'énergie de l'atome est soit chimique par ses électrons, soit nucléaire par son noyau) doit être évitée au profit de celle de réacteurs nucléaires.

Dans l'empilement sont ménagés des *canaux* horizontaux ou verticaux suivant les modèles de réacteurs, dans lesquels sont enfilées les cartouches du combustible.

* *Réfrigérant*

Le gaz carbonique (CO_2) est utilisé à une pression comprise entre 15 et 50 bars. Il circule dans les canaux, mis en mouvement par des soufflantes entraînées par une turbine. Sa température, de l'ordre de 250 °C à l'entrée du cœur, est de 400 °C environ à la sortie.

En cas de rupture d'une gaine, il faut craindre une réaction chimique entre l'uranium métallique et le CO_2. On surveille donc en permanence l'étanchéité du gainage par un système d'analyse de prélèvements de gaz à la sortie des canaux (système DRG : détection de rupture de gaine). En cas de défaut, le réacteur est arrêté sans délai.

* *Caisson*

Le cœur est contenu dans une enceinte difficile à réaliser, car elle doit être étanche, résistante à la pression, supporter la température interne (soit directement, soit par calorifugeage) et l'irradiation durant toute la vie du réacteur. Cette enceinte peut être soit métallique, soit en béton précontraint. Les derniers réacteurs construits ont reçu des caissons en béton précontraint, ce matériau étant plus facile à mettre en œuvre et ayant été jugé plus sûr.

* *Échangeurs de chaleur*

Le gaz carbonique chaud, à une température de l'ordre de 400 °C, est envoyé dans les générateurs de vapeur. Il n'a pas été envisagé d'utiliser directement le CO_2 dans une turbine en raison de la température trop faible du gaz. Pour des raisons de sécurité, le circuit d'extraction de chaleur du réacteur comporte plusieurs boucles de circulation de gaz indépendantes.

Les générateurs de vapeur sont disposés, soit à l'extérieur du caisson avec lequel ils sont raccordés par des tuyauteries de circulation du gaz, soit à l'intérieur du caisson. On dit dans cette dernière disposition que le réacteur est de type « intégré », c'est-à-dire que le gaz caloporteur sous pression ne sort pas du caisson. Par analogie avec la terminologie des chaudières classiques, on pourrait dire qu'il s'agit d'une chaudière à foyer intérieur. La solution « intégrée », plus satisfaisante pour la sûreté de l'installation, a été adoptée sur les derniers réacteurs français. Les générateurs de vapeur de ces réacteurs comportent plusieurs sections et on retrouve (voir illustrations) comme sur les générateurs de vapeur classiques un économiseur, un vaporisateur et un surchauffeur.

Aspects spécifiques des réacteurs « graphite-gaz »

Le choix du graphite comme modérateur est imposé par l'utilisation de l'uranium naturel. Pareillement, l'emploi de ce combustible oblige à travailler avec de l'uranium métallique, solution moins favorable que les formes « oxyde » ou « carbure ». L'avantage de cette

filière qui paraissait décisif au début de son développement est de pouvoir utiliser l'uranium naturel. Avec ces réacteurs, on évitait donc l'enrichissement de l'uranium dont la technologie est beaucoup plus difficile à mettre au point que celle de ces réacteurs.

Les réacteurs « graphite-gaz » constituaient une bonne solution pour les pays disposant d'uranium naturel et soucieux d'acquérir rapidement un certain degré d'indépendance énergétique ; c'était le cas en particulier de la France et de la Grande-Bretagne. On a vu que l'expérience n'a pas été concluante.

Les qualités plutôt médiocres du graphite comme modérateur nécessitent un empilement de grande dimension, ce qui ne va pas sans poser de difficiles problèmes de toutes sortes : supportage, tenue de l'empilement, dilatation, etc. Les dimensions finales de ce type de réacteur, même de puissance modeste, excluent par ailleurs des applications de propulsion.

La durée de vie du combustible aussi bien par usure métallurgique (déformation des cartouches) que par usure neutronique (disparition de l'^{235}U) doit être limitée à 3 ou 4 ans. La procédure de renouvellement du combustible adoptée sur ce type de réacteur, compte tenu du grand nombre de cartouches, est celle de la manutention en marche. Le remplacement du combustible est assuré par une machine particulière, appelée *machine de chargement*. Ces machines sont très complexes, étant donné les multiples tâches qu'elles ont mission d'accomplir dans le remplacement des cartouches. Leur fonctionnement est automatique, compte tenu du nombre élevé d'opérations répétitives (25 à 30 000 remplacements des cartouches d'un canal dans la vie du réacteur).

Chaudières à « eau légère »

Les réacteurs de ces chaudières utilisent l'eau ordinaire ou eau légère comme modérateur et caloporteur. Le combustible est de l'uranium enrichi, étant donné les caractéristiques d'absorption des neutrons par l'eau.

L'eau étant en revanche un bon ralentisseur des neutrons, ce qui permet, contrairement aux réacteurs graphite-gaz, une construction compacte, et de plus, étant facilement disponible sur toute la surface du globe, cette filière qui l'utilise était particulièrement adaptée à la propulsion navale. Ce type de réacteurs a donc bénéficié d'importants efforts de développement des programmes militaires, d'abord aux États-Unis, ensuite en U. R. S. S., en Grande-Bretagne et en France. Cette forte impulsion reçue au départ, ajoutée à une relative simplicité, explique peut-être leur succès considérable puisque les réacteurs à eau constituent à présent l'essentiel des programmes électronucléaires dans le monde entier.

Deux variantes sont concurremment utilisées dans cette filière. Elles se distinguent par la façon dont la chaleur du cœur est extraite par l'eau. La première variante est celle des réacteurs à *eau sous pression* ou PWR (Pressurized Water Reactor), la seconde celle des réacteurs à *eau bouillante* ou BWR (Boiling Water Reactor) [*fig.* 25].

- Dans les chaudières PWR, l'eau est maintenue dans le réacteur à une pression de 155 bars environ, ce qui permet d'atteindre sans ébullition des températures de 320 °C environ à la sortie du cœur. Cette eau chaude pressurisée est envoyée dans un générateur de vapeur où elle produit la vapeur. Refroidie, elle retourne ensuite vers le réacteur, accomplissant ainsi un circuit fermé. Ce circuit, qui comporte donc le réacteur, les générateurs de vapeur, les pompes de circulation et un pressuriseur pour maintenir l'eau liquide, constitue le *circuit primaire* de la chaudière par opposition au *circuit secondaire* de production et d'utilisation de la vapeur. Une chaudière PWR a donc son foyer (réacteur) distinct des générateurs de vapeur : elle est analogue à une chaudière à foyer indirect. Cette séparation prend une importance particulière dans le cas des chaudières nucléaires, car la radio-activité normale ou accidentelle reste ainsi confinée dans le circuit primaire. On exprime aussi cette idée en disant que ces réacteurs fonctionnent selon un *cycle indirect*.
- Dans la chaudière BWR, on utilise la vaporisation de l'eau, qui comme on le sait absorbe beaucoup de calories, pour extraire la chaleur du cœur. L'eau est donc portée à ébullition pendant sa traversée du cœur. La pression de fonctionnement est celle de la vapeur saturante aux environs de 280 °C, soit 70 bars. Cette vapeur est ensuite envoyée vers l'utilisation. Il n'y a donc pas de générateur de vapeur distinct dans ce type de chaudière. C'est le réacteur lui-même qui assure la production de vapeur. Les réacteurs BWR fonctionnent donc à *cycle direct*.

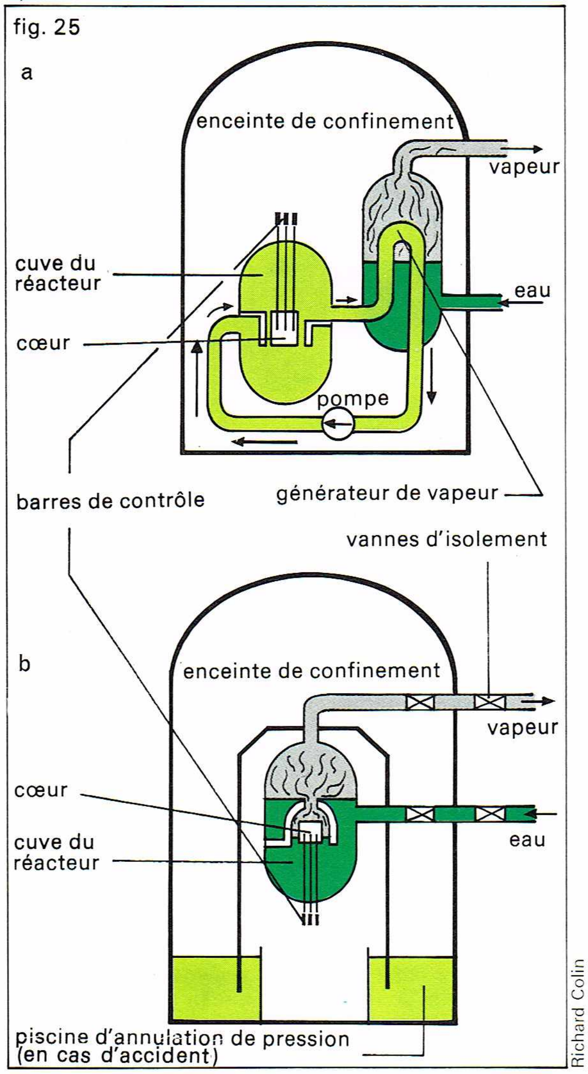

◀ ***Figure 25; les deux types de réacteurs à eau légère :***
a) chaudière à eau pressurisée ou PWR ;
b) chaudière à eau bouillante ou BWR.

Les deux « sous-filières » des réacteurs à eau légère, PWR et BWR, ont connu des succès différents. Actuellement, 70 % des centrales construites ou en construction appartiennent au type PWR, pour 30 % au type BWR. On sait que la France a retenu pour bénéficier de l'effet de série (standardisation, réduction des coûts) un seul type pour ses programmes de réacteurs à eau légère : le PWR.

Description d'une chaudière PWR

Le cœur d'un réacteur PWR utilise des assemblages combustibles à uranium enrichi et de l'eau légère comme modérateur et caloporteur. On a vu que ce type de cœur est très compact en comparaison de celui des réacteurs « gaz graphite ».

* *Combustible*

Il est sous la forme de pastilles d'oxyde d'uranium enrichi empilées dans des tubes de Zircalloy, alliage de zirconium, qui forment le gainage. Ces tubes, appelés aussi *crayons*, sont liés entre eux, par paquets pouvant en inclure jusqu'à 300 pour former des *assemblages* sur lesquels s'effectue la manutention. Ces assemblages ont déjà été décrits en détail (voir texte *Réacteurs nucléaires*, volume II de *Physique*).

Le renouvellement du combustible se fait réacteur à l'arrêt, au rythme d'un arrêt par an qui coïncide en général avec l'arrêt pour entretien annuel. On ne renouvelle chaque fois qu'une fraction du combustible, 1/4 ou 1/3

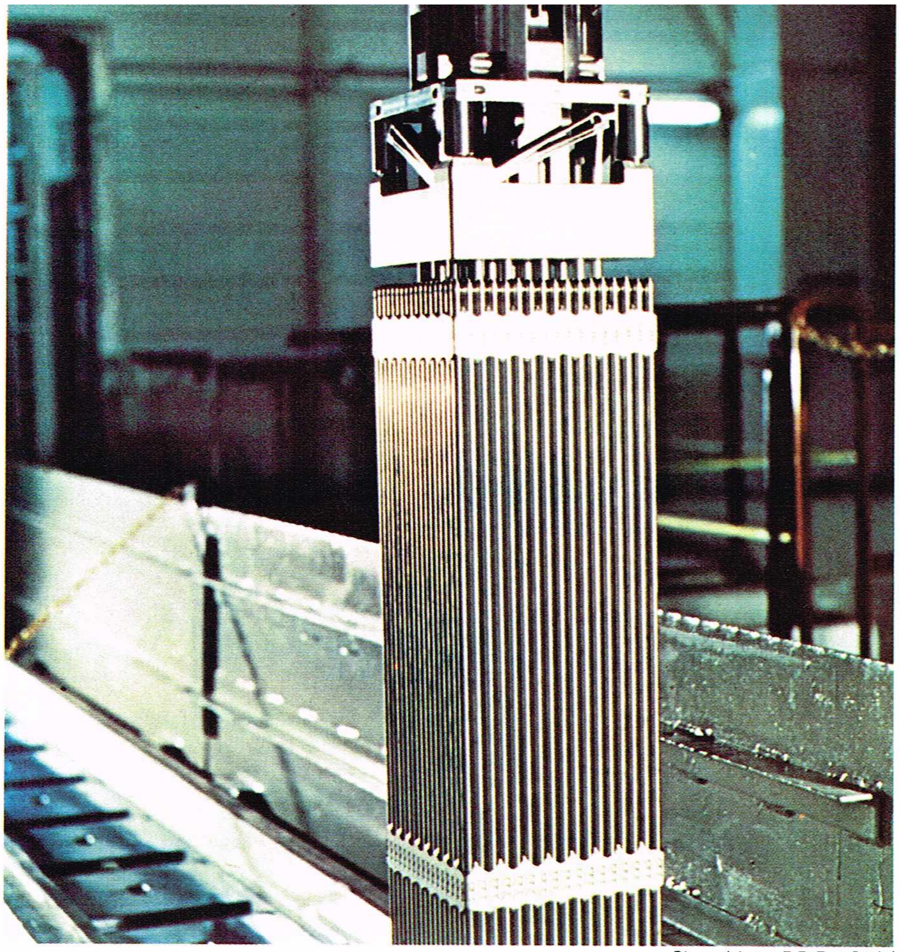

Photothèque E.D.F. - Sodel

▲ ***Télémanipulation d'un assemblage de crayons dans la centrale PWR de Fessenheim 1 (Haut-Rhin) [900 MW].***

du cœur. Un assemblage reste donc dans le réacteur pour une période de 3 à 4 ans. Son taux de combustion est de 30 000 MWj/t environ.

* *Cuve*

C'est la pièce maîtresse du réacteur. Dans une chaudière de 1 000 MW, la cuve a un diamètre de 4 m, une hauteur de 12 m et un poids de 350 t environ. Elle est calculée pour supporter la pression de 155 bars et la température de 300 °C du caloporteur. Elle doit résister également aux rayonnements gamma et aux neutrons issus du cœur. Elle comporte des tubulures qui permettent de la raccorder aux générateurs de vapeur. Chaque générateur a son propre circuit qui est appelé *boucle de refroidissement.* Dans la technologie actuelle, un échangeur peut absorber de 300 à 500 MW suivant les constructeurs. Les réacteurs ont toujours au moins deux boucles pour des raisons de sûreté.

C'est un ensemble mécano-soudé qui se compose d'une cuve proprement dite et d'un couvercle qui se fixe sur la cuve par une série de goujons. Le matériau constitutif est l'acier au carbone, avec, sur la face intérieure, en contact avec le fluide caloporteur, une couche d'acier inoxydable résistant à la corrosion. Cette précaution est nécessaire pour éviter que les produits de la corrosion, qui ne manquerait pas de se produire avec l'acier au carbone, ne viennent se faire activer dans le cœur et ne contaminent tout le circuit.

La réalisation des cuves PWR a posé de difficiles problèmes de fabrication, parmi lesquels on peut citer : soudure de tôles de forte épaisseur (250 mm), dépôt d'acier inoxydable sur l'acier au carbone, traitements thermiques, etc.

Ces cuves étant encore transportables, elles sont entièrement fabriquées en usine. Les ateliers de construction doivent posséder d'énormes presses pour le forgeage et l'emboutissage des éléments, des fours de grande taille pour les traitements thermiques, des moyens spéciaux d'usinage et enfin des appareils de contrôle pour vérifier le haut degré de qualité requis. On conçoit qu'il n'existe qu'un nombre restreint d'entreprises dans le monde susceptibles de mener à bien ces fabrications.

* *Générateurs de vapeur*

Bien que simple dans son principe, le générateur de vapeur d'un PWR pose également des problèmes difficiles de fabrication. Cet appareil pèse 300 t environ et a une hauteur de 20 m pour 4 m de diamètre. C'est essentiellement un faisceau vaporisateur qui est constitué de plusieurs milliers de tubes d'Inconel (alliage à forte teneur de nickel). Il existe plusieurs modèles suivant les constructeurs. Le modèle le plus courant est celui où les tubes sont disposés en U renversé. On trouve dans ce cas au-dessus du faisceau les appareils traditionnels d'épuration de la vapeur : séparateurs et sécheurs. La vapeur délivrée est dans ce cas saturée. Un autre modèle est réalisé par des tubes droits avec un passage unique *(once through) ;* dans ce modèle, la vapeur peut être séchée par une légère surchauffe.

* *Auxiliaires du réacteur PWR*

Pour assurer la circulation du fluide primaire entre la cuve et les échangeurs, chaque boucle de refroidissement comporte une pompe dont le débit unitaire est de l'ordre de 20 000 m^3/h. Le moteur d'entraînement doit avoir une puissance de 6 000 kW; il est muni d'un volant d'inertie qui évite à la pompe de s'arrêter brutalement en cas de perte d'alimentation électrique.

Le pressuriseur est une capacité munie de chaufferettes électriques. La quantité d'eau contenue dans cette capacité qui est en communication avec le circuit primaire peut être maintenue par ébullition en équilibre thermique avec sa vapeur à la valeur de pression de pressurisation désirée (155 bars).

Plusieurs circuits auxiliaires sont associés au circuit primaire. Les plus importants sont ceux qui ont un rôle de sûreté ; ils assurent en toute circonstance, et en particulier à la suite des accidents les plus divers susceptibles de se produire, l'arrêt de la réaction en chaîne et une réfrigération convenable du cœur.

Description d'une chaudière BWR

Comme dans les chaudières PWR, le cœur d'un réacteur BWR utilise l'uranium enrichi comme combustible et l'eau légère comme modérateur et caloporteur.

* *Combustible*

Il se présente en assemblages de crayons comme dans le PWR. Ceux-ci ont toutefois un diamètre plus élevé (⌀ 14 au lieu de ⌀ 10) et sont plus espacés pour permettre le passage de l'émulsion eau-vapeur.

La puissance spécifique est de l'ordre de 30 % moins élevée sur le BWR que sur le PWR. Ces réacteurs sont donc plus gros à puissance égale.

Les principes de manutention sont identiques à ceux des réacteurs PWR. Le taux de combustion du combustible est légèrement inférieur : 25 000 MWj/t environ.

* *Cuve*

C'est dans la cuve que se produisent simultanément la réaction nucléaire qui dégage de la chaleur et la production de vapeur. Il n'y a donc pas besoin de générateurs de vapeur. L'économie ainsi réalisée conduit à une cuve encore plus imposante que celle des PWR. Il faut en effet loger dans cette cuve les séparateurs et les sécheurs de vapeur. Dans une chaudière de 1 000 MW, ces dimensions atteignent 15 m de haut et 5,5 m de diamètre. La pression de fonctionnement étant seulement de 70 bars, les parois sont plus minces et l'ensemble ne pèse que 550 t.

Ces dimensions rendent très difficile le transport de la cuve en une seule pièce. Elle est donc fabriquée en usine en plusieurs parties qui sont, après transport, assemblées sur le site. Les problèmes de fabrication sont de même nature que ceux des cuves de PWR.

* *Auxiliaires du réacteur BWR*

Dans les différents modèles proposés par les constructeurs, on trouve des pompes de circulation dont le rôle est, comme dans les chaudières classiques, de favoriser la circulation de l'émulsion qui serait insuffisante avec la simple convection naturelle. Ces pompes peuvent être montées directement sur la cuve, le rouet étant à l'intérieur, le moteur à l'extérieur. Ce dernier est dans ce cas de type étanche. Les pompes peuvent être aussi complètement extérieures et raccordées à la cuve par des boucles. Elles sont associées dans ce cas à des éjecteurs qui fonctionnent comme des amplificateurs de débit.

Les réacteurs BWR sont également munis de circuits de sécurité de principe assez semblable à ceux des PWR.

Les réacteurs BWR comptent enfin des installations de stockage et de traitement des effluents radio-actifs sensiblement plus importantes que celles des PWR. C'est une conséquence du « cycle direct ». Dans les PWR, la radio-activité reste confinée dans le circuit primaire, alors que, dans les BWR, une partie est entraînée avec la vapeur, et on la retrouve dans les circuits d'utilisation.

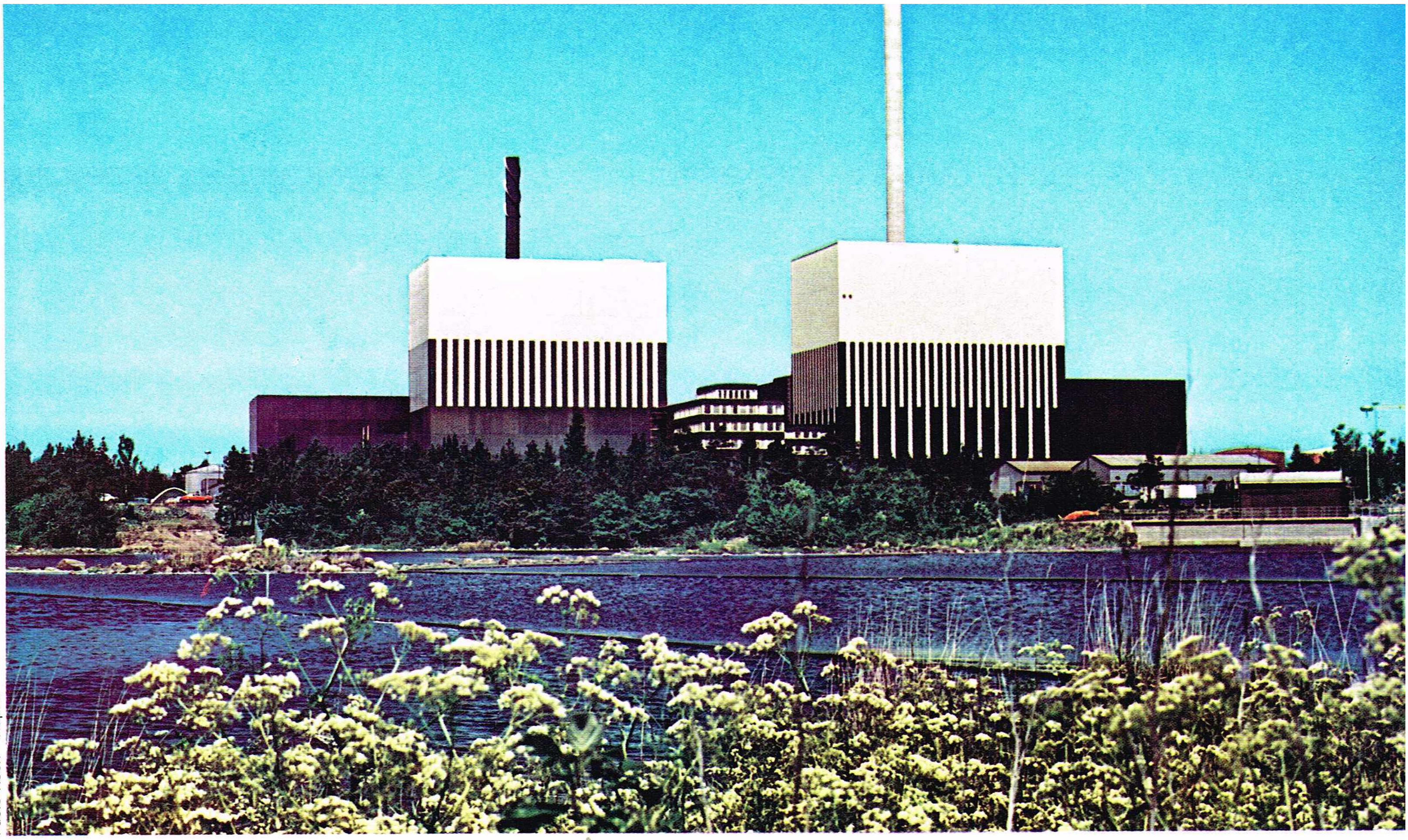

Paolo Koch - Rapho

▲ *Vue extérieure de la centrale nucléaire d'Oskarshamm en Suède ; cette centrale comprend deux tranches de type BWR : la première, mise en service en 1972, développe une puissance de 440 MW ; la deuxième, mise en service en 1974, a une puissance de 580 MW.*

Comparaison des réacteurs PWR et BWR

De prime abord, on peut penser que le réacteur BWR, par la simplicité du cycle direct, conduit à une installation plus ramassée, donc moins coûteuse. Il n'en est rien, car l'introduction de circuits complémentaires, en particulier ceux destinés au stockage et au traitement des effluents radio-actifs, compense les avantages du cycle direct.

Sur le plan commercial, les deux « sous-filières » des chaudières à eau légère étaient donc concurrentielles et, jusqu'en 1970, les commandes dans le monde entier étaient à peu près équilibrées. Depuis, les PWR ont pris nettement l'avantage, dans les chaudières à eau légère, avec environ 70 % des commandes. Pour la propulsion, qui est aujourd'hui, on le sait, essentiellement militaire, seuls les PWR sont utilisés.

Sur le plan technique, en plus des différences déjà signalées, les deux types de réacteurs diffèrent par d'autres aspects tels que : chimie de l'eau, contrôle du réacteur, protections biologiques, etc. Mais ce sont des différences de principe : la technologie d'ensemble reste la même. Cette technologie dérive en grande partie de celle des chaudières classiques, aussi bien dans le domaine de la conception que dans celui de la réalisation. De nombreux appareils tels que les pompes, les échangeurs, les robinets, les réservoirs, etc., sont très souvent identiques ou ne diffèrent que par des détails de réalisation. C'est probablement parce que leur technologie utilise celle des chaudières classiques et la prolonge que le développement des réacteurs à eau légère a connu un si grand succès.

Chaudières à « neutrons rapides » au sodium

Les réacteurs utilisés par ce type de chaudières sont originaux à plusieurs titres (*fig.* 26).

— Les neutrons ne sont pas ralentis et il n'y a donc pas de modérateur.

— La matière fissile utilisée est le plutonium, élément artificiel qui est un « déchet » des réacteurs thermiques.

— Ils peuvent fabriquer plus de matières fissiles qu'ils n'en consomment ; on les appelle pour cela « surrégénérateurs ».

— Le sodium est utilisé comme fluide caloporteur, ce qui introduit une technologie entièrement nouvelle.

De tous ces aspects, c'est sans conteste celui de la surrégénération qui retient le plus l'attention. A la fin de la dernière guerre, le physicien Fermi qui venait de faire diverger le premier réacteur construit au monde avait prophétisé que les pays qui maîtriseraient la surrégénération disposeraient d'une indépendance énergétique totale. Pour cette raison tous les grands pays industriels ont lancé très tôt des programmes de recherche et de développement. Ces programmes se présentaient comme un parcours jalonné d'étapes : petit réacteur de recherche de faible puissance, réacteur de démonstration de puissance industrielle (2 à 300 MW), réacteur commercial de forte puissance (1 000 à 1 200 MW) compétitif économiquement avec les autres filières.

Ces programmes ont connu des bonheurs différents. Résumons la situation en disant que la première épreuve a été réussie par tous les protagonistes. Seuls trois pays, l'U. R. S. S., la France et la Grande-Bretagne, ont réussi la seconde. Les résultats se font attendre encore en Allemagne, au Japon et aux États-Unis. Quant à la troisième, il est vite apparu qu'elle ne pouvait être valablement menée que dans le cadre d'une coopération internationale. Le projet Super-Phénix, dont la construc-

▼ *Figure 26 : schéma des circuits d'un réacteur à neutrons rapides au sodium.*

fig. 26

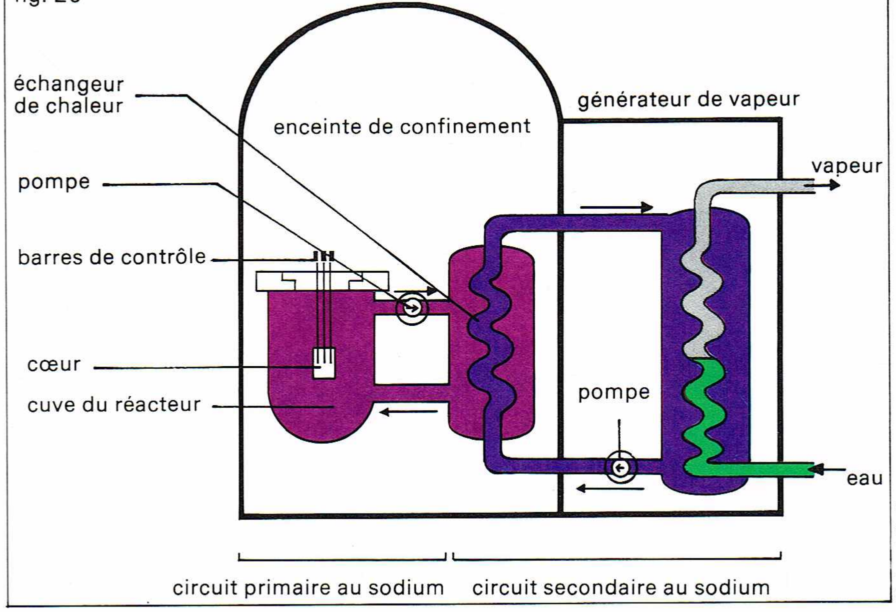

Richard Colin

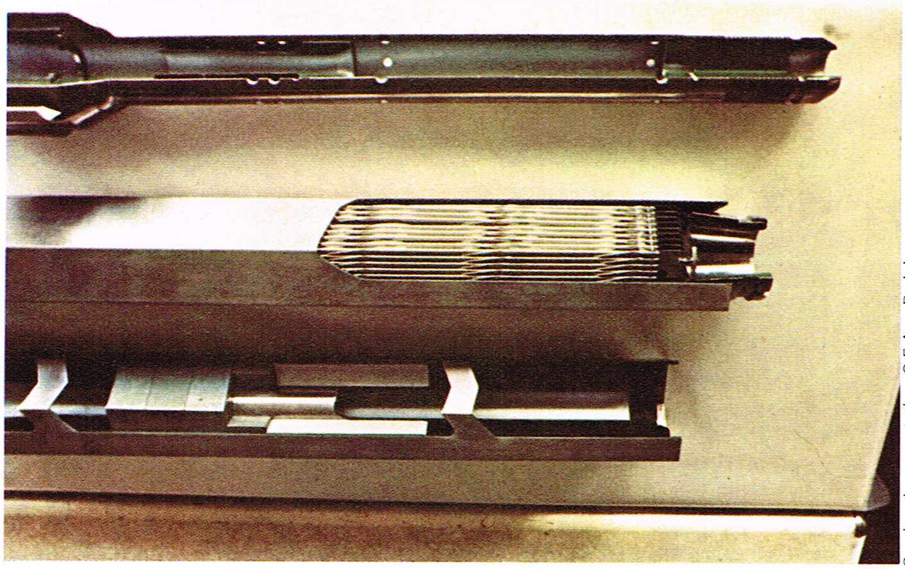

Service documentation C.E.A. - P. Jahan

Fertile
Qualificatif s'appliquant à un atome susceptible d'être transformé en atome fissile par réaction nucléaire (capture d'un neutron). Exemples : uranium 238 et thorium 232.

Fissile
Qualificatif s'appliquant à un atome susceptible de subir la fission nucléaire par des neutrons lents. Exemples : uranium 233, uranium 235 et plutonium 239.

Réacteur convertisseur
Réacteur qui produit à partir d'une substance « fertile » une substance « fissile » différente de la substance fissile consommée par le réacteur. Tous les réacteurs thermiques fonctionnant à l'uranium naturel ou enrichi sont des convertisseurs qui fabriquent la matière fissile « plutonium » en consommant la matière fissile « uranium 235 ».

Réacteur régénérateur
Réacteur qui produit à partir d'une substance « fertile » une substance « fissile » identique à celle qu'il consomme.

Réacteur surrégénérateur
Réacteur régénérateur qui produit plus de matière fissile qu'il n'en consomme.

▲ *A gauche, combustible de la chaudière à neutrons rapides de Phénix à Marcoule. A droite, quelques définitions utiles pour la compréhension des chaudières à neutrons rapides.*

tion vient de démarrer en France, en coopération avec l'Italie et l'Allemagne, et qui sera suivi de la construction d'un projet de même puissance en Allemagne, s'inscrit dans ce mouvement de coopération. On a déjà dit que la mise au point d'une nouvelle filière représentait un investissement humain et financier très important qui dépassait manifestement les possibilités d'un seul État.

Disons enfin qu'on peut imaginer différents types de réacteurs pour faire de la surrégénération. Différentes solutions ont été proposées, mais elles ont été écartées pour l'instant au seul profit du réacteur rapide à sodium qui monopolise la quasi-totalité des efforts de développement en ce domaine dans le monde entier.

Description d'une chaudière « neutrons rapides » à sodium

Le cœur d'un réacteur rapide utilise donc le plutonium comme matière fissile et le sodium comme caloporteur. Le sodium chaud, ou *sodium primaire*, puisqu'il traverse le cœur du réacteur, cède sa chaleur à un autre circuit qui utilise également le sodium comme caloporteur. Ce sodium, ou *sodium secondaire*, cède enfin sa chaleur pour la transformation d'eau en vapeur dans un générateur de vapeur. Le rôle de ce circuit secondaire sera explicité plus loin.

* *Combustible*

Comme pour les réacteurs à eau, le combustible est organisé en assemblages, composés de tubes remplis de pastilles d'oxyde qui sont appelées « aiguilles », car leur diamètre est petit (5 à 7 mm). Il y a donc beaucoup d'aiguilles dans un assemblage, ce qui permet de développer une grande surface de contact entre le combustible et le caloporteur, absolument nécessaire pour évacuer la puissance.

Le cœur comprend deux parties :

— au centre, le cœur proprement dit, où les pastilles sont fabriquées à partir d'un mélange de plutonium et d'uranium naturel ;

— autour du cœur central, une partie appelée *couverture* qui ne comprend que de l'uranium naturel.

L'uranium naturel, présent dans le cœur et la couverture, est dénommé matériau « fertile » (par opposition à fissile), puisque son uranium ^{238}U est appelé à se transformer en plutonium. On peut aussi utiliser comme matériau fertile l'uranium appauvri, tel qu'il est rejeté par les usines d'enrichissement.

Si l'on se rappelle que cet uranium ^{238}U, qui constitue 99,3 % de l'uranium naturel, est inutilisable dans les réacteurs thermiques, puisqu'il ne subit pas la fission, on comprend pourquoi les surrégénérateurs peuvent multiplier par un facteur supérieur à 50 l'énergie contenue dans l'uranium naturel.

On se posera la question de savoir combien de temps il faut à un réacteur surrégénérateur pour fabriquer une charge de plutonium identique à la sienne et donc susceptible de permettre le démarrage d'un réacteur de même puissance. Il faut compter entre douze et quinze ans, ce qui signifie que les réacteurs rapides ne peuvent pas fournir eux-mêmes les quantités de plutonium nécessaires à la mise en route d'un programme important de réacteurs rapides. On compte pour cela sur les convertisseurs que sont les réacteurs thermiques pour fabriquer le plutonium à partir de l'uranium ^{238}U. On peut aussi, et c'est ce qui a été fait pour démarrer certains réacteurs rapides, utiliser de l'uranium enrichi, mélangé ou non avec du plutonium.

Le combustible du cœur central est très enrichi de façon à permettre le fonctionnement en *neutrons rapides*. Comme il n'est pas nécessaire de faire de la place à un modérateur, le cœur est très compact (1,2 m³ à Phénix pour 250 MW) et sa puissance spécifique est très élevée (90 % de la puissance est dégagée dans le cœur et 10 % seulement dans la couverture). On voit tout le problème que pose ici l'extraction de la chaleur. L'emploi du sodium a constitué une réponse élégante : il ne ralentit pas les neutrons, il est abondant, facile à préparer, peu coûteux et doté, comme on l'a déjà signalé, de caractéristiques thermiques remarquables qui en font un excellent caloporteur. Il permet au réacteur rapide de produire, tout en restant à la pression atmosphérique, de la vapeur surchauffée à 560 °C tout comme les chaudières classiques. Le cœur d'un réacteur rapide contient donc de grosses quantités de plutonium : la charge de Super-Phénix serait composée de 32 t d'oxyde mixte uranium naturel-plutonium, enrichi à 15 % environ,

▼ *Maquette d'une centrale à neutrons rapides au sodium.*

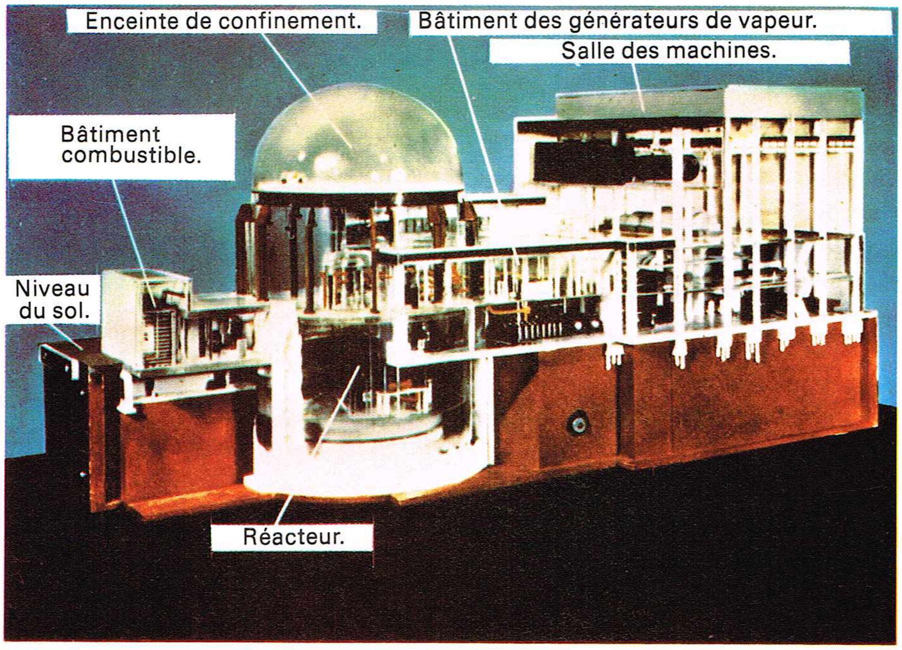

U.S.I.S.

ce qui représenterait 4 t de plutonium. De telles quantités de matériau fissile, et de plus toxique, posent inévitablement des problèmes de sûreté qui seront évoqués plus loin.

* *Caloporteur*

L'utilisation du sodium a nécessité la création d'une nouvelle technologie. En effet tous les appareils habituels tels que pompes, robinets, filtres, tuyauteries, réservoirs, etc., qui fonctionnent convenablement avec les fluides courants, sont totalement inadaptés quand on les utilise en sodium.

La conception même des circuits et des appareils a dû être entièrement revue. Des systèmes de préchauffage ont été prévus pour éviter le gel du sodium (solidification à 98°) en dehors des périodes de marche. Les capacités comportant des niveaux libres sont remplies de gaz neutre (argon) pour éviter l'oxydation du sodium au contact de l'oxygène de l'air. Des filtres qu'on appelle « pièges froids », car ils sont fondés sur la décroissance de la solubilité des oxydes dans le sodium avec la température, maintiennent ce dernier dans un état de propreté permanente.

Ainsi maîtrisé, le sodium, corps stable et non corrosif, est d'exploitation facile, de l'avis même de tous les exploitants de circuits de sodium.

* *Cuve*

Le circuit primaire peut être conçu de deux façons différentes : soit une cuve raccordée à des échangeurs (c'est la chaudière type « circuit »), soit une cuve renfermant les échangeurs (c'est le type « intégré »). Cette dernière conception, qui est celle en France de Phénix et de Super-Phénix, semble avoir actuellement la faveur des constructeurs.

Avec ses échangeurs et les pompes associées, la cuve a des dimensions imposantes : diamètre 21 m, hauteur 19,5 m pour Super-Phénix. Elle est réalisée en acier inoxydable et construite, étant donné ses dimensions, directement sur le site.

* *Circuit secondaire*

Les générateurs de vapeur utilisant le sodium comme fluide chauffant ne sont pas simples à réaliser, car ils mettent en contact un sodium sous pression avec le mélange eau-vapeur à très forte pression (200 bars). En cas de rupture du tube, il est nécessaire de limiter les conséquences de l'irruption brutale de la vapeur dans le sodium.

Ce risque d'accident a eu comme première conséquence la mise en place d'un circuit intermédiaire pour découpler les générateurs de vapeur du réacteur. Le rôle de ce circuit est donc simplement de prélever la chaleur du réacteur par des échangeurs dits « intermédiaires » pour la transmettre aux générateurs de vapeur. Ce circuit utilise le sodium également comme caloporteur, ce qui simplifie la conception de l'échangeur intermédiaire : sodium sans pression des deux côtés. Une fuite sur cet échangeur qui met en contact deux circuits de sodium n'aura donc que des conséquences limitées.

De plus, le risque de rupture de tube dans un générateur de vapeur a orienté la conception même de cet appareil. Des détecteurs (qui cherchent l'hydrogène de l'eau) constatent en permanence l'intégrité de la surface d'échange. En cas d'incident, l'échangeur est aussitôt isolé et les produits de la réaction sodium-eau sont évacués par des membranes d'éclatement vers un réservoir de stockage.

Les générateurs de vapeur sont généralement de type tubulaire, à passage unique. Ils comportent une section vaporisateur, une section surchauffeur et éventuellement une section resurchauffeur. Ils délivrent pour la production d'électricité une vapeur dont les conditions de pression et de température sont identiques à celles des chaudières classiques. On dispose donc du même rendement thermodynamique élevé 42 % (contre 32 % seulement pour les réacteurs à eau légère), et il est possible pour la production d'électricité d'utiliser le matériel standard éprouvé sur les installations classiques (turbo-alternateur de 250 MW à Phénix, deux turbo-alternateurs de 600 MW à Super-Phénix).

Développement et avenir des chaudières « rapides »

Tous les problèmes posés par l'accumulation de matières fissiles dans le cœur du réacteur et par la réfrigération par métal liquide situent cette filière à un niveau technologique différent de celui des autres réacteurs. Il n'y a plus, comme c'est le cas pour les composants (capacités sous pression et circuits) des réacteurs à eau, prolongation d'une technologie existante, mais rupture.

Cette situation est fréquente dans l'histoire technologique des machines : à une période donnée, un appareil de technologie souvent achevée se voit remplacé par un autre, de principe différent et mettant généralement en jeu une technologie nouvelle. Ainsi en est-il aujourd'hui des grandes chaudières classiques qui cèdent progressivement la place, sous l'effet implacable du renchérissement des combustibles fossiles, aux chaudières nucléaires à réacteurs thermiques. Ces nouvelles chaudières, qui se contentent de brûler une partie des 0,7 % d'uranium 235 contenu dans l'uranium naturel, seront-elles remplacées à leur tour par les chaudières à neutrons rapides? Les implications à la fois technologiques, industrielles, politiques et psychologiques de ce problème font qu'il n'est pas possible aujourd'hui d'apporter une réponse tranchée à cette question. Remarquons simplement que les chaudières « neutrons rapides à sodium » arriveraient à point dans la décennie 1980-1990 (stocks importants de plutonium, coût croissant de l'uranium). Elles n'ont pas bénéficié au départ, comme les chaudières à eau légère, de la priorité et des investissements habituellement

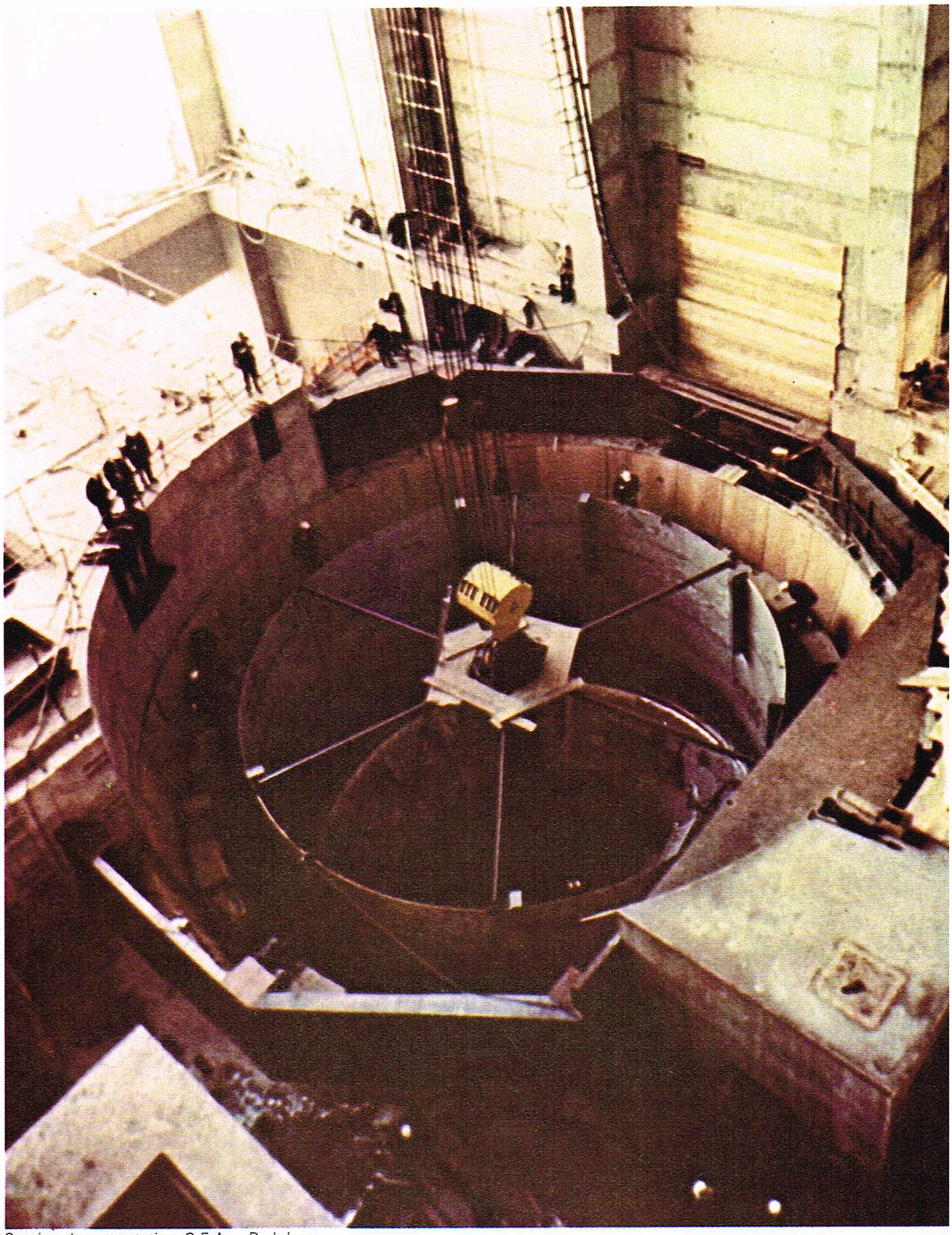

Service documentation C.E.A. - P. Jahan

▲ *Construction des différentes enceintes de la cuve du réacteur Phénix : dans ce type de chaudière, dit type intégré, la cuve renferme aussi les échangeurs de chaleur, ce qui lui donne des dimensions impressionnantes.*

Paolo Koch - Rapho

▲ *Vue extérieure de la centrale à eau lourde de Pickering (Canada). Actuellement le développement de ce type de filière se poursuit uniquement au Canada.*

réservés aux fabrications militaires. Il leur faut donc, étant soumises aux lois de la concurrence, démontrer qu'elles sont aussi sûres et aussi économiques que les autres types de chaudières. C'est dans cette perspective que se déroulent les programmes de développement en cours dans le monde.

Autres types de réacteurs

Pourquoi développer de nouveaux types de réacteurs alors que la filière à eau légère s'est déjà imposée techniquement, financièrement et industriellement, que cette filière paraît encore perfectible et qu'enfin on semble tenir avec les surrégénérateurs un type de réacteur capable de prendre la suite des réacteurs à eau légère en « brûlant » la plus grande partie de leurs déchets, à savoir le plutonium et l'uranium appauvri ?

Plusieurs objectifs justifient de nouveaux développements.

— La combustion *directe* de l'uranium naturel dans des conditions économiques satisfaisantes. Les réacteurs à eau légère font en effet appel à l'uranium enrichi dont la production dépasse les possibilités industrielles de nombreux pays ; ceux-ci deviennent donc, s'ils adoptent cette filière, dépendants des pays détenteurs des usines d'enrichissement.

— La recherche d'une meilleure utilisation des matières fertiles, en particulier le thorium.

— L'ouverture des applications de l'énergie nucléaire, actuellement limitées à la production d'électricité, à la fourniture de chaleur.

C'est dans ces perspectives que se placent les efforts actuellement déployés dans les filières « eau lourde » et « haute température » (HTR).

Chaudières à « eau lourde »

Les réacteurs de cette filière sont fondés sur l'emploi de l'eau lourde (D_2O) comme modérateur. On a vu que l'eau lourde est le meilleur des modérateurs ; elle permet l'emploi de l'uranium naturel sous sa forme « oxyde ». Celui-ci est brûlé presque complètement, et il n'y a donc pas besoin de retraitement si on ne cherche pas à récupérer le plutonium. On évite donc avec ces réacteurs, non seulement l'usine d'enrichissement, mais aussi l'usine de retraitement des combustibles (*fig.* 27).

La réfrigération peut se faire avec de l'eau lourde ou de l'eau légère, un liquide organique ou un gaz (CO_2 par exemple, comme dans le prototype français EL4).

Le développement de cette filière se poursuit uniquement au Canada : variante *CANDU* (Canada Deuterium Uranium). Le cœur est refroidi par de l'eau lourde sous pression, mais contrairement aux réacteurs PWR « eau légère », le *fluide modérateur* n'est pas mélangé avec le *fluide réfrigérant*, bien qu'ils soient tous les deux constitués par de l'eau lourde. Pour éviter les problèmes liés à la réalisation et à l'exploitation de grandes cuves en acier au carbone revêtu intérieurement d'acier inoxydable comme sur les PWR, le réfrigérant circule dans des tubes sous pression ou tubes de forces. Il y en a 390 de 10 cm de diamètre traversant une cuve de 8 m de long sur 7 m de diamètre. La simplicité gagnée par la suppression de la cuve se paye par toutes les étanchéités qu'il faut prévoir aux extrémités des tubes de forces.

Le programme canadien prévoit la réalisation de 8 000 MW ; 4 tranches de 540 MW sont déjà en service à Pickering.

Ces réacteurs permettent de « brûler » l'uranium naturel. Ils sont susceptibles de fonctionner avec un cycle utilisant le thorium. Les Canadiens sont très confiants dans l'avenir de leur filière.

Réacteurs « haute température » (HTR)

On ne peut plus parler ici de chaudière au sens habituel du mot, car ces réacteurs ont pour premier objectif d'atteindre des températures élevées dans la plage de 800 à 1 100 °C. A ces températures, il n'est plus question d'utiliser la vapeur d'eau comme agent de transmission de la chaleur et tous les projets en cours utilisent le gaz comme réfrigérant, en général l'hélium qui est inerte chimiquement à haute température (*fig.* 28).

Ces hautes températures devraient ouvrir à l'énergie nucléaire des débouchés intéressants dans les domaines suivants : sidérurgie, gazéification du charbon, électrolyse de l'eau, fabrication de combustibles de synthèse, etc. Ces réacteurs pourraient également être électrogènes par couplage en cycle direct avec une turbine à gaz.

Le cœur de ces réacteurs utilise le graphite comme modérateur. L'élément combustible se présente sous la forme de particules de diamètre 1 mm environ, constituées par un noyau de combustible fissile et fertile, enrobées de graphite. Ces particules sont dispersées dans des éléments de graphite en forme de boulets de 6 cm de diamètre ou de prismes hexagonaux.

Si l'élément prismatique est utilisé, le réacteur prend la forme d'un empilement, percé par les canaux de refroidissement. Dans le cas où le combustible se présente sous la forme de boulets, le réacteur ressemble à nos anciens poêles à charbon. La cuve est chargée de boulets par le haut ; le gaz de refroidissement circule dans les interstices et les boulets, après « combustion » nucléaire, sont déchargés à la partie inférieure. Il est intéressant de noter cette ressemblance entre le poêle à charbon et le réacteur à boulets.

fig. 27

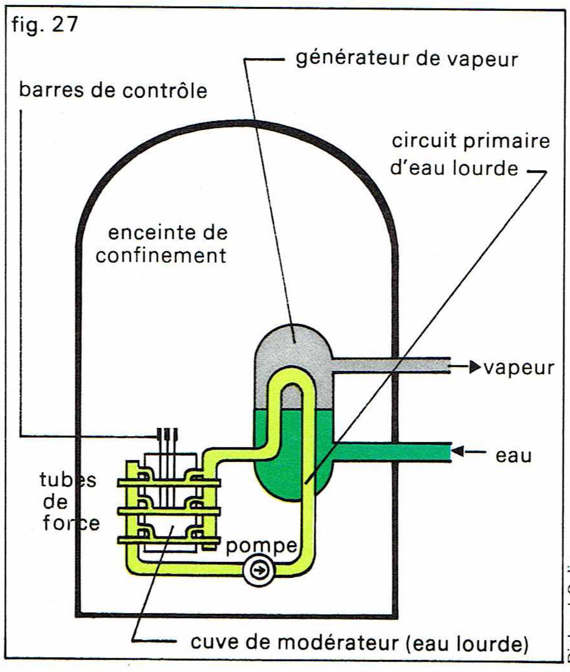

Richard Colin

▶ *Figure 27 : schéma d'un réacteur à eau lourde PWR (à tubes de force).*

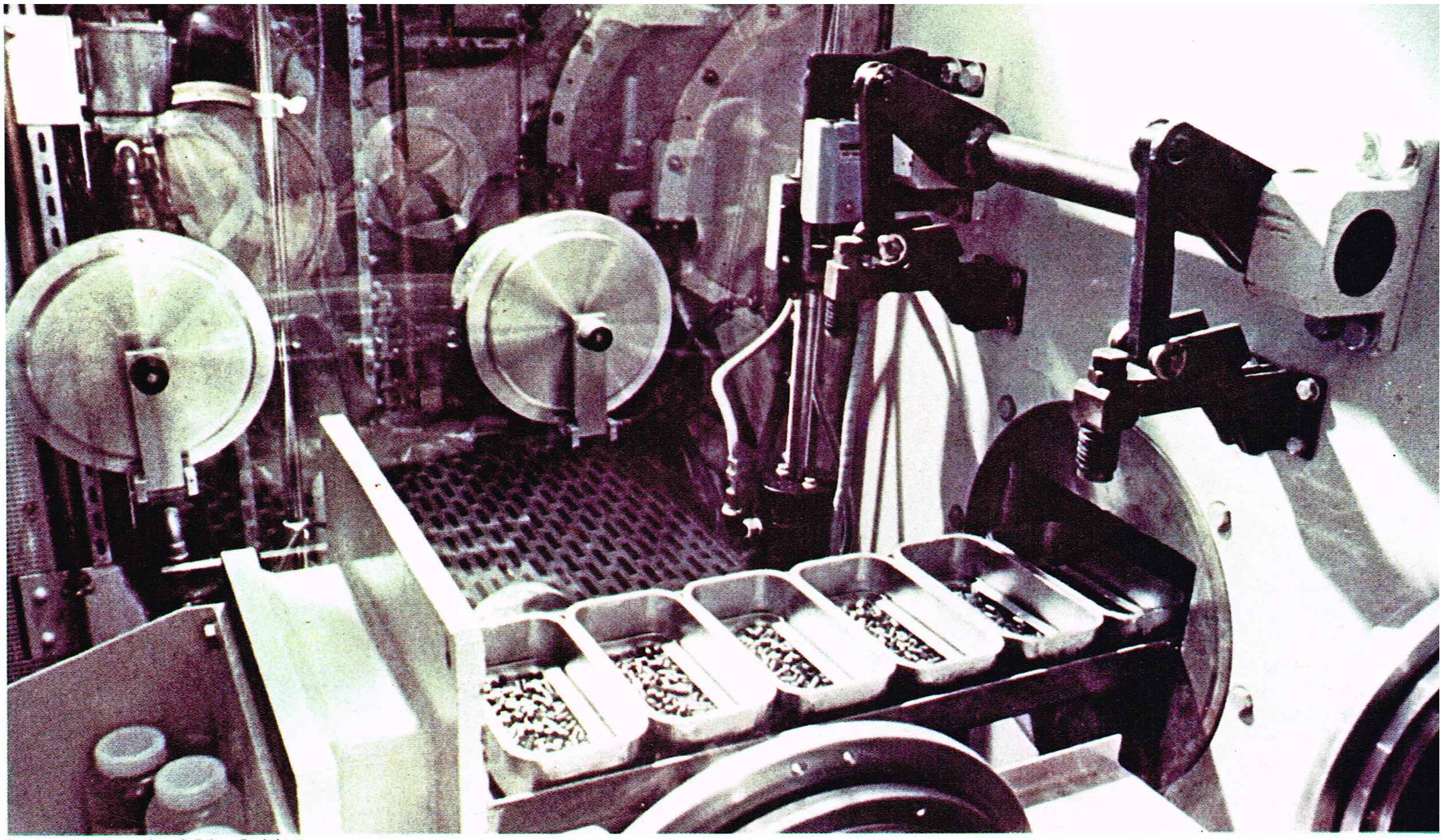

Service documentation C.E.A. - P. Jahan

▲ ***Détail de la fabrication des pastilles d'oxyde d'uranium pour la centrale Phénix; ces pastilles sont ensuite enfilées dans des tubes appelés aiguilles.***

Une autre caractéristique de cette filière est l'utilisation du cycle thorium, puisque tous les réacteurs construits ou envisagés ont un combustible comportant du thorium. Le fonctionnement des installations en service est satisfaisant, mais le retraitement des combustibles au thorium reste à mettre au point.

Fourniture de chaleur à basse température

De nombreuses études ont été menées pour utiliser les chaudières nucléaires actuelles pour la fourniture de chaleur à basse température pour des usages domestiques ou industriels. Le problème ainsi posé conduit donc à des installations mixtes de production d'électricité et de chaleur. La vapeur est prélevée à l'amont de la turbine, sur un étage de celle-ci ou à son échappement (turbine à contre-pression). La rentabilité d'une telle installation est difficile à obtenir, sauf si la production d'électricité et de chaleur peut être maintenue tout au long de l'année (usages industriels, pays très froids, etc.). Pour cette raison, le nombre des réalisations est resté jusqu'à ce jour limité. On pense aujourd'hui que ce besoin de chaleur à basse température, pour des applications comme le chauffage urbain par exemple, serait beaucoup mieux satisfait par des réacteurs conçus spécialement pour cet usage. Ces réacteurs pourraient par exemple être des réacteurs à eau légère de faible puissance, de type « piscine » comme les réacteurs de recherche. Ces réacteurs sous pression présentent peu de risques et il serait facile d'admettre leur construction à proximité des agglomérations, comme c'est le cas pour les réacteurs de recherche. Ces questions sont pour le moment à l'étude.

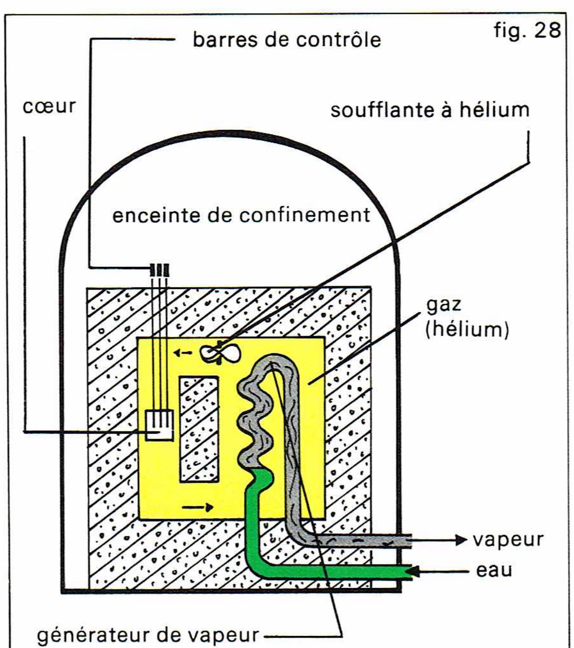

Richard Colin

◀ ***Figure 28 : schéma d'un réacteur à haute température.***

Problèmes spécifiques à l'énergie nucléaire

Toute combustion d'un combustible *fossile* produit de la chaleur et des déchets. La « combustion nucléaire » n'échappe pas à cette règle, et, tout au long de son fonctionnement, le cœur d'un réacteur, qui est le siège des réactions nucléaires, accumule des produits radio-actifs. A côté des produits de fission qui prennent naissance dans le combustible et qui constituent la plus grande partie des déchets, on trouve des produits « d'activation » dans tous les matériaux qui se trouvent en permanence ou circulent dans le cœur, à savoir : les structures, le modérateur et le réfrigérant. Tous ces produits ne sont pas des déchets. Les matières fissiles (^{235}U résiduel et plutonium) sont réutilisables; certains produits de fission sont recherchés pour des applications scientifiques, médicales ou industrielles. Mis à part ces cas particuliers, on ne sait que faire pour l'instant des corps radio-actifs produits au cours de la marche des réacteurs.

Le caractère « radio-actif » de ces résidus de la combustion nucléaire inspire de la crainte. Le rayonnement ne se voit pas, ne se sent pas (il en était de même avec l'électricité à ses débuts). Ses effets biologiques sont retardés et restent liés dans nos esprits aux effets des explosions nucléaires. On comprend donc facilement que tous les problèmes relatifs aux déchets radio-actifs soient à la fois très étudiés et très controversés. Il n'est pas du propos de cet ouvrage d'alimenter la controverse mais de présenter les principes et les réalisations actuellement retenus pour le confinement de la radio-activité engendrée par les réacteurs; d'abord dans les réacteurs eux-mêmes pendant leur fonctionnement, ensuite à l'extérieur après déchargement du combustible usé.

Confinement de la radio-activité des réacteurs

La sûreté d'un réacteur repose tout d'abord sur son comportement physique dans les conditions de marche

Photothèque E.D.F. - Sodel - Berenger

▲ *La sûreté d'un réacteur repose sur son comportement physique dans les conditions normales ou accidentelles qu'il est susceptible de rencontrer : ici, circuit d'aspersion sous le dôme du réacteur de Bugey 2.*

normales ou accidentelles qu'il est susceptible de rencontrer. C'est donc pendant toute sa conception que l'on s'efforce de donner à un type de réacteur toutes les qualités qui le rendront « intrinsèquement » sûr.

D'autre part, on entoure le combustible, où vont se localiser les produits de fission, d'enceintes successives, à la manière des « poupées russes », pour confiner la radio-activité : c'est *le principe des barrières multiples* (*fig.* 29).

- La première barrière est toujours constituée par le gainage du combustible.
- La seconde barrière comprend la cuve et le circuit primaire qui lui est éventuellement associé.
- La troisième barrière prend généralement la forme d'une enceinte étanche et résistante qui renferme le circuit primaire.
- Une quatrième barrière est quelquefois prévue sous la forme d'une deuxième enceinte, seulement étanche, qui entoure la première.

Suivant les filières, c'est-à-dire suivant les types de réacteurs, ces différentes barrières prennent des formes assez différentes mais respectent toujours ce principe des barrières successives entre les produits radio-actifs et l'environnement.

Ces barrières successives sont indépendantes. La rupture de l'une d'entre elles ne doit pas entrainer la défaillance des autres. Leur étanchéité est surveillée en fonctionnement de façon aussi continue que possible. En cas de doute, le réacteur est arrêté et mis en état de sécurité. La réalisation de ces différentes barrières est faite avec le plus grand soin et leur intégrité doit être démontrée par une organisation particulière (programmes d'assurance qualité).

Malgré tout le soin pour les construire, ces barrières ne sont pas totalement étanches (l'étanchéité absolue n'est pas concevable : certains gaz de fission traversent le métal du gainage sans qu'il y ait pour autant de défaut décelable dans ce dernier). Il est donc prévu des systèmes de récupération des fuites (appelées ensuite « effluents ») qui fonctionnent en permanence et envoient le produit de leur collecte vers une station de traitement. Les effluents radio-actifs y sont triés : les plus nocifs sont mis à part et conditionnés avant d'être envoyés vers un centre de stockage; les effluents qui ne présentent pas de danger sont rejetés s'ils sont gazeux à l'atmosphère par la cheminée de l'air de ventilation et s'ils sont liquides dans le rejet d'eau des condenseurs.

Ces rejets, qui s'effectuent selon des normes internationales, ne représentent pas de dangers objectifs pour l'environnement. Ils présentent cependant deux inconvénients : le premier est psychologique. Même faible, un rejet est toujours mal accueilli et on s'efforce donc actuellement de rendre les centrales parfaitement « propres ». De plus, la nécessité de diluer les effluents liquides rend la centrale tributaire d'un gros débit d'eau et on utilise habituellement celui qui a été prévu pour la réfrigération des condenseurs. La suppression de cette nécessité de diluer les effluents affranchirait les centrales de la réfrigération par eau et leur ouvrirait de nouvelles perspectives d'implantation dans des sites isolés, mais inutilisables aujourd'hui du fait de leur manque de capacité de réfrigération (zones désertiques par exemple) ; c'est pour cette raison que l'on fonde beaucoup d'espoir actuellement sur la technique de réfrigération sèche (directement à l'air).

Stockage des déchets radio-actifs

La radio-activité est un phénomène physique sur lequel les techniques n'ont pas de prise, et de ce fait, sauf réutilisation dans certains cas particuliers, les déchets radio-actifs ne peuvent être que stockés dans des conditions parfaites de sûreté.

Il existe de nombreuses variétés de déchets radio-actifs qui posent de façon différente le problème du stockage. Les caractéristiques à considérer sont :

— le volume;
— l'activité, qui s'exprime en curies (Ci) ;
— la période radio-active ou demi-vie, qui est le temps moyen nécessaire pour que l'activité diminue jusqu'à la moitié de sa valeur (cette période s'exprime en secondes, jours ou années suivant les corps radio-actifs considérés) ;
— la radio-activité, qui est liée aux rayonnements émis par un élément radio-actif fixé par un organisme vivant. Elle est liée d'une part à la nature de ce rayonnement (α, β et γ) et d'autre part au métabolisme de l'élément considéré dans l'organisme qui l'a fixé.

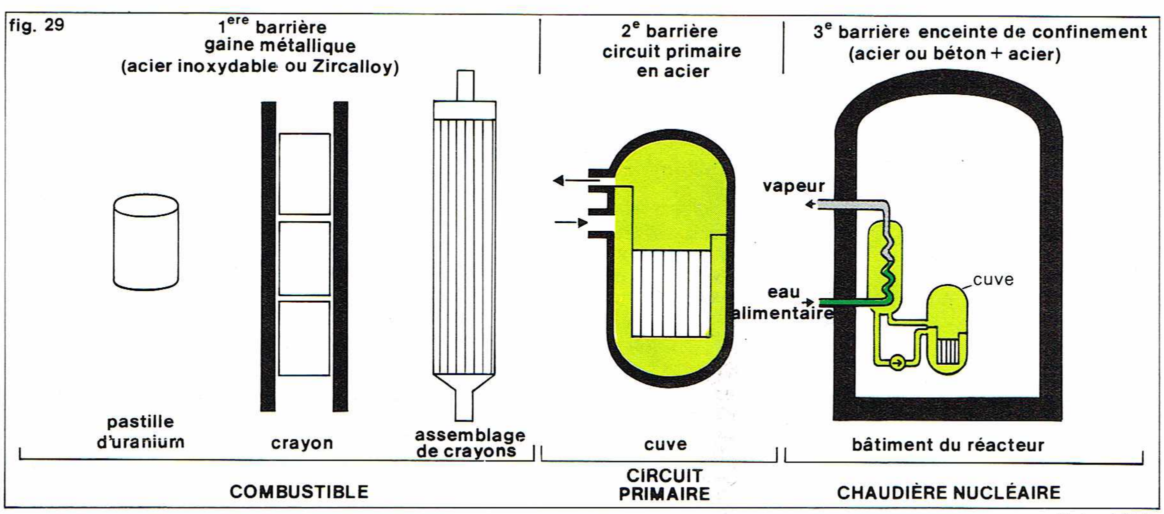

Richard Colin

▶ *Figure 29 : schéma du principe des barrières multiples ; la radio-activité du combustible est confinée grâce à des enceintes successives, indépendantes les unes des autres.*

Bruno Barbey - Magnum

◄ *Les rejets d'éléments radio-actifs, qui s'effectuent selon des normes internationales, ne présentent pas de dangers objectifs pour l'environnement ; cependant ils sont mal accueillis par l'opinion et l'on s'efforce actuellement de rendre les centrales nucléaires parfaitement « propres » ; ici, une vue extérieure de la centrale de Saint-Laurent-des-Eaux.*

Compte tenu de ces données, on considère habituellement, pour ce qui concerne leur stockage, trois familles de déchets.

— Les déchets de faible radio-activité (de l'ordre du Ci/m^3) ne contenant pas, de plus, des éléments radio-actifs à longue période. Les effluents des réacteurs de puissance actuels appartiennent à cette catégorie : les volumes produits sont importants et la radio-activité faible.

— Les déchets de faible ou moyenne radio-activité (de l'ordre du Ci/dm^3) contenant des éléments radio-actifs à longue période. Ces déchets sont produits par les usines de retraitement des combustibles irradiés et de fabrication des combustibles au plutonium. Les quantités sont peu importantes.

— Les déchets de forte activité (de l'ordre du Ci/cm^3). Cette famille est essentiellement constituée par les produits de fission produits par les réacteurs. Ils sont séparés dans les usines de retraitement des combustibles irradiés. Comme on l'a déjà noté, on retrouve dans ces déchets la quasi-totalité de la radio-activité produite par les réacteurs de puissance (99,9 %). Le volume de ces déchets est très faible.

* *Principe du stockage*

Les conditions retenues actuellement pour le stockage peuvent se résumer ainsi :

— garantie totale du confinement. Il faut éviter le retour de la radio-activité vers l'environnement pendant la période dangereuse. Le principe utilisé est, comme sur les réacteurs, celui des « barrières multiples » ;

— surveillance et contrôles aussi réduits que possible ;

— neutralisation d'espace aussi réduite que possible ;

— pas d'hypothèque sur l'exploitation future de ressources naturelles.

On notera que ces trois derniers points sont dictés par le souci de ne pas léguer de contraintes à nos descendants.

* *Réalisations actuelles*

Les déchets correspondant aux deux premières familles (faible et moyenne activité) représentent un volume important. Un réacteur à eau légère de 1 000 MW produit en moyenne 250 m^3 par an de déchets de faible activité. Le volume cumulé en Europe à la fin du siècle, compte tenu du développement actuel de l'énergie nucléaire, peut être évalué à 1 000 000 m^3. Ce chiffre est considérable, mais il faut le comparer à d'autres rejets industriels. Une centrale thermique rejette par sa cheminée plus de 2 000 t de poussières par an. L'ensemble des poussières relâchées dans l'atmosphère pour une seule

▼ *Les déchets radio-actifs autres que les combustibles (boues, filtres d'épuration, etc.) sont compactés puis entourés de béton et entreposés dans des silos comme celui de Simiane-la-Rotonde (Basses-Alpes).*

Martine Franck - Viva

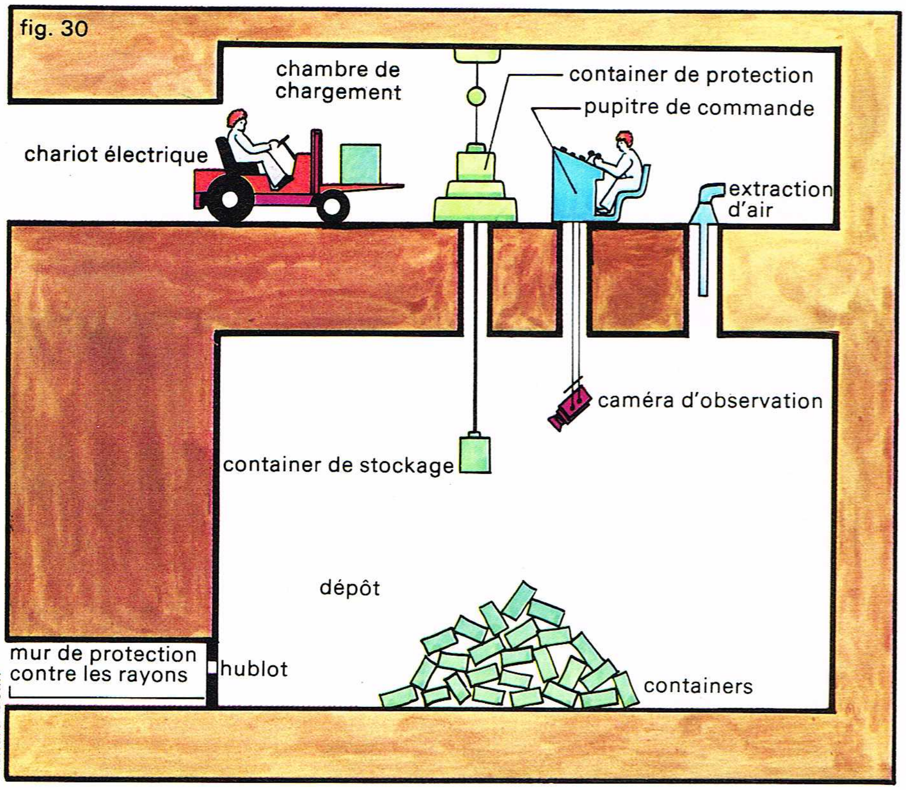

▲ *Figure 30 : stockage souterrain de déchets radio-actifs.*

année par l'ensemble des foyers domestiques et industriels pour un pays comme la France dépasse le million de tonnes. Dans le cas de l'industrie chimique, certains déchets ont des nuisances potentielles très grandes sans qu'il existe un processus de disparition naturelle comme dans le cas de la radio-activité.

Pour ces déchets d'activité peu élevée et de volume important, les solutions utilisées sont l'immersion dans des fosses océaniques ou le stockage terrestre en surface ou à faible profondeur (*fig.* 30). Les règles des conditions de l'immersion ont été fixées par des règlements internationaux et, compte tenu des très grandes marges de sécurité prises, ces opérations peuvent être considérées comme ne présentant aucun danger. Les déchets sont enfermés dans des containers très résistants et présentant une double barrière d'étanchéité dont le but n'est pas de réaliser un confinement absolu. On demande à ce container une résistance suffisamment grande pour que la dispersion de la radio-activité se fasse sur de longues périodes de temps, ce qui permet, compte tenu des masses d'eau intéressées, d'atteindre après dilution un niveau d'activité très inférieur à ceux de la radio-activité naturelle de l'eau de mer, qui est notable, comme on le sait. La gêne que pourrait représenter la présence des containers au fond du fossé océanique lors d'une exploitation future des fonds de l'Océan, d'une part, le coût des opérations d'immersion, d'autre part, ont incité de nombreux pays à renoncer à l'immersion des déchets radio-actifs de faible activité. Ces pays, et c'est le cas de la France, utilisent donc le stockage terrestre qui ne soulève aucune difficulté technique. Il s'agit en effet de stocker ces déchets après conditionnement (enrobage dans du bitume, du béton ou des résines, suivi de mise en fût métallique ou en béton) dans des ouvrages en béton, généralement pour des périodes de l'ordre de 1 000 ans. C'est une durée très longue comparée à la vie humaine, mais inférieure à la durée de certaines constructions humaines qui ont résisté aux intempéries, sans aucun entretien, pendant plusieurs dizaines de siècles. Ces deux procédés, immersion et stockage terrestre, sont appelés à coexister à l'avenir, étant donné leurs avantages respectifs.

Les déchets de haute activité d'éléments de période radio-active longue posent des problèmes de stockage beaucoup plus difficiles. Jusqu'à présent, compte tenu des volumes très faibles mis en jeu, on s'est contenté de stocker provisoirement ces déchets après conditionnement (un des procédés, très employé, est celui de la vitrification) dans des puits en acier aménagés dans du béton.

Une solution définitive de stockage envisageable à court terme est de placer ces déchets dans des formations géologiques stables. On sait en effet que des formations ont mis des centaines de millions d'années à se former, et certaines sont stables depuis des dizaines de millions d'années. On peut donc penser que cette stabilité se maintiendra pendant des durées de quelques centaines de milliers d'années. Dans des formations géologiques sans circulation d'eau, ou de nature absorbante, les risques de migrations des produits radio-actifs sont nuls. On s'oriente donc vers des stockages de ce type qui, compte tenu du développement actuel de l'énergie nucléaire, devraient être opérationnels vers 1990. Ces stockages seront ouverts sur une base réversible, de façon à pouvoir revenir

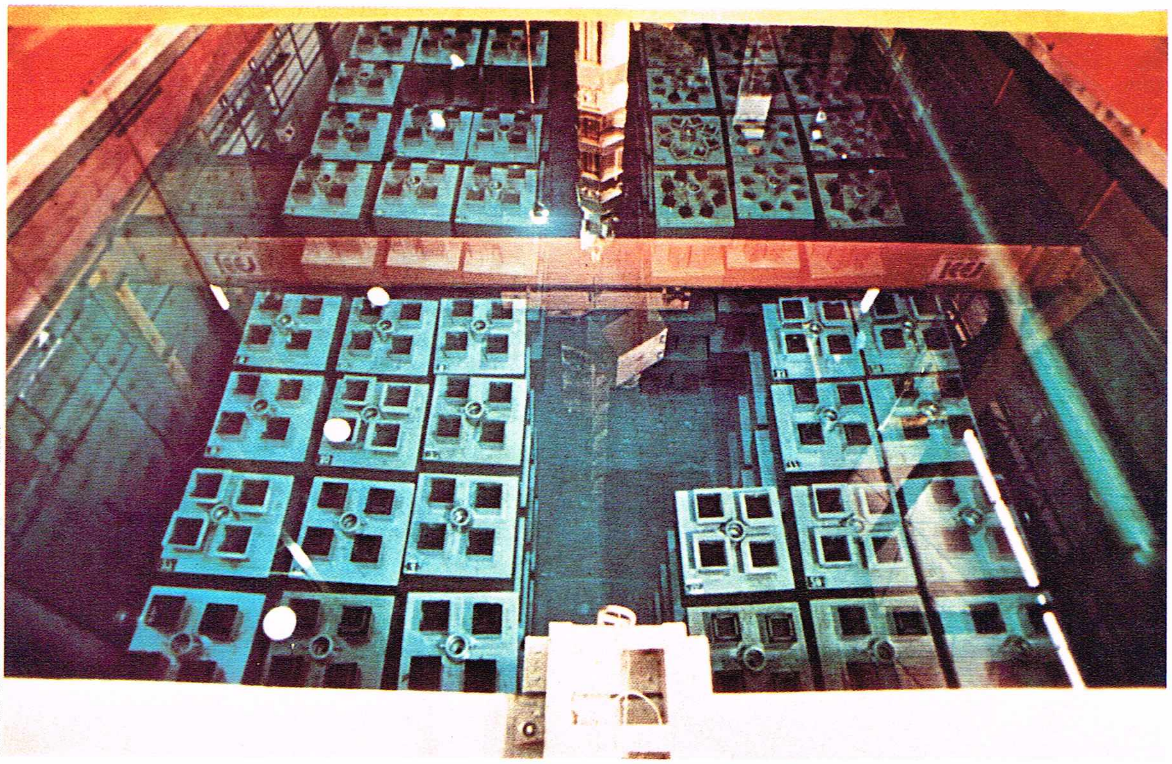

▶ *Après leur renouvellement, les éléments combustibles, fortement radio-actifs, séjournent trois mois dans la piscine du réacteur, puis ils sont transportés à l'usine de traitement de La Hague ; découpés et après un autre séjour en piscine, ils subissent divers traitements chimiques permettant l'obtention de déchets liquides.*

en arrière après plusieurs dizaines d'années si on s'apercevait que les hypothèses initiales ne se révélaient pas tout à fait exactes.

D'autres solutions sont envisageables. Citons tout d'abord le stockage dans le fond des océans. Il ne s'agit pas ici d'immersion mais d'un stockage dans des puits forés dans le fond marin. Ces stockages seraient prévus dans des zones de faible sismicité, à sédimentation rapide pour ajouter une barrière de confinement supplémentaire.

On a songé aussi à des méthodes d'élimination plus définitive. Pour certains éléments, on peut les transformer, par transmutation dans un réacteur, en un autre élément de moindre activité. Le recyclage du plutonium appartient à cette méthode qui peut s'étendre à tous les éléments lourds transuraniens. On a parlé également d'évacuation spatiale vers le Soleil. Le coût de ces opérations (séparation des transuraniens en vue de leur transmutation, évacuation spatiale) est trop élevé aujourd'hui pour qu'elles soient envisageables à court terme, d'autant plus que la solution de stockage en formation géologique stable paraît réalisable en toute sécurité.

En conclusion, les problèmes de stockage des déchets très radio-actifs à vie longue peuvent se résumer ainsi :
— la nécessité de stocker apparaîtra de façon significative dans 10 ans (entre 1985 et 1990) ;
— il existe une solution qui est le stockage en formation géologique stable des déchets au préalable conditionnés ;
— d'autres solutions, en particulier stockage dans les fonds marins, sont envisageables.

On peut donc constater que, si les spécialistes prétendent pouvoir mettre en œuvre des solutions satisfaisantes, ils ne peuvent s'appuyer sur une expérience de plusieurs dizaines ou centaines d'années. La garantie ne peut donc se fonder que sur leurs connaissances techniques et leurs calculs. C'est toujours de cette manière qu'a progressé la technologie, en prenant bien souvent des risques. Cette notion de risque a beaucoup évolué : mal apprécié mais couvert par des coefficients de sécurité par les ingénieurs de jadis, le risque est devenu aujourd'hui partie intégrante des projets. On le reconnaît comme un paramètre mathématique et il perd de ce fait son caractère subjectif de « coup du sort ». Par des calculs de probabilités, il est possible de le maintenir à un niveau suffisamment bas pour qu'il devienne acceptable.

Le public réagit sur d'autres critères où la passion se mêle à la raison. Y a-t-il un point de contact entre la notion de risque probabiliste et l'opinion publique des pays industrialisés ? Tel est l'enjeu de la controverse actuelle sur le problème du stockage des déchets radio-actifs et plus généralement sur celui du développement de l'énergie nucléaire.

Autres types de chaudières

Dans les paragraphes précédents ont été décrites les chaudières classiques qui assurent la conversion de l'énergie chimique en énergie thermique et les chaudières nucléaires qui font cette conversion à partir de l'énergie nucléaire. Les chaudières classiques ont assuré pendant longtemps les besoins thermiques sous forme vapeur. Depuis une vingtaine d'années, les chaudières nucléaires les remplacent progressivement dans les installations de grande puissance destinées à la production d'énergie électrique. On sait que cette évolution se fait sous la pression des coûts croissants des combustibles fossiles qui favorise la production de thermies nucléaires à partir d'un certain niveau de puissance.

Les besoins de vapeur de puissance réduits, tels qu'on les rencontre dans la plupart des industries, sont satisfaits par des chaudières classiques. Les quelques tentatives d'insertion d'une chaudière nucléaire dans un processus industriel n'ont jusqu'à présent jamais abouti. Dans l'état actuel de la technologie nucléaire, les chaudières utilisant la fission nucléaire ne sont pas en effet adaptées à cette mission. A côté des chaudières classiques se développent depuis une vingtaine d'années des chaudières électriques. Ces chaudières devraient connaître un large développement dans la mesure où l'utilisation de l'électricité nucléaire comme énergie primaire va s'accentuer dans tous les pays industrialisés.

Il reste un dernier type de conversion dont on n'a pas encore parlé : la conversion d'énergie radiante en énergie thermique. C'est sur ce principe que fonctionneront les futures chaudières solaires actuellement à l'étude dans divers pays. Il est difficile de leur prédire aujourd'hui un avenir. Comme toute nouvelle technologie, elles auront à s'imposer techniquement et économiquement. Peut-être chaudières de demain, elles clôtureront ce chapitre sur les conversions aboutissant à l'énergie thermique.

Chaudières électriques

Ces chaudières transforment l'énergie électrique en chaleur. Leur rendement est excellent (98 %) et leur emploi est justifié économiquement si on dispose d'énergie électrique primaire. Il est à noter que ce type d'équipement s'est développé dans des pays comme la Suède et la Suisse dont la production d'énergie repose en grande partie sur l'hydraulique et le nucléaire.

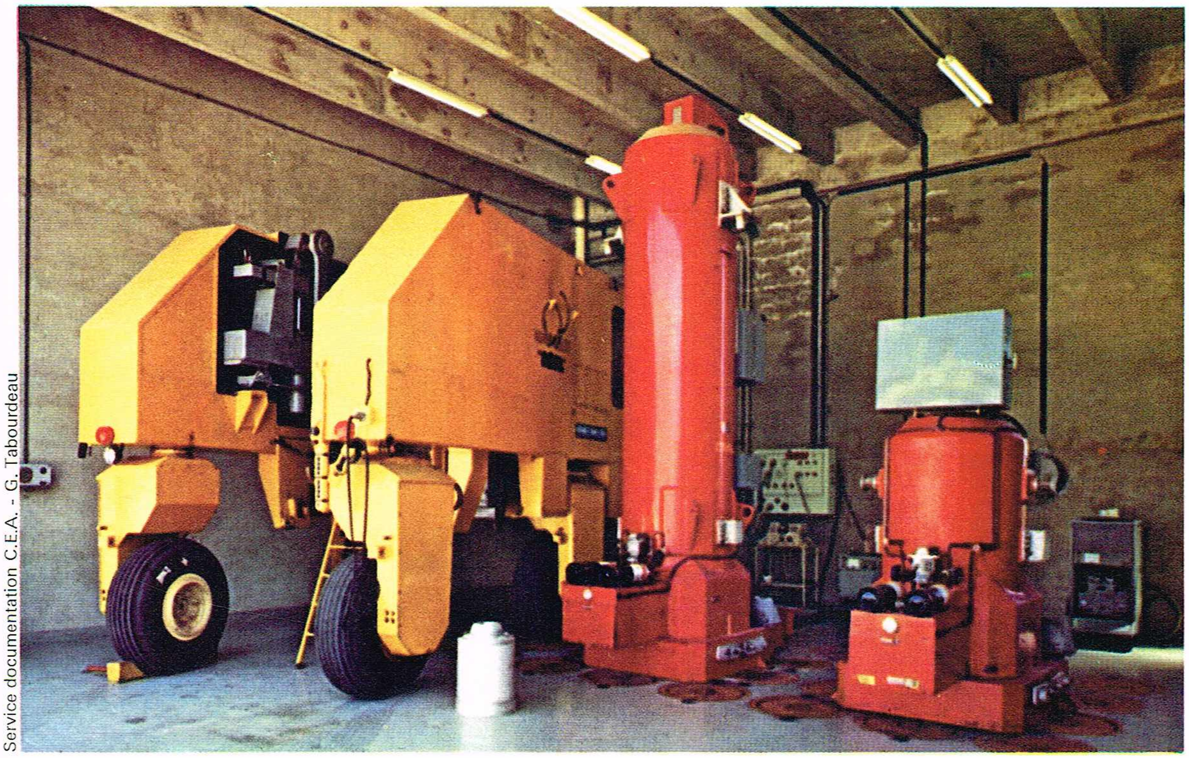

Service documentation C.E.A. - G. Tabourdeau

◀ ***Une fois liquéfiés, les déchets sont enrobés par différents procédés (béton, bitume, vitrification). Ici, une machine permettant le transport des blocs de verre à Marcoule.***

▶ *Figure 31 ; principe des chaudières électriques : a) réglage par variation de niveau (type ALFA-LAVAL) ; b) chaudière à jets multiples (type SULZER).*

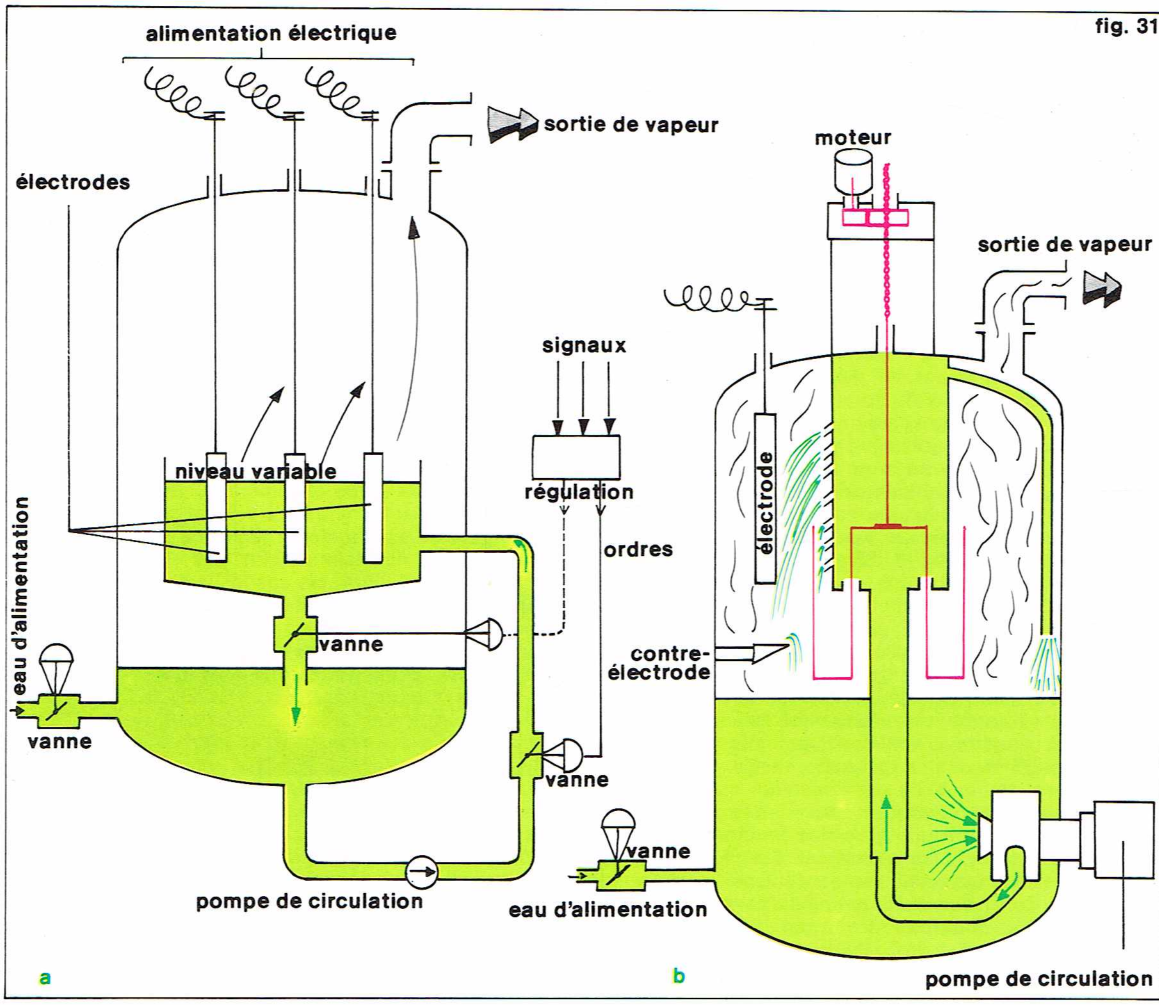

▼ *Dessin du projet de la centrale solaire THEM en cours d'étude, au centre de recherches de l'E.D.F. : ce projet prévoit la mise en place en 1980, de 500 miroirs de 50 m² chacun, focalisant les rayons solaires au sommet d'une tour haute de 100 m où sera installée une chaudière utilisant comme fluide un mélange de sels fondus.*

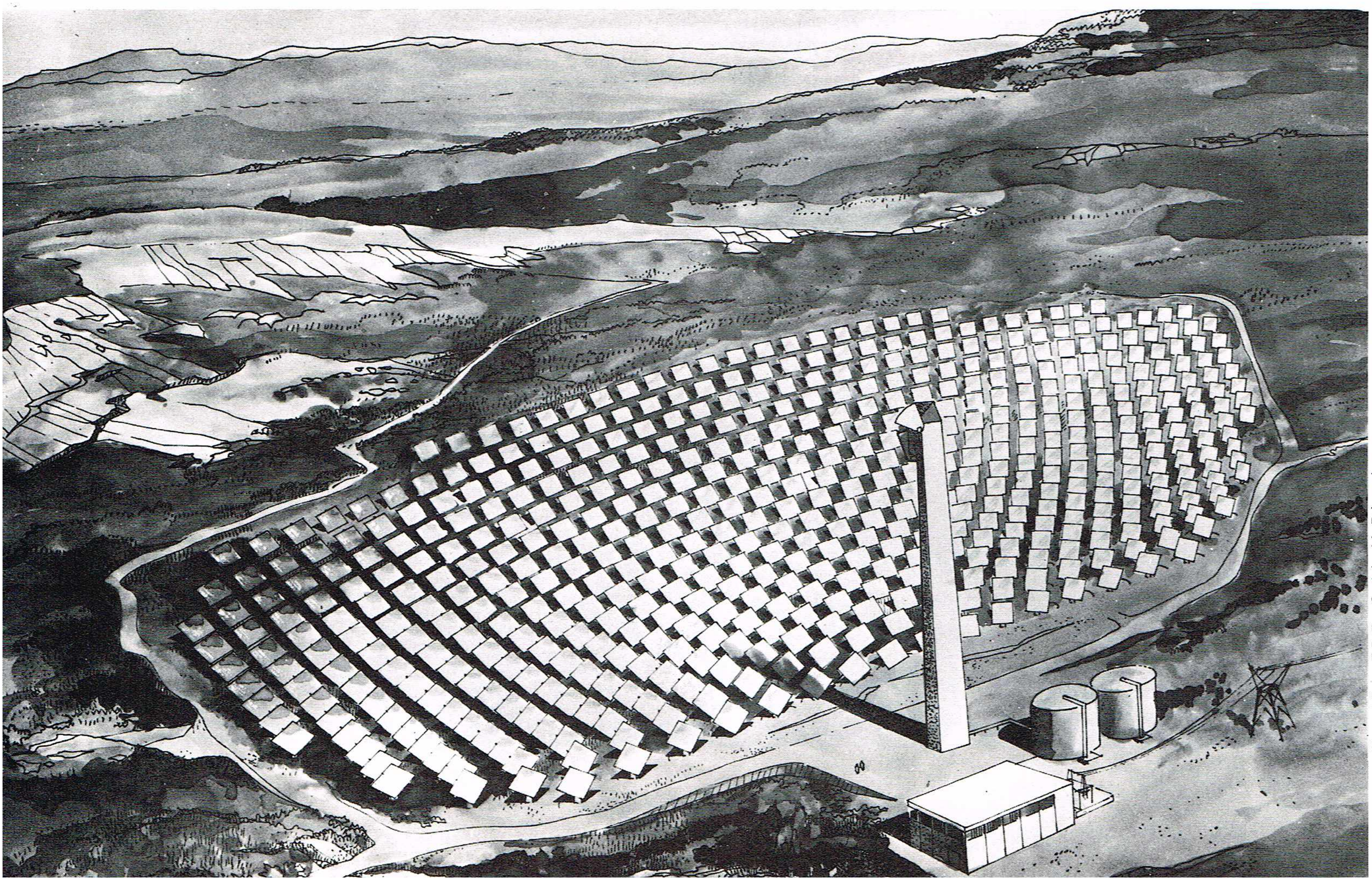

Photothèque E.D.F. - Sodel - M. Brigaud

Ces chaudières ont de multiples qualités. La conversion utilisée ne produit pas d'émissions et ne laisse aucun résidu ; il n'y a donc pas de contraintes sur l'environnement. Le fonctionnement est très sûr et peut être rendu automatique, sans grande complexité. Les frais d'investissement enfin sont peu élevés. Ces chaudières se présentent donc comme des générateurs idéals d'eau surchauffée ou de vapeur. La gamme de puissance des appareils disponibles sur le marché va de quelques centaines de kW à une trentaine de MW.

Il existe différents types de chaudières électriques. Pour les faibles puissances, elles se présentent sous la forme d'un bouilleur dans lequel ont été disposées des résistances électriques. Pour les puissances élevées, on utilise l'eau alimentaire dont on a élevé la conductivité en faisant agir un sel dissous (phosphate) comme élément de résistance entre des électrodes. Il devient alors facile de régler la puissance par simple variation d'un niveau ou d'un débit d'eau. En cas de manque d'eau, et on sait que c'est un des plus graves accidents qui menacent les autres types de chaudières où il est nécessaire d'ajuster en permanence la production de chaleur et son évacuation, la puissance est automatiquement ramenée à zéro.

On trouvera sur la *figure* 31 des schémas de chaudières électriques. Elles sont constituées par un corps qui supporte la pression vapeur et qui porte les trois électrodes de phase, le neutre du transformateur d'alimentation étant mis à la terre. Ces électrodes sont alimentées en moyenne tension 10 à 20 kV. Ces chaudières comportent un circuit de circulation qui permet d'une part d'homogénéiser la chauffe de l'eau et d'autre part de régler la puissance électrique, donc le débit de vapeur, par variation de niveau dans un cas ou par variation de débit dans l'autre cas.

La puissance peut être réglée sur une très large plage (5 à 100 % de la charge nominale). Les chaudières peuvent être de plus conservées à l'état chaud (marche en bouillotte) de façon à permettre un démarrage rapide.

Ces chaudières sont utilisées dans tous les secteurs de l'industrie. Elles sont recherchées pour les applications où la sûreté de fonctionnement et l'absence de nuisance sont primordiales : hôpitaux par exemple.

Chaudières solaires

Ces chaudières fonctionnent par conversion de l'énergie rayonnante d'origine solaire en énergie thermique. Des projets de centrales électrogènes utilisant ce type de chaudière sont actuellement à l'étude en France et dans d'autres pays. La solution considérée comme la plus adaptée à la réalisation de chaudières de grande puissance est celle de la « chaudière à tour ». Comment se présenterait une telle installation ?

Une forêt de miroirs orientables disposés au sol et commandés automatiquement concentre le rayonnement solaire sur une chaudière placée sur un pylône de 2 à 300 mètres. La superficie du champ de miroirs fixe la puissance de l'installation. Cette surface serait limitée, car, au-delà d'une certaine valeur (de l'ordre de 1,5 km^2) qui correspondrait à une puissance de 100 MW, il devient difficile de concentrer le rayonnement solaire sur la tour. Un « gisement solaire » serait exploité par juxtaposition de modules sur toute la surface disponible. Certains pays ont prospecté les zones qui pourraient être transformées en gisements solaires. Ce sont en général des zones d'altitude (au-dessus de 2 000 m) pour bénéficier de meilleures conditions d'ensoleillement, sans aucune vocation touristique. La Suisse par exemple disposerait de 50 km^2 environ de gisements solaires qui permettraient de fournir 10 % de la consommation électrique du pays.

La vapeur pourrait être produite directement dans le réservoir en haut du mât. Plus vraisemblablement, il sera préférable d'utiliser un fluide intermédiaire caloporteur du type liquide organique, pour éviter des pressions trop fortes dans cette partie de l'installation. Dans ce cas, la vapeur d'eau serait produite dans un générateur de vapeur placé au sol et utilisée dans un cycle thermodynamique classique pour produire de l'énergie mécanique et ensuite de l'électricité.

Quel est l'avenir de ces centrales solaires ? Les études économiques montrent qu'elles seraient susceptibles de concurrencer les autres systèmes à partir de 1990 pour s'imposer sur une large échelle au-delà de l'an 2000. Il sera donc intéressant de suivre les premières réalisations correspondant aux projets en cours.

Rapho

Tableau VIII Classification des moteurs thermiques			
Dégagement de chaleur	**Avec mouvement**		**Sans mouvement**
	Machines alternatives	**Turbo machines**	
Au sein du fluide moteur Moteurs à combustion interne	Moteurs à explosion Moteurs Diesel	Turbines à gaz à combustion	Stato-réacteurs Pulso-réacteurs Moteurs fusées à propulsion chimique
A l'extérieur du fluide moteur Moteurs à combustion externe	Machines alternatives à vapeur	Turbines à vapeur Turbines à gaz à circuit fermé	Moteurs fusées à propulsion non chimique

▲ En haut, la chambre froide d'une boucherie au Canada ; une installation frigorifique telle que celle-ci constitue une machine thermique au même titre qu'un moteur à explosion. En bas, tableau VIII : classification des moteurs thermiques.

Conversion thermomécanique

Les convertisseurs qui assurent la conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique et la conversion inverse constituent la famille des *machines thermiques*. C'est ainsi qu'une installation frigorifique est une machine thermique au même titre qu'un moteur à explosion. Dans ce chapitre, nous ne nous intéresserons qu'aux machines motrices qui effectuent la conversion dans le sens chaleur vers travail mécanique. On sait que ces machines, capables de fournir du travail mécanique, font partie de la famille des moteurs.

Un *moteur thermique* a donc pour fonction de convertir la chaleur qui lui est fournie en énergie mécanique. Cette étiquette recouvre, on s'en doute, la plus grande partie des réalisations humaines destinées à la production d'énergie mécanique. Sur quelles bases pouvons-nous les classer ?

Cette tâche est malaisée, car il existe des habitudes difficiles à combattre et l'ambiguïté de certains termes complique sérieusement le problème. On trouvera dans le *tableau* VIII une classification des moteurs thermiques établie selon les principes suivants.

Relation entre le dégagement de chaleur et le fluide moteur

Une première distinction sera faite d'après la façon dont se fait le dégagement de chaleur. Ce dernier en effet peut prendre place au sein du fluide moteur (par combustion ou par réaction chimique), et, pour cette raison, on appelle les moteurs qui utilisent ce principe des *moteurs à combustion interne*.

Par opposition, le fluide moteur peut emprunter son énergie thermique à une source indépendante, et, dans ce cas, il reste étranger au mécanisme de production de chaleur et ne joue qu'un rôle *caloporteur* entre la source thermique et le moteur. Ces sources indépendantes sont constituées de tous les convertisseurs capables de transformer toute forme d'énergie en énergie thermique et qui

ont fait l'objet du précédent chapitre. Certains auteurs désignent les moteurs utilisant ce principe comme des *moteurs à combustion externe*.

Ce dernier vocable n'est pas admis par tous et, dans certains ouvrages, on confond même tous les moteurs thermiques dans le groupe des moteurs à combustion interne. Nous conserverons ici cette distinction malgré ses imperfections. La plus notable réside dans le fait que le terme combustion, spécifique de la conversion énergie chimique-énergie thermique, ne convient plus aux conversions en chaleur obtenues à partir de l'énergie nucléaire, électrique ou rayonnante. Nous sommes devant la situation qui se présente fréquemment dans le domaine de la technologie où la terminologie est dépassée par les progrès des machines.

Une autre ambiguïté vient des qualificatifs *interne* et *externe* qui tendent à faire croire que la combustion se produit dans un cas uniquement à l'intérieur du moteur et dans l'autre cas à l'extérieur du moteur. En fait, comme on l'a bien noté, ce n'est pas la relation entre « combustion » et « moteur » qui est visée mais celle qui peut exister entre la « combustion » et le « fluide moteur ». Dans le moteur à combustion interne, la conversion de l'énergie chimique du combustible en énergie thermique se fait au sein du fluide moteur, cette conversion, qui est en général une combustion, pouvant s'effectuer à l'extérieur du moteur proprement dit : c'est le cas par exemple pour une turbine de récupération fonctionnant sur l'échappement d'un moteur à explosion. Dans le moteur à combustion externe, il y a forcément découplage entre le fluide moteur et le fonctionnement de la source de chaleur : c'est le cas par exemple d'une turbine à vapeur attelée à une chaudière fonctionnant au fuel-oil. Ainsi prévenu, le lecteur n'aura pas de difficulté à admettre la classification proposée.

Mécanismes utilisés pour recueillir l'énergie mécanique

La méthode utilisée ici est habituelle. On considère d'une part les mécanismes qui mettent en jeu des pièces en mouvement, d'autre part les mécanismes entièrement statiques (*fig.* 32).

Dans le premier groupe, on distingue deux classes de moteurs : les *moteurs à mouvement alternatif* et les *turbomachines*. Dans les moteurs alternatifs, l'énergie interne est utilisée sous forme d'énergie de pression agissant sur un organe mobile appelé *piston*. Dans les turbomachines, l'échange d'énergie a lieu entre un flux continu du fluide moteur et un ensemble mécanique appelé *rotor* tournant autour de son axe. L'énergie du fluide est utilisée sous forme de pression (turbine à réaction) ou sous forme cinétique (turbine à action).

Dans ces machines, l'énergie mécanique est en général recueillie sur un arbre tournant qui peut être accouplé au récepteur qu'il s'agit d'entraîner : roue, hélice de bateau ou d'avion, rotor d'hélicoptère, générateur électrique, etc. L'énergie mécanique peut être également recueillie sous forme de poussée de la veine fluide sur le moteur lui-même, sans aucun autre intermédiaire : c'est la propulsion par réaction. Notons qu'il ne faut pas confondre la turbine à réaction évoquée ci-dessus et la propulsion par réaction. Certains moteurs comme le turbopropulseur utilisent les deux principes.

Dans les machines purement statiques, seul le principe de la réaction peut être utilisé pour recueillir l'énergie mécanique.

C'est la combinaison de ces deux éléments de classement : relation entre le dégagement de chaleur et le fluide moteur et mécanismes utilisés pour recueillir l'énergie mécanique, qui a permis la classification du *tableau* I.

On notera que les machines alternatives et les turbomachines constituent des classes très générales de machines, qui incluent certes les moteurs thermiques mais également d'autres types de machines. Les turbomachines par exemple comprennent les turbines à gaz et à vapeur mais également les turbines hydrauliques. Ces machines étant de plus réversibles, il faut ajouter à ce groupe les ventilateurs, les soufflantes, et les pompes à turbine. On aperçoit par cette remarque une autre façon de classer toutes ces machines. Mais un tel regroupement, pour aussi intéressant qu'il soit par le rapprochement de toutes les machines fonctionnant suivant des principes identiques, n'aurait pas été en accord avec l'idée de « conversion d'énergie » qui nous préoccupe dans ce chapitre. Les machines réceptrices citées ci-dessus qui transforment de l'énergie mécanique en énergie de même nature seront examinées au chapitre sur les transformateurs d'énergie.

fig. 32

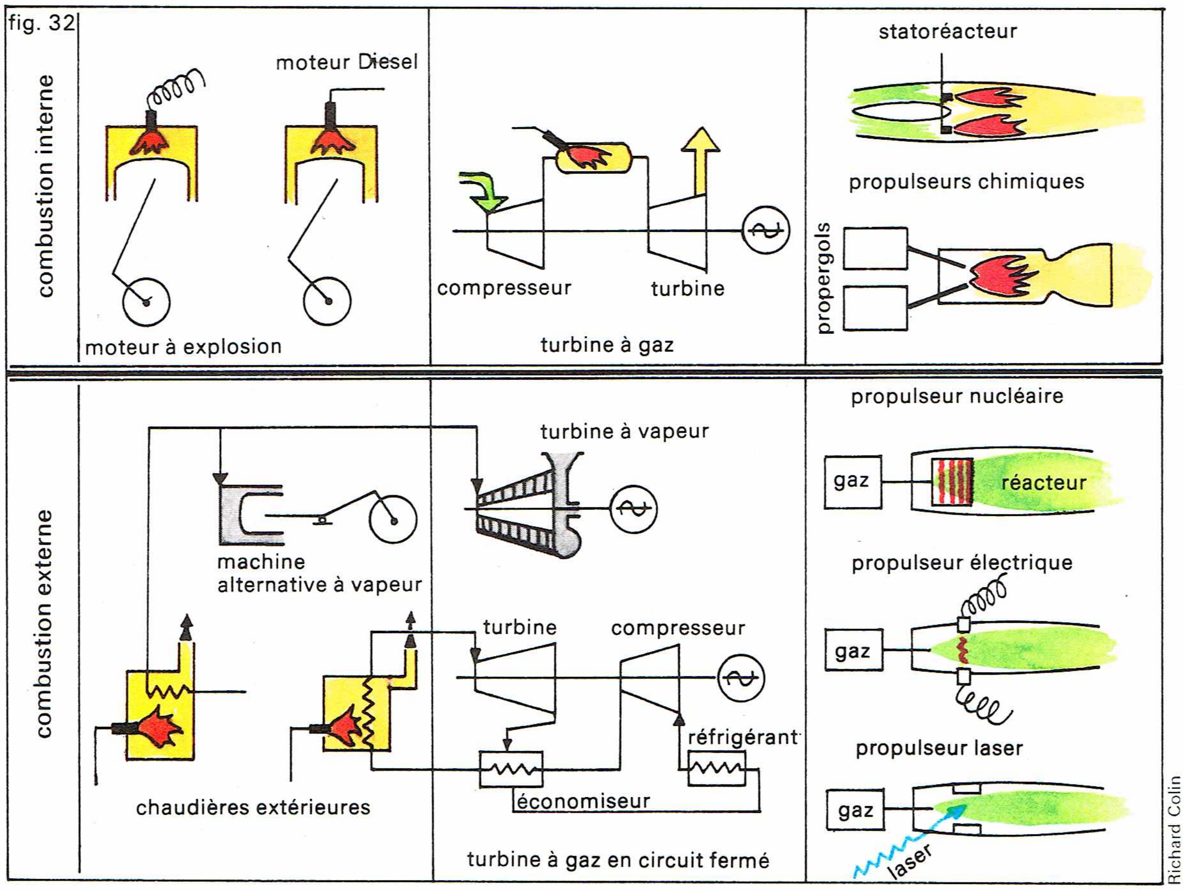

▶ ***Figure 32 : schémas des différents moteurs thermiques.***

Archives I.G.D.A.

▲ *« Break » cinq places* **Peugeot** *de 1894, avec moteur à deux cylindres en* V.

Notions de thermodynamique

Un moteur thermique a pour fonction de rendre une certaine quantité d' « énergie mécanique » à partir de l' « énergie thermique » qui lui a été fournie. Les relations entre les phénomènes mécaniques et les phénomènes thermiques font l'objet de cette partie de la physique qu'on appelle la *thermodynamique.* On en rappelle ci-après les principales notions.

On appelle **système** un ensemble de corps ou de particules considérés séparément de leur environnement. On appelle **milieu extérieur** tout ce qui, par définition, n'appartient pas au système.

Exemple : si on considère un piston comprimant un gaz dans un cylindre (voir *fig.* 33), on peut choisir comme système le *gaz seul;* le milieu extérieur est constitué du piston, du cylindre ou de l'ambiance. On peut aussi choisir comme système l'ensemble gaz-piston-cylindre, l'ambiance constituant alors le domaine extérieur.

fig. 33

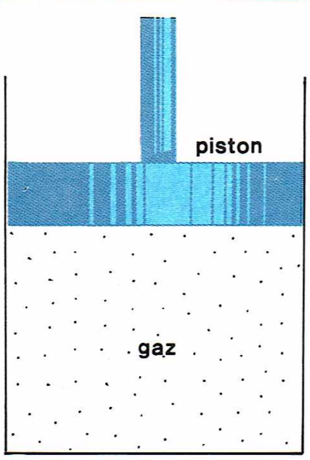

Richard Colin

◀ *Figure 33 ; système thermodynamique simple ; un piston comprimant un gaz dans un cylindre.*

Un système est en **équilibre** lorsqu'il peut demeurer identique à lui-même indéfiniment. L'**état** dans lequel il se conserve peut être caractérisé par un certain nombre de paramètres dépendant de la complexité du système : par exemple, l'état physique d'un solide ou d'un liquide incompressible est déterminé par la seule température; l'état physique d'une masse gazeuse est déterminé par deux paramètres : (pression, volume), (pression, température) ou (température, volume).

Un système a évolué de façon **réversible** d'un état d'équilibre A vers un état d'équilibre B lorsqu'il est possible de faire revenir le système B vers A en repassant par tous les états intermédiaires. En outre, les échanges d'énergie (travail et chaleur) avec le milieu extérieur sont égaux et de sens contraire. Les transformations réversibles n'existent pas en pratique. Des irréversibilités thermiques apparaissent par exemple chaque fois que des écarts finis de température existent entre deux points infiniment voisins du système.

● **Premier principe : principe de Mayer ou de l'équivalence**

Ce principe, qui s'appelle aussi principe de la conservation de l'énergie, peut s'énoncer : *Tant qu'un système demeure isolé du milieu extérieur, son énergie reste constante.* En conséquence, toute variation d'énergie de ce système ne peut provenir que de l'action du milieu extérieur. Tout système possède donc une *énergie interne* du seul fait qu'il existe dans un état physique donné; on la désigne par U et elle s'exprime en joules.

La somme des quantités de travail W et de chaleur Q reçues par le système dans une transformation qui l'amène de l'état 1 à l'état 2 ne dépend que de l'état initial et de l'état final et est indépendante de la transformation qui l'amène de l'un à l'autre. S'il s'agissait d'un cycle,

▶ *Figure 34 : toute machine thermique motrice devra utiliser les déformations, sous l'influence de la chaleur, d'un corps quelconque. Ici, l'agent de transformation, la barre, évolue cycliquement ; d'où la nécessité de la chauffer puis de la refroidir successivement, ce qui suppose l'existence nécessaire de deux sources. Le bilame améliore les performances de la simple tige métallique, mais les solides ont des coefficients de dilatation trop faibles et on utilisera en général des corps très dilatables, comme les gaz ou les liquides sous forme « vapeur ».*

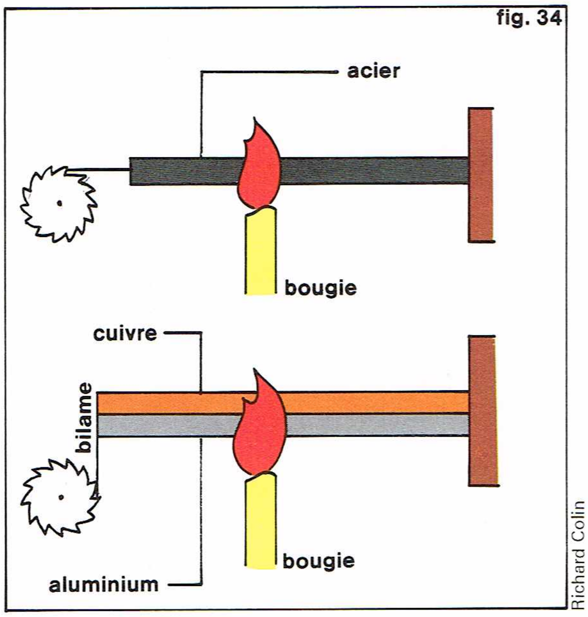

l'état final serait confondu avec l'état initial, et l'on aurait :

$$W + Q = 0$$

Si on appelle $W_f = -W$ l'énergie fournie au milieu extérieur, on a :

$$Q = W_f$$

C'est le principe d'équivalence de la chaleur et du travail. On connaît le rapport d'équivalence, désigné par J : 1 calorie = 4,185 5 joules.

● Fonction d'état

Tout état d'équilibre d'un système peut être défini par un ensemble de paramètres indépendants : pression, volume, température, etc. Toute fonction de ces paramètres est appelée *fonction d'état.* Sa valeur pour un état d'équilibre est indépendante de l'évolution qui a conduit à cet état d'équilibre (mathématiquement, on dit que cette fonction admet une différentielle totale exacte).

L'énergie interne U est une fonction d'état. On utilise beaucoup en thermodynamique pour caractériser les systèmes les fonctions d'état suivantes : l'enthalpie et l'entropie. On appelle *enthalpie,* rapportée à 1 kg de fluide, la grandeur $H = U + Jpv$, p étant la pression et v le volume spécifique.

La variation d'enthalpie est égale à la quantité de chaleur totale (échauffement, vaporisation, surchauffe) fournie au fluide augmentée de l'équivalent calorifique du travail représenté par la variation de pression.

Ces grandeurs s'expriment en kcal/kg ou kJ/kg. L'énergie interne n'étant définie qu'à une constante près, on la considère comme nulle à 0 °C. Cette convention est utilisée dans les diagrammes thermodynamiques. L'*entropie* sera définie plus loin.

● Deuxième principe : principe de Carnot-Clausius

Le premier principe a établi l'équivalence quantitative entre énergie mécanique et énergie chimique, le deuxième principe établit une différence qualitative entre ces deux formes de l'énergie. Autrement dit, si la conversion d'énergie mécanique en chaleur peut s'effectuer sans perte, la conversion inverse ne peut être que partielle. Une partie de la chaleur est cédée au milieu extérieur, donc perdue (*fig.* 34).

On peut démontrer qu'il ne peut y avoir de transformation en travail si un système n'échange de la chaleur qu'avec une seule source. Les cycles thermodynamiques habituels comportent donc des échanges avec deux sources : l'une est la source *chaude,* l'autre est la source *froide ;* ces deux qualificatifs indiquent seulement que la première est à une température plus élevée que la seconde.

Dans le cas d'un moteur thermique, si on appelle : W le travail fourni, Q_1 la chaleur cédée par la source chaude, Q_2 la chaleur reçue par la source froide, on peut écrire :

$$W = J\,(Q_1 - Q_2)$$

On appelle *rendement thermique* le rapport η de la quantité de chaleur utilisée $Q_1 - Q_2$ à la quantité de chaleur fournie Q_1

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{W}{JQ_1}$$

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

Le rendement η est évidemment inférieur à l'unité.

L'énoncé du deuxième principe se complète par le théorème suivant ou théorème de Carnot : *Le rendement thermique maximal ne dépend que des températures des 2 sources entre lesquelles le fluide évolue.* Si T_1 et T_2 sont les températures (en degrés Kelvin) des sources chaude et froide, le rendement maximal est donné par :

$$\eta_{\text{Carnot}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Exemple : si on considère une centrale nucléaire à eau légère dont la vapeur saturée sort de la chaudière à 70 bars (t_1 = 286 °C) et qui utilise une source froide constituée par une rivière à la température t_2 = 20 °C, on a :

$$T_1 = 286 + 273 = 559\ °K$$

$$T_2 = 20 + 273 = 293\ °K$$

$$\eta_{\text{Carnot}} = \frac{559 - 293}{559} = 0{,}47$$

Il s'agit d'un rendement maximal théorique. Cela signifie que, quelle que soit l'ingéniosité du moteur thermique utilisé, le rendement ne pourra pas dépasser cette valeur limite. En pratique, le rendement de ce type de réacteur est de 0,33, ce qui montre le degré de l'imperfection « thermodynamique » de nos moteurs thermiques. On expliquera plus loin ces écarts.

● Entropie

Clausius a montré que, dans une transformation ouverte dont l'état initial A diffère de l'état final B, l'intégrale $\int_{AB} \frac{dQ}{T}$ était indépendante du chemin réversible utilisé et ne dépendait que des états initial et final

$$\int_{AB} \frac{dQ}{T} = S_A - S_B$$

S est une fonction d'état qui a été appelée *entropie.* La variation d'entropie est nulle quand le cycle est fermé. L'unité qui exprime l'entropie est le J/°K. L'entropie n'est définie, comme les autres fonctions d'état, qu'à une constante près ; pour l'eau, on convient de la considérer comme nulle à 0 °C et à la pression de vapeur saturée correspondante.

La notion d'entropie est abstraite. Elle est pourtant très utile, car elle permet d'apprécier l'irréversibilité d'un processus. En effet, si toutes les transformations accomplies dans un cycle sont réversibles, l'entropie du système ne change pas. Il y a eu transfert d'entropie au cours des diverses transformations, mais non augmentation. Ce n'est pas le cas lorsque les transformations sont irréversibles.

● Représentation graphique des transformations thermodynamiques

Les paramètres décrivant les états d'un fluide au cours d'une transformation sont :
— soit thermiques : température, chaleur totale, entropie ;
— soit mécaniques : pression, volume.

On peut donc suivre leurs évolutions sur différents diagrammes suivant le but recherché. Les diagrammes les plus utilisés sont :
● le diagramme dynamique (ou diagramme de Clapeyron) [*fig.* 35a] ;
ordonnées : pression p ; abscisses : volume v ;
● le diagramme entropique (*fig.* 35b) ;
ordonnées : température absolue T ; abscisses : entropie S ;
● le diagramme enthalpique (ou diagramme de Mollier) ;
ordonnées : chaleur totale H ; abscisses : entropie S (*fig.* 35c).

Certaines transformations (*fig.* 36) se font avec un paramètre constant, les courbes les représentant sont désignées comme suit :

pression : $p = C^{st}$ isobare ;
volume : $v = C^{st}$ isochore ;
température : $T = C^{st}$ isotherme.

On appelle transformation adiabatique, une transformation où les échanges de chaleur avec l'extérieur sont nuls. Au cours d'une telle transformation, l'entropie reste constante : la courbe « adiabate » est donc aussi « isentrope ».

L'allure de ces différentes courbes est représentée sur les diagrammes de la *figure* 35.

● **Cycles**

Les cycles sont représentés sur les diagrammes à l'aide de courbes traduisant les différentes transformations qui constituent le cycle.

La *figure* 37 représente un cycle de Carnot porté sur le diagramme de Clapeyron (*p*, *v*). L'aire délimitée par la courbe représente le travail échangé avec le milieu extérieur. Ce travail est positif ou négatif selon le sens dans lequel le cycle est décrit. La même figure représente un cycle de Carnot sur un diagramme entropique (T, S). Ce cycle qui se compose de transformations irréversibles, deux isothermes et deux adiabatiques (isentropiques), se présente sous la forme d'un rectangle. On montre que l'aire du cycle représente dans ce cas la chaleur échangée avec le milieu extérieur qui est positive ou négative suivant le sens décrit.

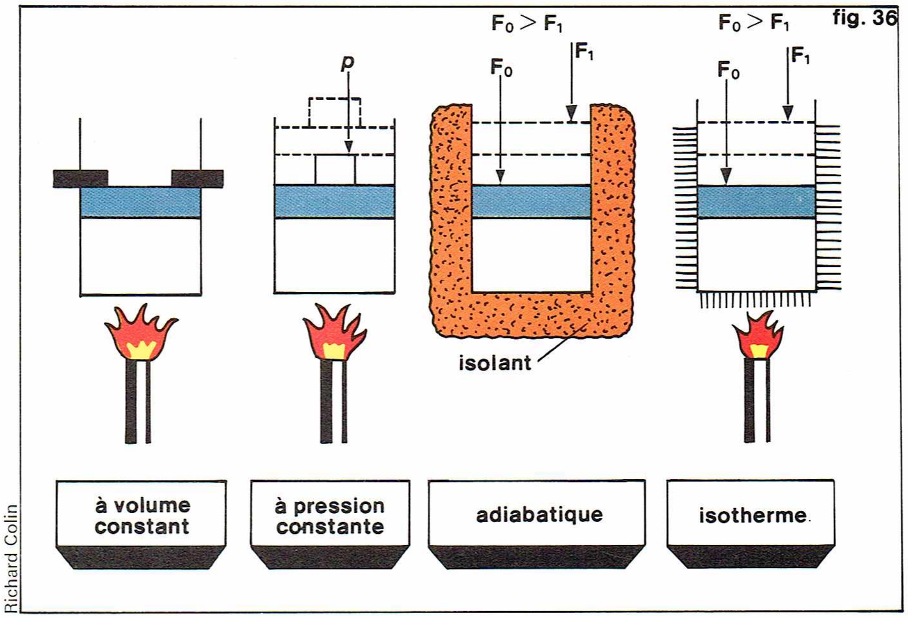

▲ ***Figure 36 : les quatre grandes transformations thermodynamiques.***

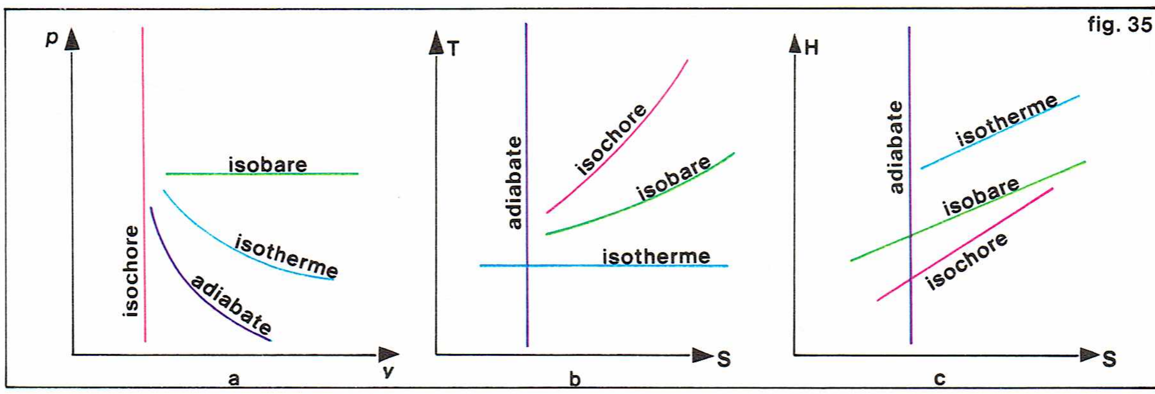

◀ ***Figure 35 ; les diagrammes les plus utilisés :***
a) diagramme de Clapeyron,
b) diagramme entropique,
c) diagramme enthalpique.

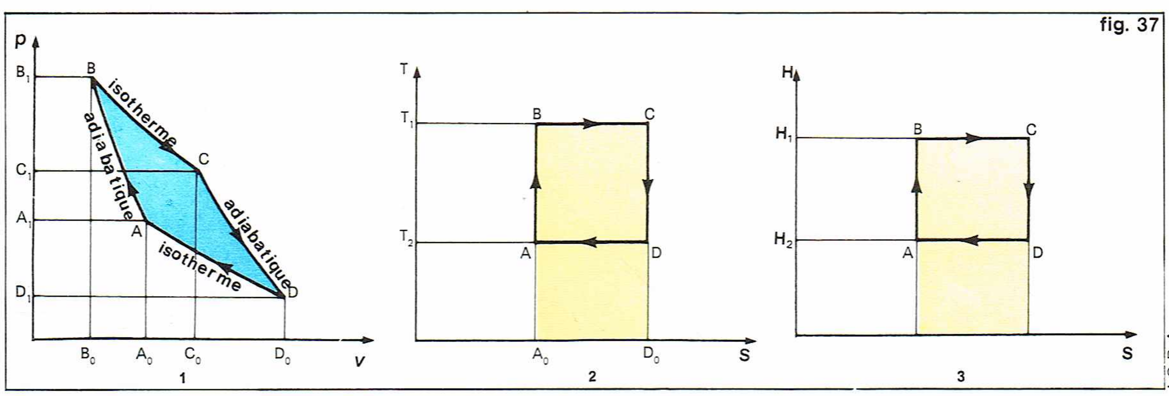

◀ ***Figure 37. (1) Cycle de Carnot porté sur un diagramme de Clapeyron ; il se compose de 4 transformations réversibles :***
AB = compression adiabatique,
BC = détente isotherme (fourniture de Q_1 calories par la source chaude),
CD = détente adiabatique,
DA, compression isotherme (Q_2 calories cédées à la source froide).
L'aire ABCD représente le travail W du cycle avec $W = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 =$ — aire ABB_0A_0 + aire BCC_0B_0 + aire CDD_0C_0 — aire DAA_0D_0.
(2) Le même cycle porté sur un diagramme entropique : aire ABCD = travail du cycle, aire A_0BCD_0 = chaleur Q_1 fournie à la source chaude, aire A_0ADD_0 = chaleur Q_2 cédée à la source froide.
(3) Même représentation sur le diagramme enthalpique : $H_2 - H_1$ = travail de la compression adiabatique AB.
$H_1 - H_2$ = travail de la détente adiabatique CD.

Moteurs à combustion interne

Sur ces machines, la combustion est réalisée au sein du fluide moteur. Il est donc nécessaire d'utiliser des combustibles pouvant brûler rapidement et complètement sans laisser de résidus solides. Ces combustibles sont en général à base d'hydrocarbures liquides ou gazeux et l'air sert de comburant. On verra plus loin que les fusées, en particulier lorsqu'elles travaillent en dehors de l'atmosphère terrestre, utilisent des couples carburant-comburant très différents.

La combustion interne permet d'obtenir dans ce type de moteur des puissances spécifiques très élevées. Cette puissance spécifique est directement liée au débit de combustible qu'on peut faire accepter par le moteur, et par voie de conséquence au débit de carburant. Pour cette raison, les moteurs à combustion interne se classent, par ordre croissant de puissance spécifique :

— moteurs à explosion et Diesel non suralimentés,
— moteurs à explosion et Diesel suralimentés,
— turbines à gaz,
— fusées.

Pour les machines tournantes (alternatives ou turbomachines), les débits d'air et donc de combustible mis en jeu sont en relation directe avec la vitesse du moteur. Lorsque la légèreté est primordiale, on retiendra donc des moteurs rapides, même si des organes d'adaptation (boîte de vitesses par exemple) sont nécessaires.

Les domaines de puissance s'étendent pour les moteurs Diesel de quelques kW à plus de 20 MW alors que celui des moteurs à explosion se limite aujourd'hui à 300 kW. Le domaine de la turbine à gaz s'étend progressivement, et aujourd'hui les turbines industrielles les plus grosses en service ont des puissances de 80 MW.

Le rendement thermique global d'un moteur à combustion interne est le rapport qui existe entre l'énergie

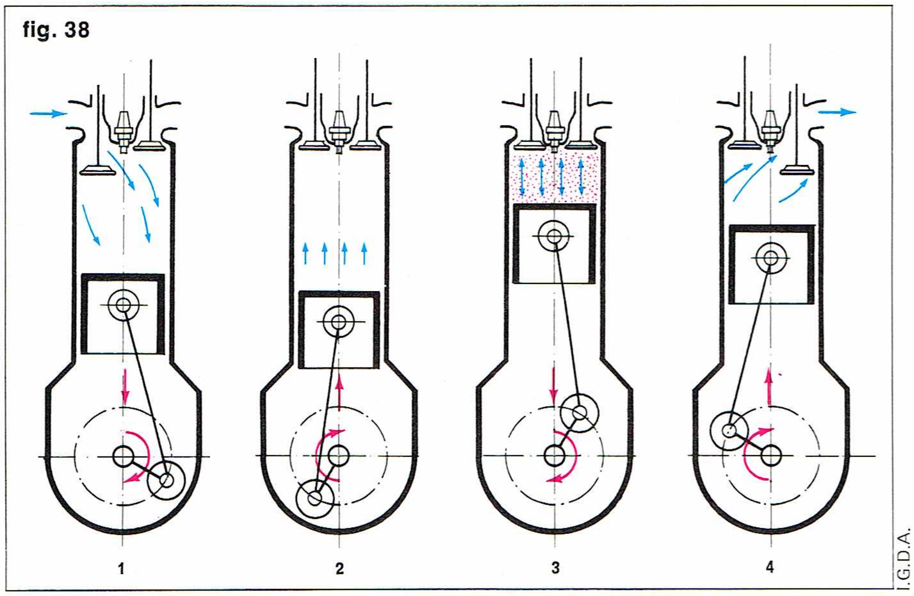

▲ *Figure 38 ; phases du cycle à 4 temps : 1, admission ; 2, compression ; 3, combustion-détente ; 4, échappement.*

recueillie sous forme de travail pendant un certain temps et l'énergie du combustible brûlé par le moteur pendant le même intervalle de temps.

Pour permettre l'étude et l'amélioration d'un moteur, on distingue différents rendements :

— rendement thermodynamique théorique, qui peut se calculer sur le cycle théorique ;

— rendement de forme, qui traduit que le cycle réel du moteur diffère du cycle théorique ;

— rendement de combustion, qui prend en considération les pertes de combustion (imbrûlés) et la chaleur perdue par les parois ;

— rendement mécanique qui traduit essentiellement la perte par frottement.

Le rendement thermique global est le produit de ces quatre rendements.

Moteur à volume variable (capsulisme)

Ces moteurs se classent en deux familles :

— moteurs à explosion,

— moteurs Diesel.

Ils sont en général à pistons et se distinguent par la façon dont est initiée la combustion.

Moteurs à explosion

* *Description sommaire*

Le moteur comprend plusieurs cylindres, fermés à une de leurs extrémités, dans chacun desquels se meut un piston. Le mouvement rectiligne et alternatif de ces pistons entre deux points extrêmes : le point mort haut (PMH) et le point mort bas (PMB), est transformé en un mouvement circulaire et continu par un ensemble de bielles et un arbre moteur, appelé aussi vilebrequin. Chaque cylindre peut être mis en communication avec l'admission ou avec l'échappement par deux soupapes commandées par le moteur lui-même. Enfin un dispositif d'allumage est placé sur le fond du cylindre. Ce type de moteur peut fonctionner suivant un cycle à 4 temps ou un cycle à 2 temps.

Le cycle à 4 temps ou cycle Beau de Rochas (brevet déposé en 1862) peut être décrit de la façon suivante, chaque temps correspondant à une course aller ou retour du piston dans le cylindre (voir *fig.* 38) :

a) Aspiration ou admission : introduction d'un mélange gazeux par la soupape d'admission.

b) Compression du mélange gazeux du type adiabatique, car les échanges thermiques avec la paroi sont très faibles. L'allumage est commandé vers la fin de ce temps.

c) Détente également adiabatique des gaz de combustion.

d) Évacuation du cylindre des gaz de combustion par la soupape d'échappement.

Ce cycle demande donc pour s'accomplir 4 courses de piston et 2 tours du vilebrequin. Sur les quatre temps, un seul est utile (détente) pour fournir un effort au vilebrequin. Les trois autres, au contraire, demandent de l'énergie au vilebrequin. Le couple d'un moteur qui serait monocylindrique serait forcément très irrégulier et c'est pour cette raison que l'on construit surtout des moteurs à plusieurs cylindres.

Dans le cycle 2 temps, l'évacuation des gaz de combustion se fait en fin de détente et la compression se place en fin d'admission. Ce type de moteur a un poids moindre puisqu'il permet un temps de travail pour tous mais sa consommation est plus élevée et il est actuellement limité aux petites cylindrées.

* *Cycle théorique — Cycle réel*

Ce moteur fonctionne avec un allumage commandé. La combustion se fait en théorie à volume constant (piston au PMH) et de façon adiabatique. On l'appelle moteur à explosion, bien que la vitesse de propagation de la flamme dans le mélange gazeux soit de beaucoup inférieure à celle des conditions explosives.

Le cycle théorique à 4 temps (*fig.* 39) comprend les transformations suivantes :

1-2 : aspiration à pression constante (pression atmosphérique),

2-3 : compression adiabatique,

3-4-5 : combustion à volume constant et détente adiabatique,

5-2-1 : mise à l'échappement du cylindre et évacuation des gaz de combustion à pression constante (pression atmosphérique).

Le cycle réel diffère du cycle théorique sur plusieurs points (*fig.* 40). Pendant l'aspiration, il y a dépression

▼▶ *Ci-dessous, figure 39 : cycle théorique Beau de Rochas en coordonnées pv (à gauche) et TS (à droite). Ci-contre, figure 40 : comparaison entre les cycles Beau de Rochas théorique et réel.*

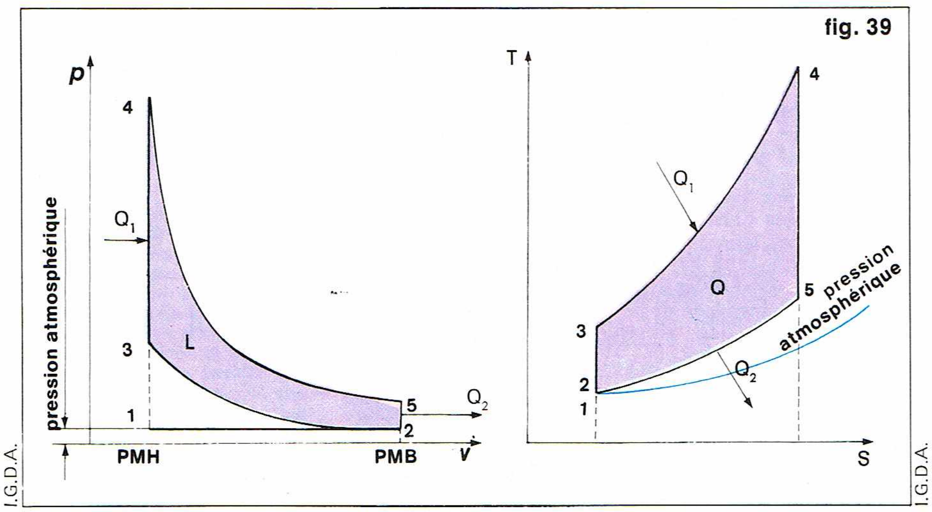

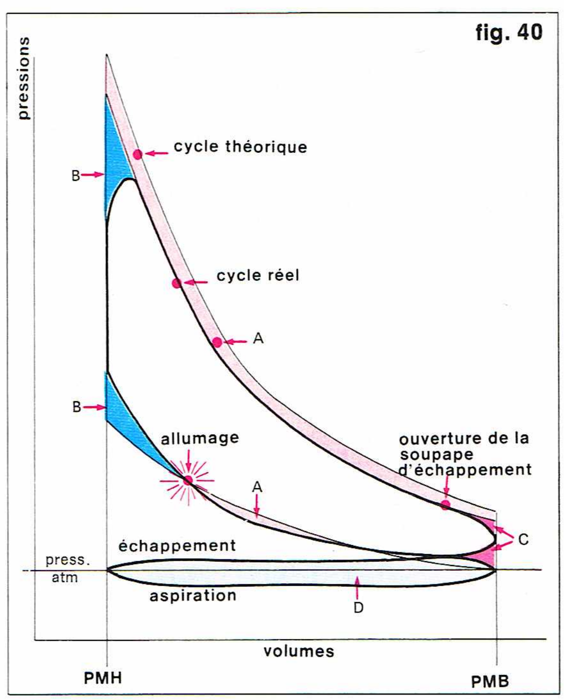

dans le cylindre et la pression descend en dessous de la pression atmosphérique. La compression ensuite n'est pas rigoureusement adiabatique, car des échanges thermiques se produisent avec la paroi. De plus, la combustion n'étant pas instantanée, il faut placer l'allumage avant la fin de la compression (avance à l'allumage). La détente enfin n'est pas non plus adiabatique et il faut ouvrir la soupape d'échappement avant la fin de la course du piston ; après l'échappement, le cylindre reste en légère surpression.

La surface du cycle réel est donc inférieure à celle du cycle théorique dans un rapport qui est de l'ordre de 0,7 au maximum.

* *Rendement — Bilan thermique*

Le rendement global des moteurs à explosion varie suivant les modèles entre 0,25 et 0,40. On l'exprime aussi très souvent en donnant la consommation spécifique qui est la consommation en carburant du moteur rapportée au cheval-heure (unité : g/ch-h).

Le bilan thermique (voir *fig.* 41) permet de montrer comment se répartissent les calories entre le travail fourni et les différentes pertes.

* *Puissance*

Compte tenu de tous les facteurs agissant sur le fonctionnement d'un moteur à explosion, il est difficile de déterminer sa puissance par des calculs théoriques. Les paramètres sont en effet nombreux : qualité du combustible, densité de l'air, réglage du moteur pour ne citer que les principaux. La puissance d'un moteur est donc généralement mesurée sur un banc d'essai, le moteur étant accouplé avec un système de freinage pour absorber sa puissance : c'est « l'essai au frein » qui permet de mesurer la puissance effective du moteur. Il existe plusieurs définitions de la puissance (SAE, DIN, etc.) selon que l'on prend en compte la puissance des auxiliaires du moteur ou non. Chaque pays a aussi une définition de « puissance fiscale » destinée à l'imposition des véhicules.

On peut retenir simplement que la puissance est fonction de la cylindrée (section πD_2), de la course C du piston, de la vitesse N et de la pression dans le cylindre au cours du temps de détente. Comme cette pression est variable, on définit une pression moyenne p_m qui, appliquée sur le piston durant toute la course de détente, fournirait le même travail que la pression réelle (*fig.* 42). Cette pression moyenne est caractéristique des performances d'un moteur ; elle traduit aussi la fatigue mécanique et thermique que celui-ci aura à supporter.

Compte tenu des remarques précédentes, la puissance d'un moteur peut s'exprimer simplement ainsi :

$$P = kD^2CNp_m$$

k étant fonction des unités choisies et du nombre de cylindres.

fig. 41

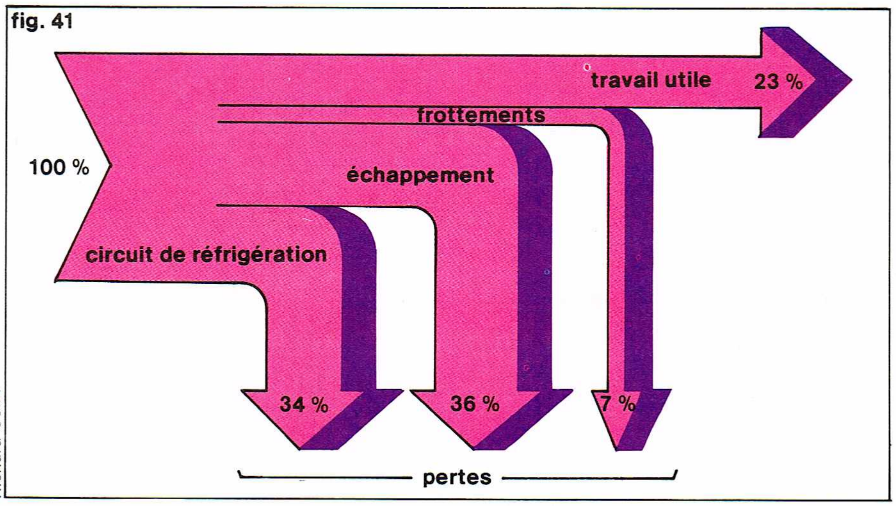

fig. 42

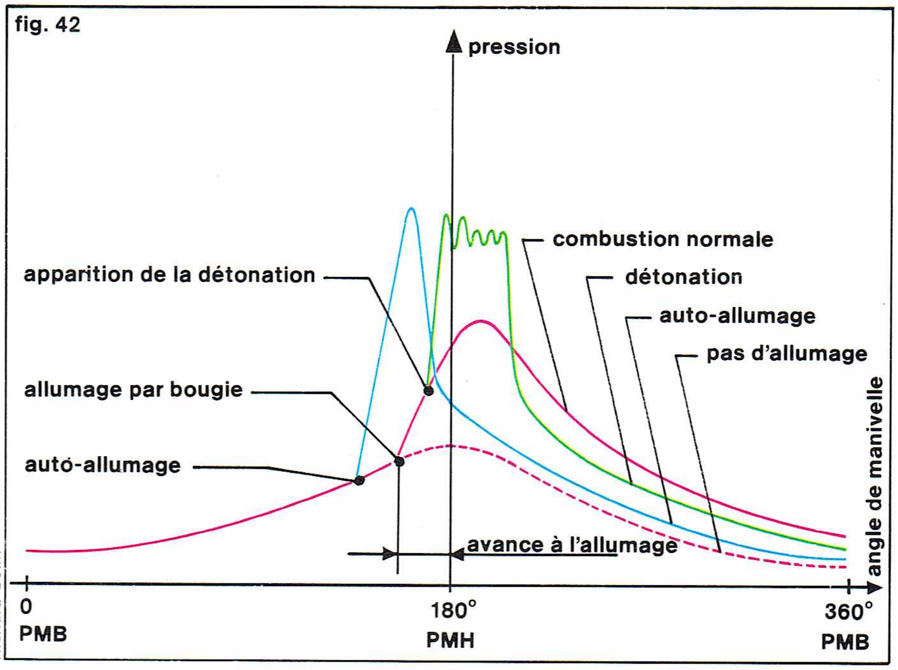

▲ ***Figure 41 :***
bilan thermique moyen d'un moteur à explosion.
Figure 42 :
combustion dans un moteur à allumage commandé.

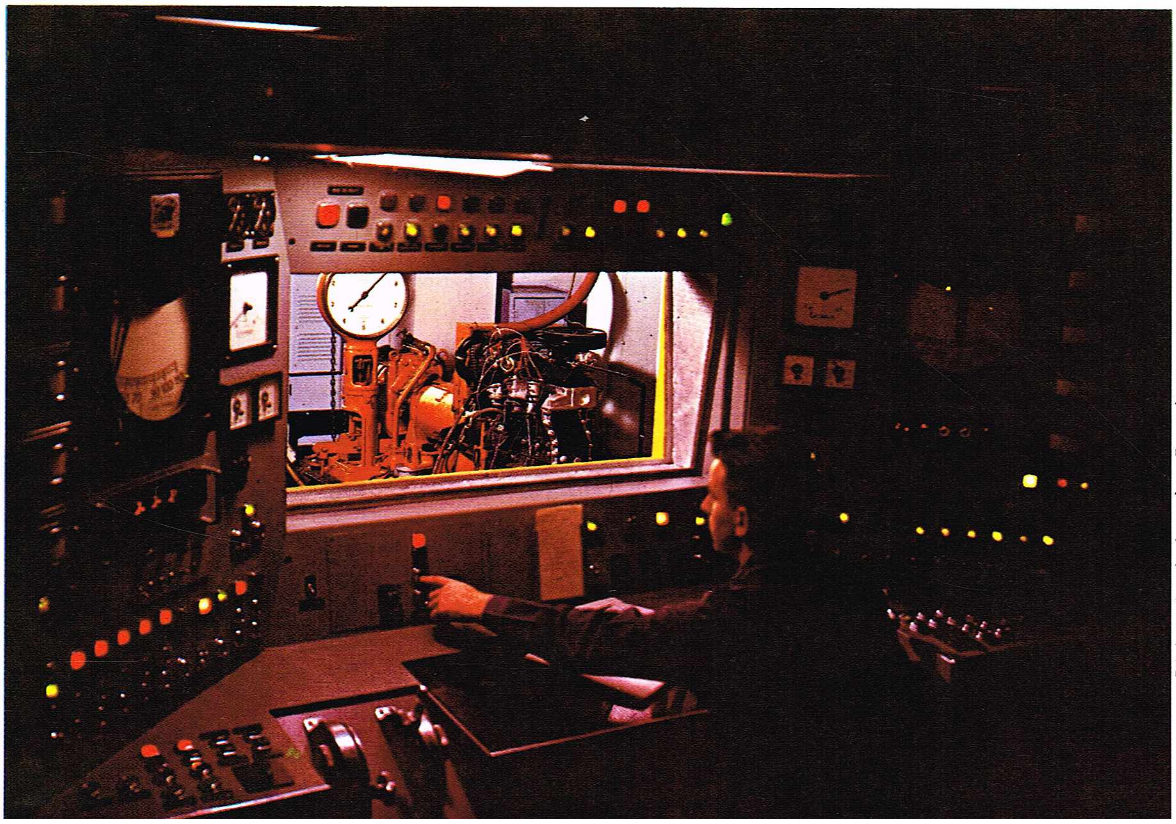

Régie nationale des usines Renault

◀ ***La puissance d'un moteur est généralement mesurée sur un banc d'essai (ici, banc d'essai Renault).***

▶ *Figure 43 : les courbes caractéristiques d'un moteur à explosion.*

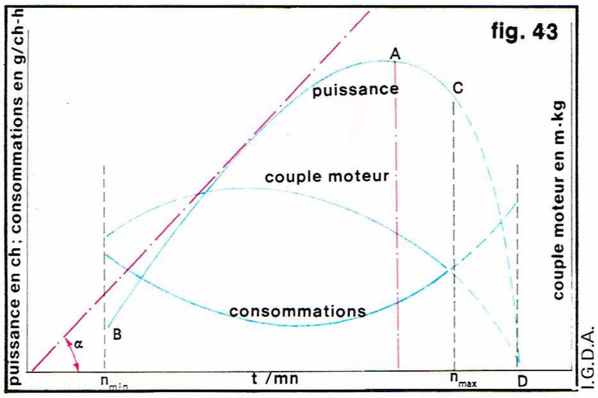

On trouvera sur la *figure* 43 les courbes caractéristiques d'un moteur. On notera la diminution de rendement aux faibles et aux fortes charges, ou autrement dit une augmentation à ces régimes de la consommation spécifique. On voit donc qu'il existe un régime optimal de consommation.

* *Combustion*

La combustion du mélange de l'air avec le combustible est déclenchée par une étincelle jaillissant entre les électrodes d'une bougie. Cet amorçage n'est possible que si la proportion du mélange ne diffère pas trop du rapport exact de combustion (rapport stœchiométrique). Si l'air est en excès, on parle de mélange « pauvre », dans le cas contraire de mélange « riche ». Pour des raisons de rendement, on s'efforce de conserver un léger excès d'air, de façon à brûler la quasi-totalité du combustible.

Malgré la modification de la nature du fluide gazeux apportée par la combustion, on peut considérer, et c'est ce qu'exprime le cycle Beau de Rochas, que la combustion se fait à volume constant, ainsi que la mise à l'échappement (isochores 3-4 et 5-6). On montre que le rendement de ce cycle thermodynamique n'est finalement fonction que du rapport $\frac{V'}{V} = \rho$ qui est appelé « rapport volumétrique de compression ». L'expression du rendement est $\eta = 1 - \frac{1}{\rho\gamma - 1}$.

On cherche donc à augmenter ce rapport volumétrique de compression.

Cependant on constate qu'il n'est pas possible avec un carburant donné de dépasser une certaine valeur du rapport volumétrique de compression sans qu'apparaisse le phénomène de la « détonation ». Celle-ci est provoquée par l'augmentation brutale de la vitesse de combustion qui prend un caractère explosif. Elle se manifeste par un phénomène sonore haute fréquence (5 à 10 000 Hz), appelé « cliquetis » qui peut avoir des conséquences graves sur le moteur : perte de rendement, donc échauffement provoquant des « coups de feu » aux soupapes.

Il ne faut pas confondre la détonation avec l'auto-allumage, qui est un allumage prématuré qui se produit, comme c'est le cas dans le cycle Diesel, lorsque la température d'inflammation est atteinte en un point du mélange. Ce phénomène se manifeste sur les moteurs à explosion lorsque la chambre de combustion présente des points chauds (dépôts ou bougies mal refroidies). Il se produit alors des chocs sur l'embiellage, bruits qu'il faut donc distinguer du cliquetis.

On a déjà noté l'influence prépondérante de la nature du combustible utilisé sur le phénomène de détonation. Celui-ci en effet subit pendant la compression et le début de la combustion des réactions d'oxydation qui entraînent la formation de produits à basse température d'inflammation, ce qui donne à la fin de la combustion une allure explosive.

La résistance d'un carburant donné au phénomène de détonation est mesurée par l'*indice d'octane*. Cet indice est obtenu par comparaison, dans un moteur normalisé, du carburant à essayer avec un mélange de deux carburants de référence, l'un étant très détonant (heptane C_7H_{16}) et l'autre peu détonant (iso-octane : C_8H_{18}). Le pourcentage en volume d'iso-octane nécessaire pour réaliser avec l'heptane un mélange équivalent du point de vue de la détonation avec le carburant essayé représente l'indice d'octane. D'après cette définition, l'heptane a l'indice 0, l'iso-octane l'indice 100. Plus l'indice est élevé, plus le carburant résiste bien à la détonation. L'essai est effectué suivant des méthodes normalisées qui correspondent à des conditions de fonctionnement des moteurs différentes. En France, actuellement, l'indice d'octane (mesuré par la méthode appelée : *Research Method*) est de 90 pour l'essence ordinaire et de 95-98 pour le supercarburant. L'indice d'octane peut atteindre 120 pour l'essence d'aviation, car les moteurs d'avion, très « poussés », ont des rapports volumétriques de compression élevés. L'indice est alors mesuré par d'autres méthodes que celle présentée ci-avant.

Les réactions d'oxydation subies par le carburant et entraînant la détonation peuvent être inhibées par l'addition de composés antidétonants dont le plus connu est le plomb tétraéthyle [Pb $(C_2H_5)_4$].

* *Carburation*

Pour assurer la combustion aussi complète que possible du carburant, il est nécessaire que son mélange avec l'air soit correctement dosé. Cette opération de dosage porte

Nat's photo

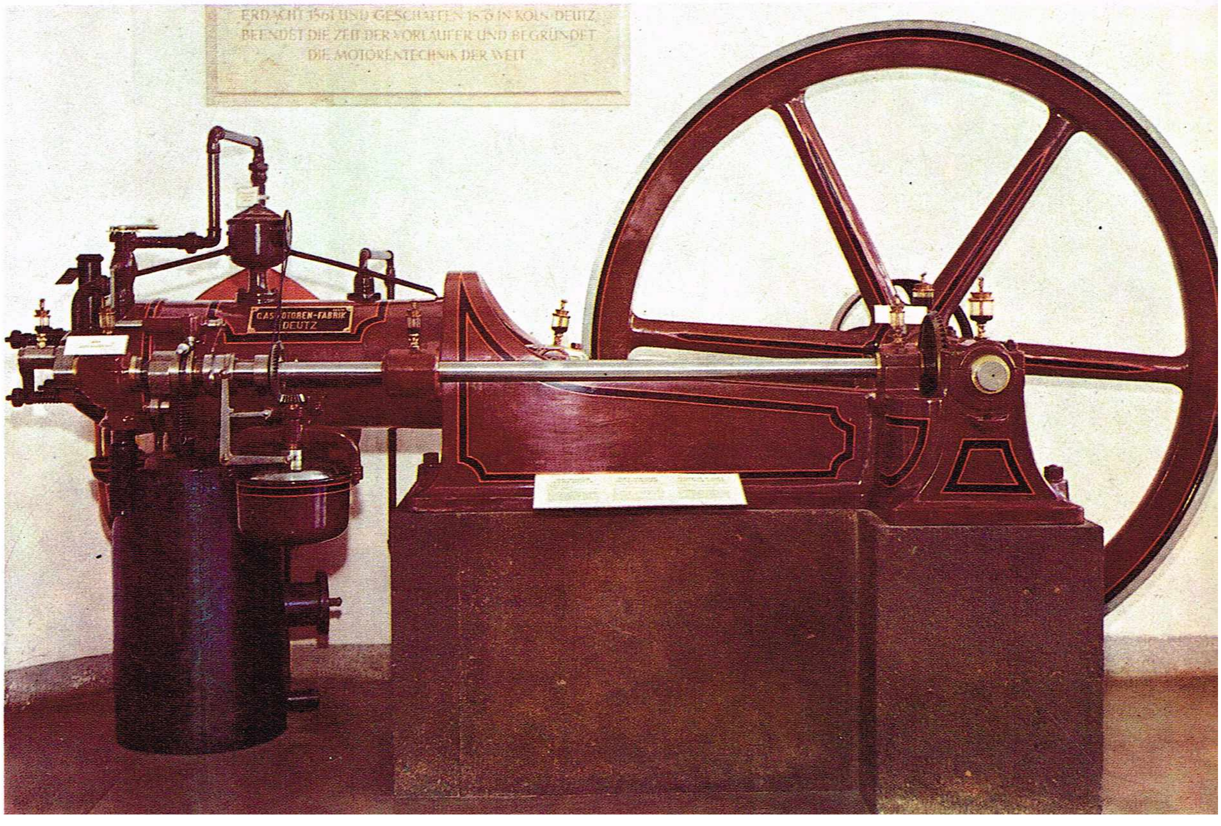

▶ *Moteur réalisé par E. Langen et N. A. Otto (1867).*

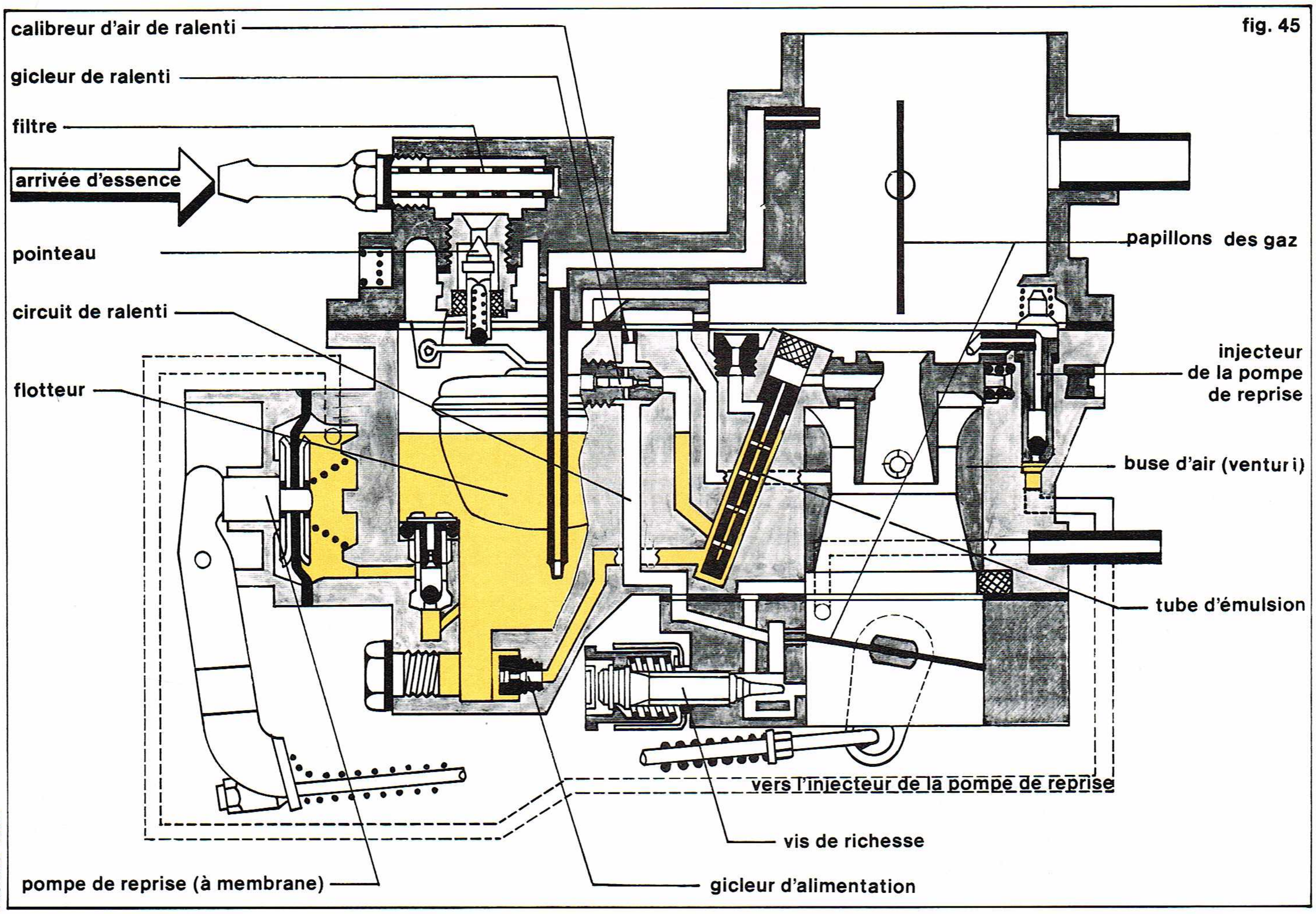

le nom de *carburation*. Celle-ci peut se faire à l'extérieur du moteur dans un appareil appelé *carburateur*. Si le carburant est liquide, il peut être injecté directement dans le cylindre : on parle alors de moteur à injection. Les carburants liquides utilisés sont surtout l'essence, mais aussi des carburants comme l'alcool ou le benzol. On peut également utiliser des gaz comme le gaz naturel, le butane ou le propane. Dans ce cas, le carburateur se réduit à une simple tuyère convergente-divergente au col de laquelle est introduit le gaz.

Le carburateur se compose essentiellement d'une cuve à niveau constant et d'une chambre de carburation. La cuve est alimentée à partir du réservoir, soit par gravité, soit à l'aide d'une pompe. Le niveau est maintenu à peu près constant par un flotteur qui porte un pointeau chargé d'obturer l'arrivée d'essence si le niveau dépasse la valeur normale. Cette cuve communique avec la chambre de carburation par un orifice calibré, ou *gicleur*. Cette chambre de forme cylindrique est en communication d'un côté avec l'atmosphère, de l'autre avec la tuyauterie d'admission du moteur. Elle a la forme d'une tuyère convergente-divergente. Au voisinage du col de la tuyère se trouve placé le gicleur. Au-delà du divergent, appelé aussi diffuseur, se trouve un « papillon » qui permet de faire varier la quantité de mélange carburé admis dans le moteur, et donc la puissance du moteur. Quand le moteur tourne, les cylindres sont successivement en communication avec la tuyauterie d'admission lors du temps d'aspiration (la soupape d'admission est alors ouverte), et le piston dans sa course descendante entraîne un appel d'air dans le carburateur. La vitesse de l'air est augmentée au col de la tuyère, créant ainsi une dépression qui permet l'aspiration du carburant par le gicleur.

Cette dépression étant d'autant plus grande que le régime du moteur est élevé et que le papillon est plus ouvert, la simple commande de ce papillon permet le réglage de puissance du moteur.

En pratique, un carburateur aussi simple que celui qui vient d'être décrit (voir *fig.* 44) fonctionnerait très mal. L'augmentation du débit d'air en fonction de la dépression suit en effet une loi de type parabolique alors que le débit de combustible entraîné suit une loi linéaire. Si le carburateur est bien réglé aux basses charges, le mélange sera trop riche à la puissance nominale; inversement, si le carburateur fonctionne bien aux fortes charges, il sera inopérant aux basses charges. Il faut donc apporter des modifications à ce carburateur simplifié pour qu'il délivre à toutes les allures du moteur un mélange convenablement dosé.

Ces dispositions complémentaires s'appliquent principalement à la marche au ralenti, au démarrage à froid et aux reprises de charge après une baisse de régime du moteur. Un carburateur se présente donc comme un appareil de principe très simple mais dont la réalisation est complexe pour qu'il puisse remplir son rôle convenablement (*fig.* 45).

La vitesse de l'air dans la tuyauterie d'admission est insuffisante pour assurer une bonne pulvérisation. De plus, il est très difficile de distribuer convenablement, dans des conditions identiques de quantité et de dosage, le mélange carburé aux différents cylindres du moteur. Pour ces raisons, on a cherché de nouvelles solutions au problème de la carburation, problème résolu en partie par le carburateur, mais d'une façon approximative. Une solution intéressante est celle de l' « injection » par pompe et injecteur comme sur les moteurs Diesel. Chaque cylindre dispose d'un injecteur et le dosage de l'air et du carburant peut donc être effectué individuellement cylindre par cylindre dans les conditions exactement requises par le régime du moteur. L'injection se fait à haute pression pour l'injection directe (dans le cylindre), à basse pression pour l'injection indirecte (dans la tubulure d'admission). Dans ce deuxième cas, le plus répandu, l'injection se fait à une pression plus faible (10 à 20 bars) pour plus de 100 bars en injection directe (*fig.* 46).

▲ ***Figure 45 :*** ***coupe schématique du carburateur Solex inversé type 32* DIS *(Solex) [extrait documentation Solex].***

▼ ***Figure 44 :*** ***principe d'un carburateur élémentaire.***

I.G.D.A.

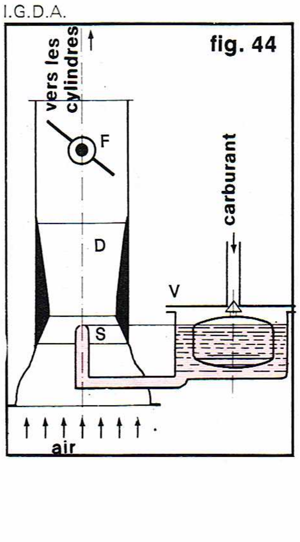

▶ *Figure 46 : les trois types de disposition des carburateurs.*

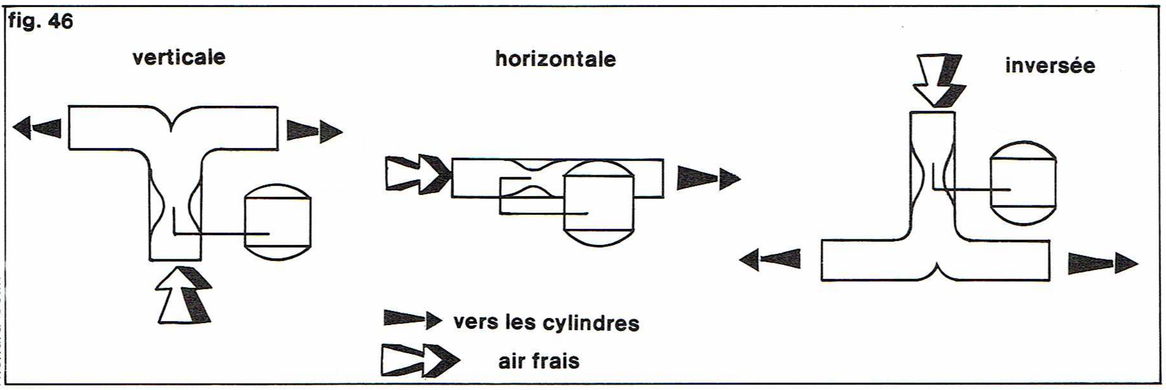

Les moteurs à injection présentent d'autres avantages. En raison de la durée limitée de contact entre le carburant et l'air, les phénomènes d'oxydation propices à la détonation n'ont guère le temps de se produire, ce qui permet d'augmenter le taux de compression ou d'utiliser des carburants de médiocre résistance à la détonation. De plus, grâce à un meilleur dosage en fonction du régime, la consommation d'un moteur à injection est inférieure dans les mêmes conditions de service à celle d'un moteur à carburation classique, et les cas de marche particuliers comme le démarrage à froid ou les reprises sont nettement facilités. Mais l'injection n'a pas que des avantages. Les injecteurs et les pompes d'injection sont des appareils de haute précision, difficiles à fabriquer et donc onéreux. Une des difficultés de fonctionnement des pompes d'injection provient du fait que l'essence, contrairement au combustible Diesel, n'est pas capable d'assurer le graissage des pistons. Malgré des avantages, dont le plus intéressant est la réduction de consommation, les moteurs à injection n'ont pas encore connu, en particulier dans le domaine de l'automobile, un développement très important.

Une autre solution développée pour améliorer la carburation est celle de la pulvérisation forcée. Le procédé consiste ici à améliorer l'atomisation du carburant en injectant, après le carburateur, dans le mélange déjà carburé, de l'air à très grande vitesse produit par une petite soufflante débitant dans une tuyère. Ce procédé donne de bons résultats pour un coût inférieur à celui de l'injection.

▼ *Carburateur Solex double corps; les carburateurs modernes ont été dotés de dispositifs intégrés qui les rendent plus complexes.*

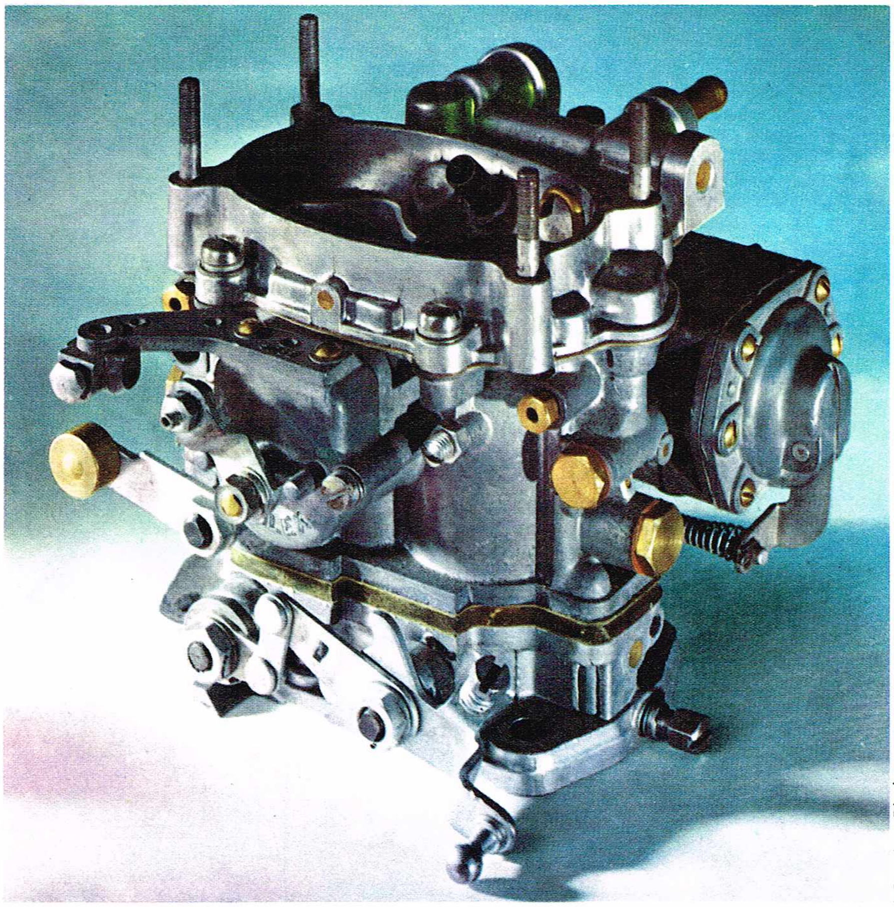

* *Allumage*

Le déclenchement de la combustion, ou allumage, est assuré par une étincelle électrique jaillissant entre les deux électrodes d'une bougie portées à une différence de potentiel de l'ordre de 10 000 volts. L'électrode centrale, isolée du culot de la bougie, est reliée au circuit d'allumage; l'autre électrode est portée généralement par le culot et se trouve de ce fait à la masse. Le circuit d'allumage a pour rôle de distribuer la haute tension sur les têtes de bougies aux instants précis où l'allumage doit être commandé. Les systèmes les plus anciens et les plus couramment employés sont l'allumage par batterie et l'allumage par magnéto. Depuis quelques années est apparu l'allumage électronique.

Le système d'*allumage par batterie* comprend un transformateur, appelé habituellement bobine, au rapport de transformation très élevé. Son circuit primaire, alimenté en basse tension par la batterie, comporte un système appelé *rupteur* qui coupe périodiquement le circuit. La variation de courant induit dans le circuit secondaire un courant haute tension qui est envoyé aux bougies par l'intermédiaire d'un distributeur. Pour que l'ensemble fonctionne, on voit que le fonctionnement du rupteur et du distributeur doit être synchronisé avec la rotation du moteur. Ceci est très simplement réalisé par un dispositif tournant ou *allumeur* entraîné par le moteur lui-même et qui comporte à la fois le rupteur (vis platinée) et le doigt de distribution. Pour éviter la détérioration du rupteur par le courant de coupure, un condensateur est disposé sur le circuit primaire pour absorber ce courant et éviter une étincelle au rupteur (*fig.* 47).

Dans l'*allumage par magnéto*, tous les organes de l'allumage par batterie, à l'exception de la bougie, sont regroupés en un seul appareil qui est entraîné par le moteur. L'énergie électrique est fournie par un générateur à aimant permanent (magnéto-génératrice). Ce système d'allumage est plus coûteux à l'achat et à l'entretien que le système d'allumage par batterie. Il présente aussi l'inconvénient de ne délivrer au démarrage qu'un courant de faible intensité, ce qui ne favorise pas l'allumage du moteur. Son seul avantage réside dans le fait qu'il n'a pas besoin de batterie pour fonctionner. Il n'est donc utilisé pratiquement que sur les moteurs de motocyclettes de petite et moyenne cylindrées couplé avec un volant d'inertie. Il est désigné dans ce cas par l'expression de *volant magnétique* (*fig.* 48).

Les systèmes d'*allumage électronique* visent à augmenter la puissance de l'étincelle d'allumage. Les principaux éléments de l'allumage par batterie sont conservés. Dans certains systèmes, allumage dit transistorisé, on simplifie le travail du rupteur en amplifiant l'impulsion qu'il donne, et c'est un transistor qui commande la bobine. Dans certains dispositifs, le rupteur mécanique est lui-même remplacé par un système de synchronisation magnétique ou optique commandé par le vilebrequin qui délivre un signal qui est amplifié par des circuits semi-conducteurs. Tous ces systèmes ont l'avantage de faciliter les démarrages à froid et les marches à haut régime. Ils sont malheureusement d'un prix élevé, ce qui limite

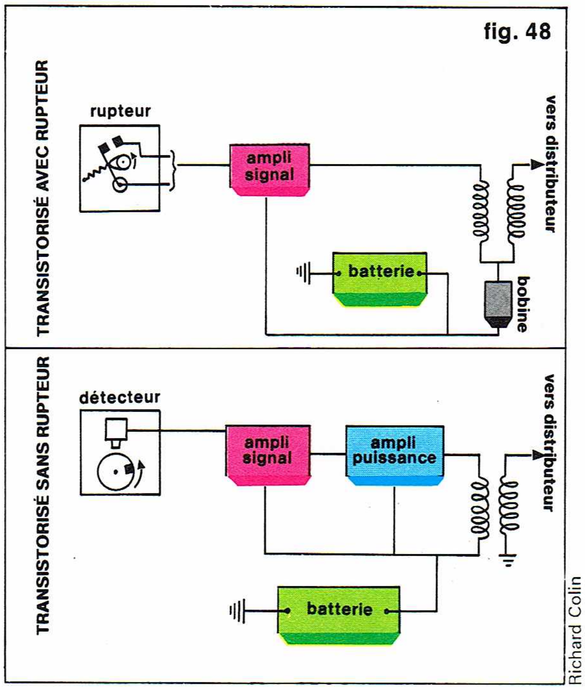

Richard Colin

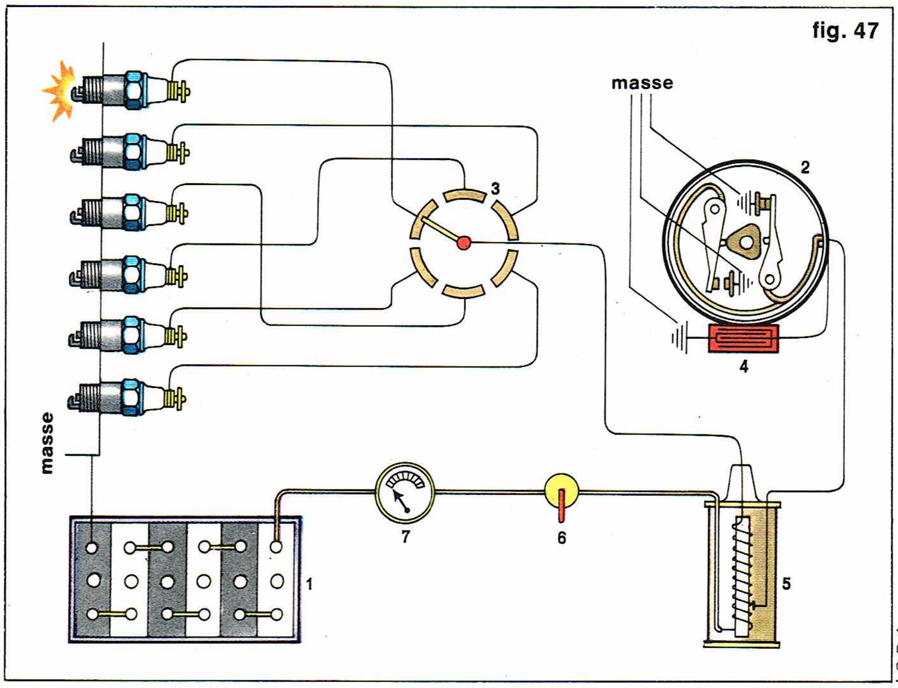

I.G.D.A.

leur développement. Ils s'imposent sur les moteurs poussés (vitesse supérieure à 10 000 t/mn).

* *Fonctions auxiliaires*

A côté de ces fonctions principales que sont la carburation et l'allumage, le fonctionnement d'un moteur exige que soient remplies les fonctions auxiliaires suivantes.

— Démarrage : il est assuré très généralement par un moteur électrique de lancement, alimenté en continu par la batterie. Les moteurs de faible puissance peuvent être lancés manuellement.

— Graissage : il s'effectue sous pression à l'aide d'une pompe volumétrique attelée qui aspire l'huile dans le carter.

— Refroidissement : il doit maintenir les parties sensibles du moteur en dessous de la température de tenue de l'huile de graissage (200 °C max.). Il peut s'effectuer à l'air (petites cylindrées et moteurs d'avion) ou à l'eau.

— Échappement : un collecteur d'échappement est nécessaire pour faciliter la détente des gaz de combustion à la fin du temps d'échappement. Ce collecteur comporte un silencieux pour diminuer le bruit d'échappement du moteur.

* *Domaines d'utilisation du moteur à explosion*

Depuis sa relève par la turbine à gaz dans le transport aérien, le moteur à explosion est surtout utilisé dans les transports terrestres et la propulsion des embarcations. Ses qualités, parmi lesquelles il faut citer surtout sa légèreté (masse spécifique exprimée en kg/kW peu élevée), le destinent particulièrement à ces applications. Les gammes d'utilisation sont :

— monocylindres, généralement cycle 2 temps, pour les motocyclettes, petites embarcations et petits engins autonomes ;

— moteurs de 2 à 8 cylindres, cycle 4 temps, pour les automobiles, camions et embarcations.

Si l'on excepte certaines applications (voiture de course ou avion), la puissance des moteurs à explosion reste limitée, car ce type de moteur est vite concurrencé par le moteur Diesel dès que la puissance augmente et que la masse spécifique n'est plus un paramètre d'importance.

Il n'est pas besoin d'insister sur le succès du moteur à explosion pour la propulsion automobile. Le développement considérable de ce moyen de transport a aujourd'hui en raison de son succès même une contrepartie : la pollution atmosphérique des villes par les gaz d'échappement.

C'est donc le souci de faire des moteurs moins polluants qui va probablement être chez les constructeurs un des principaux facteurs d'évolution du moteur à explosion durant les prochaines décennies.

Moteurs Diesel

* *Description sommaire*

Le moteur Diesel fonctionne suivant un cycle à 4 temps ou à 2 temps comme le moteur à explosion avec pour différence essentielle le mode de déclenchement de la combustion. Le combustible est en effet pulvérisé, dans le cylindre en fin de course du piston (PMH), dans l'air comburant porté à une température élevée par une compression sensiblement adiabatique. Les particules de combustible s'échauffent progressivement au cours de leur trajet dans la chambre de combustion, et, lorsque les premières d'entre elles atteignent leur température d'inflammation, la combustion démarre spontanément. Un moteur Diesel ne comporte donc ni carburateur ni circuit d'allumage ; il a besoin en revanche d'un système d'injection.

* *Cycle théorique — Cycle réel*

Le cycle à 4 temps de Diesel (brevet déposé en 1892) est caractérisé par une combustion à pression constante (injection du combustible au PMH). Il peut se décrire ainsi (voir *fig.* 49) :

1.2 : aspiration à pression constante (p. atmosphérique) ;

2.3 : compression adiabatique avec en fin injection de combustible ;

3.4.5 : combustion à pression constante et détente adiabatique ;

5.2.1 : mise à l'échappement du cylindre et évacuation.

Le rendement thermodynamique de ce cycle augmente, comme celui du cycle Beau de Rochas, avec le taux de

▲ ***A gauche, figure 48 : schéma de principe de l'allumage électronique. A droite, figure 47 : schéma du principe de l'allumage par batterie : 1, batterie ; 2, rupteur ; 3, distributeur ; 4, condensateur ; 5, bobine ; 6, interrupteur ; 7, ampèremètre.***

▼ ***Figure 49 : cycle Diesel théorique.***

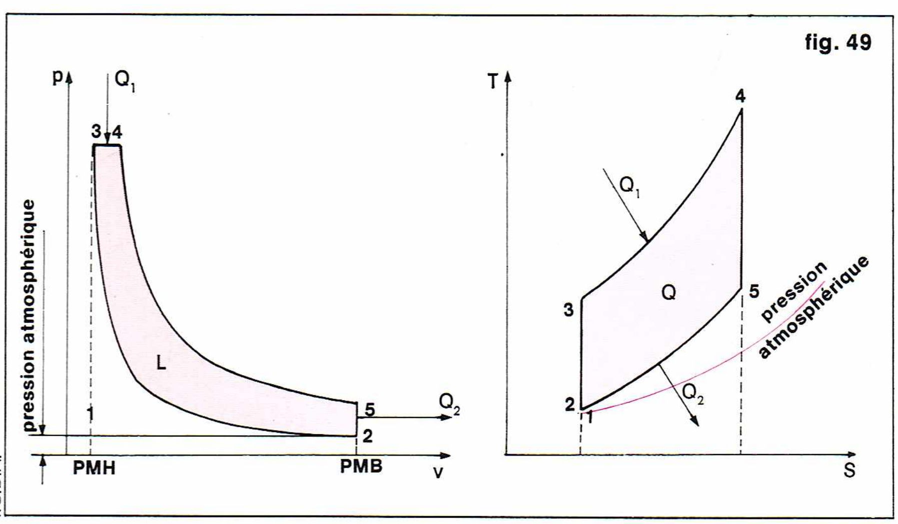

I.G.D.A.

▶ *A gauche, figure 50 :* **cycle de Sabathé** *ou* **cycle mixte.** *A droite, figure 51 :* **comparaison entre les cycles Diesel théorique et réel.**

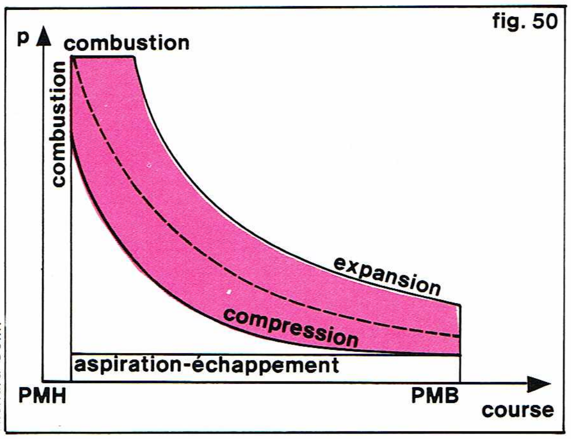

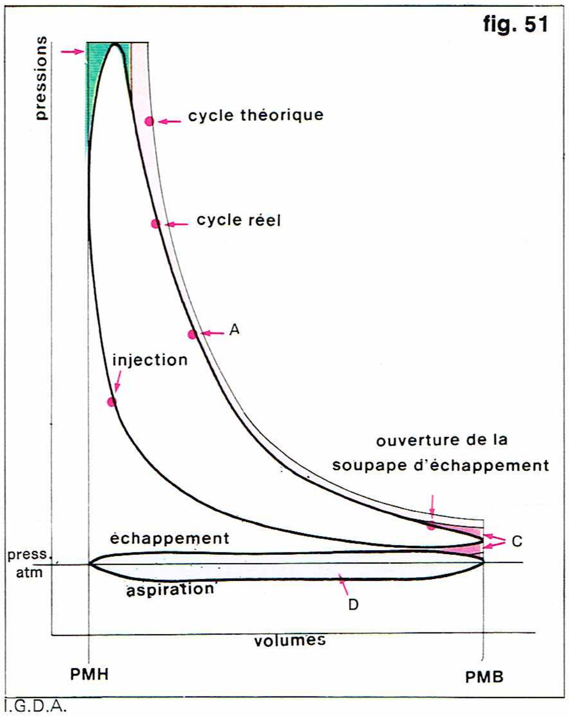

compression ; il diminue quand $\frac{v'}{v}$ augmente. En pratique, la combustion commence avant le PMH et on la décompose, pour les besoins du calcul, en deux parties : une à volume constant, une à pression constante. Le cycle ainsi obtenu (voir *fig.* 50) est appelé cycle de Sabathé ou cycle mixte. Il peut être considéré comme la réunion d'un cycle Beau de Rochas et d'un cycle Diesel accolés le long d'une adiabatique commune.

Le cycle réel d'un moteur Diesel (voir *fig.* 51) diffère du cycle théorique pour des raisons analogues à celles du moteur à explosion : laminage à l'aspiration et à l'échappement, compression et détente non rigoureusement adiabatiques. Pour obtenir une surface de cycle maximale, l'expérience montre que la régulation théorique doit être modifiée comme suit :

a) Début de l'injection ou « avance à l'injection »
b) Ouverture de l'échappement
c) Ouverture de l'aspiration } *croisement des*
d) Fermeture de l'échappement } *soupapes*
e) Fermeture de l'aspiration

* *Rendement — Bilan thermique*

On a déjà noté dans l'introduction que le rendement global des moteurs Diesel est élevé et sensiblement supérieur à ceux du moteur à explosion. Il varie entre 0,25 et 0,4. Ceci est dû aux températures plus élevées atteintes dans ce type de moteur. Ce rendement correspond à une consommation spécifique de 160 à 200 g/chl-h. Le bilan thermique (voir *fig.* 52) diffère donc légèrement de celui du moteur à explosion.

* *Facteurs de puissance*

Comme pour les moteurs à explosion, la puissance effective d'un moteur Diesel peut s'exprimer par la formule :

$$P = kD^2CNp_m$$

dans laquelle D est le diamètre du cylindre, C la course du piston, N la vitesse, p_m la pression moyenne définie comme pour le moteur à explosion et k un coefficient fonction des unités choisies et du nombre de cylindres.

L'alésage D peut être très grand, jusqu'à 1 m de diamètre, la course étant dans ce cas de 1,5 m à 1,8 m. Le rapport C/D est sur ces gros moteurs toujours supérieur à 1,5 et quelquefois plus grand que 2. Ces moteurs tournent à faible vitesse (100 à 300 t/mn) et on les appelle des *moteurs lents*. Par opposition, on trouve des moteurs dits *rapides* de plus petite cylindrée dont la vitesse varie entre 150 et 1 500 t/mn. Le poids étant approximativement proportionnel à la cylindrée (D^2C), la puissance massique est inversement proportionnelle à la vitesse. Augmenter la vitesse est donc le moyen le plus simple pour augmenter la puissance massique des moteurs.

La fatigue du moteur est fonction de la puissance moyenne p_m mais aussi de la pression maximale. On s'efforce d'augmenter la pression moyenne sans trop accroître la pression maximale : d'une part en se rapprochant du processus de combustion à pression constante, d'autre part en suralimentant le moteur comme on le verra plus loin.

* *Combustion*

Pour que la combustion se déclenche et se poursuive dans un cylindre de moteur Diesel, il faut que les deux conditions suivantes soient réalisées.

— Température de l'air supérieure à la température d'inflammation : pour des rapports volumétriques de compression de 15 environ, on peut atteindre en fin de compression une température de 500 à 600 °C alors que la température d'inflammation du gas-oil est de 350 °C environ.

— Contact étroit entre combustible et carburant : après inflammation du combustible, l'air contenu dans la chambre de combustion s'appauvrit progressivement en oxygène et le combustible peut alors, sauf si certaines précautions sont prises, ne plus rencontrer l'oxygène nécessaire à sa combustion, en particulier au nez de l'injecteur. Ce risque est éliminé grâce à un excès d'air important et à la turbulence créée par l'expansion des gaz de combustion.

On distingue plusieurs phases successives dans la combustion (voir *fig.* 53) :

— un délai d'allumage entre le début de l'injection et le début de l'inflammation ;

— une phase de combustion rapide du combustible déjà injecté au moment de l'inflammation, entraînant une élévation brutale de la pression qui est à l'origine des chocs sur l'embiellage (chocs Diesel) ;

— une période de combustion réglée par le débit de l'injecteur appelée période de combustion contrôlée, pendant laquelle le combustible s'enflamme au fur et à mesure de son introduction. La combustion devrait en principe se terminer en fin d'injection, mais elle se poursuit sur les moteurs rapides durant une fraction appréciable de la course de détente.

▼ *Figure 52 :* **bilan thermique moyen d'un moteur Diesel.**

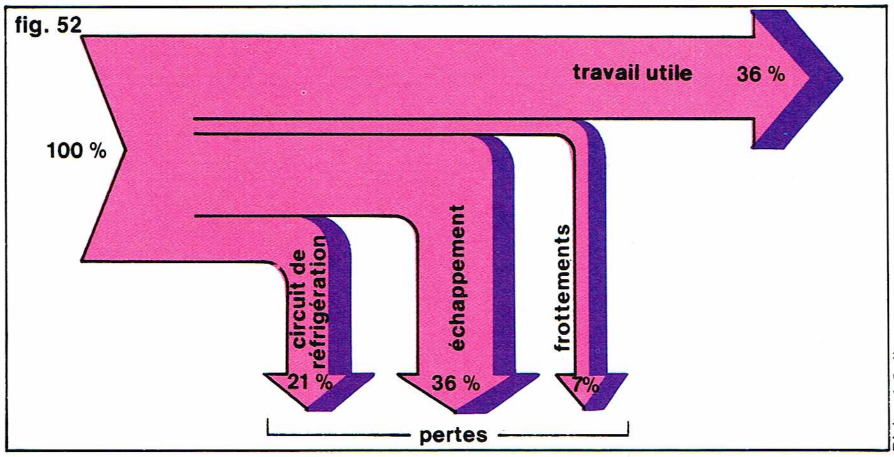

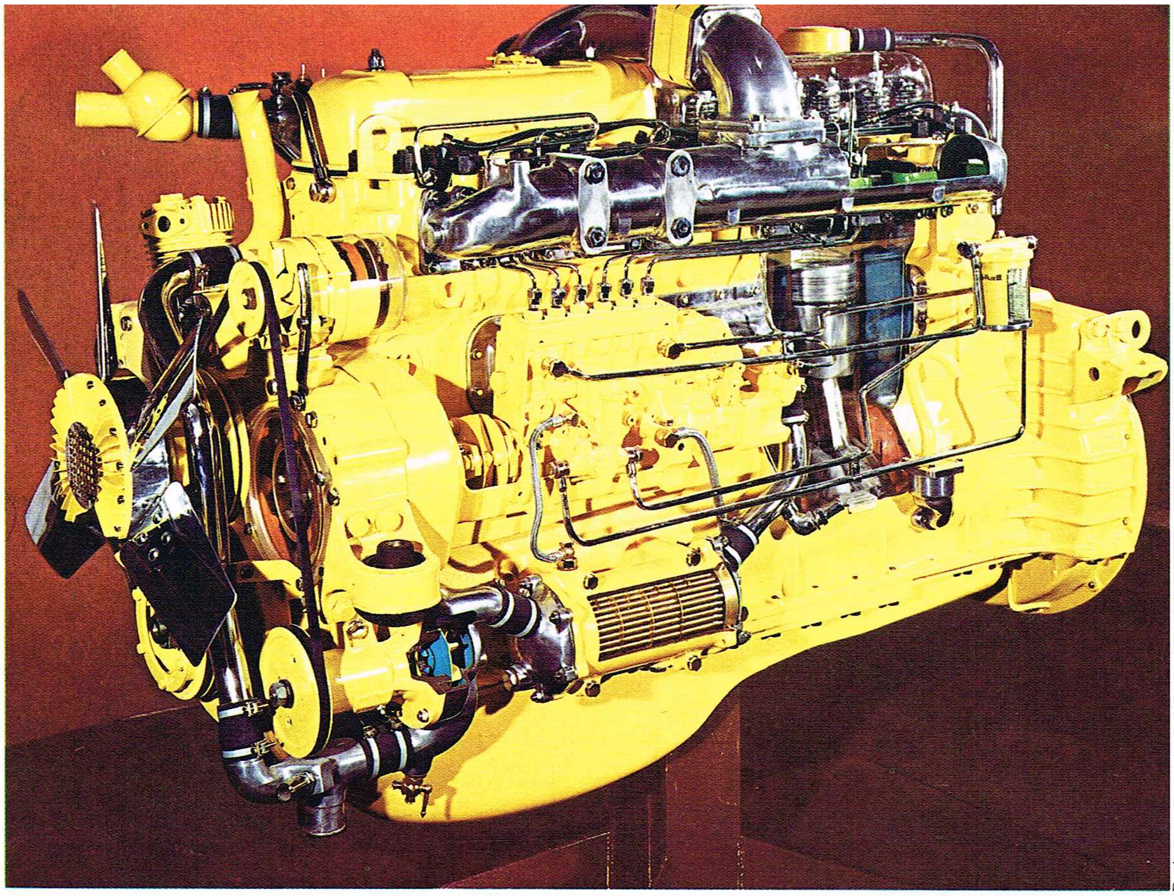

◀ *Moteur Diesel Berliet MDS 06.35.40, (6 cylindres, 265 ch) à aspiration atmosphérique.*

I.G.D.A.

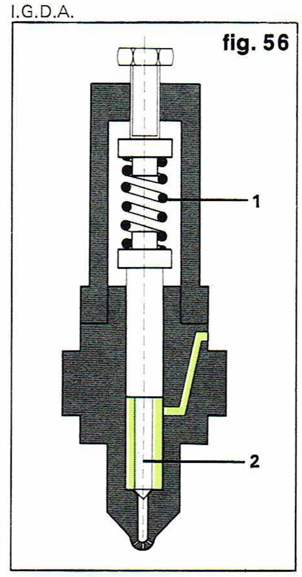

Berliet

Le délai d'inflammation est donc l'élément important des caractéristiques d'un combustible Diesel puisqu'il est à l'origine, s'il est trop important, du choc Diesel. On l'apprécie pour un combustible donné par l'*indice de cétène*. La méthode d'estimation est analogue à celle de l'indice d'octane pour la détonation des combustibles des moteurs à explosion. On attribue au cétène ($C_{16}H_{32}$), de faible délai, l'indice 100, et au méthyl-napthtalène ($C_{10}H_7CH_3$), à grand délai, l'indice 0. L'indice de cétène d'un combustible est déterminé, par comparaison avec le mélange des deux hydrocarbures de référence, comme le pourcentage en volume de cétène dans ce mélange qui donne le même délai d'allumage que le combustible donné. Cette mesure est effectuée sur un moteur standard. L'indice de cétène peut être amélioré par des additifs comme le nitrate d'éthyle ($NO_3C_2H_5$), qui ont une action inverse à celle des antidétonants. Incorporé dans le combustible, il réduit le délai d'allumage admis dans l'air et facilite le départ du moteur. Le nombre de cétène admissible varie de 40 sur les moteurs lents à 80 pour les moteurs rapides.

D'autres caractéristiques du combustible intéressent la combustion : la volatilité qui influe sur la rapidité de la combustion, la température d'inflammation, la viscosité qui doit en particulier être suffisante pour graisser les pompes d'injection, le pouvoir calorifique et le carbone résiduel. Il faut citer également la teneur en cendres et la teneur en soufre dont les effets nuisibles, si ces teneurs sont trop élevées, concernent surtout l'endurance du moteur.

Malgré toutes ces qualités requises pour le combustible, les moteurs Diesel peuvent brûler des produits d'origines très variées. En pratique, on ne brûle guère que les produits de distillation du pétrole brut désignés sous le terme générique de « gas-oil ».

* *Systèmes d'injection*

Le système d'injection du combustible doit :

— introduire dans le cylindre pendant une période bien précise du cycle une quantité bien déterminée de combustible;

— assurer la pulvérisation convenable du combustible, celle-ci devant être d'autant plus fine que la vitesse du moteur est élevée et que son alésage est petit.

Par pulvérisation fine on entend une division du combustible en gouttelettes suffisamment fines, ce qui réduit le délai d'inflammation. Ce diamètre varie de une à plusieurs dizaines de microns suivant le procédé d'injection employé. Il faut également que la pénétration du jet de combustible dans l'air sous pression soit suffisante pour assurer un bon mélange entre les deux. Cette pénétration est directement fonction de l'énergie mise en jeu dans le système d'injection. Cette énergie est fournie soit par de l'air comprimé dans les moteurs à insufflation, soit par des pompes dans les moteurs à injection. On distingue donc deux procédés d'injection : l'*injection pneumatique* et l'*injection mécanique*.

Dans l'*injection pneumatique* (voir *fig.* 54), le combustible est dosé par une pompe à piston et refoulé dans l'injecteur qui le pulvérise dans le cylindre à l'aide d'air sous pression de 60 à 80 bars. Dans l'*injection mécanique* (*fig.* 55), le dosage et la pulvérisation du combustible sont assurés par une pompe qui refoule le combustible sous une forte pression (300 à 800 bars) dans l'injecteur.

Chaque procédé a ses avantages et ses inconvénients. L'injection pneumatique consomme beaucoup plus d'énergie que l'injection mécanique mais donne une pulvérisation bien supérieure. Ce procédé a été utilisé en règle générale sur les premières générations de moteurs Diesel. Il est resté en usage ensuite sur des moteurs lents de forte puissance. Aujourd'hui on peut dire que l'injection mécanique est généralisée.

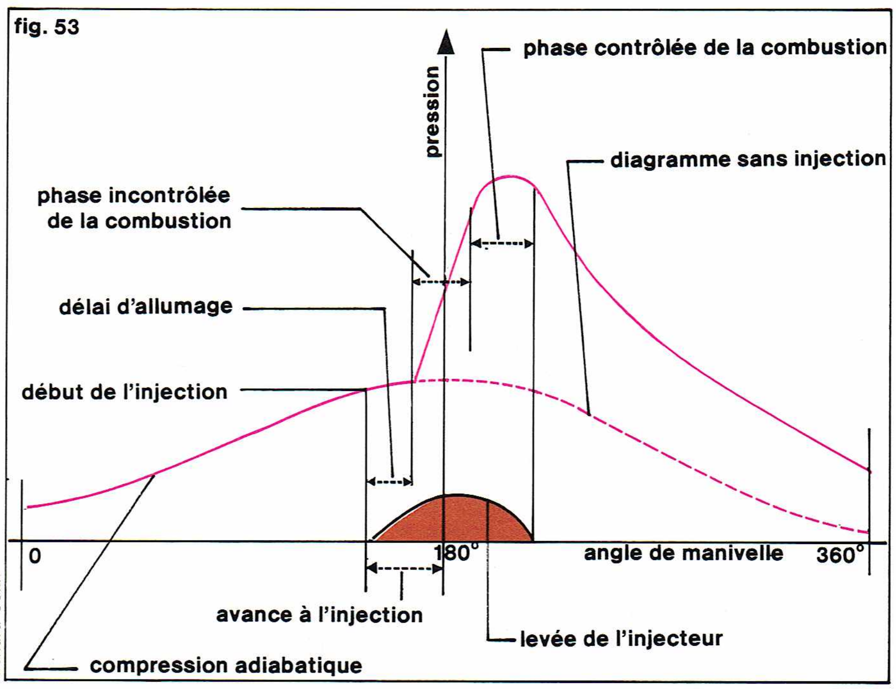

Richard Colin

▲ ***Figure 56 ; injecteur pour injection mécanique : 1) ressort de tarage; 2) aiguille. Figure 53 : phases de la combustion dans un moteur à cycle Diesel.***

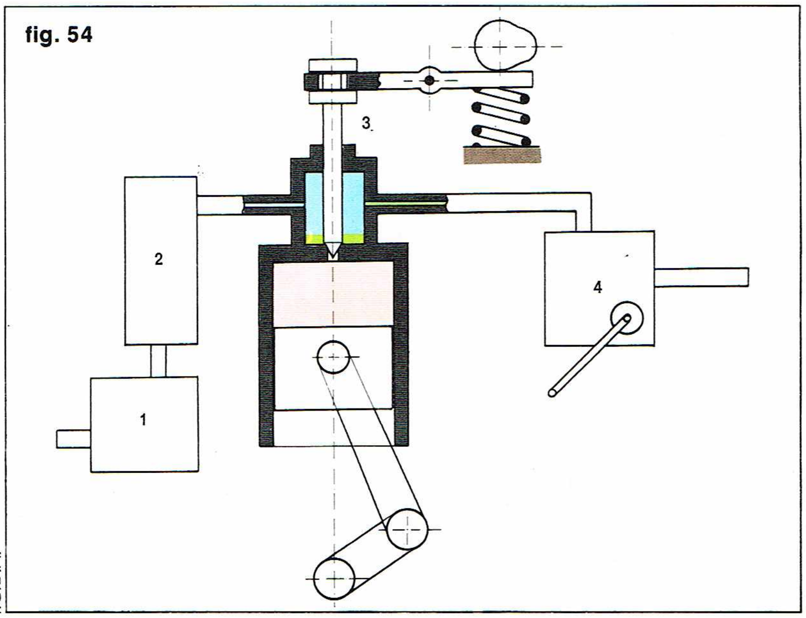

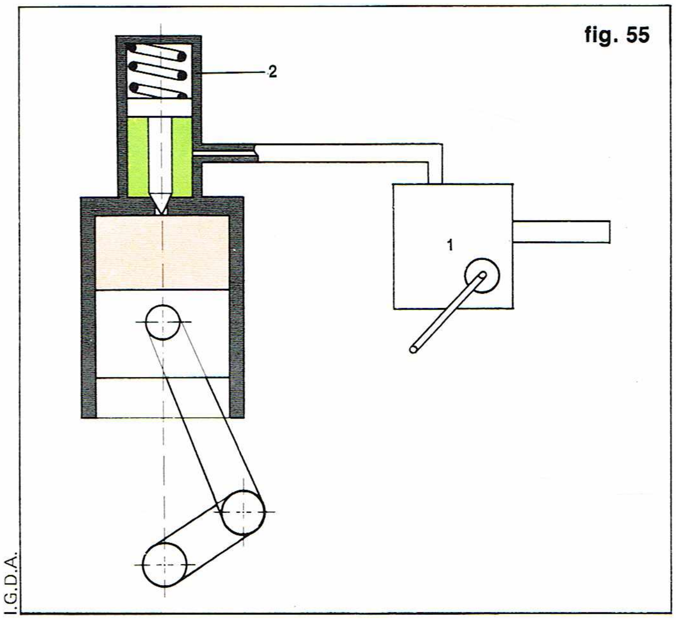

▲ ***Figure 54 ;** schéma de l'injection pneumatique du combustible : 1, compresseur ; 2, bonbonne d'air sous pression ; 3, injecteur ; 4, pompe.*
***Figure 55 ;** schéma de l'injection mécanique : 1, pompe ; 2, injecteur.*

▼ *Pompe à injection rotative du moteur Diesel Berliet MID 06.20.30 (6 cylindres, 185 ch).*

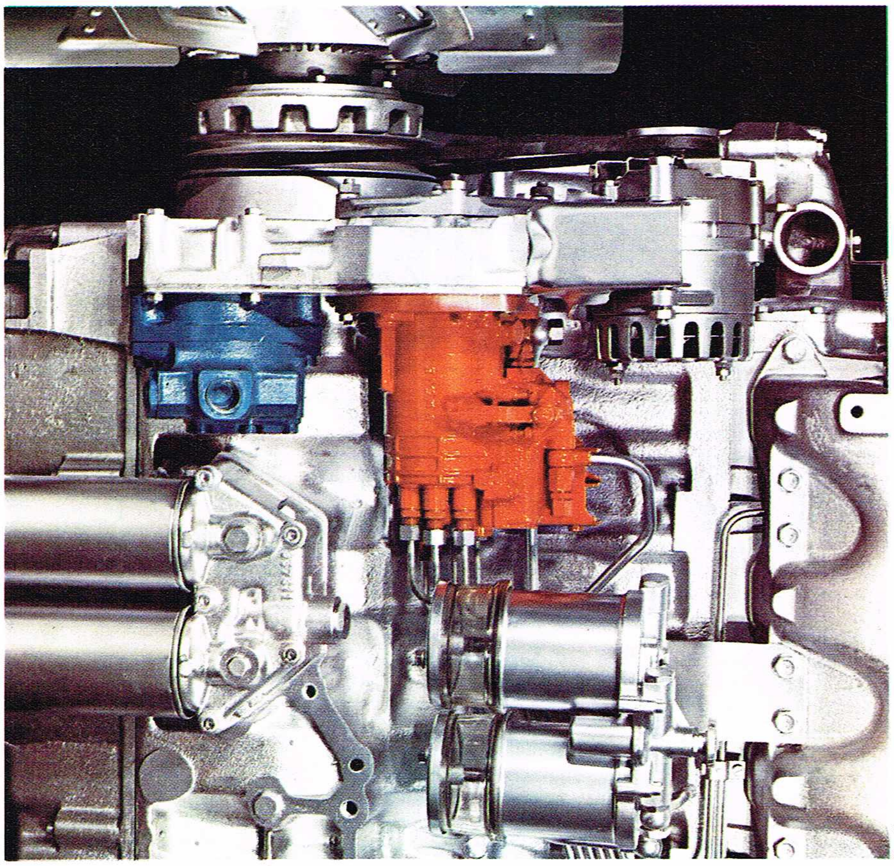

* *Injecteurs*

L'injecteur doit assurer :

— la pulvérisation,

— la répartition du jet de combustible dans la chambre.

Cette double fonction est assurée par une *buse* comportant un ou plusieurs orifices calibrés débouchant dans le cylindre. Divers modèles d'injecteurs ont été imaginés mais avec la généralisation de l'injection mécanique, le type d'injecteur fermé par aiguille (voir *fig.* 56) s'est imposé. Le principe en est simple : l'aiguille-pointeau qui ferme l'orifice de pulvérisation est commandée hydrauliquement par le combustible lui-même. Cette aiguille s'ouvre lorsque la pression de refoulement de la pompe à combustible qui s'applique dans la chambre permet de contrebalancer l'effort d'un ressort de tarage. Cette pression d'ouverture est de 200 bars environ, l'aiguille se ferme sensiblement à la même pression. On évite par cette aiguille la mauvaise pulvérisation qui se produirait en début et en fin d'injection par insuffisance de pression. Il faut noter qu'entre ces deux valeurs des pressions d'ouverture et de fermeture, la pression est réglée par la pompe d'injection, et elle atteint des valeurs notablement supérieures à la pression d'ouverture de l'aiguille. On trouve des injecteurs à trou unique ou à trous multiples.

Les trois parties essentielles de l'injecteur sont donc la *buse* qui porte le siège de l'aiguille et les orifices de pulvérisation, l'*aiguille* qui est responsable de l'étanchéité vers le cylindre et vers l'extérieur, et le *ressort de tarage*. Du fait de leur situation, les injecteurs risquent de subir des échauffements préjudiciables à leur fonctionnement : vaporisation du combustible, coincement de l'aiguille, obstruction des orifices de la buse. Il y a donc nécessité de réfrigération. Celle-ci peut être assurée par le combustible lui-même qui traverse l'injecteur, à condition que son débit soit suffisant. Cette condition est remplie sur les moteurs qui ont une forte puissance massique, c'est-à-dire les moteurs rapides. Sur les moteurs lents, cette réfrigération est assurée par un circuit d'eau ou de combustible, et effectuée au plus près de la buse.

* *Pompes à combustible*

Le rôle de cette pompe est d'introduire la quantité convenable de combustible à point nommé, c'est-à-dire d'effectuer le *dosage*.

Les solutions les plus répandues associent une pompe à chaque cylindre, celle-ci étant reliée à l'injecteur par une tuyauterie.

Les pompes sont toujours du type « piston plongeur ». Leur course est synchronisée avec celle du piston moteur concerné. Il y aura une course de refoulement tous les 2 tours pour les moteurs 4 temps, tous les tours pour les 2 temps.

La loi de débit d'injection est fixée par des dispositions constructives, tel un profil de came. Des dispositifs permettent de régler en marche l'avance à l'injection et la quantité de combustible injectée à chaque cycle. Ces réglages peuvent être effectués soit par action directe sur le débit, soit par variation de la course du piston plongeur. On trouvera sur la *figure* 57 le schéma d'une pompe à réglage par excès de débit.

Les conditions de fonctionnement des pompes à combustible de moteur Diesel sont particulièrement dures. Sous une pression élevée (pouvant atteindre 500 bars), elles doivent refouler du combustible en quantité pouvant être très faible avec cependant une bonne précision de dosage. Ces pompes n'ont généralement pas de presse-étoupe, et l'étanchéité entre le piston et son fourreau est assurée par un jeu très faible qui nécessite une grande qualité d'usinage : rectification suivie d'un rodage. L'ensemble piston-fourreau constitue alors un ensemble indissociable sans interchangeabilité possible des éléments.

La tuyauterie de liaison entre la pompe et l'injecteur joue un rôle important par sa longueur, car cette tuyauterie peut être le siège de phénomènes hydrauliques complexes. Certains constructeurs ont regroupé les deux appareils en un seul organe, appelé *injecteur-pompe*, actionné par une came avec ou sans culbuteurs.

* *Chambres de combustion*

La chambre de combustion est le volume délimité par le cylindre, la culasse et le piston, et dans lequel se déroule la combustion. La répartition globale du combustible dans l'air dépend de la forme de la chambre de combustion. Le problème à résoudre est de permettre aux dernières fractions de combustible injectées de trouver l'oxygène nécessaire à leur combustion. C'est par un brassage énergique de la masse gazeuse en cours de combustion que l'on essayera d'atteindre ce but.

Il s'agit donc de créer des conditions de turbulence. Les solutions techniques se résument à deux grandes catégories.

— Les *moteurs à injection directe*. La chambre de combustion n'a aucune particularité (turbulence naturelle) ou comporte des dispositions constructives simples telles que le creusement de la tête du piston ou la disposition dissymétrique des soupapes (turbulence activité). Les premières chambres conviennent bien aux moteurs lents à 2 temps, les deuxièmes aux moteurs 4 temps semi-rapides.

— Les *moteurs à chambre de précombustion*. Sur ces moteurs, la chambre de combustion est divisée en deux parties de volume inégal séparées par un étranglement. L'injection s'effectue dans la plus petite partie (1/3 du volume total) ou antichambre qui communique avec le cylindre par une ou plusieurs tuyères. Des inflammations du combustible dans l'antichambre, l'ensemble de la masse gazeuse s'écoule violemment dans la partie principale de la chambre par les tuyères, ce qui provoque la turbulence souhaitée. Sur certains moteurs, l'antichambre peut être relativement très grande par rapport au volume de haut de cylindre et constitue une véritable chambre de précombustion. Ces dispositions conviennent particulièrement aux moteurs rapides (*fig.* 58).

* *Alimentation en air et expulsion des gaz brûlés*

Sur les moteurs 4 temps, la distribution se fait, comme sur les moteurs 4 temps à explosion, par des soupapes. Le cycle 4 temps permet un bon remplissage des cylindres et il est donc possible d'obtenir des puissances moyennes relativement élevées. Sur les moteurs 2 temps, on a vu qu'un balayage du cylindre était nécessaire, et, sur les moteurs à explosion, le balayage est réalisé par le carter mais cette solution reste limitée à des petits moteurs, monocylindrés en général (*fig.* 59).

La raison en est simple : il y a perte de combustible pendant le balayage puisque celui-ci est effectué avec le mélange carburé. Dans le cas du moteur Diesel, le balayage se faisant avec de l'air pur, il n'y a aucun inconvénient et c'est même un avantage de laisser partir une fraction de l'air avec les gaz d'échappement.

Pour produire l'air de balayage, on utilise une pompe de type volumétrique ou une soufflante. La pompe volumétrique peut être indépendante ou attelée au moteur. La soufflante, étant donné sa vitesse optimale, est généralement indépendante et entraînée par un moteur électrique.

L'air de balayage est canalisé par un collecteur qui dessert les cylindres. Le principe de balayage, opération qui, rappelons-le, combine dans un même temps la chasse des gaz brûlés et l'admission d'air frais, est réalisé par les constructeurs :

— entièrement par lumières (admission et échappement) : on réalise ainsi un balayage transversal appelé aussi balayage « en boucle » ;

— par une combinaison de lumières et de soupapes : l'admission se fait par lumière et l'échappement par soupapes ou inversement ; c'est le balayage « équicourant ».

* *Suralimentation*

Le principe de la suralimentation est simple. Pour brûler plus de combustible dans un cylindre, il faut y introduire davantage d'air. Ceci peut se faire simplement en remplaçant l'admission d'air atmosphérique par une admission d'air sous pression. Si la pression de cet air est de n fois la pression atmosphérique, on pourra alors brûler n fois plus de combustible par cycle. Il va de soi que le rapport volumétrique de compression du moteur devra être réduit si on ne veut pas atteindre une pression

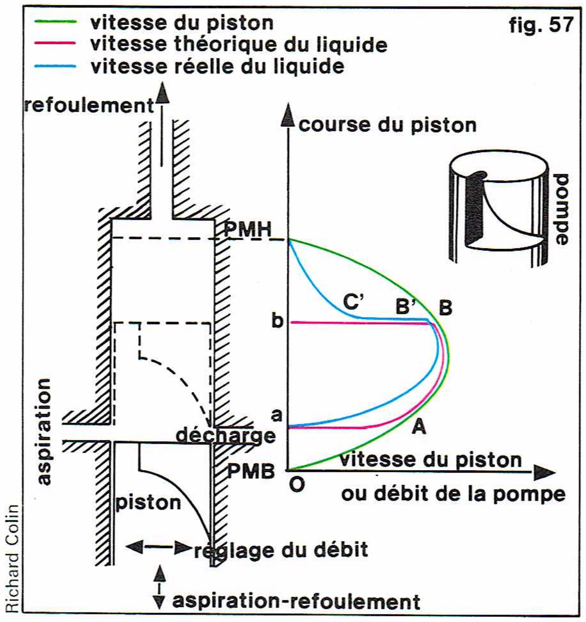

◀ *Figure 57 : pompe à réglage par excès de débit et courbe de débit en fonction de la course du piston.*

▼ *Figure 58 : injection en chambre de précompression (1) et en chambre de précombustion (2). Figure 59 : deux types de balayage d'un moteur Diesel 2 temps : 1, par piston profilé ; 2, équicourant, par lumière et soupape.*

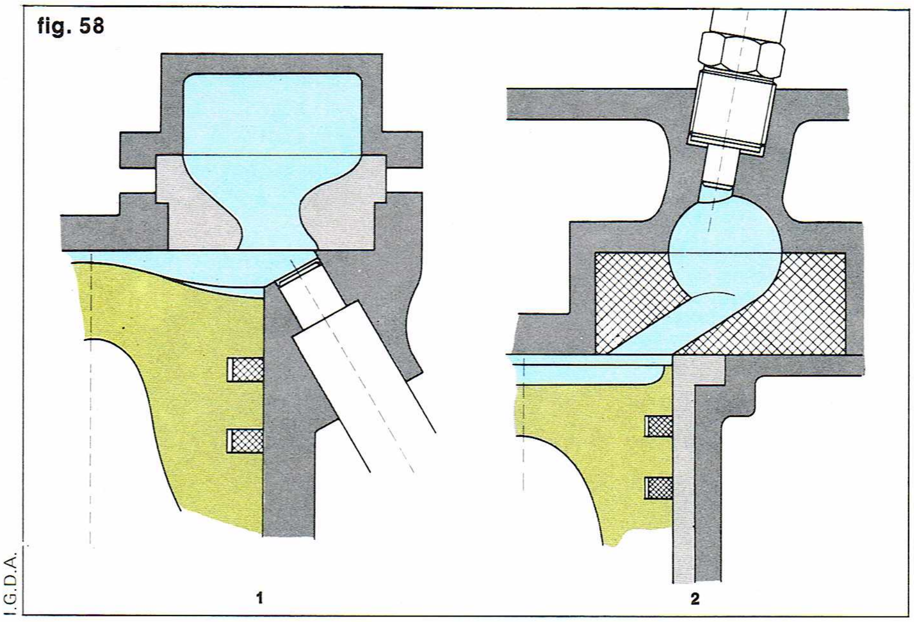

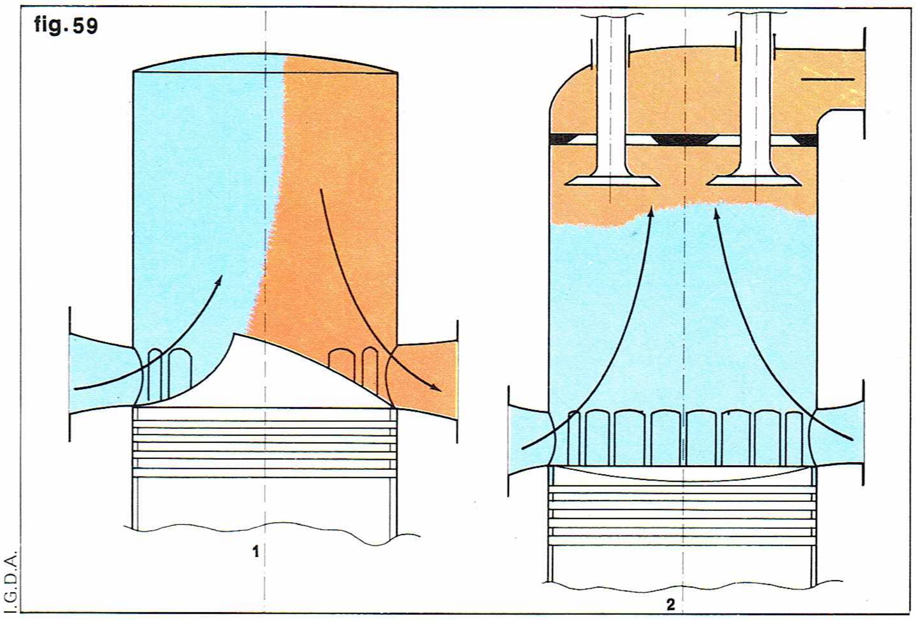

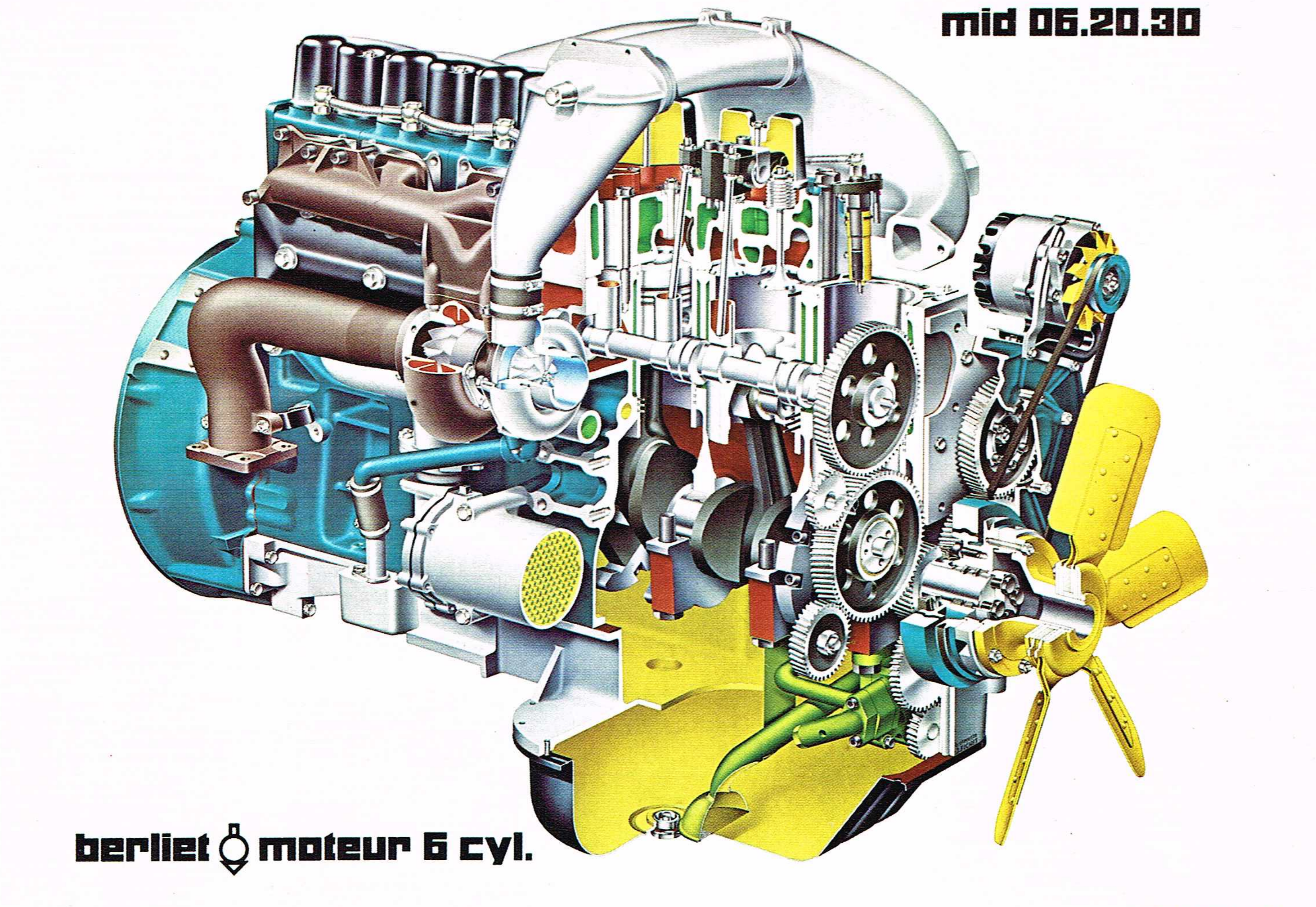

Berliet

▲ *Moteur Diesel MIDS 06.20.30 (6 cylindres, 215 ch) version suralimentée par turbo.*

▼ *Moteur Diesel à plat monté sur autorail (type 4500, 330 kW).*

trop forte en fin de compression. Ce faisant, on réduira aussi la température en fin de combustion, ce qui diminuera le rendement thermique théorique du cycle. Il y a donc un optimal à la suralimentation.

On peut aussi limiter la pression en retardant la fermeture de la soupape d'échappement (augmentation du temps de croisement des soupapes), ce qui permet d'effectuer un très bon remplissage du cylindre, tout en réfrigérant notablement les parois.

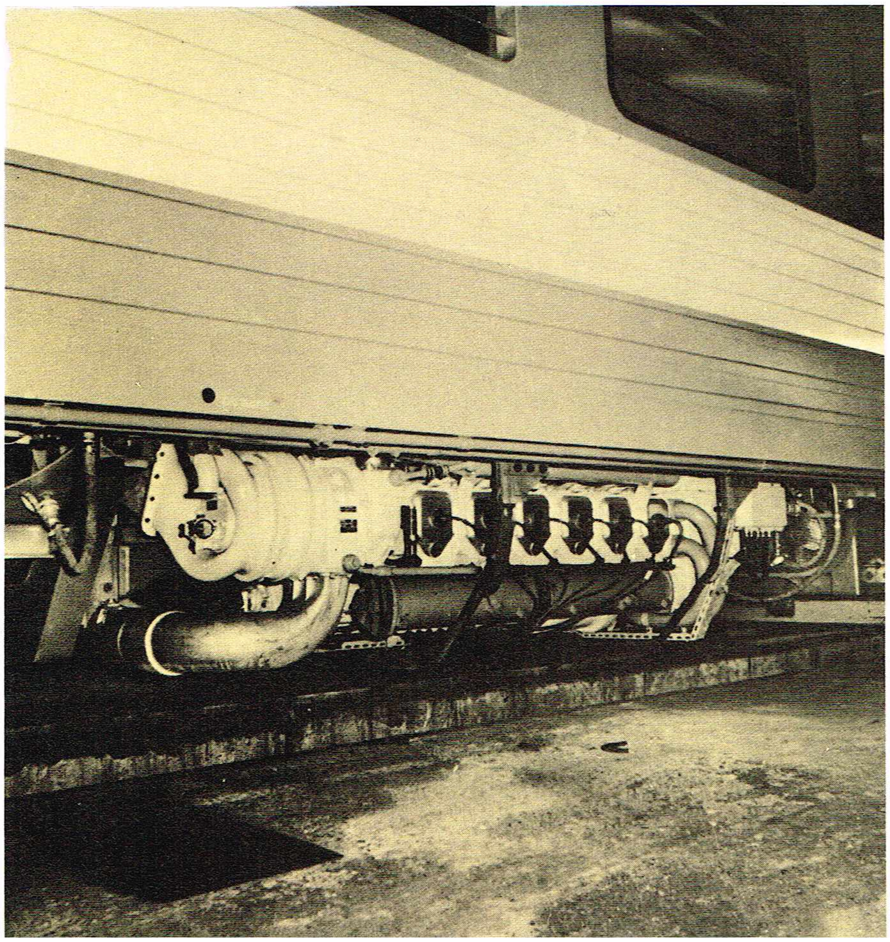

Cliché S.N.C.F.

En dépit des réserves sur les rendements, les avantages de la suralimentation sont réels : gain sur la puissance massique et diminution de la consommation aux fortes charges. Il est possible par ailleurs de limiter les conséquences de la suralimentation sur l'endurance du moteur. Pour toutes ces raisons, la suralimentation des moteurs, tant 4 temps que 2 temps, s'est considérablement développée.

L'air de suralimentation est produit par une soufflante de type volumétrique. Une autre solution, très répandue, est de produire cet air par une soufflante entraînée par une turbine à gaz fonctionnant sur les gaz d'échappement du moteur.

* *Fonctions auxiliaires*

Ce sont les mêmes que celles du moteur à explosion : démarrage, graissage, refroidissement et échappement.

A noter cependant que, pour le démarrage, le moteur ne peut fonctionner que si la température en fin de compression dépasse la température d'inflammation du combustible. Il faudra donc prévoir un système de démarrage suffisamment puissant, capable de lancer le moteur à une vitesse de l'ordre de 25 % de sa vitesse normale. Sur certains moteurs, munis d'une préchambre, on prévoit dans cette dernière une bougie de démarrage.

Le refroidissement peut sur certains moteurs poser des problèmes particuliers : on peut citer pour exemple la réfrigération des fonds de piston qui exige des dispositifs complexes pour faire circuler le liquide réfrigérant dans le piston, compte tenu de son mouvement périodique alternatif.

* *Domaines d'utilisation des moteurs Diesel*

Ils sont nombreux et variés, compte tenu des qualités de ce type de moteur.

La gamme de puissance est très étendue et va de quelques chevaux à plus de 30 000 ch ; les modèles les plus utilisés se situent entre 10 et 200 ch. Les moteurs de grande puissance sont en général des moteurs lents dont la vitesse varie entre 100 et 200 t/mn. On distingue ensuite des moteurs semi-rapides (200 à 600 t/mn) dont la puissance est encore élevée et des moteurs rapides (600 à 1 500 t/mn) dont la puissance ne dépasse guère 6 000 ch.

Les applications sont nombreuses. Les moteurs Diesel sont utilisés comme moteurs stationnaires pour

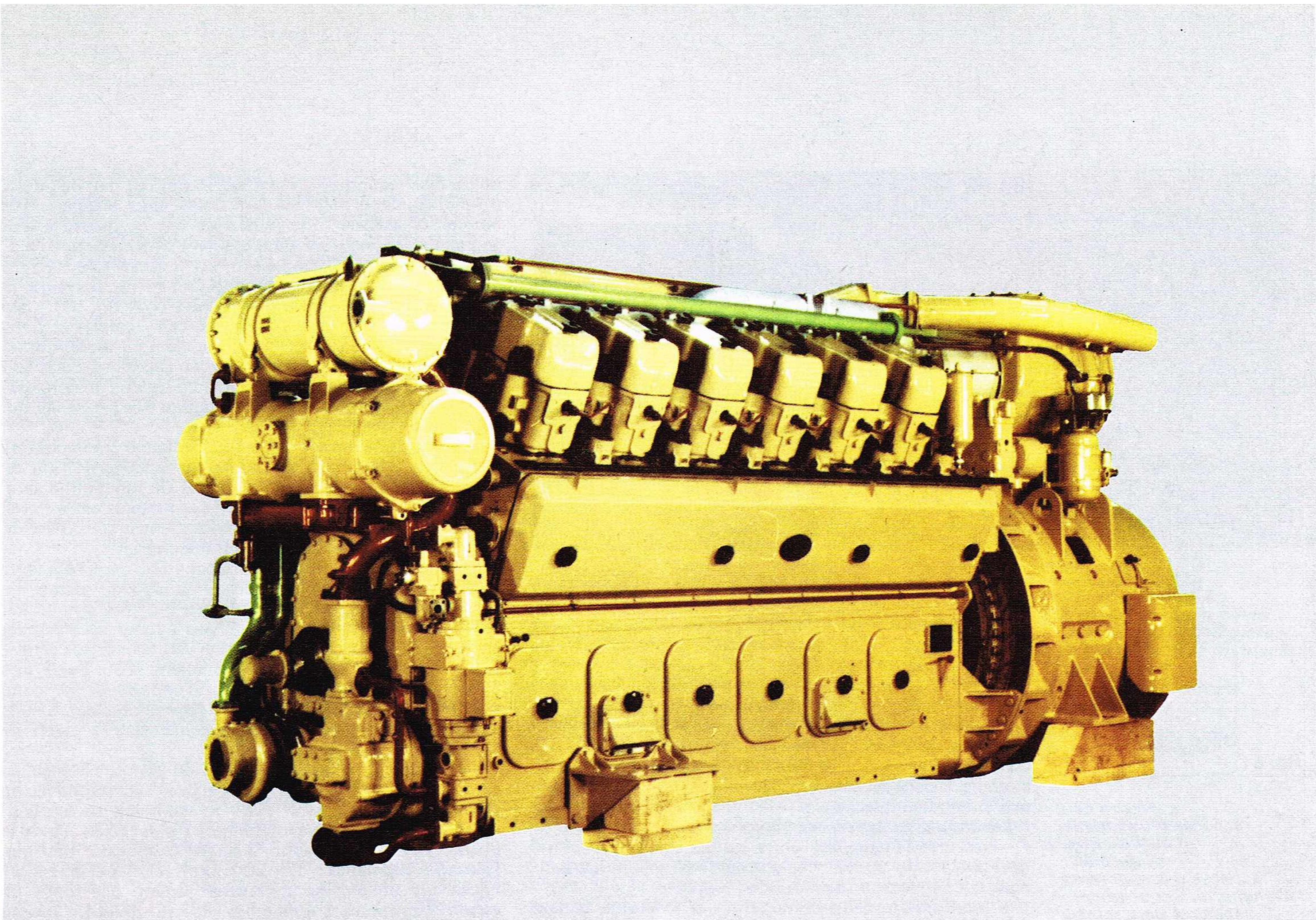

Sulzer

▲ *Moteur Diesel utilisé pour la traction sur rail.*

la production d'électricité et la commande de machines diverses. Ils sont très utilisés en propulsion marine, tant civile que militaire. Ces moteurs sont soit du type lent à attaque directe de l'hélice, soit du type rapide dans la solution diesel-électrique. Comme moteur de propulsion, ils sont encore très utilisés dans les transports routiers et la traction sur rail dans la solution diesel-électrique. Pour des raisons de puissance massique trop peu élevée, le moteur Diesel n'a pratiquement pas pénétré le transport aérien.

Technologie des moteurs thermiques alternatifs

La partie centrale des machines alternatives est constituée par l'ensemble « piston-bielle-manivelle ». C'est le piston en effet qui recueille l'énergie mécanique contenue dans le fluide de travail pour la transmettre à l'arbre moteur par le système bielle-manivelle qu'on appelle souvent « attelage ». L'analogie est frappante : on relie les pistons à l'arbre manivelle de la même façon que les chevaux (moteurs) sont reliés au véhicule (récepteur).

La fonction de ce trio d'organes mécaniques dépasse le domaine des seuls moteurs à combustion interne, et un certain nombre de dispositions techniques citées ci-après concernent les machines alternatives à vapeur, qui seront décrites plus loin. Elles concerneraient tout aussi bien d'autres machines alternatives comme les récepteurs : compresseurs et pompes. Dans ce cas, le système fonctionne à l'inverse, en général en transformateur d'énergie : l'énergie mécanique de l'arbre en mouvement sert, dans un compresseur, à comprimer un fluide.

* *Piston*

Le piston, paroi mobile de la chambre de combustion, reçoit la poussée des gaz enflammés et assure les fonctions suivantes :

— transmission des effets de détente (travail +) et de détente (travail —) à l'arbre moteur par le système bielle-manivelle ;

— évacuation des calories non transformées en travail qu'il reçoit ;

— transmission des réactions latérales sur la chemise.

Le piston peut, de plus, sur les moteurs 2 temps jouer le rôle de distributeur d'air de balayage et de gaz brûlés.

Le piston est donc soumis, d'une part, à des contraintes d'origine thermique et, d'autre part, à des contraintes mécaniques sous l'effet de la pression de combustion et des forces d'inertie ; ces dernières croissent rapidement avec l'alésage et la vitesse de rotation du moteur. Sous ces diverses sollicitations, les déformations du piston doivent rester limitées, ainsi que sa température, pour que l'étanchéité et le graissage soient convenablement assurés. On demande donc à un piston trois qualités difficilement conciliables : rigidité, légèreté et précision.

I.G.D.A. - Rizzi

◄ *Un piston doit présenter trois qualités difficilement conciliables : rigidité, légèreté et précision.*

On distingue sur un piston deux parties :

— un fond, appelé aussi « tête » de piston, qui porte généralement les segments d'étanchéité ;

— un fourreau ou jupe.

Pour les petites cylindrées, le piston est généralement monobloc et réalisé en alliage léger ou en fonte résistants. Les alliages d'aluminium se sont généralisés sur les moteurs à explosion. Dans les grosses cylindrées, le piston est

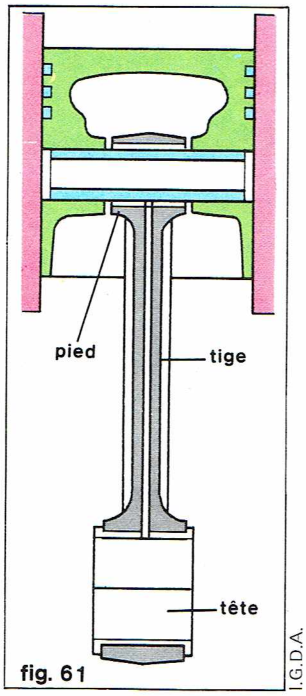

I.G.D.A.

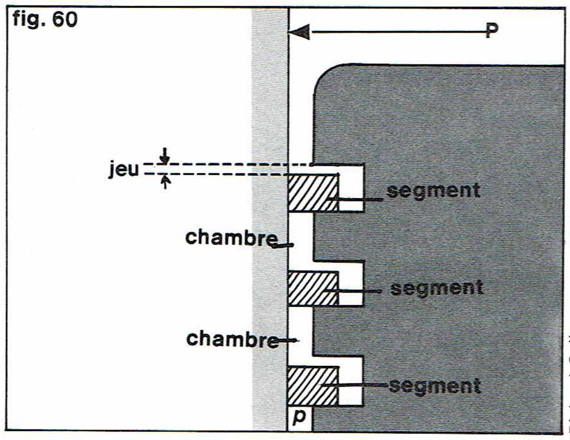

Richard Colin

▲ ***Figure 61 :* schéma d'une bielle d'automobile.**
***Figure 60 :* schéma des segments d'étanchéité. Ces segments réalisent un « joint à labyrinthe » utilisant les détentes dans des chambres successives pour diminuer le débit de fuite. Si on a *n* segments, la charge motrice du débit de fuite passe approximativement de $P - p$ à $\frac{P - p}{n}$.**

toujours en deux parties : le fond en acier, la jupe en fonte pour améliorer le glissement.

Les pressions maximales étant plus élevées sur les moteurs Diesel que sur les moteurs à explosion, les fonds de piston sont habituellement plus épais et les jupes plus longues sur des moteurs comparables. La jupe plus longue permet de limiter la pression d'appui sur la chemise, ce qui est favorable au graissage. Sur les gros moteurs, l'attelage est souvent réalisé avec des glissières pour supprimer la réaction latérale. La face supérieure des pistons des moteurs Diesel est souvent complexe pour provoquer le phénomène de turbulence.

Les segments ont un double rôle :

— assurer l'étanchéité entre piston et chemise aussi bien pendant la détente des gaz de combustion que pendant la compression de l'air frais ;

— contrôler le débit de remontée d'huile vers le haut du cylindre.

Dans leur rôle d'étanchéité les segments réalisent une sorte de joint à labyrinthes (on appelle ainsi une succession de chambres de détente). Pour les moteurs de faible puissance, les moteurs à explosion ont, en général, deux à trois segments ; les moteurs Diesel trois à quatre. Les moteurs Diesel de forte puissance ont de quatre à huit segments, leur nombre étant d'autant plus élevé que l'alésage est grand. L'étanchéité n'est assurée que s'il y a appui des segments, sous la pression des gaz, sur la gorge d'une part, et la chemise d'autre part (voir *fig.* 60). Cela suppose que ces segments conservent leurs jeux dans toutes les conditions de fonctionnement du moteur. Il ne faut pas, de plus, que la mobilité des segments dans leur gorge soit entravée par des dépôts de résidus de combustion. C'est ce phénomène de bloquage des segments qui est appelé « gommage ».

Les segments doivent présenter un faible coefficient de frottement ; leurs caractéristiques métalliques doivent de plus rester stables aux températures de fonctionnement. Le matériau utilisé dans la plupart des moteurs est la fonte, en raison de son aptitude au frottement à sec. C'est de plus un matériau stable et à bon marché.

Le raclage de l'huile est assuré par un ou deux segments disposés à la partie inférieure de la jupe du piston. Le vilebrequin projette une importante quantité d'huile sur les chemises. Cette huile, qui n'a pas le temps de s'écouler vers le carter, a tendance à remonter vers le haut du cylindre sous l'action des segments d'étanchéité. Pour éviter une consommation excessive d'huile, l'importance de cette remontée d'huile est limitée par le segment racleur. L'huile ramassée par le segment est évacuée vers le carter au travers de la paroi du piston.

La chaleur absorbée par le fond du piston est évacuée par sa jupe vers le fond du cylindre. Les segments ne jouent aucun rôle dans cette transmission de chaleur, étant donné le caractère intermittent de leur contact avec le piston. Cette réfrigération devient insuffisante dès que l'alésage augmente (d = 200 mm), et il devient alors nécessaire de prévoir un refroidissement des fonds de piston. Les moteurs concernés, compte tenu du niveau de puissance, sont des moteurs Diesel. La réfrigération est assurée par un circuit d'huile pris en dérivation sur le circuit de graissage.

Sur certains gros moteurs marins, le refroidissement est assuré par un circuit d'eau douce.

* *Bielle*

Dans les machines alternatives la bielle est une pièce de liaison entre le piston, d'une part, et la manivelle, d'autre part. Elle transforme un mouvement rectiligne alternatif en un mouvement circulaire continu dans le cas des moteurs ; elle est chargée de la transformation inverse dans le cas des machines réceptrices comme les pompes et les compresseurs.

La bielle se compose essentiellement (*fig.* 61) :

— d'un corps monobloc ou en deux parties,

— d'un logement de coussinet aux deux extrémités.

L'assemblage du côté du piston est appelé « pied de bielle », celui du côté de la manivelle « tête de bielle ». Au point mort haut (PMH) et au point mort bas (PMB), bielle et manivelle sont alignées, faisant un angle de 180° dans le premier cas et un angle de 0° dans le second cas. Le rapport entre longueur de bielle et rayon de manivelle est en général compris entre 4 et 6. Plus ce rapport est élevé, plus l'effort latéral est faible et la transmission de l'effort facilitée. Sur les gros moteurs, on reprend cet effort latéral par un système de crosse coulissant dans des glissières (voir *fig.* 62). Cette disposition s'impose dans les moteurs à double effet.

Pour limiter les efforts d'inertie, la bielle est d'autant moins longue que le moteur tourne vite. Cette pièce travaille surtout au flambement et, pour concilier légèreté et rigidité, sa section a souvent la forme d'un I. Les métaux utilisés sont l'acier sur les gros moteurs, la fonte ou des alliages d'aluminium sur les petits moteurs.

Le fonctionnement de l'axe de pied de bielle a longtemps posé des problèmes, car c'est une pièce très sollicitée (flexion) qui n'est animée que d'un mouvement relatif de faible amplitude par rapport au piston. Le graissage de cet axe se fait donc dans des conditions difficiles. Les solutions techniques varient avec les constructeurs. L'axe peut être :

— solidaire de la bielle et libre dans le piston ;

— fixé sur le piston avec portage dans la bielle (avec éventuellement montage sur aiguilles) ;

— entièrement libre (axe flottant). C'est cette dernière solution qui est généralisée sur les petits moteurs.

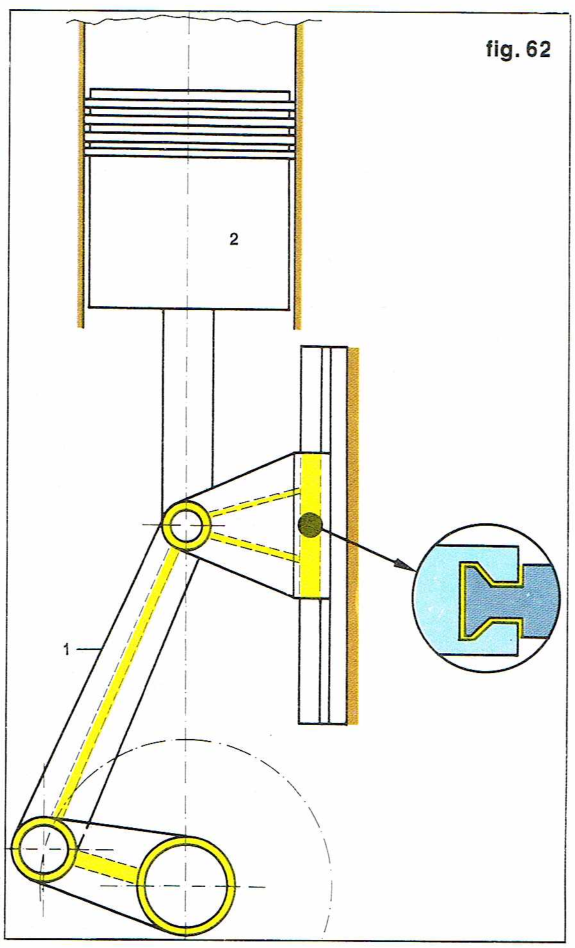

I.G.D.A.

▶ ***Figure 62 ;* manivelle à tête en crosse : 1, bielle ; 2, piston. Cette disposition s'impose dans les moteurs à double effet.**

La tête de bielle est articulée sur une partie de la manivelle appelée *maneton*. Cette articulation est généralement démontable. Certains petits moteurs font exception, en particulier lorsque la tête de bielle est montée sur roulement à billes. Cet assemblage de la tête de bielle sur le maneton est soumis à des efforts cycliques importants dus à la transmission de l'effort moteur ainsi qu'à la force centrifuge. En revanche, le graissage de cette partie est facile, du fait que l'huile sous pression peut y être amenée par l'intérieur du vilebrequin. Certaines conditions de fonctionnement comme le démarrage, au début duquel la pression d'huile n'est pas établie, imposent l'emploi de matériau antifriction. Pour diminuer le coût d'un changement éventuel, ce matériau est déposé sur une pièce amovible en deux parties, appelées *coussinets*. Les matériaux antifriction les plus connus sont le métal blanc ou régule (90 % d'étain), qui a été très utilisé et progressivement remplacé par des alliages au cuivre ou à l'aluminium qui supportent des pressions plus élevées à plus haute température.

Sur les moteurs où les cylindres sont alignés, chaque bielle est articulée sur un maneton. Sur les moteurs en V, deux bielles doivent s'articuler sur le même maneton. Plusieurs dispositions sont adoptées : le système bielle-biellette où une des bielles plus petite tourillonne sur un axe porté par la tête de la bielle normale, le système bielle à fourche où une bielle normale tourillonne dans la tête de l'autre en forme de fourche, ou le système bielles accolées.

* *Arbre-manivelle*

L'arbre-manivelle ou vilebrequin reçoit et transmet au récepteur le mouvement de tous les attelages. Il tourillonne dans des paliers-supports portés par le bâti du moteur.

Cet arbre travaille à la flexion et à la torsion. Tous les efforts sont cycliques et engendrent des contraintes de fatigue. On s'efforce donc de réduire ces efforts en plaçant des contrepoids sur chaque manivelle pour équilibrer les masses liées au maneton. L'arbre-manivelle entièrement monté doit être enfin correctement équilibré.

Le matériau utilisé est généralement l'acier. Les vilebrequins sont constitués d'un ou plusieurs tronçons selon les constructeurs. La construction en plusieurs morceaux (polyblocs) est générale sur les gros moteurs mais elle est également utilisée sur les petits moteurs. Le vilebrequin est foré pour livrer passage à l'huile de graissage des paliers fixes et des têtes de bielle.

* *Soupapes*

Une soupape se compose d'une « tête » et d'une « tige » appelée aussi « queue », raccordées par un collet.

Les soupapes sont réalisées en aciers alliés pour l'admission, et en acier inoxydable pour l'échappement (pour résister à la corrosion à chaud). On utilise aussi sur les zones en contact (siège et portée) des dépôts de matériaux très durs comme le stellite.

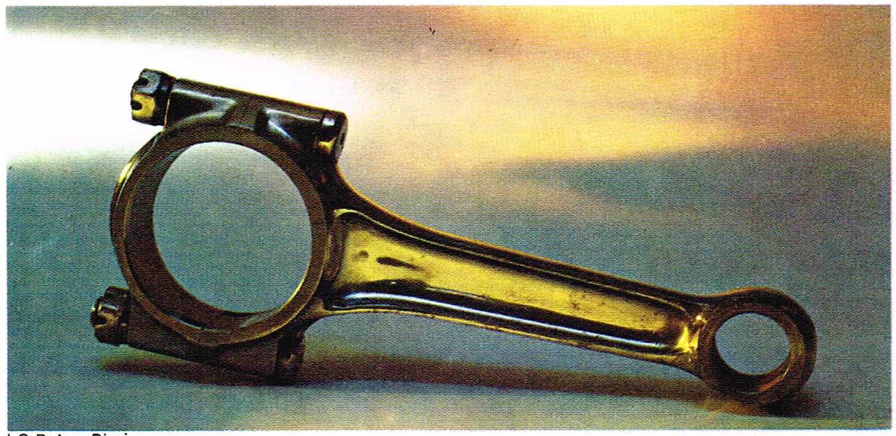

I.G.D.A. - Rizzi

▲ ***La bielle est, dans les machines alternatives, une pièce de liaison entre le piston d'une part, et la manivelle d'autre part.***

Les soupapes doivent être parfaitement guidées pour leur assurer une très bonne assise sur leur siège. C'est de la qualité de ce contact que dépendent l'étanchéité de la soupape et son refroidissement.

* *Distribution*

On appelle *distribution* l'ensemble des mécanismes dont le mouvement, synchronisé avec celui du piston, commande le déroulement des différentes phases du cycle. Les organes d'exécution ont déjà été examinés aussi bien pour les moteurs à explosion que pour les moteurs Diesel : allumeur, pompes à combustible, soupapes.

La question est maintenant de voir comment ces différents organes sont commandés pour assurer la régulation du moteur.

Pour la levée des soupapes ou la commande des pompes d'injection, le dispositif utilisé est l'*arbre à cames*. La rotation de cet arbre est synchronisée avec celle du moteur par un système d'entraînement dont les trois montages les plus classiques sont l'entraînement :

— par arbre vertical ;
— par chaîne ;
— par engrenages droits.

Ces diverses solutions (voir *fig.* 63) permettent de laisser l'arbre à cames dans le carter ou de le surélever (arbre à cames latéral), et même de le placer au-dessus du moteur (arbre à cames en tête).

Il existe pour la commande des soupapes différentes dispositions. Les soupapes peuvent être en effet :

— alignées sur une ligne ou deux lignes ;
— à côté du moteur (solution latérale) ou au-dessus (en tête) ;
— à attaque directe ou à attaque par culbuteurs. Dans ce dernier cas, la commande des culbuteurs par l'arbre à cames se fait soit directement, soit par brimbale.

▼ ***Figure 63; représentation schématique de la distribution : 1, soupapes en tête avec arbre à cames en tête; 2, soupapes latérales et soupapes en tête avec arbre latéral.***

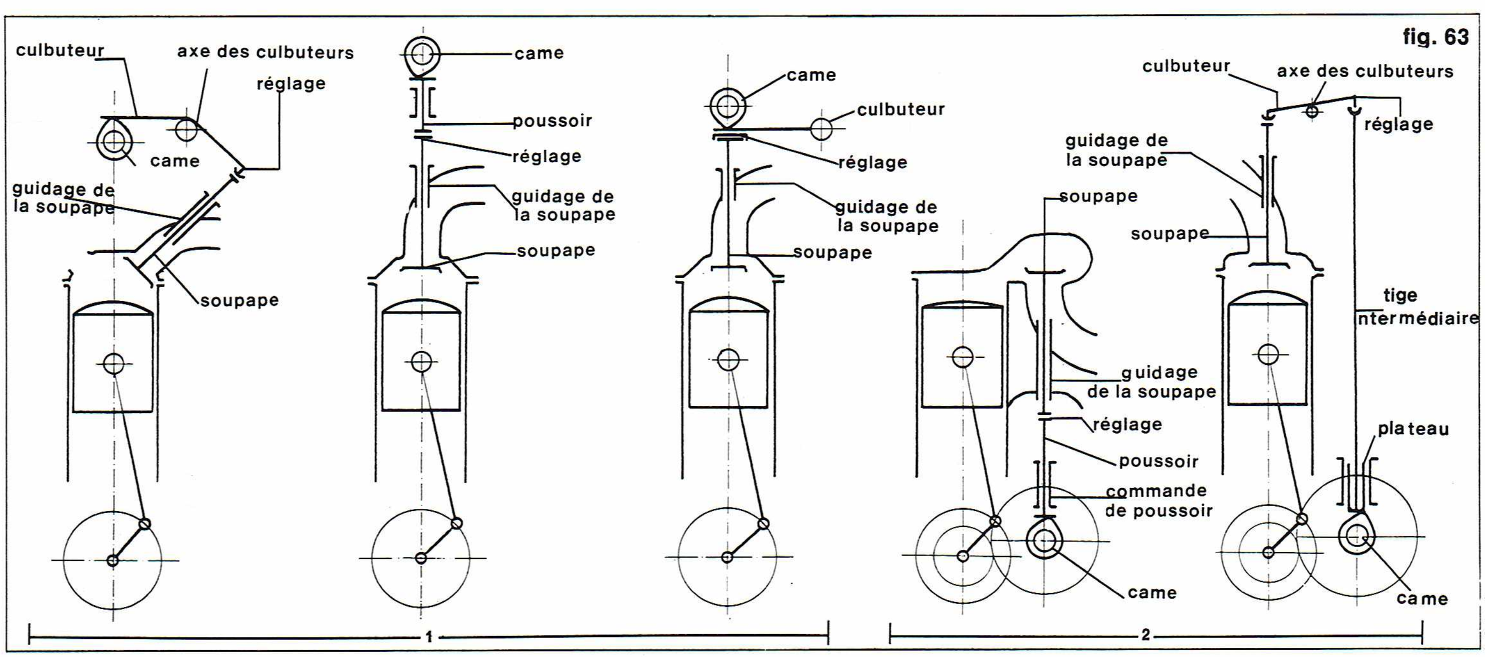

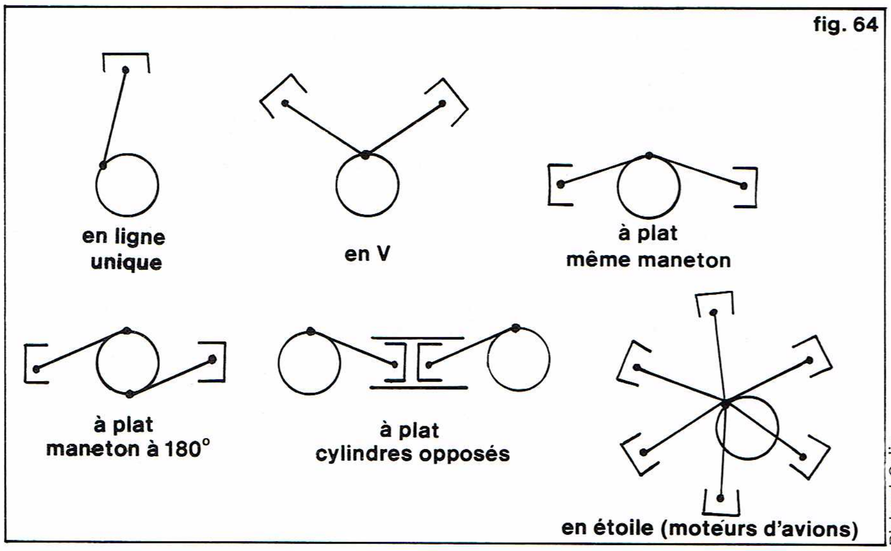

Richard Colin

▲ *Figure 64 : arrangement des cylindres sur un moteur à piston.*

▼ *Figure 66 : balayage et couplage des manivelles dans un moteur Diesel 2 temps à pistons opposés.*

▶ *Figure 65 : architecture d'un gros moteur Diesel lent 2 temps du type MAN (section transversale du cylindre).*

On trouvera sur la *figure* 63 les dispositions les plus classiques de commande de soupapes.

On trouve des dispositions analogues pour la commande des pompes à combustible sur les moteurs Diesel.

L'allumeur sur les moteurs à explosion ainsi que les différentes pompes attelées que l'on rencontre sur tous les moteurs sont entraînés de la même façon par des prises de mouvement sur l'arbre-manivelle, soit directement, soit à partir de la commande de l'arbre à cames.

Tous les organes et mécanismes de la distribution sont conçus de façon à permettre le réglage initial et la vérification en service de tous les éléments de la régulation du moteur.

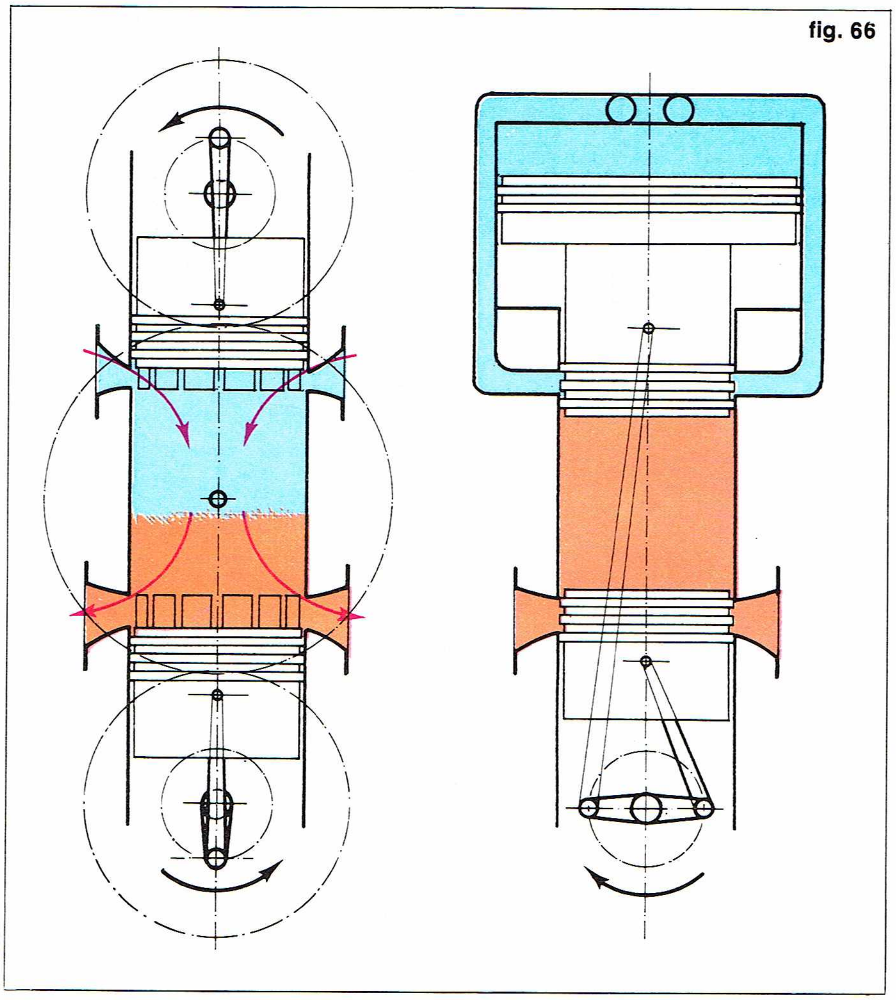

I.G.D.A.

Architecture des moteurs à volume variable

L'effort moteur du piston est transmis sur la plus grande partie des moteurs à un arbre par le système classique « bielle-manivelle ». Mais depuis très longtemps, les ingénieurs ont cherché d'autres solutions de moteurs supprimant les forces d'inertie dues au mouvement des pièces génératrices de vibrations difficiles à maîtriser. Les efforts ont porté surtout sur les turbines à gaz, les machines à flux continu, mais également sur les moteurs à capsulisme. Dans ce dernier domaine, la plupart des inventions ont donné lieu à des réalisations ingénieuses mais sans intérêt pratique. Aujourd'hui, quelques solutions ont réussi à s'imposer, sans toutefois concurrencer sérieusement les moteurs traditionnels : moteurs à piston libre et moteurs à piston rotatif. On en trouvera ci-après une description.

★ *Moteurs à piston et bielle-manivelle*

Mis à part les moteurs 2 temps des petites cylindrées, la quasi-totalité des moteurs comprend plusieurs cylindres. Les avantages sont nombreux : couple plus régulier, meilleur équilibrage, démarrage plus facile. D'autre part, la réalisation de puissances importantes conduit au fractionnement de la puissance, car il faut augmenter la vitesse, et on ne peut le faire, à cause des effets d'inertie sur les attelages, qu'en diminuant l'alésage.

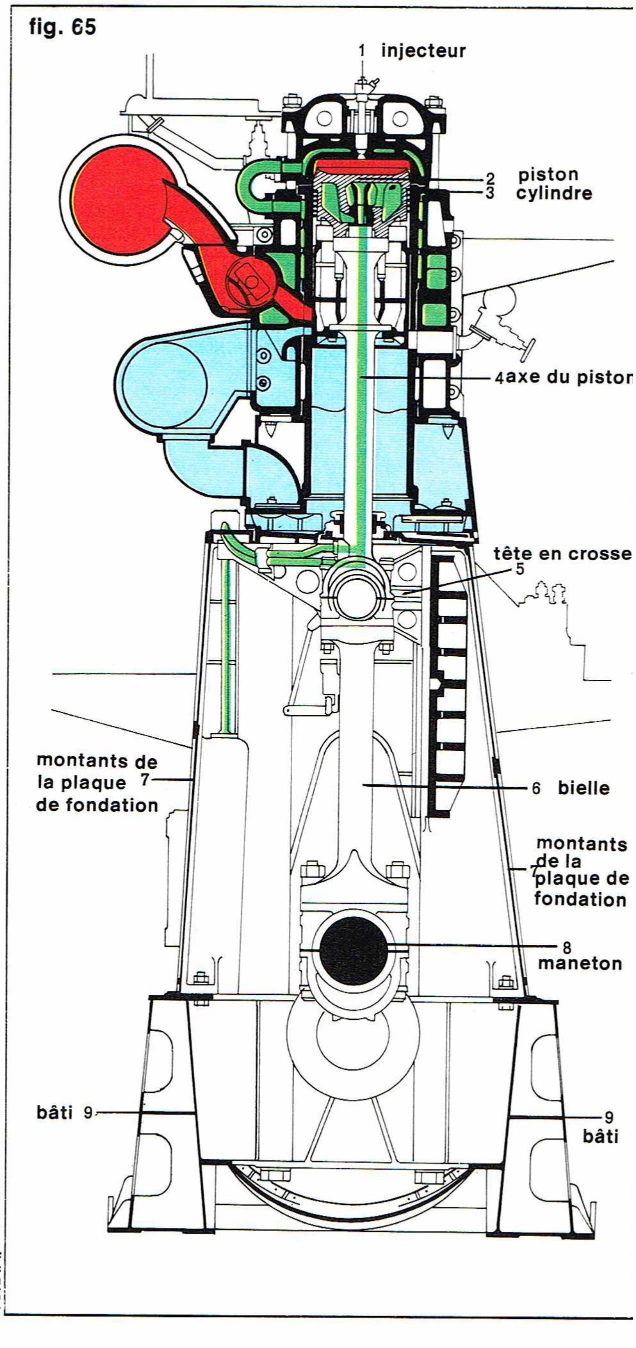

I.G.D.A.

Les groupements de cylindres sont très variés (voir *fig.* 64). On peut distinguer :

— les groupements en ligne : ligne unique, en V ,à plat (flat), qui sont les solutions les plus classiques ;

— les groupements en étoile : étoile simple jusqu'à 9 cylindres, ou étoile double, triple ou quadruple. Ils ont surtout été utilisés sur les moteurs d'avions.

Cette possibilité de groupement des cylindres permet aux constructeurs de limiter leurs études à la mise au point de quelques monocylindres types et de proposer ensuite à la clientèle des moteurs dans une large gamme de puissances, ceux-ci étant réalisés par la réunion de cylindres identiques en groupements qui diffèrent par le nombre de cylindres et leur disposition. Compte tenu du caractère éprouvé de la technologie de ce type de moteurs, l'architecture générale est sensiblement la même chez tous les constructeurs.

Sur les moteurs à explosion, le moteur est constitué d'un bloc-cylindre en fonte, pièce monobloc venue de fonderie. La partie inférieure de ce bloc constitue la partie supérieure du carter. Elle supporte l'arbre vilebrequin par les paliers. Ce bloc reçoit :

— à sa partie supérieure, sur un plan de joint, la culasse ;

— à sa partie inférieure, le carter. La partie inférieure du bloc culasse participe généralement au volume du carter.

Sur les moteurs modernes, on rapporte dans les cylindres des chemises dont le matériau est judicieusement choisi pour faciliter le frottement. Ces chemises généralement amovibles peuvent être emmanchées dans le cylindre (chemises sèches) ou en contact direct avec l'eau du circuit de réfrigération (chemises humides).

La culasse est du même métal que le bloc-cylindre. Ces pièces sont généralement en fonte mais on utilise aussi des alliages d'aluminium.

Le carter enveloppe toutes les pièces en mouvement des attelages. Il sert de réserve d'huile pour le circuit de graissage et contient en général la pompe à huile.

Les moteurs 2 temps à explosion sont en général d'une architecture très simple. L'alimentation se fait par lumières, il n'y a donc pas de soupapes. La compression se fait par le carter : on utilise le piston lui-même par sa face inférieure pour refouler le mélange carburé, introduit préalablement dans le carter, dans le cylindre. La face supérieure, au fond du piston, présente une sorte de bosse qui, en jouant un rôle de déflecteur, évite l'association du mélange carburé et des gaz d'échappement. Pour graisser ce type de moteur, on introduit de l'huile dans l'essence dans une proportion de 3 à 5 %. Cette huile se consomme pendant la marche du moteur.

L'architecture des moteurs Diesel 2 temps et 4 temps ne diffère guère pour les petites et moyennes puissances de celle des moteurs à explosion.

Les gros moteurs ont une structure plus complexe (voir *fig.* 65). On peut distinguer, en partant du bas vers le haut : une plaque de fondation, un bâti et les blocs-cylindres fermés individuellement par une culasse. Les blocs-cylindres se présentent séparément ou par assemblage de plusieurs cylindres. Ces moteurs ont généralement leur cylindre en ligne et travaillent à simple effet ou à double effet. Les moteurs double-effet (combustion de chaque côté du piston) existent surtout en 2 temps (on dispose alors d'un temps moteur par tour). Les attelages de ces gros moteurs sont montés généralement avec crosse.

Parmi les autres configurations utilisées dans l'architecture des moteurs Diesel, on peut citer encore le moteur à pistons opposés qui nécessite un attelage sur deux de grande dimension (*fig.* 66). Les moteurs de puissance intermédiaire sont souvent réalisés en V.

* *Moteurs à pistons libres*

Ce type de moteur ne fournit pas directement de l'énergie mécanique mais fonctionne comme un générateur de gaz chauds sous pression. Il est donc en général associé à une turbine à gaz qui fournit l'énergie utile.

Un groupe moteur est composé habituellement de plusieurs générateurs identiques. Chaque générateur comprend un cylindre Diesel 2 temps équicourant avec l'injecteur au centre et 2 pistons de part et d'autre. Chaque piston Diesel est solidaire d'un piston de compresseur qui fournit l'air de balayage. Le mouvement de ces pistons est synchronisé par un ensemble de biellettes et limité par un matelas d'air comprimé.

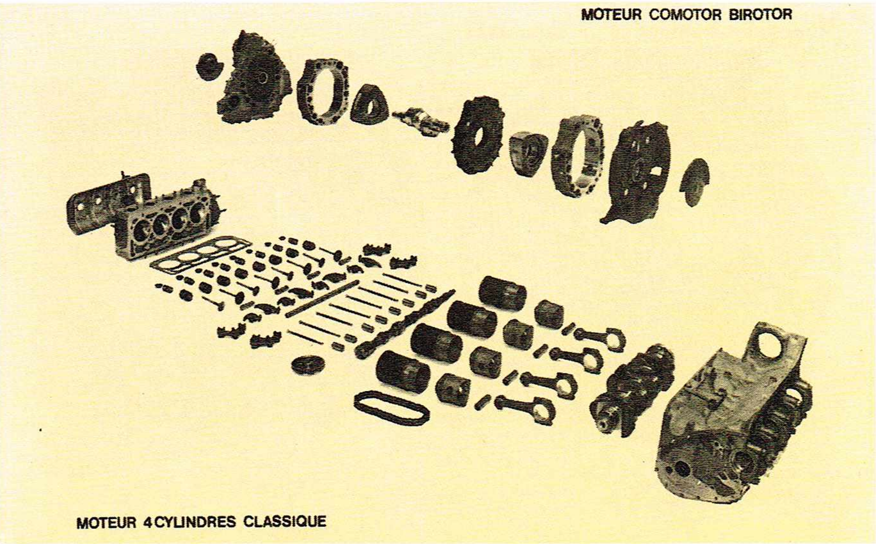

Citroën

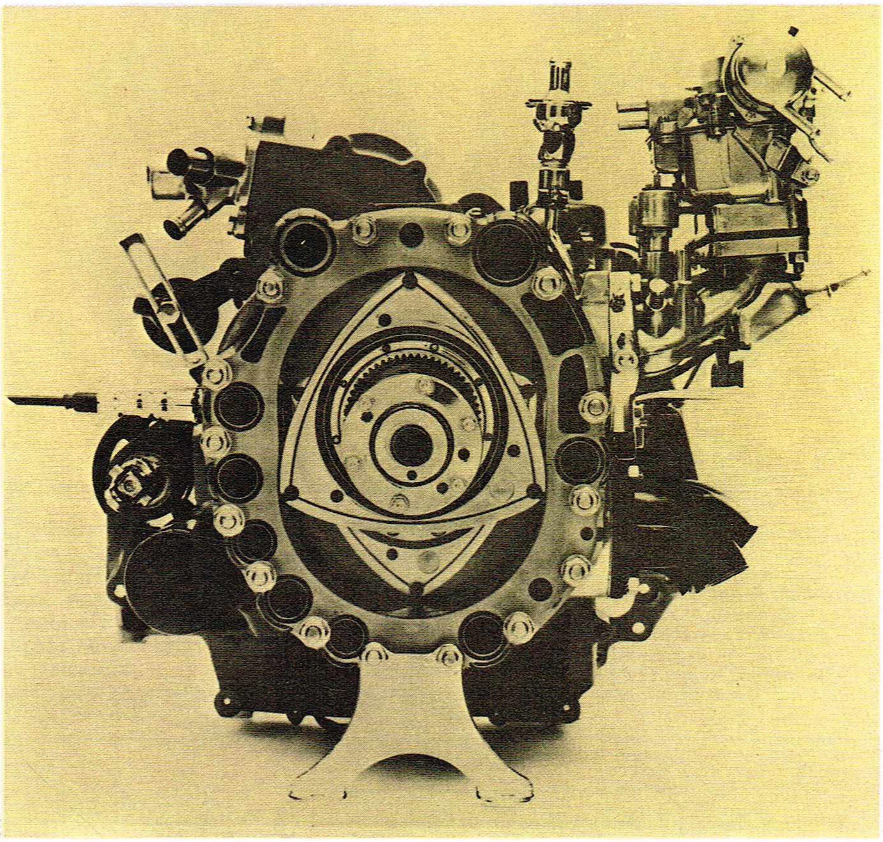

Citroën

▲ ***En haut, comparer le nombre de pièces entrant dans un moteur comotor birotor et un moteur 4 cylindres classique.***
En bas, le moteur birotor.

Comme les moteurs Diesel 2 temps, ces générateurs peuvent brûler des combustibles lourds. Ils peuvent concurrencer avec leur turbine associée soit les moteurs Diesel, soit les turbines à compresseur. Ils ont fait l'objet d'applications dans les domaines de la propulsion navale comme groupe propulsif de petits bâtiments et de la production d'électricité comme groupe de pointe. La gamme de puissance usuelle va de 500 à 5 000 kW.

* *Moteurs à piston rotatif (moteurs Wankel)*

Le principe de ce moteur est connu depuis fort longtemps mais sa réalisation pose de difficiles problèmes de mécanique, ce qui explique sa venue tardive sur le marché. L'avenir dira si ce moteur n'est pas venu trop tard, car ses qualités intrinsèques devraient lui permettre un développement brillant (*fig.* 67).

L'idée de ce moteur est de réaliser les volumes variables (capsulisme) rencontrés dans les moteurs alternatifs par la rotation d'un rotor dans une chambre. Dans les moteurs commercialisés actuellement, appelés moteurs Wankel du nom du professeur allemand qui en a pris le

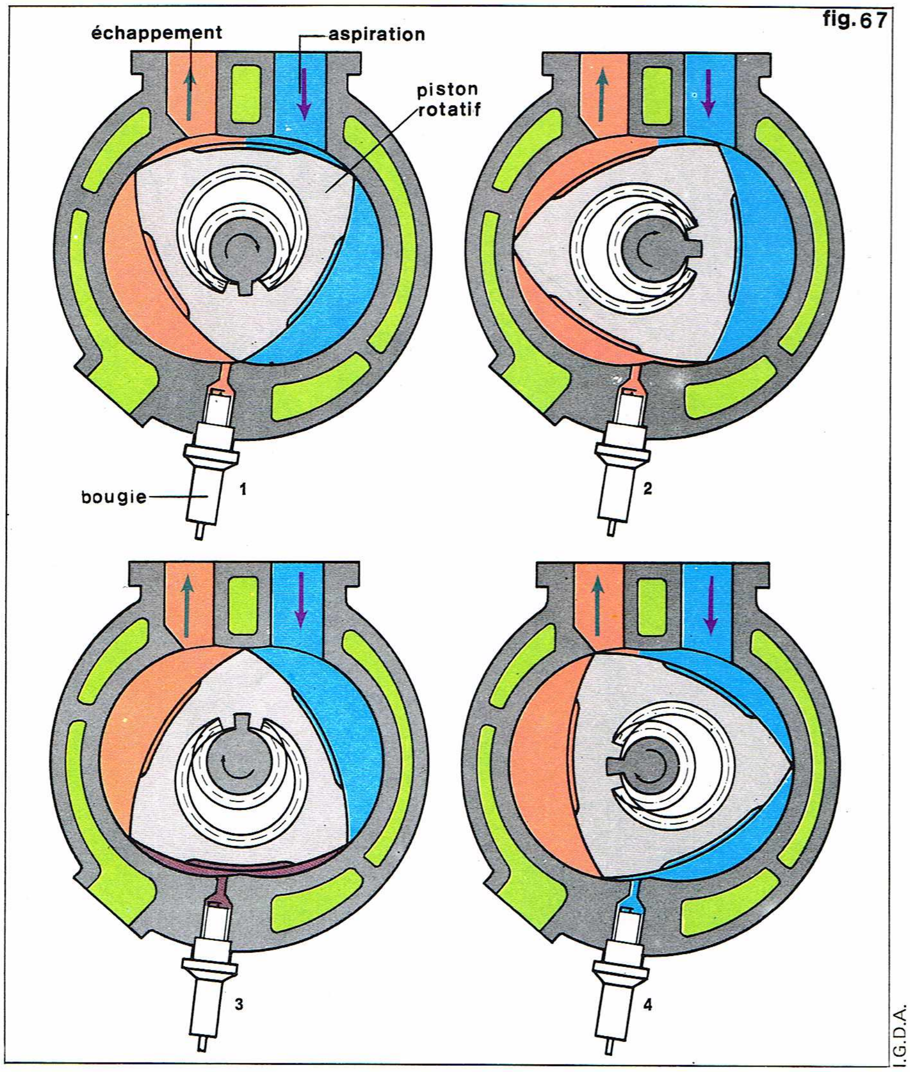

▲ *Figure 67 : les quatre phases du cycle de fonctionnement du moteur à piston rotatif (type Wankel).*
▼ *Figure 68 : voir légendes groupées page ci-contre.*

brevet, le rotor, de forme triangulaire, tourne dans un carter étanche, entraîné par un train d'engrenage. Le système est conçu pour que le rotor reste en permanence en contact avec le carter, ce qui crée trois volumes variables, susceptibles d'être utilisés dans un cycle 4 temps, à explosion ou Diesel. L'étanchéité entre rotor et carter est réalisée par segments. Le rapport volumétrique de compression est adapté en creusant une cavité dans les faces du rotor. Deux ou plusieurs rotors peuvent être associés dans le même moteur ; ainsi constitué, le moteur à piston rotatif est très simple. Son fonctionnement est souple et silencieux. Il peut fonctionner avec de l'essence d'indice octane peu élevé. Sa consommation, à puissance égale, est légèrement supérieure à celle des moteurs classiques ; en revanche, ses gaz d'échappements sont moins polluants. On le trouve aujourd'hui sur divers modèles de voitures automobiles, en général sous la forme d'un moteur birotor.

Turbines à gaz

Les turbines à gaz font partie avec les turbines à vapeur, qui seront présentées plus loin, de la grande famille des turbomachines. On distingue ainsi les appareils dans lesquels un transfert d'énergie a lieu entre une masse tournante appelée « rotor » et un fluide en écoulement.

Ce fluide peut être incompressible, et c'est le cas dans les turbines hydrauliques. Il peut être compressible et incondensable (turbines à gaz) ou compressible et condensable (turbines à vapeur). Dans ces deux derniers types de machines, turbines à gaz et à vapeur, l'énergie contenue dans le fluide est initialement d'origine thermique et la détente de ce fluide permet de recueillir de l'énergie mécanique.

Description sommaire

Les turbines à gaz peuvent être réalisées dans des configurations plus ou moins complexes qui dérivent toutes du schéma le plus simple qui comporte un compresseur, une chambre de combustion et une turbine (voir *fig.* 68 et 69).

Cet ensemble, ainsi constitué, est appelé *turbomoteur*. La turbine est actionnée par les gaz de combustion, obtenus en brûlant du combustible à pression constante dans de l'air préalablement comprimé par le compresseur. La turbine fonctionne sur le même principe qu'une turbine à vapeur. Elle entraîne le compresseur, et l'énergie en excès peut être prélevée sur l'arbre commun ou dans les gaz d'échappement. Si toute la puissance est récupérée dans les gaz d'échappement pour produire une poussée, on a réalisé un turboréacteur. La puissance peut être intégralement prélevée sur l'arbre pour entraîner une hélice comme dans le turbopropulseur ou toute autre machine réceptrice.

Le turbomoteur se présente donc comme un moteur à turbine qui se compare au moteur Diesel. On peut distinguer les mêmes phases de fonctionnement : aspiration, compression, combustion à pression constante (isobare), détente et échappement, à la différence importante près que, dans un moteur Diesel, ces phases sont successives dans le même cylindre, alors qu'elles se déroulent en continu et de façon concomitante sur une turbine à gaz.

Cycle théorique - Cycle réel

Le cycle thermodynamique de la turbine à gaz comprend trois phases : compression, combustion, détente ; une quatrième pouvant être représentée par l'atmosphère. Le

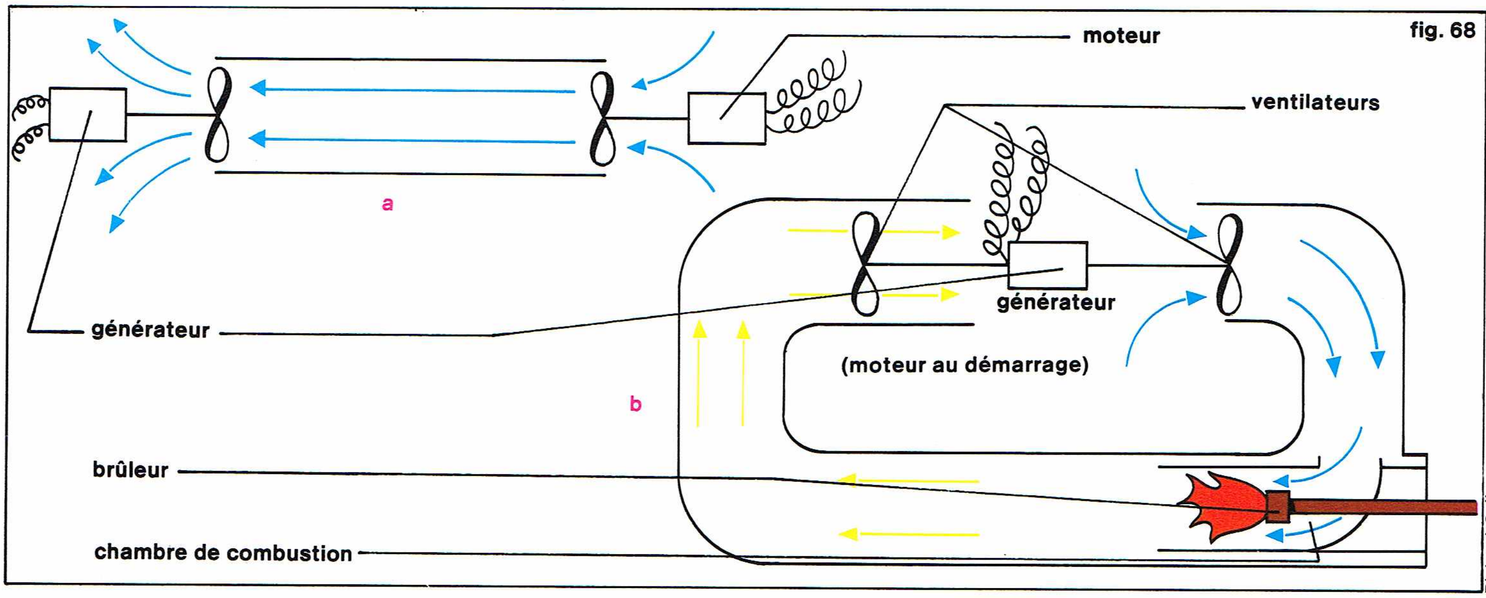

diagramme correspondant (p, V) est représenté sur la *figure* 70 ; il est appelé diagramme de Joule ou diagramme de la turbine à gaz.

Au cours de la première phase se fait la compression, au cours de la seconde l'apport de chaleur dans la chambre de combustion. Seule une partie de l'air comprimé (au plus 30 %) est utilisée pour la combustion, le reste permettant de refroidir les parois de la chambre de combustion et de limiter ensuite par mélange avec les gaz brûlés la température de ces derniers. Une turbine à gaz fonctionne donc avec un large excès d'air très supérieur à celui des moteurs Diesel. Cet excès d'air permet, comme on le verra plus loin, d'alimenter une chaudière avec les gaz d'échappement d'une turbine à gaz. La troisième phase est constituée par la détente.

Rendement

Le cycle de la turbine à gaz peut être défini sur le diagramme entropique (voir *figure* 71 a) par deux isobares reliant une source froide et une source chaude. Les points caractéristiques du diagramme sont :

A - Source froide p_A pression atmosphérique
T_A température de l'air ambiant

B - Fin de compression p_B et T_B, pression et température de l'air comprimé.

C - Source chaude T_C, température entrée turbine (avant détente).

D - Fin de détente T_D, température en fin de détente.

Toutes les températures sont exprimées en degrés Kelvin (T).

$$m = \frac{T_B}{T_A} = \frac{T_C}{T_D}$$

est le taux d'échauffement lors d'une compression isentropique (S = C^{te}) qui est égal au rapport des températures de compression.

On montre que $m = \beta^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}$, avec β taux de compression : $\beta = \frac{p_B}{p_A}$, γ étant le rapport $\frac{C_p}{C_V}$ des chaleurs massiques à pression constante et à volume constant.

Le travail massique (pour 1 kg de fluide) fourni pour la détente adiabatique dans la turbine s'écrit :

$$W_t = C_p\,(T_C - T_D)$$

Le travail absorbé par le compresseur :

$$W_C = C_p\,(T_B - T_A)$$

Le travail utile représente la différence entre le travail fourni par la turbine et celui qui est absorbé par le compresseur :

$$W_u = W_t - W_C = C_p\,[T_C - T_D - T_B + T_A]$$

La dépense de calories a pour expression :

$$q = C_p\,(T_C - T_B)$$

Le rendement thermodynamique théorique du cycle, qui est égal au travail utile rapporté à la quantité de chaleur introduite dans le cycle, a donc pour expression :

$$\eta_T = \frac{W_u}{q} = \frac{T_C - T_D - T_B + T_A}{T_C - T_B} = 1 - \frac{T_D - T_A}{T_C - T_B}$$

or

$$\frac{T_B}{T_A} = \frac{T_C}{T_D} = m$$

d'où

$$\eta_T = 1 - \frac{T_D - T_A}{(T_D - T_A)\,\beta} = 1 - \frac{1}{m} = \frac{1}{1 - \beta^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}}$$

Le rendement thermodynamique théorique ne dépend donc que du taux de compression.

Le cycle réel diffère du cycle théorique par la compression qui n'est pas rigoureusement adiabatique, ainsi que la détente. Les courbes représentatives ne sont donc plus des isentropiques et le cycle se déforme : B devient B′ et D devient D′ (voir *figure* 71 b). Le travail utile prend la forme :

$$W_u = C_p\,[T_C - T_D{'} - T_B{'} + T_A]$$

Les températures $T_D{'}$ et $T_B{'}$ étant supérieures à T_D et T_B, le travail a diminué. L'augmentation de T_C, température de la source chaude, ne peut être considérablement

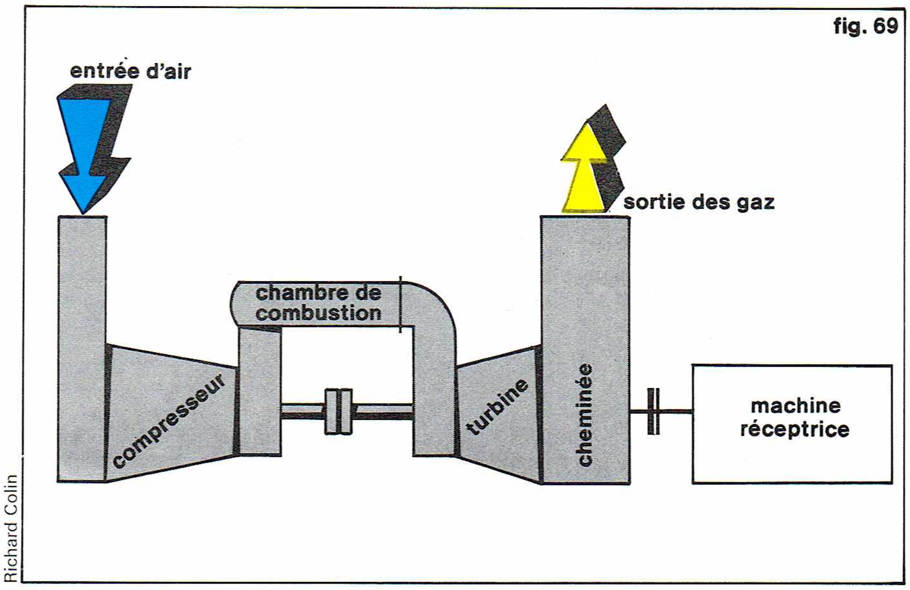

◄▲ *Figures 68 et 69 ; turbine à gaz : configuration simple et principe de combustion. Dans le schéma* a, *l'énergie mécanique du moteur est transmise au générateur par un débit d'air. Dans le schéma* b, *les deux ventilateurs sont couplés sur le même arbre et, après démarrage, l'énergie est apportée sous forme thermique par le combustible.*

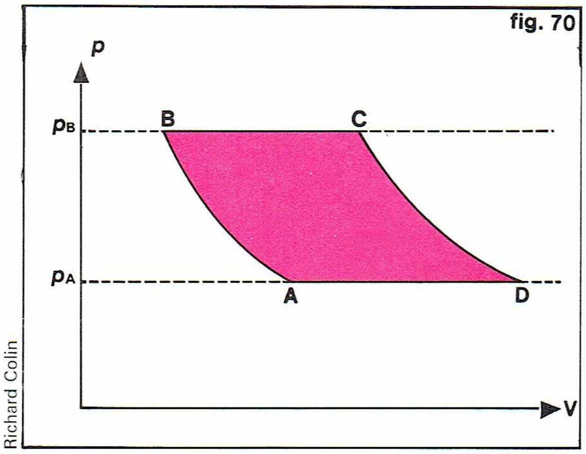

◄ *Figure 70 : cycle de la turbine à gaz ou cycle de Joule.*

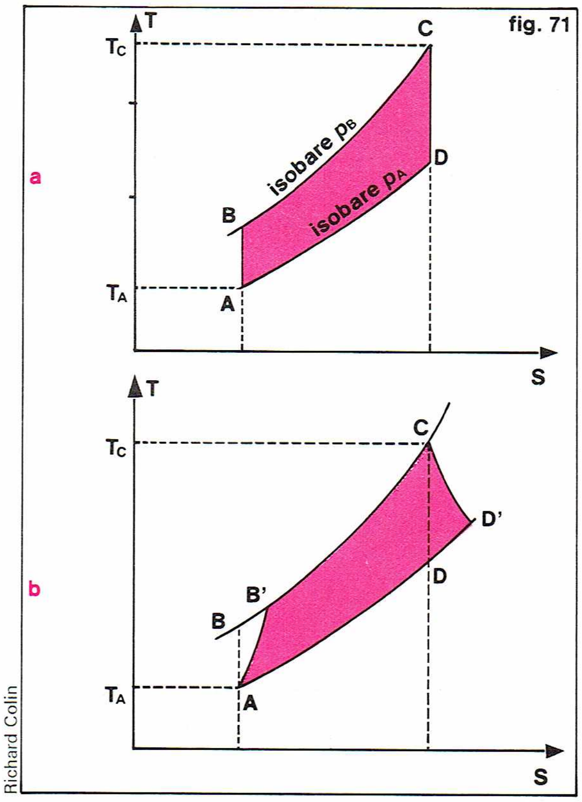

◄ *Figure 71, cycle théorique de la turbine à gaz défini sur le diagramme entropique* (a), *et diagramme du cycle réel* (b).

▶ *Figure 72;* (a), *représentation, sur un diagramme* TS, *du cycle Brayton d'une installation* (b) *comportant deux étages de compression avec réfrigération intermédiaire, un étage de réchauffage en cours de détente, et un échangeur de récupération :* C_1, C_2, *compresseurs;* B_1, B_2, *chambres de combustion;* I, *réfrigérant;* R, *réchauffeur d'air;* T_1, T_2, *turbines;* U, *utilisateur.*

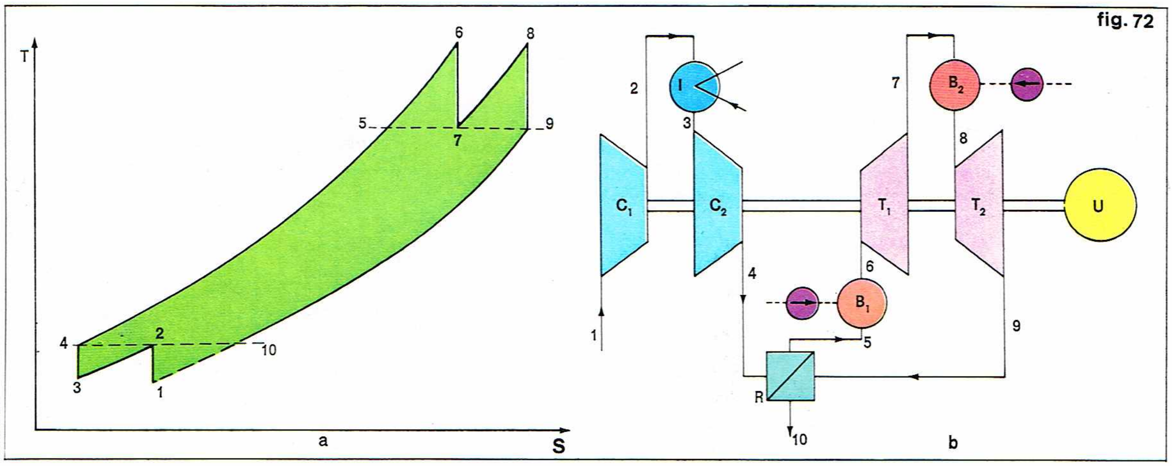

I.G.D.A.

▶ *Une turbine à gaz Fiat TG 16.*

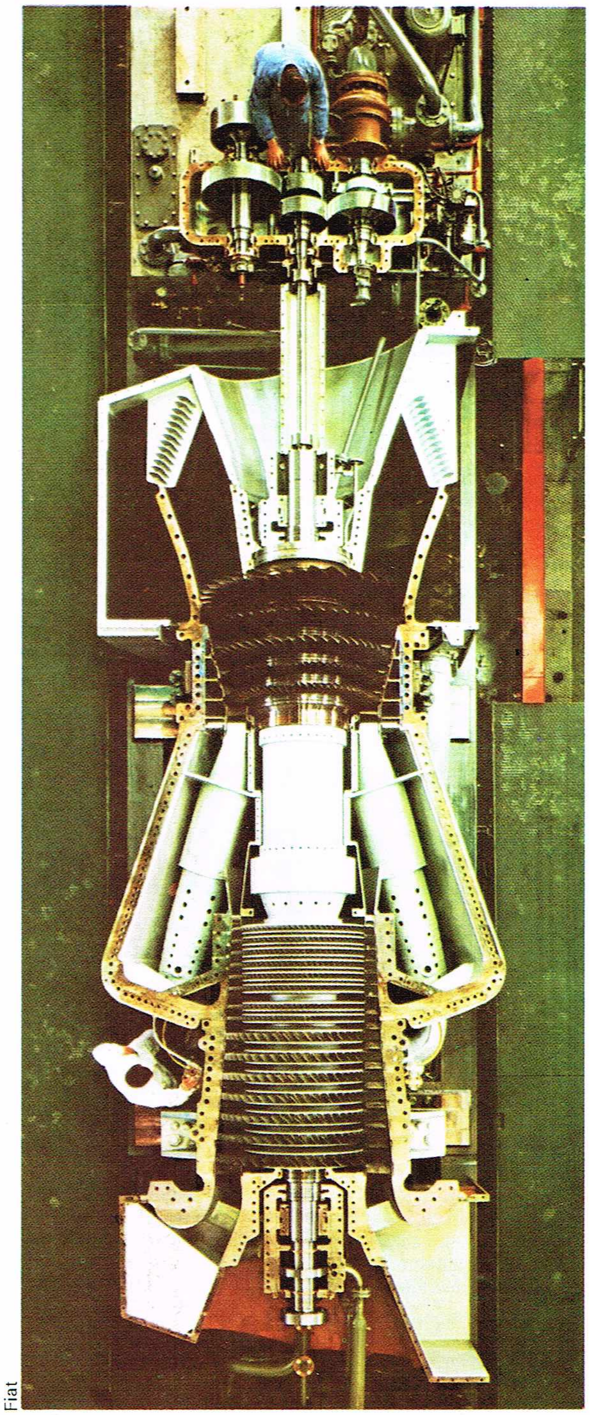

Fiat

augmentée, car elle est limitée par la tenue des premiers aubages de la turbine. On augmente donc le travail utile par les deux procédés suivants : réfrigération en cours de compression, réchauffage en cours de détente et récupération sur les gaz d'échappement.

La réfrigération en cours de compression permet de remplacer la compression adiabatique par une compression qui se rapproche de l'isotherme, et on montre que le travail absorbé par le compresseur est plus faible : on gagne donc sur la puissance utile. L'installation peut comporter un ou plusieurs réfrigérants.

Le réchauffage en cours de détente permet de se rapprocher des conditions d'une détente isotherme. Cette opération est analogue à l'opération de resurchauffe sur les turbines à vapeur. La récupération des calories des gaz d'échappement permet d'économiser du combustible et d'accroître ainsi le rendement.

On trouvera sur la *figure* 72 le cycle réel d'une installation comportant deux étages de réfrigération, un étage de réchauffage et un échangeur de récupération. Ces dispositions permettent d'augmenter considérablement le rendement en le doublant presque, mais au prix d'une complexité qui nous éloigne beaucoup du schéma de base initial. De plus, l'installation a besoin d'eau pour fonctionner, ce qui n'est pas le cas du turbomoteur simple.

Combustion

On a déjà noté que, pour limiter la température des gaz de combustion à l'entrée de la turbine, on réalisait une combustion avec un grand excès d'air. Cet excès d'air risque de refroidir le combustible au-dessous de la température d'inflammation, donnant ainsi des imbrûlés solides dangereux pour les aubages de la turbine (érosion et encrassement). Une autre difficulté provient du fait que, sur la plupart des turbines à gaz, la place est très limitée, contrairement aux chaudières classiques, et les chambres de combustion sont très petites.

On élimine donc ces difficultés que pourrait rencontrer la combustion en créant deux zones dans la chambre de combustion :

▼ *Figure 73; représentation schématique d'une chambre de combustion : 1, chambre de mélange; 2, injecteur du combustible; 3, brûleur; 4, enveloppe extérieure; 5, entrée de l'air.*

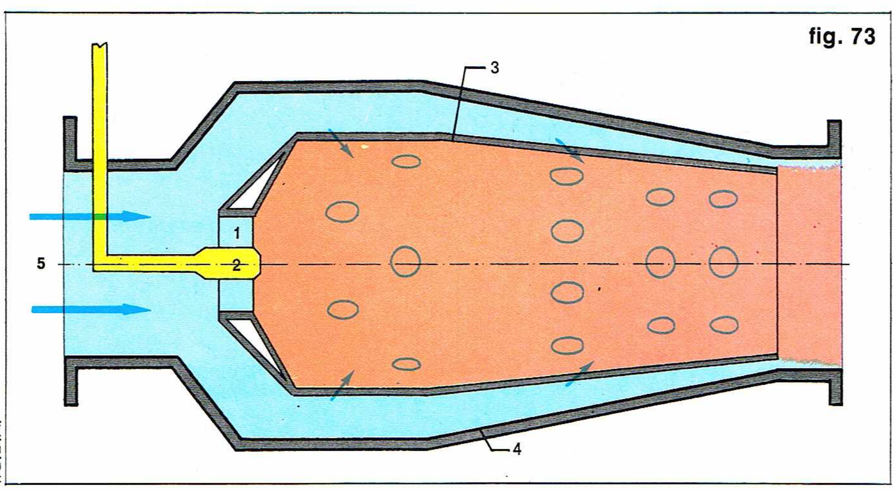

I.G.D.A.

— une zone primaire dans laquelle l'excès d'air est modéré ;
— une zone secondaire dans laquelle va s'effectuer le mélange.

Le brûleur assure la pulvérisation du combustible qui s'échauffe sous l'action du rayonnement de la flamme et des parois (température de 1 000 °C), se vaporise et brûle comme dans une chaudière classique ; on distribue l'air primaire en tourbillonnant pour provoquer un mélange intime du combustible et du carburant. L'air de mélange est injecté ensuite dans les gaz de combustion de façon à favoriser le mélange des gaz chauds et de l'air froid. Les parois du foyer et le brûleur sont refroidis par un courant d'air froid.

Une chambre de combustion (voir *figure* 73) se compose donc d'une enveloppe extérieure, travaillant à basse température et devant tenir la pression, et d'un habillage interne, non soumis à la pression, mais exposé aux hautes températures. L'enveloppe extérieure est en acier, l'habillage doit être en matériau réfractaire.

Les combustibles utilisés pour les turbines à gaz sont très variés. Sur les installations terrestres où elles concurrencent les autres types de moteurs, on donne à brûler aux turbines à gaz des combustibles bon marché : fuels lourds et même charbons pulvérisés. Le problème de la combustion est plus facile sur les installations stationnaires, car il est possible de dimensionner plus largement les chambres de combustion. On demande néanmoins aux combustibles de ne pas avoir une teneur en cendres trop élevée pour l'endurance de la turbine. Sur les turbines à gaz, le gaz naturel est un excellent combustible et de nombreuses installations l'utilisent.

Sur les turbines à gaz d'avion, en plus de la place limitée, se posent les problèmes de stabilité de flamme à tous les régimes de fonctionnement ainsi que le démarrage et le fonctionnement à très basse température. On utilise donc des carburants spéciaux appelés *carburéacteurs* et qui sont des distillats légers du pétrole (kérosène).

Problèmes technologiques

Les divers éléments constituant un groupe turbomoteur sont de technologie bien connue. On étudie et on réalise en effet depuis longtemps des compresseurs, des turbines et des échangeurs. Les problèmes nouveaux posés par les turbines à gaz ont pour origine essentielle les hautes températures que l'on rencontre dans ce type de machines.

Les compresseurs sont classiques. Ils sont très généralement de type axial à cause du bon rendement de ce type de machine et de son faible encombrement en maître-couple. Le compresseur centrifuge de fabrication plus simple est préféré sur les machines de faible puissance.

Les turbines à gaz ne diffèrent pas dans leur principe des turbines à vapeur mais les hautes températures de fonctionnement exigent le recours à des matériaux et à des solutions constructives différentes. Le point sensible se trouve sur la première roue dont les ailettes sont exposées à la température extrême du cycle, ce qui impose l'emploi d'alliages de type Ni-Cu, résistant à la température, ou de matériaux réfractaires.

Les échangeurs, que ce soient des réfrigérants ou des récupérateurs, sont semblables à ceux utilisés couramment dans l'industrie. Les réfrigérants d'air fonctionnent avec de l'eau et de l'air propre. Le récupérateur est un échangeur entre deux gaz : air et gaz de combustion. L'échange étant moins bon que dans l'échange avec un liquide, cet appareil est plus gros, donc plus coûteux. Il pose les mêmes problèmes qu'un récupérateur de chaudière : encrassement et risque d'incendie du côté gaz de combustion. On écarte ce danger d'incendie par des nettoyages périodiques. En revanche, le danger de corrosion signalé dans les réchauffeurs de chaudières (condensation dans les gaz de combustion) n'existe pas ici, puisque la température de l'air en fin de compression est supérieure à la température dangereuse (150 °C environ).

La régulation de la machine se fait par action sur le débit de combustible injecté. Pour les groupes à vitesse constante, et c'est le cas des turbines entraînant un générateur électrique, le débit d'air reste constant, et à chaque valeur de la charge correspondent un débit de combustible et une température à l'entrée de la turbine. Pour les groupes à vitesse variable, le débit d'air est approximativement proportionnel à la vitesse de rotation du compresseur, et on peut alors maintenir constante la température à l'entrée de la turbine.

Domaines d'utilisation

La turbine à gaz concurrence le moteur et la turbine à vapeur, et ses domaines d'utilisation recouvrent en partie ceux de ces deux types de machines.

Sur le moteur Diesel, elle a les avantages des turbomachines, et sur les autres moteurs, elle a pour elle la simplicité et la possibilité de fonctionner sans une source abondante de refroidissement. Elle ne peut cependant rivaliser dans le domaine de la propulsion automobile avec le moteur Diesel et le moteur à explosion. Sa puissance encore limitée lui ferme la production massive d'électricité telle qu'elle se pratique dans les centrales modernes. Elle a enfin des domaines d'utilisation propres où aucun type de moteur ne paraît susceptible pour l'instant de la remplacer.

Quelques types de dispositions de groupes utilisant la turbine à gaz sont donnés sur la *figure* 74.

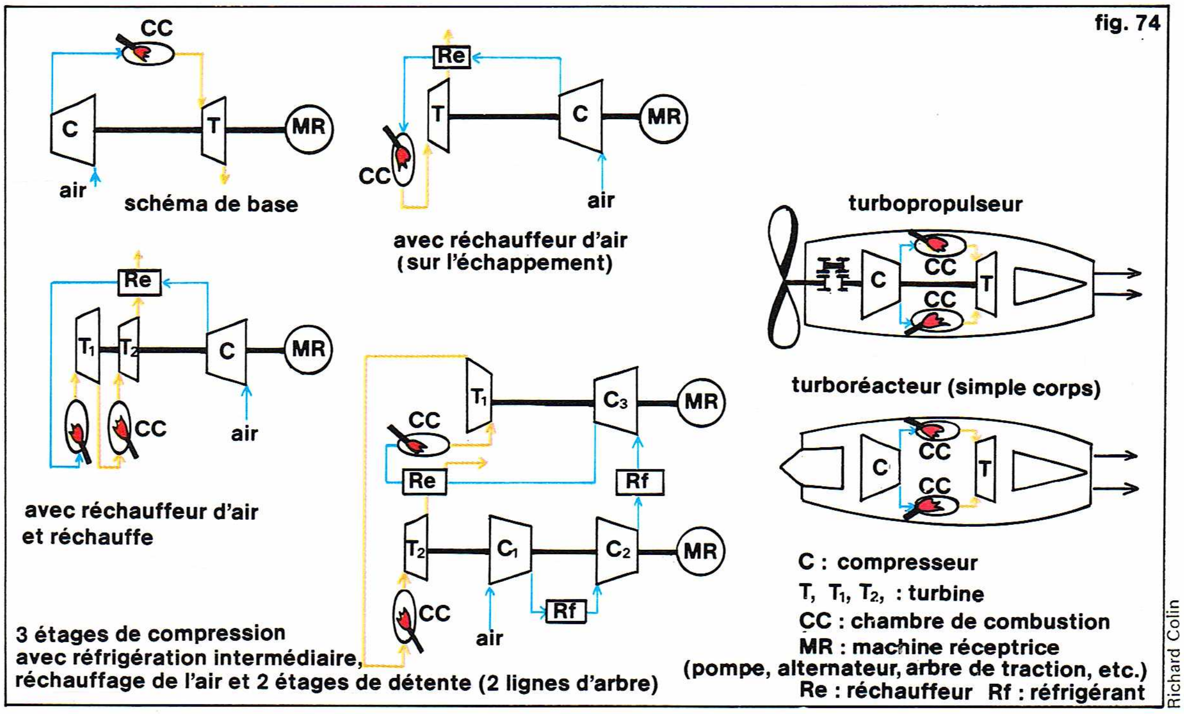

◀ *Figure 74 : types de dispositions de groupes utilisant la turbine à gaz.*

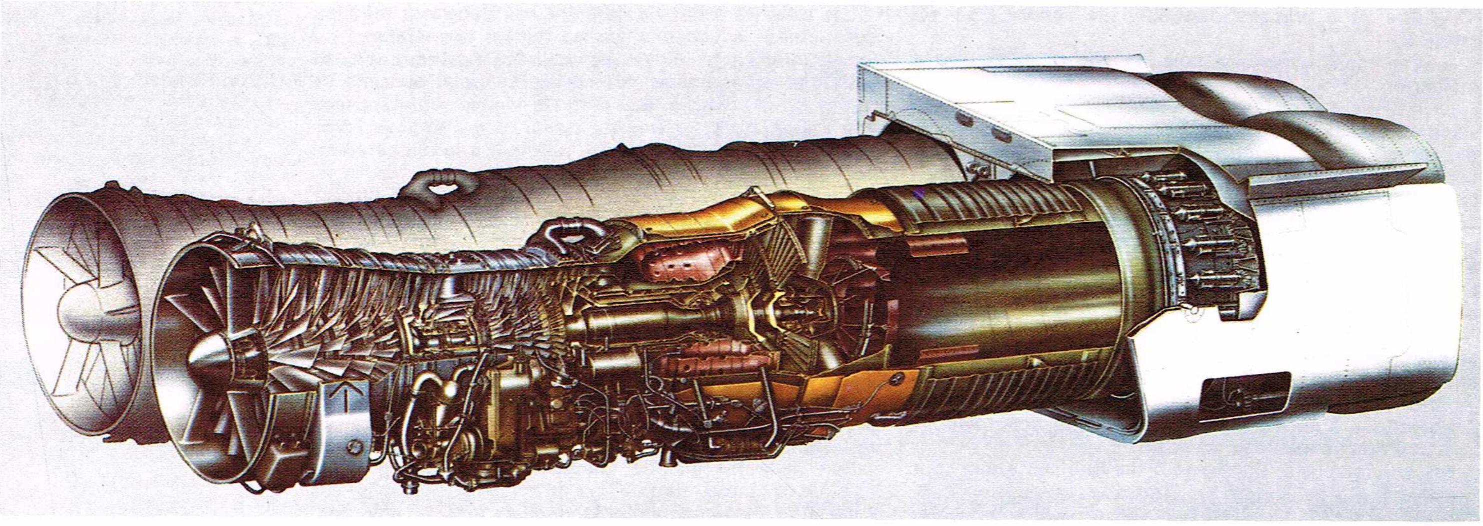

S.N.E.C.M.A.

▲ *La turbine à gaz a envahi le domaine des transports long- et moyen-courrier ; ici le turboréacteur de* Concorde *en vue éclatée.*

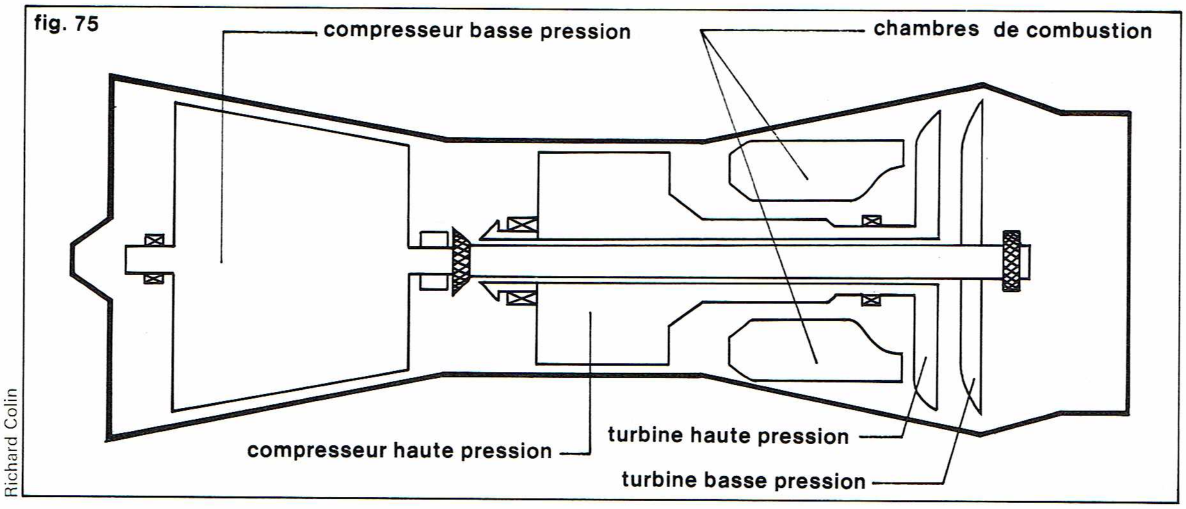

Richard Colin

▶ *Figure 75 : représentation schématique du réacteur double corps de* Concorde.

Ses domaines privilégiés sont les suivants.

* *Fourniture d'électricité*

La turbine à gaz est utilisée soit comme centrale de base sur de petits réseaux, soit comme centrale de pointe. Dans le premier cas, le rendement est un paramètre primordial. Comme groupe de pointe, la turbine à gaz est intéressante du fait de sa rapidité de démarrage ; le rendement est un paramètre moins important.

Les puissances des groupes vont de 5 000 kW à 80 000 kW. Certains groupes sont conçus par les constructeurs pour former un ensemble complet à la sortie d'usine (groupe package) susceptible d'être transporté ainsi, ce qui permet une mise en service très rapide.

* *Entraînement de machines diverses*

La turbine à gaz est particulièrement appréciée si on dispose dans l'usine d'un combustible adapté (gaz

Turbo meca

▶ El Astazou XVI *est un turbopropulseur à arbre simple.*

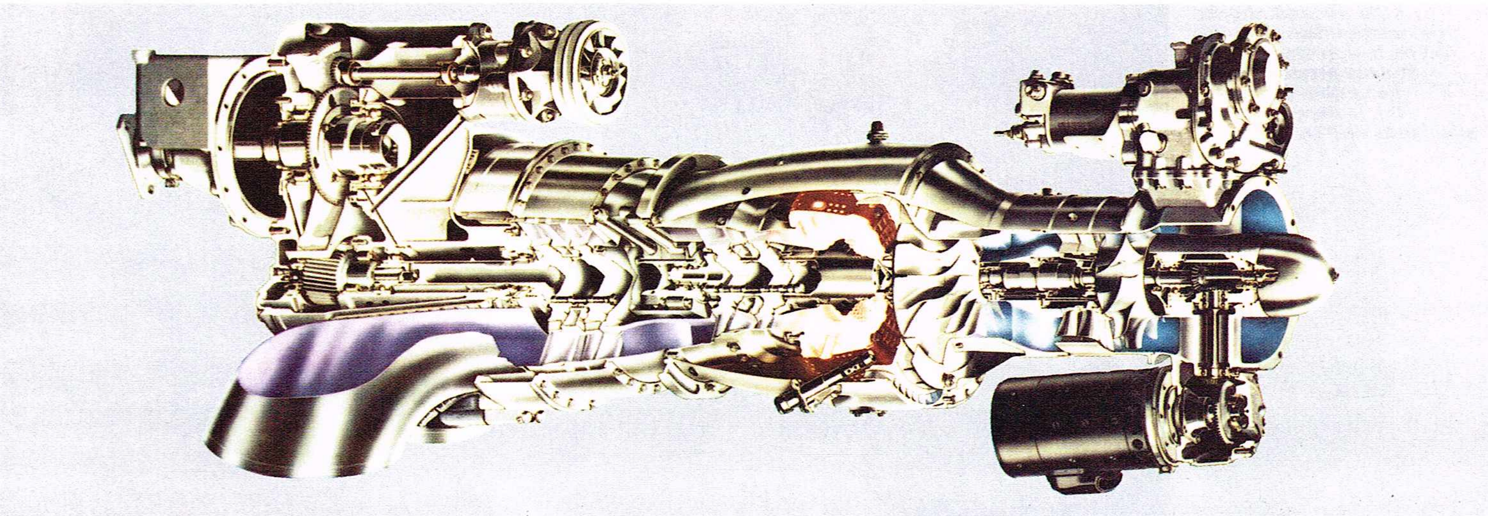

Turbo meca

▲ *Le* Turmo III F *(ici, en vue éclatée) est un turbomoteur du type à turbine libre; il équipe notamment l'hélicoptère* Super Frelon *de* Sud-Aviation *et les turbotrains* E.T.G. *et* R.T.G. *utilisés par la* S. N. C. F.

de haut fourneau par exemple).

* *Propulsion d'avion*

Sous la forme du turboréacteur, la turbine à gaz a envahi le domaine des transports long- et moyen-courrier (*fig.* 75). Elle est utilisée sur les petits appareils sous la forme de turbopropulseur ou de turbomoteur (hélicoptère).

* *Propulsion navale*

Son emploi est limité, car, en attaque directe de l'hélice, il est nécessaire d'interposer un réducteur à engrenages entre la turbine et la ligne d'arbre. Ce système ne permet pas la marche arrière.

On peut utiliser la propulsion électrique en passant par un générateur et un moteur, mais cette solution devient plus lourde et nettement plus coûteuse.

* *Propulsion ferroviaire*

Les deux types de propulsion, mécanique et électrique, ont été également mis en œuvre. La propulsion mécanique est beaucoup moins souple que la propulsion électrique, mais elle apporte un gain de poids. D'autres transmissions comme la transmission hydraulique sont actuellement à l'étude.

Moteurs statiques

Dans ces moteurs, il n'y a pas, par définition, de pièces en mouvement et il n'est donc pas possible de recueillir l'énergie mécanique sous la forme d'un couple moteur sur un arbre tournant. L'énergie produite ne peut être utilisée que sous forme de poussée et en conséquence le domaine d'application des moteurs statiques sera celui de la propulsion par réaction. Ce type de propulsion convient surtout aux véhicules se déplaçant à grande vitesse, et c'est ce qui explique que ces moteurs soient utilisés seulement en aéronautique et en astronautique.

Rappelons tout d'abord le sens de propulsion par réaction. Elle se définit comme un moyen de propulsion s'effectuant par projection de masses pesantes; par application du principe de l'égalité de l'action et de la réaction, l'aéronef reçoit une poussée dans le sens inverse de celui de la projection. Les masses pesantes sont, dans le cas des moteurs thermiques à combustion interne, les gaz de la combustion.

Si la masse éjectée m a une vitesse v, le véhicule de masse M prendra une vitesse V, telle que

$$MV = mv$$

De plus, si la masse m est éjectée pendant un temps t, on peut exprimer la poussée P de la façon suivante, γ étant l'accélération :

$$P = m\gamma = m\frac{v}{t}$$

Comme on le voit, seule la « réaction » est à l'origine du mouvement et non pas comme on l'a cru très longtemps l'appui du jet gazeux sur l'air extérieur. La propulsion à réaction fonctionne dans le vide absolu.

Cette dernière remarque nous conduit à distinguer deux types de moteurs.

— Les moteurs utilisant l'air comme comburant; ils ne peuvent donc fonctionner que dans l'atmosphère et on les appelle des moteurs *aérobies*.

— Les moteurs pouvant fonctionner en dehors de toute atmosphère, car ils sont alimentés par un mélange carburant-comburant; ce sont les moteurs *anaérobies*.

En matière de terminologie, on utilise souvent le terme de propulseur à la place de celui de moteur. Cette confusion est justifiée si on remarque que la majorité des moteurs statiques à combustion interne est utilisée pour la propulsion.

Pour terminer cette introduction, remarquons que la propulsion par réaction n'est pas le domaine exclusif des moteurs statiques à combustion interne. En fait, dans l'atmosphère, les turboréacteurs sont d'un emploi généralisé. Dans les applications aéronautiques, disons que, la combustion étant le moyen le plus simple pour fabriquer et éjecter des gaz, les moteurs de fusée et particulièrement ceux de puissance élevée sont des moteurs à combustion interne.

Mais il existe bien d'autres moyens d'éjecter des particules à grande vitesse. On rentre alors dans la catégorie des propulseurs non chimiques. Ce type de propulseur fait actuellement l'objet d'études pour prendre la relève des propulseurs chimiques dont l'inconvénient majeur est l'obligation d'emporter dans l'espace tout le comburant nécessaire à la combustion.

Ces propulseurs ne sont plus des moteurs à combustion interne. Ils seront donc traités dans le paragraphe consacré aux moteurs statiques à combustion externe, bien que pour la plupart d'entre eux le terme de « combustion » ne soit guère approprié.

Moteurs statiques aérobies

Deux types de moteurs ont fait l'objet de réalisations : le statoréacteur et le pulsoréacteur.

* *Statoréacteur*

Dans ce type de moteur, l'énergie thermique résultant de la combustion d'un carburant est directement transformée en énergie cinétique pour la propulsion.

Le schéma de principe d'un statoréacteur (*fig.* 76) est très simple. Ce moteur se présente sous la forme d'une tuyère. A l'extrémité avant, l'air pénètre à grande vitesse. Un divergent augmente sa pression jusqu'à la chambre de combustion où se fait l'arrivée de combustible finement pulvérisé. Ce combustible allumé au préalable brûle ensuite au contact de la flamme. Les gaz d'échappement, à très haute température (de l'ordre de 2 000 °C), sont évacués par l'arrière. Les parois soumises aux gaz d'échappement doivent être refroidies par une circulation d'air.

Le statoréacteur est surtout destiné aux vols dans l'atmosphère à vitesse élevée (Mach 3 à Mach 8). Son domaine d'utilisation se situe entre celui des turboréacteurs et celui des moteurs fusées, et concerne aujourd'hui uniquement la propulsion militaire. Ce type de moteur a fait l'objet d'études très poussées en France (avion Leduc) comme à l'étranger. On a surtout réalisé des avions expérimentaux ou des engins militaires comme des cibles volantes.

Il faut noter enfin que le statoréacteur n'est pas susceptible de démarrer un aéronef par ses propres moyens. Les

▶ *Les engins de représailles V1 et V2 de la dernière guerre étaient propulsés par des pulsoréacteurs. Ici, la base militaire allemande de Peenemünde.*

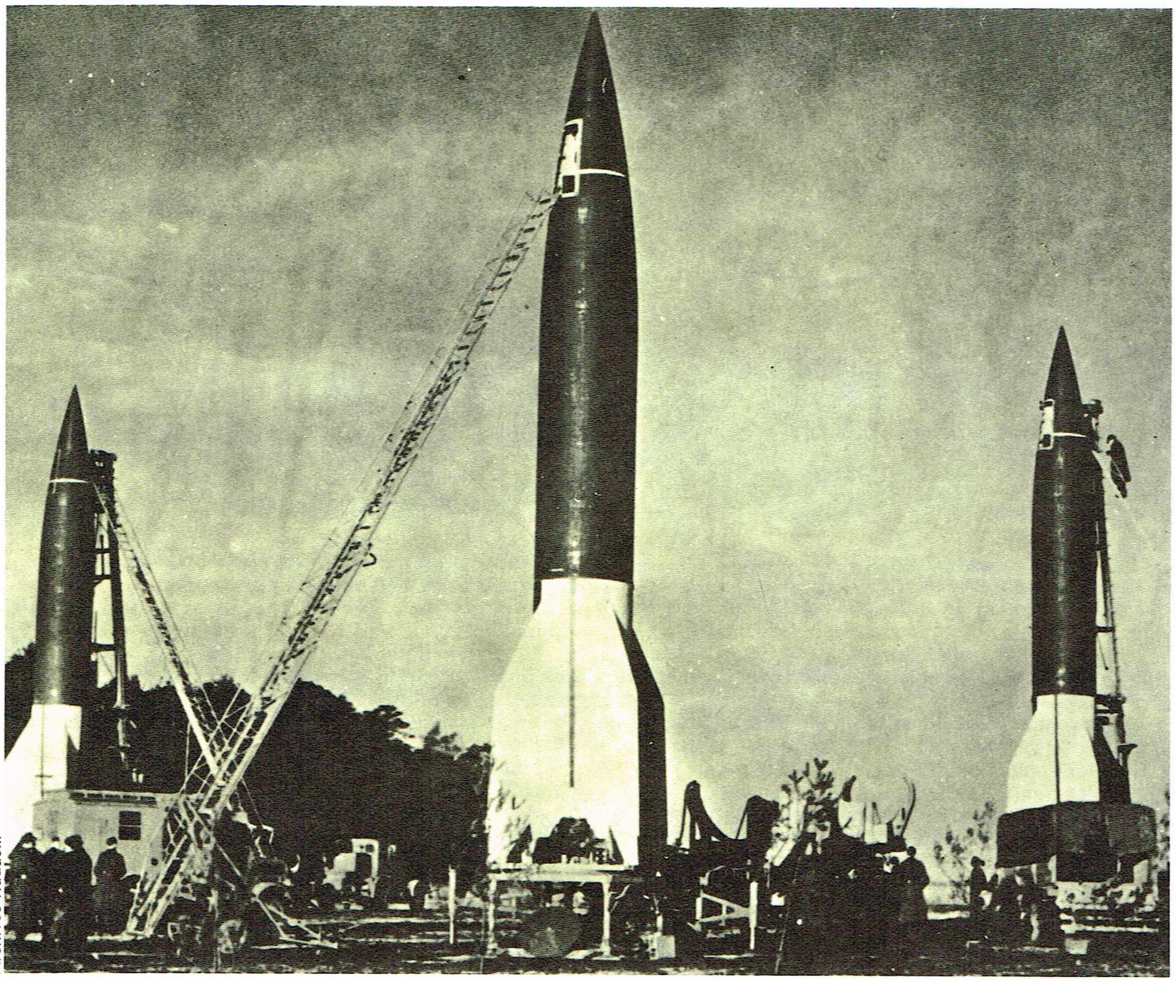

Archives Radaelli

▼ *Figure 76 :* représentation *schématique* d'un statoréacteur. *Figure 77 : schéma de principe du* pulsoréacteur.

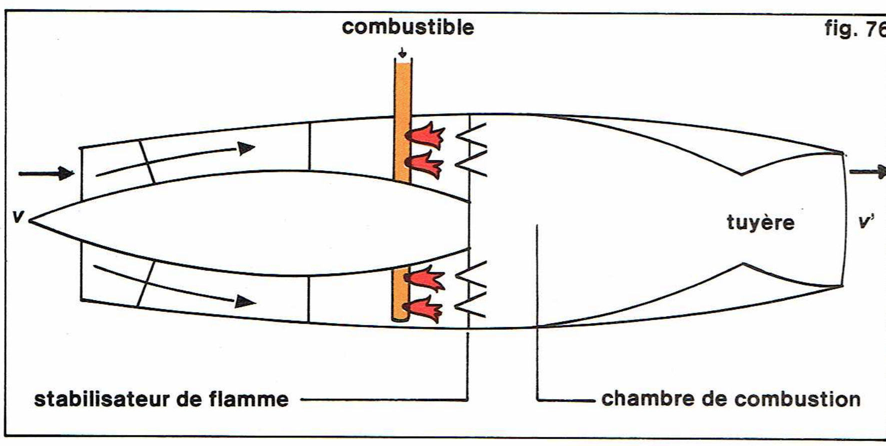

Richard Colin

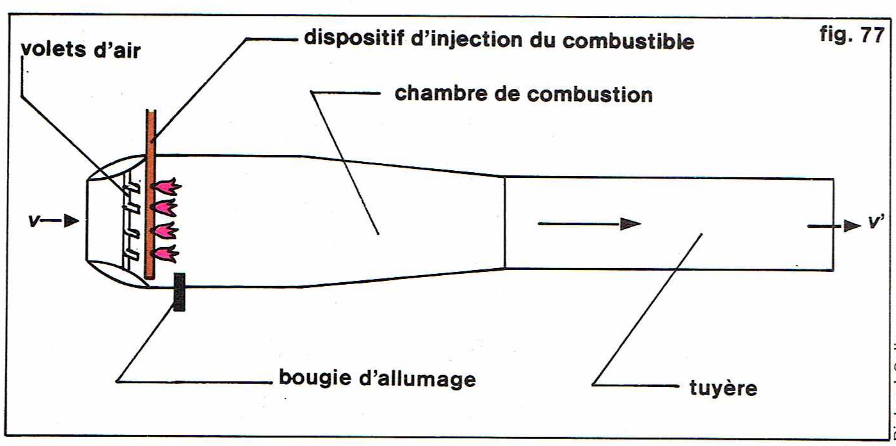

Richard Colin

engins munis de ce type de moteur doivent donc être lancés d'un avion en vol. On a donc pensé à combiner le statoréacteur avec un turboréacteur, ce qui a donné le statoturboréacteur. Le *Griffon* de la société *Nord-Aviation* était équipé d'un moteur de ce type.

* *Pulsoréacteur*

Le pulsoréacteur se présente sous la forme d'une tuyère, comme le statoréacteur, mais son fonctionnement est différent. L'entrée d'air est obturée par des volets d'air normalement fermés par des ressorts qui s'ouvrent automatiquement lorsque la chambre de combustion est en dépression. Au démarrage, le carburant injecté dans la chambre de combustion est enflammé à l'aide d'une bougie électrique et l'onde de pression résultante éjecte les gaz brûlés vers la sortie, créant ainsi une dépression dans la chambre de combustion qui entraîne l'ouverture des clapets d'entrée. Il y a donc admission d'air frais et le cycle peut recommencer (*fig.* 77).

La combustion qui s'effectue à volume constant est périodique (50 battements par seconde). Le combustible après le premier allumage s'enflamme spontanément. La colonne de gaz dans la tuyère est pulsée, d'où le nom de pulsoréacteur. Ce moteur peut, contrairement au statoréacteur, fonctionner à vitesse nulle.

Faut-il rappeler que les engins de représailles *V1* de la dernière guerre étaient propulsés par des pulsoréacteurs. Ce dispositif, bien qu'ayant été étudié dans plusieurs pays, n'a jamais connu un développement notable en raison du manque d'endurance des volets d'air d'une part et de sa consommation spécifique élevée.

Récemment, la firme allemande MMB a mis au point un nouveau type de pulsoréacteur comportant des orifices d'entrée dont le dessin particulier permet, sans aucune pièce mobile, le fonctionnement en combustion périodique. Ce pulsoréacteur sans volet justifie le classement habituel de ce type de moteur dans les moteurs statiques. Même ainsi renouvelé, il ne semble pas que ce type de moteur puisse sortir du domaine des quelques applications militaires auxquelles il semble adapté.

Moteurs statiques anaérobies

Le fonctionnement d'un moteur-fusée a propulsion chimique peut être décrit très simplement : ce moteur comprend une chambre de combustion ou foyer qui est munie d'une ouverture en forme de tuyère. Les gaz de combustion sous pression s'échappent par la tuyère, permettant ainsi l'effet de propulsion.

Pour assurer la combustion, le véhicule doit emporter à la fois le combustible et le comburant. Il est habituel de désigner ces produits sous le nom d'*ergols* : un ensemble d'ergols en rapport défini formant un *propergol*. Pour compléter ces définitions, ajoutons qu'un ergol capable de dégager de l'énergie par lui-même est appelé *mono-ergol*. Un propergol formé de deux ergols est un *diergol*, de trois ergols, un *triergol*. Lorsque deux ergols s'enflamment à la température ambiante par simple contact, on dit qu'ils sont *hypergoliques*.

On distingue deux grandes familles de propergols : les propergols solides et les propergols chimiques. Il a été imaginé des systèmes mixtes utilisant un ergol liquide et un ergol solide. Ce type de propergol (appelé *lithergol*) est au stade de l'expérimentation et n'a pas encore fait l'objet d'applications significatives.

* *Moteurs-fusées à propergol solide*

Ces moteurs, appelés aussi *moteurs-fusées à poudre*, sont très simples, et c'est ce qui explique que les premières réalisations humaines dans ce domaine se soient appuyées sur ce moyen de propulsion.

Un tel moteur comprend :

— une charge de poudre dont la combustion doit être lente et progressive ;

— une chambre de combustion dans laquelle est stocké tout le propergol à l'état solide ;

— une ou plusieurs tuyères par où vont s'échapper les gaz de combustion ;

— un système d'allumage ;

— un système d'arrêt de la poussée.

Le gros intérêt des fusées à poudre est la possibilité de stocker la fusée pendant des périodes aussi longues que la stabilité chimique de la poudre le permet, dans un état de disponibilité de lancement immédiat. Pour cette raison, ce type de fusée est surtout utilisé pour des applications militaires.

L'inconvénient principal de la fusée à poudre est qu'elle ne peut pas être allumée une deuxième fois. Il est difficile en effet d'éteindre un bloc de poudre, et on règle généralement la durée de l'application par réorientation du jet. Il n'est pas possible non plus de modifier l'intensité de la poussée, une fois le moteur allumé. La loi de poussée est donc fixée à l'avance à la construction.

On distingue en général deux familles de propergols solides.

— Les *poudres homogènes* qui ne forment qu'une phase dans laquelle comburant et combustible sont fixés sur une même molécule organique. Les produits utilisés sont généralement composés à partir de nitro-cellulose ou de nitroglycérine.

— Les *poudres composites* qui sont obtenues par un mélange intime et homogène d'un combustible et d'un comburant.

Généralement, le combustible est un composé organique ou un corps simple réducteur, et l'oxydant, servant de comburant, se présente sous la forme d'un sel minéral cristallisé et finement broyé (nitrate ou perchlorate d'ammonium). A ces produits de base sont ajoutés d'autres corps destinés à stabiliser le produit, à lui donner de bonnes caractéristiques mécaniques ou à l'empêcher de vieillir.

Les blocs de poudre ont des formes variées (voir *figure* 78) qui sont conditionnées par la forme de la chambre de combustion et par la loi de poussée (progressive, dégressive, constante) en fonction du temps que l'on désire obtenir. La combustion se développe par couches concentriques et il est donc possible de faire varier la surface offerte à la combustion en fonction du temps.

La mise en forme des blocs de poudre est réalisée de diverses manières : extrusion à la presse, moulage dans un moule ou coulée directe dans la chambre de combustion.

La résistance mécanique des blocs de poudre doit être suffisante pour résister au choc du démarrage et à la pression des gaz sans se casser.

Les allumeurs doivent être conçus pour faire démarrer la combustion sur la totalité de la surface du bloc de poudre de façon que celle-ci puisse atteindre rapidement un régime stable.

L'arrêt de poussée du moteur se réalise simplement par ouverture du fond du propulseur. Des tuyères tournées vers l'avant peuvent être utilisées pour inverser la poussée, ce qui est utile dans le cas de séparation du moteur et de la fusée. Ces opérations sont réalisées par des systèmes de ruptures pyrotechniques (boulons explosifs).

* *Moteurs-fusées à propergol liquide*

Ces fusées comportent, en plus de la chambre de combustion et des tuyères, des fusées à poudre, des réservoirs, des circuits d'alimentation, un système d'injection. La complexité de ces fusées est donc plus grande que celle des fusées à poudre (*fig.* 79).

Les réservoirs ont une place importante de par leur volume et leur poids. On s'efforce de rendre ces réservoirs aussi légers que possible pour une contenance donnée. La forme sphérique, la meilleure de ce point de vue, est quelquefois utilisée ; plus généralement, ces réservoirs sont cylindriques. On utilise des matériaux à hautes caractéristiques mécaniques : aciers, alliages légers ou matériaux composites à fibre de verre. Ces réservoirs sont compartimentés pour éviter les effets de carène liquide.

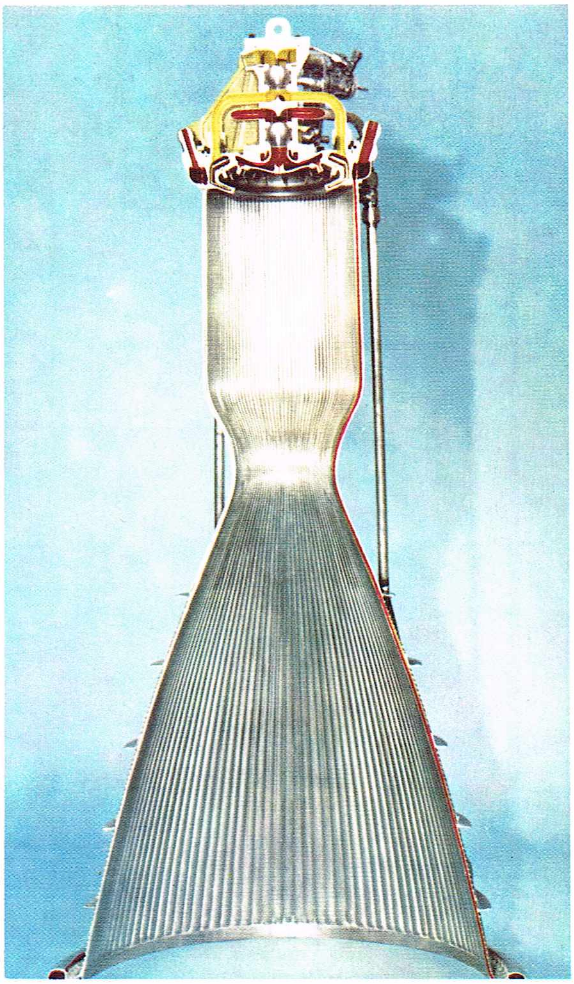

Archives Radaelli

◀ ***Section de la chambre de combustion d'un moteur-fusée à propergol liquide, montrant le flux d'alimentation du carburant.***

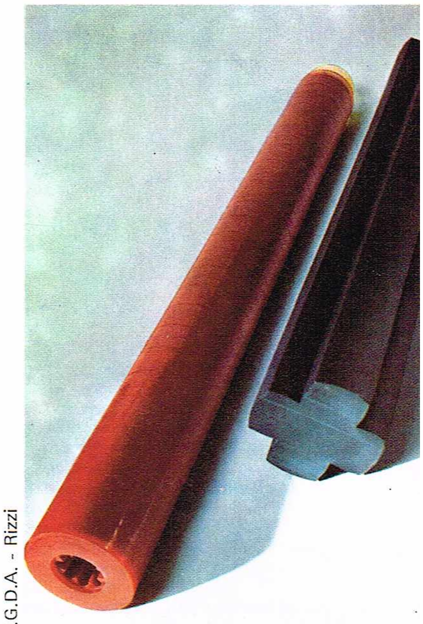

I.G.D.A. - Rizzi

▲ ***Deux types de propergol solide.***

▼ ***Figure 78 ; coupe schématique de deux blocs de poudre montrant deux formes de la chambre de combustion : (a) cylindrique ; (b) en étoile, ce qui permet le réglage de la surface de combustion et par suite de la poussée.***

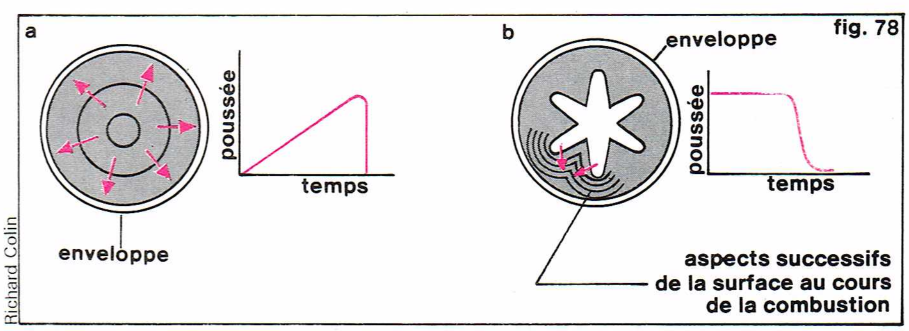

Richard Colin

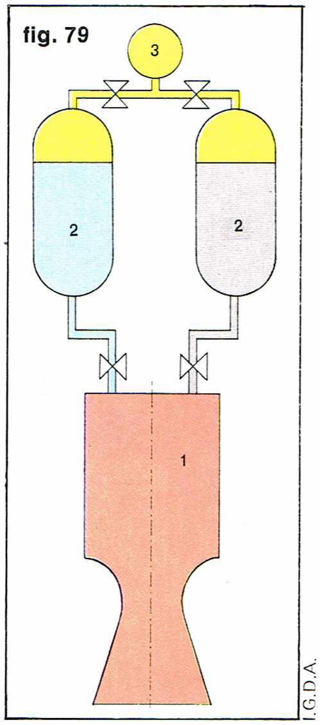

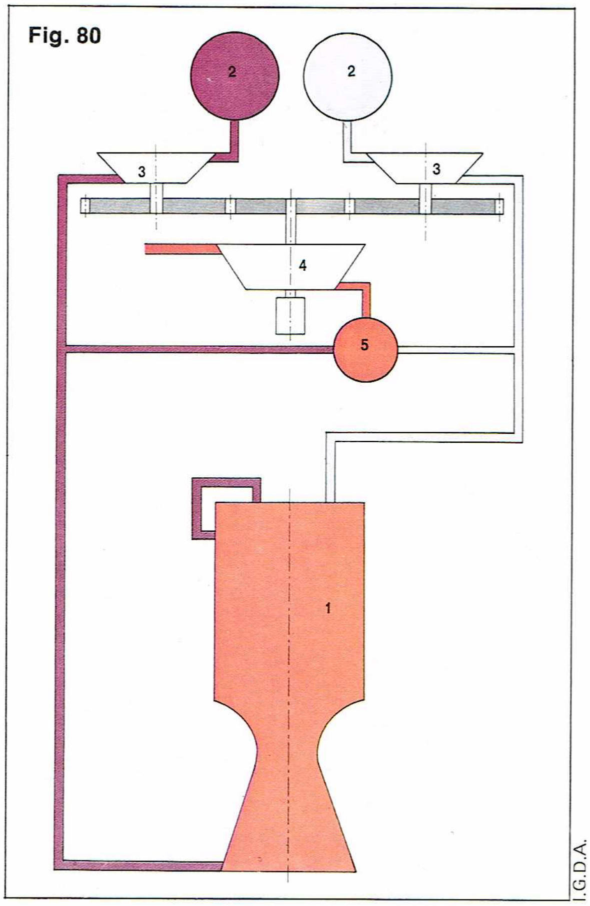

▲ *Figure 79 ; schéma d'un moteur-fusée à propergols liquides pressurisés : 1, chambre de combustion ; 2, réservoirs pressurisés de propergol ; 3, réservoir de gaz pressurisé.*

▶ *Figure 80 ; schéma d'un moteur-fusée à propergols liquides alimenté par turbopompe : 1, chambre de combustion ; 2, réservoirs de propergols ; 3, turbopompe d'alimentation ; 4, turbine ; 5, chambre de combustion auxiliaire.*

Le déplacement des ergols vers la chambre de combustion utilise deux grands principes.

— *Chasse par gaz sous pression :* c'est une solution simple. Le gaz de manœuvre peut être soit du gaz sous pression de 100 à 250 bars, stocké à bord du véhicule dans des bouteilles, soit un gaz fabriqué à bord par combustion d'un solide ou d'un liquide. La première solution est plus lourde à cause des bouteilles de stockage ; dans la seconde, les gaz ne doivent pas réagir avec les ergols.

— *Pompage par turbopompe :* les ergols sont confinés dans leur réservoir par des turbopompes qui les refoulent dans la chambre de combustion. La turbine d'entraînement est alimentée par des gaz chauds fabriqués par combustion comme dans le cas de la chasse par gaz. Cette solution de groupe turbopompe est employée sur les grosses fusées, car le poids relatif du groupe par rapport à l'ensemble de stockage devient plus faible et avantage alors cette solution (*fig.* 80).

L'injecteur a pour mission, comme dans tout moteur thermique, de pulvériser les ergols à leur entrée dans la chambre de combustion. Le mélange des deux ergols doit être convenablement effectué avant l'injection.

Le foyer est le résultat, là encore, d'un compromis entre le poids qui doit être le plus bas possible, ce qui conduit à un faible volume, et la qualité de combustion qui exige un grand volume. La tenue des matériaux pose de difficiles problèmes, car la température des gaz peut atteindre 3 000 °C et presque tous les matériaux connus fondent à cette température. Des dispositions particulières de refroidissement doivent donc être prévues : circulation d'un des ergols en double paroi ou projection d'un film liquide (ergol) sur les parois.

L'ensemble formé par l'injecteur, la chambre de combustion ou foyer et la tuyère, est souvent désigné par le vocable *éjecteur.*

L'allumage est un problème difficile, car, compte tenu de l'énergie du propergol, une réaction explosive peut se produire et détruire l'éjecteur. Il faut donc une parfaite synchronisation de l'allumage avec l'injection des ergols.

Les diergols sont des couples formés d'un oxydant et d'un combustible se présentant sous forme liquide (voir *tableau* IX).

Les plus utilisés sont les suivants.

● *Oxydants*

— *Oxygène liquide :* il permet de grandes vitesses d'éjection et une température de combustion élevée.

C'est un produit bon marché et les gaz de combustion ne sont ni toxiques, ni corrosifs. Son stockage n'est pas très facile (ébullition à — 183 °C).

— *Acide nitrique :* il présente sensiblement les mêmes caractéristiques que l'oxygène. C'est un produit bon marché. Il est très corrosif et sa mise en œuvre demande des précautions.

— *Péroxyde d'azote* (N_2O_4) : c'est aussi un excellent oxydant qui a l'avantage de pouvoir se stocker simplement.

— *Perhydrol,* qui est de l'eau oxygénée (H_2O_2) concentrée.

● *Combustibles*

Ils sont nombreux. Tous les *hydrocarbures* peuvent être utilisés, avec l'oxygène en particulier. On utilise aussi l'*essence de térébenthine,* l'*alcool éthylique,* l'*hydrazine,* l'*aniline,* etc. Le meilleur combustible est l'*hydrogène liquide,* dont les performances sont très élevées. Il pose cependant de sérieux problèmes de stockage en raison de son point très bas d'ébullition (— 253 °C). Sa manipulation est dangereuse en raison des risques d'explosions qu'elle entraîne.

Les mono-ergols sont utilisés avec un catalyseur qui provoque la combustion. On utilise comme mono-ergols l'eau oxygénée et l'hydrazine. La mise en œuvre des mono-ergols est difficile, car ces produits sont peu stables.

Il est possible de faire fonctionner un moteur-fusée avec des *triergols* (3 liquides stockés dans 3 réservoirs différents) mais, en raison de la complexité que prendrait un tel dispositif, eu égard aux avantages attendus, aucun moteur de ce type n'a été réalisé.

* *Moteurs-fusées à lithergol*

Comme on l'a déjà indiqué, il s'agit d'un moteur encore expérimental utilisant un ergol liquide et un ergol solide. L'oxydant est généralement sous forme liquide, stocké dans un réservoir. Le combustible de forme solide est stocké dans la chambre de combustion. L'injection de l'oxydant dans cette chambre permet d'enclencher la combustion.

L'avantage de ce propulseur est de pouvoir arrêter et remettre en route le moteur, et même de façon automatique si le lithergol utilisé est hypergolique (les 2 ergols s'enflammant par simple contact). Dans un lithergol, on peut marier les propergols liquides et solides, et réaliser ainsi des couples très intéressants sur le plan des performances. Ce type de moteur est donc peut-être appelé à se développer.

Tableau IX
Caractéristiques de quelques propergols pour une pression au foyer de 20 kg/cm² et un rapport de détente de 20

Oxydant			Combustible			Rapport de mélange optimum	Température de combustion	Vitesse d'éjection	Densité
Nom	Formule chim.	Masse moléculaire	Nom	Formule chimique	Masse moléculaire				
Oxygène liquide	O_2	32	Ammoniac	NH_3	17	0,77	2 770 °C	2 460 m/s	0,88
			Hydrazine	N_2H_4	32	1,35	3 030 °C	2 600 m/s	1,06
			Diméthyl-hydrazine	$(CH_3)_2N_2H_2$	60	0,72	3 180 °C	2 540 m/s	0,96
			Kérosène	$C_{10}H_{20}$	140	0,45	3 250 °C	2 480 m/s	0,98
			Hydrogène liquide	H_2	2	0,25	2 730 °C	3 360 m/s	0,28
Fluor	F_2	38	Ammoniac	NH_3	17	0,36	4 150 °C	2 840 m/s	1,14
			Hydrazine	N_2H_4	32	0,55	4 210 °C	2 880 m/s	1,29
			Kérosène	$C_{10}H_{20}$	140	0,35	3 950 °C	2 580 m/s	1,19
			Hydrogène liquide	H_2	2	0,13	3 600 °C	3 540 m/s	0,45
Acide nitrique	HNO_3	63	Ammoniac	NH_3	17	0,46	2 330 °C	2 150 m/s	1,12
			Hydrazine	N_2H_4	32	0,81	2 730 °C	2 390 m/s	1,26
			Kérosène	$C_{10}H_{20}$	140	0,24	2 840 °C	2 150 m/s	1,30

Moteurs à combustion externe

Le fonctionnement de ces moteurs pose tout d'abord la question de nature du fluide de travail. Quel *fluide « caloporteur »* utiliser entre la chaudière, lieu de la combustion où s'effectue la conversion d'une certaine forme d'énergie (chimique, nucléaire, électrique ou rayonnante) en énergie thermique, et le moteur? Pour des raisons de simplicité et de coût, on sait que l'eau et sa vapeur ont joué et jouent encore un rôle primordial dans l'histoire de la conversion thermomécanique. Cette situation est si bien établie qu'on ne voit pas comment elle pourrait changer dans un avenir immédiat, compte tenu du poids des infrastructures dans l'évolution d'une technologie. A côté de la vapeur d'eau qui tient la première place, il faut citer l'air qui, pour les mêmes raisons d'abondance et de coût, est utilisé sur les turbines à gaz. Quand ces dernières sont couplées avec des réacteurs nucléaires, on préfère alors utiliser l'hélium, gaz stable vis-à-vis du rayonnement. D'autres fluides ont été utilisés sur des installations très spécifiques, mais ces applications restent très marginales.

Cycle ouvert ou cycle fermé? Cette question, remarquons-le tout d'abord, ne se pose pas pour le moteur. Celui-ci reçoit un fluide disposant d'un contenu énergétique élevé et le restitue après détente, c'est-à-dire après lui avoir prélevé l'énergie mécanique récupérable. Ce qui se passe avant et après la conversion thermomécanique ne le concerne pas. Il s'agit en fait d'un problème d'économie de l'ensemble chaudière-moteur. Les premières machines à vapeur fonctionnaient en cycle ouvert. Progressivement, en particulier avec l'augmentation de puissance des machines, on a utilisé des cycles fermés.

Machine alternative à vapeur

Les machines alternatives à vapeur, ou machines à vapeur à piston, ont disparu aujourd'hui de notre environnement familier. Durant la première moitié du XXe siècle, leur emploi s'est concentré sur la locomotive. Puis, dans la période qui a suivi la Seconde Guerre mondiale, la traction électrique d'abord et la propulsion par moteurs à combustion interne ensuite ont chassé sans rémission les derniers modèles du genre. On peut même dire que les coûts considérables d'électrification d'un réseau, d'une part, et l'arrivée tardive des moteurs à combustion interne dans la traction ferroviaire, d'autre part, ont prolongé la vie de ce moteur thermique qui sans cela aurait disparu beaucoup plus tôt.

En fait, la machine à vapeur à piston a été condamnée dès le début du XXe siècle par l'avènement de l'électricité. La production de cette dernière exige en effet des vitesses élevées pour entraîner les génératrices (1 500 ou 3 000 t/mn). Les machines à vapeur à piston, mal adaptées aux vitesses rapides, étaient donc tout à fait incapables de résister à la concurrence des turbines à vapeur pour le développement des fortes puissances. Dans le bas de la gamme, les moteurs électriques, plus légers, plus propres, plus silencieux, ne pouvaient aussi que prendre l'avantage.

Aujourd'hui, l'aptitude dont dispose ce type de moteur à fournir des puissances notables à vitesse réduite sans disposition particulière fait qu'il est encore utilisé dans la propulsion navale et, à ce titre, un paragraphe lui sera consacré. Mais ces machines encore en service de nos jours sont les témoins d'une époque révolue; ce sont des « fossiles vivants », pour utiliser le vocabulaire du paléontologiste.

Disons également qu'il nous paraissait difficile de supprimer complètement la machine à vapeur à piston de cette encyclopédie, étant donné le rôle historique considérable qui fut le sien dans la naissance et le développement de la société industrielle. Grâce à elle, l'homme a pu disposer à discrétion comme jamais auparavant d'énergie en quantités importantes. Autre mutation, la conduite de ces machines a introduit dans le monde technologique de l'époque l'autorégulation. Le régulateur à boules de Watt a été un point de départ décisif pour l'automatisation des machines. On connaît tous les développements qui suivirent.

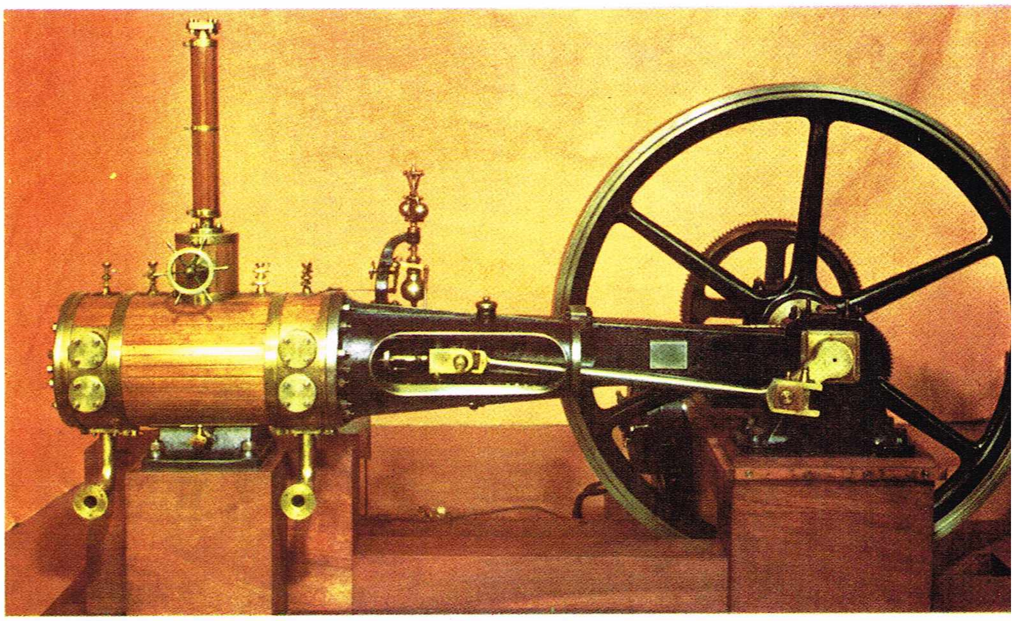

I.G.D.A.

▲ Machine à vapeur Farcot, type Corliss, réalisée vers 1890. La motrice à vapeur dont l'emploi s'est concentré dans la première moitié du XXe siècle sur la traction ferroviaire a aujourd'hui presque totalement disparu.

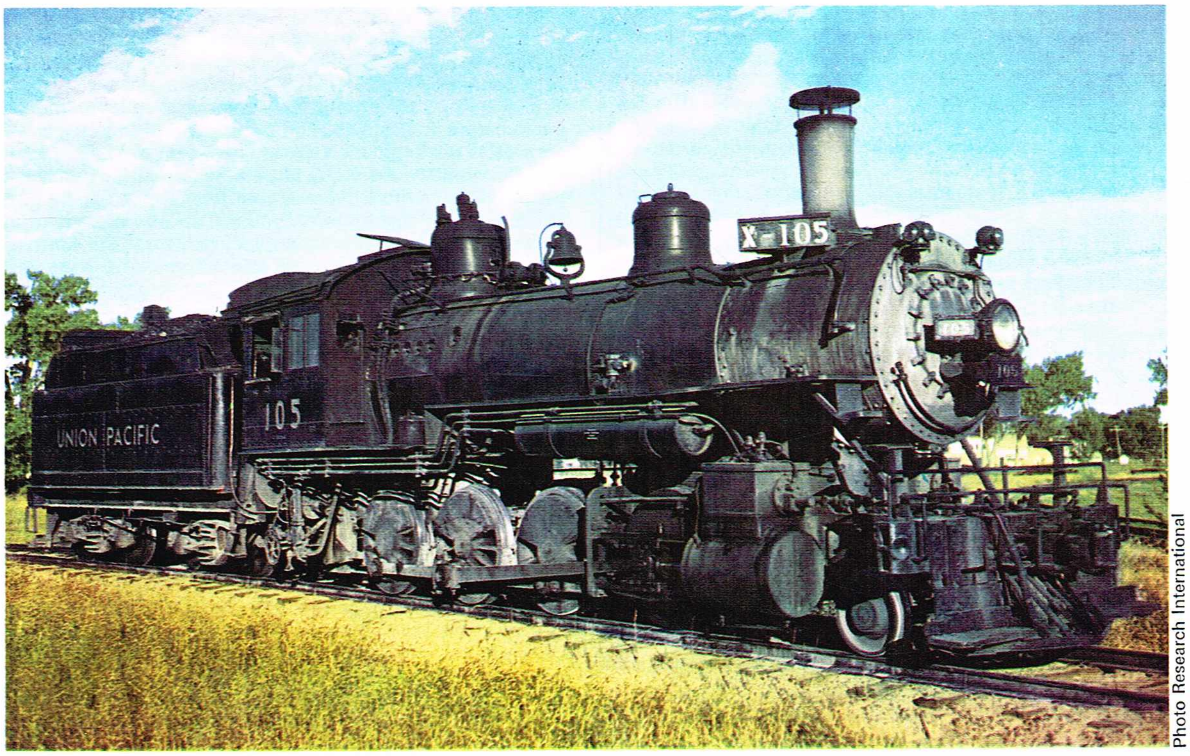

Photo Research International

◀ Un modèle de locomotive à vapeur en service vers 1890-1900 dans les chemins de fer américains.

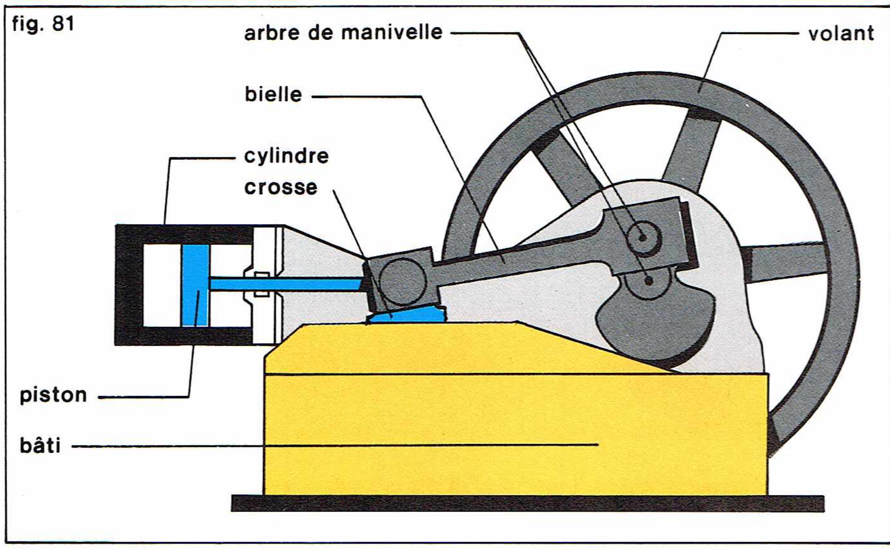

Richard Colin

▲ *Figure 81 : représentation schématique d'une machine à vapeur simple.*

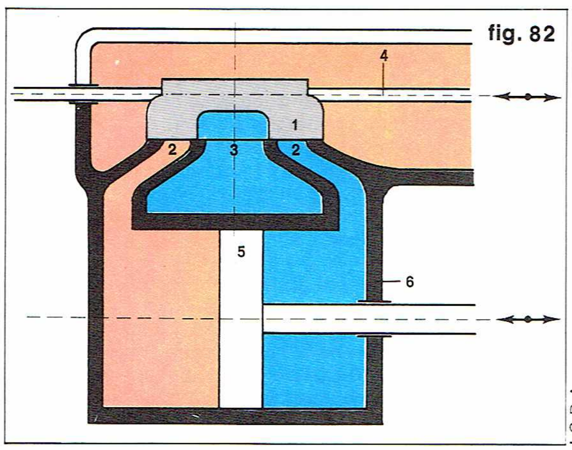

I.G.D.A.

▶ *Figure 82 ; distribution à tiroir simple : 1, tiroir ; 2, conduits en communication avec les extrémités du cylindre ; 3, échappement ; 4, tige de commande ; 5, piston ; 6, cylindre.*

▼ *Figure 83 : système à distribution par soupapes ; ici, soupapes ouvertes.*

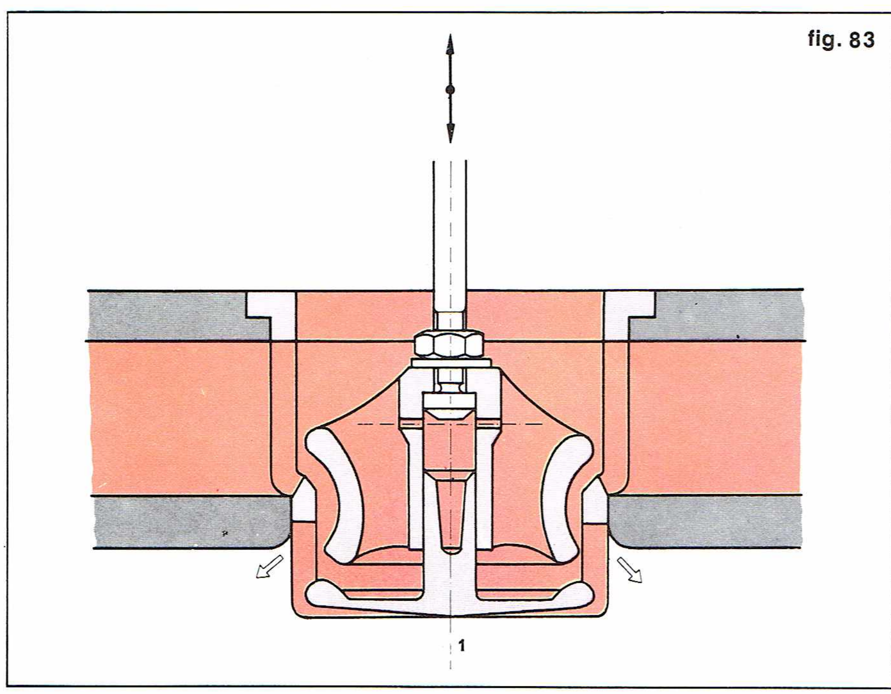

I.G.D.A.

Description sommaire et fonctionnement

Le modèle le plus simple que peut prendre une machine à vapeur est celui de la *figure* 81. Dans un cylindre se déplace un piston sur lequel on fait agir la vapeur, alternativement sur chacune des deux faces. Le piston porte une tige qui traverse le cylindre par un orifice muni d'un presse-étoupe ; cette tige vient s'articuler sur une bielle qui agit sur le maneton de l'arbre moteur. Le pied de bielle porte une crosse qui coulisse dans des glissières. Les extrémités du cylindre ont des orifices pour l'admission et l'échappement de la vapeur. Ainsi présentée, la machine à vapeur à piston ressemble à un moteur à combustion interne double effet.

Le fonctionnement du moteur est alors intuitif. Si on admet la pression de vapeur sur un côté du cylindre et si dans le même temps on met l'autre côté en communication avec l'échappement, le piston va se mouvoir dans le sens de l'effort créé par la vapeur ; et on conçoit qu'une commande judicieusement synchronisée des obturateurs permette le fonctionnement régulier du moteur.

Pour cette commande des obturateurs, qu'on appelle *distribution* comme sur les moteurs à combustion interne, deux systèmes sont utilisés : le système à tiroir et le système à soupape.

Dans le *système à tiroir,* il existe sur le côté du cylindre une capacité qui reçoit la vapeur de la source chaude et qui est en communication par deux conduits avec les extrémités du cylindre. Un troisième conduit en liaison avec le condenseur vient déboucher dans la capacité entre les deux premiers sur une surface plane, parfaitement usinée (appelée *glace*). Le tiroir en forme de coquille se déplace sur la glace pour réaliser les opérations d'admission et d'échappement (voir *figure* 82). Le tiroir plan, très utilisé au début de la machine à vapeur, a été ensuite remplacé par des tiroirs cylindriques de forme plus rationnelle. Pour donner au tiroir le mouvement de va-et-vient d'amplitude convenable, on le commande par un système bielle-manivelle sur l'arbre moteur, à côté de la manivelle principale.

Le *système de distribution par soupapes* rappelle les dispositifs utilisés sur les moteurs à combustion interne (arbre à cames). Les réglages des différentes phases de la distribution étant plus facilement réalisables par ces dispositifs, la distribution par soupapes est en général préférée sur les gros moteurs (*fig.* 83).

Cycle thermodynamique

Sur le diagramme de Clapeyron (p, v) le cycle thermodynamique théorique, tel que nous l'avons décrit précédemment, se présente pour un côté du cylindre sous la forme d'un rectangle ABCD, construit de deux isobares : p_0 (pression d'échappement) et p_1 (pression de vapeur) et de deux isochores. Le travail par tour se calcule aisément :

$$W = 2\,\pi\,D^2/4\,(p_1 - p_0) \cdot C$$

avec D diamètre du cylindre et C longueur de la course.

Mais, dans ce cycle, on n'utilise pas la détente de la vapeur, ce qui conduirait, si on fonctionnait ainsi, à une consommation prohibitive de vapeur. Pour faire travailler la vapeur, on ferme l'admission après une fraction de la course (point M) et la vapeur déjà admise va continuer à exercer sa pression tout en détendant. Si le point M est au milieu du segment BC, on va économiser la moitié du débit vapeur, alors que la perte sur la surface du cycle est de 15 % environ. La pression d'échappement ne peut être celle de l'atmosphère comme sur les locomotives à vapeur, mais on gagne notablement en utilisant un condenseur, car la pression d'échappement peut être alors ramenée à 0,1 bar. Contrairement aux turbines à vapeur, le gain dans cette voie est vite limité par suite de l'impossibilité de donner aux orifices d'échappement des dimensions suffisantes.

Pour finir avec la régulation, ajoutons que, pour donner un fonctionnement satisfaisant, il faut prévoir une avance à l'ouverture de l'échappement (point O_E) pour que la pression dans le cylindre tombe franchement avant la course de retour. On anticipe également l'avance à la fermeture de l'échappement (point F_E) et l'avance à l'admission (point O_A) pour que le cylindre soit déjà bien rempli au point mort. Ces ajustements de la régulation donnent donc au diagramme réel la forme générale indiquée sur la *figure* 84.

En fait, le diagramme réel tel qu'on peut le mesurer sur une machine se présente suivant la courbe en pointillé de la même figure. Les différences constatées ont différentes origines :

— pertes par espace mort ;

— perte par effet de parois, la détente n'est donc plus adiabatique ;

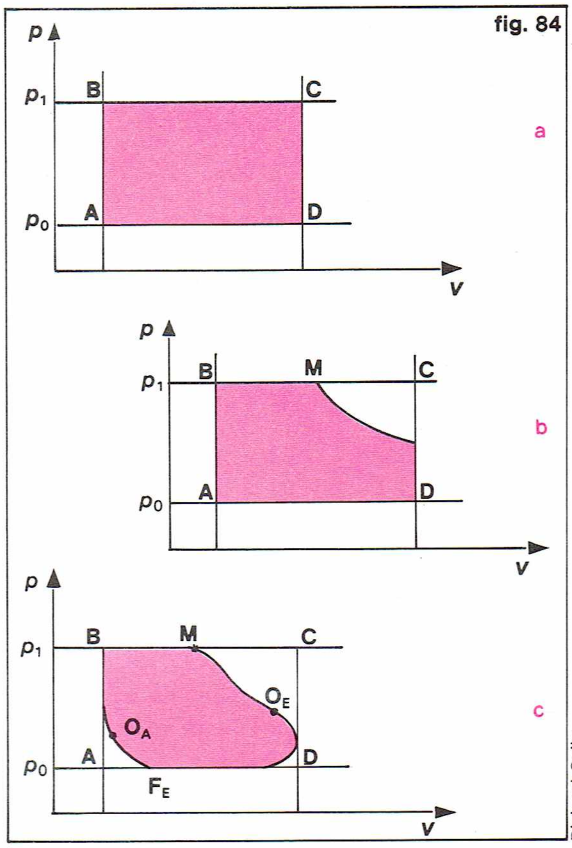

Richard Colin

Machatschek - TOP

▲ ***La machine à vapeur alternative n'est pratiquement plus utilisée que dans le domaine de la propulsion navale, comme ici sur les remorqueurs.***

◀ ***Figure 84 : diagrammes théoriques sans détente de vapeur*** **(a)**, ***avec détente de vapeur*** **(b)** ***et diagramme réel*** **(c).**

— pertes par laminage à l'admission et à l'échappement.

Pour diminuer l'importance de ces pertes, les solutions sont :

— le fractionnement de la détente en plusieurs cylindres, ce qui réduit l'effet des espaces morts ;

— le réchauffage des parois à la vapeur pour limiter les échanges thermiques entre celles-ci et la vapeur motrice ;

— l'amélioration des tracés des conduits d'admission et d'échappement pour réduire les pertes par laminage.

Compte tenu du gain réalisé par le fractionnement de la détente et en dépit de la complexité qu'elle ajoute, la quasi-totalité des machines à vapeur à piston en service aujourd'hui est à « expansion multiple ».

Le diagramme d'un cycle théorique à trois expansions est représenté sur la *figure* 85. On constatera l'importance de la détente permise, chaque cylindre n'en prenant qu'une fraction.

Par ailleurs, comme on le verra plus loin dans l'étude des cycles de turbines à vapeur, il est intéressant d'utiliser de la vapeur surchauffée pour éviter une humidité trop grande de la vapeur en fin de détente, la solution idéale étant de la resurchauffer en cours de détente. Rien ne s'oppose à l'utilisation de la surchauffe et de la resurchauffe sur les machines à vapeur à piston.

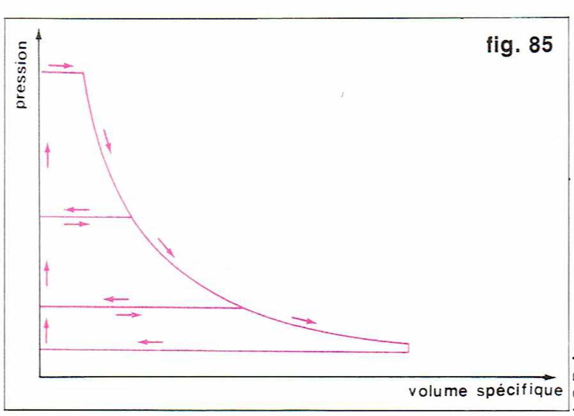

I.G.D.A.

◀ ***Figure 85 : diagramme d'un cycle théorique à trois expansions dans une motrice à détente fractionnée.***

Domaine d'application

La machine à vapeur alternative n'est pratiquement plus utilisée que dans le domaine de la propulsion navale. Jusqu'à une puissance de 4 000 chevaux, elle peut concurrencer les autres moyens de propulsion, bien que son rendement soit en général plus faible. Son gros avantage réside dans la facilité avec laquelle elle fonctionne à faible vitesse, ce qui la destine particulièrement aux navires qui effectuent beaucoup de manœuvres : remorqueurs, caboteurs, chalutiers, cars et trains ferries, engins de servitude, etc.

Les machines les plus simples comportent deux cylindres. Sur les moteurs plus poussés, le nombre de cylindres est de trois habituellement, quatre au maximum. Il est intéressant d'utiliser de la vapeur surchauffée et même resurchauffée.

On a déjà noté la difficulté d'utiliser à plein la faible pression du condenseur, car il devient impossible de placer sur le cylindre basse pression des orifices d'échappement de taille suffisamment grande. Pour diminuer cette perte, on a pensé à faire échapper le dernier cylindre de la machine alternative dans une turbine à vapeur. Les deux machines sont alors couplées sur la même ligne d'arbre, un réducteur étant introduit entre la turbine et la machine alternative. La turbine est débrayée pendant les manœuvres : elle est utilisée en marche normale pour améliorer le rendement. Cette solution présente de plus l'avantage de stabiliser la ligne d'arbre lorsque l'hélice s'emballe par gros temps.

D'autres systèmes ont été également imaginés pour éviter le couplage mécanique de la turbine de récupération de la vapeur d'échappement avec le groupe principal constitué par la machine à piston. Sur certains systèmes, la turbine fonctionne sur l'échappement BP (basse pression) et entraîne un compresseur à vapeur qui comprime la vapeur d'échappement HP (haute pression) avant son admission dans le cylindre MP (moyenne pression). La turbine peut également servir à entraîner une génératrice électrique dont le courant est disponible pour les besoins du bord ou pour alimenter un réchauffeur de vapeur entre corps HP et corps MP à résistances électriques.

La lubrification des pistons sur leur chemise exige que de l'huile de graissage soit introduite dans les cylindres. Ce graissage est en général effectué par pompe individuelle pour chaque cylindre, comme sur les gros moteurs Diesel. Cette huile, entraînée par la vapeur, se retrouve dans l'eau alimentaire et risque donc, si on n'y prend pas garde, d'être introduite dans la chaudière. Les circuits d'alimentation des installations utilisant des machines alternatives comportent donc toujours sur le circuit d'alimentation de la chaudière des filtres importants pour fixer l'huile de graissage des cylindres, ce qui est une sujétion de ce type d'installation.

Turbines à vapeur

La turbine à vapeur est un moteur thermique qui permet de convertir en énergie mécanique l'énergie contenue dans la vapeur d'eau. Cette vapeur a été en général produite

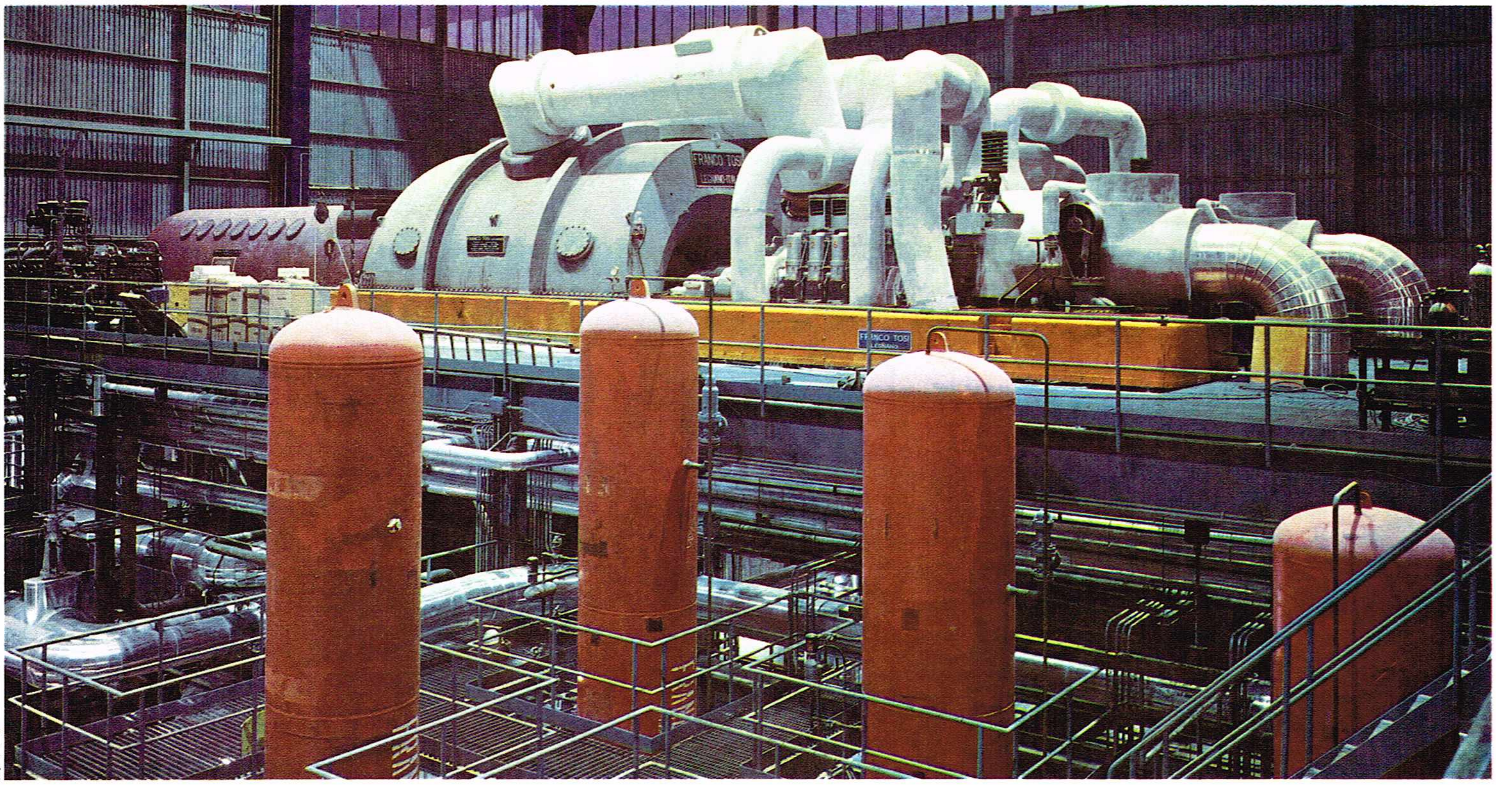

F. Tosi

▲ ***Turbine à vapeur en service dans une centrale classique : au premier plan, les réchauffeurs haute pression du poste d'eau alimentaire.***

dans une chaudière par vaporisation de l'eau ; elle peut être surchauffée ou simplement saturée. Elle tire donc son énergie du « combustible » (fossile, nucléaire, etc.) utilisé par la chaudière. Cette énergie est contenue dans la vapeur sous forme d'énergie thermique mais aussi d'énergie mécanique (pression).

On a vu dans les rappels thermodynamiques du chapitre consacré à la conversion thermodynamique que la somme de ces deux formes d'énergie était représentée par l' « enthalpie ». Cette fonction d'état s'exprime en kcal/kg ou en kJ/kg et dépend uniquement de la pression et de la température.

Une turbine peut donc être représentée par le schéma simplifié de la *figure* 86. Placée entre une source chaude et une source froide, elle réalise une chute d'enthalpie ΔH. La façon dont se fait la conversion thermomécanique dans ce type de machines sera examinée plus loin.

L'idée d'utiliser la « force » de la vapeur pour produire du travail était déjà connue, d'après les historiens, dès l'Antiquité. Il a fallu cependant attendre les thermodynamiciens du XIXe siècle pour que cette idée simple puisse prendre corps et se développer. Les grandes dates de cette évolution peuvent se résumer ainsi. Le Suédois De Laval construit, en 1883, la première turbine ; celle-ci ne comportait qu'un étage à « action » et tournait à 30 000 t/mn. La puissance fournie était de quelques chevaux. A la même époque, en 1884, l'Anglais Parsons présente un modèle différent : sa machine est une turbine à « réaction » à plusieurs étages, tournant à 18 000 t/mn et fournissant une puissance de 10 chevaux. Les termes d'action et de réaction seront explicités plus loin.

▼ ***Figure 86 : représentation schématique d'une turbine à vapeur.***

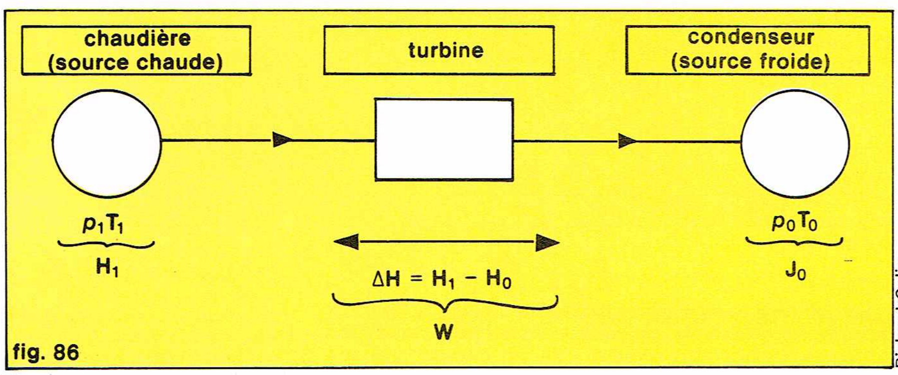

Richard Colin

Le départ est donné, et au début du XXe siècle, il existe déjà de nombreuses machines, mais leur puissance ne dépasse pas encore 10 MW. Vers 1907, la société suisse Brown-Boveri associe les deux procédés dans une même machine et la puissance des turbines peut encore être augmentée. Les progrès de la turbine à vapeur avaient donc été considérables en une période de temps relativement courte. On pensait alors que ces machines étaient très certainement les plus grosses qui pouvaient être construites et, pour cette raison, on les appelait « turbines limites ». L'histoire du développement des machines est truffée de ce genre de présomptions où l'ingénieur-inventeur, contrairement aux idées reçues, sous-estime ses capacités créatrices plus qu'il ne les surestime.

La suite montra qu'on pouvait faire beaucoup mieux. Associés avec les constructeurs de chaudières, car la turbine est très dépendante des caractéristiques de la vapeur qui l'alimente, les « turbiniers » augmentèrent par étapes successives le rendement des machines et leur puissance unitaire. Il serait trop long de retracer cet itinéraire pourtant passionnant. Aujourd'hui cette puissance unitaire a dépassé le million de kilowatts, et les techniques actuelles ne semblent pas limitées à ce niveau de puissance.

Si la machine alternative à vapeur a été le moteur du XIXe siècle, la turbine à vapeur est celui du XXe siècle. Sans elle, le développement de l'électricité aurait été très limité. Son rôle a également été décisif dans le développement de l'industrie et de la propulsion navale.

Description élémentaire d'une turbine

Dans une turbine à vapeur (et à gaz), le fluide en mouvement est compressible et il se détend dans la machine en traversant une série d'aubages dont les uns sont fixes et les autres mobiles. Ces aubages peuvent être considérés comme une succession de modules qu'on appelle des étages, comprenant chacun :

— une partie fixe ou distributeur, de forme circulaire, composée de tuyères ou d'aubages ;

— une roue mobile comportant à sa périphérie en regard du distributeur des aubages ou ailettes.

Le fluide en mouvement traverse en se détendant les aubages fixes et mobiles des étages successifs. Une turbine comprend en général de nombreux étages.

Leur nombre est fonction de l'importance de la détente réalisée dans la turbine. On ne peut en effet utiliser une détente importante dans un seul étage, car cela donnerait une très grande vitesse de vapeur et en conséquence des

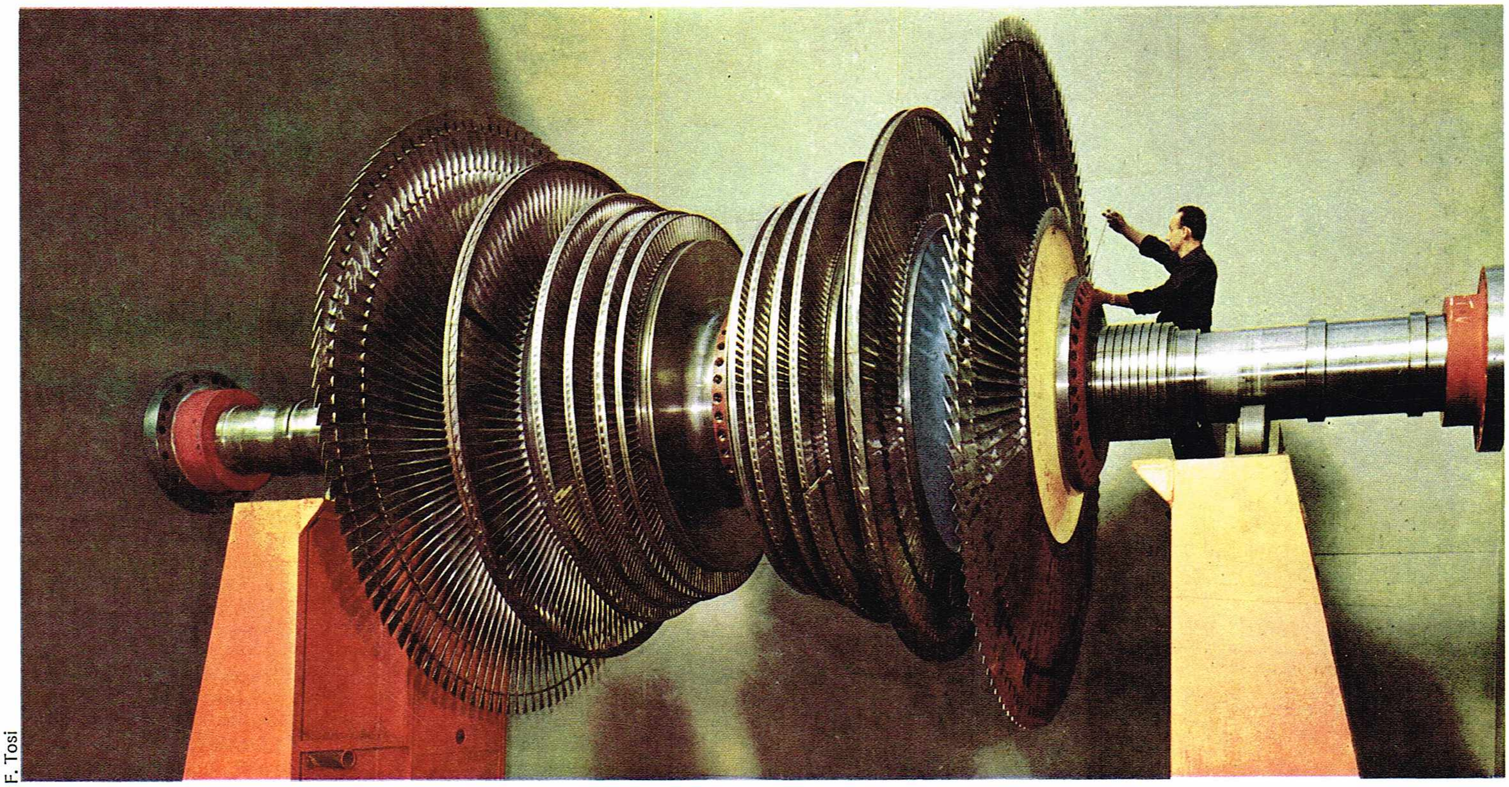

F. Tosi

▲ *Rotor avec ses ailettes d'une turbine à condensation et à pression hypercritique.*

vitesses circonférentielles d'aubages mobiles tout à fait inadmissibles. Les parties fixées sont réunies entre elles et constituent le *stator;* les parties mobiles sont solidaires d'un arbre appelé *rotor*.

Dans la turbine décrite ci-dessus, l'écoulement de la vapeur se fait suivant un cylindre coaxial avec la turbine. On dit qu'il s'agit d'une *turbine axiale*. Si l'écoulement de la vapeur se fait perpendiculairement à l'axe de la turbine, c'est une *turbine radiale*. On ne parlera ci-après que des turbines axiales, car ce sont de loin les plus répandues. Il existe quelques types de turbines radiales, dont le plus connu est celui construit par la firme suédoise *Ljung Strom*.

En amont de la turbine, on trouve des éléments de robinetterie qui permettent le réglage du débit de vapeur. L'échappement est en général raccordé directement au condenseur (turbine à condensation). Sur certaines turbines, on limite la détente dans la machine pour pouvoir disposer à l'échappement d'une source de vapeur pour des applications basse pression (turbines à contre-pression). Des prélèvements de vapeur sont fréquemment effectués en cours de détente pour le réchauffage de l'eau d'alimentation de la chaudière ou pour tout autre usage indépendant de la marche de la turbine (turbines à soutirage ou à prélèvement).

Une turbine comporte enfin des auxiliaires qui permettent d'effectuer la régulation de la machine, son graissage et l'étanchéité du corps de la turbine au passage de l'arbre.

Étude de la turbine à vapeur

La détente de la vapeur dans la turbine se fait en deux phases qui correspondent aux étapes suivantes :

— conversion de l'énergie thermique de la vapeur en énergie cinétique ;

— transformation de cette énergie cinétique en énergie mécanique disponible sur un arbre.

La détente peut s'effectuer uniquement dans les distributeurs fixes. On dit alors que la machine est une *turbine à action*. La transformation de l'énergie cinétique en énergie mécanique se fait ensuite dans les aubages mobiles (*fig.* 87).

La détente peut à l'opposé ne s'effectuer que dans les aubages mobiles. Il s'agit alors d'une *turbine à réaction pure*. L'énergie cinétique engendrée dans ces aubages mobiles est, dans ce cas, directement transformée en énergie cinétique. Les turbines à réaction n'ont jamais été utilisées. Il y a toujours fractionnement de la détente entre les aubages fixes et les aubages mobiles. On définit un degré de réaction comme le rapport entre la chute d'enthalpie dans les aubages mobiles et la chute totale d'enthalpie dans l'étage.

Dans les turbines utilisant ce principe, le degré de réaction est voisin de 0,5 et on les appelle *turbines à réaction*.

Les turbines modernes combinent souvent ces deux modes de fonctionnement qui vont être examinés, ci-après, plus en détail.

* *Turbine à action*

Tout écoulement passant au travers d'aubages peut se représenter par un triangle de vitesse (voir *figure* 88).

V est la vitesse absolue de la vapeur par rapport aux aubages fixes de la turbine.

W est la vitesse relative de la vapeur par rapport aux aubages mobiles (celle qu'enregistrerait un observateur tournant avec la roue).

U est la vitesse circonférentielle des aubages mobiles.

Ces trois vecteurs vitesse se combinent de la façon suivante : en tout point, la vitesse absolue de la vapeur est la somme géométrique de sa vitesse relative et de la vitesse circonférentielle des aubages mobiles :

$$\vec{V} = \vec{W} + \vec{U}$$

▼ *Figure 87; les deux modes de fonctionnement d'une turbine :*
a) *à action;*
b) *à réaction.*

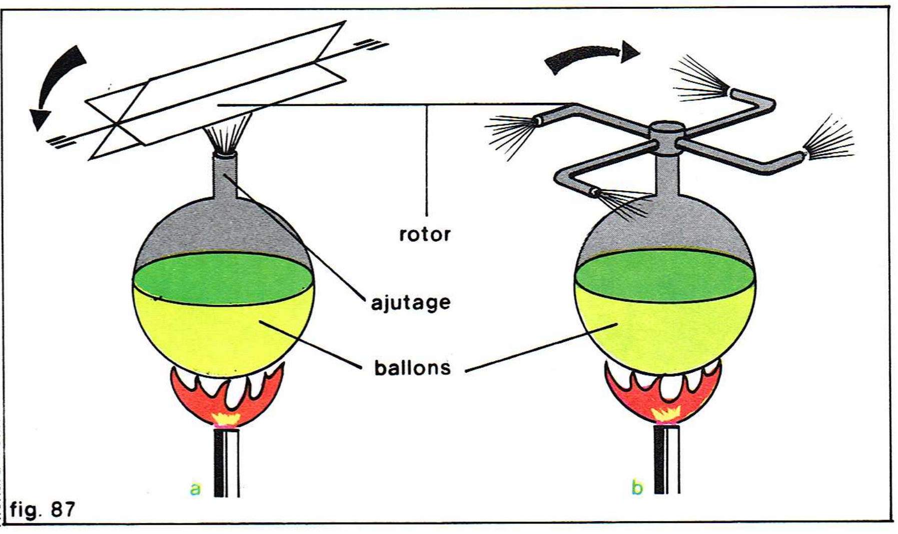

Richard Colin

fig. 87

fig. 88

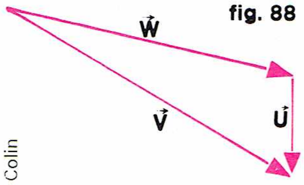

Richard Colin

▲ ***Figure 88 ; triangle de vitesses dans une roue de turbine $\vec{V} = \vec{W} + \vec{U}$: $\vec{V}$, vitesse absolue de la vapeur ; $\vec{W}$, vitesse relative de la vapeur ; $\vec{U}$, vitesse circonférentielle de la roue.***

L'application de cette relation à un étage de turbine à action supposé parfait (pas de choc ni de frottement) conduit aux triangles de vitesses de la *figure* 89. L'évolution de la pression et de la vitesse absolue dans les aubages a été également indiquée. On voit que, dans les aubages fixes dont la section est variable, il y a eu détente de la vapeur de p_0 à p_1, ce qui entraîne une augmentation de la vitesse absolue de V_0 à V_1. Dans l'étage mobile de section constante, la pression ne varie plus : $p_1 = p_2$, et comme il n'y a pas de détente dans cet aubage, la vitesse d'écoulement de la vapeur y reste également constante : $W_1 = W_2$. Mais la vitesse absolue de la vapeur décroît et passe de V_1 à V_2. Pour qu'il n'y ait pas de choc, à l'entrée des aubages, il faut que le profil d'entrée de l'aubage mobile soit tangent à W_1. Si la vapeur à la sortie de l'étage mobile devait pénétrer dans un distributeur fixe, il faudrait que le profil d'entrée de ses aubages fixes fût tangent à V_2.

L'observation des triangles de vitesse permet de voir comment, du fait de la courbure de l'écoulement, se réduit la vitesse absolue de la vapeur de V_1 à V_2. Cette réduction est le signe apparent de la transformation d'énergie cinétique de la vapeur en énergie mécanique. Si on se rappelle que l'énergie cinétique d'un corps ou d'un fluide en mouvement est proportionnelle au carré de sa vitesse $\left(E = \frac{1}{2}mV^2\right)$, l'échange d'énergie est proportionnel à la différence :

$$\overline{V}_1^2 - \overline{V}_2^2$$

* *Turbine à réaction*

Il a déjà été indiqué que les machines à réaction pure n'existaient pas. On décrira donc ci-après un étage de turbine de degré de réaction 0,5 (voir *figure* 90).

La détente est fractionnée en deux parties égales :

— de p_0 à p_1 dans les aubages fixes ;

— de p_1 à p_2 dans les aubages mobiles.

La vitesse absolue de la vapeur croît de V_0 à V_1 dans les aubages fixes et décroît de V_1 à V_2 dans les aubages mobiles. Contrairement à ce qui se passait dans la turbine à action, la vitesse relative de la vapeur augmente dans les étages mobiles $W_2 > W_1$, du fait de la détente qui s'y produit.

La transformation de l'énergie cinétique en énergie mécanique s'effectue de façon analogue à celle indiquée ci-dessus pour les turbines à action, à une différence portant sur la poussée axiale sur les aubages mobiles. Négligeable sur la roue d'une turbine à réaction, cette force prend sur la turbine à réaction une valeur notable du fait de l'augmentation progressive de la vitesse relative de la vapeur dans l'aubage (de W_1 à W_2) qui conduit à un profil dissymétrique. Pour annuler cette poussée, les rotors des grosses turbines se présenteront sous la forme de deux séries d'étages montées en opposition (double flux).

* *Turbine à éléments multiples*

Il a déjà été noté qu'une turbine devait comporter un certain nombre d'étages. Deux procédés sont possibles pour éviter la vitesse très élevée à laquelle devrait tourner une turbine à roue unique pour s'adapter aux vitesses de vapeur que l'on obtiendrait.

Le premier procédé consiste à diviser la chute totale d'enthalpie en un certain nombre *n* de chutes partielles. La turbine sera donc constituée de *n* étages en série, qui peuvent fonctionner à action ou à réaction. On appelle cette machine une *turbine à étages de pression*.

Le deuxième procédé consiste à effectuer dans un seul distributeur la chute totale d'enthalpie.

Cette détente unique confère à la vapeur une très grande vitesse qui va être utilisée dans *n* roues, chacune d'elles abaissant progressivement la vitesse. Cette machine, appelée *turbine à étages de vitesse*, ne peut être évidemment que du type à action. Pour une même détente, le calcul montre qu'il faut plus d'étages de pression que d'étages de vitesse. Ces derniers paraissent donc plus intéressants mais, en pratique, il faut limiter à deux ou trois le nombre des étages fonctionnant suivant ce principe en raison des pertes par frottement dans les aubages. Autre inconvénient : la puissance développée est mal répartie entre les étages successifs. Elle est très forte sur le premier étage et décroît ensuite rapidement. Pour ces différentes raisons, la turbine à action à étages de vitesse n'est utilisée que pour réaliser des puissances faibles.

Les turbines de moyenne et grande puissance sont à étages de pression. La détente est fractionnée en autant de parts qu'il y a d'étages. Le degré de réaction des aubages est variable dans la machine et diffère selon les constructeurs.

▼ ***Figure 89 : étage de turbine à action. Figure 90 : étage de turbine à réaction.***

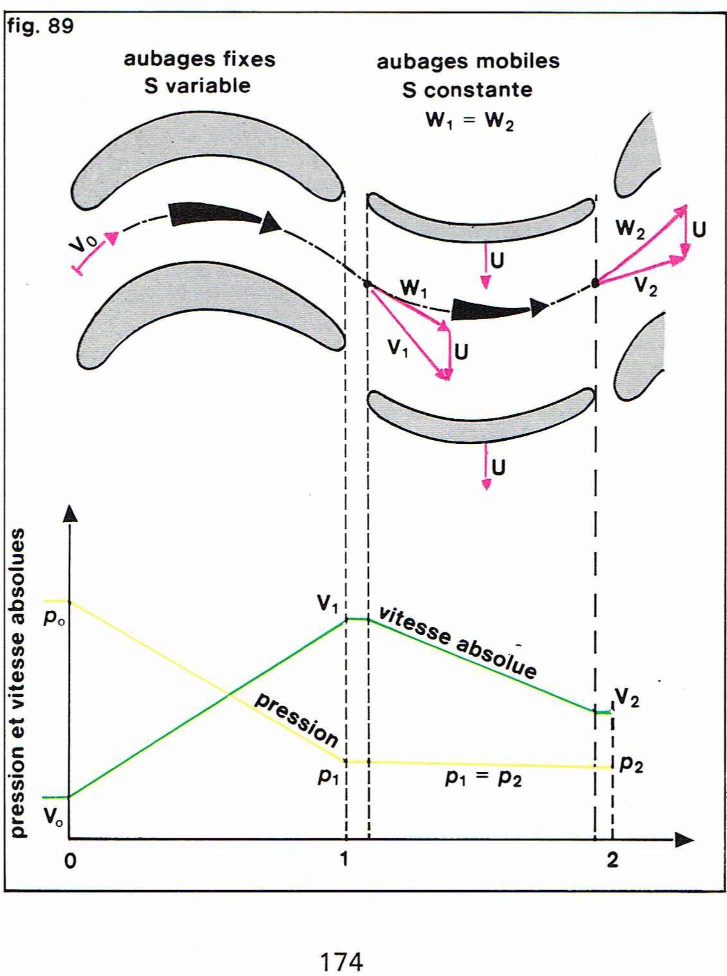

Richard Colin

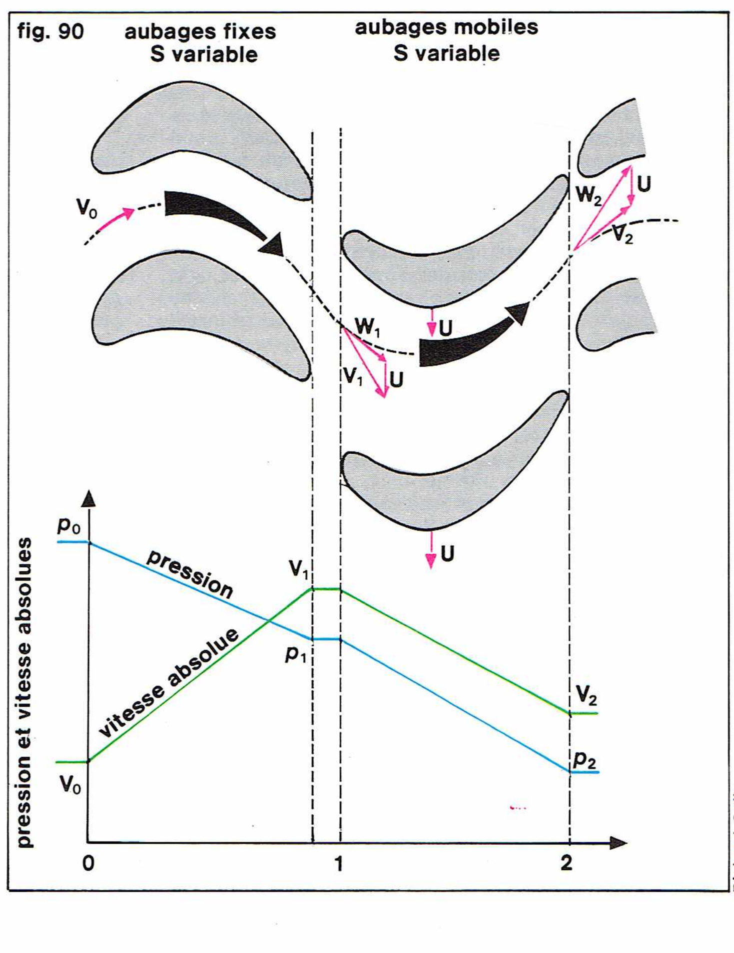

Richard Colin

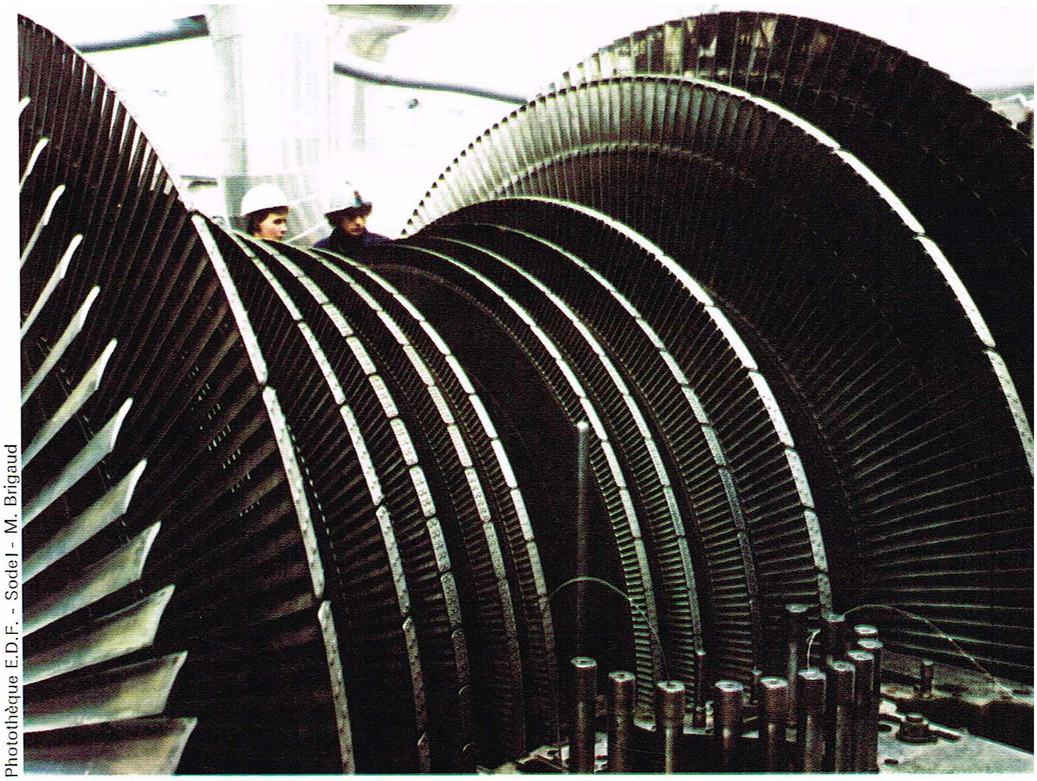

Photothèque E.D.F. - Sodel - M. Brigaud

▲ ***Détail d'un rotor « basse pression » de la turbine, tranche 1, de la centrale nucléaire de Fessenheim.***

Pertes et rendement des turbines

Dans l'étude sommaire de la turbine à vapeur qui précède, on a supposé que la turbine était parfaite. On entend par là que l'écoulement se produit sans choc, ni frottement sur les parties fixes et mobiles, et que la seule perte à considérer est celle par vitesse restante à l'échappement. En réalité, la conversion d'énergie thermique en énergie mécanique dans les turbines réelles s'accompagne de pertes importantes. On peut les classer ainsi :

— les *pertes dans les aubages :* ces pertes ont essentiellement pour origine les frottements et les chocs du fluide sur les parois ;

— les *pertes internes :* on peut ici distinguer les fuites internes de vapeur par le bord des aubages, les pertes par humidité de la vapeur qui ralentit le rotor (et érode aussi les dernières ailettes), et les pertes par ventilation ;

— les *pertes externes :* dues à la mauvaise isolation thermique de la turbine, aux fuites de vapeur vers l'extérieur, aux frottements dans les paliers, à l'entraînement des auxiliaires de la turbine ;

— *les pertes par vitesse restante* (pour mémoire).

Les performances d'une turbine peuvent être appréciées de différentes façons, ce qui permet d'établir des comparaisons entre les machines.

* *Consommation spécifique de vapeur*

C'est la quantité de vapeur utilisée par la turbine pour produire une unité de travail mécanique. Cette consommation s'exprime en kilogramme de vapeur par kilowatt-heure (kg/kWh).

Ce rapport est intéressant pour fixer la capacité de la chaudière qui doit alimenter la turbine. Il ne convient pas pour comparer les turbines entre elles, car il ne prend pas en compte les caractéristiques de la vapeur. Il est mesuré sur les installations comme indicatif du bon fonctionnement de la machine.

* *Consommation spécifique de chaleur*

C'est la quantité d'énergie thermique nécessaire pour produire une unité de travail mécanique. Cette consommation s'exprime en kilocalories par kilowatt-heure.

Ce rapport traduit la qualité de la conversion d'énergie de chaleur (kcal) en travail (kWh) et permet de comparer les turbines entre elles. Il apparaît donc comme l'inverse du rendement de la turbine.

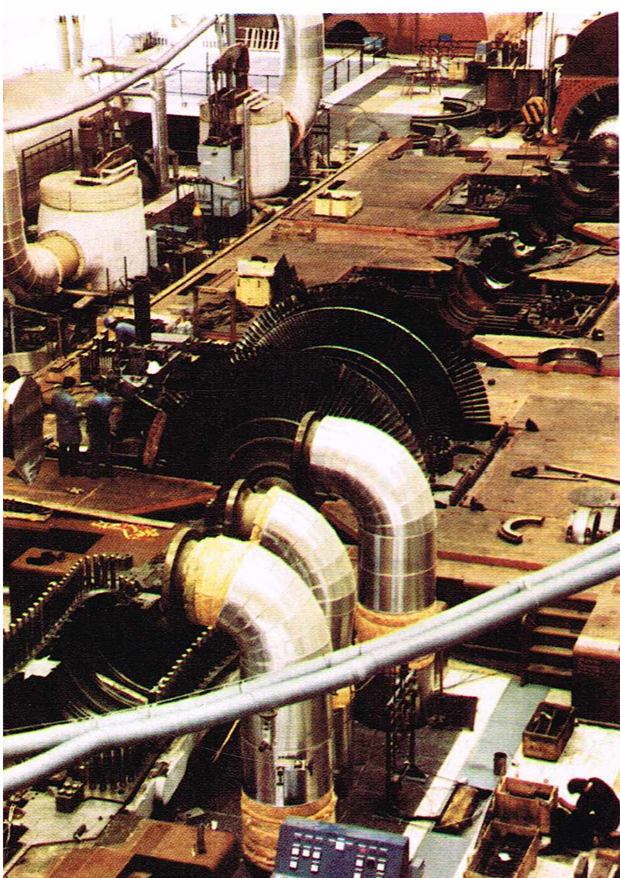

Photothèque E.D.F. - Sodel - M. Brigaud

◀ ***Montage de la turbine de la centrale de Fessenheim.***

* *Rendement de la turbine*

Ce rendement prend donc en compte toutes les pertes de la machine énumérées ci-dessus et c'est celui qui intéresse l'utilisation de la machine. Il est directement relié à la consommation spécifique de chaleur :

$$\eta = \frac{860}{C_s}$$

C_s, consommation spécifique en kcal/kWh.

On parle de rendement brut (et par conséquent de consommation brute de vapeur) si on ne prend en compte que les auxiliaires de la turbine et de rendement net (et de consommation nette), si on tient compte de la puissance de pompage de l'eau alimentaire.

Le constructeur cherche à comparer sa turbine réelle à la turbine parfaite qui travaillerait dans les mêmes conditions. Ce rapprochement peut s'effectuer à l'aide du rendement thermodynamique défini comme suit.

* *Rendement thermodynamique*

La détente se produit théoriquement (voir *figure* 91) de façon isentropique entre le point M défini par les conditions de pression et de température de la source chaude et la courbe isobare correspondant à la pression du condenseur, soit la ligne MN. En fait, l'énergie thermique se dégrade dans la turbine, ce qui se traduit par une croissance de l'entropie, et la ligne réelle de détente est représentée par MN′. On voit que la variation d'enthalpie se réduit de ($H_M — H_N$) à ($H_M — H_{N'}$). Le rendement thermodynamique traduit cette dégradation :

$$\eta_{th} = \frac{H_M — H_{N'}}{H_M — H_N}$$

Ce rendement varie avec les caractéristiques de la vapeur. Il est différent dans chacun des étages de la turbine.

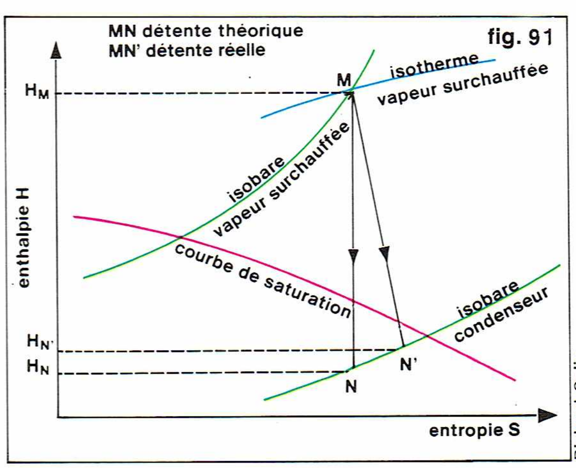

Richard Colin

◀ ***Figure 91 : détente de la vapeur dans une turbine représentée sur un diagramme de Mollier.***

▶ *Figure 92 : cycles de Carnot* (ABCD) *et de Rankine* (A'BCD) *représentés sur le diagramme entropique. Figure 93 : cycle avec surchauffe de la vapeur* (T_2) *sur le diagramme entropique.*

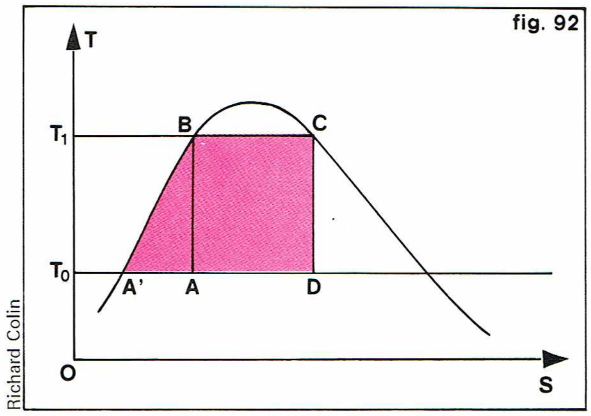

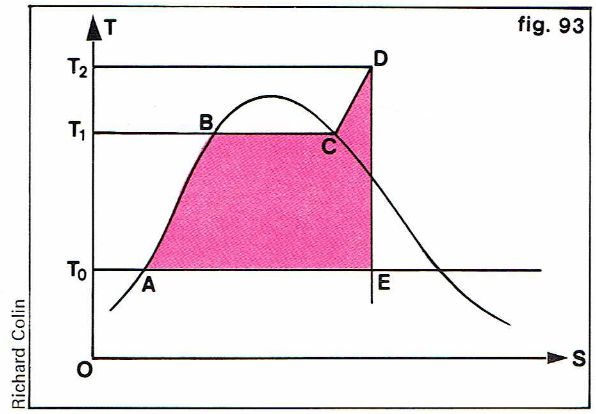

▶ *Figure 94 : cycle nucléaire d'un réacteur PWR représenté sur le diagramme entropique. Figure 95 : cycle de Hirn à resurchauffe représenté sur le diagramme entropique.*

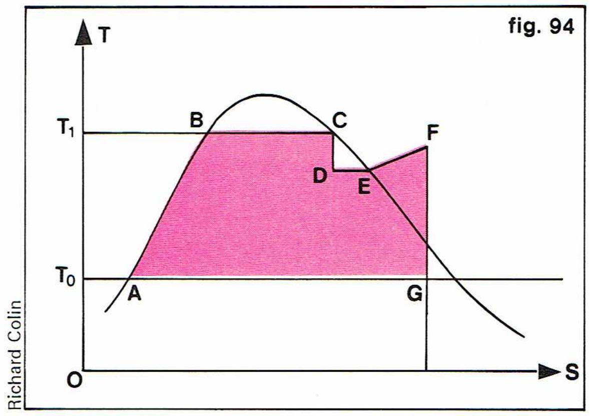

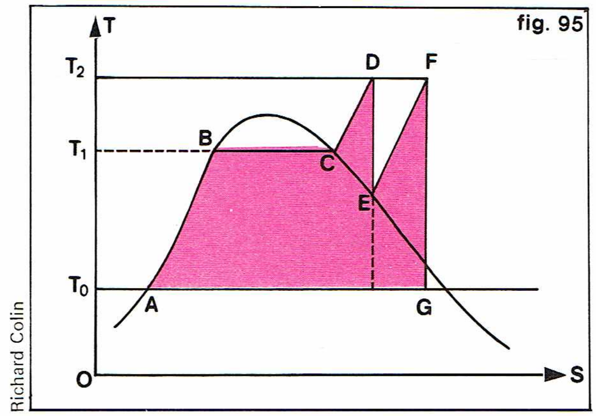

Cycles - Rendement global

Pour décrire le cycle complet suivi par la vapeur, il faut considérer l'ensemble constitué par la chaudière, la turbine, le condenseur et le circuit alimentaire. Le cycle idéal à utiliser serait évidemment celui de Carnot, dont on a vu qu'il donnait entre une source chaude (T_1) et une source froide (T_0) le rendement maximal (voir *figure* 92).

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_0}{T_1}$$

Malheureusement ce cycle représenté par le rectangle ABCD est mécaniquement irréalisable et il faut se résoudre à remplacer la transformation AB (qui est une compression isentropique d'une vapeur humide) par l'alimentation de la chaudière en eau froide provenant du condenseur.

Ce nouveau cycle (A'BCD), réalisable pratiquement, est appelé : *cycle de Rankine*. Son rendement est donné par l'expression suivante :

$$\eta_{Rankine} = \frac{H_C - H_D}{H_C - H_A}$$

H étant l'enthalpie considérée aux points caractéristiques du cycle.

* *Nécessité de la surchauffe et de la resurchauffe*

Pour augmenter la chute d'enthalpie, on peut agir sur les deux points extrêmes de la détente : augmenter la température de la source chaude T_1 et diminuer celle de la source froide T_0. On est vite limité dans ces deux voies. Il n'est guère possible en effet d'augmenter la température de la vapeur car, ce faisant, on augmente l'humidité de la vapeur en fin de détente, et il n'est plus possible de faire fonctionner correctement la turbine. Vers le bas, on est limité par la source froide elle-même : rivière, lac ou mer. Ces considérations expliquent pourquoi les turbines fonctionnant avec de la vapeur saturée en détente directe utilisent de la vapeur qui ne dépasse pas une pression de 20 bars.

Un des moyens d'augmenter la chute d'enthalpie sans trop abaisser l'humidité en fin de détente est d'utiliser la surchauffe de la vapeur, à pression constante, en général la pression de saturation de la chaudière. Le cycle ainsi modifié (voir *figure* 93) s'appelle le *cycle de Hirn*. Son rendement est donné par la formule :

$$\eta_{Hirn} = \frac{H_D - H_E}{H_D - H_A}$$

Ce rendement est un peu supérieur à celui du cycle de Rankine. La température de surchauffe est limitée par la résistance aux hautes températures des métaux utilisés pour la fabrication des surchauffeurs et des premiers étages de turbines. Cette température ne dépasse pas en général 540 à 560 °C pour des raisons économiques, car les matériaux à mettre en œuvre seraient alors trop coûteux (aciers inoxydables austénitiques). Le cycle de Hirn à une seule surchauffe permet de monter la pression de fonctionnement jusqu'à 80 bars environ.

Sur les centrales nucléaires à eau légère, on utilise un cycle de Rankine avec surchauffe en cours de détente. Ces réacteurs ne délivrent en effet qu'une vapeur saturée (pression de 60 à 70 bars), au mieux légèrement surchauffée sur certains modèles, et l'humidité en fin de détente qui résulterait d'une détente directe provoquerait de sérieuses difficultés sur la marche de la turbine.

En conséquence, après une détente partielle, on procède à un séchage de la vapeur et à une surchauffe effectuée avec de la vapeur vive (on a donc $T_2 < T_1$). Cette surchauffe permet d'obtenir une humidité acceptable de la vapeur en fin de détente. Le cycle correspondant est représenté sur la *figure* 94.

Si l'on veut utiliser des pressions supérieures à 80 bars, il devient nécessaire de prévoir une deuxième surchauffe qu'on appelle « resurchauffe ». En général, la première détente isentropique est arrêtée sur la courbe de saturation de la vapeur. On effectue alors la resurchauffe à une température souvent égale à celle de surchauffe et la vapeur est ensuite détendue jusqu'à la pression du condenseur. C'est le cycle de Hirn à resurchauffe qui est présenté sur la *figure* 95.

Le gain de rendement apporté par la resurchauffe est de l'ordre de 5 %. La contrepartie de ce gain est une augmentation de la complexité de l'installation. Pour cette raison, on n'utilise la resurchauffe que sur des centrales de grande puissance. Rien ne s'oppose en principe à l'idée de resurchauffer deux fois la vapeur. Mais la double resurchauffe entraîne des coûts d'investissement qui ne sont plus en rapport avec le gain qu'elle procure ; elle n'est donc pas utilisée en pratique.

* *Réchauffage de l'eau d'alimentation par soutirage*

On a déjà noté la différence qui existe entre le cycle de Hirn et le cycle de Carnot, et qui vient de l'échauffement

irréversible dans la chaudière de l'eau alimentaire froide en provenance du condenseur. Cette irréversibilité peut être supprimée, théoriquement, par un réchauffage de l'eau alimentaire effectué par une infinité d'échangeurs travaillant à des températures voisines. Ces échangeurs, qu'on appelle des réchauffeurs, eu égard à leur fonction, doivent emprunter leurs calories à la vapeur en cours de détente ayant le même niveau thermique. De cette façon, l'eau injectée dans la chaudière serait à la température de la source chaude T_1, et les échanges avec cette source chaude seraient isothermes (vaporisation).

Ce système de réchauffage représenté sur la *figure* 96 n'est pas réalisable pratiquement. On peut l'approcher par une série de réchauffeurs alimentés par de la vapeur prélevée sur la turbine. Le gain sur le rendement est d'autant plus fort que le nombre d'étages de réchauffage est élevé. On en trouvera 4 ou 5 sur les installations de puissance moyenne, et 6, voire 7, sur les centrales de puissance élevée.

Les conséquences sur la turbine sont les suivantes :

— augmentation de la consommation spécifique de vapeur : il faut plus de vapeur à l'entrée pour faire la puissance puisque l'on en soutire en cours de détente ;

— amélioration du rendement de la machine, car les débits sont augmentés dans la partie haute pression de la turbine et diminués dans la partie basse pression, dont le rendement est très sensible à l'humidité de la vapeur ;

— augmentation de la puissance unitaire d'un groupe donné qui est en général limité par la section d'échappement de la vapeur au condenseur.

Construction des turbines à vapeur

Lorsque la puissance est suffisamment faible, on peut se contenter d'une turbine à un seul étage. Ces machines ont un très mauvais rendement ; aussi, dès que la puissance devient significative, la turbine comprend un nombre plus ou moins important d'étages, et pour les turbines de grande puissance ces étages sont regroupés en plusieurs corps. On distingue le corps haute pression (HP), le corps moyenne pression (MP) et le corps basse pression (BP). Ces corps sont généralement à double flux pour limiter la poussée axiale ; ils peuvent être doublés ou triplés.

Les rotors des différents corps de la turbine sont en général solidaires sur un même arbre pour entraîner la machine réceptrice. Mais ce n'est pas une règle générale : les rotors peuvent être associés sur deux arbres différents qui entraînent soit deux machines réceptrices distinctes, soit le même récepteur après couplage des deux turbines par un réducteur. La solution à deux lignes d'arbre séparées se rencontre sur les centrales de grande puissance ; la solution à réducteur est classique en propulsion navale.

La vitesse de la machine est un compromis entre le désir de faire tourner la turbine à la vitesse la plus élevée possible et le souci d'éviter un réducteur entre celle-ci et la machine réceptrice. Les turbo-alternateurs sont entraînés directement à des vitesses correspondant au synchronisme : 3 000 t/mn ou 1 500 t/mn. Les turbines industrielles qui entraînent des turbomachines comme des pompes ou des compresseurs peuvent tourner à des vitesses plus élevées. Lorsqu'il faut produire une puissance élevée à faible vitesse, le réducteur s'impose.

Les étages des turbines peuvent être du type à action ou du type à réaction. Les constructeurs sont restés longtemps attachés à l'un ou l'autre de ces types. Mais, en pratique, les turbines utilisent ces deux principes. On a vu ci-avant que la pression restait constante dans un aubage mobile à action, alors qu'elle est variable dans un aubage à réaction. Il sera donc plus facile d'éviter les fuites internes avec des étages à action. Les turbines à réaction seront souvent munies en tête d'une roue double à action, et les turbines à action seront dotées d'étages à réaction en fin de détente, le meilleur rendement de ce type d'aubage n'étant plus détruit par les fuites internes.

Il existe deux types de fabrication de rotors (voir *figure* 97), ce qui permet de distinguer deux classes de turbines.

* *Turbines à diaphragmes*

Dans ces turbines, appelées encore à tort multicellulaires, le rotor est formé d'un arbre cylindrique porteur de disques de diamètre croissant. Chaque disque fait partie d'un étage et il y a autant d'étages que le nécessite le fractionnement de la détente. Le rotor peut être monobloc ou assemblé. Les disques sont usinés séparément, puis emmanchés et clavetés sur l'arbre. Ils portent à leur périphérie les aubages mobiles.

Les disques sont séparés par des cloisons fixes, appelées diaphragmes. Ils portent les aubages des tuyères distributrices et sont tenus par le stator. Ils laissent passer l'arbre en leur centre au travers d'un système d'étanchéité, rendu nécessaire par la différence qui existe entre les deux faces d'un même diaphragme.

* *Turbines à tambour*

Ce type de rotor a la forme d'un cylindre. Les aubages mobiles y sont directement rapportés, les aubages fixes étant portés par le stator. La construction peut être mono-

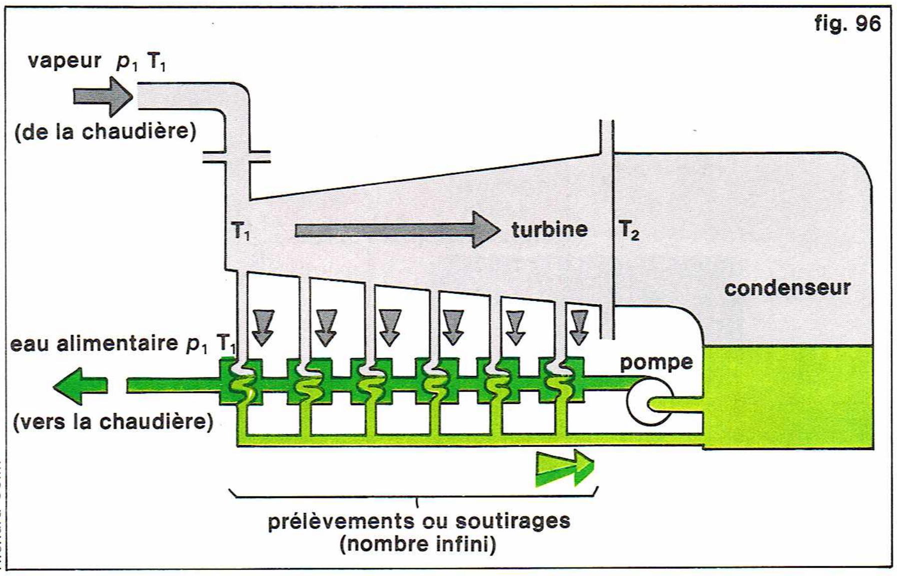

▲ ***Figure 96 : cycle à prélèvement ou à soutirage.***

▼ ***Figure 97 : comparaison des deux types de construction d'une turbine à vapeur :***
a) construction à diaphragmes ;
b) construction à tambours.

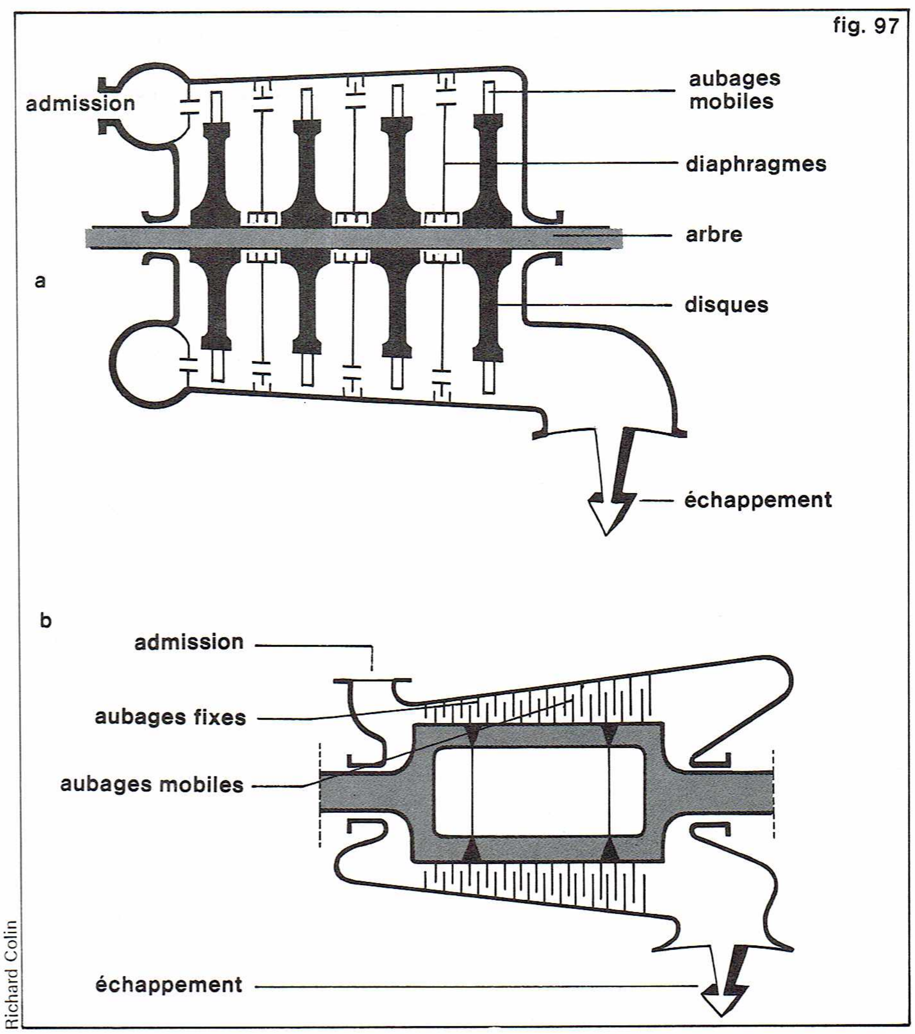

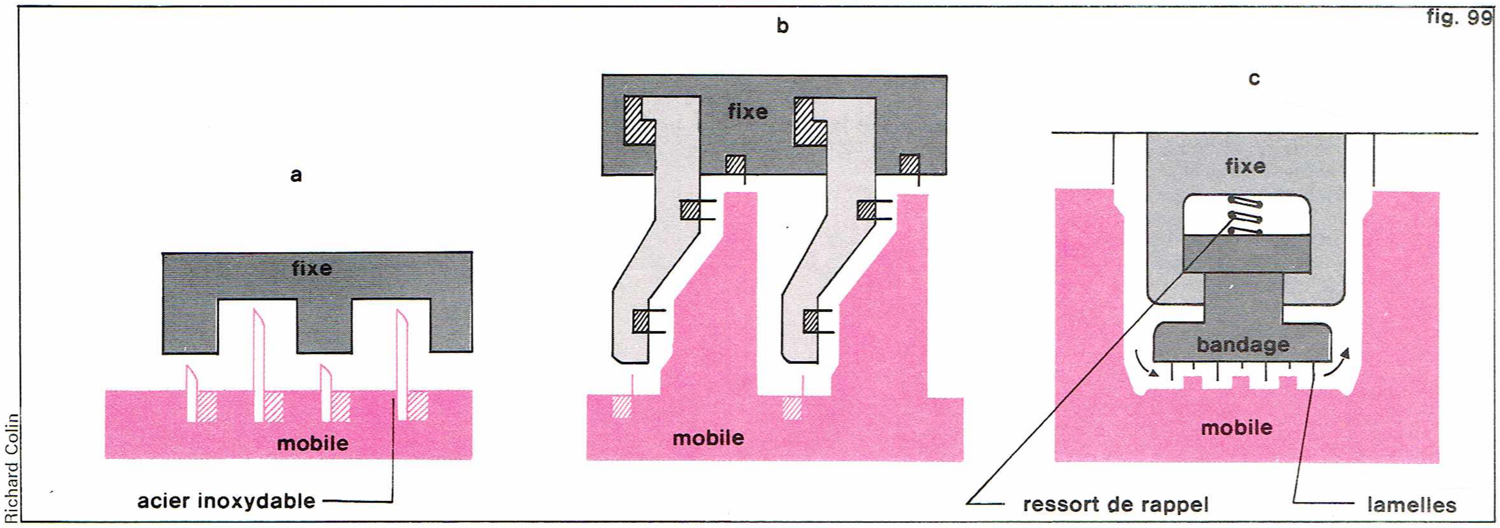

▲ *Figure 99; dispositifs d'étanchéité : a) labyrinthe à pointes radiales; b) labyrinthe à pointes radiales et axiales; c) labyrinthe à segments effaçables.*

▼ *Figure 98; fixation des aubages mobiles : a) queue d'aronde simple ou à tête de marteau (ailette introduite par rotation et blocage par verrou); b) emmanchement marteau avec encastrement pour empêcher l'ouverture de la queue d'aronde; c) queue d'aronde multiple ou montage en sapin; d) enfourchement et rivetage.*

bloc : le rotor est obtenu par forgeage. Il peut être aussi obtenu par assemblage ou par soudure de plusieurs éléments.

Dans la turbine à diaphragme, on a noté qu'il fallait limiter les fuites le long de l'arbre. Ici, les fuites vont se produire entre aubages fixes et rotor d'une part, et si l'étage est à réaction entre aubages mobiles et stator d'autre part. Pour les éviter, l'ensemble est monté avec des jeux très réduits.

La conception du rotor à disque convient bien à la turbine à action, alors que la conception à tambour s'adapte mieux à la turbine à réaction. Historiquement, la conception des machines a été déterminée par ces règles pendant longtemps. Il n'en va plus de même à présent. Pour des raisons très diverses, relatives en particulier aux coûts de fabrication et aux moyens à mettre en œuvre, les deux procédés de fabrication sont concurremment employés sur les différents types de turbines.

* *Aubages mobiles*

Ils sont soumis par la force centrifuge à des efforts considérables qui peuvent multiplier leur poids par des facteurs de plus de 10 000. Ces problèmes d'ordre mécanique s'ajoutant aux problèmes hydrodynamiques, on concevra aisément que la conception des ailettes d'une turbine soit particulièrement difficile.

C'est dans le pied de l'ailette que l'effort est maximal, et sa fixation dans le disque ou le rotor doit être particulièrement soignée. On trouvera sur la *figure* 98 les différents types d'accrochage les plus utilisés.

Un autre danger guette les ailettes : celui des vibrations. Des calculs longs et difficiles sont en général nécessaires pour étudier ce phénomène. Diverses protections sont prises, comme, sur les derniers étages basse pression, la réunion par des fils de liaison de groupes de plusieurs ailettes.

* *Dispositifs d'étanchéité*

Ils ont pour but de limiter les pertes par fuite de vapeur qui se produisent entre les parties fixes et les parties mobiles de la machine, lorsque le jeu qui sépare ces parties met en communication des zones de pression différentes. Il s'agit de fuites internes de vapeur à l'intérieur de la machine et de fuites entre l'intérieur et l'extérieur de la machine aux passages de l'arbre dans le corps de turbine. Cette dernière fuite est une fuite de vapeur lorsque le corps de la turbine est sous pression; c'est une entrée d'air lorsque le corps est sous vide.

Il n'est pas possible de rendre étanches toutes les lignes de fuites; tout au plus s'efforce-t-on de limiter le débit de la fuite par des obstacles, qu'on appelle des « labyrinthes ».

Les solutions techniques adoptées varient avec les constructeurs. On trouvera sur la *figure* 99 différents types de réalisation. Les systèmes « effaçables » sont très utilisés, car ils ne sont pas détruits en cas de contact accidentel entre la partie fixe et la partie mobile.

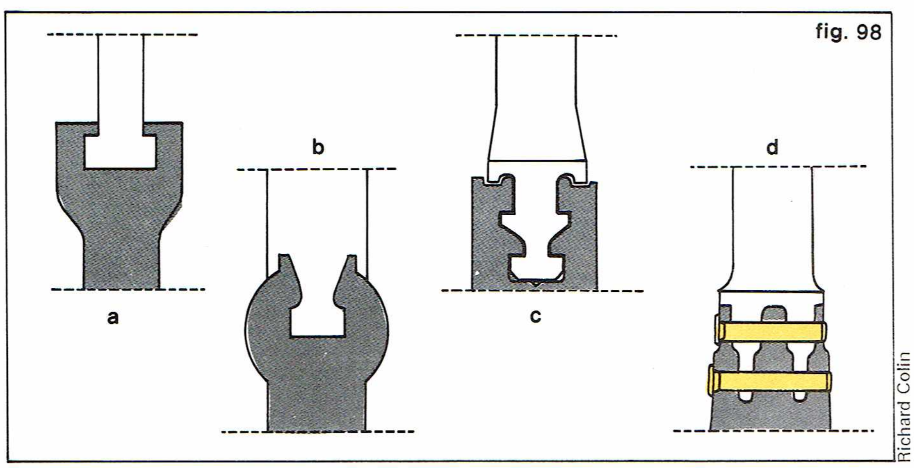

Domaines d'utilisation

La turbine à vapeur est pour beaucoup d'entre nous la machine géante des centrales électriques. Ce point de vue est justifié, car c'est dans le domaine de la production électrique que la turbine à vapeur s'est imposée par ses possibilités de fournir de grandes puissances. On se reportera au *tableau* X pour voir l'évolution en France de la puissance des groupes turbo-alternateurs. Une évolution sensiblement comparable pourrait être constatée dans les autres pays industrialisés. Elle a pour origine l'abaissement du coût de l'énergie produite entraîné par l' « effet de taille ». Le prix d'une centrale n'est pas proportionnel à sa puissance, ainsi que les coûts de conduite et d'entretien.

Où en sommes-nous aujourd'hui? Dans le domaine, classique, les turbines à une ligne d'arbre ne dépassent guère 700 à 800 MW. Dans la solution à deux lignes d'arbre *(cross-compound)*, la taille maximale actuelle des groupes est de 1 300 MW. La chaudière classique à cette puissance devient monumentale, et c'est elle qui limitera sans aucun doute la croissance des machines. On peut évidemment, et cela s'est fait, associer deux chaudières pour alimenter une turbine, ce qui permettrait d'augmenter encore la taille des machines. Dans le domaine nucléaire, on sait que les programmes actuels dans le monde font appel à des turbines à une ligne d'arbre, dont la puissance va de 900 à 1 300 MW. A ce dernier niveau de puissance, la machine devient gigantesque, compte tenu de la médiocre qualité de la vapeur nucléaire, et son développement vers des puissances encore supérieures sera probablement vite limité, tout au moins si l'on conserve les conceptions actuelles. Des études sont en cours dans divers pays pour faire sauter les verrous qui ferment la porte à des puissances supérieures. Parmi ceux-ci se trouve l'emploi de la vapeur d'eau comme fluide de travail dont les caractéristiques aux basses pressions du condenseur conduisent à des débits de vapeur qui sont responsables du gigantisme. Son remplacement en fin de cycle par un autre fluide de volume massique beaucoup plus faible paraît être une possibilité intéressante.

Ces remarques sur la taille des grandes turbines productrices d'électricité pourraient faire croire que les petites

Tableau X - Centrales thermiques classiques E.D.F. au 1/6/1977						
Équipements	Pression (en bars)	Nombre de tranches	Puissance cumulée (en MW)	Date du programme	Température de la vapeur d'admission (en °C) surchauffé/resurchauffé	Consommation spéciale (en mth/kWh)
Moyenne pression	$30 < p < 60$	(11 en réserve)	527		500 max	3 200
Haute pression sans resurchauffe						
palier 40-60 MW	$65 < p < 80$	6 (+ 2 en rés.)	292	1946-1949	510 max	2 900
palier 110 MW	87	5	534	1946-1952	520 max	2 800
Haute pression avec resurchauffe						
palier 60 MW	125	2	110	1956	540/540	3 170
palier 125 MW	87 ou 125	38	4 457	1952-1965	540/540	2 400
palier 250 MW	163	37	9 250	1956-1971	565/565	2 250
palier 600 MW	163	7	4 095	1968-1975	{ 565/565 540/540	2 200
palier 700 MW	163	4	2 740	1972-1973	540/540	2 260
Total thermique classique E.D.F.		99	21 478			

Nota : cette période d'équipement couvre une trentaine d'années. Noter l'augmentation de la puissance unitaire des groupes, de la pression et de la température de surchauffe, avec une stabilisation aujourd'hui à 163 bars, 540 °C. La resurchauffe est apparue dès que la pression a dépassé 87 bars. La consommation spécifique théorique décroît régulièrement avec l'augmentation de la taille des groupes, avec une stabilisation autour de 2 250 mth/kWh.

◄ ***Tableau X : évolution en France de la puissance et des caractéristiques des groupes turbo-alternateurs.***

turbines de puissance faible ou modérée n'ont plus de raison d'exister. Il n'en est rien, et de telles machines sont très utilisées pour des applications industrielles et pour la propulsion navale.

Dans l'industrie, elles sont particulièrement intéressantes lorsqu'il existe un besoin simultané d'énergie électrique et de chaleur. On utilise alors des turbines à prélèvement ou à contre-pression. Elles permettent aussi de brûler des combustibles résiduaires difficilement commercialisables, situation que l'on rencontre dans les mines et les usines métallurgiques. Les turbines utilisées sont de types très divers : leur puissance s'échelonne de quelques centaines de kilowatts à plus de 100 MW.

Pour la propulsion navale, l'utilisation des turbines devient compétitive dès que la puissance nécessaire est significative. Les réalisations vont de quelques mégawatts à plus de 100 MW. Pour des raisons de sécurité et d'encombrement, les fortes puissances sont en général fractionnées en plusieurs groupes qui entraînent chacun une ligne d'arbre. Il est en général nécessaire d'introduire un réducteur entre la turbine et l'arbre porte-hélice, car la vitesse de la première doit être élevée (plusieurs milliers de tours par minute) alors que le second fonctionne à des vitesses très lentes, de l'ordre de la centaine de tours par minute.

Il existe donc une très grande variété de turbines à vapeur, dans une gamme de puissances très large et dans des domaines d'utilisation très divers. L'utilisation de ce type de machine va donc se prolonger encore longtemps. Son développement est loin d'être terminé. La puissance unitaire des machines, malgré leur taille respectable d'aujourd'hui, est sans doute encore appelée à croître.

Turbine à gaz en circuit fermé

La disposition générale d'une installation utilisant une turbine à gaz à circuit fermé est donnée sur la *figure* 100. C'est la même masse gazeuse qui décrit le cycle sans aucune communication avec l'atmosphère. Ce gaz échauffé dans la chaudière qui représente la source chaude est détendu dans la turbine. Une partie de sa chaleur résiduelle est récupérée dans un échangeur. Ce gaz, ensuite, est encore refroidi par un réfrigérant avant son entrée dans le compresseur. Ce réfrigérant n'existe pas dans le cycle ouvert, puisque le prélèvement d'air frais se fait directement dans l'atmosphère.

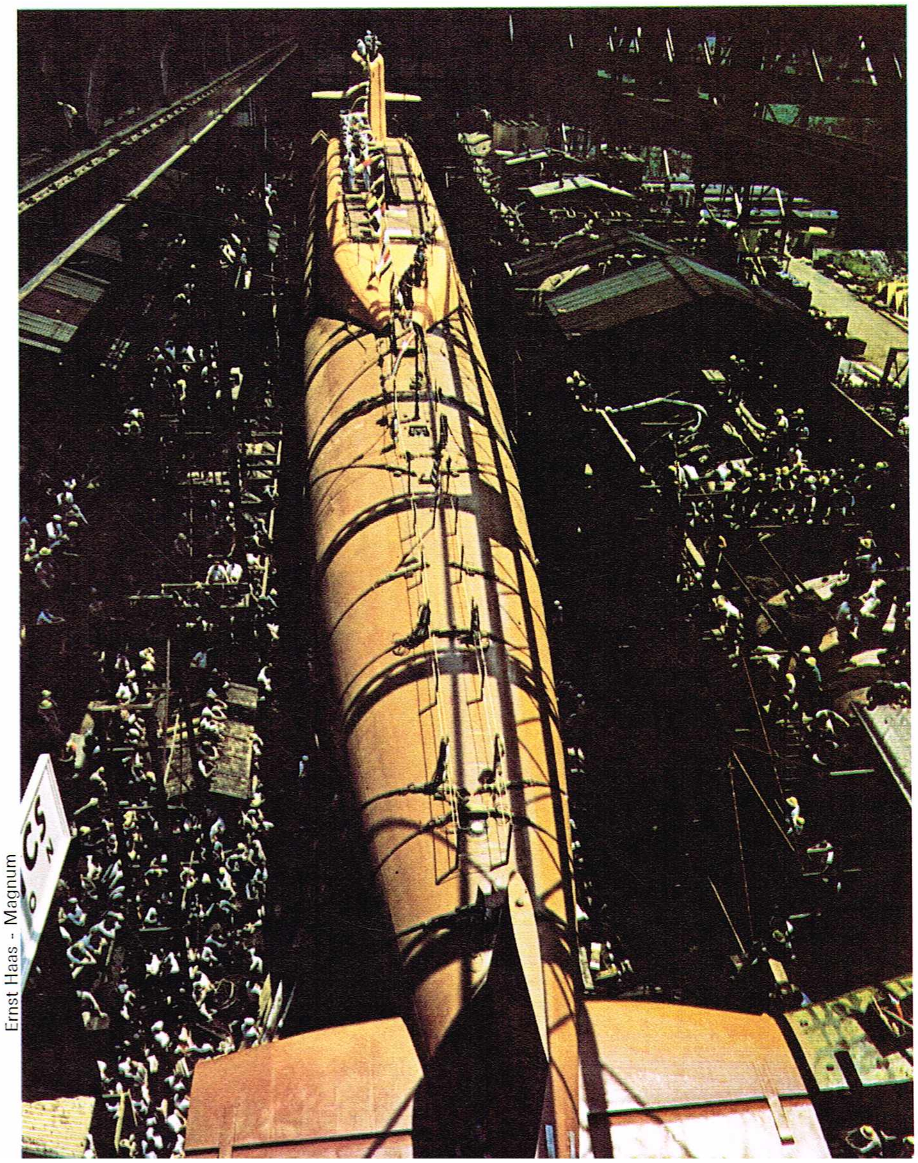

Ernst Haas - Magnum

▼ ***Les turbines productrices d'électricité de faible puissance sont très utilisées dans la propulsion navale ; ici, un sous-marin atomique américain en cale sèche.***

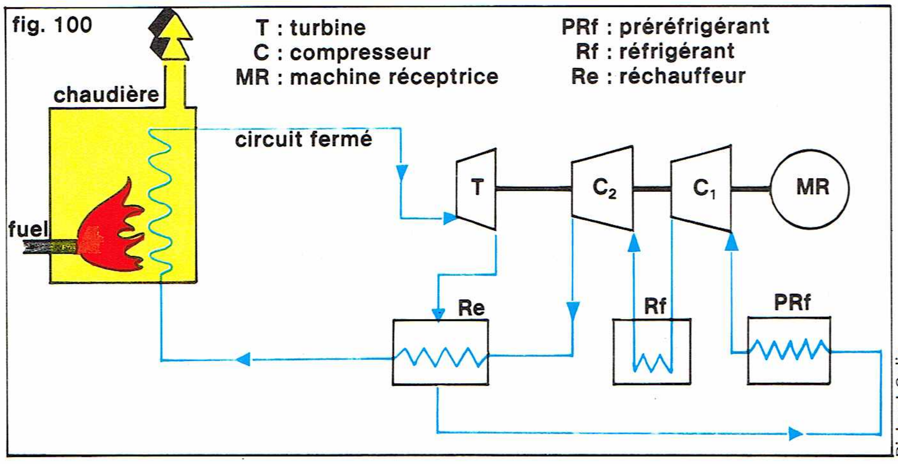

Richard Colin

▲ *Figure 100 : principe de fonctionnement d'une turbine à gaz en circuit fermé à deux étages de compression et réfrigération intermédiaire.*
▼ *Ci-dessous, le propulseur nucléaire* Phœbus IA, *un des moteurs prototypes expérimentés par les États-Unis.*
A droite, figure 101 : schéma d'un propulseur nucléo-thermique : 1, réservoir de propergol; 2, réacteur nucléaire; 3, tuyère.

Le cycle théorique ne diffère pas de celui d'une installation fonctionnant en circuit ouvert. Mais la pression d'entrée au compresseur n'est plus obligatoirement celle de l'atmosphère. Il devient possible de relever cette pression, ce qui permet d'augmenter la puissance unitaire des machines.

Le fluide utilisé peut être de l'air ou tout autre gaz. Il est donc possible de le choisir en fonction des exigences de l'installation, ce qui est très intéressant dans le cas des installations nucléaires. Ce fluide de travail reste très propre, ce qui n'est pas le cas lorsqu'on utilise des gaz de combustion. Le découplage entre chaudière et turbine donne la possibilité de brûler toutes sortes de combustibles, et en particulier les combustibles bon marché comme la tourbe et le lignite qui ne sont pas directement utilisables dans un moteur à combustion interne.

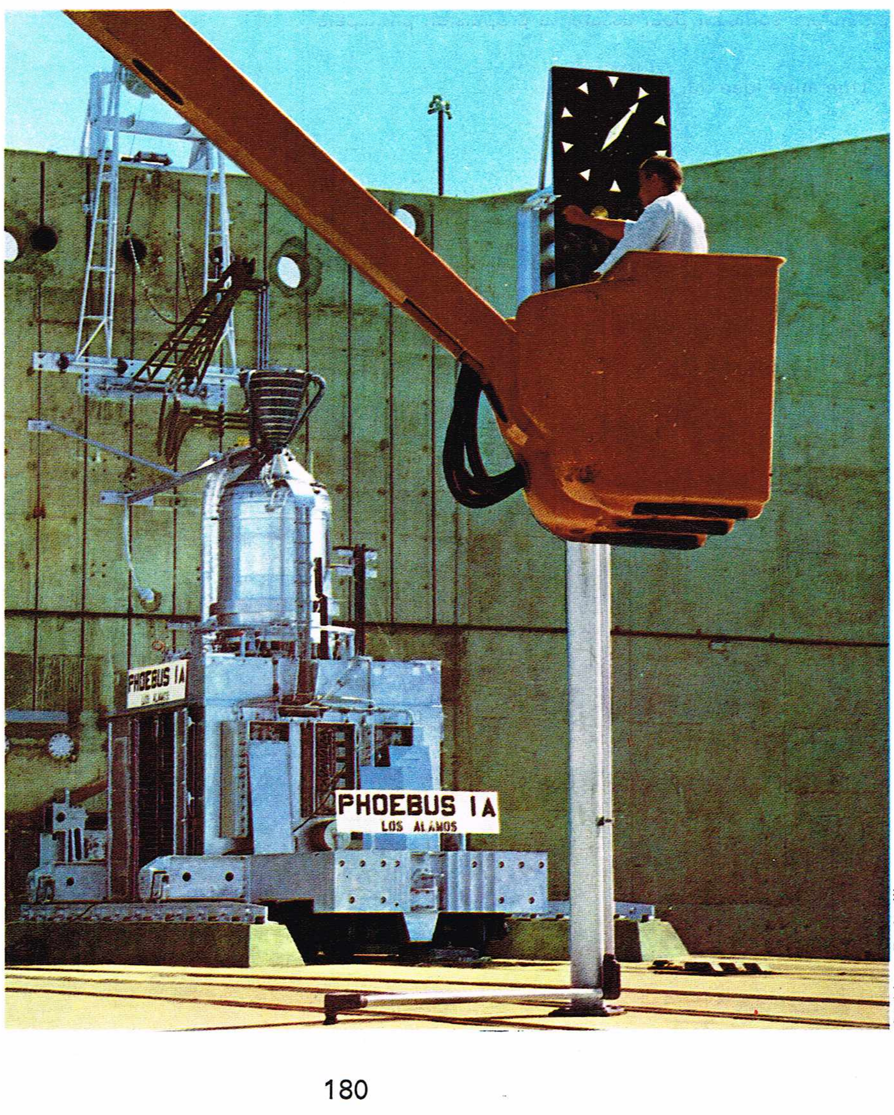

Archives Radaelli

Les turbines à gaz en circuit fermé, construites à ce jour pour brûler des combustibles fossiles, utilisent l'air comme fluide de travail. Certaines installations fonctionnent avec un circuit semi-fermé. Le circuit fermé en effet ne résout pas le problème de l'alimentation en air de la chaudière. Dans le circuit semi-fermé, une partie de l'air à la sortie du compresseur HP est dérivée vers la chaudière et une quantité d'air correspondante est prélevée à l'entrée du compresseur BP.

Le circuit fermé, plus complexe que le circuit ouvert, n'est utilisé que dans les applications très spécifiques. Ce type d'installation est appelé à connaître un fort développement si les réacteurs à haute température s'imposent un jour commercialement. Pour ce type de réacteurs, en effet, la solution la plus adaptée pour produire de l'électricité est la turbine à gaz en circuit fermé utilisant un gaz chimiquement et nucléairement neutre, tel que l'hélium.

Moteurs statiques (à propulsion non chimique)

Les moteurs-fusées à propergol chimique examinés avec les moteurs à combustion interne souffrent d'un défaut grave. Pour effectuer une mission dans l'espace, il leur faut emporter une grande quantité, donc une masse importante, de propergol dont la réaction exothermique fournira les gaz chauds nécessaires à la propulsion. De plus, si on se rappelle que le principe de la propulsion dans le vide est d'éjecter vers l'arrière une masse q par unité de temps avec la plus grande vitesse d'éjection possible V_e de façon à obtenir la quantité de mouvement $q \cdot V_e$ maximale qui est à l'origine de la force de réaction, on comprend que lorsqu'on utilise une réaction chimique, la vitesse obtenue va se trouver limitée par l'énergie chimique disponible dans la masse q expulsée.

Les vitesses d'éjection les plus grandes que l'on puisse envisager en utilisant l'énergie libérée pour une réaction chimique sont de l'ordre de 4 000 m/s (cette vitesse est obtenue avec le mélange oxygène-hydrogène qui est un des meilleurs couples de propergols chimiques).

Pour obtenir des vitesses d'éjection supérieures, il faut donc recourir à une source d'énergie autre que l'énergie chimique qui sera par définition extérieure au corps éjecté. Ces moteurs, qui vont fonctionner avec une totale indépendance entre le fluide de travail et la source d'énergie, sont donc bien des moteurs à combustion « externe », compte tenu des réserves déjà formulées sur cette terminologie. Ce sont des moteurs par principe anaérobies (qui n'ont pas besoin de l'air de l'atmosphère pour fonctionner).

Les chercheurs ont donc essayé d'utiliser en lieu et place de l'énergie chimique les autres formes de l'énergie et, en particulier, l'énergie nucléaire, électrique et rayonnante.

Ces nouveaux propulseurs demandent des moyens de recherche considérables et les programmes lancés aux États-Unis et en U. R. S. S. dans la période 1950-1960 ont beaucoup souffert du ralentissement brutal des programmes spatiaux.

Propulsion nucléaire

Ce propulseur, que l'on appelle aussi *propulseur nucléo-thermique,* est constitué sous sa forme la plus simple d'un réacteur nucléaire solide qui constitue la source chaude, et d'un réservoir de gaz ou de liquide utilisé comme matière éjectable (*fig.* 101).

Si les températures de réchauffage sont faibles (2 500 à 3 000 °K), il faut utiliser des gaz à masse moléculaire

fig 101

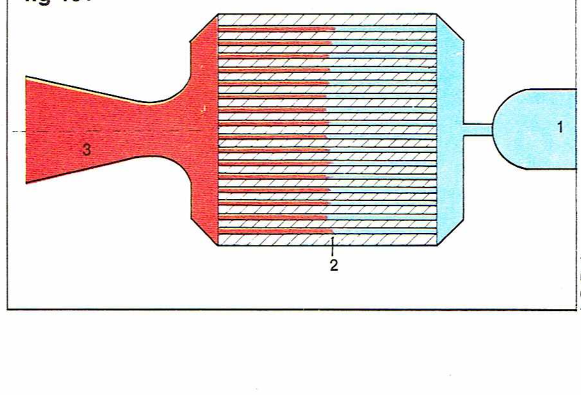

I.G.D.A.

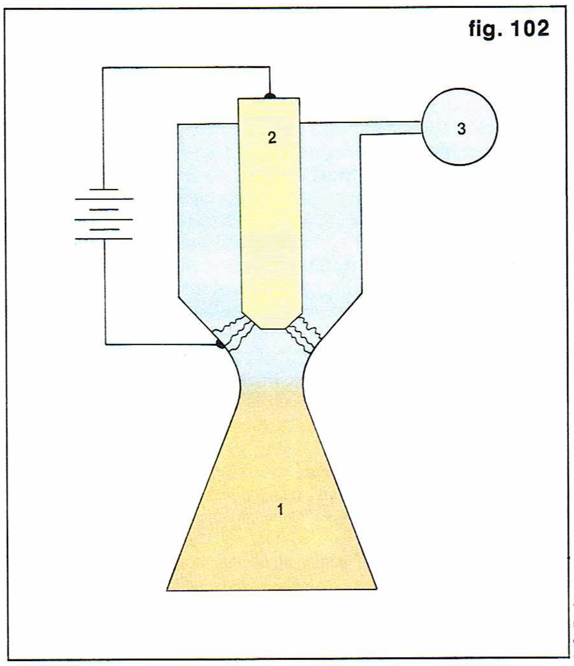

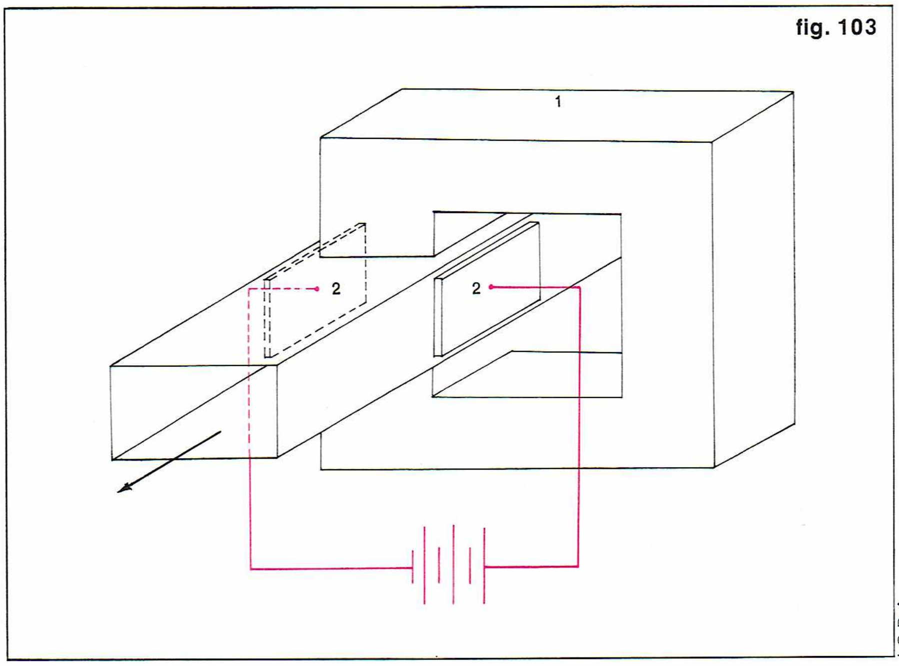

faible et, pratiquement, seuls conviennent l'hydrogène et l'hélium. Si on dispose d'un réacteur permettant des températures nettement supérieures à 3 000 °K, l'utilisation de liquide comme l'eau ou l'ammoniaque constituerait une solution intéressante. Les performances sont fonction de la température de préchauffage. Avec de l'hydrogène par exemple, porté à 4 500 °K, on disposerait d'une vitesse d'éjection de 12 000 m/s environ.

Il s'agit là bien sûr de résultats de calculs théoriques car la mise au point de réacteurs nucléaires susceptibles de travailler à de telles températures reste encore un objectif lointain. Les États-Unis ont lancé, il y a plus de vingt ans, un programme au nom de code de Rover qui a permis de 1958 à 1968 d'expérimenter plusieurs moteurs appelés *Kiwi A, B* et *C*. D'autres prototypes ont ensuite vu le jour : *Nerva, Phœbus*.

Le rapport poussée/poids du moteur est moins bon que celui d'un propulseur chimique du fait de la masse élevée du réacteur. Ce type de moteur s'utiliserait donc pour des missions lointaines sur des véhicules déjà satellisés. Les performances d'un tel moteur sont limitées, comme sur les réacteurs des chaudières nucléaires terrestres, par la température des gaines de combustible. On a imaginé de construire un réacteur utilisant un combustible sous forme gazeuse. Il serait alors possible d'atteindre des températures très élevées. La difficulté principale d'un tel moteur est d'éviter que le combustible gazeux ne s'échappe avec le gaz d'éjection. Ce type de réacteur reste encore, on s'en doute, du domaine de la spéculation théorique.

Propulsion électrique

Nous savons tous qu'il est possible de porter, à l'aide d'un arc électrique, un gaz à une température beaucoup plus élevée que celle des matériaux solides constituant les électrodes. Ce principe conduit donc au *propulseur thermo-électrique* qui peut donner des vitesses d'éjection, après détente dans une tuyère, de 5 000 à 15 000 m/s (*fig.* 102).

Mais il est possible d'accélérer directement les molécules d'un gaz, sans utiliser l'énergie thermique, par passage du gaz, au préalable ionisé, dans un champ électrostatique de plusieurs milliers de volts. Il ne s'agit plus alors d'un moteur thermique puisque l'énergie électrique est transformée, sous forme d'énergie cinétique, directement en énergie mécanique. La vitesse d'éjection de ce moteur, qu'on appelle *propulseur ionique,* pourrait atteindre 100 000 m/s.

Fondé sur le même principe, mais travaillant avec un gaz sous forme de plasma éjecté par une tuyère, après passage dans un champ magnétique intense, le *propulseur à plasma* pourrait disposer de vitesse d'éjection de l'ordre de 10 000 km/s (*fig.* 103).

Propulsion par énergie rayonnante (laser)

La première idée qui vient à l'esprit est d'utiliser l'énergie du Soleil dont on a vu au chapitre sur les ressources énergétiques que le flux dans l'espace, au voisinage de la Terre, était de 0,139 W/cm² (soit 1 MW pour 700 m² environ). Une fusée à énergie solaire aurait l'avantage de fonctionner sans générateur à bord. Malheureusement, le flux solaire, surtout lorsqu'on s'éloigne du Soleil, ne paraît pas suffisant pour assurer la propulsion principale d'une fusée. Tout au plus, et c'est loin d'être négligeable, le flux solaire pourrait servir d'appoint.

Une autre idée qui est, paraît-il, très prometteuse est la propulsion par laser. L'utilisation des lasers pour le transport d'énergie est bien connue. Dans le cas du propulseur de fusée, le laser serait utilisé pour chauffer le gaz à éjecter après concentration du faisceau lumineux (*figure* 104). Les vitesses d'éjection disponibles se situeraient, suivant le gaz utilisé et la température disponible, entre 10 000 et 15 000 m/s. L'émetteur laser opérerait soit de la Terre, soit à bord d'un satellite. Il reste évidemment à fabriquer des lasers suffisamment puissants pour rendre le procédé intéressant. Il n'en existe pas aujourd'hui mais aucune difficulté théorique ne semble fermer le chemin à ce type de réalisation. Ce procédé ne permettra pas la satellisation rapprochée de grosses charges, opération qui restera longtemps du ressort des propulseurs chimiques, mais il serait, s'il voit le jour, d'une souplesse étonnante pour modifier les orbites des satellites artificiels évoluant autour de la Terre et pour lancer, dans le système solaire, des vaisseaux de grande taille.

Propulsion photonique

Pour clore cette liste des moteurs d'anticipation, signalons l'idée du *propulseur photonique* qui disposerait, par éjection de photons lumineux, de la vitesse de la lumière qui est, rappelons-le, de 300 000 km/s.

▲ ***Figure 102 ; schéma d'un propulseur thermo-électrique : 1, tuyère ; 2, électrode ; 3, réservoir de propergol. Figure 103 ; schéma d'un propulseur à plasma : 1, aimant ; 2, électrodes.***

▼ ***Figure 104 : schéma d'un propulseur par énergie rayonnante (laser).***

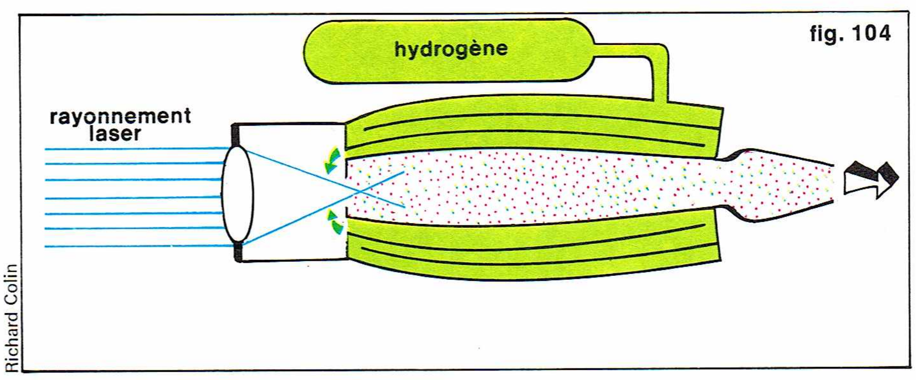

Cycles mixtes

Dans ce chapitre consacré à la conversion thermomécanique, nous avons examiné successivement les différents types de moteurs thermiques. Ces moteurs peuvent être utilisés séparément, mais il est aussi possible de les combiner pour profiter de leurs différents mérites respectifs. On arrive alors à des ensembles groupant plusieurs machines de principes souvent fort différents.

Nous avons déjà rencontré des montages de ce type dans les moteurs à explosion ou Diesel. Dès que leur puissance devient significative, il est intéressant de récupérer l'énergie résiduelle des gaz d'échappement dans une turbine à gaz pour entraîner un compresseur de suralimentation du moteur. C'est une solution très répandue. On a aussi mentionné certaines réalisations de propulsion navale où étaient associées une machine à vapeur à piston et une turbine à vapeur. Enfin, il a été fait allusion également au couplage d'un moteur Diesel à piston libre avec une turbine à gaz.

Parmi les exemples historiques, il faut citer la suralimentation des moteurs d'avion par turbocompresseur alimenté par les gaz d'échappement, réalisé en 1916 par Rateau. C'est le premier exemple connu de suralimentation de moteur par turbine. L'idée fut reprise en 1930, mais cette fois-ci pour alimenter des chaudières par des groupes turbocompresseurs (chaudières *Velox* de *Brown-Boveri*).

Les chaudières suralimentées par groupes turbocompresseurs ne se sont pas développées pour des raisons à la fois thermodynamiques (rendement moins bon) et économiques (nécessité de brûler un combustible de qualité). Elles ont été utilisées en propulsion navale en raison de leur plus grande capacité.

▼ Figure 105 : cycle mixte combinant une turbine à gaz et une turbine à vapeur, et consistant à utiliser l'énergie thermique contenue dans les gaz d'échappement de la turbine à gaz pour produire de la vapeur. Figure 106 ; cycle mixte de la centrale E. D. F. de Vitry-sur-Seine, tranches 3 et 4 : turbine à gaz et turbine à vapeur peuvent fonctionner séparément ou être couplées dans un cycle mixte.

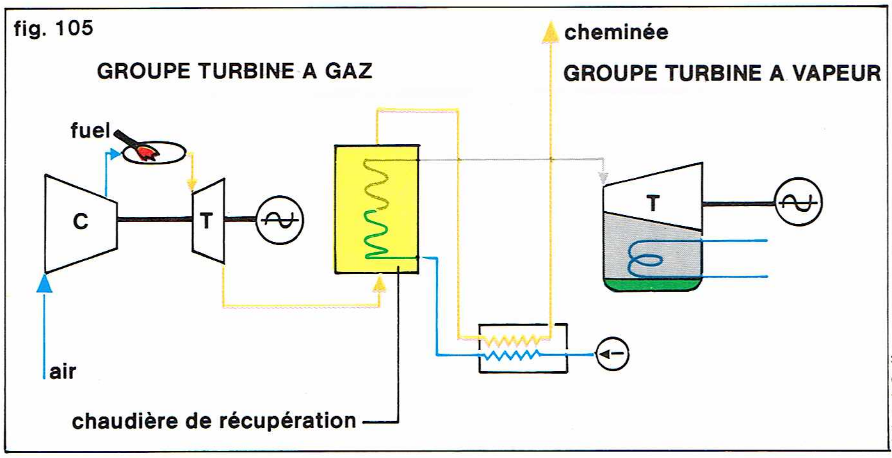

Richard Colin

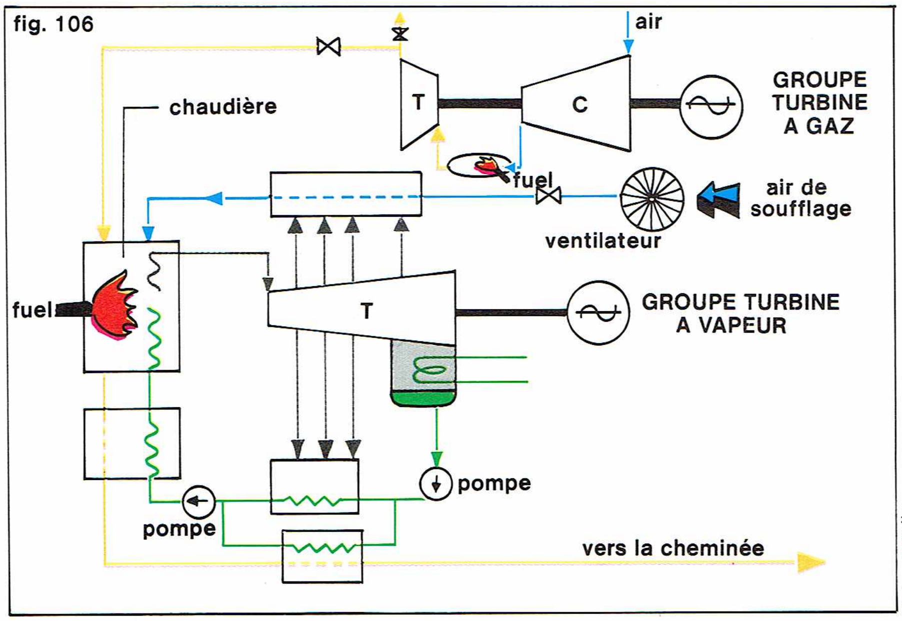

Richard Colin

Mais l'emploi combiné de turbine à vapeur et de turbine à gaz continue à faire l'objet de réalisations. Deux solutions sont fréquentes pour associer une turbine à gaz avec un ensemble chaudière-turbine à vapeur.

La première solution consiste à utiliser l'énergie thermique contenue dans les gaz d'échappement d'une turbine à gaz pour produire de la vapeur. Cette vapeur est ensuite utilisée pour le chauffage de procédés industriels ou pour la production d'énergie électrique (*fig.* 105).

L'autre solution, qui est beaucoup plus répandue aujourd'hui, consiste à placer la turbine à gaz en amont de la chaudière. La turbine à gaz, dont les gaz de combustion contiennent un large excès d'air (environ 80 %), est utilisée comme un ventilateur de soufflage d'une centrale classique. Cette solution a été récemment utilisée en France sur la centrale Émile Huchet des Charbonnages de France et sur les tranches 3 et 4 de la centrale de Vitry d'E. D. F. (*fig.* 106).

Dans la centrale des Charbonnages, trois turbines à gaz (3 × 16 MW) brûlant du gaz de cokerie sont associées à une chaudière brûlant du charbon de basse qualité. La turbine à vapeur a une puissance de 294 MW. Chaque turbine à gaz peut alimenter le foyer de la chaudière ou peut fonctionner indépendamment. Les gaz sortant de la chaudière traversent les réchauffeurs d'eau et les économiseurs.

Dans la centrale de Vitry, une seule turbine de 42 MW fonctionnant au gaz naturel est associée avec une tranche thermique de 250 MW. Turbine et chaudière peuvent fonctionner ensemble ou séparément. L'exploitation de la tranche s'effectue avec la chaudière seule en dehors des heures de pointe. La turbine à gaz n'est donc utilisée que quelques heures par jour. Pour que le rendement de l'installation soit conservé, quand la turbine à gaz n'est pas en service, l'installation fonctionne suivant un cycle un peu particulier dans lequel le réchauffage de l'air, comme celui de l'eau habituellement, se fait par soutirage de vapeur *(cycle Cesas)*.

Ces cycles mixtes permettent d'augmenter la puissance d'une tranche classique en payant à un faible prix la puissance complémentaire, et de disposer d'une rendement légèrement supérieur.

En conclusion, la combinaison d'une turbine à gaz avec une centrale à vapeur apparaît comme une solution intéressante, tant pour son coût d'investissement que pour sa souplesse de fonctionnement. Ce type d'installation se développera très certainement avec le progrès technique des turbines à gaz, d'autant plus qu'on cherchera à assurer la production de l'énergie de pointe par des installations brûlant des combustibles fossiles, la base étant produite par les centrales hydrauliques ou nucléaires.

Conversion électromécanique

Deux phénomènes vont se conjuguer, dans un proche avenir, pour augmenter la consommation d'énergie sous sa forme électrique. Ce sont, d'une part, la poursuite de l'augmentation de la consommation globale d'énergie et, d'autre part, au sein de cette croissance, le rôle grandissant de l'électricité comme source d'énergie primaire.

L'augmentation du niveau de vie et, par voie de conséquence, la croissance de la consommation d'énergie paraissent être en effet un mouvement inéluctable. Qui ne le souhaiterait pour les nombreux pays en voie de développement ? Pour les pays industrialisés, le taux de croissance devrait être moins fort, compte tenu des niveaux déjà atteints, mais il ne faut pas compter sur un renversement de tendance, tant il est vrai qu'une société ne peut pas, sauf sous la contrainte, retourner à une étape antérieure de son développement !

Mais pourquoi l'électricité devrait-elle participer davantage à cette croissance ? A la production, les futures sources d'énergie destinées à suppléer les combustibles fossiles : nucléaire (fission ou fusion) et énergies nouvelles, sont basées pour la plupart sur une conversion conduisant à la production d'électricité. Leur mise en œuvre va donc augmenter la part de cette forme d'énergie à la production. A l'autre bout de la chaîne, les qualités de l'électricité : propreté, distribution facile, transformation et conversion dans les autres formes d'énergie possibles, en font un support d'énergie tout à fait remarquable. Tout nous conduit donc à penser que nous allons vers un monde de plus en plus « électrique ».

Si on considère à présent la conversion électromécanique, il faut remarquer que ce type de conversion se fait dans les deux sens et, presque toujours, avec un bon rendement. Ce sont souvent les mêmes machines qui assurent les deux sens de la conversion. Tout le monde sait que sur certaines lignes ferroviaires de régions montagneuses, les machines des motrices fonctionnent en « moteur » à la montée des rampes et en « générateur » pour faire du freinage à la descente. Dans ce dernier cas, la motrice renvoie de l'énergie électrique sur le réseau.

Si une machine électrique peut théoriquement fonctionner aussi bien en moteur qu'en générateur, dans la pratique les machines sont spécialisées, si on excepte quelques cas particuliers comme celui mentionné ci-dessus. Une machine est donc faite pour fonctionner dans un certain sens de la conversion, et ce n'est que dans des conditions anormales que l'inversion de la conversion, toujours possible, se produit. Les générateurs et les moteurs vont donc se distinguer, non par des différences dans leur théorie ou leur technologie, mais par les conditions mêmes de leur fonction.

Les exigences entre les impératifs de la production d'une part et les besoins de la consommation, d'autre part, ont amorcé très vite dans l'histoire de l'électricité un double mouvement concernant la taille des machines.

D'un côté, pour des raisons économiques, les générateurs ont vu leur taille augmenter de façon régulière. Si l'on excepte les génératrices affectées à des tâches spécifiques et qui ne représentent en production qu'un très faible pourcentage, on peut dire que dans les pays industrialisés, une grande part de l'électricité est produite par un petit nombre d'alternateurs de très forte puissance unitaire dont le maximum est aujourd'hui 1 300 MW, demain 1 500 MW ou plus. Cette tendance ne semble pas devoir s'inverser dans un futur proche ; tout au plus verra-t-on une stabilisation de la taille des machines.

De l'autre côté, en face des quelques alternateurs géants qui seront mis en service chaque année, se présente le monde foisonnant et insolite des moteurs électriques. Dans une gamme de puissances allant de zéro à quelques mégawatts, dotés également d'une large gamme de vitesses, les moteurs électriques sont aujourd'hui partout. Leur vitesse peut être fixe, ajustable ou variable. Ils sont, de plus, interchangeables, étant normalisés en dimensions, types et vitesses. Les plus petits ont envahi notre univers familier et si nous ne les remarquons guère, c'est que la plupart du temps ils fonctionnent sans anicroche.

Ces moteurs qui travaillent à notre place sont donc, suivant une formule souvent employée, des « esclaves mécaniques » à notre disposition. Lorsqu'on nous dit que l'homme d'aujourd'hui dispose de plusieurs dizaines d'esclaves mécaniques, sachons que la plupart d'entre eux sont des moteurs électriques. Ces esclaves ne sont pas des robots anthropomorphes un peu rétifs tels que les futurologues du XIX^{e} siècle les imaginaient. Ce sont des machines dociles aux performances élevées, au fonctionnement sûr, dont la petite taille leur permet de s'intégrer aux appareils qu'ils animent. Ils savent souvent se rendre irremplaçables : qui accepterait aujourd'hui d'utiliser de façon habituelle un phonographe ?

Les moteurs électriques vont donc retenir toute notre attention et, délaissant les générateurs qui font partie du secteur très spécialisé de la production d'énergie électrique, et que peu d'entre nous ont l'occasion d'approcher, nous allons consacrer aux moteurs qui nous entourent ce chapitre sur la conversion électromécanique.

Présentation générale des moteurs électriques

On ne reviendra pas ici sur la théorie du fonctionnement des moteurs électriques. Le lecteur pourra se reporter pour cela au texte *Électrotechnique* du volume II de *Physique*. Nous rappellerons seulement qu'on utilise dans les machines électriques l'action d'une induction magnétique sur un conducteur traversé par un courant. Ce phénomène a deux aspects.

Loi de Laplace

Un conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ d'induction magnétique est soumis à des forces.

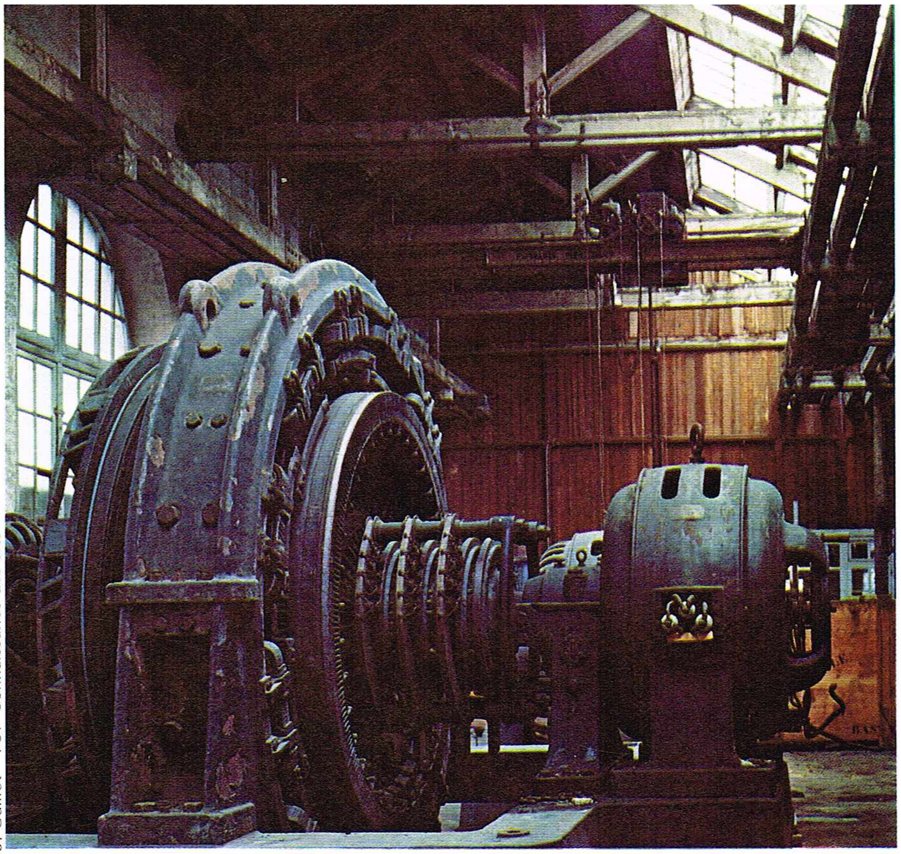

J. Guillot - TOP Connaissance des arts

▲ *Alternateur construit en 1825, exposé dans le hall de montage des usines de Creusot-Loire dont un projet à l'étude prévoit de le transformer en un musée de la sidérurgie du Creusot.*

▼ *La turbine à gaz en service à la centrale E. D. F. de Vitry (tranche 4).*

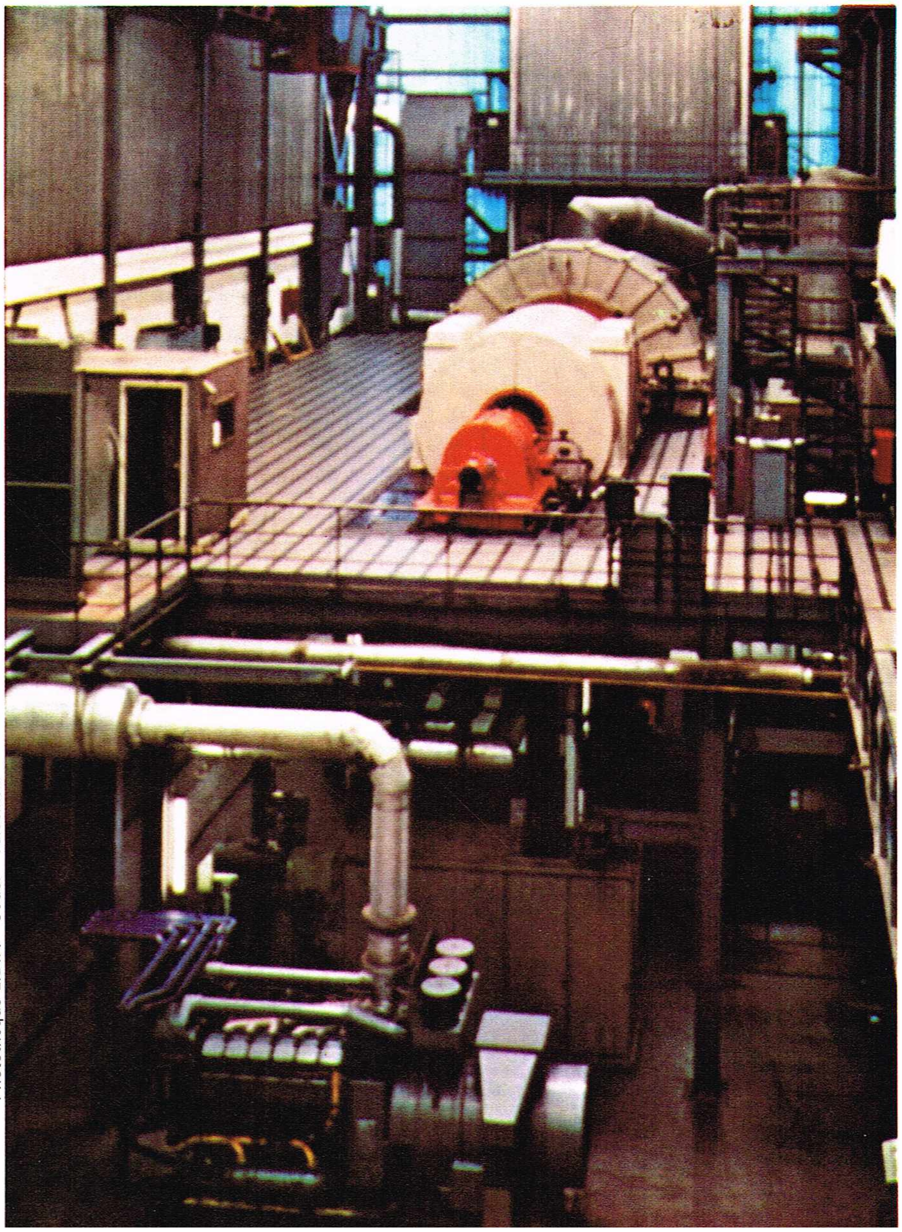

Photothèque E.D.F. - Sodel - Valusinski

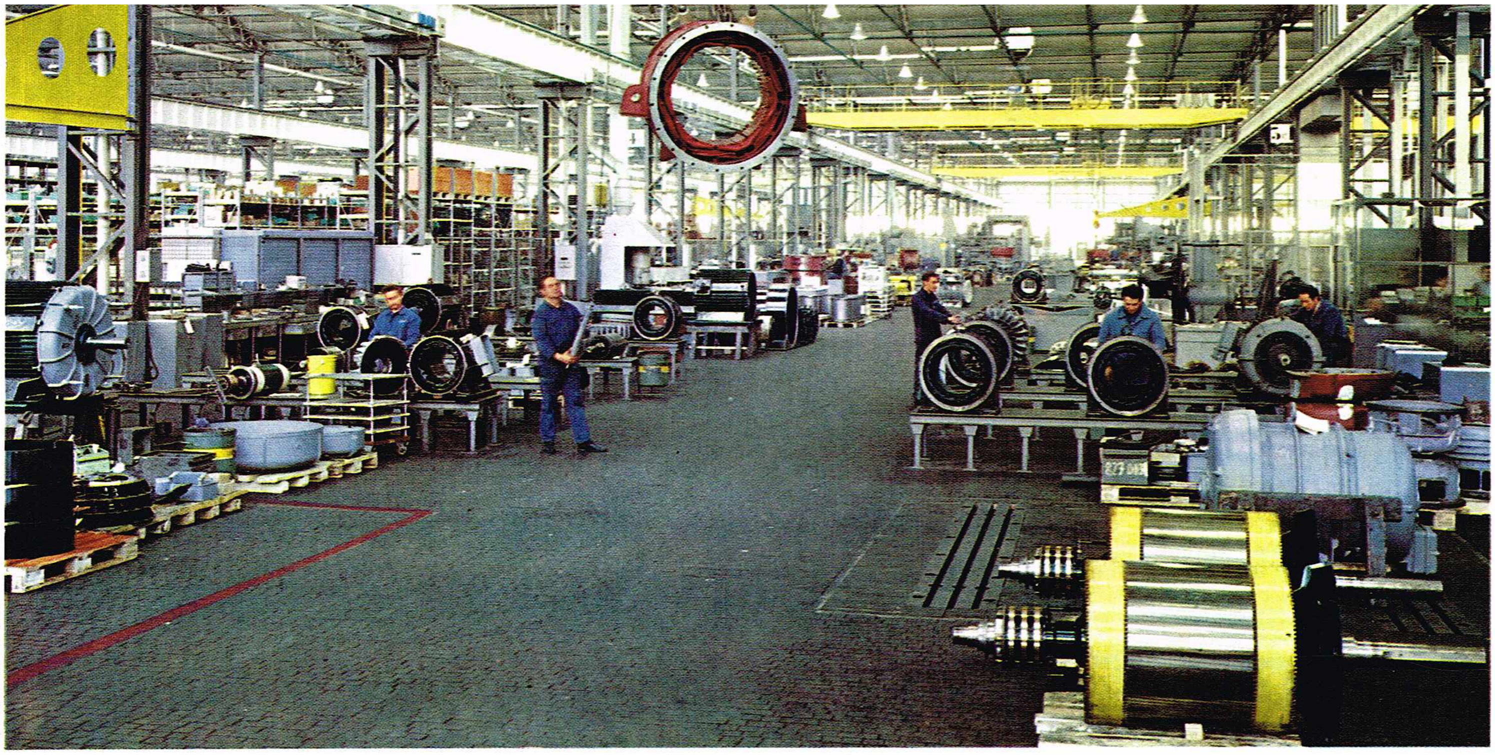

T.I. Brown Boveri

▲ *Usine de fabrication de moteurs électriques. La production et l'utilisation de l'énergie électrique sont deux des facteurs principaux de l'évolution industrielle du XXᵉ siècle et expliquent comment ces machines dociles et aux performances élevées ont su se rendre irremplaçables.*

Loi de Faraday

Une force électromotrice est induite dans un circuit électrique par la variation avec le temps du flux du champ magnétique qui le traverse. Ce flux peut varier, soit par déplacement du circuit électrique, soit par modification du champ lui-même.

Ces deux lois indiquent bien comment se fait la conversion d'énergie électrique en énergie mécanique et inversement. Un courant (énergie électrique) peut produire un déplacement (énergie mécanique) et *vice versa*.

La *figure* 107 illustre la loi de Laplace qui nous intéresse plus particulièrement, puisque c'est celle qui décrit la conversion électromécanique effectuée par les moteurs électriques. L'expression de la force exprimée en newtons est rappelée ci-dessous :

$$f = ilB$$

où i est le courant en ampères, B le champ d'induction magnétique en webers/m², et l la longueur en mètres. L'illustration montre les directions relatives du courant, du champ et de la force. Cette dernière change de sens si on inverse le sens du champ ou du courant. Sa direction reste inchangée si on inverse champ et courant à la fois.

Rappelons également que la puissance mécanique fournie par ce moteur élémentaire est égale au produit du courant i par la variation du flux $d\psi$ vue par l'élément du circuit :

$$P = i\frac{d\psi}{dt}$$

$\frac{d\psi}{dt}$ est aussi l'expression, au signe près, de la force électromotrice qui serait induite dans le circuit selon la loi de Faraday :

$$\varepsilon = -\frac{d\psi}{dt}$$

$\varepsilon' = \frac{d\psi}{dt}$ est appelé force électromotrice et on a :

$$P = \varepsilon' i$$

▼ *Figure 107 : positions relatives du champ, du courant et de la force illustrant la loi de Laplace.*

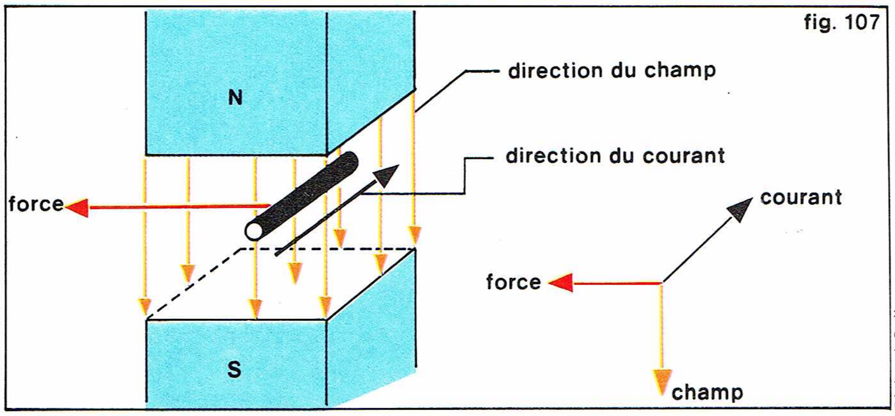

Richard Colin

Ce produit $\varepsilon' i$ représente la puissance électrique convertie et restituée par le moteur, aux pertes près, en puissance mécanique : $P_m = \varepsilon' i$ — pertes

Notons enfin que la tension aux bornes d'un moteur est égale à la somme de la force contre-électromotrice et de la chute ohmique entraînée par le passage du courant.

$$V = \varepsilon' + Ri$$

Description sommaire d'un moteur électrique

Un moteur utilisant les principes de la conversion électromécanique peut se présenter sous la forme d'une machine tournante ou d'une machine linéaire (*fig.* 108).

Les machines tournantes, qui sont de loin les plus répandues, comportent deux armatures cylindriques coaxiales, mobiles l'une par rapport à l'autre. Considérées d'un point de vue électrique, ces deux armatures, qui comportent des circuits ou enroulements, sont appelées :
— *inducteur*, lorsqu'elles créent le champ magnétique ;
— *induit*, lorsqu'elles sont le siège de forces contre-électromotrices induites par ce champ.

Si l'on se place, à présent, sur un plan mécanique, on peut distinguer :
— le *stator* qui est fixe ;
— le *rotor* qui est mobile, porté par des paliers.

Le bon fonctionnement électrique exige que les deux parties du moteur possèdent des circuits magnétiques avec lesquels les circuits électriques vont se trouver en interaction. Il est donc fait appel à des matériaux ferromagnétiques et, pour cette raison, le jeu entre rotor et stator, nécessaire au bon fonctionnement mécanique de la machine, s'appelle *entrefer*. Chacune de ces deux parties mécaniques peut jouer le rôle d'inducteur ou d'induit selon la machine considérée. Sur les moteurs, le stator joue généralement le rôle d'inducteur et le rotor le rôle d'induit.

Le moteur linéaire comprend de la même façon un inducteur et un induit. Les termes de stator et rotor des machines tournantes ne conviennent plus ici et ne devraient pas être utilisés.

L'alimentation des moteurs peut se faire de différentes façons. Comme on vient de voir qu'un moteur a deux parties, l'alimentation peut être :
— simple : elle intéresse alors le stator ;
— double : elle intéresse le stator et le rotor.

L'alimentation du rotor, partie mobile de la machine, peut se faire de deux façons :
— par bague,
— par collecteur.

Classification des moteurs électriques

On peut classer les moteurs électriques de multiples façons et en particulier suivant les critères suivants.

Puissance

La valeur d'un cheval-vapeur (736 W) sépare ainsi les gros moteurs des petits moteurs. Pour ces derniers,

on parle aussi de moteurs fractionnaires (fraction de cheval), suivant en ceci l'habitude anglo-saxonne. Ces moteurs sont de loin les plus nombreux. Ils sont fabriqués en très grandes quantités (plus de 25 millions d'unités en 1974) par des procédés fortement automatisés.

Fonction
Dans ce cas, on donne au moteur des appellations qui indiquent la destination ou les conditions d'utilisation du moteur : c'est ainsi que l'on parle de moteur-couple, de moteur-frein, de servomoteur, etc.

Configuration électrique
Les moteurs sont ici classés en fonction de critères électriques. On trouvera la classification la plus usuelle sur la *figure* 109. Différents critères sont utilisés : disposition des enroulements (moteurs à courant continu), type de construction du rotor pour les moteurs à induction, ou astuce de démarrage.

Protection mécanique et réfrigération
On peut parler ainsi de construction étanche, à ventilation extérieure, semi-ouverte, ouverte, etc., ou de réfrigération par air, par eau, etc.

Possibilité de variation de la vitesse
C'est un critère qui intéresse l'utilisateur. La vitesse des moteurs peut être constante, variable ou réglable. Un moteur peut avoir aussi plusieurs vitesses.

Conditions de montage
On considère ici la façon dont est fixé le moteur sur ses éléments de supportage : position verticale ou horizontale, attache par pattes, par brides, etc.

Ces différentes façons de classer les moteurs électriques font apparaître la grande variété possible de ces appareils puisqu'il existe de toute évidence un très grand nombre de façons de combiner ces critères entre eux. En pratique, pour des raisons économiques, les moteurs sont normalisés, ce qui évite la multiplication anarchique des types de ces appareils.

Caractéristiques

Choisir un moteur pour une application donnée, c'est trouver le moteur qui satisfait sans exagération à toutes les exigences cinématiques (vitesse et accélération) du récepteur, sans que pour autant ce moteur dépasse ses limites admissibles de couple et de température.

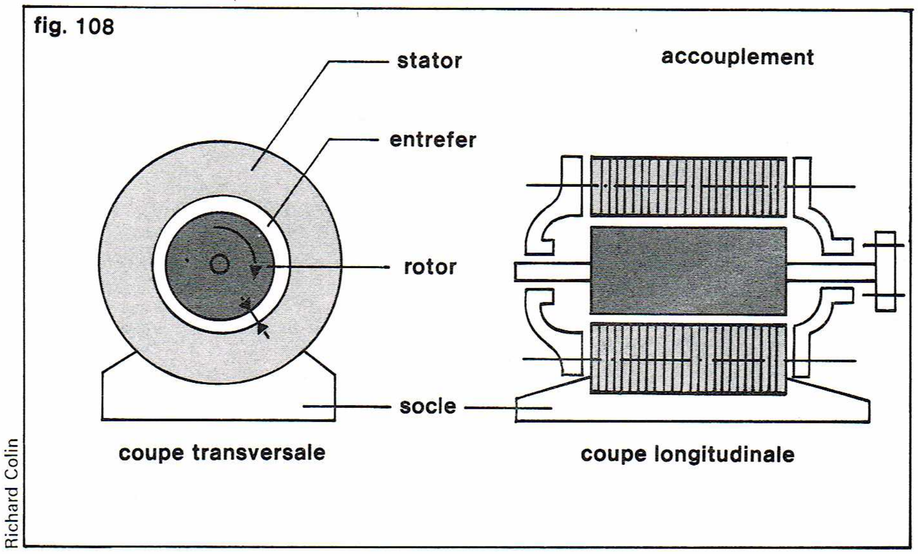

▲ *Figure 108 : schéma de principe d'un moteur électrique rotatif.*

Couple
Deux valeurs sont à considérer : le couple de démarrage et le couple à la marche nominale. Durant la phase de démarrage, le couple « moteur » doit toujours rester supérieur au couple résistant du récepteur, sinon le démarrage ne peut pas s'effectuer. L'accélération de l'ensemble moteur-récepteur est d'autant plus grande que la différence entre couple de démarrage et couple résistant est importante.

On conçoit que la variation du couple en regard de la vitesse revête une grande importance. La relation entre ces deux grandeurs apparaît immédiatement sur un diagramme (N, C) comme ceux représentés sur la *figure* 110. Les électriciens ont l'habitude d'utiliser comme références pour décrire une courbe caractéristique (N, C) celles des moteurs à courant continu. C'est ainsi que l'on parle des courbes suivantes.

— *Type « dérivation » (ou shunt).* La variation de vitesse en fonction de la charge est faible. Ce type de caractéristique convient bien si l'on souhaite une vitesse constante alors que la charge varie.

— *Type « série ».* Le couple est très élevé à vitesse nulle ; il décroît quand la vitesse augmente. Le moteur

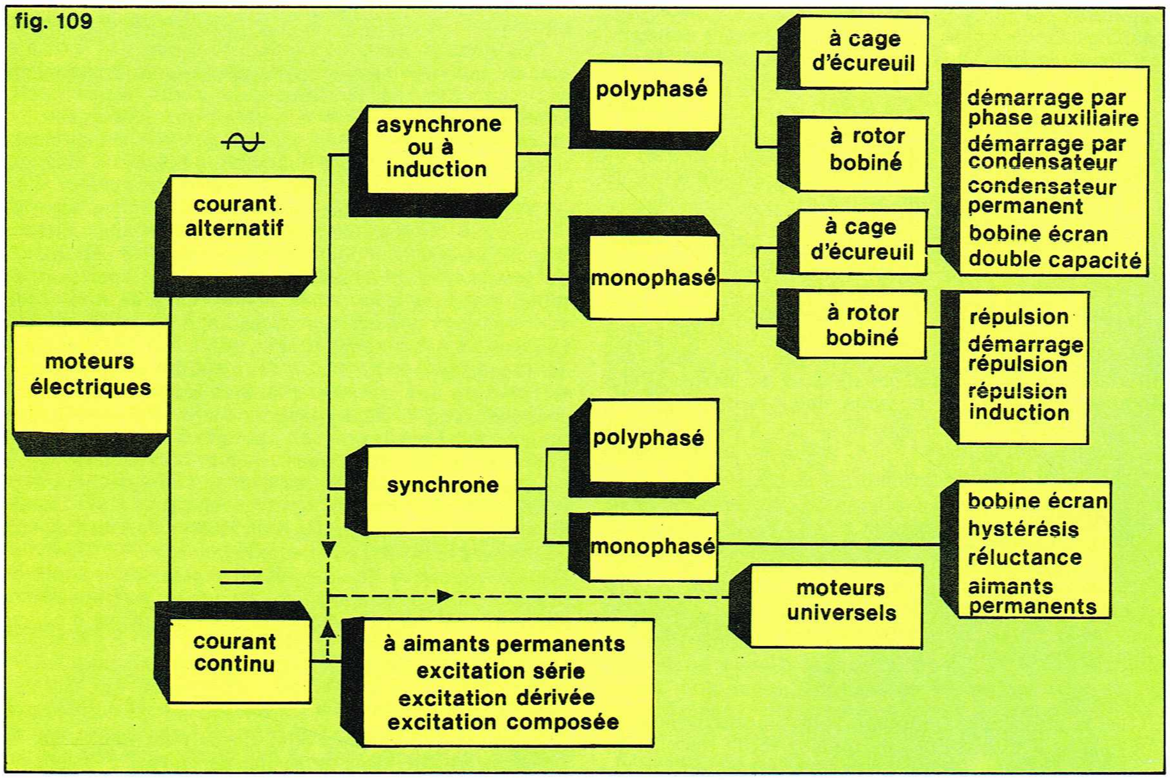

◄ *Figure 109 : classification des différents moteurs électriques.*

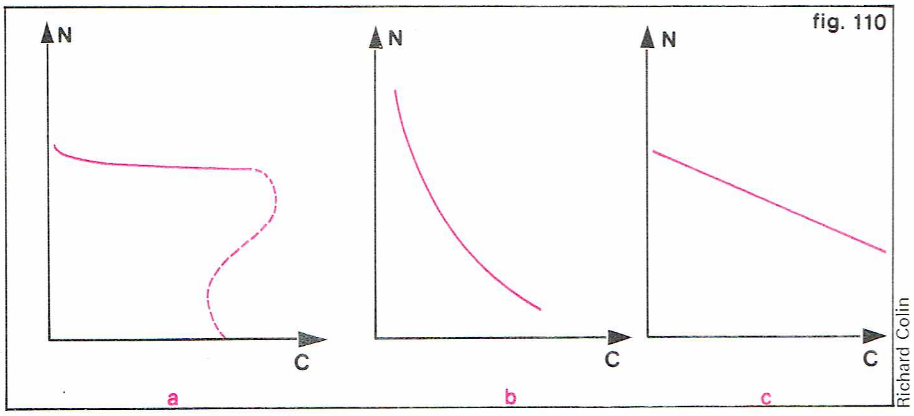

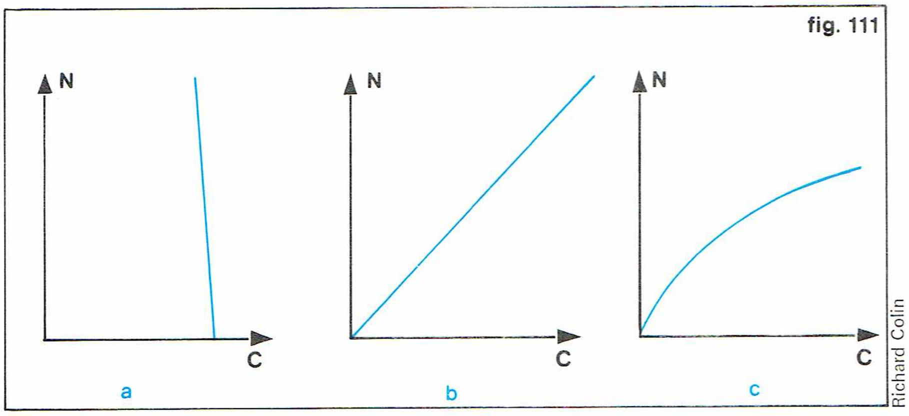

▲ *Figure 110; différents types de courbes caractéristiques* **(N, C)** *de moteurs électriques :*
a) *type dérivation (shunt);*
b) *type série;*
c) *type composé ou compound.*
Figure 111; différents types de courbes caractéristiques **(N, C)** *de machines réceptrices :*
a) C *constant;*
b) C *proportionnel à* **N;**
c) C *proportionnel à* **N^2.**

peut s'emballer à charge nulle. Ce type de caractéristique convient bien aux applications du type « traction » : besoin d'un fort couple au démarrage, charge croissante avec la vitesse.

— *Type « composé » (ou compound).* Cette caractéristique diffère du type shunt par une plus grande variation de la vitesse avec le couple.

De la même façon, on peut caractériser les courbes (N, C) des machines réceptrices (voir *figure* 111). Les relations les plus habituelles sont les suivantes.

— *Couple constant.* Dans ce cas, la puissance est proportionnelle à la vitesse. Il existe de nombreuses machines fonctionnant à couple sensiblement constant. Les appareils élévateurs (palans, treuils, monte-charge, ascenseurs, etc.) en sont de bons exemples.

— *Couple proportionnel à la vitesse.* Ce cas, le moins fréquent, se rencontre par exemple sur les machines à cylindres chauffants destinées à lustrer ou à sécher les étoffes et les papiers (calandres). La puissance croît alors comme le carré de la vitesse.

— *Couple proportionnel au carré de la vitesse.* Cette relation se rencontre sur la plupart des turbomachines : pompes centrifuges par exemple. La puissance est alors proportionnelle au cube de la vitesse.

Il faut noter qu'il s'agit ici de courbes types représentant des caractéristiques de machines, aussi bien motrices que réceptrices, fonctionnant sans autre régulation que celle introduite par les phénomènes naturels qui régissent leur fonctionnement. Il est possible, bien évidemment, de fabriquer toutes autres sortes de caractéristiques par des régulations appropriées. Cette pratique, généralement coûteuse, est réservée à des cas très particuliers.

Accélération

Elle conditionne directement le temps de démarrage du moteur. Ce temps est d'autant plus grand que le couple d'accélération (couple moteur moins couple récepteur) est petit et que l'inertie du rotor est grande. L'obtention d'un faible temps de démarrage est primordiale dans certaines applications.

Puissance

C'est la puissance que fournit le moteur pour entraîner son récepteur aux conditions nominales de marche. La puissance, le couple et la vitesse sont liés par la relation :

$$P = C \times N$$

La marche du moteur est supposée régulière et continue sur de longues périodes de temps. Ce n'est pas toujours le cas et le cycle de travail d'une machine peut être très irrégulier. Dans ce cas, la présence d'un volant sur l'arbre moteur permet d'absorber les pics de la charge, le moteur se contentant, entre les intervalles de travail, de restaurer l'énergie perdue du volant. Le cycle de travail peut, dans certains cas, imposer au moteur de fréquents démarrages. L'énergie nécessaire pour démarrer étant en général très supérieure à celle de la marche normale pour une même période de temps, de fréquentes opérations de démarrage vont donc entraîner des températures anormales dans ce cas, et ces conditions particulières de marche sont donc devenues le critère principal de dimensionnement du moteur.

Facteur de charge

Le facteur de charge est un pourcentage qui indique la marge de fonctionnement du moteur au-dessus de sa puissance nominale, marge dans laquelle il peut fonctionner sans échauffement dangereux. Le facteur de charge peut autoriser un fonctionnement de durée indéfinie en surcharge, et il ne traduit alors que le surdimensionnement du moteur; il peut être assorti d'une durée limitée de fonctionnement. Il faut toujours garder à l'esprit que la puissance d'un moteur n'est limitée que par la température de ses enroulements.

Un moteur calculé avec un facteur de charge peut donc :

— fonctionner avec une marge de sécurité en marche normale;

— être surchargé occasionnellement;

— accommoder une erreur dans la définition de sa puissance nominale;

— permettre une augmentation de puissance ultérieure lors d'une modification de l'installation.

On voit donc que le choix de la puissance d'un moteur électrique se présente comme un compromis entre le coût de la machine et ses performances, et exige une analyse détaillée des conditions de fonctionnement du moteur.

Matériaux

On a vu qu'une machine électrique se composait de deux types de circuit :

— le circuit inducteur qui produit le champ magnétique (ce circuit n'existe pas sur les petits moteurs utilisant un aimant permanent);

— le circuit induit qui subit l'action du champ magnétique.

Ces circuits sont constitués soit par des bobines placées sur des pôles, soit par des barres logées dans des encoches. Ils constituent la partie sensible des moteurs. Pour les réaliser, on utilise des conducteurs en cuivre (éventuellement en aluminium). Ces conducteurs dont la section est limitée pour réduire l'effet des courants de Foucault parasites, sont toujours recouverts d'un isolant. Pour des petits conducteurs, comme les fils, l'isolement est produit par une ou plusieurs couches d'émail. Pour les conducteurs de section plus importante, on ajoute à la protection de l'émail une épaisseur de ruban imprégné d'un vernis isolant. La soie et le coton sont utilisés à cet usage pour les applications courantes. Les enroulements terminés sont, après leur mise en place sur la machine, enduits d'un compound destiné à assurer la cohésion des bobinages et à en parfaire l'isolement.

La vie d'un moteur fonctionnant à une température donnée est fonction de son aptitude à résister à l'humidité, à la tension et au vieillissement des isolants.

La principale cause de destruction d'une machine reste l'altération des isolants par la chaleur. L'expérience montre que le temps de vie d'un isolant est une fonction exponentielle de la température. La norme UTE C-51-100 (Union technique de l'électricité) classe les isolants en fonction de la température maximale qu'ils peuvent supporter pendant plusieurs dizaines de milliers d'heures sans altération de leur pouvoir isolant :

Classe :	Y	A	E	B	F	H	C
θ °C max. :	90	105	120	130	155	180	180

La *figure* 112 illustre l'effet de la température sur la durée de vie des isolants pour trois classes d'isolement.

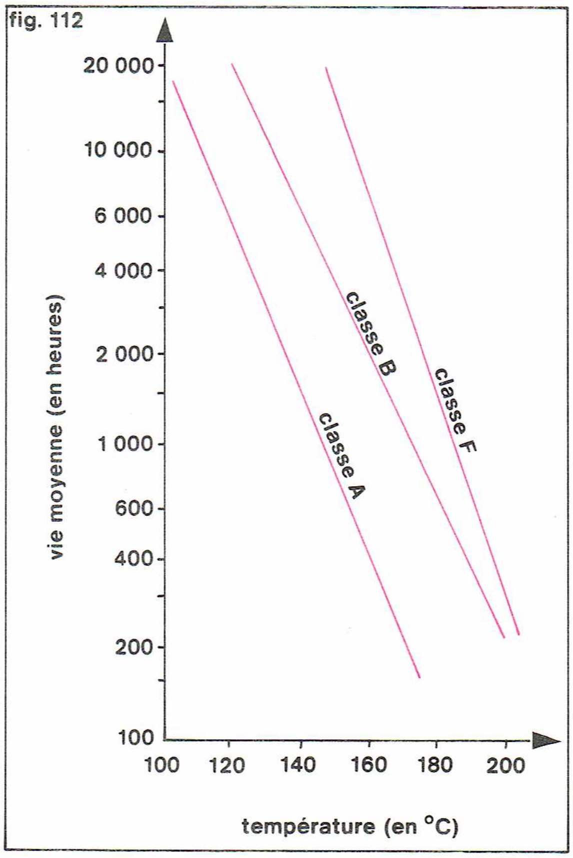

◄ *Figure 112 : vie moyenne d'un isolant en fonction de la température.*

On peut noter qu'en moyenne une réduction de la température de 10 °C se traduit par un doublement de la durée de vie.

Si un moteur est choisi conformément aux normes actuelles, sa durée de vie est approximativement de 35 000 h dans des conditions normales de fonctionnement. Pour une machine travaillant souvent à charge partielle ou de façon discontinue la durée de vie pratique est d'environ 20 ans.

Il existe de nombreux matériaux pouvant être utilisés pour l'isolement des bobinages. Les moteurs de classe C utilisent principalement les tissus en fibre de verre imprégnés de silicone.

Moteurs à courant alternatif

Les moteurs à courant alternatif peuvent être divisés en deux grandes familles : les moteurs asynchrones ou moteurs à induction et les moteurs synchrones.

Le moteur à induction est de loin le plus répandu des moteurs à courant alternatif. Ce n'est en fait qu'un transformateur dont l'enroulement primaire serait fixe et l'enroulement secondaire tournant. L'enroulement primaire porté par le stator est alimenté par le réseau ; dans le secondaire constitué par le rotor, circulent des courants induits. Ces courants placés dans le flux généré par les enroulements du stator créent le couple moteur. Une seule partie du moteur, le stator, est donc reliée au réseau, l'autre fonctionnant avec des courants induits. C'est de cette constatation que ce type de moteur tire son nom de moteur à induction.

Le moteur synchrone constitue une autre famille de moteurs qui diffèrent notablement des premiers par leur constitution et leurs caractéristiques. La vitesse de ces moteurs est constante par définition puisqu'elle est inhérente à la pulsation du courant alternatif qui l'alimente. C'est pour cette raison que ces moteurs sont appelés « synchrones ».

Moteurs à induction ou asynchrones

Ces moteurs sont donc constitués par une partie fixe (stator) qui porte dans des encoches de son circuit magnétique un enroulement (polyphasé ou monophasé), et une partie mobile (rotor) dont les enroulements sont fermés sur eux-mêmes lors du fonctionnement. De tels moteurs fonctionnent nécessairement à une vitesse inférieure à celle du synchronisme et sont appelés pour cette raison « asynchrones ».

Ce moteur utilise l'action d'un champ tournant sur les courants qu'il induit dans une masse métallique. Ce principe est illustré *figure* 113 par un aimant permanent et un disque métallique alignés suivant un même axe AA'.

Par sa rotation, l'aimant crée un champ tournant qui induit dans le disque des courants de Foucault. Les forces dues à l'action du champ sur les courants induits s'opposent à la cause qui leur donne naissance (loi de Lenz) c'est-à-dire au mouvement du champ par rapport au disque ce qui entraîne ce dernier en rotation dans le sens du champ.

Les vitesses du champ et du disque doivent être différentes pour qu'il y ait couple ce qui donne au moteur son qualificatif d'asynchrone.

Sur un moteur, le champ tournant est réalisé électriquement par des enroulements statiques.

Les moteurs à induction sont les plus couramment utilisés en raison de leurs nombreuses qualités : construction simple et économique, rendement satisfaisant, et vitesse sensiblement constante quel que soit le couple. Les moteurs à alimentation triphasée se font à toutes les puissances et sont presque systématiquement utilisés dès lors qu'une telle alimentation est disponible. Les moteurs monophasés sont en général des moteurs de faible puissance (quelques watts à quelque 100 watts). Leur puissance peut aller néanmoins jusqu'à 20 kW.

Moteurs à induction polyphasés

Ces moteurs sont de deux types qui se distinguent par la construction du rotor : rotor à cage d'écureuil ou rotor bobiné. Le stator est identique dans les deux types de moteurs ainsi que dans le moteur synchrone. L'alimentation du stator peut se faire en courant di- ou triphasé.

On ne reviendra pas ici sur le fonctionnement de ce type de moteur qui a été longuement décrit dans le texte *Électrotechnique*. On rappellera seulement que le fonctionnement d'une machine asynchrone est caractérisé par son glissement :

$$g = \frac{N_s - N}{N_s}$$

avec N_s, vitesse du champ tournant en t/mn

$$N_s = \frac{60\,f}{p}$$

f = fréquence du réseau, p = nombre de paires de pôles et N = vitesse en t/mn du rotor.

La vitesse du moteur peut donc s'exprimer ainsi :

$$N = \frac{60\,f}{p}\,(1 - g)$$

* *Moteurs à cage d'écureuil* (*fig.* 114)

C'est sans doute le type le plus simple et le plus robuste de tous les moteurs électriques. Le rotor est constitué par des barres (cuivre, bronze ou aluminium) placées dans des encoches sur la périphérie du rotor, rappelant la cage d'écureuil dont ce type de moteur tire son nom. Ces barres sont réunies à chaque extrémité du rotor par des bagues de court-circuit. L'ensemble barres et bagues peut être obtenu directement par moulage sous pression d'aluminium dans le rotor. On démontre qu'une telle cage se comporte comme un enroulement polyphasé fermé sur lui-même. Le nombre de pôles d'une cage est toujours égal au nombre de pôles créés par l'enroulement du stator.

Le démarrage peut s'effectuer directement par mise sous pleine tension stator. Pour des moteurs puissants, ce type de démarrage se traduit par un appel de courant important qui peut ne pas être admissible pour le réseau. Les constructeurs ont amélioré les conditions de ce type de moteur dit à simple cage, soit par la double cage, soit par le moteur à barres profondes. Ces deux dispositifs permettent de réduire très nettement le courant de démarrage tout en augmentant le couple correspondant (*fig.* 115).

Une autre solution consiste à démarrer le moteur sous tension réduite. Une solution très employée est celle du démarrage « *étoile-triangle* ». Dans ce cas, les enroulements statoriques, dont toutes les bornes sont sorties, sont d'abord couplés en étoile, puis en triangle. On peut démarrer aussi à l'aide d'un autotransformateur. Dans ce cas, le démarrage peut être très progressif si plusieurs prises

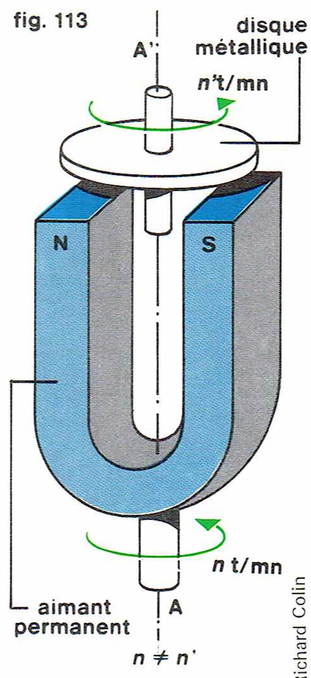

▲ *Figure 113 : principe du moteur à induction.*

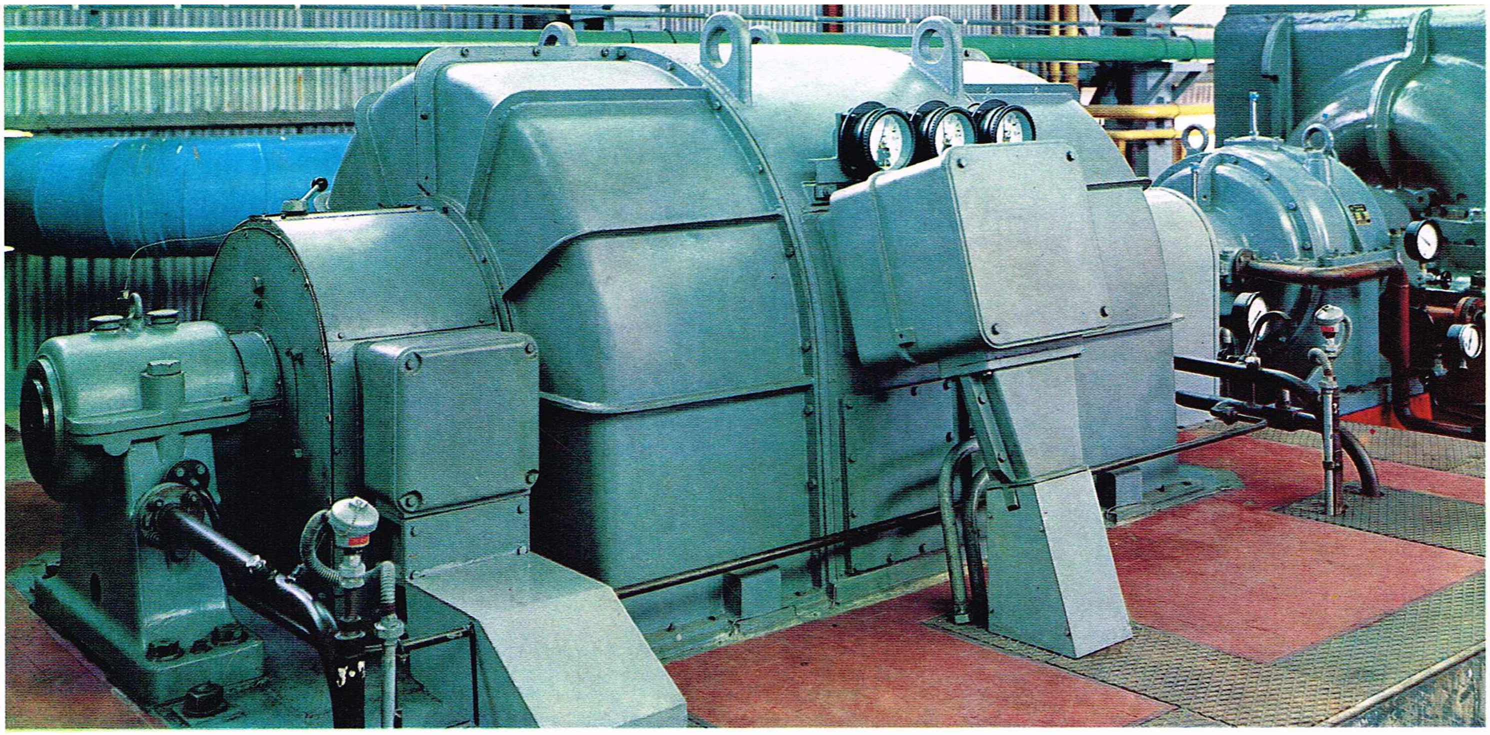

T.I. Brown Boveri

▲ *En haut, un moteur asynchrone triphasé.*

▸ *Figure 115 : principe de démarrage des moteurs à induction à cage.*

▼ *Figure 114 : les différentes pièces d'un moteur à rotor à cage; ici, moteur* CUIRACEM *série* L, *types 160 à 250.*

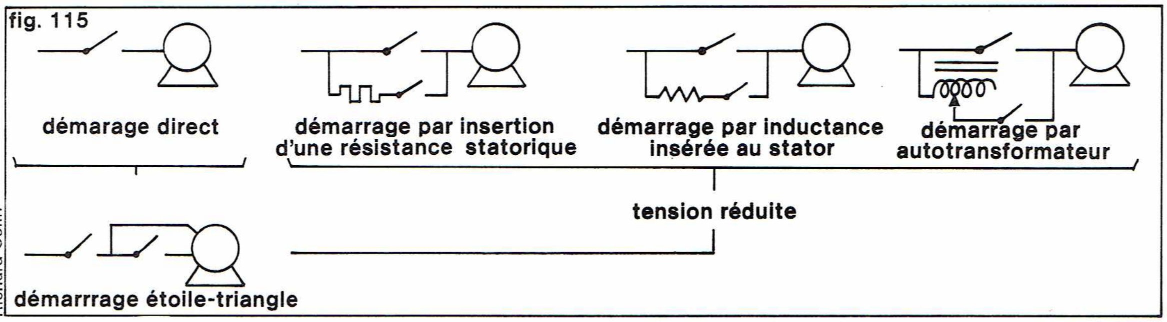

Richard Colin

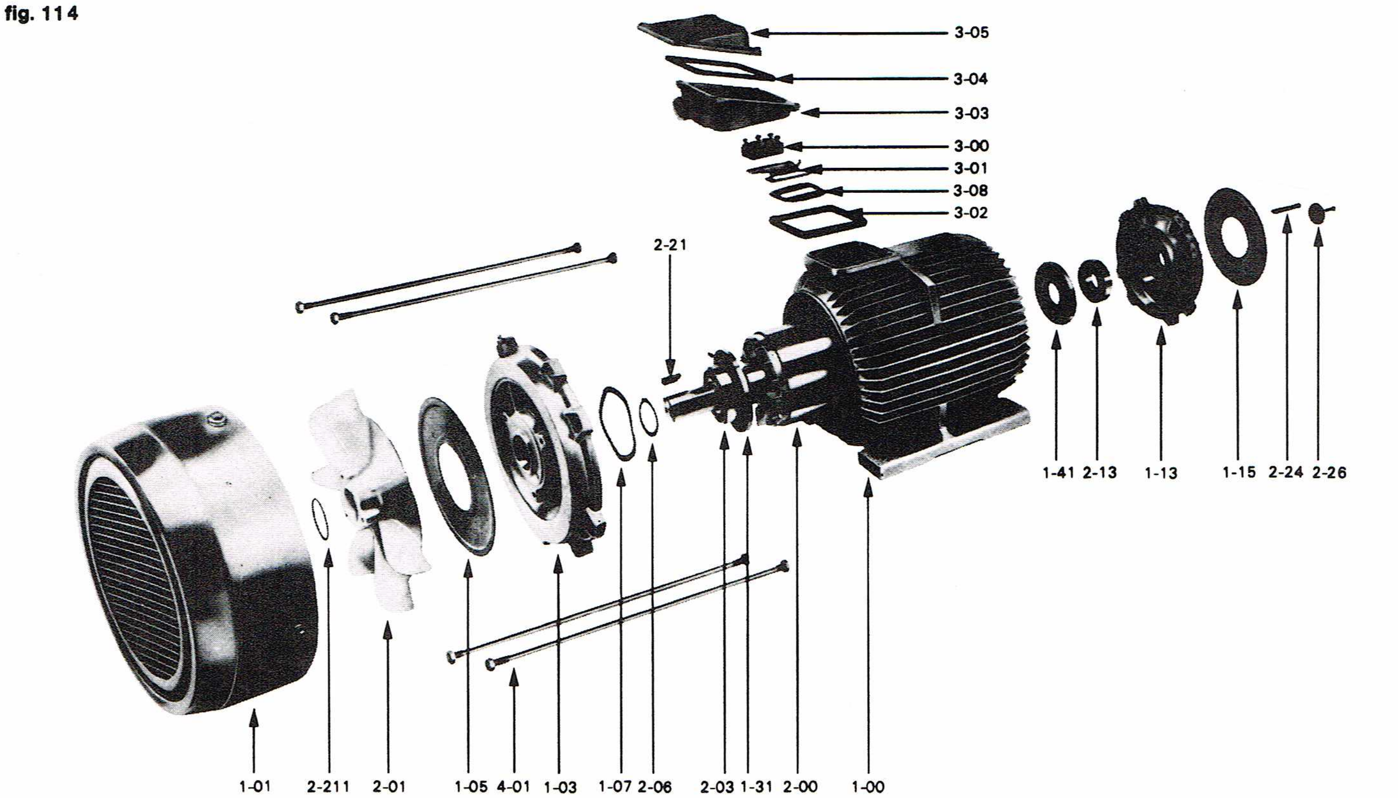

NOMENCLATURE DES PIÈCES

1-00. Stator bobiné (carcasse)
1-01. Enveloppe de ventilateur
1-03. Flasque-palier, côté opposé commande
1-05. Disque de fermeture côté opposé commande (éventuel)
1-07. Rondelle élastique
1-13. Flasque-palier côté commande
1-15. Disque de fermeture côté commande (éventuel)
1-31. Couvercle intérieur (éventuel)
1-41. Couvercle intérieur (éventuel)

2-00. Rotor
2-01. Ventilateur
2-03. Roulement côté opposé commande
2-06. Circlips (éventuel)
2-13. Roulement côté commande
2-21. Clavette de ventilateur
2-211. Jonc (éventuel)
2-24. Clavette de bout d'arbre
2-26. Vis et rondelle de bout d'arbre

3-00. Plaque de bornes
3-01. Support de plaque de bornes
3-02. Joint de fond de boîte à bornes
3-03. Fond de boîte à bornes
3-04. Joint de couvercle
3-05. Couvercle de boîte à bornes
3-08. Plaque d'obturation
4-01. Tiges de fixation des flasques

fig. 116

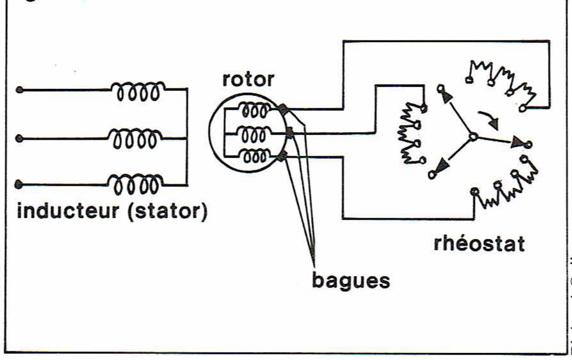

◀ ***Figure 116 : représentation schématique d'un moteur à rotor bobiné.***

sont prévues. Le démarrage sous tension réduite peut enfin être effectué par insertion de résistances ou d'inductances dans le circuit des enroulements du stator.

* *Moteurs à rotor bobiné*

Ce type de rotor comporte un enroulement généralement triphasé connecté à trois bagues portées par l'arbre. Ces dernières sont branchées à un rhéostat approprié soit pour démarrer le moteur, soit pour permettre un réglage de sa vitesse (voir *fig.* 116).

Le démarrage est effectué avec le maximum de résistances en ligne avec les circuits du rotor. Les résistances sont ensuite séquentiellement éliminées jusqu'à ce que le moteur atteigne sa vitesse normale avec la mise en court-circuit de ses enroulements. De cette façon, un moteur à rotor bobiné peut développer un couple élevé avec un courant de démarrage réduit. La mise en court-circuit des enroulements peut être combinée avec le relevage des balais, de façon à leur éviter une usure inutile pendant la marche.

Les résistances extérieures peuvent être utilisées pour faire varier la vitesse. Celle-ci peut être réduite jusqu'à 50 % de sa valeur nominale. Ce procédé n'est pas très satisfaisant dans la mesure où il entraîne une perte sensible de rendement. D'autre part, les vitesses obtenues sur les différents plots du rhéostat ne sont pas indépendantes de la charge, ce qui peut être gênant dans certains cas.

Ce type de moteur est utilisé lorsqu'un couple élevé au démarrage est requis alors qu'un fort courant de démarrage n'est pas admissible. Il convient bien pour les applications où un démarrage progressif est désiré.

Moteurs à induction monophasés

Ces moteurs ont des performances bien inférieures aux moteurs à induction polyphasés. Leur emploi s'impose dès que la seule alimentation électrique dont on dispose est monophasée. Ce sont en général des moteurs de faible puissance que l'on rencontre dans les secteurs domestiques et industriels. Ces moteurs peuvent avoir plusieurs vitesses : 2, 3 ou 4 vitesses sont les solutions les plus répandues. L'obtention de plusieurs vitesses se fait soit en prévoyant plusieurs polarités indépendantes, soit par modification du branchement des enroulements à l'extérieur du moteur.

* *Moteurs à cage d'écureuil*

Le rendement de ces moteurs est faible, ainsi que leur facteur de puissance. Ils ont un autre inconvénient qui est celui de ne pas pouvoir démarrer sans un dispositif auxiliaire. En effet, le courant monophasé induit bien un champ tournant capable de faire tourner le moteur, mais incapable d'induire, rotor à l'arrêt, les courants d'induit susceptibles de produire le couple de démarrage. Il faut donc munir ces moteurs d'un dispositif auxiliaire de démarrage, ce qui permet de distinguer les différents types de moteurs suivants.

• *Moteur à démarrage par phase auxiliaire* (*fig.* 117)

Ce moteur est une machine à vitesse pratiquement constante, dotée de deux enroulements inducteurs : un enroulement principal et un enroulement auxiliaire ou enroulement de démarrage à 90° du premier. Cet enroulement auxiliaire crée un déphasage qui induit un couple permettant le démarrage et l'accélération du moteur. Quand la vitesse normale est atteinte, le circuit de l'enroulement auxiliaire est ouvert par un dispositif centrifuge porté par l'arbre, l'interrupteur étant disposé à l'intérieur du moteur.

Le couple de démarrage de ce type de moteur n'est pas très élevé.

• *Moteur à démarrage par condensateur* (*fig.* 118)

Ce moteur est très similaire au précédent. La seule différence est qu'il comporte dans le circuit de l'enroulement de démarrage une capacité. Cette disposition permet à ce moteur d'avoir un meilleur couple de démarrage et une plus forte accélération que le moteur muni d'une simple phase auxiliaire. Après élimination du circuit de démarrage, la caractéristique (C, N) de ce moteur est évidemment identique à celle du moteur précédent. Alors que sans condensateur la puissance des moteurs ne dépasse guère 200 W, on fait des moteurs à démarrage par condensateur jusqu'à des puissances de l'ordre de 5 kW.

• *Moteur à condensateur permanent* (*fig.* 119)

Ce moteur a un enroulement auxiliaire avec en série une capacité toujours alimentée. Cette disposition donne au moteur un bon facteur de puissance ; le couple de démarrage en revanche n'est pas très élevé. Son avantage est d'éviter le contact centrifuge, ce qui diminue sa taille.

• *Moteur à double capacité* (*fig.* 120)

Ces moteurs ont un enroulement auxiliaire permanent associé à un condensateur doublé par un deuxième condensateur pouvant être mis hors circuit par un contact centrifuge. Au démarrage, les deux condensa-

▼ ***Figure 117 : moteur à induction monophasé à démarrage par phase auxiliaire.***
Figure 118 : moteur à induction monophasé à démarrage par condensateur.
Figure 119 : moteur à induction monophasé à condensateur permanent.
Figure 120 : moteur à induction monophasé à double capacité.

fig. 117

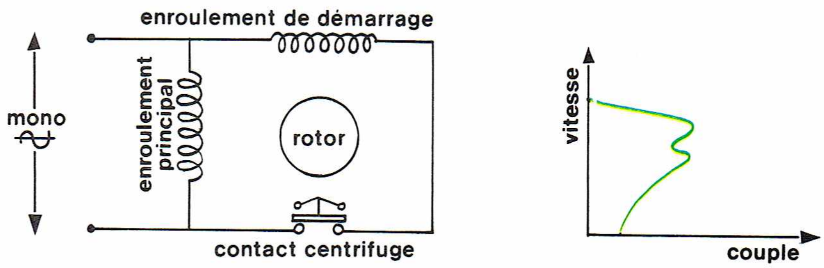

fig 118

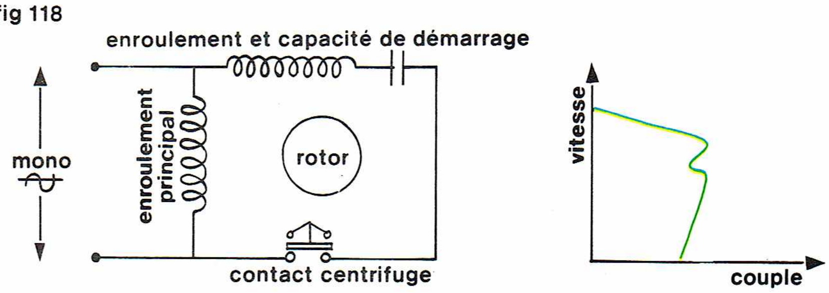

fig. 119

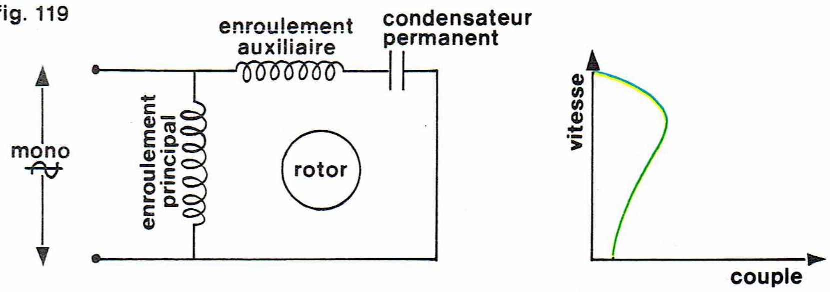

fig. 120

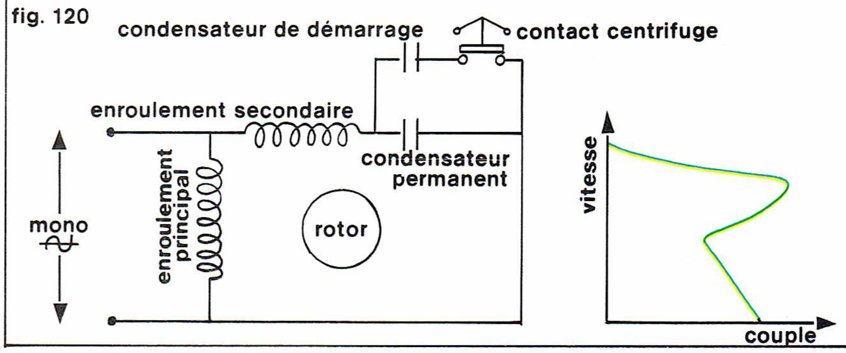

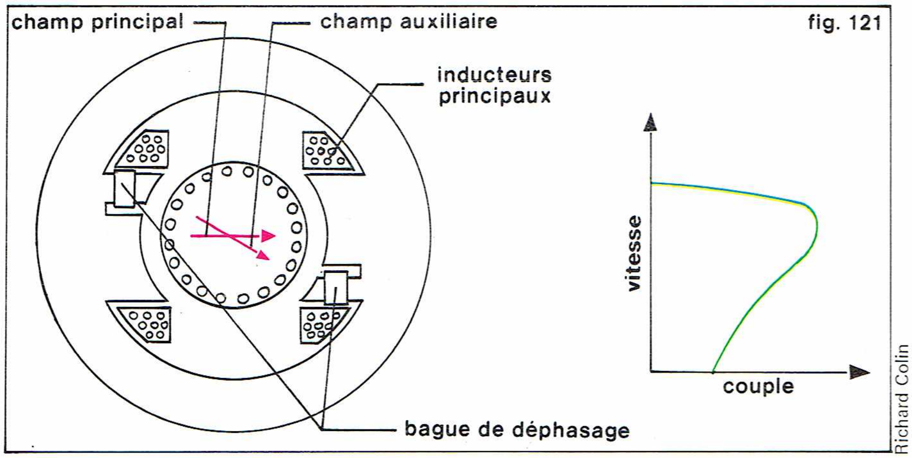

▲ *Figure 121 : schéma de principe et caractéristique (C, N) d'un moteur à induction monophasé du type bobine-écran.*

▼ *Figure 122 : moteur à induction monophasé à répulsion. Figure 123 : moteur à induction monophasé à démarrage répulsion. Figure 124 : moteur à induction monophasé à répulsion-induction.*

teurs sont en service ; à la vitesse nominale, le condensateur isolable est mis hors circuit, laissant en service l'enroulement auxiliaire et son condensateur.

Ce type de moteur a un couple de démarrage élevé et un bon facteur de puissance. C'est probablement le meilleur moteur à induction monophasé.

● *Moteur à bobine-écran* (*fig.* 121)

Ce moteur, appelé aussi moteur à bague de déphasage, se présente de la façon suivante. C'est un moteur à cage d'écureuil dans lequel la phase unique, semblable à celle des moteurs universels qui seront examinés plus loin, a ses deux pôles munis de deux bagues en court-circuit dont le but est de déphaser une partie du champ, créant ainsi un pseudo-champ déphasé qui est susceptible de faire tourner le moteur. Le couple obtenu est inférieur à celui d'un moteur à phase auxiliaire, mais il est suffisant pour de nombreuses applications.

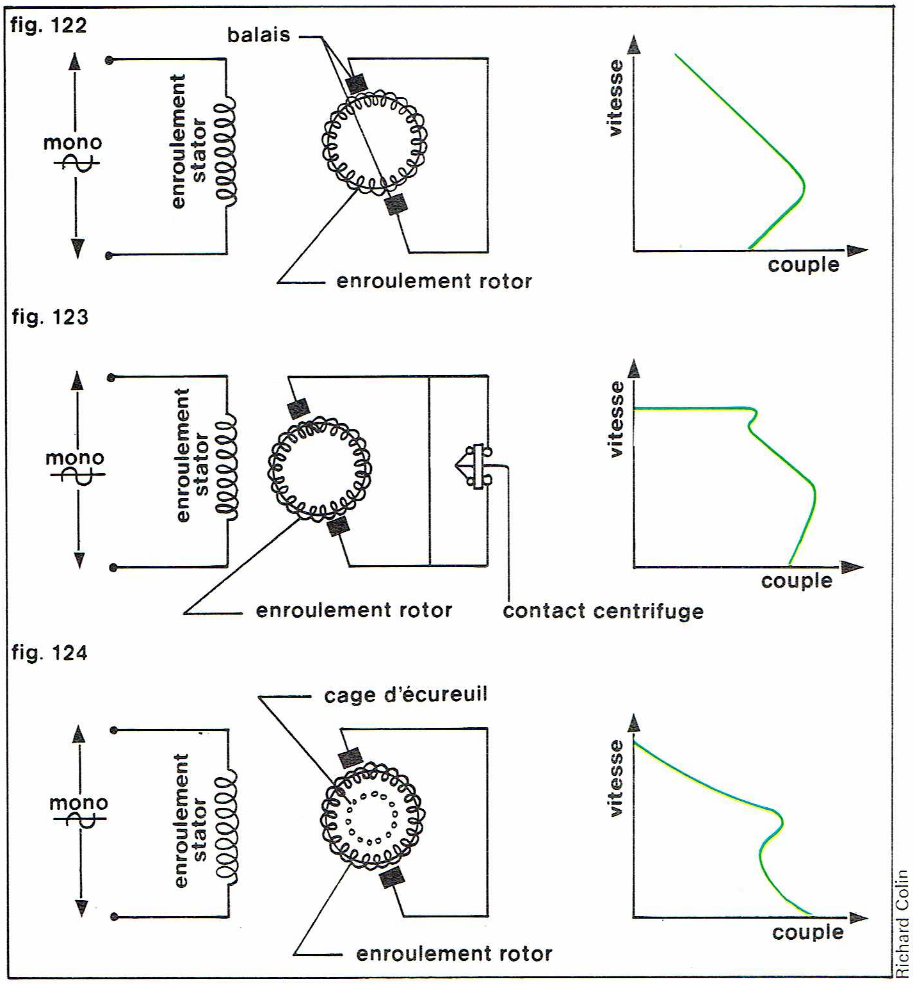

Ce moteur est donc de construction beaucoup plus simple que les moteurs examinés précédemment et se trouve par conséquent meilleur marché. Les performances sont faibles, en particulier le rendement et le facteur de puissance. Il se fait en plusieurs vitesses : 4 et 6 pôles. Une ventilation du moteur est bien souvent nécessaire.

* *Moteurs à rotor bobiné*

Ces moteurs monophasés à rotor bobiné comportent un collecteur et se présentent comme des moteurs à courant continu. L'alimentation se faisant en courant alternatif, l'inducteur comme l'induit doivent être feuilletés de façon à réduire les pertes par courant de Foucault. Ce type de moteur donne naissance à la famille des moteurs à répulsion qui font l'objet de ce présent paragraphe ainsi qu'à la famille des moteurs universels qui seront décrits plus loin.

● *Moteur à répulsion* (*fig.* 122)

On trouve sur le collecteur deux lignes de balais à 180° réunies en court-circuit et décalées par rapport à la ligne des pôles. Lorsque le moteur est alimenté, les enroulements inducteur et induit se comportent comme des électro-aimants tournants, dont les pôles de même nom se repoussent, d'où ce phénomène de répulsion qui fait tourner l'induit et qui a donné son nom au moteur.

● *Moteur à démarrage répulsion* (*fig.* 123)

Ce moteur est de type à répulsion, mais il possède un dispositif centrifuge qui court-circuite toutes les lames du collecteur une fois que le moteur a atteint une vitesse égale à 75 % de sa vitesse nominale. Le moteur fonctionne alors comme un moteur à induction monophasé à cage.

Ces moteurs à démarrage répulsion sont très utilisés dans l'industrie.

● *Moteurs à répulsion-induction* (*fig.* 124)

Ce moteur est également un moteur à répulsion mais son rotor comporte une cage d'écureuil sous son enroulement d'induit. La cage stabilise la vitesse et évite le dispositif centrifuge. Pour le dosage des effets de l'enroulement d'induit et de la cage d'écureuil, on peut ajuster les caractéristiques (CN) du moteur aux exigences du récepteur. Ce moteur enfin peut être utilisé si un couple élevé au démarrage est requis.

Moteurs synchrones

Les moteurs synchrones sont par définition des moteurs à vitesse constante. Ils fonctionnent en synchronisme avec la fréquence du réseau qui les alimente. Comme pour les moteurs à induction, leur vitesse est déterminée par le nombre de paires de pôles ; cette vitesse est donc toujours une fraction, mais une fraction exacte puisqu'il n'y a pas de glissement, de la fréquence du réseau.

Le principe du moteur synchrone peut être illustré (*fig.* 125) par un aimant permanent et une aiguille aimantée alignés suivant le même axe AA'.

Lorsque l'aimant tourne, il crée un « champ tournant » qui entraîne l'aiguille aimantée à la *même vitesse* de rotation.

Sur un moteur, le champ tournant est réalisé électriquement par des enroulements statiques. Au démarrage, il faut lancer l'aiguille à la vitesse du champ pour qu'il y ait « accrochage ». Si le couple résistant devient trop fort, le moteur décroche.

La gamme de puissances de ces moteurs est très large. Elle va des petits moteurs sans excitation aux moteurs de forte puissance à excitation par courant continu. Les gros moteurs sont utilisés dans les applications où l'on recherche la vitesse constante d'une manière précise : groupes changeurs de fréquence par exemple. Le rendement de ces moteurs est excellent, d'où l'intérêt de les utiliser dans les fortes puissances.

Les moteurs sans excitation se contentent d'une alimentation simple (stator) et se présentent de ce point de vue comme les moteurs à induction.

Différents principes sont utilisés pour obtenir le synchronisme : on distingue principalement les moteurs à réluctance, les moteurs à hystérésis et les moteurs à aimants permanents. Ces moteurs peuvent fonctionner en polyphasé et en monophasé, mais ils sont généralement de faible puissance et fonctionnent en monophasé.

Les moteurs à excitation par courant continu sont des moteurs de puissance allant de quelques kilowatts à 20 MW environ. La source de courant continu nécessaire à l'excitation peut être indépendante du moteur ou constituée par une génératrice directement attelée à l'arbre de

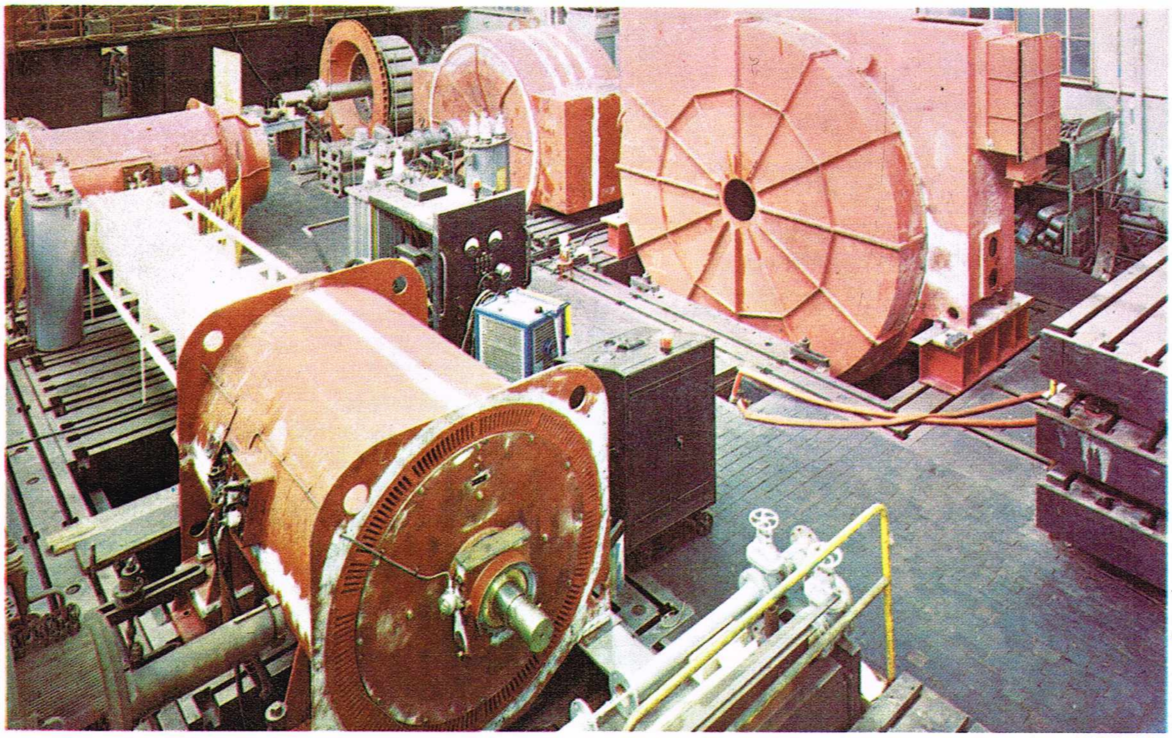

T.I. Brown Boveri

◀ *Moteurs asynchrones et moteurs synchrones en cours de construction. A gauche, deux moteurs asynchrones pour la commande des ventilateurs. A droite, le premier est un moteur asynchrone pour la commande d'un compresseur alternatif; le second est un moteur synchrone pour la commande d'un compresseur alternatif; le troisième est le rotor du moteur précédent.*

la machine. Cette génératrice peut délivrer directement le courant continu nécessaire. On peut utiliser également un alternateur et des redresseurs tournants, ce qui évite les balais, toujours source d'ennuis. Ces moteurs sont en général triphasés.

Un moteur synchrone mono- ou triphasé ne peut démarrer tout seul, car il a besoin d'être lancé jusqu'à une vitesse proche de celle du synchronisme. Pendant le démarrage et avant synchronisation, il y a donc glissement du rotor. Pour les petits moteurs fonctionnant en monophasé, on a recours aux mêmes procédés que ceux utilisés sur les moteurs à induction (phase auxiliaire, démarrage par capacité, bobine-écran, etc.). Sur les moteurs triphasés, on munit le rotor d'une sorte de cage d'écureuil dans les épanouissements polaires, ce qui permet un démarrage en asynchrone.

Moteurs synchrones polyphasés

Ces moteurs sont en général des moteurs de forte puissance qui tournent à vitesse élevée (500 à 1 500 t/mn). Leur excitation est faite à partir de courant continu. Beaucoup d'entre eux sont munis d'une excitation sans balais par alternateur et redresseurs tournants.

On a déjà noté que le moteur synchrone pose un problème de démarrage. Bien que le moteur à excitation par courant continu possède une cage de démarrage, le couple peu élevé que celle-ci produit exige que des précautions soient prises. La séquence de démarrage doit comporter les étapes suivantes :

— fermeture des enroulements du rotor sur une résistance de démarrage;
— mise sous tension totale ou réduite du stator;
— excitation du rotor à la vitesse de synchronisation dans le même temps qu'on ouvre le court-circuit.

La fermeture des inducteurs sur une résistance de démarrage a pour but de limiter la tension induite entre les bagues, qui pourrait atteindre plusieurs millions de volts, rotor ouvert, et détruire les inducteurs.

La mise sous tension du stator peut être directe, soit sur l'ensemble des enroulements, soit sur une partie seulement dans un premier temps. Cette méthode est évidemment très brutale; elle se traduit par un appel important de courant sur le réseau et entraîne des contraintes mécaniques sur les pièces tournantes. Le démarrage peut être corrigé par amélioration de la cage : double cage ou encoche profonde.

Le démarrage sous tension réduite convient mieux aux moteurs de forte puissance. Les différentes méthodes utilisées sont l'insertion d'une résistance ou d'une inductance en série avec le stator ou l'emploi d'un autotransformateur.

Les différentes méthodes de mise sous tension du stator au démarrage sont données sur la *fig.* 126. On constatera qu'elles ne diffèrent guère des méthodes utilisées pour les moteurs à cage d'écureuil.

Il existe aussi des moteurs synchrones polyphasés du type à réluctance dans la gamme de puissances inférieures à 20 kW. Ce type de moteur beaucoup plus utilisé en monophasé va être décrit dans le paragraphe suivant.

Moteurs synchrones monophasés

Ces moteurs ont seulement une alimentation simple sur le stator; ils n'ont pas d'excitation extérieure.

* *Moteurs à réluctance* (*fig.* 127)

Ces moteurs sont des moteurs à cage d'écureuil mais leur rotor, au lieu d'être lisse, c'est-à-dire à entrefer constant, présente des pôles saillants dont la réluctance est minimale par rapport aux intervalles où l'entrefer est plus important. L'espace entre les dents peut être comblé par de l'aluminium; ainsi le rotor reste lisse et les barres d'aluminium constituent la cage de démarrage.

▼ *Figure 125 : principe du moteur synchrone.*

Richard Colin

fig. 125

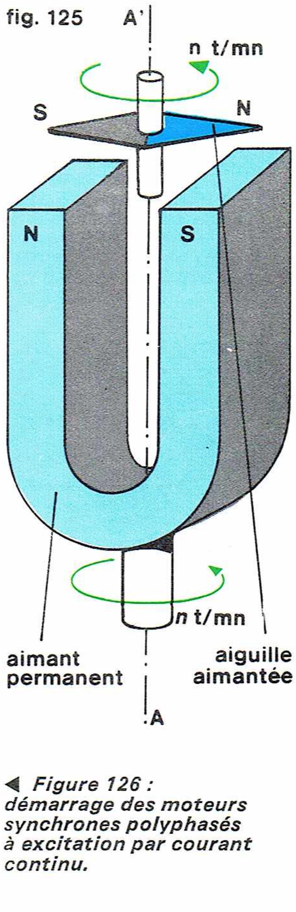

fig. 126

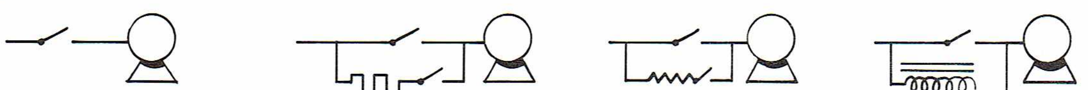

Richard Colin

◀ *Figure 126 : démarrage des moteurs synchrones polyphasés à excitation par courant continu.*

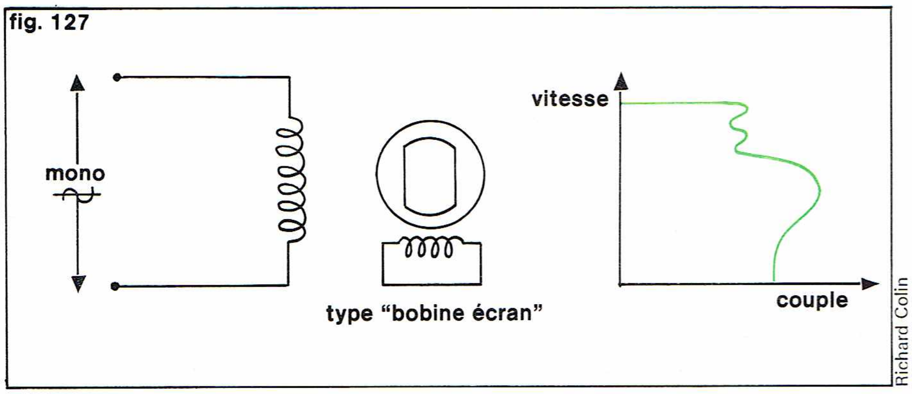

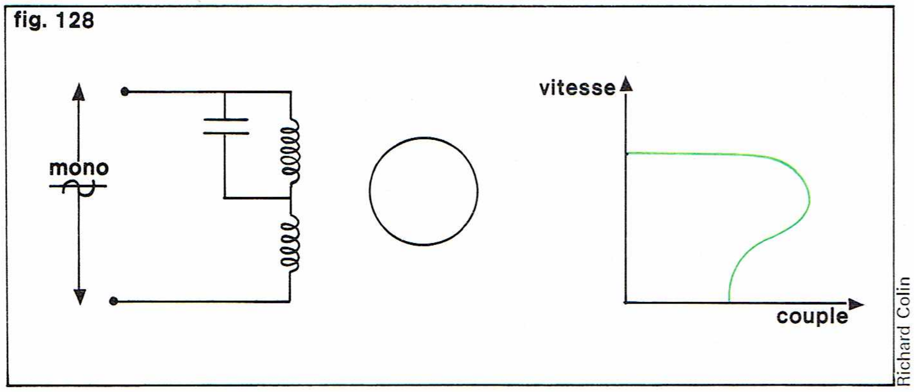

▲ ***Figure 127 :* moteur synchrone monophasé à réluctance :** ***Figure 128 :* moteur synchrone monophasé à hystérésis.**

Le démarrage en monophasé s'effectue à l'aide des mêmes artifices que ceux employés pour les moteurs asynchrones monophasés (phase auxiliaire, condensateur, bobine-écran, etc.). Ces moteurs sont également en triphasé jusqu'à des puissances de l'ordre de 75 kW.

Ces moteurs ont un rendement et un facteur de puissance inférieurs à ceux des moteurs synchrones à excitation par courant continu et même à ceux des moteurs asynchrones. Mais leur qualité est d'être bon marché, simples et tout à fait adaptés aux applications où l'inertie du récepteur est faible, car il leur faut au démarrage atteindre la vitesse du synchronisme.

* *Moteurs à hystérésis* (*fig.* 128)

Le stator est semblable à celui d'un moteur à induction : il produit un champ tournant. Le rotor en revanche se présente, à la place des barres et des tôles feuilletées constituant une cage d'écureuil, comme un cylindre massif d'un matériau magnétique utilisé pour la fabrication des aimants. Ce moteur démarre du fait des pertes par hystérésis induites dans le rotor par le champ tournant. Au synchronisme, il s'accroche par aimantation de même polarité que le champ inducteur.

Contrairement au moteur à réluctance dont le couple moteur est ondulé à basse fréquence de par son principe même (glissement sur une largeur de dents), le moteur à hystérésis ne vibre pas. Pour cette raison, il est plus utilisé que le moteur à réluctance.

▼ ***Figure 129 :* moteur synchrone monophasé à aimant permanent.**

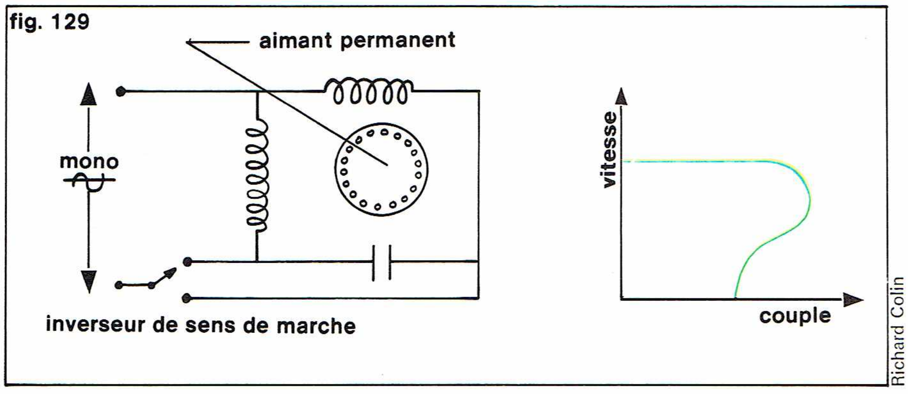

On peut monter des rotors à hystérésis sur la plupart des moteurs asynchrones monophasés, en particulier sur le moteur à bobine-écran. De tous les moteurs à hystérésis c'est le type le plus utilisé. On le rencontre sur tous les appareils de mesure de temps.

Ce type de moteur est habituellement monophasé ; il est quelquefois construit en polyphasé.

* *Moteur à aimants permanents* (*fig.* 129)

Il s'agit ici encore d'un moteur qui est muni d'une cage d'écureuil servant au démarrage, mais le rotor comporte en plus des aimants permanents qui constituent des pôles fixes. En fonctionnement, ces pôles s'accrochent sur le champ tournant.

Ces moteurs se développent en raison de leurs performances intéressantes tant sur le rendement que sur le facteur de puissance.

Moteurs universels

Le moteur universel est un moteur qui fonctionne indifféremment en courant alternatif ou en courant continu. Ses performances, dans les deux cas, sont sensiblement équivalentes. Il se présente comme un moteur à courant continu de type « série ». C'est donc un moteur à collecteur mais il se distingue du moteur série classique à alimentation continue par des détails constructifs. Les inducteurs, soumis à un champ alternatif, doivent être réalisés en tôles feuilletées, d'une part, et en nombre de spires de l'induit limité, d'autre part. Un moteur à courant continu peut fonctionner en alternatif mais avec un très mauvais rendement. Ainsi modifié, le moteur universel fonctionne convenablement sur les deux tensions. La vitesse pour une même tension est généralement plus forte en continu qu'en alternatif.

Le réglage de la vitesse d'un moteur universel est facile à réaliser puisqu'il est sensible aux variations de tension. Les moyens les plus classiques pour faire varier la tension peuvent donc être utilisés. Ils sont présentés sur la *figure* 130. Le réglage électronique est très utilisé, car il permet de conserver un fort couple moteur à faible vitesse, ce qui n'est pas le cas des autres systèmes de réglage.

Un des avantages du moteur universel sur les moteurs alternatifs à induction est de pouvoir fonctionner à des vitesses considérables, très supérieures à celle du synchronisme. Cela lui permet d'avoir sur ces autres moteurs une puissance massique très supérieure. Ce moteur peut supporter également des conditions de charge difficiles : à-coups et surcharges.

C'est donc un moteur doté de nombreuses qualités : couple de démarrage élevé, vitesse variable, puissance spécifique élevée, fonctionnement à fréquence variable, qui lui donneraient l'avantage sur les autres moteurs alternatifs si son temps de vie n'était pas limité par son collecteur. Les balais doivent être remplacés périodiquement. Ce type de moteur est réalisé dans une gamme de puissances allant de quelques watts à 1 500 kW. Il est surtout réalisé en petite puissance, et son domaine de prédilection est celui de l'électroménager où le fonctionnement est intermittent.

Moteurs à courant continu

Les moteurs à courant continu sont adoptés dans de nombreuses applications industrielles en raison de la facilité de réglage de vitesse qu'ils présentent. Ils sont préférés aux moteurs à courant alternatif dont le réglage de la vitesse est également possible, mais dans des conditions de coûts nettement plus élevées. Les moteurs peuvent fonctionner de façon continue dans une plage de vitesses allant de 1 à 8. Il est de plus possible de les faire fonctionner pour de courtes périodes à des vitesses très faibles.

Les moteurs à courant continu sont très appréciés également du fait de la possibilité d'adapter facilement leur courbe de caractéristique de couple, en fonction de la vitesse, aux exigences du récepteur, aussi bien en marche moteur qu'en marche en générateur puisque ce sont des machines parfaitement réversibles.

Ces machines sont capables de supporter des surcharges importantes par rapport à leurs caractéristiques nominales. Il est possible de freiner électriquement ces moteurs en récupérant même l'électricité produite. Il est possible de les stopper en un temps très bref, ce qui évite l'installation d'un dispositif mécanique de freinage.

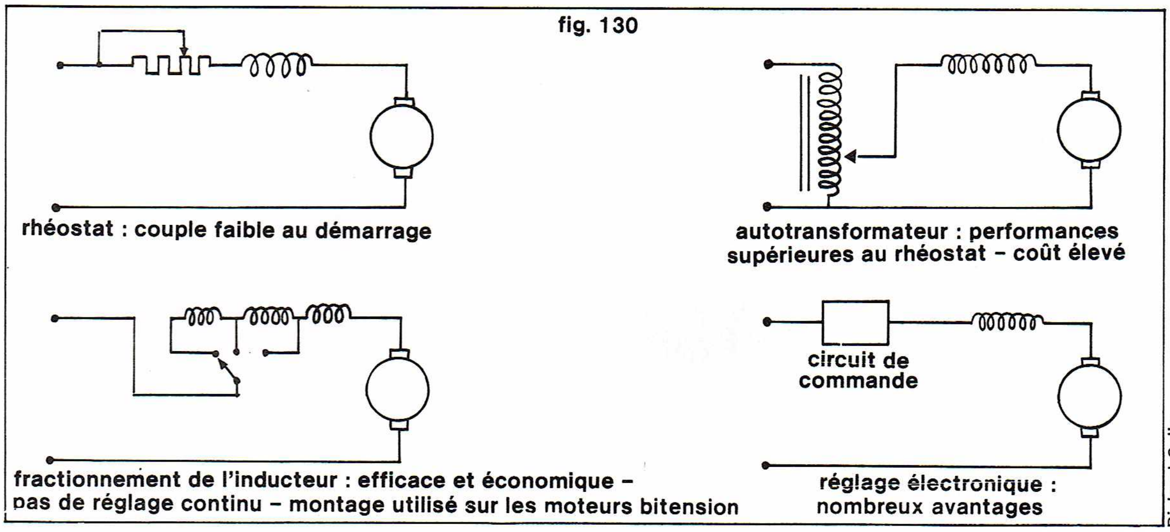

◀ *Figure 130 : réglage de la vitesse des moteurs universels.*

Les moteurs à courant continu sont fabriqués dans une large gamme de puissances : moins d'un watt à plusieurs centaines de kW. Les tensions d'alimentation sont très variables selon les utilisations : 6 V à 1 000 V ou plus. Leur alimentation se fait sans difficulté à partir des réseaux de courant alternatif depuis l'apparition des semi-conducteurs au silicium (diodes et thyristors). Leur emploi s'impose dès lors qu'il est nécessaire de disposer de vitesses variables.

Réglage de la vitesse

Les moteurs, dont les inducteurs sont bobinés, sont classés habituellement d'après leur mode d'excitation :
— excitation indépendante ou dérivation (shunt);
— excitation série;
— excitation composée (compound).

Il faut ajouter à ces moteurs les machines à aimants permanents ainsi que celles sans collecteur. Ces derniers types de moteurs n'existent que pour des puissances très faibles inférieures au cheval.

Le réglage de la vitesse peut s'obtenir de deux façons, la combinaison des deux pouvant aussi s'utiliser. On a vu en *Électrotechnique* que les grandeurs mécaniques (couple et vitesse) et les grandeurs électriques (tension U et intensité I) étaient liées par les relations suivantes :

(1) $$N = \frac{E}{kn\Phi} \quad \text{avec} \quad E = U - RI$$

(2) $$C = 60\,\frac{nk}{2\pi}\,\Phi I$$

avec E force électromotrice, *n* nombre de conducteurs de l'induit, Φ flux inducteur.

On voit donc que la vitesse d'un moteur continu dépend d'abord de sa tension d'alimentation et de son flux **(1)**, ensuite, toutes choses restant égales, du courant absorbé c'est-à-dire de la charge **(2)**. On distingue donc :

— Réglage de la vitesse par la tension de l'alimentation : le réglage s'effectue par action sur la tension d'alimentation.

— Réglage de la vitesse par variation du champ : le réglage s'effectue à l'aide d'un rhéostat, dit rhéostat de champ, placé en série avec l'inducteur.

L'organisation des circuits de commande dépend évidemment du mode d'excitation des moteurs, tels qu'ils sont présentés ci-après.

Une solution très employée, lorsqu'on veut qu'un moteur travaille dans une large gamme de vitesses avec, éventuellement, un freinage rapide et un renversement de marche, est celle constituée par le groupe *Ward-Leonard* (*fig.* 131). Le groupe comprend trois machines attelées sur le même arbre : un moteur asynchrone, une génératrice à courant continu et une excitatrice. L'excitatrice fournit le courant d'excitation au moteur à courant à excitation séparée.

Ce système n'a pas un bon rendement puisque ce dernier est le produit des rendements de plusieurs machines, mais son extrême souplesse le fait utiliser dans de nombreux cas. Il est aujourd'hui concurrencé dans les petites puissances par les alimentations statiques qui fournissent le courant continu au moteur à partir d'un réseau alternatif.

Moteurs à excitation séparée ou dérivation

Ces deux types d'excitation (*fig.* 132) sont équivalents puisque l'excitation est la même pour une tension d'alimentation donnée. Dans les deux cas, le courant dans l'inducteur reste constant. Cela donne un moteur à vitesse pratiquement constante. Cependant, ces deux modes

▼ *Stator (à gauche) et rotors (à droite) de moteurs à courant continu destinés aux laminoirs du complexe sidérurgique de Huta Katowice en Pologne et construits à Nancy (caractéristiques : 6 000 kW, 65 à 165 t/mn et 3 000 kW, 75 à 190 t/mn; 1 210 V).*

Photo C.E.M.

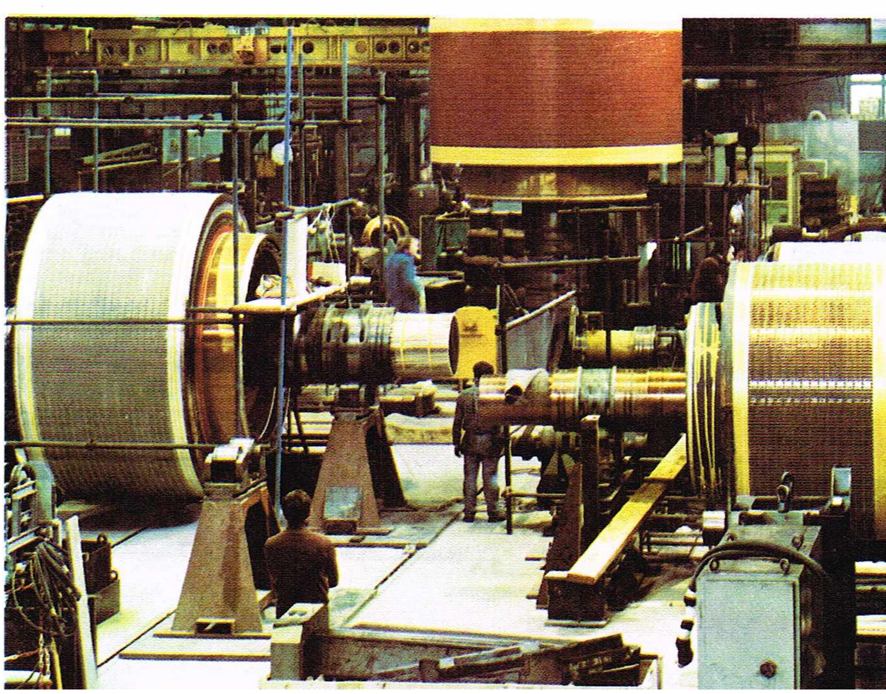

Photo C.E.M.

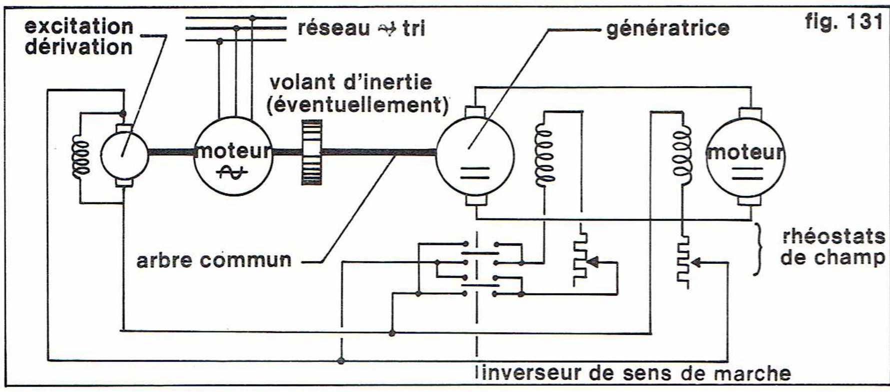

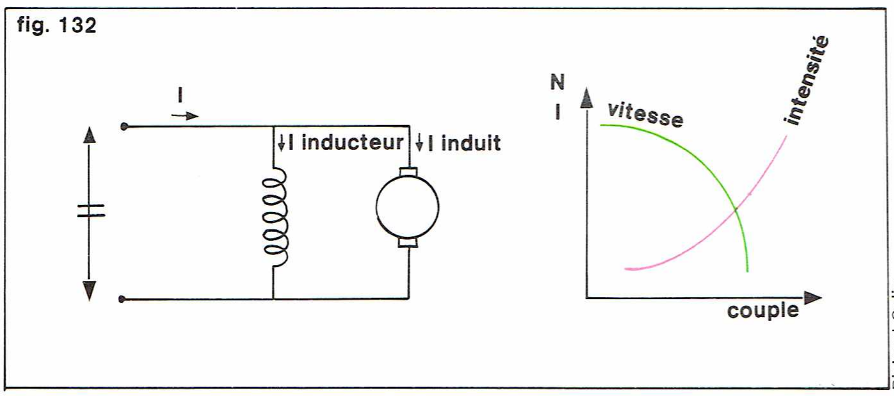

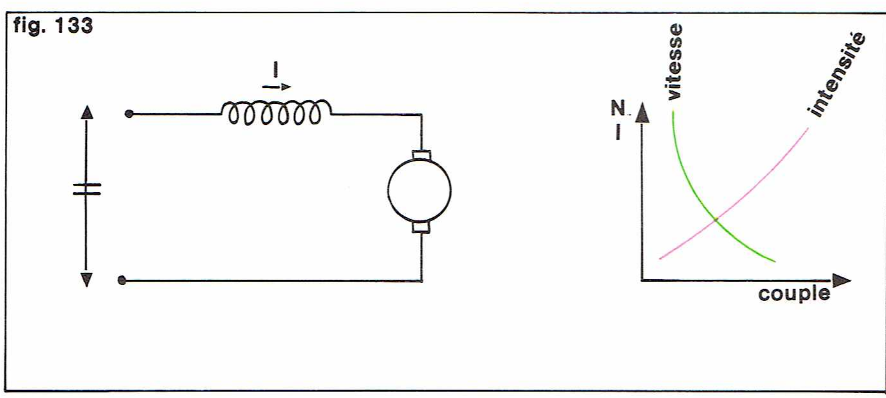

▲ *Figure 131 : représentation schématique du groupe Ward-Leonard.*
Figure 132 : moteur continu à excitation dérivation (shunt).
Figure 133 : moteur continu à excitation série.

▼ *Figure 134 : moteur continu à excitation composée (compound).*

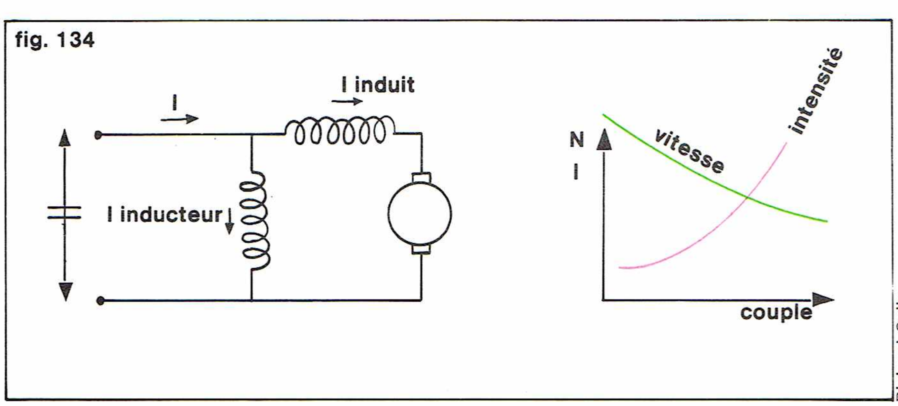

d'excitation diffèrent s'il y a variation de la tension d'alimentation ; en effet, il y a, pour le moteur dérivation, modification du flux avec la tension, ce qui se traduit par des variations de vitesse plus faibles que lorsque l'excitation, donc le flux, reste constante. On recourt donc au moteur à excitation séparée lorsqu'on veut obtenir un réglage de vitesse important par variation de la tension d'alimentation.

Ces deux types d'excitation sont utilisés lorsqu'on souhaite que la vitesse ne soit pas sensible aux variations de charge.

Les moteurs sont en général alimentés par un dispositif donnant une tension variable, ce qui permet de les démarrer simplement sans aucun artifice de démarrage.

Moteurs à excitation série

Dans ce type de moteur, les enroulements de l'inducteur sont en série avec le circuit d'induit (*fig.* 133). Les deux circuits sont donc parcourus par le même courant. Au démarrage du moteur, le courant est maximal, ce qui se traduit par un flux important et un couple de démarrage important. Quand la vitesse du moteur augmente et que l'intensité diminue, le flux se réduit parallèlement. A la limite, le moteur risque l'emballement à la charge nulle. Sur les petits moteurs, le danger est inexistant en raison des frottements relativement importants des paliers, des balais et de la perte dans l'entrefer. Pour les moteurs de puissance notable, il faut éviter le risque de survitesse et on n'emploie pas ces moteurs dans des applications où la charge peut disparaître brusquement (par rupture de courroie par exemple).

Ces moteurs en revanche conviennent très bien chaque fois qu'un couple important au démarrage est nécessaire. Cette remarque explique pourquoi ces moteurs sont principalement utilisés dans les applications de traction où les deux caractéristiques : couple de démarrage élevé et charge croissante avec les vitesses, se présentent.

Moteurs à excitation composée

Ces moteurs comportent deux enroulements inducteurs, l'un de type « dérivation », l'autre de type « série » (*fig.* 134).

Cette disposition permet d'éviter l'inconvénient du moteur « série ». En effet, sur le moteur à excitation composée, en cas de charge nulle, le courant dans l'inducteur série est si faible que l'excitation est pratiquement déterminée par l'inducteur dérivation. A charge nominale, la vitesse dépend évidemment du flux résultant de la somme des deux flux inducteurs. La variation de vitesse avec le couple ressemble alors à celle du moteur série.

On peut distinguer les moteurs à flux additionnel dans lesquels les deux flux inducteurs ajoutent leurs effets, et les moteurs à flux différentiel dans lesquels le flux de l'inducteur série se retranche de celui de l'inducteur dérivation. En fait, on construit surtout des moteurs à flux additionnel qui ont ainsi des caractéristiques intermédiaires entre celles des moteurs série et celles des moteurs dérivation. La chute de vitesse en charge est plus grande que celle du moteur dérivation, mais l'enroulement dérivation évite l'emballement à charge nulle. Le couple au démarrage est élevé.

L'inversion du sens de marche pose une difficulté, car il faut inverser soit la polarité des inducteurs, soit celle de l'induit. Pour cette raison, les moteurs à deux sens de marche ne sont construits que pour des fortes puissances. On utilise en revanche l'excitation composée pour toutes sortes de moteurs à un seul sens de marche dans lesquels il faut améliorer le couple de démarrage.

Moteurs à aimants permanents

Dans ces moteurs (*fig.* 135), le champ inducteur est créé par des aimants permanents avec une ou plusieurs paires de pôles. L'induit alimenté en courant continu, l'interaction entre le flux et les courants de l'induit crée le couple. Le flux reste constant quel que soit le régime de fonctionnement du moteur. Les caractéristiques (C, N) et (C, I) sont linéaires.

Ce type de moteur se construit des plus faibles puissances jusqu'à des puissances de quelques kilowatts. Il présente un certain nombre d'avantages sur les moteurs dont le flux est créé par des enroulements : pas de circuit d'alimentation, robustesse, danger nul de survitesse par perte du flux. D'autre part, les pertes des enroulements inducteurs des autres moteurs ainsi que la ventilation

que ces pertes nécessitent n'existent plus sur ce moteur. Par ailleurs, l'absence de bobines inductrices supprime toute possibilité de réglage de la courbe (C, N). De plus, les surcharges peuvent entraîner une démagnétisation des inducteurs et par voie de conséquence une détérioration des caractéristiques mécaniques du moteur. La restauration de la magnétisation des masses polaires reste toujours possible.

Comme moteur de puissance, le moteur à aimants permanents est de taille plus importante et de prix plus élevé qu'un moteur dérivation de puissance équivalente. Si on ajoute aux prix des moteurs nus les circuits auxiliaires, l'avantage vient au moteur à aimants permanents.

On fait en petite puissance des moteurs à aimants permanents dont l'induit est un circuit imprimé.

Commande des moteurs

Cette commande est réalisée de différentes façons, selon le type de moteurs à commandes.

Moteurs à courant alternatif

Moteurs à induction à cage

* *Démarrage sous pleine tension*

Ce type de démarrage convient bien aux moteurs à vitesse unique comme les moteurs à cage d'écureuil.

Le problème est d'appliquer la pleine tension aux bornes du moteur.

Pour des moteurs de très faible puissance, un interrupteur suffit. Des fusibles de protection sont placés sur l'alimentation pour éviter la marche en surcharge du moteur.

Au-delà d'une certaine puissance qui ne dépasse pas quelques kilowatts, on utilise la commande par contacteur. Un contacteur se compose d'une bobine de manœuvre et de contacts mobiles qui peuvent fermer un circuit en s'appliquant sur des contacts fixes. L'utilisation d'un contacteur permet la duplication et surtout l'automatisation de la commande. Quand il est demandé au moteur d'inverser son sens de marche, on utilise le montage classique du « contacteur-inverseur ».

Le démarrage sous pleine tension offre les avantages d'un appareillage très simplifié, d'où l'impossibilité de fausse manœuvre. Le courant de démarrage est malheureusement très important.

* *Démarrage sous tension réduite*

Ce type de démarrage est utilisé pour démarrer les gros moteurs et limiter l'appel de courant sur le réseau. Trois procédés sont utilisés.

Tout d'abord, le plus répandu pour les petits moteurs parce que le plus simple : le *démarrage par résistance insérée au stator.*

Ensuite le *démarrage par inductance insérée au stator* qui présente le même schéma que le dispositif précédent à l'exception de la résistance qui est ici remplacée par une inductance. La qualité du démarrage est meilleure sans pour autant que cet avantage apparaisse comme décisif. Si l'inductance est variable, on obtient alors un réglage de vitesse qui peut être apprécié dans certaines applications.

Le troisième système utilise un *autotransformateur.* Il est utilisé lorsqu'il est nécessaire de limiter fortement le courant de démarrage. Il permet, comme l'inductance variable, le réglage de la vitesse pendant le démarrage, mais cette possibilité est dans les deux cas coûteuse.

Il existe un autre système qui n'est pas à proprement parler un système de démarrage sous tension réduite : c'est le *démarrage « étoile-triangle »*. L'enroulement inducteur est connecté au réseau en étoile lors de la mise sous tension et reconnecté en triangle en fin de démarrage. Le courant de démarrage et le couple correspondant représentent environ 30 % des valeurs du démarrage sous pleine tension. Ce procédé n'est convenable que pour des démarrages à faible charge.

Moteurs à rotor bobiné

Le démarrage de ces moteurs se fait à l'aide d'un rhéostat (résistances réglables) placé sur le circuit, sorti par des bagues tournantes du rotor bobiné. La manœuvre peut être manuelle ou automatique. Dans ce dernier cas, l'élimination successive des portions de résistance se fait suivant des critères de courant, de temps ou de vitesse

fig. 135

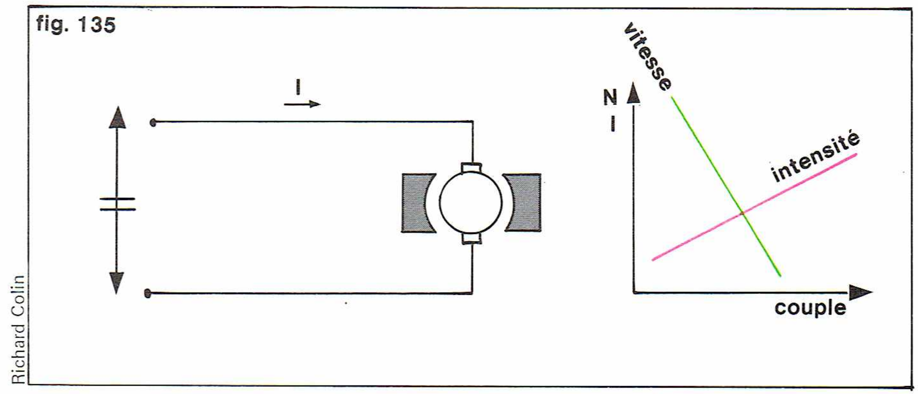

▲ ***Figure 135 : moteur continu à excitation par aimant permanent.***

(contact centrifuge).

On utilise aussi aujourd'hui des dispositifs statiques pour le démarrage de ces moteurs.

Moteurs synchrones

Le système de démarrage d'un moteur synchrone comprend quatre composants :

— le système de mise sous tension alternative triphasée du stator ;

— le contacteur de mise sous tension continue du rotor ;

— un système de surveillance de la synchronisation qui ouvre en cas de défaut le circuit d'alimentation du rotor ;

— un système de protection de la cage de démarrage qui ouvre le circuit stator en cas de marche prolongée en asynchrone.

Moteurs à courant continu

Ces moteurs sont mis sous tension et démarrés par des interrupteurs à commande manuelle ($P < 1,5$ kW) ou par des contacteurs. On a vu que le couple de démarrage de ces moteurs est toujours satisfaisant. Le passage d'un courant plus élevé qu'à la vitesse nominale dans le collecteur (commutation) ne pose pas de problèmes particuliers, étant donné que la vitesse est limitée.

Pour les gros moteurs, une résistance de démarrage du courant d'induit est nécessaire. Cette résistance peut être éliminée progressivement par un rhéostat. Si la commande se fait par contacteur, la résistance est fractionnée et ses différentes parties sont éliminées successivement comme pour les moteurs alternatifs à rotor bobiné. En démarrage automatique, on utilise, pour la commande d'effacement des fractions de résistance, des critères de courant, de temps ou de vitesse.

Protection et commande

Au moteur électrique proprement dit, viennent s'ajouter des circuits d'alimentation, de commande et de signalisation qui compliquent notablement le branchement du moteur à son réseau d'alimentation. L'ensemble de ces circuits, plus ou moins complexes suivant le cas considéré, doit répondre à trois objectifs de protection :

— protection du personnel ;

— protection du réseau ;

— protection du moteur.

Protection du personnel

Celle-ci est réalisée de deux façons. Pour le personnel d'exploitation, on évite en général, après une panne du réseau, que le moteur ne se remette en route tout seul lors du retour de la tension. Le circuit de commande du contacteur est conçu pour satisfaire à cette condition. Si l'on souhaite le redémarrage du moteur, indépendamment d'une action d'opérateur, et c'est le cas pour toutes les machines fonctionnant en automatique de façon intermittente, on protège alors mécaniquement les parties tournantes et il est clairement indiqué dans le voisinage du moteur que celui-ci peut démarrer de façon impromptue. Pour le personnel d'entretien, il est prévu un système d'ouverture de la ligne englobant tous les circuits auxiliaires. Le but recherché ici est d'abord la mise hors-tension du moteur et de ses circuits associés de façon à permettre le travail d'entretien ou de réparation « hors-

▶ ***Figure 136 : schéma de principe des circuits d'un moteur électrique.***

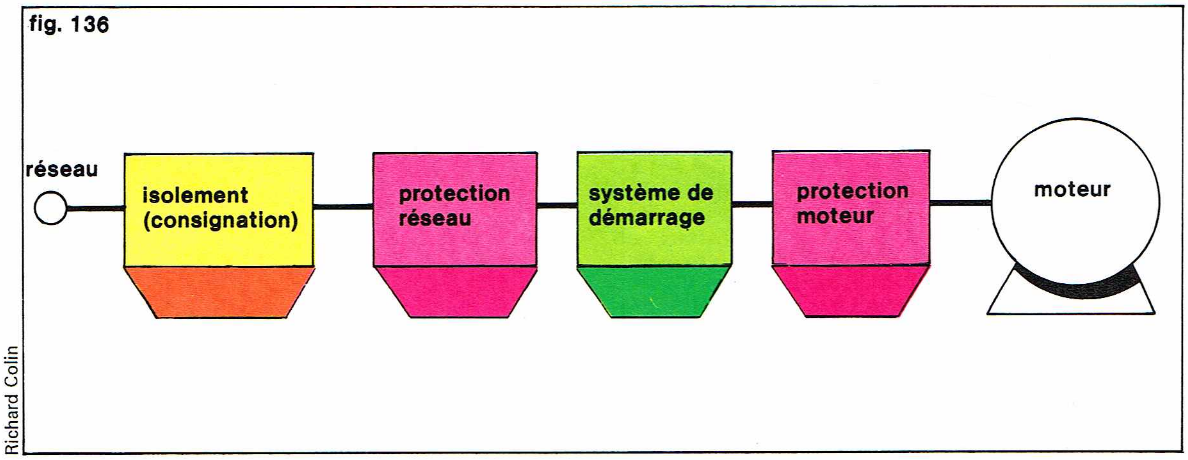

tension »; ensuite, par une consignation de l'organe d'ouverture du circuit, on évite le retour intempestif de l'alimentation pendant la période de travaux.

Protection du réseau

En cas de court-circuit sur le moteur, il faut éviter que celui-ci ne se propage vers le réseau d'alimentation et n'induise des accidents sur des matériels placés en amont. Les organes chargés d'assurer cette protection appartiennent aux types suivants :

— fusibles,

— déclencheurs ampèremétriques (à action mécanique),

— relais ampèremétriques (à action électrique).

Protection du moteur

Il faut enfin protéger le moteur en l'arrêtant si sa température de fonctionnement devient anormale. On a vu qu'une augmentation même minime de température entraîne un vieillissement accéléré des isolants. Cette protection est assurée par des relais thermiques qui limitent l'intensité du moteur et par des thermosondes, placées à l'intérieur des bobinages du moteur.

Ces différents appareils de protection se combinent avec les appareils de protection de la ligne ou avec le contacteur pour former des appareils de commande et de protection intégrés.

On trouvera sur la *figure* 136 un schéma de principe des circuits de protection d'un moteur. La *figure* 137 donne un exemple d'un circuit complet de télécommande et de protection d'un moteur à induction triphasé à démarrage direct et un seul sens de marche.

BIBLIOGRAPHIE

Techniques de l'ingénieur, édition, 21, rue Cassette, 75006 Paris. – *Handbook of Chemistry and Physics,* 49th Edition, 1969, The Chemical Rubber Co. – *Génie atomique* (INSTN Saclay, P.U.F.), 1967 – VINER L., *Turbines à vapeur et à gaz,* éd. Albin Michel, 1965. – A. HOWBERECHTS, *les Turbines,* Vander éd., 1972. – THURIET L., *l'Énergie nucléaire,* éd. Dunod, 1976. – *Machine Design, Electric Motors and Controls,* Penton Inc., 1976. – Revue *Power,* Mc Graw Hill Publications, 1975-1976. – *Notices techniques des centrales thermiques,* SPT-E.D.F. – *Encyclopédie internationale des sciences et des techniques,* Presses de la Cité, 1973. – *Journées d'information astronautique,* Société française d'astronautique, 1960. – Revue *Power Engineering,* Bamington Ill., 1975-1976. – *Encyclopedia of Energy,* Mc Graw Hill, 1976. – RICARD J., *Équipement thermique des usines génératrices d'énergie électrique,* Dunod, 1962.

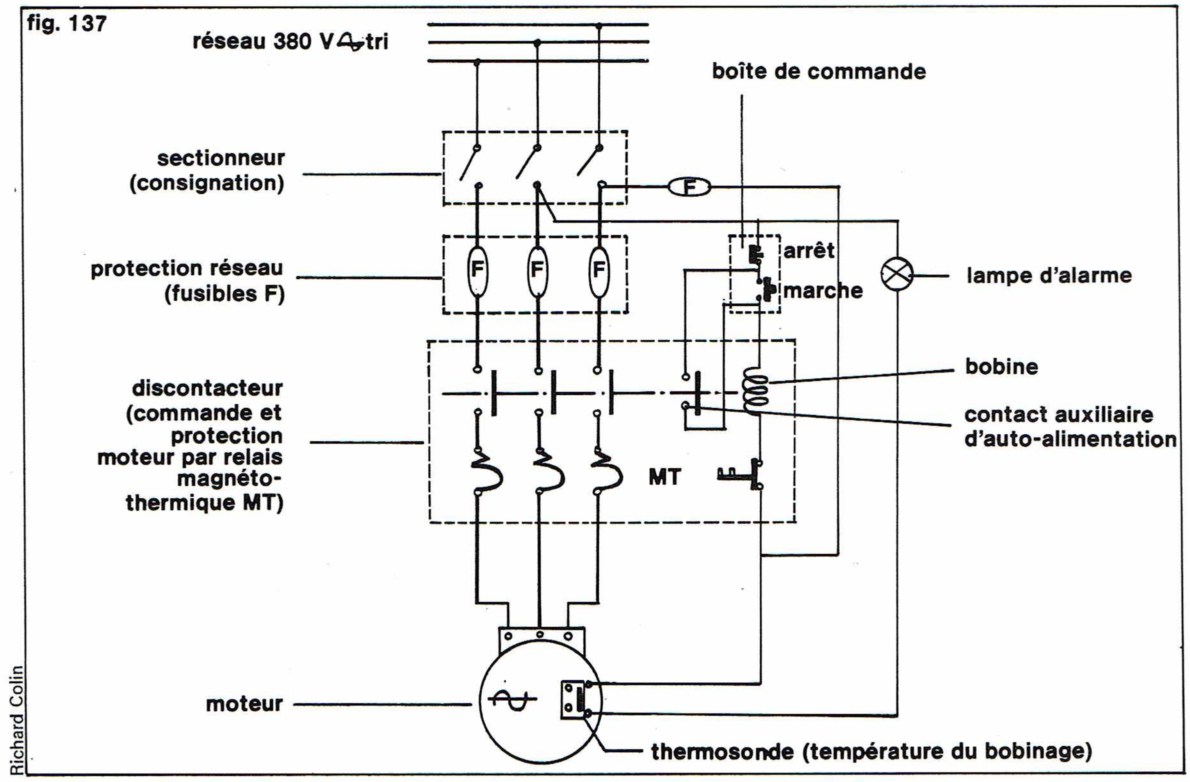

▶ ***Figure 137 : exemple d'un circuit complet de télécommande et de protection d'un moteur à induction triphasé à démarrage direct et un seul sens de marche.***

TRANSFORMATIONS DE L'ÉNERGIE

Après ces chapitres consacrés aux « conversions » de l'énergie, nous abordons ici les « transformations » de l'énergie. Il nous faut sans tarder rappeler au lecteur que cette distinction entre conversion et transformation n'a jamais été consacrée par l'usage. Les praticiens utilisent généralement dans le même sens les deux mots. Pour découper le volumineux sujet des métamorphoses de l'énergie, nous nous sommes permis d'introduire cette distinction entre la « conversion » après laquelle l'énergie finale a pris une forme différente de l'énergie initiale et la « transformation » qui ne change pas la forme de l'énergie mais simplement en modifie les grandeurs caractéristiques. Il nous a paru commode d'adopter cette terminologie, car, d'une part, elle permettait une présentation rationnelle du sujet et, d'autre part, elle s'appuyait sur certaines habitudes de langage qui semblent la justifier.

En effet, nous connaissons le « transformateur » électrique qui modifie la caractéristique de tension du courant sans changer la nature électrique de l'énergie transférée par ce transformateur. Les électriciens appellent « convertisseurs » des groupes tournants dont la fonction est de modifier la fréquence du courant et éventuellement sa tension. Il n'y a pas ici apparemment modification de la forme de l'énergie entre l'état initial et l'état final : il s'agit toujours d'énergie électrique. Mais si on regarde de plus près le fonctionnement d'une telle machine, on s'aperçoit que son principe repose sur une double conversion d'énergie : un moteur transforme l'énergie électrique initiale en énergie mécanique dans une première conversion, et cette énergie mécanique sert à entraîner une génératrice qui délivre le courant désiré, et c'est la deuxième conversion. Il n'est donc pas choquant d'appeler une telle machine un convertisseur.

Si notre vocabulaire manque ainsi de précision, c'est généralement parce que dans le domaine de la technologie, les praticiens sont intervenus avant les théoriciens. Les différentes machines ont vu le jour dans un ordre qui tenait plus du hasard que de la logique et les vues d'ensemble sont venues alors que le vocabulaire existait déjà.

Le lecteur est à présent prévenu et nous pouvons revenir au problème des transformations de l'énergie. La distinction entre transformation et conversion apparait clairement sur le *tableau* I déjà présenté au chapitre de la conversion et que nous reproduisons ici, et sur le *tableau* I bis. On voit immédiatement que les transformations occupent les cases placées sur la diagonale alors que les conversions occupent le restant du tableau.

Comme il y a six formes d'énergie, nous allons trouver six familles de transformations. Dans ce chapitre, seront traitées en détail trois d'entre elles :
— énergie thermique en énergie thermique ;
— énergie mécanique en énergie mécanique ;
— énergie électrique en énergie électrique.

Les trois dernières transformations feront seulement l'objet de quelques commentaires dans un dernier paragraphe.

Avant de clore cette introduction, revenons au point de départ de la définition de l'énergie. Celle-ci est, en général, comme on l'a montré, le résultat du produit de deux grandeurs, l'une dite extensive, l'autre intensive. Le *tableau* II rappelle le nom de ces grandeurs pour les trois formes d'énergie dont les transformations vont être examinées ci-après. Comme on peut le noter, on peut écrire d'une façon générale et sous une forme différentielle :

$$d\varepsilon = x \cdot dy$$

avec *x* : facteur de tension, et *y* : facteur de quantité.

L'analogie ne doit pas être poussée trop loin, car ces différents facteurs possèdent des propriétés spécifiques en fonction de la forme d'énergie à laquelle ils s'appliquent.

On peut simplement dire que, lorsqu'il y a transformation d'énergie, le facteur de quantité se conserve. Ayons à l'esprit le transformateur électrique pour illustrer ce principe : la quantité d'électricité prélevée au secondaire est identique à celle fournie par le primaire (aux pertes près), seul le facteur de tension U change.

Lorsque plusieurs systèmes possédant des énergies de même nature ont le même facteur de tension, les facteurs

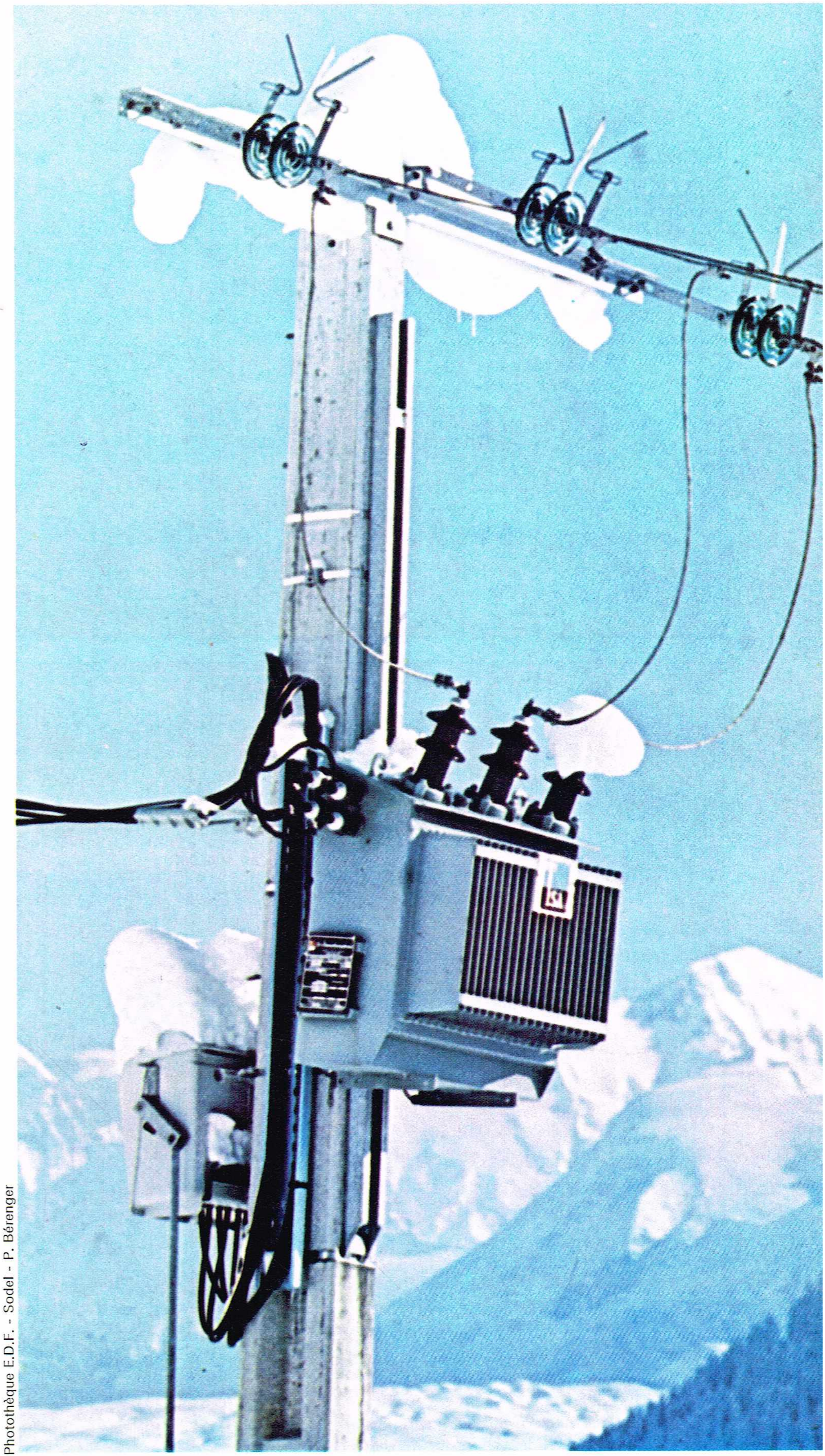

Photothèque E.D.F. - Sodel - P. Bérenger

▲ ***Un transformateur électrique** sur poteau ; **le transformateur électrique modifie la caractéristique de tension du courant sans changer la nature électrique de l'énergie transférée par cet appareil.***

Tableau I Conversion d'énergie						
Énergie d'arrivée / Énergie de départ	**Mécanique**	**Électrique**	**Calorifique**	**Chimique**	**Rayonnante**	**Nucléaire**
Mécanique		Tribo-électricité Piézo-électricité Dynamo Alternateur	Frottements Machines frigorifiques Pompes à chaleur	Réactions provoquées par compression	Triboluminescence	
Électrique	Moteurs électriques Pompes à métaux liquides		Effet Joule	Électrolyse	Électroluminescence	
Calorifique	Moteurs thermiques	Thermo-électricité		Réactions endothermiques (cracking)	Incandescence	
Chimique		Piles Accumulateurs Piles à combustible	Réactions exothermiques (combustion en particulier)		Chimio-luminescence	
Rayonnante	Radiomètre	Photo-électricité	Absorption	Photochimie – photosynthèse – photographie – photolyse		
Nucléaire			Fission et fusion nucléaires	Transformation des éléments radio-actifs	Radio-activité naturelle et artificielle	

Tableau I bis Transformation d'énergie						
Énergie d'arrivée / Énergie de départ	**Mécanique**	**Électrique**	**Calorifique**	**Chimique**	**Rayonnante**	**Nucléaire**
Mécanique	Leviers Vérins Engrenages Chaînes Courroies, etc.					
Électrique		Transformateurs Redresseurs				
Calorifique			Échangeurs Fours Condenseurs, etc.			
Chimique				Réactions chimiques en général		
Rayonnante					Laser	
Nucléaire						Convertisseurs Régénérateurs

▲ ***Tableaux I et I bis permettant de faire la distinction entre la conversion et la transformation d'énergie. Noter dans le tableau I que l'énergie nucléaire, en raison de sa nature particulière, ne figure pas dans l'énergie d'arrivée.***

de quantité peuvent s'ajouter, le facteur de tension demeurant constant.

Soit par exemple : $d\varepsilon_1 = x dy_1$

$d\varepsilon_2 = x dy_2$

On peut écrire : $d\varepsilon = d\varepsilon_1 + d\varepsilon_2 = x\,(dy_1 + dy_2)$

et d'une façon plus générale : $d\varepsilon = \Sigma d\varepsilon_1 = x \Sigma dy$.

Il faut noter que les facteurs de tension des systèmes caractérisent l'aptitude de ces derniers à produire ou à transmettre de l'énergie. Les conversions ou transformations se font plus facilement avec des fluides à haute pression ou à haute température ou avec de fortes tensions électriques. Ces facteurs ne sont pas toujours connus en valeur absolue, mais on les détermine généralement par rapport à des niveaux arbitrairement choisis.

Terminons en disant que, comme pour les conversions, toutes les transformations ne sont pas possibles ; certaines en particulier sont irréversibles. Pour les transformations réalisables, il faut aussi toujours compter avec les pertes et il est donc important de préciser le rendement d'une transformation.

Formes d'énergie	Grandeurs extensives (facteurs de tension ou de potentiel)	Grandeurs intensives (facteurs de quantité ou d'intensité)	Produit
Mécanique			
Potentielle	*gh* (potentiel de gravitation)	M (masse)	= M*gh*
Élastique	*p* (pression)	V (volume)	= *p*V
Cinétique	1/2 *V* (vitesse)	M (masse)	= 1/2 M*V*
Travail	F (force) C (couple)	*x* (déplacement) (angle)	= F*x* = C*x*
Électrique	U (différence de potentiel)	*q* (quantité)	W = U*q*
Thermique	T (température absolue)	S (entropie)	Q = ST

Tableau II

Grandeurs extensives et intensives pour les trois formes d'énergie

◀ ***Tableau II :*** ***les grandeurs extensives et intensives pour les trois formes d'énergie (mécanique, électrique et thermique).***

Transformation de l'énergie thermique en énergie thermique

La transformation d'une énergie thermique en énergie thermique se limite au *transfert* d'énergie thermique avec *conservation* de l'énergie totale transférée. Le potentiel qui provoque la transformation de l'énergie thermique est la *température* et, si deux points matériels placés dans un milieu thermiquement isolé sont à la même température, on peut affirmer qu'il n'existe aucun échange thermique global entre ces deux points, dits en *équilibre thermique* (il s'agit bien d'un équilibre thermique, car chacun des points matériels émet une énergie thermique nette de même module mais de signe opposé).

Le transfert de chaleur au sein d'une phase ou plus généralement entre deux phases se fait de trois façons.

— **Par conduction :** le transport de chaleur correspond à la transmission d'une énergie cinétique due aux chocs élastiques des molécules des fluides, aux oscillations longitudinales des molécules des solides non conducteurs de l'électricité, ou aux mouvements des électrons dans les autres cas. Les lois fondamentales de transfert par conduction sont en complète analogie avec celles de la conduction électrique et des transports diffusionnels moléculaires de matière et de quantité de mouvement. Ainsi, le flux de chaleur transporté dans une direction donnée sera proportionnel au gradient de température dans cette direction.

— **Par convection :** ce transport ne se produit que dans le cas d'un fluide en mouvement et le transport de chaleur est dû au brassage de fractions de fluide ayant des températures différentes. Le mouvement du fluide peut être provoqué par une différence de pression totale (cas de convection forcée), ou par une différence de masse volumique, conséquence de l'existence, dans le milieu, de zones de fluide à températures différentes (cas de la convection naturelle ou libre).

— **Par rayonnement thermique :** tout corps (solide, liquide ou gazeux) porté à une température supérieure au zéro absolu rayonne dans toutes les directions une énergie thermique sous forme d'ondes électromagnétiques. Inversement, tout corps est susceptible d'absorber tout ou partie d'une énergie électromagnétique émise par lui-même ou par un corps situé dans son voisinage. Ce type de transport est analogue à la propagation de la lumière et il ne nécessite aucun support matériel, contrairement aux écoulements.

Dans de nombreux problèmes de transformation d'énergie thermique, les trois modes de transfert coexistent, mais généralement au moins une des trois formes pourra être négligée, ce qui simplifiera le traitement mathématique de l'appareil de transfert. Nous pouvons dire dès à présent qu'aux températures ordinaires le transport par rayonnement est négligeable, mais il peut devenir notable et prépondérant lorsque le niveau de température augmente.

En outre, certaines transformations thermiques sont accompagnées d'un *transfert de matière* entre deux phases. Le flux de chaleur transféré en présence d'un changement de phase dépend de la nature et des propriétés physico-chimiques des phases en présence. C'est le cas de l'ébullition, de la condensation, mais aussi des problèmes d'humidification, de séchage, de cristallisation, etc. Dans ces dernières opérations, les phases vapeur ou liquide ne sont pas pures, et elles contiennent en particulier un soluté présent seulement dans une des deux phases.

Dans une première partie, nous allons rappeler succinctement les lois générales et les principales corrélations permettant d'évaluer les débits de chaleur transférés en présence ou non d'un transfert de matière. Pour plus de détails, on pourra consulter les ouvrages généraux suivants :

— CARSLAW H.S., JAEGER J.C., *Conduction of Heat in Solids,* New York, Mac Milan, 1947.

— JAKOB M., *Heat Transfer,* t. I, II, J. Wiley and Sons, New York.

— Mac ADAMS W.H., *Transmission de la chaleur,* Dunod, Paris, 1964.

— PERRY R.H., CHILTON C.H., *Chemical Engineers' Handbook,* 5ᵉ édition, Mac Graw Hill Book Company, 1973.

— WUITHIER P., *Raffinage et Génie chimique,* pub. de l'Institut français du pétrole, t. I, II, Éd. Technip-Paris, 1972.

La deuxième partie sera consacrée à l'étude des principaux appareils de transformation d'énergie thermique en énergie thermique, le transfert pouvant être accompagné ou non d'un changement de phase.

Nous n'avons pas la prétention de présenter ici une revue complète et détaillée de tous les appareils de transformation thermique, mais, pour les quelques types d'appareils étudiés, nous indiquerons les principes de calcul, les différentes conceptions avec leurs caractéristiques et leurs contraintes.

Tableau III

Conductivité thermique λ des métaux à 0 °C (en W/m/°K)

Métaux	λ	Métaux	λ
Aluminium	202	Magnésium	154
Antimoine	18,6	Mercure	8,3
Argent	418	Molybdène	146
Béryllium	160	Nickel	58
Bismuth	8,3	Or	297
Cadmium	92	Plomb	35
Cuivre	389	Platine	71
Étain	67	Sodium	133
Fer	63	Tungstène	159
Lithium	71	Zinc	113

Tableau IV

Conductivité thermique λ des alliages (en W/m/°K)

Alliages	Température (en °C)	λ
Fonte	54	47,6
	102	46,4
Acier (1 % C)	18	45,2
Acier (13 % Cr, 0,2 % Ni)	500	29,0
Acier (18 % Cr, 8 % Ni)	500	21,5
Acier (23 % Cr, 11 % Ni)	500	18,6
Laiton (70 % Cu, 30 % Zn)	0	97,0
	100	103,9
Bronze marine	30	112,6
Constantan (60 % Cu, 40 % Ni)	18	22,6
	100	26,7
Manganin (84 % Cu, 4 % Ni, 12 % Mn)	18	22,2
	100	26,2

Tableau V

Conductivité thermique λ des isolants (en W/m/°K)

Isolants	Masse volumique (en kg/m³)	Température (en °C)	λ
Amiante (ciment)	1 970	30	0,389
Amiante (carton)	970	30	0,122
Amiante (laine)	400	100	0,100
Carbon black	190	56	0,021
Charbon de bois (poudre)	180	17	0,050
Ciment	2 280	25	1,82
Laine cardée	—	0	0,050
Coton cardé	80	38	0,060
Brique réfractaire	220 à 380	150	0,080
		540	0,128
Brique rouge	—	—	0,83
Liège en grains	90	— 5	0,049

Principales lois et corrélations en transfert de chaleur

Le transfert de chaleur par conduction

La loi de Fourier

Le flux de chaleur transféré par conduction dans une direction donnée est proportionnel au gradient de température dans cette direction. Ainsi, la composante sur l'axe Ox du flux est telle que :

$$\varphi_x = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \qquad (1)$$

Dans cette loi, postulée dès 1822 par Fourier, le coefficient de proportionnalité λ est une caractéristique physico-chimique du point matériel désignée sous le nom de *conductivité* ou *conductibilité thermique*. Dans le système international, elle s'exprime en W/m/°K, et dans les *tableaux* III, IV, V, VI et VII sont reportées les conductivités de certains corps solides, liquides et gazeux.

La conductivité thermique diminue d'un facteur 10^3 à 10^4 lorsque l'on passe d'un métal à un gaz loin des conditions critiques. La conductivité thermique des liquides est une dizaine de fois supérieure à celle des gaz. Quant à celle des gaz purs et de leur mélange, elle peut être prévue avec une très bonne précision à partir de la théorie cinétique moderne des gaz. La conductivité thermique varie très légèrement avec la température mais il n'existe pas ou peu de règles générales permettant de prévoir le sens de variation.

Équation générale de transfert de chaleur par conduction

Un bilan de chaleur dans un élément de volume *dx dy dz* construit au point matériel M de coordonnées (*x, y, z*), en l'absence d'écoulement et de débit de travail mécanique, s'écrit en coordonnées cartésiennes sous la forme générale suivante :

$$\rho C_p \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z}\right) + q \qquad (2)$$

où *t* désigne la température au point M (*x, y, z*) et à l'instant τ ; λ, ρ et C_p représentent respectivement la conductivité thermique, la masse volumique et la capacité calorifique massique à pression constante du corps matériel au point M ; *q* est le débit de chaleur généré dans le volume élémentaire par réaction chimique, réaction nucléaire, énergie électrique, etc., rapporté à l'unité du du volume.

Selon la forme géométrique du milieu dans lequel le transport est étudié, on écrira l'équation **(2)** en coordonnées cylindriques ou sphériques. C'est l'équation **(2)** qu'il faudra résoudre pour trouver à chaque instant la distribution des températures et le flux transféré en tout point de l'enceinte.

Dans les ouvrages cités en référence, et plus spécialement pour les problèmes de conduction, on trouvera dans le Carslaw et Jaeger la solution de l'équation **(2)** en régime stationnaire et transitoire pour de nombreuses géométries courantes. Rappelons certains résultats élémentaires obtenus dans le cas de géométrie à une dimension principale.

* *Cas d'une plaque plane en régime stationnaire*

En régime stationnaire et en l'absence de source de chaleur interne, pour une plaque plane de très grande surface par rapport à son épaisseur, le flux de chaleur normal à la plaque est constant et égal à :

$$\varphi = \frac{\lambda_m}{x}(t_1 - t_2)$$

t_1 et t_2 désignent les températures des faces planes de la plaque, *x* l'épaisseur de la plaque, et λ_m la conductivité thermique moyenne du matériau constituant la plaque, soit :

$$\lambda_m = \frac{1}{t_2 - t_1}\int_{t_1}^{t_2} \lambda dt$$

Si la plaque n'est pas homogène mais constituée d'un empilement de *n* plaques d'épaisseur $x_1, x_2, ..., x_n$ et de conductivité $\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_n$, le flux en un point quelconque de la plaque composite est constant et égal à :

$$\varphi = \frac{t_1 - t_2}{\frac{x_1}{\lambda_1}} = \frac{t_2 - t_3}{\frac{x_2}{\lambda_2}} = \dots =$$

(3)

$$\frac{t_n - t_{n+1}}{\frac{x_n}{\lambda_n}} = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{x_i}{\lambda_i}}$$

Si $R_i = \frac{x_i}{\lambda_i}$ désigne la résistance thermique de la i-ième plaque, les relations **(3)** expriment que la résistance globale est la somme des résistances individuelles placées en série :

$$R_T = \sum_{i=1}^{n} R_i = \sum_{i=1}^{n} \frac{x_i}{\lambda_i}$$

avec $\varphi = \frac{t_1 - t_{n+1}}{R_T}$

* *Cas d'un cylindre creux, infiniment allongé, en régime stationnaire*

Soit un cylindre creux de rayon intérieur r_1, de rayon extérieur r_2, de très grande longueur par rapport à son épaisseur $e = r_2 - r_1$. En régime stationnaire et en l'absence d'une source de chaleur interne, le débit de chaleur par unité de longueur du cylindre, normalement à un tube cylindrique de rayon quelconque compris entre r_1 et r_2 est constant, soit :

$$\Phi' = -2\pi r \lambda \frac{dt}{dr} = C^{te}$$

d'où, par intégration entre r_1 et r_2 :

$$\Phi' = \frac{2\pi\lambda_m}{\text{Log}\frac{r_2}{r_1}}(t_1 - t_2)$$

Si l'épaisseur entre r_1 et r_2 n'est pas homogène mais constituée d'un empilement de n cylindres creux de rayons internes $r_1, r_2, \dots, r_n$, le débit de chaleur par unité de longueur du cylindre est constant et égal à :

$$\Phi' = \frac{t_1 - t_2}{\text{Log}\frac{r_2}{r_1}/2\pi\lambda_1} = \frac{t_2 - t_3}{\text{Log}\frac{r_3}{r_2}/2\pi\lambda_2} = \dots =$$

$$\frac{t_n - t_{n+1}}{\text{Log}\frac{r_{n+1}}{r_n}/2\pi\lambda_n} = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^{n} \text{Log}\frac{r_{i+1}}{r_i}/2\pi\lambda_i}$$

Ici encore, si $R_i = \frac{\text{Log}\frac{r_{i+1}}{r_i}}{2\pi\lambda_i}$ représente la résistance du

Tableau VI

Conductivité thermique λ des liquides (en W/m/°K)

Liquides	Température (en °C)	λ
Eau	0	0,578
Acide acétique	20	0,171
Acétone	30	0,176
Alcool éthylique	20	0,182
Aniline	0-20	0,173
Benzène	30	0,159
Chloroforme	30	0,138
Éthylène glycol	0	0,267
Essence	30	0,135
Pétrole	30	0,147
Toluène	30	0,149
Vaseline	15	0,183

Tableau VII

Conductivité thermique λ des gaz (en W/m/°K)

Gaz	Température (en °C)	λ
Air	0	0,024 1
	100	0,031 8
Gaz carbonique	0	0,014 5
	100	0,022 1
Oxygène	0	0,024 6
	100	0,032 5
Hydrogène	0	0,166
	100	0,215
Azote	0	0,024 0
	100	0,031 3
Méthane	0	0,030 3
Éthane	0	0,018 2
Éthylène	0	0,058 0
n Pentane	0	0,012 7
n Hexane	0	0,124
Vapeur d'eau	100	0,023 3
	200	0,029 9

◀▲ *Page ci-contre et ci-dessus, tableaux III, IV, V, VI et VII : conductivité thermique de diverses substances pour les températures indiquées en référence.*

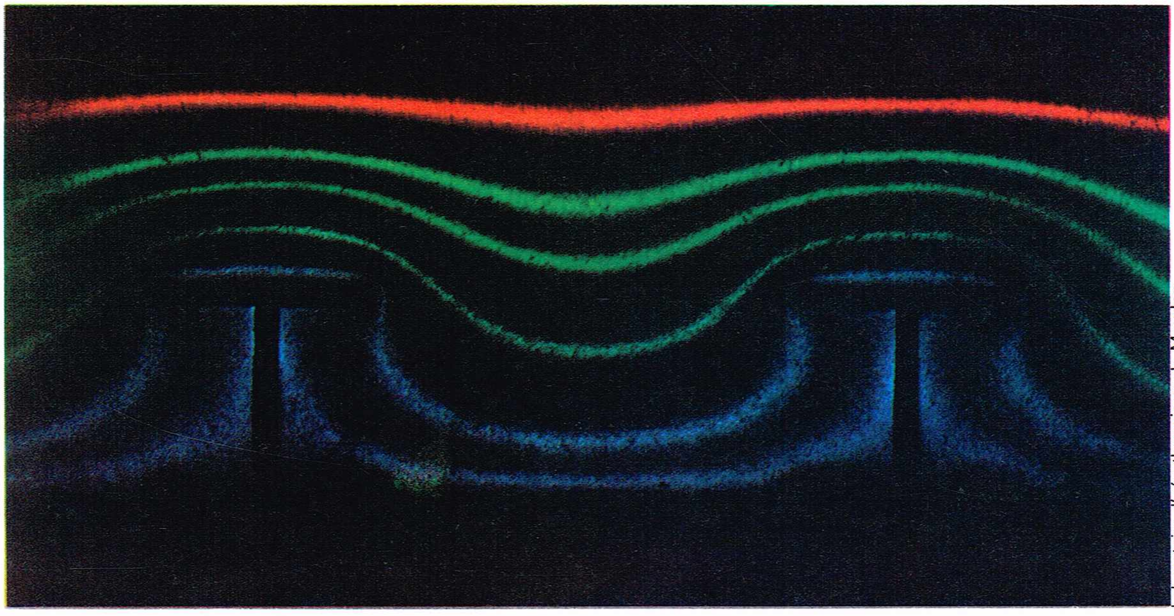

Laboratoire d'aérothermique de Meudon - Centre national de la recherche scientifique

◀ *Étude de la conduction en régime variable dans un mur complexe : visualisation d'isothermes par effet Christiansen dans des cellules d'essais thermiques contenant un milieu poreux.*

i-ième cylindre creux, la résistance globale est la somme des résistances individuelles placées en série.

* *Problème de l'égalisation des températures par le contact*

Soit deux solides semi-infinis limités par une face plane ayant les températures initiales t_{10} et t_{20} et les propriétés physico-chimiques suivantes : conductivités thermiques : λ_1 et λ_2, capacités calorifiques massiques : C_{p1} et C_{p2} et masses volumiques ρ_1 et ρ_2.

Au temps $\tau = 0$, les deux solides étant mis en contact par la face plane, on veut connaître en particulier l'évolution et la valeur de la température de contact au cours du temps. Il s'agit de résoudre l'équation **(2)** pour deux milieux unidimensionnels illimités, en l'absence de source locale de chaleur.

Pour des milieux semi-infinis, la température de contact est indépendante du temps et égale à :

$$t_c = \frac{\beta_1 t_{10} + \beta_2 t_{20}}{\beta_1 + \beta_2} \qquad \textbf{(4)}$$

où β représente la quantité :

$$\beta = \sqrt{\lambda \rho C_p}$$

Pour concrétiser l'intérêt de la relation **(4)**, évaluons par exemple la température s'établissant au contact de la main (dont nous assimilerons les propriétés à celles de l'eau) supposée à 25 °C avec un solide à 100 °C. Les résultats obtenus sont reportés dans le *tableau* VIII.

Alors que le cuivre provoque une brûlure, le bois ne donne qu'une sensation de chaleur. D'une manière générale, la température à la surface de séparation se rapproche de la température du solide pour lequel la valeur de β est la plus élevée.

▼ *Tableau VIII : constantes et températures de contact (t_c) de quelques substances. Figure 1 : distribution des températures observées entre un fluide chaud et un fluide froid séparés par une paroi métallique (dans le cas d'un transfert de chaleur par convection, en régime stationnaire).*

Le transfert de chaleur par convection

Définition des conductances partielles et globales de transfert par convection

Le transfert de chaleur par convection, dû au brassage de fractions de fluide à températures différentes, suppose donc la présence d'un écoulement. Ce mode de transport est donc exclu à l'intérieur des solides, mais il est prépondérant dans le cas des phases fluides s'écoulant nécessairement à l'intérieur et/ou à l'extérieur de surfaces solides. Ainsi, dans de nombreux problèmes industriels de transformation de chaleur, la chaleur est transmise d'une phase fluide à une autre phase fluide au travers d'une surface solide.

Imaginons un fluide chaud à la température t_1, s'écoulant d'un côté d'une paroi métallique, et un fluide froid à la température t_G s'écoulant de l'autre côté de la paroi d'épaisseur x. En régime stationnaire, les distributions de températures observées entre le fluide chaud et le fluide froid sont voisines de celles schématisées sur la *figure* 1.

L'étude des écoulements d'un fluide à l'intérieur ou à l'extérieur d'une conduite montre qu'il est toujours possible de répartir la distribution des vitesses du fluide en deux zones principales.

— Une première est située au voisinage de la paroi. Son épaisseur occupe toute la conduite si l'écoulement est laminaire ; elle décroît très rapidement lorsque l'écoulement devient de plus en plus turbulent. Dans cette région, le transport des trois extensités, matière, énergie et quantité de mouvement, se fait par diffusion moléculaire.

— Une deuxième est située au-delà de la première. Dans cette zone, le fluide est animé d'un mouvement tourbillonnant aléatoire entraînant très rapidement une égalisation de la vitesse, de la température et des compositions du fluide.

En écoulement turbulent, la première zone de très faible épaisseur porte généralement le nom de *couche limite*. Les gradients de température, de vitesse et de composition dans la couche sont très importants, ce qui signifie que la résistance principale au transfert est localisée dans la couche limite.

La distribution des températures dans la phase fluide peut s'obtenir en théorie par la résolution du bilan différentiel d'énergie (en supposant constantes les propriétés physico-chimiques du fluide), soit :

$$\rho C_p \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} + u_x \frac{\partial t}{\partial x} + u_y \frac{\partial t}{\partial y} + u_z \frac{\partial t}{\partial z}\right) = \lambda_e \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}\right) + q + l_W \qquad \textbf{(5)}$$

u_x, u_y, u_z représentent les composantes du vecteur vitesse $\vec{u}$, q est le débit de chaleur généré par unité de volume, l_W est le débit de travail perdu par unité de volume, conséquence de la nature visqueuse du fluide, et λ_e est la conductivité thermique apparente du fluide.

Pour résoudre **(5)**, il est donc nécessaire de connaître les valeurs locales et instantanées du vecteur vitesse et la valeur locale de la conductivité thermique. Il faut donc associer à l'équation précédente les équations traduisant les bilans différentiels de matière et de quantité de mouvement. La résolution simultanée de ce système d'équations n'est envisageable que dans des cas simples de géométries et d'écoulement, et principalement pour l'écoulement laminaire. Pour un écoulement turbulent, des hypothèses simplificatrices et des approximations sur les distributions de vitesse doivent être faites pour obtenir une expression théorique donnant la distribution des températures et le flux transféré à la paroi.

Par suite de ces difficultés dans le cas de l'écoulement turbulent et de l'impossibilité de mesurer les épaisseurs de couche limite ainsi que les températures aux extrémités, on définit le flux de chaleur transféré à la paroi de manière purement phénoménologique en posant :

$$d\Phi = h_i dS_i\,(t_1 - t_3) = h_e dS_e\,(t_4 - t_6) \qquad \textbf{(6)}$$

Les deux coefficients h_i et h_e représentent les coefficients de transfert (ou conductance partielle de transfert) interne et externe. La définition des coefficients h_i et h_e est arbitraire puisque leur valeur dépend du choix de la force motrice.

En outre, le débit transféré dans une phase entre l'entrée et la sortie peut être défini de diverses manières et l'usage courant est d'utiliser soit une moyenne arithmétique, soit une moyenne logarithmique de la différence des températures Δt du fluide loin de la paroi et du fluide au voisinage de la paroi. Si Φ désigne le flux transféré entre l'entrée et la sortie, on écrira que ce débit est tel que :

Tableau VIII
Constantes et températures de contact (t_c) de quelques substances

Corps	λ (en W/m/°C)	C_p (en J/kg/°C)	ρ (en kg/m³)	β	t_c (en °C)
Cuivre	389	382	8 950	36 186	96,9
Verre	0,81	836	2 500	1 301	59,1
Eau	0,58	4 180	1 000	1 557	62,5
Bois	0,18	2 383	670	536	44,2

fig. 1

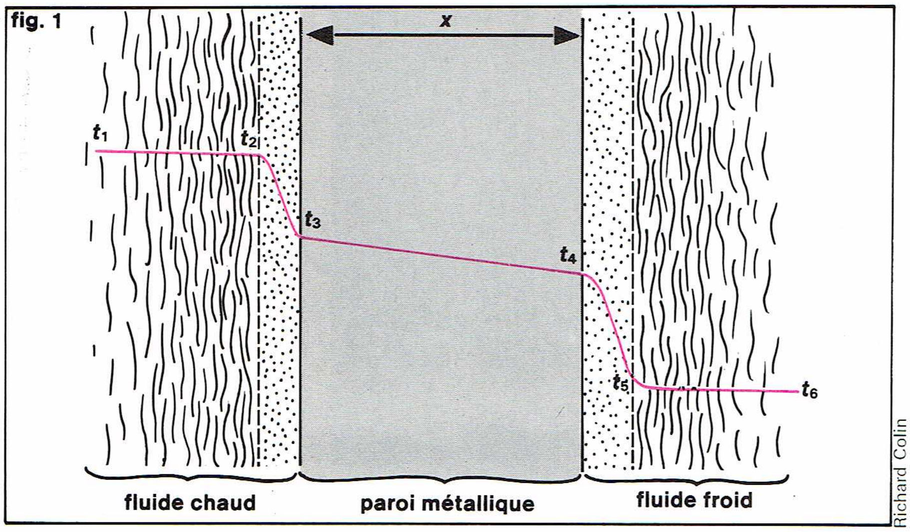

Richard Colin

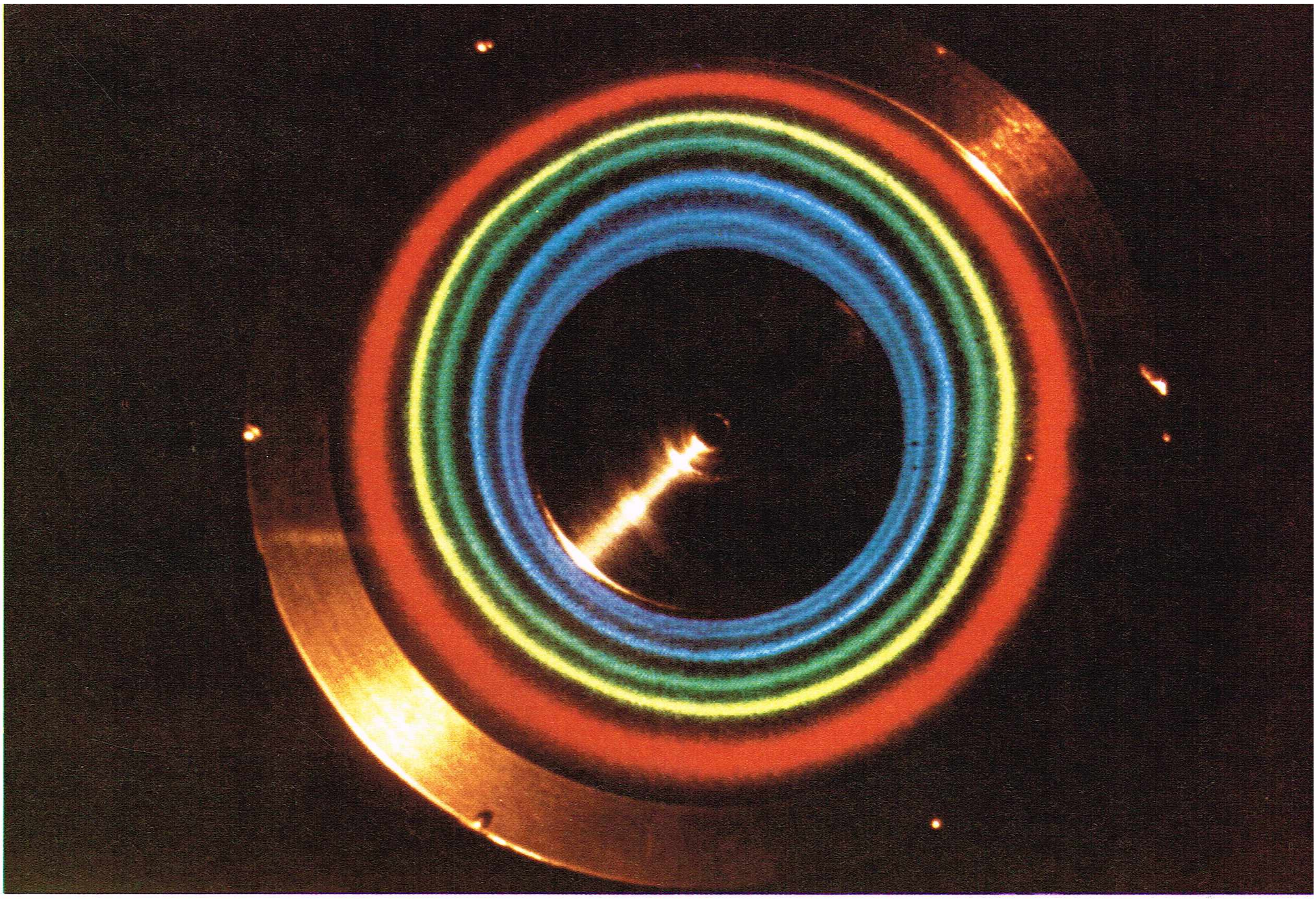

Laboratoire d'aérothermique de Meudon - Centre national de la recherche scientifique

▲ ***Déformation des isothermes due à la convection naturelle (convection libre) dans une cellule simulant une conduite horizontale chauffée, entourée par une gaine isolante en fibres de verre.***

$$\Phi = h_{ma}\,(\Delta t)_{ma} \quad \text{où} \quad (\Delta t)_{ma} = \frac{(\Delta t)_{sortie} - (\Delta t)_{entrée}}{2}$$

$$\Phi = h_{ml}\,(\Delta t)_{ml} \quad \text{où} \quad (\Delta t)_{ml} = \frac{(\Delta t)_{sortie} - (\Delta t)_{entrée}}{\text{Log}\,\dfrac{(\Delta t)_{sortie}}{(\Delta t)_{entrée}}}$$

Les coefficients de transfert h_{ma} et h_{ml} sont des coefficients globaux fondés sur la moyenne arithmétique ou la moyenne logarithmique des différences de températures. Ils sont en général différents et, dans de nombreux appareils de transfert, les coefficients de transferts partiels définis par la relation **(6)** sont voisins du coefficient global h_{ml}.

Pour évaluer les coefficients partiels et globaux, introduits précédemment à partir de la connaissance des débits transférés, il est nécessaire de connaître la température du fluide à la surface du solide, température délicate à mesurer. Aussi préfère-t-on définir le débit transféré par rapport à une différence de température plus facilement accessible, par exemple celle entre les températures du noyau turbulent du fluide intérieur et extérieur, soit :

$$d\Phi = \mathrm{U}d\mathrm{S}_m\,(t_1 - t_6)$$

Le coefficient U représente une conductance globale de transfert et S_m désigne une valeur moyenne de la surface solide de séparation.

En régime stationnaire, le débit élémentaire transféré est tel que :

$$d\Phi = \frac{d\mathrm{S}_m\,(t_1 - t_6)}{\dfrac{1}{\mathrm{U}}} = \frac{(t_1 - t_6)}{\dfrac{1}{h_i d\mathrm{S}_i} + \dfrac{x}{\lambda d\mathrm{S}_m} + \dfrac{1}{h_e d\mathrm{S}_e}}$$

La résistance globale locale est la somme de trois résistances partielles placées en série.

Représentation des conductances de transfert

L'analyse des critères adimensionnels fait apparaître deux critères contenant le coefficient de transfert convectif.

★ *Le critère de Margoulis (ou de Stanton)*

Il représente l'efficacité locale du transport transversal par rapport au transport longitudinal. Il est tel que :

$$\mathcal{MS}_t = \frac{h}{\rho_m\,\mathrm{C}_{pm}\,\mathrm{U}_m}$$

On relie ce critère d'une part au *critère de Prandtl* :

$$\mathcal{P}r = \frac{\nu}{\alpha}$$

où ν et α désignent respectivement les diffusivités de quantité de mouvement (ou viscosité cinématique) et thermique, et d'autre part au *critère de Reynolds* :

$$\mathcal{R}e = \frac{\rho_m\,\mathrm{U}_m\,d}{\mu_m}$$

où μ_m est la viscosité moyenne du fluide et d une longueur caractéristique de l'enceinte dans laquelle s'effectue le transfert.

Le *critère de Prandtl* est caractéristique des propriétés physico-chimiques diffusionnelles du fluide, et le critère de Reynolds est caractéristique de la nature de l'écoulement.

D'autres critères peuvent intervenir également :

— Le rapport $\frac{\mathrm{L}}{d}$ où L est la longueur d'une conduite cylindrique de diamètre d. Ce rapport permet de tenir compte des perturbations dues aux extrémités de la conduite.

— Le rapport $\left(\frac{\mu_m}{\mu_p}\right)^{0,14}$ où μ_p est la viscosité du fluide à la température de la paroi. Ce rapport permet de tenir compte des variations de viscosité en fonction de la température (variation importante dans le cas des liquides).

A l'exception des gaz sous faible pression, pour lesquels l'analogie entre les trois transferts, de matière, de chaleur et de quantité de mouvement est sensiblement réalisée, Colburn a montré expérimentalement qu'un meilleur accord était observé dans tous les cas entre les trois transports en considérant les trois critères adimensionnels suivants :

— Pour la matière $j_m = \mathcal{MS}_m\,(\mathcal{S}c)^{2/3}$

$\mathcal{MS}_m$ représente le *critère de Margoulis* pour la matière

$$\mathcal{MS}_m = \frac{k_\mathrm{D}}{u_m}$$

où k_D est la conductance globale de transfert de matière ;

$\mathcal{S}c$ représente le *critère de Schmidt;* il est tel que $\mathcal{S}c = \frac{\nu}{D}$

où D est la diffusivité du soluté transféré dans la phase fluide.

— Pour la chaleur $j_t = \mathcal{M}S_t\ (\mathcal{P}r)^{2/3}$

— Pour la quantité de mouvement :

$$\frac{f}{2} = \frac{\tau_s}{\rho u_m^2}$$

où τ_s est la contrainte de frottement sur la paroi, due à la nature visqueuse du fluide.

Le critère $f/2$ ou facteur de frottement n'est rien d'autre que le critère de Margoulis relatif au transfert de quantité de mouvement.

Les critères j_m, j_t et $f/2$ sont tels que :

$$j_m = j_t = f/2 \quad (7)$$

La relation **(7)** proposée par Colburn (*Trans. Am. Inst. Chem. Engrs*, 29, 174 [1933]) est assez bien vérifiée expérimentalement. Aussi utilise-t-on indifféremment pour le transfert de chaleur convectif les critères $\mathcal{M}S_t$ ou j_t.

★ *Le critère de Nusselt*

Il représente le rapport d'une dimension géométrique de l'appareil à l'épaisseur de la couche limite dans le modèle à deux zones. Il est tel que :

$$\mathcal{N}u = \frac{hd}{\lambda}$$

Bien que le critère de Margoulis ou le facteur j_t soient directement accessibles par l'expérience, le critère de Nusselt est plus usuel pour représenter les variations du coefficient de transfert en fonction des grandeurs intervenant dans les nombres adimensionnels :

$$\mathcal{R}e,\ \mathcal{P}r,\ \frac{L}{d},\ \left(\frac{\mu_m}{\mu_p}\right)^{0,14}$$

Nous allons dans ce qui suit donner quelques-unes des corrélations permettant d'avoir un ordre de grandeur du coefficient de transfert. En effet, dans de nombreux cas, il ne s'agira que d'un ordre de grandeur, la dispersion des résultats expérimentaux étant de l'ordre de 30 à 50 % par suite de l'influence de certains paramètres difficilement contrôlables tels que l'état de surface des supports solides par exemple.

Convection forcée

★ *A l'intérieur de la conduite*

● *Écoulement laminaire*

Les écoulements laminaires ont été étudiés théoriquement de manière détaillée pour de nombreuses géométries et différentes conditions aux limites. Cependant l'écoulement laminaire idéal est très rare et, en particulier, la convection naturelle est très souvent présente et l'hypothèse d'un transport transversal de la chaleur uniquement par conduction moléculaire n'est pas correcte. Aussi, des relations plus empiriques conduisent souvent à des résultats plus voisins des valeurs expérimentales.

▼ ***Tableau IX :** **valeurs limites du critère $(\mathcal{N}u)_{ml}$ pour différentes formes de conduites fermées.***

Tableau IX
Valeurs limites du critère $(\mathcal{N}u)_{ml}$ pour différentes formes de conduites fermées

Section de la conduite	Valeur limite de $(\mathcal{N}u)_{ml}$	
	à température constante	à flux constant
Cercle	3,66	4,36
Triangle équilatéral	—	3,00
Carré $\left(\frac{a}{b} = 1\right)$	2,89	3,63
Rectangle $\left(\frac{a}{b} = 0,5\right)$	3,39	4,11
Plans parallèles illimités $\left(\frac{a}{b} \to 0\right)$	7,60	8,24

Le coefficient de transfert moyen (moyenne logarithmique ou arithmétique) est généralement introduit dans un critère de Nusselt ne dépendant dans de nombreux cas que du *critère de Gruetz* tel que :

$$\mathcal{G}z = \mathcal{R}e\mathcal{P}r\frac{d}{L}$$

Dans certains cas, on tient compte de la convection naturelle en introduisant, comme nous le verrons plus loin, le *critère de Graetz.*

Les études théoriques montrent que, pour des tubes très longs, le critère $(\mathcal{N}u)_{ml}$ tend vers une valeur limite. Dans le *tableau* IX, on a reporté ces valeurs limites pour différentes formes de conduites cylindriques fermées et pour les deux hypothèses classiques postulées à la paroi : température de la paroi constante, et flux de chaleur transféré à la paroi constant.

Parmi les relations expérimentales proposées, pour des tubes cylindriques circulaires de longueurs finies, on pourra utiliser :

— la *relation de Hausen* (*Z. Ver. Deut. Beih. Verfahrenstech.* n° 4, 91 [1943]) valable pour $\mathcal{G}z < 100$, soit :

$$(\mathcal{N}u)_{ml} = 3,66 + \frac{0,085\ \mathcal{G}z}{1 + 0,047\ (\mathcal{G}z)^{2/3}} \left(\frac{\mu_m}{\mu_p}\right)^{0,14} \quad (8)$$

— la *relation de Sieder et Tate* (*Ind. Eng. Chem.*, 28, 1429 [1936]) valable pour $\mathcal{G}z > 100$, soit :

$$(\mathcal{N}u)_{ma} = 1,86\ (\mathcal{G}z)^{1/3} \left(\frac{\mu_m}{\mu_p}\right)^{0,14} \quad (9)$$

Pour des conduites fermées non circulaires, différentes relations ont été proposées pour chacune des géométries particulières, mais, comme le précisent Kays et London (*Compact Heat Exchangers*, 2e ed. Mac Graw Hill, New York [1964]), on peut utiliser les relations **(8)** et **(9)** à condition toutefois de remplacer le diamètre introduit dans les critères par un diamètre d_e défini par la relation :

$$d_e = 4\,\frac{\text{volume du fluide}}{\text{surface solide mouillée par le fluide}} = 4\,d_H$$

où d_H est le diamètre hydraulique de la conduite.

● *Écoulement intermédiaire*

Entre la limite supérieure de l'écoulement laminaire ($\mathcal{R}e = 2\,100$) et la limite inférieure de l'écoulement turbulent ($\mathcal{R}e = 5\,000$) se situe le domaine où l'écoulement est dit intermédiaire. Il n'existe pas de relation unique permettant de représenter avec précision ce domaine.

Lorsque $L/d > 60$, la relation proposée par Hausen (*Z. Ver. Deut. Ing. Beih. Verfahrenstech.* n° 4, 91, [1934]) représente bien les résultats aux extrémités de la zone intermédiaire, soit :

$$(\mathcal{N}u)_{ma} = 0,116\ (\mathcal{R}e^{2/3} - 125)\ \mathcal{P}r^{1/3} \left[1 + \left(\frac{d}{L}\right)^{2/3}\right] \left[\frac{\mu_m}{\mu_p}\right]^{0,14}$$

● *Écoulement turbulent*

A partir de modèles fondés sur la distribution des vitesses en régime turbulent à l'intérieur des conduites cylindriques circulaires et en tenant compte des analogies entre transfert de chaleur et de quantité de mouvement, on aboutit aux relations dites *relations de Prandtl-Taylor et de von Karman.* Ces relations sont trop complexes et pas plus précises que certaines relations empiriques.

Ainsi pour $\mathcal{R}e > 10^4$, $0,7 < \mathcal{P}r < 700$, $\frac{L}{d} > 60$, les propriétés physico-chimiques du fluide étant évaluées à la température moyenne du fluide, on pourra employer la relation dite *relation de Sieder et Tate*, soit :

$$\mathcal{N}u = 0,023\ \mathcal{R}e^{0,8}\ (\mathcal{P}r)^{1/3} \left(\frac{\mu_m}{\mu_p}\right)^{0,14}$$

qui s'écrit en fonction du critère de Colburn j_t :

$$j_t = \mathcal{M}S_t\ (\mathcal{P}r)^{2/3} \left(\frac{\mu_m}{\mu_p}\right)^{0,14} = 0,023\ (\mathcal{R}e)^{0,8}\ \# \ \frac{f}{2} \quad (10)$$

Dans l'équation **(10)**, le facteur tenant compte de la variation de la viscosité en fonction de la température peut être supprimé si les propriétés physico-chimiques du fluide sont évaluées à la température de film :

$$t_f = \frac{t_m + t_p}{2}$$

Les relations précédentes ne sont valables que dans le cas de tubes lisses. Pour des tubes rugueux, par suite de l'analogie de Colburn, il suffira de remplacer dans la relation **(10)** le terme $0{,}023\ \mathcal{R}e^{0,8}$ par la valeur du facteur de frottement relatif aux tubes rugueux, soit :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4{,}06 \log \frac{d}{2\,e} + 3{,}36$$

où e est la hauteur moyenne des protubérances.

Dans le cas de l'air et de l'eau, il existe des relations donnant directement le coefficient de transfert.

Comme dans le cas de l'écoulement laminaire et intermédiaire, il est possible en écoulement turbulent de tenir compte des effets dus aux extrémités. Le coefficient de transfert pour une conduite de longueur L est lié au coefficient de transfert évalué à l'aide des relations précédentes (soit h_∞) par une loi du type :

$$\frac{h\mathrm{L}}{h_\infty} = 1 + \mathrm{F}\frac{d}{\mathrm{L}}$$

Des valeurs du coefficient F ont été précisées par Kays (*Convective Heat and Mass Transfer*, Mc Graw Hill, New York [1964]), Knudsen et Katz (*Fluid Dynamic and Heat Transfer*, Mc Graw Hill, New York [1958]).

Les valeurs suivantes peuvent être utilisées :

— profil de vitesse totalement établi : F = 1,4

— rétrécissement brusque à l'entrée : F = 6

— coude à 90° : F = 7

— courbure à 180° : F = 6.

Pour des espaces annulaires concentriques, on peut définir des coefficients différents pour chacune des parois, mais, comme le précise Mac Adams (*Transmission de la chaleur*, Dunod, Paris [1964]), on peut prendre une valeur unique pour les deux coefficients à condition d'évaluer cette valeur à l'aide de la relation de Sieder et Tate dans laquelle on a remplacé le diamètre de la conduite par le diamètre équivalent. Cette procédure pourra également s'appliquer au cas des conduites cylindriques non circulaires.

* *A l'extérieur d'obstacles solides*

● *Tube isolé perpendiculaire à l'écoulement*

Pour des tubes cylindriques à 100 °C, de diamètre compris entre 0,3 et 15 cm, Hilpert (*Forschung and d. Geb. d. Ingenieurwes.* n° 4, 125, [1933]) a étudié le transfert de chaleur avec de l'air dont la température variait de 19 à 24 °C. L'ensemble des résultats expérimentaux peut être représenté par une équation de la forme :

$$\mathcal{N}u = \frac{h_m d_0}{\lambda} = a\left(\frac{\rho u d_0}{\mu}\right)^n$$

d_0 est le diamètre de la conduite cylindrique. Les valeurs de a et n à utiliser sont reportées dans le *tableau* X.

D'autres relations ont été proposées pour des domaines plus étendus en critères de Reynolds. L'équation précédente établie pour l'air reste valable pour les gaz diatomiques.

Pour les liquides, il est nécessaire de faire intervenir le critère de Prandtl. Ulsamer (*Forschung and d. Geb. d. Ingenieurwes.*, n° 3, 94 [1932]) propose une relation du type :

$$\mathcal{N}u = a\left(\frac{\rho u d_0}{\mu}\right)^n (\mathcal{P}r)^{0,3}$$

Les valeurs de a et n à utiliser sont reportées dans le *tableau* XI.

● *Faisceau de tubes*

Les tubes peuvent être disposés dans une direction normale à l'écoulement soit dans un même plan, soit en quinconce. Il est difficile de préciser la nature de l'écoulement car la section offerte au passage du fluide varie constamment. Certains auteurs définissent un critère de Reynolds avec la vitesse du fluide entre deux tubes. Aucune équation n'est applicable directement aux échangeurs industriels. Dans le cas de rangées de tubes en quinconce, Colburn (*Trans. Am. Inst. Chem. Engrs.* 29, 174 [1933]) recommande la relation :

$$\frac{h_m d_0}{\lambda} = 0{,}33\ (\mathcal{P}r)^{1/3}\left(\frac{\rho u_{\max}\, d_0}{\mu}\right)^{0,6}$$

Tableau X
Coefficients à utiliser dans le cas de la convection forcée entre l'air et l'extérieur d'un tube isolé perpendiculaire à l'écoulement

$\dfrac{\rho u\, d_0}{\mu}$	n	a	$\dfrac{h_m\, d_0}{\lambda}$
1-4	0,330	0,891	0,891 - 1,42
4-40	0,385	0,821	1,40 - 3,40
40-4 000	0,466	0,615	3,43 - 29,6
4 000-40 000	0,618	0,174	29,5 -121
40 000-200 000	0,805	0,023 9	121 -528

Tableau XI
Coefficients à utiliser dans le cas de la convection forcée entre un liquide et l'extérieur d'un tube isolé perpendiculaire à l'écoulement

$\dfrac{\rho u\, d_0}{\mu}$	n	a
0,1-50	0,385	0,91
50-10 000	0,500	0,60

▲ ***Tableau X** : valeurs des différents coefficients à utiliser dans le cas de la convection forcée entre l'air et l'extérieur d'un tube isolé perpendiculaire à l'écoulement.*
***Tableau XI** : valeurs des différents coefficients à utiliser dans le cas de la convection forcée entre un liquide et l'extérieur d'un tube isolé perpendiculaire à l'écoulement.*

$u_{\max}$ représente la vitesse du fluide dans la section minimale rencontrée. Cette équation est valable pour des critères de Reynolds $\frac{\rho u_{\max}\, d_0}{\mu}$ compris entre 2 000 et 32 000 et pour des rangées de tubes alignés, Colburn a suggéré de ramener la constante 0,33 de l'équation précédente à 0,26.

Lorsque le nombre de rangées de tubes augmente, le coefficient de transfert augmente puis atteint une valeur asymptotique d'ailleurs indépendante de la forme géométrique, dès que le nombre de rangées est supérieur à 10.

● *A travers des lits à structure granulaire*

Les coefficients de transfert de chaleur au niveau d'une particule sphérique isolée peuvent être prévus théoriquement ; on trouve :

$$\mathcal{N}u = 2$$

Cette relation n'est valable que dans le cas où le diamètre de la particule est très supérieur au libre parcours moyen des molécules du fluide. En présence de convection libre (exemple des évaporations), Ranz et Marshall ont établi la relation :

$$\mathcal{N}u = 2{,}0 + 0{,}6\ (\mathcal{P}r)^{1/3}\ (\mathcal{G}r)^{1/4}$$

où $\mathcal{G}r$ est le critère de Grashof dont l'expression sera explicitée plus loin.

Lorsque le critère de Grashof devient négligeable devant le critère de Reynolds, les différentes relations proposées sont telles qu'aux faibles valeurs du critère de Reynolds, le critère de Nusselt doit prendre des valeurs voisines de 2. Cela n'est vérifié que pour des particules de diamètre supérieur à 1 mm. Parmi les relations, nous citerons celles de Boussinesq :

$$\mathcal{N}u = 1{,}23\ \ \mathcal{R}e^{0,5}\ (\mathcal{P}r)^{1/2} \quad \text{valable pour } \mathcal{R}e > 100$$

et de Pigford :

$$\mathcal{N}u = 0{,}714\ \mathcal{R}e^{0,5}\ (\mathcal{P}r)^{1/2} \quad \text{valable pour } \mathcal{R}e > 500.$$

Les deux relations précédentes donnent un ordre de grandeur du domaine d'incertitude des déterminations expérimentales des coefficients de transfert.

Dans le cas des lits fixes, l'indétermination sur les coefficients de transfert est encore plus importante et les résultats expérimentaux sont traduits généralement sous forme de courbes. Les coefficients de transfert en lit fixe sont supérieurs pour un même critère de Reynolds à ceux de la particule isolée.

Certains auteurs tiennent compte des effets dus à la paroi au voisinage de laquelle la porosité du lit est plus grande. On admet que les effets de paroi sont négligeables lorsque le rapport dt/dp est supérieur à 18 ; dt et dp désignent respectivement le diamètre de la conduite et le

diamètre de la particule. Ainsi Baumester et Bennett (*A.I. ch. E Journal*, 4, 69 [1958]) proposent les relations :

$$\text{pour } \frac{dt}{dp} < 18 \quad \mathcal{N}u = 1{,}09\ \mathcal{R}e^{0{,}68}\ (\mathcal{P}r)^{1/3}$$

$$\text{pour } \frac{dt}{dp} > 18 \quad \mathcal{N}u = 0{,}92\ \mathcal{R}e^{0{,}72}\ (\mathcal{P}r)^{1/3}$$

Une valeur moyenne du critère de Nusselt préconisée par Kunii et Levenspiel (*Fluidization Engineering*, John Wiley and Sons, New York [1969]), pour $\mathcal{R}e > 100$ et $dp < 1$ mm, s'écrit :

$$\mathcal{N}u = 2{,}0 + 1{,}8\ (\mathcal{R}e)^{0{,}5}\ (\mathcal{P}r)^{1/3}$$

Lorsque le diamètre des particules devient inférieur à 1 mm, on obtient expérimentalement des critères de Nusselt inférieurs à la valeur limite 2. Ceci a pu être expliqué de manière qualitative et même quantitative mais les difficultés rencontrées lors des mesures expérimentales ne permettent pas de justifier totalement les hypothèses faites pour rendre compte de ces effets.

En ce qui concerne le transfert de chaleur à la paroi, de nombreuses relations ont été proposées. Pendant longtemps, on a utilisé des relations du type de celles proposées par Leva (*Chem. Eng. Progr*, 45, 563 [1943], *Ind. Eng. Chem.*, 40, 747 [1948]), soit :

réacteur réchauffé :

$$\frac{hdt}{\lambda} = 0{,}813 \exp.\left(-\frac{6\ dp}{dt}\right)\left(\frac{\rho udp}{\mu}\right)^{0{,}9}$$

réacteur refroidi :

$$\frac{hdt}{\lambda} = 3{,}50 \exp.\left(-\frac{4{,}6\ dp}{dt}\right)\left(\frac{\rho udp}{\mu}\right)^{0{,}7}$$

Ces corrélations se révèlent suffisantes dans le cas où le débit de chaleur produit au sein du lit est nul ou faible. En revanche, en présence de réactions fortement exo- ou endothermiques, le transfert de chaleur dans le lit doit être caractérisé par deux paramètres :

— une conductivité apparente λ_e ;

— un coefficient de transfert convectif au voisinage de la paroi, α_w. Pour chacune de ces grandeurs, on distingue d'une part une contribution statique et d'autre part une contribution dynamique. Les contributions statiques peuvent être estimées à partir de modèles de transport proposés initialement par Kunii et Smith. Des relations donnant les contributions dynamiques ont été établies par Froment pour un écoulement d'air, le critère de Reynolds variant de 30 à 10 000, soit :

$$\lambda_{eD} = \frac{0{,}002\,5}{1 + 46\left(\dfrac{dp}{dt}\right)^2}\mathcal{R}e$$

$$\alpha_{wD} = \frac{0{,}011\,5\ dt}{dp}\mathcal{R}e$$

Dans le cas d'un réacteur cylindrique circulaire, le coefficient de transfert h estimé à partir des relations de Léva est lié aux grandeurs λ_e et α_w par la relation :

$$\frac{1}{h} = \frac{1}{\alpha_w} + \frac{dt}{8\ \lambda_e}$$

En lit fluidisé, on pourrait penser que la valeur du coefficient de transfert doit rester comprise entre celles du lit fixe et de la particule isolée. Cela n'est observé expérimentalement que pour de très grosses particules et des critères de Reynolds supérieurs à 100. En réalité, les particules utilisées dans les lits fluides ont des diamètres moyens inférieurs à 1 mm et, pour un même critère de Reynolds, la valeur du coefficient de transfert en lit fluide est sensiblement 3 fois plus petite que celle en lit fixe. Pour des critères de Reynolds inférieurs à 100, de nombreux résultats expérimentaux peuvent être interprétés par la relation :

$$\mathcal{N}u = 0{,}3\ \mathcal{R}e^{1/3}$$

Quant au coefficient de transfert de chaleur entre le lit fluide et la paroi du lit ou une paroi intérieure au lit, il est d'une manière générale 20 à 40 fois plus grand que le coefficient de transfert entre la phase fluide et la particule. De nombreuses corrélations ont été proposées pour évaluer ces coefficients de transfert. Les principales sont rappelées dans l'ouvrage de Kunii et Levenspiel indiqué précédemment.

Convection libre

Le transport de chaleur dû à l'existence du gradient de température est couplé à un transport de matière provoqué par la différence de masse volumique.

Dans le cas d'une paroi plane verticale de hauteur L, à la température t_p baignée dans un fluide au repos à la température t_1, le flux de chaleur transféré entre le fluide et la paroi est proportionnel à la différence de température $t_p - t_1$. Le coefficient de transfert peut être obtenu de manière rigoureuse si l'écoulement du fluide au voisinage de la paroi est laminaire. La résolution a été proposée initialement par Pohlhausen (*Zeitschrift fur angew. Math und. Mech.* 1, 115 [1921]), Schmidt et Beckmann (*Techn. Mech. and Termodynamik* 1, 341, 391 [1930]) ; Le coefficient de transfert est tel que :

$$\textbf{(11)}\quad h_m = 0{,}518\,\frac{\lambda}{\mathrm{L}}\left(\frac{\beta g\ (t_p - t_1)\ \rho^2 \mathrm{L}^3}{\mu^2}\right)^{1/4}\left(\frac{\mu C_p}{\lambda}\right)^{1/4}$$

où β est le coefficient de dilatation volumique du fluide :

$$\beta = -\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial\rho}{\partial \mathrm{T}}\right) = \frac{1}{v}\left(\frac{\partial v}{\partial \mathrm{T}}\right)$$

v représentant le volume molaire.

En introduisant le critère adimensionnel dit de Grashof, soit :

$$\mathcal{G}r = \frac{\beta g\ (t_p - t_1)\ \rho^2 \mathrm{L}^3}{\mu^2}$$

la relation **(11)** s'écrit sous forme adimensionnelle :

$$\textbf{(12)}\quad \mathcal{N}u_{\mathrm{L}} = 0{,}518\ (\mathcal{G}r_{\mathrm{L}}\mathcal{P}r)^{1/4}$$

Lorsque la hauteur de la plaque est suffisante, et plus précisément lorsque le critère de Grashof atteint certaines

Tableau XII

Coefficient *a* pour quelques géométries usuelles dans le cas de la convection libre

Surface	Dimension caractéristique	Coefficient *a*	
		Régime laminaire	Régime turbulent
Plan ou cylindre vertical *	hauteur	0,56	0,12
Cylindre horizontal	diamètre	0,47	0,12
Plan horizontal face supérieure	largeur	0,57	0,14
Plan horizontal face inférieure	largeur	0,25	—

* Le cylindre vertical conduit au même résultat que le plan vertical à condition que son diamètre soit très supérieur à l'épaisseur de la couche de fluide en mouvement.

► ***Tableau XII** : valeur du coefficient a pour quelques géométries usuelles dans le cas de la convection libre.*

▲ ***Exemple d'appareil réalisant des échanges par convection avec changement de phase, le liquéfacteur mixte à hélium et à hydrogène fonctionne automatiquement avec un débit de 6,5 litres d'hélium liquide par heure.***

valeurs, les filets de fluide en écoulement au voisinage de la plaque ne restent plus parallèles à la surface plane ; il apparaît de la turbulence. La relation **(12)** n'est plus valable, mais de manière générale le coefficient global de transfert reste donné par des relations du type :

$$\mathcal{N}u_L = a\,(\mathcal{G}r_L\mathcal{P}r)^n$$

Le coefficient *a* dépend de la géométrie, de l'orientation et du régime d'écoulement, alors que l'exposant *n* ne dépend que du régime d'écoulement. La transition entre les régimes d'écoulement laminaire et turbulent se produit pour des valeurs du produit $\mathcal{G}r\mathcal{P}r$ voisines de 10^9.

L'exposant *n* vaut 0,25 en écoulement laminaire et 0,33 en écoulement turbulent. Des valeurs du coefficient *a*, pour quelques géométries usuelles, sont reportées dans le *tableau* XII.

Convection avec changement de phase

* *La condensation*

La condensation se produit lorsqu'une vapeur saturée se trouve au contact d'une surface à une température inférieure ou égale à la température de saturation. La condensation peut présenter alors deux aspects.

— La formation de gouttelettes qui ruissellent sans couler le long de la paroi. Ce type de condensation a été observé pour la vapeur d'eau ou des vapeurs immiscibles, en présence de surfaces métalliques propres, polies ou convenablement traitées. Dès que l'état de la surface présente des irrégularités, la condensation en gouttes disparaît. On aboutit au second aspect, soit :

— La formation d'un film continu de vapeur condensée s'écoulant le long de la paroi. C'est le cas le plus fréquent, et bien que la condensation en gouttes conduise à des débits de chaleur transférés 6 à 8 fois plus grands que la condensation en film, tous les condenseurs industriels sont évalués avec l'hypothèse d'une condensation en film.

Seul ce type de condensation a été étudié théoriquement. La première théorie, due à Nusselt, date de 1916 (*Z. Ver. Deut. Ing.*, 60, 541 [1916]).

Soit une plaque verticale à la température t_p sur laquelle se condense en film une vapeur saturée à la température t_v. Γ désignant le débit massique de liquide condensé par unité de périmètre de film, on introduit un critère de Reynolds défini de la manière suivante :

$$\mathcal{R}e = \frac{4\,\Gamma}{\mu}$$

Pour $\mathcal{R}e < 2\,100$, l'épaisseur du film de liquide condensé vaut $\left(\frac{3\,\mu\Gamma}{\rho^2 g}\right)^{1/3}$ et le coefficient de transfert moyen, pour une surface verticale de hauteur L, est tel que :

$$\mathcal{N}u_L = \frac{hL}{\lambda} = 0{,}943\left(\frac{\Lambda\rho^2 g L^3}{\lambda\mu\,(t_p - t_v)}\right)^{1/4} = 0{,}925\left(\frac{\rho^2 g L^3}{\mu\Gamma}\right)^{1/3}$$

Λ est la chaleur latente massique de vaporisation à la température de la paroi. Les caractéristiques physico-chimiques du film liquide doivent être évaluées à la température du film, soit $\frac{t_p + t_v}{2}$.

La relation précédente reste également valable pour un tube cylindrique vertical à condition que le diamètre du cylindre soit grand devant l'épaisseur du film.

Dans le cas d'une conduite horizontale de diamètre *d*, de longueur L et pour des critères de Reynolds inférieurs à 2 100, Γ est égal à $m/2\,L$ où *m* représente le débit massique de vapeur condensée.

Le coefficient de transfert est donné par la relation :

$$\mathcal{N}u_L = \frac{hd}{\lambda} = 0{,}73\left(\frac{\Lambda\rho^2 g d^3}{\lambda\mu\,(t_p - t_v)}\right)^{1/4} = 0{,}76\left(\frac{\rho^2 g d^3}{\mu\Gamma}\right)^{1/3}$$

Pour une rangée verticale de tubes cylindriques horizontaux où le condensat du tube supérieur tombe entièrement et sans éclaboussures sur le tube situé en dessous et pour des critères de Reynolds inférieurs à 2 100, le coefficient de transfert de la rangée horizontale N est lié à celui de la rangée du sommet (N = 1) par la relation :

$$\textbf{(13)}\qquad \frac{h_N}{h_1} = N^{0,75} - (N-1)^{0,75}$$

Ainsi $h_2 = 0{,}68\,h_1$, $h_3 = 0{,}60\,h_1$, $h_4 = 0{,}55\,h_1$, etc.

h_N décroît avec N mais le coefficient de transfert des tubes inférieurs est en général supérieur à celui donné par

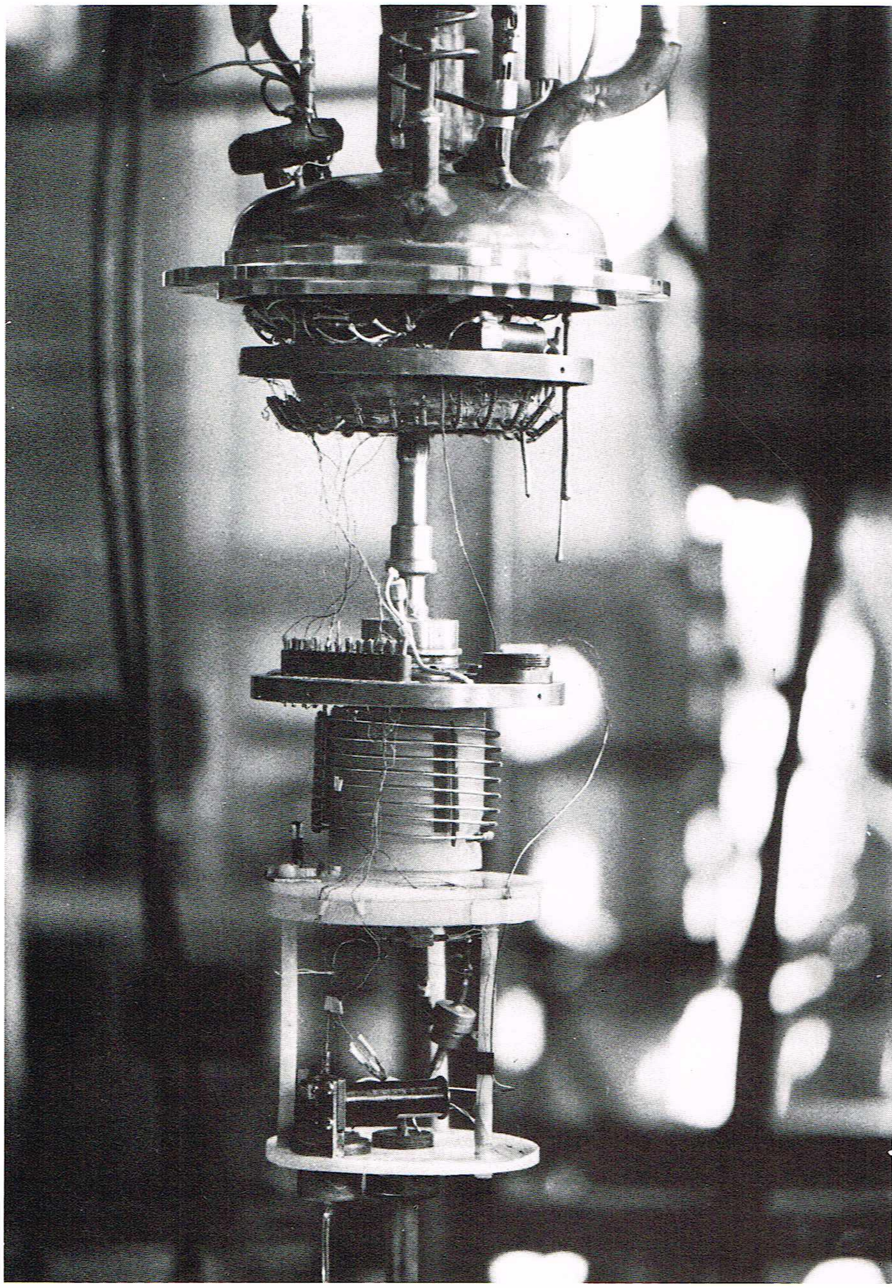

▲ ***Partie inférieure d'un* réfrigérateur à dilution *d'hélium 3 dans l'hélium 4 : détail de l'échangeur et de la boîte de mélange.***

▼ ***Figure 2 : courbe du flux de chaleur transféré en fonction de la différence de température Δt, lors de la vaporisation d'un liquide ; on peut noter la présence de cinq zones.***

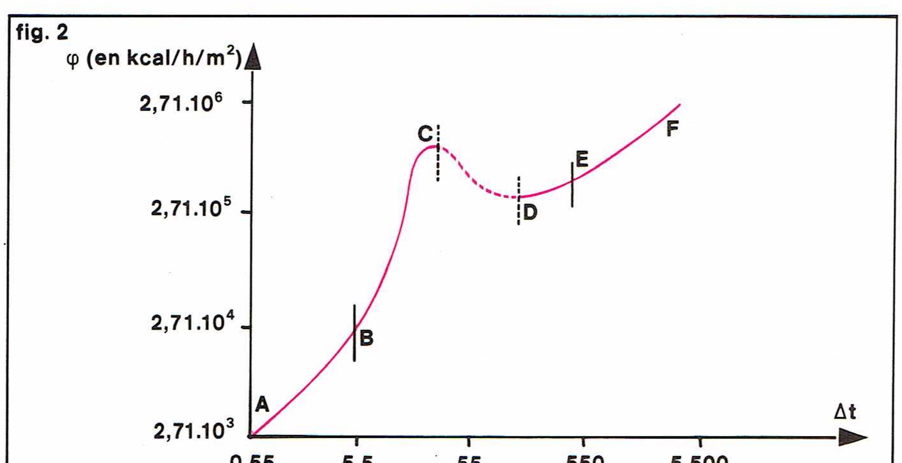

la relation **(13)** par suite de la turbulence provoquée par les clapotis et les éclaboussures du condensant tombant d'un tube sur un autre.

Pour une rangée de N tubes horizontaux, la valeur moyenne du coefficient de transfert est telle que :

$$\frac{\overline{h_N}}{h_1} = N^{-1/4}$$

Bien que le coefficient de transfert pour un tube horizontal soit supérieur au coefficient de transfert obtenu pour le tube placé verticalement, le coefficient de transfert moyen pour une rangée de N tubes horizontaux devient rapidement inférieur au coefficient de transfert du tube vertical.

Généralement, la condensation est réalisée à l'extérieur des tubes. Cependant, dans le cas de vapeurs corrosives ou des rebouilleurs à vapeur, on préfère effectuer la condensation à l'intérieur de tubes.

Pour des tubes verticaux où la vapeur et le condensat s'écoulent à co-courant de haut en bas, et tant que le régime d'écoulement du film liquide reste laminaire, le coefficient de transfert pourra être évalué par la relation :

$$h = 1{,}5 \left[\frac{\Lambda\lambda^2\rho}{6\ \mu L\ (t_v - t_p)}\ \rho_v\ u_v^2\right]^{1/3}$$

u_v est la vitesse de la vapeur dans le tube. Cette relation est valable à condition que la masse volumique ρ_v et la vitesse u_v de la vapeur soient sensiblement constantes le long du tube, ce qui est le cas lorsque la fraction condensée demeure faible.

Si l'écoulement n'est plus contrôlé par les forces de gravité mais par celles de viscosité, le coefficient de transfert pourra être évalué par des corrélations plus empiriques proposées par Carpenter et Colburn (*General Discussion on Heat Transfer*, London, 1951, ASME, New York) ou par Boyko-Kruzhilim (*Inter. J. Heat Mass Transfer*, 10, 361 [1967]).

Pour des condensations à l'intérieur de tubes cylindriques horizontaux et pour de faibles débits de vapeur, on pourra utiliser la modification de l'équation de Nusselt préconisée par Kern (*Process Heat Transfer*, Mc Graw Hill, New York, [1950]), soit :

$$h = 0{,}612 \left(\frac{\Lambda\lambda^3\rho_l\ (\rho_l - \rho_v)\ g}{\mu d\ (t_v - t_p)}\right)^{1/4}$$

Une relation plus précise a été proposée par Chaddock (*Refrig. Eng.* 65, 36 [1957]). Ce type de condensation est réalisé industriellement dans les rebouilleurs utilisant la vapeur d'eau comme fluide chaud.

Nous ne rappelons pas ici les lois de condensation des mélanges de vapeur saturée et non saturée en présence d'un gaz non condensable.

● *L'ébullition (ou vaporisation)*

La vaporisation est la transformation isotherme d'une phase liquide pure en vapeur. La chaleur nécessaire à la vaporisation peut être apportée par convection et rayonnement à partir d'une source n'étant pas en contact direct avec le liquide ou par une surface métallique baignant dans la phase liquide. Ce dernier type de vaporisation est plus fréquent et il n'apparaît de vapeur que si le liquide est suffisamment surchauffé à sa surface libre.

Le premier type de vaporisation n'est rien d'autre que l'évaporation. La chaleur nécessaire à l'évaporation est fournie par la source de chaleur constituée par l'atmosphère gazeuse située au-dessus du liquide. A l'exception d'une diminution du niveau du liquide dans un récipient initialement rempli, aucune autre manifestation visuelle n'accompagne le phénomène de vaporisation.

Le deuxième type de vaporisation ou d'ébullition a été analysé clairement en 1934 par Nikuyama (*J. Soc. Mech. Engrs. Japan*, 37, 367 [1934]), mais Leidenfrost en 1756 (*De aquae communis nonnulis qualitatibus tractatus*, Duisburg, 1756) et Lang en 1888 (*Trans. Inst. Engrs. Shipbuilders, Scot.* 32, 279 [1888]) avaient déjà signalé l'existence de flux calorifiques minimal et maximal transmissibles par ébullition.

Les courbes donnant le flux transféré en fonction de la différence de température $\Delta t = t_p - t_l$ (où t_l est la température du liquide) présentent au moins cinq zones constituant ainsi la difficulté principale lors du calcul des évaporateurs et des chaudières.

Dans le cas de l'eau, on obtient des courbes semblables à celle reportée sur la *figure* 2.

Dans la zone AB, le liquide est chauffé par convection naturelle et l'évaporation ne se produit qu'en surface. Étant donné le mécanisme mis en jeu, le flux transféré est proportionnel à $(\Delta t)^{5/4}$.

Dans la zone BC, des bulles de vapeur se forment au niveau des noyaux actifs existant à la surface métallique et s'élèvent à travers le liquide, produisant des courants de circulation naturelle. L'ébullition est tout d'abord intranucléaire (les bulles n'atteignant pas la surface libre) puis nucléaire ou nucléée (les bulles de vapeur viennent crever sur la surface du liquide). Dans cette zone, le flux varie comme $(\Delta t)^n$, n étant compris entre 3 et 4. Au point C, le flux calorifique passe par un maximum pour une différence de *température* dite *critique*.

Dans la zone CD, il commence à apparaître un film de vapeur sur la surface métallique, et le flux de chaleur décroît lorsque Δt croît. C'est la région dite *région d'ébullition transitoire* ou *instable*.

Au point D, le flux est minimal : c'est le *point de Leiden frost*.

A partir de D, le film de vapeur occupe toute la surface métallique. C'est la zone d'ébullition en film. Entre D et E, le transfert de chaleur dans le film gazeux se fait essentiellement par conduction et, au-delà de E, le transfert par rayonnement devient de plus en plus prédominant.

Le point F correspond à la fusion et à la destruction de la surface métallique.

Du point de vue industriel, seules les zones d'ébullition nucléée et d'ébullition en film stable présentent un intérêt.

Le mécanisme d'ébullition nucléaire n'est pas encore établi de manière définitive mais il existe de nombreuses déterminations expérimentales du coefficient de transfert. Le choix entre les différentes corrélations proposées ne repose que sur une appréciation personnelle dépendant du problème d'ébullition étudié.

En effet, le coefficient de transfert dépend non seulement des propriétés physico-chimiques du liquide à vaporiser, mais aussi de la différence de température Δt, de la pression totale, de la nature et de l'état de surface de la source ainsi que de la forme géométrique du système dans lequel s'effectue la vaporisation. Pour la conception d'un évaporateur, il sera indispensable de connaître les différences de température au point critique et au point de Leiden frost.

Des corrélations fondées sur un grand nombre de données expérimentales ont été proposées. Indiquons à titre d'exemple celle de Rohsenow (*Trans. Am. Soc. Mech. Engrs*, 74, 969 [1956]), soit :

$$\frac{h\beta'}{\lambda}\left(\frac{\sigma}{g\,(\rho_l-\rho_v)}\right)^{1/2} = C_r\left[\left(\frac{\sigma}{g\,(\rho_l-\rho_v)}\right)^{1/2}\frac{\beta' m}{\mu\Omega}\right]^{2/3}\left(\frac{\mu C_p}{\lambda}\right)^{-0,7}$$

où β' est l'angle de contact que fait la bulle avec la surface en degrés, σ la tension superficielle du liquide à la température d'ébullition, m le débit massique du liquide vaporisé, et Ω l'aire de la surface métallique.

La constante C_r n'est pas à proprement parler une constante puisqu'elle varie de 0,006 à 0,015 (Westawer, *Advances in Chemical Engineering*, vol. I, Academic Press, New York [1956]).

Le flux maximal en ébullition nucléée peut être prévu par différentes relations, et en particulier par celle préconisée par Kutateladse-Zuber (*Trans. Am. Soc. Mech. Engrs*, 80, 711 [1958]), soit :

$$\varphi\ (\mathrm{W}/m^2) = \rho_v\Lambda\left[\frac{g\,(\rho_l-\rho_v)\,\sigma}{\rho_v^2}\right]^{1/4}$$

Dans le cas de l'ébullition en film (ou caléfaction), on pourra utiliser la relation due à Bromley, soit :

$$h = 0,620\left[\frac{g\Lambda\lambda_v^2\rho_v\,(\rho_l-\rho_v)}{\mu_v d\,\Delta t}\right]^{1/4}$$

Pour l'ébullition à l'intérieur des tubes, le phénomène est encore plus complexe, car les bulles de vapeur émises ne montent plus librement dans l'étroite section du tube. Seules des données expérimentales sont disponibles pour résoudre ce problème.

Le transfert par rayonnement

L'importance relative des divers transports de la chaleur d'un corps à un autre diffère beaucoup selon la température. Les phénomènes de conduction et de convection dépendent principalement des différences de températures et très peu de leur niveau, alors que les échanges de chaleur par rayonnement augmentent rapidement avec ce niveau. Il s'ensuit qu'aux basses températures la plus grande partie de la chaleur sera transmise généralement par conduction et convection, alors qu'aux températures élevées le transfert par rayonnement devient rapidement prédominant.

fig. 3

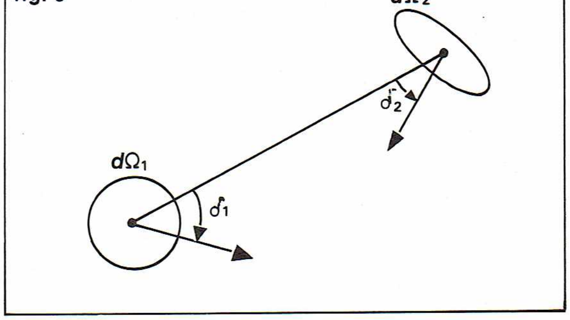

◀ ***Figure 3 : représentation du rayonnement entre deux éléments de surface $d\Omega_1$ et $d\Omega_2$.***

Nature du rayonnement thermique

Soit le faisceau de rayonnement entre deux éléments de surface $d\Omega_1$ et $d\Omega_2$. L'élément $d\Omega_1$ est vu du centre de $d\Omega_2$ sous l'angle solide $d\omega_2 = \dfrac{d\Omega_1 \cos\delta_1}{r^2}$ (*fig.* 3). De même l'élément $d\Omega_2$ est vu du centre de $d\Omega_1$ sous l'angle solide

$$d\omega_1 = \frac{d\Omega_2 \cos\delta_2}{r^2}$$

Le flux q rayonné par l'élément $d\Omega_1$ par unité d'angle solide porte le nom d'intensité I_1 du rayonnement et le débit de chaleur rayonné par la surface $d\Omega_1$ vers $d\Omega_2$ est donné par la *loi de Lambert* (ou loi du cosinus), soit :

(14) $$d\Phi_1 = q\,d\Omega_1 \cos\delta_1 = I_1 d\omega_1 d\Omega_1 \cos\delta_1$$

En l'absence d'absorption et de diffraction, l'intensité du rayonnement issu de $d\Omega_1$ dans le faisceau est constante.

Le pouvoir émissif e^0 d'une surface est par définition le flux émis par cette surface sur une surface hémisphérique située en avant de la surface émettrice. En intégrant l'équation **(14)**, on aboutit à la relation :

$$e^0 = \pi I$$

Les caractéristiques du rayonnement thermique entre deux surfaces sont bien connues dans le cas des *corps noirs* ou *corps radiants parfaits*.

Un corps noir absorbe intégralement tout rayonnement incident, et la qualité et l'intensité du rayonnement qu'il émet ne dépendent que de sa température. Le pouvoir émissif d'un corps noir vers une surface hémisphérique située en avant de la surface noire est donné par la loi de Stéphan-Boltzmann : $e^0 = \sigma T^4$, T étant exprimé en °K.

La constante σ dite de Stéphan vaut dans le système international : $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}\ \mathrm{W/m^2(°K)^4}$.

Il est quelquefois intéressant de connaître la répartition du rayonnement du corps noir dans le spectre et le déplacement de cette répartition en fonction de la température.

Si e_λ^0 est le pouvoir émissif monochromatique pour la longueur d'onde λ de telle sorte que $e_\lambda^0 d\lambda$ représente le pouvoir émissif à travers la demi-sphère située en avant pour les rayonnements de longueurs d'onde comprises entre λ et $\lambda + d\lambda$, la relation entre e_λ^0, λ, T est donnée par la loi de Planck :

$$e_\lambda^0 = \frac{2\,\pi h c^2 \lambda^{-5}}{e^{hc/k\lambda T} - 1}$$

c est la vitesse de la lumière $c = 2,997\,9 \cdot 10^8$ m/s

h est la constante de Planck $h = 6,623\,6 \cdot 10^{-34}$ W

k est la constante de Boltzmann $k = 1,308\,2 \cdot 10^{-23}$ J/°K

La loi de Planck est plus facile à retenir sous la forme :

$$\frac{e_\lambda^0}{T^5} = f\,(\lambda T) = \frac{c_1\,(\lambda T)^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1}$$

Avec $c_1 = 3,740\,3 \cdot 10^{-16}\ \mathrm{W \cdot m^2}$

et $c_2 = 1,438\,7 \cdot 10^{-2}\ \mathrm{m \cdot °K}$.

Le pouvoir monochromatique à une température quelconque part de 0 (à $\lambda = 0$), passe par un maximum et revient à 0 pour $\lambda = +\infty$. Pour toutes les longueurs d'onde, il croît avec la température, mais il croît d'autant plus vite que la longueur d'onde est plus courte, aussi la valeur du maximum se déplace vers les courtes longueurs d'onde lorsque la température s'élève. La longueur d'onde de l'intensité maximale est inversement proportionnelle à la température absolue ; c'est la **loi de déplacement de Wien,** soit :

$$\lambda_{max} T = 0{,}289\,8 \cdot 10^{-2}\ \mathrm{m} \cdot {}^\circ\mathrm{K}$$

Échange par rayonnement entre surfaces solides séparées par un milieu non absorbant

⋆ *Coefficients d'absorption* (α) *et d'émission* (ε)

Le rapport du pouvoir émissif d'une surface réelle à celui de la surface noire à la même température est appelé *coefficient* ou *facteur d'émission.* Ce facteur peut être spécifique d'une longueur d'onde, d'une direction ou de manière globale (coefficient d'émission monochromatique directionnel ou total).

De même, les rayonnements frappant une surface réelle ne sont pas totalement absorbés. Une partie est réfléchie ou diffusée ou même transmise à travers le corps (cas des corps transparents au rayonnement thermique dits diathermiques). La fraction absorbée est le *coefficient d'absorption ;* il peut être spécifique d'une longueur d'onde ou global. D'après la loi de Kirchhoff, les coefficients d'absorption et d'émission pour une surface et son environnement à la même température sont égaux, tant du point de vue monochromatique que du point de vue global.

D'une manière générale, la différence entre les facteurs d'absorption et d'émission est due à la différence de température du rayonnement incident et du rayonnement émis. Cependant, de nombreux corps sont tels que le facteur d'absorption monochromatique est indépendant de la longueur d'onde et, par suite, de la température du rayonnement incident. Dans ces conditions, la valeur unique du facteur d'absorption est égale au facteur total d'émission de la surface qualifiée de *grise.*

Par définition, les facteurs d'absorption et d'émission sont des grandeurs comprises entre 0 (corps transparents) et 1 (corps noir), mais, pour un même matériau, les coefficients d'émission peuvent varier notablement en fonction de la température, de l'état de surface et du degré d'oxydation dans le cas des métaux. Les coefficients d'absorption dépendent non seulement des paramètres précédents mais également de la qualité du rayonnement incident mesurée par sa distribution spectrale.

On trouvera dans les ouvrages généraux indiqués précédemment des tableaux et des courbes donnant les valeurs et les variations des coefficients d'absorption et d'émission.

⋆ *Échange entre surfaces noires séparées par un milieu transparent, en présence ou non de surfaces sans flux*

Pour trouver l'échange de chaleur par rayonnement entre les éléments de surface $d\Omega_1$ et $d\Omega_2$, il suffit d'appliquer la loi du cosinus aux deux éléments de surface. On obtient :

$$d\Phi_{1 \rightleftarrows 2} = d\Phi_1 - d\Phi_2 = \mathrm{I}_1 d\Omega_1 \cos\delta_1\, d\omega_1 - \mathrm{I}_2 d\Omega_2 \cos\delta_2 d\omega_2$$

En explicitant $d\omega_1$ et $d\omega_2$ et en exprimant les intensités en fonction des pouvoirs émissifs, on aboutit à la relation :

$$d\Phi_{1 \rightleftarrows 2} = \frac{\sigma}{\pi}\left(\mathrm{T}_1^4 - \mathrm{T}_2^4\right) \frac{d\Omega_1 d\Omega_2 \cos\delta_1 \cos\delta_2}{r^2}$$

Pour des surfaces noires aux températures uniformes T_1 et T_2, le débit de chaleur échangé s'obtient par intégration de la relation précédente, soit :

$$\textbf{(15)}\quad d\Phi_{1 \rightleftarrows 2} = \sigma\left(\mathrm{T}_1^4 - \mathrm{T}_2^4\right) \iint_{\Omega_1\Omega_2} \frac{1}{\pi} \frac{\cos\delta_1 \cos\delta_2}{r^2}\, d\Omega_1 d\Omega_2$$

Le calcul de l'intégrale du 2^e^ membre est possible analytiquement pour certaines géométries simples. On écrit généralement le résultat de cette intégrale sous les deux formes équivalentes suivantes :

$$\textbf{(16)}\quad \iint_{\Omega_1\Omega_2} \frac{1}{\pi} \frac{\cos\delta_1 \cos\delta_2}{r^2}\, d\Omega_1 d\Omega_2 = \Omega_1 \mathrm{F}_{12} = \Omega_2 \mathrm{F}_{21}$$

F_{12} est la fraction du rayonnement émis par la surface Ω_1 dans toutes les directions qui frappe la surface Ω_2 (et qui est absorbé par Ω_2 si la surface Ω_2 est noire). De même, F_{21} est la fraction du rayonnement émis par la surface Ω_2 dans toutes les directions qui frappe la surface Ω_1. F_{12} et F_{21} sont appelés *facteur géométrique* ou *facteur de forme.* La symétrie de l'intégrale donnant les facteurs géométriques implique l'égalité **(16)** entre les facteurs de forme F_{12} et F_{21}. Bien que ces facteurs soient établis dans le cas de surfaces noires pour des surfaces réelles, ils continueront à représenter la fraction du rayonnement émis par une des deux surfaces et reçu par l'autre (cette fraction n'étant pas nécessairement absorbée si la deuxième surface n'est pas noire).

Par suite de la signification physique des facteurs de forme, on aurait pu écrire *a priori* le débit de chaleur échangé entre deux surfaces noires Ω_1 et Ω_2, soit :

$$\Phi_{1 \rightleftarrows 2} = \sigma \mathrm{T}_1^4 \Omega_1 \mathrm{F}_{12} - \sigma \mathrm{T}_2^4 \Omega_2 \mathrm{F}_{21}$$

Dans cette écriture, les deux termes $\Omega_1 \mathrm{F}_{12}$ et $\Omega_2 \mathrm{F}_{21}$ doivent être nécessairement égaux pour qu'à l'équilibre thermique $\mathrm{T}_1 = \mathrm{T}_2$, le débit net échangé soit nul. On retrouve bien les relations **(15)** et **(16)**.

En présence de n surfaces noires, par suite de leur signification physique les facteurs de forme devront satisfaire aux égalités suivantes :

$$\textbf{(17)}\quad \sum_{j=1}^{n} \mathrm{F}_{ij} = 1 \qquad \forall i = 1, 2, \ldots, n$$

$$\Omega_i \mathrm{F}_{ij} = \Omega_j \mathrm{F}_{ji} \qquad \forall j = 1, 2, \ldots, n$$

Pour des géométries particulières telles que les surfaces engendrées par des droites parallèles à une direction donnée, les facteurs de formes sont calculables facilement sans qu'il soit nécessaire de résoudre la double intégrale de surface. En outre, dans de nombreux cas pratiques, les surfaces Ω_1 et Ω_2 par exemple se trouvent en présence de surfaces pour lesquelles le débit de chaleur net échangé par rayonnement est nul. De telles surfaces peuvent être totalement réfléchissantes ou partiellement absorbantes mais alors le débit émis est sensiblement égal au débit absorbé. De telles surfaces sont dites *sans flux.*

En particulier, les réfractaires des fours à combustion se comportent généralement comme des surfaces sans flux. Seule la chaleur apportée par convection par le gaz intérieur au four est transmise par conduction à travers la paroi au milieu extérieur. Mais comme le débit de chaleur apporté par rayonnement sur les parois du réfractaire est très grand par rapport aux pertes thermiques, l'hypothèse d'un débit net rayonné nul pour les parois du four est une très bonne approximation. Cette hypothèse simplifie notablement les problèmes de transfert de chaleur par rayonnement entre une source et un récepteur placés dans l'enceinte d'un four.

En présence de surfaces sans flux, la fraction du rayonnement émis par la surface noire Ω_1 dans toutes les directions et qui frappe la surface noire Ω_2 ne se limite pas à F_{12} (rayonnement direct). Elle est en réalité supérieure à F_{12} puisqu'une autre fraction du rayonnement émis par Ω_1 peut frapper Ω_2 après réflexion sur les surfaces réfractaires ou sans flux Ω_R. Le facteur de forme ainsi défini sera désigné par $\overline{\mathrm{F}}_{12}$ et le débit de chaleur échangé entre les surfaces noires Ω_1 et Ω_2 en présence des surfaces sans flux Ω_R sera égal à :

$$\Phi_{1 \rightleftarrows 2} = \Omega_1 \overline{\mathrm{F}}_{12}\, \sigma\left(\mathrm{T}_1^4 - \mathrm{T}_2^4\right)$$

Comme les facteurs F_{ij}, les facteurs $\overline{\mathrm{F}}_{ij}$ satisfont aux relations **(17)**.

Dans la plupart des ouvrages généraux cités précédemment, on trouvera des courbes donnant les facteurs F_{ij} et $\overline{\mathrm{F}}_{ij}$ pour des géométries classiques rencontrées lors des études de fours où les transferts par rayonnement sont importants.

⋆ *Échange de chaleur entre surfaces non noires séparées par un gaz transparent, en présence ou non de surfaces réfractaires*

Soit une enceinte composée de surfaces non noires Ω_1, Ω_2, ... et de surfaces réfractaires Ω_R, Ω_S... En régime stationnaire, le débit de chaleur net issu de Ω_1 est la somme de tous ses échanges mutuels avec Ω_1, Ω_2, ... Cependant, l'échange entre Ω_1 et Ω_2 est le fruit d'un jeu complexe mettant en œuvre des réflexions à partir de toutes les surfaces réfractaires ou non.

On peut écrire encore le débit émis par la surface Ω_1 et absorbé par la surface Ω_2 sous la forme :

$$\Phi_{1 \to 2} = \Omega_1 \mathcal{F}_{12} \sigma T_1^4$$

De même, le débit émis par Ω_2 et absorbé par Ω_1 peut être écrit sous la forme :

$$\Phi_{2 \to 1} = \Omega_2 \mathcal{F}_{21} \sigma T_2^4$$

Dans ces conditions, le débit net échangé par rayonnement entre Ω_1 et Ω_2 est tel que :

$$\Phi_{1 \rightleftarrows 2} = \Omega_1 \mathcal{F}_{12} \sigma T_1^4 - \Omega_2 \mathcal{F}_{21} \sigma T_2^4$$

Puisque, à l'équilibre thermique ($T_1 = T_2$), le débit net transféré doit être nul, les facteurs de forme ainsi définis vérifient également les relations **(17)**. Mais contrairement aux coefficients F et $\overline{F}$, leur évaluation dans le cas le plus général se révèle délicate, voire impossible. On simplifie leur calcul en répartissant les zones émettrices, réceptrices et les surfaces sans flux en un nombre restreint de zones à température constante. Lorsque les sources et les puits ainsi définis peuvent être assimilés à des surfaces grises, Mac Adams (*Transmission de la chaleur*, Dunod, Paris [1964]) suggère une méthode simple permettant d'évaluer les facteurs de forme supposés indépendants de la répartition des températures des puits, des sources et des surfaces sans flux. En admettant par exemple que toutes les surfaces émettrices sauf une sont à la température 0 °K, les bilans d'énergie sur chacune des surfaces permettent de trouver les valeurs numériques des coefficients de forme $\mathcal{F}$.

Cette procédure n'est plus valable dans le cas des surfaces réelles puisque les facteurs d'absorption dépendent de la température du rayonnement incident. Les coefficients de forme dépendent de la température mais, comme le précise Mac Adams, on ne commet pas d'erreur significative en remplaçant les facteurs d'absorption et les facteurs d'émission par une valeur moyenne tenant compte des variations des facteurs d'absorption et d'émission en fonction de la température. On se ramène donc à nouveau au cas de surfaces grises. Soulignons cependant que les limitations de cette méthode n'ont pas encore été étudiées complètement.

* *Rayonnement des gaz non transparents*

Si les gaz diatomiques (oxygène, azote, hydrogène) sont transparents au rayonnement thermique dans tout le spectre d'émission du corps noir (visible et infrarouge), il n'en est pas de même pour le gaz carbonique et la vapeur d'eau (produit de combustion des hydrocarbures) qui présentent des bandes d'absorption dans l'infrarouge. D'après la loi de Kirchhoff, ces gaz émettent donc un rayonnement thermique dans ces mêmes bandes de fréquence. D'autres constituants gazeux absorbent le rayonnement thermique (CO, CH_4, SO_2, NH_3, etc.) mais leur influence reste généralement faible devant celle de la vapeur d'eau et du gaz carbonique.

L'absorption du rayonnement thermique par les gaz s'effectue à l'échelle moléculaire. Elle est proportionnelle au nombre de molécules rencontrées sur le trajet du faisceau d'énergie rayonné et par suite proportionnelle à la pression partielle du gaz et au trajet dans le gaz.

Soit un faisceau monochromatique traversant un milieu absorbant et transportant au point d'abscisse x le flux d'énergie φ_λ. Entre x et $x + dx$ la fraction $-d\varphi_\lambda/\varphi_\lambda$ absorbée est proportionnelle à la longueur dx et à la pression partielle p, d'où :

(18) $$-\frac{d\varphi_\lambda}{\varphi_\lambda} = k_\lambda p dx$$

Par l'intégration de l'équation **(18)**, on obtient la **loi de Beer**, soit :

$$\varphi_\lambda = \overset{0}{\varphi}_\lambda \exp(-k_\lambda p x)$$

Sur un trajet de longueur L dans le gaz et pour une pression partielle constante du gaz, la fraction $\varphi_\lambda/\overset{0}{\varphi}_\lambda$ est transmise et la fraction absorbée sur la longueur L est telle que :

$$\alpha_\lambda = 1 - \exp(-k_\lambda p L)$$

Le facteur d'absorption global sera obtenu par une sommation dans les domaines spectraux où le gaz est absorbant.

Pour évaluer le coefficient d'absorption puis le débit de la chaleur échangé entre le gaz et les surfaces entourant le gaz, il est nécessaire de donner une méthode de calcul tenant compte de la forme géométrique de l'enceinte contenant le gaz. Une méthode exposée dans l'ouvrage de Mac Adams conduit à définir une épaisseur moyenne fictive L telle que l'émission vraie pour le gaz à la température T_G dans l'enceinte donnée soit calculée par la formule $e^0(T_G)\,\varepsilon_{TG} pL$. La valeur de L ainsi définie dépend en général du gaz dans lequel se produit l'émission et du produit py, où y est une caractéristique dimensionnelle de la forme du système gazeux ; heureusement, dans les applications, L figure presque toujours sous forme d'une fraction presque constante de y. En outre, pour les faibles valeurs du produit pL, il est possible de trouver la valeur limite L^0. Elle est égale à 4 fois le rapport :

$$\frac{\text{volume de l'enceinte gazeuse}}{\text{surface latérale des parois de l'enceinte}}$$

La comparaison entre les valeurs de L et L^0 pour différentes formes géométriques montre que l'on peut évaluer L à partir de L^0 à l'aide de la relation : $L = 0{,}85\ L^0$.

Des valeurs des facteurs totaux d'émission pour le gaz carbonique et la vapeur d'eau ont été obtenues expérimentalement par Hottel et Mangelsdorf (*Trans. Am. Inst. Chem. Engrs.*, 31, 517 [1935]) et par Hottel et Smith (*Trans. ASME. Iron and Steel*, 55, 56, 39 [1933]).

Pour le gaz carbonique, les courbes donnent le facteur d'émission total en fonction de la température du gaz T_G et du produit $p_c L$ (p_c est la pression partielle en gaz carbonique) pour une pression totale de 1 atmosphère. Lorsque la pression totale est différente de 1 atmosphère, on emploie un facteur correctif. Pour la vapeur d'eau, le coefficient d'absorption dépend en plus de la pression partielle p_e de l'eau. Les courbes sont relatives à une pression partielle tendant vers zéro ; pour des pressions partielles différentes de zéro et une pression totale différente de 1 atmosphère, on emploie un autre facteur correctif.

Les facteurs d'absorption se déduisent des facteurs d'émission par des règles empiriques expérimentales rappelées dans les principaux ouvrages généraux. On trouvera également dans ces ouvrages les règles permettant de calculer les facteurs totaux d'émission et d'absorption des mélanges de vapeur d'eau et de gaz carbonique.

La longueur caractéristique du rayonnement gazeux ayant été précisée, il est alors possible d'évaluer le débit de chaleur net échangé par rayonnement entre le gaz et la surface noire Ω_1, soit :

$$\Phi_{G \rightleftarrows 1} = \Omega_1 \sigma (\varepsilon_G T_G^4 - \alpha_{G1} T_1^4)$$

Dans α_{G1} l'indice 1 rappelle que la température du rayonnement est celle de la surface noire T_1. Si les températures T_1 et T_G sont peu différentes (en pratique, même lorsque T_1 et T_G sont dans un rapport 2), on ne commet qu'une faible erreur en écrivant le débit net transféré sous la forme :

$$\Phi_{G \rightleftarrows 1} = \sigma \varepsilon_{G, \frac{T_1 + T_G}{2}} \frac{4 + a + b - c}{4} (T_G^4 - T_1^4)$$

Des courbes donnant la valeur des coefficients a, b, c pour la vapeur d'eau et le gaz carbonique sont données dans les ouvrages généraux consacrés au transfert de chaleur par rayonnement.

Si dans l'enceinte gazeuse se trouvent des sources et des récepteurs de natures quelconques et à des températures différentes, le calcul du débit échangé entre le gaz et une quelconque surface se fera en introduisant un facteur géométrique comme dans le cas d'un gaz transparent. Ainsi, le débit échangé entre le gaz et la surface Ω_1 sera posé égal à :

$$\Phi_{G \rightleftarrows 1} = \Omega_1 \mathcal{F}_{1G} \sigma (T_G^4 - T_1^4)$$

La détermination des facteurs $\mathcal{F}_{1G}$ sera voisine de celle des gaz transparents dans le cas d'un gaz gris pour lequel les facteurs totaux d'absorption et d'émission sont égaux. Dans ces conditions, si f désigne le facteur de transmission pour une distance L, le facteur total d'émission du gaz gris est :

— pour une épaisseur égale à L : $\varepsilon_L = (1 - f)$;
— pour une épaisseur égale à nL : $\varepsilon_{nL} = (1 - f)^n$.

En pondérant les débits échangés entre les différentes surfaces par le facteur de transmission correspondant, on peut déterminer ainsi les facteurs géométriques, puis le débit de chaleur net échangé par rayonnement.

Pour un gaz réel, on divise le spectre de fréquence en différentes classes x, y, ..., z et, pour une épaisseur du

Laboratoire de chimie macromoléculaire de Vitry-Thiais - Centre national de la recherche scientifique

▲ ***Portées à haute température par conduction et convection, les particules solides contenues dans les gaz émettent un rayonnement dans tout le spectre infrarouge et visible. Cette propriété trouve son application dans la technique de spectrophotométrie de flamme.***

▼ ***Brûleur à flammes plates utilisé pour l'étude des profils de front de flamme.***

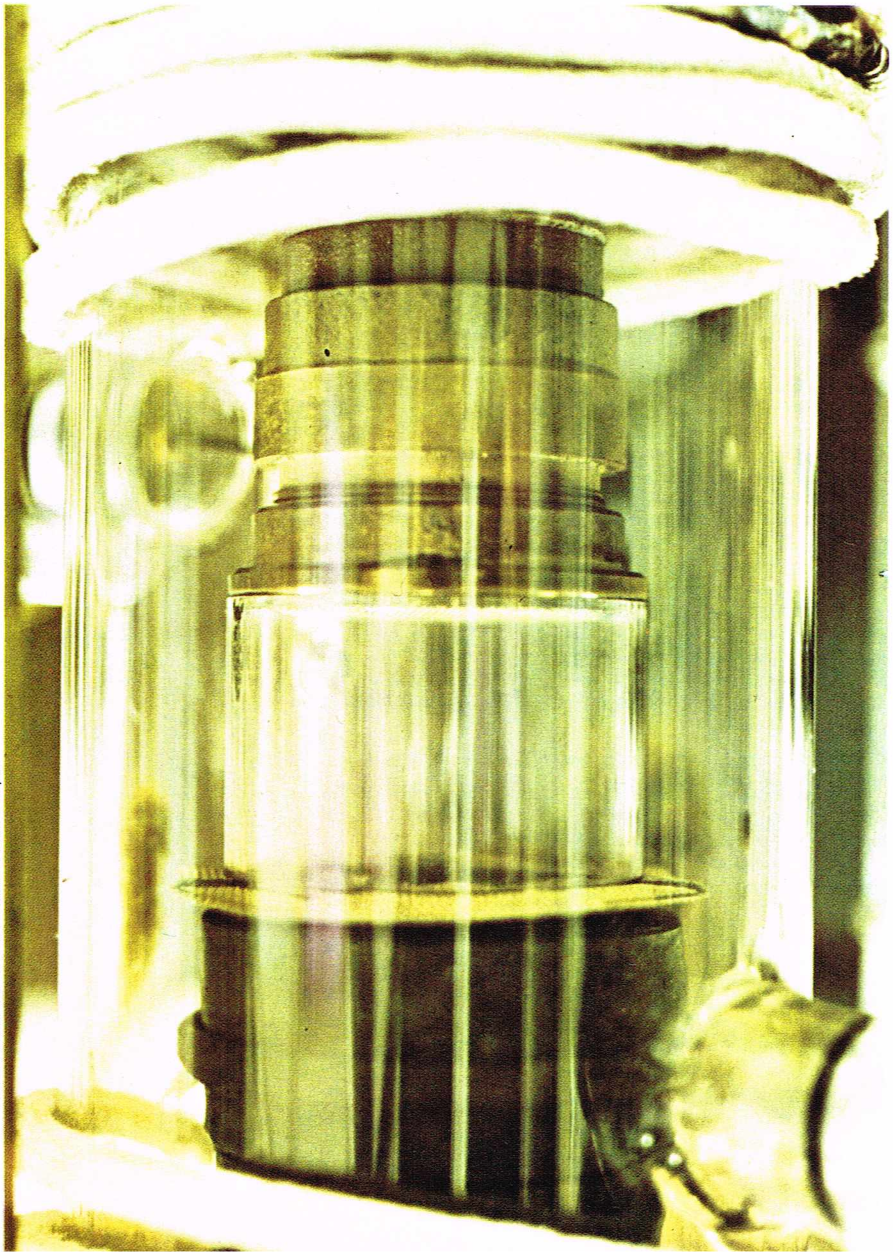

Laboratoire de chimie de la combustion et des hautes températures - Centre national de la recherche scientifique

gaz égale à L, on écrit que le facteur de transmission est tel que :

$$f_L = xf_{xL} + yf_{yL} + ... + zf_{zL}$$

Si q désigne le nombre de classes, on écrit les $(2q - 1)$ relations donnant les facteurs de transmission pour les épaisseurs L, 2 L, ..., $(2q - 1)$ L. En particulier :

$$f_{qL} = x\,(f_{xL})^q + y\,(f_{yL})^q + ... + z\,(f_{zL})^q$$

Le système des $(2q - 1)$ équations ainsi obtenues permet de calculer les $(q - 1)$ facteurs de pondération inconnus (en effet $x + y + ... + z = 1$) et les q facteurs de transmission $f_x, f_y, ..., f_z$. Ensuite, chacune des classes étant considérée se comporter comme un gaz gris de facteur de transmission donné, on peut donc évaluer les différents facteurs de forme pour chacune des classes. Le facteur de forme du gaz réel s'obtient par pondération des facteurs de forme correspondant à chacune des classes. Ainsi, le facteur de forme $\mathcal{F}_{12}$ du gaz réel sera donné par la relation :

$$[\mathcal{F}_{12}]^{réel} = x\,[\mathcal{F}_{12}]^{gris}_{fx} + y\,[\mathcal{F}_{12}]^{gris}_{fy} + ... + z\,[\mathcal{F}_{12}]^{gris}_{fz}$$

On voit apparaître très rapidement la complexité du calcul. Heureusement que, dans de nombreux cas, on pourra se limiter à n'envisager que 2 classes dans le spectre des fréquences.

* *Rayonnement des flammes et des nuages de particules*

Les flammes sont généralement éclairantes, car au sein des gaz portés à haute température par la combustion se trouvent dispersées de fines particules constituées le plus souvent par du carbone formé au cours des réactions de combustion. Ces particules solides portées à haute température par conduction et convection des gaz environnants émettent un rayonnement dans tout le spectre infrarouge et visible. Suivant la dimension des flammes et suivant la densité de particules solides qu'elles renferment, leurs facteurs d'émission (ou d'absorption) peuvent varier largement et atteindre presque l'unité pour les flammes épaisses et denses. Pour les particules de carbone formées par craquage des hydrocarbures, on admet souvent que leur dimension est de l'ordre de

$$0{,}3\ \mu m\ (3 \cdot 10^{-7}\ m).$$

Dans ces conditions, on peut montrer que la différence de température entre le gaz et les particules solides est très faible, de l'ordre de 1 °C.

● *Température de la flamme*

La température vraie de la flamme peut être mesurée directement à l'aide d'un pyromètre monochromatique qui repère en fait la luminance de la flamme pour une longueur d'onde donnée (la luminance est l'intensité lumineuse émise dans une direction donnée). La méthode de Kurlbaun permet de calculer la température vraie à partir de mesures faites au pyromètre monochromatique.

● *Facteur total d'émission de la flamme*

La connaissance de la température vraie de la flamme permet le calcul de son facteur total d'émission par une simple mesure, au pyromètre à rayonnement total, de sa température d'émittance T_F. En effet, d'après la loi de Stéphan-Boltzmann :

$$\varepsilon_T = \frac{T_F^4}{T^4}$$

— *Étude des flammes contenant de très fines particules ou suies*

Si l est la largeur de la flamme, le facteur d'absorption monochromatique est donné par la loi :

$$\alpha_\lambda = 1 - e^{-k'_\lambda l}$$

où k'_λ est un facteur variant avec la longueur d'onde λ. L'expérience montre que :

$$k'_\lambda = \frac{K}{\lambda^a}$$

où K est une constante et où l'exposant a, légèrement variable, reste voisin de 1. Il en résulte que :

$$\alpha_\lambda = 1 - e^{-\frac{Kl}{\lambda}}$$

Ainsi, à l donné, la température de luminance de la flamme est d'autant plus forte qu'elle est mesurée avec une longueur d'onde plus petite. A l'aide de deux mesures au pyromètre monochromatique $\lambda_R = 0{,}665\ \mu m$ (rouge) et $\lambda_V = 0{,}555\ \mu m$ (vert), on peut déterminer Kl.

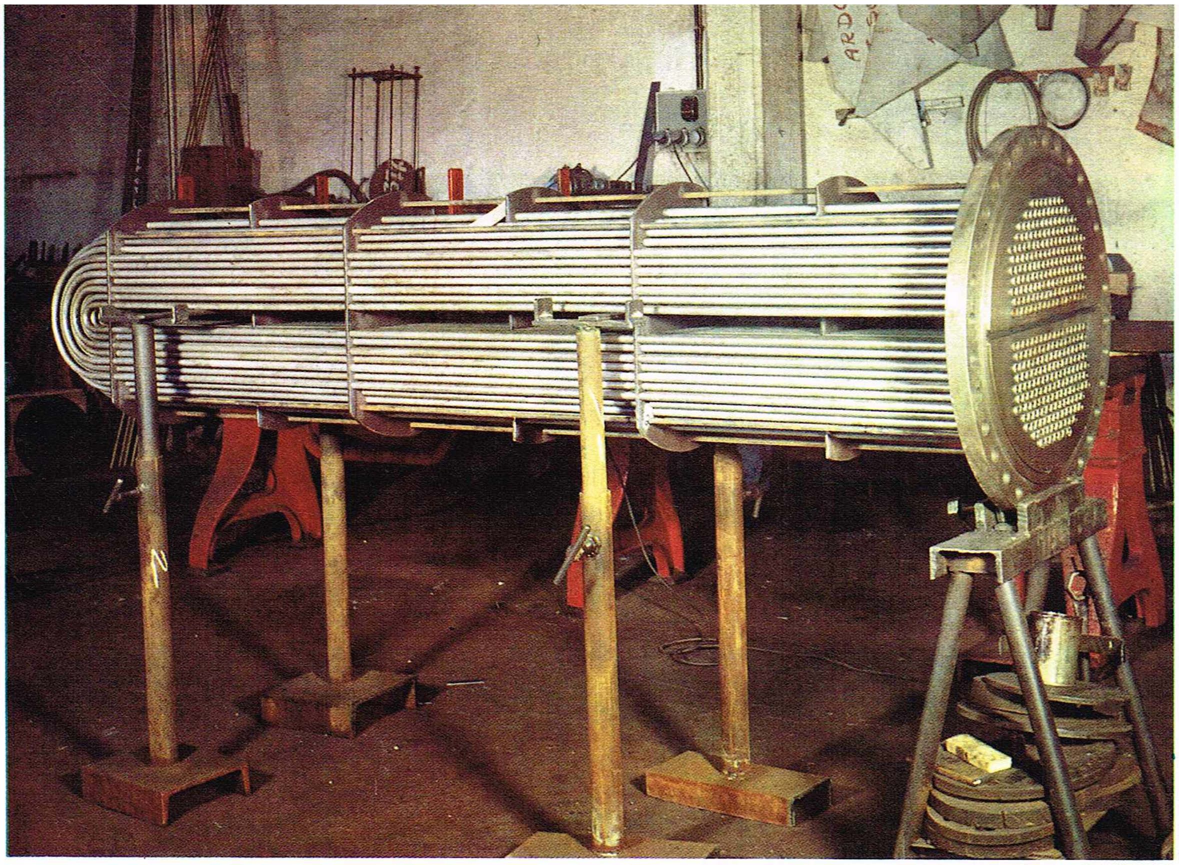

C. Dani

◀ *Ensemble du faisceau de tubes en U en acier inoxydable d'un échangeur de chaleur ayant une potentialité de 7 200 kcal/h.*

Des abaques établis par Hottel et Broughton (*Ind. Eng. Chem. Anal.* Ed. 4, 166 [1932]) permettent, à partir des deux mesures précédentes, de déterminer simultanément la valeur de K*l*, la température vraie de la flamme et son facteur total d'émission.

● *Étude des flammes contenant de grosses particules solides*

Il s'agit essentiellement des flammes de charbon pulvérisé dont les particules ont des dimensions de plusieurs dizaines de microns, très supérieures à la valeur des longueurs d'onde du rayonnement. Dans ces flammes, les particules jouent simplement le rôle d'écrans pour le rayonnement qui les frappe sans diffusion appréciable. Le facteur total d'émission peut être calculé directement par l'expression :

$$\varepsilon = 1 - e^{-Kl} = 1 - e^{-\frac{450\, wl}{\rho T d}}$$

w est la concentration massique du solide en suspension (en kg/m³), ρ est la masse volumique du solide (en kg/m³), T est la température vraie de la flamme (en °K), *l* est l'épaisseur de la flamme (en m), *d* est le diamètre des particules (en m).

Étude des principaux appareils de transformation de chaleur

Les appareils de transformation de la chaleur peuvent être classés en deux grandes familles :

— La première correspond à des transferts de chaleur sans changement de phases. Ces transferts se font à basses et moyennes températures dans les *échangeurs de chaleur* et à des températures plus élevées dans les *fours*.

— Dans la deuxième famille, le transfert thermique est accompagné d'un transfert de matière. Nous nous limiterons ici aux changements de phase liquide en phase vapeur.

La condensation d'une vapeur saturée ou non permet de récupérer des quantités de chaleur très importantes, utilisées par la suite pour mener à des températures voulues le fluide circulant de l'autre côté de la surface sur laquelle s'effectue la condensation. Cette transformation se déroule généralement dans des *condenseurs* utilisant, par conséquent, de la vapeur. Cette vapeur est généralement produite dans des *chaudières*. La vaporisation d'un liquide peut être employée industriellement de deux autres manières.

— Pour concentrer un soluté donné par vaporisation du diluant. C'est le cas des *évaporateurs*.

— Pour refroidir un liquide ou un gaz récupérant les frigories produites par le liquide qui se vaporise. C'est le cas des *tours de réfrigération*.

En outre, le couplage entre transferts de matière et de chaleur peut être observé sans changement de phases dans le phénomène qu'est la *thermodiffusion*. Il est possible ainsi de récupérer de la chaleur bas niveau pour concentrer, voire séparer des mélanges gazeux ou liquides nécessitant l'utilisation de méthodes de séparation à haut niveau énergétique. Les centrales nucléaires conduisant à des productions notables d'énergie basse calorie (eau de refroidissement), il est probable que leur développement relance l'intérêt de telles méthodes de séparation.

Dans ce qui suit, à l'exception des colonnes thermodiffusionnelles et des chaudières développées par ailleurs, nous allons reprendre avec plus de détails l'étude des divers appareils cités précédemment. Pour chacun, nous nous efforcerons de donner une description générale avec les caractéristiques.

Échangeurs de chaleur

Description des appareils

* *Échangeurs double tube*

Ces échangeurs (*fig.* 4) sont constitués par des éléments rectilignes de deux tubes parallèles raccordés à leurs extrémités par des coudes. Les divers éléments sont tous assemblés par des raccords à démontage rapide, et un remplacement des tubes est possible. Les problèmes de dilatation thermique entre le tube intérieur et le tube extérieur sont résolus par l'utilisation de presse-étoupe ou de joint torique.

Les tubes sont généralement en acier de caractéristique I.P.S. et schédule 40, et les longueurs courantes sont de 3,6, 4,5, ou 6 m. On utilise également quelquefois des tubes en verre et en graphite. Un certain nombre d'associations des diamètres des tubes intérieurs et extérieurs a été préconisé par Kern (*Process Heat Transfer*, Mac Graw Hill, New York [1954]).

▼ *Figure 4 : principe de l'échangeur double tube.*

fig. 4

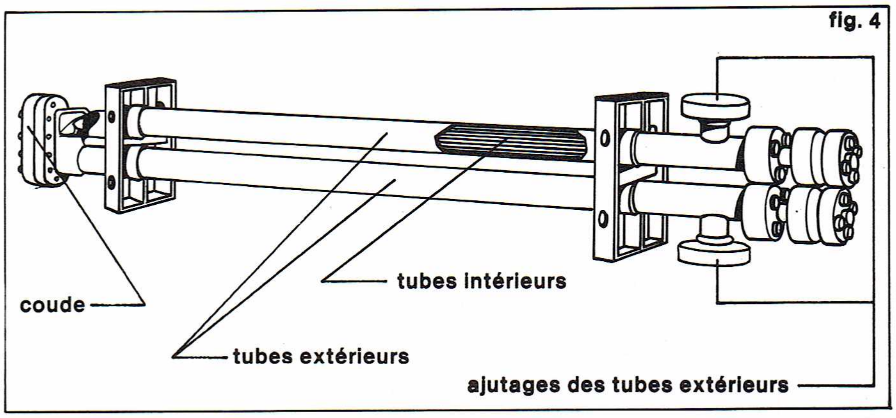

Richard Colin

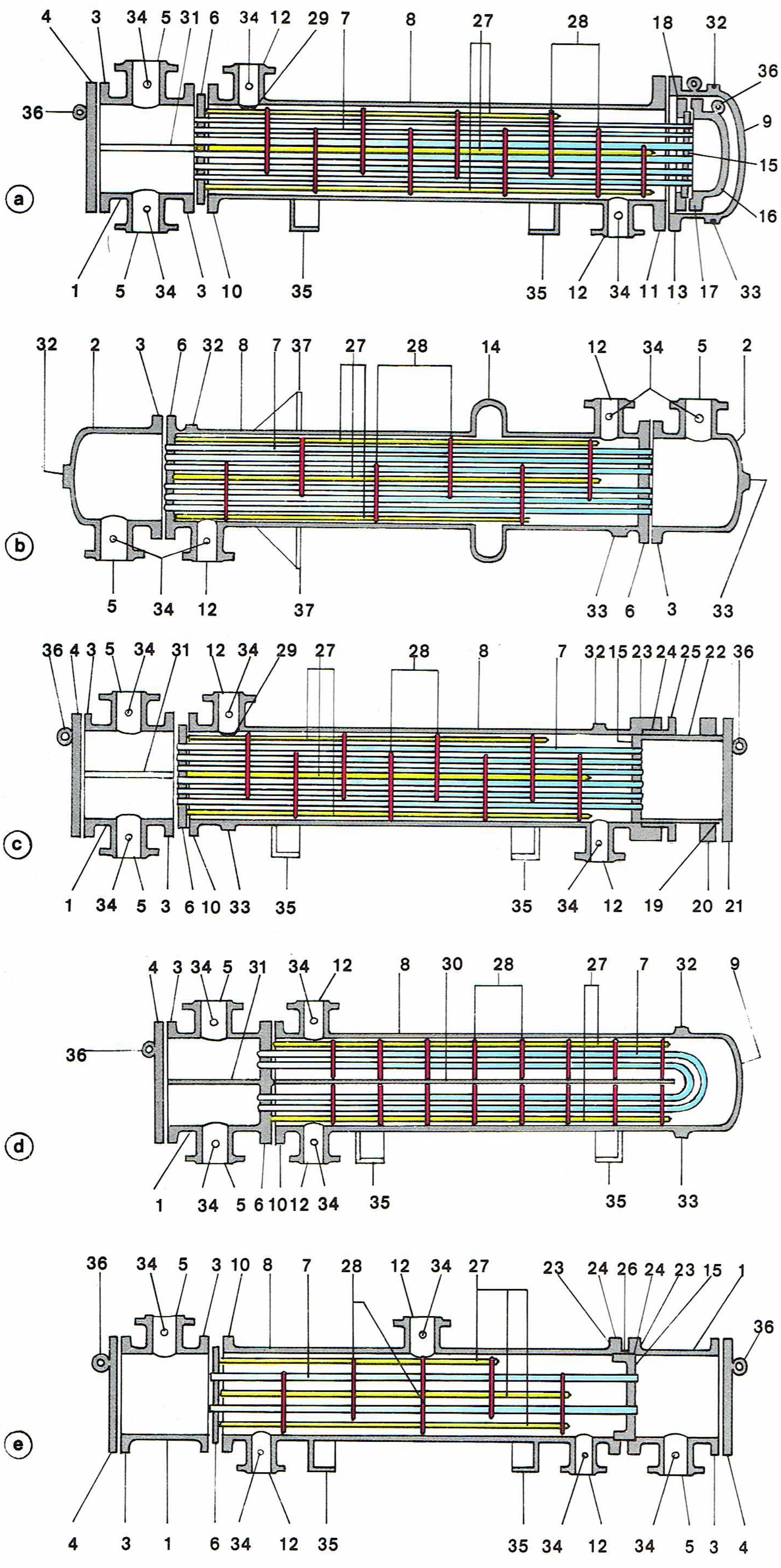

fig. 5.

1 : conduit immobile d'extrémité
2 : chapeau immobile d'extrémité
3 : brides sur conduit et chapeau d'extrémité
4 : couvercle
5 : ajutages des extrémités
6 : plaque tubulaire fixe
7 : tubes
8 : enveloppe extérieure
9 : coque
10 : bride de l'enveloppe
11 : bride de l'enveloppe
12 : ajutage de l'enveloppe
13 : bride de la coque
14 : assemblage de dilatation
15 : plaque tubulaire flottante
16 : chapeau des extrémités flottantes
17 : brides sur le chapeau flottant
18 : dispositif de soutien
19 : anneau de rupture de cisaillement
20 : bride de renfort
21 : couvercle flottant
22 : enveloppe de la tête flottante
23 : bride de la boîte à garniture
24 : garniture
25 : bague de garniture
26 : segments
27 : tirants et entretoises
28 : chicanes transversales
29 : chicanes d'arrêt
30 : chicanes longitudinales
31 : cloisonnement des passes
32 : passage des assemblages
33 : purge
34 : mécanisme d'assemblage
35 : selles de support
36 : oreilles de levage
37 : console de support

Richard Colin

fig. 6

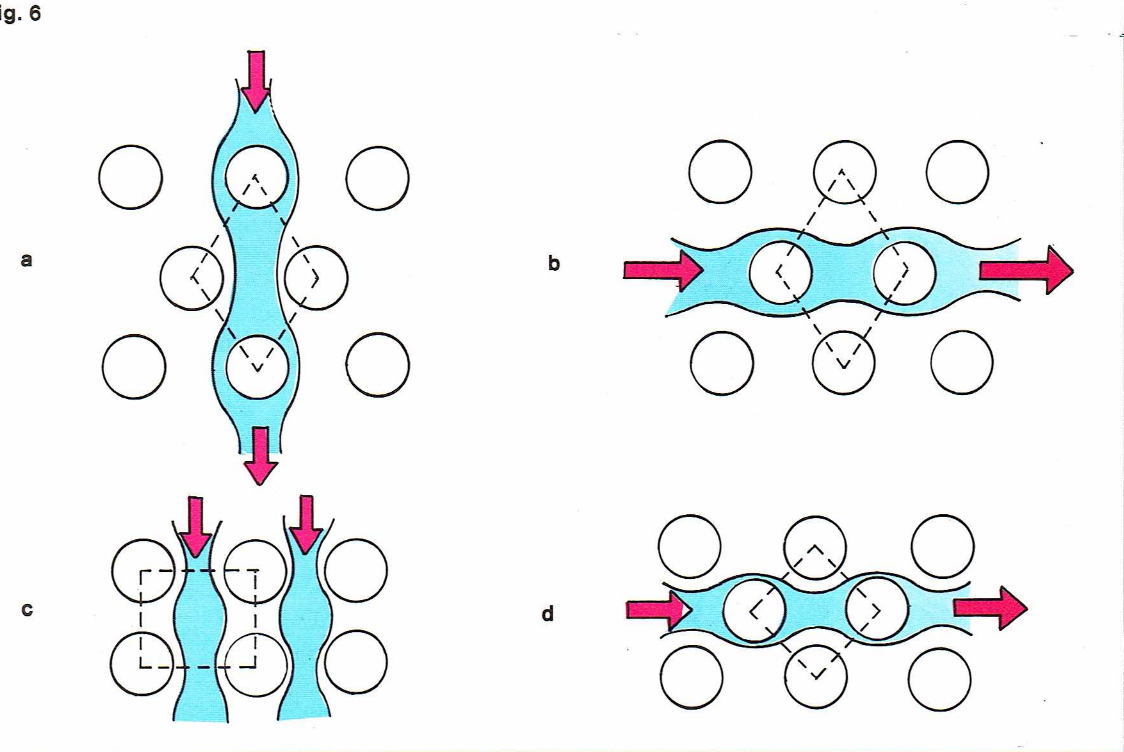

◀ ***Figure 6 ; les quatre types d'écoulement des fluides entre les tubes d'un échangeur à faisceau et calandre en fonction de la disposition des tubes :*** a) ***disposition au pas triangulaire normal ;*** b) ***disposition au pas triangulaire renversé ;*** c) ***disposition au pas carré normal ;*** d) ***disposition au pas carré renversé.***

Ces appareils sont intéressants pour les facilités qu'ils offrent au point de vue du démontage et de l'entretien. Ils peuvent fonctionner à contre-courant pur, ce qui permet d'obtenir de bons rendements. Par contre, ils présentent les inconvénients suivants : risque de fuites aux raccords ; flexion du tube intérieur si la longueur est importante ; surface d'échange faible pour le volume global de l'appareil par suite du rayon minimal des coudes reliant les longueurs droites des tubes.

Ces échangeurs utilisés depuis l'origine conviennent aux produits sales, pour des débits faibles, des températures et des pressions élevées.

* *Échangeurs à faisceau et calandre*

Ce type d'échangeur est de loin le plus répandu dans les industries de transformation de l'industrie chimique et pétrochimique. Un faisceau de tubes est situé à l'intérieur d'une calandre dans laquelle circule le deuxième fluide. Cette conception se retrouvera également dans les condenseurs, les rebouilleurs et les fours multitubulaires.

Le faisceau est monté entre deux plaques en communication avec des boîtes de distribution qui assurent la circulation du fluide à l'intérieur du faisceau, généralement en plusieurs passes. Le faisceau, muni de chicanes, est logé dans une calandre possédant des tubulures d'entrée et de sortie pour le deuxième fluide circulant à l'extérieur des tubes du faisceau. Le chemin de ce deuxième fluide est imposé par les chicanes.

Tous les éléments entrant dans la construction de ces échangeurs ont fait l'objet d'une normalisation publiée par la T. E. M. A. (Standard of Tubular Exchangers Manufacturers Association, 5th Edition, 1968), qui spécifie leurs caractéristiques mécaniques et thermiques pour diverses conditions de fonctionnement. Cette normalisation a complété le code plus général proposé par l'A. S. M. E. (American Society of Mechanical Engineers) sur les récipients à pression et ébullition. L'A. P. I. (American Petroleum Institute) a proposé des compléments à la normalisation T. E. M. A. et au code A. S. M. E. De plus, de nombreuses sociétés possèdent des codes spécifiques pour les échangeurs faisceau tubulaire-calandre commercialisés au point de vue de la spécificité, de la garantie et des tolérances.

Calandre. Elle est en général réalisée en acier au carbone. Aux deux extrémités (à l'exception des échangeurs en U et à tête flottante) sont soudées les brides qui portent le couvercle et la boîte de distribution. Les principaux types d'échangeurs à faisceau et calandre sont décrits dans les ouvrages généraux rappelés précédemment, et les schémas des principaux types sont reportés sur la *figure* 5 (d'après *Chemical Engineers' Handbook*).

Faisceau. Les tubes du faisceau forment une catégorie spéciale répondant à des spécifications très sévères normalisées selon le calibre B. W. G. (Birmingham Wire Gage). On utilise couramment des tubes 12, 14, 16, B. W. G. avec des longueurs de 2,4, 3,6, 4,8, 6 m. Le choix du matériau dépend de l'utilisation : — acier au carbone pour un usage courant ; — laiton amirauté pour les appareils travaillant avec de l'eau de mer ; — aciers alliés pour les produits corrosifs et les températures élevées ; — aluminium et cuivre pour les très basses températures.

Les tubes sont fixés dans les plaques par mandrinage, et la perforation des trous dans les plaques est normalisée. Elle s'effectue selon une disposition, soit au pas triangle, soit au pas carré. Compte tenu de l'orientation du faisceau par rapport à la direction générale du fluide circulant dans la calandre, on obtient pour l'écoulement du fluide entre les tubes les quatre dispositions indiquées sur la *figure* 6.

Le pas triangulaire permet de placer environ 10 % de plus de tubes que le pas carré sur une plaque tubulaire de diamètre donné, mais, en contrepartie, la disposition des tubes rend difficile le nettoyage par insertion de grattoirs dans le faisceau. Pour ces appareils, il faut avoir recours à un nettoyage chimique et réserver leur emploi à des fluides propres. Pour des fluides susceptibles de conduire rapidement à des dépôts, on utilisera des dispositions à pas carré.

Le faisceau tubulaire est généralement muni de chicanes transversales qui ont pour but d'allonger le chemin du fluide circulant dans la calandre et d'améliorer le transfert par une augmentation de la vitesse du fluide. Les chicanes sont souvent constituées par un disque de diamètre légèrement inférieur à celui de la calandre, comportant une section libre représentant 20 à 45 % de la section totale (*fig.* 7).

La section libre de la chicane et l'espacement entre deux chicanes sont pratiquement normalisés. L'espacement conditionne directement la vitesse du fluide, et il est compris entre D_c et $D_c/5$ où D_c est le diamètre de la calandre. Les chicanes assurent en outre la rigidité du faisceau.

L'alimentation du fluide dans le faisceau est obtenue par l'adjonction d'une boîte de distribution portant des brides d'entrée et de sortie, et d'une boîte de retour. La disposition de ces boîtes permet au fluide de traverser successivement plusieurs sections du faisceau, ce qui a

fig. 7

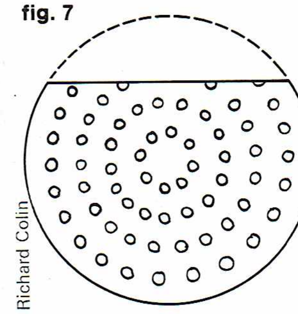

▲ ***Figure 7 : schéma d'une chicane de faisceau tubulaire.***

◀ ***Page ci-contre, figure 5 : les principaux types d'échangeurs à faisceau et calandre :*** a) ***échangeur à tête flottante interne ;*** b) ***échangeur à plaques tubulaires fixes ;*** c) ***échangeur à tête flottante externe ;*** d) ***échangeur à tubes en U ;*** e) ***échangeur à tête flottante externe avec anneau et bague de garniture.***

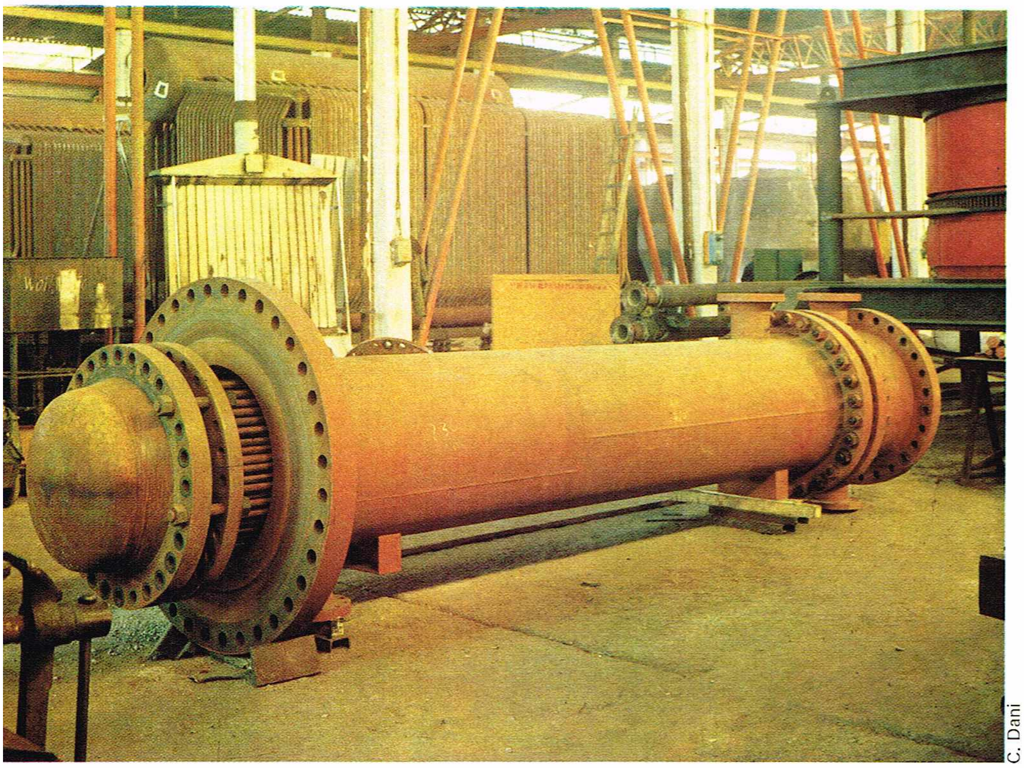

▲ **Un échangeur à tête flottante interne :**
ce type d'échangeur est très utilisé dans l'industrie pétrochimique.

▼ ***Un échangeur à plaques planes utilisé dans l'installation de chauffage par géothermie de la ZUP de Melun (France).***

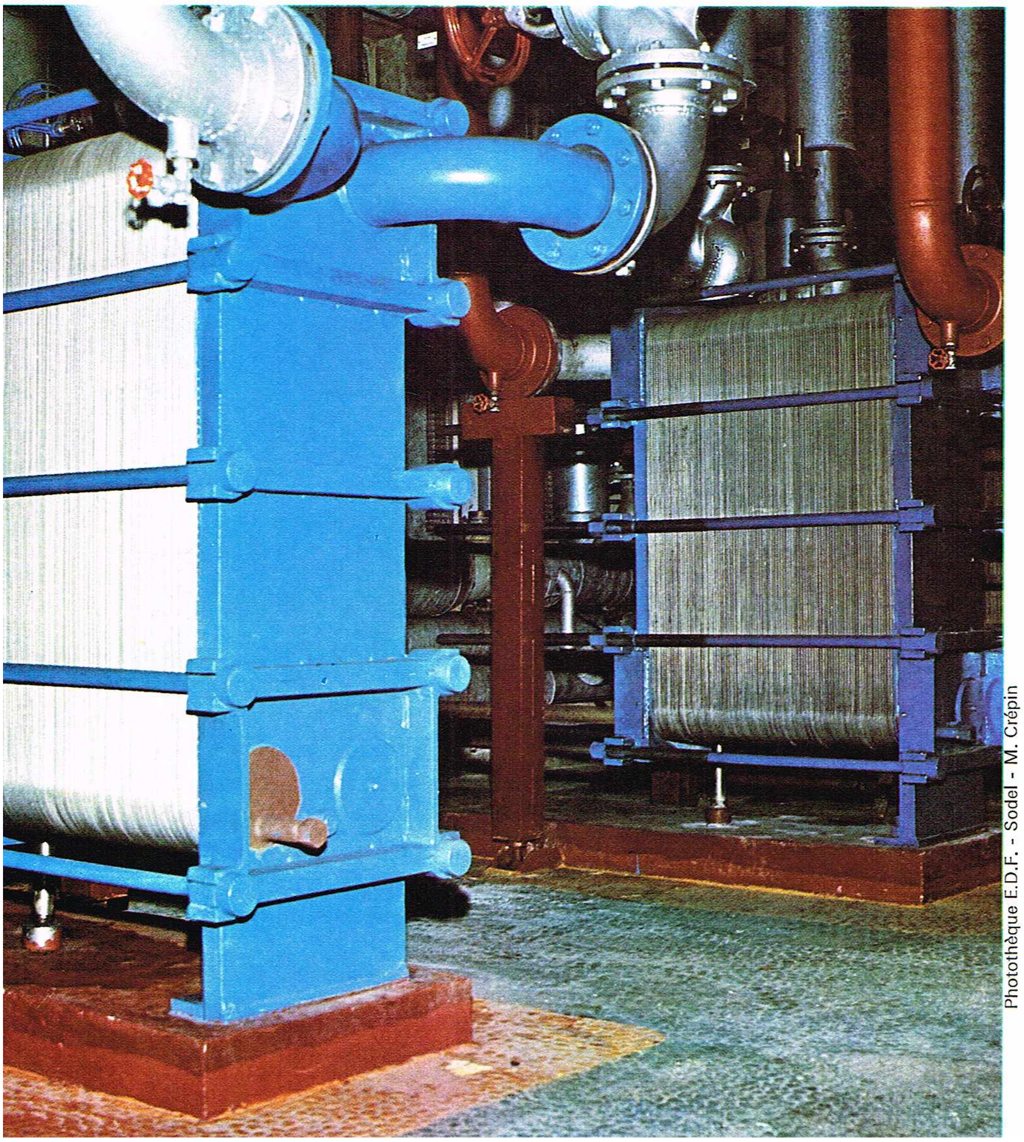

pour but d'accroître la vitesse du fluide et d'augmenter le coefficient de transfert à l'intérieur des tubes. Cette disposition correspond toujours à un nombre pair de passages (ou passes) dans le faisceau. Compte tenu de l'espacement nécessaire aux portées de joint et au tirant, le nombre de tubes du faisceau en fonction du diamètre de la calandre, du nombre de passes dans le faisceau, du diamètre des tubes et de leur disposition peut être prévu, et Kern (*Process Heat Transfer*, Mac Graw Hill, New York [1954]) a donné des tableaux résumant les résultats obtenus.

Sur la *figure* 5 sont reportés également les principaux assemblages possibles pour le faisceau et la calandre.

Pour les *échangeurs tubulaires à plaques fixes,* les plaques fixes sont soudées directement à la calandre. Ces échangeurs peu onéreux ne peuvent être utilisés que si la différence de température entre les fluides chaud et froid est suffisamment faible pour que la dilatation ou la contraction du faisceau soit faible. En outre, le nettoyage de l'extérieur des tubes ne peut s'effectuer que par voie chimique.

Dans les *échangeurs à tête flottante,* l'une des plaques du faisceau est fixe, puisque bloquée entre les brides de la calandre et de la boîte de distribution. La deuxième plaque, de diamètre inférieur, porte la boîte de retour et peut coulisser librement à l'intérieur du capot qui ferme la calandre. Ces appareils permettent l'expansion thermique ainsi qu'un nettoyage mécanique de la surface externe du tube. La plupart des échangeurs faisceau-calandre utilisés dans l'industrie pétrochimique sont de ce type.

Les *échangeurs en U* permettent de supprimer la deuxième plaque tubulaire tout en conservant la propriété d'expansion de la tête flottante. L'économie ainsi réalisée lors de la construction est compensée par l'impossibilité d'un nettoyage mécanique interne des tubes et par la réduction du nombre de tubes placés dans une calandre de diamètre donné par suite de l'existence de coudes à 180°. Le faisceau présente généralement un espace libre au centre.

* *Autres types d'échangeurs*

Deux autres types d'échangeurs sont également utilisés de manière industrielle, d'une part les échangeurs à plaques, et d'autre part les échangeurs utilisant comme fluide réfrigérant l'air ambiant.

● *Les échangeurs à plaques*

Les échangeurs à plaques se présentent sous diverses formes : — les échangeurs à plaques hélicoïdales; — les échangeurs à plaques planes; — les échangeurs à plaques munies d'ailettes; — les échangeurs à tubes munis d'ailettes.

Dans tous ces appareils, les surfaces d'échange, pour un encombrement géométrique donné, sont très supérieures à celles des échangeurs à faisceau et calandre. En outre, comme nous le verrons plus loin, les écoulements secondaires et les pertes de charge correspondantes sont éliminés, ainsi que les problèmes de court-circuit et de dilatation différentielle. Cependant, la réalisation de ces échangeurs est beaucoup plus délicate et très onéreuse, et jusqu'à présent ils ne sont utilisés que pour des échanges ne nécessitant pas en valeur absolue de très grandes surfaces d'échange.

Les *échangeurs à plaques hélicoïdales* sont formés par une paire de plaques enroulées selon une hélice délimitant deux espaces annulaires rectangulaires où les fluides s'écoulent à contre-courant. Ce type d'échangeur peut être très compact. Ainsi, un échangeur de 1 m de diamètre, de 1,5 m de long, avec une spirale de 30 m, conduit à une surface d'échange de 100 m². On peut nettoyer les espaces annulaires en enlevant leur couvercle. Ces échangeurs sont réalisés en acier inoxydable, en inconel et en nickel.

Les *échangeurs à plaques planes* sont constitués de plaques disposées sur un bâti selon une disposition voisine des plaques des filtres presse. Les pertes de charge sont faibles et les courants secondaires de fluide impossibles. Les plaques d'échange sont désormais standardisées et elles sont réalisées en acier inoxydable, en inconel, en nickel, mais également en bronze et en cupronickel. De tels échangeurs peuvent être très polyvalents, et on peut en particulier faire circuler des fluides de grande viscosité. On ne peut cependant pas dépasser des pressions supérieures à 30 atmosphères et des températures supérieures à 150 °C. Par rapport à un échangeur à faisceau en acier

inoxydable, les échangeurs à plaques construits dans le même matériau et à surfaces d'échange identiques sont moins onéreux. Un échangeur ayant des plaques carrées de 0,85 m d'arête, de 3,80 m de long et comportant 416 plaques permet une surface d'échange maximale de 440 m².

Les *échangeurs à plaques fines* sont formés à partir de tôle emboutie entre deux plaques planes soudées aux deux extrémités, avec des rainures permettant le passage des fluides. Ces échangeurs se sont développés durant la dernière guerre mondiale pour des échanges thermiques à basses températures nécessités lors du fractionnement des mélanges gazeux. La pression ne peut pas dépasser 50 atm à 35 °C. Les plaques sont généralement réalisées en aluminium et leur association constitue un échangeur économiquement rentable lorsque les surfaces d'échange deviennent supérieures à 370 m².

Dans les *échangeurs tubulaires ailetés,* des ailettes planes soudées sur les tubes cylindriques permettent d'augmenter le rapport de la surface externe du tube à la surface interne d'un facteur allant de 1 à 40.

Signalons enfin l'existence d'*échangeurs à blocs de graphite.* Chaque bloc de graphite est percé de rangées de trous traversés de manière adéquate par le fluide chaud et le fluide froid. L'association de plusieurs blocs permet l'obtention d'échangeurs très performants.

● *Les échangeurs refroidis par une circulation forcée d'air*

Le refroidissement d'un fluide chaud par l'air ambiant s'est développé considérablement depuis 1960, et, pour refroidir un fluide, on s'oriente de plus en plus vers cette solution.

L'air ambiant traverse avec une grande vitesse des tubes munis d'ailettes à travers lesquels circule le fluide que l'on veut refroidir. Le faisceau est généralement constitué de tubes de 1,5 cm de diamètre extérieur munis d'ailettes de 1,25 à 1,50 cm de hauteur, l'espacement entre les ailettes étant tel que le rapport entre la surface des ailettes et celle du tube soit de 7 à 20. La longueur des tubes varie de 2,4 à 9 m et la largeur du faisceau de 1,20 à 3,60 m. Le faisceau peut comporter jusqu'à 30 rangées de tubes placées les unes au-dessus des autres. L'écoulement de l'air à travers ces rangées de tubes est obtenu à l'aide d'une hélice composée de 4 à 6 pales, et le débit d'air peut être modulé en modifiant la vitesse de rotation et l'orientation des pales. Dans certains cas, ces modifications sont réalisées automatiquement, ce qui permet d'adapter le débit d'air aux variations de température de l'air extérieur. L'air aspiré par l'hélice est distribué sur les rangées de tubes par l'intermédiaire d'une chambre dont la hauteur est supérieure au rayon de l'hélice. La vitesse d'aspiration de l'air est de l'ordre de 5 à 10 m/s. Autour de l'hélice se trouve une couronne dont la hauteur joue un rôle important sur la vitesse de l'air. L'hélice d'aspiration peut être située au-dessus ou en dessous du faisceau aileté. Lorsqu'elle est située en dessous, pour un débit de gaz identique, la puissance consommée est plus faible que pour la position supérieure dans la mesure où, le gaz étant plus froid, la densité est plus grande.

Un inconvénient non négligeable de ces échangeurs est le bruit provoqué par les hélices d'aspiration, que l'on peut cependant réduire en équipant l'ensemble de panneaux isolants ou en diminuant la vitesse de rotation des hélices.

Les échangeurs à plaques et à refroidissement à air étant d'utilisation plus récente, il n'existe pas de normes et de codifications aussi précises que pour les échangeurs à calandre et à faisceau; en outre, par suite de leur très grande variété, il est difficile de proposer des théories et des corrélations générales. Aussi, nous allons nous limiter, dans ce qui suit, à rappeler des méthodes de calcul élaborées dans le cas des échangeurs double tube et à faisceau et calandre, échangeurs dont les constructions sont standardisées à l'échelle internationale.

Calcul des échangeurs

Le but d'un échangeur est de récupérer une certaine quantité de chaleur dans des conditions économiques optimales, qui sont un compromis entre les frais d'investissement et les frais de fonctionnement. La dualité transfert de chaleur-perte de charge est à la base de tout calcul d'échangeur de chaleur. En effet, les résistances au transfert thermique sont d'autant plus faibles que les vitesses locales d'écoulement du fluide seront plus élevées. Dans ces conditions, on pourra utiliser des surfaces d'échange plus réduites (diminution de l'investissement), mais, les pertes de charge étant plus grandes, la pompe de circulation devra être plus puissante, ce qui entraînera une augmentation du prix de fonctionnement. Aussi, l'obtention des conditions optimales de fonctionnement d'un échangeur ne peut se concevoir sans une étude en parallèle du transfert de chaleur et de la perte de charge dans l'échangeur.

En outre, les fluides circulant à l'intérieur et à l'extérieur des tubes ne sont pas obligatoirement propres et un encrassement des surfaces se produit dans le temps. La formation de ces dépôts, généralement mauvais conducteurs de la chaleur, augmente les résistances au transfert thermique et conditionne la fréquence des arrêts pour nettoyage et entretien. Dans l'optimisation de l'échangeur, il faut tenir compte de ces variations du transfert thermique au cours du temps, et les conditions optimales de fonctionnement d'un échangeur usagé seront différentes de celles de l'échangeur neuf.

* *Étude du transfert de chaleur*

Quel que soit le type d'échangeur, si on ne tient compte que des conditions d'entrée et de sortie des deux fluides, le débit de chaleur transféré du fluide 1 (fluide chaud) au fluide 2 (fluide froid), en régime stationnaire et en l'absence de source de chaleur interne, s'écrit :

$$\text{(19)} \quad \Phi = m_1 Cp_1 \, (T_{1E} - T_{1S}) = m_2 Cp_2 \, (T_{2S} - T_{2E})$$

m et Cp représentent les débits massiques et la capacité calorifique massique des fluides. Les indices E et S sont relatifs à l'entrée et à la sortie de chacun des fluides.

Comme dans la première partie, nous pouvons exprimer le débit transféré en fonction d'une force motrice (différence de température) Δt_m, d'où :

$$\text{(20)} \qquad \Phi = \frac{\Omega}{\sum_{i=1}^{n} R_i} \Delta t_m = U\Omega\Delta t_m$$

Ω est la surface d'échange de l'appareil et U un coefficient de transfert global défini par rapport à la force motrice Δt_m. Pour un échangeur de géométrie donnée, Ω est connu mais les valeurs de U et Δt_m dépendent des caractéristiques de fonctionnement de l'appareil, et nous allons donner dans ce qui suit les expressions de Δt_m et U pour les caractéristiques de fonctionnement relatives aux échangeurs double tube et à faisceau et calandre.

● *Différence de température moyenne* Δt_m

La différence de température moyenne va dépendre de la nature des deux fluides, de leur débit, mais également de leur sens d'écoulement. Dans le cas des échangeurs à double tube, les écoulements des fluides peuvent être soit à co-courant, soit à contre-courant (*fig.* 8a et b).

En supposant constant le coefficient de transfert global entre les deux extrémités de l'échangeur, un bilan thermique dans l'échangeur permet de montrer que :

$$\text{(21)} \qquad \Phi = U\Omega \text{ (DTML)}$$

DTML représente la moyenne logarithmique des différences de températures aux deux extrémités, soit :

$$\text{(22)} \qquad \text{DTML} = \frac{(\Delta t)_0 - (\Delta t)_L}{\text{Log}\,\dfrac{(\Delta t)_0}{(\Delta t)_L}}$$

Échangeur à contre-courant
$(\Delta t)_0 = T_{1E} - T_{2S}$
$(\Delta t)_L = T_{1S} - T_{2E}$

Échangeur à co-courant
$(\Delta t)_0 = T_{1E} - T_{2E}$
$(\Delta t)_L = T_{1S} - T_{2S}$

Bien que la formulation soit identique pour les deux associations, pour des températures d'entrée ou de sortie

fig. 8

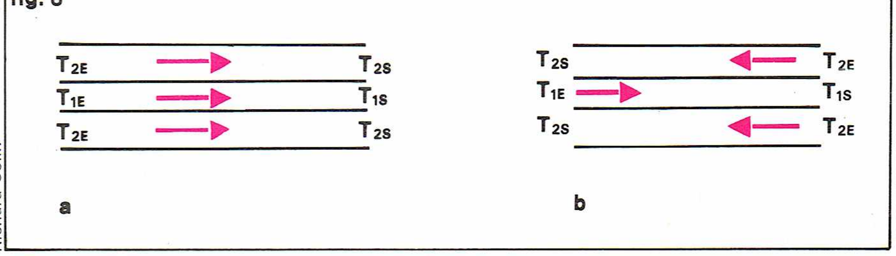

Richard Colin

▼ *Figure 8 : représentation schématique des écoulements de fluides dans le cas des échangeurs double tube;*
a) *écoulement à co-courant*
b) *écoulement à contre-courant.*

des fluides identiques l'association à contre-courant conduit à des débits échangés très supérieurs à ceux obtenus avec une association à co-courant.

Les relations **(21)** et **(22)** établies dans le cas des échangeurs double tube ne peuvent pas être appliquées directement au cas des échangeurs à faisceau et calandre. La différence de températures à utiliser a été présentée sous sa forme définitive par Nayle, Bowman et Mueller (*Trans. Am. Soc., Mech. Engrs.*, 62, 283 [1940]). La différence de températures moyenne s'obtient en multipliant la DTML relative aux deux extrémités par un facteur correctif F qui dépend de deux coefficients E et R :

— le coefficient $E = \dfrac{T_{2S} - T_{2E}}{T_{1E} - T_{2E}}$ représente le rendement de l'échange puisque la limite supérieure de la température de sortie du fluide froid est égale à la température d'entrée du fluide chaud ;

— le coefficient $R = \dfrac{T_{1E} - T_{1S}}{T_{2S} - T_{2E}}$ représente, pour un fonctionnement adiabatique global de l'échangeur, le rapport $\dfrac{m_2 Cp_2}{m_1 Cp_1}$ et en première approximation le rapport des débits massiques des deux fluides, puisque, dans de nombreux cas, les capacités calorifiques massiques des fluides sont voisines.

Le facteur correctif F a été obtenu par les auteurs précédents, et, dans la plupart des ouvrages indiqués dans la première partie, on trouve des courbes donnant F en fonction de E et R pour divers types de fonctionnement des échangeurs à faisceau et calandre. Dans tous ces calculs, les écoulements des fluides sont supposés soit à co-courant, soit à contre-courant. Si dans l'échangeur les écoulements sont à courants croisés, on introduit encore un facteur F dépendant des paramètres E et R et mesurant l'efficacité de l'appareil par rapport à un contre-courant pur. Nous ne donnerons pas ici les différentes expressions du facteur correctif F.

Signalons enfin que, pour certaines caractéristiques de fonctionnement, la température de sortie du fluide froid peut devenir supérieure à la température de sortie du fluide chaud. Le facteur correctif F diminue alors considérablement, et il est nécessaire dans tous les cas d'éviter le croisement des températures de sortie. On y parvient généralement en augmentant le nombre de passes côté calandre, et on s'efforce toujours, dans la pratique, d'obtenir un facteur correctif F supérieur à 0,75.

● *Coefficient de transfert global* U

L'étude du transfert de chaleur entre le fluide chaud et le fluide froid au travers de la paroi fait apparaître dans le cas le plus général cinq résistances de transfert schématisées sur la *figure* 9 : $R_1 = 1/h_1$ est la résistance de transfert par convection dans le fluide chaud. R_{d1} est la résistance de transfert par conduction dans le dépôt d'encrassement côté fluide chaud. $R_2 = 1/h_2$ est la résistance de transfert par convection dans le fluide froid. R_{d2} est la résistance de transfert par conduction dans le dépôt d'encrassement côté fluide froid.

$R_p = e/\lambda$ est la résistance de transfert par conduction dans la paroi métallique.

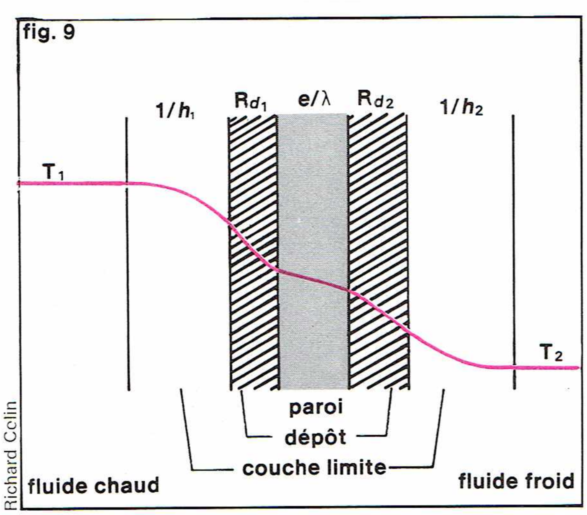

▶ *Figure 9 : les cinq* **résistances** *de transfert lors de l'échange de chaleur entre un fluide chaud et un fluide froid au travers d'une paroi.*

Dans la plupart des cas, cette résistance est négligeable devant les autres résistances. C'est ce que nous supposerons dans la suite des calculs.

Comme le débit de chaleur transféré fait apparaître une surface de transfert Ω, il est nécessaire de rapporter les résistances de transfert énumérées précédemment à une même surface. Dans les échangeurs industriels, quel que soit leur type, le fluide chaud circule à l'intérieur du tube, alors que le fluide froid circule à l'extérieur. Généralement, on convient de choisir en référence la surface extérieure du tube et de rapporter les autres résistances à cette même surface en multipliant les diverses résistances par le rapport correspondant des diamètres, d'où les nouvelles valeurs des résistances : R_1^*, R_{d1}^*, R_{d2}^*, R_2.

La résistance globale U_S est alors donnée par la relation :

$$\textbf{(23)} \qquad \frac{1}{U_S} = \frac{1}{h_2} + R_{d2}^* + R_{d1}^* + \frac{1}{h_1^*}$$

U_S représente le coefficient global de transfert du tube usagé (sale) par opposition au coefficient global de transfert U du tube neuf tel que :

$$\textbf{(24)} \qquad \frac{1}{U} = \frac{1}{h_2} + \frac{1}{h_1^*}$$

Le coefficient de transfert h_1 est évalué à l'aide d'une des corrélations présentées dans la première partie. Pour l'estimation des coefficients h_2, la plupart des auteurs sont d'accord pour une utilisation des relations établies lors des écoulements intérieurs, à condition toutefois d'apporter aux critères adimensionnels apparaissant dans les corrélations deux modifications principales : la première est relative au *« diamètre équivalent »* à utiliser dans les corrélations; la seconde concerne l'évaluation du *« flux massique »* du fluide extérieur.

Pour les échangeurs double tube, la section annulaire étant constante, le flux massique s'obtient en divisant le débit massique par l'aire de la section annulaire comprise entre les deux tubes. Le diamètre équivalent, comme nous l'avons indiqué dans la première partie, est pris égal à 4 D_H, où D_H représente le diamètre hydraulique de l'espace annulaire :

$$\textbf{(25)} \qquad D_H = \frac{\text{volume du fluide}}{\text{surface mouillée par le fluide}}$$

Dans le cas des échangeurs à faisceau et calandre, le flux massique est beaucoup plus difficile à définir, car l'écoulement du fluide dans la calandre se fait avec des orientations et des vitesses différentes selon la disposition des chicanes. On peut distinguer grossièrement deux types de courants : — un courant principal qui s'écoule normalement au faisceau entre les chicanes et parallèlement au faisceau au voisinage des chicanes; — de nombreux courants secondaires dus aux tolérances de la construction entre chicanes et calandre, entre tubes et chicanes et surtout entre faisceau et calandre.

Cependant, par suite de l'effort de normalisation, les auteurs ont pu, dans le cas de ces échangeurs, préciser les modifications à apporter sur les valeurs du diamètre équivalent et du flux massique. On distingue deux types principaux de modifications. Des auteurs, tel Donohue (*Ind. Eng. Chem.*, 41, II, 2499 [1949]), définissent deux débits massiques moyens, l'un longitudinal, l'autre transversal, et utilisent le diamètre extérieur des tubes comme diamètre équivalent. D'autres auteurs, parmi lesquels Kern (*Process Heat Transfer*, Mac Graw Hill Book, Inc., New York [1954]), définissent un seul débit moyen pour l'ensemble de l'appareil et introduisent un diamètre équivalent dépendant de la disposition des tubes.

Précisons quelque peu les deux types de modifications.

— *Méthode de Donohue :* Donohue prend en compte l'espacement entre chicanes pour définir un flux massique transversal G_T et la hauteur sous chicanes pour définir un flux massique longitudinal G_L. Le flux massique moyen à introduire dans les corrélations étant tel que :

$$\textbf{(26)} \qquad G = \sqrt{G_T G_L}$$

Le flux massique transversal est évalué en divisant le débit massique par l'aire maximale de passage du fluide relative à la section équatoriale de l'échangeur :

$$\textbf{(27)} \qquad G_T = \frac{m}{\Omega_T}$$

L'aire Ω_T varie selon l'arrangement des tubes entre deux chicanes, et on trouvera dans l'ouvrage de Wuithier des valeurs de Ω_T pour les différentes dispositions : pas normal carré ou triangulaire; pas renversé carré ou triangulaire.

Le flux massique longitudinal est calculé en divisant le débit massique par une aire proportionnelle à la différence des aires de la section intérieure de la calandre et de la section des tubes. Le facteur de proportionnalité est égal au rapport de l'aire du secteur libre des chicanes à l'aire de la section intérieure de la calandre.

Connaissant G_T et G_L, pour des échangeurs où les tolérances de construction sont similaires, la formule pratique suivante préconisée par Bowman (A. S. M. E., *Miscellaneous Papers*, 1028, 75 [1936]) permet d'obtenir un bon ordre de grandeur du coefficient de transfert h_2 :

$$\frac{h_2 d_2}{\lambda} = 0{,}22 \left(\frac{G d_2}{\mu}\right)^{0,6} \left(\frac{\mu C_p}{\lambda}\right)^{0,33} \left(\frac{\mu}{\mu_p}\right)^{0,14} \quad \textbf{(28)}$$

— *Méthode de Kern :* Kern tient compte de la disposition géométrique des tubes dans le faisceau pour définir un diamètre équivalent. Ainsi, p désignant le pas des tubes (distance entre les centres des tubes), le diamètre équivalent d_e est égal à :

$$d_e = \frac{4\,p^2}{\pi d_2} - d_2 \quad \text{pour un pas carré} \quad \textbf{(29)}$$

$$d_e = \frac{3{,}464\,p^2}{\pi d_2} - d_2 \quad \text{pour un pas triangulaire} \quad \textbf{(30)}$$

Constatant que, pour des chicanes normalisées, la hauteur de la section libre étant de l'ordre de 25 % du diamètre intérieur de la calandre, les flux massiques G_L et G_T sont du même ordre de grandeur, Kern se contente de calculer le flux transversal G_T; le coefficient de transfert h_2 est obtenu à l'aide de la relation :

$$\frac{h_2 d_e}{\lambda} = 0{,}36 \left(\frac{G_T d_e}{\mu}\right)^{0,55} \left(\frac{\mu C_p}{\lambda}\right)^{0,33} \left(\frac{\mu}{\mu_p}\right)^{0,14} \quad \textbf{(31)}$$

La relation **(31)** est valable pour des critères de Reynolds $\frac{G_T d_e}{\mu}$ supérieurs à 2 100.

Comme nous l'avons indiqué précédemment, on ne tient pas compte des résistances de transfert à l'intérieur de la paroi métallique, mais la valeur de la température de la paroi est nécessaire pour tenir compte du terme correctif relatif à la variation de la viscosité du fluide en fonction de la température. On l'obtient en écrivant l'égalité des flux transférés, soit :

$$h_2\,(t_2 - t_p) = h_1^*\,(t_p - t_1) \quad \text{d'où :}$$

$$t_p = \frac{h_2 t_2 + h_1^* t_1}{h_1^* + h_2} \quad \textbf{(32)}$$

Connaissant h_1 et h_2, il est donc alors possible de trouver la valeur de la résistance globale du tube propre. Après un certain temps d'utilisation, il peut se former à l'intérieur et à l'extérieur des tubes des dépôts qui augmentent la résistance globale de transfert. Le coefficient de transfert U_S sera par suite inférieur à celui du tube neuf mais, dans la plupart des cas, l'appareil sera calculé pour la valeur minimale du coefficient de transfert relative au tube sale. On convient de manière empirique qu'un échangeur doit fonctionner sans nettoyage durant une année et, dans la norme T. E. M. A., on trouve une liste des valeurs des résistances d'encrassement pour divers produits véhiculés dans les industries pétrochimiques.

Nous pouvons désormais calculer le coefficient de transfert global et le débit transféré dans l'échangeur en utilisant pour la différence de température moyenne la valeur DTML multipliée par le facteur correctif F. En réalité, le débit évalué ainsi n'est correct qu'à condition que le coefficient de transfert global U_S reste constant tout au long de l'échangeur. Cette hypothèse ne peut être qu'approchée puisque le coefficient de transfert dépend des propriétés physico-chimiques des fluides, lesquelles varient au cours de la traversée dans l'échangeur. Le débit de chaleur transféré peut être cependant toujours évalué à l'aide de la relation **(20)** à condition de prendre, comme le préconise Colburn, une valeur moyenne de U_S égale à la valeur du coefficient de transfert pour des températures moyennes des fluides chaud et froid T_{1C} et T_{2C}, appelées généralement températures calorifiques. Colburn (*Eng. Bull. Purdue Univ.*, 26, I, 84 [1942]) postule une variation linéaire du coefficient de transfert global en fonction de la température de l'un des fluides. Il définit ainsi deux coefficients de transfert global U_1 et U_2 et le débit de chaleur transféré est tel que :

$$\Phi = \Omega\,\frac{U_2\,\Delta t_c - U_1\,\Delta t_f}{\text{Log}\,\dfrac{U_2\,\Delta t_c}{U_1\,\Delta t_f}} \quad \textbf{(33)}$$

$$\text{avec} \quad \Delta t_c = T_{1E} - T_{2S} \quad \text{et} \quad \Delta t_f = T_{1S} - T_{2E} \quad \textbf{(34)}$$

Dans l'ouvrage de Wuithier, on trouvera les relations permettant d'évaluer à partir de U_1 et U_2 les valeurs des températures calorifiques. Ces dernières ne sont pas nécessaires pour le calcul du débit transféré mais, dans la mesure où elles correspondent aux conditions de températures moyennes des fluides dans l'appareil, elles permettent d'obtenir une valeur moyenne du critère de Reynolds caractéristique de la nature de l'écoulement des deux fluides dans l'échangeur.

* *Étude des pertes de charge*

Les deux fluides traversant l'échangeur s'écoulent sous l'effet d'une différence de potentiel mesurée par la différence de pression totale entre l'entrée et la sortie appelée *perte de charge*. Cette perte de charge dépend de la vitesse, des propriétés physico-chimiques du fluide ainsi que de la géométrie de l'appareil. Les analogies entre le transfert de chaleur et de quantité de mouvement en régime stationnaire sont telles qu'à une augmentation du coefficient de transfert de chaleur correspond également une augmentation de la perte de charge. Industriellement, on essaie de limiter cette perte de charge à 1 atm pour des échangeurs fonctionnant au refoulement d'une pompe. En revanche, si l'écoulement est dû à la force de pesanteur, la perte de charge ne devra pas dépasser la pression hydrostatique à l'intérieur des tubes.

● *Perte de charge à l'intérieur des tubes*

En régime stationnaire, un bilan de quantité de mouvement dans une conduite cylindrique de longueur L permet de relier la perte de charge Δp au critère de Margoulis de quantité de mouvement (soit le facteur de frottement $f/2$), soit :

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{f}{2} \cdot \frac{4\,G^2}{\rho d_1} \quad \textbf{(35)}$$

Dans tous les ouvrages généraux de mécanique des fluides, on trouve des expressions du facteur de frottement, à savoir :

— *en régime laminaire* $\left(\mathcal{R}e = \frac{G d_1}{\mu} < 2\,100\right)$, le facteur de frottement $f/2$ est donné par la relation de Poiseuille :

$$f/2 = 64/\mathcal{R}e \quad \textbf{(36)}$$

— *en régime intermédiaire et turbulent* ($\mathcal{R}e > 2\,100$), il existe de très nombreuses corrélations semi-empiriques. Dans le cas des échangeurs de chaleur, on pourra utiliser les relations préconisées par Mac Adams (*Ind. Eng. Chem.*, 14, 105 [1922], *Trans. A.I. Ch. E.*, 28, 56 [1932]), soit :

— pour les tubes lisses :

$$f/2 = 0{,}000\,7 + 0{,}062\,5\ \mathcal{R}e^{-0,32} \quad \textbf{(37)}$$

— pour les tubes rugueux :

$$f/2 = 0{,}001\,75 + 0{,}132\ \mathcal{R}e^{-0,42} \quad \textbf{(38)}$$

Pour tenir compte de la non-isothermicité de l'écoulement, Sieder et Tate (*Ind. Eng. Chem.*, 18, 1429 [1936]) proposent de multiplier le facteur $f/2$ obtenu à l'aide des relations précédentes par les rapports $\left(\frac{\mu_p}{\mu}\right)^{0,25}$ en régime d'écoulement laminaire et $\left(\frac{\mu_p}{\mu}\right)^{0,14}$ en régime d'écoulement turbulent.

Dans les échangeurs à double tube, les tubes intérieurs sont généralement rugueux, alors qu'à l'état neuf, les tubes des échangeurs à faisceau et calandre sont lisses. Dans ces derniers, il faudra ajouter à la perte de charge du fluide à l'intérieur des conduites celle observée dans les boîtes de distribution et de retour, ces pertes étant traduites essentiellement par une dégradation d'énergie cinétique.

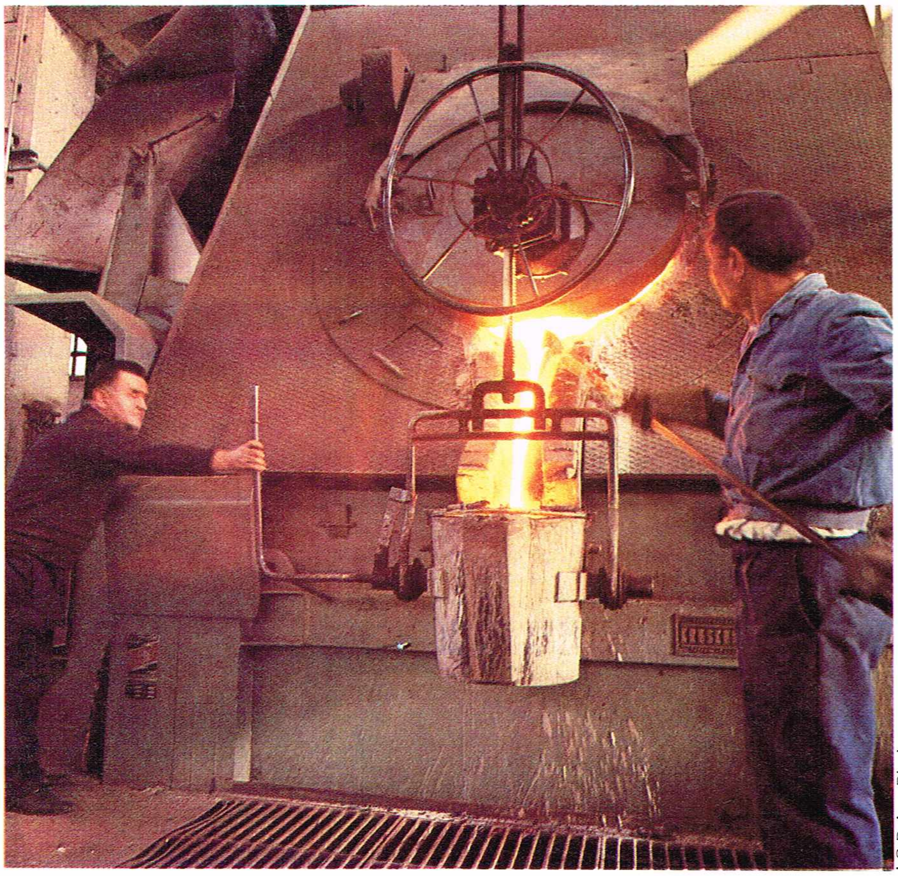

I.G.D.A. - Rizzi

▲ *Transvasement d'une poche de coulée de métal d'un* four électrique ; *les fours électriques utilisés en métallurgie réalisent la transformation de l'énergie électrique (provenant d'un arc électrique) en énergie thermique.*

● *Perte de charge à l'extérieur des tubes*

Pour les échangeurs double tube, on utilise les relations précédentes, à condition toutefois de remplacer le diamètre intervenant dans les différents critères par le diamètre équivalent $d_e = 4\ D_H$, D_H étant le diamètre hydraulique défini par la relation **(25)**.

Dans le cas des échangeurs du type faisceau et calandre, les pertes de charge résultent de l'écoulement principal et des écoulements secondaires dus aux jeux et aux tolérances entre les divers éléments de l'échangeur. Bell (*Petr. Eng.* 32, C 26 - C 40 [1960]) a proposé des méthodes numériques de calcul des pertes de charge où apparaissent les courants secondaires, mais ces calculs sur ordinateur ne se justifient que pour des calandres de faible diamètre. Comme pour le transfert de chaleur, Donohue et Kern ont publié, pour leur part, des méthodes de calcul négligeant les courants secondaires. Les résultats obtenus sont cependant en bon accord avec les valeurs expérimentales.

Donohue décompose le calcul en deux éléments :

— Δp_L, perte de charge longitudinale relative à l'espace libre des chicanes, assimilée à un orifice de coefficient 0,7, d'où :

$$\textbf{(39)} \qquad u_L = 0{,}7 \sqrt{\frac{2\ \Delta p_L}{\rho}}$$

et

$$\Delta p_L \# \frac{G_L^2}{\rho}$$

G_L est le flux massique longitudinal introduit précédemment.

— Δp_T, perte de charge transversale relative à l'écoulement normal du fluide au travers du faisceau entre deux chicanes. En introduisant le critère de Reynolds :

$$\textbf{(40)} \qquad \mathcal{R}e_T = \frac{G_T d_2}{\mu}$$

où G_T est le flux massique transversal, le facteur de frottement $f_{T/2}$ correspondant à cet écoulement est donné en fonction du pas p de la disposition géométrique des tubes du faisceau par les relations :

$$\textbf{(41)} \qquad f_{T/2} = \frac{7{,}5\ d_2}{(p - d_2)\ \mathcal{R}e_T} \qquad \text{pour } \mathcal{R}e_T < 2\,100$$

$$\textbf{(42)} \qquad f_{T/2} = 0{,}375 \left[\frac{d_2}{(p - d_2)\ \mathcal{R}e_T}\right]^{0,2} \qquad \text{pour } \mathcal{R}e_T > 2100$$

Le courant transversal rencontre N rangées horizontales de tubes, situées entre la section libre des chicanes et de la calandre ; si D_C est le diamètre de la calandre et H la hauteur de la section libre des chicanes, le nombre de rangées est : $\dfrac{D_C - H}{p}$, et la perte de charge transversale entre deux chicanes est :

$$\textbf{(43)} \qquad \Delta p_T = N f_{T/2}\ 4\ G_T^2$$

Si N_c représente le nombre de chicanes dans l'échangeur, la perte de charge totale est égale à :

$$\Delta p = N_c\ \Delta p_L + (N_c + 1)\ \Delta p_T \qquad \text{soit :}$$

$$\textbf{(44)} \qquad \Delta p = \frac{1}{\rho}\left[N_c G_L^2 + 4\ (N_c + 1)\left(\frac{D_C - H}{p}\right) f_{T/2} G_T^2\right]$$

La perte de charge ainsi calculée ne tenant pas compte des propriétés physiques en fonction de la température, on peut corriger le résultat obtenu en le multipliant par le rapport $\left(\dfrac{\mu_p}{\mu}\right)^{0,14}$.

Dans son analyse, Kern suppose, pour les échangeurs normalisés, l'égalité des flux massiques G_L et G_T, et caractérise l'écoulement du fluide dans l'échangeur à l'aide d'un seul critère de Reynolds :

$$\textbf{(45)} \qquad \mathcal{R}e_K = \frac{G_T d_e}{\mu}$$

où le diamètre équivalent dépendant de la disposition des tubes dans le faisceau est donné par les relations **(29)** et **(30)**. Le facteur de frottement étant calculé par des relations analogues aux relations **(41)** et **(42)**, la perte de charge globale dans l'échangeur est telle que :

$$\Delta p = 4\ f_{T/2} \frac{G_T^2\ (N_c + 1)\ D_C}{\rho d_e}$$

Ici encore, on devra multiplier le résultat obtenu par le terme collectif $\left(\dfrac{\mu_p}{\mu}\right)^{0,14}$ pour tenir compte des variations des propriétés physico-chimiques du fluide en fonction de la température.

Sachant, désormais, évaluer le transfert de chaleur et la perte de charge dans les échangeurs double tube et à faisceau et calandre, il est possible d'envisager leur étude économique. Nous n'en parlerons pas ici, mais on pourra trouver ces aspects dans les ouvrages généraux indiqués précédemment.

Fours

Introduction

On peut classer globalement les fours industriels en deux grandes familles : d'une part les fours électriques, et d'autre part les fours à combustion.

Pour les fours électriques, à l'exception des fours de laboratoire, la source de chaleur est obtenue par l'intermédiaire d'un arc électrique entre une anode et une cathode convenablement choisies, permettant l'obtention de températures élevées sans la présence de constituants gazeux nuisibles à la transformation envisagée. De tels fours sont utilisés en métallurgie pour les affinages et les réductions électrochimiques des métaux et des oxydes réfractaires. C'est un procédé généralement coûteux qui n'a d'intérêt que dans la mesure où un four plus classique à combustion n'est pas envisageable. Nous n'aborderons pas ici l'étude de ces fours où l'énergie électrique est transformée en énergie thermique.

Nous allons nous limiter exclusivement aux fours pour lesquels la chaleur est produite par combustion. La combustion peut s'effectuer dans un foyer utilisant du coke ou de la houille finement pulvérisée ou dans des brûleurs à fuel et à gaz. Suivant les capacités et les utilisations des fours, les trois types de combustibles sont concurremment employés mais nous ne traiterons pas ici l'étude des foyers et des brûleurs dont les conceptions jouent un rôle essentiel dans le rendement énergétique global des fours. Signalons que l'utilisation des brûleurs à fuel ou à gaz paraît indispensable si l'on souhaite faire varier rapidement le débit de chaleur produit. Il en est ainsi lorsque le récepteur est constitué par un mélange réactionnel fortement endo- ou exothermique.

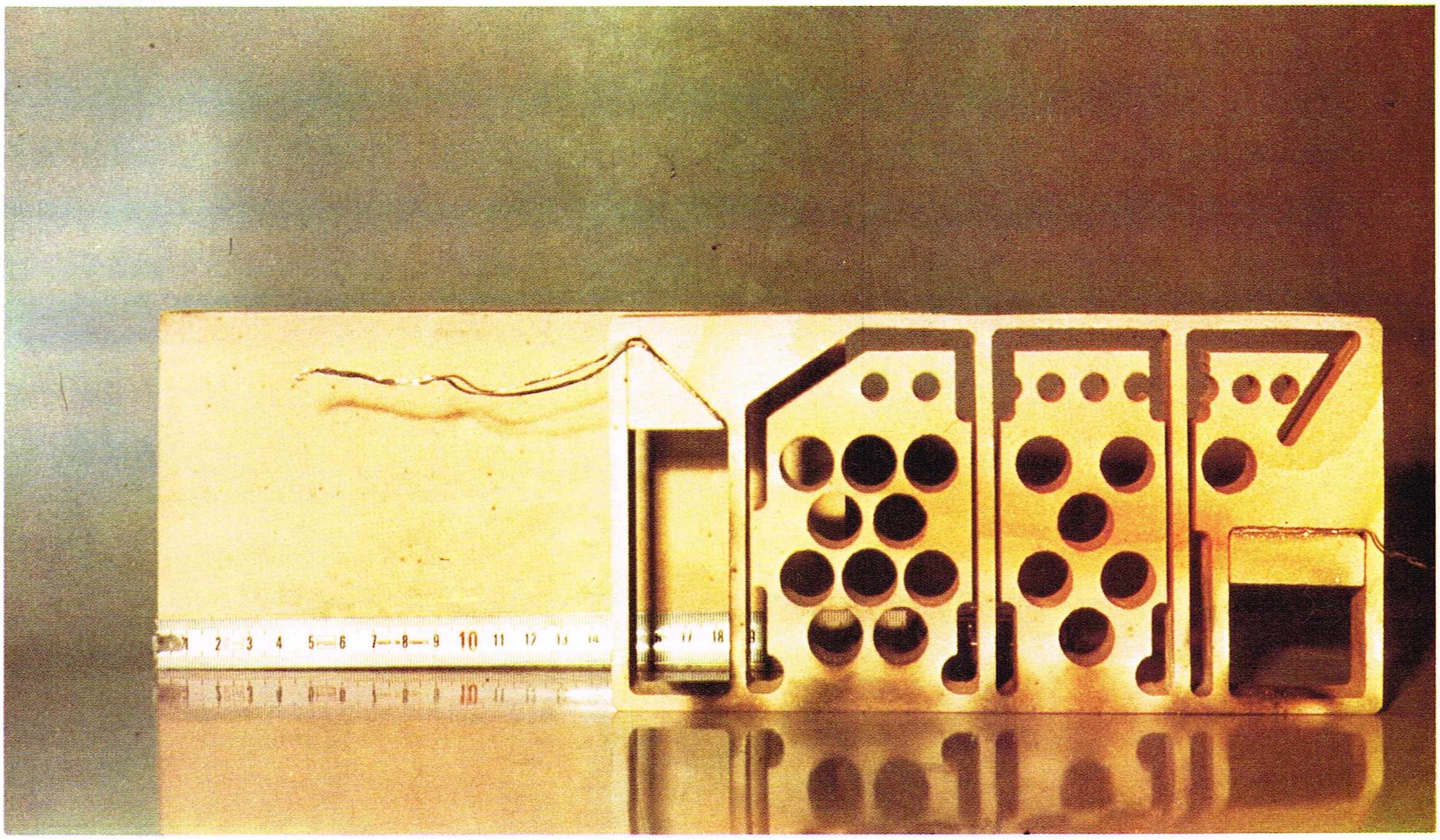

Laboratoire de physique des hautes températures - Centre national de la recherche scientifique

▲ ***Les parois intérieures des fours sont recouvertes de briques ou de ciments réfractaires permettant d'éviter les échanges par rayonnement tout en limitant les pertes thermiques par conduction avec l'extérieur. Ici, une brique réfractaire utilisée dans le four de 2 200 °C en atmosphère oxydante du Laboratoire de physique des hautes températures à Orléans (Brevet C. N. R. S.-ANVAR).***

Le débit de chaleur produit par combustion est transmis par rayonnement, convection et conduction au récepteur constitué généralement par un faisceau tubulaire où circule le fluide froid. Parmi les fours industriels à combustion, ceux de ce type, de loin le plus important, portent le nom de *fours tubulaires*. Leur conception dépend fortement de leurs utilisations, dont les principales sont :
— le chauffage d'un fluide sans changement de phase ;
— le chauffage d'un liquide avec vaporisation partielle et totale (cas des chaudières) ;
— le chauffage d'un mélange réactionnel endothermique traversant un serpentin.

La chaleur de combustion n'est pas utilisée en totalité par le fluide circulant à l'intérieur du récepteur. Une partie, généralement faible, est perdue par les parois du four, et une autre, plus importante, est évacuée vers le milieu extérieur par les fumées circulant dans une cheminée. Les gaz quittant le four étant à des températures élevées, on utilise dans certains cas cette chaleur pour préchauffer d'autres fluides ou l'air d'alimentation. Cependant, il est nécessaire que la température des fumées ne soit pas trop abaissée pour avoir un bon tirage de la cheminée ; en effet, un bon tirage de la cheminée crée une dépression à l'intérieur du four, facilitant ainsi l'admission d'air dans les brûleurs.

Le rendement du four représentant la fraction de l'énergie libérée par la combustion et absorbée par le récepteur, la conception actuelle des fours tubulaires est telle que le transfert de chaleur entre le foyer et le faisceau se fait dans son intégralité par rayonnement. Dans les fours plus anciens, seule la première et la deuxième rangée des tubes du faisceau étaient accessibles au rayonnement thermique, le transfert avec les autres rangées se faisant uniquement par convection.

Description des fours à combustion tubulaires

★ Description générale

L'enceinte extérieure est constituée d'une enveloppe métallique parallélépipédique ou cylindrique. Le four comprend une zone de radiation correspondant à la zone où se développent les flammes de combustion et où se trouvent placés la plupart des tubes du récepteur en une ou deux rangées situées au voisinage des parois du four. Au-delà de la zone de radiation, on peut trouver une zone de convection comprenant un faisceau tubulaire en quinconce placé normalement ou parallèlement à la direction des fumées. Dans tous les cas, on cherche à augmenter le débit transféré par un accroissement de la vitesse des fumées et de la surface d'échange en recouvrant le faisceau d'ailettes.

L'enveloppe du four doit satisfaire aux contraintes mécaniques et être étanche afin de maintenir la dépression créée à l'intérieur du four par le tirage de la cheminée.

Les parois intérieures du four sont recouvertes de briques ou de ciments réfractaires permettant d'éviter les échanges par rayonnement tout en limitant les pertes thermiques par conduction vers l'extérieur. Les brûleurs sont placés dans des orifices percés dans les parois du four. Lorsque les températures dans le four sont très élevées, les parois sont constituées de plusieurs épaisseurs de briques, et entre la dernière épaisseur et la paroi métallique on dispose généralement un isolant permettant de réduire plus encore les pertes par conduction. Dans les parois du four, des regards permettent d'observer la combustion, la forme des flammes, la tenue des tubes, etc.

Les fumées quittent le four par l'intermédiaire de la cheminée en traversant, lorsqu'elle existe, la zone de convection. Les fumées sont amenées à la cheminée au travers d'un carneau. La cheminée est constituée de plus en plus d'une armature métallique recouverte à l'intérieur, du moins à sa base, par un ciment réfractaire. Ses dimensions, sa forme et sa hauteur doivent être telles qu'elles assurent un tirage donné que l'on peut régler d'ailleurs par un registre en acier, résistant à la température des fumées et placé à la base de la cheminée.

Tubes et faisceaux tubulaires. A l'exception des fours cylindriques droits où l'on utilise un serpentin hélicoïdal, le faisceau tubulaire est constitué par une association de tubes droits et parallèles, le passage d'un tube à un autre se faisant par des coudes à 180° ou des boîtes de distribution munies de bouchons permettant le nettoyage des tubes. La dimension des tubes est normalisée, et leur qualité et leur nature dépendent essentiellement de l'usage du four. Pour des fluides non corrosifs et des températures peu élevées (400 °C), les tubes et les accessoires sont en acier au carbone. Au-delà de 450 °C, on emploie des aciers réfractaires qui sont des alliages au chrome et au molybdène. Lorsque les températures

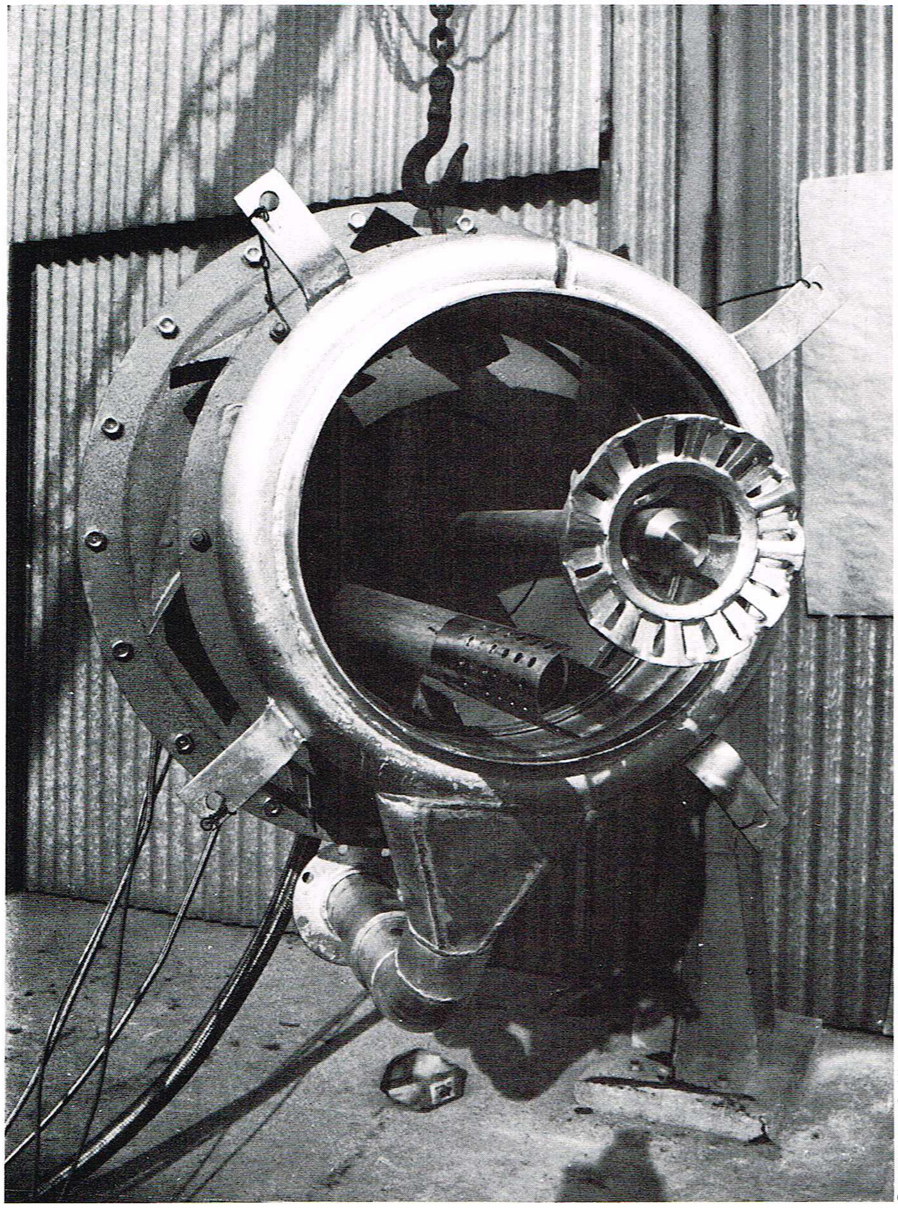

Sucmanu - C. Klein

▲ ***Les brûleurs doivent assurer un mélange intime de l'air et du combustible afin d'obtenir une combustion complète de ce dernier : ici, un brûleur industriel au gaz de grosse capacité (entre 4 et 12 kth).***

deviennent supérieures à 700-750 °C, on fait appel à des aciers inoxydables contenant de plus en plus de nickel ou à des alliages tels que l'inconel. Dans de nombreux cas, la température dans les tubes variant d'une extrémité à l'autre, les divers tubes peuvent être de nature différente. Dans le cas des fluides corrosifs, le choix du métal est lié à la nature de la corrosion.

Brûleurs. Nous nous limiterons à une description sommaire des brûleurs à fuel et à gaz. Les brûleurs doivent assurer un mélange intime de l'air au combustible afin d'obtenir une combustion complète de ce dernier. L'air de combustion est introduit par des volets réglables. Le fuel ou le gaz débouche dans le courant d'air au centre d'une buse en réfractaire.

Pour les brûleurs à gaz, le gaz peut être prémélangé à une partie de l'air, permettant ainsi l'obtention d'une combustion plus rapide avec des flammes courtes. Sans ce prémélange, les flammes sont plus longues et plus lumineuses.

Pour les brûleurs à fuel, il faut diviser très finement l'hydrocarbure sous forme d'une pulvérisation obtenue soit mécaniquement, soit par addition de vapeur. La pulvérisation mécanique se fait par détente sur la buse de l'hydrocarbure alimenté sous pression. La pulvérisation à la vapeur d'eau présente plus de souplesse : en effet, il est facile d'adapter les conditions d'alimentation à celles du fonctionnement du four alors qu'une pulvérisation mécanique exigera le changement de la buse si les conditions de fonctionnement varient notablement. Le fuel est généralement préchauffé et la vapeur de pulvérisation doit être essentiellement sèche.

Préchauffeurs. On désigne ainsi la zone de convection lorsqu'elle existe. Il s'agit d'un échangeur de chaleur particulier entre un faisceau tubulaire et les gaz de combustion. On souhaite une perte de charge faible (afin d'éviter l'emploi d'un ventilateur) tout en ayant un débit de chaleur transféré suffisamment grand pour permettre une diminution des investissements. Les faisceaux sont généralement tubulaires et munis de chicanes. L'écoulement du fluide à réchauffer et celui des fumées sont à co-courant afin d'éviter la condensation des vapeurs d'anhydride sulfureux présentes dans les fumées sur les tubes du faisceau, qui entraînerait très rapidement une destruction du faisceau.

* *Principaux types de fours tubulaires*

Il existe de nombreuses géométries pour la construction des fours tubulaires. Ils diffèrent les uns des autres par la forme de la chambre de combustion et la disposition de la zone de convection. On peut tout de même répartir les fours tubulaires à combustion en deux grandes familles en ne considérant que la disposition des tubes dans la zone de radiation qui peut être soit horizontale, soit verticale.

Parmi les *fours à tubes horizontaux,* les plus fréquents possèdent une chambre de combustion de section carrée. Les brûleurs sont situés sur les parois latérales, et par suite les flammes sont horizontales. La zone de convection est placée soit au-dessus, soit à côté, la séparation entre les zones étant dans ce dernier cas assurée par un mur en réfractaire dit *mur d'autel.* La cheminée est en général indépendante du four. Pour les autres fours horizontaux, la chambre de combustion est parallélépipédique. Les tubes sont placés sur les parois latérales et le toit du four. Les brûleurs situés dans la sole ont leur flamme dirigée vers le haut. La zone de convection est située au-dessus de la zone de combustion, et la cheminée est érigée directement au-dessus du four.

Les *fours à tubes verticaux* sont généralement cylindriques, les tubes étant placés dans la plupart des cas circonférentiellement le long de la paroi intérieure. Les brûleurs sont encastrés dans la sole et leur flamme est verticale. La zone de convection prolonge la zone de combustion, et la cheminée est située au-dessus des deux zones. Ces fours présentent un encombrement plus réduit, les zones de combustion, de radiation et la cheminée étant les unes au-dessus des autres. En outre, les zones contribuent au tirage de la cheminée, réduisant ainsi la hauteur de cette dernière.

Calcul des fours tubulaires à combustion

Nous ne détaillerons pas ici les différentes étapes que comporte le calcul théorique d'un four tubulaire. Nous nous limiterons à en faire l'inventaire en indiquant toutefois les principales hypothèses simplificatrices introduites lors de leur développement.

* *1re étape : étude de la combustion*

Les gaz ou les fuels utilisés comme combustibles sont des mélanges d'hydrocarbures généralement aliphatiques contenant très souvent des impuretés, négligeables ou non, telles que le soufre. La combustion des hydrocarbures conduit par craquage à l'apparition de carbone et d'hydrogène se transformant par combustion en gaz carbonique, en oxyde de carbone et en vapeur d'eau. En dehors de ces constituants, les fumées contiennent les gaz inertes de l'air (essentiellement l'azote) et l'oxygène en excès, car les hydrocarbures et l'hydrogène sont généralement totalement consommés.

L'écriture des équations stœchiométriques entre les divers constituants permet d'évaluer l'enthalpie des différentes réactions et en particulier de préciser le pouvoir calorifique du combustible. On appelle ainsi la quantité de chaleur obtenue par 1 kg ou 1 m^3 de combustible dans les conditions normales de température et de pression (0 °C, 1 atm). On distingue le pouvoir calorifique supérieur du pouvoir calorifique inférieur selon que l'eau est prise à 0 °C, sous forme liquide ou sous forme vapeur. Le pouvoir calorifique inférieur des combustibles gazeux et liquides reste compris entre 9 000 et 11 000 kcal/kg. Dans le *Chemical Engineers' Handbook* se trouvent des tableaux donnant les pouvoirs calorifiques des principaux combustibles solides, liquides et gazeux en fonction de leurs caractéristiques physiques. Y figure également

la quantité d'oxygène théorique consommée par la combustion; mais, pour éviter la formation d'oxyde de carbone, il est nécessaire d'opérer avec un excès d'oxygène ou avec un excès d'air. Cet excès, exprimé en pour cent de la quantité d'air théorique, joue un rôle important dans le calcul du four. En effet, en général, l'air d'alimentation est réchauffé par les fumées dans la zone de convection et un excès d'air diminue d'autant le pouvoir énergétique des fumées. Il faut donc réduire au minimum l'excès d'air, mais on constate dans la pratique qu'au-delà d'un certain seuil il apparaît rapidement de l'oxyde de carbone qui diminue considérablement la quantité de chaleur dégagée par la combustion et nécessite en conséquence une consommation supplémentaire de combustible. Dans les fours récents, l'excès d'air est de 20 à 30 % pour les brûleurs à gaz et de 30 à 40 % pour les brûleurs à fuel.

La composition des fumées dépend de la nature du combustible et de l'excès d'air. Pour prévoir leur enthalpie différentes relations ont été établies par Mallard et Le Chatelier, et on trouvera dans les ouvrages généraux la valeur moyenne des capacités calorifiques entre 0 °C et la température T des fumées pour les gaz suivants : hydrogène, azote, oxyde de carbone, anhydride carbonique, oxygène et vapeur d'eau. La connaissance de l'enthalpie des fumées permet de préciser le rendement énergétique du four. En effet, la différence entre les débits d'enthalpie du fluide alimentant le brûleur, soit H_a, et le débit d'enthalpie des fumées, soit H_f, représente le débit de chaleur transféré au récepteur, à travers les parois du four, aux pertes près, lesquelles sont souvent négligeables. Le rendement global du four est tel que :

(46) $$E\,\% = 100\,\frac{H_a - H_f}{H_a}$$

En outre, pour préciser les échanges par rayonnement entre la flamme et le récepteur, il est nécessaire de connaître la température de la flamme. Une température maximale de la flamme peut être obtenue si la combustion se déroule de manière adiabatique. Dans ces conditions, $H_a = (H_f)_{\text{adiabatique}}$, et la température des fumées ainsi calculée représente la température adiabatique de la flamme, soit T_a. La température de la flamme, et par suite celle des fumées, dont nous indiquerons ci-après une méthode approchée de détermination, est toujours inférieure à T_a dans la mesure où la combustion n'est pas instantanée et où les échanges par rayonnement apparaissent dès que la température de la flamme est supérieure à celle du récepteur.

★ 2e *étape : étude des échanges entre source, récepteur et parois*

Dans la chambre de combustion. Pour une géométrie donnée, il est possible d'évaluer la quantité de chaleur échangée entre la flamme et les tubes situés au voisinage des parois réfractaires du four. On est toutefois amené à faire un certain nombre d'hypothèses simplificatrices :

— Le transfert dans la zone de radiation entre le gaz et les tubes récepteurs se fait exclusivement par rayonnement.

— La surface réceptrice et les gaz de combustion sont à des températures uniformes, respectivement T_1 et T_G. Si la combustion n'est pas instantanée et/ou si la chambre de combustion est allongée, les hypothèses précédentes sont trop grossières. On découpe alors la chambre de combustion en un nombre limité de régions où les hypothèses précédentes pourront être admises.

— Les réfractaires se comportent pour le rayonnement thermique comme des surfaces sans flux. Les pertes par conduction à travers les parois du four sont alors égales au débit transféré par convection par le gaz, mais dans tous les cas ce débit reste très faible devant le débit échangé par rayonnement.

Avec les hypothèses précédentes, le débit transféré par le gaz aux tubes est tel que :

(47) $$\Phi_{G \leftrightarrows 1} = \sigma \mathcal{F}_{1G} \Omega_1 (T_G^4 - T_1^4)$$

Ω_1 est la surface extérieure des tubes et $\mathcal{F}_{1G}$ un facteur géométrique. Pour les fours tubulaires à combustion où les tubes sont proches des parois réfractaires, on peut, devant les dimensions géométriques de la phase gazeuse, comme le souligne Mac Adams (*Transmission de la chaleur*, Dunod, Paris, 1964), tenir compte des réflexions sur les réfractaires et remplacer la surface Ω_1 par une surface plane noire égale à la surface des réfractaires Ω_2 multipliée par un facteur total d'émission ε_1.

fig. 10

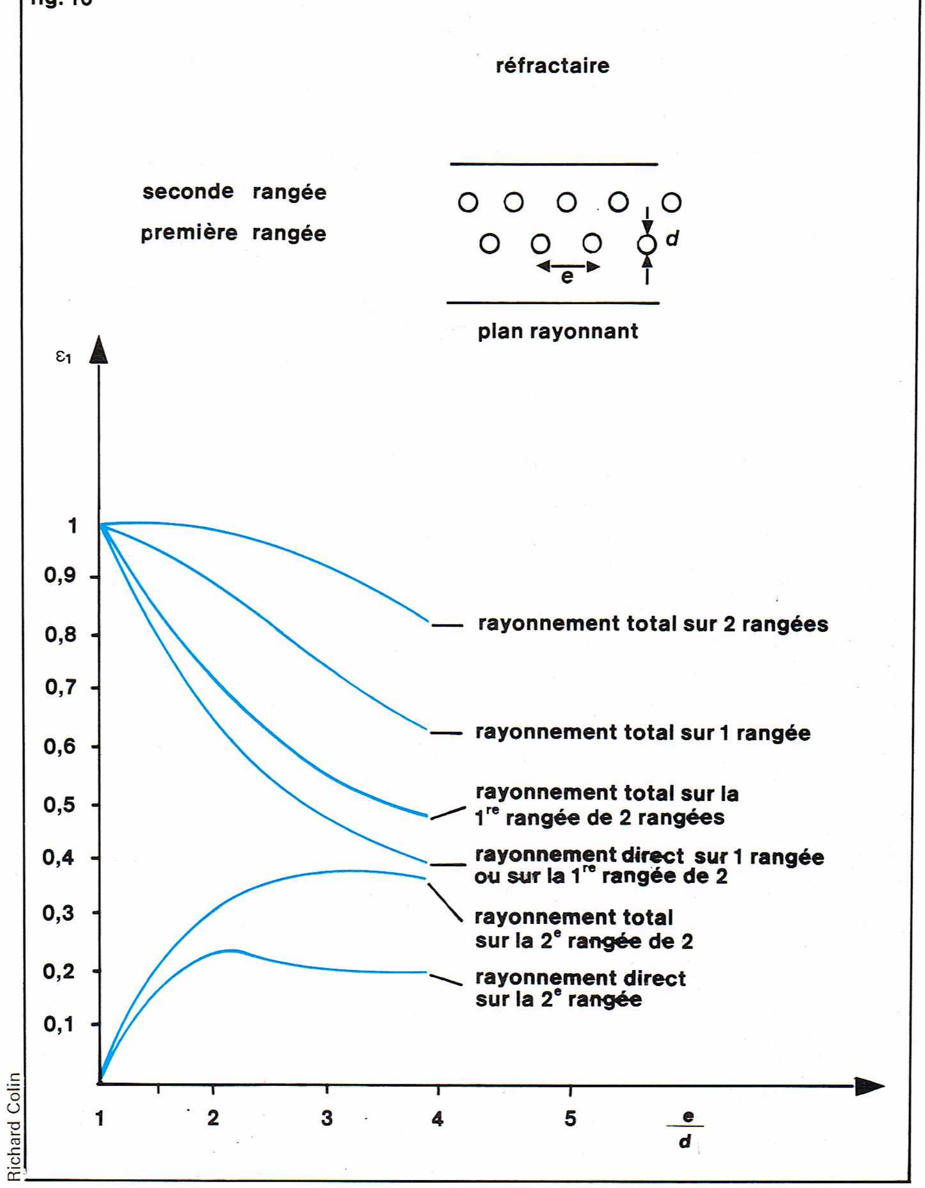

▲ ***Figure 10 : courbe de la valeur du coefficient d'absorption ε_1 pour des faisceaux tubulaires à une ou deux rangées en quinconce placées contre les parois d'un réfractaire (en fonction du rapport écartement sur diamètre des tubes).***

La *figure* 10 donne les valeurs de ε_1 pour des faisceaux tubulaires à une ou deux rangées en quinconce placées contre les parois d'un réfractaire.

Ces déterminations supposent que le gaz contenu entre les différents tubes et la paroi est transparent au rayonnement thermique.

Dans ces conditions, la surface émettrice est remplacée par une surface plane noire de section $\Omega_R = \varepsilon_1 \Omega_1$, et le débit échangé entre le gaz et le récepteur est tel que :

(48) $$\Phi_{G \rightleftarrows 1} = \sigma \Omega_R\, (\varepsilon_{G,\, pL} T_G^4 - \alpha_{G1\, pL} T_1^4)$$

où ε_G et α_{G1} représentent respectivement le facteur total d'émission et le facteur total d'absorption. Comme nous l'avons indiqué dans la première partie, ces facteurs dépendent de la température du gaz, de la pression partielle des gaz absorbants (essentiellement anhydride carbonique et vapeur d'eau), de la pression totale et de la dimension géométrique de la masse gazeuse L. Nous avons également indiqué comment ces coefficients sont évalués dans la pratique.

La relation **(48)** ne pourra être appliquée qu'à condition que toutes les surfaces réfractaires soient recouvertes de tubes. Si Ω_S représente la surface des réfractaires non recouverte de tubes, le débit transféré entre le gaz et la surface plane noire Ω_R en présence de la surface sans flux Ω_S sera donné par une relation identique à l'équa-

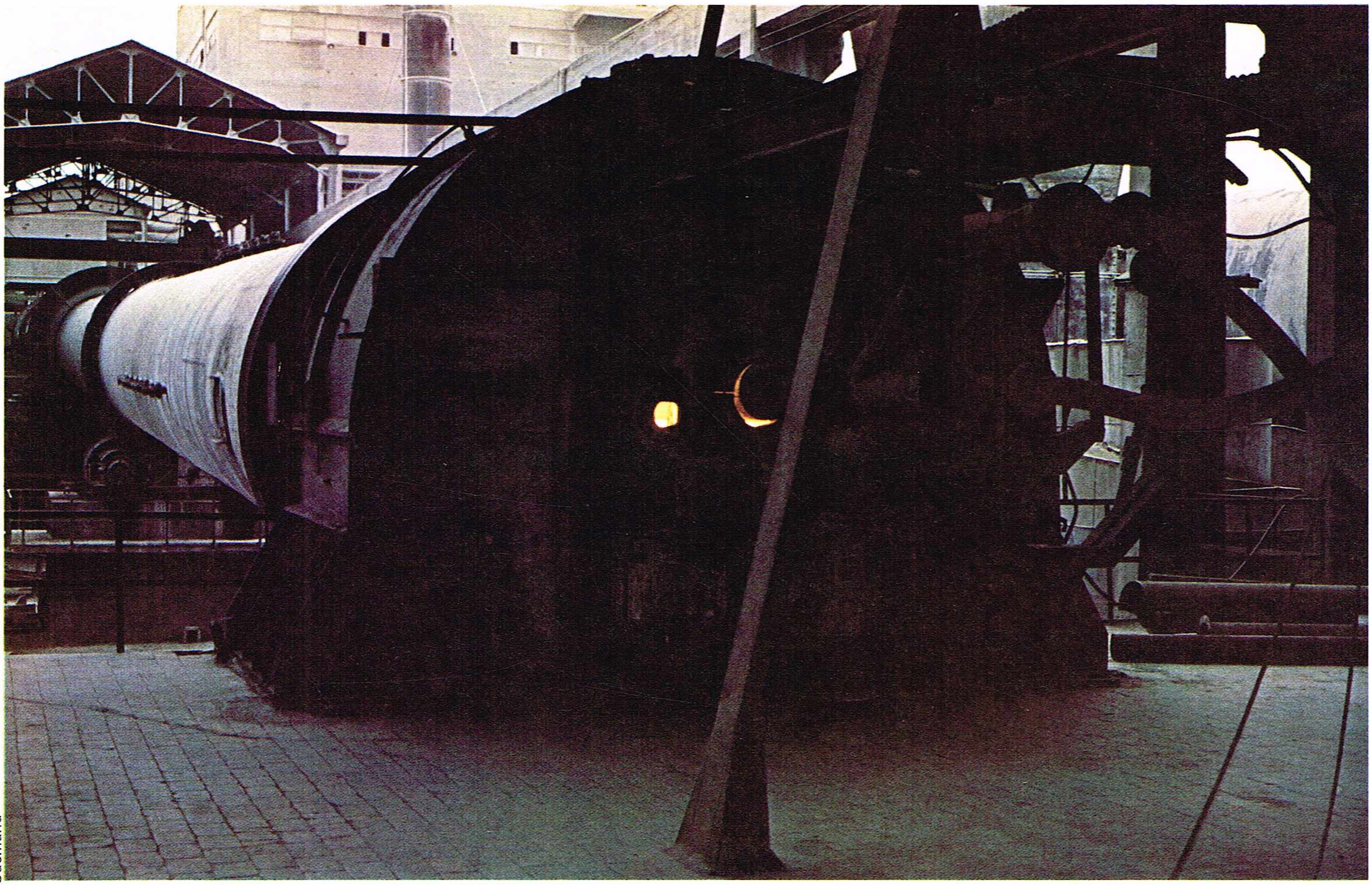

Sucmanu

▲ ***Un* four de cimenterie montrant au premier plan le brûleur ; de tels fours tubulaires peuvent dépasser 150 m de longueur.**

tion **(47)**. Le facteur géométrique $\mathcal{F}_{1G}$ sera évalué en supposant le gaz de combustion soit gris, soit réel. Dans ce dernier cas, le spectre d'absorption du gaz réel est réparti en un nombre limité de domaines, et dans chaque domaine de longueurs d'onde ainsi défini, le gaz sera supposé gris.

Si nous considérons comme négligeables les pertes de chaleur par convection à travers les parois du four, la différence entre le débit d'enthalpie des fumées en combustion adiabatique et le débit d'enthalpie des fumées est égale au débit de chaleur échangé par rayonnement entre le gaz et le récepteur, soit :

$$H_{Ga} - H_G = mC_p\,(T_a - T_G) = \Phi_{G \rightleftarrows 1} = \sigma \mathcal{F}_{1G}\Omega_1\,(T_G^4 - T_1^4) \quad \textbf{(49)}$$

Connaissant T_a et T_1, la relation **(49)** permet d'évaluer la température des gaz de combustion. En négligeant les pertes par convection, on aboutit à une valeur inférieure de la température du gaz. Cette dernière peut d'ailleurs être établie avec plus de précision en tenant compte de la variation des capacités calorifiques des différents constituants gazeux en fonction de la température.

Lorsque toutes les surfaces réfractaires ne sont pas recouvertes de tubes récepteurs, un bilan de chaleur sur les réfractaires permet d'évaluer la température des réfractaires et par la suite d'estimer une valeur du débit de chaleur perdue à travers les réfractaires.

La température T_1 du récepteur s'obtient à partir de la connaissance du débit transféré, des caractéristiques d'écoulement et des propriétés physico-chimiques du fluide circulant à l'intérieur des tubes placés au voisinage des parois. Le calcul complet du four sera donc en principe résolu avec la détermination des facteurs géométriques $\mathcal{F}_{1G}$.

Les flux transférés par rayonnement dans la chambre de combustion varient bien entendu avec le type de four, la nature, la température et la vitesse de circulation du fluide dans les tubes, mais on constate qu'ils restent pratiquement compris entre 25 000 et 55 000 kcal/h/m².

Dans la zone de convection. Dans la zone de convection, lorsqu'elle existe, se trouve un faisceau tubulaire placé normalement ou parallèlement au trajet des fumées. Les tubes sont lisses ou munis d'ailettes. Le calcul de la zone de convection est plus délicat que celui de la zone de radiation car le transfert par rayonnement n'est pas négligeable, en particulier pour les premières rangées du faisceau pouvant être atteintes directement par le rayonnement thermique de la flamme.

Certains auteurs ont proposé des relations simples donnant les différents débits de chaleur transférés, mais toutes ces relations, établies pour des géométries particulières, doivent être utilisées avec précaution. Il est préférable de simplifier le calcul de la zone de convection en la divisant en deux régions. Dans la première, le transfert par rayonnement subsiste, et dans la deuxième le transfert se fait uniquement par convection. Pour cette région on pourra utiliser les relations établies lors des études de transfert de chaleur par convection d'un fluide circulant normalement ou parallèlement à un faisceau tubulaire muni ou non d'ailettes.

* 3e *étape : étude du faisceau tubulaire situé dans la zone de combustion*

Le calcul du four ne peut se concevoir indépendamment de l'étude de l'évolution du fluide circulant dans les tubes contenus dans la zone de radiation. En général, on souhaite avoir à la sortie des tubes un fluide ayant une température, une pression et une composition données (pour le cas d'un changement partiel ou total de phases). Aussi, pour une géométrie donnée, il s'agit de préciser les conditions d'alimentation du fluide. Il est nécessaire, en particulier, de prévoir la perte de charge à l'intérieur des tubes, et, dans le cas d'une vaporisation partielle (cas très fréquent), la perte de charge pourra être évaluée par des méthodes discrètes utilisant des approximations successives ou à l'aide de méthodes graphiques. Si la perte de charge est trop grande, il faudra reprendre le calcul complet du four avec des tubes de diamètres supérieurs. On peut également modifier la disposition géométrique des tubes en plaçant ceux-ci en parallèle lorsque le fluide atteint une température au-delà de laquelle la vaporisation partielle du fluide peut se produire.

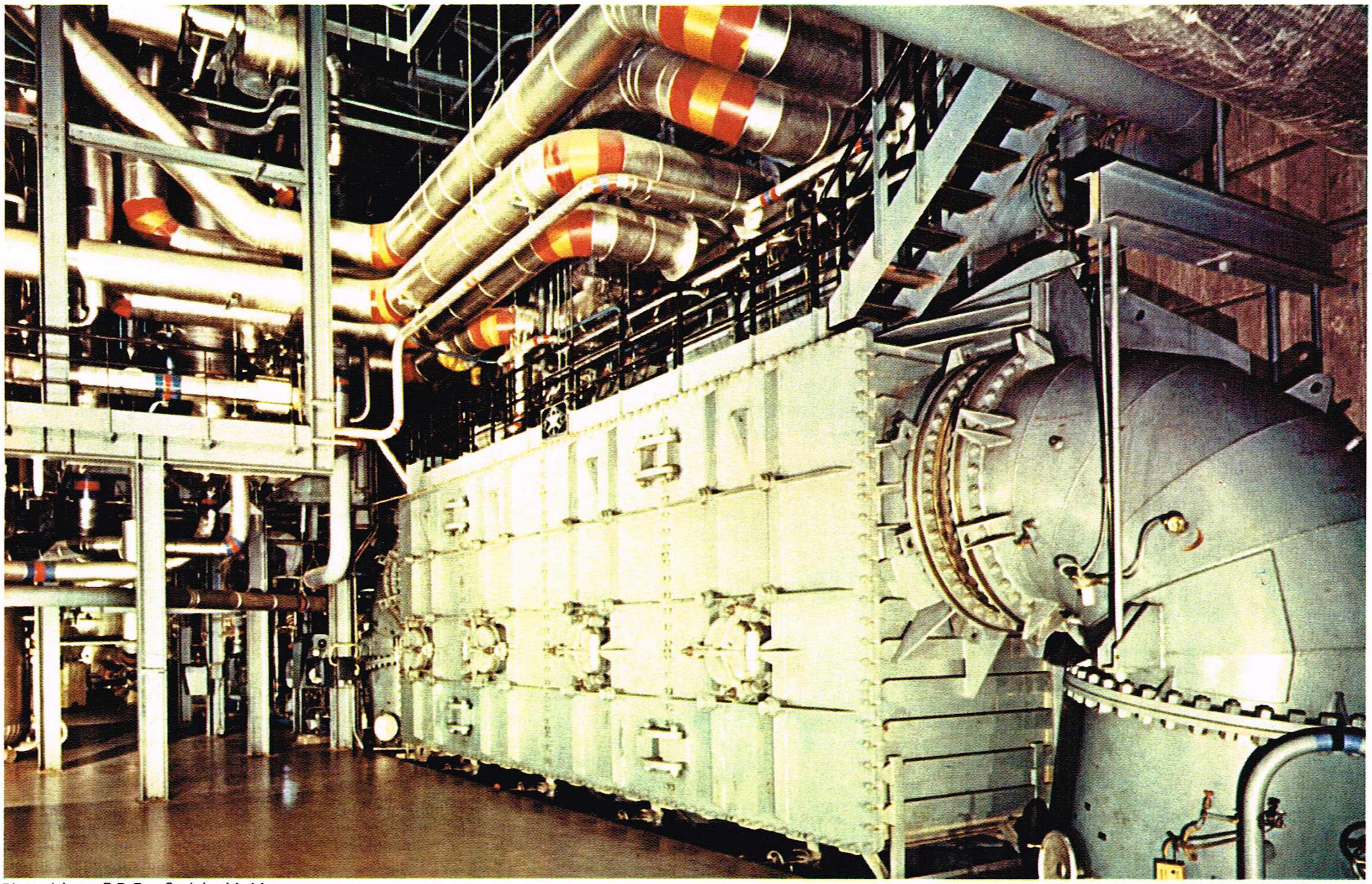

Photothèque E.D.F. - Sodel - M. Morceau

▲ ***Le condenseur de la centrale thermique classique de Champagne-sur-Oise : la vapeur provenant de la turbine à vapeur y est condensée en eau qui retourne à la chaudière.***

Condenseurs

Description générale des condenseurs

Les condenseurs se présentent toujours comme des appareils à faisceau tubulaire et calandre, et les caractéristiques données lors de l'étude des échangeurs à faisceau et calandre restent valables.

Les applications industrielles des condenseurs apparaissent essentiellement sous trois formes :

— Utilisation de la grande quantité de chaleur libérée par la condensation de vapeur sèche ou saturée pour porter à une température voulue un fluide froid alimentant le faisceau. C'est le cas des productions d'eau chaude par condensation de vapeur.

— Inversement, liquéfaction et refroidissement d'une vapeur pure d'un fluide frigorifique (ammoniac, Fréon, chlorure de méthyle, etc.) avant détente. C'est le cas des appareils de réfrigération à compression et détente en phase liquide.

— Condensation partielle ou totale de mélanges complexes de vapeurs de liquides miscibles et non miscibles en présence ou non de vapeurs non condensables. De tels appareils équipent toutes les tours de distillation des unités de raffinage.

Les condenseurs peuvent être disposés horizontalement et verticalement.

Pour les *condenseurs horizontaux*, la condensation s'effectue essentiellement à l'extérieur des tubes du faisceau. Les chicanes sont échancrées convenablement afin de permettre l'évacuation du condensat se formant à la base du condenseur, la hauteur du liquide condensé étant réglée à l'aide d'un siphon.

Pour les *condenseurs verticaux*, la condensation est réalisée à l'extérieur ou à l'intérieur du faisceau. Dans les deux cas, le niveau du condensat à la base du condenseur est ajusté par l'intermédiaire d'un siphon, débouchant, pour la condensation interne, dans une boîte de réception.

La disposition des chicanes dans les condenseurs horizontaux correspond dans la plupart des cas à l'une des trois dispositions suivantes : — courant divisé à une passe ; — courant divisé, puis regroupé ; — courant doublement divisé, puis regroupé.

Lorsqu'on souhaite utiliser la vapeur condensée pour chauffer le fluide (ou inversement, si l'on souhaite sous-refroidir le condensat), un condenseur vertical présentera plus de souplesse qu'un condenseur horizontal. En effet, dans les condenseurs verticaux, tous les tubes baignent dans le condensat d'une hauteur identique, et le contrôle de la surchauffe ou du sous-refroidissement est facilité.

Calcul des condenseurs

Il est indispensable de distinguer le calcul des condenseurs à vapeur pure surchauffée ou saturante de celui des condenseurs de mélange complexe de vapeurs de liquides miscibles ou non miscibles en présence de vapeurs non condensables.

* *Cas des vapeurs pures saturées et sèches*

Pour une vapeur saturée, la température du condensat est égale à la température d'ébullition du liquide. La résistance thermique de transfert est, dans de nombreux cas, celle due au film liquide de condensat, mais d'une manière générale, la surface d'échange du condenseur sera évaluée par la relation :

(50) $$\Omega = \frac{\Phi}{U_S\,(\Delta t)_m}$$

La condensation se faisant à une température sensiblement constante, le contre-courant pur ou les écoulements à co-courant conduisent à la même différence moyenne de température, à savoir la moyenne logarithmique des différences de températures aux deux extrémités, ou DTLM. Le coefficient global de transfert U_S (tubes usagés) est égal à :

(51) $$\frac{1}{U_S} = \frac{1}{h_2}\frac{d_1}{d_2} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_c} + R_{d2} + R_{d1}$$

d_1 et d_2 représentent les diamètres extérieur et intérieur des tubes du faisceau. $1/h_2$ est la résistance de transfert à l'intérieur du tube. $1/h_c$ est la résistance de transfert dans le film de vapeur condensée. R_{d1} et R_{d2} sont les résistances

d'encrassement dues aux dépôts à l'extérieur et à l'intérieur des tubes. e est l'épaisseur des tubes. λ est la valeur moyenne de la conductibilité thermique du matériau solide constituant les tubes du faisceau.

Si la vapeur est surchauffée, avant de pouvoir la condenser, il sera nécessaire de la refroidir. Si la température de la paroi est supérieure à celle de la saturation, il ne se produit pas de changement de phase, et le débit de chaleur transféré peut être prévu par l'une quelconque des relations indiquées lors de l'étude des échangeurs. En revanche, si la température de la paroi est inférieure à celle de saturation, la condensation peut se produire directement, même avec une vapeur surchauffée.

A partir de la température de la vapeur surchauffée (T_v) et de celle du fluide de refroidissement, on peut calculer une température de la paroi en l'absence de condensation :

$$T_p = \frac{U}{h} T_2 + T_v \left(1 - \frac{U}{h}\right) \tag{52}$$

où U est le coefficient de transfert global en l'absence de condensation et h le coefficient de transfert convectif du côté vapeur.

Si la température ainsi calculée est supérieure à la température de saturation, il n'y a pas de condensation. Si la température T_p est inférieure à la température de saturation, il y a condensation de la vapeur surchauffée, et le flux de chaleur transféré est très supérieur à celui que l'on aurait en l'absence de condensation.

Si le condenseur possède une zone de refroidissement, le calcul de cette zone est plus délicat, surtout si l'on souhaite une température finale très précise. Pour les condenseurs verticaux à condensation externe, la surface nécessaire au sous-refroidissement peut être calculée indépendamment et sera additionnée à la surface du condenseur sans zone de sous-refroidissement. Pour les tubes ou les plaques horizontales, par suite du débordement du condensat d'un tube sur un autre, le refroidissement du condensat d'épaisseur variable le long du tube des échangeurs devra être calculé en discrétisant la longueur des tubes.

La perte de charge, côté vapeur, diminue la température finale du condensat ainsi que la moyenne des différences de température entre l'entrée et la sortie, et il sera indispensable de la préciser. Si les températures de la vapeur et du condensat sont fixées aux extrémités, une estimation de la perte de charge ne permettra pas d'obtenir les spécifications voulues. En outre, l'évaluation des pertes de charge pour des écoulements diphasiques étant peu précise, le calcul des condenseurs devra prendre en considération les conséquences d'une perte de charge supérieure à celle calculée.

La condensation des vapeurs pures saturées ou surchauffées peut s'effectuer dans les différents types de condenseurs. Nous avons donné dans la première partie les principales corrélations permettant d'évaluer le coefficient de transfert h_c du film de condensat. Pour la condensation à l'extérieur des tubes, la perte de charge peut être obtenue à l'aide des résultats et des méthodes préconisées par Diehl et Uruh (*Petrol. Ref.* 36, 10, 147 [1957], 37, 10, 124 [1958]). Pour la condensation à l'intérieur des tubes, on emploiera les relations générales préconisées par les articles généraux sur les écoulements diphasés et dont les principaux résultats sont rapportés dans le *Chemical Engineers' Handbook*. Signalons que, dans les condenseurs verticaux à condensation interne, où la phase vapeur et la phase liquide s'écoulent à contre-courant (cas des condenseurs situés sur les reflux des colonnes à distiller), l'écoulement de la phase vapeur retarde et diminue l'épaisseur du condensat, et, pour ces condenseurs, ni le transfert de chaleur ni la perte de charge n'ont été encore correctement analysés.

* *Cas d'un mélange complexe de vapeurs*

L'étude de la condensation des mélanges complexes de vapeur fait apparaître plusieurs cas :

— Toutes les vapeurs sont condensées à la température minimale atteinte dans le condenseur en donnant une phase liquide miscible.

— Tous les constituants sont substantiellement solubles dans le condensat, même si la température d'ébullition est inférieure à celle du condensat.

— Un ou plusieurs constituants ne sont ni condensables, ni solubles dans les conditions de température et de pression du condenseur.

Pour la condensation d'un mélange complexe de vapeur, la composition de la phase vapeur et du condensat varie tout le long des tubes et des gradients de compositions apparaissent dans les deux phases. Les études des gradients de température et de composition ont été faites dans le cas des mélanges binaires, d'une part pour un mélange de deux vapeurs donnant des liquides miscibles (Colburn et Drew, *Trans. Am. Inst. Chem. Engrs.*, 33, 196 [1937]) et d'autre part pour un mélange d'une vapeur avec un gaz insoluble (Colburn et Hougen, *Ind. Eng. Chem.*, 26, 1178 [1934] ; Colburn et Edison, *Ind. Eng. Chem.*, 33, 457 [1941]). Ces calculs nécessitent la connaissance des coefficients de diffusion, et à chaque étape du calcul il faudra estimer la température, la composition, les débits d'enthalpie en fonction de la quantité de chaleur transférée. On suppose, en outre, que l'équilibre thermodynamique est réalisé à l'interphase liquide-vapeur à la température locale de la vapeur. Cela n'est pas très exact dans la mesure où le condensat et l'interphase liquide-vapeur sont à une température intermédiaire entre celle de la vapeur et celle du fluide de refroidissement.

En outre, si la principale résistance au transfert thermique est celle du film vapeur, la surface d'échange Ω peut être évaluée à l'aide de la relation :

$$\Omega = \int_0^{\Phi} \frac{1 + Uz/h_{sv}}{U\,(T_v - T_2)}\, d\Phi \tag{53}$$

U est le coefficient de transfert global entre la vapeur à la température T_v et le fluide de refroidissement à la température T_2. Cette résistance englobe en particulier la résistance du film du condensat et celles des dépôts interne et externe. La résistance de film du condensat est obtenue à l'aide des corrélations établies dans le cas des vapeurs pures. h_{sv} est le coefficient de transfert convectif pour la phase vapeur en l'absence de condensat. z est le rapport du débit de chaleur transféré en l'absence de condensat au débit de chaleur total transféré. Ce rapport est obtenu à l'aide de calcul thermodynamique et il peut varier notablement d'une extrémité à l'autre du condenseur, surtout si la vapeur contient un gaz non condensable. Le coefficient de transfert h_{sv} devra être évalué à chaque pas d'intégration. Le principe de cette procédure de calcul est voisin de celui préconisé par Ward (*Petro. Chem. Engr.*, 32, II, 42 [1960]).

La perte de charge, dans le cas d'une vapeur complexe, est obtenue à l'aide des relations préconisées dans le cas des vapeurs pures, en tenant compte cependant de la variation de la vitesse de la phase vapeur en fonction de la température de cette dernière.

Évaporateurs

Dans les évaporateurs, la surface d'échange représente la plus grande part dans le coût de l'appareil, et, toutes choses étant égales par ailleurs, il faudra rechercher le type d'évaporateurs conduisant au plus grand coefficient de transfert.

Il existe deux utilisations principales des évaporateurs.

La première correspond à la séparation d'une phase vapeur et d'une phase liquide (récupération ou élimination d'un solvant). La vaporisation du solvant provoque par contrecoup la concentration de la phase liquide résiduelle sans provoquer la précipitation du ou des solutés présents dans la solution. Comme nous l'indiquerons ci-après, on essaie de récupérer la vapeur ainsi produite pour chauffer et même vaporiser le mélange lui-même. On aboutit alors à une association particulière d'évaporateurs dits *à effets multiples*. On peut également comprimer la vapeur ainsi produite et l'utiliser ensuite comme source de chaleur dans le même évaporateur.

Dans la deuxième utilisation des évaporateurs, la vaporisation et la température de la solution sont telles que le soluté présent dans la phase liquide précipite. Dans le cas de mélange de solutés, cette précipitation peut être sélective. De tels évaporateurs dits *à cristallisation* conduisent à des cristaux de tailles uniformes, bien définies dans le cas d'une circulation forcée du liquide. En dehors des dépôts dus à la corrosion et des impuretés présentes dans l'alimentation, la précipitation du soluté se produit sous forme de cristaux si la solubilité du soluté augmente avec la température, et sous forme d'écailles si la solubilité du soluté diminue avec la température. Si l'on souhaite éviter la précipitation, il est indispensable de maintenir le

solvant en contact fréquent et permanent avec la plus grande surface du solide déposé. Dans le cas des évaporateurs à cristallisation, le temps de contact du solide précipité avec la surface de chauffe doit être faible afin d'éviter la dégradation thermique du soluté. En outre, dans ces évaporateurs, les effets contaminants et catalytiques de la phase solide constituant la surface de chauffe orientent leur choix.

Description générale des évaporateurs

Les évaporateurs se différencient par la manière dont s'effectue le chauffage du liquide à vaporiser. La disposition entre la source de chaleur et le liquide à vaporiser se présente sous les quatre formes principales suivantes :

— La source de chaleur est séparée du liquide à vaporiser par des surfaces tubulaires.

— La source de chaleur circule dans des serpentins, des espaces annulaires plans, des doubles enveloppes, etc., et le liquide à vaporiser s'écoule à l'extérieur.

— La source de chaleur est en contact direct avec le liquide à vaporiser.

— La vaporisation est provoquée directement par le rayonnement solaire.

De très loin, le plus grand nombre d'évaporateurs industriels utilise des surfaces de chauffe tubulaires. Nous nous limiterons à leur étude et, pour chacun des types d'évaporateurs tubulaires, nous indiquerons les principales caractéristiques et le domaine d'application.

* *Évaporateurs à circulation forcée*

Bien qu'ils ne soient pas les plus économiques, ils sont fréquemment utilisés pour les divers usages par suite de la circulation forcée du liquide à vaporiser. La circulation obtenue à l'aide d'une pompe rend possible la séparation des étapes, chauffage, vaporisation du solvant et cristallisation. Si la circulation forcée est sans conséquence sur la vitesse d'évaporation, elle permet de maintenir en suspension les solides cristallisés, et ce type d'évaporateur est particulièrement bien adapté pour les opérations de cristallisation. Signalons que la présence des particules solides contribue à une érosion rapide des tubes, d'où la nécessité de bien choisir le matériau constituant ces derniers. Si l'on désire éviter la précipitation et utiliser l'évaporateur en séparateur vapeur-liquide, il faut maintenir le niveau du liquide à une hauteur suffisante dans les tubes à vaporisation par l'intermédiaire d'un tube immergé dans le liquide froid d'alimentation dont le niveau est situé au-dessus des surfaces chauffantes.

Le *tableau* XIII résume les principales caractéristiques et les domaines d'application des évaporateurs à circulation forcée.

* *Évaporateurs verticaux à tubes courts*

Ce sont les premiers à avoir été construits à l'échelle industrielle; leur usage reste toutefois encore très répandu dans l'industrie sucrière. La circulation dans les tubes chauffants est provoquée par l'ébullition du liquide. Les tubes placés verticalement ont un diamètre de 5 à 7,5 cm et une longueur de 1,20 à 1,80 m. Le débit liquide à l'intérieur des tubes est plusieurs fois le débit d'alimentation. Le passage du fluide chaud de la sortie supérieure du faisceau à sa base se fait par l'intermédiaire d'un puits central dont la section est du même ordre de grandeur que la surface des plaques du faisceau. L'efficacité de ces évaporateurs dépend totalement du niveau du liquide dans les tubes, et, pour empêcher une précipitation des solutés, le niveau du liquide dans les tubes devra être le plus élevé possible. Dans le cas d'une cristallisation, si l'on souhaite éviter une sédimentation des cristaux en cas d'arrêt de l'ébullition, on dispose un système mécanique d'agitation dans le puits central. Cela permet, en outre, d'augmenter la capacité des évaporateurs à tubes courts.

Le *tableau* XIV résume les principales caractéristiques et les domaines d'application des évaporateurs verticaux à tubes courts.

* *Évaporateurs verticaux à tubes longs*

La plupart des évaporations industrielles sont effectuées de nos jours dans ce type d'évaporateurs, car, à capacité identique, leur prix de revient est inférieur à celui des autres.

Le liquide à vaporiser traverse un faisceau tubulaire à une passe constitué par des tubes de diamètre moyen 5 cm (diamètre minimal 2,5 cm) et dont la longueur reste comprise entre 6 m et 10,5 m. Au sommet des tubes, le liquide est entièrement vaporisé et le temps de contact du liquide ne dépasse pas quelques secondes. La circulation du liquide et de la vapeur est due à l'ébullition du liquide, et la température de ce dernier varie notablement au cours de la traversée dans le tube. Dans ces évaporateurs, très utilisés dans l'industrie papetière pour concentrer la liqueur noire, le liquide étant ascendant (évaporateurs *à film ascendant*), les forces de gravité augmentent la perte de charge du liquide dans les tubes. On peut éliminer la contribution de la gravité dans la perte de charge en imaginant une alimentation en liquide au sommet du faisceau. Dans ces évaporateurs verticaux dits *à film tombant*, la distribution du liquide est très importante, car les parois du tube doivent être mouillées de manière uniforme.

Ces évaporateurs, qu'ils soient à film ascendant ou tombant, sont utilisés généralement pour concentrer des solutions et non pour provoquer des cristallisations. Certes, en modifiant le niveau du liquide dans les tubes, on peut les employer pour précipiter des solutés, mais il est alors indispensable d'opter pour un évaporateur

Tableau XIII

Caractéristiques et domaines d'application des évaporateurs à circulation forcée

Avantages	Coefficient de transfert élevé Circulation forcée Évaporateur polyvalent
Inconvénients à la réalisation	Coût élevé Puissance consommée par la pompe de circulation Temps de contact et de séjour dans les tubes élevés
Inconvénients au fonctionnement	Rendement faible de la circulation forcée Formation de dépôts par suite de l'ébullition Corrosion et érosion des tubes Possibilité de pistonnage dans les tubes par suite de la formation de cristaux de soluté et des dépôts
Domaines d'application	Évaporateurs à cristallisation Vaporisation de solutions corrosives Vaporisation des solutions visqueuses

Tableau XIV

Caractéristiques et domaines d'application des évaporateurs verticaux à tubes courts

Avantages	Coefficient de transfert élevé pour de grandes différences de température Hauteur réduite Désincrustation mécanique des cristaux et des écailles Peu coûteux
Inconvénients au fonctionnement	Coefficient de transfert faible pour de petites différences de températures Encombrement au sol important Temps de contact important Coefficient de transfert faible pour les liquides visqueux
Domaines d'application	Évaporateurs de solvant Évaporateurs de cristallisation si l'évaporateur possède un système d'agitation Vaporisation de solutions peu corrosives Désincrustation facile des précipités

▲ ***Tableaux XIII et XIV : caractéristiques et domaines d'application des évaporateurs à circulation forcée, et des évaporateurs verticaux à tubes courts.***

Tableau XV
Caractéristiques et domaines d'applications des évaporateurs verticaux à tubes longs à film ascendant ou tombant

Avantages	Faible coût Grande surface de chauffe Faible temps de contact Encombrement au sol réduit Bon coefficient de transfert pour les différences de température raisonnables pour les évaporateurs à film ascendant Bon coefficient de transfert pour des différences de température quelconques pour les évaporateurs à film tombant
Inconvénients à la réalisation	Hauteur élevée Peu adaptés comme évaporateurs de cristallisation Faible coefficient de transfert pour les faibles différences de température Une pompe d'alimentation est nécessaire pour les évaporateurs à film tombant
Inconvénients au fonctionnement	Le rendement des évaporateurs à film ascendant est très sensible aux conditions opératoires La distribution uniforme du liquide dans les évaporateurs à film tombant est délicate
Domaines d'application	Évaporateurs de solvant Évaporateurs de liquide moussant Évaporateurs de liquide corrosif Grande capacité de vaporisation Évaporateurs à film ascendant dans le cas de grandes différences de température Évaporateurs à film tombant dans le cas de petites différences de température et pour des températures de bas niveau

▲ ***Tableau XV :*** ***caractéristiques et domaines d'application des évaporateurs verticaux à tubes longs à film ascendant ou tombant.***

▼ ***Tableau XVI :*** ***caractéristiques et domaines d'application des évaporateurs à tubes horizontaux.***

ascendant afin d'éviter la formation de pistonnage. Le chauffage des tubes de chauffe est obtenu par de la vapeur et pour les évaporateurs à film ascendant la différence de température est relativement faible (écoulements à contre-courant) alors qu'elle devient importante dans les évaporateurs à film tombant (écoulements à co-courant). Cependant, dans les deux cas, les coefficients de transfert sont très élevés.

Le *tableau* XV résume les principales caractéristiques et les domaines d'application des évaporateurs verticaux à tubes longs à film ascendant ou tombant.

Tableau XVI
Caractéristiques et domaines d'application des évaporateurs à tubes horizontaux

Avantages	Hauteur réduite Grande surface de séparation entre le liquide vaporisé et la vapeur Coût modéré pour les évaporateurs de faible longueur
Inconvénients à la réalisation	Peu adapté comme évaporateur de cristallisation Prix de revient élevé des évaporateurs à tubes courbés permettant d'envisager des évaporations conduisant à des dépôts et à des cristaux
Domaines d'application	Hauteur limitée Évaporateurs de petite capacité Évaporateurs à tubes droits pour les évaporateurs à solvant Évaporateurs à tubes courbés pour les évaporateurs à cristallisation

* *Évaporateurs à tubes horizontaux*

Ces évaporateurs sont assez peu utilisés, sauf pour l'obtention d'eau pure pour les chaudières. Le liquide à vaporiser circule généralement à l'extérieur des tubes, la vapeur de chauffage circulant à l'intérieur des tubes du faisceau. Ce type de conception interdit l'utilisation de ces évaporateurs comme appareils de cristallisation par suite de la difficulté de détacher les dépôts et les cristaux formés à l'extérieur des tubes.

Le *tableau* XVI résume les principales caractéristiques et les domaines d'application des évaporateurs horizontaux.

Association des évaporateurs

* *Évaporateurs à simple effet*

Les évaporateurs décrits précédemment sont dits *à simple effet.* Ils sont employés lorsque la capacité de vaporisation est faible, la vapeur permettant le chauffage des tubes étant à bon marché et celle résultant de la vaporisation, qui est corrosive et contaminée, interdisant alors une réutilisation possible. Les évaporateurs à simple effet peuvent fonctionner en système fermé, en système semi-fermé pour la production, et en système ouvert.

* *Évaporateurs à simple effet et à thermocompression*

La méthode la plus simple, mais sûrement pas la moins onéreuse, de réutiliser la vapeur produite est de la comprimer. La vapeur ainsi obtenue est surchauffée et peut servir de source de chaleur pour chauffer le faisceau tubulaire de l'évaporateur lui-même ou de tout autre appareil. La thermocompression peut être obtenue mécaniquement ou à l'aide de jets dans une turbine utilisant une fraction de la vapeur produite.

Pour une compression mécanique, si l'on souhaite que le prix de revient du compresseur reste raisonnable, il faut que les différences de température dans l'évaporateur ne dépassent pas une dizaine de degrés.

La compression à l'aide de jets de vapeur est adéquate lorsqu'on dispose de vapeur à haute pression que l'on peut introduire sous forme de jets sur les pales de la turbine du compresseur.

* *Évaporateurs à effets multiples*

Ce dispositif est de loin le plus économique du point de vue énergétique. On peut le mettre en œuvre lorsque la vapeur produite par la vaporisation au niveau d'un évaporateur peut être utilisée. En effet, si ce dernier travaille à la température normale d'ébullition, la vapeur produite est telle que, par condensation sur les surfaces de chauffe d'un deuxième évaporateur, elle peut permettre l'évaporation d'une quantité égale d'un liquide à la température normale d'ébullition ; la vapeur produite peut servir à un troisième évaporateur, et ainsi de suite.

On peut donc envisager une association en série de plusieurs évaporateurs ; on rencontre fréquemment dans l'industrie des évaporateurs à 6 et 7 effets, et des évaporateurs à 10 effets et plus ont été construits. En première approximation, l'économie en vapeur est proportionnelle au nombre d'effets. Cependant, le prix de revient et de fonctionnement augmentant avec le nombre d'effets, on ne dépasse pas le nombre d'effets indiqués précédemment.

En outre, dans ces associations, l'alimentation du liquide froid à vaporiser peut se faire à différents niveaux, soit : — au dernier effet, alimentation en aval ; — au premier effet, alimentation en amont ; — au dernier et au premier effet, alimentation mixte ; — à tous les effets, avec un soutirage de liquide concentré à tous les effets. Ce dernier dispositif est employé lorsque la vaporisation est accompagnée de précipitation.

Des récupérateurs de chaleur sont généralement associés aux différents effets afin d'accroître l'économie de vapeur ; le condensat de la vapeur de chauffe doit quitter l'évaporateur à la température la plus basse, aussi utilise-t-on ces condensats pour préchauffer les liquides d'alimentation dans des récupérateurs. Ces récupérateurs se réduisent à de simples échangeurs liquide-liquide, qui, à cause de leur complexité, n'équipent que des évaporateurs de grandes capacités. Plus fréquemment, la vapeur condensée étant à une pression élevée, le condensat du premier effet est détendu à la pression de fonctionnement du deuxième effet, et ainsi de suite. Pour les évaporateurs à alimentation en amont, le liquide est préchauffé par la vapeur perdue à chaque effet.

Les évaporateurs à effets multiples ont connu un développement considérable durant ces dernières années pour la production d'eau potable à partir d'eau de mer.

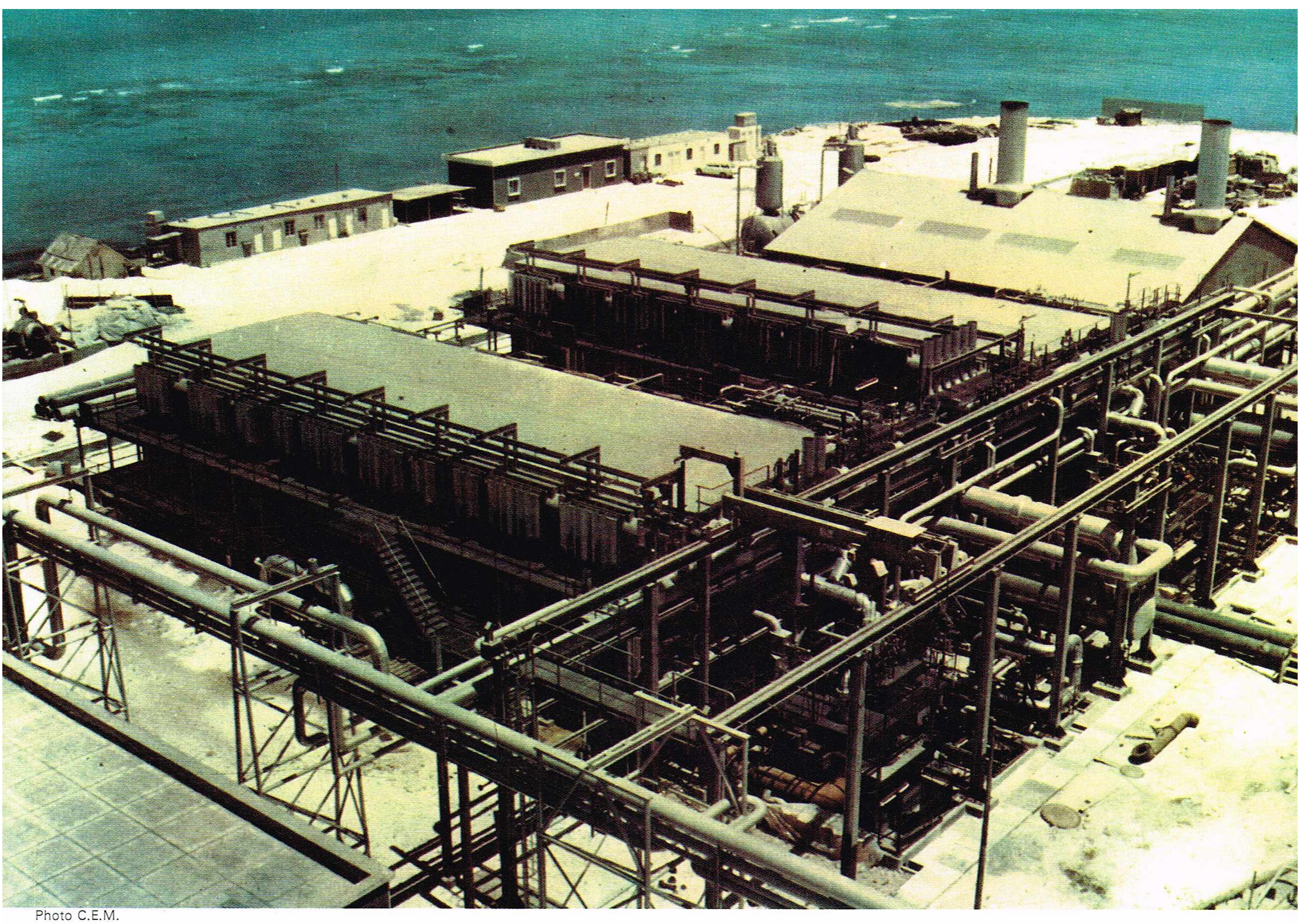

Photo C.E.M.

▲ ***Une usine de dessalement de l'eau de mer mise en service au Qatar en 1973. L'ensemble des deux évaporateurs (évaporateur à effet multiple) produit 20 000 m³ d'eau douce par jour.***

Calcul des évaporateurs

Le calcul des surfaces de chauffe d'un évaporateur est délicat, car les corrélations donnant les coefficients de transfert sont établies pour la vaporisation de liquides purs et propres, alors que dans de nombreux cas, les solutions à évaporer contiennent des solutés en concentrations élevées, que l'on cherche d'ailleurs à précipiter dans les évaporateurs à cristallisation.

Pour les évaporateurs, et contrairement aux autres appareils, la surface de chauffe est définie comme celle en contact avec le liquide à vaporiser. Quel que soit le type d'évaporateurs, les études expérimentales ont conduit les auteurs à présenter leurs résultats expérimentaux sous forme de courbes, et, si des corrélations sont proposées, il sera indispensable de bien connaître les conditions pour lesquelles elles ont été établies avant de pouvoir les utiliser.

* *Évaporateurs à circulation forcée*

Si, dans les tubes, la pression hydrostatique du liquide est suffisante, l'ébullition ne s'y produit pas et le coefficient de transfert global pourra être estimé à partir des corrélations établies pour la convection forcée et la condensation. Lorsque le liquide se vaporise à l'intérieur du tube, le coefficient de transfert devient plus grand et Fragen et Badger (*Ind. Eng. Chem.*, 28, 534 [1936]) ont proposé une corrélation empirique applicable à ce type d'évaporateurs.

* *Évaporateurs à circulation naturelle*

Pour les évaporateurs verticaux à tubes longs et courts, il existe de nombreux résultats expérimentaux donnant le coefficient de transfert dans la zone d'ébullition et la perte de charge d'accélération due à l'écoulement simultané de la phase liquide et de la phase vapeur. Pour plus d'informations, on pourra se reporter au *Chemical Engineer's Handbook* et aux ouvrages généraux indiqués dans la première partie.

Tours de réfrigération

Nous désignons ainsi tous les appareils où la vaporisation d'un liquide provoque son refroidissement. Généralement, la vaporisation est due à un écoulement d'air à la surface du liquide; depuis très longtemps, on sait qu'il est possible de refroidir de l'eau en exposant sa surface à un courant d'air. Aussi la plupart des tours de réfrigération concernent le refroidissement d'eau par l'air ambiant. Dans ce qui suit, nous nous limiterons exclusivement à ces problèmes. Le débit de chaleur transféré entre l'air et l'eau comporte d'une part la chaleur latente de vaporisation de l'eau, et d'autre part le débit transféré par convection, l'eau liquide et la vapeur d'eau contenues dans l'air n'étant pas à la même température. La première contribution représente sensiblement 80 % du débit de chaleur transféré. La quantité maximale d'eau vaporisée dans le courant d'air dépend de la température de l'air et de son degré hygrométrique. Ce dernier peut d'ailleurs être mesuré à l'aide du psychromètre à bulbe dont la température, voisine de la température de saturation adiabatique, représente la valeur minimale que peut atteindre la température de l'eau refroidie. Pratiquement, la température la plus froide du liquide reste légèrement supérieure à la température de saturation adiabatique, car il est impossible de mettre en contact tout le liquide avec l'air. La différence entre ces deux températures dépend de la conception de l'appareil dont les paramètres essentiels sont : — le temps de contact air-eau ; — la surface de contact ; — l'état de dispersion de l'eau.

A l'heure actuelle, les réalisations les plus performantes permettent de s'approcher de la température de saturation adiabatique à mieux que 1 °C.

Avant d'indiquer brièvement les méthodes d'étude théorique des tours de réfrigération, nous allons présenter les différentes conceptions technologiques permettant de refroidir de l'eau par évaporation dans un écoulement d'air.

Description générale des tours de réfrigération

Nous pouvons répartir les différents appareils de refroidissement d'eau par l'air en deux grandes familles selon que l'écoulement de l'air est obtenu de manière mécanique ou de manière naturelle (*fig.* 11).

▶ ***Figure 11 : différents types de tours de réfrigération ; a et b, à circulation mécanique à aspiration ; c, à circulation naturelle.***

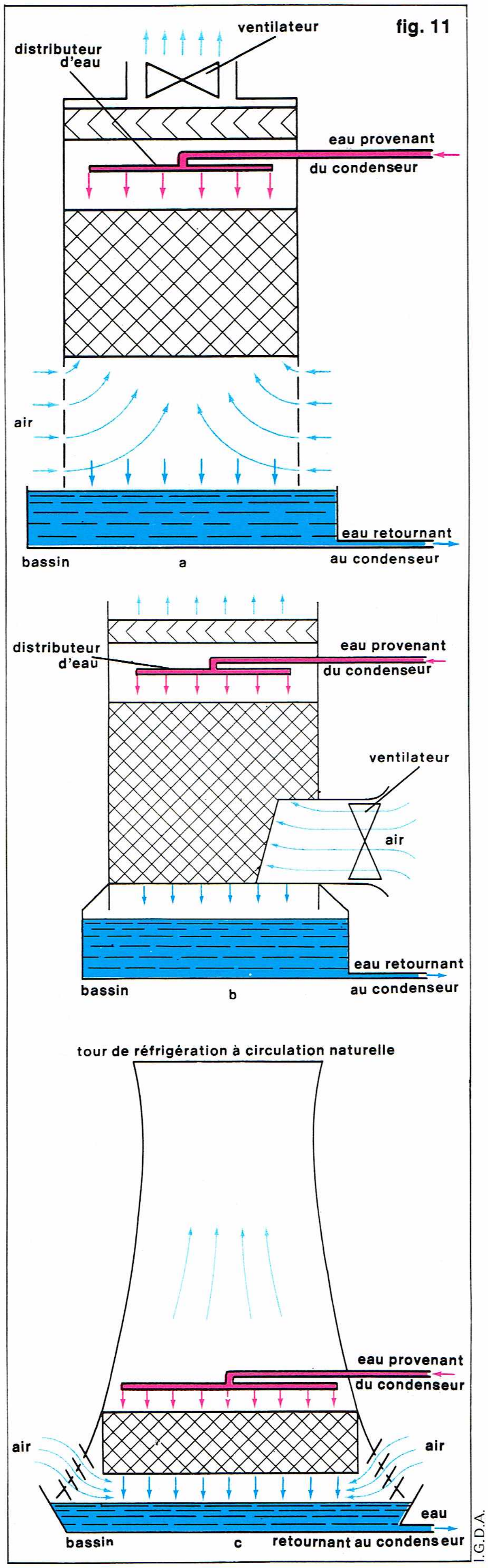

* *Tours à circulation mécanique*

L'écoulement des deux phases est assuré mécaniquement. La phase liquide est dispersée généralement au sommet de la tour, l'atomiseur étant alimenté à l'aide d'une pompe.

Dans les tours de réfrigération dites *à aspiration*, l'écoulement de l'air est provoqué par une hélice d'aspiration montée sur le socle de la tour ; l'air, dont le débit est forcé à la base de la tour, s'échappe à une vitesse faible à son sommet. Dans ces appareils, l'hélice et le moteur d'entraînement sont situés à l'extérieur de l'enceinte, ce qui facilite leur entretien et leur contrôle. Dans la mesure où le système mécanique d'aspiration n'est pas placé au sommet de la tour où l'air est chaud et humide, l'hélice n'est pas soumise à une atmosphère humide très corrosive, mais, la vitesse de l'air étant faible, la circulation de l'air humide avec l'air d'alimentation est importante. Cela a comme conséquence une diminution notable des performances de la tour.

Pour remédier à cet inconvénient, on a réalisé les tours à circulation mécanique, dites *à entraînement*. Dans la tour, la circulation de l'air est forcée mécaniquement tout au long de la colonne. L'écoulement de l'air et de l'eau se fait soit transversalement (écoulements perpendiculaires), soit à contre-courant. L'écoulement à contre-courant est thermodynamiquement plus efficace, car l'eau la plus froide est en contact avec l'air le plus froid. Cependant, si l'on souhaite que la différence de température entre le liquide froid et la température de saturation adiabatique ne soit pas trop faible, on trouve que les deux conceptions nécessitent des caractéristiques de fonctionnement voisines. Aussi le choix entre les tours à entraînement transversal et à contre-courant dépendra-t-il du taux de remplissage de la tour, des conditions de fonctionnement, et du coût à la construction.

Les performances d'une tour de réfrigération donnée sont fonction d'une part du rapport $\frac{L}{G}$ (L et G désignent respectivement le débit massique d'eau et le débit massique d'air sec traversant la colonne), et d'autre part du temps de contact entre l'air et l'eau.

Industriellement, la valeur optimale de $\frac{L}{G}$ est obtenue en faisant varier le débit d'eau, le débit d'air étant maintenu constant. Puis la colonne est adaptée aux conditions requises de fonctionnement en modifiant convenablement le débit d'air à traiter. Le temps de contact entre l'air et l'eau est lié très étroitement au temps de séjour du liquide entre les trous de l'atomiseur et le bac de réception du liquide froid. Pour un débit d'eau fixé, il dépend par conséquent de la hauteur de la colonne. On constate l'existence d'un temps de contact minimal au-delà duquel il n'est pas possible, même en modifiant le rapport L/G, d'atteindre un refroidissement fixé.

En résumé, les paramètres fonctionnels d'une tour de réfrigération à circulation mécanique sont :

— Le degré de refroidissement de l'eau (différence de température entre l'eau d'alimentation et celle du bac de réception).

— Le degré d'approche à la saturation (différence de température entre l'eau du bac et celle de l'air humide au niveau du bac).

— Le débit massique d'eau à refroidir.

— Le degré hygrométrique de l'air d'alimentation.

— La vitesse de l'air dans la tour.

— La hauteur de la tour.

* *Tours à circulation naturelle*

La désignation globale sous le nom de tour n'est pas très correcte dans la mesure où ces appareils se présentent soit sous forme de tour, soit comme une suite de bassins.

— *Tours de réfrigération à circulation naturelle*

La circulation de l'air se fait sous forme de vent, et le débit de liquide que l'on veut refroidir à une température donnée dépend des cinq paramètres suivants : — le degré du refroidissement de l'eau ; — le degré d'approche à la saturation ; — la vitesse du vent ; — la hauteur de la tour ; — la température de l'air humide.

Par suite du nombre infiniment grand de combinaisons possibles entre ces cinq paramètres, on trouve dans la littérature des courbes donnant L en fonction des degrés de refroidissement et d'approche pour une tour de hauteur

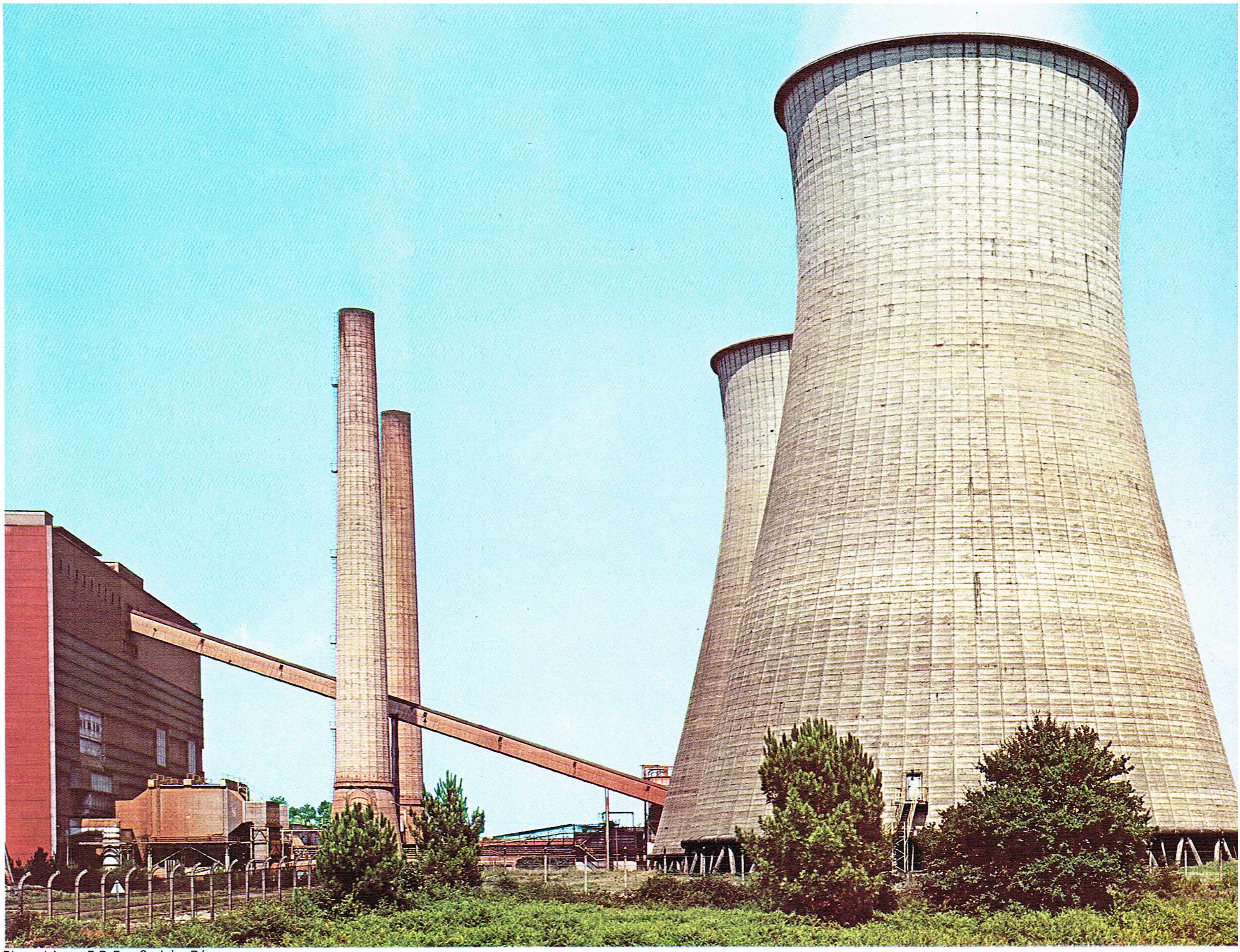

Photothèque E.D.F. - Sodel - Bérenger

▲ ***Les tours de réfrigération à circulation naturelle sont reconnaissables à leur forme d'hyperboloïde de révolution ; on les rencontre près des centrales nucléaires ou classiques ; ici, les deux tours de la centrale thermique au lignite d'Arjuzanx dans les Landes.***

donnée, la vitesse du vent et la température de l'air humide étant généralement fixées. Les résultats ainsi trouvés sont ensuite corrigés en fonction des trois paramètres fixés *a priori*.

Les tours de réfrigération à circulation naturelle se présentent généralement sous la forme d'hyperboloïdes de révolution. Depuis l'origine, elles ont été envisagées pour de très grandes capacités de refroidissement, et elles peuvent atteindre 80 m de diamètre et 100 m de haut. Ces tours n'ont pas la souplesse de fonctionnement des tours à fonctionnement mécanique, car l'écoulement d'air est dû essentiellement à la différence de masse volumique entre l'air froid d'alimentation et l'air chaud quittant la tour. Ce dernier, plus léger que l'air ambiant, provoque un effet cheminée ; de ce fait, la présence d'hélices de circulation n'est pas nécessaire.

En outre, à la différence des tours à circulation mécanique, les tours à circulation naturelle dépendent simultanément de l'humidité relative et de la température humide de l'air ambiant. En effet, l'humidité de l'air favorise la circulation de l'air dans la tour en augmentant les différences de pression statiques provoquant l'écoulement de l'air. Aussi, ces tours se trouvent particulièrement bien adaptées aux régions où l'humidité relative de l'air ambiant est importante (75 à 80 %).

— *Bassins à aspersion*

Ces bassins permettent de refroidir l'eau par évaporation, et la dispersion de l'eau en gouttes au-dessus du bassin réduit considérablement la surface des bassins.

La dispersion est obtenue à l'aide de buses qui doivent diviser finement l'eau sans conduire à la formation d'aérosols ou de brouillards qui, entraînés par le courant d'air, conduiraient à une perte en eau excessive. L'orientation du bassin vis-à-vis de la direction prédominante des vents est un facteur essentiel ; un bassin rectangulaire, à largeur étroite mais convenablement orienté, conduit à un refroidissement par unité de surface supérieur à celui obtenu dans les mêmes conditions avec un bassin carré. En principe, le grand axe du bassin est orienté normalement à la direction des vents d'été.

La distance entre les buses d'aspersion est telle que la dispersion doit retomber sur toute la surface du bassin ; quelquefois, pour éviter les pertes par entraînement, on entoure le bassin d'une enceinte dont la hauteur est au plus égale à la hauteur maximale des jets de l'aspersion.

Compte tenu des divers paramètres pouvant modifier l'efficacité de refroidissement de tels bassins, il n'existe pas de méthode générale d'étude ; plusieurs auteurs ont indiqué les résultats obtenus pour des bassins dans des conditions opératoires bien définies.

— *Bassins de refroidissement*

Lorsque les bassins peuvent avoir de très grandes surfaces, il n'est pas nécessaire de recourir à l'aspersion pour refroidir l'eau, et des bassins creusés dans le sol, de 1,80 m à 3 m de profondeur, permettent de refroidir de l'eau en envisageant une suite de plusieurs bassins. Bien entendu, il est souhaitable que le sol dans lequel sont creusés les bassins soit d'une part imperméable, et d'autre part peu dénivelé.

Pour les bassins à écoulement, de la chaleur est perdue par conduction, convection et rayonnement, mais une quantité non négligeable est gagnée par absorption du rayonnement solaire. La surface des bassins dépend du débit de refroidissement souhaité. On constate que les capacités de refroidissement sont peu affectées par la profondeur du bassin si celle-ci est supérieure à 0,90 m. Pour les épaisseurs plus faibles, la variation de la température de l'eau entre le jour et la nuit est importante. Les performances de refroidissement de ces bassins sont fonction de la température et de l'humidité relative de l'air, de la vitesse des vents, de l'intensité du rayonnement solaire, et, à un degré moindre, de la température du sol et des variations de température et d'humidité de l'air ayant traversé la phase liquide.

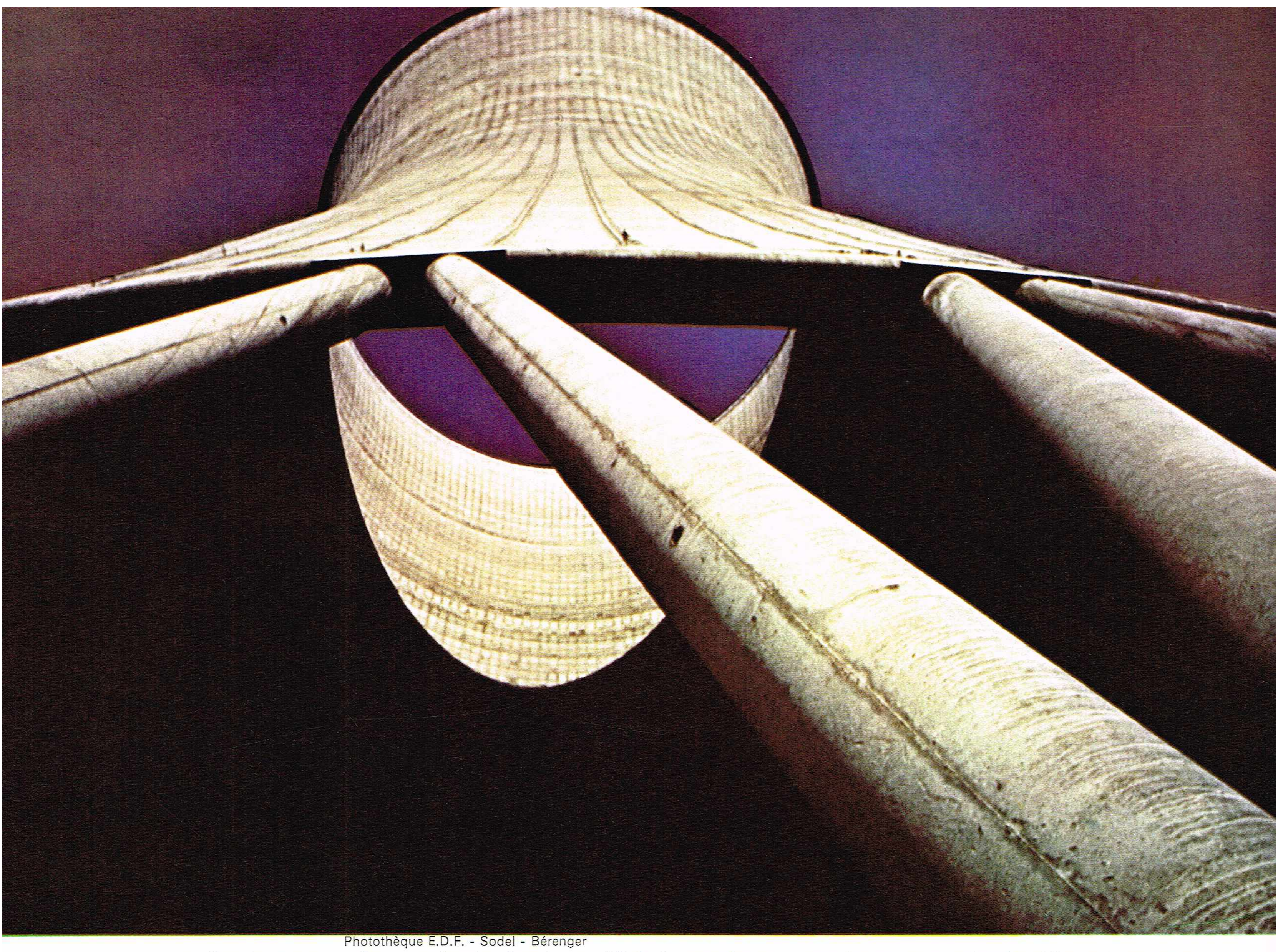

Photothèque E.D.F. - Sodel - Bérenger

▲ *Une des tours de réfrigération de la centrale nucléaire du Bugey.*

Pour un bassin donné, on définit la température d'équilibre t_E comme celle où les pertes de chaleur par évaporation sont compensées exactement par l'apport de chaleur dû au rayonnement solaire. La capacité d'un bassin est caractérisée par la différence entre la température d'équilibre et celle de l'eau du bassin.

Bases théoriques du calcul des tours de réfrigération

Compte tenu de tous les paramètres, dont certains climatiques, modifiant les caractéristiques de fonctionnement des bassins de refroidissement et des tours de réfrigération à convection naturelle, la théorie ne peut être envisagée de manière sérieuse que pour les tours à circulation mécanique. La plus fréquemment admise est celle préconisée à l'origine par Merkel (*Ver. Deut. Ing. Forschengsurb*, nº 275, Berlin [1925]). La force motrice qui provoque le transfert est la différence d'enthalpie entre le film gazeux situé au voisinage de l'eau liquide et l'air environnant.

Sous forme intégrale, l'équation de Merkel s'écrit :

$$\frac{kaV}{L} = \int_{T_{1E}}^{T_{1S}} \frac{dT}{H' - H} \qquad \textbf{(54)}$$

où k est le coefficient de transfert convectif, a l'aire spécifique (surface d'échange par unité de volume de colonne), V le volume actif par unité de surface active, L le débit massique d'eau, H' l'enthalpie massique de l'air saturé à la température de l'eau, H l'enthalpie massique de l'air. T_{1E} et T_{1S} désignent les températures de l'air entrant et sortant.

Le membre de droite de **(54)** ne dépend que des propriétés de l'air et de l'eau et est indépendant des caractéristiques géométriques de la tour. Les tours de réfrigération, comme celles d'humidification et de séchage, sont analysées généralement de manière graphique en envisageant un système d'axes où l'on porte en abscisses les températures, et en ordonnées obliques, d'une part l'humidité absolue, et d'autre part les enthalpies rapportées à l'unité de masse d'air sec. Dans ces diagrammes, le bilan enthalpique sur l'air conduit à une courbe sensiblement rectiligne appelée « droite opératoire » dont la pente est égale au rapport L/G. L'intégrale de l'équation **(54)** se calcule alors graphiquement, et sa valeur *(grandeur caractéristique de la tour)* varie en fonction de L/G.

On peut également utiliser une méthode numérique approchée s'inspirant de la méthode de Tchchychef relative au calcul d'intégrale en écrivant que :

$$\frac{kaV}{L} = \int_{T_{1E}}^{T_{1S}} \frac{dT}{H' - H} \# \frac{T_{1S} - T_{1E}}{4}\left(\frac{1}{\Delta H_1} + \frac{1}{\Delta H_2} + \frac{1}{\Delta H_3} + \frac{1}{\Delta H_4}\right) \qquad \textbf{(55)}$$

où H' est l'enthalpie massique de l'air saturé à la température du liquide, et où H représente l'enthalpie massique de l'air à la température humide du gaz, ΔH_1 la valeur de $H' - H$ à $T_{1E} + 0{,}1\,(T_{1S} - T_{1E})$, ΔH_2 la valeur de $H' - H$ à $T_{1E} + 0{,}4\,(T_{1S} - T_{1E})$, ΔH_3 la valeur de $H' - H$ à $T_{1S} - 0{,}4\,(T_{1S} - T_{1E})$, ΔH_4 la valeur de $H' - H$ à $T_{1S} - 0{,}1\,(T_{1S} - T_{1E})$.

Pour des tours de réfrigération à circulation mécanique, le rapport L/G reste compris entre 0,75 et 1,50 et, par suite, la valeur de la caractéristique varie entre 0,5 et 2,5. Une fois évaluée la valeur de la caractéristique, il faudra concevoir un remplissage de la colonne et une distribution des gaz permettant de se rapprocher de la valeur calculée de la caractéristique. Pritchard (*Performances Curves, Cooling Tower Institute,* Houston [1967]) a donné de nombreux résultats expérimentaux relatifs à divers remplissages des tours, et ses études, ainsi que celles de Baleer et Mart (*Marley Co, Tech. Bull,* R 52, Kansas City), seront très précieuses à tous les utilisateurs de tours de réfrigération.

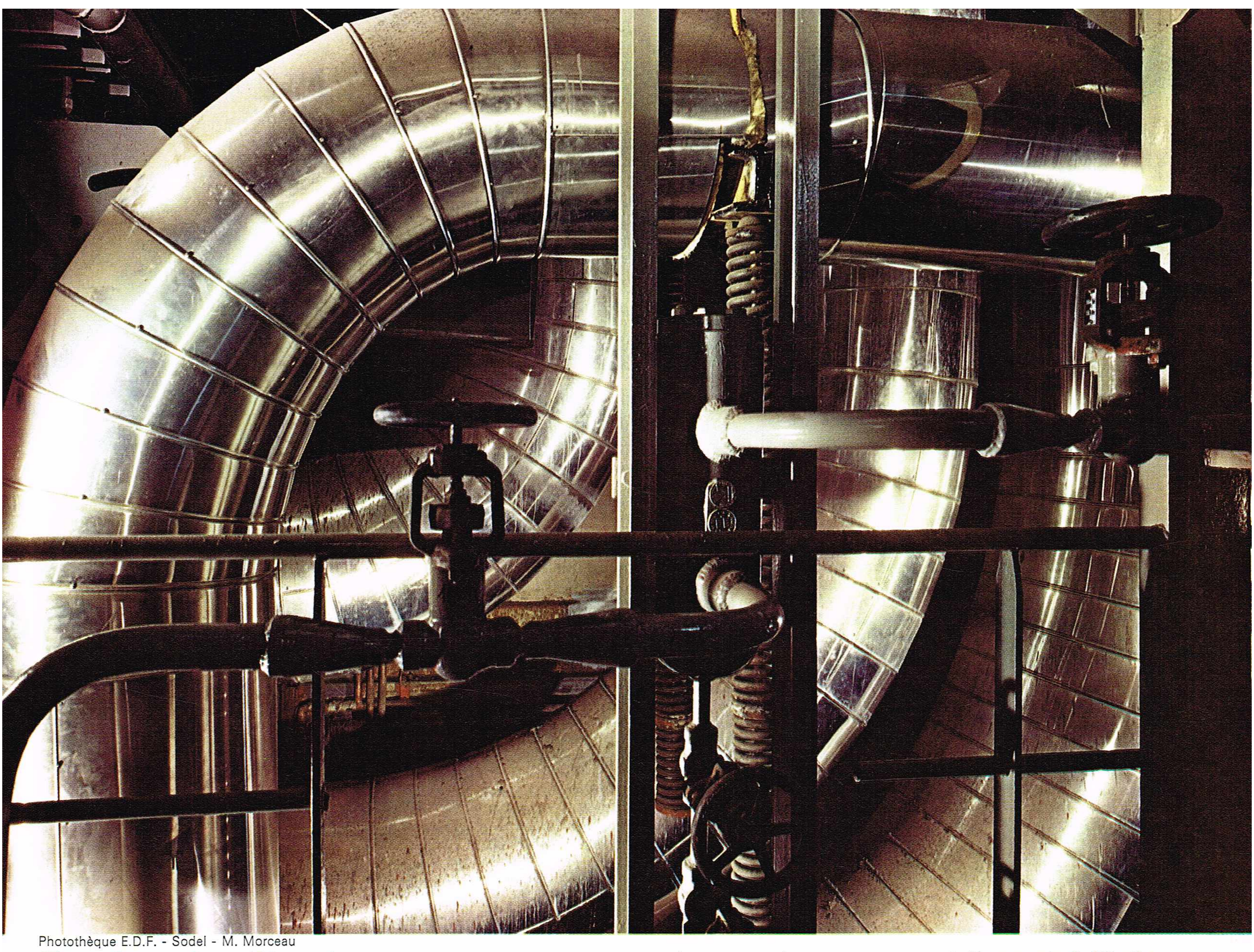

Photothèque E.D.F. - Sodel - M. Morceau

▲ *Un exemple d'utilisation des ressorts au niveau de la purge de conditionnement de la tuyauterie de vapeur surchauffée de la centrale de la Maxe.*

Transformation d'énergie mécanique en énergie mécanique

Quelle qu'en soit la forme initiale, l'énergie libérée par une source primaire est généralement convertie en énergie mécanique lorsqu'il s'agit de l'utiliser pour la réalisation d'un travail mécanique : la vapeur d'eau met en mouvement une turbine à vapeur, le courant électrique fait tourner un moteur, l'explosion de la poudre propulse un projectile, etc.

Cette énergie mécanique ainsi disponible est transmise, en fonction des besoins, aux organes de la machine qui doit effectuer les opérations souhaitées par l'utilisateur. Elle doit être adaptée au type de travail à réaliser ; l'intensité des efforts qu'elle est susceptible de fournir doit être contrôlée.

Ce transfert d'énergie, ou plus exactement sa transformation, s'effectue par l'intermédiaire d'éléments mécaniques qui assurent la liaison entre le « moteur » source d'énergie et les organes actifs de la machine.

Nous étudierons dans ce qui suit la fonction de ces éléments et la façon dont ils doivent être employés.

Ressorts

Les ressorts sont des organes mécaniques élastiques étudiés pour supporter l'application d'une charge P ou d'un couple C et se déformer sous l'action de ces charges pour reprendre leur position initiale lorsque cesse l'application de la charge.

C'est l'*élasticité apparente* qui distingue les ressorts des autres éléments mécaniques dont la rigidité est beaucoup plus importante.

Les ressorts permettent une grande déformation (la flèche f), pour une même charge P, ou une grande rotation θ pour un même couple C.

Pendant leur déformation, les ressorts emmagasinent une quantité d'énergie $W = \frac{1}{2} Pf$ ou $W = \frac{1}{2} C\theta$, qui sera restituée. C'est une énergie potentielle élastique. Les ressorts, grâce à la valeur relativement importante de leur déformation f ou θ, sont capables de transformer l'énergie cinétique en énergie potentielle élastique. C'est le cas par exemple des ressorts de suspension des véhicules terrestres. Les roues sont liées au châssis des véhicules par des éléments élastiques qui absorbent l'énergie cinétique due au choc des roues sur les différents défauts du revêtement ; les ressorts modifient leur position à l'instant du choc, pour ensuite reprendre leur état d'origine en transmettant un minimum d'énergie cinétique aux passagers ou à la charge du véhicule.

La modification brutale de l'état d'énergie du ressort entraîne des vibrations, d'autant plus que le véhicule est une masse libre qui va osciller pour une durée infinie après modification brutale de la position ; les ressorts sont alors accompagnés d'amortisseurs visqueux ou à friction sèche qui ont pour but de limiter le nombre d'oscillations du couple ressort-masse suspendue.

Imaginons un véhicule sans ressorts de suspension, ce qui serait bien entendu peu confortable sur nos véhicules habituels. L'énergie cinétique à l'instant du choc serait transmise intégralement à la masse du véhicule, les déformations des pièces de liaison étant alors très faibles, les efforts développés prendraient des valeurs très importantes, ce qui nécessiterait des éléments de section importante pour ne pas rompre.

Les ressorts ont pour buts principaux d'absorber les chocs et d'emmagasiner de l'énergie ; éventuellement, ils améliorent le confort par leur grande déformation.

Caractéristiques des matériaux pour ressort

La caractéristique prédominante des matériaux pour ressort est de conserver un comportement élastique durable pour des contraintes élevées. Pour les ressorts fabriqués

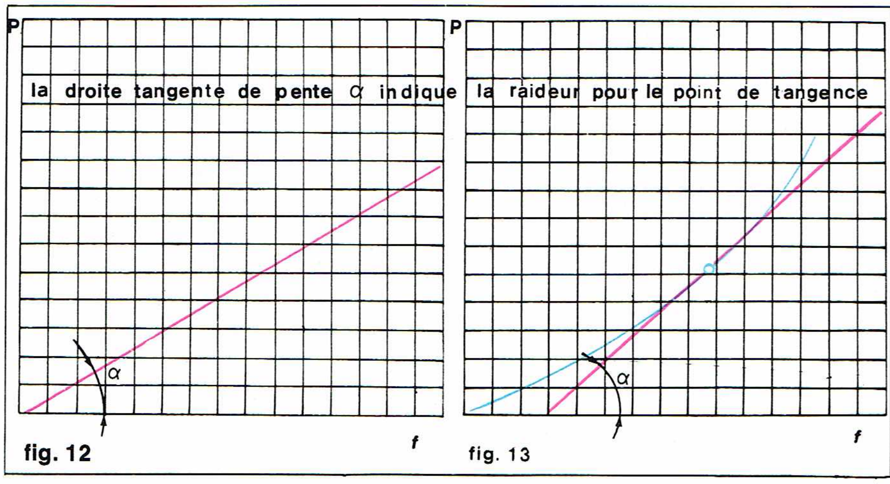

I.G.D.A.

▲ *Figure 12 et 13 : représentation graphique de la variation de la flèche f en fonction de la charge P d'un ressort; pour le ressort de la figure 12, la rigidité est constante; pour celui de la figure 13, elle est variable.*

Les calculs de projet ou d'avant-projet d'un ressort quelconque comprennent la détermination des contraintes dans le métal, mais aussi la détermination de la rigidité du ressort qui est la relation liant la charge appliquée à la flèche prise par le ressort.

Dans certaines limites (*fig.* 12), on peut dire que la rigidité d'un ressort est constante. En portant en ordonnée la charge appliquée P et en abscisse la flèche *f* sur un diagramme orthonormé, la courbe obtenue est rectiligne, ce qui peut se traduire par : la flèche est directement proportionnelle à la charge appliquée.

Un contre-exemple est donné par la *figure* 13. La charge croît plus vite que la flèche; la courbe est concave vers le haut.

Si on appelle K la rigidité d'un ressort définie comme étant le rapport de la charge P par la flèche *f*, on peut dire que $K = P/f = tg\alpha$.

La rigidité représente la pente en un point quelconque de la courbe P, *f*.

Pour la courbe de la *figure* 12, la rigidité est constante, par contre, pour la courbe de la *figure* 13, elle est variable

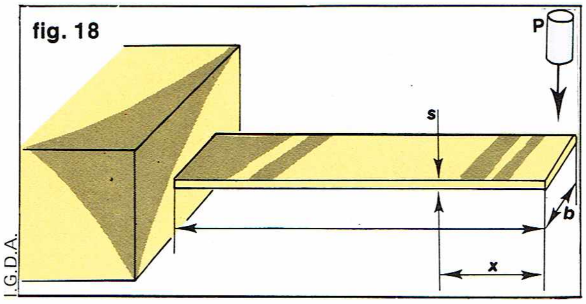

I.G.D.A.

► *A droite et page ci-contre à gauche, figures 18 et 19; fig. 18 : ressort de flexion dans sa forme géométrique la plus simple; fig. 19 : ressort de flexion à contrainte « constante »; pour ce dernier, la largeur b varie linéairement en fonction de x.*

et a pour valeur $\frac{dP}{df}$, qui représente la pente de la tangente à la courbe en un point donné.

Par exemple, pour les principaux ressorts utilisés en construction mécanique, les courbes caractéristiques ont l'allure des *figures* 14, 15, 16, 17.

Parfois, on utilise un vocabulaire différent pour parler de ressorts et on utilise le vocable *flexibilité* qui est tout simplement l'inverse de la rigidité : flexibilité $= \frac{1}{K} = \frac{f}{P}$

Ressorts de flexion

La forme la plus simple du ressort de flexion consiste en une lame, d'épaisseur *s* et de largeur *b* uniforme, encastrée à une extrémité et supportant une charge concentrée P à l'autre extrémité (*fig.* 18).

La contrainte d'extension σ en un point situé à la distance *x* de l'extrémité et à la surface de la lame est :

$$\sigma = 6\,\frac{Px}{bs^2}$$

La contrainte varie théoriquement de 0 pour $x = 0$ sous la charge à un maximum $\sigma = 6\,\frac{Pl}{bs^2}$ au voisinage de l'encastrement, pour $x = 1$. La contrainte n'est pas uniforme si la lame a une largeur constante; le métal est donc mal utilisé. Conservons une lame d'épaisseur *s* constante; pour avoir une bonne utilisation du métal, il faut obtenir une contrainte constante dans la longueur de la lame; sa largeur doit être donnée par :

à froid, les aciers fins pour traitements thermiques ou les aciers corde à piano sont les plus courants, ou les bronzes au phosphore ou au béryllium, ou l'acier inoxydable du type 18/8 (18 % de chrome, 8 % de nickel) lorsqu'il est nécessaire d'obtenir un matériau peu oxydable. Lorsque les ressorts sont fabriqués à chaud, on emploie couramment des aciers au silicium ou au chrome-silicium-molybdène, ou encore au chrome-vanadium; quelquefois, on utilise un acier à 10 % de tungstène si le ressort doit être utilisé à haute température (ne dépassant pas 500 °C toutefois).

Les ressorts seront dans tous les cas trempés après fabrication. Les ressorts bronze ou Inox sont réalisés avec un métal écroui.

La *propriété d'élasticité durable* est donnée par la stabilité du *module d'élasticité longitudinale* E ou *module de Young* et du *module transversal* G. Ces caractéristiques seront utilisées dans les calculs. Leurs valeurs moyennes sont :

— pour les aciers à ressorts : $E = 220\,000$ N/mm², $G = 80\,000$ N/mm²;

— pour les bronzes à ressorts : $E = 120\,000$ N/mm², $G = 45\,000$ N/mm².

Il est nécessaire d'utiliser des matériaux parfaitement élaborés et d'une constance de qualité aussi bonne que possible. Les aciers pour ressort supportent des contraintes d'extension pouvant atteindre 2 000 N/mm². Il est nécessaire d'utiliser le métal au plus près possible de ces qualités limites pour obtenir un rapport énergie emmagasinée/kg de poids de métal le plus élevé possible, mais pour cela la dispersion des caractéristiques doit être la plus faible possible, et le taux de travail sera d'autant plus près du taux de rupture que la dispersion de qualité sera faible.

Différents modes d'action

Le mode de sollicitation est différent d'un ressort à l'autre. Les trois cas principalement rencontrés sont les ressorts de flexion, de torsion, et de traction ou compression.

Il existe une multitude de pièces à effet ressort, de formes aussi diverses que l'on peut imaginer, chaque forme s'adaptant à un usage bien défini et quasi impossible à adopter pour un usage différent. Ces ressorts peuvent parfois être calculés, mais les essais sont souvent nécessaires.

▼ *Figures 14, 15, 16 et 17 : représentation de la variation de la flèche f en fonction de la charge P, pour différents types de ressort; fig. 14, ressort en hélice cylindrique appelé aussi ressort à boudin, ressort à lames; fig. 15, ressort en hélice cylindrique à pas variable, ressort conique; fig. 16, rondelles coniques ou Belleville; fig. 17, ressort en spirale d'Archimède.*

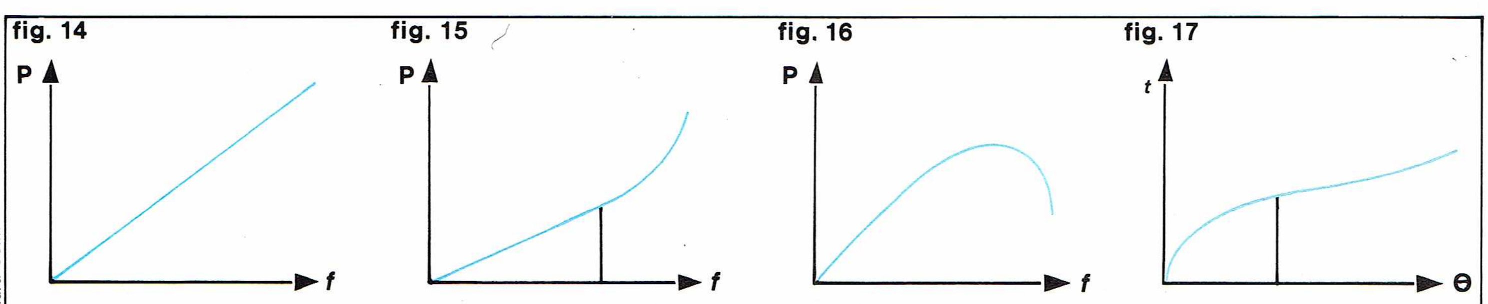

Diagrammes de raideur

Richard Colin

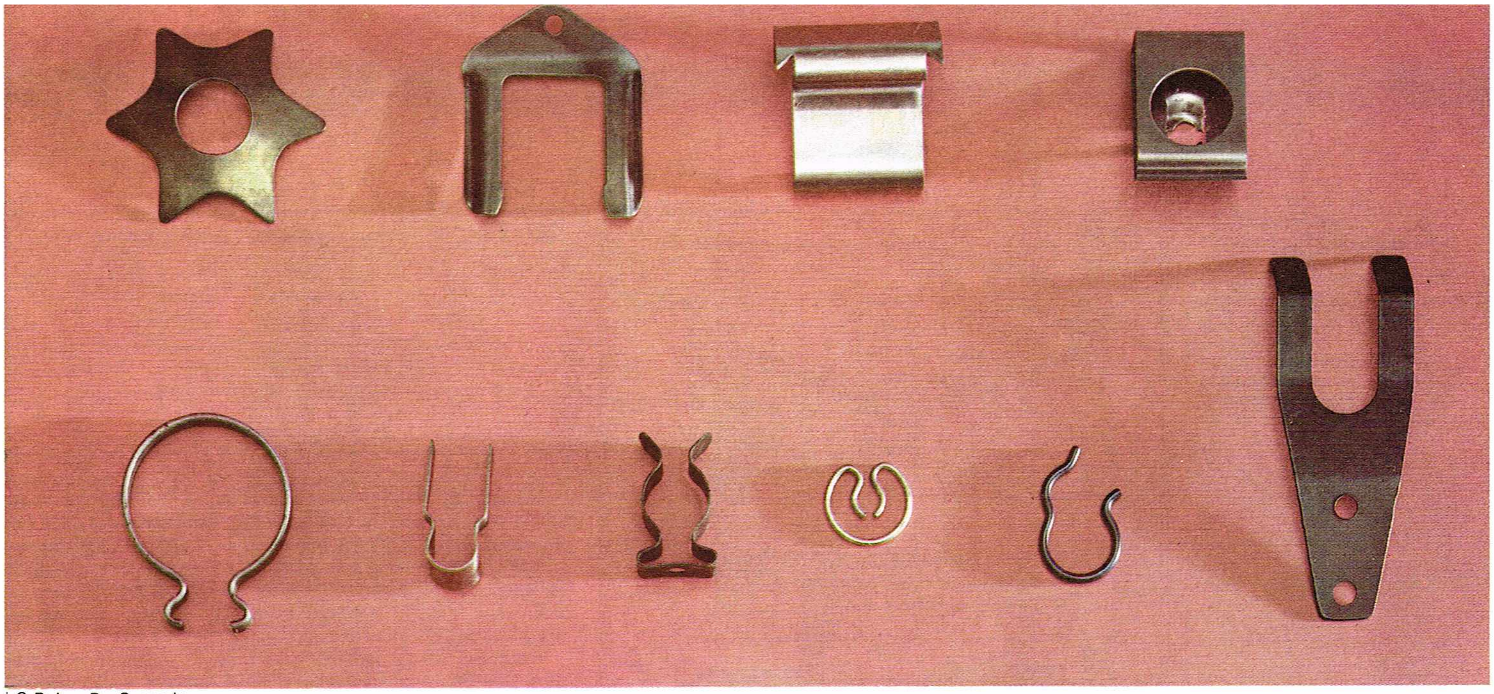

I.G.D.A. - De Gregorio

fig. 19

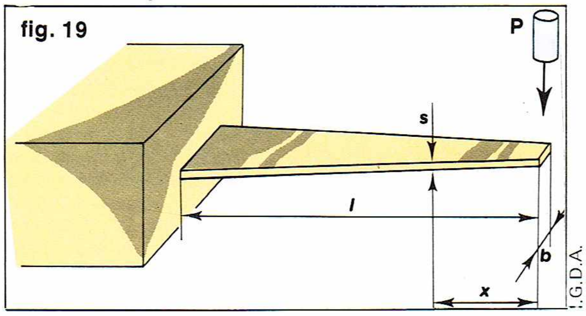

$$b = \frac{6\,P}{\sigma s^2} x$$

σ et s sont constants. La relation est de la forme $b = ax$ qui est l'équation d'une droite de pente x dans un repère cartésien, ce qui veut dire que la lame doit avoir une forme triangulaire (*fig.* 19).

La largeur à l'encastrement n'est pas modifiée, mais la largeur sous la charge est nulle. La lame a donc une masse moitié de celle de la lame rectangulaire. Pour le métal, il n'y a pas de problème de tenue, car la contrainte maximale n'a pas augmenté, elle est tout simplement maximale dans tout le métal. Cette disposition est intéressante ; elle économise le métal de haute qualité et, de plus, permet un gain de poids (sur un véhicule par exemple).

La lame atteint pourtant une largeur b à l'encastrement très importante, ce qui ne facilite pas sa mise en place, surtout sur véhicule.

Il n'y a pas de contrainte transversale dans ce genre de ressort ; on peut donc imaginer une solution où la lame triangulaire d'origine est découpée en n bandes de largeur b' qui seront superposées (*fig.* 20) telles que $nb' = b$. Pour obtenir ce paquet de lames, il est bien plus simple de découper dans une bande de métal des longueurs différentes pour constituer chaque lame. Le ressort ainsi constitué doit former un tout, tel que les lames ne puissent pas s'échapper ou pivoter pendant l'utilisation; des étriers de liaison où rainures et bossage sont prévus (*fig.* 21).

La lame la plus longue, ou lame maîtresse, a ses extrémités recourbées pour former un œil de fixation (*fig.* 21, 22). Les extrémités de la lame sont fixées en d sur le châssis b par une chape et en e par une jumelle qui permet à l'une des extrémités de suivre les déformations du ressort ou les variations de flèche lors des variations d'effort (*fig.* 22-1).

Le ressort est monté sur Silentbloc (*fig.* 22- 2 et 3) formé de deux tubes concentriques d'acier entre lesquels est vulcanisé du caoutchouc, ce qui amortit les vibrations en évitant de les transmettre au châssis. Le Silentbloc est introduit dans l'œil du ressort et traversé par un boulon h de liaison à la jumelle. Le montage de la jumelle sur le support b est identique et réalisé par le boulon g.

Parfois, un système mixte est utilisé : une extrémité est formée en boucle, l'autre extrémité est droite et glisse sur le support.

fig. 20

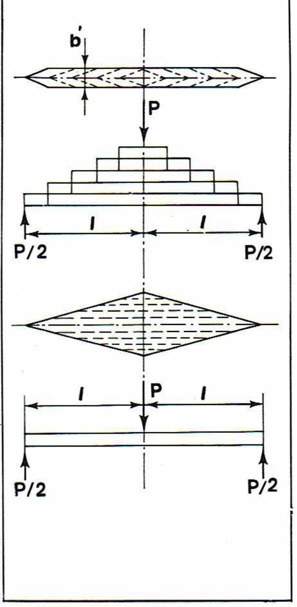

▲ ***En haut, différents types de ressort de flexion. Ci-dessus, figure 20 : en haut, ressort de suspension en lames superposées obtenu par le découpage théorique du losange en bas.***

fig. 21

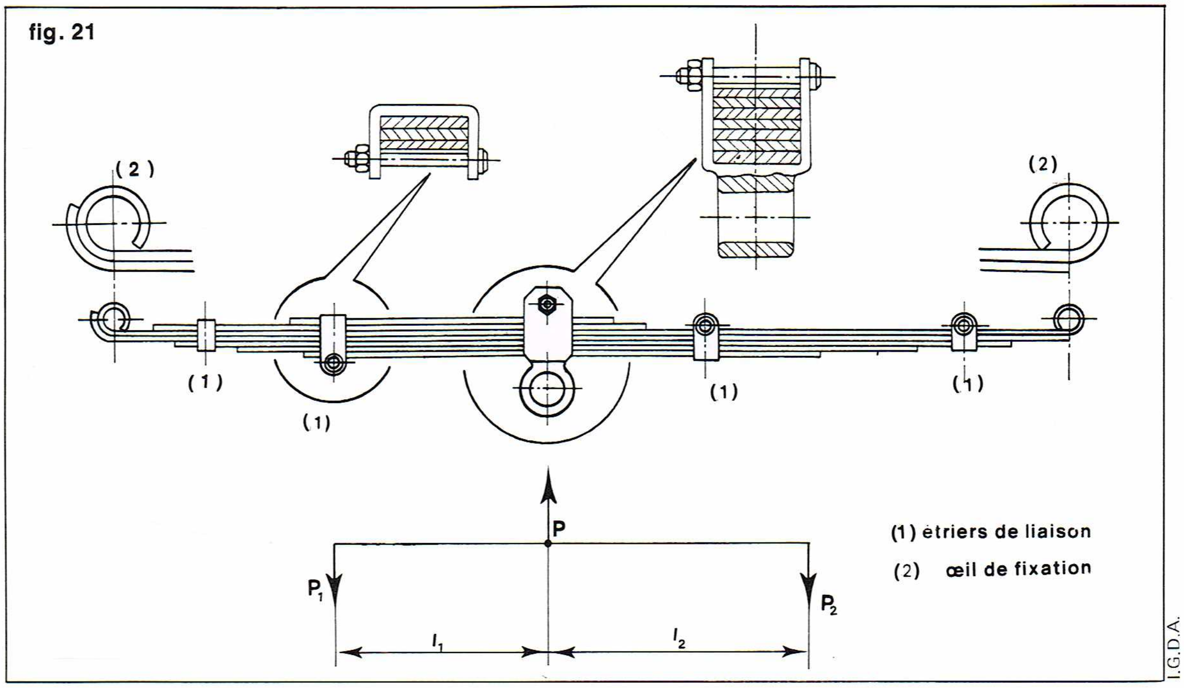

◀ ***Figure 21 : un ressort à lames, ses étriers de liaison et ses systèmes de fixation.***

▶ ***Figure 22 :***
1) montage d'un ressort à lames avec jumelle de liaison ;
2 et 3) détail du montage sur le Silentbloc.
Figure 23 :
ressort à double flexibilité utilisé pour les véhicules poids lourds.

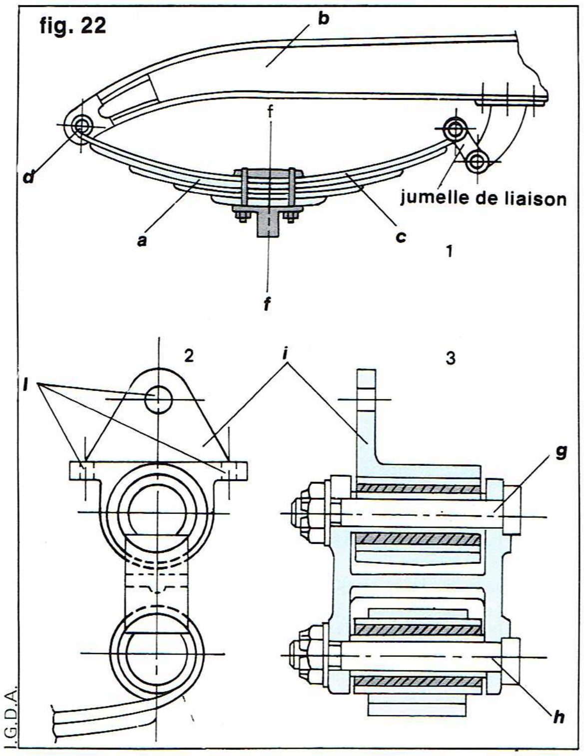

I.G.D.A.

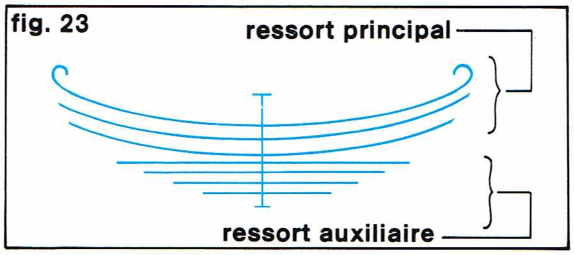

Richard Colin

Beaucoup de ressorts à lames ont une lame maîtresse renforcée ; dans ce cas, la lame la plus longue est doublée. En effet, nous n'avons pas tenu compte de l'effort tranchant qui provoque des contraintes de cisaillement dans la lame. La rupture se produit toujours au niveau d'un point de fixation externe quand la lame maîtresse est simple (*fig.* 22-2).

Pour les poids lourds, une telle suspension est, bien sûr, calculée à charge maximale du véhicule. En circulation à vide, il se produit un sautillement du camion dû à une trop grande raideur des ressorts en cas de charge faible. Il n'est pas possible d'utiliser des ressorts de moindre raideur satisfaisants pour le fonctionnement à vide ; dans ce cas, l'ensemble chargé aurait une fâcheuse tendance à balancer au moindre virage.

Pour remédier à ces inconvénients, des ressorts à double flexibilité sont utilisés (*fig.* 23). Le ressort principal est utilisé en permanence, le ressort auxiliaire n'entrant en action qu'en charge.

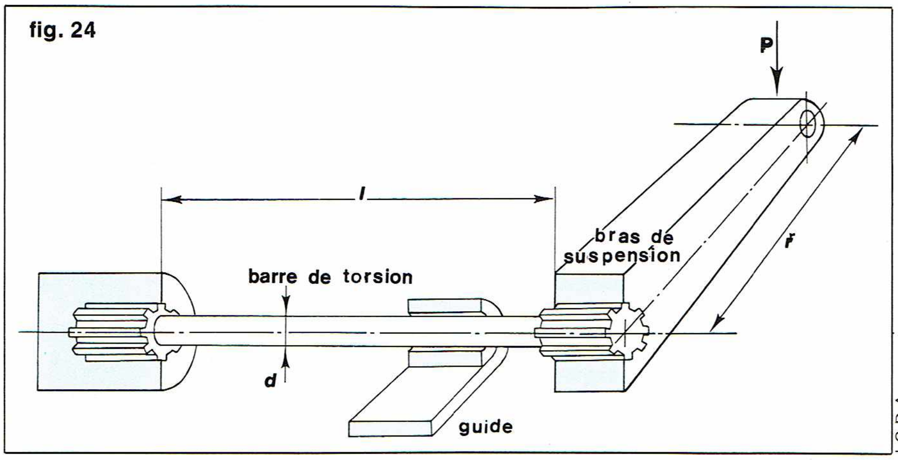

I.G.D.A.

▲ ***Figure 24 : ressort de torsion à axe droit, souvent appelé barre de torsion.***

Ressorts de torsion

Barre de torsion

Un type de ressort très à la mode en construction automobile est la barre de torsion, constituée par une barre aux extrémités souvent cannelées, dont l'une est encastrée dans un support lié au châssis et l'autre dans le bras porte-roue (*fig.* 24). Un guide complémentaire est prévu afin que la barre soit soumise à la torsion « pure » sans flexion.

Si P est la force appliquée perpendiculairement à l'extrémité du bras de suspension et *r* le rayon du bras, la contrainte tangentielle à la périphérie de la barre est $\tau = \frac{16\,\mathcal{M}}{\pi\, d^3}$ où $\mathcal{M} = pr$, moment de torsion du couple. Dans la relation de contrainte, la nature du matériau et la longueur de la barre n'interviennent pas. La déformation de la barre, ici l'angle relatif de rotation d'une extrémité par rapport à l'autre, est :

$$\theta = \frac{32}{\pi}\frac{\mathcal{M} l}{G d^4} = \frac{2\, l}{G d}\,\tau$$

L'encombrement de ce ressort est faible, ou du moins sa forme permet de le placer sous le châssis.

Une autre technique consiste à enrouler cette barre en hélice cylindrique pour constituer un ressort de forme différente qui est le *ressort à « boudin »*.

▼ ***Figure 25 : ressort de torsion en hélice cylindrique à fil rond (1) ou à fil carré (2).***

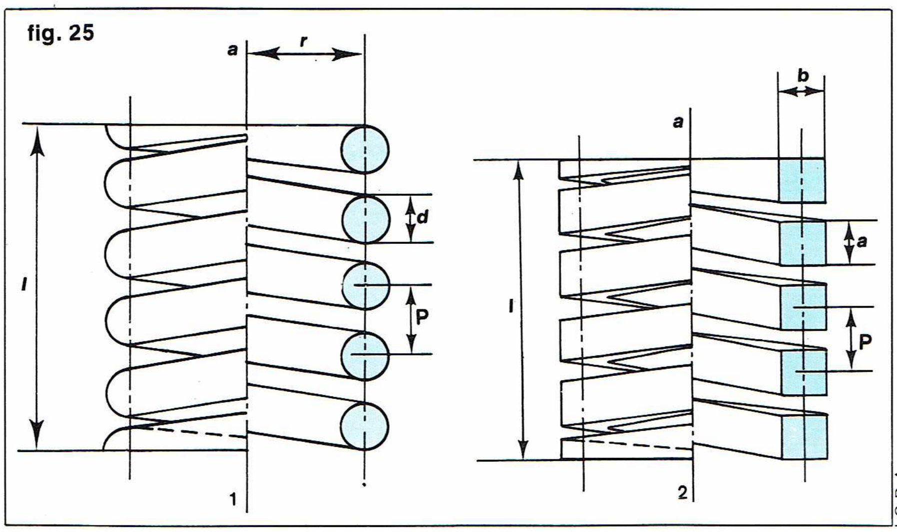

I.G.D.A.

Ressort en hélice cylindrique à pas P constant

Ce ressort est un cas particulier de barre de torsion ; le fil, comme la barre d'ailleurs, peut être à section carrée, ou rectangulaire. La notation adoptée sur la *figure* 25 permet de calculer la contrainte :

$$\tau = \frac{16\, pr}{\pi d^3} \quad \text{pour fil rond}$$

ou

$$\tau = \frac{pr}{0{,}21\, a^3} \quad \text{pour fil carré}$$

La déformation angulaire θ peut ici être transformée en déformation rectiligne suivant l'axe *a-a* d'enroulement du ressort et traduite par la flèche *f*, telle que :

$$f = \frac{pnr^3}{G d^4} \quad \text{pour fil rond}$$

ou

$$f = \frac{5{,}6\, pnr^3}{8\, G a^4} \quad \text{pour fil carré}$$

n étant le nombre de spires actives du ressort. La longueur de fil utile est sensiblement $l = 2\,\pi r n$, longueur équivalente à celle de la barre de torsion.

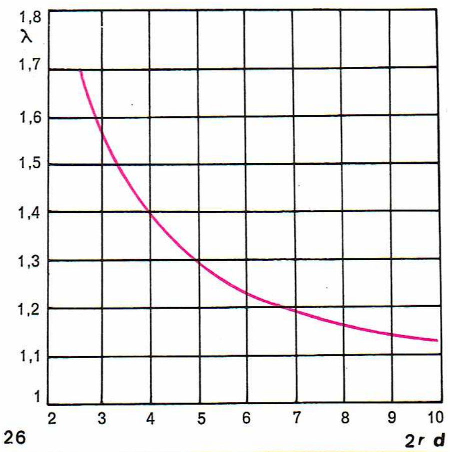

fig. 26

I.G.D.A.

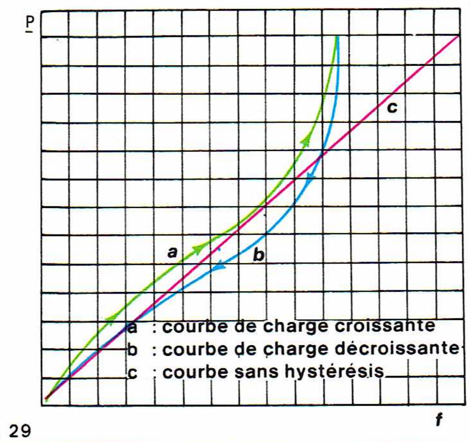

fig. 29

I.G.D.A.

◀ ***Figure 26 :*** ***courbe représentative du coefficient multiplicateur de correction de contrainte λ en fonction du rapport 2 r/d pour un ressort de torsion en hélice cylindrique.***
Figure 29 : ***diagramme d'hystérésis d'un ressort caoutchouc.***

* *Construction des ressorts en hélice*

Ce type de ressort doit respecter certaines dispositions constructives. Le rapport du diamètre d'enroulement par rapport au diamètre du fil est généralement compris entre 6 et 16 ; un rapport inférieur entraîne une augmentation importante de la contrainte par rapport à celle calculée ; le coefficient multiplicateur de correction est λ (*fig.* 26). Les extrémités des ressorts doivent être préparées pour recevoir convenablement la charge p ; les ressorts recevant une charge de compression ont la dernière spire de chaque extrémité meulée pour former une surface plane ; la charge est ainsi appliquée sensiblement dans l'axe du cylindre d'enroulement. Les ressorts recevant des charges en traction ont la dernière spire formant anneau ou crochet de fixation (*fig.* 27). Dans la détermination de la longueur du ressort, on tient compte des dernières spires meulées en ajoutant 1 à 2 spires à chaque extrémité.

$$n_{totales} = n_{utiles} + 2 \text{ à } 4$$

Dynamique des ressorts

La fréquence propre de vibration d'un ressort chargé est :

$$f_0 = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{f}}$$

où f_0 est la fréquence en hertz, T la période en secondes, g l'accélération de la pesanteur et f la flèche de ressort, qui peut s'exprimer d'une autre manière, en mesurant la flèche en centimètres (valeurs courantes des flèches) par

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1\,000}{f}} \simeq \frac{5}{\sqrt{f}}$$

Un calcul rapide des vibrations des ressorts peut être effectué à partir de cette formule qui permet en particulier de déterminer si la fréquence propre du ressort correspond ou non à la fréquence de la variation de l'effort appliqué. Lorsque les deux fréquences correspondent sensiblement, il se produit un phénomène de résonance et le ressort bat d'une manière différente de celle qui correspond à la charge, si bien qu'il lui est impossible de remplir son rôle de ressort.

Dans tous les cas d'effort dynamique, ce calcul de vérification est fait et oblige parfois à introduire un second ressort qui modifie la fréquence propre de vibration. C'est le cas, par exemple, des ressorts de soupapes pour moteurs très rapides. Deux ressorts concentriques d'hélice inverse et de flèches différentes sont montés, ce qui permet d'éloigner la zone dite « d'affolement de soupape ».

Ressorts particuliers : ressorts caoutchouc

Les éléments en caoutchouc sont très souvent utilisés en construction mécanique pour leurs propriétés élastiques d'une part et d'hystérésis d'autre part.

De plus, les blocs caoutchouc sont moulés, ce qui permet de leur donner des formes particulières permettant des rigidités diverses, lesquelles fluctuent, en outre, pendant l'utilisation, selon la flèche imposée : on a alors des éléments à raideur variable. C'est le cas, par exemple, des *butées de suspension* de forme sensiblement conique sur lesquelles prennent appui les bras de suspension en fin de course, ce qui évite le choc brutal à ce moment, ou, comme sur la *figure* 28, du *limiteur de flèche* des ressorts à lames.

Le comportement du caoutchouc est différent en traction et en compression, la contrainte maximale admissible en compression étant nettement plus importante qu'en extension. C'est pourquoi ces éléments ne sont pratiquement jamais utilisés en traction.

La *figure* 29 illustre le comportement d'un bloc caoutchouc : en *c*, courbe de raideur constante, en *a*, courbe

▼ ***Figure 27 : spires d'extrémité pour fixation de différents ressorts.***
Figure 28 : ressort caoutchouc limiteur de flèche pour ressort à lames.

I.G.D.A.

fig. 27

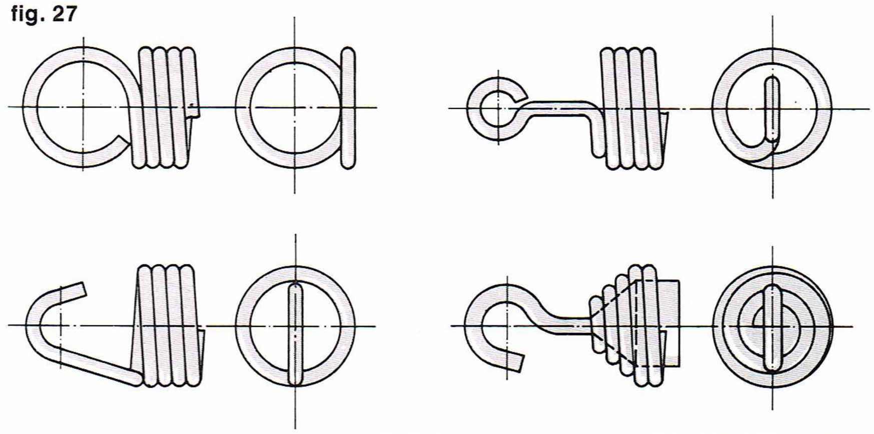

fig. 28

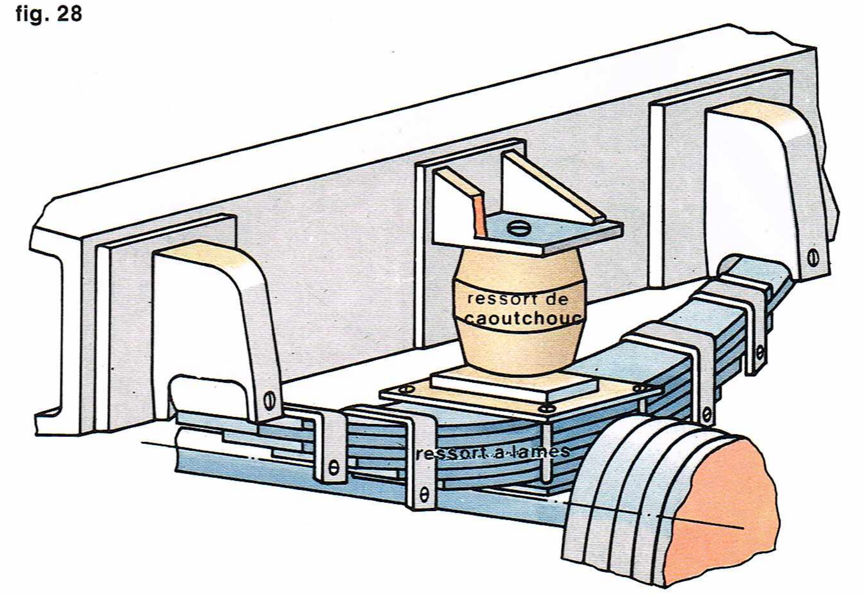

I.G.D.A.

▶ ***Figure 30 :** un ressort spiral. De tels ressorts de flexion sont employés dans toute l'industrie horlogère (horlogerie mécanique).*
***Figures 32 et 33 :** empilage de disques coniques ; pour une même valeur de la charge, la flèche diminue (cas fig. 33), ou augmente (fig. 32).*

fig. 30

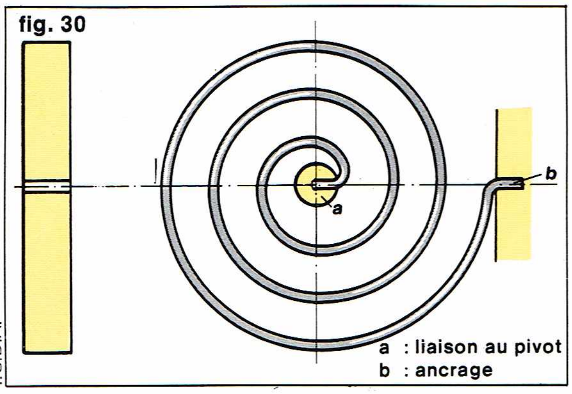

fig. 33

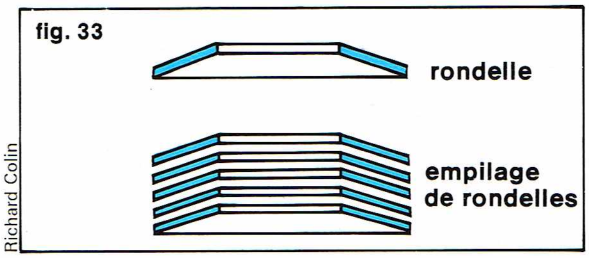

fig. 34

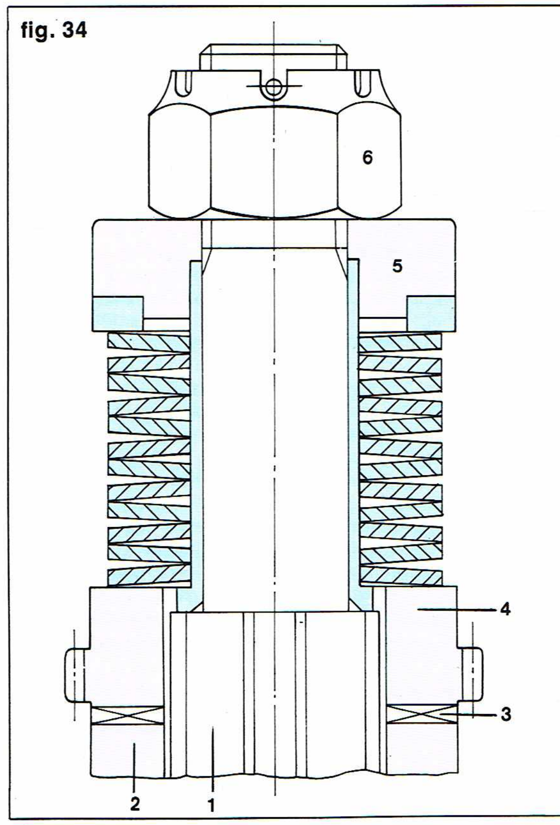

fig. 31

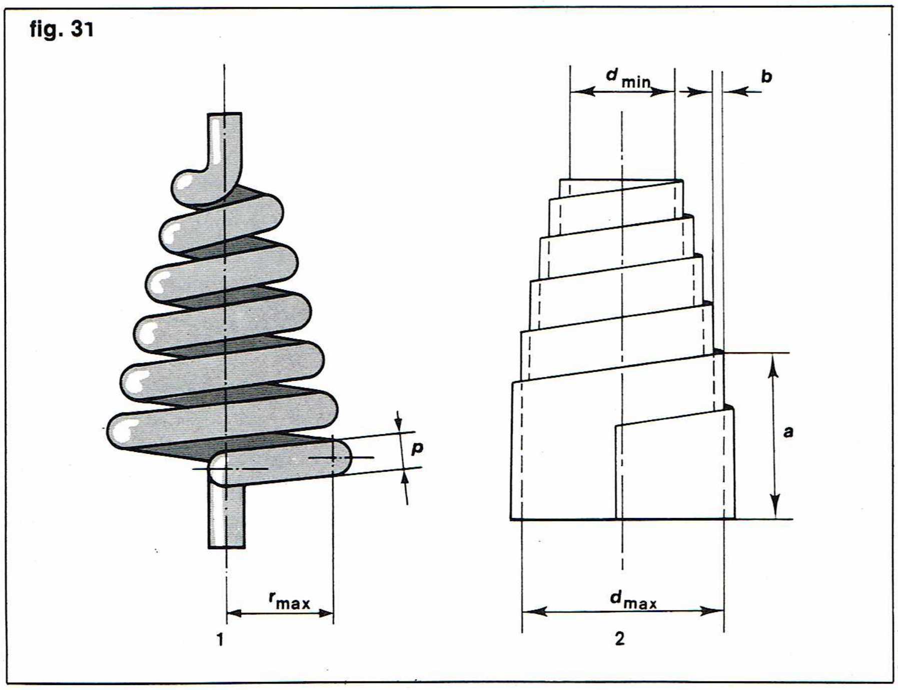

▲ ***Figure 31 :** ressorts en hélice conique ; 1) à fil rond ; 2) à fil rectangulaire.*
***Figure 34 :** application des rondelles Belleville à un limiteur de couple (voir développement dans le texte).*

de charges croissantes et en *b*, courbe de charges décroissantes. La différence entre *a* et *b* correspond à la dispersion d'énergie représentant l'amortissement à l'intérieur du bloc, qui s'échauffe d'ailleurs en fonctionnement dynamique. Les éléments caoutchouc sont sensibles aux hydrocarbures, ils doivent en être bien protégés.

fig. 32

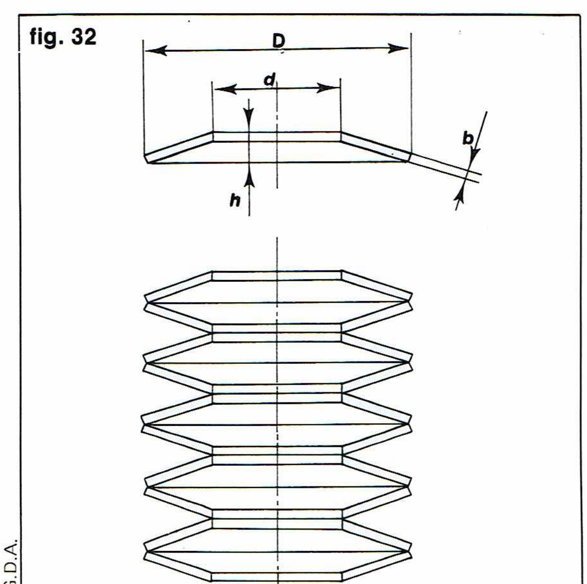

▶ ***Figure 32 :** voir légende en haut de page.*

Autres ressorts

D'autres types de ressorts sont couramment employés, par exemple le *ressort spiral* (*fig.* 30) employé dans toute l'horlogerie mécanique ; c'est un ressort de flexion. Une extrémité de la lame est enroulée sur un axe, l'autre est maintenue sur le boîtier. Ce système est utilisé aussi pour les stores de fenêtre afin de compenser le poids de la partie déroulée du store. En général, ce ressort est constitué d'une bande de métal, plus rarement d'un fil rond.

Un *ressort à hélice conique* (*fig.* 31) est souvent utilisé dans les tampons de wagon de chemin de fer. Il présente l'avantage d'une raideur croissante avec l'augmentation de flèche ; il est toujours utilisé pour des efforts de compression suivant l'axe d'enroulement.

La *rondelle Belleville* très employée en mécanique dans différents systèmes de réglage est constituée d'une simple rondelle conique en acier à ressort (*fig.* 32).

Chaque rondelle de dimensions données a sa propre courbe de raideur ; cependant, suivant l'empilage qui est fait, il est possible pour *n* rondelles, par exemple, assemblées comme sur la *figure* 32, d'obtenir une flèche totale *nf* pour la même charge axiale P, ou au contraire, comme sur la *figure* 33, d'obtenir une flèche *f*/*n* pour la même charge P, ce qui permet des combinaisons intéressantes pour résoudre les problèmes de réglage ; les dimensions vont d'un diamètre extérieur de 10 à 800 mm. Ces éléments sont couramment en acier au manganèse-silicium ou chrome-vanadium ou en bronze.

L'exemple de la *figure* 34 illustre un montage de limiteur de couple. L'arbre central (1) porte la pièce cannelée (2) qui transmet le couple au pignon (4) à alésage lisse par l'intermédiaire de dents frontales (3) obliques. Le contact entre les pièces (2) et (4) est assuré par l'en-

semble des rondelles Belleville, maintenues comprimées partiellement par la rondelle (5) et l'écrou à créneaux (6). Lorsque le couple atteint la valeur critique, les pièces à dents frontales s'écartent progressivement l'une de l'autre ; l'effort dû aux rondelles augmente sensiblement jusqu'au moment où, le couple ayant augmenté, les dents sautent de leur encoche. En plus de la sécurité mécanique automatique, un tel système, très sonore, prévient l'opérateur que la limite a été atteinte.

Chaînes

Les chaînes pour applications mécaniques sont utilisées pour transmettre la puissance d'un arbre à un autre qui lui est parallèle ; l'exemple de la bicyclette est bien connu. La chaîne est utilisée dans le cas où la distance entre axes est importante, ce qui évite une multitude d'engrenages ou des engrenages de dimensions importantes. Citons la chaîne de distribution du moteur qui entraîne l'arbre à cames en tête à partir du vilebrequin.

Différents types de chaînes

La chaîne la plus simple est la *chaîne Galle* (*fig.* 35) dont les maillons sont formés par des lames parallèles droites ou évidées, assemblées par des axes rivés mais pouvant tourillonner. Le nombre de lames peut varier. On aura des chaînes à 2, 3 ou 4 mailles si, de chaque côté, il y a 2, 3 ou 4 lames assemblées. Ces chaînes conviennent pour les transmissions de puissance à faible vitesse linéaire : de 0,25 à 0,8 m/s. Il y a frottement des mailles sur les axes et ceux-ci, qui ne peuvent pas être trempés, s'usent rapidement. Le rendement est assez médiocre, $\eta = 0{,}8$. On utilise ces chaînes surtout comme chaînes de manutention.

Un modèle plus perfectionné est obtenu en introduisant un tube sur chaque axe de la chaîne précédente. On en obtient un autre encore plus perfectionné en entourant ce tube ou douille d'un deuxième cylindre, le faux rouleau, pour obtenir une *chaîne à rouleaux* (*fig.* 36). Toutes les pièces peuvent être en acier dur cémenté, trempé, ou en acier au nickel-chrome.

Cette disposition permet des vitesses rapides pouvant atteindre 8 à 11 m/s suivant le pas de la chaîne. Pour les charges importantes, il n'est pas possible, comme pour la chaîne Galle, de placer plusieurs mailles, mais on dispose parallèlement plusieurs chaînes assemblées par le même axe (*fig.* 37).

Une amélioration intéressante est obtenue avec la *chaîne silencieuse* qui, comme son nom l'indique, est moins bruyante que les précédentes. La partie active n'est plus l'axe de chaque maillon mais des dents portées par les mailles. Ce type de chaîne a un contact doux sur les roues (*fig.* 38 et 39) et permet des vitesses linéaires de 20 m/s.

Avec les types précédents, il faut 2 sortes de maillons, ce qui pose parfois un problème de fermeture de la chaîne. Il existe un type de chaîne, où les maillons sont tous identiques, avec laquelle il n'y aura pas de problèmes de fermeture : c'est la *chaîne à maillons coudés* (*fig.* 40).

Rapport de transmission

Une première condition de calcul sera de respecter l'impossibilité d'utiliser des roues de moins de 8 dents et de s'en tenir aux limites maximales de vitesse citées précédemment par type de chaîne. Des vitesses plus importantes entraînent une usure prématurée des chaînes et des roues par chocs au moment du contact, et, de plus, l'effort centrifuge, qui atteint des valeurs importantes, entraîne une surtension trop grande des chaînes.

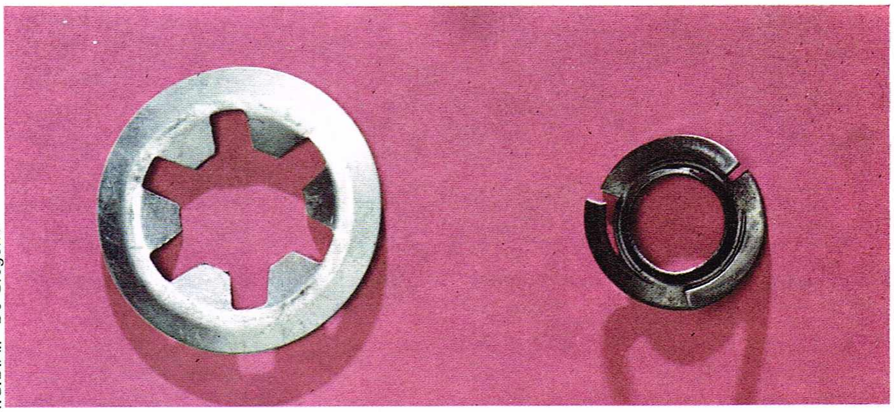

I.G.D.A. - De Gregorio

▲ ***Deux exemplaires de rondelles Belleville.***

Guy Marineau - TOP

▼ ***Les chaînes comme celles des bicyclettes sont utilisées pour transmettre la puissance d'un arbre à un autre arbre parallèle en évitant l'emploi d'une multitude d'engrenages.***

▶ *Figure 35 : détails d'un maillon de chaîne Galle. Figure 36 : détail d'une chaîne à rouleaux. Figure 37 :* a) *une chaîne simple à rouleaux;* b) *groupement de chaînes à rouleaux assemblés par le même axe; cette disposition permet la transmission de charges importantes.*

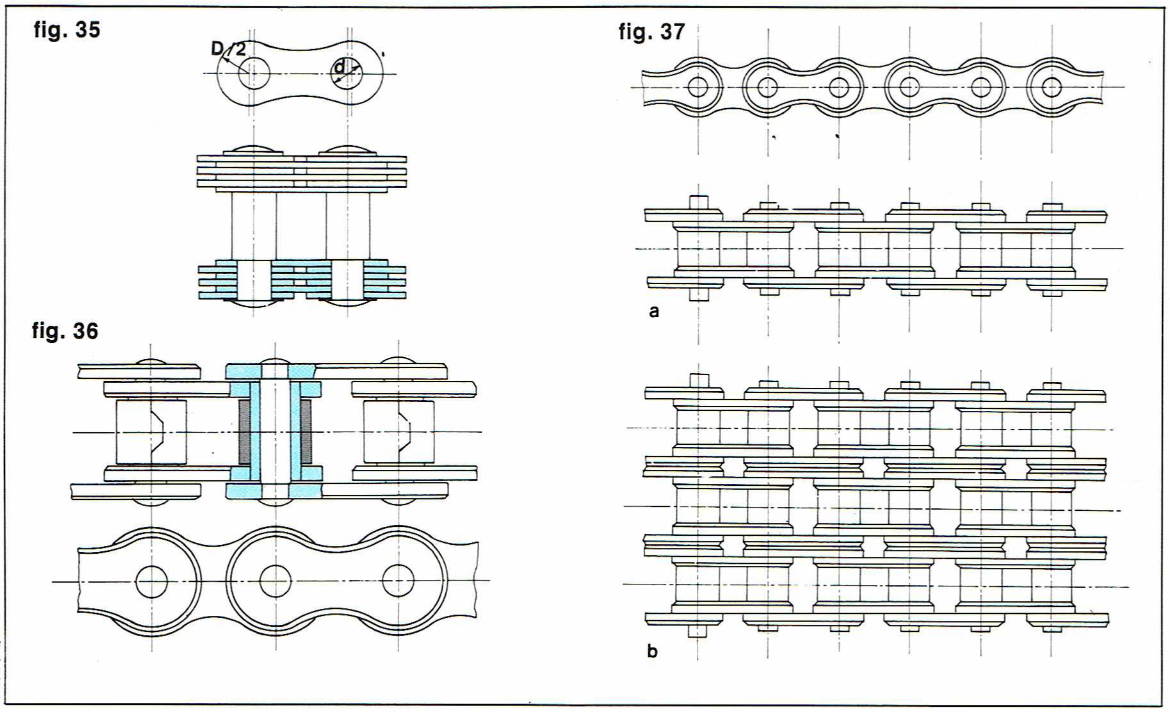

▶ *Page ci-contre, tableau XVII : pression spécifique de contact d'une chaîne en fonction de la vitesse optimale de rotation. Tableau XVIII : valeurs du facteur de service K_0 en fonction de la charge et du nombre de dents du pignon.*

▶ *Figure 38 : détail de chaîne silencieuse. Figure 39 : emboîtement d'une chaîne silencieuse sur sa roue dentée. Figure 40 : chaîne à maillons coudés.*

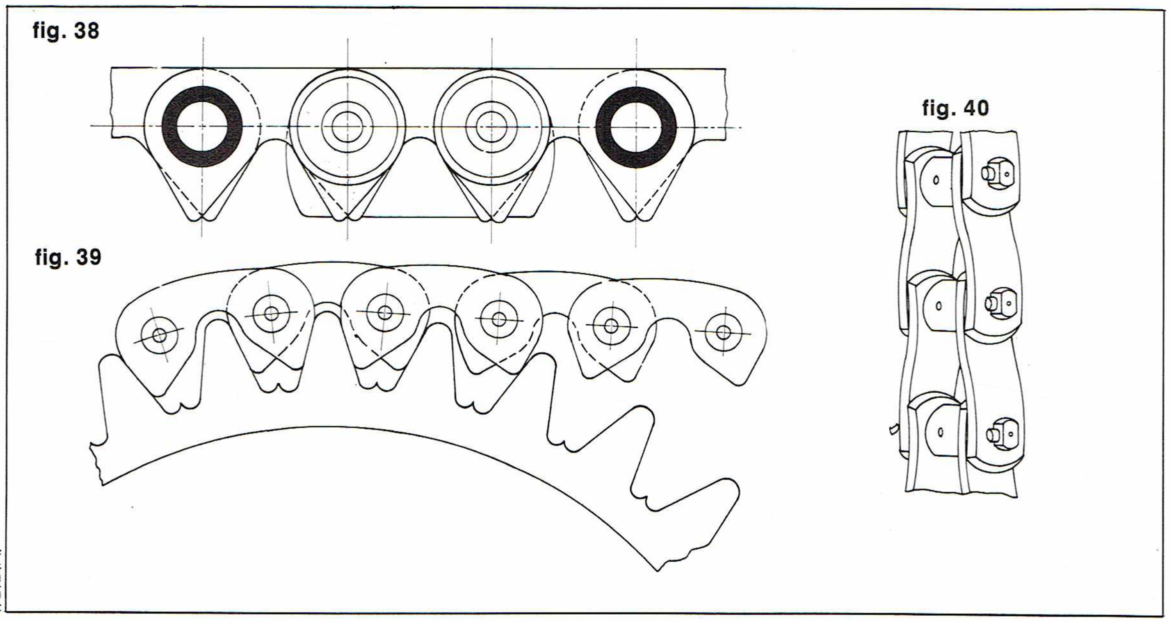

▶ *Figure 41 ; représentation schématique de l'engrènement chaîne-roues : voir développement dans le texte.*

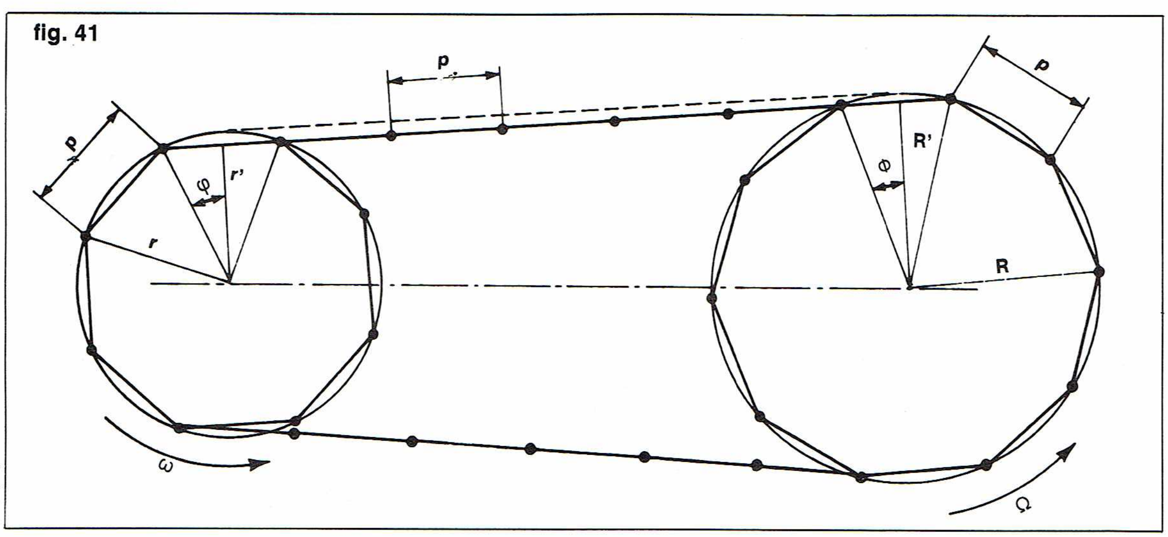

Étudions l'engrènement chaîne-roues (*fig.* 41), en appelant p le pas de la chaîne. Le pas de la chaîne doit se retrouver sur chacune des roues et, bien sûr, le nombre de dents de chaque roue est entier. Soit φ et Φ les angles au centre de chaque maillon tournant, r et R les rayons primitifs de chaque roue. Il est à remarquer que le pas p des roues correspond à la corde d'un arc et non à la longueur d'arc comme dans les engrenages : $r = \frac{p}{2} \cdot \sin \varphi$ et $R = \frac{p}{2} \cdot \sin \Phi$.

La ligne d'axe de chaque maillon est alors à la distance :

$$r' = \frac{p}{2 \operatorname{tg} \varphi} \quad \text{et} \quad R' = \frac{p}{2 \operatorname{tg} \Phi}$$

Pour éviter le fouettement de la chaîne, les roues doivent être préparées de façon que les rouleaux quittent ou abordent chaque roue suivant la tangente commune aux deux diamètres primitifs, ce qui ne peut être obtenu que si la roue a plus de 8 dents.

A grande vitesse, les vibrations inévitables provoquent, malgré ces précautions, un battement du brin mou. Ce battement peut être réduit par l'addition d'un tendeur de chaîne (soit un galet, soit un poussoir à ressort ou hydraulique).

Conditions de calcul

Contrairement aux engrenages qui doivent être intégralement calculés, les chaînes ne demandent qu'un minimum de calcul, les calculs de résistance des différents éléments constitutifs ayant été effectués par les fabricants.

On adopte les relations pratiques suivantes :

— *vitesse de puissance maximale :*

$$V_m = \sqrt{\frac{F}{30\, ml}}$$

F étant la charge maximale supportée par la chaîne, ml la masse par mètre linéaire de la chaîne ;

— *vitesse optimale :* pour une charge T égale au dixième de la charge de rupture, cette vitesse permet des durées de l'ordre de 15 000 heures :

$$V_0 = \sqrt{\frac{q_0 s}{3\, ml}}$$

s étant la surface d'appui de chaque axe sur la roue. C'est une donnée de fabrication tout comme la *masse linéique*. On peut dire que : $V_0 = 1{,}6\sqrt{q_0}$, q_0 étant la pression spécifique de contact (*tableau* XVII).

Pour déterminer l'effort de tension de la chaîne, il suffit d'écrire la relation : $T \cdot V = P$

T étant exprimé en newtons ; V en m/s et P en watts.

Une tension trop élevée produit un allongement permanent de la chaîne qui engrène mal, le pas étant plus grand que celui de la roue.

La puissance transmise doit subir une correction de coefficient K_0, facteur de service (*tableau* XVIII).

La chaîne est ensuite sélectionnée grâce à la courbe de la *figure* 42.

Les appareils entraînés sont couramment classés de la manière suivante :

— *machines sans chocs :* machines-outils, transporteurs et élévateurs, ventilateurs, imprimantes, machines d'embouteillage, machines à bois, escaliers roulants, compresseurs et pompes centrifuges ;

— *machines irrégulières :* cribles, compresseurs et pompes à pistons, hélices, mélangeurs, treuils ;

— *machines à chocs :* alternateurs et génératrices de sondage, concasseurs, excavateurs, pelles mécaniques, dragues, machines à forger, machines-outils de rabotage, laminoirs, presses.

Entretien et lubrification

Les chaînes demandent une lubrification permanente ; pour cela, elles sont généralement sous carter étanche afin d'éviter les projections d'huile et l'entrée de poussières. Les fabricants recommandent les huiles pour moteur automobile. Lorsque la chaîne est à l'air libre, une protection de sécurité est nécessaire. La lubrification périodique se fait à l'huile de vaseline qui évite l'amalgame de poussière.

Tableau XVII

Pression spécifique de contact d'une chaîne en fonction de la vitesse optimale de rotation en tours par minute

Nombre de tours par minute	0	50	100	500	1 000	5 000
$q°$	400	285	130	155	130	40

Tableau XVIII

Valeurs du facteur de service k_0 en fonction de la charge et du nombre de dents du pignon

Caractéristique de l'appareil entraîné	Nombre Z de dents du pignon				
	17	19	21	23	25
Charge normale	0,80	0,73	0,66	0,63	0,55
Charge irrégulière	1,25	1,1	1	0,95	0,90
Charge avec à-coups importants	1,6	1,5	1,3	1,25	1,20

▼ ***Figure 42 ; courbes de la puissance corrigée transmise par une chaîne en fonction de la vitesse du pignon : ces courbes permettent de sélectionner le type de chaîne à utiliser.***

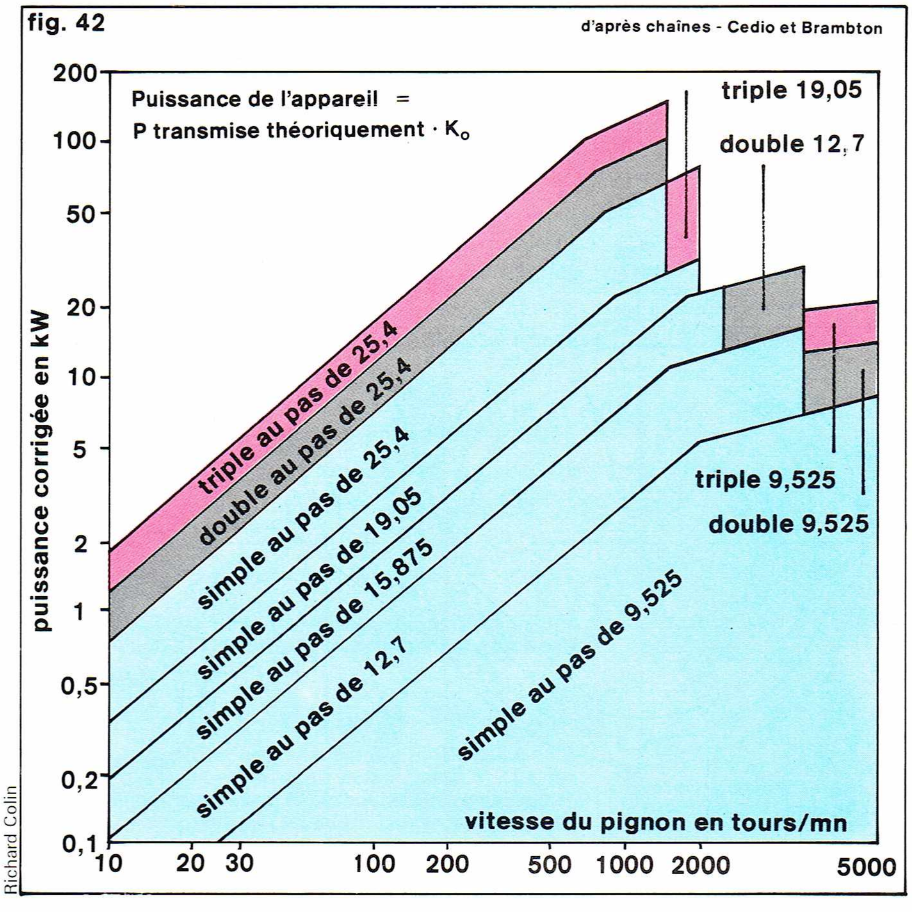

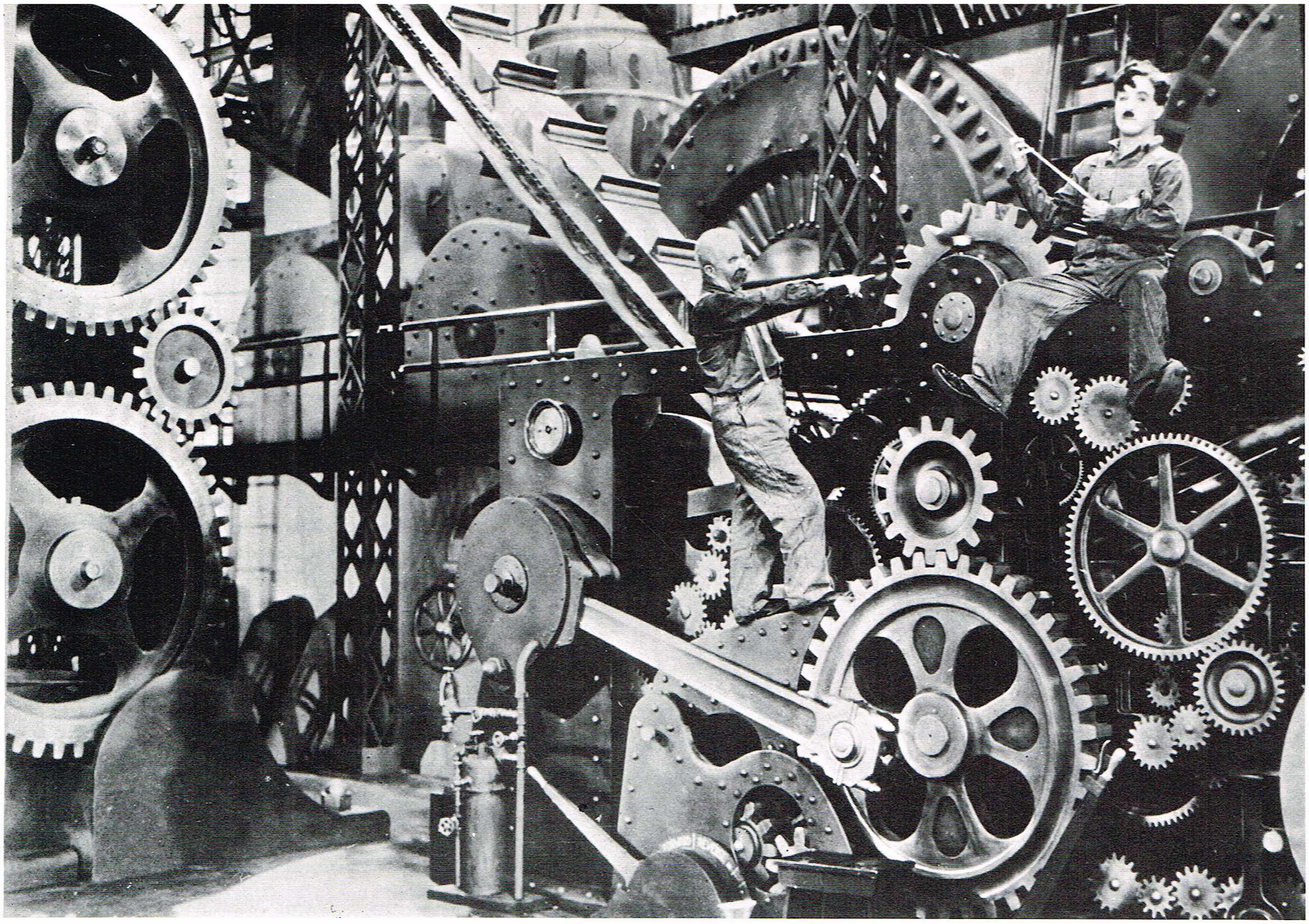

René Dazy

▲ *Charlot et les engrenages (extrait du film les* **Temps modernes***).*

▼ *Figure 43 : couple d'engrenages formé d'une roue dentée de grand diamètre permettant la réduction de la vitesse sans altération importante de la puissance (voir développement dans le texte).*

Engrenages

Un des moyens pour transmettre de la puissance est l'utilisation des roues dentées ou engrenages. Ce moyen permet éventuellement de modifier la vitesse de rotation et le couple transmis mais la puissance est conservée, au rendement près bien entendu.

Le rendement η des systèmes de transmission de puissance par engrenages est généralement bon. Si P_m est la puissance du moteur et P_u la puissance utile à la sortie de l'appareil à engrenages, boîte de vitesses, réducteur de vitesse ou multiplicateur de vitesse, on peut écrire :

$$P_u = \eta P_m$$

η a pour valeur courante 0,95 à 0,98.

Il est admis en moyenne 1 % de perte de puissance par paire de roues utiles.

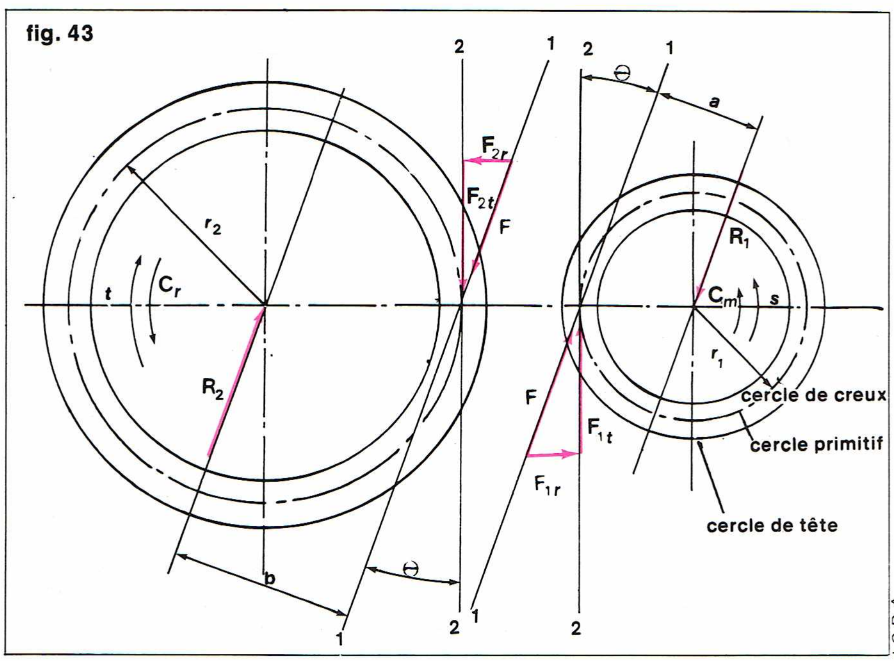

Relation entre puissance transmise, couple et vitesse de rotation

La puissance a pour unité légale le *watt*, de symbole W. La vitesse a pour unité le *tour par seconde, n*, ou le *radian par seconde* pour la vitesse angulaire, ω ; pour 1 tour un point de la pièce tournante a balayé un angle de 360° ou 2π radians (rd) soit environ 2 · 2,141 6 radians. On a donc 1 tour/seconde = 2π radians/seconde.

La vitesse en tours/seconde est difficilement mesurable.

L'unité de temps étant brève, bien souvent la vitesse de rotation N s'exprime en tours/minute ; on écrit :

$$\frac{N}{60} = n, \text{ ou aussi : } \frac{N}{60} \times 2\pi = \omega \quad \omega \text{ radians/seconde}$$

ou $\frac{\pi N}{30} = \omega$, ce qui donne en valeur approchée pour le calcul mental $\omega = \frac{N}{10}$ environ.

Par exemple, un moteur tournant à 1 500 tours/minute a une vitesse angulaire de 150 radians/seconde, la valeur exacte étant 157 radians/seconde.

Pour les rotations, on a la relation :

$$P = C \cdot \omega$$

où C est le couple qui s'exprime en newtons × mètre (N · m).

Engrenages cylindriques

Charge transmise : considérons un couple d'engrenages constitué par une roue de grand diamètre et un pignon de petit diamètre. Supposons que la denture est droite, c'est-à-dire que les dents sont parallèles à l'axe de rotation de chaque engrenage, et que le pignon est l'organe moteur. On appelle *cercle primitif* le cercle de contact des dents des différentes roues (ce cercle est fictif, il n'est pas visible) ; il a pour rayons r_1 et r_2 sur chaque roue (*fig.* 43).

Le *cercle de tête* est le cercle extérieur aux dents (c'est le cercle qui correspond au contour de la pièce avant de tailler les dents). Le *cercle de creux* est le cercle intérieur aux dents (il représente le morceau de pièce restant si on retire les dents).

L'effort est incliné par rapport à la tangente 2-2 au cercle primitif; il a pour direction (1-1) faisant un angle θ avec la tangente (2-2) : cet angle est l'angle de pression; il est en général de 20°.

Il faut mettre en équilibre chaque engrenage, le pignon donnant un effort F à la roue et recevant un effort résistant de même intensité mais de sens opposé.

Les appuis du pignon le maintiennent en place en lui donnant un effort R_1 tel que R_1 et F aient la même intensité mais des directions opposées. Il en est de même pour R_2 et F.

Ces efforts R_1 et F ou R_2 et F créent des couples respectivement moteur et résistant.

Si *a* est la distance entre F et R_1 et *b* la distance entre F et R_2, le couple peut s'écrire :

$F \cdot a = F \cdot r_1 \cos\theta$ et $C_r = F \cdot b = F \cdot r_2 \cos\theta$

$C_m = F \cdot r_1 \cos\theta = F_{1t} \cdot r_1$; F_{1t} étant la projection de F sur la tangente au cercle primitif

et $C_r = F \cdot r_2 \cos\theta = F_{2t} \cdot r_2$.

La projection radiale F_{1r} et F_{2r} n'a aucune influence sur le couple. Comme F est de même valeur sur chaque roue et qu'il y a un seul angle θ : $F_{1t} = F_{2t}$, donc le couple varie avec le rayon et de la même façon :

$$\text{ici } r_2 > r_1 \text{ donc } C_r > C_m$$

ce qui est concevable puisque les vitesses de rotation seront différentes; le pignon tourne à vitesse plus élevée que celle de la roue. Connaissant la puissance P en watts, la vitesse de rotation N en tours par minute et le rayon r_1 en mètres, on peut calculer F_t.

$$P = C\omega = \frac{CN}{10} \quad \text{ou} \quad C_m = \frac{10\,P}{N_m}$$

comme $C_m = F_t \cdot r_1$ pour le pignon.

$F_t = \frac{10\,P}{N_m r_1}$ ce qui est d'ailleurs égal pour la roue à $F_t = \frac{10\,P}{N_r r_2}$

Calcul de la résistance de la dent à flexion

La *figure* 44 représente une dent. Soit *s* l'épaisseur de la dent au cercle primitif. Pour la facilité d'usinage, la dent est symétrique et, pour une simple question de résistance, les dents de chaque roue et pignon engrenant ensemble doivent avoir la même épaisseur, l'effort F étant de même valeur sur roue et pignon. Il faut donc que l'intervalle entre deux dents successives soit égal à l'épaisseur de la dent. Le nombre de dents est évidemment entier, soit Z. Le développement du cercle primitif est πD ou $2\,\pi r$. Ce développement correspond à Z fois la longueur d'arc de dent et d'intervalle, soit

$$2\,\pi r = 2\,Z \cdot s.$$

La valeur 2 *s* est le pas *p* de l'engrenage. On peut écrire :

$$r = Z\frac{s}{\pi} \quad \text{ou} \quad D = Z\frac{p}{\pi}$$

Les roues engrènent ensemble si leur pas est le même, donc si $\frac{p}{\pi}$ est le même pour les différents couples. On appelle *module m* la valeur $\frac{p}{\pi}$.

On peut dire : $m_1 = m_2 = m = \frac{p}{\pi} = \frac{D_1}{Z_1} = \frac{D_2}{Z_2}$.

Il est à noter que le rapport de réduction τ peut s'écrire soit en fonction des diamètres, soit en fonction des nombres de dents

$$\tau = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{D_1}{D_2}$$

Le module *m* définit les dimensions géométriques de la dent. Pour des nombres de dents identiques Z_1 et Z_2, deux couples d'engrenages ayant des modules différents donneront un même rapport de réduction. Le module peut être *a priori* librement choisi, cependant, pour simplifier l'outillage, des séries de modules ont été normalisées (*tableau* XIX).

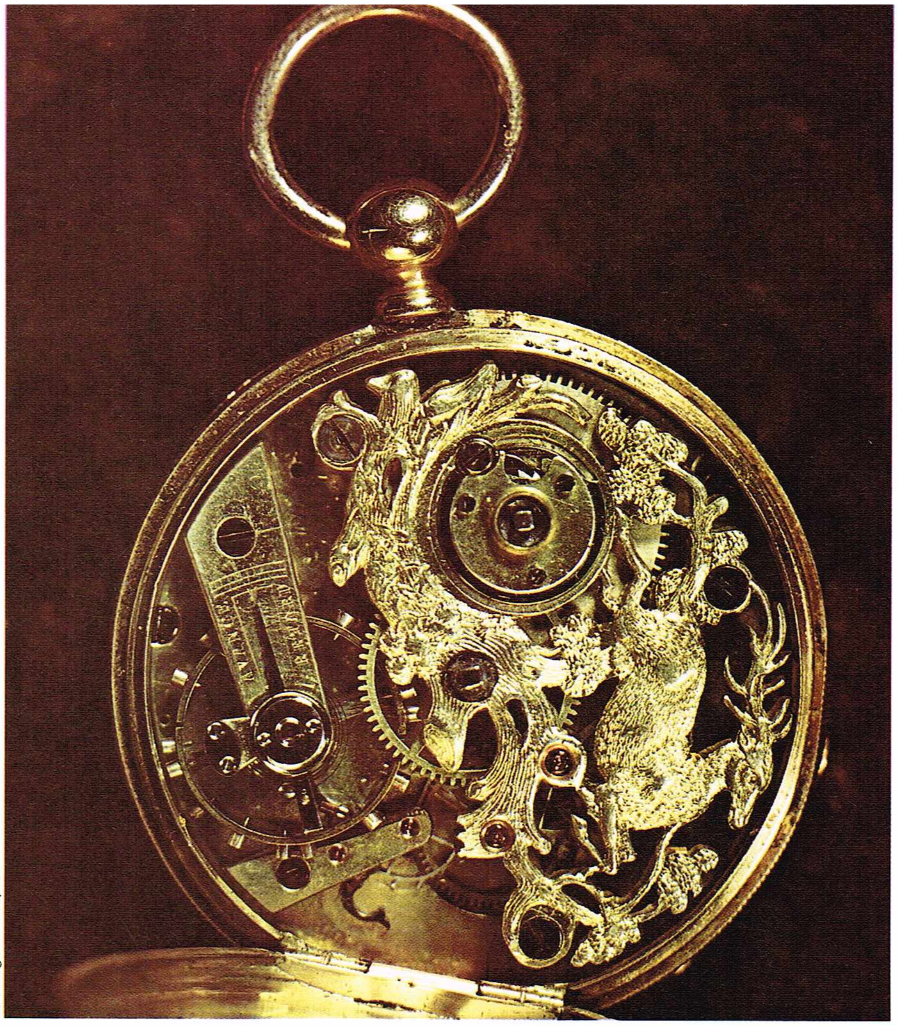

R. Buigné - Rapho

Tableau XIX
Modules normalisés (en mm) pour roues dentées

principaux		secondaires		exceptionnels
0,5	2	0,55	1,75	0,75
0,6	2,5	0,7	2,25	3,25
0,8	3	0,9	2,75	3,75
1	4	1,125	3,5	6,5
1,25	5	1,375	4,5	
1,5	6		5,5	
			7	

▲ *En haut, les rouages d'une montre ancienne. Tableau XIX : les modules normalisés pour les roues dentées.*

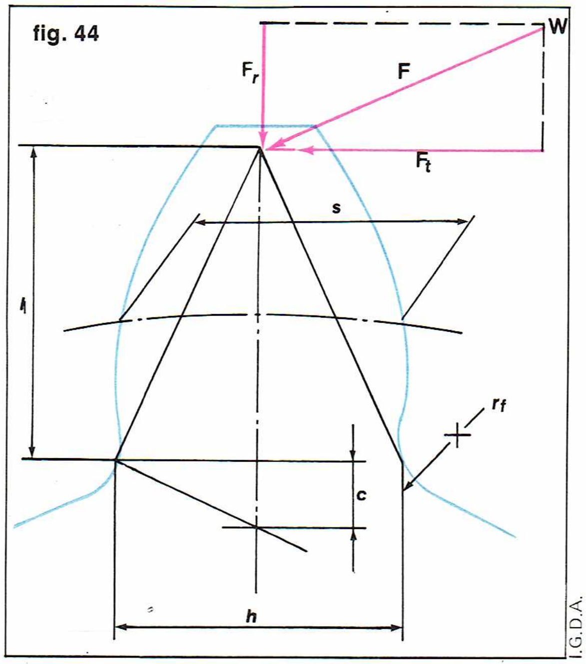

I.G.D.A.

◀ *Figure 44 : représentation schématique d'une dent d'engrenage cylindrique permettant le calcul de la résistance de la dent à la flexion avec* $c = \frac{h^2}{4\,l}$

▶ *Figure 45 : modèle mathématique de dent permettant les calculs de base.*

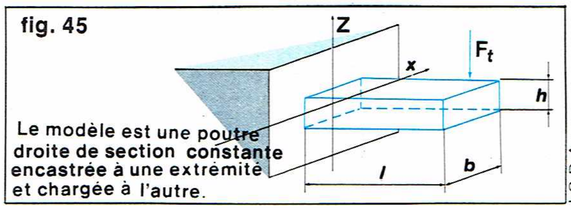

Tableau XX : Valeur du facteur K_l pour les engrenages à dents droites et hélicoïdales

Nombre de cycles de fatigue	Dureté Brinell		
	160 H_B	250 H_B	450 H_B
1 000	1,6	2,4	3,4
10 000	1,4	1,9	2,4
100 000	1,2	1,4	1,7
1 000 000	1,1	1,1	1,2
10 000 000	1,0	1,0	1,0

R_e : résistance élastique du métal
K_l : coefficient de dureté
K_f : coefficient de fatigue compris entre 1 et 3 (1,5 pour un acier doux ; 2,8 pour un acier haute résistance)
K_t : coefficient de température d'utilisation $K_t = \frac{460 + T}{620 \text{ en degrés F}}$

▲ *Tableau XX : valeur du facteur de longévité ou de durée K_l pour les engrenages à dents droites et hélicoïdales*
$\sigma_{pratique} = R_e K_l / K_t \cdot K_f$.

Seules des roues de même module peuvent engrener. De même, certaines dimensions des dents sont normalisées :

— la *saillie :* partie de dent au-delà du cercle primitif (saillie = module) ;

— le *creux :* partie de dent en deçà du cercle primitif (creux = 1,25 module), ce qui permet à la saillie de dent de l'autre roue de passer sans buter à fond de dent ;

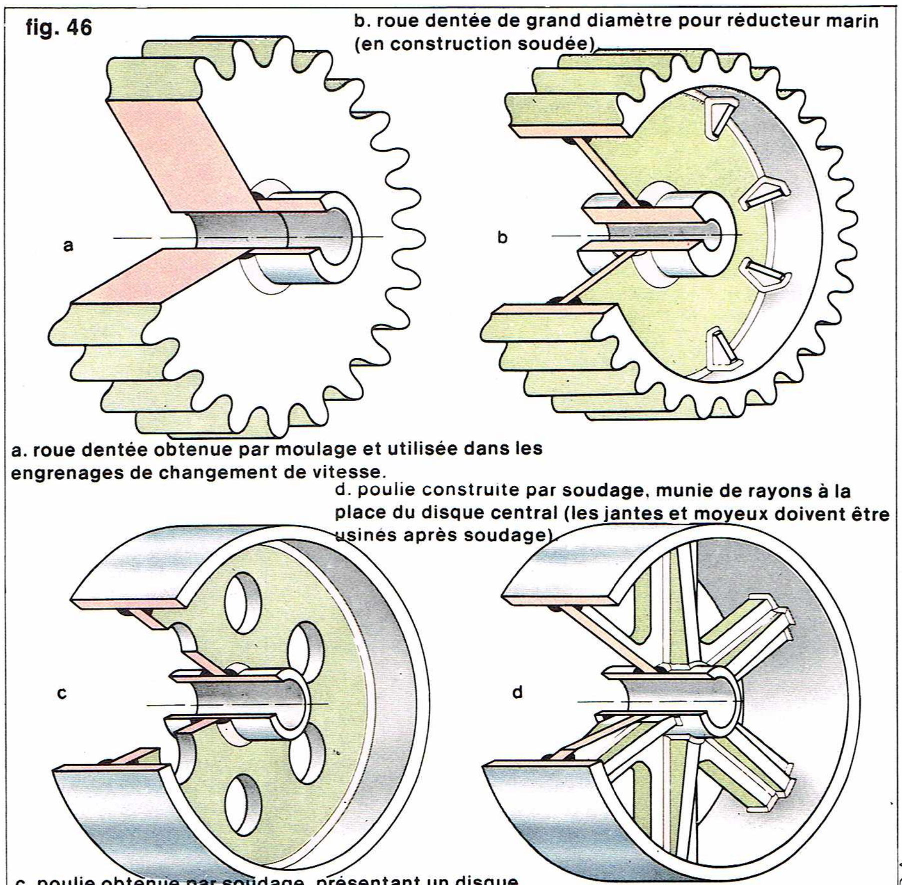

a. roue dentée obtenue par moulage et utilisée dans les engrenages de changement de vitesse.
b. roue dentée de grand diamètre pour réducteur marin (en construction soudée).
c. poulie obtenue par soudage, présentant un disque ou voile central percé de trous pour l'allègement.
d. poulie construite par soudage, munie de rayons à la place du disque central (les jantes et moyeux doivent être usinés après soudage).

— la *hauteur totale* de la dent est donc :

saillie + creux = 2,25 modules ;

— l'*épaisseur* de dent est $\frac{\pi m}{2} \simeq 1{,}6$ module ;

— la *largeur* est donnée en fonction du module. On donne largeur de dent : λm, ce qui indique des proportions entre épaisseur et largeur de dent (λ varie de 5 à 10). Les grandes valeurs de λ demandent une rectification des dents.

Il est possible de comparer une dent d'engrenage à la poutre encastrée de la *figure* 45.

On suppose l'effort F_t appliqué à l'extrémité de la dent qui a pour épaisseur $h = \frac{m\pi}{2}$, pour largeur $b = \lambda m$ et pour porte-à-faux $l = 2{,}25\ m$.

Le moment d'inertie de la section transversale de la poutre, donc de la dent, est

$$\mathfrak{J} = \frac{bh^3}{12} \quad \text{et} \quad \frac{\mathfrak{J}}{v} = \frac{\mathfrak{J}}{h/2} = \frac{bh^2}{6} = \frac{\lambda m\ (1{,}6)^2\ m^2}{6}$$

La contrainte dans la dent est au maximum :

$$\sigma_{max} = \frac{\mathcal{M}_f}{\frac{\mathfrak{J}}{v}}$$

$\mathcal{M}_f$ est le moment fléchissant ; il est égal à

$$F_t \times l = F_t \times 2{,}25\ m.$$

Des formules précédentes on déduit :

$$\sigma_{max} = \frac{F_t \times 2{,}25\ m}{\frac{\lambda m\ (1{,}6)^2\ m^2}{6}} = \frac{5\ F_t}{\lambda m^2}$$

$$\sigma_{max} = \frac{5\ F_t}{\lambda m^2}$$

ce qui peut aussi s'écrire en fonction du couple transmis :

$$C = F_t \cdot r \qquad \text{et} \qquad r = \frac{mZ}{2}$$

donc
$$\sigma_{max} = \frac{10\ C}{\lambda Z m^3}$$

ou encore, en fonction de la puissance et de la vitesse de rotation et du nombre de dents :

$$\sigma_{max} = \frac{100\ P}{\lambda Z N m^3}$$

Dans la méthode de calcul précédemment décrite, nous avons supposé que l'effort agissait en bout de dent et qu'une seule dent par roue transmettait tout l'effort ; en fait, la dent n'est pas seule à transmettre cet effort, plusieurs dents de la même roue sont utiles simultanément, et l'effort n'est pas tout à fait à l'extrémité de la dent. Il y a malgré tout fatigue des dents qui se trouvent chargées et déchargées pendant la rotation, le coefficient de fatigue K_f étant variable de 1 à 3 suivant le matériel et la machine utilisatrice.

Si la température dépasse 70 °C ou 160 °F, la dureté du métal se modifie, le facteur de température K_t est donné par :

$$K_t = \frac{(460 + T)}{620}, \qquad \text{T étant exprimé en °F.}$$

Suivant le traitement thermique effectué sur les dents et la durée d'utilisation souhaitée, la correction effectuée intervient par le facteur de durée K_l ou facteur de longévité, qui est fonction de la dureté Brinell H_B (*tableau* XX).

Les trois facteurs précédents corrigent la résistance R_p à la fatigue du métal pour obtenir une contrainte admissible σ_{adm} inférieure à la résistance pratique :

$$\sigma_{adm} = \frac{R_p K_l}{K_t K_f}$$

La contrainte calculée doit rester inférieure à la contrainte admissible pour permettre une bonne tenue des dents :

donc $\sigma_{max} < \sigma_{adm}$

ou $\frac{10\ C}{\lambda Z m^3} < \frac{R_p K_l}{K_t K_f}$

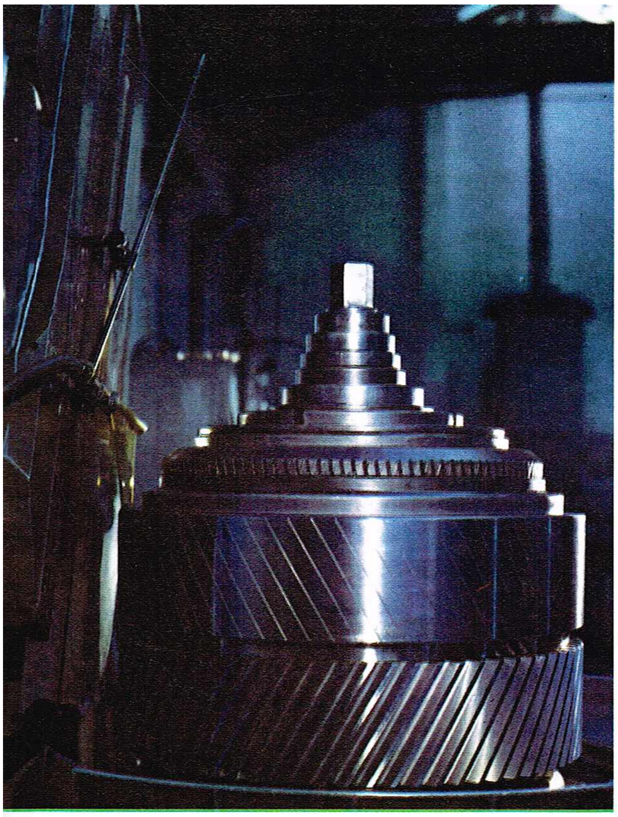

I.G.D.A. - De Gregorio

I.G.D.A. - Rizzi

◀ *A gauche, une denture à chevrons ; à droite, une denture hélicoïdale.*

Réalisation et construction des engrenages

Les grandes roues dentées ont l'apparence d'une poulie à la périphérie de laquelle ont été usinées des dents dans l'épaisseur de la jante. Les roues de taille importante peuvent être construites par soudure ou moulage ; les roues de petite et moyenne dimension sont usinées dans la masse ; ou, parfois, le pignon est taillé directement dans l'arbre pour obtenir un *pignon arbré,* qui peut aussi être forgé dans certains cas (*fig.* 46). Quelle que soit la méthode utilisée, les dents sont taillées à l'aide de machines spéciales. On rencontre de plus en plus d'engrenages obtenus directement par frittage (compression à haute température de poudre métallique dans un moule de forme).

Denture hélicoïdale

Il est en fait assez rare d'utiliser des engrenages à denture droite comme précédemment. La dent droite a l'inconvénient de présenter une attaque brutale. Pendant la rotation, il y a choc des dents des deux roues, ce qui nuit à la durée de fonctionnement et, de plus, est source de bruit.

La denture hélicoïdale permet une attaque progressive ; les engrenages sont alors plus silencieux et moins fragiles.

Il y a néanmoins un revers ; l'inclinaison de denture introduit un effort axial $F \cdot \sin \alpha$ et les roulements d'arbre doivent être calculés en conséquence.

Dans de gros réducteurs, cet effort axial peut prendre des valeurs considérables. Il suffit de placer deux roues jumelées d'inclinaison opposée pour obtenir une denture dite *denture chevron*.

Roues coniques

L'industrie sait calculer et réaliser des engrenages pour des axes de position quelconque. L'emploi en est particulièrement rare.

La majorité des cas utilisés concerne les engrenages d'axes parallèles à denture droite ou hélicoïdale et assez souvent des engrenages d'axes perpendiculaires à denture droite ou hélicoïdale.

Les engrenages coniques sont particulièrement délicats à réaliser, le profil des dents n'étant pas constant, ce qui nécessite un usinage face par face pour chaque dent ; cela rend l'emploi particulièrement coûteux.

Les paliers de chaque arbre, même pour des dents droites, doivent supporter un effort axial. Les calculs font intervenir l'effort au rayon moyen des roues (*fig.* 47). L'effort F normal à la dent est projeté en F_t, F_a, F_r sur les différents axes *x, y, z*. L'angle θ de pression est normalement de 20°, d'où $F_t = F \cos \theta$.

L'angle γ dépend du diamètre des engrenages et de l'angle de calage des arbres (*fig.* 48).

Il résulte que $F_r = F \sin\theta \cdot \cos\gamma$ et $F_a = F \sin\theta \cdot \sin\gamma$, ce qui permet de déterminer l'effort axial et l'effort radial supportés par l'arbre porte-engrenage.

fig. 47

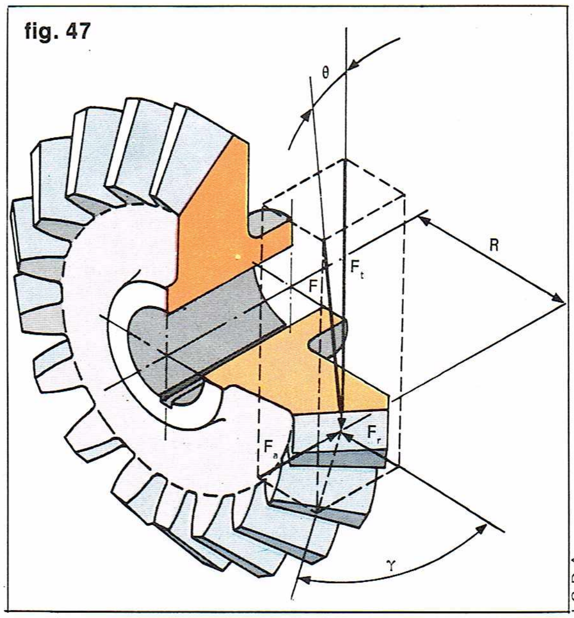

I.G.D.A.

◀ *Figure 47 : schéma montrant l'importance et la direction des 3 composantes F_t, F_a, F_r de la force F normale à la dent d'une roue conique.*

L'effort F_t est supposé concentré au rayon moyen R ; il est calculé connaissant le couple transmis C : $F_t = C/R$.

Les calculs se développent de la même manière que pour les engrenages d'axes parallèles ; le rayon moyen est $R = \frac{R_i + R_e}{2}$, R_i et R_e étant respectivement le rayon intérieur et le rayon extérieur de la roue ; le module moyen

fig. 48

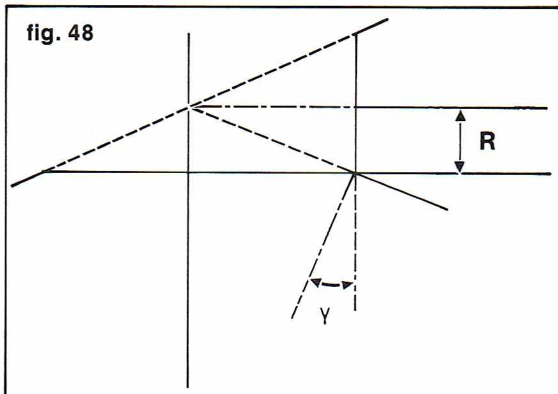

Richard Colin

◀ *Page ci-contre, en bas, figure 46 : représentations schématiques de poulies et roues dentées obtenues par différentes techniques*

◀ *Figure 48 : détermination de l'angle γ pour le calcul d'une roue conique.*

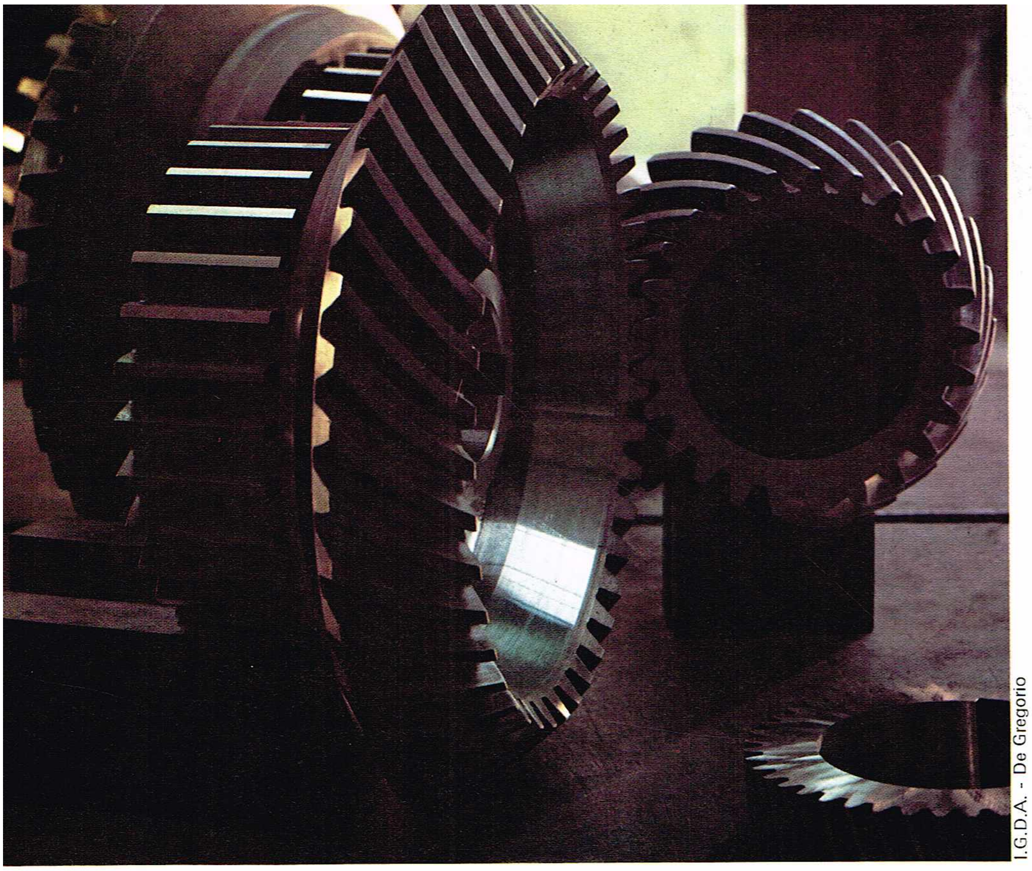

▲ *Roues dentées : la partie cylindrique est à dents droites ; la partie conique présente une denture Gleason.*

▼ *Tableau XXI : valeurs du facteur de distribution de charge K_c pour roues coniques.*
Figure 49 : diagramme donnant la valeur du facteur géométrique K_g en fonction du nombre de dents de la roue et du pignon conique.

Tableau XXI
Valeurs du facteur de distribution de charge K_c

Utilisation	roue entre coussinets	une roue encastrée	deux roues encastrées
Applications industrielles	1,00-1,10	1,10-1,25	1,25-1,40
Construction automobile	1,00-1,10	1,10-1,25	—
Construction aéronautique	1,00-1,25	1,10-1,40	1,25-1,50

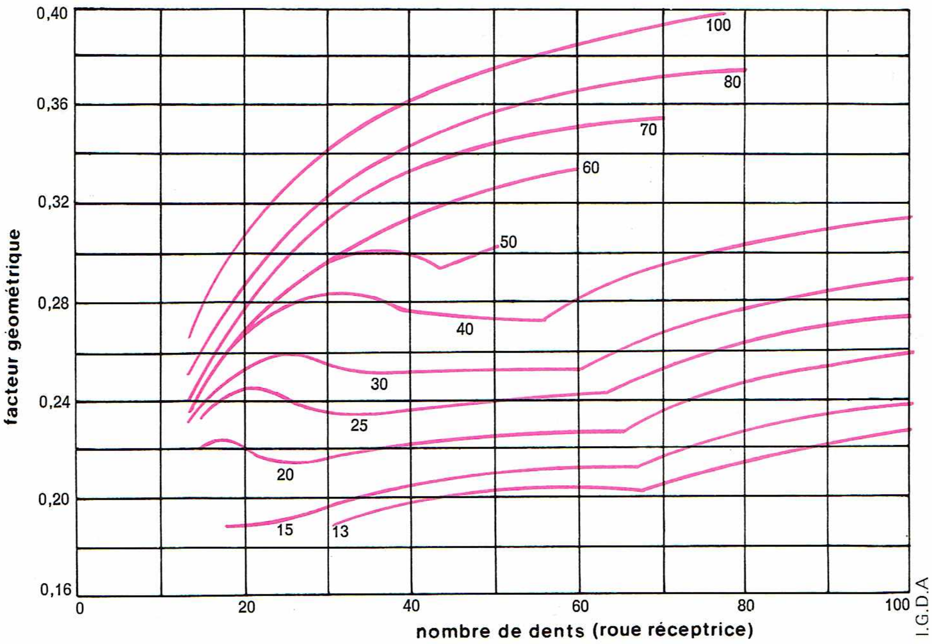

est $m = \frac{D}{Z} = \frac{2R}{Z}$, et, si on adopte pour la roue et pour le pignon un nombre de dents fictif (respectivement Z_r et Z_p), on a :

$$Z_{fr} = \frac{Z_r}{\cos \gamma_r} \qquad Z_{fp} = \frac{Z_p}{\cos \gamma_p}$$

Après calcul de prédétermination, il faut corriger de la façon habituelle en tenant compte de la fatigue, des chocs, de la répartition de la charge et de la vitesse. On peut pour cela appliquer la *méthode de Lewis*. Un dimensionnement plus précis peut être obtenu en tenant compte de résultats pratiques et de l'expérience acquise ; pour cela, on peut utiliser la formule à adapter pour chaque roue et pour chaque cas de charge :

$$\sigma = F_t \frac{Z}{D_p \lambda m} \frac{K_s K_c}{K_v K_g}$$

K_c est le facteur de distribution de charge (*tableau* XXI).

Le facteur géométrique K_g se déduit du diagramme de la *figure* 49 en fonction du nombre de dents de la roue et du pignon. Le nombre de dents d'une des roues est lu en abscisse, le nombre de dents de l'autre roue est lu sur les courbes.

Les autres facteurs K_s et K_u sont les facteurs de service et de vitesse. Le facteur K_s tient compte des irrégularités de fonctionnement et des chocs propres à la machine. Un ventilateur et un concasseur, par exemple, n'ont pas le même facteur de service ; un appareil entraîné par un moteur électrique ou par un moteur Diesel monocylindre n'a pas non plus la même régularité de fonctionnement. Il faudra donc estimer par comparaison la valeur de K_s, sachant qu'elle est comprise entre 1 et 2,25.

Le facteur de vitesse K_v tient compte de la vitesse d'entrée en contact de deux dents sans tenir compte du service de l'appareil, ce qui est le rôle d'autres facteurs. Ce facteur de vitesse ne tient pas compte des efforts extérieurs à l'appareil ; il ne faut se préoccuper que du fonctionnement interne au niveau de la roue menée et de la roue menante.

Observons l'exemple de la *figure* 50a, où est portée en abscisse la ligne de conduite de dents : c'est la ligne de contact des dents [en (1) contact initial et en (2) fin du contact] ; en ordonnée est porté l'effort développé dans une dent.

A l'instant du contact initial au voisinage de (1), la roue conduite doit accélérer ; comme elle possède une certaine masse et une certaine inertie de rotation, il se développe un effort F_1. Cette brutale accélération tend à éjecter la dent menée, ce qui conduit à une annulation de l'accélération, les vitesses des deux roues devenant identiques. Ensuite, apparaît l'effort F_2 caractérisé par l'application de l'effort maximal ayant pour origine le couple transmis, pour descendre ensuite à une valeur moyenne F_3 pour finir par un effort F_4. Au moment où une autre dent entre en contact en bout de ligne de conduite, l'effort s'annule au point (2), la dent est libérée du contact. On multiplie l'effort F_3 par le coefficient de vitesse K_v. Le coefficient K_v a pour expression :

$$K_v = \frac{78}{78 + v}$$

v étant la vitesse tangentielle au diamètre primitif, qui se détermine aisément.

Roue et vis sans fin ou vis tangente

Les engrenages pour arbres parallèles ou perpendiculaires concourants précédents permettent des rapports de réduction de 6 à 7 par couple ; pour des réductions plus importantes, le système à roue et vis tangente permet la réalisation d'appareils moins encombrants. La disposition courante compte deux arbres perpendiculaires mais non concourants ; les axes sont orthogonaux.

La vis est en quelque sorte une vis de boulonnerie ou plutôt une vis d'étau à filet trapézoïdal très accentué, en prise sur un engrenage.

La *figure* 51 illustre schématiquement la disposition de la roue et de la vis, ainsi que les directions des principaux efforts. L'angle de pression est toujours θ. Dans cette disposition, suivant la valeur du pas et du diamètre de la vis, le filet est plus ou moins incliné ; soit β l'inclinaison du filet ; R et R′ sont les rayons primitifs respectifs de la vis et de la roue.

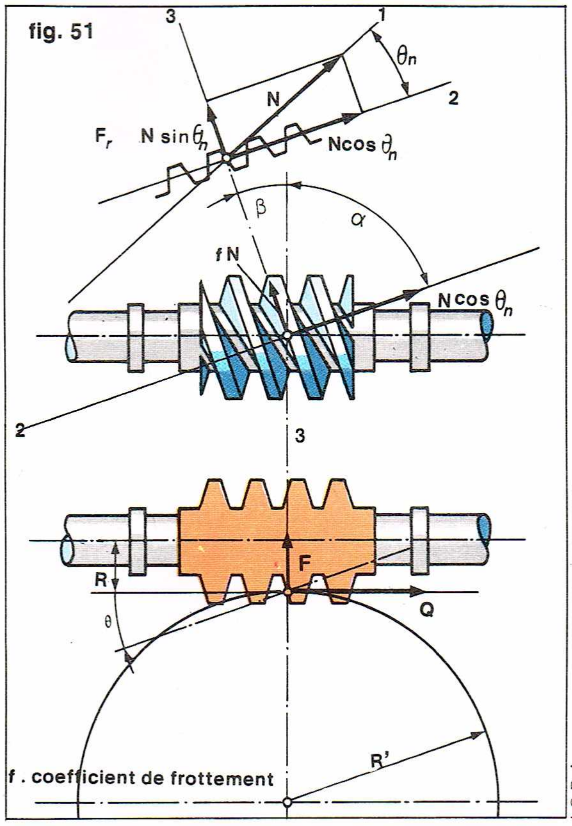

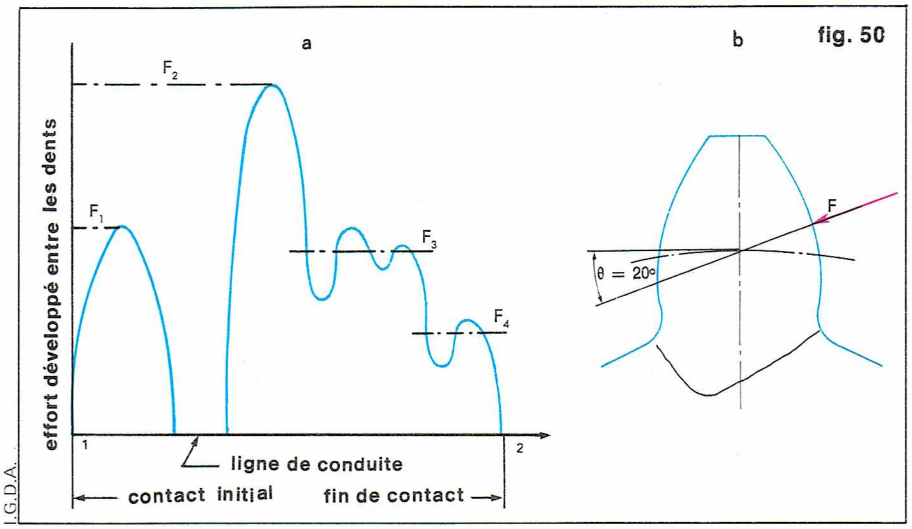

I.G.D.A.

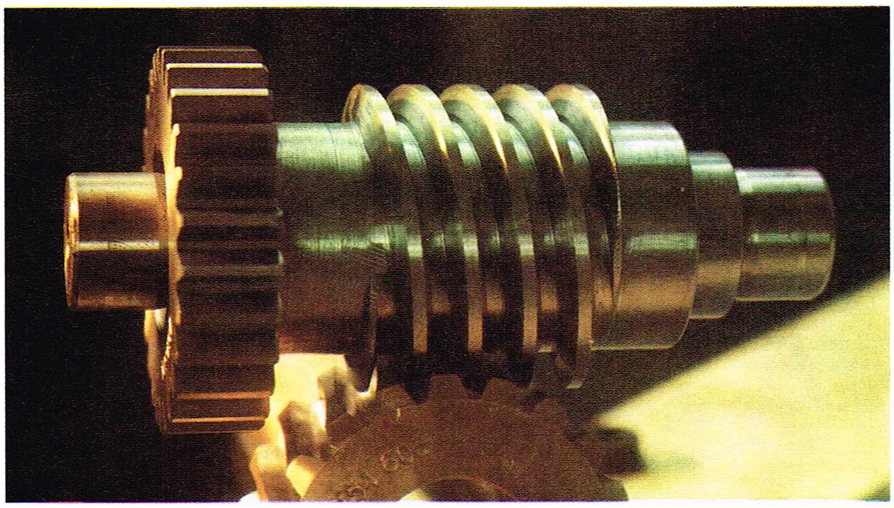

I.G.D.A. - De Gregorio

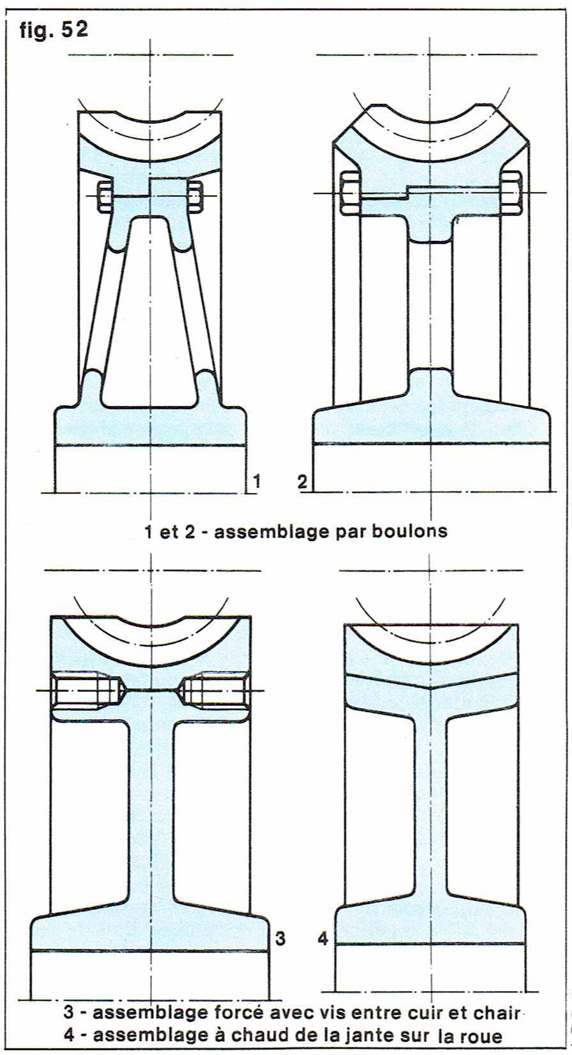

I.G.D.A.

L'effort normal à la surface du filet est N. Il est contenu dans un plan perpendiculaire à celui du schéma et passant par 2-2. En projection sur 2-2 et 3-3, il vient N · cos θ_n et N · sin $\theta_n = F_r$. La composante axiale de la vis est la composante tangentielle de la roue; il faut projeter N cos θ_n et *f* N sur l'axe de la vis, *f* étant le coefficient de frottement, d'où

$$Q = N\,(\cos\theta_n \cdot \cos\beta - f \cdot \sin\beta)$$

C'est cet effort Q qui produit la rotation de la roue. Les autres efforts se trouvent facilement par projection, pour déterminer l'effort axial de la roue et l'effort radial de la vis.

Dans cette construction, des efforts autres que ceux intéressant directement la transmission de puissance sont créés; le rendement de ce réducteur est relativement faible, de l'ordre de 0,7. Il est cependant très simple de déterminer le rapport de réduction par le rapport $\frac{n_f}{Z_R}$, n_f étant le nombre de filets de la vis et Z_R le nombre de dents de la roue. Le nombre de filets se voit en bout de vis pour ne pas être confondu avec le nombre d'hélices apparentes sur le cylindre de la vis.

Caractéristiques de construction

Différentes formes de roues sont utilisées : la plupart du temps, les dents de roues sont arrondies pour mieux épouser la vis. La jante de roue a une forme torique.

Il est très courant d'utiliser des roues à couronne dentée en bronze phosphoreux, ce qui réduit le frottement et améliore sensiblement le rendement. Dans ce cas, la jante est rapportée sur un moyeu en acier ou en fonte lorsque le diamètre est important (*fig.* 52).

Toujours en vue de réduire le frottement, roue et vis sont montées sur roulement et butée. Généralement, pour éviter un brassage trop important d'huile, la vis à rotation rapide est placée en partie haute de l'appareil (*fig.* 53).

▲ ***Figure 51 :** disposition de la roue et de la vis dans le groupement roue-vis sans fin, et direction des principaux efforts.*
***Figure 50 :** a) effort développé entre deux dents de roue en fonction de la ligne de conduite des dents; b) schéma montrant les lignes de rupture les plus fréquentes dans une dent de roue cylindrique.*
Ci-dessus, assemblage d'une vis sans fin et d'une roue.

◀ ***Figure 52 :** différents types d'assemblage de jante sur roue.*

fig. 53

a

b

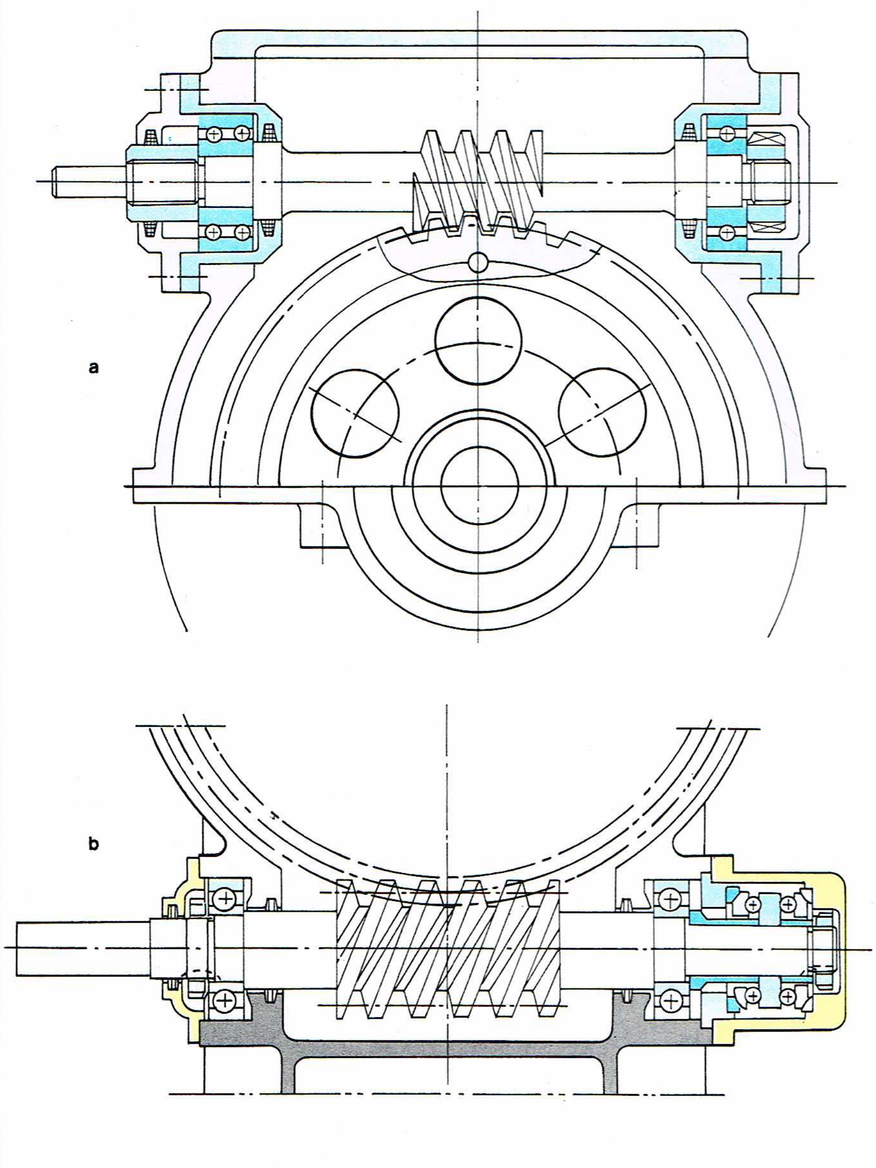

fig. 54

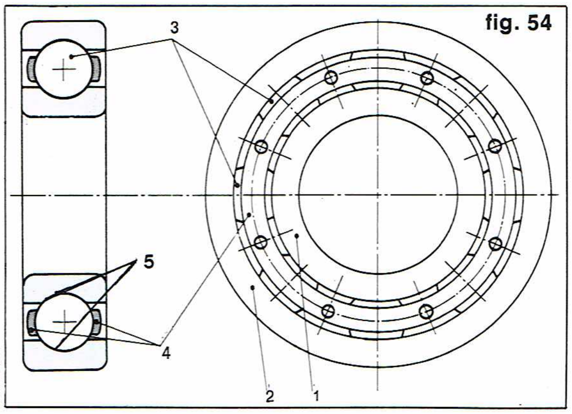

▲ **Figure 53 : deux exemples de montage de roue et de vis sans fin de réducteurs. Figure 54 : représentation schématique d'un roulement à billes à gorges profondes.**

Roulements

Lors du mouvement relatif de deux solides, il y a déplacement d'une pièce par rapport à l'autre. Ce déplacement correspond à un besoin de fonctionnement; la pièce mobile doit suivre une trajectoire bien déterminée. Cette trajectoire est définie par des guidages qui peuvent être des paliers ou des glissières dans les rotations ou déplacements rectilignes.

Le mouvement relatif de trajectoire définie directement par deux surfaces dans les liaisons lisses peut aussi être réalisé par l'interposition d'éléments roulants (billes, galets, aiguilles) entre deux surfaces portées respectivement par chaque solide; ces surfaces sont des pistes.

Alors que les surfaces lisses de guidage sont généralement réservées sur chaque solide, les pistes de roulement sont presque toujours portées par des pièces standardisées (les bagues, ou glissières) que l'on fixe sur les solides à guider.

Les ensembles mécaniques constitués par ces deux pièces portant les pistes et les éléments roulants prennent le nom de *roulements* et *butées* lorsqu'il y a mouvement de rotation, de *glissières à roulement* lorsqu'il y a mouvement de translation, de *vis à bielles* lorsqu'il y a mouvement hélicoïdal. Dans tous les cas, le frottement est remplacé par du roulement.

Avant d'aborder plus en détail l'étude des roulements, des remarques préliminaires s'imposent. Le montage des roulements facilite dans bien des cas le guidage en rotation, à condition de respecter un minimum de règles élémentaires :

Il ne faut pas oublier que le métal constituant le roulement change de caractéristiques mécaniques à partir de 100 °C.

Le roulement n'est pas un ensemble mécanique parfait. Les pistes ne sont pas des cercles géométriquement parfaits; de même, les billes ou rouleaux ne sont pas parfaits; ceci entraîne des défauts systématiques de rotation et, de plus, le roulement est une source non négligeable de vibrations. Contrairement au guidage lisse correctement lubrifié, le roulement ne permet pas d'amortir les chocs; le film d'huile du palier lisse joue le rôle de matelas amortisseur, alors que les billes d'acier sont infiniment plus rigides.

Description

Les roulements sont couramment réalisés en acier 100 C6 trempé, c'est-à-dire un acier à 1 % de carbone et 1,5 % de chrome, parfois en acier inoxydable.

Seule la très grande série permet d'obtenir des ensembles de bonne précision, les éléments étant choisis (éléments apairés) parmi des éléments fabriqués, ce qui permet d'obtenir des jeux constants dans chaque dimension de roulement.

On distingue dans le roulement différentes pièces qui sont (*fig.* 54) la bague intérieure (1), la bague extérieure (2) [sur chacune des bagues ont été usinées des pistes (5)], les corps roulants (3) et une cage (4) réalisée en une ou plusieurs pièces métalliques ou en plastique moulé. Cette cage permet de maintenir l'écartement entre les corps roulants. Il est à noter que dans le roulement à billes les pistes sont des portions de tore.

Du jeu est nécessaire entre pistes et corps roulants. Ce jeu permet la libre dilatation des différentes pièces; en effet, le coefficient de roulement n'est pas nul; bien que faible, il existe si bien que sous les efforts supportés par le roulement une faible perte de rendement dissipe en chaleur une partie de la puissance de l'appareil.

En général, la bague extérieure est en contact avec des parties massives de la machine, le carter par exemple; cette bague peut donc évacuer dans de bonnes conditions la chaleur reçue pour conserver une température relativement faible.

La quantité de chaleur transmise à la bague intérieure se transmet à l'arbre; cet arbre se trouve isolé, par les roulements, du contact avec le carter de la machine et ne peut évacuer les calories que par l'air qui le sépare du carter; donc évacuation faible, d'où échauffement plus important de la bague intérieure qui, en se dilatant, augmente de diamètre, ce qui a pour effet de réduire le jeu initial du roulement.

Si le jeu devient nul ou négatif (serrage), il se crée des efforts internes s'ajoutant aux efforts machines, et le phénomène de dilatation s'accentue jusqu'au blocage du roulement.

Cela explique la nécessité de lubrifier les roulements : une très faible quantité d'huile est utilisée pour la lubrification proprement dite, tandis que la majeure partie est utilisée pour l'évacuation des calories.

Dans le cas d'un carter fermé avec bain d'huile, l'huile chaude se refroidit au contact du carter qui transmet la chaleur à l'air ambiant. La température courante des diffé-

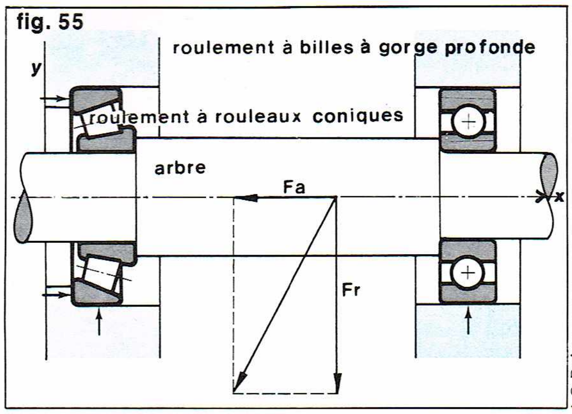

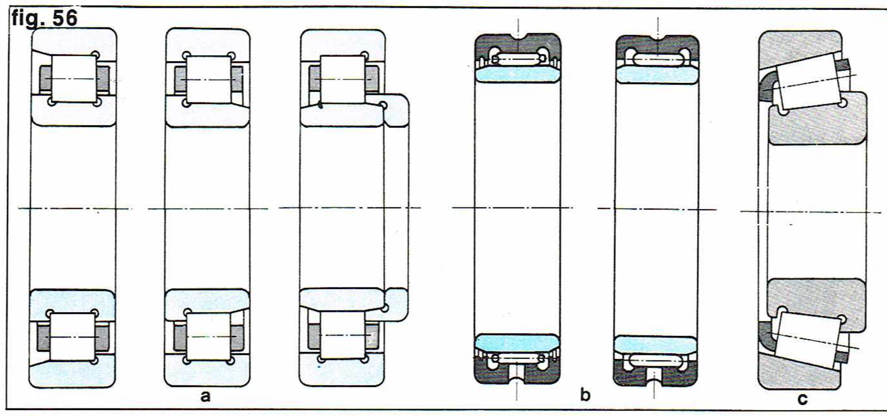

rents appareils est de l'ordre de 50 à 80 °C, les calories reçues par l'huile ayant pour origine les paliers et les engrenages, chaînes et autres organes constitutifs des appareils.

Différents types de roulements pour différentes charges

Considérons un plan passant par l'axe de rotation d'un arbre ; supposons-le vertical (*fig.* 55).

La charge supportée par l'arbre est généralement oblique dans le plan. On utilise dans les calculs les projections sur l'axe Ox de l'arbre : effort axial F_a et sur une normale Oy à l'arbre effort radial F_r.

Une butée supporte uniquement des charges axiales pures ; un roulement à aiguilles et certains roulements à rouleaux subissent uniquement des charges radiales pures. Les autres roulements peuvent supporter des charges de direction quelconque, c'est-à-dire à la fois des charges axiales et des charges radiales. Suivant la valeur du rapport F_r/F_a, on choisit le type de roulement à utiliser : à rouleaux cylindriques, à rouleaux coniques, à aiguilles par exemple (*fig.* 56).

Un type de roulement très important est le roulement à rotule sur billes ou sur rouleaux (*fig.* 57). Il permet de supporter la charge, bien entendu, mais il peut suivre la déformation de flexion de l'arbre.

L'arbre supposé sur deux appuis simples fléchit sous l'action des efforts dont la résultante radiale est F (*fig.* 58) ; au niveau des appuis, l'axe de l'arbre n'est plus horizontal, mais incliné d'un certain angle α. Les roulements à rotules peuvent supporter un angle d'inclinaison α important : c'est l'*angle de rotulage ;* il est de quelques degrés.

Règles de montage

La règle fondamentale est de prévoir un ajustement serré de la bague mobile par rapport à la charge.

Prenons l'exemple d'un arbre de scie circulaire ; la charge (l'effort de sciage) est de direction fixe par rapport au bâti de la scie ; en revanche, l'arbre est tournant, c'est lui qui entraîne la scie. La bague intérieure du roulement, c'est-à-dire celle qui est en contact avec l'arbre, est donc mobile par rapport à la charge ; c'est cette bague qui devra être serrée.

Supposons qu'il y ait jeu entre l'arbre et la bague intérieure du roulement, la différence de diamètre, bien sûr, est faible ; cependant, pour un arbre tournant à 3 000 tours/minute, une différence de diamètre de quelques centièmes de millimètre entraîne rapidement un retard de la bague de quelques tours. La bague, étant plus grande que l'arbre, tourne légèrement moins vite que celui-ci, ce qui produit un effet laminoir : la bague se trouve laminée entre l'arbre et les éléments roulants ; il y a alors allongement de la longueur circonférentielle de la bague qui se traduit par un accroissement de diamètre ; cela, d'ailleurs, amplifie l'effet de laminage, mais surtout réduit le jeu interne du roulement, ce qui est néfaste au bon fonctionnement, nous en avons discuté précédemment.

Le même type de phénomène (moins accentué toutefois) se produit si c'est la bague extérieure qui est mobile par rapport à la charge ; il ne peut dans ce cas y avoir blocage du roulement, mais ce dernier prend un jeu exagéré.

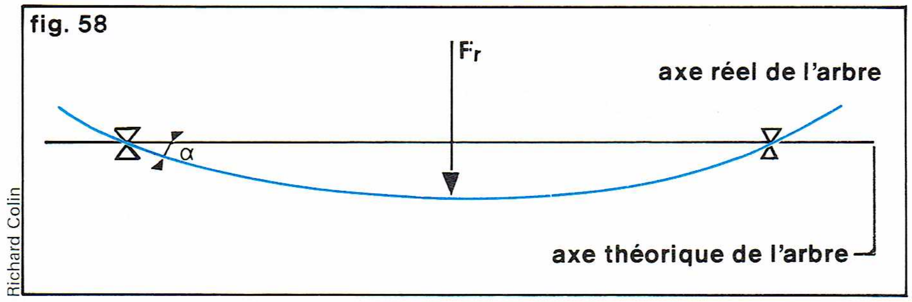

Il est donc impératif de prévoir un assemblage serré de la bague mobile par rapport à la charge.

Pour procéder au montage, plusieurs solutions sont possibles : deux méthodes sont couramment employées. La première, qui consiste à utiliser une presse et à effectuer le montage à force du roulement, ne peut être envisagée que si l'appui pendant le montage se fait sur la bague qui est montée serrée ; sinon, l'effort de montage est transmis par les pistes et les corps roulants qui seront déformés ; il s'ensuivra irrémédiablement la destruction rapide du roulement et, dès la mise en service, des défauts de rotation.

Une autre méthode consiste à chauffer le roulement, obligatoirement dans un bain d'huile à la température de 80-90 °C, laquelle est grandement suffisante, le serrage n'étant jamais très important ; bien entendu, l'arbre est à la température de l'atelier ; après mise en place rapide du roulement, il suffit d'attendre le refroidissement pour obtenir le serrage désiré. Cette méthode est particulièrement efficace, car il n'y a pas frottement à force de la bague sur l'arbre pendant le montage, frottement qui provoquerait un arrachement de métal avec modification de forme et de dimension des pièces.

Bien souvent, en plus de l'ajustement serré de la bague mobile par rapport à la charge, il faut prévoir un système de blocage axial de cette bague, un écrou par exemple (*fig.* 59).

Les écrous utilisés sont des écrous spéciaux pour roulement ; ces écrous sont très plats pour réduire l'encombrement, et à pas fin ; ils peuvent être autofreinés ou employés avec rondelle-frein à dents ; l'écrou normal a quatre encoches, la rondelle est munie d'une dent intérieure pénétrant dans une rainure spécialement effectuée sur l'arbre, ce qui assure l'immobilisation en rotation de la rondelle. Après serrage de l'écrou, on rabat dans une encoche de ce dernier une dent de la rondelle, ce qui assure l'immobilisation en rotation de l'écrou.

Il a été dit précédemment que la bague mobile par rapport à la charge est montée serrée ; la valeur du serrage est variable suivant la nature de la charge (choc, vibrations, etc.). L'autre bague, fixe par rapport à la charge, doit être libre ; l'ajustement prévu est du type glissant doux ; il faut prévoir en plus un léger jeu axial pour la bague libre d'un roulement, afin de permettre une automise en place de cette bague en début de fonctionnement.

La bague libre du 2e roulement sera montée avec un jeu axial important pour la libre dilatation des pièces, sinon un effort axial important va se développer lors de la dilatation et provoquer la destruction des roulements.

▲ ***Figure 55 :** composantes axiale (F_a) et radiale (F_r) des efforts supportés par un arbre guidé par un roulement à rouleaux coniques et un roulement à billes.*
***Figure 56 :** différents types de roulements :*
a) à rouleaux cylindriques ;
b) à aiguilles ;
c) à rouleaux coniques.
***Figure 58 :** flexion d'un arbre sous l'action d'un effort radial F_r.*

▼ ***Figure 57 :** roulement à rotule à deux rangs de billes.*

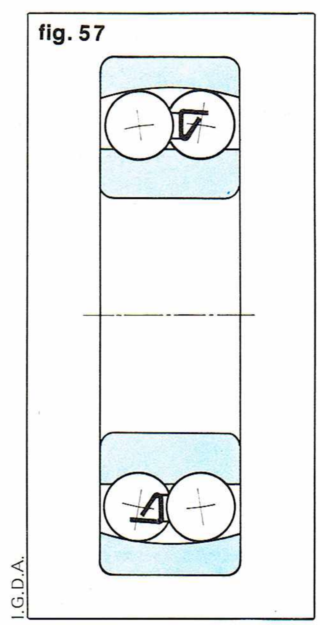

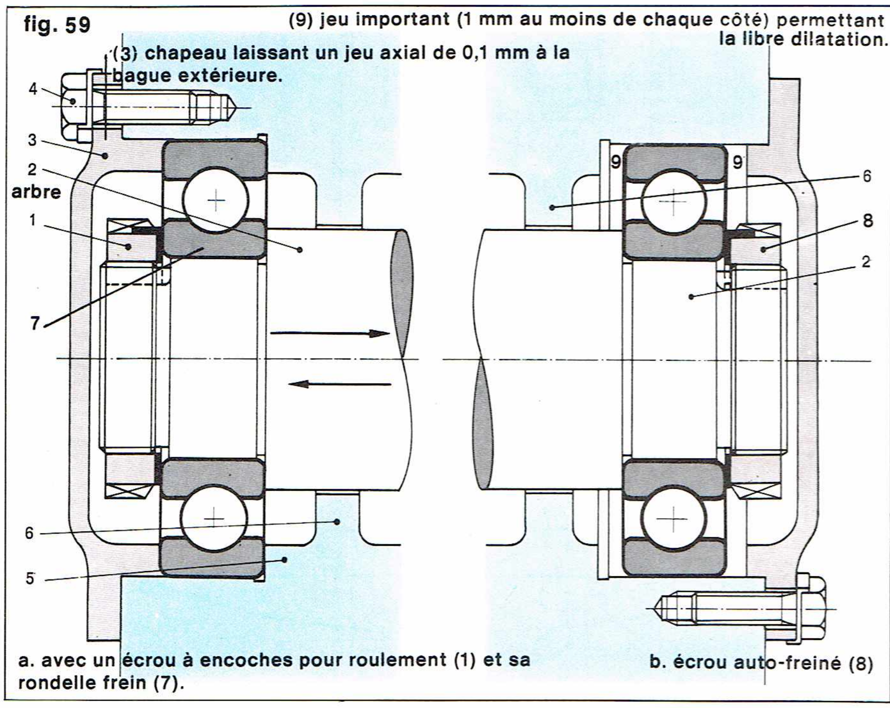

▲ ***Figure 59 :** montages types de roulements à billes.*

Le principe général est simple :

La bague mobile	⟶	fixe
La bague fixe	⟶	mobile
par rapport à la charge		par rapport à la pièce

Dimensionnement des roulements

Pendant le service d'un roulement, les éléments roulants et la bague mobile par rapport à la charge supportent celle-ci en des points successifs; chaque élément se trouve donc chargé et libéré de façon répétitive; le métal se fatigue et finit par s'écailler après s'être fissuré; la durée de vie du roulement est alors largement dépassée. Il est préférable d'essayer de prévoir la durée probable de service du roulement. Pour cela, les fabricants procèdent à des essais statistiques de durabilité des roulements et indiquent pour chaque référence de roulement une charge C, appelée *capacité dynamique*, qui produit l'usure normale juste avant fissuration que doivent atteindre ou dépasser 90 % des roulements dans des conditions de vitesse données pour 1 million de tours.

Il est bien rare d'employer un roulement dans les conditions d'essais du fabricant; la charge et la vitesse d'utilisation sont différentes, et il y a chocs dans certains cas. Il faut donc corriger les données, et ce à l'aide d'une relation liant la durée L (en millions de tours), la capacité de base C et la charge équivalente P appliquée :

pour un roulement à billes, on a $L = \left(\frac{C}{P}\right)^3$

pour un roulement à rouleaux, $L = \left(\frac{C}{P}\right)^{\frac{10}{3}}$

Ayant calculé la durée en millions de tours, il est facile de déterminer la durée h en heures à la vitesse de rotation N tours/minute :

$$h = \frac{1\,000\,000\ L}{60 \cdot N}$$

La charge équivalente P est donnée par $P = XF_r + YF_a$. X et Y sont donnés en fonction du type de roulement suivant le rapport F_a/F_r.

Conditions de lubrification

Il faut prévoir la lubrification des roulements pour obtenir de faibles coefficients de roulement, mais aussi et surtout pour assurer le refroidissement. La lubrification se fait à l'huile ou à la graisse.

La *lubrification à la graisse* convient bien aux roulements travaillant en ambiance poussiéreuse, car la graisse a un bon pouvoir d'obturation; sa limite d'emploi est fonction de la vitesse de rotation et de la température d'utilisation. Les fabricants préconisent des graisses à la soude, à la chaux, mais surtout au lithium.

Pour assurer l'étanchéité, un joint feutre est souvent suffisant pour parer aux entrées de poussière et à la coulée de la graisse à l'extérieur.

Avec la *lubrification à l'huile*, il faut prévoir un système efficace d'étanchéité, car l'huile n'a pas de pouvoir d'obturation et, de plus, s'échappe facilement à l'extérieur. Il faut nécessairement utiliser un joint à lèvre et même un joint à deux lèvres : une antipoussière dirigée vers l'extérieur et une antifuite dirigée vers l'intérieur. Un ressort assure un maintien du contact lèvre-arbre; l'arbre doit être de préférence chromé pour éviter l'usure des joints.

On lubrifie avec des huiles minérales très fluides pour les rotations rapides, très visqueuses pour les roulements très chargés.

Il est à noter que bien des avaries ont pour source un excès de graissage qui provoque l'échauffement.

Il existe un type de roulement, fort pratique, qui est souvent employé dans les petits appareils et les appareils ménagers, c'est le *roulement étanche;* il possède ses propres joints et le graissage est effectué une fois pour toutes en usine au moment de l'assemblage des différentes pièces du roulement. La quantité de graisse convient tout à fait à l'utilisation (*fig.* 60).

Exemples d'utilisation

La *figure* 61 représente une roue pour câble de téléphérique. La roue (1) est portée par le support (7) par l'intermédiaire d'un axe (2) et de roulements à billes à

▶ *A gauche, roulement à rotule sur deux rangs de billes (RIV-SKF). A droite, roulement à rotule sur rouleaux (les rouleaux ont une forme de tonneau) [RIV-SKF].*

fig. 60

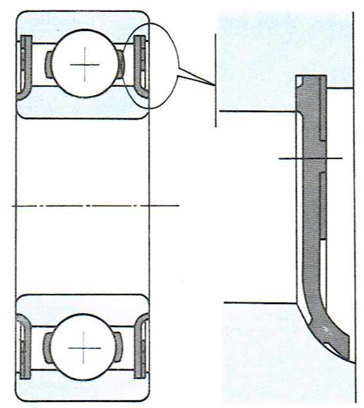

I.G.D.A.

fig. 61

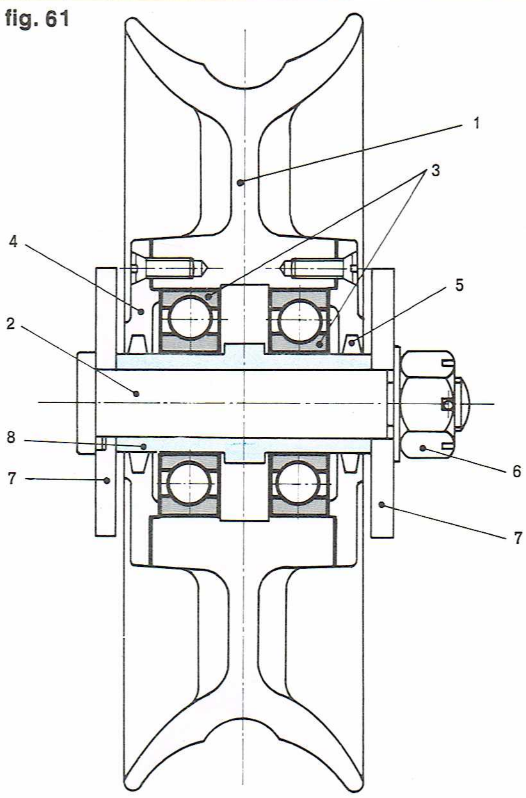

I.G.D.A.

fig. 62

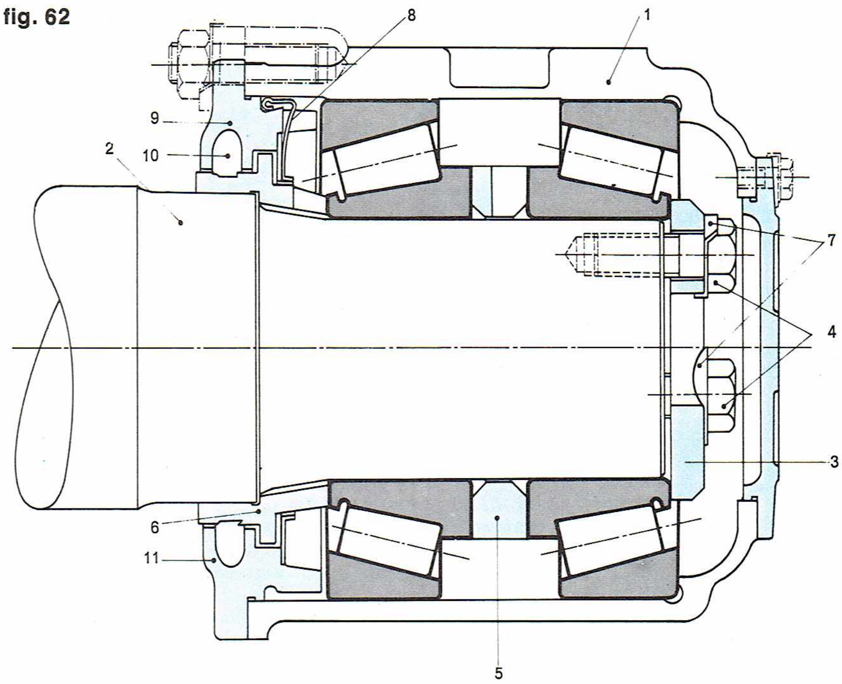

I.G.D.A.

◀▲ ***Figure 60 :*** ***roulement étanche à deux joints.***
Figure 61 : roue de renvoi de téléphérique montée sur roulements à billes à gorges profondes.
Figure 62 : boîte d'essieu de boggie de wagon, à deux roulements à rouleaux coniques montés en X (voir développement dans le texte).

gorge profonde (3). Les flasques (4) portent des joints feutres placés dans les gorges trapézoïdales (5). La bague extérieure de chaque roulement est mobile par rapport à la charge ; c'est cette bague qui est montée serrée dans l'alésage de la poulie. Les bagues intérieures sont libres sur l'entretoise (8) qui porte un épaulement central de limite de déplacement axial.

L'axe (2) est lié aux flasques (4) par ergot ; l'écrou (6) est un écrou à créneaux, goupillé sur l'axe après montage. L'ensemble est monté en pendule par les supports afin de permettre un débattement de l'ensemble qui s'aligne automatiquement pour assurer le bon fonctionnement du système.

La *figure* 62 illustre le montage d'une boîte d'essieu de boggie de wagon de chemin de fer.

La boîte d'essieu (1) est boulonnée au châssis ; l'arbre porte-roues (2) est monté sur quatre roulements à rouleaux coniques (deux par boîte) ; chaque paire de roulements est montée en X, ce qui permet d'éviter le balancement latéral du wagon et améliore le confort en courbes et aux raccordements. Une rondelle (3) bloquée par trois vis (4) disposées à 120° assure le serrage des bagues de roulement dont l'écartement est assuré par l'entretoise (5). La pièce d'appui (6) permet de conserver un arbre à variation de diamètre très progressive, tout en donnant un bon appui au roulement de gauche ; de plus, cette pièce (6), par sa forme extérieure, forme turbine d'huile par le grand disque et constitue un labyrinthe qui pare aux entrées de poussières. L'étanchéité est améliorée par la rondelle métallique (8) qui est très près de l'appui (6).

Des plaquettes arrêtoir (7) assurent l'immobilisation des vis (4) ; une extrémité de la plaquette est repliée dans l'alésage (3), l'autre extrémité est rabattue sur un plat de la vis (4).

La *figure* 63 montre le montage d'une roue postérieure de guidage de pont roulant, cette roue servant au guidage

fig. 63

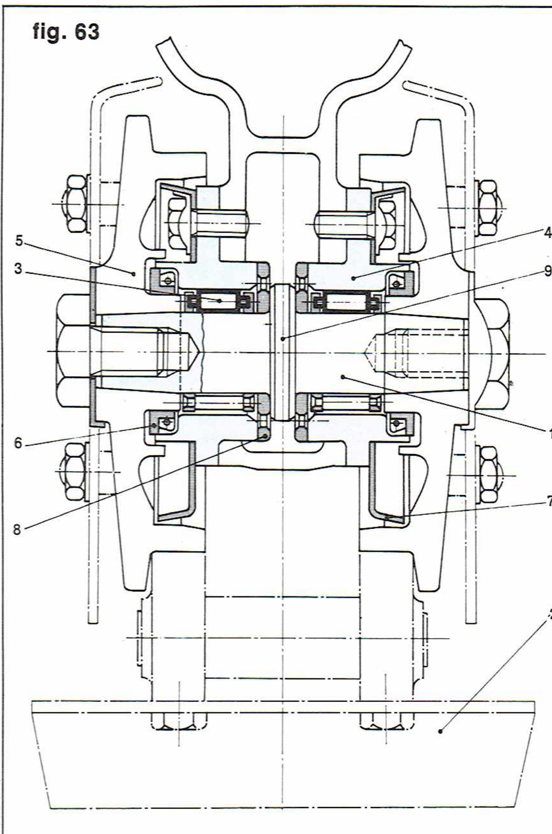

I.G.D.A.

◀ ***Figure 63 : montage d'un galet de chemin de roulement de portique de pont roulant (voir développement dans le texte).***

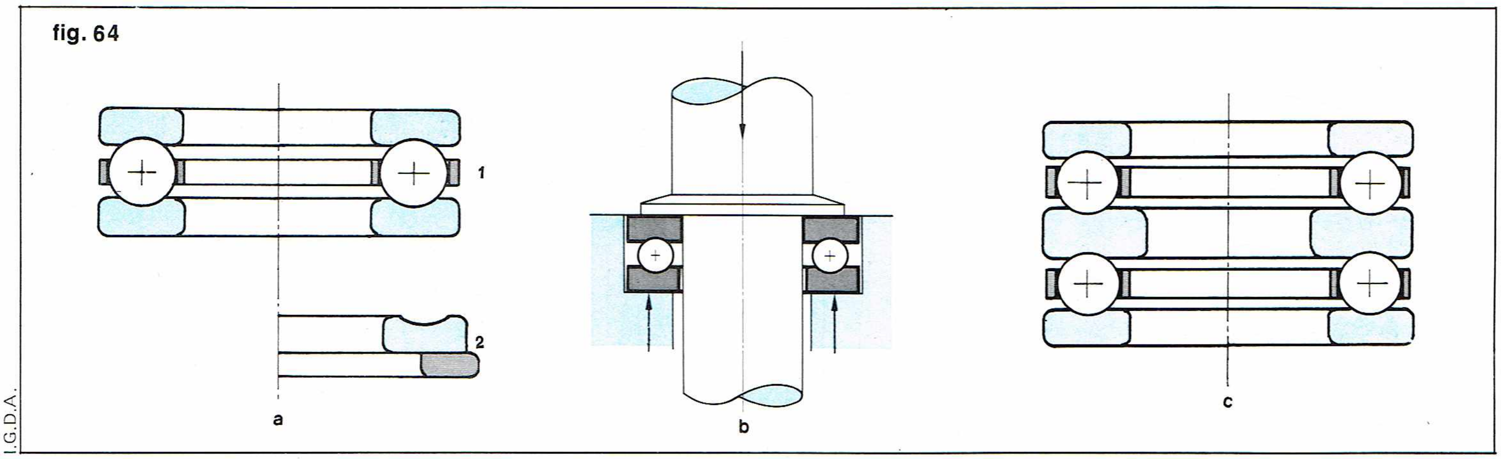

▲ *Figure 64 :*
a) *butée simple effet;*
b) *disposition des efforts sur une butée simple effet;*
c) *butée double effet.*

au sol du portique sur ses rails (2). Le galet antérieur est moteur, il assure le déplacement; le galet postérieur joue seulement un rôle dans le guidage; c'est le rail et le déplacement du portique qui assurent la rotation des deux roues (5).

Les roues à jante sont assemblées par cône sur l'axe (1), ce qui garantit la parfaite concentricité sans jeu du chemin de roulement et de l'axe. Un montage cylindrique nécessiterait un emmanchement avec serrage, sinon il y aurait mouvement de rotation entre chacune des roues et l'axe, qui provoquerait des déformations des pièces.

Le montage est fait à l'aide de roulements à aiguilles sans bagues; de ce fait, l'axe (1) et les supports (4) jouent le rôle de bagues et sont en acier trempé rectifié.

Les deux pièces (8) en métal antifriction assurent le maintien latéral par l'épaulement (9) de l'axe. Ces pièces sont percées pour permettre le graissage des roulements. La protection est double : un disque (7) évite l'introduction des pulvérulents et un joint (6) assure l'étanchéité.

Roulement de butée pour charge axiale

Lorsque l'effort est purement axial, un système de butée permet le mouvement relatif de rotation. Il est constitué dans le cas de la butée simple effet par deux rondelles portant les pistes et des billes ou quelquefois des rouleaux coniques. La butée simple effet ne supporte l'effort axial que dans un sens (*fig.* 64). La butée double effet peut supporter un effort axial alterné. Pour la butée double effet, l'arbre prend appui sur la rondelle intermédiaire double piste. Le guidage en rotation de l'axe ne peut être assuré par la butée pure; il devra l'être par ailleurs comme dans la *figure* 65 représentant une contre-pointe tournante de tour.

On distingue un roulement à rotule à deux rangées de billes (6) et un roulement à rouleaux coniques (3) qui effectuent le guidage en rotation et supportent l'effort radial.

Dans cette disposition, l'effort axial est de direction fixe. Une butée simple effet suffit; un anneau de butée est ajusté serré sur l'arbre. L'autre anneau est simplement appuyé dans le corps (1) de la contre-pointe, ce qui permet à cette rondelle de s'auto-aligner sur l'axe de rotation défini par les deux roulements (6) et (3). Un espace est prévu pour la libre mise en place de la rondelle d'appui.

La vis (4) pour clef à ergots assure un serrage initial de la butée (2) et du roulement (3) de telle façon que sous les efforts la déformation des pièces ne puisse pas provoquer un jeu néfaste à la précision. La vis chapeau (4) est freinée en position par une vis sans tête (5) et une pastille de Nylon ou de cuivre. La vis (8) obture l'orifice de graissage.

Le crochet de levage (1) de la *figure* 66 illustre le montage sphérique d'une butée; dans ce cas, une rondelle supplémentaire à portée sphérique est utilisée (3), sphère centrée en C; une contre-butée (5) de même centre maintient l'ensemble. (8) est un fourreau de protection. L'écrou (7) doit être usiné pour permettre le pivotement du crochet sans s'appuyer sur (8), d'où la présence d'une gorge.

▼▶ *Figure 65 : montage d'une contre-pointe tournante de tour.*
Figure 66 : montage d'un crochet de levage à articulation sphérique, laquelle permet au crochet de rester en permanence aligné avec la direction de la charge levée (voir développement dans le texte).

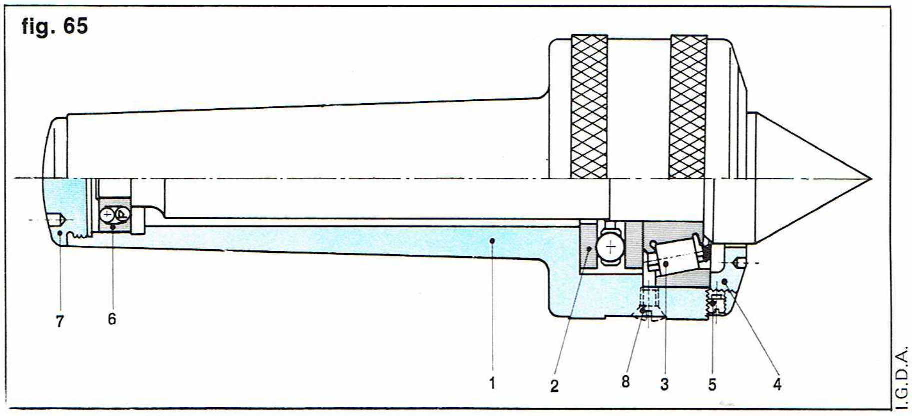

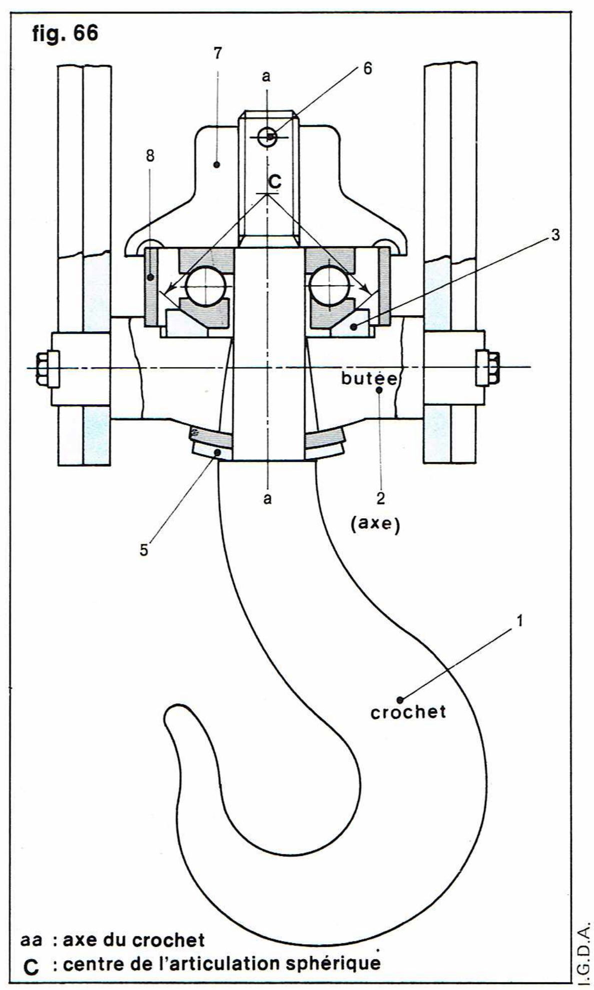

Transformations de l'énergie électrique en énergie électrique

Transformateurs

Un transformateur statique est un appareil fixe à induction électromagnétique qui a pour rôle de transformer un système de courants alternatifs en d'autres systèmes de courants alternatifs de même fréquence, mais généralement de tensions et d'intensités différentes.

Les transformateurs sont les appareils les plus répandus, car leur possibilité de transiter de l'énergie électrique à des tensions différentes en fait des éléments indispensables aussi bien pour les usages industriels que pour les usages domestiques.

Ils se présentent sous une très grande variété, depuis les très petits transformateurs de quelques dizaines de grammes utilisés en électronique jusqu'aux très gros transformateurs d'interconnexion entre réseaux ou de sortie de puissance des nouvelles centrales nucléaires dont les tensions couramment employées sont de 400 000 volts et les masses de quelques centaines de tonnes. Cette diversité provient des nombreux paramètres qui interviennent dans leur construction et peuvent influencer leur dimensionnement, par exemple la puissance, la fréquence, le nombre de phases, le nombre d'enroulements, les tensions, le système de refroidissement, les conditions de transport et d'installation...

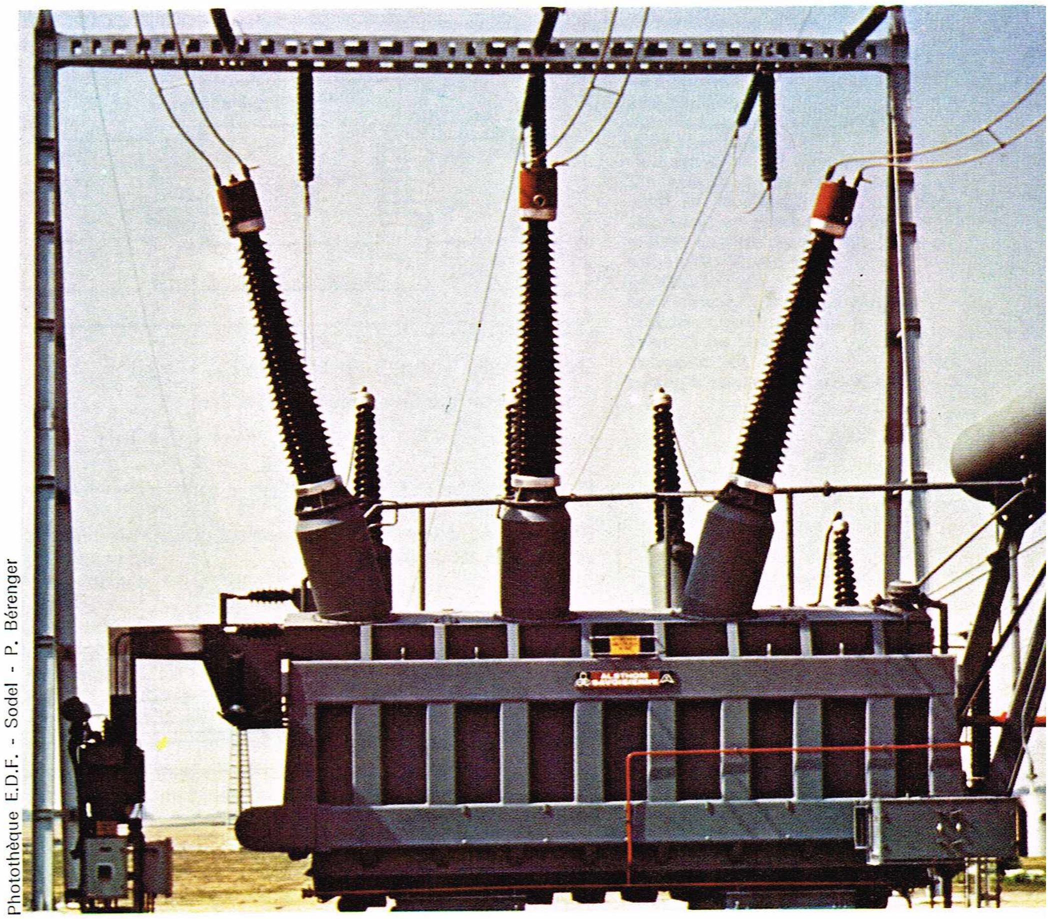

Photothèque E.D.F. - Sodel - P. Bérenger

▲ ***Autotransformateur de puissance 380 kV/225 kV du poste E. D. F. de Mezerolles.***

Principe

Les transformateurs à fréquence industrielle se composent d'un circuit magnétique et d'enroulements primaire et secondaires. L'enroulement primaire est celui qui reçoit la puissance, les enroulements secondaires la restituent aux circuits extérieurs.

Le principe de fonctionnement et la théorie élémentaire sont les suivants : soit un circuit magnétique et deux enroulements possédant chacun n_1 et n_2 spires (*fig.* 67).

L'enroulement primaire, alimenté par le générateur, est parcouru par une intensité I_1 qui produit le flux Φ variable. Ce flux traverse l'enroulement secondaire et donne naissance à une force électromotrice $\vec{E}_2$ de par la relation générale :

$$E_2 = n_2 \frac{d\vec{\Phi}}{dt}, \quad \text{or } \vec{\Phi} = \vec{B}S, \quad \text{donc } \vec{E}_2 = n_2 S \frac{d\vec{B}}{dt} = n_2 S \omega \vec{B}.$$

Réciproquement, nous aurions $\vec{E}_1 = n_1 S \omega \vec{B}$. Soit Φ le flux commun aux deux enroulements et $\mathcal{R}$ la réluctance du circuit magnétique, la loi d'Hopkinson nous donne $n_1\vec{I}_1 + n_2\vec{I}_2 = \mathcal{R}\vec{\Phi}$.

L'enroulement primaire se comporte comme un récepteur, la tension à ses bornes est donc donnée par l'équation : $\vec{U}_1 = -\vec{E}_1 + R_1\vec{I}_1$, l'enroulement secondaire se comporte comme un générateur dont la tension aux bornes est $\vec{U}_2 = \vec{E}_2 - R_2\vec{I}_2$.

Théorie élémentaire

Dans la théorie élémentaire, on considère que le circuit magnétique est sans fuite, que la réluctance du circuit magnétique est nulle, que les pertes fer sont nulles et que les résistances des enroulements sont également nulles.

fig. 67

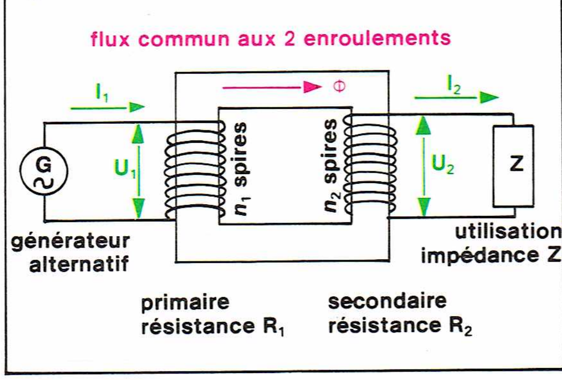

Richard Colin

◀ ***Figure 67 : représentation schématique d'un transformateur à fréquence industrielle comprenant un circuit magnétique et des enroulements primaire et secondaire.***

A partir de ces hypothèses, les relations principales sont :

Pour les tensions : $U_1 = -E_1, \quad U_2 = E_2, \quad \frac{E_1}{E_2} = \frac{n_1}{n_2},$

soit en valeur absolue : $\frac{U_2}{U_1} = \frac{n_2}{n_1} = m$, m est le rapport de transformation du transformateur, ce qui s'exprime : le rapport des tensions est sensiblement égal au rapport du nombre de spires.

Pour les intensités : $n_1 I_1 + n_2 I_2 = 0$

soit en valeur absolue : $\frac{I_2}{I_1} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{1}{m}$, ce qui s'exprime : le rapport des intensités est sensiblement égal au rapport inverse du nombre de spires.

Dans cette théorie élémentaire, nous voyons que les puissances absorbée et fournie sont égales : $U_1 I_1 = U_2 I_2$.

Transformateur réel monophasé

Dans l'étude du transformateur réel, il faut tenir compte des fuites du circuit magnétique, de la résistance des enroulements, des pertes fer et de la réluctance du circuit magnétique. Soit un transformateur monophasé ayant les caractéristiques suivantes : R_1 et R_2 les résistances des enroulements primaire et secondaire, $l_1\omega$ et $l_2\omega$ les réactances de fuites, U_1 et U_2 les tensions, I_1 et I_2 les intensités, n_1 et n_2 le nombre de spires, Φ_c le flux commun aux deux enroulements, Φ_{f1} et Φ_{f2} les flux de fuite, φ_1 et φ_2 les déphasages entre tensions et intensités primaires et secondaires (*fig.* 68).

Pour ramener les flux aux intensités, on ne se sert pas des coefficients d'auto-inductance et de mutuelle inductance, car ils sont variables avec la tension, la perméabilité du circuit magnétique variant suivant l'état magnétique. On prend des coefficients d'auto-inductance de fuite qui sont constants puisque les lignes de force se ferment dans l'air, dont la perméabilité $\mu_0 = 4\pi\, 10^{-7}$ est invariable.

Les relations fondamentales des transformateurs réels sont obtenues de la façon suivante :

$\Phi_p = \Phi_c + \Phi_{f1}$ et $\Phi_s = \Phi_c + \Phi_{f2}$, à Φ_{f1} et Φ_{f2} correspondent des inductances $l_1 = n_1 \frac{\Phi_{f1}}{I_1}$ et $l_2 = n_2 \frac{\Phi_{f2}}{I_2}$ bien définies.

▶▼ Figure 68 : schéma et caractéristiques d'un transformateur monophasé.
Figure 69 : représentation graphique montrant que, pour le transformateur schématisé sur la figure 68, les intensités primaire et secondaire ne sont pas en opposition de phase par la présence du courant $\vec{I}_m$ ($\vec{I}_m$ = courant magnétisant dont on peut obtenir la valeur en faisant fonctionner le transformateur à vide).

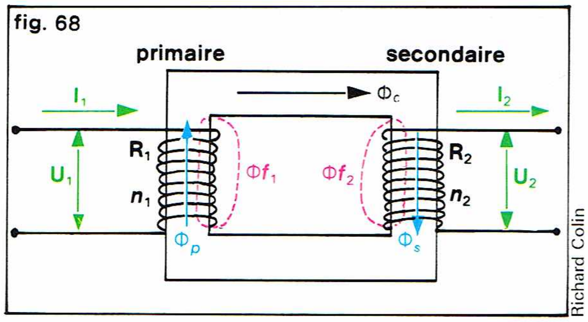

fig. 69

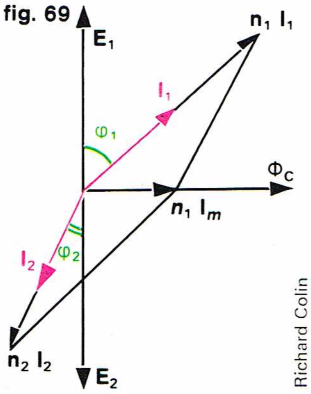

De $\Phi_p = \Phi_c + \Phi_{f1}$, on peut écrire $E_{p1} = E_1 + E_{f1}$.

L'équation primaire (récepteur) s'écrit :

$$U_1 = -E_{p1} + R_1I_1 = -E_1 - E_{f1} + R_1I_1$$

or, $E_{f1} = -l_1\frac{dI_1}{dt} = -l_1\omega I_1$, donc $\vec{U}_1 = -\vec{E}_1 + R_1\vec{I}_1 + \overrightarrow{l_1\omega I_1}$.

Si nous faisons le même raisonnement pour l'enroulement secondaire, nous obtenons :

$$\vec{U}_2 = \vec{E}_2 - R_2\vec{I}_2 - \overrightarrow{l_2\omega I_2}$$

En reprenant les équations de la théorie simplifiée, nous remarquons que $U_1 \# E_1 = n_1S\omega B$, équation qui montre que l'induction est constante si la tension primaire est constante ; or, cette induction est produite par les ampères-tours magnétisants qui, de ce fait, sont constants. Ils sont liés pour le primaire et le secondaire par la relation $n_1\vec{I}_1 + n_2\vec{I}_2 = n_1\vec{I}_m$ = Cte ; I_m est le courant magnétisant dont on peut facilement obtenir la valeur en faisant fonctionner le transformateur à vide. En effet, dans ce cas, $I_2 = 0$, donc $n_1\vec{I}_{10} = n_1\vec{I}_m$, soit $\vec{I}_{10} = \vec{I}_m$; l'intensité primaire à vide I_{10} mesure le courant magnétisant en négligeant le courant actif très faible dû aux pertes fer.

La représentation graphique montre que les intensités primaire et secondaire ne sont pas en opposition de phase de par la présence du courant I_m. Notons qu'en réalité φ_2 est très peu différent de φ_1 (*fig.* 69).

L'étude réelle et les cas de fonctionnement en charge sont exprimés clairement par l'étude suivante simple qui aboutit à l'équation de Kapp. Représentons graphiquement les équations $\vec{U}_1 = -\vec{E}_1 + R_1\vec{I}_1 + \overrightarrow{l_1\omega I_1}$ et

$$\vec{U}_2 = \vec{E}_2 - R_2\vec{I}_2 - \overrightarrow{l_2\omega I_2}$$

après avoir multiplié par m et tourné de 180° le diagramme relatif au primaire. Nous voyons (*fig.* 70) que $m\vec{U}_1 = \vec{U}_2 + \overrightarrow{CB} + \overrightarrow{BA}$ avec $CB = R_2I_2 + mR_1I_1$, or $I_1 = mI_2$, donc $CB = (R_2 + m^2R_1)\,I_2 = RI_2$, R est appelé *résistance totale du transformateur ramenée au secondaire.* De même, $BA = l_2\omega I_2 + ml_1\omega I_1 = (l_2\omega + m^2l_1\omega)\,I_2$

$BA = l\omega I_2$, $l\omega$ est appelé *réactance totale du transformateur ramenée au secondaire.*

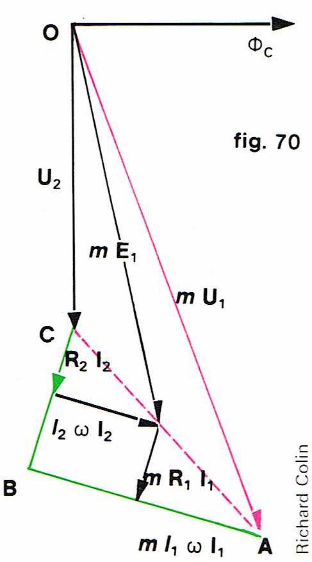

▲▼ Figures 70 et 71 : voir développement dans le texte.

fig. 71

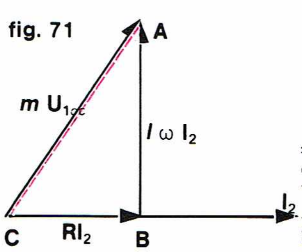

L'équation de Kapp est $m\vec{U}_1 = \vec{U}_2 + \overrightarrow{RI_2} + \overrightarrow{l\omega I_2}$ et ne comporte, dans le deuxième membre, que les valeurs secondaires. Le diagramme relatif à cette équation permet de prédéterminer la plupart des cas de fonctionnement. Son utilisation nécessite la détermination de R et $l\omega$. R est calculée à partir d'une mesure des résistances d'enroulement en courant continu après avoir fait un essai à vide pour connaître le rapport de transformation (s'il n'est pas indiqué par ailleurs) ; $l\omega$ est obtenu à partir d'un essai en court-circuitant l'enroulement secondaire et en appliquant au primaire une tension réduite dont la valeur permet d'avoir une intensité secondaire voisine de l'intensité nominale. L'équation de Kapp devient :

$$\overrightarrow{mU_{1cc}} = \overrightarrow{RI_2} + \overrightarrow{l\omega I_2}, \text{ d'où } l\omega I_2 = \sqrt{CA^2 - CB^2} \quad (\textit{fig. } 71).$$

Considérons quelques exemples de fonctionnement.

Premier exemple

Un réseau alimente un utilisateur qui possède un transformateur abaisseur entre le réseau et l'utilisation. Connaissant les caractéristiques du transformateur, comment doit varier la tension primaire en fonction de la charge : I_2 variable et φ_2 variable, si l'on veut garder constante la tension secondaire ? Répondons à cette question en trois temps.

* *Premier temps*

I_2 variable, φ_2 constant. La tension primaire est égale à $\frac{OA}{m}$. Nous voyons qu'il faut augmenter U_1 (OA' est supérieur à OA) quand la charge augmente pour garder U_2 constante (*fig.* 72).

* *Deuxième temps*

I_2 constant, φ_2 variable. Ici le point A correspond à une intensité donnée, donc la grandeur CA est invariable, mais il se déplace sur un cercle de centre C et de rayon CA. Nous voyons que, pour certaines valeurs de déphasage avant, la tension du réseau devra diminuer si l'on veut garder U_2 constant (*fig.* 73).

* *Troisième temps*

I_2 et φ_2 variables. La représentation est la superposition des deux figures ci-dessus. Il suffit de placer le point de fonctionnement A pour lire la valeur de la tension U_1 sur les arcs de cercle représentés en pointillé (*fig.* 74).

Deuxième exemple

Un réseau alimente un utilisateur sous une tension constante. Un transformateur abaisseur est monté entre le réseau et l'utilisation. Connaissant les caractéristiques du transformateur, comment varie la tension secondaire en fonction de la charge ? Comme pour l'exemple précédent, en premier lieu on considère I_2 variable et φ_2 constant et en deuxième lieu I_2 constant et φ_2 variable. Le résultat final est obtenu par superposition des deux figures (*fig.* 75 et 76).

Chute de tension

La chute de tension en charge est égale à $mU_1 - U_2$ (*fig.* 77). Le calcul exact est obtenu à partir des projections sur l'axe des x et l'axe des y des vecteurs $\overrightarrow{OC}$, $\overrightarrow{CB}$ et $\overrightarrow{BA}$. Projections sur Ox : $U_2 + RI_2\cos\varphi_2 + l\omega I_2\sin\varphi_2$.
Projections sur Oy : $-RI_2\sin\varphi_2 + l\omega I_2\cos\varphi_2$.

$$mU_1 = \sqrt{\overline{\text{projections sur Ox}}^2 + \overline{\text{projections sur Oy}}^2}$$

projections sur Ox, d'où :

$$mU_1 - U_2 = RI_2\cos\varphi_2 + l\omega I_2\sin\varphi_2$$

Un ordre de grandeur des valeurs des chutes de tension est donné par le tableau suivant en fonction du facteur de puissance.

Puissance du transformateur en kVA		5	100	500	1 000
Chute de tension en %	cos φ = 0,8	5	>4	4	4
	cos φ = 1	3	2	1,5	<1,5

La tension secondaire peut être ajustée en fonction des besoins, soit hors tension, soit en charge. Dans le premier cas, le transformateur est isolé du réseau et le réglage se fait à l'aide de prises supplémentaires raccordées à des bornes disposées sur le couvercle du transformateur. Le changement de prises peut s'effectuer aussi au moyen d'un commutateur.

Ce commutateur est manœuvré de l'extérieur de la cuve par une commande appropriée. Dans le second cas, le commutateur est manœuvré en charge et les prises peuvent être disposées sur les enroulements primaire ou secondaire, au milieu ou à l'extrémité des enroulements. La *figure* 78 donne un exemple simplifié de montage avec résistance ou inductance de passage d'une prise à une autre, qui évite l'interruption au passage d'une prise à l'autre et le court-circuit de la portion de bobinage située entre les prises 1 et 2 quand les contacts ont lieu simultanément sur 1 et 2.

Rendement et pertes

Le rendement est donné par le quotient de la puissance fournie P_2 et de la puissance absorbée P_1 : $\eta = \frac{P_2}{P_1}$, soit pour un transformateur monophasé

$$\eta = \frac{U_2I_2\cos\varphi_2}{U_2I_2\cos\varphi_2 + \text{pertes}}$$

Le tableau page 256 donne un ordre de grandeur du rendement en fonction de la puissance apparente :

fig. 72

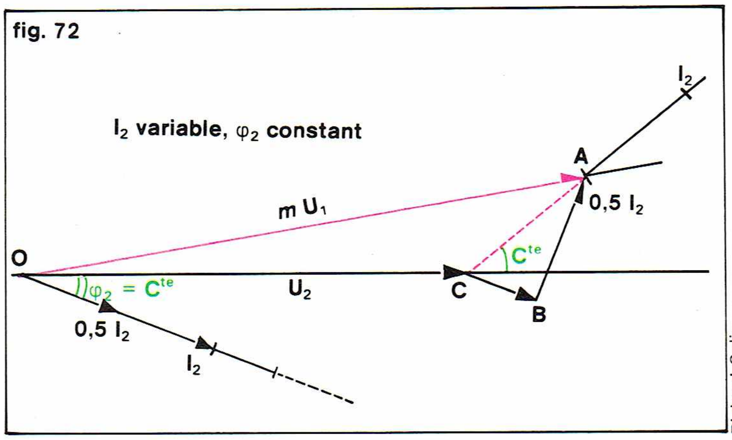

fig. 73

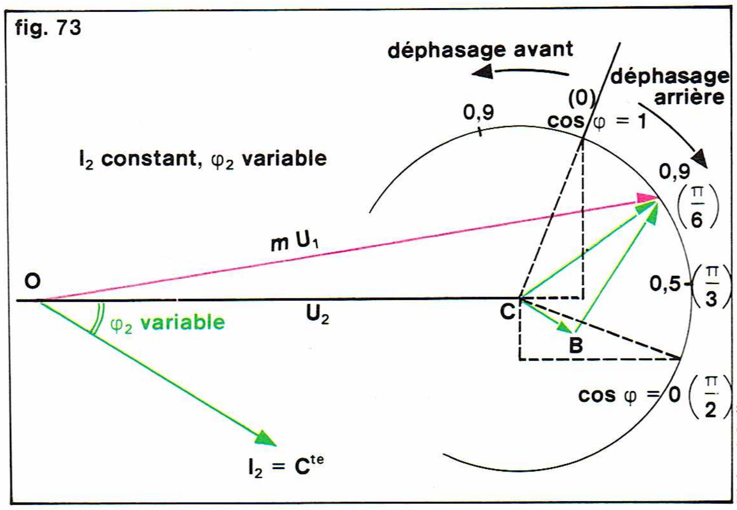

fig. 74

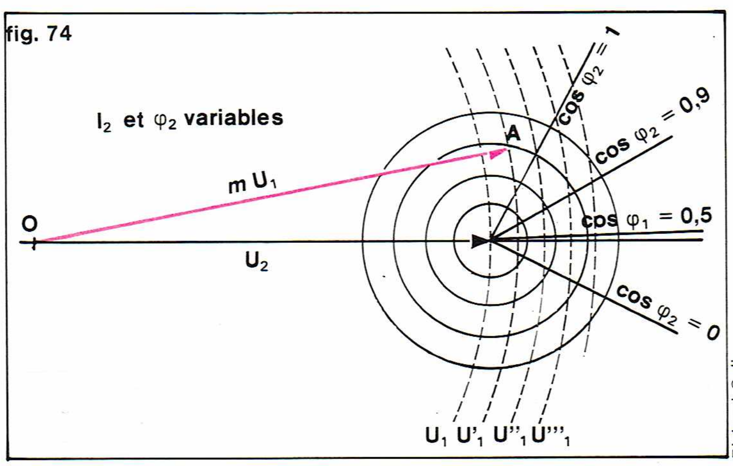

fig. 77

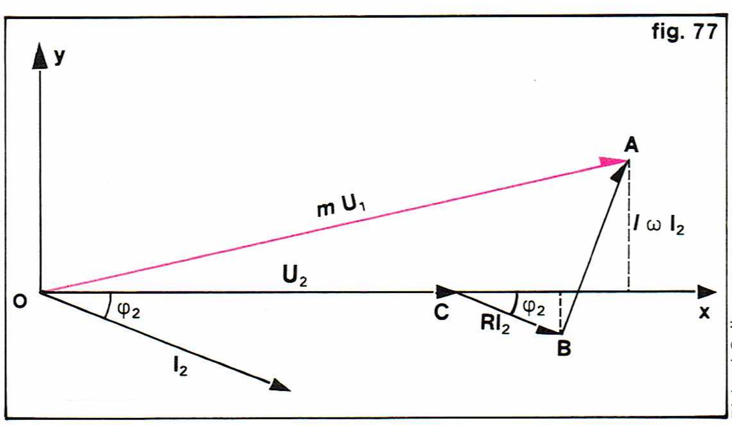

fig. 76

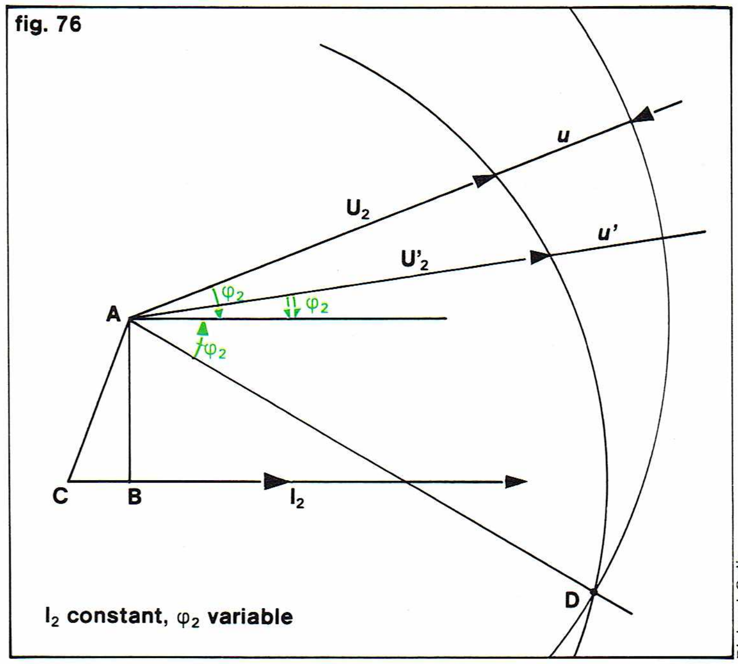

fig. 75

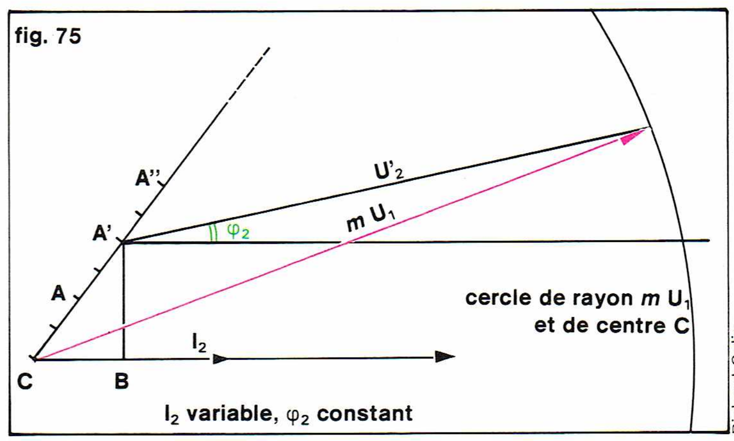

◀▲ Figures 72, 73, 74 : cas d'un transformateur abaisseur entre réseau et utilisation ; variations de la tension primaire U_1 en fonction de la charge (I_2, φ_2) pour garder constante la tension secondaire U_2.
Figures 75, 76 : cas d'un transformateur abaisseur monté entre un réseau alimentant un utilisateur sous une tension constante et l'utilisation. Variation de la tension secondaire U_2 en fonction de la charge (I_2, φ_2).
▼ Figure 77 : transformateur monophasé : chute de tension en charge (égale à $mU_1 - U_2$).
Figure 78 : voir texte.

fig. 78

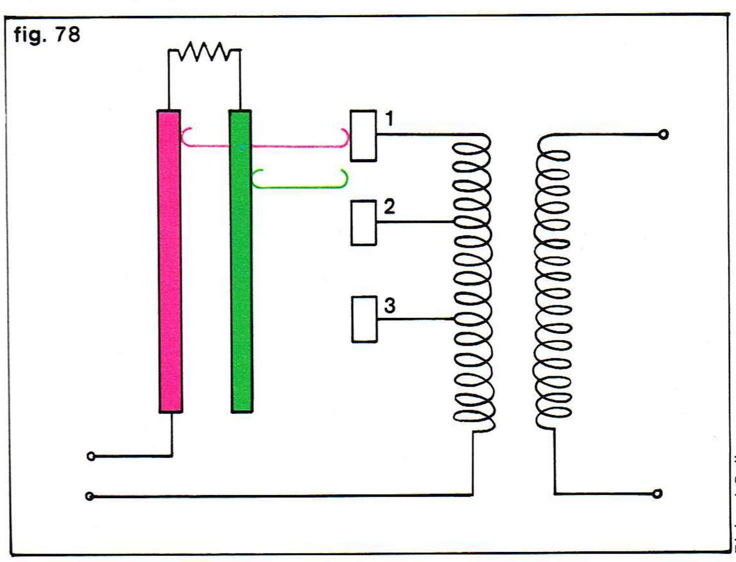

▶ *Figure 79 ; transformateur monophasé : représentation graphique de la variation du rendement en fonction de la charge ; pour les unités de petite et de moyenne puissance, le rendement maximal se situe vers les 2/3 de la puissance nominale. Figures 80 et 81 : représentation schématique du couplage de transformation en parallèle et diagramme de Kapp correspondant.*

fig. 79

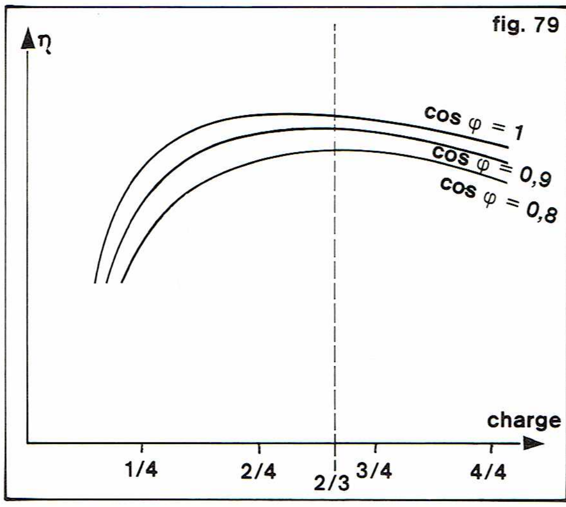

fig. 80

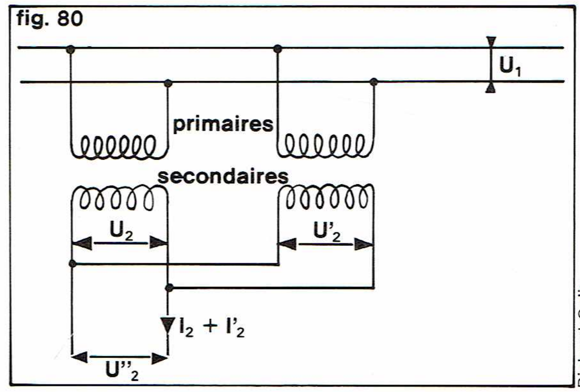

fig. 81

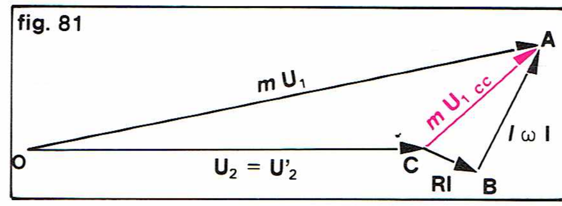

Puissance nominale en kVA	20	100	500	1 000
Rendement maximal à cos $\varphi = 1$	0,96	0,975	0,983	0,985

Pour un même appareil, le rendement n'est pas constant : il varie notamment avec l'intensité débitée et le cos φ. Pour les unités de petite et de moyenne puissance, dont la construction n'a pas été motivée par un cahier de charge bien précis, le rendement maximal se situe vers les deux tiers de la puissance nominale (*fig.* 79). Pour les autres unités, le constructeur cherche toujours le point de rendement maximal pour l'utilisation pour laquelle l'appareil a été spécialement construit. Les pertes ont pour origine : les pertes fer, les pertes cuivre, les pertes dues à l'utilisation des appareils de refroidissement et de contrôle-commande. Les pertes fer du circuit magnétique sont de deux sortes : les pertes par courant de Foucault et les pertes par hystérésis. Les pertes par courant de Foucault ont pour origine les variations du flux qui donnent naissance à des courants à l'intérieur des tôles et produisent des échauffements par effet Joule. C'est pour diminuer ces pertes que les circuits magnétiques sont constitués par un empilage de tôles de faible épaisseur isolées entre elles. Les pertes par hystérésis dépendent de la qualité des tôles. L'énergie calorifique perdue est proportionnelle à la surface du cycle ; c'est pourquoi on cherche des qualités d'acier ayant des surfaces de cycle minimales. D'autre part, la surface étant fonction de la saturation, il y a intérêt à fonctionner à faible induction, c'est-à-dire à augmenter la section de passage du flux en augmentant la section du circuit magnétique. Une étude économique est à faire pour arriver à un compromis rentable.

Les pertes cuivre par effet Joule proviennent de la circulation des courants dans les enroulements primaire et secondaires et ont pour valeur $P_J = R_1I_1^2 + R_2I_2^2$.

La mesure des pertes fer est obtenue par un essai à vide. L'enroulement primaire est alimenté sous la tension nominale U_1, le secondaire du transformateur est à circuit ouvert, l'intensité I_2 est nulle. L'enroulement primaire est parcouru par le courant magnétisant $I_m = I_{10}$. Un wattmètre mesure les pertes totales. Les pertes fer sont alors égales à la différence entre la lecture du wattmètre (W) et les pertes Joule de l'enroulement $P_f = W - R_1I^2_{10}$.

Suivant la puissance des transformateurs, on utilise pour leur refroidissement des ventilateurs, des pompes de circulation du fluide de refroidissement ; leur consommation, ainsi que celle des organes de contrôle-commande rattachés à l'appareil, doit être prise en compte.

Couplages en série et en parallèle

Pour le couplage en série, il suffit de s'assurer que l'isolement par rapport à la masse est suffisant. Si par erreur les secondaires étaient montés en opposition, leurs tensions se retrancheraient au lieu de s'ajouter.

Pour le couplage en parallèle (*fig.* 80), il est indispensable de satisfaire à trois conditions : d'une part, en fonctionnement à vide, il ne doit exister aucun courant de circulation entre les deux secondaires $I_c = \dfrac{\overline{U} - \overline{U'}}{\overline{Z} + \overline{Z'}}$; pour cela, il faut que les tensions secondaires soient égales, ce qui s'obtient par l'égalité des rapports de transformation à vide. D'autre part, il faut l'égalité des tensions de court-circuit pour le courant nominal de chacun des transformateurs. Écrivons l'équation de Kapp, pour le premier transformateur :

$$m\vec{U}_1 = \vec{U}_2 + \vec{RI}_2 + l\vec{\omega I}_2 = \vec{U}_2 + m\vec{U}_{1cc} ;$$

pour le second transformateur (*fig.* 81) :

$m\vec{U}_1 = \vec{U}_2 + \vec{R'I'}_2 + l'\vec{\omega I'}_2 = \vec{U'}_2 + m\vec{U'}_{1cc}$, nous voyons que pour avoir $\vec{U}_2 = \vec{U'}_2$ il faut que $mU_{1cc} = mU'_{1cc}$. Et enfin, pour qu'il n'y ait pas de circulation de courant, les deux secondaires doivent être en opposition.

Transformateurs triphasés

La transformation d'un système de courants alternatifs triphasés en un autre système de courants alternatifs triphasés de même fréquence peut être obtenue en connectant entre eux au primaire et au secondaire trois transformateurs monophasés. Ce montage est notamment utilisé pour les transformateurs de très grosses puissances pour lesquels se posent les contraintes de gabarits des ouvrages d'art au cours de leur transport. Généralement, on utilise un transformateur qui ne comprend qu'un circuit magnétique. Les enroulements sont reliés entre eux de façons

▼ *Figure 82 : trois modes de couplage utilisés pour relier les trois enroulements d'un transformateur triphasé et la représentation vectorielle correspondante ; 1, couplage étoile ; 2, couplage triangle ; 3, couplage zigzag.*

fig. 82

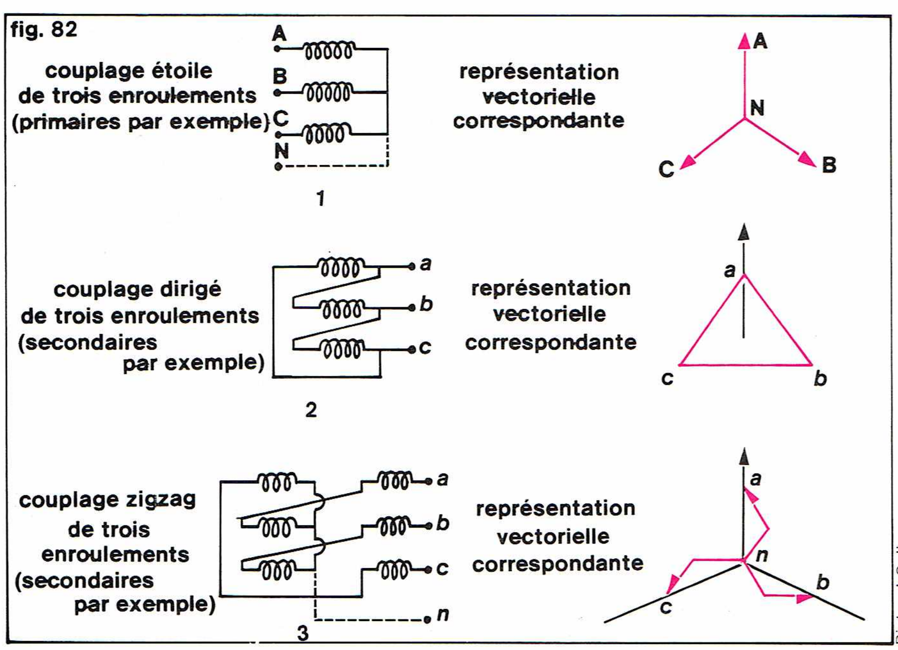

diverses suivant les modes de couplage : étoile ou triangle ou zigzag (*fig.* 82).

En régime équilibré, les couplages peuvent être quelconques ; par contre, en régime déséquilibré, certains couplages comme étoile-étoile sont à proscrire ; d'autres, triangle-étoile et étoile-zigzag, par exemple, sont conseillés. En effet, considérons le montage étoile-étoile ; branchons une impédance Z au secondaire entre une phase et le neutre. Le courant secondaire circule dans l'enroulement de la phase ***a*** et se referme dans Z ; aucun courant ne circule alors dans les autres enroulements secondaires (*fig.* 83). Ce courant I_2 crée un appel de courant I_1 dans l'enroulement primaire A qui doit se refermer obligatoirement par les deux autres phases B et C. Les ampères-tours primaires ne sont équilibrés par aucun ampère-tour secondaire ; le circuit magnétique se sature et donne naissance à des pertes fer importantes qui entraînent un échauffement exagéré.

Maintenant, considérons le montage triangle-étoile (*fig.* 84). Comme dans le cas précédent, branchons une impédance entre une phase du secondaire et le neutre. Le courant secondaire I_2 circule dans l'enroulement de la phase ***a*** et se referme dans Z, aucun courant ne circule dans les enroulements des phases ***b*** et ***c***. Au primaire, le courant I_1 appelé dans la phase A se referme directement en B sans traverser les autres enroulements. Les ampères-tours primaires et secondaires sont équilibrés alors qu'il n'y a qu'une seule phase qui débite, et le transformateur est en régime déséquilibré.

Pour les transformateurs triphasés, l'équation de Kapp peut être utilisée, à condition, dans certains cas, d'y adjoindre des coefficients. Si l'on connaît les couplages primaires et secondaires, il est préférable, pour éviter des erreurs, d'employer le diagramme de Kapp pour une colonne comprenant un enroulement primaire et un enroulement secondaire, qui constitue ainsi un transformateur monophasé. Il ne faut pas oublier de ramener les résultats *de colonne* en résultat *de ligne* vu des bornes qui intéressent l'utilisateur. Si le couplage est en triangle, la tension aux extrémités d'une colonne est la même que celle entre bornes ; si le couplage est en étoile, il faut multiplier les résultats obtenus par $\sqrt{3}$ pour obtenir les tensions entre bornes. Si l'on ne connaît pas les couplages primaires et secondaires, il faut faire les prédéterminations en utilisant les grandeurs vues des bornes (*fig.* 85). Si R'_1 et R'_2 sont les résistances des enroulements mesurées entre bornes sans ouvrir l'appareil, la chute ohmique sera donnée par la relation :

$$u = \frac{\sqrt{3}}{2} R' I_2 \cos \varphi_2 + l' \omega I_2 \sin \varphi_2.$$

R' et $l'\omega$ sont les *résistance totale et réactance totale du transformateur ramenées au secondaire du transformateur.* Le diagramme de Kapp correspondant est indiqué sur la *figure* 86.

Rendement et pertes

Le rendement d'un transformateur triphasé est

$$\eta = \frac{U_2 I_2 \sqrt{3} \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \sqrt{3} \cos \varphi_2 + \text{pertes}}.$$

Les rendements sont très bons. Par exemple, un transformateur de 660 MVA peut avoir un rendement de 0,996 4. Soulignons que, malgré cette valeur élevée, la puissance à évacuer provenant des pertes est, pour un cos φ = 0,9, égale à $660 \times 0{,}9 \left(\frac{1 - 0{,}9964}{0{,}9964}\right) = 2{,}16$ MW. Comme pour les transformateurs monophasés, le rendement varie avec la charge et le facteur de puissance suivant des courbes de formes identiques à celles déjà dessinées.

Couplage en parallèle

Les transformateurs triphasés ne peuvent être couplés en parallèle que s'ils satisfont aux conditions qui sont : égalité des rapports de transformation à vide, égalité des tensions de court-circuit pour le courant nominal de chacun des transformateurs, opposition des bornes correspondantes. Cette dernière condition peut présenter certaines difficultés. En effet, suivant les couplages utilisés, les déphasages sont différents entre primaire et secondaire. Utilisons les désignations symboliques normalisées des modes de connexion en respectant la forme des caractères employés : majuscules pour l'enroulement dont la tension d'épreuve est la plus élevée, minuscules pour un enroulement à plus basse tension :

Triphasé étoile	Y	*y*
Triphasé étoile à neutre sorti	Y*n*	*yn*
Triphasé triangle	D	*d*
Triphasé zigzag à neutre sorti	Z*n*	*zn*

En monophasé, suivant la position des bornes secondaires, les tensions primaires et secondaires peuvent être en phase ou en opposition. Il en est de même en triphasé ; la représentation vectorielle d'un couplage Y-*d* par exemple montre que, suivant les sens relatifs de bobinage des enroulements, les modes de connexion des phases, les liaisons aux bornes, les tensions secondaires tournent par rapport aux tensions primaires (*fig.* 87). Cette rotation est exprimée par un indice horaire associé aux deux lettres du couplage. Cet indice indique les déphasages des forces électromotrices entre les bornes des enroulements par rapport aux forces électromotrices entre les bornes homo-

fig. 83

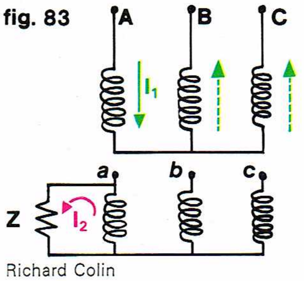

fig. 84

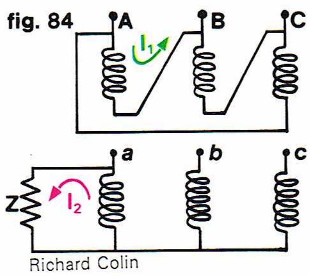

▲ ***Figures 83 et 84 : déséquilibre des ampères-tours dans le cas de fonction primaire en régime déséquilibré d'un transformateur triphasé ; fig. 83 : cas du couplage étoile-étoile ; fig. 84 : cas du couplage triangle-étoile.***

fig. 85

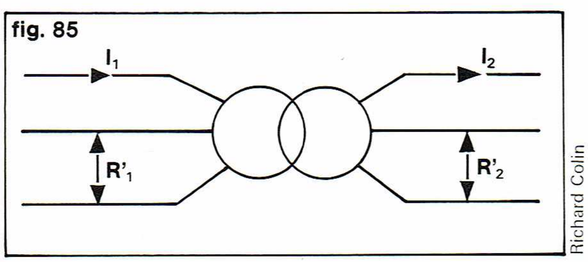

fig. 86

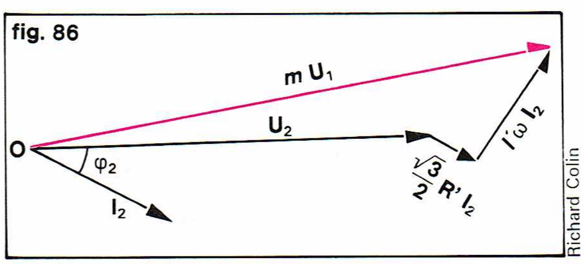

◀ ***Figure 85 : grandeur vue des bornes pour prédéterminer les caractéristiques quand on ne connaît pas les couplages primaires et secondaires. Figure 86 : diagramme de Kapp correspondant à la figure 85.***

fig. 87

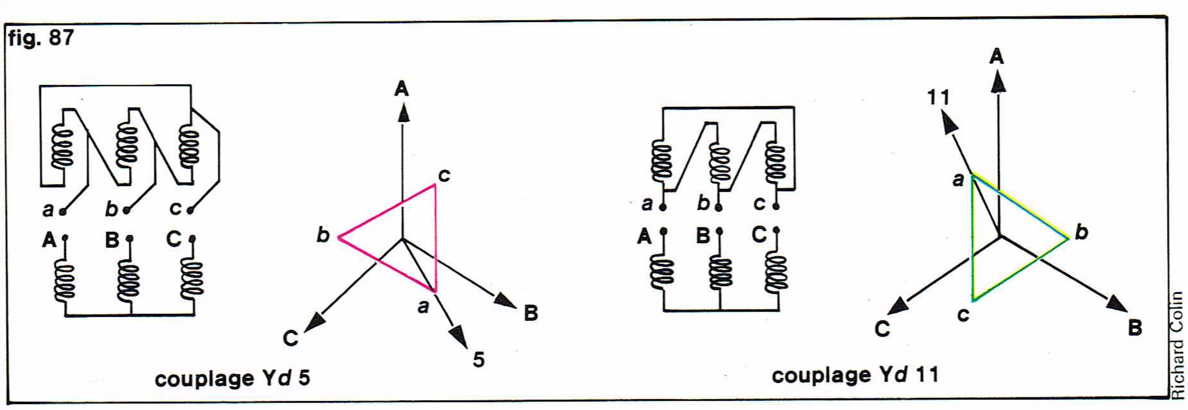

◀ ***Figure 87 : représentation vectorielle pour 2 types de couplage (Yd_5 et Yd_{11}) montrant la rotation des tensions secondaires par rapport aux tensions primaires.***

Photo C.E.M.

▲ *Transformateur en cours de remontage après remise en état par les ateliers Repellec au Havre (10 MVA-90/5,8 kV).*

logues des enroulements ayant la plus haute tension et étant pris comme référence. Au centre d'un cadran, on place le point neutre réel ou fictif représentant les forces électromotrices étoilées des bornes de cet enroulement. Le vecteur correspondant à une borne A est placé à midi, les autres vecteurs des bornes B, C... suivent les chiffres du cadran. On opère de même pour le ou les enroulements à plus basse tension en faisant coïncider les points neutres. L'heure indiquée par le vecteur ***a*** donne l'indice horaire de cet enroulement.

Les transformateurs ayant le même indice horaire peuvent être branchés et fonctionner en parallèle. Si les indices horaires sont différents, il faut distinguer quatre groupes de couplage : le groupe I d'indices horaires 0,4 et 8, le groupe II d'indices horaires 6,10 et 2, le groupe III d'indices horaires 1 et 5 et le groupe IV d'indices horaires 7 et 11.

En changeant l'ordre de succession des phases, il est possible de brancher en parallèle deux transformateurs des groupes III et IV. Par contre, il n'est pas possible de faire les combinaisons du groupe I avec II ou III ou IV, du groupe II avec I ou III ou IV, du groupe III avec I ou II, du groupe IV avec I ou II.

Si le transformateur a un enroulement tertiaire, la lettre du couplage est entre parenthèses et les lettres se succèdent dans le sens décroissant des tensions, par exemple Y*n* (*d*11) y_0.

Les circuits magnétiques

Les circuits magnétiques se composent de *noyaux* qui sont les parties sur lesquelles on place les enroulements, et de *culasses* qui assurent les liaisons entre les noyaux. Ces ensembles, parcourus par un flux variable, nécessitent pour leur construction des tôles magnétiques minces, isolées les unes des autres pour réduire les pertes fer par hystérésis et courants de Foucault.

Les circuits magnétiques se divisent en deux grandes classes : les circuits magnétiques cuirassés et les circuits magnétiques à colonnes. Dans les premiers, les culasses sont disposées autour des enroulements à la manière d'une cuirasse. Dans les seconds, les noyaux ont la forme de colonnes et les culasses sont généralement courtes.

Les formes les plus caractéristiques des circuits cuirassés monophasés sont :

— Le circuit idéal où la culasse enveloppe complètement les enroulements.

— Le circuit « Berri », qui se compose d'un certain nombre de culasses autour d'un noyau central sur lequel sont placés les enroulements. Il est peu employé, car sa fabrication est compliquée.

— Le circuit à quatre culasses.

— Le circuit à deux culasses du type vertical en tôles roulées.

— Le circuit à deux culasses du type horizontal en tôle découpée.

— Le circuit à deux culasses du type vertical en tôle découpée.

Les formes les plus caractéristiques des circuits à colonnes monophasés sont :

— Le circuit à deux colonnes dont une seule est bobinée ; il peut être en tôle découpée ou roulée. D'une manière générale, il est employé pour des transformateurs de faible puissance et tension élevée.

— Le circuit à deux colonnes bobinées.

— Le circuit à quatre colonnes dont deux bobinées.

Sauf cas très particuliers, les circuits magnétiques sont fermés. A la fabrication, l'introduction des enroulements sur les noyaux nécessite l'ouverture par enlèvement d'une culasse. L'espace entre les tôles culasses-noyaux s'appelle joint.

Le circuit cuirassé triphasé est né de la juxtaposition de trois circuits monophasés ; il est employé pour les fortes puissances.

Parmi les circuits triphasés à colonnes, on peut noter :

— Le circuit triphasé symétrique où les trois noyaux sont placés au sommet d'un triangle équilatéral ; la culasse qui les réunit est circulaire.

— Le circuit triphasé à trois colonnes dans un même plan ; il est très employé, car il est très simple, mais les trois phases ont des réluctances différentes qui entraînent une légère dissymétrie dans le fonctionnement à vide.

— Le circuit triphasé à cinq colonnes dans le même plan dont trois seulement sont bobinées. Il permet de réduire la hauteur de la culasse, ce qui le rend plus facilement transportable dans le cas des grandes unités.

— Le circuit triphasé à cadres.

Quand les puissances sont très importantes, pour faciliter le transport, on utilise trois unités monophasées. Certaines utilisations particulières nécessitent des formes toriques, comme les transformateurs de mesure, pour lesquels les fuites doivent être les plus faibles possibles.

Les enroulements

Ils sont constitués de métaux bons conducteurs employés sous forme de fils cylindriques, barres rectangulaires ou feuilles. Ils sont isolés et enroulés sur des formes qui constituent des bobines. Le cuivre et l'aluminium sont les principaux métaux employés. L'aluminium a une résistivité supérieure de 63 % à celle du cuivre, qui entraîne des pertes par effet Joule proportionnelles. Sa résistance mécanique est plus petite, mais cela ne crée pas de difficulté d'emploi, hormis les jonctions pour lesquelles il faut prendre quelques précautions. On ne l'utilise pas seulement comme produit de remplacement, mais par exemple pour la construction de transformateurs de locomotives dont le poids doit être aussi faible que possible ; à conductances égales, un bobinage d'aluminium aura la moitié du poids d'un bobinage de cuivre. La feuille d'aluminium est utilisée dans certains transformateurs de distribution basse tension.

Les enroulements peuvent être *concentriques* ou *alternés*. Ils sont concentriques quand ils sont emboîtés l'un dans l'autre ; ils peuvent être *concentriques simples* ou *biconcentriques*. Ils sont alternés quand chacun des enroulements est subdivisé en tronçons de cylindre placés alternativement au montage l'un sur l'autre : BT, HT, BT, etc. Dans cette disposition, les tronçons extrêmes sont généralement en basse tension pour réduire l'isolement par rapport aux culasses. Les enroulements concentriques sont très utilisés, car ils sont sûrs et simples.

Pour les petites puissances, les enroulements basse tension sont cylindriques et constitués de fils ronds d'assez

▼ *Partie active du premier transformateur élévateur (20/235 kV) de puissance 760 000 kVA de la centrale E. D. F. de Cordemais ; ce transformateur a été mis sous tension le 15 avril 1976 sur le site.*

Photo C.E.M.

gros diamètre ou de méplats. Pour les fortes puissances, on subdivise le conducteur en plusieurs fils branchés en parallèle et placés côte à côte pour diminuer les courants de Foucault. Pour qu'ils aient des longueurs égales et embrassent le même flux, on les transpose de manière que chaque couche présente la même résistance et la même réactance de fuites. Pour les faibles puissances, les enroulements haute tension sont constitués de fils ronds de faible diamètre.

Généralement, l'enroulement est subdivisé en plusieurs bobines élémentaires branchées en série pour diminuer la tension entre couches. Quand la puissance augmente, le fil est remplacé par un méplat et, à la limite, l'enroulement se compose d'une pile de bobines à une spire par couche. Pour uniformiser la répartition de surtensions à front raide sans changer la capacité par rapport à la masse, on réalise des enroulements en couche qui sont des bobines à une couche emboîtées les unes dans les autres. Les enroulements alternés ,d'un emploi plus réduit, sont constitués par de grandes bobines plates du même type que celles à une spire par couche. Les bobines basse tension ont le même aspect que les précédentes.

Refroidissement

La propagation de la chaleur au sein des organes actifs depuis son lieu de production jusqu'au milieu ambiant se fait par conduction à l'intérieur de ces organes, par convection naturelle ou forcée dans les canaux de refroidissement et par rayonnement et convection naturelle ou forcée à la surface des parties extérieures.

Les différentes pertes donnent naissance à un échauffement qui, par définition, est la différence entre la température de la partie considérée et l'air de refroidissement ou le fluide de refroidissement à son entrée dans le dispositif permettant un échange de chaleur avec l'extérieur. Le tableau suivant donne les valeurs de l'échauffement en degrés Celsius en fonction des classes de température en fonctionnement nominal permanent :

Classe de température	Échauffement
A	60
E	75
B	80
F	100
H	125
C	⩾ 150

Les modes de refroidissement les plus utilisés sont :

— Transformateur à sec à refroidissement naturel pour des puissances de l'ordre de quelques centaines de kVA et des tensions inférieures à 20 kV; c'est un refroidissement naturel à l'air libre.

— Transformateur à sec à circulation forcée d'air pour des puissances de quelques milliers de kVA.

— Transformateurs immergés à refroidissement par circulation naturelle d'air pour des appareils placés dans des locaux humides, poussiéreux ou à ambiance corrosive; le circuit magnétique et les enroulements sont immergés dans une huile minérale qui favorise les échanges thermiques par convection et l'isolement; suivant les surfaces qu'il est nécessaire d'avoir en contact avec l'air pour évacuer les pertes, on utilise des cuves à parois planes, des cuves à ondulations, des cuves à tubes, des cuves à radiateurs accolés, des cuves à batteries de radiateurs indépendantes.

— Transformateurs immergés à circulation forcée de l'air de refroidissement; les ventilateurs de soufflage ont un fonctionnement intermittent et n'entrent en service que si la température dépasse la valeur préréglée.

— Transformateurs immergés à circulation forcée du liquide d'immersion et circulation naturelle de l'air de refroidissement.

— Transformateurs immergés à circulation forcée du liquide d'immersion et circulation forcée de l'air de refroidissement.

— Transformateurs à circulation naturelle du liquide d'immersion et à circulation forcée d'eau dans un serpentin placé dans la cuve.

— Transformateurs à circulation forcée du fluide d'immersion dans un hydroréfrigérant et circulation forcée de l'eau de refroidissement.

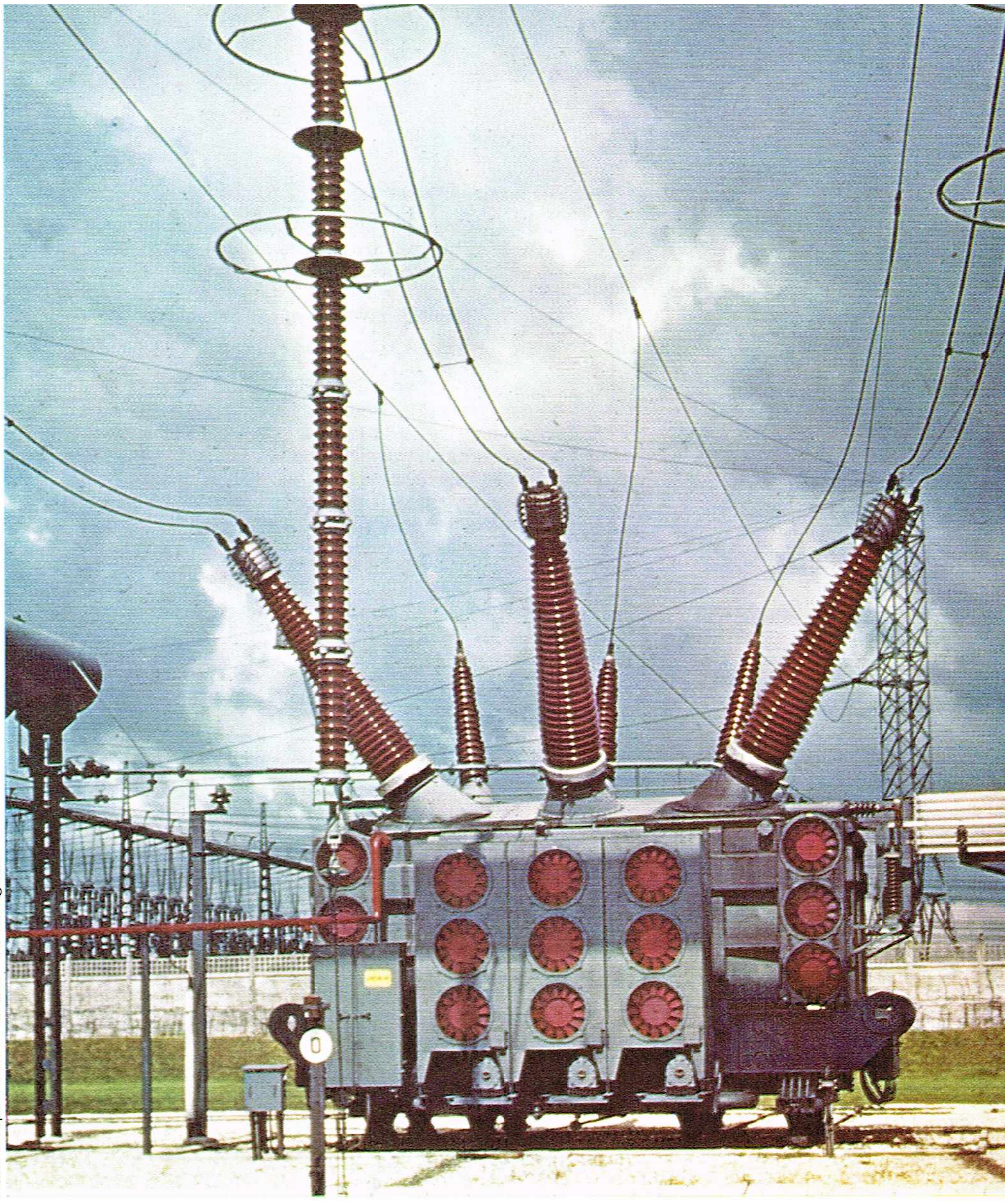

Photothèque E.D.F. - Sodel - H. Gloaguen

Les symboles littéraux, normalisés suivant les modes de refroidissement et la nature de la circulation, sont indiqués ci-dessous :

Fluide de refroidissement	Symbole
Air	A
Gaz	G
Askarel	L
Huile minérale	O
Isolant solide	S
Eau	W

Nature de la circulation	Symbole
Forcée et dirigée	D
Forcée	F
Naturelle	N

▲ Un transformateur immergé dans l'huile. On remarque les ventilateurs de circulation forcée de l'air de refroidissement (cercles rouges).

▼ Détail des ventilateurs de circulation forcée de l'air de refroidissement du transformateur ci-dessus. Au second plan, le conservateur d'huile et la tuyauterie du reniflard-désamorceur.

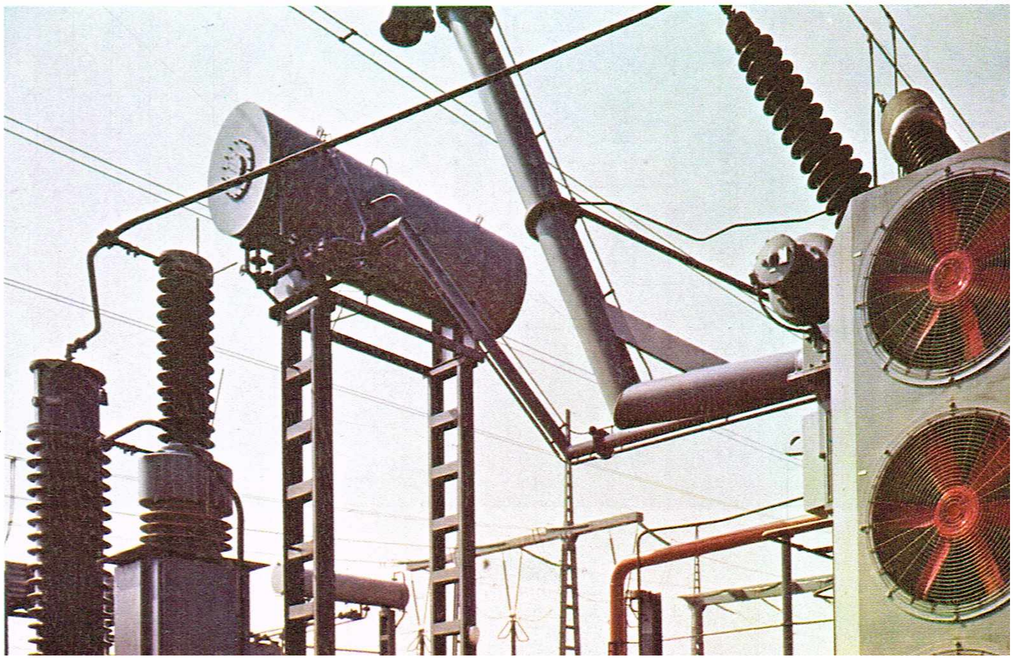

Photothèque E.D.F. - Sodel - P. Bérenger

fig. 88

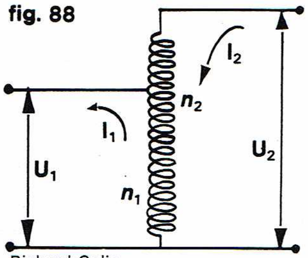

Richard Colin

▲ *Figure 88 : représentation schématique d'un autotransformateur comprenant un circuit magnétique et un seul enroulement.*

Autotransformateur

Un autotransformateur se compose d'un circuit magnétique et d'un seul enroulement dont une partie constitue le second enroulement d'un transformateur ordinaire (*fig.* 88). Les formules du transformateur s'appliquent. Dans la théorie simplifiée, nous retrouvons

$$m = \frac{U_2}{U_1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

en négligeant le courant magnétisant. Le courant qui traverse la partie commune est égal à la différence entre les courants primaire et secondaire. Il en résulte des conséquences intéressantes quand on fait la comparaison avec un transformateur ordinaire, notamment sur le poids de cuivre des enroulements et les pertes Joule. Le poids du cuivre est proportionnel aux intensités et au nombre de spires

$$P_{transfo} = \alpha\,(n_1 I_1 + n_2 I_2) \# 2\,\alpha n_2 I_2$$

$$P_{autotransfo} = \alpha\,[n_1\,(I_1 - I_2) + (n_2 - n_1)\,I_1] = 2\,\alpha\,(n_2 - n_1)\,I_2$$

d'où $$\frac{P_{autotransfo}}{P_{transfo}} = \frac{n_2 - n_1}{n_2} = 1 - \frac{n_1}{n_2} = 1 - \frac{1}{m}$$

Le même résultat est obtenu en calculant les pertes Joule si on considère que la résistance d'un enroulement est proportionnelle au nombre de spires et inversement proportionnelle à l'intensité qui le traverse. On conclut que le rendement est d'autant plus élevé que le rapport de transformation est près de l'unité. Si une coupure se produit dans la partie commune de l'enroulement, le courant qui la traverse est interrompu, la chute de tension interne est supprimée et la haute tension est reportée sur la basse tension, car il y a continuité du circuit électrique entre le primaire et le secondaire. De même, en cas de décharge atmosphérique, l'onde risque de se propager sur toute la ligne. Les transformateurs de grande puissance des postes d'interconnexion 380 kV/220 kV sont généralement des autotransformateurs.

Transformateurs de phases

La transformation d'un système triphasé en un système diphasé ou réciproquement s'effectue soit avec un transformateur Scott, soit avec un transformateur Leblanc.

Transformateur Scott

On utilise le plus souvent deux transformateurs monophasés. Le principe est le suivant si on raisonne dans le sens diphasé-triphasé : les deux enroulements primaires sont alimentés par un système diphasé représenté par deux vecteurs déphasés de $\frac{\pi}{2}$ (*fig.* 89). Pour obtenir un système triphasé, il faut créer un système de vecteurs formant un triangle équilatéral *abc*; le vecteur $\overrightarrow{ab}$ peut être obtenu avec le secondaire du premier transformateur. Pour avoir le point *c*, on prend le milieu M de *ab* à partir duquel on élève une verticale de longueur $\frac{ab\sqrt{3}}{2}$. Si l'enroulement *ab* comporte *n* spires, on relie la spire centrale au secondaire du deuxième transformateur qui a $\frac{n\sqrt{3}}{2}$ spires. Le neutre *n* se trouve aux 2/3 de *c*M.

Ce montage ne fonctionne bien qu'en régime équilibré.

Transformateur Leblanc

Il utilise un circuit magnétique triphasé. Le principe est le suivant si on raisonne dans le sens triphasé-diphasé : il faut obtenir deux vecteurs déphasés de $\frac{\pi}{2}$ à partir de trois vecteurs déphasés de $\frac{2\pi}{3}$ (*fig.* 90). Comme pour le transformateur Scott, ce résultat est obtenu en associant des vecteurs de grandeurs différentes pris sur les divers enroulements pour avoir les déphasages voulus. Le vecteur vertical, qui correspond à une phase du système diphasé, est la somme vectorielle de deux vecteurs pris respectivement sur les phases *b* et *c*. Le vecteur horizontal, qui correspond à la deuxième phase du système diphasé, est la somme vectorielle de trois vecteurs pris respectivement sur les phases *a*, *b* et *c*. La figure indique le nombre de spires de chaque enroulement diphasé. Ce montage ne fonctionne bien qu'en régime équilibré.

On remarque que le montage Leblanc nécessite plus de cuivre et moins de fer que le montage Scott. Ce dernier est de préférence utilisé quand le réseau diphasé a une forte intensité ou une forte tension.

La transformation d'un système triphasé en un système hexaphasé et réciproquement se fait aisément à l'aide d'un transformateur triphasé en réunissant les milieux des enroulements secondaires. Par rapport à ce point, les extrémités d'un même enroulement sont en opposition de phase. On a alors six vecteurs étoilés déphasés de $\pi/3$ les uns par rapport aux autres. Ce montage est fréquemment utilisé pour l'alimentation des redresseurs.

Transformateurs de mesures

Ils sont utilisés dans les installations à forte intensité et à haute tension pour alimenter les appareils de mesure et de protection en abaissant l'intensité et la tension à des valeurs telles que leur utilisation n'entraîne pas de précautions spéciales pour le personnel et pour la fabrication des appareils. Pour que les mesures soient exactes, il faudrait que le rapport des valeurs efficaces soit égal au rapport du nombre de spires (ou l'inverse) et que les tensions primaires et secondaires, ou les courants, soient en opposition de phase.

Transformateur de tension

Il sert notamment à mesurer une tension alternative élevée, à alimenter un relais de tension ou à alimenter le circuit fil fin d'un wattmètre. Il devrait théoriquement satisfaire aux conditions rappelées ci-dessus relatives au

▼ *A gauche, figure 90 : représentation schématique d'un transformateur de phases de type Leblanc. A droite, figure 89 : représentation schématique d'un transformateur de phases de type Scott.*

fig. 90

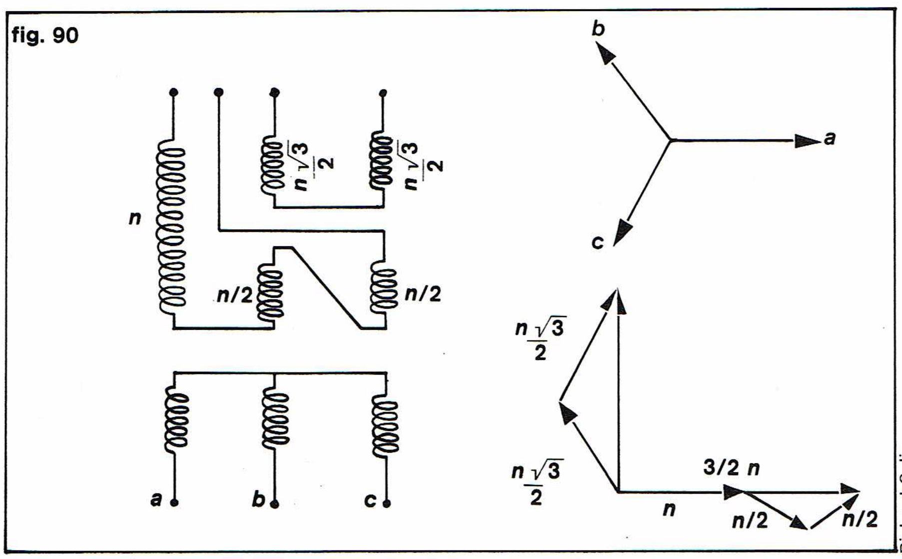

Richard Colin

fig. 89

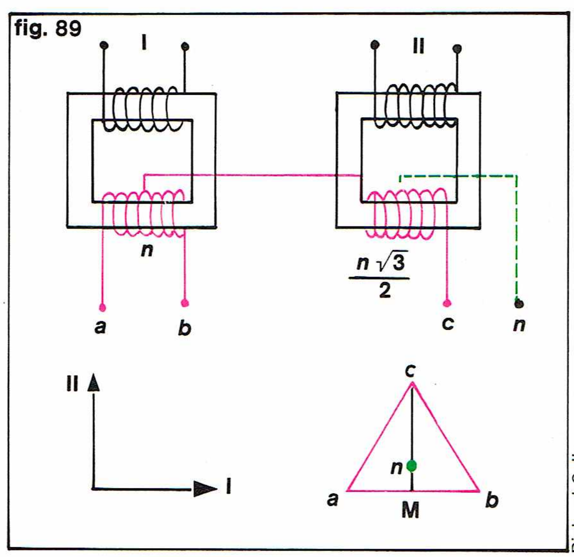

Richard Colin

rapport de transformation et à l'opposition des phases qui sont les conditions d'un transformateur parfait qui ne peuvent être satisfaites que si les chutes ohmiques primaire et secondaire sont nulles et qu'il n'y ait pas de fuites magnétiques. Les circuits alimentés par le secondaire ont toujours une grande impédance (quelques kΩ à MΩ par volt), et de ce fait les intensités sont très faibles.

L'erreur sur le rapport de transformation ε est fonction de la puissance apparente et du rapport U/U_n :

$$\varepsilon = \frac{mU_1 - U_2}{mU_1} \times 100\,;$$

de même, le déphasage ψ qui mesure l'angle entre U_2 et $-U_1$. Si on fait l'étude sur un cas réel de transformateur qui présente des fuites magnétiques, on arrive à une formule de rapport de transformation de la forme

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}(1 + k)\,;$$

k est un terme correctif, qui, simplifié, est égal à

$$\frac{\mathcal{R}}{R_1} + \frac{R_1\mathcal{R}^2}{2\,n_1^4\omega^2}$$

qui doit être petit, et il le sera d'autant plus que la résistance de l'enroulement primaire sera faible, la réluctance commune faible, la réluctance de fuite primaire élevée.

D'autres formules montrent que le courant primaire I_0 doit rester très faible. On aurait intérêt à faire travailler le circuit magnétique à faible induction, mais, compte tenu de la forte tension primaire, le nombre de spires de cet enroulement serait très élevé $\left(n = \frac{U}{S\omega B}\right)$ ou la section du circuit magnétique trop importante.

La consommation des appareils branchés sur le circuit secondaire ne peut pas toujours être considérée comme négligeable, car il arrive fréquemment de connecter un voltmètre, un phasemètre, un fréquencemètre et quelquefois des enregistreurs. Dans ce cas, le calcul est fait à partir de diagrammes comme pour les transformateurs de puissance en se donnant la puissance apparente et le cos φ du courant secondaire.

Nous avons vu que les erreurs de mesure augmentent avec la puissance apparente; c'est pourquoi on est conduit à fixer une valeur maximale à ne pas dépasser avec un facteur de puissance spécifié pour que les erreurs restent dans certaines limites qui correspondent à la classe du transformateur. Cette valeur maximale est appelée puissance de précision du transformateur. Pour les très hautes tensions, si le transformateur est branché entre phase et terre, le conducteur à haute tension est réuni à la terre à travers une série de condensateurs noyés dans l'huile à l'intérieur d'une borne isolante. Le transformateur est alimenté à partir d'une prise intermédiaire des condensateurs.

Ils fonctionnent dans les limites de fréquences 15 Hz à 400 Hz. Généralement, la tension secondaire est 100 volts pour les transformateurs monophasés branchés sur les réseaux monophasés ou branchés entre phases de réseaux triphasés. Les puissances de précision les plus courantes sont 15, 30, *50*, 75, *100*, 150, *200* et 300 VA.

Transformateur d'intensité

Le transformateur d'intensité est monté en série dans le circuit pour lequel on désire connaître le module du courant qui circule; il doit donc avoir une faible impédance. Les erreurs relatives au rapport de transformation et à l'opposition des phases doivent être les plus faibles possibles. Dans le cas d'un transformateur réel avec fuites, le rapport des intensités est donné par l'expression simplifiée : $\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1}(1 + k')$, k' est un terme correctif égal à $\frac{\mathcal{R}/_2}{n_2^2} + \frac{\mathcal{R}^2R_2^2}{2\,n_2^4\omega^2}$ qui doit être petit, et le déphasage ψ par l'expression simplifiée $\operatorname{tg}\psi = \frac{R_2}{n_2^2\omega\left(\frac{1}{\mathcal{R}} + \frac{1}{R_2}\right)}$. Il est nécessaire d'avoir une valeur de réluctance commune $\mathcal{R}$ très faible qui nécessite l'emploi d'un matériau à forte perméabilité comme le Mumétal et de faible longueur. Le déphasage n'offre pas d'intérêt pour la mesure d'intensité quand le secondaire est fermé sur un ampèremètre; en revanche, il est important pour la mesure d'une puissance où le déphasage doit être aussi petit que possible. Les réluctances doivent être invariables, ce qui exige la fixité des bobines primaire et secondaire l'une par rapport à l'autre et par rapport au circuit magnétique. Ces considérations exigent un soin très particulier des études des forces électrodynamiques qui s'exercent sur chaque bobine de par la circulation de son propre courant et des courants de court-circuit dus aux régimes transitoires.

La puissance de précision est la puissance apparente que le transformateur fournit au secondaire pour laquelle l'erreur du rapport de transformation et le déphasage du courant secondaire par rapport au courant primaire ne dépassent pas les limites correspondant à la classe de précision du transformateur. La puissance de précision doit correspondre à la somme des puissances des appareils à alimenter.

Les transformateurs de classes 0,1 et 0,2 sont utilisés en laboratoire pour des mesures très précises et pour étalonner des transformateurs de moins grande précision. Ceux de classe 0,5 sont destinés aux mesures qui n'exigent pas de précision spéciale. Ceux de classe 1 sont destinés aux mesures industrielles et ceux de classe 2 aux mesures industrielles pour lesquelles le facteur de puissance intervient peu.

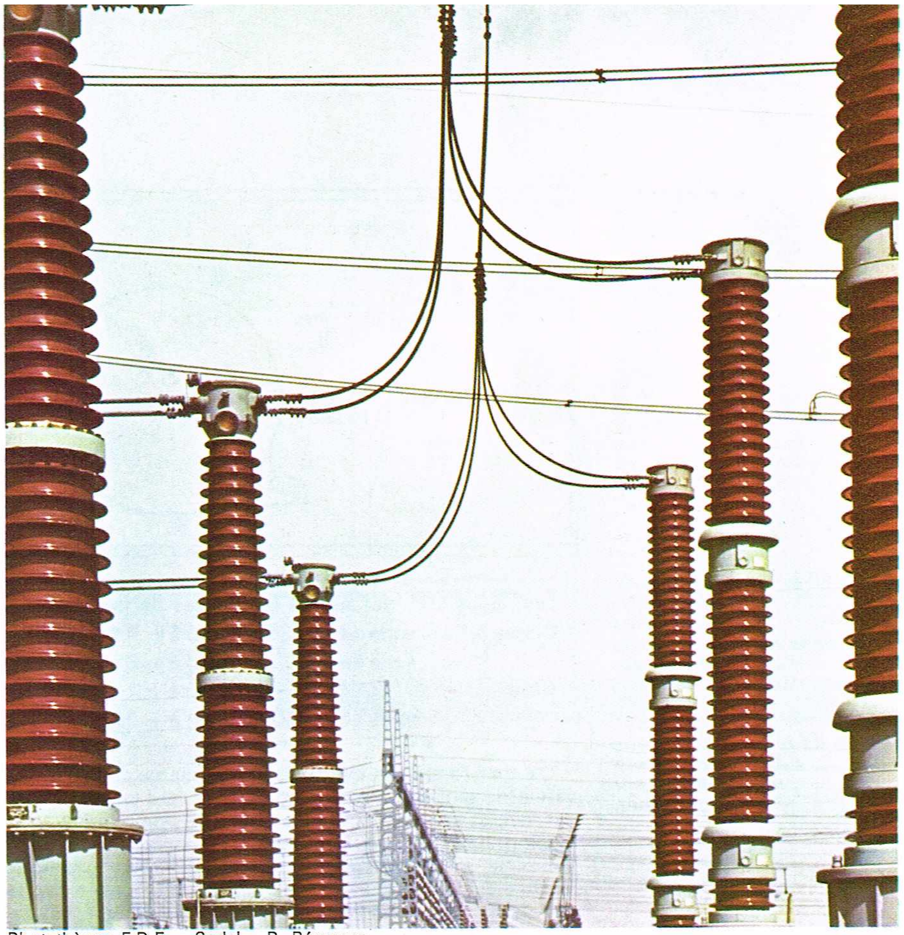

Photothèque E.D.F. - Sodel - P. Bérenger

▲ ***Transformateur de mesure 380 kV au poste E. D. F. du Plessis-Gassot; à gauche, transformateurs d'intensité; à droite, transformateurs de tension.***

▼ ***Un transformateur de mesure « Transtonic » de petite taille.***

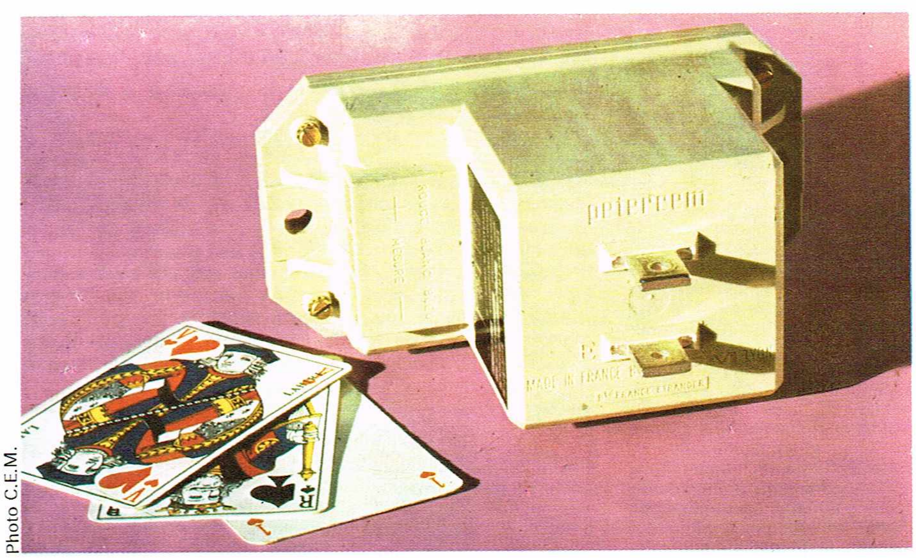

Photo C.E.M.

▶ *Figure 91 : représentation schématique d'un régulateur d'induction : cet appareil est constitué d'un stator (alimenté par le réseau) créant un champ variable et d'un rotor bobiné ; à gauche, diagramme des tensions ; la tension résultante* U *est déphasée d'un angle α.*

fig. 91

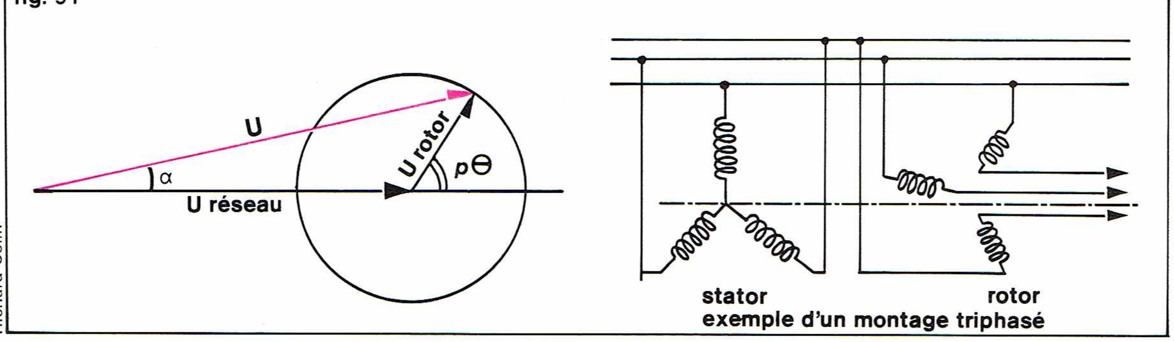

▶ *Page ci-contre, figure 95 : courbes de flux dans les deux circuits d'un amplificateur magnétique et courbes de tension.*
Figure 96 : courbe de la caractéristique $n_a I_a = f(n_c I_c)$ *pour un amplificateur magnétique.*

Les règles UTE définissent les classes de précision :

Classe 0,1	ε % varie de	± 0,25 (0,1 In)	à ± 0,1	(1,2 In)
	ψ varie de	± 10′ (0,1 In)	à ± 5′	(1,2 In)
Classe 1	ε % varie de	± 2 (0,1 In)	à ± 1	(1,2 In)
	ψ varie de	± 120′ (0,1 In)	à ± 60′	(1,2 In)

Ce transformateur est abaisseur d'intensité, donc élévateur de tension ; c'est pourquoi il ne faut jamais laisser son circuit secondaire ouvert quand le primaire est sous tension. D'autre part, interrompre le circuit secondaire supprime sa force magnétomotrice ; la force magnétomotrice primaire ne varie pas, car I_1 est imposée par le réseau sur lequel est branché le transformateur. L'induction augmente sensiblement, les pertes fer échauffent le circuit dangereusement.

Il existe différentes formes de construction en fonction des tensions et des intensités : pour les tensions élevées et les intensités faibles, l'ensemble primaire-secondaire est placé à l'intérieur d'un isolateur. Quand les tensions sont faibles, les primaires et secondaires sont séparées comme dans un transformateur ordinaire.

Régulateurs d'induction

Un régulateur d'induction est un transformateur qui permet de régler progressivement le rapport de transformation. La présentation matérielle est différente d'un transformateur classique, car il est constitué comme un moteur asynchrone à l'arrêt. Bien que tous les organes soient fixes, il se compose d'un stator alimenté par le réseau qui crée un champ variable à l'intérieur duquel est logé un rotor bobiné bloqué. Les enroulements de ce dernier, placés dans ce champ variable, sont parcourus par des courants suivant des lois identiques à celles utilisées pour les transformateurs. Ce rotor, soumis à un couple, est bloqué mais on peut le faire tourner à volonté pour décaler les axes de ses phases par rapport aux axes des phases correspondantes du stator. On obtient alors un déphaseur à rapport de transformation constant $m = \frac{k_2 n_2}{k_1 n_1}$.

Si, maintenant, on branche les extrémités des enroulements du rotor au réseau (il faut évidemment que le nombre de phases soit identique), on obtient pour une phase $\vec{U} = \vec{U}_{réseau} + \vec{U}_{rotor} < p\theta$, si le régulateur a p paires de pôles (*fig.* 91).

La tension varie de façon continue en fonction de la rotation du rotor entre les valeurs extrêmes $U_{réseau} - U_{rotor}$ et $U_{réseau} + U_{rotor}$. Hormis ces deux valeurs pour lesquelles U est en phase avec $U_{réseau}$, la tension résultante est déphasée d'un angle α. Pour supprimer cet angle, qui peut être un inconvénient dans certains cas, on utilise un double régulateur : les rotors sont montés sur le même arbre, les stators sont branchés pour que leur champ tourne en sens inverse. Les enroulements des rotors sont montés en série de telle manière que le déphasage en avance de l'un soit compensé par le même déphasage arrière de l'autre (*fig.* 92). Il s'ensuit que la tension résultante est toujours en phase avec $U_{réseau}$ et que les deux couples qui s'exercent sur les rotors s'annulent.

La puissance du régulateur est plus faible que la puissance à régler, mais le (ou les) rotor(s) est (ou sont) parcouru(s) par l'intensité totale utilisée. La construction est spéciale, car elle comporte plus de cuivre qu'une machine tournante de même puissance. Généralement, la tension régulée est faible. Au point de vue du calcul, il faut prendre en compte une réactance plus importante qu'un transformateur ordinaire.

Il présente l'avantage d'une variation absolument continue de la tension, et de l'absence de contacts pouvant être détériorés par un arc. En effet, la rotation limitée à $\pm \frac{\pi}{2}$ par rapport à la valeur moyenne $p\theta = \frac{\pi}{2}$ permet de supprimer les bagues et de les remplacer par des liaisons souples.

Amplificateurs magnétiques

Le principe est celui de la réactance saturable : la réactance offerte à un courant alternatif par une bobine à noyau de fer peut varier dans de larges proportions quand les ampères-tours produits par un courant continu saturent plus ou moins le circuit magnétique. La commande est donc en principe réalisée avec un courant continu. C'est un appareil qui permet de réaliser de grandes variations de puissance dans un récepteur Z par les variations d'un faible courant continu.

Sous la forme simplifiée décrite ci-dessus, le courant alternatif induirait dans l'enroulement de commande à courant continu une force électromotrice alternative. Pour supprimer cet inconvénient, on utilise un montage symétrique comprenant deux circuits identiques connectés de manière que les forces électromotrices induites s'annulent. L'ensemble obtenu s'appelle *transducteur* (*fig.* 93).

Adoptons certaines hypothèses simplificatrices, notamment que le cycle dynamique du matériau est constitué de segments linéaires. Quand le circuit n'est pas saturé, l'impédance d'un enroulement parcouru par un courant alternatif est très élevée, par contre elle est faible quand le circuit est saturé. Les résistances des enroulements du circuit de commande sont faibles. Quand le courant de commande est nul, le point représentatif de l'état magnétique du circuit parcourt le cycle d'hystérésis ABCD (*fig.* 94). A l'apparition des ampères-tours de commande,

▶ *Figure 92 : diagramme des différentes tensions dans le cas d'un double régulateur d'induction : ce montage permet la suppression de l'angle α.*
Figure 93 : représentation schématique d'un transducteur, amplificateur magnétique comprenant 2 circuits identiques connectés de manière que les f. é. m. induites s'annulent.

fig. 92

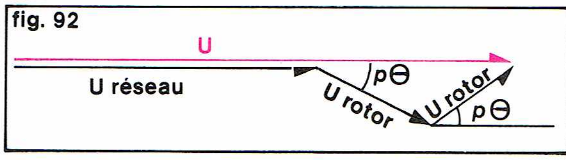

fig. 93

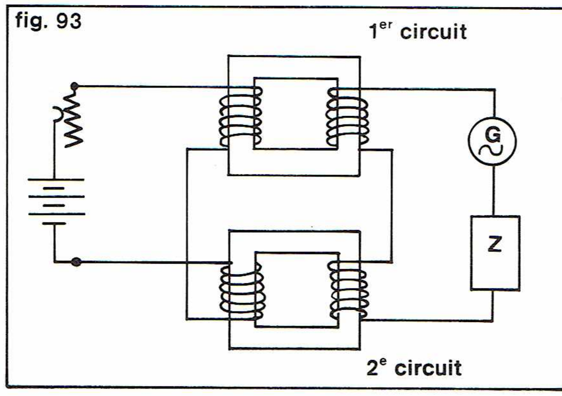

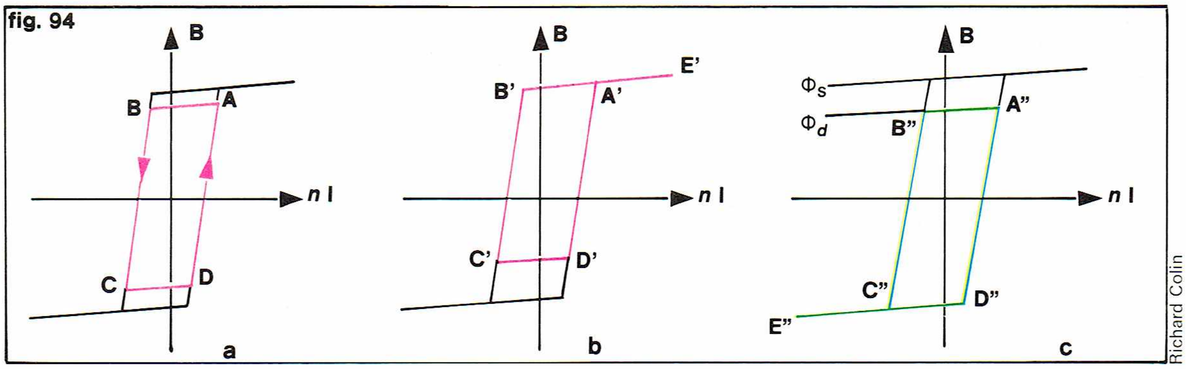

◀ *Figure 94; parcours du point représentatif de l'état magnétique du circuit d'un amplificateur magnétique :*
a, quand le courant de commande est nul;
b, à l'apparition des ampères-tours de commande (pour le premier circuit);
c, à l'apparition des ampères-tours de commande (pour le deuxième circuit).

le point représentatif de l'état magnétique se déplace suivant la courbe A′B′C′D′E′ pour le premier circuit et A″B″C″D″E″ pour le second circuit. La courbe du flux dans chaque circuit permet de déduire la variation de la tension aux bornes de l'utilisation (*fig.* 95). Quand les variations de flux peuvent se produire, la relation qui lie $n_a I_a$ à $n_c I_c$ est $n_a I_a = n_c I_c$. Sinon l'égalité n'est plus valable. La caractéristique $n_a I_a = f\ (n_c I_c)$ est représentée par la *figure* 96.

Pour obtenir les meilleures performances, il est souhaitable d'avoir de très faibles pertes par hystérésis, avec un cycle très étroit, de très faibles pertes par courants de Foucault, avec une résistivité élevée et des matériaux de faible épaisseur, une induction de saturation élevée, des coudes du cycle d'hystérésis très brusques, des caractéristiques stables.

Ils présentent certains avantages : le gain en puissance peut être élevé : 25 avec les montages décrits, 10^6 avec les montages avec réaction; leur usure est nulle, très peu d'entretien, les circuits d'entrée et de sortie sont isolés électriquement, les puissances de sortie peuvent être importantes. Pour les faibles puissances, l'emploi des circuits magnétiques toriques est conseillé par ses fuites magnétiques très faibles. Pour les fortes puissances, les circuits à colonnes sont préférés à cause des difficultés d'isolement pour un volume donné des circuits toriques.

Convertisseurs

Un convertisseur est un appareil destiné à transformer un système électrique de caractéristiques données en un autre système électrique de caractéristiques différentes. On peut convertir

— un courant alternatif en courant continu et réciproquement,

— un courant alternatif d'une certaine fréquence en courants alternatifs de fréquences différentes,

— un système de courant alternatif en un système de même fréquence ayant un nombre de phases différent.

Cette conversion s'effectue au moyen de machines électromagnétiques ou à semi-conducteurs.

La transformation du courant alternatif en courant continu par semi-conducteurs fait l'objet du chapitre *Redresseurs*. Le changement de phases à l'aide de transformateurs est explicité dans le chapitre *Transformateurs*.

La conversion continu-alternatif apporte une solution aux problèmes de la continuité d'alimentation en alternatif par le stockage préalable qu'il est possible d'avoir en continu (et non en alternatif) par des batteries d'accumulateurs.

Convertisseurs électromagnétiques continu-alternatif et réciproquement

Il existe deux types principaux de machines : les groupes convertisseurs et les commutatrices.

Groupe convertisseur

Un groupe convertisseur est un ensemble de deux machines accouplées mécaniquement, l'une à courant alternatif, l'autre à courant continu. Si on transforme un courant alternatif en courant continu, la machine alternative fonctionne en moteur qui entraîne la génératrice à courant continu (*fig.* 97). Le moteur est généralement une machine asynchrone dont la vitesse varie peu en fonction de la charge, car le glissement n'excède pas

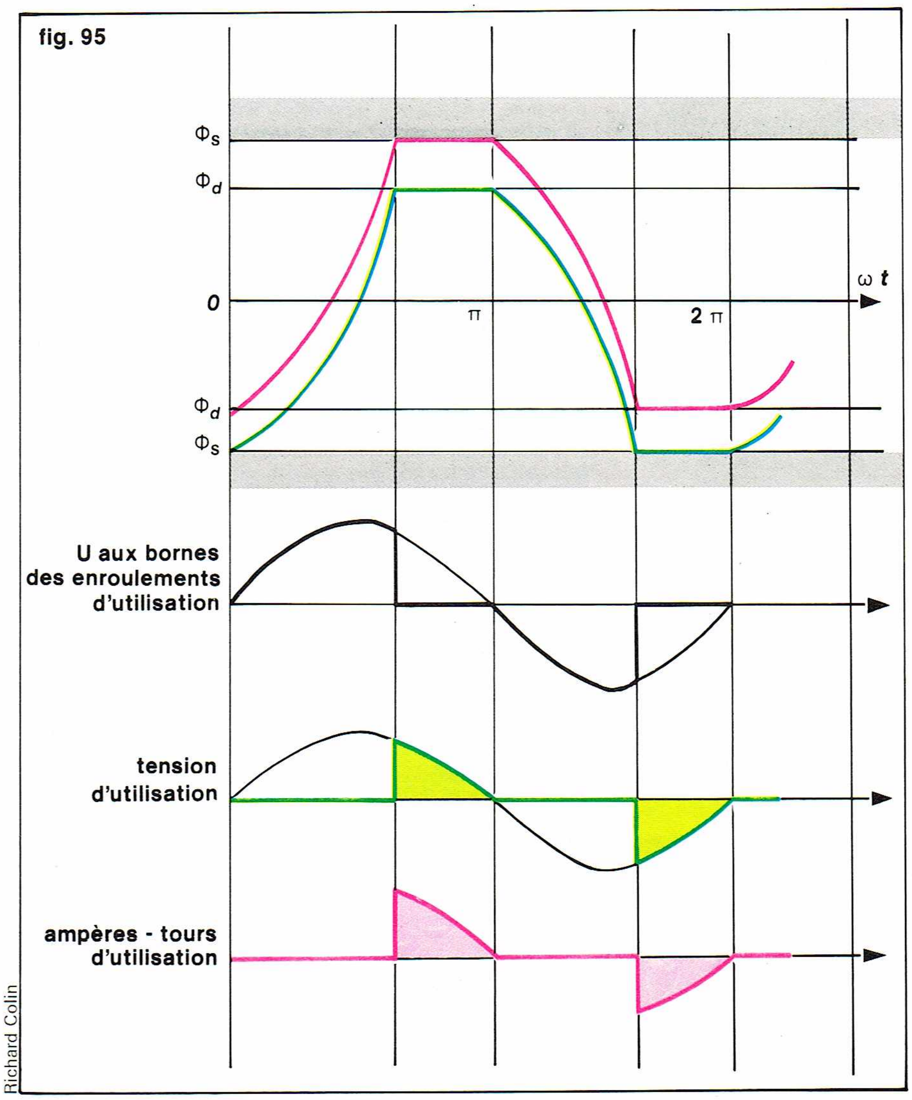

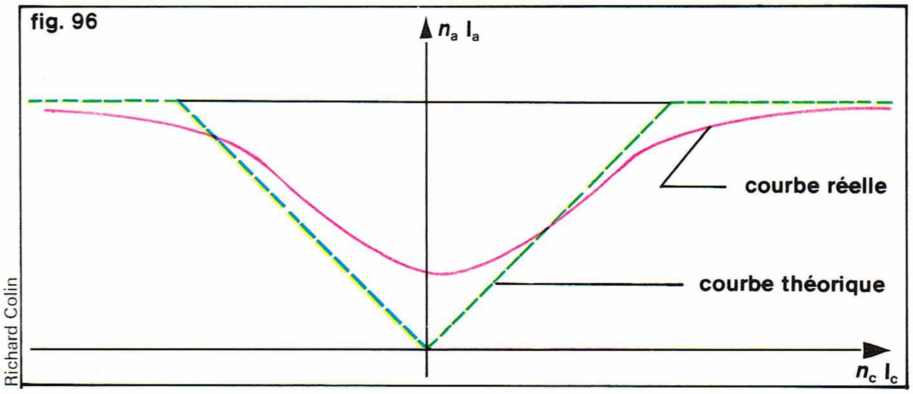

▶ *Figures 97 et 98 : représentation schématique de deux types de convertisseurs ; fig. 97 : convertisseur transformant du courant alternatif en courant continu ; fig. 98 : convertisseur transformant du courant continu en courant alternatif.*

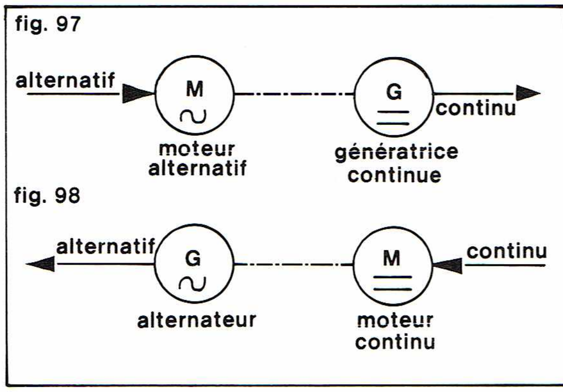

fig. 99

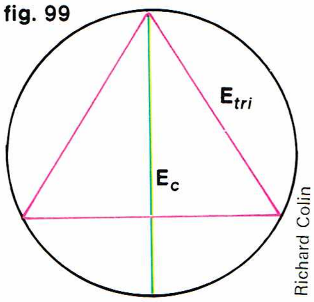

▲ *Figure 99 : voir développement dans le texte.*

quelques pour cent. Cette constance de vitesse est souhaitable ; en effet, la tension de la génératrice varie avec sa vitesse de rotation suivant la loi

$$U = kn N\Phi - RI - h' - \Delta u_{balais}.$$

Si le flux inducteur Φ et la charge sont constants, la relation devient $U = k'n - h$ qui montre que cette tension est proportionnelle à la vitesse n. La génératrice est choisie en fonction de l'utilisation suivant les allures des caractéristiques en charge que nous offrent les différents modes d'excitation : séparée, en dérivation, en série, composée.

Dans le fonctionnement inverse (*fig.* 98), la génératrice devient moteur d'entraînement du groupe, et le moteur devient générateur alternatif. Dans ce cas particulier, l'emploi d'un générateur asynchrone est très exceptionnel, l'utilisation courante est le générateur synchrone ou alternateur, qui, contrairement au précédent, peut alimenter seul, sans artifice, un réseau de distribution en fournissant les puissances actives et réactives nécessaires aux utilisateurs. La fréquence est fonction de la vitesse du groupe $f = \frac{pn}{60}$; de ce fait, s'il est nécessaire qu'elle soit constante, il faut un moteur à courant continu suffisamment puissant pour que le point de fonctionnement reste dans la partie pratiquement horizontale et linéaire de sa caractéristique en charge. L'emploi d'un moteur de plus faible puissance nécessite une régulation de vitesse. Un tel groupe ne nécessite pas une étude spéciale ; il suffit de se reporter séparément aux machines correspondantes.

Commutatrice

C'est une seule et même machine qui permet d'obtenir les mêmes résultats que le groupe convertisseur, avec toutefois quelques restrictions. Elle se compose d'un stator et d'un rotor. Le rotor comporte un bobinage fermé identique à celui des machines à courant continu. D'un côté, les enroulements sont reliés à un collecteur ; de l'autre côté, ils sont reliés à des bagues dont le nombre varie suivant le nombre de phases du réseau alternatif (*fig.* 99).

Ce rotor est placé dans un stator de machine à courant continu. L'inducteur fixe, alimenté en courant continu, produit un champ constant en direction. Si l'induit est alimenté par une source continue, ses enroulements parcourus par un courant et placés dans un champ se déplacent perpendiculairement à celui-ci : c'est un moteur à courant continu. Côté bagues, on recueille une tension alternative dont la fréquence dépend de la vitesse de rotation. Inversement, si l'induit est alimenté par une tension alternative, du côté des bagues, c'est un moteur synchrone.

Entraînée par un moteur extérieur, elle peut débiter simultanément ou indépendamment par les bagues des courants polyphasés et par le collecteur un courant continu. Le fonctionnement dans le sens moteur continu-alternateur est assez exceptionnel et est appelé *commutatrice inversée*.

Quel que soit le nombre de phases, les enroulements ne peuvent être connectés en étoile, car le bobinage doit être obligatoirement fermé pour permettre le fonctionnement en courant continu. Dans le fonctionnement moteur continu-alternateur, la fréquence dépend de la vitesse et peut être réglée à volonté ; si l'on désire une fréquence constante, il faut prévoir une régulation de vitesse. Dans le fonctionnement moteur synchrone-dynamo, la vitesse est obligatoirement constante, car elle est imposée par le réseau. La présence d'un seul enroulement rotorique confère à la commutatrice un rapport constant entre les tensions continue et alternative. En effet, en monophasé, les forces électromotrices maximales sont identiques, soit $E_{continu} = E_{maxi}$ alternative, et en valeur efficace

$$E_{eff}/E_c = 1/\sqrt{2}.$$

Le rapport est dans ce cas $1/\sqrt{2}$. En triphasé,

$$E_{max\ tri}/E_c = \sqrt{3}/2$$

et en valeur efficace $E_{3eff}/E_c = \sqrt{3}/2\,\sqrt{2}$. Le rapport est dans ce cas $\sqrt{3}/2\,\sqrt{2}$. Pour toute autre tension polyphasée, on obtient ce rapport aisément par simple calcul. Il est toutefois plus aisé de prendre la loi générale

$$U_{alternatif}/U_{continu} = 1/\sqrt{2} \times \sin \pi/q$$

q est le nombre de phases. En réalité, ce rapport varie légèrement en fonction de la charge à cause des chutes de tension internes. L'enroulement de l'induit est traversé simultanément par les intensités continue et alternative qui sont opposées en vertu de la loi de Lenz. Le courant instantané dans une spire est égal à la somme algébrique des courants alternatif et continu. Dans le cas d'une spire par phase avec un facteur de puissance égal à l'unité, les intensités changent de signe au même moment (*fig.* 100). A l'instant t, le courant résultant est égal à $i = I_c - I_a \sin \omega t$. La valeur efficace de l'intensité résultante est généralement plus faible que les intensités continue et alternative qui traverseraient séparément la spire. Il en est tout autrement s'il y a déphasage entre les deux intensités, car, pendant un temps t', variable avec le déphasage φ, les deux intensités s'ajoutent et la valeur résultante devient rapidement plus élevée que les intensités continue et alternative prises séparément (*fig.* 101). A l'instant t, le courant résultant est égal à

$$i = I_c - I_a \sin (\omega t \pm \varphi).$$

Ces résultats montrent qu'une commutatrice doit fonctionner avec un facteur de puissance voisin de l'unité. En réalité, une phase comprend plusieurs spires. Si le brin médian est parcouru par des intensités en opposition de

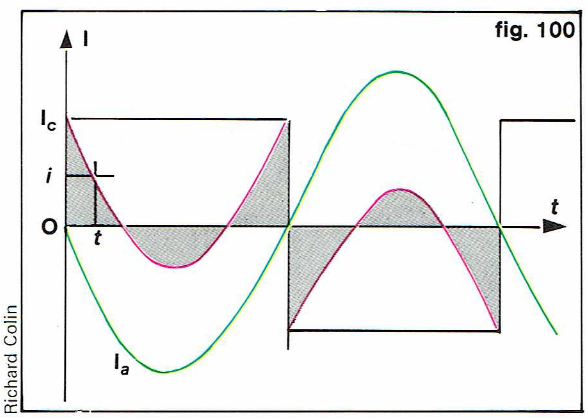

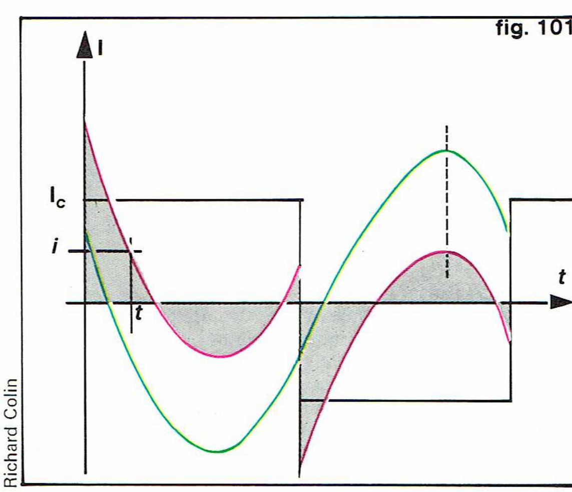

▶ *Figures 100 et 101 : courbes des intensités continue I_c, alternative I_a et résultante i en fonction du temps t ; fig. 100 : dans le cas d'une spire par phase et d'un facteur de puissance égal à l'unité, les intensités changent de signe au même moment ; fig. 101 : dans le cas du déphasage entre I_c et I_a.*

phase, les brins extrêmes d'une phase sont parcourus par des intensités alternative et continue déphasées qui engendrent des pertes Joule plus importantes que celles émanant de la spire médiane. Les pertes Joule d'une commutatrice sont d'autant plus faibles que le nombre de phases est élevé.

Appelons W l'énergie perdue par effet Joule dans une spire placée suivant un angle θ par rapport à la spire médiane. Cette énergie varie suivant la position des spires. Sa valeur moyenne pour l'ensemble des spires comprises entre les brins extérieurs est égale à

$$W_{moy} = \frac{q}{2\pi}\int_{-\pi/q}^{+\pi/q} W d\theta$$

et permet d'établir le rapport, suivant le facteur de puissance, entre les pertes Joule d'une commutatrice et les pertes Joule d'une génératrice à courant continu.

Nombre de bagues	Rapport à cos φ = 1	Rapport à cos φ = 0,8
2	1,39	2,51
3	0,56	1,23
4	0,38	0,90
6	0,27	0,77
∞	0,19	—

A cos φ = 1, le rendement de la commutatrice polyphasée est supérieur à celui de la dynamo à puissance égale. Dans le fonctionnement moteur alternatif-générateur continu, les variations de tension continue sont difficiles à faire à cause du rapport de transformation qui est constant et de la tension alternative qui est souvent constante. Pour obtenir cette variation de tension continue, les procédés de réglage peuvent agir soit sur la tension alternative, soit sur la tension continue.

Côté alternatif, nous pouvons mentionner trois solutions : le transformateur à prises, la bobine d'inductance, le régulateur d'induction. La première solution permet une variation importante, mais discontinue. La seconde permet une variation faible, mais continue, et ne nécessite pas d'appareils compliqués.

En faisant varier l'intensité d'excitation du moteur synchrone, on fait varier le déphasage entre la tension à ses bornes et le courant d'alimentation (*fig.* 102).

Étant donné que la tension aux bornes de l'inductance U_L, en négligeant la résistance, est perpendiculaire à l'intensité qui la traverse, la tension aux bornes de la commutatrice U_{com}, qui est la somme vectorielle

$$\overrightarrow{U_{com}} = \overrightarrow{U_R} + \overrightarrow{U_L},$$

varie de façon continue. Ce réglage est réalisé par l'intermédiaire du déphasage; or, le rendement diminue quand on s'éloigne de l'unité pour le facteur de puissance. Pratiquement, les variations de tension ne doivent pas dépasser ± 5 %. La troisième permet une variation un peu plus importante et continue de ± 5 % à ± 15 %. Le régulateur d'induction (voir chapitre *Transformateurs*) est intercalé entre le réseau et la commutatrice. La rotation de son rotor fait varier la tension alternative. Côté continu, on peut monter un survolteur-dévolteur dont le réglage de l'excitation permet de faire varier la tension dans les limites $U_{continu} - U_{survolteur\text{-}dévolteur}$ à $U_{continu} + U_{survolteur\text{-}dévolteur}$.

Ces solutions sont onéreuses par leur construction et leur entretien; c'est pourquoi, sauf pour des applications spéciales ou pour de grandes puissances, on préfère les convertisseurs statiques.

Convertisseurs statiques

Les convertisseurs sont des appareils utilisés pour la conversion électronique de l'énergie et constitués de semi-conducteurs, transformateurs, filtres et éventuellement d'auxiliaires. Ils sont autocommutés quand leur sont incluses les tensions de communication.

Les onduleurs sont utilisés pour la conversion de courant continu en courant alternatif. Ceux qui comprennent un redresseur et un onduleur avec une liaison en courant continu s'appellent des convertisseurs indirects à courant alternatif. Les convertisseurs indirects à courant continu comprennent un onduleur et un redresseur avec une liaison en courant alternatif.

fig. 102

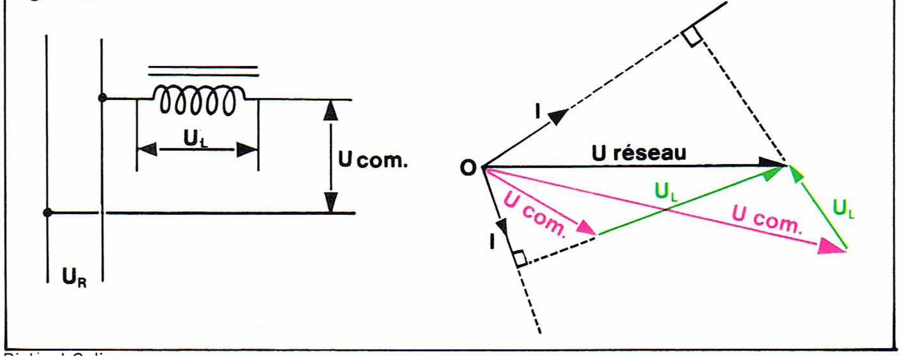

Richard Colin

▲ *Figure 102 : montage permettant la variation de tension continue dans une commutatrice (voir développement dans le texte).*

Abordons en premier lieu les onduleurs. Il existe deux types d'onduleurs : l'onduleur assisté, ou onduleur non autonome, et l'onduleur autonome. Le premier alimente un réseau alternatif, et sa commande est assurée par le secteur. Le second est surtout utilisé pour alimenter un réseau qui ne comporte pas de source de courant, et sa commande lui est propre.

Onduleurs monophasés

Le principe est le suivant : avec deux redresseurs contrôlés, dont les plus couramment employés sont les *thyristors*, il s'agit de faire circuler dans la charge, alternativement dans un sens puis dans l'autre, le courant continu issu de la batterie d'alimentation. Le montage est toujours symétrique. L'utilisation des deux chemins est contrôlée par les thyristors successivement conducteurs et non conducteurs. Un thyristor est un assemblage à semi-conducteurs monocristallin à conductibilité unidirectionnelle. Il est bistable dans le sens direct et comporte trois jonctions PN et une électrode de commande appelée gâchette; quand on applique un signal électrique à la gâchette, il passe de l'état non conducteur à l'état conducteur. Considérons le montage de la *figure* 103. Il comporte une batterie d'alimentation, deux résistances de charge R_1 et R_2, deux thyristors Th_1 et Th_2 et une capacité C. Au repos, les deux thyristors sont non conducteurs et les points A_1 et A_2 sont au potentiel + U; la capacité n'est pas chargée. Rendons conducteur Th_1 à l'instant t_1 en appliquant un signal électrique à sa gâchette : le potentiel de A_1 tombe à 0 et entraîne le point A_2 au potentiel 0 par l'intermédiaire de C (*fig.* 104). La capacité va se charger à travers les résistances R_1 et nous aurons le potentiel + U sur ses armatures de droite et — U sur

▼ *Deux groupes de convertisseurs statiques S. T. C. O. utilisés dans les voitures de voyageurs du réseau S. N. C. F. et des réseaux européens. Ils peuvent être alimentés par 4 tensions différentes : 1 500 V ou 3 000 V continu, 25 000 V-50 Hz ou 16 2/3 Hz.*

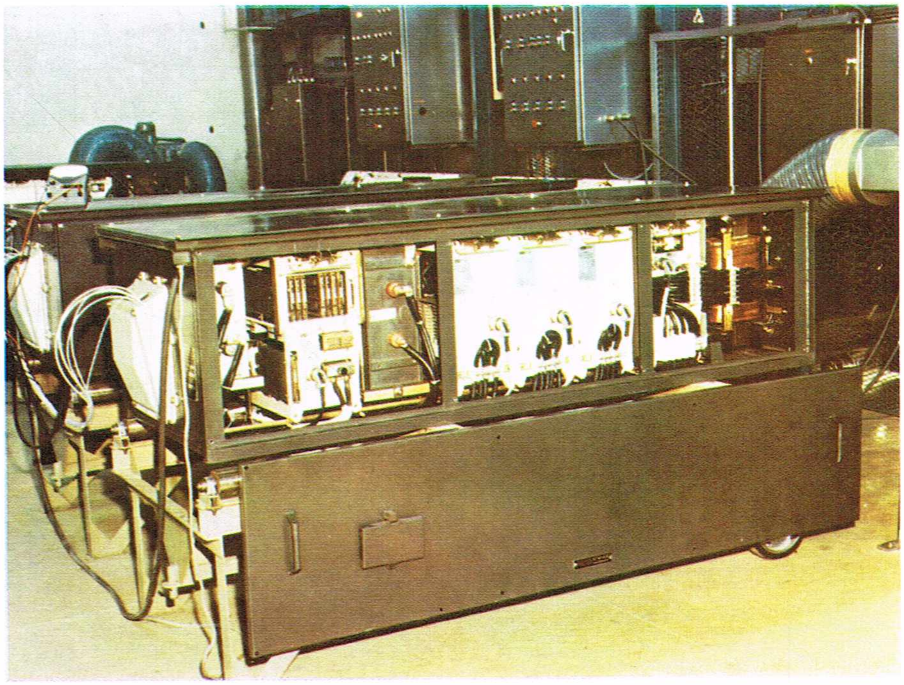

Photo C.E.M.

fig. 103

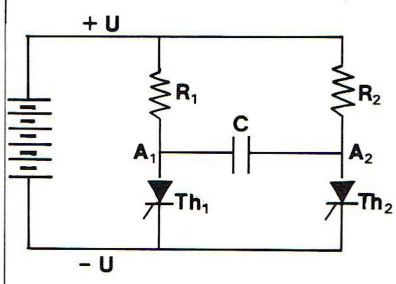

fig. 104

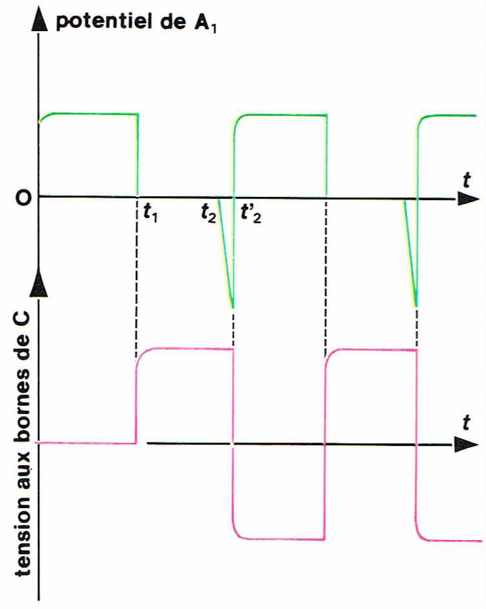

Richard Colin

fig. 105

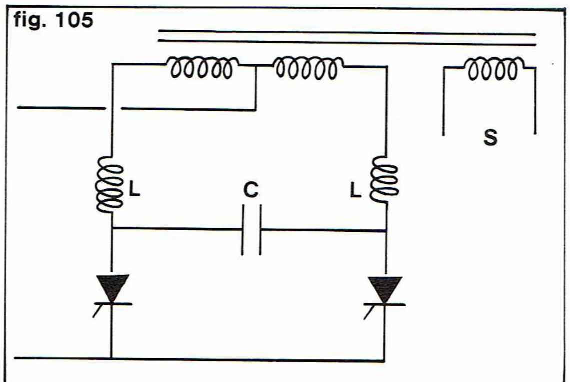

Richard Colin

fig. 106

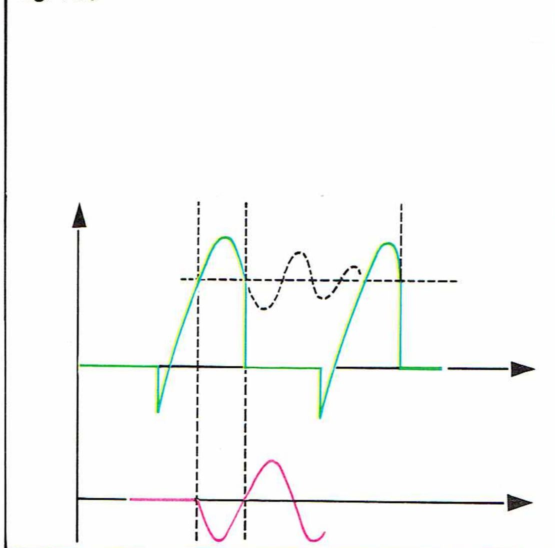

Richard Colin

▲ *Figure 103 : principe de l'onduleur monophasé.*
Figure 104 : courbes des potentiels et tensions d'un onduleur monophasé.

▶ *Figure 105 : autre type d'onduleur monophasé ; les deux résistances sont remplacées par un enroulement de transformateur.*
Figure 106 : courbe de tensions correspondant au montage de la figure 105.

▼ *Tiroir électronique pour la commande de convertisseurs de fréquence bi- et quadricourant réalisé par la C. E. M. pour la S. N. C. F.*

ses armatures de gauche. Rendons conducteur Th_2 à l'instant t_2 en appliquant un signal électrique à sa gâchette : le potentiel de A_2 tombe à 0 et, simultanément, le potentiel de A_1 passe à — U, car il y a eu translation de la valeur U vers les négatifs du potentiel des armatures. Si cette tension négative, appliquée à A_1, est supérieure au temps de désionisation ou de turn-off, le thyristor Th_1 devient non conducteur, le potentiel de A_1 redevient + U. Si le cycle des amorçages de Th_1 et Th_2 continue, nous recueillons aux bornes de C une tension alternative. Si la constante de temps RC est faible par rapport aux intervalles 0, t_1, t_2, etc., la tension aux bornes C est pratiquement rectangulaire. Quand l'onde alternative a la forme de créneaux, l'appareil est un mutateur. Par contre, si cette constante de temps est longue, le temps $t'_2 — t_2$ augmente et le potentiel maximal de A_1 peut ne pas atteindre + U et la tension aux bornes de C est triangulaire.

Pour avoir une utilisation pratique, on remplace (*fig.* 105) les deux résistances par un enroulement de transformateur à point milieu auquel on applique le potentiel + U. L'inversion de sens de charge du condensateur à travers les enroulements engendre une onde oscillatoire amortie par la présence de L et C. Il faut calculer la fréquence d'accord en fonction de la fréquence que l'on désire dans la charge d'utilisation. Si l'on amorce le second thyristor après une demi-période d'oscillation du circuit LC, on recueille aux bornes de l'enroulement secondaire du transformateur une tension sinusoïdale à la fréquence désirée. Si le circuit est correctement calculé, il est possible d'obtenir sans filtrage moins de 10 % de distorsion.

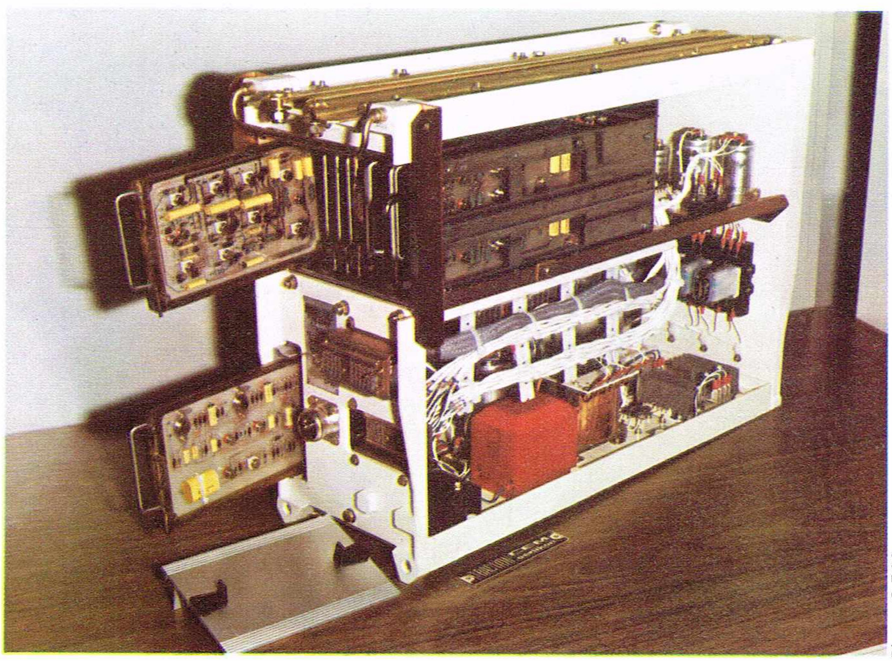

Photo C.E.M.

Onduleurs triphasés

On peut obtenir un système triphasé en associant trois onduleurs monophasés dont les tensions de sortie sont déphasées de 2 π/3 les unes par rapport aux autres. Le générateur d'impulsion est conçu pour conserver ce décalage et régler les onduleurs indépendamment les uns des autres quand la charge est déséquilibrée (*fig.* 106).

La stabilité de la fréquence est fonction de la qualité de la base de temps du générateur d'impulsions de commande des thyristors. Le rendement de la conversion continu-alternatif atteint 85 à 90 %. Ils sont couramment utilisés comme source de secours dans les installations où la continuité d'alimentation doit impérativement être assurée pour des raisons de sécurité.

Il est quelquefois économique d'assurer le transport d'énergie en courant continu. C'est cette solution qui a été retenue entre la France et la Grande-Bretagne. Quand la France assure une fourniture à l'Angleterre, l'appareillage côté français fonctionne en redresseur, celui du côté anglais en onduleur, et réciproquement (*fig.* 107).

* *Convertisseurs alternatif-alternatif*

Ils permettent un changement de fréquence avec ou sans changement de tension. Ils se composent d'un redresseur suivi d'un onduleur (*fig.* 108).

* *Convertisseurs continu-continu*

Ils permettent un changement de tension, très souvent dans le sens élévateur de tension. Ils se composent d'un onduleur, d'un transformateur et d'un redresseur (*fig.* 109).

fig. 108

fig. 109

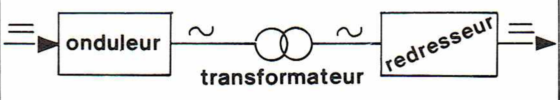

Richard Colin

fig. 107

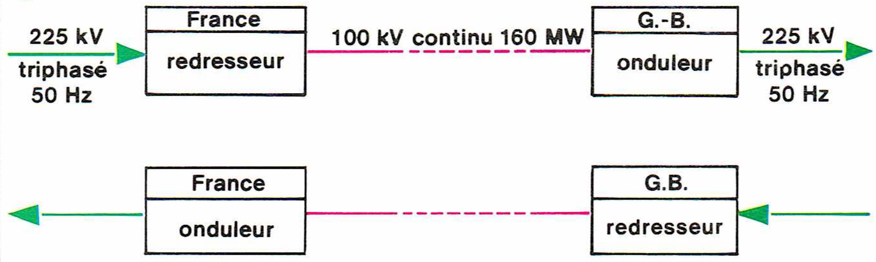

Richard Colin

Redresseurs

Les redresseurs assurent la conversion alternatif-continu. Les tensions et courants continus sont très utilisés pour l'alimentation des moteurs à courant continu qui présentent des avantages relatifs aux réglages des vitesses et couples, pour effectuer des électrolyses, pour charger les batteries d'accumulateur. On peut utiliser des machines tournantes : convertisseurs à plusieurs machines, commutatrices (voir le chapitre *Convertisseurs*), ou des montages à semi-conducteurs à conductibilité unidirectionnelle : diodes ou thyristors.

Principe d'un semi-conducteur à conductibilité unidirectionnelle

Une diode de ce type est formée par la jonction de semi-conducteurs dopés N et P. Un semi-conducteur est dopé quand il contient des impuretés qui donnent ou qui acceptent des électrons libres ; quand il y a excès d'électrons, il est de type N. Inversement il est de type P quand il y a excès de « trous ». A la jonction, dans la zone de contact, il y a déplacement des charges négatives de la région N vers la région P. Ce passage se fait par diffusion et tend à uniformiser la densité des charges dans tout le métal. Ces charges spatiales négatives et positives font apparaître un champ électrique interne $\vec{h}$ de sens tel qu'il s'oppose à la diffusion des trous vers N et des électrons vers P : c'est une barrière de potentiel (*fig.* 110).

Si on applique aux bornes de cette jonction une différence de potentiel, elle produit un champ électrique $\vec{H}$. Si le potentiel positif est branché côté P et le potentiel négatif côté N, le champ $\vec{H}$ s'oppose à $\vec{h}$ et favorise la tendance à la conduction, les électrons se propagent dans le sens de $\vec{H}$ et la jonction conduit (*fig.* 111). En revanche, si on inverse les branchements, le champ $\vec{H}$ renforce le champ $\vec{h}$, ce qui a pour but d'augmenter l'épaisseur de la barrière de potentiel, et la jonction ne conduit pas (*fig.* 112). La correspondance entre la réalité physique et la représentation symbolique est donnée par la *figure* 113.

En réalité, dans le sens direct, il faut une certaine tension pour que le passage se fasse et, dans le sens inverse, il existe toujours un léger courant. La *figure* 114 donne la caractéristique courant-tension d'une diode au silicium. Si on applique une tension inverse trop élevée, appelée *tension de claquage*, on détruit la diode en supprimant sa propriété de semi-conducteur par phénomène d'avalanche. Sa résistance passe alors d'une valeur de quelques dizaines ou centaines de mégohms à une valeur pratiquement nulle. De redresseur elle devient un *court-circuit*. Les limites de fonctionnement de la diode sont définies par la température maximale de la jonction au-delà de laquelle elle perd ses propriétés. Cette énergie électrique dissipée dans les redresseurs apparaît sous forme d'énergie thermique, c'est pourquoi il faut très sérieusement étudier les radiateurs sur lesquels ils sont montés. Cette température déplace le coude de la caractéristique inverse. En effet, le courant inverse augmente avec la température. Ce phénomène est plus important pour le silicium que pour le germanium.

fig. 114

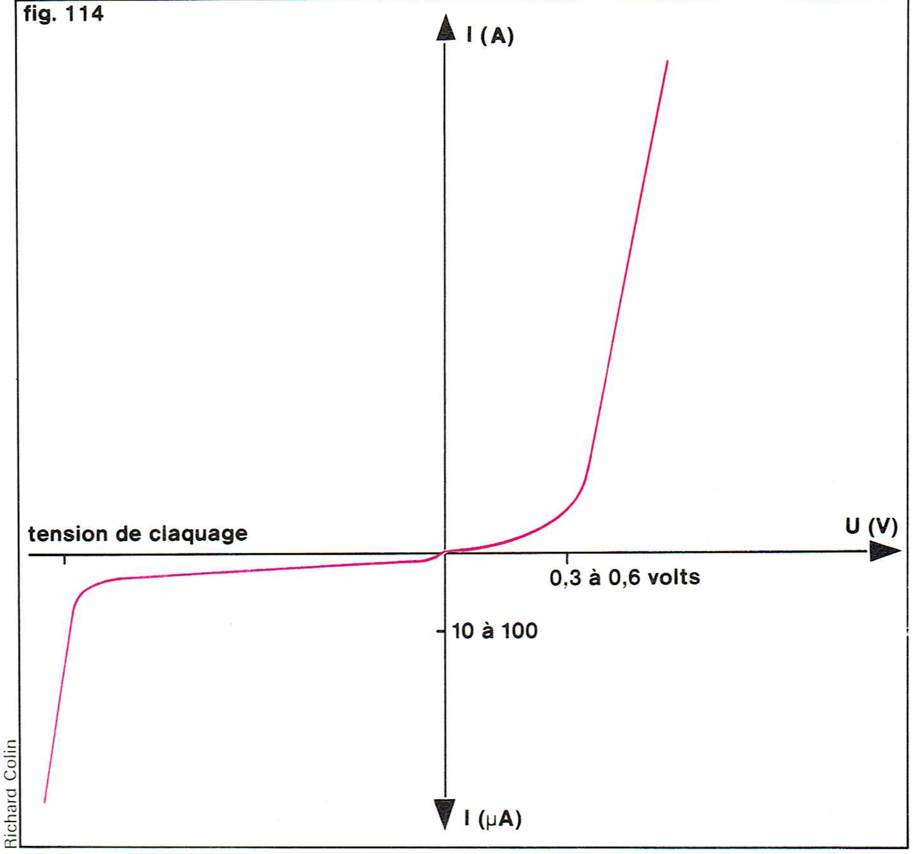

Richard Colin

▲ Figure 107 : principe de l'échange de courant continu-triphasé entre la France et la Grande-Bretagne.
Figure 108 : convertisseur alternatif-alternatif.
Figure 109 : convertisseur continu-continu.
Figure 114 : caractéristiques courant-tension d'une diode au silicium.
▼ Voir page 268.

fig. 110

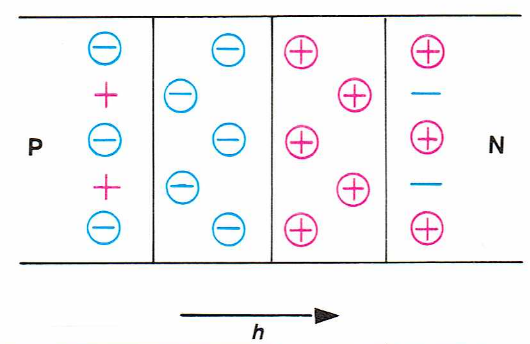

Richard Colin

fig. 111

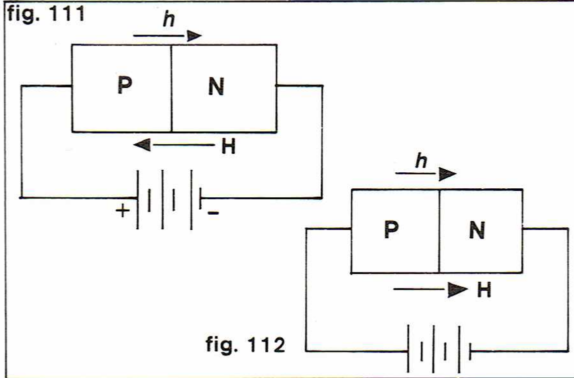

fig. 112

fig. 113

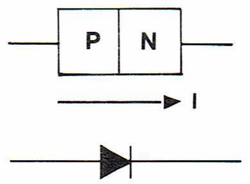

Richard Colin

▶ *Figure 115 : schéma de principe d'un thyristor.*
Figure 117 : montage avec une diode pour le redressement monophasé une alternance, et courbes caractéristiques.
Figure 118 : montage avec deux diodes pour le redressement monophasé deux alternances, et courbes caractéristiques.

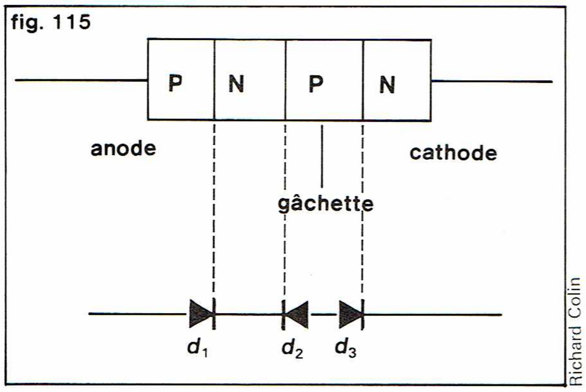

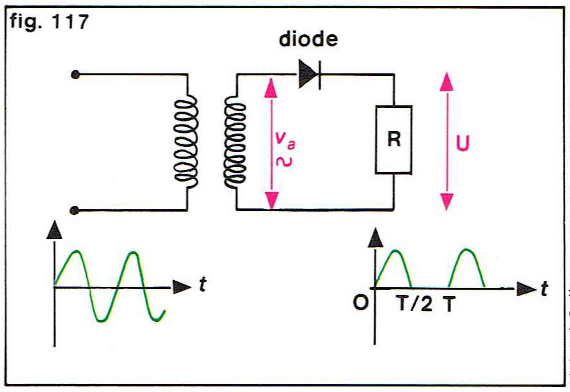

Thyristor

Un thyristor est un semi-conducteur dont la conduction ne peut avoir lieu qu'après avoir appliqué un signal sur une de ses jonctions. Il comporte quatre couches de semi-conducteurs successivement P-N-P-N, soit trois jonctions, chacune d'elles étant une diode (*fig.* 115). Si on applique une tension positive à l'anode, la diode d_2 empêche toute conduction à condition que cette tension soit inférieure à la tension d'amorçage quand le courant de gâchette est nul. Appliquons à la gâchette une tension positive par rapport à la cathode, d_2 devient brutalement conductrice et le thyristor devient conducteur indépendamment de la tension de la gâchette qui peut même être déconnectée. La *figure* 116 donne la caractéristique courant-tension. Le thyristor reste bloqué si on inverse les polarités appliquées à l'anode et à la cathode, quel que soit le potentiel de la gâchette. Pour le bloquer à partir de l'état conducteur, il faut soit diminuer le courant principal qui le traverse à une valeur inférieure au courant de maintien, soit lui appliquer une tension inverse.

Redressement avec diodes

★ *Redressement monophasé, une alternance*

La diode ne laissant passer le courant que dans un seul sens, quand on la place dans un circuit alimenté en alternatif, elle ne laisse passer qu'une alternance. Le montage monoalternance est le plus simple que l'on puisse trouver (*fig.* 117).

Calculons la tension moyenne aux bornes d'une charge purement résistive :

$$U_{moy} = \frac{1}{T}\int_0^T v_a dt = \frac{1}{T}\int_0^T V \sin \omega t dt = \frac{V_a}{\pi} = 0{,}318\ V$$

v_a est la valeur instantanée, V est la valeur maximale ou de crête. Si V_{eff} est la valeur efficace, nous avons

$V_{eff} = V/\sqrt{2}$ soit $U_{moy} = \sqrt{2}\, V_{eff} \times 0{,}318 = 0{,}45\ V_{eff}$

L'intensité moyenne qui traverse la résistance est

$$I_{moy} = \frac{U_{moy}}{R}$$

★ *Redressement monophasé, deux alternances*

Ce montage nécessite un transformateur à point milieu sur l'enroulement secondaire. Chaque demi-enroulement

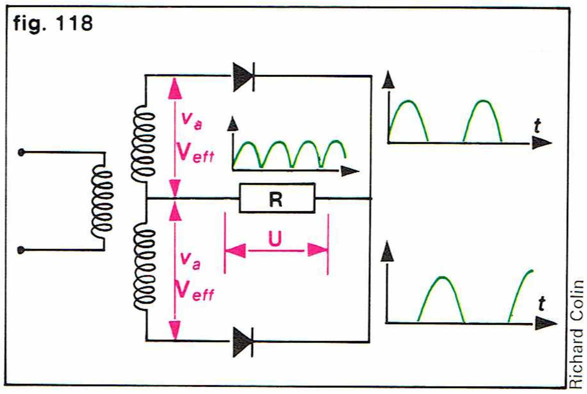

secondaire ne travaille que pendant la demi-période où la diode est conductrice. Il fonctionne en va-et-vient, chaque moitié du montage correspondant au redressement simple alternance précédent (*fig.* 118). La valeur moyenne aux bornes d'une charge purement résistive est :

$$U_{moy} = \frac{2}{T}\int_0^T v_a dt = \frac{2\ V}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{eff} = 0{,}9\ V_{eff}$$

★ *Redressement monophasé, deux alternances, montage en pont*

Ce montage permet d'obtenir les mêmes résultats que le précédent, mais il offre l'avantage de ne pas se servir de transformateur à point milieu. Par contre, il nécessite quatre diodes. Au cours de chaque demi-période, deux diodes conduisent soit les paires d_1-d_3 ou d_2-d_4, suivant la polarité de la tension d'alimentation (*fig.* 119). La valeur moyenne aux bornes de la résistance est

$$U_{moy} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{eff} = 0{,}90\ V_{eff}$$

★ *Redressement triphasé, simple alternance*

Il faut que le couplage du transformateur placé à l'amont du montage soit D_y (voir chapitre *Transformateurs*).

Les enroulements secondaires alimentent trois diodes (*fig.* 120), chacune d'elles redressant la demi-alternance correspondant à son état de conduction. Les tensions secondaires sont données par les expressions suivantes :

◀ *Page 267, en bas, figure 110 : principe d'une diode. Figure 111 : conduction dans la jonction* NP. *Figure 112 : non-conduction dans la jonction* NP. *Figure 113 : représentation symbolique de la jonction* NP.

▶ *Figure 116 : caractéristiques courant-tension d'un thyristor.*
Figure 119 : montage en pont avec quatre diodes pour le redressement monophasé, deux alternances.

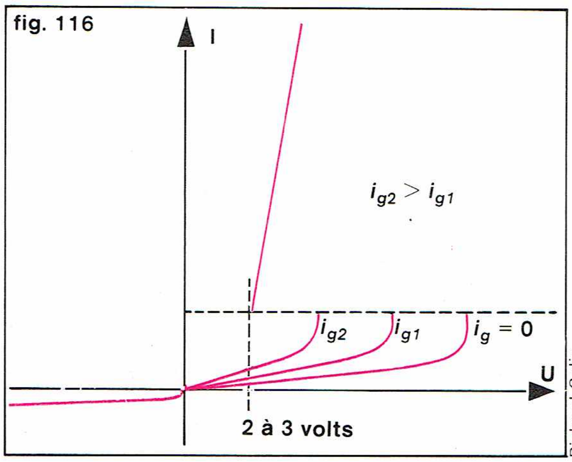

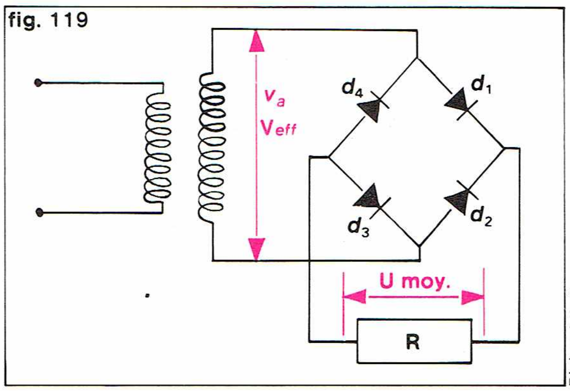

$$v_1 = V \sin \omega t, \qquad v_2 = V \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$\text{et} \qquad v_3 = V \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

La diode d_1 est conductrice entre t_1 qui correspond à $\frac{T}{12}$ et t_2 qui correspond à $\frac{5\,T}{12}$. La diode d_2 est conductrice entre t_2 et t_3, soit $\frac{5\,T}{12}$ et $\frac{9\,T}{12}$. La diode d_3 est conductrice entre t_3 et t_1, soit $\frac{9\,T}{12}$ et T.

Quand une diode conduit, les deux autres sont bloquées. La tension aux bornes de la charge ne s'annule pas. La valeur moyenne de la tension U_{moy} s'obtient en prenant comme période d'intégration $t_1 — t_2$,

soit $$\frac{5\,T}{12} - \frac{T}{12} = \frac{4\,T}{12} = \frac{T}{3}$$

$$U_{moy} = \frac{1}{\frac{T}{3}} \int_{T/12}^{5T/12} v_a dt = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V = 0{,}825\ V$$

* *Redressement triphasé, deux alternances*

C'est un pont de Graetz triphasé comprenant six diodes (*fig.* 121). Il n'utilise pas le point neutre du secondaire du transformateur. La valeur moyenne de la tension s'obtient en prenant comme période d'intégration $t_1 — t_2$, soit

$$\frac{2\,T}{6} - \frac{T}{6} = \frac{T}{6}$$

$$U_{moy} = \frac{1}{\frac{T}{6}} \int_{T/6}^{T/3} v_a dt = \frac{3}{\pi} V = 0{,}955\ V$$

A un instant donné, deux diodes seulement sont conductrices. La période de la tension redressée est égale à celle de la tension d'alimentation divisée par 6.

Deux autres montages sont utilisés en triphasé : redressement double alternance avec utilisation du point milieu des enroulements secondaires du transformateur d'alimentation et double étoile.

Pour ces deux dernières solutions, les valeurs moyennes de la tension sont toujours $U_{moy} = 0{,}955$ V.

* *Alimentation d'une charge inductive*

Il est assez rare que la charge d'un redresseur ne soit constituée que d'une résistance pure. Le plus souvent, il alimente des moteurs à courant continu ou des électro-aimants qui se composent d'une résistance pure et d'une inductance en série. L'intensité qui traverse le circuit est donnée par la solution de l'équation différentielle dans le cas d'un redressement simple alternance :

$$V \sin \omega t = Ri + L\frac{di}{dt} \qquad \text{soit :}$$

$$i = \frac{V}{\sqrt{R^2 + L^2\omega^2}} \left[\sin(\omega t - \varphi) + \sin \varphi e^{-\frac{Rt}{L}}\right]$$

avec $\operatorname{tg} \varphi = \frac{L\omega}{R}$.

* *Alimentation d'une charge capacitive*

En régime permanent, le condensateur se charge de l'instant t_0 à l'instant t_1, puis se décharge, dans la résistance, dans l'intervalle de temps t_1 à $T + t_0$ (*fig.* 122).

Le passage de courant i n'a lieu qu'à partir du moment où le potentiel du point A est supérieur à celui du point B. Si la constante de temps du circuit RC est grande, la décroissance de la tension u est faible. L'intensité débitée par la diode est donnée par l'équation :

$$i = \omega C \frac{dv}{d\theta} + I_c = \omega CV \cos \theta + I_c$$

et elle ne peut débiter que si la relation $\frac{dv}{d\theta} > -\frac{I_c}{\omega C}$ est satisfaisante.

* *Alimentation d'une charge ayant une force contre-électromotrice*

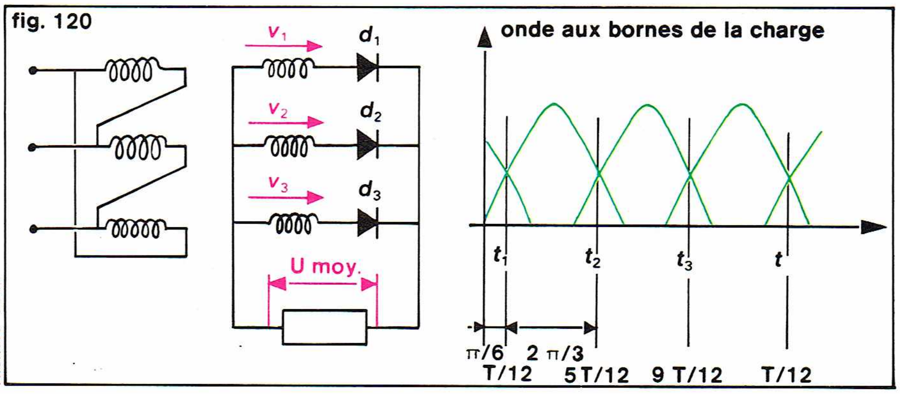

▲ *Figure 120 : montage avec trois diodes pour le redressement triphasé simple alternance, et courbe caractéristique.*

▼ *Figure 121 : montage en pont de Graetz à six diodes pour le redressement triphasé deux alternances, et courbe caractéristique.*
Figure 122 : montage avec une diode permettant la charge et la décharge d'un condensateur et courbes de charge et de décharge du condensateur.

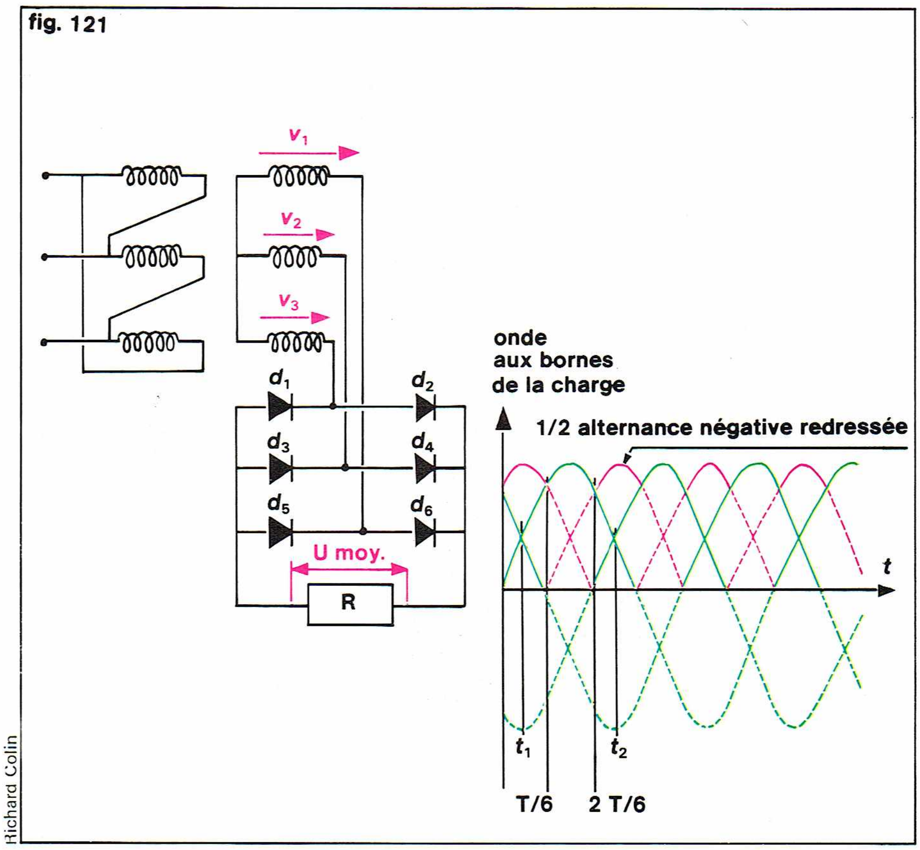

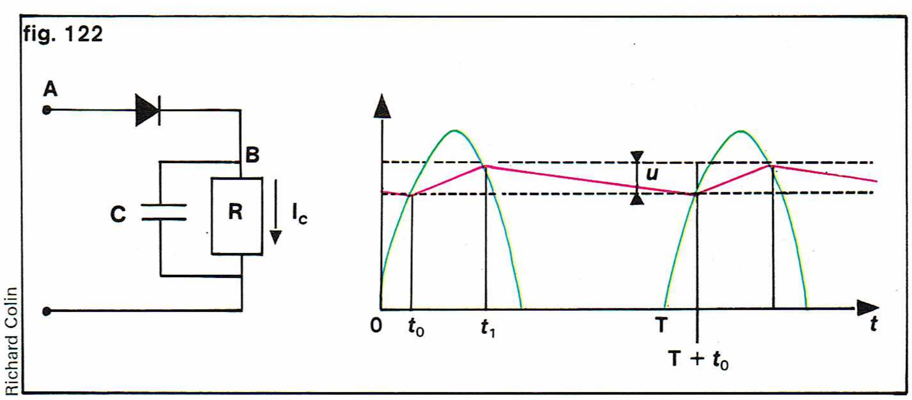

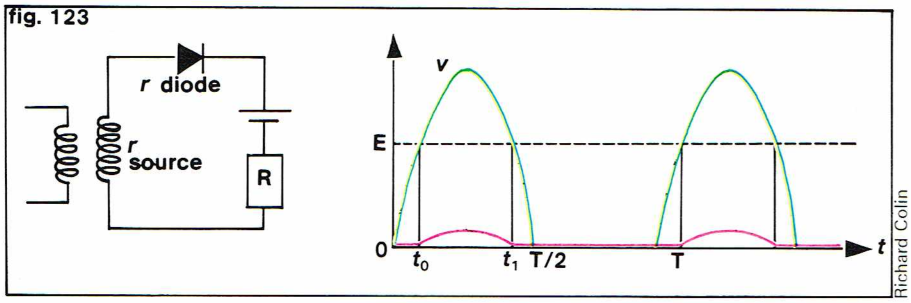

▲ *Figure 123 : montage comprenant une diode pour l'alimentation d'une charge ayant une f. é. m. (pour charger par exemple une batterie d'accumulateurs).*

▼ *Figure 124 : montage avec six thyristors pour le redressement triphasé deux alternances.*
Figure 125 : courbes des valeurs moyennes de la tension obtenue (U_{moy}) après redressement avec des thyristors pour différentes valeurs de φ.

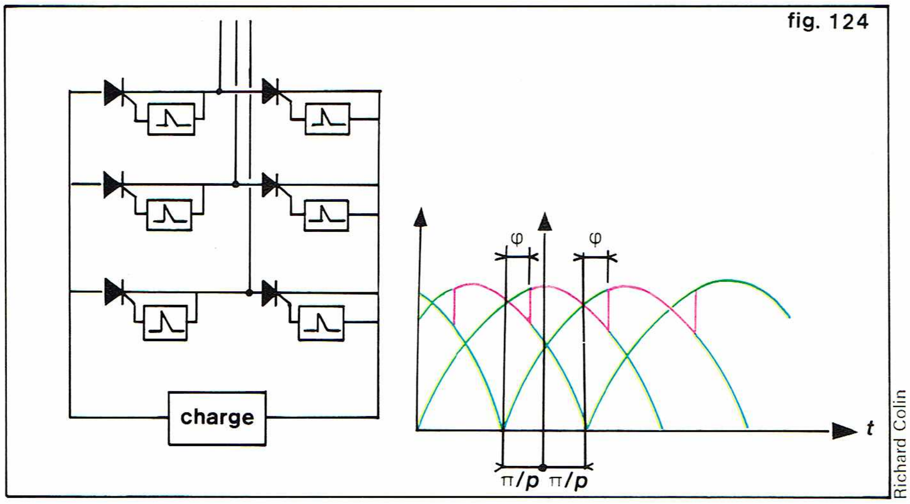

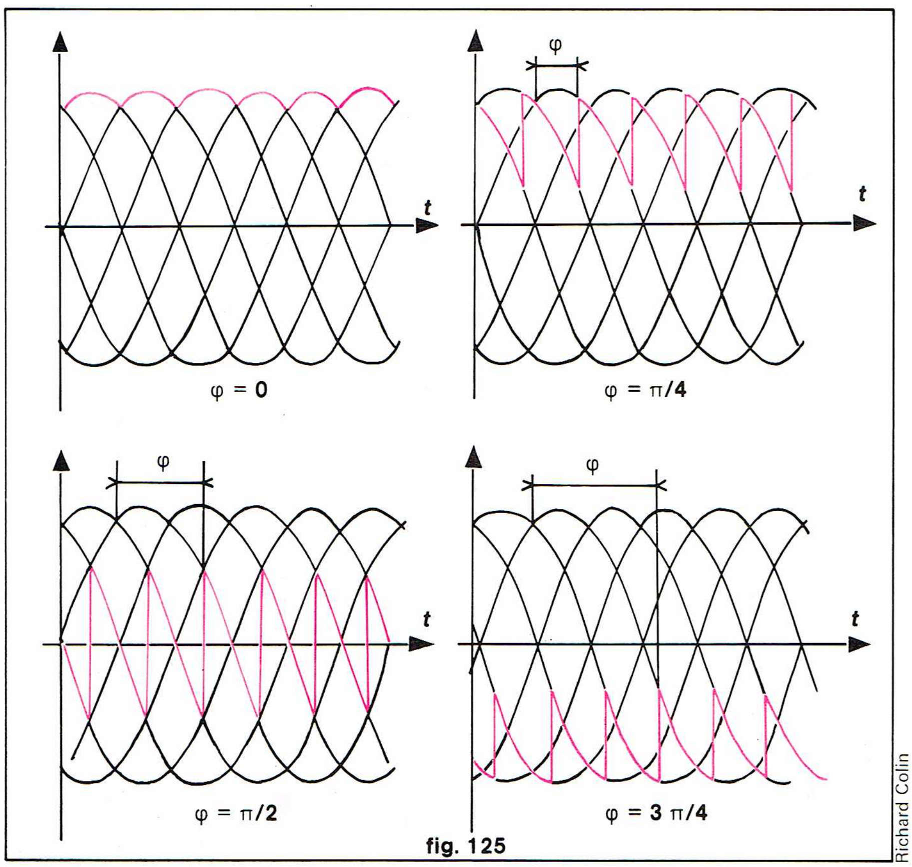

Pour que la diode conduise, il faut que le potentiel du point A soit supérieur à celui de B. Or, la force contre-électromotrice impose au point B un potentiel égal à E. La diode n'est conductrice que dans l'intervalle $t_0 - t_1$ (*fig.* 123). L'intensité qui la traverse est :

$$i = \frac{v - E}{R + r_d + r_s}$$

et la valeur moyenne :

$$I_{moy} = \frac{1}{\frac{T}{2}} \int_{t0}^{t1} \frac{v - E}{R + r_d + r_s} \, dt$$

Ce montage est utilisé pour charger les batteries d'accumulateur. La variation de la valeur maximale de v, qui a pour but de régler la charge, est obtenue simplement en utilisant un transformateur à prises. L'utilisation du redressement monophasé simple alternance n'est pas conseillée, il vaut mieux employer la double alternance ou, si possible, le redressement triphasé ou hexaphasé.

Redressement avec thyristors

L'emploi de thyristors à la place de diodes permet un redressement contrôlé en employant l'un quelconque des montages précédents. La valeur moyenne est ajustée à volonté par variation du retard à la commutation. Soit un montage triphasé redressement deux alternances (*fig.* 124). Chaque thyristor a son générateur d'impulsions de commande. Ils sont évidemment liés entre eux pour que toute variation du point d'allumage se fasse simultanément sur les six thyristors. La tension obtenue a pour période $2\,\pi/p$. Pour obtenir sa valeur moyenne, il faut prendre la période comme l'intervalle d'intégration en ayant, au préalable, translaté l'axe vertical pour qu'il se place au sommet d'une des sinusoïdes. L'équation qui permet de calculer cette valeur moyenne est :

$$U_{moy} = V \frac{p}{2\,\pi} \int_{\varphi - \frac{\pi}{p}}^{\varphi + \frac{\pi}{p}} \cos x \, dx =$$

$$V \frac{p}{2\,\pi} \left[\sin\left(\varphi + \frac{\pi}{p}\right) - \sin\left(\varphi - \frac{\pi}{p}\right) \right] =$$

$$V \frac{p}{\pi} \sin \frac{\pi}{p} \cos \varphi$$

Ce résultat est général et applicable aux redresseurs avec diodes. Par exemple, en redressement monophasé simple alternance, nous obtenons :

$$U_{moy} = V \frac{2}{\pi} \sin \frac{\pi}{2} = \frac{2}{\pi} V = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{eff}$$

Suivant la valeur de φ, les résultats sont représentés par la *figure* 125.

Filtrage

Les tensions redressées sont toujours ondulées. La valeur de l'ondulation dépend du montage utilisé. Ce résultat peut être néfaste et il est souvent nécessaire de filtrer la tension de sortie pour obtenir une onde la plus constante possible. Les éléments les plus utilisés sont les capacités et les inductances. Un montage rencontré très couramment est le filtre en π. Il se compose de deux capacités et d'une inductance comme le montre la *figure* 126. L'inductance, quelquefois remplacée par une résistance, offre une forte impédance aux harmoniques de fréquences élevées qui passent par les condensateurs. Ces condensateurs ont une capacité suffisante pour maintenir une tension utilisable pratiquement constante. Il existe des filtres de toute sorte qui sont des assemblages de cellules montées en série.

Autres transformations de l'énergie

Dans les paragraphes précédents, ont été présentés en détail les principes et la technologie de la transformation de l'énergie dans les domaines thermique, mécanique et électrique. Ces développements étaient justifiés par l'importance de ces trois types de transformations dans notre vie quotidienne. La vie domestique nous fournit de nombreux exemples de transformateurs d'énergie dans

les trois domaines cités ci-dessus : radiateurs de chauffage central, leviers et entraînements divers, et transformateurs électriques de jouets motorisés pour n'en citer que quelques-uns.

Dans ce chapitre, nous examinerons plus succinctement les trois autres domaines de la transformation énergétique : énergie chimique, énergie rayonnante et énergie nucléaire. Là encore, le but recherché est généralement de modifier l'état initial de l'énergie pour l'adapter à l'usage auquel elle est destinée.

Transformations de l'énergie chimique

On sait que dans la plupart des réactions chimiques il y a dégagement ou absorption de chaleur. Pour satisfaire à la loi sur la conservation de l'énergie, ces variations, tantôt positives, tantôt négatives, d'énergie thermique doivent correspondre à des variations équivalentes et de sens contraire d'une autre forme d'énergie. Cette autre forme n'est autre que l'énergie chimique des produits qui sont entrés en réaction. En résumé, la variation d'énergie chimique est égale et de signe contraire à la variation de chaleur accompagnant la réaction.

Le domaine des transformations de l'énergie chimique est donc très vaste puisqu'il y a transformation de l'énergie chimique dans la quasi-totalité des réactions chimiques. Notons qu'il n'est pas possible de mesurer la valeur absolue de l'énergie chimique; on ne peut qu'apprécier ses variations lors des réactions.

Pour revenir au domaine énergétique qui nous préoccupe, les transformations qui nous intéressent sont celles relatives aux produits énergétiques, c'est-à-dire essentiellement les combustibles. Considérons tout d'abord les produits naturels constitués par les combustibles fossiles les plus utilisés, à savoir le charbon, le pétrole et le gaz naturel. Les produits bruts tels qu'ils sont obtenus après leur extraction subissent divers traitements avant de devenir des produits commerciaux, répondant à une utilisation technique bien définie. Avant leur transport, les produits bruts subissent généralement les traitements de nature physique tels que triage, déshydratation, séparation des impuretés, etc., qui ne modifient pas la structure chimique de leurs composés. C'est ensuite, dans des installations appropriées, que s'effectuent les transformations chimiques nécessaires pour produire les combustibles dans leur forme utilisable.

● Les *charbons* sont employés directement lorsqu'ils sont destinés à la combustion, mais ils sont difficiles à transporter et leur état solide ne facilite pas leur utilisation. On songe depuis longtemps à leur transformation en gaz. La combustion est déjà un processus de gazéification puisque ses résultats, à part les résidus solides, sont tous gazeux. On réserve en fait le terme de gazéification aux procédés conduisant à des produits gazeux susceptibles de se substituer au gaz naturel, soit pour des applications purement énergétiques en raison de la facilité d'emploi des combustibles gazeux, soit pour servir d'élément de synthèse à l'industrie chimique.

Les principes de base du processus de gazéification du charbon sont connus depuis longtemps et de nombreux procédés ont déjà été mis au point et brevetés dans de nombreux pays. Cependant, compte tenu de l'importance des réserves mondiales de charbon et de l'intérêt attaché à sa gazéification, les recherches se poursuivent toujours activement dans ce domaine. Il s'agit généralement de faire réagir le charbon avec de l'air, de l'oxygène, de la vapeur, du gaz carbonique ou un mélange de plusieurs de ces produits. On récolte de ces réactions un mélange des composés suivants : oxyde de carbone, hydrogène et méthane auxquels peuvent se rajouter d'autres composés chimiques comme le soufre, dans des rapports dépendant du charbon et des réactifs utilisés ainsi que des conditions de température et de pression du réacteur de gazéification. Ces gaz subissent ensuite d'autres transformations dans des réacteurs, en présence de catalyseur, avant d'être utilisables.

Il a été envisagé d'effectuer la première étape de gazéification directement dans le sol de façon à éliminer les problèmes d'exploitation des mines de charbon qui sont d'autant plus ardus que les gisements sont enfouis profondément. Les études déjà entreprises dans divers pays charbonniers n'ont pas débouché jusqu'à aujourd'hui sur des réalisations de grande envergure.

Mais la gazéification *in situ* est de nouveau considérée comme une voie intéressante d'exploitation du charbon depuis l'augmentation brutale du prix de l'énergie, et de nouveaux programmes de recherche ont été lancés, en particulier aux États-Unis.

● Le *pétrole brut* est un mélange très varié d'hydrocarbures contenant en outre un faible pourcentage de produits oxygénés, azotés, sulfurés, etc. La composition en hydrocarbures varie énormément d'un gisement à un autre et parfois même dans le même gisement. Cette grande diversité dans les compositions, d'une part, et la variété en qualité et quantité des produits commerciaux, d'autre part, expliquent qu'il existe un grand nombre de traitements de raffinage.

La simple distillation du brut permet de séparer plus ou moins grossièrement suivant le but recherché les différents hydrocarbures en utilisant les différences de température des points d'ébullition (la température d'ébullition augmente avec la masse moléculaire). On arrive ainsi à séparer les différentes fractions : gaz, essence, gas-oil, fuel, résidus divers. Mais les proportions ainsi obtenues ne correspondent pas aux besoins du marché. On a en général besoin de beaucoup plus de carburant auto que n'en contiennent les pétroles bruts raffinés. D'autres produits sont également recherchés en quantité importante comme le gas-oil et le kérosène. Il faut donc soit casser les molécules lourdes pour obtenir des molécules plus légères, et ce sont les différents types de cracking, soit recombiner des produits gazeux et des molécules légères par polymérisation.

Les différents procédés de cracking sont le cracking thermique, le cracking catalytique et l'hydrocracking.

Dans le *cracking thermique*, le seul agent utilisé pour casser les molécules est la température.

Dans le *cracking catalytique*, le produit à traiter est également chauffé, à des températures inférieures à celles du cracking thermique, et en présence de catalyseur. Comme, à partir d'un brut, on obtient beaucoup plus d'essence et de meilleure qualité par cette voie, le cracking catalytique est le procédé le plus largement employé aujourd'hui.

L'*hydrocracking*, d'application industrielle plus récente, est un cracking de type catalytique en présence d'hydrogène. La présence d'hydrogène permet d'obtenir des produits de haute qualité, ce qui laisse prévoir un grand développement de cette méthode.

● Le *gaz naturel* est également un mélange d'hydrocarbures dont les deux éléments principaux sont le méthane et l'éthane. Certains éléments étrangers comme le soufre doivent être retirés, sinon le gaz naturel est disponible pour l'emploi sans transformations complexes et c'est ce qui fait tout son intérêt.

Transformations de l'énergie rayonnante

Les échanges d'énergie entre un corps et le milieu extérieur ou entre deux corps peuvent s'effectuer sous la forme de rayonnement constitué par des ondes électromagnétiques.

Nous avons vu qu'habituellement, dans un transport d'énergie, la matière se déplace avec son énergie cinétique et son énergie interne. Dans le processus de transport d'énergie par radiation, les phénomènes utilisés sont du type ondulatoire. Une onde qui se propage peut transporter de l'énergie sans transfert de masse. Une onde simple se caractérise par une loi cyclique (sinusoïde par exemple) qui définit sa fréquence et son amplitude. Dans la réalité, les ondes sont souvent plus compliquées, car elles sont le résultat d'un grand nombre d'ondes élémentaires.

Transformer l'énergie rayonnante consisterait donc à modifier les caractéristiques des rayonnements mis en œuvre. Mais ce type de transformation n'est pas très répandu. On peut citer néanmoins comme exemple l'effet de serre qu'on utilise dans les capteurs solaires du type thermique.

Même si l'énergie rayonnante joue un rôle essentiel dans les échanges d'énergie entre les corps qui conduisent à l'équilibre thermique, cette forme d'énergie n'a été jusqu'à présent employée de façon systématique que dans les hautes températures.

L'utilisation prochaine de l'énergie solaire ainsi que certains développements comme celui du laser donneront un nouveau champ d'application aux conversions et aux transformations d'énergie rayonnante.

fig. 126

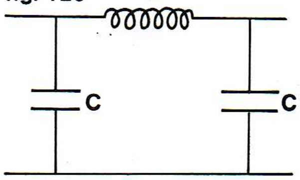

Richard Colin

▲ ***Figure 126 : le filtre en π, montage utilisé pour filtrer la tension de sortie d'un redresseur.***
▼ ***Une tour de cracking : après distillation du pétrole brut, certaines molécules lourdes sont cassées pour obtenir des molécules plus légères : il s'agit là d'une transformation de l'énergie chimique.***

Photothèque Total

Transformations de l'énergie nucléaire

L'énergie nucléaire est liée à l'organisation des noyaux des atomes. La radio-activité naturelle, qui est due à des réactions nucléaires spontanées, a permis de mettre en évidence cette forme d'énergie. On connaît les progrès réalisés depuis une quarantaine d'années dans la mise en œuvre à des fins civiles de ce type d'énergie.

Ce type d'énergie est caractérisé tout d'abord par l'importance des quantités d'énergie mises en jeu lors des réactions nucléaires : l'énergie libérée est environ un million de fois plus élevée dans la réaction nucléaire que dans une réaction chimique intéressant le même nombre d'atomes. Ensuite, il est difficile de domestiquer l'énergie des noyaux, contrairement à ce qui se passe pour d'autres formes d'énergie. Certaines réactions chimiques, comme par exemple la combustion, sont relativement faciles à mettre en œuvre. On ne connaît pratiquement que deux types de réactions nucléaires pouvant être utilisées dans la maîtrise de ce type d'énergie : la *fission* et la *fusion*.

Cette difficulté d'accéder à l'énergie nucléaire fait que la transformation d'énergie dans ce domaine a paru longtemps impossible, contrairement à ce qui se passe pour l'énergie chimique où toutes les réactions donnent lieu à des modifications de l'énergie chimique disponible.

En fait, cette impossibilité a été levée dès que l'on a disposé de flux de neutrons comme on en rencontre aujourd'hui couramment dans les réacteurs nucléaires. Les noyaux soumis à un tel flux subissent par absorption d'un neutron une véritable transmutation, réalisant ainsi le rêve des alchimistes de transformer un corps en un autre.

Dans le domaine énergétique, c'est la fabrication d'éléments fissiles, c'est-à-dire susceptibles de subir la fission dans un réacteur nucléaire, qui nous intéresse. On a vu que ce processus se produit dans tous les réacteurs dès lors que se trouve en place dans le cœur ou autour du cœur un matériau fertile. Ce qualificatif s'applique justement aux noyaux susceptibles d'être transformés, soit directement, soit indirectement, en noyaux fissiles par capture des neutrons. Les matériaux fertiles que l'on connaît sont l'uranium 238 et le thorium 232.

L'uranium 238, sous bombardement de neutrons, se transforme en plutonium qui est un élément fissile. Le thorium 232 se transforme dans les mêmes conditions en uranium 233, élément également fissile.

Il est donc possible de transformer des éléments de peu d'intérêt énergétique en matériau fissile en les plaçant dans un réacteur nucléaire. Cette opération se fait, dans la plupart des réacteurs et la nouvelle matière fissile ainsi formée est d'abord utilisée sur place, et ensuite, le cas échéant, extraite du combustible irradié pour servir à la fabrication de nouveaux éléments combustibles.

Si la substance fissile produite par le réacteur à partir de la substance fertile est différente de la substance fissile consommée par les réactions nucléaires prenant place dans le réacteur, on parle alors de *conversion* et le réacteur est appelé un *convertisseur*. C'est le cas par exemple des réacteurs à eau légère dont le combustible est de l'uranium enrichi U 238 enrichi en U 235. La matière fissile consommée est du plutonium.

Si, au contraire, la matière fissile produite est la même que celle qui a été consommée, on a alors un *réacteur régénérateur*. C'est le cas par exemple d'un réacteur contenant de l'uranium U 238 et fonctionnant avec du plutonium comme matière fissile. Certains réacteurs de ce type peuvent fabriquer plus de matières fissiles qu'ils n'en consomment et on les appelle pour cette raison des *réacteurs surrégénérateurs*.

On voit que la transformation d'un élément en un autre est possible par réaction nucléaire. Une telle transformation revêt une importance capitale si l'élément produit est fissile et donc susceptible de restituer d'énormes quantités d'énergie par fission. Les réserves d'uranium 238 et de thorium 232 qui sont sans valeur aucune constituent en fait des réserves potentielles de matières fissiles dès lors qu'il est techniquement possible d'assurer les transformations convenables dans des réacteurs.

Les réacteurs à eau légère construits aujourd'hui ne sont que de mauvais convertisseurs qui utilisent donc très mal les matériaux fertiles dont on les charge. On voit donc tout l'enjeu qui se cache derrière la mise au point de réacteurs bons convertisseurs ou bons régénérateurs, et en particulier de réacteurs surrégénérateurs.

TRANSPORT ET DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE

Le transport de l'énergie devrait être considéré en toute logique comme un cas particulier du transport des marchandises. Mais l'énergie n'est pas un bien comme les autres, et elle s'intègre mal dans les études générales sur les transports : on constate effectivement que la plupart de ces études omettent bien souvent de traiter le cas particulier de l'énergie. Comment rapprocher, en effet, les mouvements d'énergie électrique avec le transport d'hydrocarbures par oléoducs et gazoducs, ou celui du charbon par minéraliers ?

Pourtant, si l'apparence externe du produit transporté est fort différente, il s'agit, comme cela a déjà été maintes fois signalé, de la même substance : l'énergie aux multiples visages.

On pourrait remarquer que certains produits n'ont pas seulement une vocation énergétique, comme les hydrocarbures par exemple, et à ce titre, il faudrait les considérer comme de simples matières premières. Mais cette distinction n'est pas encore aujourd'hui significative dans la mesure où le caractère énergétique d'un produit est tenu pour essentiel dans notre monde qui est, selon l'image consacrée, assoiffé d'énergie.

Le transport de l'énergie, matière première précieuse entre toutes, se présente donc comme le mouvement d'un produit énergétique d'un point où il est produit vers un autre point où il est désiré pour être consommé.

Sur cette définition au caractère évident, on remarquera tout d'abord que le problème du transport se pose du fait qu'il existe une distance entre le gisement et l'utilisateur. Ce paramètre important que constitue la distance, cet obstacle pourrait-on dire, est toujours analysé en termes de « temps » et de « coût ». Qu'importent les kilomètres si l'obstacle qu'ils établissent est facilement franchi, c'est-à-dire rapidement et à coût faible !

A ces critères qui, en fait, n'en forment qu'un purement économique puisque « le temps, c'est de l'argent », s'ajoutent des critères secondaires dont le plus significatif est certainement la sûreté d'alimentation. Pour cette raison, une source énergétique localisée dans un pays prend pour celui-ci une valeur considérable puisque à la proximité de cette source s'ajoute la sûreté d'approvisionnement. Dans le même esprit, un pays s'efforcera dans toute la mesure du possible de diversifier pour une forme d'énergie donnée ses sources énergétiques afin d'éviter les inconvénients liés à la défaillance de l'une d'entre elles.

On a posé ci-avant le problème du transport en considérant un gisement et un utilisateur. La réalité à l'échelle mondiale est, on le sait, beaucoup plus complexe : il existe plusieurs zones de gisements et les points d'utilisation sont extrêmement nombreux.

Il va donc se créer tout un ensemble de liaisons pour acheminer les produits avec un certain nombre de stockages le long des lignes de transport, et des bouclages pour garantir l'alimentation de façon à permettre le fonctionnement convenable de l'ensemble. On vient de façon schématique de décrire un *réseau de transport*.

L'utilisation de ce terme de réseau est souvent limitée en matière d'énergie au transport de l'énergie électrique, à l'exclusion des autres substances énergétiques telles que le charbon, le pétrole, le gaz naturel, pour ne citer que les plus importantes. En fait, cette restriction n'est pas fondée, car chaque substance sécrète son réseau.

Autre remarque de vocabulaire : on désigne habituellement par « *transport* » le premier mouvement entre la source et un point de traitement. Il est rare en effet que les conditions optimales de transport, qu'il faut rechercher puisqu'il s'agit à ce stade initial de transporter de grandes quantités d'énergie, soient celles de l'utilisation. Il est donc nécessaire de prévoir ensuite une transformation suivie de l'éclatement vers les points d'utilisation. Cette seconde étape est celle de la « *distribution* ».

L'énergie électrique est transportée par exemple sous de très hautes tensions de plusieurs centaines de kilovolts et distribuée sous des tensions allant de 220 volts pour le secteur domestique à quelques kilovolts pour la petite industrie.

Les différentes sources d'énergie ont joué successivement, comme on l'a montré au chapitre sur les ressources, leur rôle dans l'histoire de l'humanité : le bois d'abord, le charbon ensuite, puis le pétrole, le gaz, et aujourd'hui le nucléaire. A un moment donné, différentes sources d'énergie coexistent, entretenant entre elles une vive compétition.

On compare souvent entre elles les différentes substances énergétiques en mettant en regard leurs avantages et leurs inconvénients. Il est frappant de constater que s'il existe des états d'équilibre successifs ,l'évolution, c'est-à-dire le remplacement progressif d'une source d'énergie par une autre, se produit bien avant l'épuisement de la première source. Le bois a été éliminé par le charbon, et ce dernier s'est vu supplanté par le pétrole puis par le gaz naturel alors que les réserves de bois et surtout celles de charbon sont tout à fait considérables.

Il est admis aujourd'hui que ce ne sont plus les qualités intrinsèques des substances énergétiques qui leur permettent de s'imposer mais un ensemble de caractéristiques parmi lesquelles l'aptitude au transport joue un rôle déterminant. Cette aptitude n'est pas la seule à considérer; il faut citer aussi les possibilités de conversion et de transformation qui permettront l'utilisation de réseaux existants, et les facilités de stockage. Ce dernier point est aussi d'importance et il sera examiné dans le prochain chapitre.

Comment définir les qualités d'un réseau de transport? Ce n'est pas une question simple dans la mesure où celui-ci peut revêtir des formes très diverses.

Tout d'abord, il faut mentionner le *rendement de l'opération* qui traduira la perte d'énergie occasionnée par le transport. L'origine en sera une perte de charge dans une conduite ou une perte en ligne sur un réseau électrique par exemple. Dans tous les cas, ce rendement pourra s'exprimer en termes de perte d'énergie ou en coût. On sait que le transport et la distribution de l'énergie électrique dans un pays comme la France entraînent une perte de 7 à 8 % de l'énergie produite.

La *sûreté d'alimentation* sera ensuite un aspect important d'un réseau de distribution. Ce dernier en effet doit être capable de faire face à un certain nombre de situations sans grave interruption de service.

L'*interconnexion des réseaux*, qui permet de prendre en compte la défaillance de quelques sources d'alimentation tout en profitant de l'écrasement de la demande par l'effet de foisonnement, est une nécessité indiscutable.

Il faudrait signaler enfin d'autres aspects plus techniques de l'exploitation des réseaux comme le problème du comptage, c'est-à-dire l'évaluation des quantités d'énergie transportées et distribuées.

Pour illustrer le rôle déterminant du transport dans la création d'un réseau et dans le développement d'une nouvelle source d'énergie, nous développerons à présent quelques exemples.

— L'électricité s'est rapidement imposée, car sa distribution est très facile. En revanche, cette forme d'énergie se transporte mal en raison des pertes en ligne qui deviennent prohibitives avec les techniques actuelles. La distance moyenne de transport est de 100 km environ. Ceci explique les recherches actuelles sur l'amélioration des réseaux de transport électrique.

Cette contrainte du transport est très pesante puisqu'elle oblige à placer les usines de production près des centres de consommation. Elle freine l'exploitation de ressources énergétiques passant par la conversion électrique et éloignées des centres de consommation, comme certains « gisements » hydrauliques d'Afrique ou d'Amérique du Sud, ou thermiques des eaux océaniques. La mise en valeur de ces richesses se fera donc très probablement par conversion sur place de l'énergie électrique produite en une forme énergétique plus facilement transportable, plutôt que par industrialisation des zones situées à proximité des gisements.

— Le gaz naturel, à l'opposé, se transporte très bien, ce qui explique la pénétration rapide de cette forme d'énergie dans nos économies. La distance de transport économique du gaz dépasse les 1 000 km, ce qui justifie la mise en place de réseaux d'échelle continentale, comme on peut le constater en Europe ou aux États-Unis. Le gaz naturel doit donc, selon toute vraisemblance, poursuivre son développement dont on prévoit le point culminant vers la fin de ce siècle.

— Le nucléaire pose un problème particulier. Dans l'état actuel des techniques, on sait que l'exploitation de cette forme d'énergie passe par l'électricité. Pour le nucléaire, c'est à la fois un avantage puisque le réseau de transport et de distribution existe et qu'il suffit donc d'ajouter les centrales nucléaires aux usines électrogènes existantes (à combustibles fossiles et hydrauliques) ; et un inconvénient pour son développement puisque la quantité d'énergie qui pourrait être fournie par le nucléaire sera limitée par les besoins des utilisateurs du réseau. Cette limite, dans les pays industrialisés, se situe, dans l'état actuel des choses, entre 30 et 40 % de l'énergie totale consommée.

Le nucléaire se voit donc assigner une limite qui ne pourra être franchie que par une ouverture de nouveaux marchés à l'électricité ou par un changement radical du support énergétique. Cela signifie que l'électricité fournie par les centrales nucléaires devrait être utilisée pour fabriquer une nouvelle substance énergétique.

On pense que la meilleure solution serait d'obtenir un combustible gazeux qui pourrait remplacer le gaz naturel lorsque celui-ci commencera à s'épuiser.

Plusieurs procédés existent et le plus prometteur est peut-être l'emploi de l'hydrogène. Il n'existe pas encore de techniques industrielles capables de produire l'hydrogène avec une faible consommation d'énergie, mais les recherches dans ce domaine sont nombreuses et on entrevoit aujourd'hui des solutions intéressantes. L'hydrogène produit commencerait par se substituer au gaz naturel pour le remplacer ensuite définitivement.

On voit ici l'importance des possibilités de conversion pour une forme énergétique, car cela lui permet de s'implanter sur des réseaux de transport et de distribution qui au départ n'étaient pas faits pour elle.

— Le charbon, on le sait, se transporte mal. Toutefois, les réserves de ce combustible sont considérables. On comprend alors tout l'intérêt de la gazéification du charbon qui conférerait à ce dernier l'aptitude à être transporté facilement qui lui manque aujourd'hui.

La mise en valeur sur une grande échelle des immenses réserves charbonnières passe sans nul doute par la gazéification de ce produit.

— Si on considère à présent l'énergie solaire, il faut constater que celle-ci est, selon l'expression habituelle, déjà distribuée. C'est là encore un avantage et un inconvénient. L'avantage est, semble-t-il, l'inutilité d'un réseau. En fait, compte tenu de la dilution du rayonnement solaire, cette forme d'énergie est condamnée, si on l'utilise sans concentration, à un rôle d'énergie d'appoint. Son exploitation sur une grande échelle passera donc par la construction de centrales solaires électrogènes qui concentreront la puissance solaire pour la convertir en électricité qui sera alors injectée dans le réseau électrique pour y être transportée et distribuée.

On voit toute l'importance que prend le transport dans le développement d'une nouvelle source énergétique. Le poids d'un réseau dans un tel développement est tout à fait considérable, étant donné l'importance des investissements que représente sa création. Au départ, l'absence du réseau est un frein au développement : ainsi, pendant longtemps, on a brûlé sur place du gaz naturel et on a fermé des gisements qui ne contenaient que du gaz, car le produit, non transportable, était inexploitable. Lorsque le réseau existe, sa présence est une incitation à l'utiliser et il freine le développement d'une énergie concurrente.

Le poids des investissements à consentir et le temps de mise en place d'un réseau sont tels qu'il n'est pas possible de modifier rapidement les circuits de l'énergie dans une économie donnée. A ce titre, les problèmes liés au transport de l'énergie participent à la lourdeur de mise en œuvre de toute politique énergétique.

Distribution de l'énergie chimique

Les moyens de transport et de distribution de l'énergie chimique varient avec la nature des combustibles. Il s'agit en fait d'un poste très important de l'économie de l'énergie.

Nous avons vu précédemment que les écarts de coût de production étaient très grands selon les zones géographiques. L'effort technique a porté sur la réduction du coût de transport qui est un élément capital dans le choix de la source d'énergie à aménager ou à utiliser.

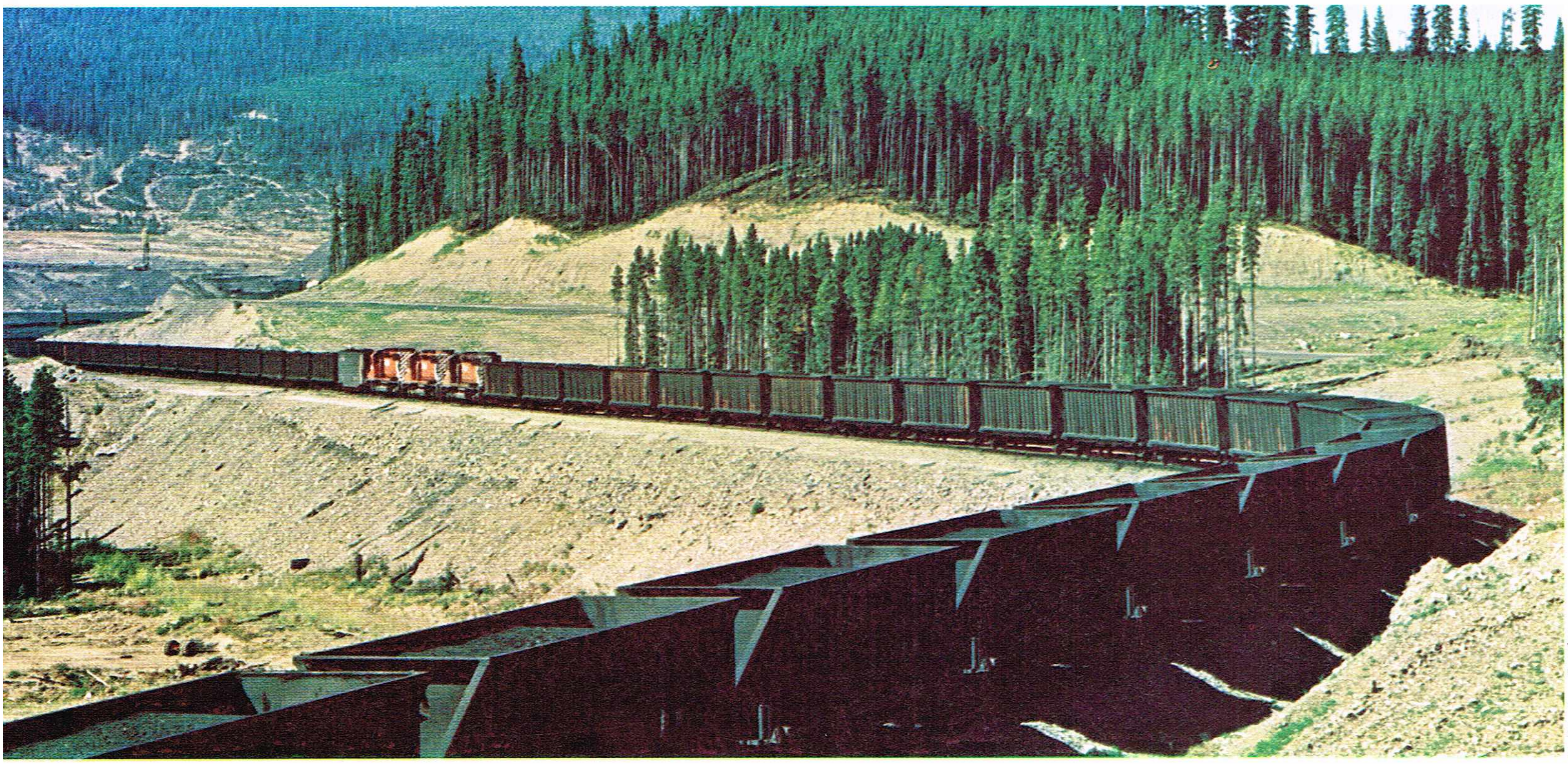

P. Koch - Rapho

▲ *Transport de charbon par chemin de fer à partir d'une mine à ciel ouvert en Colombie britannique (Canada) ; on peut noter, au centre, une unité de traction composée de trois locomotives.*

Les paramètres qui composent les frais de transport sont : les frais de manutention aux extrémités du trajet parcouru, les frais fixes dus aux installations, les frais d'exploitation. La valeur relative de ces trois facteurs varie considérablement selon la forme d'énergie et le moyen utilisé.

Une comparaison sur la base d'une unité énergétique commune des frais entraînés par les divers modes de transport ne tiendrait pas compte de leur rendement ni des obstacles physiques auxquels certains se heurtent, ni enfin de l'utilisation finale. On ne peut comparer les moyens de transport de l'énergie que dans les cas où plusieurs méthodes s'offrent pour transporter : soit la même forme d'énergie ; soit des formes d'énergie qui peuvent se substituer l'une à l'autre pour une utilisation donnée ; soit une énergie primaire et une énergie secondaire qui peut en dériver (électricité).

On ne peut donc pas formuler de lois générales, car il faut tenir compte de l'équivalence énergétique des formes d'énergie transportées.

Transport des combustibles solides

Le transport du charbon peut se faire, lorsqu'il s'agit de franchir les mers, par minéraliers, et sur terre par chemin de fer, par voies navigables intérieures ou par carboducs.

Le transport ne se justifie que si le pouvoir calorifique est suffisamment élevé (supérieur à 4 500 calories/kg). Le lignite doit préalablement être transformé en briquettes ou être utilisé sur place.

Les coûts de transport des combustibles solides sont trop élevés et expliquent qu'en fait une faible partie de la production soit exportée.

Les avantages à la production doivent compenser les pertes sur le transport pour permettre la compétitivité sur les marchés consommateurs. C'est le cas des charbons américains exportés vers l'Europe.

Le transport par chemin de fer du charbon a longtemps représenté une part importante du trafic. Des progrès techniques ont été apportés concernant l'augmentation des tonnages transportables, mais les caractéristiques sont, au fond, restées les mêmes. La mise en service des *trains unitaires* ou *trains blocs* a permis de diminuer fortement les coûts de transport. Un exemple typique en est le train unitaire qui relie la mine de Tunnelton en Pennsylvanie à une centrale thermique située à Martin's Creek, dans le même État, à 635 km de distance.

Le train comprend une locomotive fournie par les chemins de fer et des wagons privés destinés uniquement au service de la navette. Le tarif est calculé d'après le volume. Il n'y a ni dételage, ni triage, ni pesage. Ce trajet s'effectue à grande vitesse. Les frais d'exploitation sont ainsi diminués grâce à l'augmentation du taux d'utilisation du matériel. La rotation rapide des wagons réduit le parc nécessaire et, partant, diminue les investissements. Cependant, pour assurer un chargement rapide, il faut prévoir des capacités de stockage et des trémies de chargement. Pour le déchargement des trains blocs, on utilise des wagons munis d'attelages rotatifs et un culbuteur, ou bien des wagons-trémies. On arrive ainsi à décharger en 20 minutes des convois de soixante-douze wagons de 91 tonnes chacun. Toutes ces opérations sont entièrement automatiques. A partir d'une tour de contrôle surplombant la trémie de déchargement, le chef de train commande la vitesse du convoi ; au fur et à mesure que les wagons passent au-dessus de la trémie, les trapes sont ouvertes par un dispositif électrique qui signale également la fin de l'opération.

Les grands transporteurs de charbon mettent au point actuellement le train intégral qui consistera en section équivalente à trente wagons couplés de façon permanente en groupes de cinq à six avec un convoi moteur entre chaque section. Les convois moteurs sont télécommandés à partir de la tête du train. De tels convois sont prévus pour avoir une autonomie de combustible d'une semaine.

De par l'implantation d'usines grosses consommatrices d'énergie et d'eau le long des voies navigables (cimenteries, sidérurgies, papeteries, etc.), le transport du charbon par voie d'eau s'est développé. Les réseaux de navigation permettent d'utiliser les bateaux de grand tonnage et d'augmenter la vitesse du trafic. C'est la voie navigable qui constitue le moins onéreux des moyens d'acheminement de la mine au consommateur. Mais malheureusement, ceux-ci ne sont pas forcément reliés par un cours d'eau navigable.

Pour les produits de qualité supérieure, combustibles défumés et coke, on peut employer des conteneurs. L'avantage est d'éviter la dégradation du produit par le transport ; cette technique permet également de regrouper à la mine toutes les opérations de pesage et d'accélérer les opérations de transbordement d'un wagon à l'autre, et donc d'améliorer la rotation du matériel roulant.

Nous avons déjà parlé du transport par carboduc qui représente une solution d'avenir. Cependant, il ne concerne que les exploitations où l'on peut utiliser des fines.

▶ *Page ci-contre, un super-tanker ; la dispersion des zones de production et de consommation du pétrole implique le transport sur des distances importantes par grosses quantités ; le commerce pétrolier maritime représente donc plus de 55 % en tonnage du commerce mondial total.*

En fait, il s'agit à chaque fois d'un cas d'espèce. Ainsi, on ne peut pas toujours profiter des investissements faits sur le réseau ferroviaire. Dans le cas de création d'une ligne nouvelle en terrain difficile, il est plus avantageux, même du seul point de vue des investissements, d'installer des carboducs.

Transport des combustibles nucléaires

Le transport des combustibles nucléaires comprend trois phases principales :

— Le transport du minerai à l'usine de fabrication des éléments combustibles.

— Le transport des éléments de combustibles au réacteur.

— Le transport des éléments de combustibles irradiés à l'usine de reconversion.

La première phase ne présente pas plus de difficultés que le transport en vrac de n'importe quel minerai. En revanche, pour les deux autres, il se pose des problèmes de sécurité à cause des risques d'irradiation. Il faut donc utiliser des conteneurs spéciaux. Par exemple, pour transporter 2,66 tonnes d'uranium, le conteneur a un poids de 47 tonnes.

Le coût de transport varie de 1 à 5 selon la phase à laquelle on se place.

Transport des combustibles liquides

Les transport massif des hydrocarbures liquides se fait par navires pétroliers ou par oléoducs.

L'outil de transport est spécifique, car le pétrole est un produit sale et dangereux. La dispersion des zones de production et de consommation implique que ces transports massifs s'effectuent sur de grandes distances. La distribution des produits finis se fait sur des distances plus courtes et utilise également les moyens classiques : voies fluviales, voies ferrées, routes.

Là, c'est la diversité des produits qui pose des problèmes. Il faut en effet ravitailler des marchés de faible importance unitaire en produits tantôt solides (bitume), tantôt liquides (fuel, essence), tantôt gazeux, ou liquéfiés artificiellement. Tous ces produits répondent à des spécifications strictes, et il n'est pas question de les transporter ou de les stocker dans les mêmes récipients, car ils se pollueraient.

En plus des navires et des oléoducs, sont utilisés les chalands, les wagons-citernes et les camions, seuls à permettre la distribution des produits au niveau du consommateur final.

Transport maritime

Le commerce pétrolier maritime représente plus de 55 % en tonnage du commerce mondial total. En 1975, le trafic pétrolier a porté sur plus de 1,5 milliard de tonnes. La capacité des navires était en juin 1976 de 300 millions de tonnes de port en lourd, auxquels il faut ajouter les 20 millions de tonnes des transporteurs mixtes et 45 millions de tonnes désarmées par suite de la crise que connaît actuellement le transport pétrolier.

Les investissements des compagnies pétrolières concernant les tankers correspondent pour 1974 à 8 900 millions de dollars, soit 19 % des investissements totaux.

Les États-Unis, bien que deuxième producteur mondial derrière l'U.R.S.S., importent plus de 300 millions de tonnes par an, soit environ 10 % de la production mondiale. Leur principal fournisseur est l'Amérique latine avec 114 millions de tonnes, puis le Moyen-Orient avec 57 millions de tonnes.

Pour le reste du monde il y a essentiellement deux blocs :

— Pour la consommation, l'Europe occidentale avec 626 millions de tonnes importées dont 70 % du Moyen-Orient, soit 23 % de la production mondiale, et le Japon avec 245 millions de tonnes importées.

— Pour la production, le Venezuela et le Moyen-Orient. Ce dernier exporte près de 34 % de la production mondiale.

Le transport maritime de produits finis ou semi-finis représente une part croissante du tonnage transporté : plus de 20 % en tonnage, mais seulement 10 % en tonnes-kilomètres.

Les distances à parcourir sont très grandes : 13 500 km entre le golfe Persique et les États-Unis ; 20 000 km entre

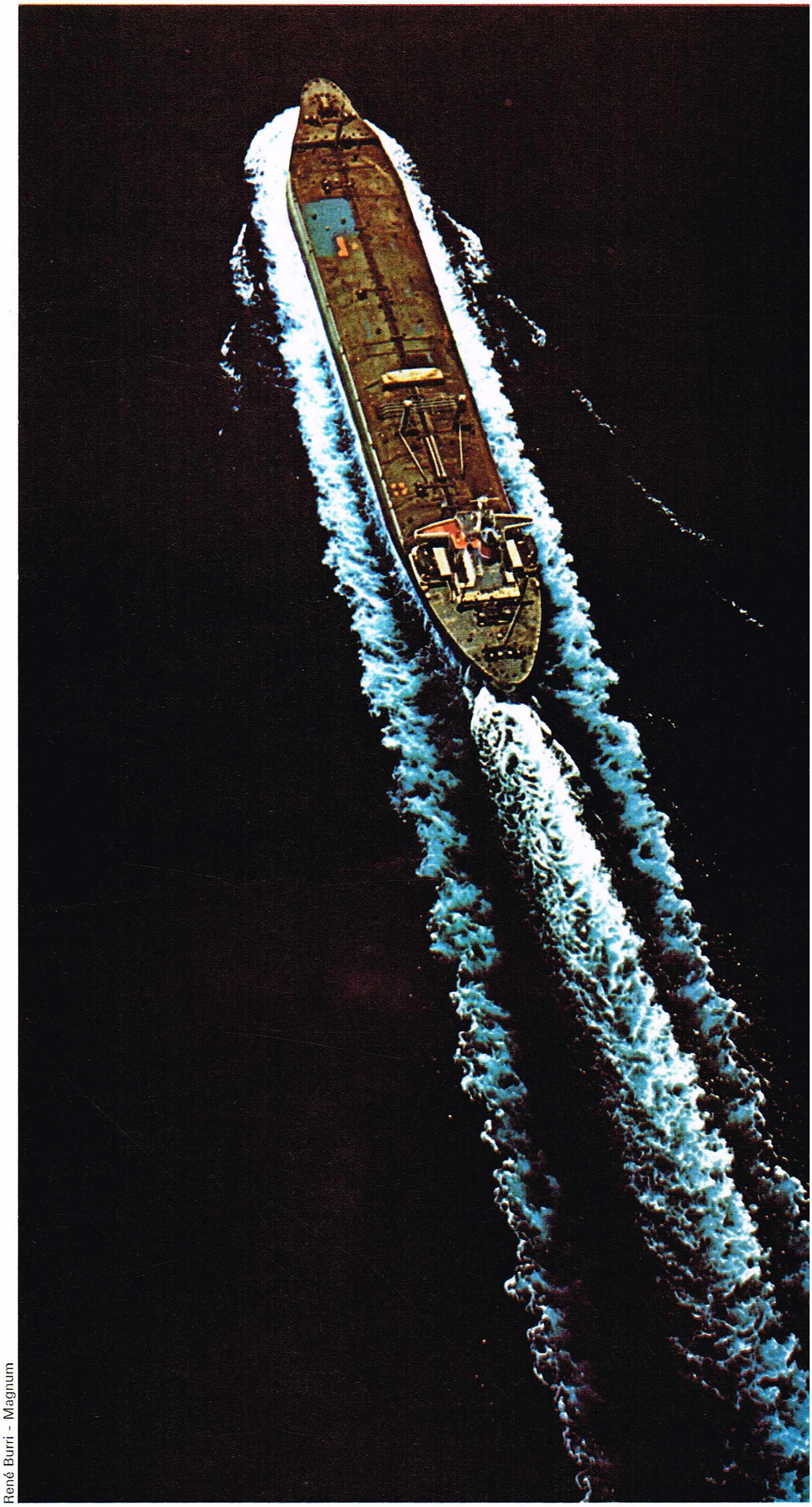

René Burri - Magnum

Rotterdam, port pétrolier de l'Europe du Nord et le golfe Persique en passant par le cap de Bonne-Espérance; 7 800 km entre Marseille et le golfe Persique en passant par le canal de Suez; 12 500 km entre le Japon et l'Arabie Saoudite.

Les routes maritimes étant très longues, les pétroliers combinent l'utilisation des navires avec celle des oléoducs; ainsi le réseau d'oléoducs construit à travers l'Irak, la Syrie et le Liban fait gagner dix-huit jours par rotation sur le trajet vers New York. On comprend ainsi l'intérêt que portent les États-Unis à la stabilité politique dans ces régions.

La flotte pétrolière

Le pétrole, il y a une centaine d'années, était transporté dans des fûts, puis dans des réservoirs en acier disposés dans la coque des navires. Ensuite, la coque servit elle-même de réservoir. La construction de bateaux en acier résolut définitivement le problème. De là vient le nom de *tanker*, qui dérive de *tank*, et qui signifie réservoir ou citerne.

C'est la Seconde Guerre mondiale, avec l'approvisionnement des armées en produits pétroliers, qui imposa la construction d'un nombre considérable de tankers. Les États-Unis lancèrent plus de cinq cents navires d'un modèle standard baptisé T2 dont certains sont encore en service. Des progrès techniques considérables ont été effectués dans ce domaine, notamment en ce qui concerne la construction d'unités de plus grande taille. Cette évolution s'est faite sous l'impulsion des chantiers japonais et suédois.

Les chantiers de Saint-Nazaire ont lancé en 1971 *l'Esso Bretagne*, premier d'une série de seize navires pétroliers de 255 000 tonnes de port en lourd. Actuellement, ils ont réalisé la construction de deux tankers de 540 000 tonnes de port en lourd pour la Shell. Ces bateaux ont 415 m de long et 63 m de large.

La flotte pétrolière mondiale double tous les huit ans. La capacité de construction des chantiers japonais est de plus de la moitié du tonnage mondial.

Les pétroliers des classes 200 000 et 300 000 tonnes représentent actuellement 46 % du tonnage; depuis la dernière guerre mondiale, on a assisté à une course au gigantisme. Actuellement, il y a un surplus de navires sur le marché qui, conjugué avec la crise pétrolière et la diminution du rythme des importations, provoque une crise grave.

Les bateaux suivent les lois du pays dont ils portent le pavillon. Or, les droits d'inscription et les taxes sur les navires ainsi que les charges sociales et les salaires des équipages sont beaucoup plus élevés aux États-Unis ou en Europe occidentale qu'au Liberia ou à Panama. C'est pourquoi un certain nombre d'armateurs de nationalité diverse, mais surtout grecque ou américaine, ont fait immatriculer leur flotte dans ces deux pays. Le pavillon libérien couvre plus de 21 % en tonnage de la flotte pétrolière.

Exploitation des navires

La spécialité du transport est telle que les taux de fret sont très sensibles à l'offre et à la demande. Seulement 35 % de la flotte appartient aux compagnies, la concurrence est donc très vive.

Actuellement, les taux de fret très bas ont conduit les armateurs à désarmer une partie de la flotte. Désarmer le navire permet de diminuer les frais de personnel, d'entretien, de réparations et d'assurances, que les taux actuels ne permettent pas de couvrir. En 1975, 17 % des navires ont été désarmés.

Bien que le prix de revient ait tendance à diminuer en raison inverse de la taille des pétroliers, il est formé de deux facteurs : le coût de construction et les charges d'exploitation.

Les prix de construction ont fortement diminué dans les années soixante grâce à l'effort des chantiers japonais, pour réaugmenter ces dernières années et baisser à nouveau à cause de la surproduction actuelle. L'augmentation de la taille permet de faire des économies d'acier et de gagner sur les puissances propulsives à installer. Le prix des moteurs est proportionnel à la puissance, c'est-à-dire à la racine carrée du tonnage environ. L'effet de taille s'estompe quand on passe à des capacités supérieures à 300 000 tonnes, car il y a là de nouvelles contraintes de construction concernant la rareté des cales sèches, le coût des appareils de sécurité, le double système de propulsion, etc. Le prix de revient au voyage se compose donc des amortissements et charges financières, frais d'exploitation, de port et de combustible.

Le poste des dépenses d'exploitation ramené à la tonne décroît très rapidement avec la taille des navires. Si les taux de fret sont bas, il pourra donc être plus avantageux pour les armateurs de désarmer leurs navires de petite et moyenne dimension. Pour les gros navires, les armateurs réduiront la vitesse, allongeront le temps de séjour dans les ports et étaleront les programmes de réparations et d'entretien.

Réduire la vitesse permet de faire des économies notables sur le combustible. La consommation varie comme le cube de la vitesse. Tant que les économies sur le combustible seront supérieures au montant du fret reçu pour la fraction supplémentaire d'un voyage qui aurait été effectué pendant le temps perdu, l'armateur aura intérêt à diminuer la vitesse. A l'inverse, quand les taux de fret sont élevés, il a intérêt à augmenter les vitesses pour améliorer la rotation des navires et ainsi amortir plus vite les investissements correspondant aux coûts de construction.

De plus, les affréteurs sont souvent liés par des contrats à long terme, donc ils ont intérêt à réduire la vitesse de la flotte affrétée et à profiter ainsi des taux de fret peu élevés sur le marché pour obtenir des tonnages à une somme inférieure au montant économisé sur les coûts. Une réduction de vitesse de 16 à 12 nœuds entraîne une économie d'environ la moitié du coût des soutes.

Le marché est très sensible à la fluctuation des taux de fret et à la concurrence très vive. La durée de vie technique est très grande. Cependant, les navires de petite taille capables de naviguer parfaitement seront remplacés par les navires plus grands. Dans le cas d'un 540 000 tonnes, la réduction des coûts est de 56 % à la tonne transportée par rapport à un pétrolier de 80 000 tonnes. La durée de vie économique est donc plus faible. On opère là des investissements anticipés très coûteux.

Ces investissements sont énormes. Le montant unitaire d'un navire de 300 000 tonnes de port en lourd est supérieur à 52 millions de dollars. Le taux d'assurance est très élevé : 1 % de la valeur pour les navires de 100 000 Tpl; 4 % pour les navires de 450 000 Tpl. L'assurance contre la pollution est prise par les compagnies pétrolières et les armateurs eux-mêmes.

Le plan Tovalop, qui regroupe 94 % de la flotte, rembourse un maximum de 10 millions de dollars par sinistre. Le plan Cristal, qui groupe 80 % de la flotte, ajoute une garantie supplémentaire maximale de 30 millions de dollars par sinistre. Les fonds sont versés par les participants au prorata des tonnages inscrits.

Sécurité et pollution

L'augmentation des tailles des navires entraîne un risque plus grand en cas de sinistre. Cependant, la probabilité des accidents diminue beaucoup. La plupart des accidents ont pour origine un abordage. L'augmentation des tailles diminue l'encombrement sur les routes maritimes. Après guerre, les tankers de type T2 transportaient 16 000 tonnes. Si l'on avait continué la fabrication de ces navires, il y aurait à l'heure actuelle quelque treize mille navires! Une raffinerie portuaire de 4,5 millions de tonnes par an nécessiterait le déchargement d'un T2 toutes les trente heures contre un navire de 540 000 tonnes, comme le *Batillus* de la Shell, tous les quarante-cinq jours.

Pour diminuer les conséquences en cas de sinistre, on procède au compartimentage de la cargaison. Le volume des citernes est réglementé pour limiter les quantités de produits susceptibles d'être répandues à la mer. Ainsi, sur les très grands navires pétroliers de 540 000 tonnes, les citernes de la partie avant, plus vulnérables, ont une capacité de 9 000 m^3 contre 17 000 m^3 pour les citernes latérales et à l'arrière. En revanche, sur les navires de 270 000 tonnes, la taille des citernes varie de 13 000 à 21 000 m^3.

Le corollaire de tout cela est une complexité accrue de manipulation de la cargaison, qui nécessite l'emploi de calculateurs.

Les dimensions, le poids et les vitesses entraînent un effet multiplicateur sur les sinistres et leurs conséquences; cependant, les gains de productivité réalisés permettent l'installation d'équipements évitant les risques de collision et d'échouement.

Les grands navires sont dotés d'éléments technologiques de sécurité très avancés. Le *Batillus*, par exemple, outre l'appareillage classique (deux compas gyroscopiques, deux gyropilotes, deux radars, etc.), est équipé d'un système anticollision géré par ordinateur et dont le but est de traiter les images radar en vue de prévenir les abordages. Pour éviter les accostages brutaux, le navire comporte un loch Doppler mesurant avec une grande précision les vitesses longitudinale et latérale. Le système de radiocommunication est très poussé. Le navire est relié au réseau télex mondial conçu pour assurer des liaisons fiables en toutes circonstances.

Le bâtiment est doté de deux groupes moteurs, de deux hélices et de deux gouvernails entièrement indépendants. De ce fait, le rayon de giration et la distance d'arrêt sont sensiblement égaux à ceux d'un navire de 250 000 tonnes. De plus, en cas d'avarie à l'une des machines, le navire peut continuer à naviguer et à être gouverné.

Les explosions et les incendies constituent les risques spécifiques des navires transporteurs d'hydrocarbures. Une étincelle, pouvant être causée par l'électricité statique qui se produit au cours du nettoyage des citernes, peut provoquer une explosion.

Pour éviter la formation d'atmosphères explosives, on utilise maintenant la *technique du gaz inerte*. Au fur et à mesure que le pétrole est déchargé, il est remplacé par un gaz contenant moins de 8 % d'oxygène. Il s'agit d'un gaz de combustion récupéré après épuration.

Cependant, il subsiste toujours un risque résiduel nécessitant la mise en œuvre de procédés de lutte anti-pollution.

La majeure partie des tonnages déversés dans la mer ne correspond pas à une pollution accidentelle. De tels rejets à proximité de nos côtes ne peuvent provenir d'un pétrolier transporteur de brut : les navires, pour naviguer, doivent remplir leurs citernes d'eau de ballast dont ils ne se débarrassent que dans les ports de chargement. La plupart des ports sont équipés d'installation de déballastage dont l'utilisation est obligatoire, en France notamment.

De plus, la quasi-totalité des navires-citernes est équipée de moyens de rétention à bord des hydrocarbures.

Les eaux de lavage des citernes sont refoulées dans les dernières citernes latérales dont les parois sont pourvues de serpentins de réchauffage ; le dernier mètre des eaux de ballast, dans lesquelles sont mélangés les hydrocarbures, est également refoulé vers les citernes de décantation.

La décantation est facilitée par une élévation de température à environ 65 °C. Au fond de la citerne, on aura de l'eau pure sur laquelle flottent les hydrocarbures. Après détection de la surface de séparation, on pompe l'eau à un débit de plus en plus lent pour éviter le mélange. Il reste évidemment quelques tonnes d'eau. Mais il n'y a plus de risques de pollution. La cargaison suivante est tout simplement chargée sur ces résidus, d'où l'expression « load on top ». L'ensemble est déchargé en raffinerie.

On fait grand bruit autour des sinistres maritimes entraînant une pollution par les hydrocarbures. Cependant, l'examen des statistiques 1975 confirme que l'actualité se nourrit d'exceptions : face aux trois mille cinq cent soixante-cinq navires-citernes en service l'an dernier et transportant quelque 250 millions de tonnes de pétrole brut, il y a eu dix-neuf cas de pollution dont trois seulement ont entraîné des conséquences sérieuses, deux par suite de collision (rejets de 2 000 et 7 000 tonnes respectivement), un par suite d'échouement (rejet de 3 600 tonnes).

Le gigantisme des pétroliers pose d'autres problèmes d'ordre technique. D'une part, les routes maritimes doivent permettre le passage de ces navires en toute sécurité. D'autre part, les ports de débarquement et d'embarquement doivent avoir eux-mêmes une taille suffisante, ainsi que des cales sèches de construction et d'entretien, lesquelles sont peu nombreuses. La plus grande est celle de Lisbonne, avec une capacité d'un million de tonnes.

Il n'existe que six ports de chargement permettant l'accès direct aux quais pour les pétroliers de 300 000 tonnes, dont cinq dans le golfe Persique, et une quinzaine de ports de déchargement, parmi lesquels le port d'Antifer au Havre.

Lorsque les profondeurs sont insuffisantes, il faut utiliser des bouées situées au large. Cette solution ne permet cependant pas d'opérer par tous les temps.

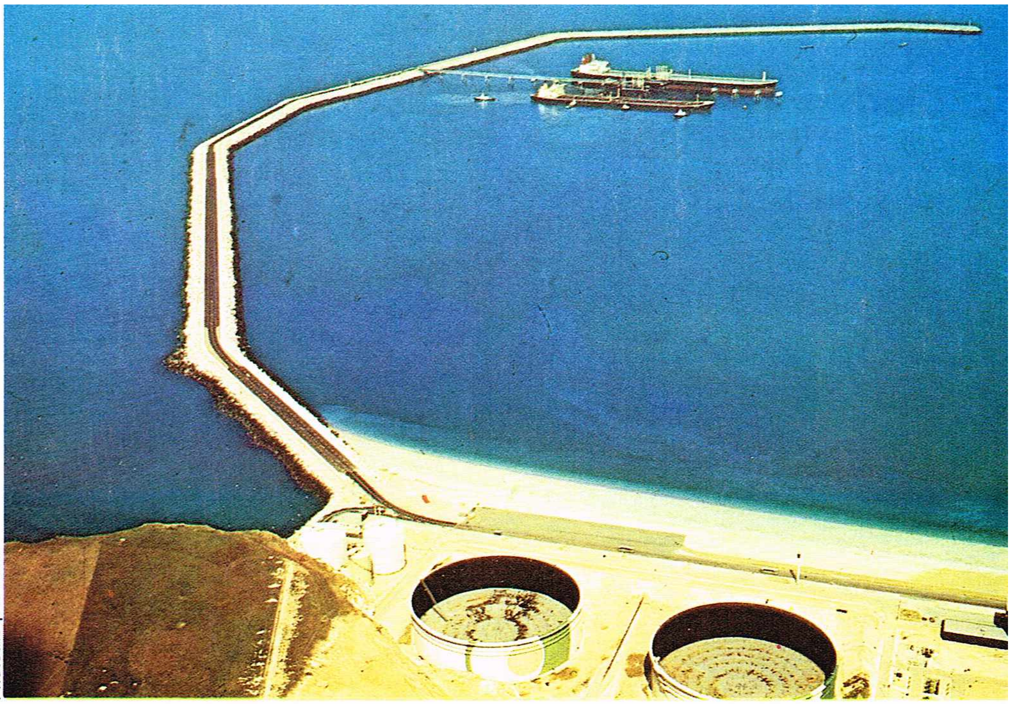

Photothèque Total

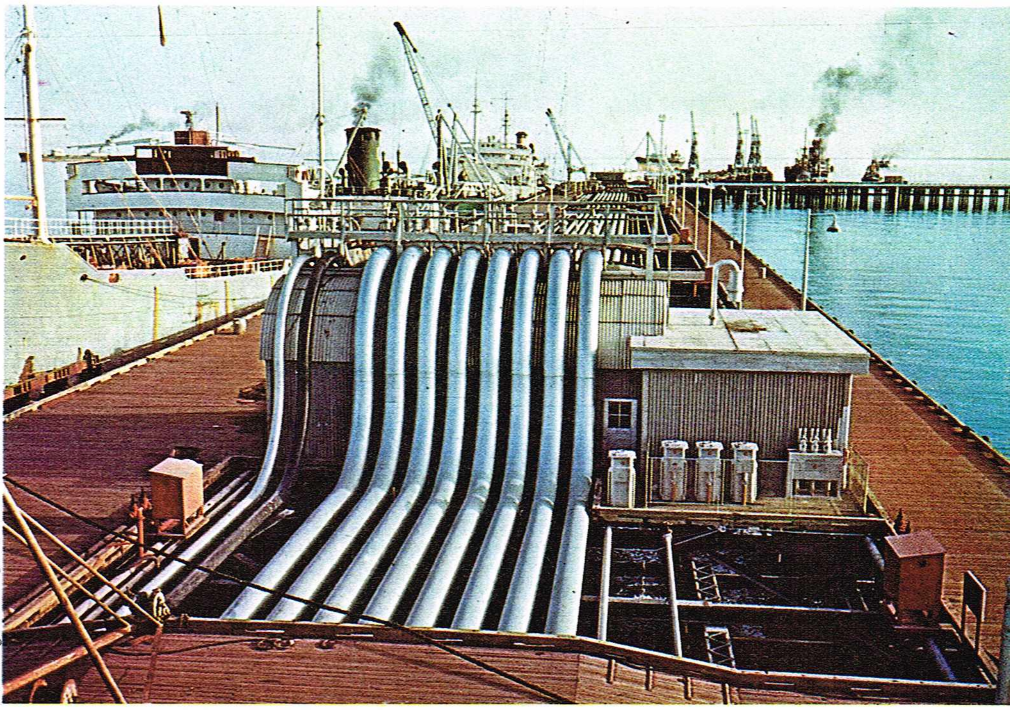

G. Rodger - Magnum

▲ *En haut, le port de déchargement d'Antifer (Le Havre) le jour de l'inauguration ; au premier plan, les réservoirs ; au fond, deux super-tankers : l'Onyx, pétrolier de la C. N. P. et le* **Batillus** *de la Shell. En bas, la principale jetée du port d'embarquement de pétrole de la Koweit Oil Company à Mina'al-Ahmadi au Koweit.*

▼ *Tableau I : longueur du réseau de pipe-lines en exploitation au début de 1975 (en milliers de kilomètres).*

Tableau I
Longueur du réseau de pipe-lines en exploitation au début de 1975 en milliers de kilomètres (d'après Omnium Technique des Transports par Pipe-lines)

Pays ou régions	Pétrole brut	Produits finis	Gaz naturel
États-Unis	122	123	400
Canada	20	5	33
Europe occidentale	11	9	75
U.R.S.S.	38	13	86
Total mondial	235	160	618

Tableau II Principaux pipe-lines de pétrole brut en service au début de 1976 en Europe occidentale (d'après le Comité Professionnel du Pétrole)			
Désignation	**Longueur (en km)**	**Diamètre (en pouces)**	**Capacité (× 10⁶ t/an)**
Wilhelmshaven-Cologne	389	28	24,5 } (80)
2e ligne	244	40	20 }
Rotterdam-Francfort	479	36 et 24	23 (36)
Rotterdam-Anvers	105	34	28 (40)
Lavéra-Karlsruhe (Sud-Européen)	782	34 }	
2e ligne, Fos-Lyon	260	24 }	65 (90)
3e ligne, Fos-Lyon-Oberhoffen-sur-Moder	725	40 }	
Karlsruhe-Ingolstadt Neustadt	287	26	18 (20)
Gênes-Ingolstadt avec bretelle Ferrera-Aigle	931	26 à 12	50
Triestre-Ingolstadt	464	40	39 (54)
Würmlach-Vienne (bretelle du Triestre-Ingolstadt)	420	18	7,5 (10)
Le Havre-Valenciennes	285	12	3,5
Le Havre-Grandpuits	245	20	10,3
Malaga-Puertollano	267	16	
Forties-Cruden Bay (immergé)	185	32	12,5 (20)
Cruden Bay-Grangemouth	208	36	12,5 (20)
Ekofisk-Teesside (immergé)	355	34	15 (25)
Piper-Flotta (immergé)	210	30	12,5

▲ *Tableau II : principaux pipe-lines de pétrole brut en service au début de 1976 en Europe occidentale.*

▼ *Une station de pompage et de dégazage du pétrole brut à Bu Hasa 2 (principauté d'Abu Dhabi).*

Photothèque Total

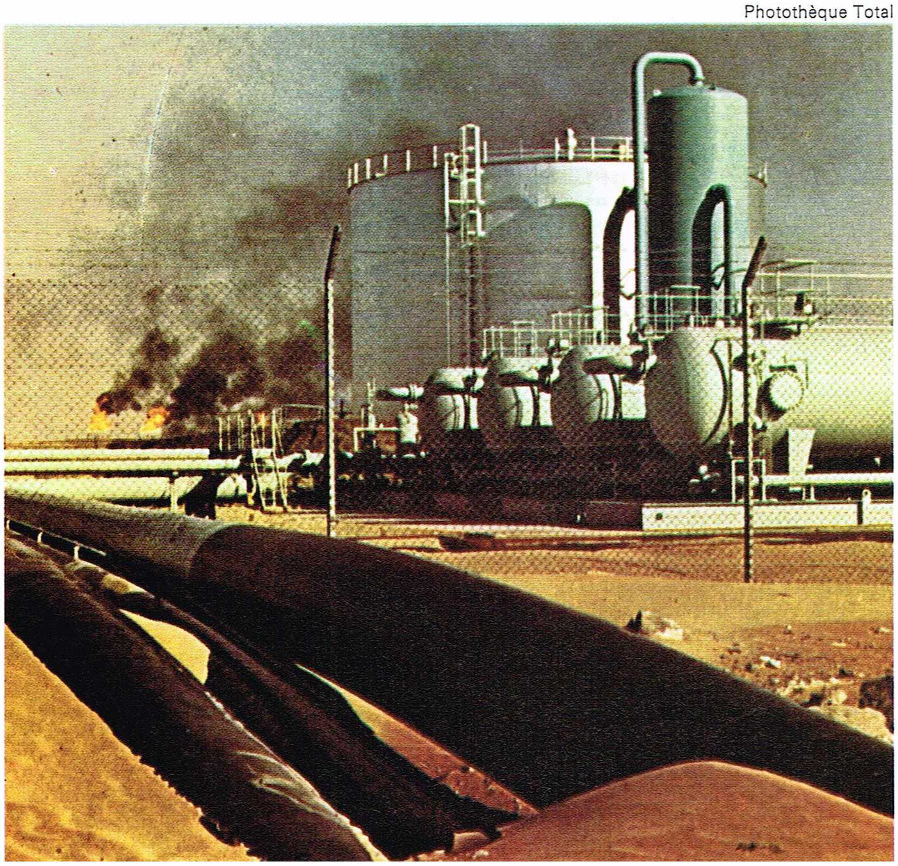

Transport par pipe-lines

C'est aux États-Unis, en 1865, que fut utilisée pour la première fois une conduite pour évacuer la production d'un gisement.

A l'heure actuelle, plus d'un million de kilomètres de conduites sont installés dans le monde. La majeure partie (61 %) sert au transport du gaz naturel, le reste au transport du pétrole brut et des produits finis, sans compter les réseaux de collecte des gisements et ceux de distribution.

En 1974, la part des compagnies pétrolières dans les investissements totaux concernant les pipe-lines a été de 5 %, soit 2 460 millions de dollars. La majorité de ces dépenses (57 %) a été effectuée aux États-Unis. Près de 75 % du pétrole y sont transportés par pipe-lines.

Les grands réseaux de pipe-lines de pétrole brut

Aux États-Unis, les pipe-lines ont été essentiellement construits pour acheminer la production des gisements aux raffineries.

Ailleurs dans le monde, leurs principales fonctions sont : le transport du pétrole des gisements aux raffineries ou aux ports d'embarcation ; la diminution des trajets des navires pétroliers ; l'alimentation depuis les ports d'importation des raffineries intérieures.

Le réseau le plus dense est celui des États-Unis (120 000 km de conduites). L'U. R. S. S. vient au deuxième rang (38 000 km) [*tableau* I].

Dans les régions productrices, des pipe-lines ont été installés pour raccourcir les routes maritimes. Ce genre de pipe-lines dispose en fait d'une rente de situation ; dans cette hypothèse, la société gestionnaire peut fixer un tarif de transport relativement au-dessus de son prix de revient tout en procurant à l'utilisateur du pipe-line un avantage économique.

Le Sumed, entre Suez et Alexandrie, double le canal de Suez ; en outre, il concurrence le monopole du T. I. P. line d'Israël reliant la mer Rouge et la Méditerranée. Mais il semblerait que le comité des transports et des communications du Conseil égyptien fût plus favorable à une augmentation de la capacité du canal qu'à celle du pipe-line. Par le canal, des navires de 150 000 tonnes pourraient passer en pleine charge et ceux de 250 000 tonnes pourraient passer sur ballast.

Les oléoducs du Moyen-Orient permettent principalemet d'exporter une partie de la production vers la côte orientale de la Méditerranée, réduisant ainsi dans de fortes proportions la durée du voyage par mer. Le plus connu est le T. A. P. line *(Trans Arabian Pipe-line)* qui relie l'Arabie Saoudite au port de Sidon au Liban.

La sécurité politique est capitale pour la bonne exploitation des oléoducs. L'Irak par exemple a décidé la construction d'une conduite évitant le territoire syrien et débouchant au port de Dortyol en Turquie ; ce pays, de plus, a ouvert une conduite, le *Strategic Pipe-line,* qui relie les gisements du Nord à l'extrémité septentrionale du golfe Persique et peut fonctionner dans les deux sens, et a fermé l'oléoduc rejoignant Tripoli et Banias.

L'Iran, qui a également de nombreux problèmes avec l'Irak, a un projet similaire pour un pipe-line dont le tracé contourne soigneusement le territoire irakien, traverse la partie la plus montagneuse du Moyen-Orient, et aboutit à la côte turque de la Méditerranée.

Dans les pays consommateurs, les oléoducs relient les ports d'importation aux raffineries intérieures. Le développement des oléoducs est récent ; la première conduite importante a été posée en Europe en 1959. Le réseau se subdivise en deux systèmes importants (*tableau* II) :

— L'un, Nord-Sud, qui relie les ports de la mer du Nord à l'Allemagne et la Belgique.

— L'autre, Sud-Nord, qui relie les ports de la Méditerranée (Gênes, Trieste, Fos-sur-Mer) aux régions du centre de l'Europe.

Exploitation des oléoducs

Les investissements sont constitués des éléments suivants : l'étude du tracé, le matériel, l'installation, les stations de pompage, les télécommunications et les stockages.

Afin d'augmenter la capacité du pipe-line, il est possible d'installer des stations de pompage. Ainsi, la première conduite du pipe-line Sud-Européen est passée d'une capacité de 10 millions de tonnes par an avec trois stations de 5 000 chevaux à une capacité de 35 millions

de tonnes par an avec seize stations de 10 000 chevaux. Pour une capacité annuelle donnée, les investissements sont pratiquement proportionnels au diamètre. Le poids d'acier augmente plus vite que le diamètre, mais les dépenses d'installation augmentent plus lentement.

La capacité de la conduite peut être multipliée par quatre grâce à l'adjonction des stations de pompage. L'effet d'échelle pour un pipe-line est très prononcé, car cela correspond à un investissement supplémentaire de 25 %. Dans ces conditions, il est intéressant d'installer des conduites de gros diamètres, même si cela entraîne un suréquipement les premières années, pour pouvoir faire face à l'augmentation postérieure des besoins de transport.

Les dépenses d'investissement pour les conduites varient fortement avec les conditions géographiques ; le rapport peut être de 1 à 20.

En mer, on utilise des barges spéciales halées sur des ancres. Les stations de pompage doivent être installées sur des plates-formes très coûteuses. On comprend dans ces conditions que l'évacuation de la production par conduites immergées ne peut être envisagée pour des gisements très éloignés des côtes que s'ils ont une production très élevée ou si plusieurs gisements sont reliés au même pipe-line (cas du golfe du Mexique). En mer, le coût de la conduite est en moyenne cinq fois plus élevé qu'à terre.

En Arctique, la technique du pipe-line est plus complexe, étant donné les différences de températures et les problèmes d'environnement. Le coût de la conduite allant de Prudhoe Bay à Valdez, en Alaska, est équivalent à celui d'une autoroute urbaine.

La consommation d'énergie pour vaincre les pertes de charge est inversement proportionnelle à la puissance cinquième du diamètre et fonction de la viscosité du pétrole transporté.

L'installation de stations de pompage supplémentaires augmente très rapidement les frais d'exploitation unitaires. Les investissements s'élèvent avec le diamètre et lui sont en première approximation proportionnels. Les frais d'exploitation diminuent considérablement quand le diamètre augmente ; il y a donc un diamètre optimal des conduites à trouver en fonction des prévisions d'exploitation. Pour un pipe-line déjà construit, il existe un diamètre optimal lié à une puissance de pompage. La conduite doit transporter la quantité correspondant à ce débit, sous peine de voir le prix de revient unitaire augmenter sensiblement, puisque la plupart des dépenses sont des charges fixes.

Il y a donc une certaine rigidité économique d'exploitation à laquelle s'ajoutent les vulnérabilités des conduites aux modifications des circonstances politiques.

Distribution des hydrocarbures liquides

La distribution doit permettre la satisfaction des besoins des consommateurs. Les difficultés proviennent de la très grande dispersion géographique de ces derniers, ainsi que de la disparité des produits et des quantités à fournir. La grande variété des produits et la précision des spécifications font que l'aspect qualitatif de la distribution est une contrainte très importante au stade final du raffinage, pour le stockage, et aussi pour le transport afin d'éviter la pollution réciproque des produits livrés.

Le poids économique de la distribution dans l'économie de la chaîne pétrolière est considérable. Les frais d'exploitation sont plus élevés que pour les autres branches d'activité de la chaîne pétrolière. La part de la distribution dans le coût de la tonne de produits finis consommés est de 15 % en Europe, si l'on tient compte des impôts et taxes perçus dans les pays producteurs et le pays consommateur. Si l'on ne retient que les coûts techniques, elle passe à 60 % environ et le poids économique devient énorme.

Cette branche fait l'objet d'un effort pour augmenter la productivité et rationaliser la commercialisation. On peut constater une évolution importante dans les réseaux. Ainsi, les points de vente trop proches ou à faible débit ont été supprimés, le service à la clientèle amélioré. L'essence, qui avait commencé à être distribuée en bidons chez l'épicier, par une sorte de retour de l'histoire est maintenant vendue dans les supermarchés, et les stations-service se transforment en boutiques.

L'importance des fluctuations saisonnières est très forte.

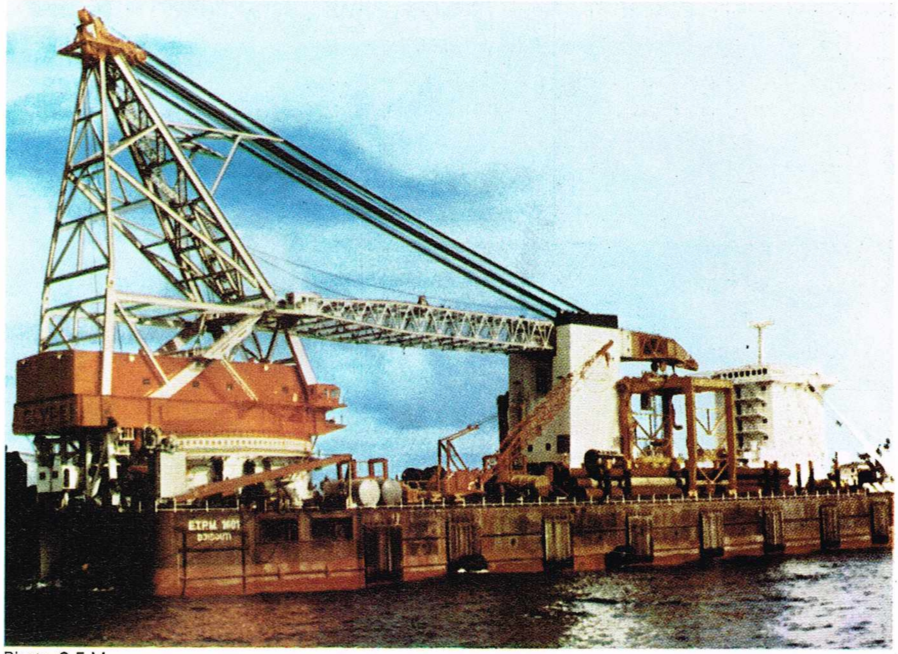

Photo C.E.M.

▲ *La barge ETPM 1601 en service en mer du Nord pour la pose de pipe-lines de gaz ou de pétrole ; en mer, le coût d'une conduite est en moyenne cinq fois plus élevé qu'à terre.*

Près de 80 % des consommations se situent entre le 30e et le 60e parallèle de l'hémisphère Nord, ce qui revient à dire que presque tous les clients ont froid ou circulent davantage en même temps.

La station-service, qui joue un rôle important pour la publicité, ne représente que moins du quart des ventes et ne doit pas faire oublier les autres systèmes de distribution. La fiscalité à ce niveau est très lourde et complexe. Un bon impôt indirect doit frapper un objet de grande consommation qui ne soit pas considéré comme de première nécessité afin de ne pas toucher les très faibles revenus. De plus, la consommation par rapport au prix de vente doit être inélastique, pour que le poids relatif des taxes ne soit pas une incitation à moins consommer. La taxation des produits pétroliers remplit ces conditions et représente plus de 10 % des revenus de l'État. La cible de choix est l'essence bien que sa consommation ne corresponde pas toujours à une dépense de loisir, car l'automobile sert d'outil de travail également.

Le cadre juridique de la distribution est également complexe. Il porte sur deux domaines principaux : la

▼ *Un exemple de transport particulier de produit fini, celui d'huile par gondole à Venise (Italie).*

Photothèque Total

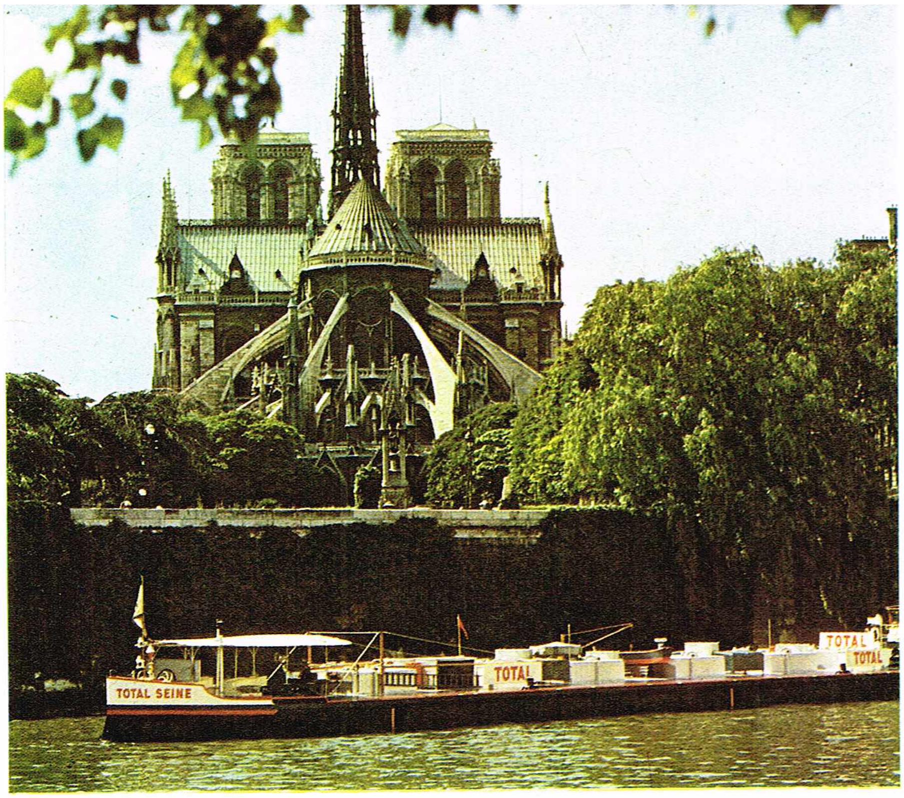

Photothèque Total

▲ *Distribution de produits finis par péniche (devant Notre-Dame de Paris).*

réglementation de la concurrence, et la réglementation concernant la construction des stations-service ou des dépôts, liée à l'urbanisme, la sécurité, la pollution, etc.

Dans tous les pays consommateurs, il existe un système réglementant la concurrence. Il est très strict en ce qui concerne les stations-service. Ainsi, en France, la localisation et le nombre sont contrôlés par la Direction des carburants.

C'est le consommateur qui se rend aux points de vente dans le cas de la commercialisation des carburants. En revanche, pour distribuer le fuel domestique, ce sont les revendeurs ou les sociétés elles-mêmes qui livrent les clients. Pour les ventes de gaz liquéfiés, la vente se fait dans sa majorité par l'intermédiaire d'emballages consignés; les autres utilisateurs sont équipés de cuves.

La part consommée par les industries est importante. Elle correspond à 25 % des gaz liquéfiés, 100 % des carburéacteurs, 30 % du fuel domestique, 33 % du fuel lourd, 100 % des bitumes, 66 % des lubrifiants.

Transport des produits finis

Transport par pipe-lines

Les fluctuations saisonnières de la consommation entraînent que le débit moyen annuel d'un pipe-line de produits finis dépasse rarement 60 à 70 % de sa capacité théorique. Cela entraîne donc une augmentation du prix de revient unitaire. De plus, ce genre de pipe-line sert au transport de nombreux produits pétroliers, ce qui entraîne des zones de contamination qu'il faut éliminer. On essaie donc d'expédier à chaque fois les plus grosses quantités possibles de chaque produit et selon des séquences correctement choisies en fonction des caractéristiques des produits.

Certains produits doivent être réchauffés, compte tenu de leur viscosité et de leur point de congélation : c'est le cas du fuel lourd. Certains pipe-lines sont donc réservés à l'alimentation des gros dépôts dans les zones de forte consommation.

▼ *Tableau III : répartition des expéditions au départ des raffineries et des points d'importation (en 1975) selon les différents modes de transport.*

Tableau III

Répartition des expéditions au départ des raffineries et des points d'importation (en 1975) selon les différents modes de transports (d'après le Comité Professionnel du Pétrole)

Modes de transports	Tonnages (en milliers de tonnes)	Pourcentages	
Caboteurs	5 886	6,1	
Chalands	12 104	12,7	
Wagons	13 508	14,1	
Camions	33 430	34,9	
Pipe-lines	17 081	17,8	32,2
Canalisations directes *	13 742	14,4	
Total	95 751	100	

* Par « canalisations directes », on entend les canalisations de faible longueur reliant certaines raffineries à des entrepôts voisins, ou encore à des stockages de gros consommateurs, tel E. D. F.

Transport par voies d'eau intérieures

C'est là le moyen de transport qui permet les frais d'exploitation les plus faibles. Les facilités de chargement des liquides permettent une automation poussée. Cependant, ce moyen de transport est lent et est donc rentable surtout pour les produits lourds de moindre valeur marchande.

Cependant, il faut pouvoir disposer d'un réseau de voies d'eau navigables étendu et interconnecté. Cet outil de transport, qui était remarquable en France sous la IIIe République, s'est dégradé depuis la guerre, car il n'est pas toujours adapté aux conditions de trafic de bateaux de grande taille. La solution consistant à utiliser des chalands, réservoirs flottants, et un engin propulseur permet une plus grande flexibilité d'exploitation. On utilise la partie motrice en pousseur pour diminuer la consommation d'énergie, car les remous de l'hélice ne viennent pas ralentir la marche des barges, comme dans le cas du remorquage.

Transport par voie ferrée

Près des trois quarts de ce transport correspondent à des mouvements depuis les raffineries ou les ports d'importation vers les dépôts de l'intérieur.

La voie ferrée est particulièrement bien adaptée au transport des gaz de pétrole liquéfiés. Pour ceux-ci, dans les canalisations, il y a des risques de formation de bouchons de vapeur; en ce qui concerne les voies d'eau, le coût des ruptures de charge qu'elles entraînent est prohibitif. Seules les citernes routières ou ferroviaires remplissent cette fonction d'une façon économique.

Pour transporter les produits à haut point de ramollissement, on utilise des wagons équipés d'un circuit de réchauffage raccordable extérieurement à un réseau vapeur basse pression, ou des wagons calorifugés. De plus, l'outil roulant est utilisé comme stockage mobile temporaire.

Cabotage

Il s'agit là du transport le long des côtes sur un court trajet et principalement pour des raisons géographiques. Les taux de fret varient beaucoup avec la régularité des affrètements.

Transport par route

Il s'agit du transport complémentaire des transports massifs. C'est le seul moyen utilisable au stade ultime de la distribution. Son coût est très élevé, mais la densité de l'infrastructure routière lui donne une grande souplesse.

Les sociétés pétrolières font de plus en plus appel à des firmes de location. De cette manière, elles évitent de gérer un parc de véhicules important, tout en conservant une politique de marque commerciale, car les contrats de location les autorisent à apposer leur sigle sur les véhicules.

Le transport routier est très réglementé, la fiscalité très complexe et les frais de personnel très lourds.

On trouvera sur le *tableau* III une comparaison quantitative entre les divers modes de transport utilisés pour les produits pétroliers en France.

La part des camions est très importante et s'est maintenue ces dernières années malgré le coût de transport élevé. Cela s'explique également par le développement des raffineries intérieures qui assurent dans leur zone de desserte des livraisons directes sans passer par l'intermédiaire de dépôts ravitaillés par fer ou par eau.

Pour les transports à longue distance et massifs, on utilisera de préférence les navires pétroliers et les oléoducs. La concurrence entre les divers modes de transport est limitée à l'intérieur de tranches délimitées en tonnage comme en distance.

En fait, les moyens de transport sont complémentaires et les aspects qualitatifs, financiers et les caractéristiques physiques du trajet sont des éléments importants du choix de l'outil de transport.

Transport du gaz naturel

La part du gaz dans la satisfaction des besoins en énergie des pays gros consommateurs est très importante, comme nous l'avons déjà vu.

Le consommateur privé individuel y voit de nombreux avantages. Sous forme gazeuse, ce combustible ne demande aucune installation de vaporisation préalable à l'utilisation. Il est polyvalent et peut être utilisé aussi bien pour la cuisine que pour le chauffage. Il est immédiatement disponible et dans l'exacte quantité désirée. Il ne nécessite pas de stockage. Il est propre.

Ces mêmes avantages existent pour l'utilisation industrielle ; les plus importants sont alors l'absence de stockage et la simplicité plus grande des brûleurs. Mais, en plus, le gaz naturel permet de contrôler d'une façon précise les atmosphères réactionnelles. Ainsi, il trouve des débouchés spécifiques dans l'industrie chimique, pour certains procédés métallurgiques, de même dans l'industrie de la céramique et des verres.

Transport maritime

Comme pour le pétrole, il existe un déséquilibre entre les régions productrices et consommatrices. En dehors des États-Unis d'Amérique et de l'U. R. S. S. où l'équilibre des ressources et de l'utilisation est réalisé, les pays consommateurs sont l'Europe de l'Ouest et le Japon, alors que les pays producteurs sont l'Afrique, le Moyen-Orient et la région Asie du Sud-Est-Océanie. Le transport maritime s'impose donc.

Le volume spécifique du gaz est trop grand, et l'on doit passer par le biais de la liquéfaction pour rendre le transport du gaz compétitif par rapport à celui des hydrocarbures liquides. En effet, on peut dire que 1 000 m^3 de gaz naturel équivalent à 1 tonne de pétrole brut. Il y a donc un rapport de 1 à 1 000 entre les volumes de gaz naturel et de pétrole nécessaires pour fournir la même énergie.

Comprimer le gaz naturel n'est pas à ce niveau une solution envisageable, car il faudrait des pressions de l'ordre de 300 atmosphères. Dans ces conditions, le poids à vide des récipients susceptibles de résister aux contraintes mécaniques résultant de la pression interne serait trop important par rapport à la charge utile. Ce n'est pas le cas au niveau du consommateur final, car, sur de petites quantités et de courtes distances, le coût compte peu devant la nécessité d'avoir du gaz.

Pour réduire le volume du gaz naturel, on peut envisager une transformation chimique du gaz en un produit énergétique liquide dans les conditions normales de température et de pression. Le produit chimique qui réalise le plus facilement ces conditions est le méthanol. Cette transformation est à l'étude pour l'Arabie Saoudite, où l'on envisage la création d'unité géante de production de « methy fuel » (méthanol impur). Le produit serait ensuite expédié vers les États-Unis dans des pétroliers spécialement aménagés.

L'inconvénient du procédé est qu'il ne restitue au moment de l'utilisation finale qu'une partie de l'énergie primaire disponible au départ en raison des consommations intervenues aux différents stades de la transformation.

A pouvoir calorifique égal chez le consommateur final, le méthanol demande 50 % de plus de gaz naturel que le gaz naturel liquéfié (G. N. L.). D'autre part, le méthanol est un neurotoxique dangereux, et les risques de pollution en cas d'accident d'un navire seraient très graves.

C'est sous forme liquéfiée à — 160 °C, sous la pression atmosphérique, que l'on transporte le gaz naturel. A cette température, son volume est 600 fois plus petit et sa densité est environ la moitié de celle du pétrole brut. On atteint ainsi le seuil économique du pouvoir énergétique spécifique.

Cependant, le coût reste élevé, car on ne peut isoler le navire méthanier des asservissements technologiques que constitue une chaîne de liquéfaction. La manutention et le stockage à si basse température posent des problèmes technologiques spécifiques. Le prix d'un méthanier de 120 000 m^3 est presque le même que celui d'un pétrolier de 500 000 tonnes.

La chaîne de G. N. L. nécessite un ensemble intégré allant du champ jusqu'au réseau de gazoducs du pays consommateur, c'est-à-dire : un gazoduc allant des gisements jusqu'à la côte ; une usine de liquéfaction sur la côte ; un terminal d'expédition comprenant le port, les stockages et les installations de chargement ; une flotte de méthaniers ; un terminal de réception dans le pays d'arrivée ; une unité de regazéification.

Photothèque Total

▲ ***Le Hilli, méthanier de 297 m de longueur, peut transporter 125 000 m³ de gaz liquéfié ; lancé en décembre 1976 par un consortium de compagnies pétrolières, il a été affrété pour une période de 20 ans sur le trajet Abu Dhabi-Japon. Ce navire a été construit suivant la technique des cuves-autoporteuses : en effet les réservoirs sont indépendants de la structure du bateau.***

Le commerce maritime a couvert en 1976 une capacité de 22,8 milliards environ de m^3/an, qui sera portée en 1985 à 247,3 milliards de m^3/an si tous les projets se réalisent. Cependant, il est nécessaire d'obtenir une étroite coordination technique entre les pays producteurs, les consommateurs et les sociétés qui travaillent au projet, pour ne pas voir des retards dans les plans de développement.

Plusieurs *procédés de liquéfaction* ont été successivement appliqués :

— A Arzew (Algérie) et à Kénaï (Alaska), chaque ligne de liquéfaction comporte trois circuits de réfrigération indépendants disposés en cascade utilisant comme fluide réfrigérant le propane, l'éthylène et le méthane. Le même souci qui a guidé le choix de ces trois fluides a conduit à ramifier chaque circuit en trois branches fonctionnant à des pressions et des températures différentes (les températures d'ébullition à la pression atmosphérique sont les suivantes : propane — 40 °C, éthylène — 104 °C, méthane — 161 °C).

— Une nouvelle technique, à cascade incorporée (Marsa el breja en Libye et Skikda en Algérie), utilise un fluide frigorigène unique qui est un mélange au sein duquel se condensent successivement, à des températures différentes mais sous la même pression, les phases liquides des constituants présents dans le gaz naturel à liquéfier.

— Un troisième procédé est envisagé qui fait précéder le cycle à fluide frigorigène unique par un cycle au propane permettant l'utilisation d'un compresseur centrifuge supplémentaire.

La deuxième technique permet de réduire les coûts de liquéfaction et de fabriquer des unités de plus grande taille, permettant ainsi des économies d'échelle importante.

En ce qui concerne les *méthaniers,* il y a deux techniques : celle des cuves autoporteuses et celle des cuves intégrées.

— Le procédé des cuves autoporteuses consiste à poser dans la cale du navire des réservoirs, parallélépipédiques ou cylindriques, qui sont donc indépendants de la structure du bateau. Ces réservoirs sont conçus pour supporter par eux-mêmes le poids de la cargaison ainsi que les efforts résultant des mouvements du navire. C'est avec ce type de navires qu'ont été installées les premières chaînes de liquéfaction.

Celle d'Arzew, près d'Oran, dont la capacité était de 1,5 milliard de m^3/an destinés pour 1/3 au Gaz de France et le reste à la Grande-Bretagne, avec 3 méthaniers, *Methane-Princess, Methane-Progress* et le *Jules-Verne*

français. De même, les quatre méthaniers d'Esso destinés au trafic entre la Libye et l'Espagne sont de ce type.

Par la suite, des perfectionnements ont été apportés par Technigaz qui a conçu en 1970 des cuves autoporteuses sphériques et Gazocéan qui, en 1971, avec *l'Euclide,* a modifié le système de support et d'ancrage des sphères.

Les chantiers norvégiens réalisent la construction des sphères en série et en dehors du navire, ce qui représente une économie sur le prix du bateau.

— Les techniques dites à cuves intégrées utilisent la coque du navire. Celle-ci doit être capable de supporter la pression statique du liquide et les surcharges dynamiques dues aux mouvements de la cargaison. Les cuves intégrées peuvent comporter des membranes gaufrées, comme dans le *Pythagore* de Gazocéan, pour absorber les grandes variations de température, ou une membrane en métal particulièrement rigide. Cette technique permet une réduction sensible des quantités d'acier spécial et une meilleure utilisation du volume disponible, et représente une économie d'environ 20 % sur le coût du navire.

Comme dans le cas des navires pétroliers, on assiste à une augmentation de la taille des navires pour permettre une économie sur les coûts de transport. Cependant, la différence fondamentale réside dans le fait qu'il y a des pertes le long de la chaîne. Dans l'usine de liquéfaction, on utilise comme énergie une partie du gaz; cette autoconsommation est de l'ordre de 16 à 18 % de la quantité de G. N. L. produite. Les pertes du terminal sont négligeables, car elles sont récupérées et mélangées aux gaz d'émission. Par contre, sur les navires, la perte journalière est de l'ordre de 0,25 % de la capacité. Ce gaz peut être utilisé concurremment avec le fuel pour la propulsion du méthanier. La vitesse du navire est donc là un facteur important de l'économie du transport. Au niveau de la regazéification, on peut envisager de récupérer les frigories. Ainsi, à Fos-sur-Mer, la société Air-Liquide les utilise pour produire de l'azote et de l'oxygène liquides.

Transport terrestre

Le transport par conduites a pendant longtemps été le seul moyen de transport du gaz envisageable sur de longues distances. On mentionnera, à ce sujet, le projet Bechtel qui a fait l'objet d'études approfondies entre 1951 et 1955. Il s'agissait d'acheminer le gaz naturel du Moyen-Orient vers l'Europe. Le gazoduc devait avoir une longueur de 4 000 km, partir de l'Irak à travers la Turquie, la Grèce, la Yougoslavie, l'Autriche, l'Allemagne du Sud et atteindre le nord de la France. Ce projet a été abandonné par suite de la découverte de gisements plus proches en Algérie, en Libye, aux Pays-Bas et en mer du Nord, et de la mise au point des transports maritimes.

C'est surtout dans les pays consommateurs que l'on rencontre les grands réseaux de transport du gaz. Près des deux tiers des pipe-lines de gaz se trouvent dans le continent nord-américain, où ils forment un formidable réseau interconnecté sans soucis de frontières politiques. Ce réseau s'articule autour de quatre grands axes :

— Le Trans-Canada, long de 3 650 km, en 34 pouces de diamètre, sensiblement ouest-est, relie les régions productrices de l'Alberta aux centres consommateurs de la côte est du Canada et de la Nouvelle-Angleterre.

— Le Pacific Gas Transport, long de 2 246 km, en 36 pouces, alimente San Francisco à partir des mêmes gisements.

— Le Trans Continental, long de 3 975 km, en 30 et 42 pouces, relie le Texas à New York et à la région est des États-Unis.

— Le pipe-line d'El Paso, en 34 pouces, relie le sud des Millands à la Californie.

Des canalisations de plus faible diamètre assurent les interconnexions et la distribution au niveau du consommateur final. Les conduites de gaz sont systématiquement de diamètre supérieur à celles de pétrole.

La première raison tient à la tarification du gaz aux États-Unis, où la Federal Power Commission contrôle la politique gazière par l'intermédiaire d'un prix maximal à la commercialisation et non par les quantités produites comme pour les hydrocarbures liquides. Ainsi, des prix artificiellement bas ont conduit les exploitants à profiter au maximum des effets d'échelle en installant des canalisations aussi largement dimensionnées que possible et à ne desservir que de gros centres de consommation.

La deuxième raison est d'ordre technique. Le volume spécifique du gaz est très important et, pour véhiculer un même pouvoir calorifique, il faudra un volume plus grand de gaz naturel, et donc un débit plus fort.

Ainsi, pour deux conduites, l'une de gaz, l'autre de pétrole brut, fournissant chacune 900 milliards de thermies par an, celle de pétrole aura un diamètre de 120 cm et débitera 90 millions de tonnes par an avec une puissance de 30 000 kW, tandis que celle de gaz naturel aura un diamètre de 250 cm et débitera 100 milliards de m^3 par an avec une puissance de 100 000 kW.

L'investissement du gazoduc est deux fois et demie à trois fois supérieur à celui de l'oléoduc. Les dépenses d'exploitation sont trois fois plus importantes en raison du surplus de consommation d'énergie que le gaz naturel entraîne. Le transport du gaz naturel est donc deux fois et demie à trois fois plus élevé que celui du pétrole brut.

Les réseaux de transport du gaz en Europe sont très développés également. Leur infrastructure correspond à celle des réseaux traditionnels du gaz de ville, auxquels se rajoutent les réseaux modernes longue distance.

En France par exemple, le réseau s'organise à partir des gisements du Sud-Ouest vers le nord, puis à partir du gaz des Pays-Bas dans toute la moitié nord de la France, et enfin depuis les terminaux de gaz naturel liquéfié du Havre pour Paris et de Fos-sur-Mer pour la région lyonnaise.

Grands projets en cours

Le gaz est une énergie propre et c'est en outre la plus demandée, étant donné les besoins actuels d'énergie.

Les techniques d'évacuation de la production à partir de gisements marins à faible profondeur vers la côte semblent maîtrisées. Cependant, lorsqu'il s'agit de construire des conduites sur de longues distances, par exemple de l'Algérie vers l'Europe, les problèmes sont d'une tout autre dimension. Il y a des fosses marines à traverser et les techniques à l'étude varient selon la profondeur et la longueur du parcours envisagé.

Ainsi, pour le parcours passant par Gibraltar, la conduite marine n'aurait qu'une trentaine de kilomètres et reposerait sur un fond plat par 450 m de fond. Il suffirait alors de remorquer au fond de la mer un train de conduites préalablement assemblées à terre. C'est cette méthode par immersion simple qui a été employée en Grèce pour la pose d'une conduite de 13 km à 240 m de profondeur.

Dans les autres trajets, la fosse a 2 700 m de profondeur et la distance est de 200 km environ.

E. D. F.-G. D. F. fait des essais pour une nouvelle technique dite *en tension contrôlée.* Elle consiste à assembler à terre des éléments de 2 à 3 km de longueur. Les éléments sont munis de flotteurs et de bouées espacés d'environ 150 m les uns des autres, fixés à la conduite par des câbles de 15 m de long. Ainsi, la conduite ne serait presque plus assujettie aux mouvements de la houle. Un navire spécialement aménagé à cet effet assemblerait en mer les éléments de conduites en cours de pose au nouvel élément à poser.

Une autre méthode consiste à poser une conduite à flottabilité positive maintenue à une certaine profondeur par des câbles amarrés sur des corps morts placés au fond. Il s'agit du *procédé Segans.* Le gazoduc Algérie-Italie *via* la Tunisie et la Sicile comprendra deux tronçons sous-marins dont une partie correspond à plus de 400 m de profondeur.

En Union soviétique, le projet *Aurore boréale* approvisionnera Leningrad et Arkangelsk à partir du gaz d'Oukhta avec des diamètres de conduite de 2 à 2,5 m et des débits de 20 milliards de mètres cubes par an.

Transport de l'hydrogène

Pour tourner le handicap du développement de l'énergie électrique à cause du coût de transport élevé, on peut utiliser un vecteur d'énergie à haut niveau sous forme chimique. Ce vecteur pourrait être l'hydrogène, qui peut être produit en quantité massive à partir de l'électrolyse de l'eau, la source d'électricité étant une centrale nucléaire. Une autre source est celle du charbon et des schistes.

★ *Production*

Les installations industrielles actuelles de 3 MW réalisent l'électrolyse en milieu alcalin à basse température.

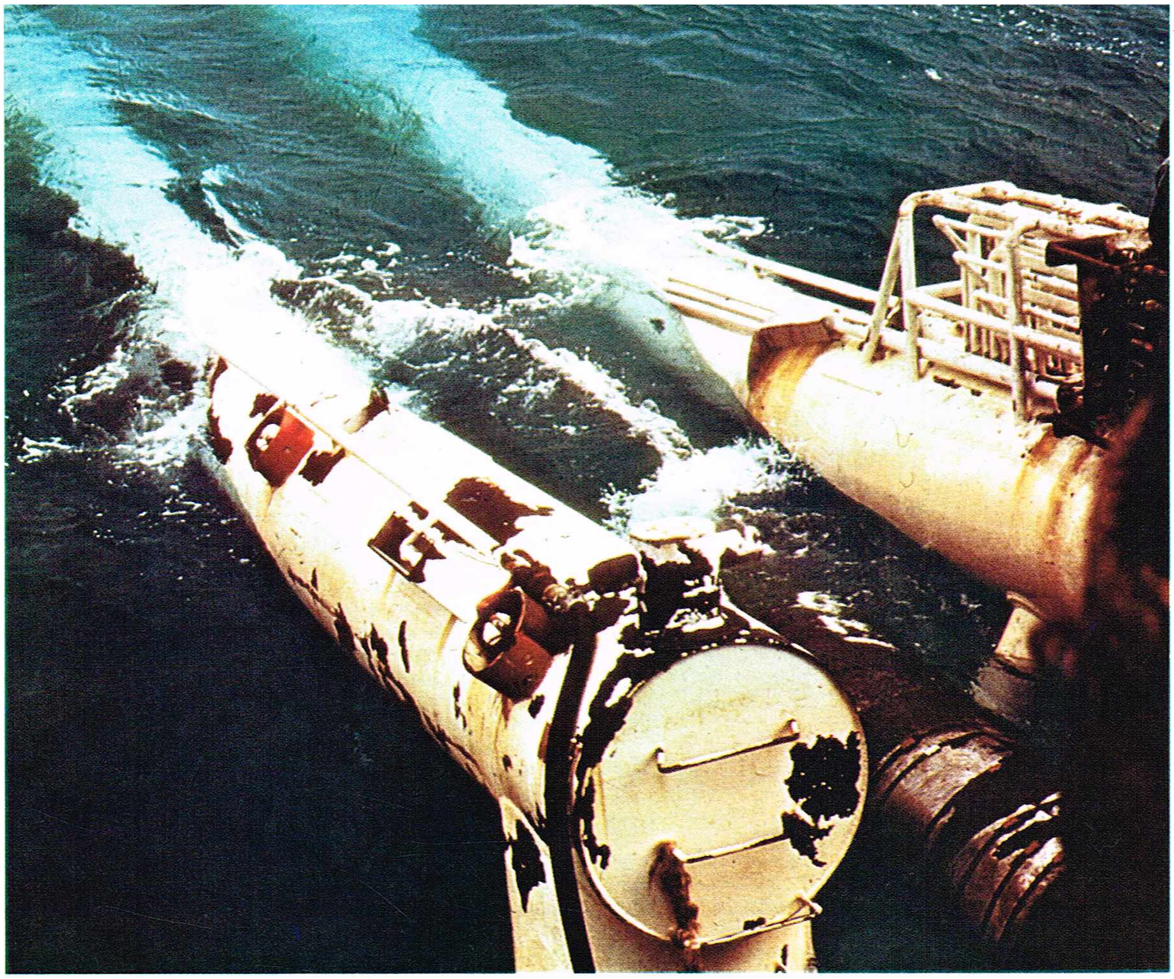

◀ *Construction de pipe-line pour le transport de gaz à partir de la plate-forme Frigg (mer du Nord). L'assemblage des différentes parties du pipe-line s'effectue en mer, à partir d'un appareil flottant, le stinger. Le contrôle de l'angle d'inclinaison du stinger, donc des canalisations qui iront ensuite reposer sur le fond de la mer, est réalisé par l'admission d'eau ou d'air comprimé dans les ballasts.*

Photothèque Total

Leur rendement est d'environ 60 %. L'énergie doit être fournie par un réacteur nucléaire, couplé à une turbine et un alternateur et à un redresseur pour produire le courant en continu. On améliore le rendement jusqu'à 72 % sans augmentation d'investissement spécifique en élevant la température et en réduisant les surtensions aux électrodes. Les cellules prototypes fonctionnent à 120 °C et sous une pression de 20 bars.

General Electric étudie un procédé avec des électrolytes solides (oxyde de zirconium) avec de la vapeur d'eau à 800 °C. Les rendements pourraient atteindre 75 à 80 %.

L'autre procédé de production d'hydrogène est la dissociation de l'eau à des températures de l'ordre de 1 000 °C. On utiliserait la chaleur produite par un réacteur nucléaire. Une cinquantaine de cycles sont à l'étude, dont les principaux sont fondés sur le bromure de calcium, le chlorure de fer, le chlorure de vanadium, l'oxyde de césium, le potassium. Les rendements seraient de l'ordre de 40 à 60 %.

Il semble qu'il faille attendre une vingtaine d'années avant de pouvoir envisager l'industrialisation de ces procédés.

* *Transport et stockage*

La température de combustion de l'hydrogène est de l'ordre de 2 045 °C, soit de 200 °C supérieure à celle du méthane, c'est donc un vecteur d'énergie calorifique à haut niveau. Le résultat de sa combustion est la vapeur d'eau ; aucune pollution n'est à craindre.

Cependant, si l'on considère qu'un gaz combustible se produit, se transporte et se vend en volume, force est de reconnaître que de tous les combustibles gazeux usuels l'hydrogène est le plus mauvais. Le rapport entre les pouvoirs calorifiques supérieur et inférieur est le plus élevé de tous les combustibles usuels. La faible densité implique qu'à pouvoir calorifique égal, il faut mettre en œuvre soit des volumes plus grands, soit des pressions plus élevées. Trois volumes d'hydrogène délivrent la même énergie qu'un volume de gaz naturel. Notons que la faible viscosité réduit les pertes de charge. Mais, de toute façon, les réseaux de distribution du gaz ne sont pas utilisables sans adaptation.

Il existe des réseaux de transport et de distribution de l'hydrogène en Allemagne fédérale dans la région de Dusseldorf-Essen, de même au Texas, qui desservent des complexes chimiques.

De plus, si l'hydrogène doit jouer un rôle important dans l'approvisionnement des ménages et des industries, il faudra construire des capacités de stockage. Les gazomètres classiques devront être trois fois plus gros à cause de la faible densité. On peut penser utiliser les stockages souterrains, mais *a priori* la grande diffusivité à travers les parois poreuses élimine l'utilisation de nombreux sites. Seuls les dômes de sel semblent être satisfaisants.

Une autre solution consiste à utiliser les hydrures métalliques et aboutit donc à un stockage sous forme solide. Ce procédé peut être très intéressant pour des usages spécifiques.

Les stockages sous forme liquide, s'ils sont techniquement réalisables, sont très coûteux. La N. A. S. A. utilise des sphères dont la capacité est de 5 000 m³ pour stocker l'hydrogène liquide comme carburant des fusées. Cependant, le coût est trois fois supérieur à celui du stockage sous forme gazeuse et de plus le procédé est dangereux. En effet, l'hydrogène, contrairement à la plupart des autres gaz, s'échauffe lors de la détente. La moindre fuite d'un réservoir à hydrogène liquide peut conduire à une explosion. En revanche, l'hydrogène liquide est un bon carburéacteur. Son pouvoir calorifique est de 29 000 kcal/kg contre 10 500 kcal/kg pour les carburéacteurs classiques. Cependant, si l'on gagne les deux tiers en poids, les volumes de réservoir doivent être importants. La densité est 7,5 fois supérieure.

Les usages chimiques de l'hydrogène sont nombreux : synthèse de l'ammoniac, synthèse des produits pétrochimiques, conversion du charbon en gaz riche ou hydrocarbures lourds.

L'hydrogène peut également alimenter des piles à combustible. On étudie en outre la combustion catalytique qui éviterait la présence de flammes et de températures élevées pour certains usages. Il peut également être utilisé pour la réduction des minerais, notamment pour l'obtention d'éponge de fer. De plus, notons que, dans l'hypothèse de l'électrolyse, le sous-produit oxygène est tout à fait valorisable.

Mais il ne semble pas que le développement de l'hydrogène au stade industriel puisse se faire avant l'an 2000, car la technologie de sa production, de son transport, de son stockage et de son utilisation n'est pas encore maîtrisée. Mais c'est là un moyen de tourner le goulot d'étranglement du transport de l'énergie électrique sur de longues distances. D'autant que l'hydrogène peut parfaitement être utilisé en mélange avec d'autres gaz. Le gaz de ville est riche en hydrogène et a été employé pendant des décennies dans les réseaux urbains.

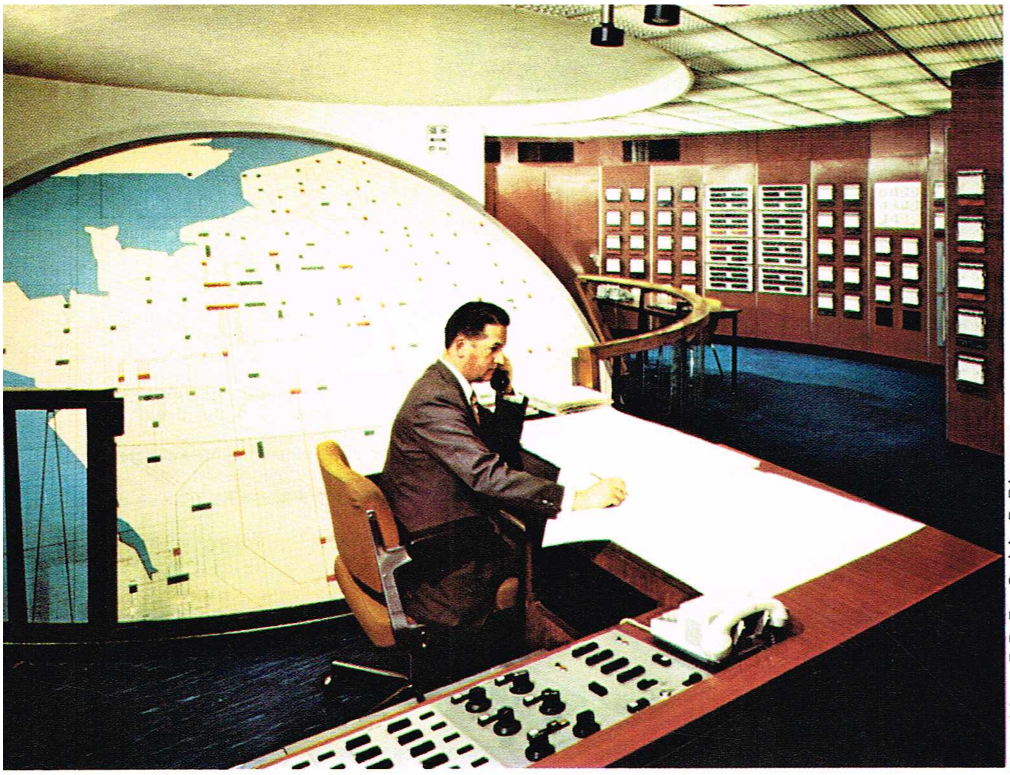

Photothèque E. D. F. - Sodel - P. Bérenger

▲ *Le réseau de l'Électricité de France est un réseau maillé composé de centrales de production reliées à des postes d'interconnexion qui alimentent des postes de répartition reliés aux réseaux de distribution; ici, une vue du centre de dispatching national de l'E. D. F.*

Distribution de l'énergie électrique

Lignes - Réseaux

L'énergie électrique que nous consommons est distribuée par un très important et complexe réseau de transport. A l'amont se trouvent les usines génératrices qui transforment l'énergie primaire en énergie secondaire. L'énergie primaire est une énergie d'origine naturelle obtenue à partir de combustibles fossiles comme le gaz naturel, le charbon, le pétrole ou à partir des mouvements des marées, du vent, des chutes d'eau, ou encore à partir de la fission d'éléments radio-actifs contenus dans certains minerais.

L'énergie électrique est plus facile à répartir et à distribuer, mais elle ne peut être stockée qu'en très petite quantité et sous forme de courants continus seulement. Ceci nécessite une production constante vingt-quatre heures sur vingt-quatre pour satisfaire les usagers. Il est actuellement exceptionnel que la production se situe sur les lieux de la consommation.

Il y a quelques dizaines d'années, en revanche, les producteurs contruisaient les centrales au centre de gravité de la consommation. Quand de réels progrès furent réalisés dans le domaine du transport d'énergie, les centrales furent construites au plus près des centres d'extraction d'énergie primaire, et notamment dans les bassins houillers. Pour les centrales hydrauliques, il est évident qu'elles ne peuvent être construites que sur les lieux mêmes des chutes d'eau, loin, en général, des centres utilisateurs industriels et des agglomérations.

De la production à l'utilisation, l'énergie électrique est transportée par des lignes et des câbles; cet ensemble constitue un réseau. Le réseau de transport de l'Électricité de France est la portion du réseau national qui transite les grandes quantités d'énergie au départ des centrales jusqu'aux régions consommatrices.

Le réseau français est un réseau maillé dans lequel les unités de production sont interconnectées. Cette interconnexion est indispensable pour des soucis de sécurité, de fiabilité et d'économie. Les pointes de consommation ont lieu en des moments et en des endroits variables, ce qui nécessite des mouvements incessants d'énergie qu'il ne serait pas possible d'assurer sans l'interconnexion. La liaison aux réseaux étrangers permet un échange économique européen.

La meilleure solution pour transporter l'énergie électrique est le courant continu qui, pour les très grosses puissances et les grandes distances, résoudrait en partie les problèmes de stabilité. Mais on se heurte à plusieurs difficultés : la première est la transformation qui nécessite des stations comportant des mutateurs fonctionnant en redresseur ou en onduleur suivant le sens de transfert; la seconde est la réalisation de disjoncteurs à courant continu pour hautes tensions et grandes puissances du fait que le courant ne passe jamais par zéro.

Actuellement, presque tout le transport français se fait en courant triphasé de fréquence 50 Hz. Les hautes tensions les plus utilisées sont 225 kV, 380 kV, prochainement 736 kV et à long terme 1 000 kV.

Prescriptions administratives

Les distributions d'énergie électrique doivent satisfaire à des textes officiels relatifs aux conditions techniques pour la sécurité des personnes et des services publics qui sont publiés par l'U. T. E. (Union technique de l'électricité).

Ce sont des arrêtés ministériels du ministre du Développement industriel et scientifique qui ont été pris en accord avec le ministre de l'Équipement et du Logement, le ministre des Transports, le ministre des Postes et Télécommunications et après avis du Comité technique de l'électricité. Ils concernent les installations de distribution dans lesquelles on distingue les supports, les isolateurs et les conducteurs des lignes aériennes, ainsi que la résistance mécanique des ouvrages; les lignes souterraines; les postes et les sous-stations; les branchements particuliers; les traversées des cours d'eau, des plans d'eau et des canaux de navigation; le voisinage d'autres lignes ou de canalisations; le voisinage de chemin de fer; les mises à la terre; les caractéristiques des plaques de sécurité à placer sur les supports des lignes électriques.

Principes de base

Considérons un récepteur unique comprenant de la résistance, de l'inductance et de la capacité. Si nous appliquons la loi d'Ohm à ce récepteur, nous aurons l'équation suivante si la tension appliquée est $u = U_m \sin \omega t$

$$U_m \sin \omega t = L\frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C}\int i dt.$$

Si nous prenons le courant comme origine des phases $i = I_m \sin \omega t$, nous aurons :

$$U_m \sin (\omega t + \varphi) = L\omega I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) + RI_m \sin \omega t + \frac{I_m}{C\omega} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

on en déduit : $U^2 = R^2 I^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2 I^2$ et l'expression de la tangente de l'angle de déphasage entre U et I :

$$\text{tg}\,\varphi = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R}$$

et du courant $I = \frac{U}{Z}$ avec $Z = \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}$.

Indépendamment des utilisateurs, une ligne est un assemblage de circuits R, L, C. Elle a une résistance dont la valeur dépend de la qualité des matériaux employés, une inductance et une capacité par rapport au sol et par rapport aux conducteurs avoisinants. Ces caractéristiques sont génératrices de pertes actives et réactives; ces dernières sont d'autant plus élevées que le facteur de puissance est bas, d'où l'intérêt de le relever. Pour ce faire, il faut avoir des récepteurs à cos φ élevé. En effet, l'intensité sera d'autant plus élevée que le facteur de puissance sera faible à puissance active égale, $P = UI \cos \varphi$. Dans une ligne, la chute de tension est proportionnelle au courant; on voit donc l'intérêt de ne pas augmenter sa valeur à cause du cos φ.

Les producteurs d'électricité imposent aux abonnés industriels, sous peine de pénalisation, une valeur minimale. La solution la plus répandue est l'emploi de condensateurs statiques. Raisonnons sur un exemple simple. Considérons un récepteur ayant une impédance Z. La résistance absorbe une puissance active P, l'inductance absorbe une puissance réactive Q_L, la capacité restitue une puissance réactive Q_C (*fig.* 1). La droite qui joint l'origine 0 à l'extrémité du vecteur Q_C représente la puissance apparente S absorbée par l'appareil. L'angle formé par S et P est φ. Pour augmenter cos φ, il faut diminuer l'angle φ. Pour ce faire, on ajoute en parallèle avec Z une capacité (*fig.* 2). Elle fournira une puissance réactive Q_C' qui s'ajoutera à Q_C. Le résultat sera une puissance réactive absorbée plus faible, un angle sera une puissance réactive absorbée plus faible, un angle $\varphi' < \varphi$, d'où un cos φ' supérieur à cos φ. La puis-

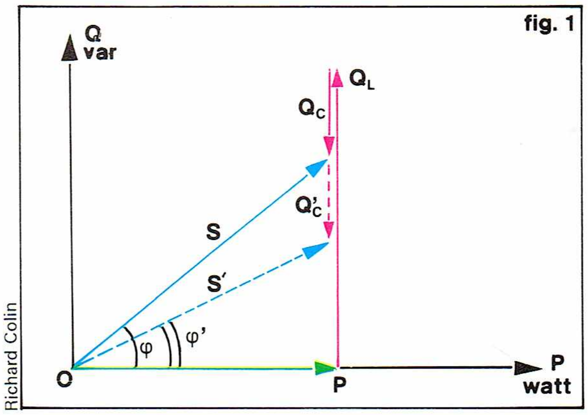

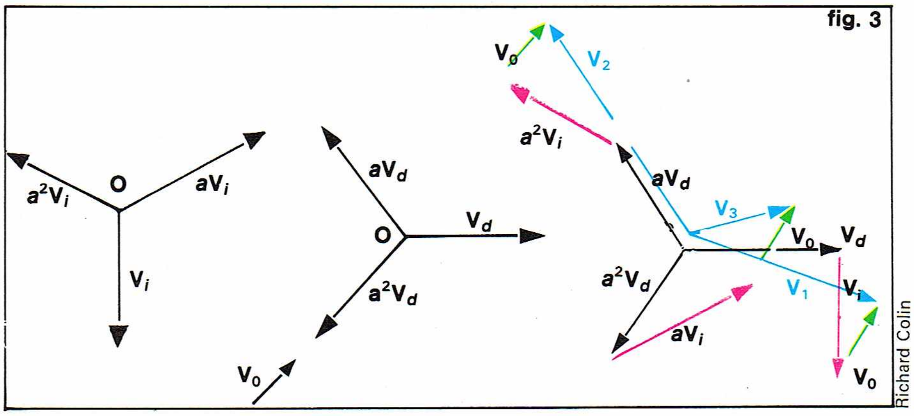

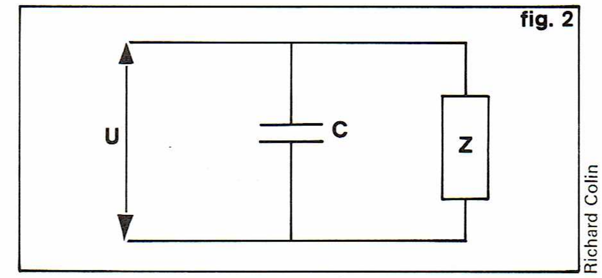

◀▲ ***Figure 1 :** représentation de la puissance apparente S absorbée par un récepteur ayant une impédance Z. S' = puissance apparente absorbée par un récepteur du même type que le précédent auquel on a ajouté, en parallèle avec Z, une capacité (récepteur schématisé sur la figure 2).*

***Figure 3 :** méthode des composantes symétriques. Représentation des trois systèmes de vecteurs symétriques : direct (V_d), inverse (V_i), homopolaire (V_0), et reconstitution à partir de ces trois systèmes des vecteurs réels V_1, V_2 et V_3*

sance réactive de ce condensateur sera $UI_C = C\omega U_2$, U étant la tension à ses bornes et ω la pulsation ($\omega = 2\pi f$).

Les producteurs utilisent, pour relever le facteur de puissance des réseaux, soit des condensateurs dont les puissances réactives sont limitées, soit des compensateurs synchrones qui sont des moteurs synchrones surexcités de puissance réactive beaucoup plus élevée.

Intensités dans les réseaux maillés

Tous les réseaux de distribution sont maillés. On appelle nœuds les points de liaison de trois ou plusieurs de ces lignes et branches les portions de circuit comprises entre deux nœuds voisins. Ces branches sont actives ou passives suivant qu'elles possèdent ou non des générateurs. Le calcul des intensités dans les branches est relativement simple quand leur nombre ne dépasse pas quelques unités ; par contre, dès que l'on atteint quelques dizaines et *a fortiori* un réseau national complet, les calculs sont fort complexes. Ces calculs se font par une méthode très connue : les lois de Kirchhoff (voir chapitre *Électricité*, p. 272).

Tensions des réseaux de transport

Nous avons vu que les usines de production n'étaient pas toujours situées sur les lieux de consommation. Le transport de l'énergie nécessite des lignes de très grandes longueurs, ce qui, malheureusement, engendre des chutes de tension en ligne et des pertes par effet Joule importantes. A puissance apparente égale S = UI, nous voyons que l'intensité sera d'autant plus faible que la tension sera élevée et dans le rapport $\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1}$. Cette faible intensité permet de diminuer les sections, donc les masses des conducteurs et les chutes de tension en ligne.

Fonctionnement en régime déséquilibré

Il est toujours préférable de fonctionner en régime équilibré ; c'est pourquoi les responsables de la distribution de l'énergie électrique répartissent au mieux les charges de la clientèle sur les phases des réseaux de distribution. Actuellement, presque tout le réseau français est en triphasé. Les consommateurs industriels utilisent simultanément les trois phases en alimentant des moteurs, des fours, des cuves à électrolyse ; le petit outillage et l'éclairage, alimentés en monophasé, sont branchés régulièrement sur chacune des phases. Les consommateurs domestiques utilisent rarement les trois phases, d'autant plus qu'elles ne sont pas toujours distribuées chez les abonnés. Il est donc courant dans ce cas de fonctionner en régime légèrement déséquilibré. Les consommateurs industriels ne sont pas à l'abri de ce phénomène si un défaut apparaît sur une des phases ; alors le déséquilibre est important. Ce déséquilibre est traduit par la représentation vectorielle suivante : le système polyphasé de vecteurs représentant les grandeurs sinusoïdales est composé de vecteurs qui n'ont pas le même module et qui sont déphasés l'un par rapport à l'autre d'un angle différent.

L'étude de tels systèmes peut être faite directement par la méthode vectorielle ou symbolique ou indirectement par la méthode des composantes symétriques. Le problème est de déterminer les courants et les tensions dans chaque phase du générateur ou du récepteur et dans le fil neutre suivant les couplages utilisés. La méthode des composantes symétriques, couramment employée, est fondée sur le théorème fondamental : un système de trois vecteurs quelconques peut être décomposé en trois systèmes de vecteurs symétriques : un système direct, un système inverse et un système homopolaire.

Si V_1, V_2 et V_3 sont les vecteurs réels du système déséquilibré (*fig.* 3), les vecteurs direct, inverse et homopolaire sont donnés par les expressions :

$$V_d = 1/3\,(V_1 + a^2V_2 + aV_3) \quad V_i = 1/3\,(V_1 + aV_2 + a^2V_3)$$
$$V_0 = 1/3\,(V_1 + V_2 + V_3)$$

et les vecteurs réels par les expressions :

$$V_1 = V_d + V_i + V_0 \qquad V_2 = aV_d + a^2V_i + V_0$$
$$V_3 = a^2V_d + aV_i + V_0$$

dans lesquelles l'opérateur *a* est égal à :

$$\overline{a} = e^{j\,2\pi/3} = \cos 2\,\pi/3 + j\sin 2\,\pi/3 = -\,0{,}5 + j\,\sqrt{3}/2$$

Reconstituons les vecteurs V_1, V_2 et V_3 à partir des trois systèmes en appliquant les relations de ces vecteurs en fonction de V_d, V_i et V_0.

Pertes par effet Joule

Les conducteurs, traversés par un courant, produisent une quantité de chaleur conformément à la loi de Joule. Si *i* est l'intensité à l'instant *t* d'un courant alternatif passant dans une résistance R, pendant un intervalle de temps *dt* infiniment petit, on peut considérer que *i* est constant et écrire $dW = Ri^2dt$. La somme de ces *d*W correspond aux pertes calorifiques. Le calcul se fait avec l'intensité efficace qui est définie de la manière suivante : l'intensité efficace I_{eff} d'un courant alternatif est l'intensité du courant continu qui, pendant une période T, cède à une même résistance R la même quantité de chaleur que le courant alternatif.

$$RI^2_{eff}T = \int_0^T Ri^2dt \quad \text{soit} \quad I^2_{eff} = \frac{1}{T}\int_0^T i^2dt.$$

Ce phénomène physique a pour origine l'augmentation de l'agitation moléculaire où un mouvement coordonné dû à la force électrique exercée par le champ se superpose au mouvement désordonné des électrons. Le nombre de chocs entre électrons et atomes ou ions augmente. Or, l'énergie de cette agitation est proportionnelle à la température du corps. Le résultat se traduit par un échauffement du conducteur.

Choix du nombre de phases

Un système monophasé, de tension efficace V et d'intensité efficace I, permet de transporter une puissance

▶ *Figure 4 : a) montage côte à côte de trois systèmes monophasés semblables ; la puissance transportée est égale à trois fois celle d'un système ; b) assemblage des trois conducteurs centraux pour n'en faire qu'un ; si le système est équilibré, la composante homopolaire du courant est nulle et ce conducteur de retour (fil neutre) ne sera traversé par aucun courant et il sera possible de le supprimer.*

Figure 5 : réseau de distribution électrique du type radial simple.

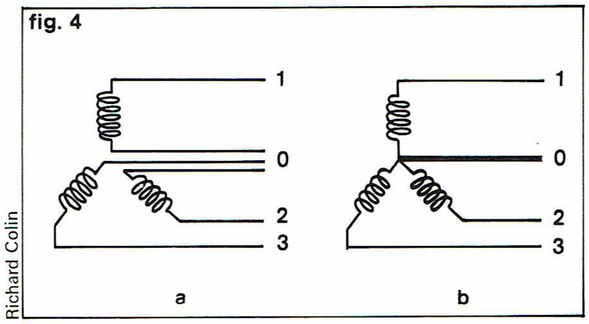

active $p = VI$. Si l'on place côte à côte trois systèmes monophasés, on aura un montage à six conducteurs et une puissance transportée égale à $P = 3p = 3\,VI$. Le même montage peut se faire avec n phases ; dans ce cas, la puissance est égale à np.

On peut assembler les trois conducteurs centraux 0 pour n'en faire qu'un (*fig.* 4). Quelle sera la section de ce conducteur ? Si le système est équilibré, la composante homopolaire du courant est nulle, donc ce conducteur de retour (appelé fil neutre) ne sera traversé par aucun courant et il serait possible de le supprimer. Le même raisonnement peut être fait avec un montage en triangle. L'emploi des courants polyphasés entraîne un gain économique évident par rapport au monophasé.

Le système polyphasé le plus utilisé, aussi bien pour le transport que pour la consommation, est le système triphasé. Le système hexaphasé est rarement transporté, mais il est couramment employé pour redresser les courants. Entre autres avantages, les courants polyphasés créent des champs tournants dans les enroulements statoriques des moteurs qui permettent des démarrages sans artifices contrairement au monophasé.

Fil neutre dans les réseaux de distribution

Les réseaux de distribution basse tension sans fil neutre présentent plus d'inconvénients que d'avantages. Prenons l'exemple courant de l'éclairage. La tension triphasée, entre phases, est 380 V. Le montage adopté avec des lampes 220 volts ne peut être que l'étoile, en effet $380/\sqrt{3} = 220$ volts. Si l'on éteint l'une d'elles, les deux autres seront en série sur 380 V, donc alimentées chacune sous une tension $380/2 = 190$ volts ; elles seront sous-voltées. Si maintenant on éteint l'une de ces deux lampes, on coupe le circuit et la deuxième s'éteindra. Si les trois lampes ont des puissances différentes, le point neutre artificiel ne se situe plus au centre de gravité du triangle équilatéral correspondant aux tensions composées ; les tensions seront différentes aux bornes des trois lampes.

Si le réseau comporte un fil neutre, le point 0 fixe le potentiel par rapport aux sommets du triangle précédent. Les tensions simples seront équilibrées. Le consommateur aura à sa disposition deux tensions, celle entre phases, U, et celle entre phase et neutre, $U/\sqrt{3}$.

Schéma général d'un réseau

Un réseau, à l'échelle nationale, se compose de centrales de production reliées à des postes d'interconnexion, eux-mêmes alimentant des postes de répartition reliés aux réseaux de distribution. Suivant la puissance souscrite par les consommateurs, leur branchement se fait directement en basse tension sur le réseau général, ou par l'intermédiaire d'un poste de transformation particulier appelé poste d'abonné, ou directement en moyenne tension. Ces configurations sont courantes dans les centres urbains ; par contre, dans les milieux ruraux, où les distances entre points desservis sont importantes, on adopte des solutions différentes : les lignes sont aériennes avec supports béton, en basse tension ou moyenne tension avec transformateurs sur poteaux.

En zone urbaine, le câble remplace la ligne aérienne, et le plus souvent le réseau est maillé pour assurer une sécurité d'alimentation. Ces câbles sont placés en tranchées ou en galeries ; les postes de transformation 20 kV/380-220 V sont le plus souvent souterrains, quelquefois construits en bord de rue ou dans les immeubles. La fréquence est 50 Hz. Pour mémoire, on peut rappeler que le réseau continu a pratiquement disparu ; de même, les distributions à 25 Hz du sud-est de la France.

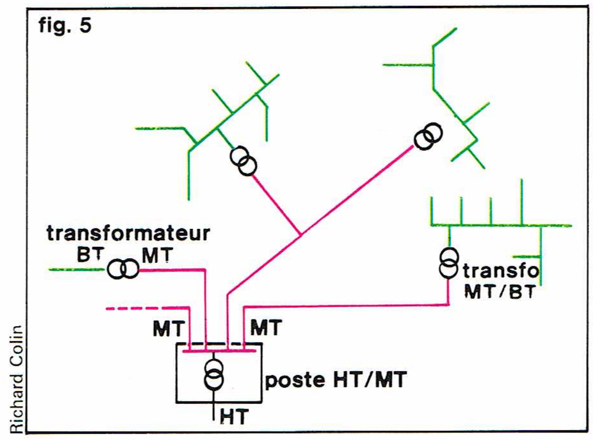

Modèles de réseaux

Suivant les fonctions, on peut distinguer diverses structures de réseaux.

* *Réseau radial simple*

C'est le plus facile à mettre en œuvre et le plus économique. Il est le plus souvent utilisé pour des lignes aériennes moyenne tension et basse tension. A partir d'un poste haute tension/moyenne tension, partent en antenne des lignes qui vont alimenter des postes MT/BT ou des transformateurs sur poteaux (*fig.* 5). De ces derniers postes partent en antenne des lignes aériennes BT vers les abonnés. Ce modèle n'étant pas bouclé, une coupure de la ligne entraîne un arrêt de l'alimentation des abonnés, mais, sur les lignes aériennes, les défauts sont facilement localisables et les durées de réparation courtes.

* *Réseau radial double*

Comme pour le précédent, la configuration est en antenne, mais il y a deux conducteurs côte à côte au lieu d'un du côté MT et un du côté BT (*fig.* 6). Ce type de réseau est rarement employé en lignes aériennes, mais plus souvent en câbles souterrains où les durées de localisation des défauts et de réparation sont relativement longues. Un seul câble est en service, l'autre est en réserve et raccordé sous tension. En cas d'incident sur le câble en service, il est débranché et remplacé par le second.

* *Réseau bouclé côté moyenne tension et radial côté basse tension*

Du poste de transformation HT/MT partent des séries de deux conducteurs reliés à leurs extrémités qui forment des boucles. Les postes MT/BT sont branchés sur ces boucles, les liaisons BT partent en antenne vers les abonnés (*fig.* 7). En cas de défaut sur un conducteur MT, on l'isole à partir des postes les plus proches, ces derniers étant toujours alimentés par l'autre côté de la boucle. Contrairement au cas précédent où un câble était en attente, ici toutes les liaisons transitent de l'énergie. Cette solution est plus satisfaisante économiquement et offre toute sécurité aux abonnés.

En zone urbaine, on place sous trottoir ou dans les immeubles des boîtes de jonction BT sur lesquelles sont branchés des conducteurs provenant de boucles différentes. En cas d'avarie grave, on peut faire la transposition d'une boucle sur l'autre.

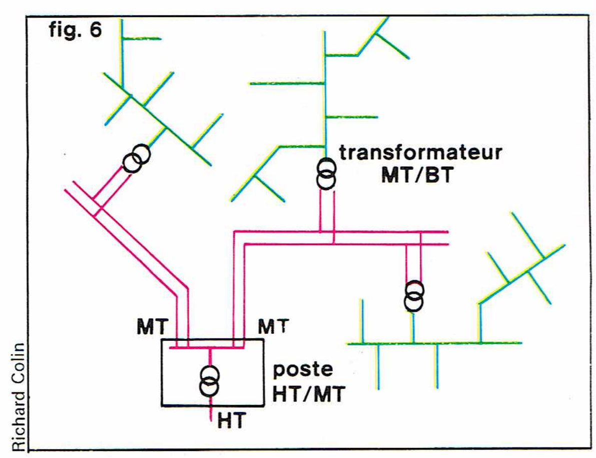

▶ *Figure 6 : réseau de distribution électrique du type radial double.*

fig. 7

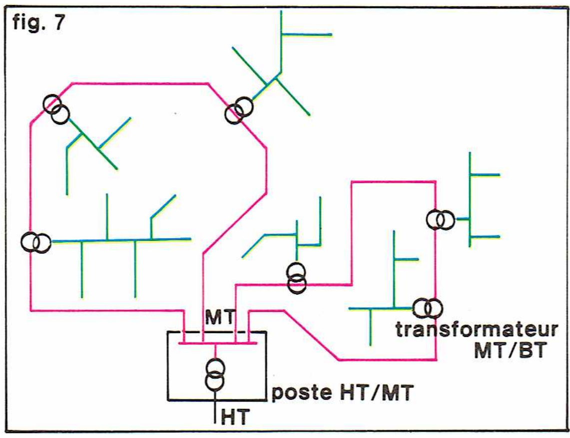

Richard Colin

◀ *Figure 7 : réseau de distribution électrique du type bouclé côté moyenne tension, et radial côté basse tension.*

* *Réseau radial multiple côté moyenne tension et bouclé côté basse tension*

Du poste transformation HT/MT part une série de canalisations sur lesquelles sont branchés les postes MT/BT, soit sur une seule d'entre elles, soit sur deux. Le réseau BT est entièrement maillé et alimenté par les postes MT/BT branchés en parallèle. Si un incident se produit sur une liaison MT ou dans un poste MT/BT, les autres postes prennent une surcharge temporaire. De même, côté BT, si un défaut apparaît sur une de ses liaisons, l'alimentation est assurée par les autres. Avec un bouclage aussi poussé, une inversion de transfert de puissance n'est pas exclue. Pour s'en protéger, on place des relais de retour de puissance.

Ce type de réseau assure une excellente continuité de service et une tension pratiquement constante, quel que soit le lieu de branchement. Par contre, le maillage lui donne une faible impédance et des courants de court-circuit importants, c'est pourquoi il est nécessaire de placer régulièrement des fusibles aux boîtes de jonction des abonnés, aux boîtes de dérivation des nœuds du réseau et aux départs des postes. Cette solution a un coût d'investissement élevé et des frais d'entretien importants, c'est pourquoi on ne l'emploie que dans les grandes villes.

Distribution

L'utilisation de l'énergie peut se faire en branchant les récepteurs en série ou en parallèle. Dans le premier cas, l'intensité qui traverse les appareils est la même, par contre les tensions à leurs bornes sont fonction de leur impédance. Dans le second cas, la tension aux bornes des appareils est la même pour tous, mais les intensités sont différentes et fonction de l'impédance. La distribution série est pratiquement abandonnée. Quelques installations d'éclairage l'utilisent encore, où les lampes sont montées en série. Quelquefois, ces dernières sont alimentées sous tension constante par des transformateurs montés en série.

Actuellement, la distribution parallèle est la seule employée. Elle assure une fourniture à tension constante. Les modèles de réseaux précédents sont tous fondés sur une distribution de ce type.

* *Distribution de courant continu*

Courant continu 2 fils. Le réseau est alimenté par une source à tension constante qui peut être une batterie d'accumulateurs, un générateur tournant, etc.

Courant continu 3 fils. Le réseau est alimenté par deux sources de tensions identiques ou différentes montées en série (*fig.* 8). Les conducteurs partent des bornes de ces sources. Cette solution permet de distribuer trois tensions différentes si besoin est. Les appareils de forte puissance sont montés en haute tension entre les fils extrêmes ; le petit appareillage et l'éclairage sont montés entre le fil et un fil extrême. Le conducteur neutre est parcouru par une intensité égale à la différence des intensités qui parcourent les conducteurs extrêmes, c'est pourquoi la section de ce fil est plus faible que celle des autres, en général le tiers ou la moitié. On utilise quelquefois un autre montage. Les deux génératrices précédentes sont montées sur le même arbre, et leurs excitations sont branchées entre les conducteurs extrêmes et de telle manière que la moins chargée fonctionne en moteur et entraîne l'autre qui fonctionne en génératrice. Une génératrice principale est toujours reliée aux conducteurs extrêmes.

Courant continu 5 fils. Comme dans le montage précédent, une génératrice principale alimente en haute tension les conducteurs extrêmes. Des tensions intermédiaires sont obtenues par quatre générateurs branchés en série et sur le même arbre. Suivant les charges, chaque machine fonctionne en moteur et en générateur. On obtient de cette manière une régulation automatique (*fig.* 9).

* *Distribution de courant alternatif*

Courant monophasé à deux ou trois fils. C'est une alimentation destinée principalement aux usages domestiques où l'on utilise de faibles puissances et dans laquelle les moteurs sont universels ou asynchrones. On obtient du monophasé trois fils en branchant un transformateur dont le circuit secondaire a un point milieu qui permet de diviser par deux la tension (*fig.* 10).

Courant triphasé. Un système triphasé peut être distribué avec trois ou quatre conducteurs. Dans le premier cas, il y a trois conducteurs de phases et un conducteur neutre. Le rapport entre les tensions entre phases ou tensions composées et les tensions entre phases et neutre ou tensions simples est $\sqrt{3}$. C'est pourquoi les valeurs les plus utilisées sont 220/380 V qui ont pratiquement remplacé le 127/220 V. La distribution trois fils se fait avec un secondaire de transformateur d'alimentation branché en triangle ou en étoile neutre non sorti ; dans ce cas, il n'y a pas de tension simple, sauf si l'utilisateur fait un neutre artificiel ou branche les appareils en étoile. La distribution quatre fils se fait avec un secondaire en étoile neutre sorti.

Courant diphasé. Ce système se compose de deux tensions monophasées déphasées de $\pi/2$. Dans les distributions trois fils, on relie deux phases. Dans les distributions quatre fils, on relie les points milieux des deux phases sans neutre sorti. Dans les distributions cinq fils, le montage est le même que le précédent, mais le neutre est sorti.

Fonctionnement du réseau de transport

Un réseau de transport est un ensemble maillé dont le fonctionnement est extrêmement complexe. Il faut en effet conserver une fréquence quasi constante en fonction de la charge, assurer des répartitions de charges actives et réactives, des réglages de tension et le maintien du synchronisme des centrales. Ces quelques points, non exhaustifs, sont difficiles à satisfaire en période de déséquilibre entraînant des régimes transitoires. Le retour en régime normal stable n'en est pas moins complexe.

fig. 8

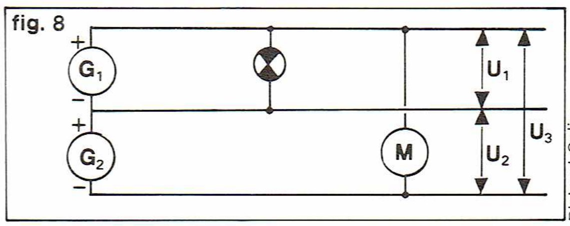

Richard Colin

◀ *Figure 8 : distribution de courant continu par un réseau de 3 fils, alimenté par deux sources de tension G_1 et G_2.*

fig. 9

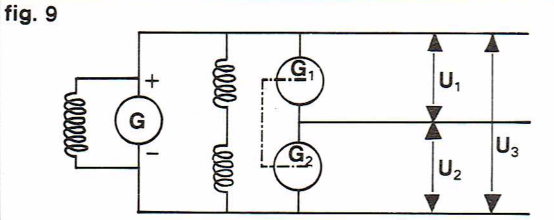

Richard Colin

fig. 10

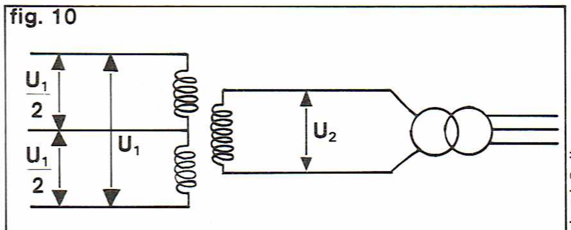

Richard Colin

◀ *Figure 9 : distribution de courant continu par un réseau de 3 fils, alimenté par une source principale.*
Figure 10 : distribution de courant alternatif monophasé par un réseau à 2 ou 3 fils.

Photothèque E. D. F. - Sodel - P. Bérenger

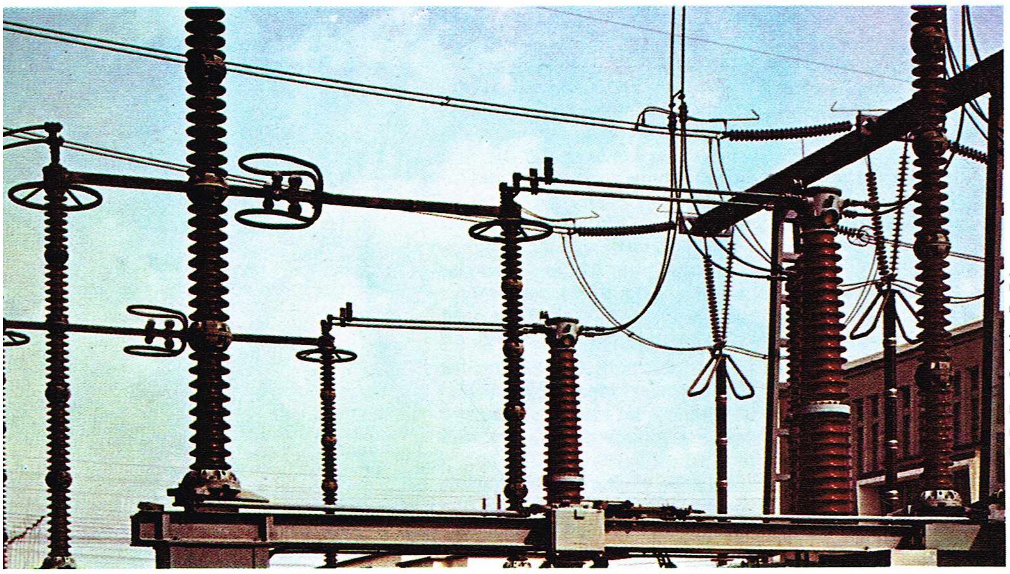

Photothèque E. D. F. - Sodel - P. Bérenger

▲ *Les* **postes d'interconnexion** *sont les nœuds des réseaux maillés de distribution : ils sont composés des matériels nécessaires aux raccordements des lignes aériennes et souterraines : en haut, les* **jeux de barres** *(collecteurs triphasés) au poste d'interconnexion E. D. F. de Mezerolles; en bas,* **les sectionneurs de tête** *de lignes 380 kV du poste E.D.F. du Plessis-Gassot.*

Un régime transitoire peut entraîner des déclenchements en cascade à l'échelle nationale. Ceux-ci peuvent avoir pour origine des courts-circuits, des surtensions, des délestages de centrale, des mises sous tension brutales, des coups de foudre, etc. La stabilité est assurée par la qualité du matériel, par exemple la rapidité d'ouverture des disjoncteurs, les inerties des machines tournantes, la rapidité d'action des régulateurs.

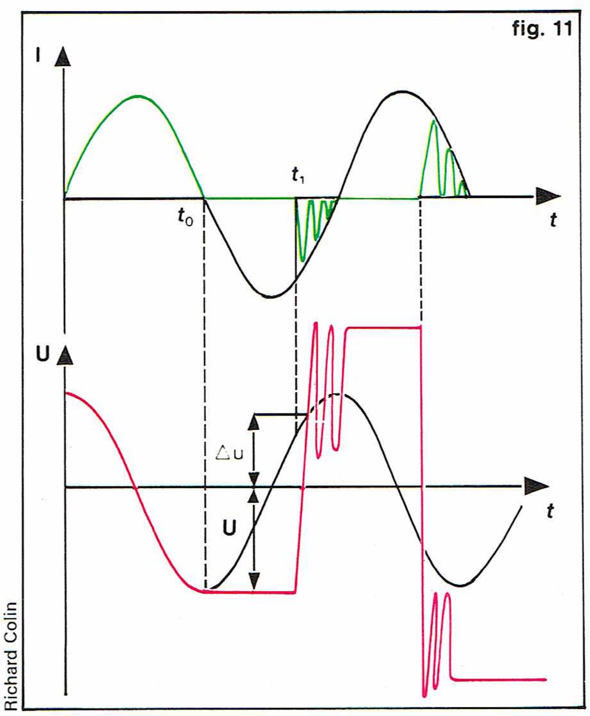

▶ *Figure 11 : intensité et tension de coupure dans un circuit capacitif.*

Les postes d'interconnexion

Les postes d'interconnexion sont les nœuds des réseaux maillés. Ils sont composés des matériels nécessaires aux raccordements des lignes aériennes et souterraines. Les appareils de protection et de coupure permettent d'éliminer les portions qui présentent des défauts. Ils assurent les liaisons et la transformation de la haute tension du réseau de transport en basse tension.

L'équipement rationnel doit être caractérisé par une réalisation économique, prévue pour une longue durée d'utilisation avec la meilleure fiabilité possible, une grande sécurité, aussi bien pour le personnel que pour l'exploitation, l'entretien et les manœuvres. Toute installation est étudiée sous le triple aspect de la sécurité du personnel, du service, du matériel.

On peut distinguer les parties haute tension et basse tension. La première regroupe :

Les **jeux de barres,** qui sont des collecteurs généraux triphasés sur toute la longueur du poste. Ils peuvent être sectionnés à l'aide de « sectionneurs ». Chaque jeu est équipé d'un ensemble d'appareils de mesures qui permettent les manœuvres et les contrôles. Notons qu'on donne le nom de « jeux de barres » à tous collecteurs de circuits, quel que soit le type de conducteurs : barres, tubes, profilés, câbles... Les liaisons peuvent donc être faites par conducteurs tendus : cuivre, aluminium, aluminium-acier, etc.; par conducteurs rigides; sous enveloppe métallique.

Les **sectionneurs,** qui permettent d'interrompre ou d'établir une liaison ou de commuter sous tension des jeux de barres ou des transformateurs sur un jeu de barres. Leur mise en place résulte de l'étude des manœuvres d'entretien. Ce sont des appareils à coupure visible dont le pouvoir de coupure est limité au courant capacitif du jeu de barres, traversées, connexions, courtes longueurs de câbles... Leur distance d'ouverture est suffisante et ils peuvent être verrouillés et condamnés en position ouverte. Un circuit ouvert à l'aide de sectionneurs permet d'y effectuer des travaux sans danger. Ils peuvent être commandés mécaniquement sur place ou à distance; dans ce cas, les commandes sont électriques, hydrauliques ou pneumatiques. Un sectionneur à commande à distance doit posséder une commande manuelle de secours. Toutes les précautions sont prises pour éviter les manœuvres intempestives.

Les **transformateurs de puissance,** qui permettent l'interconnexion des réseaux ayant des tensions différentes. Ils doivent pouvoir supporter des régimes déséquilibrés et fonctionner en parallèle. Quand leur puissance est suffisante, ils sont munis de dispositifs de surveillance, de réglage et de commande. Ils sont protégés pour éviter les défaillances internes et limiter les conséquences de régimes de fonctionnement anormaux.

Les **disjoncteurs haute tension,** qui coupent les circuits en charge sous l'intensité normale au cours des manœuvres courantes ou une intensité de défaut. Les conditions à satisfaire pour couper un réseau sont succinctement les suivantes; trois cas doivent être considérés : la coupure d'un circuit purement résistant où U et I sont en phase, la coupure d'un circuit inductif, et celle d'un circuit capacitif. A l'ouverture des contacts d'un disjoncteur, un arc s'amorce entre les pôles. Il est constitué d'une colonne gazeuse incandescente qui provient de la décomposition des gaz du milieu ambiant et des gaz ionisés dus à la vaporisation du métal des contacts. L'extinction de l'arc n'a lieu qu'au passage à zéro de l'intensité qui traverse le disjoncteur. Il faut d'autre part que la tension entre les contacts ne se rétablisse pas trop rapidement dans un délai inférieur au temps de désionisation des gaz. Suivant le cas, il y a extinction ou réamorçage. Quand le circuit est purement résistif, l'extinction a généralement lieu sans difficulté. Par contre, quand le circuit est capacitif, le problème est plus complexe. C'est le cas de l'ouverture d'une ligne à vide à cause des capacités entre phases et entre phases et terre. Ici, le courant est pratiquement déphasé de $\pi/2$ en avant sur la tension, mais sa valeur, de quelques dizaines d'ampères, est faible. Au cours de la coupure, quand l'intensité passe par zéro, au temps t_0 la tension est maximale (*fig.* 11). Les contacts étant ouverts, la ligne, sous le potentiel U, est chargée et se comporte comme un condenseur. Quand la demi-alternance de la tension devient positive, la différence de potentiel entre les contacts augmente jusqu'à $U + \Delta u$

et un arc s'amorce au temps t_1. Le transfert d'énergie entre le conducteur et la source engendre un régime oscillatoire haute fréquence. Au nouveau passage à zéro de l'intensité, l'arc s'éteint mais la différence de potentiel entre les contacts a augmenté. Ce régime transitoire peut se poursuivre et atteindre des tensions dangereuses sur la ligne susceptibles d'aller jusqu'au contournement des isolateurs. Les disjoncteurs sont étudiés pour ne donner naissance qu'à des tensions relativement réduites.

Le problème est aussi complexe quand le circuit est inductif comme la coupure d'inductances ou de transformateur à vide. La coupure d'un courant de court-circuit nécessite l'ouverture d'un circuit dont l'intensité efficace peut atteindre plusieurs milliers d'ampères et le déphasage entre U et I peut être de 80° arrière. Comme dans le cas précédent, à chaque extinction de l'arc, la remontée rapide de la tension entraîne un réamorçage et un régime oscillatoire. L'extinction de l'arc est favorisée par le soufflage et le refroidissement, et elle dépend du diélectrique dans lequel se trouvent les contacts. Trois diélectriques principaux sont employés : l'air, l'huile et l'hexafluorure de soufre (SF_6). L'air est employé à forte pression : 20 à 30 bars ; sa tenue électrique, sa stabilité chimique, son pouvoir extincteur et son refroidissement de l'arc sont bons. L'huile est utilisée à faible pression, ses caractéristiques sont moyennes ou bonnes, mais elle est inflammable. L'hexafluorure est employé à faible ou à forte pression (15 bars) ; ses caractéristiques sont très bonnes, mais il se liquéfie à 40 °C à basse pression, et à 0 °C à forte pression.

Dans un disjoncteur à huile, au moment de la coupure, l'arc, qui est à environ 3 000 °C, forme une poche de gaz entre les contacts, la pression augmente, ce qui facilite l'extinction. Pour éviter l'explosion de l'appareil, on ajoute des chambres. On peut encore entourer ces chambres d'un acier revêtu d'un matériau isolant. A la formation de l'arc, la pression est très importante, mais le gaz ne peut s'échapper que lorsque le contact mobile sort de cette chambre. L'arc est alors violemment soufflé.

Il existe deux types principaux de disjoncteur à air comprimé : les appareils autopneumatiques où l'air provient d'un piston mis en mouvement en même temps que le contact mobile (leur pouvoir de coupure est limité à environ 30 MVA en MT) ; les appareils à réserve d'air comprimé dans lesquels le soufflage, très énergique, peut être obtenu longitudinalement, ou radialement, ou transversalement.

Les disjoncteurs à hexafluorure de soufre, par la grande rigidité diélectrique du SF_6, sont construits en postes blindés et occupent un volume faible qui oriente naturellement leur utilisation aux zones urbaines où les volumes sont réduits.

Dans tous ces disjoncteurs, la vitesse de séparation des contacts doit être grande et atteint quelquefois 15 m/s. L'énergie emmagasinée est libérée en un temps très court. On distingue des commandes électromécanique à ressorts bandés par moteur, électrique à solénoïde (pratiquement abandonnée), pneumatique qui meut un piston solidaire du contact mobile, oléopneumatique par de l'azote sous pression dans un accumulateur qui déplace, par un système hydraulique, un vérin lié au mécanisme.

Appareils de protection contre les surtensions. Il est indispensable de protéger les matériels contre les surtensions, quelle que soit leur origine. Contre les surtensions d'origine atmosphérique, on place des parafoudres à résistance variable ou des éclateurs montés sur les chaînes d'isolateurs. Contre les surtensions dues aux défauts d'isolement, on assure une coordination entre les tensions auxquelles doivent tenir les matériels et les résistances des prises de terre.

Les **prises de terre.** Elles ont une importance primordiale, car elles assurent, par l'intermédiaire de systèmes appropriés, la sécurité du personnel et des matériels. Toutes les masses sont reliées à la prise de terre : gaines, écrans des câbles, cuves, bâtis, cuves de transformateurs, panneaux grillagés, points communs des enroulements primaires des TP, points communs des enroulements secondaires des transformateurs de mesure, les parafoudres, les couteaux de mise à la terre, les canalisations métalliques, les charpentes métalliques, etc. Les conducteurs de terre doivent avoir une section $\geqslant$ 25 mm^2 et supérieure à celle du conducteur de protection de plus faible section. Son échauffement admissible est 160 °C s'il est isolé et 180 °C s'il est nu. Aucun fusible ou organe de coupure n'est intercalé dans ce conducteur. La prise elle-même est constituée par des câbles, du grillage, des plaques, etc.

Classement des ouvrages des installations de distribution

Dans les installations de distribution, les ouvrages sont classés en trois catégories suivant la valeur nominale de la tension exprimée en valeur efficace pour le courant alternatif.

Sont classés en première catégorie les ouvrages dont la tension nominale ne dépasse pas 500 V en courant alternatif ou 750 V en courant continu ; en deuxième catégorie les ouvrages dont la tension nominale est inférieure à 50 000 V ; en troisième catégorie ceux dont la tension nominale est égale ou supérieure à 50 000 V.

* *Ouvrages de première catégorie*

Le point le plus bas des conducteurs traversant les voies publiques est au moins à 6 mètres au-dessus du sol. Cette distance peut être réduite si les conducteurs sont isolés, ce qui est obligatoire pour les traversées d'équipements sportifs et établissements scolaires. Pour les conducteurs nus cette distance peut être ramenée à 1 m par rapport aux façades et aux toitures dont la pente est supérieure à 45°. Les conducteurs isolés ne doivent pas être situés à moins de 30 cm au-dessous des fenêtres, si aucune protection n'est prévue. Ils ne doivent pas être situés à moins de 2 m du sol, sauf s'il est prévu une protection mécanique résistant aux chocs. Il faut prévoir une gaine isolante supplémentaire aux abords de toute partie métallique extérieure aux bâtiments, sinon la distance minimale à respecter est 5 cm. Le point neutre doit être relié directement à la terre dans le cas de distributions monophasées. Il en est de même avec le triphasé où une liaison directe doit être établie entre la terre et le point neutre. Pour ces distributions triphasées, il doit y avoir au moins une mise à la terre par 1 000 m de longueur de ligne. Dans les zones où les orages sont fréquents, il y a lieu de faire une mise à la terre tous les 300 m et de placer à chaque branchement un jeu de parafoudres entre les conducteurs de phase et le fil neutre où ce dernier est mis à la terre. S'il y a voisinage avec une autre ligne de première catégorie à supports indépendants, la distance minimale entre deux conducteurs est 1 m. Quand les supports sont communs, les conducteurs appartenant à la plus basse catégorie sont placés au-dessous des autres.

* *Ouvrages de deuxième catégorie*

Le point le plus bas des conducteurs traversant les voies publiques est au moins à 8 m au-dessus du sol pour les conducteurs nus. Cette distance est ramenée à 6 m si la ligne longe des voies publiques ou passe sous des ouvrages d'art. Pour les conducteurs nus, la distance minimale avec les habitations est 3 m. Les conducteurs isolés doivent être protégés mécaniquement s'ils sont à moins de 2,5 m au-dessus du sol et de 0,5 m en dessous. Le point neutre doit être relié à la terre, soit directement, soit par l'intermédiaire d'une faible impédance. Tous les supports doivent être munis d'un dispositif antiescalade et d'une plaque réglementaire portant l'indication « Défense absolue de toucher aux fils, même tombés à terre », suivie en gros caractères des mots « Danger de mort ». Les caractéristiques de cette plaque sont déterminées par un arrêté ministériel du 14 mai 1963. Dans la mesure du possible, il ne faut pas mettre de supports dans les établissements scolaires et les lieux sportifs, et l'on ne doit pas en mettre à moins de 10 m d'une piscine en plein air.

Quand deux lignes de première et deuxième catégorie ont les mêmes supports, celle de plus faible catégorie doit être au-dessous et la charge de rupture des conducteurs de la deuxième catégorie doit être supérieure à 4 800 newtons. Sur les supports aériens peuvent être placés des transformateurs, des sectionneurs et des interrupteurs. Les transformateurs doivent pouvoir être isolés du réseau de distribution par un appareil de sectionnement monté lui-même sur poteau et manœuvrable du sol. Le mécanisme doit comporter un double isolement et doit être immobilisé par cadenas en position ouverte ou fermée. La personne chargée de cette manœuvre doit monter sur une plate-forme isolée du sol. Évidemment, toutes les parties métalliques hors tension sont mises à la terre.

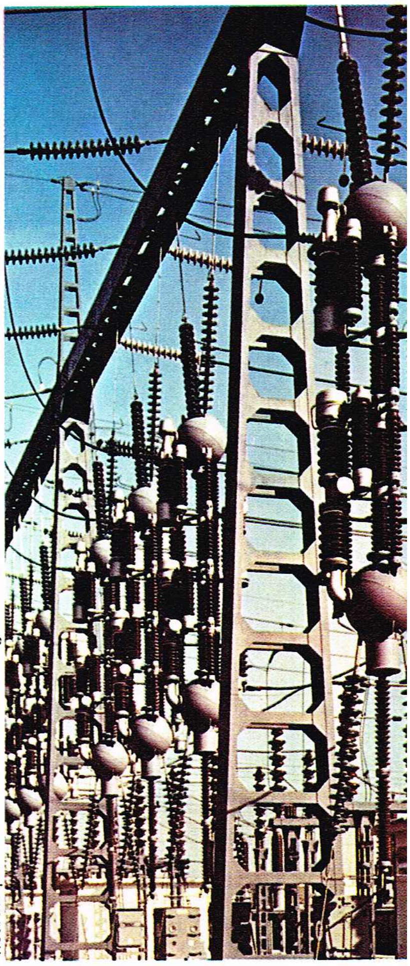

Photothèque E. D. F. - Sodel - P. Bérenger

▲ **Disjoncteur *à réserve d'air comprimé (à pression permanente) et à coupure multiple du poste E.D.F. du Plessis-Gassot.***

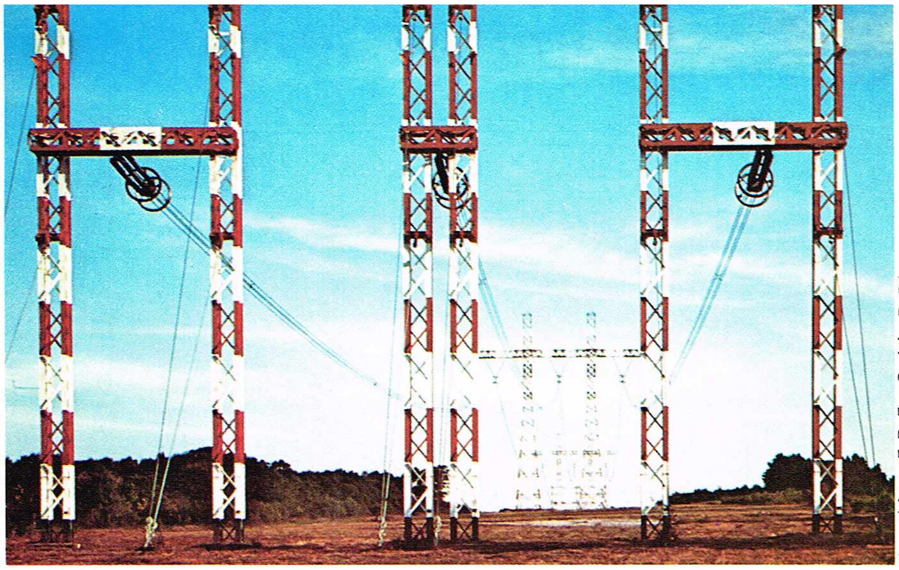

Photothèque E. D. F. - Sodel - P. Bérenger

fig. 12

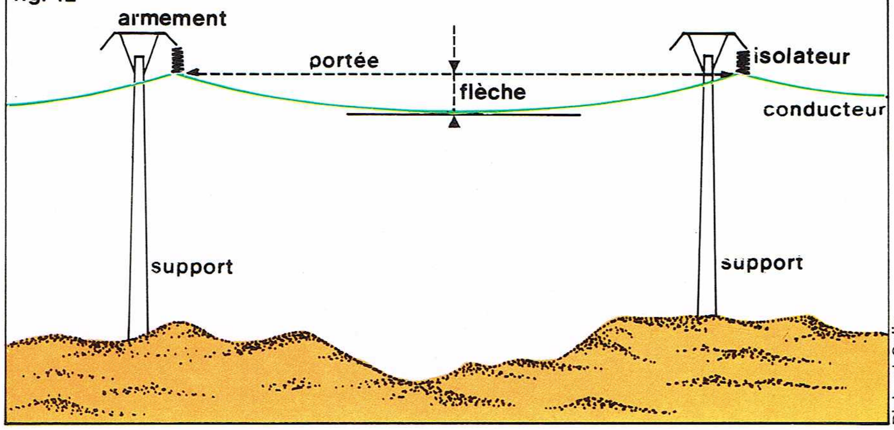

Richard Colin

▲ *En haut, vue générale de la ligne électrique aérienne expérimentale de 1 000 000 volts installée au laboratoire E. D. F. des Renardières. En bas, figure 12 : représentation schématique d'une ligne électrique aérienne.*

▼ *Pylône métallique pour ligne à très haute tension en Alsace.*

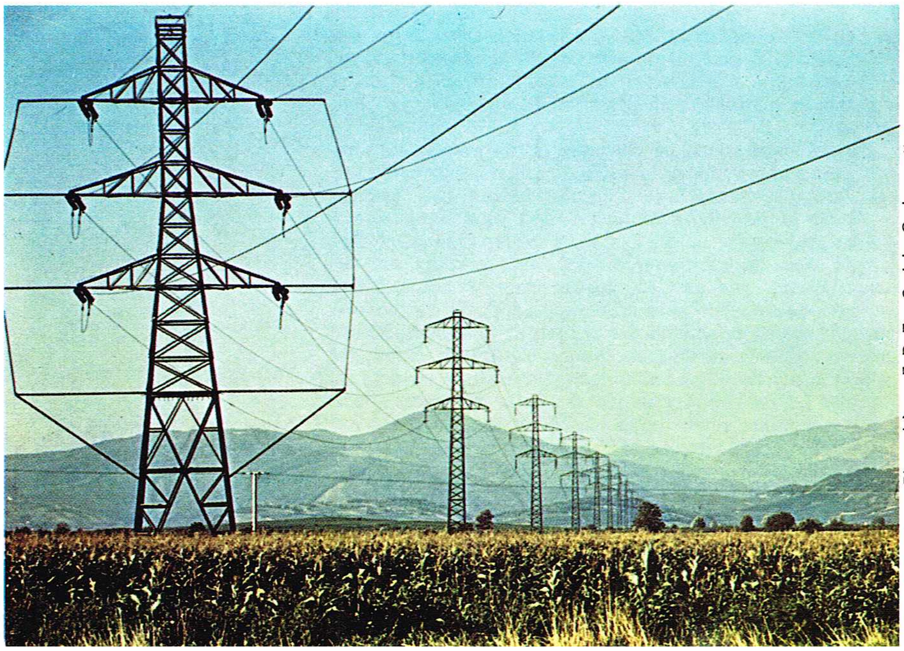

Photothèque E. D. F. - Sodel - G. Jaumotte

* *Ouvrages de troisième catégorie*

Le point le plus bas des conducteurs traversant les voies publiques est au moins à 8 m au-dessus du sol pour les conducteurs nus. Cette distance est ramenée à 6 m pour les terrains de toute nature. Pour les conducteurs nus, la distance minimale avec les habitations est 3 m. Les conducteurs isolés doivent être protégés de la même manière que ceux de la deuxième catégorie. Il en est de même pour les supports.

Les lignes aériennes

Les lignes aériennes sont utilisées quelle que soit la catégorie des ouvrages, depuis les lignes de distribution basse tension de quelques centaines de volts aux lignes THT couramment employées de 380 000 volts, y compris la ligne expérimentale E. D. F. de 1 000 000 volts installée au laboratoire des Renardières. Ce procédé de transport est souvent plus économique que les canalisations souterraines. Une ligne se compose de supports; la distance entre deux supports consécutifs est la portée. Entre deux supportages, un conducteur épouse la forme de la courbe représentant un cosinus hyperbolique caractérisée par une flèche, qui est la distance verticale comprise entre la droite joignant les deux supports et la tangente au conducteur parallèle à cette droite (*fig.* 12).

* *Les supports*

Ils sont de trois natures : en bois, en béton armé et métalliques. Ils doivent supporter des efforts verticaux dus aux charges, des efforts horizontaux et obliques dus aux tensions mécaniques importantes.

Les **poteaux en bois** sont peu utilisés en France, car leur résistance mécanique est relativement faible et leur durée de vie assez courte. Par contre, ils sont économiques, légers, faciles à transporter et à mettre en œuvre. D'autres pays, comme les États-Unis, les emploient couramment. L'effort transversal en sommet de poteau peut avoir n'importe quelle direction à cause de leur section circulaire, mais ne peut dépasser 3 000 newtons. Malgré les traitements chimiques (imprégnation de créosote), le bois pourrit à la limite du sol, et fréquemment les insectes le rongent. Les essences des bois les plus employés sont : le sapin, le pin, l'épicéa. Les hauteurs courantes sont de 8, 10, 12 et 15 m pour des diamètres s'échelonnant de 15 à 35 cm. Suivant les efforts nominaux, reportés à 25 cm au-dessous du sommet, on prend des poteaux simples (jusqu'à 485 décanewtons), des poteaux jumelés (jusqu'à 810 daN), des poteaux contre-fichés (jusqu'à 1 410 daN) et des poteaux haubanés (jusqu'à 4 130 daN).

Les **poteaux en béton armé** sont assez utilisés parce qu'ils ne nécessitent que peu de frais d'entretien. Ils sont résistants et leur durée de vie est longue. En contre-partie ils sont lourds et chers. Ils sont employés pour toutes les tensions. On distingue les poteaux en béton armé ordinaire à 400 kg de ciment par m^3. Les fers à béton sont en acier de 10 à 15 mm de diamètre pour les armatures longitudinales; les étriers ont 5 mm de diamètre. Dans les angles, les fers sont recouverts par 20 à 30 mm de béton. Ils sont généralement ajourés et leur section peut être quelconque. Leur fabrication n'apporte pas de difficulté : les hauteurs totales sont 9, 10, 11, 12, 13 et 14 m, et les efforts vont de 150 à 1 250 daN.

Les **poteaux en béton armé précontraint** sont très utilisés. Les armatures longitudinales sont en acier, dont le diamètre est de l'ordre de 5 mm, à limite d'élasticité élevée, environ 1 500 N/mm^2. Ils sont mis en tension sous un effort de 1 100 N/mm^2 au coulage du béton. Quand le poteau est sec, les vérins de mise en tension sont relâchés; les fils d'acier exercent une précontrainte longitudinale en conservant dans chacun d'eux une contrainte voisine de 1 000 N/mm^2. Cela permet aux poteaux de supporter des efforts en tête importants : 5 000 à 10 000 N.

Les **poteaux en béton armé centrifugé** nécessitent un matériel spécial. Ils sont constitués d'une armature longitudinale prise en sandwich entre deux enroulements métalliques en spirale. L'ensemble est placé dans un moule avec du béton à 450 kg de ciment par m^3. Auparavant, les armatures métalliques ont été calées pour qu'elles ne touchent pas au coffrage. Le moulage est alors entraîné progressivement jusqu'à la vitesse de rotation de 800 tours/mn. Ce procédé élimine les poches d'air, assure une parfaite homogénéité du béton et une étroite liaison entre les fers et le béton. Les résultats obtenus sont remarquables. La durée de vie est très longue, car l'homogénéité du béton empêche toute infiltration interne jusqu'aux armatures.

Les **pylônes métalliques.** Les lignes HT et THT à grandes portées sont presque exclusivement équipées de pylônes métalliques. Ils offrent les avantages d'une grande hauteur, de supporter des efforts très importants, d'être légers, d'être facilement transportables par morceaux assemblés sur place. Par contre, s'ils ne sont pas galvanisés, leur entretien entraîne des frais élevés de peinture. On peut distinguer quatre types principaux de pylônes suivant leur emplacement et le rôle qu'on leur demande de jouer. Le premier est le *pylône d'alignement* qui ne fait que supporter les conducteurs dans les parties pratiquement droites. Le second est le *pylône de traversée ;* il est comparable au précédent, mais le coefficient de sécurité est supérieur, et il est employé pour les traversées de voies de communication. Le troisième est le *pylône d'arrêt* calculé pour résister à la rupture des conducteurs. Le quatrième est le *pylône d'ancrage ;* il est comparable au précédent, mais le coefficient de sécurité est supérieur. On l'utilise pour les grands angles et les extrémités de ligne.

Les aciers employés dans la construction sont généralement de la nuance A 33. Les dimensions des cornières pour les montants et treillis sont normalisées. L'ensemble est assemblé avec des rivets posés à chaud ou par soudure à l'arc électrique. Les poutrelles sont constituées de profils dont les dimensions minimales sont 120 mm. Les calculs sont faits en considérant les efforts suivants : effort horizontal relatif à la traction maximale des conducteurs; effort dû au vent sur les conducteurs en prenant, s'il le faut, une surface de conducteur recouvert d'un manchon de givre; effort dû au vent sur le support, l'armement et les isolateurs; effort vertical dû à la masse des conducteurs, des armements et des isolateurs.

Comme les poteaux en béton armé, les pylônes métalliques sont maintenus au sol dans des massifs en béton dont le volume et la forme dépendent de la nature du terrain. Tous les supports métalliques hors tension doivent être reliés à la terre par un fer de section minimale 50 mm², boulonné au pylône à 15 cm au-dessus du massif. Ce fer traverse le massif et est déposé en fond de fouille autour du bétonnage.

* *Les isolateurs*

Ils sont en verre ou en céramique, la porcelaine n'est pratiquement plus utilisée. Le verre présente l'avantage d'être peu coûteux, et ses défauts sont faciles à déceler par simple examen visuel, aussi bien à la fabrication qu'après mise en place. Le verre est généralement trempé. Pour ce faire, on le porte à haute température, voisine de la fusion, puis on le refroidit brusquement avec des jets d'air sur toute sa surface, ce qui a pour but d'augmenter ses caractéristiques mécaniques. Les lignes HT sont montées avec des isolateurs suspendus ou des isolateurs rigides.

Les isolateurs suspendus doivent résister à un effort de rupture électromécanique de 40 kilonewtons. Ils sont en effet soumis aux efforts décrits précédemment relatifs aux masses des conducteurs, au vent, à la traction, et ils doivent évidemment assumer leur rôle principal, qui est d'isoler la ligne de la masse. Suivant la tension, on assemble plusieurs éléments en tenant compte des surtensions d'origine atmosphérique et de manœuvre, des dépôts dus à la pollution qui court-circuiterait la chaîne et du degré de sécurité. Ces assemblages suspendus sont utilisés dans les ouvrages de deuxième et de troisième catégorie. Chaque élément se compose d'une assiette isolante sur laquelle sont scellées deux parties métalliques, l'une au-dessus, l'autre en dessous, qui, par emboîtement et goupillage, permettra l'assemblage articulé de la chaîne. Pour éviter la détérioration de la chaîne par élévation de température si un arc la contourne, on place à chacune de ses extrémités des cornes ou des raquettes qui ont pour but d'éloigner l'arc des anneaux de répartition de champ électrique.

Les isolateurs rigides sont utilisés pour les ouvrages de première et quelquefois de deuxième catégorie. Une chaîne peut comporter plusieurs éléments assemblés rigidement les uns aux autres. Comme pour les précédents, les ferrures (de diamètre 20 à 25 mm) sont scellées aux assiettes par un ciment spécial. Pour les ouvrages en ligne ou en dérivation et départ de branchement, on ne prend pas en considération la charge de rupture, car les isolateurs sont choisis en fonction du diamètre des ferrures. Par contre, pour les angles importants et les arrêts, on prend, suivant les utilisations, 700 à 1 350 daN.

* *Les conducteurs*

Les conducteurs sont en cuivre ou en aluminium. On peut en retenir cinq types principaux :

— les câbles isolés à neutre porteur sont utilisés en basse tension pour la distribution de l'énergie chez les abonnés;

— les conducteurs nus pour lignes basse tension en cuivre dont les sections normalisées sont 12,57 mm², 19,63 mm², 29,3 mm², 38,2 mm² et 48,3 mm² pour les phases, et 12,57 mm², 19,63 mm², 29,3 mm² et 38,2 mm² pour le neutre;

— les conducteurs nus pour lignes BT en aluminium dont les sections normalisées sont 22 mm², 34,4 mm², 54,6 mm² et 75,5 mm² pour les phases, et 22 mm², 34,4 mm² et 54,6 mm² pour le neutre;

— les câbles homogènes en alliage d'aluminium (almélec);

— les câbles mixtes aluminium-acier utilisés en haute tension.

Photothèque E. D. F. - Sodel - M. Brigaud

◄ *Détail d'une* chaîne d'isolateurs *(de type suspendu) avec ses anneaux de répartition du champ électrique, appelés* anneaux de garde *(ligne expérimentale de 1 000 000 volts du laboratoire E. D. F. des Renardières).*

Le *tableau* IV donne leurs caractéristiques.

Effet couronne. Ce phénomène se produit quand la tension, entre un conducteur et le sol, augmente progressivement. A un certain seuil, une luminescence apparaît autour du conducteur ainsi qu'un bruissement très perceptible pour un observateur placé à proximité. Dans l'obscurité, il semble que le conducteur soit entouré d'une couronne lumineuse. Si la tension croît, un arc peut s'amorcer entre le conducteur et le sol. Dans les conditions normales, l'air ambiant est légèrement ionisé. Quand on soumet les ions à un champ électrique, leur mouvement s'accélère et ils acquièrent une énergie cinétique qui, grâce aux chocs supplémentaires, donne naissance à de nouveaux ions. Ce phénomène prend naissance avec un champ de 30 kV/cm environ : c'est le champ disruptif de l'air. L'air avoisinant le conducteur devient partiellement conducteur. Ce champ varie notamment suivant le rayon de courbure des surfaces sous tension. Aux très hautes tensions, on utilise l'armement des lignes en faisceau. Chaque phase est équipée de 2, 3 ou 4 conducteurs convenablement écartés les uns des autres (*fig.* 13). Cette disposition permet de réduire l'effet couronne en diminuant, à égalité de section de métal, le gradient de potentiel à leur surface.

Transposition des conducteurs. Il est souhaitable qu'un circuit multifilaire soit symétrique et homogène. Dans le cas de lignes aériennes, la symétrie est irréalisable. On peut disposer les conducteurs aux sommets d'un triangle équilatéral dans le cas du triphasé, mais les conducteurs ne sont pas tous à la même distance du sol. On peut les disposer en nappe horizontale, qui assure une parfaite symétrie par rapport au sol, mais cette symétrie n'est pas réalisée entre conducteurs. On réalise artificiellement cette symétrie en transportant régulièrement les conducteurs, c'est-à-dire en leur faisant occuper successivement toutes les places possibles par permutation circulaire le long de la ligne (*fig.* 14.)

▼ *Figure 13 : différents types de répartition des conducteurs (2, 3 ou 4 conducteurs) de chaque phase dans les lignes à très haute tension (THT).*

fig. 13

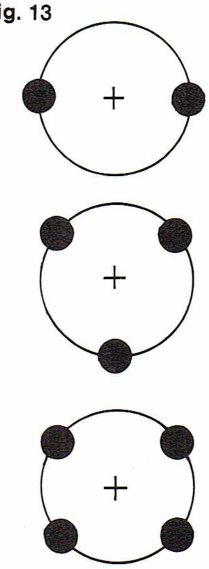

Richard Colin

▼ *Tableau IV : caractéristiques des conducteurs des lignes électriques aériennes.*

Tableau IV
Caractéristiques des conducteurs des lignes électriques aériennes

Section (en mm²)	Nombre de fils	Diamètre de chacun de ces fils (en mm)	Résistance (en Ω/km à + 20 °C)
37,7	9 en aluminium 3 en acier	2 2	1,02
59,7	12 en aluminium 7 en acier	2 2	0,77
75,5	12 en aluminium 7 en acier	2,25 2,25	0,60
116,2	30 en aluminium 7 en acier	2 2	0,31

▶ *Figure 14 : disposition des conducteurs des lignes électriques aériennes sur les supports ; ces conducteurs occupent successivement toutes les places possibles par permutation circulaire le long de la ligne.*

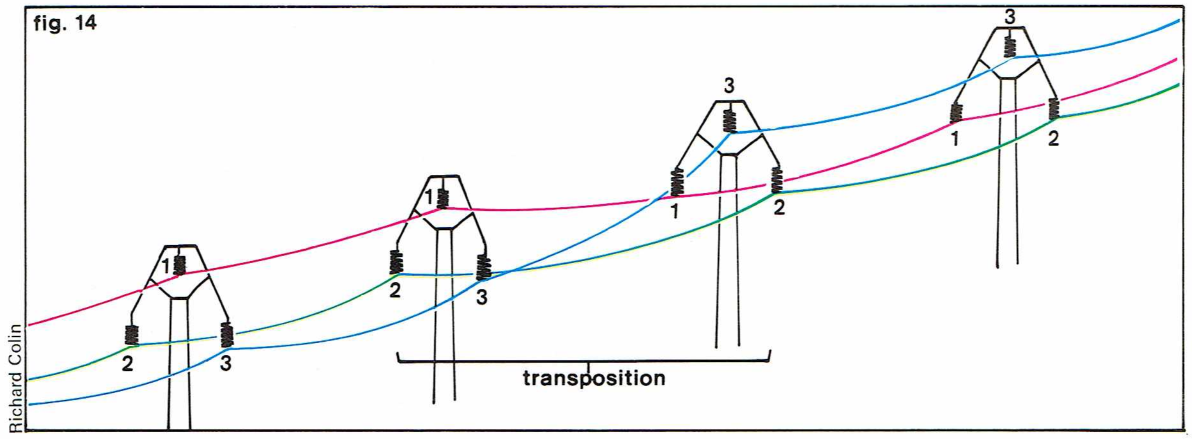

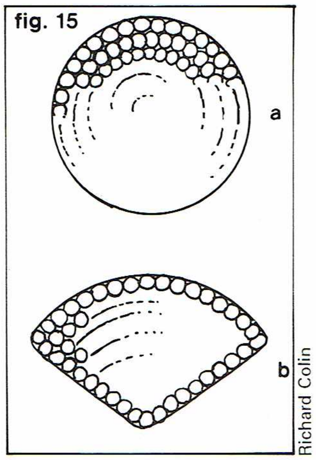

▲ *Figure 15 ; les deux types de section des âmes conductrices pour le transport d'électricité par câbles isolés :*
a) *section circulaire ;*
b) *section sectorielle.*

▼ *Tableau V : caractéristiques des âmes conductrices pour le transport d'électricité par câbles isolés.*

Transport d'énergie par câbles isolés

Ce moyen est très utilisé, aussi bien en basse qu'en haute tension, et se compose, outre les conducteurs, des protections, des supports et des fixations. Les câbles peuvent être utilisés en extérieur et aériens, en extérieur et fixés à une paroi, en intérieur sous moulure, en intérieur sur chemins de câbles, en souterrain dans des caniveaux, dans des tranchées creusées dans le sol, etc. Leurs protections mécaniques dépendent des locaux dans lesquels ils sont installés ; des symboles normalisés désignent ces locaux : H0 : locaux secs, H1 : locaux temporairement humides... Y : locaux présentant des risques d'incendie, Z : locaux présentant des risques d'explosions. Leur installation doit être faite en prenant toutes les précautions ; il faut notamment éviter de mettre côte à côte des tensions très différentes, des fonctions différentes, par exemple les commandes, le contrôle, les alimentations de puissance, les télécommunications..., des câbles et des canalisations de gaz, d'eau.

* *Les conducteurs*

Les conducteurs isolés sont constitués d'âmes conductrices protégées par des isolants.

Les *âmes conductrices* sont le plus généralement en cuivre ou en aluminium qui sont des métaux présentant une bonne conductibilité de manière à produire le minimum de pertes. Elles doivent présenter une bonne résistance mécanique et suivant l'utilisation être souples pour faciliter la pose et évidemment le transport. Cette souplesse est obtenue en divisant l'âme en plusieurs conducteurs : plus leur nombre est important, plus la souplesse est grande.

Les sections des conducteurs rigides sont, en mm^2 : 1,5 ; 2,5 ; 4 ; 6 ; 10 ; 16 ; 25 ; 35 ; 50 ; 70 ; 95 ; 120 ; 150 ; 185 ; 240 ; 300 ; 375 ; 500 ; 630 ; 800 ; 1 000 ; celles des conducteurs souples : 0,5 ; 0,75 ; 1 ; 1,25 ; 2,5 ; 4 ; 6 ; 10 ; 16 ; 25 ; 35 ; 50 ; 70 ; 95 ; 120 ; 150 ; 185 ; 240 ; 300 ; 375 ; 500. Quand l'âme est constituée par un fil unique, elle est massive ; quand elle constituée de plusieurs conducteurs, elle est câblée. Les principales caractéristiques sont données par le *tableau* V.

Les âmes peuvent avoir une section circulaire ou sectorielle (*fig.* 15). Les premières permettent d'obtenir une répartition plus uniforme du gradient de potentiel dans le diélectrique, et on les utilise en HT de préférence aux secondes. Il existe aussi des âmes rondes rétreintes, creuses en brins circulaires, creuses en brins profilés, ovales, segmentées.

* *Les isolants*

De la constitution chimique d'un isolant dépend sa résistivité qui varie aussi, dans de larges limites, avec le champ électrique. On peut distinguer deux types principaux d'isolants : le papier imprégné, pour lequel nous ne donnerons que peu de renseignements, car il est de moins en moins utilisé, de même que le caoutchouc ; on leur préfère le polyéthylène et le polychlorure de vinyle. Le papier imprégné : des bandes sont enroulées en hélice sur l'âme, étuvées et imprégnées d'huile de vaseline. Les caoutchoucs naturel, synthétique, vulcanisé, butyle sont pratiquement abandonnés. Par contre, les caoutchoucs de silicone qui résistent bien aux températures élevées sont encore employés dans le câblage des circuits de sécurité.

Le *polyéthylène.* Cet isolant synthétique a une permittivité, une résistivité thermique et des pertes diélectriques faibles. Il est obtenu par polymérisation de l'éthylène. Le polyéthylène réticulé résiste mieux au fluage à chaud et propage difficilement la flamme. Ses propriétés mécaniques sont très bonnes. Il est employé pour toutes les tensions, BT, HT et THT jusqu'à 225 000 V. Les gradients de potentiel sont les suivants : câbles à 63 kV : 5 kV/mm, câbles à 225 kV : 9 kV/mm. Les températures sont, en fonctionnement normal : 70 °C ; et, en court-circuit : 150 °C.

Le *polychlorure de vinyle* (PVC) est obtenu par polymérisation du chlorure de vinyle et mélangé à des stabilisants et à des plastifiants. Il ne transmet pas la flamme. Par contre, les pertes diélectriques sont plus importantes que pour le polyéthylène.

* *Les gaines de protection et d'étanchéité*

Les gaines de protection mécanique sont en feuillard d'acier ou en fil d'acier. Les gaines d'étanchéité aux agents chimiques et physiques sont en aluminium, en matériaux synthétiques ou en plomb. Le plomb, mis en place par filage, permet une étanchéité parfaite. L'aluminium supporte mieux les vibrations que le plomb, mais tous deux sont vulnérables à la corrosion électrochimique. Les gaines en polyéthylène ou PVC ont une bonne résistance mécanique, notamment au déchirement. Le polychloroprène est souple et ne transmet pas la flamme. Mélangé à du carbone, il résiste bien à la chaleur et à la lumière.

* *Les différentes sortes de câbles*

Qu'ils soient unipolaires ou multipolaires, et quelle que soit la nature des isolants, les câbles sont constitués, suivant la tension de service, des composants suivants en BT : de l'âme et d'une ou plusieurs enveloppes isolantes ; en MT et HT : de l'âme, d'enveloppes isolantes, de gaines de protection mécanique, d'une enveloppe isolante. Hormis les câbles isolés au papier imprégné, on trouve les *câbles à pression interne de gaz* dans lesquels, pour éviter les amorçages dus aux bulles de gaz dans les isolants, on soumet l'isolant à une pression suffisante telle que la tension de décharge disruptive ne soit pas atteinte. Entre 1 et 15 bars, les gradients de potentiel peuvent varier de 6 kV/mm à 19 kV/mm. Le gaz le plus couramment employé est l'azote.

Tableau V
Caractéristiques des âmes conductrices pour le transport d'électricité par câbles isolés

Métal	Masse atomique (en g)	Masse volumique (en kg/m^3)	Résistivité à 20 °C (en $\Omega \cdot$ m)	Charge de rupture (en N/m^2)
Cuivre	63,57	8 890	$17{,}24 \cdot 10^{-9}$	environ $250 \cdot 10^6$
Aluminium	27	2 703	$2{,}8 \cdot 10^{-9}$	environ $140 \cdot 10^6$

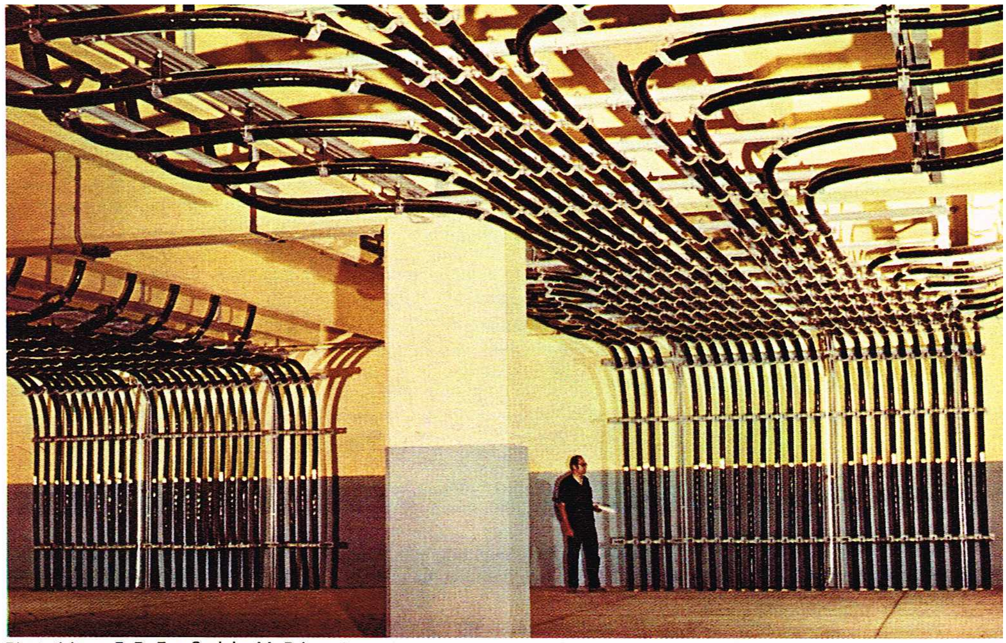

Photothèque E. D. F. - Sodel - M. Brigaud

▲ ***Départ des « artères » de 20 kV du poste MT des Buttes-Chaumont à Paris (réseau triphasé) ; ces câbles sont constitués de l'âme conductrice, d'enveloppes isolantes, de gaines de protection mécanique et d'une dernière enveloppe isolante.***

Dans les *câbles à huile fluide*, l'huile peut se dilater librement grâce à des réservoirs sous pression en liaison avec la gaine d'étanchéité. On peut réaliser ainsi des câbles unipolaires de transport d'énergie prévus pour 600 kV entre phases dans lesquels le conduit d'huile est au centre de l'âme.

On peut placer les câbles dans un tube sous pression, on obtient un câble sous tube. L'installation est complexe, car il faut absolument assurer la pression sous peine de claquage.

Les *câbles à isolement sec*. Il en existe deux types : les câbles à champ radial dans lesquels l'enveloppe isolante de chaque câble est recouverte d'un écran constitué d'un ou de plusieurs rubans de cuivre, et les câbles à champ non radial dans lesquels un écran est placé sur la ceinture isolante. Avec les premiers on peut atteindre 220 kV entre phases, avec les seconds quelques milliers de volts seulement.

Désignation des câbles. La désignation des câbles est normalisée. Pour les conducteurs des installations intérieures, on trouve une lettre (U) qui indique que le conducteur est normalisé, suivie d'un chiffre qui est la tension nominale de fonctionnement en volts. On trouve ensuite des lettres qui indiquent les natures des enveloppes isolantes en allant de l'âme vers l'extérieur.

Repérage des conducteurs BT. Ce repérage fait l'objet de la norme NF C 15-100 qui résulte « des études entreprises par les organismes de normalisation de pays du Marché commun (CENELCOM) ». Le conducteur de protection a la double coloration vert-jaune ou vert-noir. Le conducteur neutre a la couleur bleu clair. La norme UTE 15-123 indique clairement que, « des erreurs étant toujours possibles, il est toujours nécessaire de vérifier la polarité des conducteurs avant toute intervention ». Les couleurs normalisées des conducteurs de phases sont le *noir*, le *brun* et le *bleu clair* (*tableau* VI).

Protections électriques des matériels

Ces protections ont pour rôle de déceler puis de signaler et/ou mettre hors circuit un élément de réseau lorsqu'un défaut d'isolement ou un court-circuit s'y produit. Il faut non seulement limiter les dégâts matériels, mais assurer la production d'énergie en maintenant le fonctionnement général du réseau ou de la centrale et quelquefois sa stabilité. Le cerveau de ces protections est constitué par les relais qui sont de petits équipages mobiles électromagnétiques ou entièrement statiques sensibles à la tension ou au courant du réseau à surveiller. Ces organes à courants faibles ne sont jamais montés directement sur les réseaux (sauf en BT), mais par l'intermédiaire de transformateurs de potentiel ou d'intensité. Ces systèmes doivent être sûrs, sélectifs, sensibles et rapides. Ils doivent agir en cas de court-circuit, surtension, surcharge et déséquilibre. Il existe des défauts permanents et des défauts fugitifs, les premiers correspondent généralement à des avaries de matériels. Les relais sont sensibles à l'une des caractéristiques suivantes : tension, intensité, fréquence, vitesse, puissances, température, composantes inverses et homopolaires, différence de phase ou d'amplitude entre courant d'entrée et courant de sortie d'un élément de réseau, pression, niveau... Pour assurer ces fonctions, on distingue les relais « tout ou rien », les relais à « maximum » et à « minimum », les relais instantanés, les relais temporisés à temporisation indépendante, dépendante ou inverse, les relais d'ouverture ou de fermeture, les relais

▼ ***Tableau VI : affectation des conducteurs suivant la constitution des circuits (tableau 51 GD, de la publication NF C 15-100 de juin 1976, de l'Union Technique de l'Électricité).***

Tableau VI - Affectation des conducteurs suivant la constitution des circuits (tableau 51 GD / publication NF C15-100 de juin 1976 - Union Technique de l'Electricité)

(1) NOMBRE DE CONDUCTEURS DU CIRCUIT	(2) CIRCUITS	(3) Conducteurs isolés					(4) CANALISATIONS FIXES — Câbles rigides S ⩽ 25 mm² et souples (toutes sections)					(5) CANALISATIONS FIXES — Câbles rigides S > 25 mm²					(6) CANALISATIONS MOBILES — Câbles souples					
		Ph	Ph	Ph	N	T	Ph	Ph	Ph	N	T	Ph	Ph	Ph	N	T	Ph	Ph	Ph	N	T	
1	De protection ou de terre					VJ																
2	Monophasés entre phases	X	X				Noir (4)	Bleu clair	(B)			Noir	Bleu clair	(B)			Noir	Bleu clair	(B)			
	Monophasés entre phase et neutre	X			Bleu clair		Noir			Bleu clair		Noir			Bleu clair		Noir			Bleu (3) clair		
3	Triphasés sans neutre	X	X	X			Noir	Brun	(B) Bleu clair			Noir	Brun	(B) Bleu clair			Noir	Brun	Bleu clair			(B) (2)
	A 2 phases et neutre	X	X		Bleu clair		Noir	Brun		Bleu clair		Noir	Brun		Bleu clair		Noir	Brun		Bleu clair		(B) (2)
	A 2 phases et conducteur de protection	X	X			VJ	Noir (4)	Bleu clair	(A)		VJ	Noir	Bleu clair			VJ (1)	Brun	Bleu clair			VJ	(A)
	Monophasés phase-neutre avec conducteur de protection	X			Bleu clair	VJ	Noir (4)			Bleu clair	VJ	Noir			Bleu clair	VJ	Brun			Bleu clair	VJ	(A)
4	Triphasés avec neutre	X	X	X	Bleu clair		Noir	Brun	(B) Noir	Bleu clair		Noir	Brun	(B) Noir	Bleu clair		Noir	Brun	Noir	Bleu clair		(B) (2)
	Triphasés sans neutre avec conducteur de protection	X	X	X		VJ	Noir	Brun	(A) Bleu clair		VJ	Noir	Brun	Bleu clair		VJ (1)	Noir	Brun	Bleu clair		VJ	(A)
	A 2 phases et neutre avec conducteur de protection	X	X		Bleu clair	VJ	Noir	Brun		Bleu clair	VJ	Noir	Brun		Bleu clair	VJ (1)	Noir	Brun		Bleu clair	VJ	(A)
5	Triphasés avec neutre et avec conducteur de protection	X	X	X	Bleu clair	VJ	Noir	Brun	(A) Noir	Bleu clair	VJ	Noir	Brun	(B) Noir	Bleu clair	VJ (1)	Noir	Brun	(A) Noir	Bleu clair	VJ	

X Couleurs quelconques sauf blanc (gris), vert, jaune ou bleu clair
(A) Exécutions avec conducteur vert-jaune
(B) Exécutions sans conducteur vert-jaune
Ph Phase N Neutre T Conducteur de protection
VJ Vert-jaune

(1) Le conducteur de protection est réalisé par un conducteur vert-jaune séparé : par exemple, dans le cas de circuits à 4 conducteurs, il est fait usage de câbles à 3 conducteurs plus un conducteur séparé pour le conducteur de protection.
(2) Ces exécutions n'existent que pour les câbles à 3 et 4 conducteurs de la série U-500 SC1C de 2,5 et 4 mm² de section et de la série U-1000 SC12N de 1,5 mm² de section.
(3) Si le mode de connexion permet de déterminer la position du conducteur neutre.
(4) Brun pour les câbles souples.

Tableau VII Classification des installations électriques suivant les tensions				
Courant	**Classe TBT**	**Classe BT**	**Classe MT**	**Classe HT**
Alternatif	$U_{eff} < 50$ V	50 V $\leqslant U_{eff} \leqslant$ 430 V	430 V $< U_{eff} <$ 1 100 V	1 100 V $< U_{eff} <$ sans limitation
Continu	$U \leqslant 50$ V	50 V $< U <$ 600 V	600 V $< U <$ 1 600 V	1 600 V $< U <$ sans limitation

▲ ***Tableau VII : classification des installations électriques suivant les tensions.***

intermédiaires... Les appareils à protéger sont les conducteurs des réseaux, les transformateurs, les alternateurs, les auxiliaires et tous les appareils d'utilisation des abonnés. Les relais donnent des ordres aux appareils de coupure comme les disjoncteurs que nous avons vus précédemment au cours du présent paragraphe.

Protections des personnes

La protection contre les courants électriques dans les installations industrielles est réglementée par le décret du 14 novembre 1962, et la protection du personnel d'intervention fait l'objet de la publication UTE 513. Il est difficile de préciser les seuils dangereux pour les tensions, car ils dépendent de la durée du contact, du type de courant et de l'intensité qui traverse le corps humain. Le courant continu est généralement plus dangereux que le courant alternatif, car il électrolyse les tissus alors que le courant alternatif n'agit que sur les muscles et le système nerveux. L'impédance qu'offre le corps humain au passage du courant dépend des individus ; elle est la somme de l'impédance de la peau et de l'impédance interne du corps traversé par le courant. La première dépend de la pression de contact, de l'humidité du contact, de la qualité de la peau... On admet qu'un courant alternatif à 50 Hz est dangereux quand $I > 0{,}025$ A et $U > 25$ volts ; en courant continu, I doit être inférieur à 0,050 A et U inférieur à 50 volts.

Le décret du 14 novembre 1962 classe les installations électriques suivant les tensions données par le *tableau* VII.

En électropathologie, on définit l'électrisation comme un accident sans suite mortelle et l'électrocution comme un accident mortel. En dessous de 3 mA, l'intensité n'est pas dangereuse. Vers 8 mA, les muscles se contractent, à 15 mA, la main ne lâche plus les objets saisis ; en revanche, le phénomène inverse peut se produire, la main s'ouvre et l'individu chute. Ce courant peut entraîner une contraction des muscles respiratoires et asphyxie. A 25 mA, on peut avoir blocage du cœur. La respiration artificielle doit très rapidement être pratiquée. Il peut aussi y avoir fibrillation du cœur. Quand la coupure du courant intervient avant d'atteindre 30 mA, l'électrocution n'a généralement pas lieu, c'est pourquoi la législation a fixé ce seuil.

Pour prévenir ces accidents, on rend les organes sous tension inaccessibles, on isole ces organes, on isole par rapport à la terre les personnes qui travaillent, on relie à la terre les masses métalliques, on utilise les très basses tensions et on met en place des organes de coupure comme les disjoncteurs différentiels d'abonnés qui s'ouvrent quand Δi atteint 30 mA.

On peut très bien travailler sous tension quand toutes ces précautions sont prises. Les agents spécialisés de la Section d'études, de réalisation et d'expérimentation du Comité des travaux sous tension de l'E. D. F. travaillent couramment sur les lignes aériennes sous des tensions de 380 kV pour remplacer des chaînes d'isolateurs de pylône.

En cas de court-circuit, mauvais contacts ou surcharge, il y a danger d'incendie par augmentation de l'intensité, il faut donc protéger les installations par des détecteurs de surintensité : coupe-circuit ou bilames agissant sur un disjoncteur, ou relais agissant sur un disjoncteur.

Il faut toujours éliminer les différences de potentiel qui pourraient naître entre les masses métalliques et la terre. Pour ce faire, il est nécessaire de mettre en place une protection comportant un dispositif qui provoque une coupure automatique et une liaison électrique qui relie toutes les masses à la terre.

STOCKAGE D'ÉNERGIE

La consommation d'énergie, quelle que soit la forme de cette dernière : chimique, électrique, mécanique ou thermique, n'est jamais régulière dans le temps. Suivant le type d'activité qui est à l'origine de la dépense énergétique : industrie, usages domestiques, chauffage par exemple, les cycles de consommation ont une fréquence quotidienne, hebdomadaire ou saisonnière. Les maximums de la demande sont appelés les « pointes » de la consommation dont on sait qu'elles sont un souci permanent pour les producteurs et distributeurs d'énergie.

En regard d'une consommation de nature essentiellement variable, la production d'énergie n'a généralement pas la souplesse suffisante pour suivre les fluctuations de cette consommation. Il apparaît donc nécessaire de garder temporairement pour un usage ultérieur l'énergie excédentaire lorsque la production dépasse la demande.

Le stockage sera d'autant moins impérieux que l'on aura recherché au préalable l'équilibre de la production et de la consommation. Pour cette raison, les producteurs essaient d'influencer les consommateurs en leur offrant par exemple des tarifs préférentiels : tarif de nuit pour l'électricité, prix d'été pour les combustibles destinés au chauffage, etc. L'interconnexion des réseaux qui permet de niveler les écarts de la demande a également des résultats très positifs. Le câble de transfert d'énergie électrique entre la France et la Grande-Bretagne permet, du fait du décalage horaire entre les deux pays, une aide mutuelle pour la fourniture de l'énergie de pointe. On notera au passage que le fonctionnement d'une maison individuelle alimentée par des capteurs solaires et une éolienne pose, si l'on recherche l'autarcie énergétique, de difficiles problèmes de stockage d'énergie qui sont encore mal résolus dans l'état actuel de la technologie.

On verra au cours de ce chapitre qu'il y a d'autres raisons que la seule adaptation de l'offre et de la demande pour stocker de l'énergie. Un réseau de transport discontinu de produits énergétiques : charbon ou pétrole par exemple, ne peut fonctionner que s'il existe, tout au long des lignes de déplacement des produits, des moyens de stockage. Il existe aussi des stockages prévisionnels destinés à pallier une interruption de l'approvisionnement. On peut ranger dans cette dernière catégorie les réserves dites « stratégiques » prévues par les États en prévision d'un conflit. Les raisons ne manquent donc pas pour stocker les produits énergétiques ou l'énergie elle-même sous ses formes traditionnelles.

Comme il existe diverses formes d'énergie auxquelles sont associés des produits énergétiques différents, il va donc y avoir autant de dispositifs de stockage. L'énergie chimique des combustibles constituera par exemple une première famille et, dans cette famille, il faudra se préoccuper des différents produits couramment transportés et distribués : combustibles solides, liquides ou gazeux. Le stockage de ces différents produits donnera naissance à des types de stockage les plus divers. Ces solutions seront présentées dans ce chapitre, rangées par type d'énergie.

Chacune des formes de l'énergie a ses caractéristiques propres, comme on l'a déjà vu en matière de conversion ou de transformation. Il en va de même pour le stockage qui est plus ou moins facile suivant la forme de l'énergie considérée. Un combustible avec son énergie chimique contenue se stocke sans difficulté, l'électricité en revanche se stocke très difficilement, il faudra donc recourir, si le stockage d'une forme d'énergie est à la fois nécessaire et malaisé, à une conversion vers une forme d'énergie plus facile à stocker. Pour reprendre l'exemple de l'électricité, on peut la stocker en la convertissant en : — énergie chimique, dans des piles ou des accumulateurs ; — énergie thermique, dans des ballons d'eau chaude ; — énergie mécanique, en augmentant l'énergie potentielle d'un liquide ou l'énergie élastique d'un gaz.

Seul ce dernier type de conversion permet le stockage de grandes quantités d'électricité : l'application la plus répandue est la station de pompage. Si l'on désire après stockage retrouver l'énergie sous sa forme initiale, il faudra pratiquer la conversion inverse au moment de la restitution. Compte tenu du rendement de chaque opération, la double conversion peut pénaliser, si les rendements sont médiocres, cette façon de stocker l'énergie.

Les problèmes du stockage ne sont pas nouveaux : ils se posent depuis que l'homme manipule des produits énergétiques mais ils ne sont pas résolus pour autant. On pourrait même dire qu'ils n'ont jamais autant suscité de recherches qu'aujourd'hui. En particulier, depuis l'augmentation brutale du prix du pétrole de 1974 qui a entraîné dans son sillage les prix des autres produits énergétiques, les économies d'énergie sont venues au centre des préoccupations des responsables de tous les pays. On cherche donc à utiliser de mieux en mieux l'énergie, à éviter son gaspillage, et les techniques de conservation rejoignent bien souvent celles du stockage. Par ailleurs, on s'est résolument orienté dans de nombreux pays vers l'exploitation des ressources énergétiques renouvelables comme l'énergie solaire et l'énergie éolienne. On sait que ces énergies dites « nouvelles » sont capricieuses : le Soleil ne brille qu'une partie du jour et la captation de son rayonnement est très dépendante des conditions météorologiques ; le vent aussi est variable, en force et en direction, et ses sautes d'humeur ne sont guère prévisibles. Sans des possibilités de stockage pratiques et bon marché, ces énergies nouvelles ne connaîtront pas de développement notable.

De nombreuses recherches portent, on s'en doute, sur le stockage de l'électricité. Malgré tous les efforts entrepris jusqu'à ce jour, il n'existe pas de moyens permettant de stocker de petites quantités d'électricité. De nouveaux types de batteries ont été imaginés mais les modèles existants ont des performances insuffisantes comparées à leur poids, à leur volume et à leur prix pour donner une chance sérieuse au développement de la voiture électrique. La batterie « miracle » reste à inventer. Le stockage de grandes quantités d'électricité est possible, grâce aux stations de pompage. De nombreux projets ont déjà été réalisés ou sont en cours de réalisation. En France, on peut citer l'usine de Revin dans les Ardennes, d'une puissance de 600 MW, mise en service en 1976. Ce type d'usine est appelé à se généraliser pour autant que l'on trouve des sites convenables. Un autre procédé actuellement à l'étude qui permettrait de pallier l'absence de sites pour établir des stations de pompage est la production d'air comprimé à partir de motocompresseurs électriques. Cet air comprimé serait stocké dans des cavernes souterraines, naturelles ou artificielles, d'où il serait extrait au moment des pointes de consommation pour fabriquer de l'électricité à partir de motogénérateurs fonctionnant à l'air comprimé. Ce type d'installation pourrait peut-être faire l'objet d'une réalisation en France, d'ici à quelques années.

Parmi les autres possibilités examinées, il faut citer le stockage d'énergie dans des champs magnétiques utilisant des électro-aimants supraconducteurs. Le stockage d'énergie mécanique dans des volants tournant à grande vitesse paraît aussi prometteur. Ce dernier type de stockage pourrait être mis en œuvre sur des véhicules terrestres.

Un autre dispositif qui tarde à devenir compétitif en dépit d'études très poussées dans de nombreux pays est la pile à combustible. Cet appareil convertit directement et de façon continue l'énergie chimique en électricité. Le rendement de cette conversion peut être nettement plus élevé que celui de la conversion traditionnelle qui va de l'énergie chimique du combustible à l'électricité en passant par l'énergie thermique et l'énergie mécanique. Ces piles à combustible sont malheureusement encore trop chères pour faire une percée commerciale.

L'exploitation de l'énergie solaire pour l'alimentation énergétique de maisons individuelles pose, comme nous l'avons déjà noté, de difficiles problèmes de stockage. Recueilli à plus grande échelle, le rayonnement solaire pourrait être emmagasiné dans des stockages naturels, sous la forme d'énergie thermique. L'application la plus prometteuse, présentée dans le chapitre concernant les ressources énergétiques, est celle désignée sous le vocable « énergie thermique des océans ». Les vastes étendues d'eau qui recouvrent notre globe sont en effet des capteurs et un moyen naturel de stockage de l'énergie solaire. Malheureusement, la taille des océans est beaucoup trop grande et l'énergie recueillie est encore plus diluée après captation, ce qui rend son extraction particulièrement difficile, sauf en quelques points privilégiés où des écarts notables de température ont été constatés entre les couches d'eau superficielles et les couches profondes. Des chercheurs ont donc eu l'idée de remédier aux insuffisances du stockage naturel de la chaleur solaire en imaginant un stockage artificiel dans des lacs qui permettraient par exemple de restituer en hiver l'énergie recueillie et stockée pendant l'été. Ces lacs « solaires » différeraient des lacs ordinaires par un dosage en sels important des eaux profondes. La différence de densité obtenue bloquerait les courants de convection et permettrait de stocker de l'eau très chaude en profondeur à une température voisine du point d'ébullition.

Pour en finir avec les stockages de l'avenir, il faut à nouveau parler de l'hydrogène. On parle beaucoup pour un futur qui n'est peut-être pas aussi lointain qu'on l'imagine d'un système énergétique basé sur l'hydrogène. Celui-ci, en effet, offre du point de vue stockage les mêmes possibilités que le gaz naturel dont il pourrait utiliser les réservoirs et le réseau de distribution. Il serait donc à même de remplacer progressivement ce dernier dans tous ses usages traditionnels. Liquéfié, l'hydrogène pourrait être stocké dans les réservoirs des automobiles pour remplacer l'essence. Il pourrait également, et toujours sans aucune pollution, être transformé en électricité au moyen de piles à combustible ou de petites centrales thermiques. Cette conversion se ferait localement près des points de consommation, évitant ainsi le transport de l'électricité beaucoup plus dispendieux que celui d'un gaz. L'hydrogène pourrait être produit à partir de l'eau par électrolyse ou décomposition thermique dans des installations de production fonctionnant à l'énergie nucléaire d'abord et aux énergies nouvelles ensuite.

En conclusion, si notre avenir énergétique est lié aux réserves des ressources d'énergie que nous utilisons aujourd'hui, il est et sera de plus en plus dépendant des possibilités de stockage de ces ressources. La recherche dans le domaine du stockage de l'énergie est donc essentielle, aussi bien dans les domaines de l'extraction et de la distribution que dans ceux de la consommation.

Stockage d'énergie chimique

Les fonctions du stockage

Pour assurer la marche régulière d'une économie industrielle moderne, le maintien de stocks importants de matières premières, de combustibles et de produits manufacturés est nécessaire. Qu'ils soient financés par les producteurs, les commerçants ou les consommateurs, leur rôle est indispensable : ils sont un des rouages du mécanisme compliqué par lequel offre et demande sont tenues continuellement en équilibre. Dans l'industrie du pétrole, comme ailleurs, ils amortissent le choc des fluctuations, journalières ou saisonnières, et constituent une assurance contre les crises possibles.

On peut distinguer quatre types de stockages : le stockage opératoire, le stockage de modulation, le stockage de distribution et le stockage de réserve et de sécurité d'approvisionnement.

Même s'il n'y avait pas de fluctuations saisonnières dans la demande, ni de précautions à prendre en vue de crises possibles, des stocks importants de pétrole seraient nécessaires pour remédier aux diverses solutions de continuité dans l'approvisionnement. Si le pétrole s'écoule sans arrêt dans les pipe-lines principaux, le chargement des tankers est toujours discontinu et il faut donc avoir des stocks aux terminaux. Les moyens de stockage doivent être, au moins, suffisants pour emmagasiner le pétrole qui atteint le terminal entre deux chargements de tankers ; il faut en outre se prémunir en cas d'interruption dans le chargement des navires par mauvais temps ou pour d'autres causes.

L'escalade dans le tonnage des tankers au cours des dernières années a entraîné l'existence de parcs de stockage de plus en plus importants dans les ports de départ et d'arrivée, puisque les tankers doivent fonctionner avec le minimum de temps morts.

Les stockages terminaux sont également nécessaires pour alimenter en brut les raffineries souvent situées dans l'arrière-pays près des centres de consommation. Dans le même ordre d'idée, il faut maintenir des stocks aux raffineries parce que ces usines marchent de façon continue alors que l'arrivée de la matière première est irrégulière.

En France, les raffineries sont tenues, par le décret du 10 mars 1958 dans le cadre de la loi du 30 mars 1923, de constituer et de maintenir un stock de chacun des pro-

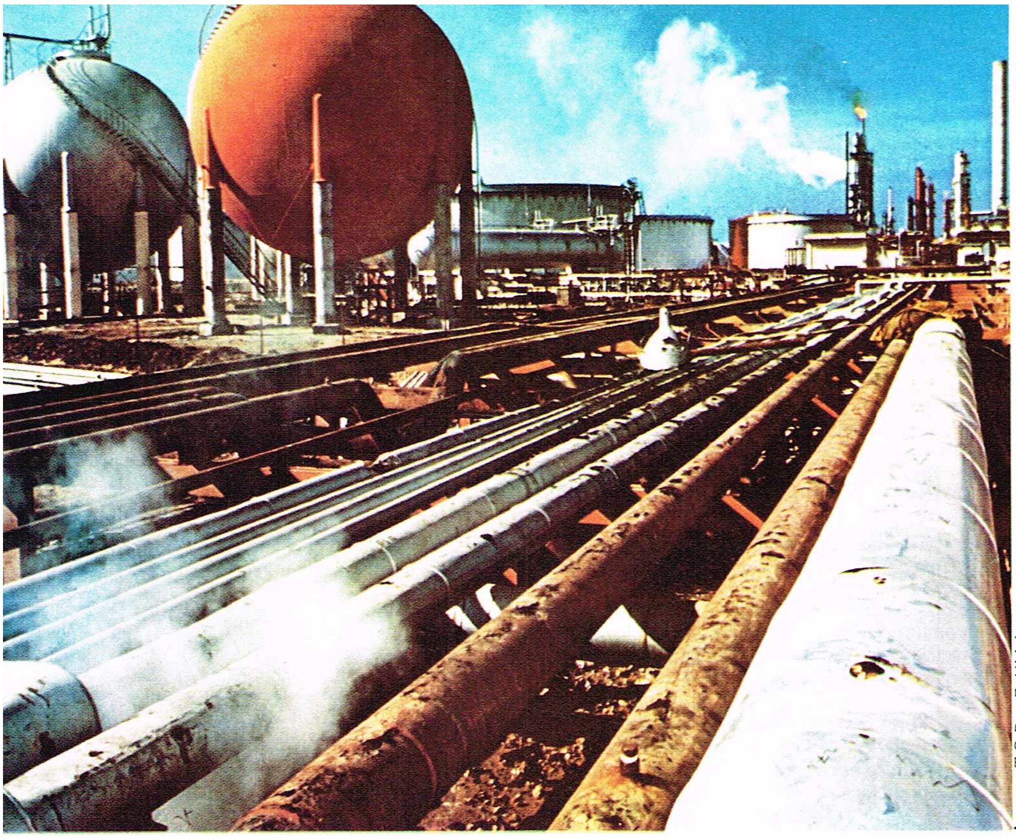

Agence T.O.P. - F. Hidalgo

▲ ***Réservoirs de stockage de la raffinerie de Frontignan (France).***

duits directeurs égal au quart des quantités commercialisées au cours des douze mois précédents, à l'exclusion des produits obtenus à partir d'hydrocarbures provenant de gisements métropolitains. Une partie de ces stocks peut être constituée par le brut en place dans les raffineries avant traitement.

On trouve donc dans les raffineries trois types de stocks :

Les **stocks de brut** servent surtout pour assurer la liaison entre les livraisons de tankers et les opérations de raffinage ; ces dernières ne peuvent être étroitement tributaires des arrivages des navires-citernes et, réciproquement, ceux-ci ne doivent pas être immobilisés trop longtemps dans les ports pétroliers faute de possibilités immédiates de déchargement de leurs cargaisons. En France, ces stocks représentent environ le tiers du stock en raffinerie de tous les produits.

Les **stocks de produits intermédiaires et de produits pour mélange** sont nécessaires à la bonne marche de la raffinerie. En France, ils représentent environ 22 % du stock en raffinerie de tous les produits.

Les **stocks de produits finis,** malgré la souplesse de marche des raffineries, sont indispensables pour amortir les fluctuations saisonnières de la plupart des produits.

Les stocks de produits finis dans les dépôts de distribution assurent la liaison entre les expéditions massives à partir des raffineries et les livraisons aux utilisateurs. Les consommateurs importants sont cependant ravitaillés directement au départ des raffineries. Ces stocks contribuent en outre à l'écrêtement des pointes saisonnières.

Les stocks chez les utilisateurs ont pour objet de mettre ceux-ci à l'abri d'à-coups dans les transports et de les faire bénéficier des meilleures conditions de distribution grâce à des livraisons par gros tonnages. Selon le volume de la consommation, celles-ci s'échelonnent depuis le jeu de jerricans ou de fûts jusqu'à des réservoirs de dimensions comparables à ceux des dépôts de distribution.

Comme nous l'avons dit, la fonction la plus commune des stocks en général est sans doute de pallier les effets des fluctuations saisonnières, qu'il s'agisse de l'offre ou de la demande. Les fluctuations du côté de l'offre sont négligeables. Elles se produisent surtout du côté de la demande.

La composition des stocks de produits suivant les saisons est liée à l'amplitude des oscillations de la demande et au degré de souplesse du raffinage, ces facteurs pouvant varier considérablement d'un pays à un autre. Ainsi, l'élément saisonnier dans les stocks est beaucoup plus grand pour les huiles de chauffage que pour l'essence. Un facteur supplémentaire joue, en ce sens que les raffineries s'efforcent de porter au maximum pendant l'été la production d'essence, mais mettent moins d'enthousiasme à la réduire pendant l'hiver parce que l'essence est le produit le plus cher. Il en résulte que les stocks d'essence tendent constamment à dépasser le niveau élevé qui suffirait pour répondre aux fluctuations saisonnières de la demande. Inutile de dire que la constitution de stocks d'huile de chauffage en été et d'essence en hiver coûterait considérablement moins cher si les réservoirs étaient facilement interchangeables.

Depuis que la consommation pétrolière des pays européens s'est développée et surtout à partir du moment où les unités motorisées et aériennes sont devenues prépondérantes dans l'armée, le problème de la *sécurité d'approvisionnement* a été posé par les autorités civiles et militaires.

On peut distinguer trois « niveaux » de stocks :

— Les stocks visant à éviter qu'un pays qui reçoit de l'étranger la quasi-totalité d'une matière première indispensable à son économie ne soit étroitement tributaire de ses fournisseurs sur le plan purement commercial.

— Les stocks visant à assurer la sécurité dans des éventualités de diverses natures (guerres, troubles intérieurs, boycottages politiques, etc.) survenant chez les pays extra-européens fournisseurs de pétrole et se traduisant par une interruption subite des expéditions.

— Les stocks visant à assurer la sécurité dans l'hypothèse d'un conflit généralisé qui se traduirait alors par un arrêt total des arrivages extérieurs, avec des difficultés éventuelles de transport intérieur du fait d'actes de guerre sur le territoire métropolitain.

Il faut remarquer que le volume de pétrole requis pour pallier les oscillations journalières est souvent sous-estimé. Aux États-Unis, les deux tiers des stocks normaux de brut sont constitués par du brut dans les pipe-lines, en transit par tankers, dans les wagons, etc., et par les stocks « outils » nécessaires aux raffineries et ailleurs. Ces stocks de base, et il en va de même pour tous les pays pétroliers, ne sont pas disponibles pour la distribution puisqu'ils sont essentiels pour assurer le fonctionnement régulier du système.

Principaux stockages

Réservoirs « atmosphériques »

Ce sont des réservoirs verticaux cylindriques. Il en existe plusieurs variétés : à toit fixe, à toit flottant et à toit ouvert.

Il est certain qu'une augmentation de la taille d'un réservoir entraîne une diminution du coût de stockage ; en effet, on quadruple le volume de produit stocké en doublant la surface d'acier utilisé.

Actuellement, l'économie réalisée par mètre cube stocké disparaît au-delà d'une certaine capacité. Il faut attendre que de nouveaux matériaux, tels que certains aciers spéciaux, le titane ou les plastiques renforcés, soient produits à des prix moins élevés. Cependant, leurs propriétés de résistance et de faible poids devraient leur permettre de grandes performances dans ce domaine.

On compte actuellement plusieurs réservoirs métalliques géants dont la capacité est comprise entre 100 000 m^3 et 150 000 m^3 et quelques-uns dont la capacité dépasse 150 000 m^3, l'on parle même de réservoirs de 200 000 m^3.

* *Les réservoirs flottants sans fond*

Certaines des difficultés rencontrées pour trouver des emplacements de stockage de pétrole peuvent être évitées par la méthode dite « Swedish Seatank » utilisable partout où de l'eau propre existe. Contrairement aux réservoirs de stockage sur terre, les réservoirs flottants ne nécessitent pas de fondations onéreuses, sont mobiles et, d'après leurs promoteurs, leur construction coûte moins cher. En effet, les tôles utilisées sont beaucoup plus minces que celles nécessaires aux installations à terre. Certains de ces réservoirs sont même construits en polyester renforcé par des fibres de verre. Des réservoirs construits en Angleterre atteignent 80 000 m^3 et servent surtout au stockage du pétrole brut.

* *Les réservoirs sous pression*

Les réservoirs métalliques de stockage sous pression sont d'une capacité unitaire plus limitée malgré les progrès accomplis dans la métallurgie, la chaudronnerie et la soudure. On ne peut donc accroître la capacité des parcs de stockage qu'en multipliant le nombre de réservoirs.

Le stockage des hydrocarbures gazeux se présente sous deux formes :

— Les batteries de gazomètres humides à basse pression. Cette solution classique est démodée pour de nombreuses raisons : montage délicat, entretien coûteux, investissement important, capacité relativement faible, encombrement important, aspect inesthétique...

— Les batteries de gazomètres secs à volume constant et haute pression. La réalisation de stations gazométriques à haute et moyenne pression se justifie pour le stockage du gaz naturel à proximité des centres de consommation. Les réservoirs sont cylindriques ou sphériques, en acier conçu pour une pression de 4 à 20 hpz. Chaque élément a normalement un volume de 100 à 2 500 m^3. Il a été cependant réalisé au Japon des sphères de 17 000 m^3 sous 225 hpz.

Il existe également des batteries de gazomètres pour le stockage des gaz liquéfiés du pétrole. Ces réservoirs ont aussi une capacité limitée : 5 000 m^3 pour le butane et 2 000 m^3 pour le propane.

Devant les limites actuelles et le coût des réservoirs aériens, les pétroliers ont cherché d'autres techniques, ils utilisent maintenant les stockages souterrains.

Parallèlement, des recherches ont été effectuées en vue de stocker des produits pétroliers au coût minimal. Ainsi, aux États-Unis, une carrière abandonnée munie d'un toit flottant a été utilisée pour les produits noirs. De même, au Venezuela, un réservoir fut creusé en terre pour le stockage des huiles.

Stockages souterrains

L'expression *stockage souterrain* désigne l'opération qui consiste à emmagasiner des hydrocarbures dans une cavité ou un réservoir artificiellement aménagé à une certaine profondeur dans le sol, et par extension, elle désigne la cavité elle-même.

C'est en Europe, en 1916, qu'on eut l'idée de stocker des hydrocarbures dans une cavité artificielle creusée sous terre. La guerre empêcha la mise en pratique de cette idée. Elle fut reprise beaucoup plus tard, au Canada, sans plus de résultat. Ce n'est qu'en 1950, aux États-Unis, qu'elle fut enfin mise en pratique et que le premier stockage souterrain fut réalisé en terrain rocheux par Fenix et Scisson pour Warren Petroleum Corporation.

La première cavité creusée dans le sel par dissolution a été utilisée vers 1951, pour y stocker des gaz liquéfiés.

Une première classification, faisant appel à la géologie, permet de distinguer :

— les stockages réalisés dans des formations poreuses et perméables profondes, telles qu'anciens gisements de gaz ou de pétrole abandonnés, ou formations constituées de sables aquifères offrant des garanties d'étanchéité à leur sommet ;

— les stockages réalisés par excavation près de la surface, dans des formations poreuses et perméables aquifères, dont les parois sont gelées pour en assurer l'étanchéité ;

— les stockages souterrains de tous types, réalisés dans des cavernes artificielles, obtenues par excavation ou dissolution dans des roches imperméables.

Les premiers conviennent uniquement au stockage des hydrocarbures gazeux, car il ne pourrait être question d'y mettre des hydrocarbures liquides ou liquéfiés pour deux raisons principales : les pertes inévitables par absorption et saturation résiduelle irréductible pouvant atteindre, surtout pour les liquides, des valeurs inacceptables ; les difficultés de mise en place et de soutirage avec des débits élevés en milieu perméable.

Les seconds, en raison de leur mode d'étanchéité et des prix de revient qui en découlent, ne conviennent qu'aux gaz liquéfiés stockés à très basse température.

Les troisièmes conviennent, en revanche, au stockage de tous les types d'hydrocarbures gazeux, liquéfiés ou liquides, aux conditions de température et de pression du stockage.

Ces conditions exigent de la roche dans laquelle la cavité doit être creusée des caractéristiques mécaniques suffisantes pour que la cavité ne s'effondre pas (dimensions limitées de la cavité), une bonne tenue à l'air, l'inaltérabilité et l'étanchéité au produit stocké et une épaisseur suffisante de morts terrains au-dessus de la cavité, compte tenu de la pression devant exister dans la cavité.

A l'inverse des stockages aériens, la taille unitaire des cavités souterraines est pratiquement sans limite (couramment 300 000 m^3).

Une fois le stockage terminé, les installations de surface, peu nombreuses, n'occupent qu'une faible superficie (pompes, organes annexes, bâtiments). Ce mode de stockage répond bien au souci de sécurité qui est fondamental ; il donne également une réponse élégante aux préoccupations d'esthétique et d'environnement qui prennent une importance croissante. Seule, la structure géologique limite la capacité finale du parc de stockage.

Les stockages souterrains ne présentent pas que des avantages. Leurs inconvénients sont liés à leur nature même : ils ne peuvent être réalisés que dans des sites particuliers qui ne se trouvent pas forcément à proximité des raffineries et des grands centres de consommation ; ils doivent donc être raccordés à une infrastructure pétrolière par un pipe-line, ou un réseau de pipe-lines, qui permette les différents mouvements de remplissage et de vidange. Ainsi, le stockage de Manosque est relié au complexe pétrolier de l'étang de Berre par un pipe-line d'une longueur de 97 km qui permet les mouvements de produits et de saumure. Les problèmes de rejet de saumure ou d'amenée et de rejet d'eau imposent également des liaisons importantes et des installations d'épuration (May-sur-Orne). Les investissements représentés par le pipe-line et les installations secondaires doivent être répartis sur une grande capacité pour ne pas grever le coût au mètre cube, sauf site exceptionnel ou stockage de gaz. Les mouvements de produits et de saumure augmentent de façon importante les frais d'exploitation s'ils sont fréquents, ce qui confine les stockages souterrains dans un rôle de modulation et surtout de réserve.

* *Stockages réalisés dans des formations poreuses et perméables profondes*

Le principe du stockage souterrain en nappe aquifère profonde consiste à injecter du gaz dans les vides interstitiels de la roche, de façon à reconstituer, en quelque sorte, un gisement de gaz naturel. La mise en œuvre de cette technique impose les conditions géologiques mentionnées ci-dessus.

En France, il existe peu de sites où se trouvent réunies toutes les conditions favorables, et c'est dans le Bassin parisien que les recherches ont donné les résultats les plus intéressants.

* *Stockages dans le sel*

De telles cavités sont réalisables dans des couches de sel (Viriat) ou dans des dômes de sel (Manosque). Les différentes phases d'un projet de stockage dans le sel se déroulent dans l'ordre suivant :

études géologiques pour vérifier la qualité du sel rencontré et choisir le site exact ;

exécution du puits d'exploitation (sa bonne réalisation est un facteur déterminant pour une exploitation saine) ;

mise à disposition d'eau douce et évacuation de la saumure ; celle-ci est un problème que l'on peut résoudre par : rejet dans une rivière par un pipe-line provisoire (Viriat), ou définitif, rejet en mer ou en étang marin (Manosque) ; utilisation de la saumure comme matière première industrielle (Hauterives) ; injection de la saumure dans un autre puits situé dans une structure favorable ;

réalisation de certaines installations de surface (pompe à saumure) ;

creusement de la cavité par injection d'eau douce et rejet de saumure ;

finition des installations de surface (sécheurs, bassins de saumure, etc.). Certains gaz sortant des cavités sont humides et doivent être séchés avant utilisation.

La perméabilité est très faible et le taux de récupération du produit est excellent ; ainsi, le très faible coût au mètre cube et la profusion des dépôts salifères expliquent le développement de ce mode de stockage.

* *Stockages réalisés par excavation près de la surface*

Dans les régions où il n'y a pas de couches ou de dômes de sel, les cavités sont creusées dans des roches convenables, à des profondeurs généralement inférieures à 150 m. Le choix du terrain et la profondeur à laquelle sera creusée la cavité sont déterminés par les mêmes impératifs que ceux régissant les autres stockages. La cavité est généralement constituée par une série de galeries qui se coupent à angle droit dans des terrains comme des calcaires marneux ou des marnes, qui n'ont pas une grande résistance mécanique et, quelquefois, par une véritable caverne dans des roches dures comme le granite.

Les dimensions des galeries de Petit-Couronne (Shell) près de Rouen, pour le stockage des gaz du pétrole liquéfiés, sont de 4 × 5,50 m dans la craie grise du Turonien. Le volume utile des galeries est de 65 000 m^3.

En Suède, des cavités de 21 × 24 × 163 m ont été creusées dans du granite à 20 m sous le sol pour stocker du

brut. Deux types de cavités ont été réalisés : le système à niveau d'eau variable ; le système à niveau d'eau fixe, de manière à éviter toute pollution de la nappe phréatique par le produit stocké.

* *Stockages dans des cavités réalisées par explosion nucléaire*

Certaines régions n'offrent ni couches de sel, ni couches rocheuses convenables à faible profondeur. Les moyens mécaniques actuels ne permettant pas de creuser à grande profondeur une cavité de volume important, on a songé à utiliser une explosion nucléaire.

Les puissances envisagées pour les explosions souterraines à caractère scientifique sont actuellement de 20 à 500 kT (à titre d'exemple la bombe A d'Hiroshima avait une puissance de 20 kT). Les problèmes de sécurité prennent une importance primordiale (radio-activité et onde sismique). Une période d'attente de 10 à12 mois est considérée comme nécessaire, tant pour le refroidissement que pour l'atténuation de radio-activité des éléments de fission produits par la détonation. Une charge nucléaire de 20 kT placée à la profondeur de 1 000 m doit créer un volume utilisable d'environ 80 000 m^3. Cette technique n'a pas pour le moment dépassé le stade expérimental.

* *Réutilisation des mines désaffectées*

Certaines mines désaffectées peuvent être utilisées pour stocker des hydrocarbures (mines de charbon en Afrique du Sud, mines d'ardoise aux États-Unis). En France, la réutilisation des mines de fer de May-sur-Orne (près de Caen) est étudiée. Dans la cavité existante, il faut s'assurer que la roche est d'une qualité satisfaisante et qu'elle répond aux mêmes impératifs que ceux retenus dans les autres cas. L'exploitation est la même que pour un stockage en cavités excavées.

* *Le stockage sous terrain cryogénique*

Le transport des gaz pétroliers, puis du gaz naturel se fait de façon très économique s'ils sont liquéfiés : le volume est moindre et le transport est plus rentable. Les arguments sont un peu moins impératifs pour le stockage, dans la mesure où l'on dispose de cavités souvent énormes et dont l'équipement cryogénique est hors de propos pour des raisons financières. Aussi, dans un certain nombre d'installations, le gaz était-il transporté liquéfié, puis stocké sous forme gazeuse comprimée.

Cependant, avec les progrès des techniques de basses températures et la mise au point de nouveaux matériaux cryogéniques, métaux ou isolants, il est devenu rentable de stocker des hydrocarbures liquéfiés dans des réservoirs dont le volume relativement faible au départ ne cesse de s'accroître. Il en existe plusieurs sortes :

— *Réservoirs souterrains en terre gelée*. Cette technique utilise la formation d'une barrière de glace dans la « fosse citerne », qui empêche les fuites de liquide et agit en même temps comme matière isolante.

Il en existe deux types : la *cavité en sol gelé*, recouverte d'un toit artificiel imperméable au gaz et convenablement isolée ; la *caverne gelée entièrement* située dans le rocher. Dans la mesure où le sol répond bien à certaines conditions, ce procédé semble légèrement moins cher et nettement plus sûr que celui par réservoirs métalliques.

— *Réservoirs en béton précontraint*. On a mis au point en France et aux États-Unis des réservoirs en béton précontraint (avec parfois un toit métallique) construits soit au-dessus, soit au-dessous du sol. L'avantage de ce genre de stockage est d'être bon marché et de présenter peu de pertes thermiques.

— *Réservoirs métalliques*. Le stockage d'hydrocarbures liquéfiés se fait couramment au moyen de réservoirs métalliques cryogéniques, généralement construits sur le sol, mais qui, à la rigueur, peuvent être enterrés.

Ces réservoirs présentent de nombreux avantages : pas de limitation géographique, technologie éprouvée, faible perte thermique, durée de vie et prix de revient bien connus à l'avance, pas de difficulté pour la maintenance ou l'accessibilité, bonne sécurité.

Nous avons déjà noté que les réservoirs aériens d'hydrocarbures gazeux avaient une capacité limitée alors que la taille des stockages souterrains dépasse couramment 200 000 m^3. Ainsi, le stockage souterrain de propane de Lavera a une capacité de 120 000 m^3 — à comparer aux sphères de propane de 2 000 m^3.

Les stockages souterrains conduisent à des coûts de stockage nettement inférieurs à ceux des stockages aériens.

Du fait du développement du chauffage, le marché du gaz est marqué par une augmentation des besoins d'hiver plus rapide que celle des besoins d'été et de demi-saison, par l'importance des consommations journalières de pointe en hiver, ainsi que par la sensibilité de ces besoins saisonniers et journaliers aux aléas météorologiques. Pour permettre l'étude technico-économique des équipements nécessaires, il faut connaître l'influence de la température sur les émissions, afin d'établir une représentation statistique des émissions probables au cours de chaque exercice gazier. Les stockages souterrains peuvent permettre de faire face aux besoins de pointe.

Stockages en mer

Parallèlement à la production en mer, la technologie des stockages s'est également développée et se modifie avec l'accroissement des profondeurs.

Les stockages géants avec leurs murs brise-lames (type Doris) ne sont plus envisageables à partir d'une certaine profondeur d'eau. Elf a développé la technique des stockages articulés sur un cardan reposant sur le fond et relié à des bouées de chargement en mer. Pour les très grandes profondeurs, il faut envisager des stockages entièrement sous-marins, reliés à des plates-formes semi-submersibles de chargement et de traitement de la production.

Certains champs de faible taille ne peuvent être développés, parce qu'il n'est pas rentable de construire un réseau de pipe-lines et un terminal à terre. Dans ce cas, le stockage sur place est la seule solution.

Le volume du stockage doit être calculé en tenant compte de la capacité de production du champ, de la taille des pétroliers géants ainsi que des conditions météorologiques dans la région considérée. Dans les régions éloignées, il est bon de prévoir un volume de stockage égal au moins à dix jours de production du champ. Ainsi, pour un champ produisant 16 000 m^3/j, il faut prévoir un stockage de 160 000 m^3. Là aussi, la technologie actuelle impose une limite à l'accroissement des capacités de stockage. En effet, un réservoir doit être construit à terre, puis remorqué jusqu'au champ et coulé, ce qui ne va pas sans poser de sérieux problèmes. Actuellement, il existe des stockages sous-marins d'une capacité de 80 000 m^3 par 45 m de fond.

Il est certain que la construction de navires pétroliers géants et de ports pétroliers en haute mer nécessitera de plus en plus la construction de réservoirs semi-immergés, mais surtout sous-marins à l'abri des tempêtes.

En ce qui concerne le gaz naturel, une solution intéressante est le stockage au fond des lacs ou des océans. L'élément liquide offre des avantages considérables par rapport aux méthodes classiques de stockage souterrain :
— il donne un plus grand volume de stockage pour le même volume brut (porosité 100 %) ;
— la pression nécessaire au stockage existe déjà ;
— les problèmes de sécurité, de fuites, de récupération et de contamination sont réduits au strict minimum ;
— la température constamment basse au fond de l'océan permet de stocker des quantités de gaz plus importantes, pour une même pression et une même profondeur ;
— la présence d'eau salée empêche la formation d'hydrates ;
— il est possible de pratiquer le mise en surpression de récipients spéciaux, de façon beaucoup plus étendue que dans le stockage souterrain.

fig. 1

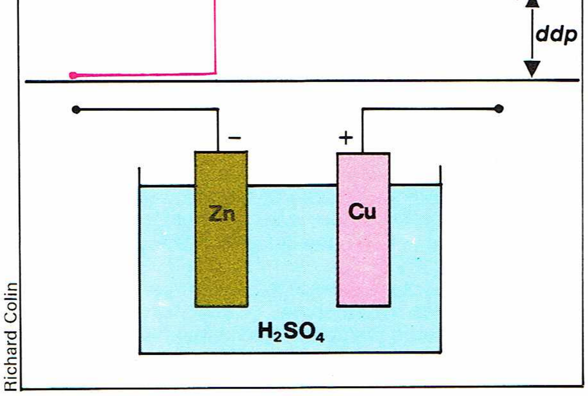

▶ **Figure 1 : schéma de principe de la pile Volta.**

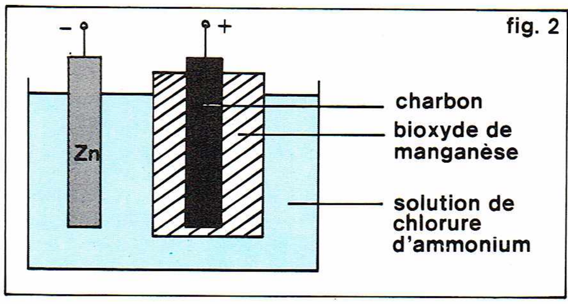

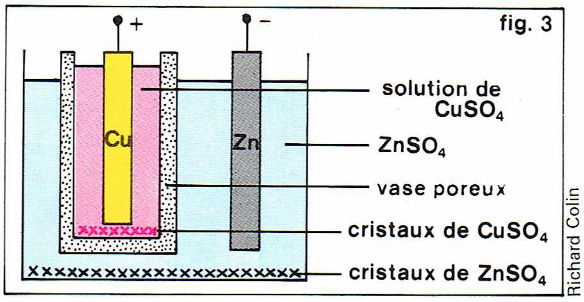

◀ ***Figure 2 : schéma de principe de la* pile Leclanché.**
***Figure 3 : schéma de principe de la* pile Daniell.**

Stockage d'énergie électrique

Piles

Une pile est un système électrochimique qui transforme une énergie chimique en énergie électrique. Son fonctionnement est fondé sur le principe que toute chaîne de conducteurs ouverte, qui n'est pas symétrique, présente entre ses extrémités une différence de potentiel. Cette dissymétrie peut être due à des différences de concentration des solutions, à des différences de nature des conducteurs, à des différences de température de la chaîne.

Piles hydro-électriques

Le système est composé d'un électrolyte dans lequel plongent deux électrodes de nature différente. Comme dans le cas précédent, c'est toujours cette dissymétrie qui est génératrice de la d.d.p. qui apparaît entre les bornes et est appelée force électromotrice (f. é. m.). Cette f. é. m. dépend de la nature de l'électrolyte et des électrodes, mais non de leur forme ni de la distance qui les sépare. Par contre, d'autres facteurs varient avec ces critères.

* *Pile Volta*

C'est la plus simple. Elle est constituée d'électrodes en zinc et en cuivre qui plongent dans une solution d'acide sulfurique (*fig.* 1). La différence de potentiel est de l'ordre du volt. Quand un courant circule, il se dégage de l'hydrogène à la cathode. A l'anode, il y a un transfert du zinc dans la solution sous forme d'ions Zn^{2+}. La réaction chimique se fait suivant l'équation :

$$Zn + 2\,H^+ \rightarrow Zn^{2+} + H_2\nearrow.$$

Quand la pile débite un courant, sa f. é. m. diminue très rapidement, car un écran gazeux isolant d'hydrogène se place dans la chaîne et vient s'intercaler entre le cuivre et l'électrolyte. Ce phénomène a été expliqué par A. Becquerel en 1826. Le débit est pratiquement arrêté : la pile est polarisée. Pour obtenir à nouveau des caractéristiques identiques à celles d'origine, il faut nettoyer très sérieusement l'électrode en cuivre. Cela empêche toute utilisation industrielle, c'est pourquoi on a trouvé une solution à dépolarisant : on introduit dans l'électrolyte une matière oxydante qui empêche la formation d'hydrogène sur la cathode.

* *Pile Leclanché*

Elle comporte une électrode positive en charbon noyée dans du bioxyde de manganèse MnO_2 qui oxyde l'hydrogène dès sa formation et annule l'écran gazeux isolant (*fig.* 2). L'électrode négative est en zinc, noyée dans une solution de chlorure d'ammonium. A l'anode, il y a transfert de zinc dans la solution sous forme d'ions Zn^{2+}. A la cathode, il se produit une ionisation ; l'équation chimique est : $2\,MnO_2 + 2\,H \rightarrow Mn_2O_3 + H_2O$.

De l'ammoniaque se forme et de l'hydrogène se dégage, qui est oxydé par le bioxyde de manganèse ; cette oxydation n'est pas immédiate. Quand la pile fonctionne longtemps, une polarisation prend naissance, c'est pourquoi il faut la laisser en circuit ouvert un certain temps pour permettre à l'oxydation de se produire. Ces piles sont couramment employées sous forme de piles sèches dans lesquelles l'électrolyte est une pâte semi-fluide réalisée par gélification. L'anode est un tube qui sert d'enveloppe à la pile, la cathode est toujours un crayon de charbon. La tension de la pile est d'environ 1,5 volt. Sa capacité est faible ainsi que les courants qu'elle forme (*fig.* 5) ; les substances qui la constituent ne sont pas dangereuses ; c'est pourquoi son utilisation est limitée aux appareils d'éclairage de poche, aux récepteurs de radio, aux jouets, etc.

* *Pile Féry*

La pile Féry est un élément Leclanché perfectionné, car sa dépolarisation, plus rapide, se fait par l'oxygène de l'air. L'électrode en zinc est placée au fond du bac et n'est pas attaquée par l'oxygène de l'air, ce qui réduit son usure. Par rapport à la pile Leclanché, elle offre une capacité plus importante et une tension plus stable entre le début et la fin de la décharge.

* *Pile Daniell*

La pile Daniell est impolarisable. Chaque électrode est plongée dans un sel de son métal. L'une est en cuivre et plonge dans une solution de sulfate de cuivre, l'autre est en zinc et plonge dans une solution de sulfate de zinc (*fig.* 3). Les deux électrolytes sont séparés par un vase poreux qui n'interrompt pas le passage du courant et qui évite le mélange des solutions. La chaîne chimique est :

$$Zn—ZnSO_4—CuSO_4—Cu.$$

Le sulfate de zinc est régénéré sur la cathode et sur la paroi poreuse, le passage du courant ne modifie pas les électrodes. Le sulfate $CuSO_4$ n'est pas régénéré, mais décomposé. Pour remédier à cette diminution de la concentration de la solution, on la sature en plaçant des cristaux de sulfate de cuivre au fond du vase contenant la cathode.

Cette pile est remarquable par la constance de sa force électromotrice à circuit ouvert. De ce fait, on l'emploie comme pile-étalon.

* *Pile Weston*

La constante de sa f. é. m. à vide est remarquable. A 20 °C, elle est égale à 1,018 3 volt. La chaîne de cet élément impolarisable est : $Hg—Hg_2^{2+}SO_4^{2-}—Cd^{2+}SO_4^{2-}—Cd$.

* *Pile au mercure*

L'électrode négative est du zinc, l'électrode positive une poudre d'oxyde de mercure, l'électrolyte une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium KOH saturée de zincate de potassium $ZnOK_2$ (*fig.* 4). Sa f. é. m. est égale à 1,35 volt, variable avec la nature de l'électrolyte et des électrodes.

Quand elle débite un courant, les ions Hg^{2+} de l'électrode positive sont neutralisés et il y a formation de mercure, qui n'est pas un obstacle au passage du courant. L'électrode reçoit des ions OH^-, il y a formation d'eau et d'oxyde de zinc. La formation de mercure au niveau de la cathode n'empêche pas la conduction, la pile est donc impolarisable. Sa capacité est bien supérieure à celle d'une pile Leclanché, approximativement quatre fois plus pour le même volume (*fig.* 5). Elle conserve très longtemps ses caractéristiques. Son emploi est particulièrement recommandé pour les utilisations miniatures : prothèses auditives, stimulateurs cardiaques internes au corps, automatismes des appareils photographiques. Elle se présente sous forme de cylindre ou en pastille.

* *Pile alcalinée au manganèse*

Cette pile est comparable à l'élément Leclanché, mais l'électrolyte est une solution d'hydroxyde de potassium. L'électrode positive est un mélange de carbone et de bioxyde de manganèse. Quand elle débite un courant, il se forme sur l'électrode négative de l'hydroxyde de zinc, et sur l'électrode positive un dégagement d'hydrogène se produit. Le bioxyde de manganèse joue le rôle d'antipolarisant. Cette pile se présente sous la même forme que la pile sèche Leclanché, étanche, ce qui permet de l'utiliser couramment sans précautions spéciales. Sa force électromotrice est 1,5 volt. Sa capacité énergétique est le double de celle d'une pile Leclanché et sa durée de vie trois à cinq fois supérieure (*fig.* 5). Sa résistance interne est faible, ce qui permet de l'utiliser pour des fortes intensités de façon continue.

▲ ***La pile de Leclanché, brevetée en 1866 ; c'est le précurseur de la pile sèche moderne (British Museum of Sciences, Londres).***

▼ ***Figure 4 : schéma de principe de la* pile au mercure.**

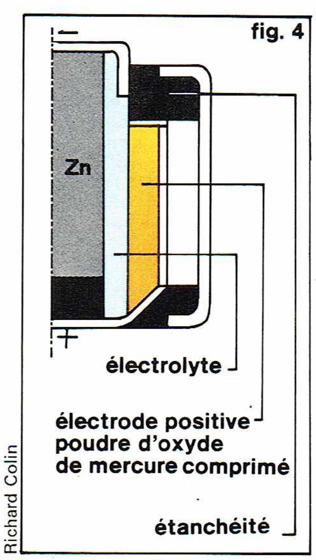

▶ *Figure 5 : comparaison des capacités énergétiques et des durées de vie de trois types de piles : Leclanché, au manganèse et au mercure. Figure 8 : schéma de principe de la* pile thermo-ionique.

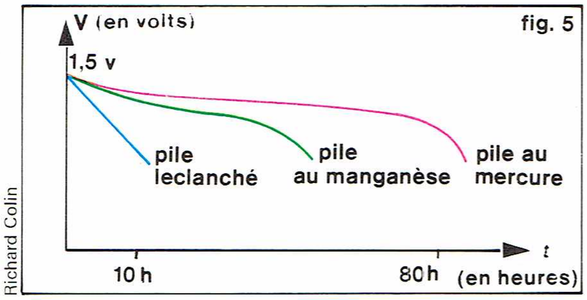

Richard Colin

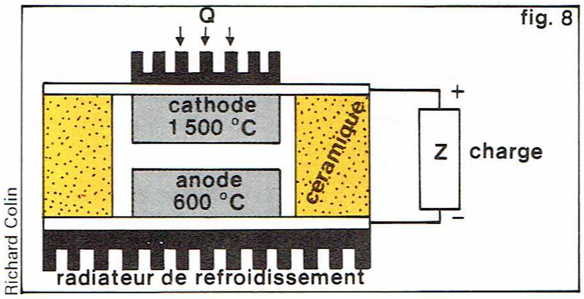

Richard Colin

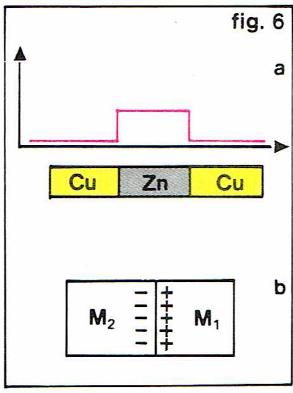

Richard Colin

▲ *Figure 6 :*
a) *représentation schématique d'une chaîne ouverte de conducteurs, et différence de potentiel entre ces conducteurs ;*
b) *explication de cette d.d.p. par le transfert des électrons.*

▼ *Figure 7 : principe de la* pile thermo-électrique : *association de deux conducteurs* M_1 *et* M_2 *différents dont les soudures sont portées à des températures* t_1 *et* t_2.

fig. 7

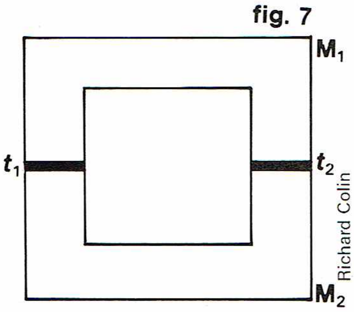

Richard Colin

* *Autres piles*

Nous pouvons citer pour mémoire : la pile à chlorure d'ammonium dont l'électrode positive est un mélange de charbon de bois et de graphite, l'électrode négative du zinc laminé et l'électrolyte une solution de chlorure d'ammonium immobilisé avec de la farine.

La pile à la soude, dont l'électrode positive est un aggloméré à base de charbon de bois, l'électrode négative du zinc fondu amalgamé et l'électrolyte une solution de soude immobilisée.

Les piles à oxyde de cuivre à la soude, dont l'électrode positive est de l'oxyde de cuivre, l'électrode négative du zinc fondu et l'électrolyte de la soude immobilisée.

Piles thermo-électriques

Toute chaîne de conducteurs ouverte, dissymétrique, présente une différence de potentiel entre ses extrémités.

Mettons en présence deux conducteurs de nature différente : du cuivre et du zinc. On relève entre ces deux métaux une différence de potentiel de l'ordre du millivolt. Si la chaîne est prolongée par du cuivre, la différence de potentiel entre les deux plaques extrêmes, de même nature, est nulle (*fig.* 6).

Ce phénomène s'explique de la façon suivante : soit deux métaux M_1 et M_2 qui ne possèdent pas le même nombre d'électrons libres par unité de volume. Quand on les met en contact, il y a transfert des électrons du métal qui en possède le plus vers le métal qui en possède le moins. Si le transfert a lieu de M_1 vers M_2, M_1 devient positif et M_2 négatif. Insérons cette chaîne dans un circuit et considérons que le courant se propage de M_2 vers M_1. La jonction est un générateur qui, pour jouer son rôle, doit absorber une autre énergie. Dans le cas considéré, l'énergie absorbée est calorifique et a lieu à la jonction. Si cette chaleur est supérieure à RI^2/J (R résistance de la jonction, J équivalent mécanique de la calorie), la soudure se refroidit : ce phénomène est appelé *effet Peltier*. En cas d'inversion du sens de circulation du courant, la soudure s'échauffe.

Si maintenant nous portons à des températures différentes deux points d'un même conducteur, il apparaît entre ces deux points une différence de potentiel : c'est l'*effet Thomson*.

L'association de ces deux phénomènes est l'*effet Seebeck* qui donne naissance à la pile thermo-électrique ou thermopile. Considérons une chaîne fermée, formée de deux métaux différents soudés M_1 et M_2 (*fig.* 7). De par l'effet Peltier, il existe au niveau de chaque jonction une différence de potentiel. Portons les soudures à des températures t_1 et t_2. De par l'effet Thomson, pour chaque conducteur, prend naissance une force électromotrice. Ces deux effets conjugués engendrent une force électromotrice résultante E qui fait circuler un courant I. On a réalisé un générateur thermo-électrique dont la force électromotrice n'est fonction que de la différence de température des deux soudures. Sur l'une on apporte de la chaleur, sur l'autre on en retire. Ces quantités de chaleur sont proportionnelles à l'intensité qui traverse les jonctions. A ce sujet, Becquerel a établi une loi importante : « La force électromotrice thermo-électrique agissant dans un circuit n'est pas modifiée si on intercale dans le circuit un ou plusieurs métaux intermédiaires, pourvu que tous ces métaux soient à la même température ». On peut donc interposer entre deux métaux un troisième métal qui n'aura pas d'influence sur la force électromotrice thermo-électrique.

Les tensions recueillies sont de quelques millivolts pour les températures couramment utilisées. Ces tensions très faibles limitent l'emploi de ces piles à la mesure des températures. La thermopile est alors appelée thermocouple.

La force électromotrice relevée est égale à $E = \alpha\,(t_c - t_f)$, où α est le coefficient de Seebeck ou pouvoir thermo-électrique d'un des métaux constituant la jonction par rapport à l'autre métal, t_c la température de la soudure chaude et t_f celle de la soudure froide.

L'emploi de semi-conducteurs permet d'obtenir des f. é. m. de quelques millivolts par degré Celsius. Les plus utilisés sont les alliages germanium-silicium et le tellurure de plomb. On peut utiliser l'énergie nucléaire comme dans les générateurs « Systems for Nuclear Auxiliary Power », mais ils sont limités par une décroissance dans le temps de l'activité de l'isotope radio-actif qui donne naissance à cette énergie et par les volumes et masses des dispositifs de protection. Des générateurs de ce type d'une puissance de 10 kW ont été construits et il ne semble pas que des puissances supérieures aient été atteintes. En revanche, en liaison avec un réacteur nucléaire, on peut atteindre quelques dizaines de kW.

Piles thermo-ioniques

L'*effet thermo-ionique* a pour origine l'émission d'électrons, à partir d'une cathode chauffée à haute température, qui sont recueillis sur une anode froide. Il a été découvert en 1884 par A. Edison. Cette émission est fonction de la température et croît quand on applique un champ électrique extérieur. La cathode est portée à des températures comprises entre 1 000 et 1 500 °C, pouvant atteindre parfois 2 000 °C (*fig.* 8). C'est une conversion directe de l'énergie thermique en énergie électrique. La densité de courant de saturation est donnée par l'équation de Richardson

$$J = AT^2 e^{\frac{-e\beta}{kT}}$$

A et β sont des constantes qui dépendent du matériau qui constitue la cathode, T est la température absolue, e la charge de l'électron, k la constante de Boltzmann. β est le travail d'extraction ; il représente l'énergie qu'il est nécessaire de fournir à un électron pour l'amener du niveau de Fermi à l'état de repos dans le vide. β est de l'ordre de 5 électrons-volts pour les métaux suivants : fer, molybdène, cuivre, aluminium. On rencontre deux types principaux de convertisseurs thermo-ioniques. Dans les premiers, la distance entre l'anode et la cathode est réduite à quelques centièmes de millimètre, sous vide. Dans les seconds, cette distance est plus importante, mais l'on introduit un corps à l'état de vapeur, généralement du césium. Ces dispositions ont pour but d'éliminer la charge d'espace qui se forme autour de la cathode et qui limite le fonctionnement.

Les électrons recueillis par l'anode traversent la charge et retournent à la cathode. Les cathodes sont constituées de matériaux réfractaires qui ont un travail d'extraction élevé. Par contre, les anodes doivent avoir un travail d'extraction faible. Les résultats que l'on obtient actuellement, avec les piles à vide, sont de l'ordre de 4 W/cm² pour une température de cathode de 1 300 °C et 8 W/cm² pour 1 800 °C ; le rendement est de 0,20. Avec les piles à plasma, les résultats sont supérieurs : 10 W/cm². Des appareils de 100 W fonctionnent avec des rendements de 0,15. Ce sont des appareils robustes qui sont utilisés dans les véhicules spatiaux à partir de l'énergie thermique solaire.

Piles photovoltaïques

Certains corps soumis à un rayonnement lumineux émettent des électrons : c'est la photo-émission, appelée *effet photo-électrique externe*, découvert par Hertz en 1887. Sur d'autres corps, on enregistre une variation de la résis-

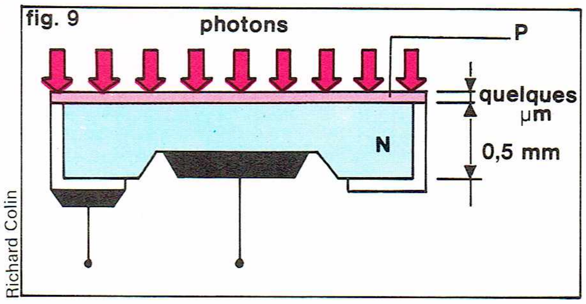

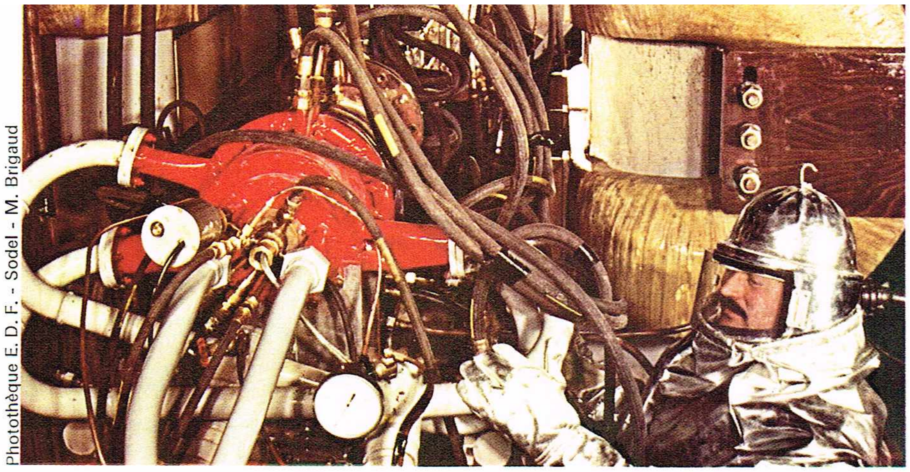

A gauche, figure 9 : schéma de principe de la **pile photovoltaïque.** *En haut, le générateur magnéto-hydrodynamique* **(générateur MHD)** *du laboratoire E. D. F. des Renardières.*

tivité : c'est la photoconduction, ou *effet photo-électrique interne*. Enfin, sous un bombardement de photons, une force électromotrice apparaît entre deux semi-conducteurs mis en contact : c'est l'*effet photovoltaïque*.

La photo-émission et la photoconduction ne sont pas à l'origine d'effets générateurs de courant au sens où nous l'entendons dans ce chapitre. En effet, une émission de photons sur une cathode de tube photo-électrique à vide, par exemple, provoque une émission d'électrons qui est recueillie par l'anode si elle est portée à un potentiel positif par rapport à la cathode à l'aide d'une source extérieure. Il en est de même des tubes photo-électriques à gaz, des photomultiplicateurs, des photorésistances. Par contre, l'effet photovoltaïque entre parfaitement dans le cadre des générateurs.

Cet effet a lieu quand on éclaire une jonction de conducteurs ou de semi-conducteurs sans qu'il y ait besoin de source extérieure. Ce phénomène s'explique de la façon suivante : à l'état d'équilibre, sans émission de photons, les niveaux de Fermi sont alignés. L'arrivée de photons sur la jonction crée des paires électrons-trous par absorption, les trous sont entraînés vers la partie *p* et les électrons libres vers la partie *n*. Si N*p* est le nombre de photons et *e* la charge d'un électron, le courant qui a pour origine N*p* photons par seconde est inférieur à N*pe*, car les photons ne sont pas tous absorbés (*fig.* 9).

Les matériaux les plus employés sont le silicium, l'arséniure de gallium GaAs, le séléniure de cadmium CdSe, le sulfure de cadmium CdS. Ce sont des semi-conducteurs dont l'énergie d'activation intrinsèque est comprise entre 1 et 1,6 eV. Le rendement est assez faible : 0,10. Ces cellules sont couramment employées dans les satellites et véhicules spatiaux, qui sont dans certains cas recouverts sur une grande partie de leur surface de plaquettes de silicium (actuellement, on atteint 100 W/m² pour une masse de 2 kg) ; ces satellites sont alimentés par des panneaux qui atteignent parfois 8 à 9 m² et comportent des dizaines de milliers de cellules. Ces cellules servent à charger des accumulateurs classiques qui fournissent l'énergie au cours des traversées des zones sombres. Elles offrent l'avantage d'être statiques, fiables et simples à mettre en exploitation. Plusieurs centrales solaires fonctionnent et donnent toute satisfaction, mais les surfaces à recouvrir sont considérables si l'on veut obtenir une puissance raisonnable.

Un calcul simple montre que, pour remplacer une centrale électrique de 900 MWe, il faudrait

$$\frac{900 \cdot 10^6}{100} = 9 \cdot 10^6 \text{ m}^2 \text{ de cellules}$$

soit un carré de 3 km de côté. Elles équipent également des luxmètres et des posemètres.

Générateur magnéto-hydrodynamique (MHD)

La magnéto-hydrodynamique est une conversion directe de l'énergie thermique en énergie électrique en présence d'un champ magnétique. Un fluide combustible, porté à haute température, est partiellement ionisé et animé d'une grande vitesse. L'ionisation indique qu'il contient des charges électriques : électrons négatifs et ions positifs. Ce gaz traverse un champ magnétique intense qui provoque la déviation, donc la séparation, des charges suivant une direction perpendiculaire au vecteur induction. Des électrodes recueillent ces charges. L'air de combustion doit être comprimé, réchauffé, traverser la chambre de combustion, puis être refroidi dans un échangeur de chaleur. La pression et la température doivent être élevées sous peine de ne transporter qu'un faible flux d'énergie. L'air ainsi réchauffé et comprimé est mélangé au fuel, ou au charbon,

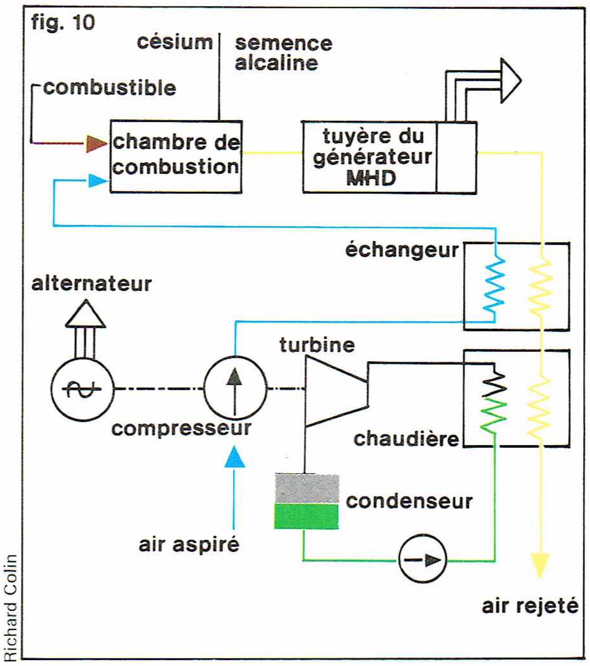

◀ *Figure 10 : schéma de fonctionnement d'un* **générateur MHD** *à circuit ouvert.*

ou au gaz. Quelquefois, pour obtenir des températures suffisantes, on suroxygène l'air.

La *figure* 10 représente le schéma de fonctionnement d'un générateur MHD à circuit ouvert : l'air de combustion est prélevé à l'extérieur et rejeté à l'extérieur après usage. Cet air est comprimé avant de passer dans un échangeur de chaleur qui élève sa température. Un brûleur le mélange au combustible. Après combustion, le mélange traverse l'échangeur et la chaudière, puis est rejeté à l'extérieur. Le compresseur est entraîné par une turbine alimentée en vapeur par la chaudière. L'excédent de puissance est transformé en énergie électrique par un alternateur placé en bout d'arbre sur le compresseur.

Pour obtenir le fonctionnement en cycle fermé, il suffit de faire une liaison entre le rejet et l'aspiration. Le gaz du cycle est de l'argon ou de l'hélium avec du césium. Au cours du cycle, les pressions varient entre 1 et 10 bars, les températures entre 1 800 et 3 000 °K.

Reprenons les trois facteurs importants du fonctionnement : l'induction, la vitesse des gaz et leur ionisation. L'induction magnétique doit être de quelques dizaines de teslas. Cette valeur nécessite une mise en œuvre particulière ; en effet, la puissance atteint souvent 1 000 kW à partir d'un ensemble transformateur-redresseur.

La chambre de combustion de faible section, environ 0,5 m², est parcourue par des gaz qui circulent à la vitesse de 1 000 m/s. Pour utiliser directement les systèmes triphasés, on a donné une forme hexagonale à la chambre. Sur trois côtés déphasés de 2 π/3, sont disposés trois enroulements générateurs du champ magnétique, et sur les trois autres côtés les électrodes. La vitesse d'éjection des gaz qui est atteinte dans les tuyères est de 1 000 m/s (*fig.* 11).

Pour l'ionisation des gaz, il n'est pas pensable, dans l'état actuel des techniques, d'utiliser un plasma (qui atteint des températures de plusieurs milliers de degrés Celsius à la surface du Soleil et quelques millions de degrés dans les étoiles), malgré les progrès réalisés ces dernières années dans les céramiques et alliages spéciaux. Il faut

▶ *Figure 11 : détail de la chambre de combustion d'un générateur* MHD. *Figure 12 : schéma de principe de la* pile à combustible hydrogène-oxygène.

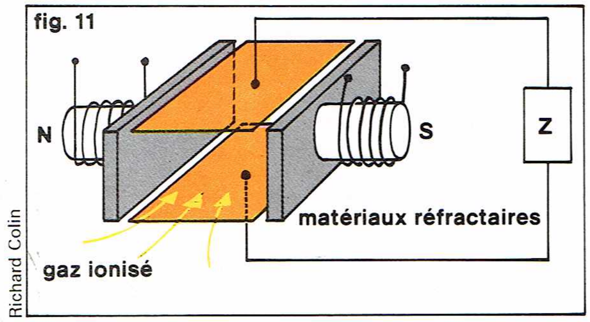

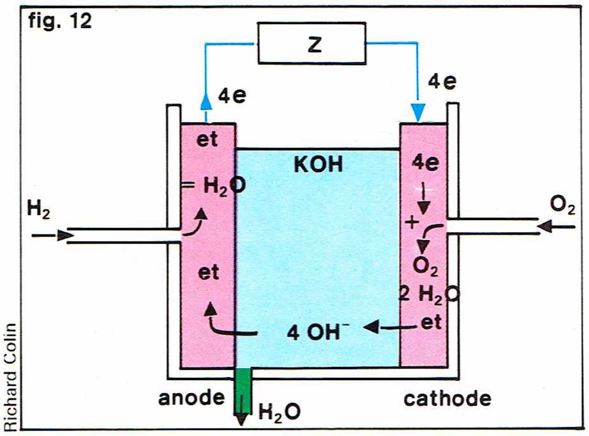

injecter dans les gaz chauds un corps aisément ionisable aux températures comprises entre 1 000 et 1 800 °C. Le césium et le potassium satisfont à ces critères; en effet, le césium perd facilement l'électron de la couche périphérique de ses atomes à sa température d'ébullition, 670 °C.

Piles à combustible

Une pile à combustible est une cellule électrochimique qui fournit une énergie électrique en courant continu basse tension à partir d'une transformation directe de l'énergie chimique d'un combustible courant en énergie électrique.

Le premier à démontrer la réversibilité de l'électrolyse fut W. Grove en 1839, puis en 1894 H. Davy et W. Grove et Ostwald réalisèrent les premières piles hydrogène-oxygène et charbon-oxygène. L'essor qu'ils étaient en droit d'attendre de ces piles fut considérablement ralenti par les polarisations importantes et l'absence de fiabilité. Les travaux ne devinrent positifs qu'après la Seconde Guerre mondiale. C'est aux environs de 1959 que plusieurs chercheurs de l'université de Cambridge réalisèrent une batterie de piles hydrogène-oxygène capable d'alimenter un chariot. En France, les études n'ont commencé qu'en 1960, grâce au Comité d'action scientifique de la Défense nationale. Depuis lors, ces piles sont entrées dans le domaine industriel, mais font toujours l'objet de recherches dans les laboratoires.

Principe de la pile à combustible hydrogène-oxygène

Elle se compose de deux électrodes poreuses entre lesquelles est placé un électrolyte liquide, qui est en général une solution de potasse. Une canalisation est branchée sur chaque électrode, l'une est alimentée par de l'oxygène comburant, l'autre par de l'hydrogène. Sur l'électrode alimentée par l'oxygène, il se produit la réaction : $O_2 + 2\ H_2O + 4e^- \rightarrow 4\ OH^-$ qui donne naissance à 4 ions OH^- et 4 électrons sont pris au circuit extérieur. Sur l'anode s'effectue l'oxydation du combustible $4\ OH^- + 2\ H_2 \rightarrow 4\ H_2O + 4e^-$ (*fig.* 12). Les ions OH^- se combinent avec les molécules d'hydrogène pour donner de l'eau et les électrons recueillis à la cathode sont renvoyés au circuit extérieur par l'anode. La réaction globale s'écrit : $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$.

Cette pile fonctionne comme une pompe à électrons. Elle est très utilisée dans les véhicules spatiaux, dans lesquels elle alimente les circuits en énergie électrique et les astronautes en eau. Au cours de l'expédition lunaire du programme Apollo, il y avait trois piles à combustible hydrogène-oxygène qui fournissaient une puissance de 1 500 W à 240 °C sous une pression de 4 bars. L'électrolyte était une solution de potasse à 85 %. La production d'eau était de 230 litres par semaine.

Dans les piles à combustible à membranes, on remplace l'électrolyte par un diaphragme de quelques millimètres d'épaisseur composé de résines artificielles comme le polystyrène sulfoné. Ce diaphragme ne laisse passer les ions que dans un seul sens et joue le rôle de semi-conducteur. D'autres diaphragmes ont la propriété d'être perméables à une polarité déterminée des ions. S'ils laissent passer les ions négatifs, on les appelle anioniques; s'ils laissent passer les ions positifs, on les appelle cationiques. Dans le premier cas, la formation de l'eau a lieu à la jonction anode-électrolyte (diaphragme) [*fig.* 13]. Dans le second cas, la formation de l'eau a lieu à la jonction cathode-électrolyte (*fig.* 14). Si la membrane est constituée de deux membranes, une anionique et une cationique, la formation de l'eau a lieu au niveau de leur jonction.

Le calcul de la force électromotrice peut s'effectuer à partir de la formule de Nernst $V = V_0 - \frac{RT}{nF} nL \frac{AM^{n+}}{AM}$ dans laquelle n est le nombre d'électrons, A l'activité des éléments M et M^{n+}, V le potentiel réversible de l'électrode et V_0 le potentiel normal. Suivant le type de réaction, ce potentiel V_0 est donné par le *tableau* I en fonction de la température.

Quel que soit le type de pile, l'énergie libérée par la réaction se divise en énergie thermique et en énergie électrique. Cette dernière ne peut être intégralement récupérée, à cause des pertes par effet Joule et des pertes dues au phénomène de polarisation. On distingue trois sortes de polarisation :

— la polarisation d'activation qui a pour origine l'irréversibilité des phénomènes électrochimiques de la pile en fonctionnement. Ce phénomène est complexe du fait de processus multiples comme les transferts de charges, l'absorption et la désorption des réactifs chimiques;

— la polarisation de concentration qui a pour origine un appauvrissement des concentrations ioniques près des

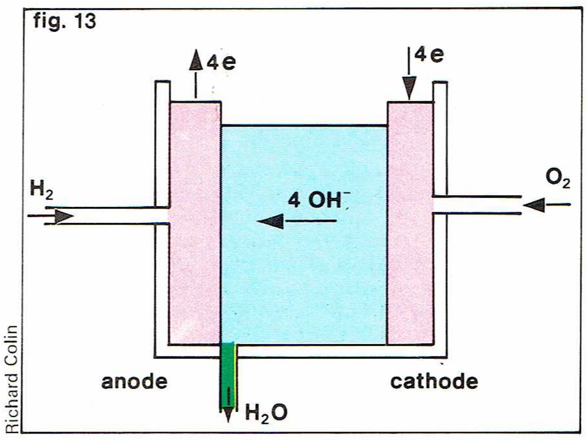

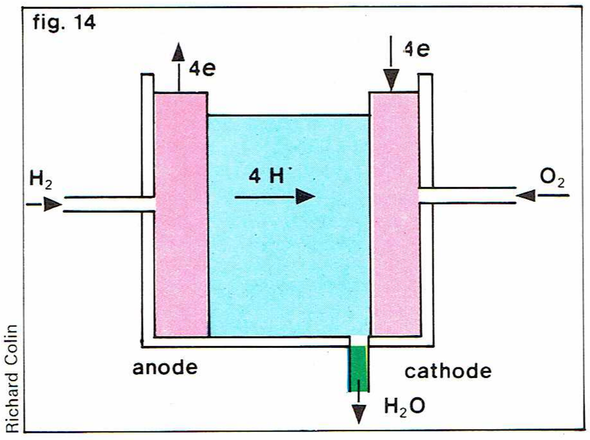

▶ *Figure 13 : schéma de principe de la* pile à combustible à membrane anionique. *Figure 14 : schéma de principe de la* pile à combustible à membrane cationique.

électrodes quand la pile débite : c'est le phénomène de Hittorf ;

— la polarisation ohmique qui a pour origine la formation de couches à la surface des électrodes au cours des réactions électrochimiques et des modifications de la conductivité spécifique de l'électrolyte.

De nos jours, il existe de nombreux modèles de piles qui diffèrent les uns des autres : — par la nature de l'électrolyte qui peut être solide comme l'oxyde de zirconium ZrO_2, ou un sel fondu : chlorure, fluorure, carbonate, ou d'autres de consistance aqueuse ; — par le type de combustible qui peut être solide, liquide ou gazeux ; la tendance est d'utiliser des combustibles peu onéreux sous forme liquide : par exemple le méthanol et l'hydrazine ; — par la forme des électrodes ; — par les conditions de fonctionnement qui sont : basse pression, basse température (5 bars et 100 °C) ; haute pression, température moyenne (60 bars et 300 °C) ; hautes températures jusqu'à 800 °C.

Même si ces piles appartiennent encore au domaine de la recherche, elles possèdent un avenir certain et leur essor devrait être remarquable.

Piles biochimiques

Ce sont des piles de la même famille que celles décrites précédemment, dans lesquelles un des corps est obtenu par l'action de micro-organismes sur un combustible primaire constitué de matières organiques, ou de glucose, ou d'urée ou d'hydrates de carbone. Il se produit une transformation qui engendre un combustible secondaire gazeux, tel l'hydrogène, le méthane, ou l'ammoniac, ou liquide, tel l'éthanol. On voit l'intérêt que ces piles présentent dans les véhicules spatiaux, et pour la transformation des ordures ménagères.

Générateurs nucléaires

Ils ont pour principe la conversion en énergie électrique de l'énergie thermique produite par des désintégrations nucléaires.

On peut distinguer deux types : le premier fait appel à la décomposition de substances radio-actives naturelles ou artificielles qui produit de la chaleur. Celle-ci est transmise à un générateur thermo-électrique à semi-conducteur en tellurure de plomb par exemple. Cet ensemble a été utilisé pour alimenter en énergie électrique l'appareillage qui était sur la Lune au cours des expériences Apollo. La substance radio-active était le plutonium 238. La puissance est limitée, c'est pourquoi ce dispositif ne semble pas avoir d'avenir au stade actuel des connaissances.

Par contre, le second type, qui fait appel aux réactions nucléaires dans une pile nucléaire, semble plus intéressant. En effet, la température à laquelle il permet de porter les soudures chaudes des thermocouples est plus élevée et peut atteindre quelques centaines de degrés Celsius. Cette caractéristique permet à l'appareil de délivrer des puissances plus fortes de quelques centaines de watts. Malheureusement, la masse de ces générateurs, due aux systèmes de protection contre les radiations, semble être un obstacle majeur à leur emploi dans les véhicules spatiaux.

Accumulateurs

Un accumulateur est un système électrochimique réversible qui transforme une énergie chimique en une énergie électrique. Grâce à cette réversibilité, un accumulateur peut se recharger quand il est parcouru par un courant en sens inverse de celui de décharge. On distingue deux types d'accumulateurs : ceux dont les électrodes sont en plomb et l'électrolyte un acide, et ceux à électrolyte alcalin.

Accumulateurs au plomb

L'électrode positive peut être composée de plomb, ou de plomb et d'antimoine, ou de plomb et de calcium. L'électrode négative est en plomb poreux. L'électrolyte est un mélange d'eau et d'acide sulfurique dont la masse/volume se situe entre 1,2 et 1,3 kg/dm^3 suivant les usages et le degré de charge. A titre d'exemple, nous pouvons indiquer 1,28 pour les batteries d'automobile, 1,20 pour les batteries fixes.

On remarque qu'au cours de la décharge (*fig.* 15), deux molécules d'acide disparaissent et deux molécules d'eau apparaissent. Ce phénomène fait décroître la concentration en acide. La résistance interne augmente, car la solu-

Tableau I

Potentiel V_0 (en volts) en fonction du type de réaction et de la température, dans une pile à combustible

Type de réaction \ Température	300 °K	600 °K	900 °K	1 200 °K
$2C + O_2 \rightarrow 2CO$	0,70	0,84	0,98	1,12
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	1,02	1,02	1,02	1,02
$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$	1,18	1,11	1,03	0,95
$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$	1,33	1,20	1,06	0,92

Fig. 15

Équation fondamentale

$$PbO_2 + Pb + 2H_2SO_4 \underset{\text{charge}}{\overset{\text{décharge}}{\rightleftarrows}} 2PbSO_4 + 2H_2O$$

Équations chimiques de chaque électrode

— à la décharge, sur l'électrode positive :

$$PbO_2 + H_2SO_4 + H_2 \rightarrow PbSO_4 + 2H_2O$$

— à la décharge, sur l'électrode négative :

$$SO_4 + Pb \rightarrow PbSO_4$$

— au cours de la charge, sur l'électrode positive :

$$SO_4 + PbSO_4 + 2H_2O \rightarrow PbO_2 + 2H_2SO_4$$

— au cours de la charge, sur l'électrode négative :

$$PbSO_4 + H_2 \rightarrow Pb + H_2SO_4$$

tion $PbSO_4$ isole les électrodes. La force électromotrice diminue. Au cours de la charge, l'eau s'évapore ; il y a électrolyse de l'eau avec dégagement d'hydrogène et d'oxygène qui entraîne des vapeurs acides, c'est pourquoi il est indispensable, pour des raisons de sécurité, de ventiler correctement les locaux qui renferment des batteries d'accumulateurs au plomb.

Avec une densité de 1,3 kg/dm^3, la force électromotrice d'un élément à température ambiante de 25 °C est 2,05 volts. Dans un accumulateur au plomb, il y a trois réactifs : Pb, PbO_2, H_2SO_4. La loi de Faraday permet de calculer les quantités de ces réactifs qui évoluent au cours des réactions. Pour une décharge de 1 Ah ou 3 600 coulombs : 3,66 g d'acide sulfurique H_2SO_4 sont consommés, 3,86 g de plomb sont transformés en $PbSO_4$ et 4,46 g de PbO_2 sont transformés en $PbSO_4$.

La capacité dépend de la température et de la vitesse de décharge. Le rapport entre la capacité réelle et la capacité théorique, que l'on devrait avoir en fonction des réactifs, est appelé coefficient d'utilisation et sa valeur se situe aux environs de 0,25. Cette faible valeur est due en partie à la formation d'un revêtement non conducteur de sulfate sur les plaques, à la diminution de la conductibilité de l'électrolyte, à la diminution de la porosité des plaques.

La formation de sulfate sur les plaques est fonction de l'intensité de décharge ; elle entraîne une diminution de la porosité par obstruction des pores et empêche toute diffusion à l'intérieur des plaques. C'est pourquoi les batteries destinées à fournir des fortes intensités ont des plaques minces.

On peut distinguer quatre caractéristiques principales :

— La force électromotrice E, différence de potentiel aux bornes quand la batterie ne débite aucun courant et qui est à l'origine de la tension U, différence de potentiel aux bornes quand la batterie se décharge dans un circuit extérieur. La relation qui relie E à U est $U = E - rI$, dans laquelle r est la résistance interne. L'idéal serait d'avoir une tension constante en fonction du temps, très voisine de E et indépendante du courant de décharge. En réalité il n'en est rien. En effet, nous avons noté que la formation de sulfate sur les plaques était fonction de l'intensité, elle dépend donc de I. D'autre part, la résistance interne n'est

▲ ***Tableau I : potentiel normal V_0 en fonction du type de réaction et de la température, dans une pile à combustible. Figure 15 : équation fondamentale de l'accumulateur au plomb et équations chimiques de chaque électrode.***

▼ ***Une batterie d'accumulateurs au plomb utilisée pour l'automobile.***

C. Dani

▶ *Figure 16 : variations de tension en fonction du temps et de la vitesse de décharge pour les accumulateurs au plomb.*

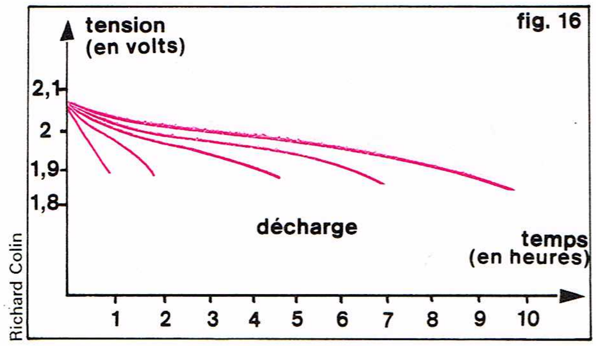

pas nulle, d'où le retrait du produit *rI*. Enfin, E diminue en fonction du temps, car les deux électrodes deviennent semblables. Voir *figure* 16 les variations de la tension en fonction du temps et de la vitesse de décharge.

— La résistance interne est très faible, de l'ordre de 10^{-2} à 10^{-4} ohm. Un court-circuit passager peut être acceptable pour une pile qui a une résistance plus élevée, mais ne peut l'être pour un accumulateur au plomb.

— La capacité, qui est exprimée généralement en ampères heure (Ah), est la quantité d'électricité que l'accumulateur peut fournir sans être rechargé. Elle est proportionnelle à la masse des plaques et comprise entre 12 et 15 Ah par kg de plaque. La capacité commerciale correspond à une décharge en 10 heures. En énergie, la capacité se situe entre 20 et 35 Wh par kg de plaque.

— Le rendement en quantité d'électricité est le rapport entre la quantité d'électricité fournie à la décharge et la quantité d'électricité emmagasinée à la charge. Il dépend de la vitesse de décharge et varie de 0,8 à 0,9.

Les éléments sont associés en série pour former une batterie. Le nombre d'éléments dépend de la tension que l'on désire obtenir. Pour les automobiles, on associe six éléments pour obtenir 12 volts.

Le point de congélation de l'électrolyte est — 50 °C pour une densité de 1,26 et — 70 °C pour une densité de 1,30.

▼ *Figure 17 : équation fondamentale de l'accumulateur alcalin fer-nickel et équations chimiques de chaque électrode. Figure 18 : équation fondamentale de l'accumulateur alcalin argent-zinc et équations chimiques de chaque électrode.*

Équation fondamentale — **Fig. 17**

$$Ni_2O_3 + 2KOH + Fe \underset{\text{charge}}{\overset{\text{décharge}}{\rightleftharpoons}} 2NiO + 2KOH + FeO$$

Équations chimiques de chaque électrode

— à la décharge, sur l'électrode positive :

$$Ni_2O_3 + 2K + H_2O \rightarrow 2KOH + 2NiO$$

— à la décharge, sur l'électrode négative :

$$Fe + 2OH \rightarrow H_2O + FeO$$

— au cours de la charge, sur l'électrode positive :

$$2NiO + 2OH \rightarrow Ni_2O_3 + H_2O$$

— au cours de la charge, sur l'électrode négative :

$$FeO + 2K + H_2O \rightarrow Fe + 2KOH$$

Équation fondamentale — **Fig. 18**

$$AgO + Zn + H_2O \underset{\text{charge}}{\overset{\text{décharge}}{\rightleftharpoons}} Ag + Zn(OH)_2$$

Équations chimiques de chaque électrode

— à la décharge, sur l'électrode positive :

$$AgO + 2K + H_2O \rightarrow Ag + 2KOH$$

— à la décharge, sur l'électrode négative :

$$Zn + (OH)_2 \rightarrow Zn(OH)_2$$

— au cours de la charge, sur l'électrode positive :

$$Ag + 2OH \rightarrow AgO + H_2O$$

— au cours de la charge, sur l'électrode négative :

$$Zn(OH)_2 + 2K \rightarrow Zn + 2KOH$$

Les batteries en plomb sont couramment utilisées pour le démarrage des moteurs à essence et des moteurs Diesel, dans les sous-marins pour la propulsion avec des moteurs à courant continu, dans l'industrie comme source de secours en cas de perte de réseau, dans de nombreux équipements et, en règle générale, partout où il faut une tension pratiquement constante et non ondulée.

Accumulateurs alcalins

L'électrolyte est une solution alcaline, les électrodes sont, suivant le type d'accumulateur, du fer-nickel, du cadmium-nickel, de l'argent-zinc.

Dans *l'accumulateur fer-nickel*, l'électrode positive est en hydroxyde de nickel et l'électrode négative en poudre fine de fer. L'électrolyte est une solution d'hydroxyde de potassium.

Contrairement à l'accumulateur au plomb, à la charge comme à la décharge (*fig.* 17), la solution reste inchangée et il n'y a pas de vapeur dangereuse dégagée, mais seulement de la vapeur d'eau. L'électrolyte ne fournit que les ions qui rendent le milieu conducteur et n'entre pas dans la réaction, c'est pourquoi sa densité ne change pas, donc ne peut indiquer l'état de charge.

Cet accumulateur doit fonctionner entre — 10 °C et + 46 °C sous peine d'une baisse importante du rendement, qui est de toute manière inférieur à celui d'une batterie au plomb. Sa tension stabilisée est 1,35 V. Son poids est relativement faible ; il est robuste et nécessite très peu d'entretien. Ces batteries peuvent être étanches et remplacer les piles.

L'accumulateur cadmium-nickel ne se différencie pratiquement du précédent que par la constitution de l'élément actif de l'électrode négative, qui est en cadmium. La force électromotrice est 1,3 volt. Les électrodes frittées présentent par rapport aux électrodes normales une résistance interne plus faible et un coefficient d'utilisation plus élevé. Pour une décharge de 10 h, la tension baisse de 1,3 à 1,2 V. Pendant la charge, la tension s'élève de 1,2 à 1,4 V en 5 h environ.

Dans *l'accumulateur argent-zinc*, la force électromotrice est sensiblement égale à 1,5 V. Les capacités en énergie par unité de masse (130 Wh/kg) et par unité de volume (300 Wh/dm^3) sont importantes, de l'ordre de six fois supérieures à celles de l'accumulateur au plomb (*fig.* 18).

Les batteries argent-zinc sont couramment utilisées dans l'aviation. Mis à part les batteries étanches dans lesquelles l'hydrogène et l'oxygène se combinent grâce à des catalyseurs, il faut prévoir dans les autres des orifices d'échappement des gaz produits au cours de la charge.

Pour *l'accumulateur zinc-air*, la capacité en énergie peut atteindre 170 Wh/kg. La chaîne dissymétrique est composée de l'oxygène de l'air, d'hydroxyde de potassium et de zinc.

Stockage d'énergie mécanique

L'énergie mécanique se présente sous différentes formes qui sont associées soit à la position d'un objet dans un champ de forces — c'est *l'énergie potentielle* — soit au mouvement d'un objet — c'est *l'énergie cinétique*. Il va donc exister, selon sa forme, différentes façons de stocker l'énergie mécanique.

Énergie potentielle

Cette énergie est donc liée à la position d'un objet dans un champ de forces. Il existe différents types de champs de forces, le plus connu étant, bien sûr, le champ de gravitation dû à la pesanteur. Si l'on considère ce dernier cas, il suffit donc d'élever un objet par rapport à un niveau pris comme référence pour lui communiquer une énergie potentielle dont l'expression est de la forme : $\Delta E = mgh$. L'accroissement d'énergie ΔE est proportionnel à la masse m, à l'accélération de la pesanteur g et à la hauteur h dont l'objet a été soulevé.

L'exemple le plus simple de ce type de stockage est donné par les poids d'une horloge dont l'énergie potentielle acquise lors de leur remontée est utilisée ensuite pour actionner le mécanisme d'horlogerie.

A une plus grande échelle, les barrages-réservoirs qui permettent de mettre en réserve de grandes quantités d'eau sont des dispositifs de stockage dans lesquels

l'énergie potentielle de l'eau est conservée en attendant sa transformation en électricité par turbinage dans l'usine hydro-électrique associée au barrage. Il existe de nombreux barrages de ce type qui ont un fonctionnement saisonnier : l'eau recueillie au printemps ou en été est stockée pour être utilisée en hiver lors des périodes de forte consommation d'électricité.

Une application de grand intérêt au cycle de marche journalier est constituée par la *station de pompage*. Le fonctionnement d'une telle installation exige un bassin supérieur et un bassin inférieur dont les niveaux présentent une différence de hauteur sensible. Une conduite relie les deux bassins en traversant en partie basse une usine comportant des pompes et des turbines, ou des machines réversibles « pompes-turbines ». L'énergie de nuit ou de week-end est utilisée pour pomper de l'eau du bassin inférieur vers le bassin supérieur où elle est stockée. Durant les journées ouvrables, aux heures de fortes consommations, l'eau stockée est relâchée du bassin supérieur vers le bassin inférieur au travers de turbines pour que son énergie potentielle soit convertie en électricité. Le fonctionnement de telles usines est donc très simple. Le rendement global de l'opération est de 70 % ; on espère pouvoir atteindre 75 % sur des installations nouvelles.

La rentabilité d'une station de pompage est très dépendante du réseau avec lequel cette dernière est connectée. L'énergie de pointe produite par la station doit être évidemment meilleur marché que celle qui serait produite par les moyens conventionnels. L'énergie utilisée pour le pompage doit être fournie par des usines délivrant l'énergie la moins chère possible. Des études ont montré que ce type de stations devrait jouer un rôle important d'ici à une vingtaine d'années ; leur place pourrait prendre 10 à 20 % de la puissance installée. Elles fonctionneraient à partir d'énergie électrique provenant de centrales nucléaires ou de centrales à charbon, ces deux sources énergétiques étant probablement les plus économiques pour encore une longue période.

Pour installer des stations de pompage, il faut malheureusement disposer de sites qui se prêtent naturellement à l'implantation de telles installations. Ces sites existent mais en nombre limité. Pour cette raison, on étudie la possibilité de transformer certains barrages actuels en stations de pompage en leur associant un réservoir inférieur souterrain qui serait creusé dans le sol à une profondeur convenable. Ces solutions très onéreuses ne seront mises en œuvre que lorsque le coût de l'énergie de pointe qu'elles seraient susceptibles de produire deviendra compétitif.

Pour terminer ce paragraphe consacré à l'énergie potentielle, remarquons que pour certains types de forces, il n'est pas nécessaire de faire appel à la notion de champ. Ainsi, un ressort exerce une force proportionnelle à son allongement l, ce qu'exprime la relation : $F = -Kl$, avec K constante du ressort. En tendant ou en comprimant un ressort, on lui fait emmagasiner de l'énergie qu'il est susceptible ensuite de restituer à la demande. Le fonctionnement des ressorts a été examiné dans le chapitre *Transformations de l'énergie*.

Énergie cinétique

D'après la théorie de la relativité restreinte, la masse d'un corps est fonction de sa vitesse. La modification de la masse est liée à la variation d'énergie cinétique par la relation bien connue : $E_c = c^2 \Delta m$, c étant la vitesse de la lumière.

Dans notre monde physique, où les vitesses sont de très loin inférieures à la vitesse de la lumière, on peut faire l'approximation suivante en intégrant l'équation : $E_c = 1/2\, mv^2$. Dans cette relation, m représente la masse du corps en repos et E_c la variation d'énergie cinétique du corps lorsque sa vitesse passe de 0 à v.

Si l'on considère des mobiles en rotation autour d'un axe à la vitesse angulaire ω, l'énergie cinétique de rotation est donnée par la relation : $E_c = 1/2\, I\omega^2$, dans laquelle I est le moment d'inertie par rapport à l'axe de rotation.

L'énergie cinétique d'un corps au repos est nulle, d'après les expressions ci-dessus, dans le système de référence adopté.

Une des applications les plus répandues de stockage d'énergie mécanique est constituée par le *volant*, dont le principe est connu depuis la très haute antiquité. C'est la pièce essentielle du tour du potier par exemple ; dans cet appareil, le volant sert à stabiliser la vitesse. L'énergie cinétique stockée dans le volant joue un rôle de tampon : elle est successivement chargée et déchargée comme l'eau d'un réservoir de régulation de débit. La présence d'un volant s'impose donc sur une machine tournante chaque fois que le couple est irrégulier.

Sans la présence de volants, le développement des machines alternatives à vapeur ou à combustion interne aurait rencontré de grandes difficultés.

Comme dispositif de stockage d'énergie, le volant est utilisé sur de nombreuses machines tournantes. On citera l'exemple des machines à estamper à volant, où l'énergie nécessaire est stockée progressivement par mise en vitesse d'un volant pour être libérée dans sa quasi-totalité pendant le temps très bref du travail mécanique de la machine.

Une autre application est celle de l'alimentation de dispositifs que l'on veut rendre indépendante des petites fluctuations du réseau normal d'alimentation. C'est le cas des barres de contrôle des réacteurs nucléaires — pour éviter l'arrêt intempestif du réacteur en cas de défaut d'alimentation fugitif du réseau, les dispositifs électriques de maintien des mécanismes de commande sont alimentés par des groupes tournants dotés d'un volant. Ce dernier est dimensionné pour que l'alimentation des mécanismes ne soit pas sensible à la majorité des petits défauts que l'on constate sur les réseaux. Autre exemple : les pompes de réfrigération du cœur en cas de disparition totale de l'alimentation électrique.

Il faut bien noter que le maintien du volant en rotation à vitesse constante ne consomme aucune énergie. Il y a consommation seulement pendant le démarrage et la mise en vitesse de la machine munie de son volant.

Récemment encore, on pensait que le rôle des volants resterait limité à des applications comme celles données en exemple ci-avant, qui ne nécessitent pas le stockage de grosses quantités d'énergie. Cette position trouvait sa justification dans la difficulté à assurer la bonne tenue mécanique des volants. Cette situation a radicalement changé avec l'apparition de nouveaux matériaux, en particulier les matériaux composites à base de fibres de verre ou de carbone. Ces matériaux ont des densités notablement inférieures à celle de l'acier mais leur résistance mécanique est tellement meilleure que leur emploi sur des volants laisse espérer des résultats très prometteurs.

Il apparaît donc possible de stocker aujourd'hui dans des volants des quantités importantes d'énergie ; parmi les applications envisagées, on peut citer le stockage d'énergie électrique pour assurer la fourniture d'énergie de pointe. Ces stations seraient placées près des lieux de consommation. La mise en vitesse des volants serait effectuée durant les périodes de nuit où l'on peut disposer d'énergie électrique abondante et bon marché. Cette énergie stockée serait ensuite restituée pendant les périodes de consommation de pointe de la journée. Ce genre d'installation pourrait concurrencer avantageuse-

Photothèque E. D. F. - Sodel - M. Brigaud

▲ ***La station de pompage de Revin (Ardennes) ; cet ensemble de grande puissance (800 MW) constitué de deux bassins présentant une différence de niveaux permet le pompage de l'eau du niveau inférieur au bassin supérieur durant les heures creuses. Durant les heures de forte consommation, l'eau stockée est relâchée. Ce type de station devrait jouer un rôle important d'ici une vingtaine d'années.***

ment en coût et en espace utilisé les stations de pompage dans un proche avenir.

La mise au point de ces nouveaux volants va demander encore d'importants efforts de recherche et de développement. Leur conception, lorsqu'on utilise des matériaux composites, s'écarte en effet des habitudes constructives en la matière. Il faut de plus limiter les frottements de toutes sortes qui absorbent inutilement de l'énergie. Parmi les causes de frottement, il faut éliminer la perte dite « par ventilation » due à la rotation à grande vitesse du mobile dans l'air. Il y aurait donc lieu de sceller ces volants dans des enceintes au sein desquelles on aurait fait le vide au préalable.

De tels groupes tournant sous vide pourraient être installés sur des automobiles électriques. La capacité de stockage d'énergie d'un volant est de loin supérieure à celle des batteries traditionnelles : 10 à 30 fois suivant les matériaux utilisés. De tels véhicules seraient donc plus intéressants que les voitures électriques fonctionnant sur batteries. Ils pourraient, par freinage électrique, récupérer la variation d'énergie cinétique du véhicule, ce qui améliorerait encore leurs performances.

Une autre façon de stocker de l'énergie mécanique est de comprimer un gaz. La théorie cinétique des gaz nous apprend en effet que la pression d'un gaz sur les parois du récipient qui le contient n'est autre que la force moyenne exercée sur l'unité de surface de la paroi par les molécules en mouvement en train de la heurter. Les mécaniciens appellent souvent *énergie élastique* l'énergie contenue dans un gaz ou une vapeur sous pression. Cette énergie est facilement transformée en travail. On utilise largement cette possibilité grâce à l'air comprimé entre 7 et 10 bars distribué par réseau. Celui-ci présente sur l'électricité l'avantage de pouvoir être stocké dans des réservoirs de pression. Il est donc possible de garantir une permanence de l'alimentation en fluide de travail en cas de défaillances passagères du système de production d'air comprimé. Cette possibilité confère aux réseaux d'air comprimé une grande souplesse et une grande sûreté de fonctionnement.

L'air comprimé est un excellent fluide de travail pour beaucoup d'applications, ce qui explique son emploi très répandu.

Dans certains cas, on souhaite disposer d'un fluide incompressible pour entraîner des moteurs et manœuvrer des vérins. L'huile sous pression est le fluide tout désigné pour ces applications. L'huile est en général mise en charge par des pompes, mais pour éviter à celles-ci un fonctionnement continu, l'huile sous pression est stockée sous une couverture d'air comprimé dans des accumulateurs. On profite alors de l'incompressibilité de l'huile et des qualités élastiques de l'air comprimé. Ce mariage heureux est utilisé dans tous les systèmes oléo-pneumatiques et l'on pense alors aux suspensions de voitures. L'accumulateur utilisant un gaz sous pression est d'un emploi très répandu qui va du ballon pneumatique de chauffage central aux gros accumulateurs d'eau d'injection des centrales nucléaires à eau légère qui permettent en cas de rupture accidentelle des circuits normaux de réfrigération de refroidir le cœur par de l'eau sous pression de gaz comprimé, sans aucune intervention de matériel mécanique ou électrique.

On envisage de stocker de grandes quantités d'énergie électrique dans des stations rappelant dans leur principe les stations de pompage. L'idée consiste à comprimer de l'air dans des cavités souterraines, naturelles ou artificielles, à l'aide de compresseurs utilisant de l'énergie électrique bon marché, produite la nuit ou le week-end. Aux heures de pointe, cet air comprimé est détendu dans les motogénérateurs qui reversent l'électricité produite au réseau. A la différence de la station de pompage, le système fonctionne avec un seul réservoir de volume limité et capable de tenir la pression, le second étant remplacé par l'atmosphère. Un autre avantage que présenterait ce genre de station sur les stations de pompage hydrauliques consiste dans le fait qu'il serait probablement plus facile de trouver des sites convenables. Le réservoir étant souterrain, l'emprise sur l'environnement serait donc faible. Pour faire fonctionner des installations de ce type, il faudrait disposer de compresseurs et de moteurs à air de grandes dimensions et possédant un bon rendement. Dès que de tels matériels seront disponibles dans des conditions économiques acceptables, on peut penser que des stations fonctionnant à l'air comprimé se développeront.

Stockage d'énergie thermique

Généralités - Notions de rendements de stockage

Dans de nombreuses industries, la consommation d'énergie thermique varie au cours de la journée ou plus généralement au cours d'un cycle, aussi souhaite-t-on disposer durant les périodes de pointe d'un apport supplémentaire d'énergie. On peut alors avoir recours à des sources d'énergie thermique nobles (énergie électrique, énergie de combustion), mais ces dernières sont coûteuses, et il serait préférable d'utiliser de l'énergie thermique stockée à une période excédentaire ou obtenue à l'aide d'une source de chaleur bon marché (énergie solaire, énergie éolienne, énergie résiduelle des centrales nucléaires, des réacteurs chimiques, etc.).

L'énergie thermique est emmagasinée sous forme d'enthalpie dans une enceinte de stockage. L'enthalpie stockée dépend de la température de stockage, T_s, et la quantité de chaleur libérée est liée à la température d'utilisation T_u. Aussi, dans ces conditions, par unité de masse du récepteur thermique, la chaleur maximale libérée ou stockée est égale à : $H(T_s) - H(T_u)$, où H représente l'enthalpie massique du récepteur.

Si M désigne la masse du récepteur, l'énergie maximale emmagasinée E entre la température de stockage et la température d'utilisation est telle que :

$$E = M\,(H(T_s) - H(T_u)).$$

Le réservoir de stockage n'étant ni adiabatique, ni uniforme en température, une partie de l'énergie E, soit Q, est transmise au milieu extérieur par conduction et convection. On peut alors définir un rendement de stockage entre les températures T_s et T_u, soit :

$$R = 1 - \frac{Q}{M\,(H(T_s) - H(T_u))} \qquad (1)$$

Le rendement ainsi défini représente un rendement intégral durant une période où la température du corps récepteur passe de la température de stockage à celle d'utilisation. Lorsque la période de stockage et celle d'utilisation ont lieu simultanément, on introduira plutôt le rendement différentiel R′ tel que :

$$R' = 1 - \frac{dQ}{M\,dH} \qquad (2)$$

Avec nos conventions, un rendement R′ inférieur à 1 ($dQ > 0$, $dH > 0$) correspond à une période de stockage et un rendement supérieur à 1 ($dQ > 0$, $dH < 0$) correspond à une période d'utilisation.

Le choix du récepteur thermique est fonction des valeurs respectives des températures T_s et T_u. Deux possibilités peuvent être envisagées : — choix d'une substance ne présentant pas de changement de phase entre T_s et T_u; — choix d'une substance avec un seul changement de phase entre T_s et T_u.

En effet, il est difficile, pour des raisons technologiques évidentes, de concevoir un réservoir de stockage avec une substance présentant deux changements de phases entre T_s et T_u.

On a respectivement :

— pour le 1er choix :

$$M\,(H(T_s) - H(T_u)) = V\rho C_p\,(T_s - T_u)$$

— pour le 2e choix :

$$M\,(H(T_s) - H(T_u)) = MC_{p1}\,(T_s - T_i) + MC_{p2}\,(T_i - T_u) + M\Lambda\,(T_i).$$

Dans les relations précédentes V, ρ, C_p, C_{p1}, C_{p2}, Λ, T_i représentent respectivement le volume, la masse volumique, la capacité calorifique massique, la capacité calorifique massique dans l'état 1, la capacité calorifique massique dans l'état 2, la chaleur latente massique de changement d'état et la température du changement d'état de la substance réceptrice d'énergie thermique.

Lorsque la substance subit un changement d'état, la température d'utilisation se limite à la température du changement d'état, et, dans ces conditions, on aura pour le deuxième choix :

$$M\,(H(T_s) - H(T_u)) = V\,(\rho C_{p1}\,(T_s - T_u) + \rho\Lambda\,(T_u)).$$

Si nous écrivons, désormais, la chaleur perdue au cours d'une période de durée τ sous la forme :

(3) $$Q = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau US\,(T_u - T_e),$$

le rendement intégral R sera donné par la relation :

(4) $$R = 1 - \frac{1}{\tau}\frac{S}{V} \frac{\int_0^\tau U\,(T_u - T_e)}{[\rho C_p\,(T_s - T_u) + \rho\Lambda\,(T_u)]}$$

Dans la relation **(4)**, S, U, T_e représentent respectivement la surface extérieure du réservoir de stockage, un coefficient de transfert global du réservoir entre la substance intérieure et le milieu extérieur, la température du milieu extérieur. Pour des températures T_s, T_u, T_e et une durée du cycle données, le rendement intégral de stockage dépend des paramètres suivants : — le rapport S/V, ou aire spécifique du réservoir de stockage ; — le coefficient de transfert U ; — les produits ρC_p et $\rho\Lambda$. Le rendement intégral sera d'autant plus grand que les valeurs de S/V et U seront faibles et que celles des produits ρC_p et $\rho\Lambda$ seront plus importantes.

Dans ce qui suit, nous allons tout d'abord donner les propriétés physico-chimiques de certaines substances thermoréceptrices et préciser les meilleures formes géométriques des réservoirs de stockage ainsi que les relations permettant le calcul du coefficient de transfert global U. Puis nous indiquerons quelques applications de stockage de chaleur.

Valeurs de ρ, Λ et ρC_p pour quelques récepteurs thermiques

Dans les *tableaux* II et III sont reportées respectivement les valeurs de ρ, ρC_p et Λ pour quelques substances thermo réceptrices. A l'exception de l'ammoniac, toutes ces valeurs correspondent à la pression atmosphérique.

Les deux tableaux nous conduisent aux conclusions suivantes : les gaz purs loin de leur condition de saturation sont difficilement envisageables comme récepteurs de chaleur. Les liquides et les solides présentent des valeurs du produit ρC_p voisines et l'eau est le corps pur ayant la plus grande valeur du produit ρC_p.

Si on utilise une substance subissant une transformation de phase, on ne peut pas, par suite de la très grande variation de masse volumique, envisager un changement de phase de l'état vapeur à l'état liquide, et réciproquement. En revanche, les changements de phase liquide-solide sont susceptibles d'être considérés ; ils permettent un stockage de chaleur très supérieur à l'utilisation d'un constituant solide ou liquide ne subissant pas de changement de phase. Une difficulté apparaît cependant, car la solidification doit être réalisée de manière uniforme dans tout le réservoir avec formation de cristaux de taille bien définie ne devant pas se fixer sur les différentes surfaces des récepteurs et de sources de chaleur situées à l'intérieur de l'enceinte de stockage. On peut lever cette difficulté en créant dans le réservoir une agitation, qui augmente malheureusement les frais de fonctionnement du stockage.

Si l'on se réfère aux très nombreuses recherches en cours, ce type de stockage est cependant loin d'être exclu. La substance réceptrice peut être soit un corps pur, soit un eutectique. Il est d'ailleurs fort probable que des réservoirs thermiques de ce genre, fondés sur la transformation liquide-solide d'un corps pur ou d'un eutectique, soient déjà utilisés de manière industrielle.

Forme géométrique des réservoirs de stockage

Nous verrons par la suite que, dans certains cas, les réservoirs de stockage sont naturels ; leur forme géométrique est donc imposée ; mais, lorsqu'on aura le choix, on sélectionnera la forme conduisant à la plus petite valeur de l'aire spécifique. Dans le *tableau* IV, nous avons reporté les aires spécifiques de réservoirs de forme géométrique bien définie.

Pour une dimension principale donnée, l'aire spécifique minimale s'obtient pour le parallélépipède où les deux autres dimensions sont très grandes devant la dimension principale. A la limite, on aboutit au feuillet d'épaisseur x et d'aire spécifique $2/x$. Les formes symétriques sphérique, cylindrique, cubique conduisent à la même valeur de l'aire spécifique, mais la capacité de stockage d'un réservoir cubique est sensiblement deux fois celle d'un réservoir sphérique de même dimension principale.

Tableau II
Chaleurs latentes massiques de changement de phase Λ

Phases en présence	Corps	T (en °C)	P (en atm)	ρ_1 (en kg par m³)	ρ_2 (en kg par m³)	Λ (en kcal par kg)
Vapeur-liquide	Eau	100	1	0,597	958	540
Vapeur-liquide	Ammoniac	5	5	3,73	650	294
Liquide-solide	Potassium	63,5	1	830	860	14,7
Liquide-solide	Sodium	97,5	1	970	970	27,4

Tableau III
Capacités calorifiques massiques C_p et produits ρC_p

Nature de la phase	Corps	T (en °C)	ρ (en kg/m³)	C_p (en kcal/kg/°K)	ρC_p (en kcal/m³/°K)
Gaz	Hydrogène	100	0,065 7	3,46	0,227
	Azote	100	0,915	0,245	0,224
	Oxygène	100	1,04	0,493	0,512
	Anhydride carbonique	100	1,97	0,210	0,413
	Ammoniac	100	0,564	0,54	0,304
		5 (5 atm)	3,73	0,50	1,86
	Vapeur d'eau		0,597	0,47	0,280
Liquide	Eau	100	958	1,007	965
	Éthanol 100%	40	772	0,63	486
	Éthanol 95 %	40	787	0,70	551
	Éthanol 50 %	40	897	0,94	843
	Ammoniaque	5 (5 atm)	650	1,10	715
	Potassium	63	830	0,20	166
	Sodium	97,5	970	0,33	320
Solide	Potassium	63	860	0,18	155
	Sodium	97,5	970	0,30	291
	Brique réfractaire	800	2 500	0,20	500
	Graphite	800	2 260	0,39	881
	Bois de chêne	50	865	0,57	493

▲ *Tableau II : chaleurs latentes massiques de changement de phase* (Λ) *de quelques substances thermoréceptrices, pour les températures, pressions et masses volumiques citées en référence.*
Tableau III : capacités calorifiques massiques C_p *et produit* ρC_p *de quelques substances thermoréceptrices pour les températures et les masses volumiques citées en référence.*

Calcul du coefficient de transfert U

Pour les réservoirs naturels, étant donné leur dimensionnement et leur fonctionnement, on ne cherche pas à diminuer les pertes vers le milieu extérieur ; mais cela se révèle indispensable dans le cas des réservoirs artificiels. On y parvient en recouvrant le réservoir d'une épaisseur e d'isolant de conductibilité thermique λ. Cela constitue dans ce cas la résistance principale au transfert thermique, car les résistances de convection sur les surfaces externes et de conduction dans les parois de l'enceinte sont négligeables.

Dans ces conditions, le profil de température dans l'isolant, supposé unidimensionnel, s'obtient par la résolution de l'équation de la conduction en régime transitoire, soit :

(5) $\alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial T}{\partial \tau}$ où α est la diffusivité thermique de l'isolant avec comme conditions aux limites :

$$T = T_u \text{ à } x = 0 \text{ et } T = T_e \text{ à } x = e.$$

Si T_u varie au cours du temps, le profil de température dans l'isolant se modifiera au cours du temps et, à chaque instant, le coefficient de transfert U sera obtenu par :

(6) $$U = \frac{-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=e}}{T_u - T_e}.$$

Quand les variations de températures de la substance accumulatrice sont faibles ou lentes, le régime station-

Tableau IV
Surfaces, volumes et aires spécifiques de différentes formes géométriques utilisées pour le stockage de l'énergie thermique

Formes géométriques du réservoir	Surfaces	Volumes	Aires spécifiques
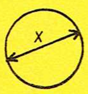 Sphérique	πx^2	$\frac{\pi x^3}{6}$	$\frac{6}{x}$
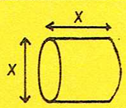 Cylindrique symétrique	$\frac{3\pi x^2}{2}$	$\frac{\pi x^3}{4}$	$\frac{6}{x}$
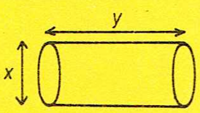 Cylindrique	$\frac{\pi x^2}{2} + \pi xy$	$\frac{\pi x^2 y}{4}$	$\frac{4 + \frac{2x}{y}}{x}$
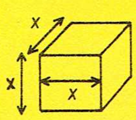 Cubique	$6x^2$	x^3	$\frac{6}{x}$
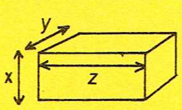 Parallélépipédique	$2xy + 2xz + 2yz$	xyz	$\frac{2 + \frac{2x}{y} + \frac{2x}{z}}{x}$

▲ ***Tableau IV : surfaces, volumes et aires spécifiques pour différentes formes géométriques de réservoirs servant au stockage de l'énergie thermique.***

naire est sensiblement établi à l'intérieur de l'isolant, et on pourra dans ces conditions prendre pour le coefficient de transfert global U une valeur constante égale à λ/e.

Nous avons donné par ailleurs des valeurs des conductibilités thermiques des principaux matériaux isolants et réfractaires.

Remarque : le calcul du coefficient de transfert U par la relation **(6)** n'est correct qu'à condition que la température du récepteur thermique soit uniforme. Dans le cas contraire, il faudra adjoindre à l'équation **(5)** celle qui traduit les variations de température dans la substance réceptrice et remplacer dans les conditions aux limites la température T_u par la valeur de la température de la substance réceptrice à la paroi du réservoir de stockage.

Quelques applications industrielles du stockage d'énergie thermique

Nous ne rappelons pas ici les accumulateurs de chaleur domestiques (eau chaude ou chauffage), car ils font appel à une source d'énergie noble et coûteuse : l'énergie électrique. Nous nous limiterons à trois exemples de stockage thermique utilisant des sources d'énergie bon marché. Dans ces trois exemples, le corps accumulateur de chaleur ne subit pas de changement de phase au cours du stockage et de l'utilisation.

* *Stockage de chaleur basse température dans les nappes phréatiques peu profondes*

Il s'agit d'un stockage de longue durée dans des milieux naturels proches de la surface et très répandus sur le territoire français. Le principe consiste à introduire dans la nappe de l'eau chaude obtenue à bon marché. De cette manière, on réchauffe la nappe, la roche imbibée d'eau et les épontes de la nappe, augmentant ainsi le volume du stock. Il est certain que le milieu naturel n'est pas isolé et qu'une partie de la chaleur stockée sera perdue (15 à 35 %). De plus, la température des eaux injectées doit être limitée (40 à 50 °C) afin d'éviter une pollution thermique de la nappe (formation de micro-organismes, d'algues, etc.).

La source de chaleur de 40 à 50 °C continue ou discontinue doit être à faible coût. Elle est obtenue par exemple : à l'aide de panneaux solaires ; à l'aide de pompes à chaleur fonctionnant aux heures creuses ; par conjugaison des deux moyens précédents.

Durant la période de stockage, on peut envisager trois types d'utilisation :

— utilisation pour le chauffage domestique, sans relever le niveau thermique du stock, mais en régulant le débit retiré ; il faut alors ajouter éventuellement un chauffage d'appoint à très faible investissement ;

— utilisation directe le jour seulement, avec emploi la nuit d'une pompe à chaleur pour relever le niveau thermique en heures creuses ; l'intérêt du stock est de seconder la pompe à chaleur dont le fonctionnement total en hiver est reporté en partie en été et en heures creuses ;

— utilisation de la source de chaleur du stock pour fournir à l'évaporateur de la pompe à chaleur une source froide à plus haute température, augmentant ainsi son rendement.

Ces trois types d'utilisation peuvent être combinés dans des proportions à optimiser. Ainsi, le stockage en nappe phréatique sera le plus souvent associé à une pompe à chaleur ; s'il ne diminue pas considérablement la puissance nécessaire au fonctionnement de cette pompe, le stockage longue durée en nappe phréatique n'est pas justifié.

Signalons que ce système de stockage peut non seulement servir comme source de chauffage pour des habitations mais aussi pour des serres de cultures. Pour le chauffage d'habitations, comme la nappe phréatique de stockage doit avoir un rayon de 100 m, ce type de chauffage ne pourra être envisagé que pour des agglomérations à faible densité d'occupation des sols.

* *Stockage d'énergie solaire dans des bassins artificiels*

Il s'agit d'un stockage intersaisonnier d'eau chaude dans un bassin de forme prismatique creusé dans le sol. L'eau chaude ainsi stockée peut servir au chauffage et comme eau chaude sanitaire de pavillons situés dans le voisinage des bassins. Chacun des pavillons est muni de panneaux solaires qui se trouvent ainsi répartis dans toutes les directions.

Les études actuelles semblent montrer que ce procédé est rentable même dans des régions où l'utilisation directe de l'énergie solaire aurait pu paraître vouée à l'échec. Le rendement thermique global varie de 50 à 70 %, et pour des bassins de 2 000 à 3 000 m³ la température de l'eau stockée varie de 25 à 55 °C au cours de l'année. La chaleur stockée paraît suffisante, sans nécessiter un apport extérieur de chaleur.

* *Stockage d'énergie thermique dans les récupérateurs ou régénérateurs de chaleur*

Les récupérateurs de chaleur sont utilisés depuis très longtemps dans les industries sidérurgiques pour chauffer les vents alimentant les hauts fourneaux. Ils opèrent généralement de manière cyclique, mais certains, comme le réchauffeur tournant de Ljungström, sont continus. Dans tous ces appareils, la chaleur provenant d'une source de chaleur gazeuse (fumées des hauts fourneaux et gaz de combustion de brûleurs situés à l'intérieur du régénérateur) est transférée à des briques réfractaires dont la disposition est conçue selon l'utilisation des régénérateurs. Les récupérateurs cycliques fonctionnent en parallèle ; ainsi, pendant que les uns stockent de la chaleur, les autres permettent, par une opération inverse, de chauffer les vents d'alimentation des hauts fourneaux.

Pour tous ces appareils, la phase solide emmagasineuse de la chaleur est fixe. De nos jours, on s'oriente de plus en plus vers la conception de récupérateurs de chaleur où la phase solide est mobile (lit fluidisé, lit transporté). On augmente ainsi beaucoup le débit de chaleur transféré et par suite la quantité de chaleur emmagasinée et libérée.

ENCYCLOPÉDIE DES SCIENCES

TECHNOLOGIE II

GRANGE BATELIÈRE

LEXIQUE DE TECHNOLOGIE (INFORMATION)

SUPPLÉMENT AU VOLUME XVII DE LA GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

ABRÉVIATIONS

adj.	adjectif	*n.*	nom	*syn.*	synonyme
ex.	exemple	*par ext.*	par extension	*v.*	verbe

A

aberration. *n.* Défaut dans la netteté ou dans la forme des images données par un système optique. On distingue les aberrations géométriques *(aberrations sphériques, courbure de champ, distorsion, coma* et *astigmatisme),* résultant d'un défaut de stigmatisme du système, et les aberrations chromatiques, dues à la dispersion des lumières non chromatiques.

accès. *n.* En informatique, méthode d'écriture ou de lecture d'information contenue dans un fichier : accès séquentiel, indexé, séquentiel-indexé, aléatoire ou direct.

accès direct mémoire ou **DMA (Direct Memory Access).** Dispositif permettant l'écriture ou la lecture d'information en mémoire, réservé à un canal d'entrées-sorties.

acquisition de données. Mise en œuvre d'un processus de mesure destiné à recueillir des données.

adressage. *n.* En informatique, méthode d'accès par l'unité de commande à un opérande situé en mémoire centrale : adressage simple, immédiat, indirect, indexé, indirect-indexé.

adresse. *n.* En informatique, numéro d'ordre d'un mot ou d'un octet de la mémoire centrale.

aérien. *n.* Antenne de radar qui définit le volume de l'espace observé et concentre l'énergie de l'émetteur dans cette direction.

agar-agar. *n.* Mucilage fabriqué à partir d'une algue marine. Peut être utilisé comme support de culture bactériologique ou comme produit d'encollage.

algorithme. *n.* Processus d'élaboration d'un résultat par une suite bien définie d'opérations éventuellement répétitives.

ambiophonie. *n.* Reconstitution de l'espace sonore au moyen d'un grand nombre de haut-parleurs.

amortie (onde). Train d'onde d'amplitude décroissant rapidement, utilisé dans les débuts de la T.S.F. pour transmettre des signaux en morse.

amplification. *n.* Appliqué aux signaux électriques, ce terme désigne l'augmentation de l'amplitude apportée à la tension ou au courant, dans le but de rendre leur mesure plus aisée, par exemple.

analogique. *adj.* La représentation analogique d'une grandeur permet de suivre toutes ses variations, aussi petites soient-elles, de manière continue dans le temps, sur un seul support physique.

anamorphose. *n.* Procédé optique qui permet de réduire ou, au contraire, d'agrandir l'image d'un objet donnée par un objectif ; le système optique proprement dit est appelé *anamorphoseur.*

anémomètre. *n.* Appareil de mesure de la vitesse des flux de fluides (gaz ou liquides).

anti-halo. *n.* Enduit filmique dorsal, qui absorbe les réflexions lumineuses parasites et qui assure la protection du support du film contre les rayures. Cette dorsale anti-halo est ramollie lors du pré-bain, puis totalement éliminée au cours du rinçage qui précède le bain chromogène.

archives. *n.* Ensemble de documents produits par un organisme public ou privé. Les archives constituent une source majeure d'information sur l'activité de cet organisme, c'est pourquoi leur conservation est importante. Les *archives de sécurité* sont la reproduction sur microformes des archives ou autres documents en vue de leur protection contre les incendies ou les dommages de guerre.

arête. *n.* Dans une image, zone de transition entre une partie sombre et une partie éclairée.

arithmétique (unité). Organe de l'ordinateur effectuant sous le contrôle de l'unité de commande les opérations arithmétiques et les conversions de type entier, réel.

A.S.A. (American Standard Association). Désigne l'indice de sensibilité d'une émulsion photographique : une émulsion de 400 A.S.A. est deux fois plus sensible qu'une émulsion de 200 A.S.A.

assembleur. *n.* 1° Langage mnémonique permettant une manipulation fidèle et plus aisée du langage machine. 2° Programme réalisant la traduction d'un texte écrit en assembleur en langage machine.

audiofréquence ou **audio.** *n.* S'applique aux fréquences dans la bande utilisée pour transmettre les sons.

autocorrélation. *n.* Nom donné à l'autocovariance centrée d'une fonction aléatoire stationnaire du second ordre.

autocovariance. *n.* Fonction de deux paramètres t_1 et t_2 ; espérance mathématique du produit $x\ (t_1)$. $x\ (t_2)$, $x\ (t)$ étant une fonction aléatoire.

autocovariance centrée. Autocovariance d'une fonction aléatoire centrée.

automate. *n.* Organe capable d'exécuter une fonction bien précise, d'une façon invariable, lorsqu'il est stimulé.

autoradiographie. *n.* Technique photographique apte à déceler et à déterminer la quantité de radionucléide présente dans l'objet à examiner.

axe optique. Axe de symétrie pour les propriétés optiques d'un cristal.

azimutage. *n.* Sur un magnétophone, opération de réglage de l'entrefer d'une tête magnétique, visant à obtenir sa perpendicularité avec la direction de défilement de la bande.

B

balayage électronique. Technique permettant de commander la position du faisceau d'une antenne sans déplacer mécaniquement cette dernière. Le principe consiste à contrôler rapidement la phase des diverses sources élémentaires du réseau.

bande bibliographique nationale. Bande magnétique sur laquelle est enregistrée la description de tous les documents (livres, périodiques, documents graphiques, etc.) édités chaque année dans un pays. Les bandes magnétiques permettent l'exploitation de ces informations par ordinateur. L'échange des bandes entre pays permettra de réunir la totalité de l'information sur les documents édités dans le monde ; c'est ce qu'on appelle le *Contrôle Bibliographique Universel.*

bande magnétique. Support de mémoire de grande capacité constitué d'un film plastique recouvert d'une pellicule magnétisable.

bande passante. Fixe l'écart entre les fréquences maximum et minimum que laisse passer un amplificateur, par exemple.

bandothèque. *n.* Local où sont rangées les bandes magnétiques.

banque de données. Réunion d'un nombre important d'informations. Généralement, on utilise cette expression pour désigner un ensemble d'informations enregistrées sur bandes magnétiques et exploitables soit localement, soit à distance par l'intermédiaire d'un ordinateur.

base de numération. Nombre minimal de symboles utilisés pour représenter un entier quelconque ; l'entier s'exprime alors comme une somme pondérée des puissances de la base.

bases de données. Cette expression est souvent employée comme synonyme de *banque de données.* En France, elle désigne le plus souvent une banque de données recensant uniquement les données bibliographiques portant sur un sujet déterminé.

batch (traitement par lot). Méthode d'exploitation séquentielle des différents travaux confiés à un ordinateur; les ordres sont généralement lus sur des cartes perforées et les résultats écrits sur imprimante.

bathycélérimétrie. *n.* Courbe représentant la vitesse de propagation acoustique dans l'eau en fonction de la profondeur. On relève parfois aussi la bathythermie (courbe de température), que l'on peut ensuite facilement relier à la vitesse de propagation acoustique.

bibliobus. *n.* Autobus ou camion aménagé en bibliothèque et qui dessert les quartiers périphériques des villes ou les zones rurales lorsque la faible densité de population ne permet pas l'ouverture d'une bibliothèque.

bibliographie. *n.* Science dont l'objet est de retrouver la totalité des documents (notamment livres et articles de périodiques) concernant tel ou tel sujet, ce qui nécessite la consultation et donc la constitution d'instruments de travail tels que les répertoires bibliographiques, les bandes bibliographiques nationales, les bases de données (*voir* ces termes). Par assimilation, ce terme désigne souvent aussi les répertoires bibliographiques. Les *bibliographes* sont les bibliothécaires spécialisés dans cette discipline.

bibliothécaire. *n.* 1° Personne chargée de la gestion matérielle et scientifique de documents. 2° En informatique, programme chargé de la gestion d'une bibliothèque.

bibliothéconomie. *n.* Science dont l'objet est l'étude de l'ensemble des problèmes touchant à la communication et à la conservation des documents : problèmes de conservation matérielle, de classement, de constitution de catalogues, d'organisation des services en vue de la meilleure satisfaction des utilisateurs.

bibliothèque. *n.* 1° Organisme chargé de collecter et conserver des documents en vue de leur communication au public. C'est en fonction du public auquel elles sont destinées que les bibliothèques acquièrent leurs collections (livres, périodiques, documents iconographiques, audiovisuels, etc.), qui sont donc différentes selon qu'il s'agit de bibliothèques de lecture publique (*voir* cette expression) : municipale ou centrale de prêt, ou de bibliothèques d'étude et de recherche : nationale, universitaire ou spécialisée. 2° En informatique, on dit aussi *programmathèque :* usité en informatique dans le double sens de collection de programmes et de lieu de rangement de cette collection.

bibliothèque centrale de prêt. Bibliothèque créée dans un département français en vue de desservir les zones à faible densité de population. La bibliothèque centrale, le plus souvent située au chef-lieu du département, a généralement des annexes dans les petites villes et possède des bibliobus (*voir* ce terme) qui circulent dans les zones les moins peuplées.

binaire. *adj.* Utilisant la base de numération 2; symboles binaires usuels : 0 et 1.

bit. *n.* (abréviation de *binary digit*). 1° Chiffre binaire valant 0 ou 1. Plus petit élément d'information stockable dans une mémoire binaire. 2° Unité de mesure d'information lorsque le logarithme est à base 2 dans la formule de Shannon.

blimp. *n.* Caisson insonore dans lequel on enferme l'appareil de prise de vues dans son entier, ou plus simplement le mécanisme d'entraînement du film et les organes complémentaires susceptibles de produire ou de transmettre des bruits.

bloc de déviation. Ensemble de bobinages de fil de cuivre, enfilé sur le tube cathodique et destiné à provoquer des déviations du faisceau électronique interne pour générer un balayage de la couche luminescente.

bloc mémoire. Ensemble de mots dans une mémoire. La partition d'une mémoire en blocs mémoire permet de diviser la recherche d'une information en deux temps (recherche du bloc, puis de l'information dans le bloc).

bloqueur. *n.* Organe utilisé pour maintenir constante, par exemple, une grandeur analogique à convertir, à l'entrée d'un convertisseur analogique digital.

B.L.U. (abréviation de *bande latérale unique*). Principe d'émission énergétiquement économique, dans lequel la porteuse ainsi qu'une des deux bandes latérales de modulation sont supprimées.

bootstrap. *n.* Procédé d'initialisation des fonctions d'un ordinateur par le chargement en mémoire du moniteur.

branchement. *n.* On dit aussi *transfert* ou *rupture de séquence.* Notification à l'unité de commande de l'adresse de l'instruction suivante; un branchement peut être conditionnel s'il dépend de l'état de la machine au moment du transfert ou, sinon, inconditionnel.

bruit. *n.* Signal ne transportant pas d'information utile.

bruit à bande étroite. Fonction aléatoire dont la densité spectrale de puissance est constante sur un domaine $[-f_c, +f_c]$ et nulle ailleurs.

bruit blanc. Processus aléatoire dont la densité spectrale de puissance est constante quelle que soit la fréquence.

bulles magnétiques. Domaines cylindriques apparaissant dans un film mince, dont l'aimantation est opposée à celle du film. Éléments de base des mémoires dites à bulles magnétiques.

bus. *n.* Organe permettant de véhiculer les informations entre les différentes unités d'un ordinateur; dans le cas des systèmes dits « unibus », tous les échanges d'informations se font par un bus unique.

C

C.A.F. (abréviation de *commande automatique de fréquence*). Dispositif électronique assurant l'accord exact du récepteur sur la fréquence de l'émetteur.

C.A.G. (abréviation de *commande automatique de gain*). Dispositif électronique chargé de maintenir constant le niveau d'écoute d'un récepteur radiophonique, et cela malgré les petites perturbations accidentelles de la réception.

caméra. *n.* Chambre noire munie d'un système optique et d'un mécanisme assurant l'entraînement intermittent d'un film.

canal. *n.* 1° Automate spécialisé dans les échanges d'informations entre l'ordinateur et un périphérique; il est indépendant de l'unité centrale. 2° Intervalle d'une bande de fréquences radioélectriques, déterminé par des accords internationaux.

candela. *n.* Unité d'intensité lumineuse (l'ancienne unité était la « bougie internationale »).

capacité. *n.* 1° En informatique, quantité d'information stockable dans une mémoire. Elle s'exprime en bits. 2° En communication, valeur maximale de l'information transmise par un canal. Ce maximum est pris par rapport aux probabilités des caractères d'entrée du canal.

capacité (d'un condensateur). Chiffre la valeur de la charge électrique Q d'un condensateur ayant à ses bornes une tension V par $Q = CV$.

capteur. *n.* Dispositif plus ou moins complexe utilisé pour « capter » une grandeur à mesurer. Comprend généralement un ou plusieurs transducteurs.

caractère. *n.* 1° Assemblage de bits dans les mémoires d'ordinateur. 2° Élément de l'alphabet d'un code. 3° Une des mesures permettant de préciser une forme.

carte perforée. Support d'information cartonné permettant le codage, par des perforations, de 80 caractères au plus.

Cassegrain (antenne). Antenne caractérisée par deux réflecteurs, un réflecteur principal constitué par un paraboloïde et un réflecteur secondaire constitué par un hyperboloïde.

catalogage. *n.* Opération de traitement du document qui consiste à rédiger une notice identifiant et décrivant celui-ci selon des normes précises. La réunion des notices catalographiques rendra possible la constitution des différents catalogues et répertoires bibliographiques (*voir* ces termes). Les moyens informatiques permettent maintenant un catalogage collectif partagé dans le cadre des réseaux de bibliothèques (*voir* cette expression).

catalogue. *n.* Document dont le support peut varier (livre, imprimé, fiches, microformes, ...) et qui rassemble des notices catalographiques. A la différence des répertoires bibliographiques, le catalogue localise les documents et correspond le plus souvent aux collections d'un établissement. Un catalogue peut avoir plusieurs *entrées* selon l'élément mis en vedette : auteur, titre, mot-clef ou mot-matière (le catalogue est dit *analytique*), indice correspondant à une classification (le catalogue est dit *systématique*).

catalogue collectif. Catalogue recensant les collections de plusieurs établissements. Les catalogues collectifs les plus répandus en France concernent les collections de périodiques. Le développement de l'informatique documentaire permet la constitution de catalogues collectifs de plus en plus importants, comme celui de l'Ohio College Library Center aux États-Unis, ou comme le projet de catalogue collectif national en France, en cours de réalisation par la Division de la coopération et de l'automatisation des bibliothèques.

cavitation. *n.* Phénomène qui se manifeste par l'apparition de bulles de vapeur dans un liquide lorsque la pression devient localement inférieure à la pression de vapeur saturante. Fréquente autour des hélices d'un navire, la cavitation limite le niveau sonore qui peut être émis avec un projecteur de sonar.

cellulose. *n.* Macromolécule végétale, constituant essentiel du bois, formée par une chaîne de motifs à structure hexagonale; sa formule brute peut s'écrire $(C_6H_{10}O_5)_n$ avec *n* pouvant atteindre 10 000.

centrale (unité). Dispositif d'un ordinateur regroupant l'unité de commande et l'unité arithmétique et logique.

centre de documentation. A l'origine, organisme destiné à recevoir les références des documents parus. Actuellement les centres possèdent également les documents eux-mêmes, si bien qu'il n'y a plus de différence entre eux et les bibliothèques spécialisées.

centrée. *adj.* Désigne une variable ou une fonction aléatoire à laquelle on a soustrait son espérance mathématique.

chaîne de mesure. Ensemble des dispositifs et instruments utilisés pour effectuer une mesure, du capteur jusqu'à l'indicateur de la mesure.

chopper. *n.* Mot utilisé couramment dans le jargon des électroniciens pour désigner un hacheur. Il s'agit ici de découper un signal électrique continu pour faciliter son amplification.

chrominance. *n.* En télévision en couleurs, le signal de chrominance est celui qui porte les informations de couleurs.

chromogène. *n.* ou *adj.* Les procédés à chromogènes permettent de renforcer ou de transformer en images colorées l'argent réduit constituant l'image. Le développement chromogène agit par copulation : développateur chromogène oxydé + coupleur → leuco-dérivé du colorant à former.

cinémascope. *n.* Procédé cinématographique de projection sur écran large, utilisant un dispositif anamorphoseur (*voir* anamorphose). Le cinémascope utilise une pellicule 35 mm à petites perforations carrées, et son format est de 2,55 (2,35 à la projection).

circuit accordé. Circuit électrique composé d'une self-inductance et d'un condensateur connectés en

parallèle, et dont l'impédance est maximale pour une fréquence particulière dite « d'accord ».

circuits intégrés. Circuits électriques pouvant être très complexes, fabriqués sur une microplaquette de silicium (quelques millimètres carrés). Comme éléments d'ordinateur, ils présentent un avantage considérable de compacité et de fiabilité sur les dispositifs électroniques.

classification. *n.* 1° Expression par un système de l'ensemble de la connaissance et fondé sur la distinction de *classes :* ensemble d'objets, d'êtres, d'idées, etc., possédant une caractéristique commune. Les multiples classifications permettent de décrire le contenu des documents et de classer ces descriptions dans un ordre logique, systématique, constituant des catalogues ou des répertoires qui en faciliteront la recherche. A condition d'être simplifiée, une classification peut servir de base au classement matériel des documents. 2° Opération classique de reconnaissance des formes ayant pour but de décider à quel ensemble une forme nouvelle appartient (les ensembles sont supposés définis antérieurement.

Clayden (effet). Effet photographique qui se caractérise par la désensibilisation d'une couche sensible, due à une exposition très courte à une énergie élevée (ou à une exposition à des rayons X).

clutter. *n.* Ensemble d'échos ponctuels, de phases quelconques, contenus dans le volume de confusion du radar.

coalescence. *n.* Technique, appelée aussi « clustering », permettant de former des groupes similaires de formes dans un ensemble de formes mesurées. Cela permet de créer des classes quand celles-ci ne sont pas imposées *a priori.*

codage. *n.* Opération réalisant la transcription de messages écrits dans un alphabet en un autre alphabet, selon les règles d'un code.

codage de Shannon-Fano. Codage, proposé par Shannon et Fano, tel qu'au message m_i de probabilité $p\ (m_i)$ est associé un mot-code de longueur n_i

avec $\log_2 \dfrac{1}{p\ (m_i)} \leqslant n_i \leqslant \log_2 \dfrac{1}{p\ (m_i)} + 1$

codage par blocs. Technique de codage telle qu'un mot-code est associé à une suite de messages de la source de longueur k au lieu d'être simplement associé à un message.

code. *n.* 1° Règle d'équivalence entre deux ensembles de messages. 2° Représentation sur plusieurs bits (6 à 8) des différents caractères imprimables ou non ; les plus usités sont : ASCII, EBCDIC et Hollerith, représentation sur 4 bits des symboles décimaux : BCD.

code de Bose-Chauduri-Hocquenghem. Code cyclique généralisateur du code de Hamming.

code à contrôle de parité. Code dont les mots-codes ont $(n + m)$ chiffres, n porteurs d'information, et m utilisés pour contrôler la partie précédente (ce sont les chiffres de parité).

code cyclique. Code détecteur correcteur d'erreurs, fermé pour l'opération de permutation linéaire des chiffres (tout permuté d'un mot-code est un mot-code).

code détecteur correcteur d'erreurs. Code ayant la possibilité de détecter et/ou de corriger des erreurs de transmission.

code de Fire. Code cyclique correcteur de paquets d'erreurs de longueur supérieure à deux.

code de Gray ou **code réfléchi.** Code cyclique tel que le passage d'un nombre au nombre immédiatement supérieur ne modifie qu'un chiffre du nombre de départ.

code de Hamming. Code à contrôle de parité détectant et corrigeant les erreurs simples.

code de Huffmann. Code optimum tel que : *a*) les messages les plus probables ont les mots-codes les plus courts ; *b*) les messages de même probabilité ont des mots-codes de même longueur.

codeur. *n.* Organe réalisant une opération de codage.

codeur de position. Convertisseur analogique digital assurant la conversion d'une position ou d'un mouvement.

codeur de tension. Convertisseur analogique digital réalisant la conversion d'une tension électrique.

coercitif. *adj.* Se dit du champ magnétique nécessaire pour annuler l'intensité d'aimantation dans un matériau initialement saturé.

cohéreur. *n.* Le cohéreur, inventé par Branly, permettait la détection des ondes électromagnétiques amorties (communications en morse).

colorants sensibilisateurs. Composés chimiques qui, inclus au sein d'une émulsion, permettent d'obtenir une sensibilité spectrale couvrant tout le domaine visible.

colorimétrie. *n.* Décrit et mesure la sensation colorée que perçoit un œil moyen, en fonction de la composition spectrale de la lumière qu'il reçoit.

commande (unité de). Partie de l'ordinateur chargée du repérage et du décodage des instructions d'un programme ; elle fournit à l'unité arithmétique et logique ses opérations et ses opérandes.

compilateur. *n.* Programme effectuant la traduction d'un texte rédigé dans un langage évolué (ALGOL, FORTRAN, COBOL, etc.) en langage-machine.

compteur de programme. Registre spécialisé désignant l'adresse en mémoire de la prochaine instruction à exécuter. Il est mis à jour à chaque instruction.

condenseur. *n.* Système optique, placé à l'intérieur d'un appareil de projection et destiné à concentrer le flux lumineux sur le plan du film. Un condenseur est généralement formé de deux lentilles épaisses plan-convexes, ou d'une combinaison de miroirs sphériques ou elliptiques.

console. *n.* On dit aussi *machine à écrire* ou *télétype.* La console d'un ordinateur se compose d'un clavier et d'un écran ou/et d'un système d'impression sur papier ; la console « maîtresse » sert à l'opérateur pour communiquer ses ordres à la machine ; les autres consoles éventuelles du système servent aux usagers, moins prioritaires.

contraste. *n.* Le contraste d'une reproduction photographique, désigné par la lettre γ, est représenté par la pente de la courbe caractéristique. Le contraste indique le degré de la variation dans les images, soit de la couleur, soit de la luminosité.

contretype. *n.* Reproduction par contact d'un film négatif ou positif ; sert à l'élaboration de positifs intermédiaires, puis de négatifs intermédiaires, pour le tirage d'une série importante de copies.

conversationnel. *adj.* Qualificatif d'un programme ou d'un système prenant ses ordres et donnant ses réponses à l'aide d'une console, par opposition à ceux utilisant lecteur de carte et imprimante.

conversion. *n.* (Dans le sens de numérisation.) En saisie des données, signifie transformation de la représentation d'une grandeur. *Ex. :* conversion analogique-digital.

convertisseur analogique digital. Périphérique d'un ordinateur chargé de convertir des tensions en mots binaires et réciproquement ; ce périphérique est utilisé pour le traitement de signal et le pilotage d'unités analogiques (oscilloscope, tables traçantes, etc.).

corps d'épreuve. Élément intermédiaire dont on mesure la déformation quand il est soumis à une force dont on ne peut mesurer directement la valeur. Connaissant les propriétés mécaniques du corps d'épreuve, on peut relier sa déformation à la force qui lui est appliquée et obtenir ainsi une mesure de cette force.

corps de Galois. En mathématiques, corps dont le nombre d'éléments est fini.

corps noir. Corps idéal absorbant complètement toutes les radiations, quelle que soit leur longueur d'onde.

corrélateur. *n.* Appareil réalisant le calcul d'une fonction de corrélation.

couchage. *n.* Traitement de surface du papier, réalisé par le dépôt d'une matière minérale pulvérulente en présence d'un agent adhésif. Le couchage rend la surface de la feuille plus régulière et diminue sa porosité.

couloir d'impression. Partie constitutive de la caméra, le couloir d'impression est une pièce métallique traversée en son centre par une fenêtre dont les dimensions correspondent à celles de l'image.

couple thermo-électrique (thermocouple). Ensemble de deux conducteurs métalliques différents soudés à leurs extrémités. Lorsque les deux soudures sont à des températures différentes, il existe entre elles une différence de potentiel qui ne dépend que de la nature des fils et de la température des soudures.

coupleurs. *n.* Composés chimiques chargés de former les images constituées par des colorants. Chacun de ces coupleurs est incorporé dans sa couche propre et permet d'obtenir des colorants cyan, magenta ou jaune.

courbe caractéristique. Graphique sensitométrique représentant l'évolution de la densité d'un photogramme en fonction de l'exposition.

courbe de sensibilité. La courbe de sensibilité de l'œil correspond à la courbe de luminance visuelle de sources monochromatiques dont la luminance énergétique est la même. Cette courbe de sensibilité présente un maximum dans les jaunes en vision photopique (diurne), qui tend à se déplacer dans les bleus en vision scotopique (nocturne).

croix de Malte. Pièce métallique composée de quatre secteurs circulaires séparés par des rainures orthogonales, qui assure l'entraînement intermittent du film dans la plupart des projecteurs.

crosscorrélation. Nom donné à la crosscovariance centrée de deux fonctions aléatoires stationnaires du second ordre.

crosscovariance. *n.* Fonction de deux paramètres t_1, t_2, espérance mathématique du produit de deux fonctions aléatoires $x\ (t)$, $y\ (t)$ prises respectivement pour les valeurs t_1 et t_2 du paramètre t.

crosscovariance centrée. Crosscovariance de deux fonctions aléatoires centrées.

cycle mémoire. Opération de lecture et d'écriture dans une mémoire d'ordinateur.

D

débit d'information. Pour les mémoires à débit séquentiel, quantité d'information lue ou écrite par unité de temps.

décimal. *adj.* Utilisant la base de numération 10 ; symboles usuels : 0, ..., 9.

décit. *n.* Unité de mesure de l'information lorsqu'on utilise les logarithmes décimaux dans la formule de Shannon.

décodeur. *n.* Organe assurant un travail inverse de celui d'un codeur (*voir* ce terme).

décodeur stéréophonique. Partie du récepteur en modulation de fréquence, chargée de séparer les canaux gauche et droit contenus dans le signal « multiplex » issu du *discriminateur.*

découpage. *n.* Représentation écrite d'un film ; le découpage est fractionné en séquences et en plans ; il s'accompagne de la continuité dialoguée et des indications techniques du metteur en scène.

décrémenter. *v.* Retrancher 1 à un nombre.

décryptable de manière unique. Propriété d'un code tel que, à toute séquence quelconque de caractères du code, corresponde une suite unique de messages de la source.

défibrage. *n.* Traitement mécanique qui sépare les fibres de la pâte lors de la fabrication de la pâte à papier.

définition. *n.* Qualité de netteté d'un cliché photographique; elle résulte du pouvoir séparateur de l'objectif ainsi que du pouvoir de résolution de la pellicule.

délignification. *n.* Ensemble des réactions qui détruisent et solubilisent la lignine du bois.

densité. *n.* Terme sensitométrique servant à définir la plus ou moins grande opacité d'un échantillon photographique. La densité correspond au logarithme décimal de l'opacité.

densité cross-spectrale de puissance. Transformée de Fourier de la fonction de crosscorrélation centrée de deux fonctions aléatoires stationnaires.

densité spectrale de puissance. Transformée de Fourier de l'autocorrélation d'une fonction aléatoire stationnaire du second ordre.

densitomètre. *n.* Appareil servant à analyser et à mesurer les différentes plages de densité d'un cliché photographique.

dépôt légal. Obligation du dépôt d'un certain nombre d'exemplaires de chaque document (livre, périodique, carte, disque, film, en général tous supports sonores ou iconographiques) par l'éditeur ou l'imprimeur. Ce dépôt permet le recensement de l'ensemble de la production d'un pays ainsi que la protection des droits des auteurs.

détection. *n.* Permet de retrouver le signal dans l'onde modulée. Plus généralement, permet de déceler la présence d'un signal déterminé dans un ensemble d'ondes de caractéristiques différentes.

développement. *n.* Première étape des traitements photographiques. Elle consiste à réduire entièrement en argent les cristaux insolés qui portent une image latente dans un temps le plus court possible, sans modifier les cristaux non insolés; c'est cette réaction qui forme les colorants des images.

dicop. *n.* Système de visée qui permet de contrôler indifféremment l'image par visée électronique ou par visée reflex, le passage d'un système de visée à l'autre s'effectuant par simple escamotage d'un miroir à 45°.

digital. *adj.* Une représentation digitale d'une grandeur utilise des combinaisons de 0 et de 1 dans la forme binaire. La représentation digitale nécessite une quantification de la grandeur en un nombre de niveaux dépendant du nombre *n* de digits utilisés (2^n en binaire).

D.I.N. (Deutsche Industrie Normen). Méthode particulière pour la détermination de la sensibilité des couches photographiques. Les degrés D.I.N., contrairement aux degrés A.S.A., sont en progression géométrique de raison $\sqrt{2}$.

dipôle de Maxwell. Petit élément linéaire de circuit électrique, de dimension très inférieure à la longueur d'onde du courant alternatif qui le parcourt.

direct (accès). *Voir* mode d'accès aléatoire.

directivité. *n.* Capacité de certains transducteurs d'émettre ou de recevoir dans une ou plusieurs directions privilégiées.

discriminateur. *n.* Partie du récepteur radio en modulation de fréquence, chargée de la transformation du signal MF en signal modulé en amplitude, puis en signal basse fréquence.

dispatching. *n.* Service chargé, dans les centres de calcul, de la restitution à l'utilisateur des états ou listings sortis par l'ordinateur.

disque. *n.* Support magnétique d'information se présentant sous forme d'un disque ou d'un empilement de plusieurs disques. *Unité de disques :* dispositif assurant la lecture et l'écriture sur le disque, et par l'ordinateur, des informations; suivant la disposition des têtes de lecture, on parlera de disques à têtes fixes ou mobiles. Les disques souples de dimensions moindres sont surtout utilisés sur les mini-systèmes.

disque magnétique. Mémoire constituée d'un disque recouvert de matériau magnétique défilant devant des têtes magnétiques.

distance de Hamming. Nombre de chiffres différents de deux nombres binaires.

distorsion. *n.* Déformation d'un signal, introduite lors de sa reproduction. La *distorsion d'amplitude* est la conséquence de la non-linéarité entre l'entrée et la sortie du système de reproduction. La *distorsion de fréquence* traduit la dépendance en fréquence de cette relation.

diversité de fréquence. Technique selon laquelle un radar émet à la même puissance qu'un radar monofréquence, mais en la divisant également sur deux fréquences d'émission f_1 et f_2 : elle annule les fluctuations de la cible en faisant apparaître l'équivalent d'une cible de fréquence constante.

donnée. *n.* Valeur numérique représentant la valeur d'une grandeur mesurée.

Doppler (effet). Il existe un écart de fréquence Δf entre la fréquence émise f_E et la fréquence signal f_s reçue lorsque la cible est animée d'une vitesse V. Δf est appelée *fréquence Doppler*. Pour un émetteur fixe, Δf est égal à $2 f_E \frac{V}{c}$, où c est la vitesse de la lumière.

duplexeur. *n.* Commutateur électronique qui ouvre la voie au signal radar émis dans le sens émetteur-antenne et la ferme dans le sens émetteur-récepteur. Il effectue le travail inverse pour le signal reçu.

E

échantillonnage. *n.* Opération consistant à ne prendre la valeur d'un signal continu qu'à certains instants appelés instants d'échantillonnage. Cette opération est nécessaire pour permettre des actions commandées par calculateur numérique.

éclairement. *n.* Quotient du flux lumineux reçu par un élément de surface, par l'aire de cet élément : $E = \frac{d\Phi}{dA}$. L'unité d'éclairement est le lux.

écran de visualisation. Partie d'une console ne servant qu'en sortie des résultats sous forme de caractères (écran alphanumérique) ou de courbes point par point (écran graphique).

édition de liens. Phase du traitement d'un programme consistant en l'ajout de références et de modules non connus du compilateur.

effet thermo-électronique. Phénomène physique se produisant pour certaines substances, qui leur permet d'émettre des électrons quand elles sont chauffées.

efficacité. *n.* Pour un code, rapport de la longueur moyenne minimale possible pour les mots-codes à la longueur moyenne des mots-codes du code étudié.

élasticité. *n.* Propriété qu'a un corps de retrouver ses dimensions initiales quand cesse la force ou la contrainte qui le déforme.

émittance. *n.* Flux lumineux émis par une source dans tout l'espace avant, par unité de surface.

émulsion photographique. Mélange de matériaux photosensibles, constitué de cristaux d'halogénure d'argent, de gélatine et de composés chimiques (colorants sensibilisateurs, ...), et servant à l'enregistrement des images et à leur fixation définitive.

enluminure. *n.* Illustration très colorée de livres ou de parchemins médiévaux. Les enluminures ont précédé la peinture sur bois ou sur toile qui, à l'origine, en a repris les thèmes.

entrée-sortie. Échange d'informations entre le calculateur et ses périphériques; une entrée désigne un transfert d'un périphérique vers l'ordinateur; une sortie désigne un transfert de l'ordinateur vers un périphérique. *Unité d'entrée-sortie :* organe chargé d'effectuer ces transferts.

entropie. *n.* En informatique, information moyenne fournie par une source.

épitaxie. *n.* Procédé technologique permettant de faire croître un monocristal à partir d'un support monocristallin.

ergodicité. *n.* Propriété de fonctions aléatoires où les moyennes temporelles sont identiques aux moyennes statistiques.

étalonnage. *n.* En photographie, opération de laboratoire précédant le tirage et qui consiste à déterminer l'intensité de lumière ainsi que les corrections de couleur à apporter au négatif afin d'obtenir des images positives correctes en densité et en contraste.

état d'imprimante ou **liste,** ou **listing.** Nom donné à une feuille d'imprimante contenant des résultats fournis par un ordinateur.

évolué (langage). Langage théoriquement indépendant de la structure des ordinateurs; il permet l'écriture, par exemple, de formules mathématiques sans que l'utilisateur ait à se préoccuper des ordres en langage machine correspondants. Les principaux langages évolués sont : ALGOL, FORTRAN, APL et LISP pour les applications scientifiques, et PL 1 et COBOL pour les applications de gestion.

extensométrie. *n.* Métrologie appliquée à la mesure des déformations. Les jauges de contrainte sont souvent appelées aussi jauges d'extensométrie.

extracteur. *n.* Étage final d'un sonar sophistiqué permettant, par comparaison entre plusieurs émissions successives, de simplifier la tâche de l'opérateur en ne retenant que les cibles intéressantes, d'en calculer avec précision la trajectoire et la vitesse et éventuellement de commander un système d'orientation d'armes.

F

fac-similé. *n.* Dans la presse, transmission de pages de journal par ligne téléphonique pour qu'elles soient imprimées dans un atelier éloigné de l'imprimerie de composition.

fading. *n.* Terme désignant les fluctuations périodiques du niveau de réception, sensibles dans certains cas de mauvaises transmissions de l'onde radioélectrique.

feeder. *n.* Ligne assurant la transmission du courant haute fréquence entre l'émetteur et l'antenne.

ferrite. *n.* Matériau en céramique ou fritté, présentant une forte susceptibilité magnétique ainsi qu'une faible *hystérésis*, employé dans les circuits magnétiques à haute fréquence (antennes miniatures des récepteurs portatifs, noyaux de bobinage, ...).

fiabilité. *n.* Degré de confiance que l'on peut accorder à un dispositif.

fichier. *n.* Catalogue établi sur fiches, chaque document étant représenté par une ou plusieurs fiches selon le nombre d'entrées choisi.

filtrage adapté. Filtrage électronique centré sur la fréquence d'émission (pour un sonar) et permettant de réduire les bruits de provenances diverses (bruit marin, bruit électronique) pour ne garder que le signal utile.

filtre. *n.* Lame transparente, en verre ou en gélatine, qui absorbe les radiations lumineuses correspondant à la couleur complémentaire de la sienne propre.

filtre linéaire. En théorie du signal, système linéaire à une entrée et une sortie, destiné par exemple à isoler une fréquence.

firmware. *n.* Terme désignant la partie du logiciel très dépendante du matériel.

fixage. *n.* Opération permettant d'éliminer les sels d'argent devenus inutiles après le développement de l'image photographique. Le *fixateur* est constitué d'une solution d'hyposulfite de sodium ou d'ammonium.

fluorescence. *n.* Rayonnement émis, avec un spectre caractéristique de la cible, par un corps excité par un rayonnement incident (rayons X par exemple).

flux lumineux. Produit du flux énergétique (puissance transportée) par le coefficient de sensibilité de l'œil pour une longueur d'onde donnée; il se mesure en lumens.

focale. *n.* et *adj.* La distance focale d'un objectif est la distance qui sépare son centre optique de son foyer image.

fonction aléatoire. Fonction d'un paramètre (généralement le temps), dont la réalisation dépend du tirage d'une expérience.

fonction aléatoire du second ordre. Fonction aléatoire dont le second moment existe.

fonction intensité. Fonction à deux arguments x_1y_1, représentative de l'intensité lumineuse au point de coordonnées (x, y) du plan d'une image. Si l'image est colorée, la fonction intensité est un vecteur à trois composantes, l'une pour le bleu, l'autre pour le rouge et la troisième pour le vert.

format. *n.* Le format d'un film correspond à la largeur de la pellicule. Le format d'image, indépendant de celui du film, est caractérisé par le rapport de la largeur de l'image à sa hauteur : $F_{image} = \frac{L}{H}$.

formation de voies. Appareillage électronique d'un sonar, permettant d'analyser simultanément les échos venant de toutes les directions.

forme. *n.* Nom donné à un ensemble de caractères précisant une configuration particulière (portion de signal, partie d'image, ...).

Foucault (courants de). Courants induits dans un matériau soumis à un champ magnétique variable.

G

gain d'une antenne. Rapport entre l'énergie émise par une antenne dans une direction donnée et celle qui serait émise dans cette direction par une antenne omnidirectionnelle ou isotrope.

galène. *n.* Minerai de sulfure de plomb dont une variété présente des propriétés analogues à celles d'une diode électronique, au niveau du contact avec une aiguille métallique. Le cristal de galène assurait la détection de la modulation d'amplitude dans beaucoup des premiers postes de T.S.F.

gammagraphie. *n.* Méthode de contrôle fondée sur l'affaiblissement de l'intensité des rayons γ par la matière qu'ils traversent.

gélatine. *n.* Protéine constituant le liant des couches sensibles en photographie.

génération d'ordinateurs. Période de l'histoire des ordinateurs caractérisée par un certain degré de l'évolution de la technologie. On distingue actuellement quatre générations, de la naissance de l'ordinateur à nos jours.

germanium. *n.* Élément semi-conducteur, qui a été le plus couramment utilisé au début de l'ère des transistors. De moins en moins utilisé.

grammage. *n.* Se définit comme la masse de papier par unité de surface. Il est donné en grammes par mètre carré.

grandeur. *n.* Paramètre physique, chimique, biologique, etc., utilisé pour décrire, seul ou avec d'autres, l'état d'un système, essentiellement représentable par un nombre associé à un nom d'unité. *Ex. :* 32 V, 47 °C.

H

Hall (effet). Champ électrique induit par l'action d'un champ magnétique sur des particules chargées en mouvement.

Hard Copy Unit. Dispositif permettant la photocopie automatique d'un écran de visualisation.

hardware (matériel). Désigne l'ensemble de tous les dispositifs physiques de l'ordinateur — le corps — par opposition au *software* (logiciel) qui désigne l'ensemble de tous les programmes — la matière grise.

haute fidélité (abréviation anglaise : **Hi-Fi**). Label de qualité décerné à un matériel de reproduction sonore répondant à certaines normes (normes Siere, DIN 45500, ...).

héliogravure. *n.* Procédé d'impression « en creux ». Des alvéoles de profondeur inégale, ménagés par l'attaque de l'acide sur un cylindre de cuivre, reçoivent l'encre qui est appliquée sur le papier.

hémicelluloses. *n.* Macromolécules végétales, voisines de la cellulose, de degré de polymérisation moins élevé. Les motifs principaux qui constituent les chaînes sont le glucose, le mannose et le xylose.

hémiédrie holoaxe. Caractérise le rapport entre les symétries des faces du cristal et celles du réseau des atomes ou des molécules qui le constituent.

hexadécimal. *adj.* Utilisant la base de numération 16; symboles utilisés : 0, ..., 9, A, ..., F.

humidité (d'un papier). Teneur en eau du papier.

hydrophone. *n.* Capteur de pression qui transforme les ondes sonores sous-marines qu'il reçoit en courant ou en tension électrique. C'est l'analogue, dans l'eau, du microphone.

hygrométrie. *n.* Métrologie appliquée à l'humidité de l'air.

hyperfocale. *n.* et *adj.* Lorsqu'on effectue la mise au point sur la distance hyperfocale, la profondeur de champ s'étend d'une distance égale à la moitié de l'hyperfocale jusqu'à l'infini. L'hyperfocale est définie à l'aide de la tolérance de netteté linéaire ρ par :

$$\overline{OP} = \frac{f^2}{\rho N}$$

hypergonar. *n.* Dispositif optique anamorphoseur mis au point en 1928 par le professeur Chrétien; il se présentait sous la forme d'un système optique afocal constitué de deux lentilles convergentes et divergentes.

hystérésis. *n.* Phénomène traduisant la dépendance de l'intensité d'aimantation, non seulement par rapport au champ appliqué mais aussi par rapport aux états d'aimantation antérieurs.

I - J

image binaire. Image obtenue après représentation d'une image à l'aide d'une fonction intensité ne prenant que deux valeurs 1 et 0 (par exemple, pour le noir et le blanc).

image latente. Enregistrement invisible de l'image photographique lors de l'exposition. L'image latente, qui se forme à la surface ou à l'intérieur des cristaux d'halogénure d'argent, se présente sous la forme de nombreuses agglomérations d'atomes d'argent.

impédance. *n.* Généralisation de la notion de résistance pour les circuits utilisés en alternatif, pour tenir compte des déphasages introduits par les inductances ou les condensateurs.

imprimante. *n.* Dispositif permettant de frapper simultanément tous les caractères d'une ligne sur une ou plusieurs feuilles de papier. Commandée par ordinateur, une imprimante peut écrire de plusieurs centaines à plusieurs milliers de lignes par minute.

incrémenter. *v.* Ajouter 1 à un nombre.

indexation. *n.* En informatique, mode d'adressage utilisant un registre d'index pour stocker l'*adresse* d'un opérande.

indexé (accès). Méthode d'organisation d'un fichier d'ordinateur; les adresses sur le support des enregistrements du fichier sont consignées dans un tableau. Pour accéder à un enregistrement, on explore le tableau d'index, puis on traite directement l'information sur le support à l'adresse indiquée. *Accès séquentiel indexé :* le tableau d'index ne contient pas toutes les adresses; on recherche donc l'adresse de l'enregistrement précédant celui recherché, et on explore le fichier à partir de celui-ci; cette organisation suppose que les enregistrements sont ordonnés séquentiellement.

indicateur panoramique (P.P.I., Panoramic Plane Indicator). Système de visualisation des échos radar sur un écran analogue à celui d'un oscilloscope. La tension de wehnelt est modulée par le signal reçu par le radar après détection et amplification.

indirection. *n.* Mode d'adressage où l'opérande est désigné par son adresse et non par sa valeur.

induction magnétique. Grandeur caractérisant l'action du champ magnétique sur la matière, égale au produit du champ par la perméabilité du matériau.

inégalité de Kraft. Condition d'existence d'un code instantané.

information. *n.* Éléments pouvant être transmis par un signal. La formalisation mathématique de ce concept a été réalisée par Shannon et porte le nom de *Théorie de l'information.*

information mutuelle. Étant donné deux ensembles de messages X et Y, différence de l'entropie de X (H (X)) avec l'entropie conditionnelle de X par Y (H (X/Y)). Cette quantité caractérise l'information échangée entre X et Y.

instantané. *adj.* Propriété d'un code tel qu'aucun mot-code n'est préfixe d'un autre.

instrumentation. *n.* Description des instruments et des techniques de mesure.

intelligence artificielle. Expression désignant en fait plusieurs techniques : reconnaissance des formes, traitement d'images, théorie de la décision, démonstration de théorèmes, ...

intensité d'aimantation. Appelée également *aimantation* ou *polarisation magnétique*, c'est le quotient du moment magnétique induit dans la matière par le champ magnétique inducteur.

intercepteur. *n.* Sonar spécial permettant la détection rapide et sûre ainsi que la mesure des paramètres des émissions sonar adverses (émission de torpilles, identification de bateaux).

interface. *n.* Dans un ordinateur, dispositif de communication et de traduction entre les périphériques et l'unité centrale.

ionosphère. *n.* Région de la haute atmosphère s'étendant approximativement entre 60 et 600 km d'altitude et dont les propriétés électriques permettent la réflexion des ondes radioélectriques.

jauge de contrainte. Élément ou dispositif utilisé pour mesurer une force, une pression ou une déformation.

justification. *n.* Terme d'imprimerie; répartition des espaces entre les mots, de manière à obtenir une dimension unique pour toutes les lignes d'un même texte.

K - L

Kerr (cellule de). Dispositif électro-optique permettant de modifier la polarisation de la lumière, par l'action d'un champ électrique sur un liquide.

kraft. *n.* Qualifie le procédé de délignification chimique, réalisé à chaud par une solution contenant de la soude et du sulfure de sodium.

Lambert (loi de). On dit d'une source qu'elle rayonne suivant la loi de Lambert si sa luminance est égale dans toutes les directions : on a donc, entre son excitance M et sa luminance L, la relation $M = \pi L$.

lampe à arc. Lampe de projection dans laquelle la décharge est entretenue entre deux bâtonnets de charbon fortement minéralisé.

lampe à décharge. Lampe dans laquelle la décharge a lieu entre deux électrodes à l'intérieur d'une ampoule à haute pression gazeuse.

lampe à incandescence. Lampe dans laquelle le rayonnement lumineux provient de l'incandescence d'un filament de tungstène traversé par un courant électrique.

langage machine. Ensemble de toutes les configurations de chiffres binaires constituant les codes des instructions exécutables par la machine.

lecteur de cartes, de rubans. Périphérique spécialisé dans la transmission à l'ordinateur des informations codées sur les cartes perforées ou les rubans papier.

lecture publique. Expression qui désigne l'ensemble des actions et méthodes bibliothéconomiques (*voir* bibliothéconomie) destinées à favoriser l'accès du grand public à la lecture et à l'information.

lecture sonore. L'ensemble de lecture sonore, composé d'une source lumineuse, d'un système optique condenseur, d'une fente de lecture et d'une cellule photo-électrique, traduit les variations de densité photographique en variations de courant électrique.

lentille électrostatique. Dispositif d'électrodes auxquelles est appliqué un champ électrique destiné à dévier la trajectoire des électrons de manière à focaliser le faisceau. Par analogie avec les lentilles qui dévient les faisceaux lumineux.

light-pen. *n.* Crayon lumineux permettant la désignation sur un écran d'un caractère ou d'un point.

ligne à retard. Circuit utilisé pour allonger le temps de propagation d'un signal (donc le retarder). Les lignes à retard peuvent être de natures très différentes : à composants électroniques, électrostrictives, par ultrasons, etc.

lignine. *n.* Composé donnant au bois sa rigidité; sa formule brute la plus représentative est $C_9H_9O_2$—OCH_3. La molécule contient un cycle aromatique, mais sa structure est loin d'être connue avec précision.

liste ou **listing.** *n. Syn.* d'état d'imprimante.

littérature souterraine. Ensemble des documents circulant hors commerce et donc très difficiles à recenser, tels que rapports, études, préprints (*voir* ce terme).

logiciel. *n.* Ensemble de programmes écrits pour une machine *(software)* ou une application *(package)*.

logique (unité). Organe de l'ordinateur effectuant, sous le contrôle de l'unité de commande, les opérations logiques (ET, OU, NON, etc.).

L.S.I. (Large Scale Integration). Nom donné à la technologie réalisant sur une faible surface de support de très nombreux composants électroniques (exemple d'une mémoire de 2 024 bits sur une pastille de quelques millimètres carrés).

luminance. *n.* 1° Quotient de l'intensité lumineuse émise par une surface, par l'aire de cette surface pour un observateur éloigné. 2° En télévision en couleurs, le signal de luminance traduit les variations de brillance de l'image. 3° Le facteur de luminance d'un écran cinématographique est défini par le rapport des luminances que présentent dans l'axe de projection respectivement l'écran et un échantillon blanc étalon appliqué parallèlement à l'écran en son centre.

lumination. *n.* Appelée aussi *éclat apparent*, la lumination est le produit de l'éclairement par la durée d'exposition.

lumen. *n.* Unité de flux lumineux.

luminophore. *n.* Désigne la couche déposée à l'intérieur du tube cathodique et qui est composée de substances émettant sur l'écran une lumière de longueur d'onde spécifique sous l'impact des électrons.

lux. *n.* Unité d'éclairement. Un lux correspond à un flux d'un lumen éclairant une surface de 1 m^2.

M

machine à écrire. En informatique, *syn.* de console.

magnétorésistance. *n.* Effet physique provoquant une variation de résistance par l'action d'un champ magnétique.

magnétoscope. *n.* Appareil d'enregistrement sur bande magnétique des images de télévision et du son associé.

magnétoscopie. *n.* Méthode de contrôle qui étudie les défauts d'un matériau grâce aux déformations des lignes de force magnétiques.

masse spécifique. Masse d'un corps de volume unité.

matériel. *n. Syn.* de hardware.

matrice syndrome. Matrice de contrôle d'un code à contrôle de parité dont la connaissance permet de détecter et/ou de corriger des erreurs.

media. *n.* Supports. Ce terme est généralement employé pour désigner les nouveaux supports de l'information, par opposition au papier et autres supports anciens ou traditionnels (papyrus, parchemin, tissus, bois, pierre...). Parmi ces nouveaux supports, citons les images fixes : photographies, diapositives, transparents; les images animées : films, bandes vidéo, montages audio-visuels; les supports sonores : disques, cassettes, bandes magnétiques; les microsupports (*voir* microformes).

mémoire. *n.* Dans un ordinateur, organe de conservation de l'information sous forme binaire. L'élément de base est un organe à deux états stables, l'un conservant le « 1 », l'autre le « 0 ».

mémoire centrale. Dispositif contenant, au moment de son exécution, les instructions et les données d'un programme.

mémoire cinématique. Mémoire non adressable, où l'information est stockée aussi longtemps que désiré.

mémoire dynamique. Mémoire où l'information doit être périodiquement régénérée.

mémoire de masse. Support d'information magnétique (disques, bandes magnétiques, tambours et feuillets).

mémoire morte. Mémoire à lecture seule.

mémoire MOS. Mémoire dont la cellule de base est constituée de semi-conducteurs MOS. Ces mémoires, atteignant une forte densité d'intégration, sont de plus en plus utilisées.

mémoire permanente. Mémoire où l'information ne peut être modifiée par une opération d'écriture.

mémoire PROM. (Programmable Read Only Memory). Mémoire morte que l'utilisateur peut coder lui-même.

mémoire RAM. (Random Access Memory). Mémoire vive adressable.

mémoire ROM. (Read Only Memory). Mémoire morte dont l'écriture est assurée par le fabricant.

mémoire statique. Mémoire adressable où l'information est stockée aussi longtemps que désiré.

mémoire vive. Mémoire où l'information peut être modifiée.

métrologie. *n.* Science de la mesure. Elle étudie les méthodes de mesure et évalue leur précision ainsi que la technologie et les performances des instruments effectuant les mesures.

microforme ou **microsupport.** *n.* Ce terme désigne les microfilms et microfiches, c'est-à-dire les documents reproduits sur films à un format très réduit, ce qui permet un gain considérable en surface de stockage et en coûts de duplication.

micro-informatique. *n.* Étude et réalisation de dispositifs miniaturisés.

micro-ordinateur. *n.* Ordinateur élaboré autour d'un microprocesseur.

microprocesseur. *n.* Circuit monolithique réalisant les fonctions d'une unité centrale.

mire. *n.* Ensemble de signaux utilisés en télévision pour régler les circuits des récepteurs. La mire apparaît sur l'écran sous des formes variées comportant des figures circulaires et des barres alternées de largeurs différentes, plus ou moins noires ou de couleurs diverses.

miroir dichroïque. Miroir dont le taux de réflexion varie avec la longueur d'onde de la lumière qu'il reçoit.

mode d'accès aléatoire. Mode de lecture d'une mémoire tel que le temps d'accès est constant, quelle que soit l'adresse de stockage. Ce terme est utilisé dans le cas de mémoires adressables.

mode d'accès séquentiel. Mode de lecture des mémoires non adressables. Le temps d'accès dépend de l'endroit où l'information est stockée. Ce mode d'accès est, par exemple, celui des mémoires à ruban magnétique.

modulateur-démodulateur (MODEM). Organe chargé de la conversion des signaux entre un ordinateur et une ligne de transmission.

modulation. *n.* Variation, suivant une loi imposée dans le temps, d'une caractéristique d'un signal électrique (amplitude, phase, fréquence).

module. *n.* Automate ou programme autonome réalisant une fonction élémentaire précise.

module objet. En informatique, résultat de la compilation d'un texte, ne pouvant être exécuté qu'après l'*édition des liens*.

module piézo-électrique. Rapport k entre la charge électrique Q résultant de l'application d'une force F sur les deux faces d'une plaquette cristalline : $Q = kF$.

moniteur. *n.* Ensemble des modules d'un système informatique assurant la prise en compte des programmes et leur enchaînement.

monochromatique. *adj.* La couleur de la lumière étant liée à sa longueur d'onde (λ) ou à sa fréquence (f) : $\lambda = c/f$, monochromatique est synonyme de « composé d'une seule fréquence ».

monoprogrammation. *n.* Utilisation d'un ordinateur pour un seul programme; l'exécution d'un programme P_2 ne peut commencer que lorsque le programme P_1 est terminé.

monopulse (poursuite angulaire par). Procédé qui consiste à effectuer des mesures angulaires en traitant chaque impulsion de retour de la cible par une antenne à directivité multiple.

MOS. (Metal Oxyde Semiconductor). Transistor à effet de champ, où la grille est isolée du canal par une couche isolante. Cet élément est actuellement très utilisé dans les mémoires.

mot. *n.* Dans une mémoire, assemblage de bits permettant de représenter une entité (code d'instruction, valeur numérique,...). Actuellement, les longueurs des mots sont fréquemment des multiples d'un octet.

MTI. (Moving Target Indicator) ou **VCM. (Visualisation des Cibles Mobiles).** Procédé fondé sur la séparation de deux cibles par leurs fré-

quences Doppler et qui permet de distinguer une cible mobile dans un milieu d'échos fixes.

multiplexage. *n.* Méthode permettant l'utilisation d'une même ligne pour transmettre simultanément plusieurs informations.

multiprogrammation. *n.* Utilisation d'un ordinateur par plusieurs programmes; le programme P_2 s'exécute lorsque le programme P_1 est momentanément suspendu.

myriamétrique. *adj.* Dont la longueur s'exprime en dizaines de kilomètres; les ondes myriamétriques étaient très employées aux débuts de la radiodiffusion.

N

nat. *n.* Unité de mesure de l'information lorsqu'on utilise les logarithmes naturels dans la formule de Shannon.

NTSC. Initiales du nom d'un procédé de transmission des images en couleurs, « National Television System Committee ».

O

objectif. *n.* L'objectif photographique (ou cinématographique) est un système optique convergent, constitué d'un assemblage de lentilles, qui assure la restitution correcte de l'image d'un objet sur la surface sensible.

obturateur. *n.* La fonction d'un obturateur de caméra consiste à intercepter le faisceau lumineux provenant de l'objectif lors du déplacement du film et à permettre son libre passage pendant l'immobilisation de ce dernier. Dans un appareil photographique, l'obturateur assure la régulation du flux lumineux incident.

octal. *adj.* Utilisant la base de numération 8; symboles utilisés : 0, ..., 7.

octet. *n.* Ensemble de huit bits.

offset. *n.* Procédé d'impression « à plat », qui a pour base la répulsion de l'eau et des matières grasses. L'origine du mot « offset » (mot à mot : décalque) vient en fait de la position, entre la forme imprimante et le papier, d'un cylindre de caoutchouc (blanchet) qui reporte l'encre de la plaque sur le papier.

oligo-élément. *n.* Bien qu'en très faible concentration, les oligo-éléments, qui sont des métaux ou des métalloïdes, semblent indispensables à la vie des êtres des différents règnes.

ordinateur. *n.* Il est formé de la réunion de l'unité centrale, de la mémoire centrale et des unités d'entrées-sorties.

orthochromatique. *adj.* Les émulsions orthochromatiques ont une sensibilité limitée aux radiations violettes, bleues, vertes et jaunes du spectre visible.

oscillographe Blondel. Dispositif permettant de visualiser de petites variations d'un courant électrique, par déviation, à l'aide d'un miroir solidaire d'un cadre de galvanomètre, d'un pinceau lumineux.

ouverture relative. L'ouverture relative d'un objectif détermine la quantité de lumière susceptible d'impressionner la surface sensible. Elle est donnée par la relation $\frac{I}{N} = \frac{O}{f}$ dans laquelle O caractérise le diamètre d'ouverture de la pupille d'entrée.

P

package. *n.* Ensemble de programmes écrits pour une application donnée.

paire électron-trou. Le passage du courant électrique dans les semi-conducteurs est limité par le faible nombre des porteurs de charge en liberté. Quand on libère un électron d'un atome, il se déplace dans le réseau pour participer à la conduction. Le trou qu'il a laissé à sa place peut être comblé par un autre électron libre. Le trou participe donc aussi à la conduction.

PAL. Initiales du nom d'un procédé de transmission des images en couleurs, « Phase Alternative Line ».

panchromatique. *adj.* Les émulsions panchromatiques ont une échelle de sensibilité qui s'étend sur tout le spectre visible. Leur courbe de sensibilité spectrale dépend en grande partie de la nature des sources lumineuses utilisées.

papier. *n.* Support de l'information écrite, obtenu par broyage de fibres de cellulose. Sa qualité varie en fonction de la quantité de cellulose pure qu'il contient. Les *papiers chiffons*, fabriqués à partir de fibres de lin, de coton ou de chanvre, sont d'une excellente qualité.

papyrus. *n.* Support de l'information écrite, obtenu par traitement de l'écorce d'un roseau de grande taille, le papyrus, qui lui a donné son nom. Utilisé dans l'ancienne Égypte, puis dans le monde romain et dans le monde occidental jusqu'au XII^e^ siècle, il a donné son nom au papier bien qu'il s'agisse d'une matière tout à fait différente.

parallaxe. *n.* Décalage de l'image enregistrée par rapport à l'objet visé, s'il est très rapproché, lorsque le système de visée n'est pas reflex.

parchemin. *n.* Cuir traité, qui a servi de support à l'information à partir du III^e^ siècle de notre ère, époque à laquelle fut inventé le procédé de traitement des peaux à Pergame (d'où le nom de *pergamentum*, parchemin), et durant tout le Moyen Age.

parité (bit de). Bit associé à un mot ou un octet servant à détecter les erreurs survenant dans ce mot ou cet octet.

pâte chimique. Pâte à papier obtenue après un traitement chimique du bois visant à la dégradation de la lignine.

pâte mécanique. Pâte à papier obtenue par un traitement mécanique du bois.

perceptron. *n.* Organe de classification adaptatif, dont le principe a été donné par Rosenblatt en 1958.

perforateur de cartes, de rubans. Périphérique permettant, sous contrôle de l'ordinateur, la perforation d'informations sur cartes ou sur rubans.

période de récurrence d'un émetteur radar. Durée entre deux trains d'impulsions émis.

périphérique. *n.* Organe d'entrée ou/et de sortie connecté à un ordinateur.

perméabilité magnétique. Quotient de l'induction magnétique et du champ magnétique qui la crée ($B = \mu H$) ; dépend du matériau considéré.

Petzval. Objectif cinématographique particulièrement utilisé sur les appareils de projection. L'objectif de type Petzval se compose, dans sa version simple, de deux blocs de lentilles dissymétriques, la combinaison postérieure étant traversée par un espace d'air.

pH. Logarithme décimal, changé de signe, de la concentration en ions hydrogène. Sert à définir l'acidité.

phosphorescence. *n.* Émission de lumière par des corps froids.

photocomposition. *n.* Composition des textes selon le procédé photographique.

photodiode. *n.* Dispositif semi-conducteur constituant une diode dont le courant inverse de fuite varie en fonction du flux lumineux qu'il reçoit.

photo-électricité. *n.* Modification des caractéristiques électriques de la matière sous l'action de la lumière.

photogravure. *n.* Procédé d'illustration des textes typographiques. L'application des principes de la photographie permet d'obtenir des plaques de zinc gravées dont le relief restitue l'image à reproduire.

photon. *n.* Élément d'énergie lumineuse exprimant l'aspect corpusculaire des ondes électromagnétiques.

photopile. *n.* Dispositif aux bornes duquel apparaît, quand il est éclairé, une force électromotrice liée au flux lumineux reçu.

photorésistance. *n.* Élément dont la résistance électrique varie en fonction du flux lumineux qu'il reçoit.

phototransistor. *n.* Dispositif semi-conducteur constituant un transistor dont le courant est commandé par le flux lumineux qu'il reçoit.

piézo-électricité. *n.* Apparition de charges électriques dans certains corps soumis à une pression ou à une déformation.

piste. *n.* Zone située devant la tête de lecture d'un disque ou d'un tambour magnétique.

pleurage. *n.* Variations lentes de la vitesse de rotation d'un disque ou de la vitesse de défilement d'une bande magnétique, qui se traduisent par une déformation très désagréable du son.

plot. *n.* Groupe d'échos issus d'une même cible et intégrés.

plumbicon. *n.* Tube de prise de vues ou analyseur d'images fonctionnant suivant un principe identique à celui du *Vidicon*, mais dont la couche photosensible présente de meilleures caractéristiques de fonctionnement.

polarisation de la lumière. La vibration des ondes électromagnétiques constituant la lumière, au lieu de se faire dans tout le plan perpendiculaire à la direction de propagation, ne se fait que dans une seule direction.

polynôme générateur. Polynôme à coefficients 0 ou 1, dont la connaissance permet de générer les polynômes correspondant aux mots-codes d'un code cyclique.

pont de Wheatstone. Circuit électrique à quatre branches servant à détecter un équilibre entre deux paires de résistances ou d'impédances.

Porro (prisme de). Système optique redresseur composé de deux prismes rectangulaires isocèles croisés à angle droit. Cet ensemble produit une inversion complète des images tout en donnant aux rayons émergents leur direction d'incidence.

porteuse. *n.* Onde de haute fréquence permettant le transport de l'information par modulation de son amplitude ou de sa fréquence.

pouvoir discriminateur en distance. Pouvoir de séparer par le traitement deux signaux (supposés de même vitesse radiale) issus d'objets voisins.

pouvoir discriminateur en vitesse. Pouvoir de séparer par le traitement deux signaux issus d'objets de vitesses radiales proches (les objets sont supposés rester à la même distance).

pouvoir rotatoire. Le pouvoir rotatoire d'une substance caractérise le fait qu'elle fait tourner le plan de polarisation de la lumière qui la traverse.

pouvoir thermo-électrique. Variation de la force électromotrice d'un couple thermo-électrique en fonction de la différence de température appliquée entre les deux soudures.

ppm. « Parties par million »; une teneur peut s'exprimer en ppm.

prémagnétisation. *n.* Procédé consistant à superposer au champ de modulation d'une tête de magnétophone un champ alternatif ultrasonore, afin d'améliorer la qualité de l'enregistrement.

préprint. *n.* Document non encore édité mais destiné à l'être. Appartient à ce que l'on appelle la littérature souterraine (*voir* cette expression).

principe de Maxwell. Fondement de la synthèse trichrome. Il se subdivise ainsi : choix des trois primaires de la restitution (rouge, vert, bleu) ; étalonnage du spectre à l'aide de ces primaires (fonction de mélange) ; sélection (sensibilités spectrales proportionnelles aux fonctions de mélange) ; restitution à l'aide des primaires choisies (positifs).

probabilité de détection. En présence d'un signal utile, c'est la probabilité pour que l'amplitude du signal composite soit plus grande que l'amplitude du seuil.

probabilité d'erreur. 1° Probabilité de transmission d'un symbole ou d'un message erroné dans un système de transmission. 2° Probabilité de mauvais classement d'une forme en reconnaissance des formes.

probabilité de fausse alarme. En absence de signal utile, un signal aléatoire peut dépasser en amplitude le niveau de détection fixé arbitrairement et appelé *seuil de comparaison*. La *probabilité de fausse alarme* est la probabilité pour que l'amplitude de ce bruit dépasse l'amplitude du seuil.

procédé EPIC. Procédé permettant d'isoler des zones les unes des autres dans un monocristal.

profondeur de champ. En photographie, zone qui s'étend en deçà et au-delà de la distance de mise au point et à l'intérieur de laquelle la netteté peut être considérée comme acceptable.

programme. *n.* Suite d'instructions destinées à un ordinateur.

projecteur (acoustique). Émetteur sonore sous-marin qui transforme l'énergie électrique qu'il reçoit en ondes acoustiques. C'est l'équivalent, dans l'eau, du haut-parleur dans l'air.

projecteur (optique). Appareil de projection. Il assure la restitution synchrone des images et des sons enregistrés lors de la prise de vues.

pyromètre. *n.* Appareil utilisé pour la mesure des températures par comparaison optique de la surface du corps dont on veut connaître la température avec un filament chauffé.

R

radar secondaire. Système émetteur en relation bilatérale avec une cible équipée d'un dispositif qui détecte l'onde émise et renvoie cette énergie après amplification.

raffinage. *n.* Lors de la fabrication du papier, traitement mécanique de la pâte, qui sépare les fibres et libère les fibrilles ; celles-ci sont des agrégats de chaînes cellulosiques.

rapidité. *n.* Désigne la sensibilité générale des émulsions photographiques. Le terme s'explique par la relation liant la sensibilité à la durée d'exposition à la lumière.

réaction (électronique). Application à l'entrée d'un système électronique d'une partie du signal de sortie. Si ce dernier est en opposition de phase avec le signal d'entrée, il s'agit d'une contre-réaction.

recherche documentaire. La recherche documentaire ou bibliographique est la recherche des références des documents existants, sur tel ou tel sujet. Cette activité est désignée également sous le terme de *documentation*.

réciprocité (acoustique). Capacité d'un transducteur à fonctionner à la fois en émission et en réception. Cet effet est souvent utilisé dans les antennes de sonar pour diminuer l'encombrement.

réciprocité (effet de). Défaut d'intégration qui caractérise l'absence de réciprocité entre la valeur du flux parvenant sur la surface sensible et la durée de son action.

reconnaissance des formes. Branche de la science et de la technologie dont le but est le développement d'outils permettant une discrimination de signaux, d'images.

récursivité. *n.* En informatique, possibilité pour un sous-programme de s'appeler lui-même.

redondance. *n.* Pour un code, complément à 1 de l'efficacité.

réentrance. *n.* Possibilité pour un sous-programme d'être partagé entre plusieurs utilisateurs.

registre. *n.* Mot spécialisé de la mémoire à accès rapide et siège d'instructions spéciales.

registre à décalage. Dispositif synchrone qui permet de mémoriser des séquences de symboles et de les déplacer à raison d'une position par impulsion appliquée.

règle de la distance minimum. Règle de décodage, qui associe à un message reçu le mot-code le plus proche au sens de la distance de Hamming.

règle du *k*-ième voisin le plus proche. Règle de classification non paramétrique, qui consiste à rechercher les *k* voisins les plus proches de la forme à classer et à attribuer cette forme à la classe la plus représentée dans ces *k* voisins.

relief. *n.* Phénomène physiologique, principalement donné par la vision binoculaire, chaque rétine recueillant deux images distinctes d'un même objet. En cinéma, le procédé stéréoscopique utilise cette particularité en différenciant à la prise de vues et à la projection les différents couples d'images.

réluctance. *n.* Dans un circuit magnétique, quotient de la force magnétomotrice par le flux d'induction.

renforcement. *n.* Traitement mathématique effectué sur une image dans le but de faire apparaître les arêtes des objets.

répertoire bibliographique. Ouvrage recensant les livres ou articles de périodiques édités pendant une période donnée dans un pays ou sur un thème donné. Les répertoires bibliographiques sont aussi appelés bibliographies (*voir* ce terme).

réseau de bibliothèques. Groupement d'organismes de documentation (bibliothèques ou centres de documentation) qui coopèrent afin d'améliorer la qualité du service rendu à leurs utilisateurs. Actuellement, cette expression désigne généralement des réseaux dont les organismes membres sont reliés par téléinformatique et peuvent échanger des informations « en conversationnel », c'est-à-dire en direct. L'échange peut se limiter aux références (*voir* réseau documentaire), ou s'élargir à une gestion en coopération, avec la constitution de catalogues collectifs réalisés « en partage » par l'ensemble des membres participants.

réseau documentaire. Groupement d'organismes de documentation (*voir* réseau de bibliothèques) dont l'activité est axée sur l'échange de références, comme, par exemple, le réseau MEDLARS (ou MEDLINE dans sa forme automatisée), le réseau de l'Agence spatiale européenne, ou encore les réseaux organisés autour de Lockheed Missile Systems ou de System Development Corporation Search Service.

résistance de rayonnement. Quotient de la puissance moyenne rayonnée par une antenne, par le carré de l'intensité du courant qui la parcourt.

ressuage. *n.* Procédé de détection des défauts qui débouchent à la surface d'une pièce mécanique, par l'utilisation de produits mouillants.

rétrofocus. *n.* Objectif de courte focale disposant d'un *tirage* très important. Cette particularité est due à la présence d'un ensemble frontal divergent de grand diamètre séparé nettement du système arrière convergent.

réverbération. *n.* Bruit très gênant pour les systèmes sonar ; il est provoqué par la diffusion de l'onde émise sur des particules en suspension dans l'eau, par des bulles, des poissons, ou sur la surface et le fond. Une partie de l'onde émise est ainsi renvoyée sur le récepteur. On peut en limiter l'inconvénient en effectuant un traitement approprié du signal (traitement cohérent).

rhomboédrique (système). Système de cristallisation dans lequel les faces principales des cristaux constituent un parallélépipède dont les six faces sont des losanges égaux.

rotative. *n.* Machine à imprimer sur laquelle la forme d'impression, cylindrique, permet le mouvement circulaire continu de la forme.

ruban magnétique. Mémoire constituée d'un ruban recouvert de matériau magnétique défilant devant une tête de lecture-écriture.

rupture de séquence. *Syn.* de branchement.

S

saisie des données. Action ou méthode pour recueillir les données.

scanning (poursuite angulaire par). Exploration conique du lobe d'un aérien, possible grâce à la technique suivante : dans le cas d'un aérien à réflecteur parabolique éclairé par une source *défocalisée*, le lobe d'antenne n'est pas orienté selon l'axe mécanique de l'antenne. Si le cornet tourne autour de cet axe, le lobe de l'aérien tourne aussi autour du même axe.

scintillement. *n.* Fluctuations rapides de la vitesse de rotation d'un disque ou de la vitesse de défilement d'une bande magnétique, entraînant une déformation du son.

scrutateur de données. Dispositif à plusieurs entrées, chargé de recueillir séquentiellement les données.

SECAM. Initiales du nom d'un procédé de transmission des images en couleurs « Séquentiel Couleur à Mémoire ».

semi-conducteur. *n.* Substance dont la conductivité varie de façon considérable avec la température ; les semi-conducteurs deviennent des isolants à très basse température.

sensitométrie. *n.* Branche de la technique photographique qui a pour objet l'étude des propriétés caractéristiques des surfaces sensibles. Elle comprend trois phases : l'exécution des sensitogrammes, l'établissement des courbes caractéristiques et l'exploitation de ces courbes.

séquentiel (accès). Organisation de fichiers où les enregistrements sont ordonnés, et où l'accès à un enregistrement nécessite la lecture préalable de tous ses prédécesseurs.

séquentielle (mémoire). *Voir* mémoire cinématique.

série de Fourier. Série trigonométrique associée à une fonction périodique.

shadow mask. S'applique au tube cathodique couleur qui possède un masque au travers duquel les points *Rouge*, *Vert* et *Bleu* des luminophores ne peuvent être atteints que par un seul des trois canons à électrons.

silicium. *n.* Élément semi-conducteur qui a remplacé le germanium dans la plupart des composants électroniques. Son avantage réside surtout dans de meilleures caractéristiques en fonction de la température. Tous les circuits intégrés fabriqués actuellement utilisent le silicium.

simplifilm. *n.* Trucage cinématographique effectué lors de la prise de vues, qui consiste à remplacer un élément de décor par une photographie de petites dimensions que l'on place tout près de l'objectif de la caméra.

singulier. *adj.* Propriété d'un code dont les mots-codes ne sont pas tous distincts.

software. *Voir* logiciel.

sonar. *n.* Système de détection, de navigation ou de communication utilisant les propriétés de propagation des ondes acoustiques sous-marines.

Contraction de « Sound Navigation and Ranging » (navigation et télémétrie sonores).

soudures chaude et froide. Dans un thermocouple, la soudure froide est maintenue à une température de référence, la soudure chaude étant placée dans l'ambiance de la température à mesurer.

source. *n.* Organe fournissant des messages à transmettre.

spectre. *n.* Désigne le contenu en fréquence (ou longueur d'onde) d'une onde électromagnétique. Une lumière monochromatique a un spectre composé d'une seule raie.

spooler. *n.* Module chargé de la communication avec le lecteur de carte ou l'imprimante dans les systèmes à multiprogrammation.

stationarité. *n.* Qualité d'une fonction aléatoire dont les propriétés statistiques sont indépendantes du temps.

stationarité du second ordre. Qualité d'une fonction aléatoire dont la moyenne est indépendante du temps et dont la fonction d'autocovariance centrée ne dépend que de la différence t_1-t_2.

stéréophonie. *n.* Méthode de reconstitution du champ sonore original à l'aide de deux haut-parleurs situés à gauche et à droite de l'auditeur.

superhétérodyne. *n.* Méthode de décalage en fréquence appliquée à l'entrée des récepteurs de radio ou de télévision avant l'amplification à fréquences moyennes. Utilise un oscillateur local dont la fréquence est modifiée en fonction de celle de la porteuse que l'on veut capter.

support. *n.* Produit constitué de triacétate de cellulose ou de polyester, et qui sert à maintenir l'émulsion photographique.

surface effective ou **surface radioélectrique d'une antenne.** Surface Σ d'un aérien à loi d'éclairement uniforme, telle que, G étant le gain d'une antenne quelconque :

$$\Sigma = \frac{G\lambda^2}{4\,\pi}$$

λ est la longueur d'onde du rayonnement dans le milieu de propagation.

surface équivalente d'une cible. Elle caractérise la faculté de rerayonnement d'une cible. Pratiquement, une cible de surface équivalente σ se comporte comme si elle recevait σ fois la densité d'énergie qui l'éclaire et la réémettait de façon omnidirectionnelle.

surmodulation. *n.* Modulation excessive de l'onde porteuse entraînant une distorsion du signal détecté.

systématique. *adj.* Qualité d'un code à contrôle de parité, dont les chiffres de parité sont simplement concaténés aux chiffres d'information.

système d'exploitation. Ensemble de tous les programmes, généralement fournis par le constructeur, permettant une utilisation aisée de la machine.

T-U

table traçante. Périphérique commandable par l'intermédiaire d'un convertisseur analogique digital et permettant de tracer des courbes sur papier.

tambour magnétique. Mémoire constituée d'un cylindre recouvert d'un matériau magnétique défilant devant des têtes magnétiques.

téléinformatique. *n.* Étude et réalisation de dispositifs et de traitements utilisant un ou plusieurs modulateurs-démodulateurs.

télémètre acoustique. Système de transducteurs permettant de déterminer des distances, soit par écoute du bruit émis par un objet (télémètre passif), soit en mesurant le temps de propagation d'une onde réfléchie (télémètre actif).

téléobjectif. *n.* Objectif de longue focale composé d'un ensemble frontal convergent suivi d'un système divergent qui lui assure un tirage sensiblement réduit.

température de couleur. Température du corps noir incandescent émettant une lumière de cette couleur.

temps d'accès mémoire. Temps nécessaire pour extraire un bit d'information de la mémoire.

temps partagé. Type de multiprogrammation où l'allocation des ressources de l'ordinateur à chacun des utilisateurs se fait par tranches de temps.

temps réel. Type de multiprogrammation où l'allocation des ressources de l'ordinateur se fait par priorités selon les divers utilisateurs.

tétraphonie. *n.* Méthode de reconstitution approchée de l'espace sonore, utilisant quatre haut-parleurs qui entourent l'auditeur.

théorème de Shannon. Théorème célèbre de la théorie de l'information, démontrant qu'on peut réduire autant que désiré la probabilité d'erreur dans une transmission avec bruit sans réduire le taux de transmission à zéro.

thermistance. *n.* Résistance électrique très sensible à la température.

thermoémissif. *adj.* Le pouvoir thermoémissif d'une substance caractérise la quantité de particules chargées (électrons) qu'elle émet quand elle est chauffée.

thermométrie. *n.* Métrologie appliquée aux températures.

thesaurus. *n.* Lexique de termes utilisés comme mots-clefs pour la description du contenu des documents et la réalisation des catalogues et répertoires bibliographiques. Dans un thesaurus, les termes sont sélectionnés, organisés, hiérarchisés, de façon à constituer un langage documentaire plus proche du langage naturel que les codes utilisés dans les classifications.

tomographie. *n.* Procédé ayant pour but d'obtenir une image radiographique claire d'une couche du corps humain.

tore de ferrite. Tore magnétique, élément de base de beaucoup de mémoires d'ordinateur, présentant un cycle d'hystérésis quasi rectangulaire.

train de travaux. Suite de programmes lus séquentiellement par l'ordinateur et exécutés dans l'ordre d'arrivée.

traitement cohérent. Appareillage électrique d'un sonar contrôlant la largeur de la bande passante et la durée des impulsions à l'émission ; exploite ces caractéristiques pour accroître le rapport entre le signal utile et les bruits parasites.

traitement d'images. Ensemble de technique utilisées pour extraire des informations d'images en noir et blanc ou en couleurs.

traitement par lot. Exécution successive de divers trains de travaux.

traitement de surface (d'une lentille). Procédé de réduction des pertes de lumière dues à la réflexion des rayons incidents à la surface des lentilles. Il consiste à effectuer sous vide une projection cathodique de fluorure de métaux légers, d'une épaisseur égale au quart de la longueur d'onde pour laquelle le traitement est réalisé (en général, la raie jaune du sodium de 0,55 μ).

trame. *n.* En télévision, désigne l'ensemble des lignes constituant le balayage d'une demi-image, sur toute la hauteur de l'écran cependant, car le balayage est entrelacé par deux trames successives formant une image.

transducteur. *n.* Élément ou dispositif permettant d'effectuer la conversion d'une grandeur en une autre grandeur. *Ex. :* transducteur piézo-électrique qui convertit une pression en une tension électrique.

transfert. *n.* *Syn.* de branchement, en informatique.

transfert (fonction de). On appelle fonction de transfert d'un système linéaire le rapport des expressions complexes du signal de sortie et du signal d'entrée.

transition. *n.* Modification de l'état énergétique d'un noyau atomique par désintégration ou désexcitation. Lors de la *transition isobarique*, le noyau à l'état final a la même masse atomique que le noyau à l'état initial. La *transition isomérique* concerne le passage d'un état stable à un état instable, avec conservation de la masse et du numéro atomique.

transparence. *n.* Trucage cinématographique qui consiste à projeter derrière un écran les images d'un décor précédemment filmé et à enregistrer simultanément à l'aide d'une caméra ces images et les acteurs qui sont placés devant cet écran.

trichromie. *n.* Propriété de l'œil permettant de reconstituer toutes les couleurs par superposition, en proportions variables, de trois d'entre elles seulement.

triplet. *n.* Objectif anastigmatique mis au point en 1893 par Taylor et qui, à l'origine, se composait d'une lentille centrale divergente entourée de deux lentilles convergentes.

tube autoconvergent. Tube cathodique de télévision en couleurs, dans lequel les canons électroniques sont situés dans un même plan.

tube cathodique. Tube électronique destiné à former une image sur une de ses faces, par bombardement d'une couche luminescente par des électrons fortement accélérés (autre appellation : tube-image).

tube trichrome. Tube cathodique de la télévision en couleurs dont les luminophores sont *Rouge, Vert* et *Bleu*.

typographie. *n.* Ensemble des procédés d'imprimerie utilisant l'assemblage de caractères en relief et, par extension, technique utilisant aussi le plomb.

unité. *n.* Organe de l'ordinateur réalisant une fonction déterminée. *Ex. :* unité centrale, de commande, arithmétique et logique, d'entrées-sorties.

V-W-Z

vidéodisque. *n.* Support en forme de disque utilisé pour la conservation des images de télévision.

vidéofréquence ou **vidéo.** *n.* S'applique aux fréquences dans la bande ordinairement utilisée pour transmettre les images.

Vidicon. *n.* Tube électronique de prise de vues utilisé dans les caméras de télévision. Il contient la surface sensible qui transforme l'image en un signal électrique.

visée reflex. Système de visée qui permet à l'opérateur de voir exactement l'image qui se formera sur la pellicule. Son principe consiste à prélever entre l'objectif et la fenêtre d'impression une partie des rayons lumineux provenant du sujet et à la renvoyer ensuite à l'aide d'un prisme à réflexion totale vers une lunette de visée placée le long de l'appareil.

volume de confusion. Domaine d'espace associé à un radar à l'intérieur duquel deux cibles ne peuvent donner naissance à deux signaux distincts.

wehnelt. *n.* En télévision, électrode d'un canon à électrons, toujours voisine de la cathode, et qui a pour rôle de commander le nombre d'électrons qui pourront passer vers les électrodes de focalisation et sortir du canon. Commande l'intensité de la trace du faisceau électronique sur l'écran du tube cathodique.

Wollaston (prisme de). Inverseur d'images, ce prisme rectangulaire ordinaire n'utilise que les pinceaux lumineux sensiblement parallèles à l'hypoténuse (lunette de visée des caméras).

zoom. *n.* L'objectif à focale variable ou zoom est constitué d'un objectif classique, à l'avant duquel est interposé un système afocal à grandissement variable dont le déplacement est compensé par celui d'un autre groupe mobile (compensation optique ou mécanique).

UNITÉS DE MESURE

Grandeur	Dénomination	Symbole	Équivalences	Dimension
Longueur	mètre mille	m	 1 852 m	L
Aire	mètre carré	m^2		L^2
Volume	mètre cube litre stère	m^3 l st	 10^{-3} m^3 1 m^3	L^3
Masse	kilogramme tonne	kg t	 10^3 kg	M
Temps	seconde	s		T
Fréquence	hertz	Hz		T^{-1}
Vitesse	mètre par seconde nœud	m/s	 1 mille par heure	LT^{-1}
Accélération	mètre par seconde carrée	m/s^2		LT^{-2}
Force	newton dyne	N dyn	 10^{-5} N	LMT^{-2}
Énergie, travail ou quantité de chaleur	joule erg watt-heure calorie thermie frigorie	J Wh cal th fg	 10^{-2} J 3 600 J 4,1855 J $4{,}1855 \times 10^6$ J $-4{,}1855 \times 10^3$ J	L^2MT^{-2}
Puissance	watt cheval-vapeur	W ch	 735 W	L^2MT^{-3}
Pression	pascal bar atmosphère centimètre de mercure	Pa atm. cm Hg	 10^5 Pa 1,013 25 bar 1 bar = 75 cm Hg	$L^{-1}MT^{-2}$
Viscosité (dynamique)	poiseuille poise	Pl Po	 10^{-1} Pl	L^{-1} MT^{-1}
Intensité de courant électrique	ampère	A		A
Force électromotrice et différence de potentiel	volt	V		$ML^2T^{-3}A^{-1}$
Résistance électrique	ohm	Ω		$ML^2T^{-3}A^{-2}$
Quantité d'électricité	coulomb	C		AT
Intensité de champ électrique	volt par mètre	V/m		$MLT^{-3}A^{-1}$
Flux magnétique	weber	Wb		$ML^2T^{-2}A^{-1}$
Température	degré Kelvin degré Celsius	°K °C	t (°C) = T (°K) — 273	
Intensité lumineuse	candela	cd		
Flux lumineux	lumen	lm		
Éclairement	lux	lx		
Luminance	candela par m^2	cd/m^2		
Activité nucléaire	seconde^{-1} curie	s^{-1} Ci	 $3{,}7 \times 10^{10}$ s^{-1}	
Quantité de rayonnement X ou γ	rœntgen	R		

INDEX DES NOMS CITÉS

Les références sont données par l'indication du numéro de la page où se trouve le terme, suivi le cas échéant, des lettres *a* et *b* se rapportant respectivement à la colonne de gauche et à la colonne de droite de chaque page.

Les références sont données, pour les illustrations, par le numéro de la page en caractères gras et, pour le texte, par le numéro de la page en caractères maigres pour une simple citation, et en italique pour un développement plus complet.

Pour les différentes variantes se rattachant à un même terme, un astérisque indiquera le renvoi à ce dernier. *Ex. :*

circuit à bascule
* trigger
trigger (ou circuit à bascule) **63**

T

U

V - X - Z

Imprimé en Italie

GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

TECHNOLOGIE II

GRANGE BATELIÈRE, ÉDITIONS ATLAS, PARIS - ÉDITIONS KISTER, GENÈVE
ÉDITIONS ÉRASME, BRUXELLES-ANVERS

RTL
J. CARLIER
F. MITTERRAND

Publiée sous le haut patronage de :
Messieurs les professeurs :
Jean DORST, membre de l'Institut,
Charles FEHRENBACH, membre de l'Institut,
Roger HEIM, membre de l'Institut,
Monsieur l'amiral André JUBELIN,
Messieurs les professeurs :
Pierre LÉPINE, membre de l'Institut,
Louis LEPRINCE-RINGUET, de l'Académie française,
Jean-François LEROY, professeur au Muséum national d'histoire naturelle,
Henri NORMANT, membre de l'Institut,
Monsieur Jacques PICCARD, docteur ès sciences h.c.

Réalisation	IDÉES ET ÉDITIONS 16, avenue de Friedland, 75008 Paris.
Comité de direction	Simone DEVAUX, Uberto TOSCO.
Rédaction	Françoise MENU, Monique LIONS-GENTIL, Vanina DORÉ, Marie-Noëlle PAILLETTE.
Recherche de l'illustration	Mathilde RIEUSSEC.
Mise en pages	Tito TOPIN et Serge BROCHE.
Illustrations techniques	Richard COLIN.
Coordinateur des dessins	Mario LOGLI.
Fabrication	Sylvia COLIN, Jocelyne TÉPÉNIER.
Directeur de la publication	Bernard BOSC.

Les schémas portant la référence Richard Colin
ont été réalisés d'après des croquis fournis par les auteurs.

Dans ce volume :

LA TECHNOLOGIE (II)

L'INFORMATION

D. Burnett - Gamma

Ont collaboré à ce volume :

pour les généralités :

B. DUBUISSON.

pour la saisie des données :

P. BAÉ.

pour le codage,

les mémoires et l'analyse du signal :

B. DUBUISSON.

pour la détection :

A. FOURRIER-LAMER, pour le radar.

C. HENNION, pour le sonar.

Y. LE GALLIC, pour la détection par les rayons X.

J.-F. CHRÉTIEN, pour les contrôles non destructifs en industrie et les examens non invasifs en instrumentation médicale.

pour l'informatique :

B. VACHON.

pour la radiodiffusion et les procédés d'enregistrement et de reproduction des sons :

J.-F. GELLY.

pour la télévision :

P. BAÉ.

pour la photographie :

P. KOWALISKI.

pour le cinéma :

J.-M. RAVON.

pour le papier et la presse :

M. GELUS et F. PERRIER.

pour la conservation de l'information :

L. VEZIER.

pour l'intelligence artificielle :

B. DUBUISSON.

Cliché Thomson - CSF

▲ *Un studio d'enregistrement de télévision: le XXe siècle est le siècle de la révolution technologique par les ondes et peut-être lors de son dernier quart assistera-t-on au déclin de la presse écrite au profit de la presse parlée et télévisée.*

L'INFORMATION. GÉNÉRALITÉS

Information, mot aux multiples sens et aux multiples interprétations. Ouvrons le dictionnaire Petit Robert *(édition abrégée) et lisons quelques-unes des définitions proposées :* **Information.** « Définition courante : *Renseignements sur quelqu'un, sur quelque chose.* D'utiles informations. *Renseignement ou événement qu'on porte à la connaissance d'une personne, d'un public...* Informations données par la radio... *XXe siècle : Ensemble des informations, et par extension, action d'informer le public, l'opinion.* Agence d'information... Scientifique : *Élément ou système pouvant être transmis par un signal ou une combinaison de signaux... ; ce qui est transmis (objet de connaissance, de mémoire)*... Théorie, traitement de l'information... Information et cybernétique... »

Ces définitions couvrent l'ensemble des technologies développées dans ce volume.

L'information est partout, nécessaire à toute décision. La nécessité d'une information pure et complète est bien connue du décideur. Combien de « mauvaises » décisions sont prises à partir d'informations tronquées ou invalides (exemple historique de la dépêche d'Ems) ; notre siècle se nourrit d'informations claires et rapides.

En époque de tension, un message ne doit pas mettre plusieurs heures pour aller de l'Est à l'Ouest. Quelques exemples permettent de voir le chemin parcouru. Austerlitz (1805) ne fut annoncé aux Parisiens que quatre jours après. Au milieu du XIXe siècle (1830), une liaison Londres-les Indes avait une durée moyenne de cinq mois... Combien de décisions étaient périmées ! A moins que cette époque n'ait su vivre ! Aujourd'hui, un événement important qui se produit dans un pays quelconque peut être connu du reste du monde avec une rapidité qui ne nous étonne plus. L'information a suivi le progrès technologique des moyens de communication.

Le XIXe siècle raisonnait en termes d'énergie. Mais deux faits vont bouleverser le XXe siècle : la mécanisation complète du travail et le travail sur signes et par signes (développement des outils mathématiques). Le besoin de communications fiables est un élément essentiel de notre monde dit moderne, d'où un développement « exponentiel » de systèmes de communication.

Mais qu'est-ce qu'un **système de communication?** *Le schéma général en a été proposé par Shannon dès 1948 (fig. 1). Tout mauvais fonctionnement d'un de ces éléments ou tout phénomène perturbatoire superposé au signal entraîne une perte d'information.*

Ce schéma est général ; sans le discuter complètement, ce qui sera fait dans une partie ultérieure, traduisons-le par un exemple : l'émetteur est le lieu d'où provient la nouvelle, la personne la créant (par exemple, le contrôle d'un aéroport annonce un détournement d'avion) ; le codeur *sera le journaliste de la presse écrite expliquant ce fait. L'article est ensuite transmis à la composition et imprimé comme partie d'un journal* (canal de transmission). *Le* décodeur *et le* récepteur *sont dans cet exemple une seule et même personne : le lecteur lisant le journal. La perte d'information peut avoir différentes causes : phrases sibyllines du journaliste mal interprétées à la lecture, coquilles à l'impression (lignes inversées rendant l'article incompréhensible...).*

Cet exemple trivial permet de comprendre la richesse de la formulation de Shannon qui porte le nom de **théorie de l'information.** *Développée après la guerre, cette théorie est toujours de mise avec les applications multiples utilisées de nos jours, applications qui ne se limitent pas aux données des communications.*

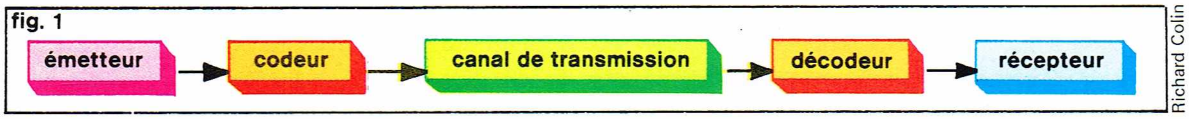

◀ *Figure 1 : schéma général d'un système de communication proposé par Shannon en 1948.*

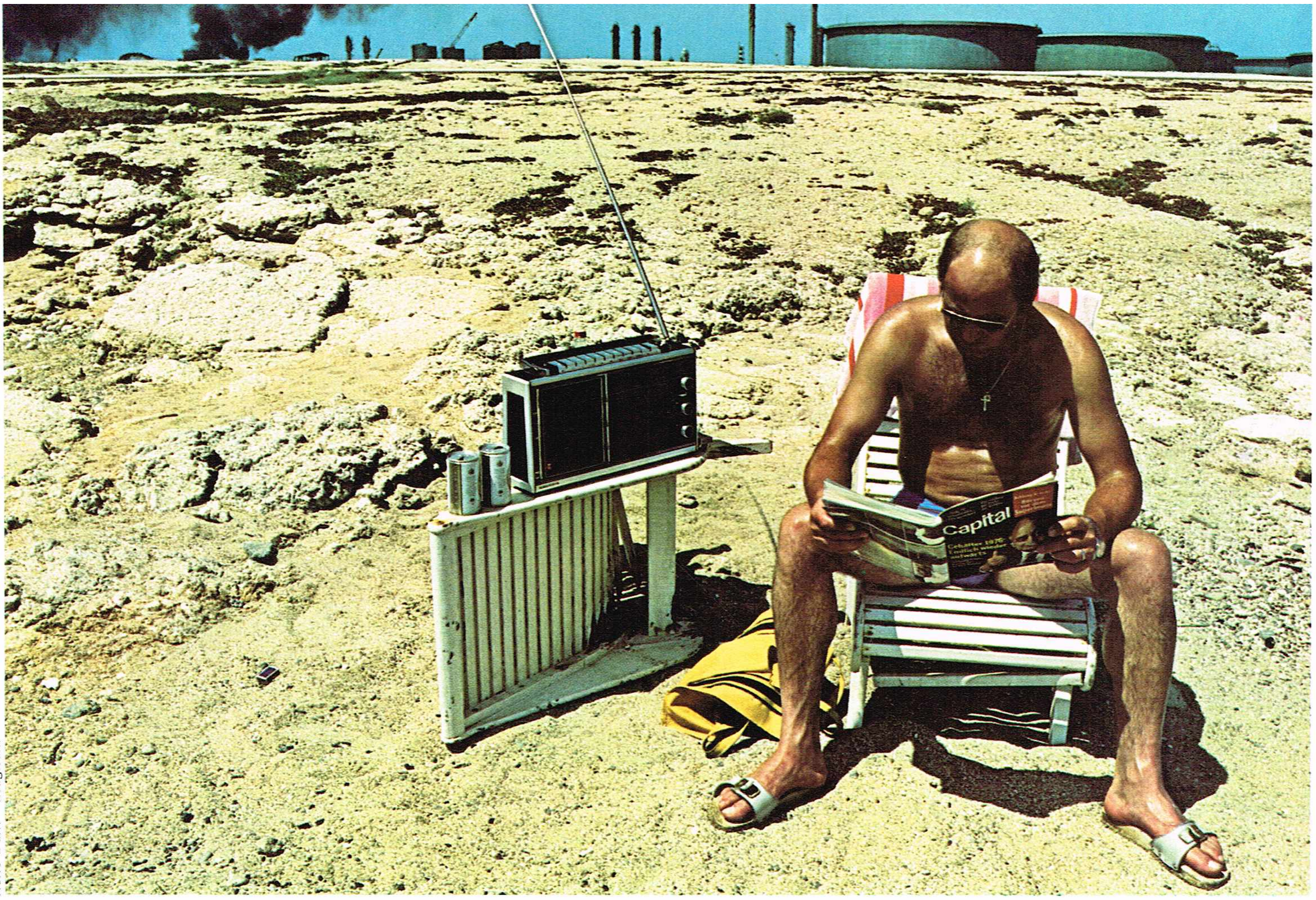

René Burri - Magnum

▲ *Dans le langage courant, le mot* **information** *est souvent interprété dans le sens de « nouvelle » : on écoute les informations à la radio ; en fait, son sens est beaucoup plus vaste.*

▶ *Page ci-contre, en bas, un transistor à effet de champ (pour la haute fréquence). Après la Seconde Guerre mondiale, l'invention du transistor donna naissance à l'industrie des semi-conducteurs, en plein développement à l'heure actuelle.*

Le mot information est aussi souvent interprété dans le langage courant par nouvelle. *On écoute les « informations » de la radio... Nous vivons à l'époque des mass media où toute nouvelle d'un coin du monde peut être répercutée dans toutes les autres parties.*

Avant, seule la presse écrite transmettait les informations et c'était une presse politique. Les feuilles étaient orientées et caractéristiques d'un parti ou d'une tranche de la société. Puis sont nés dans la presse écrite des journaux dits d'information où des journalistes exprimaient une opinion sous leur signature. Entre-temps, le cinéma devenait parlant, apparaissaient les actualités cinématographiques, condensé imagé de quelques faits marquants. La radio, les magazines, la télévision enfin ont fait entrer dans chaque foyer l'actualité, le conseil, la distraction.

On peut dire que dès 1930 le problème de l'information se posait en termes sociaux. Le problème de communication de masse suscite des inquiétudes dans le monde contemporain. Jusque dans les années soixante, d'importantes recherches sur les mass media ont eu lieu aux États-Unis en particulier, puis dans les pays d'Europe.

Le problème se pose peut-être aussi, de manière accrue aujourd'hui, en termes politiques.

On peut dire que le XX^e siècle est le siècle de la révolution technologique par les ondes, et que, peut-être, lors de son dernier quart, on assistera au déclin de la presse écrite au profit de la presse parlée et surtout télévisée. Verra-t-on demain le commun des mortels capter sur son téléviseur des informations transmises par satellite, venant d'un pays lointain. Ce n'est plus actuellement un problème technologique, on touche à la souveraineté d'un pays et ce sera vraisemblablement un frein au développement des communications que l'on pourrait qualifier de « tous azimuts ».

Effectuons un bref historique de l'apparition de quelques moyens de communication.

Le télégraphe de Chappe est né en 1790 : c'était la suite logique d'une facile expérimentation dont les idées, sinon le principe, remontaient parfois... à l'Empire romain. La télégraphie électrique (Morse, Cooke, Wheatstone, Steinheil, 1830-1840) allait suivre et être adoptée dans les différentes contrées du monde. Dès le milieu du XIXe siècle, le télégraphe est pratiquement un service ouvert au public en France, en Angleterre, aux États-Unis.

L'histoire se poursuit par l'installation de câbles sous-marins : entre l'Angleterre et l'Irlande en 1852 ; entre l'Angleterre et la Belgique ; dans la mer Noire durant la guerre de Crimée. Le couronnement fut la pose (difficile et riche d'aventures) du câble transatlantique qui fonctionna de manière sûre à partir de 1866.

Le dernier quart du XIXe siècle voit le télégraphe devenir un objet courant : on communique aisément à l'aide de cet appareil. Il s'améliore grâce à Émile Baudot, puisque les communications peuvent se faire directement avec un clavier alphanumérique et non plus en code Morse : le code Baudot est maintenant universellement connu et c'est un exemple classique donné pour le codage.

Le nom du téléphone est associé à Graham Bell (1876) : il suivait les travaux du physicien allemand Philippe Reiss ; son invention fut améliorée par Edison qui permit, en y ajoutant une source d'énergie, d'accroître les distances de communication. En 1877 se fondait alors la célèbre compagnie « Bell Telephone Association ».

Dès 1857, Edouard Leon Scott avait pensé et construit un phonographe ; l'appareil enregistrait les vibrations faites par le son sur une membrane. En 1877, Charles Cros créait le paléophone, et non seulement on enregistrait mais on

Archives Snark

Boyer - Roger Viollet

▲ *A gauche, Alexander Graham Bell (1847-1922), à qui l'on doit l'invention du téléphone (en 1876) et qui a donné son nom à la société « Bell Telephone Association ».*
A droite, un atelier de fabrication de phonographes aux environs de 1905 : hall d'audition et de mise sous boîtier des appareils.

reproduisait. La voie était ouverte pour la prodigieuse industrie actuelle du disque.

Le cinéma est né au milieu du XIX^e^ siècle. Stampfer inventait dès 1833 le stroboscope, puis, en 1853, Franz von Uchatius améliorait l'idée de la lanterne magique et obtenait de grossières projections. En 1888, Jules Marey réalisait un appareil rudimentaire de prise de vues, et en 1889 Edison créait le film de 35 mm avec perforation. Les techniques de projection cinématographique allaient ensuite être rapidement mises au point dans plusieurs pays : la France connaît alors l'invention de Louis Lumière. Malheureusement, Lumière ne crut pas en sa création ; il fallut le génie inventif de Georges Méliès pour commencer à exploiter le cinéma. Qui n'a vu ces vieux films, bourrés de truquages aux décors somptueux, véritables paradis pour les rêves ? L'industrie du cinéma allait naître, fortune d'Hollywood : le cinéma parlant, en couleurs (le Technicolor), en relief...

La radio, quant à elle, se perfectionne en huit ans. Hertz avait prouvé l'existence d'ondes électriques mises en évidence par Faraday et par Feddersen, et en 1895 la radio naissait : A. Popov réussissait à effectuer une transmission en utilisant un microphone à limaille. Marconi reprit cette invention et accrût la portée des transmissions (4 kilomètres en 1896, 15 en 1897) ; il créa la « Wireless Telegraph and Signal Company ». La radio prenait son essor, marquée par quelques inventions importantes (accord des antennes à l'émission et à la réception, détecteur à galène [1906]). Pendant ce temps, la technique des télécommunications se mettait au point. En 1906 eut lieu la première liaison par radiotéléphone. En 1907, De Forest inventa la triode qui allait changer tous les systèmes de télécommunication. De 1911 à 1914, on utilisa les immenses possibilités de cet outil : pour amplifier de faibles signaux, générer des signaux

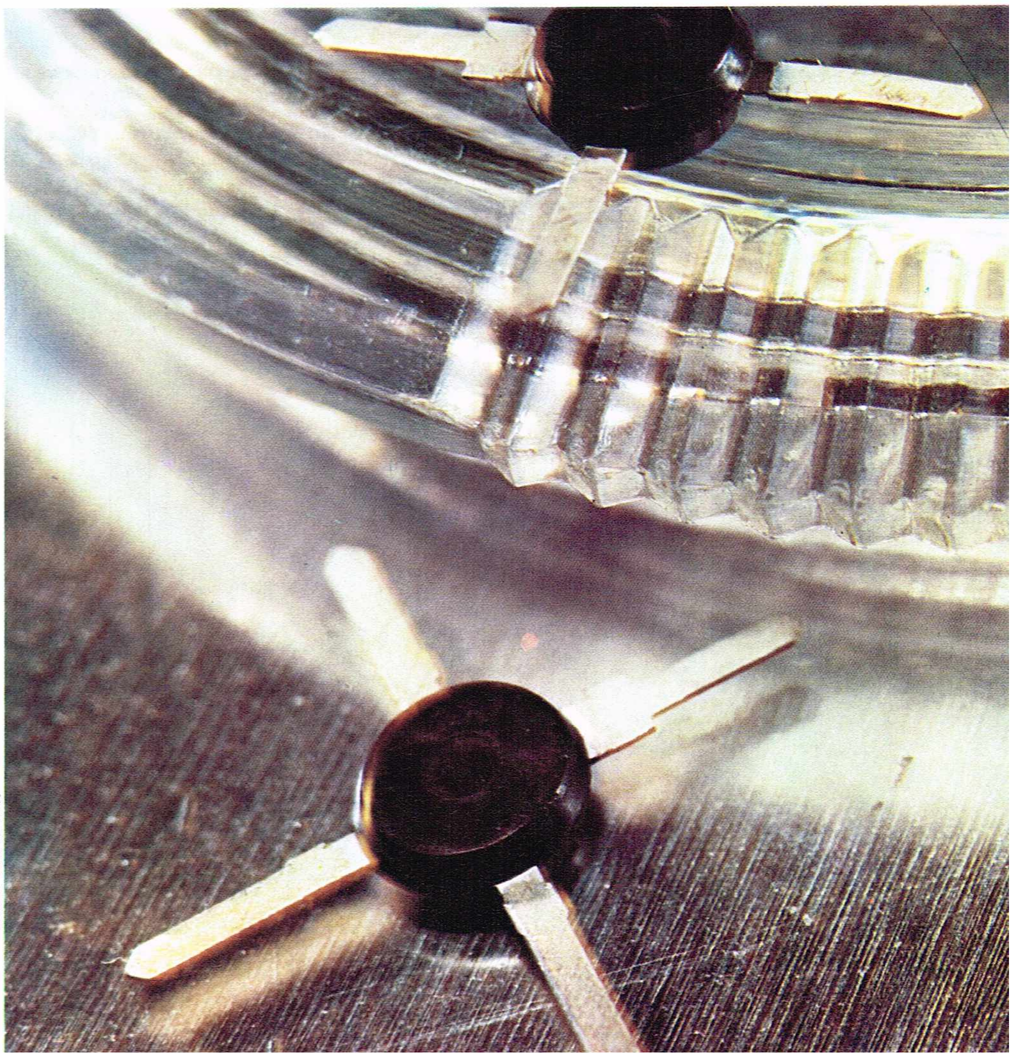

Texas Instrument

Cornell Capa - Magnum

▲▼ *La télévision a apporté l'information non seulement par le son mais aussi par l'image, en noir et blanc d'abord, puis en couleurs. Elle est actuellement un équipement courant dans le monde industrialisé (en haut) mais peu d'entre nous savent déchiffrer la complexité du câblage d'un poste de télévision (en bas).*

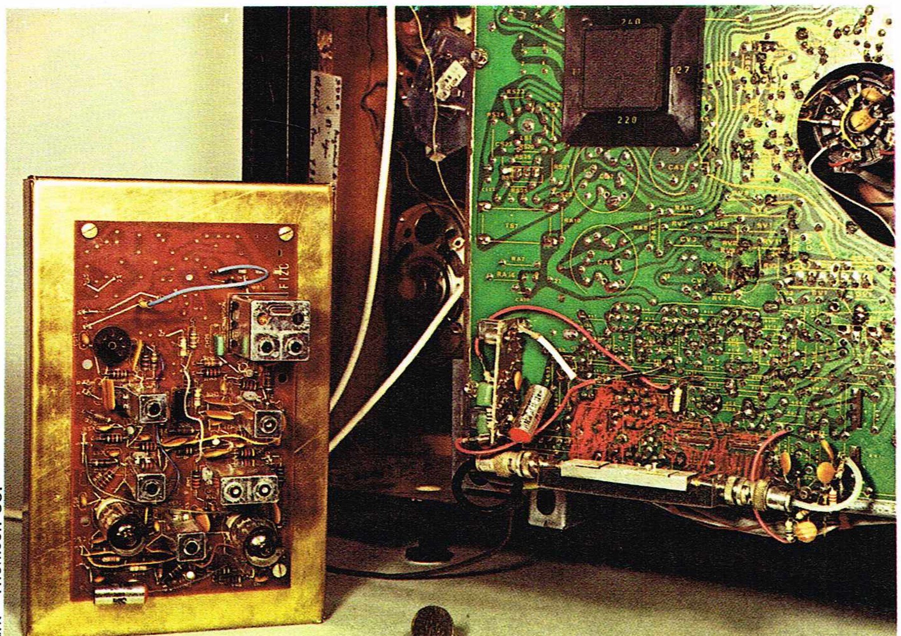

Archives Snark - Thomson CSF

haute fréquence... La triode fut suivie des tubes multi-électrodes, tétrodes, pentodes, etc. Toutes les bases de la technologie électronique étaient jetées avant la Première Guerre mondiale. Après la Seconde Guerre mondiale, le transistor (œuvre de Bardeen, Brattain, Shockley) donna naissance à l'industrie du semi-conducteur, en plein développement à l'heure actuelle. Le nom de transistor fut bientôt confondu avec l'appareil radiophonique, autonome quant à sa source d'énergie. Son essor dans le domaine public allait donner une nouvelle jeunesse aux stations de radio ; qu'on se souvienne en France de la naissance d'Europe n° 1, modèle suivi par les autres stations. Conséquence politique aussi puisque les gouvernements peuvent atteindre l'auditeur en n'importe quel lieu.

Dans chaque foyer, la télévision va ensuite faire pénétrer l'information non seulement par le son, mais aussi par l'image. Image noir et blanc d'abord, puis couleurs, deux procédés (PAL et SECAM) se disputant le marché économique. Si elle fut d'abord réservée à un petit nombre, la télévision est un équipement courant pour un foyer dans le monde industriel.

Comme souvent, un conflit armé allait entraîner de multiples développements technologiques, ainsi le radar fut créé simultanément ou presque en Allemagne, en Grande-Bretagne et dans d'autres pays impliqués dans la Seconde Guerre mondiale. Cependant, la technologie centimétrique par génération d'ondes de longueur de 10 cm à l'aide d'un magnétron est essentiellement britannique.

B.N. - ERL - Éd. R. Laffont

R. Guillemot - Agence TOP

▲ **Journaux et livres sont deux véhicules anciens d'information. A gauche, une gravure chinoise du XVII[e] siècle représentant la fabrication du papier par cuisson au bain-marie d'une bouillie de bambous. Né en Chine au I[er] siècle de l'ère chrétienne, le papier fut introduit en Occident au cours de différents conflits ; vers 1200, on en fabriquait déjà en France, mais il fallut attendre trois siècles pour voir quelques progrès. A droite, reconstitution d'une salle d'imprimerie datée de 1576, au musée Plantin (du nom de l'imprimeur Christopher Plantin) à Anvers (Belgique) ; bien que des procédés de reproduction aient déjà été employés en Chine, l'imprimerie est datée habituellement de Gutenberg qui l'améliora par l'utilisation des caractères en plomb à la place des caractères en bois.**

On ne peut parler d'information sans y associer l'informatique. Les ordinateurs ont commencé avec des tubes électroniques (1947) ; c'étaient de petites merveilles... dégageant une forte chaleur (18 000 tubes dans la machine d'Eckert et Marschly). En 1952 apparaissent en France les premières calculatrices électroniques à tubes (Bull et IBM). La technologie des transistors, en 1958-1959, fait passer aux ordinateurs de deuxième génération ; on ne peut plus les employer comme appareils de chauffage. C'est à partir de 1960 que l'ordinateur connaît un essor important ; on remplace de plus en plus les machines mécanographiques. A partir de 1964, c'est la troisième génération : une unité centrale plus performante, développement du logiciel, diversification des périphériques, télétraitement... La technologie fait de nouveaux bonds avec le L. S. I. (Large Scale Integration) qui permet de retrouver des milliers de transistors sur une pastille de support, puis les disques souples (1972). En 1971 est créé le premier microprocesseur, en 1973 le premier micro-ordinateur à microprocesseur. Sur un morceau de silicium de quelques millimètres carrés, on a fabriqué 5 000 à 20 000 transistors.

Enfin, on conclura ce survol historique par le journal, véhicule ancien d'information. Journal et livre sont associés à l'imprimerie.

Bien que des procédés de reproduction aient déjà été employés en Chine, l'imprimerie est datée habituellement de Gutenberg, lequel apporta la fabrication des caractères en plomb et non plus en bois.

L'invention de l'imprimerie allait entraîner une propagation des idées si... un support technologique existait. Le papier était né en Chine dans les années 100 de l'ère chrétienne. Puis il fut introduit en Occident à l'occasion des différents conflits, et vers 1200 on en fabriquait en France. Il faudra cependant attendre trois siècles pour voir des progrès dans ce domaine.

En Angleterre, Stanphope créait en 1780 une presse entièrement métallique. En 1814, le Times *était tiré à près de 1 000 feuilles à l'heure en fixant la feuille de papier sur un cylindre. La lithographie naissait dans les mêmes années. La presse à rotative, quant à elle, naissait en 1866 ; le journal* le Petit Journal *en profitait et atteignait des tirages fabuleux pour l'époque. Dernière création qui allait permettre d'accélérer la composition, la linotype était inventée par un employé du* New York Tribune *en 1886. L'impression des journaux actuels utilise la télétransmission et la composition à distance.*

Le lecteur va maintenant découvrir les différentes technologies associées à l'information.

A tout seigneur tout honneur, nous développerons tout d'abord la théorie de l'information de Shannon, conceptualisation mathématique de l'information. Ensuite seront évoqués successivement les sujets suivants : la saisie des données ; la transmission et le codage ; les mémoires et le traitement de l'information ; la détection ; l'informatique ; la radio et la télévision ; le cinéma et la photo ; le papier et la presse ; la conservation de l'information, et quelques technologies de pointe.

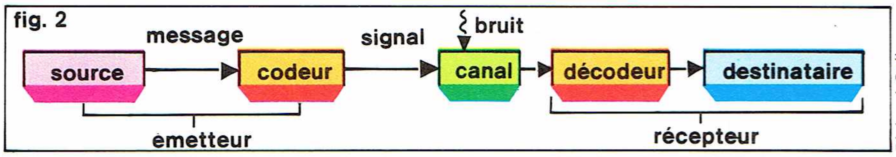

Richard Colin

H. Gloaguen - Viva

▲ *En haut, figure 2 : schéma du principe d'un système de communication (voir développement dans le texte).*
Ci-dessus, une salle de rédaction du journal italien **La Gazetta del popolo** *à Turin (Italie) ; dans le système de communication, le journaliste qui explique les faits est le* **codeur**.
▼ *Ci-dessous, le dernier maillon du même exemple de système de communication : le lecteur est à la fois le* **décodeur** *et le* **récepteur** *de l'information.*

Harlingue - Viollet

La théorie de l'information

La théorie de l'information s'attache à de nombreux domaines. Si, au départ, son domaine d'application essentiel était la communication, c'est-à-dire la transmission d'informations, on y adjoint aujourd'hui la théorie du bruit, le filtrage, la modulation, le traitement de l'information ; cependant, des domaines plus marginaux en utilisent les concepts, telles la linguistique, la reconnaissance des formes, la neurophysiologie, etc. Nous ne nous intéresserons dans ce chapitre qu'aux transmissions électriques ou électromagnétiques de communication.

L'histoire de la théorie de l'information débute dans les années 1920 avec Nyquist (1924) et Hartley (1928), qui ont tenté de quantifier le montant d'information transmis d'un système à un autre.

Shannon a publié en 1948, dans le *Bell System Technical Journal*, un article jetant les bases de la théorie moderne. Un deuxième article dans le *Proceedings of IRE* précisait toutes les notions employées aujourd'hui. Bien que de nombreuses démonstrations n'aient été faites qu'après, l'importance des notions et des théorèmes exposés dans ces deux articles n'est plus à souligner (Fernstein, 1953, Mc Millan, 1953, etc.).

Tout ensemble de communication comprend essentiellement trois parties : l'*émetteur*, la *voie de communication* et le *récepteur*. Cependant, il est bien évident que cet ensemble de trois organes peut être représenté par des éléments très variés ; ainsi, comme nous l'avons vu, le journal du jour, par exemple, constitue une voie de communication entre l'émetteur qui est le fait produit et le récepteur qui se trouve être le lecteur.

Décrivons maintenant plus complètement un *système de communication* (*fig.* 2).

La *source* ou *source d'information* produit un message devant être transmis au destinataire. Le type de message peut être varié : une suite de caractères alphabétiques (télégraphe), une fonction du temps (signal radio-électrique), une fonction de l'espace et du temps (image télévision noir et blanc), plusieurs fonctions de l'espace et du temps (image télévision couleurs) ou des combinaisons de ces différents types.

Le *codeur* a pour but de transformer le message de manière à faciliter sa transmission par l'organe physique qui suit. Cette transformation est souvent une transformation en signal électrique (téléphone par exemple). Souvent, la fonction du codeur est double : d'une part, il crée un signal dont les caractéristiques sont adaptées pour la transmission, d'autre part il met ce signal sous forme codée de façon à minimiser l'influence de perturbation et donc à augmenter la facilité d'interprétation à destination. Ainsi prenons-nous nous-mêmes l'habitude d'écrire en lettres d'imprimerie la ville destinataire d'un courrier afin de faciliter le travail des services de tri. Cet effort se fait au détriment de la vitesse d'écriture ; on verra que tout codage introduit un retard.

Le *canal* est le système de transmission ; ce peut être un câble coaxial, un faisceau hertzien, une plage de fréquences radio, un rayon lumineux, etc.

Le *décodeur* reconstruit le message à partir du signal reçu, réalisant l'opération inverse du codeur.

Le *destinataire* est l'ensemble auquel est destiné le message.

Durant la transmission, des perturbations s'introduisent que l'on désigne sous le vocable de *bruit*. Les perturbations, bruit interstellaire, parasites électriques, etc., sont d'origines diverses, dépendant du système de communication. Bien que ce ne soit pas toujours exact dans la pratique, nous supposerons toutes les sources de bruit concentrées sur le canal. Ce bruit introduit une limitation aux performances du système. Pour lutter contre ce phénomène, on peut répéter les messages, augmenter leur puissance, ce qui se traduit par une hausse du coût de l'ensemble. La théorie de l'information donne une autre arme de lutte, généralement moins coûteuse, le codage (cependant il y a alors perte en rapidité de transmission).

Avant d'explorer plus avant la théorie mathématique de l'information, donnons un exemple simple.

Supposons que la source émette deux messages *a* et *b* de façon indépendante avec la même probabilité 1/2. A cause du « bruit », l'émission de caractères *a* n'entraîne pas forcément la réception de ce même caractère ; on a une probabilité de 0,75 de recevoir effectivement *a* mais

aussi 25 chances sur 100 de recevoir *b*. Les valeurs sont inversées si le caractère *b* a été émis. Le canal ne peut transmettre pour des raisons physiques plus d'un caractère par seconde. La probabilité d'erreur est donc :

$$0,5 \cdot 0,25 + 0,5 \cdot 0,25 = 0,25.$$

Cette valeur étant jugée trop forte, on va essayer de la diminuer. La première idée venant à l'esprit est d'opérer par redondance, et de transmettre *aaa* au lieu de *a*, de même pour le caractère *b*. La règle de décision du décodeur est simple : choisir le caractère le plus présent dans le message de trois caractères reçus comme le caractère émis ; c'est une règle de décision à logique majoritaire. On effectuera une erreur si *b* émis → *bbb* → *aba* reçu, décodé en *a*.

Le calcul de la probabilité d'erreur est facile :

$$\text{P (erreur)} = \text{P (2 caractères faux)} + \text{P (3 caractères faux)}$$
$$= C_3^2 \, (0,25)^2 \, 0,75 + (0,25)^3 = 0,156 < 0,25.$$

La probabilité d'erreur a donc été diminuée, mais en contrepartie il faut avec ce nouveau système 3 secondes pour transmettre un caractère.

Un des théorèmes fondamentaux de la théorie de l'information, le *théorème de Shannon*, montre d'ailleurs que, pour obtenir une grande fiabilité, il n'est pas nécessaire de réduire le taux de transmission à 0.

Définition de la quantité d'information

Les messages émis par une source ont une signification ; cet aspect n'est pas considéré par la théorie de l'information. Le seul fait important est la sélection parmi un ensemble de possibilités du message. Le terme *information* est abstrait, relatif à une quantité difficile à mesurer, aussi quantifie-t-on le contenu possible d'un message et non le contenu réel. Si le nombre de messages possibles est fini et si tous les messages sont équiprobables, ce nombre ou toute fonction monotone de ce nombre peut être pris comme mesure de la quantité d'information. Ce fut Hartley qui le premier proposa une unité logarithmique. Ainsi, pour une source à M messages équiprobables, la quantité d'information apportée par un quelconque des messages sera log M.

Raisonnons maintenant sur une source plus complexe de M messages où un message m_i a une probabilité p_i de se produire $\left(\sum_{i=1}^{M} p_i = 1\right)$. La définition précédente s'entend facilement à partir des quelques considérations suivantes :

— Plus un message est improbable, plus sa réalisation apporte d'information. Un message certain, donc attendu à coup sûr, n'apporte aucune information. L'information apportée par un message doit donc être une fonction de l'inverse de la probabilité.

— La fonction information à définir doit être une fonction additive. L'information apportée par deux messages indépendants doit être la somme des informations de chaque message.

— Si un message A implique un message B ($A \subset B$), le fait que B soit réalisé doit diminuer l'incertitude sur la réalisation de A.

De ces trois propriétés (en fait, une axiomatique plus générale) est venue l'idée de prendre comme définition de l'information apportée par le message m_i (ou de l'incertitude levée) la quantité notée I (m_i) :

$$I\,(m_i) = \log \frac{1}{p\,(m_i)} = -\log p\,(m_i)$$

$p\,(m_i)$ est la probabilité d'apparition du message m_i.

Dans le cas de M messages équiprobables, on retrouve la définition proposée précédemment $\left(\log M = -\log \frac{1}{M}\right)$.

La base du logarithme indique l'unité choisie :

— base 2 : l'information se mesure en *bits* (binary unit) ;

— base *e* : l'information se mesure en *nats* (natural unit) ;

— base 10 : l'information se mesure en *decits* (decimal unit) ou *hartleys*.

Sauf indication contraire, nous utiliserons le bit comme unité d'information.

Ainsi, l'information apportée par un message issu d'une source de deux messages équiprobables est de :

$$\log \frac{1}{2} = 1 \text{ bit.}$$

Suivant maintenant les travaux originaux de Shannon, nous distinguerons trois systèmes de communication :

— Système discret dans lequel message et signal sont constitués d'une suite finie de caractères. Un exemple simple est le télégraphe ; le message est une suite de caractères alphabétiques, le signal une suite de points, tirets et espaces.

— Système continu, où message et signal sont des fonctions continues du temps. Ainsi, le système de télévision est un système continu.

— Système mixte, combinaison des deux précédents, telle la méthode PCM (Pulse Code Modulation) de transmission de la parole.

Canal discret sans bruit

Une source discrète est une source à nombre fini de messages, ainsi un télétype. Nous associons à chaque message m_i sa probabilité p_i.

Un type simple de source est une source sans mémoire : chaque message est indépendant de tout message émis antérieurement.

Prenons l'exemple suivant extrait de l'article de Shannon.

Soit une source à cinq messages A, B, C, D, E équiprobables (probabilité commune 0,2), un exemple de suite obtenue peut être BDCBCECCCADCBDDAAECEEA.

Si les cinq messages ont pour probabilités respectives 0,4, 0,1, 0,2, 0,2, 0,1, on pourra observer une suite du type AAACDCBDCEAADADACEDA.

Les deux sources précédentes étaient sans mémoire ; pour une source quelconque, un message est émis suivant une loi de probabilité dépendant des messages précédemment émis. Reprenons l'exemple d'une source de trois messages (A, B, C) en supposant que l'arrivée d'un message dépende du précédent (source à mémoire une unité de temps) et dressons le *tableau des probabilités :*

$p\,(m_i, m_j)$	A	B	C
A	0	$\frac{4}{15}$	$\frac{1}{15}$
B	$\frac{8}{27}$	$\frac{8}{27}$	0
C	$\frac{1}{27}$	$\frac{4}{135}$	$\frac{1}{135}$

$$p\,(m_i/m_j) = \frac{p\,(m_i m_j)}{p\,(m_j)}$$

$$p\,(m_j) = \sum_i p\,(m_i m_j)$$

Les formules ci-dessus permettent de trouver le *tableau des probabilités conditionnelles :*

$p\,(m_i/m_j)$	A	B	C
A	0	4/5	1/5
B	1/2	1/2	0
C	1/2	2/5	1/10

Un exemple type de sortie de cette source peut être : ABBABABABABABABBBABBBBBAB.

Avec de telles sources, on peut envisager de reconstituer des langages naturels. Ainsi Shannon tente-t-il de reconstituer l'anglais à l'aide de plusieurs approximations. Au départ, on a 27 caractères (26 lettres et l'espace).

— Première approximation ; tous les caractères sont équiprobables :

XFOML RXKMRJFFJUJ ZLPWXFWKCYJ.

— Deuxième approximation ; à chaque caractère est associée une probabilité égale à sa fréquence mesurée dans la langue anglaise (E a une probabilité de 0,12, W de 0,02) : OCRO HLI RGWR NMIELWIS EU LL NBNESEBYA TH EEI

— Troisième approximation ; approximation par groupe de 2 lettres (une fois une lettre sortie, la suivante est choisie suivant la probabilité qu'elle a de suivre la première ; cette méthode fait donc appel aux probabilités conditionnelles) : ON IE ANTSOUTINYS ARE T INCTURE ST BE S DEAMY ACKIN.

fig. 3

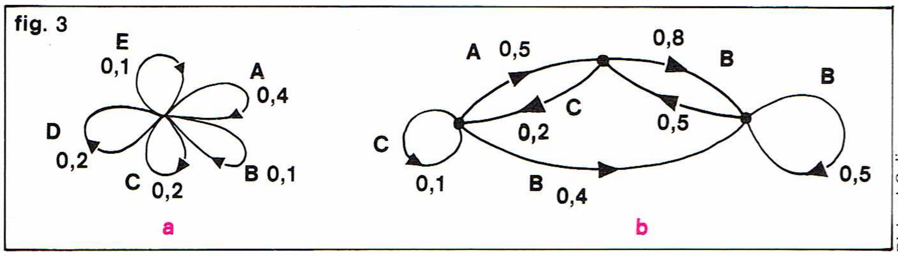

Richard Colin

▲ *Figure 3 : exemples de graphes correspondant à deux types de sources dans un système discret ;* a) *source sans mémoire à 5 messages* (A, B, C, D, E) *de probabilités respectives 0,4, 0,1, 0,2, 0,2, 0,1 ;* b) *source à mémoire à 3 messages* A, B, C *dont les probabilités conditionnelles ont été données dans le tableau page 11.*

▼ *Le centre et l'antenne d'émission de télévision de Besançon (exemple d'émetteur dans le cas d'un système de communication).*

— Quatrième approximation ; la même technique est utilisée en travaillant sur des groupes de 3 lettres : IS NO IST LAT WHE CRATICT FROURE BIRS GRUCID PONDEMONDE...

— Cinquième approximation ; approximation par des mots. Des mots sont tirés au hasard, chacun ayant sa probabilité propre d'apparition dans la langue anglaise : REPRESENTING AND SPEEDILY IS AN GOOD APT OR COME CAN DIFFERENT.

— Sixième approximation ; on introduit les probabilités conditionnelles entre deux mots : THE HEAD AND IN FRONTAL ATTACK ON AN ENGLISH WRITER THAT THE CHARACTER.

L'approximation de la langue anglaise s'améliore du premier au sixième essai. Il est évident que, si on continuait à compliquer la source, on s'approcherait de plus en plus de la langue.

Une source dont les messages sont issus indépendamment les uns des autres est dite *source sans mémoire*. Une *source à mémoire* dont le comportement ne dépend pas du temps est dite *homogène*. Des sources à mémoire peuvent être représentées par des graphes. Les nœuds représentent les états de la source et les pondérations des arêtes les probabilités de passage d'un message à l'autre (sur l'arête est aussi indiqué le message émis). La *figure* 3 donne des exemples de graphes.

Les sources à mémoire présentant des analogies avec les processus de Markov sont souvent appelées *sources de Markov*.

Archives Snark - Thomson CSF

Information moyenne-entropie

Nous avons défini précédemment l'information associée à un message ; c'est une notion absolue. Pour une source d'information sans mémoire dont chaque message m_i a pour probabilité $p\ (m_i)$, il est intéressant de chiffrer l'information moyenne apportée. Cette quantité, appelée *entropie*, est définie naturellement de manière probabiliste comme l'espérance mathématique de la variable aléatoire « mesure de l'information apportée par un message ». On notera conventionnellement cette quantité

$$H\ (p\ (m_i)\ ...\ p\ (m_n))\ \text{ou H.}$$

$$H\ (p\ (m_i)\ ...\ p\ (m_n)) = -\sum_{i=1}^{n} p\ (m_i) \log p\ (m_i)$$

Par convention, $p\ (m_i) \log p\ (m_i) = 0$ si $p\ (m_i) = 0$.

Cette quantité joue un grand rôle en théorie de l'information ; son nom d'entropie fait penser au concept de thermodynamique, et il est intéressant de voir la liaison existant entre les deux. Il y a en effet analogie formelle entre la formule ci-dessus et celle de Boltzmann concernant l'entropie thermodynamique :

$$S = -k \sum_i p\ (i)\ \text{Log}\ p\ (i) \qquad \text{(en logarithme népérien)}$$

Les $p\ (m_i)$ de la formule de Shannon sont définis comme des probabilités, alors que les $p\ (i)$ de la formule de Boltzmann sont définies comme suit : tout système peut se trouver dans un grand nombre d'états i, chacun d'entre eux étant précisé par une valeur de l'énergie e_i. Prenons l'exemple d'un gaz ; on le caractérise par des grandeurs macroscopiques (volume, masse de gaz, température) alors qu'il est composé de molécules repérables dans l'espace par leurs coordonnées et leur quantité de mouvement. Ces dernières grandeurs n'étant pas mesurables, il faut trouver comment les relier aux grandeurs macroscopiques. L'état microscopique d'un système ne pouvant être connu, chaque grandeur mesurée est considérée comme moyenne sur l'ensemble des états microscopiques possibles. A chaque état microscopique i on relie une probabilité $p\ (i)$. Dans l'étude des machines thermiques, on définit l'entropie par la formule :

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$$

où ΔS est la variation d'entropie du système, ΔQ la variation de chaleur et T la température absolue du système.

On montre en thermodynamique statistique que l'entropie est liée aux probabilités des micro-états par :

$$S = -k \sum_i p\ (i)\ \text{Log}\ p\ (i)$$

$k = 1{,}38 \times 10^{-16}$ erg/degré ; c'est la constante de Boltzmann.

Autrement dit, dans son sens thermodynamique, l'entropie est une mesure du désordre d'un système. L'entropie d'un système gazeux où les molécules peuvent avoir de grandes quantités de mouvement aussi bien que des faibles est plus grande que celle d'un système où seraient placées dans deux enceintes différentes les molécules à grande quantité de mouvement et les autres.

En représentant un micro-état comme un message d'une source, on peut dire que la définition de la thermodynamique statistique représente l'information moyenne qu'on a sur l'état microscopique du système :

$$H = -\Sigma p\ (i) \log_2 p\ (i) = -\log_2 e\, \Sigma p\ (i)\ \text{Log}\ p\ (i)$$

Donc $S = kH/\log_2 e$.

Pour continuer la discussion, il est bon de faire un retour sur les principes de la thermodynamique. Le premier principe établissait, rappelons-le, l'équivalence des formes d'énergie. Le deuxième principe, ou principe de

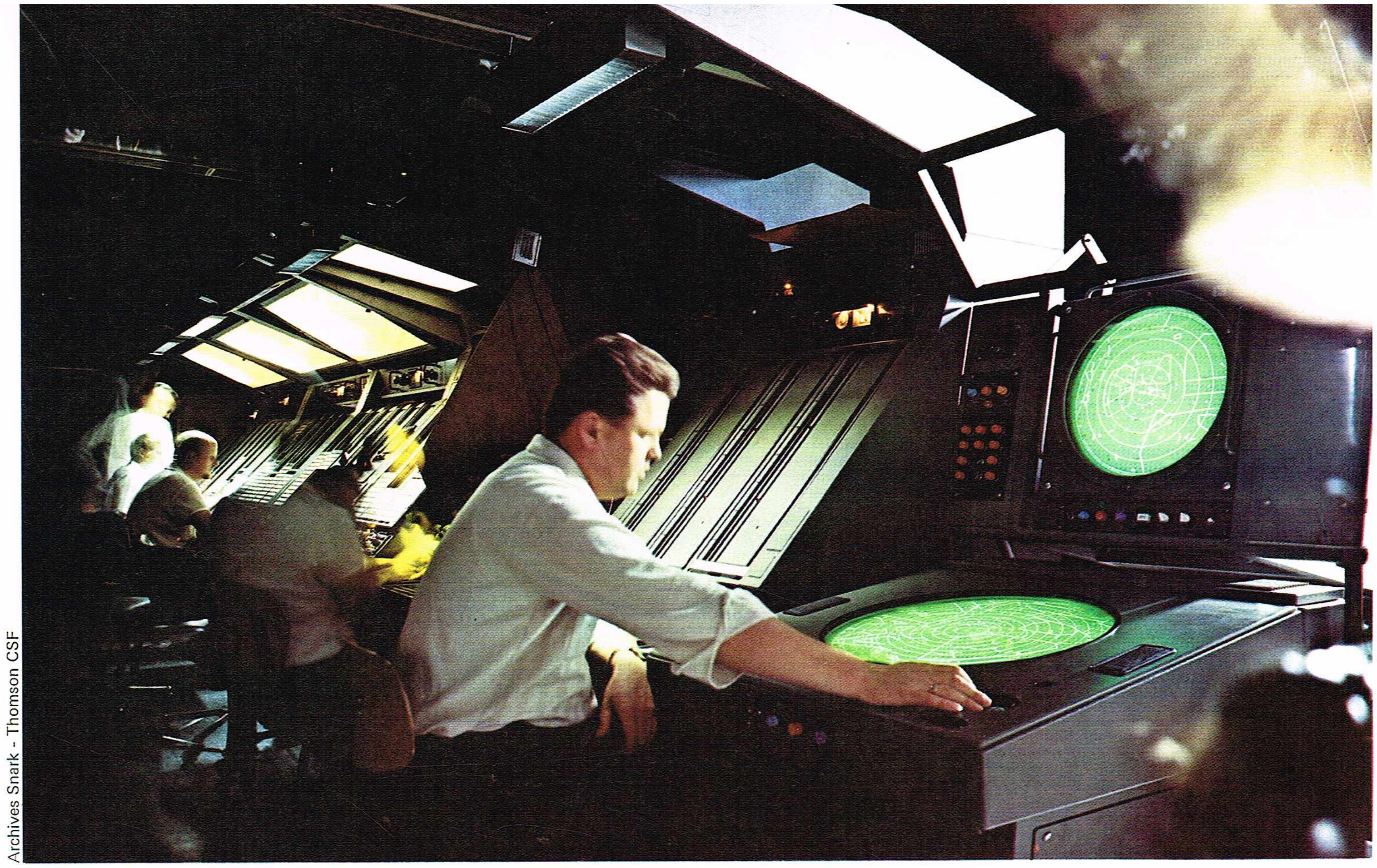

▲ ***Un exemple d'émetteur-récepteur : la salle de contrôle de l'aéroport de Francfort (R. F. A.).***

Carnot, établit une qualité des différentes formes d'énergie. Soit U l'énergie interne totale du système, alors toute variation d'énergie ΔU est la somme de deux termes : $-\Delta W$, qui indique une variation de travail disponible, et ΔQ, qui indique une variation de chaleur emmagasinée, soit $\Delta U = \Delta Q - \Delta W$.

Le signe — associé à W indique que le travail fourni augmente, donc que le travail disponible diminue. Dans un système isolé ($\Delta U = 0$), on retrouve le premier principe, c'est-à-dire $\Delta W = \Delta Q$ (toute production de travail est production de chaleur).

Cependant, on peut remarquer que la transformation est unilatérale : transformation du travail en chaleur et non réciproquement dans un système isolé. Le principe de Carnot peut alors s'exprimer ainsi : $\Delta Q > 0$. La quantité ΔQ n'étant pas une différentielle totale, on a introduit la quantité $\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$ qui présente cette propriété. La relation ci-dessus est donc équivalente à $\Delta S \cdot T > 0$. Donc l'entropie d'un système isolé ne peut que croître ; le maximum est atteint dans le cas de transformation réversible, c'est-à-dire à l'état d'équilibre.

En revenant à la définition de l'entropie donnée par Boltzmann, l'entropie est maximale dans le cas d'équiprobabilité des micro-états. Donc le désordre accroît l'entropie ; l'entropie est un indice du degré d'ordre microscopique de l'énergie du système. La chaleur correspondant à l'état microscopique le plus dégradé (déplacement désordonné de molécules et de charges), le deuxième principe ($\Delta S > 0$) traduit l'évolution d'un système isolé vers le plus grand désordre au niveau microscopique : le degré d'ordre microscopique ne peut que décroître lors des transformations énergétiques d'un système isolé. Brillouin traduit alors la discussion précédente : « L'entropie est en général considérée comme exprimant l'état de désordre d'un système physique. D'une façon plus précise, on peut dire que l'entropie mesure le manque d'information sur la véritable structure du système. Ce manque d'information implique la possibilité d'une grande variété de structures microscopiques distinctes qui sont en pratique impossibles à distinguer les unes des autres. Puisque l'une d'elles peut exister réellement à un moment donné, le manque d'information correspond à un désordre réel dans les degrés de liberté cachés. »

L'écriture de la formule de Boltzmann dans l'esprit de Shannon permet de mesurer l'information moyenne par micro-état qu'aurait un observateur si l'observation était possible. Brillouin associe alors l'entropie à une incertitude moyenne et établit le lien entre entropie et information de la façon suivante. Soit N_0 le nombre d'états possibles d'un système. Avant toute précision sur le système, la quantité d'information est nulle. Si la définition du système conduit à un des N_0 cas possibles, la quantité d'information moyenne vaut $\log_2 e$ Log N_0 en prenant pour hypothèse l'équiprobabilité des états. Pour une définition moins complète, le nombre d'états possibles est réduit de N_0 à N_1 ($N_1 < N_0$), la quantité d'information obtenue est $\log_2 e$ (Log N_0 — Log N_1) = I. L'entropie du système était au départ $S_0 = k \text{ Log } N_0$, elle devient $S_1 = k \text{ Log } N_1$. Ainsi, si on exprime l'information en unités thermodynamiques : $I = S_0 - S_1$. I correspond à une diminution de l'entropie. Cette diminution d'entropie apparaît si on constitue l'ensemble « observateur-système ». Avant la mesure, le système et l'appareil de mesure ont respectivement des entropies S_{01} et S_{02} ; après la mesure, les entropies sont respectivement S_{11} et S_{12}. D'après le principe de thermodynamique décrit plus haut, l'entropie de l'ensemble ne peut qu'avoir augmenté, donc $S_{11} + S_{12} > S_{01} + S_{02}$. On peut très facilement expliquer ce phénomène par le fait que l'appareil de mesure a besoin d'énergie pour effectuer la mesure : on a donc $S_{01} - S_{11} > 0$ et $S_{02} - S_{12} > 0$. Or $S_{11} = S_{01} - I$.

Brillouin introduit alors l'entropie négative *(néguentropie)* pour exprimer que l'information extraite entraîne une diminution de l'entropie du système ou une augmentation de la néguentropie. L'information ne peut être obtenue qu'en prenant de la néguentropie à l'appareil de mesure. Donc la quantité d'information est reliée à une variation d'entropie avec changement de signe. Si on suit ce raisonnement, il n'y a pas d'identité entre les formules de Shannon et de Boltzmann : toute information entraîne une variation négative d'entropie.

Présentons maintenant le *paradoxe du démon de Maxwell* qui a fait couler beaucoup d'encre. Mawxell avait conçu un système constitué d'une boîte divisée en deux compartiments A et B séparés par une cloison étanche au gaz et manœuvrable sans frottement. Au début de l'expérience, les deux compartiments contiennent certaines quantités de gaz à la même pression et à la même température. La commande de la cloison (ouverture et fermeture) est faite par un « *démon* » capable de discerner individuellement les molécules. Lorsque le démon voit approcher de la porte une molécule rapide venant de A, il la laisse passer en B et agit de même pour une molécule lente qu'il laisse aller de B vers A. Ainsi, sans dépense de travail, B voit sa température augmenter et A la voit diminuer. Le système a donc une entropie plus faible et on peut

▶ *Figure 4 : courbe de l'entropie* H *en fonction de la probabilité* p *d'un des éléments d'un alphabet à deux caractères.*

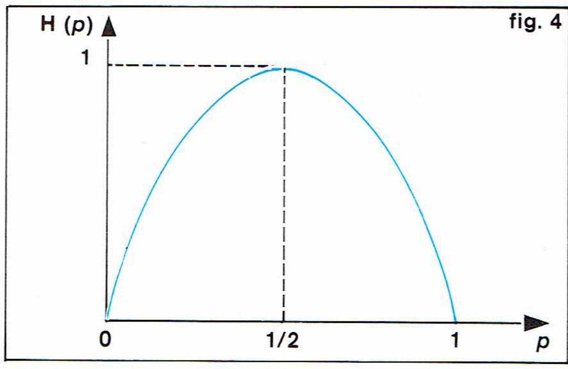

Richard Colin

faire ainsi fonctionner une machine thermique entre les deux compartiments, ce qui contredit le deuxième principe de la thermodynamique.

L'explication donnée par Brillouin est la suivante : le démon ne peut trier les molécules que s'il les « voit »; cette action s'accompagne d'absorption d'énergie (interaction lumière-molécule), d'où un accroissement d'entropie ΔS. Le second principe n'est donc pas contredit : l'information acquise correspond à une diminution du nombre des possibilités, donc à une augmentation de la néguentropie du système; cette néguentropie donne la diminution d'entropie de la séparation entre les deux gaz. Cette diminution d'entropie (due à l'acquisition d'information sur la vitesse des molécules) est compensée par l'augmentation ΔS qui accompagne l'échange d'énergie entre le démon et le reste du système. Le démon transforme une partie de l'entropie gagnée en information, transformée ensuite en néguentropie lors de la séparation en gaz chaud et froid :

néguentropie → information → néguentropie

Le bilan final est une perte de néguentropie pour l'ensemble du système. En conclusion, et de façon concise, il faut fournir un travail pour donner au démon les informations relatives à la vitesse des molécules; cela représente le prix payé pour la diminution de l'entropie.

On peut donc, comme certains auteurs, considérer l'entropie comme une mesure d'ignorance : ainsi a-t-on pu définir une axiomatique de thermodynamique statistique en partant de la quantité d'information transmise par un système à un observateur effectuant des mesures. La thermodynamique apparaît alors comme un développement de la théorie de l'information.

Revenons donc à la théorie de l'information et à sa définition de l'entropie d'une source. Si la source est constituée par deux messages m_1 et m_2 équiprobables, il y a donc un bit d'incertitude moyenne. Si tous les caractères alphabétiques (26 lettres et le séparateur) étaient équiprobables dans notre langue, la lecture d'une lettre entraînerait une information moyenne de $\log_2 27 = 4{,}75$ bits. Le code à deux caractères ou code binaire étant très employé, il convient de connaître l'allure de la courbe entropie tracée en fonction de la probabilité p d'un des caractères (*fig.* 4).

$$H = H(p) = -p \log_2 p - (1-p) \log_2 (1-p)$$

Cette courbe passe par un maximum égal à 1 lorsque p vaut 1/2, c'est-à-dire lorsque les deux caractères sont équiprobables. Ce résultat est général : pour n caractères, $H \leqslant \log_2 n$, le maximum étant atteint lorsque tous les caractères sont équiprobables.

Remarquons une autre propriété générale : H est toujours une fonction à valeurs positives. Par convention aussi, on désignera par H (X) l'entropie associée à une source X, bien que H ne soit pas fonction de X. De la même façon, on peut définir des entropies pour deux ou plusieurs sources. Ainsi, supposons deux sources de messages : X émettant $x_1 \dots x_m$, Y émettant $Y_1 \dots Y_n$; l'entropie de X sera désignée symboliquement par :

$$H(X) = -\sum_{i=1}^{m} p(x_i) \log p(x_i);$$

de même H (Y) pour la source Y. On peut définir la loi de probabilité conjointe $p(x_i, y_j)$ d'avoir les deux messages x_i et y_j. On définit alors l'entropie conjointe de deux sources X, Y par :

$$H(X, Y) = -\sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} p(x_i, y_j) \log p(x_i, y_j)$$

Ainsi :

$$H(X) = -\sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} p(x_i, y_j) \log \left[\sum_{j=1}^{n} p(x_i, y_j)\right]$$

Il est facile de montrer que :

$$H(X, Y) \leqslant H(X) + H(Y)$$

L'égalité $H(X, Y) = H(X) + H(Y)$ n'a lieu que si les deux sources sont indépendantes

$$(p(x_i, y_j) = p(x_i) \cdot p(y_j)).$$

Les définitions précédentes peuvent se généraliser à k sources $X_1 \dots X_k$.

On définit également d'autres entropies : les *entropies conditionnelles*. Rappelons qu'on définit la probabilité conditionnelle du message y_j produit par Y, sachant que X a émis le message x_i, par :

$$p(y_j, x_i) = \frac{p(y_j, x_i)}{p(x_i)} \qquad p(x_i) \neq 0$$

L'entropie conditionnelle sur le résultat de Y, sachant que X a émis x_i, se définit par :

$$H(Y/X = x_i) = -\sum_{j=1}^{n} p(y_j/x_i) \log_2 p(y_j/x_i)$$

$H(Y/X = x_i)$ est une fonction du résultat de X, x_i, c'est donc une quantité aléatoire. L'interdépendance des deux sources X et Y est mieux traduite par l'*espérance mathématique* de cette quantité que l'on note H (Y/X) :

$$H(Y/X) = E(H(Y/X = x_i)) =$$

$$-\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} p(x_i y_j) \log p(y_j/x_i)$$

Cette dernière quantité exprime l'information apportée sur Y lorsqu'on connaît le message émis par X : il ne faut pas la confondre avec H (Y), qui donne l'information sur Y sans se préoccuper de la source X.

Ces quantités sont liées entre elles; il est facile de montrer que :

$$H(X, Y) = H(X) + H(Y/X) = H(Y) + H(X/Y)$$

L'entropie conditionnelle H (Y/X) est majorée par H (Y), l'égalité des deux quantités n'ayant lieu que si les deux sources X et Y sont indépendantes.

Codage

Examinons maintenant comment ces notions peuvent être utilisées dans un problème de codage. A chacun des k messages m_i de la source on associe un mot code S_i composé de n_i caractères issus d'un alphabet de dimension c. Un alphabet très utilisé est l'alphabet binaire, dont on désigne symboliquement les caractères par $\{0, 1\}$. Chaque message ayant une probabilité $p(m_i)$, la longueur moyenne $\overline{n}$ des mots du code employé est naturellement définie par :

$$\overline{n} = \sum_{i=1}^{k} p(m_i)\, n_i$$

Remarquons immédiatement que $\overline{n}$ est nécessairement borné inférieurement. En effet, l'alphabet à c caractères peut permettre de coder au maximum $c^{\overline{n}}$ messages avec des mots de longueur $\overline{n}$. L'entropie H de la source est donc majorée :

$$H \leqslant \log_2 c^{\overline{n}}$$

Donc : $\overline{n} \geqslant \dfrac{H}{\log_2 c}$; si $c = 2$ $\qquad \overline{n} \geqslant H.$

Ainsi, l'entropie de la source est la longueur minimale des mots d'un code binaire. Si le canal transmet D lettres par unité de temps, on définit le débit d'information R par :

$$R = D \frac{H}{\overline{n}} \text{ bits/seconde}$$

L'efficacité d'un code est définie par le rapport η :

$$\eta = \frac{\overline{n}_{\min}}{\overline{n}} = \frac{H}{\overline{n} \log_2 c}$$

$1 - \eta$ traduit donc la *redondance* d'un codage. On peut alors énoncer le théorème de Shannon pour les transmissions sans bruit : il existe toujours un code déchiffrable (deux textes distincts ont des codages distincts) pour lequel la longueur moyenne des mots est aussi voisine que l'on veut de la borne inférieure indiquée ci-dessus.

Prenons un exemple fourni par Shannon dans son article original. Soit une source à quatre messages m_1, m_2, m_3, m_4 de probabilités respectives 0,5 ; 0,25 ; 0,125 ; 0,125 qu'on désire coder avec un alphabet binaire. L'entropie de la source vaut :

$$H = -(0{,}5 \log 0{,}5 + 0{,}125 \log 0{,}125 + 0{,}125 \log 0{,}125 + 0{,}25 \log 0{,}25) = 1{,}75 \text{ bit}$$

La longueur moyenne minimale du codage est donc 1,75. Shannon propose alors la technique suivante :

1) Ranger les messages par ordre de probabilité décroissante $p\ (m_1) \geqslant p\ (m_2) \geqslant ... \geqslant p\ (m_k)$. Soit

$$P_s = \sum_{i=1}^{s-1} p\ (m_i)$$

la probabilité cumulée jusqu'au $(s - 1)$-ième message.

2) Associer alors au message m_1 le mot binaire obtenu en écrivant P_s en binaire, ce développement étant tronqué à la longueur n_s déterminée par :

$$\log_2 \frac{1}{p\ (m_s)} \leqslant n_s \leqslant \log_2 \frac{1}{p\ (m_s)} + 1$$

Ainsi, les messages de faible probabilité ont les mots-codes les plus longs. Cette règle permet d'avoir des mots-codes tous différents, et donc permet la propriété de déchiffrabilité. Le calcul de $\overline{n}$ pour le code ainsi proposé montre que : $H \leqslant \overline{n} \leqslant H + 1$.

Cette méthode a été aussi proposée par Fano et porte le nom de *codage de Shannon-Fano*. Appliquons-la à l'ensemble de messages proposé. Ainsi :

$p\ (m_1) = 0{,}5$ $\quad n_1 = 1$ donc m_1 est codé par 0
$p\ (m_2) = 0{,}25$ $\quad n_2 = 2$ donc m_2 est codé par 10
$p\ (m_3) = 0{,}25$ $\quad n_3 = 3$ donc m_3 est codé par 110

De même, m_4 est codé par 111.
La longueur moyenne des mots-codes est donc

$$1 \cdot 0{,}5 + 2 \cdot 0{,}25 + 3 \cdot 0{,}25$$

soit 1,75.

Une autre application du théorème de Shannon est l'adaptation d'une source à un canal. Ce problème est analogue à celui de l'adaptation d'un générateur à une charge pour transmission du maximum de puissance dans un réseau électrique. Prenons l'exemple d'un canal binaire ayant une capacité de transmission maximale de c bits par seconde. Ce canal doit être relié à une source d'entropie H (< 1) débitant D caractères par unité de temps. Supposons que ce débit soit excessif ($D > c$) mais que le taux d'émission R en bits par seconde de la source vérifie $R < c$ ($R = DH$). Si on introduit un codeur dont la longueur moyenne des mots est $\overline{n}$, on réduit le débit de la source, et ainsi on l'adapte au canal ; le débit devient $D\overline{n}$. D'ailleurs, d'après le théorème de Shannon, on peut trouver un codage dont $\overline{n}$ est aussi proche que l'on désire de H.

Shannon avait d'ailleurs formulé son théorème d'une autre manière en disant qu'on peut trouver un codage pour une source d'entropie H bits par symbole reliée à un canal de capacité c bits par seconde de manière à transmettre au maximum au taux de $\frac{c}{H}$ symboles par seconde. En aucun cas, ce taux de transmission ne peut être dépassé. Ces deux énoncés sont similaires.

Canal discret avec bruit

Nous allons maintenant examiner le cas où le signal peut être perturbé par du bruit lors de la transmission dans le canal, autrement dit, où le signal reçu n'est pas toujours identique au signal émis.

Archives Snark

◀ **Un exemple de transmission dans le cadre d'un canal discret : la réception d'un télégramme d'Angleterre en 1898 au poste d'expérience de Winiereux (Bibliothèque nationale).**

On peut distinguer deux cas.

Le signal reçu est une fonction déterminée du signal émis, c'est-à-dire qu'à deux transmissions distinctes du même signal correspond le même signal reçu. Ce phénomène s'appelle la *distorsion*, et on peut très facilement le combattre si l'opération produisant les déformations du signal émis a une inverse unique et qu'on la connaisse.

Nous ne nous intéresserons pas à ce cas mais au deuxième où le signal reçu est une fonction statistique du signal émis. On introduit donc un processus stochastique, le bruit $n\ (t)$ (voir *fig.* 2) traduisant tous les phénomènes incontrôlés se produisant dans la transmission. Nous représenterons par X l'entrée du canal et par Y sa sortie. On peut caractériser ces grandeurs par leur entropie H (X) et H (Y). S'il n'y a pas de bruit, H (Y) = H (X). S'il y en a, on peut indiquer sa présence en faisant appel à l'entropie conjointe H (X, Y) et aux entropies conditionnelles H (Y/X) et H (X/Y). Rappelons la relation :

$$H\ (X, Y) = H\ (X) + H\ (Y/X) = H\ (Y) + H\ (X/Y)$$

Nous allons maintenant essayer de formuler l'information transmise par un canal marqué par du bruit. Partons de l'exemple simple d'une source à deux caractères $\{0, 1\}$ équiprobables que l'on transmet au taux de 1 000 symboles par seconde. Le bruit modifie le signal transmis : 1 % des signaux est reçu en moyenne de manière incorrecte (un 0 pour un 1 et réciproquement). Le taux de transmission de l'information est certainement inférieur à 1 000 bits par seconde à cause du bruit. On ne peut dire non plus que ce taux est de 990 bits par seconde, puisqu'on ne fait qu'intégrer la valeur moyenne du nombre d'erreurs. Ce raisonnement est faux. Poussons-le à l'extrême et supposons que le bruit soit particulièrement important pour que les caractères reçus soient complètement indépendants des caractères émis (on a une probabilité de 0,5 de recevoir 0 quel que soit le caractère émis, de même pour recevoir 1). Dans ces conditions, la moitié en moyenne des caractères reçus est incorrecte, et on dirait que le système transmet 500 bits par seconde, alors que réellement aucune information ne circule !

La meilleure correction à apporter au terme H (X) qui donne l'information moyenne mise à l'entrée du canal est la quantité d'information moyenne perdue lors de la transmission. Cette quantité est mesurée par l'entropie conditionnelle sur X connaissant Y : elle représente bien l'information moyenne sur la source que l'on a lorsqu'on connaît le message reçu. C'est ainsi qu'on définit l'information transmise I (X ; Y) ou information mutuelle entre X et Y par :

$$I\ (X ; Y) = H\ (X) - H\ (X/Y)$$

▶ *Figure 5 : représentation schématique du canal binaire symétrique* (**B. S. C.**, *du nom anglais Binary Symmetric Channel*) ; *les probabilités des caractères d'entrée sont : p (0) = a et p (1) = 1 — a.*

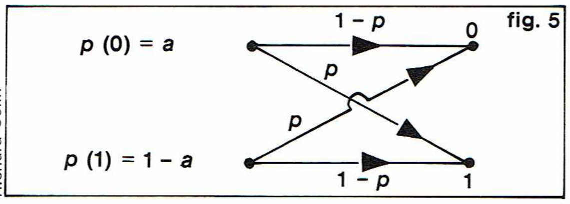

Richard Colin

H (X/Y) est parfois appelée *équivoque*. L'équivoque mesure la perte d'information due au bruit. On peut donner deux propriétés de I (X; Y) :

— I (X; Y) est toujours positive;

— I (X; Y) est une fonction symétrique.

$I(X;Y) = I(Y;X) = H(X) - H(X/Y) = H(Y) - H(Y/X)$

Calculons I (X; Y) pour l'exemple évoqué ci-dessus :

$$H(X/Y = 0) \sum_{i=0}^{1} p(X_i = i/Y = 0) \log p(X = i/Y = 0)$$

Il est facile de montrer que $P(X = 0/Y = 0) = 0{,}99$

$P(X = 1/Y = 0) = 0{,}01$

Donc $H(X/Y = 0) = -0{,}99 \log_2 0{,}99 - 0{,}01 \log_2 0{,}01$.

De même pour $H(X/Y = 1)$ et

$$H(X/Y) = \sum_{i=0}^{1} p(Y = i)\, H(X/Y = i) =$$

$-(0{,}99 \log_2 0{,}99 + 0{,}01 \log_2 0{,}01) = 0{,}0808$ bit/caractère soit donc 80,8 bits/seconde. L'information transmise par seconde par le canal est donc :

1 000 — 80,8 = 919,2 bits par seconde

Dans le cas du canal « dégénéré »

$$P(Y = 0/X = 1) = P(Y = 0/X = 0) = 0{,}5$$

on trouve :

$H(Y/X) = -0{,}5 \log_2 0{,}5 - 0{,}5 \log_2 0{,}5 = 1$ bit/caractère donc $I(X;Y) = 0$; on retrouve le résultat attendu.

Un exemple classique est le canal binaire symétrique (B. S. C., de son nom anglais Binary Symmetric Channel) où les mots de l'entrée et de la sortie sont pris dans l'alphabet $\{0, 1\}$. Ce canal peut se définir par la donnée des probabilités de transition ($p(1/1) = p(0/0) = 1 - p$; $p(1/0) = p(0/1) = p$) et celle des caractères d'entrées ($p(0) = a$; $p(1) = 1 - a$). Il peut se représenter schématiquement comme on l'a indiqué sur la *figure* 5.

Calculons à titre d'exemple pour ce canal l'information transmise I (X, Y). Soit $p(0) = a$ et $p(1) = 1 - a$ les probabilités *a priori* des caractères 0 et 1.

$$p(Y = 0) = a(1 - p) + (1 - a)\, p = a'$$

$$p(Y = 1) = 1 - a'$$

$$H(Y) = -a' \log a' - (1 - a') \log (1 - a')$$

$$H(Y/X = 0)$$
$$= -p(0/0) \log p(0/0) - p(1/0) \log p(1/0)$$
$$= -p \log p - (1 - p) \log (1 - p)$$

$$H(Y/X = 1)$$
$$= -p(0/1) \log p(0/1) - p(1/1) \log p(1/1)$$
$$= -p \log p - (1 - p) \log (1 - p)$$

$$H(Y/X)$$
$$= p(X = 0)\, H(Y/X = 0) + p(X = 1)\, H(Y/X = 1)$$
$$= -p \log p - (1 - p) \log (1 - p)$$
$$= I(X, Y) = -a' \log a' - (1 - a') \log (1 - a')$$
$$+ p \log p + (1 - p) \log (1 - p)$$

Puisque p est fixé par la physique du canal, I (X, Y) apparaît comme la fonction de a', probabilité de recevoir 0, c'est-à-dire comme une fonction de la probabilité d'émission de 0. Cette fonction est paramétrée par la probabilité p de recevoir un caractère erroné. Un calcul simple montre que I (X, Y) en tant que fonction de a est maximal si $a = \frac{1}{2}$, ce maximum valant :

$$I_{max}(X, Y) = 1 + p \log p + (1 - p) \log (1 - p)$$

I (X, Y) représente le maximum d'information transmissible. Si le canal est sans bruit, $I_{max}(X, Y) = 1$ bit.

Prenons des exemples de canaux bruyants :

$p = 0{,}1 \quad I_{max}(X, Y) = (1 - 0{,}47)$ bit

$p = 0{,}05 \quad I_{max}(X, Y) = (1 - 0{,}29)$ bit

$p = 0{,}01 \quad I_{max}(X, Y) = (1 - 0{,}08)$ bit

L'importance de la valeur du paramètre p est clairement apparente sur cet exemple.

Le résultat trouvé à propos d'un canal B.S.C. se généralise ; on appelle capacité C d'un canal le maximum d'information transmissible, c'est-à-dire le maximum de la quantité I (X; Y), considéré comme fonction des probabilités des caractères d'entrée. Ces probabilités sont en effet les seules quantités sur lesquelles on puisse agir, par le codage par exemple, sans toucher aux constituants réels du canal. Cette quantité est en général délicate à calculer, et seules sont souvent possibles des méthodes numériques de recherche opérationnelle.

Théorème fondamental de Shannon

A partir d'un message reçu en Y, il faut remonter au message émis X avec le moins d'erreur possible. Il est donc nécessaire de se définir une règle de décision à laquelle va être associée une valeur de la probabilité d'erreur. Une idée très simple vient à l'esprit pour minimiser la probabilité d'erreur : répéter les messages à l'émission et décoder suivant, par exemple, la règle du message le plus présent dans tous ceux reçus. Ainsi, on peut penser arriver à une probabilité d'erreur aussi faible que l'on veut en codant avec une redondance de plus en plus grande ; mais le taux de transmission tendrait vers zéro. Le **théorème de Shannon,** sous certaines conditions, infirme ce résultat. Tout ensemble de communication dépend de ce paramètre important : la probabilité d'erreur à la réception.

Calculons-la sur un exemple : un canal B. S. C. (voir *fig.* 3) dans lequel deux messages peuvent être envoyés : m_1 000 m_2 111. Par suite d'erreurs de transmission, huit messages peuvent être reçus : 000, 001, 010, 100, 011, 101, 110, 111. On distingue sur cet exemple l'ensemble $X = m_1, m_2$ de départ et l'ensemble Y d'arrivée composé de huit messages. Adoptons la règle de décision suivante : on décode suivant une logique majoritaire, c'est-à-dire que si on reçoit 000, 001, 010, 100, on considère que 000 a été émis, et que, si on reçoit 011, 101, 110, 111, on considère que 111 a été émis. On peut évidemment commettre des erreurs si le message émis a été modifié de plus d'un caractère. Ainsi, calculons certaines probabilités : $P(011/000) = (1 - p)\, p^2$, $P(111/000) = p^3$. Donc la probabilité P_{e1} de commettre une erreur en détectant le message 2 alors que le message 1 a été émis est égale à

$$P_{e1} = 3\, p^2 (1 - p) + p^3$$

La probabilité symétrique a la même valeur. Si a est la probabilité de m_1 et $(1 - a)$ celle de m_2, la probabilité d'erreur vaut :

$$P_e = 3\, ap^2 (1 - p) + ap^3 + (1 - a)\, [3\, p^2 (1 - p) + p^3]$$

Les équations de cet exemple sont simples. Toutefois, si l'alphabet d'entrée comprend L caractères et qu'on code avec des mots de longueur N, il y a L^N termes possibles. Les calculs deviennent alors pénibles (il est par exemple fréquent d'avoir N = 50). Aussi ne calcule-t-on généralement pas cette probabilité d'erreur mais un majorant.

L'objet de toute la théorie du codage est de trouver un code qui permette de minimiser cette probabilité.

Citons alors le **deuxième théorème de Shannon :** soit un canal discret de capacité C et une source d'entropie H bits/caractère. Si H est inférieur ou égal à C, on peut trouver un codage pour la source de manière que la probabilité d'erreur à la réception soit aussi faible qu'on le désire. Ce n'est pas possible si la capacité C est supérieure à l'entropie H (tout codage laisse une probabilité d'erreur finie).

Ce théorème est un théorème limite. Il revient à créer des codes dont la longueur N des mots est très grande et dont la taille M croît avec cette longueur. On peut montrer que $M = 2^{NR}$ dans le cas binaire (R : taux de transmission). Remarquons aussi que, si un codage efficace existe, aucune règle pratique ne le donne.

Comme la lutte contre le bruit reste prioritaire, on utilise d'abord des moyens technologiques : augmentation de la

puissance des signaux émis, apport technologique nouveau (amplification paramétrique, etc.), modulation et démodulation de signaux.

Le codage proposé par le théorème fondamental diminue peut-être le coût des organes de transmission et de réception (quoiqu'il faille tenir compte du système de codage-décodage) mais a l'inconvénient d'entraîner un retard à la réception.

Dans un chapitre ultérieur, nous évoquerons les techniques de codage permettant de lutter contre le bruit : les *codes détecteurs et correcteurs d'erreur.*

Canal continu

Nous allons maintenant essayer de définir les notions précédentes dans le cas où les signaux à transmettre sont des fonctions continues du temps (musique, parole, image...). Précédemment, à une suite de messages $m_1 \dots m_n$ on avait fait correspondre un ensemble de probabilités $p\ (m_1) \dots p\ (m_n)$ et une entropie H

$$H = -\sum_{i=1}^{n} p\ (m_i)\ \log_2 p\ (m_i)$$

On avait donc une variable aléatoire (la source) X pouvant prendre un ensemble fini de valeurs $m_1 \dots m_n$ avec certaines probabilités.

On envisage maintenant une source au nombre de messages suffisamment considérable (amplitude du signal musical à transmettre par exemple) pour la considérer comme une source continue. On parle alors de variable aléatoire continue caractérisée, sous certaines conditions mathématiques, par une fonction densité de probabilité $f\ (u)$ [*fig.* 6].

$$f\ (u)\ du = \text{Prob}\ (u < X < u + du)$$

Partant de la définition prise dans le cas discret, on en vient à exprimer l'entropie dans le cas continu par :

$$H = -\int_{-\infty}^{+\infty} f\ (u)\ \log_2 f\ (u)\ du$$

Cependant, cette nouvelle fonction présente l'inconvénient d'être négative pour certaines densités de probabilité. L'entropie n'a plus dans ce cas la signification concrète qu'on lui avait trouvée dans le cas discret. Elle peut aussi être infinie, l'intégrale divergeant au sens mathématique du terme.

Une autre difficulté est la suivante : dans le cas discret, la valeur de l'entropie associée à un ensemble de probabilités était unique, ce qui n'est pas vrai dans le cas continu. Prenons un exemple simple. Soit un signal dont la distribution d'amplitude est donnée : l'amplitude est comprise entre 1 et 3 avec une probabilité uniforme de 0,5 (*fig.* 7).

Le calcul simple de l'entropie correspondante donne :

$$H = -\frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{2} = 1 \text{ bit.}$$

Si le signal est amplifié deux fois (compris entre 2 et 6) [*fig.* 8], l'entropie s'écrit : $H = -\frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{4} = 2$ bits.

Or l'amplification du signal n'apporte aucune augmentation de l'information. L'entropie dépend donc du système de coordonnées.

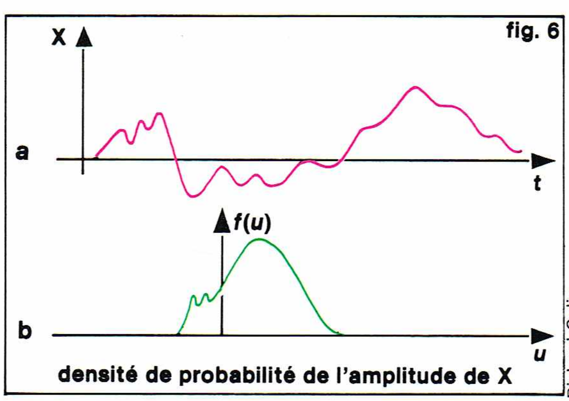

Richard Colin

◄ *Figure 6 : transmission de signal dans le cas d'un canal continu ;*
a) *amplitude de la variable aléatoire continue X ;*
b) *densité de probabilité de l'amplitude de X.*

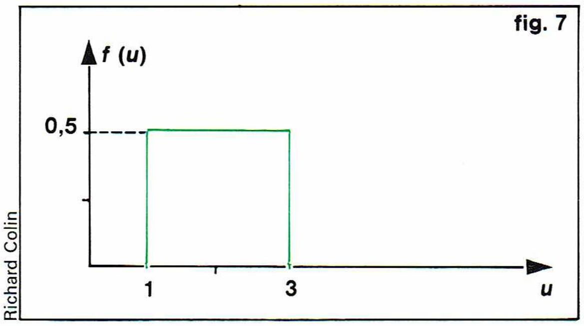

Richard Colin

◄ *Figure 7 : exemple d'un signal d'amplitude comprise entre 1 et 3 avec une probabilité uniforme de 0,5.*

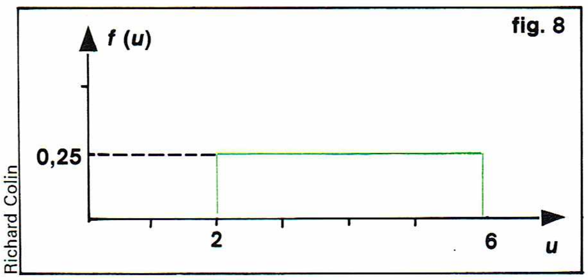

Richard Colin

◄ *Figure 8 : exemple d'un signal d'amplitude 2 et 6 avec une probabilité uniforme de 0,25.*

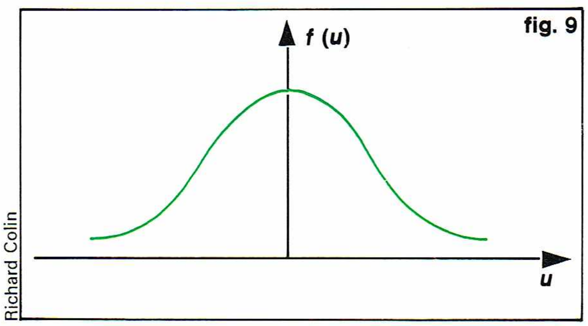

Richard Colin

◄ *Figure 9 : exemple d'un signal suivant la loi de Gauss (moyenne 0 et variance σ^2).*

Un cas très intéressant pour la suite du développement est celui où X suit une loi de Gauss de moyenne 0 et de variance σ^2 (distribution donnée *fig.* 9) :

$$H\ (X) = \log \sqrt{2\ e\pi\sigma}$$

$$\text{où } e = 2{,}718$$

Cette entropie est très utilisée, car on a le résultat suivant : l'entropie de toute variable continue de moyenne nulle et de variance finie est majorée par celle d'une variable de Gauss de même variance. L'entropie est donc maximale lorsque la variable est gaussienne.

De même que dans le cas discret, en utilisant les densités de probabilités conjointes ou conditionnelles, on peut définir :

— l'entropie conjointe de deux variables X et Y

$$H\ (X, Y) = \iint -f\ (x, y)\ \log_2 f\ (x, y)\ dx\ dy$$

— l'entropie conditionnelle

$$H\ (X/Y) = -\iint f\ (x, y)\ \log_2 f\ (x/y)\ dx\ dy$$

et $$H\ (Y/X) = -\iint f\ (x, y)\ \log_2 f\ (y/x)\ dx\ dy$$

On a toujours la relation

$$H\ (X, Y) = H\ (X) + H\ (Y/X) = H\ (Y) + H\ (X/Y)$$

Poursuivant l'analogie formelle avec le cas discret fini, on définit l'information mutuelle entre deux variables X et Y, I (X ; Y) par :

$$I\ (X ; Y) = H\ (Y) - H\ (Y/X) = H\ (X) - H\ (X/Y)$$

Ces équations régissent la transmission des messages continus. Si l'entropie n'a pas toujours de signification physique, ce n'est pas le cas de I (X ; Y) qui n'est jamais négative : on peut bien parler d'information transmise. Dans le cas de 2 variables gaussiennes caractérisées par un coefficient de corrélation p, l'information mutuelle vaut :

$$I\ (X ; Y) = \frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{1 - p^2}$$

Les notions des canaux discrets peuvent être étendues aux canaux continus ; on désigne sous ce vocable des canaux susceptibles de transmettre des signaux x (t) continus. La capacité C d'un canal continu est encore définie comme le maximum d'information transmissible, celle-ci étant considérée comme fonction de la densité de probabilité f (x) de l'entrée.

$$C = \max I(X; Y)$$

Cette définition n'est en fait valable que pour des signaux limités en fréquence, c'est-à-dire dont la plage de fréquences couvertes est finie.

Ces notions, esquissées dans cette partie, seront reprises lorsque seront traités les problèmes de codage et de communication.

BIBLIOGRAPHIE

ATLAN H., *l'Organisation biologique et la Théorie de l'information*, Hermann, 1972. - BRILLOUIN L., *la Science et la Théorie de l'information*, Masson, 1959. - CAROWELL D. S. L., *Technology, Science and History*, Heinemann, London, 1972. - ROSE A. M., *Information and Communication Theory*, Blackie and Sons Limited, 1966. - ROUSSEAU R., *Histoire des techniques et inventions*, Hachette, 1967. - SHANNON C. E., *A Mathematical Theory of Communication*, Bell Syst. Tech. vol. 27, pp. 379-423, juillet 1948.

▼ Un exemple de transmission dans le cadre d'un canal continu : la transmission téléphotographique d'un portrait de M. Fallières sur le circuit Paris-Lyon-Paris, le 1er février 1907 (journal* L'Illustration *du 2 février 1907).

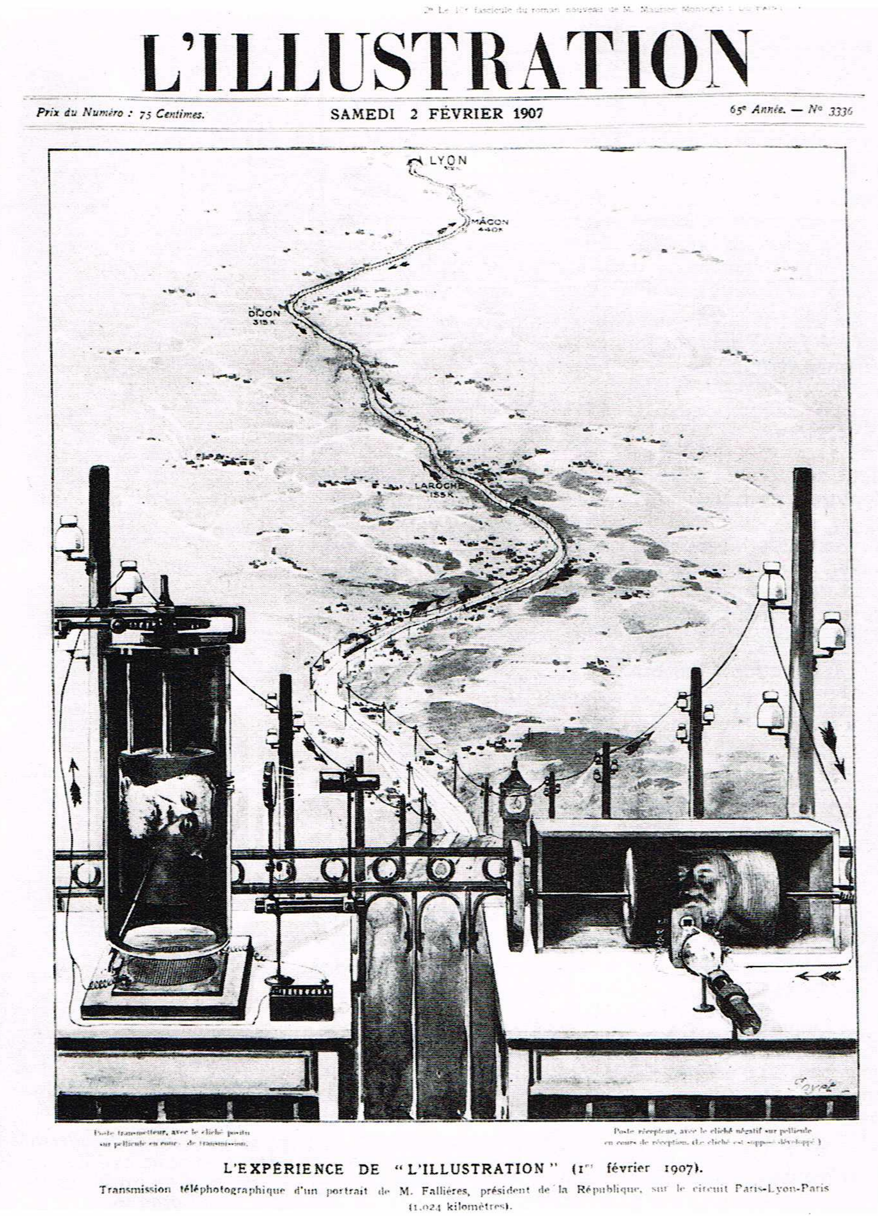

L'ILLUSTRATION

Prix du Numéro : 75 Centimes. SAMEDI 2 FÉVRIER 1907 65e Année. — N° 3336

L'EXPÉRIENCE DE « L'ILLUSTRATION » (1er février 1907).

Transmission téléphotographique d'un portrait de M. Fallières, président de la République, sur le circuit Paris-Lyon-Paris (1.024 kilomètres).

Archives Snark

LA SAISIE DES DONNÉES

Problème général

Métrologie et mesure

La métrologie est une science qui est à la rencontre de toutes les autres sciences. Elle en utilise toutes les ressources en s'appuyant essentiellement sur l'expérimentation. Elle permet au scientifique de déterminer théoriquement les meilleures conditions expérimentales qui lui permettront d'approcher au plus près la vraie valeur d'une grandeur et aussi de connaître l'écart maximal séparant le résultat de sa mesure de la valeur vraie de la grandeur qu'il voulait appréhender.

Il est nécessaire de souligner l'importance qu'a la métrologie dans l'avancement des sciences. C'est elle, bien avant qu'on l'eût baptisée, qui a permis de passer de l'ère du dénombrement puis de l'observation à l'ère de la mesure.

Les premiers hommes ont tenté d'avoir une connaissance du monde qui les entourait en essayant des dénombrements avec des points de repère. Il en a été ainsi pour le temps : les levers et couchers de Soleil rythment les jours, les évolutions de la Lune fournissant un repère grâce auquel il est possible de compter les premiers. Puis l'observation conduit à une perception qualitative permettant des descriptions. Enfin, pour avoir une prise sur le réel, pour prévoir, il a fallu affiner cette observation et introduire la *mesure*. Seuls les phénomènes bien définis et quantifiables peuvent être appelés *grandeurs ;* ils sont susceptibles d'être repérés par un nombre sur une échelle caractérisant chaque *grandeur,* et ce nombre est la *valeur*. Quand on a su définir la somme de deux valeurs d'une même grandeur, on a alors eu accès à la *mesure* au vrai sens du terme.

Le langage courant confond sous le nom de *mesure* deux choses bien différentes : d'abord l'action de mesurer que l'on pourrait désigner d'un néologisme, le *mesurage*, ensuite le résultat de cette action de mesurage qui est, en fait, la valeur de la grandeur considérée.

Pour donner une définition assez générale de l'opération de mesure, nous reprendrons l'énoncé de MM. Barrière et Gaignelet (*Métrologie générale*, Dunod) : « C'est l'ensemble des opérations qui consistent à solliciter, obtenir, transmettre et recueillir une information qui exprime l'état d'une grandeur, information qui sera ultérieurement dépouillée, codée ou décodée pour être finalement soit mise en mémoire où elle reste à la disposition de l'expérimentateur qui la confronte avec ses hypothèses, soit injectée dans une machine qui réalise une opération physique. »

Évolution de la métrologie et de l'instrumentation

Quand les physiciens, après avoir inventé quelques instruments de mesure, ont commencé à disposer de résultats, ils ont cherché à les rendre de plus en plus précis ; cela a contribué pour une grande part à l'avancement des sciences. Ils en sont arrivés à des appareils extrêmement sophistiqués et d'un emploi délicat et minutieux qui ne peuvent plus être utilisés que dans un laboratoire.

L'évolution de la technologie, par ailleurs, a conduit à des contrôles plus soignés des procédés de fabrication industriels. Il a donc fallu adapter au milieu industriel, pour lequel les besoins en précision ne sont pas, en général, trop difficiles à satisfaire, une instrumentation particulière mais qui, en revanche, doit être insensible à des conditions de fonctionnement souvent dures et doit faire apparaître le résultat de la mesure sous une forme exploitable par des utilisateurs non spécialisés ou par des automatismes plus ou moins compliqués. On a donc été amené industriellement à mesurer les grandeurs physiques non pas tant pour en avoir une valeur exacte ou très précise qu'une information utilisable directement dans des dispositifs automatiques. C'est pourquoi la plupart des résultats de mesure sont donnés maintenant sous la forme d'un courant ou d'une tension électrique, qu'une grande gamme d'appareils électroniques sont capables de traiter, de mémoriser pour en tirer les renseignements nécessaires à l'élaboration des ordres de commande des automatismes industriels.

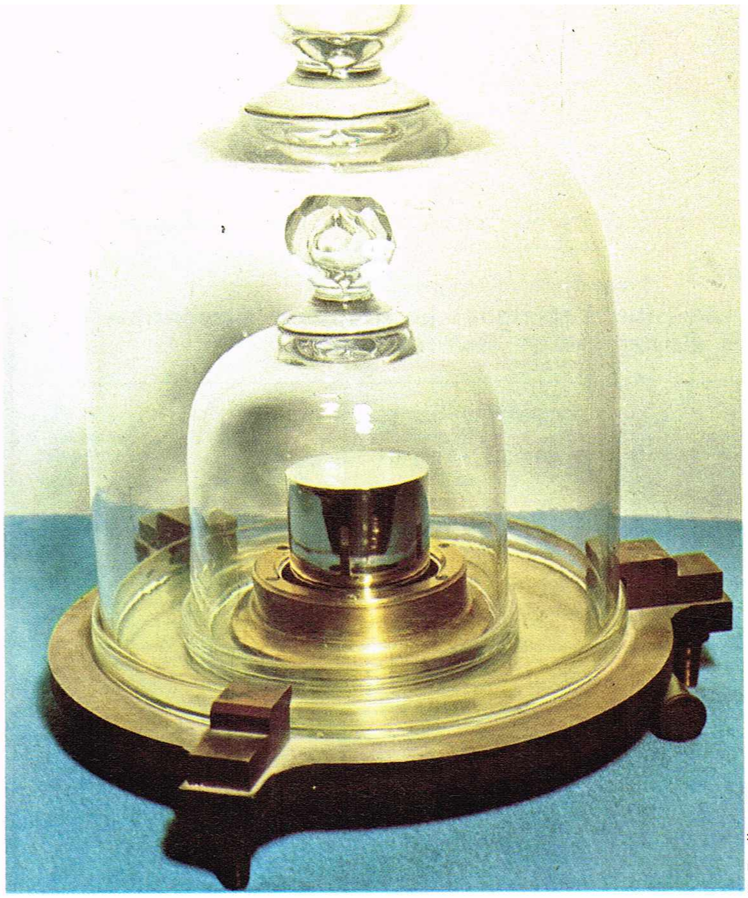

C. Bevilacqua

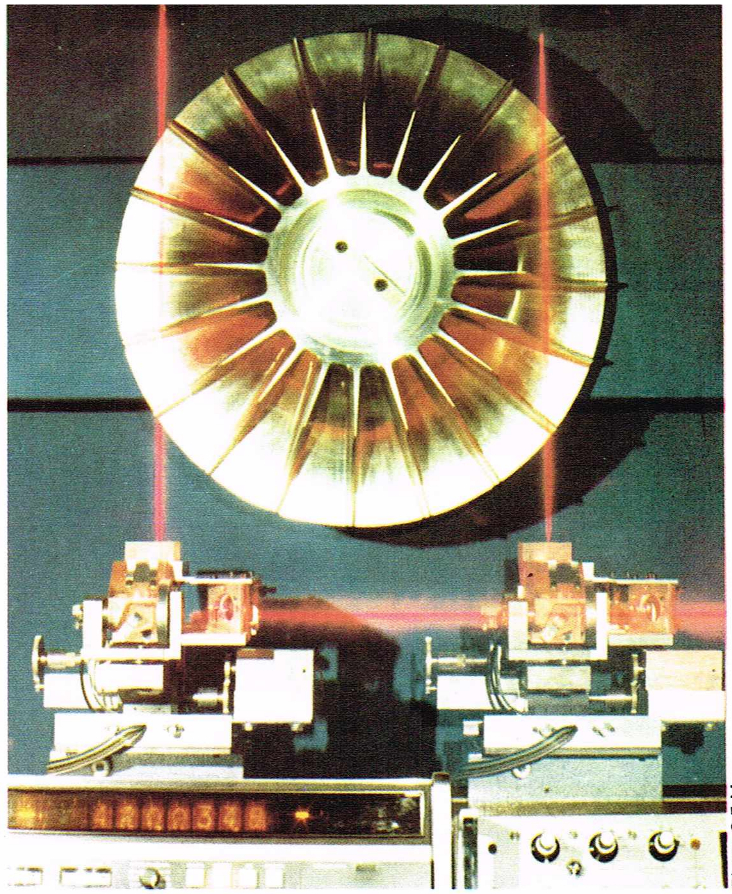

Photo C.E.M.

▲ ***A gauche,***
le kilogramme-masse-étalon exposé au Bureau international des poids et mesures (pavillon de Breteuil, Sèvres, France).
A droite, la mesure du diamètre extérieur d'une roue de compresseur effectuée à l'aide d'un faisceau laser et d'un pentaprisme.

On a donc développé des instruments capables d'appréhender des grandeurs très différentes et, pour pouvoir appliquer tous les procédés de traitement électronique aux résultats des mesures, ceux-ci sont représentés par un signal électrique. Ces instruments sont habituellement désignés sous le nom de *capteurs*. Ils permettent de transformer une grande quantité de grandeurs physiques en une autre grandeur physique plus particulièrement adaptée au traitement : un signal électrique. Les capteurs constituent ainsi l'entrée de chaînes d'asservissement ou les organes sensibles des automatismes pilotés par des calculateurs.

Il est possible d'avoir une idée des transformations que peut opérer un capteur en consultant le *tableau* I. Dans ce tableau sont présentées verticalement diverses grandeurs à mesurer et horizontalement les grandeurs électriques dans lesquelles on peut les transformer. Au croisement des lignes et colonnes figurent les dispositifs utilisables pour effectuer la transformation.

Sachant de plus que toutes les variations de grandeurs électriques peuvent se ramener à des variations de tension, on imagine la multitude de moyens à notre disposition pour convertir la valeur ou les variations de valeur d'une grandeur en un signal électrique.

Remarquons qu'il est possible d'employer plusieurs types de capteurs pour appréhender une grandeur physique déterminée. Ainsi, pour mesurer la longueur d'une barre métallique, on peut faire rouler sur elle un galet dont on relèvera le nombre de tours, ou faire défiler la barre à vitesse constante devant une cellule qui détectera le début et la fin de son passage, donc le temps pendant lequel la cellule a été occultée.

C'est le côté pratique de la mise en œuvre, avec les performances souhaitées pour la mesure, qui détermine le choix du capteur. Inversement, un transducteur déterminé pourra être utilisé seul ou en conjonction avec d'autres pour faire des mesures très différentes. Ainsi, avec un capteur angulaire, on pourra naturellement faire des mesures d'angles mais aussi de longueurs, de vitesse, d'accélération, de position, de niveau et de contrainte.

Beaucoup de grandeurs physiques sont susceptibles d'être converties en une grandeur électrique dont on sait bien mesurer la valeur. Ces conversions sont faites par le capteur qui utilise les propriétés particulières d'interaction de certains matériaux que l'on nomme couramment les « effets ». Ainsi, l'effet thermo-électrique permettra la conversion de différences de températures en différences de potentiels ou en courant, l'effet piézo-électrique la conversion de forces ou de pressions en charges électriques ; l'effet photo-électrique permettra de transformer un éclairement en un courant, etc.

Ces conversions directes peuvent être quelquefois associées dans un capteur à une transformation plus ou moins mécanique entre grandeurs. C'est ainsi que, dans certains cas, on mesure une force par la déformation qu'elle cause à un anneau métallique ; et c'est la déformation que l'on traduit grâce à une jauge de contrainte en un signal électrique. L'élément primaire, l'anneau dynamométrique, forme alors le corps d'épreuve.

Les capteurs

Chaîne de mesure

Examinons la manière dont peut s'ordonner une *chaîne de mesure* (*fig.* 1).

Au sein d'un système physico-chimique quelconque, stable ou en cours d'évolution, il y a la grandeur que l'on se propose de saisir. Elle n'est pas toujours directement accessible, et ce que l'on mesurera effectivement sera une grandeur physique ou chimique à laquelle la première est liée.

Le capteur intervient pour mesurer la seconde grandeur et fournir un signal qui la représente. Ce signal n'est qu'une grandeur objet codant la grandeur mesurée, et n'est mis en œuvre que pour ses caractéristiques fondamentales de facilité de représentation, de transmission ou de traitement. C'est bien la raison pour laquelle ce signal est, dans la majorité des cas, une grandeur électrique, tension ou courant. Le signal de mesure subit alors une première série de transformations destinées à faciliter sa transmission (amplification, modulation, etc.).

Après avoir été transmis, le signal sera éventuellement démodulé ou détecté, décodé, avant d'être traité de manière à en extraire la valeur de la grandeur à saisir ou pour élaborer un signal de commande permettant de modifier les conditions d'évolution du système physico-chimique de départ.

Le *capteur* réalise habituellement l'ensemble des opérations de conversion de grandeurs, de saisie et de conditionnement du signal, soit pour la transmission, soit pour le traitement, en donnant au signal une énergie suffisante pour l'affranchir de l'influence ultérieure de parasites. Sur le schéma de la chaîne de mesure apparaît un *transmetteur* qui est un dispositif quelquefois adjoint au capteur et qui est plus particulièrement chargé du conditionnement du signal pour sa transmission, le capteur continuant d'effectuer la saisie de la grandeur mesurée.

Donnons un exemple qui serait de vouloir connaître la température d'un métal en fusion dans un four. On procédera par méthode pyrométrique et ainsi on essaiera d'atteindre la température du métal (grandeur à saisir) en mesurant l'émissivité de la surface du métal fondu assimilé

Tableau I

Transformations possibles d'une grandeur mesurée (non électrique) en grandeur susceptible d'être mesurée par des procédés électriques et électroniques

Principe de fonctionnement / Grandeur mesurée	Variation de résistance dR	Variation de capacité dC	Variation d'un coefficient d'induction dL ou dM	Variation de flux $d\Phi/dt$ ou $d\Phi/dx$	Variation de fréquence dN	Variation de charge dQ	Variation de flux électronique ou ionique	Variation de potentiel dE
Longueur (épaisseur)	Mesure de la conductibilité	Mesure d'épaisseur de diélectriques par variation de capacité		Transparence aux rayons X, γ et β	Résonance mécanique			
Temps						Mesure d'une quantité d'électricité		Charge d'un condensateur à courant constant
Force (microdéplacement) $F = (1/K)\ dl$	Fil résistant nu, semi-conducteur (pile de carbone, caoutchouc, semi-conducteur, micro à grenaille)	Voir aussi Pression	Variation de réluctance d'un circuit magnétique déformable	Variation du flux lumineux par la biréfringence du verre. Magnétostriction Voir aussi Pression		Cristaux piézo-électriques		
Déplacement dl	Potentiomètres Fil tendu Fil de bismuth Semi-conducteurs (par effet Hall)	Électrodes fixes et mobile liées à l'objet	Variation de réluctance. Pertes H.F. dans une plaque mobile	Variation d'un flux lumineux par effet d'écran	Fil vibrant tendu (cordes vibrantes)	Cristaux piézo-électriques (bilames en particulier)	Tube électronique à électrodes mobiles	Variation de potentiel d'un condensateur chargé en fonction du déplacement des électrodes
Allongement relatif dl/l	Jauges résistantes à fil et à semi-conducteurs	Électrodes scellées en 2 points	Variation de perméabilité d'un circuit magnétique		Fil vibrant tendu (cordes vibrantes)			
Position (dl ou dx)	Potentiomètres Résistances déformables	Condensateur variable	Variation de réluctance de transformateurs rotatifs				Tubes à électrodes mobiles	
Pression (microdéplacement) $P = (S/K)\ dl$	Contacts oxydes-métaux Voir aussi Force	Déformation d'une électrode (intermédiaire mécanique)		Membrane agissant sur une bobine mobile (intermédiaire mécanique). Voir aussi Force		Voir aussi Force. Cristaux piézo-électriques sensibles à la pression hydrostatique	Jauge à ionisation	
Vitesse linéaire (solide, fluide) dx/dt	Fil chaud			Moulinet à aimant permanent ou à réflexion d'un flux lumineux	Effet Doppler-Fizeau pour les grandes vitesses		Tube accéléromètre à électrodes mobiles	
Vitesse angulaire $d\alpha/dt$				Variation de flux lumineux (intermédiaire mécanique). Dynamos, moteurs biphasés	Roue phonique	Charge et décharge d'un condensateur (intermédiaire mécanique)		
Rayonnement Opacité Transparence	Bolomètre			Cellules photo-électriques à vide et gaz : photopiles, cellules photorésistantes. Transparence aux rayons β et γ		Semi-conducteurs (titanate de baryum)	Chambres d'ionisation Tubes Geiger-Müller	Pile thermo-électrique
Température	Sonde à fil de platine Semi-conducteurs Bolomètre			Photopiles Cellules photorésistantes	Quartz oscillant			Thermocouples
Conductibilité	Mesure directe par électrodes de platine							
Humidité	Variation de résistance de ClLi Mesure directe de la résistance d'une surface ou d'un volume	Condensateur (variation de constante diélectrique)						
Perméabilité			Mesure par variation de μ					
Potentiel		Charge et décharge de condensateurs						Électrodes spéciales pour pH (électrodes de verre) Électrodes à gouttes de mercure

◀ *Page ci-contre, tableau I : les différentes transformations possibles d'une grandeur mesurée (non électrique) en grandeur susceptible d'être mesurée par des procédés électriques et électroniques (d'après U. Zelbstein, Mesures électriques, Dunod, Paris, 1969).*

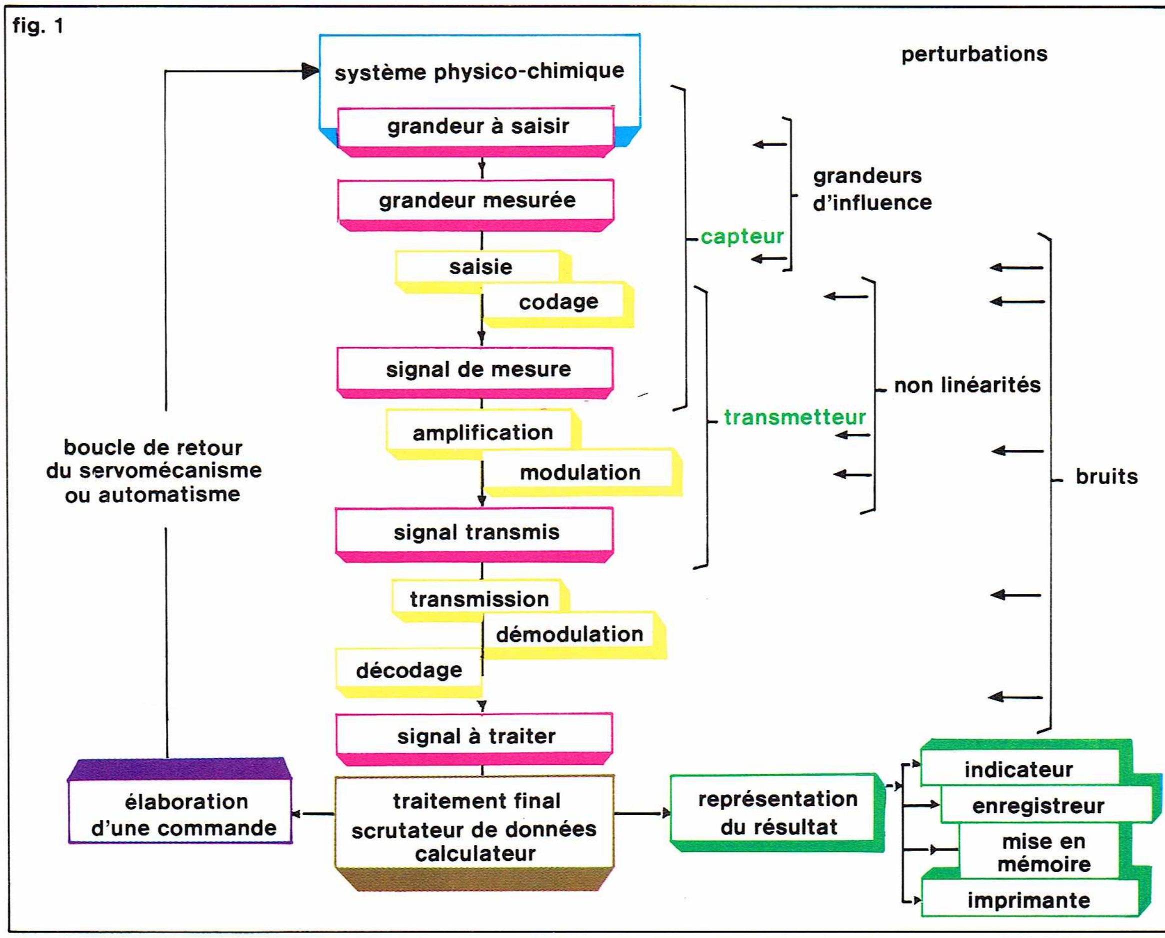

◀ *Figure 1 : représentation schématique d'une chaîne de mesure.*

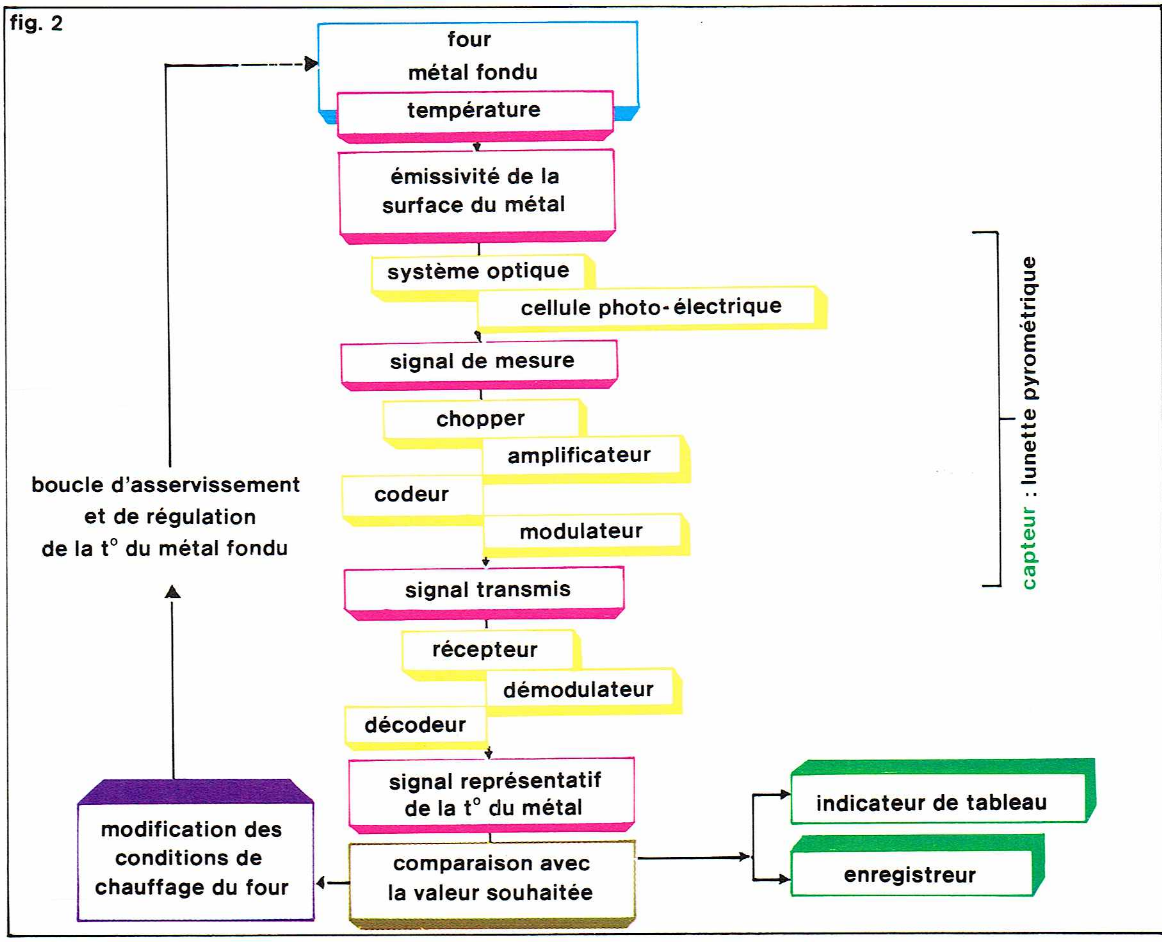

◀ *Figure 2 ; un exemple de chaîne de mesure : la mesure de la température d'un métal en fusion dans un four.*

▶ *Figure 3 : représentation digitale et analogique pour 4 bits dans le cas du code binaire ; dans ce cas 16 valeurs sont représentables.*

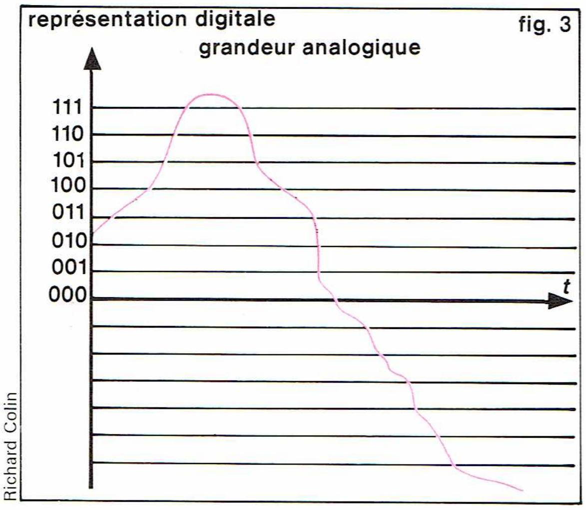

au corps noir par radiométrie optique. Le rayonnement émis par cette source frappe une cellule photo-électrique qui convertit le nombre de photons reçus en une tension électrique continue. Pour amplifier facilement ce signal continu, il est haché à une fréquence déterminée (ce qui est une sorte de codage par un « chopper », terme anglais utilisé par les électroniciens) puis conduit à un modulateur ou à un codeur avant d'être transmis vers la salle de mesures où tous les paramètres du processus sont centralisés. La chaîne de mesure dans ce cas précis est représentée sur la *figure* 2.

▶ *Page ci-contre, tableau II : codage des différentes positions de l'axe des codeurs à contact ou des codeurs optiques avec un code Gray et avec un code* BCD *(M. C. B.).*

Nature des signaux de mesure

Signaux analogiques ou continus dans le temps

Ces signaux sont tels que la précision avec laquelle on les connaît dépend de l'appareil et de la méthode de mesure. C'est la forme la plus répandue sous laquelle on appréhende les résultats de mesure.

Signaux logiques ou digitaux

Suivant le code employé, le nombre de bits utilisés pour la représentation des grandeurs fixe absolument le nombre de valeurs différentes représentables et, par conséquent, la résolution. Ainsi, en utilisant 4 bits, on sera capable de distinguer 16 combinaisons différentes des bits et, par suite, de représenter 16 informations différentes. S'introduit la notion importante de quantification de l'information. Toutes les valeurs possibles de la grandeur à mesurer ne sont pas traduites par le code ; seules 16 d'entre elles, dans l'exemple présent, sont représentables (*fig.*3).

▼ *Un codeur optique angulaire incrémental RI 15 : ce type de codeur fournit directement l'information sous forme digitale (mot digital de 10 ou 12 bits permettant une définition de 1 000 ou 1 024 points/ tour et une résolution de 21,6 ou 21').*

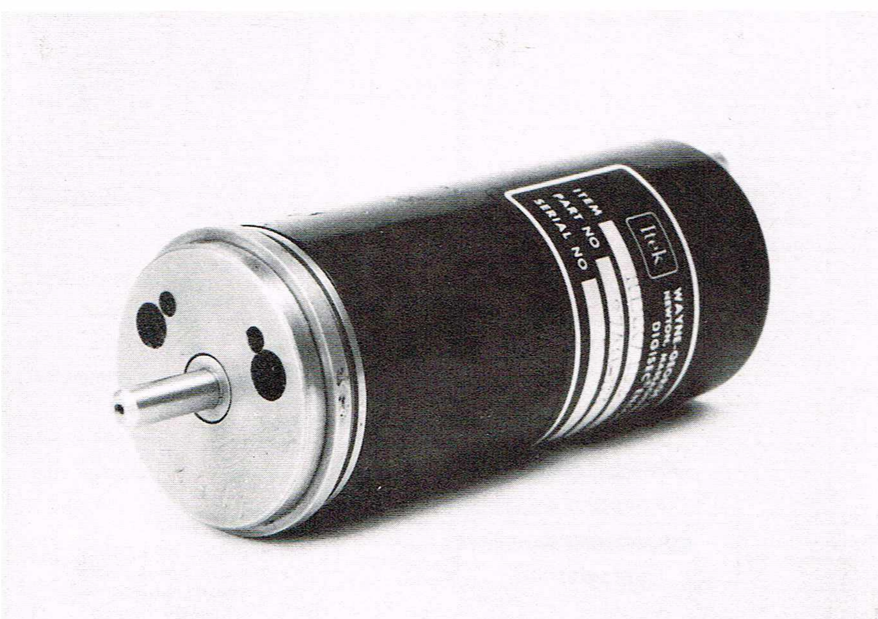

Photo Sedeme

De plus, comme la traduction d'une valeur analogique ou de son équivalent digital demande du temps et qu'il est nécessaire de conserver présente pendant tout ce temps la valeur analogique de la grandeur, on utilise un *échantillonneur-bloqueur*. Ce dispositif prélève un *échantillon* de la valeur à convertir et le *bloque* jusqu'à ce que la conversion soit terminée, puis recommence avec un autre échantillon.

L'apparition des moyens modernes de traitement de l'information (scrutateurs de données, calculateurs...) favorise le développement de cette forme de signal. Un grand nombre de capteurs délivrant une tension de sortie analogique, les signaux doivent être transformés au moyen de convertisseurs analogiques-digitaux. Certains capteurs cependant fournissent directement l'information sous forme digitale ; il en est ainsi, par exemple, de nombreux codeurs de position angulaire qui indiquent la position de leur axe par un mot digital de 10 à 12 bits permettant une résolution de 1 000 ou 1 024 points sur un tour suivant le code utilisé.

Le *tableau* II montre comment sont codées les différentes positions de l'axe avec un code Gray ou avec un code BCD. La caractéristique importante de ces deux codes est que deux positions voisines sont codées avec deux mots digitaux dont un seul bit est modifié ; cela permet d'éviter des indications erronées quand l'axe est arrêté à la limite de chaque position. Parmi tous les codes digitaux qui pourraient être utilisés pour faire ce codage, on choisit précisément un de ces deux-là à cause de cette propriété remarquable.

Ainsi, en code Gray, les positions 9 et 10 sont codées (en n'utilisant que les 5 premiers bits) :

9	0 1 1 0 1
10	0 1 1 1 1

Si l'axe s'arrête dans une position angulaire limite de 9 ou 10, l'indication du code ne pourra pas être différente de 9 ou 10 puisque seul le bit n° 2 est susceptible de changer.

En milieu industriel, les signaux digitaux (on dit aussi numériques) présentent un grand intérêt : ils sont relativement peu sensibles aux parasites. En effet, le signal n'est plus représenté directement par son amplitude en fonction du temps comme c'est le cas sous sa forme analogique, mais son amplitude, à des instants régulièrement répartis, est représentée par un ensemble de tensions qui ne peuvent prendre que deux niveaux choisis bien séparés pour que les parasites ne puissent pas nous amener à prendre un niveau pour l'autre. Sous cette forme, le signal devient donc peu sensible aux parasites, et l'introduction d'erreurs est plus rare et difficile.

Parasitage de la chaîne de mesure - Perturbations

De toute la chaîne de mesure, et pas seulement du capteur, dépendra la précision de la mesure et la justesse du résultat qu'au bout du compte on prendra comme valeur de la grandeur à saisir. Il est donc utile de considérer l'origine des perturbations que le signal va subir au cours de la mesure, et les moyens que l'on peut mettre en œuvre pour se prémunir de leurs effets.

Les perturbations sont très diverses. On peut les classer en trois catégories : grandeurs d'influence ; non-linéarités ; bruits. Elles interviennent à différents niveaux de la chaîne de mesure et constituent des sources d'erreurs.

Erreurs systématiques et erreurs aléatoires

Les erreurs systématiques sont théoriquement corrigibles puisque l'on sait de quelle manière et à quel niveau de la chaîne de mesure elles interviennent.

Les erreurs aléatoires sont difficilement corrigibles, car on ne peut pas prévoir où, quand et comment elles interviennent. Les seuls procédés utilisables pour les corriger sont de nature statistique, en procédant par moyennes par exemple.

Sources d'erreurs

Elles sont multiples et se situent dans les instruments, dans le procédé physique et dans le déroulement de la mesure.

Ainsi, une source d'erreur instrumentale fondamentale concerne la réaction de l'instrument sur la grandeur à

codeurs

Tableau II - (d'après MCB)

CODE BINAIRE REFLECHI (CODE GRAY)

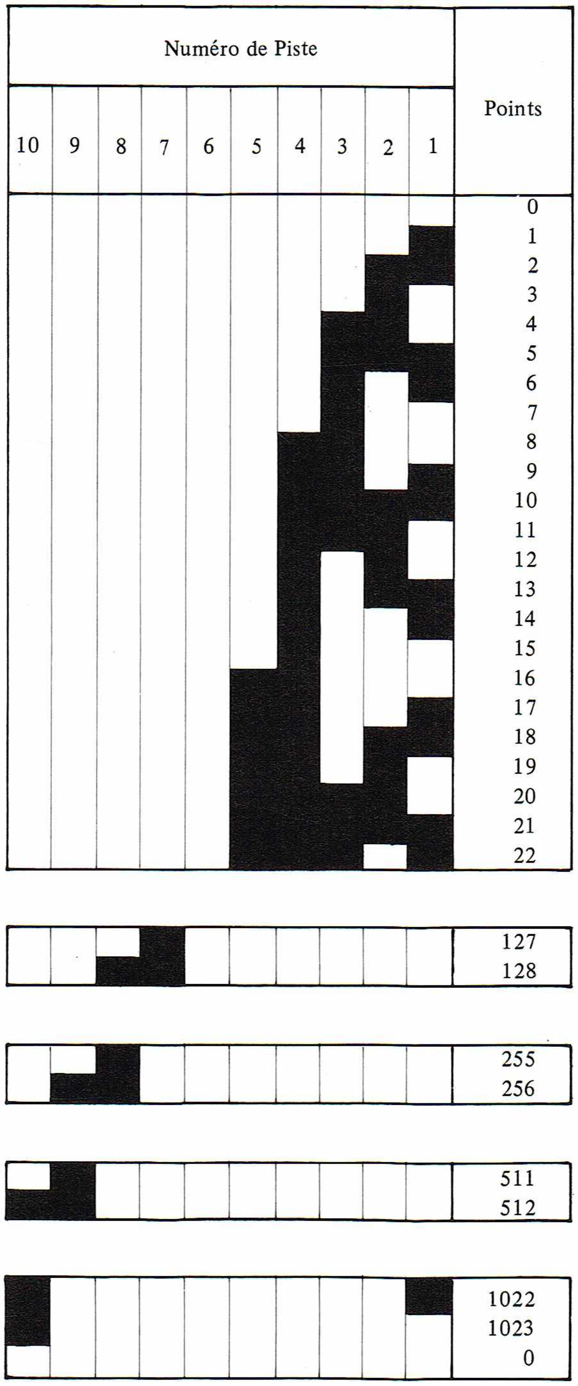

CODE DECIMAL BINAIRE REFLECHI A EXCEDENT 3 (BDR + 3)

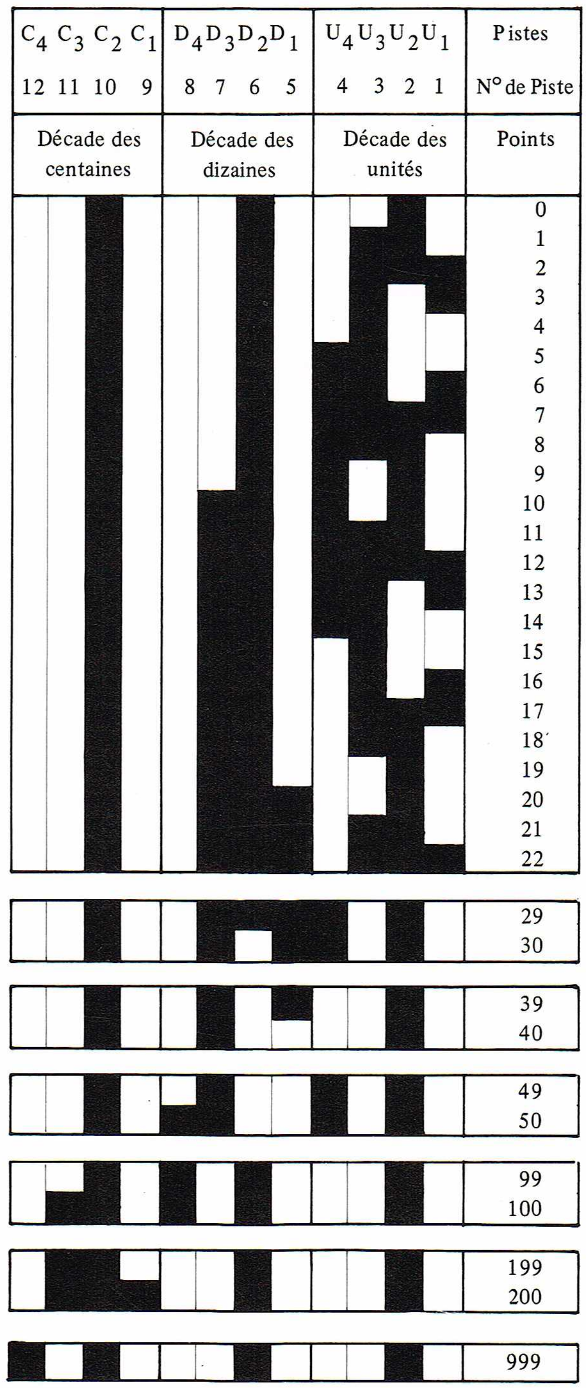

	Les zones blanche (0 binaire) correspondent à :	Les zones noires (1 binaire) correspondent à :
dans les codeurs à contacts	des parties isolantes donc absence du courant	des parties conductrices donc passage du courant
dans les codeurs optiques	I ou V minimum (niveau bas)	I ou V maximum (niveau haut)

M.C.B.

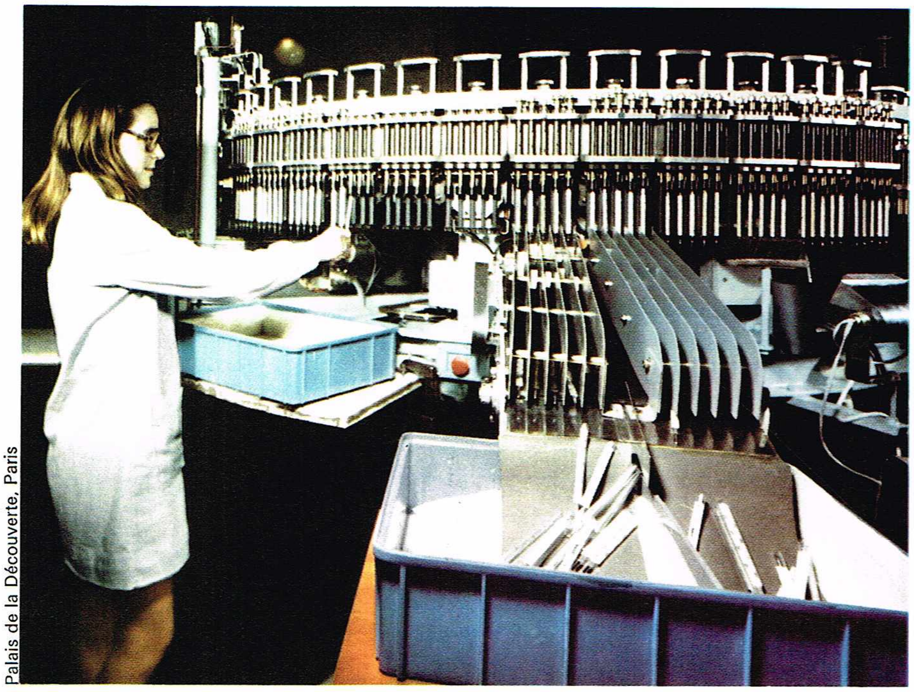

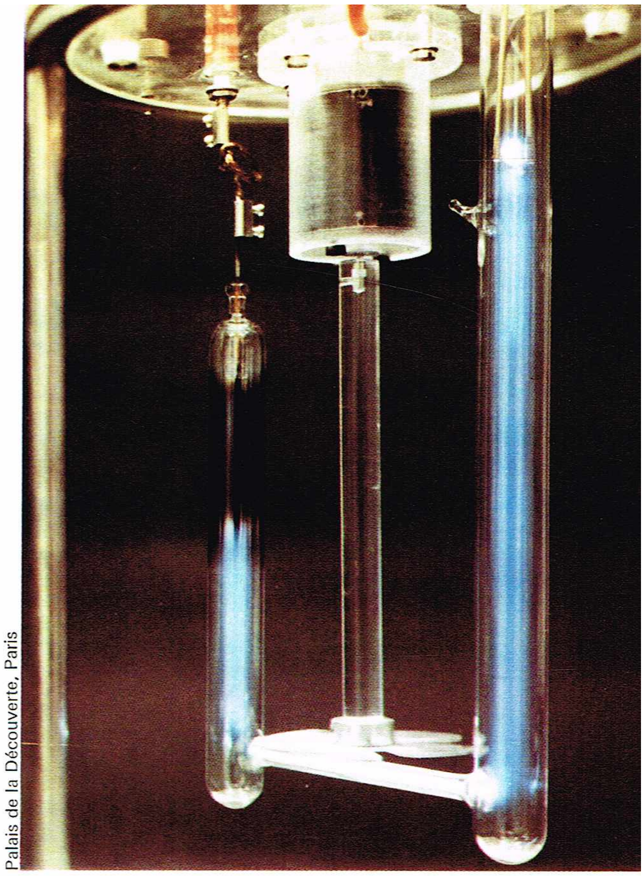

▲ A gauche, appareil de contrôle des thermomètres médicaux. A droite, une lampe à krypton mise au point par E. Engelhardt ; la longueur d'une onde de cette lampe permet de définir le mètre international.

mesurer. On sait bien qu'un thermomètre plongé dans un liquide provoque une modification de la température de ce dernier à cause de sa propre capacité calorifique et que cette perturbation est d'autant plus grande que le volume du liquide est petit. Cet exemple grossier doit toujours rester présent à l'esprit de quiconque effectue une mesure. La qualité essentielle de l'instrument de mesure doit être de ne perturber qu'au minimum la grandeur mesurée ; en tout cas, il est nécessaire de tenir compte, au besoin par un étalonnage, de cette perturbation pour connaître la précision de la mesure.

Dans certains capteurs élaborés, on utilise un asservissement pour diminuer la perturbation apportée par l'instrument. Par exemple, une mesure de pression se fait souvent par déformation d'une membrane et introduit donc une modification du volume de l'enceinte dans laquelle on veut mesurer la pression. Pour pallier cet inconvénient, on utilise un asservissement qui, créant une contre-pression de l'autre côté de la membrane, rétablit presque complètement le volume initial. Il est à noter d'ailleurs que c'est la contre-pression qui est mesurée et que la membrane primaire n'est utilisée que pour détecter l'équilibre.

Grandeurs d'influence

Les grandeurs d'influence interviennent au niveau du capteur ou dans la relation grandeur à saisir-grandeur mesurée. Ce sont : les conditions thermiques ou météorologiques comme la température, la pression, l'hygrométrie, etc. ; les grandeurs électromagnétiques comme le champ magnétique, des tensions électriques parasites, etc. ; les actions mécaniques comme une accélération ou un choc, des vibrations, les jeux ou les frottements, etc.

Non-linéarités

Les non-linéarités sont plus spécifiquement localisées dans les transformations que subit le signal et donc l'information. Elles introduisent des erreurs systématiques.

Bruits

Les bruits s'introduisent à tous les niveaux de la chaîne de mesure. Ils amènent par principe des erreurs aléatoires dont la correction ne peut guère être que de nature statistique. Le meilleur moyen de minimiser les perturbations dues aux bruits est de se garantir de leur influence en agissant le plus possible sur la cause.

Si l'on peut déterminer les endroits sensibles au bruit, il convient de les protéger le mieux possible contre les bruits extérieurs par des blindages, des systèmes antivibratoires, etc.

Caractéristiques fondamentales d'un capteur

Suivant le transducteur utilisé et le traitement imposé au signal issu de ce dernier, un capteur possède des caractéristiques fondamentales qui déterminent son utilisation. Nous allons les étudier ci-après.

Sensibilité. C'est le rapport de la grandeur électrique de sortie au paramètre physique d'entrée. C'est ainsi que nous pouvons chiffrer la sensibilité d'un capteur de déplacement, par exemple, en volts par millimètre.

On peut relier à cette caractéristique l'unidirectionnalité de la sensibilité. Il s'agit de la sensibilité à une autre grandeur physique liée à la première, mais que l'on voudrait isoler. Pour un capteur de vibrations par exemple, il est nécessaire de mesurer les déplacements suivant un axe déterminé. La plupart du temps, le capteur utilisé sera également sensible aux vibrations et aux déplacements transversaux. Cela perturbera la mesure de la grandeur que l'on voudrait isoler. On définit donc une sensibilité parasite en proportion de la sensibilité principale.

Résolution. On la détermine comme la plus petite variation de la charge qui crée une variation du signal de sortie. On l'appelle quelquefois *seuil de sensibilité*.

Linéarité. Un capteur est dit *linéaire* lorsque sa sensibilité reste constante, quelle que soit l'amplitude de la sollicitation appliquée. La plupart du temps, cette linéarité n'est obtenue qu'à l'intérieur de certaines limites de variations provenant des caractéristiques intrinsèques du transducteur (frottement, limite élastique...). La linéarité d'un capteur s'exprime en pourcentage de l'échelle totale de sortie et n'est donnée, en général, que pour une charge croissante.

Dynamique du capteur. C'est le rapport de la plus grande sollicitation acceptable (par suite de rupture, de non-linéarité inacceptable, de saturation...) à la plus petite sollicitation détectable (par suite du bruit ou de la résolution du capteur).

Hystérésis. Quand on trace la courbe de sensibilité du capteur, il est possible que le signal de sortie n'ait pas la même valeur quand la charge a une même valeur, suivant qu'elle augmente ou diminue. On chiffre généralement l'hystérésis par l'écart maximal obtenu entre les signaux de sortie pour une même charge quand la sollicitation augmente à partir de zéro et quand elle diminue à partir de la sollicitation maximale admise par le capteur. L'hystérésis doit être distinguée de la dérive et du fluage.

Dérive. Il s'agit de la variation du signal de sortie du capteur liée principalement aux variations de température ou à l'imperfection de la stabilité du système d'adaptation du signal.

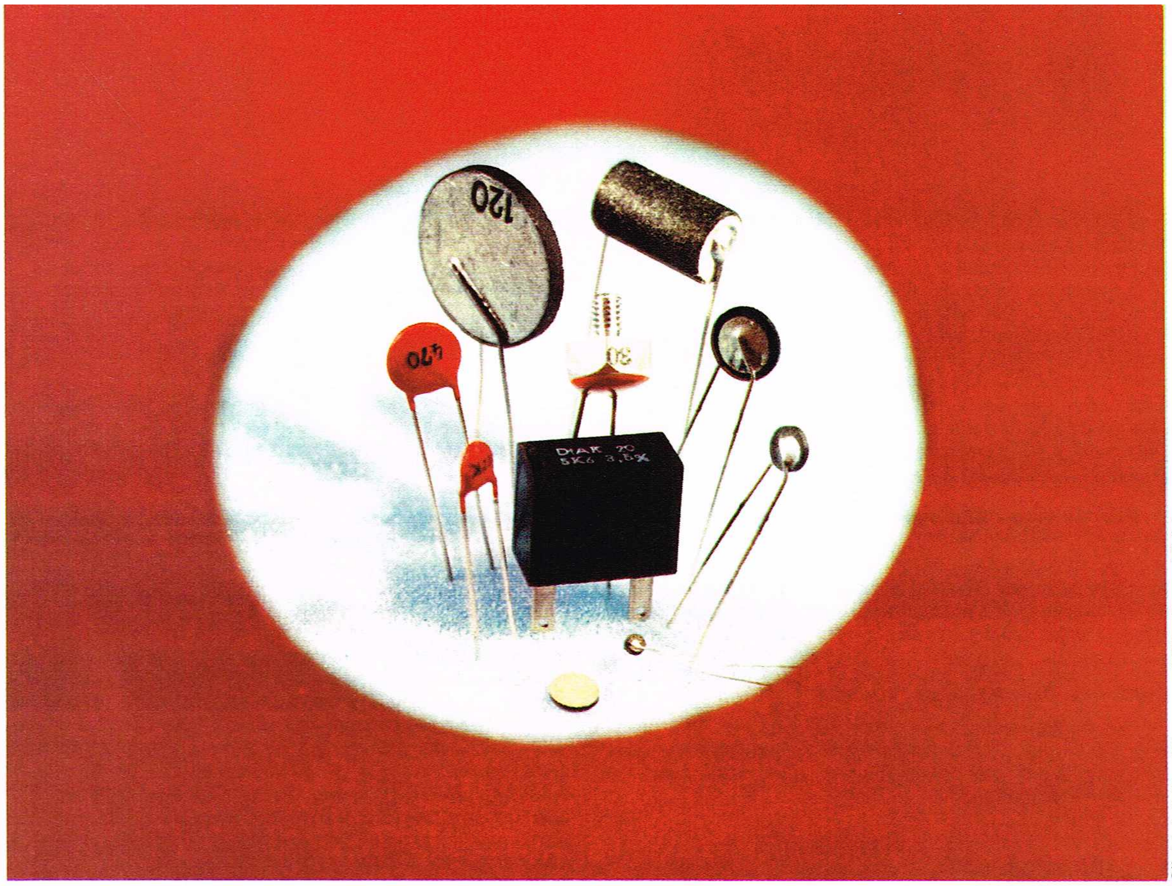

Cliché L.C.C. - Thomson CSF - Roger Violet

◀ ***Quelques exemplaires de thermistances : la variation rapide de la résistance de ces semi-conducteurs avec la température les fait utiliser comme capteurs de température ; ils sont environ 10 fois plus sensibles que le thermomètre à résistance de platine.***

Fluage. C'est la variation du signal de sortie sous charge en fonction du temps. Cette variation est généralement toujours de même sens, elle dépend surtout du transducteur. Cette variation est surtout sensible pour les transducteurs fondés sur une déformation de la matière.

Gamme de fréquences d'utilisation. Les performances d'un capteur peuvent être profondément modifiées par la fréquence. Il faut donc spécifier dans quelle gamme de fréquences la sensibilité est donnée et la linéarité garantie.

Effets des facteurs d'environnement. Il est évident que de nombreux agents d'environnement peuvent influer sur les caractéristiques d'un capteur. Les plus importants et les plus gênants sont : la température, les parasites ambiants, l'humidité, la poussière ou la fumée.

Si la sonde proprement dite est pratiquement toujours sensible à la température, il est normalement prévu dans le capteur des éléments ou des circuits de compensation tels que les caractéristiques indiquées précédemment peuvent être spécifiées dans une gamme de températures plus ou moins grande. La température à laquelle doit fonctionner un capteur, même s'il n'est pas lui-même un capteur de température, influence beaucoup sa construction. Il est même possible que l'on doive s'adresser à un autre type de transducteur pour travailler dans certaines gammes de températures trop élevées ou trop basses avec une bonne linéarité ou une sensibilité convenable.

Une ambiance fortement parasitée ainsi que l'humidité, les poussières, etc., nécessitent une construction soignée du capteur; l'élément transducteur et l'électronique d'adaptation sont placés dans des boîtiers formant blindage et résistant aux agents extérieurs perturbateurs ou même corrosifs.

Certaines présentations sont dites « tropicalisées » pour indiquer qu'elles répondent à des conditions très rudes de fonctionnement.

Les transducteurs

Après avoir posé le problème et décrit les caractéristiques fondamentales d'un capteur, nous allons examiner quelques moyens spécifiques que la physique ou la chimie nous offrent de convertir des grandeurs entre elles. Nous appellerons l'élément faisant cette conversion le *transducteur*, pour le différencier du capteur qui a une définition plus floue suivant sa réalisation. Le capteur utilise généralement un transducteur et comprend les circuits nécessaires à l'alimentation et au bon fonctionnement du transducteur ainsi qu'une bonne part des circuits de mise en forme du signal prélevé.

Comme nous l'avons déjà souligné, il existe généralement plusieurs moyens d'appréhender une grandeur déterminée. Ce sont des considérations de facilité de

Cliché L.C.C. - Thomson CSF - Roger Violet

◀ ***La large gamme des thermistances professionnelles ou d'usage général permet le contrôle des températures dans tous les domaines et jusqu'à plus de 200 °C.***

▶ *Figure 5 : représentation schématique de l'action d'un champ électrique E_x et d'un champ magnétique B sur une plaquette de conducteur ou de semi-conducteur utilisée dans un capteur à résistance variable.*

mise en œuvre, de fiabilité, d'exigences particulières liées à l'environnement, de sensibilité et de précision qui conduiront à choisir un capteur plutôt qu'un autre.

Les quelques phénomènes physiques ou chimiques que nous décrirons par la suite amènent à la construction de capteurs ayant des principes de fonctionnement différents, sans que l'on puisse citer toutes les applications où ils pourraient servir. Cette description doit donner quelques idées sur les immenses possibilités qui nous sont offertes de mesurer des grandeurs.

Capteurs électriques

Nous ne ferons que noter les différents capteurs électriques comme les transformateurs de tension ou d'intensité, ainsi que les voltmètres et les ampèremètres. Ce sont des capteurs où il n'y a pas transformation de nature de la grandeur physique. Leur utilisation dépend des mêmes caractéristiques que celles qui viennent d'être énoncées.

Capteurs à impédance variable

Pour transformer une grandeur physique en une grandeur électrique, il est possible d'agir sur un élément passif d'un circuit, comme une résistance, un condensateur ou une self-inductance.

Capteurs à résistance variable

Il y en a de trois sortes :

— la grandeur physique à mesurer agit mécaniquement sur le curseur d'un rhéostat ;

— elle agit sur les dimensions géométriques de l'élément résistif en modifiant *l* ou S de la formule

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

— elle agit sur la résistivité suivant différents processus physiques.

Le premier type est souvent utilisé pour sa grande simplicité de mise en œuvre, et ne nécessite pas un développement théorique particulier. Les deux autres sortes de capteurs à résistance variable sont souvent mélangées, en ce sens que les deux phénomènes agissent conjointement : c'est l'*effet piézorésistant*. La grandeur physique agit directement à la fois sur les trois paramètres de la résistance : ρ, *l* et S. Cet effet a été mis en évidence par lord Kelvin dans les métaux, et on le retrouve dans les jauges classiques à fil ou ruban résistant. Il existe aussi, cinquante fois plus important, dans les semi-conducteurs. Nous n'insisterons pas davantage sur ce point qui sera examiné très en détail dans les jauges de contrainte.

* *Thermistances*

La résistivité des semi-conducteurs diminue rapidement lorsque leur température s'élève suivant la loi

$$\text{Log} \frac{R}{R_0} = K \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)$$

La variation de résistance par degré varie suivant les corps choisis de 3 à plus de 5 % par degré. La résistance chute de moitié pour un échauffement de 20°. Les thermistances sont constituées d'oxydes tels que $NiO + MnO_3$, ou de sulfures Ag_2S frittés. Leur variation rapide avec la

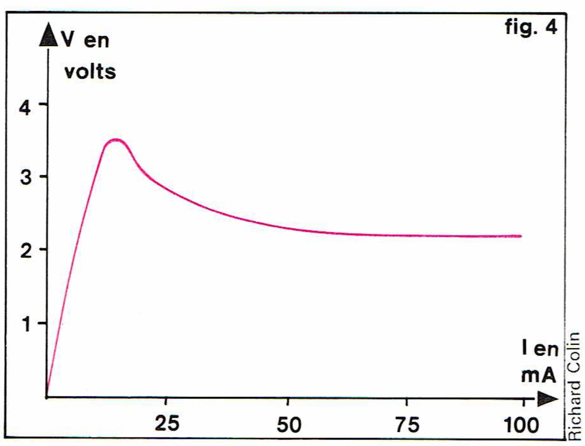

▶ *Figure 4 : caractéristique d'une thermistance.*

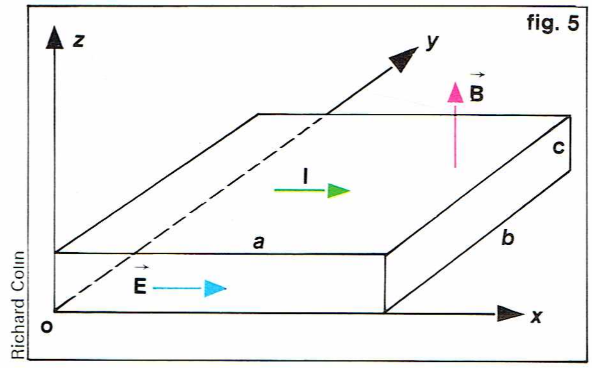

température les fait utiliser comme thermomètres dix fois plus sensibles que le thermomètre à résistance de platine, mais jusqu'à maintenant moins fidèles.

Les thermistances suivent la loi d'Ohm si elles sont maintenues à température constante, mais dans les conditions habituelles d'emploi, le courant I qui les traverse peut faire diminuer R par échauffement au point que RI diminue, bien que I augmente. La caractéristique V, I à la température d'équilibre thermique a une partie de résistance négative. Cette partie est représentable par la relation $I = \sigma V^{-2}$ (*fig.* 4).

* *Magnétorésistances*

La magnétorésistance est la variation de résistance de matériaux sous l'action combinée d'un champ électrique E et d'une induction magnétique B. Elle est due à la déviation du courant électrique, ce qui constitue l'effet Hall (1879).

— *Action d'un champ électrique et d'un champ magnétique.* Supposons une plaquette d'un conducteur ou d'un semi-conducteur parcourue par un courant I sous l'action du champ électrique E_x suivant la *figure* 5.

La densité de courant δ s'exprime en fonction de la conductivité du matériau et de la mobilité des électrons :

$$\vec{\delta} = \sigma \vec{E} + \mu \vec{\delta} \wedge \vec{B}$$

Ce qui donne, en projetant sur O*x* et O*y* :

$$\delta_x = \sigma E_x$$
$$0 = \delta E_y + \mu \delta_x B$$

puisque l'on suppose que le courant I de densité δ est dirigé suivant O*x*.

Il apparaît donc un champ électrique E_y tel que

$$E_y = \frac{\mu\delta}{\sigma} B = -\frac{\delta}{ne} B$$

avec $\sigma = ne\mu$

On peut donc mesurer sur les faces latérales de la plaquette une différence de potentiel de Hall, telle que $V_H = bE_y$. Comme le courant I est égal à δbc, la tension de Hall peut s'écrire

$$V_H = R_H \frac{BI}{c}$$

avec $$R_H = -\mu/\sigma = -\mu\rho$$

La constante de Hall R_H est le produit de la mobilité par la résistivité du matériau considéré. On peut donc noter qu'on obtiendra une tension de Hall plutôt dans les semi-conducteurs que dans les métaux.

Si l'on considère la déformation des lignes de courant, on peut définir un angle θ de déviation.

$$\text{tg } \theta = -E_y/E_x$$

ou encore $$\text{tg } \theta = -\mu B$$

— *Application de la magnétorésistance.* Les sondes à magnétorésistance sont fabriquées surtout avec des semi-conducteurs qui ont une sensibilité bien plus grande que les métaux, ainsi l'antimoniure d'indium (InSb) dont la résistivité est de $6 \cdot 10^{-15}$ Ωm et le coefficient de Hall de $2{,}4 \cdot 10^{-4}$.

On réalise des plaquettes de très petites dimensions ayant une résistance de 10 à 500 Ω à base de l'eutectique InSb-NiSb. On obtient un angle θ de 80° pour une induction magnétique de 1 tesla, ce qui entraîne une augmentation considérable de la résistance pure dans le rapport $1 + \text{tg}^2\theta$, soit ici de 40.

Capteurs à inductance variable

* *Réluctance d'un circuit magnétique*

La loi de Lenz nous donne pour un circuit parcouru par un courant I variant de dI une force électromotrice e s'opposant à la variation de courant, telle que

$$e = -L\frac{dI}{dt}$$

où L est la self-inductance du circuit.

Pour une bobine constituée de N spires enroulées sur un noyau magnétique de perméabilité μ, on peut écrire :

$$L = N^2/\mathcal{R}$$

où $\mathcal{R}$ est la réluctance du circuit magnétique. Ainsi, si cette bobine de N spires est parcourue par un courant I, le flux à travers le circuit magnétique est

$$\Phi = LI = \frac{N^2 I}{\mathcal{R}} = N\Phi_0$$

c'est-à-dire N fois le flux Φ_0 résultant de l'action de la force magnétomotrice $\mathcal{M} = NI$ dans une section du circuit magnétique de réluctance $\mathcal{R}$, et on a donc

$$L = \frac{N}{I}\frac{\mathcal{M}}{\mathcal{R}}$$

Il est ainsi possible de provoquer des variations de la self-inductance par des variations de réluctance. Usuellement, on n'agit pas sur la force magnétomotrice pour faire varier L.

* *Variation de réluctance d'un circuit magnétique*

Si le circuit magnétique est formé de plusieurs constituants ayant des perméabilités différentes ainsi que des dimensions différentes, on a

$$\mathcal{R} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\mu i}\frac{l_i}{S_i}$$

Dans le cas d'un circuit magnétique de section uniforme coupé par un ou plusieurs entrefers :

$$\mathcal{R} = \sum \frac{1}{\mu_0}\frac{l_0}{S_0} + \frac{1}{\mu}\frac{l}{S}$$

$$\mathcal{R} = \frac{1}{\mu_0}\left(\sum \frac{l_0}{S_0} + \frac{1}{\mu_r}\frac{l}{S}\right)$$

Une variation de réluctance peut être obtenue par une action sur tous les termes figurant dans la parenthèse.

— *Variation de la longueur d'un entrefer.* Examinons le circuit magnétique de la *figure* 6. Soit $e/2$ l'entrefer élémentaire et l la longueur moyenne des lignes de force dans le fer, S la section de passage du flux dans le fer et dans les entrefers

$$\mathcal{R} = \frac{1}{\mu}\frac{l}{S} + \frac{1}{\mu_0}\frac{e}{S} = \frac{1}{\mu_0 S}\left(\frac{l}{\mu_r} + e\right)$$

si μ_r est suffisamment grand, on aura $e\mu_r \gg l$ et ainsi

$$\mathcal{R} = \frac{1}{\mu_0 S}e$$

La variation d'induction sera telle que :

$$L = \mu_0 \frac{S}{e} N^2 \qquad \frac{\Delta L}{L} = -\frac{\Delta e}{e}$$

L'étendue linéaire du déplacement Δe est relativement faible. On se limite à ce que $\Delta e/e$ reste inférieur à 10 %.

On utilise plutôt un circuit symétrique comportant deux inducteurs variant en sens inverse (*fig.* 7). Il y a deux enroulements placés sur deux demi-circuits magnétiques en M, avec une armature mobile commune. Cette armature est placée, au repos, au milieu de l'entrefer, c'est-à-dire que la distance entre chaque armature est e. Si on suppose que la contribution de l'entrefer à la réluctance du circuit est bien plus importante que celle des masses magnétiques ($\mu_r \gg 1$), la variation globale de la self-inductance L est proportionnelle à

$$\Delta L = \frac{K}{e - \Delta e} - \frac{K}{e + \Delta e} = -K\frac{2\,\Delta e}{e^2 - \Delta e^2} - \frac{2\,\Delta e}{e^2}K$$

où $$\frac{\Delta L}{L} = \frac{2\,\Delta e}{e}$$

Ceci s'applique en particulier à la réalisation de capteurs ayant une résolution de 0,1 à 1 μm. Pratiquement, on limite les étendues linéaires de mesure à quelques millimètres.

— *Variation de la section de l'entrefer.* Si, dans le cas de la *figure* 6, on déplace la pièce mobile transversalement, on fait varier la section de l'entrefer ; on aurait ici aussi

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta S}{S}$$

La linéarité n'existe qu'autant que le flux de fuite est négligeable, c'est-à-dire que la variation de section S est prépondérante. Pratiquement, on se limite encore à une variation relative de la section de 10 %.

Le shunt magnétique répond également à une variation de section d'un entrefer (*fig.* 8). Toutefois, son domaine

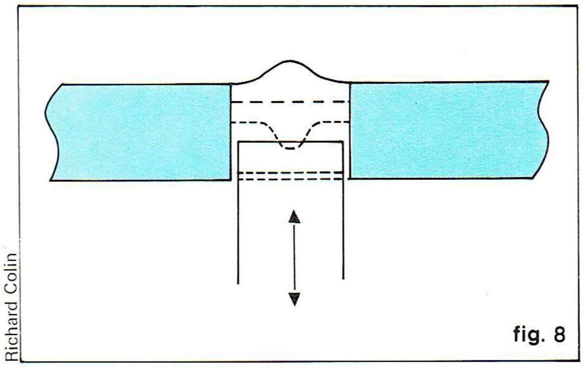

◄ ***Figure 8 :*** ***shunt magnétique permettant la variation de la section de l'entrefer (capteurs à réluctance variable).***

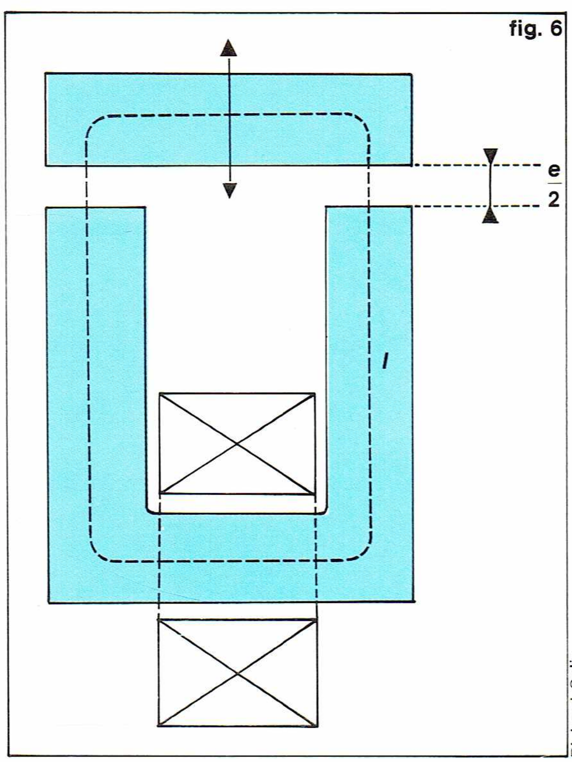

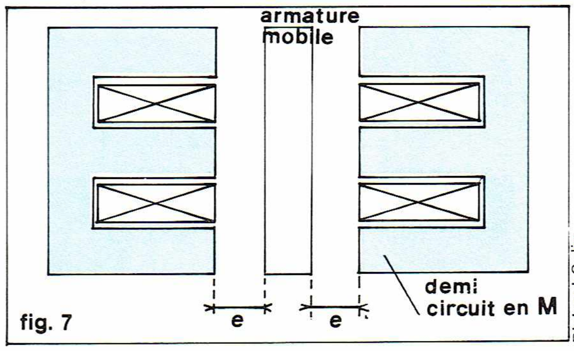

◄ ***Figure 6 :*** ***circuit magnétique permettant la variation de la réluctance par la variation de la longueur de l'entrefer (capteur à inductance variable).***

Figure 7 : ***circuit magnétique symétrique comportant deux inducteurs variant en sens inverse ; ce type de circuit, comme celui de la figure 6, permet une variation de la réluctance par la variation de la longueur de l'entrefer.***

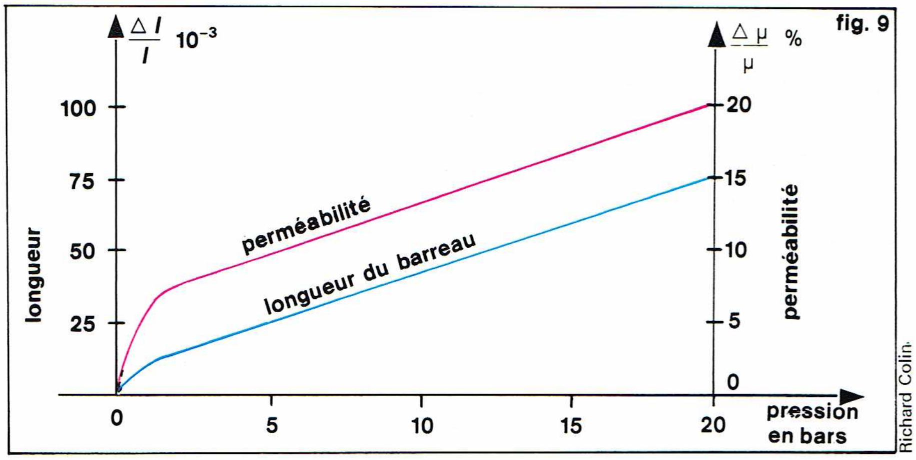

▲ *Figure 9 : variation relative de la perméabilité des ferronickels du groupe Permalloy à 40-70 % de nickel, et variation relative de la longueur du barreau en fonction de la pression.*
Figure 11 : tension de sortie fournie par le transformateur différentiel de la figure 10, en fonction du déplacement du noyau.

d'application se limite surtout à la génération d'impulsions, la loi de variation n'étant pas linéaire. L'avantage de ce circuit est la grande profondeur de modulation qu'il permet d'obtenir, la variation relative de self-inductance pouvant être de 20 %.

— *Variation de la perméabilité. Magnéto-élasticité.* La perméabilité des matériaux ferromagnétiques (les ferronickels du groupe Permalloy à 40-70 % de nickel en particulier) varie lorsqu'ils sont soumis à des contraintes mécaniques. La *figure* 9 donne la variation relative de la perméabilité en fonction de la pression ainsi que la variation relative de la longueur du barreau sur lequel les mesures ont été faites.

* *Variation d'induction mutuelle*

On peut imaginer d'innombrables procédés pour faire varier l'induction mutuelle de deux enroulements. Généralement, on utilise un montage différentiel soit en déplaçant la bobine d'induction entre deux bobines inductrices, soit en déplaçant la bobine inductrice entre deux bobines d'induction, ou encore par déplacement d'un noyau magnétique entre les différentes bobines.

On peut avoir, par exemple, le transformateur différentiel variable de la *figure* 10. Trois enroulements sont bobinés autour d'un noyau magnétique pouvant se déplacer longitudinalement. Celui du milieu est le primaire du transformateur, les deux secondaires sont reliés de manière que les enroulements soient en opposition. A la position de repos, l'inductance mutuelle de chaque secondaire avec le primaire est identique, de telle sorte que la tension de sortie est nulle. Pour un déplacement donné du noyau, il y a déséquilibre des deux tensions secondaires et opposition d'une tension en sortie, conformément à la *figure* 11. De manière à pouvoir détecter le sens du déplacement, on ne travaille pas autour de 0 mais autour d'un point N comme cela est représenté sur la figure. Cela permet également d'avoir une bonne linéarité du transducteur.

La sensibilité des capteurs du commerce est de l'ordre de 0,5 à 3 mV pour un déplacement de 25 microns par volt appliqué à l'enroulement primaire. La sensibilité varie également avec la fréquence de la tension d'alimentation. Cependant, cette variation est relativement lente, de sorte qu'une régulation de fréquence précise de la source d'alimentation n'est généralement pas nécessaire.

Capteurs à capacité variable

Un condensateur plan dont les armatures de surface S sont espacées de *e* avec un diélectrique de permittivité ε a une capacité :

▶ *Figure 10 : transformateur différentiel variable comprenant trois enroulements bobinés autour d'un noyau magnétique pouvant se déplacer longitudinalement (capteur à inductance mutuelle).*
Figure 12 : condensateur plan (capteur à capacité variable) servant à la mesure des niveaux liquides.

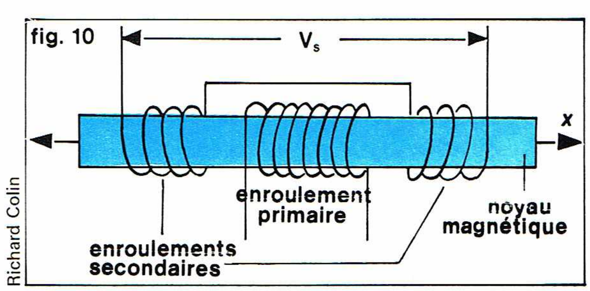

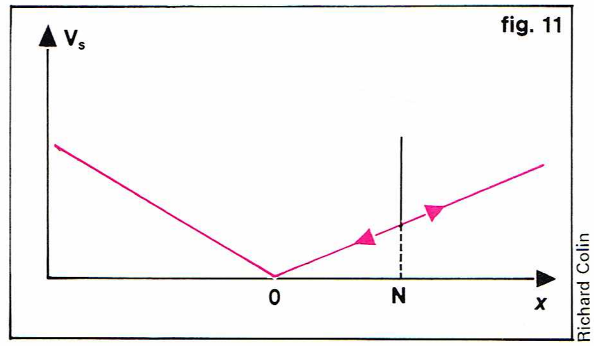

$$C = \varepsilon \frac{S}{e}$$

Il sera donc possible de faire varier la capacité en faisant varier la permittivité, la surface ou l'épaisseur du condensateur.

— *Variation de la surface.* C'était le moyen le plus utilisé pour faire des condensateurs variables. Le diélectrique est l'air avec $\varepsilon = 8{,}859$ pF/m. La forme des lames peut servir à l'établissement d'une loi de variation quelconque : linéaire, logarithmique ou autre.

— *Variation de la distance entre les armatures.* La loi de variation n'est pas linéaire mais hyperbolique. Pour de faibles variations de l'épaisseur, on pourra, avec une approximation de quelques %, considérer la réponse comme linéaire.

— *Variation de la constante diélectrique.* En déplaçant une lame diélectrique entre les armatures, on peut obtenir une loi de variation quelconque suivant la forme donnée à la lame.

Souvent, les capteurs capacitifs sont utilisés pour mesurer des niveaux de liquides suivant la *figure* 12.

$$C = C_0 + C_1 + C_2$$

où C est la capacité totale
C_0 la capacité parasite
C_1 la capacité des lames immergées
C_2 la capacité des lames émergées dans l'air.

$$C = C_0 + \frac{\varepsilon_0 l}{e} [\varepsilon'_r x + \varepsilon_r (h - x)]$$

soit $$C = a + bx$$

On obtient bien une indication proportionnelle au niveau du liquide *x* dans le réservoir.

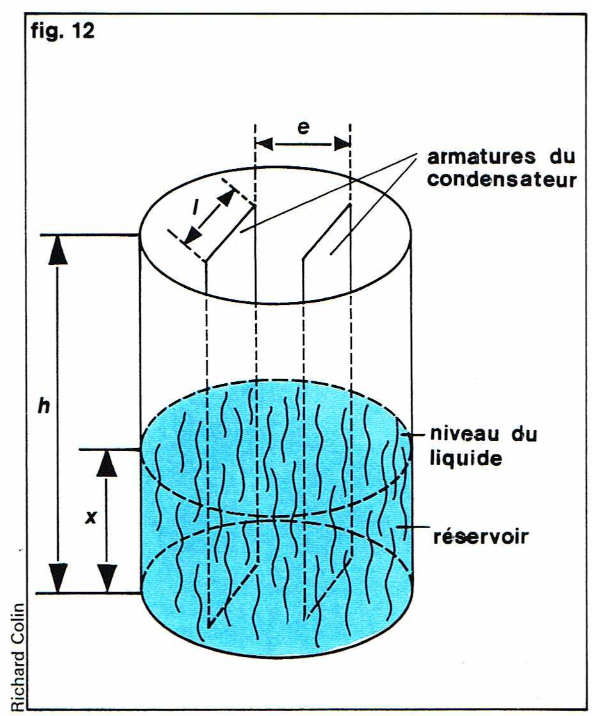

Détecteurs optiques

Les dispositifs capables de détecter les fréquences optiques sont multiples dans leurs principes et dans leurs possibilités. Les détecteurs optiques utilisent les effets suivants : émission électronique (tube photomultiplicateur) ; modification des caractéristiques électriques (photoconducteurs) ; déformation mécanique (cellule pneumatique de Golay) ; modification de la nature chimique (émulsion photographique).

Seuls les trois premiers permettent d'obtenir directement un signal électrique représentant l'information. Nous décrirons quelques éléments utilisant la photoélectricité.

Rappel des propriétés générales relatives à l'utilisation des sources ou des détecteurs optiques

Fréquence, longueur d'onde, énergie des radiations

Les différentes radiations sont caractérisées par leur fréquence ν. La longueur d'onde λ est liée à la fréquence ν et à la vitesse de propagation c pour un milieu transparent considéré.

$$\nu = c/\lambda$$

L'énergie d'une radiation se traduit par la loi de Planck :

$E = h\nu$ ($h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}$ J · s, constante de Planck).

Lois de rayonnement des corps incandescents

Les liquides et les solides portés à une température élevée émettent des radiations formant un spectre continu qui ne sont qu'approximativement régies par les lois de rayonnement du « corps noir ». Celui-ci est caractérisé par le fait qu'il absorbe toutes les radiations qu'il reçoit, quelle que soit leur longueur d'onde, alors que tous les corps réels émettent ou absorbent sélectivement certaines fréquences ou bandes de fréquences.

Quantités énergétiques relatives aux radiations

* *Flux d'énergie irradié par la source.* Une source S a toujours trois dimensions. Elle émet un flux Φ représentant une certaine quantité d'énergie par seconde.

* *Flux transporté par un rayon.* Il existe toujours une ouverture ou diaphragme pour limiter le faisceau lumineux. Ce flux dépend de l'énergie de la source et de la configuration géométrique du faisceau (*fig.* 13).

* *Intensité d'un point de la source dans une direction* Δ (*fig.* 14). La source n'est pas un point géométrique. Elle n'émet pas également dans toutes les directions. A la direction Δ on associe un angle solide élémentaire $d\Omega$ transportant le flux élémentaire $d\Phi$:

$$I_\Delta = \frac{d\Phi}{d\Omega} \qquad I'_{\Delta'} = \frac{d\Phi'}{d\Omega'}.$$

Si l'intensité est constante quelle que soit la direction, nous avons une émission isotropique. L'intensité I se mesure en watts/stéradian.

* *Luminance.* Les différents points d'une source peuvent émettre différemment. Soit dI l'intensité émise par l'élément dS de la source S (*fig.* 15) :

$$L = \frac{dI}{dS \cos \alpha}$$

$dS \cos \alpha$ représente la surface sous laquelle est vu l'élément dS dans la direction Δ. L se mesure en watts/stéradian · m^2.

* *Étendue du faisceau* (*fig.* 16). Le faisceau est limité par deux ouvertures dS et dS'. L est la luminance du point M.

$$dI = L dS \cos \alpha \quad \text{dans la direction } \Delta$$
$$d^2\Phi = dI d\Omega$$
$$d^2\Phi = L dS \cos \alpha d\Omega.$$

En tenant compte de la symétrie entre dS et dS', on peut écrire (il y a conservation du flux lumineux) :

$$d^2\Phi = L dS' \cos \alpha' \, d\Omega'.$$

Soit donc le facteur géométrique noté d^2E :

$$d^2E = dS \cos \alpha \, d\Omega$$
$$d^2E = dS' \cos \alpha' \, d\Omega'$$
$$d^2E = \frac{dS \cdot dS' \cos \alpha \cos \alpha'}{d^2}$$

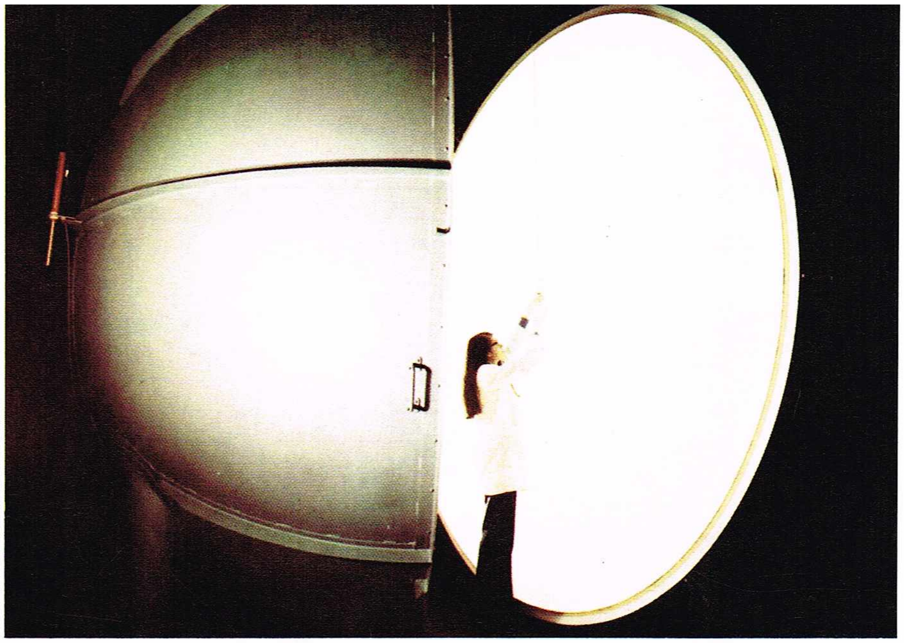

Palais de la Découverte, Paris

▲ *Installation pour la comparaison des lampes-étalons photométriques.*

▼ *Détermination de quantités énergétiques relatives aux radiations ; figure 13 : flux transporté par un rayon ; figure 14 : intensité lumineuse ; figure 15 : luminance ; figure 16 : étendue du faisceau.*

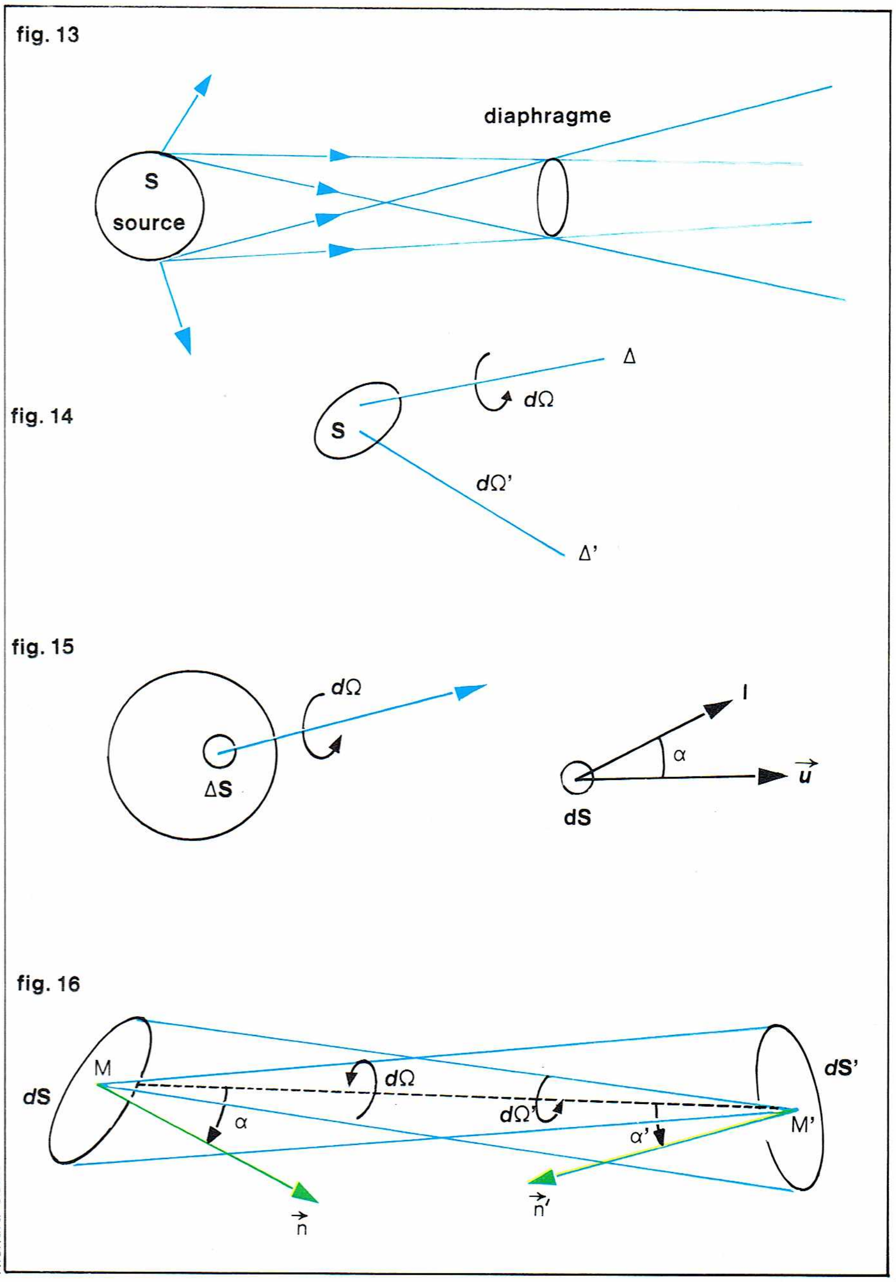

Richard Colin

fig. 17

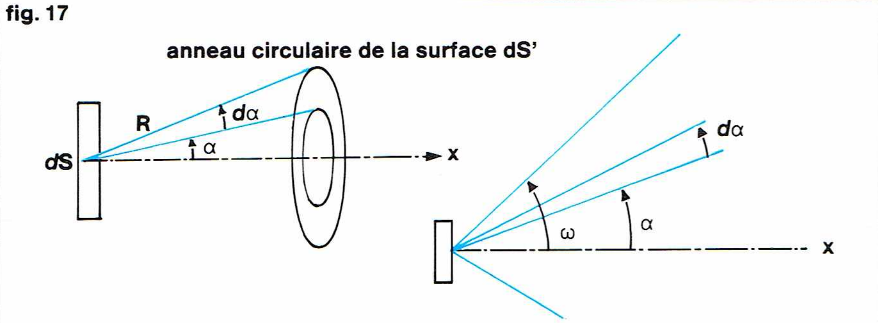

fig. 18

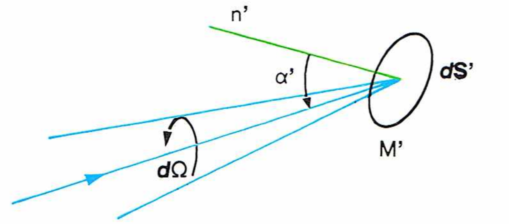

Richard Colin

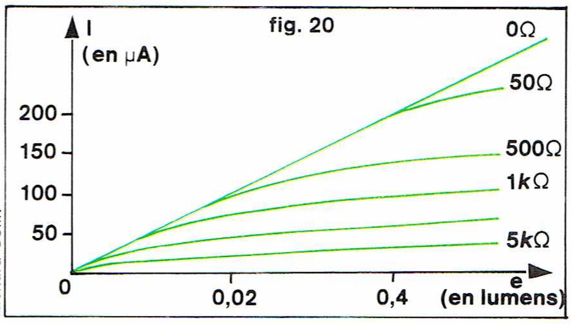

Richard Colin

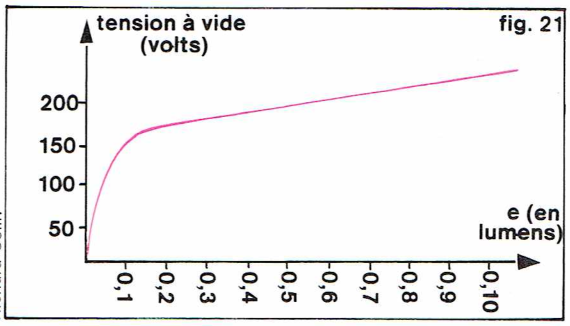

Richard Colin

▲ *Figure 17 : émittance d'une source lumineuse ; figure 18 : illumination d'un écran.*

fig. 19

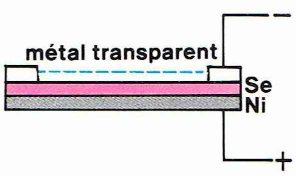

▲ *Figure 19 : représentation schématique d'une photopile au sélénium.*
▼ *Un générateur électrique à photopiles présenté au salon du Bourget (France).*

avec $d\Omega = \dfrac{d\Omega \cos\alpha}{d^2} = \dfrac{dS' \cos\alpha'}{d^2}$

d^2E est l'étendue géométrique du faisceau.

★ *Émittance de la source* (*fig.* 17). Par définition, la radiance ou émittance H d'une source est le flux dans tout l'espace avant, par unité de surface :

$$d^2E = dS \cos\alpha \, d\Omega$$
$$d\Omega = 2\,\pi R \sin\alpha \, d\alpha$$
$$dE = \pi dS \sin^2\omega$$

soit, pour un espace avant de la source correspondant à $\omega = \pi/2$:

$$dE_0 = \pi dS.$$

Dans la mesure où la luminance L reste constante quand α varie :

$$d^2\Phi = L d^2E$$
$$d\Phi = L \int d^2E = L dE$$

et pour tout l'espace avant de la source (2 π stéradians) :

$$dE_0 = \pi dS$$
$$d\Phi_0 = L\pi dS.$$

Pour l'unité de surface définissant ainsi l'émittance :

$$H = \frac{d\Phi_0}{dS} = \pi L$$
$$H = \pi L.$$

★ *Illumination d'un écran* (*fig.* 18). $e = \dfrac{d\Phi}{dS'}$ se mesure en watts/m². L'illumination de l'écran dépend donc : de la luminance du rayon incident ; de l'angle α' d'inclinaison sur la normale ; de l'angle solide $d\Omega$ sous lequel on voit le rayon M'.

★ *Flux transporté par unité de longueur d'onde.* Si on suppose que le flux transporté par un faisceau limité en longueur d'onde entre λ et $\lambda + d\lambda$ est $d\Phi$:

$$\Phi_\lambda = \frac{d\Phi}{d\lambda}.$$

Ainsi, on définit :

$$L_\lambda = \frac{dL}{d\lambda} \quad H_\lambda = \frac{dH}{d\lambda}$$
$$I_\lambda = \frac{dI}{d\lambda} \quad e_\lambda = \frac{de}{d\lambda}$$

Photo-électricité

Effet photovoltaïque (photopiles)

Les photopiles ne nécessitent aucune source extérieure d'énergie. Fermées sur une résistance extérieure, elles débitent du courant électrique dont l'intensité est liée au flux lumineux qu'elles reçoivent. Ce sont des convertisseurs directs d'énergie.

Examinons la photopile au sélénium constituée essentiellement (*fig.* 19) d'une plaque en nickel qui sert de support à une couche de sélénium. Cette couche est semi-conductrice de type P. Afin d'obtenir une jonction P-N, on dépose sur la surface du sélénium un film métallique très mince, bon conducteur et très transparent à la lumière. La caractéristique tension-courant d'une telle cellule reliée à une source extérieure d'énergie est non linéaire. Il existe un effet redresseur lié à l'existence de la jonction.

Quand elle est éclairée, la photopile mise en court-circuit fournit un courant proportionnel à l'éclairement. Quand on ferme le circuit sur différentes résistances, on obtient les courbes de la *figure* 20 du courant en fonction de l'éclairement. La sensibilité moyenne des photopiles au sélénium est de 500 μA par lumen. A vide, la tension aux bornes de la photopile atteint rapidement un palier (*fig.* 21).

La courbe de sensibilité chromatique se rapproche de celle de l'œil, centrée sur 6 000 Å, elle chute rapidement pour n'être plus que de 20 % à 5 000 Å et 15 % à 7 000 Å.

De telles photopiles ont une capacité importante de l'ordre de 0,1 μF par cm² interdisant leur emploi pour la détection de flux lumineux rapidement variables.

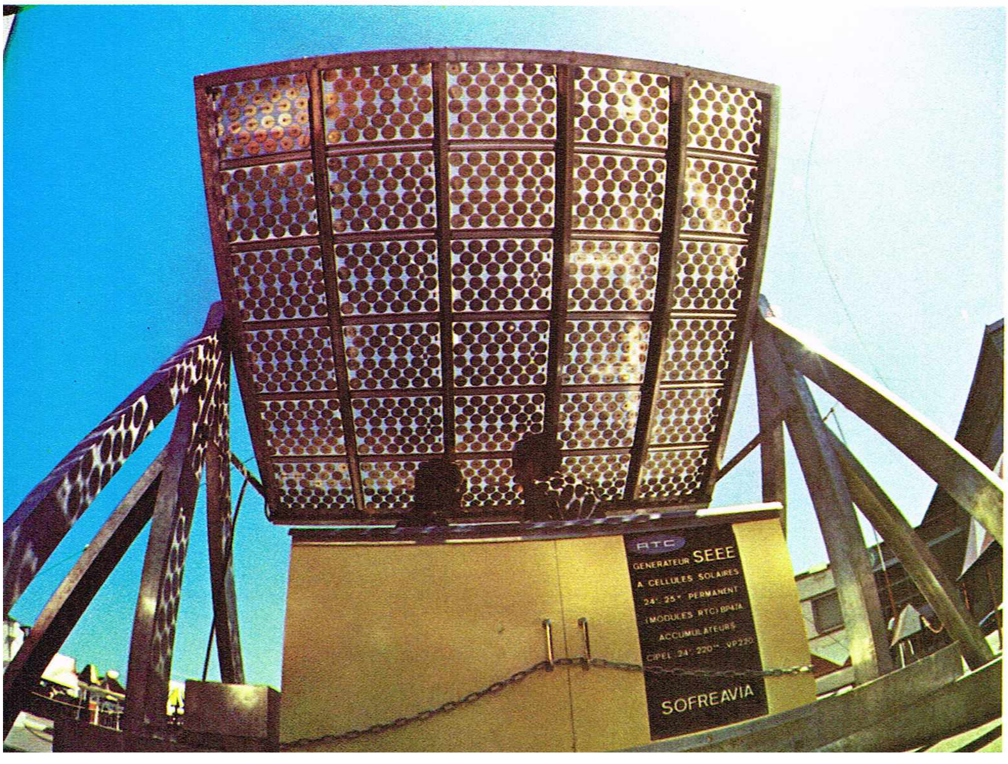

M. Durazzo - Magnum

fig. 22

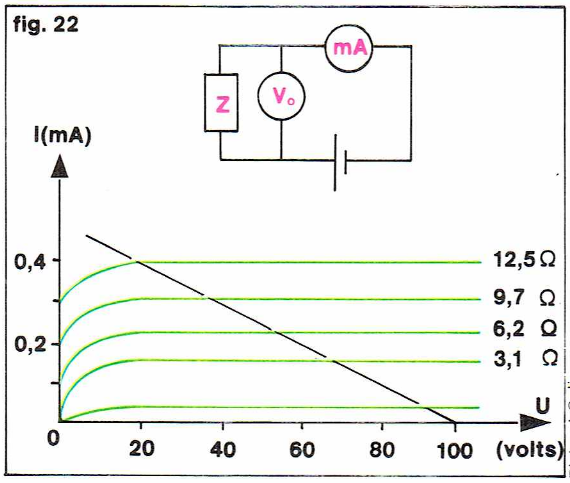

fig. 23

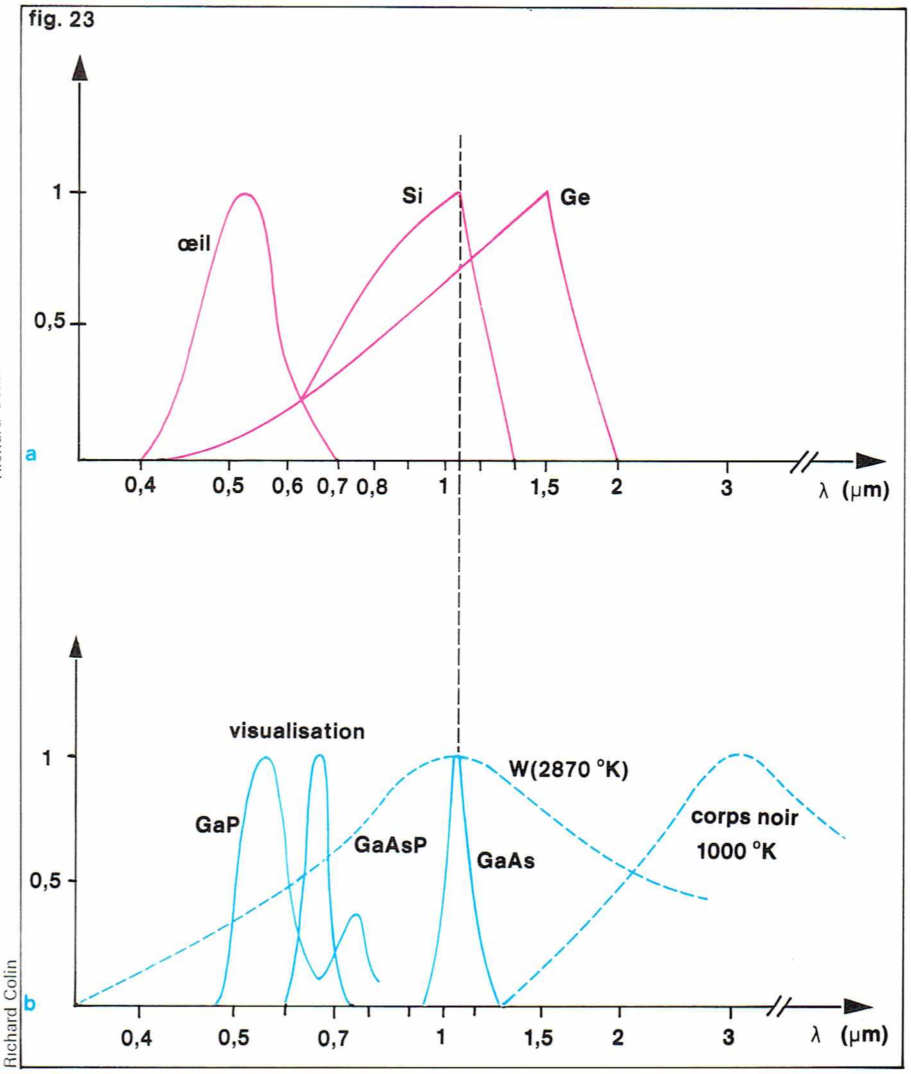

Photodiodes et phototransistors

On utilise ici l'effet photovoltaïque dans le silicium. Il s'agit en fait d'une jonction P-N constituant une diode que l'on polarise en sens inverse. La lumière crée des paires électron-trou séparées par le champ important de la zone de déplétion, qui permettent ainsi au courant de passer. La *figure* 22 montre la caractéristique U. I. d'une photodiode pour différents éclairements.

La sensibilité est de l'ordre de 10 à 30 mA par lumen. Cette sensibilité peut être augmentée en utilisant l'amplification de courant inhérente au transistor. En construisant un dispositif à deux jonctions N-P-N dont on peut éclairer une jonction, on réalise un phototransistor. La sensibilité est ainsi portée à 3 A par lumen.

Effet photoconducteur

Les photorésistances sont constituées d'un semi-conducteur auquel on applique une tension continue de quelques dizaines de volts : sulfure de plomb, sulfure de thallium, sulfure de cadmium ou séléniure de cadmium. Le rayonnement incident crée des porteurs de charge supplémentaires se superposant à un faible courant d'obscurité, si bien que la résistance globale chute.

Ces photorésistances diffèrent surtout par leur seuil photo-électrique (c'est-à-dire par la valeur de la longueur d'onde du rayonnement incident pour laquelle la sensibilité n'atteint que 50 % de sa valeur maximale), mais aussi par la valeur de cette sensibilité maximale et par le courant d'obscurité. La *figure* 23 donne les réponses spectrales d'un certain nombre de corps utilisés soit comme détecteurs (courbes du haut), soit comme émetteurs (courbes du bas).

Capteurs photo-électriques

On peut faire un classement des phénomènes physiques permettant de transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique :

— *Cellules photo-émissives* : cellules à vide; cellules à gaz; photomultiplicateurs.

— *Dispositifs à semi-conducteurs :* photorésistances; photodiodes; phototransistors; cellules à couche d'arrêt.

Mais on se limitera à l'étude des dispositifs mettant en jeu le phénomène de photorésistance.

Rappel des unités photométriques

* *Unité d'intensité lumineuse : la candela.* Par définition, on attribue une luminance de 60 candelas/cm² au rayonnement du corps noir à la température de fusion du platine (2 028 °K). La valeur de la candela est très voisine de l'ancienne « bougie internationale ».

* *Unité de flux lumineux : le lumen.* Étant donné une source lumineuse ayant une intensité de 1 candela dans toutes les directions (elle rayonne dans un angle solide de 4 π), le lumen est le flux rayonné par cette source dans un angle solide unité.

Pour une longueur d'onde égale à 0,555 μm, 1 watt correspond à 621 lumens. Par contre, une énergie de 1 watt rayonnée sous forme de lumière blanche (lampe à incandescence) ne correspond qu'à 250 lumens et exige une dépense de 40 watts (l'infrarouge n'impressionne pas l'œil).

* *Unité d'éclairement : le lux.* Le lux correspond à l'éclairement d'une surface de 1 m² recevant un flux de 1 lumen.

* *Unité de brillance : le stilb.* Le stilb est la luminance de 1 candela/cm².

Généralités sur les récepteurs photosensibles

On se limitera essentiellement aux dispositifs à semi-conducteurs les plus courants.

* *Principe*

Quand l'énergie $h\nu$ d'un photon est juste suffisante pour faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction, on assiste à une diminution de la résistivité du corps envisagé. Ce phénomène est mis à profit dans les cellules photorésistantes.

Dans un élément photosensible à jonction, si un photon $h\nu$, d'énergie supérieure à l'énergie d'activation du semi-conducteur, tombe sur la jonction polarisée en sens inverse, il libère à l'intérieur de la zone de charge d'espace une paire électron-trou. A cause du très fort champ électrique régnant au niveau de cette jonction, les charges sont collectées pour donner naissance à un courant (dit courant photo-électrique) pratiquement proportionnel à l'énergie lumineuse qui lui a donné naissance.

* *Photorésistances* (*fig.* 24). Elles sont caractérisées par leur grande sensibilité et leur faible prix de revient.

Parmi les nombreux corps présentant une résistivité très élevée dans l'obscurité et diminuant sous l'action de la lumière, on peut citer les suivants : le germanium; le silicium; le sulfure, le séléniure et le tellurure de plomb; l'antimoniure d'indium; le sulfoséléniure de cadmium. Dans le domaine du visible et du proche infrarouge, on utilise le sulfure, le séléniure et le sulfoséléniure de cadmium.

***▲ Figure 22 :** caractéristique **UI** d'une photodiode pour différents éclairements.*
***Figure 23 :** réponses spectrales relatives d'un certain nombre de corps utilisés comme détecteurs **(a)** ou comme émetteurs **(b)** dans une photorésistance.*

***◀ Page ci-contre, en haut, à droite figure 20 :** courbes de l'intensité du courant donné par une photopile mise en circuit avec différentes résistances, en fonction de l'éclairement; **figure 21 :** tension à vide aux bornes d'une photopile, en fonction de l'éclairement.*

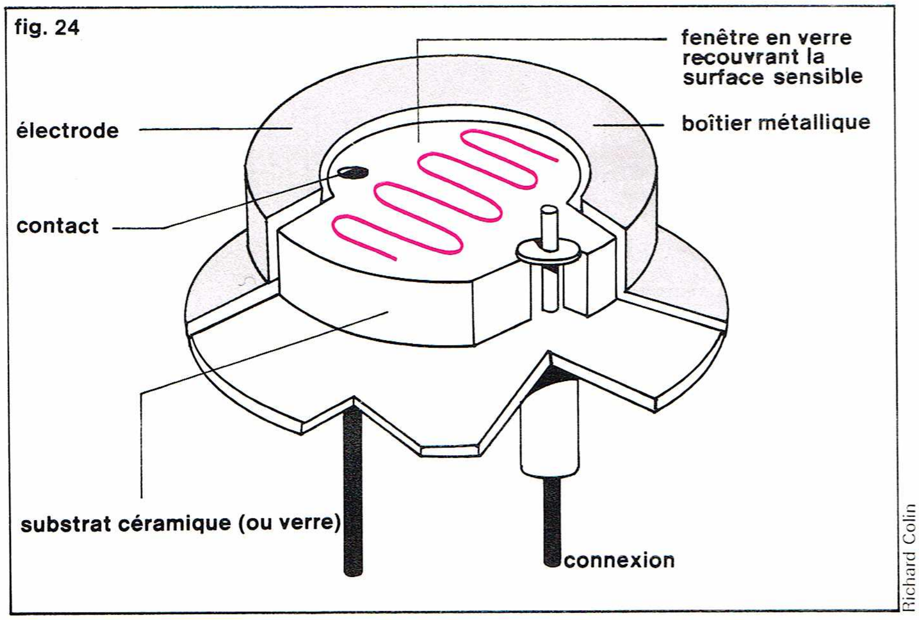

▲ ***Figure 24 :*** ***coupe schématique d'une photorésistance.***

Dans le domaine de l'infrarouge, on utilise le silicium (λ_{max} = 0,9 µm), le sulfure de plomb (λ_{max} = 2,5 µm), le séléniure de plomb (λ_{max} = 3,4 µm), l'antimoniure d'indium (λ_{max} = 6,8 µm), le germanium avec différents dopages (dopé à l'or, λ_{max} = 5 µm; dopé au mercure, λ_{max} = 10,5 µm; dopé au cadmium, λ_{max} = 16 µm; dopé à l'antimoine, λ_{max} = 20 µm; dopé au cuivre, λ_{max} = 23 µm; dopé au zinc, λ_{max} = 35 µm).

Les principales caractéristiques des résistances photosensibles sont :

— *la résistance d'obscurité :* mesure faite au moins 20 secondes dans l'obscurité; ce paramètre est généralement désigné par R_0 et varie de 10^4 à 10^9 Ω;

— *la résistance pour un éclairement donné de* 100 lux;

— *la dissipation maximale* (comprise en général entre 50 mW et 1 W);

— *la tension maximale admissible* aux bornes de la photorésistance non éclairée;

— *la réponse spectrale;*

— *l'action de la lumière* sur la résistivité des photorésistances qui doit être pratiquement linéaire sur un large domaine d'éclairement (important pour les dispositifs à action proportionnelle);

— *le temps de réponse :* pour une cellule photorésistante, c'est le paramètre qui en limite l'emploi à des fréquences inférieures ou égales à 1 Hz.

Remarques : l'action de la température pour de forts éclairements peut être négligée mais peut affecter notablement la résistance d'obscurité R_0. Les cellules photorésistantes sont susceptibles d'avoir les formes les plus variées, donc d'être adaptables aux dispositifs les plus complexes.

* *Éléments photosensibles à jonction.* Le plus simple de ces éléments est la photodiode à jonction obtenue par le procédé planar. Si on réalise une diode plane à jonction dont la géométrie est étudiée de telle façon que la zone de charge d'espace soit égale ou supérieure à la profondeur de pénétration des photons, chacun des photons ayant l'énergie suffisante donnera naissance au niveau de la jonction à une paire électron-trou qui sera collectée par la jonction polarisée en sens inverse. Le courant sera proportionnel à l'intensité lumineuse incidente et à la surface de la région photosensible.

Il existe de nombreux dispositifs à couche mince (duo photodiode, diode P. I. N., phototransistors). Sans entrer dans le détail, on peut essayer de voir quelles sont leurs caractéristiques communes : la courbe de réponse spectrale est propre aux semi-conducteurs utilisés; le courant d'obscurité propre au semi-conducteur utilisé (quelques centaines de picoampères à quelques microampères à la température ambiante pour le silicium et quelques centaines de microampères pour le germanium); la vitesse de réponse à une impulsion lumineuse à front raide qui détermine la fréquence maximale d'emploi en lumière modulée.

Cellules sensibles aux infrarouges. Utilisation

La source lumineuse utilisée est la matière elle-même portée à une certaine température et émettant un rayonnement électromagnétique dans l'infrarouge. Il existe deux catégories distinctes de cellules infrarouges : les cellules de détection et les cellules de régulation.

* *Les cellules de détection* délivrent des signaux logiques « tout ou rien » correspondant à la présence ou à l'absence de matière. Elles servent par exemple : au pistage des billettes, au cumul des longueurs, à l'étalonnage de tops pour une cisaille, à des mesures de vitesses linéaires, au déclenchement de séquences.

* *Les cellules de régulation* délivrent au contraire un signal analogique proportionnel à la position du produit dans leurs champs d'exploration.

Les cellules pourront porter le nom de « détecteurs photoélectriques à amplificateurs incorporés ». Il faut en effet généraliser la notion de capteur, car une cellule photoélectrique donne habituellement un signal électrique déjà mis en forme. Elle comprend le transducteur proprement dit (cellule photorésistante par exemple) et un système optique permettant d'obtenir un éclairement correct de l'élément photosensible, ce dispositif ayant parfois comme autre fonction celle de moduler la lumière incidente; le transducteur est associé à un amplificateur permettant la mise en forme du signal. Dans une cellule élaborée, on peut de plus trouver, par exemple, une source lumineuse de référence associée à un élément photosensible secondaire permettant de calibrer les informations.

Application des photodiodes : capteurs de sens de marche

Dans un dispositif utilisant un compteur de tops étalonnés qui permet de positionner un produit, il est souvent nécessaire de connaître le sens de déplacement de ce produit, c'est-à-dire le sens de la machine. On peut, pour ce faire, utiliser un dispositif qui fournira le sens du déplacement en indiquant si le compteur de tops est en comptage ou décomptage.

On considère une roue portant deux photodiodes (transducteurs) et une source lumineuse. Par mesure de sécurité, le système peut être doublé (*fig.* 25).

La *figure* 26 représente les signaux électriques donnés par les diodes. Ils sont amplifiés et mis en forme, et injectés dans un dispositif électronique logique capable de discriminer le sens de la marche (schéma de principe : *figure* 27, et principe de la discrimination : *figure* 28). Cette discrimination est envoyée au compteur de tops indiquant le positionnement du produit. Elle donne un ordre pour indiquer que l'on est en comptage ou en décomptage d'après la suite ABC ou la suite CBA.

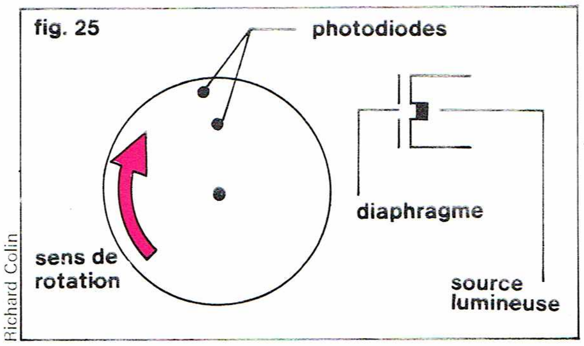

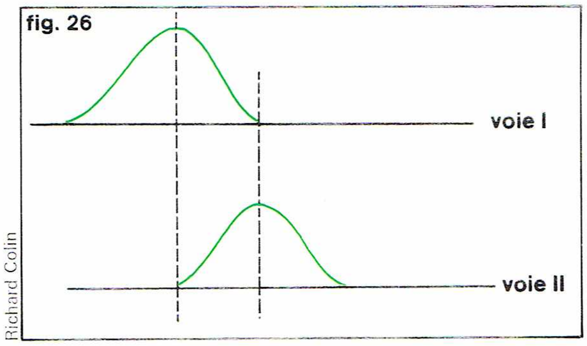

▶ ***Figure 25 :*** ***représentation très schématique d'un capteur de sens de marche comprenant deux photodiodes et une source lumineuse.***
Figure 26 : ***signaux électriques délivrés par les deux photodiodes du capteur de sens de marche de la figure 25.***

Repérage des températures

De nombreuses méthodes permettent de repérer la température d'un milieu, puisque tout paramètre physique variant avec la température peut être à la base d'une méthode de mesure. Nous distinguerons d'abord les capteurs dont le détecteur est en contact avec le milieu à contrôler (a) et les capteurs qui ne nécessitent pas ce contact, ces derniers faisant essentiellement appel à la thermométrie optique (b).

a — *Thermomètre à dilatation :* thermomètre à gaz ; thermomètre à dilatation de liquide ; thermomètre à dilatation de solide.

— *Thermométrie par changement d'état*, par exemple changement de couleur.

— *Thermométrie à résistance :* thermomètre à résistance ; thermomètre à thermistance.

— *Thermométrie à couple thermo-électrique.*

b — *Thermométrie optique :* mesure du rayonnement total ; mesure monochromatique.

Parmi ces différentes méthodes de mesure, seules celles qui s'effectuent au moyen de thermocouples, de lunettes à radiation totale et de résistances thermo-électriques permettent l'enregistrement. Le pyromètre optique à disparition de filament nécessite l'appréciation d'un opérateur.

Rappel des différentes lois relatives aux rayonnements des corps incandescents

Loi de Kirchhoff

D'une façon générale, les radiations électromagnétiques émises possèdent toutes les longueurs d'onde. La puissance rayonnée par l'unité de surface du corps dans l'intervalle $d\lambda$ au voisinage de la longueur d'onde λ est $H_\lambda d\lambda$; H_λ est l'émittance énergétique monochromatique. Pour l'ensemble, on a donc :

$$H = \int_0^\infty H_\lambda d\lambda.$$

Le corps C rayonne mais aussi absorbe des radiations électromagnétiques. Si ce corps reçoit une puissance Φ_λ provenant de toutes les directions de l'espace, il réémet la puissance Φ'_λ.

On pose que le coefficient d'absorption monochromatique est a_λ avec

$$a_\lambda = \frac{\Phi_\lambda - \Phi'_\lambda}{\Phi_\lambda}$$

pour la longueur d'onde λ.

On peut démontrer la loi de Kirchhoff, que nous admettrons ici : il existe entre l'émittance énergétique monochromatique H_λ et le coefficient d'absorption monochromatique a_λ un rapport indépendant du corps considéré :

$$\frac{H_\lambda}{a_\lambda} = k.$$

Le facteur k est fonction de la longueur d'onde λ et de la température T.

Pour le corps noir, $a_\lambda = 1$ (corps idéal), c'est-à-dire :

$$H_\lambda = k.$$

Pour un corps réel, nécessairement $a_\lambda < 1$.

Loi de Stéfan

L'énergie totale émise par le corps noir à la température absolue T est de la forme :

$$H = PT^4$$

Il faut remarquer que l'échauffement d'un corps noir (voir *Pyrométrie à radiations totales*), de surface unité recevant la radiation $H = PT^4$ et placé dans une enceinte à la température T_0, est produit seulement par l'énergie

$$H = P\,(T^4 - T_0^4)$$

Loi de Planck

L'émittance énergétique monochromatique H_λ est donnée en fonction de la température absolue T par la relation :

$$H(\lambda, T) = A \cdot \lambda^{-5} \frac{1}{e^{\frac{B}{\lambda T}} - 1}$$

$A = 1{,}185 \cdot 10^{-16}$ MKSA ; $B = 1{,}43 \cdot 10^{-2}$ MKSA.

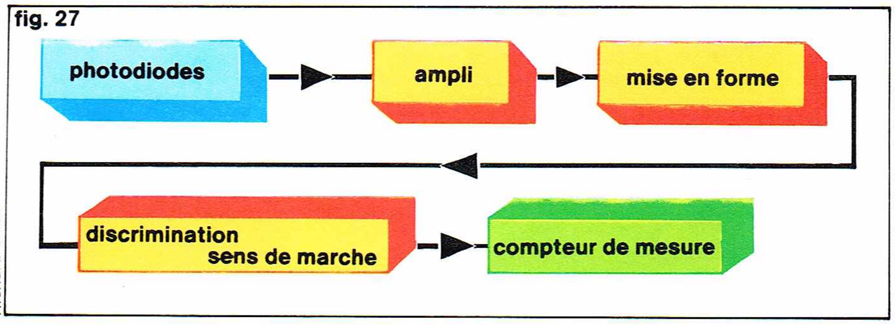

Richard Colin

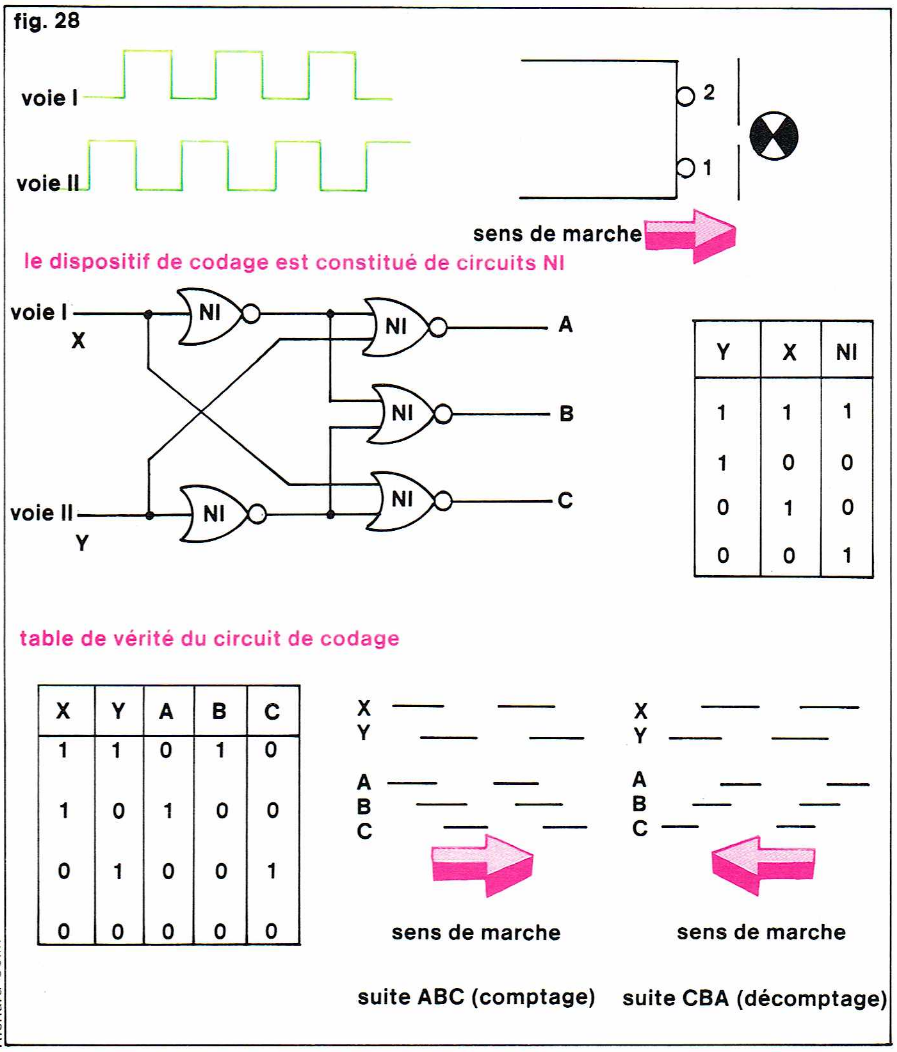

Richard Colin

▲ ***Figure 27 :** schéma synoptique de l'électronique du capteur de sens de marche de la figure 25.*
***Figure 28 :** principe de discrimination dans le capteur de sens de marche de la figure 25.*

Cette formule permet de représenter correctement les résultats expérimentaux, et on vérifie qu'elle fournit la loi de Stéfan lorsqu'on calcule

$$\int H_\lambda d\lambda.$$

Pyrométrie optique

La pyrométrie optique utilise le rayonnement électromagnétique de la source dont on veut déterminer la température. Il existe trois grandes catégories de capteurs : le pyromètre monochromatique (utilisant une partie étroite du spectre visible) ; le pyromètre à radiation totale recevant tout le rayonnement de la source ; le pyromètre à deux couleurs.

Le pyromètre à disparition de filament

Parmi les types de pyromètre monochromatique, ce modèle s'est imposé parce qu'il est facile à construire et à utiliser, qu'il est précis et qu'il est de plus capable de mesurer la température d'échantillons de très faibles dimensions.

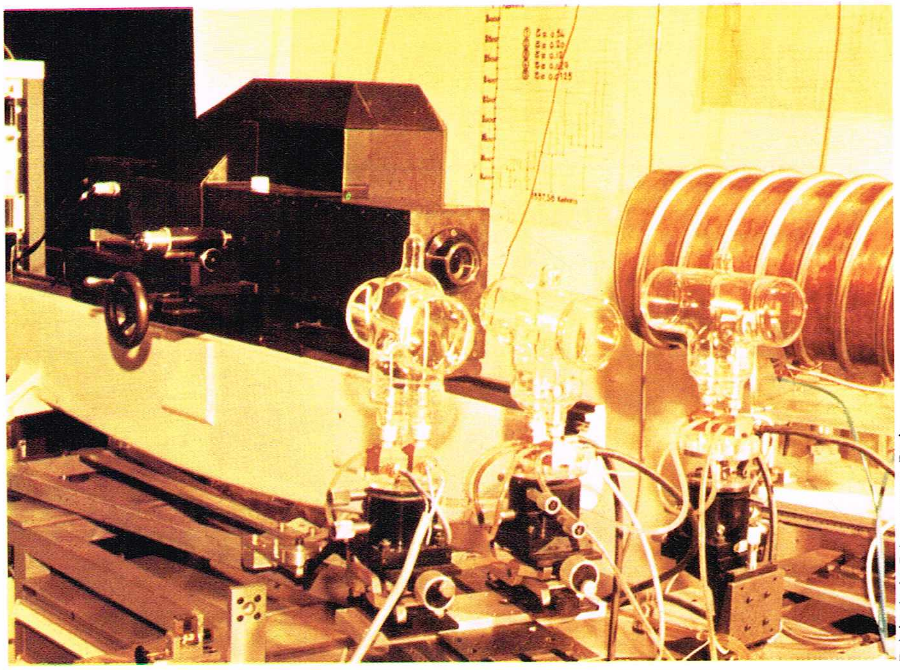

fig. 29

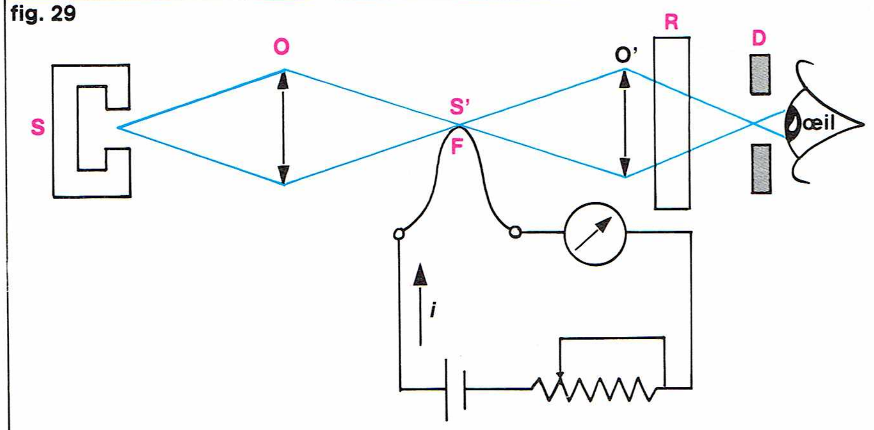

▲ *En haut, un pyromètre monochromatique. Ci-dessus, figure 29 : principe du pyromètre à disparition de filament. L'appareil a été préalablement étalonné à l'aide de sources de températures connues, en faisant correspondre à chacune d'entre elles l'intensité du courant entraînant la disparition du filament.*

▲▶ *Figures 31 et 32 : principe de la lunette et du télescope pyrométriques à radiation totale.*

* *Principe* (*fig.* 29).

On compare la brillance du corps visé (S) à celle d'un filament de tungstène chauffé par effet Joule pour la longueur d'onde $\lambda = 0{,}65$ µm correspondant au filtre rouge (R) monochromatique. La lunette représentée sur la figure comprend :

— un objectif O donnant de la source à contrôler S une image S′ dans le plan du filament F d'une lampe-étalon ;

— un filtre rouge (R) déterminant la largeur de bande comprise entre λ et $\lambda + d\lambda$, dans laquelle on effectue la comparaison des brillances de la source et du filament.

— L'œil placé derrière un diaphragme (D), par l'intermédiaire d'un oculaire O′, voit à la fois l'image de la source, S′, et le filament (*fig.* 30).

La température mesurée n'est exacte que si le corps visé est assimilable au corps noir. L'appareillage ne permet pas de faire des mesures à des températures inférieures à 800 °C.

fig. 30

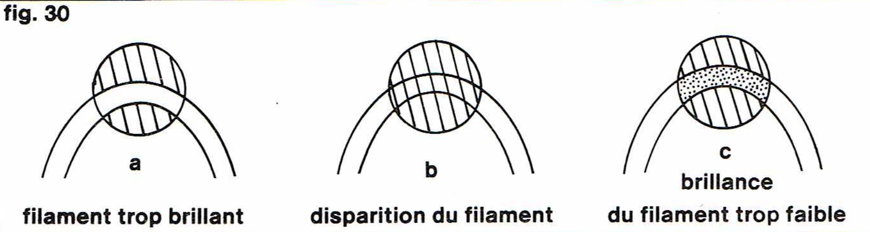

fig. 31

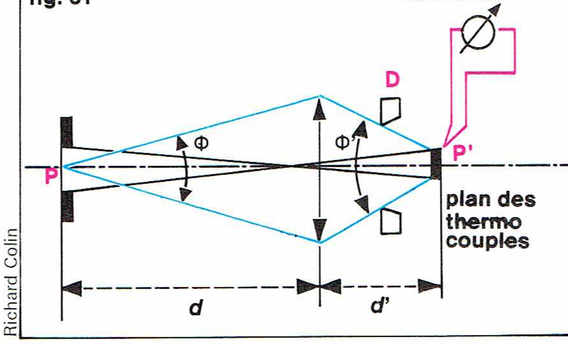

fig. 32

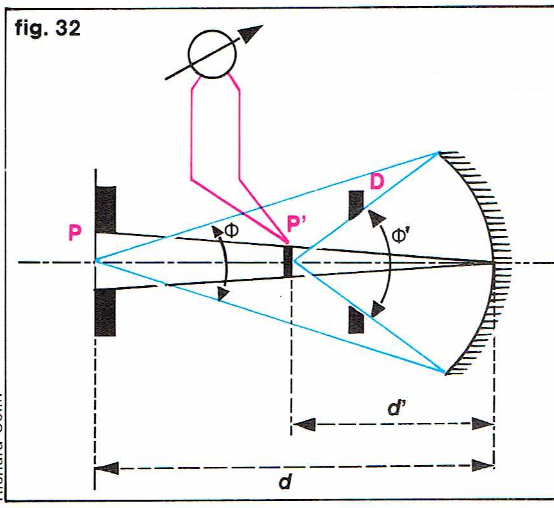

Le pyromètre à radiation totale

* *Principe*

Toutes les radiations émises par la source sont envoyées, grâce à un dispositif optique, sur un récepteur noirci, formé en général d'un simple disque mince. L'élévation de température de ce récepteur est mesurée par un couple sensible dont la soudure chaude est soudée sur le récepteur et dont les extrémités sont reliées aux bornes d'un appareil de mesure de force électromotrice. A chaque f. é. m. donnée correspond une température. Le principe de la mesure dérive de la loi qui lie la valeur W de l'énergie totale rayonnée par l'unité de surface du corps à la température de ce corps. Cette loi s'écrit :

$$H = PT^4 \qquad \text{(loi de Stéfan-Boltzmann)}$$

Le dispositif peut être un simple objectif en verre (lunette pyrométrique) : voir la *figure* 31 ; ou bien un miroir concave (télescope pyrométrique) donnant une image de la source sur le disque récepteur : voir la *figure* 32.

Soit S la surface utile de la source ;
S′ la surface des couples ;
Φ l'angle solide utile d'émission ;
Φ′ l'angle solide de réception ;
ε la surface utile de la lentille ;
d la distance de la source à la lentille ;
d′ la distance de la lentille aux couples.

Le corps visé étant voisin du corps noir, l'énergie émise par le corps et reçue par la surface P′ est :

$$Q = \frac{H}{\pi} S \frac{\varepsilon}{d^2} = \frac{H}{\pi} \frac{S'}{d'^2}$$

or $H = PT^4$

$$Q = \frac{PT^4}{\pi} \frac{S'}{d'^2} = P \frac{S'}{\pi} \Phi' T^4 = kS'T^4$$

Les thermocouples émettent aussi à une température T′

$$Q' = kS'T'^4$$

Si on néglige T'^4 devant T^4 la quantité de chaleur reçue par les couples est de la forme :

$$Q = kS'T^4$$

Il faut faire intervenir t, température en degrés centigrades du thermocouple, et θ, température régnant à l'intérieur du système optique.

Si on appelle α le coefficient de convection et r le coefficient de conduction :

$$kS'T^4 = 2\ S'\ (\alpha + r)\ (t - \theta)$$

soit

$$kT^4 = 2\ (\alpha + r)\ (t - \theta)$$

On s'arrange dans la construction de l'appareil pour que α, r et θ soient constants. Par conséquent, la température t °C indiquée par les thermocouples n'est fonction que de T, la température de la source :

$$t = f\ (T)$$

* *Précisions de la mesure*

L'appareil est étalonné en utilisant une source se rapprochant le plus près possible du corps noir idéal. Pour une source réelle, il faut effectuer des corrections pour ne pas altérer la précision de la mesure.

● *Corps non noir*

L'énergie reçue par un corps réel est de la forme :

$$kH_T = kH_{0T}a_T = ka_TPT^4$$

où H_T est l'émittance totale reçue par les thermocouples correspondant à l'énergie émise par le corps réel à la température T,

H_{0T} l'émittance du corps noir à la même température T,

a_T le coefficient d'absorption à la température T.

On considère que l'énergie rayonnée par le corps réel à la température T est la même que celle rayonnée par le corps noir à la température R, R < T.

$$a_TPT^4 = PR^4$$

$$T = R\frac{1}{\sqrt[4]{a_T}}$$

$$T = R + (T - R)$$

Ainsi, à la valeur lue, R, de la température, on ajoute le terme T — R donné par le *tableau* III.

$$T - R = R\left(\frac{1}{\sqrt[4]{a_T}} - 1\right)$$

Quand a_T s'éloigne sensiblement de 1, les corrections deviennent trop importantes, et la mesure de la température par lunette à radiation totale perd beaucoup de son intérêt. De plus, il faut connaître a_T. Mais souvent, les mesures industrielles visent à la reproductibilité d'une température plus qu'à la connaissance de sa valeur exacte. Si les variations du pouvoir absorbant sont faibles, l'emploi des pyromètres à radiation totale est très satisfaisant. En outre, les conditions d'utilisation pour la mesure des températures à l'intérieur des foyers des fours sont suffisamment proches du corps noir idéal pour qu'on obtienne une température correcte avec la précision recherchée.

● *Erreurs dues aux phénomènes d'absorption*

L'atmosphère régnant entre la source et le capteur peut contenir des gaz (anhydride carbonique, vapeur d'eau) qui absorbent une partie du rayonnement.

* *Avantages et inconvénients du pyromètre à radiations totales*

Son principal avantage est de permettre un enregistrement automatique des températures, la f. é. m. du récepteur peut être en effet enregistrée à distance sur un millivoltmètre enregistreur.

Un premier inconvénient tient à l'échauffement des pièces optiques qui rayonnent vers le récepteur et perturbent la graduation. Le second, plus grave, tient à l'absorption partielle des infrarouges par les gaz transparents tels que le gaz carbonique et la vapeur d'eau, perturbation difficilement chiffrable. Pour éviter ce double inconvénient, dans les installations destinées à l'enregistrement, on est amené à entourer tout le pyromètre d'une gaine à circulation d'eau et à le pointer dans un tube réfractaire fermé, plongé dans le four et dans lequel on fait passer un courant d'air de façon à chasser les gaz absorbants. De plus, il faut faire les corrections de pouvoir émissif (voir le *tableau* III).

Tableau III

Corrections à ajouter à la température mesurée avec un pyromètre à radiation totale, pour obtenir la température vraie

Température (en °K)	Pouvoir absorbant								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
500	385	245	175	130	95	70	45	30	15
1 000	780	495	350	255	190	135	95	55	25
1 500	1 165	745	525	385	285	205	140	85	40
2 000	1 550	990	700	515	380	260	185	115	55
2 500	1 940	1 240	880	645	475	340	230	145	65
3 000	2 335	1 385	1 055	770	570	410	280	170	80

▲ ***Tableau III : correction à ajouter à la température mesurée avec un pyromètre à radiation totale, pour obtenir la température vraie.***

* *Réalisations industrielles*

Remarques très importantes

Dans le cas d'une lunette pyrométrique, le rayonnement incident fait varier les propriétés de la lentille. Pour le télescope pyrométrique, ce mécanisme est moins important. En effet, le phénomène de réflexion ne dépend que de la même couche de métal réfléchissante dont les propriétés optiques sont quasi indépendantes de la température. De plus, le pouvoir réflecteur des miroirs est nettement supérieur au coefficient de transmission des lentilles et ne dépend que très peu de la longueur d'onde incidente. Les systèmes optiques à miroirs permettent la réalisation de pyromètres pour la mesure des basses températures.

Les pyromètres à radiation sont souvent utilisés dans les cas suivants : températures au-dessous du domaine d'emploi du thermocouple; atmosphère corrosive attaquant les cannes pyrométriques; corps en mouvement; corps difficilement accessibles; température moyenne de grandes surfaces; dispositif dont les caractéristiques seraient perturbées par la présence d'une canne pyrométrique. La précision obtenue dans le cas le plus favorable est de ± 1 %. Les appareils usuels ont des échelles couvrant un domaine de températures allant de 500 °C jusqu'à 2 000 °C.

Des modèles spécialement étudiés permettent de mesurer des basses températures. Ainsi, le pyromètre à miroir Siemens est prévu pour la mesure de températures allant de — 40 °C à + 20 °C, son échelle la plus large s'étendant de 100 °C à 600 °C.

Thermo-électricité

La thermo-électricité a deux applications principales : le repérage des températures grâce aux thermocouples et la réfrigération par l'utilisation des éléments Peltier. Cette dernière application repose sur l'utilisation des matériaux semi-conducteurs qui, seuls, ont un coefficient thermoélectrique suffisamment élevé pour avoir un intérêt pratique. Mais, notre propos étant les capteurs, nous ne nous intéresserons qu'à la première application, dans laquelle les métaux et les alliages jouent également un rôle très important.

La compréhension des phénomènes thermo-électriques est fortement liée à celle des métaux, en particulier de leur structure électronique et des phénomènes de diffusion liés à l'énergie des particules et à leur libre parcours moyen; cette notion intervient aussi, d'ailleurs, dans les conductivités électriques et thermiques.

Effet Seebeck. La thermo-électricité est la création directe de force électromotrice par des moyens thermiques : un conducteur est soumis à un gradient de température. Physiquement, le phénomène s'induit parce que les élec-

◀ ***Page ci-contre, en bas, figure 30 : comparaison de la brillance de l'image S' de la source S et de celle du filament dans le pyromètre à disparition de filament.*** **a)** ***cas du filament trop brillant;*** **b)** ***disparition du filament;*** **c)** ***brillance trop faible du filament.***

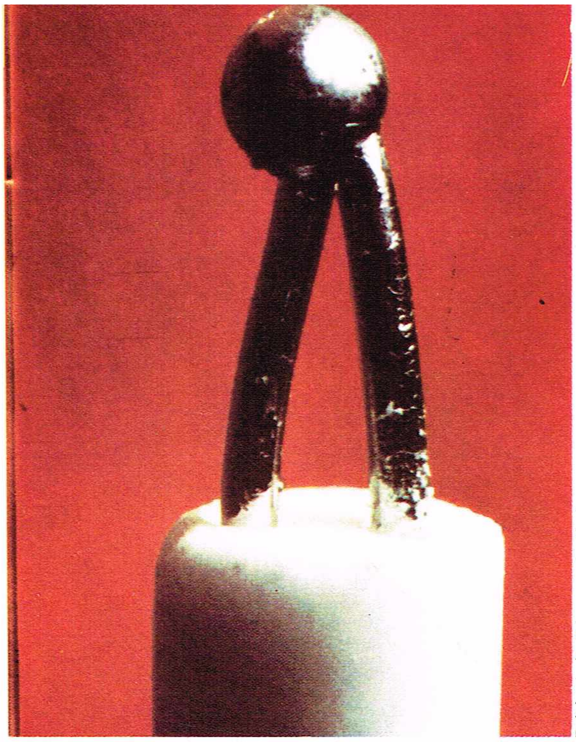

Palais de la Découverte, Paris

▶ *Extrémité d'un thermocouple montrant la soudure des deux fils et la gaine protectrice.*

▶ *Page ci-contre, en haut à gauche, figure 34 : variation de la force électromotrice E en fonction de la température θ pour les couples thermo-électriques. Figure 35 : pouvoir thermo-électrique Q de différents métaux (avec le plomb en référence) en fonction de la température θ.*

trons de l'extrémité chaude du conducteur peuvent trouver des états de plus faible énergie à l'extrémité froide vers laquelle ils diffusent, créant de la sorte une différence de potentiel électrique entre les deux extrémités.

En d'autres termes, on peut considérer qu'un électron a une énergie E qui, sous l'influence du gradient de température, dépend de sa position x dans le métal. Une force F_x agit sur cet électron :

$$F_x = \frac{\partial E}{\partial x}$$

Puisque les électrons peuvent se déplacer dans le métal, ils s'accumulent vers l'extrémité froide du conducteur ; c'est essentiellement de cette manière que la chaleur se propage. Comme cela provoque aussi l'apparition d'une différence de potentiel entre les extrémités du métal, il arrive un moment où un équilibre dynamique s'établit entre les électrons descendant le gradient thermique et l'action du champ électrique créé par l'accumulation à l'extrémité froide d'électrons qui ont déserté l'extrémité chaude. Ainsi, le nombre d'électrons passant à travers une section droite perpendiculaire, ou flux moyen, est égal dans une direction et dans l'autre. Cependant, la vitesse des électrons en provenance de l'extrémité chaude est plus élevée que celle des électrons repoussés par le champ électrique, ce qui continue d'assurer le transfert thermique.

Si nous voulons mesurer la différence de potentiel ainsi créée, il faut réaliser des connexions électriques, ce qui impose un gradient de température identique dans le circuit de détection qui crée, de la sorte, sa propre force électromotrice d'origine thermo-électrique. Si tout le circuit de détection est fait du même métal que le conducteur initial, la symétrie est complète, et on ne pourra détecter aucune force électromotrice. Ainsi donc, pour rendre possible cette détection, il sera nécessaire d'employer au moins deux métaux différents, A et B, et la f. é. m. mesurée est la différence entre les deux contributions. Cette f. é. m. E_{AB} est appelée force électromotrice de Seebeck, parce qu'elle a été découverte par Johann Seebeck (1770-1851) ; c'est celle qui est mesurée habituellement aux bornes d'un thermocouple. Elle ne dépend, pour des conducteurs homogènes libres de contraintes, que de la nature des deux conducteurs A et B et de la différence de température entre les jonctions. Elle ne dépend pas de la forme des conducteurs, pourvu que leurs dimensions soient grandes devant le libre parcours moyen des porteurs de charge.

La dérivée $\frac{\Delta E_{AB}}{\Delta \theta}$ est appelée « pouvoir thermo-électrique » du couple A, B ; c'est une fonction de la température.

▼ *Figure 33 : jonction de deux conducteurs A et B permettant de définir l'effet Peltier (voir développement dans le texte).*

fig. 33

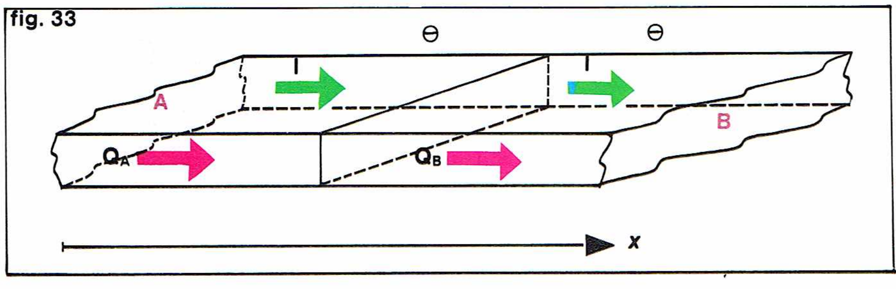

Richard Colin

Effet Peltier. Si, au lieu de connecter les deux branches du thermocouple précédent à un appareil de mesure, on les relie, un courant d'origine thermo-électrique circulera dans la boucle. Ce courant produit un échauffement par effet Joule dans les conducteurs et cette élévation de température tend à détruire le gradient, même s'il n'y a pas de conduction thermique, à moins qu'une absorption continue d'énergie ne se produise aux jonctions à partir de réservoirs de chaleur. Examinons la situation dans une jonction AB que nous supposerons isotherme à la température θ (*fig.* 33). Le courant électrique résulte du passage des électrons de conduction dont la densité est N ; Δv est leur vitesse de déplacement suivant x. Si l'on associe une énergie moyenne $\overline{E}$ à chaque électron, l'accroissement d'énergie produit par A à la jonction est, par unité d'aire :

$$\Delta Q_A = N_A \overline{E}_A \Delta v_A.$$

De la même manière, l'énergie retirée à la jonction en B est :

$$\Delta Q_B = N_B \overline{E}_B \Delta v_B.$$

L'énergie sous forme de chaleur, absorbée ou dégagée à la jonction, est alors :

$$\Delta Q = N_A \overline{E}_A \Delta v_A - N_B \overline{E}_B \Delta v_B$$

où Q est la densité de flux calorifique totale.

Les densités de courant en A et B de chaque côté de la jonction sont identiques et données par

$$I = N_A e \Delta v_A = N_B e \Delta v_B$$

où e est la charge de l'électron. On en déduit :

$$Q = \frac{I}{e} (\overline{E}_A - \overline{E}_B).$$

Donc, si $\overline{E}_A$ est différente de $\overline{E}_B$, il y aura une absorption ou un dégagement de chaleur proportionnel au courant traversant la jonction et dû à l'interaction des électrons avec le réseau cristallin, alors que le dégagement de chaleur par effet Joule est proportionnel à I^2. Si de la chaleur est absorbée à la jonction chaude, il en sera dégagé à la jonction froide. De la même manière, le phénomène est réversible dans une jonction donnée maintenue à une température constante : la même quantité de chaleur qui était absorbée sera dégagée quand le courant sera inversé. C'est l'effet Peltier résultant ainsi de la différence des propriétés électroniques de deux métaux. L'effet Peltier est bien plus important dans les semi-conducteurs et a conduit à la fabrication d'éléments réfrigérants.

Pouvoir thermo-électrique

L'expérience montre que la force électromotrice thermo-électrique pour tous les couples de métaux est correctement donnée, souvent dans de larges domaines de températures, par les deux premiers termes de son développement en série suivant $\theta = T - T_0$:

$$E_0 = a\theta + \frac{b}{2}\theta^2.$$

La variation de la force électromotrice en fonction de θ est ainsi représentée par une parabole verticale, dont le sommet est atteint pour $\theta = -a/b$, le maximum de force électromotrice étant $-\frac{a^2}{2b}$, et qui recoupe l'axe des abscisses pour $\theta_i = -2a/b$: température d'inversion (*fig.* 34).

Le pouvoir thermo-électrique est déterminé par la dérivée de cette fonction :

$$Q = a + b\theta \qquad \mu V/°C$$

En prenant comme métal de référence le plomb, et comme température T_0 celle de la glace fondante, θ est la température centésimale. On donne dans le *tableau* IV

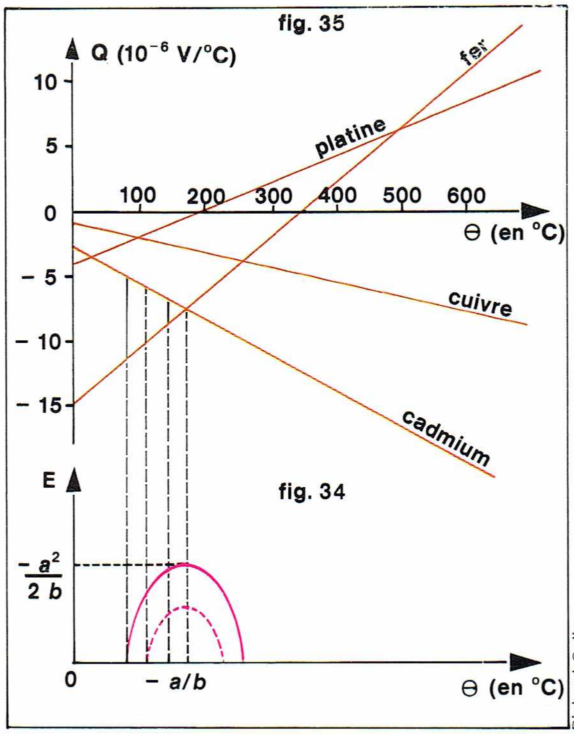

Richard Colin

les valeurs des constantes *a* et *b* pour quelques métaux et alliages usuels. La force électromotrice que l'on peut en tirer est exprimée en microvolts et comptée positivement si le courant qui en résulte va vers le métal de référence dans la soudure froide.

Pour un certain nombre de couples usuels, ce tableau donne la force électromotrice thermo-électrique.

Cuivre-constantan

$$E\ (\mu V) = 40{,}9\ \theta + 0{,}05\ \theta^2$$

Nickel-chrome

$$E = 30{,}3\ \theta$$

La loi est quasi linéaire jusqu'à 1 200 °C.

Platine rhodié-platine

$$E = 7{,}02\ \theta + 0{,}005\ \theta^2 \text{ jusqu'à } 1\,600\ °C$$

Cuivre-fer

$$E = -13{,}84\ \theta + 0{,}021\ \theta^2$$

Chromel-alumel : le chromel (90 % Ni, 10 % Cr) et l'alumel (95 % Ni, 2 % Al, 2 % Mn, 1 % Si) ont des représentations de force électromotrice par rapport au platine qui exigent un développement à trois termes. Ensemble, par compensation, ils constituent un couple dont la tension entre 250 °C et 1 250 °C est linéaire en fonction de θ à mieux que 1 % près, suivant E = 41 θ.

La *figure* 35 est un diagramme où l'on a porté le pouvoir thermo-électrique de différents métaux avec le plomb comme référence en fonction de la température θ.

Thermocouples usuels

Pour choisir les métaux employés pour la réalisation de thermocouples, on tient compte des facteurs suivants : la comparaison d'un fil à l'autre; l'homogénéité des fils; la fidélité; la tenue aux hautes températures; la linéarité de la force électromotrice E (T) en fonction de la température T; la sensibilité du couple $s = \frac{dE\ (T)}{dT}$ [*tableau* V].

Parmi ceux qui satisfont aux conditions énumérées ci-dessus, on trouve les quatre thermocouples suivants, utilisés dans la plupart des cas :

- fer-constantan travaillant entre — 200 °C et 600 °C;
- cuivre-constantan travaillant entre — 200 °C et 350 °C;
- chromel-alumel travaillant entre 0 °C et 1 100 °C;
- platine-platine rhodié travaillant entre 800 °C et 1 500 °C.

On choisit le couple donnant la plus grande force électromotrice pour le domaine de températures exploré. Comme le couple travaille dans l'environnement du milieu contrôlé, c'est la corrosion qui impose le type. Cependant, le souci de normalisation fait parfois choisir un thermocouple moins adapté à la mesure.

* *Préparation d'un thermocouple*

Les fils formant la jonction doivent être isolés. Pour cela, on utilise un matériau réfractaire. Les perles isolantes peuvent se présenter sous différentes formes : isolateurs cylindriques à un ou plusieurs fils; isolateurs circulaires ou méplats; perles à rotules. Les diamètres sont variables et, suivant le domaine de température, ils sont fabriqués soit en stéatite, soit en porcelaine, silice, alumine...

Tableau IV
Valeurs des constantes *a* et *b* pour quelques métaux et alliages usuels

Métaux et alliages	*a*	*b*	Domaine de validité (en °C)
Aluminium	— 0,472	0,003	— 200, + 100
Bismuth	— 43,7	— 0,465	— 200, + 100
Constantan	— 38,1	— 0,089	0, + 300
Cuivre	2,76	0,012	0, + 300
Fer	16,6	— 0,030	— 100, + 300
Nickel-Chrome (85 % Ni, 15 % Cr)	27,3	— 0,032	0, + 300
Platine	— 3,04	— 0,032	— 200, + 300
Platine rhodié (90 % Pt, 10 % Rh)	3,98	— 0,022	— 200, + 300

Tableau V
Principales propriétés des thermocouples

Nature des couples	Composition des alliages	Pouvoir thermo-électrique en µV/°C	Pouvoir thermo-électrique valeur en mV à t °C	Domaine maximum d'utilisation (en °C)	Limite d'emploi (en °C)
Cuivre-constantan	54 % Cu + 46 % Ni	11	33,6 à 600 °C	— 250 + 600	350
Fer-constantan	54 % Cu + 46 % Ni	56	51,9 à 900 °C	— 250 + 1 000	600
Chromel-Alumel	90 % Ni + 9,8 % Cr + 0,2 % Mo 94 % Ni + 2 % Al + 1 % Si + 2,5 % Mo	41	32,4 à 800 °C	500 1 250	1 100
Platine rhodié-platine	90 % Pt + 10 % Rh	9,5	15,34 à 1 500 °C	800 1 600	1 500
Argent-constantan	54 % Cu + 46 % Ni	41	33,6 à 600 °C	20 600	600
Chromel-constantan	90 % Ni + 10 % Cr 55 % Cu + 45 % Ni	70	45 à 600 °C	300 1 000	700
Platine-or		50		jusqu'à 2 000	1 200
Carbone/silicium-carbone		250	535 à 1 800 °C	jusqu'à 2 000	1 700
Iridium rhodié-iridium	40 % Ir + 60 % Rh	5,4	10,85 à 200 °C	500 2 000	
Molybdène/fer-tungstène	99 % Mo + 1 % Fe	8	16 à 2 000 °C	500 2 200	
Carbone-tungstène		20	40 à 2 000 °C	jusqu'à 2 400	
Tungstène/molybdène/fer-tungstène	75 % W + 25 % Mo + εFe		6 à 3 000 °C	jusqu'à 3 000	

▲ ***Tableau IV* : valeur des constantes thermo-électriques *a* et *b* pour quelques métaux et alliages usuels.**
***Tableau V* : quelques propriétés des thermocouples (d'après M. Véron).**

fig. 37

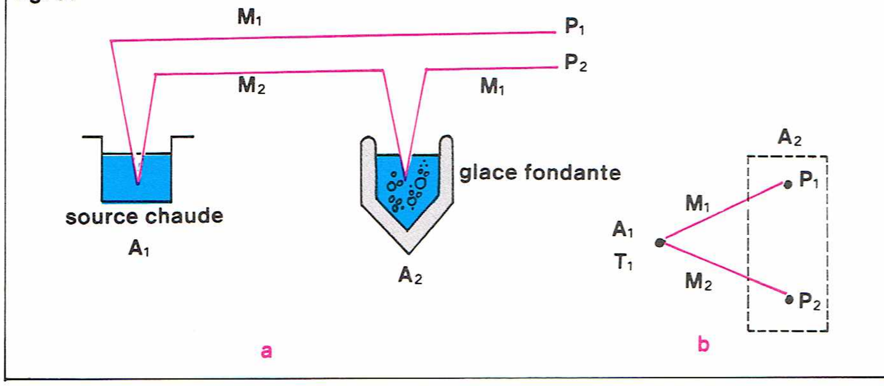

fig. 36

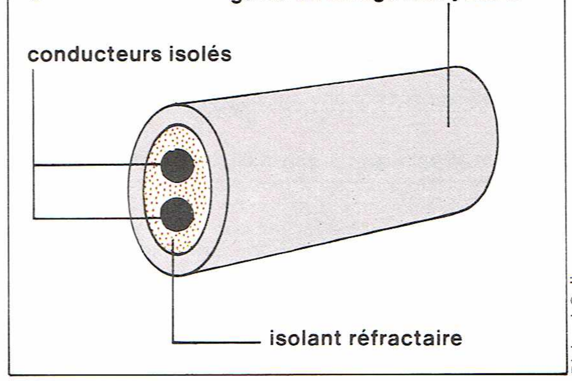

▲ *A gauche, figure 37 : principe du montage d'un thermocouple : a) montage fondamental (utilisé pour les mesures de laboratoire) ; b) montage habituel (employé dans les mesures industrielles). A droite, figure 36 : coupe transversale montrant les diverses gaines assurant la protection d'un thermocouple.*

▼ *Figure 38 : schéma électrique permettant de comprendre le principe de la mesure de la température par thermocouples (voir développement dans le texte). Figure 39 : schéma électrique du montage permettant la correction automatique de la soudure froide dans le cas de la mesure de températures par thermocouples. Figure 40 : schéma du prolongement d'un thermocouple par des câbles de compensation (M_3 et M_4).*

Pour assurer la *protection* (*fig.* 36) contre les chocs, contre les atmosphères corrosives, pour assurer l'étanchéité de l'enceinte à contrôler, on place le couple dans une gaine appelée canne pyrométrique. Ces gaines doivent avoir les propriétés suivantes : bonne tenue à la température de service ; résistance aux chocs mécaniques et thermiques ; grande conductibilité thermique ; faible conductibilité électrique, surtout pour celles utilisées dans des fours à chauffage électrique ; étanchéité par rapport au milieu ambiant ; bonne tenue à la corrosion. Toutes ces qualités sont difficiles à satisfaire, la forme des cannes est très variée, la diversité des cannes pyrométriques est donc très grande.

* *Le circuit thermo-électrique*

● *Soudure froide*

T_1 est la température de la soudure chaude A_1 et T_2 la température de la soudure froide A_2.

Généralement, A_2 (T_2) se trouve être à la température ambiante, et celle-ci est susceptible de variations au cours d'une mesure. De plus, la variation de la force électromotrice n'est pas obligatoirement parfaitement linéaire. Il faudra donc avoir une température de référence ou faire une correction de soudure froide.

Le montage fondamental (mesures de laboratoire) ne nécessite pas de correction, tandis que le montage habituel (cas des mesures industrielles) en nécessite une (*fig.* 37) :

$$E_0 (T_1) = E_0 (T_2) + E_2 (T_1).$$

Il faut ajouter à la valeur lue sur l'appareil de mesure de la f. é. m., soit E_2 (T_1), la valeur E_0 (T_2) qui est la correction de soudure froide pour avoir la vraie valeur de f. é. m., E_0 (T_1) donnant la température de la source chaude A_1. Sur un potentiomètre portatif, du type E. S. P. M. (MECI), cette correction se fait manuellement. Sur un appareil enregistreur, elle se fait de façon automatique.

— *Principe de la mesure* (*fig.* 38). La source S débite un courant continu constant dans le circuit comprenant la résistance R et le potentiomètre X. La résistance R permet de calibrer I en fonction de S. La méthode est une méthode d'opposition. O. S. est l'organe sensible permettant de faire le zéro. X peut être gradué soit en f. é. m., soit en température.

— *Principe de la correction automatique* (*fig.* 39). La valeur de la résistance D est fonction de la température à 0 °C. Elle a une résistance correspondant à la tension V_0 pour le courant I. Pour une température T_2, sa tension a pour valeur

$$V = V_0 + E_0 (T_2).$$

La correction n'est valable que pour un seul type de thermocouple à la fois.

● *Prolongation d'un thermocouple*

Par câble de compensation : dans le cas où la jonction A_2 n'est pas à la température ambiante, les conducteurs M_3 et M_4 doivent avoir les mêmes propriétés thermoélectriques que les fils du thermocouple qu'ils remplacent dans un domaine de températures peu élevé (100 °C, — 20 °C) [*fig.* 40]. Ces câbles sont moins onéreux que les fils du couple et peuvent avoir des sections plus élevées de façon que leur résistance électrique soit très faible. Ils sont livrés sous diverses présentations permettant une adaptation aux conditions de service. La température au niveau A_2 doit être homogène.

Par fil de cuivre, dans le cas où la température de A_2 est déjà la température ambiante, mais où l'appareil de mesure de f. é. m. se trouve éloigné du point de mesure.

Piézo-électricité

Certains cristaux (naturels ou artificiels) possèdent la propriété de faire apparaître une polarisation électrique orientée par rapport aux axes cristallins sous l'influence d'une pression ou d'une déformation mécanique convenablement dirigée.

Les corps piézo-électriques sont soit des cristaux naturels comme le quartz ou la tourmaline, artificiels comme le phosphate diammonique (ADR) ou le sel de seignette, soit des céramiques à base de titanate de baryum ($BaTiO_3$) frittées à haute température et refroidies dans un champ électrique.

La polarisation électrique du cristal peut provoquer le déplacement de charges électriques libres dans des armatures métalliques disposées perpendiculairement aux axes électriques de ces cristaux (*fig.* 41).

L'effet piézo-électrique apparaît sous sa forme la plus simple dans le quartz qui est un bioxyde de silicium (SiO_2). Le quartz cristallise dans le système rhomboédrique pour former une hémiédrie holoaxe. Le cristal est anisotrope et possède un axe optique dirigé suivant l'axe

fig. 38

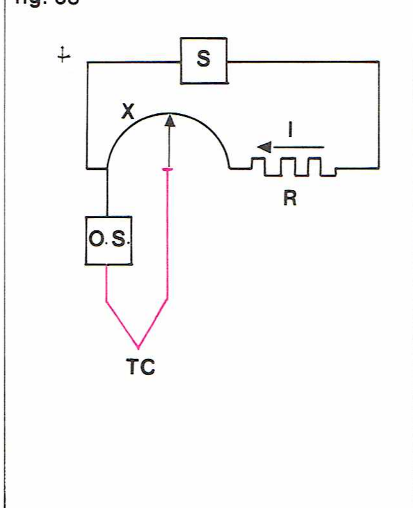

fig. 39

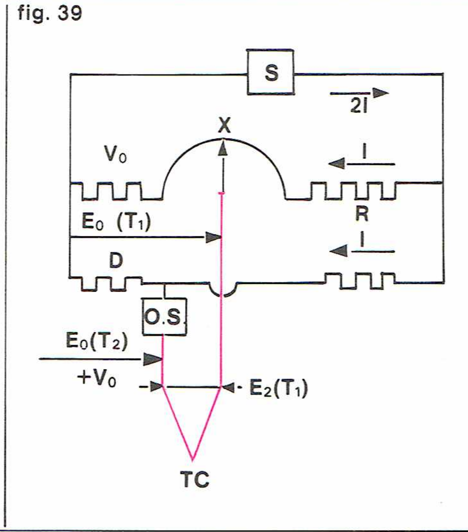

fig. 40

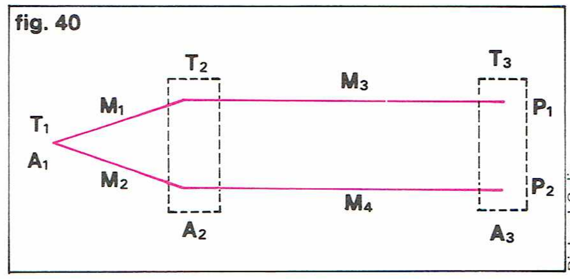

des pyramides terminales du cristal. Il y a trois axes de symétrie dans une coupe transversale formant un hexagone perpendiculaire à l'axe optique. Ce sont les axes électriques.

Découpons à l'intérieur du quartz un parallélépipède rectangle dont les surfaces *a* et *b* sont perpendiculaires à l'axe électrique E_1. Avec une compression uniforme sur ces faces, il apparaît des charges. Dans la lame comprimée suivant son épaisseur, il y a un déplacement des ions silicium par rapport aux ions oxygène. Le moment électrique dipolaire des molécules sur la face *a* diminue et le moment électrique des molécules de la face *b* augmente. La résultante fait apparaître un champ extérieur qui n'agit que par influence.

L'expérience montre que la valeur de la charge Q est proportionnelle à la force F appliquée dans un large intervalle des valeurs de cette dernière :

$$Q = kF.$$

Le coefficient *k* est le module piézo-électrique. Pour une coupe Y du quartz, il vaut :

$$k = 2{,}32 \times 10^{-12}\ \text{C/N}.$$

En fait, pour des forces appliquées différemment, il y aura encore apparition de charges sur les faces considérées. Un module piézo-électrique est donc relatif à une direction de force appliquée et à des charges qui apparaissent sur des faces déterminées. Il s'agit donc d'un tenseur de rang 2.

Ainsi, si on écrit la polarisation résultant de l'application d'une force sur le quartz :

$$P_i = \sum_{k=1}^{6} d_{ik} F_k$$

où le tenseur *d* est tel que

$$\begin{array}{cccccc} d_{11} & -d_{11} & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & -2\,d_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}$$

C'est ainsi qu'en prenant la lame taillée précédente, on appelle « effet piézo-électrique direct longitudinal » l'effet observé. Si maintenant on applique un champ électrique entre les faces *a* et *b*, on notera une variation proportionnelle de l'épaisseur ; c'est l'effet piézo-électrique inverse. En comprimant la lame sur des faces parallèles à l'axe électrique E_1, les charges n'apparaissent que sur les faces *a* et *b* : c'est l'effet piézo-électrique transversal.

On conçoit donc aisément que l'effet piézo-électrique peut être mis à profit pour réaliser des transducteurs permettant de mesurer des forces, des pressions, voire des déplacements et des accélérations. Le capteur certainement le plus connu qui utilise l'effet piézo-électrique est la « cellule piézo » de nos électrophones. Bien que supplantée maintenant par des dispositifs à réluctance variable, elle a permis à quantité de mélomanes ou simplement d'amateurs de musique d'écouter leurs disques. Ce capteur de déplacement avait l'avantage de présenter une grande sensibilité et une gamme de fréquences assez étendue. Malheureusement, la réponse en fréquence souffrait de nombreux accidents, et surtout les caractéristiques mécaniques de la cellule, compliance en particulier, ne sont plus en accord avec les exigences actuelles en matière de reproduction des transitoires.

Les cristaux et les céramiques piézo-électriques sont très utilisés, aussi bien comme émetteurs que comme capteurs d'ultrasons et comme capteurs de vibrations dans une gamme de fréquences de dix kilohertz à quelques dizaines de mégahertz.

Jauges de contrainte. Mesure des déformations mécaniques. Jauges d'extensométrie

Les jauges de contrainte sont d'un emploi extrêmement répandu pour mesurer des déformations, mais aussi pour atteindre par là différentes grandeurs comme une force, une pression, voire un débit ou un volume. Nous allons étudier le principe de fonctionnement des jauges électriques d'extensométrie avec leurs limites théoriques d'emploi ainsi que certains problèmes pratiques posés par leur utilisation ; nous illustrerons ainsi la difficulté qui reste à résoudre, une fois que l'on a choisi le capteur, pour l'utiliser correctement, c'est-à-dire de telle manière que rien ne vienne fausser la mesure.

Une jauge est constituée par un fil très fin collé sur un support, feuille très mince, et disposé comme le montre la *figure* 42 ; la majeure partie de la longueur du fil se trouve dirigée suivant une direction principale, par exemple O*x*. Les contacts sont réalisés en fil conducteur de grosse section.

Pour déterminer l'allongement d'une structure suivant une direction donnée, on colle la jauge suivant cette direction. On mesure la variation de résistance ; celle-ci est liée à l'allongement relatif de la jauge. La connaissance des déformations sert à calculer les contraintes lorsqu'on connaît les lois qui lient ces grandeurs, en général les lois de l'élasticité.

La première application connue de la variation électrique d'un fil sous l'action d'une force est due à Bridgman, qui l'a utilisée en 1917 pour des mesures de pression hydrostatique.

Les jauges à fil résistant sont très utilisées parce qu'elles sont très pratiques : une faible déformation de la jauge entraîne en effet une variation notable de la résistance ; la méthode est fidèle ; les résistances sont légères et de faible inertie, elles permettent de suivre des déformations rapidement variables.

Différents procédés permettent de fabriquer les jauges (jauges à grille plane, jauges en dents de scie, jauges tissées) ; une technique développée depuis quelques années utilise les procédés des circuits imprimés. Elle permet d'obtenir les jauges dites « pelliculaires » très plates avec un support de 20 à 30 µm en résine époxy à partir d'une feuille de métal de 2 µm. Une autre technique récente utilise comme transducteur des bâtonnets de silicium monocristallin dopés. La sensibilité des jauges peut être de 50 et même 100 fois supérieure à celle des jauges métalliques. La variation de résistance peut être négative ou positive.

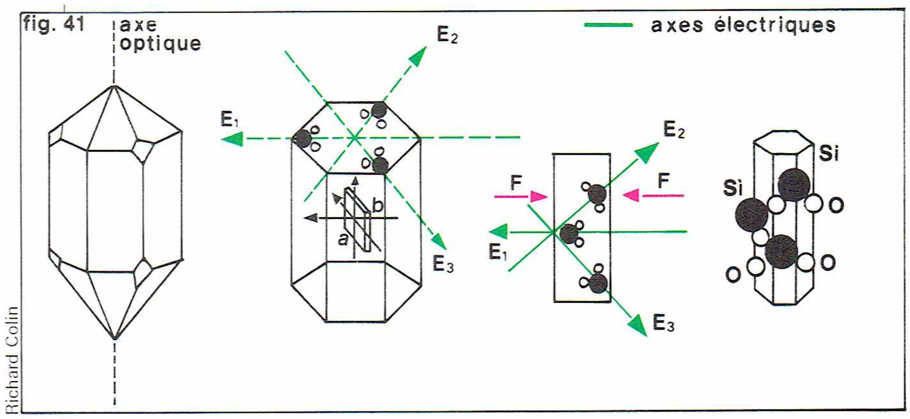

fig. 42

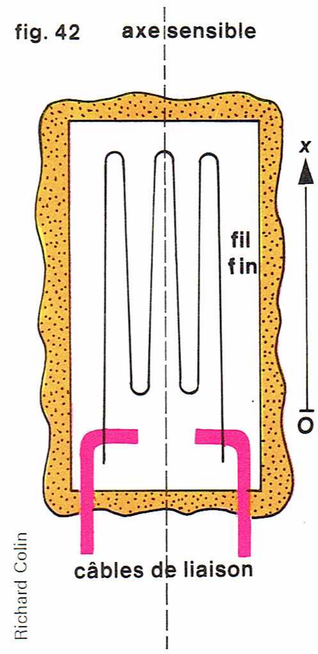

▲ ***Figure 41 : propriétés piézo-électriques d'un cristal de quartz. Figure 42 : représentation schématique d'une jauge à grille plane.***

▼ ***Une jauge linéaire à trame pelliculaire (5 mm de longueur).***

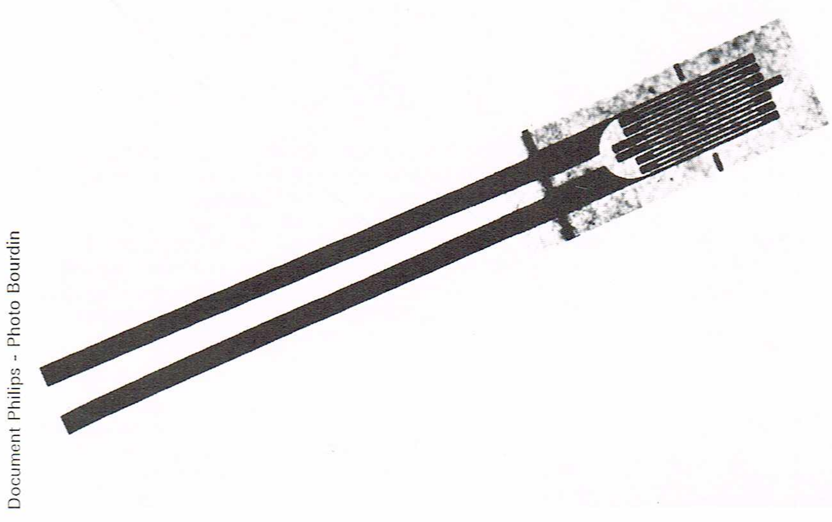

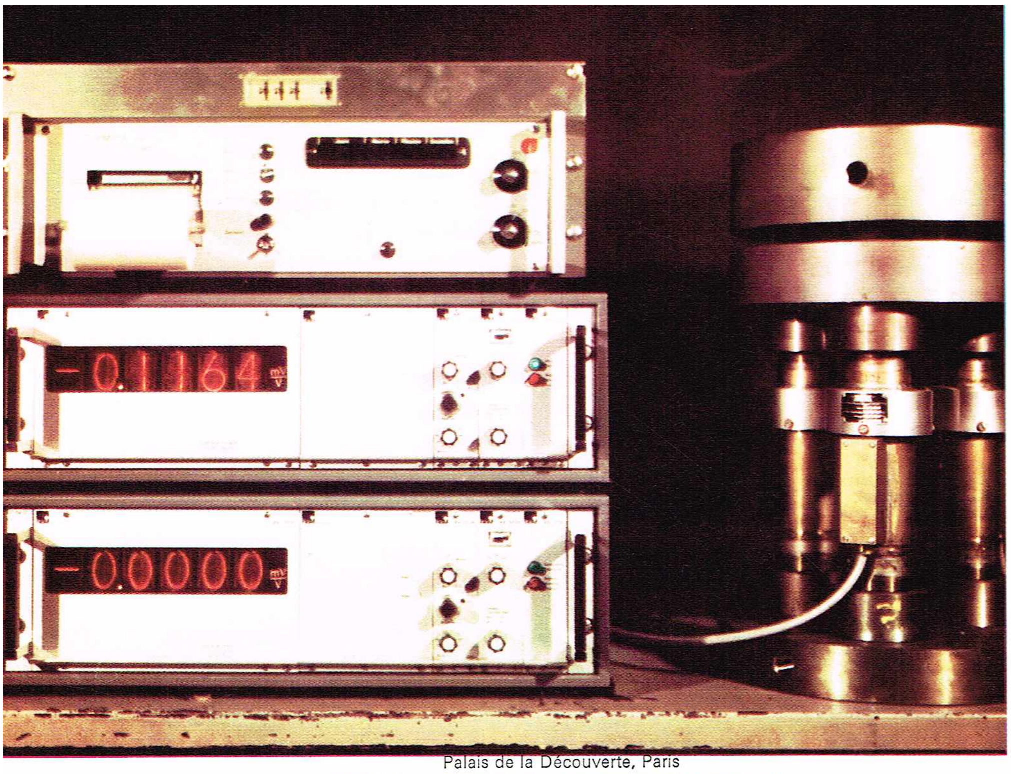

Palais de la Découverte, Paris

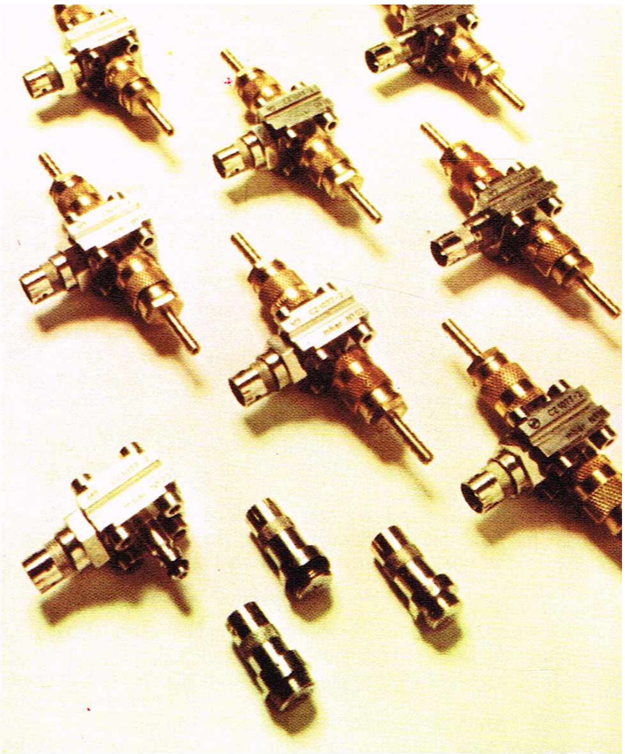
Palais de la Découverte, Paris

▲ *A gauche, étalonnage sur une presse de compression d'un dynamomètre de capacité 90 000 dynes. A droite, capteurs de pression à jauge diffusée.*

Principe physique des jauges

Phénomènes physiques

La plus grande partie du conducteur constituant la jauge se trouve disposée suivant une direction privilégiée O*x*. En première approximation, on peut admettre que le fil suit fidèlement les déformations que subit la surface à contrôler.

Si on considère un fil très fin soumis à une traction, dans les limites de son domaine élastique, il s'allonge, tandis que sa section diminue. Soit $\Delta l/l$ son allongement relatif, le diamètre du fil diminue de $\eta \frac{\Delta l}{l}$, η étant le coefficient de Poisson (0,3 pour la majorité des métaux).

La résistance électrique du fil de longueur l, de diamètre d et de résistivité ρ est donnée par la formule suivante :

$$R = \rho \cdot \frac{4\,l}{\pi d^2}$$

soit

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - 2\,\frac{\Delta d}{d}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + (1 + 2\,\eta)\,\frac{\Delta l}{l}$$

La loi de Bridgman relie les variations relatives de résistivité aux variations relatives de volume. C'est une loi de proportionnalité que nous écrivons :

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = C\,\frac{\Delta V}{V}$$

or

$$V = l \cdot \frac{\pi d^2}{4}$$

soit

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{2\,\Delta d}{d} = C\,(1 - 2\,\eta)\,\frac{\Delta l}{l}$$

d'où

$$\frac{\Delta R}{R} = [(1 + 2\,\eta) + C\,(1 - 2\,\eta)]\,\frac{\Delta l}{l}$$

On voit donc que, si l'on connaît la valeur de C et celle de η, on peut théoriquement relier la variation relative de résistance à la variation relative d'allongement.

La valeur de C est obtenue par des expériences de traction sur des fils. Cependant, dans le cas de fils laminés ou tréfilés usuellement rencontrés, qui sont constitués de cristaux ayant une orientation préférentielle, ρ ne peut dépendre du seul volume, et sa variation relative doit dépendre de la direction de déformation.

Application aux jauges

Une jauge doit être considérée comme un ensemble de brins parallèles reliés entre eux par des boucles qui sont cause d'un léger effet latéral. On a donc deux déformations, l'une suivant O*x*, l'autre suivant O*y*, que l'on appellera ε_x et ε_y.

Coefficient de sensibilité d'une jauge (facteur de jauge) : la variation relative de résistance ρ par rapport à l'allongement relatif définit le coefficient de sensibilité.

$$\frac{\Delta R}{R} = k\,\frac{\Delta l}{l} \qquad k = \text{facteur de jauge}$$

Coefficient de sensibilité longitudinale :

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_x \div \varepsilon_x = k_1$$

Coefficient de sensibilité transversale :

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_y \div \varepsilon_y = k_2$$

Ainsi, de façon générale :

$$\frac{\Delta R}{R} = k_1\varepsilon_x + k_2\varepsilon_y$$

Seule la déformation ε_x est intéressante, et l'idéal est d'avoir pour k_1 une valeur permettant le calcul de ε_x et pour k_2, l'effet transversal, une valeur nulle. Ainsi le but des constructeurs sera de rendre k_2 sinon nul, du moins aussi petit que possible.

On sait que $\varepsilon_y = -\varepsilon_x \cdot \eta$

$$\frac{\Delta R}{R} = k_1\varepsilon_x - \eta k_2 \varepsilon_x = (k_1 - \eta k_2)\,\varepsilon_x$$

Ce qu'il est intéressant de connaître, c'est :

$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon_x \qquad k = \text{facteur de jauge}$$

donc

$$k = k_1 - \eta k_2$$

$$k = k_1\left(1 - \eta\,\frac{k_2}{k_1}\right)$$

En général, le rapport de la sensibilité transversale à la sensibilité longitudinale est de l'ordre de 2,5 %, et l'on trouve que le coefficient de sensibilité réel, k, de la jauge est de 0,7 % plus petit que le coefficient théorique.

Conclusion de cette approche théorique

Le facteur de jauge est impossible à calculer avec une bonne précision, puisque la constante C repose sur des hypothèses plus ou moins justifiées et que le rapport k_2/k_1 ne peut qu'être approché, c'est-à-dire évalué.

La valeur du facteur de jauge ne peut donc être obtenue que par étalonnage, et cela pour chaque jauge. En réalité, une jauge collée est irrécupérable, et il faut donc faire un étalonnage statistique. On prélèvera généralement sur les lots fabriqués avec le même fil 10 à 15 % de la production journalière, et on déterminera leur coefficient de sensibilité.

* *Propriétés des métaux constitutifs des jauges*

- Le facteur de jauge doit être élevé pour rendre la mesure aisée.
- La résistivité doit être grande. En effet, on mesure $\Delta R/R$, et plus ρ est élevée, plus R est grande et plus ΔR qui est proportionnelle à R est grande.

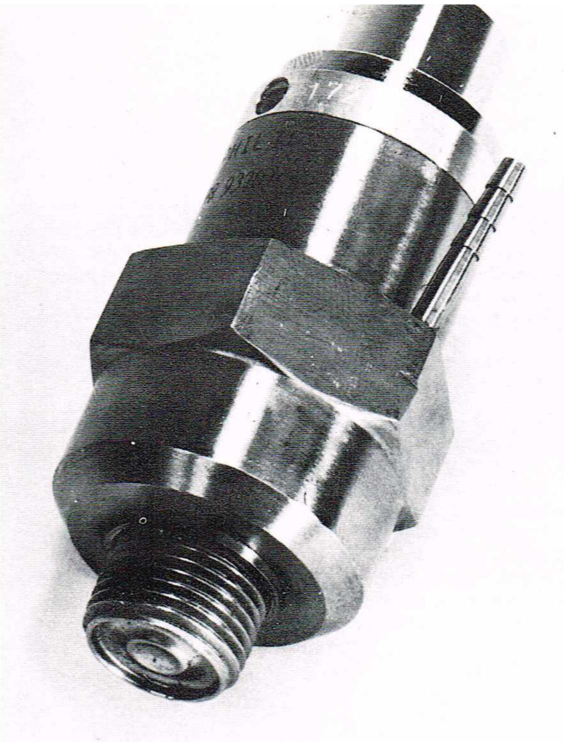

Document Philips

◀ *Un capteur de pression à jauge de contrainte ; cet appareil peut contrôler en continu des pressions dans des liquides atteignant 200 °C et dans des gaz atteignant 2 800 °C (pendant 10 s).*

Emploi des jauges de déformation

Principe

On considère un pont de Wheatstone (*fig.* 43) constitué de quatre résistances R_1, R_2, R_3 et R_4, une source de tension continue et un galvanomètre.

$$V_p - V_q = V_B - V_D = E\left|\frac{R_3}{R_1 + R_3} - \frac{R_4}{R_2 + R_3}\right|$$

$$Z_{pq} = g + \frac{R_1R_3}{R_1 + R_3} + \frac{R_4R_2}{R_2 + R_4}$$

Le courant i traversant le galvanomètre est de la forme :

$$i = E\,\frac{R_3(R_2 + R_4) - R_4(R_1 + R_3)}{g\,(R_1 + R_2)\,(R_2 + R_4) + R_1R_3\,(R_2 + R_4) + R_2R_4\,(R_1 + R_3)}$$

* *Première méthode*

$R_3 = R_4 = R$
$R_1 = X = R + \Delta R$
R_2 = résistance variable étalonnée.

La méthode est une méthode de zéro, c'est-à-dire que l'on ajuste R_2 jusqu'à ce que le courant soit nul dans le galvanomètre.

▼ *Tableau VI : propriétés des alliages constituant les jauges.*

- Le facteur de jauge doit être stable dans un domaine de température suffisant.
- La variation de résistance ne doit dépendre que de la déformation (les variations de température ne doivent pas intervenir).
- La déformation ne doit pas provoquer d'effet électrique autre que la variation de résistance ohmique (thermoélectricité par exemple).
- Le métal doit avoir un grand domaine où il garde ses propriétés élastiques.
- La mise en œuvre doit être aisée.

Les propriétés des métaux constituant les jauges sont récapitulées dans le *tableau* VI.

* *Effets thermiques sur la jauge*

Effets primaires. Lorsqu'une jauge collée sur une structure est soumise à une variation de température, on constate :

— un allongement de la grille

$$\Delta l/l = \alpha\Delta t$$

— un allongement du matériau support de grille

$$\Delta l/l = \gamma\Delta t$$

— une variation de résistance

$$\Delta R/R = \beta\Delta t.$$

La résultante de ces trois effets est de la forme :

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{\Delta t} = (\alpha - \gamma)\,k\Delta t + \beta\Delta t.$$

Pour éliminer ces variations de résistances, on essaie par « autocompensation » d'annuler le terme

$$k\,(\alpha - \gamma) + \beta.$$

C'est un problème propre à chacune des jauges. Le constructeur doit donner le domaine d'autocompensation de la jauge. Il s'arrange pour que le terme $k\alpha + \beta$ soit égal et opposé à $k\gamma$ sur un certain domaine de température en dopant en impuretés, par exemple, le métal constitutif de la jauge. Lorsque les jauges sont utilisées hors de ce domaine, il peut en résulter des transformations métallurgiques irréversibles détruisant le capteur, tout en entraînant une modification des coefficients α et β, et détruisant l'autocompensation.

Il est possible aussi d'éliminer ces effets par des compensations extérieures au capteur (voir plus loin).

Effets secondaires. Il peut apparaître une f. é. m. au contact entre la jauge et les fils de liaison. Le module d'Young des matériaux formant le support (semelle) de la jauge varie parfois de façon importante avec la température.

* *Mesure du facteur de jauge k*

On ne fera que la remarque suivante : dans les conditions actuelles de production des jauges par des procédés mécaniques, tous les prélèvements d'un même lot donnent des facteurs k connus à mieux que 0,2 %, ce qui permet de garantir statistiquement k à 0,5 %.

Tableau VI
Propriétés des alliages constitutifs des jauges

Alliages	Nom usuel et composition	Type de jauge	Facteur de jauge	Résistivité (en Ω/cm)	$\frac{\Delta\Omega}{\Omega}/°C = \beta$
Cupro-nickel	Advance Constantan (57 % Cu, 43 % Ni)	Séries 100	2	$49 \cdot 10^{-6}$	$20 \cdot 10^{-6}$
Nickel-chrome-fer	Isoélastic (36 % Ni, 8 % Cr 0,5 % Mo, Fe)	Séries 300	3,5 (domaine élastique)	$115 \cdot 10^{-6}$	
Nickel-chrome	Nichrome V 80 % Ni, 20 % Cr	Séries 400 Séries 600	2	$108 \cdot 10^{-6}$	
Nickel-chrome-aluminium	Karma 4 (Ni_3Cr) Ni_3Al	Séries 500	2	$128 \cdot 10^{-6}$	$135 \cdot 10^{-6}$
Nickel pur		Sondes de température	de — 2 à — 12,1	$12 \cdot 10^{-6}$	

fig. 43

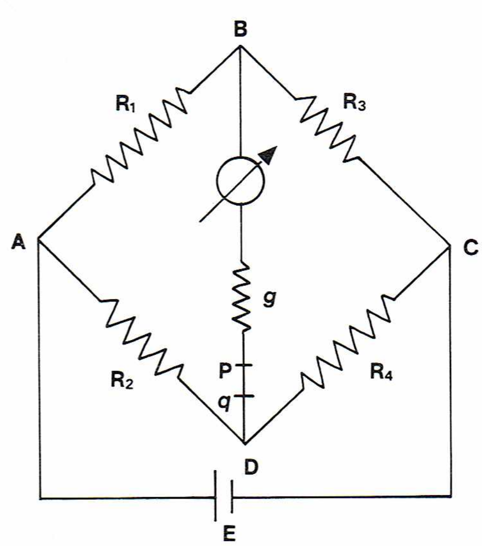

Richard Colin

◀ *Figure 43 : schéma de principe du pont de Wheatstone.*

▶ *Figure 44 : montage demi-pont ; l'introduction d'une jauge passive* (JP) *au voisinage de la jauge active* (JA) *permet la compensation des effets parasites d'origine thermique.*

fig. 44

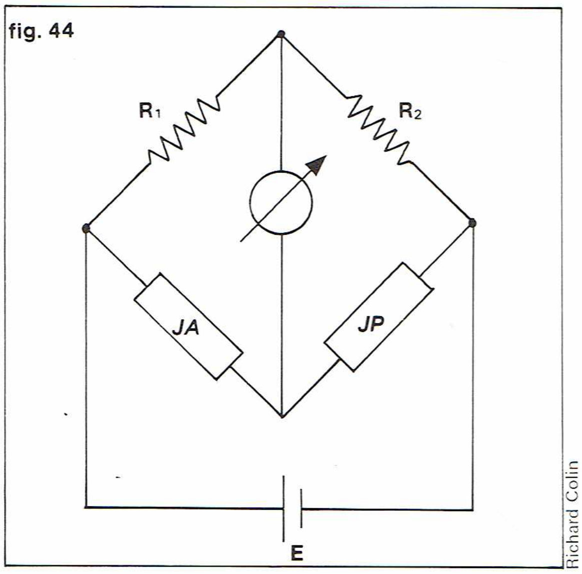

▶ *Page ci-contre, figure 47 : principe de différents types de capteurs à jauges ;* a) *capteur de traction ;* b) *capteur de compression ;* c) *capteur de torsion ;* d) *capteurs de pression. Aspect extérieur et coupe longitudinale de :* e) *un capteur de pression ;* f) *un capteur de force à jauge (capteurs Sexta) ; d'après Uri Zelbstein,* Mesures électroniques, *Dunod, Paris, 1969.*

$$R\,(R_2 + R) = R\,(R + \Delta R + R)$$

$$R_2 = R + \Delta R$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{R_2 - R}{R}$$

C'est une méthode précise, mais qui ne permet pas l'enregistrement.

* *Deuxième méthode*

On pose $R_2 = R_3 = R_4 = R$

$$R_1 = X = R + \Delta R$$

$$i = \frac{E}{4\,(R + g) + Z\Delta R\,(1 + g/R)} \cdot \frac{\Delta R}{R}$$

g/R doit être petit ; ainsi, le terme $Z\Delta R\,(1 + g/R)$ est négligeable devant $4\,(R + g)$:

$$i = \frac{E}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{1}{R + g}$$

g et R sont fixées ; seule ΔR varie. Le courant i est donc directement proportionnel à la variation relative de résistance $\Delta R/R$. Cette méthode permet l'enregistrement d'un courant.

Compensation des effets parasites d'origine thermique

Utilisation d'une jauge passive — demi-pont : dans le montage en pont classique de Wheatstone, on introduit une deuxième jauge, qui sera installée au voisinage de la jauge active (c'est-à-dire de mesure de déformation) et sera donc à la même température que celle-ci. Elle doit donc normalement annuler tous les effets thermiques. Ce procédé a longtemps été le seul utilisé (*fig.* 44).

Utilisation d'une jauge autocompensée : l'existence de jauges autocompensées permet d'utiliser des montages avec une seule jauge active, mais n'empêche pas qu'il soit nécessaire d'éliminer les effets thermiques sur les fils de liaison. La méthode consiste à prendre des jauges à trois fils pour avoir la même longueur de câble dans les branches adjacentes du pont ($l_1 = l_2$) [*fig.* 45].

Propriétés des jauges de contrainte

Que la jauge soit collée sur une structure conductrice (métal) ou sur une structure non conductrice (plastique), la résistance d'isolement se traduit par une résistance en parallèle avec la jauge (*fig.* 46).

La résistance de la branche AB a pour valeur :

$$Z = \frac{R_i}{R_i + J}$$

avec Z = valeur apparente de la résistance de jauge, J = valeur réelle de la résistance de jauge, R_i = résistance d'isolement.

Le pont de mesure donne la variation $\Delta Z/Z$, qui a deux origines : la variation ΔJ et la variation ΔR_i. Cette dernière peut être due soit à une mauvaise polymérisation de la colle, soit à la température, soit à l'effet de l'humidité. Ainsi, on peut se poser deux problèmes : quelle doit être la valeur de R_i pour que la mesure $\Delta J/J$ soit correcte à R_i constante ? quelle est l'influence de la variation de R_i sur la mesure $\Delta J/J$ à J constant ?

- R_i *est constant :*

$$\frac{\Delta Z}{Z} = \frac{\Delta J}{J}\,\frac{R_i}{R_i + J} = \frac{\Delta J}{J} \cdot \frac{1}{1 + J/R_i}$$

Dans l'hypothèse où $R_i \gg J$

$$\frac{\Delta Z}{Z} = \frac{\Delta J}{J} \cdot \left(1 - \frac{J}{R_i}\right)$$

Si on veut une précision de 10^{-4} sur $\Delta J/J$, il faut que $J/R_i = 10^{-4}$. Pour $J = 120\ \Omega \rightarrow R_i = 1{,}2\ M\Omega$.

- R_i *varie :* on peut supposer que R_i varie de R_i à aR_i avec a compris entre 0 et 1.

$$Z = \frac{R_iJ}{R_i + J} \qquad Z' = \frac{aR_iJ}{aR_i + J}$$

$$\frac{Z - Z'}{Z} = \frac{\Delta Z}{Z} = \frac{1 - a}{1 + aR_i/J}$$

Cette dernière relation permet donc de calculer l'influence de la variation de R_i.

Pour avoir une bonne mesure, il faut que R_i soit de l'ordre de 1 000 MΩ.

Il faut dire aussi que la résistance d'isolement est un critère de qualité de collage. En effet, c'est une coïncidence heureuse pour l'expérimentateur que la résistance d'isolement soit en corrélation avec l'état de polymérisation de la colle (époxy en particulier).

Réalisation de quelques capteurs

Voir les différents types représentés sur la *figure* 47.

Contrôle de la matière. Capteurs chimiques

Un certain nombre d'activités industrielles sont consacrées à la préparation et à l'élaboration de matériaux ou de corps plus ou moins complexes ; c'est le cas de beaucoup d'industries chimiques et des industries métallurgiques notamment. Les procédés d'élaboration nécessitent un contrôle de la matière qui revêt trois aspects : le contrôle dimensionnel, le contrôle physique, le contrôle chimique.

Le contrôle dimensionnel s'attache aux mesures de longueur, de volume, pour lesquelles on emploie des capteurs dont on a déjà parlé. Les contrôles physique et chimique sont souvent très intimement liés, et l'on utilise fréquemment des méthodes physiques pour faire une

▶ *A gauche, figure 46 : montage montrant la mise en parallèle de la résistance d'isolement* R_i *avec la résistance de jauge J. A droite, figure 45 : montage avec une jauge autocompensée (jauge active) à trois fils ; les câbles dans les branches adjacentes du pont auront la même longueur.*

fig. 46

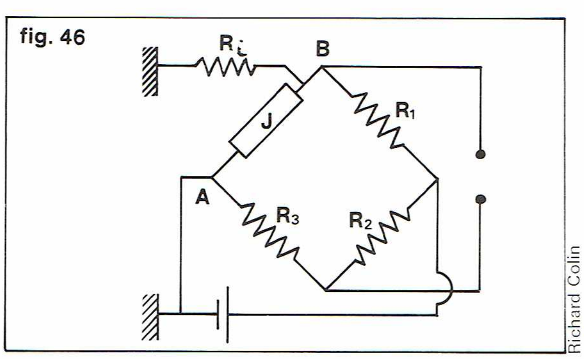

fig. 45

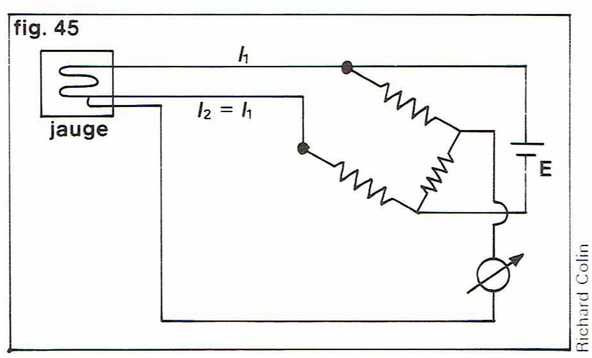

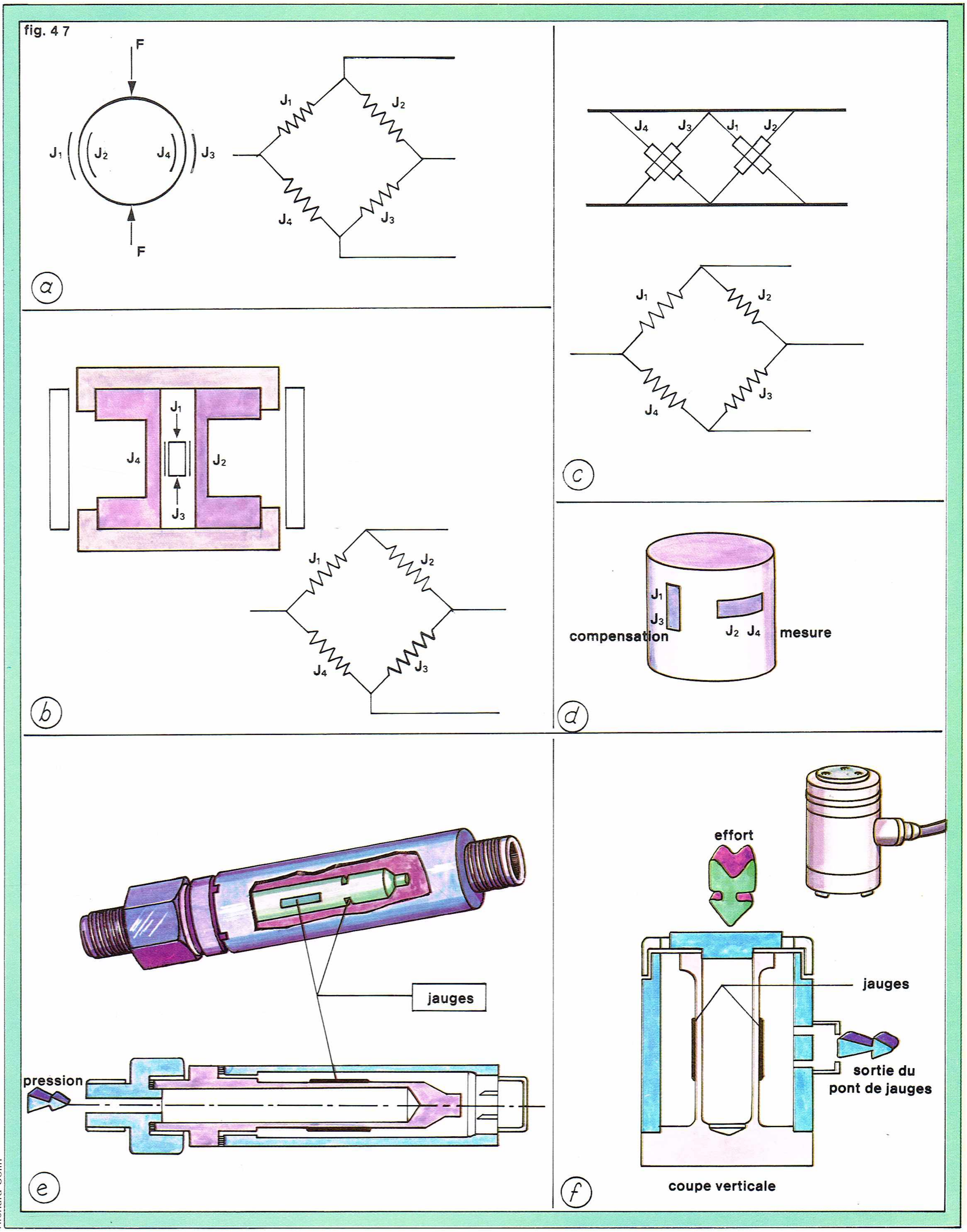

fig. 4 7
F
J1 J2 J4 J3
F
J1 J2 J4 J3
a
J4 J3 J1 J2
J1 J2 J4 J3
c
J1 J4 J2 J3
J1 J2 J4 J3
b
J1 J3
compensation
J2 J4
mesure
d
effort
jauges
sortie du pont de jauges
coupe verticale
f
jauges
pression
e

Tableau VII
Méthodes physiques d'analyse chimique

Classes	Phénomènes mis en jeu	Techniques	Utilisations les plus courantes
Optique	Indice de réfraction	Réfractométrie	Dosage de composés organiques (huiles)
	Pouvoir rotatoire	Polarimétrie	Dosage de composés organiques (sucre)
	Forme et comptage des cristaux	Microscopie	Dosage des espèces chimiques par dénombrement des cristaux de même forme
	Différence des indices de réfraction des métaux	Microscopie polarisante	Minéraux doués de biréfringence
	Diffusion de la lumière		Dosage des milieux troubles
	Fluorescence	Fluorescencimétrie	
	Phosphorescence	Phosphorométrie	
	Émission des photons optiques	Spectrométrie d'absorption dans le visible et l'ultraviolet	Dosage des éléments
Rayonnement	Absorption des photons optiques	Spectrométrie d'absorption dans le visible et l'ultraviolet	Dosage des éléments et des molécules organiques
		Spectrométrie d'absorption dans l'infrarouge	Dosage des molécules organiques Étude des structures moléculaires
	Absorption et réémission des photons optiques	Spectrométrie par effet Raman	Étude des structures moléculaires
	Rayonnement d'émission X	Spectrométrie X et spectrométrie par fluorescence X	Dosage des éléments (de nombre atomique supérieur à celui du magnésium
	Rayonnement corpusculaire et γ Résonance magnétique nucléaire	Spectrométrie γ	Dosage des éléments Dosage des espèces chimique et recherche des structures
Méthodes électriques — Le phénomène mis en jeu est une réaction chimique provoquée par le courant électrique qui modifie le caractère physique de la solution	Vitesse de diffusion et potentiel de dépôt sur électrode	Polarographie	Dosage des ions et des molécules
	Quantité d'électricité	Coulométrie	
— Il n'y a pas de réaction chimique apportée par le courant. Le phénomène utilisé sert à repérer un état chimique de la solution	Potentiel des électrodes	Potentiométrie	
	Intensité de courant de saturation	Ampérométrie	
	Résistivité de la solution	Conductométrie	
— Autre méthode	Vitesse de transport des ions dans un champ électrique	Électrophorèse	Dosage des ions
Méthodes magnétiques et électromagnétiques		Spectrographie de masse	Dosage des molécules et des éléments
Autres méthodes	Adsorption	Chromatographie sur support de partage, en phase gazeuse et thermochromatographie	Séparation et dosage de molécules notamment de molécules organiques
	Tension superficielle	Tensiométrie	Dosage de quelques espèces chimiques (ex. alcool camphré)
	Gravimétrie contrôlée	Thermogravimétrie	Dosage de composés minéraux
	Marquage des éléments	Méthodes isotopiques	Dosage des éléments

analyse chimique (*tableau* VII), de même que les physico-chimistes interviennent aussi fréquemment pour faire des déterminations de paramètres physiques.

Après avoir donné un tableau condensant les méthodes physiques utilisées pour faire une analyse chimique de la matière, nous détaillerons un capteur essentiel des mesures chimiques : le pH-mètre.

pH-métrie

Réaction acide-base

On peut adopter la définition de Brönsted qui s'applique aisément aux réactions acide-base dans un grand nombre de solvants. Les acides sont des corps susceptibles de céder des protons; inversement, les bases ont la propriété de fixer les protons.

$$\text{Acide} \rightleftharpoons \text{Base} + H^+.$$

On peut définir un acide comme une substance qui se dissocie en solution aqueuse en formant des ions hydrogène, tandis qu'une base contient des ions hydroxyde OH^- ou des groupes hydroxyle —OH qui, en solution aqueuse, fournissent les ions hydroxyde.

Concentration en ions hydrogène. Définition du pH

L'eau pure possède une certaine conductivité, très faible mais mesurable, égale environ au dix-millionième d'une solution normale d'acide ou de base. Cela fait supposer que l'ionisation de l'eau

$$H_2O \rightleftharpoons H^+ + OH^-$$

produit des ions hydrogène et des ions hydroxyde à la concentration 10^{-7} N.

Les déterminations précises de conductibilité électrique de l'eau et des solutions diluées d'acide chlorhydrique, de soude et de chlorure de sodium, ont donné la valeur $1{,}00 \cdot 10^{-7}$ pour (H^+) et (OH^-) dans l'eau pure à 25 °C. En effet, l'importance de l'ionisation dépend de la température : à 0 °C, les concentrations (H^+) et (OH^-) sont $0{,}83 \cdot 10^{-7}$ et, à 100 °C, $6{,}9 \cdot 10^{-7}$.

Ainsi, au lieu de dire que la concentration de l'ion hydrogène dans l'eau est $1 \cdot 10^{-7}$, on a coutume de dire que le pH de l'eau pure est de 7. Le pH est le logarithme décimal, changé de signe, de la concentration en ions hydrogène.

$$pH = -\log_{10}(H^+).$$

Exemples :

- pH d'une solution où la concentration (H^+) est de $2 \cdot 10^{-5}$

$$\log 2 \cdot 10^{-5} = 0{,}301 - 5 = -4{,}699$$
$$pH = 4{,}699$$

- Concentration en ions hydrogène d'une solution dont le pH est nul :

$$(H^+) = \text{antilog } 0 = 1$$

Donc une solution normale en ion (H^+) a un pH nul.

Eau et solution diluées

Puisque l'ionisation de l'eau dans les solutions aqueuses diluées est à peu près la même que celle de l'eau pure, et qu'elle peut donc être considérée comme sensiblement constante à température constante, on a l'habitude de ne pas faire figurer l'activité de l'eau dans l'expression de la loi d'action de masse pour les solutions aqueuses diluées.

Une réaction importante est celle de neutralisation :

$$H^+ + OH^- \rightarrow H_2O_{(\text{liquide})}$$

et la réaction d'ionisation de l'eau

$$H_2O_{(\text{liquide})} \rightarrow H^+ + OH^-.$$

La constante d'équilibre de cette dernière réaction est :

$$\frac{(H^+)\,(OH^-)}{(H_2O)} = k_1$$

(H_2O) représente l'activité de l'eau dans la solution. Le produit $k_1\,(H_2O)$ peut être considéré comme constant à température constante; on le posera égal à k.

$$\text{Soit} \qquad (H^+)\,(OH^-) = k.$$

La valeur de k est de $1{,}0 \cdot 10^{-14}$ mole²/litre² à 25 °C. Donc, dans l'eau pure, les ions H^+ et les ions OH^- sont les uns et les autres à la concentration de 10^{-7} mole par litre, et dans les solutions acides ou basiques, le produit des concentrations de ces deux ions est égal à 10^{-14}.

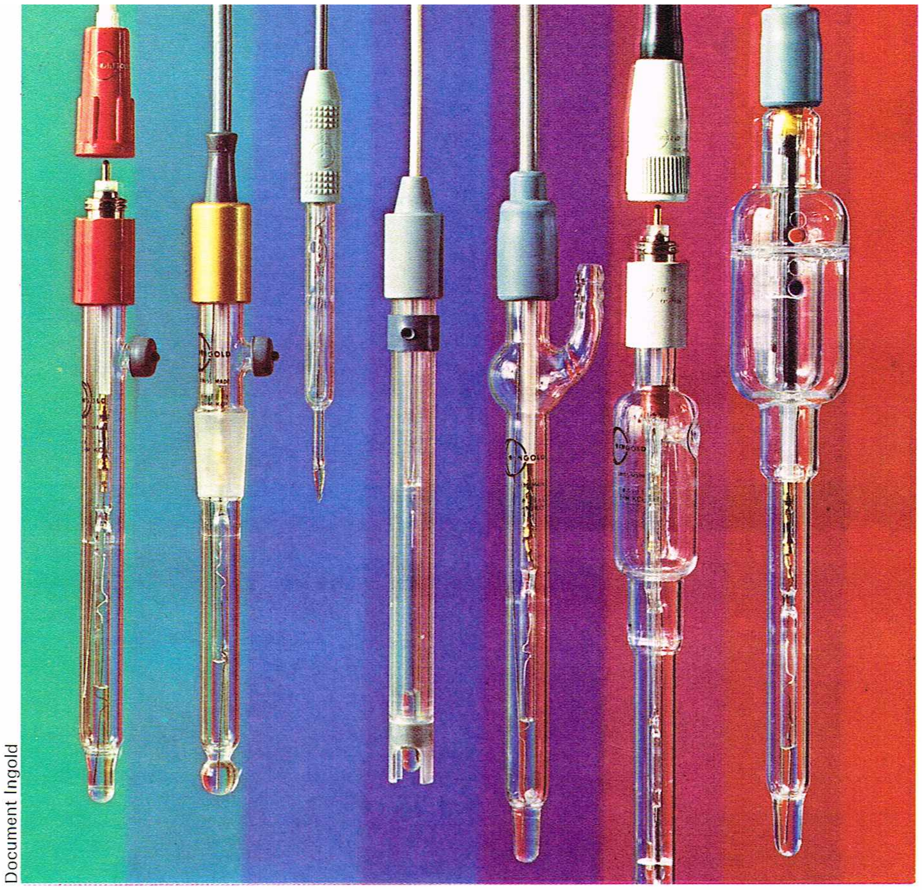

Document Ingold

▲ ***Ensemble de sept électrodes combinées, respectivement de gauche à droite : à membrane cylindrique très robuste et tête enfichable, utilisée dans l'industrie (405 K 7); à membrane sphérique, à rodage normalisé et tête métallique (K 19), à membrane de pénétration du type aiguille pour mesurer dans les tissus animaux ou végétaux ou les milieux très consistants (406 M 3); à membrane protégée, à monture renforcée en matière plastique, destinée aux mesures itinérantes (455); avec tubulure latérale pour alimentation en charge par un réservoir KCl extérieur, à usage industriel (425); pour sondes industrielles, stérilisable à la vapeur, à tête enfichable (465-35 K 9); pour sondes industrielles pressurisables jusqu'à 25 bars (465).***

◀ ***Page ci-contre, tableau VII : méthodes physiques utilisées pour l'analyse chimique.***

▼ ***Chaîne de mesure microcapillaire blindée dont tous les éléments peuvent être maintenus à température constante; cet appareil permet la détermination précise du pH (du sang par exemple) sur des prélèvements de 10 à 20 μl.***

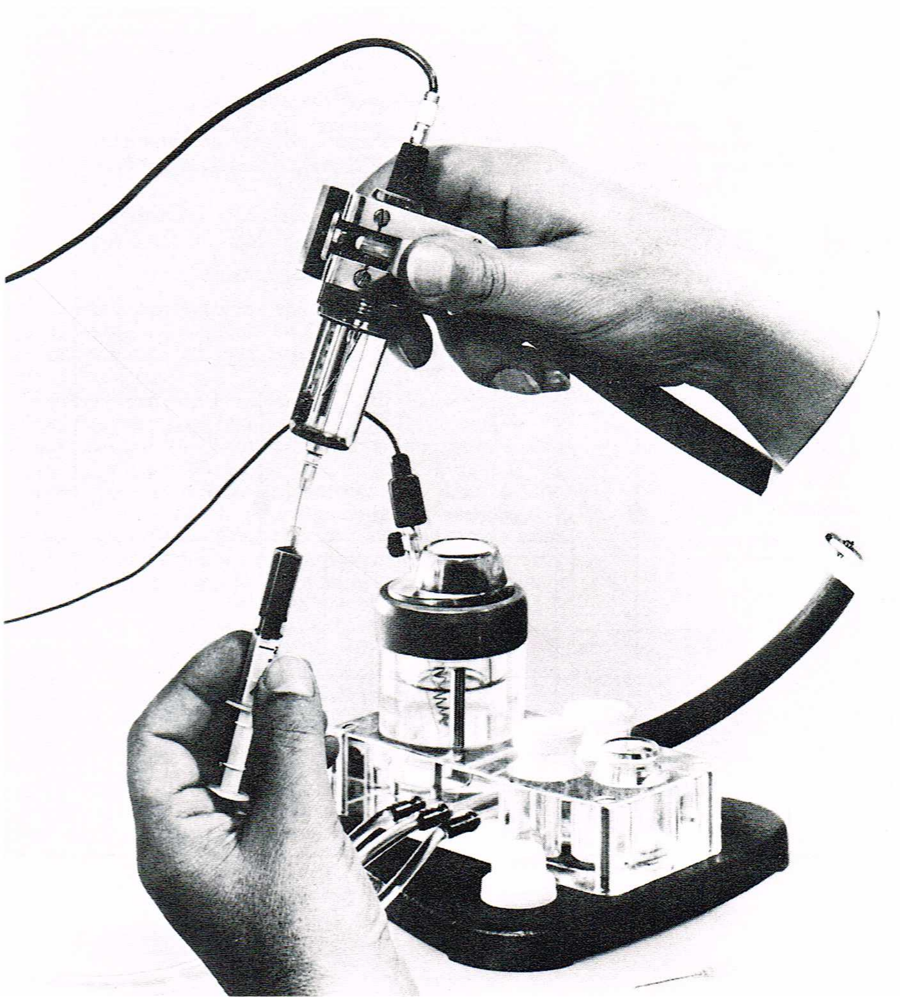

Document Ingold

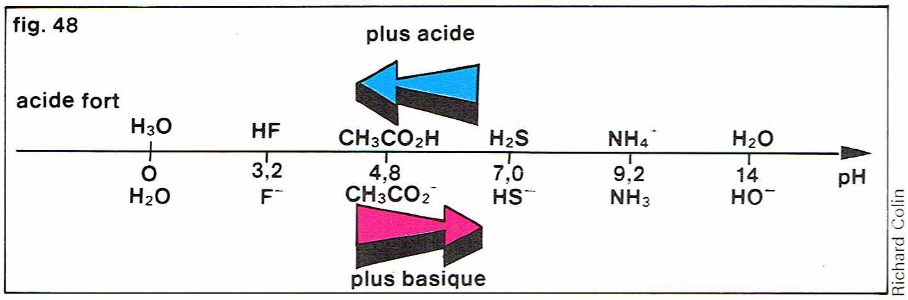

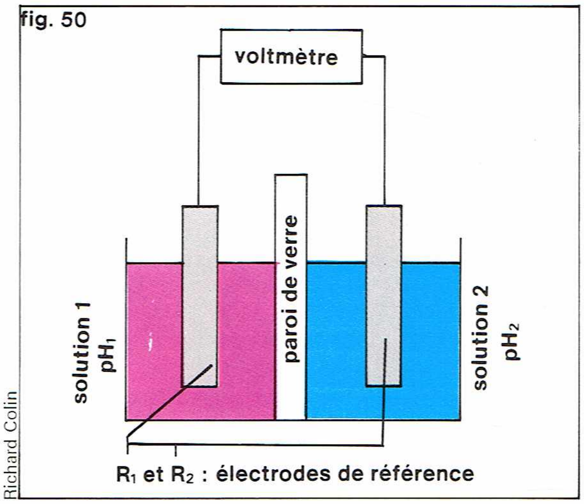

▲▶ *Figure 48 :* *échelle des acidités.*
Figure 50 : mesure du pH avec une électrode de verre.

Ceci va nous permettre de définir une échelle d'acidité. En effet, en utilisant l'expression d'équilibre précédente

$$(OH^-)\ (H^+) = k = 1{,}00 \cdot 10^{-14} \text{ à } 25\ °C,$$

on peut aussi calculer la concentration en ions hydroxyde pour une solution de pH donné. Ainsi, dans une solution de pH 14, on a

$$(H^+) = 10^{-14} \qquad \text{d'où } (OH^-) = 1.$$

Les solutions acides ont un pH inférieur à 7 et les solutions alcalines un pH supérieur à 7.

Pour comparer la force des différents acides, il suffit de les faire réagir sur une même base ; plus un acide est fort, plus il aura tendance à céder ses protons. Si le solvant est lui-même susceptible de fixer des protons H^+, il est commode de le choisir comme base de référence. Ainsi, lorsque l'on met de l'acide dans de l'eau, on observe l'équilibre suivant :

$$\text{Acide} + H_2O \rightleftharpoons \text{Base} + H_3O^+$$

par exemple :

$$HF + H_2O \rightleftharpoons F^- + H_3O^+$$

On applique la loi d'action de masse :

$$\frac{(\text{Base})\ (H_3O^+)}{(\text{Acide})\ (H_2O)} = k$$

La concentration en eau restant très élevée, on la considérera comme constante en solution diluée :

$$\frac{(\text{Base})\ (H_3O^+)}{(\text{Acide})} = k_A$$

k_A est la constante d'acidité.

On prendra, comme pour le pH $pk_A = -\log_{10} k_A$

$$pH = pk_A + \log_{10} \frac{(\text{Base})}{(\text{Acide})}$$

Le pk_A est égal au pH d'une solution contenant un mélange d'acide et de la base du même couple à la même concentration (*fig.* 48).

▼ *Figure 49 :* *mesure absolue du pH avec une électrode à hydrogène.*

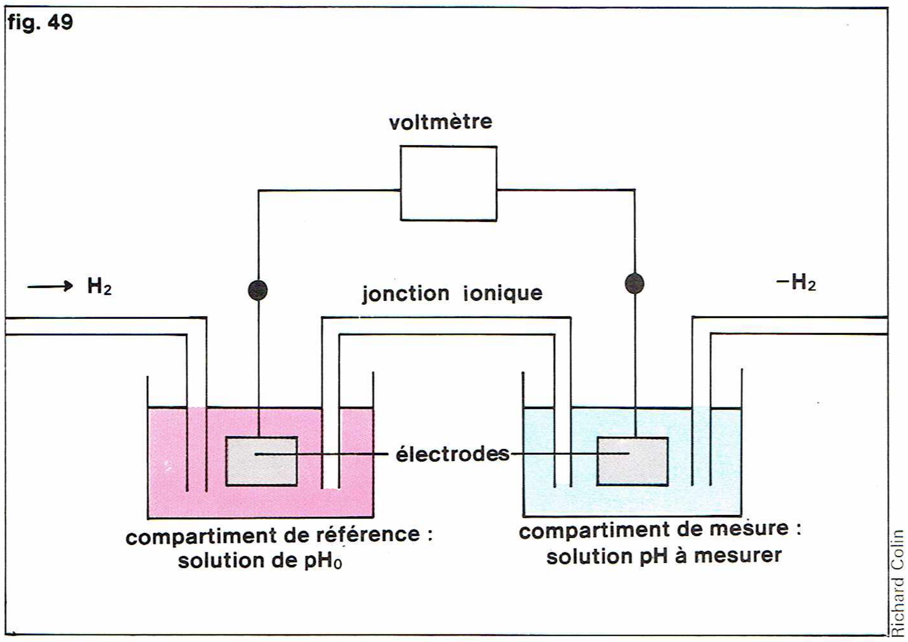

Remarques. Il existe des solvants autres que l'eau. L'intérêt qu'ils présentent est considérable ; ils permettent de faire des réactions acide-base impossibles à réaliser dans l'eau. Un acide fort dans l'eau peut devenir faible dans un solvant convenablement choisi, et inversement.

Mesure du pH

* *Électrode à hydrogène*

C'est le système oxydoréducteur H^+/H_2 qui permet de faire une liaison entre les mesures de pH et les mesures de potentiel.

A la réaction $2\ H^+ + 2\ e^- \rightleftharpoons H_2$, on fait correspondre le potentiel d'équilibre défini par la loi de Nernst :

$$E = E^x{}_0 + \frac{RT}{2\ F} \text{Log}_e \frac{(H^+)^2}{(H_2)}$$

R = constante des gaz parfaits
T = température absolue
F = constante de Faraday (96 500 C)

En solution saturée d'hydrogène sous la pression atmosphérique, (H_2) est une constante ; à 20 °C, cette relation devient :

$$E = E_0 + 0{,}029 \log_{10} (H^+)^2$$

avec E_0 = potentiel normal du système.

Par définition de l'origine des potentiels, on a $E_0 = 0{,}00$ V,

donc $$E = -0{,}058 \text{ pH}.$$

La mesure du potentiel d'une électrode à hydrogène permet donc une détermination absolue du pH (*fig.* 49). Cependant, la mise en œuvre de cette méthode présente trois difficultés : l'électrode proprement dite est constituée d'une lame ou d'un fil de platine ; la solution dans laquelle on doit mesurer le pH doit être saturée d'hydrogène sous la pression atmosphérique ; le potentiel de référence doit être placé dans un compartiment distinct de la cellule de mesure. Cette méthode est inutilisable pour les solutions trop oxydantes ou trop réductrices. Le platine s'empoisonne rapidement et l'électrode doit être replatinée à chaque mesure.

Remarque. Une jonction purement ionique doit assurer la continuité du milieu conducteur ; elle ne peut en aucun cas être constituée d'un conducteur métallique. Cela est réalisé pratiquement en plaçant entre les deux compartiments un obstacle qui s'oppose au passage des ions tout en assurant une continuité du milieu conducteur. Par exemple, on a toujours employé un gel d'agar-agar rendu conducteur par un électrolyte indifférent (KCl, KNO_3). Ce gel est le plus souvent supporté par un tube en U (appelé pont d'agar-agar) dont chacune des extrémités plonge dans un des compartiments.

* *Électrode de verre*

Il existe heureusement d'autres électrodes plus simples ; l'électrode en verre est constituée par une membrane de verre de composition spéciale qui possède les propriétés suivantes : lorsque les deux faces de cette membrane sont baignées par deux solutions de pH différents respectivement égaux à pH_1 et pH_2 (*fig.* 50), il apparaît entre les parois de la membrane une différence de potentiel, à 20 °C, égale à :

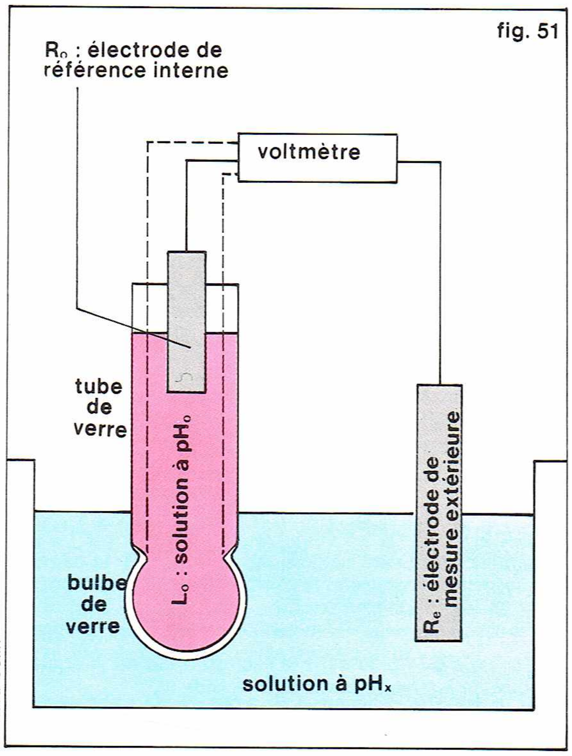

Richard Colin

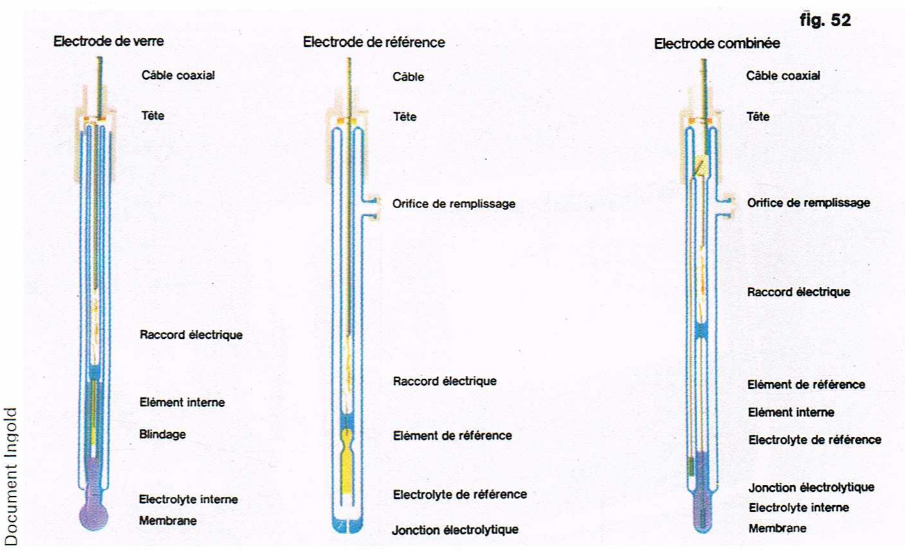

Document Ingold

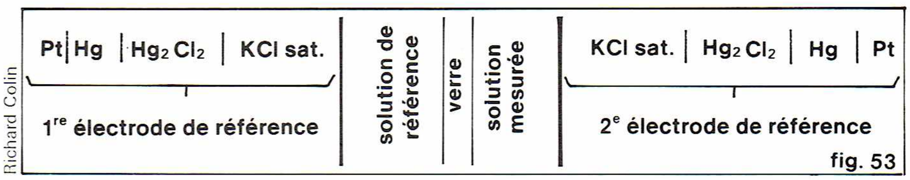

Richard Colin

$$\Delta E = A + 0{,}58\ (pH_1 - pH_2).$$

A est une caractéristique de l'électrode, appelée potentiel d'oxymétrie, qui est de quelques millivolts et peut varier lentement avec le temps. Elle doit donc être déterminée par étalonnage avant chaque mesure. Donc, si on connaît A et pH_1, E permet la détermination de pH_2.

Chacune des électrodes de référence définit une origine des potentiels dans le compartiment où elle baigne. La différence de potentiel apparaissant entre R_1 et R_2 est donc égale à celle existant entre les parois de la membrane de verre.

Du point de vue de la réalisation pratique, une électrode de verre est constituée par un bulbe de verre de composition adéquate, soudé à l'extrémité d'un tube. Le compartiment interne contient une solution de référence $pH = pH_0$, dans laquelle baigne l'électrode de référence R_0 ; la détermination d'un pH consiste à placer cet ensemble dans la solution à étudier, et à mesurer la différence de potentiel apparaissant entre l'électrode de référence R_0 et l'électrode extérieure R_e (*fig.* 51 et 52).

Les électrodes R_e et R_0 peuvent être différentes ; soit E_0 et E_e leurs potentiels respectifs, la d. d. p. mesurée est de la forme :

$$\Delta E = (E_0 - E_e) + A + 0{,}058\ (pH - pH_0).$$

Le plus souvent, l'électrode interne est soit en calomel, soit en argent-chlorure d'argent.

Il faut donc connaître $(E_0 - E_e) + A$ et pH_0 pour faire une mesure. On prend une solution connue comme pH_T :

$$\Delta E_T = (E_0 - E_e) + A + 0{,}058\ (pH_T - pH_0)$$

$$\Delta E_x = (E_0 - E_e) + A + 0{,}058\ (pH_x - pH_0)$$

$$\Delta E_x - \Delta E_T = 0{,}058\ (pH_x - pH_T)$$

Pratiquement, l'étalonnage se fait automatiquement à l'aide d'un montage électrique ou électronique.

● *Avantages et inconvénients :* détermination rapide et précise ; résistivité élevée : il faut une impédance élevée précise ; résistivité élevée : il faut une impédance élevée pour le pH-mètre de l'ordre de $10^{12}\Omega$; la membrane de verre doit être saturée d'eau ; le choix du verre dépend des pH à mesurer.

● *Caractéristiques des mesures* pH-*métriques à l'aide de l'électrode en verre.* L'expérience montre qu'une mesure de pH à 0,01 unité près exige de grandes précautions expérimentales :

— *température :* au voisinage de 20 °C, une variation de 1 °C se traduit par une erreur voisine de 0,005 pH ;

— *étalonnage :* il faut faire attention au fait que l'électrode de verre n'est pas linéaire, donc il faut choisir une solution d'étalonnage dont le pH est très voisin de celui que l'on veut mesurer ;

— *agitation :* l'agitation crée des charges électrostatiques ;

— *modification des solutions.*

● *Réalisation pratique des électrodes :* l'électrode au calomel est constituée par un fil de platine plongeant dans du mercure recouvert de calomel, lui-même baigné par une solution saturée de chlorure de potassium.

Le mercure métallique est en équilibre avec les ions Hg_2^{++} du calomel suivant la réaction

$$2\ Hg - 2\ e \leftrightarrows Hg_2^{++}$$

d'où l'apparition d'un potentiel d'oxydoréduction.

Le schéma de la chaîne est représenté sur la *figure* 53.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{RT}{2\ F} \log_{10} \frac{(Hg_2^{++})}{(Hg_2)^2}.$$

La concentration en ions Hg_2^{++} est gouvernée par le produit de solubilité du calomel

$$(Hg_2^{++})\ (Cl^-)^2 = S$$

et comme la concentration en ions Cl^- est constante puisque la solution est saturée en KCl, il en est de même pour la concentration en ions Hg_2^{++}. Le potentiel ε est donc constant lui aussi.

Pratiquement, ε vaut 246 mV à 25 °C par rapport à l'électrode normale d'hydrogène que nous prenons comme origine des potentiels, et varie avec la température d'environ 0,7 mV par °C. La principale difficulté dans la réalisation d'une électrode au calomel réside dans la jonction entre la solution de chlorure de potassium et la solution dans laquelle on plonge cette électrode (problème de deux solutions différentes ; il apparaît une différence de potentiel appelée « potentiel de jonction liquide », qui varie avec la mobilité et la concentration des ions en présence, ainsi qu'avec le mode de jonction réalisé).

La réalisation de l'électrode de verre se fait de la façon suivante : une électrode de référence au calomel plonge dans un tube à l'extrémité duquel on a soufflé un bulbe très mince de verre spécial. Ce tube et le bulbe sont remplis d'une solution de pH connu et constant (pH de référence) ; ils sont immergés dans le liquide à contrôler (pH inconnu). Dans cette solution inconnue plonge une seconde électrode de référence au calomel.

La mesure se fait aux bornes des deux électrodes de référence.

▲ ***Figure 51 :*** ***mesure du pH avec une électrode de verre (réalisation pratique).***
Figure 52 : ***les trois types d'électrodes utilisées en pH-métrie : électrode de verre, électrode de référence, et électrode combinée.***
Figure 53 : ***schéma conventionnel de la chaîne réalisée entre les électrodes d'un pH-mètre, la solution de référence et la solution à mesurer.***

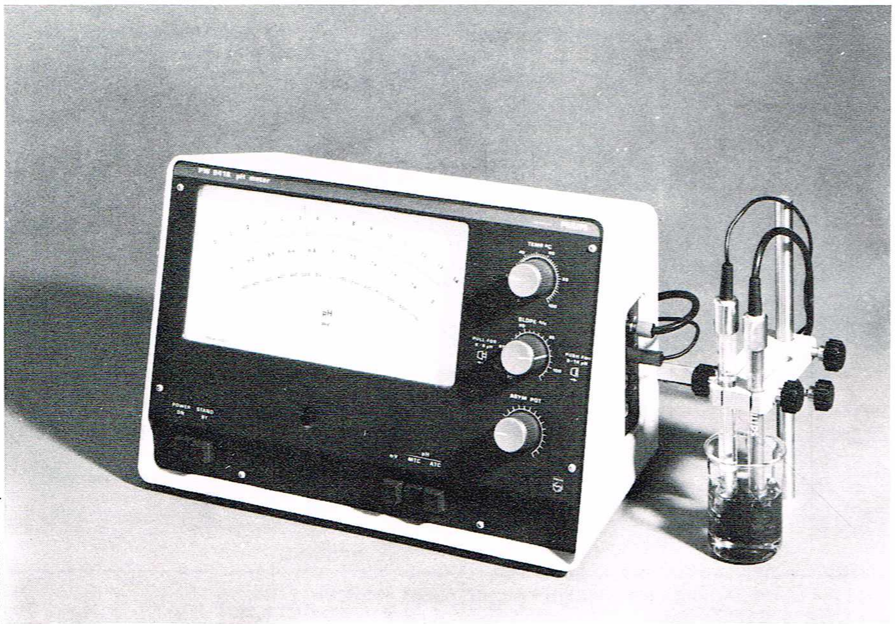

Document Philips

▲ *Ci-dessus, un pH-mètre de laboratoire et son millivoltmètre ; les données sont affichées directement en unités pH (de 0 à 14) ou en millivolts (— 700 mV à + 700 mV).*
Figure 55 : notion de pression statique des fluides dans une conduite.
Figure 56 : notion de pression totale des fluides dans une conduite.

Mesures de pressions et de vitesses dans les fluides

Dans la chaîne de mesures dont nous avons donné le schéma au début, nous nous plaçons encore en tête du capteur pour examiner l'élément sensible à la grandeur à saisir. La description des sondes qui sont le plus souvent des sondes de pression ou des sondes anémométriques nous conduit à une justification expérimentale s'appuyant sur les principes, donnés ici très sommairement, de la mécanique des fluides.

Écoulement dans les conduites

Considérons le cas très particulier d'une canalisation de section S parcourue par un écoulement d'un fluide incompressible de masse spécifique ρ, de viscosité dynamique μ, la vitesse v du fluide étant supposée constante dans toute la section droite de la canalisation (*fig.* 54). Supposons de plus que l'écoulement soit permanent, c'est-à-dire que l'écoulement garde les mêmes caractéristiques au cours du temps.

Dans ces conditions, il est possible de formuler un certain nombre de résultats importants.

Notion de charge

On désigne sous le nom de charge du fluide l'énergie du fluide par unité de débit-poids ; cette charge s'exprime en hauteur de fluide.

Il y a trois origines de charge : la pression du fluide P (une détente permettrait en effet de fournir du travail) ; l'altitude h du fluide par rapport à un niveau de référence (la chute de la masse du fluide dans le champ de pesanteur fournirait du travail) ; l'énergie cinétique (qui représente encore une réserve de travail).

On notera par $\mathcal{H}$ la charge moyenne du fluide dans la section définie par

$$\mathcal{H} = \frac{P}{\rho g} + h + \frac{v^2}{2\,g}$$

où g est l'accélération de la pesanteur.

fig. 54

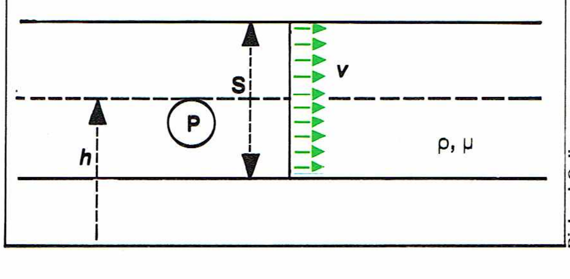

Richard Colin

▶ *Figure 54 : écoulement d'un fluide incompressible dans une canalisation.*

fig. 55

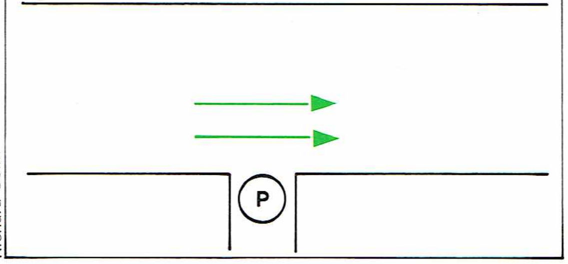

Richard Colin

fig. 56

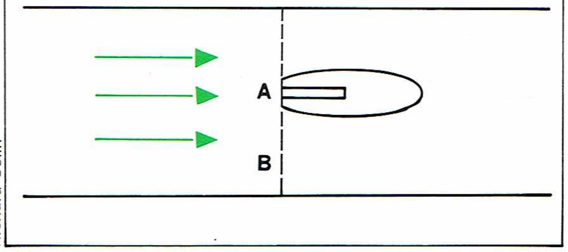

Richard Colin

L'énergie du fluide dans la section S est donc égale au produit de la charge par le débit-poids :

$$E = Q_\rho\,\mathcal{H} = \rho g v S = \left(\frac{P}{\rho g} + h + \frac{v^2}{2\,g}\right)\rho g v S.$$

Pour pouvoir mesurer la charge d'un fluide, il est essentiel que l'écoulement soit permanent et unidirectionnel (canalisation rectiligne).

Pression statique

Nous avons admis que la vitesse était constante dans toute la section S. On démontre de plus que

$$\frac{P}{\rho g} + h$$

est constante dans la section droite, ce qui signifie que, dans une section perpendiculaire à l'écoulement, les variations de pression P sont uniquement dues à des différences d'altitude (*fig.* 55).

Une sonde de pression placée en paroi permet de mesurer la pression qui règne dans le fluide. D'une manière plus générale, toute sonde de pression placée tangentiellement à l'écoulement donnera une mesure de la pression statique.

Une correction de pression statique dans une section droite ne se justifie que pour les canalisations de très fort diamètre traversées par un liquide.

Pression totale

Considérons cette fois une cavité placée frontalement à l'écoulement (*fig.* 56). Au point A, le fluide est immobile. Il possède toutefois la même énergie que le fluide environnant. La charge en A est égale à la charge en B.

$$\frac{P_a}{\rho g} = \frac{P_b}{\rho g} + \frac{v^2}{2\,g}$$

Il en résulte que la pression totale P_a mesurée en un point d'arrêt A est égale à la pression statique augmentée du terme de vitesse

$$P_a = P_b + \rho\,\frac{v^2}{2}$$

Notion de perte de charge

Lorsqu'un fluide visqueux se déplace à l'intérieur d'une conduite, les frottements du fluide sur les parois occasionnent une dissipation d'énergie, ce qui se traduit par une diminution de la charge du fluide de l'amont vers l'aval.

Entre les sections S_1 et S_2 (*fig.* 57), la charge du fluide a chuté d'une valeur $\Delta\mathcal{H}$ telle que

$$\Delta\mathcal{H} = \mathcal{H}_1 - \mathcal{H}_2.$$

On distingue deux familles de pertes de charge : les pertes de charge régulières et les pertes de charge singulières.

* *Pertes de charge régulières :* ce sont les dissipations d'énergie qui apparaissent principalement le long de la conduite. Elles sont proportionnelles à la longueur de la canalisation.

On distingue deux régimes d'écoulement : les régimes dits laminaires pour lesquels les pertes de charge régulières sont sensiblement proportionnelles à la vitesse ; les régimes dits turbulents pour lesquels les pertes de charge régulières sont sensiblement proportionnelles au carré de la vitesse. Il serait trop long de définir les critères permettant de différencier ces deux types d'écoulement (nombre de Reynolds critique). Sachons simplement qu'au plan industriel, les écoulements sont le plus souvent turbulents (exception faite des canalisations véhiculant des liquides fortement visqueux).

* *Pertes de charge singulières :* dès que le fluide rencontre une singularité dans la canalisation (coude, élargissement, vanne, etc.), il y a une perte locale d'énergie. La singularité est caractérisée par un coefficient de perte de charge K. La perte de charge singulière se calcule par la relation

$$\Delta\mathcal{H} = K \frac{v^2}{2g}$$

Lorsque l'on désire déterminer expérimentalement la perte de charge occasionnée par une singularité, il convient de la placer entre deux portions rectilignes de canalisation pour que les mesures aient un sens. Le coefficient K est en général donné par le constructeur.

Les sondes de mesure de pression-vitesse et débit

Nous nous bornerons à la description des sondes les plus couramment utilisées en métrologie industrielle.

Sondes de pression

* *Prise de pression en paroi*

Dans la paroi d'une canalisation rectiligne parcourue par un écoulement de fluide permanent, on perce un orifice. Cet orifice est relié par un tube au manomètre permettant la lecture de la pression statique P. L'orifice doit ne pas être trop grand et avoir un état de surface soigné.

* *Prise de pression statique au sein de l'écoulement*

La sonde de Prandtl (*fig.* 58) est destinée à la mesure locale de la pression statique. Les prises de pression statique sont disposées sur un tube cylindrique positionné parallèlement à l'écoulement v_0. Les orifices sont placés à une certaine distance du nez hémisphérique de la sonde, afin que l'écoulement soit tangentiel à la sonde, et à une distance suffisante de la canne support, pour être insensible à la recompression au point d'arrêt de ce support.

Une erreur de parallélisme inférieure à 5° entre la direction de la sonde et la direction de l'écoulement n'entraîne pas de variation sensible de la mesure de pression statique.

fig. 57

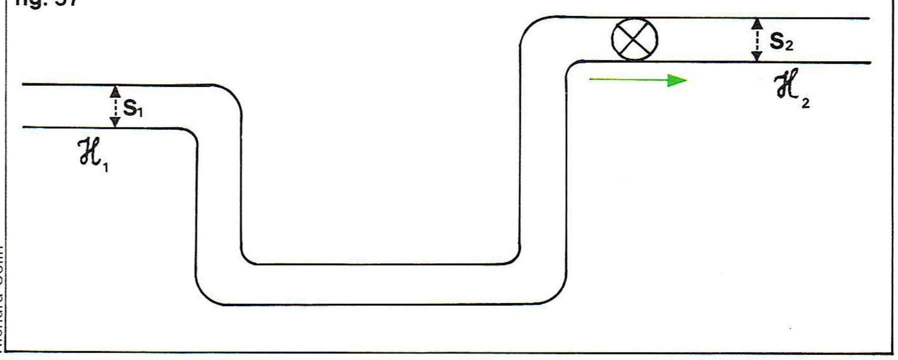

▲ *Figure 57 : notion de perte de charge à l'intérieur d'une conduite.*

fig. 59

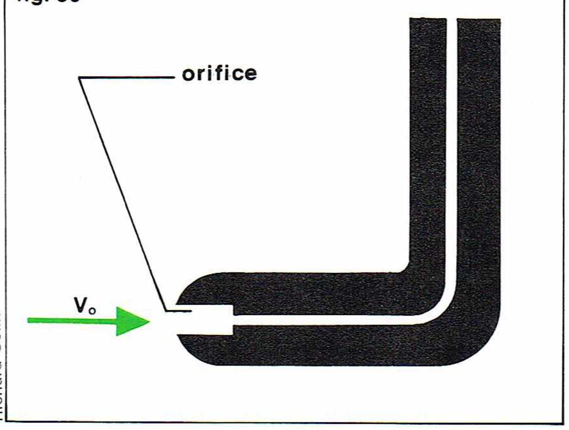

◀ *Figure 59 : un pitot simple : cet appareil permet de mesurer la pression totale du fluide ou pression d'arrêt dans une conduite.*

* *Prise de pression totale ou pression d'arrêt*

L'antenne la plus fréquemment utilisée est le pitot simple (*fig.* 59). Le point d'arrêt est obtenu sur le nez de la sonde positionnée parallèlement à la vitesse. Un orifice placé au nez permet la mesure de la pression d'arrêt ou pression totale. Les diamètres des sondes peuvent être très petits dans le cas de mesures locales fines. Le diamètre de l'orifice par rapport à celui de la sonde devra être grand lorsque des erreurs de parallaxe sont possibles (mesures correctes jusqu'à 13° d'erreur pour un orifice de 0,46 D).

Lorsque l'on connaît la position de la sonde, la mesure de pression totale permet l'estimation de la charge du fluide :

$$\mathcal{H} = \frac{P}{\rho g} + h + \frac{v^2}{2g} = \frac{P_a}{\rho g} + h$$

Tant pour les sondes de pression statique que pour les sondes de pression totale présentées ci-dessus, la lecture de pression est effectuée par un manomètre placé à une certaine distance. Il en résulte que les mesures de ce type sont des filtres passe-bas, ayant une fréquence de coupure très faible. Pratiquement, les lectures ne sont valables que pour des grandeurs constantes dans le temps ou très lentement variables. Lorsque les pressions à mesurer sont variables rapidement dans le temps, on a le plus souvent recours à des capsules manométriques équipées de quartz piézo-électriques.

Sondes de vitesse

* *Pitot double*

La sonde dite « pitot double » (*fig.* 60) est la combinaison des deux sondes de pression statique et totale. Deux tubes cylindriques concentriques délimitent deux espaces dont l'un est en communication avec des prises de pression statique et l'autre en liaison avec la prise de pression totale. On dispose à la sortie de la canne des deux pressions dont la différence est proportionnelle au carré de la vitesse locale.

Le dimensionnement du pitot double résulte du compromis entre des exigences des prises de pression statique et de pression totale vues plus haut. Cette antenne reste exacte pour des erreurs d'alignement allant jusqu'à 15°. Les modèles courants ont un diamètre de l'ordre de 10 mm.

fig. 58

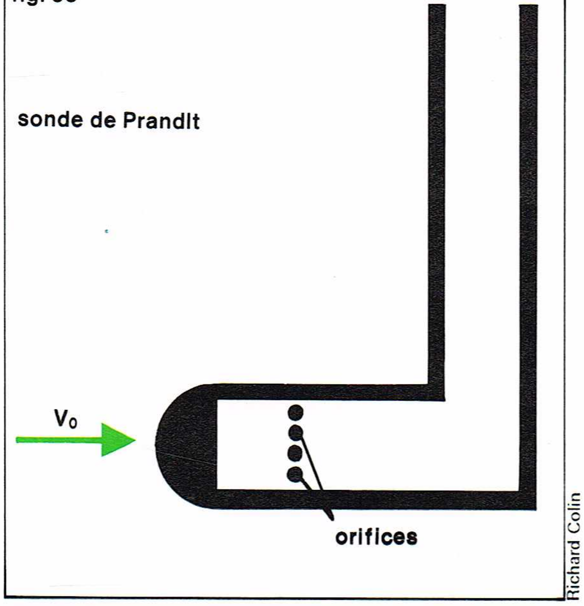

◀ *Figure 58 : une sonde de Prandtl destinée à la mesure locale de la pression statique au sein d'un écoulement de fluide.*

▶ *Figure 60 : un pitot double permettant de mesurer la vitesse d'un fluide.*

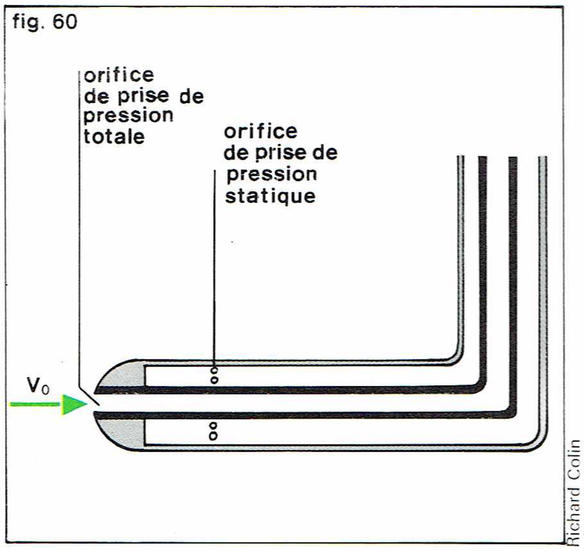

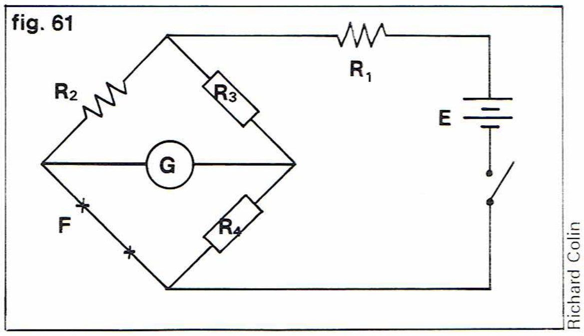

▶ *Figure 61 : montage du fil chaud F (anémomètre à fil chaud) dans un pont de Wheatstone.*

Le pitot double ne permet des mesures que dans les écoulements stationnaires. $v =$ cte, toujours pour les raisons invoquées plus haut.

* *Anémomètres à indications électriques*

Ces appareils ont la particularité précieuse de se prêter à la mesure ponctuelle d'une vitesse variable en fonction du temps. Ils sont d'un très grand intérêt dans les mesures de turbulences et dans les explorations de couches limites.

Le principe de l'anémométrie à fil chaud est fondé sur la relation entre la vitesse du fluide et la perte de chaleur d'un fil chauffé électriquement et placé dans l'écoulement. Un fil métallique fin et inoxydable (platine, nickel) est chauffé électriquement par un courant d'intensité i_0 à une température θ_0, sa résistance est R_0. Quand ce fil est situé dans un écoulement de vitesse v perpendiculaire à l'axe du fil, l'échange thermique par convection forcée tend à faire baisser sa température, donc sa résistance qui devient R.

Deux méthodes peuvent être employées :

— soit on ne compense pas la perte thermique et on détermine expérimentalement la courbe d'étalonnage de l'appareil à intensité constante : $v = f$ (R) ou encore $v = f$ (U) avec U = différence de potentiel aux bornes du fil chaud ;

— soit on maintient la résistance R_0 constante en agissant sur l'intensité I du chauffage. Dans le cas d'un tel anémomètre dit « à température constante », la courbe d'étalonnage est donnée par $v = f$ (I).

On obtient une relation de la forme :

$$I^2 = I_0^2 + k\sqrt{v}$$

où k est une constante dépendant du fil.

On peut lire la différence de potentiel aux bornes d'une résistance en série avec le fil chaud.

Pour maintenir constante la résistance R, on monte le fil chaud F dans un pont de Wheatstone, et R_1 permet le réglage de l'intensité de chauffage (*fig.* 61).

Le fil chaud possède une faible inertie; de plus, le retard introduit dans la réponse est compensé systématiquement par un circuit électrique approprié. Cet appareil permet une analyse très fine des phénomènes fluctuants

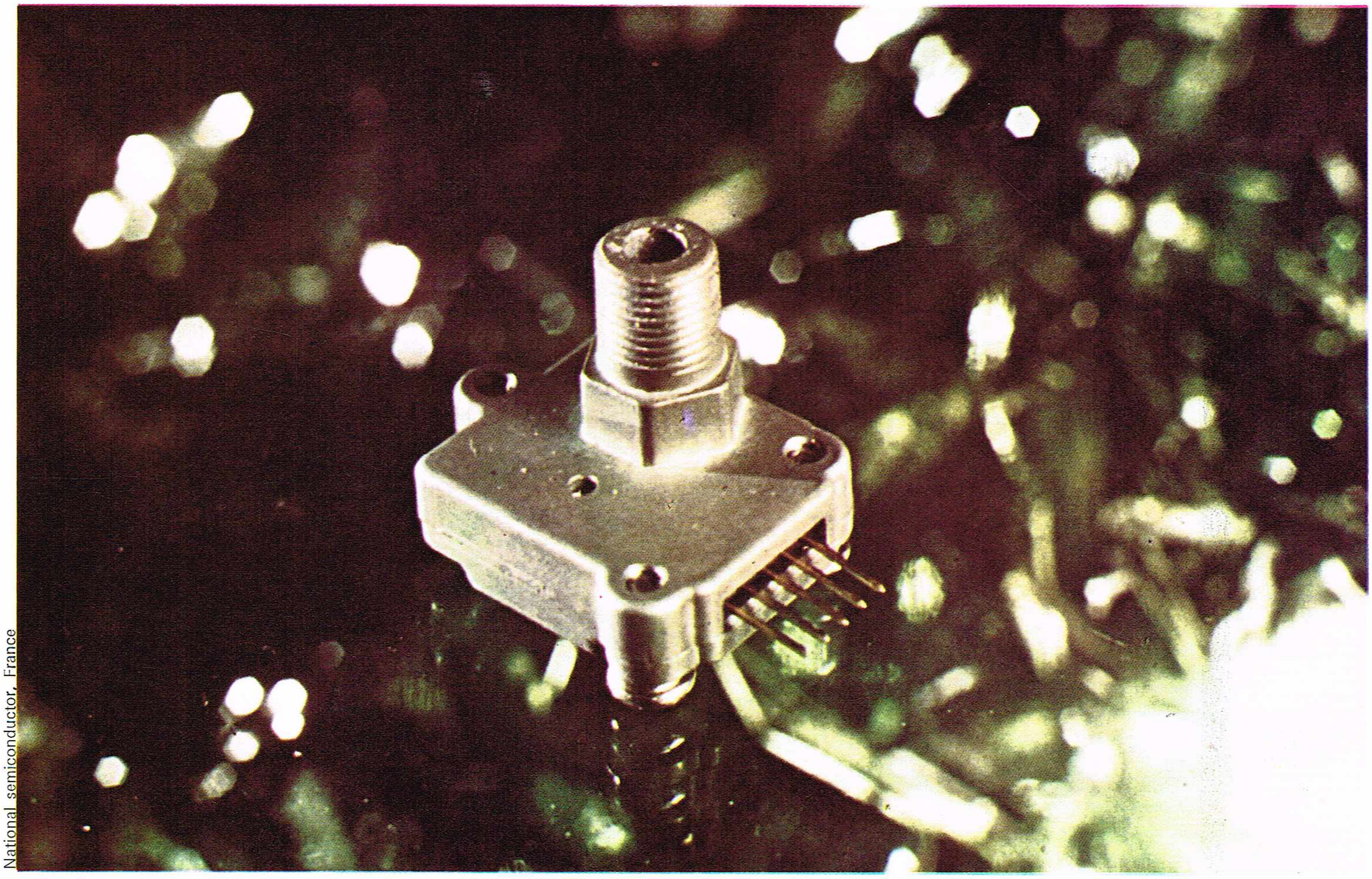

jusqu'à des fréquences de quelques kilohertz. La bande passante dépend essentiellement des caractéristiques électriques et géométriques du fil utilisé. L'anémomètre à fil chaud est également très approprié lorsque des mesures locales sont nécessaires ; ses dimensions réduites évitent de perturber l'écoulement au voisinage de la zone que l'on désire explorer.

Pour apprécier la valeur de la pression indiquée par les sondes que nous venons de voir, on utilise plusieurs types d'appareils : le tube en U et les manomètres à tube de Bourdon en C, à soufflet ou à membrane. Tous ces appareils sont destinés à être lus par un opérateur et, si l'on veut utiliser la mesure de la pression dans un automatisme, il sera nécessaire de la convertir en un signal électrique.

Nous devons signaler ici l'existence d'automatismes fluidiques qui ne demanderaient évidemment pas la conversion des pressions en grandeur électrique. Ces automatismes principalement utilisés dans des installations de compression ou de traitement de fluides présentent l'intérêt de travailler avec des grandeurs de nature homogène. Les capteurs, les éléments de calcul et les organes de puissance mesurent, traitent et sont commandés par des pressions ou des débits. Bien sûr, les éléments de calcul, qui sont surtout des comparateurs, sont beaucoup moins sophistiqués que les calculateurs électroniques. Les automatismes fluidiques sont donc principalement utilisés pour des installations de sécurité ou de régulation simple.

Dans le capteur de pression ou de débit, pour reprendre le cas général des automatismes électroniques, on aura donc un convertisseur chargé de transformer la grandeur prélevée en un signal électrique. Pour ce faire, nous avons beaucoup de possibilités. En nous référant à ce que nous avons vu précédemment, nous pouvons lier à la déformation d'une membrane une sonde de déplacement comme un transformateur différentiel, une sonde piézo-électrique ou des jauges de contrainte, pour n'en citer que quelques-unes. De nouveaux capteurs de pression liés aux propriétés des semi-conducteurs ont vu le jour. Leur intérêt réside dans le fait que la sonde et les éléments d'adaptation et d'amplification sont fabriqués suivant les techniques de miniaturisation de l'électronique : cela conduit à une réalisation très peu encombrante, très robuste et fiable, ainsi qu'à des possibilités de construction en grande série permettant un bas prix de revient.

Conclusion

A ce point, il reste une multitude de capteurs à examiner. Cependant, dans beaucoup d'entre eux, on reconnaîtrait les éléments que nous venons de décrire. Bien sûr, les quelques paragraphes précédents ne sont pas complets ; mais ils ont l'ambition de préciser ce que l'on entend par « capteur » et de donner un certain nombre d'exemples parmi les plus répandus et les plus démonstratifs ou caractéristiques.

Ce qu'il paraît important d'écrire, à propos des capteurs, c'est qu'il s'en invente tous les jours, mais que seuls ont un avenir industriel ou dans les laboratoires ceux qui sont suffisamment bien adaptés aux conditions de travail qui règnent en ces lieux. Beaucoup d'idées très astucieuses se sont heurtées à la mise en œuvre technique et aux limites de la technologie qui ne permettaient pas de réaliser un capteur suffisamment précis tout en étant convenablement protégé des perturbations extérieures. Inversement, tout progrès technologique est exploité pour l'amélioration des capteurs existants ou pour la réalisation de capteurs n'ayant pas encore pu voir le jour à cause de ces limites.

BIBLIOGRAPHIE

BASSIÈRE M., GAIGNEBET E., *Métrologie générale. Théorie de la mesure. Les Instruments et leur emploi*, Paris, Dunod, 1966. - BROUSSAUD, *Optoélectronique*, Paris, Masson. - DISA ELEKTRONIK A. S., Denmark, *Hot-Wire Anemometer* « Probe Manual ». - ZELBSTEIN U., *Mesures électroniques au laboratoire et dans l'industrie. Physique des capteurs*, Paris, Dunod, 1969.

◄▼ *Page ci-contre, en bas, intérieur du capteur figurant ci-dessous : le transducteur de pression, deux pastilles d'amplificateurs opérationnels intégrés et le réseau de résistances à couche épaisse ajustées au laser sont montés sur un support de céramique. Ci-dessous, un capteur de pression (LX 162 Z) à semi-conducteurs dans sa présentation finale.*

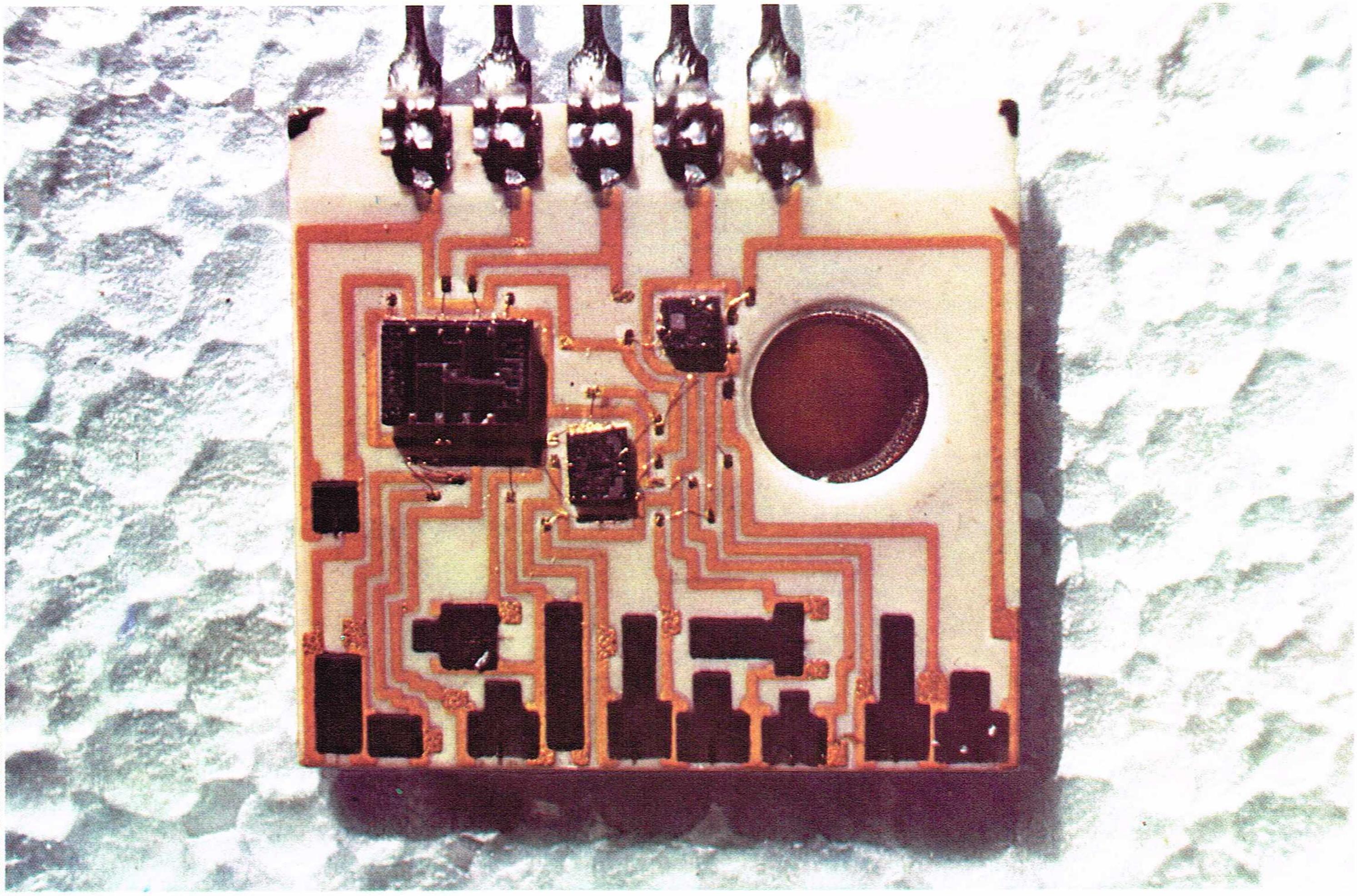

National semiconductor, France

▶ *Un système ancien de transmission : le télégraphe optique de Montmartre (sur l'église St-Pierre de Montmartre) : il s'agit là d'un télégraphe selon la technique de Chappe.*

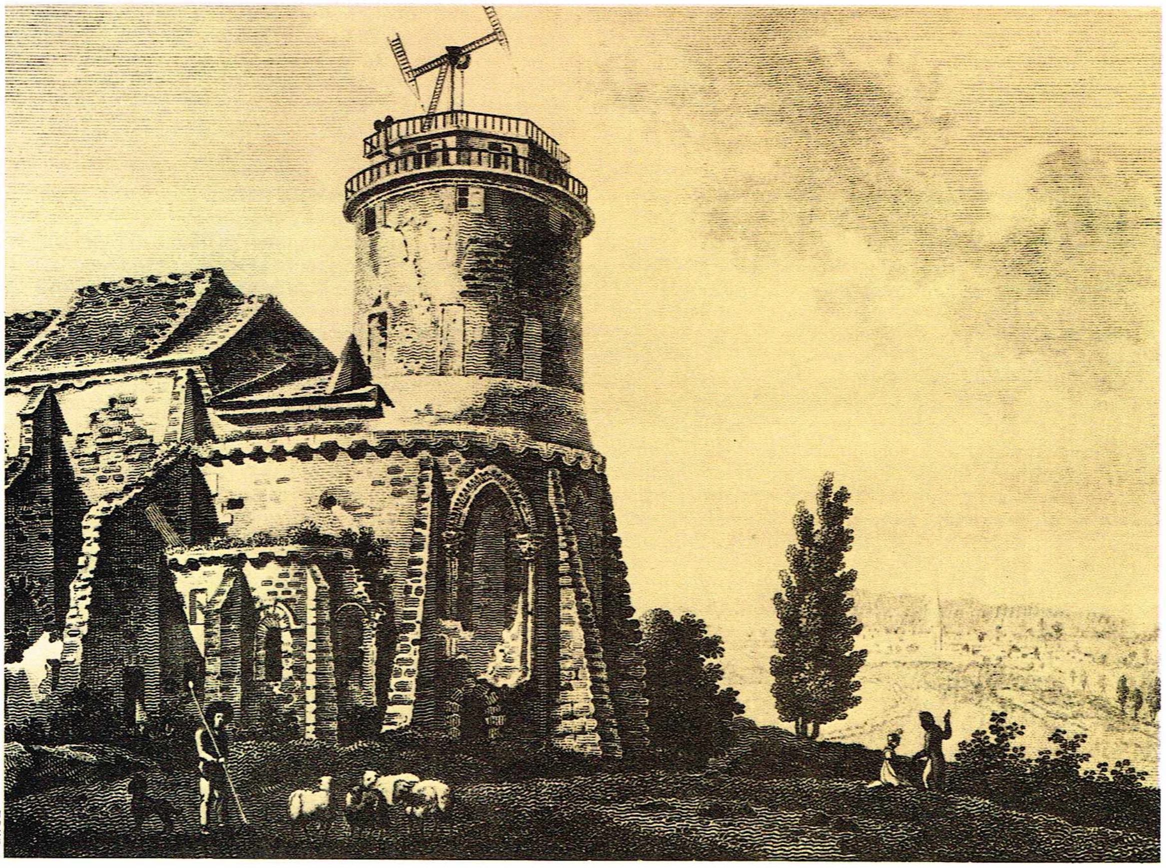

Bulloz

LE CODAGE

La transmission de l'information à travers un canal éventuellement soumis à des perturbations pose deux problèmes : la reproductibilité du signal à l'arrivée et l'utilisation au maximum des possibilités de l'ensemble de la transmission. Pour la reproductibilité, il faut se définir un critère. Actuellement, on utilise en général, dans le cas de la transmission de signaux continus, une fonction quadratique $c(t) = E[x(t) - y(t)^2]$. $E[\cdot]$ est l'opérateur espérance mathématique, c'est-à-dire moyenne probabiliste, $x(t)$ et $y(t)$ étant respectivement les signaux émis et reçu. Auparavant (et dans encore beaucoup d'applications), on utilisait aussi la fonction appelée rapport signal sur bruit définie par $\eta = \frac{P_{x(t)}}{E[n^2(t)]}$ où $P_{x(t)}$ est la puissance du signal émis et $n(t)$ le bruit, c'est-à-dire l'ensemble des perturbations au canal. Dans le cas de la transmission de signaux discrets, le critère pris est la probabilité d'erreur définie au début de la partie *Information*. Quant à l'utilisation de la voie de communication, elle est caractérisée par le rapport $\frac{I(X;Y)}{C}$, $I(X;Y)$ étant l'information transmise entre la source X et le destinataire Y, C la capacité du canal. Ce rapport est compris entre 0 et 1, l'efficacité maximale étant atteinte lorsque l'information transmise est égale à la capacité du canal.

Il y a deux manières pour éviter les déformations du signal reçu par rapport au signal émis. On peut opérer un codage préliminaire de façon à assurer une redondance, ou donner certaines clefs qui, connues de la réception, permettront de reconstituer le message : c'est la technique de codes détecteurs-correcteurs d'erreur. On peut aussi augmenter la puissance de transmission des signaux en employant des organes technologiques plus évolués de manière à surmonter les phénomènes perturbatoires. La première technique est en général d'un coût plus faible, mais introduit un retard à la réception (technique de reconnaissance et éventuellement de reconstruction), tandis que la seconde permet une détection instantanée, mais demande un investissement plus important. Dans les deux cas, il faut faire appel aux méthodes de décision statistique (traitement du signal) pour reconnaître le message émis dans le message reçu. L'utilisation du codage ou de l'amplification dépend du cas d'espèce; nous ne traiterons dans cette partie que le codage. Comme les codes les plus utilisés sont les codes composés à partir d'un alphabet à deux caractères représentés symboliquement par $\{0, 1\}$ nous prendrons systématiquement cet exemple. Nous traiterons successivement le codage dans le cas de canaux sans bruits, puis le codage utilisé pour des canaux soumis à des perturbations.

Codage de sources dans le cas de canaux sans bruit

Nous raisonnons dans le cas de sources discrètes au nombre fini N de messages $x_1 \dots x_N$. Un codage est une application qui à chaque message x_i fait correspondre un ou plusieurs mots-codes, suites de symboles écrits avec un alphabet de taille D. Par exemple, si notre suite de messages est constituée des lettres de l'alphabet A, B, ..., Z et qu'on utilise le code Beaudot à deux caractères désignés conventionnellement par $\{a, b\}$, E est codé par *abaaa*, Z par *abaab*. Le but d'un codage est d'assurer l'adaptation de la source au canal, la capacité maximale de transmission d'information du canal étant $\log_2 D$.

Quelques définitions

$x_1, \dots, x_N$ messages de la source ont pour probabilités respectives $p(x_1) \dots p(x_N)$. Avec les lettres de l'alphabet de taille D du code, on constitue des mots-codes $m_1, \dots, m_N$ qu'il s'agit d'associer de manière si possible unique à $x_1 \dots x_N$. Un code est dit **non singulier** lorsque tous les mots-codes sont distincts.

Exemple 1

Message	Mot-code
x_1	0
x_2	10
x_3	01
x_4	00

Ce code semble non singulier, puisque tous les mots-codes sont distincts. Toutefois, si on considère l'ensemble

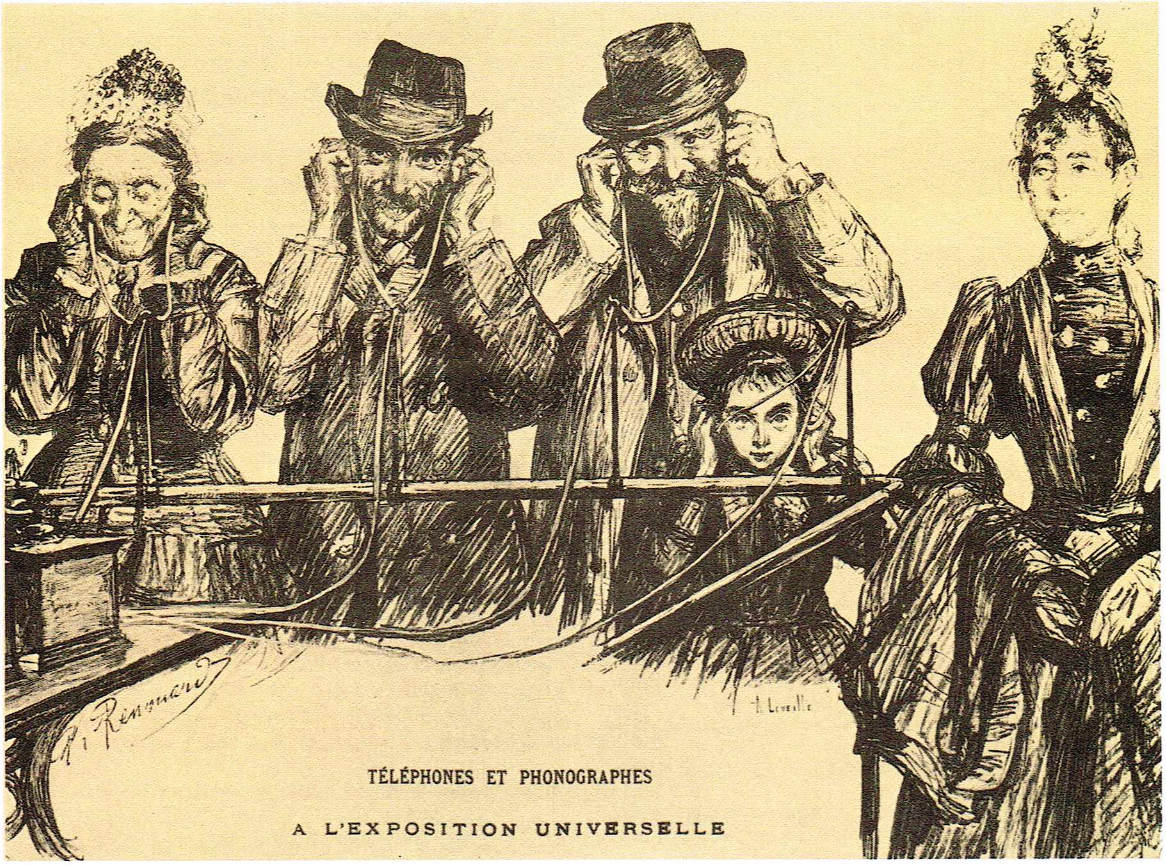

Archives Snark

◀ *Réception de sons grâce au téléphone et au phonographe à l'Exposition universelle de 1889.*

suivant reçu 0010, on peut le décoder comme x_1, x_3, x_1 ou comme x_4, x_2. Il y a donc ambiguïté. Si on emploie des mots-codes de même longueur l, il y a D^l mots-codes possibles et il faut dans ce cas que $N < D^l$. Un code est dit décryptable de manière unique si, à toute séquence quelconque de caractères du code, correspond une suite unique de messages de la source. Le code de l'exemple précédent n'est pas décryptable de manière unique. L'exemple 2 ci-dessous correspond au même ensemble de messages.

Exemple 2

0
01
011
0111

Il a la propriété évoquée, car le caractère 0 indique systématiquement le début d'un mot.

Une manière très simple d'obtenir des codes binaires décryptables de manière unique, lorsque le nombre de messages à coder est une puissance de 2, est d'utiliser un code dont tous les mots ont même longueur et où le mot-code de chaque mot est la traduction en binaire du rang du message (les messages étant ordonnés séquentiellement de manière arbitraire).

Exemple 3

Soit 8 messages à coder, on emploiera donc des mots-codes de longueur 3.

Message	Rang (arbitraire)	Mot-code	Message	Rang	Mot-code
x_1	0	000	x_5	4	100
x_2	1	001	x_6	5	101
x_3	2	010	x_7	6	110
x_4	3	011	x_8	7	111

Cette méthode est très simple, mais nécessite qu'on se rapporte à la puissance de 2 la plus proche; elle a l'inconvénient de ne pas tenir compte des probabilités d'apparition des messages (les messages les plus fréquents comme les plus rares ont des mots-codes de même longueur) ; en fait, dans ce cas, les messages sont considérés comme équiprobables.

Prenons un quatrième exemple, encore un code décryptable de manière unique :

Exemple 4

Message	Mot-code
x_1	0
x_2	10
x_3	110
x_4	111

La différence entre le code de cet exemple et celui de l'exemple 2 est qu'on peut décoder immédiatement toute suite du code de l'exemple 4 sans aucune référence aux mots suivants. En effet, prenons l'exemple suivant :

Code 4	10	110	0	0	111
	x_2	x_3	x_1	x_1	x_4
Code 2	0	111	00		

On ne peut prendre aucune décision après le premier 0, puisque ce peut être x_1 ou x_2 ou x_3 ou x_4 ; après réception de 01, ce peut être x_2, x_3 ou x_4; après 011, x_3 ou x_4; pour 0111, on est certain de x_4. (Le décodage complet donne $x_4\,x_1\,x_1$.)

Les codes qui ont la propriété décrite ci-dessus sont dits **instantanés**. En fait, pour les obtenir, il suffit d'empêcher qu'un mot-code ne puisse être obtenu à partir d'un autre plus court en y ajoutant des caractères. C'est la propriété du préfixe. On dit que A, suite finie de caractères du code, est préfixe de B si B s'écrit AC, quelle que soit la suite finie C.

Ainsi, dans le code 2, le mot-code correspondant à x_2 (01) est préfixe de celui correspondant à x_3 (011). Une condition nécessaire et suffisante pour obtenir un code instantané est qu'aucun mot-code ne soit préfixe d'un autre. Les codes instantanés sont en fait des cas particuliers des codes à décryptage de manière unique. Les codes instantanés peuvent être obtenus très facilement à l'aide de structures arborescentes. Soit l'exemple suivant : prenons comme mot-code origine correspondant au message x_1 11, les autres mots doivent commencer par 01 ou 10 ou 00, x_2 sera codé en 10, x_3 en 01, x_4 en 001, puis on continue... On remarque que ces mots-codes se placent sur un graphe (*fig.* 1).

L'inégalité de Kraft donne une condition d'existence d'un code instantané sans toutefois fournir une méthode

▶ *Figure 1 : graphe d'un exemple de code instantané dont le mot-code origine correspondant au message x_1 est 11.*

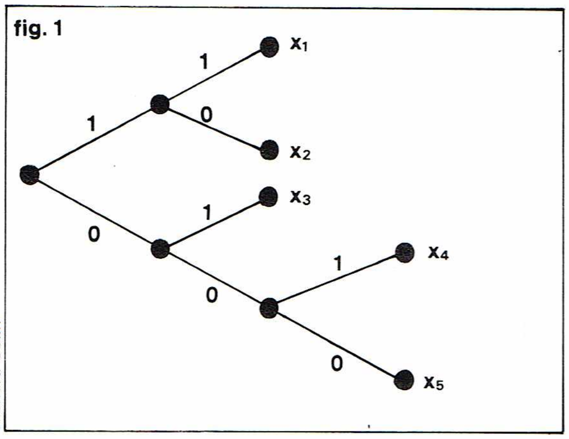

d'obtention. Soit $l_1 \dots l_N$ les longueurs respectives des mots-codes $m_1 \dots m_N$, D la taille de l'alphabet, la condition nécessaire et suffisante pour l'existence d'un code instantané est que :

$$\sum_{i=1}^{N} D^{-l_i} \leqslant 1$$

Cette inégalité est aussi une condition nécessaire pour l'existence d'un code décryptable de manière unique.

Reprenons les différents exemples proposés :

Code 1 (D = 2) : $2^{-1} + 2^{-2} \cdot 3 = 1{,}25$, non décryptable de manière unique.

Code 2 : $2^{-1} + 2^{-2} + 2^{-3} + 2^{-4} = 0{,}94$, code décryptable de manière unique.

Code 4 : $2^{-1} + 2^{-2} + 2 \cdot 2^{-3} = 1{,}00$, code décryptable de manière unique.

Nous raisonnerons dans ce qui suit sur des codes instantanés.

Encadrement de la longueur moyenne d'un mot-code

A une transmission on peut associer un coût. Puisqu'on se place dans le cas où il n'y a aucun phénomène perturbatoire, on peut prendre comme fonction-coût la longueur moyenne d'un mot-code, admettant implicitement — ce qui semble logique — que la transmission de tout caractère du code est de coût identique. Logiquement, on définira cette longueur moyenne $\bar{l}$ par

$$\bar{l} = \sum_{i=1}^{N} p\ (x_i)\ l_i$$

l_i étant la longueur du mot-code associé au message x_i. Raisonnons sur un code à deux caractères. L'entropie de la source $(x_1 \dots x_N)$ s'exprime simplement :

$$\mathrm{H}\ (\mathrm{X}) = -\sum_{i=1}^{N} p\ (x_i) \log_2 p\ (x_i)$$

$$\mathrm{H}\ (\mathrm{X}) - \bar{l} = -\sum_{i=1}^{N} p\ (x_i) \log_2 p\ (x_i) - \sum_{i=1}^{N} l_i\, p\ (x_i)$$

$$= \sum_{i=1}^{N} p\ (x_i) \log_2 \frac{2^{-l_i}}{p\ (x_i)}$$

Comme pour $x > 0$, $\log\ (x) \leqslant x - 1$ (égalité si $x = 1$), il vient tout simplement

$$\log_2 \frac{2^{-l_i}}{p\ (x_i)} \leqslant \frac{2^{-l_i}}{p\ (x_i)} - 1$$

Soit

$$\mathrm{H}\ (\mathrm{X}) - \bar{l} \leqslant \sum_{i=1}^{N} 2^{-n_i} - 1$$

$\leqslant 0$ d'après l'inégalité de Kraft.

Par suite, pour un code binaire :

$$\bar{l} \geqslant \mathrm{H}\ (\mathrm{X}).$$

La borne inférieure pour un code écrit dans l'alphabet binaire est donc l'entropie de la source. Si on avait employé un alphabet à D caractères, on aurait trouvé $\frac{\mathrm{H}\ (\mathrm{X})}{\log \mathrm{D}}$. Un code dont la longueur moyenne atteint ce minimum est dit code optimal. Une manière d'obtenir un tel code est de se placer (dans les lignes ci-dessus) dans le cas de l'égalité, c'est-à-dire de prendre une longueur l_i de mot-code telle que $p\ (x_i) = 2^{-l_i}$ (ou D^{-l_i}). Ce n'est pas toujours possible, car le nombre $(-\log_2 p\ (x_i))$ $\left(\text{ou } -\frac{\log_2 p\ (x_i)}{\log_2 \mathrm{D}}\right)$ n'est pas toujours entier. On peut donc encadrer l_i entre deux nombres :

$$-\log_2 p\ (x_i) \leqslant l_i < -\log_2 p\ (x_i) + 1$$

ou

$$-\frac{\log_2 p\ (x_i)}{\log_2 \mathrm{D}} \leqslant l_i < -\frac{\log_2 p\ (x_i)}{\log_2 \mathrm{D}} + 1.$$

Cette dernière relation fournit les bornes entre lesquelles est toujours comprise la longueur moyenne d'un mot-code.

$$\frac{\mathrm{H}\ (\mathrm{X})}{\log_2 \mathrm{D}} \leqslant \bar{l} < \frac{\mathrm{H}\ (\mathrm{X})}{\log_2 \mathrm{D}} + 1.$$

On peut se rapprocher de la borne inférieure en utilisant une technique appelée codage « par blocs ». Au lieu de donner un mot-code à chaque message x_i, on associe un mot-code à chaque suite de longueur k de messages de la source. Prenons par exemple une source à deux messages x_1 et x_2 à coder en binaire et construisons le code très simple ci-dessous.

Message	Probabilité $p\ (x_i)$	Mot-code
x_1	0,75	0
x_2	0,25	1

Puis réalisons toutes les combinaisons deux à deux de messages de la source et construisons le nouveau code ci-dessous.

Combinaison de messages	Probabilité	Mot-code
x_1x_1	9/16	0
x_1x_2	3/16	10
x_2x_1	3/16	110
x_2x_2	1/16	111

Dans le premier cas $l = 1$, dans le second cas $l = \frac{27}{16}$ pour deux messages, soit $\frac{27}{32} = 0{,}84$ caractère par message de la source. Or l'entropie H (X) vaut 0,81.

Par référence avec cette borne inférieure de la longueur moyenne d'un mot-code désignée par $l_{\min}$, on peut définir l'efficacité d'un code par le rapport $\frac{l_{\min}}{l}$. La redondance est le complément à 1 de cette quantité. Soit par exemple à coder en binaire une source à quatre messages $x_1x_2x_3x_4$ de probabilités respectives 0,5, 0,25, 0,125, 0,125. Nous proposons comme premier code un code à longueur de mot fixe 2 constitué des nombres binaires associés à la suite décimale 0, 1, 2, 3.

$x_1 \to 00$ $x_2 \to 10$ $x_3 \to 01$ $x_4 \to 11$

Pour ce code, $l = 2$, et pour cette source,

$$l_{\min} = \mathrm{H}\ (\mathrm{X}) = \frac{7}{4} = 1{,}75 \text{ bit.}$$

L'efficacité vaut 0,875 et la redondance 0,125.

Prenons maintenant un deuxième code :

$x_1 \to 0$ $x_2 \to 10$ $x_3 \to 110$ $x_4 \to 111$

$\bar{l}$ vaut ici 1,75, l'efficacité vaut l'unité et la redondance est nulle.

Exemples de codes optimaux

Pour avoir un code optimal, il faut choisir la longueur des mots-codes de façon à avoir

$$l_i = -\frac{\log_2 p\ (x_i)}{\log_2 \mathrm{D}}.$$

Nous donnerons deux exemples de codes optimaux : le code de Shannon-Fano et le code de Huffmann.

fig. 2

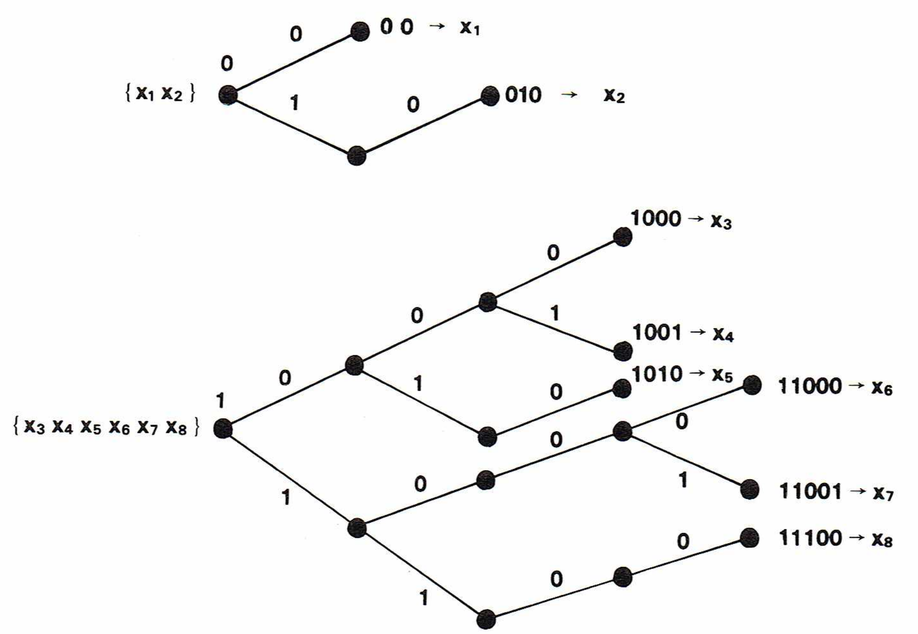

◀ *Figure 2 : construction d'un code à partir d'un arbre de codage; on groupe les messages en deux ensembles à peu près équiprobables : $\{x_1x_2\}$ et $\{x_3x_4x_5x_6x_7x_8\}$, et affectés respectivement des chiffres 0 et 1 comme 1ers chiffres binaires, puis on élabore un arbre.*

* *Code de Shannon-Fano*

Nous nous plaçons dans le cas où les messages sont codés un par un. Nous donnons sans démonstration la méthode.

- On range les messages de façon à avoir la suite d'inégalités suivantes $p\ (x_1) \geqslant p\ (x_2) \geqslant ... \geqslant p\ (x_n)$.
- On détermine les plus petits entiers l_i tels que

$$l_i \geqslant -\frac{\log_2 p\ (x_1)}{\log_2 D}.$$

On a donc $l_1 \leqslant l_2 \leqslant ... \leqslant l_n$. Les messages les plus fréquents ont les mots-codes les plus courts.

- Le mot-code m_i associé au message x_i a pour longueur l_i, il est choisi de façon qu'aucun mot-code ne soit préfixe d'un autre. On s'aide pour cela d'un arbre de codage.

Soit l'exemple suivant :

Message	Probabilité	Après calcul l_i
x_1	0,4	2
x_2	0,18	3
x_3	0,10	4
x_4	0,10	4
x_5	0,07	4
x_6	0,06	5
x_7	0,05	5
x_8	0,04	5

Partageons en deux ensembles à peu près équiprobables $\{x_1x_2\}$ et $\{x_3x_4x_5x_6x_7x_8\}$, et arbitrairement affectons « 0 » au premier et « 1 » au second comme premier chiffre binaire. Nous obtenons facilement l'arbre représenté sur la *figure* 2 :

Pour systématiser cette procédure (le graphe précédent n'est pas unique en effet), la méthode de Shannon et Fano consiste à partager successivement l'ensemble de messages en sous-ensembles de probabilités égales pour arriver aux messages eux-mêmes, à qui on affecte la suite binaire correspondant aux chiffres successifs.

Reprenons le même exemple (*fig.* 3) :

Le code ainsi obtenu n'est pas optimal, puisqu'il n'y a pas d'entier correspondant à la condition sur les longueurs des mots-codes, mais il est aussi proche de l'optimal que possible.

* *Code de Huffmann*

La méthode repose sur les deux considérations suivantes : les messages de grande probabilité doivent avoir les mots-codes les plus courts; deux messages de même probabilité doivent avoir des mots-codes de même longueur. La technique est alors la suivante (dans le cas d'un codage binaire) :

— ordonner l'ensemble des messages suivant la succession des probabilités non croissantes

$$p\ (x_1) \geqslant p\ (x_2) \geqslant ... \geqslant p\ (x_N)$$

fig. 3

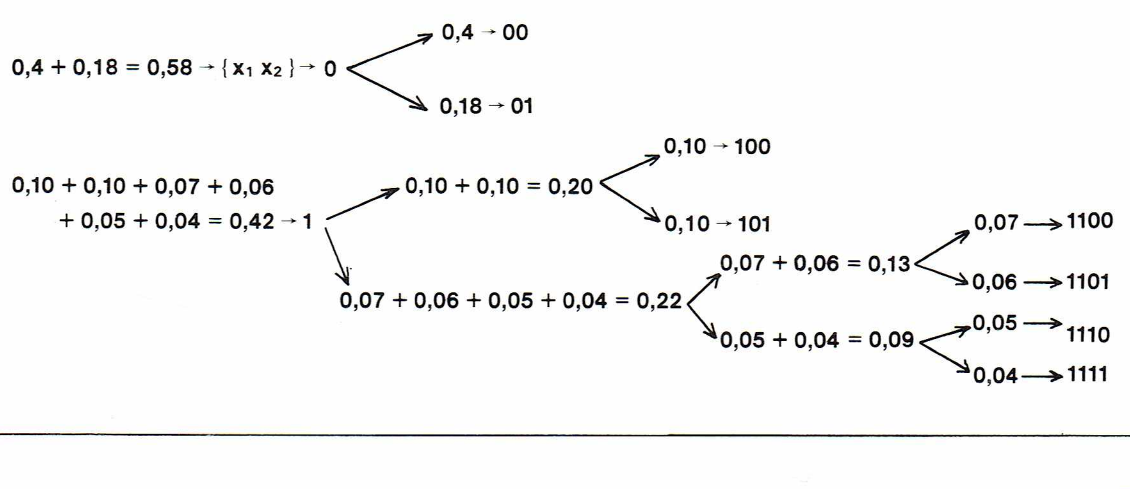

◀ *Figure 3; méthode de Shannon-Fano pour construire un code : on partage successivement l'ensemble des messages en sous-ensembles d'égales probabilités.*

▶ *Figure 4 : application du code de Huffmann à l'exemple de la figure 2.*

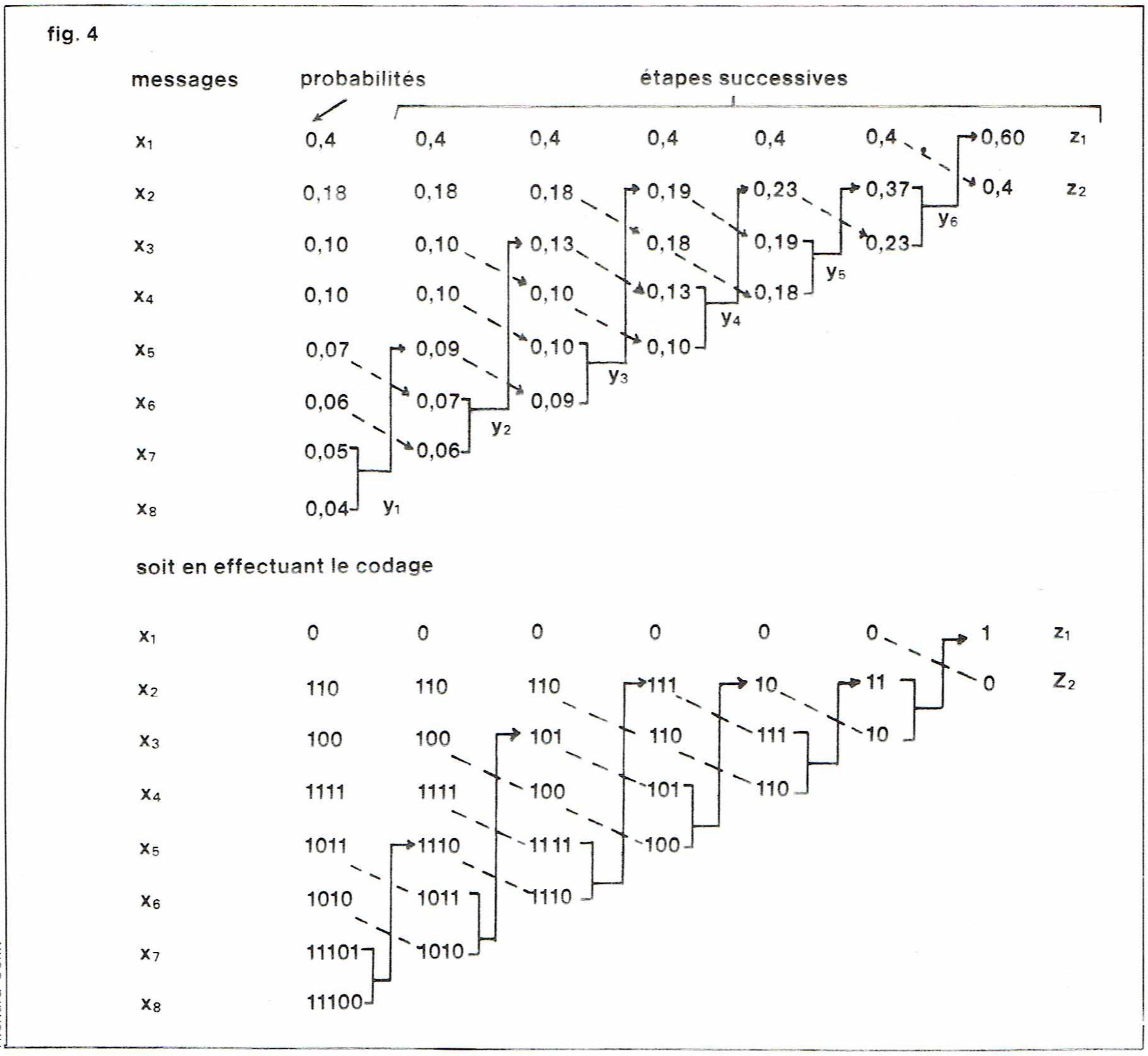

▼ *Figure 5 : application du code de Huffmann à un exemple comportant 6 messages à coder avec un alphabet ternaire.*

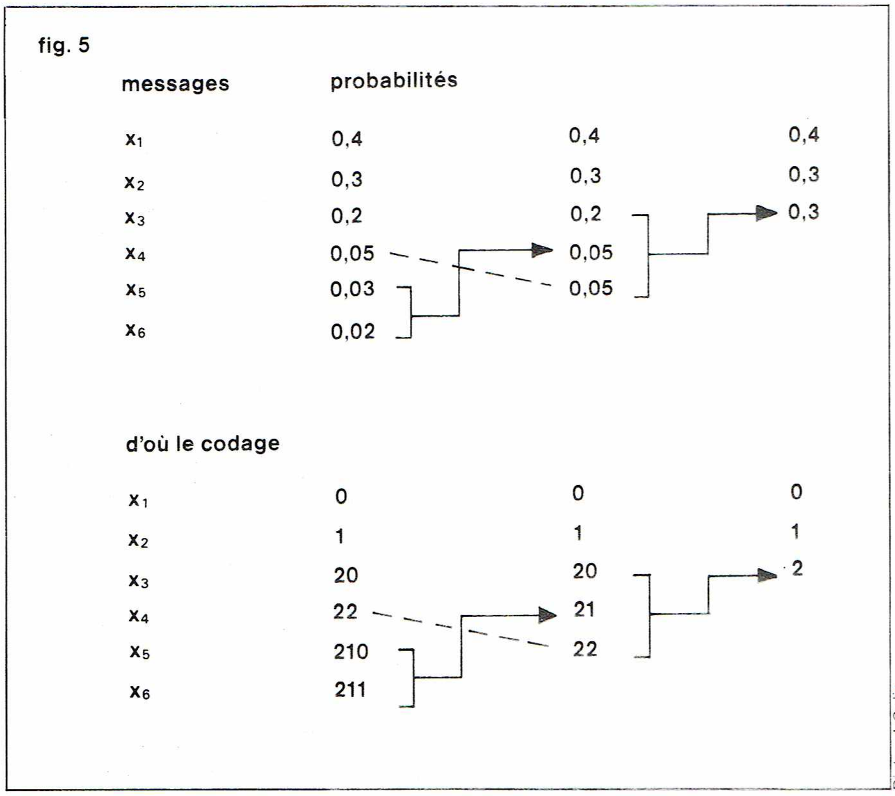

— former des ensembles de messages pouvant être divisés en deux sous-ensembles de probabilités aussi proches que possible ;

— considérer un ensemble formé de deux messages

$$\{x_N \text{ et } x_{N-1}\};$$

— regrouper ces deux messages en un message unique y_1 $(p\ (y_1) = p\ (x_{N-1}) + p\ (x_N))$ qu'on réordonne avec $x_1 \ldots x_{N-2}$

$$(p\ (x_1) \geqslant p\ (x_2) \geqslant \ldots \geqslant p\ (y_1) \geqslant \ldots \geqslant p\ (x_{N-2})\ ;$$

— recommencer avec les deux messages les plus improbables de la série $x_1, x_2, \ldots, x_{N-2}, y_1$, puis avec la nouvelle série obtenue jusqu'à obtenir deux messages z_1 et z_2 de probabilités pratiquement égales ;

— affecter arbitrairement « 0 » à z_1 et « 1 » à z_2 puis remonter la chaîne en attribuant un « 0 » ou un « 1 » à chaque division par deux.

Un exemple fera mieux comprendre l'algorithme ; soit le même ensemble de messages à coder que dans l'exemple précédent (*fig.* 4).

La règle précédente peut se généraliser dans le cas où la taille D de l'alphabet est supérieure à 2. On groupe les messages en ensembles successifs de taille 2 + (reste de la division par (D — 1) de K — 2 si K est la taille de l'ensemble de messages à l'étape *i*).

Prenons par exemple six messages à coder avec un alphabet tertiaire (*fig.* 5). A la première étape, il faut grouper : 2 + (reste de la division de (6 — 2) par 2) = 2 messages, à la deuxième étape :
2 + (reste de la division de (5 — 2) par 2) = 2 + 1 = 3 messages,
à la troisième étape :
2 + (reste de la division de (3 — 2) par 2) = 2 + 1 message.

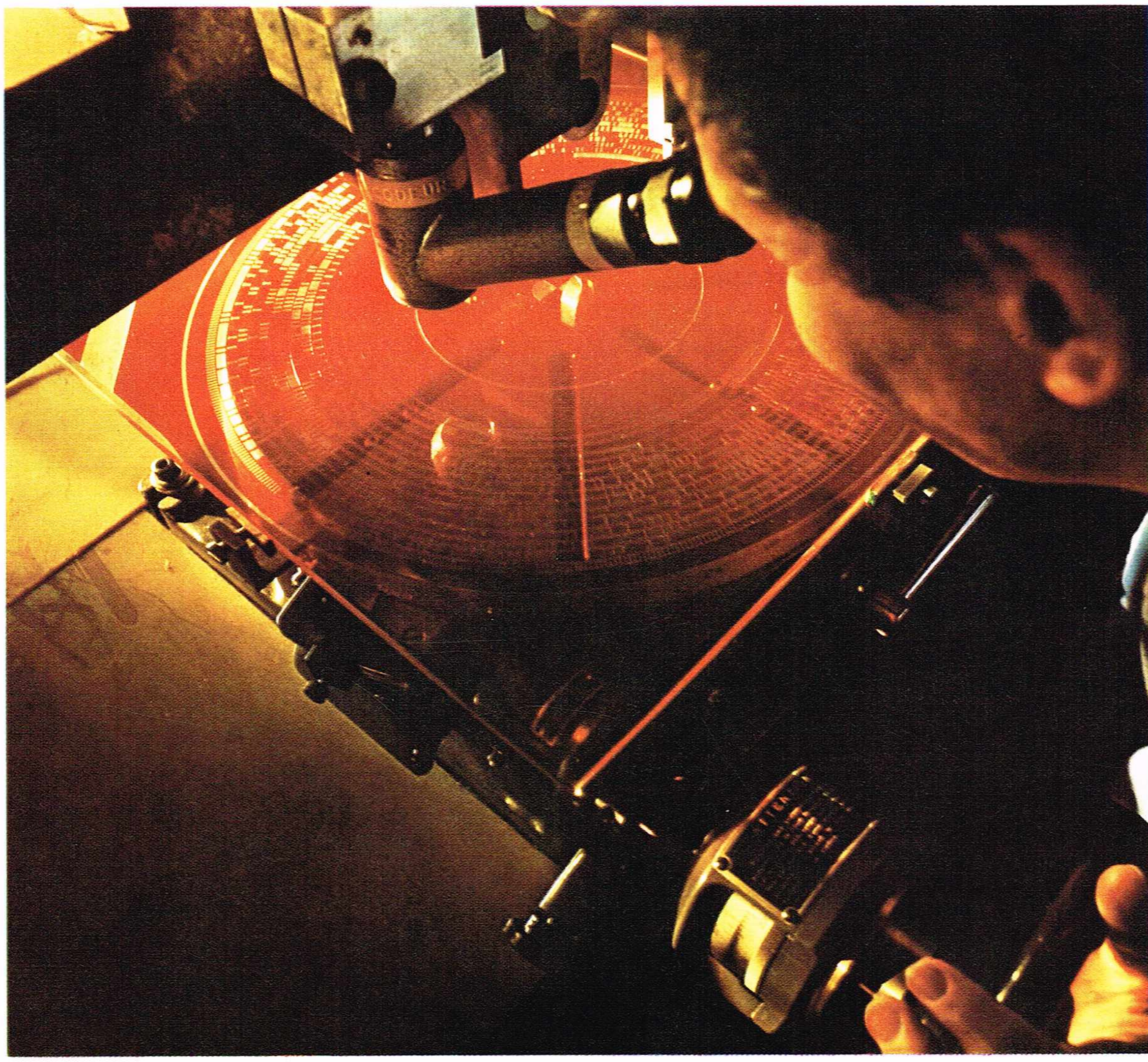

M.C.B.

◀ *Tracé d'un pelliculable (film de Mylar recouvert de vernis) destiné, après réduction photographique, à constituer le masque optique qui servira à la gravure d'un disque codé utilisé dans un codeur angulaire.*

Codage de sources en présence de bruit

La présence de bruit va entraîner des modifications du signal reçu par rapport au signal transmis. On va donc tenter de lutter contre ces perturbations par la technique du codage : quelle opération faut-il effectuer pour détecter et même, ce qui est idéal, corriger les éventuelles erreurs ? Notre exposé sera fondé sur l'utilisation du code binaire à cause de son emploi très fréquent, mais les résultats sont généralisables à des alphabets de taille plus importante.

Pour transmettre les signaux binaires, on utilise des canaux binaires dont nous avons vu la définition (voir chapitre *La théorie de l'information*) ; deux types de perturbations peuvent se produire, ce qui introduit une classification des canaux : les canaux où les erreurs arrivent par « paquets », ce qui entraîne une modification en bloc des mots-codes ; les canaux où les symboles sont affectés individuellement et indépendamment les uns des autres (par exemple, le canal binaire symétrique B. S. C.). Les deux problèmes de détection et correction des erreurs ne sont pas identiques : on peut parfois se limiter à la détection si une retransmission immédiate est possible, il faut parfois faire les deux, par exemple dans le cas où les données sont mémorisées un long temps avant leur utilisation, puisque aucune nouvelle transmission pour vérification n'est possible. On peut diviser les codes utilisés en codes-blocs et en codes récurrents. Les codes-blocs utilisent des suites de n caractères $\{0, 1\}$ appelées mots. On établit une correspondance biunivoque entre l'ensemble des messages et certains mots ; ces mots sont alors les mots-codes. Il n'y a pas, en revanche, de mots-codes dans les codes récurrents, mais une succession de symboles ; ces codes, dits aussi codes convolutionnels, sont très adaptés à la correction de paquets d'erreur.

Décision statistique, distance de Hamming

Nous supposerons, dans ce qui suit, être dans le cas d'application du deuxième théorème de Shannon ; on peut donc rechercher un code de façon que la probabilité d'erreur soit aussi faible qu'on le désire. Les mots-codes ayant pour longueur n, il y a 2^n mots possibles. Chaque mot peut se représenter dans un espace à n dimensions par un point : chaque coordonnée correspond à un chiffre du mot (*fig.* 6).

Exemple :

$n = 2$ 4 mots possibles :

$m_1 = 00$ $m_2 = 10$

$m_3 = 01$ $m_4 = 11$

Une autre représentation possible est une représentation matricielle :

$$\mathbf{m}_2 = [1, 0].$$

fig. 6

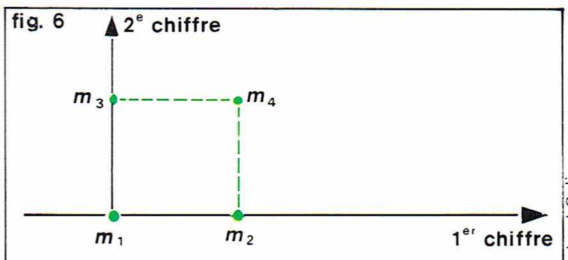

Richard Colin

◀ *Figure 6 : coordonnées des 4 mots-codes possibles de longueur $n = 2$, dans un espace à $n = 2$ dimensions : $m_1 = 00$, $m_2 = 10$, $m_3 = 01$, $m_4 = 11$.*

fig. 7

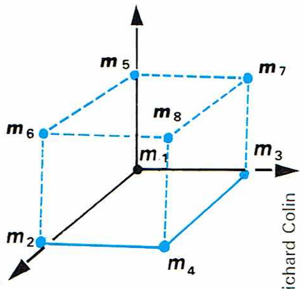

▲ *Figure 7 : exemple de code dans un espace à 3 dimensions (voir développement dans le texte).*

Chaque élément de la matrice est un des chiffres du mot. On désignera par m_i une telle matrice (nous utiliserons indifféremment dans la suite $\mathbf{m}_i$ et $\mathbf{m}_i$). Deux cas sont possibles : ou bien le nombre de mots-codes vaut exactement 2^n, il n'y a aucun mot dépourvu d'information et l'information moyenne transmise par un mot-code vaut n bits, donc chaque symbole porte un bit. Étant donné que tout est utilisé, il est alors impossible de détecter ou de corriger des erreurs, puisque tout mot erroné est un mot-code. Le deuxième cas est celui où l'ensemble des mots-codes est un sous-ensemble de l'ensemble des mots; supposons donc qu'on utilise 2^m mots pour mots-codes ($m < n$). L'information moyenne transmise par mot-code est alors de m bits et l'information moyenne par symbole de $\frac{m}{n}$ bits. Elle est évidemment plus faible que dans le premier cas, mais les mots inutilisés vont servir à la détection d'erreur (l'apparition d'un de ces mots à la sortie du canal veut bien dire qu'il y a eu erreur). Nous désignerons dans ce qui suit par C l'ensemble des mots-codes et par $\overline{C}$ l'ensemble complémentaire par rapport à l'ensemble des mots possibles. Pour juger de la relation entre deux mots, on va introduire la notion de distance de Hamming.

On appelle **distance de Hamming** d ($\mathbf{m}_i$, $\mathbf{m}_j$) de deux mots-codes m_i et m_j le nombre de chiffres par lequel ils diffèrent. Ainsi pour $\mathbf{m}_i = (00110)$ $\mathbf{m}_j = (10010)$, $d(\mathbf{m}_i, \mathbf{m}_j) = 2$. Il est facile de vérifier que cette quantité a toutes les propriétés d'une distance. Elle va permettre de donner une procédure de décodage dans le cas d'utilisation d'un canal symétrique où la probabilité d'un caractère erroné ($p(0/1) = p(1/0)$) est inférieure à 0,5 (ce qui est logique, sinon il vaut mieux changer d'organe physique de transmission). Désignons par $\mathbf{y}$ le mot reçu qui doit être accordé avec un des mots possibles émis $\mathbf{m}_1 ... \mathbf{m}_m$. La règle de décision choisie est la règle classique du maximum de vraisemblance. $\mathbf{y}$ est associé au mot $\mathbf{x}_i$ si

$$P(\mathbf{y}/\mathbf{x}_i) > P(\mathbf{y}/\mathbf{x}_j) \ \forall \mathbf{x}_j \neq \mathbf{x}_i$$

Autrement dit, le mot $\mathbf{y}$ est associé au mot $\mathbf{x}_i$ pour lequel la probabilité d'obtention est la plus grande : c'est une règle logique. Après une courte suite de calculs, il est facile de montrer que, dans le cas des canaux précités, cette règle revient à associer le mot-code $\mathbf{x}_i$ pour lequel

$$d(\mathbf{y}, \mathbf{x}_i) < d(\mathbf{y}, \mathbf{x}_j) \ \forall \mathbf{x}_j \neq \mathbf{x}_i;$$

il suffit donc de décoder $\mathbf{y}$ en $\mathbf{x}_i$, mot le plus proche de $\mathbf{y}$ au sens de la distance de Hamming.

Au moyen de cette distance, on peut effectuer une partition de $C + \overline{C}$ en régions R_i distinctes, telles que si $\mathbf{y}$ tombe dans la région R_i on lui associe le mot-code m_i. Notons R_0 l'ensemble des points se trouvant à égale distance de deux points $\mathbf{m}_i$, $\mathbf{m}_j$. R_0 est l'ensemble des points pour lesquels une décision immédiate est impossible. On a donc, pour un mot reçu $\mathbf{y}$, les cas possibles suivants :

$\mathbf{y} \in \overline{C}$: le mot n'est pas un mot-code, on peut faire la détection d'erreurs;

$\mathbf{y} \in R_i$: on peut corriger l'erreur et décoder $\mathbf{y}$ en x_i;

$\mathbf{y} \in R_0$: on peut détecter l'erreur mais on ne peut corriger ($R_0 \in \overline{C}$).

Prenons un exemple avec $n = 3$. L'ensemble ($C + \overline{C}$) est constitué de $m_1 = 000$, $m_2 = 001$, $m_3 = 010$, $m_4 = 011$, $m_5 = 100$, $m_6 = 101$, $m_7 = 110$, $m_8 = 111$. Choisissons pour mots-codes $Cm_1 = 000$ et $m_7 = 110$. En ce cas, il est facile de voir d'après la *figure* 7 que $R_1 = m_2, m_1$ $R_2 = m_7, m_8$ et $R_3 = m_3, m_5, m_4, m_6$. Il y a donc un grand ensemble de messages où on détecte une erreur sans la corriger. Sans calcul et par un simple raisonnement logique, on peut dire qu'on diminuera le risque d'erreur et qu'on augmentera la possibilité de correction en agrandissant la distance entre les mots-codes. On a d'ailleurs les deux résultats suivants : la condition nécessaire et suffisante pour qu'un code binaire permette la détection d'au plus r erreurs est que la distance entre les mots-codes vérifie : $d(\mathbf{m}_i, \mathbf{m}_j) \geqslant 2r + 1$. De même, la condition nécessaire et suffisante pour qu'un code binaire permette la détection d'au moins r erreurs (et en corrige $(r - 1)$) est que la distance entre les mots-codes vérifie $d(\mathbf{m}_i, \mathbf{m}_j) \geqslant 2r$.

Principe des codes à contrôle de parité

Dans les raisonnements antérieurs, nous avons dit que, pour 2^n mots-codes possibles, 2^m étaient utilisés, donc que, sur les n chiffres, m étaient porteurs d'information. Les $(n - m)$ autres chiffres vont être utilisés en contrôle; ce sont les « bits de parité ». Pour comprendre le mécanisme, introduisons l'addition modulo 2, $\oplus$

$$1 \oplus 1 = 0 \qquad 0 \oplus 1 = 1$$
$$1 \oplus 0 = 1 \qquad 0 \oplus 0 = 0$$

et créons un mot-erreur de même longueur n que les mots-codes. Ce mot a un 1 en i-ième position si le i-ième chiffre du mot-code est erroné et un 0 aux positions où les chiffres du mot-code sont corrects. Soit donc $\mathbf{m}_i$ le mot-code émis et $\mathbf{m}'_i$ le mot reçu, $\mathbf{e}_i$ le mot-erreur correspondant :

$$\mathbf{m}'_i = \mathbf{m}_i \oplus \mathbf{e}_i$$

L'addition modulo 2 ci-dessus s'entend comme addition de chaque chiffre correspondant dans chaque vecteur.

Ainsi avec $n = 4$, si $\mathbf{m}_i = 1000$ $\mathbf{m}'_i = 1001$, le mot-erreur $\mathbf{e}_i$ vaut $\mathbf{e}_i = 0001$.

Nous allons constituer les mots-codes $\mathbf{m}_i$ à partir de la partie information de dimension m de la façon suivante (codes à contrôle de parité) :

$m_i = u_i$ pour les chiffres 1 à m

$m_i = a_{1i}u_1 \oplus a_{2i}u_2 \oplus ... \oplus a_{mi}u_m$ pour les chiffres $m + 1$ à n. Les coefficients $a_{1i} ... a_{2i}$ sont fixés une fois pour toutes.

Supposons par exemple $m = 3$, $n = 6$ et définissons la transformation suivante :

$$m_1 = u_1 \qquad m_2 = u_2 \qquad m_3 = u_3$$
$$m_4 = u_4 + u_3 \qquad m_5 = u_1 + u_3 \qquad m_6 = u_1 + u_2$$

Partie information	Mot-code
000	000 000
001	001 110
010	010 101
011	011 011
100	100 011
101	101 101
110	110 110
111	111 000

Un tel code (une application de l'espace à 2^m éléments dans un espace à 2^n dimensions) est dit code systématique. Un code est dit non systématique si la séparation de la partie information et de la partie parité n'est pas nette. Pour un tel code, on a :

$$m_i = u_1a_{1i} \oplus u_2a_{2i} \oplus ... \oplus u_ma_{mi} \quad 1 \leqslant i \leqslant m.$$

En prenant une écriture matricielle, on définit la matrice génératrice G du code par la relation :

$$\mathbf{m} = \mathbf{u}G.$$

Pour un code systématique, la matrice G peut s'écrire :

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & ... & 0 & a_{1\,m+1} & ... & a_{1\,n} \\ 0 & 1 & ... & 0 & a_{2\,m+1} & ... & a_{2\,n} \\ , & , & & & , & & , \\ 0 & 0 & ... & 1 & a_{mm+1} & ... & a_{mn} \end{bmatrix} \qquad \mathbf{u} = [u_1 ... u_m]$$

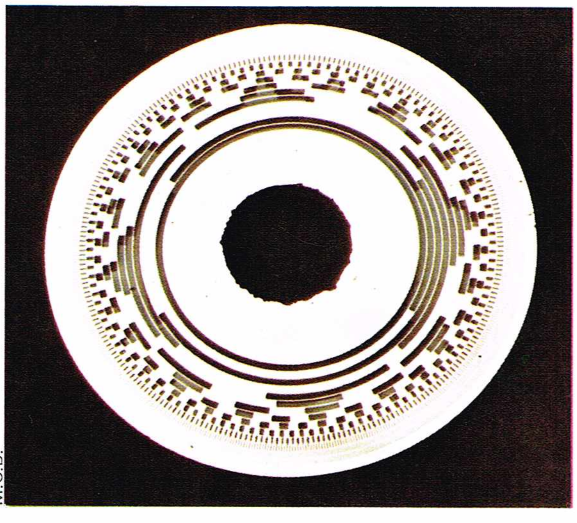

▶ *Disque codé en code absolu comprenant 46 000 points.*

C'est donc une matrice à m lignes et n colonnes dont la connaissance permet de générer les mots-codes. Dans l'exemple ci-dessus, elle vaut :

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Les remarques suivantes se déduisent facilement de ces notions :

— Si $\mathbf{u}_1$ et $\mathbf{u}_2$ sont deux séquences d'information dont les mots-codes sont $\mathbf{m}_1$ et $\mathbf{m}_2$, $\mathbf{m}_1 \oplus \mathbf{m}_2$ est un mot-code correspondant à $\mathbf{u}_1 \oplus \mathbf{u}_2$.

— Soit $\mathbf{u} = [0 \dots 0\ 1\ 0 \dots 0]$, le 1 étant en i-ième position, alors $\mathbf{m}$ est égal à la i-ième ligne de G. Les lignes de G forment donc une base de l'ensemble des mots-codes. En effectuant certaines transformations sur la matrice génératrice, on obtient la matrice de parité H.

Il est facile de vérifier qu'on a la relation :

$$\mathbf{m}\mathrm{H} = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{0} = [\underbrace{0 \dots 0}_{n-m}]$$

$$\mathrm{H} = \begin{bmatrix} a_{1\,m+1} & \dots & a_{1\,n} \\ / & & / \\ a_{mm+1} & \dots & a_{mn} \\ 1\ 0 & & 0 \\ 0\ 1 & \dots & 0 \\ / & & / \\ 0 & & 1 \end{bmatrix}$$

Cette matrice est parfois appelée matrice de contrôle, car elle permet de voir si un mot est un mot-code (le produit par H doit donner une matrice ligne nulle). Par exemple, pour le même code que précédemment :

$$\mathrm{H} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Prenons $\mathbf{m} = [110110]$

$\mathbf{m}\ \mathrm{H} = [000]$

L'utilisation des matrices H va permettre la détection et la correction éventuelle des erreurs de transmission. En effet, soit $\mathbf{m}$ le mot-code émis, $\mathbf{y}$ le mot reçu. Deux cas se présentent : soit $\mathbf{y}\mathrm{H} = \mathbf{0}$, auquel cas aucune erreur ne peut être détectée (le mot appartient au code), soit $\mathbf{y}\mathrm{H} \neq \mathbf{0}$, auquel cas le mot reçu est erroné, et on s'en aperçoit. D'autre part,

$$(\mathbf{y} \oplus \mathbf{m})\ \mathrm{H} = \mathbf{y}\mathrm{H} = \mathrm{S}$$

S est appelée matrice syndrome. Or $(\mathbf{y} \oplus \mathbf{m})$ est un mot contenant un « 1 » aux positions où $\mathbf{y}$ et $\mathbf{m}$ diffèrent. Soit $\mathbf{e}$ cette séquence qui est en fait ce que nous avions appelé mot-erreur. Nous avons donc : $\mathbf{e}\mathrm{H} = \mathrm{S}$.

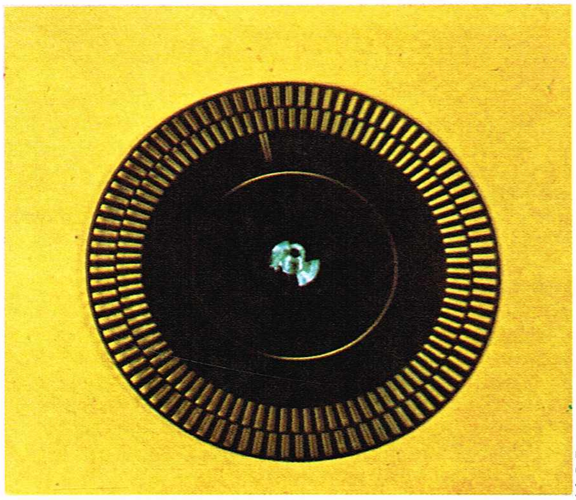

M.C.B.

◀ ***Disque codé incrémental à 2 pistes, 1 top permettant la remise à 0 du compteur d'impulsions, et 100 points.***

Pour appliquer la règle de décodage du maximum de vraisemblance, il faut rechercher le mot-code $\mathbf{m}$ le plus proche de $\mathbf{y}$ au sens de la distance de Hamming, c'est-à-dire rechercher le mot-erreur $\mathbf{e}$ de poids le plus faible qui redonne S.

D'où la technique de décodage :

— constituer la table des valeurs possibles de S (il y en a 2^{n-m}) à partir des séquences erreurs (commencer par la séquence erreur de poids le plus faible) ;

— soit $\mathbf{y}$ le mot reçu, calculer $\mathbf{y}\mathrm{H} = \mathrm{S}$;

— rechercher dans la table la séquence erreur $\mathbf{e}$ correspondant à S et décoder $\mathbf{y}$ en $\mathbf{m} = \mathbf{y} \oplus \mathbf{e}$.

Cette technique de décodage demande donc la constitution d'une table qu'on consultera dès réception d'un mot-code.

Prenons comme exemple le code ($n = 6$, $m = 3$) dont nous avons donné la matrice génératrice et la matrice de parité. Dans un premier temps, constituons la matrice syndrome S pour chaque séquence erreur possible.

Séquence erreur **e**	eH = HS
000 000	000
100 000	011
010 000	101
001 000	110
000 100	100
000 010	010
000 001	001

Nous avons aussi couvert l'absence d'erreur (première séquence) et toutes les erreurs simples (un chiffre erroné), mais la table de syndrome n'est pas complète, puisqu'elle doit comporter 2^{n-m} séquences. Il faut donc rechercher la séquence erreur de poids minimal (donc, dans notre cas, au moins 2) qui réalise le syndrome manquant 111. Par essais successifs, on trouve 100 100 :

$$((100\ 100) \cdot \mathrm{H} = 111).$$

Il n'y a pas une seule séquence erreur de poids 2 donnant ce syndrome de 111 (par exemple 010 010), mais on est obligé de faire un choix arbitraire. Supposons maintenant que le mot reçu soit $\mathbf{y} = (010\ 011)$, $\mathbf{y}\mathrm{H} = 110$, donc $\mathbf{y}$ est erroné, ce n'est pas un mot-code. La séquence erreur correspondant au syndrome 110 est 001 000 (chiffre n° 3 erroné), on peut rétablir le mot émis par :

$$\mathbf{m} = \mathbf{y} \oplus \mathbf{e} = (010\ 011) \oplus (001\ 000) = 011\ 011$$

L'information transmise est donc 011 puisque nous avions un code systématique.

D'une façon générale, on notera (n, m) un code de longueur de mots n, dont la partie information a pour longueur m (application de l'espace de dimension 2^m dans l'espace de dimension 2^n).

Les codes de Hamming

Si on admet uniquement la possibilité de correction d'erreur simple, on doit avoir $2^{n-m} \geqslant n + 1$. Le nombre de syndromes doit être au moins égal à la somme du nombre de séquences erreurs de poids 1 et de la séquence correspondant à une transmission correcte. Les codes pour lesquels on a égalité sont des codes à redondance minimale appelés aussi codes de Hamming. Par exemple :

$n - m$	n	m	code
1	1	0	(1, 0)
2	3	1	(3, 1)
3	7	4	(7, 4)
4	15	11	(15, 11)
5	31	26	(31, 26)

Ces codes détectent et corrigent les erreurs simples. L'organe de codage peut être réalisé avec des circuits simples : registre à décalage ET (OU) exclusifs (additionneur modulo 2) [*fig.* 8], ces derniers opérant l'élaboration des chiffres de parité.

De même pour l'opération de décodage. A titre d'exemple, examinons le code de Hamming (7, 4) dans lequel 3 chiffres sont consacrés au contrôle. Le mot-code est $[c_1\ c_2\ a_3\ c_4\ a_5\ a_6\ a_7]$ où $c_1\ c_2\ c_4$ sont les chiffres de contrôle donnés par les équations :

$$c_1 = a_3 \oplus a_5 \oplus a_7 \quad c_2 = a_3 \oplus a_6 \oplus a_7$$
$$c_4 = a_5 \oplus a_6 \oplus a_7$$

M.C.B.

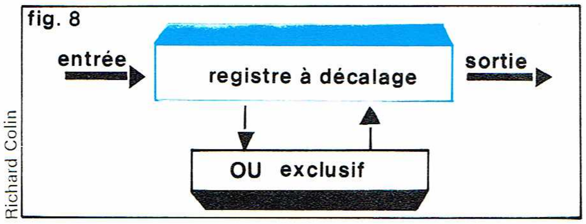

Richard Colin

▶ *Figure 8 : organe de codage utilisant un registre à décalage et des portes OU exclusif.*

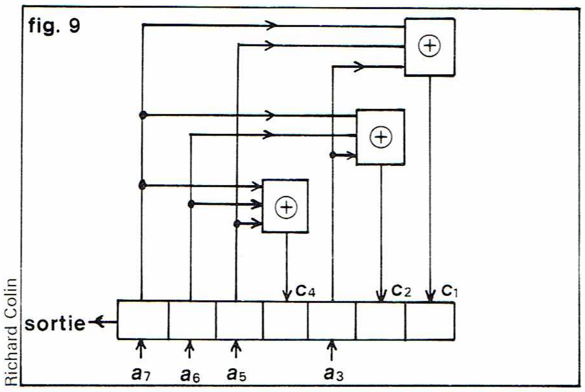

Richard Colin

▶ *Figure 9 : circuit utilisant un registre à décalage et servant au codage d'un code de Hamming (7,4). La partie information est* $[a_7, a_6, a_5, a_3]$.

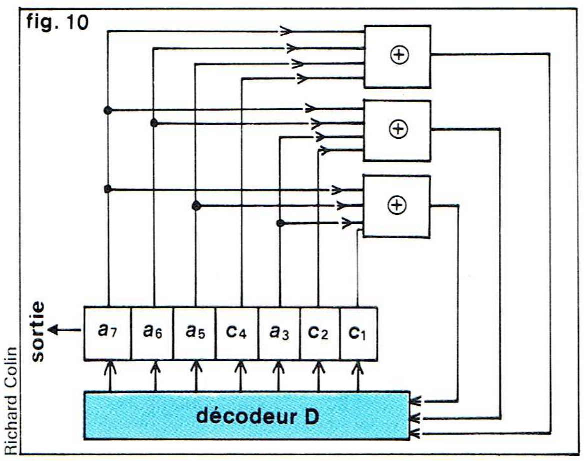

Richard Colin

▶ *Figure 10 : circuit utilisant un registre à décalage servant au décodage d'un code de Hamming (7, 4) [partie information du mot* $a_7a_6a_5a_3$*].*

Le lecteur pourra retrouver les matrices génératrices et de parité. Le codage peut être réalisé par le circuit de la *figure* 9 à l'aide d'un registre à décalage.

Au décodage, on élabore le contrôle des chiffres par :

$$z_1 = c_4 \oplus a_5 \oplus a_6 \oplus a_7$$
$$z_2 = c_2 \oplus a_3 \oplus a_6 \oplus a_7$$
$$z_3 = c_1 \oplus a_3 \oplus a_5 \oplus a_7$$

Si $(z_1\, z_2\, z_3) = (0, 0, 0)$, il n'y a pas d'erreur. S'il y a une erreur, le mot formé (7 possibilités) peut être mis en correspondance directe avec le chiffre erroné. Notons que, dans le cas très simple du code proposé, calculer **y**H (**y** mot reçu) revient à exprimer les chiffres du syndrome en fonction directe des autres chiffres. Le circuit de décodage est alors représenté par la *figure* 10. Le décodeur D associe à la séquence $(z_1\, z_2\, z_3)$ le chiffre erroné. Les symboles d'information sont séparés par des circuits portes — qu'on n'a pas représentés — qui s'ouvrent au moment où ces symboles apparaissent à la sortie : c'est l'inconvénient d'avoir pris un code non systématique.

Codes cycliques

Les codes cycliques forment un sous-ensemble des codes détecteurs-correcteurs d'erreurs. La construction de ces codes et leur utilisation sont très faciles grâce à l'algèbre des polynômes.

Rappels d'algèbre

Nous nous limiterons aussi dans cette partie aux codes élaborés à partir de l'alphabet binaire. Considérons donc l'espace formé de 2 éléments $\{0, 1\}$ qu'on munit de deux opérations : « OU exclusif » et « ET ». La première opération a déjà été définie, la seconde est caractérisée par la table de vérité suivante :

	0	1
0	0	0
1	0	1

Muni de ces opérations, on obtient une structure de corps. Le nombre d'éléments étant fini, le corps est appelé **corps de Galois** et sera noté GF (2) (en anglais, « Galois Field »). Une expression du type :

$$a_n x^n \oplus a_n x^{n-1} \oplus \ldots \oplus a_0$$

est appelée polynôme de degré n sur GF (2) si les a_i sont des éléments de GF (2), $(a_n \neq 0)$, x est appelé une indéterminée : il ne doit pas être interprété comme une variable ou un élément inconnu du corps, car en fait c'est la suite $[a_n, \ldots, a_0]$ qui va nous intéresser, le polynôme n'étant qu'une aide à la construction du code. Deux polynômes sont dits égaux s'ils correspondent tous deux à la même suite de coefficients. Ainsi, d'après notre définition,

$$P_1(x) = x^3 \oplus x^2 \oplus x \quad \text{et} \quad P_2(x) = x$$

sont deux polynômes différents et pourtant $P_1(1) = P_2(1)$, de même $P_1(0) = P_2(0)$. Sur l'ensemble des polynômes, on peut définir la somme :

$$P_1(x) \oplus P_2(x) = \sum_i (a_{1i} \oplus a_{2i})\, x^i$$

Par exemple, $(x^2 \oplus x \oplus 1) \oplus (x^2 \oplus 1) = x$, la multiplication par un scalaire et la multiplication de deux polynômes :

$$P_1(x)\, P_2(x) = \sum_{ij} (a_{1i}\, a_{2j-i})\, x^i$$

Muni de l'addition, l'ensemble des polynômes définis sur GF (2) forme un groupe abélien, mais ce n'est pas un groupe si on le munit de la multiplication. La structure algébrique créée par cet ensemble est un anneau.

Soit maintenant deux polynômes $P_1(x)$, $P_2(x)$ définis sur GF (2) ($P_2(x)$ de degré minimal 1) ; alors il existe deux polynômes $q(x)$ et $r(x)$ tels que :

$$P_1(x) = q(x)\, P_2(x) \oplus r(x)$$

Le degré de $r(x)$ est inférieur à celui de $P_2(x)$. Cette opération, la **division euclidienne**, permet de définir une relation d'équivalence : deux polynômes sont dits équivalents modulo $f(x)$ si le reste de leur division par $f(x)$ est identique. Cette règle permet de partager l'ensemble des polynômes en classes résiduelles modulo $f(x)$. Chaque classe peut être représentée par son terme de plus bas degré. Pour un polynôme $f(x)$ de degré N, il y a 2^N classes résiduelles. Par exemple, prenons comme polynôme $f(x) : x^2 \oplus 1$. Il y a 4 classes résiduelles,

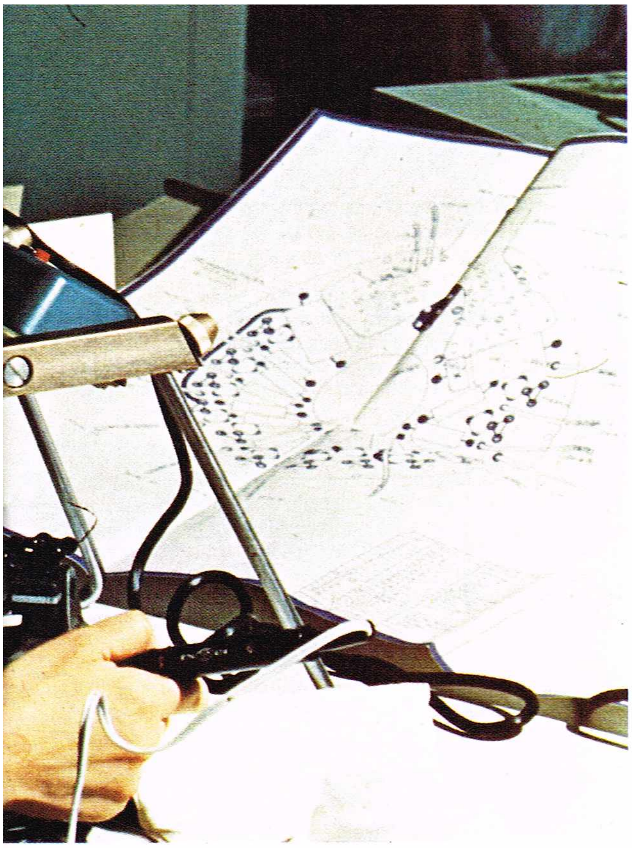

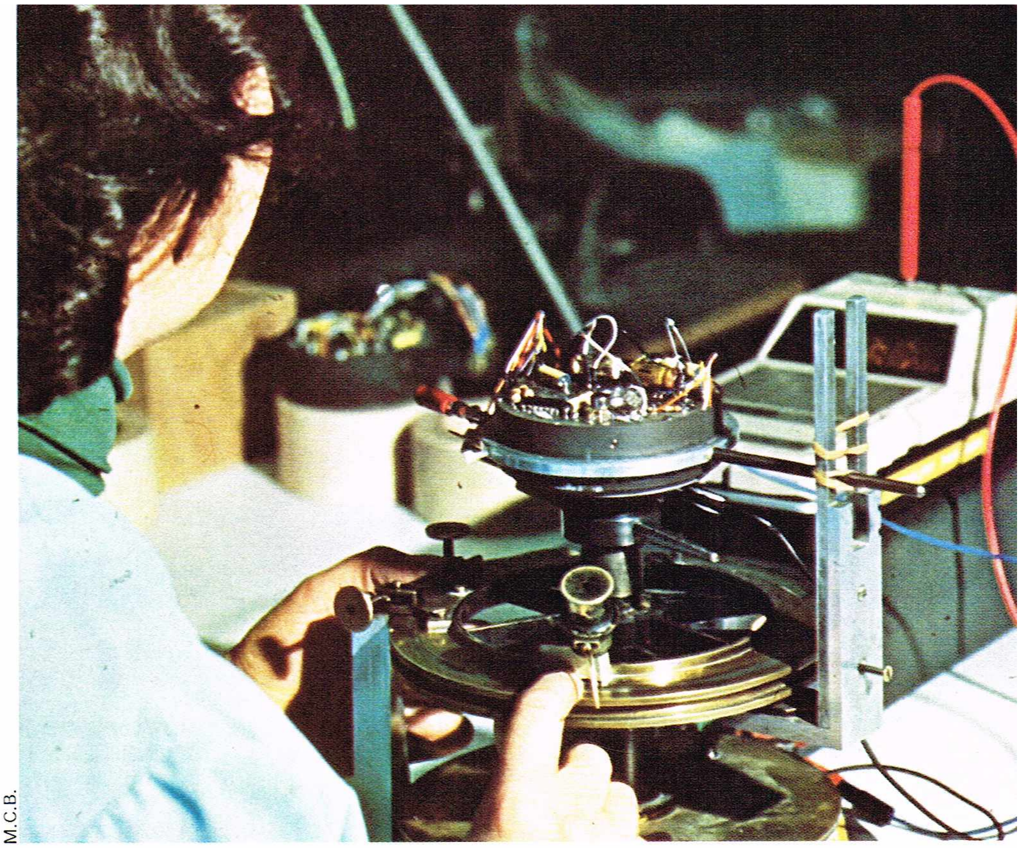

M.C.B.

▲ ***A gauche, soudure et contrôle du circuit imprimé incorporé dans un codeur destiné au traitement de l'information; on peut observer le plan agrandi du circuit imprimé à droite de l'ouvrière. A droite, contrôle du couple optique d'un codeur angulaire.***

0, 1, x, $x \oplus 1$. Pour $f(x) = x^3 \oplus 1$, il y a 8 classes résiduelles 0, 1, x, $x \oplus 1$, x^2, $x^2 \oplus 1$, $x^2 \oplus x$, $x^2 \oplus x \oplus 1$.

Rappelons aussi qu'en algèbre on appelle **idéal** toute partie d'un anneau fermée pour l'addition et la multiplication. L'ensemble des multiples d'un élément est un idéal particulier dit idéal principal.

Considérons donc l'ensemble des polynômes P (x) et l'ensemble des classes résiduelles $Ig(x)$, reste des divisions par $g(x)$. Dans $Ig(x)$, chaque idéal est engendré par le polynôme de plus bas degré $f(x)$: cet élément est unique et divise $g(x)$. Réciproquement, tout diviseur de $g(x)$ engendre un idéal. Donc la condition pour qu'une classe appartienne à un idéal est qu'elle soit divisible par le polynôme générateur de cet idéal.

Par exemple, soit $g(x) = x^3 \oplus 1$. Ce polynôme se décompose en produit du polynôme $x \oplus 1$ par le polynôme $x^2 \oplus x \oplus 1$ et il y a 8 classes résiduelles

$$(0, 1, x, x \oplus 1, x^2, x^2 \oplus 1, x^2 \oplus x, x^2 \oplus x \oplus 1).$$

Dans ces 8 classes, il y a deux idéaux, le premier formé par les multiples de $x \oplus 1$ $(0, x \oplus 1, x^2 \oplus x)$, l'autre formé par les multiples de $x^2 \oplus x \oplus 1$ $(0, x^2 \oplus x \oplus 1)$.

Nous terminerons ces rappels d'algèbre par la notion d'**irréductibilité.** On dit qu'un polynôme P (x) est réductible sur un corps s'il existe deux polynômes $g(x)$ et $h(x)$ tels que P $(x) = g(x)\, h(x)$. Dans le cas contraire, on dit que le polynôme est irréductible. Notons que l'irréductibilité est liée au corps; ainsi $x^2 \oplus 1$ est irréductible sur le corps des réels mais est réductible sur le corps des complexes. Un élément est dit racine d'un polynôme P (x) si P $(x) = (x \oplus \alpha)$ Q (x). Ainsi 1 est racine de $x^2 \oplus 1$, car $x^2 \oplus 1 = (x \oplus 1)(x \oplus 1)$.

Ces différentes notions vont nous permettre de construire les codes cycliques.

Définition du code cyclique

Les codes cycliques forment une classe particulière des codes linéaires, encore appelés codes de groupe. Un code cyclique C de taille n et de longueur de mot N est un code linéaire fermé pour la permutation linéaire des chiffres. Ainsi, si $(a_{N-1} \dots a_1\, a_0)$ est un mot-code, $(a_{N-2} \dots a_1\, a_0\, a_{N-1})$, $(a_{N-3} \dots a_1\, a_0\, a_{N-1}\, a_{N-2})$, etc., le sont aussi. Jusqu'à présent, nous avions adopté une représentation matricielle des mots-codes, nous allons maintenant utiliser la notion de polynôme précédemment définie sur GF (2). A tout mot-code, on associe le polynôme construit sur GF (2) de la manière suivante :

$$\text{mot-code} : a_{N-1}\, a_{N-2} \dots a_0 = \mathbf{u}$$

polynôme associé $u(x) = a_{N-1}\, x^{N-1} \oplus \dots \oplus a_0$.

Dans la suite du texte, lorsqu'il n'y aura pas d'ambiguïté, nous désignerons le mot-code aussi bien par la matrice **u** que par le polynôme associé $u(x)$.

Étudions le produit : $x \cdot u(x)$

$$x\,(a_{N-1}\, x^{N-1} \oplus \dots \oplus a_0) = a_{N-1}\, x^N \oplus a_{N-2}\, x^{N-1} \oplus \dots \oplus a_0 x$$
$$= a_{N-1}\,(x^N \oplus 1) \oplus a_{N-2}\, x^{N-1} \oplus \dots \oplus a_{N-1}$$

Donc $x\,(a_{N-1}\, x^{N-1} \oplus \dots \oplus a_0)$ est équivalent à

$(a_{N-2}\, x^{N-1} \oplus \dots \oplus a_0 x \oplus a_{N-1})$ modulo $(x^N \oplus 1)$.

Multiplier par x le polynôme équivalent d'un mot-code permet d'obtenir, modulo $(x^N \oplus 1)$, un polynôme associé à un autre mot-code, celui obtenu après une première permutation sur **u**. De même $x^i u(x)$ modulo $(x^N \oplus 1)$ est un polynôme correspondant au i-ième permuté de **u**, donc à un mot-code.

Soit C (x) l'ensemble des polynômes associés à un mot-code cyclique C. Si $\mathbf{u}_1$ et $\mathbf{u}_2$ sont deux mots-codes, C (x) contient $u_1(x) \oplus u_2(x)$. Si **u** est mot-code, C (x) contient $x^i u(x)$ modulo $(x^N \oplus 1)$. Donc C (x) contient toute somme du type $\sum_k c_k x^k u(x)$ (modulo $(x^N \oplus 1)$).

C (x) est ainsi fermé pour l'addition et la multiplication par un scalaire : il correspond à la définition que nous avions associée à la notion d'idéal. Donc, d'après ce qui a été vu au paragraphe précédent, il existe un polynôme de plus bas degré qui engendre cet idéal; de plus, ce polynôme est un diviseur de $x^N \oplus 1$. Soit $u_0(x)$ ce polynôme, m son degré, on l'appelle le polynôme générateur du code. $u_0(x)$ divise aussi de par la notion d'idéal chaque polynôme $u(x)$ de C (x); $u(x)$ étant de degré N, il y a 2^{N-m} quotients possibles, donc C (x) est de dimension 2^{N-m}. Un code cyclique de taille de mots N caractérisé par un polynôme $u_0(x)$ de degré m est donc un code dont la partie information comprend N — m chiffres : on note (N, N — m) un tel code. Pour ces codes, on peut retrouver facilement les notions de matrice génératrice et de matrice de parité : les codes cycliques ne sont en effet que des cas particuliers des codes à contrôle de parité.

Définissons $u_0(x)$ par un mot de taille N constitué de ses coefficients :

$$\underbrace{0\,0 \dots 0\, a_m \dots a_0}_{N}$$

Il est facile de montrer que $\mathbf{u}_0$ et ses (N — m — 1) permutés circulaires forment une base du code : on élabore alors facilement la matrice génératrice G

$$G = \underbrace{\begin{bmatrix} a_m\, a_{m-1} \dots a_0\, 0 \dots 0 \\ 0\, a_m \dots a_1\, a_0\, 0 \dots 0 \\ 0\, .\, .\, .\, .\, .\, 0\, a_m \dots a_0 \end{bmatrix}}_{N} \left.\vphantom{\begin{bmatrix}a\\a\\a\end{bmatrix}}\right\} N - m$$

Si x est la partie information, le mot-code **u** s'élabore par $\mathbf{u} = x\mathrm{G}$. Cette méthode revient à multiplier la partie

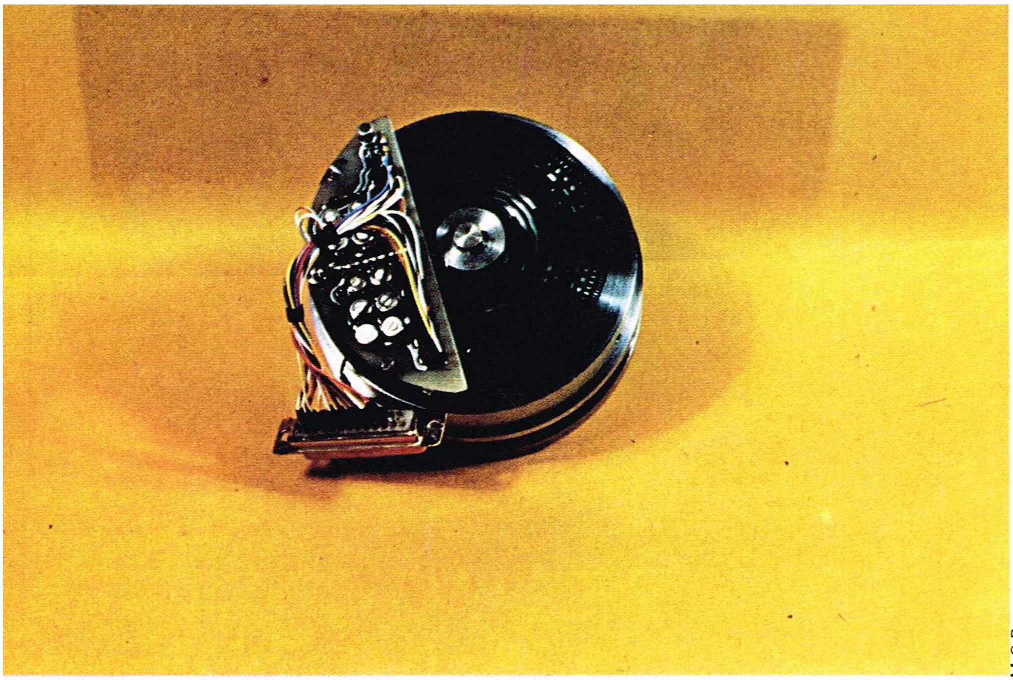

M.C.B.

▲ *Écorché d'un codeur optique permettant d'observer le circuit électronique et le disque codé.*

information par le polynôme générateur. Considérons le code (7, 4) engendré par $u_0(x) = x^3 \oplus x \oplus 1$.

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Pour définir la matrice de parité, il est nécessaire de définir le polynôme orthogonal d'un code cyclique. $\overline{u_0}(x)$ est dit orthogonal au polynôme générateur $u_0(x)$ du code cyclique si

$$u_0(x)\,\overline{u_0}(x) = 0 \text{ modulo } (x^N \oplus 1).$$

▼ *Tableau I : génération des mots-codes par division [cas de l'exemple du code (7, 4)].*

Ce polynôme est donc de degré $(N - m)$

$$\overline{u_0}(x) = \overline{a}_{N-m}\, x^{N-m} \oplus \ldots \oplus \overline{a}_0$$

$u(x)$ étant un mot-code

$$u(x) = u_0(x)\, Q(x)$$
$$u(x)\,\overline{u_0}(x) = u_0(x)\,\overline{u_0}(x)\, Q(x)$$
$$= (x^N \oplus 1)\, Q(x)$$

Donc $x^N \oplus 1$ divise le produit $u(x)\,\overline{u_0}(x)$. Une condition pour que $u(x)$ soit un mot-code est que son produit par le polynôme orthogonal soit divisible par $(x^N \oplus 1)$. A partir de là, il est facile de montrer que la matrice de parité H telle que $\mathbf{u}H = 0$ peut s'écrire avec les coefficients du polynôme orthogonal :

$$H = \underbrace{\begin{bmatrix} \overline{a}_0 & 0 & \ldots\ 0 \\ \overline{a}_1 & \overline{a}_0 & « \\ « & « & « \\ \overline{a}_{N-m} & « & « \\ 0 & \overline{a}_{N-m} & \overline{a}_0 \\ « & 0 & « \\ 0 & « & \overline{a}_{N-m} \end{bmatrix}}_{m} \Bigg\} N - m$$

Recherchons la matrice de parité du code (7, 4) généré par $u_0(x) = x^3 \oplus x \oplus 1$.

Pour cela, divisons $x^7 \oplus 1$ par $x^3 \oplus x \oplus 1$:

$x^7 \oplus 1$	$x^3 \oplus x \oplus 1$
$x^7 \oplus x^5 \oplus x^4$	$x^4 \oplus x^2 \oplus x \oplus 1$
$x^5 \oplus x^4 \oplus 1$	
$x^5 \oplus x^3 \oplus x^2$	
$x^4 \oplus x^3 \oplus x^2 \oplus 1$	
$x^4 \oplus x^2 \oplus x$	
$x^3 \oplus x \oplus 1$	
$x^3 \oplus x \oplus 1$	
0	

$\overline{u_0}(x)$ s'écrit donc $x^4 \oplus x^2 \oplus x \oplus 1$

et la matrice H

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A partir d'un code cyclique généré par $u_0(x)$, on peut définir le code orthogonal $\overline{\Gamma}$ qui a même longueur de mot, mais est généré par le polynôme orthogonal à $u_0(x)$, $\overline{u_0}(x)$. $\overline{\Gamma}$ est donc un code (N, m).

Ces définitions nous donnent deux méthodes de génération des mots-codes. La première est la **génération par division.** On peut séparer dans un mot-code **u** la partie information **i** de la partie parité **p**. Dans le cas de la simple concaténation des deux, on a :

$$u(x) = i(x) \oplus p(x)$$

où $i(x)$ est le polynôme correspondant à **i** cadré en partie haute de **u**, $p(x)$ le polynôme correspondant à **p** cadré en partie basse :

$$u(x) = \underbrace{i_{N-1}\, x^{N-1} \oplus \ldots \oplus i_m\, x^m}_{i(x)} \oplus \underbrace{p_{m-1}\, x^{m-1} \oplus \ldots \oplus p_0}_{p(x)}$$

Comme $u(x)$ est un mot-code

$$u(x) = u_0(x)\, Q(x)$$
$$u(x) \oplus p(x) = u_0(x)\, Q(x)$$
$$i(x) = u_0(x)\, Q(x) \oplus p(x)$$

La partie parité correspond donc au polynôme reste de la division du polynôme associé à la partie information cadrée en degré $(N - 1)$ par le polynôme générateur $u_0(x)$. Reprenons l'exemple du code (7, 4) généré par $x^3 \oplus x \oplus 1$ et générons par cette méthode les mots-codes (*tableau* I).

Tableau I

Génération des mots-code par division [exemple du code (7, 4)]

i	$i(x)$	$t(x)$ = reste de la division de $i(x)$ par $u_0(x)$ $(x^3 \oplus x \oplus 1)$	mot-code
0000	0	0	0000 000
0001	x^3	$x \oplus 1$	0001 011
0010	x^4	$x^2 \oplus x$	0010 110
0011	$x^4 \oplus x^3$	$x^2 \oplus 1$	0011 101
0100	x^5	$x^2 \oplus x \oplus 1$	0100 111
0101	$x^5 \oplus x^3$	x^2	0101 100
0110	$x^5 \oplus x^4$	1	0110 001
0111	$x^5 \oplus x^4 \oplus x^3$	x	0111 010
1000	x^6	$x^2 \oplus 1$	1000 101
1001	$x^6 \oplus x^3$	$x^2 \oplus x$	1001 110
1010	$x^6 \oplus x^4$	$x \oplus 1$	1010 011
1011	$x^6 \oplus x^4 \oplus x^3$	0	1011 000
1100	$x^6 \oplus x^5$	x	1100 010
1101	$x^6 \oplus x^5 \oplus x^3$	1	1101 001
1110	$x^6 \oplus x^5 \oplus x^4$	x^2	1110 100
1111	$x^6 \oplus x^5 \oplus x^4 \oplus x^3$	$x^2 \oplus x \oplus 1$	1111 111

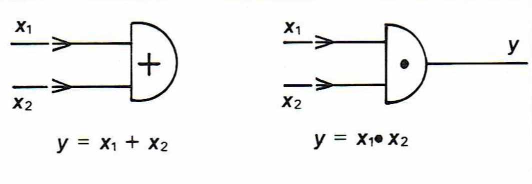

Richard Colin
fig. 11

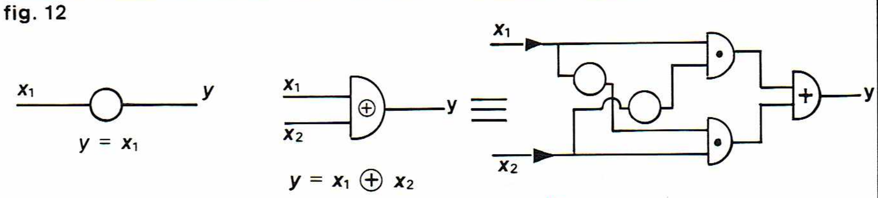

Richard Colin
fig. 12

Cette méthode de génération est très facile, on verra de plus que l'implémentation par des circuits électroniques est aisée. Une deuxième méthode de génération est la **méthode de multiplication** par $g(x)$. En effet, tout mot-code est un multiple de $u_0(x)$: il suffit donc d'écrire le polynôme $i(x)$ correspondant à la partie information i cadrée en bas et d'opérer la multiplication par $u_0(x)$ pour obtenir $u(x)$.

Réalisation du codage

Nous ne développerons dans cette partie que les réalisations à partir de circuits électroniques, mais on peut opérer aussi des réalisations entièrement informatiques à partir de logiciels. Les symboles 0 et 1 des codes binaires sont attribués conventionnellement aux niveaux de tension. (Deux conventions sont possibles : la convention 1 où « 0 » est attribué au potentiel minimal, « 1 » au potentiel maximal, la convention 2 où la spécification précédente est inversée.) Enfin les circuits de commutation peuvent être synchrones ou asynchrones selon que la commutation se fait à des temps bien déterminés marqués par un générateur de synchronisation ou bien à des temps arbitraires déterminés par les signaux qui sont appliqués à l'entrée. Nous présenterons symboliquement des circuits « OU » et des circuits « ET » comme le montre la *figure* 11. L'opérateur « OU exclusif » est en fait réalisé à partir de circuits « OU » et « ET ».

$$x_1 \oplus x_2 = (x_1 \cdot \bar{x}_2) + (x_2 \cdot \bar{x}_1).$$

L'opérateur « NON » est celui qui associe à la variable la variable complémentée (*fig.* 12).

Autre organe de base, le **circuit à bascule ou « trigger »** : c'est un circuit de commutation séquentielle à deux états stables qu'on associe au « 0 » et au « 1 ». On peut associer plusieurs bascules et portes pour réaliser un circuit à décalage. Ces circuits sont des dispositifs synchrones qui permettent de mémoriser les séquences de symboles et de les déplacer à raison d'une position par impulsion appliquée. Il y a quelques années, on réalisait des registres à décalage en câblant des ensembles de bascules et de portes, mais actuellement, grâce au développement des circuits intégrés, le registre à décalage est devenu un circuit de base. Nous avons besoin pour le codage de circuits réalisant la multiplication ou la division de deux polynômes équivalents aux séquences binaires. Le schéma bloc du circuit de la multiplication du polynôme $g_n x^n + ... + g_0$ par un polynôme de degré m $u_0(x) = a_m x^m + ... + a_0$ est donné à la *figure* 13. A l'entrée, le signal appliqué est g_n à la première impulsion de rythme, g_{n-1} à la suivante, et ainsi de suite. Ce circuit est donc fondé sur le fait que la multiplication par x correspond à une avance d'une impulsion de rythme. Le nombre d'impulsions de rythme nécessaire pour obtenir le résultat est égal à $(n + m + 1)$.

Pour bien comprendre le fonctionnement logique, réalisons la multiplication de $x^4 \oplus x \oplus 1$ par $x^3 \oplus x \oplus 1$. Le circuit et la table d'évolution des états du circuit sont donnés par la *figure* 14.

On retrouve bien
$(x^4 \oplus x \oplus 1)(x^3 \oplus x \oplus 1) = x^7 \oplus x^5 \oplus x^3 \oplus x^2 \oplus 1$.

Le circuit réalisant la division de deux polynômes est fondé sur le même principe (*figure* 15).

Le nombre d'impulsions de rythme pour réaliser l'opération est égal au degré du dividende plus un. Soit à réaliser la division de $(x^7 \oplus x^5 \oplus x^3 \oplus x^2 \oplus 1)$ par $(x^3 \oplus x \oplus 1)$. Le circuit et la table d'évolution sont donnés par la *figure* 16.

On retrouve bien $x^4 \oplus x \oplus 1$. A noter que l'état des bascules B_0, B_1, B_2 représente les coefficients, reste de la division (dans notre exemple, ce reste est nul).

fig. 13

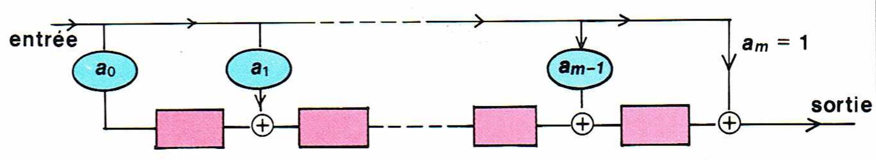

Richard Colin

fig. 14

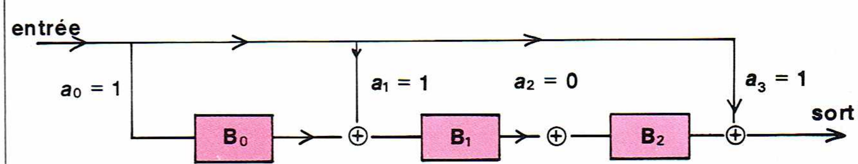

impulsion d'horloge	entrée	état des bascules B₀	B₁	B₂	sortie
0	0	0	0	0	0
1	1(x^4)	1	1	0	1(x^7)
2	0(x^3)	0	1	1	0(x^6)
3	0(x^2)	0	0	1	1(x^5)
4	1(x)	1	1	0	0(x^4)
5	1(x^0)	1	0	1	1(x^3)
6	0	0	1	0	1(x^2)
7	0	0	0	1	0(x)
8	0	0	0	0	1(x^0)

Richard Colin

▲ *Figure 11 : circuits de commutation :* a) *circuit* OU ; b) *circuit* ET.
Figure 12 : circuits de commutation : a) *circuit* NON ; b) *circuit* OU *exclusif dont on donne la réalisation équivalente en* NON, OU *et* ET.
Figure 13 : circuit réalisant la multiplication d'un polynôme par le polynôme de degré m, $u_0(x) = a_m x^m \oplus ... \oplus a_0$.
Figure 14 : exemple de fonctionnement du circuit précédent : multiplication de $x^4 \oplus x \oplus 1$ *par* $x^3 \oplus x \oplus 1$*, et évolution des états de ce circuit.*

▼ *Figure 15 : circuit permettant la division de deux polynômes.*

fig. 15

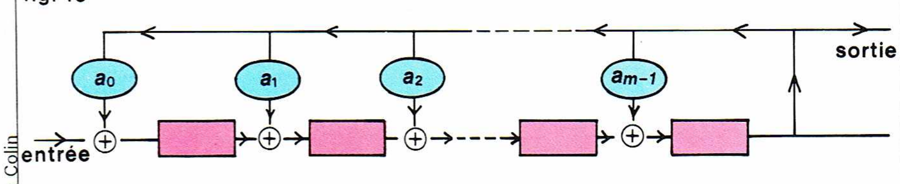

Richard Colin
a₀... am sont les coefficients du polynome diviseur

fig. 16

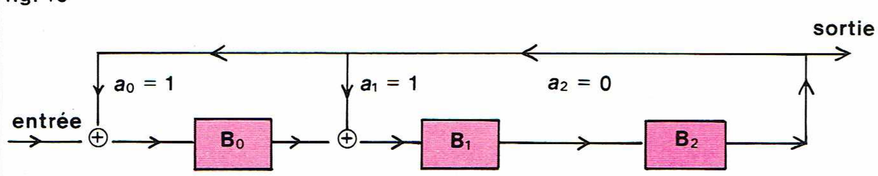

impulsion d'horloge	entrée	état des bascules			sortie
		B_0	B_1	B_2	
0	0	0	0	0	0
1	$1(x^7)$	1	0	0	$0(x^7)$
2	$0(x^6)$	0	1	0	$0(x^6)$
3	$1(x^5)$	1	0	1	$0(x^5)$
4	$0(x^4)$	1	0	0	$1(x^4)$
5	$1(x^3)$	1	1	0	$0(x^3)$
6	$1(x^2)$	1	1	1	$0(x^2)$
7	$0(x)$	1	0	1	$1(x)$
8	$1(x^0)$	0	0	0	$1(x^0)$

Richard Colin

fig. 17

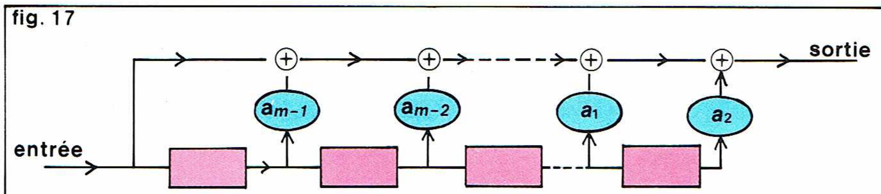

Richard Colin

fig. 18

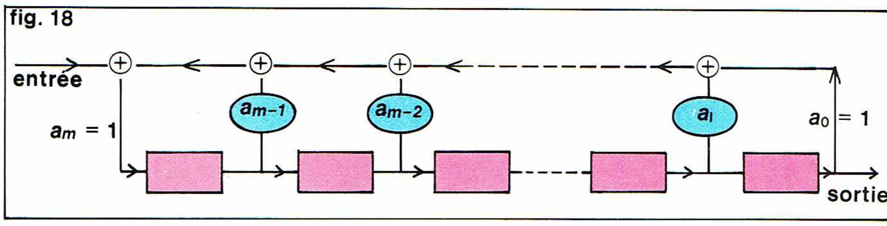

Richard Colin

▲ ***Figure 16; exemple de fonctionnement du circuit de la figure 15 : division de $x^7 \oplus x^5 \oplus x^3 \oplus x^2 \oplus 1$ par $x^3 \oplus x \oplus 1$ et table d'évolution des états de ce circuit. Figure 17 : autre version d'un circuit de multiplication. Figure 18 : autre version d'un circuit de division.***

fig. 19

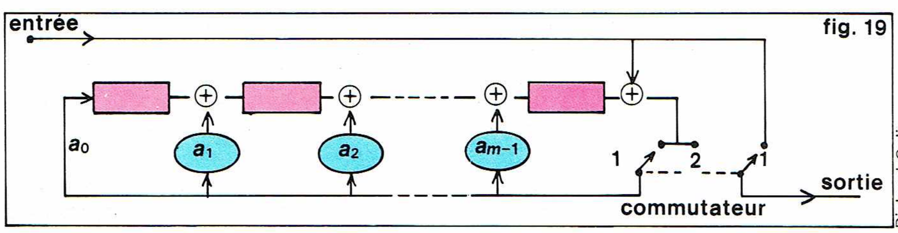

Richard Colin

fig. 20

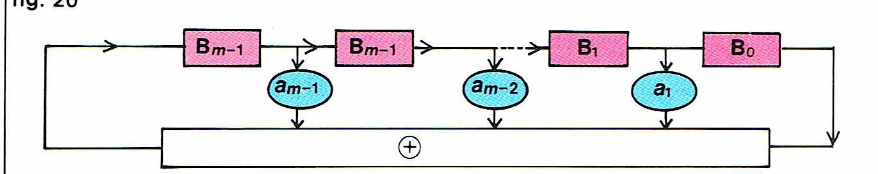

Richard Colin

On peut proposer une autre version d'un circuit de multiplication par $a_m x^m \oplus \ldots \oplus a_0$: *figure* 17 ; et d'un circuit de division par le même polynôme : *figure* 18.

A partir de ces deux types de schéma, il est facile de réaliser le codage par multiplication ou par division d'un code cyclique. Les coefficients $a_m \ldots a_0$ des circuits précédents sont ceux du polynôme générateur du code. Dans le cas de l'utilisation d'un circuit à multiplication, la partie information (mise en entrée) est considérée comme un polynôme de degré (N — m — 1) ; on obtient après multiplication par u_0 (x) de degré m un polynôme de degré (N — 1) correspondant au mot-code de longueur N — 1. Dans le mot obtenu, les mots d'information et ceux de parité apparaissent par l'intermédiaire de combinaisons linéaires ; le code n'est pas, dans ce cas, systématique. Au contraire, si on opère par division, on a un code systématique, comme le montre la *figure* 19.

Le commutateur étant dans la position 1, la sortie est constituée de la succession des coefficients de $x^m i$ (x) (i (x) polynôme de degré (N — m — 1) correspondant à la partie information), ce qui correspond aux chiffres information placés en partie haute du mot-code. Durant ce temps, le reste est emmagasiné dans les m bascules. Après que tous les chiffres d'information ont été introduits dans le circuit, donc que le reste a été calculé, le commutateur bascule en position 2 et on peut lire successivement les coefficients du reste, donc les chiffres de parité. Le code est ici un code systématique.

Une autre technique de codage est l'utilisation d'un **registre à décalage à réaction.** L'avantage d'un tel circuit séquentiel est de pouvoir fonctionner de manière autonome sans signal appliqué de l'extérieur : voir *figure* 20.

Soit e_i (t) l'état de la bascule i à l'instant t, on a alors :

$$\begin{aligned} e_0\ (t+1) &= e_1\ (t) \\ e_1\ (t+1) &= e_2\ (t) \\ \text{»} \quad & \quad \text{»} \\ e_{m-2}\ (t+1) &= e_{m-1}\ (t) \\ e_{m-1}\ (t+1) &= e_0\ (t) \oplus a_1 e_1\ (t) \oplus \ldots \oplus a_{m-1} e_{m-1}\ (t) \end{aligned}$$

En écrivant la suite d'états sous la forme d'une matrice vecteur :

$$\mathbf{e}\ (t) = \begin{bmatrix} e_0\ (t) \\ \vdots \\ e_{m-1}\ (t) \end{bmatrix}$$

on a
$$\mathbf{e}\ (t+1) = \mathbf{Ce}\ (t)$$

où C est la matrice caractéristique du registre à décalage

$$\mathrm{C} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \ldots & 0 & \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \ldots & 0 \\ & \text{»} & & \text{»} & & \text{»} \\ 1 & a_1 & . & . & . & a_{m-1} \end{bmatrix}$$

Si, à l'instant de départ, l'état vaut **e** (0), alors, à l'instant 1, l'état est **Ce** (0), à l'instant 2, $\mathrm{C}^2\mathbf{e}$ (0), ..., à l'instant i, $\mathrm{C}^i\mathbf{e}$ (0). Nous avons systématiquement imposé le coefficient a_0 à la valeur 1, c'est une condition nécessaire pour que la matrice C ait une inverse. Dans ces conditions, l'état précédant chaque état du registre est unique. On peut donc se poser le problème suivant : partant d'un état

$$\mathbf{e}\ (0) \neq \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

au bout de combien de transitions revient-on à cet état ? Si, au départ, toutes les bascules sont dans 0, on revient à cet état en une transition. Le problème posé est donc celui de la détermination du plus petit entier k tel que $\mathrm{C}^k\mathbf{e}$ (0) = **e** (0). Ce nombre k est appelé période de la matrice caractéristique C. On appelle polynôme caractéristique de la matrice C la quantité

$$|\mathrm{C} \oplus x\mathrm{I}| = \mathrm{P}\ (x) \qquad (\mathrm{P}\ (x) \text{ est de degré } m).$$

Un calcul simple montre que

$$\mathrm{P}\ (x) = a_0 \oplus a_1 x \oplus \ldots \oplus a_{m-1} x^{m-1} \oplus x^m.$$

On démontre alors que la période de la matrice C est le plus petit entier l tel que $x^l \oplus 1$ soit divisible par P (x). Le nombre de bascules étant fixé, on peut aussi rechercher le polynôme P (x) tel que la matrice caractéristique associée ait une période maximale : cette valeur maximale est $2^m - 1$. On démontre alors que P (x) doit obéir à

certaines conditions mathématiques, il doit être primitif ($P(x)$ est primitif s'il est irréductible et s'il divise $x^n \oplus 1$ pour n supérieur ou égal à $2^m - 1$). A l'aide d'un registre à décalage à réaction à m états, on peut réaliser le codage d'un code cyclique systématique, comme on le voit *figure* 21.

Les coefficients a_i sont ceux du polynôme générateur du code. L'état du registre est au départ l'état nul (0 ... 0). Le commutateur étant en position 1, on introduit les $(n-m)$ chiffres d'information $i_{n-1} ... i_m$. Ces chiffres sont en même temps transmis sur le fil de sortie. A la première impulsion de rythme, l'état du registre sera

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \text{»} \\ 0 \\ i_{n-1} \end{bmatrix}$$

qu'on va écrire i_{n-1} U avec

$$U = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \text{»} \\ 1 \end{bmatrix}$$

La matrice caractéristique de ce registre s'écrivant

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \ldots & 0 \\ & \text{»} & \text{»} & \text{»} & \\ a_0 & a_1 & \ldots & a_{m-1} & \end{bmatrix}$$

à la deuxième impulsion, l'état du registre sera

$$i_{n-1}CU \oplus i_{n-2}U.$$

En continuant le raisonnement, à la j-ième impulsion, l'état sera

$$i_{n-1}C^{j-1}U \oplus i_{n-2}C^{j-2}U \oplus \ldots \oplus i_{n-j}U.$$

Passé la $(n-m)$-ième impulsion, le commutateur bascule en position 2. En sortie, on ne va donc pas retrouver les symboles d'information, mais les symboles de parité élaborés par traitement logique : c'est bien un code systématique. A noter que, pendant ces m dernières impulsions, on applique à l'additionneur en sortie deux entrées identiques, les symboles de contrôle. Donc, comme la sortie de cet additionneur est reliée à la bascule B_{m-1}, le registre va peu à peu se remplir de « 0 », ce qui permet le codage du mot suivant.

Décodage et correction des erreurs

Soit $\mathbf{u}_1$ le mot émis, $\mathbf{u}_2$ le mot reçu, la séquence erreur est par définition

$$\mathbf{e} = \mathbf{u}_1 \oplus \mathbf{u}_2.$$

Si $\mathbf{e} = (0 \ldots 0)$, le mot est correct et aucune correction n'est nécessaire (s'il y a plusieurs erreurs qui se compensent, on ne peut les voir). Si la séquence erreur appartient au code, il y a une erreur non détectable. Dans le cas où la séquence erreur n'est pas un mot-code, on peut détecter la ou les erreurs. Donc, la condition nécessaire et suffisante pour qu'une erreur soit détectable est que le polynôme $e(x)$ associé à la séquence erreur $\mathbf{e}$ ne soit pas divisible par le polynôme générateur $u_0(x)$.

La première opération à la réception de u_2 est de diviser $u_2(x)$, polynôme associé, par $u_0(x)$. Si le reste est nul, aucune éventuelle erreur n'est détectable. On peut pour cela utiliser un des circuits de division proposés au paragraphe précédent.

● *Détection d'erreurs simples.* Toute séquence erreur correspondant à une erreur simple est un permuté du mot (0 ... 01), c'est-à-dire $e(x) = 1$. Ce polynôme réduit à une constante n'est divisible par aucun polynôme (sauf le polynôme formé de l'unique 1). Donc les codes cycliques détectent les erreurs simples.

● *Détection d'erreurs doubles.* Toute séquence erreur correspondant à une erreur double est un permuté du mot (0 .. 10 .. 1) dont le polynôme associé est $x^i \oplus 1$. Une condition nécessaire et suffisante pour détecter les erreurs doubles est que le polynôme générateur ne divise pas les polynômes $x^i \oplus 1$ $(0 \leqslant i \leqslant N-1)$. On pourrait exposer les conditions de détection des autres erreurs multiples (triples...) par un raisonnement analogue.

● *Détection de paquets d'erreur.* Un paquet d'erreur de longueur au plus égale à p est un permuté circulaire du mot $(0 .. e_1 .. e_p)$ où $e_1 \ldots e_p$ ne sont pas tous égaux à 0. A ces mots on peut associer $2^p - 1$ polynômes de degré au maximum égal à $(p-1)$. Pour que $u_0(x)$ ne divise aucun de ces polynômes, il suffit que le degré de $u_0(x)$ soit au moins égal à p. Tout code $(N, N-m)$ détecte donc les paquets d'erreur de longueur $p \leqslant m$.

Étudions maintenant les **possibilités de correction.** Dans le cas d'une erreur simple, $u_2(x) = u_1(x) \oplus x_i$. Donc $u_2(x) \oplus x_i$ est un mot-code, c'est-à-dire divisible par $u_0(x)$. Avec une table de reste de division par $u_0(x)$, il est donc aisé de corriger l'erreur simple. Un raisonnement analogue peut être fait pour des erreurs multiples. A titre d'exemple, nous allons donner les circuits de codage et de décodage pour le code déjà abondamment étudié : le code cyclique (7, 4) généré par $x^3 \oplus x \oplus 1$.

On réalise le codage par un registre à décalage dont le câblage est conforme à la *figure* 22 :

La matrice caractéristique de ce registre est

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Le décodage (détection et correction d'erreurs simples) peut être réalisé par le circuit de la *figure* 23.

Il y a un registre $B_6 \ldots B_0$ qui sert à emmagasiner le mot reçu de longueur 7. A et B sont deux registres à décalage à réaction câblés de manière identique à celui utilisé pour le codage. Les décodeurs D_1 et D_2 servent à détecter certains états du registre : le symbole 1 émis chaque fois qu'un de ces états est décelé permet de corriger le symbole se trouvant dans la dernière cellule B_0 du registre. L'ensemble fonctionne de la manière suivante : les chiffres du mot reçu sont introduits à la fois dans $B_6 \ldots B_0$ et dans A qui permet de connaître la position du chiffre éventuellement erroné. La porte P est fermée jusqu'à ce que le dernier symbole soit introduit dans le registre $B_6 \ldots B_0$. Puis on ouvre P et on procède à l'opération de correction. Au même instant, il y a commutation de C en 2, et le mot suivant commence à remplir à la fois $B_6 \ldots B_0$ et le registre B. Donc séquentiellement le premier mot quitte $B_0 \ldots B_6$ et le chiffre erroné est corrigé lors de son passage en B_0.

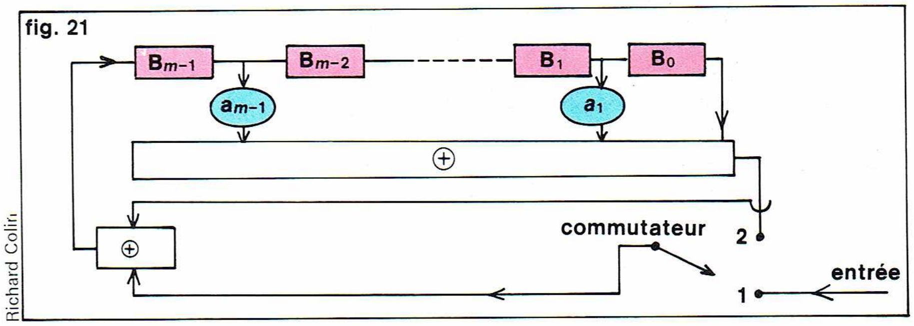

▲ ***Figure 21 :** registre à décalage à réaction à m états permettant le codage d'un code cyclique systématique.*

◀ ***Page ci-contre, en bas, figure 19 :** circuit opérant par division et permettant le codage systématique. **Figure 20 :** circuit séquentiel utilisant un registre à décalage à réaction.*

▼ ***Figures 22 et 23 :** circuits permettant la correction d'erreurs dans le cas du code cyclique (7, 4) généré par $x^3 \oplus x \oplus 1$; fig. 22 : cas du codage; fig. 23 : cas du décodage.*

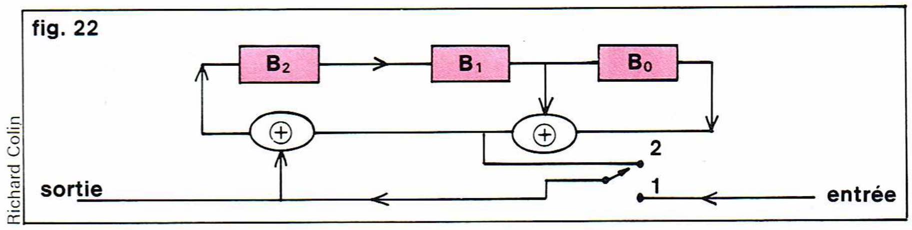

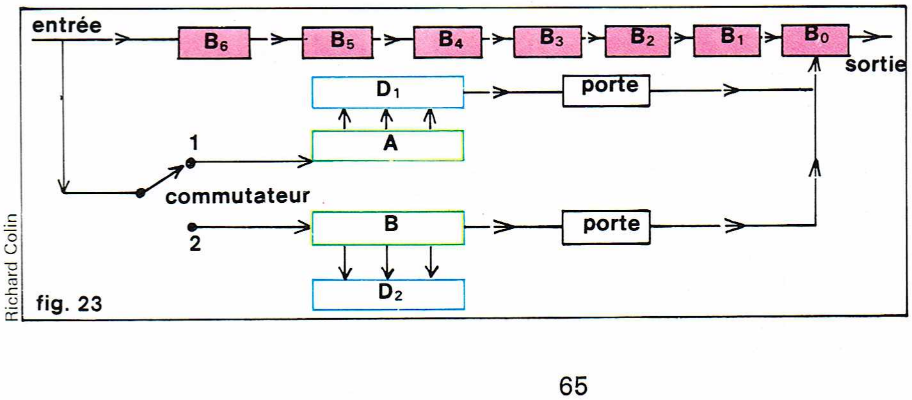

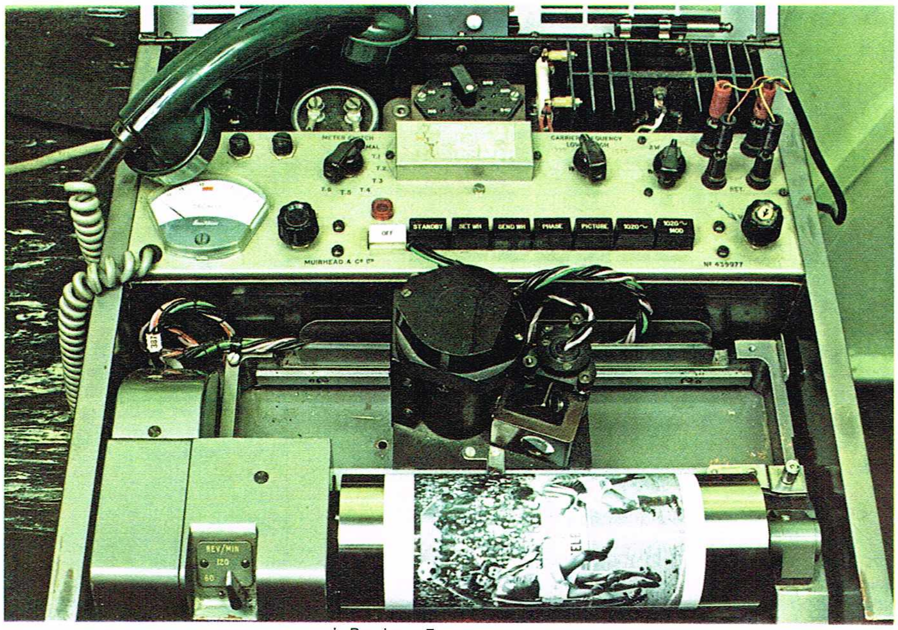

J. Bordas - Fotogram

▲ Un bélinographe permettant la transmission à distance de textes, photographies, etc.

Par addition modulo 2, il y a donc correction de ce chiffre. Ce code cyclique (7, 4), qui est un code de Hamming, détecte et corrige donc les erreurs simples. C'est un exemple facile d'emploi de la méthodologie des codes cycliques.

Autres exemples de codes cycliques

Une généralisation des codes de Hamming est obtenue avec les **codes de Bose-Chauduri-Hocquenghem** proposés d'abord par Hocquenghem, puis par Bose et Chauduri (1960). Ce sont des codes faciles à construire dans lesquels la longueur du mot N est de la forme $2^r - 1$. Si l'on désire que le code corrige q erreurs, le nombre maximal de chiffres par mot est qr. Le degré maximal du polynôme générateur est donc qr. Ainsi le code de Bose-Chauduri-Hocquenghem (15, 7), correspondant à $r = 4$ et $qr = 8$, donc $q = 2$, corrige deux erreurs indépendantes, détecte donc 4 erreurs indépendantes et les paquets d'erreur de longueur 8. Le code (15, 5), qui a pour paramètre $r = 4$, corrige les erreurs triples indépendantes, détecte 6 erreurs et les paquets d'erreur de longueur 10. Il est à noter ici que le degré du polynôme générateur 10 est inférieur au produit $qr = 15$.

Citons encore les exemples suivants avec $r = 7$ codes (127, .). Si on veut corriger les erreurs simples ($q = 1$), le mot-code a 120 chiffres d'information; si on veut corriger les erreurs doubles ($q = 2$), le mot-code a 113 chiffres d'information; si on veut corriger les erreurs d'ordre 10 ($q = 10$), le mot-code a 64 chiffres d'information; si on veut corriger les erreurs d'ordre 27 ($q = 27$), le mot-code a 18 chiffres d'information. Donc, et ce résultat est évident, pour augmenter la possibilité de correction, on augmente la redondance et, par là, on réduit le taux de transmission de l'information. A noter aussi que, plus les possibilités de correction sont grandes, plus les équipements nécessaires deviennent coûteux.

Un autre type de code très employé est le **code de Fire,** correcteur de paquets d'erreur de longueur supérieure à 2. Ainsi le code Fire, ayant pour longueur de mots-codes 155, dont 145 symboles d'information, donc code (155, 145), détecte et corrige les paquets d'erreur de longueur 3 ou moins. Ce code décèle certains paquets d'erreur de longueur 4, mais pas tous.

Enfin il existe des **codes cycliques raccourcis,** dérivés des codes cycliques, obtenus en annulant un nombre l de chiffres d'information que l'on ne transmet pas ensuite sur le canal. On n'a plus à faire à proprement parler à un code cyclique, puisque le code n'est plus fermé pour la permutation circulaire. Étant donné aussi que le nombre de chiffres de parité est inchangé, donc augmente en valeur relative par rapport au nombre de chiffres d'information entre le code cyclique et le code raccourci, les possibilités de correction sont plus grandes.

Enfin signalons une autre possibilité d'erreur dont nous n'avons pas parlé, les **erreurs de synchronisation.** En effet, lors d'une transmission réelle il peut y avoir des symboles parasitaires ou au contraire disparition de symboles, ce qui peut tromper le récepteur sur le début ou la fin d'un mot-code. Les méthodes de détection ou de correction d'erreurs addition vues précédemment ne s'appliquent plus. Rappelons qu'il y a deux types de transmission : la transmission synchrone, où les mots sont transmis de façon continue, et la transmission asynchrone, où les mots sont transmis de façon irrégulière. Dans ce dernier cas, on peut synchroniser le récepteur; on peut ajouter au mot-code un préfixe afin de déterminer le début précis du mot. Dans le cas d'une transmission synchrone, l'omission ou l'introduction de symboles exige donc de rétablir parfois le synchronisme, c'est-à-dire de déterminer le nombre de symboles omis ou sautés. Une façon simple de déterminer les translations à droite ou à gauche est d'ajouter un préfixe à structure connue au mot-code. Ainsi, pour déceler un déplacement vers la droite ou vers la gauche, on ajoutera le préfixe 001. A la réception, on examine la zone allouée au préfixe : si on a 001, il n'y a pas de translation; si on a 000 ou 100, il y a eu déplacement à gauche; si on trouve 010 ou 011, il y a eu translation à droite. A noter que, si on rétablit le synchronisme, on ne retrouve pas le mot-code où s'est produite l'erreur et, en particulier, on n'y corrige pas les erreurs additives, mais on pourra les corriger éventuellement dans les mots qui suivent.

Il existe d'autres codes que les codes cycliques, en particulier les **codes convolutionnels** dont l'analyse est complexe. Leur structure est faite de blocs : dans une transmission continue, il y a un bloc de longueur l_0 qui contient le symbole d'information et $l_0 \dots k$ symboles de contrôle. La différence avec les codes cycliques tient dans le fait que les $(l_0 - k)$ symboles de parité contrôlent les symboles d'information d'autres blocs. Un bloc ne joue donc plus le rôle d'un mot-code. Nous n'avons pas voulu dans cette partie développer tous les codes correcteurs d'erreurs, orientant notre exposé sur les principaux codes correcteurs; en effet, ceux-ci donnent une idée suffisante de la question.

Pour terminer, il faut rappeler le dilemme de tout système de transmission : on augmente la puissance des signaux, ce qui est coûteux, ou on utilise des codes détecteurs-correcteurs d'erreurs, ce qui introduit un retard à la réception. Suivant les cas d'espèce, on choisit la solution 1 ou la solution 2, ou parfois un mélange des deux.

▼ Un standard téléphonique.

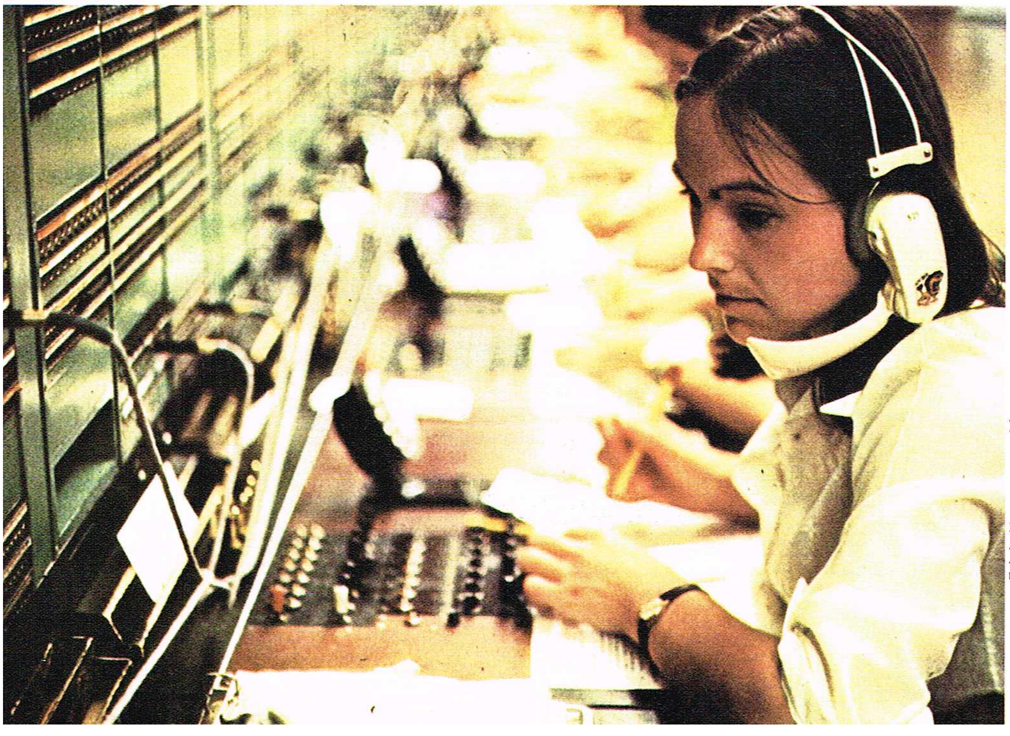

Erich Hartmann - Magnum

BIBLIOGRAPHIE

GALLAGHER R. G., *Information Theory and Reliable Communication.* - ROUBINE E., *Introduction à la théorie de la communication.* - SPATARU Al., *Théorie de la transmission de l'information.*

LES MÉMOIRES ET L'ANALYSE DU SIGNAL

Les mémoires

Le bloc diagramme simplifié de la *figure* 1 donne le schéma de principe d'un calculateur. Les périphériques d'entrée alimentent en information le calculateur ; ils sont de types divers : lecteur de rubans perforés ou de cartes, claviers de télétype, tubes cathodiques, disque ou bande magnétiques, convertisseur analogique digital. La mémoire centrale a pour fonction de conserver les données, les résultats des calculs, les programmes. L'unité arithmétique et logique effectue les opérations mathématiques de base. Tout est dirigé par l'unité de contrôle. L'ensemble unité de contrôle, unité arithmétique et logique, mémoire centrale, constitue l'unité centrale (Central Processing Unit : CPU). Les informations sont ressorties pour l'utilisateur par l'intermédiaire de périphériques de sortie : perforateur de ruban ou de cartes, claviers de télétypes, écrans de visualisation, imprimantes, mémoires magnétiques, convertisseurs digitaux analogiques agissant sur le procédé commandé.

Dans le cas d'entrée ou de sortie par mémoire magnétique, on s'aperçoit que dans ce schéma coexistent deux organes à fonction mémoire : c'est pour cela qu'on distingue mémoire interne et mémoire externe. Dans les ordinateurs des premières générations, il arrivait qu'on trouvât un tambour magnétique en mémoire interne. La différence essentielle exigée aujourd'hui entre ces deux types de mémoire est le temps d'accès. Les mémoires externes seront des organes peu coûteux mais à forte capacité, donc de temps d'accès important. Les mémoires internes doivent avoir un temps d'accès faible, elles sont de capacité plus faible et, en principe, plus onéreuses.

Ces dernières années, la vitesse de travail de l'unité arithmétique et logique et de l'unité de contrôle a énormément augmenté. Pour utiliser cette possibilité, la taille nécessaire de la mémoire interne augmente. Une fois l'information traitée, il est nécessaire d'alimenter le calculateur en nouvelles informations venant des mémoires extérieures. Celles-ci étant lentes, le processeur d'entrée sortie ne va pas fonctionner avec un rendement important. Pour résoudre ce problème, deux méthodes sont actuellement proposées : soit trouver des technologies de mémorisation peu onéreuses, mais rapides et autorisant une conservation importante, c'est la recherche d'une solution « hardware » ; soit utiliser le logiciel en créant une hiérarchie des mémoires. L'écart entre la vitesse de la mémoire externe et celle de la mémoire interne est comblé par une mémoire intermédiaire de capacité supérieure à celle de la mémoire interne et plus rapide que la mémoire externe. Ainsi, entre un disque et la mémoire interne, on peut placer une mémoire à tores de ferrite, de bonne capacité, mais moins lente : c'est le principe de la mémoire tampon (« buffer »). Une autre solution est d'augmenter les possibilités de contrôle du CPU. Quand cet organe peut connaître de quelle information il aura besoin une fois son travail terminé, on peut transférer ces informations en temps voulu dans la mémoire interne. Dans ces conditions, le calculateur présente une mémoire interne de temps d'accès rapide (celui de sa réelle mémoire interne) et de grande capacité (celle de sa mémoire externe) : c'est la solution nommée mémoire virtuelle, qui demande un contrôle complexe (savoir quel morceau du programme est dans telle partie de la mémoire...). Depuis dix ans, une autre différence de rapidité est apparue, entre les mémoires à tores de ferrite et l'unité arithmétique et logique à base de circuits transistorisés : on a comblé cette différence par l'adjonction dans les gros systèmes d'un cache-mémoire dont la gestion est assurée par l'unité de contrôle mémoire.

Bref historique

Dès 1833, l'ingénieur anglais Charles Babbage proposait la construction d'une mémoire mécanique destinée à conserver, non seulement les nombres nécessaires au calcul, mais aussi les instructions demandées pour effectuer ces calculs, ce qui était nouveau. La capacité était de 1 000 nombres, chacun de 50 chiffres décimaux...

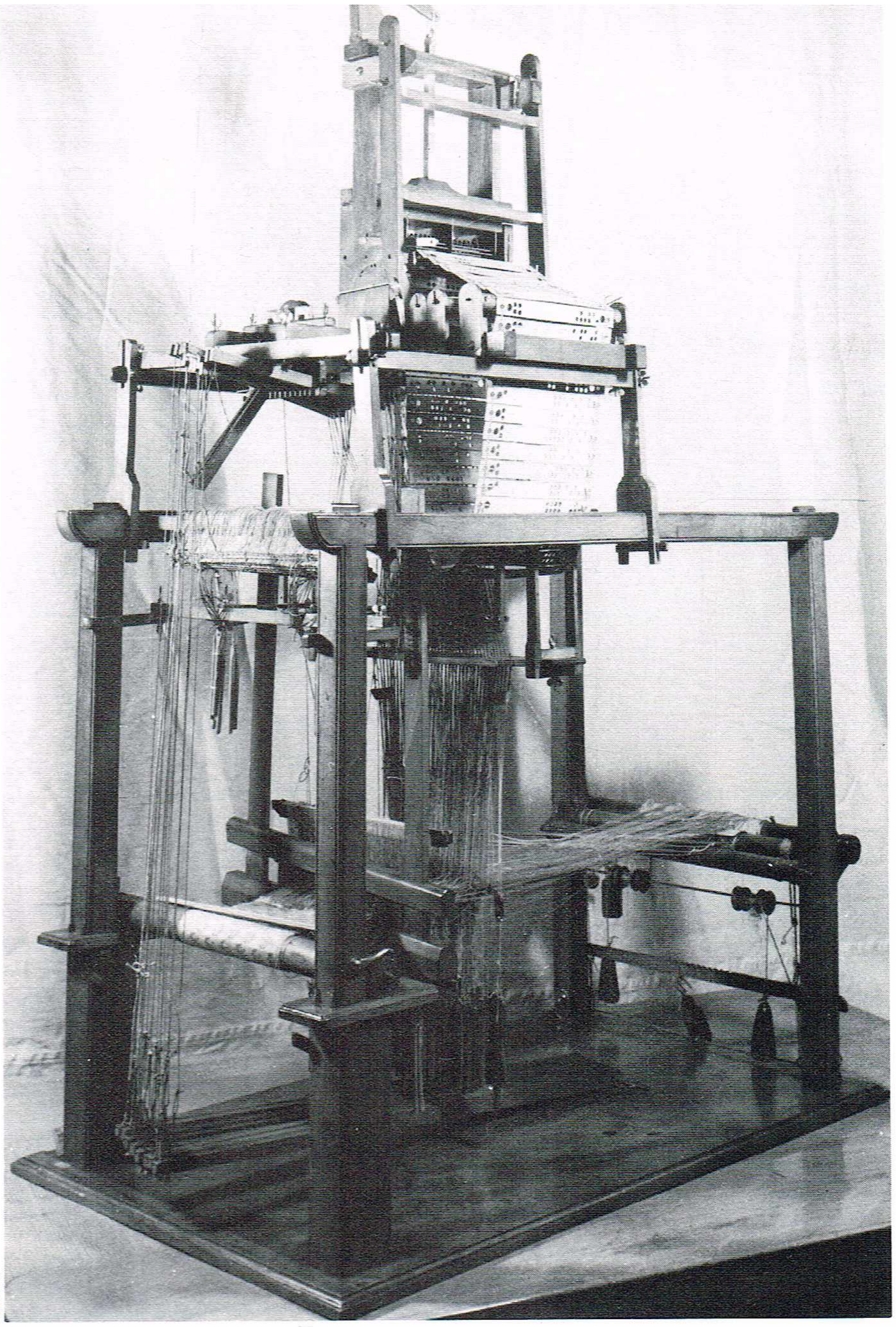

I.B.M.

▲ ***La machine de Falcon (1728) utilise pour la première fois la carte perforée pour la commande des fils de chaîne. Ce principe sera repris et amélioré en France par Jacquart.***

▼ *Figure 1 : schéma de principe d'un calculateur.*

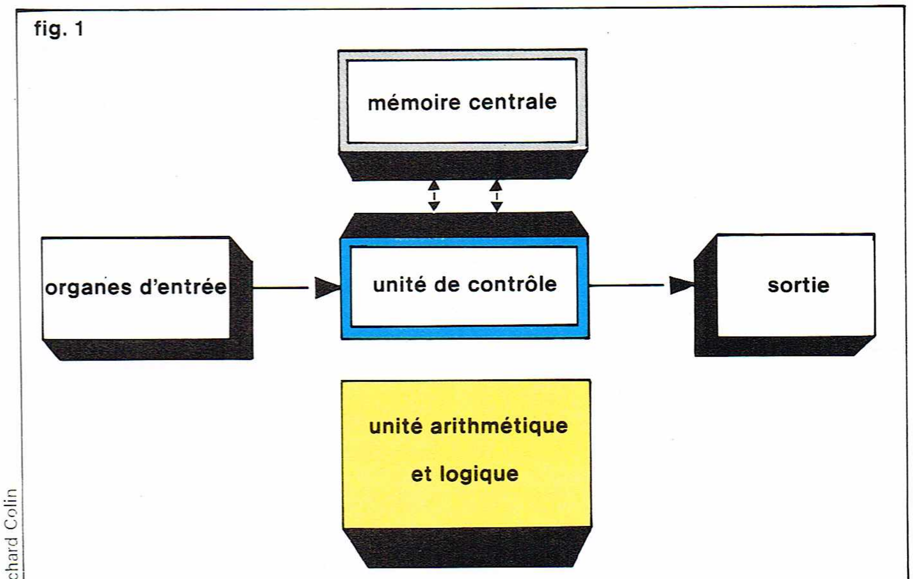

Richard Colin

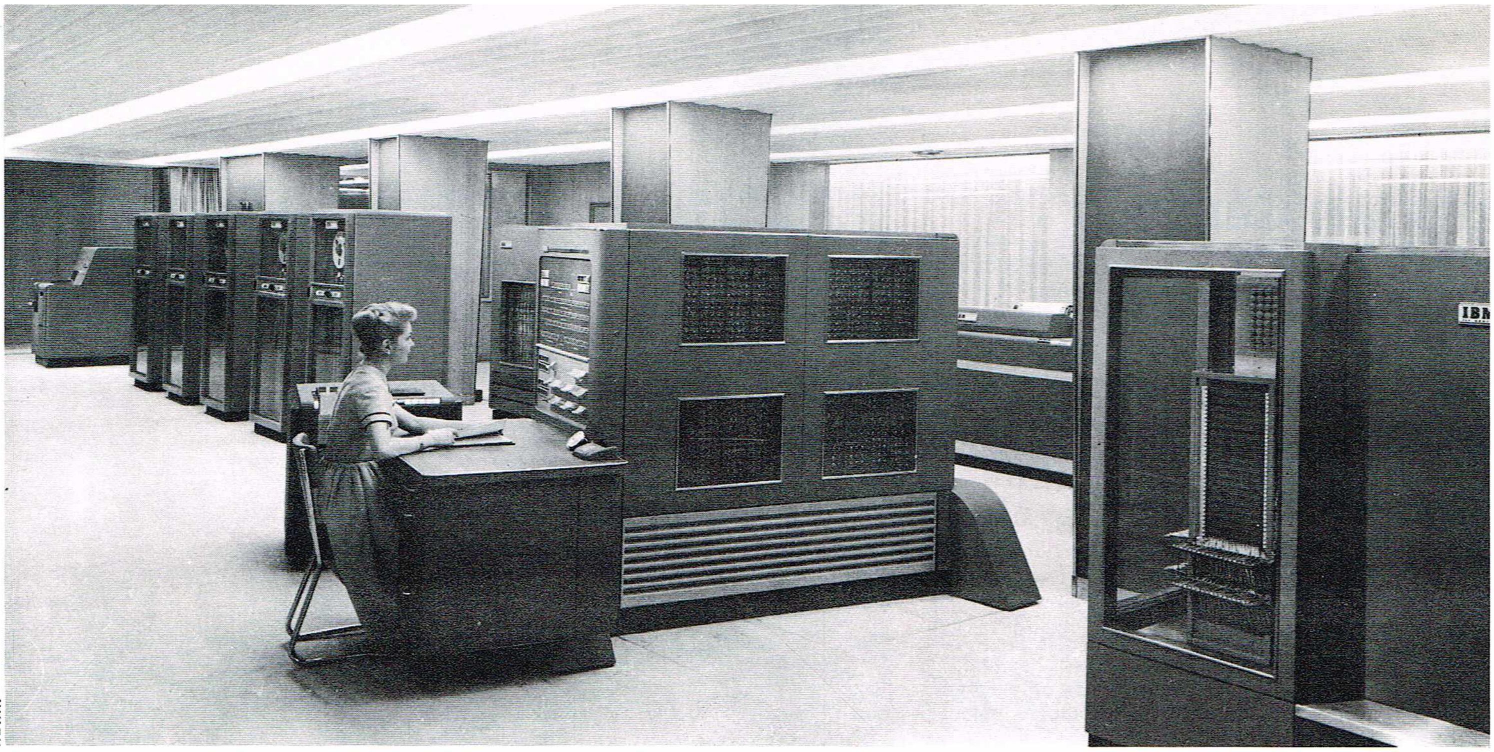

I.B.M.

▲ *L'ordinateur IBM 704, mis en vente en 1954, pouvait être équipé d'une mémoire électrostatique ou d'une mémoire magnétique à tores.*

▶ *Figure 2 : schéma de principe de la cellule de base de la mémoire du calculateur SEAC mis au point en 1951 aux États-Unis par le « National Bureau of Standards ». Cette cellule de base comprenait deux diodes et un condensateur.*

▼ *Figure 3 : schéma d'ensemble des différents organes intervenant dans les transferts et les opérations à l'intérieur d'un ordinateur.*

mais cette mémoire ne vit pas le jour, à cause des limites imposées par la construction d'organes mécaniques à cette époque. Les chiffres devaient être conservés à l'aide de roues dentées et les instructions à l'aide de cartes perforées (déjà utilisées en France par Jacquard pour les métiers à tisser). Sur ce modèle naquit en 1944 l'un des premiers calculateurs, le Harvard Mark 1 (mémoire de 72 nombres, chacun ayant 23 chiffres décimaux).

En 1941, Berey (université de l'Iowa) avait proposé une nouvelle technologie de mémorisation : un tambour rotatif portant 32 pistes, chacune ayant 51 condensateurs. Le signe de la charge du condensateur indiquait le chiffre binaire. L'unité arithmétique associée pour former le premier calculateur électronique utilisait 300 tubes à vide.

C'est en 1945 qu'est créé le fameux ENIAC (Electronic Numerical Integrater and Calculation) à l'université de Pennsylvanie, qui comportait 18 000 tubes ! Sa mémoire était faible (20 chiffres décimaux), constituée de registres à base de tubes à vide. Une autre machine à calculer, l'EDVAC (Electronic Discrete Variable Automatic Computer), possédait une mémoire plus importante pour les données et les instructions, mémoire réalisée par une ligne à retard à mercure. En Angleterre, à l'université de Manchester, on a employé dès 1948 un tube à rayons cathodiques (tube de Williams) comme mémoire. La lecture de l'information était faite par bombardement électronique de l'écran (la lecture était destructrice, il fallait régénérer l'information). C'est aussi la première utilisation d'un tambour magnétique. En 1954, IBM propose son calculateur 704 équipable soit d'une mémoire électrostatique, soit d'une mémoire magnétique à tores. IBM équipe aussi son modèle 650 d'un tambour. Dès 1950, Harvard III (à l'université de Harvard) utilisait comme entrée sortie une bande magnétique. Harvard IV, le calculateur suivant, innove avec, comme organe de mémoire rapide, des registres à décalage magnétiques.

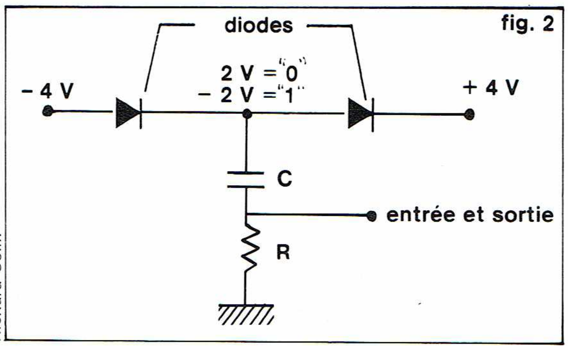

Richard Colin

En 1951, le « National Bureau of Standards », pour son calculateur SEAC, développe une mémoire dont la cellule de base est constituée de deux diodes et d'un condensateur (*fig.* 2) : capacité de 256 mots de 8 chiffres binaires, temps de cycle de 6 μs. A partir de 1951, J. W. Forrester et W. N. Papion développent au Massachusetts Institute of Technology une mémoire magnétique à ferrite. Le premier calculateur utilisant cette mémoire date de 1953. Ses avantages sont si évidents que bientôt tout nouveau calculateur utilise les ferrites. En 1955, Blais propose la mémoire à film magnétique, et, en 1960, Long l'améliore avec une nouvelle technologie moins chère. Des mémoires de ce type ont été utilisées par UNIVAC dans la série des 9000 jusqu'en 1966. Vers 1956 naissait le disque magnétique, qui est encore aujourd'hui l'organe de conservation le plus utilisé.

Les premières mémoires à semi-conducteur ont été commercialisées par IBM en 1965 dans la série 360/85 : en fait, une partie seulement de la mémoire était à semi-conducteur. C'est en 1970 seulement que l'IBM 370/145 présente une mémoire entièrement à semi-conducteurs. Cela marque vraisemblablement le début du déclin de la mémoire à tores.

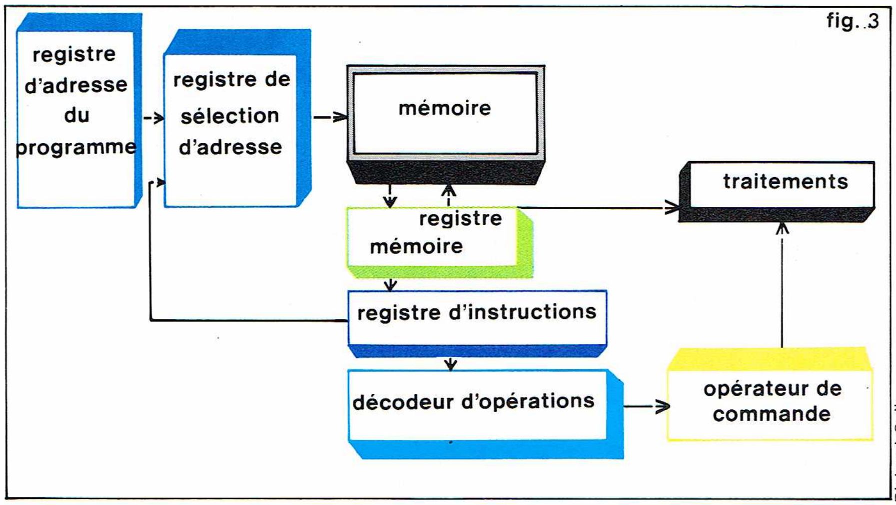

Richard Colin

Organisation générale d'un ordinateur

Nous donnerons ici un schéma d'ensemble des différents organes composant un ordinateur, afin de replacer la fonction mémoire dans son contexte. Un ordinateur est un organe mécanique et électronique destiné à traiter l'information. Ce traitement se fait à partir de deux types d'opérations : des opérations de transfert et des opérations spécialisées dans des cellules. A chaque instant, des circuits de commande déterminent quels transferts et quelles opérations sont à réaliser. Ces circuits prennent dans les mémoires les informations nécessaires à la réalisation du traitement. Le traitement a été déterminé par un programme, suite d'instructions, écrit par l'utilisateur, généralement dans un langage dit « évolué » (FORTRAN,

COBOL, PL1, etc.). Ces instructions sont transcrites dans un langage dit langage machine dont le décodage permettra la commande directe des circuits. Pour simplifier, nous supposons que ce programme final est mémorisé, placé en mémoire centrale, et aussi que la suite logique des instructions est rangée en mémoire en séquence à partir d'une position de départ connue. Les organes intervenant sont alors le registre d'instruction, le registre d'adresse, le décodeur d'opération, l'opérateur de commande (*fig.* 3).

A partir de l'adresse de l'instruction contenue dans le registre d'adresse du programme et transmise au registre d'adresse de la mémoire, on trouve en mémoire l'instruction qui est transférée au registre d'instruction. L'adresse de l'instruction est incrémentée de 1, ce qui permettra d'aller chercher l'exécution suivante une fois que l'instruction en cours aura été exécutée et mise dans le registre d'adresse.

L'instruction est décodée, et la partie opération est transmise au décodeur d'opération, qui commande à l'opérateur de commande une configuration de signaux qui permettront d'exécuter l'ordre contenu dans l'instruction. Lorsque cette dernière a été exécutée, un signal de fin d'instruction indique qu'on doit prendre l'adresse de l'instruction suivante.

La solution choisie pour enchaîner d'une instruction à l'autre était ici de générer un signal particulier de fin d'instruction. On pourrait procéder autrement : allouer à chaque opération une durée maximale et enchaîner sur l'instruction suivante à la fin de cette durée. C'est le principe des ordinateurs synchrones à rythmes où les transferts sont assurés par des rythmes aux instants définis par le concepteur ; l'écart entre temps réel et temps calculé risque de causer une perte de temps. Cette méthode demande une horloge électronique de bonne qualité. Dans les ordinateurs asynchrones arythmiques, nous avons encore évaluation de la durée maximale de l'opération, mais sans rythme de déclenchement : un système à retard alloue simplement à chaque opération sa durée maximale ; il y a encore risque de retard. Dans les ordinateurs asynchrones, un test évalue si l'instruction est terminée pour passer à l'instruction suivante. Ces machines sont plus chères à cause de la complexité des circuits et ne sont pas obligatoirement plus rapides, car les tests exigent du temps. En général, on préfère des machines synchrones à rythmes : il est toutefois fréquent que, dans ce type d'ordinateurs, des parties fonctionnent en régime asynchrone, en particulier pour les échanges entre l'unité centrale et les périphériques.

Essai de classification des mémoires

La mémoire est un organe central, très important, d'un système informatique : elle stocke les données, les programmes et les résultats. Rappelons que l'information va se trouver codée en alphabet binaire {0, 1} suivant des codes à longueur de mot fixe. Cette longueur de mot varie avec la qualité de l'information à coder (elle n'est pas la même, par exemple, pour un chiffre décimal et pour un caractère alphabétique). Nous ne nous préoccuperons pas dans ce qui suit du type de code utilisé, car il ne change rien au principe d'utilisation des mémoires. Dans certaines applications, on élabore à partir des mots-codes de base d'autres mots-codes de longueur plus importante, comprenant donc une partie parité ; cela permet de détecter ou de régénérer des parties modifiées.

Il existe plusieurs types de classification des mémoires, chacune ayant son avantage. Une première classification est fondée sur la notion de *capacité*, qui représente la quantité d'information stockable ou le nombre d'éléments à deux états stables qui la constituent. Elle s'exprime en bits, unité d'information habituelle. Les mémoires centrales à accès rapide ont des capacités allant de 10^5 à 10^6 bits. Les mémoires à rubans ou à disques magnétiques ont des capacités beaucoup plus grandes.

Une deuxième classification est offerte par le *mode d'accès*. L'accès est dit *aléatoire* lorsque l'information peut être lue avec un temps d'accès constant, indépendamment de l'endroit de stockage, et parce qu'on connaît son adresse. Ce mode d'accès est associé aux *mémoires statiques* dans lesquelles l'information est stockée aussi longtemps qu'on le désire. Le mode d'accès est dit *séquentiel* si la mémoire n'est pas adressable et s'il faut attendre le positionnement devant l'organe d'écriture ou de lecture de l'emplacement cherché. C'est le cas des mémoires à ruban magnétique. Ces mémoires sont dites *cinématiques*. Le mode d'accès est dit *semi-séquentiel* s'il est une combinaison des deux modes précédents. Ainsi, dans un disque magnétique, le choix de la piste est à accès aléatoire, mais la sélection dans la piste est à accès séquentiel. C'est aussi le mode d'accès des tambours magnétiques.

A côté des mémoires statiques et cinématiques, on distingue les *mémoires dynamiques* et les *mémoires à défilement*. Dans les mémoires dynamiques, l'information doit être régénérée périodiquement, le mode d'accès peut être séquentiel ou aléatoire. Dans les mémoires à défilement, les chiffres binaires d'information se propagent le long d'une « ligne », sont régénérés en sortie et réappliqués à l'entrée. Leur mode d'accès est obligatoirement séquentiel.

Une des caractéristiques des mémoires est leur *temps d'accès*. Le temps d'accès est le temps nécessaire pour extraire 1 bit de la mémoire. Ce temps d'accès est actuellement de l'ordre de 150 nanosecondes pour les mémoires à technologie MOS. Il faut se rappeler qu'il était de l'ordre

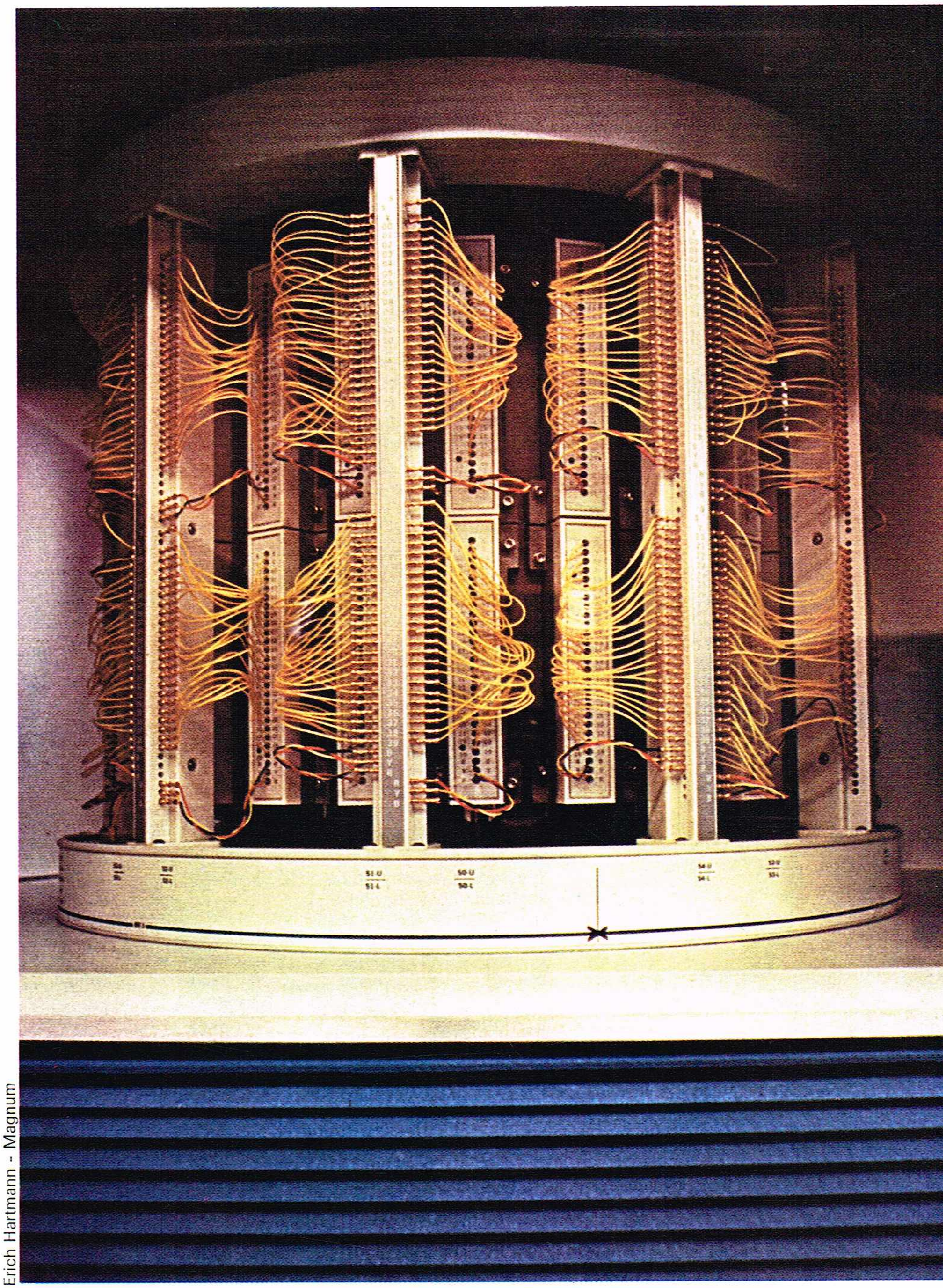

Erich Hartmann - Magnum

▲ ***Exemple de mémoire d'ordinateur : la mémoire est un organe central qui stocke les données, les programmes et les résultats ; l'information s'y trouve codée en code binaire.***

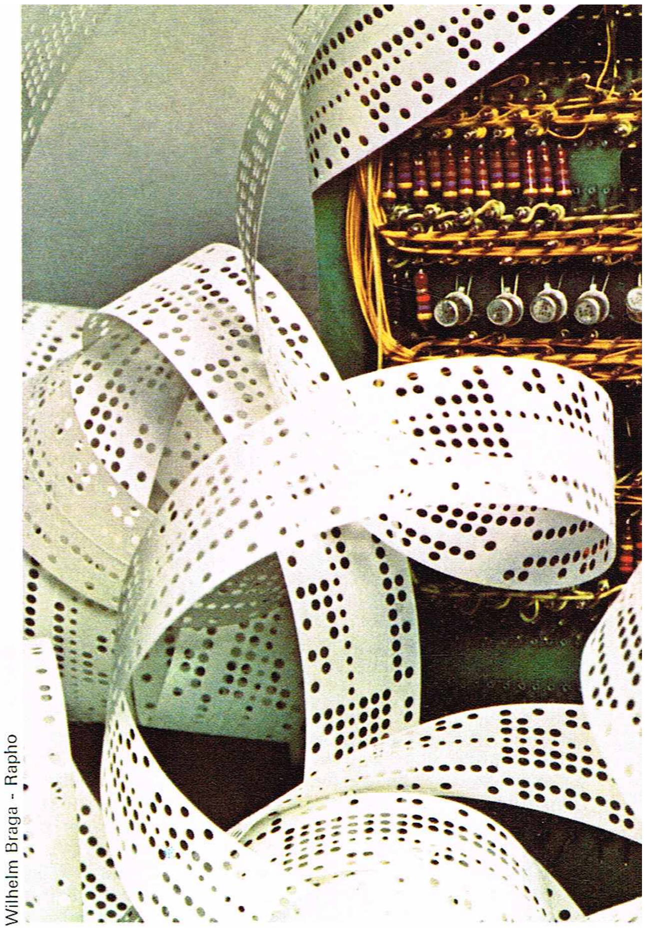

Wilhelm Braga - Rapho

▶ ***Les rubans perforés sont des mémoires utilisées surtout en fichiers ; leur écriture et leur lecture sont séquentielles.***

de la milliseconde pour les ordinateurs de la première génération. La limite imposée à la diminution de ce temps est la vitesse de la lumière, puisque l'information, présente sous forme d'impulsions électriques, ne peut aller à une vitesse supérieure à celle de la lumière dans le milieu constitué par les câblages (15 à 20 cm pour 1 ns). Donc, pour une distance de 1 mètre entre la mémoire et l'unité de calcul, le temps d'accès sera de l'ordre de 6 nanosecondes. La diminution du temps d'accès dépend de celle de la longueur des interconnexions, c'est-à-dire de la compacité des circuits (intégration à grande échelle des composants).

Un cycle de mémoire est constitué d'une opération de lecture et d'une opération d'écriture. Remarquons que certaines mémoires dites permanentes n'autorisent pas des opérations d'écriture. La durée du cycle est bien évidemment liée au temps d'accès. Ce dernier peut représenter 50 % de la durée du cycle pour les mémoires statiques. Pour une mémoire cinématique, par exemple un ruban magnétique, le temps d'écriture ou de lecture est négligeable devant le temps d'accès. D'ailleurs, le temps d'accès varie suivant l'endroit où est l'information et l'endroit où s'est arrêtée la bande après l'opération précédente.

Une opération de lecture peut être de deux types : destructive ou non destructive. Dans le premier cas, il faut récrire l'information, car l'opération de lecture a laissé la mémoire dans un état non défini. Dans le second cas, c'est inutile, car il n'y a aucune modification du contenu de la mémoire.

Les *puissances* consommées et dissipées sont aussi deux paramètres importants. Le choix du composant de base dépend en effet de ces deux facteurs, puisqu'on réalise des assemblages de plus en plus importants.

Citons enfin un dernier paramètre qui est employé pour les mémoires à débit séquentiel, le *débit d'information*. Le débit est la quantité d'information lue (ou écrite) par unité de temps. On peut atteindre actuellement plusieurs centaines de milliers de bits par seconde.

Organisation des mémoires

Comme le bit, plus petit élément d'information stockable dans une mémoire, est trop petit pour développer des manipulations complexes, plusieurs assemblages sont utilisés :

— le caractère à 4 bits permet de faire des calculs décimaux ($2^4 = 16) > 10$;

— le caractère à 6 bits permet de coder 64 symboles, 26 lettres, 10 chiffres ou 28 symboles spéciaux (signes algébriques, ponctuation, dollar...) ; ce caractère ne permet qu'un type de lettres ;

— l'octet ou caractère à 8 bits dont on utilise 7 chiffres pour l'information. On peut coder 128 symboles (majuscules, minuscules, chiffres, etc.). Le huitième digit est un chiffre de contrôle de parité. C'est l'assemblage le plus courant actuellement.

Pour représenter des entrées plus complexes du type code d'une instruction, on utilise le mot. Un des premiers minicalculateurs, le PDP 8 de Digital Equipment, fonctionnait en mots de 12 bits. Actuellement, on s'oriente vers des mots dont la longueur est un multiple de l'octet (mots de 16, 32 ... bits). Le choix du type de mot dépend de la destination préférentielle que le constructeur attribue à l'ordinateur. Si ce dernier doit servir à plusieurs types d'applications très différentes, on choisit une longueur de mot, on sait alors que certains problèmes exigeants en précision demanderont que l'on travaille par exemple en doubles mots.

Dans une mémoire, on groupe les mots en blocs, ce qui permet de diviser la recherche d'un mot en deux temps : localisation du bloc, recherche du mot dans le bloc. La taille des mémoires adressables est actuellement trop importante pour rechercher directement un mot.

Méthodes de consultation des mémoires

Pour un ordinateur, on ne peut parler d'*une* mémoire. Dès que le travail demandé est important, la taille exigée pour la mémoire centrale, la plus rapide, est élevée, donc son coût important. Du fait donc de ces possibilités de stockage limitées, on utilise des mémoires de masse de grande capacité mais de temps d'accès plus élevé (tambours magnétiques, disques, bandes magnétiques). Les informations situées sur ces mémoires ne sont pas directement traitables, il faut les faire transiter par la mémoire centrale pour effectuer des opérations en les utilisant.

Les méthodes de consultation se scindent en deux suivant que la mémoire est adressable ou ne l'est pas. Dans le cas des *mémoires adressables*, on repère un élément par son adresse. La donnée d'une adresse permet l'accès direct à l'élément qu'elle désigne, c'est une consultation aléatoire. Il ne faut pas confondre adresse et contenu de l'élément mémoire, de même qu'on ne confond pas l'adresse d'un appartement dans un quartier avec les personnes qui l'habitent. Ces mémoires sont réalisées en tores magnétiques, films minces magnétiques ou semi-conducteurs. Dans une mémoire non adressable, on a un accès séquentiel à l'information, puisqu'on ne peut accéder directement à elle. Pour extraire une information, on peut opérer par un déroulement séquentiel exhaustif qui est la méthode la plus simple, ou par des repérages.

Ainsi, si les informations sont ordonnées et repérées par un numéro, on peut ne lire que n informations. On peut aussi placer en tête de chaque information une étiquette qui la caractérise ; pour la recherche d'une information dont on connaît nécessairement l'étiquette, on lit alors successivement les indicatifs jusqu'à trouver la coïncidence. Cela nécessite de lire toujours la mémoire à partir de son début. Les tambours magnétiques, les disques magnétiques sont des exemples de mémoires non adressables.

Exemples de mémoires

Parmi les mémoires adressables, les plus utilisées jusqu'à présent sont les **mémoires à tores de ferrite.** Leurs capacités peuvent être de l'ordre de plusieurs millions de bits. Avec des temps de cycle plus petits (300 ns), on trouve les **mémoires à films magnétiques minces.** Actuellement se développent les **mémoires à semi-conducteurs** (ainsi, en 1976, avec une technologie MOS Canal N, une mémoire de 4 096 bits avec un temps d'accès de 150 ns).

Les **tambours magnétiques** peuvent aussi être adressables, mais on les classe plutôt parmi les mémoires non adressables. Il s'agit de cylindres recouverts d'un matériau magnétique tournant devant des têtes magnétiques. On appelle piste la zone située devant chaque tête. Le temps de consultation moyen est celui d'une demi-rotation du tambour. Une bonne utilisation est d'inscrire des quantités d'information occupant presque totale-

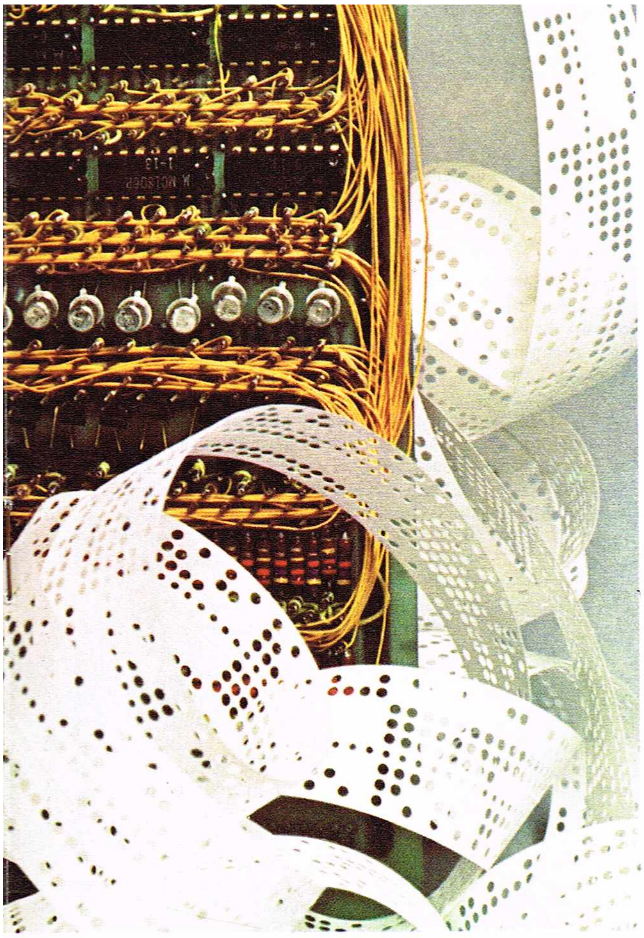

ment une piste. Dans ce cas, on a une consultation aléatoire, puisqu'il suffit de désigner la piste. Leur capacité peut être très grande.

Un **disque magnétique** est un disque recouvert de matériau magnétique tournant devant des têtes de lecture. La surface est divisée en pistes, ce qui permet un adressage par piste, puis une lecture séquentielle de la piste. Ici encore, il est souhaitable qu'un bloc d'information occupe environ une piste. Quand il n'y a qu'un disque et une tête de lecture, la consultation se fait comme nous l'avons indiqué et le temps de consultation comprend le temps de déplacement de la tête, le temps d'accès au bloc, puis le temps de lecture. Quand il y a plusieurs disques et une tête de lecture par face, la consultation se fait par adressage du disque et de la piste, puis recherche séquentielle sur cette dernière. Quand il y a plusieurs faces et une tête par piste, les têtes de lecture n'ont plus besoin d'être déplacées.

Le **ruban magnétique** est certainement la mémoire la moins chère : un ruban recouvert de matériau magnétique défile devant une tête de lecture et une tête d'écriture. Le temps d'accès n'a pas ici d'intérêt, en revanche on peut caractériser ces mémoires par le débit d'information (au maximum 100 000 caractères par seconde). A cause de leur grande capacité, ces mémoires sont utilisées essentiellement en fichiers.

Des **lignes à faible vitesse de propagation** sont utilisées aussi en mémoires. L'information circule sur la ligne : quand elle parvient en sortie, elle est régénérée et réinjectée à l'entrée. Elle tourne donc constamment et peut être extraite en bout de ligne. Les lignes à magnétostriction présentent les plus fortes capacités (temps de circulation entre 500 μs et 3 ms pour 2×10^6 bits). C'est une mémoire adressable, car on connaît le rang de l'information.

Des **mémoires fixes à éléments passifs** (résistances, capacités...) sont aussi réalisées une fois pour toutes ; elles sont adressables et non modifiables. Seule la lecture est possible.

Citons encore comme mémoires les **cartes et rubans perforés.** Ce sont surtout des mémoires utilisées en fichier. Une carte peut représenter 80 caractères représentés par 1, 2 ou 3 trous sur 1, 2 ou 3 lignes parmi 12 sur chaque colonne. Le ruban fonctionne sur le même principe, mais il est séquentiel à l'écriture comme à la lecture. Ce sont des mémoires non adressables.

Nous allons maintenant donner les éléments technologiques élémentaires pour la compréhension des cellules unitaires de mémoire.

Les cellules de mémoires magnétiques

Rappel de ferromagnétisme

Les propriétés magnétiques d'un matériau proviennent de l'existence de moments magnétiques dans les atomes. Le phénomène macroscopique observé est dû à la combinaison de ces moments élémentaires : il résulte de l'alignement sur une direction de ces moments. Pour expliquer le ferromagnétisme, Weiss a émis l'hypothèse de l'existence, dans les atomes présentant ces propriétés, d'un type d'interaction différent des interactions électriques ou magnétiques, le champ moléculaire. Sans entrer dans le détail, disons que l'action des champs moléculaires est de constituer des domaines aimantés à saturation. Au contraire, une action magnétique partage à l'infini ces domaines. Par conséquent, à l'état d'équilibre, tout corps ferromagnétique va se présenter comme un assemblage de domaines dans lesquels la matière est aimantée à saturation ; ces domaines sont de l'ordre de la centaine de microns, ils sont observables par l'utilisation de l'effet magnéto-optique de Kerr.

Dans un matériau désaimanté, l'aimantation observée est nulle, car les aimantations des domaines se compensent. Si on applique un champ extérieur croissant, il y a d'une part déplacement des parois des domaines (les domaines orientés dans le sens du champ grandissent) et d'autre part rotation de l'aimantation pour se rapprocher de celle du champ. On observera un phénomène d'hystérésis, car, au cours d'une décroissance du champ, les domaines ne retrouvent pas leurs configurations initiales.

Les phénomènes **ferromagnétiques** sont liés à l'état cristallin de la matière. Un cristal ferromagnétique n'est jamais isotrope quant à ses propriétés magnétiques. Pour une valeur du champ appliqué, on obtient dans une certaine direction, dite de facile aimantation, une aimantation forte, tandis que, pour le même champ, l'aimantation obtenue sera faible dans la direction de difficile aimantation. Ces directions correspondent aux axes de symétrie du cristal. Ainsi, le cristal de fer de forme cubique présente trois axes de facile aimantation, les axes parallèles aux arêtes ; les axes de difficile aimantation sont parallèles aux diagonales du cube (*fig.* 4). L'aimantation d'un cristal dans un champ uniforme est maximale dans la direction de facile aimantation.

Un phénomène plus complexe est l'**antiferromagnétisme.** Dans ce cas-là, le corps présente bien un alignement parallèle de tous les moments magnétiques des atomes, comme pour le ferromagnétisme, mais ces moments sont orientés alternativement dans un sens et dans l'autre.

Si, de plus, les moments magnétiques ne se compensent pas, il existe une aimantation spontanée, c'est le **ferrimagnétisme,** propriété présentée par les ferrites. Les ferrites à base de manganèse sont des éléments de base des mémoires, car elles présentent un cycle d'hystérésis à peu près rectangulaire, ce qui permet de stocker les deux états d'une variable binaire. De plus, comme la valeur du champ minimal pour le basculement d'un état à l'autre est faible, cela permet de consommer peu d'énergie pour leur commande.

Les ferrites sont obtenues après broyage d'oxydes, moulage sous pression, puis cuisson à 1 200 °C ; leurs propriétés mécaniques sont proches de celles des céramiques.

Mémoires à tores de ferrite

Environ 60 % des mémoires des calculateurs sont actuellement constituées de tores de ferrite. Cette prédominance devrait bientôt faire place à celle des mémoires à semi-conducteur. La cellule de base est un tore magnétique traversé par un fil (*fig.* 5) ; le courant dans le fil crée un champ magnétique $\vec{H}$ qui produit une induction magnétique $\vec{B}$ dans le tore. Un champ $\vec{H}$ positif créé par une impulsion de courant va entraîner le point de fonctionnement (*fig.* 6) au-delà du point α. A la fin de l'impulsion, le champ est nul, donc le point de fonctionnement est en β. Pour une impulsion de courant d'une polarité opposée, le point de repos aurait été γ. Ce cycle d'hystérésis est à peu près rectangulaire pour les tores fabriqués aujourd'hui. Les points β et γ indiquent donc le sens de l'impulsion appliquée : le tore constitue une mémoire unitaire, il suffit d'associer la valeur « 0 » ou « 1 » à chaque état.

fig. 4

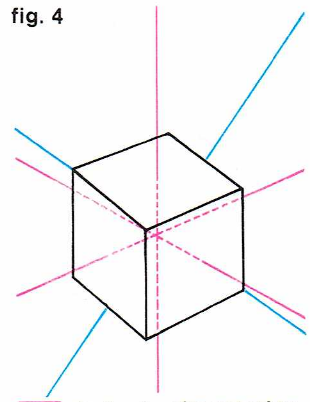

axes de facile aimantation

axes de difficile aimantation

Richard Colin

▲ ***Figure 4 :** axes d'aimantation dans un cristal de fer de forme cubique.*

▼ ***Figure 5 :** un tore de ferrite traversé par deux fils (d'écriture et de lecture) représente la cellule de base de certaines mémoires magnétiques.*

fig. 5

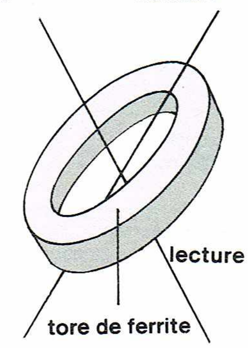

Richard Colin

▼ ***Figure 6 :** cycle d'hystérésis d'un tore magnétique (voir développement dans le texte).*

fig. 6

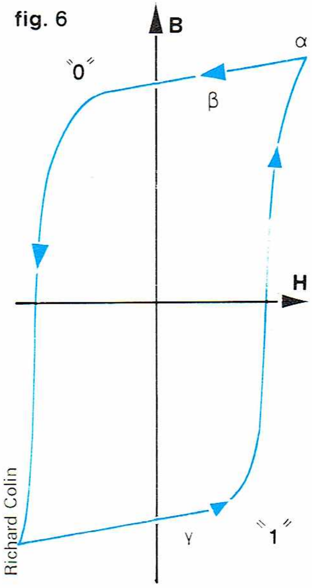

Richard Colin

▶ ***Figure 7 :** variation de la tension de lecture en fonction du temps de basculement dans les tores de ferrite pour deux valeurs de l'intensité du courant.*

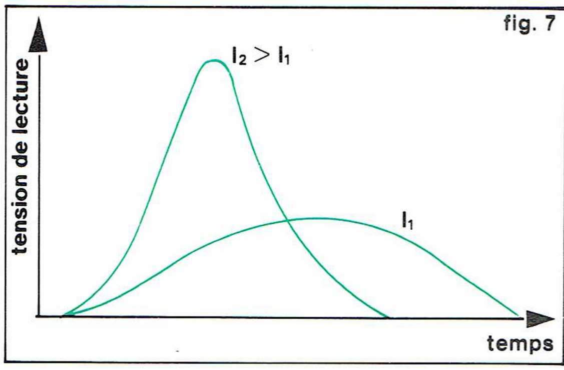

Pour utiliser une mémoire, nous devons effectuer deux opérations : l'écriture et la lecture. Pour un tore, la lecture est destructive. Pour écrire, on envoie une impulsion de courant dans le fil d'écriture : le sens est choisi de manière que le point de fonctionnement soit en β ou en γ (écriture d'un « 0 » ou d'un « 1 »). Pour lire, on envoie une impulsion de courant dans le fil d'écriture de manière à amener le point de fonctionnement au-delà de α. Si un « 0 » est écrit, il y aura faible variation de l'induction, donc faible impulsion sur le fil de lecture. Si un « 1 » est écrit, au contraire, on aura une forte impulsion de courant sur ce fil. En fin de lecture, quel que soit le chiffre lu, le point de fonctionnement est en β. Pour écrire un « 1 », on envoie une impulsion de courant dont le sens est tel que le point de fonctionnement est en γ ; on envoie une impulsion de signe opposé pour écrire un « 0 ».

L'utilisation de tores de ferrite comme unité élémentaire de mémoire pose d'énormes problèmes technologiques : il faut fabriquer des millions de tores avec des propriétés magnétiques et cristallographiques identiques. Après fabrication, on procède à des tests : test d'uniformité pour s'assurer des propriétés équivalentes de la production, test d'ensemble lorsque les tores sont assemblés en matrices et donc reliés par un ensemble complexe de fils (ce test est particulièrement utile pour les mémoires 3 D — à trois dimensions — où les basculements sont obtenus par coïncidence de courant).

On a intérêt à fabriquer des tores petits, d'abord pour des raisons d'encombrement, ensuite à cause de la vitesse de basculement. En effet, quand le courant destiné à faire changer d'état le tore augmente, le temps de basculement T diminue. Puisque l'aire sous la courbe est constante, la tension lue augmente (*fig.* 7). Pour un champ magnétique de valeur supérieure au champ coercitif (champ minimal pour entraîner un basculement), ce temps de basculement et le champ magnétique sont liés par la relation

$$T (H - H_c) = K.$$

Le coefficient K, facteur de commutation, est d'autant plus faible que le tore est petit. Par exemple, pour un courant de 400 mA, le temps de basculement est de 2 μs avec un diamètre de tore de 2 mm, de 1 μs avec un diamètre de 1,25 mm, de 0,7 μs avec 0,8 mm.

Pour accélérer le fonctionnement, on peut aussi employer la technique du basculement partiel. Cette technique, utilisée pour les mémoires à deux dimensions, est maintenant abandonnée à cause des progrès de la technologie. La lecture se fait par un courant suffisant pour entraîner un basculement complet du tore. En revanche, pour l'écriture d'un « 1 », le basculement est partiel, car le courant d'écriture revient à zéro avant que le tore ait basculé complètement.

Les paramètres du tore sont liés à la température. On a vu qu'on augmentait les vitesses de basculement en diminuant la taille des tores ; mais alors on doit prendre des fils de lecture ou d'écriture à faible section, donc à forte dissipation Joule. La quantité de chaleur dissipée dans une mémoire rapide à tores entraîne des augmentations de températures telles que les conditions de fonctionnement peuvent être modifiées. Par exemple, le champ coercitif H_c est une fonction de la température. Ainsi, pour des durées de cycle de l'ordre de 500 ns, on peut assister à une augmentation de température de l'ordre de 50 °C. Une autre conséquence de l'utilisation de tores de faible dimension est le caractère non homogène des efforts mécaniques créés par les fils de liaison, effet qui peut modifier les performances attendues.

Pour obtenir des mémoires toujours plus rapides, on essaie d'améliorer les technologies de réalisation. Pour améliorer la vitesse, on peut diminuer :

— la taille du grain : on fabrique des tores à partir de grains d'environ 2 μm ; en dessous, on n'est pas assuré du caractère très rectangulaire du cycle d'hystérésis ;

— la taille du tore. Durant les vingt dernières années, la vitesse de basculement est ainsi passée de 1,5 μs à 0,1 μs. Actuellement, on semble avoir atteint la limite inférieure des dimensionnements ;

— le basculement partiel. Nous avons déjà parlé de cette technique. Ainsi Warner et Whalem ont obtenu une mémoire de 8 192 mots de 72 bits avec temps de cycle de 110 ns. L'impulsion de courant d'écriture de mot était de 500 mA et durait 30 ns. Cependant, ce type de mémoire 2 D demande beaucoup d'électronique de commande et a une densité d'information faible, aussi l'a-t-on peu à peu abandonné.

Pour diminuer le prix, on peut :

— utiliser une technologie de fabrication différente en réalisant les tores en série à partir de grandes plaques au lieu de les réaliser unité par unité (cette technique est utilisée pour les mémoires $2\frac{1}{2}$) ;

— réaliser des plans de mémoires avec le câblage en une seule fois.

Le film magnétique mince

Pour réaliser des mémoires très rapides, il semble intéressant de rechercher des éléments magnétiques monodomaines dans lesquels les phénomènes d'amortissement seront diminués. Au moment où les calculateurs munis de mémoire à ferrite prenaient leur essor, une publication de Blois (1955) sur les films magnétiques a soulevé beaucoup d'intérêt : l'auteur a montré qu'un film magnétique nickel-fer déposé par évaporation sous vide sur du verre en présence d'un champ magnétique présente un cycle d'hystérésis rectangulaire. Un tel film pouvait donc être utilisé comme élément bistable. Actuellement, les réalisations utilisent soit des couches de nickel pur, soit des couches d'alliage fer-nickel déposé sur du verre en présence d'un champ magnétique, de façon à former un plan continu de quelques dixièmes de micron d'épaisseur. On opère soit par évaporation, soit par électrolyse ; cette dernière est la plus courante : on effectue un dépôt sur un fil de cuivre d'environ 100 à 150 μ de diamètre en présence d'un champ d'orientation.

Le premier schéma d'utilisation des mémoires à film magnétique était calqué sur celui des mémoires à tores. On l'a vite abandonné à cause des couplages parasites

▼ *Un ensemble de mémoires à tores de ferrite.*

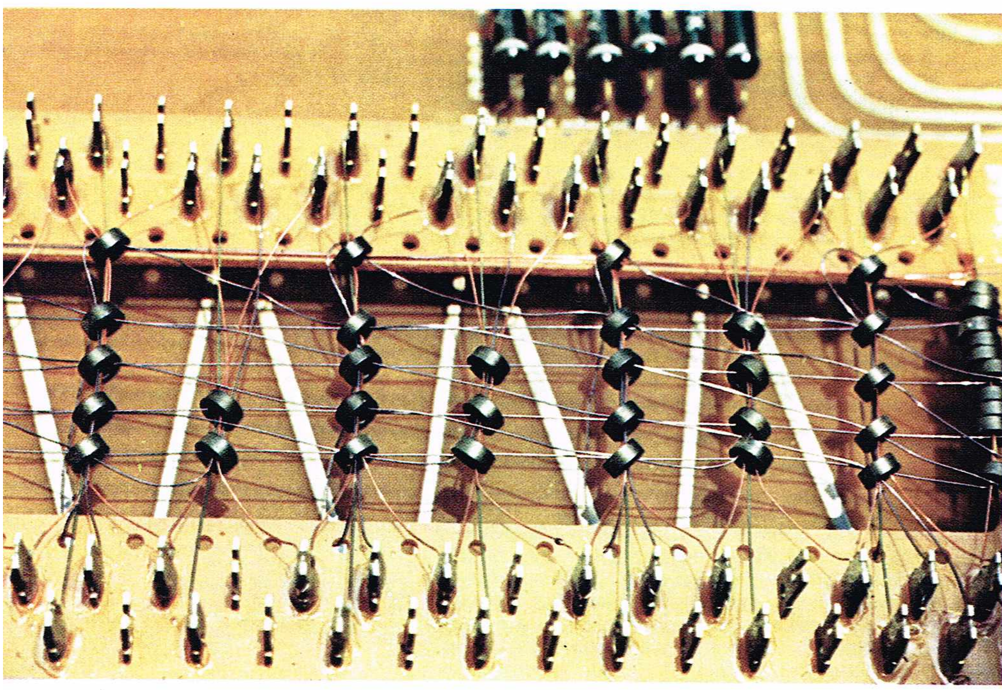

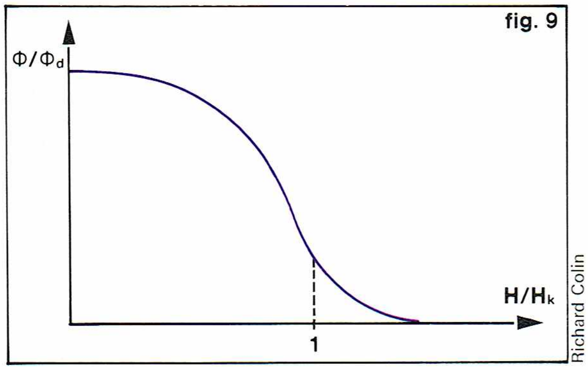

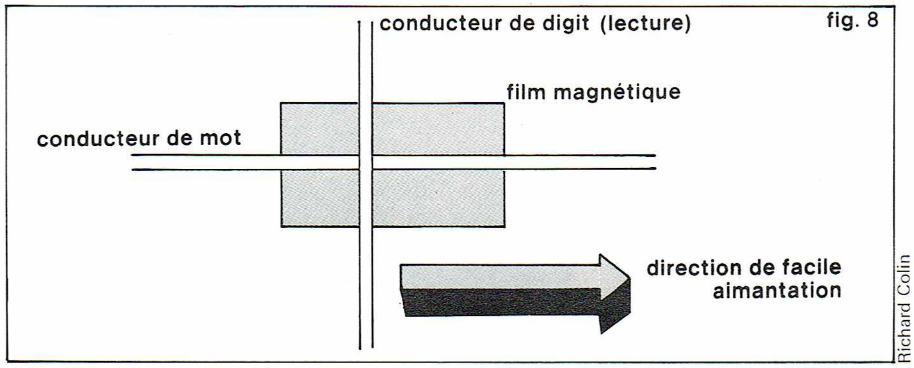

qu'il présentait. On utilise plutôt aujourd'hui le schéma de la *figure* 8. Sur chaque élément sont placés deux conducteurs : l'un parallèle à l'axe de facile aimantation, c'est le conducteur de mot, l'autre perpendiculaire au premier, c'est le conducteur de digit (méthode de sélection de Raffel). Au repos, le moment magnétique a l'une des directions de facile aimantation. L'application d'une impulsion sur le conducteur de mot champ transverse fait tourner ce moment d'un angle; si on arrêtait l'impulsion à cet instant, le moment retournerait à son état initial, et on aurait une lecture non destructive. Si au contraire le champ appliqué est supérieur à H_k, le moment devient parallèle au fil de la lecture, puisque seul le moment longitudinal existe. Et on recueille une tension soit positive, soit négative. Le sens dans lequel le moment vient sur l'axe transversal dépend du sens du courant du mot. La polarité, par contre, de la tension recueillie dépend de la différence entre le flux initial et le flux final, qui est nul. Mais cette polarité dépend du sens du moment initial: ce sens correspond soit à un « 1 », soit à un « 0 » écrit. La courbe de la *figure* 9 indique les liens entre le rapport $\frac{\Phi}{\Phi_d}$ du flux du vecteur moment au flux de ce même vecteur au repos, en fonction du rapport du champ appliqué H au champ H_k.

Après l'interruption du courant de mot, donc du champ appliqué, le moment revient de manière indéfinie soit à l'état « 1 », soit à l'état « 0 ». Pour écrire une information, on ajoute un champ parallèle au sens de facile aimantation; grâce au fil de digit suivant le sens de courant, on écrit « 1 » ou « 0 ». La *figure* 10 donne un exemple de séquence lecture-écriture. Il est à remarquer qu'apparaissent, outre les signaux de lecture, des signaux parasites dus aux rotations du moment magnétique; c'est d'autant plus gênant que les signaux de lecture sont faibles (inférieurs à 1 mV).

L'organisation de l'opération lecture-écriture avec des conducteurs de mot et des conducteurs de digit entraîne une organisation de mémoires à films magnétiques minces dites « par mot ». Tous les éléments d'un mot sont intégrés simultanément. Il faut donc beaucoup d'organes électroniques pour « lire » et régénérer. Le temps de basculement est de l'ordre de la nanoseconde, la vitesse de fonctionnement est donc limitée par les organes électroniques de commande. Un film magnétique mince possède un cycle d'hystérésis classique, du même type que celui d'un tore magnétique.

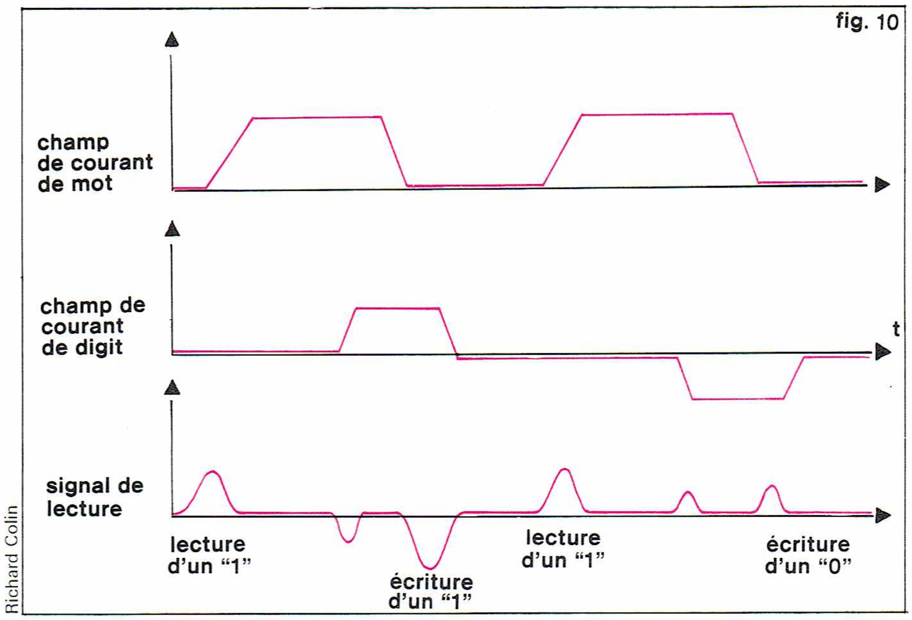

Cependant, il existe des particularités dues aux positions respectives du vecteur aimantation et du champ magnétique appliqué. Le premier cas intéressant est l'application d'un champ dans l'axe de facile aimantation (axe longitudinal). On retrouve le cycle d'hystérésis classique (*fig.* 11). Si H est très grand, le moment magnétique M est orienté suivant l'axe de facile aimantation, dans le même sens que H. Si H devient plus faible que ($-H_k$), ce moment change de signe et prend celui de $-$H. Si H croît d'une valeur négative à $+H_k$, le moment garde le signe négatif; il ne devient positif que si H dépasse la valeur $+H_k$.

Quand on applique un champ transverse (perpendiculaire à l'axe de facile aimantation), le moment magnétique présente deux composantes : l'une parallèle à la direction de facile aimantation $\overrightarrow{M_{FA}}$, l'autre orthogonale $\overrightarrow{M_{DA}}$. Pour ce qui est de $\overrightarrow{M_{DA}}$ la relation entre $\overrightarrow{M_{DA}}$ et $\vec{H}$ est donnée par la *figure* 12. M_{DA} vaut $\vec{M}$ suivant que H

▲ ***Figure 8 :** schéma d'utilisation des mémoires à film magnétique.*
***Figure 9 :** variation du rapport Φ/Φ_d en fonction du rapport H/H_k pour les mémoires à film magnétique mince.*
***Figure 10 :** exemple de séquence de lecture-écriture dans une mémoire à film magnétique mince.*

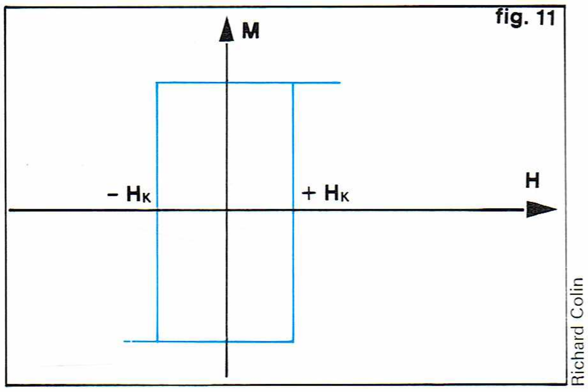

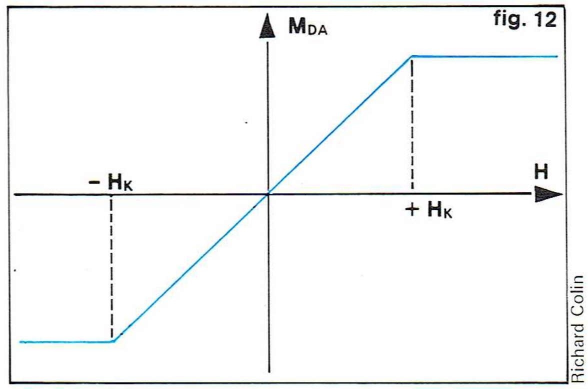

◄ ***Figure 11 :** cycle d'hystérésis d'un film magnétique mince lors de l'application d'un champ dans l'axe de facile aimantation.*
***Figure 12 :** variation de la composante M_{DA} du moment magnétique dans le film magnétique lors de l'application d'un champ transverse.*

fig. 13

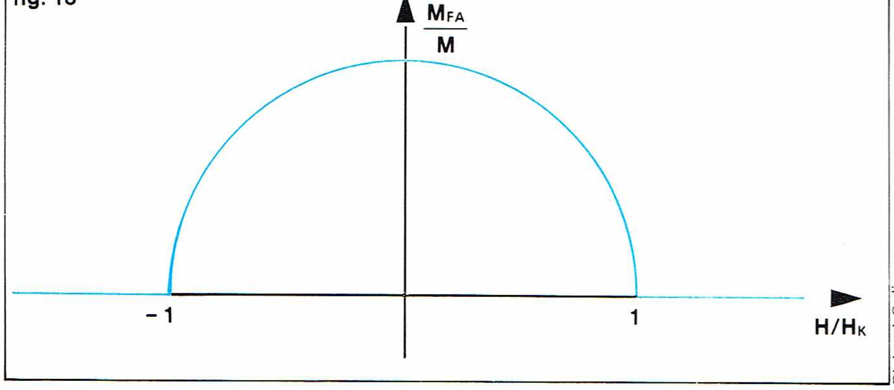

Fig. 15

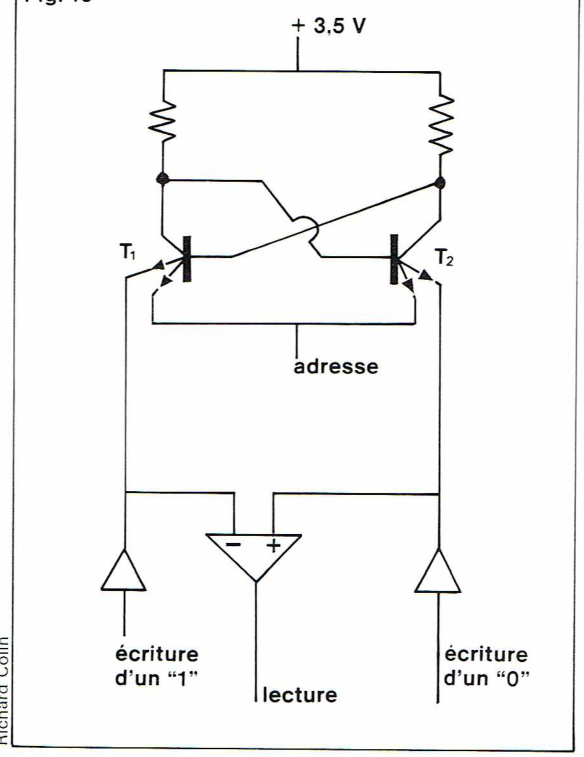

▲▶ Figure 13 : variation du rapport M_{FA}/M en fonction de H/H_k pour les mémoires à film magnétique mince.
Figure 15 : cellule de mémoire à base de deux transistors multiémetteurs.
▼ Figure 14 : schéma d'un bistable réalisé à l'aide de deux transistors T_1 et T_2 (l'un est bloqué et l'autre saturé).

fig. 14

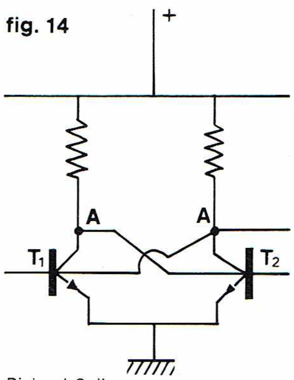

Richard Colin

est supérieur ou inférieur à — H_k. Entre ces deux valeurs, M_{DA} est une fonction linéaire de H. L'équation liant M_{FA}/M appliqué au rapport $\frac{H}{H_k}$ est celle d'un cercle tant que le champ est inférieur à H_k et supérieur à (— H_k). En revanche, le moment longitudinal est nul pour un champ supérieur à H_k ou inférieur à — H_k (*fig.* 13).

Les cellules de mémoires à semi-conducteur

On peut distinguer les mémoires à lecture seule (mémoires mortes) et les mémoires à accès (mémoires vives). Les mémoires vives peuvent être divisées en mémoires statiques où l'information est maintenue tant que l'énergie est fournie, et mémoires dynamiques où l'information se dégrade et doit donc être périodiquement régénérée, c'est ce qu'on appelle « rafraîchissement ».

Élément unitaire statique bipolaire

Il repose sur le schéma d'un bistable réalisé à l'aide de transistors (*fig.* 14). Sans entrer dans le détail du fonctionnement d'un transistor (qu'on suppose connu), ce circuit présente deux états : soit le transistor T_1 est bloqué et T_2 est saturé, soit l'inverse. Par transistor bloqué, on entend qu'aucun courant n'y circule et donc que la tension au point A se trouve portée à la valeur de la tension d'alimentation. En régime saturé au contraire, le transistor est traversé de courants électriques et la tension au point A est proche de la masse. Les deux états, « bloqué » et « saturé », sont les deux seuls stables, ce qui explique le nom de bistable donné à cet élément.

Un exemple d'utilisation est donné *figure* 15 par emploi de transistors multiémetteurs. Par convention, « 1 » correspond à une certaine tension positive, « 0 » à un niveau proche de la tension nulle (logique positive). L'état 1 correspond par convention à T_1 bloqué, T_2 saturé, l'état 0 à l'inverse. Pour lire, on sélectionne la cellule par le fil adresse qu'on porte à une tension de 2 volts, ce qui ne change pas l'état du bistable (il y a simplement inversion des rôles joués par les deux émetteurs des transistors). L'émetteur de T_2 saturé fournit du courant à une des lignes de l'amplificateur différentiel de lecture. Le choix du digit lu (1 ou 0) vient de la dissymétrie des entrées. La lecture n'est pas destructive. Pour changer l'information écrite, on agit par commande sur les deux émetteurs E_1' et E_2'. Pour écrire « 1 », on porte E_1' à 3 volts en maintenant E_2' à une tension proche de la masse (500 mV), bloquant ainsi T_1 et saturant donc T_2. L'étude de Denis J. Lynes montre que cette cellule consomme 800 μW dans l'état non adressé qui est le plus dissipateur et qu'il faut 20 ns pour écrire. Cette cellule a été utilisée dans la mémoire INTEL 3101 à 64 chiffres de temps d'accès 60 ns, dissipant 6 mW/chiffre. Elle présente l'avantage d'être compatible avec les circuits DTL (Diode Transistor Logic) et TTL (Transistor Transistor Logic). Il existe des variantes au montage précédent (couplage par diode à effet Schottky par exemple).

Mémoire statique à MOS

Un transistor MOS (Metal Oxyde Semiconductor) est un transistor à effet de champ particulier. Le transistor à effet de champ utilise deux jonctions polarisées en sens inverse donnant un fonctionnement du même type que celui de la triode. C'est un dispositif unipolaire, car le courant n'est porté que par un seul type de porteurs. Le schéma en est donné *figure* 16. Sur un substrat fortement dopé de type P^+ on dépose une couche de type N, le canal, puis on forme une zone de type P^+ (la grille) et deux de type N^+ (le drain et la source). Les caractéristiques du transistor à canal N sont données *figure* 17, elles lient le courant drain I_D à la tension drain-source pour

▶ Figure 16 : schéma de principe d'un transistor MOS *et représentation.*
Figure 17 : caractéristiques I_D en fonction de V_{DS} pour différentes valeurs de V_{GS} pour un transistor à canal N.

fig. 16

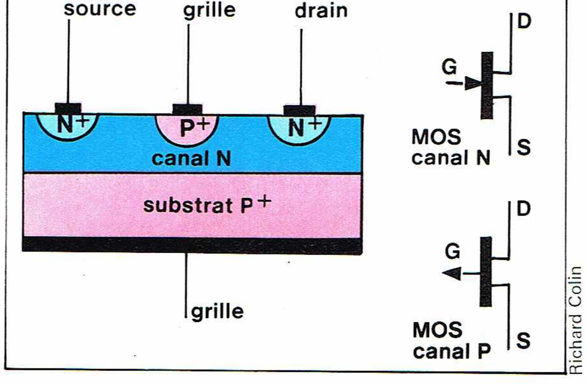

fig. 17

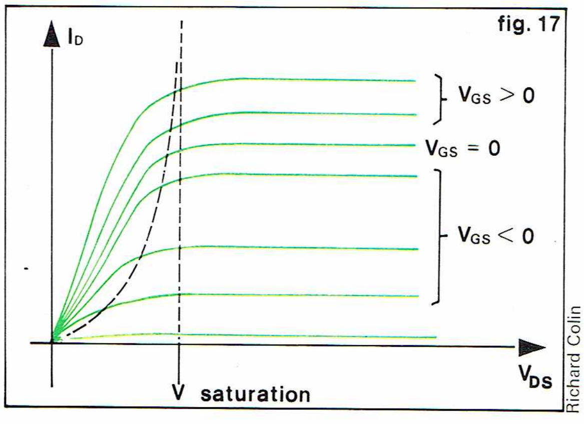

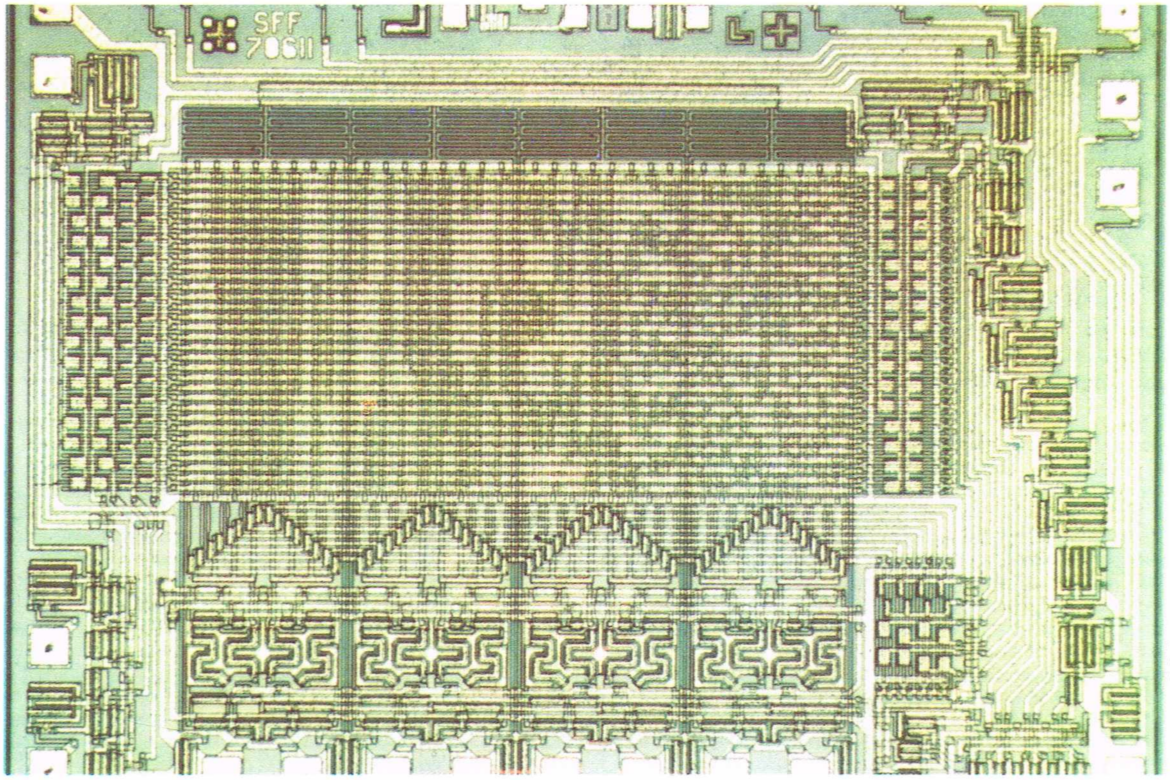

Thomson - C.S.F.

◀ *Une mémoire statique à MOS à 2 048 bits (mémoire SFF 70 611 fabriquée par SESCOSEM).*

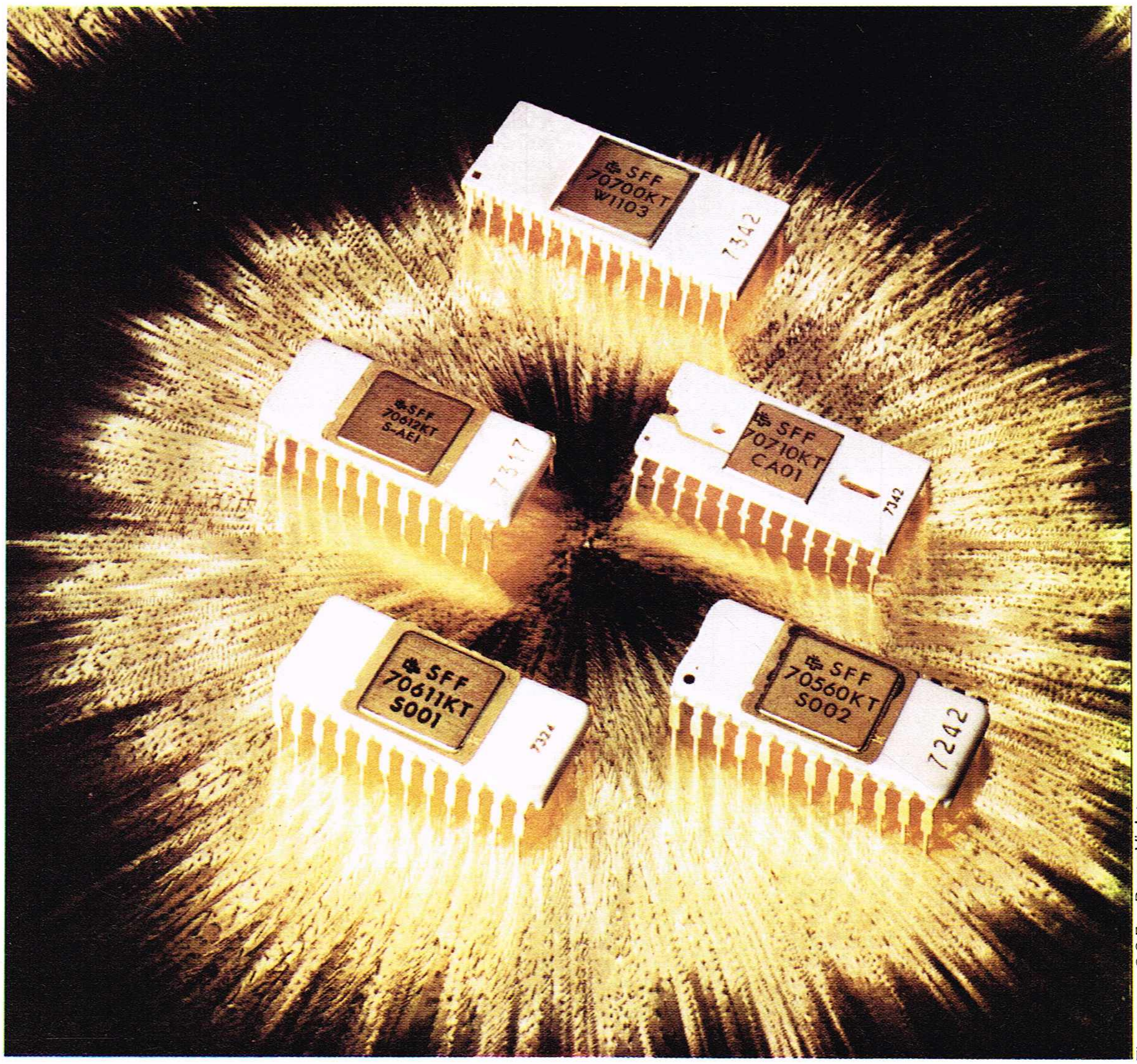

Thomson - C.S.F. - Roger Violet

◀ *Un ensemble de mémoires statiques à MOS (fabriquées par SESCOSEM) dans leur présentation finale.*

▶ *Figure 18 : schéma de principe d'un transistor* MOS *induit par champ.*
Figure 19 : caractéristiques courant-drain (I_D) *en fonction de la tension grille-substrat* (V_{GS}) *pour les transistors à appauvrissement et à enrichissement.*
Figure 21 : a) *caractéristiques* I_D *en fonction de* V_S *dans le cas du transistor* T_2 *de l'inverseur de la figure 20;* b) *caractéristiques* I_D *en fonction de* V_{DS} *des deux transistors à* MOS *de l'inverseur de la figure 20.*

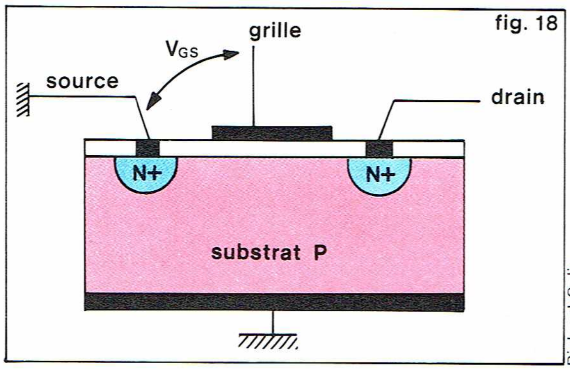

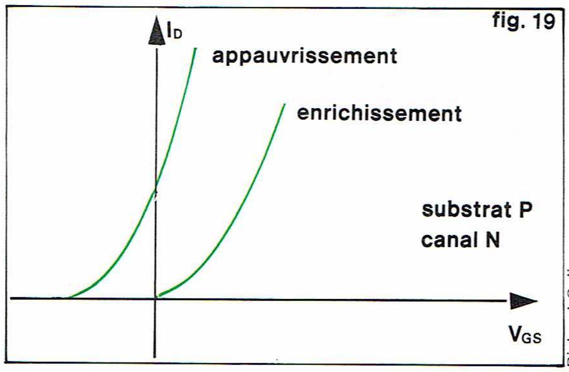

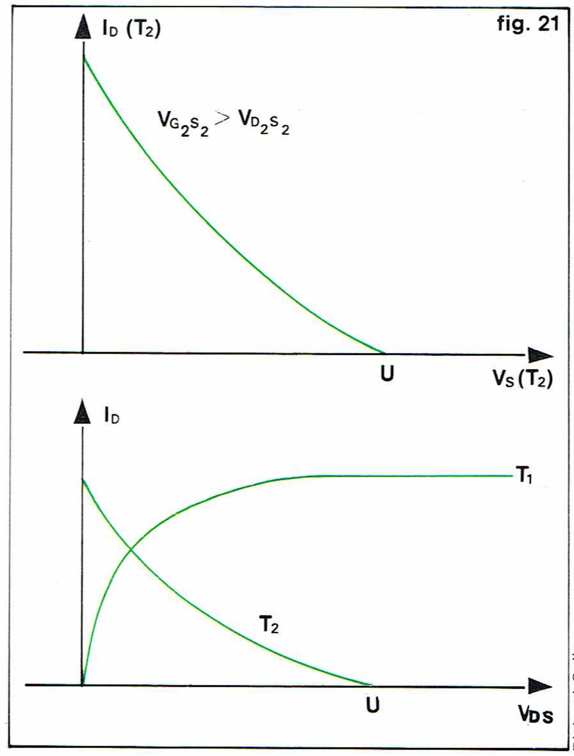

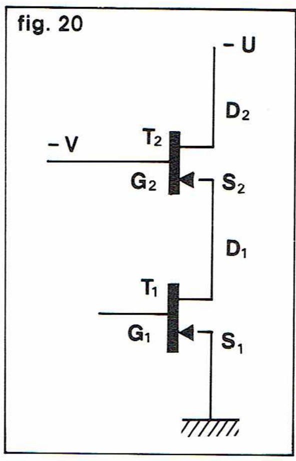

▲ *Figure 20 : représentation schématique d'un inverseur réalisé avec deux transistors* MOS *(*T_1 *pour la commande,* T_2 *pour la charge).*

différentes tensions grille-source V_{GS}. Pour $V_{GS} = 0$, le courant drain augmente avec la tension V_{DS} jusqu'à ce que cette dernière atteigne la tension de saturation, où le courant I_D cesse de croître. Pour V_{GS} négative, la résistance du canal étant plus grande, la tension de saturation est plus faible que dans le cas précédent. Si V_{GS} est suffisamment négative, on bloque le transistor quelle que soit la tension V_{DS} appliquée. Dans le cas où V_{GS} est positive, on a un fonctionnement analogue, mais ce montage présente l'inconvénient d'avoir une impédance d'entrée faible vue de la grille, la fonction grille-canal étant polarisée en sens direct.

Le transistor MOS est un transistor à effet de champ où la grille est isolée du canal par une couche isolante. Le canal peut être créé au cours du fonctionnement (canal à effet de champ) ou au cours de la fabrication (canal métallurgique). La *figure* 18 indique la structure d'un transistor MOS induit par champ. L'application d'une tension négative entre grille et substrat entraîne une charge positive dans le substrat. Si on crée une forte charge positive entre grille et substrat, il y a création locale au voisinage de l'isolant d'un semi-conducteur N : on crée ainsi une couche d'inversion, le champ ayant induit un canal N entre source et drain. La valeur minimale de la tension grille-substrat pour cette induction est appelée tension de seuil V_S. En pratique, toutefois, la situation n'est pas aussi simple, parce que des charges positives sont déjà présentes : ainsi la tension seuil n'est pas toujours positive, mais peut être négative et le transistor peut se révéler conducteur pour une tension grille-substrat nulle. Les transistors MOS conducteurs pour une tension grille-substrat nulle sont dits à appauvrissement, les autres sont dits à enrichissement (la *figure* 19 donne les caractéristiques courant-drain en fonction de la tension grille-substrat pour les deux types de transistors). Nous ne développerons pas le fonctionnement du MOS à canal métallurgique, c'est-à-dire à canal fabriqué en même temps que le reste du transistor, car il est plus complexe à réaliser et plus cher.

La *figure* 20 donne un schéma à deux transistors MOS qui réalise un inverseur : il y a un MOS de commande T_1, un de charge T_2. Dans le cas où la tension V est supérieure à la somme de la tension seuil de T_2 et de la tension U, la courbe caractéristique I_D (T_2) fonction de V_S (T_2) est présentée *figure* 21 : elle admet U comme abscisse à l'origine. On peut combiner les deux transistors T_1 et T_2 de plusieurs façons (T_2 peut fonctionner en saturation ou en régime triode...). Actuellement, on utilise des transistors à canal P, T_1 est à enrichissement, T_2 soit en régime linéaire, soit en saturation.

Parmi les avantages des transistors MOS, on peut citer : une seule sorte de porteurs; une forte impédance d'entrée (de l'ordre de 10^9 kΩ) ; une faible consommation; une fabrication simplifiée pour ce qui concerne le nombre d'opérations élémentaires; pas de caisson d'isolement. Parmi les inconvénients, en contrepartie, il est bon de donner : la sensibilité aux charges d'électricité statique, à cause de l'épaisseur faible de la couche isolante; la fréquence maximale d'utilisation qui est inférieure à celle des transistors bipolaires; les tensions d'alimentation nécessaires plus élevées que dans le cas des transistors bipolaires; une technologie de fabrication critique; une dérive temporelle et thermique des éléments.

La cellule de base d'une mémoire statique à MOS réalisée en canal P est donnée *figure* 22. Deux inverseurs sont couplés : le premier a T_3 en charge, le second T_4. T_1 est soit bloqué, soit passant, T_2 est à ce moment dans l'état contraire. Au départ, les lignes d'écriture de « 1 »

▶ *Figure 22 : la cellule de base d'une mémoire statique à* MOS *réalisée en canal* P.

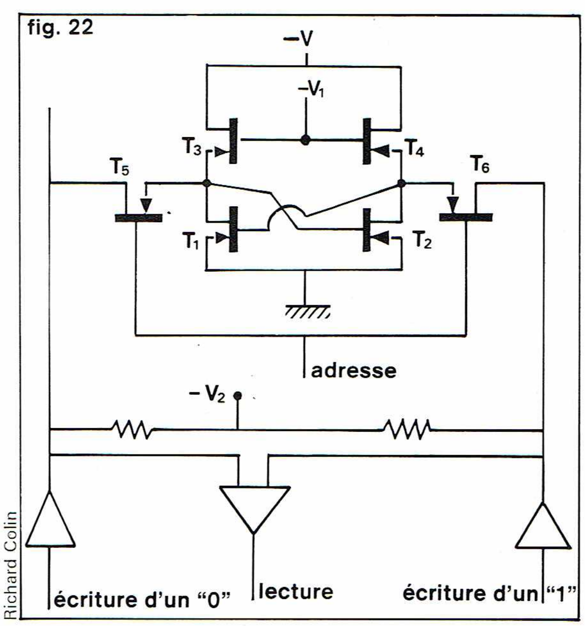

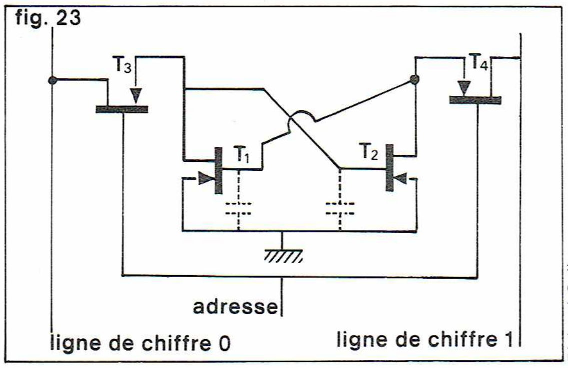

Richard Colin

◀ ***Figure 23 : la cellule de base d'une mémoire dynamique à MOS.***

et de « 0 » sont à la tension ($-V_2$). Pour lire on applique ($-V_1$) sur la connexion d'adresse, ce qui rend conducteur T_5 ou T_6, suivant que T_2 est bloqué ou non. Dans ces conditions, un courant traverse la ligne de chiffre « 1 » ou « 0 ». L'amplificateur de lecture étant monté en différentiel, le signe du signal de sortie permet de repérer la ligne de chiffre sur laquelle a circulé le courant de lecture. Pour écrire, on applique une tension ($-V_1$) sur la sélection d'adresse et une tension $2\ V_{DS} < 0$ sur l'une des lignes de chiffre. Si c'est sur la ligne de chiffre 1 et si la cellule représente cet état (T_2 passant par exemple), il n'y a aucun changement; si c'est sur la ligne de chiffre 0 et si la cellule est toujours dans l'état 0, il y a blocage de T_2 et donc inversion de l'information contenue. Cette cellule est compatible avec les circuits DTL et TTL si le substrat est à $+5$ V. Elle équipe la mémoire INTEL 1101A de 1 256 bits avec un temps d'accès de 850 ns (dissipation de 1,5 μW/bit). Chaque cellule occupe $125 \times 125\ \mu m^2$.

Mémoire dynamique à MOS

Le schéma en est donné *figure* 23, c'est celui de la cellule précédente après suppression des transistors T_3 et T_4. Pour régénérer l'information, c'est-à-dire recharger la capacité drain-source du transistor bloqué, on effectue un « rafraîchissement » de manière périodique en opérant un cycle de lecture sans détection du signal lu. La capacité grille-substrat est rechargée par la ligne de digit correspondante après avoir rendu passants T_3 et T_4 par la sélection d'adresse (T_3 et T_4 jouent le rôle des transistors T_3 et T_4 du schéma de la cellule unitaire statique; on voit alors qu'on a reconstitué le schéma d'un bistable). On peut faire aussi des cellules de mémoire à trois transistors : circuit INTEL 1103 de 1 024 bits au temps de cycle de 580 ns, temps d'accès de 250 ns et un rafraîchissement de période 2 ms. La surface de pastille est de 3 mm × 3,5 mm. Notons qu'on est passé d'une cellule à 6 éléments à une cellule à 4 et que l'organe de mémoire n'est plus un bistable mais deux capacités.

D'autres types de mémoires existent : c'est un domaine actuellement en plein progrès technique : ainsi on sait réaliser une cellule mémoire à trois transistors.

Mémoire morte à MOS

Dans ce type de mémoire, l'information est permanente et lue chaque fois que c'est nécessaire. La *figure* 24 en donne un exemple. Le stockage de l'information est commandé par l'épaisseur de l'oxyde isolant lors de la fabrication de la mémoire : épaisseur faible, tension de seuil faible; épaisseur d'oxyde grande, tension de seuil grande. La ligne d'adresse est sélectionnée par une impulsion de valeur comprise entre les deux tensions de seuil, il y a alors courant sur la ligne de chiffre suivant que le transistor devient passant ou reste bloqué. On lit ainsi le chiffre « 1 » ou « 0 ». Cette mémoire est programmée au cours de la fabrication, elle ne peut l'être par l'utilisateur.

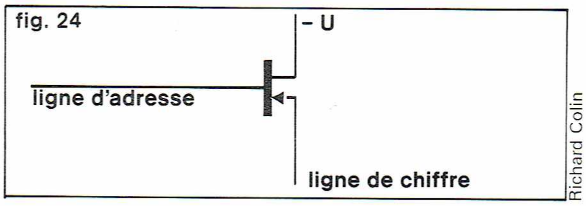

Richard Colin

◀ ***Figure 24 : lecture dans une mémoire morte à MOS.***

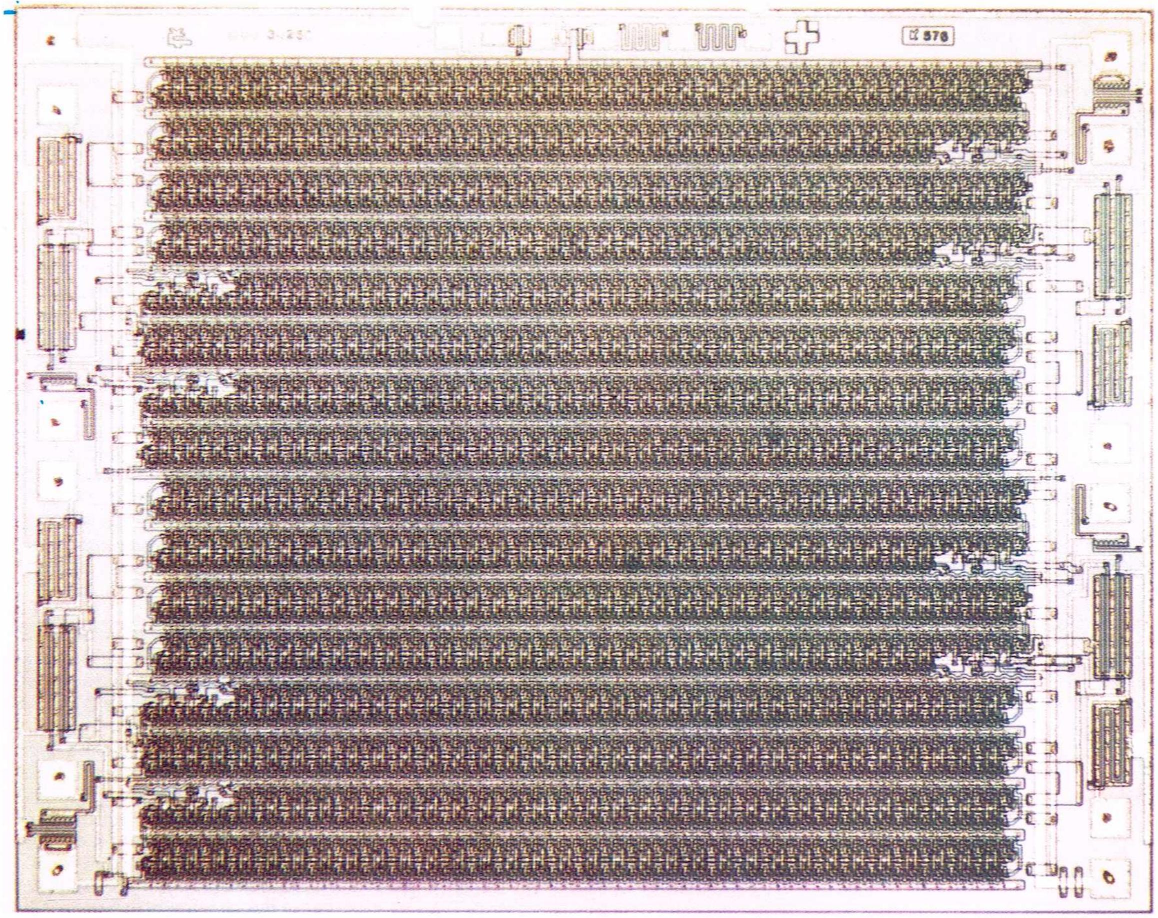

Thomson-C.S.F. - Jacques Pierre

◀ ***Une mémoire dynamique à MOS à 1 024 bits (mémoire SFF 31402 fabriquée par SESCOSEM).***

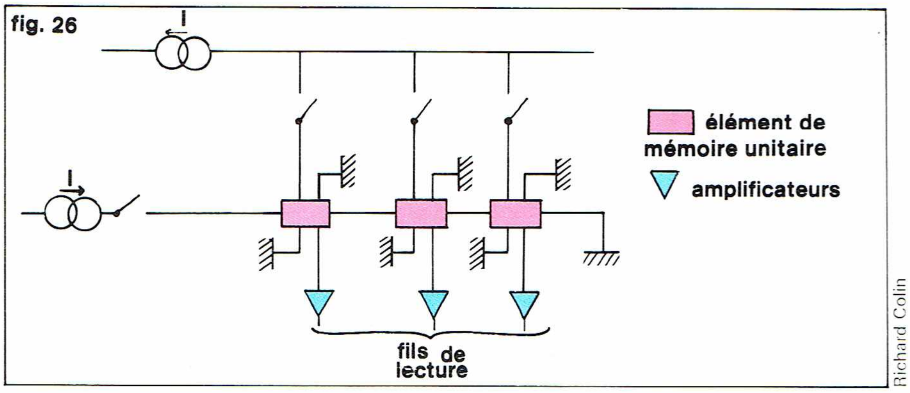

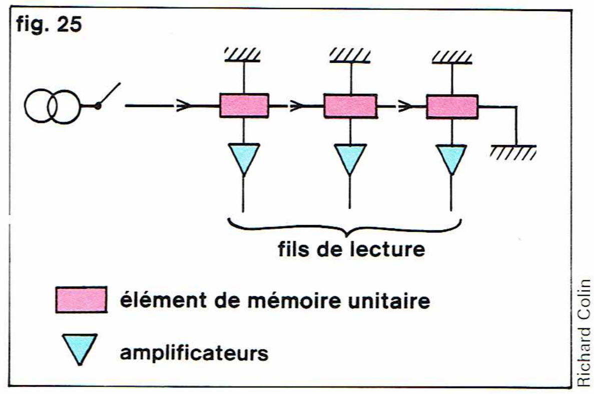

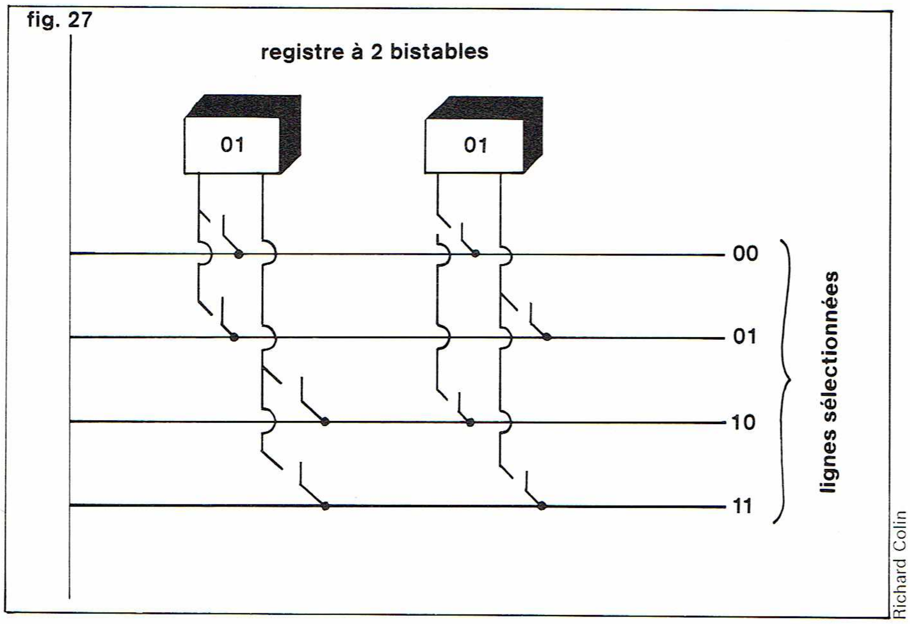

▲ *Figure 25 : organisation de base d'une mémoire adressable pour la lecture ; il y a un fil de lecture par élément de mémoire unitaire.*
Figure 26 : organisation de base d'une mémoire adressable pour l'écriture.
Figure 27 : sélection d'un mot dans une mémoire 2D.
▼ *Figure 28 : sélection des voies lignes et colonnes lors de l'adressage d'une mémoire de 4 096 mots dans une mémoire 2D.*

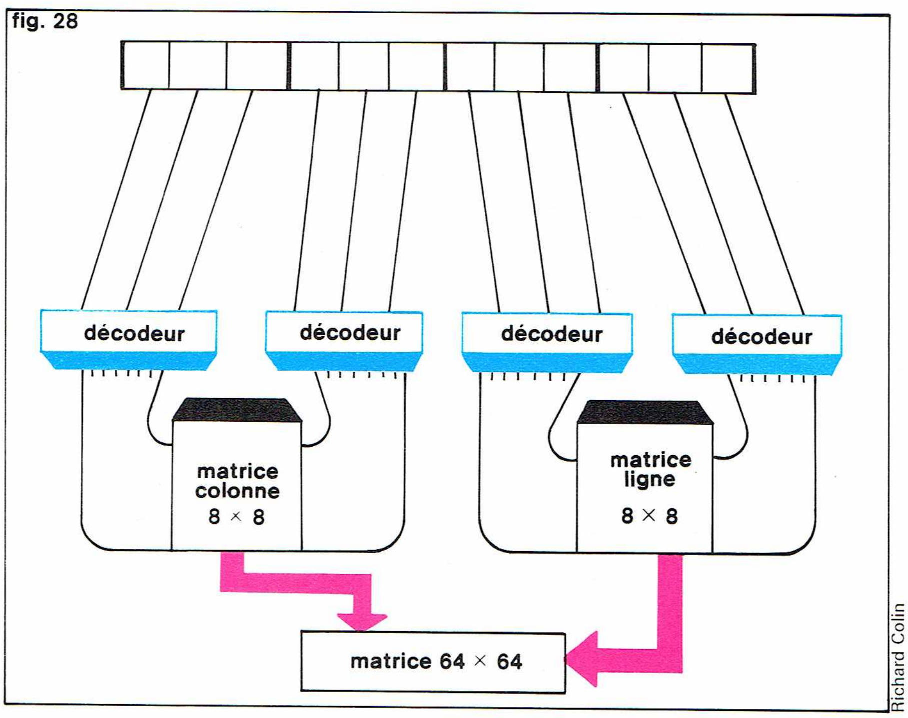

Organisation des mémoires adressables

Il y a deux types de mémoires adressables : les *mémoires vives* où on peut modifier l'information, les *mémoires mortes* où seule la lecture est possible. Pour décrire leur organisation, nous supposerons que les mots ont une longueur de n bits.

Pour lire un mot, on envoie un courant dans le fil qui passe par les n éléments de mémoire unitaire et on recueille les signaux correspondant aux présences de « 1 » ou de « 0 » dans n amplificateurs de lecture. Il y a donc un fil de lecture par élément de mémoire unitaire (*fig.* 25). Pour écrire l'information dans un mot, il faut un fil d'écriture par élément unitaire. On écrit simultanément dans les n éléments. Cependant, il faut que la commande sur le fil d'écriture soit différente si on veut écrire 1 ou 0. On peut utiliser le schéma de la *figure* 26. Dans un premier temps, on fait une lecture qui remet tous les éléments du mot à zéro, ensuite on envoie un courant correspondant à l'écriture d'un « 1 » dans les éléments correspondant aux positions du mot ayant cette valeur.

Nous ne nous sommes préoccupés que de la lecture d'un mot ou de son écriture. Dans une mémoire de N mots, il s'agit tout d'abord de sélectionner le mot. L'idée est de simplifier au maximum le nombre d'organes de sélection, d'amplificateurs de lecture, qui sont coûteux.

Sélection dans les mémoires 2D

Nous avons vu que la position d'un mot était donnée par son adresse. Ainsi, une mémoire de 2 048 mots peut être adressée avec une adresse de longueur 11 chiffres ($2^{11} = 2\,048$). L'adresse est stockée dans le registre d'adresse. Le décodeur d'adresse doit sélectionner le fil du mot correspondant. Il a k entrées correspondant aux k positions du registre d'adresse et 2^k sorties, chacune reliée à un fil de mot. Un exemple en est donné sur la *figure* 27 où sont schématisés des interrupteurs fermés ou ouverts, suivant les niveaux présents dans les bistables des registres d'adresse. Généralement, ces interrupteurs sont réalisés par des diodes. Le nombre d'interrupteurs électroniques nécessaires est $k\,2^k$. La croissance est donc rapide avec la taille de la mémoire. Aussi emploie-t-on une méthode de sélection matricielle.

Prenons l'exemple d'une mémoire de 4 096 mots (64 × 64) et réalisons une matrice carrée de 64 « lignes » et 64 « colonnes » comprenant 4 096 portes « ET ». L'organe de sélection est constitué par la matrice : il y a 64 + 64 = 128 entrées et 4 096 sorties. Le principe est de sélectionner un élément par croisement des actions sur une ligne et une colonne (d'où l'intérêt d'utiliser les organes logiques ET).

Il reste le problème de la sélection des voies « lignes » et des « colonnes ». Pour cela, on peut utiliser aussi une solution matricielle. Les 6 premiers chiffres du registre d'adresse sont utilisés pour les « colonnes », les 6 suivants pour les lignes (*fig.* 28). Raisonnons sur les colonnes : un premier décodeur ayant comme commande les 3 premiers bistables du registre et 8 sorties (2^3) sélectionne une colonne d'une matrice 8 × 8, un deuxième décodeur commandé par les 3 bistables suivants sélectionne une ligne. Le résultat sera bien la sélection d'une colonne de la matrice 64 × 64. On fait de même pour les lignes. C'est la solution la plus économique (elle ne nécessite que 4 décodeurs). Les décodeurs les plus simples sont réalisés

en diodes. Un exemple de sélection matricielle est donné *figure* 29. Le mot n° 2 est sélectionné en fermant l'interrupteur de ligne n° 2 et celui de colonne n° 0. Ce système doit être doublé, puisque les courants de lecture et d'écriture n'ont pas le même sens. Il existe des systèmes où on évite deux fils (sélection à 4 diodes par mot par exemple). Actuellement, le progrès en technologie intégrée fait que le transistor ne revient pas plus cher que la diode, aussi réalise-t-on des sélections matricielles à transistors (elles présentent de plus l'avantage de pouvoir utiliser un courant de lecture important).

Sélection dans les mémoires 3D

Cette méthode de sélection est très utilisée dans les mémoires à tores magnétiques. La sélection est réalisée par l'addition de deux courants qui, pris séparément, ne pourraient l'assurer. Ces mémoires sont divisées en plans.

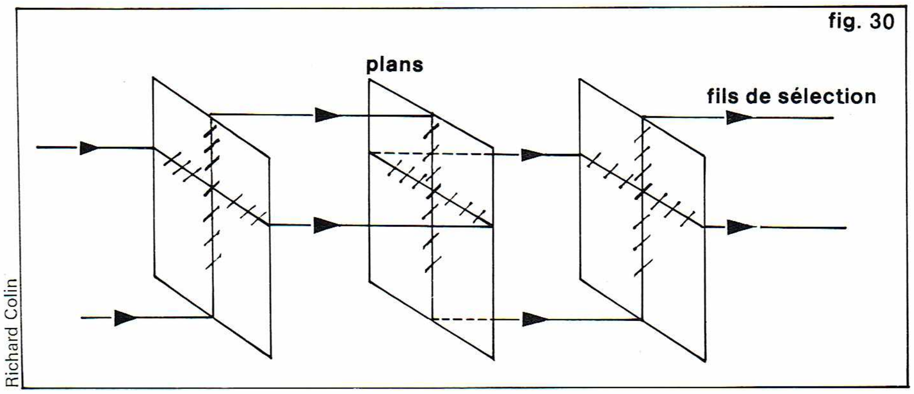

▲ ***Figure 30 :** dans les mémoires à tores magnétiques, les mémoires sont divisées en plans comprenant autant de tores que la mémoire comporte de mots et autant de plans que de chiffres par mots; les fils de sélection sont les mêmes pour tous les plans.*

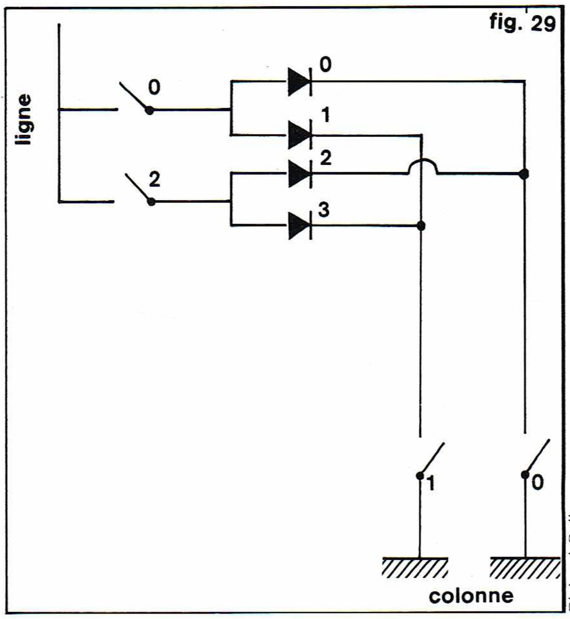

◀ ***Figure 29 :** exemple de sélection matricielle dans une mémoire 2D.*

Sur un plan, il y a autant de tores que la mémoire comporte de mots (ici 4 096). Il y a surtout autant de plans que de chiffres par mot (ici 32). Un mot est donc constitué par un tore de chaque plan. On opère une sélection matricielle sur chaque plan. Pour éviter de multiplier les fils de sélection et d'avoir donc des problèmes de synchronisation, ce sont les mêmes fils pour tous les plans (*figure* 30). Un inconvénient est que chaque fil ligne et chaque fil colonne traverse tous les tores situés sur la même ligne et sur la même colonne. Il faut donc que le courant passant dans chaque tore ne soit pas suffisant, c'est l'addition des courants qui crée la sélection. Dans un tore, il passe donc : un fil de sélection de ligne; un fil de sélection de colonne; un fil de lecture; un fil d'écriture (ces deux derniers fils sont les mêmes pour un plan, car on n'écrit ou on ne lit jamais deux tores d'un même plan). Il y a un amplificateur de lecture et un générateur de courant d'écriture par plan. Pour une mémoire 3D de 4 096 mots de 32 bits, il y a 32 plans de 64 × 64 tores parcourus par 4 fils, 64 + 64 générateurs de courant pour la sélection, 32 générateurs d'écriture et 32 amplificateurs de lecture.

Précisons maintenant le fonctionnement d'un tore. La lecture se fait sur le tore dont la sélection a été assurée par l'addition de deux courants, chacun de valeur $-\frac{I}{2}$, passant dans le fil de ligne et le fil de colonne. Après lecture, le tore est à 0 quel que soit son état antérieur. La lecture se fait par coïncidence de 3 courants : le courant de ligne $+\frac{I}{2}$ celui de colonne $+\frac{I}{2}$ et le courant d'écriture. Si ce dernier a pour valeur $\frac{I}{2}$, le résultat est $\left(+\frac{I}{2}\right)$, ce qui ne fait pas basculer le tore, on écrit donc « 0 ». Si le courant d'écriture a pour valeur 0, le résultat est I qui fait passer le tore à l'état « 1 ». Le fil d'écriture ne commande pas l'écriture, il l'empêche, on l'appelle aussi fil d'inhibition.

Les mémoires ROM *et* PROM

Ce sont des *mémoires adressables à lecture seule;* on dit aussi mémoires mortes. L'information ne pouvant donc pas être modifiée, la lecture de ce genre de mémoire doit être non destructive. Il y a deux types de mémoires à lecture seule : les mémoires ROM (Read Only Memory) dont l'écriture est assurée par le fabricant, et les mémoires PROM (Programmable Read Only Memory) que l'utilisateur peut coder, mais une fois pour toutes. Ces mémoires sont des mémoires à sélection de mots. Elles comprennent une matrice pour mémoriser l'information, un décodeur d'adresse et des organes de lecture.

L'emploi de ce type de mémoires s'est beaucoup développé ces dernières années avec la technologie du LSI (Large Scale Integration). On les trouve pour stocker des microprogrammes assurés auparavant par le logiciel (opérations courantes, gestion de la mémoire centrale, etc.), pour mémoriser des programmes correspondant au régime transitoire de fonctionnement de l'ordinateur (démarrage, pannes), pour créer des émulateurs (adaptation d'un ordinateur de façon qu'il admette les programmes d'un autre ordinateur). Les ROM peuvent être réalisées par couplage capacitif, magnétique ou résistif, ou par intégration de semi-conducteurs.

Un schéma de **mémoires ROM à couplage capacitif** est donné *figure* 31. La sélection est faite par une impulsion sur la ligne de mots choisis : quand l'impulsion est transmise par les capacités, c'est que le chiffre correspondant vaut 1. Ces mémoires sont faciles à réaliser : elles sont codées généralement par photogravure. Elles équipent certains ordinateurs de la série 360 d'IBM.

Nous décrirons les **mémoires à couplage électromagnétique** ayant un circuit magnétique par fil de digit (*figure* 32), qui sont les plus économiques. Un exemple de réalisation est la mémoire utilisée par Honeywell-Bull dans un de ses ordinateurs. On utilise une ferrite sans aimantation rémanente et sans hystérésis. Le fil de mot entoure ou non le bâtonnet, créant ou non une spire de couplage suivant que le chiffre vaut 1 ou 0. Le secondaire du transformateur constitué de cette spire et du bâtonnet est constitué par la spire de lecture. Cette mémoire est lente (la réalisation citée a un temps de cycle de 1 μs).

Dans les **mémoires à résistances**, le couplage est assuré par des résistances placées aux endroits où on a

▼ ***Figure 31 :** mémoire* ROM *à couplage capacitif.*

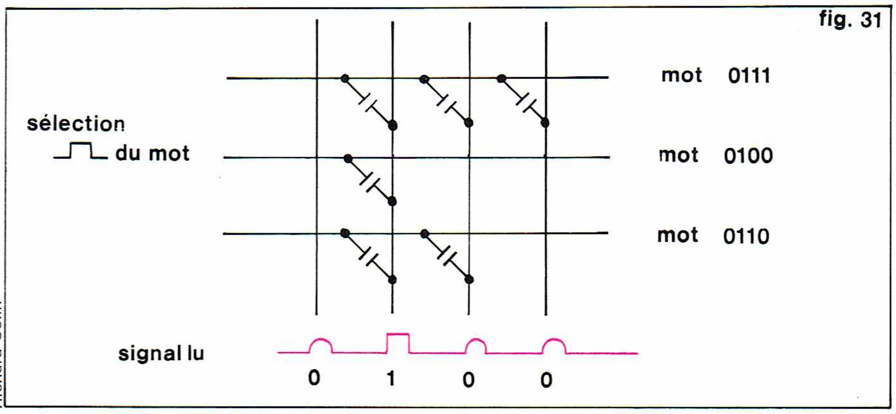

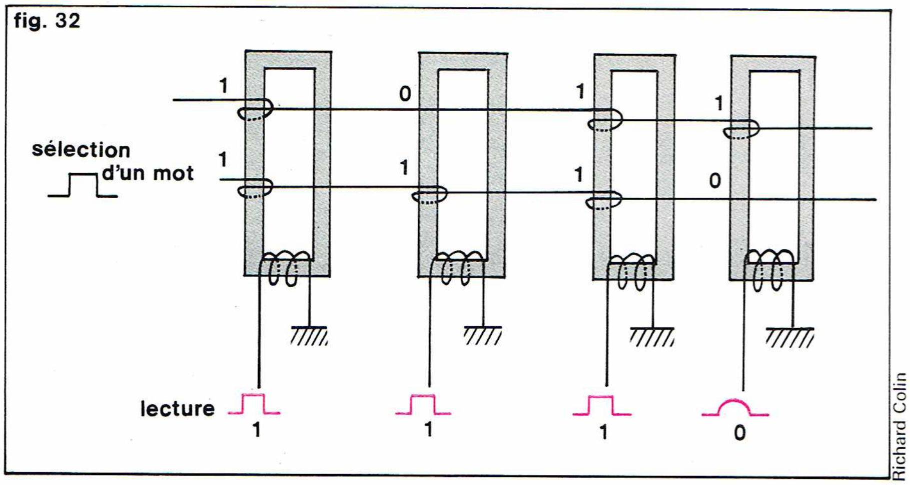

▲ ***Figure 32 : mémoire* ROM *à couplage électromagnétique ayant un circuit magnétique par fil de digit.***

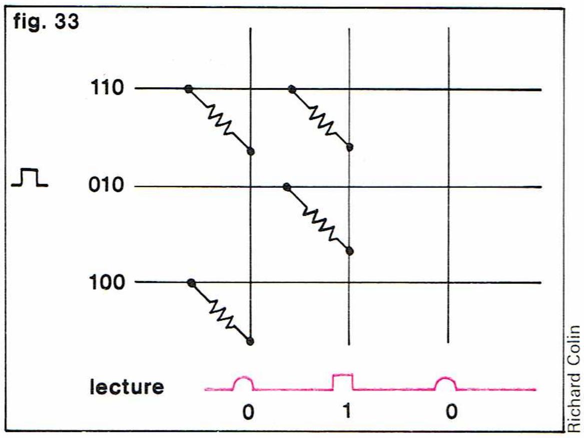

▶ ***Figure 33 : mémoire* ROM *à résistances.***

▼ ***Figure 34 : mémoire vive* RAM *réalisée par le tissage d'éléments de base composés de fils recouverts d'un film magnétique mince.***

voulu inscrire 1 (*figure* 33). Leurs avantages sont : la faible dispersion du signal de lecture; l'élimination des couplages parasites est simple; leur faible coût. L'inconvénient vient du fait que les résistances sont des éléments bidirectionnels et qu'il y a donc des liaisons parasites d'un fil de mot à l'autre. Ces mémoires peuvent être programmées par le fabricant ou l'utilisateur. Dans ce dernier cas, il suffit de placer des résistances partout en série avec des fusibles que l'utilisateur fait fondre. On atteint une densité de 1 bit/mm^2 (par exemple la mémoire INTEL 3301) de 256 mots de 4 bits.

Les technologies précédentes ne permettent pas d'atteindre une grande densité d'intégration. Actuellement, on sait réaliser des **mémoires à semi-conducteurs** telles que la mémoire et ses organes de sélection d'écriture et de lecture se trouvent sur une même pastille de silicium (1 024 bits sur une pastille de quelques mm^2). Les premières mémoires ROM ou PROM à semi-conducteurs ont été à transistors bipolaires. Dans le cas de mémoires ROM, le fabricant réalise les « 1 » ou « 0 » à l'aide d'un masque de métallisation (les transistors sont raccordés ou non aux fils de digit). La programmation dans le

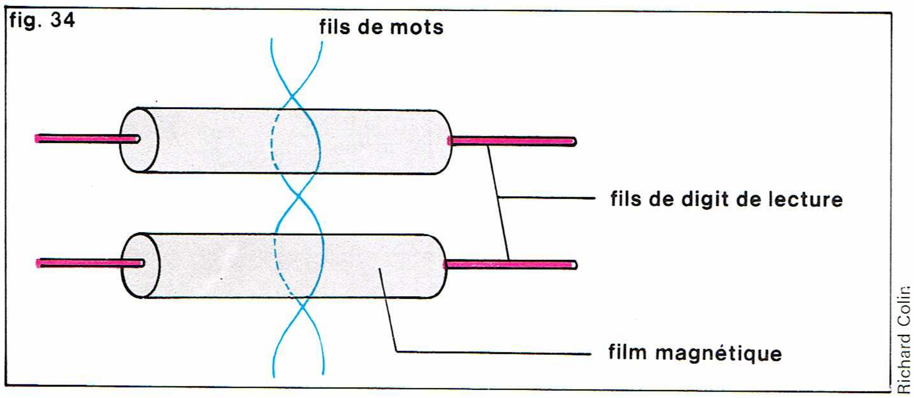

cas du PROM peut être réalisée par deux procédés. Dans le premier, chaque transistor est relié au fil de digit par un fusible que l'utilisateur peut ou non détruire pour créer des « 0 ». Le second procédé consiste à dégrader la jonction émetteur-base avec une impulsion de courant, ce qui crée un « 1 ». On réalise aussi des mémoires à semi-conducteur MOS, bien qu'ils soient plus lents que les bipolaires. Mais les mémoires MOS présentent d'autre part un encombrement réduit (1/3 de la surface est gagné), un coût de réalisation plus faible et demandent peu de courant. De plus, on sait réaliser des mémoires effaçables avec des semi-conducteurs FAMOS (Floating Gate Avalanche injection MOS) par des rayons ultraviolets ou X. C'est le cas de la mémoire INTEL 1601 qui est un circuit intégré de 2 048 éléments organisés en 256 mots de 8 chiffres.

Les mémoires vives RAM *(Random Access Memory)*

On distingue les mémoires adressables à lecture destructive des mémoires à lectures non destructives. Ces mémoires du premier type sont constituées à partir de tores de ferrite ou de films magnétiques minces. Les mémoires à tores de ferrite sont les plus anciennes. On a déjà évoqué ce type de mémoires, mais rappelons qu'on peut trouver plusieurs organisations de base : l'organisation 2D ou à 2 dimensions utilisée pour des mémoires de faible capacité; pour des grosses mémoires, on utilise l'organisation 3D à 3 dimensions (2 dimensions pour la sélection et 1 pour le chiffre). Des mémoires existent aussi en organisation 2,5D (une des dimensions de sélection et la dimension du digit sont communes). Ce type d'organisation a été imposé par la fabrication de tores de plus faible dimension où on ne pouvait faire passer 3 fils. Ces mémoires sont plus rapides. Le principe de lecture et d'écriture dans les mémoires 3D a été décrit précédemment. Leur avantage par rapport aux mémoires 2D est un gain en organes électroniques interrupteurs, en nombre de circuits augmentant avec la capacité de la mémoire. Pour une mémoire 3D à N mots, il faut 4 $\sqrt[4]{N}$ interrupteurs; pour une mémoire 2D, il en faut 2 $\sqrt{N}$; il faut donc 0,5 $\sqrt[4]{N}$ plus d'interrupteurs pour une mémoire 2D que pour une mémoire 3D. Ce rapport est égal à 1 pour N = 16, c'est-à-dire pour une mémoire de très faible capacité. Parmi les inconvénients des mémoires 3D, on peut citer la longueur des fils (augmentation du temps de propagation), la perturbation des tores ne correspondant pas au mot sélectionné (pour lutter contre ce phénomène, on utilise un tissage particulier des tores, le MIT).

Les mémoires à film magnétique mince sont aussi des mémoires à lecture destructive. Ces mémoires sont toujours organisées par mots. On peut les réaliser soit par des films déposés sur des fils, soit par dépôt de films sur une plaque de cuivre. Dans le premier cas, les fils deviennent des fils de digit de lecture, le fil de mot est réalisé par un tissage (*fig.* 34). Lorsqu'on utilise des mémoires à films magnétiques minces, on découvre des phénomènes parasites non présents dans les mémoires à tores (parasites dus au champ magnétique terrestre, parasites par digits et mots voisins). Ces parasites sont plus importants pour les mémoires à films plans.

Un deuxième type de mémoires adressables modifiables est constitué des mémoires à écriture et lecture non destructives. Ce sont des mémoires à semi-conducteurs bipolaires ou à semi-conducteurs MOS. C'est la technologie des mémoires actuellement en plein essor. Par exemple, SESCOSEM fabrique en circuits intégrés bipolaires une mémoire de 64 bits (16 mots de 4 bits) dont les caractéristiques sont les suivantes : temps d'accès 40 ns, consommation 400 mW, 500 composants sur une pastille de 8,7 mm^2, boîtier 16 broches.

Pour des mémoires de capacité plus grande, un problème immédiat se pose. Les boîtiers standards ont 16 broches. Si la mémoire a une capacité de 256 bits, il faut 8 broches pour les adresses, 2 broches pour les tensions, 1 pour sélectionner le module et 1 pour l'écriture. Il ne reste donc que 4 broches pour les sorties et les données, donc les mots ne peuvent avoir une longueur supérieure à 2 bits. On associe alors plusieurs boîtiers pour constituer des longueurs de mots suffisantes. En

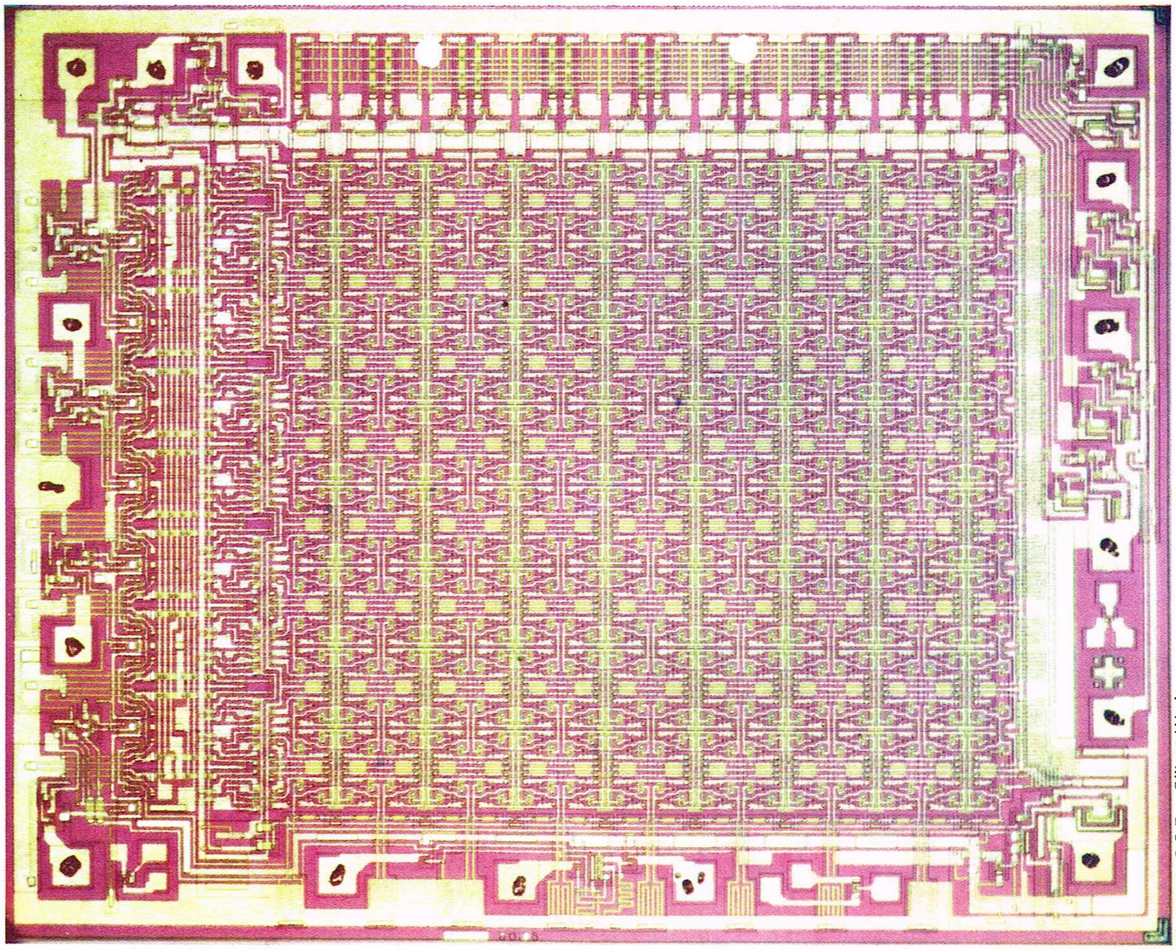

◀ *Une mémoire vive* **RAM** *à 256 bits ; il s'agit d'une mémoire dynamique réalisée en technologie bipolaire par SESCOSEM.*

Thomson-C.S.F. - Gilbert Warin

▼ *Figure 35 : réalisation d'une diode avec des dopages successifs* N *et* P *à partir d'une plaquette de silicium fortement dopée.*

fig. 35

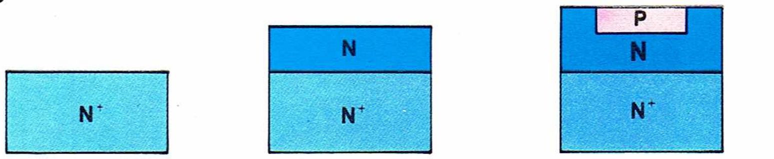

Richard Colin

fait, deux caractéristiques imposent des limitations : la consommation de puissance et la surface de la pastille de silicium.

En réalité, si on diminue la puissance consommée, on augmente le temps d'accès. Une réduction de l'encombrement, c'est-à-dire une augmentation du nombre de composants sur la pastille, se fait par de nouveaux procédés technologiques : couche épitaxiale pincée par diffusion latérale par exemple, Isoplanar, isolement par gravure anisotropique du silicium, V-ATE, etc. Pour avoir des mémoires de plus grande capacité encore, il faut utiliser la technologie MOS. Avant de décrire ce type de mémoire, nous décrirons brièvement les technologies d'élaboration des transistors bipolaires intégrés.

Dans la technologie dite intégrée, au lieu d'assembler les composants (transistors, résistances, condensateurs) avec des soudures à l'étain, on diffuse des impuretés dans un bloc de silicium. L'isolement entre éléments est assuré soit par des cloisons isolantes, soit par des diodes polarisées en inverse. On part d'un bloc de silicium (diamètre environ 4 cm, épaisseur 0,22 mm) sur lequel on réalise plusieurs circuits identiques. Ces circuits sont ensuite obtenus par découpage, et on les encapsule, dans un boîtier généralement à 16 broches réalisant les connexions vers l'extérieur. La technologie utilisée est celle des transistors (planar). Le procédé de départ est l'épitaxie, que nous allons maintenant définir.

L'épitaxie permet de faire croître un monocristal à partir d'un support également monocristallin qui impose sa structure. Cette formation est réalisée soit à partir du semi-conducteur porté à haute température (1 100 °C), donc gazeux, soit à partir d'une réaction chimique en phase gazeuse. Dans la couche, on peut ensuite faire diffuser des dopants. La *figure* 35 indique ainsi la réalisation d'une diode avec des dopages successifs N et P à partir d'une plaquette de silicium fortement dopée (10^{26} atomes d'impuretés par m^3), ce qui donnera une tension de claquage élevée : on a fait croître une couche épitaxiale de dopage moyen (10^{22} atomes/m^3), puis on diffuse des impuretés pour créer une zone P.

Pour réaliser un **circuit intégré,** on part d'une plaquette de silicium monocristallin polie sur laquelle on dépose par épitaxie une deuxième couche de silicium. A la surface de cette couche, on forme une couche de silice isolante. A partir du dessin du circuit réalisé avec grande précision, on fait un cliché photographique noir et blanc, le masque. Sur la couche de silice, on étale une laque photosensible, qui est polymérisée par des rayons ultraviolets à travers le masque. Les parties situées sous les zones obscures du masque sont protégées et non polymérisées ; on les élimine par un solvant, on élimine aussi en ces zones la silice par un décapage à l'acide. On retrouve donc en ces endroits le silicium. A travers ces « fenêtres », on dope le silicium en plaçant la plaquette dans une atmosphère gazeuse à haute température (1 200 °C).

Les opérations précédentes sont répétées autant de fois que c'est nécessaire pour réaliser les différents composants (diodes, transistors, résistances, capacités). En utilisant toujours la méthode du masque, on dépose de l'aluminium sur le silicium pour assurer les connexions. Puis on découpe les différents circuits élémentaires avec une pointe de diamant (plusieurs centaines, voire un millier de circuits sont réalisés en même temps). Chaque pastille est ensuite placée dans un boîtier qui assure sa protection mécanique.

Les **résistances** sont réalisées suivant deux procédés : diffusion ou dépôt. Dans le premier procédé, on diffuse

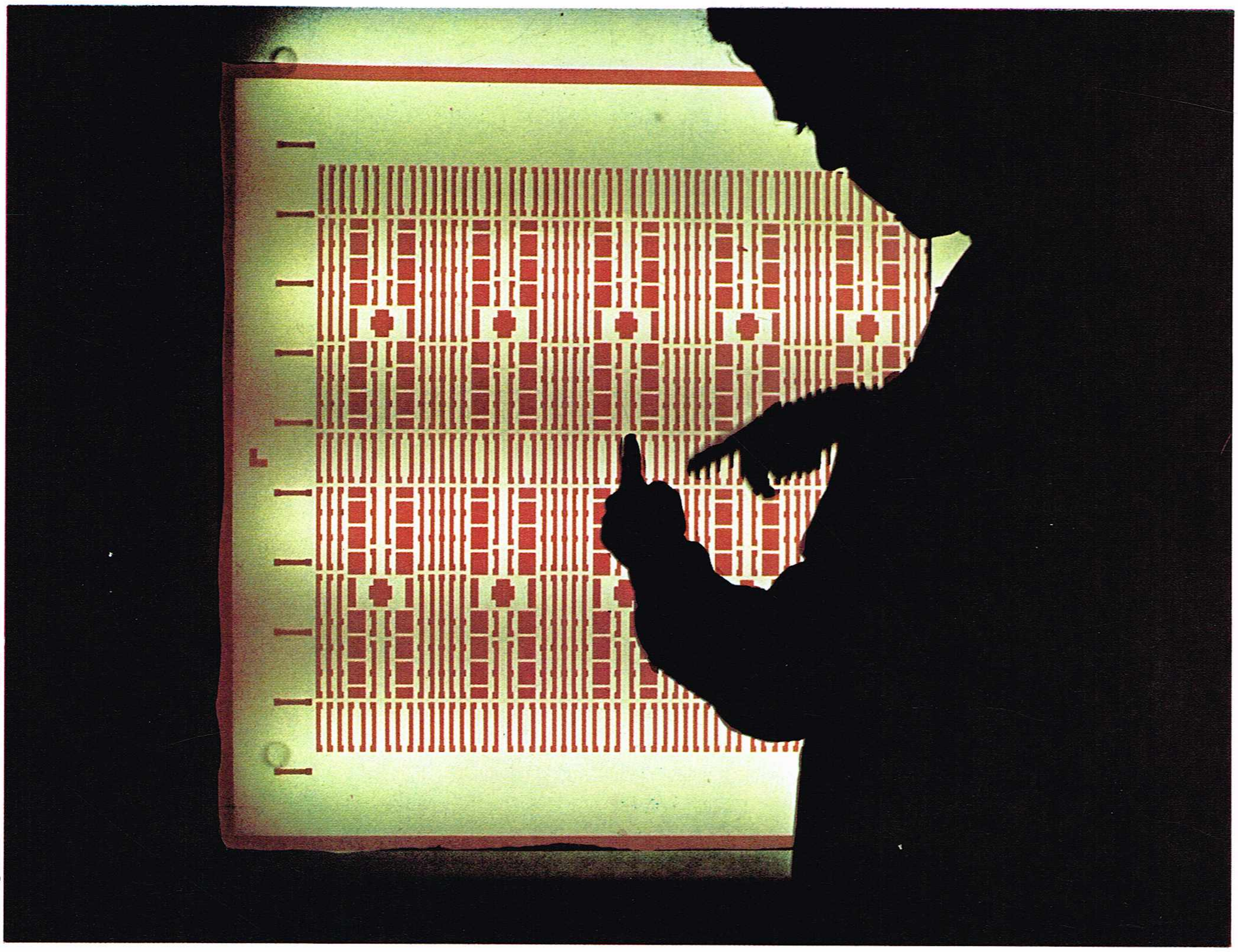

Société générale des semi-conducteurs

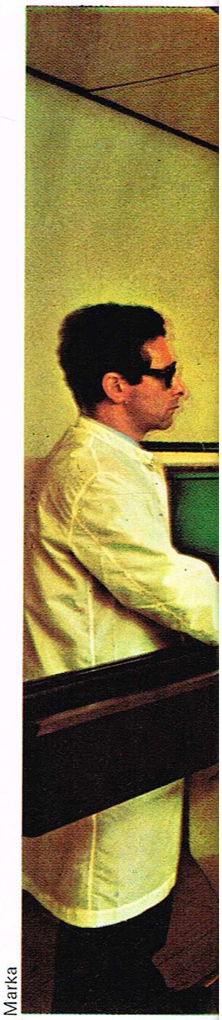

Marka

▲ *Deux étapes de la fabrication des circuits intégrés : à gauche, le dessin, quatre cents fois plus grand que le circuit, est contrôlé avec précision ; à droite, le dessin est photographié pour fabriquer un masque ; celui-ci sera ensuite réduit et appliqué sur la plaquette de silicium recouverte de silice et d'une laque photosensible.*

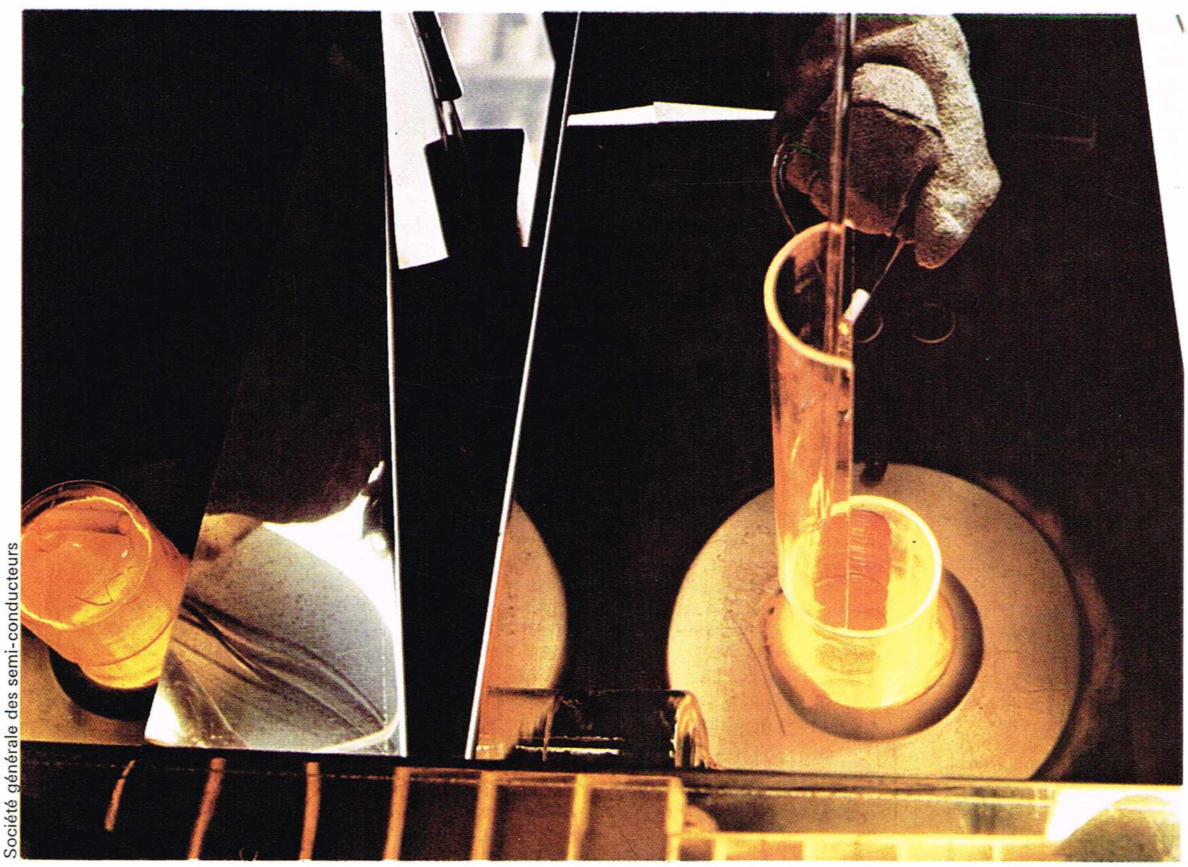

Société générale des semi-conducteurs

▶ *Un four d'oxydation et de diffusion utilisé pour la fabrication de semi-conducteurs par la technologie planar.*

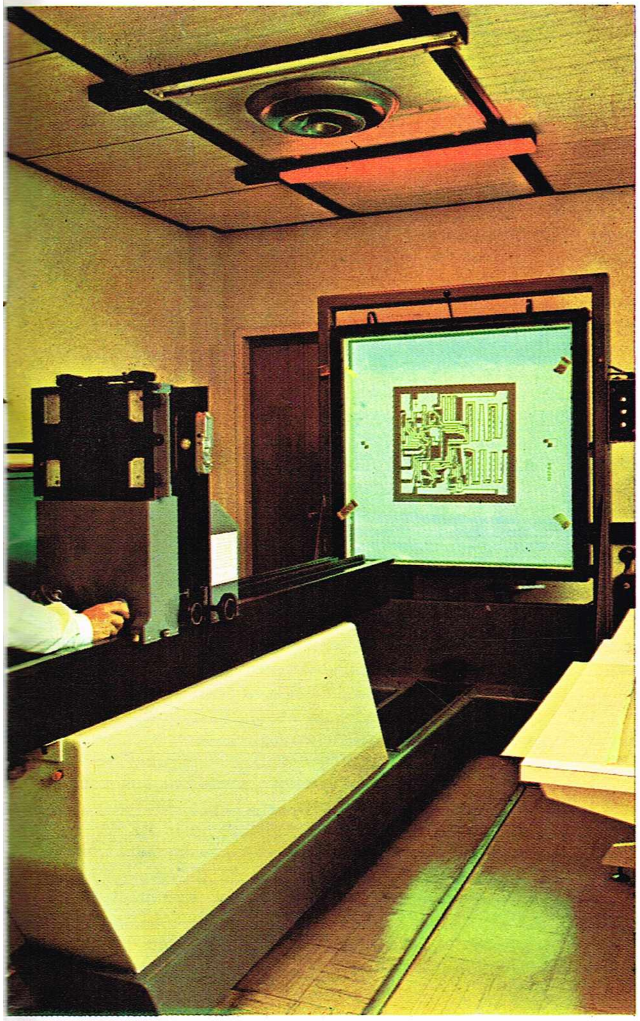

du bore dans le substrat N de façon à réaliser une mince couche de silicium P. On fabrique une jonction PN qu'on polarise en sens inverse. Les valeurs des résistances réalisées varient de 2,5 Ω à 100 kΩ; elles diminuent avec la température, car elles sont réalisées en semi-conducteurs. Par le second procédé, on dépose du nickel-chrome sur la couche isolante de silice SIO_2. Avec du nickel-chrome, la valeur maximale des résistances est limitée autour de 50 kΩ : on obtient des résistances plus élevées avec du nitrate de tantale ou du palladium. Notons que le circuit réalisé ne peut alors être qualifié d'intégré.

Les **capacités** sont de deux sortes : la capacité de jonction en sens inverse, la capacité MOS. Dans le premier cas, on retrouve les inconvénients des capacités de transition (faible valeur des capacités, mauvais isolement, loi non linéaire de la capacité en fonction de la tension inverse). Donnons quelques ordres de grandeur : avec une jonction de 625 μm^2, C = 1,8 pF pour une tension inverse nulle, C = 0,8 pF pour — 5 volts, 0,54 pF pour — 10 volts. La capacité MOS est une capacité au dioxyde de silicium; c'est un condensateur dont une armature est le semi-conducteur voisin de l'oxyde, la seconde armature un film d'aluminium déposé en même temps que les connexions (*fig.* 36). Les capacités obtenues sont supérieures ou égales à 500 pF/mm^2, leur valeur est constante.

Les **transistors** les plus faciles à réaliser en technologie intégrée sont les transistors NPN. En effet, les transistors PNP réalisables ont un gain faible. On doit ajouter que la fabrication d'un transistor NPN intégré entraîne celle, parasite, d'un transistor PNP qu'on doit bloquer. De plus, il existe une capacité de transition collecteur-substrat variant en fonction de la tension à chaque jonction bloquée. Les diodes des circuits intégrés sont en fait des transistors montés en diode parce que la fabrication en est facile (transistors NPN).

Le monocristal étant en partie conducteur de l'électricité, on doit donc isoler les zones les unes des autres. Pour réaliser ces parois isolantes, on peut utiliser des diodes polarisées en sens inverse par le procédé EPIC ou le procédé Isoplanar. Le premier procédé présente l'inconvénient de courants inverses qui peuvent devenir gênants lorsque la température augmente, et d'une capacité de transistion importante. Dans le procédé EPIC, on grave des sillons dans le monocristal de silicium, on oxyde les parois, on fait un dépôt épitaxial de silicium polycristallin, on retourne la plaquette et on abrase jusqu'à retrouver les différents morceaux isolés. Le procédé Isoplanar est une modification du procédé d'isolement par diodes polarisées en inverse : ce procédé est coûteux.

Les **mémoires MOS** prennent actuellement un essor considérable : leur densité élevée d'intégration fait que le prix de revient par bit est en constante diminution, ce qui va sans doute entraîner le remplacement des mémoires à tores par cette technologie pour les mémoires RAM à grande capacité. Ainsi, INTEL fabrique la mémoire MOS 1103 dont les caractéristiques sont les suivantes : capacité 1 024 bits, temps d'accès 300 ns, cycle minimal de 580 ns, rafraîchissement toutes les 2 ms, consommation de 400 mW, 4 200 transistors MOS sur une pastille de 3 mm × 3,5 mm, boîtier de 18 broches. Rappelons qu'un rafraîchissement est nécessaire, car la mémoire est en fait une capacité qui se décharge lentement. La lecture de ces mémoires est non destructive (cellule bistable).

Enfin, pour les unités centrales d'ordinateur, on réalise des **mémoires RAM** de grande capacité (256, 512, 1 024, 4 096, 16 384 bits) dans des boîtiers de 16, 18 ou 24 broches. Les mémoires statiques de ce type, compatibles avec la logique TTL, sont réalisées par exemple avec des modules de base de 256 bits (256 mots de 1 bit). Les mémoires dynamiques sont en général plus complexes, généralement non compatibles avec la logique TTL sans interfaces. Leur inconvénient est en particulier le problème des « rafraîchissements ».

Mémoires à lecture-écriture à accès séquentiel

Dans ces mémoires, l'information circule, est réinjectée de la sortie à l'entrée, moment où elle est lisible. Si on écarte la réalisation par ligne à retard, l'organe de principe est le registre à décalage dont le principe de fonctionne-

▼ ***Figure 36 : schéma de principe d'une capacité MOS. Figure 37 : mémoire à lecture-écriture à accès séquentiel.***

fig. 36

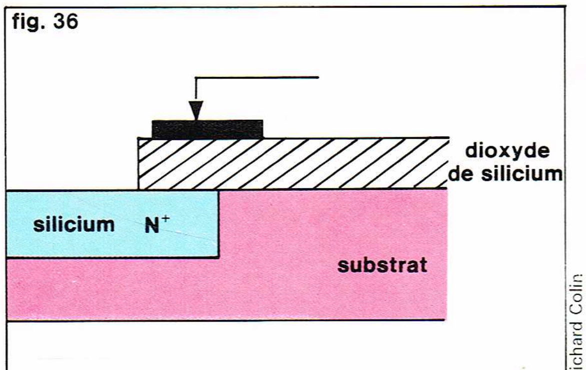

fig. 37

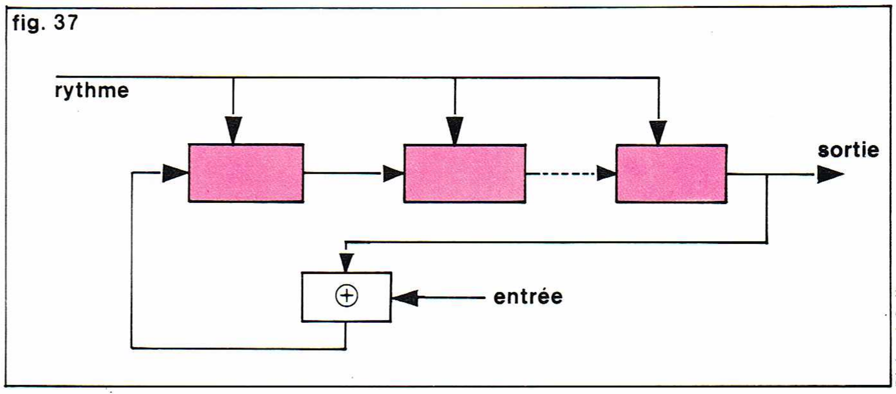

Tableau I Caractéristiques de quelques technologies utilisées pour la fabrication des mémoires à semi-conducteurs				
Technologies	Temps de propagation (en ns)	*	Densité de composants (au mm²)	Densité de portes (au mm²)
MOS canal P grille aluminium	80	450	128	40
MOS canal P grille silicium	30	145	256	85
MOS canal N — grille silicium — à charge — à appauvrissement	12	36	300	100
C/MOS grille silicium	12	0,5	210	36

* Produit du temps de propagation par la puissance dissipée au niveau du composant (unité pj)

▲ *Tableau I : caractéristiques de quelques technologies utilisées pour la fabrication des mémoires à semi-conducteurs (d'après* Minis et Micros, n° 32 (76)).

ment a déjà été décrit (*fig.* 37). Il se compose de *n* bistables : l'horloge H fait avancer l'information. Ce type de mémoire peut être organisé de deux façons : ou tous les mots de *k* bits sont en série, et les chiffres aussi, ou les mots sont en série et les chiffres des mots en parallèle. Leur inconvénient est un temps d'accès long, proportionnel à la capacité de la mémoire. Une autre grande différence par rapport aux RAM est due au problème de parité : si une cellule est en panne, la mémoire l'est aussi, ce qui n'est pas le cas des RAM. Les registres à décalage peuvent être réalisés en transistors bipolaires ou en transistors MOS. Ce sont ces derniers qui semblent promis à un grand avenir, en particulier les éléments à transfert de charge en surface CCD (Charge Coupled Device).

Ces mémoires sont d'une grande simplicité technologique parce que leurs interconnexions internes sont faciles à réaliser, qu'elles ont peu de connexions vers l'extérieur, que c'est le même élément qui est répété.

Perspective technologique

Les mémoires à tores sont-elles condamnées ? En 1976, Modular Computer Systems (Modcomp) commercialise « Memory Plus » qui est une mémoire à performances intermédiaires entre mémoire centrale et mémoires périphériques. Le module est une mémoire à tores de 256 kilo-octets. Un périphérique « Memory Plus » se compose de un à seize modules de 256 kilo-octets et d'au moins un contrôleur. Ils sont répartis en deux fichiers de huit modules au maximum. Chaque fichier possède pour ses 8 modules sa propre alimentation, et ses interfaces sont compatibles avec la logique TTL. Pour réduire la puissance consommée, les circuits sont TTL avec utilisation de l'effet Schottky. En raison de l'emploi des tores, cet équipement a un degré de fiabilité supérieur à la plupart des autres équipements périphériques. Il combine le prix des périphériques de stockage avec la vitesse d'accès et le débit d'une mémoire centrale (maximum 4 millions d'octets par périphérique). Qui a enterré les mémoires à tores ? Une tentative de prospective a été faite dans un numéro de septembre 1976 de la revue *Minis et Micros* dont nous extrayons les lignes suivantes : La mémoire vive dynamique de 1 kilobit est apparue en 1972, en 1973 on réalisait des mémoires vives dynamiques de 2 kilobits, mais, pour des questions de rentabilité, on attendait 1974 pour des mémoires de 4 kilobits. Un système de 64 000 transistors en 1960 peut se faire aujourd'hui avec un seul circuit monolithique. Quatre raisons expliquent cette progression : diminution des dimensions des composants, augmentation de la puce, utilisation de la technologie MOS, intelligence des concepteurs. On intègre à dimension égale 64 fois plus aujourd'hui qu'en 1960. Un circuit « Large Scale Integration » a une surface 32 fois plus grande qu'en 1960. On peut caractériser une technologie par le temps de propagation et le facteur de mérite (produit du temps de propagation par la puissance dissipée au niveau du composant), et la densité de composants ou de portes intégrables sur 1 mm². Donnons quelques exemples dans le *tableau* I.

Le *tableau* II tente une perspective à l'horizon 80 à partir des mémoires en 1970.

Le développement de la technologie V/MOS et D/MOS et bipolaire de type IIL va permettre d'avoir des circuits LSI très complexes ayant les performances de la TTL, donc de trouver un nouveau champ d'application.

Enfin, citons comme perspective technologique « excitante » les mémoires à bulles magnétiques, dont on attend qu'elles débouchent sur l'industrialisation. Les bulles sont de petits domaines cylindriques dont l'aimantation est de sens contraire à celle du film mince dans lequel elles apparaissent. Voici les résultats acquis : bulle mémoire de l'ordre de 3 µ, énergie requise pour déplacer une bulle 0,04 pW, fréquence de travail 1 MHz, capacité de plusieurs millions d'octets, densité 1 000 bits/mm². La mémoire réalisée par les laboratoires Bell en 1974 a un temps d'accès de 2,7 ns, un cycle lecture écriture de 5 µs (mémoire de 5 000 000 bits sur 7 × 3 cm).

BIBLIOGRAPHIE

ARSAC J., *les Systèmes de conduite des ordinateurs,* Paris, Dunod, 2ᵉ éd., 1970. - BOULAYE G., *la Microprogrammation,* Dunod, 2ᵉ éd., 1976. - LILEN H., *Circuits intégrés MOS et CMOS,* éditions Radio, 1976. - METZGER G., VABRE J.-P., *les Mémoires électroniques : Mémoires statiques et dynamiques;* tome I, *les Phénomènes physiques;* tome II, *l'Organisation des mémoires)* Paris, Masson, 1973 et 1974. - MIDDELKOEK S., GEORGE P. K., DEKKER P., *Physics of Computer : Memory Devices,* Academic Press, 1976.

Tableau II Résultats et perspectives concernant les mémoires à l'horizon 1980 à partir des données de 1970					
Années	1972	1974	1976	1978	1980
Types de mémoires	1 024 bits dynamiques	4 096 bits dynamiques	16 384 bits dynamiques	65 536 bits dynamiques	131 072 bits ?
Technologies	canal P	canal N	canal N	V/MOS D/MOS	?
Temps d'accès (en ns)	300	250	200	200	?

▶ *Tableau II : résultats et perspectives concernant les mémoires à l'horizon 1980 à partir des données de 1970 (d'après* Minis et Micros, n° 32 (76)).

L'analyse du signal

Les fonctions aléatoires

Considérons l'expérience simple du lancer d'une pièce de monnaie. Supposons qu'un générateur associe au résultat une fonction simple. Ainsi à « face » on lie $y = \sin(\omega t)$, à « pile » $y = \sin(\omega t + \pi)$ [*fig.* 38]. On a ainsi constitué une fonction aléatoire. Plaçons-nous du point de vue d'un observateur. Ce dernier va « voir » la fonction $\sin \omega t$ ou la fonction $-\sin \omega t$ suivant le résultat de l'expérience qu'il ne peut maîtriser. Cette fonction observée n'étant pas « prévisible », elle a pour lui quelque chose d'aléatoire. Continuons à raisonner sur cet exemple très simple. Supposons que tous les résultats observables soient disponibles (dans notre cas, il n'y en a que deux) et fixons le temps $t = t_0$. A t fixé, la fonction aléatoire devient une variable aléatoire. En effet, le résultat observé dépend du tirage de l'expérience. Fixons maintenant l'expérience : on observe une fonction du temps dont nous avons, ici, un modèle mathématique, mais ce n'est pas toujours le cas. Si on laisse libres les deux paramètres, temps et expérience, on obtient une fonction aléatoire. Citons maintenant deux ensembles simples de fonctions aléatoires.

Soit un tube à vide. Un bruit de fond est créé par les électrons partis de la cathode et arrivant sur l'anode, ces électrons dont le mouvement est dû à l'agitation thermique. Sur un écran d'oscilloscope cathodique, on observe un courant électrique, variant en intensité, qui est un phénomène macroscopique. En fait, ce courant résultant est la superposition des courants élémentaires produits par chaque électron :

$$I(t) = \sum_k I(t - t_k),$$

t_k, instant d'arrivée du k-ième électron, est une variable aléatoire. Le courant produit dépend donc d'un nombre infini de variables aléatoires. Si on appelle « expérience » la donnée des t_k, on voit qu'à chaque épreuve correspond un courant $I(t)$.

Un autre exemple, pris dans le domaine biomédical, est fourni par l'électro-encéphalogramme (EEG). L'EEG est un signal électrique recueilli sur le cuir chevelu d'un individu. Il est le résultat de combinaisons complexes de signaux électriques élémentaires. Pris à une certaine heure et dans certaines conditions expérimentales, l'EEG observé présente certains rythmes remarquables (α par exemple). Le même individu, dans les mêmes conditions expérimentales, pourra présenter un électro-encéphalogramme très différent.

La première idée qui vient à l'esprit est de faire une description statistique d'une fonction aléatoire $x(t)$. Pour t fixé, $x(t)$ est une variable aléatoire. On peut peut-être définir sa densité de probabilité $f(x(t); t)$ sous réserve de la vérification de certaines propriétés mathématiques :

$$f(x; t)\, dx = P(x < x(t) < x + dx)$$

fig. 38

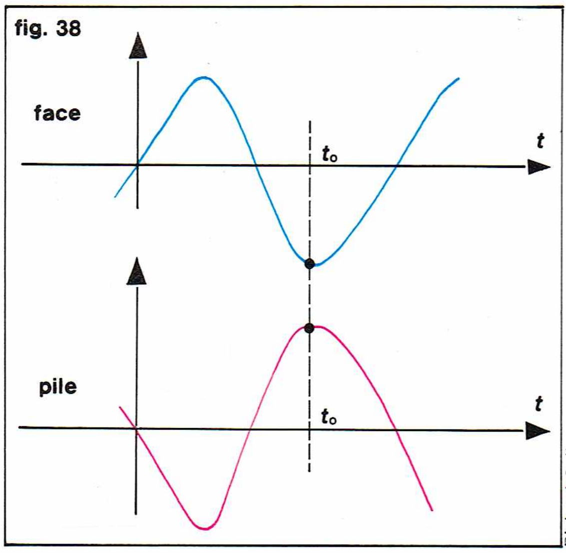

Richard Colin

◀ *Figure 38 : fonctions simples $y = \sin(\omega t)$ et $y = \sin(\omega t + \pi)$ associées respectivement aux résultats face et pile de l'expérience du lancer d'une pièce de monnaie.*

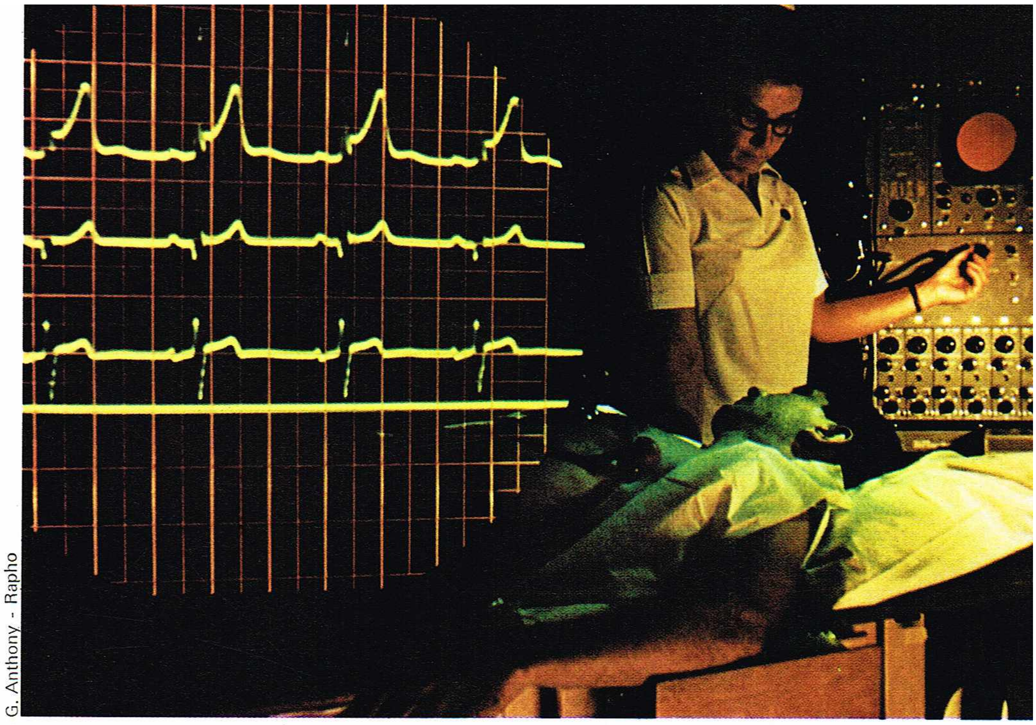

G. Anthony - Rapho

▲ *Un exemple de signal électrique pris dans le domaine biomédical, l'électrocardiogramme ; les signaux électriques produits par les ventricules et les oreillettes sont captés par des électrodes placées sur les membres et le thorax de l'individu.*

On peut aussi définir sa fonction de répartition :

$$F_x(u, t) = P(x(t) < u) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, t)\, dx$$

Cependant, ces propriétés à une dimension ne sont pas suffisantes pour définir une fonction aléatoire. Plusieurs fonctions aléatoires sont susceptibles d'avoir les mêmes fonctions de répartition du premier ordre. On peut alors définir les propriétés statistiques à deux, trois, ..., n dimensions. Ainsi, à deux dimensions :

$$f(x_1, x_2, t_1, t_2)\, dx_1 dx_2 = P(x_1 \leqslant x(t_1) < x_1 + dx_1, x_2 \leqslant x(t_2) < x_2 + dx_2)$$

Le problème devient vite impossible à résoudre dès que le nombre de dimensions augmente. Aussi préfère-t-on caractériser les fonctions aléatoires par des propriétés du second ordre, les moments. Il faut garder à l'esprit que cette caractérisation est une simplification qui rend la définition moins précise.

Moments d'une fonction aléatoire

Les moments se définissent comme dans le cas des variables aléatoires. Rappelons qu'on désigne par $E(\cdot)$ l'opérateur espérance mathématique. Le moment du premier ordre ou moyenne d'une fonction aléatoire s'écrit :

$$m(t) = E(x(t)) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(u) f(x(u))\, du$$

Le moment d'ordre n :

$$M_n(t) = E[x^n(t)]$$

Le moment centré d'ordre n :

$$m_n(t) = E[(x(t) - E(x(t)))^n].$$

En particulier, le moment centré d'ordre 2 s'appelle la variance σ^2 :

$$\sigma^2 = E[(x(t) - E(x(t))^2] = E(x^2(t)) - E^2(x(t))$$

Pour deux fonctions aléatoires $x(t)$ et $y(t)$, on définit les moments communs d'ordre 2 :
la cross-variance :

$$c_{XY}(t_1, t_2) = E[x(t_1)\, y(t_2)]$$

la cross-variance centrée :

$$\Gamma_{XY}(t_1, t_2) = E[(x(t_1) - E(x(t_1))(y(t_2) - E(y(t_2))]$$

l'autocovariance centrée :

$$\Gamma_{XX}(t_1, t_2) = E[(x(t_1) - E(x(t_1))(x(t_2) - E(x(t_2))]$$

Nous allons maintenant particulariser ces définitions dans un cas que nous utiliserons jusqu'à la fin de cet exposé.

Une fonction aléatoire est dite du second ordre si son second moment existe. On peut remarquer que le deuxième moment est homogène à une énergie ; donc, prendre en compte le deuxième moment revient à s'occuper de fonctions aléatoires à énergie finie. Une fonction aléatoire est dite stationnaire si ses propriétés statistiques sont indépendantes du temps. Cette propriété étant trop difficile à vérifier, on préfère parler de stationnarité du second ordre. Une fonction aléatoire est stationnaire du

second ordre si la moyenne est indépendante du temps ($m(t) = m$) et si la fonction d'autocovariance centrée ne dépend que de la différence $t_1 - t_2$. La fonction d'autocovariance centrée s'appelle alors fonction d'autocorrélation R ($t_1 - t_2$), la fonction de cross-covariance, cross-corrélation. La fonction d'autocorrélation indique le lien statistique existant entre deux instants de la fonction aléatoire. Elle sera donc maximale pour $t_1 = t_2$ (un point ne peut être plus lié qu'avec lui-même) : l'autocorrélation en 0 est la variance de $x(t)$. C'est aussi une fonction paire quand la fonction aléatoire est réelle.

Ainsi, prenons comme exemple la fonction aléatoire désignée sous le nom de signal des télégraphistes. Elle est définie comme suit :

- Elle ne peut prendre que des valeurs 0 ou 1.
- La probabilité d'avoir k changements pendant un temps T est donnée (processus de Poisson) :

$$P(k, T) = \frac{(aT)^k}{k!} e^{-aT}$$

a est le nombre moyen de changements par unité de temps.

- La probabilité d'avoir 0 ou 1 à l'origine est 0,5

Calculons pour cette fonction la moyenne et la fonction d'autocorrélation :

$$m = E(x(t)) = 0 \cdot \text{Prob}(x(t) = 0) + 1 \cdot \text{Prob}(x(t) = 1) = \text{Prob}(x(t) = 1)$$

$$\text{Prob}(x(t) = 1) = \text{Prob}(x(0) = 1) \cdot \text{Prob (nombre pair de changements)} + \text{Prob}(x(0) = 1) \cdot \text{Prob (nombre impair de changements)}$$

$$= 0{,}5 \qquad m = \frac{1}{2}$$

$$R_x(t_1 - t_2) = R_x(\tau) = E(x(t)\, x(t - \tau)).$$

Posons $x_1 = x(t) \quad x_2 = x(t - \tau)$

$$R_x(\tau) = 0 \cdot 0\, P(x_1 = 0, x_2 = 0) + 0 \cdot 1\, \text{Prob}(x_1 = 0, x_2 = 1) + 1 \cdot 0\, \text{Prob}(x_1 = 1, x_2 = 0) + 1 \cdot 1\, \text{Prob}(x_1 = 1, x_2 = 1)$$
$$= \text{Prob}(x_1 = 1, x_2 = 1)$$
$$= \text{Prob}(x_1 = 1)\, \text{Prob (nombre pair de changements de valeur de } x(t) \text{ pendant } (\tau))$$
$$= \frac{1}{4}(1 + e^{-2a|\tau|})$$

La courbe R (τ) est donnée *figure* 39.

Une dernière propriété est l'ergodicité. Une fonction est dite ergodique si moyenne temporelle et moyenne probabiliste sont identiques. Dans ce cas :

$$m = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(u)\, du$$

$$R_{XX}(\tau) = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(u)\, x(u - \tau)\, du$$

L'accès aux moyennes d'ensemble étant impossible dans presque la totalité des problèmes de traitement de l'information, la propriété d'ergodicité est particulièrement importante pour les mesures des quantités précédemment définies. Il faut aussi constater que nous sommes allés en particularisant : fonctions aléatoires, fonctions du second ordre, fonctions stationnaires du second ordre, fonctions ergodiques. La plupart de ces propriétés ne sont pas vérifiables, du moins par des tests d'hypothèses simples et généraux. On travaillera donc la plupart du temps sous l'hypothèse de leur validité.

fig. 39

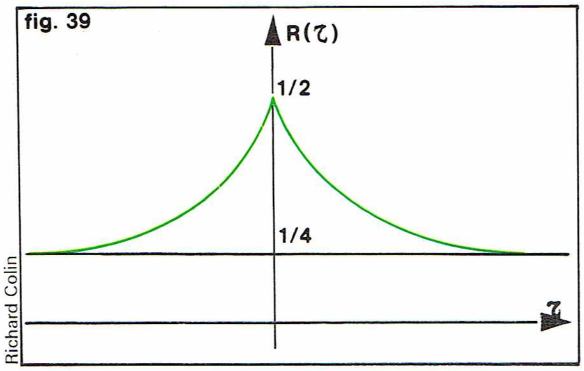

Les filtres

Nous allons rappeler brièvement la notion de filtre linéaire. C'est un système linéaire à une entrée et une sortie. Ce système peut se caractériser par une équation différentielle linéaire d'ordre n reliant la sortie $s(t)$ à l'entrée $e(t)$.

$$a_n \frac{d^n}{dt^n} s(t) + a_{n-1} \frac{d^{n-1} s(t)}{d^{n-1}} + \dots + a_0 s(t) = be(t).$$

A conditions initiales nulles ($y(t = 0) = 0$), la solution de cette équation est donnée par un produit de convolution

$$s(t) = \int_0^t h(t - u)\, e(u)\, du = h(t) * e(t).$$

$h(t)$ s'appelle la réponse impulsionnelle du système. Ce nom vient du fait que $h(t)$ représente la sortie du système lorsque l'entrée est « une impulsion de Dirac » $\delta(t)$;

$$\delta(t) = 0 \text{ pour } t \neq 0 \quad \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t)\, dt = 1.$$

Si on prend la transformée de Fourier des deux membres définie par :

$$S(f) = \int e^{+j2\pi ft} s(t)\, dt$$
$$H(f) = \int e^{+j2\pi ft} h(t)\, dt$$
$$E(f) = \int e^{j2\pi ft} e(t)\, dt,$$

l'équation s'écrit :

$$S(f) = H(f)\, E(f).$$

H (f) s'appelle la fonction de transfert.

La transformée de Fourier d'un signal temporel représente son image dans le domaine fréquentiel. Un filtre linéaire est donc déterminé si on connaît soit les coefficients de l'équation différentielle, soit la réponse impulsionnelle, ou la fonction de transfert. Cependant, n'importe quelle réponse impulsionnelle ne convient pas, encore faut-il que l'organe soit physiquement réalisable. Ainsi, un effet ne pouvant précéder une cause, la réponse impulsionnelle doit être nulle pour $t < 0$. D'autre part, la fonction de transfert H (f) peut s'écrire $|H(f)|\, e^{j\varphi(f)}$ où $\varphi(f)$ n'est jamais identiquement nul. Tout filtre physique introduit donc un déphasage. Par exemple, essayons de concevoir un filtre isolateur de fréquence (filtre à bande

fig. 40

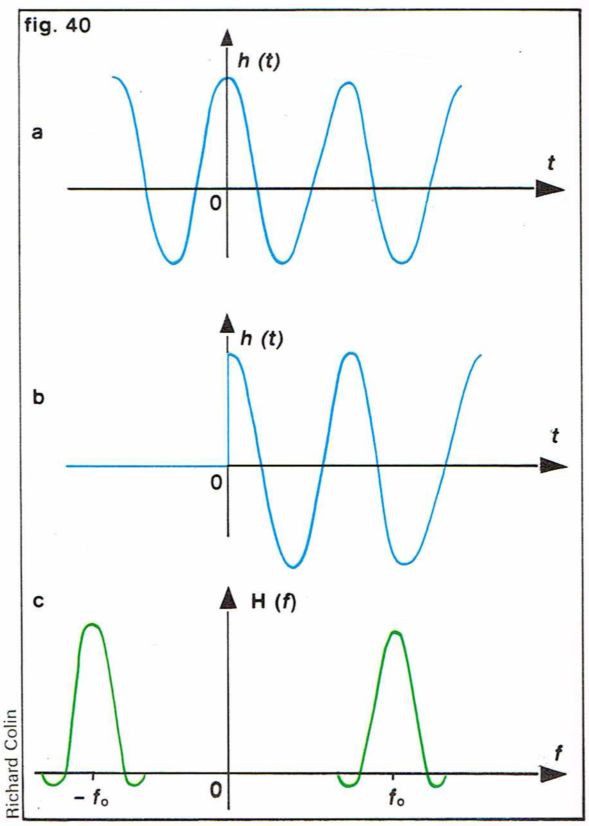

▶ Figure 39 : fonction d'autocorrélation R (τ) du signal des télégraphistes. Figure 40 : un filtre isolateur de fréquence (filtre à bande étroite) ; a, $h(t) = \cos 2\pi f_0 t$; b, $h(t) = 0$ pour $t > 0$; c, fonction de transfert H (f) correspondant à b.

étroite). Sa fonction de transfert étant une impulsion de Dirac en $f = f_0$, la réponse impulsionnelle s'écrit $\cos 2\pi f_0 t$ (*fig.* 40a). Cette réponse correspond à un filtre non réalisable physiquement; aussi, prenons $h(t) = \cos 2\pi f_0 t$ pour $t > 0$ et $h(t) = 0$ pour $t < 0$ (*fig.* 40b). Dans ces conditions, la fonction de transfert H (f) est indiquée *figure* 40c. Les raies ont été remplacées par des plages de largeur non nulle, et le filtre réalisable n'est pas un véritable isolateur de fréquence. Aussi retrouve-t-on l'éternel compromis du concepteur : la réalisabilité entraîne fréquemment des baisses des performances exigées.

Analyse spectrale

De même qu'on peut étudier les processus déterministes dans le domaine temporel et dans le domaine fréquentiel, de même aux notions de fonctions de corrélation va correspondre un traitement fréquentiel. Raisonnons d'abord sur le cas déterministe. Dans la plupart des problèmes, on désire connaître les propriétés du signal de sortie d'un système lorsque l'entrée est connue. Dans le cas linéaire, nous avons vu qu'il suffisait de connaître la réponse impulsionnelle ou la fonction de transfert du système. Dans le cas non linéaire, les calculs deviennent rapidement compliqués, aussi a-t-on recours à une approximation linéaire du système. Pour cela, il est intéressant de décomposer le signal $x(t)$ complexe en une somme finie ou infinie de signaux plus simples

$$x(t) = \sum_i a_i x_i(t).$$

Une idée simple est d'utiliser les séries de Fourier si $x(t)$ est limité à T_0

$$x(t) = \Sigma e_i \, e^{jnw_0 t}$$

où $$e_i = \frac{1}{T_0}\int_0^{T_0} x(t)\, e^{-jnw_0 t}\, dt, \quad \omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$$

Si le signal $x(t)$ a une énergie finie, il y a convergence, en moyenne quadratique vers $x(t)$, de la somme finie au niveau N. Une propriété très importante est donnée par l'égalité de Parseval : la somme des carrés des coefficients e_i est égale à l'énergie du signal sur T_0. Lorsque T_0 devient infini, on utilise la transformée de Fourier définie par

$$X(f) = \int x(t)\, e^{-2\pi j f t}\, dt$$

(il faut, pour l'existence de cette intégrale, que $x(t)$ soit de carré intégrable). Nous ne reviendrons pas sur les propriétés de cette transformée développées dans d'autres parties de cet ouvrage.

Il existe une propriété comparable à l'égalité de Parseval pour les séries de Fourier : l'énergie du signal sur $(-\infty, +\infty)$ est égale à l'intégrale sur $(-\infty, +\infty)$ du carré du module de sa transformée de Fourier X (f). Il est d'usage d'appeler « spectre d'amplitude » la fonction $|X(f)|$. Remarquons cependant que $|X(f)|$ ne précise pas de manière unique $x(t)$, puis qu'il manque la notion de phase. En ce qui concerne les fonctions aléatoires, l'analyse spectrale représente l'outil fondamental de l'étude et de la synthèse des systèmes dans des domaines aussi divers que les techniques radar, les télécommunications, le diagnostic médical, etc.

On dit qu'une fonction aléatoire stationnaire est périodique de période T_0 si sa fonction d'autocorrélation est périodique de même période. Soit $x(t)$ un tel exemple de fonction aléatoire qu'on développe en série de Fourier :

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} c_k\, e^{-jkw_0 t}$$

avec $$\omega_0 = \frac{2}{T_0}.$$

ω_0 et k étant déterministes, nous considérons le caractère aléatoire donné par l'ensemble des paramètres c_k. On peut démontrer que ces variables aléatoires ne sont pas correlées, c'est-à-dire que $E(c_k c_j) = 0$ pour $j \neq k$ et que $E(|c_k|^2) = a_k$, a_k étant le coefficient du développement de Fourier de la fonction d'autocorrélation

$$R_X(\tau) \qquad \text{de } x(t).$$

a_k représente donc la puissance moyenne au sens statistique de $x(t)$ pour la fréquence kf_0. On peut alors définir, par analogie avec le cas déterministe, une densité spectrale de puissance :

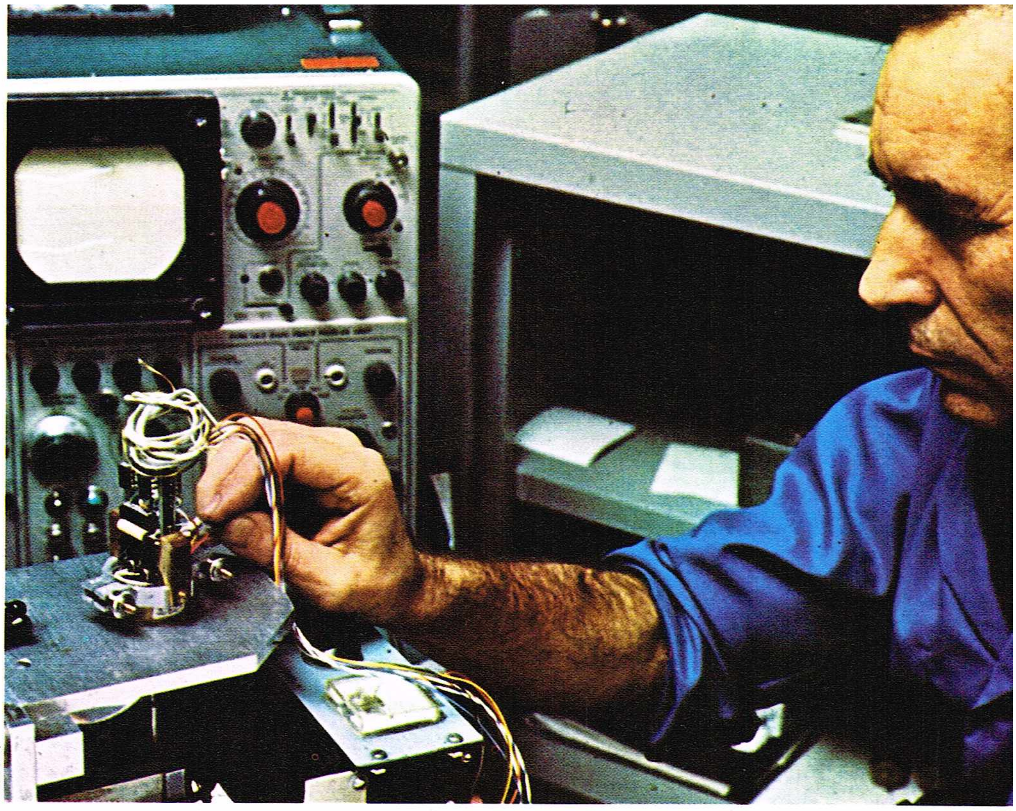

M.C.B.

▲ ***Ajustage et contrôle du signal de sortie électronique d'une voie de codeur de position à l'aide d'un oscillographe.***

$$S_x(f) = \sum_{-\infty}^{+\infty} a_k \delta(f - kf_0)$$

$$\text{où } \delta(f - kf_0) = 0 \quad \text{pour } f \neq kf_0$$
$$= 1 \quad \text{pour } f = kf_0$$

et $$a_k = \frac{1}{T_0}\int_0^{T_0} R_x(\tau)\, e^{-jk\omega_0\tau}\, d\tau.$$

Dans le cas général d'un processus stationnaire du second ordre, on définit la densité spectrale de puissance par la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation :

$$S_X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_x(T)\, e^{-j2\pi f T}\, dT$$

et réciproquement :

$$R_x(T) = \int S_X(f)\, e^{+j2\pi f T}\, df$$

Une autre représentation permet de montrer l'importance de la densité spectrale de puissance. Limitons le processus à 2 T unités de temps (— T, + T), c'est-à-dire créons

$$x_T(t) = x(t) \qquad -T < t < +T.$$

$x_T(t)$ a en général une transformée de Fourier que nous notons $X_T(f)$. D'après l'égalité de Parseval, la puissance moyenne du signal dans l'intervalle (— T, + T) peut s'écrire :

$$\frac{1}{2T}\int_{-T}^{+T} |x(t)|^2\, dt = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2T} |X_T(f)|^2\, df$$

$\dfrac{|X_T(f)|^2}{2T}$ représente donc la densité spectrale de puissance dans l'intervalle $[-T, +T]$. $|X_T(f)|^2$ est aléatoire, on définira alors la densité spectrale moyenne par :

$$E\left(\frac{|X_T(f)|^2}{2T}\right)$$

On peut montrer que, sous certaines conditions de convergence, la limite lorsque T tend vers l'infini de cette quantité est ce que nous avons appelé densité spectrale de puissance $S_x(f)$. Autrement dit, si certaines conditions mathématiques sont respectées, la densité spectrale de puissance est la limite pour un temps d'observation infini de la valeur moyenne de la densité spectrale de puissance sur un temps fini.

A titre d'exemple, la densité spectrale de puissance du signal des télégraphistes précédemment défini est

$$\frac{1}{4}\delta(f) + \frac{1}{4}\frac{a}{a^2 + \pi^2 f^2}$$

($\delta(f)$ est la distribution impulsion de Dirac).

▶ *Figure 41 :*
a, signal à spectre borné ;
b, spectre du signal échantillonné pour une période d'échantillonnage $T > \frac{1}{2 f_c}$ *;*
c, spectre de signal échantillonné $T < \frac{1}{2 f_c}$.

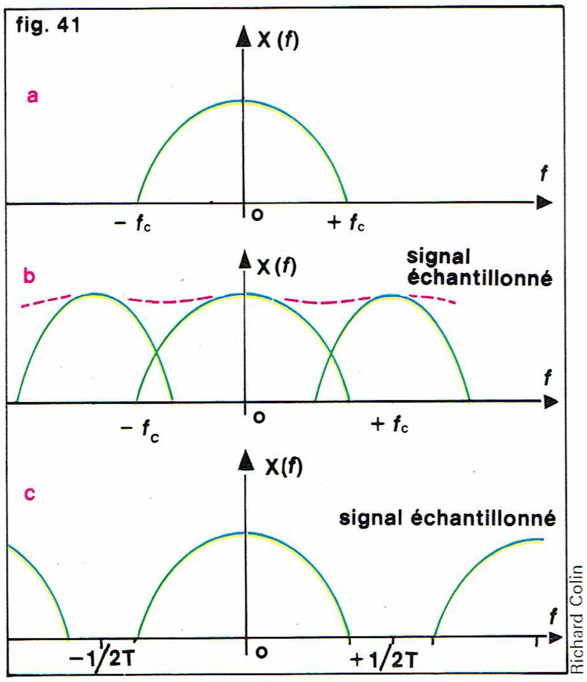

Une fonction aléatoire très utilisée est celle qui est appelée « bruit blanc » *(white noise)*. On définit un bruit blanc comme un processus aléatoire dont la densité spectrale de puissance est constante quelle que soit la fréquence $S_x(f) = K > 0$. La fonction d'autocorrélation transformée de Fourier inverse est alors

$$R_X(T) — K\delta(T),$$

c'est-à-dire une impulsion de Dirac de surface K en 0. Cela veut dire que la valeur de $x(t)$ n'est pas correlée avec une autre valeur $x(t+T)$ quel que soit T positif. C'est donc un processus totalement imprévisible, puisque la valeur présente ne donne aucune information sur l'avenir. Ce nom de bruit blanc a été donné par analogie avec le nom de lumière blanche. En effet, la densité spectrale de puissance a une valeur non nulle pour toutes les fréquences, et la « lumière blanche » est une composition de toutes les raies du spectre. Un bruit blanc est une entité mathématique, mais n'a aucune réalité physique. En effet, on sait que l'énergie moyenne de $x(t)$ $E((x(t))^2)$ est égale à l'intégrale du spectre $S_X(f)$ pour toutes les fréquences. Un bruit blanc aurait donc une énergie infinie ! Aussi rencontre-t-on plutôt, dans les observations physiques, des bruits à « bande étroite », c'est-à-dire le résultat théorique du passage d'un bruit blanc dans un filtre passe-bande. La densité spectrale de ces bruits est constante dans un certain domaine, nulle ailleurs :

$$S_X(f) = K \quad |f| < f_c$$
$$= 0 \quad \text{ailleurs.}$$

La fonction d'autocorrélation d'un bruit à bande étroite s'écrit :

$$R_X(T) = \frac{2K}{\pi T} \sin(\pi T (2 f_c)).$$

Enfin, pour clore ce paragraphe, signalons l'utilisation de la densité cross-spectrale de puissance. $S_{XY}(f)$ se définit comme la transformée de Fourier de la fonction de cross-corrélation centrée. Si $S_X(f)$ est toujours réelle et positive, $S_{XY}(f)$ présente une partie réelle et une partie imaginaire : on la caractérise donc par un module et une phase.

Échantillonnage

Dans de très nombreux cas, et en particulier lorsqu'on utilise des méthodes numériques de résolution, on ne traite pas directement les signaux continus fournis par les capteurs de mesure, mais on procède à un échantillonnage : on n'observe pas alors ces signaux de manière continue, mais à certains instants seulement. En général, cet échantillonnage est périodique, c'est-à-dire qu'on lit l'information toutes les $k \cdot T$ unités de temps : $x(t)$ est transformé en une suite d'impulsions $x(nT)$.

Dans le cas de signaux déterministes, il convient de calculer la période T d'échantillonnage de façon à perdre le moins possible d'information sur le signal, c'est-à-dire de façon que sa reconstruction éventuelle soit la plus conforme possible. Pour déterminer cette fréquence d'échantillonnage, il faut calculer le spectre, la transformée de Fourier, du signal échantillonné. Si $X(f)$ est la transformée de $x(t)$, la transformée du signal échantillonné est

$$\sum_{-\infty}^{+\infty} X\left(f - \frac{k}{T}\right)$$

La transformée de Fourier de $x(t)$ échantillonné est donc obtenue en faisant la somme d'une infinité de fonctions, chacune d'elles étant la transformée de $x(t)$ mais décalée en fréquence de $\frac{k}{T}$.

Cela va nous permettre de donner le théorème de Shannon. Dans le domaine temporel, il existe une infinité de fonctions passant par les points $x(nT)$. Plaçons-nous alors dans le domaine fréquentiel et considérons un signal à spectre borné, c'est-à-dire

$$X(f) = 0 \text{ pour } f > f_c \text{ ou } f < -f_c \; (\textit{fig. } 41\text{a}).$$

La *figure* 41b indique le spectre du signal échantillonné pour une période d'échantillonnage T telle que $T > \frac{1}{2 f_c}$.

Nous avons indiqué chaque composante et leur somme. Pour retrouver un signal ressemblant à $x(t)$, il faudrait faire passer le signal échantillonné dans un filtre passe-bas éliminant toute composante supérieure à f_c, composantes introduites par l'échantillonnage. Dans le cas de la figure, par le fait du recouvrement des composantes élémentaires, on ne retrouvera pas $x(t)$. Au contraire, si le spectre de $x(t)$ est nul au-delà de la fréquence $\frac{1}{2T}$ (*fig.* 41c), il n'y a pas recouvrement et un filtre passe-bas (c'est-à-dire une intégration) peut reconstituer le signal. On peut alors donner l'énoncé du théorème de Shannon. Si un signal a un spectre d'énergie nul pour les fréquences supérieures à f_c, on peut l'échantillonner sans perte d'information à une fréquence égale ou supérieure à $2 f_c$. En fait, nous avons fait tout le raisonnement sur un filtre passe-bas idéal pour reconstituer le signal : un tel filtre n'est pas physiquement réalisable, car sa réponse impulsionnelle est non nulle pour $t < 0$. D'autre part, le théorème d'échantillonnage est un théorème-limite, car il n'existe pratiquement pas de signaux à spectre borné. Cependant, il permet de se faire une bonne idée de l'influence de l'échantillonnage.

Étudions maintenant la transposition de ce théorème dans le cas de l'échantillonnage de signaux aléatoires. On ne peut raisonner comme précédemment sur la transformée de Fourier de $x(t)$, puisque celle-ci est aléatoire. Le raisonnement est effectué sur la fonction d'autocorrélation et la densité spectrale de puissance. La fonction d'autocorrélation de $x(t)$ échantillonné est la fonction obtenue en échantillonnant la fonction d'autocorrélation de $x(t)$ si le processus $x(t)$ est stationnaire et ergodique. On peut donc transposer les résultats obtenus dans le cas déterministe : pour retrouver le spectre $S_x(f)$, il faut échantillonner à une fréquence égale ou supérieure à deux fois la fréquence maximale de la densité spectrale d'énergie $S_x(f)$. En général, on n'a aucune information sur la valeur de cette fréquence maximale, aussi fait-on passer les signaux à traiter dans un filtre passe-bas, qui limite en valeur le spectre, et procède-t-on ensuite à l'échantillonnage à une fréquence au moins double de celle du filtre passe-bas.

Les convertisseurs analogiques digitaux et digitaux analogiques

Actuellement, on sait transformer directement en nombre les grandeurs continues du type tension ou courant électrique, les rotations et les déplacements. Avant de décrire plus complètement les convertisseurs, nous allons brièvement passer en revue quatre problèmes :

● Dans la conversion analogique numérique, on doit nécessairement utiliser un organe de blocage afin de

maintenir constante à l'entrée du convertisseur la grandeur à convertir. La conversion analogique numérique est souvent utilisée quand un calculateur est présent dans la chaîne de traitement; il est alors nécessaire de convertir le résultat digital des calculs effectués par l'ordinateur en grandeur analogique pouvant agir sur un organe physique. Cependant, la rapidité de calcul étant largement supérieure aux inerties des organes physiques, il est nécessaire de maintenir constantes les sorties du calculateur afin qu'elles restent disponibles entre les instants où deux résultats de calcul sont fournis : donc, en conversion numérique digitale, un bloqueur est aussi souvent nécessaire.

- Le temps de conversion doit être le plus faible possible, surtout pour les processus rapides.
- Les capteurs donnent souvent une information perturbée par du bruit (par exemple des parasites dus au secteur). Une première technique de lutte contre le bruit est de coder au niveau du capteur et de transmettre au calculateur avec un code peu sensible au bruit. Comme cette conversion au niveau du capteur n'est pas toujours possible, on peut soit amplifier avant transmission, ce qui est généralement coûteux, soit transmettre à faible niveau en réalisant un filtre passe-bas avant conversion (en particulier pour éliminer le 50 Hz).
- Le code de conversion est toujours un code binaire. Le plus simple est le code binaire naturel déjà décrit. Un nombre N s'écrit dans ce code avec un mot de n chiffres de la façon suivante : $N = \sum_{i=0}^{n} a_i 2^i$ avec $a_i = 0$ ou 1. Ce code présente un inconvénient en conversion : plusieurs chiffres binaires peuvent se modifier en même temps lors du passage d'un nombre au nombre immédiatement supérieur. Ainsi 7 s'écrit 0111, et 8 s'écrit 1000 (4 chiffres binaires modifiés).

En revanche, le code binaire réfléchi ou code de Gray présente deux importantes propriétés qui rendent son emploi fréquent en codage. Tout d'abord, le passage d'un nombre au nombre immédiatement supérieur n'affecte qu'un digit. Ensuite, ce code est un code cyclique. La conversion d'un nombre écrit en code réfléchi en un nombre codé binaire naturel ou la conversion réciproque sont de plus très aisées. Ce code s'applique à des nombres compris dans un intervalle $(-c, +c)$: sans nuire à la généralité, on prendra l'intervalle $(-1, +1)$ pour notre exposé. On veut coder par un mot de longueur 5 quatre indicateurs de la valeur numérique, un indicateur du caractère positif ou négatif du nombre. Généralement, ce « bit de signe » vaut $(+1)$ si le nombre est négatif, (0) si le nombre à coder est positif ou nul. Les autres chiffres des mots-codes sont déterminés à l'aide du graphique du *tableau* III. Ainsi, un nombre compris entre $\left(-\frac{1}{2} \text{ et } -\frac{5}{8}\right)$ s'écrit 1101. On voit aussi d'après cet exemple que, lorsqu'on passe d'un nombre au nombre immédiatement supérieur, il n'y a qu'un chiffre du mot binaire qui est modifié. Pour un mot codé avec $(n+1)$ bits, la définition est de $\frac{1}{2^{n+1}}$. Enfin, il est facile de vérifier que tous les mots obtenus se déduisent les uns des autres par une permutation circulaire (code cyclique).

Pour montrer le caractère simple de la transformation, donnons sur un exemple les règles de passage du code binaire au code de Gray. Soit un nombre en binaire pur écrit $b_4b_3b_2b_1$ ($b_i = 0$ ou 1) et en code de Gray $a_4a_3a_2a_1$; les règles sont les suivantes :

$$\begin{aligned} a_4 &= b_4 & b_4 &= a_4 \\ a_3 &= b_4 \oplus b_3 & b_3 &= a_4 \oplus a_3 \\ a_2 &= b_3 \oplus b_2 & b_2 &= a_4 \oplus a_3 \oplus a_2 \\ a_1 &= b_2 \oplus b_1 & b_1 &= a_4 \oplus a_3 \oplus a_2 \oplus a_1 \end{aligned}$$

$\oplus$ étant le symbole de l'opération logique « OU exclusif ». Par exemple, $1010 = 10_{10}$ en code binaire s'écrit en code de Gray :

$$\left.\begin{aligned} a_4 &= 1 \\ a_3 &= 1 \oplus 0 = 1 \\ a_2 &= 0 \oplus 1 = 1 \\ a_1 &= 0 \oplus 1 = 1 \end{aligned}\right\} 1111$$

1011 en code de Gray correspond à :

Tableau III
Codage de chiffres par code binaire réfléchi ou code de Gray (nombre compris entre —1, +1)

−1	−7/8	−3/4	−5/8	−1/2	−3/8	−1/4	−1/8	0	1/8	1/4	3/8	1/2	5/8	3/4	7/8	1
1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	
1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	
1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	

▲ *Tableau III : codage de chiffres par code binaire réfléchi ou code de Gray (nombre compris entre — 1 et + 1).*

$$\left.\begin{aligned} b_4 &= 1 \\ b_3 &= 1 \oplus 0 = 1 \\ b_2 &= 1 \oplus 0 \oplus 1 = 0 \\ b_1 &= 1 \oplus 0 \oplus 1 \oplus 1 = 1 \end{aligned}\right\} 1101 = 13_{10}$$

Convertisseurs analogiques digitaux

Nous allons maintenant décrire successivement les codeurs analogiques digitaux de tension ou de position.

Codeurs de tension

Il y a plusieurs méthodes de réalisation : les convertisseurs à rampe, les convertisseurs à approximations successives, les convertisseurs à tension-fréquence, les convertisseurs à double pente.

Dans le cas d'une conversion par utilisation d'une *rampe*, un compteur numérique est déclenché au début du codage en même temps qu'une tension de comparaison croît à partir de zéro, par exemple. Le comptage est arrêté lorsque la tension de comparaison est égale à la tension à coder (*fig.* 42). La précision du codeur dépend de l'élément de comparaison et de la précision de la tension de comparaison. Le temps de codage dépend de la valeur de la tension à coder. Un schéma synoptique de réalisation est donné *figure* 43a. Cette méthode de conversion est simple et peu coûteuse. Dans la réalisation Hewlett-Packard 3440, la conversion est affichée sur un indicateur numérique à 4 chiffres, la résolution est de 10 μV.

Un convertisseur à *approximations successives* utilise une boucle de réaction. Un compteur avance pas à pas, et un convertisseur digital analogique, dont nous décrirons le fonctionnement plus loin, convertit cette valeur digitale en une tension qui est comparée à la valeur de la tension d'entrée. Quand l'égalité est obtenue entre les deux tensions, le bouclage est rompu, et l'état du compteur indique la valeur digitale cherchée. Le schéma synoptique d'une réalisation simple est donné *figure* 43b : la méthode est lente, car on commence par les poids binaires les plus faibles. Les procédés suivants l'améliorent. Dans le cas de la comparaison par simple pesée, la tension de référence est élaborée en ajoutant les unes aux autres des tensions proportionnelles aux différentes puissances de 2. D'après le sens de la différence entre tension à coder et tension de référence, on élabore un signal de façon à modifier la référence pour qu'elle se rapproche le plus possible de la grandeur à coder. Si telle composante dans la tension de référence est présente, le chiffre binaire correspondant vaut 1 ; dans le cas contraire, si telle composante est sautée, le chiffre vaudra 0. On commence, pour élaborer la tension de

▼ *Figure 42 : principe du codage par utilisation d'une rampe.*

fig. 42

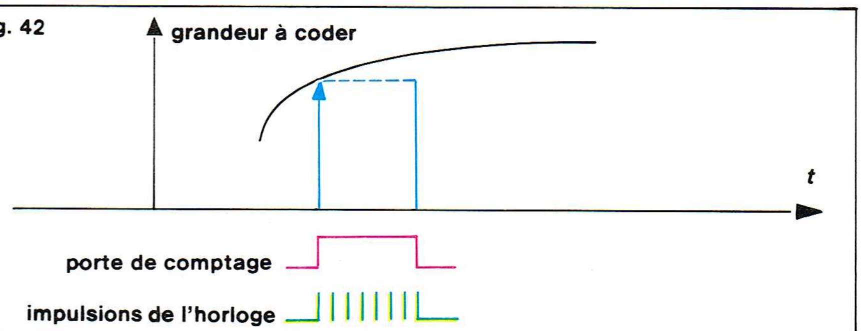

Richard Colin

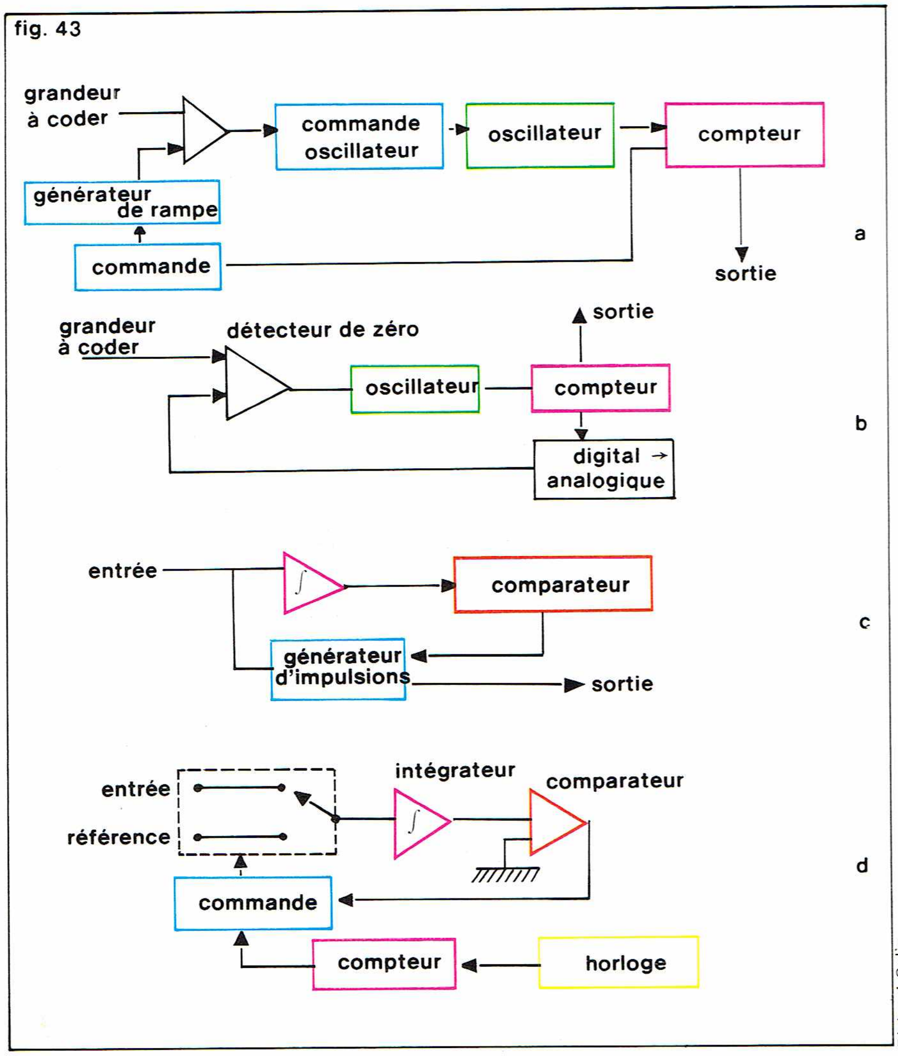

Richard Colin

▲ *Figure 43 : schémas synoptiques de quatre types de codeurs de tension : a, convertisseur à rampes ; b, convertisseur à approximations successives ; c, convertisseur à tension-fréquence ; d, convertisseur à double pente.*

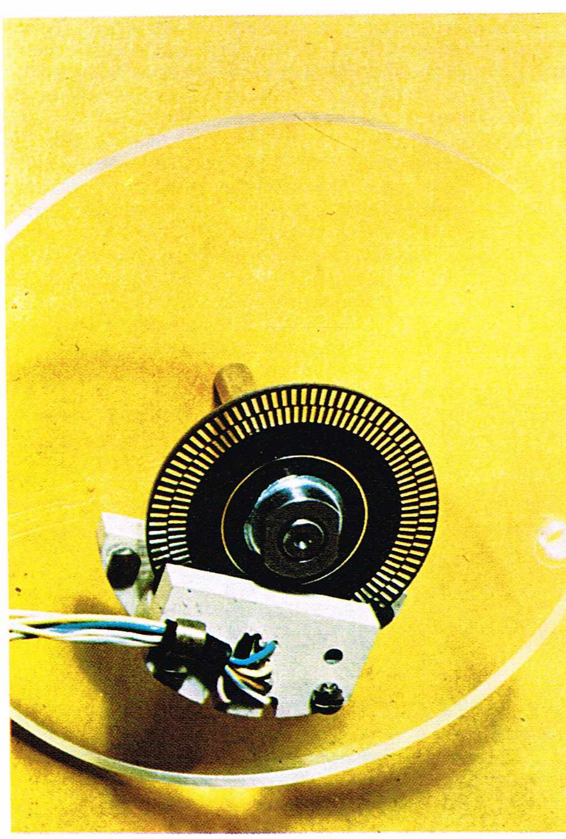

▶ *A gauche, un kit générateur d'impulsions incrémental comprenant 100 points et une remise à zéro. A droite, figure 44 : courbe permettant la comparaison d'une tension inconnue mesurée pendant un temps connu à une tension de référence mesurée pendant un temps variable (conversion double pente).*

référence, par la puissance de 2 la plus élevée (2^{n-1} si le mot a *n* chiffres). Si la différence réalisée par le comparateur est positive, c'est-à-dire si la grandeur à coder est supérieure à la tension de référence, on ajoute à la grandeur de référence la tension correspondant à 2^{n-2}. Si, par contre, cette différence est négative, on enlève la composante correspondant à 2^{n-1} et on ajoute celle correspondant à 2^{n-2}, et ainsi de suite. Le nombre d'opérations ainsi effectuées est constant, indépendant de l'amplitude de la tension à coder (le nombre d'opérations est égal au nombre de chiffres binaires). Pour diminuer le temps de conversion, on peut rendre le système asynchrone : au lieu de commander le système par un registre synchronisé sur les impulsions d'une horloge, on enchaîne les essais les uns sur les autres, la fin d'un essai commandant le suivant. Le temps gagné est ainsi dans un rapport 2.

On peut augmenter la précision des convertisseurs précédents au détriment de leur rapidité : c'est la méthode de comparaison dite de *double pesée*. Tout d'abord, on mesure une tension V_1, ensuite on retranche de manière analogique la grandeur à mesurer V ; on mesure

$$V_2 = V_1 - V$$

la valeur V est obtenue en faisant la différence en binaire $V_2 - V_1$. Par rapport à la méthode de simple pesée, on compare toujours à la même grandeur V_1 ; quelle que soit la tension à coder V, le convertisseur travaille donc toujours dans les mêmes conditions. Ce système est plus lent que le précédent (temps plus que doublé), mais plus précis (toutefois son prix de revient est plus élevé). Les méthodes à approximations successives sont en général très rapides et stables. Leur précision et leur stabilité dépendent de la résolution du comparateur, de la précision du convertisseur digital analogique.

Les *convertisseurs à tension-fréquence* réalisent en premier lieu une intégration de la tension à convertir. Le résultat numérique est donc la valeur moyenne de la tension à convertir durant le temps d'opération. C'est un système bouclé (*fig.* 43c) : la fréquence d'un générateur d'impulsions est commandée de manière que la valeur moyenne des impulsions soit égale à la valeur moyenne de la grandeur à convertir. Si la grandeur d'entrée est par exemple positive, la sortie de l'intégrateur présente une évolution linéaire à pente négative. Quand le niveau du seuil du comparateur est atteint, celui-ci commande un générateur fournissant une impulsion déterminée en amplitude et en durée qui décharge le condensateur et replace l'intégrateur en position de départ. Cette méthode n'est ni aussi stable ni aussi précise que la méthode par approximations successives.

Le type de conversion le plus utilisé, dans les voltmètres numériques de précision par exemple, est la conversion dite *double pente*. Le schéma synoptique en est donné *figure* 43d. On compare dans cette méthode une tension inconnue mesurée pendant un temps connu avec une tension de référence mesurée pendant un temps variable. Durant un temps connu T, calibré par un compteur, on connecte l'entrée de l'intégrateur à la tension inconnue V_e. A la fin de ce temps, l'interrupteur bascule sur une entrée dite de référence V_{ref} de polarité opposée. Dans un deuxième temps *t* variable, la charge décroît avec le temps, et on a une rampe linéaire. Ce processus s'arrête quand la tension atteint par exemple la valeur 0 (*fig.* 44). On a donc :

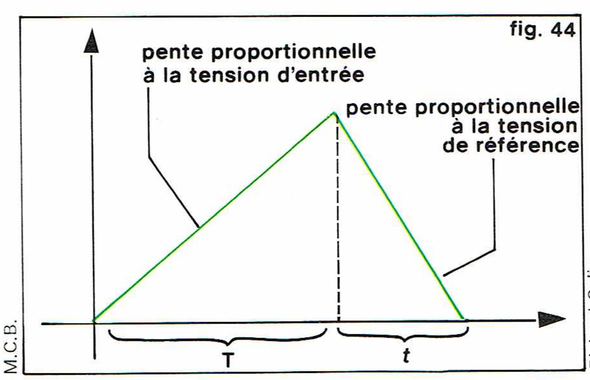

M.C.B. — Richard Colin

$$V_e T = V_{ref}\, t \text{ donc } V_e = V_{ref} \frac{t}{T}$$

T et t sont déterminés par comptage d'impulsions d'horloge. Dans cette technique, la conversion finale est une conversion tension-temps; il y a intégration de l'entrée comme dans le cas de la conversion tension-fréquence; la précision et la stabilité sont bonnes sous réserve de celles du relais et de l'intégrateur.

Codeurs de position

Si on utilise un transducteur continu, le mouvement est transformé soit en une grandeur électrique (par un potentiomètre, par exemple), soit en un intervalle de temps (déphasage). Ce déphasage ou cet intervalle est ensuite codé par une des méthodes précédemment décrites. Si on utilise un transducteur quantifié, on associe directement un nombre à la position à coder. Tels sont les dispositifs à code tournant (*fig.* 45). Soit un disque divisé en plusieurs couronnes, chacune correspondant à 1 bit. Chaque couronne porte alternativement des 1 ou des 0; la première couronne est séparée en deux, une zone correspondant à 1, l'autre à zéro. La seconde est divisée en 4 parties représentant alternativement 1 ou 0. Si les bits 1 sont, par exemple, matérialisés par une piste conductrice, il suffit de placer une série de frotteurs pour détecter ces zones et d'avoir directement la valeur binaire de l'angle de rotation. Pour remplacer les frotteurs, on peut utiliser des capteurs à photodiodes et un disque ayant des zones transparentes et des zones opaques, placé devant une source lumineuse. On aura intérêt ici, afin d'éliminer les erreurs dues au changement de chiffre, à utiliser un disque correspondant au code de Gray, car un seul bit change à chaque fois.

On peut aussi utiliser des dispositifs à comptage. Considérons un disque tournant dont le bord porte n divisions. Il suffit, à partir d'une position de référence, de compter les divisions qui défilent; il y a toutefois une difficulté lors d'un changement de sens de rotation.

Convertisseurs digitaux-analogiques

Ces convertisseurs sont utilisés pour effectuer une visualisation tracée de résultats, pour commander un actionneur à partir d'un calculateur numérique, etc. Les *décodeurs de tension* les plus utilisés sont les décodeurs à réseau (*fig.* 46). Chaque interrupteur figuré par I_i correspond à la valeur 1 ou 0 du chiffre correspondant du nombre binaire à décoder. Quand une branche est reliée à la tension de référence, toutes les autres étant reliées à la masse, le courant de la branche parcourt le réseau, et est divisé par 2 à chaque jonction. La contribution en courant de chaque branche est pondérée suivant le code binaire. Ce réseau R — 2 R présente l'avantage d'avoir une impédance constante vue de l'entrée du sommateur (R). La précision dépend des différences relatives des résistances, donc de leur évolution respective en fonction de la température.

Les *décodeurs de position* sont réalisés avec des codeurs de position entraînés par un automatisme et insérés dans un asservissement de position (*fig.* 47). Le codeur délivre un signal donnant la position de l'arbre de l'automatisme. Ce nombre est comparé à celui à décoder. La différence décodée commande l'asservissement. Des variantes de ce procédé permettent de supprimer le codeur de position.

fig. 46

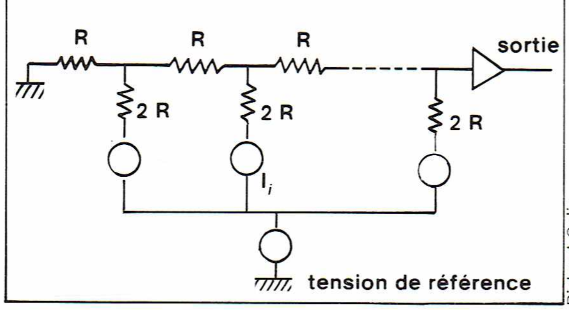

Richard Colin

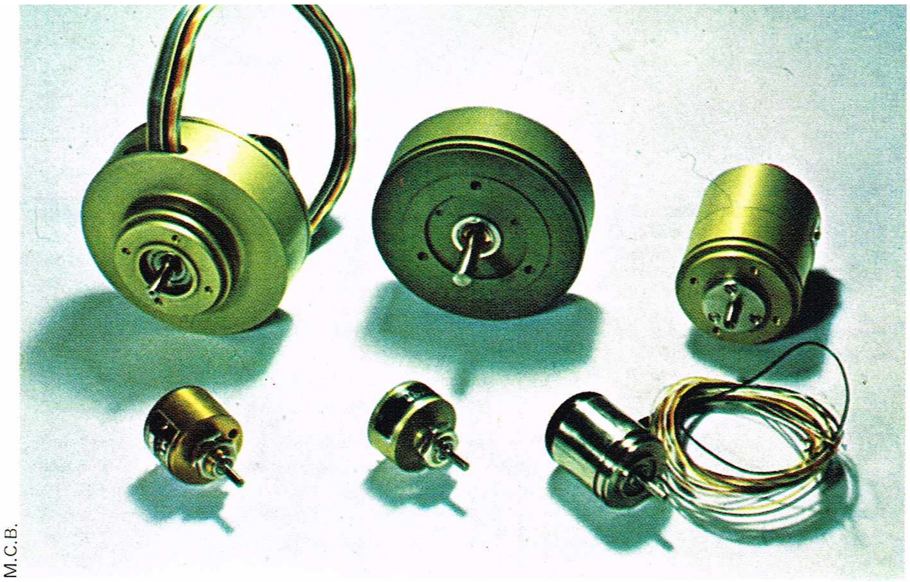

M.C.B.

fig. 47

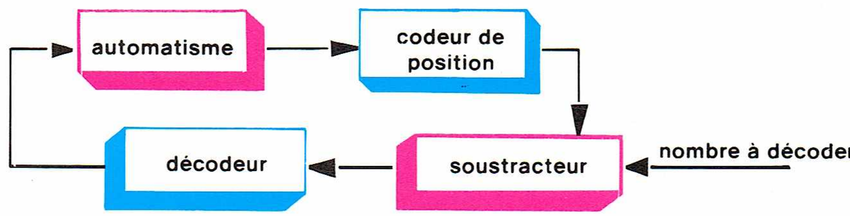

Richard Colin

▲ *En haut, quelques codeurs optiques de position.*
Ci-dessus, figure 47 : schéma synoptique de la réalisation d'un décodeur de position.

Mesures des fonctions d'autocorrélation et des spectres

Pour calculer la *fonction de corrélation* entre deux fonctions aléatoires $x\,(t)$ et $y\,(t)$, il faut évaluer la quantité $E\,[x\,(t)\; y\,(t - \tau)]$ pour différentes valeurs de τ. Si le processus est ergodique, on peut remplacer la moyenne probabiliste $E\,(\cdot)$ par une moyenne temporelle

$$\frac{1}{T} \int_0^T x\,(u)\; y\,(u - \tau)\; du$$

Dans le cas de signaux échantillonnés, ceci devient :

$$\frac{1}{N+1} \sum_{i=0}^{N} x\,(iT)\; y\,[(i - m)\; T]$$

où T est la période d'échantillonnage (on ne calcule la fonction de corrélation que pour des multiples de la période d'échantillonnage). Pour calculer une fonction de corrélation, il faut donc réaliser un opérateur retard, un multiplieur, un intégrateur ou un sommateur. Une méthode très lente et aujourd'hui un peu abandonnée consiste à réaliser un *corrélateur point par point*. On utilise un enregistreur magnétique muni d'un dispositif permettant de faire varier la position relative des deux têtes de lecture. Sur une piste on lit $x\,(t)$, sur l'autre $y\,(t)$. Ainsi, pour chaque position des têtes de lecture, $y\,(t)$ sera retardé d'un temps τ par rapport à $x\,(t)$. Les deux signaux sont ensuite multipliés, intégrés ou moyennés. Ce dispositif n'est plus guère utilisé aujourd'hui, les *corrélateurs électroniques* étant plus fiables et moins coûteux.

Pour aller plus vite, on cherche à avoir tous les points de la fonction de corrélation en même temps, de manière à éviter d'avoir à lire un grand nombre de fois les signaux. Ainsi travaillent les *corrélateurs en temps réel* sur signaux échantillonnés. Soit le k-ième échantillon du signal $y\,(t) : y\,(kT)$. On réalise les produits successifs

$$y\,(kT) \cdot x\,(kT),\; y\,(kT) \cdot x\,[(k+1)\;T],\; y\,(kT) \cdot x\,[(k+2)\;T],\; \ldots,\; y\,(kT) \cdot x\,[(k+m)\;T]$$

ce qui correspond aux produits unitaires pour les retards respectifs 0, T, 2 T, ..., mT de la fonction de corrélation. Quand ceci est terminé, on recommence avec une valeur $y\,(l\mathrm{T})$ de $y\,(t)$. On somme alors les valeurs successives des produits correspondant à un retard nul, T, ..., mT. Chaque séquence comporte le prélèvement de m échantillons espacés de T (*fig.* 48).

Pour calculer la fonction de corrélation sur N produits, il faut prendre mN échantillons, et donc observer le signal durant mNT unités de temps. Pour évaluer l'erreur

◀▼ *A gauche, figure 46 : schéma de principe d'un décodeur de tension à réseau.*
Ci-dessous, figure 45 : représentation schématique d'un disque codé servant dans un codeur de position.

fig. 45

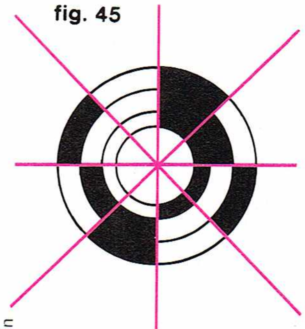

Richard Colin

▶ *Figures 48 et 49 : principe de calcul de la fonction de corrélation entre deux fonctions aléatoires x (t) et y (t); fig. 48, méthode de calcul sur signaux échantillonnés; fig. 49, calcul automatique en temps réel.*

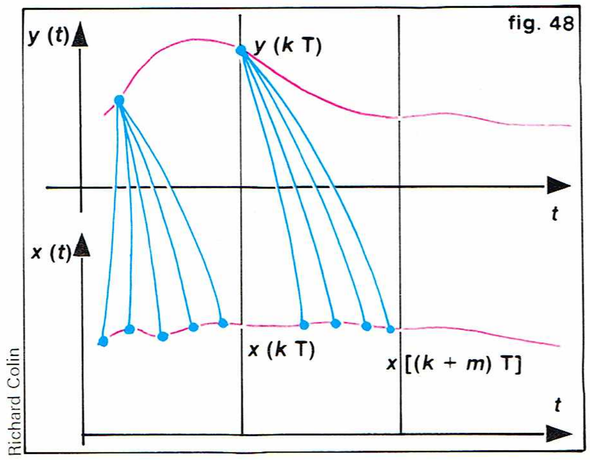

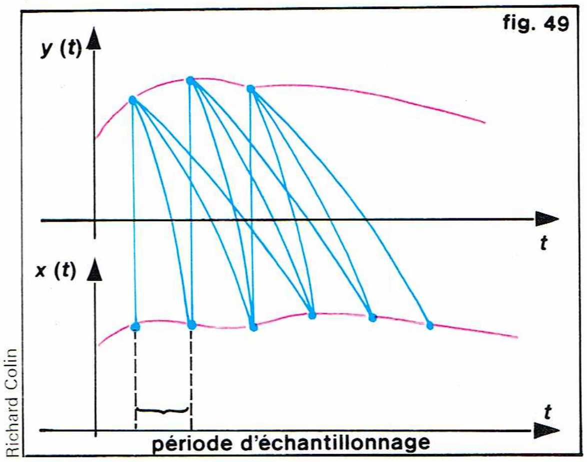

possible, donnons-nous un intervalle de confiance de 90 %, c'est-à-dire qu'on a une probabilité de 0,90 que l'erreur d'estimation soit dans l'intervalle (— ε, + ε) ; on démontre alors, pour des signaux gaussiens, que

$$\varepsilon = 1{,}6\sqrt{\frac{m\mathrm{T}}{m\mathrm{NT}}\left(1 + \frac{\mathrm{R}^2xx\ (0)}{\mathrm{R}^2xx\ (\mathrm{T})}\right)}$$

L'erreur à l'origine vaut donc $\varepsilon_0 = 1{,}6\sqrt{2}\,\frac{1}{\sqrt{\mathrm{N}}}$. L'erreur est inversement proportionnelle à $\sqrt{\mathrm{N}}$.

On peut avoir une autre expression en faisant intervenir la largeur spectrale f_c du processus étudié. En effet, $\mathrm{F} = \frac{1}{\mathrm{T}} = 2\,\alpha f_c$ (coefficient multiplicatif de la fréquence d'échantillonnage par rapport à la fréquence de Shannon). En ce cas, l'erreur à l'origine ε_0 s'écrit :

$$\varepsilon_0 = \frac{1{,}6}{\sqrt{f_c\mathrm{T_T}}}\cdot\sqrt{\frac{n}{\alpha}}$$

($\mathrm{T_T} = n\mathrm{NT}$, temps d'observation total).

L'erreur est $\sqrt{\frac{n}{\alpha}}$ fois plus grande dans le cas de l'échantillonnage. En fait, pour visualiser correctement la fonction de corrélation, on doit échantillonner à un rythme beaucoup plus rapide que la fréquence de Shannon et le terme $\frac{n}{\alpha}$ est bien diminué.

On réalise ainsi des *corrélateurs automatiques* travaillant en temps réel, utilisant simultanément toute l'information sur *x* (*t*) et *y* (*t*). Chaque voie est échantillonnée au même rythme (1/T) comme l'indique la *figure* 49. Le retard est réalisé soit à l'aide d'un registre à décalage, soit à l'aide de tables et pointeurs dans des mémoires RAM. La durée d'intégration est fonction, pour une bonne précision, de la bande spectrale du processus; on distingue donc deux cas : les signaux de basse fréquence et les signaux de fréquence plus élevée. Dans le cas de signaux basse fréquence, l'intégration est nécessairement longue, et on procède par des méthodes numériques. Les signaux sont échantillonnés par deux convertisseurs analogiques numériques, mémorisés (les retards correspondent alors aux positions mémoires), multipliés, puis sommés dans des positions mémoires correspondant chacune à une valeur de la fonction de corrélation. Il est à noter qu'il est inutile d'échantillonner et de mémoriser toutes les valeurs nécessaires; on mémorise seulement *m* valeurs de *x* (*t*) et une valeur de *y* (*t*); on réalise tous les produits entre deux périodes d'échantillonnage. Ces appareils sont actuellement réalisés en technologie MOS, donc en version intégrée. Le nombre de points de la fonction d'autocorrélation calculée peut être de 256, 512, 1 024, 2 048. Pour des signaux hautes fréquences, le temps d'intégration nécessaire est plus court (le temps d'intégration est, rappelons-le, donné pour un corrélateur idéal de $\mathrm{T_T} = \frac{2{,}6}{\varepsilon^2 f_c}$, ε étant le niveau d'erreur choisi).

Si $f_c = 150$ Hz pour une précision de 2 %, un temps d'intégration de 20 s suffit. En ce cas, on réalise cette intégration par un simple filtre analogique passe-bas. Du fait qu'il peut aussi réaliser le produit sous forme analogique, le codage analogique numérique est imposé par la réalisation des retards. Il est inutile de coder les deux voies; seule la voie devant être retardée sera convertie en numérique. De plus, à cause de la présence de fréquences élevées dans le signal, on peut faire fonctionner l'ensemble sous forme parallèle. Ce type de corrélateur est en fait constitué de *m* corrélateurs associés en parallèle, chacun associé à un retard de la voie *y* convertie en numérique. Rien, en principe, ne limite le nombre de points, si ce n'est le prix des composants, en baisse actuellement; la technologie LSI permet de faire des corrélateurs ayant un très grand nombre de points sans se heurter à des difficultés de prix et de volume, insurmontables avec les anciennes technologies.

Pour calculer la *densité spectrale de puissance,* deux approches sont possibles : par transformée de Fourier ou par filtrage direct du signal. Dans ce dernier cas, on filtre le signal dans un filtre (*fig.* 50a) dont la fonction de transfert se rapproche le plus possible du filtre idéal de valeur 1 entre $f_0 - \Delta f$ et $f_0 + \Delta f$, et de valeur 0 ailleurs. La sortie du filtre est élevée au carré dans un quadrateur, le résultat étant moyenné dans un intégrateur. Ces opérations sont à répéter pour autant de valeurs de définition en fréquence que l'on désire pour le spectre S_x (*f*); les répéter N fois exclut donc un travail en temps réel. Il faut constituer une batterie de filtres en parallèle, chacun travaillant pour une fréquence bien déterminée (*fig.* 50b). Ce système présente d'énormes difficultés de réalisation (largeurs de bande égales; positionnement des fréquences, non-recouvrement des filtres).

Une autre méthode consiste à numériser les signaux pendant une durée τ (c'est-à-dire à prendre *n* échantil-

▼ *Figure 50 : montage permettant le calcul de la densité spectrale de puissance par filtrage direct du signal; a, calcul d'un point pour une valeur de la fréquence; b, montage permettant d'obtenir simultanément N valeurs de définition en fréquence pour le spectre S_x (f).*

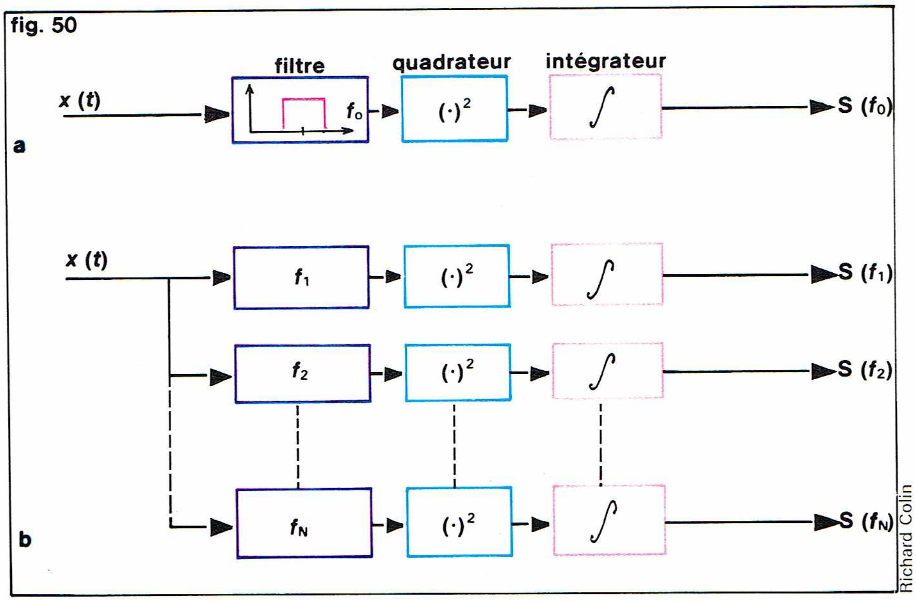

lons). On relit cette mémoire à grande vitesse, on décode en analogique, on filtre, puis on intègre la sortie du filtre élevée au carré. Après N relectures et en changeant la fréquence de définition du filtre, on obtient le spectre $S_x(f)$. Comme on travaille sur une tranche de durée τ, il faudra, pour avoir une bonne précision, recommencer m fois (donc $m\tau = N$). Si les N relectures de la mémoire peuvent avoir lieu durant une période d'échantillonnage T, le système peut travailler en temps réel. C'est l'analyseur à compression de temps.

L'utilisation directe de la transformée de Fourier permet de travailler entièrement en numérique. De plus, Cooley et Tuckey ont mis au point un algorithme rapide de calcul de transformée de Fourier (FFT, « Fast Fourier Transform »). Actuellement sont commercialisés des calculateurs en technologie intégrée dont la fonction unique est le calcul de la transformée de Fourier. Considérons $x(t)$ pendant une durée θ. On aura $x(t) = x(\theta)$ dans l'intervalle $t - \theta/2,\ t + \theta/2$. $x_\theta(t)$ a une transformée de Fourier $X_\theta(f)$. Par le théorème de Parseval

$$\frac{1}{\theta}\int |x_\theta(t)|^2\,dt = \frac{1}{\theta}\int_{-\infty}^{+\infty} |X_\theta(f)|^2\,df = \int S_{X\theta}(f,\theta)\,df$$

Donc:
$$S_{X\theta}(f) = \frac{|X_\theta(f)|^2}{\theta}$$

Pour calculer avec la même résolution la densité spectrale sur $T = n\theta$, on calcule $S_{X\theta}(f)$ sur chaque tranche et on fait la moyenne

$$S_X(f,\theta) = \frac{1}{n}\sum_\theta S_{X\theta}(f) = \frac{1}{n}\sum_\theta \frac{|X_\theta(f)|^2}{\theta}$$

Échantillonnons le signal à la fréquence $F_e = \frac{1}{T_e}$; et soit N le nombre de points mémorisés. La durée du signal est $\theta = NT_e$. On montre facilement que le spectre calculé par la méthode ci-dessus $S_{XX}(f,\theta)$ est égal au spectre réel convolué par

$$\theta^2\left(\frac{\sin \pi f\theta}{\pi f\theta}\right)^2$$

La finesse d'analyse est donc inversement proportionnelle à θ (largeur de $\left(\frac{\sin \pi f\theta}{\pi f\theta}\right)^2 \theta^2$ à mi-hauteur). Et elle est donc liée à $\theta = NT_e$. N étant fixé par construction, on a intérêt à échantillonner $x(t)$ à une fréquence aussi proche que possible de la fréquence de Shannon. Soit f_c la limite supérieure du spectre

$$F_e = 2\,\alpha f_c \quad (\alpha \geqslant 1)$$

On obtient N points du spectre, celui-ci est donc échantillonné en fréquence avec un intervalle $\Delta f = \frac{f_c}{N}$. Au mieux, le spectre est échantillonné dans les mêmes conditions que le signal, c'est-à-dire dans le même rapport au regard de la fréquence de Shannon.

On peut opérer enfin par calcul préalable de la fonction de corrélation, puis prendre la transformée de Fourier. Avec un corrélateur à N points donnant la fonction de corrélation pour des retards variant entre $-[(N-1)]\,T_e$ et $[(N-1)]\,T_e$, on démontre que la finesse d'analyse ne peut être meilleure que

$$\frac{1}{2\,(N-1)\,T_e}$$

On a donc intérêt à avoir $2\,(N-1)\,T_e$ aussi grand que possible, et donc, N étant fixé par construction, à prendre T_e aussi grand que possible, et F_e faible (tout en restant compatible avec le théorème de Shannon). La plus basse fréquence analysée du spectre est $\frac{1}{2\,(N-1)\,T_e}$ et les fréquences seront espacées de $\frac{1}{2\,(N-1)\,T_e}$. La fréquence maximale sera $\frac{1}{2\,T_e}$. Avec un corrélateur à N points, on peut calculer par transformée de Fourier N points significatifs du spectre, mais rien n'empêche d'en calculer un nombre plus grand par interpolation.

Les appareils calculant corrélation et spectre, appelés *analyseurs de spectre*, sont maintenant réalisés en technologie intégrée : ils comprennent des organes de mémoire pour les entrées et la conservation des valeurs des fonctions sinus et cosinus, un multiplicateur, un intégrateur. Généralement, outre la partie réelle et la partie imaginaire du spectre (dans le cas d'un cross-spectre), ces appareils fournissent module et phase.

Quelques applications des méthodes de corrélation

- Nous allons tout d'abord montrer comment on peut *détecter un signal périodique noyé dans du bruit.* Soit $x(t)$ le signal périodique de période T, $n(t)$ le bruit de moyenne supposée nulle, $y(t)$ l'observation :

$$y(t) = x(t) + n(t)$$

Nous supposons aussi le signal $x(t)$ non correlé avec le bruit $n(t)$, ce qui est une hypothèse physique très plausible. Calculons l'autocorrélation de l'observation $y(t)$:

$$\begin{aligned} R_{yy}(\tau) &= E[(y(t)\,y(t-\tau)] \\ &= E[(x(t)+n(t)\,(x(t-\tau)+n(t-\tau)] \\ &= R_{xx}(\tau) + R_{nn}(\tau) \end{aligned}$$

(Puisque $R_{xn}(\tau) = R_{nx}(\tau) = 0$.)

Si le bruit est blanc (*cf.* définition donnée antérieurement), $R_{yy}(\tau)$ s'écrit $R_{xx}(\tau)$.

Si le bruit n'est pas blanc, il présente au moins un spectre limité en fréquence, donc, pour $|\tau| > T_1$, $R_{nn}(\tau) = 0$, et on retrouve l'équation ci-dessus. Or $R_{xx}(\tau)$ est la fonction d'autocorrélation d'un signal périodique, elle est donc périodique, et cette méthode permet de déceler s'il existe ou non un signal périodique noyé dans du bruit.

Pour simplifier, supposons le signal périodique de la forme $X_0 \cos\left(2\pi \frac{t}{T} + \varphi\right)$. Le rapport de la puissance du signal à la variance σ^2 du bruit s'appelle le rapport signal sur bruit. Il vaut ici $\eta = \frac{X_0^2}{\sigma^2}$; c'est une indication des « forces » relatives. Si le calcul de la corrélation est effectué sur n réalisations, on montre que ce rapport signal sur bruit en sortie du corrélateur devient :

$$\eta_1 = \frac{n}{\frac{4}{\eta} + \frac{2}{\eta^2}}$$

A noter que le rapport signal sur bruit se donne généralement en décibels $\left(\eta_{dB} = 10 \log_{10} \frac{X_0^2}{\sigma^2}\right)$. Ainsi, si n vaut 1 000, le rapport signal sur bruit peut passer de — 35 dB à — 30 dB ; si n vaut 100 000, de — 35 dB à — 22 dB.

- Une deuxième application est constituée de l'*extraction d'un signal répétitif noyé dans du bruit.* On suppose connus les instants d'apparition du signal, on observe

$$y(t) = x(t) + n(t)$$

où $n(t)$ est un processus de moyenne nulle spectre borné. A chaque début d'apparition du signal $x(t)$, on commence un échantillonnage et on mémorise ces échantillons. Soit N le nombre d'échantillons pris sur une période $y_1(0)$, $y_1(T_c)$ ... $y_1(N-1)(T_c)$. On répète ce processus sur m intervalles de temps (ces intervalles sont supérieurs aux périodes d'apparition du signal [*fig.* 51]). On additionne ensuite les échantillons de même rang, c'est-à-dire qu'on constitue :

$$\sum_{i=1}^{m} y_i(0) \quad \sum_{i=1}^{m} y_i(T_c) \ldots \sum_{i=1}^{m} y_i((N-1)\,T_c)$$

Si le spectre du bruit est borné à fréquence maximale du spectre, f_c faible ($1/f_c$ période du signal), les échantillons successifs de bruit sont indépendants et

$$\sum_{i=1}^{m} y_i(jT_c) = \sum_{i=1}^{m} [x_i(jT_c) + n_i(jT_c)]$$
$$\simeq \sum_{j=1}^{m} x_i(jT_c) \simeq m x_i(t)$$

$x_i(\ )$ représente le i-ième échantillon du signal $x(t)$. On retrouve donc bien le signal $x(t)$. L'opération ainsi

▶ *Figure 51 : principe de l'extraction d'un signal répétitif noyé dans du bruit (voir développement dans le texte).*

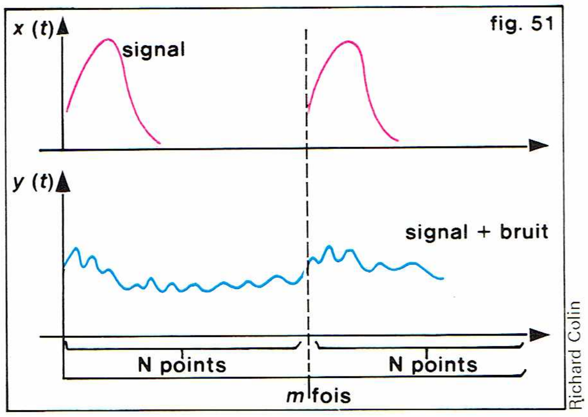

effectuée s'appelle un moyennage. Si η_0 est le rapport signal sur bruit avant le moyennage, η_1 après, on a la relation

$$\eta_1 = \sqrt{m}\,\eta_0$$

On améliore donc le rapport signal sur bruit dans le rapport $\sqrt{m}$. Pour voir quelles sont les limites de cette méthode, il faut être conscient des nombreuses hypothèses prises en début de l'exposé. Il existe d'autres méthodes d'extraction d'un signal du bruit, valables avec des hypothèses moins contraignantes, mais aussi plus coûteuses.

● Une autre application très utilisée est la *mesure de la réponse impulsionnelle d'un système linéaire*. En effet, au cours d'exposés précédents, nous avons déjà parlé de cette fonction très importante, mais nous n'avons jamais défini comment on l'obtenait. On peut la déduire des équations physiques des constituants du système, ou bien par analyse des signaux d'entrée et de sortie $x(t)$ et $y(t)$. Parmi les méthodes utilisant cette analyse, celle que nous allons décrire suppose qu'on place à l'entrée du système un processus aléatoire. Rappelons que si $h(u)$ est la réponse impulsionnelle du système :

$$y(t) = \int_{-\infty}^{t} x(u)\,h(t-u)\,du$$

Si on calcule la corrélation sortie-entrée, on a le résultat suivant :

$$R_{xy}(T) = \int_{-\infty}^{T} R_{xx}(u)\,h(T-u)\,du$$

Supposons que le processus aléatoire $x(t)$ en entrée soit un bruit blanc, alors $R_{xx}(u) = \delta(u)$ et $R_{xy}(T) = h(T)$. On mesure donc directement la réponse impulsionnelle du système par corrélation sortie-entrée (*fig.* 52). Cette méthode présente le très grand avantage d'être encore applicable si le signal test $x(t)$ est superposé à l'entrée $e(t)$ du système en fonctionnement normal. Car

$$R_{(x+e)\,y}(T) = \int R_{xx}(u)\,h(T-u)\,du$$

puisque $R_{ye} = 0$, car y et e sont indépendants. On retrouve $R_{(x+e)\,y}(T) = h(T)$ si $R_{xx}(T) = \delta(T)$. De plus, ce signal $x(t)$ peut être choisi assez faible en puissance pour ne pas perturber le fonctionnement du système. Cependant, il faut réaliser un processus $x(t)$ « blanc » qu'on sait non physique. Il suffit d'abord que la densité spectrale de $x(t)$ soit plus grande que la bande passante du système (*fig.* 53). Ainsi, pour le système, le bruit apparaît comme « blanc ». Cela revient à dire que $R_{xx}(u)$ doit être étroite devant $h(T)$. On réalise en général $x(t)$ à l'aide d'un bruit binaire pseudo-aléatoire (*fig.* 54a) dont la fonction de corrélation est donnée *figure* 54b. Cette fonction d'autocorrélation ne correspond pas à celle d'un bruit blanc, puisque, en particulier, elle est périodique. Le signal se présente sous la forme d'une succession d'impulsions de largeur variable, cette largeur étant un multiple entier d'une largeur minimale θ. Si la longueur d'une séquence est $N\theta$, la fonction d'autocorrélation est un triangle de base 2θ. Si on répète indéfiniment la séquence de base, la fonction d'autocorrélation est périodique de période $N\theta$.

La génération d'un tel signal se fait au moyen d'un registre à décalage bouclé sur lui-même par des OU exclusifs selon des techniques analogues aux générations des codes cycliques. Si le registre a n étages et fonctionne avec une fréquence d'horloge F, la base des triangles de l'autocorrélation est $\frac{2}{F}$, et la période $(2^n - 1)\,\theta$. Par action sur l'horloge et sur le nombre d'éléments du registre, on peut se rapprocher de l'autocorrélation d'un bruit blanc. Comment choisir n ? Si la réponse impulsionnelle est présumée s'annuler pour $t > t_M$ il faut que $(2^n - 1) \gg t_M$ soit $(2^n - 1) > t_M F$, soit environ $t_M > \frac{\log t_M F}{\log 2}$. D'autre part, il ne faut pas hésiter à prendre θ assez petit, ce qui est évident d'après la forme de la fonction d'autocorrélation.

Lien avec la théorie de l'information. Rapport signal sur bruit

Pour conclure cette partie consacrée à l'analyse du signal, nous allons reprendre la notion d'information transmise par un canal dans le cas continu. Rappelons que cette information I (X ; Y) transmise entre l'entrée X et la sortie Y du canal s'écrit

$$I(X;Y) = \iint f(x,y)\,\mathrm{Log}\,\frac{f(x,y)}{f_X(x)\,f_Y(y)}\,dxdy$$

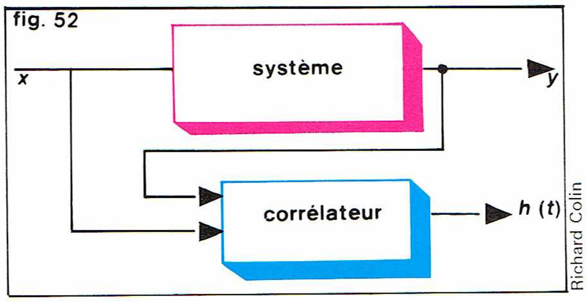

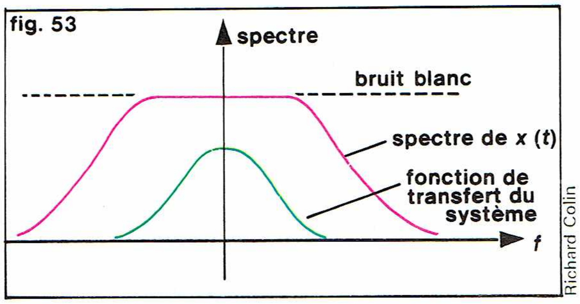

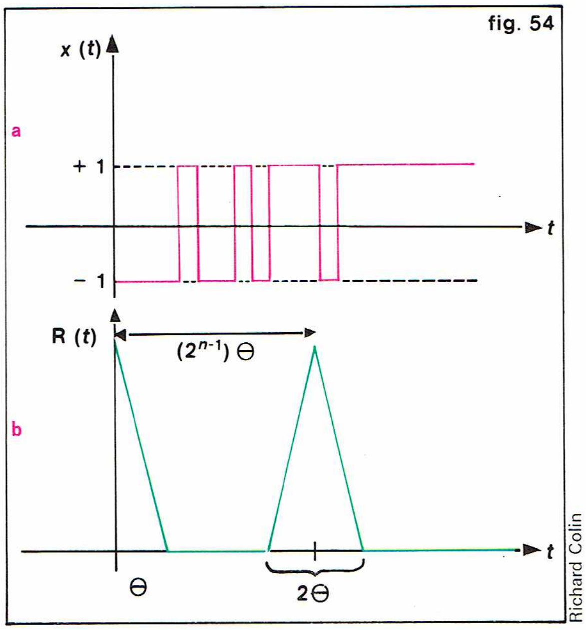

▶ *Figures 52, 53 et 54 : principe de la mesure de la réponse impulsionnelle d'un système linéaire par corrélation sortie-entrée (voir développement dans le texte).*

où $f\ (x, y)$ est la densité conjointe de x et de y, $f_X\ (x)\ f_Y\ (y)$ respectivement les densités marginales de x et de y. Un canal transmettant des signaux continus est dit aussi continu. En général, le canal a une bande passante limitée, ce qui peut entraîner une perte d'information si le signal présente un spectre trop large. Une modification de l'information transmise peut aussi être causée par le bruit présent dans le canal.

Soit $(-f_c, +f_c)$ la bande passante du canal. Les signaux transmis sont alors justifiables du théorème d'échantillonnage. Les signaux sont entièrement déterminés par des valeurs espacées de $\frac{1}{2 f_c}$ secondes. Il suffit donc de les spécifier $2 f_c$ fois au cours d'une seconde. La capacité du canal est définie, rappelons-le, comme le maximum d'information transmissible par unité de temps. Nous supposerons pour son calcul que le bruit est une fonction aléatoire stationnaire de second ordre. La capacité C est donc à un instant le maximum, pris par rapport à toutes les lois d'émission possibles, de I (X; Y). La vitesse maximale de transmission de l'information est donc $2 f_c$ C bits par seconde. Pour faire le calcul, nous allons ajouter les hypothèses suivantes :

- $y\ (t) = x\ (t) + n\ (t)$, c'est-à-dire le bruit est additif.
- Le bruit $n\ (t)$ est indépendant du signal.
- $n\ (t)$ est de moyenne nulle

$$\mathrm{I\ (X; Y) = H\ (Y) - H\ (Y/X)}$$
$$\mathrm{H\ (Y/X) = H\ (X/X) + H\ (N/X) = H\ (N)}$$

En effet, la connaissance de X enlève toute incertitude sur X, d'autre part le bruit et le message sont indépendants. Ajoutons l'hypothèse que le bruit est un processus gaussien de variance σ^2

$$\mathrm{H\ (N)} = \log \sqrt{2\ \pi e \sigma^2}$$

d'après ce que nous avons vu précédemment. Donc

$$C = \max\ (\mathrm{H\ (Y)} - \log \sqrt{2\ \pi e \sigma^2})$$

Si le message $x\ (t)$ est aussi un processus gaussien centré de variance s^2, $y\ (t)$ se comporte comme un processus gaussien de variance $(s^2 + \sigma^2)$ et H (Y) vaut :

$$\mathrm{H\ (Y)} = \log \sqrt{2\ \pi e\ (\sigma^2 + s^2)}$$

Donc $\quad C = \max\ [\log \sqrt{2\ \pi e\ (\sigma^2 + s^2)} - \log \sqrt{2\ \pi e \sigma^2}]$

Or l'entropie d'une fonction aléatoire est maximale lorsque ce processus est gaussien, cas dans lequel nous sommes. Donc la capacité d'un tel canal s'écrit

$$C = \frac{1}{2} \log \left(1 + \frac{s^2}{\sigma^2}\right)$$

et la vitesse de transmission de l'information maximale vaut

$$V = f_c \log \left(1 + \frac{s^2}{\sigma^2}\right) \text{ bits/s}$$

Nous obtenons la célèbre formule de Hartley-Tuller-Shannon. Cette formule indique le lien précis qu'il y a entre bande passante $(-f_c, +f_c)$ et rapport signal sur bruit $\frac{s^2}{\sigma^2}$.

En suivant le modèle géométrique de Shannon, nous allons voir qu'on peut atteindre cette vitesse maximale sans perte d'information. Nous rappellerons au premier abord quelques résultats sur les espaces multidimensionnels. Si $x_1, ..., x_n$ sont les coordonnées d'un point M dans un tel espace, la distance de M à l'origine O vaut

$$OM = \sum_{i=1}^{n} x_i^2$$

et le volume V d'une hypersphère de rayon a

$$V = \frac{\pi^{n/2}}{\Gamma\ (n/2 + 1)}\ a^n$$

$(\Gamma\ (x) = \int_0^x t^{x-1} e^{-t}\, dt$ est une fonction spéciale appelée fonction gamma).

Si les signaux acheminés par le système ont une durée de T secondes, le canal présentant une largeur de bande $(-f_c, +f_c)$, on peut, d'après le théorème d'échantillonnage, représenter le signal par $2 f_c$T échantillons. Dans un espace à $2 f_c$T dimensions, le signal est représenté par un point, chaque coordonnée égalant la valeur d'un échantillon x_i. La puissance moyenne de $x\ (t)$ peut se calculer par

$$S^2 = \frac{1}{2 f_c T} \sum_{i=1}^{2 f_c T} x_i^2$$

donc la distance du point X, signal à l'origine, s'écrit :

$$OX^2 = \sum_{i=1}^{2 f_c T} x_i^2 = 2 f_c T S^2$$

La distance du point représentatif du signal est égale au produit du nombre de dimensions par la puissance moyenne. Donc, si les signaux sont des morceaux de T secondes d'un signal continu, les points représentatifs sont à la surface d'une hypersphère dans un espace à $2\ Tf_c$ dimensions (la puissance des signaux étant considérée la même). Ajoutons maintenant un bruit gaussien centré de variance (donc de puissance) σ^2. La puissance moyenne du signal reçu est $(\sigma^2 + s^2)$. Le point représentatif est à l'intérieur d'une sphère de rayon

$$\sqrt{2\ Tf_c\ (\sigma^2 + s^2)}$$

La figure 55 montre une coupe d'un tel système. Soit B le point représentatif du signal reçu, A celui du signal émis. A se trouve à l'intersection d'une sphère de rayon $\sqrt{2\ Tf_c \sigma^2}$ de centre B et d'une sphère de rayon $\sqrt{2\ Tf_c s^2}$ de centre O. La probabilité de se trouver dans l'intersection peut être estimée, dans le cas d'une distribution uniforme, par

$$P = \frac{\text{volume de l'intersection}}{\text{volume de la sphère}}$$

Après calcul, cette probabilité peut être majorée par :

$$P < \left(\frac{\sigma^2}{s^2 + \sigma^2}\right)^{Tf_c}$$

Pour que la discrimination au niveau du récepteur soit parfaite, il faut que, parmi tous les signaux transmis, seul le point A soit à l'intérieur de l'intersection. Soit M le nombre de signaux transmis. La probabilité P' pour que (M — 1) signaux soient à l'extérieur vaut :

$$P' = (1 - P)^{M-1}$$

Donc : $\quad P' > \left(1 - \left(\frac{\sigma^2}{s^2 + \sigma^2}\right)^{Tf_c}\right)^{M-1}$

Si on veut que P' soit supérieur à $1 - \varepsilon$ (ε petit : donc que le système marche presque parfaitement), cela revient à :

$$(M - 1) < \varepsilon \left(\frac{s^2 + \sigma^2}{\sigma^2}\right)^{Tf_c}$$

Cette condition est satisfaite si :

$$M < \left(\frac{s^2 + \sigma^2}{\sigma^2}\right)^{Tf_c}$$

Le second membre de cette inégalité donne la limite maximale du nombre de signaux transmissibles, donc la cadence maximale de transmission de l'information. Cette cadence maximale est donnée par :

$$C = \frac{\log_2 M}{T} = \frac{\log_2 \varepsilon}{T} + f_c \log_2 \left(1 + \frac{s^2}{\sigma^2}\right)$$

Si ε est un taux d'erreur arbitrairement petit, $\log_2 \varepsilon$ tend vers $-\infty$. En prenant T grand, on fait tendre $\frac{\log_2 \varepsilon}{T}$ vers zéro, et le système peut transmettre l'information avec un taux d'erreur faible, arbitraire, à une cadence donnée par la formule de Shannon. Ce développement permet de faire le lien entre l'analyse du signal et la théorie de l'information, montrant bien que les deux analyses sont conjointes.

fig. 55

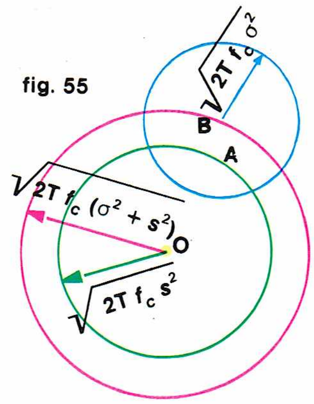

Richard Colin

▲ ***Figure 55 : rapport signal sur bruit dans le cas d'information transmise par un canal dans le cas continu (voir développement dans le texte).***

BIBLIOGRAPHIE

COOPER G. R., Mc GILLEN Clar D., *Probabilistic Methods of Signal and System Analysis*, Holt, Rinehart and Winston, 1971. - MAX J., *Méthodes et Techniques de traitement du signal et Applications aux mesures physiques*, Paris, Masson, 1972. - STERN J., DE BARBEYRAC J., POGGI R., *Méthodes pratiques d'études des fonctions aléatoires*, Paris, Dunod, 1967.

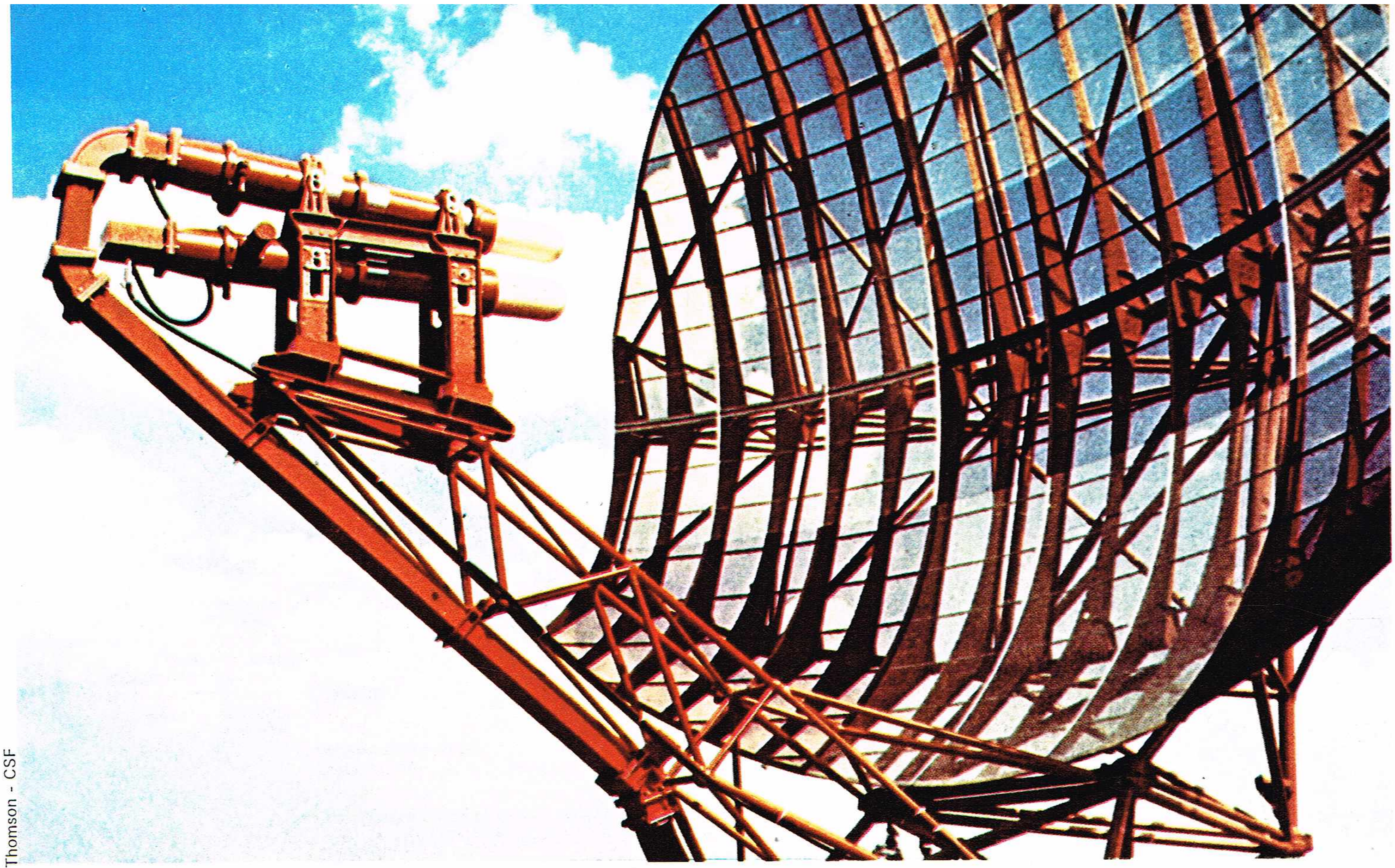

Thomson - CSF

▲ *L'antenne d'un radar bande L à haute puissance (2 MW) assurant la surveillance de la zone terminale des grands aéroports (hauteur 5 m, envergure 7 m, vitesse 15 t/mn).*

▼ *Tableau I : choix des bandes de fréquence et longueurs d'onde correspondantes pour un radar en fonction de l'usage prévu.*

LA DÉTECTION

Le radar

Le radar (Radio Detection and Ranging) est un système de détection électromagnétique des obstacles fixes ou mobiles : c'est la réflexion des ondes électromagnétiques sur les objets qui permet de déceler leur existence, de déterminer leur position et d'identifier leur nature et même leur forme. Si l'objet est équipé d'un dispositif qui détecte l'onde émise et renvoie cette énergie après amplification, le système émetteur qui l'a éclairé peut échanger une véritable conversation avec cette cible dotée d'un *répondeur actif :* il s'agit du *radar secondaire* utilisé dans l'aviation et les vols interplanétaires.

Tableau I

Choix des bandes de fréquence et longueurs d'onde correspondantes d'un radar en fonction de l'usage prévu

Bandes	Fréquences (en MHz)	Longueurs d'ondes (en cm)	Usages
	3-30	10 000-1 000	(1)
L	1 120-1 700	26-17	(2)
S	2 600-4 000	11,5-7,6	(2) (3)
C	3 950-5 850	7,6-5,12	(3)
X	8 200-12 400	3,6-2,42	(3) (4)
K	18 000-26 500	1,67-1,13	(4)
Q	33 000-50 000	0,91-0,60	(4)
Optique	$\simeq 5 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^{-5}$	(5)

(1) Très grande portée.
(2) Stations fixes, veille aérienne.
(3) Stations mobiles, tir, navigation.
(4) Aéroporté, navigation, météorologie.
(5) Météorologie.

Depuis la naissance du radar, entre 1930 et 1935, simultanément en France, aux États-Unis, en Grande-Bretagne et en Allemagne, les ingénieurs ont travaillé à en développer les principes théoriques; les progrès technologiques tout récents permettent de mettre en pratique les idées nouvelles (1), aboutissant ainsi à des réalisations très sophistiquées, et bien éloignées en particulier du dispositif anticollision qui, dès 1935, avait équipé le paquebot *Normandie*.

(Les chiffres entre parenthèses notés en indice au cours de cet article se réfèrent à la bibliographie placée en fin de texte.)

Pendant la guerre de 1940, les efforts effectués pour maîtriser les longueurs d'onde inférieures au mètre ont permis l'utilisation de dispositifs plus précis en leur associant des antennes plus directives. Par exemple, à côté du réseau de déclenchement d'alerte presque continu qui fonctionnait, en Grande-Bretagne, à partir de 1939 et qui, sur une longueur d'onde de 10 m, puis de 1,5 m, décelait les avions jusqu'à 100 km des côtes sud et est, les Britanniques développèrent les radars de bord qui utilisèrent des longueurs de 1 m, 30 cm, et apparurent dès la bataille d'Angleterre en 1940. Au sol, des progrès parallèles étaient effectués sur les radars de DCA (défense contre avions) et de tir en général.

Pendant ce temps, aux États-Unis, les laboratoires du MIT (Massachusetts Institute of Technology) développaient considérablement la théorie et la technologie du radar, et des ouvrages édités en 1945 servent encore de documents de base.

Aujourd'hui, le choix d'une fréquence de fonctionnement pour un radar dépend de la *fonction* que l'on désire réaliser et de l'*encombrement* que l'on veut donner au système, en particulier dans le cas de radars embarqués. Le *tableau* I montre que les longueurs d'onde utilisées vont du domaine décamétrique (2 à 20 m pour les radars transhorizon à l'étude aux U. S. A. et en U. R. S. S.) au domaine optique (LIDAR). D'autre part, la *portée* d'un système radar peut varier de quelques mètres, dans le cas de la mesure de la vitesse d'une automobile susceptible d'une contravention pour excès de vitesse, à plusieurs millions de kilomètres, dans le cas de l'atterrissage automatique d'un vaisseau spatial sur une planète. La puissance des sources correspondantes variera de quelques dizaines de milliwatts à des centaines de mégawatts. Le problème de la portée d'un radar est lié à celui de la réception de signaux très faibles. En effet, plus la fraction d'énergie qui vient l'éclairer est faible, et d'autant moins intense sera la

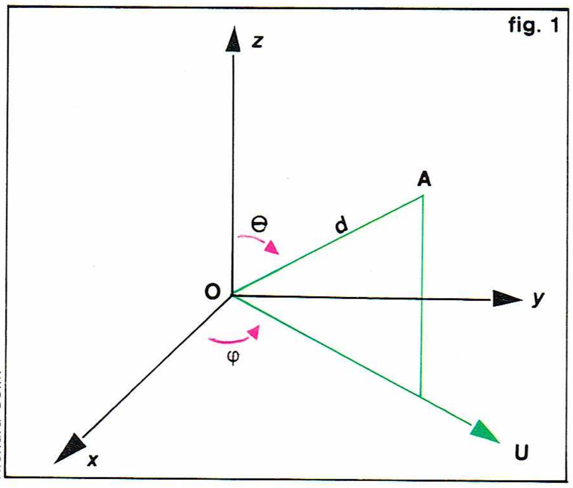

◀ *Figure 1 : coordonnées d'une cible (voir développement dans le texte).*

proportion d'énergie captée par le radar en retour.

L'antenne, élément du radar le plus connu, car le plus visible, a pour but d'envoyer de l'énergie dans un secteur donné de l'espace. On définit le *gain de l'antenne* G (θ, φ) par le rapport entre l'énergie émise par cette antenne dans une direction donnée et celle qui serait émise dans cette direction par une antenne isotrope, c'est-à-dire qui rayonne des ondes identiques dans toutes les directions. La densité d'énergie rayonnée par une telle antenne, reliée à une source d'énergie E_s, dans la direction (θ, φ), *figure* 3, est par unité d'angle solide :

$$\frac{dE}{d\Omega} = \frac{E_s}{4\pi} G(\theta, \varphi)$$

A la réception de l'écho, l'antenne recueille une énergie :

$$E_r = \frac{G\lambda^2}{4\pi}\frac{dE}{dS}$$

où S est la surface de l'ouverture,
G le gain maximal d'une ouverture plane à loi d'éclairement uniforme,
λ la longueur d'onde utilisée.

On pose $\Sigma = \frac{G\lambda^2}{4\pi}$, c'est la *surface effective de l'antenne*. Parallèlement, on définit la faculté de rayonnement d'une cible par sa *surface équivalente* σ égale au rapport entre l'énergie réémise par la cible dans la direction du radar et la densité d'énergie qu'elle reçoit. σ varie de 0,1 m² à une centaine de m² selon l'importance de la cible envisagée.

L'*équation de propagation du radar* relie l'énergie reçue par le radar E_r à la puissance crête P_c émise par ce dernier pendant la durée d'une impulsion τ :

$$E_r = \frac{P_c \tau G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 D^4 L}$$

où D est la distance radar-cible, et où L est un coefficient d'atténuation qui regroupe toutes les pertes (propagation dans l'atmosphère, circuits hyperfréquences, traitement du signal dans le récepteur, extraction du signal, exploitation, mouvement de l'aérien). Un exemple numérique emprunté à l'ouvrage de J. Darricau [2] montre que la puissance crête des signaux reçus est égale à $0{,}25 \cdot 10^{-13}$ W dans le cas où :

$P_c = 1$ MW, $\tau = 4\ \mu$s, G = 40 dB, $\sigma = 3$ m², L = 8 dB, D = 300 km, $\lambda = 10$ cm

Cette puissance est très faible, le récepteur radar doit donc être très sensible. Or on démontre que la puissance de bruit d'un récepteur (sans tenir compte du filtrage) est du même ordre de grandeur.

D'autre part, la cible fluctue. Le signal reçu n'est donc pas constant dans le temps. Le bruit a trois effets : il se superpose au signal utile et le noie, il crée de fausses indications, ou « fausses alarmes », il déforme le signal et rend donc plus aléatoire l'identification d'un signal utile. En conséquence, on définit une *probabilité de détection* (probabilité de voir une cible où elle existe réellement) et une *probabilité de fausse alarme* (probabilité de voir une cible là où il n'y a rien). Ces deux facteurs caractérisent la qualité de réception d'un radar et sont reliés directement au rapport :

$$\frac{S}{B} = \frac{\text{Puissance crête du signal moyenne fréquence après filtrage}}{\text{Puissance moyenne du bruit moyenne fréquence après filtrage}}$$

Le signal composite reçu est donc aléatoire, et, dans le dessein d'améliorer le rapport S/B, on utilise des radars émettant plusieurs impulsions [2]. Compte tenu de la *largeur des impulsions* et de la *vitesse des cibles*, on peut considérer que l'instant d'apparition de chaque écho, correspondant à chaque impulsion, est invariable pendant un grand nombre d'impulsions. L'intégration de ce groupe d'échos issus d'une même cible, appelé *plot*, améliore le rapport S/B. Dans les cas simples, cette intégration se fait grâce à la rémanence des écrans utilisés pour la visualisation.

Dans d'autres cas, un système appelé *extracteur* a pour but de trier les informations et de fournir pour un calculateur un message concernant les plots détectés. Quelles sont les informations qu'un radar peut alors fournir soit à un contrôleur humain, soit à un calculateur ? Un radar de surveillance délivre l'information d'existence ainsi que l'*azimut* et la *distance* de la cible. Or il est aussi indispensable de connaître l'*altitude* de l'écho par rapport au sol, ce qui revient à trouver l'*angle de site* de la cible. Pour préciser ce dernier, on sera amené à définir le *diagramme de rayonnement de l'antenne en site* et *en gisement* respectivement (*fig.* 2). La *figure* 3 montre le diagramme de couverture de l'antenne de la photo. Enfin, la *vitesse* du mobile et son *identité* sous forme d'un code seront fournies si c'est nécessaire.

Le schéma de la *figure* 4 montre un « système radar » destiné à répondre aux besoins du contrôle du trafic aérien d'un aérodrome. Il est constitué de l'ensemble (a) proprement détecteur de signal et de l'ensemble (b) traitement du signal et visualisation, les deux étant reliés par des lignes de transmission (c) : lignes téléphoniques, câbles, faisceaux hertziens. Il s'agit essentiellement d'un radar de veille.

▼ *Figure 2 : a, schéma permettant de définir les informations fournies par un radar azimut, distance, altitude et site de la cible ; l'angle de gisement est l'angle que fait la direction OA avec le nord ; b, en vert, diagramme de rayonnement de l'antenne en site (défini dans le plan xOz) ; en rouge, diagramme de rayonnement de l'antenne en gisement (défini dans le plan xOy), l'antenne étant centrée en O dans le plan yOz, c'est-à-dire perpendiculaire à Ox.*

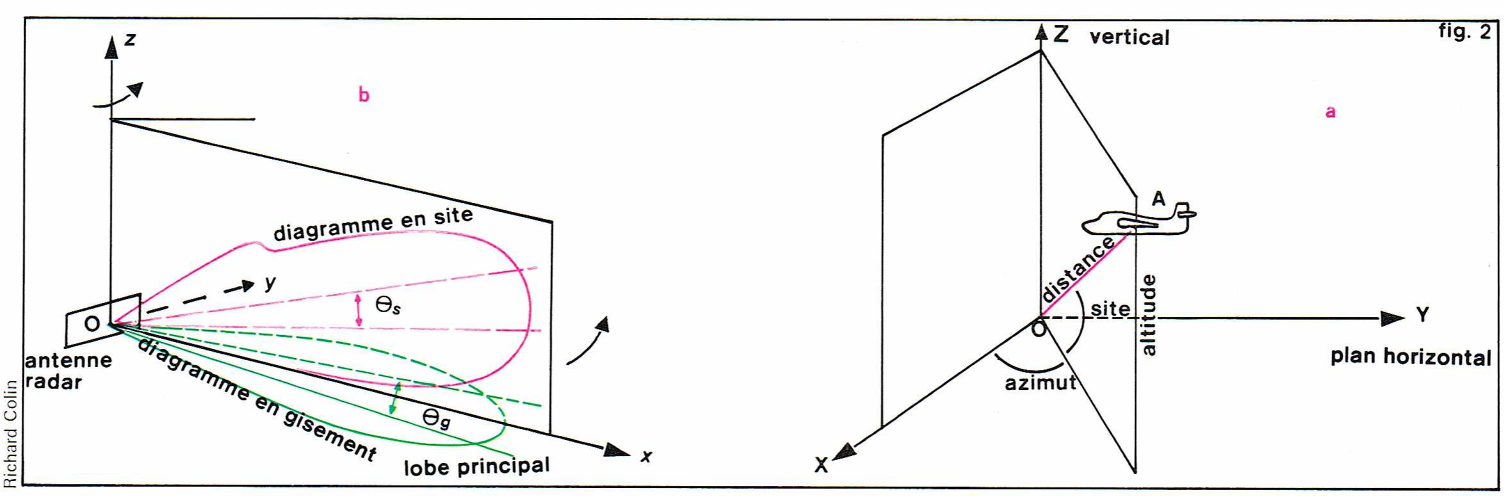

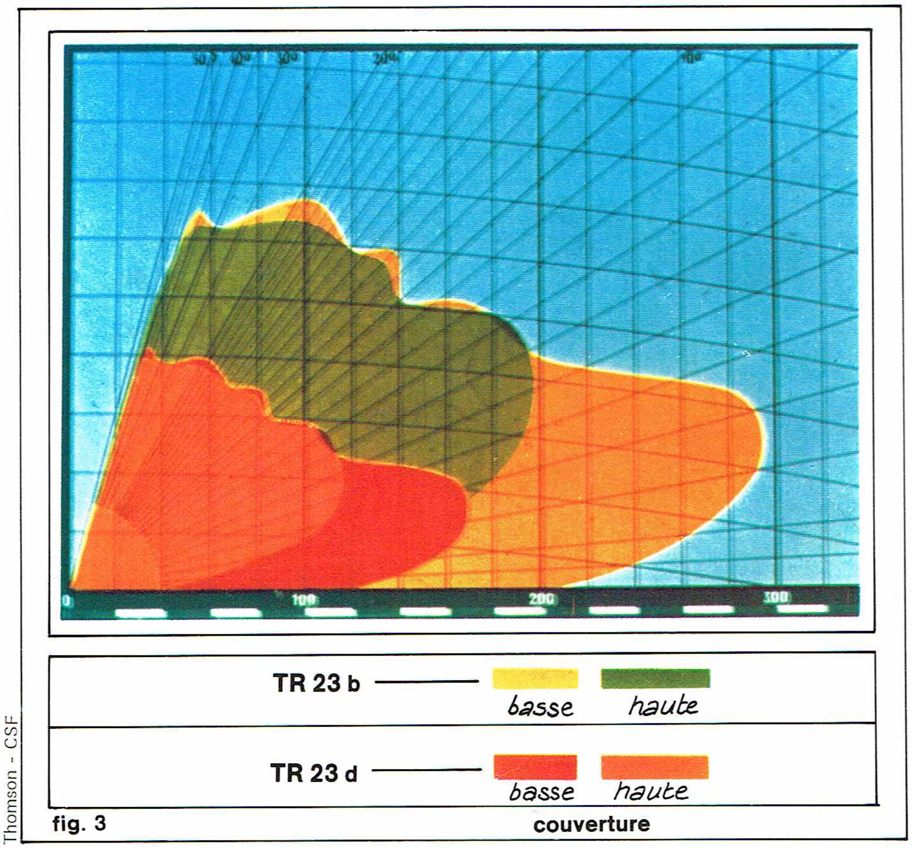

Thomson - CSF

▲ *Figure 3 : diagramme de couverture (en site) de l'antenne (plan xOz) de la photo de la page 96.*

▼ *Figure 4 : système radar permettant le contrôle du trafic aérien d'un aéroport.*

Les autres fonctions que peut assurer un radar sont résumées dans le *tableau* II. Le diagramme fonctionnel applicable à l'ensemble de ces radars est donné sur la *figure* 5. Un exemple de radar de surveillance est donné par celui d'Orly dont les caractéristiques sont les suivantes : fréquence 35 GHz; puissance de crête 10 kW; durée d'impulsion 0,03 μs; fréquence de récurrence 15 kHz; facteur de bruit du récepteur > 16 dB; l'antenne tourne à 750 tours/minute. Nous nous proposons de passer en revue chaque élément et de décrire succinctement les modalités de réalisation imposées suivant les impératifs requis.

Les émetteurs radars

L'élément principal est la **source** hyperfréquence; elle est constituée soit d'un émetteur oscillateur de puissance seul, soit d'un émetteur suivi d'une chaîne amplificatrice. L'oscillateur est soit un tube (magnétron, klystron, carcinotron, triode ou tétrode), soit un dispositif à semi-conducteur (diode GUNN). L'amplificateur est soit un tube (tube à onde progressive), soit un amplificateur paramétrique.

Le choix de la source conditionne la conception générale de l'équipement : par exemple, suivant la portée désirée, on utilisera un magnétron de forte puissance (2 MW de puissance de crête pour 120 milles nautiques de portée, soit 220 km) ou une diode émettant une faible puissance (50 mW pour 100 m de portée). La fréquence d'émission du magnétron est située dans la bande 1 215-1 370 MHz, ce qui correspond à des dimensions des guides rectangulaires de sortie de l'ordre de 20 cm, les dimensions du magnétron étant 1,77 × 1,41 × 0,91 cm. La puissance requise à partir d'un secteur 220/360 V et 50/60 Hz est de 45 kW nominal. Il est refroidi par un courant à liquide.

Dans le cas du radar portable, la diode fonctionne à 9 300 MHz; les dimensions du guide sont de l'ordre de 2 cm, les dimensions de la diode seule étant millimétriques, celles de son boîtier identiques à celles du guide. La tension d'alimentation est de 120 V, la

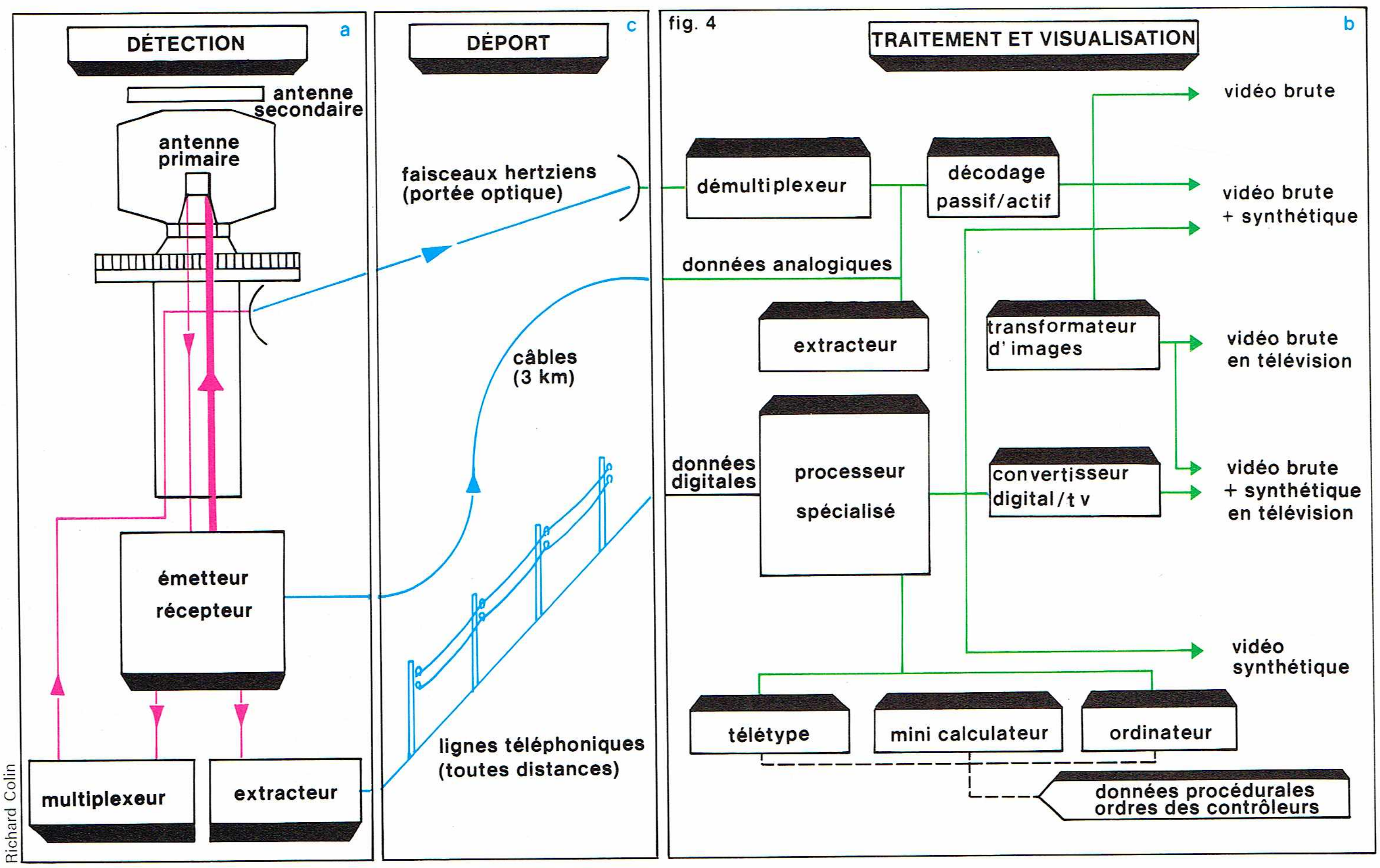

Richard Colin

fig. 5

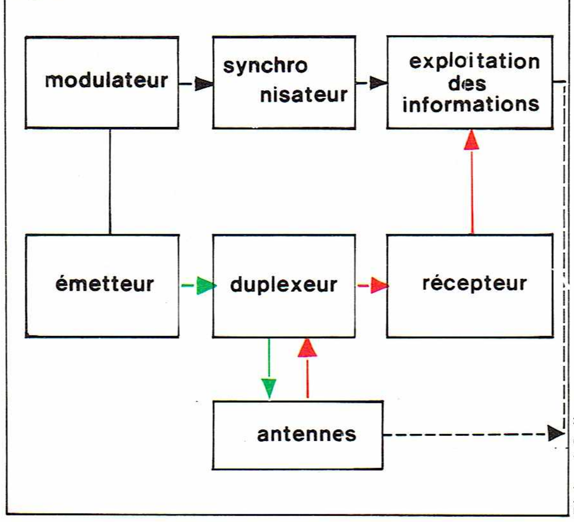

puissance correspondante de l'ordre de 50 mW. Le lecteur trouvera la description détaillée de ces éléments de base dans les ouvrages [3] [4] de la bibliographie.

Le second élément de l'émetteur est le **modulateur** qui découpe l'onde hyperfréquence émise par la source et permet le fonctionnement en impulsion (*fig.* 6) : il élabore des signaux de synchronisation (c'est l'*horloge* du radar) ; il stocke l'énergie émise continûment par la source pendant le temps long séparant deux impulsions successives et la restitue pendant la durée brève d'une impulsion ; enfin, il met en forme l'énergie délivrée au tube de façon que le signal ait la forme désirée. Cette double fonction de réservoir et d'interrupteur est réalisée grâce à des technologies différentes suivant le niveau des puissances émises ; le stockage est effectué soit dans une capacité, soit dans une ligne à retard. En ce qui concerne l'interrupteur, on utilisera soit un tube à vide (tube dur) [*fig.* 7], soit une bascule à thyristors.

Le duplexeur

C'est un commutateur électronique qui ouvre la voie au signal émis dans le sens émetteur-antenne et la ferme dans le sens émetteur-récepteur ; inversement, il ouvre la voie au signal reçu dans le sens antenne-récepteur et la ferme dans le sens antenne-émetteur. Sachant la faible énergie associée à un écho et la forte puissance émise par le radar, on comprend que l'isolement entre ces voies doit être draconien. Les commutateurs doivent fonctionner à chaque impulsion (tubes alternats = TR).

L'antenne ou aérien

Partie spectaculaire du radar, elle définit, par son *diagramme*, le volume de l'espace observé, et concentre l'énergie de l'émetteur dans cette direction (*fig.* 2b et 3). Sa construction requiert des connaissances en mathématiques pour l'application des lois de propagation des ondes électromagnétiques, des connaissances en mécanique et en automatique (asservissements). Ses dimensions dépendent de la fréquence utilisée : en reprenant les exemples décrits à propos des émetteurs, on voit qu'au magnétron émettant dans la bande L est associée une antenne de dimensions 9 m × 13 m ; à la diode GUNN émettant dans la bande correspond une antenne type Comet de dimensions 12 cm × 8 cm × 5 cm.

Le *tableau* III montre les différents types d'antenne. La polarisation du signal émis est fixée par la source de l'aérien. Le choix entre *polarisation horizontale* et *verticale* est déterminé en fonction du terrain, (le sol réfléchissant les ondes électromagnétiques) lorsque l'on désire une couverture régulière. La *polarisation circulaire* est préférée s'il est utile d'éliminer les nuages et la pluie. Pour explorer l'espace, on recourt à un déplacement mécanique de l'aérien. La vitesse de rotation de l'antenne N est liée à la durée d'impulsion τ et à la fréquence de récurrence f : si $\tau = 1{,}5\ \mu s$ et $f = 750$ Hz, N = 15 t/mn ; si $\tau = 0{,}03\ \mu s$, $f = 15\,000$ Hz, N = 750 t/mn.

Tableau II

Classement et fonctions des radars classiques

Couverture plane (2D), radars volumétriques (3D), radars de sitométrie		
Radars terrestres	Contrôle aérien	— veille — surveillance d'aérodromes — aterrissages de précision — contrôle régional
	Contrôle maritime	— mêmes fonctions que ci-dessus — surveillance des ports
	Guidage spatial	— missions interplanétaires
Radars embarqués	A bord d'avions militaires	— veille — poursuite — tir — interception — météorologique
	A bord de navires militaires A bord de navires civils	— mêmes fonctions que ci-dessus — anticollisions

fig. 6

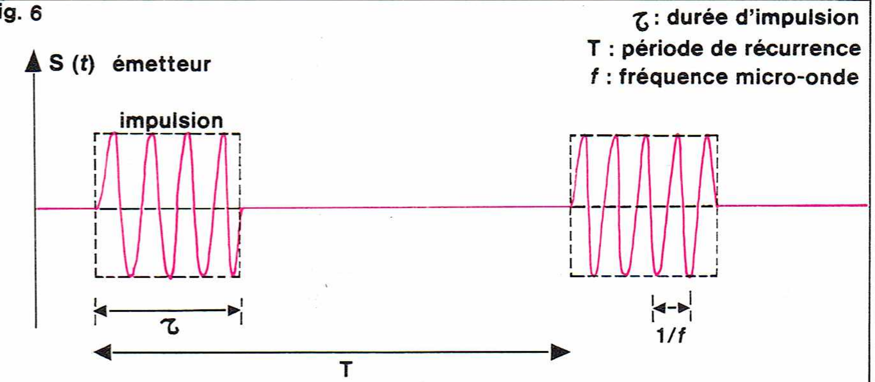

fig. 7

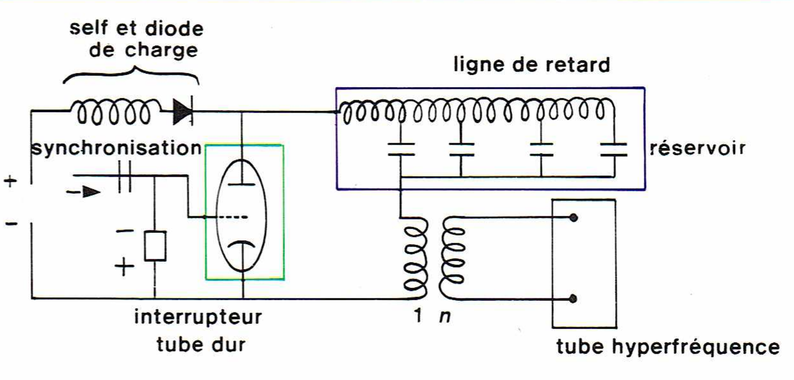

A côté d'une rotation autour d'un axe vertical, pour laquelle on utilise un faisceau étroit dans le plan de gisement afin d'avoir un bon pouvoir séparateur angulaire (*fig.* 2), où le volume d'espace exploré est torique, on peut avoir recours à un balayage conique de l'espace-radar à exploration conique utilisé pour la recherche et la poursuite des engins ; ou encore l'antenne radar peut être animée d'un balancement, sa plus faible ouverture étant dans le plan vertical : radar de site à balancement.

Or le déplacement mécanique de l'antenne dans l'espace peut limiter les performances des radars, et la mise au point du *balayage dit électronique* permet d'explorer une

▲ Tableau II : classement et fonctions des radars classiques.

Figure 5 : diagramme de fonctionnement applicable à l'ensemble des radars classiques.
Figure 6 : signal émis par un radar à impulsions.
Figure 7 : schéma de principe d'un modulateur à tube dur.

Tableau III
Les différents types d'antennes

Un réflecteur : paraboloïde P	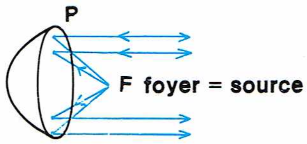	Antenne peau d'orange (veille).
Antenne Cassegrain Deux réflecteurs : P paraboloïde (foyer F) H hyperboloïde (F, F'). S source	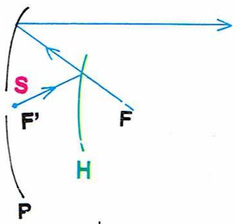	Plus compacte que l'antenne classique ; utilisée pour les radars de bord, de poursuite.
Dipôle demi-onde	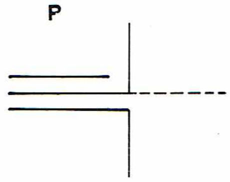	Utilisée dans les réseaux de source.
Cornet	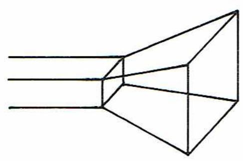	Mode TE_{01} : loi d'éclairement d'amplitude constante suivant $\vec{E}$, en cosinus dans le plan H.
Hélice	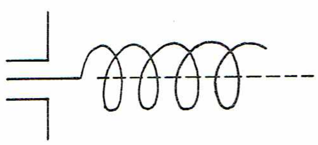	Diagramme de rayonnement de révolution autour de leur axe.
Guides à fente	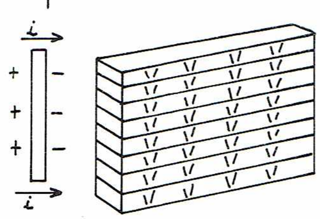	Les fentes rayonnent si elles coupent les lignes de champ.

▲ ***Tableau III :* les différents types d'antennes.**

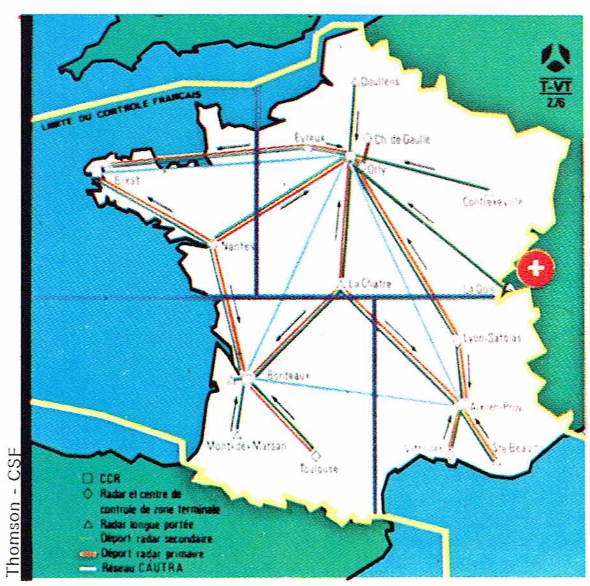

▶ ***Carte des radars de contrôle régional pour la France.***

partie de l'espace (+ 60°, — 60° au maximum) en conservant l'antenne fixe. Dans le cas où l'aérien reçoit l'énergie d'un *réseau* ou groupe de sources rayonnantes d'amplitude et de phase différentes, le diagramme de rayonnement de l'antenne dépendra de la position de chaque source, de l'amplitude et de la phase du signal qu'elle émet. En conséquence, commander électroniquement la phase de chaque source revient à contrôler le diagramme de rayonnement de l'antenne. Comme il n'est pratiquement pas nécessaire de contrôler la phase (définie à 2π près) des différentes sources avec une grande précision, on peut quantifier la phase contrôlée. On dira que le déphasage est à n bits si les valeurs successives possibles diffèrent de $\frac{\pi}{2^{n-1}}$. Cependant, la ressemblance du diagramme expérimental avec le diagramme calculé dépend de la valeur de n et du nombre N de sources.

S étant la surface de l'antenne, $\lambda/2$ la demi-longueur d'onde, chaque source a des dimensions maximales de l'ordre de $\lambda/2$; dans ce cas

$$N = \frac{S}{\left(\frac{\lambda}{2}\right)^2} = \frac{4\,S}{\lambda^2}$$

On se rapprochera du diagramme théorique dans la mesure où n sera petit et N grand. Si $S = 1\ m^2$, $\lambda = 0{,}05$ m, $N \sim 1\,600$ sources ; on peut prendre $n = 3$; n variant de 2 à 6 dans la plupart des applications, une antenne à balayage électronique sera donc constituée des éléments suivants :

Les **sources** (d'émission et/ou de réception) sont une association de dipôles ou d'hélices dont le couplage, c'est-à-dire l'adaptation, doit être optimisé. Le nombre de sources rayonnant dans ce cas peut varier de quelques centaines à quelques milliers et un émetteur unique alimente alors l'ensemble des sources. Un projet à l'étude, appelé balayage électronique actif, vise à associer chaque dipôle à une source réelle (diode GUNN). L'intérêt est de pouvoir contrôler chaque source rayonnante. Mais alors, le prix de revient est beaucoup plus élevé que dans le cas du système passif (20 000 F le module au lieu de 3 000 F).

Les **déphaseurs :** ils utilisent tantôt des systèmes à ferrite, tantôt des diodes PIN. Les systèmes à ferrites sont lourds, volumineux et sensibles aux variations de température, mais supportent des puissances élevées et des pertes d'insertion faibles, tandis que les déphaseurs à diode PIN sont légers, peu encombrants, insensibles aux variations de température, mais résistent mal aux fortes puissances et présentent des pertes relativement élevées (environ 2 dB). Remarquons que ces pertes sont compensées par un gain plus élevé de l'aérien pour une surface donnée.

Réalisés sur des substrats d'alumine afin de réduire leur volume, les déphaseurs à diodes seront tantôt à *commutation :* dans ce cas, ils font circuler le signal dans des trajets de longueur différente suivant la commande $\left(\text{déphasage élevé égal à } \pi \text{ ou } \frac{\pi}{2}\right)$; tantôt ils seront à *perturbation*, et ramèneront sur la ligne de transmission des impédances variables (déphasage faible : $\frac{\pi}{8}$ ou $\frac{\pi}{4}$).

Une **alimentation** fait parvenir le signal de l'émetteur aux sources via les déphaseurs et au retour des sources au récepteur via les déphaseurs.

Un **système de calcul** pilote les déphaseurs et contrôle aussi la position du faisceau de l'aérien dans un temps faible devant la période de répétition du radar. Cette commande se fait à partir des informations fournies par le *récepteur du radar.*

Les antennes à balayage électronique équipent les systèmes embarqués *(Mirage)* et les radars de la Marine. Elles conservent des prix de revient très élevés dus au coût des déphaseurs et des moyens de calcul nécessaires à la commande et la gestion de l'aérien. En résumé, le balayage électronique permet à un seul radar d'assurer les différentes fonctions (veille, poursuite, cartographie) de jour ou de nuit *sur une même antenne ;* il ne faut que quelques secondes pour changer de cible (poursuite

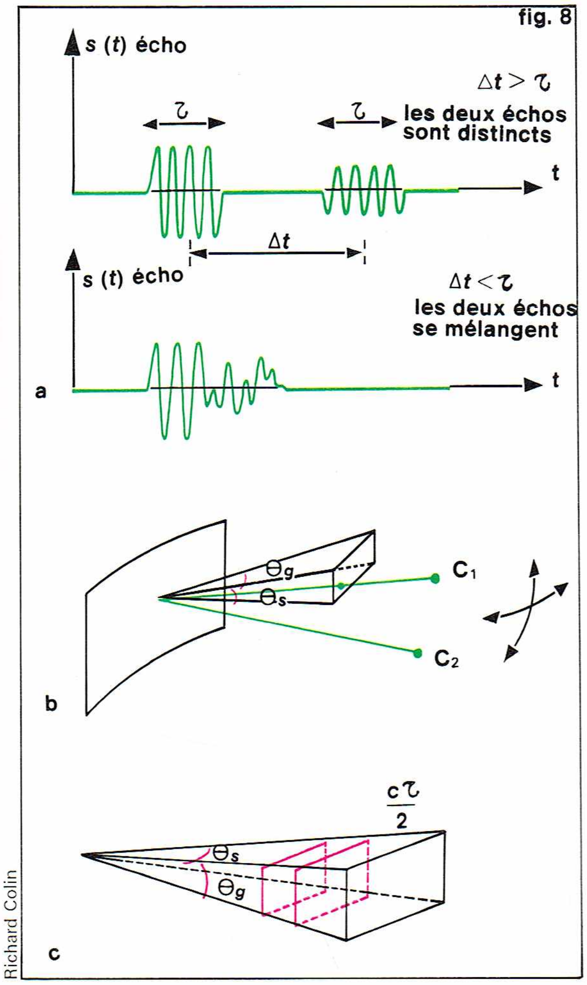

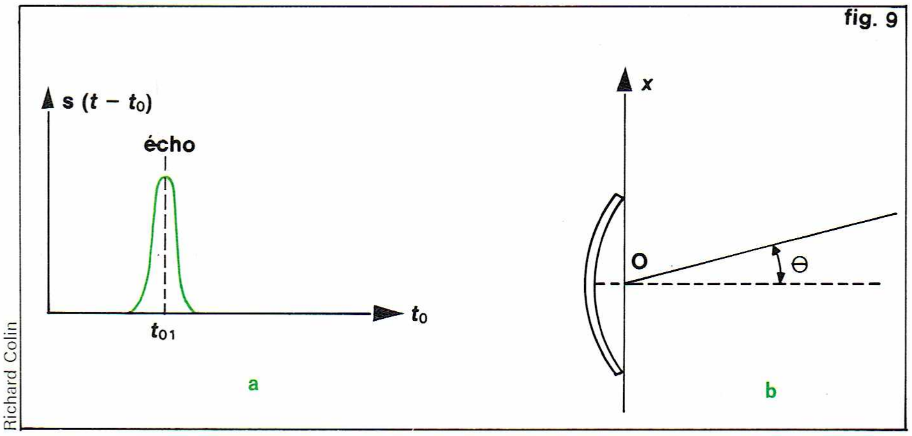

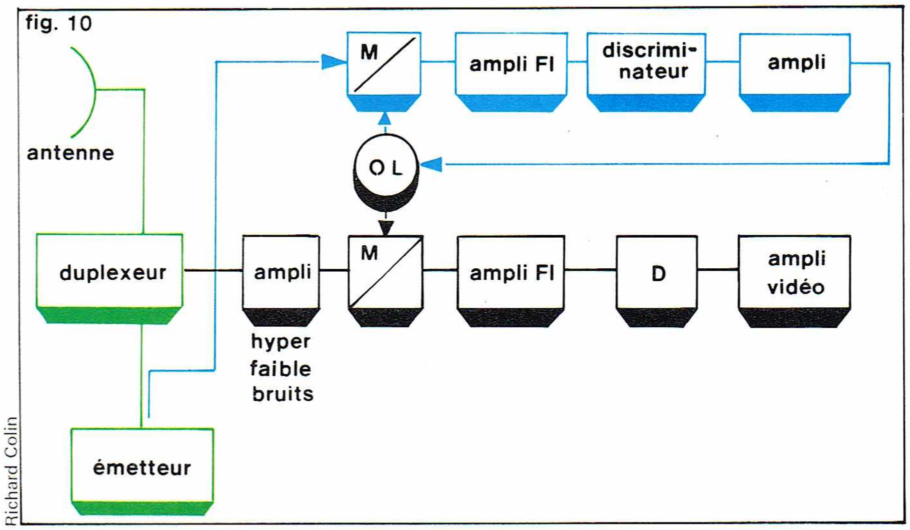

multicible), ce qu'une antenne à déplacement mécanique ne peut effectuer. L'exploitation de l'espace reste limitée à 120° au maximum, ce qu'une antenne classique ne peut effectuer sans mouvements.

D'une façon générale, l'observation de l'espace définit les critères de performance des radars, et la *finesse de l'observation* sous-entend à la fois la *précision* avec laquelle le radar peut localiser une cible isolée — pratiquement, elle correspond à la détermination fine du centre du plot ou groupe d'échos — et le *pouvoir discriminateur* qui permet de séparer deux cibles voisines, et qui correspond à la dimension du plot. La *figure* 8a montre comment est défini le pouvoir discriminateur en distance : Δt étant l'intervalle de temps qui sépare deux échos de durée τ à la réception, si $\Delta t > \tau$, les échos sont bien séparés; si $\Delta t \leqslant \tau$, les échos se mélangent pour former un signal composite : le radar ne peut plus distinguer les deux cibles; tout se passe comme s'il n'y en avait qu'une seule. Le *pouvoir discriminateur en distance* est alors égal à $\Delta D = \frac{c\tau}{2}$ où c est la vitesse de la lumière.
Le *pouvoir discriminateur angulaire* distingue deux cibles C_1 et C_2 séparées d'un angle tel qu'elles ne puissent se trouver simultanément dans l'angle solide $\theta_s\theta_g$, ceci par exemple dans le cas d'un balayage conique (*fig.* 8b). Le volume résultant (*fig.* 8c), à l'intérieur duquel deux cibles ne peuvent donner naissance à deux signaux distincts, est alors appelé *volume de confusion.*
Lorsqu'une cible est unique dans ce volume, avec quelle précision peut-on la localiser? La précision en distance est définie par l'erreur commise δ dans la mesure du temps t_{01} centre de l'écho S $(t - t_0)$ (*fig.* 9a), soit $\sqrt{\overline{\delta^2}} = \frac{1}{2\pi B\sqrt{R}}$ où B est le « moment du second ordre » du spectre du signal utile émis, et R le rapport de l'énergie du signal dans le temps de la mesure à la densité spectrale de bruit. Pour obtenir l'écart type sur la mesure de la distance de la cible au radar, on multiplie $\sqrt{\overline{\delta^2}}$ par $\frac{C}{2}$: à 1 µs correspond une précision en distance de 150 m.
La précision angulaire (*fig.* 9b) est définie par la même formule, dite de Woodward.
Par exemple, si θ est l'angle en gisement de la cible qui, équipée d'un répondeur, émet un signal, on a :

$$\sqrt{\overline{\theta^2}} = \frac{1}{2\pi B_\nu \sqrt{R}}$$

où B_ν est le moment de second ordre de $|A(\nu)|$, $A(\nu)$ étant l'éclairement de l'antenne, ν la fréquence spatiale égale à $\frac{x}{\lambda}$.
En conclusion, le pouvoir discriminateur dépend de l'aérien et de la durée de l'impulsion, la précision dépend de l'aérien et du bruit qui accompagne le signal : bruit atmosphérique, bruit propre du récepteur, brouillage dû à un ennemi. Le soin apporté à la réalisation du récepteur, l'élaboration de techniques comme celles du « monopulse d'amplitude » ou du « scanning » (2) améliorent la précision.

Le récepteur

Le signal provenant de la cible est reçu par l'antenne et aiguillé vers le récepteur par le duplexeur. Le récepteur amplifie le signal et le rend exploitable. Sa fréquence est donc accordée sur celle du signal, sa bande passante adaptée afin de ne pas le déformer et de limiter le bruit transmis. Son gain est très élevé, puisque nous avons vu que la puissance du signal est de l'ordre de 10^{-14} watt : pour être traitée, elle doit être amplifiée jusqu'à quelques watts ou quelques dizaines de watts. Enfin, il doit présenter un facteur de bruit très faible — surtout en ce qui concerne les étages d'entrée — afin d'avoir une bonne sensibilité. Le schéma général d'un récepteur radar est donné sur la *figure* 10 : il est du type superhétérodyne, c'est-à-dire que le signal est transposé sur une fréquence

▲ ***Figure 8 :** pouvoir discriminateur d'un radar;*
a, pouvoir discriminateur en distance $\Delta D = \frac{c\tau}{2}$;
b, pouvoir discriminateur angulaire;
c, volume de confusion.
***Figure 9 :** définition de la précision d'un radar;*
a, précision en distance $\sqrt{\overline{\delta^2}}\, c/2$, *$\delta$ étant l'erreur commise sur la mesure de t_{01}, centre de l'écho;*
b, précision angulaire.
***Figure 10 :** schéma synoptique du récepteur d'un radar (OL oscillateur local, M mélangeur, D détecteur; en bleu, le contrôle automatique de fréquence de l'oscillateur local).*

▶ *Figure 11 : variation du facteur de bruit* F *d'un mélangeur en fonction du courant de polarisation* I *(cas d'un mélangeur à cristal et diode à pointe de tungstène-silicium).*

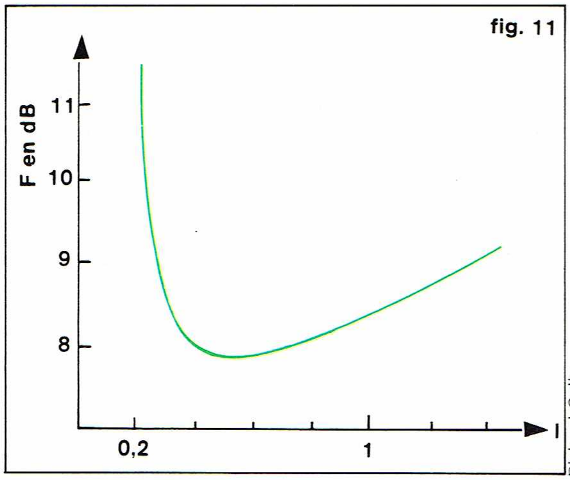

Richard Colin

plus basse appelé fréquence intermédiaire (FI ou f_M), cela afin d'éliminer le bruit de l'émetteur et des détecteurs.

Amplificateur faible bruit à l'entrée : il fixe la sensibilité du radar à sa valeur maximale. Ce peut être soit un tube à onde progressive, un amplificateur à transistor (transistor à effet de champ) ou à diode tunnel, ou un amplificateur paramétrique (varactor). Dans les radars anciens, cette amplification directe de l'onde hyperfréquence n'existe pas.

L'oscillateur local (de puissance continue de l'ordre de 1 mW) émet une onde à la fréquence f_L peu différente de la fréquence signal f_S telle que $f_L = f_S + f_M$; f_M est fixe et de l'ordre de quelques dizaines de MHz. Un contrôle automatique de fréquence (CAF) aligne systématiquement la fréquence de l'oscillateur local sur la fréquence de l'oscillateur de puissance (magnétron par exemple) pour compenser les dérives de ce dernier. L'oscillateur local peut être un klystron, un carcinotron ou un dispositif à état solide : diode GUNN ou Impatt. On appelle *récepteur cohérent* un récepteur dans lequel la phase des signaux est conservée de l'émission à la détection (*fig.* 9). Dans la recherche d'une grande stabilité, des oscillateurs sont obtenus à partir d'un quartz par multiplication de fréquence et l'oscillateur local devient un vrai standard de fréquence. Les multiplicateurs à diode de commutation (Schottky, Snap off, avalanche) et les multiplicateurs à varactors réalisent des rapports de multiplication de 2 à 3.

Le **mélangeur** assure le changement de la fréquence f_S en la fréquence $f_M = f_L - f_S$. Sa caractéristique de transfert n'est pas linéaire et, d'une façon générale, il peut délivrer des signaux de fréquence $pf_L + qf_S$. On le caractérise par sa perte de conversion P_c ainsi que par le rapport :

$$r = \frac{\text{température de bruit en sortie du mélangeur}}{\text{température de référence}}$$

Le facteur de bruit F du mélangeur s'écrit $F = r \cdot P_c$. La *figure* 11 donne les variations de F en fonction du courant de polarisation I. Le minimum de cette courbe correspond à la sensibilité maximale du récepteur. D'autre part, pour diminuer le bruit du mélangeur, on éliminera le bruit de l'oscillateur local en construisant des mélangeurs symétriques et en supprimant la fréquence image $f_{IM} = f_S + 2 f_M$. Les types de diodes utilisés sont des diodes à pointes (Ge, Si) et des diodes à barrière (As Ga-Schottky), ces dernières étant plus performantes ; elles acceptent des niveaux de puissance de l'oscillateur local de l'ordre de 0,1 mW au lieu de 1 mW pour la diode à pointe [2].

Les deux fonctions correspondant à l'oscillateur local et à la diode mélangeuse peuvent être effectuées par un seul et même dispositif appelé *oscillateur-mélangeur* où une diode unique (Impatt ou Barrit) assure les deux fonctions [5] ; un dispositif très compact de ce genre est appliqué à la détection d'objets en mouvement ou plus précisément d'intrus.

Amplificateur à fréquence intermédiaire : il a pour mission d'assurer la sélectivité : c'est donc un filtre passe-bande. N'oublions pas que le signal utile n'est pas seul, mais qu'il est superposé à des signaux parasites dus à des échos de sol, de mer, appelé « clutter ». Pour mieux voir les signaux utiles dans le « clutter », on utilise le fait que ces signaux correspondent à des cibles mobiles et sont alors affectés d'effet Doppler : il existe un écart de fréquence Δf entre la fréquence émise f_E et la fréquence signal f_S reçue lorsque la cible est animée d'une vitesse V ; Δf est appelée fréquence Doppler ; pour un émetteur fixe, elle est égale à $2 f_E \frac{V}{c}$ où c est la vitesse de la lumière. Ce système nécessite l'emploi d'un amplificateur limité dans des dispositifs dits VCM ou MTI (Moving Target Indication) qui sont représentés sur les photos.

On peut aussi utiliser un *amplificateur logarithmique*. Soit v_e la tension d'entrée d'un amplificateur et v_s la tension de sortie. Si $v_s = a \log bv_e$, où a et b sont des constantes,

$$\Delta v_s = a \frac{\Delta v_e}{v_e}$$

Si Δv_e est proportionnel à v_e, ce qui est vérifié pour des signaux de « clutter », la fluctuation Δv_s de la tension de sortie devient indépendante de l'amplitude à l'entrée v_e. Autrement dit, on obtient des variations du niveau de sortie indépendantes du niveau moyen à l'entrée, favorisant ainsi les signaux utiles par rapport au clutter, au niveau de la fréquence intermédiaire. Nous verrons qu'après détection, d'autres dispositifs anticlutter sont prévus. L'amplificateur intermédiaire a un gain élevé (100 à 120 dB), un contrôle automatique de gain

▼ *Ci-dessous, une tête mélangeuse de récepteur radar en technologie triplaque. A droite et page 103 en bas à gauche, respectivement : écran sans traitement* MTI *(observer les signaux parasites) ; écran avec traitement* MTI *de sélection des signaux.*

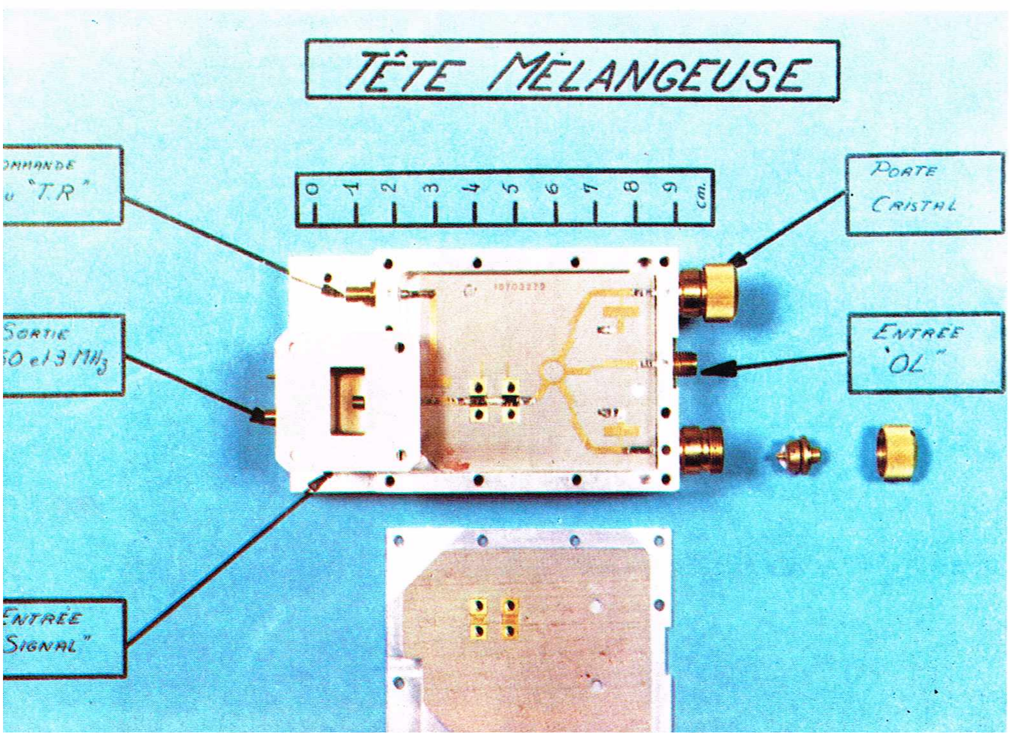

Thomson - CSF

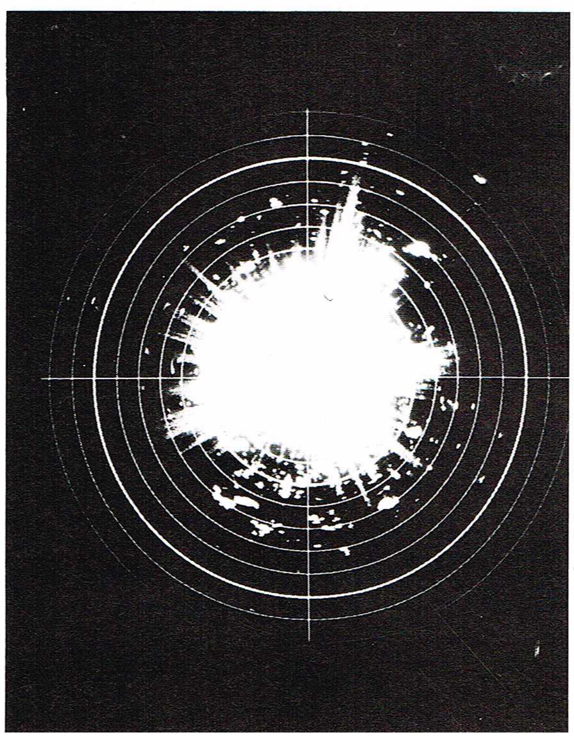

Service DT-ATT

(CAG), et comporte plusieurs étages. Afin de diminuer le clutter plus important pour les échos à distance faible, on équipe l'amplificateur d'un système de gain variable avec le temps (GVT) [6].

Dans le cas d'un brouillage intentionnel ou accidentel, on utilise des récepteurs dits à *taux d'alarme constant* (TFAC, prononcer téfac). Après amplification dans un amplificateur à large bande, le signal reçu est limité à un niveau inférieur à celui du bruit, puis filtré par un filtre adapté. La puissance de bruit en sortie de chaîne est alors indépendante de la puissance de bruit à l'entrée [2].

Le **détecteur** : il peut détecter soit l'amplitude, soit la phase du signal suivant le radar réalisé. Dans le cas de la détection d'amplitude, un système à diode restitue l'enveloppe des signaux moyenne fréquence d'amplitude crête variable. On appelle *détecteurs cohérents* ou *démodulateurs* les détecteurs fournissant la phase du signal.

Amplificateur vidéofréquence : à l'amplification du signal détecté s'ajoutent un certain nombre de traitements et, en particulier, d'autres dispositifs « anticlutter ». Précisons la nature des échos « clutter » ou « empilement d'objets quelconques ». Dans le cas d'une antenne qui balaie le sol, le relief du terrain donne des échos de longue durée, et l'on peut, dans certains cas, obtenir une carte très précise d'installations au sol et du relief.

En ce qui concerne les radars de navigation maritime, une protection efficace contre le clutter de mer devra être envisagée (mer agitée). Sauf dans les radars météorologiques où ils seront exploités, les échos dus aux nuages, à la pluie, seront éliminés (antenne à polarisation circulaire). On appelle *anges* des échos de « clutter » dont la nature est difficilement identifiable : oiseaux, insectes, inhomogénéités de l'indice de réfraction de l'air. Par exemple, sachant qu'un oiseau présente une surface équivalente à 0,01 m^2, un vol de groupe peut présenter un écho notable. Indiquons le principe d'un *discriminateur de durée d'impulsion* (DDI) : il a pour but de supprimer tous les signaux dont la durée est différente de τ (*fig.* 12).

Visualisation des échos : l'indicateur panoramique (IP)

Le signal vidéofréquence délivré par le récepteur module le wehnelt d'un tube cathodique. L'indicateur magnétique à bobine fixe fonctionne suivant le principe décrit à la *figure* 13a, b, c. La photo montre un écran en vidéo. Un tel système permet le décentrement à volonté de la représentation, l'agrandissement d'une portion (effet de loupe) et l'inscription de caractères (*cf.* photo). Aujourd'hui, la visualisation multichrome permet de superposer sur l'écran la carte de navigation et l'image fournie par le radar météorologique : le changement de couleur est obtenu par une variation d'énergie du faisceau électronique avec le *tube à pénétration de faisceau*. Ces tubes sont capables de fonctionner dans une ambiance lumineuse très élevée.

Le balayage d'une image radar, par exemple pour un radar de veille panoramique, est un balayage en coordonnées polaires ρ et θ où le déplacement angulaire θ se fait à une vitesse lente en général, synchrone de celle de l'antenne. Pour que l'image sur l'écran de l'indicateur soit exploitable, on utilise des tubes à grande rémanence, d'une part, et, d'autre part, la conversion de l'image radar en *image télévision* (tube transformateur d'image).

L'extracteur

L'exploitation des informations renouvelées à une cadence élevée dépasse les possibilités de l'opérateur humain, elle est donc confiée à un calculateur électronique, l'homme intervenant pour surveiller, contrôler, compléter. Les nombreux signaux sont transmis au calculateur, qui en assure l'exploitation automatique, par *l'extracteur,* lequel extrait des signaux vidéo les échos utiles en éliminant le bruit. Le schéma de la *figure* 14 montre la situation de l'extracteur dans la chaîne radar.

▼ Figure 12 :
a, schéma de principe du discriminateur de durée d'impulsion ;
b, différentes étapes de la suppression des signaux de durée différente de τ.
En bas, image radar Decca de l'aéroport de Paris-Orly ; la zone d'ombre vers la droite correspond à la vallée de la Seine.

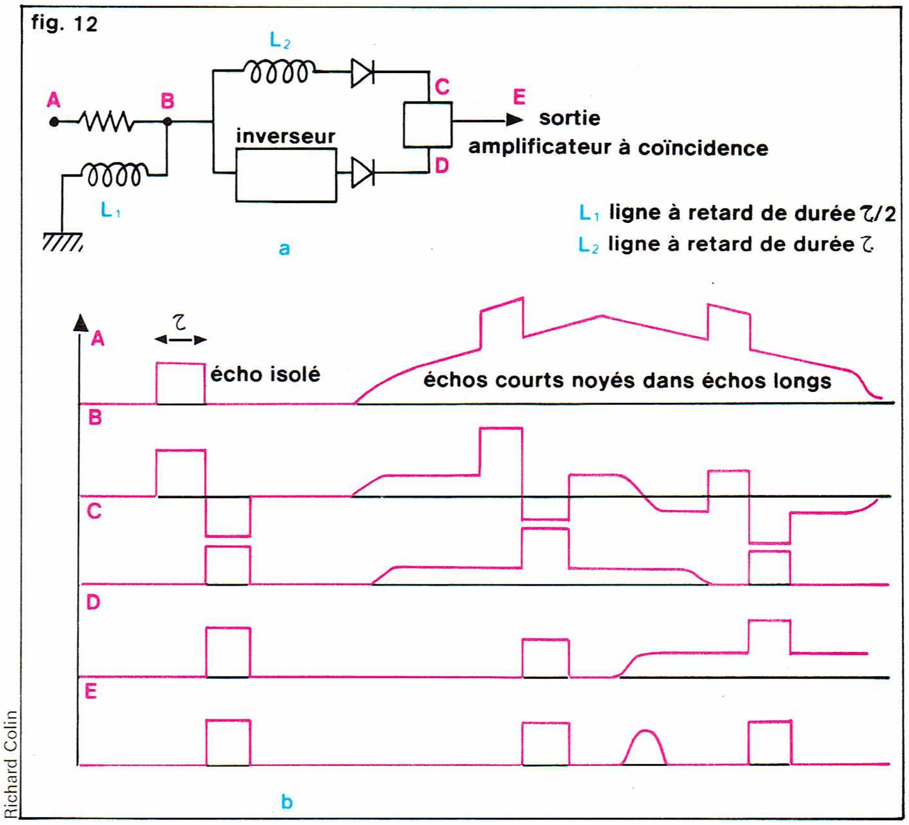

Richard Colin

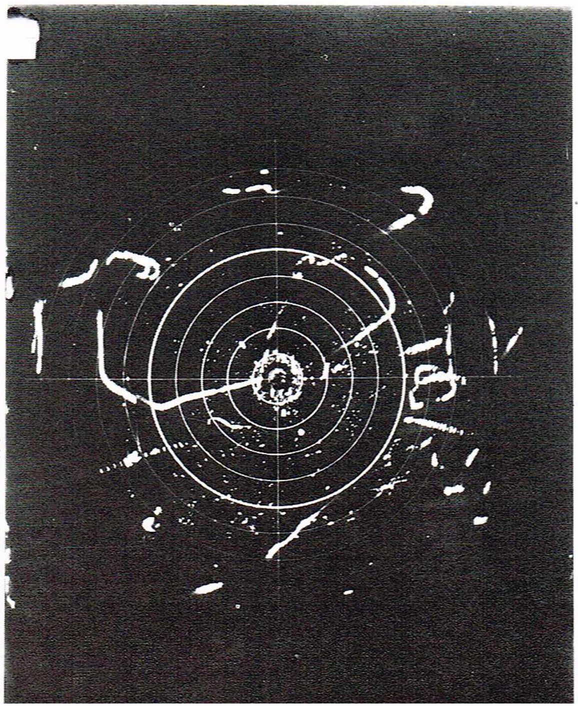

Service DT-ATT

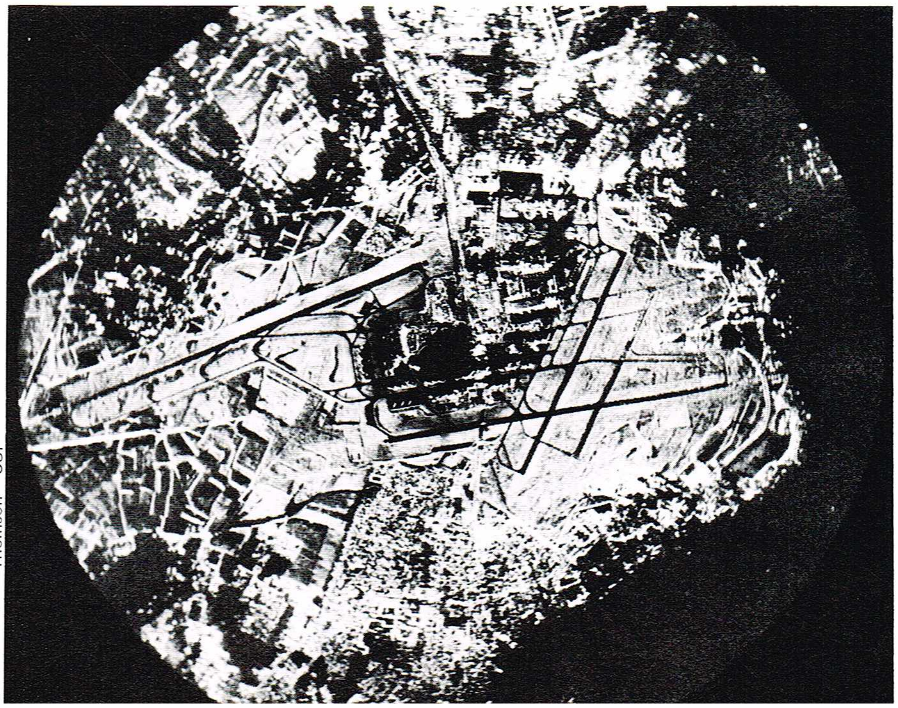

Thomson - CSF

▶ A gauche, image vidéo brute d'un radar primaire et secondaire. A droite, image vidéo brute plus synthétique (le radar secondaire est décodé automatiquement).

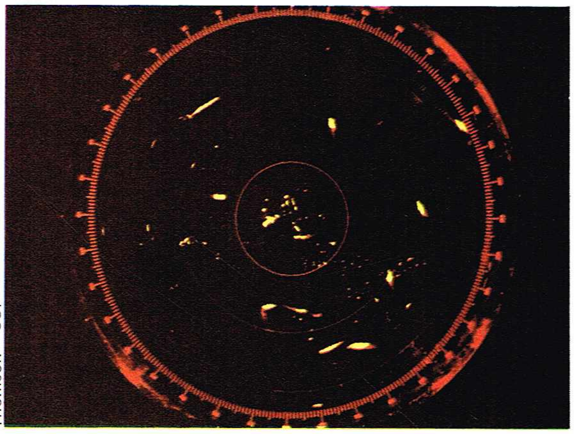

Thomson - CSF

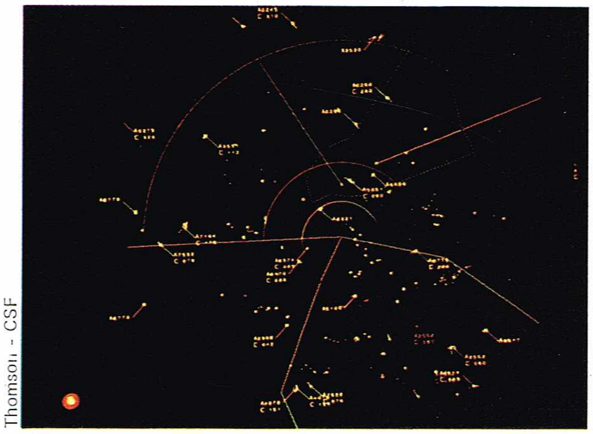

Thomson - CSF

▶ A gauche, image de radar couleur (non opérationnelle) ; les coordonnées sont X, Y au lieu de φ, θ ; les zones colorées indiquent les zones de perturbation. A droite, image radar télévision plus synthétique montrant la circulation dans le port du Havre.

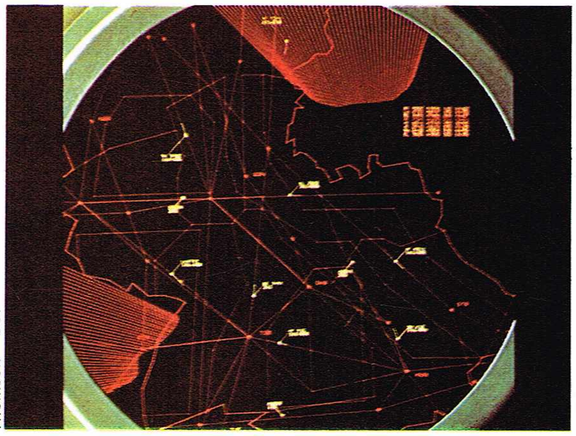

Thomson - CSF

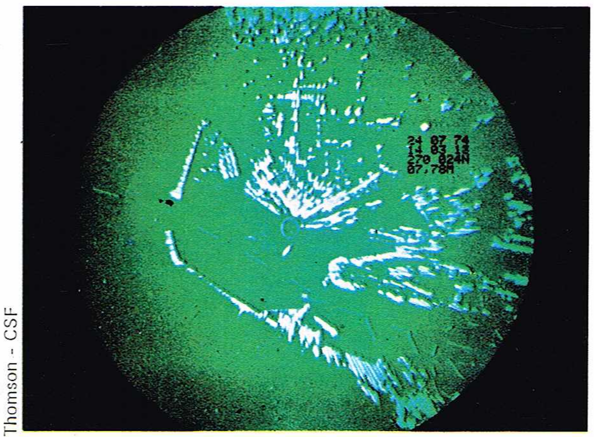

Thomson - CSF

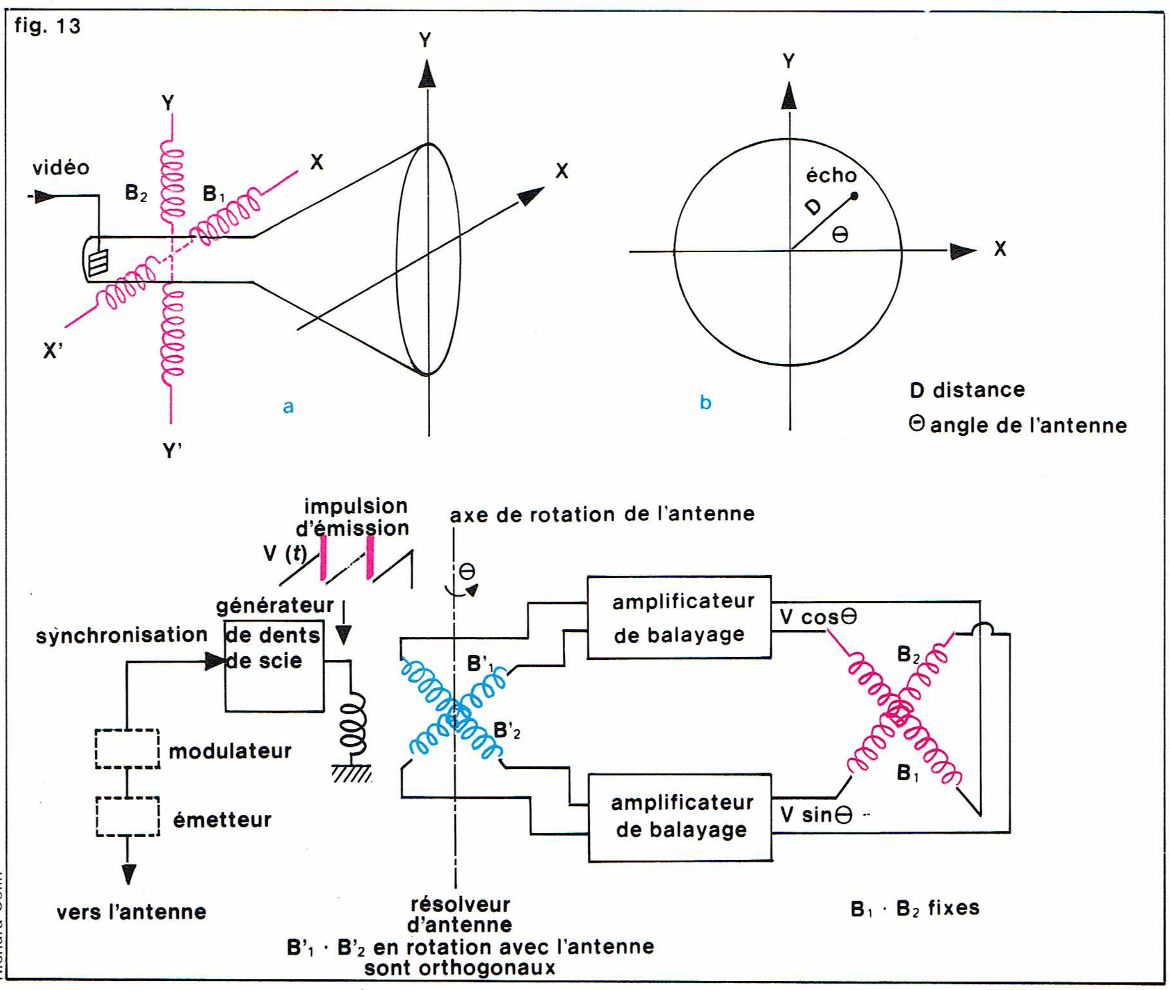

Richard Colin

▶ Figure 13 : indicateur panoramique à bobines fixes : a, tube cathodique et bobines fixes ; b, écran ; c, principe de fonctionnement.

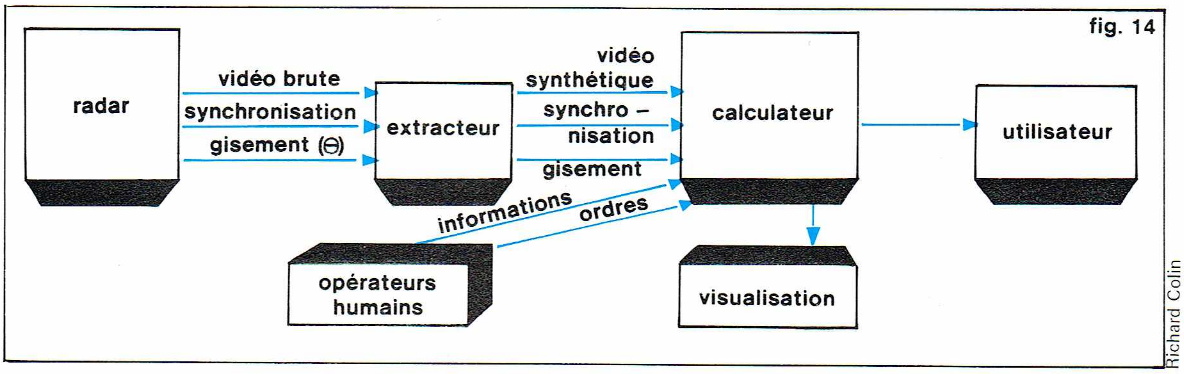

◀ *Figure 14 : la situation de l'extracteur dans la chaîne radar.*

Les différentes informations sont transmises en général sous forme binaire, et l'extracteur doit élaborer les signaux correspondants. La *figure* 15 rappelle les différents traitements que doit subir le signal, traitements qui, suivant que la mesure de fausse alarme sera faite sur la vidéo brute ébasée ou sur la vidéo quantifiée, appartiendront soit au récepteur, soit à l'extracteur. Les échos ainsi obtenus sur plusieurs récurrences sont mis en mémoire, et on compare les échos ainsi obtenus (*fig.* 16). Le nombre de récurrences sur lequel s'effectue cette corrélation dépend du radar. Si la cible reçoit une moyenne de 5 impulsions, on prendra comme entrée 3 impulsions sur 5 pour maintenir le groupe d'échos correspondant, ou *plot* [7] [8].

Le calculateur

Il assure l'exploitation automatique. C'est un calculateur arithmétique programmé, qui, dans le cas du contrôle de la circulation aérienne, fournira : la distance ρ, l'azimut θ, mais aussi d'autres messages : IM (identité militaire), D (détresse militaire), PF (plot fictif), SPI (identité civile), etc. En particulier, le calculateur déterminera à partir d'un plot correspondant à une cible sa trajectoire en fonction du temps, connaissant sa vitesse maximale. L'exploitation des pistes connues permet une prévision, et si un risque de collision apparaît, les ordres nécessaires sont immédiatement transmis.

L'évolution des radars s'opère à la fois dans le dessein d'améliorer les différentes caractéristiques des radars existants et dans celui de répondre à des besoins nouveaux, non seulement dans le cadre d'applications civiles, concernant le transport aérien ou maritime, ou d'applications militaires, mais encore dans le cadre des applications dites industrielles. En ce qui concerne l'amélioration des caractéristiques, l'augmentation de la probabilité de détection d'une cible fluctuante a été réalisée grâce au fonctionnement opérationnel, depuis un certain nombre d'années, des radars à diversité de fréquence [2]. Le *pouvoir discriminateur* en distance a été accru grâce à la mise en service du radar à *compression d'impulsions* qui, par exemple, pour une puissance crête de 250 kW, émettant des impulsions de 100 μs occupant un spectre de 1,2 MHz, a les mêmes performances qu'un radar classique émettant des impulsions de 1 μs sur une puissance crête de 25 MW [2]. Enfin, des procédés plus récents : *l'agilité de fréquence*, où on effectue un changement de fréquence d'une récurrence à l'autre, est une technique de « discrétion » qui augmente la puissance de brouillage. On se reportera aux ouvrages cités pour la description des autres techniques, qui sort du cadre de cet article.

Dans le domaine industriel, de multiples applications, en particulier du radar Doppler, ont été développées : système d'alarme contre les intrus dans une maison, contrôle de la vitesse des automobiles — et, dans ce domaine, la mise au point de radar anticollision est à l'étude [9] —, sûreté du personnel et contrôle des vitesses pour les chemins de fer; des applications dans la mécanique : contrôle des vibrations de turbines, de câbles de ponts suspendus, de la vitesse de pièces de différentes machines, etc.

En physiologie, les radars Doppler permettent de contrôler la respiration des êtres humains et, en particulier, des nouveau-nés placés en couveuse, la puissance rayonnée de l'ordre de 2,5 mW ne créant aucun effet biologique [10].

A côté de l'évolution des technologies concernant une bande de fréquence donnée, il faut signaler l'effort effectué pour augmenter la fréquence d'émission des sources. Aujourd'hui, des études appliquées au système à multiplication de fréquence ont mis au point des doubleurs 200 GHz (10,2 mW) et des tripleurs 300 GHz (2,1 mW) utilisant des varactors AIL. As Ga; cette montée vers les très hautes fréquences est illustrée par un système existant, le *« lidar »*, dans lequel l'émetteur est un *laser*. La conception et l'utilisation d'appareillages de télémétrie laser à moyenne et longue portée (3 000 km), effectuées par MM. Moreau et Vernet en 1969 en France, ont permis l'étude et la mise au point d'un

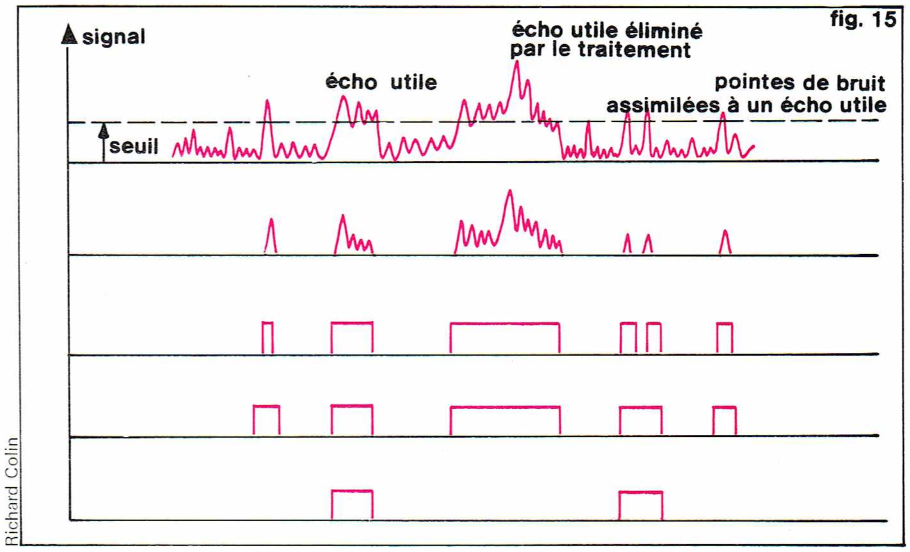

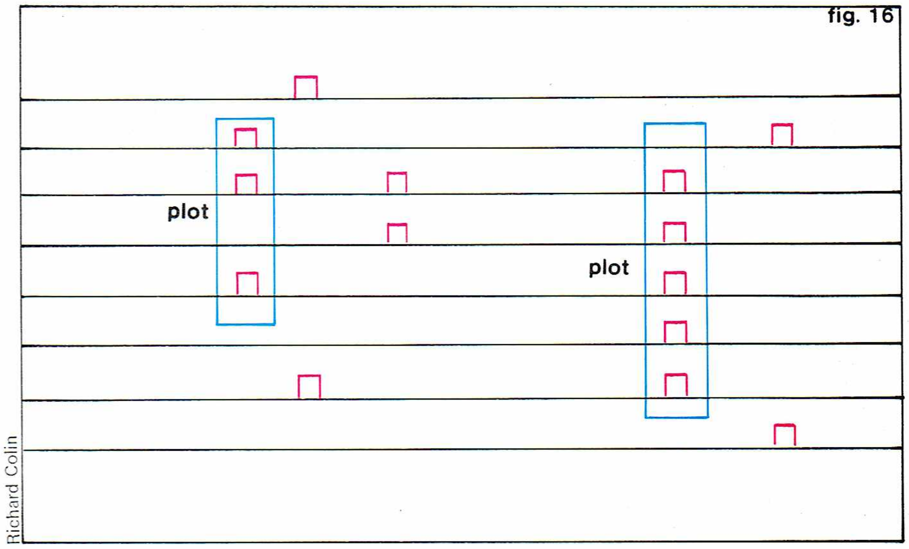

▲ *Figure 15 : les différents traitements subis par le signal radar.*
Figure 16 : définition d'un plot.

Tableau IV Comparaison du radar et du lidar		
Caractéristiques	**Radar**	**Lidar**
Angle solide dans lequel est concentrée l'énergie (α)	$\frac{1}{30}$ sr	10^{-3} sr
Durée de l'impulsion électromagnétique (τ)	10^{-6} s	$30 \cdot 10^{-9}$ s
Puissance de crête de l'impulsion P	1 MW	30 MW
$\frac{P \cdot \tau}{\alpha^2}$	900 J/sr	900 000 J/sr

▲ *Tableau IV : comparaison du radar et du lidar.*

système de poursuite automatique d'un mobile utilisant des échos laser [11] ; le laser ($\lambda = 6\ 943$ Å) émettait des impulsions très énergétiques de 1 joule en 30 nanosecondes, et une partie de cette énergie était réfléchie par la cible, en direction du télescope où elle était détectée. La mesure du temps séparant l'émission de la réception permettait, avec les moyens de l'époque, de définir la distance radiale à quelques mètres près. Sur le *tableau* IV sont comparées les performances d'un radar hertzien et d'un lidar respectivement. Comme dans le cas du radar classique, l'association du lidar et d'un ordinateur (en particulier dans le cas de la poursuite de satellites, en aveugle, de nuit) a augmenté les performances. Le lidar a apporté une solution nouvelle et avantageuse pour déterminer rapidement les données aérologiques au-dessus d'une base de lancement, au moment d'un tir : détermination de la vitesse radiale des nuages, de l'air, caractérisation des turbulences. Des études ont aussi été entreprises sur les possibilités de l'anémométrie interférentielle (lidar Doppler) pour mesurer à distance la vitesse et la direction du vent.

En conclusion, on voit la diversité des applications radar dans le domaine des ondes électromagnétiques et l'essor extraordinaire qu'a connu cette technologie depuis moins d'un demi-siècle. Mis au point essentiellement pour des applications militaires, le radar présente des fonctions réalisables très variées qui permettent de satisfaire de nombreux besoins dans le domaine civil.

BIBLIOGRAPHIE

(1) CARPENTIER M., *Radars, Concepts nouveaux*, Paris, Dunod, 1966.
(2) DARRICAU J., *Physique et Théorie du radar*, Sodepe, 1973.
(3) CHODAROW M., SUSSKIND C., *Fundamentals of Microwave Electronics*, New York, McGraw Hill.
(4) WATSON M., *Microwave Semiconductors Devices and their Circuit Applications*, New York, McGraw Hill.
(5) ARMAND M., SURYN A., *Oscillateur-mélangeur hyperfréquence et son application aux radars détecteurs d'objets en mouvement*, brevet Th. CSF 4016-7433081.
(6) THOUREL L., *Cours de radar*, ENSAE, 1975.
(7) MONPETIT M., *Radars*, tome I, *Systèmes radars*, ENSTA, 1972.
(8) TSIAMPALIDES M., *l'Ensemble extracteur générateur de plots à Orly*, décembre 1976, service DTXST.
(9) *Electronics*, February 17, 1977, p. 7 E.
(10) WHEATON C. P., *Industrial and Scientific Applications of Doppler Radar*, in *Microwave Journal*, November 1975, vol. 18, n° 11, p. 39.
(11) STARON M., *Étude d'un dispositif de poursuite automatique d'un mobile utilisant des échos laser*, in *la Recherche spatiale*, n° 133, novembre-décembre 1969.

▶ *Page ci-contre, en bas à gauche, figure 19 : composante radiale V_r de la vitesse intervenant dans l'effet Doppler et directement mesurable au sonar (A : bateau porteur du sonar, B : cible). A droite, le poste central d'opérations sonar d'un chasseur de mines montrant les coupoles de visualisation du détecteur et du classificateur de mines.*

Le sonar

Le sonar, contraction de « sound navigation and ranging » (navigation et télémétrie sonores), est un système qui utilise les propriétés de propagation des ondes acoustiques sous-marines pour la navigation, la détection et les communications en milieu marin.

C'est l'équivalent acoustique et sous-marin du radar. Son importance tient au fait que, contrairement aux ondes électromagnétiques utilisées par ce dernier, les ondes sonores sont peu atténuées dans l'eau et peuvent, dans des conditions favorables, se propager sur des centaines de kilomètres.

Historique

La naissance et l'évolution du sonar ont été fortement liées à un problème d'ordre militaire : la détection sous-marine. Dès 1915, un ingénieur russe, Constantin Chilowski, proposait un détecteur ultrasonore de sous-marins. Un peu plus tard, Paul Langevin, directeur de l'École de physique et chimie industrielles de la ville de Paris, mettait en évidence pour la première fois un phénomène de propagation ultrasonore à 40 kilohertz. Il fit cette manipulation assisté de MM. Chilowski, Tournier et Holweck au laboratoire d'électricité générale de l'École dans un évier passé à la postérité sous le nom d' « évier de Langevin ». L'émetteur était un transducteur électrostatique appelé condensateur chantant, et le récepteur un pendule de torsion.

L'une des premières applications des ondes sonores sous-marines a été la détermination de la profondeur de la mer. Le principe est simple (*fig.* 17) : une source placée à la surface de l'eau émet un signal court (impulsion) qui est partiellement réfléchi par le fond. Un récepteur permet de mesurer le temps t mis par l'onde pour faire cet aller-retour ; la distance parcourue par l'onde sera donc deux fois la hauteur h cherchée. Si on appelle c la vitesse du son dans l'eau (c est voisin de 1 500 mètres par seconde), on peut écrire :

$$h = \frac{ct}{2}$$

De plus, si la longueur d'onde de l'onde émise ($\lambda = \frac{c}{f}$ où f représente la fréquence) est faible devant les dimensions de l'émetteur, l'énergie va se propager principalement dans l'axe du transducteur : ce phénomène, appelé directivité, permet de mesurer précisément la profondeur en utilisant une fréquence élevée ; c'est l'intérêt des ultrasons (ondes sonores de fréquences supérieures aux fréquences audibles).

Les premières expériences de propagation ont été faites en 1915 par P. Langevin. En raison du mauvais rendement du dispositif électrostatique, il utilisa à partir de 1917 un quartz piézo-électrique monté entre deux armatures d'acier et fonctionnant à la fois comme émetteur et comme récepteur. Un tel système possède une fréquence de résonance ; excité un bref instant par une tension électrique, il se déforme et vibre à cette fréquence. Cette vibration se propage dans l'eau : on a constitué ainsi un émetteur. Comme la plupart des transducteurs, ce système est réciproque : quand l'onde acoustique revient, elle fait entrer le quartz en résonance et une tension électrique apparaît aux bornes du quartz. Il est donc aisé de mesurer le temps mis par l'onde pour revenir. La fréquence de résonance utilisée par Langevin était de l'ordre de 20 kilohertz. En émettant régulièrement des impulsions à partir d'un bateau en déplacement, il pouvait obtenir une courbe précise de la profondeur en fonction de la position.

Ce type de sondeur, qui constitue une forme simplifiée de sonar, est aujourd'hui utilisé en navigation. Il a permis également la détection d'épaves (le *Lusitania*) et la découverte des fosses du Pacifique.

Il est possible, en orientant le système horizontalement, de détecter la présence de navires ou de sous-marins (*fig.* 18) et de connaître leur position. C'est le principe du sonar qui va naître et se développer rapidement en raison des besoins militaires : en 1916, une mission « Langevin-Colin » se constitue ; elle va permettre la mise au point et les tests de dispositifs de détection de sous-marins (détection jusqu'à 1 300 m de distance en

mai 1918 à Toulon). Devant les résultats obtenus, ces appareils seront installés sur des bâtiments de guerre et ne cesseront de se développer parallèlement à des systèmes de communication sous-marine et de recherche de mines.

La bataille de l'Atlantique a montré que l'utilisation des propriétés de propagation des ondes sonores était un moyen décisif pour la détection des mines et des sous-marins. Les progrès de ces derniers (sous-marins atomiques rapides et à longue durée d'immersion) font qu'une part importante du budget des Marines nationales est consacrée à l'étude et à la fabrication de systèmes sonar de plus en plus performants.

Il existe un grand nombre de types de sonars; on peut distinguer les sonars actifs qui émettent de l'énergie acoustique, laquelle est réfléchie par tout objet situé dans le champ sonore, puis reçue par une antenne de réception et détectée, des sonars passifs qui n'émettent rien mais écoutent les rayonnements émis volontairement ou non par les navires ou les sous-marins.

Sonar actif

Fonctionnement

Un sonar actif fonctionne de la même façon que le sondeur ultrasonore déjà décrit, mais il est plus complexe, car, au lieu de déterminer une profondeur d'eau, on cherche à connaître la direction (appelée gisement si elle est repérée par rapport au bateau porteur, ou azimut par rapport au nord géographique), la distance, éventuellement la profondeur (ou site) s'il s'agit d'un sous-marin, la vitesse et l'itinéraire du bâtiment.

La **direction** peut être obtenue en utilisant un ensemble émetteur-récepteur directif orientable : le sonar est alors dit directif. Pour éviter d'avoir une partie mobile, on peut en disposer dans un nombre de directions suffisant. L'inconvénient de ces procédés est qu'ils obligent à sonder successivement toutes les directions pour explorer l'horizon. Une méthode de plus en plus employée, et qui sera décrite plus loin, est la formation de voies; elle nécessite un grand nombre d'hydrophones (récepteurs sous-marins analogues aux microphones dans l'air) orientés dans toutes les directions et un traitement électronique des signaux issus de ces capteurs. Un tel sonar, qui peut sonder simultanément toutes les directions, est dit panoramique.

Comme pour le sondeur ultrasonore, la **distance** est mesurée grâce au retard entre l'émission et le retour de l'écho.

La **vitesse relative** de la cible (*fig.* 19) par rapport au bâtiment porteur est déterminée grâce à un décalage en fréquence causé par ce mouvement et appelé effet Doppler : si le bateau A porteur du sonar est fixe et si la cible B se rapproche avec une vitesse dont la composante dans l'axe des deux bateaux est V_r (voir *fig.* 20), un signal émis au temps $t = 0$ en A sera reçu en B au temps :

$$t_1 = \frac{AB_1}{c}$$

soit

$$t_1 = \frac{l - V_r t_1}{c}$$

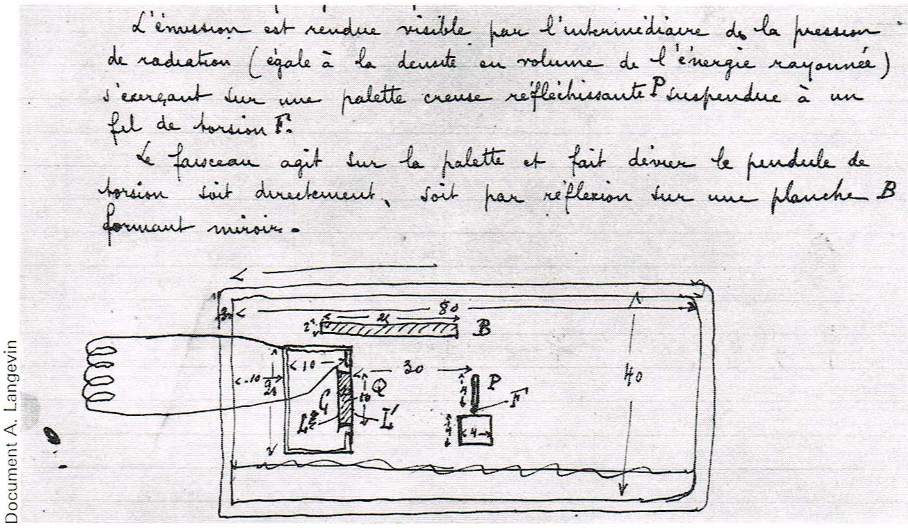
L'émission est rendue visible par l'intermédiaire de la pression de radiation (égale à la densité en volume de l'énergie rayonnée) s'exerçant sur une palette creuse réfléchissante P suspendue à un fil de torsion F.
Le faisceau agit sur la palette et fait dévier le pendule de torsion soit directement, soit par réflexion sur une planche B formant miroir.

Document A. Langevin

fig. 17

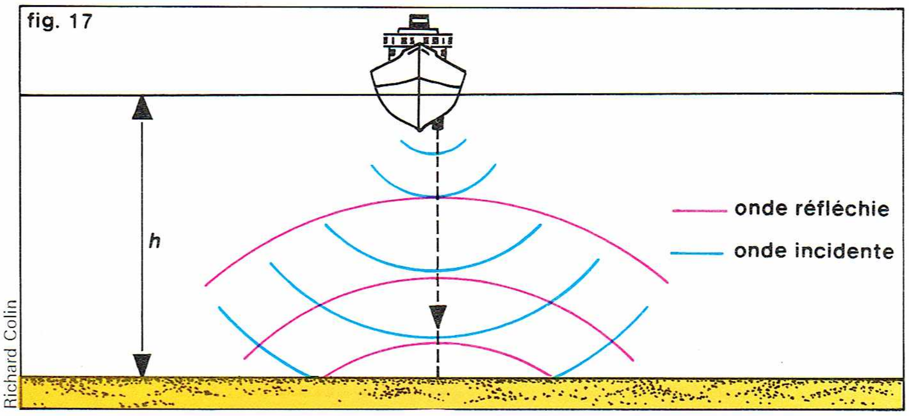

Richard Colin

fig. 18

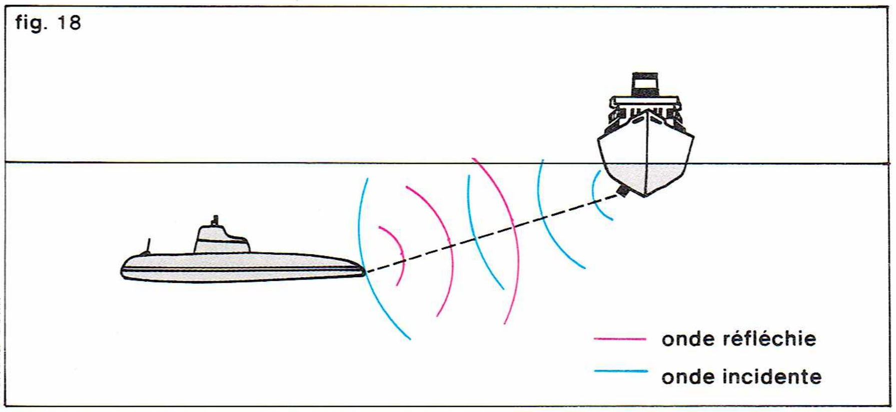

Richard Colin

fig. 19

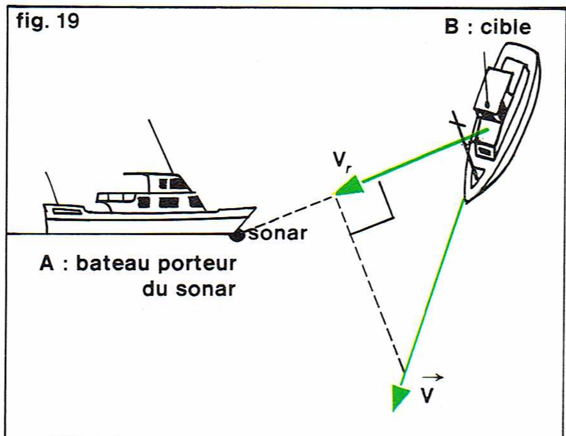

Richard Colin

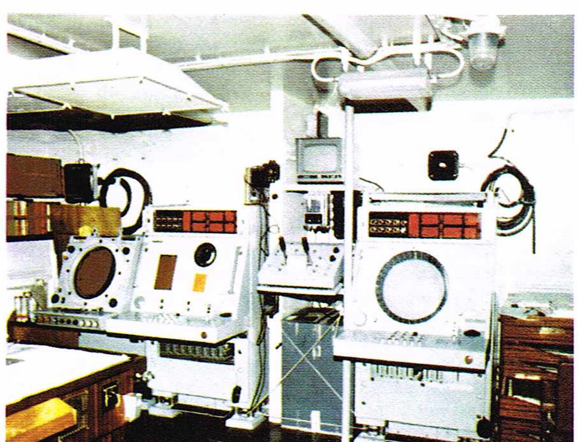

Thomson - CSF

En haut, manuscrit de Paul Langevin relatif à la première mise en évidence de propagation dans l'eau des ultrasons, faite en 1915.

▲ *Figure 17 : mesure de la profondeur des mers à l'aide d'un sondeur ultrasonore. Figure 18 : principe du premier sonar fonctionnant de la même façon que les sondeurs ultrasonores; il permet de détecter la présence de navires et de sous-marins et de connaître leur position.*

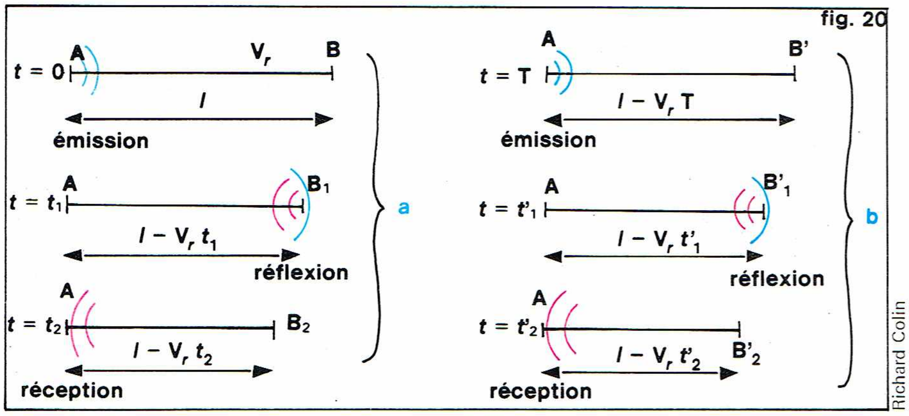

▲ *Figure 20 : trajets parcourus par l'onde sonore émise au temps $t = 0$ (en a) et au temps $t = T$ (en b).*
▼ *Figure 21 : diagramme de fonctionnement d'un sonar actif moderne.*
Figure 22 : diagrammes de directivité en émission pour les sonars ; a, émission panoramique : elle est simultanée sur tous les hydrophones ; b, émission directive ; toute la puissance de l'émission est concentrée sur un seul secteur ; c, émission T. F. T.

donc
$$t_1 = \frac{l}{c + V_r}$$

L'écho, qui se comporte comme un signal émis de B_1 par la cible au temps $t = t_1$, parviendra donc en A au temps $t_2 = 2\,t_1$

soit
$$t_2 = \frac{2l}{c + V_r}$$

Si le signal est périodique $\left(\text{fréquence } f, \text{ période } T = \frac{1}{f}\right)$, l'onde émise au temps $t = T$ parviendra en B au temps :

$$t'_1 = T + \frac{AB'_1}{c}$$

soit
$$t'_1 = T + \frac{l - V_r t'_1}{c}$$

d'où
$$t'_1 = \frac{cT + l}{c + V_r}$$

La durée du trajet total $(t'_2 - T)$ sera donc égale à :

$$2\,(t'_1 - T)$$

d'où
$$t'_2 = 2\,t'_1 - T$$

soit
$$t'_2 = \frac{2\,l + T\,(c - V_r)}{c + V_r}$$

La période de l'onde reçue est :

$$T' = t'_2 - t_2$$

soit
$$T' = \frac{c - V_r}{c + V_r}$$

La fréquence f' reçue est donc :

$$f' = f\,\frac{c + V_r}{c - V_r}$$

Elle est plus élevée que la fréquence d'émission.
Si la cible s'éloigne, on trouve de même :

$$f' = f\,\frac{c - V_r}{c + V_r}$$

La fréquence est alors plus basse que celle de l'émission.
On montre que ces formules restent vraies même lorsque les deux bâtiments se déplacent. La mesure de cette variation de fréquence permet donc de déterminer facilement la vitesse relative. Un phénomène analogue se produit lorsqu'on écoute des voitures sur le bord d'une route : le son est plus aigu lorsqu'un véhicule s'approche, et il devient plus grave après son passage.
Enfin, on peut déterminer la **vitesse absolue** ainsi que l'**itinéraire** du bâtiment en utilisant les indications obtenues après plusieurs échos successifs.

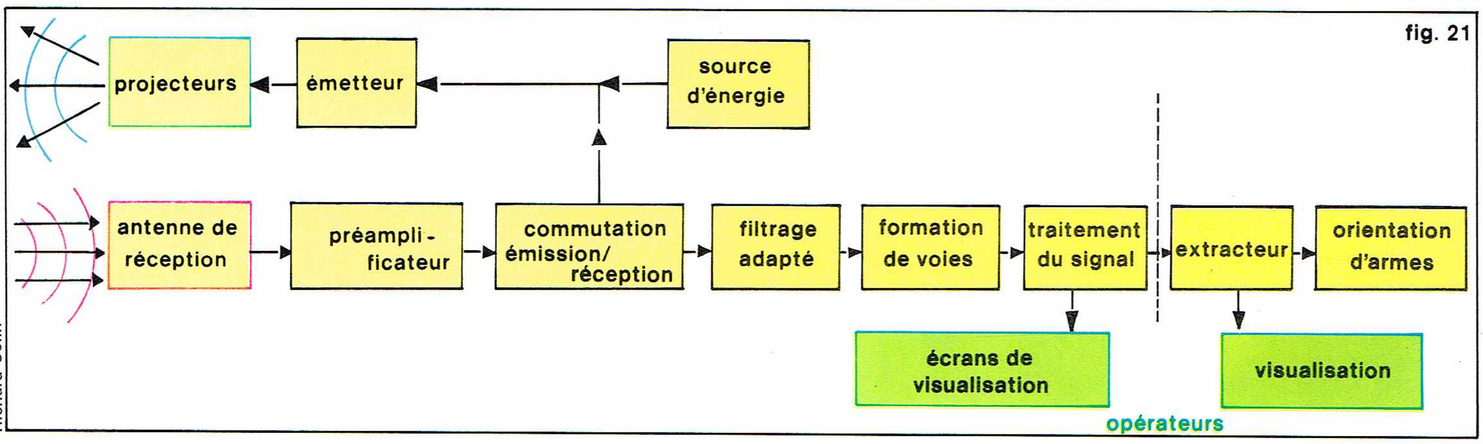

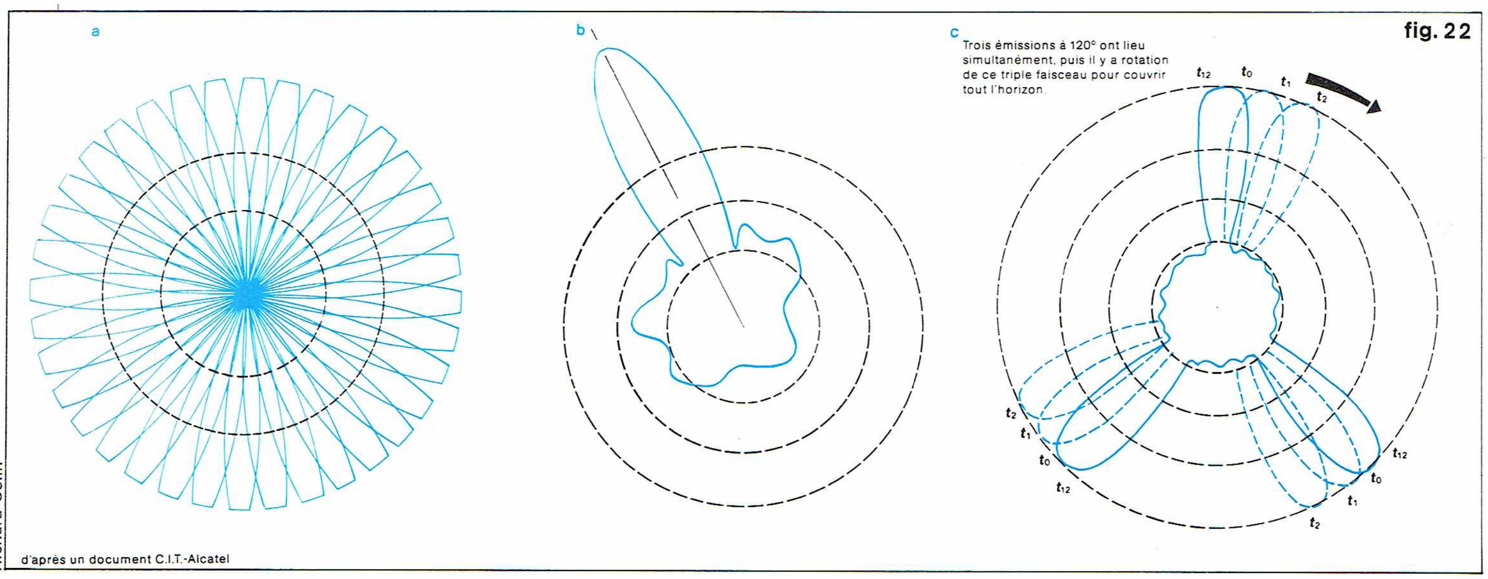

Description

Un système sonar actif moderne équipant un bâtiment de guerre est un ensemble très important dont les principaux éléments sont représentés sur la *figure* 21.

L'**émetteur** est un étage de puissance amplifiant le signal à émettre et alimentant les *projecteurs* qui transforment l'énergie électrique en énergie acoustique (système analogue au haut-parleur dans l'air). La base d'émission d'un sonar panoramique est un cylindre de plusieurs mètres de diamètre sur lequel les transducteurs sont disposés en colonne. En émission, un tel sonar peut fonctionner de plusieurs façons suivant la puissance qu'il est nécessaire d'envoyer dans chaque voie (voir *fig*. 22).

Le transducteur lui-même est généralement du type magnétostrictif et électrostrictif. La partie active est constituée d'un ensemble de céramiques ferro-électriques alimentées électriquement en parallèle.

Cet ensemble vibre en demi-onde et une contremasse permet de régler la bande passante du projecteur. L'adaptation d'impédance avec l'eau est réalisée grâce à un pavillon, et l'ensemble est placé dans un boîtier étanche, le pavillon seul restant en contact avec l'eau.

Pour obtenir une puissance d'émission suffisante, des éléments analogues sont regroupés sur une base d'émission. L'ensemble peut contenir quelques centaines de projecteurs et peser plusieurs tonnes.

Enfin, les transducteurs sont montés dans des dômes de protection permettant en outre un carénage et une réduction de la traînée et des bruits d'écoulement.

Un **système d'alimentation** permet de fournir des puissances atteignant quelques centaines de kilowatts pendant l'émission ; il s'agit de batteries tampon ou plus souvent de groupes tournants à volant d'inertie.

Une **antenne de réception** composée d'un grand nombre d'hydrophones (quelques centaines) est disposée pour permettre de reconnaître la provenance (gisement et parfois site) de l'écho. Pour des raisons d'encombrement et de commodité, cette antenne est généralement confondue avec la base d'émission, les mêmes éléments pouvant fonctionner tour à tour comme projecteurs puis comme hydrophones en raison de propriétés de réciprocité des transducteurs. Dans certains cas, il peut être cependant intéressant de les séparer pour diversifier les choix possibles de dimension d'antenne.

Cette antenne est disposée à l'avant du bâtiment, car c'est la zone la moins bruyante. Sur les gros navires, elle est disposée dans un bulbe d'étrave. Ces antennes sont stabilisées par une suspension au roulis et même au tangage pour éviter de voir se dégrader leurs performances de directivité.

Une **préamplification** des signaux issus des hydrophones est nécessaire. Elle permet d'abaisser considérablement leur impédance de sortie à l'aide de transistors à effet de champs.

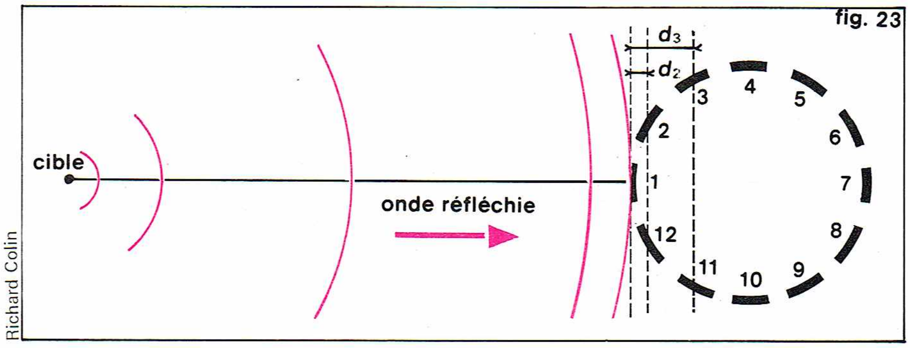

Richard Colin

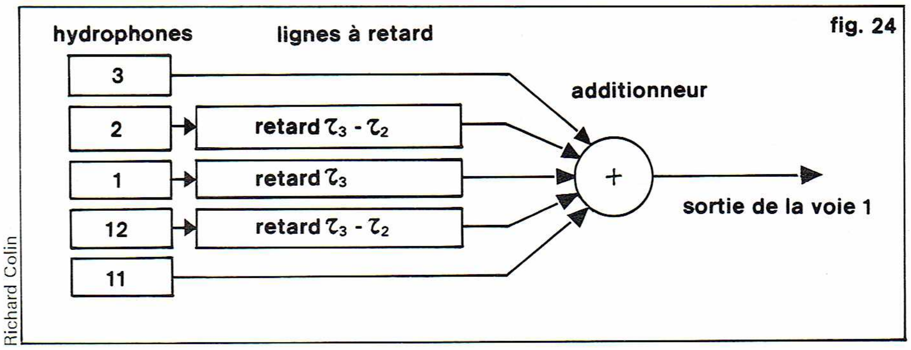

Richard Colin

▲ *Figure 23 : antenne de réception d'un sonar ; les hydrophones n° 2 et n° 3 recevront un signal qui aura parcouru une distance supérieure respectivement de d_2 et de d_3 par rapport au signal reçu par l'hydrophone n° 1.*
Figure 24 : principe de la formation d'une voie.

Un **filtrage adapté,** centré sur la fréquence d'émission, est destiné à réduire les bruits de provenances diverses (bruit marin, bruit électronique, etc.) pour ne garder que le signal utile.

Un étage appelé **formation de voies** permet de déterminer la direction de la source des échos réfléchis.

Quand un écho parvient sur une antenne cylindrique, les hydrophones sont excités les uns après les autres (*fig.* 23). Si l'écho renvoyé par une cible située dans l'axe de l'hydrophone numéro 1 y parvient au temps $t = 0$, il parviendra sur les hydrophones numéros 2 et 12 avec un retard :

$$\tau_2 = \frac{d_2}{c}$$

sur les hydrophones numéros 3 et 11 avec un retard :

$$\tau_3 = \frac{d_3}{c}, \text{ etc.}$$

Former une voie, c'est retarder électroniquement (de façon analogique ou, actuellement, de façon digitale à l'aide de registres à décalage) le signal issu de la voie 1 d'un temps τ_3 et des voies 2 et 12 d'un temps $\tau_3 - \tau_2$, puis faire la somme des signaux obtenus (*fig.* 24).

Ainsi, tous les signaux obtenus après retard sont en phase et s'ajoutent pour accroître l'amplitude du signal provenant de cette direction au détriment des signaux d'origine différente. En répétant ce montage pour toutes les voies, on obtient une réception panoramique à voies préformées. On peut également, pour réduire l'ensemble, faire tourner rapidement par commutation électronique un seul ensemble de lignes à retard : c'est la réception panoramique à « scanning ». Une valeur usuelle de nombre de voies est 36, chacune couvrant 10 degrés. Sur certains sonars, on peut atteindre plusieurs centaines de voies. Le système de voies préformées est implanté sur tous les sonars importants et permet d'obtenir à la fois une bonne directivité et une visualisation simultanée de toutes les voies.

Le **traitement du signal** est un étage électronique qui permet d'obtenir les informations cherchées ; la façon la plus simple est de détecter puis d'intégrer le signal obtenu à la sortie des voies. Actuellement, le traitement cohérent, qui permet des gains considérables de performances, est largement utilisé. Ces traitements fournissent une estimation des paramètres recherchés (existence d'un écho, direction, distance, vitesse) qui ne doit pas être tributaire de phénomènes sans rapport avec ceux-ci (bruit, notamment réverbération dont l'origine sera décrite plus loin). On montre en particulier qu'en

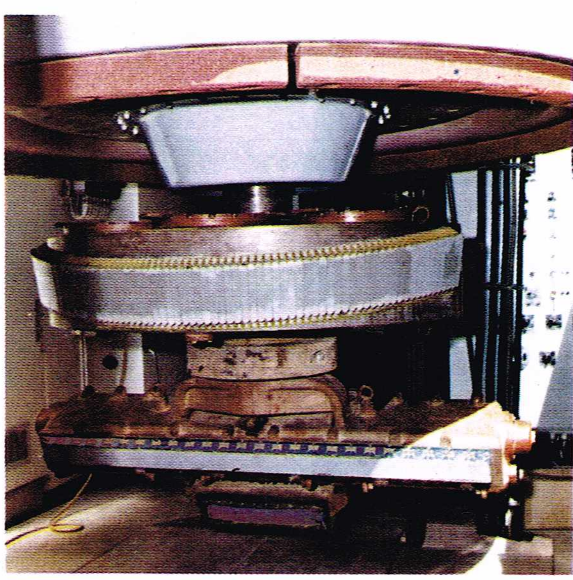
Thomson - CSF

◀ *Les bases d'émission-réception du sonar détecteur (circulaire, en haut) et classificateur (rectangulaire, en bas) d'un chasseur de mines. Cet ensemble, muni d'un système de stabilisation antiroulis et antitangage, est ici en position de maintenance dans le bateau ; il est immergé lors de son utilisation.*

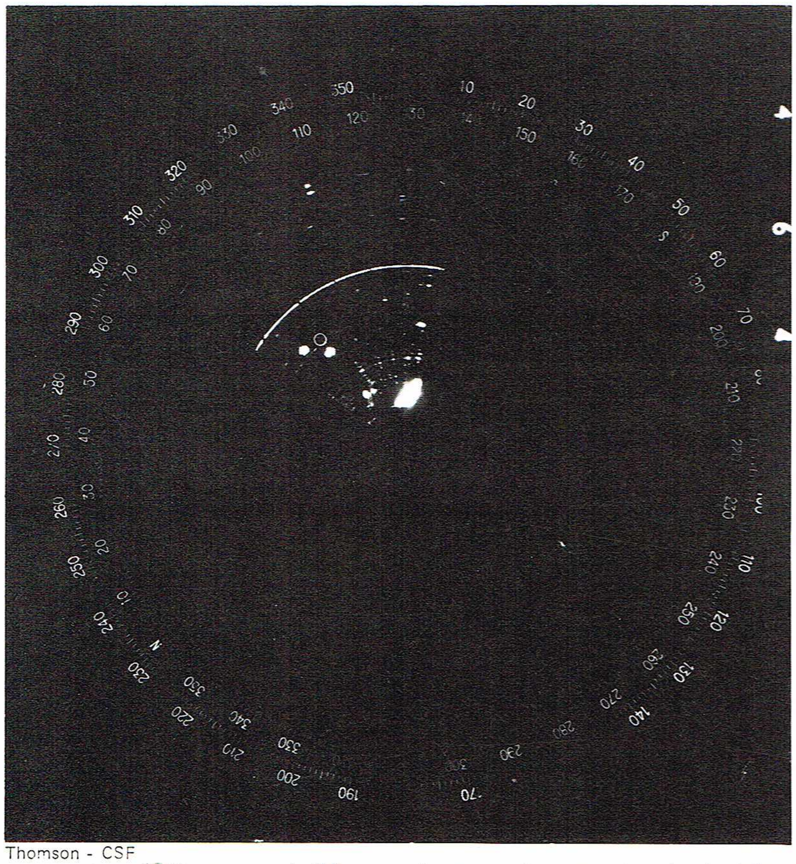

Thomson - CSF

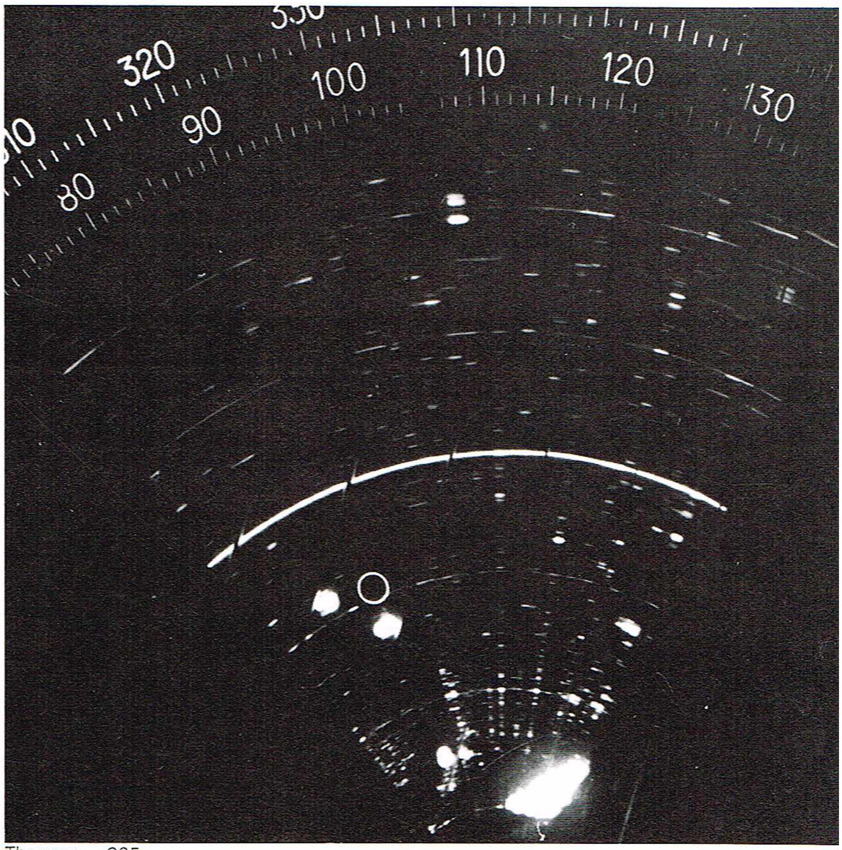

Thomson - CSF

▲ ***Deux vues de l'écran de visualisation d'un sonar-détecteur d'un chasseur de mines : à gauche, l'écran entier; à droite, grossissement du champ balayé (= 30° par rapport à la direction moyenne); le repérage de l'écho de la mine est réalisé par le marqueur circulaire.***

émettant dans une bande de fréquence de largeur B, pendant une durée T, le rapport signal sur bruit est multiplié par un gain théorique égal à BT par rapport à une émission à fréquence fixe.

Un **écran de visualisation,** constitué par un tube cathodique circulaire appelé tube PPI (Plan Position Indicator), donne une représentation géographique (direction et distance) des échos; leur amplitude est traduite grâce à une modulation de la brillance. Le balayage se fait après chaque émission sous forme d'une circonférence de diamètre croissant avec le temps et s'illuminant sur chaque écho. Le tube utilise des phosphores à forte rémanence pour maintenir assez longtemps la visualisation. Un autre écran appelé loupe permet, après avoir localisé un écho, de le pointer avec un plus fort agrandissement pour avoir le maximum de précision sur la cible.

Pour réduire la complexité de la surveillance d'un tel écran, les sonars les plus sophistiqués possèdent un **extracteur** qui, par comparaison entre les balayages successifs, permet de ne retenir que les points intéressants et de les projeter sur un autre écran de visualisation. Un dispositif de poursuite permet de s'assurer de la persistance et de la cohérence de ces échos; un calculateur détermine avec précision position, itinéraire et vitesse réelle de la cible. Ces résultats sont présentés à l'opérateur. L'extracteur peut également commander un système d'orientation d'armes.

Un système sonar actif moderne est un ensemble très volumineux, complexe et cher. Sur un bâtiment de surface, il peut y avoir un sonar de coque et un sonar remorqué, permettant d'émettre et de recevoir des échos jusqu'à plusieurs centaines de mètres de profondeur.

Il existe de nombreux autres types de sonars actifs :

— sonar pour sous-marins;

— sonar de torpilles;

— sonar de chasse aux mines, qui équipe les dragueurs de mines;

— sonar pour hélicoptères : l'hélicoptère mouille le sonar qui lui est relié par un câble, émet, écoute et repart. Il peut ainsi couvrir rapidement une grande surface. Il est utile pour la détection des sous-marins;

— bouée sonar, larguée par avion ou mise en place par un bâtiment. Elle enregistre ou émet les informations qu'elle peut obtenir;

— sonar fixe pour la surveillance;

— sonar de navigation : il permet de déterminer la présence d'obstacles (récifs, hauts-fonds, glace) ou, en utilisant l'effet Doppler sur le fond ou en réverbération de volume dans l'eau, de connaître la vitesse et la distance parcourue par le bateau.

▼ ***Figure 25 : principe du télémètre acoustique passif.***

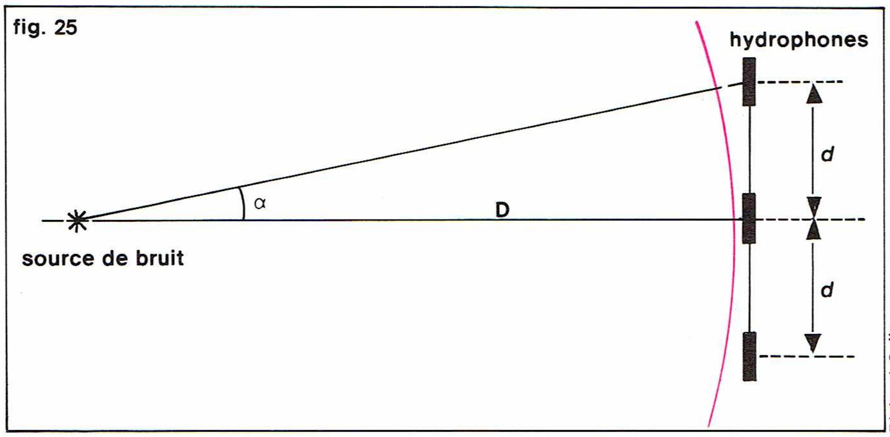

Sonar passif

C'est un autre type de sonar, qui n'émet pas afin d'éviter de se faire repérer. Pour cette raison, il est très utilisé dans les sous-marins. Ce dispositif écoute tous les bruits de la mer pour déceler la présence de bâtiments. La plupart des systèmes sonar actif modernes peuvent fonctionner en passif. L'écoute se fait en large bande pour capter toutes les vibrations des navires : arbres d'hélice, moteurs, traînée, cavitation (bulles de vapeur formées dans l'eau lorsque la pression hydrostatique devient inférieure à la pression de vapeur saturante de l'eau; ce phénomène se produit en particulier autour des hélices, et l'implosion de ces bulles produit un bruit caractéristique). On détermine ainsi la présence et la direction d'un rayonnement anormal (sonar de veille passive). Il est difficile de connaître la distance; elle peut être estimée par triangulation entre différents hydro-

phones ou par différence de temps de réception entre rayons ayant suivi des chemins différents; ce dernier point suppose une connaissance précise des conditions de propagation (courbe de bathycélérimétrie qui représente l'évolution de la vitesse de propagation des ondes acoustiques en fonction de la profondeur et dont l'importance sera signalée plus loin).

La distance peut aussi être calculée en déterminant la courbure de l'onde incidente : c'est le télémètre acoustique passif (*fig.* 25). Trois récepteurs distants de d reçoivent le signal avec un décalage de durée τ. L'angle α étant toujours petit, on peut écrire :

$$\alpha = \frac{d}{D} = \frac{\tau c}{d}$$

La distance D est donc :

$$D = \frac{d^2}{\tau c}$$

On évite de pointer exactement la source, en introduisant des lignes à retard compensant les différences de marche dues à l'inclinaison des rayons par rapport au plan des récepteurs.

Enfin, certains sonars appelés intercepteurs permettent la détection rapide et sûre ainsi que la mesure des paramètres des émissions sonar adverses (émission de torpilles, identification de bateaux).

Influence des conditions de propagation

La propagation d'une onde sonore est régie par l'équation de D'Alembert, qui relie le déplacement u d'un point lié au milieu à sa position et au temps, et s'écrit :

$$\Delta u - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0$$

Vitesse du son

On montre que c représente la vitesse de propagation de l'onde et vaut :

$$c = \sqrt{\frac{1}{\rho\chi}}$$

où ρ est la masse volumique du milieu et χ son coefficient de compressibilité.

La vitesse du son dans l'eau de mer peut varier entre 1 450 et 1 560 mètres par seconde; elle dépend de la température t (en degrés Celsius), de la pression due à la profondeur h (en mètres) et de la salinité s (en °/₀₀), selon la loi approchée :

$$c \text{ (en m/s)} = 1\,450 + 4{,}61\, t - 0{,}045\, t^2 + 0{,}018\,2\, h + 1{,}3\,(s - 34)$$

En surface, pour une salinité de 34 °/₀₀ et à 10 °C, on obtient $c = 1\,492$ m/s.

La salinité est généralement uniforme et, à un instant donné, la température dépend principalement de la profondeur; cela revient à dire que la vitesse du son c ne dépend que de l'abscisse verticale. Au cours du temps, les variations saisonnières de température en surface modifient le profil de célérité (bathycélérimétrie). On peut voir un exemple sur la *figure* 26.

Trajet des rayons sonores

L'allure de la bathycélérimétrie influe considérablement sur les conditions de propagation. Si c_0 et θ_0 représentent la vitesse du son et l'angle d'un rayon sonore avec l'horizontale à l'émission (*fig.* 27), c et θ en un point quelconque du rayon sont liés par la loi de Descartes :

$$\frac{c}{\cos\theta} = \frac{c_0}{\cos\theta_0}$$

On peut, en connaissant $c\,(z)$, déterminer les trajectoires des rayons sonores en résolvant l'équation :

$$x = \int_{z0}^{z} \frac{c\,(z)}{\sqrt{\dfrac{c_0^2}{\cos^2\theta_0} - c^2\,(z)}}\, dz$$

La zone insonifiée par un sonar dépend fortement de la profondeur d'émission. A partir d'une certaine profondeur appelée *immersion critique* (la vitesse du son y est égale à celle en surface), il n'y a plus de zone d'ombre. Cela explique pourquoi, outre un sonar de coque, les bâtiments sont souvent équipés d'un sonar remorqué : cela permet d'accroître considérablement la partie insonifiée en l'immergeant de quelques centaines de mètres. Il n'est pas possible actuellement d'atteindre l'immersion critique (500 à 4 000 mètres), en raison des grosses difficultés soulevées par la fabrication et le remorquage d'un sonar de plusieurs tonnes à grande profondeur.

Par petits fonds, les réflexions sur le fond et la surface créent un régime d'ondes stationnaires et un phénomène de dispersion (la vitesse du son dépend de la fréquence) qui compliquent considérablement les calculs de champ sonore. Ce dernier est alors la somme de termes correspondant à des modes discrets de propagation; en particulier, selon les directions, certaines fréquences ne peuvent pas se propager (interférences destructrices) ou sont renforcées (interférences constructrices). Des calculs précis, tenant compte du coefficient de réflexion de fond et de variations de profondeur, ne sont possibles qu'avec l'aide de calculateurs.

Bruit

Les performances d'un sonar peuvent être très affectées par la présence de bruit; ce dernier peut être défini comme un signal aléatoire qui vient s'ajouter au signal utile et le rend ainsi moins facile, voire impossible à identifier. Il limite à la fois la portée et la cadence des informations de tout appareil de détection. Ce bruit a des origines très diverses :

— *Bruit ambiant marin* qui provient des bulles et embruns dus au vent, de la pluie, du trafic maritime, des phénomènes biologiques, du bruit thermique. Le niveau de ce bruit peut très fortement varier, et le système sonar doit pouvoir s'y adapter pour utiliser au mieux ses performances.

— *Bruit d'origine électrique* : tous les étages d'amplification et de traitement du signal introduisent du bruit sous forme de tensions ou de courants aléatoires ajoutés aux signaux reçus par les hydrophones. Moyennant quelques précautions (hydrophones sensibles, préamplificateurs à faible bruit), on peut faire en sorte que cette

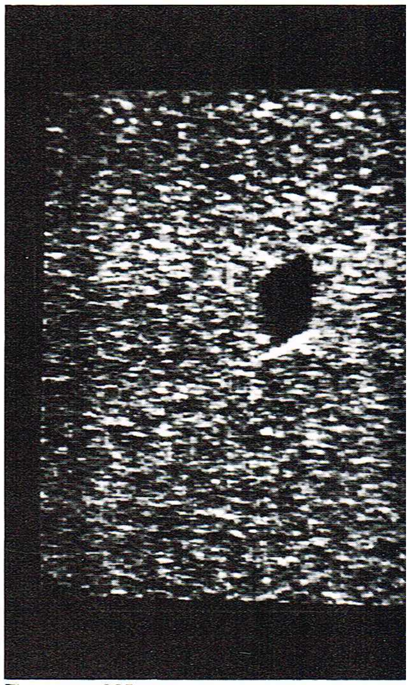

Thomson - CSF

▲ *Image obtenue sur l'écran loupe d'un sonar; la mémoire loupe permet de grossir une zone intéressante repérée sur l'écran de visualisation et de garder l'image durant environ 15 mn.*

▼ *Figure 26 : profil de la vitesse du son dans l'océan Atlantique. Figure 27 : variation de l'inclinaison des rayons sonores* (b) *avec la vitesse du son* (a).

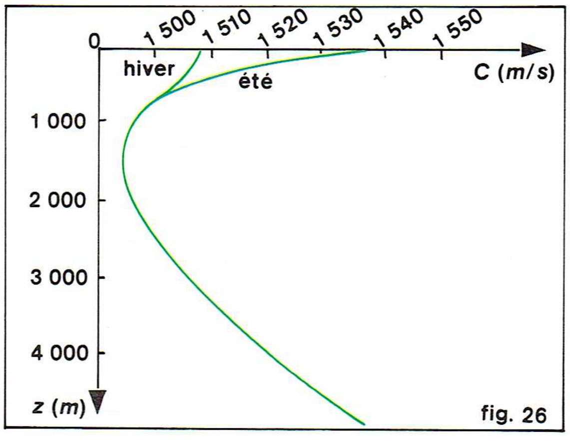

Richard Colin

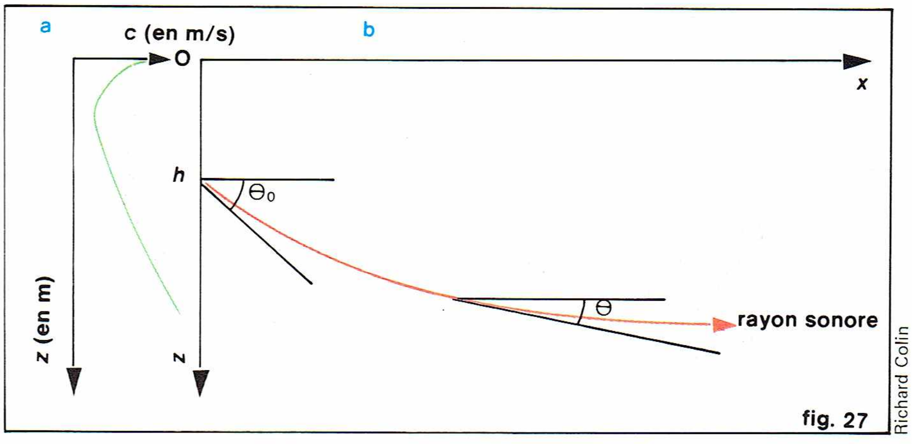

Richard Colin

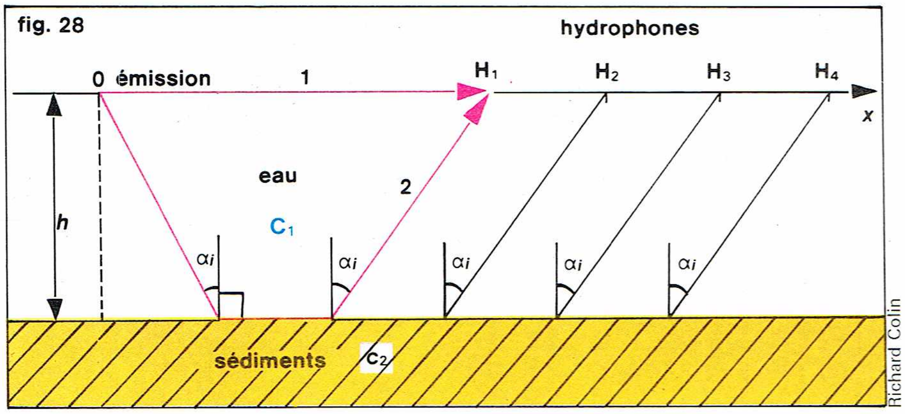

▲ *Figure 28 : principe de la sismique réfraction ; l'onde qui a pénétré dans les sédiments sous l'angle critique α_i en ressort en tout point sous cet angle. Les hydrophones reçoivent deux échos : le premier a suivi le chemin 1 à la vitesse c_1, l'autre, le chemin 2 à la vitesse c_2. Les différences de temps de réception permettent de connaître c_1, c_2 et h.*

perturbation soit négligeable devant le bruit ambiant marin.

— *Bruit du porteur :* les récepteurs doivent être placés au point le moins bruyant du navire (en général à l'avant) et découplés de ce dernier à l'aide de suspensions. D'autre part, toutes les machines bruyantes doivent être éloignées et amorties.

— *Bruit de réverbération.* Ce bruit est lié au signal émis : les bulles, les particules en suspension, les poissons diffusent l'onde émise et la renvoient partiellement sur le récepteur. C'est la réverbération de volume. Il en est de même sur le fond et la surface (réverbération de surface).

On peut limiter l'influence de certains de ces bruits (bruit ambiant, électronique, bruit du porteur) en émettant un signal très puissant. Malheureusement, on reste limité par la cavitation qui se produit aux fortes pressions sonores. D'autre part, le bruit de réverbération augmente en même temps que le niveau d'émission. Seul un traitement approprié du signal (traitement cohérent par exemple) peut alors permettre de séparer le signal de la réverbération.

Fréquence d'émission

Pour obtenir une directivité convenable, il est nécessaire que l'antenne soit grande devant la longueur d'onde émise, donc que la fréquence soit élevée. Malheureusement, l'absorption de l'eau et la réverbération croissent rapidement avec la fréquence et limitent alors la portée de l'ensemble. Le choix de la fréquence d'émission dépend donc de la portée nécessaire et varie entre quelques kilohertz et quelques dizaines de kilohertz.

▼ *Figure 29 : courbe dromosomique ; c'est le relevé des retards t_1 et t_2 mis par les échos pour arriver sur les hydrophones lors de la sismique réfraction. Les vitesses de propagation c_1 et c_2 sont les inverses des pentes respectives de ces deux droites.*

Autres applications

Un nombre important de dispositifs sous-marins fonctionnent de la même façon que le sonar :

Célérimètre. Il détermine la vitesse du son en fonction du temps de parcours entre deux transducteurs.

Sondeurs ultrasonores. Analogues aux dispositifs de Langevin, ils peuvent mesurer les plus grandes profondeurs océaniques avec une précision de quelques mètres grâce à des pinceaux d'émission très étroits et une détermination précise de la vitesse du son et du temps de parcours.

Prospection géologique et pétrolière. Le sous-sol marin est formé de couches dont on désire connaître l'épaisseur et la vitesse de propagation du son afin de les identifier. Pour cela, un bateau émet des ondes de choc : source explosive, sparker, boomer, canons à vapeur, etc. Si c_1 et c_2 sont les vitesses du son dans l'eau et dans la première couche sédimentaire (c_2 est supérieure à c_1), l'onde de choc émise, qui a pour incidence l'angle limite α_i tel que :

$$\sin \alpha_i = \frac{c_1}{c_2}$$

subit une réflexion totale (sismique réfraction). En fait, l'onde réfractée se propage dans la couche de sédiment et en ressort en chaque point sous l'angle critique α_i. Des hydrophones sont disposés selon la *figure* 28 ; ils reçoivent deux échos : l'onde directe (trajet 1) et l'onde réfléchie (trajet 2). Les temps de propagation sont respectivement :

$$t_1 = \frac{x}{c_1}$$

$$t_2 = \frac{x - 2\,h \sin \alpha_i}{c_2} + \frac{2\,h \cos \alpha_i}{c_1}$$

Le tracé de la courbe dromosomique (t_1 et t_2 en fonction de x) permet de connaître c_1 et c_2 en mesurant la pente des deux droites (*fig.* 29).

On peut généraliser ce procédé à l'étude de plusieurs couches, à un fond incliné, etc.

Navigation Doppler.

Balises acoustiques de navigation (répondeurs pour sous-marins leur permettant de connaître leur position).

Sonar portable pour plongeur.

Systèmes de télécommunication acoustique.

Conclusion

Un système sonar est un ensemble volumineux d'appareillages de nature très différente : acoustique, électronique de pointe, théorie de l'information, transducteur de puissance, mécanique, etc. Ses performances doivent s'adapter aux variations des paramètres du milieu. Les améliorations qui peuvent lui être apportées sont l'objet de nombreuses recherches, principalement financées par les militaires : étude de la propagation en milieu marin, traitement de plus en plus sophistiqué du signal, mécanique complexe pour l'immersion plus grande des sonars remorqués. Ses applications civiles sont surtout la navigation et la recherche pétrolière en mer.

Des recherches sont également menées sur des sonars biologiques : certains animaux (chauves-souris, dauphins) possèdent un système d'émission et de réception acoustiques tout à fait analogue au sonar, qui leur permet de se diriger ou d'atteindre leurs proies dans de très mauvaises conditions de visibilité (la nuit par exemple) : la nature a mis au point au cours des siècles des dispositifs de faible encombrement et à hautes performances, bien adaptés à la localisation et à la poursuite, et dont l'homme a tout intérêt à s'inspirer !

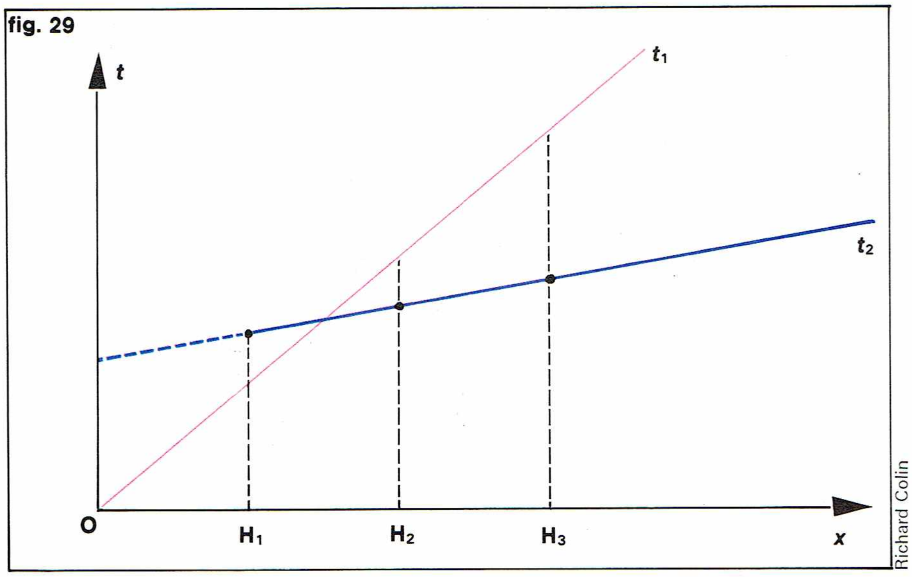

BIBLIOGRAPHIE

ALBERS V. M., *Underwater Acoustics*, New York, Plenum Press. - GUIEYSSE L., SABATHE P., *Acoustique sous-marine*, Paris, Dunod. - HORTON J. W., *Fundamentals of Sonar*, Annapolis, US Naval Inst. - LUCAS R., *Acoustique*, Paris, éd. Claude Bernard. - MASON W. P., *Physical Acoustics*, New York, Van Nostrand. - PASTEAU H., *Théorie et Applications de l'acoustique sous-marine*, Paris, ENSTA. - SABINE W. C., *Collected Papers on Acoustics*, Harvard University Press. - STEPHENS R. W. B. S., BATES A. E., *Acoustics and Vibrational Physics*, London, Edward Arnold Publishers Ltd.

La détection par les rayons X

Les rayons X furent découverts en 1895 par Rœntgen qui reçut le prix Nobel en 1901 pour avoir mis en évidence ce rayonnement inconnu — d'où l'appellation de « X » — qui avait la propriété de traverser les corps opaques. La nature des rayons X est identique à celle des ondes lumineuses dont ils ne diffèrent que par la longueur d'onde. La preuve expérimentale de leur nature d'onde électromagnétique n'a été obtenue qu'en 1912, à la suite des travaux de von Laue sur leur diffraction par les atomes d'un cristal.

Les travaux théoriques de Moseley, le spectrographe à cristal tournant de M. de Broglie complétèrent la caractérisation de ces rayonnements et jetèrent les bases de l'analyse quantitative par les rayons X qui prit son essor en 1923 avec les expériences de D. Coster et de G. de Hevesy.

La production des rayons X

Les générateurs de rayons X

La production des rayons X est obtenue dans tous les générateurs par le même phénomène : des électrons accélérés sont projetés sur une cible et, au cours des interactions qu'ils subissent avec la matière de cette cible, une partie de leur énergie cinétique est transformée en photons.

L'énergie maximale des rayons X est égale à l'énergie cinétique des électrons qui les ont produits. Comme les différentes applications, et en particulier la radiothérapie, nécessitent l'utilisation de rayons X dont l'énergie s'étend sur un très large domaine, de quelques keV à quelques dizaines de MeV, on est conduit à réaliser des faisceaux d'électrons auxquels sont communiquées des énergies de cet ordre.

Les générateurs de rayons X sont donc constitués de trois organes principaux : un générateur d'électrons; un dispositif d'accélération des électrons; une cible.

Le générateur d'électrons

L'émission d'électrons est obtenue par effet thermoélectrique. L'émetteur d'électrons chauffé électriquement est relié au pôle négatif d'une source extérieure de différence de potentiel. Dans l'enceinte se trouve une plaque conductrice reliée au pôle positif. Dans la diode ainsi constituée, les électrons arrachés à l'émetteur (cathode) sont accélérés sous l'action de la différence de potentiel V vers la plaque (anode ou anticathode) et créent dans le circuit un courant électrique dont l'intensité dépend :

— de la différence de potentiel appliquée V;

— de la température du corps émetteur; l'intensité du courant de saturation est donnée par la formule de Richardson :

$$i_s = a\mathrm{T}^2 e^{-\frac{b}{\mathrm{T}}}$$

avec T : température absolue,
a et *b* : constantes,
e : base des logarithmes naturels;

— du corps émetteur qui peut être une pièce de métal pur, d'un alliage (par exemple tungstène thorié) ou d'un métal recouvert d'oxydes à grand pouvoir émissif (Ba, Sr, Cs, etc.).

Accélération des électrons

L'accélération des électrons ne doit pas être gênée par des interactions avec des corpuscules matériels se trouvant sur leur trajectoire, c'est pourquoi elle est effectuée dans une enceinte où règne un vide très poussé (10^{-7} torr), qui constitue le tube à rayons X.

Les électrons sont accélérés par :

— accélérateur électrique : le principe toujours utilisé est celui du tube de Coolidge (*fig.* 30) dans lequel le filament qui constitue la source d'électrons est placé en face d'une plaque métallique (anticathode), une différence de potentiel élevée étant établie entre filament et anticathode.

— accélérateur magnétique d'électrons : c'est le principe des bêtatrons. Des électrons sont injectés à intervalles réguliers dans un champ magnétique de 5 000 gauss environ, produit par un électro-aimant alimenté par un courant dont la fréquence est de l'ordre

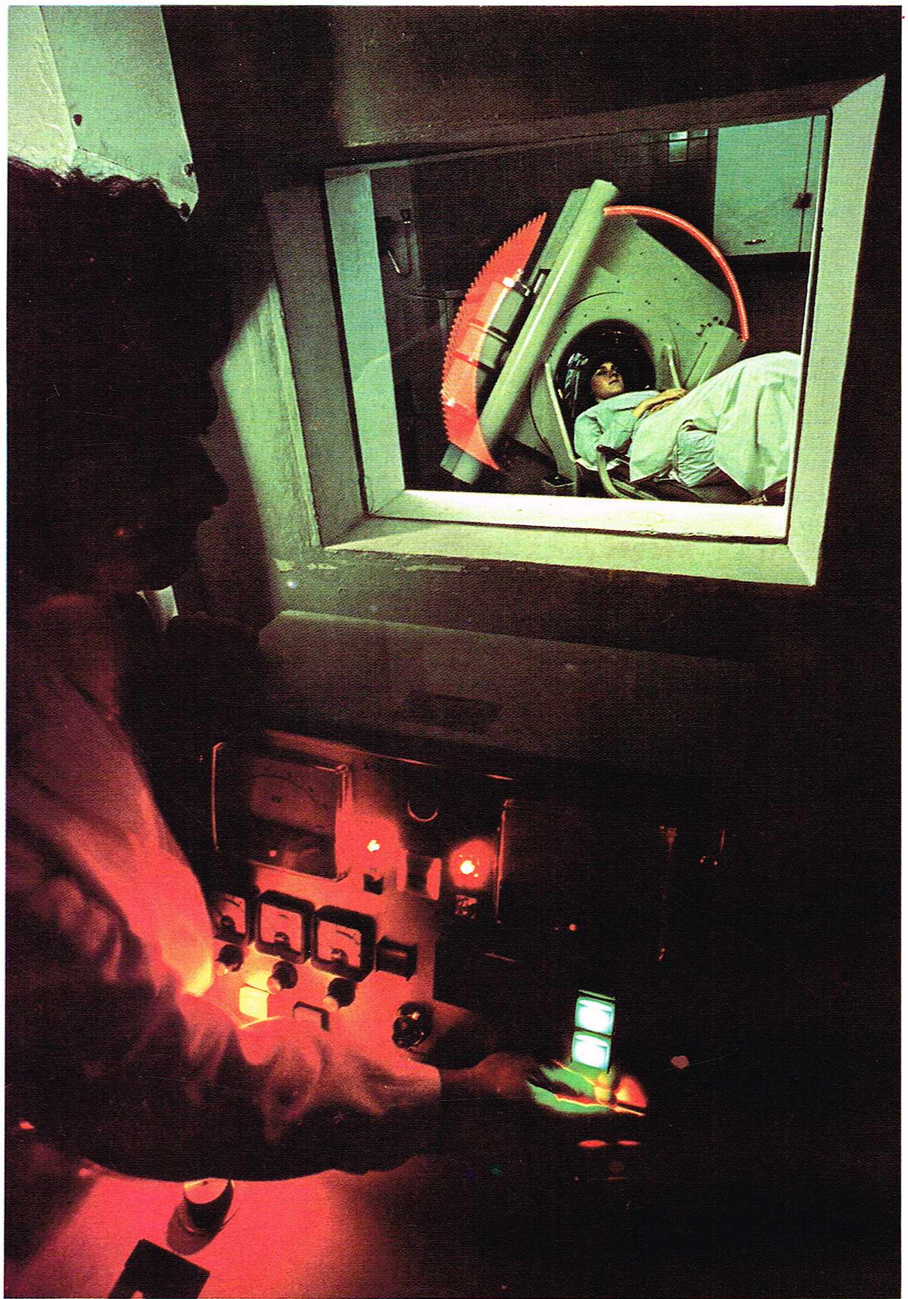

Ted Spiegel - Rapho

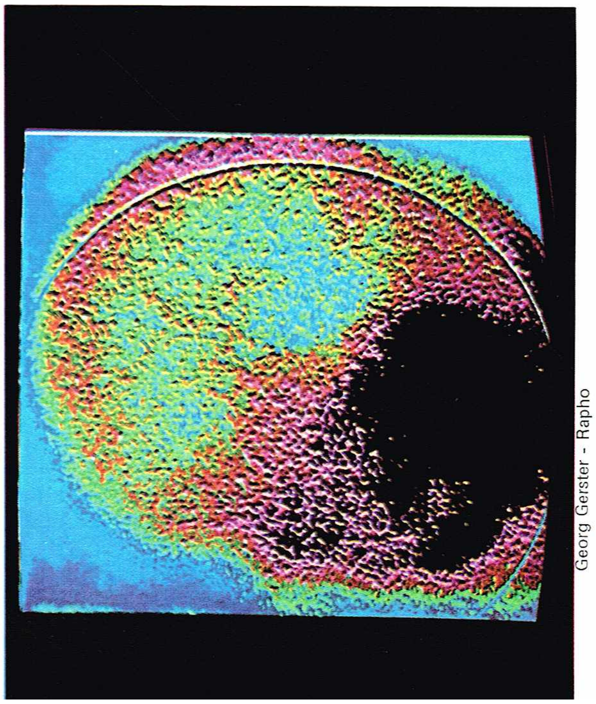

Georg Gerster - Rapho

▲◀ En haut, réalisation d'une radiographie totale du cerveau par balayage latéral et rotationnel d'un faisceau de rayons X. Cette technique, appelée tomographie, permet une localisation précise des lésions dans l'espace. Ci-contre, la densité d'absorption des rayons X par le cerveau a été traduite en couleurs grâce à une analyse réalisée par un ordinateur.

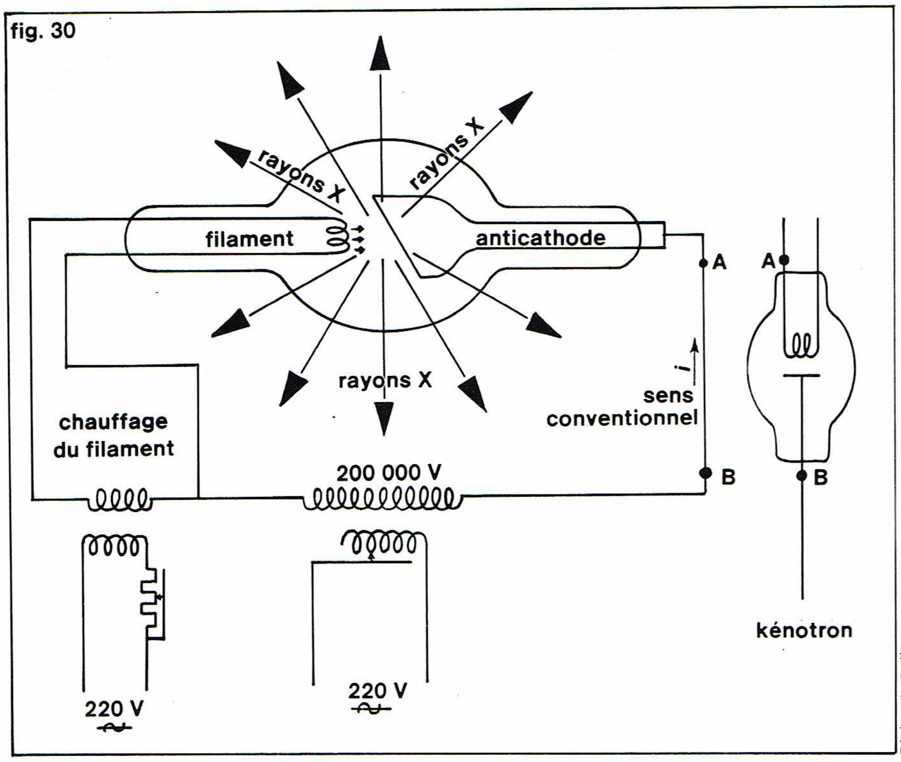

▲ *Figure 30 : tube à rayons X (ou tube de Coolidge) et ses circuits d'alimentation.*

de 200 cycles/seconde. Dans l'entrefer est placée une chambre annulaire où existe un vide très poussé et dans laquelle tournent les électrons. L'émission des rayons X se produit sous forme de jets discontinus (rayons X pulsés) dont le débit est extrêmement élevé.

La cible

Les électrons accélérés sont projetés sur une plaque de métal : la cible. Le métal choisi présente généralement un numéro atomique et une température de fusion élevés; en effet, bien que la surface d'impact des électrons (foyer) soit relativement grande (environ 1 cm^2), la quantité de chaleur dégagée est importante, de l'ordre de quelques kW, et pose de sérieux problèmes de refroidissement.

L'émission X produite par les générateurs

Les interactions des électrons accélérés avec les atomes de la cible sont de deux sortes :

* *Collision*

L'électron incident arrache un électron d'une couche de l'atome qui devient ionisé et subit un réarrangement électronique : l'emplacement vide tend à être reporté sur la couche la plus externe. Au cours de ce réarrangement, un ou plusieurs électrons effectuent un saut, l'excédent d'énergie après chaque saut étant rayonné sous forme de *photons de fluorescence* dont l'énergie dépend seulement de la nature des atomes de la cible. Ces photons de fluorescence sont distribués selon un spectre de raies qui est le spectre caractéristique des atomes considérés.

Pour une cible de tungstène, par exemple, on obtient :

- pour une ionisation de la couche K, des raies X de 59,5, 67 et 69 keV selon que le saut va des couches L, M ou N vers la couche K;
- pour une ionisation de la couche L, des raies X de 8 à 12 keV;
- pour une ionisation de la couche M, des raies X de 1,4 à 2,5 keV.

L'émission de rayons X d'énergie supérieure à 1 keV ne se produit :

- sur la couche N que si $Z > 85$;
- sur la couche M que si $Z > 50$;
- sur la couche L que si $Z > 30$;
- sur la couche K que si $Z > 10$.

Les éléments légers ($Z < 10$) ne peuvent donc pas émettre des rayons X de fluorescence de plus de 1 keV d'énergie; dans les atomes lourds, seules les couches K, L, M peuvent les produire.

* *Freinage ou Bremsstrahlung*

Un électron incident d'énergie E_0 passant au voisinage d'un noyau subit un brusque ralentissement; l'énergie cinétique qu'il perd est rayonnée sous forme de photons dont l'énergie peut avoir n'importe quelle valeur entre 0 et E_0, et les photons de freinage sont distribués selon un spectre continu.

L'énergie retenue par la cible correspond à l'absorption des composantes de faible énergie qui représentent une fraction du spectre d'autant plus petite que l'énergie E_0 des électrons incidents est plus élevée.

Le phénomène de freinage et la production des rayons X qu'il provoque deviennent de plus en plus importants à mesure que l'énergie des électrons augmente et que le Z de la cible est plus élevé. La dissipation de chaleur dans la cible est d'autant plus faible que les collisions participent moins à la production de rayons X.

Les autres procédés de génération de la fluorescence X

La production des rayons X par les tubes générateurs X permet d'obtenir, comme nous venons de le voir, des spectres X continus en énergie. Il est toutefois intéressant de produire des spectres de raies X caractéristiques des éléments. Ces raies de fluorescence X peuvent être obtenues de différentes manières : fluorescence X-X provenant de l'excitation d'une cible par un rayonnement X d'énergie plus élevée que celles des raies caractéristiques de cette cible; fluorescences β-X, α-X, *p*-X, etc., qui sont autant de variantes de la méthode précédente avec simplement la substitution d'une source radio-active β ou α au générateur X utilisé dans la fluorescence X-X; rayonnement laser.

Désintégration radio-active de certains radionucléides

Les radionucléides ont différents modes de désintégration possibles; l'un d'entre eux, la désintégration par capture électronique, conduit à l'émission de rayons X. Le principe de cette désintégration est le suivant : lorsqu'un noyau ne dispose pas de l'énergie suffisante pour créer un électron positif, il utilise un autre mode de transition isobarique concurrent de la désintégration β^+. Dans ce cas, un électron du cortège électronique est absorbé par le noyau et, comme dans la désintégration β^+, c'est un proton qui se transforme en neutron à l'intérieur du noyau, suivant la réaction ci-après :

$$^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e^- \rightarrow {}^{1}_{0}n$$

Le processus de capture électronique entraîne un changement de Z qui devient $Z-1$, mais le nombre de masse A ne change pas. Il n'y a pas de rayonnement nucléaire émis, puisqu'il n'y a pas d'électron créé, mais la capture d'un électron de l'orbite électronique de l'atome provoque un réarrangement des couches électroniques avec production de rayons X et d'électrons Auger.

Exemple : ${}^{58}_{27}Co + {}^{0}_{-1}e^- \rightarrow {}^{58}_{26}Fe$ + rayons X

${}^{55}_{26}Fe + {}^{0}_{-1}e^- \rightarrow {}^{55}_{25}Mn$ + rayons X

Propriétés des rayons X

Caractérisation d'un faisceau de rayons X

Pour définir l'émission X, il faut caractériser à la fois la quantité, la qualité et la direction du faisceau.

Quantité de rayonnement

Elle peut être définie en énergie (ergs); dans un tube générateur de rayons X, elle est proportionnelle au nombre d'électrons qui frappent l'anticathode, c'est-à-dire au courant *i* qui traverse le tube. La quantité de rayonnement dépend aussi de l'énergie E_0 des électrons et du numéro atomique Z de la cible, puisque l'énergie transférée aux rayons X par les phénomènes de collision et de freinage dépend de ces deux facteurs.

On admet en première approximation que l'énergie convertie en rayons X de freinage, pour un électron d'énergie E_0 exprimée en MeV, est approximativement égale à ZE_0^2, ce qui revient à dire : que l'intensité du flux augmente d'un facteur 9 quand la différence de potentiel

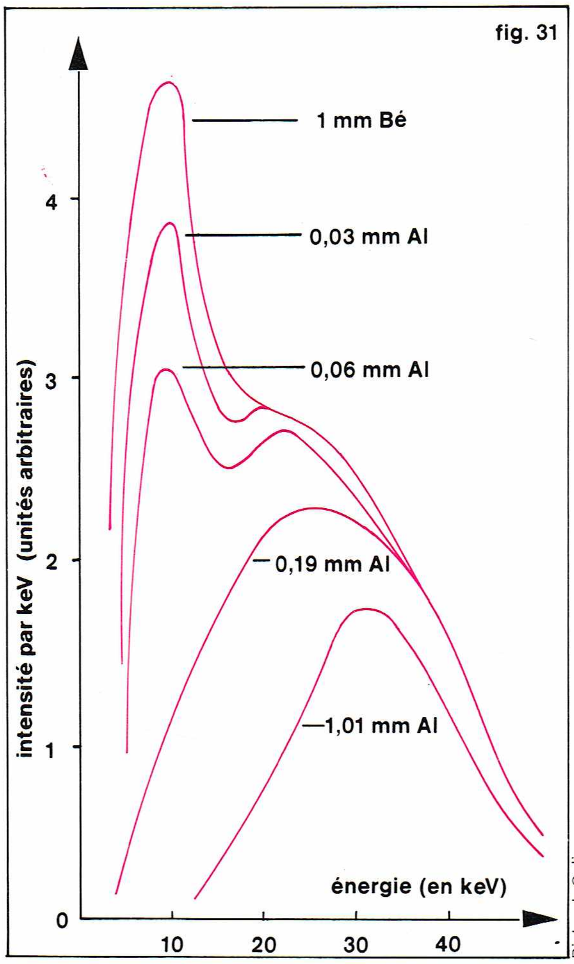

◀ ***Figure 31 : spectres de rayons X de 50 kV pour différentes filtrations : la courbe du haut correspond à la filtration par une mince fenêtre de béryllium, les autres à la filtration par des fenêtres d'aluminium de différentes épaisseurs.***

passe de 100 kV à 300 kV ; que l'intensité du flux croît proportionnellement au numéro atomique de la cible ; que le matériau utilisé comme cible doit avoir un point de fusion élevé. C'est pourquoi on utilise habituellement le tungstène (Z = 74 ; température de fusion : 3 370 °C).

Qualité du rayonnement

Elle est définie par la distribution spectrale des rayons X produits par le générateur qui est elle-même la superposition du spectre de raies des photons de fluorescence et du spectre continu des photons de freinage. L'énergie maximale des photons de freinage est égale à l'énergie E_0 des électrons incidents ; cette valeur constitue la limite supérieure du spectre. Le spectre de raies pour les anticathodes classiques en tungstène se limite pratiquement à la raie K_α de cet élément dont l'énergie est 59,5 keV. Les raies de la couche L ont une énergie beaucoup plus faible, de l'ordre de 10 keV ; elles sont absorbées par une faible épaisseur de matière et n'émergent pratiquement pas du tube émetteur. En définitive, l'importance relative des deux spectres dépend surtout de l'énergie des électrons primaires ; en particulier, au-delà de quelques centaines de kV, le spectre de raies n'apparaît plus dans la distribution spectrale qui se limite au spectre de freinage.

La *figure* 31, qui représente un spectre de rayons X de 50 kV après différentes filtrations, met bien en évidence le phénomène de superposition du spectre de raies et du spectre continu. Elle montre que la distribution spectrale du faisceau émergent, sortant par une mince fenêtre de béryllium, fait apparaître le pic des raies caractéristiques L. Une filtration par une mince lame d'aluminium suffit à faire disparaître cette raie. Dans ce cas, l'énergie des électrons est insuffisante pour produire les raies caractéristiques K.

La *figure* 32, qui montre le spectre des rayons X produits par un bêtatron de 22,5 MV, ne fait plus apparaître que le spectre continu dû au rayonnement de freinage.

Direction des rayons X

Le rayonnement X n'est pas isotrope, c'est-à-dire qu'il n'est pas émis de façon uniforme dans toutes les directions de l'espace.

Pour une cible très mince et pour des électrons de faible énergie, l'émission des rayons X s'effectue dans toutes les directions de l'espace, avec un maximum dans une direction perpendiculaire au faisceau d'électrons. Quand l'énergie des électrons augmente, la direction où l'émission est la plus intense se rapproche progressivement de celle du faisceau d'électrons ; aux environs de 20 MeV par exemple, la moitié du rayonnement est contenue dans un cône dont l'angle au sommet est de 5 degrés environ.

Pour une cible épaisse, la diffusion des électrons modifie leur direction et il est difficile de calculer leur distribution spatiale ; il faut dans ce cas faire appel aux techniques expérimentales pour obtenir le spectre réel.

Interaction des rayons X avec la matière

Les modes d'interaction des rayons avec la matière sont représentés sur la *figure* 33 ; ce sont essentiellement :
— l'absorption du rayonnement dans la matière ;
— la diffraction du rayonnement ;
— la production de raies X de fluorescence.

Absorption des rayons X

C'est le mode d'interaction le plus connu ; il a été très rapidement mis en évidence par Rœntgen. La loi d'absorption est :

$$I = I_0 e^{-\mu \cdot \rho \cdot d}$$

avec I_0 : intensité initiale du faisceau ;
I : intensité du faisceau émergent ;
μ : coefficient d'absorption dépendant de l'énergie des rayons X et de la nature de la cible ;
ρ : masse spécifique de la cible ;
d : épaisseur massique de la cible.

▼ ***Figure 32 : spectres de rayons X de 22,5 MV produits par un bêtatron. Figure 33 : les modes d'interaction des rayons X avec la matière.***

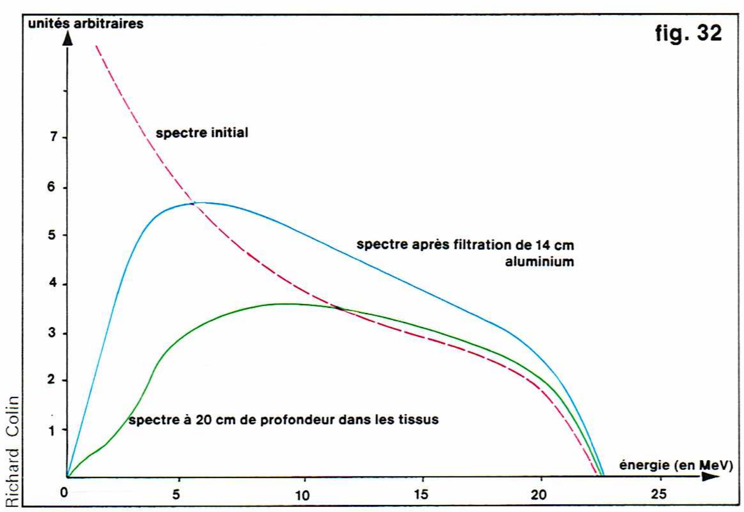

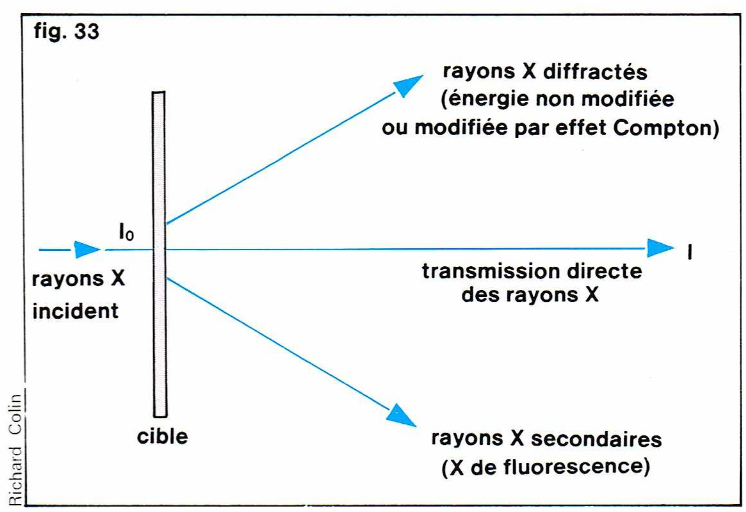

▶ *Tableau V : absorption dans le cuivre et l'aluminium de rayons X de différentes énergies.*

Tableau V

Absorption dans le cuivre et l'aluminium de rayons X de différentes énergies

Énergie (en keV)		10	15	20	30	40	50	100	200	500	1 000
Intensité transmise	par 1 mm de cuivre	10^{-83}	10^{-30}	10^{-13}	10^{-5}	1,5 %	11 %	68 %	87,5 %	93 %	95 %
	par 1 mm d'aluminium	10^{-3}	12 %	40 %	75 %	87 %	91 %	95,5 %	97 %	98 %	99 %

▶ *Page ci-contre, deux exemples de l'utilisation des rayons X dans le domaine médical : en haut, la radiographie d'une main ; au milieu, la radiographie d'un estomac.*

Le *tableau* V montre les parcours dans le cuivre et l'aluminium de faisceaux X monochromatiques pour différentes énergies.

Diffraction du rayonnement

C'est le phénomène de déviation de la trajectoire des photons qui s'effectue sans altération de l'énergie (sauf dans le cas d'un effet Compton). La diffraction est sensible à l'association d'éléments en composés, aux traitements thermiques et parfois aux déformations mécaniques, ce qui présente un très grand intérêt dans les applications analytiques.

La diffraction par les rayons X ne peut cependant être utilisée que pour des rayonnements dont la longueur d'onde est de l'ordre de la distance réticulaire, c'est-à-dire 10^{-7} mètre ; cette méthode est limitée à l'étude des rayons X de quelques dizaines de keV.

Production de raies X de fluorescence

Les rayons X bombardant une cible produisent une émission X secondaire dont l'énergie est caractéristique de l'élément constituant la cible. C'est sur l'étude de ces raies X secondaires que reposent les méthodes d'analyse par fluorescence X qui peuvent pratiquement s'appliquer à tous les éléments de la table de Mendeleïev. Les raies X ainsi obtenues sont monochromatiques et ont une énergie variant en fonction de l'élément pris comme cible allant de 0,185 keV pour le bore à 69 keV pour le tungstène.

▼ *Figure 34 : résultats d'une analyse dispersive des structures intracellulaires par les rayons X ; chaque courbe correspond au spectre X d'une structure cellulaire.*

fig. 34

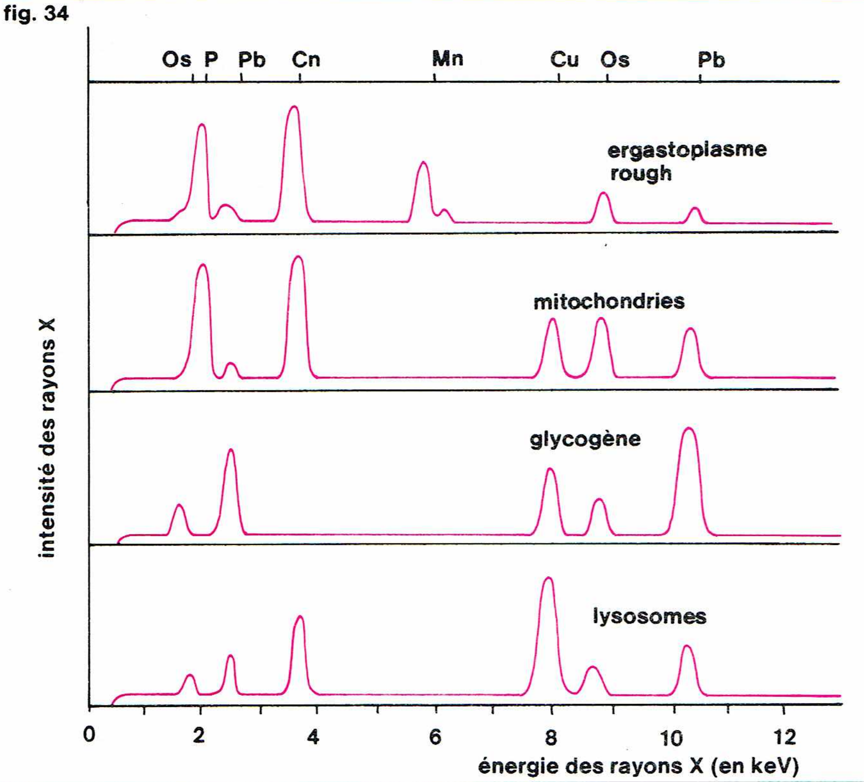

Richard Colin

Applications des rayons X

Les rayons X présentent un champ d'applications extrêmement important axé sur la détection, l'analyse et le contrôle non destructif ; il en résulte que les domaines scientifiques et techniques qui ne sont pas concernés sont très peu nombreux. La détection par les rayons X a, par conséquent, subi un essor considérable ces vingt-cinq dernières années, tant dans le domaine de la recherche fondamentale que dans celui de la recherche appliquée.

Comme il n'est pas possible de procéder à une énumération exhaustive, nous nous bornerons, dans ce qui suit, à donner quelques exemples des principales applications des rayons X.

Les rayons X et la recherche fondamentale

La diffraction X est largement utilisée pour étudier les structures cristallines : par sa nature cristalline, l'échantillon à étudier joue vis-à-vis de la radiation primaire le rôle d'un réseau triplement périodique. L'analyse consiste à détecter les signes particuliers du réseau cristallin à partir des figures de diffraction obtenues. Dans le cas de métaux ou d'alliages, les figures de diffraction sont ramenées à un petit nombre de modèles correspondant à des structures cristallines compactes ou à interstices réduits.

Les microsondes actuellement utilisées sont de puissants moyens d'investigation qui permettent les analyses qualitatives et quantitatives de la microstructure des échantillons. La sensibilité de cette technique est très grande, elle permet la détection de masses de l'ordre de 10^{-12} gramme.

La précision de ces mesures dépend de nombreux paramètres : perfection cristalline du spécimen étudié, donc du traitement thermique et mécanique auquel il a été soumis ; de son histoire métallurgique ou chimique, pour un objet fabriqué ; histoire de notre planète, pour un minéral ; histoire du cosmos, pour une météorite.

La *figure* 34 montre la carte élémentaire des composants d'une coupe biologique telle qu'elle apparaît lors d'une analyse dispersive par les rayons X.

La recherche fondamentale en matière d'énergies nouvelles utilise aussi la détection X. Les études sur la fusion contrôlée conduisent à analyser des plasmas dont les températures sont supérieures à 10^{-6} °K. Ces plasmas émettent des rayons X dont la détection contribue fortement au diagnostic de la qualité de l'expérience.

Dans le domaine de la recherche spatiale, l'étude de l'émission X de l'espace au moyen de détecteurs X embarqués à bord de satellites artificiels permet de tracer une nouvelle carte du ciel, prenant ainsi le relais de la radio-astronomie.

Les rayons X et la médecine

L'aide au diagnostic

L'utilisation des générateurs X pour la radiographie du corps humain est de loin la plus connue et la plus répandue des applications des rayons X. Ses variantes sont très nombreuses (radioscopie, radiographie, tomographie, etc.) ; elles constituent des outils fondamentaux pour la prévention et l'aide au diagnostic.

L'énergie des rayonnements X utilisés varie de 20 à 160 keV et, en général, la faible diffusion des rayons X permet d'obtenir une bonne qualité de l'image du corps traversé, comme le montre la photo qui représente une

radiographie d'une main. La radiographie des organes (intestins par exemple) qui absorbent peu les rayons X pose toutefois certains problèmes; leur mise en évidence est alors obtenue par une rétention de préparations opaques à base de sels de baryum, par exemple, comme le montre la photo qui représente la radiographie de l'estomac.

Récemment, une nouvelle technique est venue renforcer la panoplie des techniques d'aide au diagnostic. Il s'agit de la scintigraphie, dont le principe est le suivant : une molécule organique présentant une affinité particulière pour un organe est marquée par un radionucléide ^{99m}Tc, ^{57}Co, ^{113m}In, qui se désintègre, soit par capture électronique, soit par transition isomérique et qui émet lors de sa désintégration radio-active des rayons X. Ces photons sont ensuite détectés au moyen d'une caméra à scintillation. L'image obtenue permet de déceler soit des lacunes, soit des fixations anormales et, par là même, de détecter des tumeurs malignes et des récidives de métastases. Les photos ci-dessous montrent une scintigraphie du cerveau dans le cas d'un homme normal et dans celui d'un homme présentant une tumeur cervicale.

La radiothérapie

Les faisceaux de rayons X sont également utilisés pour la thérapie; deux types de thérapie sont particulièrement importants : le traitement des rhumatismes et des affections articulaires par les rayons X de quelques dizaines de keV produits par des générateurs X; le traitement du cancer, pour lequel on utilise quelquefois les générateurs X, mais beaucoup plus souvent les bêtatrons qui produisent des faisceaux d'électrons et de rayons X d'une énergie de plusieurs dizaines de MeV.

La toxicologie

L'analyse par fluorescence X permet, en examinant des milieux biologiques, de détecter des éléments toxiques, en particulier pour les empoisonnements d'origine industrielle. C'est le cas par exemple pour le saturnisme, maladie issue d'un empoisonnement par le plomb. La détection du plomb, du cadmium, du mercure est effectuée avec une sensibilité de l'ordre de 10^{-7} gramme.

Les rayons X et la métallurgie

De toutes les industries, c'est très certainement dans la métallurgie que l'on utilise le plus les propriétés des rayons X. Les techniques les plus utilisées sont : la cristallographie qui permet de caractériser la structure cristalline des échantillons à étudier; la radiographie et la gammagraphie qui permettent le contrôle non destructif des objets finis, la détermination de leur qualité et l'évaluation de leur fiabilité.

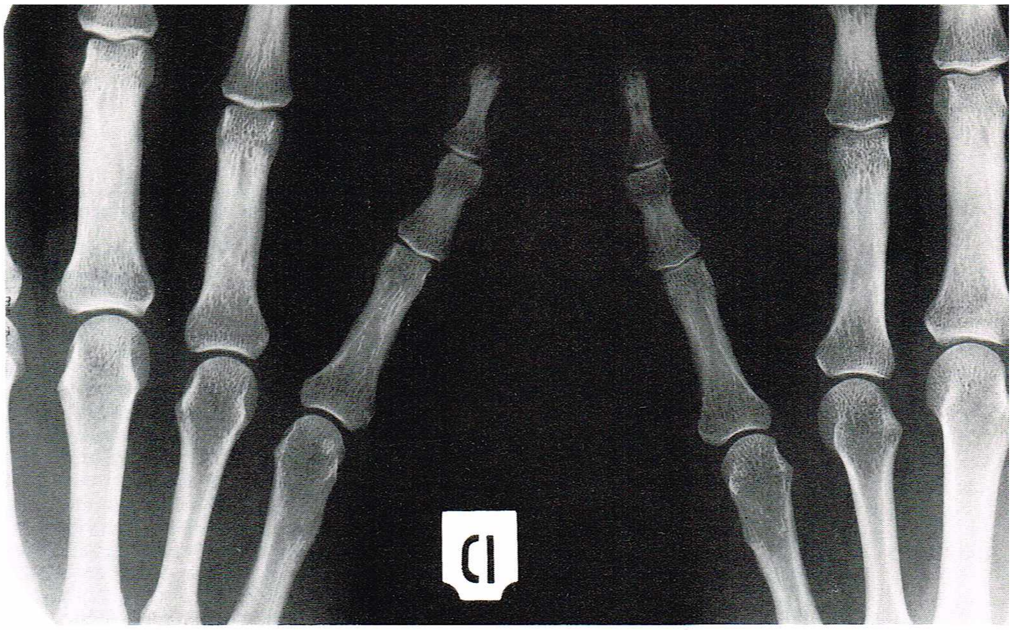

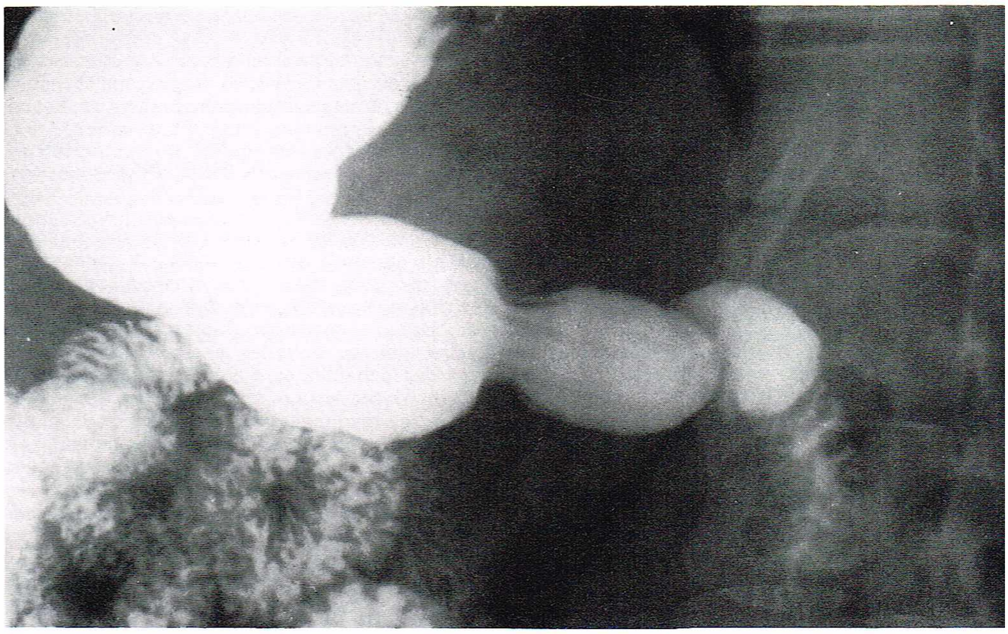

▼ *La scintigraphie fait appel à l'injection dans le corps à étudier d'un radionucléide capable en se désintégrant d'émettre des rayons X, lesquels sont détectés par une caméra à scintillation. Ici, deux scintigraphies du cerveau : à gauche, celle d'un cerveau normal; à droite, celle d'un cerveau présentant une tumeur (indiquée par la flèche).*

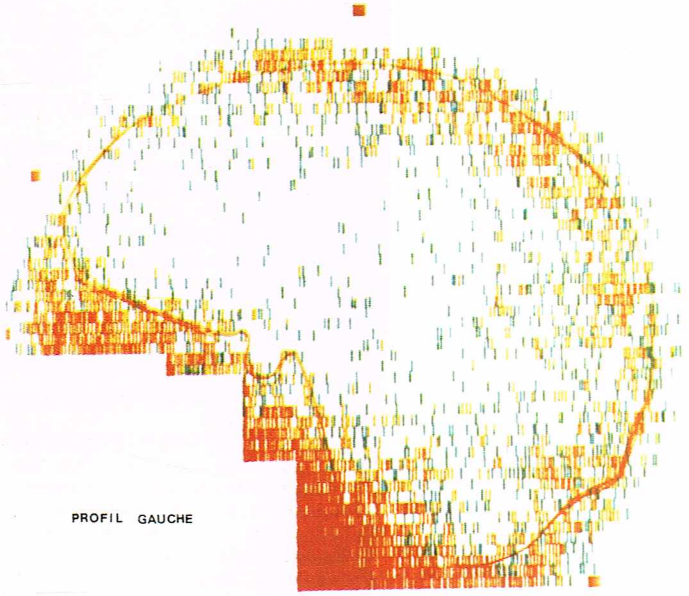

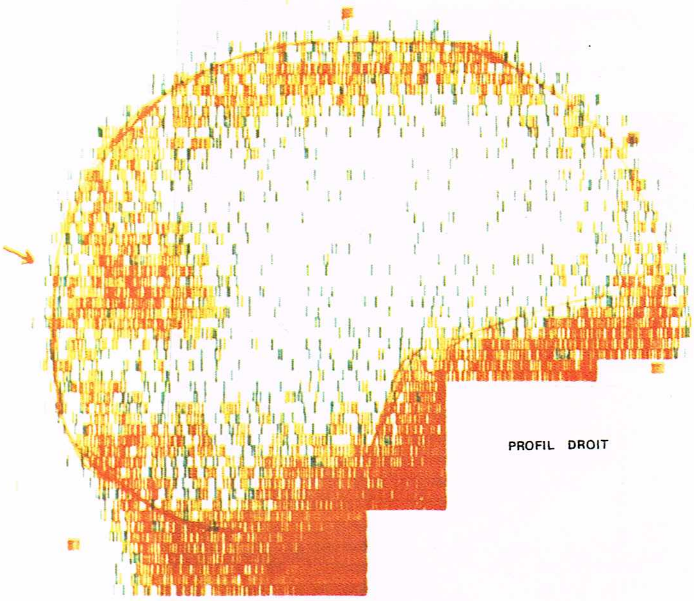

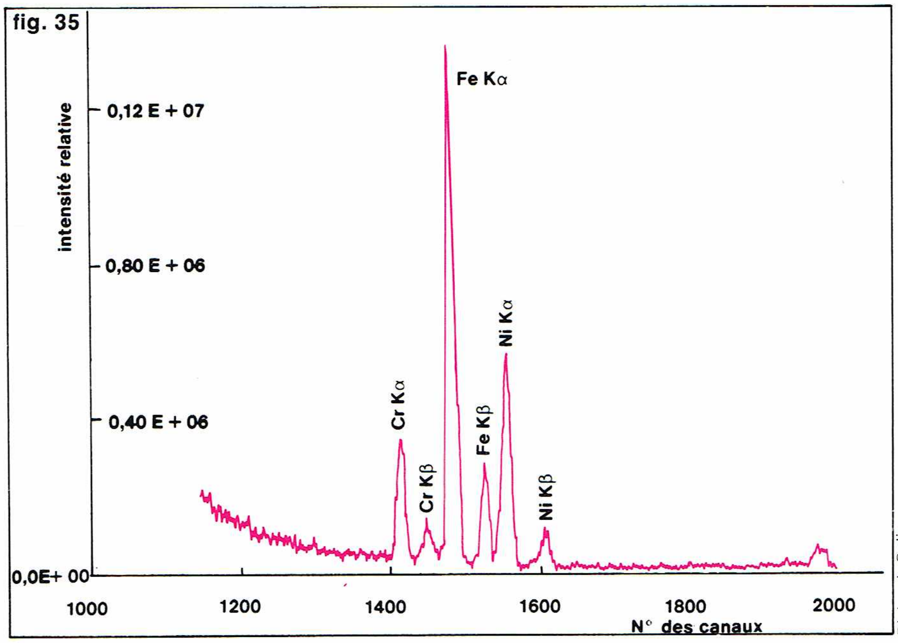

▲ *Figure 35 : spectre X d'un échantillon d'acier bombardé par les rayonnements d'une source de plutonium 238 ; ce spectre a été obtenu au moyen d'un spectromètre à semi-conducteur ; cette méthode est non destructive.*

La sidérurgie

Les laboratoires des grandes entreprises sidérurgiques sont équipés d'appareils de fluorescence X entièrement automatisés qui permettent une analyse précise et rapide des différents constituants d'un acier.

Les méthodes d'analyse par fluorescence α -X sont en particulier utilisées pour les analyses précises non destructives des échantillons d'acier, comme le montre la *figure* 35 qui représente le spectre X d'un échantillon bombardé par les rayonnements d'une source de plutonium 238 et dont l'analyse est effectuée au moyen d'un spectromètre à semi-conducteur équipé d'un détecteur Si-Li.

Le *tableau* VI indique les précisions que l'on peut obtenir par cette méthode ; elle met en évidence la qualité des résultats obtenus, puisqu'il est possible d'obtenir des précisions de l'ordre de 10^{-4} pour des éléments comme le titane, dont la teneur dans les échantillons analysés est extrêmement faible.

Le contrôle de qualité des tôles galvanisées est également effectué en continu par une méthode de fluorescence X. La raie X de fluorescence du zinc est excitée par une source radio-active et les précisions obtenues sur l'épaisseur du dépôt sont de l'ordre de 5 % pour une gamme d'épaisseurs variant de 50 à 350 g/m^2.

Le traitement des minerais

Les appareillages d'analyse par rayons X sont dans ce cas utilisés en ligne, c'est-à-dire qu'ils sont intégrés dans le processus de traitement. Par exemple, ils effectuent en continu l'analyse des boues de flottation et les résultats obtenus permettent le pilotage du processus de traitement des minerais. Ce procédé est utilisé en particulier pour le traitement des minerais de cuivre, de zinc et de plomb ; les précisions obtenues sur les teneurs en ces éléments sont de l'ordre de 5 %.

▼ *Tableau VI : précision de l'analyse par fluorescence X pour les différents éléments contenus dans des échantillons d'acier. Tableau VII : précision obtenue en prospection géologique et minière par fluorescence X pour différents éléments.*

Tableau VI
Précision de l'analyse par fluorescence X pour les différents éléments contenus dans des échantillons d'acier

Éléments	Fe	Si	Ca	Al	Ti	Mg	P	Mn
Précision	0,3 %	0,11 %	0,07 %	0,06 %	0,009 %	0,13 %	0,003 %	0,004 %

Tableau VII
Précision obtenue en prospection géologique et minière par fluorescence X pour différents éléments

Éléments	Au	Ag	V	Mn	U	Ni	Fe	Sn	Cu	Zn	Pb
Précision	0,03 %	0,02 %	0,06 %	0,01 %	0,01 %	0,1 %	1 %	0,05 %	0,1 %	0,3 %	0,3 %

Les rayons X et les autres industries

La détection par les rayons X a de nombreuses autres applications industrielles qui présentent pour la plupart des analogies marquées, c'est pourquoi nous nous bornerons à donner les deux exemples suivants.

Les cimenteries

Avant de passer au four, le cru de ciment est constitué d'un mélange pulvérulent qu'il faut analyser. Deux méthodes sont généralement utilisées :

— analyse en continu du CaO par une méthode de fluorescence β-X, l'excitation étant produite par une source radio-active. Précision obtenue : 0,4 %.

— analyse par prélèvement au moyen d'un appareil classique de fluorescence X qui permet de déterminer les teneurs des différents constituants du ciment tels que Si, Al, Ca, Fe.

L'industrie pétrolière

L'automatisation de plus en plus poussée des raffineries de pétrole implique que la détection et le dosage des impuretés soient effectués en continu. Les méthodes de fluorescence X se prêtent fort bien à ce dosage ; en particulier, la technique d'absorptiométrie des rayons X est utilisée pour déterminer la teneur en soufre et en plomb des carburants et des naphtas.

Les rayons X et la géologie

Des techniques analogues à celles utilisées en sidérurgie et dans les autres industries sont, bien entendu, utilisées pour l'analyse des échantillons géologiques, mais il est intéressant de signaler ici une application nouvelle des rayons X en matière de prospection.

La prospection géologique ou minière nécessite l'analyse d'un nombre très important d'échantillons. L'obligation d'expédier ces échantillons à des laboratoires d'analyse souvent lointains et d'attendre les résultats pour orienter les recherches a ouvert un marché à des appareils portatifs utilisant la fluorescence X excitée par une source radio-active. Ces appareils, d'un poids inférieur à 10 kg, donc aisément transportables, permettent une spectrométrie par filtres qui sélectionnent la bande d'énergie correspondant à l'énergie de la raie X de l'élément recherché. Cette analyse *in situ* n'atteint bien entendu pas les précisions de celles effectuées au laboratoire, mais les résultats obtenus sont très suffisants en prospection, comme le montre le *tableau* VII qui indique les précisions obtenues avec des teneurs de l'ordre de 100 ppm pour différents éléments sur des échantillons préalablement broyés.

Une prospection spectaculaire par les rayons X est celle qui a été effectuée par les Américains lors de l'expédition *Apollo* sur la Lune. Une sonde α-X équipait en effet le véhicule spatial pour faire une analyse du sol lunaire.

Les rayons X et l'agriculture

Une des possibilités offertes par les radio-éléments qui se désintègrent par capture électronique et qui émettent des rayons X est de permettre l'étude de la fixation du fer dans une plante ; le sol est arrosé avec une solution aqueuse contenant un isotope radio-actif du fer, le ^{55}Fe, qui émet en se désintégrant des rayons X_K de 5,9 keV ; la plante absorbe la solution et l'autoradiographie de la plante permet de repérer la fixation sélective du fer.

L'analyse par fluorescence offre par ailleurs de nombreuses possibilités en agriculture :

— détermination des constituants essentiels des sols : K, Ca, Mg, Si, Cl, Zn ;

— détermination des oligo-éléments tels que Co, Cr, V, Ba, Ni, Sr à des teneurs de l'ordre de 30 ppm.

Les résultats obtenus sont en particulier exploités : pour établir des corrélations entre la nature des sols et la nutrition des végétaux ; pour doser la composition des engrais, choisir les amendements des sols et déterminer

les toxicités; pour déterminer la qualité des aliments du bétail.

Les rayons X et la pollution

Il s'agit ici encore d'une application de la fluorescence X, mais qui est cette fois excitée par des particules lourdes chargées (α, protons, ions lourds). Cette technique est particulièrement adaptée à la détection des éléments lourds ($Z > 45$) à des teneurs de 2 à 10 ppm. Très souvent, ces méthodes sont fondées sur la détection des raies X_L, car les raies X_K ont une énergie trop grande pour les éléments de numéro atomique élevé. Dans le cas de la détection des éléments légers, la méthode est extrêmement sensible, puisqu'elle permet d'atteindre des teneurs aussi faibles que 0,1 ppm.

Cette technique d'analyse X a trouvé un champ important d'applications dans l'étude de la pollution, en particulier pour évaluer l'importance des aérosols qui se déposent dans les voies respiratoires. A titre d'exemple, citons la station de contrôle de la pollution de l'air implantée en Californie qui utilise un petit cyclotron pour produire les raies X de fluorescence et qui permet de doser quotidiennement 700 prélèvements d'air, la détection s'effectuant à des concentrations de 10^{-9} g/m^3 d'air avec une précision de l'ordre de 10 %.

Les rayons X et la recherche criminologique et judiciaire

L'aptitude des rayons X à produire des radiographies très sensibles et à détecter les traces en fait un outil incomparable pour la recherche criminologique et judiciaire. Voici leurs principales applications : contrôle de police aux aéroports permettant de détecter des armes dans les bagages; contrôle de douane pour détecter l'or aux frontières; identification des traces les plus diverses, telles que peinture, poudre, etc., dans le cadre des enquêtes de la police judiciaire.

Les rayons X et l'art

La radiographie par les rayons X, l'analyse par fluorescence X non dispersive sont des moyens très puissants et qui ont l'avantage, incommensurable lorsqu'il s'agit d'œuvres d'art, d'être non destructifs.

Une des premières utilisations a été l'authentification des peintures célèbres. La détection repose sur la différence de composition des peintures, sur la présence ou l'absence de sels de titane dans les pigments.

De même, la radiographie de sculptures, de momies égyptiennes, etc., donne de précieuses indications sur les techniques de fabrication utilisées.

Une autre application de la diffraction X est l'étude des dégradations subies par une œuvre d'art et des possibilités de restauration. Cette technique a été utilisée par exemple pour la restauration des fresques abimées par les inondations de Florence.

Dans le domaine de l'archéologie, enfin, la fluorescence X a été utilisée pour étudier les monnaies anciennes et, à partir d'analyses non destructives des poteries, localiser les ateliers de fabrication.

Conclusions

Nous n'avons évoqué dans ce qui précède que quelques possibilités de détection par les rayonnements X; il est clair que les propriétés de ces rayonnements, qui permettent la détection et l'analyse sans pour autant détruire l'objet ou l'échantillon à étudier en font un outil indispensable à la recherche fondamentale, aussi bien qu'à la recherche appliquée, et que l'homme, dans sa soif de connaître, ne manquera pas de trouver encore beaucoup d'autres utilisations des rayons X.

BIBLIOGRAPHIE

BROGLIE M. de, *Introduction à la physique des rayons X*, Paris, Gauthier-Villars, 1928. - EBERMART J.-P., *Méthodes physiques d'études des minéraux*, Paris, Douin. - HEVESY G. de, *Advances in Radiobiology*, Édimbourg, 1957. - LAMARQUE P., *Bases physiques de la rœntgenthérapie*, Paris, Masson. - TUBIANA M., DUTREIX J., DUTREIX A., *Bases physiques de la radiothérapie*, Paris, Masson.

Les méthodes de contrôle non destructif des matériaux et structures

Lors de la conception d'une pièce ou d'une structure mécanique, les ingénieurs du bureau d'études en calculent les dimensions, en définissent la géométrie, choisissent le ou les matériaux ainsi que les procédés de fabrication, de telle sorte que les caractéristiques du produit obtenu répondent aux besoins de l'utilisateur tant sur le plan de la fonction que sur celui de la durée d'usage.

A ce niveau de la réalisation, on suppose que le matériau employé ne contient pas de défauts susceptibles de modifier ses propriétés mécaniques par rapport à celles prévues, et que les techniques de fabrication ne sont pas génératrices d'imperfections nuisibles à la qualité du produit fini, créant le risque d'une détérioration prématurée et catastrophique.

Il apparaît donc nécessaire de s'assurer à tous les stades de la fabrication de la qualité du matériau, des éléments, des assemblages et enfin de la structure complète. En particulier, il faut pouvoir déceler au sein du matériau la présence éventuelle de défauts dangereux, c'est-à-dire pouvant entraîner une rupture prématurée ou tout au moins une diminution trop importante des propriétés mécaniques, sans que cela modifie en quoi que ce soit les caractéristiques dimensionnelles, géométriques, physiques et chimiques de la pièce contrôlée.

Les catégories de défauts nuisibles sont très nombreuses : hétérogénéité du matériau, fissures ou criques, inclusions gazeuses ou solides, tapures de trempe, etc. Il existe, pour les déceler sans destruction de la pièce, un très grand nombre de techniques dont les domaines d'applications sont plus ou moins étendus et dont la sensibilité est plus ou moins grande.

Une méthode de contrôle non destructif idéale devrait apporter une réponse précise au groupe de questions suivant :

— Existe-t-il un défaut?
— Quelle est sa position au sein du matériau?
— Quelles en sont les caractéristiques et la nature (dimensions, nocivité, etc.)?

De plus, elle devrait être suffisamment précise pour qu'à la lumière des informations qu'elle apporte, il soit possible de prendre une décision avec un risque d'erreur aussi faible que possible quant à l'utilisation ou à la non-utilisation de la pièce.

Parmi toutes les méthodes, nous verrons qu'il n'en existe pas d'idéale, mais que chacune d'entre elles a des qualités propres qui la rendent mieux adaptée à certains types de problèmes qu'à d'autres.

Nous passerons en revue dans ce qui suit celles qui, à l'heure actuelle, sont les plus utilisées dans l'industrie et le laboratoire, en insistant plus particulièrement sur les méthodes qui sont en train de se développer et dont on peut penser qu'elles remplaceront dans l'avenir un certain nombre des techniques actuellement en usage.

Ressuage

Le ressuage est un procédé de détection des défauts qui débouchent à la surface de la pièce que l'on désire contrôler.

Le principe en est extrêmement simple (*fig.* 36) : on répand sur la surface à examiner un produit de couleur caractéristique, dont le pouvoir mouillant est très important, et qui va pénétrer dans les cavités qui débouchent en surface. On ôte ensuite très soigneusement l'excès de substance pénétrante, puis l'on dépose une poudre hygroscopique afin d'absorber le liquide qui subsiste, après le nettoyage, à l'intérieur des cavités. La présence d'un défaut se traduira par une tache de taille plus ou moins importante selon le volume de pénétrant qui a ressué. Les produits employés sont généralement à base de pétrole et de couleur rouge. Certains sont fluorescents sous éclairage aux rayons ultraviolets. Dans tous les cas, on recherche un contraste suffisamment bon pour que l'examen visuel des taches donne les informations les plus précises possibles.

Le ressuage est un procédé très simple qui permet de détecter des défauts débouchant en surface, et ceux-ci

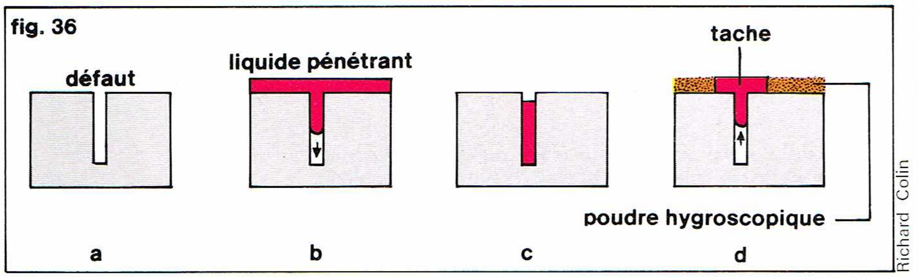

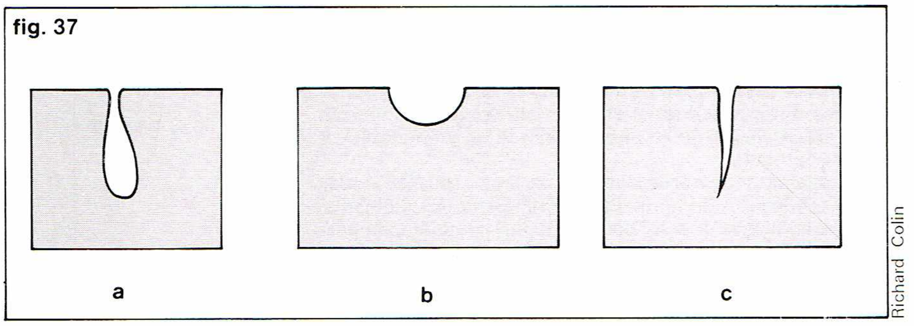

▲ ***Figure 36 : principe de détection des défauts à la surface d'une pièce par la technique de ressuage aux pénétrants liquides; a, défaut à détecter; b, aspersion du liquide pénétrant; c, nettoyage de la surface; d, détection par formation d'une tache. Figure 37; la sensibilité du ressuage est liée à la forme et aux dimensions du défaut : a, bonne détection; b, mauvaise détection; c, détection difficile.***

▶ ***Tableau VIII : vitesses V_L et V_T des ondes ultrasonores dans différents matériaux.***

uniquement; il en détermine, bien sûr, la position, mais ne donne qu'une indication très grossière sur la nature et la taille des défauts. La forme et la dimension de la tache peuvent être analysées pour tenter d'obtenir des informations sur ces deux derniers points, mais le nombre de paramètres qui interviennent (temps de pénétration, efficacité du nettoyage, durée du ressuage proprement dit, forme de l'ouverture de la cavité, etc.) rend difficile une évaluation quantitative suffisamment précise (*fig.* 37).

La mise en œuvre de cette méthode nécessite un certain nombre de précautions :

— l'état de la surface de la pièce examinée et sa propreté doivent être bons pour éviter la présence de *points de retenue* du pénétrant qui donneraient une multitude de taches, créant ainsi une sorte de « bruit de fond » où il serait difficile de déceler un défaut réellement important.

— un soin tout particulier doit être apporté à la réalisation des différentes phases du ressuage (nettoyage, durée de pénétration, etc.).

— l'interprétation des résultats doit être faite avec la plus grande prudence, en particulier si les fissures ont une ouverture trop fine pour que le produit puisse y pénétrer facilement, ou bien au contraire si les cavités sont trop largement ouvertes pour que le pénétrant y subsiste après la phase de nettoyage; ces défauts ne seront pas décelés au cours de l'opération de ressuage.

Méthodes ultrasonores

La recherche des défauts par ultrasons consiste à analyser les perturbations créées par des hétérogénéités existant au sein d'un matériau sur un faisceau d'ultrasons qui s'y propage.

Avant de décrire les techniques de contrôle non destructif utilisant les ultrasons, il est nécessaire de rappeler les lois physiques qui en régissent le comportement ainsi que les procédés d'émission et de détection.

Rappel des lois physiques de propagation

Les ultrasons sont des ondes élastiques de fréquences supérieures aux fréquences audibles (supérieures à 20 kHz) ; pour le contrôle, on utilise des fréquences comprises entre 500 kHz et 20 MHz. Ces ondes se propagent dans les matériaux avec des vitesses qui sont fonction des propriétés mécaniques de ceux-ci.

Trois modes de propagation sont susceptibles de coexister dans un milieu donné.

● Citons tout d'abord les *ondes longitudinales* ou *de compression* pour lesquelles les particules de matière sont animées d'un mouvement parallèle à la direction de propagation des ultrasons et dont la vitesse est donnée par :

$$V_L = \left\{\frac{E}{\rho}\,\frac{(1-\nu)}{(1-2\nu)\,(1+\nu)}\right\}^{1/2}$$

où E = module d'Young ; ρ = masse spécifique du matériau ; ν = coefficient de Poisson.

● Dans le cas des *ondes transversales* ou *de cisaillement*, les particules de matière sont en mouvement perpendiculairement à la direction de propagation. La vitesse est donnée par :

$$V_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

où G = module de Coulomb.

Ce mode de propagation n'existe pas dans les liquides.

● Les *ondes de surface* ou *ondes de Rayleigh* ne se propagent qu'à la surface du matériau et sont arrêtées par le moindre obstacle. La vitesse de ces ondes est :

$$V_S \simeq 0{,}9\ V_T$$

Il faut ajouter les *ondes de Lamb* qui ne sont mises en évidence que dans des tôles minces.

Les vitesses V_L et V_T des ondes ultrasonores dans différents matériaux sont données dans le *tableau* VIII.

Si l'on considère deux milieux (1) et (2) de masses spécifiques différentes (ρ_1 et ρ_2) où les vitesses de propagation des ondes longitudinales (par exemple) sont respectivement V_{L1} et V_{L2}, on définit pour ces deux milieux deux impédances acoustiques :

$$Z_1 = \rho_1 V_{L1} \quad \text{et} \quad Z_2 = \rho_2 V_{L2}.$$

Tableau VIII
Vitesses V_L et V_T des ondes ultrasonores dans différents matériaux

Matériaux	V_L	V_T
Acier	5 800 m/s	3 230 m/s
Air	331 m/s	—
Eau	1 500 m/s	—
Résine acrylique	2 670 m/s	1 120 m/s

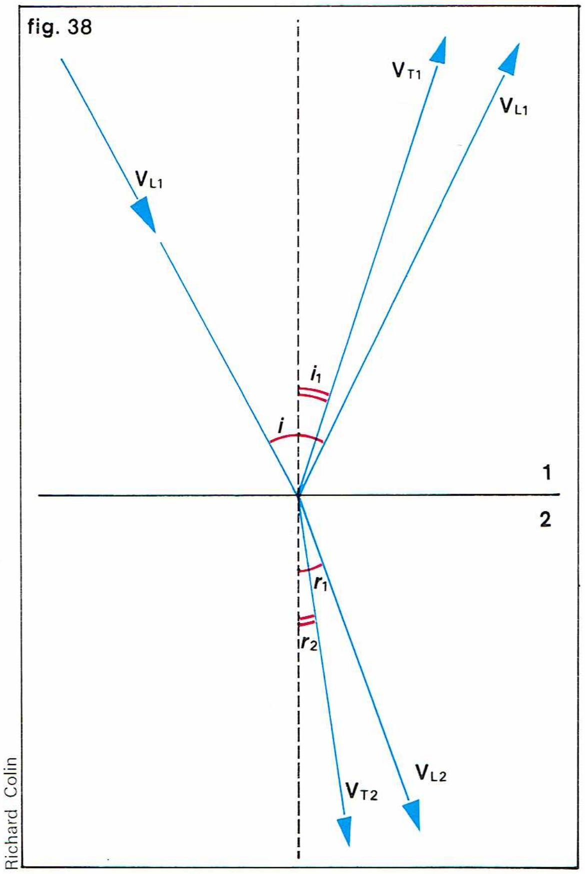

▶ ***Figure 38 : loi de propagation des ondes ultrasonores (réflexion et réfraction).***

Lorsqu'un faisceau d'ultrasons rencontre l'interface entre les milieux (1) et (2), une partie de l'énergie incidente est réfléchie tandis qu'une part est transmise. On définit un coefficient de réflexion R, rapport entre l'énergie réfléchie et l'énergie incidente :

$$R = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2} = \frac{E_r}{E_i}$$

et un coefficient de transmission T, rapport entre l'énergie transmise et l'énergie incidente :

$$T = \frac{4\, Z_2 Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2} = \frac{E_t}{E_i}$$

Bien entendu : $R + T = 1$.

On constate que, pour une interface acier-air, pratiquement 100 % de l'énergie est réfléchie ; en d'autres termes, une telle interface se comporte vis-à-vis du faisceau d'ultrasons comme un miroir parfait. C'est sur cette propriété que repose le principe de la détection par ultrasons des défauts dans les matériaux. Il faut remarquer cependant que, si cette caractéristique est favorable à la mise en évidence de défauts, elle soulève une difficulté importante quant à l'introduction des ondes ultrasonores dans le matériau et à leur détection après leur traversée de celui-ci.

Pour une interface liquide-métal, la désadaptation d'impédance est moins importante, par conséquent la part d'énergie transmise est plus élevée (par exemple, pour une séparation eau-acier, R = 88 % : 12 % de l'énergie incidente est transmise).

Lorsqu'un faisceau d'ondes ultrasonores longitudinales arrive sous une certaine incidence *i* sur l'interface entre un milieu (1) et un milieu (2) où les vitesses de propagation des ondes longitudinales et transversales sont respectivement V_{L1}, V_{T1} et V_{L2}, V_{T2}, il obéit aux lois de Snell qui lient les angles de réflexion et de réfraction aux vitesses de propagation (*fig.* 38) :

$$\frac{\sin i}{V_{L1}} = \frac{\sin i_1}{V_{T1}} = \frac{\sin r_1}{V_{L2}} = \frac{\sin r_2}{V_{T2}}$$

Par conséquent, pour un mode incident donné, il y a possibilité de plusieurs modes de réflexion et de transmission avec des vitesses de propagation différentes. L'énergie du faisceau incident va se répartir entre ces différents modes.

Il existe un angle i' tel que :

$\sin i' = \frac{V_{L1}}{V_{L2}}$. Il lui correspond un angle r'_1 tel que

$$\sin r'_1 = 1 \qquad \text{soit } r'_1 = 90°.$$

pour cet angle i' par conséquent seules des ondes transversales seront transmises du milieu (1) au milieu (2).

De même, on peut déterminer un deuxième angle d'incidence i'' tel que :

$\sin i'' = \frac{V_{L1}}{V_{T2}}$. Il lui correspond un angle r''_2 tel que

$$\sin r''_2 = 1 \qquad \text{soit } r''_2 = 90°$$

Pour un angle d'incidence supérieur à i'', il n'y a plus transmission ni d'ondes longitudinales, ni d'ondes transversales, mais uniquement création d'ondes de surface.

Les angles i' et i'' sont les deux *angles critiques*.

Lors de sa propagation dans un matériau, l'onde ultrasonore perd une partie de l'énergie mécanique qu'elle transporte soit sous forme de chaleur, soit sous forme d'énergie communiquée aux défauts du réseau cristallin (frottement interne). L'intensité de l'onde acoustique décroît avec *x*, distance parcourue, selon la loi :

$$I = I_0 e^{-2\alpha x}$$

où α est un coefficient d'amortissement qui est une fonction croissante de la fréquence *f*, tout au moins pour les pertes d'énergie sous forme de chaleur.

Émission et détection des ultrasons

Les ondes ultrasonores peuvent être produites par des transducteurs qui transforment l'énergie électrique en énergie mécanique. Il y a transformation directe d'un courant alternatif en vibrations acoustiques.

Le principe de ces transducteurs est fondé sur : la piézo-électricité ; la magnétostriction ; l'électrostriction.

Pour les applications au contrôle non destructif, on emploie en règle générale des émetteurs piézo-électriques constitués d'une pastille de cristal. Sur les faces de cette lame, on dépose un revêtement métallique. Si le condensateur ainsi constitué est relié à une tension électrique alternative, l'élément piézo-électrique va se déformer et la fréquence de ce mouvement sera celle de la tension d'excitation. En particulier, si cette fréquence est telle qu'elle corresponde à une des fréquences propres de la lame, il y a résonance. Un tel transducteur, s'il reçoit des ondes ultrasonores, produit une tension électrique. Il s'agit donc non seulement d'un émetteur mais d'un récepteur d'ultrasons.

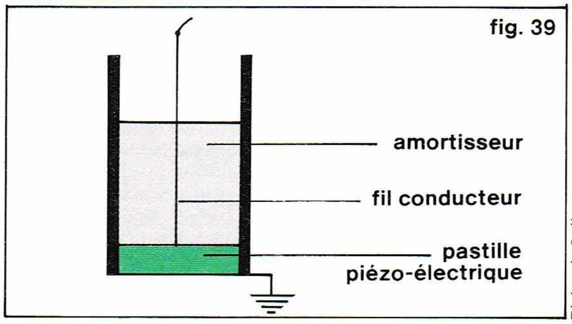

◀ ***Figure 39 :** représentation schématique d'un émetteur-récepteur d'ultrasons.*

Les émetteurs-récepteurs fondés sur l'électrostriction emploient des pastilles ferro-électriques convenablement polarisées qui se déforment lorsqu'elles sont soumises à un champ électrique.

Les transducteurs utilisés pour la production et la détection des trains d'ondes ultrasonores lors de la recherche de défauts dans des matériaux contiennent donc, qu'ils soient piézo-électriques ou ferro-électriques :

un élément sensible (quartz, céramique, etc.) dont l'épaisseur détermine la fréquence de travail (qui est la fréquence de résonance $F = V/2\,e$; F = fréquence en hertz ; V = vitesse du son en mètre/seconde ; *e* = épaisseur de la pastille en mètres) ;

un amortisseur qui a pour double rôle d'absorber les vibrations produites par la face arrière de l'élément piézo-électrique et d'amortir mécaniquement le train d'ondes (*fig.* 39).

Le champ acoustique issu d'un tel émetteur est tout d'abord constitué d'une zone de turbulence cylindrique où l'énergie se répartit irrégulièrement dans le faisceau. La longueur *d* de ce champ proche, ou zone de Fresnel est, pour un élément sensible circulaire de diamètre D, dans un milieu où les ondes ultrasonores (longitudinales par exemple) ont une vitesse de propagation V, donnée par la relation :

$$d = \frac{D^2}{4\lambda}$$

avec $\lambda = \frac{V}{f}$ longueur d'onde dans le milieu considéré.

L'énergie passe par un maximum sur l'axe du faisceau à la limite du champ proche, puis décroît ensuite régulièrement et se répartit dans un cône de demi-angle au sommet α tel que :

$$\sin \alpha = \frac{1{,}22\,\lambda}{D} \qquad (\textit{fig. } 40).$$

Il est intéressant de noter que, si l'on emploie une pastille de petit diamètre, on n'obtiendra pas un faisceau plus directif qu'avec un capteur de grand diamètre, puisque l'angle de divergence du faisceau croît lorsque le diamètre diminue.

Pour produire des ondes longitudinales, on emploiera des lames de quartz ou de céramique vibrant en épaisseur. L'émission d'ondes transversales sera réalisée soit avec des cristaux piézo-électriques spécialement taillés, soit, plus généralement, en donnant au faisceau d'ultrasons un angle d'incidence adéquat par rapport à la surface de la pièce examinée en interposant un prisme (« coin en plastique ») entre celle-ci et le transducteur.

Un appareillage pour le contrôle non destructif par ultrasons se composera donc d'un générateur d'impulsions électriques ou de trains d'ondes électriques pour l'excitation de l'émetteur, d'un amplificateur à gain élevé et d'un système de visualisation pour l'observation des signaux recueillis par le récepteur. Ces éléments de base sont bien entendu complétés de circuits spécialement

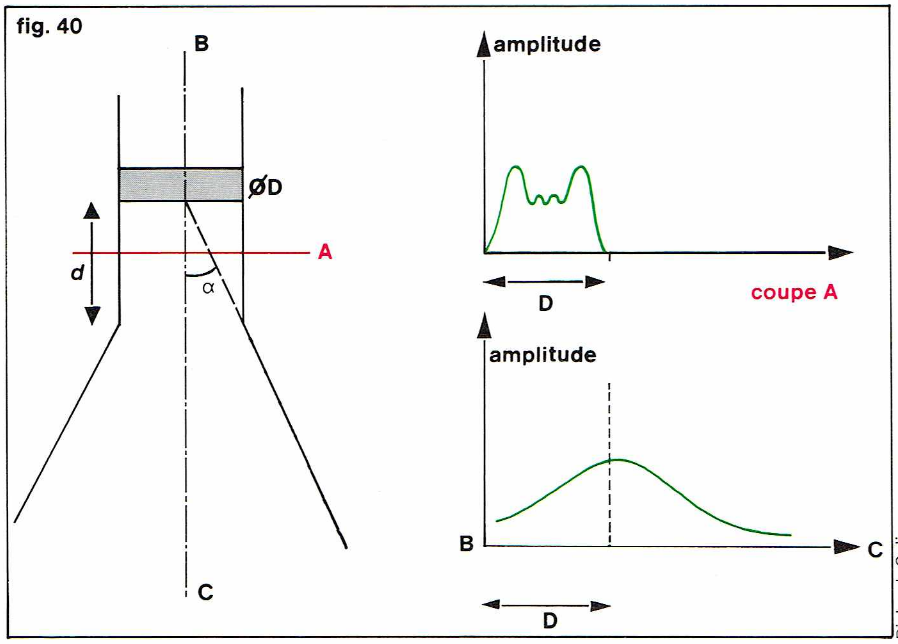

étudiés pour répondre aux besoins du contrôle industriel (seuil réglable d'alarme, affichage de la distance parcourue par les ultrasons dans le matériau testé, etc.).

L'excitation à intervalles réguliers, par impulsions ou par trains d'ondes courts, permet l'utilisation du même transducteur pour remplir les fonctions d'émetteur et de récepteur : entre deux impulsions d'excitation (émission), il peut recevoir les ondes ultrasonores et les transformer en signal électrique.

Méthodes de contrôle non destructif par ultrasons

Nous avons vu dans ce qui précède que la présence d'un défaut, ou plus précisément d'une discontinuité d'impédance acoustique dans un matériau, avait pour conséquence la réflexion de la majeure partie d'un faisceau d'ultrasons interrompu par cette discontinuité (pratiquement 100 % s'il s'agit d'une interface métal-air). On pourra donc, pour déceler les défauts éventuels dans une pièce, analyser l'intensité de l'onde ultrasonore transmise (méthode par transmission) ou celle de l'onde réfléchie (méthode par réflexion ou par échos).

Dans le premier cas, la présence d'un défaut se traduira par une diminution importante ou par une disparition totale de l'énergie recueillie par le récepteur placé sur la face de la pièce opposée à la surface d'entrée du faisceau d'ultrasons (*fig.* 41). La disparition, sur l'écran de l'oscilloscope de l'appareil, du signal de réception normal sera le signe de l'existence d'un défaut, une indication de la surface réfléchissante qu'il présente perpendiculairement à la direction de propagation du faisceau (donc une information sur ses dimensions), mais n'apportera pas de renseignements sur la position de la discontinuité dans l'épaisseur de la pièce.

Au contraire, la présence d'un défaut se traduit en échographie par l'apparition, sur l'écran de l'oscilloscope, d'un signal dont l'amplitude est fonction de l'énergie ultrasonore réfléchie, et dont la position sur l'écran (où la base de temps est réglée de telle sorte que l'abscisse soit directement proportionnelle à la distance traversée) indique la situation au sein du matériau (*fig.* 42 et 43).

Que ce soit dans un cas ou dans l'autre, l'un des paramètres les plus importants du contrôle est l'efficacité et la constance du couplage entre le transducteur et le matériau examiné, couplage rendu nécessaire par la très basse impédance acoustique de l'air vis-à-vis du milieu testé. Il existe deux procédés principaux pour assurer cette liaison :

L'interposition d'un film d'huile ou de graisse entre l'émetteur ou le récepteur et la pièce (contrôle par contact). L'opérateur déplace le (ou les) transducteurs sur la surface de l'objet examiné pour en balayer tout le volume.

Le couplage par l'intermédiaire d'une colonne d'eau (immersion totale ou partielle). Cette dernière technique, souvent plus difficile à mettre en œuvre, offre beaucoup plus de souplesse, en particulier pour le réglage de la position relative transducteur-pièce (distance, incidence, etc.), ce qui permet de se placer dans la configu-

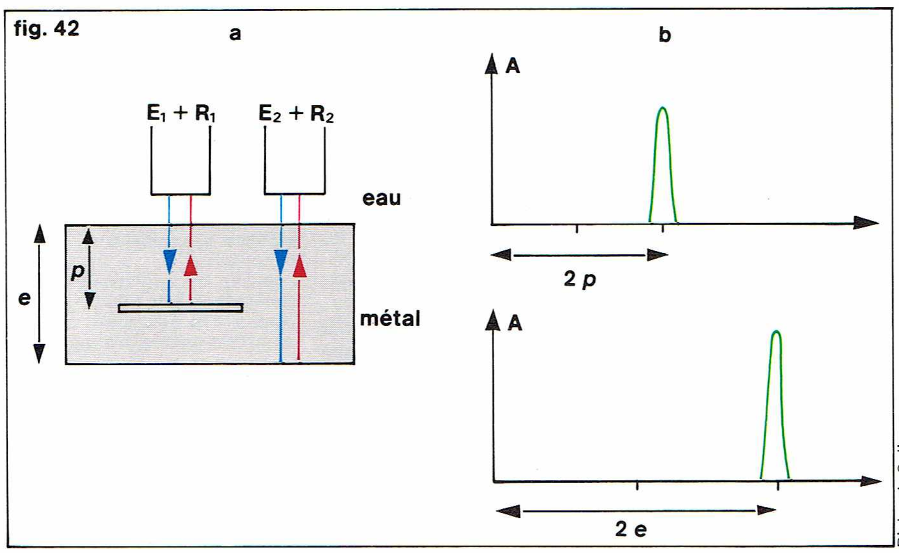

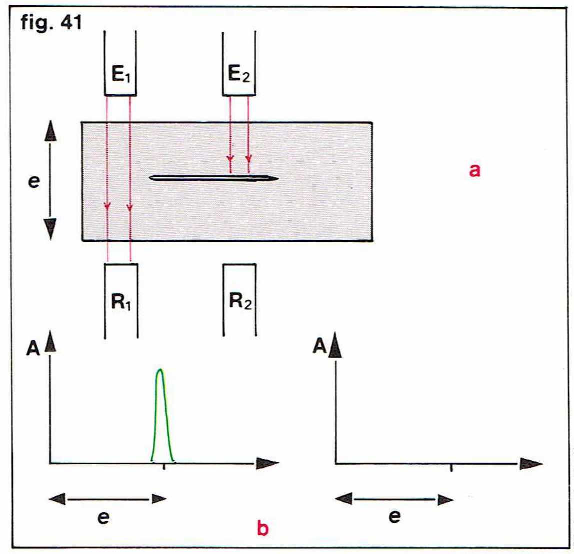

▲ *Figure 41 : détection des défauts par la* **méthode ultrasonore par transmission** ; a, *disposition du montage ;* b, *représentation des signaux reçus par* R_1 *et* R_2 : *à gauche, apparition d'un signal en* R_1, *donc pas de défaut ; à droite, disparition du signal en* R_2, *donc présence d'un défaut.*

Figure 42 : détection des défauts par la **méthode ultrasonore par échographie en incidence normale** ; a, *montage ;* b, *signaux reçus par les émetteurs-récepteurs* $E_1 + R_1$ *(courbe du haut) et* $E_2 + R_2$ *(courbe du bas) : la position du signal sur l'écran indique la situation du défaut dans la pièce.*

▼ *Figure 43 : détection des défauts par la* **méthode ultrasonore par échographie en incidence oblique** ; a, *montage ;* b, *signal reçu sur le récepteur* R.

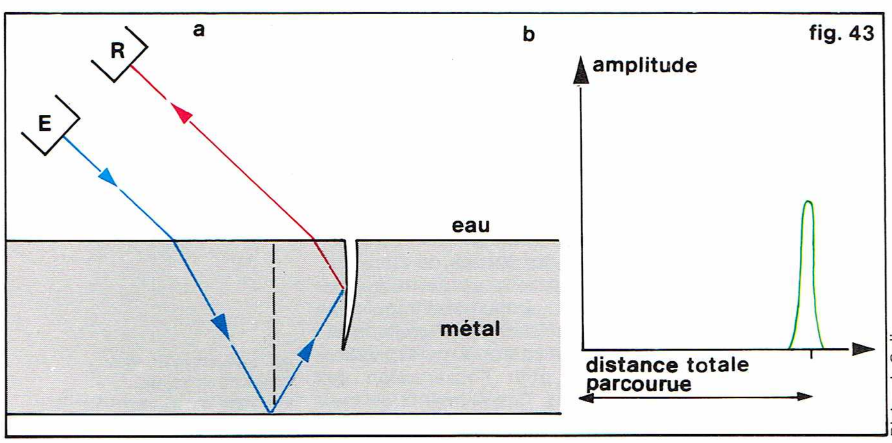

ration optimale, compte tenu des caractéristiques des défauts recherchés (dimensions, nature, orientation, etc.). La constance du couplage est beaucoup plus aisée à assurer en immersion, et de ce fait on peut envisager sans difficultés majeures l'automatisation de certains contrôles.

Selon la géométrie et les dimensions du produit testé, la structure du matériau, les caractéristiques des défauts recherchés, le seuil minimal de détection souhaité, les critères de rebut retenus, on choisit la méthode la mieux adaptée, le type d'onde, la fréquence du travail, etc. Un étalonnage est nécessaire pour s'assurer des qualités de sensibilité et de reproductibilité des appareillages et de la méthode. On dispose pour cela « d'étalons » normalisés adaptés aux exigences de problèmes particuliers (étalons pour la mise au point des techniques de contrôle de soudures, par exemple), mais il est en outre souvent souhaitable de réaliser une pièce de référence dont les caractéristiques sont aussi proches que possible de celles des produits contrôlés et où l'on a réalisé des défauts artificiels, images plus ou moins fidèles de ceux, réels, que l'on souhaite détecter et évaluer.

Radiographie X - Gammagraphie

Principe de la radiographie et de la gammagraphie

Lorsqu'un corps est soumis à un rayonnement X ou γ, les rayons subissent à la traversée de ce corps un affaiblissement qui dépend de la nature des matériaux et de l'épaisseur. La modulation du faisceau donne une image radiante représentative de la constitution de l'objet radiographié. Cette image radiante peut être enregistrée sur un film sensible : c'est l'image radiographique où les régions les plus claires correspondent aux parties les plus denses de l'objet et inversement.

Avant de décrire les techniques radiographiques de contrôle des matériaux, il est nécessaire de rappeler quelques notions sur la nature des rayons X et γ.

Nature des rayons X

Sous l'action d'électrons animés de vitesse élevée, les atomes d'un matériau ainsi bombardé émettent des rayons X ; il y a transformation de l'énergie cinétique des électrons en énergie rayonnante. Les rayons X sont de même nature que les rayons lumineux et ne s'en distinguent que par leur longueur d'onde beaucoup plus courte.

Nature des rayons γ

Les rayons γ sont de même nature que les rayons X, mais ils sont émis spontanément lors de la désintégration des noyaux d'atomes instables. Certains corps, comme le radium, présentent à l'état naturel une émission notable, mais on utilise généralement des sources radio-actives artificielles : cobalt 60 ou tritium 192.

Nous verrons que les caractéristiques d'un rayonnement X peuvent être modifiées par simple variation des paramètres électriques de fonctionnement du générateur. Au contraire, l'émission γ, inhérente au corps constituant la source, ne peut être influencée de l'extérieur.

Atténuation des rayons X et γ par la matière

Pour un pinceau de rayons X ou γ, l'atténuation causée par la traversée d'une épaisseur *x* d'un matériau est donnée par la loi classique :

$$I = I_0{}^{-\mu x}$$

I_0 = intensité incidente ; μ = coefficient d'atténuation linéique ; x = épaisseur traversée.

Cette relation n'est valable que pour un rayonnement mono-énergétique, donc monochromatique, puisque l'énergie et la longueur d'onde du rayonnement sont liées par la relation d'Einstein. En effet, μ est fonction de l'énergie du rayonnement. Les générateurs usuels de rayons X ont en fait un spectre d'émission assez étendu, et la relation précédente n'est plus valable.

Plus l'énergie du rayonnement est importante, plus l'atténuation est faible ; comme $E = h/\lambda$, plus la longueur d'onde est courte, plus le rayonnement est pénétrant.

Dans le pouvoir d'atténuation d'un objet interviennent l'épaisseur et la densité mais surtout le nombre atomique du matériau constitutif : plus celui-ci sera élevé, plus l'absorption sera importante. C'est sur cette propriété qu'est fondé le contrôle non destructif par radiographie X ou γ.

Production des rayons X - Sources de rayons γ

Le principe du tube générateur de rayons X est le suivant : un filament (tungstène par exemple) est porté à incandescence, dans le vide, par un courant d'intensité réglable. On soumet le nuage électronique ainsi constitué à une forte différence de potentiel ; les électrons sont alors entraînés à vitesse élevée vers une cible (anode) où leur énergie cinétique est transformée en énergie rayonnante pour une part, en chaleur pour une autre. Le nombre d'électrons émis, qui règle l'intensité du courant dans le tube, est fonction de la température du filament, tandis que la différence de potentiel détermine l'énergie du rayonnement.

Il existe divers types de générateurs de rayons X selon l'intensité et l'énergie que l'on veut atteindre, mais ils sont tous fondés sur le même principe et permettent d'atteindre des différences de potentiel de l'ordre de 500 kV, suffisantes pour contrôler efficacement une épaisseur de 10 cm d'acier. Pour atteindre des énergies supérieures, on doit alors employer des accélérateurs de particules qui rendent possible l'obtention d'énergies de l'ordre de 20 MeV nécessaires à la traversée de 50 cm d'acier, par exemple.

Les sources de rayons γ, quant à elles, sont peu encombrantes et fonctionnent sans apport d'énergie extérieure, ce qui, pour les contrôles en chantier par exemple, peut être un avantage important. L'énergie du rayonnement qui détermine le pouvoir de pénétration est par contre fonction de la nature de la source sans qu'il soit possible à l'opérateur d'intervenir. Le cobalt 60 donne un rayonnement à fort pouvoir pénétrant (1,2 MeV environ) tandis que l'iridium 192 donne une énergie équivalente à celle fournie par un tube de rayons X à 600 kV.

L'intensité du rayonnement γ dépend de l'activité de la source, qui s'exprime en curies. Cette activité décroît avec le temps, ce qui impose par conséquent des corrections de temps d'exposition ou bien le renouvellement périodique des sources.

Facteurs influant sur le contrôle radiographique

Les lois de propagation des rayons X ou γ sont identiques à celles qui régissent la propagation de la lumière. La formation de l'image radiographique dépend de paramètres géométriques que l'on peut déterminer en considérant la formation des ombres par la lumière (*fig.* 44).

◀ ***Page ci-contre, en haut, figure 40 : champs acoustiques proche et éloigné issus d'un émetteur d'ultrasons.***

▼ ***Figure 44 : principes géométriques de la formation de l'image radiographique.***

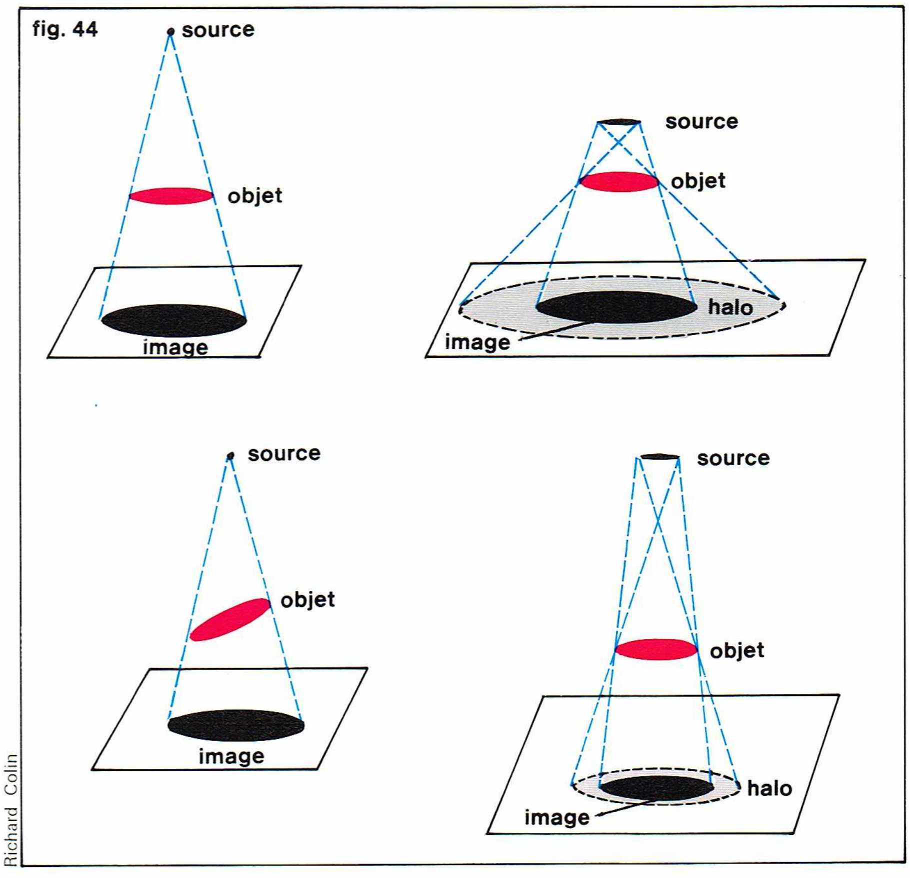

On constate alors qu'il est nécessaire de respecter au mieux les conditions suivantes pour obtenir une image radiographique aussi représentative que possible, qualitativement et quantitativement, de la constitution de l'objet :

— la source de rayons X doit être autant que possible assimilable à une source ponctuelle.

— elle doit être aussi éloignée que possible de l'objet.

— le plan image (film) doit être aussi proche que possible de l'objet.

— la direction moyenne du faisceau doit être perpendiculaire au plan image qui doit lui-même être parallèle au plan moyen de l'objet.

On peut concevoir des générateurs de rayons X où la surface d'émission est très faible, mais, dans ce cas, dès que l'intensité devient importante, il y a échauffement et risque de détérioration de l'anode. Pour répondre aux autres conditions, on éloigne la source autant que le permettent les conditions pratiques, et on emploie des films enfermés dans des cassettes que l'on place directement au contact de la pièce à radiographier.

L'intensité et la tension du générateur de rayons X (grandeurs sur lesquelles l'opérateur peut intervenir) n'ont pas la même influence sur la qualité du rayonnement, donc sur les conditions du contrôle. Lorsque, pour une tension donnée, on augmente l'intensité de courant dans le tube (*fig.* 45a), l'intensité du rayonnement croît mais sa composition spectrale reste identique (il n'y a pas modification du pouvoir pénétrant). Au contraire, lorsque l'on augmente la tension aux bornes du tube tout en maintenant constante l'intensité de courant, il apparaît dans le spectre des longueurs d'onde plus courtes (pouvoir pénétrant accru) en même temps que l'intensité du rayonnement augmente (*fig.* 45b).

Le contrôle radiographique des matériaux repose sur le fait que la structure interne de l'objet rencontré par le faisceau de rayons X sur son parcours module l'intensité de ce faisceau. Le film radiographique traduit cette variation d'intensité reçue par une variation de densité de l'image radiographique. Mais l'atténuation du faisceau s'accompagne d'une diffusion (rayonnement secondaire émis dans toutes les directions de l'espace) qui contribue au noircissement du film, créant ainsi un voile uniforme nuisible à la qualité de l'image.

Les rayons X ont une action plus faible que les rayons lumineux sur les émulsions photographiques. Pour augmenter la qualité de l'image, on place généralement entre le film et l'objet des écrans renforçateurs soit fluorescents (les photons X sont transformés en photons lumineux), soit métalliques (écran de plomb). Dans le premier cas, le pouvoir renforçateur est important mais la qualité de l'image n'est pas très bonne, compte tenu de la grande dimension des grains constitutifs de ces écrans et de leur épaisseur. Ils sont peu utilisés, sauf lorsqu'il est nécessaire de réduire les temps de pose. Les écrans de plomb sont par contre très employés en radiographie, en dépit de leur caractère renforçateur faible, parce qu'ils absorbent préférentiellement les rayonnements diffusés, réduisant ainsi le « bruit de fond » créé par ce rayonnement secondaire, ce qui accentue le contraste de l'image radiographique.

▼ ***Figure 45 : influence de l'intensité du courant* (a) *et de la tension* (b) *sur la composition spectrale et l'intensité du rayonnement X.***

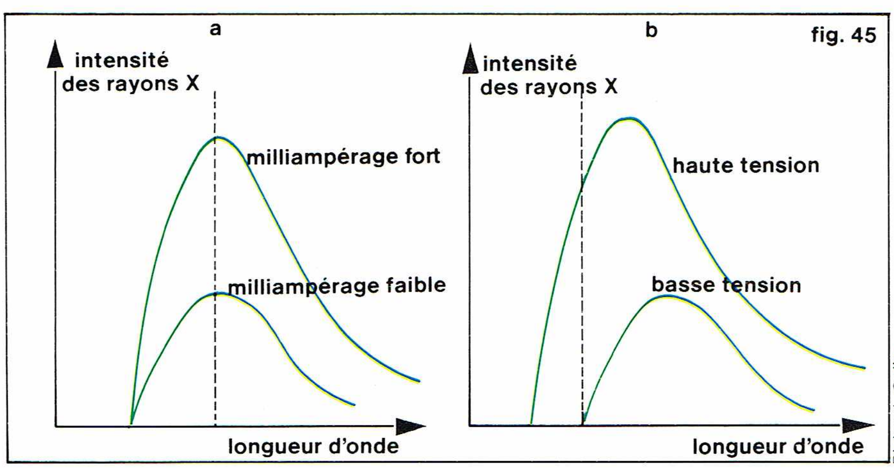

Indicateurs de qualité d'image

Les applications industrielles de la radiographie consistent essentiellement dans la recherche de défauts fins (fissures, etc.) dans une pièce métallique. Le contrôle sera d'autant meilleur que la définition, le contraste et la résolution de l'image radiographique seront bons. Il est donc important de connaître la qualité de la radiographie que l'on a réalisée pour en évaluer la sensibilité. On dispose pour cela de toute une gamme d'indicateurs de qualité d'image (IQI) qui, radiographiés en même temps que la pièce contrôlée, permettent de juger de la qualité de la prise de vue. Il s'agit soit de petits escaliers réalisés dans un matériau identique à celui qui est examiné (IQI de l'U. S. Bureau of Ships), soit de gradins pouvant être percés de trous (IQI Afnor), soit d'une série de fils de diamètre croissant (IQI DIN).

L'examen des images radiographiques doit être effectué dans des conditions d'éclairage appropriées pour diminuer autant que possible les risques de mauvaises interprétations de la part de l'observateur.

Neutronographie

La radiographie par flux de neutrons ou neutronographie est une technique complémentaire de la radiographie X ou γ qui n'est pas encore d'un usage courant dans l'industrie mais qui va probablement connaître, avec la multiplication des réacteurs nucléaires, un certain développement.

L'objet que l'on veut examiner est placé dans un faisceau de neutrons thermiques. Celui-ci est modulé par l'objet, et cette modulation est enregistrée sur un film radiographique après que le flux de neutrons, qui, n'étant pas ionisant, n'impressionne pas les émulsions photographiques, a été converti en rayonnement β ou γ grâce à des écrans métalliques spéciaux (cadmium, rhodium, etc.).

L'interaction des neutrons avec la matière se produit au niveau du noyau des atomes, alors que les rayons X ou γ agissent au niveau des couches électroniques. Cela explique que les éléments lourds soient généralement opaques aux rayons X mais transparents aux neutrons tandis que, pour les éléments légers (riches en hydrogène, par exemple), on a le phénomène inverse.

La neutronographie est donc une méthode de contrôle utilisable, là où, compte tenu de la nature du matériau, les rayons X ou γ sont inefficaces.

Les sources de neutrons sont : les réacteurs nucléaires ; les sources radio-isotopiques ; les accélérateurs de particules munis d'une cible appropriée.

Contrôle non destructif par courants de Foucault

L'utilisation pour le contrôle non destructif des courants de Foucault induits dans un matériau métallique a fait l'objet depuis quelques années d'études théoriques très importantes qui ont conduit à la mise au point de matériels qui, en dépit de leur complexité, sont parfaitement adaptés au problème des contrôles industriels. C'est une méthode d'examen sans contact, très rapide, qui peut de plus être très facilement automatisée.

Principe de la méthode

Une bobine (ou tout simplement un conducteur) est parcourue par un courant alternatif qui crée un champ alternatif H_r. Lorsque la pièce à contrôler est placée au voisinage de la bobine, le champ H_r y induit des courants de Foucault de même fréquence que l'intensité circulant dans la bobine mais de phase différente. Ces courants de Foucault créent, en retour, un champ H_i qui s'oppose à H_r et dont l'action va se traduire par une variation de l'impédance de la bobine (*fig.* 46).

Une modification quelconque des caractéristiques de la pièce donne lieu à une modification du parcours ou de l'intensité des courants de Foucault, donc de l'impédance de la bobine. Cette dernière est définie par sa résistance R et par sa réactance ωL ($\omega = 2\pi f$, f étant la fréquence du courant et L l'inductance). Lorsque le matériau à tester est loin de la bobine, ces deux paramètres ont pour valeurs R_0 et ωL_0 qui peuvent être représentées par un point P_0 dans un plan d'impédance (*fig.* 47). Lorsque la pièce à

contrôler est approchée de la bobine, l'influence des courants de Foucault déplace le point P_0 à P_1 (R_1, ωL_1). Le contrôle par courants de Foucault consiste en l'analyse des déplacements du point P qui sont fonction des propriétés de l'échantillon (conductibilité électrique, perméabilité magnétique, dimensions, défauts, température) et des caractéristiques de l'appareillage (fréquence du courant alternatif parcourant la bobine, dimensions et géométrie de celle-ci, distance entre la pièce et la bobine).

Lorsque l'on calcule l'atténuation des courants de Foucault en fonction de l'épaisseur du matériau, on montre que la densité des courants décroît exponentiellement à partir de la surface du conducteur selon la loi :

$$i_z = i_0 e^{-\gamma z} e^{-j\gamma z}$$

i_z étant l'intensité à la profondeur z tandis que γ est une fonction des caractéristiques du matériau mais aussi de la fréquence de l'onde électromagnétique. Le terme en $e^{-\gamma z}$ représente l'atténuation proprement dite, le terme imaginaire $e^{-j\gamma z}$ est le facteur de phase (variation de la phase en fonction de z). Plus la fréquence est grande, plus l'atténuation est importante. Pour des fréquences élevées, la pénétration des courants de Foucault est très faible, c'est l'*effet de peau*. Sur le plan pratique, à titre d'exemple, les épaisseurs d'acier inoxydable qui peuvent être explorées efficacement par courants de Foucault sont :

à 1 kHz	e = 13,5 mm
à 50 kHz	e = 1,9 mm
à 300 kHz	e = 0,78 mm

Le calcul théorique qui donne le comportement des courants de Foucault dans le cas général est très complexe. Il est en revanche assez simple dans le cas de conducteurs cylindriques (barres ou tubes) entourés par la bobine. Dans ce cas, le docteur Förster a défini une valeur caractéristique, homogène à une fréquence, du matériau à contrôler :

$$f_g = \frac{1}{2\pi\sigma\mu a^2}$$

où σ est la conductibilité électrique, μ la perméabilité magnétique et a le diamètre extérieur.

La connaissance de f_g pour le matériau à tester va permettre de définir la fréquence de travail pour répondre au problème posé.

On peut montrer que l'influence du défaut sur la variation d'impédance de la bobine sera plus ou moins prépondérante selon la fréquence du courant circulant dans la bobine. Le choix de la fréquence est donc essentiel pour la mise en œuvre du contrôle par courants de Foucault.

Principe des appareils

Les appareils de contrôle non destructif sont devenus depuis quelques années, avec le développement de la technologie dans le domaine de l'électronique, de plus en plus sophistiqués, mais ils reposent tous sur le même schéma de principe : un oscillateur, un système de mesure (bobine), un système d'analyse et un ensemble d'exploitation (*fig.* 48). L'oscillateur fournit la tension sinusoïdale de référence. Le système de mesure se présente soit comme un point de mesure dont la bobine est une des branches, soit comme un circuit magnétique à enroulements multiples (*fig.* 49). Le capteur peut être constitué soit d'une bobine unique, soit de deux éléments à fonctions séparées. La forme dépend essentiellement de la géométrie de l'objet examiné.

Le système d'analyse utilise l'une des techniques suivantes : analyse d'impédance et d'amplitude; analyse de phase et d'amplitude; analyse de modulation.

La deuxième technique permet de différencier les divers types de discontinuités en observant les variations de phase induites. L'analyse de modulation complète la méthode d'analyse de phase en ce qui concerne le tri des défauts.

Utilisation des courants de Foucault au contrôle non destructif

Les progrès importants réalisés ces dernières années dans la mise au point des matériels et la connaissance des phénomènes mis en jeu ont permis à cette méthode, qui offre l'avantage de ne pas nécessiter de contact avec la pièce testée et d'avoir un temps de réponse très bref, de se répandre de plus en plus dans l'industrie, en particulier pour le contrôle des tubes, des barres et des fils métalliques.

Contrôle non destructif par magnétoscopie

Principe

Dans une pièce constituée d'un matériau magnétique aimanté au voisinage de la saturation, les lignes de forces associées au champ magnétique sont déformées par une discontinuité débouchant en surface au voisinage immédiat de cette dernière (*fig.* 50). La mise en évidence de ces anomalies se fait en observant la répartition d'une poudre magnétique sur la surface de la pièce. Les particules ont tendance à s'accumuler près des défauts.

fig. 46

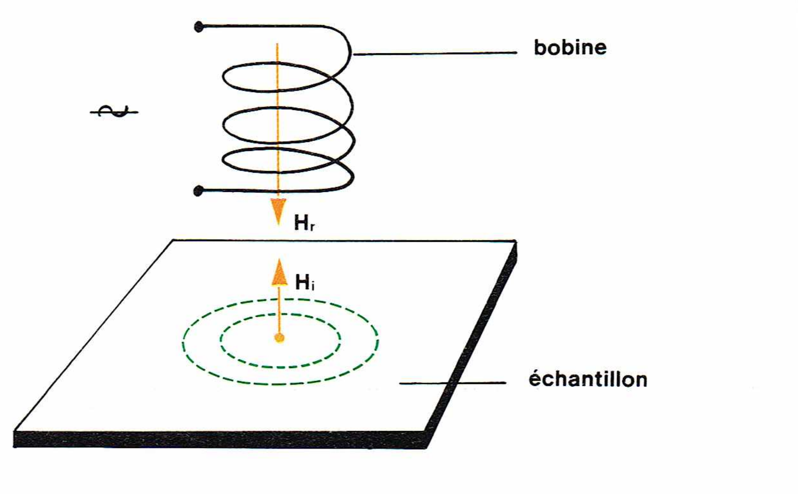

▲ ***Figure 46 : schéma de principe de la détection d'un défaut dans une pièce par la méthode des courants de Foucault.***

fig. 47

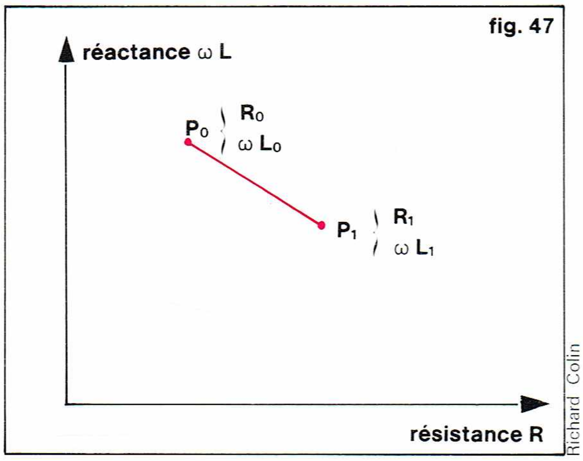

fig. 48

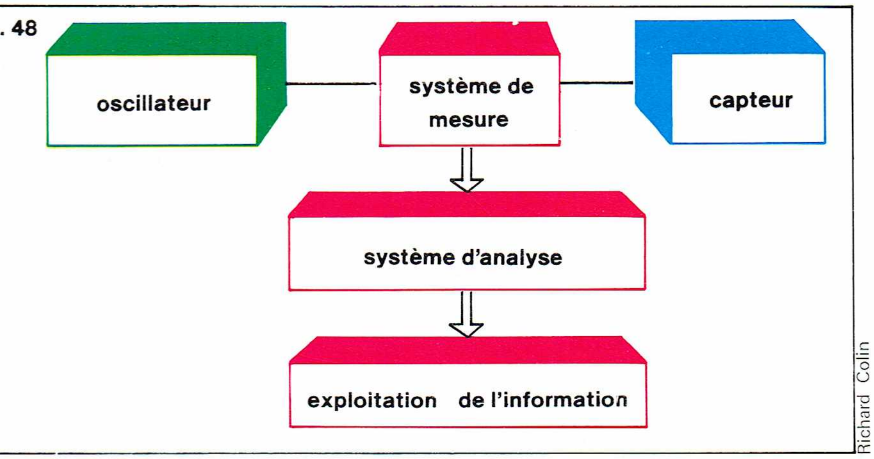

▼ ***Figure 47 : plan d'impédance pour la détection des défauts dans une pièce par la méthode des courants de Foucault (voir développement dans le texte).***
Figure 48 : schéma synoptique d'un appareil à courants de Foucault.

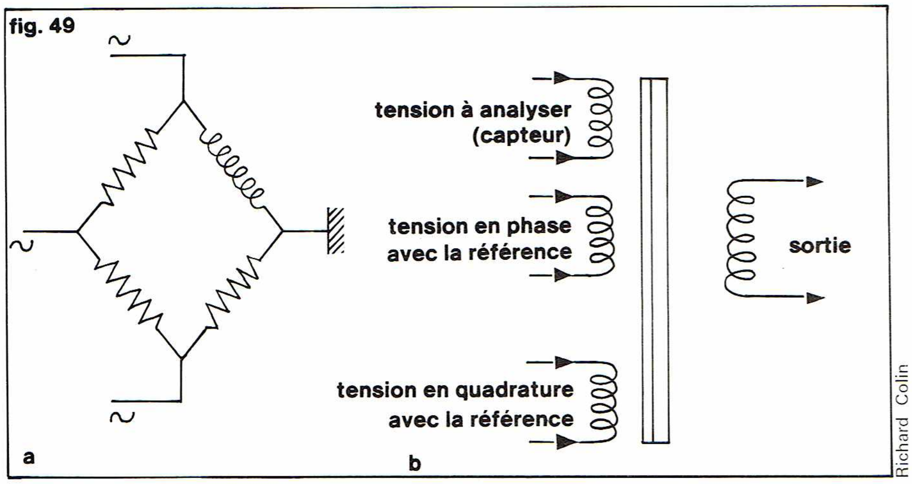

▲ *Figure 49 : systèmes de mesure des appareils à courants de Foucault ; a, montage en pont équilibré ; b, circuit magnétique à enroulements multiples.*

Mise en œuvre de la magnétoscopie

La première étape consiste à magnétiser l'objet que l'on veut contrôler. Selon les dimensions et la géométrie de celui-ci, on emploie des appareils fixes ou mobiles. Dans tous les cas, la pièce est serrée entre deux masses polaires qui créent un champ magnétique suivant l'axe qui les relie. On détectera uniquement les défauts perpendiculaires au champ magnétique, ceux qui sont parallèles aux lignes de forces n'introduisant pas de modifications notables. Par conséquent, il est souvent nécessaire de créer un champ perpendiculaire au premier pour déceler les anomalies d'orientations différentes.

La poudre magnétique est déposée soit par pulvérisation, soit par application d'un liquide où les particules sont en suspension. L'examen est souvent facilité par l'usage de produits fluorescents.

Possibilités et limites de la magnétoscopie

La magnétoscopie est une méthode très simple, peu coûteuse, qui est couramment employée dans l'industrie pour le contrôle de pièces de géométrie simple (arbres, barres laminées, etc.), pour l'examen de soudures, etc. C'est, comme le ressuage, une technique sensible aux défauts débouchant en surface mais qui permet de déceler des défauts situés à une profondeur qui peut aller jusqu'à 10 à 15 mm.

Ce procédé est limité bien entendu aux matériaux magnétiques. De plus, comme le ressuage, il ne donne pas d'indications quantitatives précises sur les défauts décelés.

Méthodes diverses

Nous passerons en revue dans ce chapitre des techniques dont les domaines d'application sont plus restreints

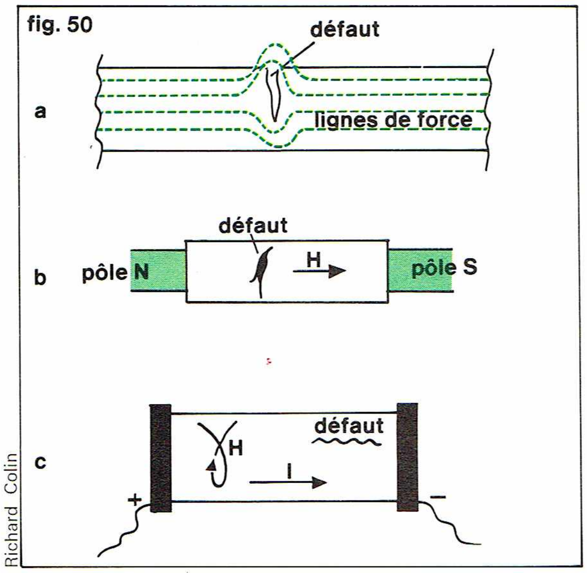

▶ *Figure 50 : détection des défauts d'une pièce par magnétoscopie ; a, répartition des lignes de force dans un matériau magnétique ; b, appareil fixe à pôles ; c, appareil fixe à circulation de courant.*

ou qui n'ont pas encore connu le développement industriel des méthodes classiques.

Émission acoustique

Lorsqu'un matériau est soumis à une contrainte et qu'il se produit en son sein une transformation irréversible, il émet des ondes élastiques, de très faible amplitude en général, qui peuvent être détectées par un dispositif approprié. C'est ce qu'on appelle l'*émission acoustique*.

L'apparition et la propagation d'un défaut dans une structure correspondent bien à une transformation irréversible et donnent donc lieu à émission acoustique, mais ce ne sont pas les seules sources possibles : la déformation plastique, la transformation martensitique par exemple produisent aussi des ondes de contrainte.

Contrairement à l'ensemble des méthodes que nous avons étudiées dans ce qui précède, l'émission acoustique ne décèle que ce qui évolue au sein du matériau : c'est une méthode « active », par opposition aux méthodes « passives ». On voit donc l'intérêt de cette technique qui permet de surveiller l'état d'une structure pendant son utilisation.

Les signaux mécaniques sont recueillis par des capteurs piézo-électriques, fonctionnant généralement à leur résonance, semblables aux transducteurs ultrasonores ; ils sont ensuite amplifiés puis analysés. A l'heure actuelle, on ne sait pas relier les caractéristiques des ondes à la source émissive, donc à la nature du défaut, mais on a pu mettre en évidence la relation entre la densité de l'émission et le caractère de gravité de la progression du défaut. De plus, en disposant sur la pièce observée plusieurs capteurs et en mesurant les différences de temps d'arrivée d'un même signal à ces divers transducteurs, il est possible, par triangulation, de déterminer la position du défaut.

L'émission acoustique est actuellement employée pour l'examen en service de certaines structures (cuve de réacteur nucléaire, réacteur de pétrochimie, etc.). De nombreuses études sont actuellement en cours en France et à l'étranger pour améliorer la connaissance des phénomènes physiques mis en jeu ainsi que pour mettre au point des méthodes d'analyse qui permettent de tirer des informations qualitatives et quantitatives plus précises sur la nature des sources détectées, donc sur la nature des défauts qui se propagent.

Méthodes thermiques

Ces méthodes utilisent le fait qu'au sein d'un matériau une discontinuité perturbe la propagation d'un flux de chaleur. Le principe en est très simple : on chauffe une surface de la pièce à examiner et on relève la répartition des températures sur la face opposée. L'hétérogénéité éventuellement présente dans la pièce donne lieu à une anomalie de température.

La carte thermique est relevée soit grâce à un détecteur sensible au rayonnement infrarouge émis par la surface observée, soit par la variation de coloration de cristaux liquides (substances qui ont une structure analogue à celle des matériaux cristallins, laquelle se modifie en fonction de la température).

Ces techniques sont employées pour le contrôle de la qualité des collages, des soudures et de structures composites.

Autres méthodes

Il faudrait pour être complet citer : l'analyse des modes de vibrations d'une pièce qui donne des indications sur l'existence éventuelle de défauts ; les méthodes utilisant les variations de résistivité d'un matériau (techniques employées lors d'un essai de fatigue pour suivre la progression de la fissure), les techniques holographiques, etc. Toutes ces méthodes et bien d'autres sont employées soit au laboratoire, soit dans l'industrie pour résoudre des problèmes de contrôle particuliers.

BIBLIOGRAPHIE

CHRÉTIEN J.-F., *Cours de contrôle non destructif*, U. T. C. - PIGNET J.-L., *Méthodes non destructives pour l'étude et le contrôle des matériaux*, Éditions de la *Revue d'optique*, 1957. - *Initiation à la radiographie industrielle*, Kodak Pathé. - *Non Destructive Testing Handbook*, Edited by R. C. Mc Master, Ronald Press Company.

INFORMATIQUE

Histoire de l'ordinateur

C'est avec l'invention de la notation indo-arabe que débute le calcul numérique. Dans la plus haute antiquité, les Indiens, les Incas, les Babyloniens, les Grecs et les Romains utilisaient des abaques. L'emploi de galets pour garder la trace de l'information est indiqué dans l'étymologie du mot *calcul* provenant de *calcis* (calcaire) et *calculus* (petit morceau de caillou dont on se sert pour compter). Les Grecs appelaient *abax* la pierre plate sur laquelle ils disposaient les cailloux, ce qui a donné le mot *abaque* en français.

Les abaques furent progressivement remplacés par les bouliers, utilisés en Chine à partir du Ve siècle avant Jésus-Christ. Les bergers du Pérou utilisaient, eux, un *quipu,* longue cordelette nouée, pour compter leurs troupeaux. Grâce aux fils attachés à la cordelette, teintés de couleurs différentes, entrelacés en des nœuds variés selon des règles à signification précise, le berger pouvait compter et mémoriser certaines informations.

Vers l'an 825, Abu Abdallah Muh Ibn Musa Al Khwarizmi écrit les fondements d'une arithmétique. Celle-ci sera traduite en latin vers le XIIe siècle. Du nom de son auteur dérive le mot *algorithme,* très utilisé en informatique moderne.

Il faut attendre 1617 pour que le mathématicien écossais John Napier, qui invente les logarithmes et rend systématique l'utilisation du point décimal pour séparer la partie fractionnaire de la partie entière d'un nombre, montre comment effectuer de façon automatique les multiplications et les divisions.

En 1642, pour aider son père, intendant des Finances, Blaise Pascal conçoit une machine à additionner utilisant un système de roues dentées. Chaque roue comporte dix positions marquant les chiffres de 0 à 9 et un ergot. Celui-ci avance automatiquement la roue immédiatement à gauche, chaque fois que la roue concernée passe de 9 à 0. Ce principe permet la propagation des retenues. La soustraction est rendue possible par une méthode analogue.

En 1671, Leibniz améliore la machine de Pascal, en la dotant de la multiplication et de la possibilité d'extraire les racines carrées. La multiplication est faite par additions successives. (Les ordinateurs modernes utilisent encore un dispositif analogue.) L'ensemble des travaux de Leibniz fait progresser la rigueur dans la science mathématique. Il entreprend une synthétisation en créant un langage universel de formalisation et une algèbre de raisonnement. Il montre les avantages de la numération binaire par rapport à la numération décimale dans les automatismes.

Comme Jacquard au XVIIe siècle, Basile Bouchon, au début du XVIIIe, s'inspirant des orgues de Barbarie commandées par des cylindres à pivots, schématise une

Archives Snark

▲ *Document ancien représentant un Péruvien muni d'un quipu, ensemble de cordelettes permettant de compter les troupeaux (Bibliothèque nationale, Paris).*

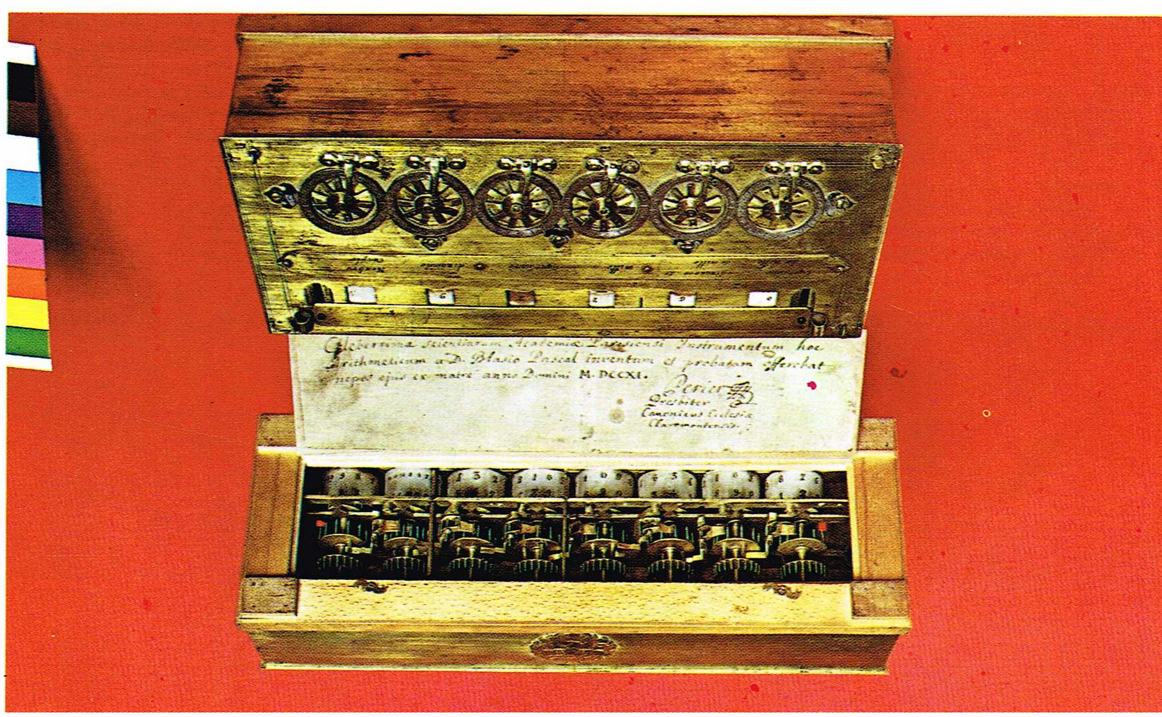

Archives Snark

◀ *La machine à calculer conçue en 1642 par Pascal pour aider son père qui était intendant des Finances (Conservatoire national des Arts et Métiers, Paris).*

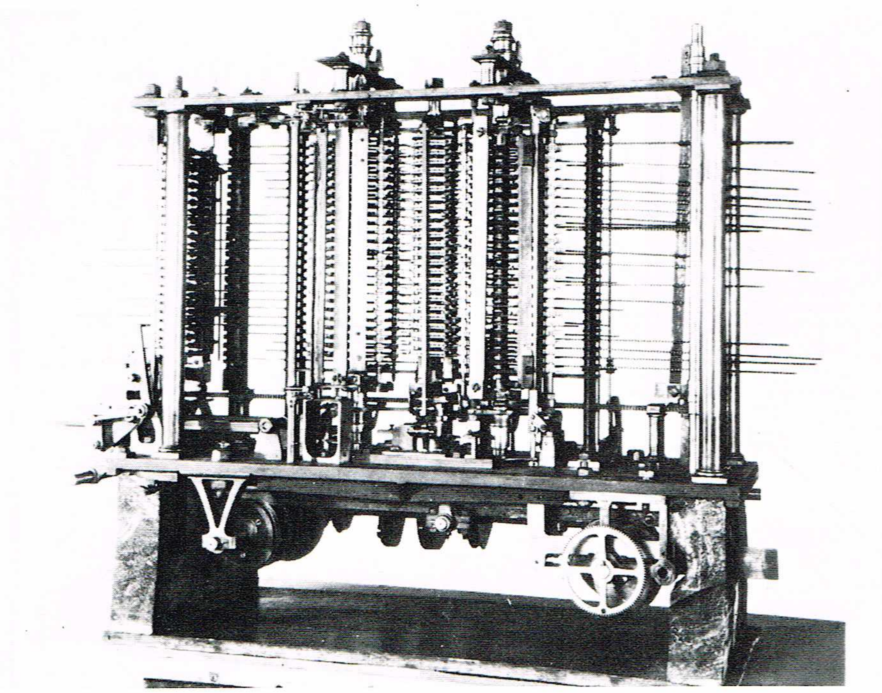

IBM

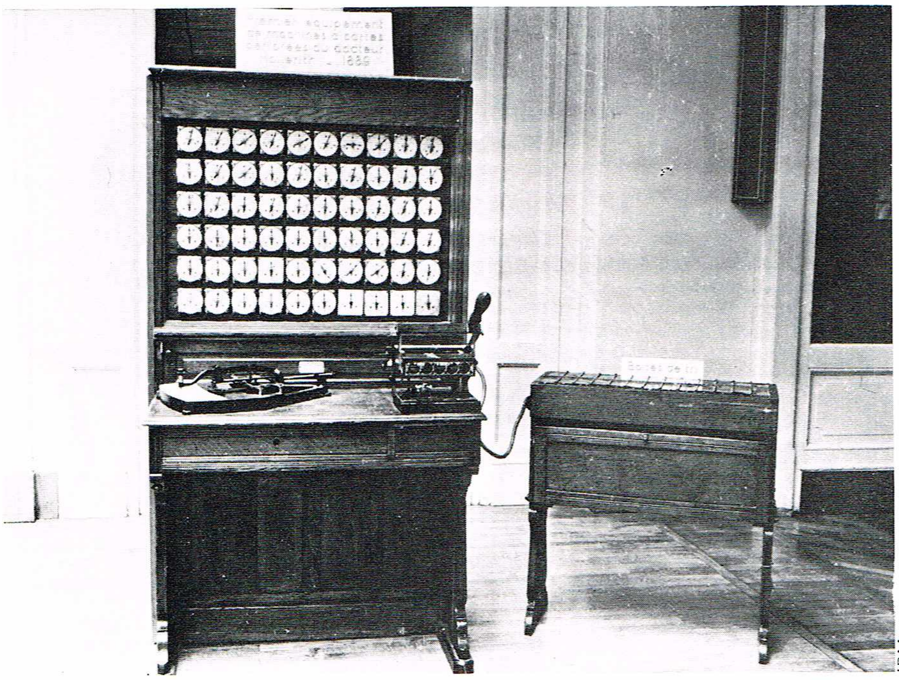

IBM

▲ *En haut, la machine analytique de Charles Babbage (1792-1871). Ci-dessus, une des machines électromécaniques à calculer de Hollerith (1860-1929) ; elle utilisait des cartes perforées selon un code dit* **code Hollerith** *; les résultats étaient restitués en langage clair (1882).*

commande des fils de chaîne d'un métier à tisser par l'intermédiaire d'une carte perforée.

C'est à partir de bandes perforées, ou d'autres mécanismes ingénieux d'engrenages, de cames d'entraînement divers, que Jacques de Vaucanson réalise de célèbres automates.

Puis Charles Babbage, en 1833, marie les innovations de Jacquard et de Pascal et propose sa machine analytique : *analytical engine*. Il pense qu'il est inutile d'augmenter les performances des machines mécaniques, tant que les opérations ne peuvent être enchaînées de façon automatique. Pour cela, il invente une machine utilisant deux jeux de cartes perforées : l'un contient les données à traiter, l'autre la suite des opérations à effectuer ; l'automate lit la commande, l'exécute, et continue en lisant la commande suivante. Cette machine ne fut en fait jamais réalisée pratiquement, à cause du retard de la technologie du moment sur les idées de Babbage. Cependant, les derniers plans retrouvés montrent une structure logique très peu différente de celle des calculateurs d'aujourd'hui. La machine se compose de trois parties : une mémoire pouvant contenir mille mots de cinquante positions binaires, un organe de calcul et une unité de commande. Babbage fut aidé dans ses travaux par lady Lovelace, fille de lord Byron, qui écrivit toute une série de programmes pour ces machines. Babbage est également connu pour deux progrès importants : le transfert conditionnel permet à la machine de ne pas exécuter obligatoirement les instructions qui suivent lorsque certaines conditions sont réalisées dans les traitements précédents ; la machine peut modifier les nombres et les instructions qu'elle possède en mémoire. Il lance également les idées de programme enregistré, de sous-programme, qui ne seront utilisées que vers 1940. Il reconnaît enfin l'importance de l'impression des résultats, et l'utilité des organes d'entrées-sorties.

Pendant ce temps, des mathématiciens, comme Gauss, créent des méthodes mathématiques qui vont se trouver adaptées aux machines à calculer. Boole et de Morgan édifient les fondements de la logique moderne.

Barbour imagine en 1870 le premier dispositif d'impression de chiffres sur papier à partir de la machine. Vers 1875, Boudot invente les premiers codes opérationnels binaires permettant une transmission plus rapide en télégraphique électrique ; ces codes sont encore en usage à l'heure actuelle. En 1885, Hollerith réalise la première machine électromécanique fonctionnant réellement. Utilisant un principe analogue à celle de Babbage, mais moins complexe cependant, elle travaille à partir de cartes perforées. Ces cartes sont encore un support privilégié des informations, et le code utilisé pour y représenter les données s'appelle *code Hollerith*.

C'est en 1936 que Turing formule une définition des machines automatiques et élabore le modèle mathématique d'un calculateur universel capable d'effectuer tous les traitements exécutables par une machine automatique. L'influence des automates de Turing se fait sentir dans la théorie des langages ; les grammaires formelles utilisent ces concepts. En 1951, Markov systématise le concept d'algorithme. Quelques années plus tard, Detlovsk définit les fonctions récursives et calculables. Les travaux théoriques permettront la conception de grammaires, langages et compilateurs.

Cependant, de 1936 à 1939, les Américains Howard Aiken et Georges Stibitz mettent au point un calculateur automatique fonctionnant avec des relais mécaniques. Ils réalisent les idées de Babbage sur le calcul automatique, tant pour le stockage mécanique des informations que pour les instructions permettant la rupture de séquence

▼ *Le calculateur électronique MARK I conçu et construit par Aiken et IBM en 1942-1943 ; cette machine longue de 15 m, large de 2,4 m pouvait effectuer des additions, soustractions, multiplications et divisions.*

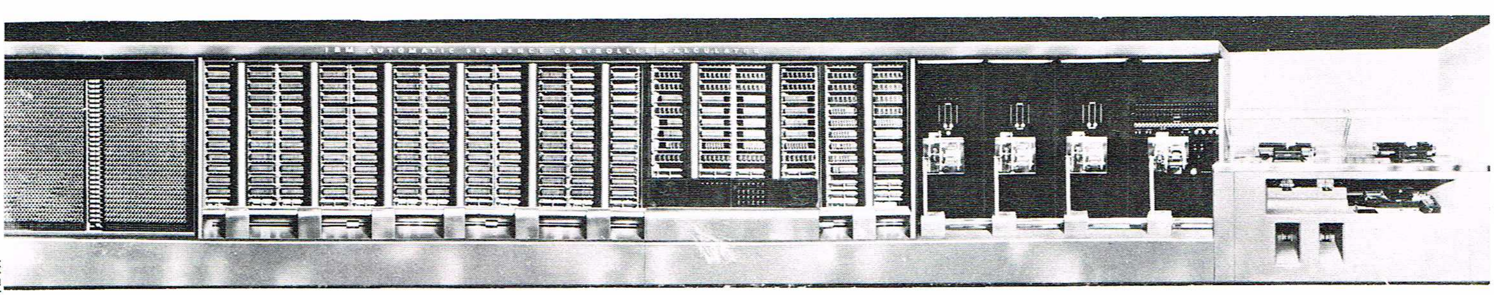

IBM

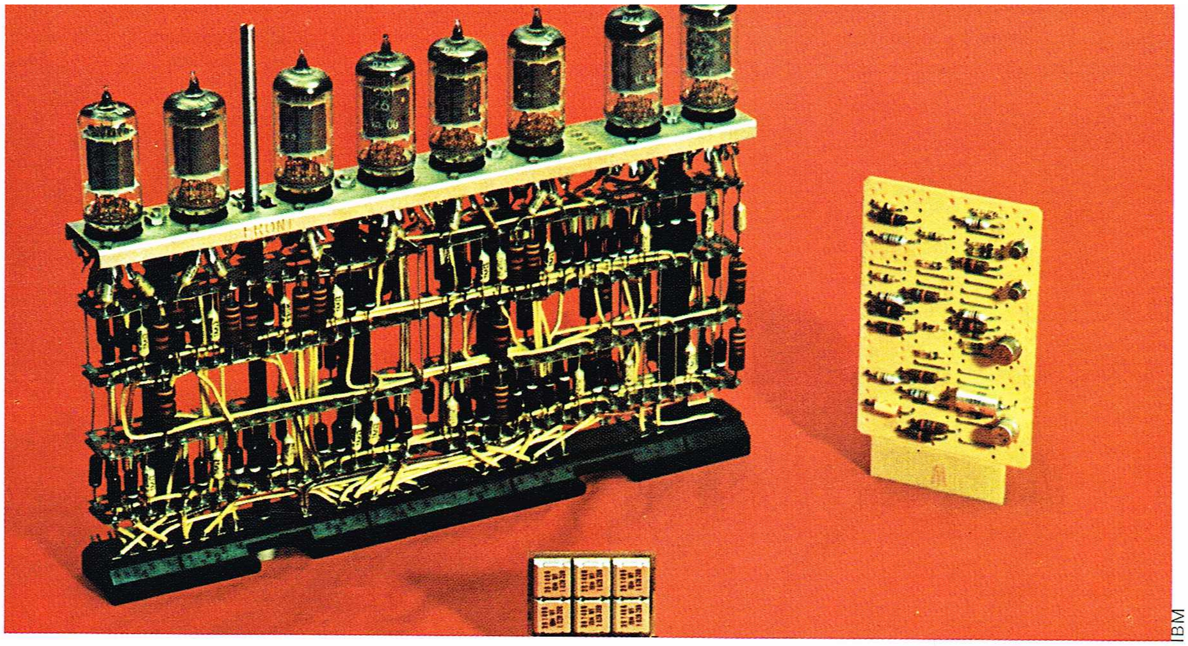

◀ *Évolution des technologies utilisées en informatique : en haut à gauche, la première génération avec l'emploi des tubes ; en haut à droite, la deuxième génération avec l'utilisation des cartes transistorisées (circuits imprimés) ; au milieu, la troisième génération avec les cartes assemblages de micromodules (circuits intégrés) ; tout en bas, la quatrième génération avec les cartes micromodules et microplaquettes de silicium (circuits monolithiques) ; on peut observer la miniaturisation progressive des composants.*

conditionnelle des instructions. Le calculateur électronique MARK I a été conçu et construit par Aiken avec l'aide d'IBM, le plus important des constructeurs d'ordinateurs actuels. Cette machine de 15 m de long et 2,4 m de large était capable d'effectuer les additions, soustractions, multiplications et divisions ; elle faisait référence à des tables. Les entrées étaient faites à partir de cartes perforées. Les résultats étaient édités sur imprimante ou sur cartes perforées. L'ENIAC (Electronic Numerical Integration and Calculator) est construite en 1944 par Eckert et Mauchly à la Moore School de l'université de Pennsylvanie pour effectuer des calculs de tables balistiques. Mille fois plus rapide que la machine précédente, elle est constituée de 18 000 tubes électroniques, dissipe 150 kW et pèse trente tonnes. A titre de comparaison, une machine à calculer actuelle de même puissance, HP 55, mesure quelques centimètres de long, tient dans la poche et pèse une centaine de grammes.

A partir de 1957, von Neumann, qui avait travaillé avec l'équipe précédente à la construction d'ENIAC, développe une méthode pour convertir le principe de programme externe en programme enregistré. Les machines possèdent déjà des mémoires permettant de conserver des résultats partiels réutilisables ; von Neumann a l'idée de s'en servir pour enregistrer les séquences d'instructions. Pour exécuter un programme, la machine doit commencer par introduire le programme dans la mémoire avant de lancer l'exécution des opérations. Ce progrès permet de ne plus avoir recours à une opération manuelle lors d'une série de décision. A partir de la valeur calculée d'une expression, la machine exécute telle ou telle partie de programme, tel traitement spécial.

A partir de 1946, plusieurs machines ont été élaborées à partir de ces principes. Après l'EDVAC, Goldstine et von Neumann créent l'IAS, ou machine de Princetown, caractérisée par son arithmétique parallèle et sa programmation à une seule adresse. Le Whirlwind 1 du MIT (Massachusetts Institute of Technology) a fonctionné tout d'abord avec des mémoires électrostatiques, puis a reçu des mémoires magnétiques. Plus tard, Williams invente une nouvelle mémoire : le tube à rayon cathodique.

Dès lors, l'informatique est sortie de sa préhistoire et entre dans une phase de développement rapide que nous verrons plus en détail dans les chapitres suivants.

Évolution de la technologie des ordinateurs

L'évolution des différentes technologies utilisées en informatique s'est faite en quatre temps.

La **première génération** correspond à l'emploi de *tubes électroniques* de types diode et triode et de *tambours magnétiques* comme supports de mémoires. Elle correspond à l'apparition des machines à programme enregistré, supplantant les machines à relais, programmés à partir de tableaux de connexion à la manière des standards téléphoniques. Ces machines étaient encore très encombrantes et consommaient beaucoup d'énergie. A leurs débuts, elles n'eurent guère de succès, car elles coûtaient très cher et étaient peu puissantes. Leur intérêt s'accrut quand apparut la possibilité d'enregistrer les fichiers sur des organes externes autres que les cartes perforées ; en effet, les gros fichiers utilisés dans les entreprises prennent une place considérable et sont difficiles à manipuler s'ils sont conservés sur ce support. L'avènement des *bandes magnétiques,* plus souples et permettant une meilleure utilisation du volume disponible, a favorisé l'essor de l'informatique naissante. Comme les opérations de lecture-écriture étaient ainsi plus rapides, il fallut augmenter les performances des machines.

L'apparition des *transistors* et des *circuits imprimés* inaugure la **seconde génération** d'ordinateurs. Un transistor est un petit parallélépipède de silicium de moins d'un centimètre de côté et de 150 microns d'épaisseur. Les transistors sont montés dans des boîtiers et sont assemblés avec les autres composants sur des plaquettes de quelques dizaines de centimètres de côté. L'intérêt de cette évolution est double. Le volume et la consommation énergétique des machines diminuent considérablement. De plus, la fiabilité des calculateurs est grandement améliorée.

Une évolution s'est produite en même temps dans un autre domaine : le *software* ou *logiciel.* Les langages évolués se développent, rendant l'usage de la machine plus aisé pour l'homme. L'utilisation des disques magnétiques et des bandes magnétiques se généralise. Toutefois, les entreprises n'emploient encore l'ordinateur que comme une machine comptable perfectionnée.

Les ordinateurs de la **troisième génération** se répandent vers 1964. Ils révolutionnent la conception du traitement de l'information. La technologie de *miniaturisation* des circuits améliore les performances de l'unité centrale. Les *circuits intégrés* remplacent les transistors. Sur un circuit intégré de la taille d'un transistor, on peut loger des dizaines de composants élémentaires. Le développement des canaux et d'accessoires intermédiaires entre l'unité centrale et les périphériques améliore les performances de l'ensemble. La carte perforée marque le pas devant une grande variété de périphériques et de moyens de saisie de l'information. L'emploi généralisé de mémoires à accès aléatoire (disques) permet le travail simultané sur plusieurs fichiers, donc une plus grande souplesse de programmation. Parallèlement, le développement du logiciel se poursuit. Des langages évolués très puissants sont créés. Des sytèmes d'exploitation plus souples et mieux adaptés contribuent à une meilleure utilisation de l'ordinateur. Le *traitement à distance* de données (ou télétraitement) apparait à cette époque.

La **quatrième génération** fait son apparition vers 1970. Il ne s'agit pas d'une révolution, mais d'un tournant de l'histoire de l'informatique. Le logiciel reste celui de la génération précédente. La technologie de miniaturisation permet la mise en œuvre de *circuits monolithiques.* Ces circuits sont réalisés à partir d'une plaquette d'un métal conducteur du type silicium. Les diodes, les transistors et les autres composants élémentaires sont réalisés par l'introduction judicieuse de différentes impuretés. Ces circuits sont utilisés pour faire des mémoires et des unités centrales. Leur faible coût et la possibilité de programmer ces circuits monolithiques ouvrent un champ d'applications immense à la micro-informatique. Une tendance se dessine, remplaçant l'informatique centralisée à l'aide d'une seule grosse machine par une informatique répartie, permettant des traitements locaux sur de petits ordinateurs à faible prix de revient.

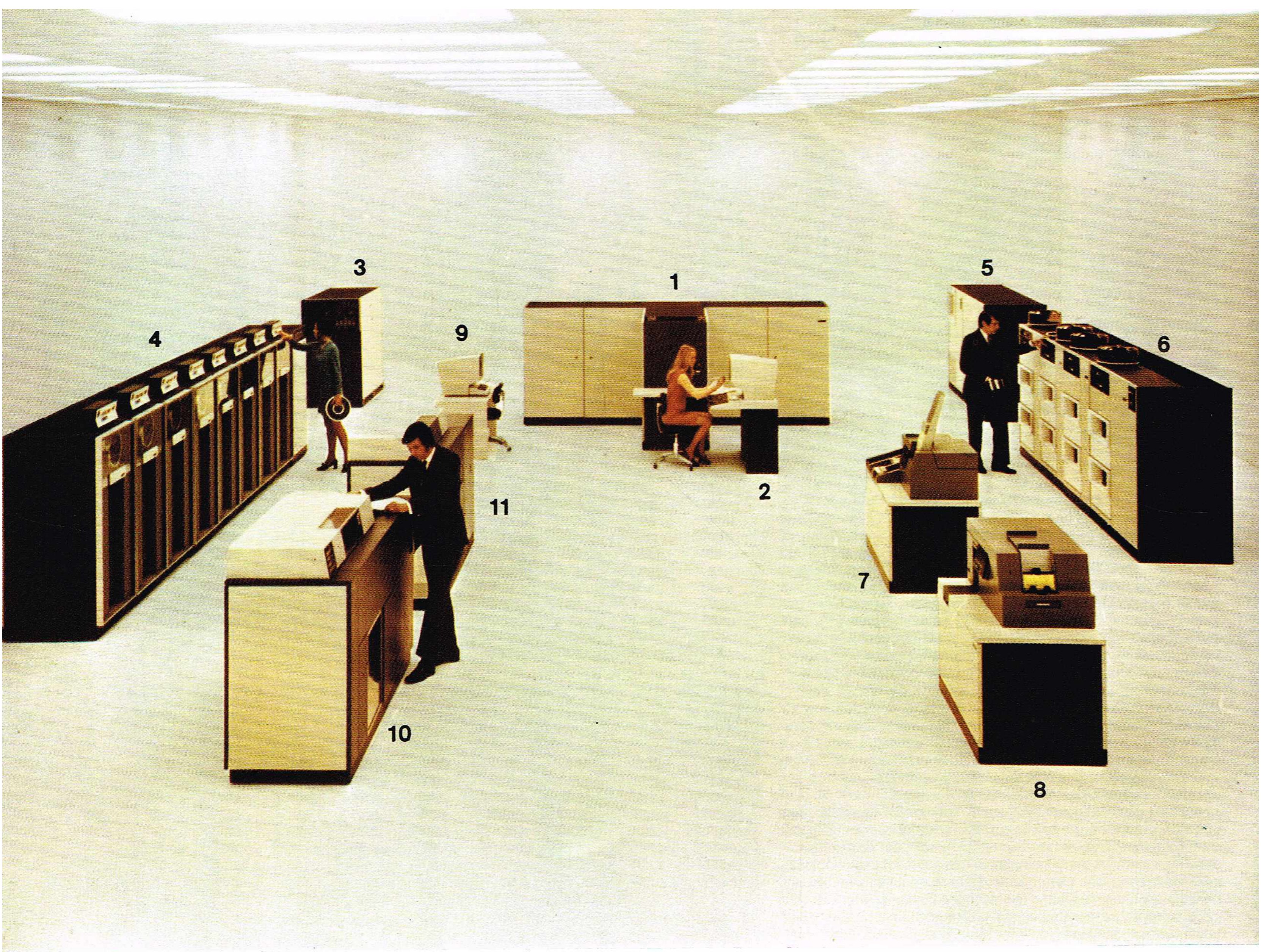

IBM

▲ *Vue d'ensemble de l'ordinateur IBM 370 modèle 158, ordinateur de la quatrième génération bénéficiant de la technologie avancée des circuits monolithiques. On peut reconnaître les différentes parties de l'ordinateur : 1, unité et mémoire centrales ; 2, console maîtresse à écran et imprimante de l'opérateur ; 3, unité de contrôle de communications ; 4, dérouleur de bandes magnétiques ; 5, unité de disques à têtes fixes ; 6, unité de disques mobiles ; 7, lecteur de cartes ; 8, perforateur de cartes ; 9, écran cathodique ; 10 et 11, imprimantes.*

Structure d'un calculateur

Présentation générale

Selon leur constructeur et leur utilisation, les ordinateurs possèdent des apparences très différentes. L'immense machine, dans une salle entièrement climatisée, entourée de l'armée de ses *périphériques*, fait de la gestion toute la journée. Une équipe d'opérateurs spécialisés lui communique des masses d'informations sous forme de cartes perforées, de bandes magnétiques. Les imprimantes rapides crachent leurs flots de factures, bordereaux et états divers. A l'opposé, un petit calculateur, isolé dans un coin d'un atelier, régit, sans défaillance, le procédé industriel qu'il est chargé de surveiller, écrivant de temps à autre un compte rendu de l'état de la manipulation. Ses sens sont des thermocouples, des manomètres ou d'autres appareils de mesure.

Sous leurs divers aspects, les ordinateurs ont en commun une structure interne analogue. Leur mémoire centrale contient les instructions à exécuter et les informations qu'ils seront chargés de manipuler. L'unité centrale est chargée de coordonner les différentes actions de la machine ; c'est elle qui sait compter, prendre les décisions. Les communications avec le monde extérieur se font par l'intermédiaire des unités d'échange (ou d'entrées-sorties) ; chacune de ces unités est spécialisée pour pouvoir prendre en compte les informations que lui délivre l'appareil qui lui est attaché, le périphérique.

La *mémoire centrale* se comporte, d'un point de vue logique, comme une commode possédant de nombreux tiroirs. Chacun de ces tiroirs, ou mots, contient une information qui peut être ou bien une instruction pour la machine, ou bien une donnée destinée à être traitée. La taille d'un ordinateur est évaluée à partir du nombre de ces mots. Les petites machines possèdent en général au moins 4 000 mots, les plus grosses en ayant plusieurs millions.

L'*unité centrale* se décompose en deux organes principaux : l'unité de commande et l'unité arithmétique et logique. Cette dernière est capable d'effectuer très vite une grande variété d'opérations (arithmétiques ou logiques). Il est cependant nécessaire de lui désigner l'instruction à exécuter ainsi que les opérandes. C'est l'unité de commande qui est chargée de ces fonctions. Elle lit dans la mémoire centrale l'ordre et les données et les transmet. Éventuellement, elle range le résultat obtenu dans le mot qui doit le contenir. On obtient alors le schéma de la *figure* 1.

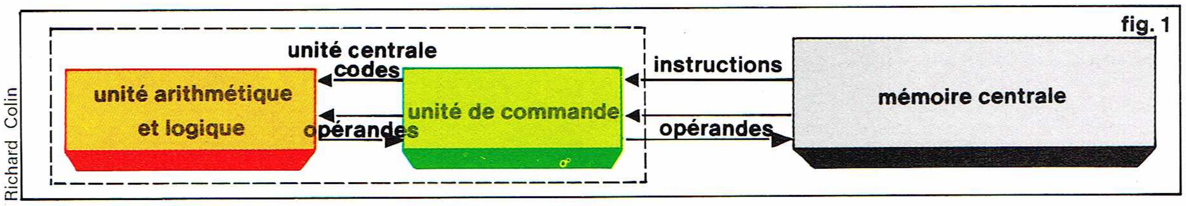

▶ *Figure 1 : schéma synoptique de la mémoire centrale et de l'unité centrale d'un ordinateur.*

Ainsi définie, la machine est capable d'exécuter un programme préalablement rangé dans sa mémoire et de traiter les informations qui y sont enregistrées. Cependant, sa puissance est très limitée. C'est pourquoi elle dispose en plus d'*unités d'échange* ayant deux fonctions principales. La première consiste à augmenter la taille de stockage disponible par la gestion de liaison avec des mémoires auxiliaires (disques, bandes magnétiques, feuillets, etc.) dont la capacité est très supérieure à celle de la mémoire centrale. Cependant, le temps d'accès à l'information est augmenté. La seconde fonction des unités d'échange est de permettre une communication avec le monde extérieur et, en particulier, avec l'être humain. C'est par elles que transiteront les informations lues sur des cartes perforées et les lignes à imprimer.

A la lumière de ce qui précède, un ordinateur peut être défini comme étant constitué de plusieurs unités coopérant dans le dessein d'exécuter le programme contenu dans la mémoire centrale. L'unité de commande contrôle l'exécution des instructions correspondantes. Elle active l'unité arithmétique et logique ou une unité d'échange, suivant qu'il s'agit d'une opération de calcul ou d'un transfert d'information. Dans les chapitres suivants, nous détaillerons plus particulièrement le rôle de chacun de ces composants.

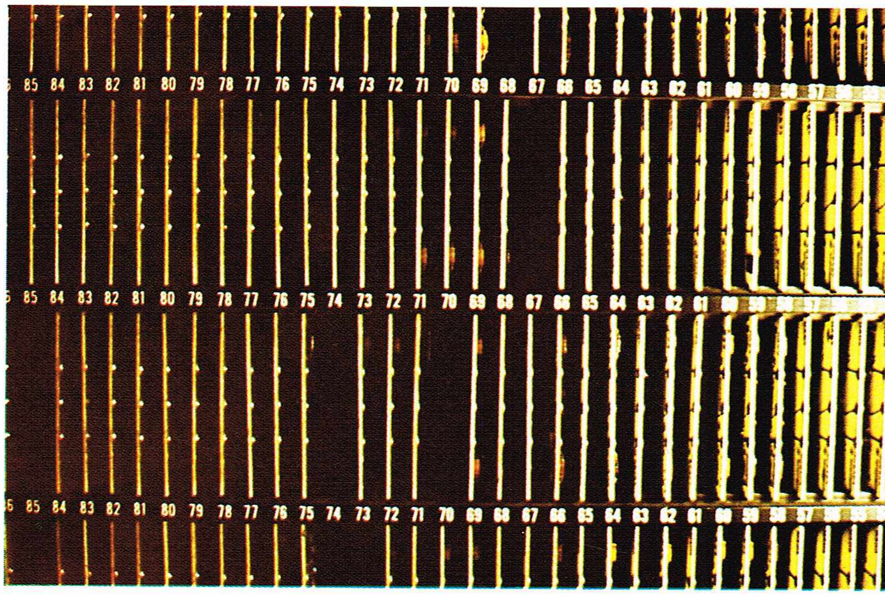

Centre interdisciplinaire régional de calcul électronique d'Orsay - Centre national de la recherche scientifique

▲ ***Carte des circuits logiques d'un ordinateur CDC 3600.***

Les instructions de la machine

Représentation des données

Lorsque l'on écrit un nombre, par exemple 2 141, tout le monde comprend qu'il s'agit de représenter 1 unité plus 4 dizaines plus 1 centaine plus deux milliers. L'habitude et les conventions veulent que le chiffre de droite représente le nombre d'unités, le suivant le nombre de dizaines, plus le nombre de dizaines de dizaines, etc.; on peut voir ainsi le rôle important de la dizaine : on dira que l'on compte en base dix. Dans ce cas, il est nécessaire, pour écrire les nombres, de disposer d'un alphabet de dix symboles qui sont les chiffres de 0 à 9. Avec la technologie actuelle, il est plus facile de coder deux symboles seulement, c'est pourquoi, dans la machine, on ne disposera que de deux chiffres : 0 et 1. Par exemple, 0 correspondra à une absence de courant électrique et 1 à sa présence. Les nombres que l'on écrira ne seront donc qu'une suite de 0 et de 1. Le chiffre de droite comptera les unités, le suivant le nombre de couples, puis le nombre de couples de couples, etc. Le nombre binaire 1101 sera l'équivalent du nombre décimal :

$$1 \times 1 + 0 \times 2 + 1 \times 2 \times 2 + 1 \times 2 \times 2 \times 2 = 13.$$

Un chiffre binaire s'appelle couramment *bit* (abréviation de *binary digit* qui signifie chiffre binaire). Le nombre 1011 s'écrit donc à l'aide de 4 bits. Les nombres manipulés par la machine, ainsi que le codage des instructions, consistent donc en une succession de 0 et de 1.

Le risque d'erreur et la difficulté de compréhension inhérents à ce code font que les programmeurs utilisent plus généralement deux autres systèmes de numération. Prenons par exemple un nombre binaire d'une longueur de 12 digits : 101001100010. Les adeptes du système octal liraient ce nombre par tranches de 3 bits. Or, à l'aide de 3 bits, il est possible de coder les chiffres allant de 000 à 111, soit 8 chiffres. Le système octal utilise la base 8, et les symboles utilisés sont les chiffres de 0 à 7. Le nombre donné en exemple s'écrirait donc dans ce système 5142, qui est plus facile à manipuler. Une deuxième manière de procéder consiste à regrouper les bits par paquets de 4. Il faut donc disposer de 16 symboles pour pouvoir les coder. On se servira alors des dix chiffres arabes et des lettres A à F. 0 correspondra à « 0000 », 1 à « 0001 », ..., et 9 à « 1001 », puis A à « 1010 », B à « 1011 », jusqu'à F mis pour « 1111 ».

Dans la mémoire centrale d'un calculateur, les bits sont regroupés en mots. La longueur d'un mot reste constante pour une machine donnée, mais elle varie d'un constructeur à l'autre et parfois même d'un modèle à l'autre. Ainsi, chez IBM, les séries 360 et 370 sont dotées de mots de 32 bits. Chez Digital Equipment, les mots du PDP8 ont une longueur de 12 bits, ceux du PDP11 de 16 et ceux du PDP20 de 36. Les machines de Control Data possèdent des mots de 60 bits et celles de Burroughs 55. Tout en conservant la structure du mot, certains ordinateurs ont des instructions permettant de travailler sur un octet, regroupement de 8 bits. Les mots des IBM 360 et 370 sont divisés en quatre octets adressables, et ceux du PDP11 en deux.

Les données manipulées par un ordinateur sont de trois types : il s'agit des nombres entiers, des nombres réels et des caractères. D'autres types plus compliqués existent (complexes, tableaux, structures), mais sont ramenés pour le traitement à ces catégories. Examinons les représentations qui leur correspondent.

Les *nombres entiers positifs* sont représentés en base binaire comme nous venons de le voir, en général sur un mot. Pour coder les nombres négatifs, il faut de plus indiquer le signe; que l'on utilise ou non le codage par complémentation (à 1 ou à 2), l'entier relatif est défini du point de vue logique comme suit : 1 bit de signe plus le reste du mot pour coder la valeur absolue.

Les *nombres réels* sont codés en trois parties. Le bit de signe est toujours présent. Le reste du mot est séparé en la mantisse *m* d'une part et l'exposant *e* d'autre part. Le nombre codé se lira alors : signe $m \times 2^e$. Ainsi, 1 sera codé par : le signe plus, la mantisse 0,1 et l'exposant 1, et devra être lu comme : $+ 0{,}1 \times 2^1$ (0,1 en langage binaire représente la fraction 1/2; 0,01 représente 1/4, etc.).

En fait, l'exposant indique la position réelle de la virgule dans la mantisse et numérote le nombre de bits dont il faut la décaler pour avoir la valeur vraie. Ainsi, en décalant une fois 0,1, on obtient bien 1. Pour augmenter la précision des nombres manipulés, on peut coder la mantisse sur plusieurs mots. On a ainsi une double, triple précision. Certains ordinateurs disposent d'instructions permettant d'opérer en précision multiple. Quand ce n'est pas le cas, le programmeur doit écrire les modules permettant d'effectuer ces opérations. Les constructeurs fournissent en général ces modules avec la machine.

Certains ordinateurs ont aussi la possibilité de travailler à partir d'une autre nature de nombres, qui sont représentés en décimal codé binaire (BCD pour « Binary Coded Decimal »). Chaque chiffre est codé en quatre positions binaires, et les combinaisons restantes servent de signe ou sont des erreurs. Les opérations sont alors faites directement dans cette représentation ou après conversion en binaire naturel.

La manipulation de *caractères* se fait à partir de différents codages qui dépendent en grande part des périphériques utilisés. Ainsi, pour qu'une imprimante écrive le caractère « A », il faut que l'ordinateur lui envoie une séquence de bits qui représente par convention cette lettre. Les codes les plus couramment utilisés en machine sont : EBCDIC (« Extended Binary Coded Decimal Interchange Code ») et ASCII « American Standard Code for Information Interchange »). Le premier utilise 8 bits, le second 7 (et même 6 si l'on élimine les lettres minuscules). Le jeu de caractères qu'ils servent à décrire comporte à peu près 90 signes : 26 lettres majuscules et autant de minuscules, 10 chiffres et 25 symboles divers environ [+ — = <, > ( ), etc.].

▶ *Figure 2 : les quatre informations nécessaires à l'exécution d'une instruction de traitement dans un ordinateur.*

code opération	adresse 1er opérande	adresse 2e opérande	adresse du résultat

fig. 2

Richard Colin

Dans les machines utilisant un code à 8 bits, la structure d'octets facilite le traitement de caractères (IBM, PDP11, etc.).

Les instructions et leur déroulement

Parmi tous les mots de la mémoire, certains ont des propriétés particulières : ce sont les *registres*. Ils servent à repérer l'instruction à exécuter, à transférer les informations aux périphériques, ils servent d'indexation et sont le siège des opérations arithmétiques et logiques. Ils permettent aussi la communication de mémoire à mémoire. Lorsqu'ils cumulent ces fonctions, on les appelle registres banalisés. Actuellement, les opérations portant directement sur les mots de mémoire se développent et les privilèges des registres sont moindres.

Les mots de la mémoire centrale sont repérés par leur *adresse*, qui se trouve être un nombre binaire. Lorsque le calculateur a terminé l'exécution d'une instruction située dans la mémoire à l'adresse A, par exemple, il enchaîne ensuite par l'exécution de l'instruction située à l'adresse A + 1, sauf dans le cas d'une rupture de séquence. On peut distinguer trois grandes familles d'instructions : les instructions de traitement qui permettent les opérations arithmétiques et logiques de mémoire à mémoire et les mouvements; les branchements, ou ruptures, qui sont utilisés pour indiquer que l'instruction à exécuter n'est pas la suivante en mémoire, mais doit être cherchée à l'adresse indiquée; les instructions d'entrées-sorties qui permettent les échanges entre le calculateur et ses périphériques.

▼ *Deux illustrations de la complexité des câblages à l'intérieur d'un ordinateur; la photo du haut montre le câblage de l'unité centrale d'un ordinateur UNIVAC.*

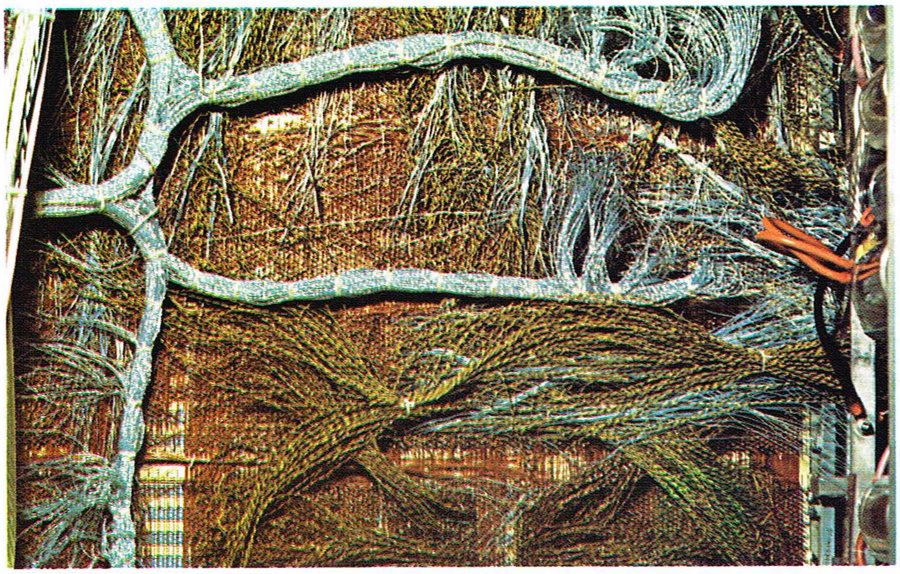

Niepce - Rapho

J. Ross - Rapho

Examinons tout d'abord une **instruction de traitement.** Pour être entièrement définie, elle nécessite quatre informations : le code de l'opération à effectuer, l'adresse du premier opérande, l'adresse du second et enfin l'adresse où stocker le résultat, comme on le voit *figure* 2. Le nombre total de bits nécessaire pour caractériser une instruction dépend donc du nombre d'opérations possibles et de la taille de la mémoire. Cependant, les trois adresses ne sont pas toujours précisées. Certaines machines considèrent implicitement que le résultat doit être rangé dans le second opérande. D'autres, ne disposant que d'un accumulateur, n'autorisent que les opérations entre ce registre et la mémoire et, dans ce cas, l'accumulateur jouera le rôle de second opérande et de résultat, il ne sera plus nécessaire que de préciser la seule adresse de l'opérande 1. La longueur d'une instruction machine peut être variable. En général, les machines à accumulateur ont une longueur d'instruction constante, ainsi que les machines à mots très longs.

Comment s'exécute une instruction de traitement? Dans l'unité de commande existe un registre nommé *compteur de programme* qui sert à viser constamment l'instruction à exécuter. Pour illustrer le raisonnement qui va suivre, nous allons créer une machine disposant d'un ensemble de 16 instructions possibles et d'une mémoire centrale de 16 mots de 4 bits. (Un tel calculateur aurait un intérêt bien faible !) Nous utiliserons la symbolisation hexadécimale (ou à base 16) qui caractérise un paquet de 4 bits par un seul symbole. Supposons qu'au moment d'exécuter l'instruction, le compteur de programme contienne 2. Nous allons chercher l'ordre à exécuter dans la cellule mémoire d'adresse 2. Imaginons que les mots de la mémoire qui nous intéressent contiennent

2	3	4	5	. . .	A	B	C
1	A	B	C	. . .	3	1	0

L'unité de commande va tout d'abord lire le contenu de l'adresse 2. La valeur 1 qui s'y trouve est le code de l'opération d'addition dans notre machine. Cette opération nécessite trois adresses d'opérandes. L'unité de commande va donc explorer l'adresse 3 pour y trouver l'adresse de l'opérande numéro 1. Il s'agit ici de A. Alors, le contenu de l'adresse A va être lu à son tour et communiqué à l'unité arithmétique qui dispose maintenant de son premier opérande, ici 3. La même procédure est exécutée par l'unité de commande pour le second opérande, qui est à l'adresse B et qui vaut 1. L'unité de commande ordonne alors à l'unité arithmétique d'effectuer l'addition de 3 et de 1. Celle-ci rend le résultat : 4. L'unité de commande va alors lire l'adresse de l'opérande numéro 3, à l'adresse 5, et trouve C. Le résultat obtenu 4 sera donc stocké à cet endroit, et la valeur 0 qui s'y trouvait sera définitivement perdue. Après cette instruction, le compteur de programme, qui a servi successivement à repérer les cases mémoire 2, 3, 4 et 5 au cours des différentes lectures en mémoire, contiendra la valeur 6. C'est à cette adresse que l'unité de commande ira chercher l'instruction suivante et le processus décrit recommencera.

Étudions maintenant les **instructions de branchement.** La rupture de séquence consiste à indiquer à l'ordinateur que l'on ne veut pas exécuter l'instruction suivante, mais une autre dont on donne l'adresse. Si 7 est le code de l'instruction de *branchement inconditionnel,* et D l'adresse de l'exécution prochaine à exécuter, nous aurons alors, si le compteur de programme contient 6 :

.	.	6	7	.	.
.	.	7	D	.	.

La procédure d'analyse et d'exécution de cette instruction sera comme suit. L'unité de commande ira lire en 6 le code de l'opération à effectuer, ici 7. L'adresse de l'opérande sera lue dans la cellule mémoire d'adresse 7 et sera

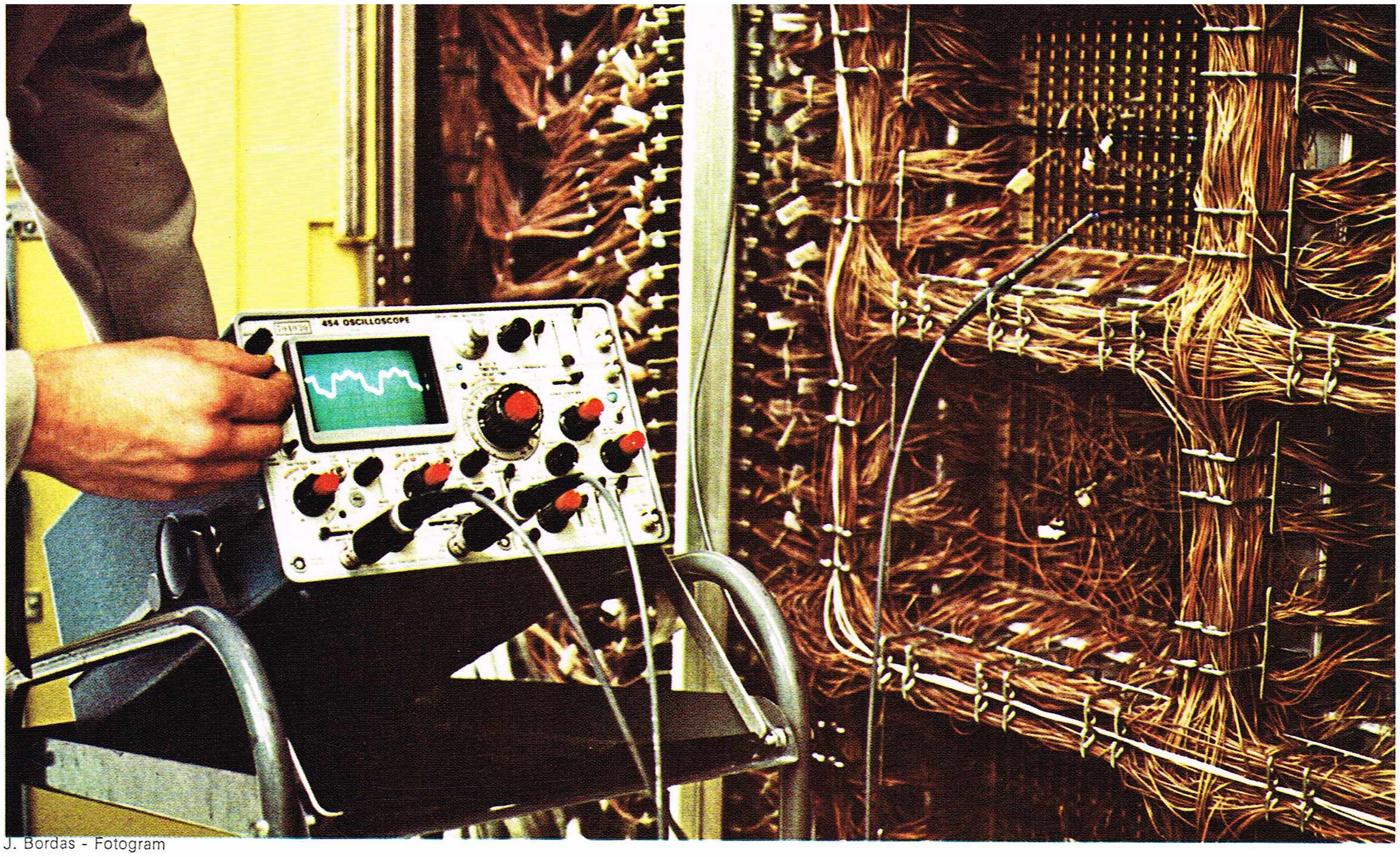

J. Bordas - Fotogram

▲ *Contrôle des circuits d'un ordinateur sur un oscilloscope.*

déposée dans le compteur de programme. L'instruction est terminée. Le compteur contient maintenant D, c'est-à-dire que cette adresse sera celle de l'instruction suivante.

Mais il n'existe pas uniquement des branchements inconditionnels. Les ruptures de séquences peuvent être faites *sous conditions*. En règle générale, il existe dans un ordinateur plusieurs bits qui sont positionnés au cours des instructions. Ce peuvent être : un bit de signe, qui indique que la quantité que nous venons de manipuler était positive ou négative, un bit de nullité pour indiquer si elle était ou non nulle, un bit de débordement de capacité qui est positionné lorsque le résultat d'une opération dépasse la capacité de sa zone de stockage, un bit de retenue, un bit de lien. Ces informations dépendent de la machine, elles n'existent pas toujours : ainsi les bits de signe et de nullité sont remplacés sur les machines à accumulateur par le signe et la nullité de l'accumulateur lui-même. La procédure d'exécution est analogue à celle que nous venons de décrire, mais l'adresse D n'est changée dans le registre compteur que si la condition est réalisée. Ainsi, au lieu du branchement inconditionnel, on aurait pu avoir :

6 7

8 D

où 8 est le code de l'opération : « si nul aller là ». Dans ce cas, le résultat de l'opération précédente (addition de 3 + 1) ayant donné 4 non nul, le chargement de D dans le compteur de programme n'aurait pas eu lieu et c'est en 8 que l'unité de commande aurait cherché l'instruction suivante.

Il peut être aussi intéressant de conserver l'adresse de l'instruction qui suit au moment d'un branchement, ce qui permettra de revenir poursuivre la séquence d'instructions interrompue. Nous arrivons ainsi à la notion de *sous-programme*. Ici, l'adresse de retour est rangée dans un registre particulier réservé à cet effet, ou dans un registre banalisé ou encore dans une position mémoire bien définie. On reviendra reprendre le programme interrompu par une instruction spéciale référençant l'endroit où cette adresse de retour est stockée.

Nous ne passerons pas en revue toutes les instructions possibles d'un ordinateur, mais, parmi les deux catégories que nous venons de voir, les plus courantes sont :

— les opérations arithmétiques (+ — ×/) et logiques (ET, OU, OU exclusif, complémentation) ;

— les décalages de registres (à gauche ou à droite, ouverts ou fermés) ;

— les mouvements de mémoire à mémoire, de registre à mémoire et de registre à registre. Les branchements conditionnels se font sur les bits que nous venons de voir, bits qui sont positionnés par les instructions de traitement.

Il existe aussi différentes **méthodes d'adressage.** Celles-ci changent la façon dont l'unité de commande aura accès aux valeurs des opérandes. On peut citer : l'adressage direct, l'adressage immédiat, l'adressage indirect, l'indexation, l'indirection indexation, l'autoincrémentation et l'autodécrémentation. (Il est bien évident que le code de l'instruction comporte les renseignements pour que l'unité centrale sache à quel mode d'adressage elle a affaire.)

L'*adressage direct* correspond à ce que nous venons de voir. Dans l'instruction, l'opérande est désigné par son adresse.

L'*adressage immédiat* sous-entend que, dans l'instruction, l'opérande est indiqué par sa valeur directement.

L'*adressage indirect* utilise la méthode inverse : l'adresse contenue dans l'instruction ne désigne pas l'opérande, mais une cellule de mémoire dans laquelle est rangée l'adresse de l'opérande. Cela permet, par programmation, de changer la valeur de la mémoire intermédiaire et donc d'opérer tantôt sur tel opérande, tantôt sur tel autre.

Chaque indirection nécessite une exploration supplémentaire d'une cellule mémoire et augmente ainsi le temps d'exécution effectif de l'instruction.

L'*adressage indexé* suppose l'existence d'un (ou plusieurs) registre d'index. L'adresse effective de l'opérande désigné s'obtient en ajoutant à l'adresse référencée dans l'instruction le contenu de ce registre. L'intérêt de ce mode est particulièrement grand dans la manipulation de tableau. En effet, on spécifie dans l'instruction l'adresse de début du tableau de valeurs, et l'élément recherché est obtenu directement après un calcul d'indice effectué dans le registre d'index.

L'indirection et l'indexation peuvent être combinées de deux façons : *indirection pré- ou postindexée*. Dans le premier cas, l'adresse référencée dans l'instruction plus le contenu de l'index désigne l'adresse de l'adresse réelle de l'opérande. Cette technique est utilisée pour manipuler des tables d'adresses. Dans le second cas, l'adresse référencée dans l'instruction désigne une cellule mémoire, au contenu de laquelle il est nécessaire d'ajouter l'index pour avoir l'adresse réelle de l'opérande. Si l'on désigne par des parenthèses « le contenu de », par X le contenu du registre d'index, et si l'on appelle A la valeur spécifiée dans l'instruction, la valeur réelle de l'opérande sera O telle que :

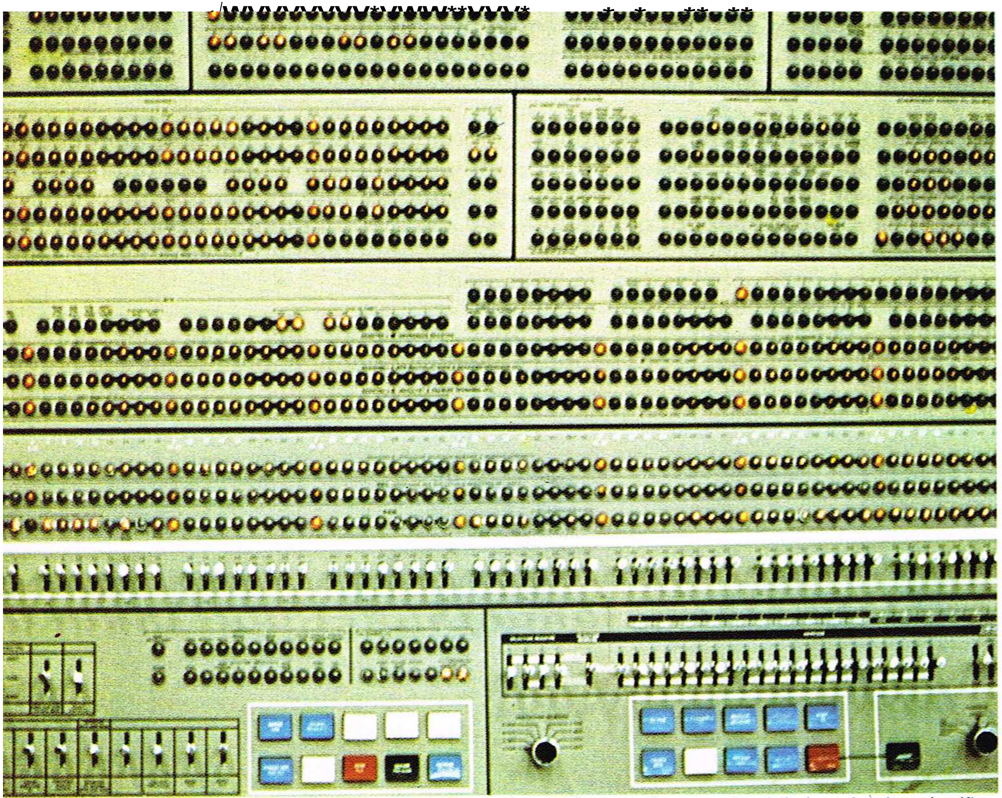

Centre interdisciplinaire régional de calcul électronique d'Orsay - Centre national de la recherche scientifique

▲ ***Le panneau de contrôle de l'ordinateur IBM 360/75 ; en haut, les voyants lumineux et en bas, les boutons et les clés permettant une intervention de l'opérateur.***

immédiat : O = A
indirect : O = (A)
indexé : O = (A + X)
indirect indexé : préindexation : O = ((A + X))
postindexation : O = ((A) + X)

Sur certaines machines existe aussi la possibilité d'*auto-incrémentation*, ou d'*autodécrémentation*. Dans ce cas, un numéro de registre est spécifié dans l'instruction. Ce registre désigne l'adresse de l'opérande, mais est altéré après l'exécution de l'instruction. Il est incrémenté (on lui ajoute 1) ou décrémenté (on lui retranche 1) suivant le code de l'opération. L'indirection peut être combinée avec ce mode d'adressage, rendant très aisée la manipulation de « piles », « files » et autres structures de données.

Entrées-sorties

Introduction

Alors que le calculateur est capable d'exécuter des milliers d'opérations par seconde (de 100 000 à 1 000 000), les périphériques sont par comparaison des organes très lents. Ainsi un télétype (ou machine à écrire) n'est capable d'imprimer que quelques caractères par seconde. C'est cette considération de la différence d'échelle entre les vitesses de l'unité centrale et les taux de transferts qui marque l'évolution de la technique des entrées-sorties.

Supposons que nous voulions écrire *n* caractères sur une machine à écrire. Nous pouvons procéder comme suit *n* fois : regarder si le périphérique est prêt. S'il n'est pas prêt, on repose la question, et ce jusqu'à ce qu'il soit prêt. Alors on transfère le caractère dans un registre spécial de l'unité de commande de la machine à écrire, ce qui provoque son impression. Si les *n* caractères ont tous été transférés, c'est terminé, sinon on retourne à la boucle. Quel est l'inconvénient de cette méthode ? Imaginons que $n = 20$, il faut donc transférer 20 caractères. Si la machine à écrire est capable d'imprimer 10 caractères par seconde, le temps total de l'opération est de 2 secondes, pendant lesquelles le calculateur va attendre que le télétype soit prêt. Sur une machine puissante, une telle perte de temps coûte très cher : le calculateur aurait en effet pu exécuter des centaines de milliers d'opérations. Voilà pourquoi ce mode de procéder n'est plus répandu que sur les petits systèmes.

Une autre méthode consiste à connaître l'ordre de grandeur du nombre d'instructions exécutables pendant l'impression d'un caractère. On lance alors le transfert, puis on commence l'exécution d'une séquence d'instructions. A la fin de cette séquence, on place une instruction permettant de savoir si le périphérique est prêt à recevoir le caractère suivant, etc. Cette programmation présente l'avantage d'utiliser les possibilités de la machine de bien meilleure façon que précédemment, mais elle est très lourde. Le programmeur doit avoir sans cesse en tête des problèmes de calculs de temps ; il doit poser des tests tout au long de ses instructions. Cette technique est réservée à des problèmes très particuliers, elle est donc rarement utilisée.

Un grand pas a été franchi lorsque les constructeurs se sont rendu compte que le problème pouvait être posé différemment. Pourquoi l'unité centrale devrait-elle sans arrêt examiner si le périphérique est prêt ? Il est bien préférable de laisser celui-ci signaler de lui-même son état. C'est ce qui a donné naissance à la notion d'*interruption*. Le calculateur est totalement déchargé de la surveillance des périphériques, ce sont ceux-ci qui l'interrompent quand ils sont prêts à travailler. Une interruption est une suspension momentanée du programme en cours, au bénéfice d'un module, qui réalise le transfert demandé en priorité, puis rend le contrôle dès qu'il est terminé. (On appelle module un petit programme autonome, réalisant une tâche très précise.) Les seuls instants volés au calculateur pour effectuer le transfert sont ceux correspondant à l'exécution du module ; ils sont en général très courts. Le programmeur est totalement déchargé de la tâche du transfert, car le module de gestion d'interruption est le plus souvent écrit par le constructeur.

Cependant, aussi satisfaisante que soit cette solution, il reste que, pour une instruction de transfert, le calculateur doit exécuter plusieurs instructions, celles du module d'interruption. Pour éviter cette perte de temps, on a été amené à construire des unités d'échanges sophistiquées : les *canaux*. Ceux-ci prennent complètement en charge le transfert de tout un bloc d'informations. Le programme se charge de fournir au canal les renseignements qui lui sont nécessaires (où trouver les données à transférer, combien de mots il faut échanger, sur quelle unité, dans quel mode, etc.) et d'initialiser le transfert. Il exécute ensuite, sans plus se préoccuper de l'échange : c'est le canal qui se charge maintenant de communiquer au périphérique les caractères. Il n'y a plus d'interruption pendant le transfert. Mais au rythme du périphérique, le canal viendra de temps à autre prélever un cycle de mémoire pour lire l'information suivante. Lorsque tout l'échange est terminé, le canal provoque alors une interruption, pour signaler à l'unité centrale la fin du transfert. La simultanéité entre les entrées-sorties et l'exécution du programme est presque totale. Le temps consacré par le calculateur au transfert ne consiste qu'en un cycle mémoire de temps à autre.

Les canaux ont encore évolué. Certains sont capables d'effectuer plusieurs opérations d'entrées-sorties successives, par chaînage. Ce sont eux-mêmes de petits calculateurs programmables, véritables unités centrales indépendantes. La tentation est alors forte d'augmenter leur puissance et leur autonomie. Ainsi, sur le CDC 6600, les entrées-sorties sont gérées par de petits calculateurs frontaux. Sur le CDC 7600, machine extrêmement puissante, c'est un complexe de 5 ou 6 petits ordinateurs qui assure la gestion des échanges et aussi certaines tâches du système.

Description de l'interface

Pour que les données émises par les périphériques soient comprises par l'unité centrale, et réciproquement, il est nécessaire de créer un dispositif de communication et traduction entre ces organes. C'est ce dispositif qu'on appelle *interface*. Les signaux échangés à travers cette interface sont de deux types : les commandes et synchronisations permettant le dialogue entre les deux partenaires et l'information à transférer proprement dite.

Parmi les fils qui fournissent les commandes, on peut en distinguer trois principaux. Le premier indique le sens de l'échange. Appelons-le *sens*. Suivant la tension qui règne dans ce fil, *sens* prendra deux valeurs (0 ou 1) signifiant : entrée de données ou sortie de données. Le second fil sert à indiquer que l'unité centrale désire le transfert de l'information. Une impulsion sera envoyée au moment judicieux par le fil *go*. La troisième information est fournie par le périphérique pour indiquer qu'il est prêt pour un nouveau transfert. Il positionne alors le niveau correspondant sur le fil *prêt*. Les fils d'information sont en nombre variable : 6, 7 ou 8 pour les machines à écrire suivant le code qu'elles utilisent ; 8 à 12 pour les organes de conversion analogique-digital suivant la précision fournie.

Nous allons examiner la **procédure des échanges** en tenant compte du fait que les termes « entrée » et « sortie » sont considérés du point de vue de l'ordinateur. Une entrée d'information se fait du périphérique vers l'unité centrale et une sortie de l'unité centrale vers l'extérieur. Le principe général d'une entrée d'information est le suivant : l'unité d'échange positionne l'indicateur « sens » à la valeur « entrée ». Puis elle envoie une impulsion sur le canal « go » qui déclenche la transmission par l'organe périphérique de l'information sur les fils correspondants. Lorsque cela est fait, le périphérique est à nouveau prêt pour un nouvel échange et émet le signal « prêt ». La prise en compte de l'information est faite dans l'unité d'échange après la réception de ce signal.

Une sortie d'information s'effectue suivant la procédure ci-dessous : l'unité d'échange positionne l'indicateur « sens » pour signifier « sortie ». Puis elle demande l'échange en envoyant une impulsion sur le fil « go ». L'organe périphérique sollicité prend alors en compte la signification des fils d'information. L'ordre correspondant est exécuté (impression d'un caractère, etc.). Lorsque le périphérique a accompli sa mission, et peut donc effectuer une autre sortie, il positionne le fil « prêt ».

Une unité d'échange peut être en liaison avec plusieurs périphériques : on parle alors de *multiplexage*. Il faut spécifier quel est le périphérique que l'on choisit. La logique est plus compliquée dans ce cas. Une autre structure de transfert peut reposer sur le principe de l'*unibus*. Il s'agit d'une seule ligne de transmission, connectée à une unité d'échange, transitant à travers toutes les unités de commandes des périphériques. L'information comporte l'indicatif du périphérique sélectionné. Toutes les unités de commandes ne se reconnaissant pas sur la ligne laissent passer l'information sans l'utiliser. Celle qui est sélectionnée l'exploite, en revanche, lorsqu'elle lui parvient.

L'ordinateur travaille en général par mot. Nous avons vu que les périphériques peuvent avoir besoin d'un nombre variable de bits. La standardisation se fait au niveau de l'unité d'échange qui possède un registre ayant la longueur d'un mot machine. Lorsque la transmission des données se fait en série, ce registre est à décalage et l'unité d'échange se charge de la transformation série-parallèle. Ainsi, l'ordinateur n'a pas à se préoccuper de la technologie et de la logique des périphériques, ce qui permet au programmeur d'avoir un travail plus aisé au niveau des entrées-sorties. L'unité centrale n'a à transmettre qu'un mot sans se soucier réellement de l'échange.

A l'aide de cette description de l'unité d'échange, nous pouvons passer en revue les différentes **techniques utilisées pour transférer les informations.** Nous étudierons pour cela les méthodes d'échange d'une seule information. Pour réaliser cet échange, il est nécessaire de disposer de certaines informations : l'adresse en mémoire de l'information échangée. Ce sera l'adresse de la cellule où est rangée l'information s'il s'agit d'une sortie, et celle de la cellule où l'on veut récupérer l'information dans le cas d'une entrée. Appelons X cette adresse. Il est nécessaire aussi de spécifier le sens de l'échange ainsi que l'instant précis du transfert. C'est dans la façon de donner ces informations au calculateur que se distinguent les différents modes d'échange.

Le *transfert programmé* suppose l'ordinateur doté de deux instructions : entrer à X et sortir à partir de X. La demande de transfert (« go ») se fait au moment de l'exécution de l'instruction. Le sens est déterminé à partir de son code. L'unité externe peut aussi forcer l'instruction d'entrée-sortie. En ce cas, l'exécution de l'instruction en cours de traitement dans l'unité centrale s'achève et la demande d'entrée ou de sortie est prise en priorité. Le programme reprend ensuite, après avoir été interrompu pendant le temps d'une instruction.

De même que dans le cas précédent, c'est l'unité externe qui prend l'initiative dans le *transfert « par vol de cycle »*. L'unité centrale termine le cycle mémoire en cours, et accorde le cycle suivant à l'unité externe qui en profite pour ranger ou lire l'information en mémoire, suivant le sens du transfert. Ce mode est plus rapide, car l'exécution du programme en cours n'est retardée que pendant le temps d'un cycle. Nous avons vu que l'exécution d'une instruction comportait plusieurs cycles mémoire.

Dans le *transfert par accès direct mémoire* (DMA pour « Direct Memory Access »), le programme n'est interrompu

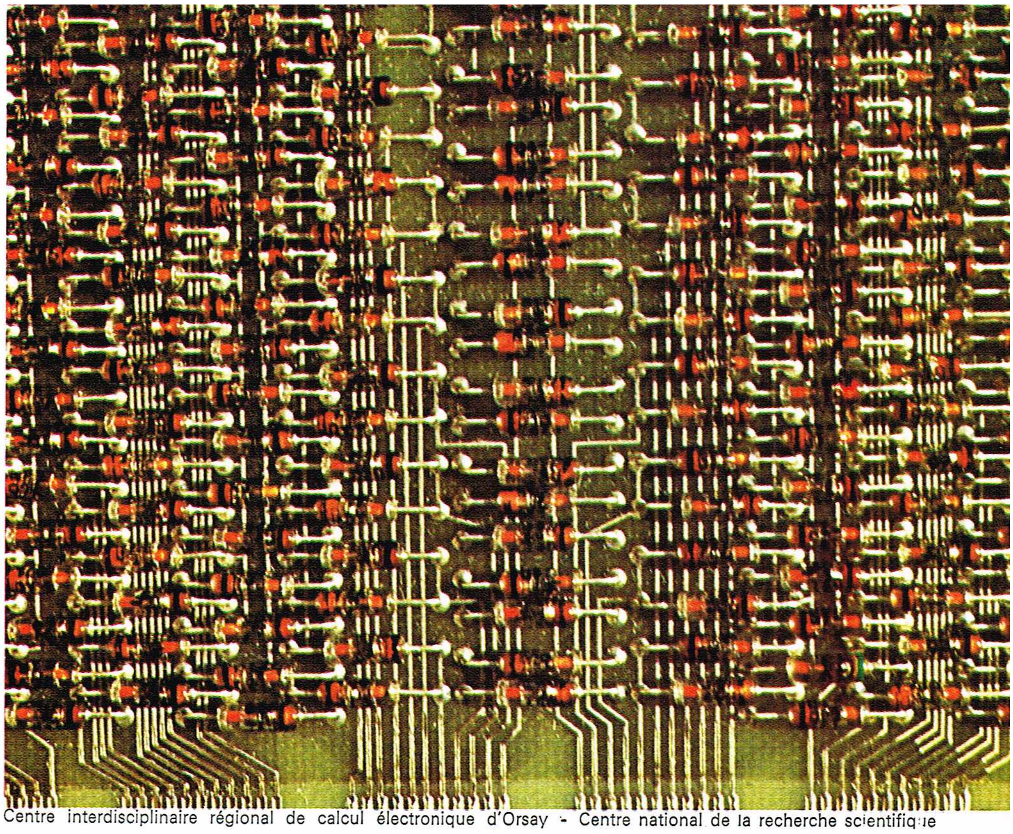

Centre interdisciplinaire régional de calcul électronique d'Orsay - Centre national de la recherche scientifique

▲ ***Gros plan sur les composants d'une carte logique : transistors, diodes et résistances.***

que pendant un cycle mémoire si l'unité centrale en a besoin à cet instant précis ; sinon, le programme ne sent pas passer l'entrée-sortie. Dans ce mode, le calculateur est doté d'un dispositif qui permet deux accès à la mémoire : l'un est réservé à l'unité centrale, l'autre à l'unité externe. Les demandes de cycle mémoire sont adressées à un contrôleur qui gère les priorités entre les différentes demandes. Les canaux utilisent cette particularité pour fonctionner.

Les interruptions

Si l'ordinateur ne pouvait voir le monde extérieur que sur sa propre initiative, il se produirait l'une des deux possibilités suivantes : ou bien le calculateur passerait une grande partie de son temps à scruter les différents périphériques et serait donc ralenti, ou bien il faudrait beaucoup d'unités centrales et les événements extérieurs lui parviendraient avec du retard, ou même ne lui parviendraient pas si l'information était volatile. La solution à ce problème consiste à donner une certaine initiative aux unités externes : celles-ci ont la possibilité d'envoyer un signal à l'unité centrale lorsqu'un événement se produit.

Bien qu'utilisé pour les entrées-sorties, le système d'interruptions a un domaine d'utilisations très vaste. Nous retiendrons les principales : les pannes machine, en cas de baisse de la tension d'alimentation du calculateur, ou d'erreur de parité mémoire ; les erreurs de programme, occasionnées par une instruction illicite, ou une tentative d'adressage impossible ou interdit, ou encore une opération arithmétique dont le résultat excède la capacité de la machine ; les interruptions d'entrées-sorties générées par les unités externes pour signifier la fin d'un échange ou une anomalie ; les interruptions externes, provoquées pour alerter la machine en cas de modification du monde extérieur, particulièrement dans le cas où le calculateur pilote un procédé industriel ; les interruptions d'horloge permettant le comptage du temps, qui peuvent provenir d'une horloge interne du calculateur, ou d'un phénomène extérieur.

Dans les calculateurs ne possédant qu'un seul niveau d'interruption, chacune de ces causes provoque une seule et même interruption. Le programme de gestion des interruptions doit alors examiner une à une les causes pour identifier l'origine de l'alarme et la traiter, ce qui prend beaucoup de temps machine ; dans le cas d'anomalies très urgentes, ces précieuses microsecondes peuvent coûter très cher. La priorité entre les différents cas d'alarme est alors réglée par le sens d'exploration des causes. Ainsi, si deux organes appellent en même temps, le cas le premier réglé sera celui du premier reconnu.

Pour accélérer la prise en compte de l'alarme, les ordinateurs plus puissants possèdent un système d'alarme hiérarchisé. Chaque niveau d'interruption regroupe une ou plusieurs causes d'appels ; un programme de traitement est associé à chacun de ces niveaux ainsi qu'une priorité.

IBM

▲ *Le* **disque magnétique rigide** *est une mémoire auxiliaire de l'ordinateur pouvant stocker de 1 Mo à 400 Mo, et dépassant ainsi largement les possibilités de stockage de la mémoire centrale.*

Lorsqu'une interruption apparaît sur un niveau, le traitement exécuté en unité centrale est suspendu, et le module associé au niveau est lancé pour traiter l'anomalie. Il doit, bien sûr, commencer par chercher la cause de l'alarme parmi celles qui correspondent à son niveau ; comme la recherche est faite sur un nombre faible de cas possibles, elle est très rapide. Mais que se passe-t-il lorsqu'une interruption survient pendant l'exécution du programme chargé justement de traiter une interruption ? Tout dépend de la priorité associée à ce nouvel appel.

Illustrons cela par un exemple. Supposons que le calculateur que nous étudions possède trois niveaux d'interruption avec les priorités 1, 2, 3. Sur le niveau 3, le plus prioritaire, est connecté un capteur de température qui émet un signal d'alarme lorsque le processus industriel qu'il surveille chauffe trop. Le niveau 2 regroupe l'horloge et le canal d'entrée-sortie. Le niveau 1 est consacré à la machine à écrire de l'opérateur. (Cet exemple est, bien sûr, fictif.) Les considérations qui permettent d'ordinaire d'associer à une cause d'interruption sa priorité sont évidemment l'urgence de la décision à prendre, la durée de validité de l'information, mais aussi la durée du traitement à effectuer. A un instant donné, sur notre calculateur survient un appel de l'horloge. Celle-ci émet un signal, périodiquement, afin que l'ordinateur ait conscience du temps qui s'écoule. Le programme qui s'exécutait en unité centrale est arrêté dès la fin de l'instruction en cours. Le module chargé de la gestion de l'horloge entre alors en action ; il met à jour la date et regarde dans une liste s'il y a des programmes à lancer à cette heure-ci. Pendant l'exécution de ce module, une autre interruption survient. Deux cas peuvent alors se produire : si l'appel est fait sur le même niveau, 2, ou s'il est émis sur le niveau 1, moins prioritaire, il est mis en attente et sera pris en compte dès que le module de gestion de l'horloge sera terminé ; en revanche, si c'est le niveau 3 qui a lancé l'alarme, sa priorité étant supérieure à celle du programme en cours, l'exécution du module du niveau 2 est suspendue. Le module associé ou capteur de température prend les décisions qui s'imposent (ouverture ou fermeture d'électrovannes, arrêt de la plaque chauffante, etc.). Lorsque c'est terminé, le module de niveau 2 reprend le contrôle de l'unité centrale et poursuit son exécution jusqu'à sa fin, à moins qu'une nouvelle interruption plus prioritaire ne le mette en attente. Le programme qui s'exécutait en mémoire centrale ne reprendra son cours que lorsque toutes les interruptions auront été traitées.

L'instruction qui termine un module d'interruption est une instruction spéciale d'acquittement. Les programmes normaux ou « de fond » sont considérés comme ayant la priorité minimale.

Les périphériques

On appelle périphérique d'un ordinateur tout appareil connecté à cet ordinateur mais n'en faisant pas partie. Cette définition, bien qu'elle paraisse claire et sans ambiguïté, ne résout pas les problèmes posés, par exemple par l'horloge interne ! Nous considérerons donc que les périphériques sont tous les organes connectés à une machine par l'intermédiaire d'interfaces. Leur gamme est extrêmement étendue. Nous pouvons distinguer trois classes principales : les mémoires de masses ou auxiliaires ; les périphériques adaptés au dialogue homme-machine ; les périphériques adaptés à l'environnement du calculateur.

La mémoire centrale d'un ordinateur est nécessairement limitée, et cela en particulier pour des raisons technologiques (adressage, etc.) et financières ; pour augmenter la puissance d'un ordinateur, on est amené à lui adjoindre des **mémoires auxiliaires.** Les performances de celles-ci sont jugées en termes de caractères, qui, ici, correspondent chacun à un octet, soit 8 bits en général. On a toujours à réaliser un compromis entre capacité et temps d'accès : en général, plus une mémoire peut contenir d'information, plus le temps d'accès à cette information est élevé. Les technologues modernes cherchent à résoudre cette contradiction de façon satisfaisante ; nous examinerons en particulier les disques et les dispositifs à rubans magnétiques.

● Un *disque magnétique,* tel qu'il est utilisé en informatique, mesure environ 35 cm de diamètre ; il est fabriqué en matière plastique, et recouvert d'une pellicule d'oxyde magnétisable. Il se présente différemment suivant qu'il est « souple » ou « rigide ».

Les *disques rigides* peuvent être seuls ou empilés de façon à former un édifice d'une dizaine de plateaux superposés et espacés pour laisser passer les têtes de lecture. On utilise les deux faces de chaque disque (sauf les faces de garde). Les têtes de lecture sont solidaires et se déplacent simultanément par l'intermédiaire d'un bras. Ainsi, toutes les pistes situées dans un même cylindre sont explorées en même temps, bien qu'une seule soit lue ou

IBM

▶ *A gauche, l'unité de disques de l'ordinateur IBM 370/158 ; page ci-contre, à droite, deux dérouleurs de bandes.*

écrite au cours d'un transfert. Le disque tourne en permanence à une vitesse variant de 1 200 à 2 400 tours par minute suivant les modèles.

Deux conséquences découlent de ces considérations : d'une part, lors de l'écriture d'un caractère, chaque bit est écrit sur le disque de façon séquentielle (l'un après l'autre) ; d'autre part, les pistes sont concentriques, à la différence des microsillons. Chaque caractère peut être adressé, et les réécritures se superposent exactement de façon que la modification d'un seul caractère n'altère pas le contexte, ce qui permet d'effectuer des mises à jour : nous verrons que c'est une particularité très importante du disque. Le nombre de caractères que l'on peut stocker sur un disque varie de 1 Mo à 400 Mo. (Le symbole Mo [méga-octet] signifie : million de caractères.) Comparé à la taille d'une mémoire centrale, ce chiffre est énorme : les plus grosses machines ont des mémoires pouvant atteindre 1 Mo, rarement plus.

Le temps d'accès à un caractère varie suivant la position du bras par rapport à celui-ci au moment de la demande d'échange ; il est en moyenne d'environ 100 ms ; ce temps inclut le délai mécanique du bras, qui doit se positionner sur la bonne piste, et l'attente due à la rotation, qui est en moyenne d'un demi-tour. Il est bien évident que le temps de recherche n'est pas doublé pour deux caractères ; en effet, si les caractères cherchés sont écrits en séquence sur la même piste, seul le temps d'accès au premier intervient, puisque le délai de lecture ou d'écriture est très faible. Pour éviter le délai dû au déplacement du bras, les constructeurs ont créé des disques à têtes fixes. Chaque piste est dotée d'une tête de lecture ; le temps d'accès à l'information est donc réduit au délai de rotation du disque. Le nombre de têtes magnétiques est ainsi multiplié, ce qui rend ce matériel beaucoup plus coûteux ; il est cependant intéressant pour contenir les informations auxquelles on accède très souvent (principalement : programmes systèmes).

Fonctionnant sur un principe analogue, les *disques souples* sont tous destinés aux minicalculateurs ou aux microcalculateurs. Ils occupent un faible volume ; leur prix est réduit et leur temps d'accès très intéressant ; de plus, un grand effort de standardisation est fait sur ce marché. Leur aspect diffère de celui des disques rigides : leur diamètre est réduit de moitié (18 cm) et ils sont protégés de façon permanente dans une enveloppe de carton-pâte. Contrairement aux unités à disques rigides, où les têtes de lecture affleurent les disques sans les toucher, il y a ici contact physique. L'ordre de grandeur de la capacité de stockage est le million de caractères.

● Une *bande magnétique* est un ruban de plastique recouvert d'oxyde magnétisable, comme les disques, analogue à une bande classique de magnétophone, tout

IBM

▲ ***Une unité de saisie des données utilisant comme mémoire des mini-disques souples de 20 cm de diamètre pouvant contenir une information équivalente à celle stockée par 3 000 cartes perforées.***

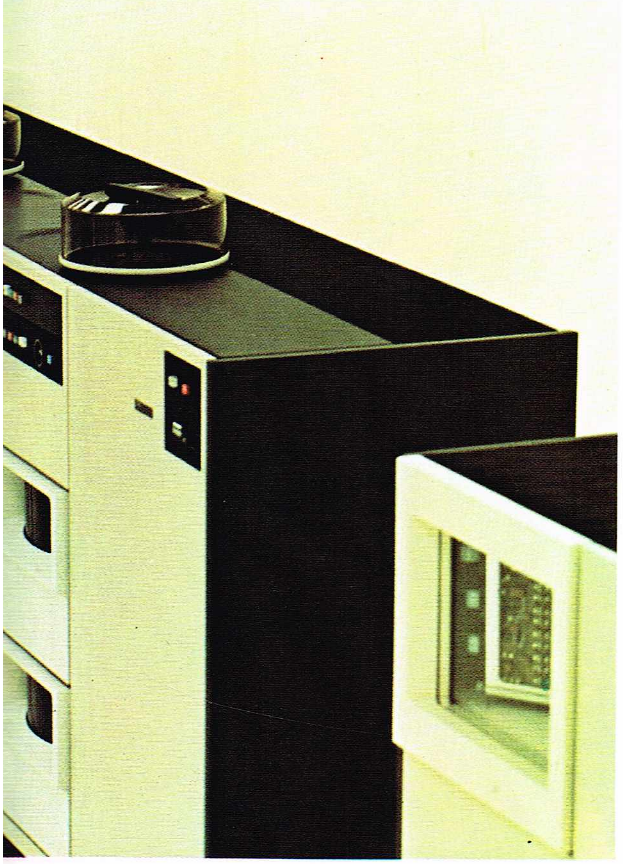

Bernhaut - Rapho

en étant plus large et plus longue (730 m). L'information est stockée sur la bande en parallèle et en série à la fois. Les caractères sont disposés séquentiellement, c'est-à-dire à la suite l'un de l'autre, les 6 ou 8 bits formant chaque caractère codés en parallèle. On appelle *pistes* les traces sur lesquelles sont stockés les bits; c'est la structure du dérouleur de bande qui fixe le nombre de ces pistes; dans tous les cas, il existe une piste supplémentaire, qui contient la parité du caractère : c'est un dispositif de contrôle qui permet de détecter les anomalies survenant pendant le transfert.

Les *dérouleurs de bande,* semblables à des magnétophones dans leur principe, disposent de 7 ou 9 têtes de lecture et d'écriture. Les fonctions programmables ou manuelles sont l'avance, l'avance rapide et, le rebobinage, tandis que la lecture et l'écriture sont uniquement programmées. Pendant les transferts, la bande se déroule à une vitesse de 2 mètres par seconde. Elle a une grande capacité de stockage : suivant les densités (800 ou 1 600 bpi : bits per inch ou bits par pouce) et avec les espaces laissés disponibles en prévision des arrêts et des démarrages entre chaque lecture-écriture de bloc, on peut écrire sur une bande jusqu'à 30 millions de caractères.

Les avantages des bandes magnétiques sont leur très faible prix, leur solidité et leur volume réduit. En comparaison, les disques, pour une capacité de même ordre de grandeur, sont beaucoup plus chers et fragiles. En contrepartie, l'accès à l'information est beaucoup plus lent sur les bandes, car, pour accéder à un caractère, il faut auparavant lire tous ceux qui précèdent : c'est ce que l'on appelle organisation séquentielle, par opposition à l'accès direct des disques. De plus, il n'est pas possible de faire de la mise à jour sur une bande magnétique, car on n'est jamais certain de l'endroit où l'on écrit, et l'information risquerait fort d'être détériorée.

● Fonctionnant sur un principe analogue, les *cassettes magnétiques* se sont développées à cause de leur faible

IBM

▲ *Le* lecteur de cartes *de l'ordinateur IBM 370/158; cet appareil est capable de lire de 800 à 1 200 cartes perforées par minute.*

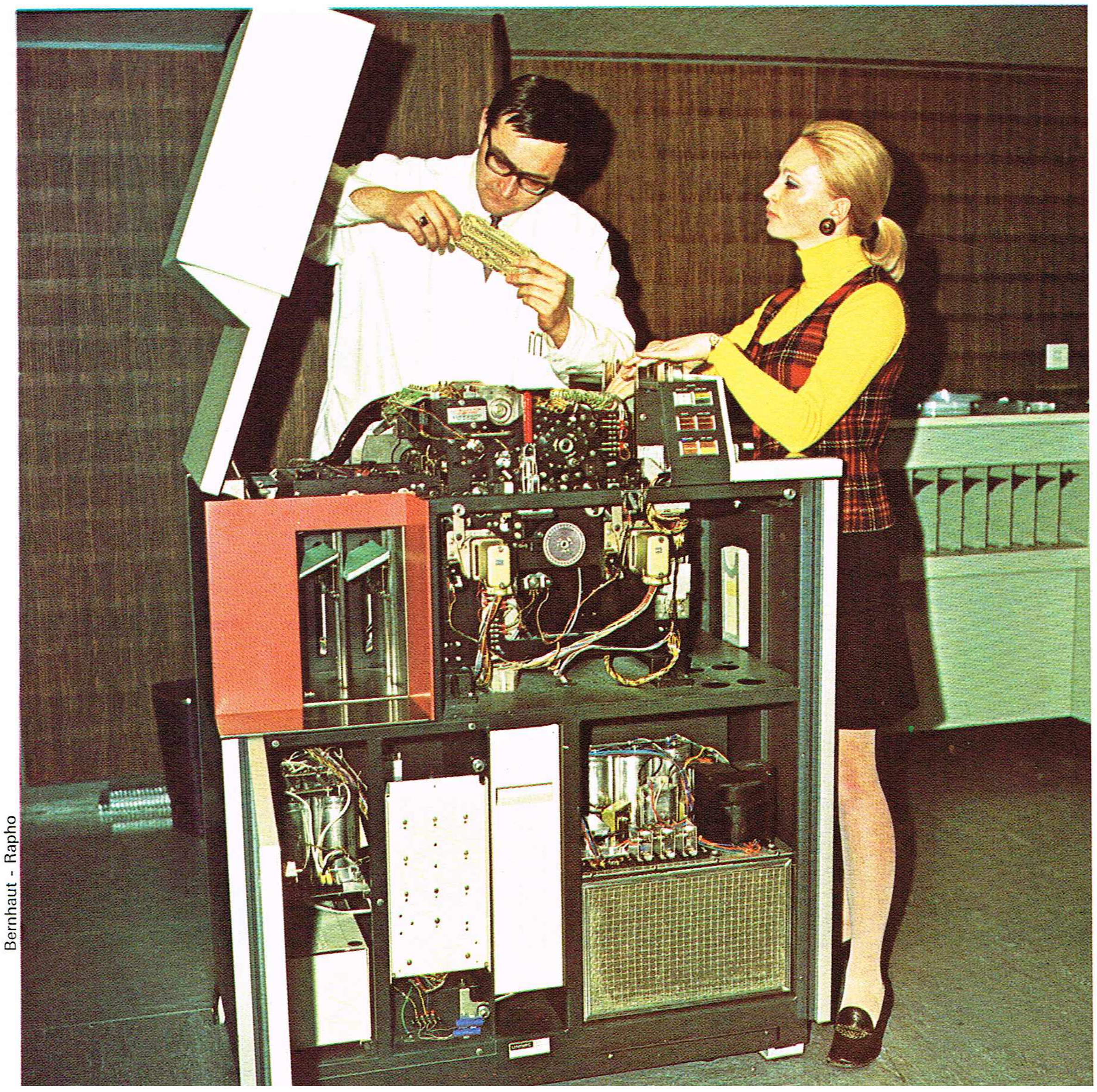

Bernhaut - Rapho

▶ *Intérieur de la* perforatrice de cartes *de l'ordinateur UNIVAC 9300.*

prix et de leur facilité de manipulation ; mais leur capacité de stockage est faible (300 000 caractères en moyenne). Ces caractéristiques expliquent que, bien qu'absentes dans les gros systèmes, les cassettes sont, avec les disques souples, les périphériques privilégiés des minicalculateurs, et surtout des microcalculateurs.

Les **périphériques permettant le dialogue homme-machine** sont des organes transformant les caractères déchiffrables par l'homme en impulsions pour le calculateur, et inversement. Les plus utilisés sont les lecteurs de cartes, les imprimantes et les machines à écrire. On peut aussi y ranger les écrans de visualisation et les tables traçantes.

● Le *matériel à carte perforée* est le précurseur de l'ordinateur actuel. La facilité de mise à jour des cartes et le fait qu'elles sont lisibles par l'être humain font d'elles un moyen très courant de communication avec la machine, pour lui fournir des ordres et des données. Une carte perforée est rigide, en carton, avec un angle coupé pour permettre de bien la positionner. On peut écrire 80 caractères sur une carte ; chaque caractère est codé par un ou plusieurs trous disposés sur un des 12 emplacements prévus à cet effet sur une même colonne. Le code universellement utilisé par toutes les machines à perforer est le code Hollerith.

Les *lecteurs de cartes* sont des appareils comportant deux bacs. Dans le premier, sont disposées les cartes à lire par la machine. Sur un ordre du calculateur, un dispositif entraîne la carte sélectionnée à travers le dispositif de lecture. Sur les lecteurs électromagnétiques, 12 balais caressent la carte, créant par contact une impulsion électrique quand un trou se présente. Sur les lecteurs optiques, l'information est détectée par des cellules photoélectriques. Souvent, un second dispositif de lecture suit le premier de façon à contrôler le bon déroulement de la lecture. Les impulsions reçues pour chaque caractère sont alors converties et transmises au calculateur. D'après le principe même de son fonctionnement, un lecteur de cartes ne peut pas avoir de nouveau accès à l'information portée par une carte déjà lue. Il ne peut pas non plus s'interrompre dans la lecture d'une carte et reprendre ensuite. C'est un organe d'entrée d'information. Il ne peut en aucun cas écrire. Le second bac reçoit les cartes lues par l'ordinateur dans leur ordre de lecture.

Le *perforateur de cartes* est un appareil indépendant, incapable de lire, mais servant à perforer les cartes sur l'ordre de la machine. Les modifications automatiques de fichiers sur cartes peuvent se faire ainsi, bien que cette pratique ait pratiquement disparu. En effet, les problèmes de stockage posés par les cartes perforées, qui sont encombrantes, qui craignent l'humidité (et le feu !), donnent un avantage décisif aux unités magnétiques (bandes et disques) pour la conservation de données nombreuses.

● Les réponses aux questions posées par l'ordinateur à l'aide de ces cartes sont en général *listées* sur des *imprimantes*. Ce sont des appareils qui permettent d'imprimer des informations en grandes quantités et en plusieurs exemplaires. Les jeux de caractères utilisés sont ceux que nous connaissons. Les performances de ces organes sont diverses et se chiffrent en lignes par minute. Les imprimantes les plus utilisées ne dépassent en général pas 2 200 lignes. Pourtant, avec une nouvelle technologie (électrostatique), IBM annonce la création d'une imprimante pouvant écrire 13 000 lignes par minute. Ce chiffre est absolument étonnant, il suffit pour s'en convaincre de regarder « sortir » 2 000 lignes par minute ! La technologie classique utilise un système de marteaux (132) qui frappent à la volée sur une chaîne qui se déroule à grande vitesse, imprimant ainsi le caractère désiré. La précision requise par ce procédé limite les performances et explique le prix élevé de ces appareils.

● Les *machines à écrire* servent à la fois d'organe d'entrée et de sortie. L'entrée des données se fait par l'intermédiaire d'un clavier. Chaque frappe d'une touche provoque une interruption, et le calculateur vient lire le caractère frappé. La sortie est faite sur papier ou sur un écran. Les machines à écrire à papier utilisent une boule, ou un système à aiguilles. Les écrans sont purement alphanumériques et se comportent comme le dispositif à papier, ou sont graphiques et sont alors utilisables comme une table traçante. Les machines à écrire sont très utilisées.

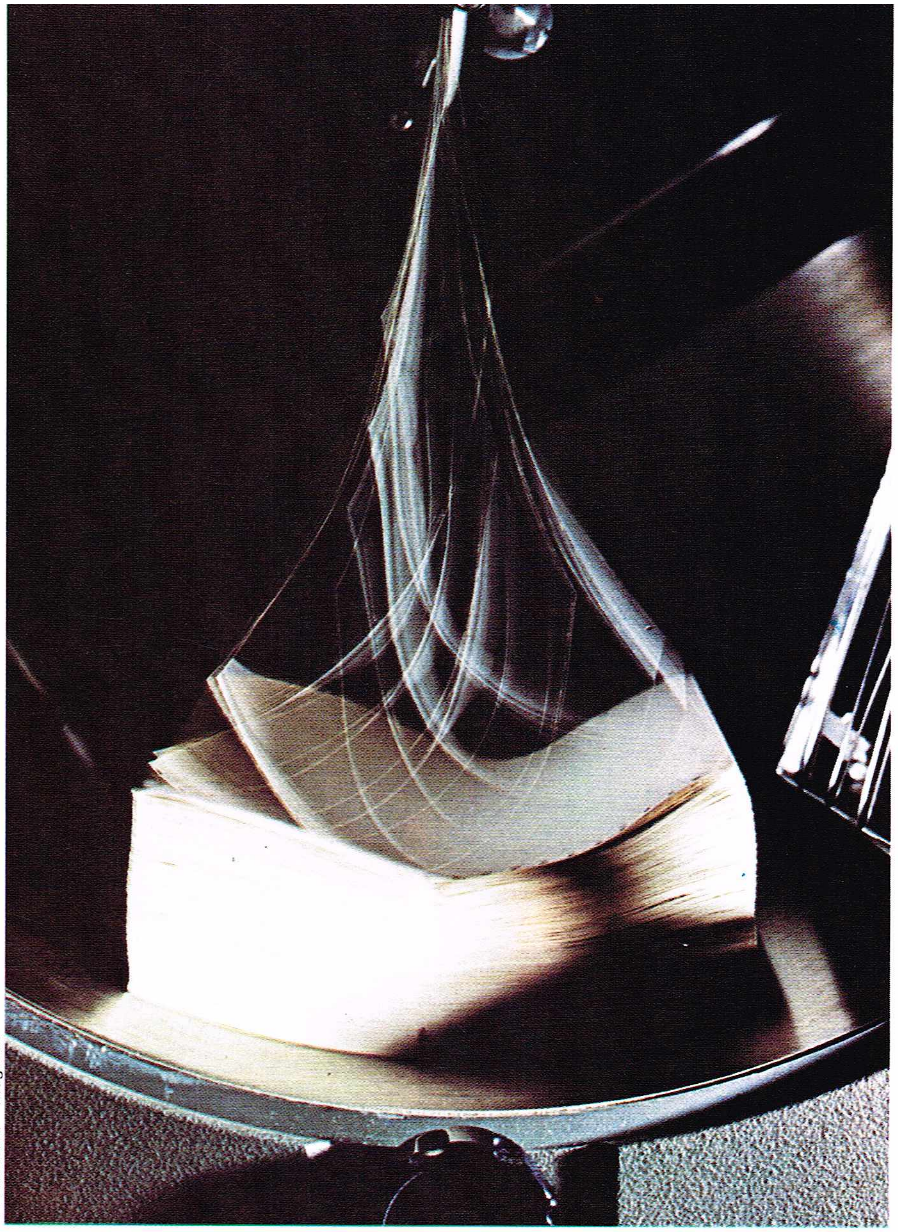
L. Hartmann - Magnum

▲ ***Les résultats des opérations posées à l'ordinateur sont généralement donnés sous forme écrite par une* imprimante *qui réalise des « listings ».***

L'une d'elles, privilégiée par le système, est la « console maîtresse ». C'est devant elle que se tient l'opérateur chargé de la direction de la machine. Elle lui sert à « converser ». S'il en existe d'autres, celles-ci sont à la disposition des utilisateurs dans le cas de systèmes multiprogrammés. L'utilisation de langages conversationnels (Basic) nécessite une machine à écrire, de même que tous les systèmes utilisant les banques de données. C'est le cas, en particulier, des dispositifs de réservations automatiques d'avions, de trains, etc.

Les machines à écrire sont parfois aussi dotées d'un *lecteur-perforateur de ruban*. Ces rubans en papier permettent une communication aisée de machine à machine, à cause de leur faible coût et de leur volume réduit. Cependant, leur fiabilité n'est pas exceptionnelle et, à moins d'une grande habitude, ils ne sont pas lisibles directement par l'homme.

● Lorsque les caractères ne suffisent plus, il faut avoir recours aux *tables traçantes*. Celles-ci sont capables de dessiner toutes les courbes, tous les croquis ou schémas calculés par l'ordinateur. L'ordinateur commande d'une part un bras qui peut se déplacer de gauche à droite par translation X et d'autre part la position Y sur ce bras de la plume. Tous les points de la table peuvent ainsi être adressés à l'aide de deux quantités X et Y. De plus, par l'intermédiaire de relais, le calculateur commande le lever et le baisser de la plume. Les tables traçantes suivant ce principe sont assez lentes, mais très précises. Dans d'autres cas, c'est le papier qui se meut sous un bras fixe. Il existe aussi des tables sur lesquelles la plume est montée sur un dispositif à coussin d'air isolé des bords de la table et se repérant de façon électrostatique.

● Les *écrans alphanumériques* permettent un affichage très rapide de données succinctes. L'écran ne peut en effet contenir qu'un nombre limité de caractères (de l'ordre de 1 000), mais ceux-ci sont affichés en moins d'une seconde. L'inconvénient majeur qu'ils présentent est

▶ *L'écran cathodique alphanumérique (avec imprimante) de l'ordinateur IBM 370/158; cet ensemble permet l'entrée directe des données et aussi l'interrogation des fichiers; le crayon lumineux permet de sélectionner un point de l'écran afin d'effectuer une correction.*

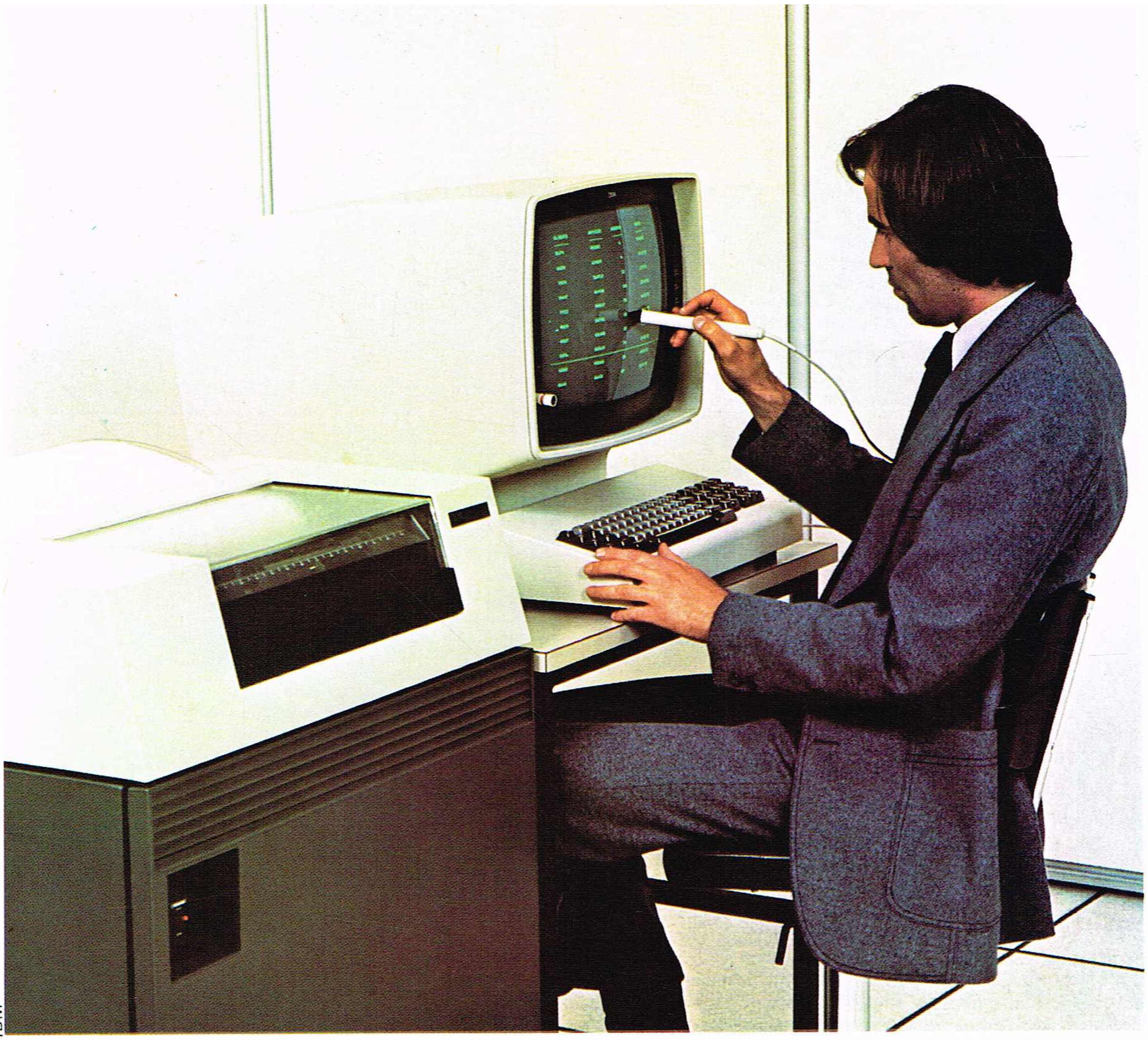
IBM

l'absence de trace écrite. Pour y remédier il est nécessaire de sortir les résultats à conserver sur une imprimante ou de faire une photo de l'écran; certains modèles sont associés à des « hard copy units », qui copient l'écran sur un papier, à la manière d'une photocopie, en un temps très court. Cependant, le coût du matériel et de la photocopie est élevé. Les écrans cathodiques sont fréquemment couplés à des moyens d'entrée tels que le « light-pen » (ou crayon lumineux) qui permet de sélectionner un point de l'écran de façon approximative, ou les curseurs qui remplissent la même fonction avec une meilleure précision, mais de façon moins aisée.

● Les *lecteurs optiques* permettent de faciliter l'entrée des informations dans le calculateur et fonctionnent déjà dans certains domaines. Cependant, les problèmes de la reconnaissance de l'écriture manuscrite ne sont pas encore résolus dans le cas général. Certains ordinateurs sont dotés d'organes vocaux. La synthèse de la parole est maintenant au point, mais l'ordinateur n'est pas encore capable de reconnaître la voix humaine de façon sûre.

Les périphériques d'un calculateur peuvent ne pas être physiquement dans la même pièce, ils peuvent être situés à plus de 100 km de l'unité centrale; on les appelle alors *terminaux,* et l'on parle de **télé-informatique**. Les techniques de télétraitement ou de télétransmission sont nécessaires; la ligne servant à assurer la liaison peut être une ligne spéciale ou une ligne téléphonique des P. T. T. L'information ne transite pas dans ces lignes de la même façon que dans les câbles qui lient les périphériques à l'ordinateur. Il faut effectuer la transformation adéquate par l'intermédiaire d'un MODEM (abréviation usitée pour modulateur-démodulateur). Les données saisies par le terminal d'entrée sont modulées par le MODEM qui y est connecté, parcourent la ligne et sont démodulées par le MODEM branché sur l'ordinateur. Les résultats émis par le calculateur vers un terminal de sortie suivent le chemin inverse.

Les terminaux ne sont toutefois pas toujours de simples périphériques. Le même MODEM regroupe en général au moins un organe d'entrée (lecteur de cartes) et un organe de sortie (imprimante). Les plus sophistiqués sont susceptibles de recevoir en plus un support magnétique. Enfin, le terminal peut fort bien être un ordinateur à part entière lui aussi, ce qui lui permet de traiter les problèmes qui sont de sa compétence de façon locale et de n'appeler l'ordinateur principal que lorsqu'il ne suffit plus. Il est capable d'économiser l'information à transférer en faisant des compactages et des mises en forme.

Il ne faut pas perdre de vue que la vitesse de transfert par ces lignes est limitée. L'unité utilisée est le *« baud »* qui représente une impulsion élémentaire par seconde, ce qui ne correspond pas tout à fait au bit par seconde, car l'information utile est entourée d'impulsions de contrôle et de synchronisation. On peut grossièrement estimer que la transmission d'un caractère de huit bits nécessite dix impulsions élémentaires. Les liaisons télégraphiques fonctionnent à 50 bauds (environ 5 caractères par seconde), mais cette vitesse pourrait passer à 200 bauds (20 caractères par seconde), ce qui est de l'ordre de la vitesse d'impression d'une machine à écrire. Les lignes téléphoniques sont beaucoup plus rapides : de 800 à 9 600 bauds.

Des réseaux d'ordinateurs très compliqués sont déjà opérationnels aux États-Unis et en Europe. Il ne s'agit plus de relations ordinateur-terminal dans ce cas. L'intérêt de ces réalisations sophistiquées réside dans la transmission rapide de données immédiatement assimilables. Il va de soi que des problèmes importants sont posés au point de vue technique par ces réseaux. La priorité de communication et la standardisation en sont quelques-uns; nous ne parlons évidemment pas des problèmes légaux, philosophiques et politiques.

Les derniers périphériques dont nous parlerons sont les **convertisseurs analogiques-digitaux.** Ces organes permettent à l'ordinateur de coder en nombres binaires des tensions électriques, et réciproquement de piloter des organes analogiques. C'est à eux que sont reliés des *capteurs des processus* que surveille le calculateur : thermocouples, manomètres, voltmètres, etc. Ce sont eux qui fourniront les commandes aux tables traçantes et aux écrans cathodiques. L'ordinateur ne peut commander les relais et autres dispositifs électromécaniques que par leur intermédiaire. Le traitement de signal, qui est une utilisation de l'ordinateur, s'effectue à partir des valeurs numériques obtenues par le calculateur à travers ces convertisseurs.

Centre interdisciplinaire régional de calcul électronique d'Orsay - Centre national de la recherche scientifique

▲ ***Vue générale de la salle des ordinateurs du Centre interdisciplinaire régional de calcul électronique d'Orsay.***

Les langages de programmation

Nous avons vu comment est constitué un ordinateur. Il importe maintenant de le faire travailler, et, pour cela, de lui donner des ordres. La suite d'instructions qu'exécute un ordinateur s'appelle un *programme*, l'ensemble de tous les programmes exécutables par un calculateur donné le *logiciel* (ou *software*), par opposition au *matériel* (ou *hardware*). Lorsque l'on met un ordinateur sous tension, il est incapable de faire la moindre chose, il est en état d'attente. Pour qu'il commence à travailler, il faut lui inculquer un rudiment d'intelligence. Cette phase d'initialisation s'appelle le « bootstrap » (ou chausse-pied). Elle consiste à rentrer, à l'aide des clefs situées sur la façade du calculateur, un petit programme, toujours le même, qui a pour rôle de lire sur une unité magnétique (disque, bande) ou autre (ruban) un programme plus important qui lui permettra de retrouver la mémoire de ce qu'il sait faire. Rentrer à l'aide des clefs un programme en mémoire centrale est une tâche ingrate et délicate; c'est pourquoi, dans la plupart des calculateurs, cette procédure est câblée. Lorsque cette phase est terminée, le calculateur est prêt à exécuter des ordres, converser avec l'opérateur, etc. Voyons les différentes possibilités qui s'offrent à l'homme pour communiquer sa volonté à la machine.

La première méthode consiste à écrire ses programmes en **langage machine.** Ce langage se compose exclusivement de 0 et de 1, comme nous l'avons vu dans l'étude de l'unité centrale. Il va sans dire que cette façon de procéder est très rarement utilisée. Il est en effet difficile de se remémorer le code de toutes les instructions de la machine; il faut de plus savoir avec précision l'adresse en mémoire des quantités que l'on manipule.

Pour faciliter la tâche des utilisateurs, les constructeurs livrent avec leur machine un programme appelé *programme d'assemblage,* capable d'effectuer la conversion d'un texte plus aisément compréhensible par l'homme en langage machine. Ce texte est rédigé en *assembleur.* Les facilités offertes par ce langage sont nombreuses. Les codes d'opérations sont désignés par des symboles mnémoniques tels que : ADD pour additionner, MUL pour multiplier, etc. Le programme d'assemblage s'occupe de gérer les adresses en mémoire des données de l'utilisateur. Ainsi, sans plus savoir qu'elle occupe la cellule mémoire d'adresse 1031, le programmeur peut désigner la valeur qu'il manipule par un nom évocateur, par exemple X. S'il veut ajouter une constante logée en CONST à cette valeur X, il écrira ADD CONST, X au lieu de 17 1037 1031 par exemple.

Les langages d'assemblage permettent de rédiger des programmes plus sophistiqués. Ainsi, les compilateurs que nous verrons par la suite peuvent être écrits en langage assembleur. L'utilisation de macro-instructions est souvent permise. Cette technique extrêmement puissante évite d'avoir à répéter des séquences identiques : il suffit de les désigner par un nom symbolique. Elles seront alors réintroduites par le programme d'assemblage à l'endroit où elles sont référencées. Bien qu'il présente un grand progrès par rapport au langage machine, l'assembleur ne résout pas certains problèmes : le programmeur doit être très familiarisé avec la machine; de plus, il est difficile de mettre au point un programme rédigé dans cette langue. Des machines différentes ont des langages machine et donc des assembleurs différents, ce qui complique singulièrement la transplantation de programmes d'une machine à l'autre.

Pour remédier à ces inconvénients, des **langages plus évolués** ont été créés, accompagnés d'efforts de standardisation. Citons parmi les plus utilisés : ALGOL 60 (Algorythmic Oriented Language), FORTRAN (Formula Translation) et BASIC (Beginners Symbolic Instruction Code) dans le domaine scientifique, et COBOL (Common Business Oriented Language), PL1 (Programming Language 1) pour la gestion. A vocation mixte, nous trouvons aussi ALGOL 68 et APL (A Programming Language). Il existe beaucoup d'autres langages évolués, nous n'allons pas les nommer tous. Ils couvrent les domaines de traitement de caractères, des listes et de la simulation. Il existe aussi des programmes de *cross-assemblage* permettant l'interprétation par une machine d'un programme écrit dans le langage machine d'une autre.

Voici les principaux avantages des langages évolués : ils sont indépendants théoriquement de la machine utilisée, ils permettent une manipulation aisée de structures complexes, ils sont faciles à comprendre et ils incluent la gestion automatique des périphériques d'usage courant. L'inconvénient qui en découle tient à la différence de

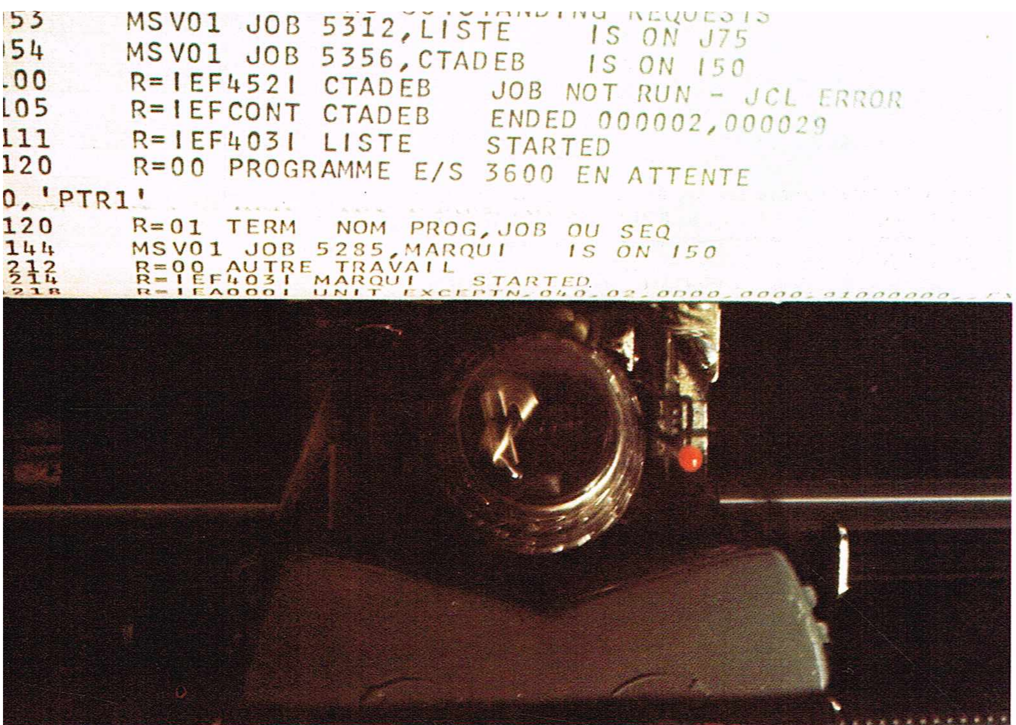

Centre interdisciplinaire régional de calcul électronique d'Orsay - Centre national de la recherche scientifique

▲ ***Informations sur le déroulement des travaux exécutés par l'ordinateur; ces informations sont fournies automatiquement et inscrites sur console maîtresse par le système de programmation qui gère l'ordinateur.***

performance du programme réalisé : le temps d'exécution d'un programme en langage évolué sera plus élevé et la place mémoire utilisée plus grande que dans le cas d'un programme écrit en assembleur. Mais ce coût est en fait plus que compensé par le gain de temps considérable apporté par la facilité de mise en œuvre de ce même programme. Un programmeur qui pourrait, en quelques jours, écrire et rendre opérationnel un programme en FORTRAN mettrait peut-être plusieurs mois avant de mettre au point le même programme écrit en assembleur.

On peut, à titre d'exemple, comparer les différentes façons de coder une instruction simple dans ces langages. Prenons le problème consistant à calculer le prix de revient d'une commande. Le prix de vente unitaire d'un article est symboliquement appelé PU et le nombre d'objets commandés est N. Si le montant de la commande excède 1 000 F, une remise de 10 % est consentie au client. Il s'agit de calculer le montant final de la commande M.

En langage ALGOL, ceci s'écrirait :

M : = PU * N * si PU * N > 1000 alors 0.8 sinon 1.

En FORTRAN, plusieurs instructions seraient nécessaires :

M = PU * N IF (M · GT · 1000) M = M * 0.8

En APL enfin, nous aurions :

$M \leftarrow M \times (1 + 0.2 \times 1000 < (M \leftarrow PU \times N))$

Ces exemples montrent comment le même problème peut être différemment exprimé dans les langages évolués. Ils montrent aussi que la compréhension n'est pas évidente à la lecture d'un texte, bien qu'elle soit facilitée grandement par rapport à l'assembleur.

Les systèmes d'exploitation

Systèmes à monoprogrammation

L'exécution d'un programme écrit dans un langage évolué nécessite certains prétraitements. Tout d'abord le texte du programme doit être *compilé,* c'est-à-dire que la machine doit transformer chaque ordre évolué en toutes ses composantes en langage machine. Le programme obtenu, appelé *module-objet,* sera ensuite lié avec les différents sous-programmes dont il peut avoir besoin. On appelle cette phase *édition des liens.* La version définitive et exécutable par la machine est prête, le programme est alors installé en mémoire et exécuté. Il lit les cartes ou les informations dont il a besoin, les traite et sort les résultats attendus. Lorsque le texte d'un programme a été lu, sur le lecteur de cartes ou à partir d'une machine à écrire, il est rangé sur un support magnétique. Si une *erreur* survient, il est nécessaire de corriger les portions correspondantes du texte du programme. Pour cela, on utilise un programme appelé *éditeur de texte.* Souvent conversationnel, l'éditeur de texte permet de réaliser les commandes telles que : chercher dans le texte la séquence « TOTO » et la remplacer par « TATA » à chaque fois ou seulement une fois; insérer les phrases suivantes; changer un caractère par un autre; etc. Lorsque l'erreur est ainsi rectifiée, il est nécessaire de compiler le nouveau texte et de refaire une édition des liens. Lorsque le programme est jugé satisfaisant, il peut être ajouté aux modules déjà existants d'une *bibliothèque.* Pour cela, on utilise un programme, le bibliothécaire, qui permet de manipuler les textes d'autres programmes : il sert à ajouter un autre module, effacer un texte périmé, remplacer un programme par sa version plus récente. Il permet aussi de connaître la liste de tous les modules connus de la bibliothèque. Pour une utilisation souple de la machine, on a besoin de nombreux programmes. Chaque tâche devant être décrite avec précision, il est prudent d'écrire des programmes suffisamment généraux pour s'adapter à plusieurs cas par le simple ajustement de quelques paramètres.

Nous allons décrire maintenant les différents systèmes d'exploitation. Un système d'exploitation est un ensemble de programmes, en général fournis par le constructeur, qui décharge l'utilisateur de tâches ingrates ou routinières. Ainsi, sauf dans des cas très particuliers, le programmeur n'a pas à se préoccuper de la gestion des entrées-sorties, il utilise pour cela des macro-instructions ou des fonctions du système. D'autre part, le système d'exploitation coordonne les tâches confiées à la machine; il commande l'introduction en mémoire des programmes et veille à leur bon enchaînement; il s'occupe d'allouer les ressources du calculateur aux divers programmes (ces ressources désignent la place en mémoire centrale ainsi que l'accès aux différents périphériques demandés par l'utilisateur); il effectue certains contrôles, par exemple, sur le temps de calcul déjà utilisé par un programme, afin d'éviter qu'un programme qui boucle (c'est-à-dire qui fait sans arrêt le même travail) n'empêche un fonctionnement correct de l'ensemble. Il a la mission, dans certains cas, de donner le contrôle aux tâches les plus urgentes ou de façon périodique aux différents utilisateurs du calculateur.

Définissons maintenant les différentes fonctions et structures d'un système d'exploitation simple, appelé encore **moniteur.** Il est préparé sur un support intermédiaire (ruban papier ou plus souvent mémoire de masse), puis introduit en mémoire centrale au moment de l'initialisation (« bootstrap »). Dès lors, c'est lui qui va gérer toutes les commandes qui lui parviendront. Il sait reconnaître toutes les ressources qu'il a à sa disposition, que ce soient les périphériques et la mémoire centrale ou les différents programmes systèmes dont nous avons déjà parlé. Il reçoit toujours ses ordres de la console maîtresse et souvent, en plus, du lecteur de cartes et d'autres machines à écrire.

Voyons quelles sont les commandes nécessaires à l'exécution d'un programme utilisateur. Suivons pour cela un programmeur, disons Jean. Jean s'assied devant sa machine à écrire et signale sa présence en tapant sur le clavier son numéro d'ordre. En effet, quand Jean sera parti, d'autres usagers utiliseront la machine, et il est nécessaire de bien distinguer les différents utilisateurs. Le moniteur se chargera donc d'attribuer à tous les utilisateurs qu'il connaît une partie de ses ressources (disques) et y rangera les informations propres à chacun. Pour éviter que, par maladresse ou malveillance, les fichiers d'un programmeur ne soient détruits, chaque zone particulière peut être protégée par un mot de passe, associé au numéro d'ordre de l'utilisateur. Lorsqu'il a reconnu Jean, le moniteur se met en attente de ses commandes.

Supposons que Jean désire tout d'abord créer un fichier qui contiendra le texte de son programme; il frappe la commande EDI. Le moniteur le reconnaît et donne le contrôle à l'éditeur du texte qui, poliment, s'annonce en inscrivant un signe distinctif sur la machine à écrire. Jean lui indique alors le nom qu'il désire donner à son programme : ESSAI. Il entre ensuite à l'aide du clavier le texte correspondant. Quand ceci est terminé, Jean rappelle le moniteur pour compiler son programme. Si le langage utilisé est le FORTRAN, il frappe alors la commande FOR. Le moniteur charge en mémoire le programme de traduction d'un texte FORTRAN en langage machine. Jean donne l'ordre au compilateur de traiter le fichier ESSAI de façon à en faire une suite d'instructions assimilables par la machine.

Ensuite, l'appel de l'éditeur de liens par l'ordre LIE donnera à Jean la possibilité d'utiliser les fonctions du système ou de sous-programmes personnels. Par exemple, il est possible en FORTRAN, et dans bien d'autres langages évolués, de calculer la racine carrée d'un nombre X en écrivant simplement SQRT (X). (SQRT est l'abréviation des mots anglais « Square Root » signifiant racine carrée.) Pour le compilateur FORTRAN, cette suite de caractères correspond à l'appel d'une tâche particulière capable de calculer cette racine. Cette tâche, écrite en général par le constructeur, est fournie avec bien d'autres dans une bibliothèque FORTRAN. Le compilateur ne se préoccupe pas de cette bibliothèque ; c'est l'éditeur de lien, qui, lui, connaît son existence et sa composition, qui aura pour mission d'ajouter, derrière celles de l'utilisateur, toutes les séquences d'instructions qui correspondent à ces tâches.

L'édition des liens étant terminée, Jean lance l'exécution de son programme. Il est bien rare qu'un programme soit opérationnel au premier essai : des erreurs peuvent avoir été commises, soit dans la syntaxe du texte en langage évolué, soit dans sa logique. C'est pourquoi, après avoir détecté quelques erreurs, Jean rappellera l'éditeur de texte pour corriger son programme. Il recommencera ensuite toute la procédure que nous venons de décrire jusqu'au moment où son programme lui fournira les résultats qu'il en attend.

Nous venons de décrire un *moniteur conversationnel*. La logique est la même dans le cas d'un moniteur tirant ses directives du lecteur de cartes. Dans ce cas, on parle de *« trains de travaux »* ou *« batch processing »*. En effet, le moniteur va lire les ordres à exécuter sur le lecteur de cartes, et il les traite les uns à la suite des autres jusqu'à ce que toutes les cartes aient été lues. Cette façon de travailler a pour avantage d'obtenir un meilleur rendement de la machine. Dès qu'un travail est terminé, le moniteur enchaîne sur le suivant ; il n'y a pas de temps mort, dû par exemple à une hésitation devant la machine à écrire ou encore à la lenteur de la frappe humaine. Paradoxalement, les délais sont plus longs du point de vue de l'usager. Alors que l'ordinateur répond immédiatement en conversationnel, un délai assez long peut s'écouler entre le moment où l'utilisateur donne ses cartes à l'opérateur et celui où il reçoit le listing comportant les résultats. La rentabilisation d'un système « trains de travaux » nécessite en effet la présence d'opérateurs et d'une organisation qui sont plus contraignants. Les préoccupations qui justifient l'une ou l'autre utilisation de la machine sont très différentes dans les deux cas. Nous verrons que les systèmes plus gros et plus évolués permettent d'employer simultanément ces deux modes de travail.

Systèmes à multiprogrammation

Un inconvénient majeur des systèmes à monoprogrammation est la perte de temps occasionnée par les entrées-sorties. Si un programme a besoin pour travailler de l'information contenue sur une carte ou sur un disque magnétique, il demande la lecture correspondante et attend qu'elle soit terminée. Ce temps d'attente est inemployé ; pour l'utiliser de façon constructive, on fait appel à la multiprogrammation. Le principe de cette méthode est d'entrer plusieurs programmes en mémoire et de permettre l'utilisation des temps morts d'un programme par les autres. Imaginons, par exemple, que deux programmes P1 et P2 sont installés en même temps dans la mémoire centrale. Si P1 demande une entrée ou une sortie sur un périphérique, le système donnera le contrôle à P2 qui pourra travailler. Lorsque l'échange demandé par P1 sera terminé, le contrôle sera rendu à P1 jusqu'à la prochaine entrée ou sortie d'information. Les différentes grandes familles de systèmes à multiprogrammation se distinguent par la façon de donner le contrôle aux différents programmes demandeurs.

Le moniteur temps réel

La loi d'allocation de la mémoire centrale d'un tel système est la priorité. Plusieurs tâches sont installées, attendant pour être activées une interruption du périphérique qui leur est associé ou de l'horloge. C'est le contexte extérieur qui agit. L'ordinateur a pour mission de traiter, lorsqu'ils surviennent et suivant leur priorité, les événements provenant du monde extérieur. Il doit apporter une réponse à la question posée dans un temps très court. L'utilisation de ces systèmes couvre aussi bien les domaines industriels (commande de processus de toutes natures, surveillances) que certains domaines de la gestion (réservation de places en temps réel pour les trains ou les avions, gestion de stocks, documentation en ligne). Lorsque toutes les tâches sont inactives, l'ordinateur est utilisé pour traiter les programmes des utilisateurs en « batch » ou en conversationnel. A l'échelle de temps humaine, l'ordinateur semble travailler pour tous les usagers simultanément. Cependant, de temps à autre, l'utilisateur perçoit un temps d'attente. Cela se produit lorsque la machine doit effectuer des tâches plus prioritaires.

Le moniteur temps partagé

Dans ce type de multiprogrammation très orienté pour le mode conversationnel, tous les utilisateurs ont la même priorité ; le système leur alloue une fraction de temps à tour de rôle, mais comme l'utilisateur humain a des temps de réponse élevés par rapport à la machine, il ne s'en rend absolument pas compte : pour lui, la machine répond aux questions posées avec promptitude. Des problèmes de délai se posent cependant, lorsque le nombre d'utilisateurs connectés à une même machine devient trop élevé. Il se produit alors un phénomène de saturation, et les performances du système s'effondrent.

Évolution du moniteur train de travaux

La logique du traitement par train de travaux n'est pas modifiée par la multiprogrammation. En revanche, la façon de procéder du système n'est plus la même. Deux tâches spéciales, nommées « spooler », sont créées et ont pour but de gérer les entrées-sorties des deux périphériques principaux de ce genre d'application : le lecteur de cartes et l'imprimante. La tâche affectée au lecteur de cartes est mise en route et un prétraitement élémentaire est effectué. Dès que toutes les informations nécessaires sont rassemblées, cette tâche alerte le moniteur qui peut commencer son travail. Celui-ci aura un rendement accru, puisqu'il n'aura jamais à attendre la lecture d'une carte. Le même mécanisme est adopté en sortie. Les programmes écrivent leurs résultats sur le disque, et la tâche associée à l'imprimante se charge d'éditer ces lignes. L'avantage de ce système réside dans le fait que les programmes sont affranchis des délais inhérents aux périphériques lents et ont donc un meilleur rendement. Les périphériques sont utilisés au mieux puisqu'ils travaillent toujours à leur vitesse maximale. Enfin plusieurs programmes peuvent utiliser simultanément la même imprimante sans risques de conflit : les lignes qu'ils veulent imprimer sont écrites sur disque, et le « spooler » les édite tour à tour, sans qu'il y ait risque de chevauchement.

Les différentes multiprogrammations que nous venons de voir ne peuvent être opérationnelles efficacement que sur des ordinateurs de taille et de performances suffisantes.

La micro-informatique

Le terme de micro-informatique englobe à la fois les micro-ordinateurs et les microprocesseurs. Le préfixe « micro » évoque avant tout une volonté de réduction de volume ; il s'agit plutôt d'une évolution de la technologie fondamentale. On définit un microprocesseur comme étant formé d'un ou de plusieurs circuits intégrés de très grande complexité, réalisant les fonctions d'une unité centrale classique, telle que nous l'avons décrite auparavant. Un micro-ordinateur est un ordinateur construit autour d'un microprocesseur ; par conséquent, son prix est très réduit. Le marché de ces composants est donc ouvert sur les applications où les performances nécessitées ne sont pas très élevées, non plus que le budget alloué.

Un bouleversement s'est produit dans la mentalité des informations depuis l'avènement de la micro-informatique. La tendance à concentrer tous les « pouvoirs » et les informations entre les circuits d'une seule super-machine très puissante, très chère et très fragile par son unicité, se transforme petit à petit en une volonté de décentralisation. Un niveau de décisions élémentaires est d'abord constitué par des machines de faibles coûts et performances, réservant pour une machine centrale plus

▶ *Le micro-ordinateur IBM 5100 ; cet appareil comporte un clavier, un petit écran cathodique incorporé et utilise les bandes magnétiques sous forme de minicassettes comme support d'information. Réalisé autour d'un microprocesseur, ce type d'ordinateur présente l'avantage d'être de petite taille, portable, et d'être accompagné d'une bibliothèque de programmes.*

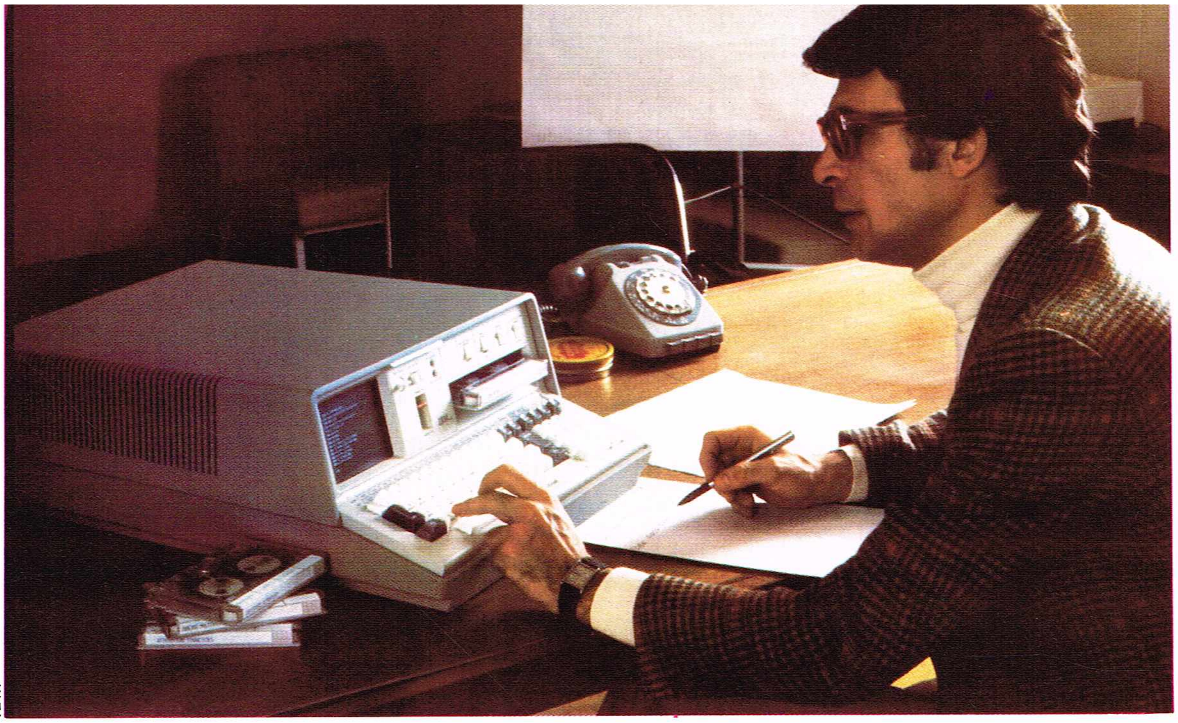

IBM

puissante les problèmes plus complexes ou demandant une plus grande quantité d'informations. Les pannes de la machine centrale ne sont plus alors ressenties comme la catastrophe qui immobilise tout le service informatique, mais comme un accident qui laisse subsister les « arcs-réflexes » au niveau des micromachines frontales. Dans une usine, par exemple, les contrôles et les commandes élémentaires des processus en fonctionnement seraient assurés dans des conditions de sécurité normale. Les statistiques et l'optimisation de plus haut niveau seraient suspendues pendant la durée de la panne. De plus, si la sécurité l'exige, plusieurs micro-ordinateurs peuvent être mis en parallèle pour une même fonction, du fait de leur faible coût.

Quels sont les marchés privilégiés du microprocesseur ? Il sert tout d'abord à remplacer dans certains cas la logique câblée des ordinateurs. En effet, celle-ci est calculée et réalisée une fois pour toutes ; elle peut exiger un grand nombre de composants et donc être onéreuse ; enfin elle est figée et n'offre guère de souplesse d'utilisation. A l'inverse, le microprocesseur est d'un emploi très souple, car la logique qu'il remplace est élaborée par programmation. Les micro-instructions permettent une mise en place ou des modifications aisées et rapides. Le microprocesseur sort maintenant du marché informatique pour s'installer dans l'électroménager (machines à laver, cuisinières programmables, etc.), les machines à calculer diverses et les affichages numériques (appareils de mesure, montres)... L'avenir qui lui est offert est encore difficile à définir de façon précise, mais s'annonce brillant. On peut citer, parmi quelques réalisations dont il est le centre : la conduite de machines-outils de processus industriels ; la centralisation et la répartition d'informations ; l' « intelligence » de certains terminaux, comme les caisses enregistreuses ou les cartes de crédit, la réalisation d'interfaces souples en informatique. Il est aussi très utilisé dans les télécommunications, dans la régulation du trafic routier par commande des feux de signalisation, dans le traitement automatique de signaux.

▼ *Un microprocesseur de technologie* **MOS** *fabriqué par Sescosem. Il s'agit d'un circuit intégré ou d'un ensemble de circuits de très grande complexité réalisant les fonctions d'une unité centrale classique.*

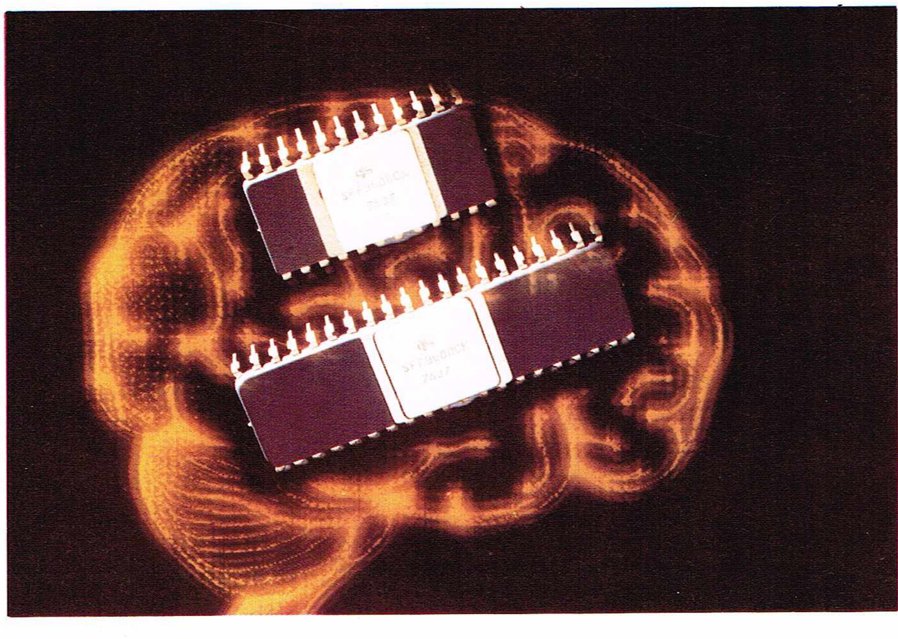

Thomson - CSF - Jacques Pierre

Les applications de l'informatique

On peut distinguer trois grands secteurs d'activité de l'informatique. Le plus important à l'heure actuelle est celui de la **gestion**. Les machines utilisées sont souvent puissantes, les périphériques nombreux, car les informations traitées sont volumineuses. Cela implique la réalisation d'une organisation rigide autour de l'ordinateur et la création d'emplois spécialisés : pupitreurs, opérateurs dans la salle machine ; préparateurs et bandothécaires chargés de la prise en compte des informations des utilisateurs ; les résultats fournis par la machine sont répartis par un service spécial (« dispatching ») aux personnes concernées. Les différents programmes traités par la machine ont été réalisés par une équipe. Le chef de projets définit avec le client les buts de l'application, les moyens mis à la disposition, les informations traitées. L'analyste organise de façon plus informatique le traitement correspondant et le découpe en unités fonctionnelles. Il donne une présentation définitive (format) aux données qui seront utilisées dans les chaînes de traitement. Le programmeur, à partir de ces cahiers des charges, écrit et met au point les différents programmes nécessaires. Il utilise généralement un langage évolué (COBOL, PL1).

Les applications classiques de la gestion sont : la facturation, la paye, la gestion des stocks, la comptabilité et les statistiques. La *facturation* a été une des premières utilisations de l'ordinateur : il s'agit d'établir automatiquement les factures à envoyer aux clients de l'entreprise. La facturation demande la manipulation de fichiers volumineux, ce qui se prête parfaitement à l'automatisation. Les traitements sont bien formalisés. L'ordinateur joue pleinement son rôle, puisqu'il est capable de retrouver très vite dans des fichiers de grande taille les informations utiles et d'effectuer sur elles des traitements routiniers.

La *paye* pose un problème d'un autre ordre. Sur le plan informatique, il s'agit là aussi d'une manipulation de dossiers et de calculs sur les valeurs obtenues. Mais l'aspect social est très important ; une sécurité absolue doit donc être mise en place tant pour la rigueur des traitements que pour la conservation des dossiers. Le secret doit être gardé.

De même que les prix évoluent dans le cas de la facturation, les salaires changent aussi ; il est donc nécessaire de prévoir une mise à jour constante des informations contenues dans différents fichiers. Les mouvements

◀ ***Parmi les grands secteurs d'activité de l'informatique, celui de la gestion est le plus important. Les machines sont souvent puissantes et le personnel nombreux.***

de personnel doivent aussi pouvoir être pris en compte aisément par la machine.

La *gestion de stocks* consiste à permettre aux responsables de connaître en temps utile l'état des réserves des produits qu'ils utilisent. Chaque mouvement de marchandises doit être appréhendé et pris en compte immédiatement. De la même manière, les réapprovisionnements sont saisis. La gestion de stocks peut aller plus loin. Par des méthodes prévisionnelles appropriées, l'ordinateur peut donner une estimation plausible des dates de commande de nouveaux produits; cela évite de se trouver démuni face à la demande de la clientèle, mais sans pour autant augmenter les réserves dans des proportions trop fortes, à cause des coûts de stockage et de la fragilité des marchandises périssables. Dans certains magasins, les caisses enregistreuses sont directement connectées à un ordinateur qui peut organiser le garnissage des rayons et préparer automatiquement les bons de commande pour les fournisseurs.

Certaines phases de la *comptabilité d'une entreprise* sont aisément automatisables, c'est un domaine où la rapidité de l'ordinateur est précieuse et permet de réaliser des tâches monotones. De nombreuses *statistiques* peuvent être aussi élaborées par ordinateur. Des applications intégrées telles que la *gestion automatique* et le *contrôle de production* se développent de plus en plus. Les renseignements divers donnés par la machine permettent aux responsables de prendre des *décisions* en meilleure connaissance de cause.

Les techniques de transmission de données permettent à des terminaux très éloignés d'être connectés à un ordinateur gérant une base de données. C'est ainsi que sont rendues possibles les manipulations d'informations communes à plusieurs entreprises ou filiales. La réservation de places d'avions et de trains fonctionne de cette façon.

L'*enseignement assisté par ordinateur* et la *gestion en temps réel* sont quelques-unes des multiples activités rendues possibles par la téléinformatique et par la concentration d'informations en bases de données.

Un deuxième grand secteur de l'industrie informatique se situe dans le **monde industriel.** L'endurance d'un ordinateur est très grande et permet une surveillance constante des processus les plus compliqués. La prise de décisions immédiates peut lui être confiée dans les cas d'urgence. Des écrans cathodiques ou des machines à écrire fournissent un état constant du système. L'opérateur agit à un niveau supérieur en donnant les consignes et en indiquant les procédures d'urgence.

La *commande de machines-outils automatiques* est aussi effectuée à l'aide d'ordinateurs qui, à partir de plans et d'ordres divers, calculent les différentes cotes de la pièce, prévoient tous les mouvements nécessaires de la machine-outil pour sa confection et les font exécuter.

Le troisième secteur d'activité de l'informatique se situe dans le **domaine scientifique.** Contrairement à la gestion, l'accent dans ce cas est mis sur les calculs et les traitements en mémoire centrale plus que sur les manipulations de données volumineuses. Une des applications les plus spectaculaires est le *calcul de trajectoires des satellites* et autres sondes spatiales, ainsi que leur télécommande.

Les *applications biomédicales* se développent. Une recherche importante est faite pour aider les praticiens dans leurs diagnostics.

Loin de vouloir substituer l'ordinateur à l'homme, on cherche à l'utiliser pour évaluer des quantités difficiles à saisir précisément par l'homme (fréquences en particulier). Les modélisations de systèmes et leur identification supposent parfois la résolution simultanée de centaines d'équations, que l'homme ne peut résoudre de façon satisfaisante : une heure de calcul d'une machine puissante représente des mois de travail d'une équipe de plusieurs hommes dans ce cas. Bien sûr, la position du problème ne peut pas, à l'heure actuelle, être laissée à l'initiative de la machine.

La *simulation* permet d'envisager ce qui se passerait si certaines conditions se produisaient. Ainsi, certaines expériences peuvent être simulées sur l'ordinateur avant d'être tentées réellement, ce qui évite des destructions ou des gaspillages au cas où l'évolution du processus n'est pas satisfaisante. Cela permet aussi un accroissement de la sécurité dans les études de ponts, d'automobiles, de résistance de matériaux.

Les développements des dispositifs graphiques ajoutent encore à la souplesse d'utilisation de l'informatique. Suivant les consignes qu'il donne, l'architecte suit, sur son écran de visualisation, l'évolution de l'autoroute ou de l'immeuble qu'il élabore. Dans le domaine de la création artistique, l'ordinateur est aussi utilisé, particulièrement dans la peinture et la musique.

L'évocation des possibilités énormes de l'informatique permet de constater que cette science est sortie de l'enfance. Cependant, son caractère reste encore fragile, et son adolescence passe par une prise de conscience. L'ordinateur n'est pas un dieu; mais c'est un outil très puissant qui ne doit pas être sous-estimé. Une standardisation et un assouplissement considérable de son utilisation conduiraient les informaticiens à sortir du domaine trop étroit où les cantonnent le jargon informatique et une technicité asservissante. L'informatique sera adulte quand elle sera utile à tous et utilisée par tous.

BIBLIOGRAPHIE

LILEN H., *du Microprocesseur au micro-ordinateur*, Éd. Radio, 2e édition, 1976. - MATHELOT P., *l'Informatique*, Que sais-je? n° 1371, P.U.F., 3e édition, 1975. - MEINADIER J.-P., *Structure et fonctionnement des ordinateurs*, Série informatique (Sciences humaines et sociales), Larousse, 1971. - POULAIN P., *Éléments fondamentaux de l'informatique. Les Ordinateurs*. Université et technique, Dunod, 1972.

J. Bordas - Fotogram

▶ *Intérieur d'une cabine de prise de son au studio d'enregistrement des Dames, à Paris.*

RADIODIFFUSION

Historique

En 1887, H. Hertz provoque à partir d'une étincelle électrique les oscillations haute fréquence prévues par le théoricien J. C. Maxwell, et, en 1890, Édouard Branly découvre le « cohéreur » permettant de détecter ces ondes électromagnétiques. Cinq ans plus tard, A. Popov invente l'antenne. Dès lors, tout est prêt pour le développement de la télégraphie sans fil (signaux codés) et, en 1910, un premier poste militaire à étincelle est installé, utilisant la tour Eiffel comme support d'antenne. La même année, Pickard, aux États-Unis, invente le détecteur à galène; trois ans plus tôt, Lee de Forest avait eu l'extraordinaire idée de la lampe à trois électrodes fondée sur la diode de Fleming et permettant la réalisation d'amplificateurs et d'oscillateurs.

Mais c'est en février 1921 que le phénomène de la radiodiffusion prend en France toute sa signification avec la naissance de la téléphonie sans fil : ce sont, dès juin 1921, les premiers radioconcerts et les premiers journaux parlés. L'emploi de la lampe amplificatrice se généralise, et l'écouteur se transforme progressivement en un véritable haut-parleur, tandis que la puissance des émetteurs atteint quelques kW. La conception du récepteur est déjà tout à fait semblable à celle d'un poste moderne. On assiste alors à la naissance de l'industrie de la radio. Les émetteurs se multiplient et, dès 1930, certains rayonnent une puissance de 100 kW. La création de centres d'émissions en ondes décamétriques permet d'atteindre les pays éloignés, et la Seconde Guerre mondiale éclate alors que les grandes nations terminent des réseaux destinés à assurer une diffusion sur l'ensemble de leur territoire. L'après-guerre concrétise l'essor industriel par une accélération du progrès technologique (réduction considérable de l'encombrement et de la consommation du matériel). L'utilisation du transistor permet vers 1950 la fabrication des premiers postes portatifs. L'option fondamentale de la radiodiffusion, tant sonore que télévisée, est de s'adresser au grand public, avec pour conséquence la course aux fortes puissances et aux hautes fréquences à la limite de la technologie du moment. Enfin, la qualité du son est améliorée de façon presque définitive par la modulation de fréquence et la stéréophonie (« tuners » haute fidélité).

En France, la radiodiffusion est un service public, et un monopole d'État. La loi interdit la construction d'émetteurs sur le territoire national, mais rien n'empêche les ondes électromagnétiques de franchir les frontières : des émissions privées (radios périphériques) peuvent être captées par les postes de commerce. La vigilance de l'État et la concurrence n'ont laissé subsister qu'un petit nombre de postes émetteurs, dont les budgets sont tous importants : leur puissance d'information («media ») et les intérêts mis en jeu font que, même si les motivations sont à l'origine différentes, radio d'État et radios privées présentent de nombreux points communs.

Les émetteurs à diffusions restreintes (radios amateurs) sont soumis aux lois sur les télécommunications qui interdisent toute transmission privée qui pourrait être assurée par les P. et T. Malgré cette limitation, la radio d'amateur trouve de nombreux adeptes. Nous lui devons d'avoir attiré l'attention sur les propagations extraordinaires des ondes courtes. Le parc national d'appareils récepteurs de radiodiffusion compte environ 14 millions de postes, dont un million et demi est recensé, et le nombre des récepteurs équipés de la modulation de fréquence ne cesse d'augmenter.

Malgré la sévère concurrence de la télévision, la « radio » restera sans doute encore très longtemps un moyen privilégié d'information, de divertissement, et, dans certains cas, de culture.

Généralités

La *radiodiffusion sonore* est la transmission à distance du son par voie hertzienne.

L'information à transmettre est une onde sonore (bruit, parole ou musique). Cette onde crée une variation de la pression de l'air que détecte un microphone; celui-ci délivre une tension électrique, proportionnelle à la pression acoustique, qui sert à moduler une caractéristique (de façon générale, l'amplitude ou la fréquence) de l'onde électromagnétique rayonnée par l'émetteur. Le récepteur détecte les variations de cette caractéristique qu'il met sous la forme d'une tension proportionnelle à la modulation initiale. Enfin, un autre transducteur électro-acoustique (haut-parleur, écouteur) transforme cette tension en une pression acoustique proportionnelle au son original.

Les programmes sont souvent enregistrés avant d'être diffusés. Les studios radiophoniques sont des salles acoustiquement étudiées (isolation, réverbérations par les parois), d'un volume compris entre quelques dizaines et plusieurs milliers de mètres cubes. Le preneur de son effectue divers réglages dans la cabine technique, voisine du studio et en communication visuelle avec lui (mélanges avec des passages enregistrés, modification et correction du son, effets spéciaux...).

Ce programme est envoyé dans une « cabine de programme », et le programme final est composé à l'aide

des différentes séquences qui lui parviennent. Annonces et programmes d'attentes (disques, passages enregistrés) proviennent d'un studio spécialisé.

Un centre de modulation (CDM) permet la commutation à l'intérieur d'un réseau entre les divers émetteurs et cabines de programme. Les liaisons sont assurées par câbles téléphoniques ou par des voies hertziennes réservées en ondes centimétriques.

La production radiophonique met à profit deux possibilités essentielles et complémentaires : l'instantanéité du reportage et l'enregistrement, qui sont respectivement la vie et la richesse d'une émission. Le reportage instantané s'est progressivement évadé du studio avec l'amélioration de la technique. De son côté, l'enregistrement a accru les possibilités, et finalement la qualité de la production. Utilisé pendant plus de dix ans à cet effet, le disque souple (en aluminium verni, il n'admettait que quelques passages) a joué un rôle considérable dans l'évolution des structures radiophoniques. Actuellement, et depuis son invention, le magnétophone le remplace avec une fidélité et une commodité d'utilisation inégalées. En contrepartie, la radiodiffusion risquait, ces dernières années, de perdre de sa fraîcheur en cédant à cette facilité : on constatait jusqu'à 80 % de programmes à base d'enregistrements. Cette proportion est actuellement en diminution.

Propagation des ondes radio-électriques

Le support de l'information entre l'antenne d'émission et l'antenne de réception est une onde électromagnétique (onde porteuse).

Tout comme l'air propage les ondes sonores, la mer les ondes de la houle, le vide ou l'air (et en général n'importe quelle région de l'espace) est capable d'assurer la propagation d'un champ électromagnétique. Comme pour tout phénomène ondulatoire, on peut lui attribuer une amplitude, une fréquence, une longueur d'onde et une vitesse. Fréquence f, longueur d'onde λ et vitesse c sont liées par la relation :

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Le champ électrique et le champ magnétique sont perpendiculaires entre eux et à la direction de propagation. Observées en un point fixe de l'espace, leurs amplitudes varient sinusoïdalement avec la fréquence f et sont proportionnelles; ce qui explique qu'en radio-électricité le champ électromagnétique est traditionnellement caractérisé par la valeur du champ électrique.

La vitesse c ne dépend pratiquement pas de la fréquence, elle est donc la même pour toute onde électromagnétique; en particulier, c est la vitesse de la lumière (environ 300 000 km/s).

En radiodiffusion, on caractérise souvent l'onde par sa longueur plutôt que par sa fréquence. Les domaines de longueurs d'onde et leur dénomination sont les suivants :

— ondes kilométriques : de 2 à 1 kilomètre (anciennes « grandes ondes ») ;

— ondes hectométriques : de 571 à 120 mètres (anciennes « petites » et « moyennes » ondes) ;

— ondes décamétriques : de 93,75 à 13,5 mètres (anciennes « ondes courtes ») ;

— ondes métriques : de 7,32 à 1,39 mètre (anciennes « VHF ») ;

— ondes décimétriques : de 64 à 31 centimètres ;

— ondes centimétriques : de 2,56 à 2,36 centimètres.

Des accords internationaux délimitent des « canaux » à l'intérieur de ces bandes de fréquence (*fig.* 1).

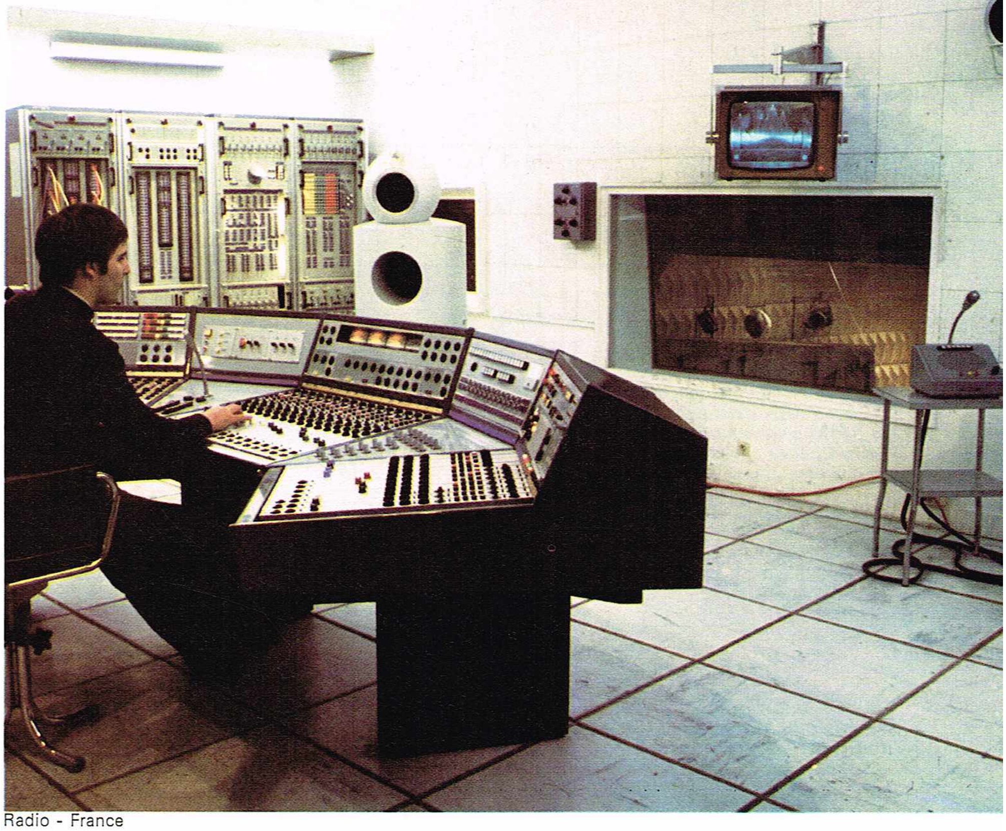
Radio - France

Radio - France

▲ ***Deux vues des studios d'enregistrement de Radio-France; en haut, la régie du studio 104 (enregistrements réalisés dans le grand auditorium); en bas, la régie du studio 134 avec, à l'arrière-plan, une interview dans la cabine de prise de son.***

▼ ***Figure 1 : les différents canaux attribués à la radiodiffusion.***

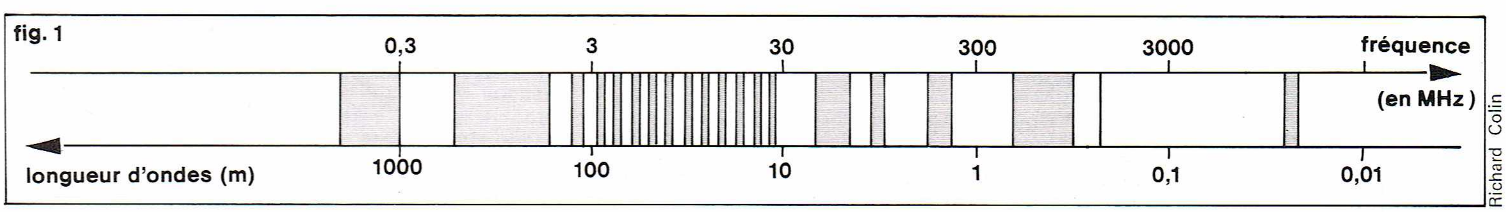

▶ *Figure 2 : le phénomène de réfraction par l'atmosphère ; l'indice de réfraction de la basse atmosphère décroît avec l'altitude, et il en résulte une courbure de la trajectoire du rayonnement électromagnétique.*
Figure 3 : le phénomène de diffusion par l'atmosphère. Les turbulences atmosphériques et de petites discontinuités de l'indice de réfraction sont à l'origine d'une réémission partielle des ondes métriques et inférieures.

▼ *Figure 4 : le phénomène de réflexion sur l'ionosphère ; il existe un angle limite α_0 au-delà duquel il n'y a plus réflexion (sin α_0 est inversement proportionnel à la longueur d'onde). Pour une longueur d'onde donnée, il existe donc entre l'émetteur et le récepteur une « zone de silence » que l'onde réfléchie ne peut atteindre. Ce terme de « zone de silence » n'a de sens que pour les ondes courtes dont la propagation directe est négligeable ; en onde longue, cette zone est couverte par l'onde directe.*
Figure 5 : le phénomène de « fading » ; dans le cas des ondes hectométriques, le rayonnement pénètre dans la zone de réflexion où l'interférence des deux champs provoque d'importantes perturbations de la réception.

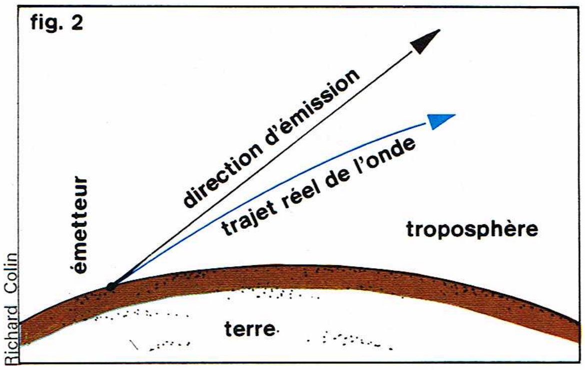

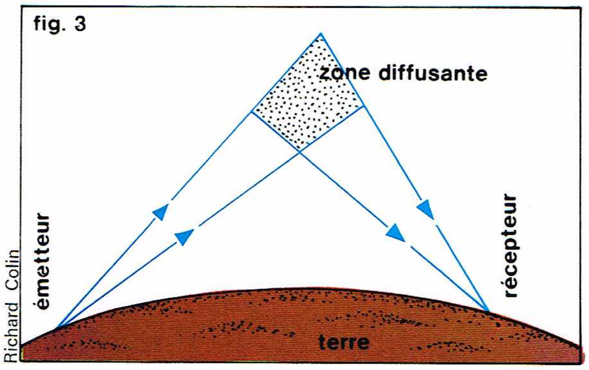

Si, en champ libre, la propagation des ondes ne dépend pas de la fréquence, ce n'est plus le cas en présence d'obstacles : une onde ne « voit » un objet que si les dimensions de celui-ci atteignent la longueur d'onde. Ainsi, un objet intercepte la lumière et devient visible dès que sa dimension est supérieure à un demi-micron, alors que les murs d'un bâtiment sont parfaitement transparents pour une onde radio kilométrique.

L'onde se propage à peu près comme une onde libre si, d'une part, dans sa direction de propagation, elle ne rencontre aucun obstacle entre l'émetteur et le récepteur, et si, d'autre part, elle reste éloignée des obstacles d'au moins une dizaine de longueurs d'onde : pour les émetteurs terrestres, cette condition n'est réalisée que par les longueurs d'onde métriques et inférieures, et lorsque l'émetteur est visible du récepteur. Une autre méthode d'émission consiste à rayonner parallèlement au sol : ce dernier absorbe l'onde d'autant plus rapidement qu'il est moins conducteur et que la longueur d'onde est courte. C'est pourquoi la radio a débuté avec les ondes myriamétriques (10 km).

Il ne faut pas confondre ce type de propagation avec la propagation directe : par exemple, le milieu marin (bon conducteur) est impropre à la transmission radio-électrique (entre sous-marins par exemple), mais il guide l'onde à sa surface avec une faible absorption.

Outre ces deux types de transmission, on observe des réfractions, diffusions et réflexions dues à l'atmosphère : les propriétés électromagnétiques de l'air sont voisines de celles du vide, mais, sur de larges distances de propagation, certains effets peuvent prendre de l'importance. Ainsi, l'indice de réfraction de l'atmosphère dépend de l'altitude : l'onde ne se propage plus en ligne droite. Pour le calcul des distances de propagation, on peut montrer que tout se passe comme si la trajectoire était rectiligne et le rayon terrestre multiplié par 4/3 (*fig.* 2).

Pour certaines fréquences (ondes métriques), les phénomènes de diffusions par les inhomogénéités de l'air deviennent sensibles : la région de l'atmosphère « éclairée » par l'onde rayonne à son tour une partie de l'onde vers la terre (*fig.* 3). Enfin, la haute atmosphère possède des propriétés électriques et magnétiques agissant sur l'onde : les ondes suffisamment longues sont réfléchies à quelques centaines de kilomètres d'altitude par l'ionosphère et renvoyées sur la terre. Très affaibli pour les plus grandes longueurs d'onde, ce phénomène n'est sensible que pour les ondes moyennes (dont l'affaiblissement est lui-même beaucoup plus important le jour que la nuit) et pour les ondes décamétriques (qui sont peu affaiblies) ; lorsqu'il y a réflexion, les émissions en ondes décamétriques peuvent parcourir plusieurs milliers de kilomètres (*fig.* 4).

Si le récepteur reçoit à la fois l'onde directe et l'onde réfléchie (dont le retard est lentement variable en fonction des perturbations de l'ionosphère), leur interférence provoque le phénomène du « fading » (variation périodique du niveau de réception), insensible dans les postes modernes, dont le niveau est automatiquement maintenu constant (CAG) [*fig.* 5].

La connaissance des phénomènes de propagation sur terre est essentielle pour l'exploitation des réseaux d'émetteurs. L'étude en a été longue et difficile (statistiques journalières, saisonnières, et même décennales). L'utilisation des réémetteurs sur satellites, qui bouscule un peu les données du problème, se révèle de plus en plus intéressante.

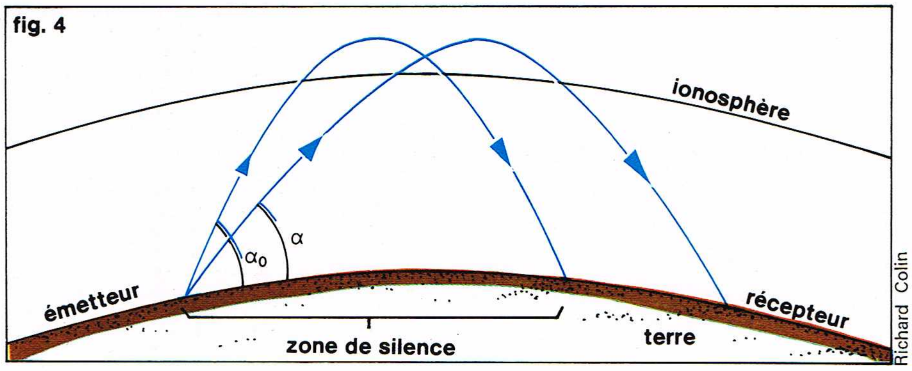

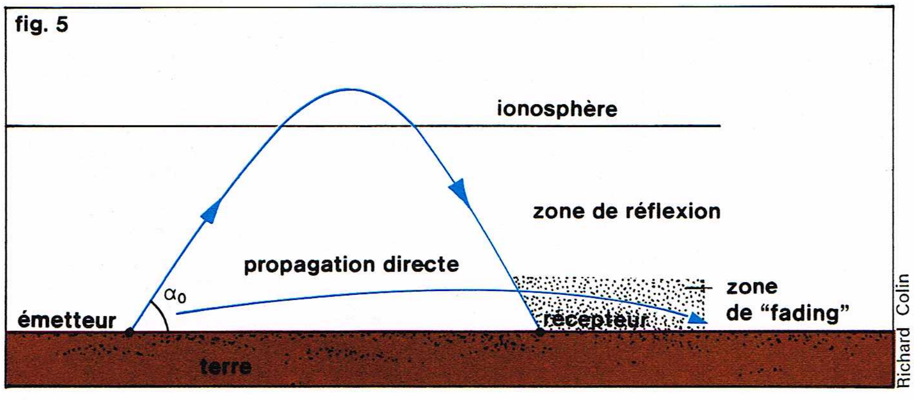

Production des ondes électromagnétiques

Il existe de nombreuses sources naturelles d'ondes radio-électriques : la plus connue, pour son effet désastreux sur l'écoute des émissions en modulation d'amplitude, est l'éclair de l'orage. C'est justement par une étincelle plus modeste qu'a débuté la radio-électricité. Mais, contrairement à l'optique, dont la période « cohérente » vient de débuter avec la réalisation du laser, la radio-électricité a rapidement bénéficié de sources de plus en plus cohérentes, c'est-à-dire capables de produire des ondes de fréquence et de phase déterminées, augmentant ainsi considérablement la densité d'information transportable par l'onde.

Pour rayonner une onde électromagnétique avec un rendement suffisant, il est nécessaire de faire circuler un courant de haute fréquence dans un *circuit d'antenne* dont les dimensions sont de l'ordre de la longueur d'onde. Chaque élément du circuit d'antenne parcouru par le courant alternatif rayonne un champ électromagnétique dont l'intensité décroît (en champ libre) proportionnellement à la distance (à la différence d'un champ statique qui s'affaiblit proportionnellement au carré de celle-ci). Le calcul du rayonnement total d'une antenne (grandeur et direction) s'obtient par intégration des effets de ces petits éléments de courant qui la

composent (dipôles électriques de Maxwell). En particulier, on comprend qu'un circuit fermé de petites dimensions devant la longueur d'onde ne rayonne pas à grande distance, à cause de la compensation entre ses différentes parties.

La résistance de rayonnement R_0 est donnée par l'expression : $P = R_0 I^2$, P étant la puissance moyenne rayonnée, I l'intensité dans l'élément de courant. L'impédance caractéristique ramenée au point d'excitation de l'antenne doit être adaptée au générateur qui l'alimente ; si leurs impédances caractéristiques sont différentes, une partie de l'onde est réfléchie par l'antenne, ce qui augmente inutilement les pertes. La sensibilité de ce phénomène à la fréquence est inversement liée au diamètre des conducteurs utilisés par l'antenne (possibilité d'antennes « large bande »).

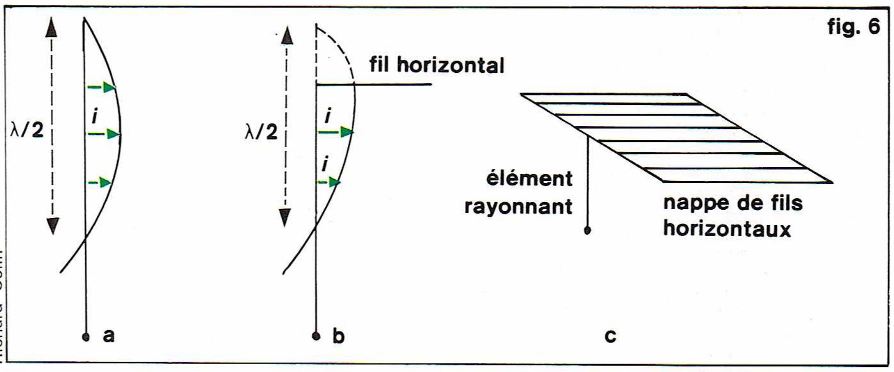

Richard Colin

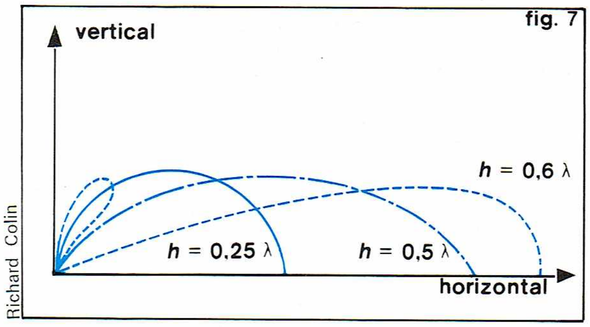

Richard Colin

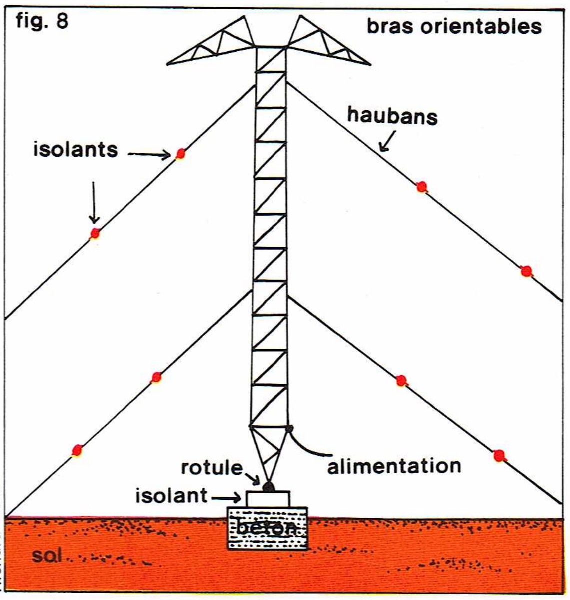

Richard Colin

Lorsque l'antenne est constituée par un simple *fil vertical*, elle ressemble à un circuit ouvert (*fig.* 6a). En fait, il s'agit bien d'un circuit fermé, la haute fréquence traversant le condensateur formé par l'espace entre le sol et le fil vertical. Pour diminuer les pertes dans le sol, il est d'ailleurs nécessaire de le rendre conducteur sur une grande distance. On choisit sa longueur un peu supérieure à la demi-longueur d'onde émise. Le courant dans l'antenne, nul au sommet et maximal à mi-hauteur, affecte la forme d'une onde stationnaire. Cette disposition permet la meilleure concentration du rayonnement dans la direction horizontale (en particulier, on évite les phénomènes de « fading » pour les ondes hectométriques en diminuant l'énergie rayonnée vers l'ionosphère) [*fig.* 7].

Cette forme d'antenne est réalisable pour les longueurs d'onde déca- et hectométriques : un fil vertical est supporté par un pylône isolé du sol. L'antenne demi-onde n'est plus possible pour les ondes kilométriques, on la remplace par une antenne quart-d'onde, ou on charge l'extrémité de l'antenne par une capacité (*fig.* 6c). Pour des raisons d'économie et afin d'élargir la bande passante de l'antenne, on utilise souvent directement le pylône comme élément rayonnant (*fig.* 8).

Édouard Berne - Fotogram

◄▲ Figure 6 : la distribution du courant dans une antenne à fil. Pour rayonner avec une antenne plus courte une quantité d'énergie comparable à celle de l'antenne demi-onde (a)*, on charge son extrémité par un fil horizontal* (b) *qui constitue une capacité et qui ne participe pas au rayonnement (le courant moyen dans l'antenne est ainsi augmenté). En onde longue, l'antenne est chargée par une capacité élevée* (c)*, et l'élément rayonnant est très court devant la longueur d'onde ; il est donc assimilable à un petit dipôle de Maxwell.*

Figure 7 : diagramme de rayonnement d'une antenne à fil vertical, non chargée ; pour une hauteur d'antenne h égale au quart de la longueur d'onde, le diagramme a la forme d'une demi-circonférence. Pour une hauteur supérieure à la demi-longueur d'onde, un second lobe apparaît. Ce type d'antenne étant utilisé en onde moyenne, il convient d'augmenter le rayonnement horizontal et de réduire le rayonnement vers l'ionosphère (risque de fading). Le meilleur compromis est obtenu pour une hauteur un peu supérieure à la demi-longueur d'onde (h = 0,65 λ). Si l'antenne est chargée par une capacité, la hauteur la plus intéressante est égale à 0,55 λ.

Figure 8 : une antenne pylône ; l'adaptation de cette antenne est ajustée par l'orientation des bras terminaux (capacité variable).

◄ L'antenne émettrice située au sommet de la tour Eiffel (320,755 m de hauteur) assure l'émission pour les ondes de radio et de télévision.

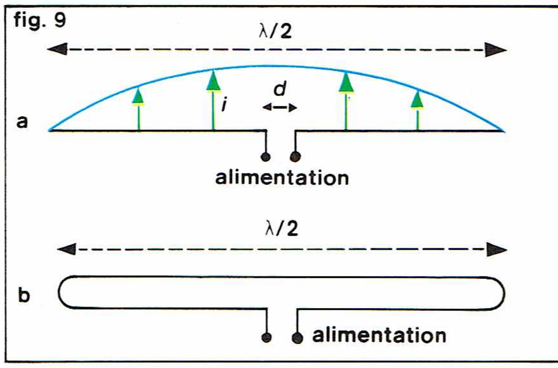

Richard Colin

▶ ***Figure 9** : deux types d'antennes utilisées en ondes métriques ;* **a, antenne dipôle ;** *utilisée en onde courte, cette antenne est formée d'un fil de longueur égale à la demi-longueur d'onde et est coupée en son milieu pour permettre l'alimentation ; sa résistance de rayonnement est d'environ 73 Ω, et son impédance caractéristique (quelques centaines d'Ω) dépend du diamètre du conducteur et de l'écartement des fils ;* **b, antenne trombone ;** *variante de l'antenne dipôle, elle possède sur celle-ci l'avantage d'une résistance de rayonnement plus élevée et d'une impédance caractéristique plus faible. La largeur de bande passante est également augmentée.*

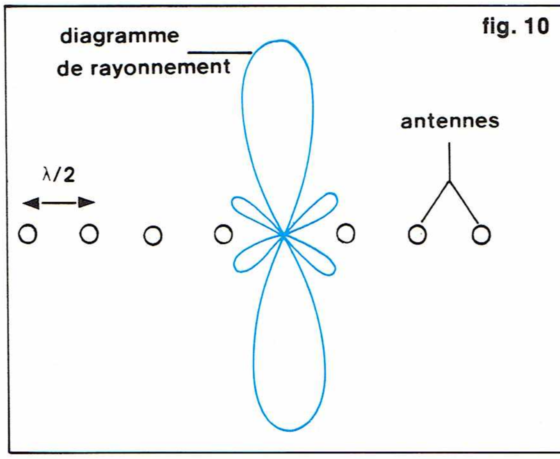

Richard Colin

▶ ***Figure 10** :* l'antenne rideau. *Pour accroître la directivité dans une direction donnée, on fait interférer les rayonnements d'un certain nombre d'antennes ; le diagramme de rayonnement qui en résulte est fonction de leur écartement, de leur nombre et du courant dans chaque antenne. Pour réduire le rayonnement vers l'arrière (émission unidirectionnelle), on dispose derrière le premier rideau un second rideau d'antennes non alimentées.*

En onde métrique, le dispositif de base est l'*antenne dipôle* (*fig.* 9).

En onde courte, on recherche une grande directivité (émission longue distance pour un pays donné) et un angle de 15 à 5° par rapport à l'horizontale (utilisation de la réflexion sur l'ionosphère). On utilise l'*antenne en rideau* (rangée d'antennes verticales ou horizontales demi-onde suivant la polarisation recherchée) [*fig.* 10]. Le gain isotrope G d'une antenne directive est défini par :

$$G = 20 \text{ Log } \frac{P_i}{P_d}$$

P_d étant la puissance consommée par l'antenne directive considérée et P_i la puissance consommée par une antenne isotrope rayonnant dans la direction utile la même énergie que l'antenne directive.

En ondes décamétriques, les antennes sont de type « rideau de doublet à réflecteur », de gain isotrope élevé (20 dB).

En modulation de fréquence (ondes métriques), on emploie les « panneaux de doublet » ou les « panneaux à fente ». Il existe également des antennes presque indépendantes de la fréquence (« spirale » ou « périodique »).

Le coût d'installation et d'entretien d'une antenne d'émission étant très élevé, celle-ci est souvent utilisée par plusieurs émetteurs (multiplexage).

Selon la fréquence, les antennes sont alimentées par câble multifilaire (ondes kilométriques et hectométriques), par ligne symétrique (ondes décamétriques) ou par câbles coaxiaux (ondes métriques). On donne souvent le nom de « feeders » à ces liaisons et d' « aérien » à l'antenne proprement dite.

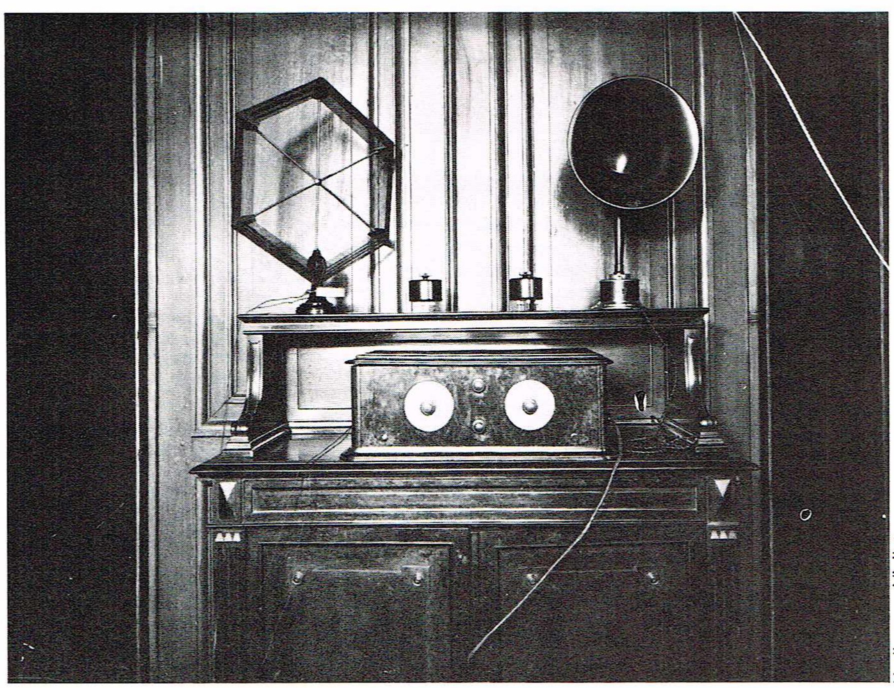

Harlingue - Viollet

▼ *Un poste de T.S.F. ancien ; on peut observer à gauche l'antenne réceptrice constituée d'un cadre muni d'un bobinage de grande surface détectant les variations de flux magnétique et à droite le haut-parleur.*

Réception des ondes électromagnétiques

Antennes de réception

Les informations transportées par le champ électrique ou par le champ magnétique d'une onde sont identiques. Pour détecter les ondes électromagnétiques, il est évidemment possible d'utiliser un système analogue au dispositif d'émission, mais ce n'est pas toujours la solution la plus pratique. Les anciens postes de radio étaient surmontés d'un cadre caractéristique constitué d'un bobinage de grande surface détectant la variation du flux magnétique. De nos jours, les postes portatifs sont munis de bâtonnets en ferrite qui ont la propriété de concentrer les lignes de champ magnétique. Leur efficacité reste limitée aux ondes kilométriques et hectométriques. Pour les ondes plus courtes, une antenne à fil (antenne télescopique) est nécessaire. La discrétion des antennes modernes de réception nous a fait progressivement oublier leur importance. La télévision, et maintenant l'excellente qualité des récepteurs en modulation de fréquence, exigent des antennes soigneusement réglées. On oublie trop souvent qu'une bonne antenne est une condition nécessaire de la réception des émissions haute fidélité, surtout en stéréophonie.

Obstacles et parasites

Les ondes kilométriques sont très sensibles aux parasites atmosphériques mais sont rarement gênées par les obstacles naturels. En revanche, l'influence de ces derniers est prépondérante en ondes hectométriques : effet d'écran des montagnes, absorption par les structures métalliques (le champ est très irrégulier et particulièrement affaibli dans les villes), effet de cage de Faraday dans les automobiles. La sensibilité aux parasites atmosphériques est plus faible que pour les ondes kilométriques. En ondes décamétriques, les perturbations de l'ionosphère sont responsables des principales instabilités de la réception.

Les dimensions des ondes métriques les rendent peu sensibles à l'effet de cage de Faraday des structures métalliques urbaines, mais les combinaisons entre les réflexions multiples sur les obstacles provoquent souvent de mauvaises conditions locales de réception.

Production des oscillations haute fréquence

Le courant haute fréquence parcourant l'antenne provient, après amplification, d'un oscillateur. Le circuit oscillant élémentaire est constitué par un condensateur et par une auto-inductance (« self ») en série. Le courant en régime permanent satisfait à l'équation :

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{1}{C} i = 0$$

dont la solution générale est :

$$i = i_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad \omega = 1/\sqrt{LC}$$

ω = pulsation ; i_0 et φ sont des constantes déterminées par les conditions initiales.

Si le circuit ne comporte aucune perte, ce courant de fréquence

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

continue à osciller éternellement, à partir du moment où il a été créé : par exemple, branchement sur la « self » du condensateur préalablement chargé.

En réalité, un tel circuit perd de l'énergie par dissipation dans l'inévitable résistance des fils ou dans la résistance parasite du condensateur, et par rayonnement (rayonnement désiré par couplage au circuit d'antenne, ou perdu par rayonnement direct). Le courant s'annule donc rapidement (au bout de quelques périodes) ; l'émission en onde amortie des débuts de la T. S. F. ne permettait facilement que la transmission de signaux codés par tout ou rien. On entretient le courant en compensant continuellement les pertes d'énergie du circuit oscillant.

Fonctionnement d'un oscillateur électronique

On fournit de l'énergie à l'oscillateur en insérant un amplificateur dans le circuit (oscillateur à réaction). Si $\overline{A}$ est le gain de l'amplificateur, $\overline{H}$ la fonction de transfert du circuit oscillant (notations complexes), le seul courant stable qui puisse parcourir le circuit possède une fréquence telle que

$$\overline{H}(\omega)\,\overline{A}(\omega) = 1$$

En supposant le système linéaire, la forme de ce courant est sinusoïdale : c'est la seule forme d'onde qui se conserve à la traversée d'un système linéaire.

En revanche, cette condition n'impose rien sur l'amplitude. Mais il est impossible pour un système réel de maintenir

$$\overline{H}\overline{A} = 1$$

rigoureusement. On choisit donc

$$\overline{H}'\overline{A}' = 1 + \varepsilon$$

$\overline{H}'$, $\overline{A}'$ étant les grandeurs théoriques (approximation linéaire).

Si le système est parfaitement linéaire, l'amplitude des oscillations doit croître indéfiniment ; en fait, on atteint ainsi la limite de linéarité (de l'amplificateur, par exemple), et le produit $\overline{H}\overline{A}$ diminue.

L'amplitude finale est celle pour laquelle :

$$\overline{H}\overline{A} = 1$$

$\overline{H}$, $\overline{A}$ étant les grandeurs réelles (fonctions de l'amplitude), ce qui représente maintenant une condition d'équilibre stable vis-à-vis de l'amplitude et de la fréquence. Le gain de boucle étant supérieur à 1 pour les petites amplitudes, l'amorçage de l'oscillateur est assuré par de petites fluctuations initiales (bruit thermique, etc.), qui sont ainsi rapidement amplifiées. La détermination de l'amplitude obtenue en introduisant une non-linéarité s'effectue évidemment au détriment de la perfection de la forme d'onde (distorsion des oscillateurs) : la sinusoïde idéale n'est pas réalisable par un système physique, mais on s'en rapproche suffisamment pour qu'il n'y ait pas à en tenir compte ici.

Une autre solution est possible pour entretenir les oscillations : on compense la perte d'énergie de l'oscillateur en insérant une « résistance négative » dans le circuit, de telle sorte que la résistance totale équivalente soit nulle. Cela est réalisé par certains composants électroniques convenablement polarisés (consommant donc évidemment de l'énergie).

Réalisation des oscillateurs

L'oscillateur Colpitts

Considérons la *figure* 11a. R_B et R'_B servent à polariser le transistor. C sert à isoler en continu le reste du circuit. C_E se conduit comme un court-circuit pour les courants alternatifs et n'intervient pas en continu. Empêche le passage du courant alternatif (self de choc). L'alimentation (piles par exemple) se conduit également comme un court-circuit pour le courant alternatif.

Si l'on suppose la polarisation bien calculée, le transistor fonctionne normalement. Il est donc possible de réécrire le schéma de la *figure* 11a en ce qui concerne les signaux alternatifs, les seuls intéressants du point de vue de l'oscillateur proprement dit (*fig.* 11b).

R_B et R'_B sont en pratique beaucoup plus grands que h : on peut les négliger en première approximation.

Le circuit L et C_1, C_2 en série résonne à la fréquence f_0 :

$$2\pi f_0 = \omega_0 = \sqrt{\frac{(C_1 + C_2)}{LC_1C_2}}$$

Le schéma de principe est donc celui de la *figure* 11c.

La fonction de transfert de l'amplificateur de courant est :

$$\overline{A} = -\beta$$

La fonction de transfert du réseau de réaction est :

$$\overline{H}(\omega) = \frac{1}{(LC_2\omega^2 - 1) + j\omega h\,(LC_1C_2\omega^2 - C_1 - C_2)}$$

La condition d'oscillation est

$$\overline{A}\cdot\overline{H}(\omega) = 1$$

soit :

- Argument $\overline{A}\overline{H}(\omega) = 0$, d'où

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{LC_1C_2}} = 2\pi f_0$$

f_0 est la fréquence d'oscillation.

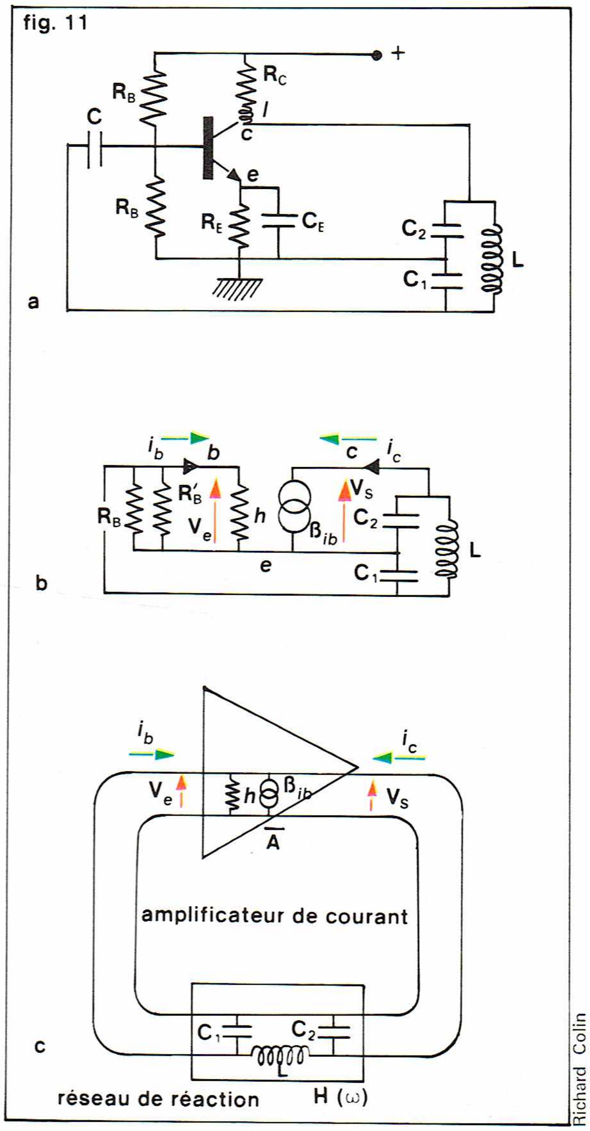

◀ ***Figure 11 :*** ***l'oscillateur Colpitts ;*** *a, schéma de principe ; b, schéma équivalent (pour les petits signaux alternatifs, C, C_E et l'alimentation sont des courts-circuits, tandis que l est une résistance infinie) ; c, principe de fonctionnement de l'oscillateur Colpitts.*

▼ ***Figure 12 :** principe de la modulation d'amplitude ; l'enveloppe du signal haute fréquence est modulée au rythme de la basse fréquence.*

***Figure 13 :** spectre de fréquence en modulation d'amplitude ; si le signal de fréquence f_0 est modulé par un signal de fréquence f, son spectre comprend les fréquences f_0, $f_0 + f$ et $f_0 - f$. Pour un signal complexe comportant des fréquences comprises entre f_{max} et f_{min}, le spectre de l'onde modulée occupe la fréquence porteuse f_0 et les deux bandes latérales de la figure.*

***Figure 14 :** a, signal de modulation à l'entrée du modulateur en anneau ; b, signal de sortie du modulateur : en l'absence de modulation, le signal est nul, c'est une modulation sans porteuse.*

• Module $\overline{A}\overline{H}$ (ω) = 1, d'où $-\beta = \frac{C_2}{C_1}$.

L'amplitude est fixée par la non-linéarité du gain en courant (β) du transistor.

On améliore la stabilité de l'oscillateur Colpitts en ajoutant une capacité en série avec L.

L'oscillateur Hartley ressemble au montage Colpitts (2 bobinages au lieu de L et une seule capacité au lieu de C_1 et C_2).

L'oscillateur à quartz se caractérise par sa grande stabilité de fréquence. Il utilise les propriétés électromécaniques d'un cristal de quartz piézo-électrique. On le rencontre très souvent dans les montages fonctionnant en ondes courtes.

L'oscillateur à déphasage comporte un réseau de réaction à base de résistances et de condensateurs. Il est utilisé en basse fréquence.

L'oscillateur à pont de Wien : il est généralement employé dans les oscillateurs à fréquence variable. La fonction de transfert du réseau de réaction est réglable par variations de capacités et de résistances.

Modulation de l'onde porteuse

On choisit de moduler une des caractéristiques de l'onde porteuse par le signal basse fréquence en provenance du microphone. Ce signal est proportionnel à la vibration sonore : sa fréquence est comprise entre 20 et 20 000 hertz. Dans le dessein de simplifier la technologie, on diminue parfois cet intervalle de fréquence (réduction de la bande passante), et on modifie le rapport des variations d'amplitude (compressions de dynamique).

En l'absence de toute modulation, le signal porteur haute fréquence s'écrit :

$$s = S \sin (\omega t + \varphi)$$

S étant l'amplitude, $\frac{\omega}{2\pi}$ la fréquence, φ la phase.

Ces trois grandeurs S, ω, et φ peuvent être modulées à la fréquence du signal basse fréquence, la réception du signal basse fréquence étant réalisée en détectant cette modulation.

Modulation d'amplitude

Si $s_m(t)$ est le signal basse fréquence à transmettre, on réalise une modulation d'amplitude de la porteuse (*fig.* 12) si

$$S = S_0 (1 + a s_m(t))$$

alors $$s = S_0 (1 + a s_m(t)) \sin (\omega t + \varphi)$$

On montre, par décomposition en série de Fourier, que le signal $s_m(t)$ peut être considéré comme la superposition de signaux sinusoïdaux dont la fréquence appartient à la bande passante occupée par $s_m(t)$. Si f_{min} est la borne inférieure de la bande passante et f_{max} la borne supérieure, le spectre de fréquence de l'onde porteuse modulée prend l'allure symétrique de la *figure* 13. On choisit a tel que

$$1 + a s_m(t)$$

reste toujours positif. Si S (t) est purement sinusoïdal, d'amplitude s_0, le produit $a s_0 = m$ est appelé taux de modulation. Lorsque $m > 1$, il y a surmodulation.

L'émetteur rayonne de l'énergie même en l'absence de modulation ($a = 0$) : il est possible d'augmenter le rendement énergétique d'une émission en supprimant la porteuse pure et une bande latérale : c'est l'émission en bande latérale unique (BLU). On réalise pour chaque composante de Fourier du signal basse fréquence, un signal modulé d'expression :

$$s = \frac{S_0 a s_0}{2} \cos [(\omega_0 + \omega) t + \varphi]$$

ω_0 = fréquence porteuse
ω = fréquence de la composante de Fourier considérée au lieu de

$$s = S_0 (1 + a s_0 \sin \omega t) \sin (\omega_0 t + \varphi)$$

$$= S_0 + \frac{S_0 a s_0}{2} \cos [(\omega - \omega_0) t + \varphi] - \frac{S_0 a s_0}{2} \cos [(\omega + \omega_0) t + \varphi]$$

La détection est plus difficile que dans le cas de la modulation d'amplitude classique, et la complexité du récepteur en BLU limite l'intérêt du système.

Pour diminuer le niveau du « bruit de fond », il est nécessaire de réduire la bande passante du signal détecté, et donc celle du signal basse fréquence. D'autre part, le taux de modulation admissible impose une importante compression de dynamique. Typiquement, on observe :

— bande transmise 50 à 4 500 Hz (bande des fréquences audibles : 20 à 20 000 Hz) ;

— dynamique permise 40 dB (dynamique réelle moyenne : 90 dB).

La « musicalité » d'un poste récepteur en modulation d'amplitude est donc limitée par son principe et non par sa qualité.

Technique de modulation et de démodulation d'amplitude

Modulation avec porteuse : le gain de l'amplificateur haute fréquence est commandé par le signal basse fréquence.

Modulation sans porteuse : on utilise un modulateur en anneau : c'est un interrupteur électronique qui inverse le courant basse fréquence au rythme de la haute fréquence (*fig.* 14).

Démodulation avec porteuse : la détection s'effectue simplement en redressant l'onde porteuse modulée

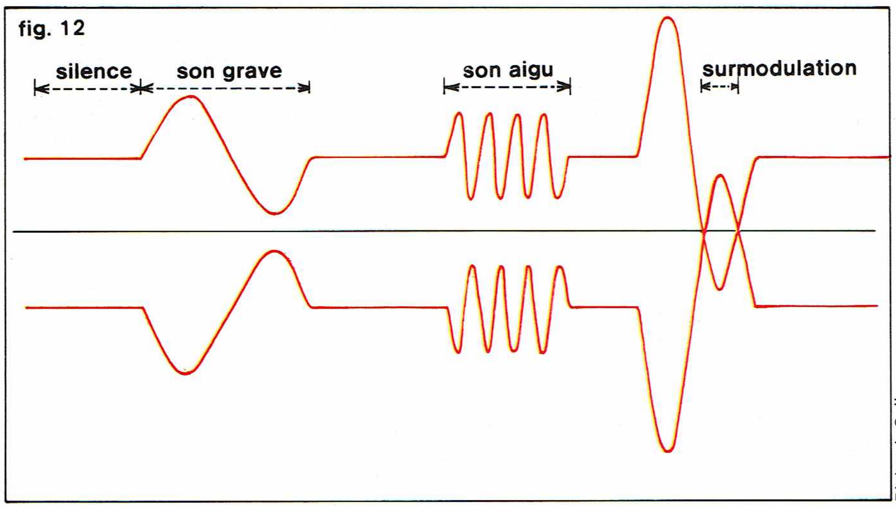

Richard Colin

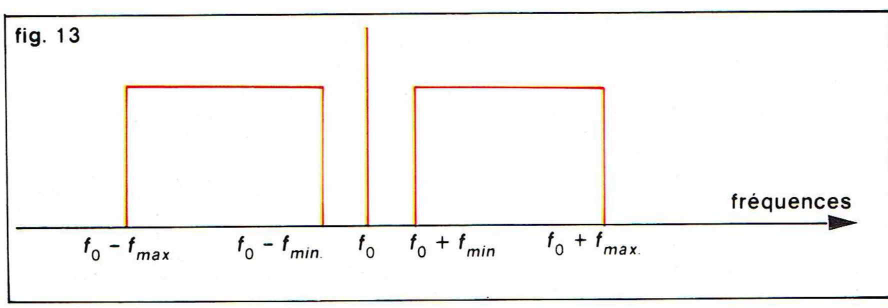

Richard Colin

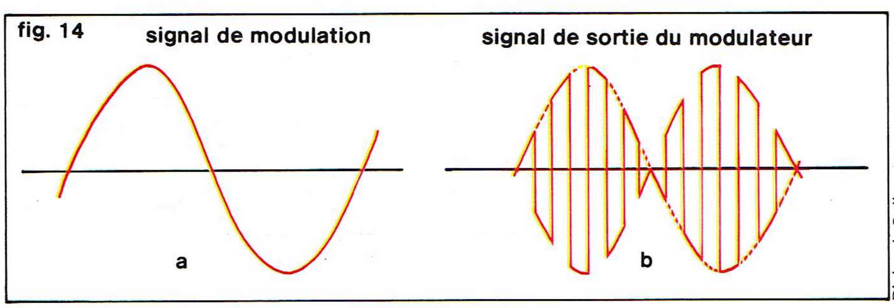

Richard Colin

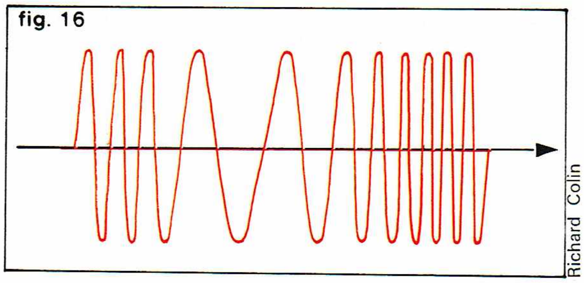

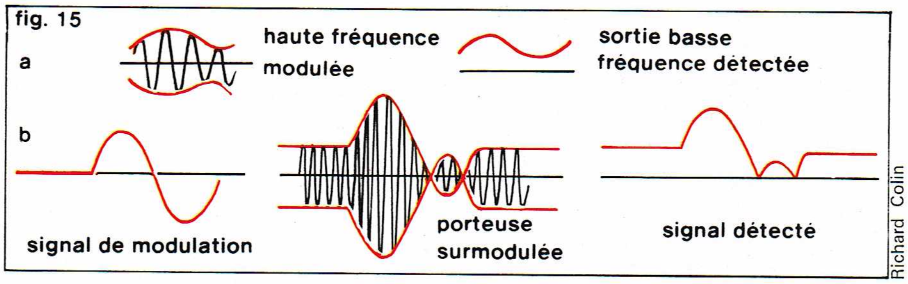

▲ *Figure 15 :* **a, démodulation d'amplitude ; b, surmodulation :** ***lorsque le taux de modulation est supérieur à 1, l'enveloppe détectée n'est plus identique au signal initial.***
Figure 16 : allure d'une **onde modulée en fréquence ;** ***sur cette figure, les variations de fréquence sont exagérées par rapport à la fréquence porteuse.***

et en filtrant la haute fréquence (circuit à diode et condensateur) [*fig.* 15].

Démodulation sans porteuse : elle est réalisable par l'opération inverse de la modulation.

Modulation de fréquence

Principe. La fréquence instantanée F_i du signal porteur varie au rythme du signal à transmettre. Supposons ce dernier sinusoïdal de fréquence f :

$$F_i = F_0 + F \cos (2 \pi f t)$$

(F_0 = fréquence porteuse en l'absence de modulation). ΔF représente l'excursion maximale de fréquence (« déviation » maximale). Le rapport $\frac{\Delta F}{f} = k$ est appelé « indice de modulation » (*fig.* 16).

Spectre de fréquences

Par définition, la fréquence instantanée F_i du signal porteur est la dérivée par rapport au temps de son argument :

$$S = S_0 \cos [F(t)]$$

$$F_i = \frac{dF(t)}{dt}$$

et donc

$$S = S_0 \cos (\omega_0 t + k \sin \omega t)$$

S étant le signal modulé avec

$$\omega_0 = 2 \pi F_0$$

$$\omega = 2 \pi f$$

S se décompose en série de Fourier (somme de signaux sinusoïdaux)

$$S/S_0 = J_0(k) \cos \omega_0 t + J_1(k) [\cos (\omega_0 + \omega) t - \cos (\omega_0 - \omega) t] + \ldots + J_n(k) [\cos (\omega_0 + n\omega) t - \cos (\omega_0 - n\omega) t] + \ldots$$

$J_n(k)$ étant la fonction de Bessel d'ordre n.

On constate donc que le spectre de fréquence s'étend à l'infini de part et d'autre de la fréquence porteuse F_0. L'examen des fonctions de Bessel montre heureusement que l'amplitude des raies latérales décroît constamment à partir d'un certain rang, lié évidemment à l'indice de modulation (*fig.* 17).

Lorsque k est très grand, la largeur du spectre ne dépend pratiquement plus de la fréquence, mais seulement de ΔF : cela limite la bande pratique occupée dans le cas des basses fréquences (pour lesquelles elle est théoriquement infinie).

Pour les indices de modulation très faibles, la largeur du spectre est la même qu'en modulation d'amplitude et vaut $2f$. On admettra donc en modulation de fréquence une largeur de spectre de

$$2(f + kf) = 2(f + \Delta f)$$

L'encombrement du spectre étant beaucoup plus grand qu'en modulation d'amplitude, la fréquence porteuse doit être élevée (supérieure à 50 MHz en général), pour maintenir le rapport bande de fréquence sur fréquence porteuse à une valeur raisonnable.

L'intérêt de ce type de modulation est sa relative insensibilité aux parasites perturbant l'amplitude de l'onde qui sont de loin les plus nombreux (parasites atmosphériques et industriels). Tout se passe comme si

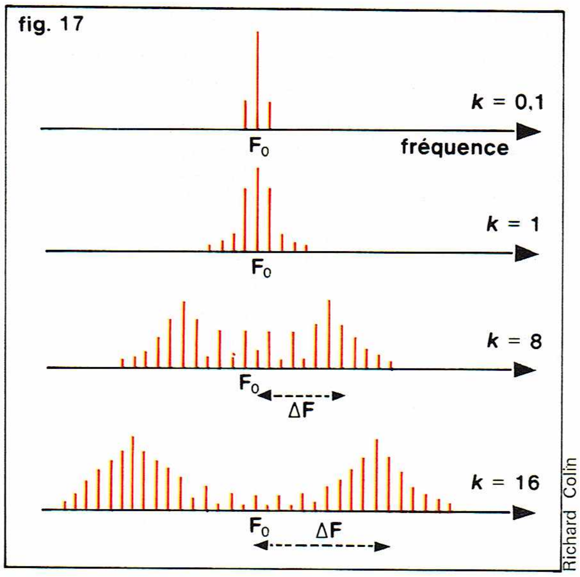

◀ ***Figure 17 : spectre d'une onde modulée en fréquence pour différentes valeurs de l'indice de modulation k.***

la modulation de fréquence avantageait le signal le plus intense. Le niveau du bruit parasite ayant été abaissé, il est donc possible d'augmenter la bande passante d'émission, et la qualité du son reconstitué entre 50 et 15 000 Hz avec 80 dB de dynamique, contre 50 Hz à 4 500 Hz et 40 dB en modulation d'amplitude, rejoint les normes haute fidélité.

La modulation de fréquence est réservée aux transmissions directes à faible distance (200 km) : on utilise des réémetteurs pour couvrir l'ensemble du territoire.

La stéréophonie en modulation de fréquence

Principe : il s'agit de transmettre séparément les signaux gauche (G) et droit (D) nécessaires à la reproduction stéréophonique. De plus, il est commode que le système soit « compatible », c'est-à-dire qu'un récepteur ordinaire non prévu pour l'effet stéréophonique puisse recevoir le signal monophonique (G + D). On module en amplitude une sous-porteuse à 38 kHz par le signal G — D : on obtient la sous-porteuse, et les deux bandes latérales 23 à 38 kHz et 38 à 53 kHz. Ce signal est ajouté au signal G + D et l'ensemble (signal « multiplex ») sert à moduler en fréquence l'émetteur proprement dit (les fréquences porteuses MF en France varient entre 88 et 100 MHz).

On améliore encore ce procédé en supprimant la sous-porteuse à 38 kHz dont la grande intensité est une source d'élargissement des spectres de sortie (intermodulation) [*fig.* 18]. La démodulation de G — D est

▼ ***Figure 18 : spectre du signal « multiplex » ; ce signal basse fréquence comporte, outre la bande habituelle*** **(G + D),** ***le signal*** **(G — D)** ***codé sous la forme d'une modulation d'amplitude à porteuse supprimée.***

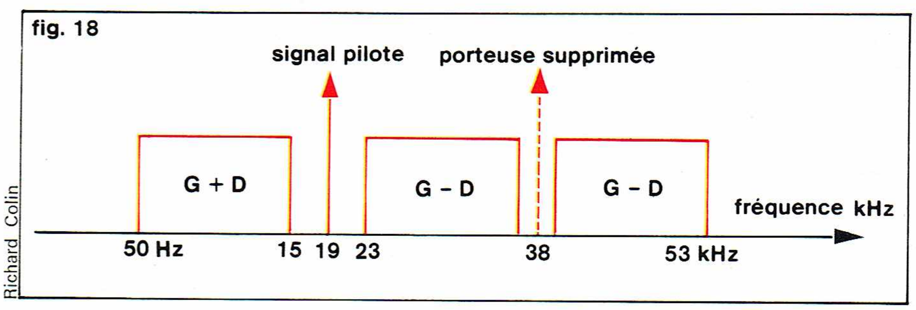

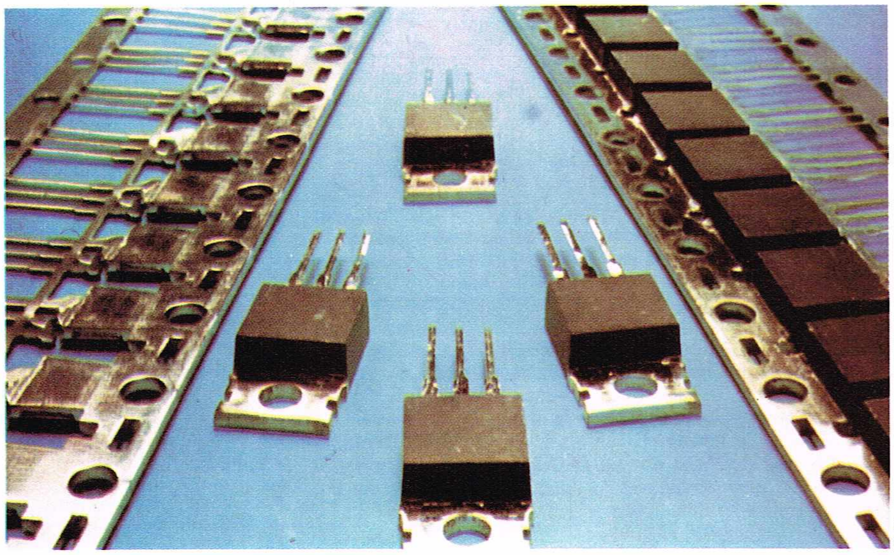

RTC

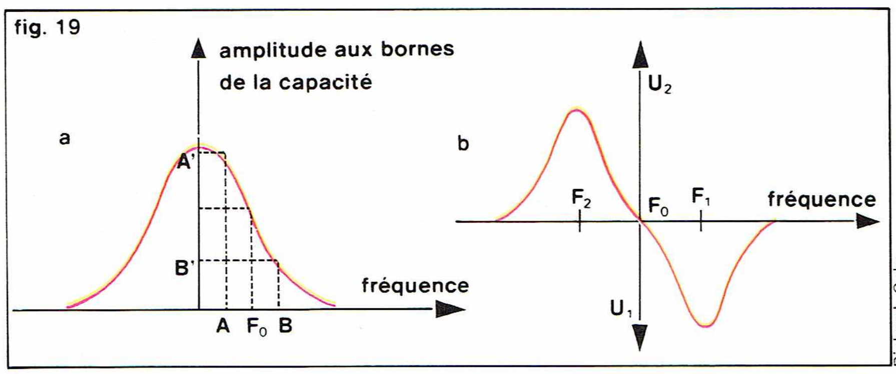

Richard Colin

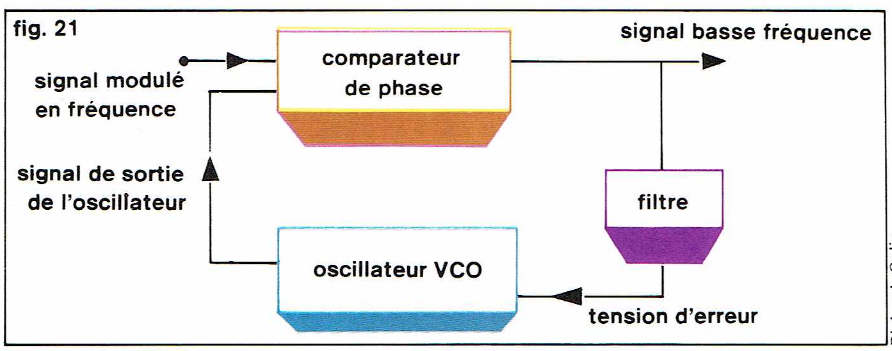

Richard Colin

▲ ***En haut, fabrication de transistors de puissance utilisés dans les amplificateurs.***

Figure 21 : une boucle d'asservissement de phase.

▼ ***Figure 22 : schéma synoptique d'un récepteur stéréophonique en modulation de fréquence.***

rendue possible en reconstituant cette sous-porteuse à partir d'un signal pilote de fréquence moitié (19 kHz), généré par l'émetteur, qui se situe donc au milieu de l'intervalle compris entre le signal G + D et la bande inférieure de G — D.

A la réception, on peut séparer par filtrage à la sortie du démodulateur de fréquence (discriminateur) :

— le signal G + D compris entre 50 et 15 kHz : signal monophonique seul conservé par le récepteur ordinaire ;

— le signal à 19 kHz, dont on double ensuite la fréquence (on reconstitue la sous-porteuse à 38 kHz) ;

— les deux bandes latérales comprises entre 23 et 53 kHz du signal G — D. On ajoute à ces deux bandes le signal à 38 kHz, et on démodule en amplitude pour obtenir G — D. G + D et G — D sont ajoutés et retranchés, et les deux canaux G et D sont ainsi reconstitués.

Mais le décodeur stéréophonique le plus utilisé met à profit la remarque suivante : le signal « multiplex » à la sortie du discriminateur est la superposition de deux signaux : le signal BF (G + D) d'une part, et le signal (G — D) d'autre part en modulation sans porteuse.

Nous avons vu qu'un signal en modulation sans porteuse peut être considéré comme le signal lui-même alternativement inversé au rythme de la fréquence porteuse. Le signal « multiplex » est donc, dans une alternance de la haute fréquence, la somme

$$(G + D) + (G - D) = 2\,G$$

et, dans l'alternance suivante :

$$(G + D) - (G - D) = 2\,D$$

Pour décoder ce signal, il suffit de le découper à la fréquence sous-porteuse (38 kHz) et d'aiguiller les tranches consécutives sur deux sorties différentes qui forment les voies droite et gauche. Cette opération est obtenue avec un circuit du type démodulateur en anneau déjà rencontré.

Circuits de modulation en MF

La modulation de la fréquence porteuse est obtenue en agissant sur l'accord de l'oscillateur, l'ajustement de l'amplitude de la déviation de fréquence étant réalisé par un changeur ou un multiplieur de fréquence. On trouve en pratique :

— modulation par inductance variable : une bobine à noyau de ferrite a son coefficient de self-induction dépendant du courant de polarisation qui sert à le moduler ;

— modulation par capacité variable : la diode « Varicap » (marque déposée d'un semi-conducteur à jonction) forme une capacité dépendante de sa tension inverse ;

— modulation par réactance variable avec le point de fonctionnement du transistor de l'oscillateur. On introduit ainsi toujours un peu de modulation d'amplitude parasite, dont on peut se débarrasser par écrêtage.

L'écrêtage revient à remplacer la sinusoïde de la porteuse par une fonction en créneaux de même fréquence, c'est-à-dire qu'on rajoute au spectre de fréquences un certain nombre d'harmoniques qui sont éliminés par filtrage à l'émission ou à la réception.

Circuits de démodulation MF

Ils sont plus complexes que le simple redressement et filtrage de la démodulation d'amplitude, ce qui explique

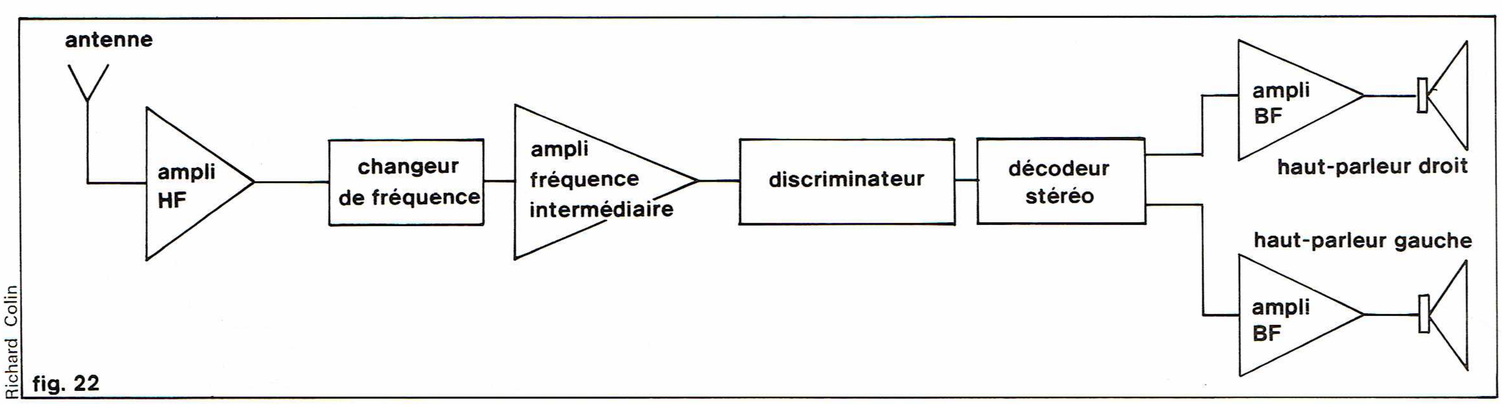

Richard Colin

le prix plus élevé des récepteurs MF. On peut transformer la modulation de fréquence en modulation d'amplitude en envoyant le signal modulé en fréquence sur un circuit oscillant accordé sur une fréquence voisine : le signal aux bornes de la capacité a une amplitude à peu près proportionnelle à la fréquence du signal MF (*fig.* 19a).

On réalise des discriminateurs plus linéaires en rendant symétrique le montage précédent (*fig.* 19b).

Comme ce système manque de fiabilité, on lui préfère le discriminateur du type « Foster Seeley », ou à comptage d'impulsions (*fig.* 20).

Détection par boucle d'asservissement de phase (circuits PLL, abréviation de l'anglais « phase locked loop ») : le signal modulé en fréquence et un signal de référence produit par un oscillateur dont la fréquence est contrôlée par une tension (VCO, de l'anglais « Volt controled oscillator ») sont envoyés sur un comparateur de phase ; si la fréquence du VCO est constamment identique à la fréquence porteuse, le comparateur de phase donne directement le signal basse fréquence démodulé. Pour assurer cette identité, le signal du comparateur de phase, convenablement filtré, sert de tension d'erreur pour le VCO, dont la fréquence est ainsi asservie à celle de la porteuse (*fig.* 21). Bien que ce système paraisse très simple, il cumule les difficultés de l'oscillation et de l'asservissement haute fréquence ; la mise au point en est difficile. Les circuits PLL sont actuellement disponibles en circuits intégrés et équipent un grand nombre de discriminateurs récents.

Conception actuelle des récepteurs

Que ce soit en modulation d'amplitude ou en modulation de fréquence, le signal modulé haute fréquence de l'antenne est amplifié, puis sa fréquence est abaissée par battement avec un oscillateur local dont la fréquence est réglée par la commande de sélection des stations. On dispose ainsi d'un signal de fréquence intermédiaire (FI) [455 kHz en modulation d'amplitude, 10,7 MHz en modulation de fréquence], dont les caractéristiques répondent mieux aux nécessités de la détection ; en particulier, la fréquence est fixe quel que soit l'émetteur reçu (*fig.* 22).

Les semi-conducteurs ont progressivement remplacé les tubes à vide chaque fois qu'une forte puissance et une haute fréquence n'étaient pas simultanément nécessaires (le dernier étage des émetteurs utilise toujours une « lampe » particulière refroidie par vaporisation d'eau : le « Vapotron »). Le circuit intégré (concentration sur une plaquette de quelques mm² d'un très grand nombre de composants électroniques) apporte sur les montages « discrets » une simplification de câblage et un gain de place important, mais ne constitue pas toujours une économie. Il est très employé en modulation de fréquence, et on peut même réaliser des amplificateurs haute fidélité entièrement à l'aide de composants de ce type, jusqu'à une puissance de sortie d'une vingtaine de watts. Depuis l'apparition des diodes à capacité variable en fonction de leur tension inverse (« Varicap »), on peut remplacer, dans les récepteurs MF, le classique condensateur d'accord par un simple potentiomètre.

Les schémas électroniques comportent peu de nouveautés, mais s'améliorent par l'utilisation de techniques professionnelles classiques que le circuit intégré met à la portée des appareils grand public.

fig. 20

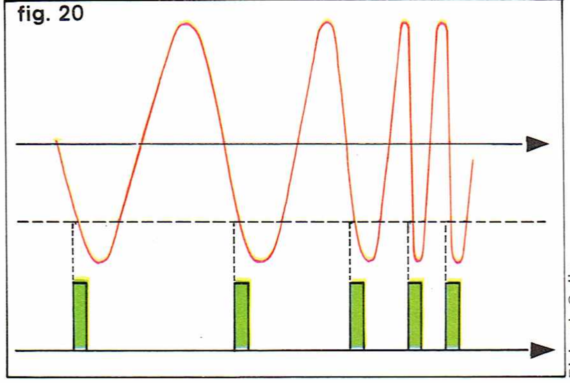

Richard Colin

◄ *Figure 20 : principe du* **comptage d'impulsions.** *On déclenche une impulsion de largeur donnée lorsque le signal d'entrée passe par un niveau donné ; le nombre d'impulsions par unité de temps est proportionnel à la fréquence du signal (cette opération est facilement réalisable à l'aide de circuits intégrés). Le signal basse fréquence est obtenu par intégration des impulsions, avec une constante de temps un peu inférieure à la période la plus courte de la modulation.*

D. Bouquignaud - TOP

◄ *Un phonographe ancien à disques.*

◄ *Page ci-contre, au milieu, figure 19 :* **a, démodulation de fréquence.** *Pour de petites variations de fréquence autour de* F_0*, l'amplitude de la tension haute fréquence aux bornes de la capacité varie à peu près proportionnellement à l'écart de fréquence ;* **b, démodulation symétrique ;** *la tension* U_1 *est proportionnelle à l'écart de fréquence lorsque celle-ci est comprise en* F_0 *et* F_1*. De même* U_2 *est proportionnelle à cet écart lorsque la fréquence est comprise entre* F_0 *et* F_2*;* U_1 *et* U_2 *sont, comme dans le cas d'un circuit résonnant unique, des signaux haute fréquence modulés en amplitude. On recueille après détection la différence de leurs enveloppes. Le détecteur étant également sensible aux variations d'amplitudes du signal haute fréquence, il est nécessaire d'écrêter ce dernier avant de le démoduler.*

PROCÉDÉS D'ENREGISTREMENT ET DE REPRODUCTION DES SONS

L'information sonore est de nos jours presque toujours traduite en un signal électrique. L'enregistrement est la mise en mémoire de ce signal ; la reproduction est la lecture de cette mémoire qui restitue le signal électrique. L'électronique et l'électrotechnique sont à la base de tous les procédés modernes, mais c'est à la mécanique du « phonographe » que nous devons la première réalisation connue. Rappelons les principales étapes de cette découverte :

L. E. Scott de Martinville décrivait, dans un brevet français de 1859, un appareil permettant de « dessiner » les sons : le phonotaugraphe transformait les vibrations d'une membrane sensible à la pression acoustique en un tracé sur rouleau enduit de noir de fumée ; il devait servir à l'étude de la voix humaine et des instruments de musique. Seize ans plus tard, Charles Cros imagine un procédé permettant non seulement d'enregistrer mais de reproduire les sons : par photogravure à partir des tracés du phonotaugraphe, un sillon est gravé en relief ou en creux, et entraîne une aiguille solidaire d'une membrane qui reproduit le son initial. Mais c'est l'Américain T. Edison qui présente l'année suivante le premier appareil porté à la connaissance du public : son « phonographe » utilise l'essentiel des principes énoncés par Charles Cros, avec une amélioration pratique : l'enregistrement hélicoïdal sur le cylindre et le choix du milieu d'enregistrement (feuille d'étain, puis cire).

Cette même année, Charles Cros décrit un grand nombre de procédés d'enregistrement des sons (dont la gravure latérale, principe de nos disques modernes), ainsi que le premier procédé électro-acoustique (une substance chimique est plus ou moins décomposée par le courant modulé d'un « microphone » et sert ensuite de résistance dans le circuit d'un écouteur lors de la reproduction).

Berliner construit en 1887 le « gramophone » : l'enregistrement est effectué sur disque plat en gravure latérale et la duplication est obtenue par pressage. Les premiers électrophones (« pick up ») datent de 1925 et marquent le début de l'ère électro-acoustique. Les enregistrements sur disque et optique résistent à la concurrence du magnétophone (1945) par leur grande facilité de duplication mais sont progressivement remplacés par ce dernier dans de nombreux domaines. La qualité de l'enregistrement sur disque est améliorée (microsillons) et en 1958 apparaît la gravure stéréophonique.

Actuellement les recherches dans le domaine de l'enregistrement sont axées sur la production des hautes fréquences (magnétoscope et vidéodisque pour la télévi-

D. Bouquignaud - TOP

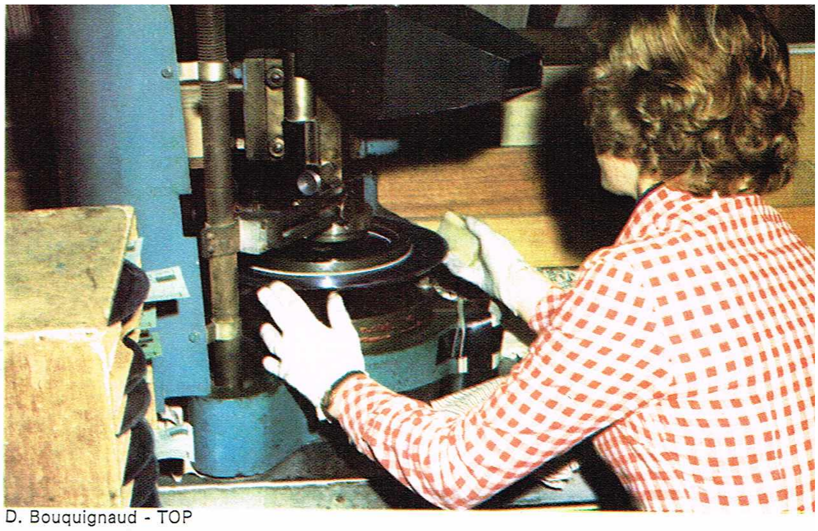

D. Bouquignaud - TOP

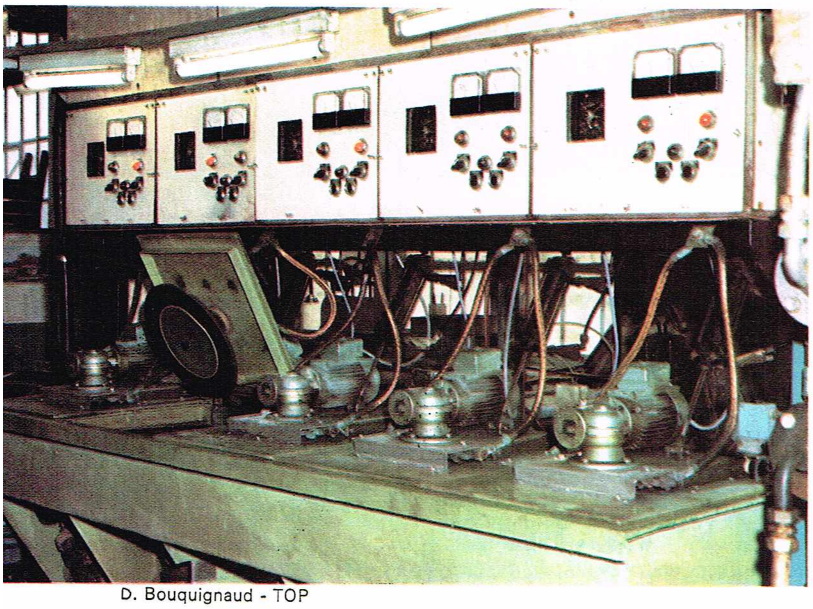

D. Bouquignaud - TOP

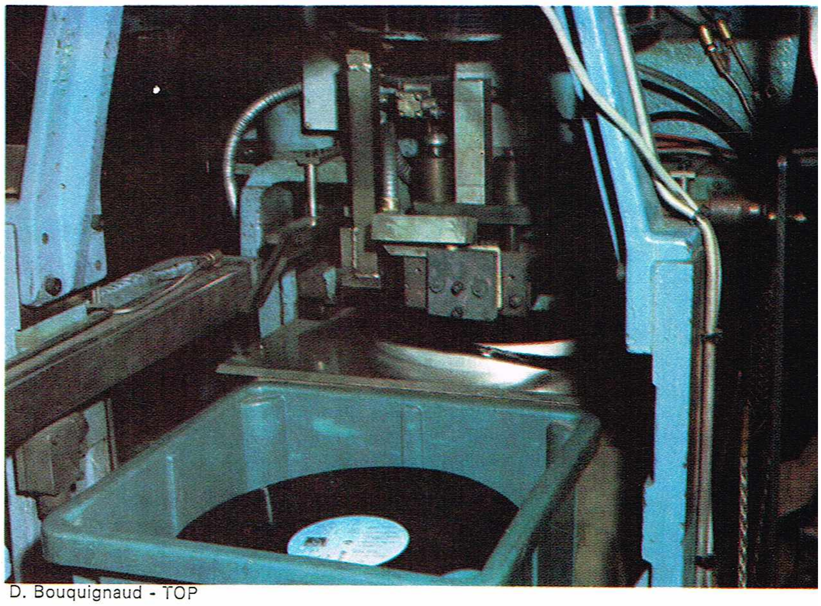

D. Bouquignaud - TOP

▲ *Quatre étapes de la fabrication d'un disque chez Pathé-Marconi : en haut à gauche, gravure du disque métallique vernis (servant de modèle) à partir de la bande magnétique préalablement enregistrée. En haut à droite, centrage du disque mère ; en bas à gauche, dépôt de nickel sur le disque mère pour réaliser une matrice ; en bas à droite, pressage et découpage du disque final.*

sion), et sur les supports nouveaux (mémoires électrostatiques).

Bien qu'ayant souvent été envisagés les dispositifs d'enregistrement sans mouvement mécanique n'ont à ce jour pas reçu d'application.

Généralités

Points communs

La principale caractéristique d'un procédé d'enregistrement et de reproduction des sons est la nécessité d'une mémoire, qui est le support matériel de l'information. Généralement, cette mémoire est une « piste » continue et, à chaque élément de longueur de cette piste, correspond un instant du signal enregistré ; l'amplitude du signal est représentée par la modification locale d'une caractéristique du support (aimantation, épaisseur, transparence, etc.). Pour des raisons d'encombrement, la piste peut revêtir différentes formes : piste en spirale à la surface d'un disque, linéaire sur une bande de magnétophone, en segments parallèles sur la bande d'un magnétoscope, etc.

Les transducteurs électro-acoustiques permettent de ramener le problème d'enregistrement et de reproduction des sons à celui du traitement des signaux électriques.

On distingue deux méthodes de traitement du signal à enregistrer.

Méthode analogique

Le phénomène sonore est linéairement relié au signal électrique. Si l'organe de lecture se déplace par rapport à la piste à la même vitesse que l'organe d'enregistrement, le signal initial sera correctement restitué en amplitude et en phase. La simplicité du système désigne tout de suite ses points faibles : nécessité d'une vitesse constante et d'une linéarité parfaite. En pratique, cette linéarité n'est jamais réalisée : on la remplace par une loi connue plus facile à respecter ou améliorant les performances. La vitesse peut être constante (bande magnétique), ou variable s'il est facile d'obtenir la même loi de variation à l'enregistrement et à la lecture (piste de disque).

Méthode numérique

Dans le dessein d'étendre à partir d'un support donné les possibilités de linéarité et d'immunité au bruit, il est possible de quantifier le signal après échantillonnage ; cette quantification est alors enregistrée sous forme numérique (tops binaires) ou analogique (longueur d'impulsion, etc.). Une porteuse modulée en fréquence est un exemple approché de quantification analogique. Cet artifice a l'avantage de permettre l'enregistrement des très basses fréquences, en translatant le spectre de l'information vers de plus hautes fréquences. Cette technique commence à faire quelques apparitions sur le marché de la haute fidélité.

Performances

Limitation mécanique

Dans tous les cas, il y a mouvement relatif des organes d'enregistrement ou de lecture et de la piste. En général, seule la piste se déplace (disque, bande du magnétophone) ; parfois, cependant, tous sont mobiles (magnétoscope). La précision de ces mouvements est un élément important de la qualité de l'appareil ; les moteurs sont souvent équipés d'un asservissement électronique. Les erreurs de vitesse peuvent être des variations rapides (effet de scintillement), la durée moyenne du message sonore restant correcte, ou lentes (effet de pleurage) ; la fréquence du son est alors modifiée proportionnellement au rapport des vitesses d'enregistrement et de lecture.

Résolution

La longueur d'onde de la modification de la caractéristique du support ne peut pas être réduite indéfiniment (elle est limitée par le grain de l'émulsion photographique en son optique, l'étendue des domaines magné-

tiques sur une bande de magnétophone, la largeur du sillon d'un disque). Il existe donc une limite supérieure aux fréquences enregistrables. On peut évidemment reculer cette limite en augmentant la vitesse de défilement de la piste, au prix de difficultés mécaniques qui, souvent, sont rapidement prohibitives. La fréquence supérieure limitant la bande passante est ainsi le résultat d'un compromis entre la résolution du support et la vitesse de défilement. La limitation inférieure de la bande passante est due au principe des transducteurs de lecture, qui sont en général incapables de fonctionner en dessous d'une certaine fréquence.

A ces problèmes s'ajoute souvent celui de la dépendance en fréquence du rendement de ces organes.

Distorsion d'amplitude

La réponse du milieu d'enregistrement possède une limite de linéarité, qu'il convient de ne pas dépasser. On fixe par conséquent un niveau maximal de modulation. Mais une part importante du bruit (bruit blanc dû à la structure du support) étant indépendante du niveau de modulation, il est intéressant d'être aussi près que possible de cette limite. Ce nouveau compromis est obtenu par la « compression de dynamique » : on empêche le niveau de modulation d'aller au-delà du seuil de linéarité; les pointes de modulation sont « comprimées », mais la forme générale de l'onde n'est pas altérée et le message reste intelligible. De même, on peut relever les sons très faibles pour éviter qu'ils ne soient noyés dans le bruit. Parfois, à la lecture, un système électronique corrige automatiquement cette distorsion volontaire : on effectue alors une amélioration du rapport signal sur bruit. Comme les propriétés de linéarité dépendent de la fréquence, la modification de la dynamique doit être également fonction de celle-ci. On comprend ainsi la nécessité des normes qui garantissent la compatibilité d'appareils de diverses fabrications.

Principaux procédés

On utilise actuellement l'enregistrement mécanique (disque), magnétique (magnétophone), et plus rarement optique (cinéma sonore). Citons de plus les procédés électrostatiques, qui suscitent un intérêt croissant depuis l'apparition des électrets.

Enregistrement par gravure sur disque

On ne réalise pratiquement plus d'enregistrements monophoniques, mais le principe de la gravure latérale est facilement compréhensible à partir de celui-ci et la méthode d'enregistrement stéréophonique s'en déduit aisément : le son est enregistré sur magnétophone, et la gravure effectuée plus tard après divers montages et contrôles. Un disque métallique verni tourne avec une vitesse constante. Un burin graveur découpe dans le vernis un sillon de profondeur constante dont la section a la forme d'un V (*fig.* 1). En l'absence de modulation, le burin est entraîné avec une vitesse régulière de l'extérieur vers l'intérieur du disque par une vis hélicoïdale, de telle sorte que le sillon découpé est une spirale couvrant toute la surface du disque. Cette spirale constitue l'axe de la piste d'enregistrement. Lorsqu'on applique le signal de modulation, le burin se déplace au rythme de celui-ci perpendiculairement à la direction moyenne du sillon (gravure latérale).

Ainsi, si le signal à enregistrer est un son pur de fréquence ω

$$s = S \cos \omega t$$

le sillon gravé a l'allure d'une sinusoïde plane, enroulée en spirale, d'amplitude constante et de longueur d'onde continûment décroissante de l'extérieur vers l'intérieur du disque :

$$\lambda = 2\pi R \frac{\Omega}{\omega}$$

Ω étant la vitesse de rotation du disque et R le rayon moyen de la spire au point de la piste considéré.

Le burin graveur est un équipage mécanique entraîné par une force proportionnelle au signal électrique à enregistrer. L'impédance mécanique du burin enfoncé dans le vernis est principalement résistive : à niveau de modulation constant, l'énergie cinétique (et donc la vitesse du burin) est constante et ne dépend pas de la fréquence.

Si le signal électrique s'écrit :

$$s(t) = S \cos \omega t$$

la vitesse du burin est :

$$V(t) = K\,s(t)$$

K étant une constante, et l'amplitude des déplacements du burin est :

$$\int_0^t V(t)\,dt = \frac{K\,s(t)}{\omega}$$

l'amplitude diminue proportionnellement à la fréquence.

Comme le pas de la spirale doit être déterminé au moins un tour à l'avance, et qu'il doit être suffisamment large pour éviter que les sillons correspondant aux crêtes de modulation ne se chevauchent, on constate qu'une grande partie du disque est gaspillée pour permettre l'enregistrement des basses fréquences. De plus,

fig. 1

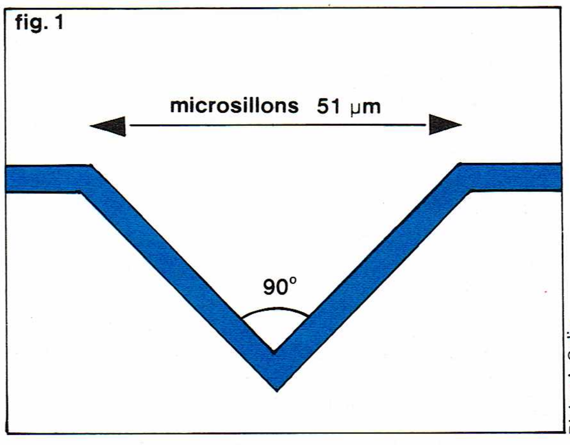

◀ *Figure 1 : coupe d'un sillon de disque microsillon (largeur 51 μm); l'ancien sillon large (78 tours) avait une largeur de 150 μm.*

fig. 2

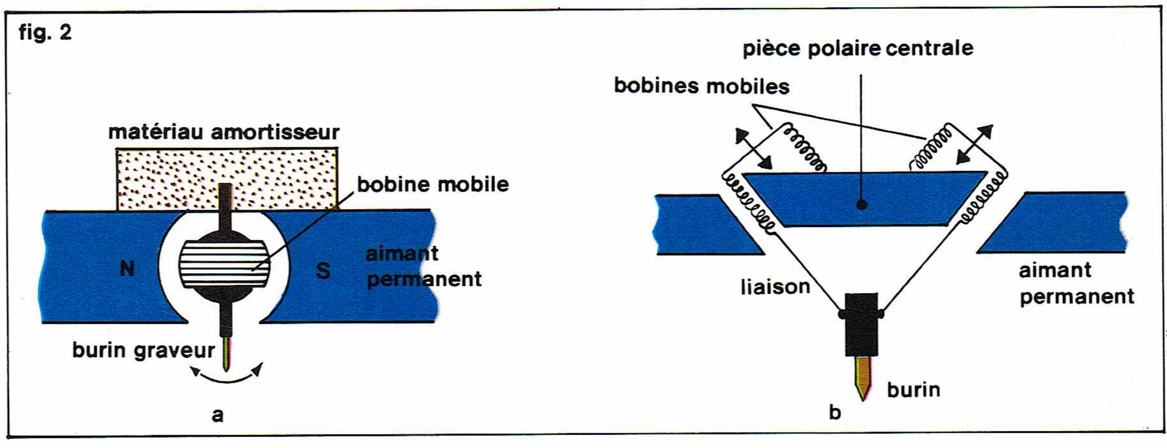

◀ *Figure 2 ; principe des appareils électrodynamiques de gravure de disques : a, graveur monophonique; b, graveur stéréophonique; un ressort définit la position de repos du burin, et chaque bobine lui impose séparément son déplacement.*

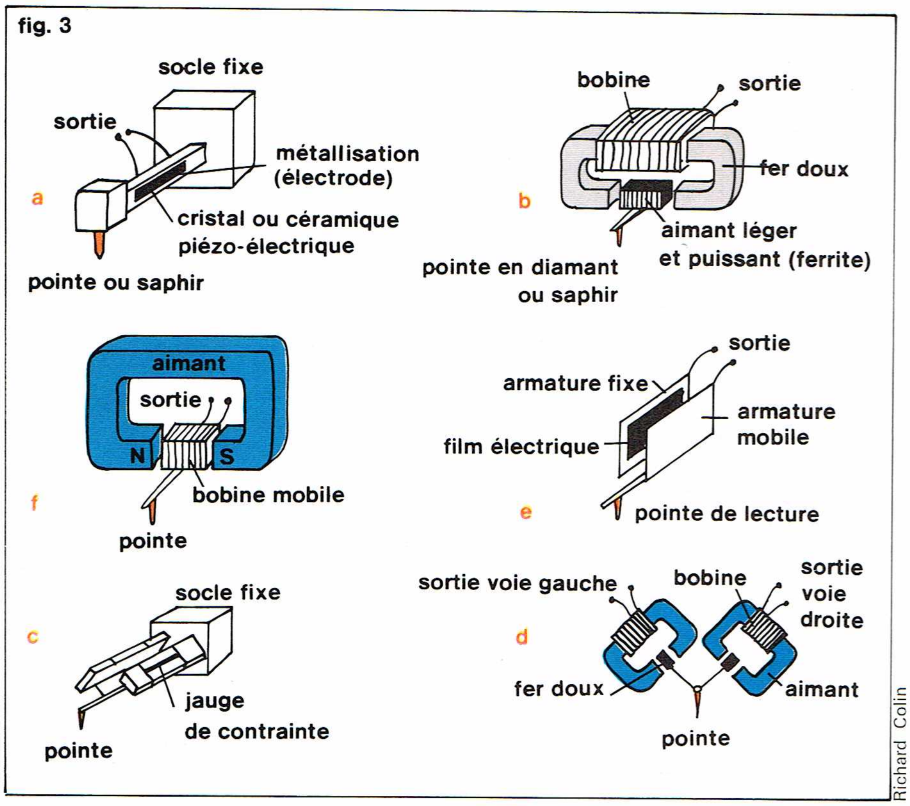

▲ *Figure 3 ; les différentes têtes de lecture pour disques :* a, tête piézo-électrique *(monophonique) ;* b, tête magnétodynamique *(monophonique) ;* c, tête à jauge de contrainte *(stéréophonique) ;* d, *cellule à* réluctance variable *(stéréophonique) ; on réalise les lecteurs stéréophoniques au moyen de deux transducteurs inclinés à 45° ;* e, tête électrostatique *à électret ;* f, tête électrodynamique *(monophonique).*

▼ *Figure 4 : la* pointe *de lecture d'un disque. Pour la gravure en sillon large,* R *doit être compris entre 18 et 26 µm ; en microsillon,* R *est de 13 à 18 µm ; les pointes 18 µm sont donc compatibles ; les pointes sphériques actuelles ont un rayon de l'ordre de 18 µm et permettent la lecture de disques 78 t/mn ; la pointe s'use et finit par atteindre le fond du sillon ; il faut alors la changer.*

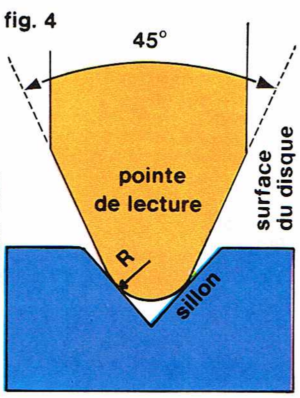

le burin doit posséder une dynamique (rapport de la plus grande à la plus petite amplitude de déplacement) très élevée. On pallie cet inconvénient en réduisant l'amplitude des basses fréquences ; de même, on accentue les fréquences élevées qui, sinon, seraient noyées dans le bruit de surface du disque. Ces modifications de dynamique sont fixées par des normes.

Gravure stéréophonique

Le signal-somme de la voie droite et de la voie gauche (signal monophonique) sert à la gravure latérale précédente, mais la profondeur du sillon est cette fois modulée par la différence des voies droite et gauche. Cette gravure est donc « compatible » : une pointe de lecture sensible uniquement aux mouvements latéraux délivre le signal monophonique seul, exactement comme dans le cas d'une profondeur de sillon fixe. Le signal stéréophonique est obtenu à l'aide d'une pointe équipée de deux transducteurs à 45° qui additionnent et retranchent les vibrations verticales et horizontales, séparant donc les signaux gauche et droit.

Appareils de gravure

C'est un matériel professionnel de très grande précision, entièrement automatisé. Le plateau est entraîné par un moteur synchrone dont la vitesse est démultipliée. Un signal enregistré sur une piste auxiliaire du magnétophone informe le graveur du niveau moyen du signal à venir lors du prochain tour de plateau, ce qui lui permet de calculer le pas de spirale le mieux adapté : la durée totale d'une face du disque dépend donc du niveau sonore moyen. Cette durée est plus courte en stéréophonie (environ 25 mn) qu'en monophonie (30 mn).

Le graveur est du type électrodynamique (*fig.* 2) ; le déplacement du burin est asservi à la tension de modulation pour limiter les résonances mécaniques. La pointe de gravure est en saphir taillé avec précision. La profondeur moyenne du sillon est réglée par un patin glissant sur le disque ou obtenue par un réglage soigneux de la liberté et de l'amortissement du mouvement vertical. La pointe, chauffée par une résistance électrique, modifie les propriétés mécaniques de la laque : la vitesse de gravure maximale est ainsi augmentée. On minimise le bruit de fond provoqué par les micro-aspérités de la laque gravée en ajustant la composition de cette laque, la profondeur de gravure et la température du burin. Il est environ de — 55 dB à — 60 dB.

Appareils de lecture

Ces appareils sont largement répandus : leur qualité est très variable ; ils s'attachent tous, en principe, à réaliser une vitesse de rotation du plateau constante et à positionner la pointe de lecture parallèlement au sillon, avec une force de contact très faible pour éviter de détériorer le disque, mais suffisante pour que la pointe ne se décolle pas du sillon et soit guidée par celui-ci.

Têtes de lecture (phonocapteurs)

Ce sont des transducteurs mécano-électriques qui doivent produire des tensions suffisantes pour de faibles forces mécaniques. Elles ont en commun un équipage mobile porteur de la pointe de lecture, de faible inertie et dépourvu de résonances aux fréquences utiles. Elles se différencient par leur principe physique de transduction et par leurs caractéristiques tension électrique-déplacement mécanique.

* Les *têtes piézo-électriques* utilisent les propriétés d'un cristal ou d'une céramique qui délivre sur ses faces convenablement taillées une tension proportionnelle à l'amplitude du mouvement de la pointe. Le système normalisé de gravure étant du type à amplitude constante sur une grande partie du spectre, quelques ajustements mécaniques suffisent à conférer à cette tête une réponse en fréquence approximativement linéaire. Cet appareil équipe les tourne-disques de qualité moyenne : il exige une force d'appui sur le sillon élevée (6 à 8 g). En revanche, sa sensibilité est élevée (*fig.* 3a).

* Les *têtes magnétodynamiques* comportent un aimant mobile par rapport à une bobine. Cette technique délivre une tension proportionnelle à la vitesse de la pointe : une correction électronique est alors nécessaire. De plus, la sensibilité est assez faible. Ce système est largement répandu en haute fidélité, car il autorise de faibles forces d'appuis (inférieures au gramme) et une courbe de réponse très régulière (*fig.* 3b).

* Les *têtes à jauge de contrainte* (*fig.* 3c) [résistances sensibles à la déformation d'un support] et les *têtes à réluctance variable* (*fig.* 3d) sont actuellement peu employées.

* Les *têtes électrostatiques* voient présentement leur intérêt renouvelé par l'utilisation des électrets qui les dispensent d'une polarisation continue. L'élément mobile solidaire de la pointe constitue l'armature d'un condensateur polarisé par l'électret. Il en résulte une variation de charge que détecte un amplificateur à haute impédance d'entrée (*fig.* 3e).

* Les *têtes électrodynamiques* (*fig.* 3f) sont très peu sensibles.

* La *pointe* est constituée d'un matériau très dur (saphir pour les appareils « bon marché », diamant synthétique en haute fidélité) [*fig.* 4].

Défauts de l'enregistrement mécanique

Ces défauts ont en général pour origine l'utilisation d'un système de lecture différent de celui de gravure.

— *Erreur de piste :* l'angle entre la direction de la tête de lecture et le sillon n'est pas nul (comme c'est le cas lors de la gravure), car la tête est supportée par un bras pivotant autour d'un axe.

— *Effet de pince :* la largeur du sillon vue par la pointe de lecture de section arrondie diffère de celle gravée par le burin ; il s'ensuit un mouvement vertical alternatif harmonique du signal gravé.

— *Distorsion de contact :* pour les mêmes raisons de géométrie, le point de contact du sillon et de la pointe de lecture se déplace sur celle-ci, d'où une modulation de phase parasite.

On peut remédier à ces défauts en superposant électroniquement sur le signal enregistré la distorsion inverse de ces distorsions systématiques (simulateur de piste, système « dynagrove »), et en rapprochant la forme de la pointe de lecture de celle du burin (section elliptique au lieu d'être circulaire).

Mais les propriétés élastiques de la matière du disque ont quelquefois pour effet de réduire les distorsions théoriques et rendent incertains les résultats des calculs.

Réalisation des disques

A partir du modèle directement gravé, on tire des copies : on métallise la laque par dépôt d'argent (réduction d'une solution de nitrate d'argent ammoniacal). Sur

la couche d'argent, on dépose une couche de nickel pour obtenir l'original (le « père ») qui ne sert pas à l'impression (il serait rapidement détérioré). Par le même procédé, on obtient une « mère » à partir du père, qui, par de nouvelles galvanoplasties, fournit plusieurs matrices semblables aux pères. Celles-ci vont servir au passage des disques (quelques centaines de disques par matrice). Le disque moulé est en chloroacétate de polyvinyle ou en polystyrène (*fig.* 5).

Incassable mais facilement rayable, le disque ne supporte pas les températures supérieures à 40 °C (fluage) ni la plupart des solvants organiques (trichloréthylène, etc.). Sa longévité dépend du soin que l'on en prend et de la qualité du système de lecture (la durée d'utilisation est d'environ 1 000 passages).

Enregistrement magnétique

Le magnétophone est connu du public depuis 1945, et s'inspire d'un appareil allemand conçu vers 1931 par la firme AEG. L'idée d'utiliser un support magnétique comme mémoire date de la fin du XIXe siècle.

Les phénomènes magnétiques sont décrits à l'aide de trois grandeurs qui sont : le champ magnétique H, l'induction magnétique B et l'intensité d'aimantation J. H, B et J sont liés par la relation :

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{J})$$

μ_0 est une constante : c'est la perméabilité du vide. J est une grandeur liée à la matière soumise au champ magnétique. C'est une fonction plus ou moins complexe du champ (J est nul dans le vide).

Pour certains matériaux dits « linéaires », la relation J (H) est simple :

$$\vec{J} = \vec{J}_0 + \vec{H}$$

$\vec{J}_0 \gg H$ dans le cas des matériaux durs constituant les aimants permanents.

$\vec{J}_0 \ll H$ dans le cas des matériaux doux (noyau d'électro-aimants).

Pour d'autres matériaux (non linéaires), la relation entre $\vec{J}$ et $\vec{H}$ dépend également de leur histoire et du sens de variation de $\vec{H}$. On résume alors leurs propriétés par les courbes d'hystérésis (*fig.* 6).

La bande magnétique

C'est un ruban de matériau plastique (polyester) de bonne tenue mécanique recouvert d'une couche d'oxyde magnétique (Fe_2O_3 ou CrO_2) enrobé dans un liant. Les paramètres magnétiques importants de cette bande sont les valeurs du champ coercitif et de l'aimantation de saturation.

Le champ magnétique d'enregistrement est appliqué parallèlement à la vitesse de déplacement de la bande (*fig.* 7). Cette technique donne un bon rendement aux fréquences élevées. Les dipôles magnétiques de l'oxyde sont d'ailleurs préalablement orientés lors du « couchage » de la bande dans la direction du défilement. On emploie parfois une direction de magnétisation parallèle à la largeur de la bande lorsqu'on n'exige pas une bande passante élevée ni un bon rapport signal sur bruit (synchronisations...). La vitesse V de défilement étant constante, la longueur d'onde de l'aimantation après enregistrement d'un signal de fréquence f s'écrit :

$$\lambda = \frac{V}{f}$$

Le champ magnétique est appliqué par une *tête magnétique*. Il est préférable d'employer des têtes différentes pour les fonctions d'effacement, d'enregistrement et de lecture. La tête est un circuit magnétique ouvert par un entrefer très étroit défini par une cale diamagnétique. Le circuit magnétique a une forme torique ou rectangulaire ; il est constitué d'un matériau de perméabilité élevée (mumetal) et feuilleté pour empêcher les courants de Foucault. Les têtes en ferrite ont une moins bonne perméabilité, mais moins de pertes par courants induits, et sont presque inusables (*fig.* 8).

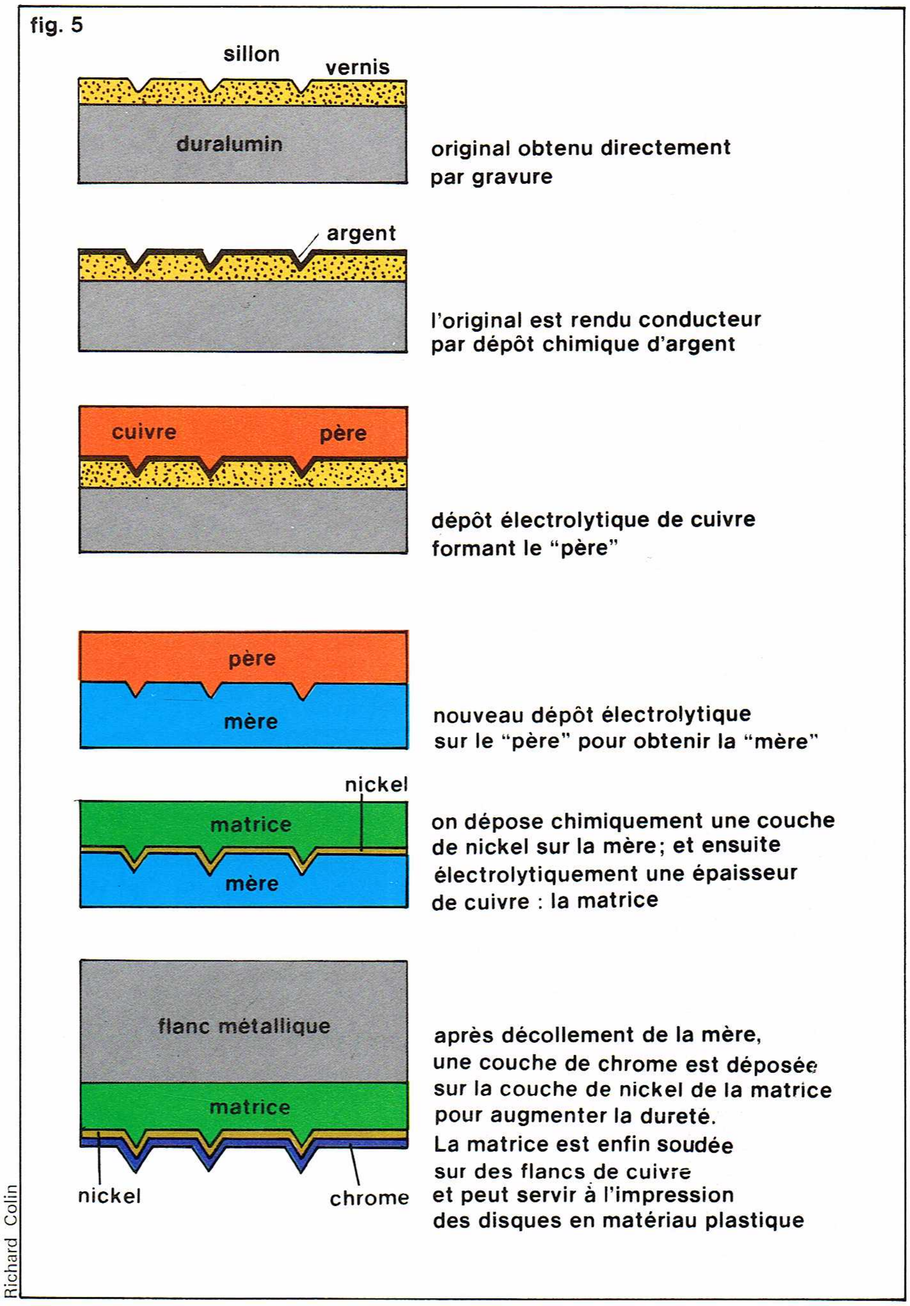

▲ *Figure 5 : principe de la duplication des disques.*

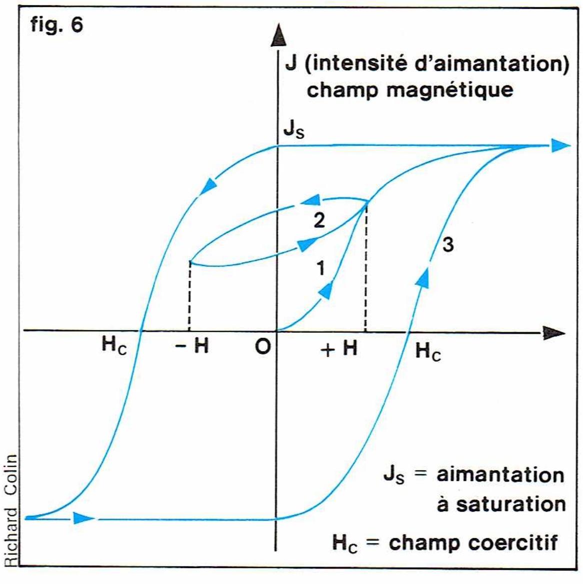

◀ *Figure 6 : cycles d'hystérésis relatifs à l'enregistrement magnétique ; 1, course de première aimantation ; 2, cycle mineur ; le champ varie entre + H et — H ; 3, cycle majeur : il représente le comportement du matériau pour les fortes variations du champ ; c'est l'enveloppe de tous les cycles mineurs.*

fig. 7

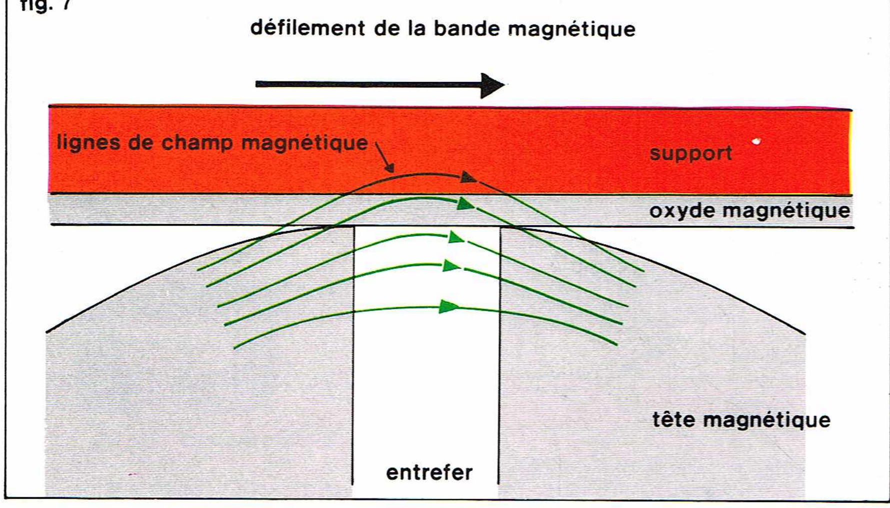

fig. 8

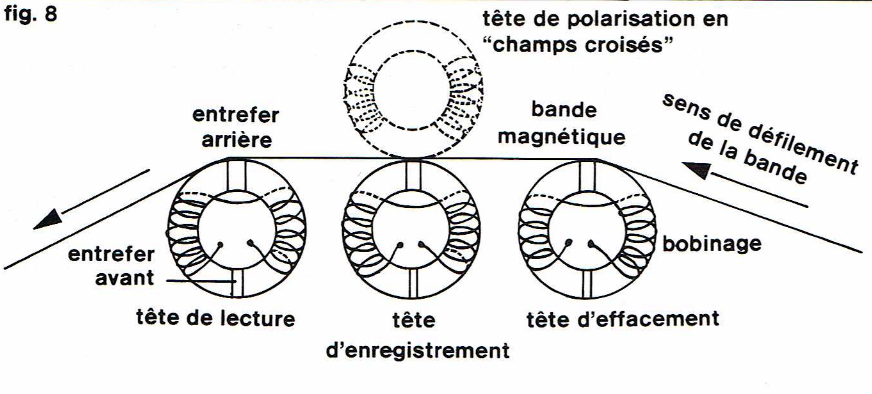

▲ *Figure 7 : principe de l'enregistrement et de la lecture magnétique.*

Figure 8 : disposition des têtes dans un magnétophone.

▼ *Figure 9 : enregistrement* **sans polarisation.**

Figure 10 : enregistrement **avec polarisation continue.**

La bande magnétique glissant devant l'entrefer ferme ce circuit magnétique, et son intensité d'aimantation variable crée une force magnétomotrice à la lecture. A l'enregistrement, le champ magnétique variable aimante plus ou moins la bande. Les variations du champ magnétique sont créées (enregistrement, effacement) ou détectées (lecture) par les bobinages entourant le circuit magnétique.

Effacement

L'effacement par aimant permanent présente l'inconvénient de laisser un signal modulé par les inhomogénéités de la bande; il est totalement abandonné de nos jours. On applique dans l'entrefer un champ magnétique haute fréquence (50 à 150 kHz) d'intensité suffisante pour saturer la bande; lors du passage devant la tête d'effacement, chaque région de la bande est donc soumise à un champ alternatif croissant puis décroissant lentement devant la fréquence : l'aimantation finale est nulle.

Soit R la réluctance du circuit magnétique, le flux créé dans la tête s'écrit :

$$\Phi = \frac{NI}{R}$$

N, nombre de spires de la bobine, I, courant de la bobine.

Le champ magnétique dans l'entrefer est :

$$H = \frac{\Phi}{\mu_0 S}$$

S, section de l'entrefer, μ_0, perméabilité du diélectrique (pratiquement égale à celle du vide).

Les champs magnétiques d'effacement sont de l'ordre de 100 000 A/m.

Enregistrement

La caractéristique intensité d'aimantation en fonction du champ magnétique n'est pas linéaire (*fig.* 9). Si l'on se contente d'appliquer le signal de modulation aux bornes de la bobine de la tête d'enregistrement, l'intensité d'aimantation sera modulée avec une forte distorsion. On pourrait superposer au signal un courant constant pour assurer une polarisation telle que le signal produise des variations d'intensité d'aimantation dans la région linéaire de la caractéristique (*fig.* 10). Pour des raisons voisines de celles qui ont conduit à l'abandon de l'effacement par un champ continu, on préfère superposer au signal modulé à enregistrer un courant alternatif haute fréquence (souvent identique à celui de la tête d'effacement).

Lorsque la portion de bande magnétisée s'éloigne de la tête d'enregistrement, le champ somme du signal et du champ alternatif de polarisation décroît, et la valeur finale de l'intensité d'aimantation est la valeur moyenne : celle du signal à enregistrer (*fig.* 11). On remarque que l'effacement n'est rien d'autre que l'enregistrement d'un silence par ce procédé. Mais le réglage de l'amplitude du champ de polarisation demande plus de précision que celui du champ d'effacement (ce dernier se contente de saturer la bande). Le champ de prémagnétisation est de l'ordre de dix fois le courant de modulation. On choisit son amplitude en fonction du champ coercitif de l'oxyde et de l'épaisseur de la couche. De ce choix dépendent la distorsion, le niveau de modulation, la courbe de réponse.

Lecture

Si la longueur d'onde de l'intensité d'aimantation est supérieure à l'épaisseur de l'entrefer, la portion de bande passante devant ce dernier se conduit comme un générateur de force magnétomotrice qui débite dans le circuit constitué par la tête et la portion de bande considérée. La force magnétomotrice s'écrit :

$$f = Je$$

fig. 9

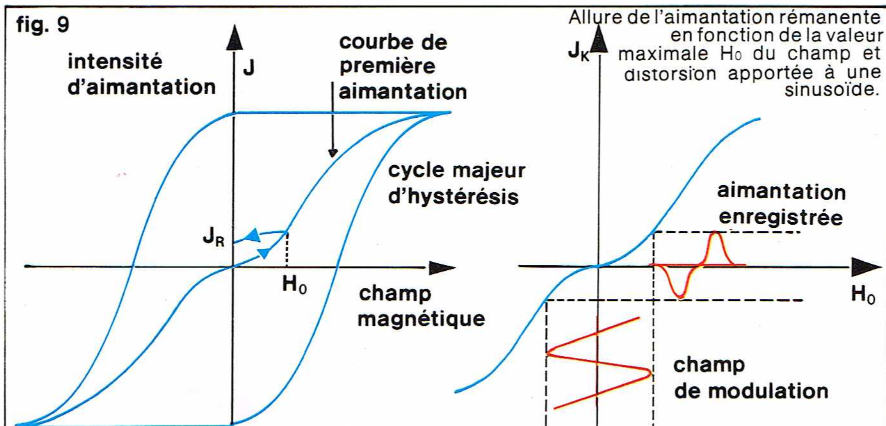

Évolution de J lorsque l'on applique à un matériau ferromagnétique, un champ continu que l'on fait croître jusqu'à la valeur H_0.

Allure de l'aimantation rémanente en fonction de la valeur maximale H_0 du champ et distorsion apportée à une sinusoïde.

Si on superpose au champ à enregistrer un champ constant H_P, on peut aimanter l'oxyde sur une partie relativement linéaire de la courbe ; la distorsion est faible si le signal de modulation n'est pas trop important.

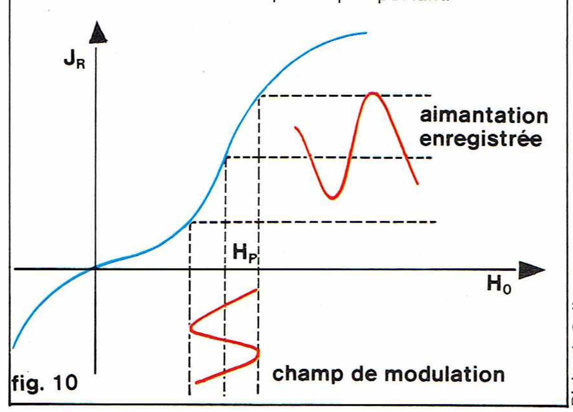

fig. 10

D. Bouquignaud - TOP

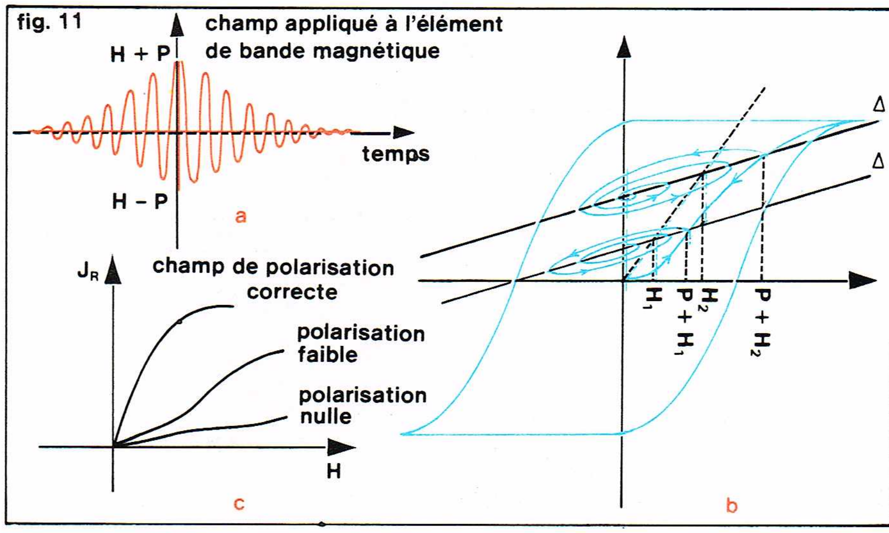

Richard Colin

e, épaisseur de l'entrefer ; J, aimantation de la bande.

Soit R la réluctance du circuit (en général, la réluctance de la tête est négligeable devant celle de la portion de bande). Le flux moyen de la tête s'écrit :

$$\Phi = \frac{Je}{R}$$

Aux bornes de la bobine de la tête de lecture, on récupère la force électromotrice :

$$U = -N\frac{d\Phi}{dt} = -N\frac{e}{R}\frac{dJ}{dt}$$

Par exemple, supposons que le signal enregistré soit sinusoïdal de fréquence f ; J est une fonction de la position x de la portion lue sur la bande :

$$J = J_0 \cos \frac{2\pi x}{\lambda}$$

La bande se déplace à la vitesse v lors de l'enregistrement

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

La lecture s'effectue à la même vitesse :

$$x = vt$$

d'où J lu par la tête de lecture s'écrit :

$$J = J_0 \cos 2\pi ft$$

et la tension de sortie :

$$U = \frac{e}{R} 2\pi N f J_0 \sin 2\pi ft$$

La tension de sortie augmente donc linéairement avec la fréquence ; il est nécessaire de corriger électroniquement cette lecture, puisque l'enregistrement est fait à amplitude d'intensité d'aimantation constante sur la plus grande partie du spectre. La tête est, en particulier, incapable de reproduire un signal continu ($f = 0$). Il existe toutefois des systèmes de têtes tournantes, qui sont donc sensibles à une intensité d'aimantation constante le long de la bande, ainsi que des têtes fixes, d'un principe différent (effet Hall).

Rigoureusement, la force magnétomotrice est l'intégrale de J (x) sur toute l'épaisseur de l'entrefer. Dans le cas d'une forme sinusoïdale de J (x), la force électromotrice est multipliée par le facteur :

$$K = \frac{\sin u}{u} \quad \text{avec} \quad u = \frac{\pi e}{\lambda}$$

Lorsque λ est très grand devant e (basses fréquences), K est sensiblement égal à l'unité, et le raisonnement précédent reste valable. Pour $\lambda = e$, le signal s'annule une première fois (K = 0) : c'est la longueur d'onde de coupure.

En pratique, la longueur d'onde de coupure est un peu supérieure à e (la portion de bande lue s'étend un peu au-delà de l'entrefer). Pour un entrefer courant de 5 microns d'épaisseur, on admet une longueur d'onde limite de 10 microns, ce qui conduit à faire défiler la

▲ *A gauche, une interview enregistrée sur magnétophone à Radio-France.*
A droite, figure 11 : polarisation alternative ; a, *l'élément de bande magnétique à aimanter est soumis à un champ alternatif croissant puis décroissant ;*
b, *le point représentatif de l'intensité d'aimantation décrit un cycle en forme de spirale ; pour les valeurs différentes* (H_1 *et* H_2) *du champ à enregistrer la pente de la droite* Δ *varie peu ;*
c, *si P est suffisant il y aura une bonne linéarité de* J_R (H).
▼ *Deux étapes de la fabrication des bandes magnétiques.*

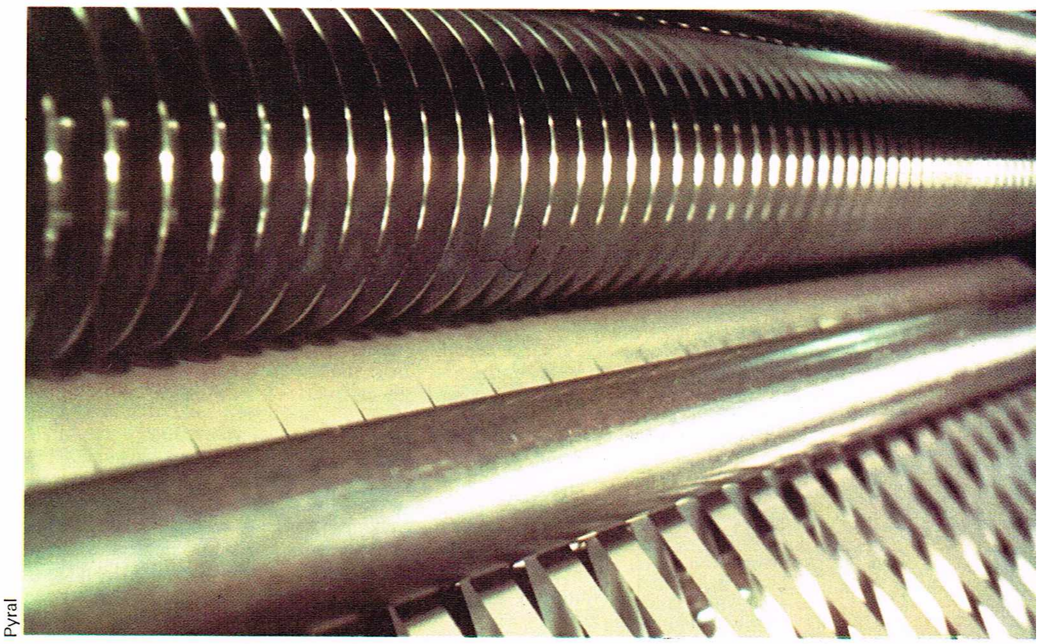

Pyral

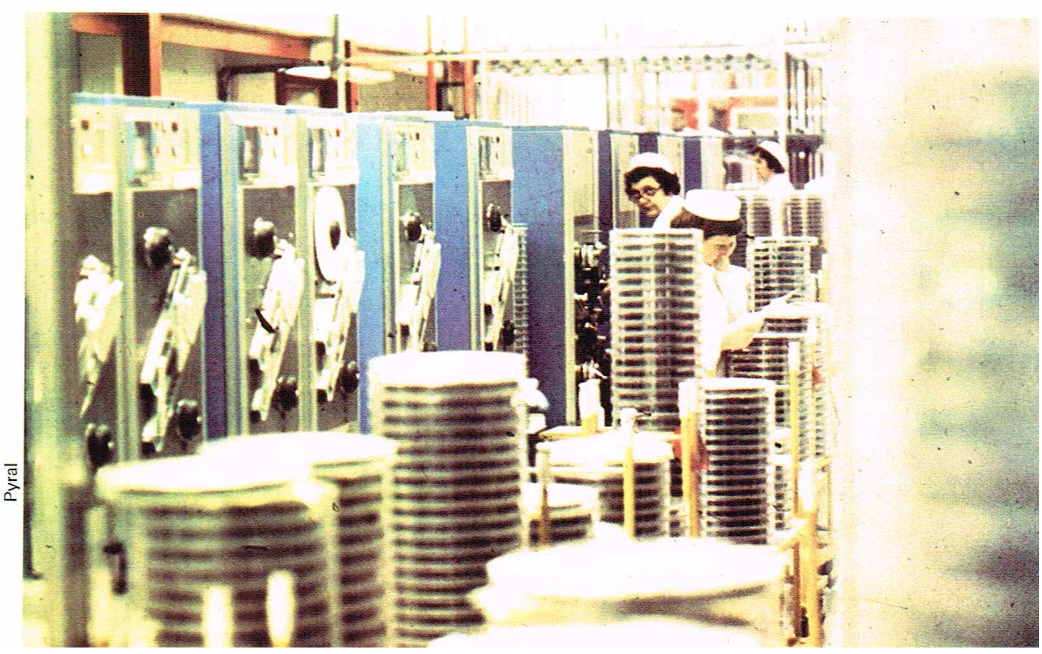

Pyral

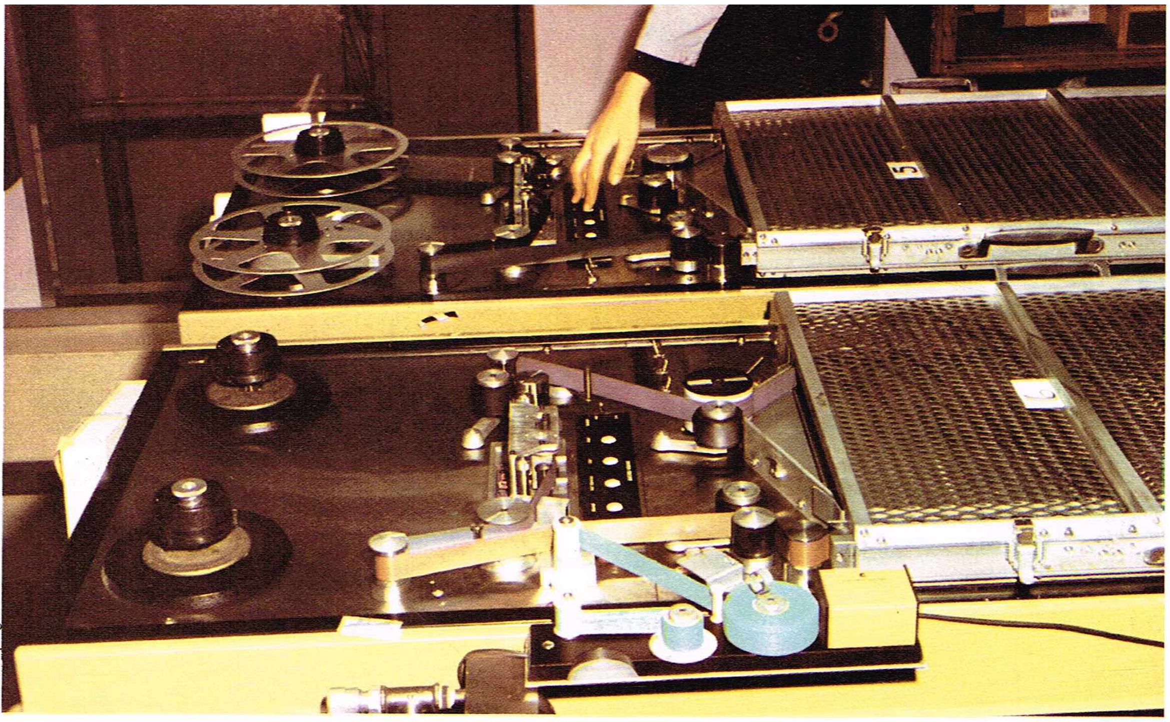

D. Bouquignaud - TOP

▶ *Passage de la bande magnétique mère lors de l'enregistrement et de la fabrication de cassettes chez Pathé-Marconi.*

▼ *Figure 12 : corrections à effectuer lors de l'enregistrement et de la lecture de signaux haute fréquence sur bande magnétique ; la valeur de la fréquence f_0 est normalisée et dépend de la vitesse de défilement de la bande ; les basses fréquences sont également accentuées lors de l'enregistrement. Pour rendre compatibles tous les magnétophones (bien que leurs têtes de lecture aient des caractéristiques différentes), on impose à l'ensemble tête de lecture-préamplificateur les caractéristiques représentées sur cette figure plutôt que de définir seulement le gain du préamplificateur en supposant la tête de lecture idéale. Chaque constructeur doit ensuite ajuster ses caractéristiques d'enregistrement pour que la courbe de réponse globale soit plate.*

bande à 19 cm/s afin de reproduire la limite des fréquences audibles (20 000 Hz).

De même, si l'entrefer n'est pas parfaitement perpendiculaire à la longueur de la bande (erreur d'azimut), la lecture intègre une plus grande partie de la sinusoïde, et la fréquence de coupure est diminuée. Tout se passe comme si l'entrefer avait l'épaisseur L tg α, L étant la largeur de la bande et α l'angle d'erreur d'orientation de la tête.

Les têtes ont des pertes qui augmentent avec la fréquence (hystérésis, courants de Foucault, adaptations d'impédance avec le circuit électronique...). Il n'est donc pas possible d'enregistrer les signaux hautes fréquences à amplitude constante : on modifie la courbe d'enregistrement selon la *figure* 12. La lecture doit évidemment effectuer la correction inverse. Il faut remarquer que l'épaisseur de la couche d'oxyde n'est pas infiniment petite : le calcul de la force magnétomotrice doit faire intervenir l'intégrale de J (x) sur cette épaisseur. La portion de bande lue augmente avec la profondeur considérée : la longueur d'onde de coupure croît aussi avec cette profondeur, et les hautes fréquences sont défavorisées. De même, l'éloignement de la bande à la suite d'imperfections mécaniques conduit, lui aussi, à l'affaiblissement des fréquences élevées.

Normes

Les pertes de lecture peuvent être corrigées à la lecture elle-même, mais la proximité de la saturation en hautes fréquences empêche la correction des pertes d'enregistrement. On normalise donc une partie de ces corrections : le courant d'enregistrement diminue à 6 décibels par octave au-dessus d'une certaine fréquence. A la lecture, la tension aux bornes de la bobine est atténuée à 6 décibels par octave, puis transmise linéairement au-dessus de la fréquence f_0.

Limitations

La bande passante est limitée du côté des basses fréquences par la sensibilité des têtes à la variation du flux (les signaux basses fréquences sont noyés dans le bruit) et par l'influence des portions de bandes voisines de la portion lue dont la corrélation annule le signal en dessous d'une certaine fréquence (longueur d'onde de l'ordre des dimensions de la tête).

Du côté des hautes fréquences, la limite ultime de résolution du support est donnée par les dimensions des aiguilles d'oxyde (de l'ordre du micron). La longueur d'onde minimale est donc de quelques microns, et la fréquence limite d'enregistrement est proportionnelle à la vitesse de défilement de la bande.

Distorsions

- *Distorsion par harmoniques.* La technique d'enregistrement par polarisation alternative autorise comme principale distorsion le troisième harmonique. Ce troisième harmonique n'est gênant que s'il appartient à la bande passante (basses fréquences).
- *Distorsion par intermodulation.* Elle est surtout sensible pour les fréquences supérieures : intermodulation entre elles ou avec le courant haute fréquence de polarisation.
- Différentes *distorsions d'amplitudes* dépendent de la qualité des bandes et des surfaces mécaniques.

Bruit

Bruit blanc dû à la structure discontinue de l'oxyde ; la puissance de bruit est proportionnelle à la bande passante ; l'emploi de pistes magnétiques de plus en plus étroites rend dans certains cas nécessaire l'augmentation des sons faibles à l'enregistrement, la lecture rétablissant leur niveau initial : le rapport signal sur bruit reste alors acceptable pour les petits signaux.

Les bandes magnétiques enregistrées peuvent être lues sans baisse de qualité plusieurs milliers de fois. Elles se conservent facilement loin des aimants permanents (proximité d'un haut-parleur par exemple) et du contact direct des métaux.

Les risques de détérioration, qui sont très limités de nos jours, proviennent de la matière du support (dégradation des polymères), et surtout du procédé de couchage de l'oxyde.

Industrie de la bande magnétique

L'enregistrement magnétique est connu depuis longtemps lorsque, à la suite de l'invention de la bande magnétique, apparaît le premier magnétophone digne de ce nom. Dès lors, les supports magnétiques ne cessent

fig. 12

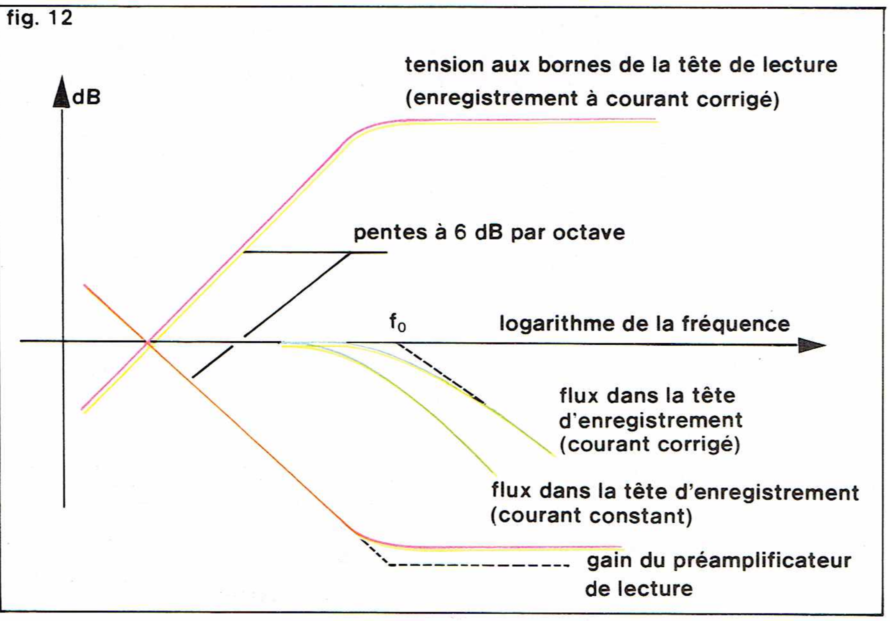

Richard Colin

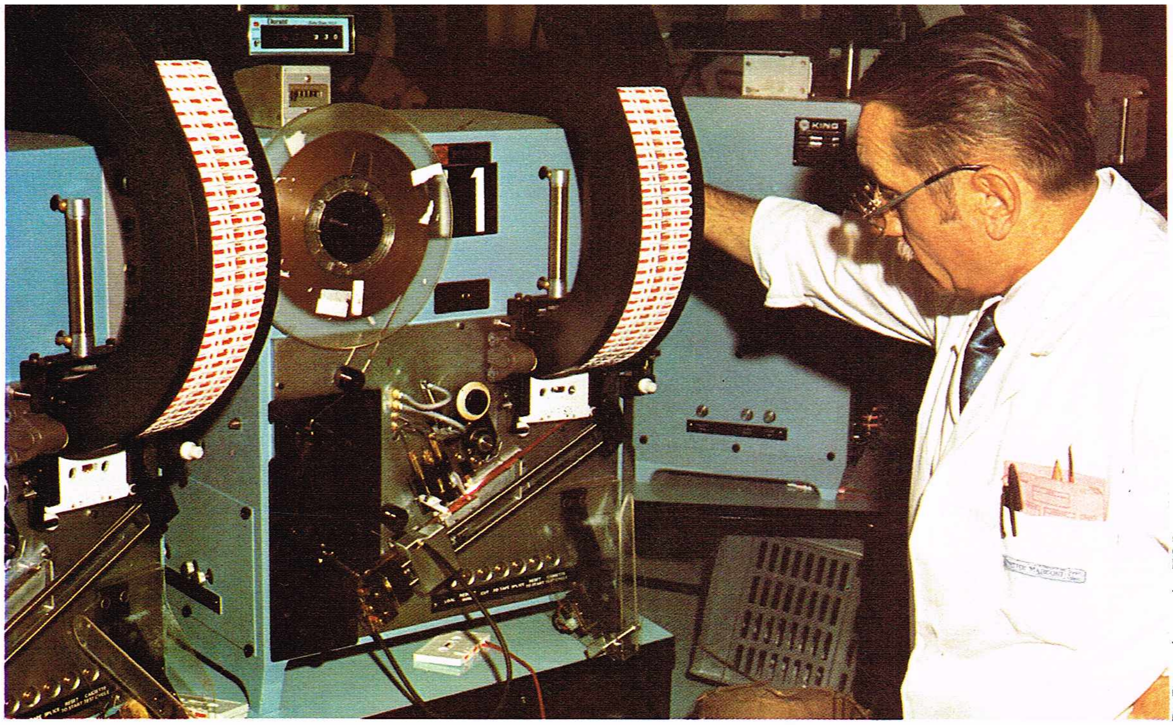

D. Bouquignaud - TOP

◀ *Machine à monter les cassettes chez Pathé-Marconi.*

de s'améliorer, et leur utilisation se généralise dans tous les domaines : cinéma, radio, télévision, ordinateurs, appareils de mesure et même le métropolitain en font une large utilisation. La bande magnétique a remplacé systématiquement les autres supports d'enregistrement chaque fois que l'on n'avait pas besoin d'un grand nombre de copies.

L'enregistrement sur bande magnétique constitue la première étape de tout enregistrement destiné à une grande diffusion, pour laquelle la bande n'est pas tout à fait adaptée : sa duplication n'est pas aussi simple et économique que le pressage d'un disque ou même la copie d'un film de cinéma. Dans des domaines particuliers où le disque est d'un emploi incommode (appareil embarqué sur une automobile par exemple), le support magnétique édité en masse présente un intérêt commercial : la « minicassette » (bande magnétique présentée dans un chargeur) est enregistrée à très grande vitesse sur un appareil spécial.

Fabrication des bandes magnétiques
(d'après une documentation Pyral)

Le support est en téréphtalate de polyéthylène (le « Mylar » est la marque commerciale d'un produit de ce type). Les largeurs sont normalisées en fractions de pouce (25,4 mm) :
1/8 de pouce (3,12 mm) : bande de minicassette ;
1/4 de pouce (6,25 mm) : bande magnétophone à bobine ;
1/2 et 1 pouce : bande professionnelle.

Le dos du support est recouvert d'une dorsale dont les propriétés de conduction et de rugosité diminuent la sensibilité aux poussières et favorisent les bobinages rapides. L'épaisseur du support varie entre 20 et 40 microns. L'enduit magnétique est constitué d'un liant et de l'oxyde magnétique, qui est une poudre constituée de particules en forme d'aiguilles (aciculaires) de longueur de l'ordre de 0,7 micron, et de 0,1 micron de diamètre. On l'obtient en transformant dans des fours spéciaux l'oxyde non magnétique $Fe_2O_3\alpha$ en Fe_3O_4, puis en $Fe_2O_3\gamma$ magnétique.

Les propriétés du liant sont essentielles : il assure l'adhérence de l'oxyde sur le support et sa répartition, la souplesse de la couche, la résistance à l'usure ainsi que la lubrification (pour éviter l'abrasion trop rapide des têtes). Sa composition fait l'objet de recherches et d'améliorations constantes.

Le couchage est l'opération de dépôt du mélange liant-oxyde sur le support. L'épaisseur de la couche, contrôlée avec précision, est d'environ 10 microns. La bande subit ensuite un traitement de calandrage (passage entre des rouleaux sous pression) destiné à améliorer le contact tête-couche et à diminuer les pertes en haute fréquence. La bande, jusqu'ici en rouleau de 32 à 64 cm de large (« jumbo »), est découpée à la largeur désirée (cette opération demande une grande précision). Enfin, elle subit divers contrôles, et elle est présentée enroulée sur des bobines de différents diamètres.

Enregistrement optique

Cette technique est née des besoins du cinéma parlant : la nécessité d'un synchronisme rigoureux entre le son et l'image suggère leur inscription sur un même support. L'idée consiste à moduler au rythme de la fréquence sonore l'intensité d'un flux lumineux. Celui-ci impressionne une piste ménagée parallèlement aux images sur le film cinématographique.

Modulation de densité

L'idée la plus simple est de moduler la tension d'alimentation d'une lampe à décharge (la lampe à incandescence ayant trop d'inertie), mais la difficulté est alors de maintenir constante la relation entre l'intensité lumineuse et la tension de modulation. Des méthodes d'un principe plus complexe ont donc été étudiées.

Dans le procédé le plus utilisé, le courant de modulation circule dans la boucle que forment deux rubans conducteurs placés dans le champ d'un aimant permanent. Un pinceau lumineux est projeté sur la pellicule cinématographique, au travers de la fente définie par les rubans. La largeur de cette fente dépend de l'intensité du courant (interaction entre le courant et le champ magnétique) et module ainsi la quantité de lumière parvenant sur l'émulsion. La tension mécanique des rubans doit être suffisante pour rejeter leur fréquence de résonance au-dessus de la gamme audible (*fig.* 13).

▼ *Figure 13 : enregistrement optique à densité variable de la piste sonore sur la pellicule d'un film parlant ;* a, *l'éclairement de la fente varie au rythme de la tension de modulation. L'image de cette fente (une dizaine de µm de largeur) impressionne plus ou moins l'émulsion photographique ;* b, *ce dispositif remplace la lampe à luminescence variable dans le schéma* a.

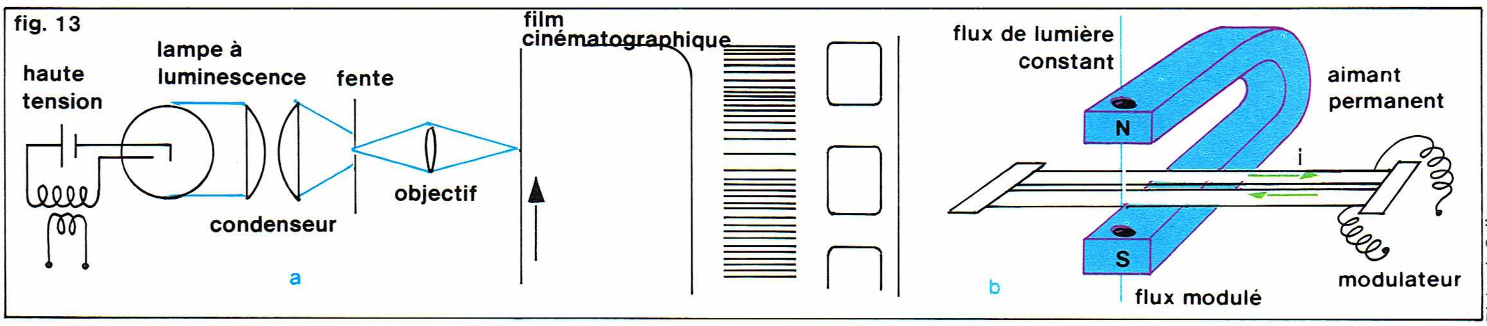

Richard Colin

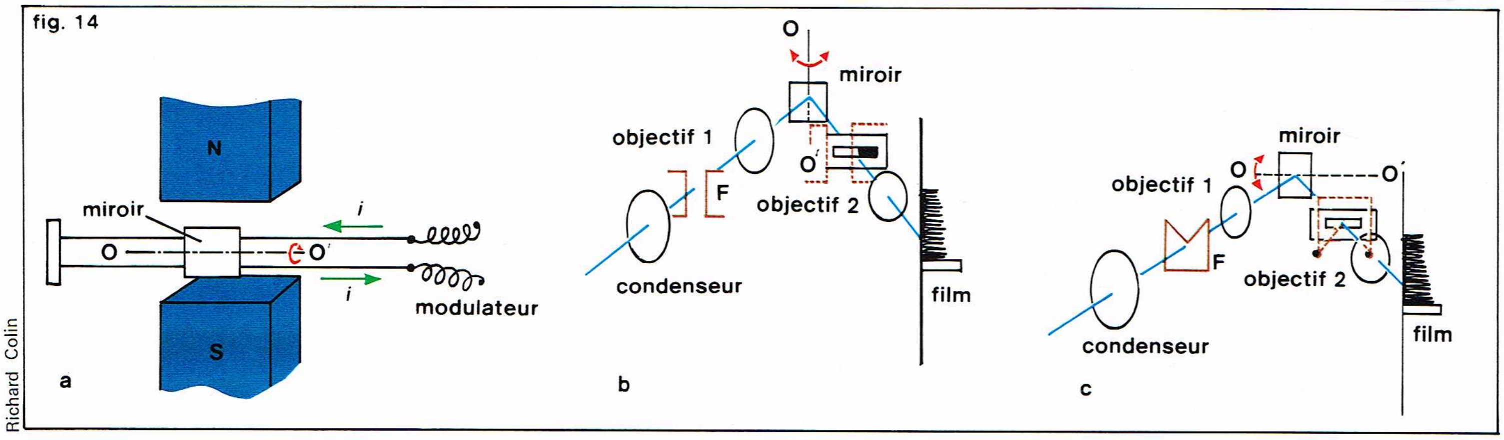

▲ ***Figure 14 :*** *enregistrement optique à densité fixe de la piste sonore sur la pellicule d'un film parlant; le miroir vibre au rythme de la modulation autour de l'axe OO′ (a); selon la forme du cache dont l'image est formée par l'objectif 1 sur la fente F, on module de façon unilatérale (b) ou symétrique (c) son image formée sur la pellicule par l'objectif 2.*

Le système à cellule de Kerr (employé quelque temps en Allemagne) utilise le pouvoir rotatoire, sensible au champ électrique, du liquide remplissant la cellule. Celle-ci, placée entre deux polariseurs croisés, intercepte le rayon lumineux dont l'intensité se trouve modulée au rythme du champ électrique. Cette méthode présente l'inconvénient d'exiger des tensions élevées pour la modulation (isolation).

Modulation à densité constante

On module cette fois l'étendue de la surface éclairée sur la piste, l'exposition de l'émulsion étant fixe.

L'*oscillographe Blondel* est à la base du procédé : un pinceau lumineux est dévié par le miroir d'un galvanomètre à cadre mobile dont l'impédance mécanique est adaptée au domaine de fréquences à enregistrer; ce pinceau éclaire la pellicule à travers une fente fixe (*fig.* 14). Selon la forme du pinceau lumineux et sa direction de déplacement par rapport à la fente, on obtient une modulation unilatérale ou bilatérale. Dans tous les cas, la lecture est effectuée par une cellule photosensible éclairée à travers la pellicule cinématographique par un pinceau lumineux d'intensité constante.

Le cinéma sonore reproduit les fréquences audibles inférieures à 6 000 hertz : le « grain » ordinaire de l'émulsion photosensible impose alors une vitesse de défilement plus élevée que celle nécessaire à l'illusion du mouvement : 24 images par seconde (soit 45,6 cm/s) au lieu de 16 images par seconde.

Des remarques concernant la nécessité de vitesses constantes tant à l'enregistrement qu'à la lecture, ou encore l'alignement des fentes d'éclairages et leurs épaisseurs, se déduisent aisément de l'exemple de l'enregistrement sur bande magnétique.

Les propriétés photosensibles des émulsions (sensitométries) agissent sur la distorsion. Les tolérances sont particulièrement étroites en modulation à densité variable.

L'inconvénient majeur de l'enregistrement optique est l'impossibilité d'effacer : cette technique ne présente d'intérêt que pour la copie des films, et n'est utilisée que lors du repiquage; toutes les autres opérations sont effectuées sur bande magnétique perforée. Par ailleurs, le « pistage » du film par une ou plusieurs bandes magnétiques s'impose dans le cas des reproductions multicanaux (cinémascope, cinérama) et pour le cinéma amateur. Il existe des systèmes mixtes optiques et magnétiques à des fins de compatibilité.

La haute fidélité

Généralités

La définition de fidélité en matière de reproduction sonore est en relation étroite avec l'état des connaissances acquises sur notre sens auditif. Certains critères, dits objectifs, sont facilement mesurables. D'autres, subjectifs, se fondent sur les impressions d'un échantillon d'auditeurs. Les possibilités de la technique et divers compromis entre ces éléments aboutissent à des réalisations dont les performances sont définies par des normes. Les normes s'alignent avec un certain retard sur les progrès des constructeurs. On trouve donc à l'intérieur du label haute fidélité des appareils de possibilités très variables. Enfin, au-dessus d'une certaine qualité, déjà très supérieure aux normes en vigueur, il n'existe plus vraiment de critères objectifs, et le choix est affaire de goût personnel.

Les principaux critères objectifs de fidélité sont étudiés ci-après :

● **La bande passante.** On appelle son de fréquence audible tout son pur (variation sinusoïdale de la pression de l'air de fréquence fixe et de durée grande devant la période) perçu par l'oreille. L'étendue des fréquences transmises par l'appareil doit au moins couvrir la bande des fréquences audibles (20 à 20 000 hertz). Mais un son réel comprend, en général, des transitoires rapides (coup de cymbale...) dont le spectre de fréquences s'étend dans le domaine ultrasonore (comme le montre une décomposition en série de Fourier). Il semble que la reconstitution du son avec ses transitoires soit utile à la fidélité de l'impression auditive, ce qui justifie l'extension de la bande passante des appareils aux fréquences ultrasonores.

● **La dynamique.** La sensibilité de l'oreille est approximativement logarithmique, c'est-à-dire que l'impression de niveau sonore augmente beaucoup moins vite que la pression acoustique (seule grandeur physique liée à l'intensité du son qui soit mesurable). On transforme donc l'échelle des pressions sonores en échelle de décibels.

Le niveau de pression acoustique évalué en décibels s'écrit :

$$N = 20 \text{ Log } \frac{P}{P_0}$$

P est la pression acoustique, $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ pascal correspond au seuil de l'audition moyenne à environ 1 000 hertz. Ainsi, à 0 décibel correspond le silence parfait pour la plupart des gens. Le seuil de la douleur survient autour de 120 décibels, soit pour une pression acoustique de l'ordre de 20 pascals (0,2 ‰ de la pression atmosphérique). La dynamique représente en décibels le rapport entre les pressions maximales et minimales reproduites. Une dynamique de 90 décibels est courante dans un passage musical, mais la « haute fidélité » n'en exige que 60.

● **Le bruit.** L'oreille est sensible au rapport signal sur bruit : en présence d'un son fort, un son faible paraît encore plus faible et un message sonore d'intensité un peu inférieure au bruit est inintelligible.

Les critères subjectifs sont nombreux et discutables. Il semble toutefois que l'oreille soit très sensible à l'équilibre tonal d'un son : il est possible d'amputer les extrémités de la bande passante, à condition de respecter une certaine symétrie. La notion du timbre d'un son est propre à l'oreille : alors que l'impression de hauteur d'un son pur s'identifie avec la fréquence, cette même hauteur semble fixée par l'harmonique de fréquence la plus faible (fondamental) dans le cas d'un son réel complexe (note de piano par exemple).

La restitution du relief sonore (audition binaurale) est en première approximation obtenue par la reproduction séparée des sons provenant de la droite et de la gauche de l'auditeur (stéréophonie).

Constitution d'une chaîne haute fidélité

L'amplificateur

C'est le centre nerveux de l'installation ; sa tâche est répartie entre deux étages.

L'amplification bas niveau (préamplification)

Son rôle est d'amplifier les signaux électriques faibles à la sortie d'un transducteur (phonocapteurs, microphones) ou d'un autre préamplificateur (tuner, magnétophone) [*fig.* 15]. Elle assure les principaux réglages.

- *Sélection de l'entrée :* pour ne pas avoir à retoucher le volume lors de la commutation de niveaux différents (pick-up magnétique et tuner par exemple), le gain moyen est ajusté par le changement de la boucle de contre-réaction. C'est par cette même boucle que sont modifiées les caractéristiques gain-fréquences propres à chaque voie d'entrée.
- *Réglage de tonalité :* il favorise à volonté les fréquences graves ou aiguës et, dans les systèmes élaborés, une troisième commande agit sur les médiums. L'intérêt de ce dispositif est de compenser approximativement l'imperfection d'un enregistrement, d'un haut-parleur ou de l'acoustique du local d'écoute.
- *Réglage de volume :* il agit sur le niveau général de sortie de l'amplificateur.
- *Réglage de balance :* il modifie le niveau relatif des voies gauche et droite.
- Les *filtres* permettent d'éliminer les défauts d'un enregistrement ou d'un transducteur non adapté à la large bande de l'amplificateur (bruit d'aiguille des anciens disques et phonocapteurs dont le spectre recoupe l'extrême aigu de la bande audible, saturation en basse fréquence provoquée par un disque déformé).
- Le *correcteur physiologique :* il est chargé de compenser la perte de sensibilité aux extrémités du spectre (basses fréquences principalement) présentée par l'oreille humaine aux faibles niveaux sonores (courbe de Fletcher).

Le bruit électronique dépend de la qualité du préamplificateur ; c'est la partie la plus sensible aux perturbations extérieures de l'amplificateur. Les progrès des circuits intégrés analogiques en terme de bruit expliquent leur emploi croissant dans cet élément.

L'amplificateur de puissance

Il est presque toujours du type « push-pull » à alimentation série. Le couplage avec la charge se fait directement ou par capacité, plus rarement par transformateur (réservé aux fortes puissances). Dans le détail, chaque constructeur apporte ses variantes, mais l'essentiel est contenu dans quelques schémas de base, et finalement les caractéristiques obtenues sont très semblables. Il faut surveiller principalement la stabilité des points de polarisation, l'équilibre dynamique du push-pull, et surtout la bande passante du transistor d'attaque qui doit éliminer les distorsions de raccordement (boucle de contre-réaction). La puissance de l'amplificateur dépend de la dynamique à reproduire et du rendement des charges acoustiques (haut-parleurs). Elle oscille entre 5 et 200 watts, mais une vingtaine de watts semble être un minimum pour la plupart des systèmes haut-parleurs de qualité. La distorsion introduite par l'amplificateur est de l'ordre du pour mille. Le rapport signal sur bruit atteint facilement 60 décibels.

Les tables de lecture

Elles assurent la rotation régulière du plateau entraînant le disque. La perfection de ce mouvement est doublement obtenue par la qualité de la construction mécanique et par une régulation ou même un asservissement électronique. Différentes solutions sont retenues par les constructeurs pour établir la liaison entre le moteur et le plateau (entraînement par galet ou par courroie). Pour réduire les risques d'usure de ces transmissions, certaines réalisations ont un plateau solidaire de la partie tournante du moteur (entraînement direct). Outre les fluctuations de vitesse du plateau (pleurage et scintillement), il faut éliminer les vibrations parasites, qu'elles proviennent des pièces en mouvement elles-mêmes ou de l'extérieur. La suspension et l'amortissement du plateau sont réglés à cet effet.

Il n'est pas facile de concevoir un système mécanique suffisamment simple capable de maintenir la tête de

Cliché Thomson - CSF - Jacques Pierre

▲ Transistors de puissance fabriqués par Sescosem. Ceux-ci sont utilisés dans les amplificateurs de puissance.

▼ Figure 15 : bloc diagramme d'un préamplificateur. Les réseaux de contre-réaction R_1, R_2, R_3 *ont le double rôle d'ajuster le gain du préamplificateur au niveau d'entrée et de satisfaire les caractéristiques d'égalisation de bande passante ; certaines corrections comme l'égalisation des phonolecteurs sont normalement demandées au préamplificateur tandis que d'autres, comme la désaccentuation des fréquences aiguës en modulation de fréquence, sont effectuées directement à la détection. Certains préamplificateurs utilisent un amplificateur différent pour les entrées bas niveau et haut niveau.*

fig. 15

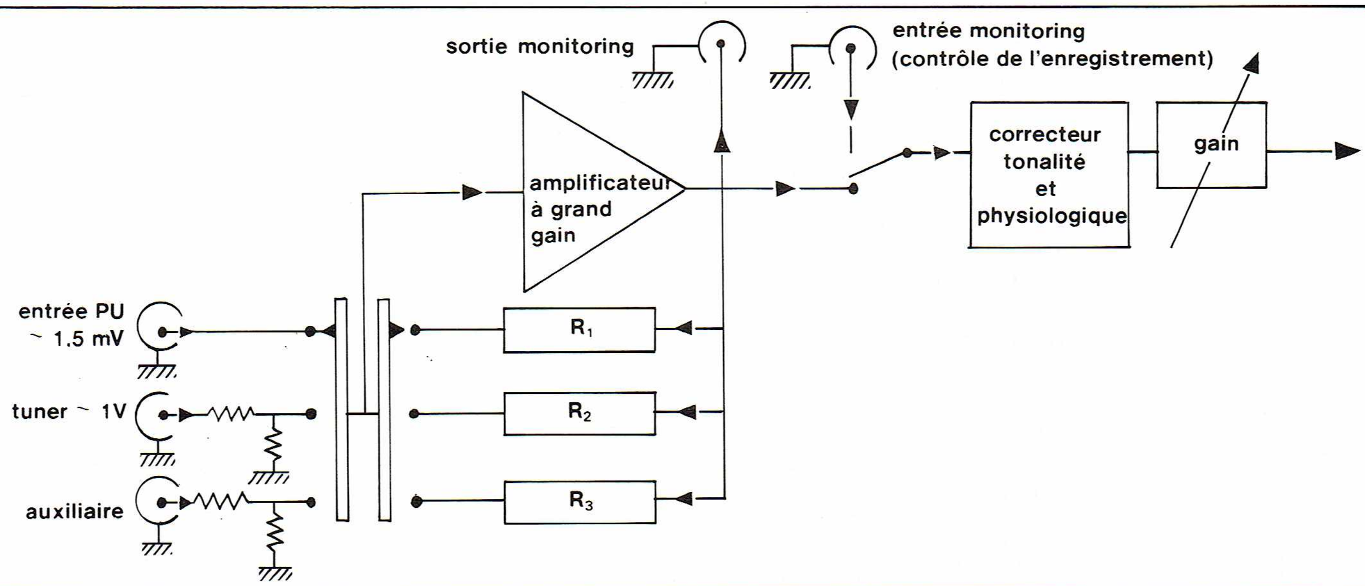

Richard Colin

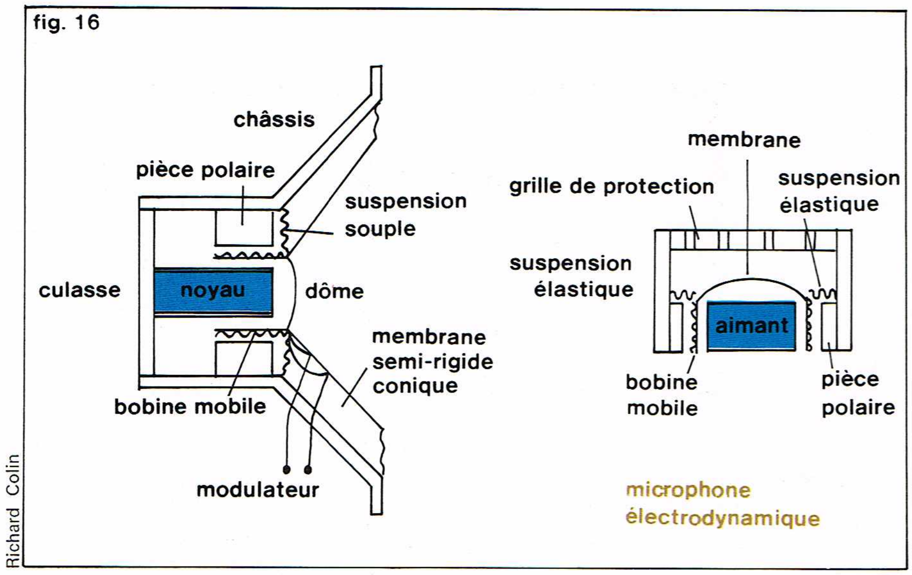

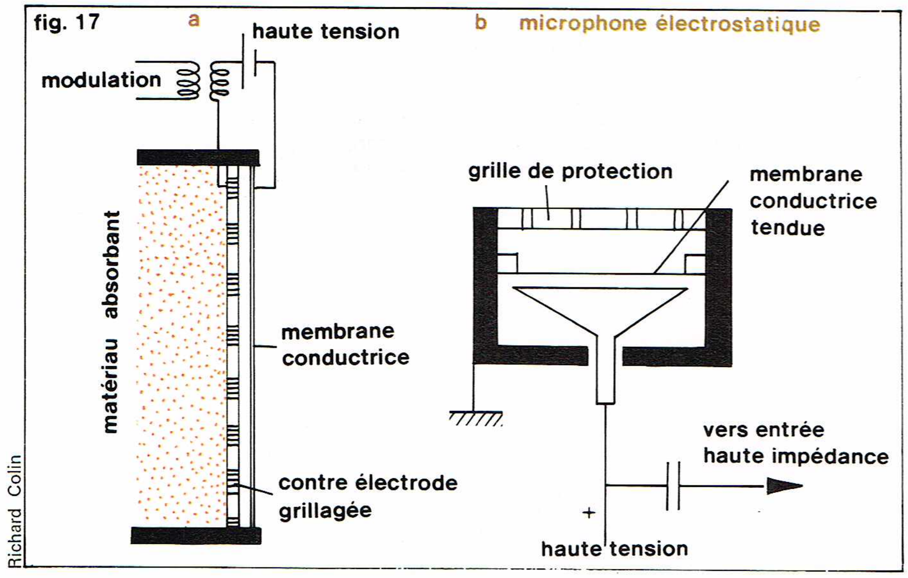

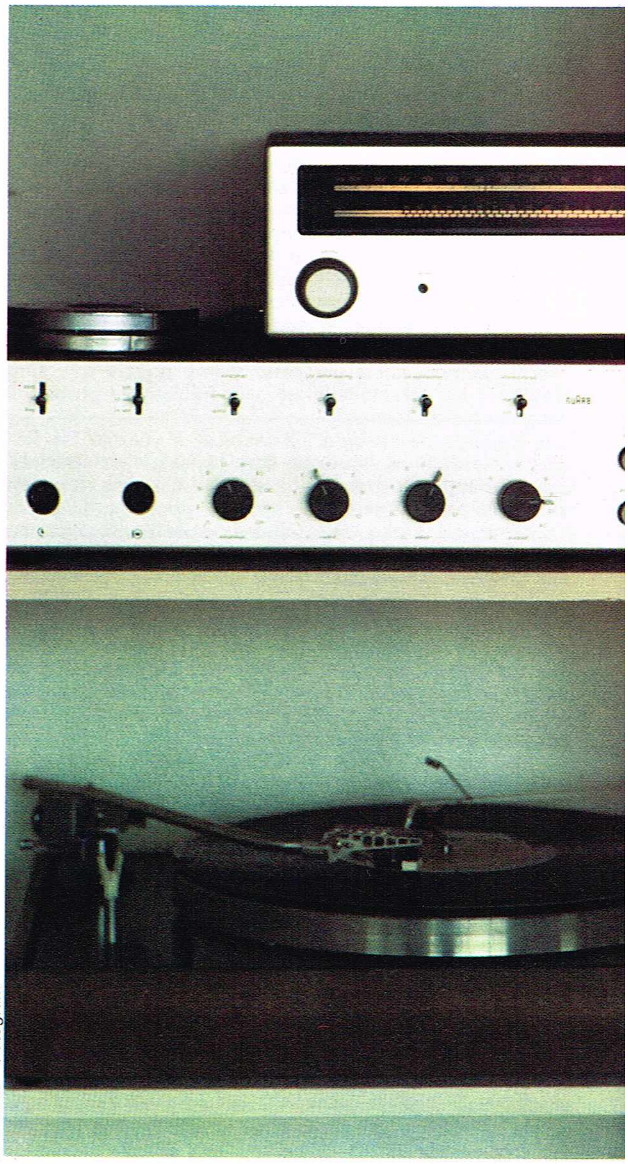

▲ *Figure 16 : représentation schématique d'un* haut-parleur électrodynamique.

Figure 17 : représentation schématique d'un haut-parleur électrostatique (a) *et d'un* microphone électrostatique (b) ; *les microphones et haut-parleurs d'un même principe obéissent en première approximation à des équations électromécaniques linéaires réversibles; ils diffèrent pourtant par le choix des impédances mécaniques et par leur puissance. Ainsi, un haut-parleur électrodynamique est un excellent microphone au-dessus de sa fréquence de résonance (quelques dizaines de hertz), alors qu'un microphone électrodynamique est un très bon haut-parleur d'aigus au-dessus de sa résonance (10 000 hertz).*

lecture parallèle à la direction des sillons sur toute l'étendue du disque. Cela est toutefois possible à condition d'utiliser un capteur auxiliaire informant un dispositif électronique de la position du sillon à lire : le bras se déplace dans son ensemble et conserve alors une direction fixe. Il est plus commode de tolérer une certaine erreur de parallélisme (erreur de piste) et d'employer un bras pivotant horizontalement autour d'un point fixe. De plus, la surface des disques est rarement parfaitement plane, et ils n'ont pas tous la même épaisseur : le bras doit être mobile dans le plan vertical. Il existe de nombreuses solutions mécaniques pour obtenir cette liberté (suspension à la Cardan, unipivot et couteaux...). Là encore, l'amortissement des résonances est essentiel (résonances basse fréquence du bras et de son contrepoids).

Ces diverses réalisations techniques ont une grande partie de leurs performances soumises à des normes. Longtemps banni des platines tourne-disques haute fidélité, l'automatisme de la pose du bras et du retour sur son support a refait une apparition appréciée.

L'enceinte acoustique

Elle est très souvent l'élément le plus critiquable d'une chaîne haute fidélité. On lui demande de produire une pression acoustique qui soit l'image fidèle de la tension délivrée par l'amplificateur de puissance. On tente d'obtenir ce résultat avec des combinaisons de haut-parleurs.

Les systèmes haut-parleurs sont principalement *électrodynamiques :* leur membrane est solidaire d'une bobine mobile dans le champ d'un aimant permanent puissant (*fig.* 16). Cette bobine, parcourue par le courant de modulation, met la membrane et donc l'air avoisinant en vibration.

Le *haut-parleur électrostatique* utilise comme membrane vibrante l'armature d'un condensateur plan. Son emploi est peu répandu (*fig.* 17). En basse et en moyenne fréquence, il est beaucoup plus encombrant à puissance égale que le haut-parleur électrodynamique, et il nécessite une alimentation particulière. En contrepartie, ses performances mécaniques et son rendement sont plus élevés (répartition de la force sur toute la surface en mouvement).

Les pressions acoustiques créées par le mouvement de la membrane en avant et en arrière du haut-parleur sont en opposition de phase. Pour des fréquences suffisamment basses, ces deux ondes interfèrent et s'annulent au niveau de l'auditeur. Il est difficile d'isoler ce dernier de l'onde arrière (disposition dite du « baffle infini » : le haut-parleur est monté sur un écran de dimensions très grandes devant la longueur d'onde). On se contente d'enfermer l'onde arrière dans une boîte étanche (enceintes closes) convenablement amortie par un matériau absorbant du son (laine de verre...) pour limiter les résonances. On se rapproche ainsi des conditions du *baffle infini* (*fig.* 18a).

La membrane du haut-parleur électrodynamique est soumise à une force proportionnelle au courant dans la bobine. La pression acoustique créée par la surface avant d'une membrane vibrante est constante si l'accélération de celle-ci est constante. A niveau de modulation constant, l'accélération de la membrane ne dépend pas de la

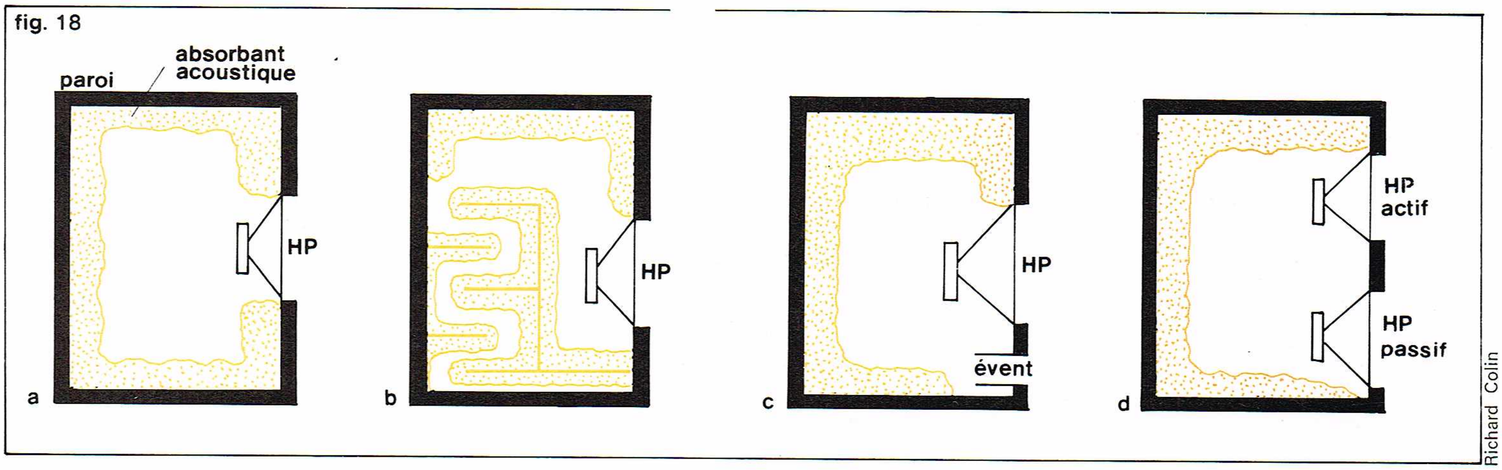

fréquence si l'impédance mécanique de l'élément mobile est une masse pure.

En première approximation, on peut assimiler le mouvement de la membrane à celui d'un système mécanique résonnant (masse maintenue à une position d'équilibre par un ressort, en présence de frottement). L'impédance mécanique d'un tel système est purement résistive (frottement) à la résonance; elle devient liée à la raideur du ressort aux fréquences inférieures à la résonance et à la masse du système au-dessus de celle-ci : le haut-parleur électrodynamique est donc utilisé au-dessus de sa fréquence de résonance, qui est elle-même très amortie (frottement important). En dessous de cette fréquence, la pression acoustique chute rapidement.

Au lieu d'étouffer l'onde arrière, on peut la renvoyer vers l'avant à condition de la mettre en phase avec l'onde directe : c'est le principe des *enceintes à labyrinthe :* l'onde arrière parcourt un chemin contourné et débouche, convenablement retardée, à côté de la face avant du haut-parleur (*fig.* 18b).

Les enceintes *bass reflex* utilisent le principe du résonateur de Helmholtz (la masse du volume d'air correspondant au trou découpé dans la face avant de l'enceinte résonne avec l'élasticité du haut-parleur en basse fréquence et du volume d'air de l'enceinte aux fréquences moyennes) [*fig.* 18c].

Les enceintes *actif-passif* emploient un haut-parleur non alimenté comme élément résonnant (*fig.* 18d).

Ces deux procédés ont pour but d'étendre la bande passante vers les basses fréquences en créant une résonance supplémentaire convenablement amortie.

Pour les hautes fréquences (longueur d'onde inférieure au diamètre du haut-parleur), le rayonnement devient très directif et l'impédance mécanique souhaitable du haut-parleur est résistive : le haut-parleur servant à la reproduction des graves n'est donc plus utilisable, sauf si le mode de vibration n'est plus le même (déformation de la membrane). On obtient un résultat acceptable en construisant des membranes dont le diamètre actif diminue quand la fréquence augmente, ce qui présente le double avantage de maintenir le niveau sonore constant et de réduire la directivité.

Mais pour reproduire correctement toute l'étendue des fréquences audibles, il est souvent avantageux d'utiliser deux ou trois haut-parleurs (haut-parleur grave, médium, aigu [*fig.* 19]) alimentés par l'intermédiaire de filtres. Le problème est alors de faire rayonner ces différents transducteurs avec la même phase.

On améliore la bande passante pour les fréquences inférieures à quelques centaines de hertz, en asservissant les mouvements de la membrane à la tension électrique : le gain de l'amplificateur de puissance est modifié par la tension d'un accéléromètre solidaire de celle-ci. La reproduction des basses fréquences n'est limitée dans ce cas que par la puissance de l'amplificateur et le débattement de la bobine mobile. Enfin, il faut savoir que la régularité de la bande passante est une condition nécessaire mais non suffisante de la qualité. On peut citer, comme autre critère, les réponses à une impulsion ou à un train d'onde, et une quantité d'éléments subjectifs résultant souvent d'interférences constructives ou destructives entre de petits défauts objectifs.

Le « tuner » haute fidélité

Dans cet appareil, qui est en fait un poste de radio d'excellente qualité dépourvu d'amplificateurs de puissance, le qualificatif haute fidélité ne s'applique, bien entendu, qu'aux émissions en modulation de fréquence, bien qu'il soit également équipé pour la réception de la modulation d'amplitude. Dans ce dernier cas, la faible amélioration de la qualité du son ne justifie pas l'inconvénient d'un poste fixe. Son fonctionnement correct exige une installation d'antenne appropriée.

Ces appareils possèdent deux types de commande d'accord sur les stations : un réglage manuel d'une part, et un certain nombre de touches préréglées d'autre part, qui permettent de sélectionner immédiatement la station désirée. Une touche supplémentaire (commande automatique de fréquence CAF) opère un accord automatique

▲ Figure 18 : différents types d'enceintes acoustiques; a, baffle clos; b, baffle à labyrinthe; c, baffle bass reflex; d, baffle actif-passif.

◄ Page ci-contre, à droite, différentes pièces d'une chaîne haute fidélité Thorens; en haut, le tuner; au centre, l'amplificateur; en bas, la platine.

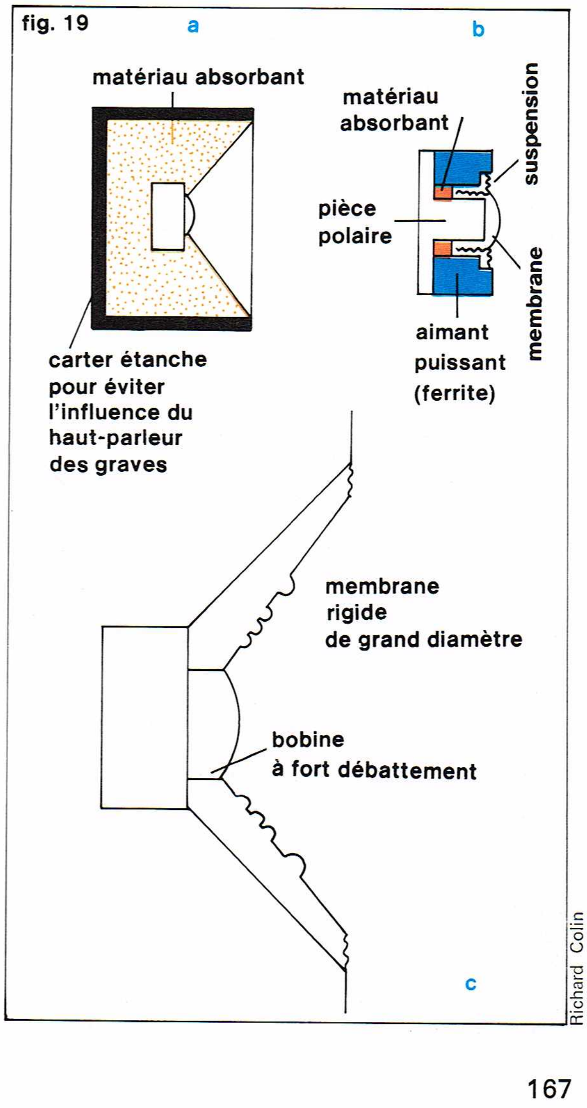

◄ Figure 19 : les trois types de haut-parleurs utilisés pour reproduire toute l'étendue des fréquences audibles; a, haut-parleur de fréquences moyennes; b, haut-parleur d'aiguës à dôme; c, haut-parleur de graves.

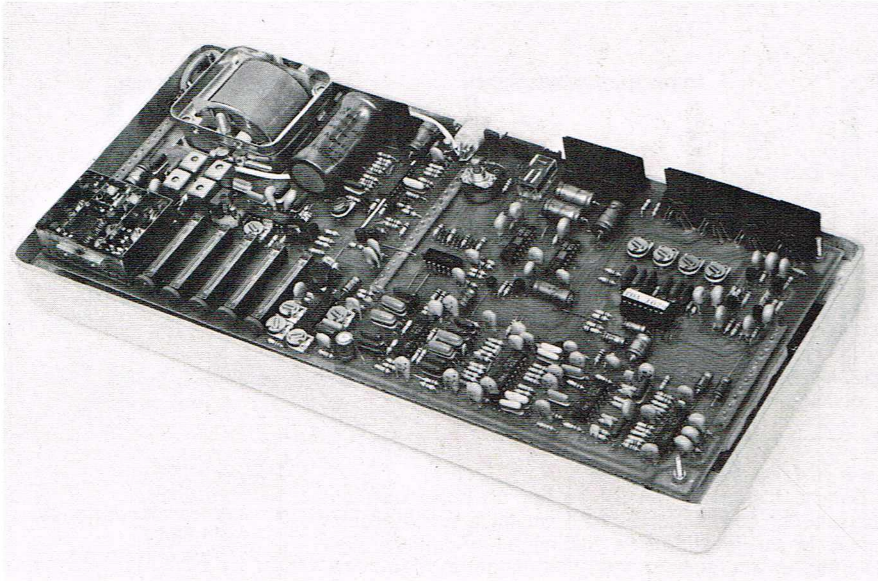

RTC

▲ ***Ensemble d'un récepteur à modulation de fréquence haute fidélité à recherche automatique de stations utilisant les circuits intégrés analogiques.***

sur la station suffisamment proche du réglage obtenu manuellement. Souvent un voyant s'allume lors des émissions stéréophoniques. Son intérêt est moins d'avertir l'auditeur de la qualité de l'émission (il est censé s'en apercevoir tout seul), que de lui signaler qu'il est éventuellement possible d'améliorer la qualité d'une réception défectueuse en passant en monophonie (la monophonie est moins sensible que la stéréophonie aux perturbations de transmissions).

Le magnétophone

Cet appareil est de plus en plus considéré comme un maillon important de la chaîne haute fidélité. Les magnétophones bénéficient maintenant des progrès qu'avait rendus indispensables le développement des minicassettes : en particulier, ils sont équipés de systèmes réducteurs de bruit jusqu'alors réservés aux professionnels (« Dolby », système « DNL » de Philips). D'un principe voisin, ces dispositifs sont, hélas, suffisamment différents pour qu'ils ne soient pas compatibles.

La « minicassette » elle-même permet des enregistrements en haute fidélité sur certains appareils perfectionnés. Sa commodité d'emploi pour l'amateur qui effectue peu de manipulations (comme le montage de différentes bandes) explique l'apparition des cassettes utilisant une bande d'1/2 pouce, contre 1/4 de pouce pour la « minicassette ».

Les magnétophones ont des systèmes multipistes à 2 ou 4 canaux (magnétophones stéréophoniques).

▼ ***Les magnétophones sont de plus en plus considérés comme un maillon important de la chaîne haute fidélité; ils comportent des systèmes multipistes qui leur permettent la reproduction stéréophonique.***

D. Bouquignaud - TOP

Les systèmes multicanaux

La stéréophonie est universellement employée en haute fidélité, même si elle comporte encore quelques farouches adversaires. La *tétraphonie* est une extension de la stéréophonie : au lieu de simuler simplement au moyen des signaux droit et gauche l'espace sonore en face de l'auditeur, on restitue également l'espace arrière; pour cela, deux canaux supplémentaires sont nécessaires. Il existe plusieurs solutions qu'il ne faut pas confondre avec les systèmes pseudo-tétraphoniques, où l'on se contente d'arranger différemment, au moyen de quatre haut-parleurs, les deux signaux stéréophoniques habituels.

Système à quatre canaux

On peut généraliser le principe de l'enregistrement stéréophonique sur bande magnétique en ajoutant deux têtes supplémentaires. Le magnétophone comporte donc quatre têtes qui enregistrent simultanément quatre pistes sur la même bande.

Système CD 4

Il utilise le principe de la gravure sur disque (45°/45°). Chaque flanc des sillons est modulé par un signal comprenant directement la somme de deux canaux d'une part, et leur différence modulant une porteuse à 30 kHz d'autre part. Pour donner de bons résultats, cette méthode nécessite une électronique de décodage compliquée ainsi qu'une cellule de lecture de bande passante élevée.

Système 424

Il nécessite deux voies d'enregistrement, tout comme le système précédent, et une électronique de codage et décodage. Au moyen d'additions pondérées et de déphasages entre les quatre signaux issus des quatre microphones disposés en carré, on peut reconstituer l'image sonore initiale.

Un inconvénient de tous ces systèmes est l'obligation d'utiliser quatre haut-parleurs. C'est une des raisons qui limitent leur commercialisation et qui laissent totalement inemployés — en ce qui concerne le grand public — des systèmes plus complexes comme l'ambiophonie (grand nombre de voies et donc de haut-parleurs).

Des nombreuses discussions sur l'efficacité des systèmes multicanaux, on retient l'importance de la notion longtemps négligée de relief sonore. Sans doute, après avoir simplement imité le champ sonore original par une reconstitution patiente et quelque peu extravagante dans sa complexité, parviendra-t-on dans ce domaine, grâce aux connaissances accumulées, à des solutions raisonnablement envahissantes. Il faudra peut-être attendre pour cela la découverte de procédés nouveaux, représentant par exemple un progrès analogue à celui de l'holographie sur la simple photographie.

BIBLIOGRAPHIE

Radiodiffusion

DELORAINE, *Des Ondes et des Hommes*, Flammarion, 1974. - HUND, *Frequency Modulation*, Mc Graw Hill, New York. - LIBOIS, *Faisceaux hertziens et Systèmes de modulation*, Chiron, Paris, 1965. *Techniques de l'ingénieur*, électronique, vol. 4, Imprimerie strasbourgeoise, Strasbourg. - STRATTON, *Théorie de l'électromagnétisme*, Dunod, Paris, 1961.

Enregistrement et reproduction des sons

Techniques de l'ingénieur, électronique, vol. 3, Imprimerie strasbourgeoise, Strasbourg. - BERANEK, *Acoustic Measurements*, Chapman and Hall, London, 1950. - DARTEVELLE, *Hifi, guide pratique*, Éd. Radio, 1972. - GAYFORD, *Electroacoustics*, Butterworth and co LTD, 1970. - HENNION, *Microphones à électrets*, thèse 3e cycle, 1975, université Pierre-et-Marie-Curie. - LEHMANN, *Les transducteurs électro- et mécano-acoustiques*, coll. CNET, Éd. Chiron, Paris, 1963. - MATRAS, *Acoustique et Électro-acoustique* (2 tomes), Éd. Eyrolles, Paris, 1967. - MEE, *The Physics of Magnetic Recording*, North Holland, 1964. - TREMAINE, *Audiocyclopedia*, Howard W. Sams and co, 1973.

Chauvaud de Rochefort - Fotogram

▲ *Prise de vues dans un studio de télévision.*

LA TÉLÉVISION

Le récepteur de télévision ou téléviseur

Le récepteur de télévision est constitué essentiellement de deux parties : le tube destiné à reconstituer l'image, et l'électronique qui doit transformer les signaux électriques captés par l'antenne en des tensions envoyées l'une au tube cathodique, l'autre au haut-parleur pour le son. La *figure* 1 donne la constitution schématique d'un récepteur noir et blanc.

Le tube cathodique

Examinons pour le moment le *tube-image* noir et blanc : il s'agit d'une ampoule de verre scellée dans laquelle on a fait un très bon vide. Un faisceau d'électrons très rapides vient frapper une couche luminescente et provoque une illumination plus ou moins grande suivant que les électrons sont plus ou moins nombreux à venir frapper un même point donné. L'ampoule de verre a une forme très caractéristique : elle est constituée d'un fond très légèrement bombé (l'*écran*) de forme rectangulaire, surmonté d'une partie conique raccordant à l'écran un court élément cylindrique que l'on nomme *col*.

Le *cône* a eu pendant longtemps un angle d'ouverture de 90°, mais, dans le dessein de raccourcir le tube (et donc de diminuer son encombrement ainsi que celui du téléviseur, dont la profondeur dépend fortement de la longueur du tube), les constructeurs ont mis au point depuis 1955 un tube dit « 110° », qui a nécessité parallèlement des améliorations électroniques importantes. Il y a quelques années est même apparu un tube « 114° », donc encore moins long, et si l'on ne peut parler d'une réelle révolution technique, le fait qu'il s'agisse d'un tube couleur dénote de la part du constructeur une belle maîtrise technologique.

On est limité en valeur de l'angle d'ouverture du cône par la qualité de la déviation du faisceau électronique devant effectuer le balayage. La symétrie du faisceau est cylindrique alors que l'image est rectangulaire, ce qui pose des problèmes dans les coins de l'écran ; l'obtention d'une image non déformée nécessite des corrections de déviation du faisceau importantes et délicates.

La *figure* 2 montre le tube cathodique. Les électrons du faisceau sont produits par effet thermo-ionique : un filament chauffe la cathode constituée d'un cylindre de nickel dont une extrémité est fermée et qui est enduit d'une pâte de baryum et de strontium à grand pouvoir thermo-émissif. C'est cet élément qui produit les électrons. Autour de la cathode se trouve un second cylindre (W) dont l'extrémité plane est percée d'un trou ; ce trou, par où passent les électrons émis par la cathode, constitue le

▼ *Figure 1 : schéma synoptique d'un récepteur de télévision en noir et blanc. Figure 2 : coupe schématique d'un tube cathodique utilisé pour la télévision.*

fig. 2

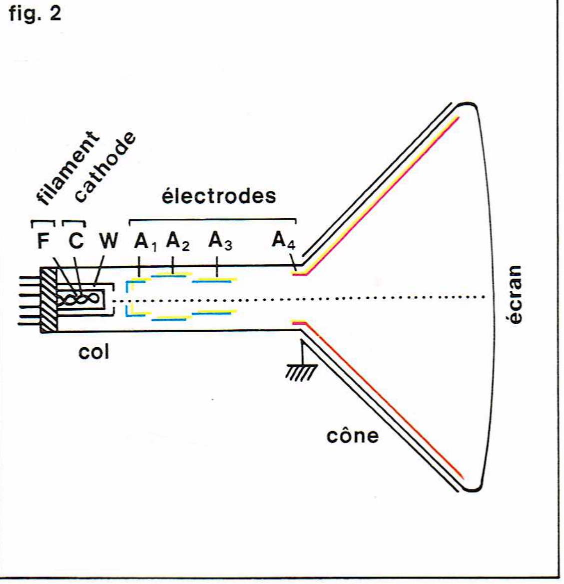

Richard Colin

fig. 1

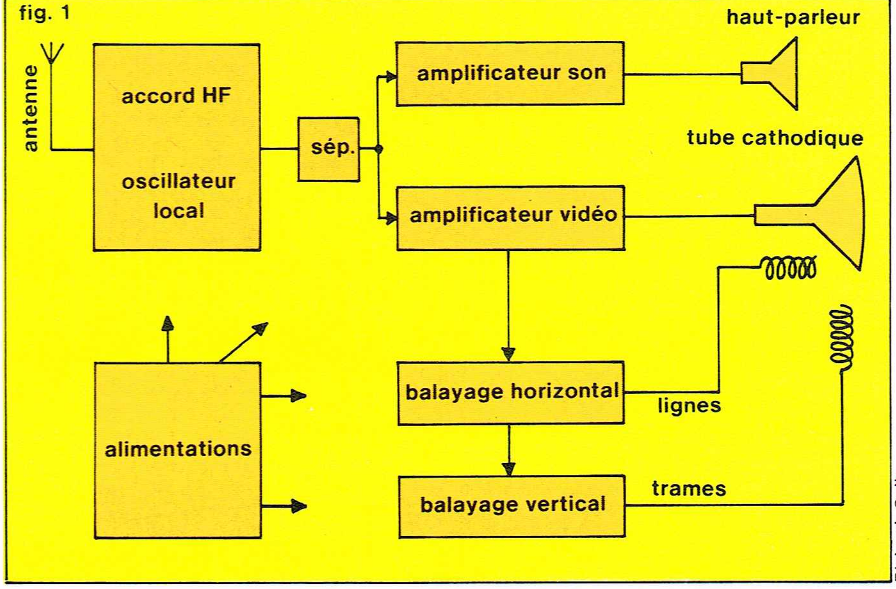

Richard Colin

trou source de l'optique électronique qui suit et aussi contrôle le nombre des électrons qu'il laisse passer par la différence de potentiel qui lui est appliquée par rapport à la cathode. En allant vers l'écran, suivent plusieurs électrodes (A_1, A_2, A_3,...) en forme de cylindres, destinées à focaliser le faisceau électronique sur l'écran; elles jouent le rôle de lentilles électrostatiques et sont portées à des tensions croissantes de manière à accélérer les électrons tout en les focalisant. La dernière électrode (A_4) est portée à une très haute tension (THT) de 18 à 20 kV et fournit la postaccélération. L'extérieur du cône du tube est graphité et mis à la masse de manière à protéger l'utilisateur et à former avec la dernière anode de postaccélération un condensateur mis à profit pour filtrer la THT.

L'ensemble filament-cathode-wehnelt et anodes d'accélération constitue le *canon à électrons*. Ce terme illustre le fait que les électrons qui en sortent sont animés d'une très grande vitesse, ce qui est nécessaire pour produire au niveau de l'écran une illumination importante de la couche sensible ou luminophore. Cette couche est formée de poudres phosphorescentes qui donnent une lumière blanc jaunâtre et sont constituées de mélanges soigneusement tenus secrets par les fabricants de tubes. On sait tout de même qu'entrent dans leur composition des substances du genre sulfure de cadmium activé à l'argent ou du tungstate de cadmium.

Frappée par un nombre plus ou moins important d'électrons, la *couche luminescente* produit un nombre variable de photons, donnant l'impression d'une luminosité plus ou moins grande et reconstituant ainsi les parties différemment éclairées d'une image. Par-dessus cette couche qui doit être homogène et d'épaisseur égale sur toute la surface de l'écran, on dépose une très mince couche d'aluminium (tube aluminisé) qui a plusieurs rôles. Elle collecte les électrons qui viennent frapper l'écran, tout en étant suffisamment mince pour les laisser passer quand ils sortent du canon. Elle arrête en revanche les ions positifs résultant de l'ionisation des gaz résiduels dans le tube par les chocs avec les électrons de haute énergie. Enfin, la couche d'aluminium réfléchit vers l'extérieur la lumière produite par la couche sensible quand elle est frappée par les électrons, améliorant de la sorte la luminosité et le contraste de l'image.

Le bloc de déviation

Le *bloc de déviation* ne fait pas strictement partie du tube, mais lui est étroitement associé, puisque c'est lui qui est chargé de produire le champ magnétique déviant les électrons à l'intérieur de l'ampoule. Pour reformer l'image de télévision sur l'écran, en effet, on fait décrire au point d'impact du faisceau électronique un ensemble de lignes (819 ou 625) situées les unes sous les autres, tout en commandant son intensité de manière à rendre les parties claires et sombres de l'image (*fig.* 3).

Pour assurer ce *balayage* en forme de lignes sur l'écran par le faisceau, sa déviation est produite par un champ magnétique agissant sur les électrons en mouvement. D'après la loi de Laplace, une charge électrique q en mouvement, animée d'une vitesse $\vec{v}$ dans un champ magnétique d'induction $\vec{B}$, subit une force $\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$ qui, suivant l'application du produit vectoriel, est perpendiculaire à sa vitesse. La structure du champ magnétique est telle qu'elle doit provoquer la déviation de manière que les lignes soient le plus droites possible et que le balayage soit fait à vitesse uniforme.

Pour remplir ces conditions, le bloc de déviation est constitué d'un ensemble de bobines et de noyaux de ferrite destinés à concentrer l'induction magnétique à l'entrée du cône du tube cathodique. Grossièrement, on peut dire que deux paires de bobines se chargent respectivement de la déviation horizontale et de la déviation verticale. En fait, les aberrations de cette optique électronique sont telles que, pour assurer un déplacement bien horizontal du spot, il est nécessaire d'agir aussi sur le déplacement vertical du faisceau. Cet ensemble est enfilé sur le col du tube et vient se caler contre le cône. En plus des bobines, il y a aussi des aimants destinés à apporter de petites corrections continues sur la position au repos du spot, par exemple un recentrement, ce qui se traduit par un cadrage de l'image. D'autres aimants interviennent pour une correction de la géométrie de l'image, en particulier pour corriger la déformation en coussin (*fig.* 4).

Nous avons donc maintenant un dispositif, tube plus bloc de déviation, qui nous permet d'obtenir sur un écran un ensemble de lignes constituant une trame sur la hauteur de l'écran, en nous donnant la possibilité de rendre plus ou moins brillant le point lumineux qui décrit ces lignes. Le spot sera plus ou moins intense suivant la valeur de la différence de potentiel appliquée entre cathode et wehnelt. C'est en fait cette tension électrique, appelée *signal vidéo,* qui transporte l'information de plus ou moins grande luminosité des différents points de l'image.

Les signaux constituant le message de télévision

Bien entendu, pour reconstituer cette image, il faudra que les informations de luminosité dans le signal vidéo soient bien replacées par rapport aux débuts de lignes et aux débuts de trames, car, à la fabrication de l'image dans la caméra de télévision, on utilise un balayage identique pour analyser l'image observée et donner de tout point de chaque ligne de chaque image une tension dont l'amplitude est proportionnelle à sa luminosité. Il faut donc que la restitution ou la recomposition de l'image soit synchronisée avec l'analyse qui a été faite dans la caméra. On utilise pour ce faire des *signaux de synchronisation lignes et trames* chargés d'indiquer à quels moments le faisceau doit recommencer un balayage de ligne ou de trame. Ces signaux sont absolument indispensables pour la reconstitution de l'image, de manière tout à fait identique à celle qui a été analysée par la caméra.

Quand on aura ajouté au signal vidéo les signaux de synchronisation et un signal porteur de l'information sonore, on aura obtenu un ensemble complet de messages transmis par la télévision. Tous ces signaux sont envoyés simultanément par l'émetteur et captés par l'antenne qui est sur le toit de chaque maison, ou de l'immeuble avec une distribution collective par l'intermédiaire d'un amplificateur. Nous verrons un peu plus tard comment est formé le spectre de l'émission de télévision; disons simplement, pour le moment, que les signaux de synchronisation sont superposés au signal vidéo, comme il apparaît sur la *figure* 5, et que le son module une porteuse dont la fréquence est voisine de celle du signal vidéo V (*t*).

▼ Figure 3 : principe du balayage entrelacé sur l'écran. Les lignes paires sont tracées en rouge et les lignes impaires en vert. En bleu sont figurés les retours de trames. Pour la clarté du dessin on n'a pas tracé toutes les lignes (625) du balayage. Figure 4 : distorsion de l'image en coussin. Figure 5 : signal vidéo composite en modulation positive.

fig. 3

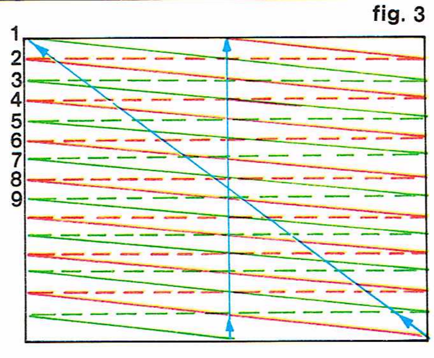

fig. 4

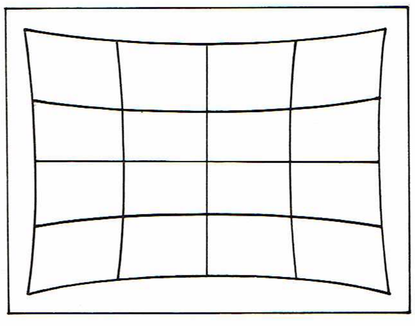

Richard Colin

fig. 5

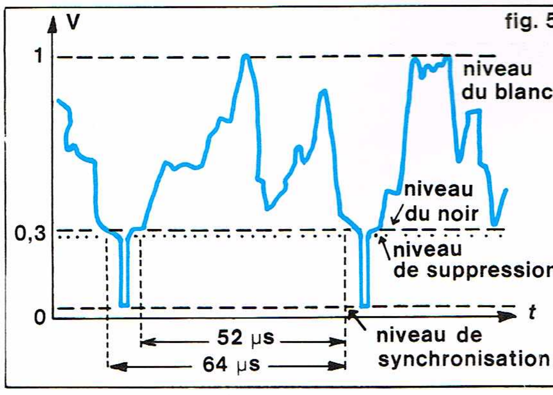

Richard Colin

L'électronique du récepteur

L'électronique associée au tube cathodique a pour buts principaux :

— de dégager du signal reçu par l'antenne et d'amplifier le signal vidéo composite, pour l'appliquer à la cathode ou au wehnelt ;

— de dégager et d'amplifier le signal son pour l'envoyer sur le haut-parleur ;

— de générer les signaux de balayage ligne et image en synchronisant les générateurs sur les tops du signal vidéo composite ;

— de produire les différentes tensions d'alimentation nécessaires au fonctionnement du tube image pour l'optique électronique et l'accélération, ainsi que pour l'ensemble des autres circuits électroniques dont les fonctions viennent d'être citées.

Le sélecteur VHF « Very High Frequencies » permet d'accorder les circuits haute fréquence d'entrée sur la fréquence du canal d'émission que l'on veut recevoir. Ce sont habituellement les émissions de la première chaîne (TF 1) qui sont émises en VHF (du moins en France). Cet accord est réalisé en substituant les unes aux autres des bobines et des circuits accordés par blocs.

On utilisait, il n'y a pas si longtemps, des ensembles de barrettes de Bakélite sur lesquelles étaient fixés les composants à changer ; ces barrettes portaient des contacts sur un de leurs grands côtés et étaient fixées dans un rotacteur dont la position angulaire permettait de choisir le canal sur lequel on souhaitait accorder le récepteur. La technique actuelle a remplacé le rotacteur par un clavier mécanique ou même par un clavier électronique faisant commuter des relais. Le matériel le plus moderne propose à l'utilisateur un clavier à touches électroniques ou sensitives, sans aucune partie mécanique, puisque le doigt posé sur la touche suffit, par le très faible courant qu'il laisse passer, à provoquer la commutation.

Suivant le procédé superhétérodyne, le signal VHF, de fréquence f_1, capté par l'antenne, est amplifié par un amplificateur accordé (premier rôle du sélecteur), puis mélangé à un signal produit localement. Ce signal local est fourni par un oscillateur dont la fréquence f_2 d'accord est également réglée par le sélecteur. Il résulte du mélange de ces deux signaux une tension de fréquence plus faible f_3 que l'on s'arrange pour garder toujours identique, précisément en modifiant la fréquence locale ($f_3 = f_1 - f_2$). Ainsi, quel que soit le canal capté, on peut, à partir de ce moment, utiliser un amplificateur accordé sur la fréquence f_3 pour donner au signal une amplitude suffisante, avant de continuer à le traiter pour en sortir les informations. Comme cet amplificateur travaille toujours à la même fréquence, dite « fréquence intermédiaire » ($F_i = f_3$), il est relativement facile de lui donner de très bonnes performances. Il y a en fait deux amplificateurs à fréquence intermédiaire F_i, car, juste avant, on sépare l'onde transportant le signal vidéo de l'onde transportant le signal son. Cette séparation est rendue possible par le fait que les fréquences porteuses de chaque signal sont suffisamment différentes pour n'exciter chacune que le circuit accordé qui lui convient et n'apporter aucune tension mélangée à l'autre voie d'amplification F_i.

Après que l'amplificateur F_i son a donné au message sonore une amplitude suffisante, il est démodulé (détecté) et envoyé à un amplificateur audiofréquence chargé d'attaquer le haut-parleur. Dans le système français de télévision, le signal sonore module la porteuse en amplitude.

De la même manière, le signal vidéo composite traverse l'amplificateur F_i vision, puis est démodulé avant d'attaquer l'amplificateur vidéo, qui doit lui donner une amplitude suffisante pour commander efficacement la cathode ou le wehnelt du tube cathodique. Il faut en effet une tension de l'ordre d'une centaine de volts pour assurer à l'image un contraste satisfaisant. Le bouton « contraste » du téléviseur agit sur le coefficient d'amplification vidéo qui envoie à la cathode une tension plus ou moins grande.

A ce niveau, les tops de synchronisation du signal vidéo composite sont appliqués à l'entrée d'un circuit chargé de séparer les tops étroits de synchronisation du balayage image. La *figure* 6 montre la configuration des signaux de synchronisation. Sur la *figure* 6a, on voit celui qui sert à synchroniser le départ de la ligne en 625 lignes ; la *figure* 6b représente l'ensemble des impulsions qui permettent de synchroniser les demi-images ou trames suivant qu'il s'agit de la trame des lignes paires ou impaires. On y voit en fait que la synchronisation des trames utilise 5 impulsions de 27,5 µs, précédées de 5 impulsions de préégalisation ayant 2,4 µs de largeur, et suivies de 5 impulsions de postégalisation de même largeur. On remarque en plus que 24 lignes sont effacées à chaque retour de trame dans le dessein d'éviter de reprendre un balayage avant que l'oscillateur concerné soit bien resynchronisé. En effet, après séparation, les signaux de synchro sont amenés jusqu'aux oscillateurs de lignes et de trames.

Dans tous les standards européens, la fréquence du balayage image est telle que l'on ait 25 images par seconde. Ce choix tient compte de ce que la persistance des impressions rétiniennes impose une fréquence de répétition minimale de 15 images par seconde environ suivant la valeur de l'éclairement moyen de l'image. Il tient compte aussi du fait que le secteur fournit une référence commode par sa fréquence à 50 Hz.

En fait, chaque image est composée par moitié, si bien que la fréquence pour chaque demi-image ou trame est de 50 Hz. La première trame est composée, sur toute la hauteur de l'écran, des lignes paires. La seconde trame est décalée par le signal de synchronisation trame, comme on peut le voir sur la *figure* 6, d'une demi-ligne, si bien que le balayage exécute les lignes impaires en commençant au milieu de la ligne du haut. Cela peut également se voir sur la *figure* 3. On dit que le balayage est entrelacé.

Bien entendu, à l'émission ou à la fabrication de l'image, on tient compte de cela pour composer le signal vidéo qui doit représenter successivement les lignes paires de l'image et, pour la seconde trame, les lignes impaires, et ainsi de suite. L'oscillateur de balayage image oscille donc à 50 Hz et délivre une forme d'onde voisine d'une dent de scie appliquée, après amplification, aux bobines de déviation verticale. Le balayage de lignes est plus rapide, puisque les deux standards français actuels nécessitent 819 et 625 lignes pour composer une image. On en utilise en fait un peu moins, comme nous l'avons vu précédemment, car on perd des lignes pendant la synchronisation des trames (24 lignes perdues en 625 et 41 en 819 lignes). Cela est peu important et ne change rien au principe de fonctionnement. Compte tenu des données précédentes : 25 images par seconde et 819 ou 625 lignes par image, la fréquence de l'oscillateur ligne doit donc être fixée à 20 475 Hz (25 × 819) et 15 625 Hz (25 × 625).

▼ *Figure 6 :* ***configuration des signaux de synchronisation ; a, impulsion de synchronisation des lignes en 625 lignes ; b, signaux de synchronisation des trames en 625 lignes pour les lignes paires et impaires. Ils sont composés de 5 impulsions de 27,5 µs, précédées de 5 impulsions de préégalisation de 2,4 µs et suivies de 5 impulsions de postégalisation*** *(b, d'après R. Besson,* Cours de télévision moderne, *Éditions Radio).*

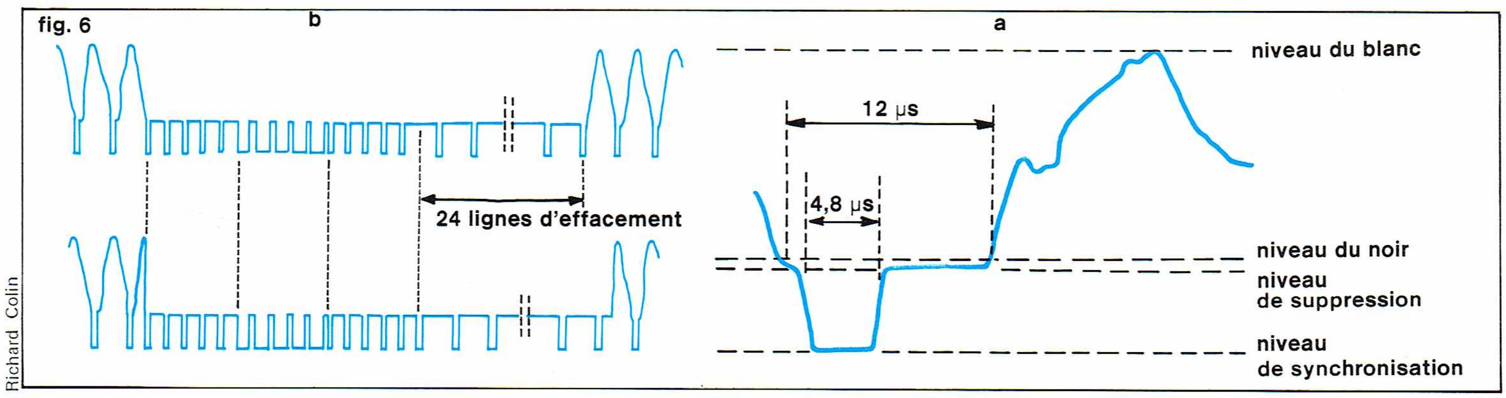

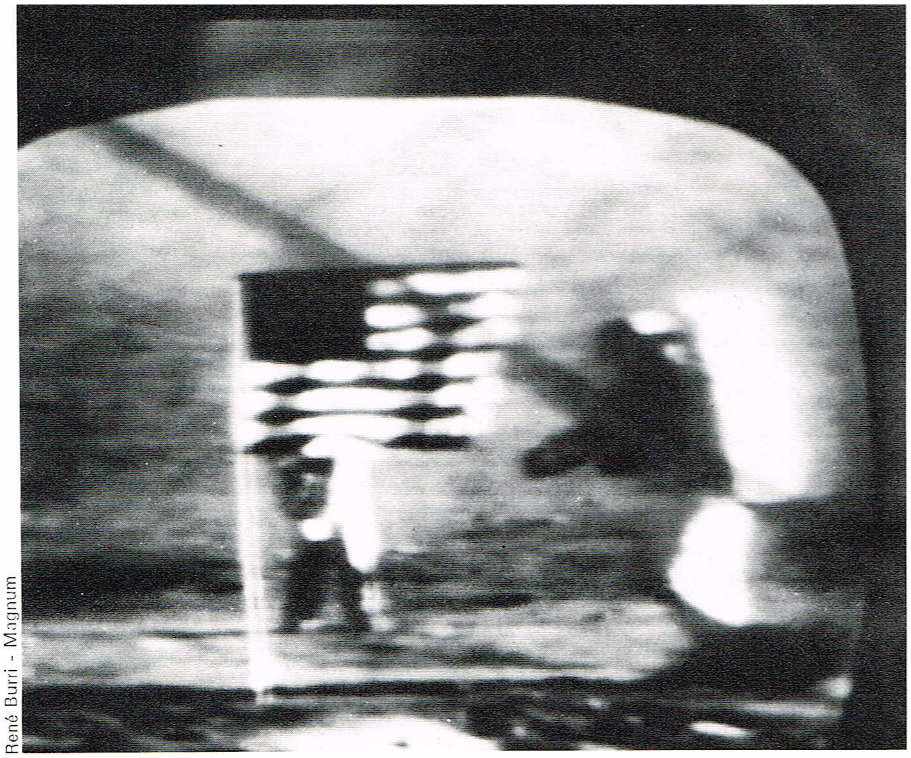

René Burri - Magnum

Paolo Koch - Rapho

▲ *A gauche, un des grands moments de la télévision, la retransmission des premiers pas de l'homme sur la Lune (20 juillet 1969). A droite, prise de vues en studio.*

Formation des images

A l'autre bout de la chaîne de la télévision, on se trouve à l'origine des signaux vidéo et son. Les images sont obtenues avec des caméras possédant une optique traditionnelle (au moins en noir et blanc), c'est-à-dire un objectif qui permet de concentrer la scène à transmettre sur une surface sensible. A la différence des appareils photographiques ou des caméras de cinéma, la surface sensible n'est pas un film qui sera par la suite envoyé au développement, mais une couche d'un matériau photo-émissif ou photoconducteur; on analyse séquentiellement par un balayage l'état de sa charge électrique. La surface sensible et le système d'analyse sont enfermés dans le tube analyseur qui est, comme le tube cathodique, un tube à vide.

Le tube de prise de vues

Il existe plusieurs sortes de tubes analyseurs dont les principaux sont l' « image-orthicon », le « vidicon » et le « plumbicon ». On trouve dans les notices des fabricants d'autres noms pour désigner des tubes analyseurs; ce sont en fait des versions un peu différentes, ou légèrement améliorées, ou destinées à des applications particulières, du même vidicon. Dans ces multiples versions, le vidicon est le tube analyseur qui est le plus employé à l'heure actuelle. Le plumbicon, qui est dans son principe identique au vidicon, est un dispositif à hautes performances généralement réservé aux équipements professionnels de la télévision en couleurs.

Le vidicon

La *figure* 7 donne le principe de fonctionnement de ce tube très répandu. La surface sensible est composée d'une couche photoconductrice dans laquelle la lumière incidente vient créer des paires électrons-trous qui sont séparées par un champ électrique appliqué à la couche.

▼ *Figure 7 : principe de fonctionnement du tube analyseur vidicon.*

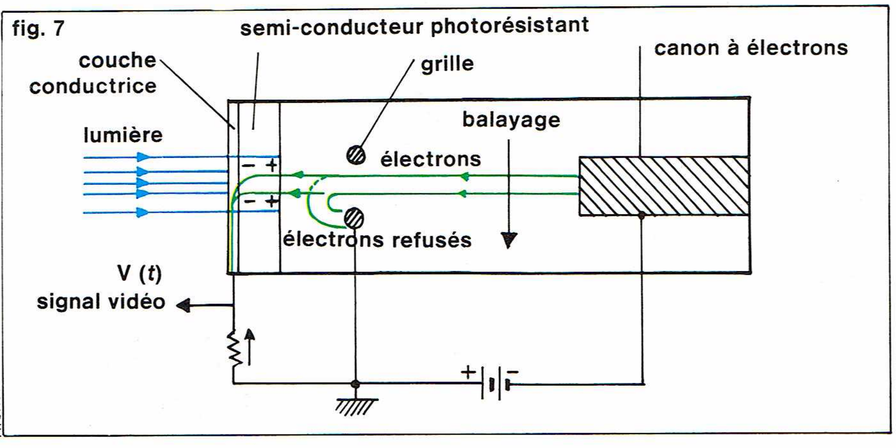

Richard Colin

Un faisceau d'électrons balaye la surface arrière de la couche et la frappe aux endroits où la lumière a provoqué une annulation de la charge négative. Une couche conductrice transparente déposée à l'avant de la couche photoconductrice collecte ce courant électronique et représente ainsi les variations d'éclairement de la surface sensible. En tous les endroits de la couche où la lumière n'est pas venue influencer la répartition des charges, les électrons sont repoussés et collectés par une grille, ne donnant ainsi aucune contribution au signal vidéo.

Le faisceau d'électrons se déplace sur la surface à analyser suivant un balayage identique à celui qui a été décrit pour la restitution des images dans le tube du téléviseur. On peut dire que le balayage fournit les indications temporelles et le signal vidéo les indications de luminosité, toutes nécessaires pour la reconstitution de l'image. En fait, on ne va pas transmettre tout le signal de balayage mais seulement les instants particuliers de fin de ligne ou de fin de trame; ce sont les signaux de synchronisation.

Les caméras de prise de vues de haute qualité, réservées, à cause de leur prix, aux stations de télévision nationales ou commerciales, sont équipées depuis une dizaine d'années de tubes de prise de vues très améliorés par rapport aux vidicons; ce sont les *plumbicons*. Leur constitution est à peu près la même que celle des vidicons, mais l'emploi de nouveaux matériaux a permis d'améliorer la rapidité du tube, c'est-à-dire sa faculté de suivre les mouvements rapides du sujet tout en conservant une bonne définition; de plus, leur réponse est linéaire, comme pour l'image-orthicon, c'est-à-dire que l'amplitude du signal vidéo est proportionnelle à l'éclairement de la surface sensible, ce qui n'est pas le cas dans le vidicon et oblige à introduire une correction dite de gamma (γ).

Les caméras dont il est question ici sont la plupart du temps équipées pour la couleur avec trois tubes de très bonne qualité pour l'analyse des couleurs, bien qu'apparaissent actuellement sur le marché des caméras couleurs portables semi-professionnelles fonctionnant avec un seul tube vidicon.

Bandes de fréquences occupées. Canal de télévision

A la sortie de la caméra de télévision, nous disposons donc du signal composite comprenant la composante vidéo et les tops de synchronisation. Avec le signal son, le signal composite doit être envoyé vers l'antenne pour pouvoir se propager et parvenir sur les récepteurs d'un maximum de télespectateurs. L'ensemble des fréquences occupées par ces signaux ne permet pas une propagation à de grandes distances. C'est pourquoi il est nécessaire de procéder à une modulation d'une onde ayant une fréquence suffisamment élevée et qui se propage bien pour véhiculer les informations de l'image de télévision. Il y a plusieurs types de modulations utilisés en télévision.

J. Tricot - Parimage

◀ *A gauche, le relais de télévision de Créteil.*

Dans le *standard européen,* le signal vidéo module la porteuse en amplitude. Mais ici, il est nécessaire de noter une difficulté à laquelle on se heurte, compte tenu des largeurs de bande qu'occupe le signal vidéo et qui sont liées à la définition de l'image. Nous avons déjà vu que l'image était constituée dans le sens vertical de lignes, ce qui impose la définition verticale qui ne peut, bien sûr, excéder dans le meilleur des cas le nombre de ces lignes. Dans le sens horizontal, par contre, la situation est différente, car le signal vidéo varie de manière continue le long d'une ligne, et on pourrait penser que sa définition est infinie. Il n'en est évidemment rien, et il faut tenir compte d'autres facteurs pour voir comment est limitée cette définition. On essaye en fait d'obtenir sur l'écran reconstituant l'image une définition équilibrée, c'est-à-dire une séparation des points identique dans le sens horizontal et dans le sens vertical. Cela conduit, le rapport de la hauteur à la largeur de l'image étant de 3/4, à une définition de 830 points par ligne en 625 lignes par exemple.

Poursuivons ce raisonnement en déterminant la bande de fréquences nécessaire pour transmettre le signal vidéo avec une telle précision. Cela s'obtient en écrivant que cette fréquence correspond à 830 transitions par ligne pour 625 lignes dans une image et pour 25 images par seconde, ce qui conduit à une fréquence de 6,5 MHz en tenant compte de ce qu'il y a deux transitions par période. Il s'agit là, bien sûr, d'un calcul fournissant une valeur maximale de bande passante. En pratique, on se limitera à une bande un tout petit peu inférieure, car on sait que l'image ne sera pratiquement jamais aussi fine et qu'elle est constituée de zones assez larges de teinte uniforme.

Sur la *figure* 8, on peut voir représenté un canal de télévision correspondant au *standard français à 625 lignes.* Les deux flèches verticales figurent les deux fréquences porteuses pour l'image et pour le son. Les modulations se font, comme il a été dit, en amplitude; elles sont séparées de 6,5 MHz. On ne conserve, pour l'image, qu'une bande latérale en tronquant l'autre de telle manière qu'elle soit réduite au cinquième de sa largeur initiale. Cette méthode conserve toute l'information tout en limitant la bande occupée sans qu'il soit nécessaire d'avoir recours à des procédés de modulation à bande latérale unique (BLU), qui ne vont pas sans entraîner quelques complications à la démodulation. La modulation son est, elle, transmise intégralement avec une largeur de bande importante, nettement supérieure aux 4,5 kHz de la radio, car la bande audiofréquence représente une très faible proportion de la bande totale occupée.

En *819 lignes du standard français,* chaque canal de télévision occupe une bande de fréquences bien plus large, soit 13,15 MHz. De telles caractéristiques de fonctionnement conduisent à des performances très bonnes, et on a longtemps dit que la télévision française était techniquement la meilleure du monde. Malheureusement, une grande largeur de bande provoque un encombrement des gammes de fréquences disponibles pour la transmission des émissions de télévision tel que l'on a dû, dans un premier temps, trouver des astuces, par exemple les canaux inversés (la porteuse son avait une fréquence inférieure à celle de la porteuse image). Par la suite, les différents pays se sont mis d'accord pour définir les bandes réservées aux émissions de télévision et préciser les différents standards mondiaux. C'était à la Conférence européenne de radiodiffusion qui s'est réunie à Stockholm en 1961. On trouvera sur le *tableau* I les différents standards mondiaux de transmission des images de télévision. Les bandes de fréquences se répartissent de la façon suivante :

- les bandes VHF I et III s'étendent respectivement de 41 à 68 MHz pour la bande I et de 163 à 216 MHz pour la bande III;
- les bandes UHF IV et V vont de 470 à 582 et de 582 à 960 MHz;
- la bande II, de 87,5 à 100 MHz, est réservée aux émissions de radio en modulation de fréquence.

Avant de considérer l'émission des signaux et leur propagation, il faut noter qu'il existe deux types de modulation image : la modulation positive et la modulation négative. Dans la modulation positive, les maximums du signal vidéo composite correspondent aux blancs de l'image et au maximum de puissance émise; ce cas est celui du dessin

fig. 8

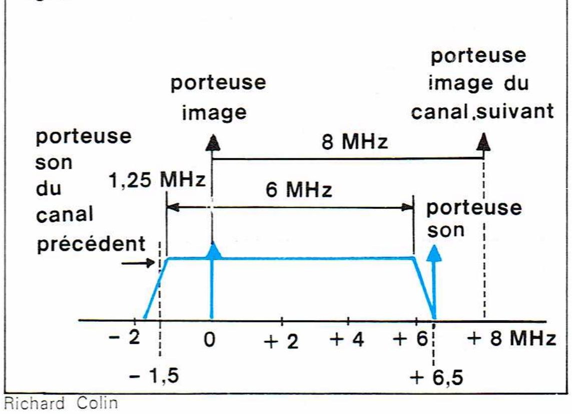

Richard Colin

◀ *Figure 8 : canal de télévision correspondant au standard français à 625 lignes (bande de fréquences occupée).*

Tableau I
Les différents standards mondiaux de transmission des images de télévision

Repère U.E.R.	A			B	C	D	E	F	G	H	I	K	L
Système	Anglais	Américain (F.C.C.)		Européen Gerber	Belge	O.I.R.T.	Français	Belge	Gerber	Gerber	Anglais	O.I.R.T. Européen	Français
Nombre de lignes	405	525	625	625	625	625	819	819	625	625	625	625	625
Affectation	VHF	VHF/UHF	VHF/UHF	VHF	VHF	VHF	VHF	VHF	UHF	UHF	UHF	UHF	UHF
Largeur canal (en MHz)	5	6	6	7	7	8	13,15	7	8	8	8	8	8
Bande vidéo (en MHz)	3	4	4	5	5	6	10,4	5	5	5	5,5	6	6
Écart porteuses (en MHz)	3,5	4,5	4,5	5,5	5,5	6,5	11,15	5,5	5,5	5,5	6	6,5	6,5
Sens du canal	V > S	V < S	V < S	V < S	V < S	V < S	V > S V < S	V < S	V < S	V < S	V < S	V < S	V < S
Bande résiduelle (en MHz)	0,75			0,75	0,75	0,75	2	0,75	0,75	1,25	1,25	1,25	1,25
Nombre de canaux VHF	13	12	12	11	11	11	11	11					
Nombre de canaux UHF		70	70						49	49	49	49	49
Fréquence trame (en Hz)	50	60	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Fréquence ligne (en Hz)	10 125	15 750	15 625	15 625	15 625	15 625	20 475	20 475	15 625	15 625	15 625	15 625	15 625
Modulation image	+	—	—	—	+	—	+	+	—	—	—	—	+
Modulation son	AM	FM	FM	FM	AM	FM	AM	AM	FM	FM	FM	FM	AM

Nota : F.C.C. = Federal Communication Commission.
Gerber = Normes allemandes définies par le Docteur Gerber et adoptées par plusieurs pays.
O.I.R.T. = Office International de Radio et de Télévision, groupant les pays de l'Est.
U.E.R. = Union Européenne de Radiodiffusion.

▲ *Tableau I : les différents standards mondiaux de transmission des images de télévision (d'après R. Besson,* Théorie pratique des téléviseurs à transistors, *Éditions Radio).*

▼ *Les relais de télévision installés près de Grenoble pour la retransmission des Jeux olympiques d'hiver (hiver 1968).*

de la *figure* 5. Dans la modulation négative, l'allure du signal vidéo composite est inversée, c'est-à-dire que le maximum de l'amplitude est atteint pour les fonds des tops de synchronisation et l'amplitude minimale pour les blancs de l'image. Cela apparaît, dans le *tableau* I des différents standards mondiaux, sur la ligne « Modulation image », par un signe + pour la modulation positive et par un signe — pour la modulation négative. On voit également apparaître sur ce tableau les différences entre les divers systèmes de télévision ; outre les normes vidéo qui viennent d'être décrites, les normes RF diffèrent en ce qui concerne l'écartement des porteuses image et son, le type de modulation du son, la bande résiduelle, l'écart entre les porteuses, leur position respective... Tout cela est, bien entendu, défini pour le noir et blanc ; nous verrons que, pour la couleur, l'existence de trois procédés différents ajoute à la confusion.

Archives Snark - R. Bouillot - Thomson - CSF

Les grandes largeurs de bande utilisées pour la transmission des images de télévision conduisent à employer des porteuses à des fréquences elles-mêmes très élevées. Elles sont caractérisées par une propagation d'autant plus rectiligne que leur fréquence est plus élevée. Il est donc nécessaire, si l'on veut atteindre des antennes de réception dans un périmètre étendu, de placer des antennes d'émission le plus haut possible et d'étudier leur implantation en fonction des obstacles naturels ou artificiels que les signaux pourraient rencontrer au cours de leur propagation. Une colline ou des immeubles créent des zones d'ombre dans lesquelles il est difficile de capter convenablement les ondes. C'est aussi la raison pour laquelle les antennes de réception sont souvent placées sur les toits, et il est quelquefois nécessaire de placer des réémetteurs de faible puissance pour fournir le signal à un groupe d'habitations isolées.

Principes de compatibilité pour la télévision en couleurs

La télévision en noir et blanc est, bien sûr, antérieure à la télévision en couleurs, mais ce n'est pas l'unique raison qui nous a fait détailler son fonctionnement avant d'aborder celui de la télévision en couleurs. C'est aussi parce que les principes de fonctionnement sont les mêmes et que le principe de compatibilité impose d'une part que les images émises en couleurs puissent être reçues sur un poste « noir et blanc », et d'autre part que les émissions en noir et blanc puissent être reçues sur un poste « couleurs ». Il ne pouvait être question évidemment de recréer, parallèlement à l'infrastructure de la production des images et de leur émission en noir et blanc, une autre infrastructure pour la couleur, pas plus d'ailleurs qu'il n'était possible de ne s'adresser, au début de l'utilisation de cette technique, qu'aux quelques privilégiés, en nombre forcément limité, qui pourraient acquérir un récepteur trois à cinq fois plus cher qu'un récepteur « noir et blanc ».

La double compatibilité, énoncée pour la première fois par Georges Valensi, a donc autorisé un développement harmonieux de la télévision en couleurs à côté du noir et blanc, les émissions en couleurs remplaçant peu à peu celles en noir et blanc, après, naturellement, que l'on eut équipé quelques émetteurs pour la couleur, dans les régions à plus forte densité de population, et que les téléspectateurs eurent commencé à changer leurs récepteurs, sans pour autant se priver des émissions en noir et blanc qui continuaient à être les plus nombreuses.

Une autre contrainte importante qu'ont rencontrée les ingénieurs qui ont mis au point la transmission des images

colorées consistait en une limitation absolue de la bande des fréquences accordée aux émissions de télévision. La grande largeur des canaux limite déjà très fortement leur nombre en noir et blanc, et il n'était absolument pas question d'accorder des standards plus larges pour la couleur. Cela signifiait que la télévision en couleurs devait être d'abord une télévision en noir et blanc, à laquelle il fallait ajouter une information de couleur — sans pour autant que sa transmission occupe dans le spectre des fréquences radio-électriques une place plus grande.

Bases de la télévision en couleurs. Trichromie

Newton (1642-1727) est le premier à avoir réalisé une étude expérimentale ayant des bases physiques sérieuses sur la composition de la lumière et de la couleur. L'expérience fondamentale consistait à faire passer un fin pinceau de lumière blanche à travers un prisme de verre : de l'autre côté, la lumière ressort en un éventail dont les différents rayons sont colorés par variation continue. Newton fut ainsi amené à formuler le principe essentiel de la colorimétrie, à savoir que la lumière blanche résulte de la superposition de lumières élémentaires ayant chacune une couleur pure.

Mais c'est Huygens (1629-1695) qui fournit l'explication de ce phénomène en considérant l'aspect ondulatoire de la lumière. D'après Huygens, les différentes couleurs sont dues aux différences de longueurs d'onde des composantes élémentaires de la lumière. De la sorte, la lumière n'est qu'une petite partie de l'ensemble des radiations électromagnétiques. Son spectre s'étend approximativement de 700 nm pour la lumière rouge à 400 nm pour la lumière violette en passant par toutes les teintes intermédiaires : bleu, vert, jaune, orange.

C'est parce que la lumière a une vitesse différente suivant sa longueur d'onde, plus grande pour la longueur d'onde la plus grande, dans un milieu tel que le verre (où sa vitesse est de toute manière inférieure à ce qu'elle est dans le vide), qu'elle est déviée différemment suivant sa longueur d'onde en traversant le prisme. La lumière violette est donc plus déviée à l'intérieur du verre que la lumière rouge, ce qui produit cet étalement du pinceau de départ en un éventail. (Voir le chapitre *Optique,* p. 207.)

Mélange des couleurs - Couleurs complémentaires

La nature physique de la lumière est à la base de la sensation de couleur, et chaque longueur d'onde est perçue par l'œil comme une certaine teinte ou nuance. Toutes ces nuances sont présentes dans la lumière blanche, disons la lumière du Soleil ; nous verrons plus tard qu'il est possible de reconstituer plus simplement une lumière qui paraîtra blanche. C'est la raison pour laquelle, à la sortie du prisme, dans l'expérience de Newton, la teinte de la lumière change de manière continue sans que l'on puisse mettre une limite bien tranchée entre les nuances. On reconnaît cependant, en les distinguant bien, des nuances particulières que l'on appelle *couleurs spectrales;* elles sont perçues par l'œil comme les couleurs les plus pures, les plus brillantes, les plus *saturées*. Entre ces couleurs spectrales, on passe progressivement d'une teinte à l'autre.

Que se passe-t-il quand on mélange deux ou plusieurs teintes pures ensemble ? C'est une expérience que tout le monde a faite à l'âge où on manipule habituellement des crayons de couleur ou des peintures, et cela a été l'occasion de se rendre compte que l'on peut ainsi produire d'autres teintes que celles de départ. Elles ne sont pas aussi intenses que celles qui ont permis de les composer, mais, en choisissant bien les composantes initiales, il est possible de retrouver toutes les teintes.

Considérons maintenant la sensation de couleur que nous pouvons avoir en regardant les différents objets autour de nous : par exemple deux poivrons, vert et rouge, du moins tant qu'ils sont éclairés en lumière blanche. Si, en effet, on les éclaire tous les deux, le vert et le rouge, avec une lumière d'une seule teinte spectrale verte, seul le poivron vert conservera sa couleur, l'autre paraîtra très sombre, presque noir. Cela s'explique par le fait que les objets colorés recevant la lumière blanche du Soleil filtrent certaines longueurs d'onde, c'est-à-dire qu'ils ne réfléchissent pas de la même façon toutes les longueurs d'onde ; ainsi, le poivron rouge réfléchit bien la composante de lumière rouge mais absorbe les longueurs d'onde correspondant aux couleurs violet, bleu, vert et orangé. Éclairé en lumière verte, le poivron rouge absorbe cette couleur et ne la réfléchit pas, si bien qu'il apparaît noir. Pour l'impression en couleurs ou pour la peinture, on procède à des mélanges de teintes en utilisant des substances qui possèdent les propriétés réfléchissantes requises. Les pigments jaunes absorbent le violet, le bleu, le vert, l'orangé et le rouge, et ne réfléchissent donc que le jaune. De même, le pigment bleu ne réfléchit que le bleu ; et si l'on mélange ces deux pigments jaune et bleu, le résultat devrait être le noir, puisque chacun des deux pigments absorbe la seule couleur que réfléchit l'autre. En fait, on obtient un vert sombre, car les pigments de départ réfléchissent une certaine bande de longueurs d'onde autour de la teinte qui leur donne leur couleur ; il y a donc un recouvrement des teintes réfléchies, dans notre exemple, qui correspond à la teinte verte, mais celle-ci sera très atténuée et paraîtra donc sombre.

Si l'on mélange ensemble plus de deux pigments, les chances de réflexion d'une bande donnée de longueurs d'onde deviennent très faibles, et, pour plus de trois constituants dans le mélange, on est pratiquement sûr d'obtenir du noir. Nous sommes dans le cas du *mélange* dit *soustractif* car chaque pigment incorporé au mélange enlève une partie du spectre des couleurs et ainsi soustrait des longueurs d'onde à la lumière réfléchie. La *figure* 9 montre le résultat d'un mélange soustractif en partant de trois couleurs bien réparties dans le spectre et dont nous reparlerons longuement : rouge, vert et bleu. Ces couleurs sont mélangées deux à deux, puis les trois dans la partie centrale du dessin qui paraît ainsi noire, montrant bien que chaque couleur de départ a soustrait une partie du spectre.

Il y a une autre manière de mélanger les couleurs que celle de l'imprimeur ; on peut procéder de la manière suivante : on projette sur un écran la lumière provenant d'une ou de plusieurs sources en s'arrangeant pour qu'elles se superposent. Ces lumières de couleurs différentes peuvent être obtenues en faisant passer une lumière blanche à travers un filtre arrêtant toutes les longueurs d'onde sauf une, ou une bande très étroite. La couleur perçue sur l'écran est imprévisible et ne s'explique pas comme dans le cas précédent en découpant des bandes dans le spectre des fréquences. Comment expliquer en effet la couleur pourpre qui résulte de l'addition de deux lumières, l'une rouge, l'autre violette ? Nous sommes dans le cas du *mélange* dit *additif*. La *figure* 10 montre le

Léonard Freed - Magnum

▲ ***Les collines ou les immeubles créent des zones d'ombre dans lesquelles il est difficile de capter convenablement les ondes de télévision ; c'est la raison pour laquelle il est souvent nécessaire de placer les antennes de réception sur les toits ou parfois sur les collines.***

▶ *Figure 9 : résultat d'un mélange soustractif de trois couleurs bien réparties dans le spectre (rouge, vert et bleu). Figure 10 : résultat d'un mélange additif de trois couleurs (rouge, vert et bleu). Figure 11 : trajet des faisceaux d'électrons dans un tube trichrome ; les trois faisceaux de rayons (rouge, vert et bleu), passent à travers un trou du masque et atteignent les luminophores correspondants ; ceux-ci sont de diamètre inférieur à celui du faisceau pour éviter le chevauchement des faisceaux (voir texte page 179).*

fig. 9

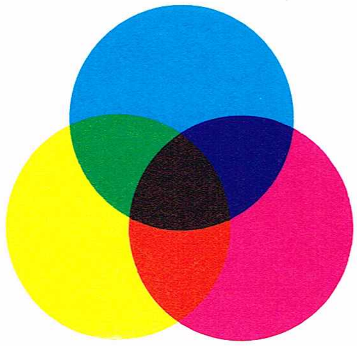

fig. 10

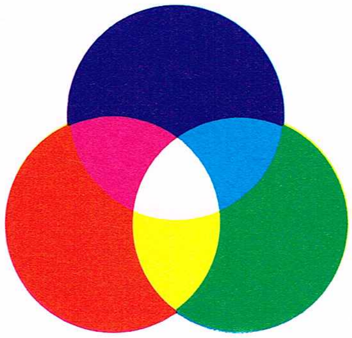

Richard Colin

fig. 11

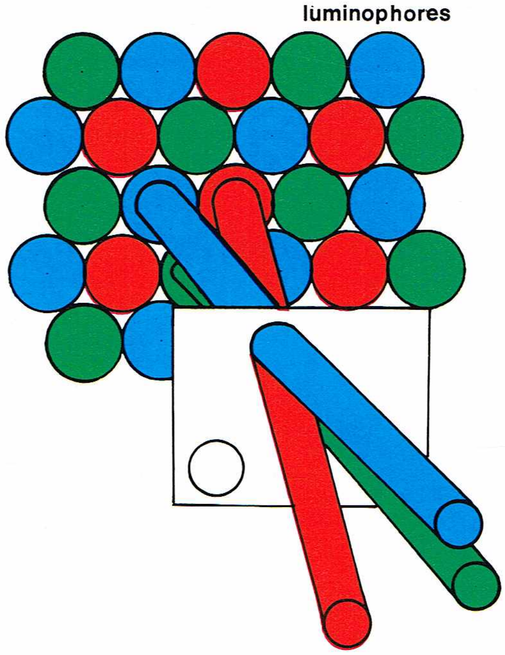

Richard Colin

fig. 12

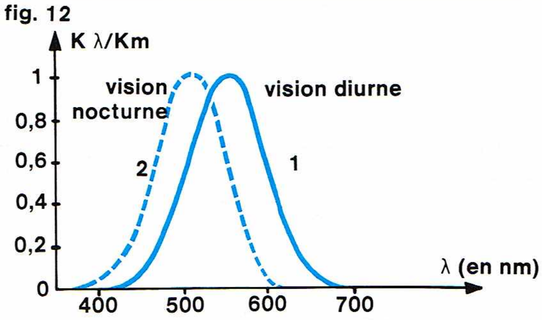

Richard Colin

▶ *Figure 12 : courbes des sensibilités relatives pour l'observateur moyen conventionnel ; la courbe 1 correspond à la vision diurne et la courbe 2 à la vision nocturne.*

résultat du mélange additif des trois mêmes couleurs que précédemment : rouge, vert et bleu. On voit qu'en mélangeant une lumière verte et une lumière rouge on a une impression de jaune, le mélange des lumières verte et bleue donne le cyan, et les lumières rouge et bleue donnent le magenta que l'on a appelé jusqu'ici « pourpre » (autre nom pour désigner la même chose). Enfin, ce qui montre bien la grande différence avec le mélange soustractif, l'addition des trois lumières au centre de la figure donne une impression de blanc. Cela est tout à fait conforme à l'expérience de Newton, qui montrait que la lumière blanche est composée de toutes les longueurs d'onde, et l'on vient de voir que l'impression de blanc peut être donnée par l'addition de trois lumières bien réparties dans le spectre.

En poussant plus loin encore les recherches sur la couleur, de nombreuses expériences ont montré qu'il est possible de donner la sensation de blanc en superposant seulement deux lumières ; mais il faut choisir très soigneusement ces deux couleurs spécifiques : il faut que leurs intensités soient dans un rapport bien déterminé. On peut même montrer qu'il est possible d'arriver au résultat avec une infinité de ces paires ; on appelle de tels couples des **couleurs complémentaires.** Cependant, la finesse d'ajustement des teintes que l'on obtient en utilisant trois couleurs de base et en les mélangeant dans différentes proportions est si bonne que c'est le procédé le plus employé pour la restitution des couleurs, aussi bien par mélange soustractif dans l'imprimerie ou la photographie que par mélange additif dans la télévision en couleurs. La technique des peintres impressionnistes était également fondée sur le mélange additif, au contraire de la technique habituelle de la peinture qui consiste à faire un mélange soustractif des pigments. Les impressionnistes juxtaposaient directement sur leur toile de petites taches de couleurs différentes. A une distance suffisante, on ne distingue plus ces taches les unes des autres, et l'œil intègre directement pour avoir une sensation colorée globale.

Dans le tube trichrome de télévision en couleurs, la sensation colorée est obtenue de la même manière en mélangeant des points des trois couleurs primaires avec des intensités différentes suivant la couleur que l'on veut obtenir. Sur la *figure* 11, on voit comment sont arrangées les pastilles des trois phosphores qui, excités par les faisceaux électroniques, produisent l'émission de trois lumières colorées rouge, verte et bleue. En commandant l'intensité des faisceaux d'électrons sur chaque pastille de luminophore, on peut doser la proportion de chaque composante de lumière colorée, et ainsi commander la teinte et la luminosité émises par l'écran. Comme il y a plusieurs types d'écrans utilisés dans les récepteurs de télévision en couleurs, nous en ferons une description détaillée plus loin. Avant d'aborder les réalisations des téléviseurs, il nous reste à préciser suivant quelles règles les mélanges de couleurs sont faits.

Grandeurs caractérisant une couleur

A l'inverse, pour déterminer la composition spectrale d'une lumière complexe, ce qui donne sa couleur, on utilise un instrument appelé *spectrophotomètre.* Ces mesures physiques conduisent à un résultat qui fait correspondre à chaque raie, pour un spectre discontinu par exemple, donc pour chaque longueur d'onde λ présente dans le spectre, une partie correspondante ΔP de la puissance totale P transportée par cette lumière. Si le spectre est continu, on évalue la puissance dP transportée sous forme de radiations entre les longueurs d'onde λ et $\lambda + d\lambda$, $d\lambda$ étant un infiniment petit. Le rapport $dP/d\lambda = P_\lambda$ est la densité de flux d'énergie monochromatique. Cela conduit à la construction d'une courbe donnant la répartition spectrale d'énergie de la lumière où les longueurs d'onde λ sont en abscisses et la densité de flux P_λ en ordonnées. Si la lumière est dans le visible, on considère son flux lumineux F qui s'évalue en *lumens.*

L'*efficacité lumineuse* K est le rapport de ces deux grandeurs, soit $K = F/P$. L'efficacité lumineuse varie en fonction de la longueur d'onde pour les lumières monochromatiques, comme l'indique la *figure* 12. Cette courbe, qui fait référence à la sensibilité de l'œil, n'a pu être

obtenue qu'à partir d'un grand nombre de mesures effectuées sur beaucoup d'observateurs et en établissant une réponse moyenne; c'est pourquoi on la rapporte communément à l'observateur moyen conventionnel tel qu'il a été défini par la Commission internationale de l'éclairage. Sur cette figure, les ordonnées sont les valeurs du rapport K/K_m où K_m est la valeur maximale de l'efficacité lumineuse égale à 680 lm/W pour $\lambda = 555$ nm, valeur donnée expérimentalement. L'une des deux courbes de la *figure* 12, relative aux forts éclairements, est dite de « sensibilité photopique », l'autre pour les éclairements faibles, est dite de « sensibilité scotopique ». La courbe 2 pour les éclairements crépusculaires ressemble beaucoup à la courbe 1, mais est décalée vers les faibles longueurs d'onde. La courbe 1 montre que l'œil est très peu sensible dans le rouge et le bleu, et très sensible dans le jaune-vert.

Une lumière complexe constituée de l'addition de plusieurs composantes monochromatiques aura une efficacité déterminée par les proportions relatives de ses diverses composantes, chacune d'elles étant affectée d'un poids proportionnel à son efficacité propre. Comme nous l'avons vu pour le mélange additif de plusieurs lumières simples, la couleur résultante dépend de leurs longueurs d'onde, et à présent nous savons de quelle manière chaque lumière simple intervient dans le résultat par son efficacité. Il est d'ailleurs possible de donner une sensation de couleur identique en faisant des mélanges de compositions spectrales très différentes. Ainsi, on peut donner la sensation d'un même jaune soit par une lumière monochromatique de longueur d'onde voisine de 580 nm, soit en filtrant une lumière blanche pour lui retirer ses composantes spectrales bleues et rouges, ou bien encore en superposant des lumières rouges et vertes. Cela récapitule toutes les possibilités qu'il y a de donner une impression de couleur particulière; nous les avions décrites en tant que décomposition de la lumière blanche, mélanges soustractif et additif.

Revenons aussi sur la notion de *lumière blanche* qui est restée imprécise pour le moment. On se rend compte effectivement dans la pratique qu'une sensation de lumière blanche est obtenue pour des compositions spectrales sensiblement différentes, et, comme on se réfère souvent à la lumière blanche, il est nécessaire de préciser ce que l'on met derrière ce terme. La Commission internationale de l'éclairage a défini trois sources A, B et C, que l'on peut utiliser comme références pour la lumière blanche suivant les applications colorimétriques particulières. L'étalon A est une lampe à filament de tungstène en atmosphère gazeuse dont la température de couleur est de 2 850 °K. (La température de couleur est la température du « corps noir » incandescent qui émet une lumière dont la composition spectrale dépend précisément de sa température. En donnant la température de couleur d'une lumière, on indique donc que sa composition spectrale est analogue à celle de la lumière émise par le corps noir porté à la température indiquée.) Les étalons B et C résultent de l'emploi de la même lampe placée derrière des filtres colorés formés de solutions de composition bien déterminée, dans lesquelles entrent notamment des sels de cuivre et de cobalt. Leurs températures de couleur sont respectivement de 4 800 et 6 500 °K. Les lumières blanches B et C se rapprochent des lumières du Soleil et du ciel bleu. La *figure* 13 montre les répartitions spectrales des lumières blanches pour les trois sources étalon A, B et C.

On utilise aussi quelquefois une lumière blanche théorique dont le spectre serait plat, c'est-à-dire que l'énergie de chaque longueur d'onde serait identique; on la désigne par W. Pour l'obtenir à peu près, on peut utiliser une source A et un filtre analogue aux précédents de manière à absorber de plus en plus en passant du bleu vers le rouge.

Longueur d'onde dominante et facteur de pureté

Si l'on superpose un faisceau de lumière blanche de flux lumineux F_w et un faisceau de lumière monochromatique de longueur d'onde λ_d et de flux F_d, on réalise un faisceau chromatiquement équivalent de flux $F = F_w + F_d$ à un faisceau coloré quelconque (pourvu qu'il ne soit pas pourpre). λ_d est la **longueur d'onde dominante** de la lumière considérée. Elle est communément appelée « teinte » de cette lumière. Ce n'est pas habituellement le maximum de la courbe de répartition spectrale de la lumière considérée; il arrive même que cette longueur d'onde λ_d n'existe pas dans son spectre. Le rapport du flux de la lumière de longueur d'onde dominante au flux total $p = F_d/F$ est appelé *facteur de pureté*. Il vaut 1 pour une lumière monochromatique sans trace de blanc; on dit alors que la teinte est *saturée* ou *pure*; p diminue au fur et à mesure que la lumière est de plus en plus lavée de blanc.

Les grandeurs p et λ_d déterminent la chromaticité d'une couleur (facteur de pureté et longueur d'onde dominante). Maxwell puis H. Grassmann ont montré que toute sensation colorée pouvait s'obtenir en superposant les lumières de trois sources de couleurs bien choisies; ce sont les sources primaires. Cette propriété de l'œil est appelée **trichromie.** De très nombreuses expériences effectuées avec beaucoup d'observateurs ont conduit à choisir les couleurs **rouge, verte** et **bleue** comme sources primaires.

Térence le Goubin - Rapho

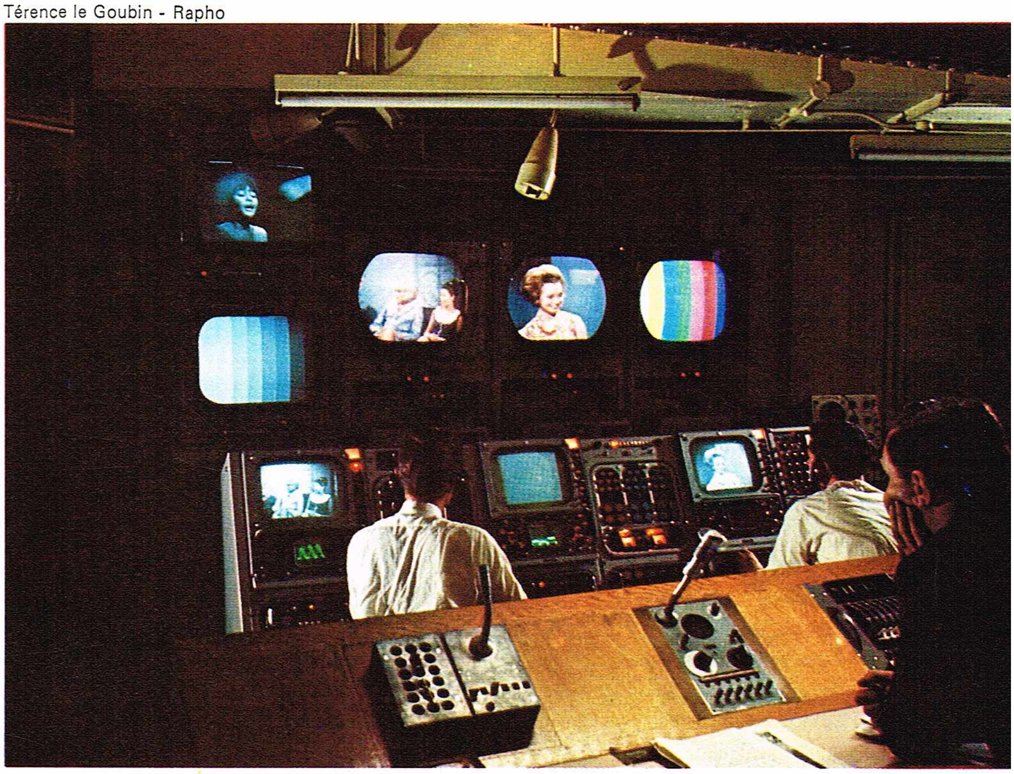

▲ *Une salle de contrôle de la télévision en couleurs à la B.B.C. en Grande-Bretagne.*

Richard Colin

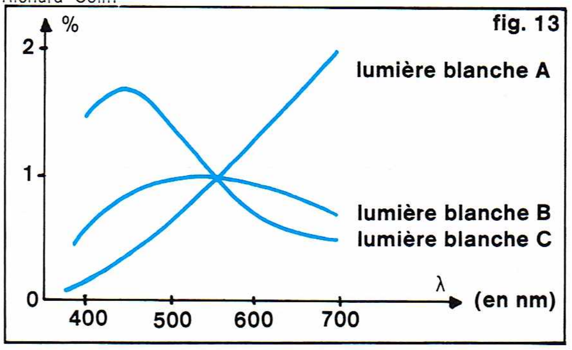

◀ *Figure 13 : répartition spectrale des lumières blanches pour les trois sources étalon conventionnelles (A, B et C).*

Trichromie - Mesure de la couleur

En partant des sources primaires dont nous allons écrire les luminosités, respectivement R, V et B pour rouge, vert et bleu, il est possible généralement d'équilibrer la luminosité d'une source C de couleur quelconque, d'une seule façon. L'équilibrage se traduit par la relation

$$C_1 = R_1 + V_1 + B_1$$

La *figure* 10 du mélange additif illustre cette possibilité d'équilibrage pour des mélanges deux à deux et pour les trois primaires à la fois, leur intensité étant réglée de manière à donner du blanc. Il y a des cas cependant où le mélange des couleurs primaires doit se faire d'une façon

fig. 14

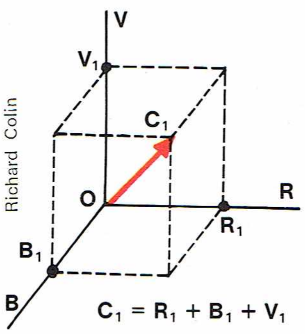

▲▶ *Figure 14 : espace* OR, OV *et* OB *avec le vecteur qui représente la couleur* C_1 *permettant l'équilibrage des couleurs (voir développement dans le texte). Figure 15 : diagramme colorimétrique ; les lumières monochromatiques se situent sur la courbe* BPQVDR *dite « lieu du spectre » ; la position du blanc est indiquée par le point* W.

un peu différente : l'équilibrage est alors possible avec un dosage de deux primaires, pourvu que l'on ajoute un peu de la troisième à la lumière que l'on se propose d'équilibrer. On écrira alors

$$C_2 + R_2 = V_2 + B_2$$

ce qui peut se ramener au cas précédent, en admettant que R puisse prendre des valeurs négatives. Ainsi donc, toute lumière peut être représentée par un vecteur dans un espace à trois dimensions dont les axes seraient OR, OV et OB. L'origine correspond à l'extinction totale des trois couleurs et donc au noir. La direction du vecteur OC indique la proportion dans laquelle chaque primaire intervient. La longueur OC est proportionnelle à la luminosité de la source C. Ainsi donc, pour une même couleur, nous pouvons avoir des luminosités différentes, ce que l'on pouvait, bien sûr, prévoir, et comme il s'agit pour le moment de mesure de la couleur, nous allons laisser de côté ce paramètre et, par conséquent, ne pas chercher à connaître la longueur du vecteur OC (*fig.* 14).

Si l'on s'arrange pour doser au départ les luminosités des trois sources primaires de telle manière que leur addition en quantités égales donne du blanc, celui-ci est représenté dans la *figure* 14 par la diagonale du cube telle que OR = OV = OB. On utilise alors, pour représenter le vecteur OC, ses cosinus directeurs qui s'écrivent :

$$r = \frac{OR}{OR + OV + OB} \qquad v = \frac{OV}{OR + OV + OB}$$

$$b = \frac{OB}{OR + OV + OB}$$

En remarquant que $r + v + b = 1$, il nous suffira de deux paramètres pour connaître la couleur considérée. Nous avons vu précédemment que l'équilibrage d'une couleur quelconque pouvait introduire l'emploi d'un flux négatif. Afin d'aboutir à une représentation graphique dans un plan qui n'utilise que des valeurs positives des paramètres, la Commission internationale de l'éclairage a remplacé en 1931 les paramètres *r*, *v* et *b* par des fonctions linéaires bien choisies qui donnent *x*, *y* et *z*. Tout se passe comme si on remplaçait les étalons physiquement réalisables R, V et B par trois étalons fictifs X, Y et Z que l'on appelle les *composantes trichromatiques*. Elles ont été choisies de telle manière que toute couleur soit représentée dans le premier quadrant, que le blanc corresponde à $x = 1/3$ et $y = 1/3$ (le dernier paramètre complète la somme à 1 et n'est donc pas représenté, $z = 1/3$), et que la somme des coefficients de R, V et B dans chaque étalon X, Y, Z soit la même. On a adopté internationalement les coefficients suivants, en tenant compte de la sensibilité de l'œil moyen :

$$\begin{aligned} X &= 2{,}796\ R + 1{,}752\ V + 1{,}130\ B \\ Y &= 1{,}000\ R + 4{,}591\ V + 0{,}060\ B \\ Z &= 0{,}057\ V + 5{,}594\ B \end{aligned}$$

Dans la pratique, les *coefficients trichromatiques* permettent de représenter toutes les couleurs dans un triangle rectangle dont les côtés perpendiculaires valent 1. En réalité, les couleurs sont représentées par des points compris à l'intérieur d'une surface délimitée par la droite BR et la courbe BPQVDR. Dans ce *diagramme colorimétrique* (*fig.* 15), les lumières monochromatiques se situent sur la courbe BPQVDR dite « lieu de spectre ». La droite BR est le lieu des pourpres purs. Le centre de gravité du triangle représente le blanc d'égale énergie W qui a comme coordonnées $x = 1/2$ et $y = 1/3$. Si sur la figure qui montre le diagramme colorimétrique, une courbe Γ représente les couleurs du corps noir à différentes températures, les points A, B et C correspondent aux étalons de lumière blanche précédemment décrits. D'après les lois de Grassmann, une lumière équivalant au mélange de deux lumières représentées par les points C_1 et C_2 est elle-même représentée par un point C situé sur le segment de droite joignant C_1 à C_2. Sa position est calculable à partir des valeurs de X, Y, Z des deux lumières composantes par la relation :

$$\frac{CC_1}{CC_2} = \frac{X_1 + Y_1 + Z_1}{X_2 + Y_2 + Z_2}$$

Deux couleurs complémentaires sont représentées par des points tels que leur composition harmonique donne le point W. Une demi-droite partant de W et passant par le point C représentant une couleur quelconque rencontre la courbe BPQVDR en un point D correspondant à la longueur d'onde dominante λ_d de cette couleur. La position de C sur le segment WD détermine la pureté de la couleur, dont le facteur de pureté est donné par :

$$p = \frac{y_d}{y}\,\frac{y - 1/3}{y_d - 1/3}$$

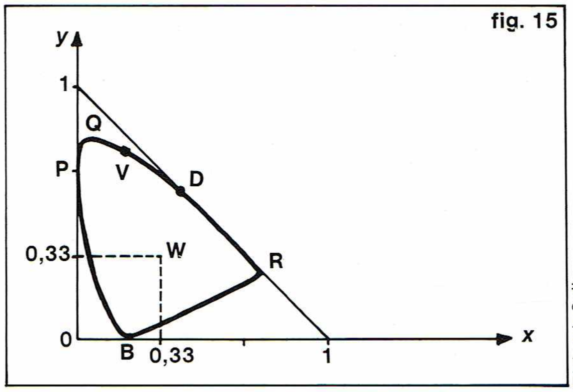

Perception des couleurs - Trivariance visuelle

Les valeurs de la longueur d'onde dominante λ_d et du coefficient de pureté *p*, ou bien les valeurs de deux paramètres *x* et *y*, caractérisent une couleur, indépendamment de l'intensité de la lumière correspondante. Elles doivent donc être complétées par une grandeur photométrique qui est la **luminance.** De manière à introduire les luminances pour le rouge L_R, le vert L_V et le bleu L_B, on divise dans X et Z les coefficients de R, V et B par les coefficients de RVB dans Y. On obtient :

$$\begin{aligned} X &= 2{,}769\ L_R + 0{,}382\ L_V + 18{,}80\ L_B \\ Y &= L_R + L_V + L_B \\ Z &= 0{,}012\,3\ L_V + 93{,}07\ L_B \end{aligned}$$

Y n'intervient que pour la luminance, tandis que X et Z déterminent la couleur.

En fait, on peut constater que la perception des couleurs est affectée par la valeur de cette luminance, bien que cela ne se produise que pour des luminances très faibles ou très fortes. Les trois facteurs indiqués ci-avant ne sont donc pas complètement indépendants, et il arrive qu'ils interagissent, bien que très faiblement. L'analyse de ces phénomènes est compliquée du fait qu'elle fait intervenir l'impression toujours un peu subjective de l'observateur ; on ne peut en tirer une conclusion valable qu'en procédant à une étude statistique sur de nombreux observateurs. On constate ainsi des sensibilités à la teinte et à la pureté variables selon les individus. Les plus petites variations de pureté décelables sont données sur la *figure* 16 autour du blanc et au voisinage de la saturation en fonction de la longueur d'onde. La *figure* 17 montre, elle, la plus petite variation de longueur d'onde décelable pour une lumière monochromatique.

Il est intéressant de porter sur le diagramme colorimétrique les plus petites variations des coefficients trichromatiques que l'œil puisse déceler. C'est ce qu'a fait Mac Adam qui a obtenu des ellipses. Cela a été mis à profit dans le procédé américain de télévision en couleurs (NTSC) qui transmettait, outre Y pour la luminance, deux signaux de **chrominance** obtenus par combinaison de R, B et Y, soit I et Q tels que :

$$\begin{aligned} I &= 0{,}74\ (R - Y) - 0{,}27\ (B - Y) \\ Q &= 0{,}48\ (R - Y) + 0{,}41\ (B - Y) \end{aligned}$$

Ces représentations ont été choisies parce que le segment WQ joignant le blanc W à la couleur représentée par Q découpe sur les ellipses de Mac Adam une corde plus longue que celle découpée par le segment WI. On peut ainsi se permettre de transmettre moins d'informations et donc moins de détails par le signal Q que par le signal I, puisque l'œil est moins sensible aux écarts de couleur dans la direction WQ. D'un point de vue pratique, cela autorise une transmission du signal Q avec une bande de fréquences de largeur inférieure à celle attribuée au signal I.

Réalisation de la trichromie en télévision en couleurs

Comme dans le tube de télévision en noir et blanc que nous avons déjà étudié, la restitution de l'image s'obtient en modulant l'intensité d'un faisceau d'électrons qui frappe une substance s'illuminant sous l'impact des électrons. Mais, puisqu'il s'agit de restituer des images en couleurs, on met à profit ce que l'on sait de l'obtention des couleurs par trichromie. Pour ce faire, on utilise trois substances, ou *luminophores*, donnant trois couleurs propres à la synthèse trichrome, c'est-à-dire rouge, vert et bleu.

Les luminophores rouges, verts et bleus sont disposés sur la face interne de l'écran du tube cathodique, suivant une disposition géométrique particulière qui leur permet de n'être atteints respectivement que par les électrons issus d'un seul canon sur les trois que comporte le tube trichrome. En effet, la brillance de chaque zone de l'écran va résulter de l'addition des luminosités des trois types de sources émettant proportionnellement au nombre d'électrons que chacune d'entre elles reçoit. L'impression de couleur sera donnée par le fait que l'œil intègre la surface de l'écran en réalisant ainsi une synthèse additive des couleurs selon les règles que nous avons exposées ci-avant.

Les tubes trichromes pour la télévision en couleurs

Nous commencerons par décrire le tube à masque qui, s'il est progressivement abandonné pour laisser la place à des tubes plus modernes, a été le premier tube industriel équipant les téléviseurs en couleurs. Il a d'abord été réalisé avec un angle de déviation de 90°, puis, suivant avec un peu de retard les perfectionnements du tube noir et blanc, avec un angle de 110°. C'est le tube qui équipe encore la plupart des téléviseurs couleurs en service actuellement, bien que, depuis l'année 1976, l'emploi du tube à canons alignés se soit généralisé.

L'écran rectangulaire du tube à masque compte environ 1 200 000 points circulaires luminophores des trois composées donnant les trois couleurs de base. Nous les appellerons rouges, verts et bleus puisqu'ils émettent des lumières de chacune de ces couleurs quand ils sont frappés par les électrons. Ces points sont régulièrement répartis en 400 000 triplets environ, dont chacun est composé d'un point rouge, d'un point vert et d'un point bleu disposés côte à côte en formant un triangle équilatéral (*fig.* 11). Ces points sont bombardés sélectivement suivant la couleur par trois canons électroniques contigus R, V, B, à travers un masque en tôle d'acier perforé d'autant de trous qu'il y a de triplets sur l'écran, c'est-à-dire environ 400 000. En anglais, ce masque s'appelle « shadow mask » parce qu'il fait ombre aux points des triplets qui ne sont pas relatifs à un canon déterminé. Autrement dit, le masque empêche les électrons émis par un canon d'aller frapper les points luminophores d'une autre couleur. Par les trous du masque, chaque canon ne voit que les points d'une seule couleur, c'est pourquoi on repère aussi les canons en utilisant les trois lettres R, V, B. Cela exige évidemment une très grande précision dans la construction du tube pour que la disposition de ses éléments soit rigoureuse et, en particulier, l'alignement des canons, des trous du masque et des points des luminophores. Pour obtenir des teintes pures, il faut que les électrons d'un canon n'atteignent rigoureusement que les luminophores de la même couleur, et cela sur toute la surface de l'écran. Cette condition impose donc que l'angle d'incidence soit le même pour tout l'écran afin que, nulle part, les électrons du canon rouge, par exemple, n'atteignent de points verts ou bleus. Les difficultés de convergence sont très grandes et nécessitent beaucoup de circuits électroniques; au niveau du tube, cependant, on rend les choses moins difficiles en faisant dans le masque des trous dont le diamètre diminue du centre du masque vers les bords.

Les trois canons du tube à masque sont identiques et disposés parallèlement à 120° l'un de l'autre, comme on le voit sur la *figure* 18. La *figure* 19 montre l'assemblage des

fig. 18

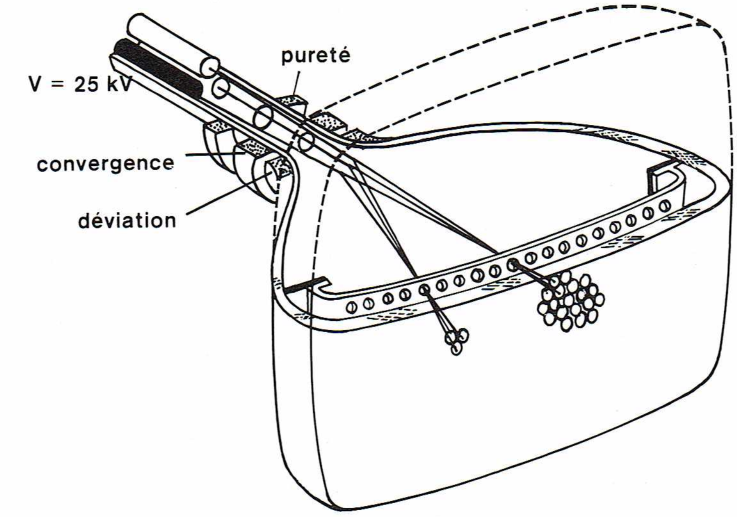

Richard Colin

fig. 19

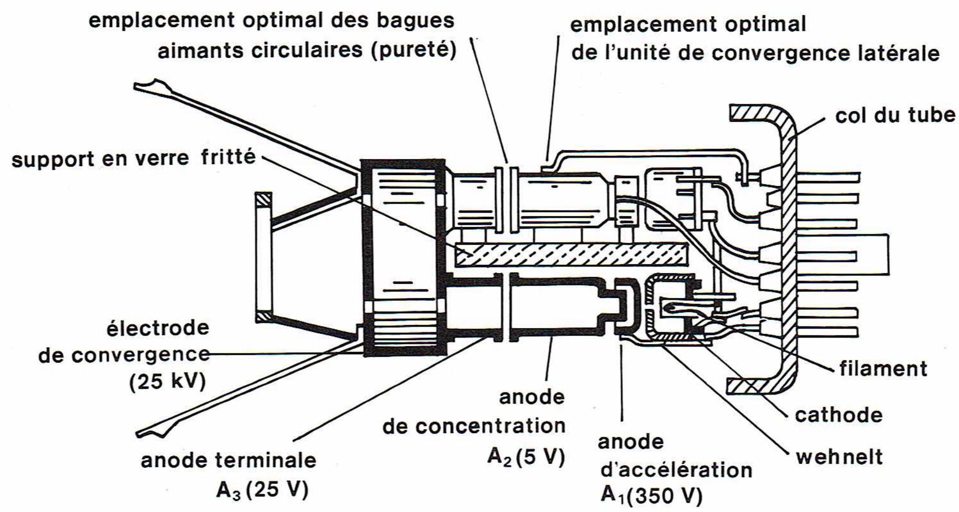

Richard Colin

▲ *Figure 18 : disposition en Δ des canons électroniques du tube à masque (d'après A. Doris,* Le Haut-Parleur, n° 1585*).*
Figure 19 : détail de l'assemblage des canons du tube à masque (d'après Ch. Dartevelle, Réglage et Dépannage des téléviseurs couleurs, *Éditions Radio).*

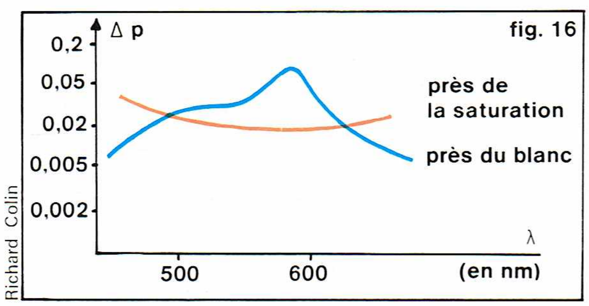

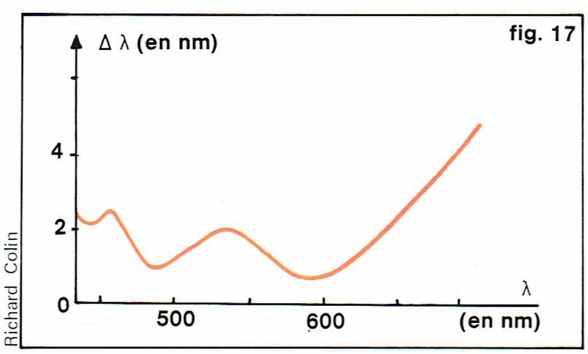

◀ *Figure 16 : les plus petites variations de pureté décelables pour chaque longueur d'onde, suivant que l'on est au voisinage de la saturation ou du blanc.*
Figure 17 : le plus petit écart de couleur décelable pour chaque longueur d'onde.

▶ *Figure 20 : coupe transversale de l'unité de convergence radiale du tube trichrome à masque.*

fig. 20

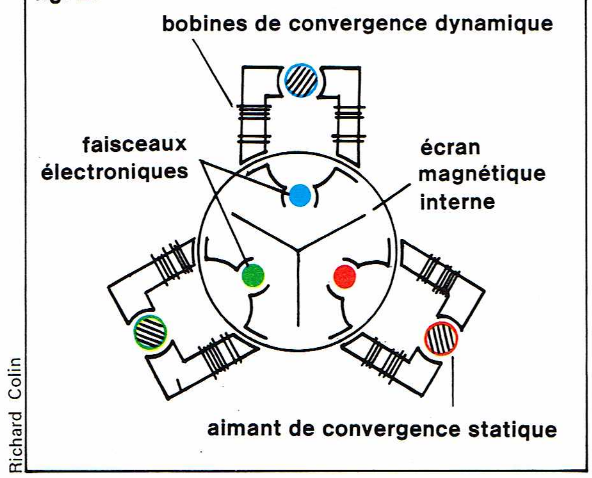

canons avec leurs différentes électrodes. Chaque canon comprend une cathode à oxyde à chauffage indirect C, une électrode de commande d'intensité du flux électronique ou wehnelt W et un ensemble d'électrodes constituant une lentille électrostatique à la fois accélératrice et focalisatrice, les électrodes étant portées à des tensions positives croissantes de 400 V pour A_1 à 5 000 V pour A_2 et 18 kV pour A_3, qui est donc portée au potentiel de la THT. Les électrodes A_2 et A_3 des trois canons sont au même potentiel, et en bout des trois canons se trouve l'électrode de convergence portée au même potentiel que l'anode A_3. Cette électrode de convergence est constituée d'un séparateur magnétique en forme d'Y, de trois pôles à 120° et de 6 pièces polaires radiales comme le montre la *figure* 20. Sur cette figure apparaissent des éléments externes au tube qui sont destinés à régler la convergence radiale, comme nous le verrons par la suite. Chaque paire de pièces polaires sert à concentrer autour de l'un des faisceaux le flux magnétique donné par un aimant permanent et par une bobine de convergence dynamique.

▶ *Page ci-contre à gauche, figure 22 : dans le cas du tube à masque : a, signaux de correction de l'effet de coussin dans le sens horizontal de l'image; b, signaux de correction dans le sens vertical de l'image (d'après Ch. Dartevelle,* **Réglage et Dépannage des téléviseurs couleurs,** *Éditions Radio). Figure 23 : problème de la convergence des faisceaux dans un tube à masque; en O, convergence correcte des 3 faisceaux au centre de l'écran; dès que les faisceaux sont déviés, ils ne convergent plus sur le masque (en A et A')* [*d'après Ch. Dartevelle,* **Réglage et Dépannage des téléviseurs couleurs,** *Éditions Radio*].

fig. 21

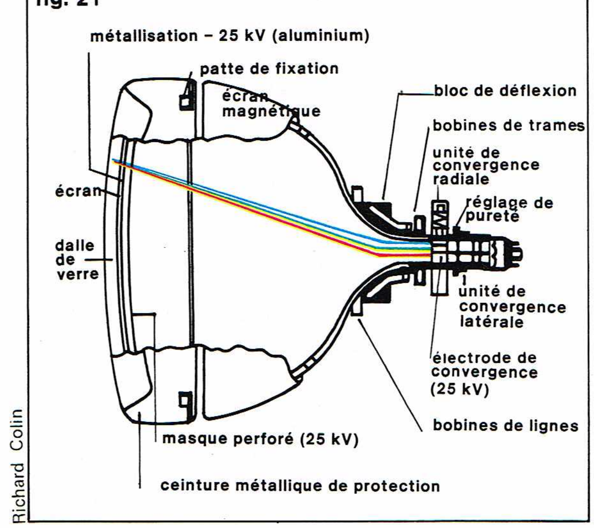

▶ *Figure 21 : coupe longitudinale du tube trichrome à masque (d'après Ch. Dartevelle,* **Réglage et Dépannage des téléviseurs couleurs,** *Éditions Radio).*

Une coupe schématique de l'ensemble du tube trichrome à masque est donnée sur la *figure* 21. Le masque est en tôle d'acier épaisse de 0,15 mm, percé d'environ 400 000 trous par un procédé d'attaque à l'acide; les trous ont un diamètre de 0,4 mm et sont écartés de 0,74 mm. Comme il reste beaucoup de matière entre les trous, un grand nombre des électrons émis par les canons sont arrêtés par le masque. La transparence de ce dernier n'est que de 17 % en son centre, c'est donc 83 % des électrons accélérés sous 25 kV qui frappent le masque et qui y transforment leur énergie cinétique en chaleur. Il y a là aussi un problème à résoudre pour l'évacuation de cette chaleur vers l'extérieur.

Fabrication du tube à masque

L'ampoule de verre du tube à masque est fabriquée en deux parties : d'une part le cône et la partie cylindrique contenant les canons électroniques, d'autre part l'écran qui est en fait une dalle de verre en forme de cuvette rectangulaire très épaisse (12 mm), conçue pour résister à l'énorme pression qui s'exerce sur elle, due à la pression atmosphérique de l'extérieur, alors qu'à l'intérieur règne le vide. Les parois de cette cuvette ont leur bord dressé et poli; à l'intérieur, trois plots métalliques permettent la fixation du masque perforé.

Le dépôt des substances luminescentes constituant les luminophores se fait de la manière suivante : sur une dalle qui a été très soigneusement nettoyée, on verse une suspension photosensible de l'un des luminophores. Après que le produit photosensible s'est bien étalé sous l'action d'une rotation du tube et qu'il a été convenablement séché, on fixe le masque perforé sur les plots prévus dans la ceinture de la dalle. Une source ultraviolette ponctuelle judicieusement placée impressionne la couche photosensible à travers le masque perforé. Un lavage à l'eau enlève les endroits de la couche qui n'ont pas été impressionnés. On recommence les opérations pour les deux autres luminophores en prenant soin de toujours utiliser le même masque pour la même dalle. Avant de sceller le tube, on dépose par évaporation une mince couche d'aluminium par-dessus les luminophores, comme dans le tube noir et blanc. Ensuite, les deux parties du tube sont assemblées par un collage étanche au vide. Il reste à préparer ce tube pour son montage dans le téléviseur. En plus des systèmes de déviation et de convergence qui viennent s'adapter sur la partie cylindrique du tube, une tôle vient protéger le cône. Elle est fixée à une armature très rigide entourant la dalle, cette armature portant elle-même quatre pattes destinées à la fixation du tube.

La tôle entourant le cône sert aussi de blindage contre les champs extérieurs parasites.

L'emploi de ce tube cathodique destiné à la reconstitution d'images en couleurs nécessite préalablement un certain nombre de réglages; quelques-uns sont d'ailleurs à peu près les mêmes que pour un tube noir et blanc : la focalisation, le centrage, les balayages horizontal et vertical et les synchronisations pour ce qui est comparable au tube noir et blanc, avec, en plus, les réglages de convergence latérale statique et dynamique et le contrôle de pureté de couleur. Tous ces réglages sont effectués en usine par le constructeur du poste récepteur, l'utilisateur ayant, quant à lui, uniquement accès aux ajustements de contraste et de luminosité, comme dans un poste noir et blanc. L'équilibrage de couleur sur lequel il peut aussi jouer agit sur des circuits électroniques autres que ceux du tube.

Dans le tube à masque, la **focalisation** est réglée en agissant séparément sur chaque canon par l'intermédiaire de l'électrode A_2 de la lentille électrostatique $A_1A_2A_3$. On focalise sur le masque, et les faisceaux donnent alors une tache d'environ 1 mm de diamètre. Ils traversent plusieurs trous voisins les uns des autres et frappent plusieurs triplets R, V, B sur l'écran.

Le **centrage** s'opère en amenant cette tache au milieu de l'écran, en jouant sur la valeur du courant continu qui traverse les bobines de déviation; les tensions en dents de scie de balayage sont supprimées.

Le bloc de déflexion (ou déviation) agit comme dans un téléviseur noir et blanc, et a d'ailleurs à peu près la même constitution. Les bobines sont en forme de selle de manière à épouser le mieux possible la forme du tube; deux paires de bobines provoquent, l'une la déviation verticale, l'autre la déviation horizontale. Pour cela, elles sont parcourues par des courants en dents de scie fournis par les oscillateurs de balayage de lignes et de trames. Si ces dents de scie sont bien linéaires, l'image présente une distorsion. Pour la corriger, on agit sur l'amplitude des lignes en la diminuant en haut et en bas de l'écran, comme le montre la *figure* 22a, et, enfin, en superposant au courant de balayage de trame une composante parabolique ayant la fréquence des lignes, ce qui se voit sur la *figure* 22b, si bien que chaque début et chaque fin de ligne est corrigé en amplitude de manière tout à fait identique à la correction directe sur les lignes de la *figure* 22a. Ces figures portent des indications de

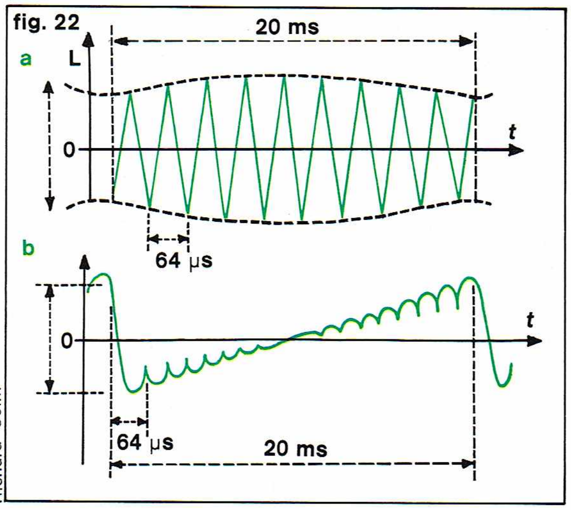

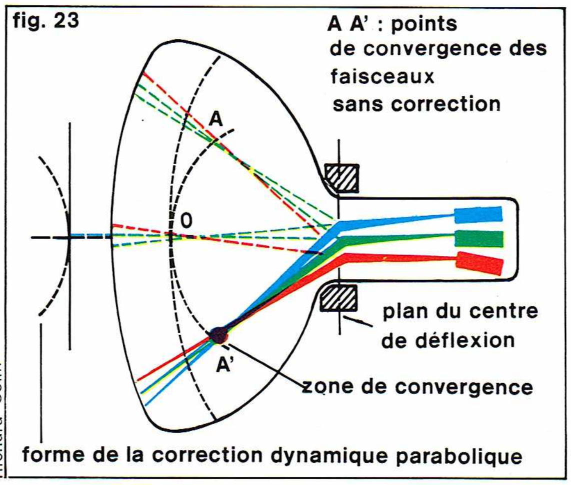

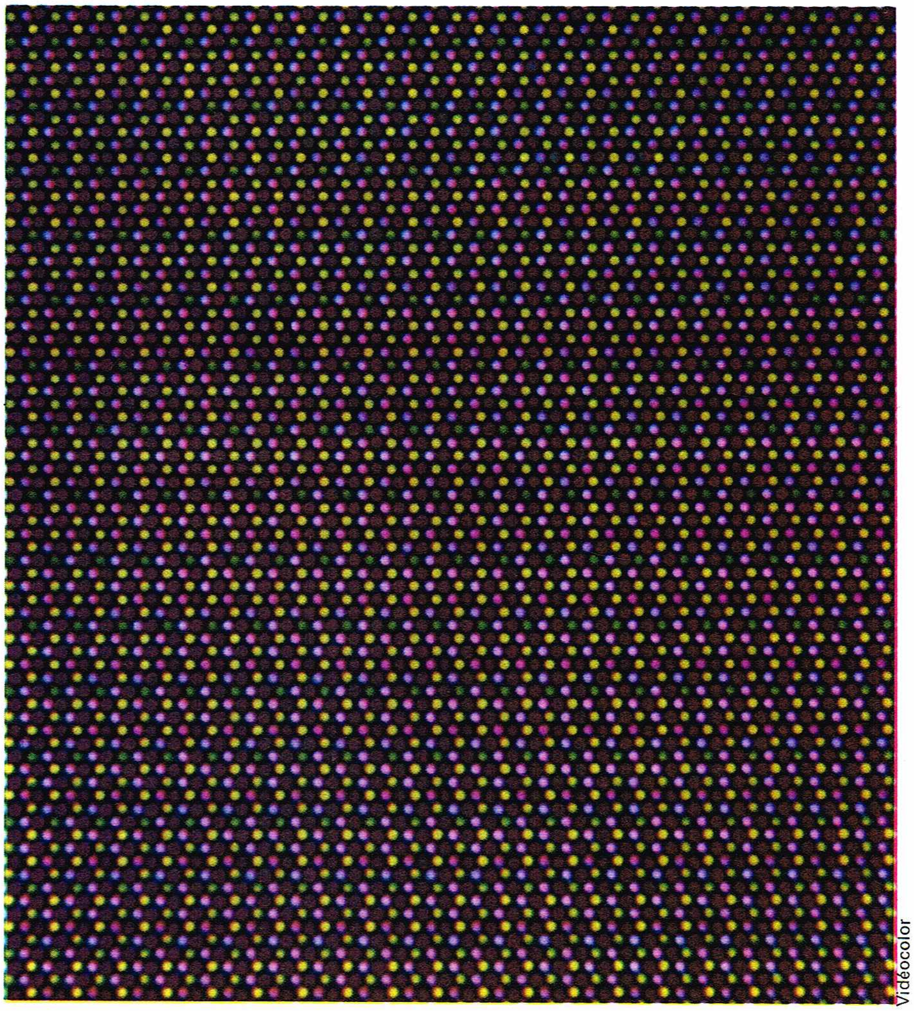

▲ La structure de l'écran Delta de Videocolor : les points rouges, verts et bleus (luminophores), répartis sur la face interne de l'écran du tube cathodique suivant une disposition en Δ, s'illuminent sous l'impact des électrons.

durée permettant de rapporter des corrections aux durées de balayage.

A cause de la symétrie en delta (Δ) représentant la disposition triangulaire des trois canons du tube trichrome, en l'absence de balayage, il est aisé de faire converger les trois faisceaux au centre de l'écran. Malheureusement, quand ils sont déviés, le point de convergence des trois faisceaux ne reste pas sur le masque, comme le montre la *figure* 23. Il est donc indispensable d'apporter des **corrections de convergence** si l'on veut être sûr que chaque faisceau vienne bien frapper les luminophores correspondant à sa couleur. Ce sont les corrections les plus délicates à apporter et aussi celles qui nécessitent le plus de circuits ; nous verrons par la suite que l'on dispose maintenant de nouveaux tubes-images dont l'avantage essentiel est d'être autoconvergents et, par conséquent, de nécessiter beaucoup moins de réglages.

Examinons tout de même rapidement comment sont effectuées les corrections de convergence dans un tube à canons en delta.

Pour ramener chaque faisceau à converger avec les autres sur le masque, quelle que soit leur déviation à un moment donné, il faut lui appliquer une déviation supplémentaire dans une direction déterminée. On repère cette direction de déviation supplémentaire par ses deux projections dans un plan perpendiculaire à l'axe du tube suivant une direction radiale et une direction normale à la précédente. La déviation supplémentaire suivant le rayon est produite par le dispositif de *convergence radiale*, la déviation supplémentaire suivant la direction perpendiculaire est produite par le dispositif de *convergence latérale*. La convergence radiale au centre de l'écran est ajustée par l'action d'un champ magnétique constant pour chaque faisceau d'électrons, qui est obtenu par un ensemble d'aimants permanents fixés sur l'unité de convergence radiale que schématise la *figure* 20 : en haut de chaque branche de l'étoile se trouve l'aimant permanent de convergence statique dont les lignes de champ sont conduites jusqu'au faisceau par un circuit magnétique en ferrite, et à l'intérieur du tube par les pièces polaires radiales. La correction statique permet d'ajuster la convergence des trois faisceaux au centre de l'écran, mais elle n'est pas suffisante pour les angles de déviation maximale du faisceau correspondant aux coins de l'écran ; il faut lui ajouter une correction dite « dynamique ».

La position du spot sur l'écran est fonction du courant traversant les bobines de déviation assurant le balayage, et comme, précisément, la correction de convergence doit tenir compte de la position du spot, il est assez naturel d'utiliser les courants de balayage pour commander aussi les circuits de convergence dynamique. Cependant, chaque faisceau doit être dévié de façon légèrement différente en fonction de la position du canon par rapport à celle du spot. Il y a donc un système de bobines particulier pour la correction de convergence de chaque faisceau. Ces bobines apparaissent sur la *figure* 20, elles sont placées autour des branches du circuit magnétique en ferrite qui conduit le flux magnétique jusqu'au faisceau, et il y a trois ensembles de ce type pour les trois branches de l'étoile constituant l'unité de convergence radiale.

Mais nous savons aussi qu'il est nécessaire de disposer d'une autre composante de déviation supplémentaire pour rétablir complètement la convergence en tout point de l'écran. C'est le rôle de l'unité de convergence latérale dont le schéma est donné sur la *figure* 24. Comme pour la précédente, son action est divisée en un réglage statique et un réglage dynamique : l'élément de correction statique est composé de plusieurs aimants permanents fixés sur un support métallique conduisant bien les lignes de champ magnétique, lui-même enfilé sur la partie cylindrique à l'extérieur du tube cathodique. La disposition des aimants et des pièces polaires provoque des déplacements latéraux des faisceaux et permet ainsi de parfaire la convergence statique au centre de l'écran. Les corrections dynamiques latérales de convergence résultent de l'action de deux bobines disposées sur les branches du montage précédent.

▼ Figure 24 : coupe de l'unité de convergence latérale du tube trichrome à masque.

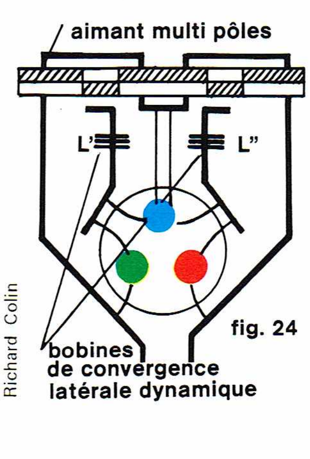

▶ *Page ci-contre, en haut, à gauche et à droite, figure 25 :* a, *éclaté du tube trinitron (1, canon unique à trois faisceaux en ligne ; 2, grande lentille ; 3, grille à fentes continues ; 4, écran à bandes verticales de phosphore ; 5, écran cylindrique ; 6, écran à grand angle : 114°) ;* b, *détail du tube trinitron.*

On leur applique un courant fonction de celui qui provoque le balayage ligne.

Malgré toutes les précautions dont on s'entoure pendant la fabrication du tube-image pour obtenir une grande précision dans l'alignement des canons, des trous du masque et des points luminophores, le jeu mécanique des pièces du tube lors de l'assemblage peut amener un certain désalignement. Il en résulte que les points luminophores ne sont plus frappés en leur centre par les faisceaux issus des canons électroniques. En cas de trop fort désalignement, il se peut même qu'un canon envoie ses électrons à cheval sur deux points luminophores. Dans ce cas, la pureté des couleurs s'en trouve sérieusement affectée, et il s'impose de remédier à tout désalignement accidentel. Les réglages que l'on introduit pour ce faire sont les **réglages de pureté**. Le dispositif est statique et constitué encore d'aimants permanents qui sont, cette fois, circulaires et au nombre de deux, montés sur des bagues tournant autour du col du tube cathodique. En les faisant tourner l'une par rapport à l'autre, on change l'intensité du champ magnétique en leur centre et, en les faisant tourner ensemble, on change sa direction. On peut, de la sorte, translater ensemble les trois faisceaux pour les amener à frapper chacun au centre des points luminophores correspondants. Tant qu'il s'agit de régler la pureté au centre de l'écran, la position du bloc de déviation n'a pas d'importance, mais dès que l'on introduit une déviation du faisceau, la position de ce bloc intervient de plus en plus au fur et à mesure que le spot s'approche du bord de l'écran. Une fois réglés les aimants de pureté, on provoque donc une déviation du spot et on ajuste la position du bloc de déviation le long du col pour que la pureté soit bonne sur toute la surface de l'écran. On peut voir sur la *figure* 21 comment sont disposés les différents dispositifs de correction sur le col du tube cathodique ainsi que le bloc de déviation.

Le tube à masque perforé équipe une grande majorité des récepteurs de télévision couleurs en service à l'heure actuelle, et il donne satisfaction en fournissant une image d'excellente qualité. Pourtant, il présente un grand nombre de défauts dont le moindre n'est pas la complexité des circuits de correction qui sont nécessaires pour un bon fonctionnement. Bien sûr, les fabricants fournissent à l'utilisateur un appareil convenablement réglé et, pourvu que la fabrication soit de bonne qualité, ces réglages ne sont à refaire que rarement. Un autre de ses graves défauts est sa consommation élevée : un peu plus de 100 W. Par ailleurs, la construction de ce tube nécessite un grand nombre d'opérations délicates et demandant une grande précision, ce qui conduit à un élément de prix élevé. Tous ces facteurs ont conduit les fabricants de tubes cathodiques à chercher et à mettre au point un tube dont la construction serait moins coûteuse et le fonctionnement plus simple.

Tubes autoconvergents

Depuis 1976, grâce à une campagne publicitaire de grande envergure, plus personne n'ignore que ce but a été atteint, du moins par un grand constructeur français. Pour tout dire, le tube à canons en ligne, puisque c'est de lui qu'il s'agit, équipe déjà les téléviseurs Sony depuis six à sept ans sous une forme, il est vrai, sensiblement différente. Les téléviseurs Philips sont également équipés de tubes à canons en ligne depuis un ou deux ans. Ces nouveaux tubes trichromes sont également appelés « autoconvergents » pour bien faire la différence avec les tubes à masque : l'avantage essentiel de ces nouveaux tubes est effectivement de ne plus nécessiter les éléments de correction de convergence de leurs prédécesseurs. Nous allons immédiatement examiner pourquoi.

D'abord, les trois canons sont disposés côte à côte (on dit en ligne), et les substances luminophores sont déposées en bandes parallèles verticales sur la dalle formant l'écran. Ensuite, le masque à trous est remplacé par une grille dont la transparence est maximale, mais dont le manque de rigidité ne permet pas de dépasser des dimensions d'écran de l'ordre de 51 cm avec un angle de cône de 114° dans le cas du tube Trinitron de Sony (il faut peut-être rappeler ici que la dimension d'un écran de télévision indique la longueur de sa diagonale, ce qui suffit à déterminer sa hauteur et sa largeur, puisque tous les écrans ont le même rapport entre ces deux dimensions, soit 3/4). La *figure* 25 montre un tube trinitron découpé partiellement pour détailler sa constitution interne. Bien que les autres tubes à canons coplanaires soient fondés sur le même principe, leur fonctionnement diffère par quelques points liés principalement au système de déviation, à la constitution des canons électroniques et aussi au dépôt des luminophores.

Les deux principaux concurrents sur le marché français en matière de tubes couleurs autoconvergents sont Philips et La Radiotechnique d'une part avec le tube 20 AX, et d'autre part Thomson avec le tube PIL. Nous plaçons un peu à part le cas de Sony qui, encore une fois, a été le précurseur du tube à canons en ligne, mais qui est surtout connu en France des professionnels de la télévision. Le matériel vidéo Sony a une excellente réputation, mais une assez faible pénétration dans le grand public, sauf peut-être en ce qui concerne les téléviseurs portables.

Les inconvénients liés à la convergence des faisceaux interviennent dans le tube à canons en delta quand on introduit une déviation des faisceaux. En d'autres termes, le champ de déviation, qui se comporte comme une optique pour les électrons, est anastigmatique, et le champ focal image, qui est le lieu de croisement des trois faisceaux déviés, ne coïncide plus avec le plan de l'écran. C'est ce qui donne des traces disposées en triangles équilatéraux. Si le champ de déviation est astigmatique, ces triangles se déforment et deviennent isocèles, car la distance entre deux de ces points diminue en même temps qu'elle augmente pour chacun de ces points par rapport au troisième. En augmentant de manière convenable l'astigmatisme du champ de déviation jusqu'à réduire à un seul point les deux points dont nous venons de parler, on élimine dans le sens horizontal l'erreur due à la courbure du champ focal image. Corrélativement, on augmente l'écart dans le sens vertical, mais cette erreur peut être annulée si les canons sont disposés dans un plan horizontal. Tel est le principe de convergence imaginé par Haantjes et Lubben, qui a été mis en application dans le tube 20 AX suivant un brevet pris par Philips.

La *figure* 26 montre les influences de la courbure du champ image et de l'astigmatisme du champ de déviation, ainsi que la différence résultant de deux dispositions des canons : en delta et coplanaires. On a ainsi mis à profit un défaut d'astigmatisme du champ de déviation, que l'on dit maintenant « parastigmatique », pour corriger l'erreur de convergence et aboutir de la sorte au tube autoconvergent. Cela ne dispense tout de même pas de régler la convergence au départ, c'est-à-dire au moment de l'ajustement du système de déviation au tube proprement dit. Cependant, ces ajustements sont minimes et, en tout cas, beaucoup moins compliqués que dans le tube à

fig. 26

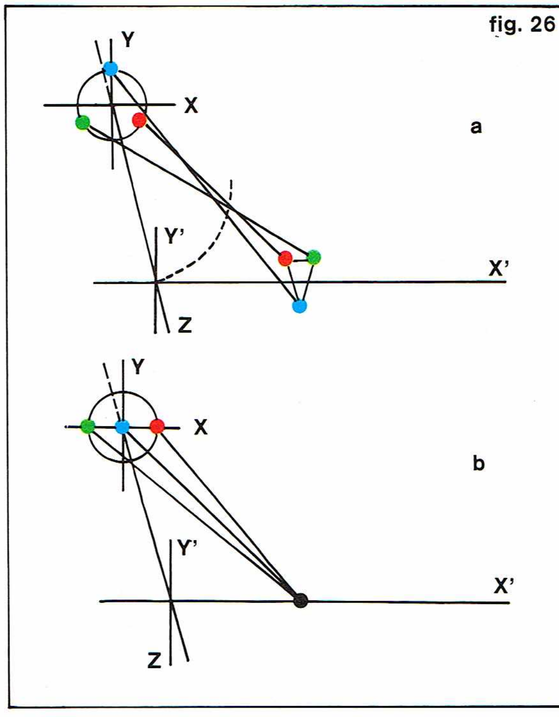

▶ *Figure 26 : influence d'un champ parastigmatique sur la convergence des faisceaux électroniques de canons disposés en* Δ (a) *et en ligne* (b).

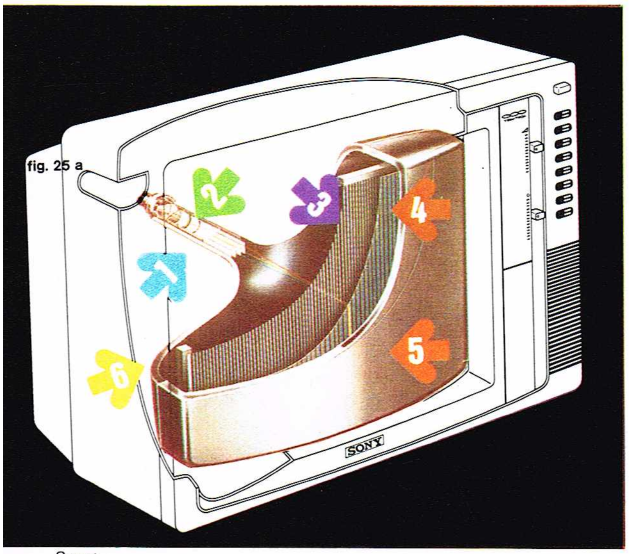

Sony

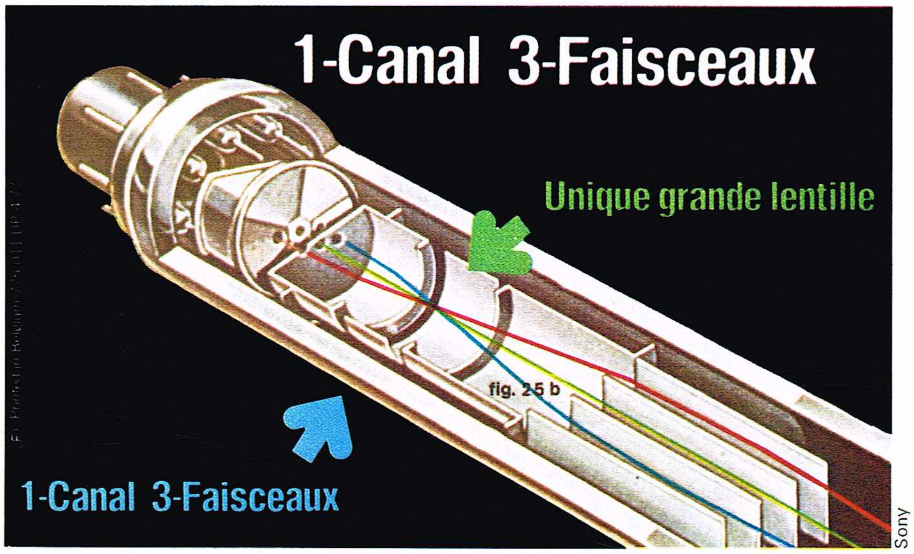

Sony

canons en delta, comme nous avons pu le voir précédemment. Ces ajustements sont appliqués, à partir de circuits simples, directement aux bobines de déflexion. Outre la simplification apportée à la construction des téléviseurs, ce nouveau tube conduit à une plus grande fiabilité de l'ensemble, ce qui explique que les constructeurs équipent maintenant tous leurs modèles de tubes autoconvergents. Il existe en effet presque toutes les dimensions d'écran (66 cm, 56 cm, 51 cm et 47 cm) avec un angle de déviation de 110°.

Le second tube autoconvergent que nous allons décrire est celui de Thomson, ou plus exactement de Videocolor, associant Thomson (51 %) et RCA (49 %), dénommé PIL (pour « Precision In-Line »). En ce qui concerne l'écran, le masque et les luminophores, le tube PIL est tout à fait semblable au tube 20 AX. Par contre, les canons électroniques diffèrent sensiblement, ainsi que le système de déviation. Les trois faisceaux sont produits par trois cathodes séparées ; c'est toujours nécessaire, puisque l'on doit commander séparément l'intensité des trois faisceaux, mais toute l'optique électronique de focalisation et d'accélération est commune. On peut ainsi rapprocher les trois faisceaux qui ne sont plus distants que de 5,1 mm, et donc enfermer les canons dans un tube à col plus étroit, ce qui permettra d'utiliser des champs de déviation moins intenses. Le bloc de déviation est également

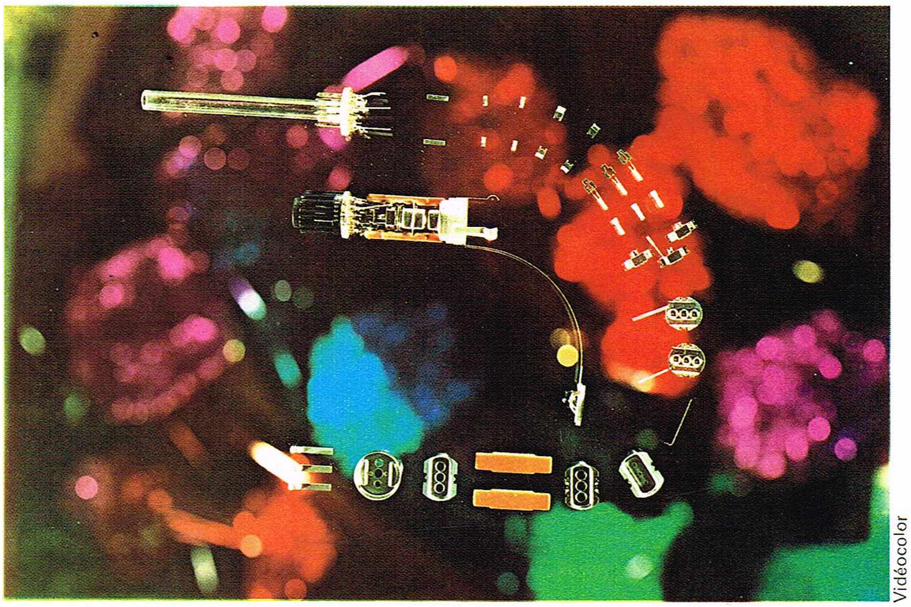

Vidéocolor

▲ ***Éléments constitutifs d'un canon électronique PIL de Videocolor.***

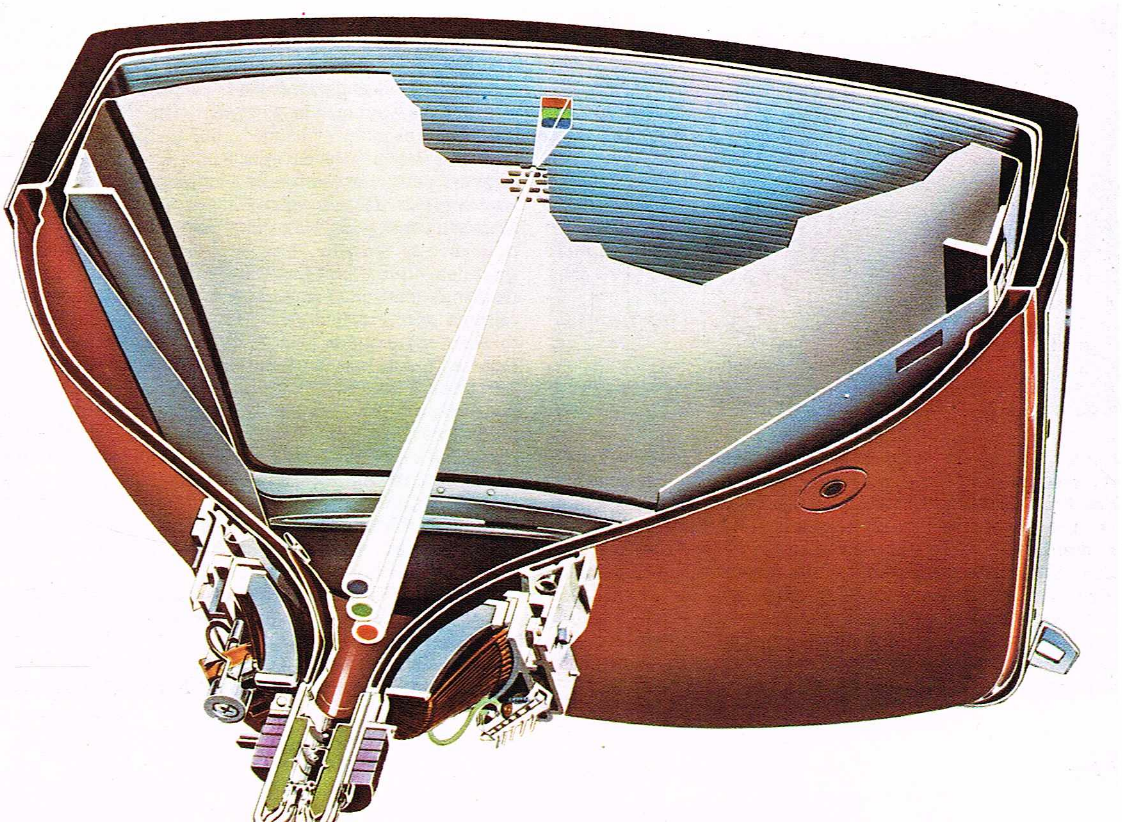

Vidéocolor

◀ ***Vue éclatée d'un tube autoconvergent PIL de Videocolor.***

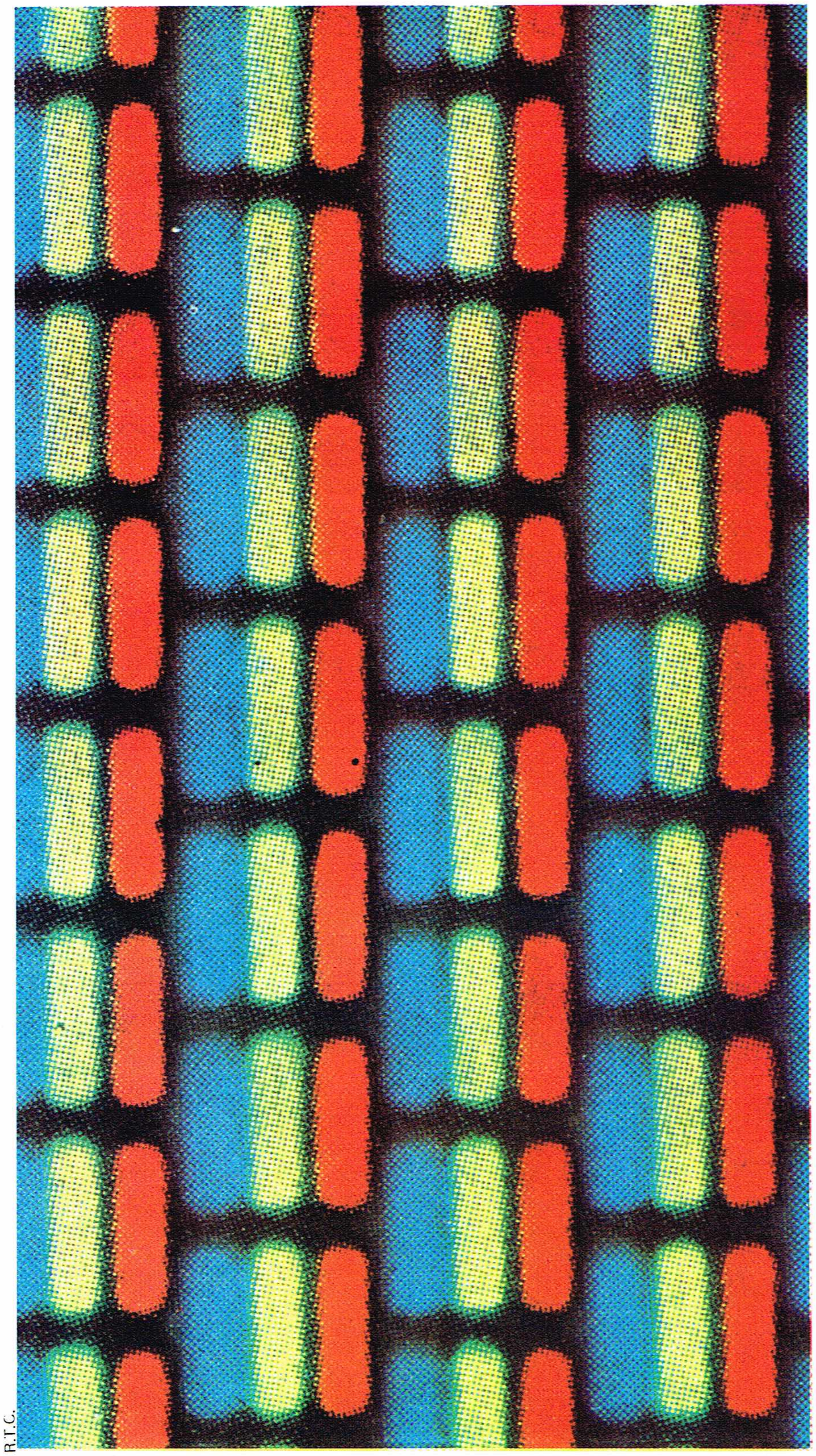

R.T.C.

▲ *Structure de l'écran du tube-image 20 AX de la R.T.C.; les substances luminophores sont disposées en bandes parallèles verticales sur la dalle formant l'écran.*

moderne : au lieu des bobines en selle utilisées habituellement, le tube PIL travaille avec un bobinage toroïdal sur des bagues en ferrite obtenues par moulage et pressage, et s'adaptant très précisément au col du tube sur lequel il est fixé définitivement. De la sorte, le bloc de déviation devient partie intégrante du tube, et cela garantit une meilleure constance des réglages au cours du temps, mais fait augmenter le coût de remplacement du tube — ce qui est de plus en plus rare, heureusement. La seule partie mobile autour du col d'un tube PIL est le dispositif de réglage de convergence statique.

Les procédés de fabrication de l'image couleurs

Il existe trois procédés de transmission de l'image en couleurs, dont deux sont en compétition très serrée. Le procédé américain, qui est le plus ancien à avoir été appliqué commercialement sur une grande échelle, est utilisé essentiellement en Amérique du Nord : c'est le procédé NTSC (National Television System Committee). Il souffre d'un certain nombre de défauts; en particulier, il est très sensible aux conditions de propagation des ondes électromagnétiques qui rendent la transmission des couleurs peu fiable. Il y a sur les récepteurs NTSC un bouton spécial de réglage de couleur qui permet de corriger localement les variations induites à la transmission, mais ce réglage doit être repris assez souvent, même au cours d'une émission, si la transmission est très perturbée par le mauvais temps, par exemple. Aussi, quand il s'est agi de développer la télévision en couleurs en Europe, les différents fabricants se sont-ils préoccupés de mettre au point un procédé débarrassé des imperfections de son prédécesseur. Deux méthodes ont débouché; l'une consistait à utiliser le même principe de modulation que le procédé américain, mais à le modifier suffisamment pour éviter toute influence des conditions de propagation. L'autre mode d'approche a repris complètement le problème à la base et utilise un principe de modulation totalement différent. Bien qu'il ait existé un organisme de concertation devant lequel les tenants des deux systèmes se sont présentés, le choix n'a pas pu se faire en faveur de l'un des deux. Des raisons techniques, et peut-être même plus des raisons politiques, ont fait qu'en Europe les deux procédés coexistent. Il s'agit des procédés PAL, pour « Phase Alternative Line », et SECAM, pour « séquentiel couleur à mémoire ». Le PAL a été mis au point par W. Bruch, des laboratoires Telefunken, et adopté par l'Allemagne fédérale, la Suisse, l'Italie, les Pays-Bas et les pays scandinaves, ainsi que par l'Espagne et l'Algérie, sans les citer tous. Plusieurs versions du SECAM existent, qui appliquent toutes le principe posé par Henri de France, et ses différentes versions sont utilisées en France, en Union soviétique et dans les pays de l'Est principalement.

Nous décrirons très rapidement les procédés NTSC et PAL, et nous nous attarderons un peu plus sur le procédé SECAM.

D'un point de vue général, les trois procédés ont en commun un certain nombre de caractéristiques liées à des considérations de sensibilité de l'œil aux impressions colorées. C'est ainsi qu'ils transmettent tous un signal de luminance Y occupant la largeur maximale de bande de fréquences permises, et deux signaux de chrominance. On dispose ainsi de trois variables à partir desquelles on peut reconstituer les intensités des trois primaires R, V et B.

Les recherches sur les propriétés sensorielles de l'œil menées par les laboratoires Hazeltine ont permis de montrer qu'il est inutile de transmettre de fins détails pour les primaires bleu et rouge, pour lesquelles l'œil est peu sensible. Comme la définition, ou finesse, de l'image est directement proportionnelle à la bande passante, on peut se contenter de fréquences allant de 0 à 1 MHz pour le bleu et le rouge. L'image est bonne dans ces conditions, pourvu que l'image verte soit assez fine, avec des fréquences vidéo allant jusqu'à 4 MHz. Puisque le maximum de bande est utilisé pour le signal de luminance composé, comme nous l'avons vu précédemment, de la somme des luminances pour le rouge, le vert et le bleu, il devient avantageux de choisir, pour les signaux de chrominance à transmettre, du rouge et du bleu pour lesquels on n'a besoin que d'une bande réduite. Le vert sera restitué à la réception avec une finesse suffisante par composition du signal de luminance Y et des signaux de chrominance.

Nous ne reviendrons pas sur les problèmes de la compatibilité, sinon pour souligner que les trois procédés la respectent bien, quoiqu'il soit difficile de ne pas perturber un récepteur noir et blanc montrant des images émises en couleurs. Ce récepteur n'a besoin que du signal de luminance qui contient toute l'information en noir et blanc, et on peut considérer que, pour lui, les signaux de chrominance sont des parasites.

La différence essentielle entre les procédés réside dans la manière de transmettre les signaux de chrominance :

R.T.C.

◀ ***Deux tubes autoconvergents 20 AX à trois canons coplanaires de la R.T.C.***

les procédés NTSC et PAL utilisent la modulation d'amplitude à suppression de porteuse et le procédé SECAM la modulation de fréquence. De plus, ils ne transmettent pas l'information de chrominance sous la même forme.

Nous avons vu précédemment que le signal de luminance avait été choisi de manière générale comme la composition pondérée des trois couleurs fondamentales R, V et B suivant la règle :

$$Y = 1{,}000\ R + 4{,}591\ V + 0{,}060\ B.$$

Les caractéristiques des tubes amènent, comme en noir et blanc, à corriger l'amplitude de ces différents signaux suivant l'écart à la linéarité; c'est la correction de γ qui consiste à remplacer R, V, B et Y par $R^{1/\gamma}$, $V^{1/\gamma}$, $B^{1/\gamma}$ et $Y^{1/\gamma}$. Sans l'oublier, nous n'en tiendrons pas compte dans notre écriture pour ne pas l'alourdir. En normalisant pour que la somme des coefficients soit égale à 1, il vient :

$$Y = 0{,}30\ R + 0{,}59\ V + 0{,}11\ B.$$

Les deux signaux de chrominance sont choisis de telle manière qu'ils soient nuls quand l'image transmise est sans couleur. C'est la raison pour laquelle on a retenu R-Y et B-Y. On obtient, à partir de la relation précédente :

$$V\text{-}Y = -0{,}51\ (R\text{-}Y) - 0{,}178\ (B\text{-}Y).$$

Toutes ces compositions linéaires des signaux seront faciles à réaliser avec des circuits électroniques.

De la sorte, la représentation que nous avions vue du diagramme de chromaticité a un équivalent appelé « plan de chrominance », qui admet comme axes R-Y et B-Y. Le centre de ce plan correspondant à R-Y = 0 et B-Y = 0 donne le blanc, et plus on s'éloigne du centre, plus les couleurs sont saturées.

Le procédé NTSC

L'information de chrominance est constituée de deux signaux qui doivent être transmis par un seul support : la sous-porteuse de chrominance. Le procédé NTSC résout le problème de la façon suivante : la sous-porteuse, de fréquence F_c, est divisée en deux composantes en quadrature; chacune d'entre elles est modulée en amplitude à suppression de porteuse par les signaux I et Q que nous avions auparavant et qui valent :

$$I = 0{,}74\ (R\text{-}Y) - 0{,}27\ (B\text{-}Y)$$
$$Q = 0{,}48\ (R\text{-}Y) - 0{,}41\ (B\text{-}Y)$$

Les deux composantes ainsi modulées sont additionnées et mélangées au signal de luminance. On retrouve donc une seule sous-porteuse de fréquence F_c dont l'amplitude et la phase dépendent des amplitudes des deux composantes modulées par I et Q. Globalement, on peut dire que la teinte de la couleur à transmettre, représentée dans le plan de chrominance par la direction du vecteur, est portée par la phase de la sous-porteuse, alors que son amplitude transmet la saturation.

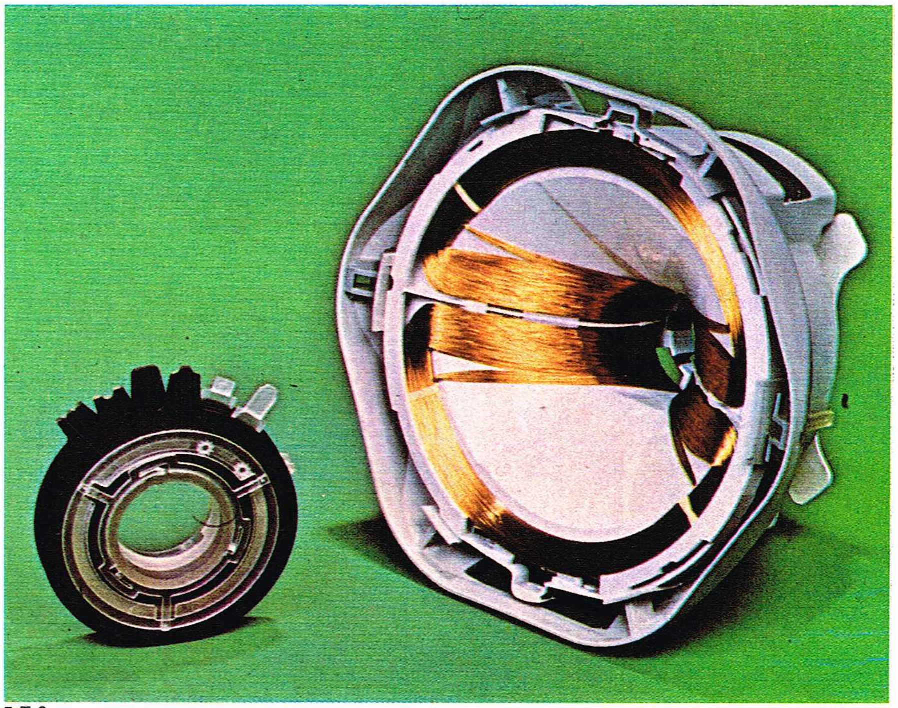

R.T.C.

▲ ***L'unité de déviation et l'unité de correction multipôles du tube autoconvergent 20 AX de la R.T.C.***

A la réception, il est nécessaire de recréer sur place la fréquence de la sous-porteuse pour pouvoir effectuer la démodulation de la chrominance, grâce à un oscillateur local. Il faut en plus que cet oscillateur soit convenablement calé en phase par rapport à la sous-porteuse de l'émission, sinon on perd la moitié de l'information de chrominance. Pour ce faire, on transmet une salve de 8 périodes de la sous-porteuse qui est placée dans le palier arrière de l'impulsion de synchronisation de lignes, pendant la suppression du retour de ligne. Ce court signal à la fréquence de la sous-porteuse, se succédant à chaque ligne, suffit, grâce à un circuit de mise en phase, à bloquer l'oscillateur local sur sa fréquence et sur sa phase.

La caractéristique principale du procédé NTSC, et c'est là son inconvénient, est sa grande sensibilité aux erreurs de phase. Outre que tous les émetteurs et tous les relais doivent être équipés de circuits onéreux de correction et de stabilisation de la phase, les récepteurs eux-mêmes sont complexes et nécessitent beaucoup de précision dans leur fabrication et une grande qualité des composants pour assurer une bonne stabilité des performances. Il n'en reste pas moins que nous ne sommes pas maîtres des conditions de propagation des signaux, et, en cas de conditions anormales, il se produit des déphasages qui dénaturent les couleurs.

Ce phénomène étant rédhibitoire, les Européens, à la veille de choisir un procédé couleurs, se sont tournés vers d'autres solutions.

En 1958, Henri de France publia les détails d'un système d'émission évitant les problèmes liés à la grande sensibilité de phase. C'est, bien sûr, le procédé SECAM qui venait d'être inventé. Le procédé PAL lui est postérieur, mais, comme il se rapproche du NTSC, décrivons-le maintenant.

Le procédé PAL

Il consiste en une amélioration du procédé NTSC destinée principalement à supprimer sa sensibilité aux déphasages. D'abord, il faut souligner que le PAL transmet comme signaux de chrominance les différences R-Y et B-Y. La valeur de ces composantes à un instant donné fixe le vecteur représentatif dans le plan de chrominance. Si l'on suppose que, d'une ligne à la suivante, ce vecteur varie très peu pour deux points l'un en dessous de l'autre, on peut utiliser une comparaison entre ces deux lignes pour s'assurer qu'il ne s'est pas introduit une déformation trop importante de l'information de couleur. On procède donc de la manière suivante : à l'émission, le signe de la composante R-Y est changé à chaque ligne, et à la réception, on prend, après démodulation, pour composante R-Y du vecteur de chrominance d'une ligne, la moyenne du signal $(R\text{-}Y)_n$ qui arrive pour cette ligne n et du signal $(R\text{-}Y)_{n-1}$ qui est arrivé pour la ligne précédente. Comme ils ont été émis en opposition de phase, c'est-à-dire inversés l'un par rapport à l'autre, les déphasages intempestifs s'annulent.

▼ Figure 27 : vecteurs représentant la couleur des lignes $n-1$ et n dans le plan de chrominance; a, à l'émission; b, à la réception; dans ce cas, la composition des vecteurs des deux lignes permet de s'affranchir des déphasages éventuels.

fig. 27

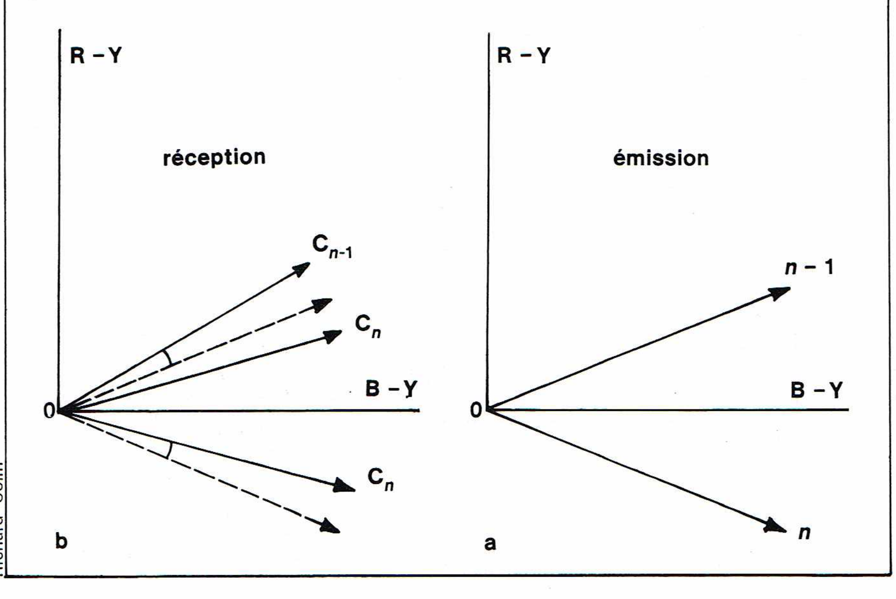

Richard Colin

La *figure* 27 montre comment les vecteurs représentant la couleur sont positionnés dans le plan de chrominance, pour deux lignes $n-1$ et n successives. La seconde partie du graphique représente ce qui se passe à la réception, en supposant que c'est la composante $(R\text{-}Y)_n$ qui a été inversée à l'émission. On reçoit C_{n-1} et C_n ; après inversion de la composante R-Y de ce dernier, on en fait la moyenne avec C_{n-1}. Le déphasage, qui a pu modifier, au cours de la transmission, la position de C_n par rapport à E_n, affecte aussi très vraisemblablement C_{n-1}. L'inversion de composante change aussi le signe de ce déphasage, et la moyenne effectuée compense cette distorsion.

Tout cela complique les circuits aussi bien à l'émission qu'à la réception, bien que l'incidence économique soit surtout sensible pour cette dernière. Il faut, en effet, conserver en mémoire pendant la durée d'une ligne le signal de chrominance pour pouvoir le composer avec celui de la ligne suivante. Il faut aussi trouver le moyen de mettre en phase à la réception, par rapport à l'émission, le commutateur qui doit inverser, une ligne sur deux, la composante R-Y du signal de chrominance. La première contrainte est satisfaite en utilisant une ligne à retard très précise de 64 µs en verre; la seconde contrainte impose de modifier les salves qui sont transmises, comme dans le NTSC, à chaque ligne pendant le signal de suppression suivant le top de synchronisation; les salves de deux lignes successives sont en effet déphasées de 180°.

Le procédé SECAM

L'idée de base de ce procédé est analogue à celle qui a servi dans la conception du PAL : la couleur est sensiblement la même pour deux lignes successives en deux points l'un au-dessus de l'autre. On en déduit que l'on peut donc se contenter de transmettre un seul signal de chrominance par ligne; le second, qui reste bien entendu nécessaire pour redonner une image colorée avec le signal de luminance, est celui de la ligne précédente. Par exemple, à la ligne n, l'émetteur envoie d'une part le signal de luminance et d'autre part le signal de chrominance R-Y. A la réception, si l'on ne dispose que de ces deux informations, il est impossible de reconstituer une image colorée, puisqu'il manque le signal B-Y. En se fondant sur la remarque du début de ce paragraphe, on pallie cette absence en utilisant le signal B-Y de la ligne $n-1$. Cela suppose évidemment que l'on a mis ce signal en mémoire pendant la durée d'une ligne. On emploie pour ce faire une ligne à retard de 64 µs, de manière un peu analogue à ce qui est fait dans le procédé PAL. On change aussi d'une ligne à l'autre le signal de chrominance transmis, si bien que, dans notre exemple, on transmettra le signal B-Y à la ligne $n+1$, et pour reconstituer la couleur de cette ligne à la réception, on utilisera le signal R-Y qui a été transmis à la ligne n. Les signaux R-Y et B-Y sont donc transmis séparément et séquentiellement. La définition verticale de la chrominance est deux fois plus faible que si R-Y et B-Y étaient émis simultanément; mais cela n'entraîne aucune baisse de qualité de l'image colorée, en raison de la faible largeur de bande dont disposent, de toute manière, les signaux de chrominance.

Plusieurs versions du système SECAM ont été mises au point, chacune présentant par rapport à l'autre une amélioration, du point de vue de la compatibilité essentiellement. Les normes employées actuellement par les chaînes de télévision françaises sont celles de la version dite « SECAM IIIb ». Le principe de base du fonctionnement reste celui que l'on a décrit. S'ajoutent un certain nombre de caractéristiques de détail que nous allons voir rapidement.

Le canal de télévision en couleurs a exactement la même largeur qu'en noir et blanc. Le spectre des signaux de couleurs vient donc se superposer à celui du signal de luminance commun au noir et blanc et à la couleur. Pour ne pas perturber la réception en noir et blanc des images émises en couleurs, il faut respecter certains impératifs en ce qui concerne l'amplitude des signaux de chrominance et la fréquence de leur sous-porteuse.

La fréquence de la sous-porteuse de chrominance doit faire l'objet d'un choix soigné, car elle est, ici, modulée en fréquence par les signaux de chrominance, et, par conséquent, en cas de réception en noir et blanc, elle peut perturber la formation de l'image par le signal de luminance seul. On constate, en effet, en observant le spectre, c'est-à-dire la composition du signal pour chaque fré-

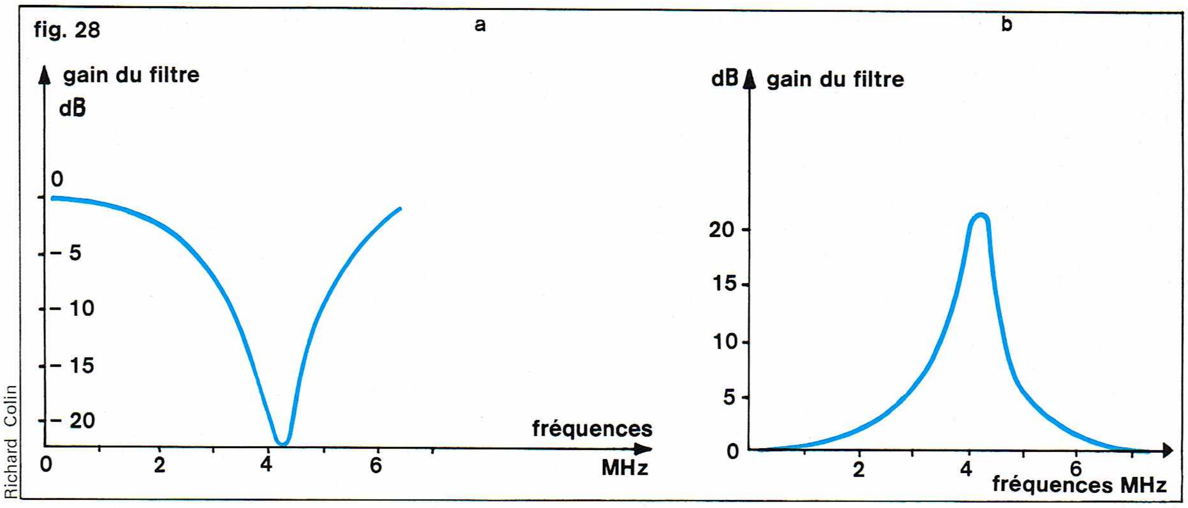

◀ *Figure 28 : courbes de réponses de deux types de filtres servant au traitement des signaux de chrominance dans le procédé SECAM ; a, filtre en anticloche ou en trappe utilisé à l'émission ; b, filtre en cloche utilisé à la réception.*

quence, qu'une modulation de fréquence conserve la porteuse en lui donnant une amplitude relative qui dépend du taux de modulation. La fréquence porteuse existe donc pratiquement toujours dans le spectre. Pour éviter qu'elle n'ait une influence visible sur l'image, on l'affaiblit volontairement à l'émission en faisant passer les signaux de chrominance dans un filtre réjecteur, ou « trappe », destiné à diminuer l'amplitude de la sous-porteuse d'un facteur 10 environ. A la réception, pour retrouver des signaux de chrominance corrects, on leur fait subir un traitement inverse qui avantage les fréquences voisines de la sous-porteuse avec un filtre en cloche dont la réponse est représentée sur la *figure* 28b qui montre la raison de cette appellation. La *figure* 28a représente le filtre « trappe » utilisé à l'émission et que les techniciens appellent aussi « anticloche », puisque ces deux réponses doivent correspondre exactement pour qu'à la réception, avant de traiter les signaux de chrominance, ceux-ci aient des amplitudes relatives identiques à ce qu'elles étaient à l'émission.

Ce n'est cependant pas le seul traitement que l'on fasse subir aux signaux de chrominance. En effet, les chrominances R-Y et B-Y sont telles que leurs amplitudes deviennent plus faibles pour les fréquences élevées, c'est-à-dire que les fins détails de l'image colorée sont moins saturés que les plus grandes surfaces, et ce sont les fins détails qui conduisent aux plus hautes fréquences de ces signaux. Si on les transmettait tels quels, on exposerait cette partie du spectre à une grande influence des parasites extérieurs. C'est la raison pour laquelle on procède à une « pré-accentuation », qui consiste à augmenter délibérément l'amplitude des signaux de couleurs R-Y et B-Y en fonction de leur fréquence, et cela avant de leur faire moduler en fréquence la sous-porteuse de chrominance. Cette manipulation a pour but de rendre moins sensibles aux aléas de la transmission les signaux de chrominance ; on procède à la réception, après démodulation, à une désaccentuation qui redonne au spectre des signaux de couleurs sa forme originelle.

Nous avons, jusqu'ici, parlé de la sous-porteuse de chrominance. En fait, dans le procédé SECAM IIIb, on utilise deux sous-porteuses de fréquences légèrement décalées pour transmettre chaque signal de chrominance. La sous-porteuse F_{SR}, qui est modulée par R-Y, est à 282 fois la fréquence de balayage des lignes, soit

$$282 \times 15\,625 = 4{,}406 \text{ MHz},$$

et celle de F_{SB}, qui est modulée par B-Y, à 272 fois, soit 4,250 MHz.

De plus, afin de diminuer le plus possible l'influence des sous-porteuses sur le signal de luminance, on inverse la phase des signaux de chrominance toutes les deux lignes d'une même trame et toutes les quatre trames pour une ligne de même numéro.

Il faut, par ailleurs, commander à la fréquence des lignes, et dans le sens convenable, par un double commutateur électronique qui aiguillera convenablement le signal de chrominance qui est transmis pour chaque ligne. Il aiguillera simultanément le signal issu de la ligne à retard vers l'autre entrée du décodeur des chrominances. Pour que ce commutateur travaille donc en phase et n'inverse pas les signaux rouge et bleu, ce qui serait évidemment catastrophique pour l'image, on envoie des signaux d'identification pendant 9 lignes de la durée de suppression de trame (se reporter à la description des signaux de synchronisation donnée pour le noir et blanc). Ces signaux d'identification sont composés de salves où la fréquence alternativement croît à partir de F_{SR} pour identifier le signal R-Y, et décroît à partir de F_{SB} pour identifier B-Y comme le montre la *figure* 29. En outre, les salves sont produites pendant le palier de suppression de ligne précédant le début de chaque ligne : une ligne pendant laquelle on transmet effectivement R-Y est précédée d'une salve sur F_{SR}, de même avec B-Y et F_{SB}.

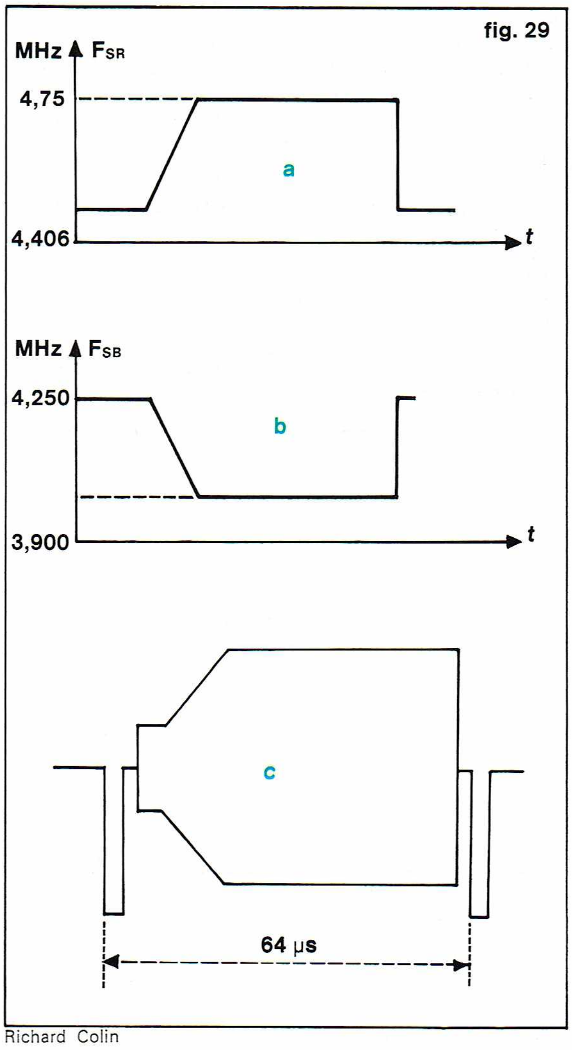

◀ *Figure 29 : signaux d'identification du procédé SECAM de transmission de l'image couleur ; a et b, signaux modulateurs autour des fréquences des sous-porteuses F_{SR} et F_{SB} ; c, signal vidéo résultant de chrominance.*

▶ *Figure 30 : les signaux de mire du procédé SECAM;* $D_R = -1{,}9\ (R - Y)$; $D_B = +1{,}5\ (B - Y)$.

fig. 30

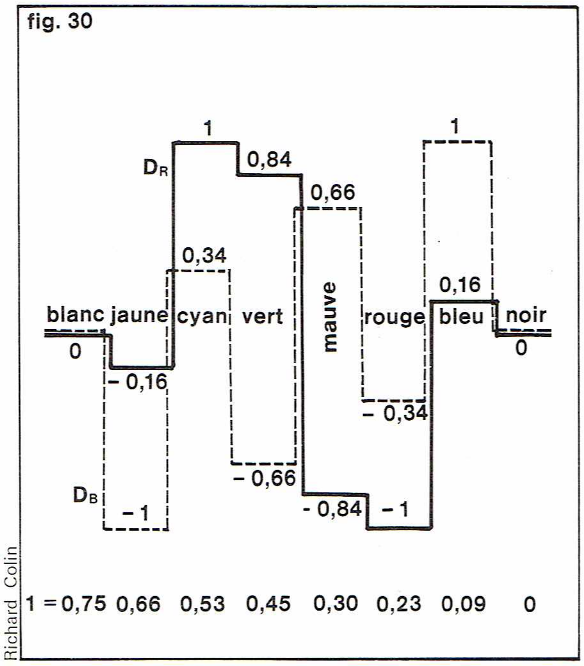

Mire de couleurs

A certaines heures, en dehors des émissions de programmes, l'usager peut constater l'apparition sur son écran de bandes colorées successivement grise, jaune, cyan, verte, mauve, rouge, bleue et noire; il s'agit d'une mire de couleurs dont les signaux sont très bien calibrés. Elle est destinée aux constructeurs et aux dépanneurs, qui peuvent, pendant ce temps, effectuer des réglages sur les téléviseurs pour que la réception se fasse de manière optimale. La *figure* 30 montre les signaux de chrominance, avec des indications sur leur amplitude relative pour chaque bande colorée transmise. En dessous, on a porté les valeurs, corrigées du gamma, pour chaque composante R, V, B et pour la luminance Y.

Pour résumer tout ce que nous venons de voir à propos du procédé SECAM, établissons un schéma des dispositifs utilisés à l'émission, comme sur la *figure* 31. La caméra de prise de vues fournit trois signaux R, V, B qui subissent, pour commencer, la correction de gamma (γ sur le schéma). Un générateur B de signaux de balayage H et V commande à la fois la caméra et le codeur SECAM. Un ensemble de circuits linéaires permet de composer les signaux R, V, B pour obtenir les signaux de luminance Y et de chrominance R-Y et B-Y. Le codeur SECAM a pour rôle d'ajouter au signal de luminance Y les tops de synchronisation et les salves des signaux d'identification.

▼ *Figure 31 : schéma synoptique d'un émetteur SECAM.*

fig. 31

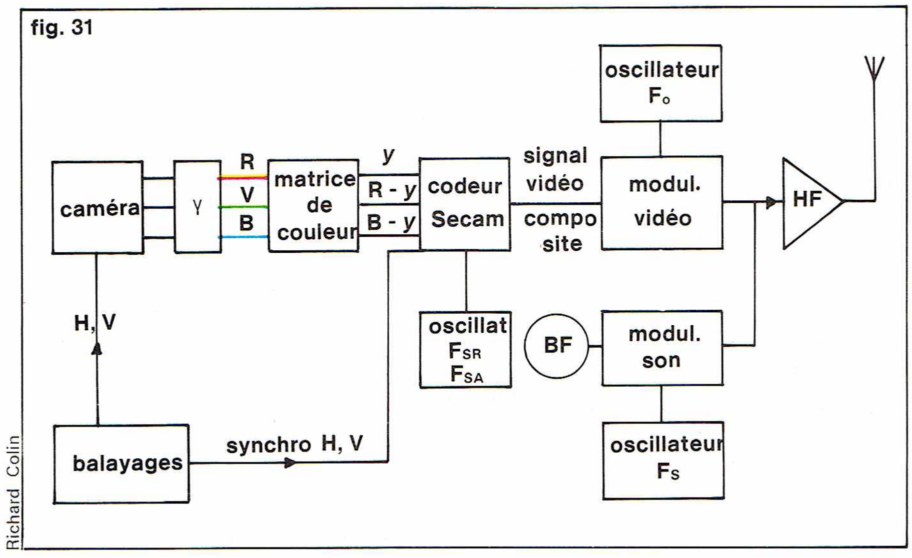

A partir de deux oscillateurs délivrant les sous-porteuses F_{SR} et F_{SB}, il effectue leur modulation en fréquence par R-Y et B-Y tour à tour. Le signal vidéo composite sortant du codeur est donc composé du signal de luminance avec ses tops de synchro, les signaux d'identification et les salves, et d'une sous-porteuse modulée en fréquence. Il reste à transmettre ce signal vidéo composite; comme pour le signal noir et blanc, on module en amplitude une porteuse HF vidéo F_v et on ajoute à la tension ainsi obtenue une autre porteuse F_s pour transmettre le son.

Un schéma détaillé du codeur SECAM est donné sur la *figure* 32. Un filtre F_1, placé après le commutateur R-Y, B-Y, limite la bande passante de ces signaux à 2 MHz. Le filtre F_3 préaccentue les fréquences élevées pour les raisons que nous avons vues auparavant; suit un limiteur d'amplitude destiné à éviter de moduler trop profondément la sous-porteuse. Après le modulateur en fréquence qui reçoit tour à tour les deux sous-porteuses en synchronisme avec la commutation R-Y/B-Y, s'interpose le filtre anticloche. Puis intervient une modulation auxiliaire d'amplitude par le signal de luminance destiné à compenser les effets perturbateurs d'un signal de luminance très fort pour des fréquences voisines de celles des sous-porteuses. Cette modulation d'amplitude n'intervient d'ailleurs qu'au voisinage de ces fréquences; c'est la raison pour laquelle on a interposé un filtre F_2 sur le signal de luminance avant la détection qui doit fournir la tension de modulation. Enfin, pour compenser le retard pris par les signaux de chrominance à la traversée de tous ces circuits, avant de leur superposer le signal de luminance, on le retarde d'une quantité égale (δ). On obtient de la sorte le signal vidéo composite qui nous ramène au schéma précédent.

Nous pouvons de la même manière décrire le schéma du décodeur donné sur la *figure* 33. Le récepteur couleurs comprend tous les circuits d'un récepteur noir et blanc et, en plus des circuits du tube trichrome, bien sûr, les circuits destinés à retarder les signaux de couleur R, V, B, qui seront appliqués aux trois cathodes du tube. Ces derniers circuits constituent le décodeur dont l'entrée reçoit le signal vidéo composite issu de la détection AM après amplification à moyenne fréquence. Un filtre F_1 débarrasse le signal vidéo composite des sous-porteuses et des signaux de chrominance. Il reste donc le signal de luminance que l'on retarde légèrement avant de l'envoyer dans la matrice de restitution des signaux R, V, B. Un autre filtre F_2 isole au contraire les sous-porteuses modulées en fréquence qui, après avoir traversé le filtre en cloche, sont appliquées à un limiteur d'amplitude. Ce signal de couleur attaque ensuite, soit directement, soit après avoir traversé la ligne à retard de 64 μs, le commutateur qui doit effectuer le tri entre les signaux de chrominance R-Y et B-Y. Le commutateur est commandé par une bascule dont les états sont imposés par un circuit qui a identifié les salves et qui reçoit les signaux de synchronisation. Après le commutateur, les deux signaux R-Y et B-Y sont extraits des sous-porteuses modulées par deux discriminateurs. On procède à la désaccentuation pour redonner aux signaux de chrominance leur amplitude réelle. Des filtres F_4 passe-bas éliminent toute présence de résidus HF, et les signaux arrivent à la matrice. La matrice reçoit donc les signaux Y et R-Y, B-Y, et en donne les trois composantes R, V, B pour l'attaque des cathodes d'un tube autoconvergent. Dans le cas des anciens tubes trichromes à canons en Δ, la matrice fournissait R-Y, B-Y et V-Y que l'on appliquait aux cathodes, le signal de luminance attaquant directement le wehnelt; dans ce cas, par conséquent, c'était le tube lui-même qui effectuait la dernière partie du décodage.

Les caméras de prise de vues en couleurs

Elles fonctionnent indépendamment du procédé qui sera employé pour la transmission et délivrent trois signaux R, V, B, plus rarement quatre : R, V, B et un signal Y de luminance direct. Les tubes photosensibles employés sont des vidicons ou des plumbicons, ces derniers ayant été spécialement développés pour la couleur. On trouve, dans les revues spécialisées ou dans les dépliants publicitaires des fabricants de matériel de prise de vues, des tubes photosensibles, aux noms plus ou moins exotiques, qui présentent quelques améliorations par rapport aux précédents et qui ne sont pas encore d'un emploi aussi répandu.

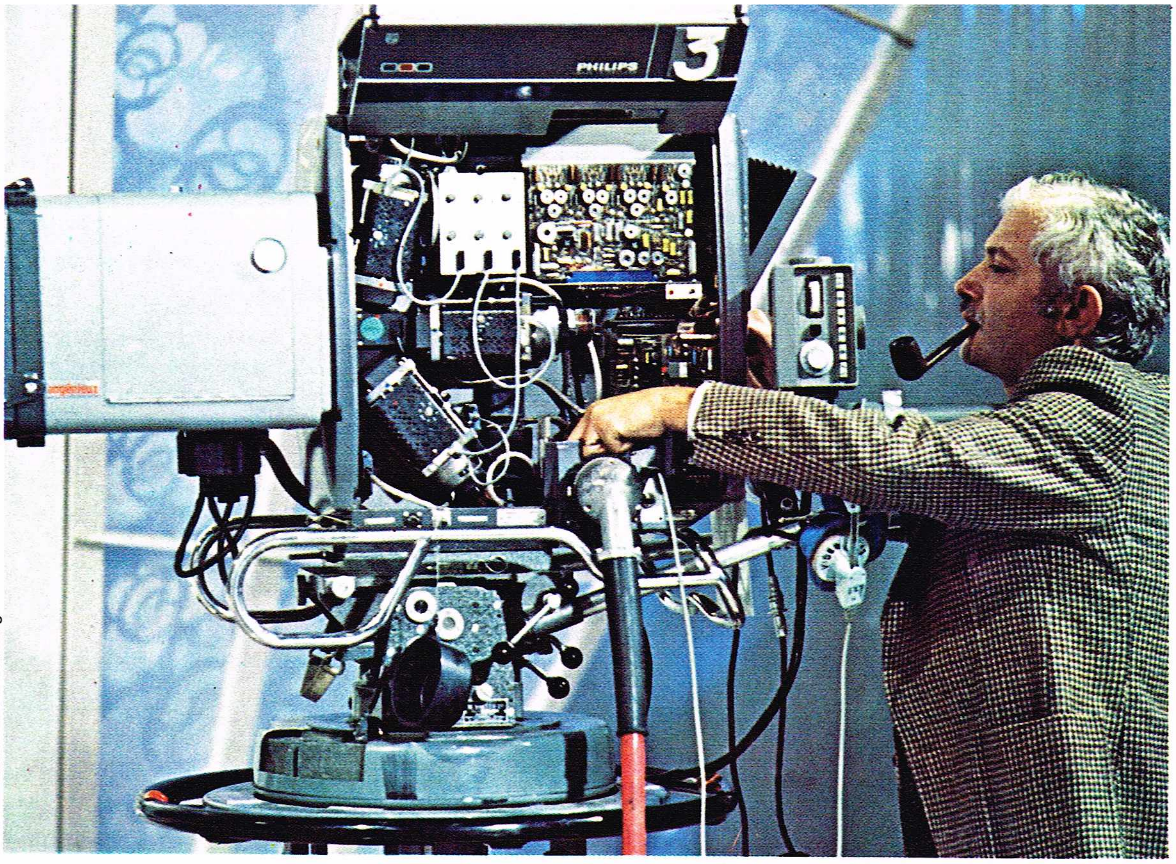

Gérard Schachmes - Parimage

◀ *Réglage d'une caméra de télévision.*

▼ *A gauche, réglage de postes de télévision en couleurs, au Japon; les bandes colorées qui apparaissent sur l'écran sont des mires de couleurs destinées aux constructeurs et aux dépanneurs qui peuvent ainsi effectuer des réglages. A droite, figure 32 : schéma synoptique du codeur SECAM.*

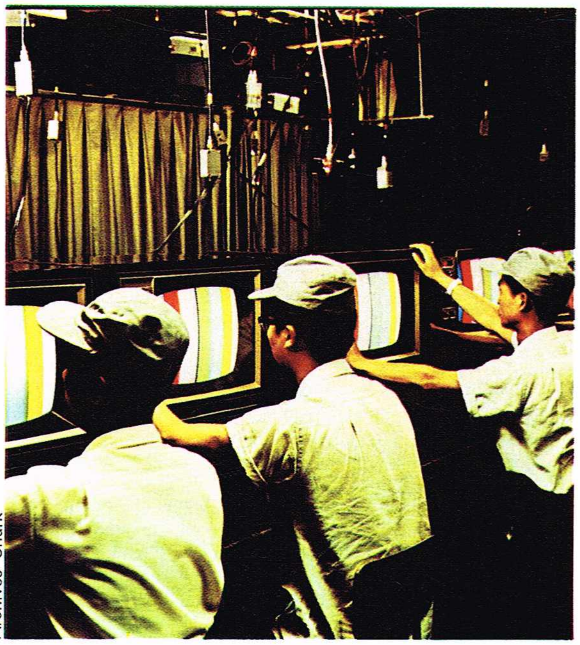

Archives Snark

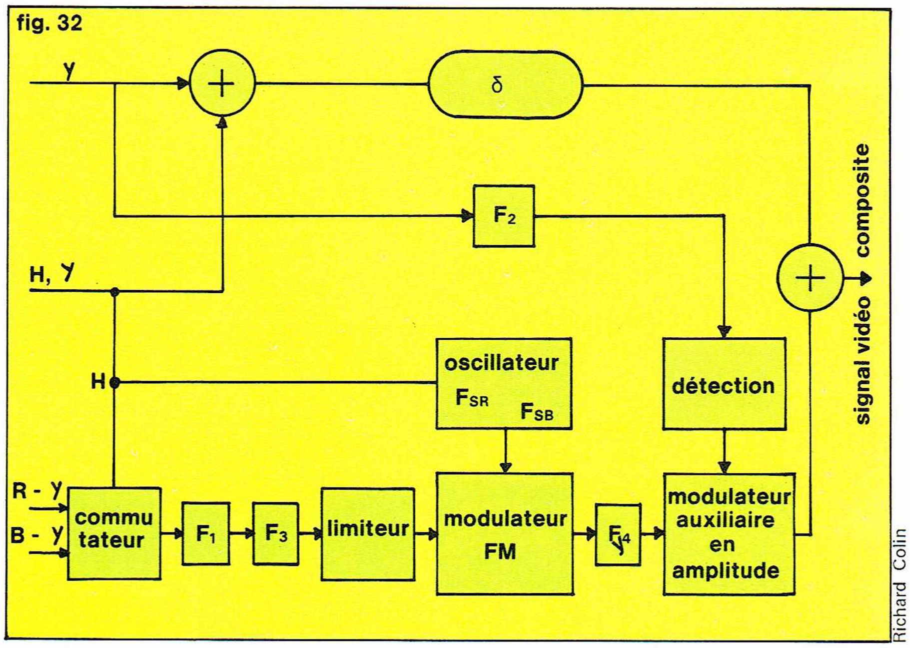

Richard Colin

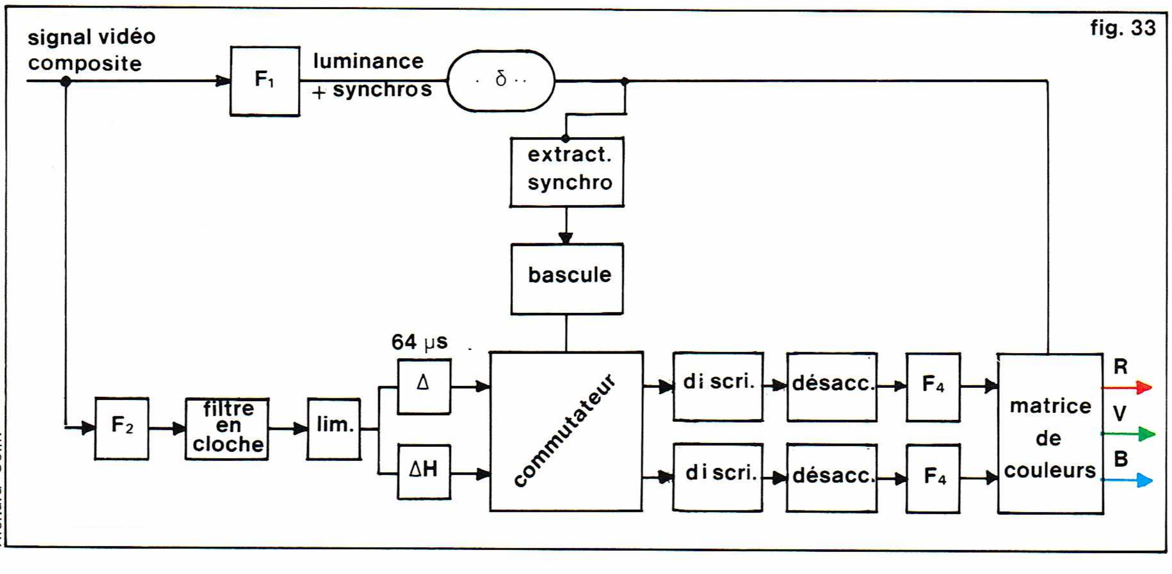

Richard Colin

◀ *Figure 33 : schéma synoptique du décodeur SECAM.*

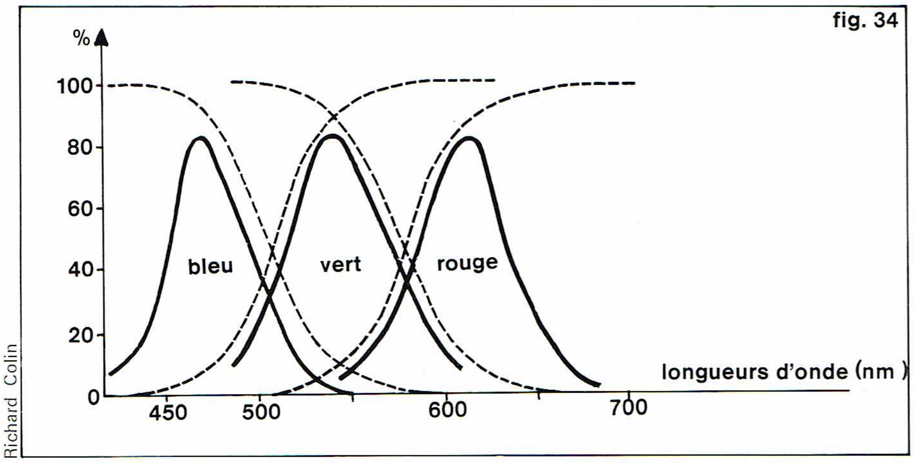

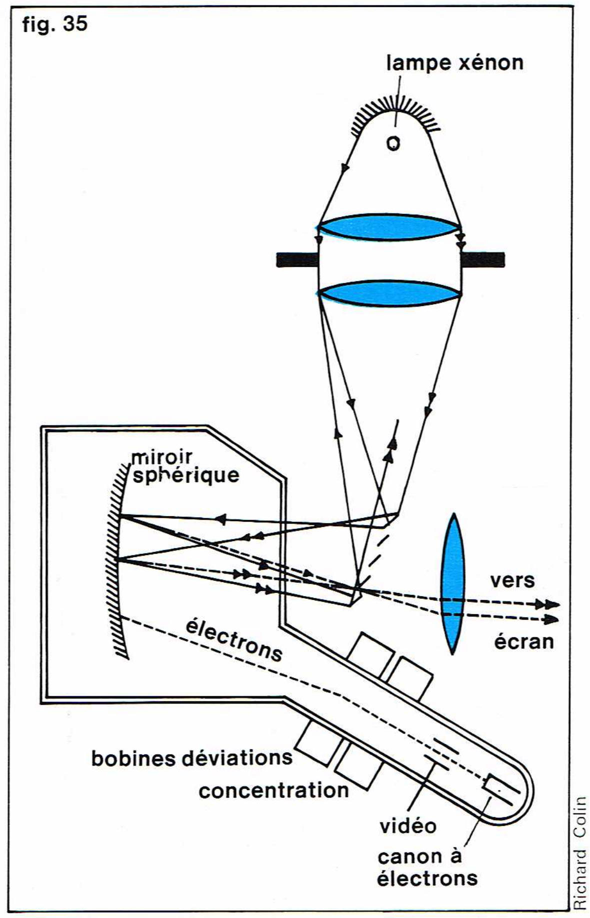

***▲▶ Figure 34 :** la conjugaison de plusieurs miroirs dichroïques permet d'isoler trois groupes de longueurs d'onde correspondant aux trois primaires rouge, vert et bleu.*
***Figure 35 :** schéma de principe de l'*Eidophore*, appareil permettant la projection d'images télévisées sur un grand écran (d'après R. Guillien,* **la Télévision en couleurs,** *collection Que Sais-je? Presses Universitaires de France).*

Comme on ne dispose pas de tubes de prise de vues dont les courbes de sensibilité chromatique correspondent bien aux trois composantes R, V, B avec lesquelles on a choisi de travailler, la séparation des couleurs doit être faite avant que la lumière vienne impressionner la surface photoconductrice. Plusieurs moyens ont été employés; le plus courant semble être un assemblage de miroirs dichroïques. Un miroir dichroïque réfléchit la lumière en proportion plus ou moins grande suivant sa longueur d'onde; les longueurs d'onde qu'il ne réfléchit pas, il les transmet : tout se passe donc comme s'il était transparent pour certaines couleurs et réfléchissant pour les autres. La *figure* 34 montre comment, en conjuguant les réflexions et les transmissions de miroirs dichroïques accordés sur certaines couleurs, on peut isoler trois parties du spectre visible centrées autour des couleurs R, V, B qui nous intéressent. Disposés judicieusement, ces miroirs permettront alors d'aiguiller sur trois tubes de prise de vues les composantes chromatiques d'une image colorée. Ce système de répartition de la lumière n'a pas un coefficient de transmission de 100 %, c'est-à-dire que, même pour une longueur d'onde qui traverse avec le minimum d'atténuation l'ensemble des miroirs avant de frapper le tube analyseur, le coefficient de transmission n'est que de l'ordre de 80 %. En gros, donc, chaque tube ne reçoit guère que 12 à 15 % de la lumière totale que peut renvoyer une scène à téléviser, ce qui impose des valeurs d'éclairement très fortes lorsque l'on emploie la couleur. En pratique, on emploie un éclairement extrêmement vif de 4 000 à 6 000 lux, de 6 à 8 fois plus élevé que ce qui est nécessaire pour téléviser en noir et blanc.

Les trois tubes analysant simultanément la même image sont attaqués par les mêmes signaux de balayage et de synchronisation. Il est nécessaire, bien évidemment, qu'à chaque instant, la tension qu'ils fournissent se rapporte absolument au même point de l'image. Cela impose une construction mécanique robuste des caméras et une électronique soignée de manière que l'analyse d'un point de l'image soit bien effectuée au même instant par les trois tubes photosensibles.

Projection sur grand écran

Pour permettre à une assemblée assez nombreuse, dépassant une cinquantaine de personnes, de regarder une image de télévision, plusieurs moyens sont possibles. L'utilisation de téléviseurs ordinaires n'est guère pratique, car elle impose une installation dispersée et ne permet pas de placer chaque spectateur dans des conditions idéales d'observation. Un moyen plus convaincant est la réalisation d'une projection sur grand écran. Malheureusement, on se heurte là à une très grosse difficulté relative à la faible luminosité des tubes générateurs qui donnent des images pouvant difficilement être projetées avec un fort grossissement. Il existe néanmoins des systèmes particuliers qui permettent une projection dans des conditions satisfaisantes. Ce sont habituellement des appareils extrêmement chers réservés à un usage commercial, bien qu'il soit apparu sur le marché français un projecteur grand public à un prix raisonnable, compte tenu du genre d'utilisations auxquelles il est destiné.

L'Eidophore

Ce procédé, inventé en 1943 par le professeur Fischer en Suisse, a été mis au point par F. Baumann et ses collaborateurs il y a 25 ans. Il est actuellement fabriqué et vendu par Philips.

On n'utilise pas ici la lumière provenant d'un tube cathodique générateur de l'image, mais on module la lumière provenant d'une source très puissante. Cette modulation, commandée par le signal vidéo, se fait au moyen d'un film d'huile déposé à la surface d'un miroir sphérique. Celui-ci est éclairé par la lampe à travers un miroir plan à barres, comme le montre la *figure* 35, de telle manière que, si le film d'huile a une épaisseur uniforme, toute la lumière reste enfermée dans le dispositif. Si, par contre, le film d'huile est déformé légèrement en un ou plusieurs endroits de sa surface, la lumière que le miroir sphérique réfléchit est déviée, et elle passe à travers le miroir à barres; reprise par un objectif, elle peut servir à former une image de la surface du film d'huile sur un écran. Il faut donc déformer le film d'huile suivant l'image que l'on veut projeter. On y arrive en bombardant le film d'huile avec un pinceau d'électrons qui crée une déformation d'autant plus forte que le pinceau est plus intense. Comme pour un tube-image ordinaire, on se sert d'un faisceau d'électrons dont l'intensité est modulée par le signal vidéo et auquel on fait balayer la surface du film d'huile comme s'il était un écran de tube-image. Avec une lampe à arc au xénon de 2,5 kW, on obtient une intensité lumineuse de 4 000 lumens permettant d'effectuer des projections sur un écran de très grandes dimensions (9,5 m × 12,5 m) avec un éclairement suffisant.

Ce dispositif, l'Eidophore, utilisé depuis longtemps en noir et blanc, a été adapté à la couleur. On utilise pour cela trois systèmes identiques, chacun d'eux étant chargé de projeter une des trois composantes colorées de l'image. Cela ne va pas sans créer des difficultés supplémentaires, et très peu de ces dispositifs sont en service dans le monde. L'un d'eux est installé au palais des Congrès de la porte Maillot à Paris. La lampe utilisée a une puissance de 6 500 W et permet la projection sur un écran d'environ 110 m^2.

fig. 36

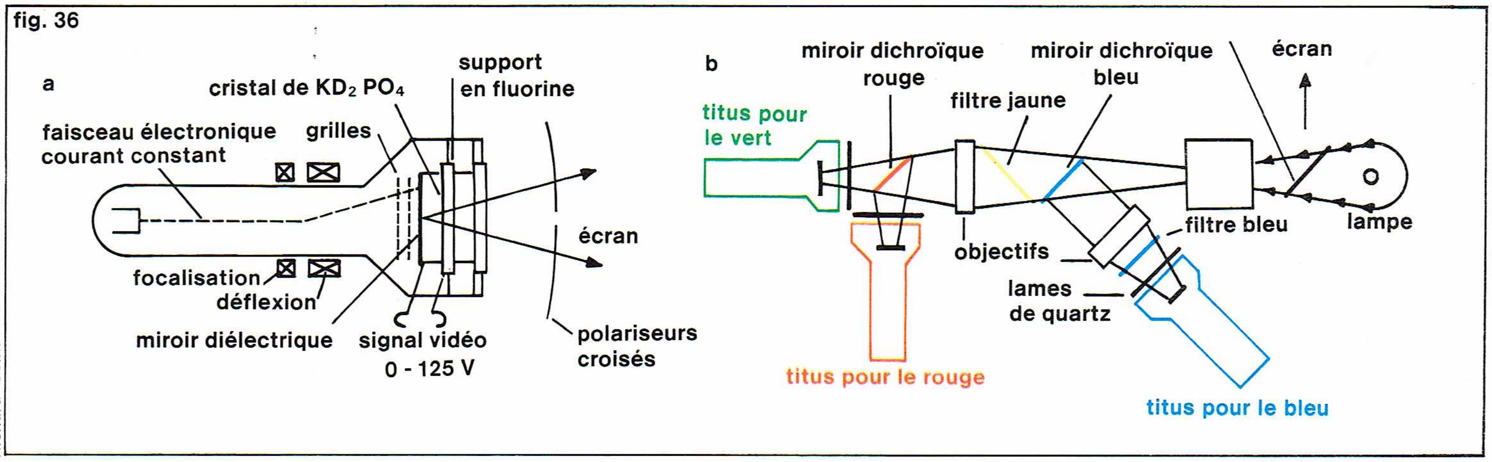

▲ *Figure 36 : le tube TITUS ; a, schéma de principe ; b, principe de la projection de l'image couleurs (d'après E. Lémery,* **Projection en couleurs sur grand écran, le Haut-Parleur, n° 1550,** *p. 41).*

Le tube TITUS

Le tube TITUS, ou tube-image à transparence variable spatio-temporelle, a un principe de fonctionnement très différent. Il modifie la transmission d'une lumière de forte intensité en modifiant sa polarisation suivant le schéma de la *figure* 36. La lumière d'une source de forte intensité traverse successivement un polariseur fixe, un cristal électro-optique jouant le rôle de polariseur variable, et un analyseur dont l'axe est croisé avec celui du polariseur fixe. En l'absence de tension appliquée à la cellule électro-optique constituée d'un cristal de KD_2PO_4, aucune lumière ne passe, puisque analyseur et polariseur sont croisés. La polarisation supplémentaire introduite par le cristal modifie cet état de fait, et on utilise la lumière transmise pour projeter une image. L'image est donc formée à partir de l'état de polarisation de chaque point ou de chaque volume élémentaire du cristal, cet état de polarisation dépendant de la tension appliquée entre les deux faces du cristal. Une de ses faces porte une électrode transparente portée à une tension continue, l'autre face sert de support à un miroir diélectrique qui renvoie la lumière reçue vers l'analyseur optique et qui est lui-même chargé par un faisceau d'électrons proportionnellement à son intensité. Le faisceau d'électrons balaie le miroir suivant un procédé familier et lui impose donc en chaque point une distribution de tension représentant les points brillants et obscurs de l'image.

Bien qu'environ deux fois moins lumineux que l'Eidophore, ce dispositif présente sur lui beaucoup d'avantages : il est en effet beaucoup plus simple à construire et à faire fonctionner.

Étudié et mis au point par le LEP (Laboratoire d'électronique physique) qui fait partie du groupe Philips, le tube TITUS n'est encore qu'un prototype qui fonctionne en public à titre expérimental à l'Empire, théâtre audiovisuel de la SFP, avenue de Wagram.

Les projecteurs grand public

Plusieurs constructeurs se sont penchés sur ce problème en visant des dimensions d'écran plus réduites convenant pour un public de 15 à 25 personnes. Le premier chronologiquement a été Sony. En utilisant son tube-image à grille, le Trinitron, qui a une luminosité bien plus élevée que le tube à masque, Sony a construit et vendu, vers 1971, un projecteur d'images en couleurs. Outre que sa luminosité restait faible, la projection nécessitait d'être faite dans le noir complet ; il n'a jamais été développé pour le procédé SECAM, il n'a donc pas été commercialisé en France.

Le projecteur Advent, soutenu par un gros effort publicitaire, est apparu sur le marché français en 1977. Il donne des images de dimensions intéressantes (1,4 m × 1,86 m), sur un écran adapté spécialement au projecteur, sa forme étant étudiée pour corriger certaines aberrations du système optique de projection. L'image est obtenue grâce à trois tubes spécialement mis au point et construits par Advent. Chaque tube comprend un canon à électrons bombardant une cible de dimensions réduites et recouverte de phosphore rouge, vert ou bleu. Cette cible se comporte comme la source d'un système optique incorporé au tube comprenant une optique de Schmidt et un objectif de sortie asphérique. Ce tube très astucieux présente un grand intérêt, sa définition est très élevée et il est incorporé à un ensemble dont l'encombrement est faible et tout à fait acceptable dans un salon, par exemple.

Les magnétoscopes

La conservation des images en noir et blanc ou en couleurs a longtemps été l'apanage de la photographie ou du cinéma. Cependant, puisque la télévision avait réussi à donner un équivalent électrique de l'information contenue dans une image, il est tout naturellement venu à l'idée d'essayer de la conserver par un enregistrement magnétique, comme on le fait pour le son avec les magnétophones. Depuis les années 1950, moment où furent tentés les premiers enregistrements d'images sur support magnétique, la technique des magnétoscopes s'est beaucoup développée, jusqu'à concurrencer le cinéma en couleurs dans le domaine professionnel et le cinéma en noir et blanc pour le grand public. Son avantage considérable et essentiel sur le film est l'exploitation instantanée des images enregistrées ; en effet, un réembobinage rapide de la bande permet de la relire immédiatement et, par conséquent, de reproduire sans délai les scènes magnétoscopées. On évite ainsi la plus lourde sujétion du film classique qui est son passage au laboratoire pour le développement, qui impose un délai plus ou moins long avant que l'on puisse disposer des images. En contrepartie, la qualité de reproduction des images est encore, à l'heure actuelle, moins bonne pour le magnétoscope que pour le film sauf pour les équipements professionnels de studio, tels que ceux dont disposent les stations de télévision nationales qui sont extrêmement élaborés et donnent des résultats de très bonne qualité. Ce sont aussi des appareils de prix très élevé et qui ne sont évidemment pas transportables. Cela explique pourquoi la plupart des séquences que nous présente la télévision, celles du moins qui ont été tournées en extérieur ou loin du studio de production, sont encore reproduites à partir de films de cinéma.

Certaines stations régionales de FR 3 disposent, à titre expérimental, d'ensembles portables pour les reportages. Pratiquement, tout étant maintenant tourné en couleurs, cet équipement est, bien que portable, nettement plus lourd et plus encombrant qu'une caméra de cinéma. Il donne aussi, les téléspectateurs de ces régions peuvent s'en apercevoir, des images de moins bonne qualité à la transmission qu'un film diffusé au moyen du télécinéma. Son gros avantage est qu'il permet une transmission immédiate des images qui viennent d'être prises grâce à la possibilité de relecture de la bande magnétique.

Comment sont donc enregistrées les images sur la bande magnétique ? Les comparaisons que l'on peut faire avec le magnétophone sont extrêmement limitées, compte tenu des bandes de fréquence très différentes nécessitées par la représentation électrique d'un son et d'une image. Le seul point commun semble être que l'on utilise, dans les deux cas, pour mémoriser l'information, une bande magnétique, ayant des caractéristiques différentes toutefois, puisque la mémoire est un état magnétique différencié localement.

▶ *Le magnétoscope Ampex AVR-2 avec sa caméra; les équipements professionnels de studio tels que celui-ci sont extrêmement élaborés et donnent des résultats de bonne qualité, mais ne sont évidemment pas transportables.*

▶ *Page ci-contre, en haut, figure 38 : déroulement de la bande magnétique* (a) *et mouvement relatif des têtes d'enregistrement* (b) *selon le procédé Ampex à quatre têtes (quadruplex)* [*d'après Ch. Dartevelle,* les Magnétoscopes. Théorie et Pratique, *Éditions Radio*]. *Figure 39 : enroulement* α *de la bande magnétique autour du tambour dans lequel tourne la tête d'enregistrement selon le procédé Toshiba; l'exploration de la bande magnétique s'effectue donc au moyen d'une seule tête vidéo tournante (d'après Ch. Dartevelle,* les Magnétoscopes. Théorie et Pratique, *Éditions Radio).*

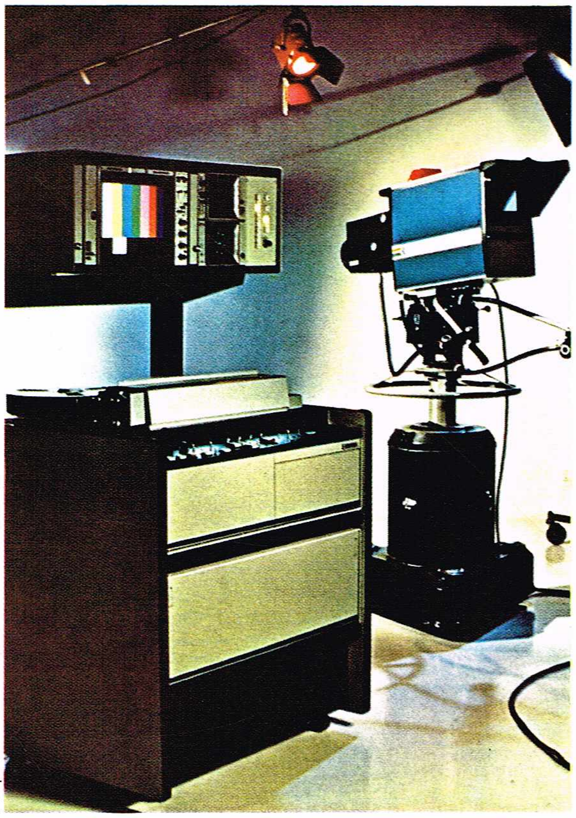

Ampex

La grande bande passante de fréquence nécessitée par l'analyse d'une image en télévision, représentée par le canal de la *figure* 8, impose des contraintes particulières à l'enregistrement magnétique. Puisqu'il faut agir localement sur la bande pour imposer des états magnétiques différents au cours du temps, la vitesse de la bande limite la fréquence maximale suivant la finesse avec laquelle on peut écrire ou lire sur elle. En clair, la largeur de l'entrefer de la tête d'enregistrement est liée à la fréquence maximale enregistrable et à la vitesse de défilement de la bande par la relation :

$$2\,e\,f_{max} < v$$

Cette relation impose une vitesse de bande de 25 m/s pour une fréquence maximale de 5 MHz et une largeur d'entrefer de tête magnétique de 2,5 μm, ce qui est le plus fin que l'on fasse actuellement. Il est évidemment inconcevable de faire défiler la bande à cette vitesse en maintenant la tête d'enregistrement immobile, comme on peut le faire d'un magnétophone. La vitesse *v* de la relation précédente est une vitesse relative, c'est-à-dire la vitesse de la bande par rapport à la tête. Puisque l'on ne veut pas faire défiler la bande aussi vite, on utilise un déplacement de la tête en face de la bande.

D'un autre côté, vers les fréquences basses, le rendement à la lecture chute régulièrement avec la fréquence; cela est dû au fait que la période du signal, et son empreinte sur la bande, devient grande par rapport à l'entrefer et, par conséquent, la tension induite, proportionnelle, suivant la loi de Lenz, aux variations inscrites sur la bande, diminue progressivement avec la fréquence. Pour s'affranchir de cette variation, on utilise une modulation de fréquence, c'est-à-dire que les signaux vidéo ne sont pas enregistrés en direct, mais qu'ils modulent en fréquence une porteuse à 5,5 MHz dont l'amplitude sature la bande magnétique. Cette saturation n'introduit pas de déformation du signal, puisque l'information est tout entière dans la fréquence et non dans l'amplitude dont la porteuse est inscrite sur la bande magnétique. De la sorte, la fréquence de repos, 5,5 MHz, correspond au niveau du noir du signal vidéo composite : l'excursion de fréquence maximale est de 1,3 MHz (fréquence modulée 5,5 + 1,3 = 6,8 MHz) et correspond au niveau du blanc. Le fond des tops de synchronisation amène la fréquence modulée à 5 MHz.

Si ce type de modulation convient bien aux signaux noir et blanc, l'enregistrement de la chrominance conduit à quelques difficultés, surtout pour les procédés NTSC et PAL d'ailleurs. L'enregistrement des signaux couleurs de ces deux procédés a conduit à développer une technique à modulation par intervalles d'impulsions. Il est ainsi possible d'enregistrer le signal vidéo composite avec sa ou ses sous-porteuses de couleurs pour tous les procédés NTSC, PAL ou SECAM avec un bon rapport signal sur bruit et une bande passante de 5 MHz, sans souffrir des erreurs géométriques inévitables de fonctionnement de la bande.

La première technique d'enregistrement sur magnétoscope a été mise au point par Ampex. Elle utilise des pistes transversales sur une bande magnétique de grande largeur : 2 pouces, soit 50,8 mm (à comparer avec la largeur de bande habituelle des magnétophones : un quart de pouce, soit 6,35 mm). La tête magnétique d'enregistrement passe devant la bande avec une grande vitesse, 42 m/s; pour ce faire, elle est fixée sur un disque tournant à 250 tours par seconde. Pour utiliser au mieux la surface de la bande magnétique, on s'arrange pour que, lorsque la tête quitte la bande, une autre tête commence à inscrire une autre piste à côté de la première. En effet, bien que le déplacement de la tête soit perpendiculaire à la bande, celle-ci se déplaçant à 38,1 m/s, la piste inscrite par la tête se trouve légèrement en biais, comme le montre la *figure* 37. Il y a ainsi quatre têtes d'enregistrement sur le disque tournant, si bien que, chaque tête créant une piste, il faut 20 pistes pour constituer une trame.

Le signal son fait l'objet d'un traitement séparé; il est enregistré comme dans un magnétophone, sur une piste réservée au bord de la bande et dans le sens du défilement, avec une tête d'enregistrement auxiliaire.

A l'enregistrement des signaux vidéo, les quatre têtes sont attaquées simultanément par les signaux modulés; la longueur d'une piste vidéo correspond à un peu plus d'un quart de tour du disque porte-têtes, si bien qu'il y a continuité et même recouvrement du message vidéo d'une piste à la suivante.

A la lecture, les choses sont moins simples, car, cette fois, le signal vient des têtes pour atteindre, par l'intermédiaire d'un amplificateur, le dispositif de démodulation; d'autre part, au mieux deux mais le plus souvent trois têtes ne sont pas sur la bande et, par conséquent, n'émettent pas de signal mais du bruit. Il faut donc commuter chaque tête quand elle arrive sur la bande pour la relier à un amplificateur et la déconnecter quand elle est sur le point de quitter le contact de la bande magnétique. Pour que ces transitions ne soient pas visibles à la reconstitution de l'image, on s'arrange pour que la commutation se fasse pendant le retour du balayage des lignes.

Il faut aussi qu'à la lecture, il y ait une bonne concordance entre la vitesse de rotation des têtes et la vitesse de

▲▶ *Ci-dessous, figure 37 : aspects d'une bande magnétique après passage devant les têtes d'enregistrement vidéo* (a), *devant la tête d'enregistrement de signaux basses fréquences* (b) *et devant la tête d'enregistrement des tops de synchronisation* (c) *(procédé Ampex)* [*d'après Ch. Dartevelle,* les Magnétoscopes. Théorie et Pratique, *Éditions Radio*]. *A droite, détail du magnétoscope VPR-1 de Ampex.*

fig. 37 Richard Colin

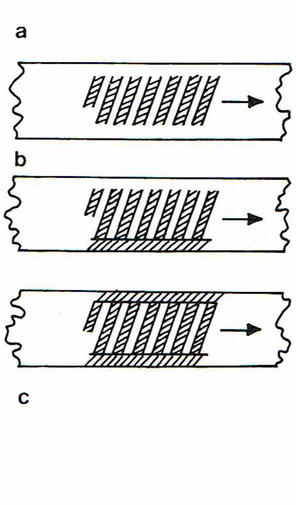

Ampex

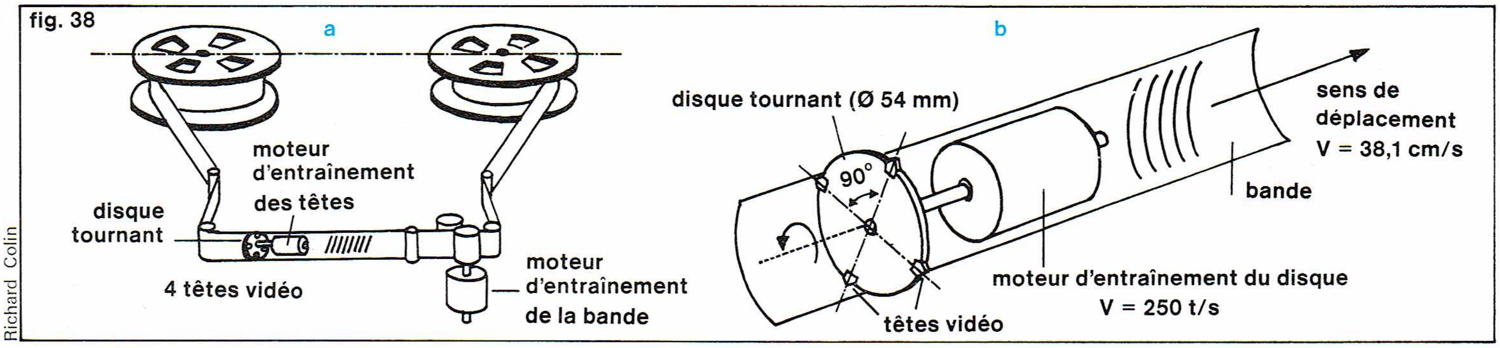

Richard Colin

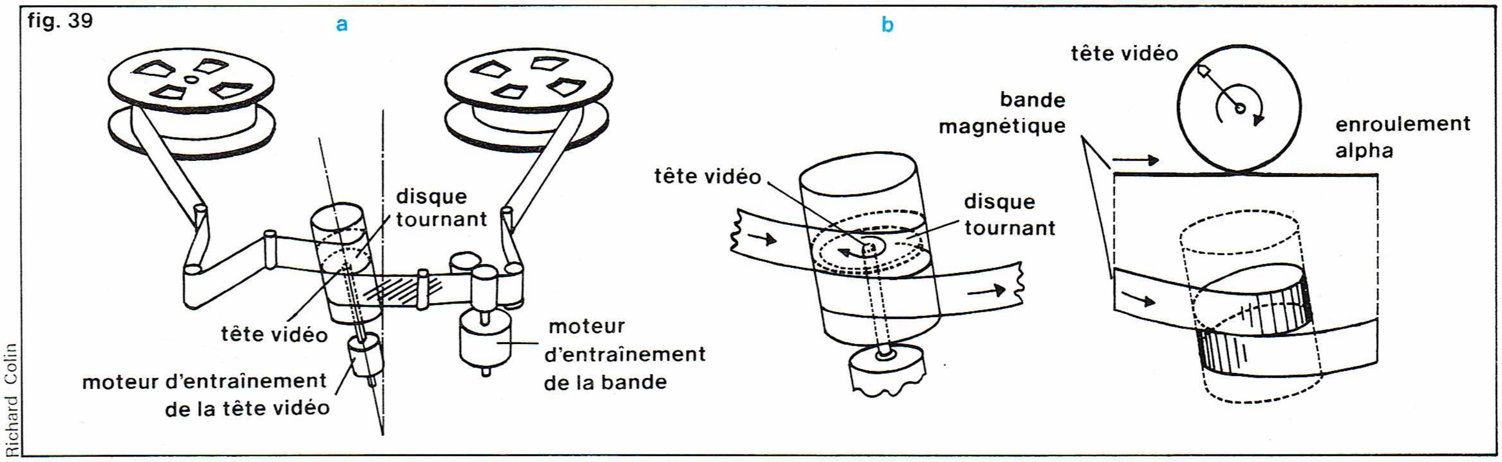

Richard Colin

défilement de la bande pour que les pistes soient rigoureusement positionnées sous les têtes au cours du défilement. Dans ce dessein, on prend la précaution, à l'enregistrement, de mettre sur une piste longitudinale, au bord de la bande, un signal de référence (ou de synchronisation) à 250 Hz piloté par la rotation du disque porte-têtes et suivant toutes les variations éventuelles de celui-ci. A la lecture, on relit le signal de référence, et on le compare constamment à la fréquence de rotation des têtes; en cas d'écart, on agit sur le moteur de défilement de la bande de manière à ramener l'égalité des fréquences. De cette manière, les têtes de lecture, qui sont les mêmes que celles d'écriture (ou d'enregistrement), restent constamment, pendant tout le défilement de la bande, au contact des pistes enregistrées.

Les magnétoscopes répondant à la norme Ampex sont des appareils très lourds et très chers. On a cherché à mettre au point des modèles plus simples, donc de coût moins élevé et aussi d'un poids tel qu'ils deviennent transportables, voire portables. Ce résultat a été atteint en 1959 par les laboratoires Toshiba, sous la forme d'un magnétoscope à une seule tête qui ne quitte la bande qu'un court instant pendant sa rotation, ceci étant obtenu par une présentation tout à fait particulière de la bande devant la tête. Le système Toshiba utilise également une bande de deux pouces (50,8 mm) qui se déplace à la vitesse de 15 pouces par seconde (38,1 cm/s). Au lieu de défiler devant les têtes tournantes suivant une direction perpendiculaire au plan de rotation des têtes (comme dans la technique Ampex [*fig.* 38]), la bande s'enroule autour d'un cylindre creux dont l'axe fait un angle tel avec la bande qu'après un tour, elle est décalée dans son plan d'une distance exactement égale à sa largeur (*fig.* 39). Cet enroulement hélicoïdal autour du cylindre est aussi appelé « enroulement α ». La tête d'enregistrement tourne à l'intérieur du cylindre; elle est en contact avec la bande par une fente ménagée dans le cylindre suivant une section droite, comme le montre la *figure* 39. La piste où se trouve inscrit le signal vidéo n'est donc plus transversale mais allongée en diagonale sur la bande. Chaque piste de vidéo mesure ainsi 72 mm et porte les informations d'une trame entière.

La rotation de la tête, qui se fait à une vitesse de 50 tours par seconde, est pilotée à l'enregistrement par le signal de synchronisation de trame du signal vidéo. Le fait d'inscrire une trame d'un seul coup présente un intérêt considérable par la possibilité que cela donne d'arrêter le défilement de la bande pour faire un « arrêt sur image », qu'il conviendrait mieux d'appeler « arrêt sur trame ». Il est même tout à fait possible, en ralentissant le défilement de la bande, de réaliser un « ralenti ». La bande porte encore sur ses bords la piste son d'une part et la piste de référence d'autre part.

L'enroulement α de la bande autour du cylindre représenterait une énorme surface de frottement s'il y avait contact. Pour l'éviter, on souffle de l'air par l'intérieur du cylindre, créant un véritable coussin d'air qui maintient la bande éloignée du cylindre.

En plus des possibilités de ralenti et d'arrêt sur image, le système Toshiba, bien plus simple que le système Ampex, permet l'enregistrement des signaux couleurs des

▼ ***Une vue d'ensemble d'un studio vidéo de télévision; les informations télévisées sont introduites dans les magnétoscopes pour une réutilisation ultérieure.***

Paolo Koch - Rapho

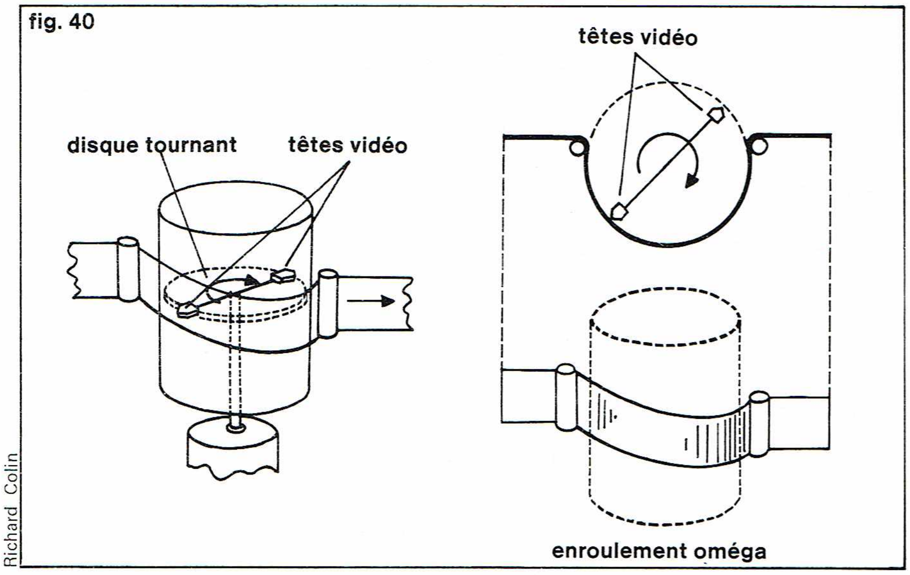

▲ *Figure 40 : enroulement de la bande magnétique en 1/2 Ω dans le cas d'un enregistrement avec deux têtes (d'après Ch. Dartevelle, les* **Magnétoscopes. Théorie et Pratique,** *Éditions Radio).*

procédés NTSC, PAL ou SECAM avec beaucoup moins de problèmes, puisqu'il n'y a plus de commutation des têtes vidéo tournantes.

Tel qu'il vient d'être décrit, le système Toshiba ne permet pas encore de construire des magnétoscopes semi-professionnels, et, bien entendu, encore moins pour le grand public.

Cependant, certaines adaptations consistant à éviter les dispositifs chers de ce système ont vu le jour. Il s'agit principalement d'un changement du parcours de la bande qui ne s'enroule plus autour du cylindre mais ne fait qu'un demi-tour, donc sur 180° ; l'enroulement est dit en « 1/2 oméga » (Ω) [*fig.* 40]. Il y a cette fois deux têtes tournantes d'enregistrement et de lecture pour compenser le fait que la bande ne suit qu'un demi-tour du cylindre. Ces magnétoscopes utilisent des bandes moins larges ; les applications professionnelles demandent des bandes de 1 pouce (25,4 mm), et les applications grand public peuvent se faire avec des bandes de 1/2 pouce de large (12,7 mm).

Certains amateurs disposent, depuis quelques années, de magnétoscopes (certains avec bande de 1/4 de pouce) qui, associés à des caméras compactes, leur permettent d'enregistrer des images noir et blanc à un prix raisonnable, compte tenu de la technicité de ces produits. Des équipements couleurs ont fait une timide apparition, mais il semble que les images ne soient pas d'assez bonne qualité pour éveiller un intérêt autre que de curiosité.

Les bandes magnétiques utilisées sur les magnétoscopes demandent à être manipulées avec beaucoup de soin.

Pour éviter toute difficulté à l'utilisateur, les présentations en « cassette » se généralisent. Malheureusement, jusqu'à aujourd'hui, chaque marque a son modèle de cassette, non compatible avec celui des autres marques. Nous sommes encore dans une période de foisonnement pendant laquelle beaucoup d'essais sont faits qui tendent à comparer les différents modèles. Il est tout à fait vraisemblable que, dans un futur proche, les constructeurs s'orienteront vers une sorte d'accord visant à standardiser un peu la présentation et les normes d'utilisation des magnétoscopes à cassettes. La tendance actuelle est de retenir la cassette à bande 3/4 de pouce de Sony dont la gamme Umatic est très répandue pour les applications de studio semi-professionnelles, par exemple, et une cassette à bande 1/2 pouce pour les modèles portables.

Autres systèmes de conservation de l'image de télévision : les vidéodisques

Dans le dessein d'abaisser le coût de diffusion des programmes TV, on a étudié d'autres dispositifs que le magnétoscope, qui reste relativement cher pour le grand public et dont le support d'information, la bande magnétique, est onéreux.

Tous ces nouveaux systèmes font appel à un disque, tout à fait différent du microsillon classique, et sur lequel les images sont enregistrées suivant des techniques très différentes. Ils portent tous, néanmoins, le nom de vidéodisques.

Le plus proche du disque classique est le vidéodisque d'AEG-Telefunken-Teldec. Au lieu de 10 à 15 sillons par millimètre sur un disque sonore, le vidéodisque Teldec a 280 sillons par millimètre. Il est lu par un capteur piézoélectrique qui traduit les micro-ondulations de sa surface en un signal électrique. Sur le lecteur, le disque tourne à 1 500 tours/mn. Un vidéodisque Teldec de 21 cm de diamètre permet de conserver un programme d'une durée de 10 minutes. Ce système, qui est fabriqué depuis 1970, est commercialisé en Allemagne mais ne semble pas avoir un succès foudroyant. Il utilise pourtant la technologie bien connue et maîtrisée des disques sonores, c'est-à-dire un disque en chlorure de polyvinyl, ce qui est un gage de sûreté de fonctionnement. Mais le système de lecture mécanique frottant sur un disque tournant à grande vitesse provoque certainement une usure rapide du disque.

▶ *Prise de vues avec une caméra vidéo portable ; ce système destiné aux amateurs permet d'enregistrer des images en noir et blanc à des prix raisonnables ; les équipements pour des prises de vues en couleurs ne sont pas encore au point.*

Un système différent, utilisant un disque rigide, mais encore relativement proche des techniques classiques, est le vidéodisque RCA. Dans les 218 sillons par millimètre sont inscrites des fentes rectangulaires dont la largeur et la distance des unes aux autres représentent le signal vidéo. Toute la surface du disque est recouverte d'une très fine couche conductrice métallique, recouverte elle-même d'une couche homogène d'isolant. La lecture se fait en laissant glisser le long du sillon un saphir porteur d'une électrode métallique. Le condensateur formé par la couche métallique du disque et l'électrode du saphir présente une capacité variable suivant la dimension des fentes au-dessus desquelles passe le saphir (*fig.* 41). Bien que très faible ($3{,}5 \times 10^{-4}$ picofarad), cette variation de capacité suffit à déplacer la fréquence d'un oscillateur qui, détecté, redonne le signal vidéo. La vitesse de rotation du disque est de 450 tours/mn, et, comme le saphir frotte sur le disque, on évalue à 500 h sa durée de vie. Le disque peut être lu 500 fois environ ; chacune de ses deux faces fournit 30 mn de programme télévisuel.

A ces procédés de lecture avec frottement du capteur sur le disque, on oppose des disques à lecture optique. Cela résout radicalement les problèmes d'usure mais conduit à des réalisations plus compliquées et plus chères. Se posant en concurrent du procédé RCA aux États-Unis, le procédé Philips utilise pour lire le vidéodisque un fin pinceau lumineux issu d'un laser à hélium-néon. L'information est enregistrée sur le disque sous la forme de très fines fentes ovales larges de 0,5 μm et profondes de 0,1 μm, dont la longueur et l'espacement représentent le signal vidéo. On détecte les variations de la lumière réfléchie pour le retrouver. Comme aucune action mécanique ne force la tête de lecture à suivre le sillon du disque, au contraire des systèmes précédents, il faut adjoindre un asservissement de guidage qui est, lui aussi, optique.

Thomson fabrique également un vidéodisque à lecture optique qui semble moins compliqué que le précédent. L'information y est enregistrée sous une forme à peu près identique, mais la lecture se fait, cette fois, par transparence, ce qui simplifie la tête de lecture. Mais, surtout, le positionnement du disque par rapport à la tête de lecture est assuré avec une très grande précision (moins de 2 μm) par un système de stabilisation aérodynamique.

Aucun des différents dispositifs décrits ci-dessus ne permet d'enregistrer directement les images de télévision. Seuls des procédés industriels spéciaux permettent de reporter l'information sur ces disques. Leur seule utilisation possible est donc la diffusion en un grand nombre d'exemplaires (pour abaisser le coût de la fabrication) de programmes susceptibles d'être observés plusieurs fois avec intérêt par le même public, pour la formation ou l'enseignement par exemple, ou par des publics différents.

Un autre système de disque sur lequel l'enregistrement est magnétique a vu le jour en Allemagne dernièrement. Le « Magnetic Disk Recorder » (MDR) a une durée de 45 minutes environ pour ses deux faces. En allant de la périphérie au centre de ce disque, on trouve un film magnétique de 8 μm jusqu'au tiers du rayon, puis une plage qui constitue un sillon de guidage de la tête magnétique de lecture ou d'écriture. En effet, un avantage de ce système par rapport aux précédents consiste dans le fait qu'il est possible à l'utilisateur d'enregistrer lui-même le signal vidéo comme sur une bande. La tête magnétique est une ferrite avec un entrefer extrêmement faible de 0,3 μm, ce qui demande une réalisation particulièrement soignée. Le disque tourne à 150 tours par minute. Son usure est uniquement due au sillon de guidage qui n'autorise guère plus de 300 passages. Ce procédé permet d'enregistrer une image en couleurs avec une définition un peu inférieure à 400 points.

La plupart de ces dispositifs à disque sont encore en gestation. Certains d'entre eux sont montrés régulièrement depuis quelques années dans les manifestations et expositions où se rencontrent les professionnels de la communication, de l'information et du spectacle, sans apparaître pour autant sur le marché ni professionnel ni grand public. Les avis sont d'ailleurs partagés sur l'utilité ou l'intérêt de telles formes de diffusion de programmes éducatifs ou récréatifs. Tout se passe comme si les grands fabricants de matériel vidéo se tenaient prêts à « sortir » rapidement un système de diffusion de programmes enregistrés sur disques le jour où une étude de marché leur aura montré que le moment est venu.

fig. 41

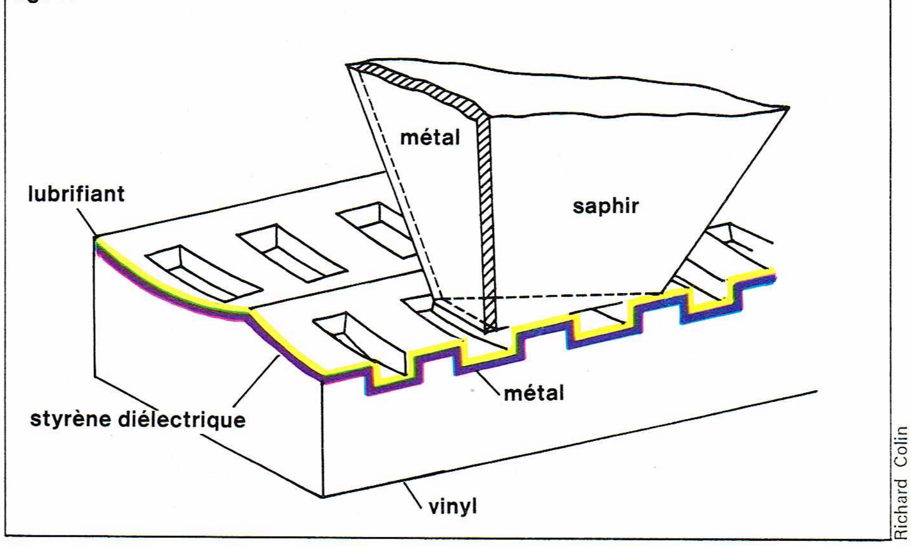

▲ *Figure 41 : aspect et constitution des sillons d'un vidéodisque RCA et de son capteur.*

La télévision industrielle - Autres emplois de la télévision

La télévision dont on parle le plus communément à l'heure actuelle est celle qui est radiodiffusée et que tout un chacun peut regarder chez lui, pourvu, bien sûr, qu'il ait un poste de réception. Il existe cependant d'autres applications de la télévision qui n'utilisent pas la transmission par ondes radio-électriques, soit parce que l'image de la scène observée doit être faite dans un lieu qui n'est pas très éloigné, et alors on utilise une transmission par câble, soit parce que le public auquel l'image est destinée est en nombre suffisamment petit et peu dispersé pour que l'on puisse utiliser une distribution en circuit fermé. Il y a aussi — cela se développe de plus en plus — l'utilisation des amateurs pour la conservation d'images-souvenirs, d'équipements portatifs de prix relativement faible devant le prix des équipements professionnels qui se placent en concurrents du cinéma amateur traditionnel.

L'industrie fait maintenant un usage abondant de la télévision pour de nombreuses applications, de surveillance en particulier. Elle permet, en effet, de regrouper en un seul endroit plusieurs images de ce qui se passe en des endroits parfois très éloignés les uns des autres et autorise ainsi la surveillance d'installations très étendues par une seule personne. Il devient possible aussi de suivre de

▼ *La salle de contrôle d'une usine munie d'écrans de télévision ; ce système regroupe en un seul endroit plusieurs images de ce qui se passe dans des lieux différents et permet la surveillance d'installations très étendues par une seule personne.*

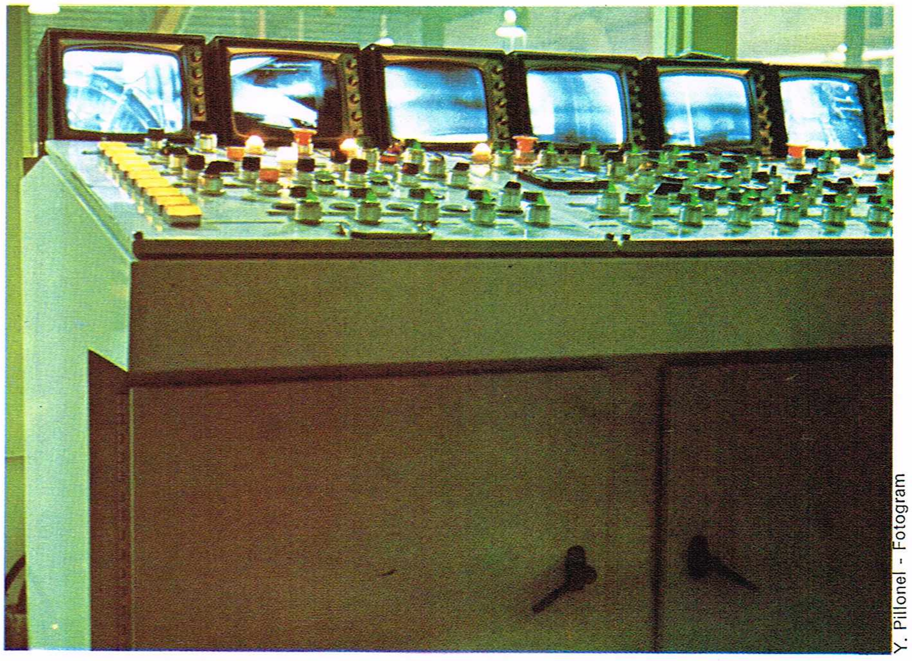

▶ *Une application de la télévision en circuit fermé au domaine médical : une caméra de télévision en couleurs est installée dans un scialitique afin de mieux surveiller une patiente.*

Archives Snark

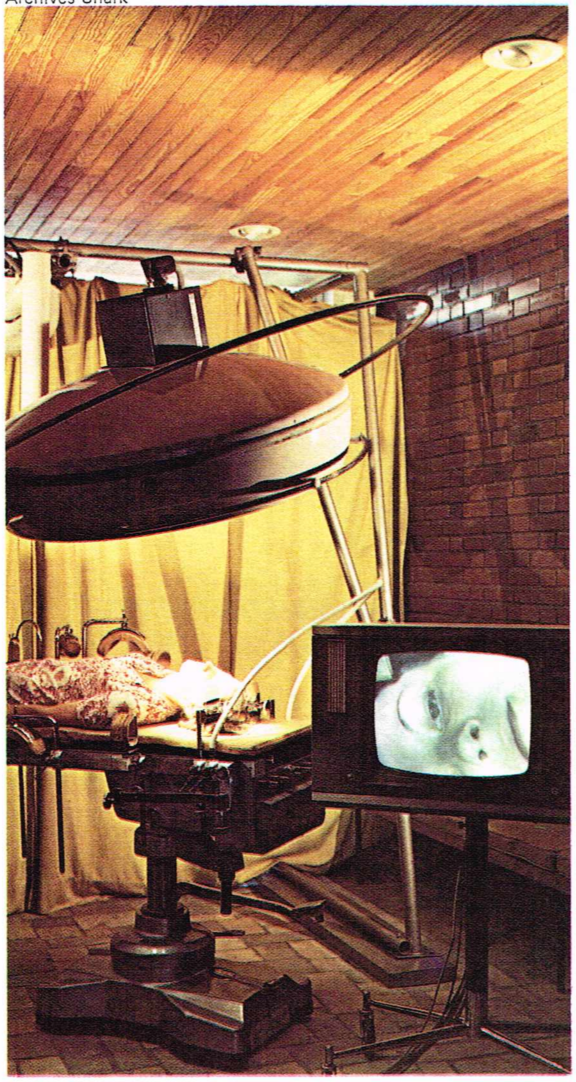

▼ *Un autre exemple de la télévision en circuit fermé : la régie et le studio de télévision du lycée de Marly-le-Roi.*

Archives Snark - Thumson - CSF

manière continue ce qui se passe dans des endroits inaccessibles à un observateur, soit parce que l'espace y est trop exigu, soit parce que les conditions de séjour y sont rédhibitoires. Il faut alors, bien sûr, que la caméra de prise de vues soit convenablement protégée des agressions extérieures par un capotage bien étudié. Ce type de caméra de surveillance est installé à poste fixe et vise de manière fixe un champ déterminé, ou bien elle est placée sur une plate-forme télécommandée dont les mouvements peuvent se faire suivant plusieurs axes ; on peut même l'équiper d'un objectif zoom pour ajuster le champ observé au mieux de ce que l'on veut suivre.

On peut souligner ici que l'utilisation de la télévision a non seulement permis de faire des économies de main-d'œuvre en autorisant une automatisation poussée, mais qu'elle a aussi ouvert la voie à l'application de procédés nouveaux en permettant de suivre leur déroulement et ainsi de les contrôler. Par exemple, on dispose maintenant de tubes de prise de vues tellement sensibles (sans parler des amplificateurs de brillance) que l'on peut voir sur l'écran d'un récepteur de télévision ce qui se passe dans une pièce obscure. C'est le cas du tube Tivicon de Philips, pour des éclairements allant de 0,2 à 100 000 lux.

Beaucoup d'autres applications existent pour la télévision en circuit fermé, qu'elle soit en noir et blanc ou en couleurs : dans le domaine médical ou dans l'enseignement, dans la recherche scientifique...

La télévision étend constamment son domaine d'application en diversifiant aussi bien les images qu'elle reproduit que les moyens de leur transmission. Il se développe même actuellement des jeux qui utilisent le récepteur de télévision comme écran pour suivre les évolutions d'une balle de tennis, par exemple, que se renvoient deux joueurs disposant d'une petite boîte avec un bouton leur permettant de déplacer leur raquette sur l'écran. Le score apparaît en chiffres également sur l'écran entre le moment où un point vient d'être marqué et celui où une nouvelle balle est remise en jeu. Plusieurs de ces types de jeux sont proposés à un ou deux joueurs aussi bien pour les téléviseurs en noir et blanc que pour les récepteurs en couleurs.

La téléinformatique emprunte de plus en plus l'écran des téléviseurs pour faire apparaître les textes de ses messages. Une forme spécialisée d'information naît de cette utilisation. On songe à proposer aux possesseurs de récepteurs de télévision des possibilités d'accès à des « banques de données » de toutes natures : horaires de trains, programmes de manifestations culturelles, nouvelles de l'Agence France-Presse... Sur l'écran du téléviseur apparaît alors un texte formé de caractères recomposés sur place par un boîtier contenant l'électronique nécessaire. La transmission des informations se fait de deux manières principalement : par voie hertzienne (elle arrive en même temps que le signal vidéo habituel, superposée à lui ou sur un canal séparé), ou bien par voie téléphonique. Dans ce dernier cas, on appelle par le téléphone un numéro particulier qui est celui d'un ordinateur, qui envoie en retour sur la ligne un message décodé sur place et qui apparaît sur l'écran en quelques lignes d'une page d'écriture. Le premier procédé fait référence au système ANTIOPE (« Acquisition numérique et télévisualisation d'images organisées en pages d'écritures ») ; le second est le système TIC-TAC mis au point par le CNET (voir le chapitre *Techniques de presse*).

BIBLIOGRAPHIE

AISBERG E., DOURY J.-P., *La télévision en couleurs ?... c'est presque simple !* Société des Éditions Radio. - BESSON R., *Cours élémentaire de télévision moderne*, Éditions Radio. - *Téléviseurs à transistors. Théorie. Pratique*, Éditions Radio. - DARTEVELLE Ch., *les Magnétoscopes. Théorie et Pratique*, Éditions Radio. - *Réglage et Dépannage des téléviseurs couleurs*, Éditions Radio. - GUILLIEN R., *la Télévision en couleurs,* Que sais-je ?, Paris, Presses universitaires de France. - HOLM W. A., *la Télévision en couleurs,* Bibliothèque technique Philips, Paris, Dunod. - PLOTTIN G., FAGOT J., *les Émetteurs de télévision*, collection « Techniques électroniques », Masson. - ENCYCLOPÆDIA UNIVERSALIS, article sur *la Couleur,* P. Fleury, Institut d'optique théorique.

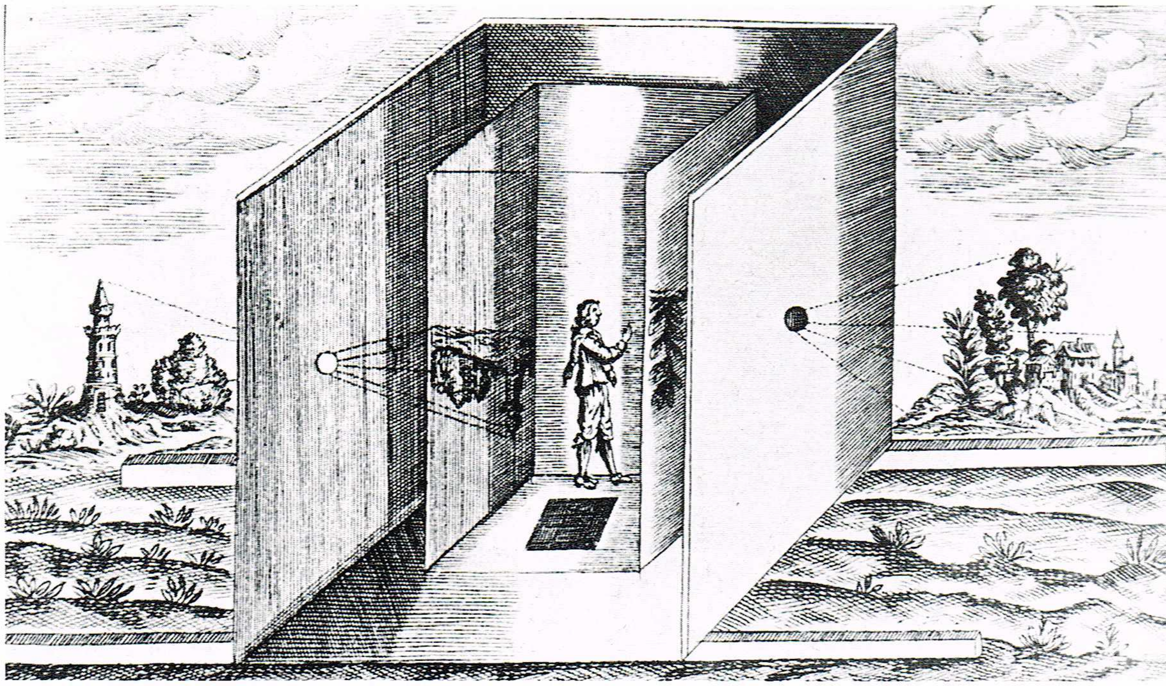

G. Schachmes-Parimage

◀ *Une chambre obscure du milieu du XVIIe siècle, système précurseur de l'appareil photographique; cette chambre mobile pouvait être transportée par deux hommes; l'observateur qui y entrait par une trappe aménagée dans le plancher pouvait dessiner sur la paroi de papier le contour de l'image formée.*

LA PHOTOGRAPHIE

Création et évolution de la photographie

Le désir de fixer les images du monde extérieur telles que les reçoit notre vue est aussi vieux que l'humanité elle-même. Ces images, réalisées depuis des temps immémoriaux par des procédés manuels, ont évolué avec les progrès des civilisations, depuis les peintures préhistoriques primitives découvertes dans les cavernes, jusqu'aux dessins précis et fidèles d'un Ingres ou aux portraits et paysages naturalistes parfaits des siècles récents. Ce développement, accompagné de la création constante de nouvelles méthodes et de nouveaux outils, s'est aussi inspiré nécessairement de l'évolution des sciences telles que l'optique et la chimie. Rien d'étonnant de voir ainsi, au cours des XVIIe et XIXe siècles, de plus en plus de peintres et dessinateurs se servir de chambres obscures, précurseurs des appareils photographiques, pour retenir avec précision les contours des modèles de leurs tableaux, ou de multiplier, au XVIIIe siècle, les tentatives pour fixer plus ou moins automatiquement les images. A cette évolution des moyens techniques s'ajoutent évidemment les besoins créés par les modifications des structures sociales. De plus en plus d'images sont nécessaires pour satisfaire la bourgeoisie, qui demande des portraits et des reproductions moins chers que les portraits peints, réservés jusque-là à l'aristocratie. On voit ainsi se répandre la technique des silhouettes, et on assiste en 1786 à l'invention, par *Gilles-Louis Chrétien*, du physionotrace, dispositif destiné à graver à l'aide d'un pantographe une plaque de cuivre d'après l'image du sujet projetée sur l'écran de la chambre noire.

Wedgwood et *Davy* avaient obtenu des images par des procédés photochimiques fondés sur l'action de la lumière sur le nitrate d'argent; cette première réussite, présentée en 1802 à l'Institution royale de Grande-Bretagne, resta sans conséquence, puisqu'il n'y avait encore aucun moyen pour enlever aux images, après leur formation, leur sensibilité à la lumière, dont la persistance empêchait la conservation. C'est à *Joseph-Nicéphore Niepce*, de Chalon-sur-Saône, que revient le mérite d'avoir réalisé les premières photographies durables, bien que celles-ci ne nous soient pas parvenues. Très intéressé par la lithographie, autre technique servant à multiplier des images, Niepce trouva en effet, en tentant de fixer de différentes façons l'image de la chambre obscure, un vernis sensible à la lumière, constitué de bitume de Judée dissous dans de l'huile de lavande. Devenant insoluble, par l'exposition à la lumière, dans un solvant d'huiles de pétrole et de lavande, une couche du vernis sensible appliquée sur une plaque d'argent poli donnait directement, après exposition dans la chambre obscure et développement dans le solvant, une image négative.

Toutefois, la réalisation du premier procédé photographique de grande diffusion était réservée à un autre inventeur français, *Louis-Jacques Mandé Daguerre*. Associé d'abord à Niepce dans un effort commun de mise au point d'un procédé photographique, Daguerre ne réussit que plus tard, après le décès de Niepce et plus de deux années d'études de chimie et de recherches personnelles, à créer son procédé, la *daguerréotypie*. Présenté par Arago à l'Académie le 7 janvier 1839, ce

G. Schachmes-Parimage

▲ *Nicéphore Niepce (1765-1833) a réalisé les premières photographies durables; malheureusement, aucune d'entre elles ne nous est parvenue.*

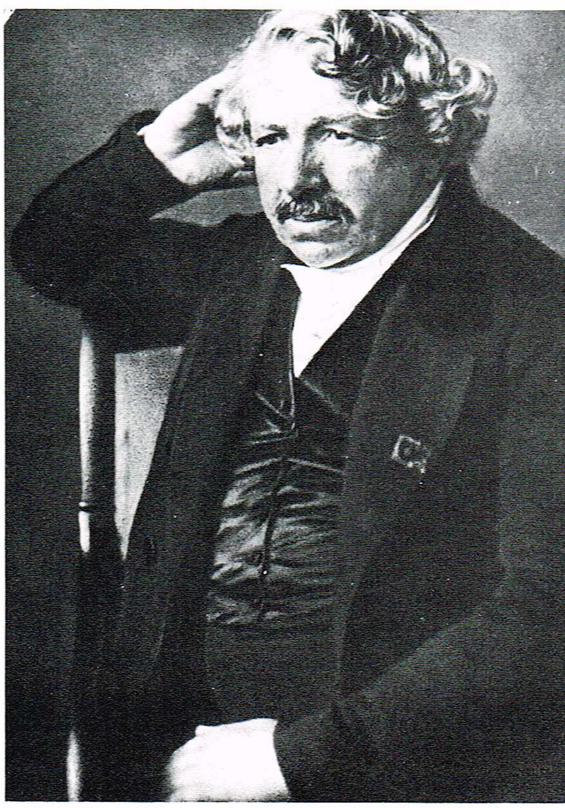

Archives photographiques, Paris

◀ *Louis Daguerre (1787-1851) fut d'abord l'associé de Niepce; quelques années après la mort de celui-ci, il réussit à créer la* **daguerréotypie**, *procédé fondé sur la grande sensibilité des halogénures d'argent à la lumière.*

▶ *L'appareil photographique de Daguerre (Conservatoire national des Arts et Métiers, Paris).*

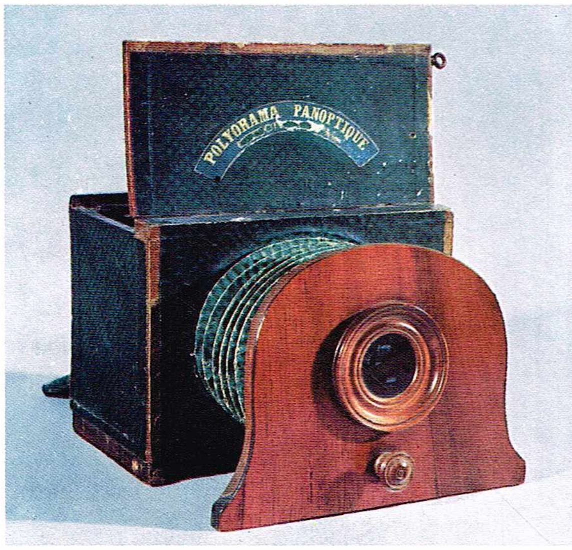

C. Bevilacqua

procédé reste toujours remarquable dans ses principes, pour deux raisons. D'abord, il est fondé sur la grande sensibilité à la lumière des halogénures d'argent, qui est encore aujourd'hui la base des principaux procédés photographiques. Par ailleurs, la daguerréotypie est la première méthode faisant appel à une image latente invisible, précédant l'image définitive qui, elle, résulte d'un apport supplémentaire d'énergie par un traitement ultérieur à la prise de vue, le développement. En effet, la matière photosensible de la daguerréotypie est l'iodure d'argent, obtenu en exposant une plaque argentée et polie à des vapeurs d'iode. Après exposition dans une chambre obscure, qui ne fait encore apparaître aucune image visible, l'image est développée par l'action de vapeurs de mercure sur la plaque impressionnée. Le mercure, se déposant sur l'argent de l'image latente dans les parties exposées à la lumière, fait alors apparaître l'image dans tous ses détails. Elle est rendue stable, enfin, par fixage dans une solution chaude de sel marin ou d'hyposulfite de sodium, solvant des halogénures d'argent découvert par sir John Herschel.

Dès sa présentation, la daguerréotypie connaît un succès énorme : cinq éditions françaises de la brochure de Daguerre sont épuisées dès 1839 ; elles sont suivies par dix éditions allemandes, quatre éditions anglaises, et d'autres en Italie, en Espagne, en Suède et en Amérique du Nord. Après plusieurs perfectionnements augmentant la sensibilité du procédé, et aussi après une amélioration de la qualité des images par un virage à l'or, due à Hippolyte-Louis Fizeau, la daguerréotypie devient la méthode la plus généralement employée pour les portraits et les paysages. Rares sont les familles qui n'ont pas conservé jusqu'aux temps actuels une ou plusieurs de ces images de leurs aïeux. Toutefois, la découverte du principe des méthodes modernes de la photographie eut, en outre, une origine différente.

Expérimentant dès 1833 de la même façon que Niepce et Daguerre, un Anglais, *William Henry Fox Talbot*, développa un procédé comportant deux étapes successives, d'abord un négatif, et ensuite l'image définitive sous forme d'un positif sur papier. Breveté en 1841 sous le nom de *calotype*, le procédé de Talbot employait comme matériau sensible du chlorure d'argent, déposé sur les feuilles de papier par immersions successives dans des solutions de sel marin et de nitrate d'argent. L'image originale étant négative, Talbot rendit son support translucide à l'aide de cire et copia l'image par exposition d'une deuxième feuille sensible, identique à la première et appliquée contre elle. Malgré les recommandations de sir John Herschel, Talbot ne se servit pas d'hyposulfite pour fixer ses images ; il les fixa par immersion dans des solutions soit de sel commun, soit d'iodure de potassium, bien moins efficaces. L'implantation de la daguerréotypie était toutefois si forte que les calotypes, malgré les efforts de plusieurs photographes, même en Amérique, ne réussirent pas à supplanter le procédé de Daguerre.

La daguerréotypie n'a été remplacée que par l'invention d'un autre procédé, donnant des images aussi précises et nettes, mais avec des temps d'exposition beaucoup plus courts : le *collodion humide*, inventé en 1851 par l'Anglais *Frederick Scott Archer*. Presque aussi délicat et compliqué que la daguerréotypie, le collodion humide a trouvé une application générale, non seulement par sa sensibilité plus élevée, mais parce qu'il donnait des négatifs sur verre qui ont permis le tirage d'autant de positifs sur papier que l'on désirait. Les plaques de verre, soigneusement nettoyées, recevaient une couche de solution alcoolique de nitrate de cellulose contenant du bromure ou iodure de potassium, d'ammonium ou de cadmium. Sensibilisées ensuite, après l'évaporation partielle de l'alcool, par immersion dans une solution de nitrate d'argent qui formait, dans la couche, de l'iodure ou du bromure d'argent, elles étaient exposées encore humides, pour pouvoir être développées et fixées avant le séchage de la couche de collodion qui les aurait rendues imperméables. L'utilisation du collodion humide

▼ *A gauche, une photo prise en 1845 selon le* procédé Talbot, *ou* calotype, *montrant les établissements d'imprimerie Fox-Talbot (Arch. Science Museum, Londres). A droite, un daguerréotype ; le procédé de Daguerre fournissait directement une image positive, ne permettant d'obtenir qu'un exemplaire unique.*

Archives Snark

I.G.D.A. - C. Bevilacqua

nécessitait donc toujours une chambre noire sur place, pour la préparation des plaques sensibles et leur traitement immédiat. On ne peut qu'admirer les photographes courageux et enthousiastes qui utilisèrent ce moyen encombrant et incommode dans des circonstances extraordinaires et souvent très difficiles, par exemple en haute montagne, en ballon (Nadar), parmi la faune sauvage des steppes africaines, ou pendant la guerre de Crimée et la guerre civile en Amérique du Nord.

C'est pour une autre raison, aussi, que le collodion humide a remplacé la daguerréotypie. Scott Archer avait imaginé, en effet, de l'utiliser pour l'*obtention directe d'images positives*. Lorsqu'on blanchissait l'image argentique immédiatement après sa formation et qu'on l'appliquait contre un fond noir, elle devenait positive sans avoir les reflets métalliques des daguerréotypies. Montées dans les cadres de celles-ci, ces nouvelles images, appelées ambrotypes, les remplacèrent rapidement. Mais l'application générale de la photographie devait attendre un autre perfectionnement, celui des plaques sèches au gélatino-bromure d'argent.

En 1871, un médecin anglais, le docteur *R. L. Maddox*, décrivait, dans une lettre à l'éditeur du *British Journal of Photography*, ses expériences avec de nouveaux liants des halosels d'argent pour les fixer sur les plaques de verre. Un de ces liants, la *gélatine*, se révélait particulièrement avantageux sur le plan pratique, parce qu'il augmentait considérablement, de façon d'abord inexplicable, la sensibilité. Le remplacement du collodion par la gélatine, repris par de nombreux photographes, a créé une véritable révolution de la photographie. Il libérait non seulement les photographes de la préparation de leurs matériaux sensibles, mais il leur permettait de conserver les plaques, avant et après l'exposition, pendant des durées illimitées, et, ce qui était encore plus important, il demandait des temps d'exposition suffisamment courts pour rendre possibles des prises de vue instantanées, souvent même sans trépied.

Cette évolution du procédé photographique a eu de grandes conséquences : d'abord la création d'un nouveau métier, celui du photographe-portraitiste, dont les studios se multiplient à vue d'œil. Employant de façon judicieuse la lumière du jour, savamment tamisée et dirigée par des jeux de rideaux et de voiles, ces portraitistes créent le style classique des images douces se perdant dans un fond blanc. D'autre part, l'emploi de la photographie pour des buts documentaires ne se limite plus aux explorateurs, aux scientifiques, aux historiens de l'art, mais il se répand pour des usages très divers, appelés du terme générique de « photographies d'amateurs ». Exécutée surtout avec des « chambres touristes », appareils photographiques en bois sur trépied, à plaques de verre de 13 × 18 cm, la photographie primitive d'amateurs se développe rapidement en s'orientant aussi vers les prises de vue de scènes de la vie familiale, baptêmes, fiançailles et mariages, et des images d'enfants. En même temps, les premiers reportages photographiques débutent avec l'illustre série d'instantanés de *Nadar*, pris lors du centième anniversaire du célèbre chimiste Eugène Chevreul.

Les possibilités immenses de la photographie d'amateurs ont été reconnues et développées par *George Eastman*, qui, déjà du temps du collodion humide, était un amateur enthousiaste de la photographie. Ayant débuté par la fabrication de plaques photographiques au gélatino-bromure d'argent sur verre, Eastman s'est bientôt intéressé à la possibilité de remplacer le support lourd et fragile de ses plaques par un matériau léger et flexible. Après de nombreux essais avec des supports pelliculables de papier et de gélatine, il réussit enfin à fabriquer un support convenable de nitrocellulose et invente ainsi le *film photographique*. Or, contrairement à ses espoirs, les photographes de l'époque se montrèrent plus conservateurs qu'il ne l'avait prévu, et le remplacement des plaques par le film ne se fit que très lentement. Pour y remédier, Eastman décida d'atteindre le grand public avec son nouveau produit. Il avait déjà lancé en 1888 son premier appareil pour la photographie d'amateurs : une boîte du type « box-caméra » contenant un rouleau de papier sensible pour la prise de cent négatifs développés et tirés à l'usine; en 1891, il met sur le marché le film d'amateurs en petits rouleaux, protégés par une bande de papier noir, étanches à la lumière pour pouvoir être

Collection Viollet

▲ ***La daguerréotypie a été remplacée par le procédé au collodion humide, qui donnait des négatifs sur plaques de verre; ceux-ci permettaient le tirage d'un nombre illimité de positifs sur papier. Munis de ce matériel encombrant, des photographes tels que Nadar n'hésitaient pas à aller en montagne ou à monter en ballon.***

chargés dans les appareils en plein jour. Suivi du lancement des premiers « petits » appareils pliants, ce nouveau développement suscite un type entièrement nouveau d'amateurs. Obligés jusque-là de développer eux-mêmes leurs négatifs et de tirer leurs épreuves, et, par conséquent, plutôt intéressés par le fonctionnement de la photographie, les amateurs avaient été détournés du véritable objet de leurs efforts, qui aurait dû être l'obtention d'une image. Libérés des manipulations, ils peuvent alors se concentrer sur le choix de leurs sujets et sur leur présentation, leur cadrage, leur éclairage, en un mot se consacrer entièrement à leur but essentiel. Ce changement a révolutionné la photographie d'amateurs et contribué à lui donner une dimension insoupçonnée jusqu'alors.

En Europe, la photographie d'amateurs subit une évolution du même ordre, mais différente sur le plan technique, qui contribue dans une large mesure à la généralisation de ce moyen commode de création d'images. L'importance de la photographie grandit, par ailleurs, grâce à une succession d'améliorations des objectifs et des appareils, et à l'introduction, vers la fin du siècle dernier, du papier « gaslight », portant des couches sensibles semblables à celles des plaques et films, beaucoup plus sensibles et d'une utilisation plus facile que les papiers à noircissement direct au soleil précédemment employés. Le résultat le plus important de cette évolution générale est la création et la croissance rapide de nombreuses industries optiques et chimiques, et d'usines fabriquant des appareils photographiques pour les utilisations les plus diverses. Le gain de netteté dû à l'invention d'ob-

Archives Snark

▲ *Le remplacement des plaques photographiques par des films en petits rouleaux et les premiers appareils pliants ont suscité l'apparition d'un type nouveau de photographes amateurs ; ici, des femmes prenant une photo au début du XXᵉ siècle.*

▼ *Figure 1 : schéma de principe du procédé* Autochrome Lumière *(premier procédé de photo en couleurs accessible au public) ; a, coupe du film Autochrome après l'exposition et le premier développement ; b, coupe après l'inversion restituant les couleurs de l'original par synthèse additive.*

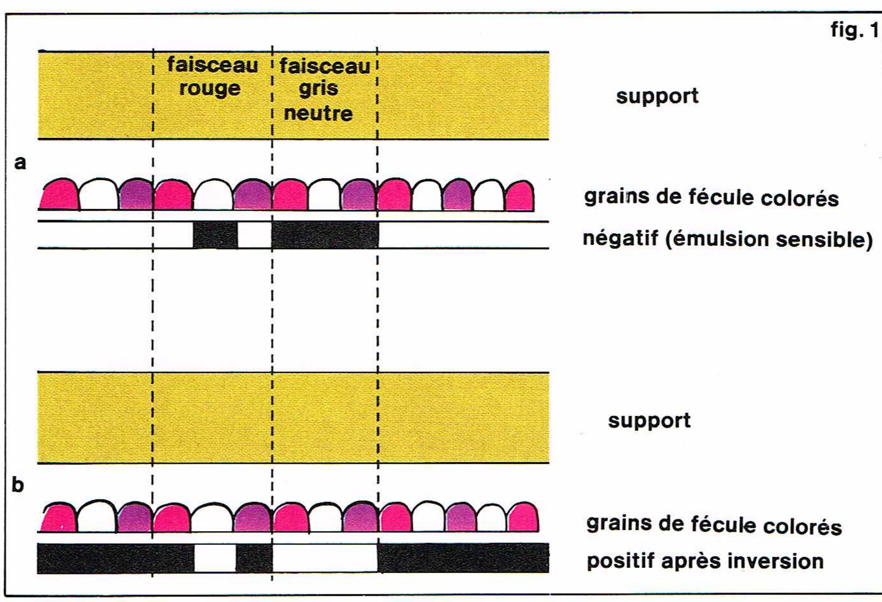

Richard Colin

jectifs optiquement parfaitement corrigés, d'ouvertures relativement grandes et à faible nombre de lentilles, tels que les « Cookes » et « Tessars », contribue à une première diminution des formats, qui, au début du siècle et avant la Première Guerre mondiale, se généralise, en Europe avec le format de 9 × 12 cm, et aux États-Unis avec le format équivalent de 4 × 5 pouces, mais ne libère pas encore entièrement les photographes de l'emploi des trépieds.

Cette évolution vers la diminution des formats s'est évidemment accentuée pendant la Première Guerre mondiale et s'est accélérée après celle-ci, avec la généralisation des appareils pliants pour films en rouleaux, d'abord de 6 × 9 cm et ensuite de la moitié de ce format, le 4 1/2 × 6 cm. Suivie par l'introduction du film de cinéma perforé de 35 mm dans le domaine de la photographie, par l'invention du Leica par un fabricant de microscopes spécialisé dans la fabrication d'optiques et d'appareils de haute précision, la diminution des formats a obligé les fabricants des surfaces sensibles à faire les efforts nécessaires pour diminuer le grain des négatifs et pour augmenter leur netteté et leur pouvoir de résolution. Avec la Seconde Guerre mondiale s'établit alors l'emploi général du *« petit format »* de 24 × 36 mm ; la voie est ainsi ouverte, d'une part, à l'introduction des appareils de haute précision, surtout de fabrication japonaise, et, d'autre part, à l'utilisation générale de la couleur en photographie. A cette évolution s'ajoute enfin la simplification d'emploi, qui a débuté en 1963 par l'apparition des appareils Instamatic-Kodak à chargement instantané, et s'est dirigée ensuite vers une nouvelle diminution du format, celui des appareils de poche employant un film perforé d'une largeur de 16 mm seulement.

Ces derniers développements n'auraient pas été possibles sans l'avènement de la reproduction photographique du monde tel que nous l'apercevons réellement, c'est-à-dire en **couleurs.** Pendant le premier siècle de son existence, la photographie était en effet entièrement caractérisée par l'absence de ce paramètre essentiel de la perception visuelle, lacune déjà sévèrement éprouvée par les premiers inventeurs. Leur déception de ne pas pouvoir fixer dans toutes leurs caractéristiques les vues apparaissant sur les écrans de leurs chambres obscures ne peut pas être mieux exprimée que par deux phrases d'une lettre adressée en 1816 par Nicéphore Niepce à son frère Claude :

« Les expériences que j'ai faites jusqu'ici me portent à croire que mon procédé réussira bien quant à l'effet principal ; mais il faut parvenir à fixer la couleur : c'est là ce qui m'occupe en ce moment et c'est ce qu'il y a de plus difficile. Sans cela la chose n'aurait aucun mérite et il faudrait m'y prendre d'une autre manière. »

L'absence de la couleur en photographie avait eu pour principal effet la naissance d'une expression artistique nouvelle, ne restituant les formes que par le jeu des valeurs monochromes de l'image, comparable en cela à la sculpture. Toutefois, le désir des inventeurs de la reproduction photographique n'en tenait nullement compte : pour eux, la reproduction photographique devait pouvoir saisir tous les aspects physiques des images perçues ; ils ont donc poursuivi leurs efforts pour résoudre ce problème.

Le principe de la trichromie du mécanisme de la vision ayant été établi en 1802 par Thomas Young, il ne restait qu'un pas à franchir pour l'appliquer aussi à la photographie. Voulant démontrer à l'aide de la photographie — qui était alors un moyen scientifique nouveau — la validité de l'hypothèse de trichromie de la vision, *James Clerc Maxwell* inventa en 1860 le principe fondamental de la *photographie additive trichrome,* fondé sur le principe du retour inverse de l'optique et appliqué à présent dans la télévision en couleurs. Indépendamment, une autre solution fut découverte quelques années plus tard, en 1869, par *Louis Ducos du Hauron.* Tandis que la synthèse trichrome de la reproduction photographique de Maxwell est additive, réalisée par la superposition des trois images projetées en lumières fondamentales rouge, verte et bleue, Ducos du Hauron obtient la synthèse par la superposition de trois images en couleurs complémentaires aux fondamentales, donc en cyan (bleu-vert), magenta et jaune. Une proposition très voisine est faite à peu près en même temps par Charles Cros, mais certaines faiblesses de son raisonnement ont laissé à Ducos du Hauron le mérite de l'invention de la *synthèse trichrome soustractive,* qui est encore aujourd'hui le principe fondamental de la photographie et de l'impression en couleurs.

L'industrialisation de la photographie en couleurs n'a eu lieu que bien plus tard. Le premier procédé vraiment accessible au public et régulièrement fabriqué fut l'*Autochrome* des frères *Auguste* et *Louis Lumière,* mis sur le marché en 1903 (*fig.* 1). Cette réalisation, extraordinaire pour l'époque, était fondée sur la synthèse additive, obtenue visuellement par la juxtaposition de minuscules filtres rouges, verts et bleus, couvrant toute l'image, et superposés à un positif obtenu par exposition à travers ces mêmes filtres et développement par inversion. Inventé une dizaine d'années auparavant par l'Irlandais John Joly, ce procédé ne put trouver d'application générale que grâce aux éminents travaux et recherches chimiques des frères Lumière, et les plaques et films Autochromes furent fabriqués par eux en France et, en Allemagne, sous leur licence, par Agfa. Le procédé Autochrome fut largement utilisé, surtout dans les reportages géographiques, mais aussi par un bon nombre d'amateurs qui tiraient parti de la facilité de son emploi. Cependant, l'application générale de la couleur en photographie ne devint possible que dans une autre voie.

Ducos du Hauron avait proposé, en effet, de réaliser des photographies en couleurs de synthèse soustractive en superposant les trois couches sensibles directement sur un seul support. Il lui manquait toutefois, à cette époque, la plupart des éléments de base nécessaires à la réalisation de cette idée. Elle fut reprise avant la Première Guerre mondiale par des chimistes allemands qui tentèrent d'abord d'utiliser pour la synthèse trichrome les composés chimiques colorés, formés au cours du développement par l'oxydation de certains agents développateurs. Cette solution, expérimentée par B. Homolka et R. Fischer dès 1907, ne permit pas, toutefois, la réalisation de procédés pratiques; il a fallu, pour cela, que les développateurs autocouplants soient remplacés par des dérivés de la para-phénylène-diamine, capables de réagir au cours du développement avec des coupleurs, composés complémentaires formant les colorants requis. (Le lecteur trouvera dans les chapitres suivants l'explication plus détaillée de certaines notions et de termes techniques, mentionnés seulement très succinctement dans ce résumé historique.)

Un deuxième problème restait à résoudre : empêcher la diffusion des colorants ainsi formés d'une couche dans l'autre. Les deux mécanismes nécessaires pour donner ces résultats ont été inventés en Allemagne par *Rudolph Fischer*, le premier concernant la synthèse des colorants appropriés, juste avant le début des hostilités de 1914, et le deuxième concernant l'absence de la diffusion des colorants vers 1930 seulement. Aux États-Unis, Léo Godowsky et Léopold Mannes ont imaginé une tout autre solution pour empêcher cette diffusion : former les trois colorants de la synthèse par le même mécanisme de copulation, mais séparément, l'un après l'autre dans sa couche respective, dans trois bains distincts de révélateurs. On voit ainsi paraître en 1935 sur le marché, simultanément, le procédé allemand *Agfacolor Nouveau* à coupleurs incorporés suivant les brevets de Fischer, et le procédé américain *Kodachrome* aux coupleurs introduits dans les bains de révélateurs, donnant tous deux directement des diapositifs en couleurs, d'une qualité jusqu'alors jamais atteinte. Cela ouvre la voie à une série de développements et d'inventions ultérieurs qui ont conduit à la généralisation de la couleur en photographie.

Une brillante idée de deux autres inventeurs américains, Wesley Turnell Hanson et Paul Vittum, a donné la possibilité d'incorporer directement les procédés de correction « par masques » des couleurs reproduites dans les couches superposées des films négatifs de prise de vue. Ces corrections, indispensables pour la reproduction satisfaisante des couleurs naturelles, malgré certaines lacunes inévitables des colorants de la synthèse et l'impossibilité pratique d'appliquer rigoureusement le principe de Maxwell, avaient jusque-là été appliquées dans les procédés d'imprimerie au prix de manipulations délicates et complexes. Leur incorporation directe dans les films par l'emploi de composés chimiques nouveaux, les coupleurs colorés de Hanson et Vittum, permet l'emploi courant de systèmes négatifs-positifs en couleurs, conformes au principe fondamental découvert par Fox Talbot. D'autres méthodes de correction, fondées sur des principes du même ordre découverts par la suite, ont permis d'améliorer encore la fidélité de la reproduction ainsi que la netteté des images et la qualité du grain, et ont contribué, elles aussi, à la généralisation de la photographie en couleurs pour les amateurs et les photographes professionnels, dans la reproduction imprimée et dans le cinéma.

L'excellente reproduction des couleurs, la diminution des formats et la facilité du chargement des appareils n'auraient pas suffi, toutefois, à donner à la photographie le rôle énorme qu'elle a dans la vie moderne. Il fallait encore la libérer de la servitude qu'a constituée pendant plus d'un siècle le choix de la pose correcte : combien de vues, en effet, n'avaient-elles pas été ratées par une sur- ou une sous-exposition ! Pour que la photographie atteignît son plein développement, il était capital de simplifier l'obtention d'épreuves toujours satisfaisantes, quelles que soient les conditions de prise de vue ou d'éclairement du sujet.

Ce problème a été entièrement résolu, de deux manières. Tout d'abord, dans les appareils non automatiques, comme les films négatifs présentent une très grande latitude de pose toutes les vues sont tirables; au cours du tirage industriel, des tireuses très perfectionnées règlent automatiquement la bonne exposition dans le seul dessein d'obtenir des épreuves satisfaisantes. L'autre solution de ce problème est constituée par la commande automatique, à la prise de vue, des vitesses des obturateurs et des ouvertures des diaphragmes par des photorésistances ultrasensibles au sulfure de cadmium, qui donnent à chaque vue, dès le départ, la pose correcte. Cette deuxième solution est importante surtout pour les appareils à vues instantanées du type *Polaroïd*, où le tirage s'effectue automatiquement par un transfert de composés chimiques entre les couches du négatif et celles du positif, sans possibilité de correction. Il est évident, d'autre part, que les appareils à pose automatique présentent aussi des avantages pour tous les autres types de films, ceux qui donnent des négatifs ou des diapositifs classiques. Le photographe — qu'il soit professionnel ou amateur — est ainsi entièrement dégagé du souci de l'exposition correcte, et il peut se concentrer entièrement sur le caractère intrinsèque de la vue qu'il compte obtenir, c'est-à-dire se consacrer au vrai but de la photographie sans aucune arrière-pensée quant à l'exécution de son action.

En conclusion de ce court résumé historique, nous voyons que la photographie a atteint à présent un niveau de simplicité et d'automatisme lié à un tel perfectionnement des résultats qu'elle constitue un des éléments de la vie quotidienne de l'humanité tout entière.

▼ A gauche, les frères Louis et Auguste Lumière qui mirent au point le procédé Autochrome permettant la restitution de la couleur en photographie; leur technique fut commercialisée dès 1903. A droite, une photographie en couleurs réalisée par les frères Lumière en 1910.

Archivio Turconi

F.S.N.

S. Prato

G. Peress - Magnum

L'appareil photographique se présente sous des formes bien différentes, depuis les premières chambres obscures en bois, encore utilisées actuellement (à droite, avec les photographes de rue à Chypre) aux petits chefs-d'œuvre de miniaturisation, de précision et d'automatisme (à gauche).

Techniques de la photographie

De par son principe, la photographie est fondée sur la combinaison d'éléments optiques, mécaniques et chimiques. D'une part, l'image est créée à l'aide d'objectifs dans des appareils qui ont évolué depuis les premières chambres obscures en bois, en prenant les formes les plus diverses, jusqu'aux chefs-d'œuvre de précision et d'automatisme actuels. D'autre part, l'image formée dans les appareils est enregistrée par une succession de réactions photochimiques et chimiques, partant de la formation de l'image latente et comprenant le développement ainsi que la fixation définitive. L'obtention d'épreuves fait ensuite intervenir des mécanismes du même ordre, sous d'autres formes : lors de l'exposition du papier d'après les négatifs ou les diapositifs classiques, dans des tireuses au moins aussi complexes que les appareils, et lors du traitement continu sur des machines à développer ou pour les vues instantanées du type *Polaroïd* à l'intérieur même des appareils.

Appareillages et équipements

Appareils de prise de vue

Les éléments de base de tous les appareils photographiques sont la chambre obscure, l'objectif avec son diaphragme, l'obturateur et le logement du film photosensible. Il existe de si nombreux modèles qu'il n'est pas possible de les ranger dans une classification exacte, d'autant plus que tous les appareils, même les plus simples, donnent à présent d'excellentes images. On peut néanmoins différencier les appareils suivant leurs buts et le degré de leurs perfectionnements et de leur complexité, d'une part, et, d'autre part, suivant leurs formats.

Les appareils les plus simples, destinés aux enfants et aux amateurs les moins exigeants, ne comportent que les éléments de base, mais ils sont en général solides et précis, puisque leurs corps et objectifs sont en matière plastique moulée, à mise au point fixe; ils ont, dans le cas le plus simple, une seule vitesse d'obturation. A l'autre extrémité de l'échelle, on trouve les appareils complexes et de haute précision, de construction métallique évoluée. Ils sont équipés, en général, de viseurs à prismes et à miroir escamotable, permettant la mise au point et le cadrage exacts par la surveillance du champ de vision jusqu'à l'instant même de la pose. Ils contiennent, en même temps que les micromécanismes classiques, des microcircuits électroniques et des mémoires agissant sur l'exposition automatique ou semi-automatique. Pour l'emploi de lampes éclair, les diaphragmes s'ajustent souvent automatiquement en fonction de la distance; ainsi, on a toujours l'assurance d'une exposition suffisante et correcte, en particulier pour les sujets rapprochés qui constituent la plupart des vues. Dans les appareils non automatiques, la pose correcte est obtenue grâce à des indicateurs électroniques, commandés par des photorésistances comme les régulateurs de pose automatique ; ils montrent quel est le réglage approprié de l'exposition par une aiguille logée dans le viseur, au bord du champ photographié.

En ce qui concerne les *formats*, les appareils sont répartis suivant le mode de chargement du film. Pour les films en cartouches, utilisés dans les appareils évolués et complexes, le format 24 × 36 mm constitue la norme, tandis que les formats des appareils à chargement instantané sont le 26 × 26 mm, désigné par le code 126, et le format 110 des appareils de poche, de 13 × 17 mm. On peut ainsi distinguer les appareils relativement lourds et volumineux de la première de ces catégories des appareils 24 × 36 « compacts », sans viseur à prisme et, par conséquent, à mise au point au télémètre ou au jugé, mais ayant l'avantage du poids réduit et d'une meilleure maniabilité, par exemple dans les équipements des ascensions en montagne. La même distinction existe dans les deux formats des grandes séries de vues d'amateurs : les appareils pour cartouches 126 ont des dimensions se situant dans la moyenne des caméras 24 × 36 mm, et les appareils dits « de poche » pour les cartouches 110, de taille et de poids réduits, s'accommodent d'une place minime pour accompagner partout leur propriétaire. A l'autre bout de l'échelle des formats, on trouve enfin les appareils des photographes professionnels, qui ont des formats supérieurs au 24 × 36 mm.

Pour donner à ces professionnels les mêmes facilités que celles que trouvent les bons amateurs dans les appareils 24 × 36 mm, les perfectionnements de toutes sortes incorporés dans ceux-ci sont à présent appliqués aux grandes chambres professionnelles de reportage et de studio, aux formats 9 × 12 cm, 10,2 × 12,7 cm (4 × 5 pouces) et 13 × 18 cm. Il n'y a donc pas de limite exacte entre les appareils professionnels et ceux des amateurs évolués, un très grand nombre de ceux-ci se servant d'ailleurs des mêmes appareils que les professionnels.

Les objectifs interchangeables constituent un autre élément important. En effet, la distance focale normale des objectifs des appareils photographiques est de l'ordre de la diagonale du rectangle ou carré formant l'image. Or, pour éviter des déformations gênantes, surtout dans les portraits, et pour faciliter des prises de vue de sujets distants, on est obligé d'employer des objectifs de distances focales beaucoup plus grandes. D'autre part, il faut, pour la réalisation de vues de paysages et d'architecture, tant extérieures qu'intérieures, des objectifs dits de grand angle, de distances focales bien plus courtes que la normale. Les appareils perfectionnés sont donc équipés de manière à permettre le changement facile de ces divers objectifs, et certains — en particulier ceux de quelques marques japonaises — en comportent

S. Prato

S. Prato

S. Prato

une gamme impressionnante. D'autres appareils, surtout dans les séries moyennes, n'ont qu'un objectif de distance focale normale. Il y a enfin des appareils d'amateurs, très simples, du format de poche, équipés de deux optiques de distances focales différentes, incorporées dans le boîtier et interchangeables par simple déplacement d'un levier : ils permettent ainsi la prise de vue soit de groupes ou de paysages, soit de gros plans et de sujets éloignés. D'autres appareils de poche sont équipés d'objectifs zoom, de distance focale variable.

Appareils à vues instantanées

Les appareils photographiques peuvent être classés d'une autre manière encore, suivant le procédé d'obtention de l'image. Dans tous les appareils classiques, qui constituent la majorité largement prédominante, le film — qu'il soit destiné à donner des négatifs ou des diapositifs — est seulement exposé. Son développement et son tirage ont lieu ensuite en dehors de l'appareil, dans des laboratoires industriels ou artisanaux. Dans les appareils à vues instantanées, en revanche, le traitement et le tirage par transfert chimique sont effectués à l'intérieur de l'appareil. Celui-ci contient alors, non seulement la chambre photographique d'exposition, mais aussi le dispositif de traitement et de tirage. Cela implique, aussi bien pour l'appareil que pour les surfaces sensibles, un équipement spécifique. D'abord, il est nécessaire que l'appareil comporte les logements pouvant contenir, à l'abri de la lumière, les matériaux négatifs et ceux donnant les images positives. Ensuite, il faut des paires de rouleaux très bien alignés pour écraser les sachets contenant, pour chaque vue, la quantité juste nécessaire des produits chimiques du traitement joints au film négatif vierge, véritables petits laminoirs destinés aussi à effectuer la mise en contact des négatifs et des feuilles recevant l'image positive. Ces appareils comportent enfin une ouverture pour la sortie séparée de chaque vue pendant son traitement, immédiatement après son exposition, sans que les films vierges contenus dans l'appareil soient voilés.

L'introduction de l'ensemble de ces mécanismes dans les appareils a graduellement conduit, en même temps que l'évolution de micro-éléments électriques et électroniques, au développement de types entièrement nouveaux d'appareils qui ne ressemblent plus du tout aux chambres obscures, dont ils sont pourtant les héritiers. Cette évolution est due également au principe même de l'obtention des épreuves : résultant d'un transfert, au cours du traitement, de produits chimiques entre les couches sensibles négatives et les couches formant l'image positive — en quelque sorte un tirage chimique par contact —, les épreuves ont exactement la même dimension que le film négatif. Pour donner des images d'une dimension suffisante, les appareils ont donc, au moins dans le sens parallèle au plan de l'image, une taille assez respectable. D'autre part, ils sont nécessairement équipés d'une optique de distance focale correspondante. Pour éviter un encombrement excessif, défavorable par rapport aux appareils classiques de plus en plus petits, de nouveaux chemins optiques complexes à miroirs ont donc été créés, à l'origine, dans l'appareil *Polaroïd SX-70*, diminuant au moins une des dimensions des appareils (*fig.* 2 et 3). Ceux-ci comportent par ailleurs des micromoteurs, qui se chargent, après chaque prise de vue, de l'éjection des épreuves, et des dispositifs d'exposition automatique avec et sans lampes éclair. Cette nouvelle génération d'appareils semble être à l'origine d'une nouvelle époque de la photographie, même si, dans l'ensemble, le nombre global des épreuves instantanées reste très inférieur à celui des épreuves classiques.

Agrandisseurs et tireuses

Les négatifs étant en général trop petits pour donner directement des épreuves au tirage par contact, on les expose dans des agrandisseurs. Les agrandisseurs ne sont rien d'autre que des appareils de projection très précis, équipés pour donner des épreuves nettes et uniformément exposées sur toute leur surface. Ils comportent des boîtes à lumière, soit triples pour l'exposition simultanée en couleurs fondamentales rouge, vert et bleu, soit simples pour l'exposition en lumière blanche et le réglage

◄ Trois photos d'un même sujet réalisées avec des objectifs de différentes distances focales : en haut, objectif de 80 mm, au milieu, objectif de 120 mm et, en bas, objectif de 250 mm.

▶ *Figure 2 : coupe de l'appareil* Polaroïd SX-70 *à développement instantané ; a, position de vision ;* b*, position de prise de vue ; cet appareil comporte un système optique particulier : le cadrage et la mise au point sont effectués à travers l'objectif de prise de vue* (a)*, et après escamotage instantané du miroir recouvrant les couches sensibles, la photo est prise par un chemin optique simple* (b).

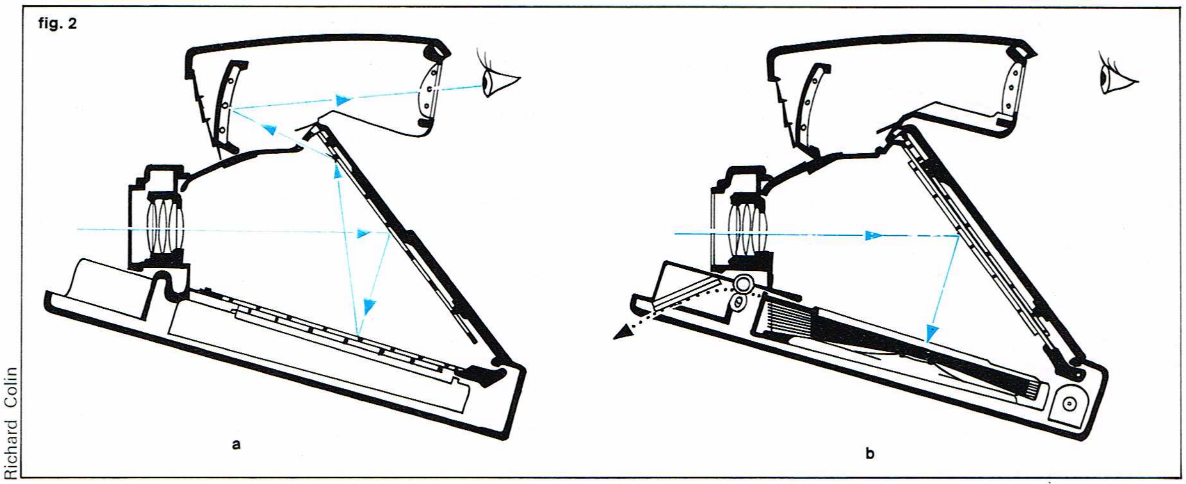

▶ *Figure 3 : coupes des appareils* Kodak EK4 *et* EK6 *à développement instantané. Ces appareils ont un chemin optique à deux miroirs, indépendant de celui du viseur ; ils comportent un dispositif électronique d'exposition automatique.*

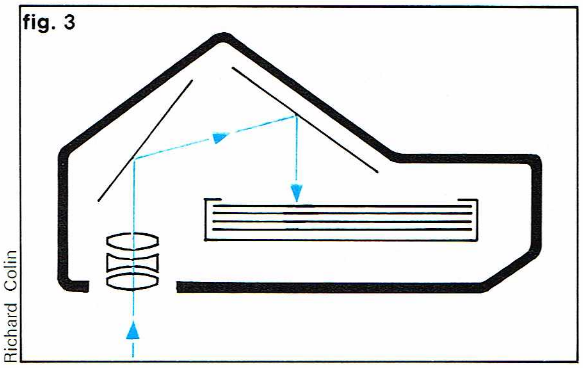

▼ *Figure 4 : schéma de principe de la* tireuse automatique Kodak 2610 *pour le tirage d'épreuves d'amateurs ; dans une première position, le négatif est d'abord analysé, et les données recueillies sont traitées en moins d'une seconde dans un ordinateur, déterminant alors automatiquement les conditions optimales de l'exposition effectuée dans la deuxième position.*

du bon équilibre chromatique par des filtres de correction de couleurs, les « filtres CC ». Leurs objectifs, équipés de diaphragmes, sont conçus spécialement pour les rapports relativement faibles entre les distances du négatif à l'objectif, et de l'objectif à l'épreuve. La mise au point est souvent automatique à l'aide d'une came qui maintient la netteté indépendamment du rapport de grossissement.

L'exposition individuelle de chaque épreuve ne peut pas convenir, toutefois, au tirage des nombres astronomiques d'images positives exposées dans les stations de tirage industriel des épreuves d'amateurs. Ce travail est exécuté sur des tireuses semi-automatiques ou automatiques, autre réalisation extraordinaire employant, encore

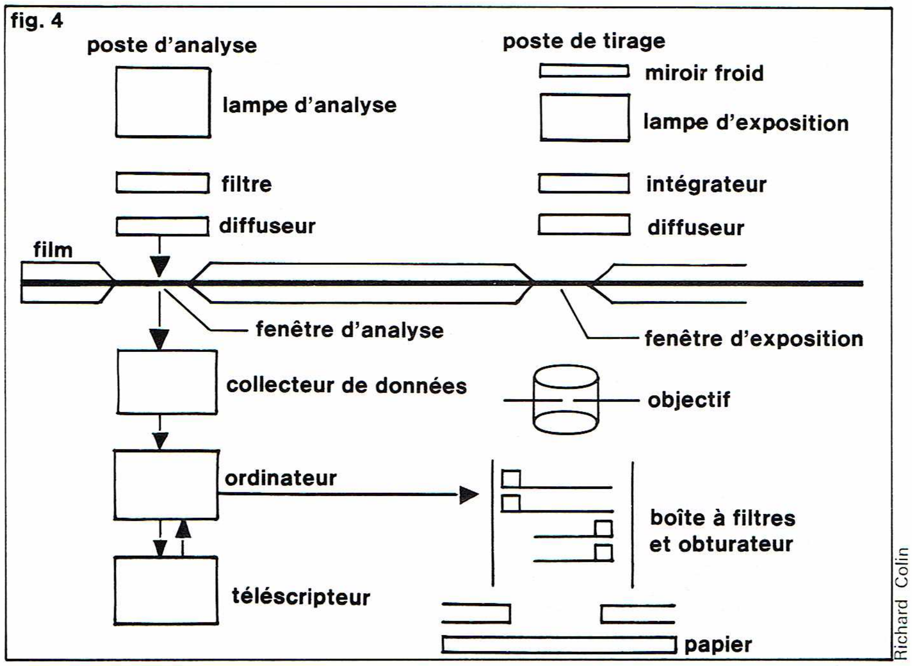

plus que les appareils, tous les moyens ultramodernes de mémoire et de micro-électronique. Les tireuses — sorte d'agrandisseurs automatisés à rapport de grossissement fixe suivant l'objectif choisi — exposent l'une après l'autre, à cadence élevée, les épreuves sur du papier en rouleaux, d'après des négatifs ou des diapositifs.

Pour accélérer la production des épreuves, les bandes de douze ou vingt vues négatives de chaque amateur, portant des numéros poinçonnés pour pouvoir être retrouvées après le tirage, sont en général montées en rouleaux continus.

Dans les tireuses semi-automatiques, une opératrice juge dans chaque vue les luminosités relatives des sujets principaux et des fonds, ainsi que le rapport des aires occupées par chacun de ces deux éléments. Dans la majorité des cas, elle ne modifie pas la réaction de la tireuse et déclenche seulement la pose automatique normale. Toutefois, dans les cas où le sujet, très différent du fond, risquerait d'être trop clair ou trop sombre sur l'épreuve à la suite d'une exposition normale, l'opératrice modifie la pose en la rallongeant ou en la raccourcissant de la quantité nécessaire, par un simple déclenchement de touches autres que la touche normale.

Dans les tireuses automatiques, ce jugement est effectué électroniquement par la machine, par exemple, dans les tireuses couleur *Kodak 2610*, par 109 évaluations du négatif, exploré suivant un réseau de lignes horizontales tel que celui d'une image de télévision (*fig.* 4). Chaque négatif est ainsi vérifié en moins d'une seconde pour la valeur du sujet par rapport au fond, pour sa saturation et sa densité de couleur, pour son niveau de voile, et pour 105 autres paramètres, tous importants pour le choix correct de l'exposition optimale. Il est évident que ce tirage automatique présente non seulement l'avantage de l'extrême rapidité inhérente aux réactions électroniques, mais qu'il accroît considérablement la latitude de pose des prises de vues ; il est constant, reproductible, et n'est pas soumis aux facteurs de la fatigue humaine. Les épreuves et les retirages sont alors toujours de la même qualité, ce qui ne peut pas être entièrement assuré lors de l'opération non automatique.

Machines à développer

Le développement des films et papiers photographiques est en général effectué mécaniquement, en continu, sur des machines. Celles-ci sont le plus souvent de deux types : le premier est conçu pour le transport continu soit d'une longue bande de film, obtenue par le collage des courtes bandes des cartouches individuelles l'une après l'autre, soit des bandes de papier exposées dans les tireuses. Les machines à développer de l'autre type transportent chacune de courtes bandes négatives, extraites de chaque cartouche, ou les feuilles séparées de films semi-rigides professionnels, par un système de rouleaux disposés en légers quinconces. Dans ces deux types de machines, les films parcourent un chemin continu à travers une succession de cuves contenant toutes les solutions composant l'ensemble du traitement. On réalise ainsi des productions qui ne seraient

pas aussi importantes par le traitement manuel classique en cuvette, ou même avec les divers dispositifs ou machines à cuves cylindriques, à tambours ou autres mécanismes simples, plutôt destinés au développement de très grandes épreuves.

Équipements divers

La pratique de la photographie fait encore appel à un grand nombre de dispositifs et d'accessoires, tels que des trépieds, des appareils d'éclairage, divers équipements de laboratoire et bien d'autres. Ils sont si nombreux qu'il n'est pas possible d'en donner ici une énumération ou une description.

Les matériaux sensibles du procédé classique

L'enregistrement de l'image à la prise de vue et sa fixation définitive lors de la formation des épreuves sont effectués, nous l'avons vu, par le procédé classique de la photographie, fondé sur la sensibilité à la lumière des halogénures d'argent. Les couches sensibles des films et papiers contiennent donc deux éléments essentiels : le matériau photosensible constitué par les cristaux d'halogénures d'argent maintenus en place par la gélatine, leur liant et les composés chimiques destinés à former pendant le développement les images composées des couleurs élémentaires de la synthèse trichrome. (Voir aussi la description des émulsions sensibles pour la photographie dans le volume *Chimie*, page 269.)

Les cristaux photosensibles

Les **halogénures d'argent** généralement employés sont des bromo-iodures dans les films de prise de vues et les papiers très sensibles, et des chlorobromures dans la plupart des autres papiers et aussi dans des films pour copies positives ou usages particuliers, exigeant un contraste élevé et une netteté exceptionnelle. La sensibilité intrinsèque des cristaux d'halogénures d'argent — de structure cubique à faces centrées — est considérablement accrue par la présence d'impuretés, constituées par l'inclusion dans le réseau cristallin d'atomes de soufre, d'argent ou d'or qui jouent un rôle comparable à celui des impuretés contenues dans les cristaux des semi-conducteurs, employés en micro-électronique. En ce qui concerne leurs tailles, les cristaux des émulsions photographiques sont très petits, de diamètres allant de quelques centièmes à un ou deux dixièmes de micron, contrairement à ceux employés pour certains usages particuliers, par exemple en radiographie, qui sont supérieurs au micron.

Notons qu'en photographie, le terme « émulsion » a une signification qui diffère de l'usage habituel ; on appelle ainsi, pour des raisons historiques, la dispersion des microcristaux d'halogénures d'argent dans la gélatine, et on emploie le terme « dispersion » pour les microgouttelettes de solutions de coupleurs, suspendues dans une solution de gélatine, qui devrait en principe être appelée émulsion.

La sensibilité des cristaux d'halogénures d'argent des émulsions photographiques dépend d'abord, suivant la loi de Grotthus-Draper, de leur absorption spectrale. Cette loi précise, en effet, que les réactions photochimiques ne peuvent avoir lieu qu'après absorption des radiations dont elles résultent. Cette absorption d'énergie modifie les équilibres ioniques et électroniques des cristaux et agit ainsi sur leur photosensibilité. Celle-ci dépend donc en deuxième lieu de leur conductivité électrique, fonction, d'une part, des propriétés atomiques et ioniques de leurs constituants et, d'autre part, de leur construction cristalline. La conductivité est, suivant la nature des porteurs de charges déplacés, soit ionique, soit électronique. Dans le premier cas, elle résulte du déplacement d'ions argent interstitiels, dans le deuxième, du seul déplacement des électrons libérés par le rayonnement incident. Ceux-ci, au repos lorsqu'ils se trouvent à l'abri d'une irradiation par un rayonnement bleu ou ultraviolet, acquièrent, lors de l'exposition à ces radiations, l'énergie nécessaire pour quitter la bande de valence et atteindre la bande de conductivité, ce qui leur permet de se déplacer librement et à très grande vitesse dans le cristal, comme s'il était un conducteur métallique. Le mouvement ionique, au contraire, résultant d'un déplacement de proche en proche d'ions argent, beaucoup plus grands que les électrons, est plus lent et dépend dans une large mesure de la température, contrairement au mouvement des électrons qui en est pratiquement indépendant. Ces bases intrinsèques de la photosensibilité des halogénures d'argent déterminent — nous allons le voir — la formation de l'image latente pendant l'exposition.

Comme la photoconductivité des halogénures d'argent n'est déclenchée que par des rayonnements d'une bande étroite de longueurs d'onde bleues et ultraviolettes, il est nécessaire d'étendre la sensibilité spectrale des couches photographiques à l'ensemble du domaine visible, pour leur donner une sensibilité aux couleurs identique à celle de la vision humaine. On y parvient par l'adjonction aux cristaux d'halogénures d'argent de colorants sensibilisateurs qui absorbent les radiations vertes, jaunes et rouges du spectre visible, c'est-à-dire toutes les radiations de longueurs d'onde plus grandes que celles absorbées par les halogénures d'argent. Fixés à la surface des cristaux, les colorants leur transmettent par résonance l'énergie provenant d'une exposition à ces rayonnements de grandes longueurs d'onde. Les colorants sensibilisateurs, composés chimiques caractérisés par de longues chaînes conjuguées d'ions carbone reliés alternativement par des liaisons simples et doubles, appartiennent soit aux systèmes de l'ion amidinium ou de l'ion carboxyle, soit au système amidique. On emploie le plus souvent des thiocarbocyanines, des mérocyanines et des composés apparentés à cette dernière classe de colorants.

En ce qui concerne le mécanisme de la sensibilisation spectrale, c'est-à-dire le transfert au cristal d'halogénure d'argent de l'énergie des grandes longueurs d'onde absorbée par le colorant, deux théories différentes peuvent être envisagées. Suivant la première, des électrons du colorant, excités par l'énergie absorbée, pourraient acquérir un niveau d'énergie suffisant pour atteindre la bande de conductivité et ainsi la mobilité nécessaire pour passer dans le réseau du cristal. Dans celui-ci, ils pourraient alors agir comme des photoélectrons libérés directement par un rayonnement d'ondes courtes, bleu ou ultraviolet. Toutefois, suivant une autre théorie, l'énergie de grandes longueurs d'onde captée par le colorant serait directement transférée au cristal pour y agir sur les niveaux énergétiques des électrons comme l'énergie absorbée par le cristal lui-même.

Le liant de la couche

La **gélatine** est le liant des couches sensibles. Produit animal, elle n'a pas encore pu être remplacée par un produit synthétique. En effet, aucun de ses substituts ne rassemble toutes ses propriétés, si favorables au procédé photographique classique. D'abord, la gélatine joue au cours de la fabrication des émulsions photographiques le rôle de colloïde protecteur : elle enrobe les cristaux pendant leur croissance et les maintient ainsi dans les dimensions microscopiques requises, tout en empêchant leur coalescence. Contenant des composés sulfurés dont la présence pendant la précipitation des cristaux d'halogénures d'argent conduit à l'inclusion dans leur réseau d'ions soufre, la gélatine augmente indirectement, mais de façon considérable, la sensibilité des couches. Elle est capable, d'autre part, de donner dans les produits terminés des couches très minces, uniformes et à surfaces sans défauts, ayant à l'état sec un indice de réfraction très proche de celui des supports des films en esters de cellulose. Immergées dans l'eau, ces couches se gonflent et se montrent alors très perméables aux solutions aqueuses, permettant ainsi le développement et les autres traitements en milieu aqueux. Enfin, après la formation des images, les couches de gélatine, de surface uniforme et brillante, semi-mate à grain ou mate, sont entièrement stables en conservation illimitée.

Les gélatines photographiques sont préparées à partir d'os de bovins ou de peaux de porcs. Dissoute dans l'eau chaude, la gélatine forme une solution colloïdale qu'un abaissement de la température en dessous de 35 °C fait prendre en gelée. Chimiquement, la gélatine est une protéine, à molécules en longues chaînes composées d'assemblages d'acides aminés qui définissent son caractère amphotère : elle change d'ionisation suivant

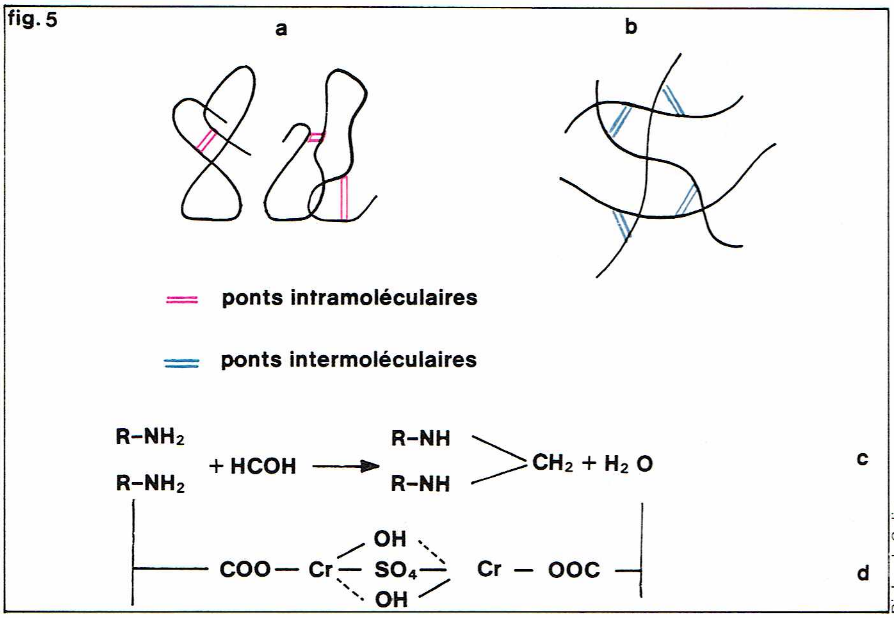

Richard Colin

▲ *Figure 5 : le tannage de la gélatine des couches photographiques s'effectue soit à l'intérieur de molécules de gélatine par des* ponts intramoléculaires (a), *soit entre les molécules par des* ponts intermoléculaires (b) *; suivant le type de tannant, ces pontages sont réalisés soit par des fonctions méthyléniques* (c), *soit par des ions métalliques, par exemple sous forme de ponts de chrome* (d).

le pH du milieu et réagit ainsi en milieu acide par ses fonctions amine, mais en milieu alcalin par ses fonctions carboxyliques. Ce comportement intervient dans les traitements photographiques au cours du tannage des couches, nécessaire pour leur conférer la solidité voulue pendant leur séjour dans les solutions des traitements. Ainsi, le tannage par des aldéhydes, par établissement de liaisons tant inter- qu'intramoléculaires entre les fonctions amine, ne peut se faire qu'à pH élevé, de l'ordre de pH = 10,0, tandis que le tannage par des aluns, formant des pontages similaires entre les fonctions carboxyliques, exige un milieu acide (*fig.* 5).

Composés formateurs des images

Le deuxième élément fondamental des couches photographiques est formé par les composés chimiques chargés de former les images constituées par des colorants. Dans les films et papiers classiques, ces composés sont des *coupleurs*, réagissant au cours du développement avec les produits d'oxydation des agents développateurs pour former les colorants des images. Dans les matériaux pour vues instantanées, par contre, ce sont soit des *colorants-développateurs*, soit des libérateurs des colorants contenus dans des couches voisines des couches sensibles. Dans les produits donnant des images monochromes sans couleur, c'est-à-dire en noir et blanc, ces composés, inutiles puisque l'image est constituée par l'argent réduit des cristaux sensibles, ne sont évidemment pas inclus dans les couches.

Suivant la couleur à former, les coupleurs, *a priori* incolores, sont constitués différemment. Ceux qui donnent les colorants cyan sont en général méthiniques, appartenant à la classe des phénols. Les coupleurs des colorants magenta sont des composés méthyléniques hétérocycliques, surtout des pyrazolones ; et les coupleurs formant des colorants jaunes, à chaînes ouvertes, ont aussi d'habitude une fonction réactionnelle méthylénique. Chacun de ces coupleurs est incorporé dans sa couche respective et donne le colorant par une réaction de condensation avec les développateurs de la classe des *p*-amino-N, N-dialkylanilines, oxydés par le développement des cristaux d'halogénures d'argent insolés au cours de l'exposition. Puisqu'il est essentiel que chaque colorant soit formé exclusivement dans sa couche respective, il faut éviter toute migration des coupleurs entre les couches. Cela est réalisé soit par l'introduction du coupleur dans la gélatine de sa couche sous forme de fines goutelettes d'une solution dans un solvant organique lourd, soit par l'alourdissement du coupleur à l'aide de longues chaînes aliphatiques.

Les colorants-développateurs des films pour vues instantanées ne sont rien d'autre que des colorants appropriés, de couleurs cyan, magenta et jaune, portant sur leurs molécules des fonctions développatrices du type hydroquinone. Avant l'exposition et le développement, ils sont donc libres de migrer à travers les couches du film négatif, tandis que l'oxydation de l'hydroquinone par le développement des aires exposées conduit à leur fixation dans leurs couches respectives. Les images négatives sont ainsi retenues, chacune dans sa couche, mais les compléments de colorants constituant les images positives peuvent diffuser librement vers la couche réceptrice mordancée pour y former l'image définitive. Dans le cas de libérateurs de colorants, par contre, ces derniers, immobilisés avant l'exposition et le développement dans leurs couches respectives, sont libérés dans les aires exposées par l'action conjointe des produits d'oxydation du développateur et d'un composé alcalin sur la chaîne qui relie à l'origine le colorant à son liant. Ainsi libérés, les colorants migrent, comme dans tous les procédés de transfert de colorants, vers la couche réceptrice mordancée pour y rester fixés.

Formation et propriétés de l'image latente

Mécanisme de la formation de l'image latente

Les couches sensibles, exposées dans les appareils photographiques à l'image optique formée par l'objectif, conservent celle-ci par une transformation chimique définitive. Invisible, ce premier enregistrement est appelé image latente, puisqu'il constitue le premier pas de la formation ultérieure de l'image visible et définitive par le développement et les autres traitements. L'image latente est constituée d'agglomérations de quelques atomes d'argent, réduits au sein des cristaux d'halogénures d'argent par les radiations actiniques. Nous l'avons vu, celles-ci apportent aux électrons de valence l'énergie nécessaire pour atteindre la bande de conductivité et se mouvoir librement à travers le cristal. Piégés alors sur les impuretés constituées par des ions soufre inclus dans le réseau cristallin, ils attirent des ions interstitiels d'argent et les neutralisent. L'agrandissement des pièges par la présence d'un premier atome d'argent ainsi déposé contribue à capter d'autres électrons, qui attirent à leur tour d'autres ions argent interstitiels jusqu'à la formation d'une image latente stable. La première réaction de sa formation est donc électronique,

$$(1) \qquad Br^- + h\nu \rightarrow Br + e^-$$

et la deuxième, ionique,

$$(2) \qquad Ag^+ + e^- \rightarrow Ag^\circ$$

Le rôle fondamental des ions soufre pour la sensibilité photographique a été reconnu dès 1925 par le chimiste S. E. Sheppard, qui réussit alors à identifier les composés sulfurés contenus dans la gélatine. Le mécanisme général de la formation de l'image latente par les deux réactions, électronique et ionique, a été formulé en 1938 par R. W. Gurney et N. F. Mott dans le cadre de leurs recherches sur les réactions électroniques dans les cristaux ioniques.

Suivant les conditions d'exposition, l'image latente se forme à la surface ou à l'intérieur des cristaux d'halogénure d'argent, et elle consiste soit en un petit nombre d'agglomérats d'atomes relativement importants, soit en de très nombreux agglomérats de petite taille. Comme elle a un rôle catalytique à jouer pour amorcer, au cours du développement, la réduction complète des cristaux, l'image latente doit nécessairement être disposée à leur surface pour être accessible au révélateur. Toutefois, les images latentes internes ne sont pas sans action, en particulier lorsque le révélateur contient des solvants des halogénures d'argent qui donnent accès à l'intérieur des cristaux par leur dissolution graduelle. Ce dernier mécanisme est couramment utilisé, par exemple dans le développement par inversion, qui donne directement des diapositives ou des épreuves d'après celles-ci. D'autre part, la dimension des images latentes agit surtout sur leur conservation. Lorsqu'elles résultent d'une exposition habituelle, de l'ordre d'un cinquantième de seconde, les images latentes sont de dimensions suffisantes pour posséder une excellente stabilité, même dans des conditions de température et d'humidité relative peu favorables à leur conservation pendant des durées très variables. D'autres expositions, soit très longues à faible éclairement, soit à des éclairs intenses et ultracourts, peuvent former des

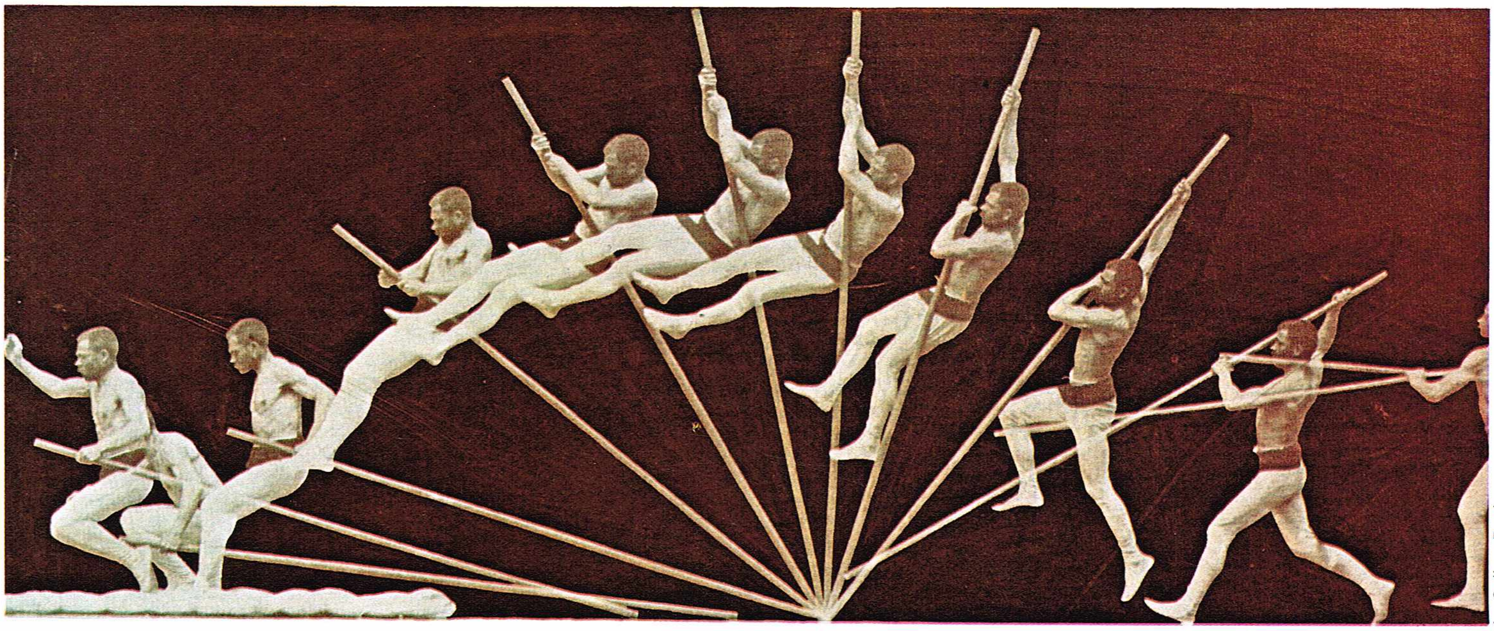

images latentes se conservant moins bien. La connaissance de ces propriétés spécifiques des images latentes permet aux fabricants de donner aux émulsions photographiques des propriétés exactement adaptées à chaque cas particulier d'utilisation.

Effets dus aux défauts d'intégration de l'énergie rayonnante absorbée

Par ailleurs, la distribution et la structure des images latentes sont à l'origine de divers comportements parfois étonnants des couches photographiques, dus à des défauts d'intégration de l'énergie apportée par l'exposition. Parmi ces effets, celui qui a le plus d'importance pratique est la non-observation de la réciprocité de la durée de l'exposition et du niveau de l'éclairement de la couche. En effet, suivant la loi de Bunsen-Roscoe, le rendement pondéral d'une réaction photochimique est indépendant de la vitesse de formation du produit de réaction et ne dépend que de la quantité globale du rayonnement absorbé. Par conséquent, la masse M du produit de la réaction photochimique est proportionnelle au produit du flux incident actif Φ par la durée de son action t,

$$M = k\Phi t, \quad \text{ou} \quad t = \frac{M}{k\Phi} \tag{3}$$

La valeur du flux et la durée de son action étant inversement proportionnelles, cette loi porte aussi le nom de « loi de réciprocité ». Or, elle n'est valable que pour une réaction photochimique primaire, telle que la libération par un rayonnement d'électrons dans les cristaux d'halogénures d'argent, mais elle ne s'applique plus ni au piégeage de ces électrons, qui ne dépend que de la présence d'ions soufre dans les cristaux, ni de l'attraction d'ions argent interstitiels par les électrons piégés. On désigne le défaut de réciprocité entre la valeur du flux et la durée de son action, qui en résulte, comme « défaillance de la loi de réciprocité » ou, en abrégé, *effet de réciprocité*. Ces effets se manifestent surtout lors d'expositions très longues à faible éclairement, ou extrêmement courtes à très fort éclairement. Dans le premier cas, il n'y a pas assez d'électrons libérés simultanément pour former des images latentes de taille suffisante pour être stables, et celles-ci se décomposent par l'agitation thermique normale du milieu avant l'arrivée de nouveaux électrons et d'autres ions argent. Dans le cas d'un afflux rapide et trop violent d'électrons, en revanche, le nombre de pièges disponibles est insuffisant pour les accueillir tous, et un certain nombre d'entre eux ne peut participer à la formation d'images latentes. Dans les deux cas, il y a perte d'énergie, et le meilleur rendement de l'exposition n'est donc réalisé qu'à un niveau d'éclairement intermédiaire et un temps de pose moyen. Comme les produits photographiques sont conçus pour être utilisés dans ces conditions habituelles, les effets de réciprocité passent en général inaperçus et n'interviennent guère que dans les cas d'expositions longues, mais aussi dans certaines circonstances particulières comme des reproductions d'écrans d'oscilloscopes et de télévision, ou des éclairs ultracourts.

Lors du fractionnement d'une exposition en une succession de poses courtes, l'effet de réciprocité donne lieu à un autre phénomène, appelé *effet d'intermittence*. En effet, l'ensemble de n poses courtes de durée t chacune donne en général un résultat qui diffère de celui d'une pose unique par la valeur de leur produit $n \cdot t$; à faible éclairement, l'interruption répétée de l'exposition accroît la probabilité de la désintégration, par l'agitation thermique, des images latentes en cours

▲▼ Deux photographies montrant la décomposition du mouvement; elles sont réalisées par impressions successives sur la même partie de la pellicule.

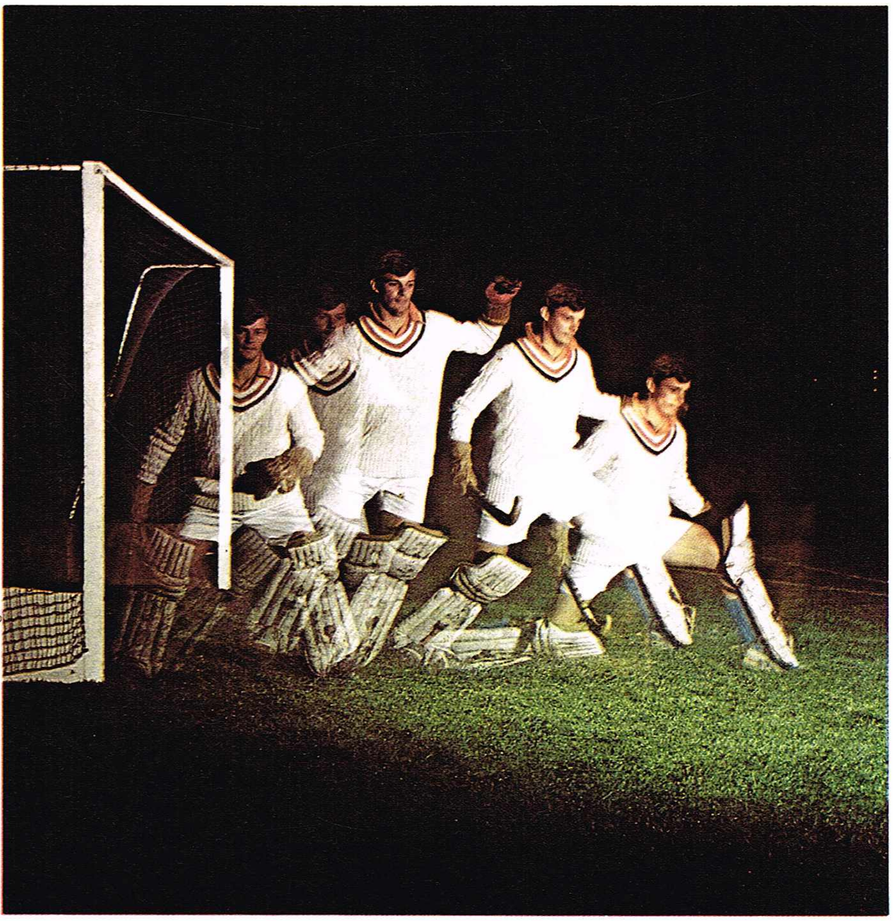

de formation, mais, à éclairement très élevé, lorsque l'afflux des photo-électrons est trop rapide, les interruptions périodiques laissent à un nombre supplémentaire d'ions argent interstitiels le temps nécessaire à leur neutralisation. L'intermittence de l'exposition peut donc entraîner soit un affaiblissement, soit un renforcement du résultat photographique, qui dépend évidemment aussi de la fréquence des interruptions de l'exposition.

D'autres effets photographiques rencontrés dans la pratique sont l'*effet Clayden*, désensibilisation d'une couche par une exposition très courte d'énergie élevée, une exposition à des rayons X, ou même une contrainte mécanique; l'*effet Herschel*, constitué par l'effacement d'une image latente par une deuxième exposition à un rayonnement de grandes longueurs d'onde, rouge ou jaune-orangé; et la *solarisation*. Résultant de la réhalogénation des images latentes superficielles par l'excès des halogènes libérés au cours d'une exposition trop importante, la solarisation donne lieu à un résultat photographique inférieur à celui dû à une exposition plus faible, mais optimal. Il ne faut pas confondre la solarisation avec l'effet Sabattier consistant en une inversion partielle des images, accompagnée d'une accentuation des contours, souvent aussi appelée « solarisation » dans la littérature photographique artistique ou pratique. On connaît de nombreux autres effets photographiques dont le rôle est à présent plutôt historique; toutefois, leur étude scientifique a largement contribué à la connaissance approfondie des propriétés de l'image latente.

Formation des images définitives par les traitements photographiques

On appelle traitements photographiques la succession d'opérations qui fait apparaître les images enregistrées par l'exposition sous forme invisible. Au cours du développement, ou bien on forme, dans les procédés classiques, les colorants composant les images dans leurs couches respectives, ou bien on fixe, dans les procédés de vues instantanées, des colorants préexistants dans une seule couche réceptrice suivant leur répartition dans les images. Dans le procédé monochrome en noir et blanc, les images résultent de la seule absorption de la lumière par l'argent réduit au cours du développement. Des traitements complémentaires sont encore nécessaires dans tous les procédés pour fixer définitivement et pour rendre utilisables les images ainsi obtenues.

Le développement

Les ions argent des cristaux photosensibles des émulsions photographiques, ayant cédé un de leurs électrons aux ions halogénures des cristaux, se trouvent normalement dans leur état oxydé. Le but du développement est de réduire entièrement en argent ceux des cristaux qui ont été insolés pendant l'exposition, et de former par cette réaction les colorants des images. Comme la réduction des ions argent par le révélateur est très lente, on l'accélère dans les cristaux exposés en faisant appel à l'action catalytique de l'image latente qui sépare les cristaux insolés de ceux qui sont restés à l'abri de l'exposition. La réduction entière des cristaux insolés est obtenue par une réaction d'oxydoréduction, résultant du déplacement de l'équilibre entre les deux couples oxydoréducteurs [halogénure d'argent-argent] et [agent développateur-agent développateur oxydé].

Dans le procédé classique, l'oxydation de l'agent développateur, concomitante de la réduction des ions argent, fournit alors la fraction des molécules de colorants qui résultent de la réaction de copulation du développateur oxydé avec les coupleurs. Dans les procédés de vues instantanées, par contre, ou bien les produits d'oxydation des colorants développateurs fixent les images négatives dans leurs couches respectives et les distinguent ainsi des colorants constituant les positifs en migrant vers la couche réceptrice pour y être fixés, ou bien les produits d'oxydation d'un agent développateur classique libèrent les colorants ancrés dans leurs couches, en oxydant leurs chaînes de fixation, pour leur permettre également de migrer vers la couche réceptrice mordancée. En résumé, la formation des images par le développement résulte de deux réactions fondamentales : la première, la réduction en argent des cristaux sensibles insolés, fournit du développateur oxydé, et la deuxième donne lieu soit à la formation de colorants par la réaction du développateur oxydé avec les coupleurs, soit à la fixation ou à la libération de colorants préexistants dans les couches, également par des réactions dues au développateur oxydé.

La première de ces deux étapes, la réduction entière en argent des cristaux insolés, n'est pas autre chose que la continuation et l'achèvement de la réduction, amorcée au cours de l'exposition par celle de quelques ions argent. L'énergie apportée par l'exposition est minime, toutefois elle ne peut suffire qu'à marquer les cristaux insolés par l'image latente, constituée par les agglomérations minuscules d'atomes d'argent. Pour réduire rapidement des cristaux entiers, il faut une énergie plus importante; celle-ci est apportée par la solution de révélateur qui, considérée sous cet angle, n'est rien d'autre qu'un immense réservoir d'électrons. Sans catalyseur, le transfert aux cristaux des électrons du révélateur est lent, freiné par la couche résiduelle d'ions négatifs adsorbés à la surface des cristaux à la fin de leur précipitation. Les petits amas d'atomes neutres de l'image latente interrompent l'uniformité de cette couche de charges négatives et permettent ainsi aux électrons du révélateur d'approcher des cristaux. La perte de ces électrons, extraits de l'agent développateur, donne lieu à son oxydation,

(4) $$D_{réd} \rightarrow D_{ox} + e^-$$

et elle est suivie par la réduction des ions argent à l'intérieur des cristaux,

(5) $$Ag^+ + e^- \rightarrow Ag°$$

Une hypothèse sur le mécanisme intrinsèque de ces réactions, formulée par F. Trautweiler, montre bien le rapport étroit entre l'image latente, due à l'exposition, et l'image visible, formée au cours du développement (*fig.* 6). Suivant la théorie atomique, un des niveaux énergétiques des ions du réseau cristallin, le niveau de Fermi, est par définition celui dont une moitié seulement est remplie d'électrons. Les ions des agents développateurs ont également un niveau de Fermi, défini de la même façon, mais de valeur énergétique différente. Ainsi, lors de la mise en contact de cristaux non insolés avec la solution de révélateur, ces niveaux se compensent; il s'établit ainsi un gradient stationnaire de potentiel à l'interface cristal-révélateur, qui empêche la réduction rapide des cristaux. Les images latentes des cristaux insolés, par contre, créent localement à leur surface un potentiel plus faible que celui du niveau de Fermi des ions développateurs et frayent ainsi la voie aux électrons du révélateur pour la réduction des ions argent. Cette réduction, s'accélérant au fur et à mesure de la formation de nou-

▼ *Figure 6 :* **schéma de Trautweiler.** *Cette représentation des niveaux d'énergie de la formation de l'image latente et du développement en photographie met en évidence leur nature commune, au cours des réductions successives de l'halogénure d'argent par l'exposition et le développement.*

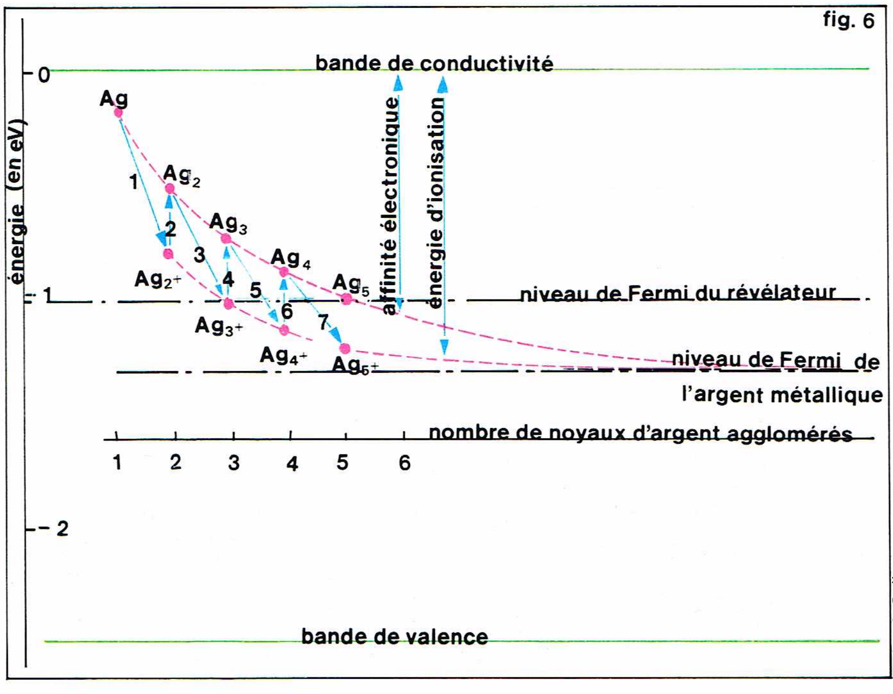

veaux atomes d'argent, est autocatalytique; elle constitue donc effectivement la continuation accélérée de la formation de l'image latente par l'exposition.

Après cette première étape du développement, le produit d'oxydation de l'agent développateur, formé à l'emplacement des cristaux insolés, réagit *in situ* — nous l'avons vu — soit avec les coupleurs pour former par copulation les colorants de la synthèse trichrome des images, soit pour fixer ou libérer des colorants de cette synthèse, préexistant dans leurs couches respectives. L'argent formé pendant le développement n'est utilisé que dans la photographie en noir et blanc, mais n'a aucune utilité en photographie en couleurs : il faut alors l'éliminer dans les traitements qui suivent le développement.

Certaines utilisations des surfaces sensibles photographiques ne nécessitent que des images monochromes, différenciant uniquement des valeurs de luminance, par exemple en radiographie médicale et industrielle, en photogravure, et dans de nombreuses applications scientifiques. Il n'est alors pas nécessaire de former des colorants, puisque l'argent réduit par le développement des cristaux insolés, finement dispersé et de couleur noire, absorbe suffisamment la lumière. Dans ce cas, on applique donc le simple développement en noir et blanc, qui a été seul employé pendant le premier siècle d'existence de la photographie, avant la généralisation de la photographie en couleurs. Les cristaux inutilisés sont ensuite éliminés par dissolution dans une solution d'hyposulfite, appelée fixateur.

Pour la formation des images argentiques, on peut utiliser l'argent provenant soit de la réduction des cristaux, soit d'ions argent présents dans la solution de révélateur; la première méthode est appelée développement direct, et la seconde développement physique. Comme les solutions de révélateur contiennent en général une certaine quantité de solvants des halogénures d'argent, suffisamment d'ions argent s'y trouvent en solution pour que les deux types de développement aient lieu simultanément.

Puisque le rendement de l'opération photographique en noir et blanc dépend de la seule absorption optique de l'argent déposé au cours du développement, la morphologie de ce dépôt joue un rôle important. Or, l'argent formé par le développement direct est très dispersé, tandis que celui provenant du développement physique est compact; le premier absorbe donc beaucoup plus de lumière que le second. Ce n'est en effet pas la masse de l'argent réduit qui définit le rendement des images photographiques en noir et blanc, mais son pouvoir couvrant, exprimé par le rapport de la densité optique du dépôt d'argent à sa masse pondérale.

Dans la grande majorité des utilisations de la photographie, les images formées par l'exposition dans les appareils et par leur développement sont des négatifs qui servent ensuite au tirage d'épreuves positives. Il est souvent utile, toutefois, de disposer d'une image positive sur le film exposé à la prise de vue. Dans les matériaux classiques, cela est réalisé par un traitement *par inversion*, et directement par le transfert des colorants des images positives dans les produits pour vues instantanées. Dans le développement classique par inversion, l'image négative résultant de la prise de vue est d'abord développée en noir et blanc, et le résidu des halogénures d'argent des couches, proportionnel aux images positives, sert alors, après avoir été voilé par une forte exposition uniforme, à former par un développement chromogène les colorants de ces images. Dans les procédés de vues instantanées, l'inversion est réalisée — nous l'avons vu — par le seul transfert des colorants des images positives dans une couche réceptrice mordancée, où ils se fixent définitivement en réagissant avec le mordant. La solution de traitement, contenant une quantité minime, correspondant juste à la superficie des épreuves, de soude caustique dans un solvant visqueux, est étalée, pendant l'avance des épreuves, par les rouleaux formant un laminoir à l'intérieur de l'appareil de prise de vue.

Pour les vues instantanées en noir et blanc, on emploie le traitement par diffusion-transfert. Immédiatement après la prise de vue, la couche sensible négative est mise en contact avec la couche réceptrice par l'intermédiaire de la couche visqueuse alcaline de traitement. Celle-ci contient un solvant des halogénures d'argent, et permet aux ions argent en solution de migrer vers la couche réceptrice qui ne contient que des germes de précipitation dans un liant, et d'y former l'image positive.

Du point de vue pratique, la solution de révélateur comporte toujours quelques éléments de base bien déterminés. Le premier — essentiel — de ces éléments est évidemment le réducteur ou *agent développateur*. Dans le développement chromogène classique, c'est un composé de la classe des *p*-amino-N, N-dialkylanilines, et, en noir et blanc, un di-ou monohydroxybenzène ou une phénylène mono- ou diamine, composés portant en général des groupements supplémentaires. Dans les procédés de vues instantanées, le réducteur constitue une fonction d'un colorant et forme alors un colorant-développateur, ou il est tout simplement un des agents développateurs classiques, chargé de libérer, dans sa forme oxydée, les colorants ancrés dans les couches. Les autres éléments de la solution de révélateur sont : *l'ion sulfite* ou d'autres composés réducteurs, destinés à empêcher l'oxydation prématurée de l'agent développateur; des *composés alcalins* fixant le pH nécessaire

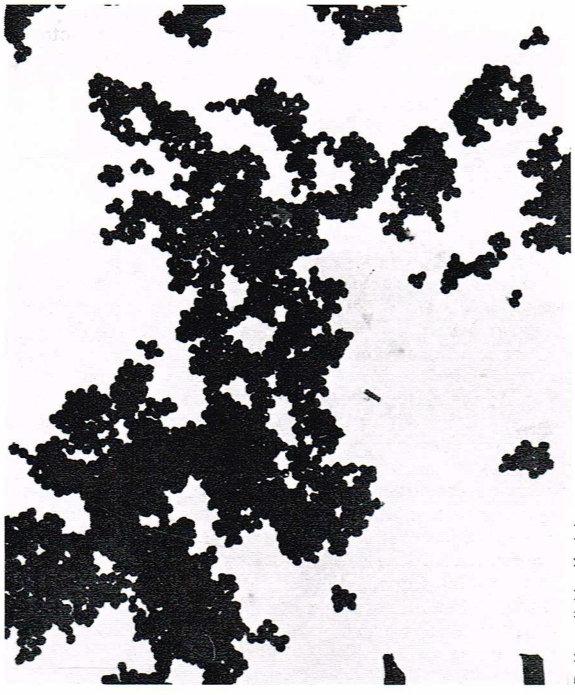

P. Kowaliski - Kodak

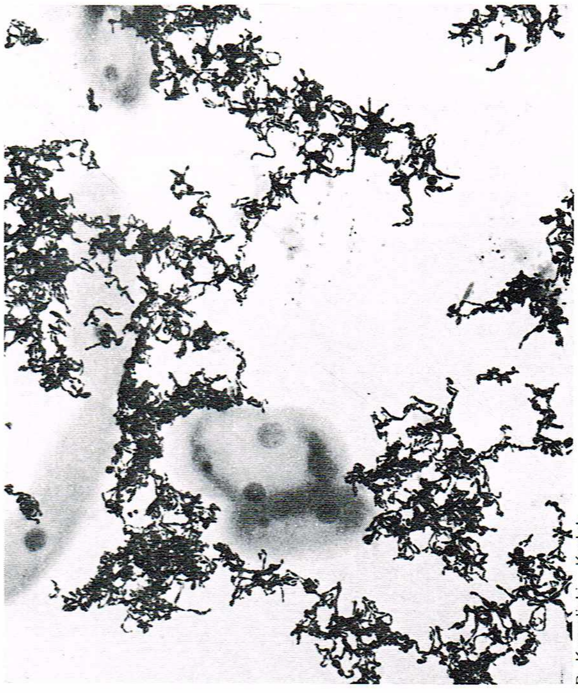

P. Kowaliski - Kodak

◀ *L'argent résultant* **du développement physique** *est formé de particules compactes (à gauche) alors que l'argent dû au* **développement direct** *est déposé en filaments (à droite).*

C. Nuridsany et M. Perennou

▶ *Vue de détail d'une fleur de tulipe; l'un des pétales a été enlevé afin de montrer l'appareil reproducteur.*

aux réactions du développement et les *composés anti-voiles*, constitués soit par des halogénures solubles, soit par des composés organiques donnant également avec les ions argent des sels peu solubles.

Les révélateurs chromogènes ne contiennent que le minimum strictement nécessaire de sulfite, puisque celui-ci, en réagissant avec les coupleurs, bloquerait leurs fonctions réactives et diminuerait ainsi les quantités de colorants formés dans les images. Les composés alcalins couramment employés sont des carbonates, des phosphates ou des hydroxydes alcalins. Les composés anti-voiles agissent soit sur le voile intrinsèque des émulsions, dû au développement de cristaux non insolés, soit sur le voile dû à une activité trop grande du révélateur. Ces deux actions protectrices sont surtout exercées par les ions halogénures qui, adsorbés sur les cristaux, recouvrent les inclusions superficielles d'ions étrangers et des aspérités ou dislocations superficielles, qui pourraient amorcer des réductions en l'absence d'images latentes et ainsi créer du voile.

Finition des traitements

L'image développée, il est encore nécessaire d'éliminer tout résidu non utilisé de sensibilité à la lumière et aussi ceux des composés ou éléments qui, formés pendant le développement, ne contribuent pas aux images. Dans le procédé classique, il s'agit donc de traiter les films et papiers pour enlever, d'une part, les halogénures non utilisés, et, d'autre part, l'argent formé pendant le développement. Ces deux éliminations sont effectuées séparément ou en même temps. Dans le premier cas, l'argent recouvrant les images est d'abord réhalogéné par une solution de blanchiment contenant des ions halogénures en présence d'un oxydant, par exemple du ferricyanure de potassium, et l'ensemble des halogénures est ensuite éliminé par un fixateur, constitué par une solution d'hyposulfite de sodium ou d'ammonium, solvants des halogénures d'argent. Dans le deuxième cas, les deux opérations sont effectuées dans une seule solution, appelée blanchiment-fixage.

Dans les procédés de vues instantanées, les images fixées par mordançage dans les couches réceptrices ne seraient pas stables si elles restaient au contact de la solution alcaline de traitement. Or, celle-ci imbibe toutes les couches à l'intérieur des sandwichs constituant les épreuves; on incorpore donc dans ces produits une couche comportant la quantité juste nécessaire d'acide pour neutraliser entièrement le résidu de solution alcaline subsistant après le traitement, ce qui permet d'assurer aux images une conservation parfaite. Dans les traitements en noir et blanc, il suffit, pour fixer les images, d'éliminer après le développement le résidu d'halogénure d'argent par un fixage dans une solution d'hyposulfite, suivi d'un lavage qui ne laisse subsister dans les images aucun composé résiduel, nocif à leur conservation.

Propriétés physiques des images photographiques

Selon le but que se propose une image photographique, on juge ses qualités techniques de façon différente. Dans la majorité des cas, lorsqu'il ne s'agit que d'avoir un enregistrement documentaire de l'impression visuelle de personnes, de lieux, de sujets, on regarde l'épreuve dans son ensemble à une certaine distance et on en fait une évaluation — toute considération esthétique mise à part — d'après la vraisemblance de la reproduction des couleurs et des valeurs. Dans d'autres cas, lorsqu'on désire avoir un document très précis sur des objets comportant de petits détails, par exemple des bijoux, des tissus, des caractères d'imprimerie, des vues d'observation aérienne, on regarde l'image de près en exigeant une excellente reproduction de toutes les finesses et un maximum de netteté. Tous ces jugements peuvent être classés et évalués soit d'après des observations faites par des juges humains, obtenues à l'aide de méthodes bien étudiées et d'exploitation statistique des résultats, soit par des mesures effectuées avec des instruments : les premiers sont subjectifs, les seconds objectifs. Il importe de considérer séparément ces deux aspects de la qualité physique des épreuves. En premier lieu, il est nécessaire de fonder la reproduction photographique, que ce soit pour les couleurs, les valeurs ou les détails, sur la fidélité physique des images par rapport aux scènes ou sujets représentés. Si certains ajustements à ce premier objectif sont nécessaires pour satisfaire aux exigences subjectives des utilisateurs, il faut évidemment que le procédé photographique en tienne compte. Toutefois, ces légères modifications de la reproduction physiquement fidèle, aussi importantes qu'elles soient pour satisfaire le goût des utilisateurs, n'ont qu'une importance secondaire.

Reproduction des couleurs et des valeurs

L'évaluation de la fidélité objective de la reproduction des couleurs et des valeurs fait appel à deux sciences étroitement liées : la colorimétrie et la photométrie. La seconde, bien plus ancienne que la mesure de la couleur, a été créée pour comparer entre elles des sources lumineuses. Or, l'impression de luminosité visuelle peut avoir son origine dans la source elle-même si elle se trouve dans le champ de vision, ou dans des surfaces d'objets réfléchissant ou transmettant cette lumière. Ainsi, la photométrie est directement employée pour la mesure de la reproduction des valeurs; de même, il est évident que l'évaluation de la reproduction des couleurs est fondée sur la colorimétrie, technique photométrique plus générale, puisque toute lumière perçue est colorée.

Paramètres photographiques

Les paramètres employés dans les mesures des images sont photométriques et sensitométriques. (Les unités photométriques font partie des unités légales de mesure et sont définies, par conséquent, dans le *Journal officiel*. Elles sont résumées dans une brochure officielle intitulée *Unités de mesure*.) Parmi les premiers, les plus importants sont (*fig.* 7) :

l'*intensité* I d'une source lumineuse, exprimée en candelas (cd);

le *flux* Φ, émanant de cette source, mesuré en lumens;

l'*éclairement* H. (En photométrie, ce paramètre est désigné par E; cette lettre étant réservée en photographie à l'exposition, on désigne pour cette utilisation spécifique l'éclairement par la lettre H.) Il résulte de l'incidence de ce flux sur des surfaces, exprimé en lux;

et la *luminance* L, en candelas par mètre carré, mesure de l'impression visuelle de luminance de chacun des points compris dans le champ de vue.

Les paramètres sensitométriques, spécifiques de la photographie, sont avant tout caractérisés par celui qui définit l'effet sur le flux de la transmission ou de la réflexion par un dépôt absorbant : c'est la *densité optique*, $d = \log 1/T$ (*fig.* 8), la densité par transparence avec la transmittance $T = \Phi_t/\Phi_0$, rapport du flux transmis au flux incident, ou $d_r = \log 1/R$, la densité par réflexion, définie de façon similaire, avec la réflectance $R = \Phi_r/\Phi_0$.

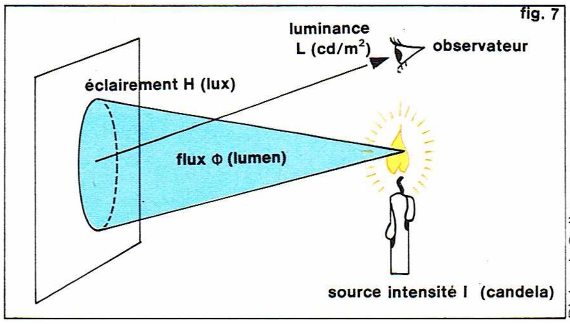

◀ *Figure 7 : les principaux* **paramètres photométriques** *employés en photographie.*

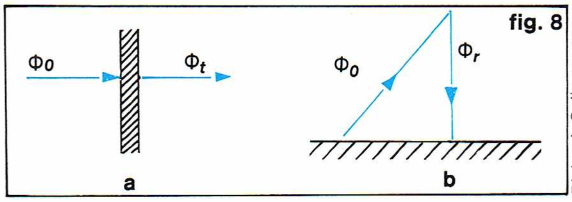

◀ *Figure 8 : principe de la transmittance d'une lame plane parallèle* (a) *et norme de la mesure de la réflectance* (b).

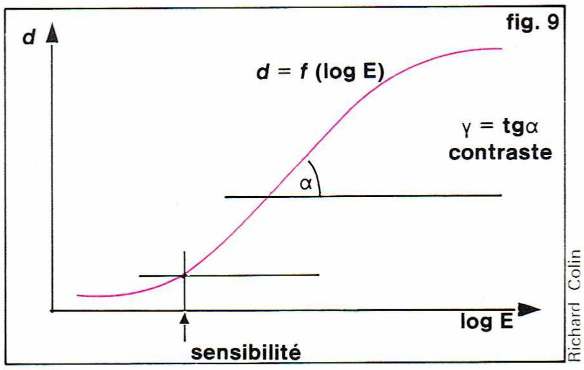

◀ *Figure 9 : fonction* **d = f** *(log* **E)** *donnant la* **courbe caractéristique** *d'un procédé photographique ; à l'aide de cette courbe empirique, on détermine les* **paramètres sensitométriques** *de* **sensibilité** *et de* **contraste**.

La densité optique est employée pour définir le *contraste* et la *sensibilité*, paramètres fondamentaux de la photographie permettant d'exprimer en quantités mesurables les propriétés pratiques des couches sensibles exposées et traitées. Leur réponse dépend d'un grand nombre de paramètres d'actions très variables, et il n'est pas possible de l'exprimer par une relation analytique. On indique par conséquent les caractéristiques d'un film ou papier, après un traitement donné, par une relation empirique, appelée *la courbe caractéristique* et représentée par un graphique (*fig.* 9) qui montre l'évolution de la densité en fonction du logarithme de l'exposition, $d = f$ (log E). Appliquée à l'origine à l'ensemble du spectre visible et, par conséquent, seulement à la photographie en noir et blanc, cette relation a évidemment été adaptée à la photographie en couleurs, par son application séparée aux trois tiers du spectre visible dont les sommes des radiations correspondent aux couleurs primaires de la reproduction trichrome, c'est-à-dire au rouge, au vert et au bleu.

Dans les fonctions $d = f$ (log E), la pente de la courbe à chaque niveau de densité, exprimée par sa tangente, $\gamma = \text{tg}\,\alpha = \frac{\text{d}\,d}{\text{d log E}}$, représente le *contraste de la reproduction photographique*. Celui-ci indique le degré de la variation dans les images soit de la couleur, soit de la luminosité. Le *contraste* γ est un paramètre photographique qui donne une appréciation chiffrée et explicite de la fidélité de la reproduction : trop élevé, il donne lieu à des couleurs crues et à des lumières et ombres heurtées, et très faible, il adoucit l'apparence des objets représentés et peut alors donner à leurs contours un aspect peu défini. Pour cette raison, le contraste de la partie moyenne de la courbe caractéristique, en général presque droite sur une certaine longueur, est considéré comme le premier des deux principaux paramètres sensitométriques. Le deuxième est la *sensibilité sensitométrique* des surfaces sensibles. Elle est exprimée par la valeur de l'exposition — représentée par sa valeur logarithmique, puisque l'axe des abscisses est gradué en log E — qui correspond à la réalisation d'une densité donnée au seuil de la courbe d'une échelle de gris, densité choisie suivant l'utilisation photographique du produit. Pour la photographie générale dans son application habituelle, cette densité est égale à $d = 0{,}1$ au-dessus du voile, c'est-à-dire au-dessus de la densité optique du matériau non exposé, mais développé et traité. Pour être définie par un seul chiffre, la sensibilité est déterminée d'après une progression de luminances neutres, représentée par les trois courbes caractéristiques entièrement superposées. Le contraste peut être mesuré de cette même façon, et il est alors important que la coïncidence des trois courbes soit réalisée sur toute leur longueur.

Bases de la reproduction des couleurs

Dans tous les procédés photographiques actuels, les couleurs sont reproduites en deux étapes fondamentales. La première est celle de la *sélection des couleurs*, où chaque couleur de la scène originale est répartie en ses trois composantes primaires. La sélection trichrome est réalisée par l'exposition de trois couches, sensibles respectivement au rouge, au vert et au bleu. La seconde étape est celle de la *synthèse trichrome ;* dans celle-ci, on emploie chacun des enregistrements de la sélection des couleurs à la définition des quantités des trois couleurs primaires dans la reproduction. Cette synthèse est réalisée — nous l'avons vu — à l'aide de colorants. La couche qui a enregistré, à la prise de vue en négatif, la fraction rouge du spectre visible définit en chaque point de l'image positive la quantité de colorant cyan (bleu-vert) ; la couche qui a enregistré la fraction verte définit de la même manière dans le positif les quantités de colorant magenta ; et la troisième couche négative, sensible à la fraction bleue du spectre, définit les quantités de colorant jaune dans l'image positive. Les teintes des colorants sont ainsi pratiquement complémentaires aux sensibilités spectrales des couches négatives qui définissent leurs quantités dans les images, et on appelle l'ensemble de ce système la *reproduction soustractive*, puisque les couleurs primaires formant les images résultent de l'absorption de lumière par les colorants, c'est-à-dire de soustractions de lumière.

▼ *Deux photos d'un même paysage prises respectivement avec un filtre rouge (à gauche) et un filtre jaune (à droite) ; ces deux filtres ont la propriété d'obscurcir le ciel et de faire ressortir les nuages.*

S. Prato

S. Prato

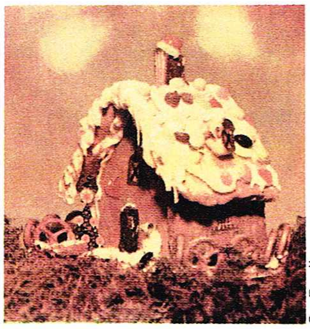

C. Bevilacqua

C. Bevilacqua

C. Bevilacqua

▲ ***De ces trois clichés représentant le même objet, le premier présente un excès de magenta, le deuxième un excès de vert, mais le troisième est correct.***

La synthèse photographique trichrome n'est pas autre chose que l'application du principe de Maxwell. Suivant celui-ci, les sensibilités spectrales des trois couches négatives doivent être proportionnelles aux fonctions de mélanges des couleurs primaires de la reproduction, définies par les trois colorants de la synthèse. En effet, la première étape de la reproduction, la sélection trichrome, a été subdivisée par Maxwell de la façon suivante : on choisit d'abord les trois lumières colorées destinées à servir ultérieurement à la synthèse; on détermine leurs fonctions de mélanges, c'est-à-dire la répartition de leurs quantités respectives, longueur d'onde par longueur d'onde, nécessaires à reproduire les couleurs du spectre; on conçoit alors le système photographique de telle sorte que ses trois couches sensibles aient des sensibilités spectrales proportionnelles à ces fonctions de mélanges. En ce qui concerne la reproduction finale, Maxwell l'effectue par synthèse additive en projetant sur un écran, à l'aide de trois projecteurs, les trois positifs tirés d'après les négatifs de sélection, en lumières rouge, verte et bleue, c'est-à-dire par des additions des trois lumières primaires. Ce principe reste entièrement valable pour la synthèse soustractive, qui n'en est qu'une autre application.

La réalisation pratique d'une reproduction trichrome parfaite nécessite des compléments aux opérations de base, constituées par la sélection et la synthèse. D'abord, il est nécessaire d'ajuster le résultat final pour corriger la correspondance qui n'est pas totalement complète entre les sensibilités spectrales réelles des couches négatives et les fonctions de mélanges. Puisque, par son principe, l'égalisation colorimétrique trichrome ne recouvre jamais le domaine entier des couleurs, les fonctions de mélanges ont des parties négatives. Suivant le principe de Maxwell, il faudrait donc que les sensibilités spectrales eussent aussi des parties négatives, mais cela ne peut évidemment pas être réalisé. D'autre part, les colorants n'agissent pas chacun exclusivement sur l'un des tiers du spectre visible, mais ils absorbent aussi dans les domaines spectraux de leurs propres couleurs. On élimine les imperfections de la reproduction trichrome qui pourraient résulter de ces deux données pratiques par des méthodes dites de « masques », réalisées par l'emploi de coupleurs colorés, de coupleurs relâchant au moment de la copulation des inhibiteurs de développement, ou par des effets de traitement entre les couches, appelés effets interimages. Ces derniers ajustent, dans chacune des images positives, les quantités du colorant de cette couche en fonction des deux autres images.

La reproduction colorimétrique fidèle ainsi obtenue est ensuite ajustée à la moyenne des exigences des utilisateurs des images photographiques. Ceux-ci les jugent en effet dans la plupart des cas en mesure absolue, puisqu'ils n'ont presque jamais la possibilité de comparer directement l'épreuve à la scène originale, et parce que les conditions d'éclairage de ces deux perceptions sont presque toujours entièrement différentes. L'observateur évalue donc la fidélité de la reproduction soit en se fiant à sa mémoire, soit, s'il n'a jamais vu le sujet photographié, ce qui est très fréquent, en jugeant l'image suivant ses préférences personnelles. Les procédés photographiques sont donc toujours légèrement ajustés pour donner aux couleurs le plus fréquemment rencontrées, telles que la teinte chair, le vert de l'herbe et des feuillages, le bleu du ciel, l'aspect des *couleurs préférées dans les reproductions*, déterminées scientifiquement par des évaluations subjectives soignées.

Reproduction des valeurs

En plus de la reproduction parfaite des teintes, il faut aussi que la progression des valeurs, c'est-à-dire des échelles de luminosité, soit optimale dans les images. Elle dépend du contraste, et, aussi, indirectement, de la reproduction des couleurs, puisque la luminosité est comprise dans les paramètres fondamentaux de la couleur, qui sont, d'une part, la chromaticité, constituée par la teinte et la saturation, et, d'autre part, la luminosité, dont dépend précisément la reproduction des valeurs. Pour une bonne reproduction photographique, la luminosité et ses progressions sont même plus importantes que la reproduction satisfaisante des chromaticités, en particulier dans les lumières et dans les ombres. Dans les premières, les aires les plus claires, donc les plus visibles, un contraste relativement élevé est essentiel. S'il est insuffisant, par exemple à la suite d'une surexposition, les lumières manquent de détail et de couleur et ne correspondent pas à l'impression visuelle de la scène originale. Il est nécessaire, de même, que les luminances des valeurs sombres des images soient bien échelonnées et distinguées, pour rehausser aussi, par un effet de contraste simultané, la luminance des parties claires. Dans les teintes moyennes, par contre, une progression lente des luminances donne des reproductions photographiques plus satisfaisantes qu'un contraste élevé. L'ensemble de ces répartitions des luminances dépend du choix judicieux de la répartition des éclairages dans la scène originale de l'exposition, soigneusement adaptée au procédé et au sujet, et, dans le cas du procédé négatif-positif classique, de la qualité du tirage.

A ces conditions d'une bonne reproduction des valeurs s'ajoutent encore les conditions de l'observation des images. Celles-ci sont aussi importantes que la qualité des images elles-mêmes : il faut qu'elles soient favorables pour permettre à l'observateur d'apprécier entièrement leur contenu. Il faut que l'image soit suffisamment et uniformément éclairée, sans reflets dissimulant des parties de son contenu. Les luminances couramment rencontrées dans les conditions habituelles d'observation d'épreuves photographiques varient en effet considérablement : dans une pièce ensoleillée, les lumières peuvent réfléchir jusqu'à 9 000 cd/m², tandis que le soir, à l'éclairage de lampes à incandescence, la luminance des parties claires d'une épreuve peut être très faible : 25 cd/m² seulement. C'est pourquoi la norme française NF-S-20 007 recommande, pour l'examen critique d'images photographiques, surtout pour des usages professionnels, un éclairement dans le plan de l'épreuve de 1 500 ± 500 lux, donnant environ 500 cd/m² aux lumières des épreuves. Pour la projection de diapositives, la luminance moyenne de l'écran, surtout dans une pièce obscurcie, peut être plus faible, mais elle doit être au moins de l'ordre de 50 cd/m².

Une bonne reproduction des valeurs est aussi indispensable dans les applications techniques et scientifiques de la photographie. L'exemple le plus typique est celui de la radiographie, où les utilisateurs ont besoin d'une progression favorable des luminances, pour pouvoir évaluer correctement tous les détails de leur enregistrement qui, en fait, ne comporte à l'origine pas de détails visibles. Lorsque, dans des enregistrements photographiques documentaires, l'échelle des luminances est plus étendue que celle que permet de reproduire le procédé choisi, on peut la comprimer ou la déformer pour obtenir une image présentant clairement la totalité du phénomène; ces déformations de l'échelle des valeurs peuvent être réalisées soit par des méthodes photographiques (tirages masqués ou autres), soit par l'action d'une calculatrice sur un premier enregistrement vidéo-électronique par exploration lignée.

L. Brun-Rapho

1

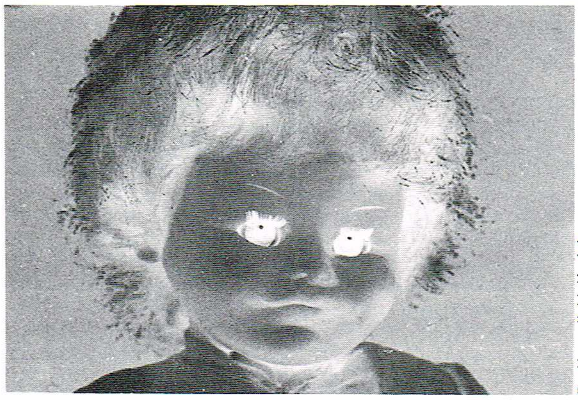

P. Kowaliski-Kodak

2

P. Kowaliski-Kodak

3

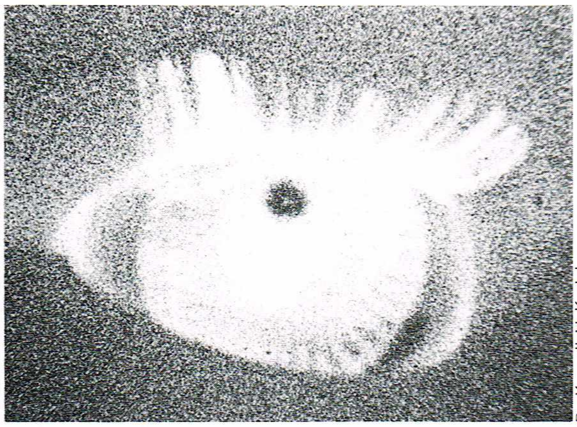

P. Kowaliski-Kodak

4

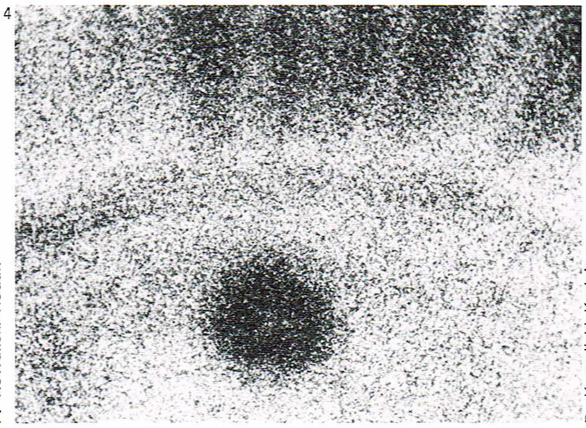

P. Kowaliski-Kodak

5

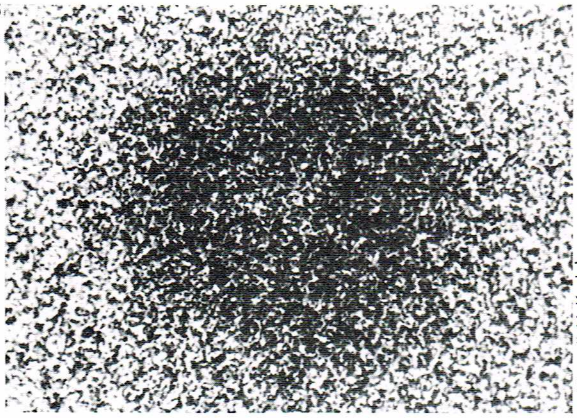

P. Kowaliski-Kodak

6

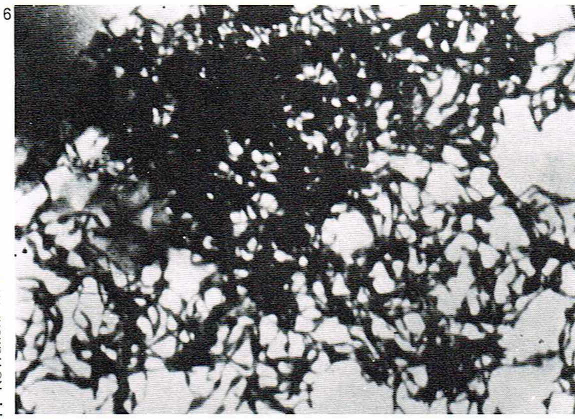

P. Kowaliski-Kodak

◀ *De haut en bas et de gauche à droite, respectivement, on a mis en évidence, par grossissement croissant, la structure d'une image photographique ; sans grossissement, le négatif (1) et le positif (2) apparaissent nets ; à faible agrandissement, sous la loupe (3) ou sous le microscope (4), on constate un certain manque de netteté ; à grossissement plus fort, sous microscope (5), on arrive à la limite du pouvoir de résolution et l'on observe la granulation. Au microscope électronique (6), on ne voit plus l'image mais seulement les cristaux d'argent.*

Reproduction des détails

Lorsqu'elle est observée dans les conditions habituelles, une image photographique de bonne qualité montre tous les détails du sujet ou de la scène originale. Observés de plus près, ces détails paraissent moins distincts et, avec un grossissement croissant, ils sont de plus en plus influencés par la structure propre de l'image photographique. D'une part, celle-ci montre à l'échelle microscopique une certaine discontinuité due à sa composition en minuscules taches de colorants ou d'argent, et, d'autre part, la netteté des contours des sujets reproduits n'est pas illimitée et diminue avec l'agrandissement de l'image.

Granulation, pouvoir de résolution et netteté

La structure des images photographiques provient, d'une part, de la diffusion de la lumière à l'exposition et des cheminements des constituants du révélateur et de ses produits de réaction à travers les couches pendant le développement, et, d'autre part, de la composition des images terminées : ce sont des amas microscopiques de particules de colorants, ou d'argent dans le cas du noir et blanc. Par conséquent, on rencontre, dans la reproduction des détails par un matériau photographique, les trois éléments suivants : d'abord la discontinuité de la structure d'image, appelée granularité, visible seulement à très fort grossissement, qui donne lieu au phénomène subjectif de la *granulation ;* ensuite la limite de la distinction et de la visibilité de fins détails à très fort agrandissement, appelée *pouvoir de résolution* de la couche photographique ; et enfin l'apparence plus ou moins définie des contours des sujets représentés, appelée *netteté*. La qualité physique d'une image étant considérée, en général, dans son ensemble, on la résume, pour la structure d'image, dans la propriété unique de *définition* qui englobe les trois paramètres subjectifs de granulation, de résolution et de netteté.

Dans l'utilisation courante de la photographie, à faible et à moyen grossissement, la *granulation* passe entièrement inaperçue. Elle intervient plutôt dans les applications particulières où les détails doivent être correctement représentés malgré un fort grossissement des images.

La *résolution*, elle aussi, est surtout sensible dans ces applications, par exemple dans des reproductions techniques de sujets comportant de fins détails périodiques, tels que des tissus, des plantes et des insectes, des œuvres d'art, ou des objets rapprochés dans des vues fortement agrandies, comme les détails d'un paysage dans des vues aériennes ou spatiales. Le *pouvoir de résolution* est exprimé par le nombre de traits au millimètre qui peuvent tout juste être distingués ; il dépend

◀ *Page ci-contre en bas, trois médecins observant des radiographies ; dans le cas de la radiographie, une bonne reproduction des valeurs (c'est-à-dire de l'échelle de luminosité) est nécessaire afin d'appréhender des détails qui ne sont pas directement visibles.*

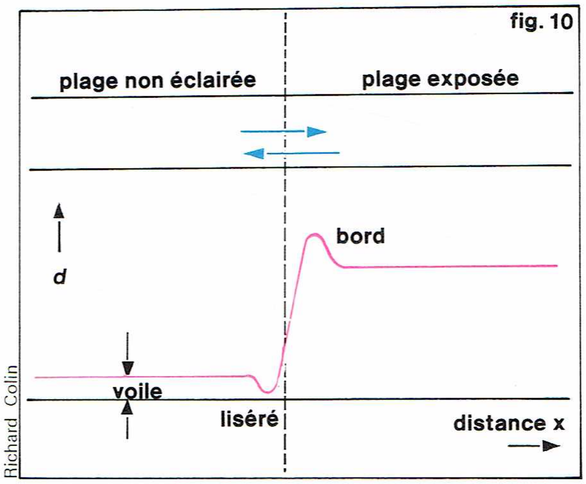

▶ ***Figure 10** : effet de la diffusion latérale des produits de la réaction du révélateur sur la netteté des images; à la limite des plages claires et sombres, il se forme, par des effets de voisinage, des « lignes de bord » et de « liséré » qui peuvent avoir un effet très favorable sur la netteté apparente.*

ainsi des conditions d'observation et de l'appréciation de l'observateur. Par conséquent, le pouvoir de résolution est un phénomène subjectif, mais il décrit la propriété importante de la séparation de très petits détails de façon univoque; c'est ainsi un critère de qualité appréciable.

Le troisième paramètre de la reproduction du détail, la *netteté*, également subjective, est une propriété des images photographiques qui joue un grand rôle. Comme pour la granulation, l'effet sur la netteté du comportement des matériaux sensibles est négligeable dans leur utilisation habituelle, où intervient plutôt le flou optique résultant d'erreurs de mise au point ou de mouvements du sujet ou de l'appareil pendant l'exposition.

Influence de la structure des matériaux et des traitements

Dans le procédé classique négatif-positif, la reproduction des détails dépend surtout de la qualité du négatif. A l'exception d'un petit nombre d'applications professionnelles de la photographie, celui-ci est en général de petites dimensions, et tous les défauts éventuels de sa structure risquent ainsi d'apparaître dans les épreuves agrandies. La qualité des détails dans les films négatifs dépend d'abord de la *diffusion de la lumière* dans les couches sensibles, résultant de leur structure non homogène. L'indice de réfraction des cristaux d'halogénures d'argent étant bien plus élevé que celui de la gélatine, une couche photographique vierge a l'aspect d'un milieu laiteux, apparence qu'accentue encore la diffusion de la lumière par les gouttelettes de coupleur également contenues dans la couche. Toutefois, les remarquables progrès de la fabrication des couches sensibles permettent à présent d'éliminer presque entièrement les effets de cette diffusion, d'abord par la réalisation de cristaux extrêmement petits et néanmoins ultrasensibles, et ensuite par des épaisseurs très faibles des couches, contribuant à réduire au minimum le chemin optique à travers celles-ci. Enfin, l'action indésirable de la lumière diffuse est éliminée par l'inclusion dans les couches de faibles quantités de colorants absorbants. D'autre part, tous les moyens du tirage des épreuves par agrandissement, tant dans les agrandisseurs que dans les tireuses semi-automatiques et automatiques, sont conçus pour qu'aucun détail consigné dans le négatif ne soit perdu. Les mêmes perfectionnements que ceux contenus dans les films négatifs sont évidemment incorporés dans les films inversibles.

Le deuxième facteur qui agit sur la structure d'image des négatifs et des diapositifs est la *diffusion des constituants du révélateur* et de leurs produits de réaction pendant le développement (*fig.* 10). En principe, ces échanges ne devraient avoir lieu que perpendiculairement aux couches, et seulement à l'intérieur de chaque couche, sans empiéter sur les couches voisines. Or la diffusion a lieu assez uniformément dans tous les sens et agit ainsi sur la reproduction du détail et la couleur des contours. L'effet des échanges latéraux dans les couches entre les produits actifs du révélateur (agent développateur, composés alcalins) et les produits de réaction dus au développement (agent développateur oxydé, ions halogénures, ions hydrogène) se manifeste surtout aux limites entre des aires qui sont fortement exposées et d'autres qui ne le sont pratiquement pas, ou peu. Il se crée alors le long de ces frontières de minces bords, plus denses que celles fortement exposées, et des lisérés moins denses que celles qui sont peu exposées. L'ensemble de ces effets de voisinage contribue à une amélioration de la netteté. D'autre part, la diffusion latérale, lorsqu'elle dépasse les limites assez étroites de cette action utile, peut avoir des effets défavorables sur la netteté et la résolution. On la limite donc en donnant une structure appropriée aux couches. On peut par exemple corriger entièrement ces effets indésirables par les coupleurs DIR, formateurs des colorants des images qui, au moment de leur réaction avec les produits d'oxydation du développateur (c'est-à-dire pendant la copulation), relâchent des composés inhibiteurs du développement. Entourant les cristaux exposés pendant leur développement, ces composés empêchent un étalement de la formation des colorants et donnent ainsi aux négatifs une netteté et une résolution exceptionnelles, permettant leur agrandissement pratiquement illimité pour tous les usages pratiques.

Dans les matériaux pour vues instantanées, les effets de la diffusion de la lumière dans les couches négatives n'agissent pratiquement pas sur la structure des images, puisque celles-ci ne sont pas agrandies. Par contre, la diffusion des composés du traitement n'intervient pour ces procédés que dans une faible mesure, le transfert des colorants ou des ions argent entre les couches négatives et la couche réceptrice constituant le tirage du positif par contact. La diffusion latérale des constituants des images est inhibée, toutefois, dans ces produits, par la minceur des couches et la vitesse des réactions mises en jeu, en particulier par la puissance du mordançage dans la couche réceptrice qui immobilise instantanément les colorants et empêche ainsi leur diffusion latérale.

Les fonctions de transfert de modulation et d'autocorrélation

Prise dans le sens le plus général, une image photographique n'est pas autre chose qu'un enregistrement graphique de données. Comme toute autre reproduction, cet enregistrement ne peut évidemment pas être entièrement parfait. Sa qualité est limitée — nous venons de le voir — par des propriétés inhérentes au principe du procédé photographique, qui permettent un transfert optimal, mais imparfait, de l'information. Considérée sous cet aspect, la reproduction photographique peut donc être incluse dans le domaine général du transfert de l'information et traitée, comme les autres méthodes de ce transfert, par analyse harmonique.

Jusqu'à présent, nous avons considéré séparément chacun des trois paramètres de la structure des images photographiques. Ce mode d'approche provient des méthodes de mesure normalement appliquées : la *granularité* est mesurée par la détermination de la variation microscopique moyenne de densité à l'aide d'une ouverture ronde de diamètre donné; le *pouvoir de résolution* est mesuré à l'aide d'une mire de traits parallèles à bords nets, par la limite de sa perception en reproduction de plus en plus réduite; et la corrélation objective de la netteté, l'*acutance*, est évaluée d'après la qualité de la reproduction d'une distribution d'éclairement entièrement nette le long de la frontière entre une plage éclairée et une plage sombre. Or, en transfert d'information, on détermine la qualité du résultat en mesurant la perte

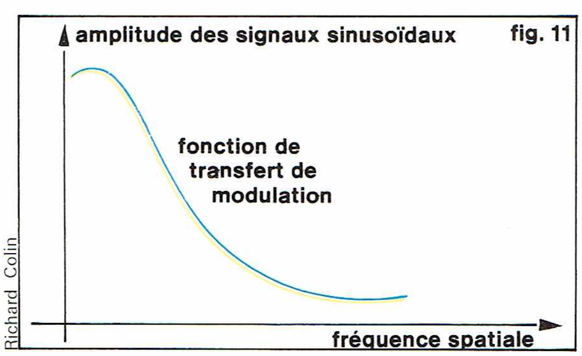

▶ ***Figure 11** : la fonction de transfert de modulation de la reproduction photographique; cette fonction est équivalente à un spectre de transmission et permet de juger de la qualité de la reproduction photographique; la rapidité de la perte d'amplitude en fonction de la fréquence spatiale donne une indication précise de la netteté, et la dernière fréquence sinusoïdale reproduite indique le pouvoir de résolution.*

d'amplitude de signaux sinusoïdaux, sachant qu'ils conservent toujours leur forme initiale, bien qu'ils aient été affaiblis par le transfert.

Au lieu de mesurer séparément le pouvoir de résolution et la netteté, on effectue donc la copie de mires à distributions sinusoïdales de luminance, de fréquences successivement croissantes, et on constate sur l'image photographique les pertes d'amplitude pour chacune de ces fréquences. Portées sur un graphique en fonction de leurs fréquences spatiales, mesurées en cycles par millimètre, les amplitudes résiduelles de la reproduction donnent la *fonction de transfert de modulation* (*fig.* 11). Celle-ci, qui est en fait équivalente à un spectre de transmission, permet de juger de la qualité de la reproduction par le matériau ou procédé considéré : la rapidité de sa perte d'amplitude en fonction de la fréquence spatiale donne une indication précise de la netteté, et la dernière fréquence sinusoïdale reproduite indique le pouvoir de résolution, puisque, à cette limite, disparaît la distinction entre un signal d'entrée sinusoïdal ou en créneaux.

L'inclusion de la granularité dans le transfert d'information se fait à partir des mesures conventionnelles, c'est-à-dire à l'aide de la variation moyenne de densité d'une plage de dimension donnée, exposée à un éclairement uniforme et traitée. A partir de cet enregistrement de la granularité, on peut déterminer le degré de corrélation entre ses valeurs correspondant à des points séparés par des distances appropriées, choisies suivant le grossissement utilisé. La caractéristique ainsi déterminée de la granularité est l'autocovariance, qui donne, en fonction de la fréquence spatiale, la *fonction d'autocorrélation*, mesure de la granularité à l'aide de laquelle il est possible d'effectuer la liaison avec la fonction de transfert de modulation. On peut ainsi étudier sous une forme entièrement cohérente les trois aspects de la structure d'image des matériaux photographiques.

Sensibilité photographique et contenu d'information

La microstructure d'une image photographique influence non seulement sa qualité, mais elle agit également — dans un sens plus général que la simple notion de sensibilité sensitométrique — sur la sensibilité de son enregistrement d'information. Vu sous l'angle de celui-ci, le but d'une photographie est en effet la conservation et la transmission de données, et on juge par conséquent sa sensibilité intrinsèque par l'évaluation de tous les facteurs qui agissent sur sa capacité d'emmagasinage et de transfert d'information.

Sensibilité limite d'un système photographique

La sensibilité d'un système photographique est évidemment définie par ses éléments photosensibles, c'est-à-dire, dans le cas des systèmes photographiques fondés sur le système classique, par les halogénures d'argent. La limite ultime de leur sensibilité dépend de l'énergie minimale nécessaire pour constituer une image latente; pour la déterminer, nous devons donc partir de la théorie de celle-ci. Un modèle de Hamilton, Spencer et Brady situe le mécanisme de l'image latente par rapport au niveau de l'énergie apportée par l'exposition. Le cristal non exposé contient — nous l'avons vu — des ions argent mobiles et des imperfections de surface physiques et chimiques. Chaque absorption d'un photon crée simultanément un électron et une « cavité » positive, captés aussitôt tous deux dans des pièges constitués par des imperfections appropriées du réseau cristallin. Un électron ainsi retenu dans un piège peu profond peut alors soit s'échapper à nouveau, soit être rejoint par un ion argent. S'il s'échappe, il peut être saisi par une cavité piégée elle-même, mais, s'il est rejoint par un ion argent, il approfondit le piège superficiel, et celui-ci attire alors un nouvel électron, qui fixe à son tour un autre ion argent. La répétition de ce cycle agrandit le piège jusqu'à une taille critique, suffisante pour catalyser ultérieurement le développement du cristal entier. Les divers centres fixes et les porteurs de charges mobiles agissent ainsi chacun dans une succession aléatoire d'événements. L'étude de ce processus par la méthode statistique dite de Monte-Carlo, effectuée parallèlement à des observations au microscope électronique, démontre qu'une exposition à intensité faible a plutôt tendance à ne créer qu'un centre isolé d'image latente par cristal, tandis que des niveaux plus élevés d'éclairement font augmenter le nombre des centres initiateurs de développement, dispersés à la limite suivant une distribution statistique de Poisson.

L'évaluation de la sensibilité limite, fondée sur ce mécanisme et sur ceux qui sont donnés par des théories du même type, conduit à la conclusion que les émulsions modernes exploitent entièrement l'énergie étonnamment faible apportée par l'exposition, et qu'une amélioration de l'efficacité quantique, même si elle était possible, conduirait inévitablement à une perte de la structure d'image par une granularité accrue et une diminution de la définition.

La limite de la sensibilité photographique dépend aussi, par ailleurs, de la nature du rayonnement qui apporte les éléments de l'information contenue dans l'image. Dans le cas de la lumière visible et des autres rayonnements auxquels on expose les couches sensibles, les messages qu'ils contiennent atteignent les couches par impacts séparés de photons ou de quanta non visibles. Par ailleurs, les microsignaux enregistrés dans une photographie sont aussi composés d'éléments séparés, constitués — nous l'avons vu — par des amas de minuscules nuages de colorants ou de « grains » d'argent qui forment un enregistrement discontinu. La sensibilité photographique dépend ainsi, d'une part, du nombre minimal de quanta capables de rendre développable un microcristal d'halogénure d'argent, et, d'autre part, de la lisibilité du signal malgré sa structure discontinue.

En ce qui concerne le premier de ces deux facteurs, il est à présent établi que quatre quanta seulement sont nécessaires par cristal pour permettre au révélateur d'amorcer le développement d'un cinquième environ des cristaux les plus sensibles d'un film négatif ou inversible rapide. Pour rendre développable la moitié des cristaux sensibles de ces couches, il faut de dix à vingt-cinq quanta par cristal, et pour que tous les cristaux soient rendus développables, il faut de dix à cent fois plus d'incidences de quanta.

Le deuxième facteur, la lisibilité des informations enregistrées, dépend évidemment du rapport qui existe entre leur importance et celle des variations aléatoires du fond, dues à sa nature discontinue. On qualifie ces dernières de variations de bruit — par analogie avec le bruit de fond en télécommunication —, et on considère qu'un signal enregistré est réel et détectable lorsque sa densité optique est au moins supérieure à l'écart-type des fluctuations statistiques de la densité uniforme du fond, variations résultant de la granularité de l'image.

Contenu d'information des systèmes photographiques

L'image photographique, considérée comme élément transmetteur d'information, est caractérisée par son contenu significatif; c'est le rapport entre la probabilité de présence d'un signal dans l'image et la fréquence d'envoi de messages à partir de la scène photographiée. En ce sens, un détecteur photographique parfait saurait distinguer un signal du bruit qui l'accompagne; il enregistrerait — nous venons de le voir — chacun des messages dès que son énergie serait supérieure à l'écart-type des variations statistiques du flux uniforme des photons ou quanta qui l'entourent. Or, un détecteur réel ne peut retenir qu'une fraction de ces messages; par conséquent, son efficacité est définie par le rapport entre sa capacité de détection de signaux au milieu d'un flux continu de rayonnement ambiant et celle d'un détecteur parfait soumis aux mêmes conditions.

Cette définition correspond aussi à la constitution des couches photographiques : leurs récepteurs élémentaires, les cristaux d'halogénure d'argent, se comportent comme des récepteurs binaires, puisque, après exposition, ils ne peuvent se trouver que dans un des deux états : ou bien ils portent une image latente et contribuent alors à la transmission du message, ou bien ils restent vierges et disparaissent ultérieurement dans le traitement sans avoir participé au transfert de l'information. La *capacité d'information d'une couche photographique* est donc donnée par le nombre maximal de signaux qu'elle est capable d'enregistrer de telle façon qu'ils puissent ensuite tous être lus sans erreur.

F. Hidalgo-Top

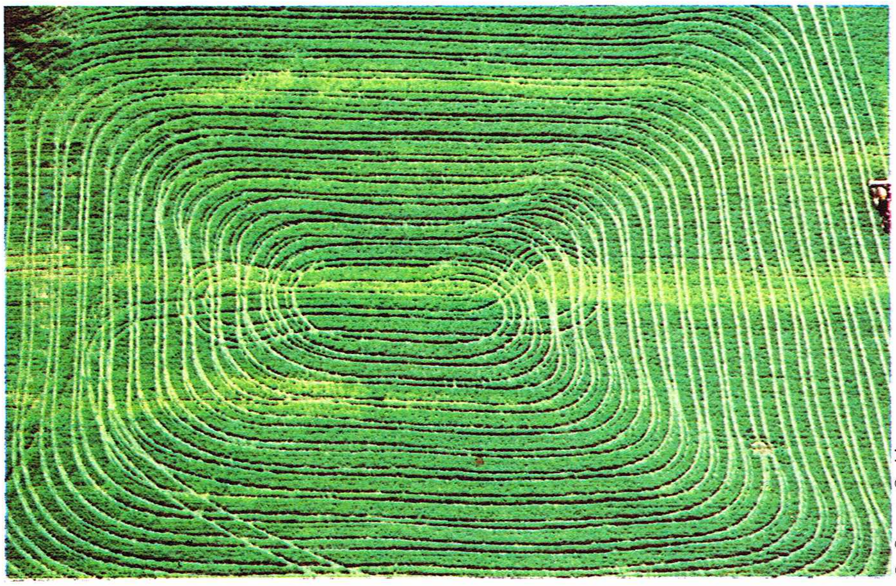

C. Sappa-Cedri

▲ En haut, photo truquée de la basilique Saint-Marc à Venise. En bas, photo aérienne d'un champ entre Vannes et La Roche-Bernard (Morbihan).

Il peut arriver que des conditions défavorables de prise de vue, imposées et impossibles à corriger, par exemple en exploration spatiale, empêchent la représentation exacte de la scène à reproduire. On applique alors, pour extraire de ce premier enregistrement photographique un maximum d'information, des techniques particulières que l'on appelle des *traitements des images*. D'abord, les densités de chaque point de l'image originale imparfaite sont notées dans une calculatrice, par une exploration lignée similaire à celle de la télévision, et cet enregistrement est ensuite soumis à des corrections appropriées, choisies en fonction du mécanisme de dégradation ayant agi sur l'image.

Une des techniques récentes de traitement des images photographiques est celle du « noise-cheating », ou élimination du bruit. Une image prise par nécessité en éclairement très faible est souvent perturbée, en effet, par la présence d'une quantité élevée de signaux dus au bruit, presque aussi importante que celle due à l'image proprement dite. Pour retrouver dans cette image le maximum des signaux de la scène, non perturbés par le bruit, on emploie alors d'abord une ouverture d'exploration de diamètre relativement élevé. Ayant ainsi diminué le niveau du bruit, on explore l'image une deuxième fois avec une ouverture plus faible, d'un diamètre égal à la moitié de celui de la première. Suivant la théorie de la granulation, on réduit ainsi le bruit à un huitième de sa valeur initiale, et la restauration de l'image par la superposition des signaux, ainsi triés et appartenant à des niveaux d'intensité bien séparés, donne un résultat beaucoup plus détaillé que l'enregistrement original. Des vues de galaxies, à l'origine à peine visibles, ont ainsi été rendues presque entièrement lisibles.

Une autre technique permet de corriger des manques de netteté par « nutation » : l'image originale est d'abord soumise à un mouvement de rotation locale de très petit diamètre, correspondant approximativement au flou original, et copiée ainsi. La soustraction des densités de cette copie floue de celles de l'enregistrement original restaure alors la netteté de celui-ci. Des méthodes dérivées de cette technique peuvent évidemment servir à éliminer des défauts différents des absences de netteté, par exemple par le choix d'un mouvement autre qu'une rotation pendant la copie, ou par des répétitions de ces mouvements.

Dans les applications de la photographie aux explorations à distance, la couleur des images peut servir à la mise en valeur de signaux ou détails peu visibles à l'origine. En augmentant leurs différences de composition spectrale, on peut faire ressortir des contours qui ne diffèrent pas assez en densité, ou on peut restaurer des détails par des superpositions de plusieurs images monochromes différentes. Il est possible, aussi, d'effectuer des traitements d'images photographiques par des tirages de plusieurs générations de copies d'un premier enregistrement, par exemple pour la détermination automatique de modifications locales, dans l'évolution des teintes des champs dans des exploitations agricoles, d'après des vues aériennes. En exploitation forestière, on emploie des films à couleurs d'images interverties et à sensibilités décalées vers l'infrarouge : dans un tel film, le film Kodak Ektachrome Infrarouge, employé à l'origine pour la détection d'installations d'intérêt militaire dissimulées par des peintures de camouflage, la couche du fond, sensible à l'infrarouge, donne l'image cyan (bleu-vert), la deuxième couche, sensible au rouge, donne l'image magenta, et la troisième couche, sensible au vert, donne l'image jaune. L'avantage des techniques purement photographiques est l'observation de la résolution originale de l'image, ainsi que de la géométrie relative des sujets représentés.

Le traitement des images photographiques en couleurs dans des calculatrices est couramment employé en astronomie et dans l'exploration spatiale. Une des techniques employées est celle des rapports des réflexions spectrales : on enregistre d'abord simultanément, à l'aide de trois caméras, des images de sélection à l'aide de filtres rouge, vert et bleu. Après un traitement très précis, ces images donnent par le calcul, en chaque point du sujet, les rapports du rouge au vert et du bleu au vert. En passant alors par le diagramme des couleurs de la Commission internationale de l'éclairage, on détermine, pour chacun de ces rapports des couleurs primaires, les valeurs correspondantes de quatre sources de couleurs qui servent à exposer des images traitées sur un nouveau film, rendues plus lisibles que les originaux.

Le rôle de la photographie dans le monde moderne

Dans le premier chapitre de notre description, le résumé historique, nous avons pu suivre l'évolution de la photographie vers son rôle capital dans la vie moderne. En effet, la photographie est à présent un des éléments de la vie quotidienne de toutes les familles des pays évolués : aux États-Unis d'Amérique, par exemple, 90 % environ des petites filles au-dessous de quinze ans et 70 % environ des petits garçons de cet âge ont des appareils. En grandissant, ce sont les garçons qui sont plus attirés par la photographie, et environ 83 % la pratiquent entre quinze et vingt ans. En France, 70 % des utilisateurs des

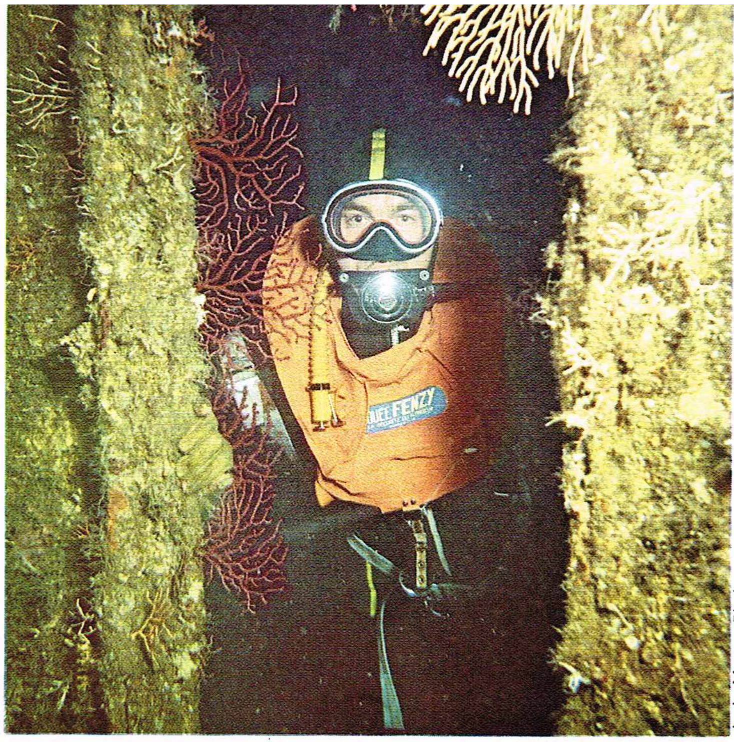

J.-J. Meusy-Pitch

J.-J. Meusy-Pitch

▲ *Deux vues sous-marines prises près de Marseille au niveau de l'épave du Liban. A gauche, le cliché normal ; à droite, un effet photographique réalisé par le procédé Agfa-contour.*

appareils photographiques à chargement rapide ont moins de trente-cinq ans, et l'âge de la pratique de la photographie baisse constamment : en 1976, la moyenne d'âge des débutants s'est située autour de treize ans. En ce qui concerne la dépense attribuée à la photographie, elle s'élève aux États-Unis en moyenne à 75 F par année et par famille, et en Europe occidentale à un équivalent de 28 F environ. Dans les pays en cours de développement, cette dépense est nécessairement plus faible et n'atteint qu'une valeur approchant 1,80 F. Toutefois, le marché mondial s'accroît constamment. S'élevant en 1974 à 28 millions d'appareils fabriqués par an, il est estimé pour 1977, par une source japonaise, à 30 millions d'appareils, dont huit millions environ d'origine japonaise. En France, le parc total des appareils en état de fonctionner, en 1975, s'élevait à 15 millions d'exemplaires environ, répartis dans 58 % des foyers français. Par comparaison, la même année, 63 % des foyers français disposaient d'une voiture automobile au moins. La répartition par type d'appareils peut être jugée, en première approximation, par les nombres d'appareils vendus. En 1975, ces nombres s'élevaient en France, pour les appareils 24 × 36, à 13 %, et pour l'ensemble des appareils à développement instantané, à 27 %, mais ce sont visiblement les appareils à chargement rapide qui ont la plus grande faveur du public, puisqu'ils représentent 60 % de ce marché, s'élevant au total à plus d'un million et demi d'appareils. Ces appareils à chargement rapide servent d'ailleurs presque exclusivement à la prise de vue en couleurs.

Les chiffres totaux atteints montrent encore mieux l'importance prise par la photographie : suivant une statistique publiée aux États-Unis d'Amérique dans le plus récent rapport Wolfman, le nombre des photographies d'amateurs s'élevait aux U. S. A. en 1974 à 6 400 millions, dont 5 600 millions en couleurs, réparties en 4 300 millions d'épreuves et 1 300 millions de diapositives. A ces chiffres s'ajoute la quantité impressionnante de 1 400 millions de photographies noir et blanc et couleurs à développement instantané.

Si l'on inclut aussi dans ce marché photographique le cinéma d'amateurs en Super 8, on constate une croissance encore plus rapide : de 2,5 millions d'appareils fabriqués en 1974, il atteindra sans doute en 1977 le chiffre de 2,8 millions, dont environ 1,09 million d'origine américaine et 1,05 million d'origine européenne ; en France, la vitesse d'extension de ce marché est remarquable : de 1,4 % des foyers qui pratiquaient en 1960 le cinéma d'amateurs, le chiffre est monté à 9 % jusqu'en 1976.

L'énumération de ces chiffres impressionnants ne donnerait qu'une image incomplète du rôle de la photographie si on omettait de mentionner les industries travaillant directement et indirectement pour elle. En effet, des ensembles très importants d'usines, réparties à travers le monde, sont consacrés à fabriquer des appareils et des surfaces sensibles, en Europe occidentale, aux États-Unis d'Amérique et au Japon. Ces énormes industries consomment des quantités très importantes de matières premières, parmi lesquelles de nombreux produits chimiques (polyesters, triacétate de cellulose, acide nitrique, argent, hyposulfites et autres), et de matériaux naturels, tels que les os et les peaux fournissant la gélatine des couches. Ainsi, les industries photographiques contribuent à l'animation d'un grand nombre d'industries non photographiques dont elles sont les premiers consommateurs. A ces industries s'ajoutent encore les industries consommatrices, telles que les usines de façonnage d'épreuves et de traitement de films, les usines de photogravure, les laboratoires cinématographiques et bien d'autres. La photographie ne constitue donc pas seulement un des éléments de nos activités quotidiennes, mais elle a pris une place telle qu'elle contribue à faire vivre une partie importante du monde moderne.

▼ *La photographie est à présent un des éléments de la vie quotidienne dans les pays évolués ; en 1976, la moyenne d'âge des débutants était située autour de 13 ans, et on considère que la dépense consacrée à la photographie en Europe occidentale est de 28 F environ par an et par famille (à gauche). Des ensembles importants d'usines sont consacrés à la fabrication d'appareils photographiques et de surfaces sensibles, notamment en Europe occidentale, aux États-Unis et au Japon (à droite, assemblage de pièces dans une usine Nikon au Japon).*

Petzold-Pitch

G. Gerster-Rapho

▶ *Deux documents anciens relatifs au cinéma ; à gauche, un exemplaire du cinématographe Lumière, appareil utilisé aussi en Angleterre lors des premières projections (Arch. Science Museum, Londres) ; à droite, une gravure extraite du* Petit Journal *(1912), montrant les dangers du reportage de guerre : deux opérateurs de cinéma échappent de peu à la mort.*

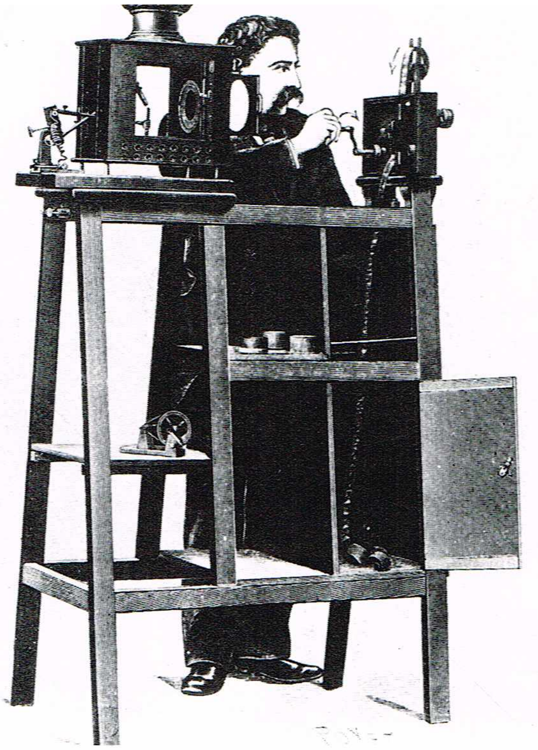

Archives Snark

Archives Snark

LE CINÉMA

Panoramique sur le cinéma

De technique brute, le cinéma est devenu un art qui, bien que souvent controversé, a su s'imposer au public au cours d'un processus extrêmement rapide, qui a vu son aboutissement dans la sphère hollywoodienne. L'évolution des techniques cinématographiques, qui n'a pas été sans influence sur le « cinéma-spectacle », a également permis d'utiliser le matériau filmique à d'autres fins professionnelles. C'est ainsi qu'aujourd'hui un très grand nombre d'activités sont illustrées et mises en valeur à l'aide du cinéma. Ces différentes illustrations font cependant appel à des techniques particulières, et il serait vain de vouloir les regrouper toutes sous une même affiche. Le seul « cinéma-spectacle » n'est pas exempt, lui non plus, d'une telle diversité : à côté des films classiques qui mettent en scène des décors et des personnages réels, on trouve des films d'animation dont les techniques sont également très variées : dessins animés, animations de marionnettes, dessins directement réalisés sur film, etc. L'évolution des techniques cinématographiques a également permis un essor considérable du cinéma d'amateur. Ainsi, de nos jours, convient-il de répertorier les différentes formes et utilisations du cinéma de la manière suivante.

* *Films destinés à l'exploitation commerciale dans des salles spécialisées.* Ces films sont produits, réalisés, distribués puis exploités selon des critères qui bien souvent relèguent le septième art au rang d'une industrie classique. Les moyens mis en œuvre pour les réaliser sont très différents : si le coût moyen d'un film français est d'environ trois millions de francs, le budget de certaines grandes productions peut être dix fois plus élevé, tandis que celui des films sans grandes vedettes, sans publicité et tournés parfois avec des moyens précaires, tourne autour d'une centaine de milliers de francs. Il s'avère donc très difficile, même au sein du cinéma commercial, d'établir des règles générales concernant la production et la réalisation des films. De plus, leur distribution, qui se limitait autrefois aux salles de spectacle conventionnelles, est aussi, depuis quelques années, réalisée par l'intermédiaire de la télévision.

* *Films à caractère professionnel ne faisant pas l'objet d'une distribution classique.* Dans cette catégorie se trouvent les films d'actualités, de reportage et de documentaire, généralement réalisés en 16 mm avec du matériel léger apte à des prises de vues « sur le champ » dans des conditions difficiles. Leur distribution est assurée principalement par les différentes chaînes de télévision, les instituts nationaux et certains organismes d'enseignement. Ils peuvent aussi servir de support à la réalisation de cours audio-visuels : il n'est d'ailleurs pas rare, dans ce cas, que les copies projetées soient en format Super 8 mm.

Il faut y ajouter les films industriels et scientifiques. Les premiers étudient et mettent en valeur certains aspects de l'activité industrielle (jusqu'à se transformer dans certains cas en une véritable opération publicitaire). Les films industriels, malgré des conditions de tournage parfois très difficiles, sont réalisés à l'aide de matériel professionnel et suivant des méthodes classiques. Il n'en est pas de même des films scientifiques qui nécessitent fréquemment l'emploi de caméras à grande vitesse, d'objectifs spéciaux, de films « à infrarouges » et de projecteurs d'analyse. Cette énumération n'est évidemment pas limitative, puisqu'il existe, pourrait-on dire, un nombre illimité d'appareils spéciaux destinés au cinéma scientifique : nous ne citerons, à titre d'exemple, que les endoscopes utilisés pour la réalisation de certains films médicaux, qui permettent l'exploration des diverses cavités du corps humain.

Enfin, les films publicitaires appartiennent également à cette catégorie : le film sert alors de support à des slogans publicitaires. Bien que leur contenu soit parfois fort discutable, il convient de remarquer que ces films sont bien souvent d'une qualité technique exceptionnelle. Ils sont réalisés en format 35 mm ou 16 mm et font fréquemment appel à des truquages fort intéressants. Leur distribution est assurée, sous forme de « spots publicitaires », dans les salles de spectacle et à la télévision.

* *Films d'amateurs ne faisant l'objet d'aucune exploitation commerciale.* Le petit monde du cinéma d'amateur s'est considérablement agrandi depuis une dizaine d'années, en partie grâce aux nombreuses améliorations techniques (facilité d'emploi, encombrement réduit, meilleure qualité des optiques, etc.) qui ont été apportées aux appareils de format réduit ainsi qu'aux prix de vente relativement bas pratiqués par les différents constructeurs (le nombre des appareils vendus et la concurrence jouant dans ce sens). Le format Super 8 mm, qui a progressivement remplacé le 8 mm et le 9,5 mm, est incontestablement le format le plus souvent utilisé. Les films d'amateur ont en général un caractère familial ou documentaire, même si d'aucuns, à partir d'un scénario préalablement établi, font appel à des dialogues et à des bruitages synchrones.

Préparation d'un film

A l'origine, un film n'est qu'une idée confuse dans l'esprit d'un créateur — à moins qu'il ne s'inspire d'un ouvrage littéraire ou d'une pièce de théâtre, idée qui fera ses premiers pas dans le monde du cinéma sous la forme d'un « synopsis » ; ce dernier, sorte de résumé, sera ensuite développé et structuré en unités dramatiques d'où sera tiré le scénario. Le scénariste — encore appelé adaptateur — établira alors, en collaboration avec le réalisateur et le dialoguiste, la continuité dialoguée qui servira de base à l'élaboration du découpage du film : les unités dramatiques seront découpées en séquences,

les scènes en plans, et chaque plan sera caractérisé par son cadrage, l'angle sous lequel il sera pris, la focale utilisée et, enfin, par le nombre plus ou moins important de renseignements techniques à l'usage des différents collaborateurs du metteur en scène.

Chaque réalisateur utilise une technique particulière de découpage et, si certains établissent des découpages extrêmement précis avec des plans au sol indiquant le déplacement des personnages et de la caméra, d'autres, au contraire, se contentent d'un minimum de préparation pour se donner au tournage une certaine liberté d'improvisation. Le découpage est avant la lettre une représentation écrite du film : chaque plan y est décrit par rapport à la partie de l'espace qu'il recouvre, d'où les appellations de plan général et de plan d'ensemble, et relativement à une échelle anthropométrique (plan moyen, plan américain, gros plan et très gros plan). A partir de là, le réalisateur détermine les angles de prise de vues en fonction de la hauteur à laquelle est placée la caméra : hauteur normale, plongée, contre-plongée. Le découpage doit également préciser si le plan est fixe ou s'il est affecté d'un mouvement de caméra : panoramique, travelling, travelling optique ou mouvement combiné. Enfin, l'auteur du découpage doit également prévoir la succession des plans en évitant les faux raccords de toutes sortes.

Une fois terminé, le découpage est remis à l'assistant réalisateur qui, en collaboration avec la « script-girl », en établit le dépouillement. Ce dernier, comme son nom l'indique, consiste à répertorier en détail tous les personnages, les accessoires et les décors ayant place dans le découpage. Chaque plan est dépouillé, minuté et classé chronologiquement par rapport à l'ordre de tournage du film. A partir du découpage et du dépouillement, on procède au choix des comédiens, des décors, des extérieurs et des accessoires, enfin de tous les moyens matériels nécessaires au tournage des différentes scènes. A la fin de cette période de préparation, dont la durée, très variable, peut s'étaler sur une année entière, le premier assistant-réalisateur établit le plan de travail, vaste tableau récapitulatif qui servira de guide pendant toute la durée du tournage.

Le film : du tournage à la projection

De l'enregistrement des images sur la surface sensible jusqu'à leur restitution sur les écrans des salles de spectacle, le film parcourt un long itinéraire aux contours très précis. Nous allons étudier à l'aide d'un schéma les différentes étapes du parcours et faire ainsi une première approche de la terminologie propre au cinéma (*fig.* 1). **(1)**. Images et sons sont enregistrés en synchronisme sur leurs supports respectifs : le film et la bande magnétique lisse 6,25 mm. **(2)**. Les prises sélectionnées du film sont envoyées dans un laboratoire cinématographique afin d'y être développées et tirées. **(A)**. Pendant ce temps, la bande magnétique lisse est repiquée sur une bande magnétique perforée. **(3) (B)**. On effectue alors dans la salle de montage le prémontage synchrone de la copie de travail, de la « bande-image » et de la « bande-son ». Il est ensuite possible pour l'équipe de production de visionner les « rushes » synchrones des scènes précédemment tournées et de faire ainsi une sélection définitive des plans à conserver ou éventuellement à refilmer. Lorsque le tournage du film est achevé, on obtient alors le prémontage synchrone de la bande-image et de la bande-son. **(C)**. A cette dernière s'ajoutent également des éléments de mixage (bruitages, phases musicales). **(4)**. Il convient de remarquer que du négatif original sont tirés un interpositif de sécurité, utilisable en cas de perte ou de dégradation de l'original, et un autre interpositif, **(5)** monté soigneusement sur le modèle de la copie travail. Ce dernier passe ensuite dans une tireuse optique au service « truca » du laboratoire, dans lequel on effectue la réalisation des effets spéciaux (fondus, effets de volets, etc.) **(6)**. On obtient de la sorte un internégatif monté et truqué. **(7)**. Cette opération terminée, on procède en laboratoire au délicat montage du négatif original : c'est la conformation du négatif. Ce travail est effectué à l'aide de chiffres repères, dits « footage », inscrits, tous les pieds, sur le négatif, et photographiés sur le positif. **(E)**. D'un autre côté, les différentes bandes-son (paroles, bruitages, musique) sont mixées ensemble sur une même bande. **(8)**. Une copie zéro est alors tirée, sur laquelle on effectue le transfert optique du son. Elle permet à la production de contrôler la qualité finale du film ; si elle est jugée satisfaisante, on procède au tirage d'un ou de plusieurs interpositifs, **(9) (H)** sur lesquels est modulé le son optique, puis d'internégatifs dont le nombre dépend de l'ampleur de la diffusion envisagée et, en dernier lieu, au tirage des copies du pays d'origine. En effet, une bande sonore uniquement constituée de musique et de bruitage est mixée pour les pays étrangers. Le doublage dans la ou les langues choisies est réalisé dans une salle dite de « doublage » ; on obtient ensuite les copies destinées à l'étranger selon le même procédé que celles à destination du pays d'origine.

Les formats de films et les différents procédés cinématographiques

Le format du film correspond à la largeur de la pellicule. Le format de l'image est indépendant du format du film : il est caractérisé par le rapport entre la largeur de l'image et sa hauteur, $F_{image} = \frac{L}{H}$; par exemple, 1,33 (image du film standard muet 35 mm) $= \frac{24 \text{ mm}}{18 \text{ mm}}$. Depuis la naissance du cinéma jusqu'à la fin du cinéma muet, l'image cinématographique positive s'est présentée sous le format suivant : 18 mm pour la hauteur, et 24 mm pour la largeur ; proportion : 1,33. Les intervalles séparant les images avaient des cotes de 0,5 mm à 1 mm, selon l'appareil employé par l'éditeur de films. Les diverses cotes de la pellicule de cinéma, et surtout celles de la perforation, connurent un commencement de normalisation au Congrès international des éditeurs de films de 1908, présidé par Georges Méliès. Quand le cinéma sonore apparut, l'image fut réduite afin de laisser une marge pour l'enregistrement des sons, et l'image positive se présenta sous le format suivant : 18 mm pour la hauteur et 21 mm pour la largeur, soit une proportion de 1,16. Mais l'image inscrite dans ce format presque carré était disgracieuse, et cette proportion était contraire à tous les principes de composition selon lesquels un des éléments de la forme doit dominer l'autre. Devant cette exigence, et pour trouver une proportion meilleure, on augmenta les intervalles entre les images, et le format normalisé apparut : 16 mm × 22 mm, proche de la proportion 1,37 (16,5 mm × 22 mm).

Mais, déjà, on travaillait dans le format dit « cadre américain » qui se présentait, pour l'image projetée, sous la forme de 15,6 mm de hauteur et de 20,8 mm de largeur, soit une proportion de 1,33. On distingue de nos jours six grands types de format de films : le 70 mm et le 35 mm, réservés généralement à la production professionnelle, le 9,5 mm, le 8 mm et le « Super 8 mm », considérés comme formats d'amateurs, et le 16 mm employé à des fins diverses par chacune des catégories précédemment citées.

▼ ***Une scène du tournage du film* Section Spéciale *de Costa-Gavras, à Paris en 1974.***

Y. Jeanmougin-Viva

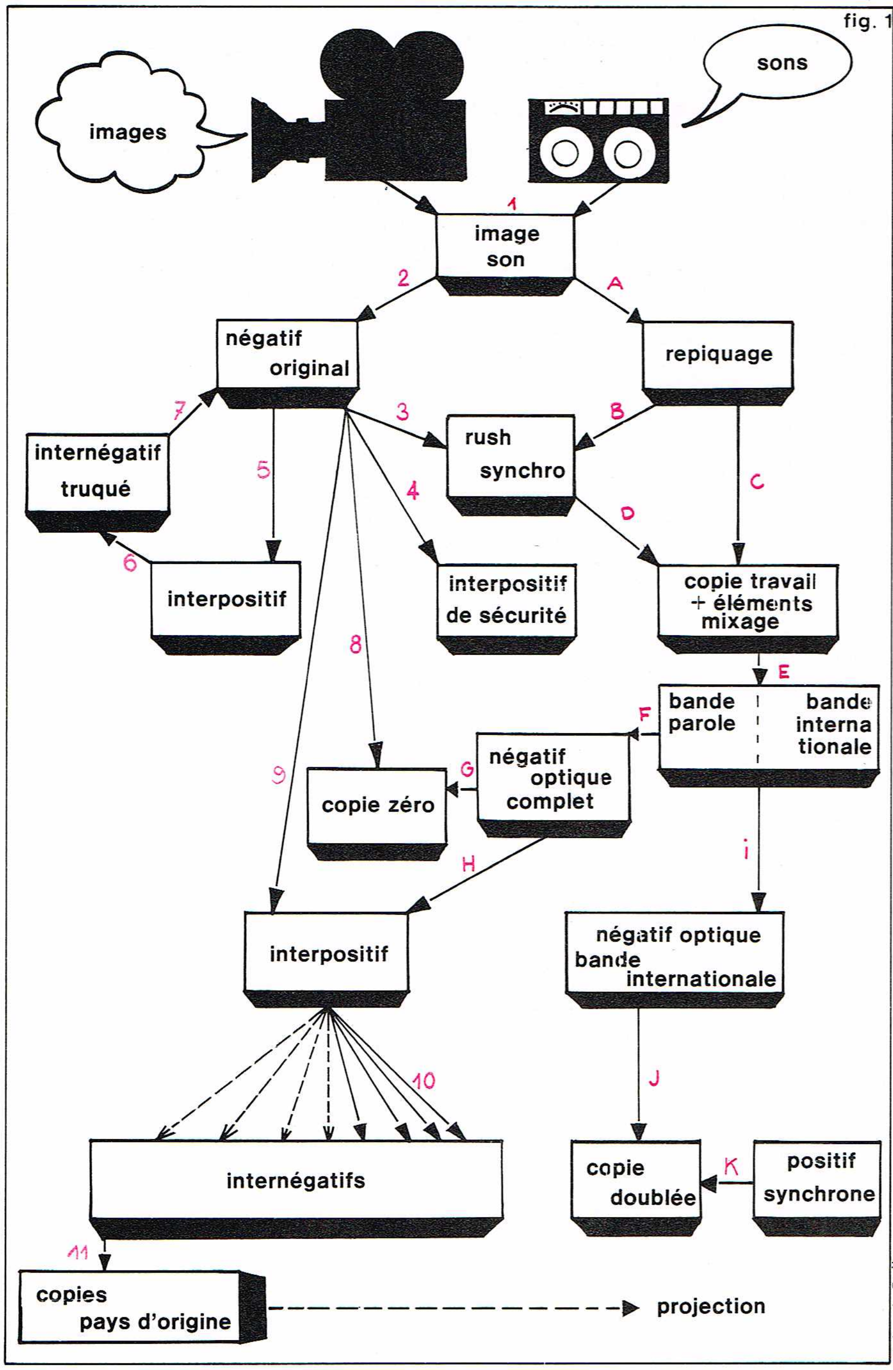

Le format 35 mm

C'est le format type employé par les professionnels. Le défilement du film dans la caméra est vertical, son entraînement est bilatéral et porte simultanément sur 2, 4 ou 8 perforations. Les dimensions de l'image du standard muet sont 24,4 mm × 18,4 mm, soit un format de 1,33, et un coefficient d'utilisation du film de 0,69. Les dimensions de l'image du standard sonore 35 mm sont 22 mm × 16 mm, soit un format de 1,37, et un coefficient d'utilisation de 0,55 (*fig.* 2). On dénombre 4 perforations par image et par côté.

La plupart du temps, un cache métallique est interposé devant la fenêtre de prise de vue, de façon à obtenir des formats panoramiques : la largeur de l'image reste inchangée, tandis que la hauteur diminue. On obtient ainsi le format de 1,65 (22 mm × 13,27 mm), format devenu classique sur film 35 mm. En interposant un cache sur la fenêtre de projection, on a la possibilité de créer les formats 1,75 (21 mm × 12 mm) et 1,85 (21 mm × 11,35 mm). Cette solution simple, permettant d'obtenir des formats panoramiques, présente néanmoins deux graves inconvénients : elle implique, d'une part, une perte de surface importante dans l'interimage (l'image muette standard a une surface utile de 432 mm^2 qui est réduite à 268 mm^2 pour le 35 mm sonore de format 1,65) et, d'autre part, l'apparition de fâcheuses surprises de cadrage lors de la projection (dues aux dimensions différentes de la fenêtre de prise de vue et de la fenêtre de projection). Le film 35 mm peut également être utilisé en défilement horizontal : c'est le procédé Vistavision de Paramount qui nécessite, soit l'utilisation d'un projecteur à défilement horizontal, soit le tirage de copies panoramiques.

Le format 70 mm

Les films positifs 70 mm sont tirés à partir de négatifs de 65 mm de format. Durant le tirage, il n'y a pas d'augmentation de la surface de l'image : il est simplement rajouté l'espace nécessaire à l'emplacement des différentes pistes sonores. Le film de 65 mm de large contient une image de 49 mm sur 22 mm (soit un format panoramique de 2,2), comportant 5 perforations par côté.

L'anamorphose et son application directe : le cinémascope

L'anamorphose est un procédé optique qui permet de réduire ou au contraire d'agrandir l'image d'un objet donnée par un objectif. En cinéma, les anamorphoses s'effectuent uniquement sur la largeur de l'image (*fig.* 3) : de ce fait, la hauteur restant inchangée, l'image du sujet se trouve compressée en largeur sur le négatif comme sur le positif, puis décompressée lors de la projection à l'aide d'un objectif anamorphoseur (*fig.* 4). Il va de soi que la décompression réalisée durant la projection doit être proportionnelle à la compression qui a eu lieu lors de la prise de vue, faute de quoi les images restituées présenteraient des déformations anormales. La première utilisation d'un anamorphoseur en cinématographie remonte à 1928, date à laquelle le professeur Chrétien mit au point son dispositif optique « hypergonar ».

***▲ Figure 1 :* les différentes étapes de la réalisation d'un film, depuis le tournage jusqu'à la projection.**

***▶ Figure 2 :* les caractéristiques du film standard sonore 35 mm.**
***Figure 3 :* principe de l'anamorphose, procédé qui permet de réduire ou d'agrandir l'image d'un objet donnée par un objectif ; a, la réduction de l'image est réalisée dans le plan horizontal ; b, l'image reste inchangée dans le plan vertical.**

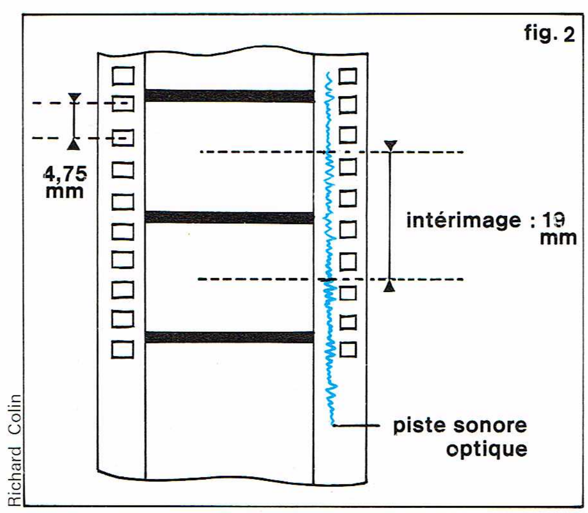

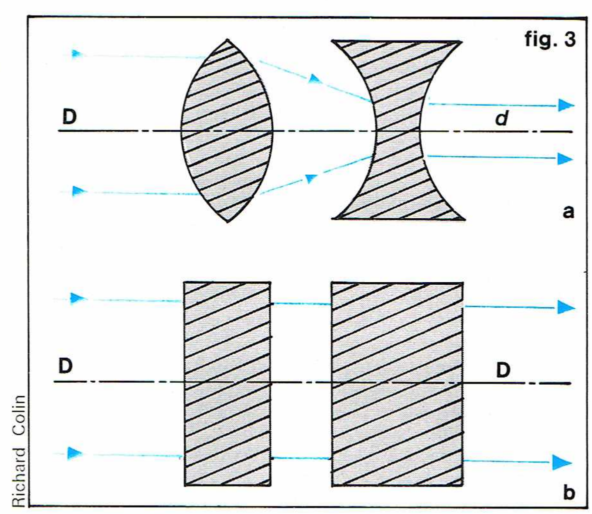

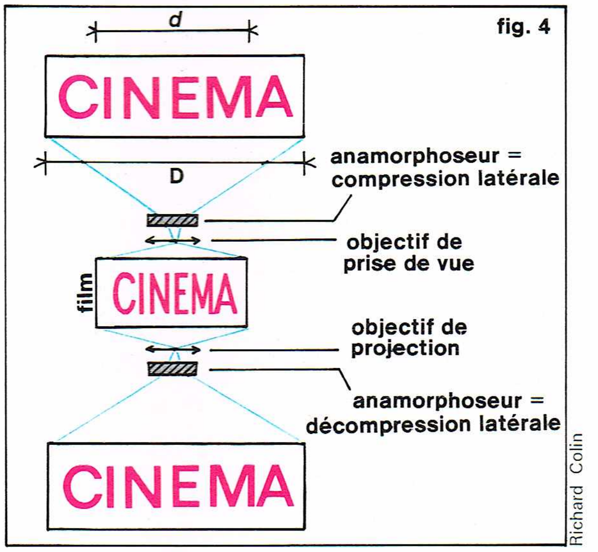

L'hypergonar, qui était alors disposé à l'avant d'un objectif sphérique classique, se présentait sous la forme d'un système optique afocal constitué de deux lentilles cylindriques (convergente et divergente). Ce n'est qu'en 1953, après qu'il eut subi quelques modifications, que la Société Fox commercialisa ce procédé sous le nom de *cinémascope*.

Dans les systèmes « en scope » généralement utilisés de nos jours, le coefficient d'anamorphose est de 2 : on filme donc des champs deux fois plus larges qui, après avoir été compressés sur le film, sont restitués sur l'écran à leurs dimensions réelles. Le cinémascope, qui utilise une pellicule 35 mm à petites perforations carrées, a un format de 2,55 (image négative compressée : 18,7 mm × 24 mm) qui se réduit à 2,35 lors de la projection. Il existe également de nombreux procédés spéciaux mettant en œuvre un anamorphoseur à la prise de vue ou en laboratoire. Parmi les plus usités en 35 mm, on peut citer le Techniscope, le Technirama, le Panavision et le Vistavision de Paramount, et, en 70 mm, le Super Panorama, le Panavision et l'Ultra Panavision. Il convient de préciser que les anamorphoseurs utilisés pour le tirage optique en laboratoire sont généralement constitués d'un système prismatique qui opère pour des distances conjuguées invariables.

Le format 16 mm

Né en quelque sorte de l'avènement de la télévision, le format 16 mm offre de très nombreuses possibilités d'utilisation. Il demeure en effet le seul type de film qui permette d'utiliser dès la prise de vue une émulsion négative ou une émulsion inversible (développée par inversion et tirée sur contretype inversible). Il en résulte que les copies 16 mm peuvent être réalisées à partir du tirage contact d'un film négatif 16 mm, par inversion à partir d'un original inversible ou par réduction optique d'un film négatif 35 mm. Dans sa version muette, le film 16 mm dispose de deux rangées de perforations, d'une seule rangée dans sa version sonore afin de permettre l'enregistrement photographique des sons. L'image standard est définie aux dimensions 7,42 mm × 10,22 mm, soit un format de 1,35 et un coefficient d'utilisation de 0,58. Un procédé, relativement récent, connu sous le nom de Super 16, consiste à faire défiler dans une caméra spécialement adaptée un film 16 mm à une seule rangée de perforations que l'on impressionne sur une plus grande largeur. Le film original obtenu, uniquement destiné au tirage (« gonflage ») de copies 35 mm, offre un format d'image de 1,85 (7,42 mm × 12,38 mm), et son coefficient d'utilisation s'élève à 0,77.

Les formats 8 mm et Super 8 mm

Ils utilisent exclusivement des pellicules inversibles noir et blanc ou couleurs. Les copies peuvent être réalisées par inversion à partir d'un original inversible 8 mm ou Super 8 mm, ou par réduction optique d'un dispositif intermédiaire 16 mm ou 35 mm; dans ce dernier cas, les images sont quadruplées sur un film 32 mm, disposant de quatre rangées de perforations, que l'on recoupe après développement. Le film 8 mm classique dispose d'une rangée de perforations rectangulaires horizontales, et son image, de format 1,33, est aux dimensions 4,37 mm × 3,28 mm (surface d'image : 14,33 mm^2); l'éventuelle piste de son magnétique est positionnée entre les perforations et le bord de la pellicule. Le film Super 8 mm, dont les perforations rectangulaires sont verticales et de plus petites dimensions, a une image de 5,36 mm × 4,01 mm (surface d'image : 21,49 mm^2, format : 1,33), et sa piste de son magnétique est couchée du côté opposé aux perforations. Signalons également **le format 9,5 mm** qui utilise une rangée centrale de perforations (disposées alors au milieu des interimages) : son image est aux dimensions 8,5 mm × 6,5 mm (format : 1,32, surface : 55,25 mm^2).

La caméra

La caméra est une chambre noire à laquelle s'ajoutent un système optique de transmission des rayons lumineux qui proviennent du sujet et un mécanisme d'entraînement intermittent du film. Ce dernier est directement fondé sur le phénomène de la persistance rétinienne suivant lequel l'œil assimile une suite de stimuli très rapprochés (inférieurs à 0,1 s) à une vision continue. Pour que l'œil puisse reconstituer les différents mouvements à la projection, il est nécessaire d'utiliser une fréquence de prise de vues au moins égale à 16 images par seconde.

Le mécanisme de la caméra est illustré par le schéma de la *figure* 5 : le film monté sur la bobine débitrice est conduit à l'aide d'un tambour denté (débiteur) vers le couloir de la caméra; il passe devant la fenêtre de prise de vue, puis est repris par un autre débiteur avant d'achever sa course sur la bobine réceptrice. Deux griffes (3) entraînent la pellicule à raison de 24 déplacements par seconde, en la faisant descendre d'une distance égale

◄ *Figure 4 :* ***principe du cinémascope; l'image du sujet est compressée en largeur sur le négatif par l'anamorphoseur, puis décompressée lors de la projection par un objectif anamorphoseur. d : champ couvert par l'objectif. D : champ couvert par l'objectif muni d'un anamorphoseur.***

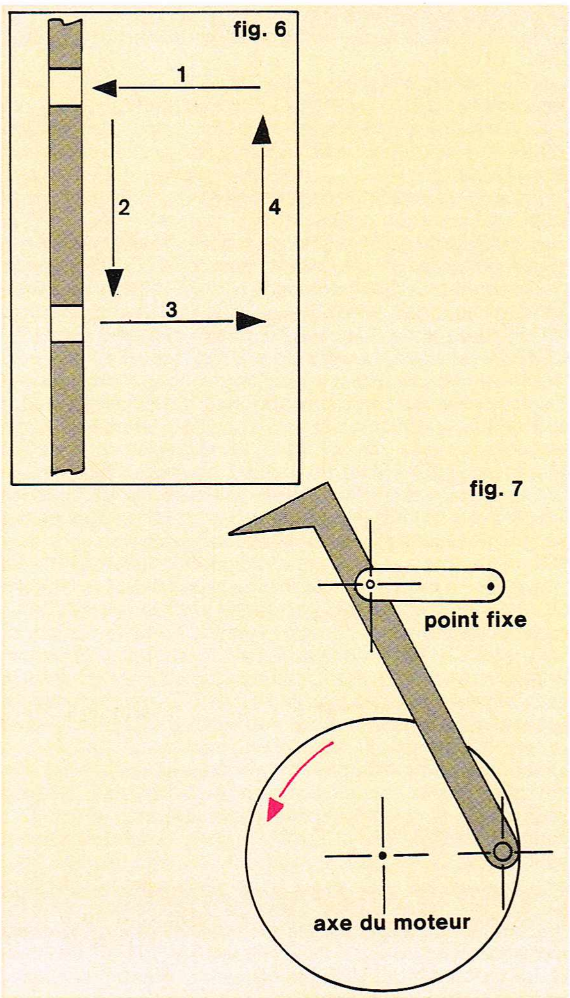

◄ *Figure 6 :* ***principe de l'escamotage d'une image lors de l'entraînement du film dans une caméra (voir développement dans le texte). Figure 7 : dispositif d'entraînement du film dans une caméra d'amateurs.***

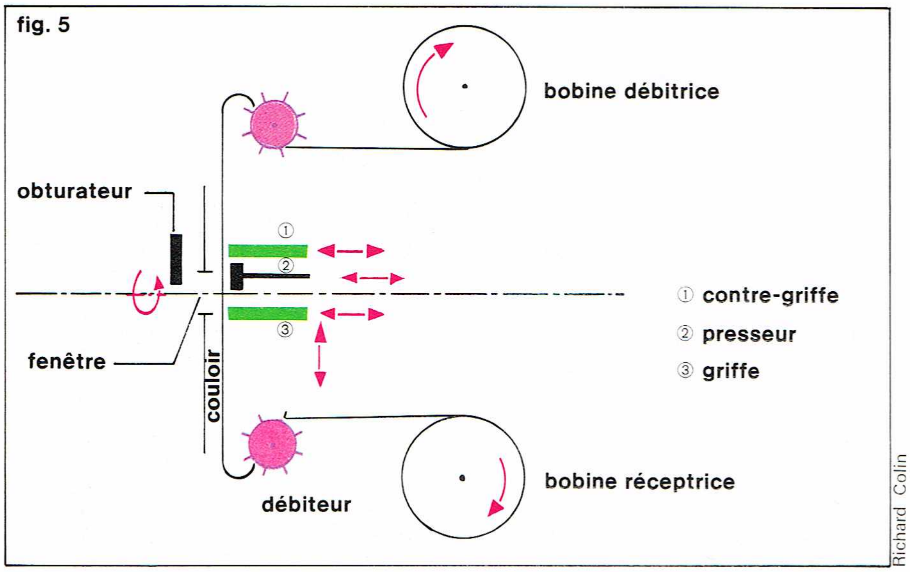

▲ *Figure 5 : mécanisme classique d'une caméra; 1, contre-griffe; 2, presseur; 3, griffe.*

à la hauteur d'une image; lorsque le mouvement de descente est achevé, deux contre-griffes (1) s'engagent dans les perforations et immobilisent le film; cette action des contre-griffes est accompagnée d'un mouvement identique du presseur dorsal (2) qui applique fortement la pellicule contre le couloir d'impression : le film étant immobilisé, l'obturateur se dégage, permettant ainsi à la surface sensible d'être impressionnée. Ces différents organes agissent en parfait synchronisme : c'est un moteur unique qui régit leurs différents mouvements.

Principe d'entraînement du film

Le mécanisme chargé d'assurer le remplacement d'une image par la suivante comporte quatre temps distincts (*fig.* 6) :

1 : engagement des griffes dans les perforations par un mouvement horizontal d'arrière en avant;

2 : les griffes entraînent la pellicule de haut en bas d'une distance égale à la hauteur d'une image (19 mm pour le film 35) ;

3 : les griffes se dégagent des perforations par un mouvement d'avant en arrière;

4 : les griffes, dégagées des perforations, remontent d'une image et se présentent dans leur position initiale.

Les systèmes d'entraînement sont en général à cames ou à excentrique; dans le cas des caméras d'amateurs, ils offrent même l'apparence d'une certaine simplicité (*fig.* 7). Les griffes agissent en synchronisme avec les contre-griffes, le presseur dorsal et l'obturateur : l'engagement des griffes correspond au retrait des contre-griffes et au début de la fermeture de l'obturateur; lors de leur abaissement, et donc du déplacement du film, les contre-griffes sont totalement retirées et l'obturateur fermé; les contre-griffes pénètrent dans les perforations lorsque les griffes se retirent, l'obturateur demeurant fermé; il se dégage lorsque les contre-griffes sont parfaitement engagées et que les griffes effectuent leur remontée. Pour une cadence de prise de vues normale, le cycle d'escamotage d'une image s'effectue en 1/24 s : l'immobilisation de l'image dure 2/3 du temps total, soit 1/36 s. Il est donc possible d'impressionner la surface sensible durant toute cette période, l'obturateur, dans ce cas, devant être ouvert à 240°. Cette solution présentait un avantage incontestable à une époque où les émulsions cinématographiques avaient une sensibilité limitée. De nos jours, en vue d'obtenir une décomposition meilleure du mouvement, le temps de pose a été sensiblement réduit : on limite l'ouverture de l'obturateur à 180°, le temps d'exposition du film étant alors ramené à 1/48 s.

Organes et accessoires complémentaires

L'adjonction d'un certain nombre d'organes annexes est nécessaire pour faciliter la prise de vue et améliorer le rendu final des images. Certains d'entre eux sont indispensables au fonctionnement normal de l'appareil : couloir d'impression, presseurs, obturateur, moteur, magasins et chargeurs et, enfin, système de visée. D'autres peuvent être considérés comme accessoires, puisqu'ils ne conditionnent pas directement le fonctionnement de la caméra : parmi les plus importants, citons les supports, les para-soleil et les porte-filtres. Ce sont généralement ces organes et ces accessoires complémentaires qui permettent de différencier les différents types d'appareils de prise de vues.

Le couloir d'impression est une pièce métallique traversée en son centre par une fenêtre dont les dimensions correspondent à celles de l'image. Le couloir possède des évidements latéraux pour le passage des griffes et des perforations dans lesquelles les contre-griffes viennent se stabiliser. Le maintien latéral du film est assuré par le bord mobile du couloir qui est monté sur des ressorts tarés. La fenêtre d'impression doit également être munie d'une glissière permettant le passage de caches pour l'obtention de formats panoramiques. Dans les caméras d'amateurs, le couloir n'est composé que d'une pièce métallique rigide et d'une fenêtre d'impression.

Les presseurs maintiennent latéralement le film et l'appliquent contre la fenêtre d'impression lors de son immobilisation. Les presseurs latéraux font partie intégrante du couloir d'impression tandis que le presseur dorsal peut être indépendant et actionné à l'aide d'une came ou lié directement au chargeur lui-même. Dans ce dernier cas, son action constante est régulée à l'aide d'un ressort taré : cette solution est adoptée sur l'ensemble des caméras *Super 8* ainsi que sur la caméra professionnelle *Cameflex* 16/35 mm.

La fonction de **l'obturateur** consiste à intercepter le faisceau lumineux provenant de l'objectif lors du déplacement du film et à assurer son libre passage pendant l'immobilisation du mécanisme d'entraînement. L'obturateur est dit fixe si son angle d'ouverture ne peut être changé : c'est le cas de certaines caméras *Super 8* non perfectionnées dont l'obturateur se présente sous la forme d'un disque évidé de 160° d'ouverture. Il est dit variable si l'on rapporte à ce disque une pale mobile chargée de faire varier l'angle d'obturation : la pale fixe est généralement ouverte à 180°, et la pale mobile peut fermer totalement l'obturateur. Cette variation est possible sur certaines caméras d'amateurs durant la prise de vues elle-même, et permet ainsi la réalisation de fondus « au noir » et de fondus enchaînés. Le temps d'exposition du film varie évidemment en fonction de l'ouverture de l'obturateur : si l'on désigne par α son angle d'ouverture et par v sa vitesse angulaire, le temps d'exposition est donné par la formule $T = \frac{\alpha}{v}$, qui donne la valeur de l'ouverture photométrique de l'objectif quelle que soit l'ouverture de l'obturateur.

Certaines caméras professionnelles *(Arriflex)* sont dotées d'obturateurs à deux pales symétriques — auxquelles s'ajoutent généralement deux pales mobiles — qui offrent un équilibrage dynamique de meilleure qualité. Afin de conserver le même temps d'obturation, la rotation de leur axe doit s'effectuer deux fois moins vite, et l'ouverture angulaire de chaque pale doit être réduite de moitié. Enfin, il existe sur un petit nombre de caméras *Super 8 (Beaulieu)* des obturateurs à guillotine animés d'un mouvement alternatif de va-et-vient.

Les magasins et **les chargeurs** contiennent le film avant et après exposition. Les magasins peuvent être indépendants; ils sont alors utilisés indistinctement comme récepteurs ou comme débiteurs, ou monoblocs, et dans ce cas, simples ou à « mécanismes ». Ces derniers sont généralement composés de deux débiteurs et d'un presseur dorsal, les boucles nécessaires à la traction discontinue du film étant alors effectuées à l'intérieur même du magasin (caméras *Super* 8, *Éclair* 16, *Cameflex* 16/35, etc.).

Le moteur entraîne toutes les parties mécaniques de la caméra. De la manivelle utilisée par les pionniers du cinéma muet jusqu'aux différents systèmes de régulation par quartz employés de nos jours, une infinie variété de moteurs a été élaborée. La plupart des caméras profes-

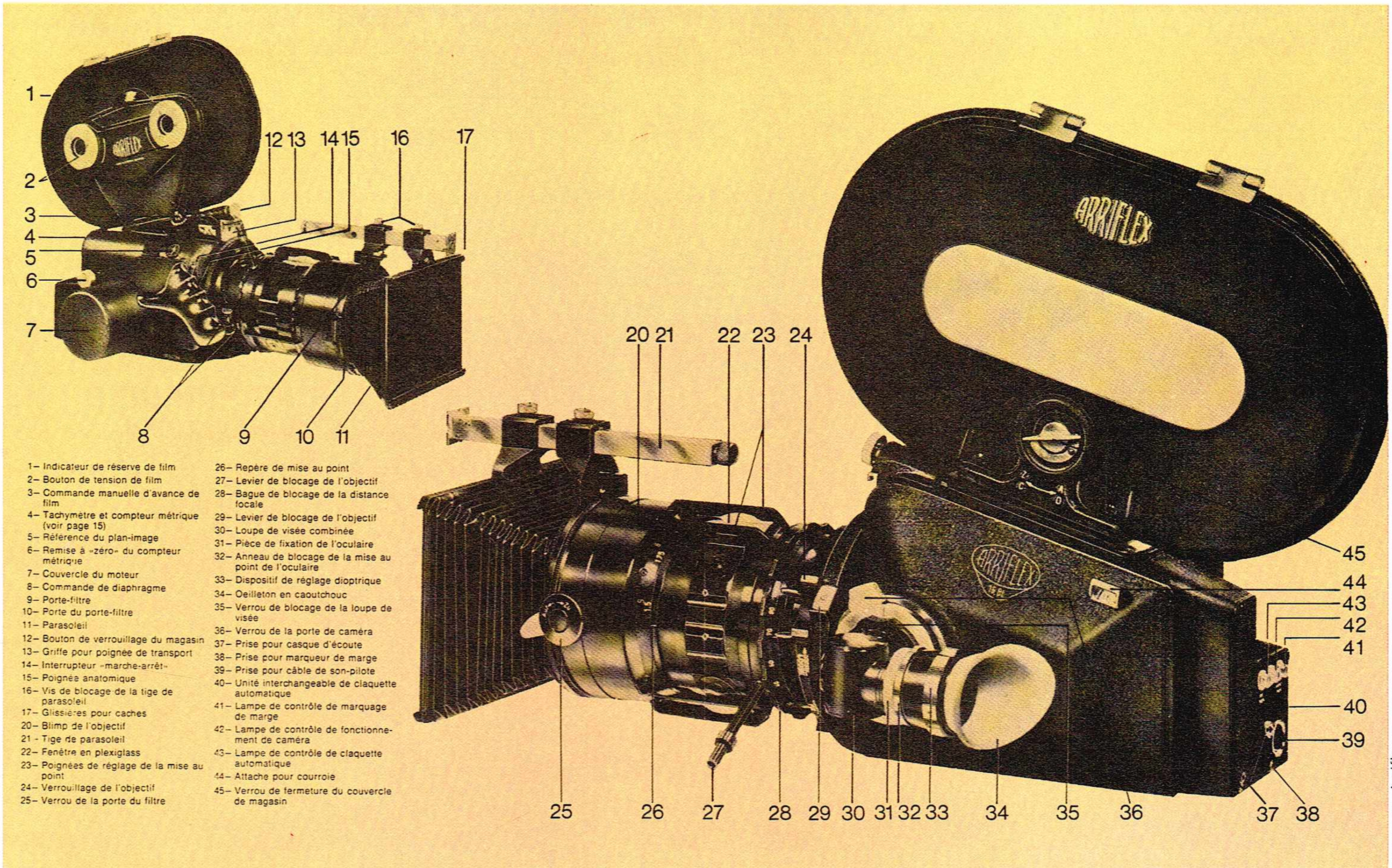

Document Arriflex

▲ ***Les parties constitutives d'une caméra.***

sionnelles de studio sont équipées de moteurs synchrones triphasés 220 volts ou de moteurs asynchrones-synchronisés 110 volts. Chaque fois que les sources d'alimentation du secteur ne sont pas utilisables (tournage en extérieur par exemple), on fait appel en principe à des moteurs à courant continu. Ceux-ci sont alimentés par des batteries de différents voltages, et leur vitesse se contrôle de deux manières différentes : le mode de contrôle le plus ancien est celui effectué à l'aide d'un rhéostat. Cette solution, qui, dans le cadre de prises de vues normales, est peu à peu délaissée, offre des avantages incontestables pour l'obtention d'effets spéciaux ou le tournage de films scientifiques qui nécessitent des cadences de prise de vues inférieures ou supérieures à la vitesse standard. Le second mode de contrôle consiste à régulariser électroniquement la vitesse par transistors : la mise en route du moteur est alors instantanée, et sa rotation a lieu à vitesse constante. Cette solution assure également un synchronisme rigoureux entre la caméra et le magnétophone, soit par une liaison électrique, soit directement par asservissement des appareils à l'aide d'oscillateurs à cristaux de quartz ou à diapasons.

Le système de visée donne au cameraman le contrôle, pendant la prise de vues, des qualités esthétiques et techniques des images qui se formeront sur la surface sensible. A l'origine, la visée était directement effectuée au travers du film à l'aide d'un dispositif constitué d'un système redresseur qui renvoyait l'image sur un oculaire. Cette solution, qui offrait alors peu de luminosité, fut totalement abandonnée lors de l'apparition des films en couleurs. On eut alors recours à la visée sur verre dépoli avec escamotage du couloir d'impression. Ce dispositif, équipé d'un viseur semblable à celui utilisé pour la visée au travers du film, permettait de vérifier le cadrage de l'image avant et après la prise de vue, mais laissait l'opérateur sans possibilité de contrôle pendant le tournage des scènes. Cette technique restait donc très limitée et interdisait, par exemple, de réaliser convenablement des mouvements de caméra.

Une autre solution, qui a été et reste encore très usitée, est celle offerte par le viseur externe qui se présente sous la forme d'une lunette de visée placée le long de la caméra. On se heurte alors à un problème d'un ordre tout différent, qui est celui de la parallaxe d'espace : le viseur externe ne présente pas, en effet, un champ semblable à celui embrassé par l'objectif. Ce procédé, dans sa version simple, resta toutefois utilisé sur certaines caméras de vulgarisation. Une version plus élaborée, créée et utilisée par la firme anglo-saxonne Mitchell, consiste à munir le viseur externe d'un système compensateur de parallaxe : la lunette de visée est reliée mécaniquement à l'objectif, et sa direction se trouve modifiée lors des changements de mise au point.

Les différents systèmes de visée que nous venons de passer en revue n'apportent pas de solution entièrement satisfaisante à l'ensemble du problème, et seule la visée reflex intégrale permet au cameraman de voir exactement l'image qui se formera sur la pellicule. Son principe consiste à prélever, entre l'objectif et la fenêtre d'impression, une partie des rayons lumineux provenant du sujet pendant la fermeture de l'obturateur (*fig.* 8). Ce dernier, qui fait un angle de 45° avec l'axe optique, est en partie recouvert d'un élément réfléchissant qui renvoie le faisceau lumineux provenant de l'objectif vers le haut de la caméra; le faisceau est alors orienté, à l'aide d'un miroir ou d'un prisme à réflexion totale, vers une lunette de visée munie d'un oculaire. On constate dans ce cas que l'image du sujet n'est transmise que pendant les périodes d'obturation : la visée reflex est donc intermittente, mais l'opérateur, de même que le spectateur dans la salle de projection, a une sensation de mouvement continu. Les caméras utilisant des obturateurs à guillotine peuvent également bénéficier de la visée reflex : il suffit pour cela de disposer un miroir à 45° sur la partie inférieure de l'obturateur.

Deux autres types de visée reflex, indépendants de l'obturateur (*fig.* 9), ont été adoptés par certains constructeurs (Paillard-Bolex, Pathé-Webo). Le premier d'entre eux consiste en un prélèvement partiel du faisceau lumi-

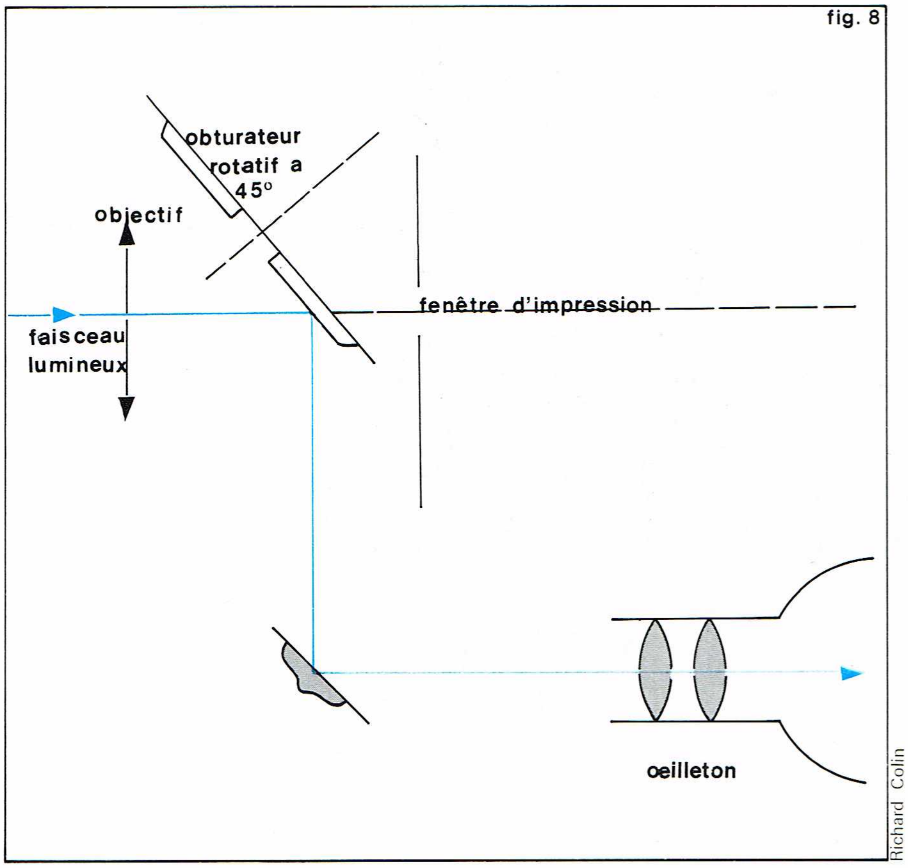

▲ *Figure 8 : dispositif de visée reflex sur obturateur.*

▼ *Figure 9 : dispositif de visée reflex indépendante de l'obturateur ; une partie du faisceau lumineux est réfléchie sur une microsurface ou sur une lamelle semi-réfléchissante.*

neux à l'intérieur même de l'objectif. Pour ce faire, deux prismes accolés, munis d'une microsurface commune réfléchissante, sont introduits entre les deux blocs de lentilles de l'objectif, et un système optique redresseur renvoie l'image vers un oculaire situé le long de la caméra. Il convient de noter que, dans ce cas, c'est l'objectif lui-même qui est reflex. Cette solution est particulièrement intéressante : par la simple adjonction d'un tel objectif, on rend reflex une caméra qui à l'origine ne l'était pas. Quant au second dispositif de visée reflex, il revient à introduire deux prismes accolés ou une lamelle semi-réfléchissante entre la partie postérieure de

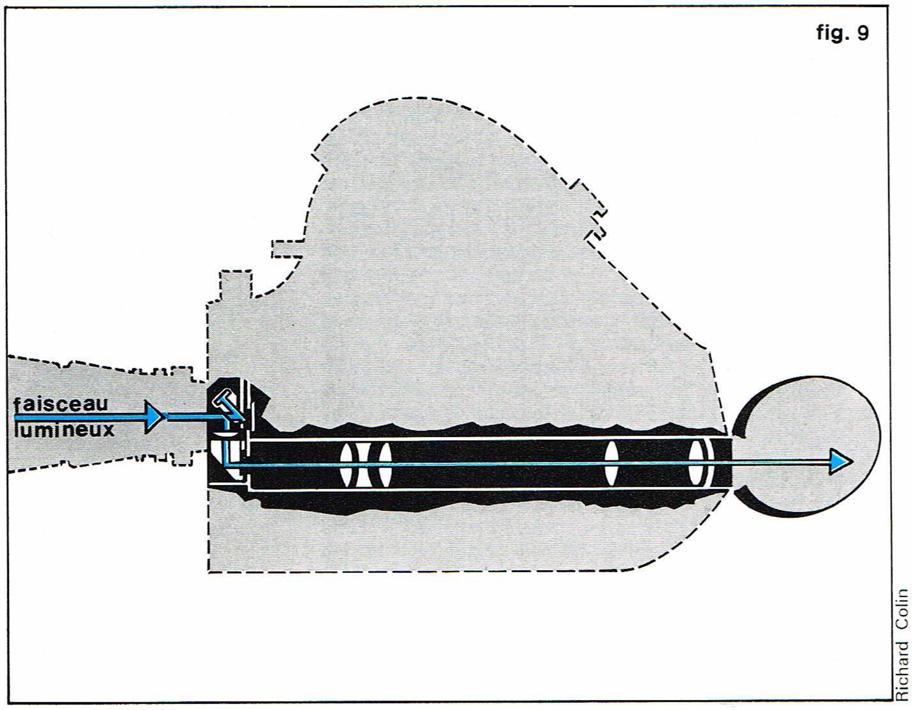

l'objectif et l'obturateur. Ces deux modes de visée combinent, sans scintillement, la clarté de l'image aérienne avec la précision du dépoli central, mais impliquent un prélèvement non négligeable sur le faisceau lumineux incident.

Un nouveau système de visée, directement lié à l'évolution des techniques électroniques, a récemment été mis au point sur un certain nombre de caméras professionnelles (*Camé 300, Mitchell Mark II*, etc.). Le viseur électronique laisse une entière liberté à l'opérateur durant le tournage de plans relativement complexes et permet la distribution de l'image sur plusieurs écrans de contrôle destinés aux autres membres de la production. Malgré la grande luminosité et les dimensions importantes de son image, il ne saurait remplacer le viseur reflex de manière définitive. Les solutions les plus élaborées sont à l'heure actuelle celles qui, sur un même appareil de prise de vues, autorisent l'utilisation simultanée de la visée électronique et de la visée reflex traditionnelle.

On distingue de ce fait trois types distincts de visée électronique :

— le système dit « Vidiflex », utilisé par Éclair, périme la visée reflex traditionnelle : l'élément réfléchissant de l'obturateur renvoie le faisceau lumineux dans un objectif de transport qui focalise l'image sur la mosaïque d'un tube analyseur ; celui-ci réalise le balayage d'un écran cathodique placé à la vue du cadreur.

— le système dit « ADD. A. Vision », utilisé par certains fabricants anglo-saxons, est particulièrement adapté aux caméras munies d'un viseur externe à correction de parallaxe. Le viseur est dans ce cas totalement abandonné, et l'on utilise un objectif reflex (généralement un zoom) à prismes incorporés qui prélève une partie du rayon lumineux et la renvoie vers un écran cathodique. Les caméras utilisant le système ADD. A. Vision offrent également la possibilité d'effectuer avant la prise de vues un contrôle de l'image sur dépoli par escamotage du couloir d'impression.

— le système « DICOP », enfin, qui autorise indifféremment le contrôle de l'image par visée électronique ou par visée reflex. Le faisceau lumineux renvoyé par la pale de l'obturateur peut être dirigé soit vers la mosaïque d'un tube analyseur à l'aide d'un miroir à 45°, soit, par simple escamotage de ce dernier, vers une loupe de visée se terminant par un oculaire.

Tels sont les organes indispensables au fonctionnement normal d'une caméra. Si l'on effectue une prise de vues synchrone (enregistrement simultané du son), il faut alors y ajouter le système d'insonorisation : il est en effet impossible de réaliser une prise de son correcte aux côtés d'une caméra non insonorisée. Pour ce faire, l'appareil dans son entier est enfermé dans un caisson insonorisé appelé « blimp » : mais ce dispositif aboutit à des ensembles extrêmement volumineux et pesants qui manquent de souplesse et de maniabilité. Une autre solution consiste à n'insonoriser que les parties bruyantes de la caméra et à laisser l'objectif et les magasins à l'extérieur du caisson : les ensembles obtenus sont plus légers et n'impliquent pas, contrairement à la disposition précédente, l'introduction d'une glace double devant l'objectif. Enfin, depuis quelques années, certains constructeurs ont effectué une mise au point très précise des différents éléments du mécanisme d'entraînement, qui évite la répercussion des bruits au sein de l'appareil. Ce mode de construction particulièrement soigné caractérise les caméras autosilencieuses du type *Éclair 16*.

Le format du film et la constitution particulière des organes annexes déterminent en grande partie les critères d'utilisation des appareils. Aux formats réduits correspondent des caméras compactes, de faible poids, d'utilisation facile et surtout dont les prix modérés répondent aux possibilités et aux besoins des amateurs. Les appareils professionnels sont au contraire beaucoup plus complexes et onéreux, et leur utilisation met en œuvre des moyens parfois considérables.

A mi-chemin entre ces deux types d'appareils, le format 16 mm a su se créer une place bien particulière. Jadis exclusivement réservé aux amateurs fortunés, il a depuis quelques années des applications professionnelles nombreuses : télévision, reportage, documentaire, cinéma industriel et scientifique, etc.

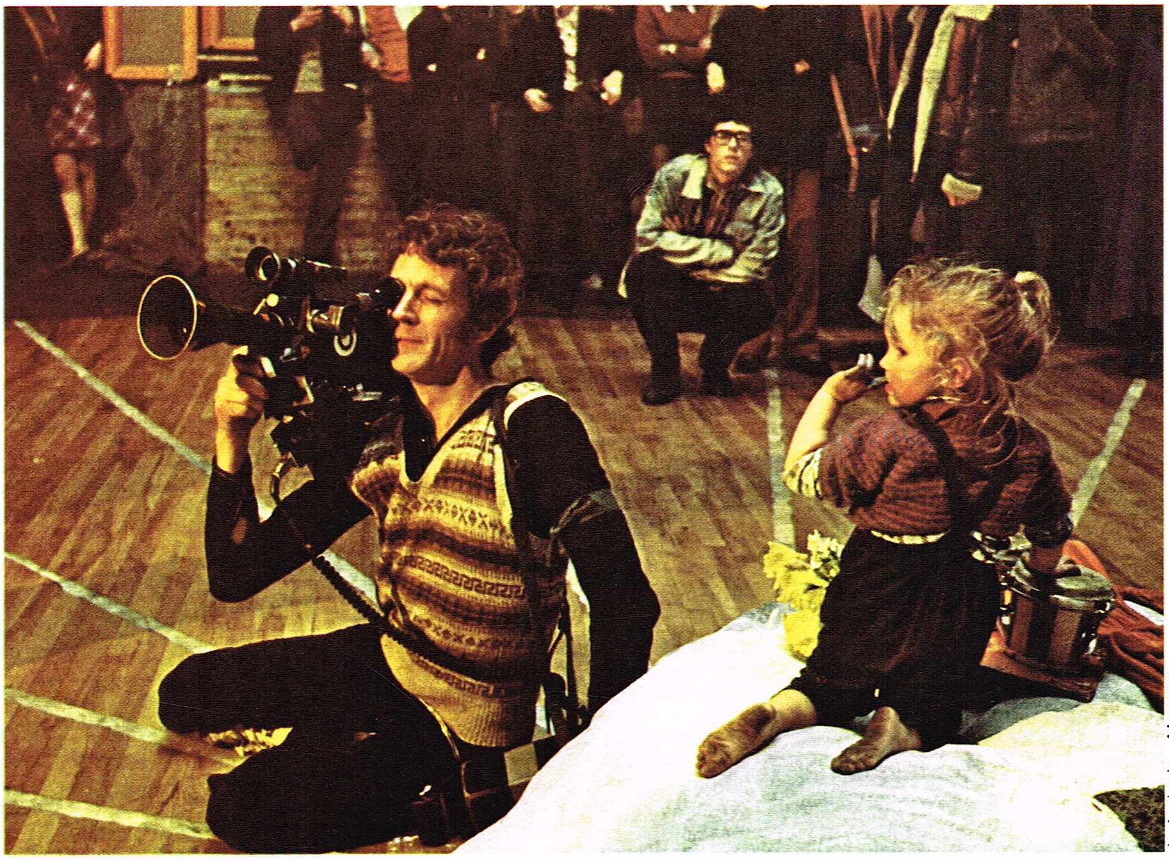

◀ ***De la petite caméra automatique pour format 8 mm à la caméra professionnelle standard 35 mm, les possibilités sont nombreuses et permettent une bonne adaptation au type de film à réaliser : amateur, documentaire, reportage ou réalisation d'un long métrage.***

Les différents types d'appareils de prise de vues

Les caméras de formats réduits 8 mm, Super 8 et 9,5 mm sont actuellement très nombreuses, et une description détaillée de leurs différentes caractéristiques ferait à elle seule l'objet d'une longue et minutieuse investigation. Depuis 1965, date de leur apparition sur le marché, les caméras Super 8 ont connu un essor considérable et ont supplanté en grande partie les anciens appareils 8 mm et 9,5 mm. Leur classification s'établit généralement suivant leur degré de perfectionnement. Les appareils les plus simples, destinés aux amateurs débutants, sont d'un emploi facile (objectif fixe réglé sur l'hyperfocale et viseur externe) et donnent des résultats satisfaisants dans la limite de leurs possibilités. On trouve également des appareils automatiques plus complexes munis, dans certains cas, d'un système de réenroulement partiel du film qui autorise la réalisation de surimpressions et de fondus enchaînés. Presque tous sont équipés d'objectifs zooms dont la variation de focale peut être commandée électriquement, de viseurs reflex et de posemètres incorporés; ils disposent bien souvent d'une large plage de mise au point et d'une vaste sélection de cadences de prise de vues. Enfin, il existe de nos jours un certain nombre de caméras (*Bell et Howell, Chinon, Beaulieu*, etc.) dotées d'un dispositif de pilotage qui permet un enregistrement synchrone du son.

Les caméras de format 16 mm se classent d'ordinaire suivant leur utilisation : c'est ainsi que l'on distingue les caméras amateurs et semi-professionnelles *(Paillard-Bolex, Reflex 16 mm, Beaulieu R 16, Pathé-Webo BTL...)*, des caméras professionnelles, telles l'*Arriflex BL*, l'*Éclair ACL* et la *Mitchell 16*. Leur encombrement réduit et leur poids limité (excédant rarement 10 kg) les disposent particulièrement bien à la prise de vues d'actualités et de documentaires. Elles sont en général équipées de moteurs autorégulés alimentés par des batteries d'accumulateurs de 8, 10 ou 12 volts qui fournissent du courant continu à la cellule incorporée et à la claquette automatique. Les objectifs utilisés sont le plus souvent des zooms, mais certaines caméras disposent d'une tourelle orientable qui admet plusieurs objectifs de différentes focales et qui, une fois verrouillée, assure un tirage optique constant.

Toute caméra professionnelle, associée à un magnétophone approprié, permet des prises de vues en son synchrone double bande faites suivant le procédé de son pilote classique ou à l'aide de la commande quartz du moteur (sans liaison entre les deux appareils d'enregistrement). Récemment, on a pu mettre au point, sur certaines caméras destinées au tournage de films d'actualités, un dispositif d'enregistrement direct du son (« single-system ») composé d'une platine d'enregistrement et d'un amplificateur transistorisé.

▼ ***Une caméra professionnelle de format 16 mm* (Arriflex 16 ST)*; l'encombrement réduit et le poids limité des caméras 16 mm les font utiliser pour les prises de vues d'actualités et de documentaires.***

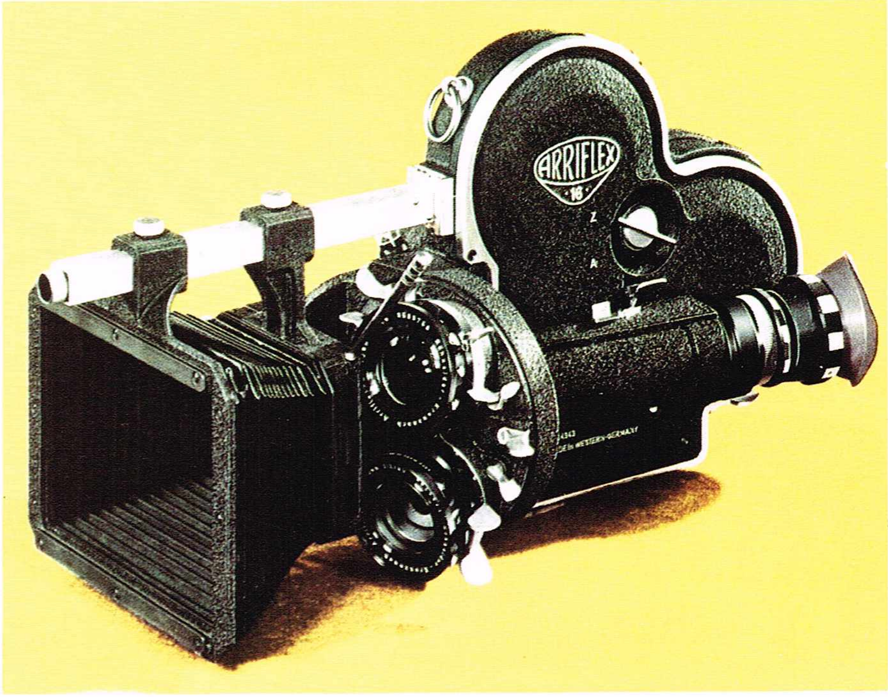

▶ *Une caméra 16 mm équipée d'un dispositif vue par vue et montée sur un microscope; cet ensemble permet l'observation de cultures de tissus, l'étude de l'action des médicaments, etc.*

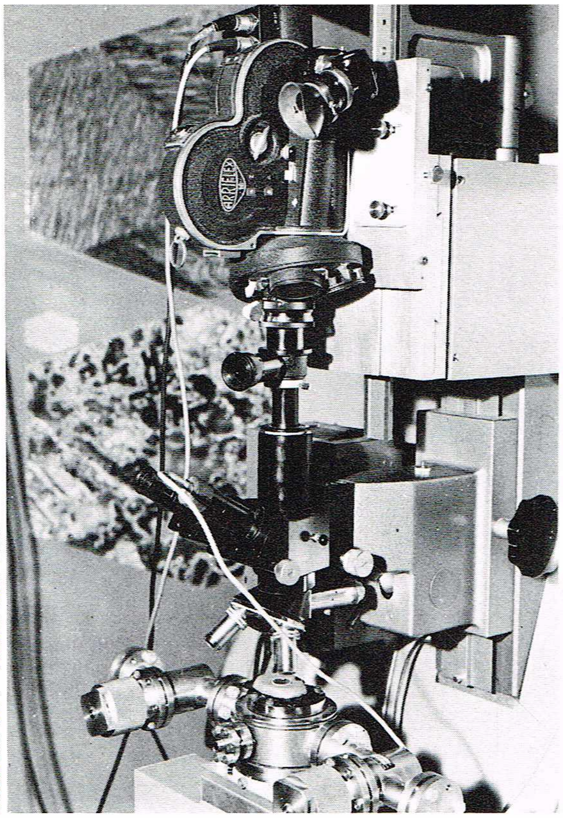

Document CEA - Techni-Ciné-Phot

Les caméras professionnelles standard 35 mm sont des appareils très onéreux et très encombrants qui doivent être en mesure, grâce à leur construction et leur finition soignées, d'assurer des prises de vues de grande qualité. Elles sont généralement équipées de deux contre-griffes, d'un système de visée reflex ou électronique, d'objectifs interchangeables et d'un tachymètre de grande précision; dans la plupart des cas, elles peuvent recevoir des magasins de 120 et 300 m. Les appareils occidentaux les plus utilisés en studio sont le *Camé 300* reflex, le *Mitchell BNC*, le *Reflex MARK II*, et le *Super Parvo* de Debrie.

Comme ces caméras sont fort volumineuses, on leur préfère, pour des prises de vues en extérieur ou en intérieur naturel, des appareils plus légers et plus maniables tels le *Cameflex* 16/35 ou l'*Arriflex 35 BL*. Le *Cameflex*, fabriqué par la société française Éclair, a la particularité de pouvoir utiliser, par simple modification du déplacement des griffes et de la fenêtre d'impression, des films de formats 35 mm et 16 mm : c'est un appareil très léger, disposant d'une tourelle divergente à trois emplacements et d'un moteur peu volumineux, qui, fixé sur le côté de l'appareil, peut servir de poignée. L'*Arriflex 35 BL* est une caméra autosilencieuse de fabrication récente qui bénéficie des toutes dernières techniques, en particulier d'un dispositif de pilotage de synchronisation du son par circuit à quartz (disposé sur le moteur) : son équilibrage dynamique est particulièrement bien adapté à des prises de vues en « caméra portée ».

▼ *Le fusil photographique réalisé en 1882 par E.J. Marey (1830-1904); cet appareil permettait l'enregistrement d'une série de 12 images par seconde sur une plaque circulaire. Il était utilisé pour l'étude du mouvement (vol d'oiseaux par exemple).*

Archivio Turconi

Caméras spéciales pour la réalisation de films scientifiques. La particularité de ces caméras tient à leur mécanisme d'entraînement du film. Les caméras grande vitesse autorisent des prises de vues à des cadences très élevées, c'est pourquoi on les utilise en balistique et en aérodynamique pour la décomposition de mouvements. Le principe de défilement du film par entraînement intermittent — qui n'autorise guère de cadences supérieures à 300 images par seconde — y est en général abandonné : on lui préfère des mécanismes à défilement continu — aux cadences beaucoup plus élevées, atteignant dans certains cas plusieurs millions d'images par seconde — auxquels on associe un dispositif de compensation pour le mouvement de la prise de vues. Ce dispositif offre la possibilité d'obtenir des cadences de prise de vues de l'ordre de 1 000 images par seconde, et la compensation est assurée, soit à l'aide d'un miroir oscillant dont la vitesse de rotation est synchronisée avec le défilement du film, soit par l'emploi d'un prisme rotatif ou d'un tambour à miroirs. La fréquence a été sensiblement augmentée (3 000 images par seconde) par la mise au point d'appareils composés de plusieurs objectifs couplés à un disque obturateur rotatif pourvu de nombreuses fentes. Enfin, certaines prises de à vues très grande vitesse se passent d'obturateur ou de système de compensation optique; il s'agit alors d'appareils à étincelle ou à gaz rares dans lesquels le film défile en mouvement continu, tandis que la partie de l'espace à photographier est éclairée par des illuminations très brèves. La fréquence des décharges y est de l'ordre de 100 000 impulsions par seconde, d'où, lorsqu'on y associe un système optique approprié, des instantanés au millionième de seconde.

On peut assimiler les caméras permettant des prises de vues image par image, de conception mécanique et optique beaucoup moins complexe, à des appareils photographiques à défilement vertical munis de deux magasins. Leur domaine d'utilisation est vaste et varié : microcinéma, biologie, astrophysique, etc.

Optique cinématographique - Objectifs

Les qualités inhérentes aux surfaces sensibles et aux divers mécanismes d'entraînement et d'assujettissement du film conditionnent la qualité finale des images cinématographiques; celle-ci dépend en outre de l'emploi d'optiques de plus en plus perfectionnées. L'évolution des techniques cinématographiques est en effet due, en grande partie, à l'amélioration qualitative des objectifs de prise de vues et de projection, qui a également ouvert de nouvelles perspectives à la pratique esthétique et artistique du cinéma avec, en particulier, l'apparition des anamorphoseurs et des objectifs zooms.

La fonction principale de l'objectif est de restituer correctement l'image de l'objet sur la surface sensible. Il se présente sous la forme d'un système optique convergent constitué d'un assemblage de lentilles dont la forme, la matière et l'emplacement sont l'objet de longs et minutieux calculs. Ces lentilles sont disposées précisément à l'intérieur d'une monture cylindrique dans laquelle elles peuvent être indépendantes ou bien regroupées en blocs homogènes à l'aide de baume du Canada ou de colle synthétique. Le flux lumineux pénétrant dans l'objectif est contrôlé à l'aide d'un diaphragme, situé en général entre les deux blocs principaux de lentilles. La reproduction d'un espace à trois dimensions sur la surface plane du film implique cependant la modification de facteurs esthético-techniques tels la perspective et le contraste; elle entraîne l'apparition de paramètres nouveaux dont la profondeur de champ est l'exemple le plus significatif. Cette restitution est donc liée en grande partie aux qualités intrinsèques du système optique utilisé. En effet, si ce dernier a un pouvoir séparateur trop faible ou est entaché d'aberrations importantes, la restitution sera imparfaite et l'image résultante de médiocre qualité.

Définitions et principes

La lumière blanche est composée de vibrations électromagnétiques correspondant à diverses longueurs d'onde qui, pour le spectre visible, se situent entre 0,4 et 0,7 microns. En deçà commence le domaine de l'ultraviolet, et, au-delà, celui de l'infrarouge. Dans un milieu homogène, ces ondes se propagent en ligne droite. On peut mettre en évidence cette composition de la lumière blanche en introduisant un prisme sur le trajet du rayon lumineux : on constate que le rayon réfracté prend l'aspect d'un pinceau lumineux constitué d'un certain nombre de raies colorées, et on parle alors de dispersion de la lumière. Cette constatation se fait également en employant une lentille simple ou un objectif mal corrigé : dans ce cas, la surface de l'image est entachée d'irisations ponctuelles et linéaires. De plus, lorsque la lumière rencontre une surface qui n'est ni parfaitement transparente ni polie parfaitement, elle est diffusée par cette surface. Pour obtenir une restitution optimale des sujets sur la surface sensible du film, on doit tenir compte des propriétés de la lumière blanche : réflexion, dispersion, diffusion, absorption, et apporter aux objectifs des traitements qui corrigent leurs effets.

La **distance focale** d'un objectif est la distance qui sépare son centre optique de son foyer image. Lorsque la mise au point est faite à l'infini, le foyer image se trouve à l'intersection du plan du film et de l'axe optique. Si le sujet se rapproche de l'objectif, il est nécessaire de

modifier la mise au point afin d'obtenir la netteté de l'image, ce qui s'effectue en déplaçant l'objectif par rapport au plan du film. Le déplacement maximal caractérise le tirage de l'objectif. La distance focale détermine directement l'ouverture angulaire et donc le champ d'un objectif. L'**ouverture angulaire**, exprimée en degrés, correspond à l'angle du cône qui a pour sommet le centre optique et dont la base contient le rectangle de l'image; sa valeur peut être déterminée en fonction de la distance focale et de la diagonale de l'image à l'aide d'un simple calcul trigonométrique. On constate ainsi que l'ouverture angulaire d'un objectif est inversement proportionnelle à sa distance focale. En 35 mm par exemple, l'objectif de focale normale a une ouverture angulaire de 37°, celui d'une courte focale de 20 mm a une ouverture angulaire de 68,30°, et celui d'une longue focale de 135 mm a une ouverture angulaire de 11,30°.

Un objectif est également caractérisé par son **ouverture relative**. Celle-ci détermine la quantité de lumière qui est susceptible d'impressionner la surface sensible. Le nombre d'ouverture est donné par la relation $N = \frac{f}{D}$ f et D désignant la distance focale et le diamètre de l'objectif. Toutefois, cette définition de l'ouverture relative n'est pas applicable pour les objectifs composés. En effet, le diamètre du diaphragme, qui correspond à celui de la lentille dans un objectif simple, ne peut donner qu'une valeur approximative du faisceau lumineux utilisé par l'objectif; on utilise alors le diamètre de la pupille d'entrée pour déterminer l'ouverture numérique de l'objectif. Cette dimension est en moyenne supérieure de 20 % au diamètre du diaphragme. On parle dans ce cas d'**ouverture utile**, et c'est elle qui est prise comme base pour la détermination des luminosités indiquées sur la monture de l'objectif. On a donc la relation $N = \frac{f}{O}$ O désignant le diamètre d'ouverture de la pupille d'entrée; on en déduit l'ouverture relative de l'objectif : $\frac{I}{N} = \frac{O}{f}$.
Si un objectif de 80 mm de focale a une pupille d'entrée de 20 mm de diamètre, son ouverture relative est de 1/4 et son nombre d'ouverture de 4 : on dit que l'objectif est ouvert à $f/4$ ou plus simplement à 1:4.

On sait d'autre part que la surface de la pupille d'entrée est proportionnelle au carré de son diamètre et que l'éclairement reçu par la surface sensible est inversement proportionnel au carré de la distance focale, ce qui permet d'affirmer que les luminosités sont proportionnelles aux carrés des ouvertures relatives. Soit par exemple deux objectifs d'ouvertures relatives $f/2$ et $f/6$; leurs luminosités sont dans le rapport : $(1/2)^2 : (1/6)^2 = 9$. L'objectif ouvert à 1:2 est ainsi neuf fois plus lumineux que celui ouvert à 1:6 et nécessite par conséquent un temps d'exposition neuf fois moins élevé.

Dans le système international de numérotage des diaphragmes, les valeurs de N sont en progression géométrique de raison $\sqrt{2}$ et d'origine $f/1$. La suite s'établit de la manière suivante : 1; 1,4; 2; 2,8; 4; 5,6; 8; 11; 16; 22,5; 32 — à chaque ouverture de diaphragme correspond un temps de pose particulier. L'échelle des ouvertures de diaphragme ayant pour raison $\sqrt{2}$, celle des temps de pose correspondants aura pour raison 2. Cela signifie en pratique que, si l'on ferme le diaphragme d'une graduation, le flux lumineux pénétrant dans l'objectif sera réduit de moitié et qu'il faudra doubler le temps de pose pour obtenir un même éclairement de l'image. Toutefois, en cinéma, à une cadence de 24 images par seconde, le temps de pose reste constant et est égal à 1/48 s. (Notons cependant qu'il est possible de le réduire en limitant l'ouverture de l'obturateur.) La graduation des diaphragmes inscrite en blanc sur la monture de l'objectif correspond à son ouverture géométrique et sert en particulier au calcul de la profondeur de champ.

Nous avons supposé jusqu'à présent que le flux lumineux incident était intégralement transmis par l'objectif. En réalité, il n'en est rien, et les pertes de lumière peuvent même atteindre, pour certains grands angulaires, plus de 50 %, à cause de la nature même de la lumière dont une partie est absorbée par le verre et une autre réfléchie à la surface des lentilles : le facteur de transmission de l'objectif $f\tau$ est égal au produit du taux d'absorption par le taux de réflexion (*tableaux* I et II).

Tableau I
Taux d'absorption de la lumière dans une caméra en fonction de l'épaisseur de verre traversée

Épaisseur de verre (en cm)	1	2	3	4	5	6	8	10	15
Taux d'absorption (en %)	99,5	99	98,5	98	97,5	97	96	95	92,7

Tableau II
Taux de réflexion de la lumière dans une caméra en fonction du nombre de surfaces air/verre traversées

Nombre de surfaces air/verre	2	4	6	8	10	12
Taux de réflexion (en %)	89,7	80,4	72,1	64,6	57,9	51,7

▲ ***Tableau I :* taux d'absorption de la lumière dans une caméra en fonction de l'épaisseur de verre traversée.**
***Tableau II :* taux de réflexion de la lumière dans une caméra en fonction du nombre de surfaces air/verre traversées.**

Cela a entraîné les constructeurs à déterminer une seconde échelle de diaphragmes pour le calcul de l'éclairement de l'image : l'ouverture photométrique dont la graduation est inscrite en rouge sur la monture des objectifs. Les objectifs utilisés sur des caméras à cellule incorporée, cas général des caméras Super 8, n'ont nullement besoin d'indication d'ouverture photométrique, puisque la mesure de la lumière est directement effectuée devant le plan du film.

La **netteté** est avant tout une notion d'ordre physiologique. L'œil ne peut en effet distinguer deux points distincts que s'ils sont suffisamment éloignés l'un de l'autre. Si, par contre, ils se rapprochent en deçà d'une certaine valeur que nous appellerons pouvoir séparateur linéaire de l'œil, ce dernier ne distinguera plus qu'un seul et unique point. Le pouvoir séparateur angulaire de l'œil a une valeur moyenne de l'ordre de 1/2 000, ce qui signifie qu'un observateur placé à 1 m d'un écran de projection pourra distinguer des points distants l'un de l'autre de 0,5 mm. En cinématographie, cependant, la netteté est également liée aux caractéristiques physiques et chimiques des instruments et des matériaux utilisés. La netteté de l'image résultante dépend, d'une part, du pouvoir séparateur de l'objectif et, d'autre part, du pouvoir résolvant de l'émulsion qui est conditionné par sa granulation et par l'irradiation qui se produit à l'intérieur de ses différentes couches.

Le **pouvoir séparateur** d'un objectif, de la même manière que celui de l'œil, se définit par une valeur angulaire ou linéaire; c'est d'ailleurs cette dernière qui présente le plus d'intérêt pour l'utilisateur. Le pouvoir résolvant d'une émulsion est caractérisé par le nombre de traits au millimètre qu'il est possible d'y distinguer (environ 50 traits au millimètre pour une émulsion de rapidité moyenne). Bien que le pouvoir séparateur d'un objectif varie en fonction de sa distance focale et de son ouverture, il est supérieur, dans la majorité des cas, au pouvoir de résolution des surfaces sensibles les plus couramment employées, aussi bien pour les pellicules réservées aux professionnels que pour celles destinées aux amateurs. On s'aperçoit donc que le seul examen du négatif ne peut pas donner des renseignements suffisamment précis sur les qualités de définition de l'objectif; c'est pourquoi on a recours à l'observation de l'image aérienne qui, après avoir traversé un collimateur, est analysée sur un verre dépoli à l'aide d'un microscope. Lorsqu'on effectue la mise au point sur un objet précis, on constate qu'une netteté acceptable définit une certaine zone autour du point considéré; cette zone, qui s'étend en deçà et au-delà de la distance de mise au point, est appelée la profondeur de champ. Il est évident qu'elle est inversement proportionnelle à la netteté demandée. En effet, seul un point précis de l'espace peut avoir une image parfaitement nette sur le plan du film. Mais l'obtention de cette netteté absolue — qui n'est, en fait,

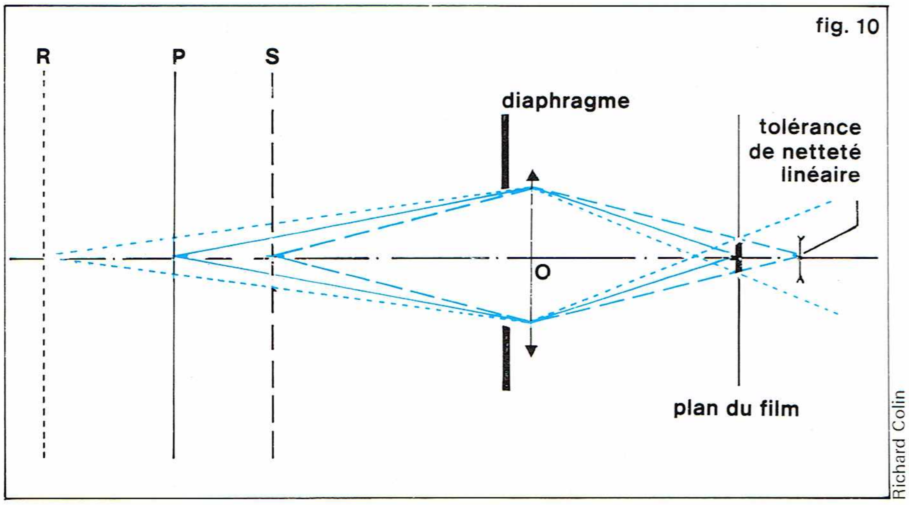

▲ *Figure 10 : définitions de la* netteté *et de la* profondeur de champ *(voir développement dans le texte).*

pas réalisable — ne présente qu'un intérêt tout relatif, car, comme nous l'avons vu, l'œil est limité par son propre pouvoir séparateur, l'émulsion par son pouvoir de résolution. La netteté acceptable sera donc celle qui ne dépasse pas les possibilités de résolution de la surface sensible et de l'œil. La définition de la **profondeur de champ** tient compte intrinsèquement de l'observation précédente. (Tout cela suppose néanmoins que l'image soit projetée et observée à des distances normales.)

En faisant intervenir la profondeur de foyer correspondante, il est possible, par un calcul assez difficile (*fig.* 10), de déterminer la formule générale de la profondeur de champ :

$$(1) \qquad \frac{1}{\overline{OP}} - \frac{1}{\overline{OR}} = \frac{1}{\overline{OS}} - \frac{1}{\overline{OP}} = \frac{\alpha N}{f}$$

dans laquelle $\overline{OP}$ désigne la distance de mise au point, $\overline{OR}$ celle jusqu'où la netteté sera acceptable, $\overline{OS}$ celle à partir de laquelle la netteté sera acceptable, α la tolérance de netteté angulaire, N le nombre d'ouverture du diaphragme et f la distance focale. On constate que la profondeur de champ est proportionnelle à la tolérance de netteté angulaire et au nombre d'ouverture : c'est-à-dire que, pour un objectif donné, il y aura plus de profondeur de champ à $f/16$ qu'à $f/2,8$ pour la même distance de mise au point. Elle est également inversement proportionnelle à la distance focale : pour une même distance de mise au point, un grand angulaire aura une plus grande profondeur de champ qu'un objectif de longue focale. On constate également que si la distance $\overline{OR}$ tend vers l'infini, la relation **(1)** s'écrit :

$$(2) \qquad \frac{1}{\overline{OP}} = \frac{1}{\overline{OS}} - \frac{1}{\overline{OP}} = \frac{\alpha N}{f}$$

d'où l'on déduit :

$$(3) \qquad \overline{OP} = \frac{f}{\alpha N}$$

et $\overline{OP} = 2\,\overline{OS}$.

Cette valeur de $\overline{OP}$ **(3)** s'appelle la distance hyperfocale. Lorsqu'on effectue la mise au point à cette distance, la profondeur de champ s'étend sur une distance allant de la moitié de l'hyperfocale jusqu'à l'infini. La distance hyperfocale peut également être définie à l'aide de la tolérance de netteté linéaire ρ :

$$\overline{OP} = \frac{f^2}{\rho N} \qquad \text{avec } \alpha = \frac{\rho}{f}$$

Dans certaines caméras d'amateurs qui ne possèdent pas de bague de mise au point, l'objectif est réglé définitivement sur l'hyperfocale.

Les différents types d'objectifs

Un objectif cinématographique est utilisé dans un but précis, ce qui détermine les recherches des constructeurs et les oblige à adopter un type d'objectif particulier. Ce choix fait, les recherches s'orientent alors en vue de l'élimination totale ou partielle des aberrations inhérentes à l'objectif lui-même. Sa qualité finale, quelles que soient ses caractéristiques (distance focale, luminosité, etc.), dépendra donc de l'habileté avec laquelle les constructeurs ont pu supprimer ces différentes aberrations, qui peuvent être simples ou complexes — dans ce dernier cas leur détermination et leur correction posent un problème particulièrement délicat. On distingue :

* *L'aberration sphérique de l'image*. L'image d'un point situé sur l'axe optique est entourée d'un halo lumineux, parce que les lentilles sont moins convergentes au centre que sur les bords. Les rayons marginaux engendrent une courbe caustique de révolution autour de l'axe, le long de laquelle se produit une accumulation de lumière. Cette aberration est en partie corrigée si la lentille convergente présente sa face convexe en direction du sujet. On peut aussi la réduire en diaphragmant; c'est ainsi qu'on peut la négliger à partir d'une ouverture de 1:8. Cependant, en cinéma, on a très souvent recours à des ouvertures de 1:2,8, auquel cas l'aberration de sphéricité se corrige par association de lentilles convergentes et divergentes, le défaut des unes compensant le défaut des autres. Lorsqu'un objectif est corrigé de son aberration de sphéricité, la courbure représentant l'aberration longitudinale se trouve repliée.

* *L'aberration en dehors de l'axe : la coma*. Celle-ci apparaît lorsque le système optique ne vérifie pas la condition des sinus d'Abbe : $\frac{\sin \alpha}{\sin \alpha'} = c^{te}$, où α et α' désignent respectivement les angles du rayon incident et du rayon émergent. Pour plus de facilité, on peut l'assimiler à l'aberration sphérique des rayons obliques. Le faisceau étant dissymétrique, la coma, contrairement à l'aberration de sphéricité, se présente sous la forme d'un halo lumineux allongé rappelant la queue d'une comète. On la corrige en diaphragmant et en associant des lentilles qui corrigent mutuellement leurs propres aberrations. Les objectifs sans aberration de sphéricité et sans coma sont dits aplanétiques : ils donnent des images nettes au centre et sur les bords.

* *L'aberration d'inclinaison : l'astigmatisme*. De même que la coma, l'astigmatisme concerne les rayons lumineux qui sont très inclinés sur l'axe. Le pinceau émergent passe par deux droites focales orthogonales, dites focales de Sturm, qui sont les focales tangentielle et sagittale. La distance séparant ces deux focales détermine la valeur de l'astigmatisme. En pratique, il est impossible d'obtenir simultanément des lignes verticales et horizontales nettes. Un compromis acceptable peut néanmoins être établi entre ces deux focales à l'endroit du cercle de moindre diffusion. Pour réduire cette aberration, il faut diminuer la distance qui sépare les deux focales de Sturm : on s'y applique en associant plusieurs lentilles ou en utilisant un mécanisme convergent. Lorsque les deux focales peuvent être considérées comme confondues pour une partie suffisamment grande du champ, on dit qu'il y a stigmatisme approché.

* *La courbure de champ*. Elle est due à ce qu'il est impossible d'obtenir simultanément la netteté au centre et sur les bords de l'image. Comme nous l'avons vu, un objectif corrigé pour l'astigmatisme ne présente plus qu'une seule surface focale. Mais cette dernière n'est pas plane et présente au contraire une certaine concavité en direction de l'objectif. Si, de ce fait, la mise au point est opérée pour un objet situé sur l'axe optique, les rayons provenant des extrémités du champ donnent des images nettes en avant du plan du film. De toutes les aberrations, la courbure de champ est la plus difficile à corriger. Elle peut néanmoins être limitée par des associations adéquates de lentilles de formes et de verres différents. Les objectifs corrigés pour l'astigmatisme et la courbure de champ sont dits anastigmats.

* *La distorsion*. Cette aberration n'affecte pas la netteté de l'image, mais la forme de ses lignes. Le parcours des rayons émergents extrêmes, qui est plus long que celui des rayons centraux, provoque un agrandissement supérieur des bords de l'image. Le sens de la distorsion ne dépend que de la position du diaphragme. Si celui-ci est placé en avant de la lentille, la distorsion est dite en barillet; dans le cas contraire, elle est dite en croissant. L'objectif symétrique à diaphragme central est corrigé de distorsion; les doubles symétriques sont dits orthoscopiques ou rectilinéaires.

* *L'aberration chromatique*. Contrairement aux aberrations précédentes, qui sont d'ordre géométrique, l'aberration chromatique est directement liée à la nature composite de la lumière blanche. Une lentille peut être assimilée à une suite infinie de microprismes dispersant la lumière blanche en faisceaux de différentes couleurs. Les faisceaux coupent l'axe optique à des endroits différents et, d'un même objet, donnent plusieurs images concentriques en différentes couleurs spectrales : il y a donc chromatisme de position et chromatisme de grandeur. Ce dernier, qui est indépendant de la distance focale, est le plus difficile à corriger. Plusieurs types d'objectifs peuvent néanmoins le limiter : c'est le cas de la lentille achromatisée qui est l'association d'une lentille convergente en crown dense et d'une lentille divergente en flint léger. L'apparition du cinéma en couleurs, utilisant des émulsions panchromatiques, a imposé la correction chromatique complète des objectifs pour les différentes longueurs d'onde du spectre.

Ces quelques considérations concernant les aberrations des objectifs nous permettent d'imaginer l'importance et la difficulté des travaux mis en œuvre depuis plus d'un siècle en vue de les corriger. Les objectifs modernes auxquels on demande une grande luminosité et un angle de champ important ne peuvent évidemment pas être parfaitement corrigés de toutes ces aberrations. Selon l'emploi auxquels ils les destinent, les constructeurs peuvent favoriser la correction d'une ou de plusieurs aberrations particulières. Les objectifs utilisés en cinéma professionnel sont dits universels : dépourvus de toute aberration notoire. Les objectifs les plus simples, équipant les appareils d'amateurs, peuvent n'être composés que d'une seule lentille, fortement diaphragmée, en forme de ménisque. L'objectif achromatique, l'objectif rectiligne à deux lentilles et le simple ménisque ne peuvent cependant plus satisfaire les exigences toujours croissantes des amateurs. Les objectifs modernes utilisés en cinématographie peuvent tous être rapportés à trois types fondamentaux. Il est d'ailleurs étonnant de constater que les recherches effectuées à partir de types différents ont abouti à la réalisation d'objectifs de mêmes caractéristiques et semblables en de nombreux points.

Objectifs de type symétrique (*fig.* 11)

Comme leur nom l'indique, ces objectifs se présentent sous la forme de deux blocs de lentilles disposés symétriquement autour du diaphragme. Les lentilles peuvent être accolées ou indépendantes. Dans le premier cas, l'objectif offre l'avantage de ne présenter que quatre surfaces air/verre, donnant ainsi à l'image un piqué de très bonne qualité. Les anastigmats symétriques à 6 ou 8 lentilles donnent une bonne correction de toutes les aberrations et permettent d'utiliser un champ assez étendu. Leur faible luminosité a cependant imposé aux constructeurs l'introduction d'intervalles d'air dans leurs différentes combinaisons. Le deuxième cas (lentilles indépendantes) présente une plus large gamme de possibilités quant à la réduction des aberrations résiduelles et à l'augmentation de la luminosité. En utilisant les lentilles sous forme de ménisques, on obtient un objectif symétrique de type Gauss qui, accompagné de collages et de dédoublements adéquats, permet l'obtention de luminosités importantes.

fig. 11

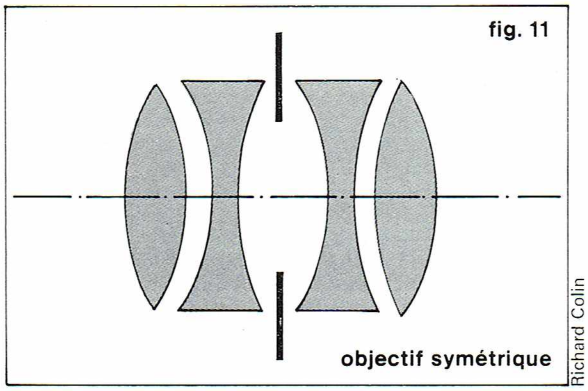

Richard Colin

◀ *Figure 11 :* objectif symétrique *; il comprend deux blocs de lentilles disposés symétriquement autour du diaphragme ; le système représenté ici est un anastigmat à quatre lentilles indépendantes.*

Objectifs du type Petzval (*fig.* 12)

Ces objectifs ont été calculés et mis en équation par Petzval dès 1840. A l'origine, ils se composaient de deux blocs de lentilles dissymétriques, la combinaison postérieure étant traversée par un espace d'air. L'objectif de Petzval (dès sa création, il avait déjà une très grande ouverture) fut particulièrement bien accueilli à l'époque du daguerréotype qui nécessitait de très longs temps de pose. Cependant, ses limites furent rapidement atteintes, et l'étroitesse de son champ, son astigmatisme et son aberration chromatique résiduelle le réservèrent à des utilisations bien particulières. Malgré les nombreuses améliorations qu'il a subies depuis lors, cet objectif reste destiné exclusivement à la projection et à la prise de vue de portraits.

Objectif triplet (*fig.* 13)

Cet objectif anastigmatique fut mis au point en 1893 par l'opticien anglais Taylor. Sa constitution était alors fort simple : une lentille convergente, une lentille divergente à proximité de laquelle se trouvait le diaphragme et, enfin, une lentille postérieure convergente. Dans cette version originale, le triplet était entaché de courbure de champ. De nos jours, lorsque l'ouverture n'est pas trop large, son emploi est pleinement justifié pour les appareils de petit format. De nombreuses formes dérivées ont été réalisées à partir de cette version simple. La première d'entre elles consiste à joindre une lentille divergente à la lentille convergente postérieure : ainsi a été réalisé le Tessar de Zeiss. La correction des aberrations géométriques est complète pour une ouverture relativement importante de f:2,8. Il présente également l'avantage de pouvoir être mis au point par simple déplacement de la lentille frontale. Enfin, un grand nombre de formes dérivées ont été mises au point par collage de lentilles supplémentaires ou dédoublement des lentilles latérales. La luminosité de ces objectifs a pu ainsi être poussée à l'extrême aussi bien pour les longues que pour les courtes focales. Tout en conservant le système triplet, la tendance actuelle observée par les calculateurs est de se rapprocher d'une certaine symétrie, soit par la forme des lentilles, soit par l'indice des verres utilisés.

Les trois types d'objectifs que nous venons de voir ne peuvent plus satisfaire pleinement les besoins des professionnels et des amateurs. L'usage de focales extrêmes

fig. 12

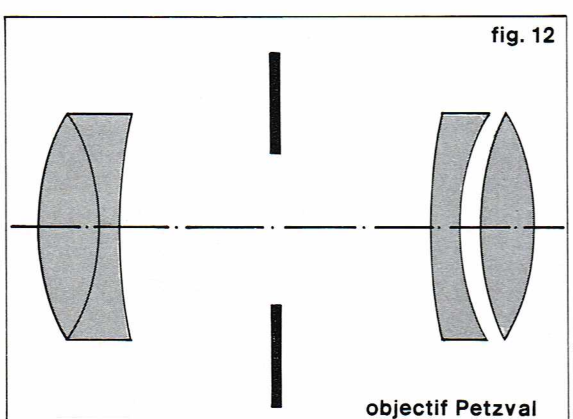

Richard Colin

fig. 13

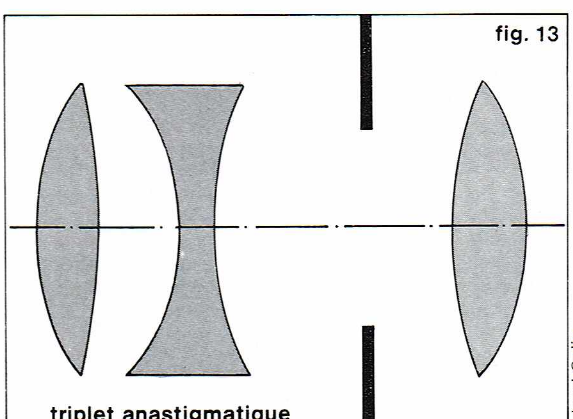

Richard Colin

◀ *Figure 12 :* objectif Petzval *; cet objectif est composé de deux blocs de lentilles dissymétriques, la combinaison postérieure présentant un espace d'air.*
Figure 13 : objectif triplet *anastigmatique dans sa version originale.*

▶ *Figure 14 : principe du Rétrofocus ; cet objectif comprend de grands ménisques divergents très éloignés du centre, ce qui augmente le tirage de l'appareil.*

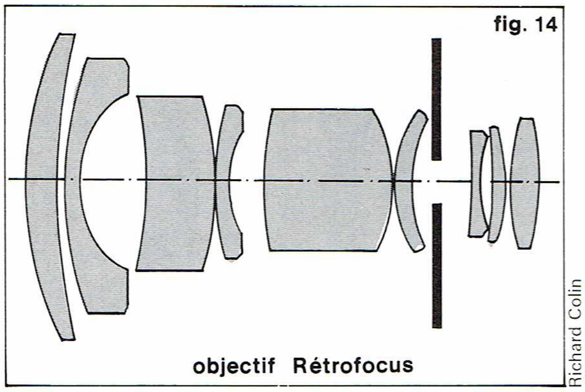

s'est fait de plus en plus fréquent, et l'emploi du travelling mécanique a laissé place — en particulier chez les amateurs — à celui du travelling optique : le « zoom » présente l'avantage incontestable de pouvoir réunir sous une même monture une infinité de focales. Les constructeurs ont dû s'efforcer de mettre au point des objectifs de types nouveaux, pourvus des mêmes qualités que les objectifs classiques les plus perfectionnés.

Grands angulaires — Rétrofocus (*fig.* 14)

Les dérivés du type Gauss ne permettaient pas l'obtention d'angles de champ supérieurs à 70°. Un nouveau type d'objectif est né par adjonction de grands ménisques divergents de chaque côté de la combinaison centrale. La qualité des images est excellente, et l'angle de champ peut atteindre 90°. Cependant, les ensembles divergents étant très éloignés du centre, ces objectifs présentent l'inconvénient d'être fort encombrants. D'autre part, il s'est avéré impossible d'adapter ces nouveaux grands angulaires aux caméras utilisant la visée reflex sur prisme ou sur obturateur : la place nécessaire à l'introduction du système de visée est devenue trop réduite. Cette difficulté a été surmontée par la création d'un grand angulaire de type nouveau : le rétrofocus. Celui-ci peut être assimilé à un téléobjectif retourné ; il se compose d'un ensemble frontal divergent de grand diamètre, séparé nettement d'un système arrière convergent. Le tirage résultant d'une telle combinaison peut être très important. A focale égale, la distance séparant la dernière lentille du plan du film est beaucoup plus grande dans un rétrofocus que dans un grand angulaire classique.

▼ *Figure 15 : principe de l'objectif zoom à compensation optique ; a, position grand angle, b, position téléobjectif.*

Longues focales — Téléobjectif

Des objectifs à longue et à très longue focales ont pu être mis au point par transformation plus ou moins complexe des trois types de base. On arrive ainsi à fabriquer des objectifs ayant jusqu'à 1 000 mm de distance focale. De telles réalisations sont cependant très encombrantes, car le tirage des appareils est sensiblement égal à leur distance focale, et c'est pour pallier cet inconvénient que les constructeurs ont été amenés à créer le téléobjectif. Ce dernier est composé d'un ensemble frontal convergent suivi d'un système divergent. A grandissement égal, donc à focale égale, cette disposition permet de réduire notablement le tirage de l'objectif et, par suite, son encombrement. L'introduction de cet élément divergent devant le plan du film entraîne toutefois l'apparition de nombreuses aberrations (astigmatisme et distorsion) et réduit considérablement la luminosité de l'ensemble. L'appellation « téléobjectif » est fréquemment utilisée de nos jours pour désigner des objectifs à long foyer et à tirage réduit, qui ne sont en fait que des formes dérivées des trois types classiques.

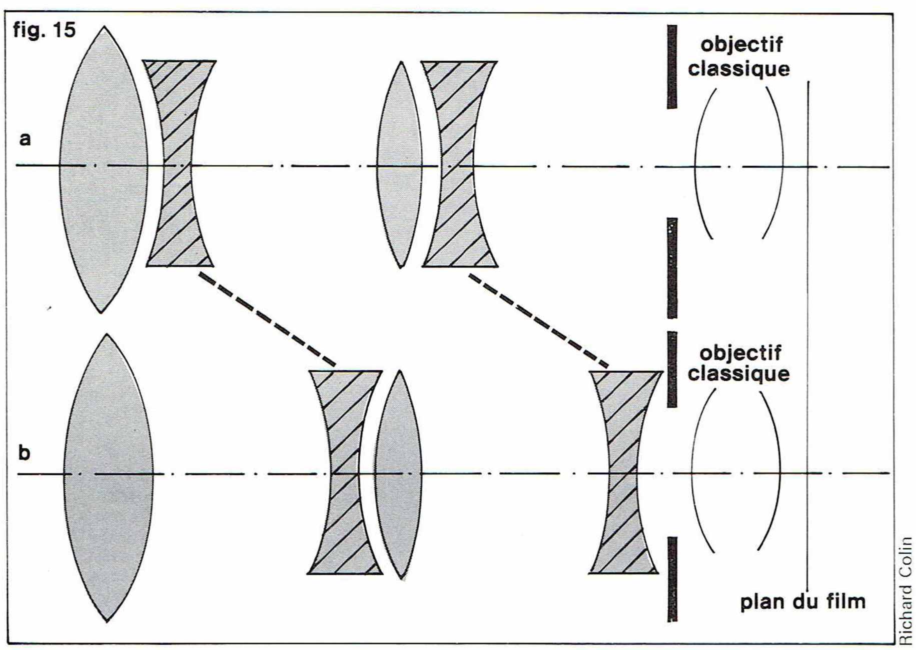

Objectifs à focale variable (*fig.* 15)

Les premières réalisations de ce type d'objectifs ont commencé après la Seconde Guerre mondiale. Les zooms, principalement mis au point pour les formats 8 et 16 mm, avaient à cette époque une amplitude limitée à deux ou trois. La meilleure qualité des verres optiques et les progrès obtenus par la généralisation des calculs électroniques ont permis très rapidement de réaliser des objectifs à focale variable de grande amplitude (de 5 à 20), dont les caractéristiques pouvaient être comparées à celles des objectifs classiques. De nos jours, des objectifs zooms de grande qualité sont également conçus pour le cinéma professionnel ; la variation de focale peut dans ce cas être réalisée électriquement à l'aide de micromoteurs de différentes vitesses. D'une manière générale, l'objectif zoom doit assurer une luminosité, un tirage optique et un pouvoir séparateur constants au cours des différentes variations de focale. Il est constitué d'un objectif ordinaire à l'avant duquel est interposé un système afocal à grandissement variable. La mise au point est très souvent obtenue par simple déplacement de la lentille frontale convergente, et la luminosité de l'ensemble est régulée par un diaphragme situé en avant de l'objectif normal. A elle seule, cette disposition ne permettrait cependant pas d'assurer une correction convenable des aberrations et provoquerait un déplacement du plan image en fonction des variations de focale. Le groupe frontal de mise au point doit donc être constitué de plusieurs lentilles convergentes et divergentes — certains constructeurs ont d'ailleurs adopté un groupe frontal divergent afin de limiter l'encombrement de l'objectif —, et le déplacement du système afocal doit être compensé par la variation d'un autre groupe mobile. Cette compensation peut être effectuée par voie optique (déplacement d'un groupe de lentilles) ou mécanique (système compensateur à cames ou à engrenages). La réduction des aberrations et le mécanisme compensateur nécessitent la mise en œuvre de nombreuses lentilles qui diminuent considérablement la luminosité du système. On peut d'ailleurs considérer qu'il existe en moyenne une différence d'un diaphragme entre les ouvertures géométriques et photométriques des objectifs à focale variable.

Conception et réalisation

La conception et la fabrication des objectifs cinématographiques font l'objet de longues et constantes recherches dans les domaines des mathématiques et des techniques optiques. Jusqu'à la première moitié du XX^e siècle, ces recherches pouvaient durer plusieurs années pour la seule fabrication d'un objectif de quatre à cinq lentilles. La qualité des objectifs modernes, en particulier celle des zooms et des grands angulaires, n'aurait jamais pu être atteinte sans l'emploi de l'ordinateur et des méthodes de calcul électronique. Ces ensembles permettent en effet le calcul automatique des diverses corrections à effectuer et le stockage d'un nombre illimité de données numériques et d'instructions codifiées. L'ouverture relative, l'angle de champ et le mode de construction sont les données qui conditionnent l'élaboration d'un objectif déterminé ; les recherches s'orientent ensuite vers l'amélioration de ses qualités d'ensemble (réduction des aberrations à toutes les distances de mise au point).

L'opération de fabrication débute lorsque tous les paramètres et les cotes des différents éléments de l'objectif sont déterminés avec précision. La fabrication des verres en est la première étape : ceux-ci sont en général composés d'un mélange de silice, d'alcali, de chaux, d'oxyde de baryum et d'acide borique, le tout étant chauffé à environ 1 500 °C et refroidi très lentement. Le bloc réfractaire est ensuite brisé à la masse, et les morceaux de verre sont récupérés et soigneusement vérifiés. Une fois cette opération terminée, les indices de réfraction des verres étant conformes aux déterminations mathématiques, a lieu le moulage, puis l'usinage des lentilles, effectué à l'aide d'un système rotatif recouvert d'une substance abrasive.

On procède ensuite au traitement de surface des verres, de façon à éliminer partiellement les réflexions parasites. La technique industrielle du traitement des lentilles par vaporisation de substances anti-reflets a été mise au point en Allemagne en 1936. Avant cette date, il était nécessaire de limiter à 6 ou 8 les interfaces air-verre du fait des réflexions qui se produisaient sur chacune d'elles et des pertes de contraste et de luminosité qui en résultaient. La réflexion des rayons incidents à la surface d'une lentille est donnée par la relation

$$\rho = \frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0}$$

n_0 et n_1 étant respectivement les indices de l'air et du verre considéré. Pour réduire cette réflexion parasite, on effectue sur le verre une projection cathodique de fluorure de métal léger (lithium, magnésium, sodium...), fine pellicule qui recouvre entièrement et uniformément la lentille. Le principe de ce traitement est fondé sur la superposition de deux mouvements vibratoires qui s'annulent par interférence lorsqu'ils sont d'amplitude égale et en opposition de phase. Les interférences créées par les deux mouvements vibratoires dépendent directement de l'épaisseur de la couche du traitement de surface et de son indice de réfraction. Pour qu'il y ait interférence destructive, cette épaisseur doit être égale ou proportionnelle au quart de la longueur d'onde pour laquelle le traitement est effectué, et l'indice de réfaction n_2 du matériau doit vérifier la relation $n_2 = \sqrt{n_1}$, n_1 étant celui du verre. En général, on effectue ce traitement pour la raie jaune du sodium de 0,55 μ : seul le jaune est transmis, ce qui crée le reflet pourpre caractéristique des objectifs traités. Le traitement de surface améliore le pouvoir séparateur et la luminosité des objectifs tout en protégeant les verres contre les attaques des agents atmosphériques. La dernière opération de fabrication consiste à sertir les lentilles dans des montures métalliques et à les positionner rigoureusement dans une monture cylindrique en assurant une parfaite coïncidence de leurs axes optiques.

La projection

La projection est l'ultime étape de l'itinéraire du film. Elle a pour but de réaliser sur un écran une reproduction quasi parfaite des images enregistrées lors de la prise de vue. Dans le cadre du cinéma commercial, cette opération s'effectue dans des salles de spectacle spécialement aménagées. Elle est généralement réalisée à l'aide d'un appareil de projection et d'un écran plan. Cependant il existe, en nombre très limité, des salles de spectacle permettant des projections multiples pouvant aller dans certains cas jusqu'au panorama total. Bien que les moyens mis en œuvre par les amateurs soient plus limités, la projection de films de format réduit nécessite un certain nombre de dispositions particulières : projecteurs portables, vitesse de défilement variable, possibilité de marche arrière et de réenroulement du film, etc. Le cinéma scientifique, de son côté, réclame l'emploi de projecteurs d'analyse, du type « Analector », qui permettent l'arrêt sur image et des cadences très faibles de défilement du film.

L'appareil de projection

Les copies standard d'exploitation destinées à la projection dans les salles de spectacle sont en général des films 35 mm (parfois 16 mm) dotés d'une piste sonore photographique. La reproduction sonore peut également être effectuée sur une ou plusieurs pistes magnétiques disposées de part et d'autre des images. Cette seconde solution est adoptée pour les restitutions stéréophoniques de projections panoramiques, tel le cinémascope, et par les amateurs qui introduisent une piste magnétique en bordure des images pour la projection sonore de films Super 8. Enfin, un autre procédé consiste à projeter simultanément sur un même appareil une bande image et sa bande son correspondante, ce qui est réalisé à l'aide des projecteurs « double bande » qui assurent en synchronisme l'entraînement des deux films.

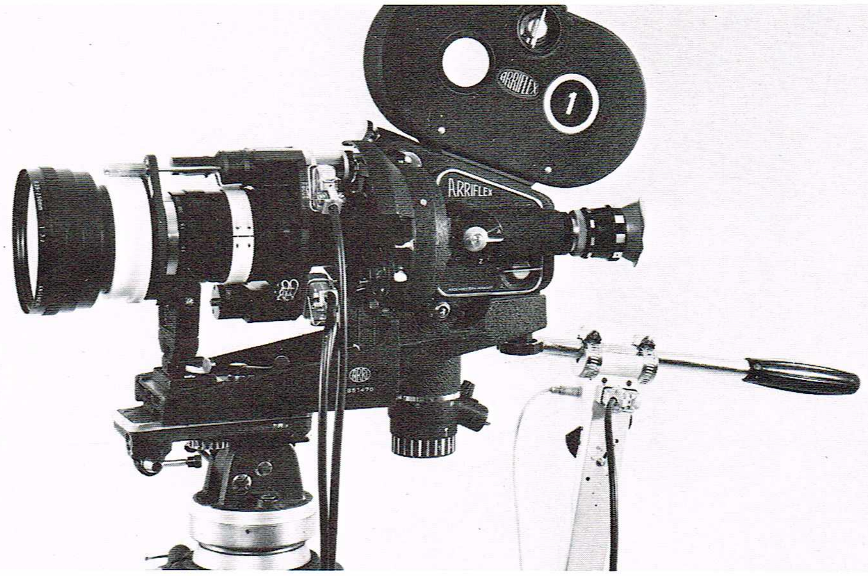

Document Techni-Ciné-Phot

▲ ***Un objectif zoom Angenieux 25/250 mm commandé électriquement.***
▼ ***Quelques anciens appareils de projection : 1, une lanterne magique ; 2, le praxinoscope réalisé par Reynaud en 1879 ; 3, le kinétoscope d'Edison, breveté en 1891 ; 4, la caméra fabriquée en 1913 par la Custom House de New York.***

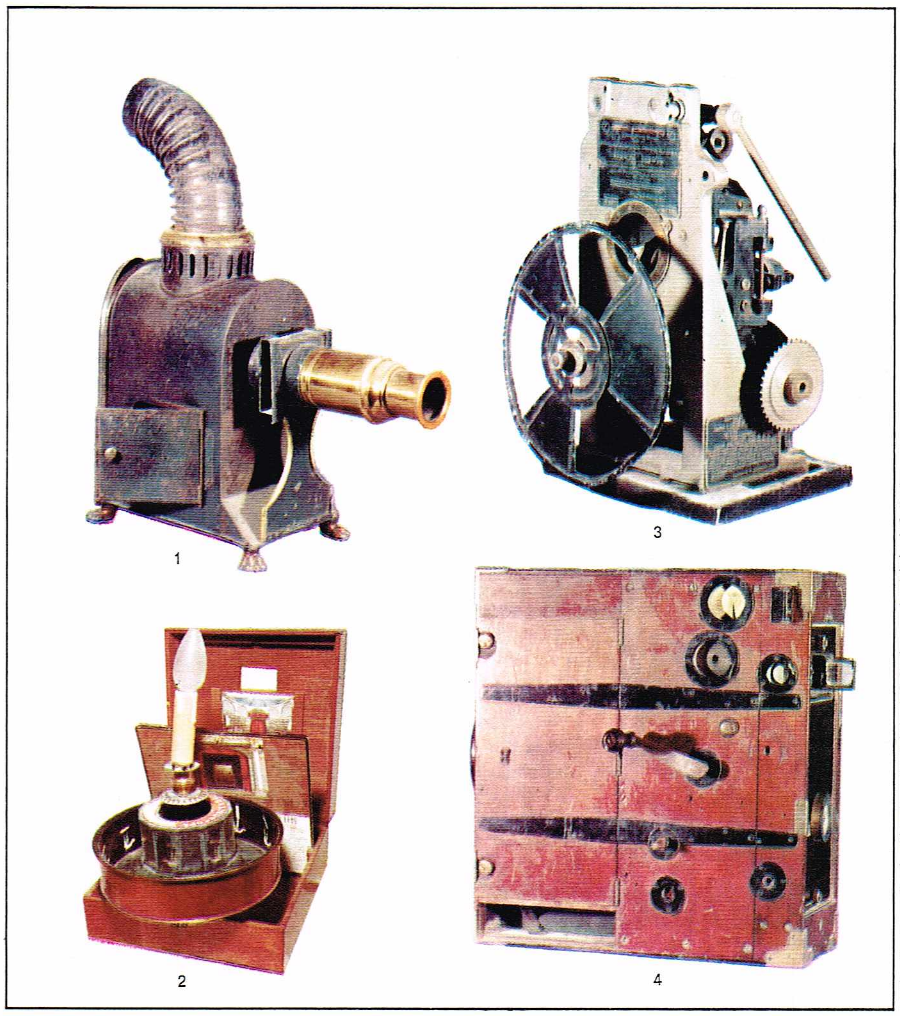

Nat's Photo   Nat's Photo   Archivio I.G.D.A.   Archivio I.G.D.A.

▶ *A gauche, figure 16 : principe de fonctionnement d'un projecteur de cinéma. A droite, un projecteur professionnel pour films 35 mm.*

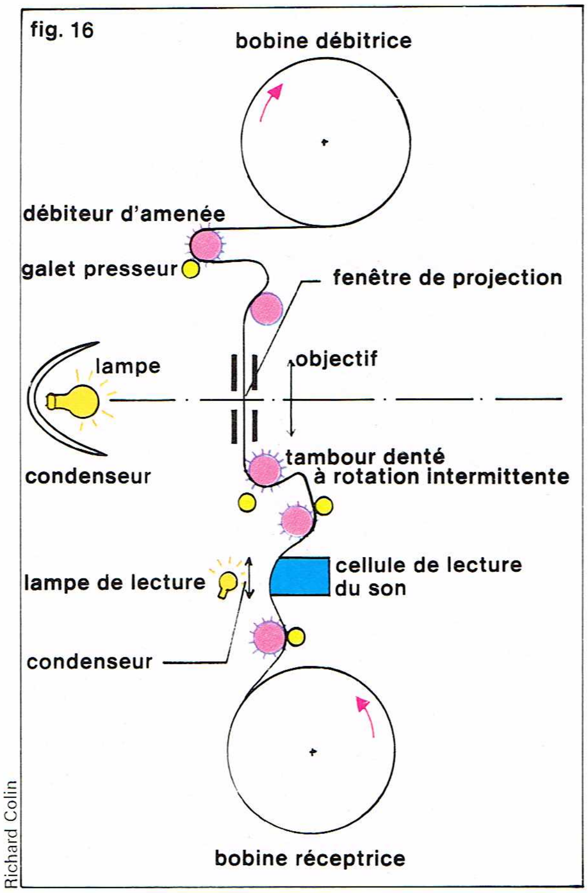

Richard Colin

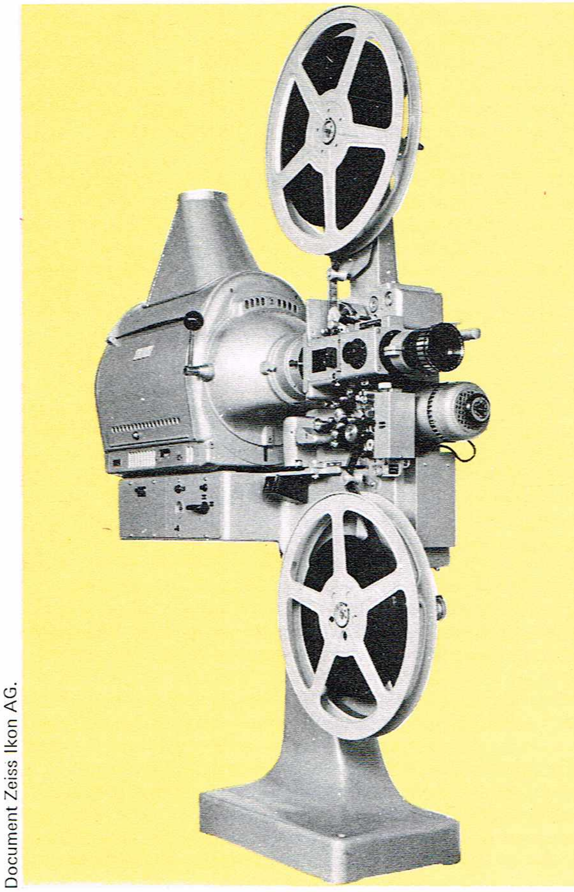

Document Zeiss Ikon AG.

La fonction de l'appareil de projection est de restituer en synchronisme les images et les sons enregistrés lors du tournage du film. La restitution des images s'effectue sur un écran de projection, et celle des sons dans la salle entière, par l'intermédiaire de haut-parleurs appropriés. Le principe de fonctionnement du projecteur est sensiblement identique à celui de la caméra (*fig.* 16) : le film est extrait du magasin supérieur à l'aide d'un débiteur d'amenée; après avoir effectué une boucle, il s'engage dans le couloir de projection à la sortie duquel un tambour denté lui impose une traction intermittente; après une seconde boucle, un débiteur lui communique à nouveau un mouvement de descente continue; le film passe alors devant une tête de lecture sonore avant de terminer sa course dans le magasin récepteur. Un obturateur circulaire assure l'obstruction des rayons lumineux provenant de la lanterne de projection pendant l'escamotage des images. Afin de conserver un parfait synchronisme entre les images et les sons, les copies standard d'exploitation présentent un décalage constant entre la bande image et la bande son, fixé à 20 images pour les films de format 35 mm (26 images pour le format 16 mm). Dans le projecteur, la lecture du son est effectuée 20 images après la fenêtre de projection.

Le mécanisme d'entraînement intermittent permet, 24 fois par seconde, de réaliser la descente du film sur une hauteur égale à une image. Dans l'appareil de prise de vues, la descente des griffes s'effectue pendant un tiers du temps d'escamotage d'une image, l'obturateur restant fermé durant la moitié de ce temps. A la projection, la réduction du phénomène de scintillement impose un temps de descente des mécanismes intermittents inférieur ou égal à un quart du temps total, afin de permettre la réalisation de deux impulsions et de deux obturations pour une même image. Le cycle d'escamotage d'une image s'effectue donc de la manière suivante : descente du film durant 1/96 s et immobilisation durant 3/96 s. Le système d'entraînement par griffes mis en œuvre dans les caméras a été totalement délaissé dans les appareils de projection; la traction du film y est en effet beaucoup plus forte et l'utilisation journalière du mécanisme beaucoup plus longue (jusqu'à 12 heures).

Le choix s'est porté sur un entraînement intermittent par tambour denté. Ce dernier, de constitution mécanique plus robuste, permet d'exercer sur le film une traction répartie sur plusieurs paires de perforations : le maintien du film est assuré par un système de galets presseurs. La solution universellement adoptée pour imprimer à ce débiteur une rotation intermittente est celle mettant en œuvre un dispositif à « croix de Malte ». La croix, solidaire du tambour denté, est une pièce métallique composée de quatre secteurs circulaires concaves séparés par quatre rainures orthogonales. Son mouvement intermittent est engendré par un plateau à ergot monté sur un arbre à rotation continue. Un tour complet effectué par le disque correspond à une rotation de 1/4 de tour de la croix de Malte. Le cycle d'escamotage d'une image,

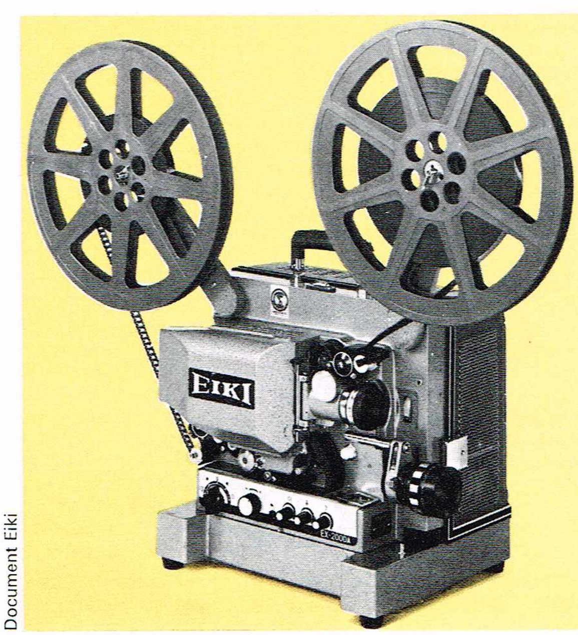

Document Eiki

▶ *Un projecteur amateur et semi-professionnel pour films 16 mm.*

correspondant à la rotation complète du plateau, se traduit mécaniquement par :

— la rotation d'un quart de tour de la croix de Malte, provoquée par l'engagement de l'ergot dans l'une de ses quatre rainures ; durée : 1/96 s ;

— l'immobilisation de la croix de Malte (durée : 3/96 s), assurée par un disque solidaire du plateau qui s'applique très exactement contre l'un des quatre secteurs concaves de la croix.

Le mécanisme de croix de Malte étant soumis à d'importants efforts, les différents organes qui le constituent sont réalisés dans des aciers trempés à haute résistance, et l'ensemble est disposé à l'intérieur d'un carter rempli d'huile. D'autre part, la stabilité verticale des images exige un centrage parfait de la croix de Malte ainsi qu'un usinage précis de ses rainures et de ses secteurs circulaires. Certains constructeurs ont adopté le mécanisme de croix de Malte accéléré, qui consiste à accroître la vitesse du plateau lorsque l'ergot est engagé dans une rainure de la croix : cette accélération est réalisée dans la plupart des cas par l'intermédiaire d'un plateau-manivelle. Notons également que les appareils de format 16 mm font intervenir une croix à huit branches dotée d'un mouvement accéléré.

Seuls, certains projecteurs de format réduit, ainsi que ceux destinés à la réalisation de transparence, font encore usage d'un mécanisme d'entraînement par griffes : outre sa fragilité, ce dispositif mécanique n'assure que partiellement l'immobilisation du film lors de la projection.

L'obturateur doit assurer l'obstruction du rayon lumineux pendant la descente du film. Il doit également, afin de réduire le phénomène de scintillement, être en mesure de couper une seconde fois le rayon lumineux durant la période d'immobilisation du film. Le nombre des obturations est donc le double de celui des escamotages d'images : un cycle de 1/24 s correspond à deux obturations de 1/96 s et à deux impulsions de 1/96 s. Si un système d'entraînement permet une descente plus rapide du film (mécanisme de croix de Malte accéléré), l'ouverture de l'obturateur peut être agrandie afin d'augmenter la durée totale de la projection. L'obturateur de type tronconique est la solution la plus usitée sur les projecteurs de modèle récent. Il permet de limiter considérablement l'angle mort d'obturation en coupant le faisceau lumineux dans sa section minimale, c'est-à-dire en arrière et le plus près possible de la fenêtre de projection. Une diminution plus importante de l'angle mort peut encore être obtenue en faisant tourner l'obturateur à raison de deux tours par cycle. Il convient alors d'utiliser un obturateur dissymétrique dont la pale unique, ouverte à 180°, fait alternativement office de pale d'escamotage et de pale de scintillement.

La lampe de projection assure l'éclairement de l'écran en concentrant sur le film une forte intensité lumineuse. Sa puissance est choisie en fonction de l'agrandissement et de la distance à laquelle est effectuée la projection. Dans cette détermination, il faut également tenir compte des différentes absorptions que subit le faisceau lumineux tout au long de son trajet, l'utilisation finale de ce dernier n'excédant que rarement 10 % de sa valeur initiale. On emploie de nos jours trois types distincts de lampes de projection :

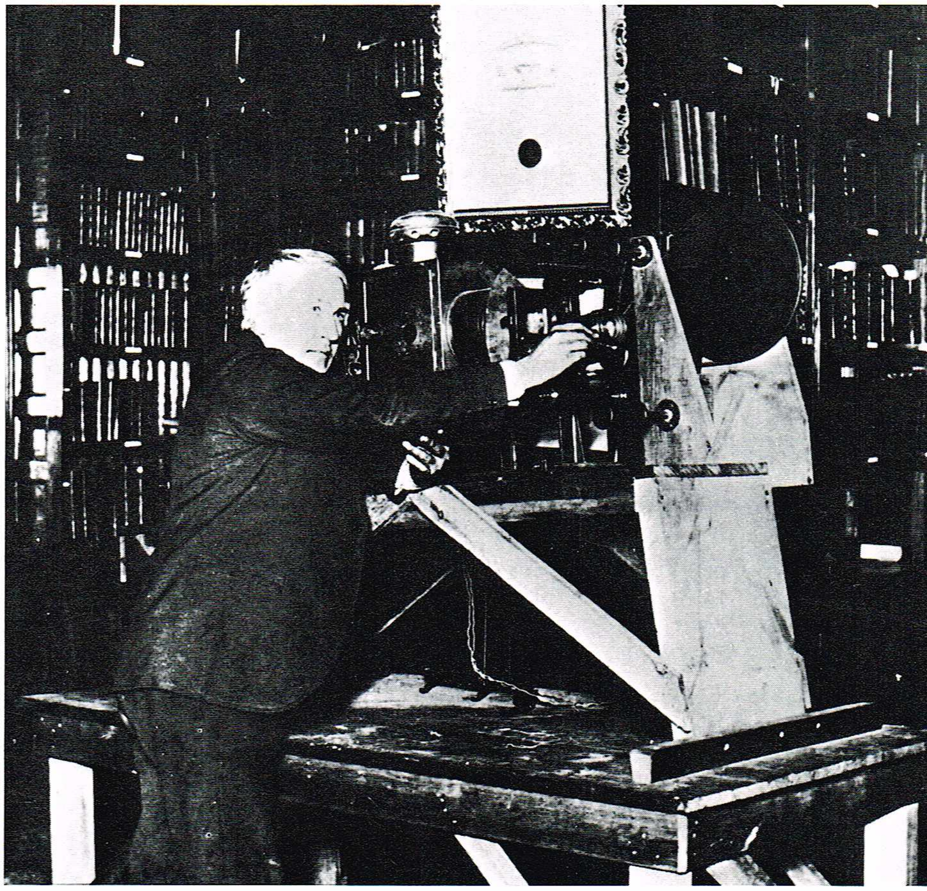

Archives Snark

▲ ***Edison projetant un film avec un projecteur de sa fabrication.***

— la plus ancienne source de lumière utilisée a été celle produite par les lampes à arc à charbons. A l'origine, la décharge était entretenue entre deux bâtonnets de charbon qui jouaient les rôles d'anode et de cathode. Le cratère du charbon positif, qui constituait la source essentielle du flux lumineux émis, était situé au foyer d'un système optique qui concentrait l'énergie lumineuse sur le plan du film. Le rendement offert par cette solution était cependant relativement faible. On eut alors recours à une minéralisation plus poussée de la mèche du charbon positif, qui, accompagnée d'une inclinaison adéquate du charbon négatif, permit l'obtention d'arcs à haute intensité : leur rendement lumineux pouvait atteindre 70 lumens par watt. Un des derniers perfectionnements consiste à insuffler sur le cratère du charbon positif un jet d'air continu qui augmente sa brillance en évacuant rapidement ses gaz d'émanation. La lumière émise par l'arc à haute intensité présente des caractéristiques identiques à la lumière solaire ;

— le second type de lampe de projection est fondé sur le phénomène de rayonnement par incandescence des corps portés à haute température. Le rayonnement lumineux est obtenu par l'incandescence d'un filament de tungstène traversé par un courant électrique. L'amélioration la plus récente consiste à introduire de l'iode à l'état gazeux à l'intérieur des ampoules. A haute température, l'iodure de tungstène se dissocie, et l'iode ainsi formé assure une régénération continuelle du filament de tungstène. La température d'incandescence peut être ainsi sensiblement augmentée sans porter atteinte à la durée de vie de la lampe. Les lampes à cycle d'iode, de dimensions et d'encombrement très réduits, conviennent particulièrement bien aux projecteurs d'amateurs ;

— pour l'illumination des écrans de grandes dimensions, l'utilisation de lampes à décharge a récemment offert la solution la plus satisfaisante. Ces lampes sont constituées de deux électrodes scellées à l'intérieur d'un tube de verre rempli d'un corps à l'état gazeux. Lorsqu'une certaine différence de potentiel est appliquée aux bornes des électrodes, les molécules du gaz passent d'un état fondamental à un état excité, puis redescendent à un état proche du fondamental en émettant un rayonnement d'une certaine fréquence. La radiation émise, qui ne

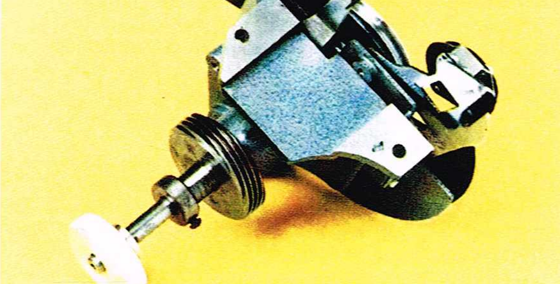

Document Eiki

◀ ***L'obturateur à griffes d'un projecteur 16 mm* Eiki *; ce dispositif d'entraînement de film ne possède pas de croix de Malte.***

▶ *Figure 17 : les condenseurs à miroirs d'un appareil de projection de films ; 1, lampe au xénon de type vertical ; l'image de la lampe forme un rectangle vertical ; 2, lampe au xénon de type horizontal ; l'image produite sur le cache est circulaire.*

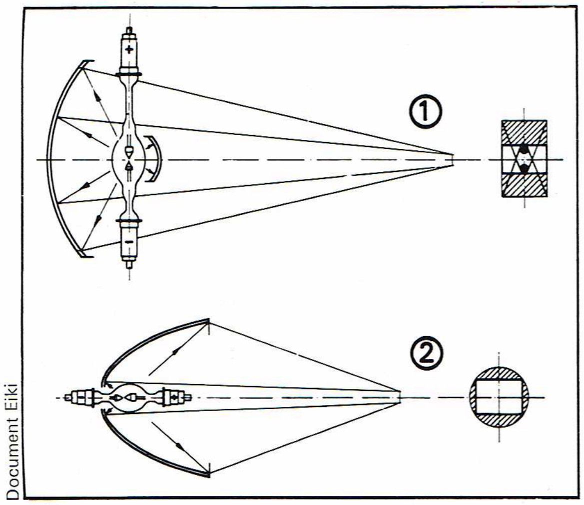

dépend que du gaz utilisé, a l'aspect d'un spectre de raies. L'intensité du rayonnement peut être augmentée en alimentant la lampe au moyen de très brèves impulsions de forte tension. Les premières lampes à décharge réalisées ne donnaient cependant pas une qualité de lumière compatible avec la projection de films en couleurs : le spectre émis restait déséquilibré et présentait une forte dominante bleu-vert due à l'absence de rayonnement rouge. L'équilibrage du spectre est obtenu de nos jours en employant des lampes à atmosphère de xénon. La décharge, entretenue au moyen d'impulsions de tension, a lieu dans des ampoules à haute pression gazeuse. L'intensité du rayonnement y est très forte, et le spectre de raies du xénon est sensiblement équivalent à un spectre continu de lumière blanche. L'équilibrage du spectre peut également être accompli en employant des lampes à iodures métalliques. Elles se présentent sous la forme de lampes à vapeur de mercure (principalement composées d'argon auquel a été ajoutée une goutte de mercure), dans lesquelles ont été introduits des halogénures métalliques dont l'émission spectrale se situe principalement dans le rouge (iodure de zinc, de thallium, etc.). Ces lampes, qui atteignent des rendements lumineux de l'ordre de 100 lumens par watt, admettent d'être équilibrées à différentes températures de couleur.

A chaque lampe de projection doit être associé **un système optique condenseur,** destiné à concentrer le flux lumineux sur le plan du film. Les principaux systèmes condenseurs utilisent les propriétés optiques des miroirs elliptiques et des lentilles convergentes (*fig.* 17). Le choix d'un système particulier est en grande partie dicté par la nature et la direction du rayonnement émis par la lampe de projection. Dans le cas des lampes au xénon de type vertical, on associe à la lampe un miroir sphérique de petites dimensions qui renvoie le flux lumineux sur un miroir elliptique placé en arrière de la lanterne de projection. On obtient ainsi une uniformisation de la luminance de la décharge tout en limitant les pertes d'énergie lumineuse. Pour les projecteurs de format réduit, les lampes à incandescence sont équipées d'un miroir incorporé ; les pertes résultant d'une telle disposition sont alors réduites en interposant un second miroir doté d'une ouverture centrale. Les nouvelles lampes à cycle d'iode sont montées dans l'axe d'un miroir elliptique enveloppant, recouvert d'un dépôt réflecteur interférentiel. Cette solution permet d'accroître le rendement lumineux de la lampe tout en réduisant l'émission du rayonnement infrarouge. L'échauffement doit en effet être évité sous peine de détérioration de la pellicule et de l'objectif. Pour ce faire, outre l'utilisation de miroirs condenseurs à couches interférentielles, on peut interposer dans le faisceau lumineux des filtres anticaloriques. Quelle que soit la formule choisie, il est toujours nécessaire d'évacuer l'énergie calorifique fournie par les sources à l'aide d'une importante circulation d'air.

Les objectifs de projection, pour l'agrandissement des images cinématographiques, renvoient sur un écran les rayons lumineux provenant du système optique condenseur. Leur constitution, quoique identique à celle des objectifs de prise de vue, vise à leur faire remplir certaines conditions particulières : lorsque le système condenseur est réalisé à l'aide d'un miroir, l'angle d'ouverture de l'objectif doit être supérieur à celui du miroir afin de bénéficier entièrement du faisceau lumineux provenant de ce dernier ; l'objectif doit également pouvoir supporter l'échauffement provoqué par la concentration de lumière et présenter une profondeur de foyer suffisamment grande pour remédier aux défauts de planéité du film lors de son passage devant la fenêtre de projection. Avant l'avènement des écrans larges, les objectifs de projection étaient des « longs foyers » — 100 à 150 mm — de type Petzval, dont la partie arrière ne comportait pas de lentille collée. De nos jours, la qualité de la ventilation des projecteurs et l'utilisation de colles synthétiques autorisent ces collages : on utilise des anastigmats symétriques de grande ouverture relative — objectifs à courtes focales, qui n'offrent qu'une faible profondeur de foyer — ou des systèmes dérivés de doublets achromatiques (type symétrique) auxquels on associe un système afocal doubleur de champ. Il existe également des objectifs de projection à focale variable, formule qui s'est principalement développée dans le domaine du cinéma amateur.

L'ensemble de lecture sonore traduit les variations de densité photographique enregistrées le long des images en variations de courant électrique. Ces dernières sont ensuite amplifiées, puis transposées sous forme de vibrations sonores à l'aide de haut-parleurs. La tête de lecture du son se compose d'une source lumineuse, d'un système optique condenseur, d'une fente de lecture et d'une cellule photo-électrique. Son fonctionnement est fondé sur un phénomène photo-émetteur : le rayon lumineux émis par la lampe est concentré sur la fente de lecture qui se trouve par là même projetée sur la piste photographique ; l'opacité variable de cette dernière effectue la modulation du rayon émergent qui vient frapper la cellule photo-électrique (une ampoule de verre, vide ou remplie de gaz inerte, dont une partie de la surface intérieure, polarisée négativement, est recouverte d'un dépôt de métal alcalin et d'un filament de tungstène de forme appropriée faisant office d'anode, l'ensemble étant soumis à une certaine différence de potentiel). Lorsque le rayon lumineux frappe la cathode, le métal émet des électrons qui, recueillis à la surface de l'anode, engendrent dans le circuit un courant photo-électrique proportionnel au flux lumineux incident.

La qualité de la lecture sonore dépend, d'une part, de la sensibilité et de la fiabilité de la cellule photo-électrique — caractéristiques que l'on a récemment pu améliorer par l'emploi de photo-diodes — et, d'autre part, de la largeur de la fente projetée. Or, pratiquement, cette dernière est au minimum d'environ 15 microns. La lecture des sons de fréquences aiguës (supérieures à 10 000 Hz), représentés par des ondulations extrêmement fines, est influencée par l'épaisseur du trait lumineux projeté par la fente, comme on le constate à l'écoute avec l'apparition d'une certaine distorsion et d'une baisse de niveau sonore (effet de fente).

La lecture du son sur piste couchée ou sur bande magnétique indépendante est effectuée à l'aide d'une tête de lecture magnétique dont le principe est identique à celui de la tête utilisée dans les magnétophones. Enfin, un appareil de projection ne saurait fonctionner sans un dispositif de refroidissement et de sécurité : les différents mécanismes et la lampe sont enfermés dans un carter métallique, et la protection du film contre l'échauffement est réalisée à l'aide d'un système de refroidissement par ventilation ou circulation d'eau. Les projecteurs 35 et 70 mm nécessitent également un dispositif de cadrage qui corrige le décalage éventuel des images par rapport à la fenêtre de projection.

La salle de projection

Le poste de projection, les installations scéniques et les aménagements réservés aux spectateurs entrent dans les attributions de l'agencement technique des théâtres cinématographiques. Afin d'assurer la sécurité et le confort des spectateurs, un certain nombre de normes en régissent la disposition générale.

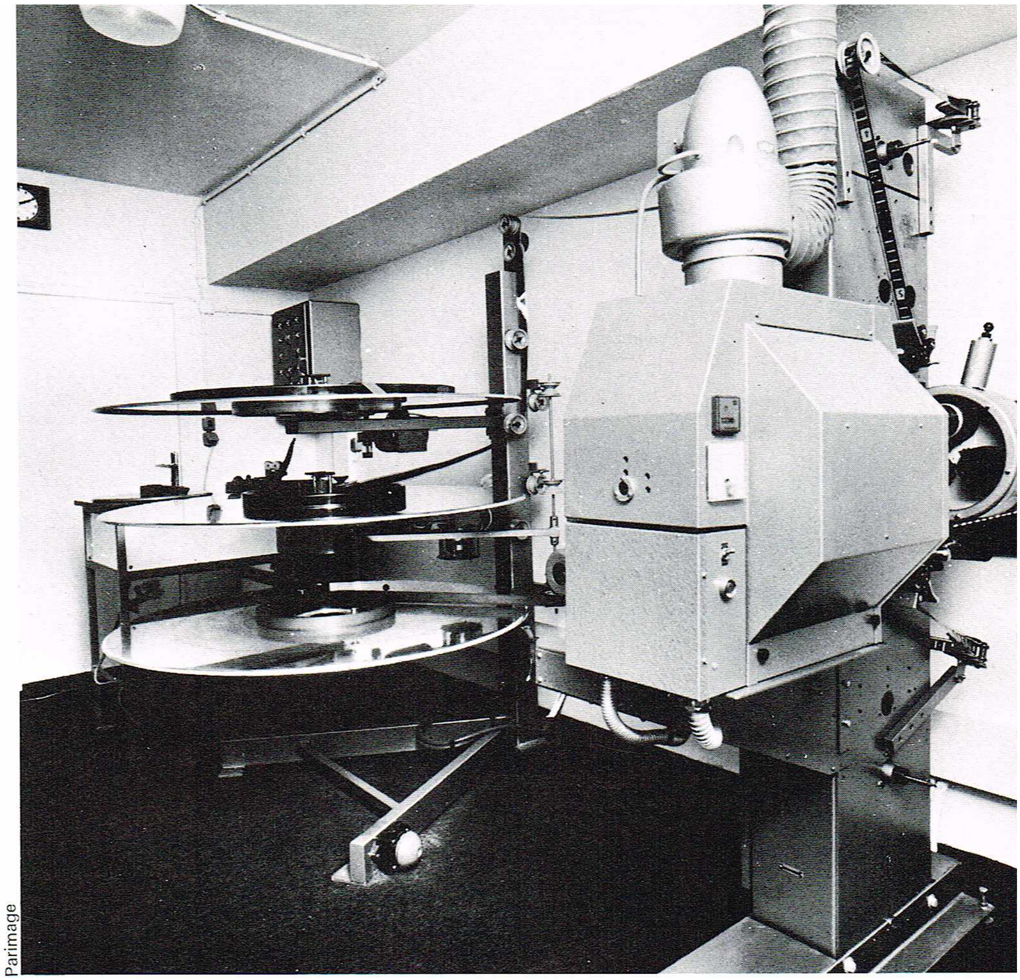

Parimage

Le poste de projection doit être séparé de la salle et situé, dans le meilleur des cas, à la hauteur de l'écran. Il comprend deux appareils de projection fonctionnant en double poste; les deux bases de projection sont montées sur une dalle flottante afin d'éviter la transmission du bruit des mécanismes. L'insonorisation devant être totale, l'intérieur de la cabine est généralement recouvert de matériau absorbant, et des glaces doubles sont aménagées dans les ouvertures destinées au passage du faisceau lumineux. Le poste de projection comporte également les préamplificateurs et les amplificateurs destinés aux réglages sonores, ainsi qu'un aménagement particulier réservé à la mise en place des appareils de montage, de rebobinage et de vérification des films.

A l'époque du cinéma muet, **l'installation scénique** se présentait sous la forme d'une scène de théâtre à l'italienne au fond de laquelle était tendue une toile de coton et devant laquelle une fosse d'orchestre abritait les musiciens chargés d'assurer l'accompagnement sonore des images projetées. Cette disposition fut cependant rapidement abandonnée avec l'avènement du cinéma parlant : le café-concert laissa place à la salle de cinéma, et celle-ci, après maintes modifications architecturales, prit la forme que nous lui connaissons actuellement. L'installation scénique comporte désormais un écran de projection et un ensemble assurant la propagation correcte des ondes sonores.

Les dimensions de l'écran sont fonction de la grandeur de la salle et du type de projection adopté. Pour les projections panoramiques de type « grand écran », on lui confère une largeur sensiblement égale à la moitié de la longueur de la salle : disposition qui permet au spectateur de regarder l'image panoramique sous un angle horizontal d'environ 30°. Pour la projection de formats classiques (1,37 jusqu'à 1,65), la largeur de l'écran doit être réduite de moitié pour éviter de provoquer chez le spectateur une fatigue oculaire excessive. D'autre part, une projection de bonne qualité nécessite une luminance de l'écran parfaitement ajustée. (Nous rappelons que le facteur de luminance d'un écran — autrefois appelé brillance — est défini par le rapport des luminances que présentent dans l'axe de projection respectivement l'écran et un échantillon blanc étalon appliqué parallèlement à l'écran en son centre. La mesure des luminances s'effectue au moyen d'un photomètre visuel à comparaison, et l'unité de grandeur est établie en nit [candela par m²], en lambert $\left[\frac{10^4}{\pi}\text{ nit}\right]$ ou en blondel [10^{-4} lambert]). La luminance ne doit pas, en effet, dépasser une certaine valeur critique au-delà de laquelle le phénomène de scintillement réapparaît, et doit, paradoxalement, être suffisamment importante pour assurer un rendu correct des contrastes : entre 100 et 150 blondels ces deux conditions se trouvent généralement réalisées.

Un écran de projection se caractérise également par la matière qui le constitue : on parle alors d'écran mat, réfléchissant ou gaufré. L'écran mat se présente de nos jours sous la forme d'un assemblage de feuilles de matière synthétique au facteur de réflexion de l'ordre de 80 %. En recouvrant ce support d'un enduit fortement réfléchissant, on obtient un nouveau type d'écran dont le facteur de réflexion peut atteindre des valeurs de 250 %. Dans ce cas, la lumière réfléchie étant très directionnelle, la luminance de l'image devient fonction de la direction d'observation. L'écran réfléchissant, composé d'une agglomération de sphérules de verre, est d'un emploi très répandu chez les amateurs. Ces derniers peuvent en effet assurer une luminance correcte de l'écran malgré la puissance réduite des lampes dont ils disposent; les spectateurs, généralement en nombre très limité, se placent de part et d'autre de l'axe de projection pour bénéficier de la luminance maximale de l'écran. Comme une telle disposition ne peut être adoptée dans les théâtres cinématographiques, il a fallu mettre au point des écrans réfléchissants à l'angle d'ouverture plus large : ainsi de l'écran nacré dont le support est recouvert d'un enduit polyvinylique dans lequel sont incrustées des paillettes cristallines à fort pouvoir de réflexion. La répartition de la lumière réfléchie peut encore être améliorée — particulièrement pour les projections panoramiques — en conférant à l'écran une certaine courbure. Enfin, un dernier type d'écran — remédiant à la directivité trop aiguë des écrans réfléchissants — est obtenu en réalisant le gaufrage d'un support aluminisé. Il semble actuellement que, grâce à une solution mixte du type « écran gaufré et perlé », on parvienne à obtenir une qualité accrue.

La propagation des ondes sonores s'opère à partir de haut-parleurs disposés à des points précis de la salle. Une partie d'entre eux, située derrière l'écran de projection, assure la restitution des paroles et des bruitages. Afin de favoriser la propagation correcte des ondes sonores, l'écran est percé d'une infinité de petits trous circulaires : d'où son nom d'écran transsonore. La restitution des sons d'ambiance est, pour sa part, réalisée à partir de haut-parleurs répartis sur les parois et le plafond

▲ *La cabine de projection automatique du cinéma « Concorde ».*

▼ *La cabine de projection d'un cinéma d'Ontario Place au Canada. Le film projeté correspond à un nouveau format, trois fois supérieur à celui des films 70 mm.*

B. Vincent - Parimage

E. Lessing - Magnum

▲ *Projection de cinéma en plein air lors d'une émission cinérama d'Europe 1.*

de la salle. Enfin, si les dimensions de cette dernière sont très importantes, on introduit un troisième ensemble de haut-parleurs faisant œuvre de relais sonore répétiteur. Le traitement acoustique du théâtre s'attache à une répartition uniforme des différents niveaux sonores tout en évitant l'apparition de phénomènes d'écho et de réverbération. Pour ce faire, les parois sont recouvertes de matériaux absorbants judicieusement disposés, et son architecture — objet de longues recherches sur maquette — favorise une bonne propagation acoustique.

Les aménagements réservés aux spectateurs doivent offrir des conditions correctes de confort, de vision et d'audition. Ces conditions sont régies par un certain nombre de normes et de dispositions générales qui, malheureusement, ne sont pas toujours respectées : soit que les salles, anciennes, se trouvent totalement inadaptées aux nouvelles normes d'implantation, soit que les exploitants sacrifient la qualité du spectacle au profit d'une rentabilité accrue. En France, les règles d'implantation sont définies par la norme S 27 001. Celle-ci impose le nombre, la disposition et la hauteur des fauteuils en fonction des dimensions de la salle et de l'écran; elle recommande un certain nombre de profils de théâtres favorisant des conditions de vision correctes quel que soit l'emplacement choisi par les spectateurs; enfin, elle stipule certaines règles destinées à assurer la sécurité des spectateurs, du personnel et du matériel.

Techniques diverses

Prise de vues et projection d'images en relief

L'impression de relief est un phénomène physiologique différentiel : après avoir convergé sur un objet particulier, l'œil humain en transmet au cerveau une image qui est fonction de la distance et de l'angle de vision; la vision humaine étant binoculaire, le cerveau recevra donc d'un même objet deux images distinctes provenant des deux rétines. C'est cette parallaxe d'espace causée par la différence de point de vue de la vision binoculaire qui engendre l'impression de relief. Cette dernière est évidemment beaucoup plus accentuée si l'accommodation de la vision s'effectue sur des objets proches.

En cinéma, l'enregistrement et la restitution du relief posent un problème particulièrement aigu, et seul un nombre très limité de procédés a été commercialisé. Le plus important d'entre eux est indubitablement le procédé stéréoscopique : celui-ci consiste à enregistrer, dès la prise de vues, deux images correctement différenciées d'un même objet, puis, lors de la projection, à fournir au spectateur un dispositif de sélection lui permettant de séparer la vision des images droite et gauche par les yeux correspondants. L'enregistrement des couples d'images est généralement effectué sur un même film à l'aide d'une caméra munie de deux objectifs, et la différenciation des images gauche et droite s'effectue par filtrage des couleurs ou polarisation de la lumière.

La sélection chromatique, ou procédé des anaglyphes, consiste à imprimer sur un même film deux images en deux couleurs différentes. Pour cela, on munit les deux objectifs de filtres de couleurs composées dont l'un laisse passer les radiations extrêmes bleues et rouges, et l'autre les radiations intermédiaires vertes et jaunes. Les spectateurs disposent de lunettes munies d'écrans-filtres correspondants qui leur permettent d'observer les images projetées avec une relative sensation de relief. Ce procédé n'est pas apte cependant à la projection et à l'observation d'images en couleurs.

Dans le cas du procédé à lumière polarisée, la différenciation des couples d'images est obtenue en interposant un filtre polarisant devant chaque objectif de projection et en dotant les spectateurs de lunettes munies d'écrans polarisants similaires. L'enregistrement des images gauche et droite, dans ce cas, s'opère sur deux films distincts, et la projection de ces films sur deux projecteurs défilant en parfait synchronisme. Il existe également un autre procédé stéréoscopique utilisant la méthode de sélection individuelle : chaque spectateur est pourvu d'un sélecteur rotatif à fenêtre où apparaissent successivement les deux images différenciées, projetées sur un écran à raison de 48 images par seconde.

Outre ces différents dispositifs impliquant le port de lunettes ou l'emploi d'un appareil individuel, on rencontre des procédés stéréoscopiques à sélecteur collectif. Chaque salle de projection est munie d'un sélecteur unique qui se présente sous la forme d'une trame disposée devant l'écran; cette trame réalise la différenciation des couples d'images en les séparant en une infinité d'éléments appartenant successivement à l'image de droite et à l'image de gauche. Cette solution, *a priori* fort intéressante, oblige toutefois les spectateurs à être situés dans l'axe de projection et à conserver leur tête constamment immobile. A l'heure actuelle, des résultats bien meilleurs

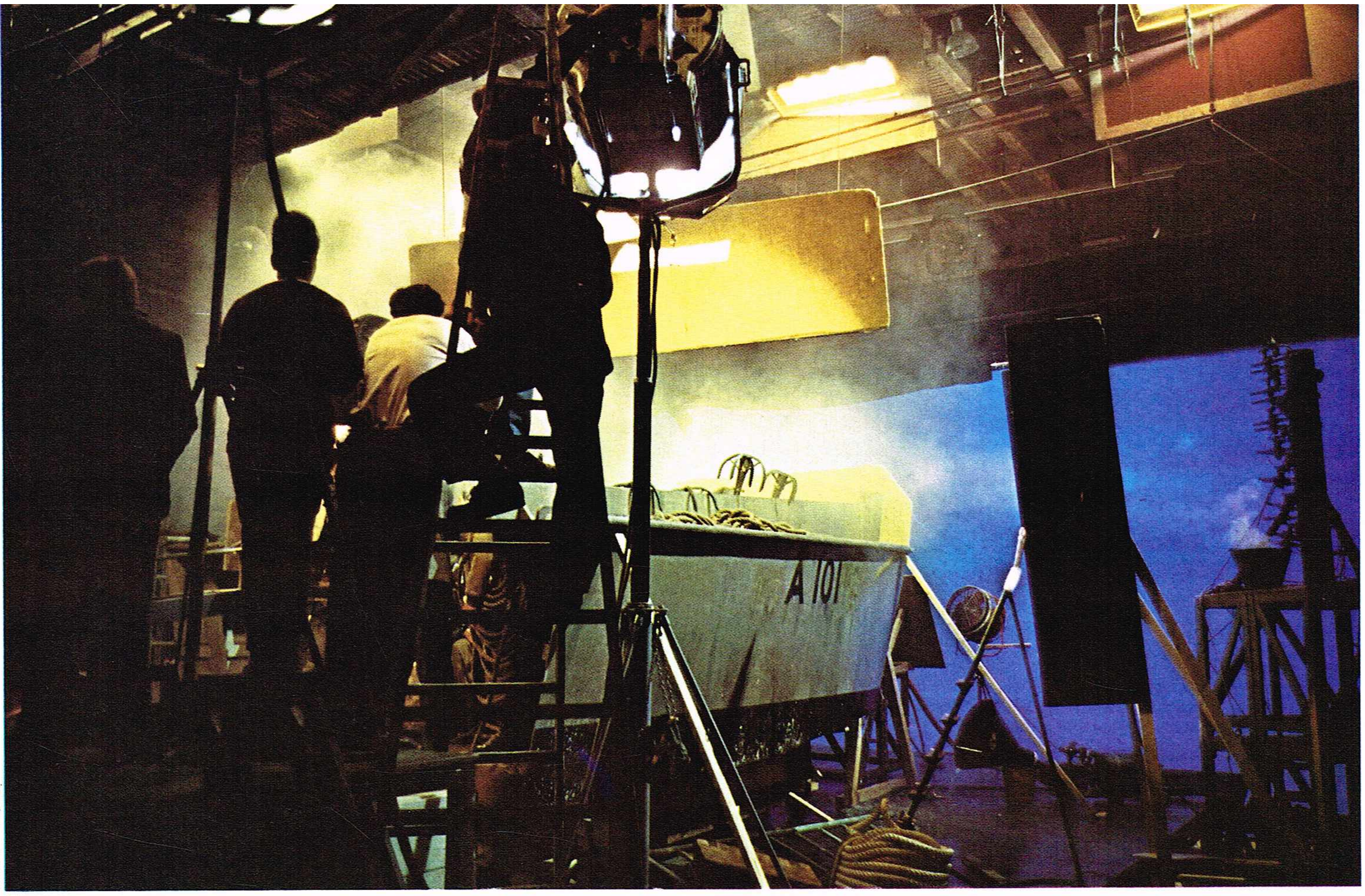

Weiss - Rapho

▲ *Réalisation de trucages avec des maquettes lors du tournage du film « Le jour le plus long ».*

sont obtenus expérimentalement en mettant en œuvre des dispositifs à trame mobile ou à trame dioptrique. Enfin, les progrès accomplis en matière de projection par laser permettront dans les prochaines décennies, pense-t-on, de réaliser des projections dans l'espace sans l'intermédiaire d'un écran-support et d'un système optique.

Trucages et effets spéciaux

Le cinéma ne donne qu'une image déformée, et parfois même totalement illusoire, de la réalité : certaines formes de cinéma (reportage, documentaire, « cinéma-vérité ») limitent cette illusion à l'enregistrement et restituent les images et les sons réels — restitution qui reste évidemment purement subjective puisque conditionnée par les choix de l'auteur et « l'œil » de la caméra — tandis que d'autres (cinéma de fiction, film publicitaire) s'accréditent elles-mêmes en amplifiant la déformation spatio-temporelle de la réalité. C'est dans cette seconde forme de cinéma, généralement, que sont utilisés les trucages et les effets spéciaux. Ceux-ci ont deux fins particulières : créer l'impression de réalité (transparence, simplifilm, maquette, etc.), ou engendrer un univers de signes et de formes totalement imaginaire (effet de fondu, inversion, film-cache, etc.). La réalisation de ce qu'il est convenu d'appeler des « trucs » est effectuée indistinctement durant la prise de vue ou en laboratoire ; toutefois, les professionnels donnent leur préférence à la seconde solution qui, tout en leur laissant une plus grande liberté lors du tournage, offre des possibilités d'utilisation beaucoup plus nombreuses. Mais, pour certains trucages, permettant la reconstitution artificielle d'un décor, la première solution devient une obligation.

Les effets spéciaux en laboratoire

La plupart d'entre eux sont réalisés à l'aide d'une tireuse optique particulière appelée *Truca*. Elle se compose d'un appareil de prise de vues, muni d'un objectif zoom couplé à un projecteur à vitesse variable où défilent deux films superposés. La *Truca* est un appareil extrêmement perfectionné dont les différents éléments, en commande électrique, concourent à des effets de travelling et de décadrement, auxquels s'ajoutent des effets spéciaux classiques comme la surimpression, le ralenti, l'accéléré, l'inversion, les différents effets de fondus et de volets et des trucages plus élaborés comme le travelling optique et le film-cache. La surimpression est obtenue en faisant défiler deux films positifs dans le projecteur de la *Truca*. Le ralenti, par opposition à l'accéléré, est réalisé lorsque le film se déplace plus vite dans la caméra que dans l'appareil de projection ; toutefois, afin de conserver le synchronisme d'obturation entre les deux appareils, il est nécessaire de maintenir les deux vitesses de défilement dans des rapports entiers : 48 images par seconde : 24 images par seconde par exemple. Le phénomène d'inversion s'obtient très facilement en faisant défiler le film en sens contraire dans la caméra.

Les ouvertures et les fermetures « au noir », obtenues à la prise de vues par variation du diaphragme ou de l'obturateur, sont réalisées dans la *Truca* en faisant varier la luminosité de la lampe du projecteur. Les fondus enchaînés s'obtiennent en effectuant une fermeture au noir du premier film positif, puis, après avoir remonté le film négatif d'une longueur correspondante, en opérant une ouverture au noir du second film positif. On réalise, enfin, les effets de volets en associant au film positif un film matrice sur lequel est impressionnée en noir la configuration de l'effet désiré, et les effets de grandissement et de décadrement en faisant varier la focale de l'objectif ou en avançant la caméra d'une certaine distance.

Dans leur version la plus simple, les trucages utilisant le cache-contre-cache ne font pas nécessairement appel à la *Truca*. On peut ainsi, lors de la prise de vues, faire évoluer différemment dans un même décor un personnage et son double en cachant alternativement les deux moitiés de l'image : une première prise de vues est réalisée en cachant, par exemple, la partie droite du cadre et en faisant évoluer le personnage dans la partie gauche ; puis, après avoir entièrement remonté le film dans le magasin débiteur, une seconde prise de vues est effectuée dans des conditions inverses. La réalisation d'un tel trucage demande, pour être parfaite, une fixité rigoureuse de la caméra, un cadrage identique du décor dans les deux prises de vues et l'emploi d'un cache flou pour éviter l'apparition d'une ligne de séparation dans la partie centrale de l'image. Les différents effets spéciaux que nous venons de passer en revue ne sont pas l'apanage des seuls professionnels : les constructeurs ont en effet, depuis plusieurs années, mis à la disposition des amateurs des caméras de format réduit dont les nombreux accessoires autorisent de telles réalisations.

Il n'en est pas de même du procédé film-cache qui nécessite impérativement des travaux de laboratoire. Le film-cache a servi de base à l'élaboration de nombreux trucages parmi lesquels les plus célèbres sont certaine-

M.C. Hugh - Sygma

▲ ***Scène de tournage du film « King Kong »; la taille du personnage nécessitait la mise en place de systèmes surélevés de prises de vues.***

ment « l'Homme invisible » et l'ouverture de la mer Rouge dans le film de Cecil B. de Mille, *les Dix Commandements*. Prenons par exemple le cas de l'Homme invisible qui se déplace tout habillé dans une pièce, mais évidemment sans tête ni mains. La prise de vues est effectuée en deux étapes successives : une première qui consiste à filmer le décor seul, et une seconde lors de laquelle sont enregistrés, sur un autre film, les déplacements sur fond noir d'un personnage habillé dont la tête et les mains ont été au préalable recouvertes d'un tissu noir. Le négatif de ce second film représente des vêtements — aux couleurs complémentaires de celles de l'original — se déplaçant sur un fond transparent; on en tire un contretype positif, puis un second négatif très contrasté, sur lequel les vêtements seront rendus par un noir opaque : c'est le second négatif qui servira de film-cache. L'opération principale consiste alors à tirer un positif à partir de la superposition du négatif du décor et du film-cache : l'image résultante représente le décor sur lequel se déplacent en silhouette les vêtements transparents. Cette opération terminée, on procède au tirage final du film positif résultant de la superposition du négatif du décor évidé et du négatif original des vêtements. Il est évident que ce type de trucage, particulièrement complexe, exige pour être parfaitement réussi la prise en compte d'un certain nombre de précautions pendant la prise de vues et lors des différentes opérations de laboratoire (éclairage particulier du tissu noir, choix de la couleur des vêtements, déplacements précis du personnage, etc.). Il est étonnant de constater que tous ces trucages avaient été découverts et utilisés par Georges Méliès dès le début de ce siècle et bien avant que l'on ne parlât de langage cinématographique !

Effets spéciaux obtenus lors de la prise de vues

Par définition, les **maquettes** sont des reproductions à échelle réduite d'appareils et de constructions architecturales dont l'aspect et les dimensions sont parfaitement respectés. En cinéma, il est également nécessaire de les construire à l'aide de matériaux convenablement adaptés qui ne risquent pas de dévoiler la « supercherie » au public. Lorsque la prise de vues d'une maquette exige des mouvements de caméra, il est nécessaire de leur conférer une vitesse proportionnelle à l'échelle de la maquette : cette réduction de vitesse s'accompagne, dans le cas du panoramique, d'un déplacement de l'axe de rotation de la caméra, laquelle doit alors être située au centre optique de l'objectif. Le rapport dimensions/vitesse doit également être conservé lorsque c'est la maquette elle-même qui se déplace : cette opération est généralement facilitée en accélérant la cadence de prise de vues et en choisissant convenablement les angles de caméra.

Outre leur fonction de décors réels réduits, les maquettes servent aussi de complément à la réalisation de grandes constructions architecturales (procédé Schufftan). Ce trucage, connu également sous le nom de maquette de perspective, consiste à interposer devant la caméra un élément de décor miniature qui se raccorde en perspective à la base du décor réel. Il est fréquemment utilisé en studio lorsqu'on désire filmer les parois et le plafond d'une salle où évoluent des personnages. Si, en effet, on construit la salle dans son entier, le directeur de la photographie ne pourra plus utiliser les projecteurs de passerelles et limitera de ce fait la qualité de son éclairage. Partant, on construit seulement les parois de la salle, et le décorateur fait réaliser un plafond miniature que l'on place en premier plan, tout près de la caméra. Pour que l'illusion soit complète, il convient de raccorder très exactement le plafond avec le reste du décor (raccords de position et d'éclairage). Le procédé Schufftan, qui exige une mise au point très détaillée, implique nécessairement la prise de vues de plans fixes.

Le **simplifilm** est une forme dérivée du procédé Schufftan. On remplace l'élément du décor miniature par une photographie, généralement de plus petites dimensions, dans laquelle est pratiqué un évidement où sont prévus l'emplacement et l'évolution des acteurs. Dans le procédé Dufour, la photographie est inversée et suivie d'un verre de champ et d'un second objectif; l'objectif de la caméra est lui-même suivi d'un prisme de Wollaston avec « toit » permettant l'inversion totale des images. Pour que le trucage soit parfaitement réussi, il faut, en plus du raccord exact de la photographie et du décor, que ladite photographie ne soit pas trop contrastée et qu'elle présente un rendu de perspective identique à celui du champ réel.

La **transparence** consiste à projeter sur un écran les images d'un décor réel ou imaginaire : cette projection est effectuée par derrière l'écran, la caméra enregistrant simultanément les images projetées et les acteurs placés devant l'écran de transparence. Ses applications sont fort nombreuses, et chacun d'entre nous se souvient des scènes de « western » dans lesquelles le héros et le méchant bandit se livrent à une lutte sans merci sur le toit d'une diligence lancée à folle allure. *A priori*, rien de plus simple : on effectue une prise de vues en mouvement du paysage dont on projette le film sur l'écran de transparence; devant cet écran est disposée une diligence montée sur ressorts sur laquelle les deux acteurs jouent la scène tandis qu'un ventilateur de forte puissance accentue l'impression de réalité en faisant voler au vent leurs cheveux et leurs vêtements.

Pourtant, la réalisation d'un tel trucage est d'une extrême complexité, et il est rare qu'il passe inaperçu dans les séquences d'un film. On doit s'assurer en premier

Walt-Disney Productions

Walt-Disney Productions

lieu que la focale de l'objectif de la caméra est la même que celle de l'objectif qui a pris le film projeté. Ce dernier doit d'ailleurs être un positif très détaillé et légèrement surexposé; on emploie pour cela une émulsion spéciale « background ». Est également nécessaire une luminance uniforme de l'écran dont la zone centrale présente invariablement un halo lumineux : la réduction de ce point chaud est partiellement réalisée en mettant en œuvre dans l'appareil de projection une lampe à arc à haute intensité à laquelle on associe un système de condenseur-relais; une autre méthode, c'est l'utilisation d'un écran mat en matière plastique à absorption compensée. Il convient de signaler que, dans le cas de projections de petites dimensions, le point chaud peut être totalement éliminé si on incline l'appareil de projection par rapport à l'axe de la caméra. En dernier lieu, il faut assurer un système de synchronisation entre l'obturateur de la caméra et celui du projecteur qui, dans ce cas, ne comporte pas de pale de scintillement. Il est amusant de remarquer que si la caméra est munie d'un système de visée reflex sur obturateur, le cameraman ne verra aucune image sur l'écran durant toute la prise de vues, chaque obturation de la caméra s'accompagnant d'une obturation de l'appareil de projection.

Une version plus élaborée de la transparence est réalisée par le **procédé Transflex**. Il consiste à disposer l'appareil de projection du même côté que la caméra en l'orientant perpendiculairement à l'axe de cette dernière : le faisceau lumineux est renvoyé sur l'écran par une glace sans tain placée à l'intersection des axes des deux appareils.

La gamme des trucages utilisés en cinéma étant infiniment étendue, nous nous sommes efforcés, dans l'énumération précédente, de n'étudier que les plus significatifs. Nous complèterons cette liste en citant les trucages qui font appel aux déplacements de la caméra ou de l'objectif par rapport à la scène (tremblements de terre, tapis volant, déplacement de maquette...), ceux qui nécessitent l'emploi de filtres spéciaux (effets de brouillard et de brume, nuit américaine...) et enfin ceux qui sont indirectement liés aux techniques cinématographiques (pluie, neige, ouragan, balle de revolver fracassant une vitrine, hémoglobine...). Ces différents effets visuels s'accompagnent évidemment d'un nombre non moins important de trucages sonores.

Le cinéma d'animation

Il vise à donner, par des dessins ou par des marionnettes, l'impression de mouvement, grâce à la photographie image par image. La technique du dessin animé consiste à filmer image par image une succession de dessins légèrement différenciés les uns des autres et à effectuer leur projection à la cadence habituelle des images cinématographiques. Les dessins sont réalisés sur des feuilles de Rhodoïd (normalisées à 180 × 240 mm), appelées *cels*, à base d'acétate de cellulose : le gouachage a lieu sur le verso des feuilles transparentes tandis que les traits sont exécutés sur le recto avec de l'encre de Chine. Chaque feuille de Rhodoïd standardisée possède des perforations qui facilitent son positionnement sur le plateau d'un banc-titre. Les effets de profondeur sont obtenus en disposant plusieurs cels sur des plaques de verre étagées d'une multiplane; le dernier cel, qui représente généralement le fond du décor, est entièrement gouaché et opaque. La caméra, munie d'un compteur métrique et d'un compteur d'images, est montée sur une colonne verticale à glissière au-dessus du plateau : les travellings verticaux (donc d'approche ou d'éloignement) sont réalisés en rapprochant ou en éloignant la caméra des dessins, et les travellings latéraux par déplacement régulier et constant — entre chaque prise de vues — d'un ou de plusieurs cels figurant le décor. La plupart des dessins sont exécutés à partir d'une bande sonore prédéterminée, et la synchronisation s'établit à

▲ ***Deux extraits de films d'animation réalisés par Walt Disney :** **à gauche, Mickey dans une scène de l'**Apprenti Sorcier **du film** Fantasia**;** **à droite,** Peter Pan **affrontant le capitaine Crochet dans le film** Peter Pan.*
© Walt Disney Productions.

▼ ***Tableau III :** les investissements français dans la production de films longs métrages (d'après* l'Activité cinématographique française *en 1976 - Centre national de cinématographie).*

Tableau III
Les investissements français dans la production de films longs métrages (en millions de francs)

Années	Films intégralement français		Films de coproduction		Total	
	Francs courants	Francs constants	Francs courants	Francs constants	Francs courants	Francs constants
1966	89,61	181,01	149,89	302,78	239,50	483,79
1967	65,85	131,04	137,44	273,51	203,29	404,55
1968	70,31	135,70	137,26	264,91	207,57	400,61
1969	112,07	201,73	162,50	292,50	274,57	494,23
1970	96,82	162,66	164,04	275,59	260,86	438,24
1971	99,56	160,29	148,41	239,94	247,97	399,23
1972	109,08	165,80	228,10	346,71	337,18	512,51
1973	154,90	215,31	241,93	336,28	396,83	551,59
1974	204,71	239,51	190,54	222,93	395,25	462,44
1975	329,37	362,31	186,10	204,71	515,17	566,69
1976	340,33	340,33	129,15	129,15	469,48	469,48

Tableau IV

L'importance des principaux postes du devis de 1973 à 1976 pour les films longs métrages (en pourcentages)

Postes du devis	1973	1974	1975	1976
Sujet	11,24	7,49	7,62	7,27
Techniciens	12,02	21,45	22,06	22,69
Interprétation	19,75	18,10	17,22	17,65
Studios	3,83	1,89	1,70	1,56
Pellicule-Laboratoires	8,87	9,21	8,16	7,73
Assurances et charges sociales	10,30	10,80	10,58	11,13
Extérieurs et fournitures	19,80	16,18	16,45	16,70
Divers	14,19	14,88	16,21	15,27

▼ *Figure 18 : la répartition de la fréquentation des cinémas dans le monde en 1975 (figure 18, ainsi que tableaux IV, V et VI, d'après l'***Activité cinématographique française en 1976 -** *Centre national de cinématographie).*

partir du tempo musical ; une noire égale 24 cels, une croche égale 12 cels, etc. La réalisation d'un dessin animé exige beaucoup de temps — une seconde de projection équivaut à 24 dessins sur Rhodoïd — et un talent imaginatif et artistique incontestable.

Le cinéma d'animation permet également d'articuler et de « donner vie » à des marionnettes ou à des sujets en cire dont on déplace minutieusement les divers éléments entre chaque ouverture de l'obturateur.

Il convient de signaler, d'autre part, le procédé de peinture sur film, mis au point par Norman Mac Laren, qui consiste à dessiner directement les images sur la pellicule cinématographique. Pour faciliter son travail de création, l'artiste dispose d'un système optique qui renvoie sur le film l'image précédemment dessinée.

Aspects généraux du cinéma commercial. Faits et chiffres

La production

Contrairement aux « major companies » américaines et au cinéma d'état d'Union soviétique, la production cinématographique française se trouve soumise aux lois rudes de la concurrence. Aucun organisme, si ce n'est les commissions d'agrément et de soutien financier du C.N.C., n'est accrédité à contrôler et à organiser le financement de l'industrie cinématographique. Il en résulte une situation particulièrement instable et précaire dans laquelle chaque producteur s'emploie désespérément à regrouper les fonds nécessaires au financement du film qui a eu ses faveurs. En 1975, on comptait en France 486 sociétés de production de films long métrage et 990 sociétés de production de films court métrage (le capital minimal des sociétés de production de films long métrage est fixé à 300 000 F, mais à 100 000 F lorsque la société est dirigée par un réalisateur qui assure lui-même la mise en scène du film, selon les chiffres officiels publiés par le Centre national de la cinématographie pour l'année 1975 ; les chiffres cités par la suite proviennent de la même source).

Ces chiffres ne doivent cependant pas cacher la véritable situation de la production française ; en effet, pour le long métrage, le nombre de sociétés de production actives (c'est-à-dire ayant effectivement participé à la production de films) s'est élevé à 185, soit 250 producteurs (« inactifs »). Lorsqu'on sait que, toujours pour l'année 1975, le nombre de films produits (films français et coproductions à majorité française) s'est élevé à 197 — ce qui correspond pour l'ensemble de la production à un investissement total de 515 millions de francs, et de plus de 700 millions en y intégrant les investissements étrangers —, on constate que chaque producteur actif ne

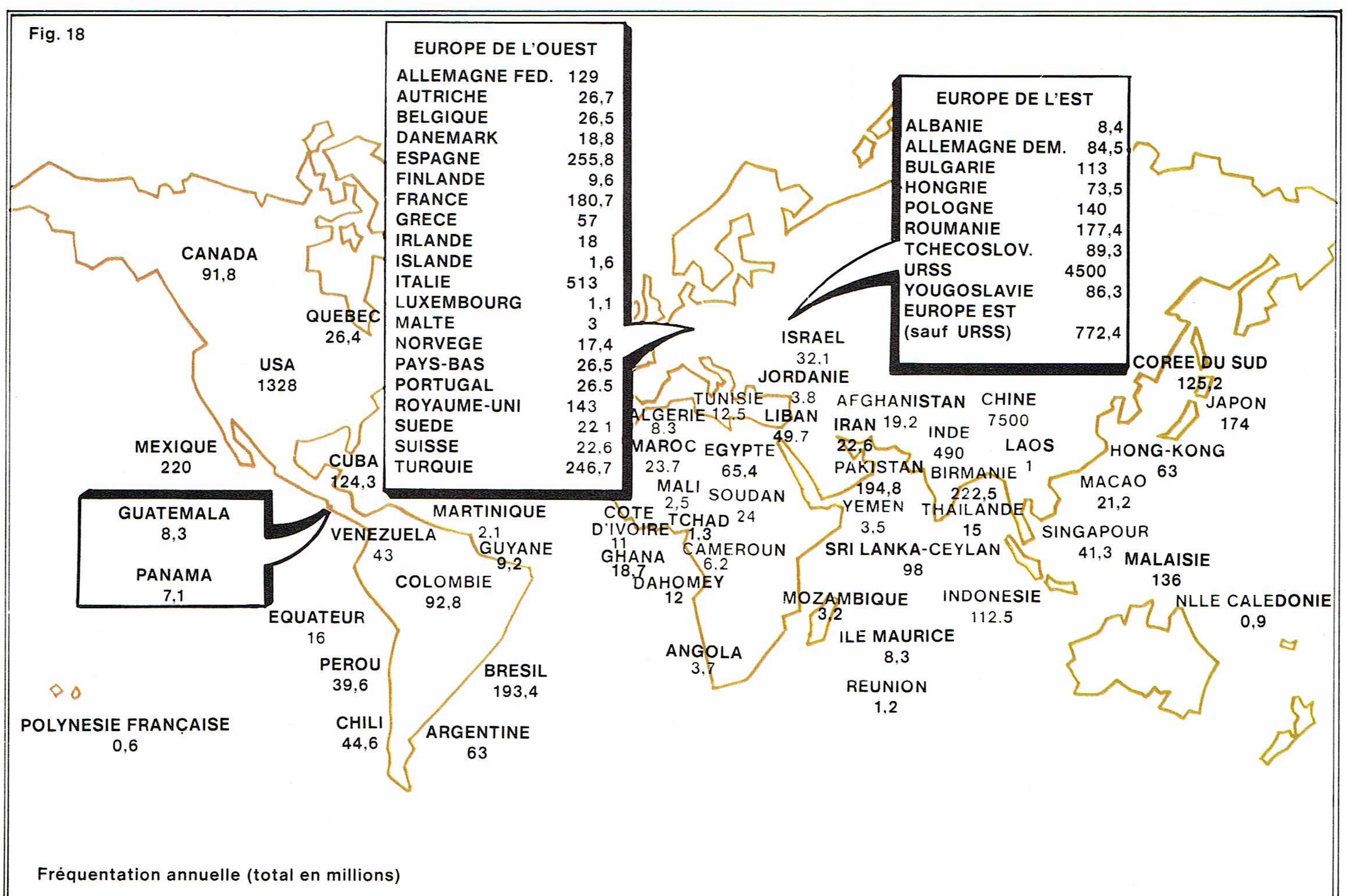

produit en moyenne qu'un seul film par année (*tableau* III). Le coût moyen d'un film français se situe actuellement aux environs de 3 millions de francs : les sociétés de production, qui ne disposent généralement pas de cette somme, doivent faire appel à diverses formes de crédit pour réaliser le financement de leur film (crédits des fournisseurs, à-valoir des distributeurs, prêts bancaires garantis, soutien financier du C.N.C. et accords de coproduction). La part des investissements étrangers dans la production française est d'ailleurs très importante, puisqu'elle s'élève annuellement à environ 200 millions de francs et qu'elle concerne un quart des films produits.

Le *tableau* IV donne la répartition comparée des postes du devis de 1973 à 1976. Sur le plan de la coproduction bipartite, les pays avec lesquels la coproduction a été la plus active sont d'abord l'Italie, et ensuite l'Espagne et l'Allemagne fédérale.

La distribution et l'exploitation

Le circuit de la distribution, intermédiaire entre la production et l'exploitation, est dans une situation beaucoup plus stable et homogène. Au 31 décembre 1974, sur un total de 193 entreprises titulaires de l'autorisation d'exercice de la profession, on dénombrait 133 sociétés de distribution de films long métrage pour lesquelles des résultats d'exploitation de films ont été enregistrés :

— 4 sociétés importantes possèdent des agences dans chaque région cinématographique (Paris, banlieue, grande région parisienne, Bordeaux, Lille, Lyon, Marseille, Strasbourg et Nancy).

— 67 sociétés exercent leur activité sur l'ensemble du territoire national sans avoir d'agence dans chaque zone cinématographique, dont 35 essentiellement dans le cadre des salles classées « Art et Essai ».

— 62 autres sociétés exercent une activité régionale ou multirégionale (dont 22 sur plusieurs secteurs cinématographiques).

Le nombre de films programmés en France est actuellement d'environ 4 470 (dont 1 420 sont français). Pendant l'année 1975, 4 328 salles d'exploitation standard (35 mm) ont accueilli 180 millions de spectateurs qui ont assuré une recette globale de 1 565 millions de francs. La part des exportations devient progressivement de plus en plus importante dans l'amortissement des films français : la Communauté européenne demeure le premier marché pour les films français (35,8 %) devançant dans l'ordre ceux d'Amérique du Nord (27,1 %), d'Asie-Océanie (8,8 %), d'Afrique (5,2 %, dont une majorité de pays francophones) et d'Amérique Latine (3,3 %), les 19,8 % restant étant représentés par des contrats de cession pour des ensembles de territoires qui ne correspondent pas à des zones géographiques définies. La répartition des recettes globales — étude comparative sur trois années — est illustrée par le schéma (statistique C.N.C. de juin 1976) : il convient de préciser que la part « production-distribution » (les actualités et T.V.A. affectant le film incluses) est de 643,43 millions de francs.

Nous achèverons cette brève incursion dans le domaine du cinéma commercial par un graphique récapitulatif, où est aussi exprimée la répartition de la fréquentation cinématographique mondiale (*fig.* 18), et par les *tableaux* V et VI qui donnent les résultats d'exploitation pour les années 1960-1975 et les films ayant enregistré les meilleurs résultats de fréquentation (1956-1975).

BIBLIOGRAPHIE

BRARD P., *Technologie des caméras*, Éditions techniques européennes. - VIVIÉ J., *Projection des images animées*, Éditions Dujarric. - LO DUCA, *Technique du cinéma*, P.U.F. - ANDRÉANI R., *l'Objectif photographique*, Publications Photo. Rev. - *American Cinematographer Manual*, A.S.C. Publications. - *Primer for Film-Making*, Bobbs-Merril Company, inc. - *Animated Film. Concepts, Methods, Uses*, Interland Publishing inc. - *Bulletin de la Commission supérieure technique*. - *Bulletin d'information* du Centre national de la cinématographie. - *American cinematographer*. - Cours et publications de l'E.N.P.C. (Vaugirard).

Tableau V
Nombre de spectateurs et volume des recettes dans les salles standards (en millions de spectateurs et en millions de francs)

Années	Spectateurs	Recettes		Recette moyenne par spectateur
		Francs courants	Francs constants	
1966	234,7	785,150	1 586,003	3,34
1967	211,4	784,716	1 561,585	3,71
1968	203,2	783,829	1 512,790	3,86
1969	183,9	806,408	1 451,534	4,39
1970	184,4	882,075	1 481,886	4,78
1971	177,0	932,869	1 501,919	5,27
1972	184,4	1 078,202	1 638,867	5,85
1973	176,0	1 174,783	1 632,948	6,68
1974	179,4	1 359,182	1 590,243	7,58
1975	181,7	1 565,013	1 721,514	8,66
1976 (partielle)	176,0	1 744,578	1 744,578	9,91

Tableau VI
Les films ayant enregistré les meilleurs résultats de fréquentation sur le marché cinématographique français (1er janvier 1956 - 31 décembre 1975)

Titre du film	Nationalité	Spectateurs (en millions)
La grande vadrouille	Française	17,179
Le pont de la rivière Kwaï	Britannique	12,964
Les dix commandements	Américaine	11,935
Le jour le plus long	Américaine	11,750
Il était une fois dans l'Ouest	Italienne	11,604
Le corniaud	Française	11,580
Ben Hur	Américaine	11,381
Les canons de Navarone	Américaine	10,044
Les Misérables	Française	9,935
La vache et le prisonnier	Française	8,842
Docteur Jivago	Américaine	8,607
La grande évasion	Américaine	8,603
La guerre des boutons	Française	8,201
Le gendarme de Saint-Tropez	Française	7,759
Les bidasses en folie	Française	7,129
Les aventures de Rabbi Jacob	Française	6,972
West Side Story	Américaine	6,950
Michel Strogoff	Française	6,867
Les sept mercenaires	Américaine	6,861
Le gendarme se marie	Française	6,643
Sissi	Autrichienne	6,593
Emmanuelle	Française	6,588
Les grandes vacances	Française	6,520
Sissi jeune impératrice	Autrichienne	6,392
La cuisine au beurre	Française	6,375
Les aristochats	Américaine	6,279
Goldfinger	Britannique	6,149
Le livre de la jungle	Américaine	6,017
Mourir d'aimer	Française	5,913
Guerre et Paix	Américaine	5,856
Le bossu	Française	5,819
Oscar	Française	5,804
Sissi face à son destin	Autrichienne	5,777
Les dents de la mer	Américaine	5,690
Notre-Dame de Paris	Française	5,675
La vérité	Française	5,655
Les 101 dalmatiens	Américaine	5,547
Le petit baigneur	Française	5,536
Le cerveau	Française	5,485
Le gendarme à New York	Française	5,474
Les fous du stade	Française	5,468
La folie des grandeurs	Française	5,434
Quand passent les cigognes	Soviétique	5,381
La jument verte	Française	5,256
Lawrence d'Arabie	Britannique	5,222
Bons baisers de Russie	Britannique	5,160
Le bon, la brute et le truand	Italienne	5,114
Opération tonnerre	Britannique	5,001

L'INDUSTRIE PAPETIÈRE : LA FABRICATION DU PAPIER

De Gutenberg à Xérox

L'homme vit dans une civilisation du papier, qui reste le support essentiel de la transmission de l'information écrite.

Depuis bientôt deux mille ans que l'on sait fabriquer du papier, les techniques ont beaucoup évolué. Le papier est d'abord obtenu à partir du bambou, en Chine, vers le IIe siècle; les Européens développent, à partir du XIIe siècle, un procédé utilisant les chiffons de lin et de chanvre. Ce n'est que vers 1850, avec l'apparition de l'énergie thermique et de la chimie industrielle, que l'on commence à fabriquer le papier à partir du bois, qui constitue maintenant la matière première de 95 % des papiers et cartons.

Quel est donc le constituant du papier, qui se retrouve dans le bambou, le chiffon de lin, le bois ? Il s'agit de la cellulose. C'est une macromolécule linéaire, constituée par une chaîne de motifs à structure hexagonale, l'hexose, de formule $C_6H_{12}O_6$. Ce sucre est synthétisé par les plantes à partir du gaz carbonique de l'air et de l'eau, à travers un mécanisme complexe, la photosynthèse, où la chlorophylle joue un rôle essentiel. Une macromolécule de cellulose comporte en moyenne entre 1 500 et 4 000 motifs, et elle peut être considérée comme très stable chimiquement. Ces chaînes sont associées en paquets, les fibrilles, qui sont agglomérées en fibres. Ces fibres ont une longueur variant avec l'espèce de bois : les résineux fournissent des fibres d'environ 3,5 mm de long, tandis que celles des feuillus ne mesurent en moyenne que 1 mm.

Ces fibres, qui constituent la pâte à papier, sont ensuite disposées de manière à faire une feuille de papier dont la qualité, la couleur, l'épaisseur peuvent varier dans de larges proportions.

Après avoir décrit rapidement la constitution du bois, il y aura lieu de présenter les techniques d'obtention de la pâte, puis la fabrication de la feuille. En effet, ces deux étapes sont très distinctes, comme le montre le schéma d'ensemble (*fig.* 1).

▶ *Page ci-contre, figure 1 : tableau synoptique de la fabrication du papier.*

Le bois

La cellulose est le constituant le plus important du bois; cependant ce dernier contient également des hémicelluloses, molécules chimiquement voisines de la cellulose, mais beaucoup moins stables chimiquement, de la lignine, un polymère contenant des noyaux aromatiques ainsi que — en très faible quantité — des composés organiques plus légers et des sels minéraux. Un bois sec contient en moyenne entre 25 et 30 % de lignine, entre 40 et 50 % de cellulose, tandis que les hémicelluloses représentent environ 20 % et les sels minéraux 0,5 %; le reste est constitué par les composés solubles comme les résines, les tanins.

La cellulose

On sait déjà que c'est une macromolécule très stable chimiquement, puisqu'elle résiste très bien aux traitements acides et alcalins, même dans des conditions difficiles de température et de concentration. Évidemment, les groupements terminaux qui se trouvent en bout de chaîne sont plus sensibles aux réactions de dégradation, d'addition ou de substitution.

Les hémicelluloses

Ce sont des hydrates de carbone voisins de la cellulose, mais qui sont beaucoup plus réactifs. Une macromolécule d'hémicellulose ne contient souvent qu'une centaine de motifs de base (glucose, mannose, xylose), si bien qu'elle subit facilement des réactions de dégradation et ne résiste pas aux traitements chimiques.

La lignine

La lignine est un composé de masse molaire mal définie, qui contient des noyaux benzéniques. La chimie de la lignine a été largement étudiée. Il est nécessaire, pour obtenir à partir du bois une pâte à papier blanchie de qualité, de détruire la lignine par voie chimique. En effet, la lignine constitue en quelque sorte le squelette du bois, c'est elle qui relie entre elles les fibres de cellulose et donne ainsi au bois sa dureté et sa rigidité. Heureusement, la lignine est sensible aux traitements acides ou basiques. Par exemple, elle réagit avec les ions sulfite et bisulfite, pour donner des lignosulfonates solubles. Elle est hydrolysée par les solutions alcalines et se révèle sensible aux mercaptans.

Toutes ces réactions, qui détruisent la lignine, sont à la base des procédés chimiques de délignification.

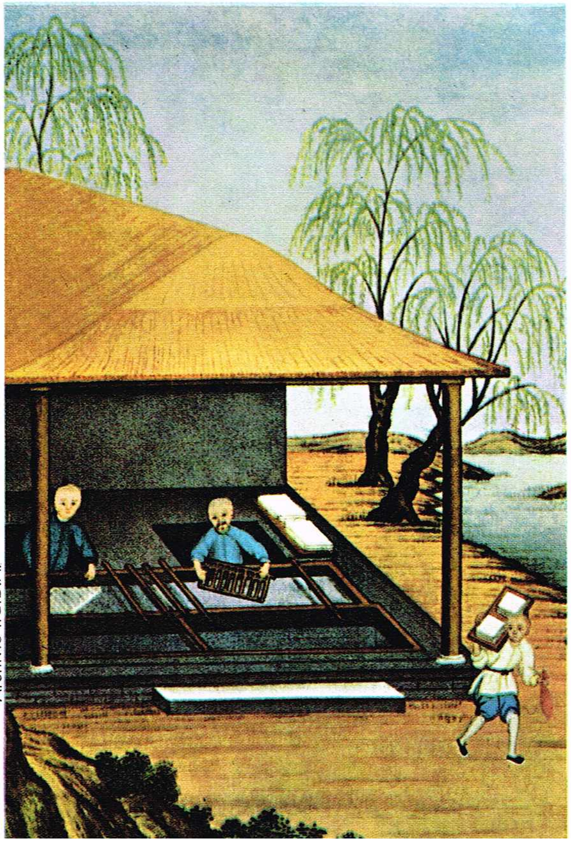

Archivio I.G.D.A.

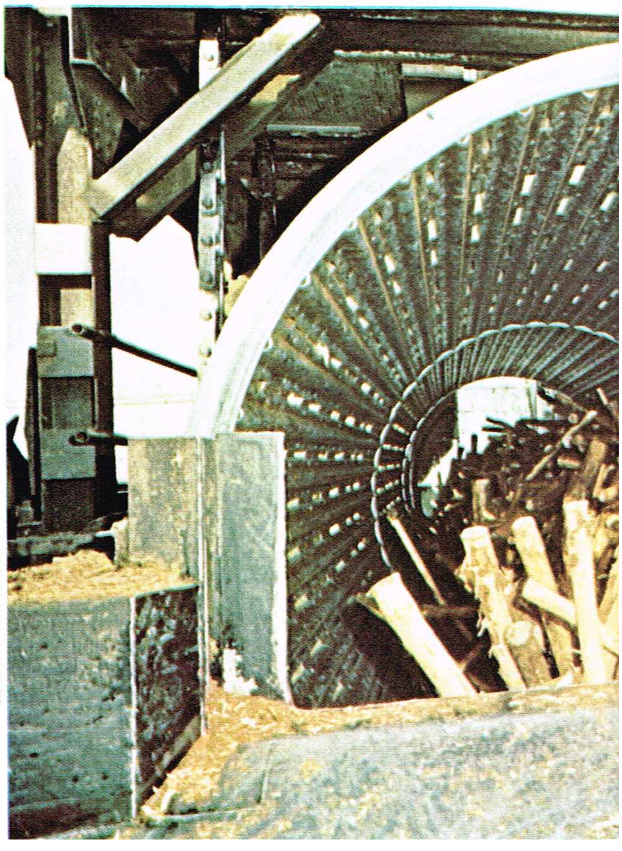

La Cellulose du Pin

▶ *A gauche, une estampe représentant la fabrication du papier dans la Chine antique. Au milieu, l'intérieur d'un écorceur à tambour; le tambour est animé d'un mouvement de rotation et l'écorçage est réalisé par le frottement des rondins les uns contre les autres. A droite, après l'écorçage, les troncs d'arbres sont coupés à la dimension adéquate avant d'être broyés ou réduits en copeaux. (Papeterie de Tolmezzo et Cisalpina, Intra, Italie.)*

Les autres composés

Citons les terpènes, que l'on retrouve dans l'essence de térébenthine, les résines, qui contiennent des acides gras, les tanins, dont la structure n'est pas encore parfaitement élucidée.

La fabrication de la pâte à papier

Il est nécessaire de libérer les fibres du bois, afin d'obtenir la pâte à papier. La qualité de la pâte obtenue peut varier dans de larges proportions. Si elle n'est constituée que de cellulose, après une délignification complète, c'est une pâte blanchie de grande qualité. Si, au contraire, elle est obtenue par un simple traitement mécanique, elle contient encore de la lignine ; elle a une couleur bistre et le rendement en pâte atteint 95 % en poids par rapport au bois initial. Il y a donc deux grandes catégories de pâte : les pâtes mécaniques et les pâtes chimiques, suivant que le procédé de fabrication repose sur un traitement mécanique ou chimique.

La fabrication des pâtes mécaniques

On a su fabriquer de la pâte mécanique dès 1800, mais ce n'est que vers 1840 que le procédé commença à se développer. Aujourd'hui, comme à l'origine, la fabrication consiste à râper ou broyer le bois, dans d'énormes « moulins », dont l'organe principal est une meule, en pierre à l'origine, maintenant dans un matériau comme le carborundum. Afin d'éviter un échauffement trop grand et pour rendre le bois plus tendre, l'opération a toujours lieu en présence d'eau. Généralement, les rondins sont maintenus contre la meule, soit par des chaînes, soit par des dispositifs hydrauliques. L'énergie consommée dans une telle opération est très grande : entre 1 000 et 13 000 kWh par tonne de pâte. On conçoit pourquoi, en France, cette industrie s'est d'abord développée dans les régions riches en ressources énergétiques comme la houille blanche. Une part importante de l'énergie consommée, 80 % environ, est dégradée en énergie calorifique, si bien que la température dans la zone de défibrage peut approcher 100 °C. Le refroidissement est réalisé par de l'eau froide, et, à la sortie, la pâte se trouve en suspension dans l'eau, sa consistance variant de 1,5 % à 4 % (la consistance est égale, par définition, à la masse de pâte sèche contenue dans 100 g de suspension).

Il est aussi possible de fabriquer de la pâte, non pas à partir de rondins de bois, mais à partir de copeaux. Les copeaux de bois, dont les dimensions moyennes sont 2 à 3 cm pour la longueur, 4 à 5 mm pour l'épaisseur, sont broyés dans des défibreurs à disques, et ce, soit en

fig. 1

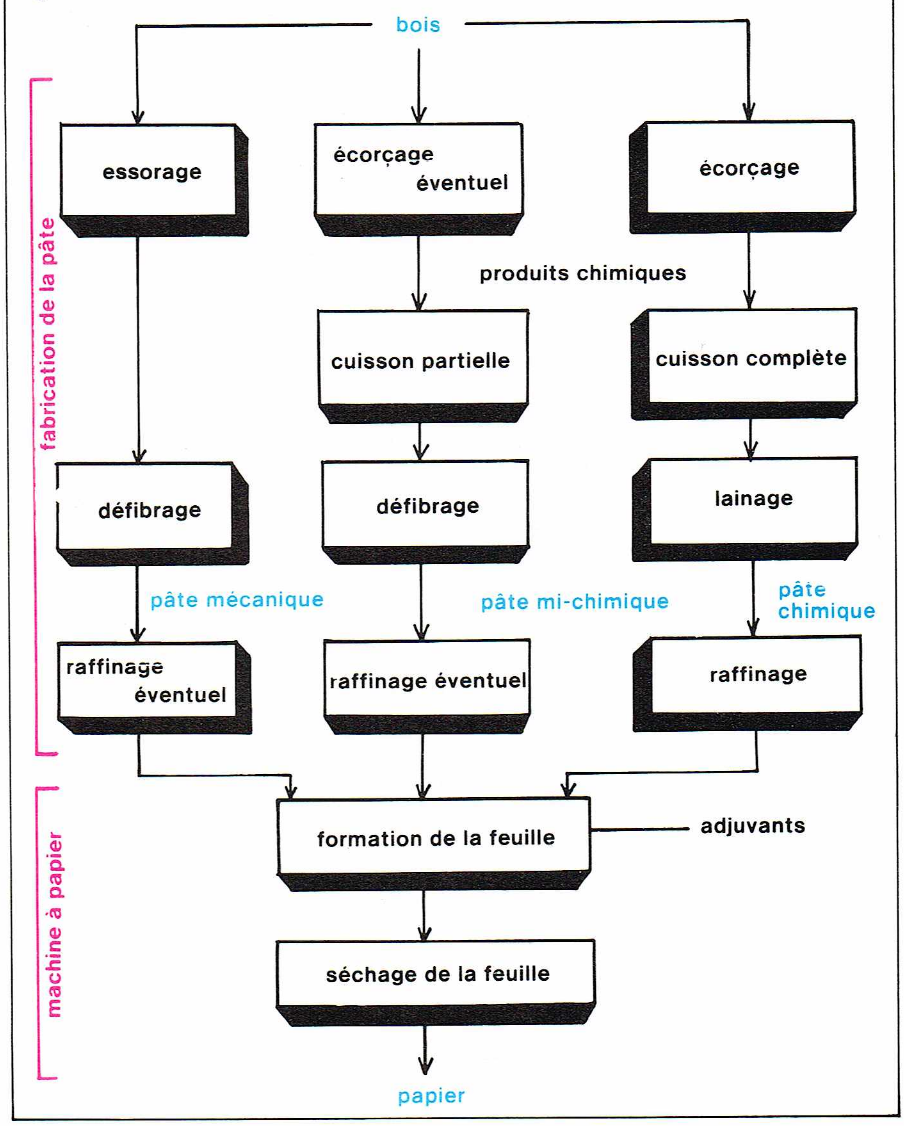

I.G.D.A. - Rizzi

▶ *A gauche, le stockage des copeaux de bois, matière première pour la fabrication de la pâte à papier, à la papeterie de Condat (Cantal). A droite, un lessiveur Kamyr de la papeterie de Facture (Gironde).*

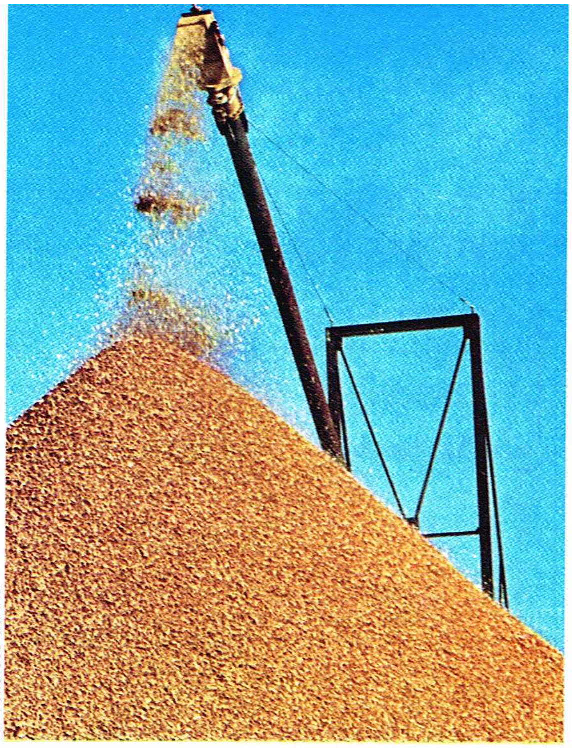

La Cellulose du Pin

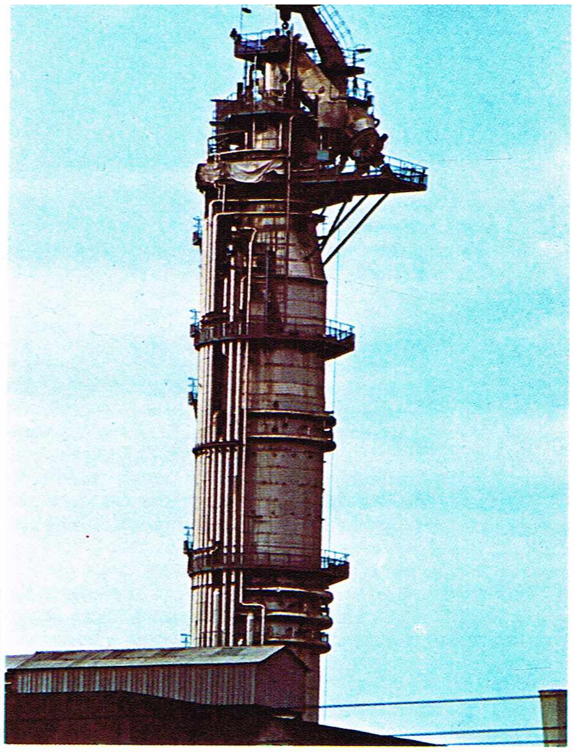

La Cellulose du Pin

présence d'eau, soit en présence de vapeur saturée, à une pression qui permette une température de broyage d'environ 180 °C. La pâte obtenue dans ces conditions est dite pâte thermomécanique. La quantité d'énergie consommée dans les défibreurs de ce type est tout à fait comparable à celle nécessaire aux broyeurs à meule.

La suspension est ensuite filtrée : la pâte est récupérée, et l'eau est recyclée. Cette pâte peut être séchée et stockée, ou utilisée telle quelle, ou encore blanchie. Notons qu'on peut faciliter la fabrication de la pâte mécanique en faisant subir au bois un traitement préalable, qui a pour but de diminuer l'énergie nécessaire à la séparation des fibres : imprégnation d'eau chaude, de liqueur alcaline ou d'une solution acide à base de monosulfite. Le rendement global de la fabrication de ces pâtes mi-chimiques varie entre 80 et 90 %, car une partie des hémicelluloses est détruite tandis que la lignine est conservée en totalité.

La pâte mécanique n'est pas une pâte de grande qualité : elle est jaunâtre, ou écrue, résiste mal au vieillissement. Elle est le constituant essentiel du papier journal — entre 80 et 100 % —; elle est souvent utilisée en mélange avec des pâtes chimiques dont la fabrication est beaucoup plus complexe.

La fabrication des pâtes chimiques

La délignification complète par voie chimique peut être réalisée par plusieurs techniques; les principales sont le procédé au sulfite et le procédé kraft.

▼ *Un baquet de pâte à papier mécanique au moulin Richard-de-Bas à Ambert (Puy-de-Dôme).*

La Cellulose du Pin

Le procédé au sulfite

Les éléments principaux de ce procédé sont connus depuis 1880 environ. Il s'est développé rapidement, car il donnait une pâte très facile à blanchir. Il a été concurrencé à partir de 1930 par le procédé kraft, lorsque l'industrie a été capable de fabriquer des pâtes blanchies par ce procédé. L'un des inconvénients majeurs des procédés au sulfite est d'engendrer une pollution importante, à quoi s'ajoute une régénération difficile, parfois impossible, des produits chimiques.

Le principe de la cuisson au sulfite est simple : les copeaux sont entassés dans un réacteur, ou lessiveur. On y ajoute une liqueur riche en sulfite, et en augmentant la température, le composé actif, l'anhydride sulfureux SO_2, est libéré et attaque la lignine. Il se forme des composés complexes, des lignosulfonates, qui sont solubles. La pâte est ensuite lavée, blanchie ou non. Les liqueurs de cuisson sont concentrées et brûlées, fournissant une partie de l'énergie nécessaire au fonctionnement de l'installation.

La liqueur acide est une solution de monosulfite dans l'eau contenant, à l'état dissous, un excès de SO_2. Elle est préparée le plus souvent sur place, par réaction du gaz SO_2 sur un carbonate alcalin, de calcium — la chaux $CaCO_3$ —, de magnésium, d'ammonium ou de sodium. La composition exacte de la liqueur est complexe, car il s'établit des équilibres chimiques, et les concentrations varient arec la température. En moyenne, la liqueur initiale contient 6 % en poids de SO_2 total, c'est-à-dire combiné ou libre.

Au cours de la cuisson, il convient de distinguer plusieurs phases. Tout d'abord l'imprégnation : les produits chimiques pénètrent dans les copeaux par capillarité. Cette phase est assez rapide. Ensuite, la lignine subit des réactions de sulfonation, puis se dissout en même temps qu'une partie des carbohydrates, qui sont dégradés, tant au sein de la pâte que dans la solution. Pour obtenir une délignification poussée, c'est-à-dire une teneur finale en lignine de 5 % par rapport au bois sec initial — rappelons que cette teneur initiale est de 25 % environ —, les opérations durent une dizaine d'heures. La température atteint 140 °C, et la pression est maintenue tout au long de la cuisson aux environs de 6 bars. Évidemment, les conditions opératoires sont beaucoup moins dures si le traitement chimique est suivi d'un défibrage mécanique, en vue de l'obtention d'une pâte mi-chimique qui peut être utilisée immédiatement pour la fabrication du papier pour carton ondulé. Les copeaux de bois, des feuillus divers à l'exception du châtaignier, sont cuits en 25 minutes dans un lessiveur en continu. Le rendement en pâte, à 90 % de siccité, est alors de 80 % par rapport au bois sec.

La cuisson fournit donc deux produits : la pâte brute et la liqueur de cuisson.

La qualité de la pâte dépend en tout premier lieu des essences de bois, puis des conditions de traitement. Les meilleures pâtes sont obtenues à partir des résineux, et

parmi les feuillus, c'est le bouleau qui arrive en tête quant à la qualité des fibres. La longueur de rupture d'une pâte de bouleau atteint 60 à 85 % de celle d'une pâte de pin ou de sapin. Le traitement de la pâte en vue d'obtenir un papier d'une qualité déterminée sera décrit dans un chapitre ultérieur. Quant à la liqueur de cuisson, c'est un liquide noir, polluant, contenant 11 à 17 % de matières sèches. Afin de la rendre combustible — elle contient des matières organiques —, il est nécessaire de la concentrer. Cette opération de concentration est réalisée dans des évaporateurs à multiples effets. Par chauffage, à une pression donnée, la liqueur bout, et l'eau est éliminée sous forme de vapeur. En évaporant sous différentes pressions — d'où le nom de multiple effet —, la concentration de la liqueur atteint environ 50 %. Avec une telle teneur, la liqueur est combustible : elle est brûlée dans des chaudières, ce qui donne de la vapeur. Mais les produits chimiques sont coûteux, et un effort a été fait pour régénérer les produits afin de minimiser les coûts et la pollution.

Le cycle de régénération varie évidemment suivant le procédé. S'il repose sur l'utilisation du sulfite de calcium, aucune possibilité de régénération n'existe. Au contraire, avec le sulfite de sodium ou de magnésium, la technique de récupération est fonctionnelle. Dans le cas du magnésium, la combustion de la liqueur fournit de l'anhydride sulfureux SO_2, et de l'oxyde de magnésium MgO. La réaction entre ces deux composés redonne du sulfite de magnésium qui est l'élément principal de la liqueur blanche de cuisson.

Les différentes eaux de lavage de la pâte sont une source de pollution importante : elles contiennent des composés chimiques et biologiques demandeurs d'oxygène. Si on rejette ces liqueurs dans une rivière, il se produit des réactions chimiques et biologiques qui consomment l'oxygène dissous, ce qui entraîne dans le milieu la disparition de la vie par asphyxie. Aussi, le traitement des eaux polluées représente-t-il depuis quelques années une préoccupation essentielle de l'industrie papetière.

Les eaux polluées séjournent d'abord dans un décanteur, où les matières en suspension décantent, sont filtrées et donnent des boues dont l'utilisation est très diverse. Ensuite, les eaux séjournent dans les lagunes, où l'eau est agitée et aérée par l'intermédiaire d'aérateurs qui insufflent dans l'eau de l'air, et donc de l'oxygène. Cette technique d'épuration est communément désignée par l'expression « lagunage aéré ». L'eau séjourne environ un mois en lagune, et n'est rejetée en rivière que lorsque sa demande chimique en oxygène (D.C.O.) et sa demande biologique en oxygène (D.B.O.) sont compatibles avec l'équilibre écologique des eaux naturelles. Notons que les notions de D.C.O. et de D.B.O. sont très bien définies et que leurs valeurs avant rejet sont fixées, en France, par le ministère de la Qualité de la vie.

Le procédé kraft

Le procédé de délignification chimique le plus répandu dans le monde est le procédé kraft. Ses avantages essentiels sont d'être rapide, applicable à de larges variétés de bois et de donner des pâtes de qualité. Il fut découvert vers 1880 lorsque, dans le cycle de régénération, on ajouta, pour compenser les pertes, non pas du carbonate de sodium, mais du sulfate de sodium. On découvrit alors que l'adjonction de sulfure à la liqueur alcaline, contenant essentiellement de la soude, rendait le procédé beaucoup plus efficace, sans pour autant modifier la régénération des produits chimiques, partie de la fabrication qui est très au point.

Dans le procédé kraft, la liqueur blanche est une solution aqueuse contenant de la soude et du sulfure de sodium, à une concentration élevée, égale à environ 200 kg par tonne de bois sec, cette somme représentant le total ($NaOH + Na_2S$). L'ion hydroxyde OH^- est capable de dissoudre la lignine, cette dissolution étant accélérée par la présence des ions sulfure.

Dans la pratique, comme dans le procédé au sulfite, la cuisson a lieu en continu ou en discontinu dans d'immenses réacteurs en acier inoxydable, les lessiveurs ; le milieu réactionnel, liqueur blanche et copeaux, est porté à une température voisine de 170 °C, tandis que la pression atteint une dizaine de bars. Comme la liqueur pénètre rapidement dans le bois, la cuisson ne dure que

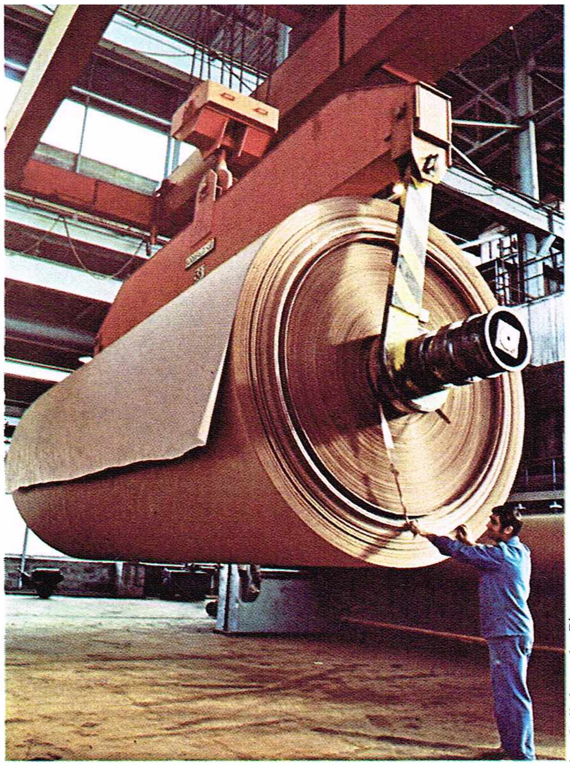

◀ *Une bobine de papier kraft (liner) à la sortie de la machine à papier. Un tel papier est généralement utilisé pour fabriquer le carton ondulé.*

La Cellulose du Pin

quelques heures : une à deux pour atteindre la température maximum, à laquelle le réacteur est maintenu deux heures environ. Pour réaliser la délignification, l'ensemble des opérations dure environ cinq à six heures. A la fin de la réaction la pâte est « soufflée » : le lessiveur est brusquement ouvert, la pâte est éjectée dans un réservoir. L'eau chaude contenue dans les copeaux est brutalement vaporisée, ce qui entraîne un défibrage partiel de la pâte et facilite le lavage. Généralement, en fin de cuisson, la teneur en lignine n'atteint qu'un faible pourcentage, calculé par rapport au bois initial. Les réactions chimiques qui accompagnent la cuisson sont très complexes, et on ne connaît pas encore parfaitement l'évolution de la concentration des produits chimiques et des principaux constituants du bois pendant la délignification.

La pâte est ensuite lavée, puis, le plus souvent, blanchie. C'est une pâte de qualité, qui donne des papiers blancs et solides. On peut dire que la meilleure pâte est obtenue par le procédé kraft à partir de résineux.

La liqueur, issue du lessiveur, a une teneur en matières sèches d'environ 20 %. Elle est concentrée dans un évaporateur à multiples effets ou d'un autre type pour que la teneur atteigne 55 à 60 %. (Parfois, afin de réduire la désagréable odeur de composés soufrés, comme les mercaptans, la liqueur noire subit une oxydation préalable.) A cette teneur, la liqueur est combustible : les matières organiques brûlent en fournissant de l'énergie, le plus souvent de la vapeur à haute pression qui actionne une turbine, productrice d'électricité ; les matières minérales fondent et forment le « salin », mélange de carbonate de sodium et de sulfure de sodium. Ce salin en fusion est dissous dans l'eau et donne une liqueur verte caractéristique. Afin de préparer la liqueur blanche nécessaire à la cuisson, qui contient surtout de la soude, on transforme le carbonate de sodium en soude par la réaction de caustification :

chaux éteinte + carbonate de sodium
= soude + carbonate de calcium ;

ainsi, la liqueur verte devient la liqueur blanche qui, après avoir subi une décantation, est recyclée.

Le carbonate de calcium $CaCO_3$ est traité dans un four à chaux. La chaux vive obtenue, CaO, est éteinte par l'eau, et peut être utilisée dans la réaction de caustification. On a ainsi régénéré tous les produits chimiques, sans que les pertes n'excèdent 10 %.

Les autres procédés

A côté de ces deux procédés, dans lesquels la délignification est réalisée en une seule étape, il existe des procédés à plusieurs étapes, en général deux. Parmi eux, par exemple, la combinaison d'un premier traitement acide suivi d'une cuisson par une liqueur alcaline. Dans un procédé moderne, le procédé soude-oxygène, il n'intervient aucun composé soufré, ce qui a pour avantage de diminuer considérablement la pollution atmosphérique. La première étape est une cuisson à la soude arrêtée

▲ ***Hangar de récupération de vieux papiers à la porte de la Villette (Paris). En France, les pâtes à papier de récupération représentent une part importante de la production, puisque environ un tiers du tonnage produit est réutilisé. Par suite de l'augmentation du prix de la pâte à papier et de la nécessité du recyclage, cette récupération s'est développée depuis 1970.***

à un rendement supérieur à 50 %. Le végétal est ensuite défibré, et les fibres obtenues sont, dans le deuxième stade, délignifiées par l'oxygène en milieu alcalin. Ce procédé, expérimenté au stade pilote, pourrait concurrencer les procédés plus classiques.

On cherche à mettre au point d'autres techniques de délignification, en utilisant divers réactifs, comme l'acide nitrique, les composés chlorés, l'ozone, etc.

Il faut, pour terminer ce chapitre, citer les procédés de fabrication de la pâte avec des matériaux autres que le bois, ce qui représente environ 5 % de la production mondiale. Citons tout d'abord la paille. La fabrication de pâte à partir de la paille, avec un rendement de l'ordre de 50 %, peut se fonder sur l'emploi de la chaux vive, à raison d'une centaine de kilos par tonne de végétal sec. Le procédé kraft est utilisé pour traiter les bagasses, nom donné aux tiges de canne à sucre. Dans le domaine que constituent les végétaux pouvant servir de matières premières, il y a place pour une grande variété de traitements : procédés purement chimiques, procédés mécano-chimiques, autant de champs de recherche.

Les pâtes de récupération

Aux pâtes obtenues à partir de matières premières vierges, il faut ajouter les pâtes de récupération, obtenues à partir de vieux papiers et cartons. Elles représentent une part importante de la production, puisque environ un tiers du tonnage produit en France est réutilisé. Il faut souligner que la situation a beaucoup évolué ces dernières années. Par suite de l'augmentation du prix de la pâte (20 % en 1969) et de la nécessité économique du recyclage, la récupération des fibres cellulosiques s'est développée depuis 1970. La plus grosse partie des fibres récupérées entrent dans la fabrication des emballages, notamment du carton ondulé. Dans ce domaine, une des difficultés essentielles se situe au niveau de l'approvisionnement. A la récupération régulière des invendus de presse ou des déchets de fabrication s'ajoute la récupération volontaire qui évolue rapidement, ne s'organisant que lorsque la demande grandit. En outre, le tri mécanique par voie humide ou sèche des papiers contenus dans les déchets ménagers pose encore des problèmes.

Les papiers d'emballage peuvent être recyclés sans traitement particulier, le plus souvent en mélange pour donner des papiers ayant des performances suffisantes. Les papiers imprimés doivent d'abord être désencrés, ce qu'assure une cuisson légère suivie d'un lavage en plusieurs étapes.

Les procédés de blanchiment

Chacun connaît l'importance de la blancheur pour le papier. Aussi, très souvent, la pâte à papier est-elle blanchie avant d'être transformée en papier.

La première chose à faire est de mesurer la blancheur, donc de définir une échelle. Plus un corps est blanc, plus il réfléchit la lumière. C'est ce principe qui est utilisé, lorsqu'on mesure le pouvoir réfléchissant, ou réflectance, de la pâte soumise à un rayonnement de longueur d'onde bien déterminée. Ainsi, une pâte blanchie aura un degré de blancheur de 90 ; elle sera le constituant essentiel des papiers de haute qualité. Une pâte mi-chimique et blanchie légèrement, comme celle utilisée pour le papier journal, a un degré de blancheur d'environ 60. Enfin, la pâte pour cartons d'emballage, un degré de 15 à 30. La stabilité de la blancheur pose un autre problème ; en effet, la lumière, la chaleur, certains produits chimiques entraînent un jaunissement du papier. Cette altération est due à des réactions chimiques, dans lesquelles la lignine joue un rôle primordial.

Le blanchiment repose entièrement sur les traitements chimiques. On peut classer ces traitements en deux grandes catégories : ceux qui conservent la lignine, la blancheur étant due à la dégradation des groupements chromophores, responsables de la couleur ; ceux, au contraire, qui entraînent une dissolution complète de la lignine. Dans les deux cas, les traitements comportent plusieurs étapes ; la pâte, en suspension plus ou moins concentrée, est blanchie dans des tours, où elle subit, à co-courant ou à contre-courant, l'action des agents blanchissants, à une température souvent voisine de 60-70 °C. Ajoutons que, avant d'être blanchie, la pâte, notamment à la sortie du lessiveur, est lavée, d'abord à l'eau chaude, puis rincée à l'eau, dans une succession de filtres à tambour rotatif.

Le blanchiment de la lignine

Ce traitement est surtout appliqué aux pâtes mécaniques et mi-chimiques, afin d'améliorer leur blancheur, et ce avec un rendement élevé. Pour décolorer la lignine, deux voies sont possibles : par réduction ou par oxydation. L'agent réducteur le plus couramment utilisé est le thiosulfate de sodium ou de zinc. Parmi les oxydants, citons les peroxydes de sodium et l'eau oxygénée.

Les conditions de traitement varient beaucoup, et l'augmentation du degré de blancheur dépend de l'état initial de la pâte. Pour une pâte mécanique, la blancheur ne peut augmenter de plus de 14 points lors d'un traitement au peroxyde et de plus de 12 points pour un traitement réducteur, quelle que soit la charge d'agent blanchissant. Pour aller plus loin, il est nécessaire de réaliser un traitement en deux stades : par exemple, un traitement oxydant (20 kg par tonne de pâte de Na_2O_2), suivi d'un traitement réducteur (10 kg de $Na_2S_2O_4$), permet de gagner jusqu'à 20 points de blancheur. D'une manière générale, le résultat est aussi très sensible au pH, à la consistance de la pâte, qui est souvent de 3 à 5 %, à la température, — une augmentation de température va de pair avec une meilleure blancheur —, au temps. Par exemple, pour le traitement au thiosulfate, l'efficacité la plus grande est obtenue pour un temps de réaction d'une heure vers 50 °C ou d'une demi-heure vers 70-80 °C.

Le traitement par élimination de la lignine

Le blanchiment des pâtes chimiques est obtenu par l'élimination de la lignine subsistant après la cuisson. C'est toujours une opération qui comprend plusieurs étapes successives : on parle alors d'une séquence de blanchiment. Parmi ces étapes, les principales sont la chloration et l'oxydation par des composés oxydés du chlore.

* *Chloration et extraction par la soude*

La chloration de la lignine était connue dès 1900. Mais il fallut attendre 1930 pour la généralisation de cette réaction, qui demeure la première étape de la plupart des séquences de blanchiment. L'opération est réalisée dans des tours, avec des suspensions de pâte inférieures à 5 % ; les consistances supérieures créent des problèmes au niveau du transport. Si l'on dissout du chlore dans l'eau, en maintenant un pH très faible, le chlore reste à l'état moléculaire. Il réagit rapidement, puisqu'en moins d'un quart d'heure, à la température ambiante, la chloration de la lignine est achevée. Cette réaction n'est efficace que si elle est suivie d'une extraction alcaline, laquelle dégrade également les hydrates de carbone et les résines encore contenues dans la pâte, qui est ainsi purifiée. Cette opération a un bon rendement pour des consistances de l'ordre de 5-15 %, avec une teneur en soude de 0,5 à 3 % par rapport à la pâte, une durée de réaction variant de une à deux heures et la température de 40 à 70 °C. Évidemment, les conditions optimales sont fonction des

caractéristiques de la pâte. De plus, en principe, chaque réaction de blanchiment par oxydation doit être suivie par une extraction alcaline, et on conçoit que la charge en soude sera d'autant plus faible que le degré de blancheur sera élevé.

* *Oxydation par les composés oxygénés du chlore*

L'un des premiers réactifs est l'ion hypochlorite — rappelons qu'il s'agit de l'eau de Javel —, qui apparaît lorsqu'on dissout du chlore en milieu basique. La plupart des traitements à l'hypochlorite se font avec une consistance de 12 à 16 %, à une température aussi basse que possible, inférieure à 35 °C, et le temps de réaction varie de deux heures et demie à quatre heures. La variable essentielle à contrôler est le pH, que l'on doit maintenir entre 8,5 et 10.

Un deuxième agent chloré est le dioxyde de chlore ClO_2, qui est très utilisé dans le blanchiment des pâtes kraft. Il est efficace, mais son utilisation pose des problèmes, car il s'agit d'un gaz toxique, très corrosif et dont l'action exige des températures relativement élevées, de 60 °C à 80 °C et un temps de réaction d'au moins trois heures. Le traitement au bioxyde est suivi d'une extraction alcaline, et il permet d'atteindre une blancheur de l'ordre de 90 pour la plupart des pâtes.

* *Les peroxydes*

Comme l'eau oxygénée H_2O_2, les peroxydes agissent essentiellement en détruisant les groupements chromophores portés par les macromolécules végétales.

La pratique du blanchiment

Pour obtenir un blanchiment convenable, un seul traitement par un des agents ne suffit pas. Aussi a-t-on mis au point des séquences, variables suivant les caractéristiques de la pâte et la blancheur désirées. Par convention, on distingue les stades suivants : la chloration C, l'extraction alcaline à chaud E, une simple purification à froid A, l'oxydation par l'ion hypochlorite H, par le chlorite de sodium S, par le dioxyde de chlore D, par un peroxyde P.

Ainsi, un blanchiment classique à trois étapes s'écrira C/E/H, avec les symboles définis plus haut. On peut donner quelques exemples : outre la séquence C/E/H pour une pâte chimique au sulfite, on aura une plus grande blancheur avec la séquence C/E/H/D. Pour les pâtes kraft, les séquences les plus courantes sont C/E/H/H ou C/E/H/D ou encore C/E/C/E/H. Si on désire des pâtes très bien blanchies, d'environ 93 points, il faudra aller jusqu'à C/E/H/C/H/D/E/D. Autre exemple : un traitement C/E/H/D/P qui dure globalement 15 à 20 heures permet de passer d'une blancheur de 25 à une de 90 environ.

Après le blanchiment, la pâte est soit utilisée immédiatement, soit séchée de manière à obtenir un taux de siccité de 90 %, norme fixée pour la commercialisation.

On a vu les différentes techniques de fabrication de la pâte. Elles sont très variées, comme la qualité des produits qu'elles fournissent. L'industrie de la pâte à papier est une industrie lourde. En Europe, une usine moyenne produit souvent autour de 400 tonnes de pâte par jour. Comme les investissements sont très importants, la fabrication est assez concentrée, et les usines sont installées dans des régions qui permettent un approvisionnement en bois suffisant, le plus souvent à proximité d'un important cours d'eau. On conçoit aisément que la fabrication de la pâte exige beaucoup d'eau, car la plupart des traitements se font avec des consistances de pâtes relativement faibles, à quoi s'ajoute le grand nombre de lavages nécessaires. Aussi n'est-il pas étonnant que, ces dernières années, l'industrie papetière ait énormément investi dans le traitement des eaux. Les mêmes problèmes se posent dans le domaine de la pollution atmosphérique. La cuisson kraft s'accompagne de la formation de mercaptans à l'odeur particulièrement désagréable; les fumées produites par la combustion des liqueurs de cuisson sont le plus souvent chargées de poussière et d'effluents gazeux néfastes pour l'environnement. Là encore, un effort efficace a permis d'améliorer très sensiblement la situation : ces dernières années, les programmes de recherche étaient en grande partie inspirés par la lutte contre la pollution.

La description des différentes techniques de fabrication de la pâte à papier a mis en évidence la grande variété des pâtes selon leurs qualités, leur degré de blancheur, etc. Aussi ne faut-il pas s'étonner que le nombre des différents produits papetiers soit encore plus grand; depuis l'ouate de cellulose, jusqu'au papier à dessin ou au papier pour carton ondulé. Cependant, avant d'aborder la technique de fabrication, il est nécessaire de donner quelques éléments statistiques, qui souligneront l'importance de l'industrie papetière dans le monde.

Les statistiques réunies dans le *tableau* I ont été publiées par l'O.C.D.E. en 1976. Elles appellent quelques commentaires.

- Entre les années 1970 et 1974, la production globale a augmenté de 14 %, soit 2 % par an en moyenne. En fait, un examen plus détaillé montrerait que le taux de croissance a faibli dès 1974 (il n'est que de 1,4 % entre 1973 et 1974).
- L'Amérique du Nord fournit à elle seule 60 % de la production des pays de l'O.C.D.E. Cette part importante se répartit en 2/3 pour les U.S.A. et 1/3 pour le Canada. Cependant, ce dernier est le plus gros producteur de pâtes mécaniques.
- Notons la faiblesse de la production des pays du Marché Commun. Par exemple, en 1975, la France a produit 1 576 milliers de tonnes de pâte, en a exporté 75,3 et importé 1 107 : autrement dit, la France couvre environ 60 % de ses besoins. Ce déficit varie d'ailleurs suivant le type de fabrication, comme le montrent les statistiques concernant la production du papier.

La fabrication du papier

Si la production de la pâte est très centralisée, il n'en est pas de même de la fabrication du papier. Il existe encore de nombreuses papeteries dans lesquelles sont fabriquées toutes sortes de papier : papiers d'emballage divers, papier glacé, papier couché... Cependant, les machines à papier fonctionnent toujours suivant le même principe qui mérite une description.

La machine à papier

Il s'agit de former, à partir des fibres qui constituent la pâte, une feuille mince et résistante. Très souvent, la première opération consiste à raffiner la pâte. Cette action, purement mécanique, consiste à rompre les fibres afin de libérer les fibrilles; elle est réalisée dans des raffineurs, qui se présentent comme des broyeurs, soit coniques, soit à disques. Le raffinage a pour effet essentiel de rendre la structure cellulosique plus accessible à l'eau. Grâce à lui, l'eau peut pénétrer intimement dans la pâte, d'autant plus que les groupements chimiques de la cellulose peuvent se lier à l'eau, composé polaire, par l'intermédiaire des liaisons hydrogène. Ainsi, les fibres gonflent et gagnent en souplesse. En somme, en augmentant la surface accessible, le raffinage augmente les possibilités de liaison, d'abord avec l'eau, mais ensuite, après élimination de l'eau, entre fibrilles, ce qui ne sera pas sans conséquence sur la résistance du papier à la rupture. Le degré de raffinage d'une pâte est d'ailleurs lié directement à sa capacité de retenir l'eau. Il faut noter que le raffinage n'est pas systématique : si la pâte contient beaucoup de fibres courtes, dues entre autres à la présence d'hémicelluloses, comme c'est le cas, par exemple, des pâtes chimiques à haut rendement, il n'est pas toujours utile de la raffiner. On conçoit aussi que les bois feuillus donnent des pâtes plus faciles à raffiner, car on sait que les fibres de ces bois sont plus courtes que celles des bois résineux.

La pâte, raffinée ou non, est stockée dans le château de pâte, vaste cuvier muni d'un agitateur qui empêche les fibres en suspension dans l'eau de décanter.

Avant d'être envoyée dans la machine à papier, la pâte subit une nouvelle épuration : la suspension est traitée dans des cyclones, dans lesquels la force centrifuge sépare les fibres des impuretés diverses de densité différente. Ce n'est qu'après cette opération que la pâte est pompée dans la caisse de tête, partie essentielle de la machine, puisque c'est là que se forme la feuille. En effet, de même que l'ouvrier, au XIX[e] siècle, faisait une feuille à l'aide d'un tamis qu'il plongeait dans un cuvier rempli de pâte à très faible consistance et qu'il égouttait ensuite, la caisse de tête a pour but de répartir la suspen-

Tableau I
Production de pâtes à papier des pays de l'O.C.D.E. (en milliers de tonnes)

Types de pâtes à papier	Années	Marché commun	Pays européens de l'O.C.D.E.	Amérique du Nord	Pays de l'O.C.D.E.	Variations en pourcentage pendant ces 5 ans
Pâtes mécaniques	1970 1974	2 534 2 503	7 623 8 355	10 844 11 586	19 764 22 135	+ 12 %
Pâtes au bisulfite écrues	1970 1974	192 85	1 784 1 748	2 240 2 224	4 325 4 285	— 1 %
Pâtes au bisulfite blanchies	1970 1974	69 65	3 166 3 150	2 442 2 364	5 711 5 588	— 2 %
Pâtes au sulfate et à la soude écrues	1970 1974	410 505	4 373 5 089	16 122 17 404	22 394 25 477	+ 14 %
Pâtes au sulfate et à la soude blanchies	1970 1974	443 701	4 757 6 016	16 954 205 586	24 422 30 170	+ 23 %
Pâtes mi-chimiques	1970 1974	669 717	1 477 1 672	3 286 3 770	6 693 7 311	+ 9 %
Total de la production	1970 1974	5 144 5 432	23 180 26 029	51 889 57 934	83 310 94 966	+ 14 %

▲ *Tableau I : production de pâte à papier dans les pays de l'O.C.D.E. (d'après les statistiques trimestrielles O.C.D.E. 1976/2).*

sion de pâte, de la manière la plus régulière possible, par une fente munie de lèvres réglables, et ceci sur une toile filtrante sans fin, tendue, analogue à un tapis roulant. La vitesse linéaire est très variable : 100 à 400 m/mn pour une machine lente, plus de 500 m/mn pour une machine rapide. Il en est de même de la largeur, qui varie entre 4 et 10 mètres. Sur cette toile, la pâte s'égoutte rapidement tant que les fibres s'orientent dans le sens de la marche. Ensuite, de par la formation d'une couche de fibres qui joue le rôle d'un papier filtre, l'égouttage se fait mal. La toile passe alors au-dessus des caisses aspirantes, dans lesquelles règne une dépression qui entraîne une accélération de l'égouttage, analogue à ce qui se passe lors d'une filtration sous vide. Cette technique de formation de la feuille explique pourquoi les deux côtés de la feuille n'ont pas le même aspect : le côté « toile », qui comporte les fibres longues, est plus rugueux. Par contre, du côté des fibres courtes, les particules les plus fines se déposent en dernier lieu, donnant donc au côté supérieur un aspect plus uni.

Enfin, après les caisses aspirantes, l'élimination de l'eau est poursuivie par un cylindre aspirant, lequel sert également de rouleau d'entraînement de la toile, du côté opposé à la caisse de tête. Les eaux recueillies dans la fosse sous la toile contiennent peu de fibres. Par contre, sous l'effet de l'aspiration au niveau des caisses et du cylindre aspirant, l'eau entraîne des fibres courtes : ce sont les eaux blanches, qui contiennent également les rognures, fibres qui sont éliminées sur les bords de la feuille en formation, afin que ceux-ci soient parfaitement rectilignes. D'ailleurs, cette rectification du bord est obtenue par un simple jet d'eau très fin, qui coupe ainsi

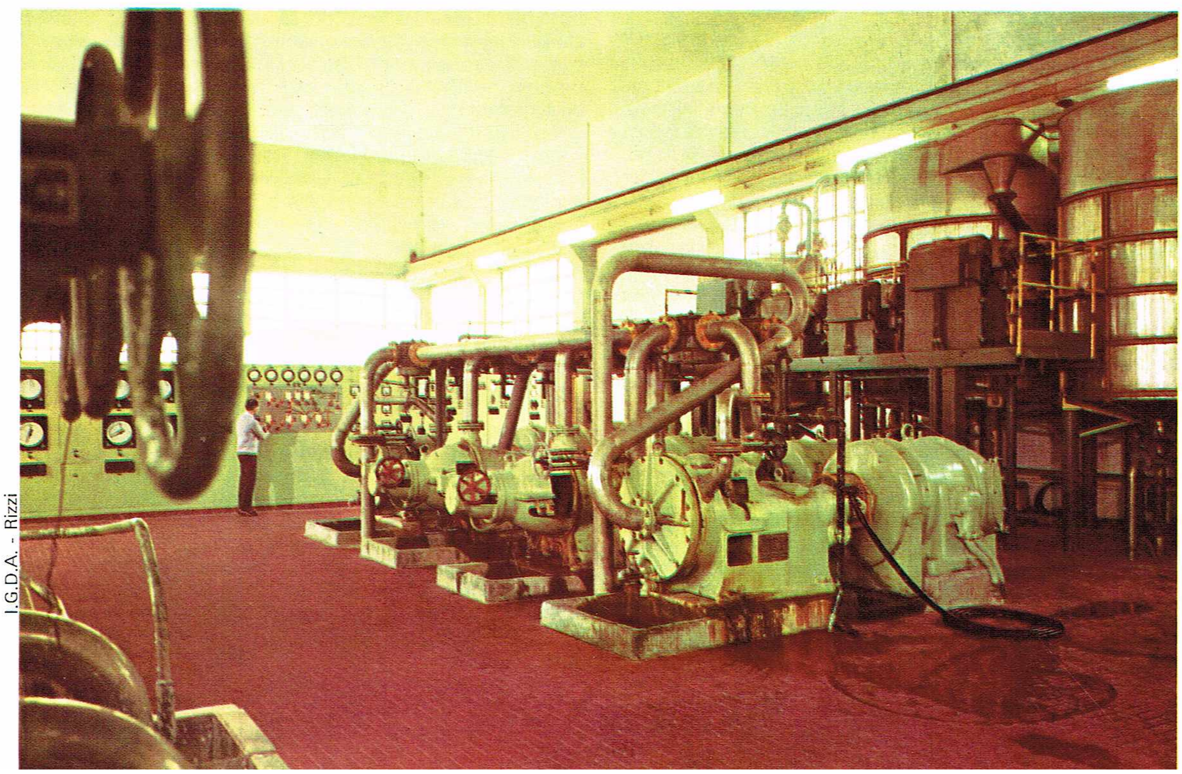

I.G.D.A. - Rizzi

▶ *Le raffinage en cycle continu de la pâte à papier. Cette opération a pour effet de rendre la structure des fibres cellulosiques plus accessible à l'eau ; les fibres sont donc écrasées, frottées et coupées. Elles gonflent et gagnent en souplesse (papeterie de Tolmezzo et Cisalpina, Intra, Italie).*

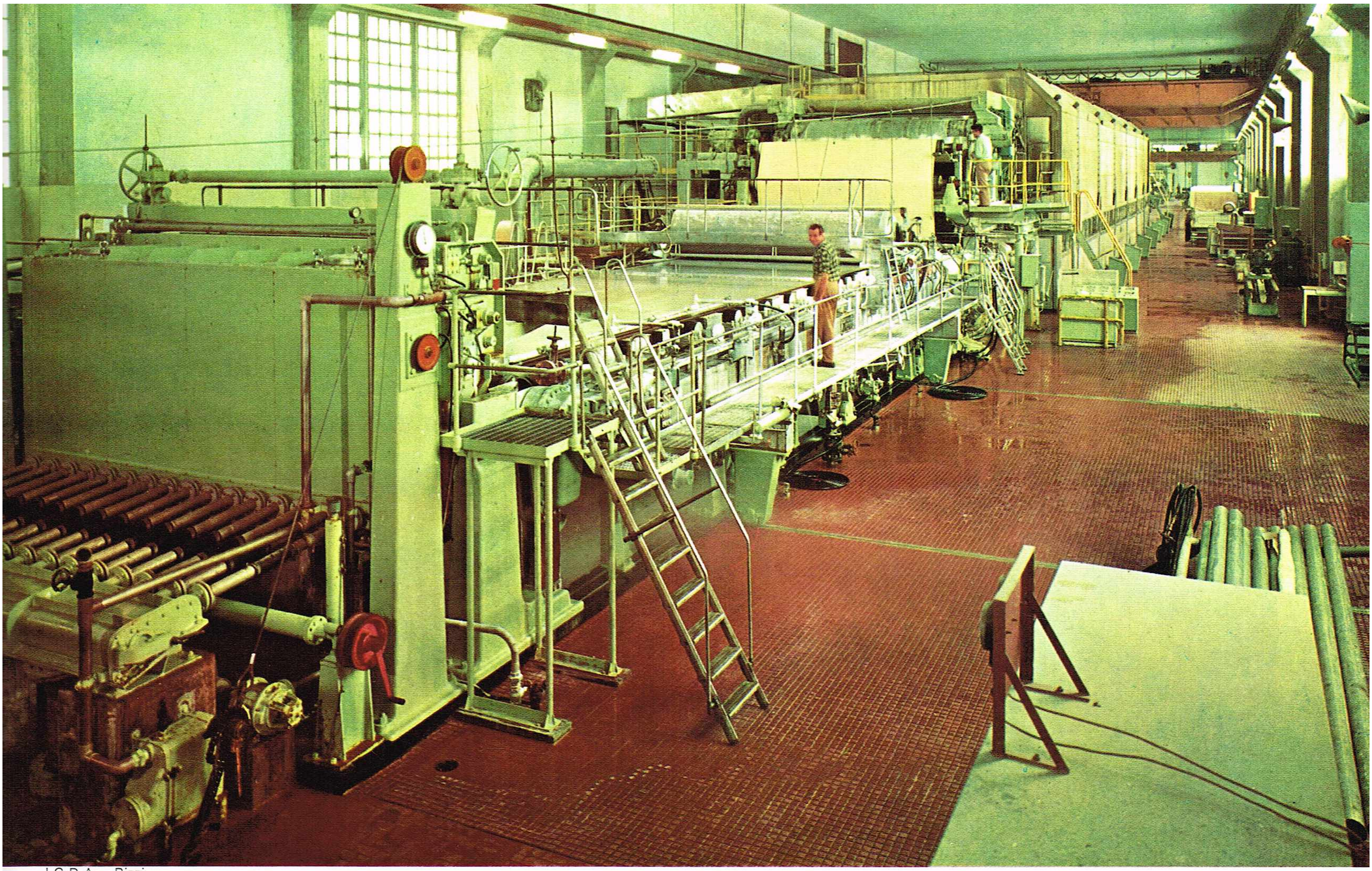

I.G.D.A. - Rizzi

la couche fibreuse. Ces eaux blanches sont recyclées en amont, pour réaliser la suspension de pâte à quelques pour cent; elle sera épurée et pompée dans la caisse de tête.

La feuille étant formée au sortir de la table filtrante, elle pénètre dans la section des presses. La teneur en eau de la couche de fibres est encore beaucoup trop grande pour que celle-ci puisse être saisie sans se déchirer. Aussi, après son passage sur le cylindre aspirant, la feuille en formation est-elle supportée par un feutre, qui va lui permettre de perdre encore de l'eau sans dommage, par l'action des presses.

Supportant les fibres, le feutre passe entre deux rouleaux, d'écartement variable; la feuille en formation perd encore de l'eau et son épaisseur diminue. L'ensemble du feutre porteur, qui se présente comme une courroie sans fin, et des deux rouleaux d'axes horizontaux qui compressent le feutre et la couche de fibres, constitue une presse. Une machine à papier comporte toujours plusieurs presses, dont la forme, et l'agencement peuvent varier largement, le but étant toujours d'optimiser le coût de l'élimination de l'eau.

A la sortie de la section des presses, la feuille pénètre dans la « sècherie », où l'eau retenue par les fibres est éliminée par évaporation. Cette opération va consommer beaucoup d'énergie, car il est nécessaire de fournir des calories pour vaporiser l'eau — rappelons que la chaleur latente de vaporisation est très élevée : sa valeur est d'environ 600 kcal/kg, et que le pouvoir calorifique du fuel est d'environ 12 000 kcal/kg —, et fournir l'énergie nécessaire à la rupture des liaisons hydrogène qui existent entre l'eau et la cellulose. Une liaison hydrogène est une liaison de faible énergie — environ 5 à 10 kcal/mole — qui se forme entre un atome d'oxygène et un atome d'hydrogène sans véritable liaison chimique. On voit que l'interaction entre l'eau et les fibrilles est forte car la cellulose porte de nombreux groupements OH, qui vont former des liaisons hydrogène avec l'eau H_2O. Cette humidité va donc être très difficile à éliminer, beaucoup plus difficile que l'eau retenue par capillarité entre les pores. On estime qu'en moyenne, dans la sècherie, la consommation d'énergie liée seulement à l'élimination de l'eau est d'environ 1 200 kcal par kilogramme d'eau évaporée, soit le double de la chaleur correspondant à la simple évaporation.

Dans la partie sèche de la machine, la résistance de la feuille est souvent suffisante pour que celle-ci n'ait plus besoin d'être supportée par un feutre. La sècherie se présente comme une immense étuve, dans laquelle la feuille de papier, par l'intermédiaire d'un grand nombre de rouleaux, suit un trajet compliqué tout en étant soumise à des courants d'air chaud. Ces cylindres sont ultérieurement chauffés à la vapeur, et la feuille est plaquée sur leur surface par un feutre, qui est séché par ailleurs. A la sortie de la sècherie, le papier, qui contient encore 5 à 10 % d'humidité résiduelle, est mis en bobine par une enrouleuse. Il est ainsi prêt pour subir d'autres traitements ou être utilisé tel quel.

Cette courte description d'une machine à papier laisse imaginer que c'est une machine impressionnante. Le visiteur reste toujours surpris devant une machine qui

▲ Une machine à papier : la pâte épurée est envoyée par la caisse de tête sur une toile filtrante sur laquelle elle s'égoutte, tandis que les fibres s'orientent dans le sens de la marche (papeterie de Tolmezzo et Cisalpina, Intra, Italie).
▼ La pâte est souvent stockée entre deux opérations, dans de vastes bacs munis d'un agitateur pour empêcher les fibres de décanter (papeterie de Tolmezzo et Cisalpina, Intra, Italie).

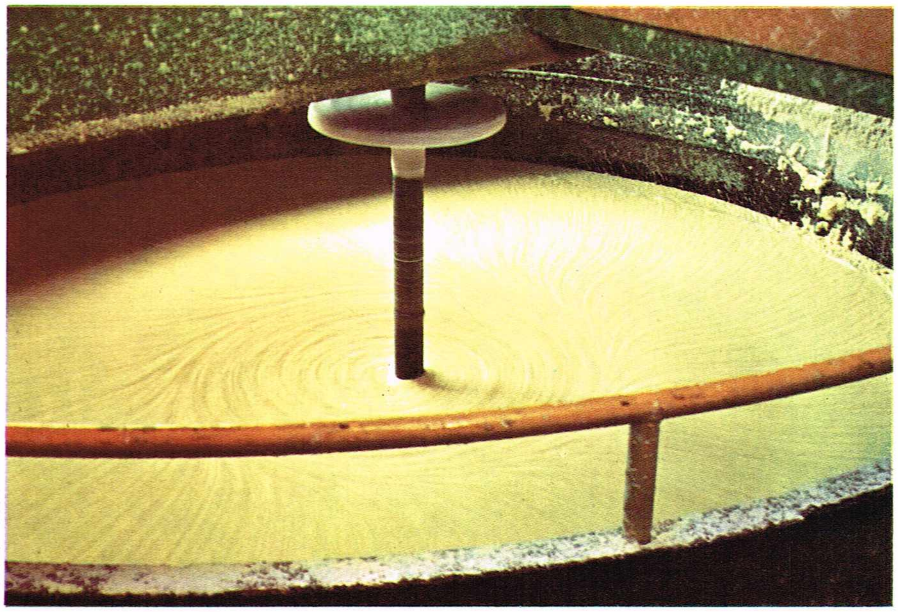

I.G.D.A. - Rizzi

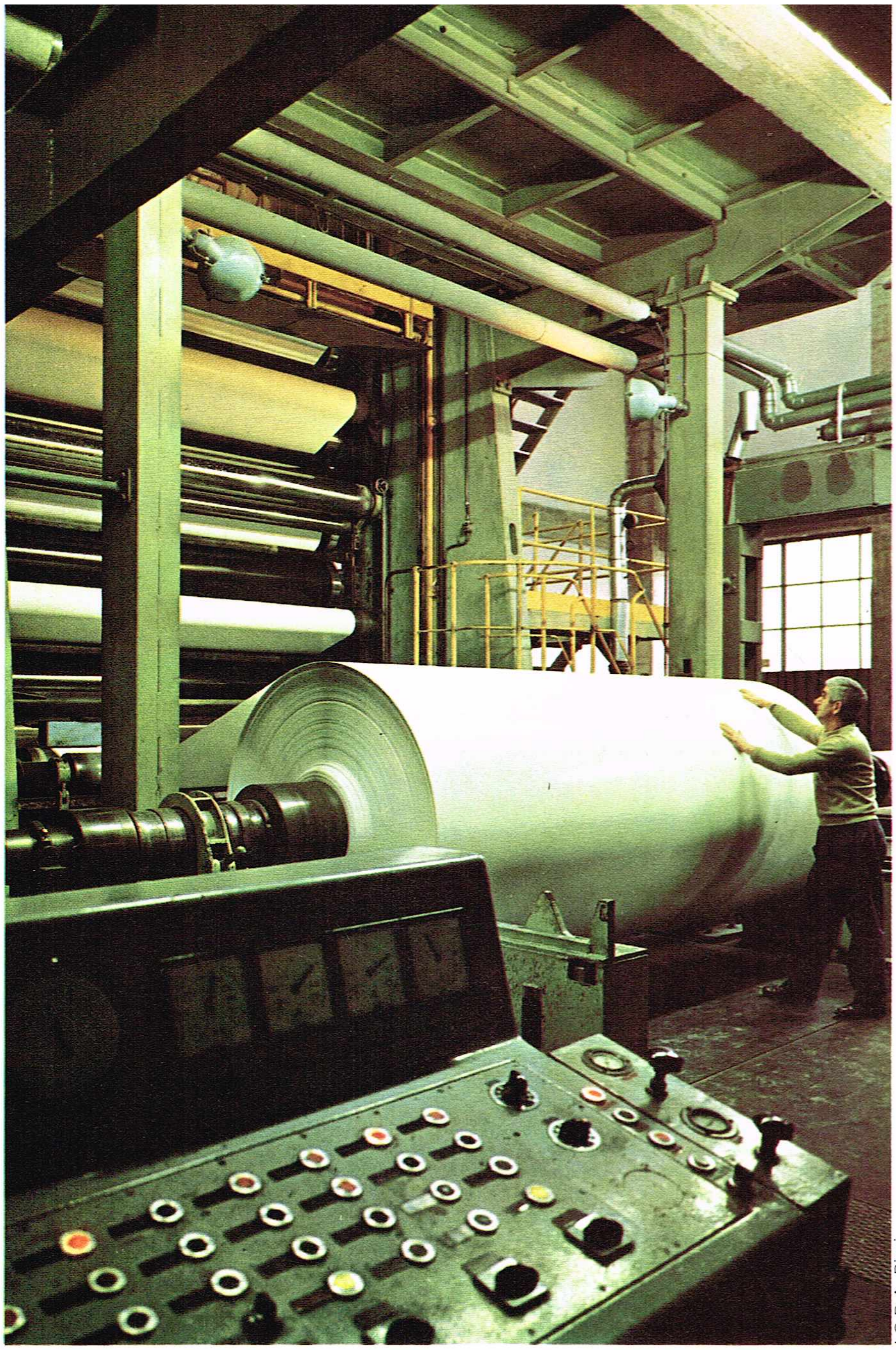

I.G.D.A. Rizzi

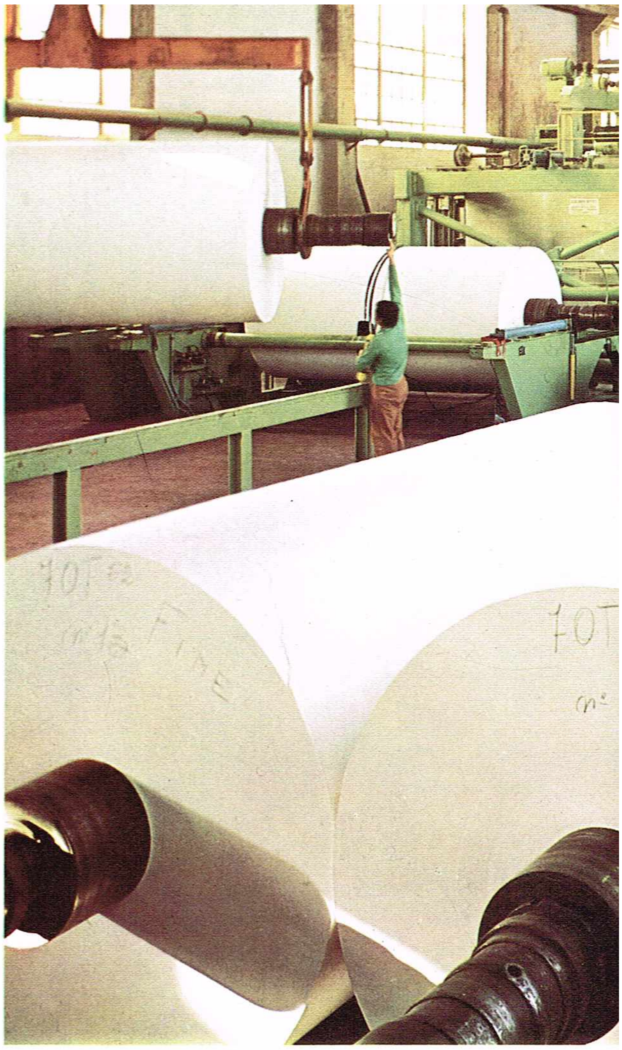

▲ *A gauche, une* calandre, *appareil servant à rendre la surface du papier moins rugueuse ; ce polissage est obtenu par frottement sur des rouleaux de cellulose. A droite, un atelier de traitement de surface du papier (papeterie de Tolmezzo et Cisalpina, Intra, Italie).*
▼ *Tableau II : production de papier journal.*

Tableau II
Production de papier journal (en milliers de tonnes)

Pays concernés	1970	1974
Pays du Marché commun	2 136	1 695
Pays européens appartenant à l'O.C.D.E.	5 450	5 141
dont la Finlande	1 305	1 219
dont la Norvège	554	519
dont la Suède	1 030	1 210
Amérique du Nord	10 849	11 630
dont le Canada	7 814	8 662
dont les U.S.A.	3 035	2 968
Ensemble des pays de l'O.C.D.E.	18 604	19 417

fabrique une feuille de plus de 5 m de largeur, à une vitesse de 10 m/s. Une telle machine pose des problèmes de régulation, et, dans ce domaine, un gros effort a été réalisé ces dernières années ; une fabrication régulière se caractérise par une bonne régularité de l'épaisseur de la feuille — on parle de grammage, en g/cm^2 — tant dans le sens longitudinal que dans le sens transversal, et un bon contrôle de l'humidité à la sortie de la sècherie. Le grammage est mesuré en continu à l'aide d'une jauge β : un composé radio-actif émet un rayonnement β, et l'absorption de ce rayonnement par la feuille est évidemment liée à son épaisseur. Quant à l'humidité, on utilise généralement la spectrophotométrie aux infrarouges ou des mesures de constante diélectrique. Les indications données par ces deux capteurs sont saisies et traitées par un calculateur, qui détermine et déclenche les actions nécessaires sur la caisse de tête (débit de pâte) et sur la sècherie (pression de vapeur). Ajoutons que la régulation de la couleur est également possible. Le maintien des conditions de fonctionnement d'une machine autour d'un point de consigne ne pose plus de problème. Il n'en est pas de même lorsqu'il s'agit de changer de régime. Dans un autre domaine, des tentatives ont été faites pour modifier la technique de formation de la feuille, mais elles n'ont pas été développées à grande échelle.

Les différents papiers

Les papiers, chacun le sait, sont très divers : papier journal, papier bible, papier monnaie...

Les papiers de presse

Commençons par le papier journal, avec quelques éléments statistiques relatifs à la production, exprimée en milliers de tonnes, réunis au *tableau* II. Une autre indication intéressante concerne les importations (*tabl.* III) et les exportations (*tabl.* IV), en milliers de tonnes.

Les chiffres sont nets : le Marché Commun produisait la moitié de sa consommation en 1970, et seulement 40 % en 1974. Les États-Unis consomment à eux seuls environ un tiers de la production des pays de l'O.C.D.E., mais ne produisent que 30 % de leur consommation. Les grands exportateurs sont évidemment le Canada et les pays scandinaves.

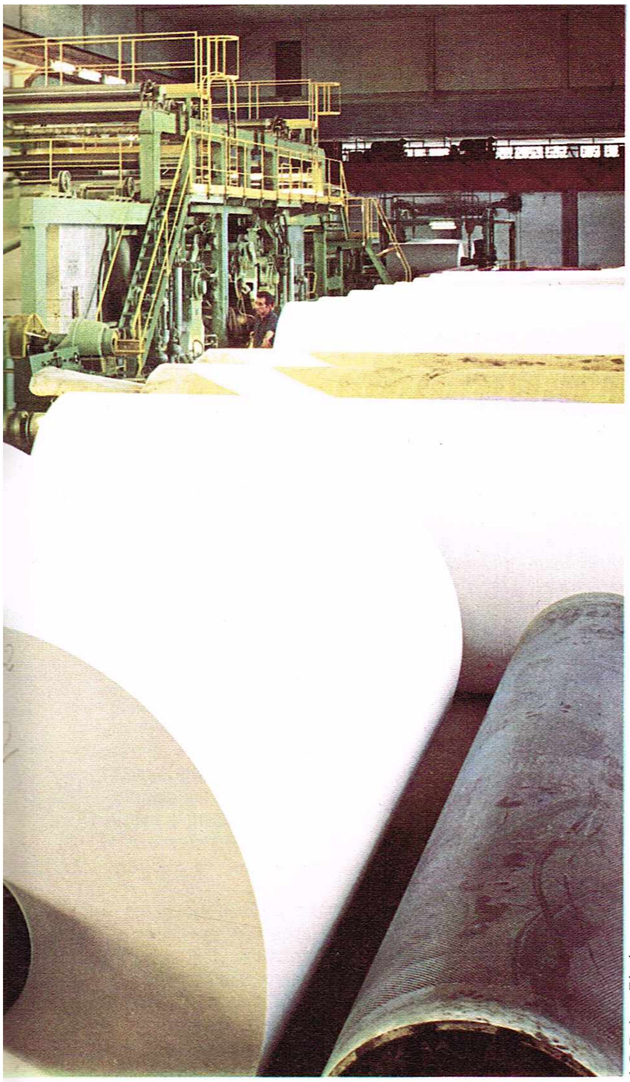

I.G.D.A. - Rizzi

Tableau III Importation de papier journal (en milliers de tonnes)		
Pays concernés	1970	1974
Pays du Marché commun	2 231	2 860
Pays européens appartenant à l'O.C.D.E.	2 400	3 074
U.S.A.	6 019	6 712

Tableau IV Exportation de papier journal (en milliers de tonnes)		
Pays concernés	1970	1974
Pays du Marché commun	133	83
Pays européens appartenant à l'O.C.D.E.	2 550	2 587
dont la Finlande	1 187	1 137
dont la Norvège	476	460
dont la Suède	687	944
U.S.A.	130	171
Canada	7 891	7 354

▲ *Tableau III : importation de papier journal.*
Tableau IV : exportation de papier journal.
▼ *Le séchage de la pâte est réalisé par de l'air chaud, dans une étuve munie d'un grand nombre de rouleaux chauffés à la vapeur (papeterie de Tolmezzo et Cisalpina, Intra, Italie).*

I.G.D.A. - Rizzi

Le papier journal ordinaire est composé essentiellement de pâte mécanique écrue (pour 80 %) et de pâte chimique pour le reste. Ces pâtes ne sont pas blanchies, d'où la couleur caractéristique du papier journal. C'est un papier opaque, poreux, fixant très bien l'encre. Il est toujours produit sur des machines très importantes, larges et rapides. Son grammage est d'environ 50 g/m^2; il ne contient en général aucun adjuvant, et il est simplement « lissé ».

Le lissage est une opération qui a pour but de rendre la surface du papier moins rugueuse. Ce résultat est obtenu soit par compression, soit par polissage. Dans le premier cas, le papier est compressé entre des rouleaux en fonte ou en acier poli. Dans le deuxième cas, le polissage est obtenu par frottement sur des rouleaux de cellulose qui constituent une calandre. Cette machine comporte essentiellement une série de rouleaux horizontaux reposant les uns sur les autres et maintenus dans un bâti vertical. Les rouleaux sont alternativement en acier poli et en cellulose compressée, le premier et le dernier étant toujours en acier. La feuille est engagée entre les deux rouleaux supérieurs, puis passe alternativement d'un rouleau à l'autre et atteint ainsi le rouleau inférieur. Comme les rouleaux en cellulose ont une vitesse de rotation toujours supérieure à celle des rouleaux métalliques, le papier subit au passage entre deux rouleaux une friction intense qui produit l'effet de polissage recherché.

Le papier journal ordinaire est le matériau utilisé pour les quotidiens. Il existe du papier journal amélioré, dont la teneur en pâte chimique est plus élevée, un tiers au lieu d'un cinquième. Ces pâtes sont partiellement blanchies; le grammage de ces papiers se situe autour de 60-65 g/cm^2, et ils contiennent souvent des charges minérales. En effet, lors de la fabrication de certains papiers, on ajoute à la pâte des charges minérales (le plus souvent du kaolin, silico-aluminate naturel exploité dans des carrières ou des mines. C'est un produit économique qui, ajouté à la pâte dans des proportions de 5 à 30 %, en poudre très fine, donne au papier une meilleure imprimabilité, sans modifier son opacité et sans lui enlever trop de ses propriétés mécaniques).

On utilise également d'autres additifs minéraux, comme l'oxyde de titane, pigment blanc qui intervient dans la

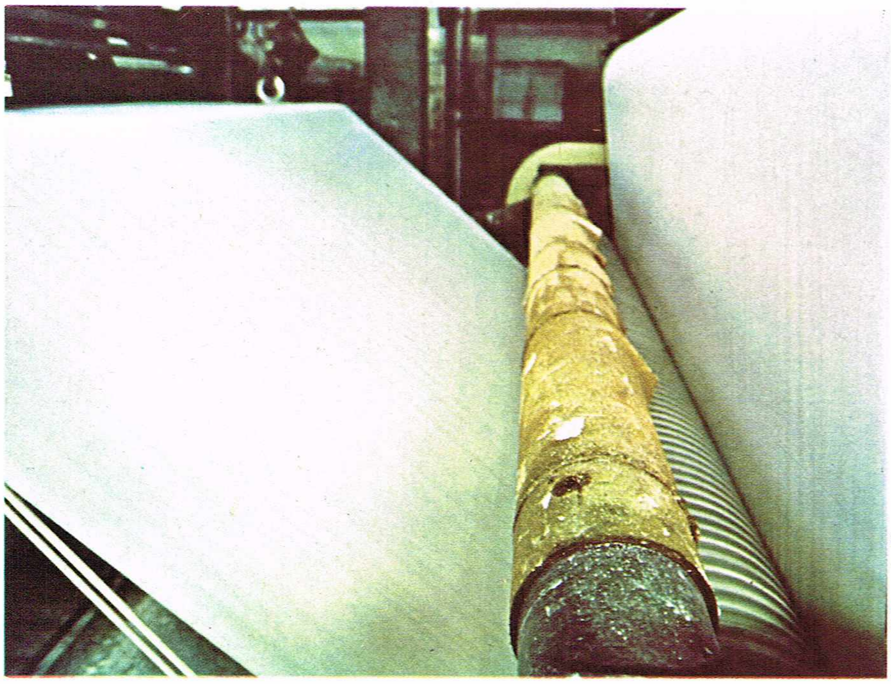

▲ *La cellulose possédant une grande affinité avec l'eau, il est nécessaire de traiter le papier destiné à l'impression ou à l'écriture; une des techniques utilisées est le* couchage, *obtenu par le dépôt d'une fine couche de matière minérale hydrophobe (kaolin, carbonate de calcium ou sulfate de baryum) en présence d'une substance adhésive; ce dépôt est réalisé par l'intermédiaire d'un rouleau en rotation immergé partiellement dans la suspension.*

▼ *Tableau V : production de papier pour l'impression et l'écriture.*

fabrication des papiers caractérisés par une grande opacité et un faible grammage, comme le papier bible.

Il existe aussi du papier journal amélioré, par un couchage léger.

Les papiers d'impression-écriture

Ils sont légion, allant des livres ordinaires jusqu'aux billets de banque en passant par les cahiers, les papiers à lettre... La matière première essentielle est la pâte chimique blanchie; si de la pâte mécanique est ajoutée, elle est blanchie elle aussi. Ces papiers contiennent toujours des charges, et s'ils doivent être utilisés en présence d'eau, ils sont collés.

On sait que la cellulose possède une très grande affinité avec l'eau, ce qui est un inconvénient lorsque le procédé d'écriture ou d'impression lui-même fait intervenir de l'eau (écriture manuelle, impression offset). Aussi pratique-t-on le collage, qui est un traitement de surface des fibres par un agent hydrophobe. Cet agent, le plus souvent à base de colophane, est ajouté à la pâte raffinée, dans le château de pâte, avant pompage dans la caisse de tête. Il précipite sur les fibres par action du sulfate d'alumine, rendant ainsi la cellulose suffisamment hydrophobe pour permettre l'écriture manuelle, sans pour cela imperméabiliser le papier. Certaines résines peuvent avoir un double effet : diminuer l'affinité de la cellulose avec l'eau, mais aussi augmenter la résistance du papier par suite de la création de fortes liaisons intermoléculaires supplémentaires.

Les papiers d'impression-écriture, notamment ceux utilisés pour les livres de belle présentation, sont « couchés ». Le couchage consiste à déposer en surface de la feuille de papier un revêtement qui est le plus souvent une poudre très fine de matière minérale (kaolin, carbonate de calcium, sulfate de baryum) en présence d'un adhésif. Un papier couché présentera donc beaucoup moins d'irrégularités superficielles, et sa porosité en surface sera beaucoup plus faible. Les procédés utilisés pour déposer en surface cette pellicule minérale varient, bien que l'opération se déroule toujours en phase aqueuse. Il y a toujours trois opérations : dépôt de la couche, égalisation de son épaisseur, séchage. En général, le dépôt est réalisé par l'intermédiaire d'un rouleau en rotation immergé partiellement dans la suspension, contre lequel est appliquée la feuille de papier. L'égalisation de la couche est obtenue soit par l'intermédiaire d'une lame d'air — c'est le cas des machines déjà anciennes, et le revêtement atteint 20 à 30 g/m² et par face —, soit par une lame traînante, qui assure un dépôt plus fin et une vitesse plus grande. Parfois, si un couchage très léger est suffisant, il peut intervenir pendant la fabrication de la feuille elle-même, par un aménagement de la machine à papier. La troisième étape, le séchage, est réalisée par l'air chaud.

Les papiers d'impression sont utilisés pour les livres, mais leur qualité varie dans de larges proportions, suivant d'ailleurs les techniques d'impression. Par exemple, la technique offset exige des papiers collés, car elle est mise en œuvre en présence d'eau. Les livres ordinaires, imprimés en typographie, sont réalisés en papier brut de machine, non collé et peu chargé. Les papiers couchés constituent le matériau de choix pour les livres et séries illustrées.

Les papiers d'écriture forment aussi une gamme très variée : les papiers à cahiers, les papiers pour imprimante de calculateur. En général, la matière première est une pâte chimique blanchie, et colles et charges sont souvent en proportion élevée.

Citons quelques papiers particuliers :

● Le papier pour fabriquer les billets est réalisé à partir de chiffons; s'il s'agit de titres, on peut ajouter un peu de pâte chimique.

● Les papiers à cigarettes sont très légers — 10 à 20 g/m² —; ils sont obtenus essentiellement avec des pâtes chimiques, de même que les papiers « pelure ».

● Les papiers « bible » contiennent des fibres végétales de lin et de coton, mais on a tendance à y adjoindre de plus en plus des pâtes chimiques de qualité.

● Enfin, le papier buvard de qualité est à base de chiffons. Souvent, en fait, il est obtenu à partir de pâte chimique, sans l'addition d'aucun adjuvant.

La consommation de papier varie énormément d'un pays à l'autre, les États-Unis arrivant en tête, avec presque 300 kg par habitant et par an, le Français n'en consommant que la moitié, environ 140 kg/an. Il en est de même de la production, comme le montre le *tableau* V.

On peut remarquer que la production de papiers pour impression et écriture est mieux répartie que celle du papier journal. Cette production est en augmentation constante : 26 % entre 1970 et 1974, et cela malgré une stagnation entre 1970 et 1971 et les problèmes économiques dus, en 1973, au renchérissement subit de l'énergie. Il est probable que cette croissance continuera, parallèlement au perfectionnement des procédés d'impression et de reproduction, notamment avec le développement de l'informatique.

Tableau V
Production de papier pour l'impression et l'écriture (en milliers de tonnes)

Pays concernés	1970	1974
Pays du Marché commun	6 575	7 947
dont la R.F.A.	1 889	2 314
dont la France	1 418	1 792
dont l'Italie	1 201	1 368
dont le Royaume uni	1 145	1 291
Pays européens appartenant à l'O.C.D.E.	9 525	12 525
dont la Finlande	981	1 819
dont la Norvège	326	358
dont la Suède	537	833
Amérique du Nord	10 706	13 064
dont le Canada	922	1 094
dont les U.S.A.	9 784	11 970
Ensemble des pays de l'O.C.D.E.	22 641	28 557

BIBLIOGRAPHIE

Mac DONALD R. G., *Pulp and Paper Manufacture* (3 volumes), prepared under the direction of the Joint Texbook Committee of the Paper Industry, Mac Graw Hill Book Company, 1969. - RYDHOLM S. A., *Pulping Processes,* John Wiley & Sons Ltd, New York, 1965. - *Pâtes et Papiers,* statistiques trimestrielles, 1976/2, O.C.D.E., 1976.

LES TECHNIQUES DE PRESSE

Les techniques de l'imprimerie traditionnelle et de la grande presse sont, à peu de chose près, identiques. Les exigences de la seconde sont essentiellement, on le verra, la possibilité de rapides modifications dans les textes et une cadence de tirage très importante.

On distingue essentiellement deux types d'opérations dans l'ensemble de ces techniques :

— l'*impression*, phase finale, où s'effectue le rapprochement de l'encre et du papier au contact d'une *forme*, intermédiaire qui reçoit l'encre et la transmet au papier ;

— la *composition*, constitution de cette forme, écriture des textes, montage, adaptation de la forme à la machine à imprimer.

Les *techniques d'impression* se divisent en trois procédés :

- l'utilisation du relief : la forme encrée se décalque par pression sur le papier ; c'est l'impression typographique ;
- l'impression en creux ou héliogravure : la forme présente des creux remplis d'encre ;
- l'offset qui utilise la répulsion entre eau et encre.

Les *techniques de composition* sont au nombre de deux :

- la composition typographique, aux caractères de plomb, en relief ;
- la photocomposition, composition des textes sur un papier photographique.

Toutes deux peuvent servir à constituer les formes utilisables par les trois procédés d'impression.

Mais l'évolution historique distingue deux périodes très inégales : l'*ère du plomb*, associant composition et impression typographiques ; l'*ère de la lumière*, après l'invention de la photographie, qui a permis l'illustration des textes typographiques par la photogravure. C'est la même gravure qui constitue le principe de l'héliogravure. Elle est modelée par la lumière qui passe à travers un transparent photographique, tout comme lors de la préparation de la plaque offset. La photocomposition est la technique la mieux adaptée à la préparation de ce document photographique.

Le plomb

Quand, en 1631, Théophraste Renaudot, le premier en France, crée un journal, *La Gazette*, l'événement, aujourd'hui historique, n'est ressenti que par une infime minorité de la population. Bien sûr, le nombre des illettrés, la difficulté des communications expliquent, pour l'essentiel, ce manque de succès. Mais l'état de la technique interdit toute velléité de diffusion, rend impossible une parution fréquente et réserve à quelques privilégiés la lecture d'un journal au prix exorbitant. C'est qu'après deux siècles l'imprimerie n'a guère évolué depuis son invention par Gutenberg, vers 1450.

La composition typographique

L'invention de Gutenberg concerne à la fois la composition des textes et leur impression.

Avant lui, déjà, on utilise des planchettes gravées, notamment pour l'impression des cartes à jouer : c'est la « xylographie ». Dessins et lettres à reproduire sont gravés, en relief, dans la planche. Une encre est appliquée et la feuille de papier est plaquée à l'aide d'une balle ou d'une brosse. Le travail de gravure est évidemment très long, et le bois ne résiste guère.

On pense donc, tout naturellement, à utiliser des lettres séparées, toujours en bois. Ainsi naît la notion de « composition ». Mais le nombre des caractères à tailler ne permet qu'une très faible accélération du procédé. Et Gutenberg, qui à l'origine était orfèvre, apporte l'innovation décisive : ses caractères mobiles sont moulés comme le sont déjà, à l'époque, les pièces de monnaie. La matrice gravée permet de reproduire les lettres à de très nombreux exemplaires. Le métal utilisé pour la fonte est un alliage, dont les proportions peuvent varier de quelques points mais dont les composants sont demeurés les mêmes jusqu'à nos jours : le plomb (84 % environ), l'antimoine (12 % environ) et l'étain.

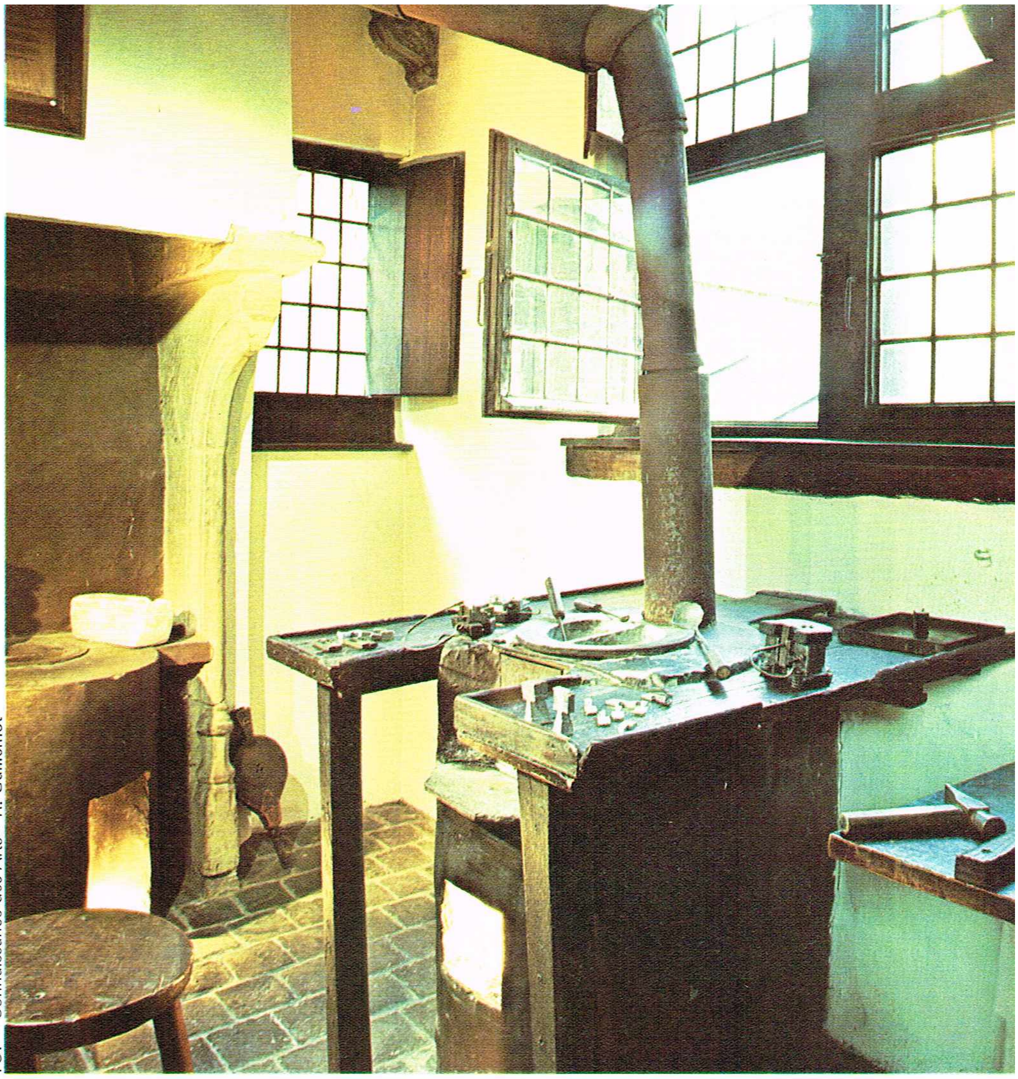

TOP - Connaissance des Arts - R. Guillemot

▲▼ *Fondée en 1576, à Anvers, l'imprimerie Plantin a été transformée en musée ; en haut, l'atelier de fonderie des caractères ; en bas, une salle de l'imprimerie.*

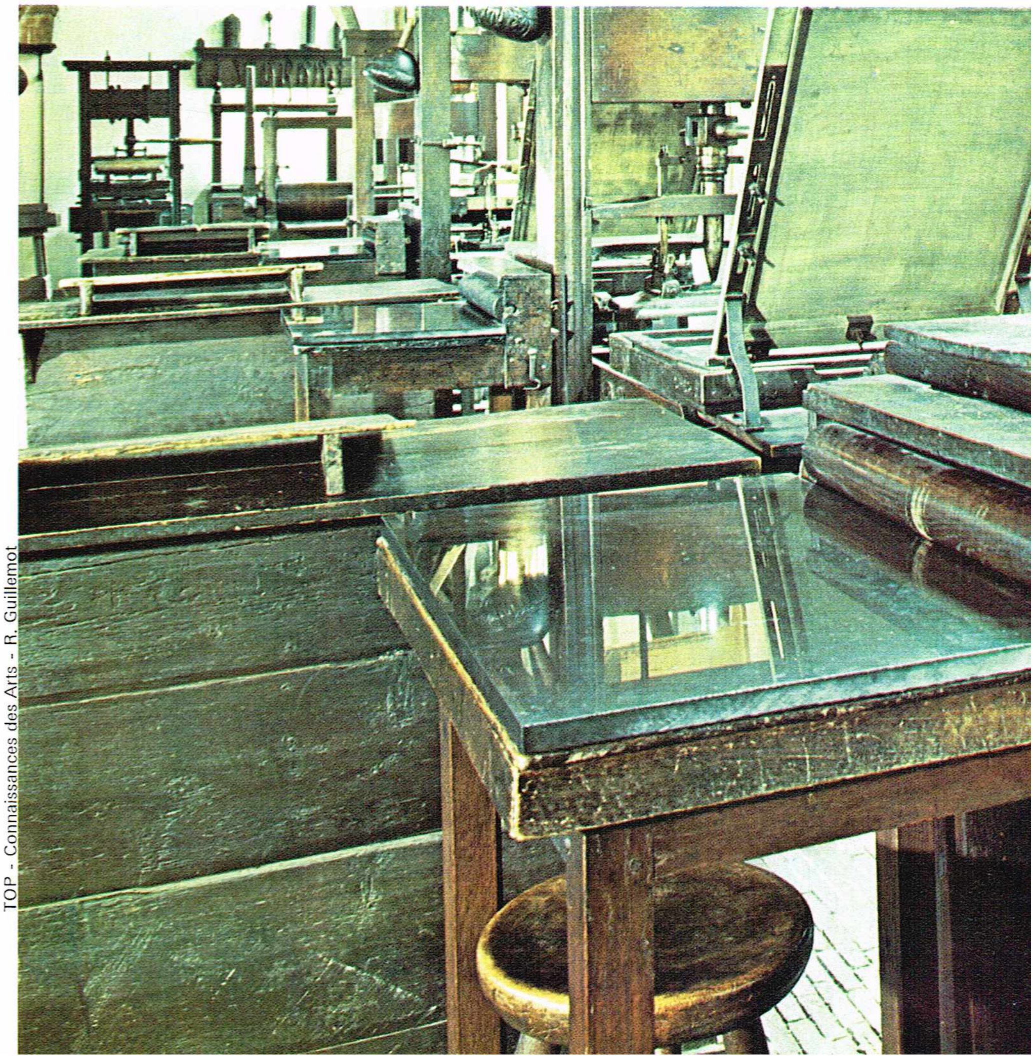

TOP - Connaissances des Arts - R. Guillemot

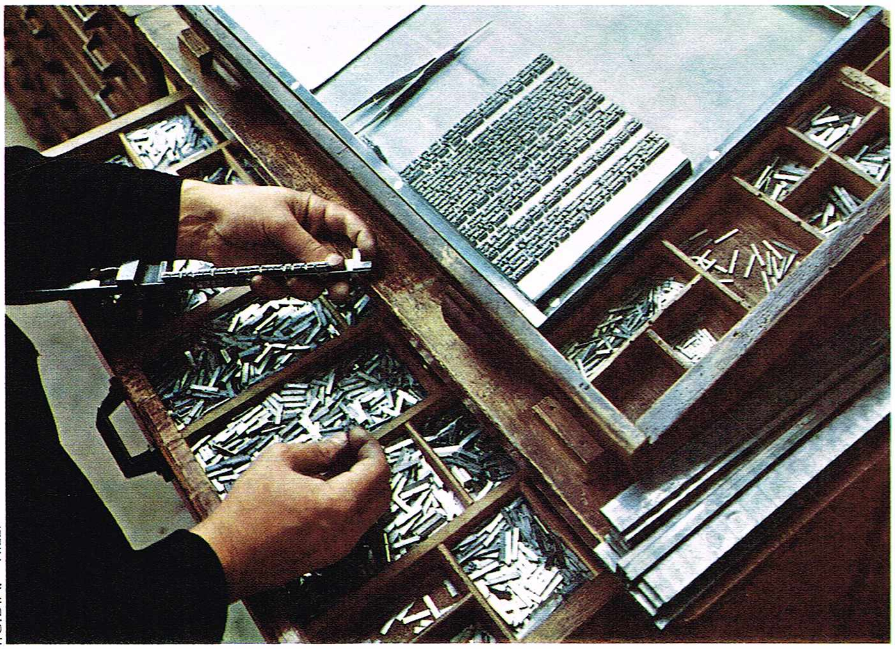

I.G.D.A. - Rizzi

▲ *Lors de la* composition manuelle, *les caractères d'imprimerie pris dans les casses sont assemblés sur une sorte de règle (le* composteur*) munie d'un curseur; les différentes lignes sont ensuite réunies dans une forme qui sert à l'impression; après utilisation, les caractères sont reclassés.*
▼ *La* Linotype *est un matériel de base pour les ateliers de presse; la machine, par l'intermédiaire d'un clavier, assemble non pas les signes mais les moules ou matrices qui forment des lignes en creux dans lesquelles est injecté le plomb.*

La composition manuelle

Le texte est composé à la main. Le compositeur assemble les caractères qu'il prend dans les alvéoles de la *casse*. Chaque compartiment contient une même lettre en de nombreux exemplaires. Les plus utilisées sont évidemment les mieux en vue. La partie supérieure contient les majuscules ou *capitales;* les minuscules sont disposées plus bas. Cette place leur vaut le nom de *bas de casse*, employé, aujourd'hui encore, en langage d'imprimerie.

Chaque casse correspond à une *famille* de caractère. Car, si les ouvriers de Gutenberg ont d'abord cherché à imiter l'écriture manuelle, l'inspiration des imprimeurs et des artistes a multiplié les formes, et le nombre des différents caractères est aujourd'hui considérable. La série complète des lettres et signes (leur nombre étant proportionnel à la fréquence d'emploi) s'appelle une *police de caractères*.

Le *compositeur* aligne les caractères dans une sorte de règle, le *composteur*. Un curseur règle la largeur de la ligne : les blancs ajoutés entre les mots permettent de donner la même dimension aux lignes d'un même texte : c'est la *justification*. Ainsi composées, une à une, les lignes sont assemblées dans une *forme*. C'est elle qui sert à l'impression proprement dite.

Après l'impression, les caractères sont repris et reclassés pour les utilisations ultérieures.

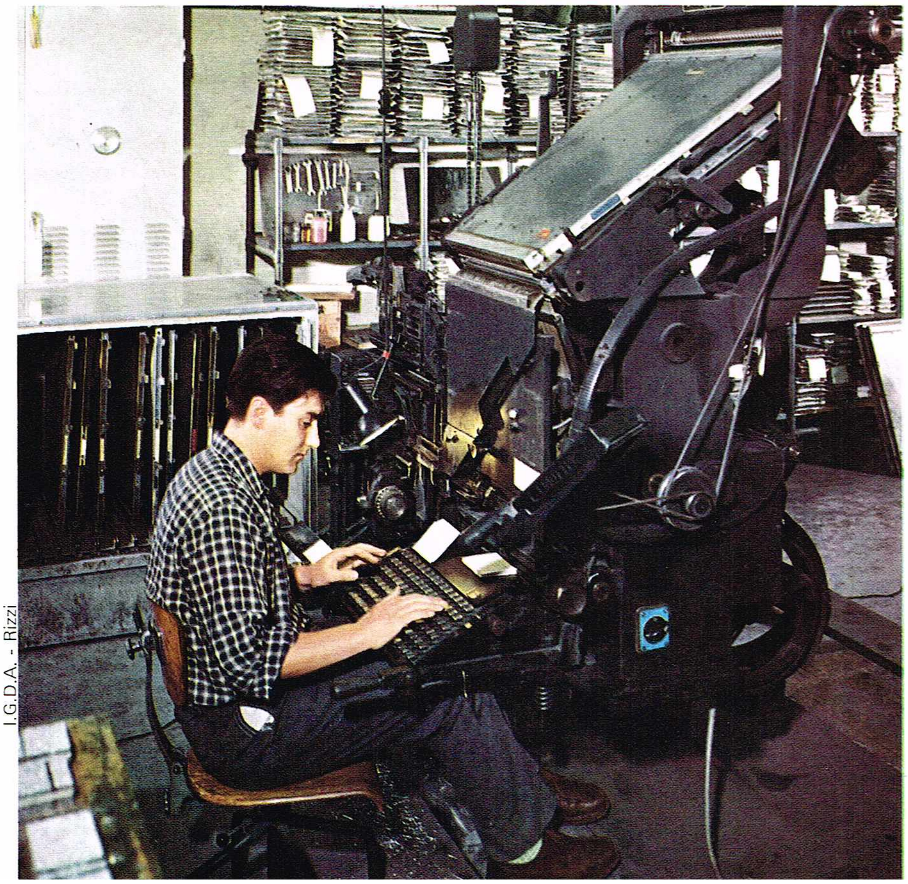

I.G.D.A. - Rizzi

La composition mécanique

En raison de sa lenteur, la composition manuelle est abandonnée depuis longtemps pour le corps des articles. La composition, d'abord mécanisée, a reçu ensuite l'assistance de l'informatique. Dans les ateliers « au plomb », la composition manuelle demeure néanmoins employée pour les gros titres et certains assemblages délicats, certains pavés publicitaires notamment.

Le progrès immédiatement réalisable semble être le remplacement mécanique des gestes du compositeur. Et les premiers efforts y tendent, en effet. Au début du XIXe siècle, de nombreux inventeurs réussissent à assurer la distribution mécanique des lettres et des signes dans le composteur : l'opérateur déclenche la descente en appuyant sur des touches. Mais c'est encore à la main qu'il ajoute les espaces de justification. D'autre part, la mécanisation est limitée par la redistribution des pièces dans les alvéoles correspondantes après usage. Ce problème est résolu par la mise au point d'un système d'encoches, comparables à celles des clefs; à chaque caractère correspond une formule d'encoches ouvrant l'accès à la casse déterminée et à elle seule.

Le procédé fait souche, mais dans une machine beaucoup plus révolutionnaire, matériel de base de tout atelier de presse jusqu'à nos jours : la *Linotype*. Son principe essentiel fait fi de tous les perfectionnements antérieurs : les caractères ne servent qu'une fois; ils sont ensuite refondus. La machine assemble non les signes, mais leurs moules (ou *matrices*) qui forment des lignes justifiées complètes, en creux, dans lesquelles est injecté le plomb.

Présentée pour la première fois à New York, en 1884, par son inventeur, l'horloger Ottmar Mergenthaler, la Linotype (nom de marque) connaît un tel succès qu'elle donne son nom à ce type de machine et à un métier, celui de linotypiste.

Celui-ci opère sur un clavier de 90 touches correspondant, chacune, à un magasin. La frappe provoque la descente des matrices dans une glissière. Chaque matrice, plaquette de laiton ou de cuivre de trois centimètres sur deux, porte sur la tranche la forme d'un caractère, inscrite en creux. Une touche libère les « espaces bandes », plaquettes spéciales, taillées en coins, qui séparent les mots. Matrices et espaces bandes descendent dans le composteur que surveille le claviste. Lorsque la ligne est complète, une manœuvre l'envoie sur un autre circuit tandis que l'opérateur en entame une autre.

La ligne de matrices est automatiquement amenée contre des mâchoires, préalablement réglées à la justification désirée. Les espaces bandes sont alors enfoncés plus profondément jusqu'à ce qu'ils bloquent parfaitement la ligne. Elle se présente devant le creuset de plomb fondu où l'alliage est maintenu à une température de 275 °C environ par un système de chauffage électrique ou au gaz. Le plomb injecté forme la ligne, cette fois en relief. Le passage entre des couteaux ajuste exactement sa hauteur. Elle tombe dans la galée où l'attendent les lignes déjà composées.

Pendant ce temps, aiguillés par leurs crans, matrices et espaces bandes sont remontés dans leurs magasins respectifs, prêts à un nouvel usage.

Chaque article est ainsi composé dans un caractère particulier à chaque machine : les magasins sont interchangeables. La Linotype présente l'inconvénient d'exiger le remplacement de la ligne complète (voire de plusieurs en cas d'oubli d'un mot) pour la correction d'une faute. Un linotypiste peut ainsi « descendre » de 6 000 à 9 000 signes à l'heure.

Apparue en même temps que sa concurrente, la *Monotype* comporte, elle, deux éléments séparés : un clavier de quelque 300 touches, correspondant à plusieurs alphabets, et une fondeuse. Par un poinçon à air comprimé, le claviste perfore une bande de papier qui commande la fondeuse. Les caractères sont, cette fois, fondus un à un et alignés dans la justification. Les trous de justifi-

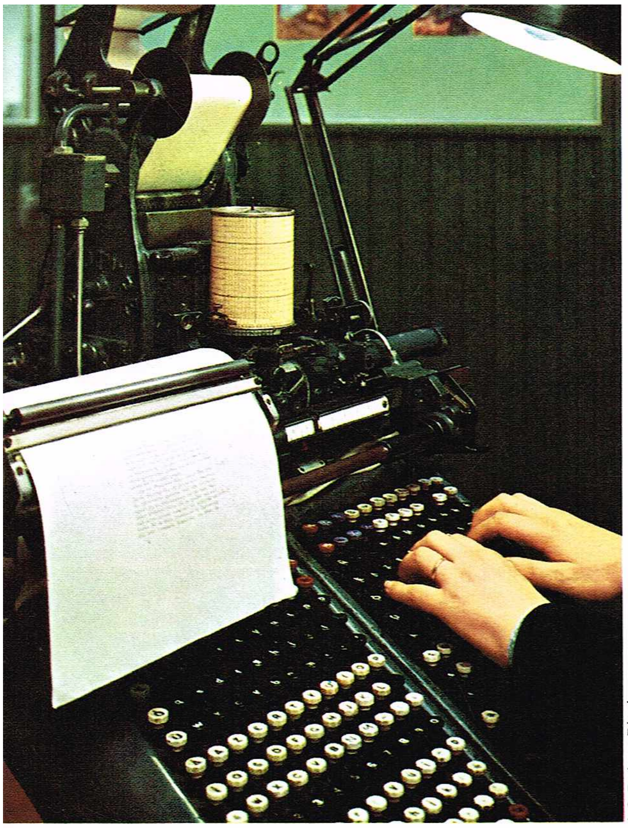

I.G.D.A. - Rizzi

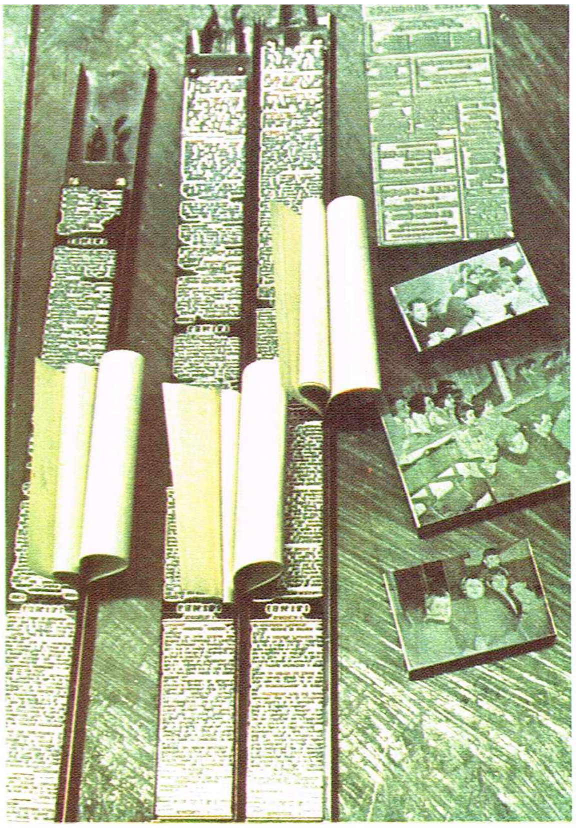

C. Michel - Explorer

◀ *A gauche, un clavier de* Monotype ; *ce type de clavier comporte environ 300 touches correspondant à plusieurs alphabets ; par l'intermédiaire d'un poinçon à air comprimé, le claviste perfore une bande de papier qui commande la fondeuse de caractères d'imprimerie. A droite, sur le marbre, on peut observer du texte composé en* Linotype *(à gauche) et prêt à être mis en page, avec en haut un cliché trait et en bas trois similis.*

cation portés sur la bande par le claviste, en fin de ligne, déterminent la largeur des espaces entre les mots.

La Monotype présente les avantages d'une correction possible lettre par lettre et d'une rapidité plus grande, mais les caractères mobiles sont difficilement maniables, et la Linotype lui est préférée dans la presse : les machines à lignes blocs sont les plus utilisées dans les journaux à composition typographique.

La composition en lignes blocs de plomb a, enfin, subi de nouveaux perfectionnements avec le développement de machines au clavier déconnecté, comme sur la Monotype. La frappe de l'opérateur limitant les possibilités de la machine à composer, les deux fonctions sont séparées : le claviste perfore une bande qui commande la fondeuse. Une même machine peut ainsi traiter la production de plusieurs opérateurs. La bande permet en outre l'éventuelle commande d'une fondeuse à distance, système utilisable par exemple depuis un bureau détaché pour les éditions régionales. Certains systèmes sophistiqués admettent aussi la correction entre la frappe et la fondeuse.

La mise en page

La mise en page est l'opération qui donne à une publication sa personnalité.

Le metteur en page dispose titres et colonnes de texte dans un châssis au format du journal, et cela en fonction des indications d'une maquette préparée par un journaliste secrétaire de rédaction. Les lignes sont séparées et bloquées en largeur par des bandes de plomb, ou par des filets dont le relief marquera, à l'impression, un trait plus ou moins gras. La page est également calée en hauteur par de minces lames, coincées entre les lignes, puis serrée grâce à un système de crémaillères prévu sur les côtés du châssis et entraîné par une clef à pignon denté.

La page est encrée. Une première épreuve est tirée, la « morasse », grâce à laquelle on peut apporter les ultimes corrections avant le « bon à tirer ». La page ainsi confectionnée constitue la forme prête à l'impression.

L'impression typographique

La table où s'effectue le montage de la page a conservé son nom depuis l'époque de Gutenberg : c'est le « marbre », mot aujourd'hui bien impropre à désigner les vastes surfaces métalliques des ateliers. Le marbre ne sert plus qu'à la mise en forme, non à l'impression.

En revanche, la presse à bras de Gutenberg comporte, effectivement, au début, une plaque de marbre dont la surface, lisse et rigide, porte la forme imprimante, plane, encrée. La feuille de papier est appliquée et serrée par une vis à main descendant une platine comme un pressoir. Le papier, pris dans cet étau, reçoit l'encre. Le procédé n'est, évidemment, pas rapide (300 feuilles par jour). Il faut deux applications successives pour obtenir une bonne impression.

Le système « plan contre plan », dérivé de cette presse initiale, n'a connu qu'un développement relatif par rapport à deux procédés plus rapides : « plan contre cylindre » et surtout « cylindre contre cylindre ».

▼ *La presse à bras dans un atelier d'imprimerie du début du XVI*e *siècle (miniature du* Recueil des chants royaux, *Bibliothèque nationale, Paris).*

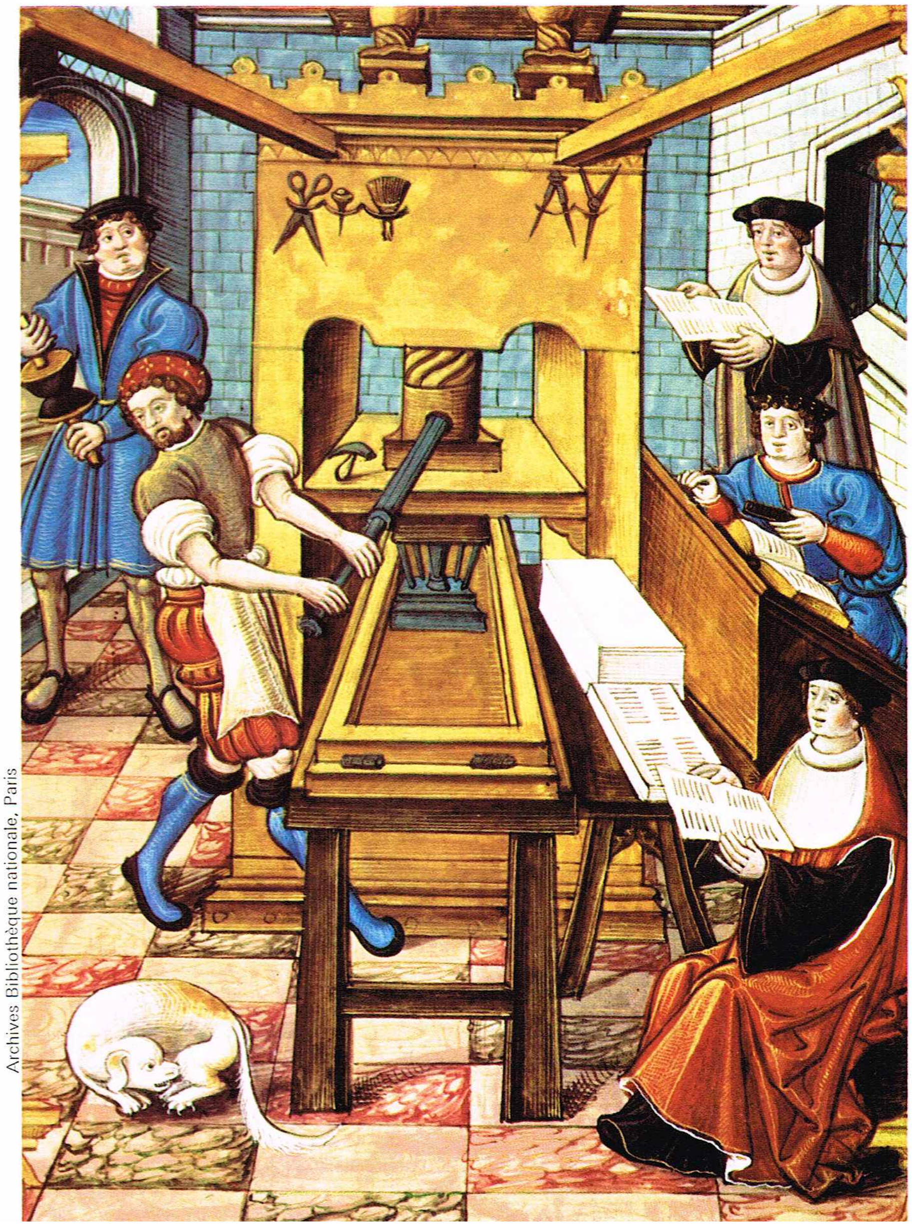

Archives Bibliothèque nationale, Paris

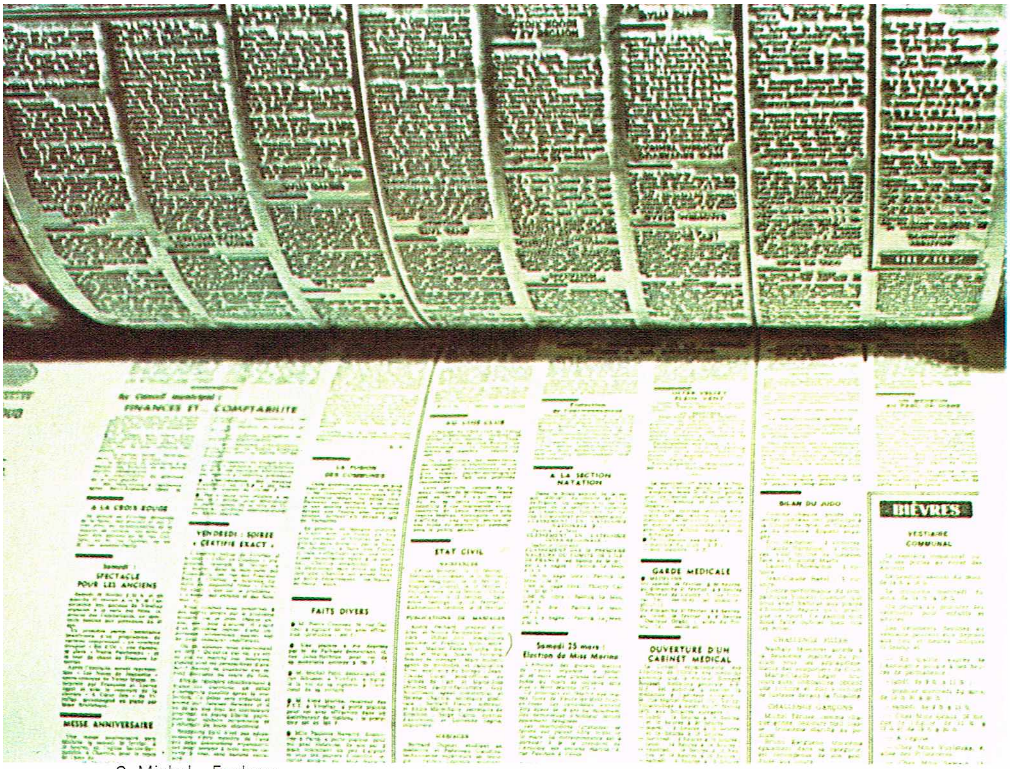

C. Michel - Explorer

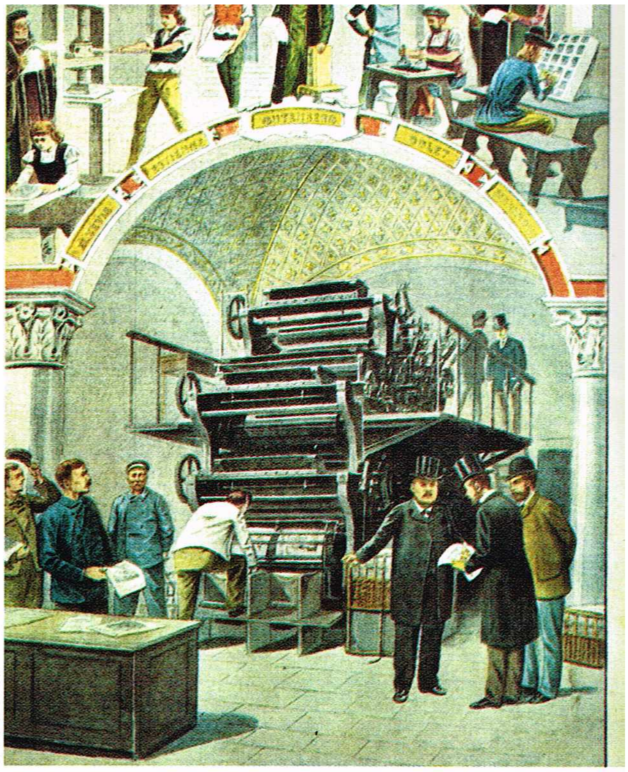

E. Rousseau - Archives Snark

▲ *A gauche, l'impression typographique par le procédé « cylindre contre cylindre » : le cliché stéréo ou stéréotype ajusté sur le cylindre du haut permet l'impression du papier amené par le cylindre du dessous. A droite, une illustration du* **Petit Journal** *de 1901 relative à la machine rotative mise au point en 1866 par Marinoni pour ce même quotidien.*

Le procédé « plan contre plan »

Les perfectionnements décisifs du système d'impression « plan contre plan » n'interviennent qu'au XIXe siècle avec l'apparition de presses où platine et marbre, tous deux mobiles et montés sur un axe, se ferment l'un sur l'autre comme un livre.

L'effet d'inertie qui intervient à chaque période du mouvement alternatif a limité son utilisation à de petits formats (platine et forme moins lourde) et à des cadences qui ne sont nullement compatibles avec les exigences de la grande presse. Le développement de ce premier procédé est d'autant plus limité qu'apparaît le principe « plan contre cylindre ».

Le procédé « plan contre cylindre »

La forme est placée sur un plateau dont le va-et-vient latéral l'amène, successivement, sous les rouleaux encreurs, puis sous un cylindre tournant autour d'un axe fixe et portant la feuille de papier.

Les machines « plan contre cylindre » sont de deux types : dans les presses à arrêt de cylindre, ce dernier est stoppé au retour de la forme, un évidement du cylindre permettant le passage. Dans la machine à mouvement continu, le cylindre tourne sans arrêt. Il se soulève légèrement pour permettre le retour de la forme vers la prise d'encre (il fait alors deux tours dont un à vide), ou bien il comporte un évidement sur une partie de sa surface.

Outre ce changement de principe, les dispositifs d'impression connaissent des modifications de détail qui n'en apportent pas moins de sensibles améliorations de fonctionnement : c'est l'encrage, par des rouleaux superposés qui amènent l'encre de l'encrier jusqu'à la forme en permettant une égale répartition sur toute la surface ; c'est la mise au point d'un système de griffes qui plaquent la feuille de papier sur le cylindre de pression.

On met au point aussi la coordination, grâce à une crémaillère à double denture, de l'ensemble de la machine : plateau portant la forme, cylindre porte-papier, cylindres encreurs. Et, en 1814, l'Allemand Kœnig équipe le quotidien londonien *Times* de la première presse mécanique à vapeur permettant le tirage de 1 100 feuilles à l'heure.

Le procédé « cylindre contre cylindre »

Pour passer des quatre à cinq mille exemplaires par heure, autorisés par les procédés « plan contre plan » et « plan contre cylindre », aux dizaines, voire aux centaines de milliers de journaux imprimés dans l'espace d'une nuit, il est nécessaire de remplacer le mouvement alternatif, dont les effets d'inertie limitent la vitesse, par le mouvement circulaire continu, pour la forme imprimante comme pour le cylindre amenant le papier ; c'est le principe « cylindre contre cylindre ». Les machines de ce type sont connues sous le nom de *rotatives*.

Dès le XIXe siècle, on comprend le progrès qui pourrait être ainsi réalisé, d'autant plus que l'on connaît déjà la manière d'imprimer de la sorte les tissus.

★ *De la forme plane au cliché stéréo*

La difficulté réside dans la transformation de la forme de plomb, plane et rigide. Les premières tentatives consistent à fixer la forme sur un cylindre de grand diamètre en coinçant, entre les colonnes des pages, des filets en coin qui bloquent les lignes, présentant ainsi au papier une suite de facettes. Le papier, lui, est pressé par un autre cylindre de taille ordinaire, donc plus petit. Pour améliorer le rendement, on pense à placer, autour du gros cylindre, plusieurs petits cylindres : jusqu'à dix, qui permettent une cadence de vingt mille pages à l'heure (mais l'alimentation en papier pose à son tour des problèmes). Il suffit d'utiliser des bobines débitrices à la place des feuilles, en tenant compte que leur nombre est nécessairement limité.

C'est la découverte d'un procédé permettant de passer de la forme plane à une autre, demi-cylindre, également en plomb, le cliché stéréo, qui permet le développement de la rotative « typo ». L'invention est utilisée pour la première fois par le *Times*, et le constructeur Marinoni met au point pour *Le Petit Journal* la première machine rotative française. Le passage d'une forme à l'autre nécessite un intermédiaire : le flan, feuille cartonnée, humidifiée, épaisse de quelques dizièmes de millimètres, qui prend l'empreinte de la page sous une forte pression.

Le texte de la page s'inscrit en creux dans le carton qui sert de moule à la forme demi-cylindrique. C'est de nouveau un alliage de plomb qui est injecté dans le creux. Nettoyé, mis au calibre, le cliché stéréo ainsi obtenu est ajusté sur le cylindre de la rotative.

★ *La rotative*

Notre description des différents principes d'impression suivait jusqu'ici, bien entendu, le traitement d'un seul exemplaire sur une seule face de la feuille. Le mécanisme est beaucoup plus complexe, qui permet de tirer, à la fois, toutes les pages d'un journal. La rotative prend alors des dimensions énormes.

Le papier, qui se dévide de bobines, est appliqué par le cylindre de pression sur le cliché, encré par une série de rouleaux, comme nous l'avons décrit précédemment. Le cylindre de pression est recouvert d'une garniture présentant une certaine élasticité. Sur les rotatives larges, on peut imprimer deux journaux à la fois : chaque cylindre porte, en largeur, les stéréos de quatre pages, réparties de manière à permettre l'impression par cahiers : la première à côté de la dernière, la deuxième à côté de l'avant-dernière, etc. ; l'ensemble de deux cylindres porte-clichés nécessaires à l'impression recto verso, alimenté par une bobine débitrice, constitue un *groupe*. L'importance d'une machine est proportionnelle au nombre de groupes, donc au nombre maximum de pages du journal.

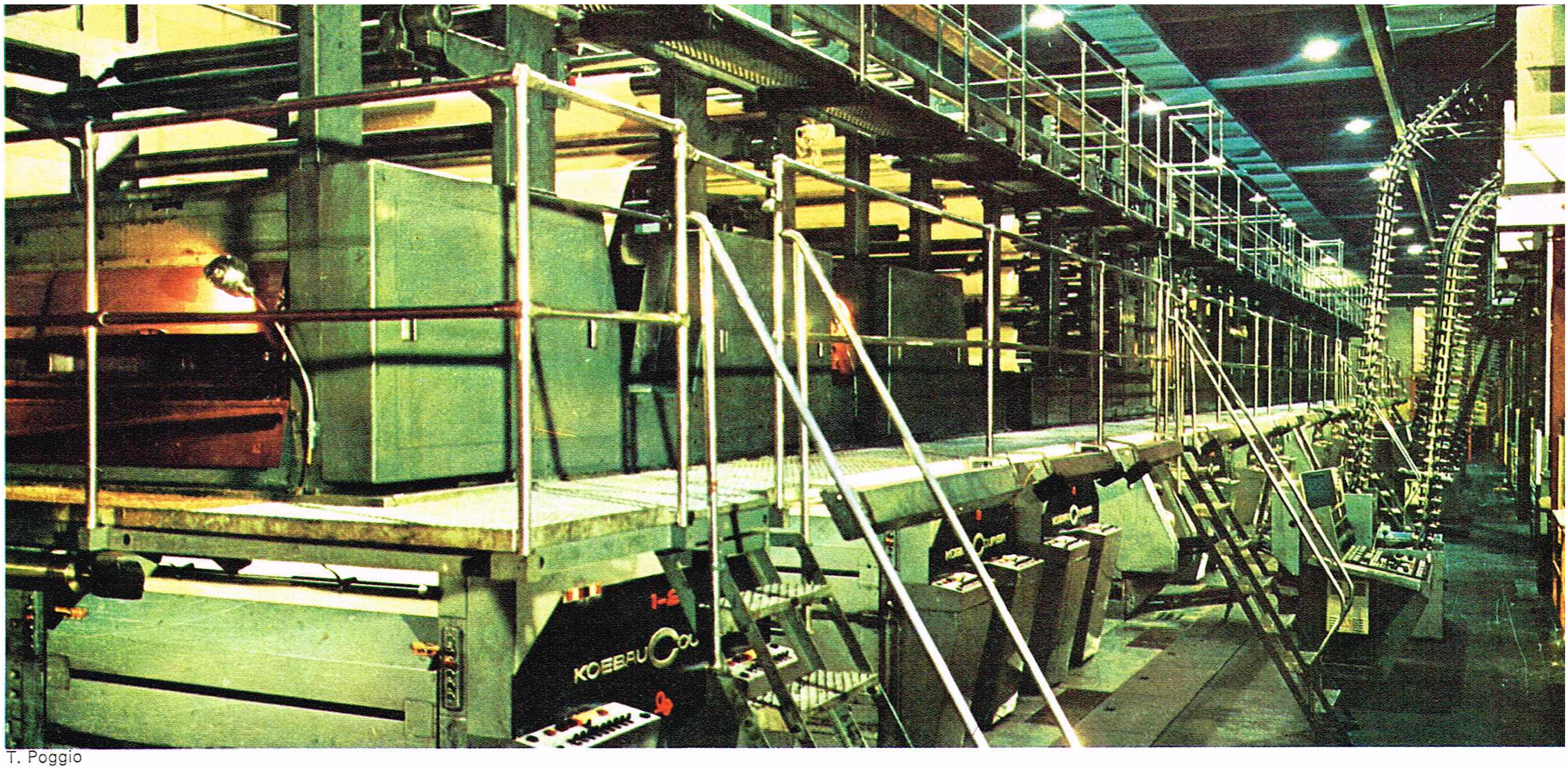

T. Poggio

▲ ***La rotative à cylindres servant à l'impression typographique du quotidien* La Stampa *à* Turin *; jusqu'à ces dernières années, le procédé typographique est resté le plus utilisé par la grande presse, et l'importance des équipements explique que l'édition des journaux soit l'apanage d'entreprises importantes.***

Les cylindres sont entraînés par des roulements à billes baignant dans l'huile de carters. Les différents groupes et les dispositifs de sortie : pliage, coupage, sont synchronisés. L'impression d'une deuxième couleur, nécessitant un passage supplémentaire, réduit d'autant la pagination. Les bandes des différents groupes sont superposées en sortie : le passage sur une molette coupante sépare les pages des deux exemplaires tirés simultanément. Chaque demi-bande est pliée dans le sens longitudinal, coupée par hauteur de journal, et dans le cas du grand format, le plus courant, pliée une nouvelle fois en hauteur. Dans cette présentation, les exemplaires sont prêts pour l'expédition : le plus souvent, un système de courroies, munies de pinces, achemine les exemplaires vers un atelier voisin en un impressionnant ruban, passant parfois au-dessus de la rotative. Ils y sont regroupés par paquets pour le transport. Dans le cas d'éditions successives, régionales par exemple, seuls les clichés des pages modifiées sont changés. Et les opérations de montage de clichés sont souvent plus longues que le tirage lui-même : sur une rotative double largeur, le rythme de 50 à 60 000 journaux à l'heure est facilement atteint. Sur ces modèles, le papier d'une largeur de 169,5 cm est dévidé en bobines de dix à onze kilomètres. Les bobines peuvent être changées sans que le rythme de production soit ralenti.

Dans le cas d'impression « en creux » (héliogravure) et non plus en relief, ou selon le procédé « à plat » offset, le système d'accrochage des formes circulaires diffère de celui des clichés typographiques. Mais les principes de fonctionnement de la machine rotative demeurent les mêmes.

L'impression typographique est demeurée, jusqu'à ces dernières années, le procédé le plus utilisé par la grande presse. Et la masse d'équipements nécessaires explique que l'édition de journaux soit l'apanage d'entreprises importantes.

La « Galaxie Gutenberg », comme l'appelle le philosophe Marshall McLuhan, est, pour lui, cette ère, à son déclin, où la conscience de l'homme a été structurée par l'écriture, par l'imprimerie. Sur le plan technologique, le nom de Gutenberg est associé à l'emploi du plomb. Et cette ère-là, aussi, est à son déclin, après un demi-millénaire.

La lumière

Une autre invention est à l'origine de la nouvelle ère : celle de la photographie; l'utilisation de la lumière devient le principe de base, d'abord de l'illustration pour les textes au plomb — c'est la *photogravure* —; de la composition des textes — la *photocomposition* —; de la préparation des formes pour les nouveaux procédés d'impression héliogravure et offset, enfin pour les techniques de reproduction en nombre limité d'exemplaires — la *photocopie*.

La photogravure

L'illustration des textes typographiques

L'utilisation des caractères moulés a relayé, on l'a vu, le procédé de xylographie pour l'impression des textes. En revanche, la plaque gravée demeure, jusqu'au XIXe siècle, la seule possibilité d'illustration par impression typographique : les plaques de bois en relief sont incluses dans les formes. Mais le bois s'use vite; et la préparation est longue. La multiplication des exemplaires entraîne donc l'utilisation d'un autre matériau, le métal. Firmin Gillot, un graveur précisément, pense que la meilleure manière de dégager de larges surfaces métalliques avec un contrôle continu de la réaction consiste à utiliser un acide. Les parties qui doivent demeurer en relief sont protégées de la morsure par un vernis dont on recouvre le dessin.

L'application des découvertes de Niepce et Daguerre transforme ce procédé, manuel et encore rudimentaire, en ce qui devient la photogravure.

Le principe de la photographie : la réaction de certaines substances à la lumière, est utilisé deux fois de suite. La première opération consiste simplement en une photographie du document à reproduire : le banc de reproduction permet l'agrandissement ou la diminution. Le négatif ainsi obtenu sur plaque de verre ou sur film est identique à ceux que réalisent les photographes. Il doit être développé. Au cours du passage au « révélateur », les sels d'argent (bromures, iodures, chlorures) transformés par l'exposition à la lumière apparaissent en sombre là où le document original est clair, et réciproquement. Le « fixateur » immobilise la réaction. La seconde opération fait passer l'image sur la plaque métallique (zinc). Celle-ci est recouverte d'une fine couche colloïdale (gélatine contenant des bichromates alcalins) qui possède la propriété de durcir et de devenir insoluble sous l'action de la lumière.

Le négatif obtenu lors de la première opération est placé au contact de la plaque, qui est insolée. Les parties claires du négatif laissent passer la lumière, et la gélatine réagit; les parties opaques arrêtent le faisceau, et la couche demeure fragile. La plaque est passée à l'eau, et la solution disparaît, laissant le métal à nu là où elle n'a pas durci sous l'action de la lumière. Le zinc est ensuite trempé dans un bain acide. Il est attaqué dans les zones où il n'est pas protégé par la gélatine, et le tracé se dégage en relief, prêt pour l'encrage. Le document original est ainsi restitué.

Ce procédé est valable pour rendre les blancs et les noirs. Pour représenter les teintes grises plus ou moins soutenues, le dessin original doit comporter des hachures plus ou moins serrées — ce type de plaque est appelé *cliché au trait*.

La reproduction des photographies

Mais ce procédé ne peut permettre sans aménagement la reproduction d'une photographie avec ses nuances,

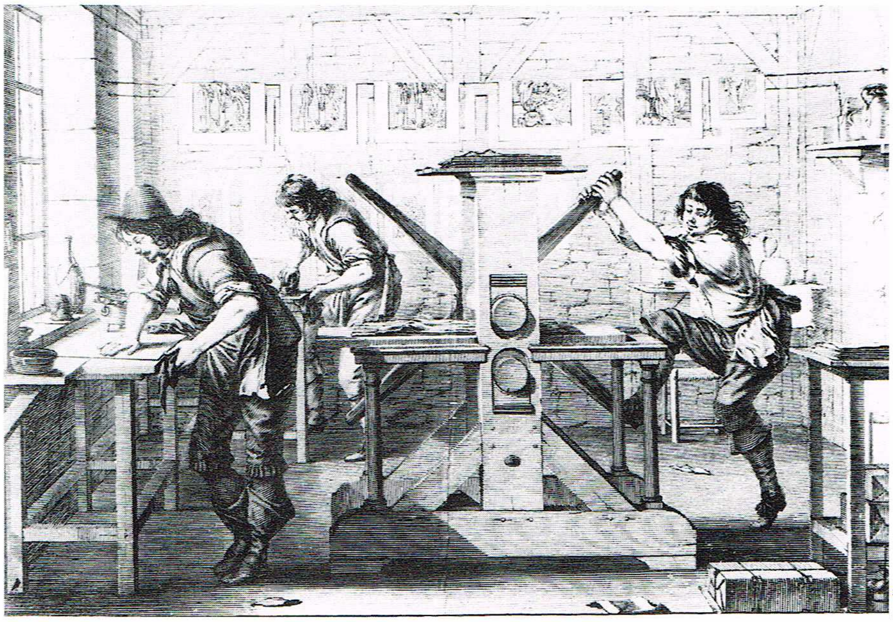

▲ *Atelier d'imprimerie des planches en* taille-douce ; *à l'inverse du procédé typographique, ce sont les parties en creux de la forme en cuivre qui reçoivent l'encre (musée Carnavalet).*

ses ombres, essentielles pour la restitution du document. Il faut utiliser une technique intermédiaire, découverte en 1850 par l'Américain Ives : la trame. Il s'agit d'une grille aux traits opaques, au réseau très fin, qui est intercalée, lors de l'exposition du négatif, entre l'original et la surface photosensible. La trame découpe le négatif en petits carreaux. Lors de la photographie sur le négatif, les surfaces blanches de l'original, qui réfléchissent fortement la lumière, inscrivent nettement les contours de la grille, les surfaces noires ombrent les formes de la trame, et les teintes intermédiaires rendent la surface du négatif plus ou moins obscure entre les points. Sur le zinc, les gris sont restitués par la densité plus ou moins grande des surfaces en relief : les foncés reçoivent plus d'encre que les clairs. Après impression, le pouvoir séparateur de l'œil n'est pas suffisant pour distinguer la multitude des points de la photographie restituée. Le cliché ainsi obtenu par l'intermédiaire d'une trame prend le nom de similigravure ou *simili*.

Lors du montage de la page, les clichés de zinc, représentant dessins ou photographies, sont intercalés parmi les textes. Pour l'impression sur rotatives typographiques, leur relief est imprimé dans le flan comme celui des caractères de plomb. Il apparaît sur le cliché demi-cylindrique placé sur la rotative.

Le procédé d'impression en « héliogravure »

L'utilisation de la lumière pour la gravure du métal, comme en photogravure, permet l'utilisation industrielle de procédés très anciens d'impression « en creux » : la « taille-douce » et l' « eau-forte ». Le principe est exactement inverse de celui de l'impression typographique : ce sont les parties en creux de la forme qui reçoivent l'encre. La taille-douce exige l'emploi d'un burin pour la gravure de la forme en cuivre. L'eau-forte reprend le procédé de gravure par acide de Firmin Gillot avec cette différence que les parties protégées par le vernis sont, cette fois, celles qui n'apparaissent pas à l'impression.

La rotative en héliogravure comporte des cylindres recouverts de cuivre, gravés, qui constituent les formes. Le cylindre baigne dans un bac à encre où s'emplissent les creux, et une languette râcle la forme afin d'éliminer l'encre des parties en relief. Le papier, fortement appliqué sur la forme, reçoit l'encre qui se diffuse comme dans un buvard, donnant une impression de qualité supérieure à celle de la typographie.

L'utilisation des gélatines employées en photogravure a permis de développer l'héliogravure : la gravure au burin des cylindres de cuivre restreignait auparavant son utilisation. Mais un aménagement du procédé a été nécessaire pour deux raisons : l'application régulière de la substance colloïdale sur un cylindre est malaisée, et, sur un cylindre, une surface importante légèrement creuse ne peut conserver l'encre. L'utilisation de la trame et d'un papier support permet de résoudre ces problèmes. La préparation du cylindre de cuivre s'effectue, en effet, par l'intermédiaire d'un « papier charbon » comportant une gélatine photosensible qui subit deux insolations successives :

— la première à travers une trame dont, cette fois, les traits sont transparents, alors que les carreaux sont opaques. Cette exposition durcit, dans l'épaisseur de la couche sensible, un treillis insoluble qui, plus tard, lors de l'attaque du cylindre par l'acide, dessine dans le cuivre des alvéoles réguliers d'où l'encre ne peut s'échapper ;

— la seconde insolation de la couche sensible s'effectue à travers un « positif » transparent des documents à reproduire : photos, non tramées cette fois, textes écrits en positif sur le film, obtenus soit en photocomposition, soit en tirant une épreuve des textes au plomb, sur une feuille de papier cellophane. La lumière qui traverse le positif durcit plus ou moins l'intérieur des cheminées dessinées par la trame : les parties noires du document correspondent aux zones non insolées, les gris durcissent plus ou moins profondément la couche. Le papier charbon est appliqué sur le cylindre, la gélatine au contact du métal qu'elle recouvre. Papier et solution non durcie partent à l'eau chaude.

Après délimitation exacte des surfaces à imprimer par un bitume protecteur, dont on recouvre les marges, commence la gravure proprement dite. Le graveur verse sur le cylindre une solution acide dont il peut modifier la concentration. L'acide élimine progressivement la gélatine et attaque le métal plus ou moins rapidement, en fonction de la couche qui subsiste. Il creuse des alvéoles plus ou moins profonds correspondant aux différentes nuances : les creux les plus importants atteignent 3 à 4 centièmes de millimètre. La profondeur des alvéoles détermine la quantité d'encre qui y pénètre, donc l'intensité des couleurs.

Le cylindre est monté sur la rotative dont la structure diffère un peu de celle du procédé typographique : la prise d'encre surtout. La constitution en groupes est la même, mais le papier est fortement pressé sur la forme, ce qui lui permet de recueillir une encre très fluide, qui exige un séchage en sortie de cylindre. Après utilisation, le cylindre est regarni de cuivre par un procédé électrolytique.

La longue préparation des cylindres et les opérations successives limitent l'utilisation de l'héliogravure à un secteur de la presse, les périodiques, où la qualité d'impression prend plus d'importance que la rapidité d'exécution. Ainsi, l'impression de textes par l'héliogravure n'est pas compétitive par rapport aux autres procédés. En revanche, cette technique est employée en particulier pour revues et magazines aux illustrations nombreuses et de qualité soignée.

La photocomposition

La photocomposition est le procédé qui consiste à envoyer sur un papier sensible l'image des caractères composant les mots. Dès 1890, un Anglais, Friese Green, entreprend des recherches sur les moyens de composer des textes photographiquement, mais c'est en 1956 seulement qu'apparaissent sur le marché les premières photocomposeuses.

En fait, la photocomposition doit son développement à l'utilisation, en aval, de moyens d'impression qui permettent eux aussi la reproduction des textes par le procédé photographique, l'offset surtout.

L'invention de la photogravure permet déjà la reproduction de textes sans l'intermédiaire de la composition typographique, car ils sont alors traités comme des clichés au trait. Mais, la plupart du temps, l'abandon du procédé typographique pour la composition s'accompagne de la réforme du matériel d'impression.

La frappe directe

La photocomposition est une forme de composition froide, par opposition à la composition chaude (au plomb) ; elle n'est pas la seule. La frappe directe sur papier, ou sur un support translucide, par une simple machine à écrire, en est une autre. De nombreuses publications : journaux d'associations, polycopiés, circulaires, sont ainsi éditées.

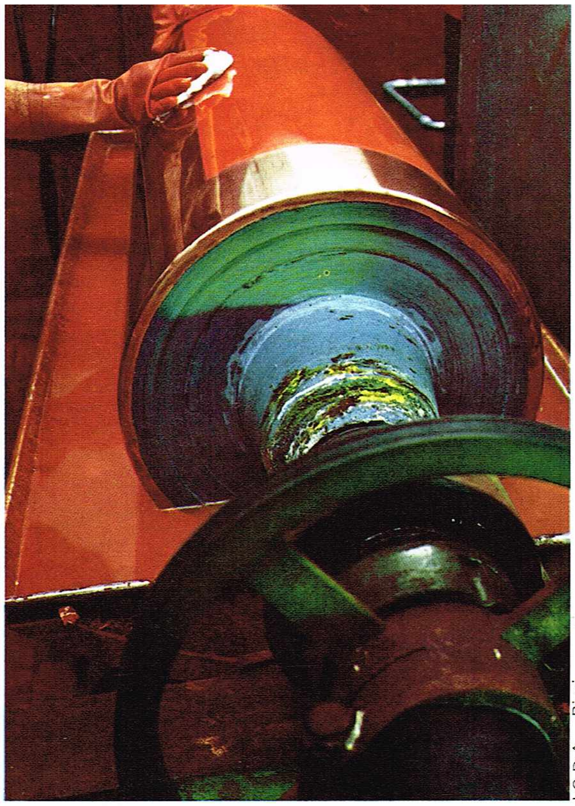

I.G.D.A. - Rizzi

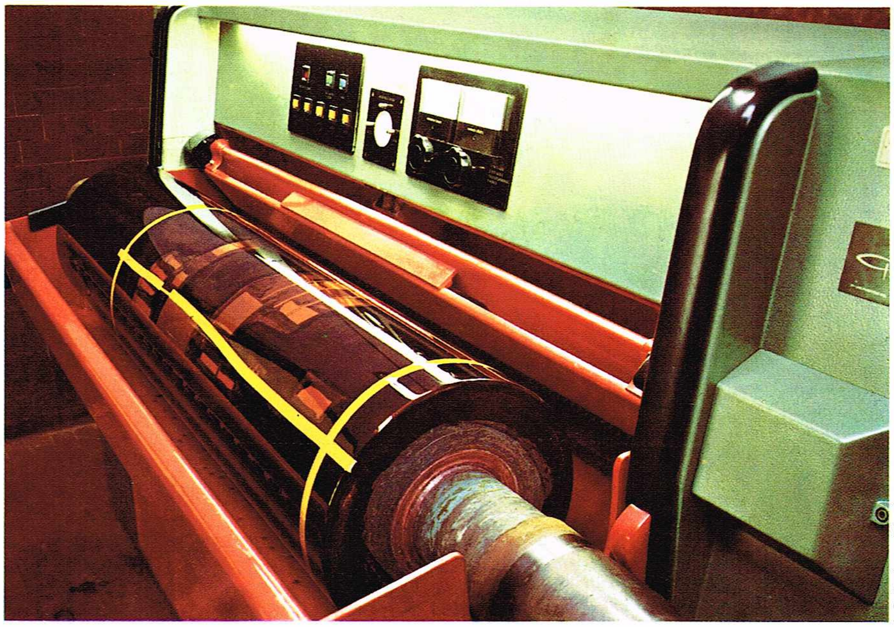

I.G.D.A. - Rizzi

Les professionnels de l'imprimerie en ont perfectionné le système, pour permettre la justification. Les machines « Varityper », « Multipoint »... sont équipées d'un clavier de machine à écrire. Elles utilisent la double frappe directe. L'opérateur tape son texte une première fois. En fin de ligne, un dispositif l'avertit qu'il lui faut éventuellement couper un mot. La deuxième frappe permet la répartition des espaces entre les mots. Le système est long, difficilement compatible avec les exigences de la presse.

En revanche, les modèles les plus récents de machines à écrire, assistées par informatique, sont utilisables par les petits journaux... en même temps qu'ils amènent une révolution dans le domaine du secrétariat.

La « Lumitype »

Dans la grande presse, c'est la photocomposition qui amène une révolution. Si la composition typographique a progressé sensiblement avec l'introduction de l'automatisation et de l'électronique, son évolution est sans commune mesure avec celle qu'a connue, en vingt années seulement, le procédé présenté pour la première fois en 1956 avec la « Lumitype 200 », œuvre des ingénieurs français René Higonnet et Louis Moyroud.

Le principe en est le suivant : un flash au xénon envoie, vers un papier photosensible, un éclair, à travers un disque matrice opaque sur lequel se découpent les caractères. Le disque tourne à la vitesse d'environ 1 800 tours par minute. L'éclair du flash est déclenché au moment où le caractère à imprimer passe devant un objectif, ou zoom, qui donne à la lettre la grosseur demandée. L'image du caractère est projetée vers un prisme qui la renvoie sur un papier sensible. Le prisme avance d'un cran à chaque commande, composant ainsi la ligne. Un système d'entraînement du papier sensible permet de passer de ligne en ligne.

En amont de cette unité photographique, qui constitue l'innovation de la machine, un opérateur frappe le texte sur un clavier. Il obtient un exemplaire de contrôle, mais la copie est enregistrée par un calculateur qui additionne les chasses (largeurs) des différents caractères. L'opérateur décide de la coupure de mot en fin de ligne. Le passage à la suivante déclenche la commande du calculateur qui répartit les espaces entre les mots et déclenche le fonctionnement de l'unité photographique.

Les premiers perfectionnements apportés sont d'ordre mécanique : le disque matrice tourne plus rapidement. Il comporte des alphabets concentriques, puis quatre alphabets sur chaque circonférence. Sur certains modèles, le disque est remplacé par un cylindre, le flash se trouvant au centre.

▲ ***Deux étapes de l'impression en héliogravure** : à gauche, le cylindre de cuivre recouvert de papier charbon à la gélatine préalablement insolée est nettoyé à l'eau chaude qui élimine le papier et la gélatine non durcie ; à droite, dans une étape ultérieure, le cylindre est placé dans une machine qui verse de l'acide, lequel enlève la gélatine restante et creuse le cylindre.*

▼ ***Une rotative à cylindres pour l'héliogravure ;** cette machine comprend huit éléments ; le pupitre visible au premier plan contrôle électroniquement la tension du ruban de papier et la viscosité de l'encre (Imprimerie I. G. D. A. à Novara, Italie).*

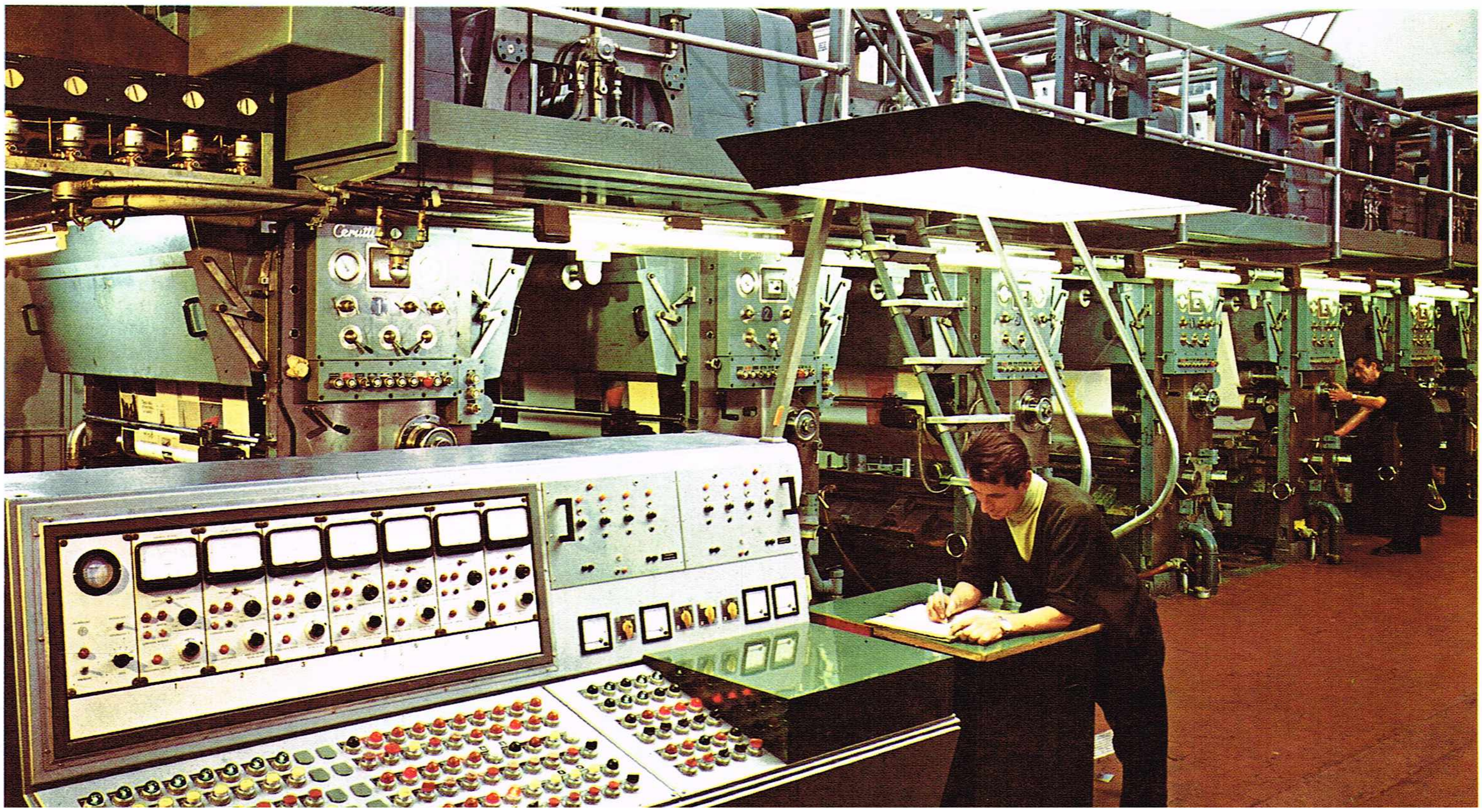

I.G.D.A. - Rizzi

I.G.D.A. - Rizzi

▲ *Utilisation d'une* **photocomposeuse Diatype** *(Imprimerie I. G. D. A. à Novara, Italie).*

En même temps, la commande directe par l'opérateur est abandonnée. Le clavier est déconnecté. Les instructions et le texte sont enregistrés sur une bande perforée ou dans la mémoire d'un ordinateur : car l'imprimerie n'a pas échappé au développement de l'informatique. Pour la commande automatisée des linotypes déjà, des programmes de coupures de mots ont été mis au point, qui gèrent la justification. En photocomposition, le claviste entre en mémoire le texte « au kilomètre ». L'ordinateur se charge d'adresser ensuite à la photocomposeuse les indications pour que le texte sorte justifié. Le rythme atteint pour certaines de ces machines 300 à 400 000 caractères à l'heure.

Les photocomposeuses à tube cathodique

L'étape suivante, en matière d'innovation, consiste à remplacer les éléments mécaniques de la photocomposeuse par l'électronique — et ce procédé permet toutes les fantaisies. C'est un tube cathodique qui remplace flash et disque matrice. Le traitement du signal électronique permet de faire varier la chasse du caractère, sa graisse, et même éventuellement de le déformer : on peut ainsi obtenir un « italique électronique ».

Certaines de ces photocomposeuses atteignent la cadence de 10 millions de caractères à l'heure, 5 000 lignes journal à la minute.

Enfin, il existe sur le marché un certain nombre de lecteurs optiques remplaçant l'introduction des textes par clavier. La copie de la rédaction, qui doit respecter quelques règles de présentation, est analysée par une tête de lecture sur certains modèles, par un rayon laser sur d'autres. La reconnaissance de lecture s'opère par analyse du trait ou par la « meilleure concordance » entre le signe présenté et les indications en mémoire. La vitesse de lecture va de 100 à 1 000 corps par seconde avec un taux d'erreur de l'ordre de 0,00001. Les caractères digitalisés (c'est-à-dire traduits en langage binaire) sont envoyés sur tube cathodique pour être photocomposés.

Une nouvelle ère

L'introduction de la photocomposition, mais surtout de l'informatique, dans une entreprise de presse bouleverse complètement le travail des différents corps de métier.

En amont de la composition, les innovations nécessitent des changements d'habitudes. En publicité, par exemple, les petites annonces, introduites au fur et à mesure en mémoire, sortent classées, et on peut même accorder la priorité aux clients les plus assidus. Dans le même temps, le calculateur peut assurer la facturation immédiate.

Dans le cas de l'utilisation de moniteur vidéo, la rédaction, voire un bureau détaché s'il est équipé d'un terminal, peut contrôler son texte, le corriger avant la composition. Le secrétariat de rédaction peut prévoir des blancs lors de la composition, jouer avec différents caractères.

L'atelier ressemble plus à un laboratoire qu'aux salles des anciennes linotypes où le cliquetis des matrices, la chaleur moite du plomb fondu créaient une ambiance très particulière. L'introduction des textes « au kilomètre » a réduit le nombre de clavistes à quelques-uns, encore moins, bien sûr, dans le cas de lecteurs optiques. Aussi les linotypistes qualifiés, hier indispensables, risquent d'être remplacés par des dactylographes sans spécialité.

L'information, stockée sur disque ou bande magnétique, est codée selon sa page de destination. Elle est corrigée et éditée sur écran cathodique sans aucune manipulation. Tous les ordres sont donnés à partir des pupitres. Une seule photocomposeuse moderne suffit à la sortie des textes d'un journal, et si les entreprises sont, en général, équipées de deux machines semblables, c'est plus par sécurité, en cas de panne, que pour augmenter la capacité. A la commande, la photocomposeuse sort les textes d'une même page. Ils peuvent être imprimés sur papier ou directement sur film transparent. La largeur de sortie dépend du type de machine : une ou plusieurs colonnes du journal.

Le montage de la page s'effectue aux ciseaux et à la colle, avec l'aide d'une table lumineuse dans le cas de films transparents. Avec les premières photocomposeuses, c'est une opération délicate : la correction exige le découpage de la ligne présentant la faute et son remplacement, les blancs sont répartis dans la page, et ces collages minutieux exigent beaucoup de temps.

Avec les photocomposeuses à écran cathodique, en revanche, le montage est réduit au minimum : la disposition des blancs, les corrections sont intervenues avant l'envoi à la composition. Il suffit de coller les bandes, placer les photos (traitées par ailleurs) avant l'envoi de la page complète à la photogravure.

Sur les modèles d'avant-garde, la mise en page elle-même peut être informatisée : l'opérateur, qui entre le texte en mémoire, indique sa place dans la page. La largeur de sortie du texte est celle du format de la page : un « tabloïd » (petit format) sort en quarante secondes.

Un groupe de presse japonais, le premier au monde, a réussi, en 1976, à informatiser totalement les opérations de composition et de mise en page de ses journaux. Son système permet la composition et la mise en page de trente pages à l'heure, tout en prévoyant, par exemple, l'incorporation de nouvelles de dernière heure. Ces pages sont écrites en japonais dont les caractères étaient, jusqu'à présent, réputés impropres au traitement par ordinateur.

L'invention récente de la photocomposition et les formidables innovations qu'elle a subies en quelques années expliquent que les divers types de machines soient en service dans les entreprises de presse. Le choix d'un matériel qui se démode aussi rapidement est particulièrement délicat pour une entreprise moyenne. Son coût risque de précipiter concentrations et regroupements, au moins au niveau de l'élaboration technique.

L'introduction de l'informatique dans le domaine de la presse amène, en outre, les mêmes bouleversements que dans tous les secteurs d'activité en permettant le stockage des informations, la gestion informatisée des fichiers d'archives et la transmission des éléments par télé-informatique. Enfin, l'adoption de l'ordinateur pour le traitement des textes s'accompagne, le plus souvent, de son introduction dans la gestion de l'entreprise.

L'impression par le procédé « offset »

Alors que l'impression typographique et l'héliogravure utilisent un procédé physique, en relief ou en creux, l'offset, dérivé de la lithographie, fait appel aux caractéristiques chimiques de certains corps : la répulsion entre l'eau et les matières grasses.

La lithographie

C'est à un artiste bavarois, Aloys Senefelder, que l'on doit la découverte de la lithographie à la fin du XVIII^e siècle. Voulant imprimer ses œuvres, et n'ayant pas les moyens financiers de recourir à la typographie, il a l'idée de graver la pierre calcaire de son pays. C'est lors du lavage qu'il s'aperçoit de la répulsion entre l'eau et l'encre sur cette pierre. Il songe alors à utiliser cette caractéristique et renonce à la gravure. Il dessine un motif à l'encre grasse, écrit son texte sur la pierre. Puis il mouille cette dernière : à l'endroit des traits, l'eau ne peut se fixer; en revanche, partout ailleurs, elle s'incruste. Et, au passage du rouleau encreur, c'est le contraire : l'eau repousse l'encre; seuls les traits l'acceptent. L'application du

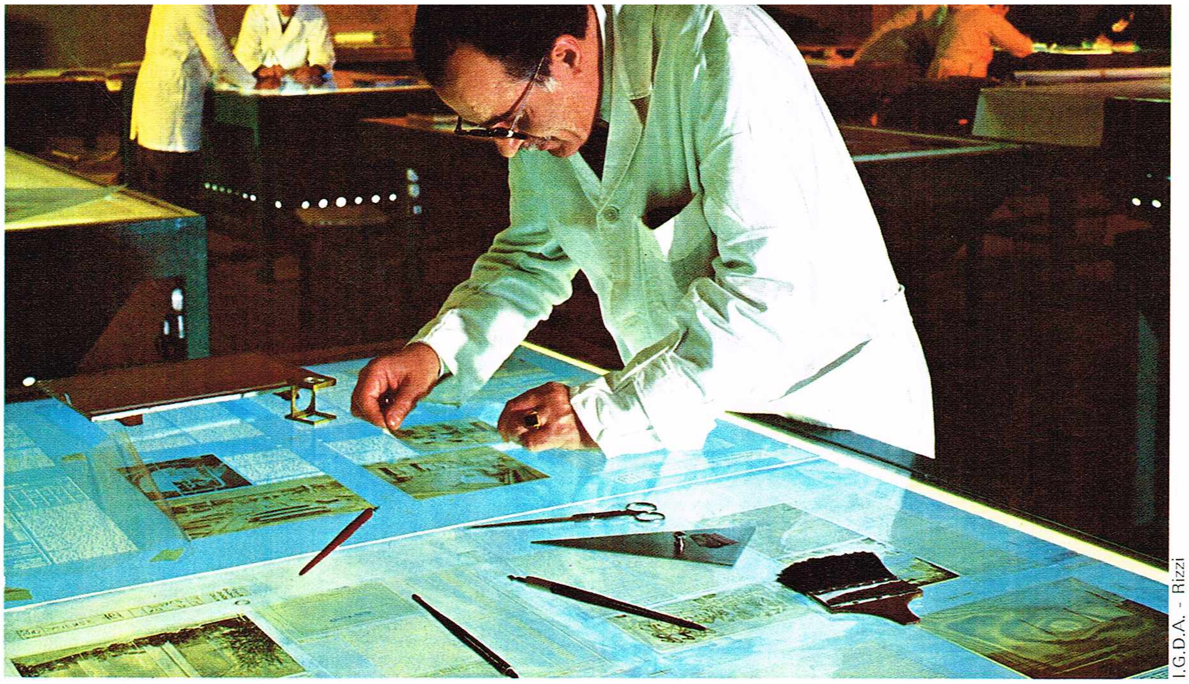

◀ *Dans le procédé offset, la page est constituée de films transparents comprenant des photos tramées et des textes frappés directement par la photocomposeuse ou rephotographiés après montage. La technique consiste ensuite à reporter sur une feuille métallique recouverte de substance sensible à la lumière (la plaque offset) l'image de la page montée (Imprimerie I. G. D. A. à Novara, Italie).*

papier donne de bons résultats. Le principe de la lithographie est découvert.

Il reste à la mécaniser, et on applique le procédé classique plan contre plan, puis plan contre cylindre (voir les paragraphes sur l'impression typographique). En même temps, on découvre que le zinc (d'une utilisation plus aisée) présente les mêmes caractéristiques que la pierre. Et comme une feuille de zinc s'enroule autour d'un cylindre, on peut utiliser ce nouveau procédé sur la presse rotative, à condition de prévoir, en plus des rouleaux encreurs, des rouleaux « mouilleurs ».

L'offset

Mais le procédé offset résulte d'une autre découverte, d'ailleurs tout à fait fortuite. En 1904, dans une imprimerie américaine, une machine, du type de celle décrite ci-dessus, tourne à vide, sans papier, si bien que l'encre se transfère sur le cylindre de pression, recouvert de caoutchouc. Lorsque l'on remet du papier, il s'imprime recto verso bien entendu, mais la qualité est meilleure du côté du caoutchouc, phénomène qui s'explique par la structure microscopique du papier : le cylindre métallique n'atteint que les « reliefs » du papier, alors que le caoutchouc fait corps avec lui. Ainsi naît le procédé « offset », mot anglais où intervient la notion de report, de décalque. Il comprend un cylindre supplémentaire entre le cylindre qui porte la plaque et le cylindre de pression : c'est le *blanchet*, qui reporte l'encre de la plaque sur le papier. Ce blanchet peut apporter une simplification du groupe rotative : c'est le principe « blanchet contre blanchet », où chacun des rouleaux de caoutchouc agit comme un cylindre de pression vis-à-vis de l'autre.

La préparation de la plaque offset

La préparation de la plaque offset consiste à reporter sur une feuille métallique (zinc ou aluminium) l'image de la page montée. Le film photographique constitue l'intermédiaire, comme pour la photogravure; on parle d'ailleurs de « photogravure offset », bien que la notion de gravure soit ici bien imparfaite.

La page est constituée de films transparents : photos tramées et textes frappés directement par la photocomposeuse ou rephotographiés après montage. Des retouches sont apportées sur le film afin d'éviter les taches produites par les inévitables défauts. C'est encore par insolation que sont déterminées sur la plaque métallique les zones de rétention d'encre et les zones « hydrophiles ».

Le premier procédé, jugé aujourd'hui imparfait, ne permet pas les tirages au-delà de 30 000 exemplaires. La plaque métallique est recouverte d'une fine couche colloïdale, sensible à la lumière. Elle est exposée à la lumière au contact de la page en négatif : les parties claires du document, et notamment les textes, laissent passer les rayons, et la gélatine durcit aux endroits à imprimer. La couche non durcie disparait à l'eau; le métal, préalablement traité, est hydrophile; le revêtement colloïdal est oléophile, mais hydrofuge. L'inconvénient est que la couche durcie forme une très légère saillie qui s'use à l'impression, ne permettant que des tirages limités.

C'est la raison pour laquelle le procédé dit offset « en creux » est plus utilisé. La page à reproduire est cette fois positive et, lors de l'insolation, la couche durcie protège les parties non imprimantes tandis que l'eau laisse le zinc à nu. Le passage dans une solution légèrement acide accentue le creux. La plaque reçoit un revêtement gras qui recouvre l'ensemble. Un nouveau décapage permet de faire disparaître le colloïde durci : le zinc hydrophile apparaît donc à nu aux endroits non imprimants, tandis que la couche grasse reçoit l'encre dans les « creux », d'ailleurs tout à fait relatifs puisque de l'ordre de 5 millièmes de millimètre (contre 4 à 5 centièmes en héliogravure).

Ces plaques plus résistantes sont elles-mêmes dépassées par l'utilisation d'autres plaques, « multimétalliques », faites de plusieurs pellicules superposées de métaux hydrophiles en surface, et hydrofuges au-dessous. La préparation de la plaque par les méthodes décrites ci-dessus consiste à faire disparaître la première couche aux endroits à imprimer.

Le développement de l'offset

Le procédé offset ne commence à prendre de l'importance dans la grande presse que depuis quelques années; le temps exigé par la préparation des plaques, les tirages limités font hésiter les responsables de journaux. Jusqu'aux années 60, on achète des rotatives typo.

Aujourd'hui, l'offset a acquis ses lettres de noblesse, en particulier pour l'impression de la couleur : certains montages planétaires permettent l'impression simultanée de quatre couleurs avec un cylindre unique de pression.

▼ *Exposition d'une plaque offset à la lumière d'une lampe au xénon (Imprimerie I. G. D. A. à Novara, Italie).*

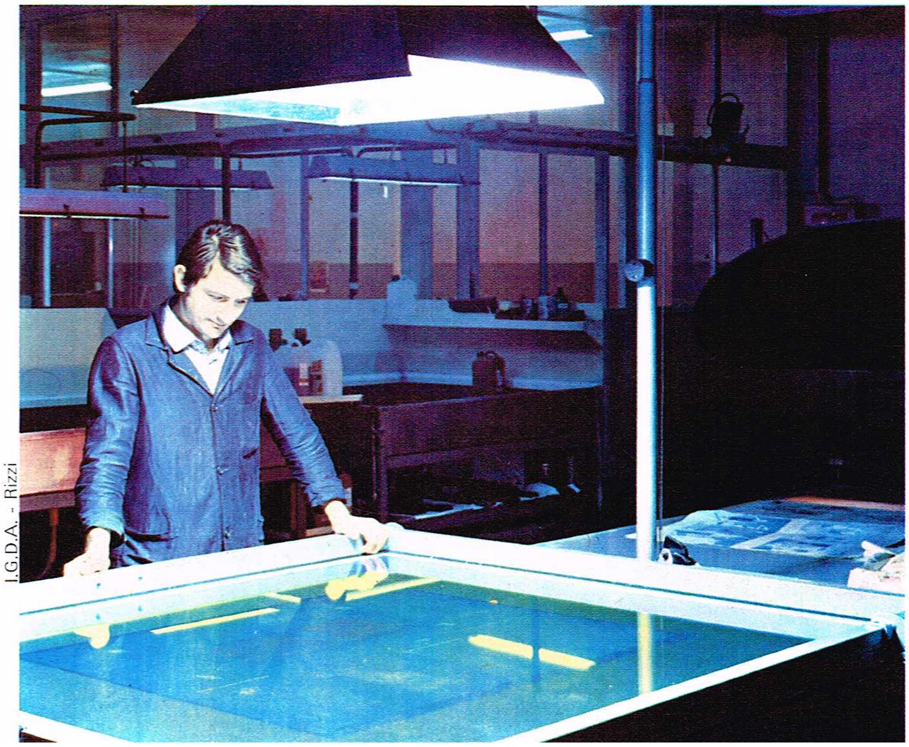

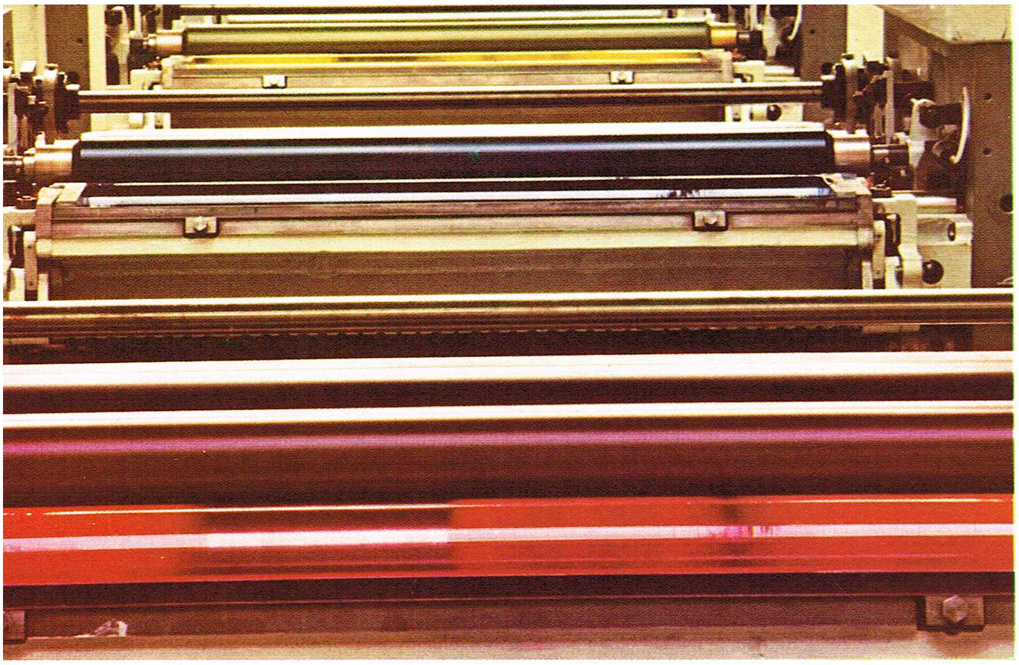

R. de Seynes - Rapho

▲ *L'impression chromatique selon les différentes techniques d'imprimerie relève d'un principe simple : il faut toujours un passage par couleur ; il en est de même pour la reproduction des photographies en couleurs, la juxtaposition des couleurs successives restituant l'original.*

Les innovations techniques apportées par le développement de l'offset connaissent des prolongements pour la modification du procédé typographique dans certains ateliers. L'utilisation de la plaque enveloppant le cylindre est une possibilité : elle supprime le lourd cliché stéréo de plomb et semble plus compatible avec la photocomposition. Dans ce dernier cas, en effet, il est nécessaire d'utiliser un procédé identique à celui de la photogravure : des plaques plastiques en relief de très grande résistance sont accrochées directement sur les cylindres ou supportent la prise d'empreinte du flan. L'intermédiaire du blanchet est également apparu sur certaines machines dites « type offset », le cylindre de plomb se déchargeant de son encre sur un rouleau de caoutchouc. La technique du blanchet contre blanchet est utilisable, simplifiant la structure de la machine et évitant le mouillage préalable.

Mais le procédé offset, outre son avenir dans la grande presse, connaît de très sûrs débouchés dans un autre monde, celui de la petite reproduction. La simplification qu'il apporte pour reproduire les textes dactylographiés, en particulier, lui ouvre des portes, fermées jusqu'alors aux trop lourds procédés typographiques et d'héliogravure : celles des administrations et des entreprises qui peuvent envisager la création de petites imprimeries dites intégrées, et même celles... des bureaux.

La reproduction des couleurs

L'impression de couleur selon les différents procédés, typographie, héliogravure, offset, relève d'un principe simple : il faut un passage par couleur. Une page de journal éditée en typo, par exemple, et présentant un titre et quelques filets rouges en plus du texte et des photos noirs reçoit, sur un premier cylindre, texte et photos, sur un second les parties rouges. Trois couleurs exigent trois passages, et ainsi de suite, les seules difficultés étant, d'une part, la précision du repérage pour le montage des clichés sur le cylindre et, d'autre part, la pagination réduite par l'immobilisation des cylindres.

Notons au passage que l'impression en « aplat », d'une couleur, sur une page, ne laissant apparaître que quelques parties blanches « en réserve », donne une possibilité supplémentaire.

Chaque passage de couleur exige donc un cliché particulier. Le principe est le même pour l'impression des photographies en couleurs, la juxtaposition des couleurs successives restituant l'original.

La transmission en fac-similé

La transmission des pages de journal par ligne téléphonique est une technique utilisée depuis peu en France, mais qui fonctionne déjà dans d'autres pays. C'est un procédé que la presse connaît depuis bien longtemps avec la transmission des photographies par *bélinographe*.

L'épreuve composée, par exemple, à Paris, tourne sur un cylindre. Elle est balayée, à la manière d'un écran de télévision, par un rayon lumineux : la lumière se réfléchit sur la surface et elle est recueillie par une cellule photoélectrique qui enregistre ses variations. Les impulsions électriques sont transmises, par ligne, à distance, dans le midi de la France pour certains des quotidiens parisiens. Là, tourne à la même vitesse un cylindre identique recouvert d'un papier photosensible. Les impulsions électriques commandent une lampe qui impressionne proportionnellement le papier. Après développement, la page ainsi transmise sert à la constitution du cliché pour le tirage en offset.

Cent cinquante secondes suffisent à la transmission de la page. Le journal peut être imprimé à la fois à Paris et à mille kilomètres de là. Il est dans les kiosques en même temps que les quotidiens régionaux. Les délais et les frais de transport se trouvent ainsi considérablement réduits.

Le télécopieur

Le procédé est désormais très fiable et connaît des usages domestiques. Le télécopieur, s'il n'est pas encore généralisé, est entré dans les mœurs. Transmettre un document, même écrit à la main, et même s'il s'agit d'un schéma dessiné, demande aujourd'hui trente secondes par le canal d'une ligne téléphonique. Un service international de fac-similé existe déjà entre les États-Unis d'une part, l'Europe et le Japon d'autre part.

Le fac-similé à domicile

L'une des techniques de diffusion de l'avenir, pour la presse, est assurément un service de fac-similé qui permettrait la réception des nouvelles à domicile par l'abonné. L'appareil est techniquement au point. Son coût devrait baisser avec l'extension du marché.

▼ *Une machine* **rotative offset** *; outre son avenir dans la grande presse, le procédé offset connaît de nombreux débouchés dans la reproduction au niveau des entreprises et des administrations qui peuvent envisager la création de petites imprimeries dites intégrées (machine Nebiolo Invicta 56).*

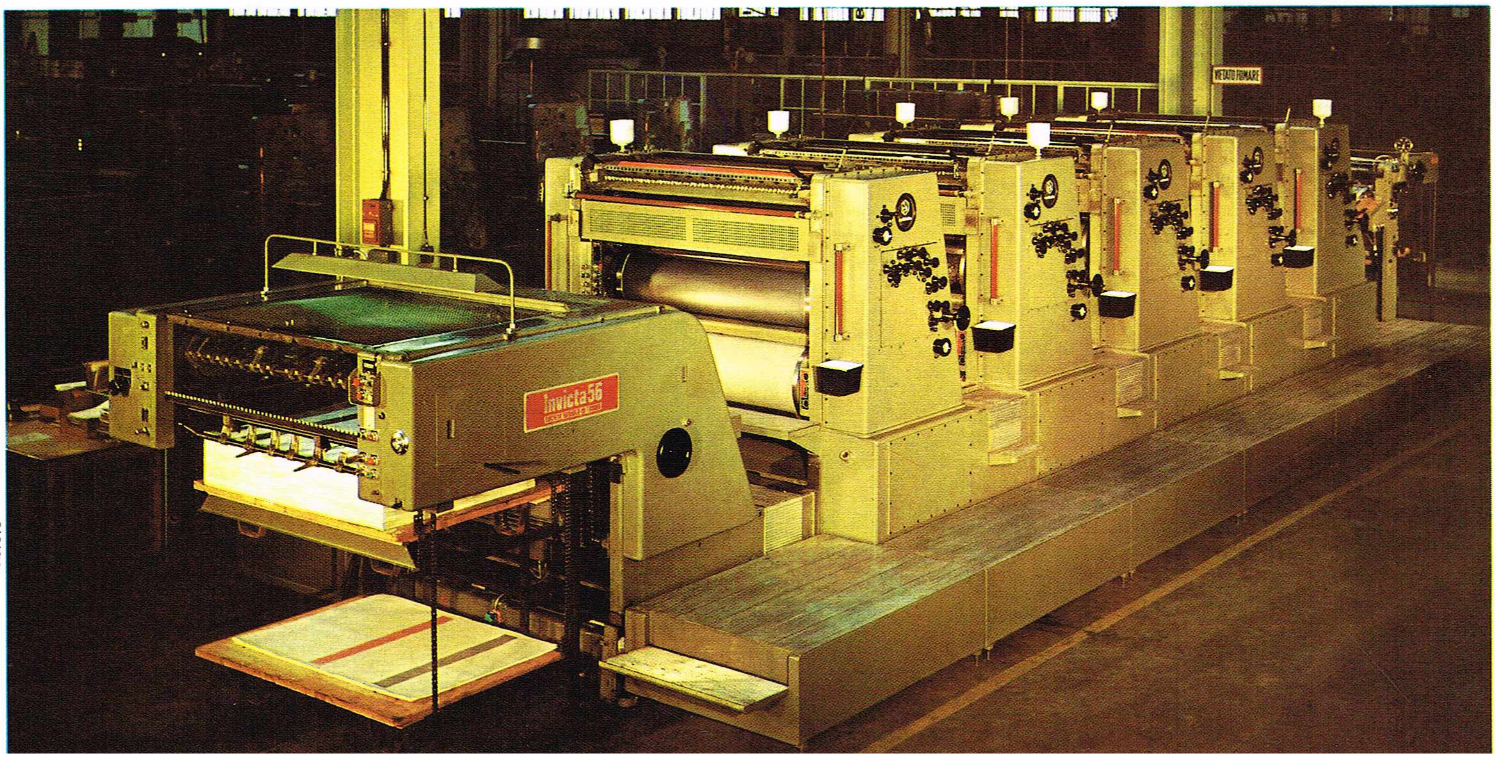

Nebiolo

La reproduction à quelques exemplaires

Parallèlement au développement de l'industrie du papier, au perfectionnement des techniques d'impression utilisant le plomb ou la lumière pour fabriquer des documents imprimés de grande diffusion, les différents procédés de duplication et de reprographie connaissent une expansion rapide. En effet, le volume annuel des copies est passé ces quatre dernières années de dix milliards cinq cent millions à vingt et un milliards cinq cent millions (*Le Monde*, 21 septembre 1976). Ces copies sont diffusées au sein des administrations, des industries qui ont souvent éprouvé la nécessité de créer une petite imprimerie, où sont rassemblés des appareils de reprographie et de duplication.

Comment classer ces différents procédés de reproduction ? On peut, dans une première approche, distinguer la duplication, qui permet la fabrication d'un très grand nombre de textes identiques à partir d'un document établi sur un support adapté, de la reprographie, technique de reproduction de n'importe quel document, tel qu'il est, sans qu'il subisse une modification quelconque.

La duplication

Les procédés de duplication peuvent se classer en trois grandes catégories, suivant les appareils utilisés : le duplicateur à cliché hectographique, les duplicateurs à stencil, les appareils utilisant la technique « offset ».

Les appareils à clichés hectographiques

Ce sont les appareils les moins coûteux — autour de 500 F en France —, qui permettent le tirage manuel ou automatique électrique de 100 à 300 copies à partir d'un cliché hectographique.

Il faut d'abord préparer le cliché hectographique, qui est une feuille de papier enduite d'un côté d'une couche spéciale. On dactylographie le texte, ou on écrit ou dessine avec une pointe sèche sur la face non enduite, avec une force suffisante pour que les caractères apparaissent nettement à l'envers sur la face enduite. On obtient ainsi un cliché. Ensuite c'est la phase de tirage : on fixe le cliché sur un cylindre ou tambour, souvent en fonte d'aluminium poli. La feuille de papier passe entre le tambour en rotation et un cylindre de caoutchouc, le rouleau de pression, et le texte est alors imprimé. Il est nécessaire d'utiliser un révélateur et d'en humecter les feuilles avant leur passage. Ce révélateur est souvent de l'alcool industriel, et il existe plusieurs dispositifs d'humectage, le plus simple étant un rouleau de feutre. Il est possible de faire des tirages à plusieurs couleurs avec un seul tirage, si le cliché est établi avec des carbones de plusieurs couleurs. Les dimensions des documents peuvent varier, depuis la simple étiquette — dans le cas des machines à adresser — jusqu'à des formats 48 cm × 70 cm. En complément du duplicateur, on peut utiliser des systèmes aptes à réaliser un cliché hectographique à partir d'un original noir et blanc ou d'une photocopie. Ces duplicateurs à alcool sont très répandus, notamment dans les collectivités, et leur faible prix leur garantit un avenir certain.

Les appareils à stencil

Ce sont les appareils les plus répandus. En 1975, ils représentaient encore 65 % du nombre des appareils de duplication installés en France. Avec un stencil, on peut faire des tirages plus importants : quelques milliers de copies.

Un stencil est constitué par un support de papier résistant, enduit d'une couche superficielle de laque qui le rend imperméable à l'encre. Par la simple frappe d'une machine à écrire sans ruban ou par traçage avec une pointe sèche, on rend le cliché perméable à l'encre. La frappe doit être suffisamment puissante, les caractères propres afin d'obtenir des perforations de la couche imperméable très nettes. L'encre les traversera, et une feuille de papier appliquée contre le cliché sera imprimée. Il est aussi possible de réaliser un cliché à partir d'un document original, avec une grande précision. Il s'agit du « stencil électronique », obtenu par un dispositif complexe : un rayonnement lumineux balaie le document ; les variations de l'intensité lumineuse sont mesurées et commandent une pointe en tungstène qui reproduit sur le stencil les traits et caractères du premier document.

Les dispositifs d'impression sont simples : le stencil est appliqué sur le tambour du duplicateur, lequel est encré. Les feuilles à imprimer sont placées sur un plateau d'alimentation ; elles sont attirées, passent contre le tambour en rotation et sont imprimées et récupérées sur un plateau de réception. Le tambour est généralement entraîné par un moteur électrique, et sa vitesse est variable. Il y a souvent un compteur qui commande un arrêt automatique lorsque le nombre de tirages désiré est atteint. Bien que des progrès soient encore possibles, il est très difficile d'obtenir un document parfait, à cause de la technique de création et du support du stencil. C'est pour cela que le parc de duplicateurs à stencil n'a pas augmenté depuis 1973. En effet, les techniques de reprographie ont évolué en même temps : l'offset s'est simplifié, son coût s'est abaissé et il a investi nombre de petits ateliers d'imprimerie.

Les duplicateurs offset

On a vu que le procédé offset s'était largement développé pour l'impression des journaux. Des machines beaucoup plus légères sont maintenant d'usage courant dans les entreprises et les administrations, la technique offset donnant des tirages d'excellente qualité, dans des conditions rentables dès qu'on dépasse cent exemplaires.

On sait que l'offset repose sur l'hydrophobie des corps gras, lesquels ne se mouillent pas. Sur le cliché, souvent métallique, les parties à imprimer sont enduites d'un corps gras. Ce cliché est mouillé : l'eau n'adhère pas sur les zones enduites. La plaque est encrée, mais l'encre a une composition telle qu'elle ne se fixe pas sur les parties mouillées. L'impression a lieu en deux étapes : le cliché est appliqué sur un rouleau sur lequel l'encre se dépose sélectivement, puis la feuille de papier est imprimée par mise au contact avec le rouleau encreur, appelé le blanchet. Au niveau du petit atelier, rien ne distingue le procédé offset de celui employé pour la grande presse. Les variantes sont introduites au niveau de la dimension des machines, de leur rapidité, mais aussi à celui de la préparation du cliché.

Il existe des composeuses mécaniques qui effectuent la justification automatique des marges, des composeuses photographiques à rubans perforés : on frappe le texte, mais la machine produit en même temps un ruban de papier perforé qui permettra la réalisation du cliché composé. Il existe également des plaques présensibilisées. Cette souplesse d'utilisation, associée à la qualité des copies obtenues, fait que le procédé offset se développe. En 1975, bien qu'il y eût quatre fois moins de duplicateurs offset que de duplicateurs à stencil, on réalisait avec les premiers deux fois plus de copies, la productivité d'un appareil offset étant en moyenne huit fois supérieure.

La reprographie

Lorsqu'il s'agit de reproduire un document existant et d'en faire quelques dizaines de copies, c'est le domaine de la reprographie. Les procédés, dans ce domaine, sont très nombreux, mais les plus anciens, exigeant souvent un révélateur et donc un bain, ont tendance à disparaître devant des techniques telles que l'électrocopie et la thermocopie.

Les anciens procédés : la diazocopie

Dans le cas de la diazocopie, on expose à la lumière un papier sensible, sur lequel se fixe l'image de l'original ; puis l'image est rendue apparente par un révélateur. La technique d'exposition est différente suivant que le document original est transparent, opaque, ou encore imprimé recto verso ; dans ce cas, une exposition par réflexion est nécessaire.

Pour le tirage des plans, application essentielle de la diazocopie, le papier sensible est recouvert d'une émulsion à base de colorants diazoïques. Or le rayonnement ultraviolet détruit ces colorants, qui se colorent au contact d'un révélateur adéquat. Le plus souvent, on utilise un support transparent — un calque —, et les parties à imprimer sont faites avec une encre opaque à l'ultraviolet. L'exposition est faite par transparence et la révélation effectuée ensuite. C'est un procédé simple,

▶ *La reproduction à quelques dizaines d'exemplaires d'un document déjà existant procède du domaine de la reprographie ; ici, le copieur II d'IBM.*

en perpétuelle évolution, bien adapté à la reproduction des plans.

On peut citer, pour mémoire, des procédés voisins, aux sels métalliques : la gélatinographie, la photocopie au sens strict, qui utilise des sels d'argent et qui a donné naissance à de très nombreuses variantes.

L'électrocopie

Les procédés électrostatiques sont de loin les plus répandus, depuis 1960 notamment, époque vers laquelle furent mises sur le marché les premières machines Rank Xerox. Notons que l'invention date de 1938 et que ce n'est qu'en 1946 que son exploitation commerciale fut décidée, pour n'aboutir que vers 1956.

L'électrocopie utilise la propriété de certains composés qui, isolants à l'obscurité, deviennent conducteurs lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Si une plaque ou un tambour est revêtu d'un tel matériau et si ce matériau est chargé électriquement en surface — ce qui est possible, car il est isolant —, il suffit de projeter sur lui le document à reproduire. La charge électrique disparaît dans les zones éclairées, mais demeure dans les zones noires. On a donc une image électrostatique, et une encre en poudre qui sera fixée par les charges électriques restantes restituera l'image. Cette idée de base a donné lieu à deux grands procédés, suivant que la copie est réalisée sur un papier ordinaire ou sur le papier photoconducteur lui-même. Le premier, commercialisé par Xerox, utilise du sélénium, l'autre, développé par Smith-Corona-Marchant (SCM), nécessite un papier contenant de l'oxyde de zinc.

Le procédé Xerox au sélénium

Le corps photoconducteur est le sélénium, métalloïde de la famille du soufre, qui est fixé en couche mince sur une plaque d'aluminium. On crée sur cette couche une densité de charge positive uniforme par le passage au voisinage d'une électrode portée à haut potentiel. On projette ensuite l'image du document sur cette plaque : dans les zones claires du document, la charge électrique positive disparaît, tandis que, dans les zones sombres correspondant aux caractères imprimés, cette charge est conservée. On obtient ainsi une image électrostatique du document sur la plaque de sélénium. Cette image est d'ailleurs inversée, à cause du dispositif optique. C'est la première étape. La deuxième étape consiste à faire apparaître l'image sur la plaque en fixant de l'encre en poudre : cette poudre, le « toner », est chargée négativement, si bien qu'elle est attirée par les charges positives du sélénium. Ensuite, il faut transférer cette image sur une feuille de papier ordinaire. Cette opération est simple : le papier est chargé positivement, et il est appliqué sur la plaque de sélénium. Le « toner », portant des charges négatives, est attiré par le papier, sur lequel apparaît alors l'image définitive. Il reste à fixer cette poudre sur le papier, par passage dans un four électrique : la poudre fond et adhère définitivement à la feuille. On a ainsi obtenu une copie du document original en noir et blanc. La plaque de sélénium nettoyée de la poudre résiduelle, rendue électriquement neutre, peut servir pour réaliser une nouvelle copie.

En résumant, il y a donc quatre étapes : exposition et création de l'image latente, fixation de la poudre sur la plaque, transfert de l'image sur la feuille de papier, fixation définitive de la poudre. Ces quatre phases se retrouvent toujours, sauf si on désire plusieurs copies d'un même original. Il est possible, avec certaines machines, d'obtenir des copies avec un format réduit, la réduction étant réalisée par le dispositif optique de projection de l'original sur la plaque.

Le procédé à l'oxyde de zinc

Il s'agit d'un procédé électrostatique, qui nécessite l'emploi d'un papier dont l'une des faces est recouverte par une couche superficielle riche en oxyde de zinc. Ce papier passe d'abord entre deux électrodes dont la différence de potentiel atteint plusieurs milliers de volts. L'ionisation de l'air permet à un faible courant de passer d'une électrode à l'autre. Comme dans le cas précédent, on projette l'image, mais sur la face du papier portant une densité superficielle de charges négatives. Sous l'effet de la lumière, donc dans les zones blanches, l'oxyde de zinc devient conducteur. Les charges électriques sont mobiles, le papier n'étant plus isolant, si

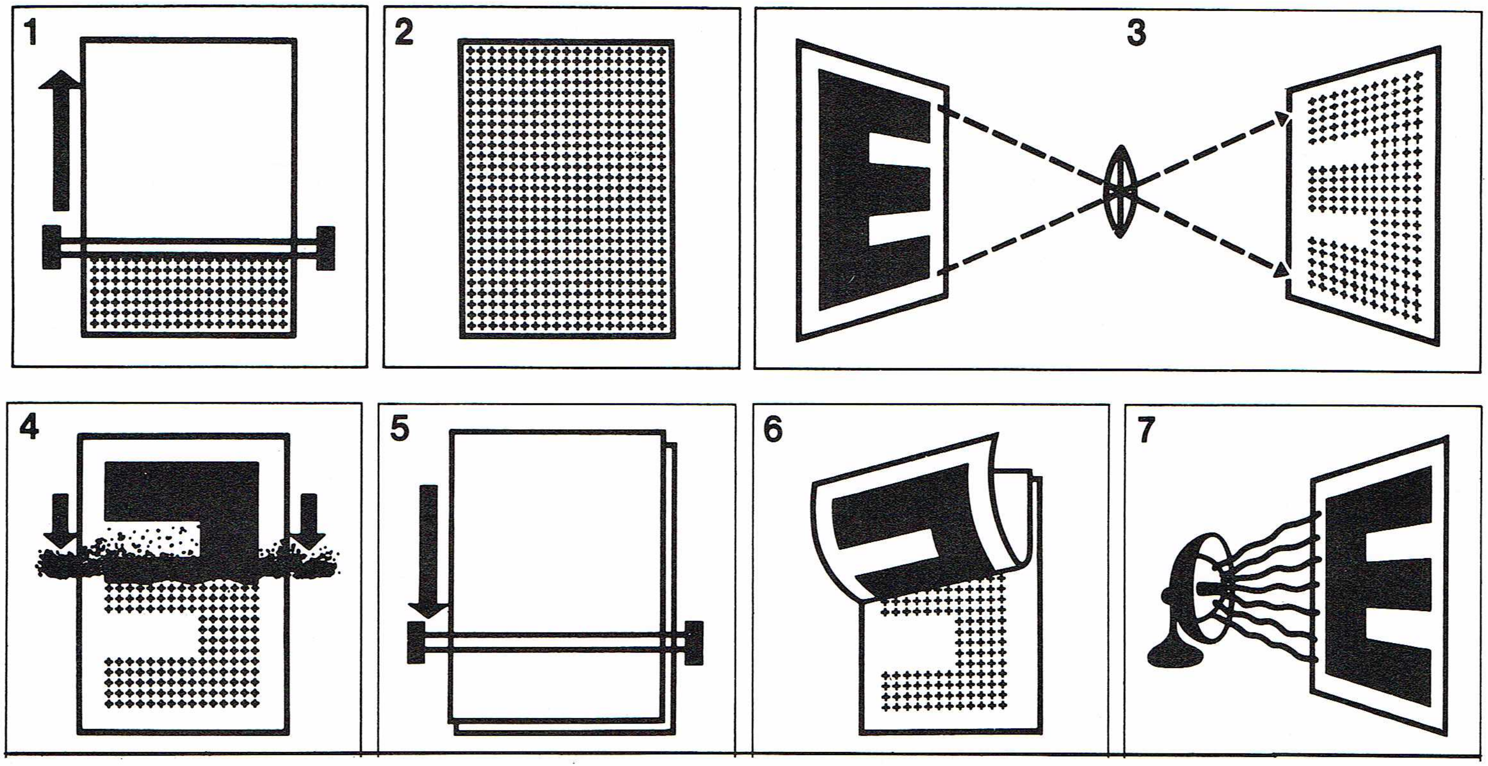

▼ *Principe de la reproduction de documents par le procédé Xerox au sélénium : 1, dans l'obscurité, une surface de sélénium (plaque ou tambour) est balayée par une grille sous courant à haute tension ; 2, on obtient ainsi une surface photosensible ; 3, l'image du document original (E) est projetée sur la surface de sélénium ; les zones atteintes par la lumière perdent leur charge électrique, les zones restées dans l'ombre la conservent ; 4, une poudre est projetée uniformément sur la surface de sélénium ; elle est attirée par les zones qui ont conservé leur charge électrique, une image poudreuse est ainsi obtenue ; 5, une feuille de papier appliquée sur la surface de sélénium reçoit une charge électrique ; 6, l'image poudreuse est transférée du sélénium sur le papier au moyen de la charge électrique qui lui est appliquée ; 7, l'image est fixée thermiquement sur le support choisi (document Rank Xerox).*

bien que charges positives et négatives se neutralisent. Par contre, dans les zones non éclairées, correspondant à l'impression du document original, apparaît une image latente, due aux charges négatives conservées par la présence de l'oxyde. Il suffit ensuite de fixer un pigment noir chargé positivement, ce qui fait apparaître l'image sur la feuille de papier. On peut utiliser soit une poudre qui est fixée par cuisson, soit une encre liquide, le carbone restant fixé après évaporation du solvant.

Le procédé du ZnO est donc plus simple que le procédé Xerox, car il n'y a pas transfert de l'image d'un support sur un autre. Le système optique, d'ailleurs, sera différent, l'image qui apparaît sur le papier par photoconduction étant l'image définitive. Bien que la technique à l'oxyde de zinc nécessite un appareillage moins sophistiqué, le fait d'utiliser un papier spécialement traité constitue un inconvénient majeur. La tendance actuelle est donc marquée par un développement plus rapide de la xérocopie, et, en 1975, on réalisait presque trois fois plus de copies sur papier ordinaire que sur le papier à l'oxyde de zinc.

La thermocopie

C'est une technique simple, utile surtout si on veut seulement quelques exemplaires de l'original. On utilise ici une autre propriété : celle que possèdent les corps noirs d'absorber la lumière au lieu de la réfléchir, donc de s'échauffer et de réémettre l'énergie lumineuse captée sous forme de rayonnement infrarouge. Des parties noires d'un document exposé à la lumière vont émettre des rayons infrarouges qui pourront impressionner une plaque sensible, ce qui produira une copie. Tel est le principe de la thermocopie.

La réalisation en est très simple. Il suffit d'appliquer le papier sensible et l'original l'un contre l'autre et de les exposer au rayonnement d'une lampe infrarouge. Les parties imprimées de l'original absorbent le rayonnement, et la chaleur dégagée provoque directement l'apparition sur le papier sensible de la reproduction positive, sans autre manipulation. C'est donc un procédé rapide, peu coûteux. Le papier sensible se conserve bien, même à la lumière. Cependant, la copie directe ne donne pas toujours de bons résultats, certaines encres se prêtant mal à une telle technique. Un perfectionnement, fondé sur l'emploi d'une copie photographique intermédiaire, a été proposé par la compagnie Minnesota et donne des résultats bien meilleurs.

D'une manière générale, la thermocopie se maintient dans le bas de la gamme des procédés, surtout s'il s'agit de réaliser à moindres frais un nombre très limité de copies. Les appareils fondés sur ce principe sont les plus répandus — presque la moitié des appareils de reprographie sur le marché français — mais fournissent seulement entre 4 et 5 % des copies.

Le journal sans papier

Le journal écrit, *sans papier*, existe : la téléinformatique permet de faire passer sur l'écran de télévision des pages de texte. En Grande-Bretagne, le procédé CEEFAX permet au téléspectateur d'obtenir un supplément écrit aux programmes de la télévision en manipulant quelques touches d'un décodeur. En France, un système analogue, ANTIOPE est à l'étude, ainsi qu'un terminal domestique utilisant le téléviseur et le combiné téléphonique : TICTAC.

Avec le **procédé CEEFAX,** la B.B.C. offre les services d'un quotidien, perpétuellement mis à jour.

L'utilisateur dispose d'un boîtier, ressemblant à une calculatrice, qui commande les pages de texte. La pression d'un premier bouton remplace l'image du programme par un sommaire indiquant les nouvelles disponibles : sports : 12, agriculture : 14... Les touches « 1 » et « 2 » amènent sur l'écran les résultats sportifs, « 1 » et « 4 » les dernières nouvelles agricoles, etc.

Chaque page ne comporte que 24 lignes, mais le système en contient une centaine, que des journalistes peuvent mettre à jour au fur et à mesure de l'évolution de l'information.

Une touche spéciale permet enfin de prévoir le passage, en sous-titres, d'informations importantes. Le téléspectateur suit le programme normal. Si un événement important survient, un sous-titre de quelques lignes, en bas de l'écran, l'en avertit. Le système a été commercialisé au cours de l'année 1977.

Les informations de CEEFAX sont portées par le faisceau hertzien de l'émission de télévision. Le procédé utilise les lignes libres que comporte chaque image télévisée pour transmettre les textes codés. Les caractères peuvent apparaître en plusieurs couleurs, et le CEEFAX peut transmettre aussi des schémas et cartes (pour les prévisions météorologiques par exemple). L'utilisation des faisceaux hertziens permet en outre d'envisager la diffusion d'informations régionales.

ANTIOPE (« Acquisition Numérique et Télévisualisation d'Images Organisées en Pages d'Écriture ») est le nom du système de télétexte étudié par le Centre commun d'études de télévision et de télécommunications. Reprenant le principe mis au point par les Britanniques, les techniciens français espèrent améliorer les possibilités du système : utilisation d'alphabets multiples (cyrillique, arabe...) pour l'enseignement des langues ou les magazines à destination des minorités linguistiques, services graphiques plus étendus, etc.

Le **système TICTAC** se rapproche plus de la conception du terminal domestique, relié à une banque de données. Des centres informatisés de renseignements existent aujourd'hui dans de nombreux secteurs d'activités : les agences de voyages, la vente sur catalogue sont les plus proches du grand public. Dans certaines grandes villes, comme Lyon, une banque de données locales donne les renseignements utiles, mais la manipulation d'un terminal ordinaire, à domicile, demeure irréaliste.

La conception du TICTAC, « Terminal Intégré Comportant un Téléviseur et l'Appel au Clavier », résout le problème du langage informatique. Ce système utilise un récepteur de télévision sur l'écran duquel l'information, transmise par ligne téléphonique, apparaît grâce à un dispositif d'interconnexion. Les touches du combiné téléphonique constituent le dispositif d'appel.

Techniquement au point, TICTAC n'est pas encore commercialisé. Le dispositif expérimental donne des renseignements d'ordre pratique : horaires des trains, ... mais également les informations transmises par l'Agence France-Presse.

La mise au point de ces techniques nouvelles est susceptible d'inquiéter les professionnels de l'information. Les systèmes utilisant les récepteurs de télévision sont encore limités par des contingences techniques : nombre de lignes sur l'écran surtout, qui obligent à des informations très succinctes. Mais de nombreux lecteurs se contentent de quelques titres indiquant les faits saillants. En outre, la création de banques de données locales accessibles par téléphone réduit l'un des avantages de la presse locale, moins touchée que les journaux nationaux par le développement de la télévision, en raison de sa spécificité géographique. Déjà, la simplification des procédés d'impression a permis la création de feuilles de faible diffusion concurrentes des organes plus vastes aux lourds équipements.

Cette évolution technique devrait permettre le développement de deux tendances déjà engagées :

— la collaboration des différents moyens d'information,

— l'évolution de la grande presse vers une réflexion sur l'événement complétant l'énoncé rapide donné par les moyens audiovisuels.

BIBLIOGRAPHIE

AUDIN M., *Histoire de l'imprimerie. Radioscopie d'une ère. De Gutenberg à l'informatique,* Paris, 1972. - BARGILLAT A., *l'Imprimerie au XX^e^ s.,* P.U.F., 1967. - BARGILLAT A., *Impression offset,* Institut national des arts graphiques, 1969 - CHAUVE R., *Informatique et Arts graphiques,* Éd. Ika, 1975. - DESCROIX P., *la Technique de la reprographie et ses applications pratiques,* Éd. Le Prat. - LA BORDERIE, *Toute l'imprimerie,* Dunod, 1970. - LECHENE R., *l'Imprimerie moderne : la Deuxième Mort de Gutenberg,* Éd. du Cap, 1967. - LECHENE R., *l'Imprimerie de Gutenberg à l'électron,* Éd. Fata Morgana. - LETOUZEY, *la Typographie,* P.U.F., Que sais-je ?, n° 1101. - MARTIN G., *l'Imprimerie,* P.U.F., Que sais-je ?, n° 1067.

LA CONSERVATION DE L'INFORMATION

Une information n'a de valeur et d'existence que dans la mesure où elle atteint son destinataire. Il faut donc qu'elle ne soit pas perdue, autrement dit qu'elle soit conservée, et conservée de telle manière qu'elle puisse être retrouvée. Cela implique un traitement de l'information, c'est-à-dire la réalisation d'un ensemble de tâches touchant la conservation matérielle des supports de l'information, le classement des documents en fonction de leur support physique et de leur nature, enfin un travail intellectuel d'analyse qui devra permettre, par la constitution d'une donnée intermédiaire, de retrouver l'information primaire. C'est en la réalisation de l'ensemble de ces opérations — dont le but est la transmission de l'information à chacun de ceux qui peuvent en avoir besoin — que consiste le métier de bibliothécaire.

L'information : vecteur et support

Il n'est d'information que transmise. Cette transmission implique un code, un signe ou un signal.

L'homme primitif transmet son message en utilisant le langage oral ou gestuel : certains langages gestuels possèdent un vocabulaire étendu et même une syntaxe propre. Ainsi, certains Indiens d'Amérique du Nord pouvaient converser longuement par gestes alors qu'ils parlaient des langues différentes. La communication peut également se faire au moyen de signaux à distance comme par exemple le tambour africain.

Au-delà des gestes et signaux apparaissent les « écritures autonomes », comme les nœuds utilisés pour le comptage des animaux dans l'Empire inca ou les signes géométriques sous forme d'entailles dans le bois, de gravure dans la pierre, de peinture, etc. Il s'agit là des premiers messages susceptibles d'être conservés : l'information est née.

Cette information va tendre à se préciser et, dans un second temps, l'écriture essaiera de coïncider avec le langage articulé de façon très approximative : un signe ou un groupe de signes suggèrent une phrase entière. Il y a une multitude de signes, puisqu'il existe une multitude de phrases : ils constituent une écriture synthétique.

Une troisième étape est franchie lorsque le signe ne signifie plus une phrase, mais un mot. Les nouveaux signes ont alors une valeur constante, et le texte exact de chaque phrase peut être conservé. Ce stade correspond aux écritures analytiques ou idéographiques : écritures cunéiformes, hiéroglyphiques, écriture chinoise. Suivant le même principe, s'il y a moins de mots que de phrases, il y a moins de sons que de mots : les signes vont donc représenter les syllabes. Enfin, ultime simplification, de l'écriture syllabique on passe à l'écriture alphabétique consonantique (c'est-à-dire où seules les consonnes sont notées) : écriture phénicienne dont sont dérivés l'arabe et l'hébreu ; puis à l'écriture alphabétique à voyelles : grecque, cyrillique et latine.

Inventer la communication ne suffit pas, il faut encore, pour que l'information se perpétue et se transmette, la consigner sur un support durable. Depuis l'origine, les hommes ont utilisé ainsi toutes sortes de matériaux, à commencer, si l'on veut, par les murs de leurs habitations... Depuis l'Antiquité, en tout cas, de nombreuses matières ont été employées à cette fin : les tablettes d'argile, supports des écritures cunéiformes dans les royaumes de Sumer et Akkad ; les carapaces de tortues et les plaques de bois dans l'ancienne Chine ; les écorces d'arbre de différentes essences : tilleul, olivier, palmier et le plus célèbre, le papyrus, fabriqué à partir d'un roseau de grande taille dans l'ancienne Égypte, mais aussi dans l'Empire romain et utilisé dans le monde occidental jusqu'au XIIe siècle. L'emploi des textiles fut également courant : les bandelettes enveloppant les momies égyptiennes portaient des hiéroglyphes ; la soie était utilisée, en Chine et en Perse notamment, et le fut jusqu'au XVIIe siècle en Occident, en particulier pour l'impression des thèses. Le cuir, avant d'être réservé aux reliures, a longtemps servi de support à l'écriture à partir du moment où, au IIIe siècle avant notre ère, a été inventé à Pergame, ville d'Asie Mineure, l'art de traiter les peaux. C'est de là que vient le nom de *pergamentum* dont est dérivé le mot parchemin. C'est à ce support que nous devons la transmission de la plus grande partie de la littérature antique.

Si le mot « papier » vient du grec et du latin papyrus, bien qu'il constitue une matière tout à fait différente, c'est en Chine qu'il a été inventé, dans un souci d'économie : la soie utilisée étant trop coûteuse, on chercha à fabriquer une matière à partir de déchets de soie, puis de déchets de coton. Le procédé, inventé en 105 avant

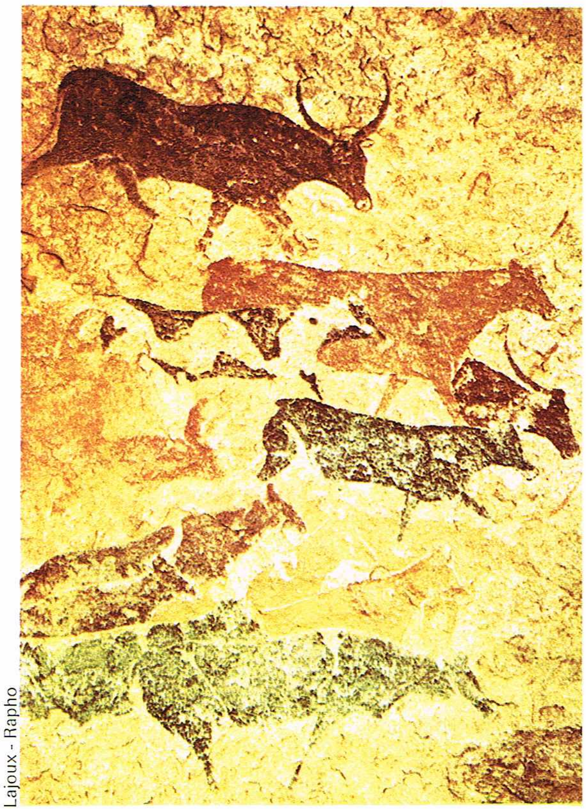

Lajoux - Rapho

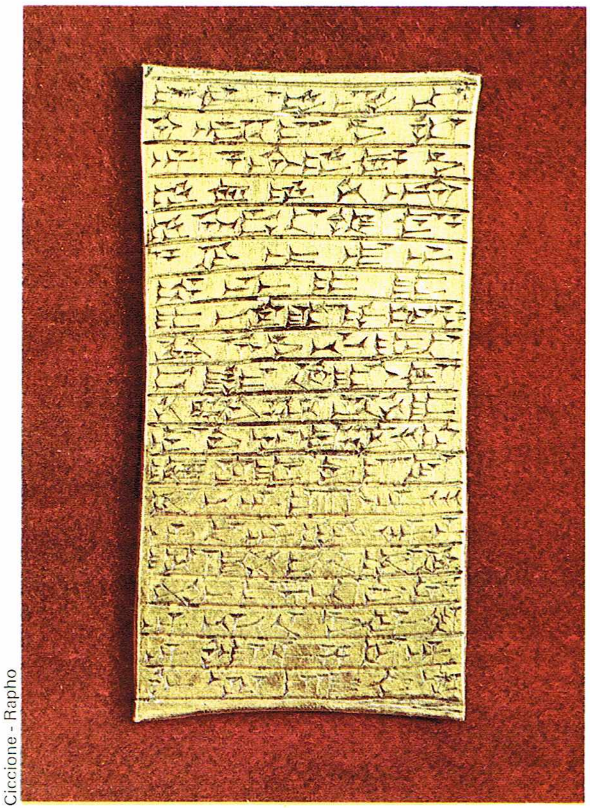

Ciccione - Rapho

▶ *L'information est née avec les premiers messages susceptibles d'être conservés, mais pour qu'elle se transmette, il faut des supports durables ; depuis l'origine, les hommes ont donc utilisé toutes sortes de matériaux : par exemple la pierre pour cette peinture rupestre du Tassili (à gauche). Deux étapes importantes sont franchies dans la simplification de l'écriture, d'abord lorsque apparaissent des signes ne signifiant plus une phrase mais un mot, il s'agit alors des écritures* idéographiques, *comme, à droite, l'écriture cunéiforme (plaque commémorative de la fondation Khorsabad, musée du Louvre, Paris), et ensuite l'écriture consonantique où seules sont notées les consonnes (comme page ci-contre à gauche sur ce manuscrit arabe issu d'un traité médical d'Avicenne, musée de Bologne, Italie).*

notre ère, n'atteignit l'Europe, en passant par l'Asie et la Perse, qu'au début du XIIe siècle. Le papier est le seul de tous ces matériaux à être encore utilisé de nos jours, et il a été pendant plusieurs siècles le principal support de l'information.

Cependant, depuis la fin du XIXe siècle et surtout au XXe siècle, de nouveaux *media* sont apparus : photographies, diapositives, films, bandes vidéo, disques, cassettes, bandes magnétiques, microfilms et microfiches. Ils permettent la transmission et la conservation d'images et de sons, accroissant ainsi considérablement la quantité et la qualité de l'information.

La conservation matérielle des supports

Chaque support pose des problèmes spécifiques de conservation, exception faite de toutes circonstances catastrophiques, incendies ou inondations, qui comptent pour beaucoup dans la méconnaissance partielle de certaines civilisations, comme l'incendie de la bibliothèque d'Alexandrie lors de la conquête de César en 47 avant notre ère : seuls quelques rares documents furent épargnés sur les 700 000 qu'elle contenait sous forme de tablettes, de rouleaux de papyrus ou de parchemin. Certains supports, par leur substance même, sont fragiles, comme le papyrus ou les écorces d'arbres. Tous sont sensibles à la lumière, à la pollution atmosphérique,aux variations de température et à l'humidité de l'air ambiant. La plupart, et particulièrement le papier et les cuirs, peuvent être attaqués par les champignons, les bactéries ou les insectes.

Nous allons voir successivement ces différents agents de destruction des documents, en indiquant les processus de destruction qu'ils engendrent, puis les remèdes à y apporter et les mesures préventives à envisager pour éviter l'apparition de ces phénomènes. Deux types de supports seront plus particulièrement observés : le papier, car c'est le support le plus répandu, et le microfilm d'archive, car l'importance des archives de sécurité constituées dans tous les pays est fondamentale pour la conservation de la mémoire du monde.

Il convient avant tout de noter que le procédé de fabrication du support a une importance capitale pour sa durabilité. Le **papier**, par exemple, est obtenu par le broyage de fibres qui contiennent de la cellulose. Toutes les fibres cellulosiques peuvent être employées pour la fabrication du papier, mais toutes ne donnent pas les mêmes résultats : la résistance d'un papier varie selon la qualité et le pourcentage de cellulose pure qu'elles contiennent. Ainsi, les papiers fabriqués jusqu'à la fin du XVIIIe siècle à partir de fibres de lin, de coton ou de chanvre, appelés couramment *papiers chiffons*, sont d'une excellente qualité : leur cellulose très pure résiste bien au vieillissement. Il n'en est pas de même des papiers à pâtes de bois apparus au XIXe siècle : en particulier les pâtes de bois mécaniques, obtenues par broyage de bois tendres sans que soit opérée de séparation entre la cellulose et les autres composés du bois, fournissent un papier qui contient environ 50 % d'impuretés et dont la longévité est donc fort mal assurée. Le procédé de fabrication des pâtes de bois chimiques, parmi lesquelles il faut distinguer plusieurs qualités, permet l'élimination d'une partie plus ou moins grande des impuretés : le papier obtenu est donc d'assez bonne qualité, sans toutefois atteindre celle des papiers chiffons.

De la même manière, les matières composant les **microfilms** sont déterminantes pour leur conservation, variable selon qu'il s'agit de films à support d'acétate, de nitrate ou de polyester, de films de type diazo ou du nouveau support d'enregistrement appelé film vésiculaire. Par exemple, les films à support de nitrate ou de type diazo vieillissent mal. De plus, le fixage du film doit être opéré dans un bain frais : les films fixés dans des bains vieux et partiellement épuisés se dégradent plus rapidement que les autres. Enfin, le fixage doit être suivi d'un lavage méticuleux.

Les procédés utilisés lors de leur fabrication font donc varier la résistance des supports de l'information aux agressions auxquelles ils sont naturellement soumis.

Agents de destruction

La lumière

Parmi les agents de destruction, la lumière a été citée. Elle est nuisible pour tous les supports, particulièrement les images : films et microfilms, photographies et diapositives. Elle attaque le papier par oxydation de ses composés phénoliques, provoquant un jaunissement de la surface et une dégradation de la cellulose qui rend le papier cassant.

La pollution

L'atmosphère des villes est dangereuse pour les documents parce qu'elle est porteuse de spores de champignons et qu'elle contient des impuretés comme

▼ *C'est à Pergame, en Asie Mineure au IIIe siècle avant J.-C., qu'a été inventé l'art de traiter les peaux pour en faire du* **parchemin** *; c'est à ce support que nous devons une grande partie de la littérature antique.*
Ci-dessous, une lettre des prélats de Terre sainte à Philippe Auguste écrite en 1220 sur du parchemin (Archives nationales, musée de l'Histoire de France).

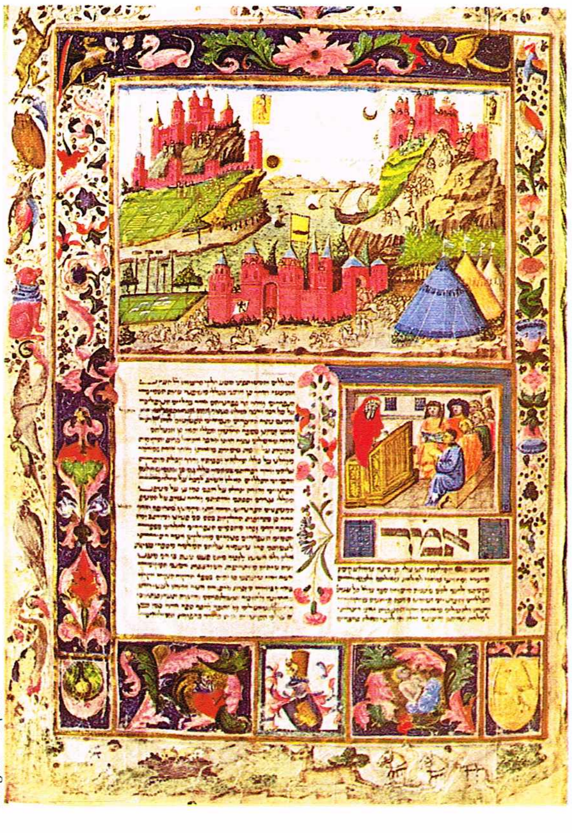
Bright - Rapho

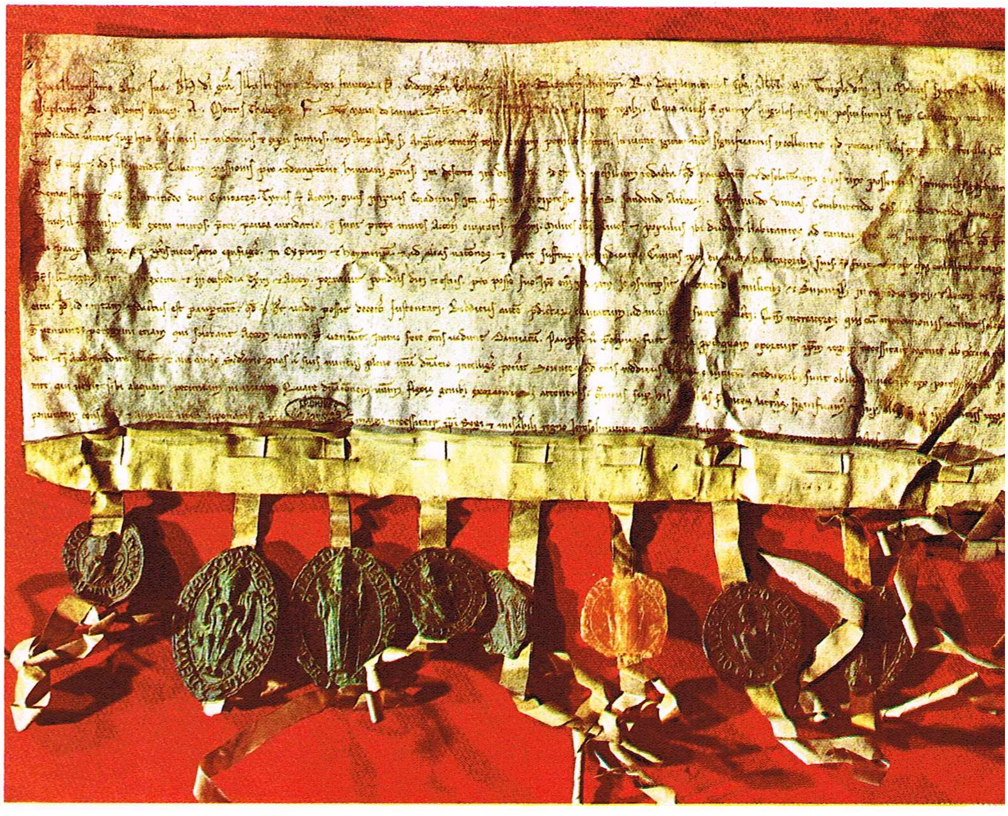
Bulloz

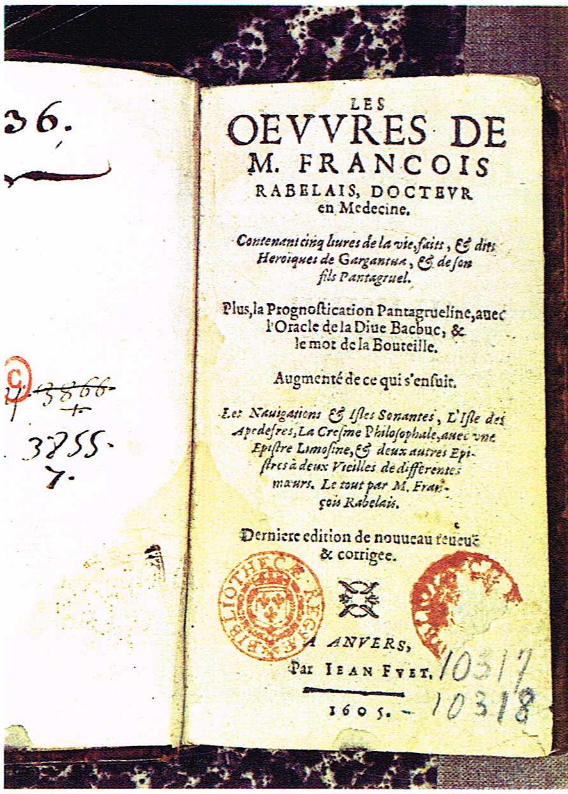
LES
OEVVRES DE
M. FRANCOIS
RABELAIS, DOCTEVR
en Medecine.

Contenant cinq liures de la vie, faits, & dits Heroiques de Gargantua, & de son fils Pantagruel.

Plus, la Prognostication Pantagrueline, auec l'Oracle de la Diue Bacbuc, & le mot de la Bouteille.

Augmenté de ce qui s'ensuit.

Les Nauigations & Isles Sonantes, L'Isle des Apedefres, La Cresme Philosophale, auec vne Epistre Limosine, & deux autres Epistres à deux Vieilles de differentes mœurs. Le tout par M. François Rabelais.

Dernière edition de nouueau reueuë & corrigee.

A ANVERS,
Par IEAN FVET.
1605.

Ciccione - Rapho

▶ *Les papiers fabriqués jusqu'à la fin du XVIII^e siècle à partir de fibres de lin, de chanvre ou de coton et appelés* papiers chiffons *résistent bien au vieillissement, contrairement aux papiers à pâte de bois ; ils doivent cependant être protégés de la lumière qui provoque le jaunissement et les rend cassants, de l'humidité excessive et de la chaleur qui favorisent le développement des moisissures, lesquelles désagrègent les papiers et laissent des taches colorées (édition de 1605 de l'œuvre de Rabelais, Bibliothèque nationale, Paris).*

l'anhydride sulfureux qui, au contact de l'humidité, se transforme en acide sulfurique (celui-ci détériore le papier et les microfilms), ou comme les chlorures et les composés azotés qui le détruisent également du fait de leurs propriétés hygroscopiques. La pollution atmosphérique est d'autant plus dangereuse pour les microfilms qu'elle les attaque à partir d'un taux extrêmement faible et, de ce fait, impossible à mesurer, ce qui accroît les difficultés de conservation : en effet, les microfilms sont attaqués à partir du moment où la teneur de l'air en anhydride sulfureux et en substances comparables atteint le cent millionième.

L'humidité et la température

L'humidité, dont l'action varie avec la température, représente de loin le plus grand danger pour tous les types de documents. C'est *l'humidité relative de l'air*, c'est-à-dire son degré de saturation en eau, qui doit être considérée et non la quantité absolue d'eau contenue dans l'atmosphère.

Le papier devient cassant s'il souffre d'une trop grande sécheresse : pour garder sa souplesse et son élasticité, il doit bénéficier d'une atmosphère suffisamment humide : environ 50 % d'humidité relative. Mais surtout, c'est l'humidité excessive, jointe à une forte chaleur, qui est à l'origine des corrosions graves d'ordres physico-chimique et biologique.

En effet, le papier et le parchemin, notamment, sont des composés organiques extrêmement hygroscopiques. La cellulose contenue dans le papier s'hydrolyse au contact d'une chaleur humide : le papier perd donc de sa résistance physique et devient cassant. D'autre part, l'humidité liée à la chaleur entraîne une corrosion biologique, qui est la plus importante : elle favorise, en effet, la germination des spores de champignons et la fructification des bactéries toujours en suspension dans l'atmosphère. Une température supérieure à 22 °C et une humidité relative supérieure à 65 % permettent la germination de ces spores, faisant apparaître un duvet blanchâtre au contact du papier qui constitue un milieu extrêmement nutritif. Ces champignons papyricoles, généralement microscopiques, sont désignés le plus souvent sous le terme de moisissures ; ils désagrègent les papiers, les parchemins et les cuirs en laissant sur eux des taches colorées dues aux pigments qu'ils sécrètent. La dégradation bactérienne du papier s'effectue uniquement par des bactéries aérobies cellulolytiques dont l'action se traduit par la formation de taches rouge, brun, vert, rouille... ; outre cette pigmentation du papier, certaines bactéries décomposent la cellulose.

De même, l'humidité et la chaleur favorisent la destruction des microfilms en accélérant les effets de la pollution atmosphérique. Parmi les dommages que peuvent, en effet, subir les microfilms, un des plus sérieux est dû à l'oxydation locale de l'argent de l'image qui entraîne la formation de dépôts minuscules d'argent colloïdal coloré donnant des taches d'oxydo-réduction brun-jaunâtre. Ces taches se développent sur les couches extérieures et sur les rayures de l'émulsion, en plus grand nombre sur les négatifs que sur les positifs. Le développement de ces taches, observées pour la première fois dans les années 1960, s'effectue au rythme de 10 % par an.

Les insectes

Les derniers agents de destruction qui s'attaquent principalement aux papiers, aux cuirs et au bois sont les insectes : depuis les « poissons d'argent », longs de 8 à 11 mm, recouverts d'écailles, qui affectionnent les endroits sombres et frais et tracent dans les volumes de longues coupures sinueuses, jusqu'aux termites, insectes des pays chauds mais aussi des régions tempérées, qui provoquent des dégâts d'autant plus énormes qu'ils ne sont décelables qu'au dernier moment. Citons aussi : les blattes qui creusent des galeries dans les livres ; les « poux du livre » qui s'attaquent surtout à la colle et aux cuirs ; les « vrillettes » qui percent le bois, mais aussi les livres par rangées entières, etc.

Conservation des autres éléments du document

La maintenance des documents dépend également des autres éléments matériels qui les composent ou les entourent : reliure, colle et encre pour les textes sur papier ; pochettes et boîtes pour les microfilms. La qualité de ces éléments dépend de leur composition et de leurs procédés de fabrication.

C'est la préparation du **cuir**, plus que sa nature, qui est déterminante pour sa conservation : un bon tannage végétal, à base d'écorce de chêne (aujourd'hui remplacé par des produits chimiques), ou minéral, à base d'alun ou de sels de chrome, permet d'éviter la moisissure.

Les **colles** traditionnelles à base de farine, d'os ou de poisson se décomposent et craquèlent en vieillissant par suite de l'hydrolyse de l'amidon ou de la dextrine qu'elles contiennent ; les colles synthétiques sont de meilleure qualité.

Les **encres** anciennes à base de noir de carbone en suspension dans des huiles étaient d'excellente qualité et extrêmement tenaces, comparables à l'encre de Chine actuelle. L'or et l'argent ont été utilisés pour écrire dès la Grèce antique ; au Moyen Age, on les utilisait pour l'écriture sur parchemin pourpre ou pour les enluminures réalisées avec des encres d'autres couleurs : vertes, rouges ou bleues. A partir du XII^e siècle, toutefois, on

A. Margiocco

▶ *Autres agents de destruction pour le papier et le cuir, les insectes, avec notamment les termites de l'espèce* Reticulitermes lucifugus, *qui peuvent provoquer des dégâts importants dans une bibliothèque.*

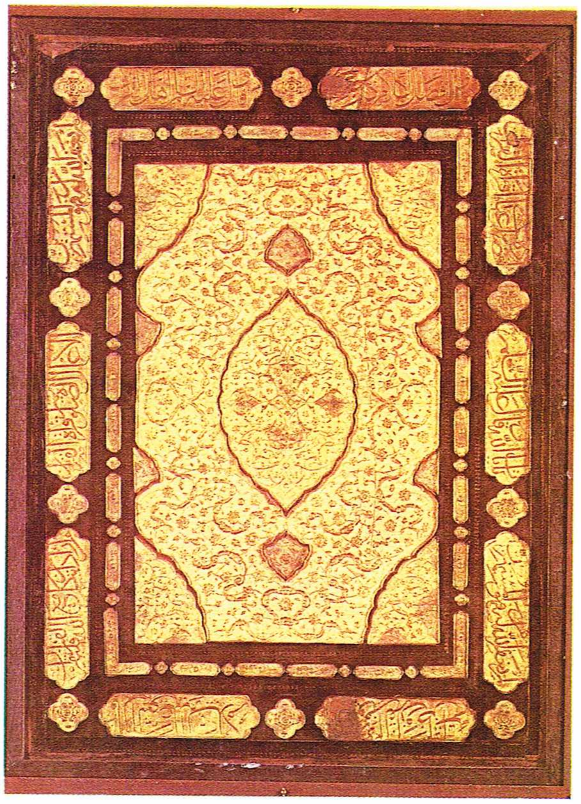
Bulloz

Bright - Rapho

▲ ***A gauche, la reliure en cuir remarquablement conservée d'une édition du Coran datée du XVI^e siècle ; plus que la qualité du cuir, c'est sa préparation qui est déterminante pour la conservation (musée du Louvre, Paris). A droite, un atelier de restauration de manuscrits à Venise.***

a commencé à utiliser des encres à base de mélange de noix de galle et de sulfate de fer de moins bonne qualité. De même, les encres renfermant de l'alun de fer et de l'aniline utilisées à partir du XIX^e siècle, très fugaces, sont corrosives pour leur support. Elles libèrent, au contact d'une humidité excessive, de l'acide sulfurique qui transforme le papier ou le parchemin en dentelle.

L'environnement immédiat du microfilm est constitué par sa **pochette** et par la **boîte** dans laquelle sont rangées les pochettes. Les films conservés dans des boîtes de carton se dégradent plus vite que ceux stockés dans des boîtes métalliques : cela semble dû à la formation de peroxyde lorsque le carton vieillit. Le peroxyde se désintègre au contact de l'argent du film qui est particulièrement protégé par la gélatine ; les hydroxyles qui se forment alors par réaction réagissent à leur tour avec la gélatine. De plus, le papier et le carton contiennent une résine préjudiciable au film. Les pochettes dans lesquelles sont placés les microfilms doivent répondre à certaines caractéristiques : résistance aux manipulations, imperméabilité aux composés neufs, fermeture aisée mais étanche. Les meilleures sont constituées d'une couche externe de polyester, d'une couche d'aluminium opaque, d'une autre couche de polyester et d'une couche interne de polythène.

Traitement et prévention

Assurer la conservation des documents, c'est donc lutter contre les multiples agents de destruction : traitements fongicides et insecticides, blanchiment chimique des taches du papier, en s'assurant que ces traitements ne seront pas eux-mêmes à l'origine de dégradations. Mais c'est surtout prévenir les attaques en choisissant, lorsque c'est possible, les procédés et matériaux de fabrication et en traitant préventivement les documents : le traitement à l'or des microfilms accroît leur résistance à l'oxydo-réduction, par exemple. La meilleure prévention consiste bien sûr à placer les documents dans les conditions matérielles les plus favorables à leur maintenance.

Ainsi, dans l'hypothèse de la construction d'un dépôt destiné exclusivement à la conservation de documents, le lieu d'implantation choisi devrait l'être en fonction de critères climatiques : faibles variations de température, éloignement de la mer pour éviter les corrosions de l'air salin, éloignement des centres industriels où la pollution atmosphérique est forte. Le bâtiment devrait être parfaitement étanche et aussi complètement isolé que possible, de façon à limiter les effets des variations climatiques extérieures ; ses fenêtres devraient permettre un éclairage suffisant, mais non excessif, et être munies de dispositifs absorbant les rayons infrarouges et ultraviolets et assurant toute l'année une température de 15 à 18 °C et une humidité relative de 55 à 65 % pour les papiers et documents sur supports traditionnels, une température de 10 à 15 °C et une humidité relative de 20 à 30 % pour les microfilms. Une propreté rigoureuse devrait y être observée, et une légère désinfection devrait y être possible annuellement grâce à une séparation en espaces moyens de stockage. Enfin des contrôles de pollution devraient être effectués régulièrement.

Les documents eux-mêmes doivent être stockés sans être tassés, de façon à garantir la libre circulation de l'air entre eux. Les microfilms seront placés dans des pochettes hermétiquement scellées, elles-mêmes placées dans des boîtes d'aluminium scellées contenant un air pur dont l'humidité relative devra être inférieure à 30 % ou, mieux, une atmosphère neutre constituée par exemple par de l'azote. Le stockage à basse température, enfin, accroît la permanence des archives sur microfilms.

Dans le cas d'archives actives : copies pour le prêt au public ou microfilms utilisés par un service et dont la conservation est nécessaire pour une brève période, dix ans par exemple, comme c'est souvent le cas dans les entreprises, les mesures de conservation sont moins rigoureuses : la température des salles devra être maintenue entre 10 et 20 °C avec une humidité relative de 20 à 50 %.

Chaque type de support de l'information présente donc des exigences particulières de conservation. Toutefois, il convient d'établir une distinction en fonction des vocations particulières des dépôts et en fonction de la nature même des documents. De toute évidence, des documents originaux, qu'il s'agisse d'ouvrages, de manuscrits, de films, de documents photographiques, exigeront des soins précis et vigilants ; de même pour des documents précieux par leur nature ou leur matière. Ce type de documents est généralement réuni dans des établissements dont la vocation fondamentale est la conservation : bibliothèques nationales, fonds ancien des bibliothèques locales, archives. Ailleurs, dans les bibliothèques publiques, spécialisées ou de recherche, les collections doivent certes être conservées ; cependant, les règles sont nécessairement assouplies afin de faciliter la consultation de l'ensemble des documents.

Bulloz

▲ *La stèle d'Hammourabi, roi de Babylone (environ 1700 av. J.-C.) porte, gravé* recto verso *en caractères cunéiformes, le code des lois en vigueur sous le règne de ce souverain (musée du Louvre, Paris) ; 20 000 autres tablettes à inscriptions cunéiformes, véritables archives découvertes à Tell Hariri, ont permis la connaissance de la vie à Babylone, à cette époque.*

▶ *Livres anciens aux Archives nationales ; devant la multiplication considérable des documents, les archivistes des ministères et des administrations sont obligés de procéder à un tri le moins arbitraire possible avant le transfert des documents aux Archives nationales.*

L'information : collecte et gestion des documents

L'information est multiple et ses origines sont diverses : du document administratif ou scientifique à l'ouvrage édité, en passant par les œuvres d'art ou les archives privées et d'entreprises. La collecte de cette information est donc difficile si on la veut exhaustive, dans l'intérêt du public et des chercheurs, et, plus généralement, dans le souci de préserver la mémoire collective. Des règles ont donc été établies pour favoriser au maximum cette collecte, aussi bien en France que dans les autres pays. Ainsi en est-il des règles de versement des archives, de la vaste entreprise de récupération qu'ont représentée les confiscations révolutionnaires en France ou encore des règles de dépôt légal des documents édités.

Outre ces enrichissements « réglementés », les collections publiques s'enrichissent grâce aux dons et legs de collectionneurs privés, bibliophiles ou scientifiques, grâce aux échanges entre établissements, grâce surtout aux achats à titre onéreux des documents édités : livres, périodiques, nouveaux media ; enfin, grâce aux relations entre chercheurs ou « par hasard » pour l'importante partie de la documentation, essentiellement scientifique, que l'on qualifie de littérature souterraine : rapports, comptes rendus de recherche, préprints... L'ensemble de ces collections est conservé et traité dans différents types d'établissements : archives, bibliothèques d'étude, de lecture publique ou de recherche, photothèques, diathèques, microthèques, discothèques... ou plus généralement médiathèques ; curieusement, en effet, lorsqu'il s'est agi de traiter des documents sur nouveaux supports, on s'est plu à décliner en « thèque » tous les nouveaux types de documents pour désigner les lieux où ils étaient entreposés, généralement d'ailleurs une bibliothèque qui conservait depuis toujours des documents de diverses natures : cartes et plans, monnaies, parchemins, tablettes, papyrus, etc.

L'habitude des documents imprimés a fortement associé les notions de livre et de bibliothèque, bien que le « biblion » n'ait guère eu de point commun, quant à sa forme, avec notre livre. La bibliothèque est de fait un lieu de dépôt de la connaissance, quel que soit le support de celle-ci et même si, pour des raisons de conservation ou de commodité de la consultation, on crée des secteurs spécialisés.

Les archives

Les archives sont constituées par l'ensemble des documents émis ou rassemblés par un organisme public ou privé, personne physique ou morale, en vue d'une activité particulière. En ce sens, les collections d'archives diffèrent profondément des collections de bibliothèque. Dans cette dernière, en effet, les documents conservés sont choisis et regroupés en fonction de critères extérieurs : philosophie, littérature, science, histoire, etc. Par contre, un fonds d'archives est le reflet de l'activité d'un organisme : qu'il s'agisse d'une société industrielle fabriquant tel ou tel produit, d'un ministère ou d'une cour de justice. L'ensemble de ces documents, comme le classement qui leur a été donné, est par conséquent important et pourra permettre à l'historien d'en déduire l'activité de l'organisme. A l'inverse, la connaissance du fonctionnement de cet organisme facilitera la consultation de ses archives.

L'archiviste n'a pas à trier et classer les documents selon ses vues propres. Il doit en faciliter la recherche et l'accès, mais sans intervenir dans leur ordre et leur présentation.

Dès la plus haute antiquité, en Assyrie, en Égypte, en Grèce et plus tard à Rome, à partir du moment où les hommes ont su consigner sur des matières durables les actes de leur vie sociale, économique, politique ou privée, ils ont éprouvé le besoin de conserver ces documents. Ces archives constituées à des fins utilitaires évidentes nous sont aujourd'hui précieuses pour éclairer les différents aspects de leur histoire. Ainsi, par exemple, les 20 000 tablettes à inscriptions cunéiformes retrouvées avant la guerre à Tell Hariri et conservées au Louvre ont permis la connaissance de la vie à Babylone à l'époque d'Hammourabi, c'est-à-dire vers 1700 avant Jésus-Christ.

Selon les pays, la collecte et le classement des archives furent plus ou moins organisés. Jusqu'au XVIIIe siècle, la notion d'archives publiques n'existe pratiquement pas, et il n'y a guère de différence entre les archives du royaume et celles des particuliers. Ainsi les ministres et secrétaires d'État conservaient les archives liées à leur activité officielle et les transmettaient à leurs héritiers. La notion d'archives d'État, au sens de conservation de documents d'intérêt public, ne s'impose vraiment qu'à la fin du XVIIIe siècle. D'ailleurs, l'intérêt des historiens pour les archives ne s'était précisé qu'aux XVIIe et XVIIIe siècles, époque à laquelle de vastes travaux d'érudition et de compilation avaient été entrepris. C'est ce mouvement d'intérêt qui permettra en France d'organiser les archives sur des bases solides à l'époque révolutionnaire par le décret du 7 messidor an II.

L'organisation actuelle des Archives de France s'inspire très directement des dispositions prises à cette époque. Les dépôts sont constitués au niveau national, départemental et communal, et les administrations y versent leurs documents. Devant la multiplication considérable des documents et avec l'apparition de la notion d'archives-instruments de travail, aussi bien pour l'historien que pour l'administration dont elles sont le produit, les archivistes ont dû modifier leur comportement vis-à-vis des produits qu'ils recevaient. Il est devenu nécessaire de procéder à un tri, le moins arbitraire possible, des documents afin de permettre leur utilisation. En France, dans la plupart des ministères, des archivistes vont trier et classer les documents avant leur transfert aux Archives nationales. Dans le reste du pays, les différents services de l'administration alimentent les dépôts d'archives départementaux ou communaux. Les communes qui n'ont pas de moyens suffisants en personnel et en matériel envoient leurs archives au dépôt départemental. Les archives peuvent également être alimentées par don ou dépôt de personnes physiques ou morales. Dans le cas d'un dépôt, les documents restent la propriété de la personne ou de la société qui les a déposés, qui peut les reprendre, et dont l'autorisation est nécessaire pour une consultation.

Une mention toute particulière doit être faite pour les *archives notariales*. Elles sont, depuis le XIVe siècle, propriété personnelle des notaires. Actuellement encore, les notaires sont tenus de garder leurs minutes pendant 125 ans, après quoi ils sont autorisés à les déposer aux

Doisneau - Rapho

Archives nationales et départementales où, avec leur autorisation, elles pourront être consultées. Elles constituent pour l'historien une source d'informations d'un intérêt considérable.

Les *archives de sécurité* forment une catégorie à part : en effet, elles ne constituent pas un fonds original, mais sont la copie des fonds existants. Les procédés modernes de micrographie permettent en effet la reproduction de tous les documents précieux ou intéressants, à des fins de conservation et parfois de communication. C'est en raison des risques de destruction par incendie ou en cas de guerre que, depuis la dernière guerre, la reproduction des archives sur microfilms a été entreprise, assez systématiquement, dans tous les pays. Le microfilm présente les avantages d'une confection rapide, d'un stockage peu encombrant, d'un transport facile, d'une reproduction aisée. Cela permet, non seulement de préserver l'information contenue dans les archives, mais souvent de la transmettre par envoi de copie de microfilm. Les archives de sécurité sont souvent conservées assez loin de leurs dépôts d'origine.

Nous avons vu précédemment que la conservation matérielle de ces documents à très long terme n'était toutefois pas sans problème. La consultation des archives est facilitée par des instruments de travail confectionnés par les archivistes : inventaires analytiques, fichiers ou tables. Les archives sont à la disposition du public, avec toutefois certaines restrictions dans l'intérêt de l'État ou des particuliers. Un délai, variable suivant les pays et la nature des documents, permet de préserver les secrets d'État ou la vie privée des citoyens. En France, il varie de 50 ans pour la plupart des fonds à 100 ans pour toutes les archives judiciaires et 125 ans pour les archives notariales.

Les bibliothèques

Les autres lieux de dépôt de l'information sont organisés d'une façon totalement différente. D'une part, les collections y sont constituées à partir d'origines diverses ; elles résultent d'une politique d'acquisitions, donc d'un choix. Le traitement des documents entrés comporte toujours cette sélection, puis une orientation, compte tenu des spécialités de la bibliothèque et non de l'origine du document. La communication, enfin, est toujours possible au public, avec des restrictions cependant pour les centres de documentation d'entreprises en vue de préserver le secret industriel.

Différents types de bibliothèques peuvent être distingués, en fonction parfois, nous l'avons vu, du type de documents qu'elles conservent et communiquent ; mais surtout en fonction des besoins qu'elles sont destinées à satisfaire, et donc des publics qu'elles desservent.

Bibliothèques nationales

Les bibliothèques nationales occupent une place à part, du fait de l'importance considérable de leurs collections, mais aussi du rôle de « mémoire nationale » qu'elles sont appelées à jouer. Une des sources principales d'accroissement de leurs collections, qui leur permet de jouer ce rôle de reflet ou de conservatoire de la vie culturelle d'un pays, est le dépôt légal.

Le **dépôt légal** a été institué en France par l'ordonnance de Montpellier, en 1537, dans le dessein de rassembler dans la bibliothèque royale « toutes les œuvres dignes d'être vues... pour avoir recours aux dits livres si, de fortune, ils étaient cy après perdus de la mémoire des hommes ou aucunemen immués, ou variés de leur vrayе et première publication ». Par la suite, les textes ont lié l'obligation de déposer à la protection des droits de l'auteur. Les modalités du dépôt ont varié en fonction de l'attitude des gouvernements vis-à-vis de la liberté d'expression. L'organisation actuelle du dépôt légal a été fixée par la loi du 21 juin 1943. Le dépôt légal des médailles avait fait l'objet d'une loi spéciale en 1929. La loi de 1943 et ses décrets d'application précisent que sont assujettis au dépôt légal « les imprimés de toutes natures (livres, périodiques, brochures, estampes, gravures, cartes postales illustrées, affiches, cartes de géographie et autres), les œuvres musicales, photographiques, cinématographiques, phonographiques mises publiquement en vente ou en distribution ou cédées pour la reproduction ». Le dépôt doit être effectué par l'imprimeur ou le producteur et par l'éditeur ou toute personne qui en tient lieu (notamment l'auteur s'éditant lui-même). L'imprimeur doit déposer deux exemplaires de chacune des publications qu'il produit à une bibliothèque municipale classée de sa région habilitée à recevoir ce dépôt. L'éditeur doit déposer quatre exemplaires

Ciccione - Rapho

◀ *Une vue de la salle de lecture de la* **Bibliothèque nationale** *à Paris ; créée par Charles V, puis continuellement enrichie depuis 1537 par le dépôt légal, la Bibliothèque nationale compte actuellement plus de 6 500 000 volumes, dont de nombreux ouvrages rares et précieux.*

De Sazo - Rapho

▲ ***La bibliothèque de l'université de Coimbra (Portugal).***

de ses publications à la Bibliothèque nationale et un au ministère de l'Intérieur. Le dépôt légal permet ainsi de collecter la quasi-totalité des documents nationaux et représente une source considérable d'accroissement pour la Bibliothèque nationale et pour un certain nombre d'autres établissements.

L'exemple français a donc inspiré un certain nombre de pays. Ainsi, aux États-Unis, les livres sont obligatoirement enregistrés au Copyright pour la protection du droit d'auteur, mais la Library of Congress ne les conserve pas tous. En U. R. S. S., un dépôt légal de 45 exemplaires alimente la Bibliothèque Lénine, les Archives nationales et un certain nombre d'autres bibliothèques. En Grande-Bretagne, le dépôt au Copyright est obligatoire : le British Museum et un certain nombre d'autres bibliothèques, dont la Bibliothèque nationale d'Édimbourg, peuvent ensuite demander un exemplaire des ouvrages à l'éditeur à titre de dépôt légal. Le dépôt légal a été instauré par une loi en 1965 seulement en Belgique, et la Suisse ne connaît encore qu'un dépôt volontaire des éditeurs. De nombreux pays neufs l'adoptent, car il est considéré sur le plan international, notamment par l'Unesco, comme le moyen de réaliser une bibliographie nationale complète, donc comme l'un des auxiliaires du Contrôle bibliographique universel (C. B. U.) qui devrait permettre de rendre accessible à tous l'ensemble des informations publiées dans le monde.

La Bibliothèque nationale à Paris, le British Museum à Londres, la Library of Congress à Washington et la Bibliothèque Lénine à Moscou sont les plus célèbres et importantes bibliothèques du monde occidental.

La **Bibliothèque nationale** tient son origine de la Bibliothèque royale créée par Charles V. Continuellement enrichie à partir de 1537 par le dépôt légal, elle a ensuite bénéficié de l'extraordinaire apport des confiscations révolutionnaires : plus de 300 000 volumes purent ainsi entrer dans ses collections. Actuellement, 20 000 livres français et 30 000 livres étrangers entrent chaque année dans son fonds, auxquels il faut ajouter quelque 1 200 000 numéros de revues... Ses collections comportent plus de 6 500 000 volumes, dont de nombreux ouvrages rares et précieux : incunables (livres édités avant 1501), reliures précieuses, éditions de luxe. Elle possède en outre 250 000 manuscrits, plusieurs centaines de milliers d'estampes, 12 millions de gravures, 2 millions de photographies, 1 million de documents musicaux, des collections remarquables d'atlas, de cartes, de globes anciens, de monnaies, de médailles et d'objets d'art.

Le **British Museum**, fondé en 1753, est à la fois un grand musée et une importante bibliothèque. La bibliothèque est extrêmement riche : 8 500 000 volumes imprimés, 150 000 manuscrits, importantes collections de musique et de cartes, de monnaies et de médailles.

La **Library of Congress** a été fondée en 1800 pour le Congrès, c'est-à-dire le Parlement américain. Elle est devenue, dans les faits sinon dans la loi, la bibliothèque nationale des États-Unis. Ses collections représentent plus de 55 millions de documents sur tous supports, y compris 3 millions de photographies, de films, de disques, de cartes, etc.

La **Bibliothèque Lénine** à Moscou est la plus récente. Elle a été créée après la révolution de 1917 pour remplacer l'ancienne Bibliothèque impériale. Elle reçoit toutes les publications d'U. R. S. S. et ses collections sont estimées à 25 000 000 de documents.

En dehors de ces très grands établissements, il existe de nombreuses autres bibliothèques dont les vocations sont plus limitées, en tout cas plus définies.

Bibliothèques municipales

Les bibliothèques municipales sont les plus proches, par leur origine et la nature de leurs collections, des bibliothèques nationales. Souvent héritières, en effet, d'un riche passé, leurs collections anciennes contiennent des documents précieux ou rares qui constituent la base de leur fonds d'étude. Elles attirent les historiens et sont souvent le siège de sociétés savantes. Parallèlement à ce rôle, elles ont en général développé des sections modernes orientées vers un plus vaste public.

L'expression « lecture publique » utilisée pour désigner ce type d'activités des bibliothèques exprime une volonté et une qualité nouvelle de service : service d'information générale et professionnelle à destination du plus large public. Le développement de cette orientation nouvelle est possible grâce à une attitude dynamique : information sur l'existence de ces possibilités, animation de la bibliothèque par des expositions ou l'organisation de débats, création d'un cadre agréable où tous les documents seront mis directement à la disposition des lecteurs avec la possibilité de les emprunter, qu'il s'agisse de livres, de revues, de photographies, de films, de diapositives ou de disques. Certains de ces documents présentent des problèmes particuliers de conservation, notamment lorsqu'ils sont prêtés : ainsi les disques risquent d'être dégradés par les manipulations et par les pointes de lecture (saphirs ou diamants) ; on sera donc amené à vérifier systématiquement les pointes de lecture avant le prêt et les disques au moment de leur retour. Ce type de bibliothèque-discothèque, ou de médiathèque, est très répandu dans les pays occidentaux : États-Unis, Canada, Grande-Bretagne, pays scandinaves, Allemagne et aussi en France.

Bibliothèques centrales de prêt

Il existe en France un autre type de bibliothèques publiques : les bibliothèques centrales de prêt (B. C. P.), instituées en 1945. Elles sont créées à la demande des départements pour assurer le développement de la lecture dans les zones à faible densité de peuplement. Elles fonctionnent dans le cadre de chaque département et doivent desservir au moyen de bibliobus les communes de moins de 20 000 habitants. En 1974, elles desservaient 16 512 communes représentant plus de 16 millions d'habitants. Leur rôle s'exerce de deux manières, soit par le dépôt renouvelé de livres dans des annexes, soit par un prêt direct dans le bibliobus, véritable bibliothèque ambulante où les lecteurs peuvent choisir directement sur les rayons les ouvrages et documents qu'ils désirent. Les bibliobus sont d'ailleurs utilisés de la même manière par les bibliothèques municipales des grandes villes pour desservir les quartiers périphériques.

Bibliothèques d'université

C'est un rôle tout différent que sont appelées à jouer les bibliothèques d'université, à mi-chemin entre les bibliothèques publiques et les bibliothèques spécialisées.

Des bibliothèques publiques, elles tiennent leur vocation de service public, désormais largement ouvert, ainsi que leur mission d'aide à la formation permanente et

leur action en faveur du développement de la lecture par l'information et par la formation de leur public à l'utilisation et à la recherche de la documentation. Des bibliothèques spécialisées, elles ont les fonctions d'auxiliaires de la recherche et les collections importantes et de haut niveau. Leur rôle est, en effet, à la fois d'accueillir et de former des étudiants de tous niveaux ainsi qu'un assez large public, et aussi de fournir aux chercheurs les instruments de travail qui leur sont nécessaires. Pour répondre à ce dernier besoin, elles doivent évidemment orienter leur politique d'acquisition, mais surtout offrir des possibilités modernes de recherche documentaire, tâches difficiles mais qu'elles parviennent à remplir efficacement.

Bibliothèques spécialisées

Les bibliothèques spécialisées sont le plus souvent rattachées à des laboratoires de recherche publics ou privés. Leur caractère est de n'être pas encyclopédiques, mais limitées à un domaine plus ou moins étendu. Leurs collections sont donc délimitées et présentent souvent un grand intérêt du fait de cette spécialisation. Il n'y a plus aujourd'hui de différence entre un centre de documentation et une bibliothèque de recherche. A l'origine, l'expression avait été créée pour désigner un des aspects de l'activité d'une bibliothèque : la recherche de références, traditionnellement appelée recherche bibliographique, plus souvent désignée aujourd'hui sous le nom de recherche documentaire. Le centre de documentation était donc le lieu où étaient stockées et traitées les références, par opposition à la bibliothèque où étaient traités et stockés les documents eux-mêmes. Par une évolution logique, les centres ont dû recourir aux documents eux-mêmes et donc les acquérir et les traiter, si bien qu'actuellement l'expression « centre de documentation » et le mot « bibliothèque » désignent sensiblement le même type d'établissement et la même qualité de service.

Conservation, élimination - Coopération entre bibliothèques

Chacun des établissements qui a été décrit a donc une politique d'acquisition particulière. Dans ces conditions et, surtout, à notre époque où le développement du nombre des ouvrages et documents publiés est considérable, il est nécessaire que des relations de prêt entre les divers organismes chargés de la gestion de la documentation puissent se développer. D'autant plus qu'il n'est pas possible de tout conserver partout pour des raisons évidentes de place : les surfaces de stockage sont limitées et, d'une manière générale, l'archivage coûte cher. Nous savons déjà qu'un tri s'opère dans les archives. De la même manière, une sélection s'opère dans les fonds des bibliothèques, qui procèdent à des éliminations. L'élimination est une pratique courante, surtout dans les bibliothèques publiques, et touche essentiellement les ouvrages de lecture courante. Toutefois, il convient de prendre des précautions : il serait en effet extrêmement préjudiciable de détruire des exemplaires uniques d'ouvrages, ou encore des documents qui, sans plus d'intérêt dans leur lieu de dépôt, seraient susceptibles d'en avoir ailleurs. De là sont nées les idées d'échanges (éliminer d'un fonds ne veut pas forcément dire destruction) et surtout de concertation entre les établissements avant une décision d'élimination. Cette concertation est difficile, car la connaissance des fonds des autres établissements n'est pas aisée. Certes, toutes les bibliothèques ont au moins des catalogues sur fiches, et certaines des catalogues imprimés, mais si la consultation de ces derniers est possible à distance, ils sont rarement à jour. Un instrument de travail manque donc à ce niveau.

Bibliothèques nationales de prêt

L'idée d'un dépôt dans des bibliothèques de conservation qui pourraient exister au niveau des régions semble donc une solution moyenne intéressante. Le besoin évoqué de connaissance des fonds des divers établissements aux niveaux national et international est également indispensable au prêt inter-bibliothèques. Les difficultés rencontrées pour la localisation des ouvrages ont suscité la naissance de réseaux informatiques de gestion, et ont été à l'origine des créations de bibliothèques nationales de prêt qui présentent des avantages complémentaires.

U.T.C.

▲ *Les bibliothèques universitaires ont un double rôle, d'une part accueillir les étudiants de tous niveaux ainsi qu'un assez large public, d'autre part fournir aux chercheurs les documents de haut niveau qui leur sont nécessaires (Bibliothèque de l'université de Compiègne).*

En France, parmi les centres de coopération scientifique qui entoureront la Bibliothèque nationale, on envisage la création d'un Centre national de prêt.

Un des exemples de bibliothèque nationale de prêt les plus intéressants est celui de la British Lending Library Division (B.L.L.D.), installée près de Londres. C'est la première bibliothèque nationale, et la seule fonctionnant actuellement, créée exclusivement pour le prêt. Elle est rattachée directement au Parlement britannique. Son origine remonte à 1916, mais elle existe dans sa forme actuelle depuis 1973. Ses collections se sont constituées progressivement, en étudiant la demande et en partant du principe qu'il fallait acquérir les ouvrages demandés, même s'ils existaient dans d'autres bibliothèques, et non acheter des collections peu demandées sous prétexte de combler des lacunes. Elle sert en outre de dépôt pour les collections éliminées dans les autres bibliothèques. C'est une des raisons du succès de l'expérience. Une autre raison est la qualité du service, extrêmement rapide : la B.L.L.D. n'a pas en effet de lecteurs propres, de telle sorte que ses documents sont toujours disponibles ; le délai de fourniture est donc extrêmement rapide. En 1976, la B.L.L.D. a répondu à 2 500 000 demandes, dont 50 % ont été satisfaites le jour de leur arrivée, 75 % le lendemain...

Ce service est un complément majeur du système de prêt inter-bibliothèques : il permet de décharger l'ensemble des bibliothèques d'une lourde tâche, surtout pour toutes les publications récentes. Il permet aux autres bibliothèques d'exploiter davantage les fonds locaux.

Catalogues collectifs

Un autre moyen de favoriser les échanges consiste à faciliter la localisation des ouvrages et collections : donc à constituer des catalogues collectifs. Ceux-ci existent déjà de manière plus ou moins développée, généralement limités aux périodiques, aux niveaux locaux ou régionaux. Une idée nouvelle, rendue possible par le développement de l'informatique, est de constituer des catalogues collectifs nationaux. Leur intérêt est évident pour la localisation des ouvrages, donc pour le prêt inter-bibliothèques, mais aussi pour faciliter les politiques d'éliminations et d'échanges, permettre une politique d'acquisition, et plus généralement, une politique de développement des collections aux niveaux régionaux et nationaux.

Les impératifs liés à la constitution de ces catalogues les amènent à rendre d'autres services : il faut en effet « entrer les données », c'est-à-dire donner au catalogue

l'information dont il a besoin pour identifier les ouvrages et les localiser. L'identification d'un ouvrage se fait à partir du nom de son ou de ses auteurs, de son titre complet et de son adresse bibliographique : nom de son ou de ses éditeurs, lieu et date d'édition. Sa description comporte en outre des éléments concernant le nombre de pages, les illustrations, l'existence d'une bibliographie, etc.

Enfin, il existe un numéro d'identification du document : International Standard Book Number (I.S.B.N.) pour les monographies, et International Standard Serial Number (I.S.S.N.) pour les publications en séries (périodiques, revues, etc.). L'I.S.B.N. et l'I.S.S.N. ont été institués il y a quelques années au plan international pour faciliter l'identification des publications. Ce numéro est en principe inscrit à l'intérieur du volume, au dos de la page de titre. L'ensemble de ces éléments constitue la description ou la notice catalographique d'un ouvrage. Tous les établissements rédigent de telles notices pour leur catalogue propre. C'est cette notice qui devrait être donnée au catalogue collectif.

Réseaux de gestion

L'idée de simplification vient donc immédiatement : pourquoi tous les établissements feraient-ils le même travail, alors qu'il suffit qu'un seul le fasse? Ces idées sont relativement récentes et ont été développées au départ en Amérique du Nord.

Le premier réseau de ce type a été créé à partir de Colombus, aux États-Unis, dans les années 1970 et est connu sous le nom de Ohio College Library Center (**O.C.L.C.**). C'est un organisme privé, sans but lucratif, auquel adhèrent des bibliothèques (une centaine actuellement à travers tout le continent nord-américain). Il est organisé de manière à permettre le catalogue collectif partagé en conversationnel et l'édition des catalogues ou la réponse à des questions de localisation.

Au système **O.U.L.C.S.** (Ontario Universities' Library Cooperative System) participent 18 bibliothèques canadiennes. Chacune est reliée par des moyens téléinformatiques à un fichier central. Comme dans l'O.C.L.C., cela leur permet de faire le catalogage en coopération et en mode conversationnel.

Le **R.I.B.** (Réseau informatique des bibliothèques) développé en France par la DICA (Division de la coopération et de l'automatisation du service des bibliothèques du secrétariat d'État aux universités) s'appuie sur les mêmes principes. Le catalogue collectif national est constitué notamment par les notices réalisées par le département des entrées de la Bibliothèque nationale à partir des ouvrages reçus en dépôt légal. Toute la production française figure au fichier et sert en même temps à préparer la bande bibliographique nationale qui pourra être échangée avec les bandes des autres pays : ainsi les données bibliographiques d'un certain nombre de pays pourront être entrées automatiquement dans ce catalogue. Les bibliothèques participant au réseau peuvent interroger le catalogue lorsqu'elles ont à traiter un ouvrage : si celui-ci a déjà été traité, elles obtiennent automatiquement les fiches correspondantes. Si l'ouvrage en question ne figure pas au catalogue national, la première bibliothèque qui le reçoit doit le traiter. C'est cette façon de procéder que l'on appelle catalogage collectif ou catalogage partagé.

Le R.I.B. est en cours de constitution et a commencé à rendre ses premiers services en 1976. Il devra permettre en outre la localisation rapide des documents, puisque, bien sûr, chaque bibliothèque acquérant un ouvrage le signale au catalogue. Le prêt inter-bibliothèques sera ainsi grandement facilité. Au-delà de ces deux apports considérables, le R.I.B. sera un instrument de travail et d'information du plus haut intérêt, aux possibilités d'application multiples. Il sera d'ici à quelques années un auxiliaire inappréciable de la politique d'acquisition et de développement des établissements qui y adhéreront.

▼ L'organigramme du réseau informatique des bibliothèques (R.I.B.); ce réseau est en cours de constitution par la DICA (division de la coopération et de l'automatisation des bibliothèques du secrétariat d'État aux universités) et a commencé à rendre ses premiers services (fourniture automatique de fiches) depuis 1976. Il permettra la constitution du catalogue collectif national et de ce fait la localisation rapide des documents, facilitant ainsi le prêt inter-bibliothèques.

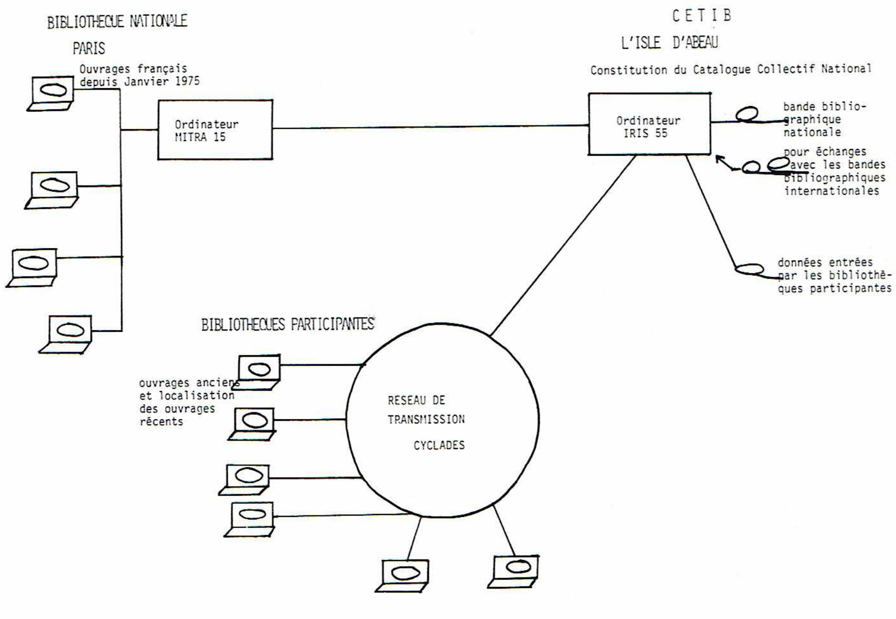

La communication et l'accès à l'information

Si l'information, et donc les documents qui la contiennent ou la supportent, est conservée et traitée, c'est dans le seul dessein de la communiquer à des fins d'information, de formation, d'étude ou de recherche : c'est la finalité unique de tous les efforts et de toutes les techniques décrits précédemment. Si ces objectifs étaient oubliés, les bibliothèques ne seraient plus que de riches collections sans intérêt. Cette communication implique le prêt matériel des documents, soit sur place, soit à domicile. La bibliothéconomie moderne a posé les principes du libre accès : les documents, livres, périodiques, disques, copies de diapositives et autres documents iconographiques sont disposés dans des meubles appropriés, en contact direct avec le lecteur qui peut se servir lui-même.

Au-delà de ces aspects matériels de la communication, un problème plus délicat se pose : celui du choix des documents, donc celui de l'orientation de la recherche avec, en corollaire, celui de la recherche bibliographique ou documentaire, et, plus généralement, de la documentation. En effet, à quoi bon se trouver devant plusieurs dizaines de milliers de documents et savoir que l'on peut facilement tous les emprunter si l'on n'a pas le moyen de « s'y retrouver »? C'est à ce besoin d'orientation du lecteur ou du chercheur qu'ont tenté de répondre divers moyens : cadres de classement, fichiers locaux analytique ou systématique utilisant des classifications de plus en plus sophistiquées, répertoires bibliographiques et, enfin, réseaux documentaires.

Cadre de classement

Le classement des documents est la façon matérielle de les ranger. Les critères peuvent varier : on classe selon l'apparence physique ou selon le contenu. Traditionnellement, l'habitude était de classer les livres par format, par ordre d'entrée dans le fonds. Un tel cadre de classement rend impossible la recherche documentaire, sinon en passant par un catalogue. Les fonds anciens des bibliothèques françaises sont souvent classés de cette manière. L'intérêt de cette méthode était de permettre un gain de place.

Pour les mêmes raisons, jointes à des impératifs au niveau de la conservation, les documents en réserve sont classés par support. Toutefois, il est apparu indispensable, particulièrement dans les établissements s'adressant au grand public, de regrouper en salle de lecture les ouvrages en fonction de leur contenu et non de leur forme. Il a fallu alors imaginer des cadres de classement qui reflètent une certaine logique : chaque établissement, en fonction de son orientation et de son public, a créé son cadre de classement, généralement dérivé, pour les bibliothèques, de la classification de Dewey ou de la classification décimale universelle (C.D.U.).

Le problème de l'intégration ou non des différents types de documents est également posé. La Bibliothèque nationale a choisi de les séparer, sauf dans sa salle des catalogues où périodiques et livres au moins sont intégrés par grands domaines. Par contre, de nouvelles bibliothèques, comme, en France, la bibliothèque-médiathèque de Cambrai ou la Bibliothèque publique d'information du centre Georges-Pompidou à Paris, ont préféré présenter aux lecteurs toute la documentation par thèmes, qu'elle se présente sous forme de livres, de revues, de disques, de films, de diapositives, etc.

Catalogues et classifications

Il n'en reste pas moins qu'un cadre de classement rend un service limité. Cadre matériel : il ne permet pas d'analyse fine ; la cote portée sur l'ouvrage ne doit comporter, pour des raisons évidentes de commodité de rangement, qu'un nombre limité de caractères, d'autant que la signalisation possible pour orienter le lecteur ne dépasse pas le niveau d'une cote par étagère. Au-delà, le code porté sur l'étiquette n'est plus transparent pour le lecteur et deviendrait donc inutile. Dans ces conditions, un relais doit donc être trouvé : c'est celui des catalogues. Le plus généralement, ces catalogues sont dactylographiés sur fiches : plusieurs fiches sont réalisées pour chaque document afin de permettre la recherche à partir de plusieurs « entrées », que l'on connaisse le nom de l'auteur du document, ou que l'on ait une idée de son contenu. Cela entraîne la réalisation de plusieurs sortes de catalogues qui contiennent chacun l'ensemble des informations liées à l'identification de l'ouvrage.

Les catalogues constituent une information secondaire : une information sur le contenu des documents. S'il est vrai qu'une information est d'autant plus intéressante qu'elle diminue davantage le nombre des possibilités ultérieures de recherche, il est aisé de comprendre que le catalogue le meilleur est celui qui répond le plus exactement à la question posée. Dans ces conditions, l'entrée la plus sûre est l'entrée auteur dont la détermination, à l'exception de certains documents collectifs comme les actes de congrès, ne pose pas de problèmes. La recherche dans ces catalogues, de même que dans les catalogues classés par titres, est aisée et assurée, mais possible seulement lorsque le chercheur connaît l'un ou l'autre de ces éléments, ce qui est rare. Le plus souvent, on recherche des informations sur un sujet donné sans avoir d'idées quant à leurs auteurs ou leurs titres éventuels. Or la réalisation et la consultation de catalogues dont l'entrée est établie en fonction du contenu des documents sont plus délicates.

Plusieurs moyens ont été imaginés qui, tous, essaient de résoudre un problème philosophique fondamental, plus précisément logique : celui d'une perception et de l'expression par un système de l'ensemble de la connaissance. En matière de logique formelle, le monde occidental doit beaucoup à l'Antiquité classique. Ainsi, nous avons appris, en regard de l'objet de la connaissance, à distinguer parmi ce qui nous entoure des *classes :* ensembles d'objets, d'être animés ou d'idées possédant une caractéristique commune. Cette notion de caractéristique est essentielle, puisque son choix détermine la nature d'une classification. L'opération élémentaire de la logique formelle, la dichotomie, est le choix d'une caractéristique et la distinction des objets à classer selon qu'ils possèdent ou non cette caractéristique. A chaque étape de la division, on ajoute ainsi un terme précis au terme général, et la classe se divise à partir de ce caractère.

La classification traditionnelle s'établit ainsi, partant du terme générique vers le terme spécifique, en suivant une stricte hiérarchie. La notion même de classification est fortement liée à l'abstraction. Distinguer une caractéristique, c'est forcément écarter les autres : l'arbitraire est évident, mais tout aussi inévitable. A l'écart de la logique antique, le développement des mathématiques et des sciences expérimentales a assuré une nouvelle forme de rationalisme. De nos jours, à la logique formelle de type classique se substitue la logistique qui s'éloigne du langage traditionnel et donne lieu à une multiplicité de systèmes propres à telle ou telle forme de la connaissance scientifique.

Les systèmes philosophiques susceptibles de représenter la connaissance sont très nombreux, depuis l'« arbre de Porphyre » jusqu'au *Trivium* et au *Quadrivium* de la philosophie scolastique et aux systèmes plus récents de philosophes ou de savants tels que Bacon, Kant, Leibniz, Hegel, Ampère ou encore Auguste Comte. Leur élaboration repose sur l'idée qu'il existe un ordre des sciences conforme à la raison. L'idée d'adapter de tels systèmes à la classification de documents est ancienne, malgré la difficulté que cela peut représenter. En effet, la classification des sciences est déjà extrêmement délicate du fait des multiples liens logiques existant entre les disciplines. Cette difficulté est accrue lorsqu'il s'agit de classer des informations qui peuvent traiter en même temps de plusieurs domaines de la connaissance. C'est ce qui fait la difficulté majeure de l'utilisation de classifications, même simplifiées, comme cadres de classement : la solution possible est l'acquisition du document en exemplaires multiples ou, bien sûr, le recours au catalogue. Les classifications classiques reposent sur le principe essentiel d'une conception de la connaissance en tant que tout formant une unité, un tronc, dont les différents domaines constituent les branches. A cette conception hiérarchique répond un système de codage qui utilise les chiffres ou une combinaison de chiffres et de lettres. Le code de ces classifications dites numériques ou alphanumériques emploie en outre différents symboles, tels que les points, les parenthèses, ou les signes mathématiques : +, —, /, etc. Parmi les plus connues et les plus utilisées se trouvent les classifications décimales : celle de Dewey et la classification décimale universelle dite C.D.U.

Classification de Dewey

C'est aux États-Unis à la fin du XIXe siècle, en même temps que la classification du Congrès imaginée pour répondre aux besoins en ce domaine de la Library of Congress, qu'est née l'idée de la notation décimale, avec la classification de Melvil Dewey, bibliothécaire de l'État de New York.

Le schéma général de cette classification n'est pas nouveau, toujours fondé sur l'arbre de la connaissance : la connaissance est un tout, symbolisé par le chiffre 1. Chacune des branches est donc une fraction de ce chiffre, elle-même symbolisée par un chiffre, ce qui

Viva - J. Minassian

▲ *Dans les nouvelles bibliothèques comme celle du centre Georges-Pompidou à Paris, toute la documentation est présentée par thèmes, qu'elle se présente sous forme de livres, de revues, de disques, de diapositives, etc.*

E. Lessing - Magnum

▲ *La bibliothèque de l'abbaye bénédictine d'Admont en Styrie (Autriche) ; construite en 1774, elle est richement décorée de fresques et de sculptures.*

permet de créer dix branches principales qui pourront se subdiviser chacune en autant de ramifications et ainsi de suite... Le chiffre 1, symbole de la connaissance, n'apparaît pas dans l'indice. Pour bien comprendre, il faut cependant considérer les indices comme des fractions de 1 et donc imaginer devant le code chiffré un « 0 » ; le mécanisme de décomposition devient alors évident. Les dix branches principales appelées *classes* sont :

000 Généralités
100 Philosophie
200 Religion
300 Sciences sociales
400 Langage
500 Sciences exactes
600 Sciences appliquées
700 Arts
800 Littérature et composition littéraire
900 Géographie - Histoire générale.

Les subdivisions se font de la façon suivante, par exemple :

600 Sciences appliquées
630 Agriculture
631 Exploitations agricoles
631.5 Cultures
631.51 Préparation du sol.

Un autre intérêt de cette classification réside dans son caractère mnémotechnique, grâce à l'utilisation pour la subdivision des autres sujets des chiffres de la classe histoire-géographie ; ainsi dans la classe 900 :

940 Histoire de l'Europe
944 Histoire de la France.

En combinant, on pourra obtenir :

700 Art
709 Histoire de l'art
709.4 Histoire de l'art en Europe
709.44 Histoire de l'art en France.

Ce sont ces côtés extrêmement pratiques, permettant de substituer un ordre relatif à un ordre fixe, qui expliquent les succès de cette classification, longtemps utilisée, non seulement pour la recherche, mais surtout, dans sa forme simplifiée, comme cadre de classement des ouvrages aux États-Unis, en Amérique latine, en Asie, en Afrique et en Europe. En France, elle est généralement employée dans les bibliothèques publiques.

Classification décimale universelle (C.D.U.)

La classification décimale universelle a été inventée par deux juristes belges, Henri-Marie La Fontaine et Paul Otlet, au début du XXe siècle ; son développement et ses mises à jour sont assurés par la Fédération internationale de documentation. Elle est largement inspirée de la classification de Dewey dont elle a conservé les grandes classes et, bien sûr, le principe de la notation décimale. Toutefois, dans le détail, elle en diffère sensiblement. Ainsi, le principe de la notation à trois chiffres, s'il est maintenu pour la séparation des indices longs, n'est pas absolu pour les notations courtes : seuls sont inscrits les chiffres significatifs. Par exemple :

0 Généralités
1 Philosophie
2 Religion
...
5 Sciences
51 Mathématiques
511 Arithmétique - Théorie des nombres
511.5 Analyse indéterminée d'ordre supérieur premier.

Mais l'originalité de la C.D.U. repose surtout sur la création de connexions et de subdivisions communes dont la lecture est facilitée par l'introduction de signes mathématiques ou de ponctuation aux côtés des chiffres. Parmi les signes de connexions, le signe « + » signale l'addition de deux disciplines (7 + 11 : art et métaphysique), le signe « : » établit une relation entre deux domaines (7 : 17 : les rapports de l'art et de la morale). Parmi les subdivisions communes, on peut signaler :

les « = » introduisant la notion de langue (= 40 le français ; ainsi 973 = 40 signalera un document sur l'histoire des États-Unis écrit en français) ;
les « () » signalant les lieux ; ainsi une étude sur l'art en France sera signalée par 7 (44) ;
les „«»" indiquant le temps. L'art en France du XIIe à la fin du XIVe siècle s'écrira 7 (44) « 1100-1399 » ; etc.

Les possibilités de notation de la C.D.U. font qu'elle est, dans sa forme développée, assez adaptée à la constitution de catalogues systématiques sur fiches, mais assez peu au classement matériel de volumes. Elle est surtout utilisée en Europe et dans les bibliothèques d'université ou de recherche. Malgré ses avantages, elle reste handicapée par la rigidité de sa construction hiérarchique et par les limites du cadre décimal. De nouveaux systèmes ont donc été imaginés, particulièrement à l'intention des bibliothèques spécialisées, comme le système de Henry Evelyn Bliss, autre bibliothécaire américain, ou celui de S. R. Ranganathan qui fut professeur de mathématiques, avant d'être bibliothécaire à Madras puis à l'université de Delhi.

65 BESSIS (Pierre). - Qu'est-ce-que la créativité ? /
BES Pierre Bessis, Hubert Jaoui. - Paris : Dunod,
1972. - VII - 116 p. ; 18 cm. - (La Vie de
l'entreprise ; 142.)

F 4404

65.011

65 BESSIS (Pierre). - Qu'est-ce-que la créativité ? /
BES Pierre Bessis, Hubert Jaoui. - Paris : Dunod,
1972. - VII - 116 p. ; 18 cm. - (La Vie de
l'entreprise ; 142.)

F 4404

Jaoui (Hubert)

65 BESSIS (Pierre). - Qu'est-ce-que la créativité ? /
BES Pierre Bessis, Hubert Jaoui. - Paris : Dunod,
1972. - VII - 116 p. ; 18 cm. - (La Vie de
l'entreprise ; 142.)

F 4404

Créativité

65 BESSIS (Pierre). - Qu'est-ce-que la créativité ? /
BES Pierre Bessis, Hubert Jaoui. - Paris : Dunod,
1972. - VII - 116 p. ; 18 cm. - (La Vie de
l'entreprise ; 142.)

F 4404

Entreprise; créativité

65 BESSIS (Pierre). - Qu'est-ce-que la créativité ? /
BES Pierre Bessis, Hubert Jaoui. - Paris : Dunod,
1972. - VII - 116 p. ; 18 cm. - (La Vie de
l'entreprise ; 142.)

F 4404

◀ ***Le plus souvent, les catalogues des bibliothèques sont dactylographiés sur fiches ; plusieurs fiches sont réalisées pour chaque document afin de permettre la recherche à partir de plusieurs « entrées », que l'on connaisse le nom de l'auteur du document ou que l'on ait une idée de son contenu ; de haut en bas respectivement, sont représentées 5 fiches établies selon la norme internationale ou International Standard Book's Description (I. S. B. D.) :***
— une fiche auteur (le nom de l'auteur est en vedette) destinée **au catalogue auteur ;**
— une fiche où un indice (65.011) établi selon la classification décimale universelle (C.D.U.) est mis en vedette ; la cote topographique (65) est également établie selon la C.D.U. mais dans une version simplifiée ; cette fiche sert à l'établissement **du catalogue systématique ;**
— une fiche mettant en évidence le nom du 2e auteur ; elle entre **au catalogue auteur ;**
— une fiche matière (un mot matière ou mot clef est mis en vedette) ; cette fiche sert à l'établissement **du catalogue matière ou analytique ;**
— une autre fiche matière ; un même ouvrage peut en effet nécessiter plusieurs entrées dans un même catalogue.

Colon classification

La Colon classification a été élaborée par Ranganathan avec deux soucis principaux : celui d'une analyse exhaustive des documents en tenant compte de tous leurs aspects, et celui de la précision dans la notation des concepts spécifiques. Il en découle la suppression de « l'arbre de la connaissance » et des subdivisions hiérarchiques. Le nouveau raisonnement se fonde sur des domaines d'étude qui ne peuvent supporter de subdivisions, puisqu'ils représentent plusieurs aspects parallèles, plusieurs *facettes*, sans hiérarchie. Il existe vingt-six domaines d'étude, assez classiques. Ces domaines sont les *foci* (les foyers). Chacun d'entre eux peut être étudié sous un grand nombre de facettes groupées en cinq catégories : Temps, Matière, Personnalité, Énergie, Lieu. Ainsi, la littérature pourra être analysée sous l'aspect de son époque, de sa forme (poésie...), de son auteur ou de son lieu d'origine. Ranganathan expose les principes de sa classification de la façon suivante : « Dans la C.C. il n'existe pas d'indices préfabriqués correspondant à un sujet. On pourrait dire que les tables de la C.C. comportent un certain nombre d'unités standards. Ces unités correspondent aux pièces d'un mécano... En combinant les indices tirés des différentes tables unitaires... les indices correspondant à tous les objets possibles peuvent être construits. Dans ce système la fonction des... symboles de connexion correspond à celle que jouent les boulons dans un système de mécano. C'est donc une classification analytico-synthétique. » Ce système permet une analyse fine et précise, qui se traduit par une notation extrêmement longue et totalement hermétique pour le lecteur.

Du catalogue matière au thesaurus

Les inconvénients du langage codé ont donc amené à reconsidérer les méthodes traditionnelles d'analyse en langage naturel. La méthode la plus couramment et la plus anciennement utilisée pour la description du contenu des documents est celle du catalogue matière : le bibliothécaire ou le documentaliste, après analyse de l'ouvrage, met en vedette quelques mots caractérisant son contenu. Une certaine hiérarchie peut exister dans ce catalogue : la vedette peut être complétée par une ou des « sous-vedettes » qui la précisent :

Ex. : Aliment, conservation.

Elle peut en outre mettre en relation deux matières lorsque le document établit un rapport entre les deux :

Ex. : Mathématiques/Physique.

Bien entendu, plusieurs entrées au catalogue matière peuvent être créées pour un même document lorsque celui-ci traite successivement de plusieurs sujets :

Ex. : Algèbre Arithmétique Géométrie.

Ce mode de traitement de l'information par mots clefs a l'avantage d'une extrême souplesse, puisque toute notion nouvelle peut y entrer couramment, mais a l'inconvénient d'une extrême subjectivité. En outre, il manque de précision du fait des sens très différents que peuvent avoir les mots (exemples : culture, circulation...) et du fait aussi que tous les termes ne sont évidemment pas utilisés, si bien que celui qui recherche une information à partir des mots dont il a l'habitude de se servir risque de ne pas la trouver sous d'autres termes. D'autre part, la grande richesse du langage naturel fait qu'il existe beaucoup de mots synonymes ou « quasi synonymes », ce qui entraîne une dispersion de l'information sur des notions exprimées par des termes différents. De plus, l'information ainsi donnée est incomplète du fait de l'absence de liens sémantiques, suggérés seulement par des renvois d'un terme à un autre, et du manque de liens hiérarchiques. Enfin, l'information peut être déformée du fait de la non-existence d'une syntaxe. Prenons l'exemple classique du « chat de ma mère » ; on mettra en vedette les mots « mère, chat », ce qui donne deux interprétations possibles.

C'est à partir de ces observations sur les catalogues matières et d'une appréciation de la rigueur logique des classifications que l'idée est venue d'organiser le langage utilisé pour la recherche documentaire. Cette organisation a pour but d'améliorer la qualité de la recherche en précisant le langage employé. A cette fin, on élimine les synonymes et on constitue des lexiques qui fixent le sens dans lequel les termes sont employés ainsi que des lexiques de « termes manquants ». Au-delà du vocabulaire, on crée entre les termes des liens sémantiques et parfois hiérarchiques ainsi qu'une syntaxe. Le résultat de cette organisation du langage se matérialise par une sorte de lexique appelé *thesaurus* dont les règles de confection sont normalisées sur le plan international. Les thesaurus sont spécialisés dans un domaine particulier ; les premiers ont été scientifiques et en langue anglaise ; actuellement ils sont de plus en plus souvent multilingues.

Recherche documentaire en dehors d'un fonds local

L'ensemble de ces moyens, des classifications aux thesaurus, constitue un auxiliaire indispensable à l'orientation du lecteur et à la recherche documentaire. Ils permettent, face à une collection donnée de documents,

de retrouver celui (ou ceux) qui intéresse tel ou tel utilisateur. Toutefois, la recherche se trouve limitée aux documents appartenant à cette collection. Or les exigences du public, et particulièrement des chercheurs, vont au-delà. Il est nécessaire de pouvoir effectuer une recherche, non seulement dans le fonds d'un établissement, mais dans la totalité des documents parus dans le monde. Différents moyens permettent de répondre à cette exigence.

Bibliographies

Les répertoires bibliographiques, ou bibliographies, sont apparus très tôt. Il s'agit d'ouvrages recensant les titres de documents et procurant une information plus ou moins précise sur ces derniers. La première nomenclature imprimée de titres de livres a été publiée en 1494 à Bâle sous le titre de *Liber de scriptoribus ecclesiasticis :* œuvre de Jean Trithème, elle recensait les écrits d'auteurs ecclésiastiques. Selon la nature des documents qui y sont recensés, les répertoires bibliographiques peuvent être nationaux ou internationaux, généraux, c'est-à-dire traitant de tous les sujets, ou spécialisés dans une seule matière.

Selon leurs caractéristiques de conception et de présentation, un certain nombre de critères de définitions ont été établis. Ils sont « primaires » lorsque les notices de signalement ont été rédigées à la vue du texte lui-même, et « secondaires » lorsque ces notices ont été extraites de bibliographies primaires. Selon le contenu de la notice, on dit qu'ils sont : signalétiques si seuls sont mentionnés les éléments d'identification de l'ouvrage ; descriptifs lorsqu'une description matérielle de la présentation et des illustrations complète cette information ; analytiques quand une analyse ou un résumé du texte du document sont joints ; critiques lorsque cette analyse comporte des appréciations de valeur. En outre, les bibliographies sont exhaustives lorsque les documents concernant le domaine choisi sont tous cités, ou sélectives lorsqu'un choix des documents est opéré en fonction de critères de valeur ou de niveau par exemple.

Enfin, les répertoires sont dits rétrospectifs lorsqu'ils recensent des ouvrages sur une période plus ancienne que l'année en cours et périodiques ou courants lorsqu'ils mentionnent des documents récents. Ce dernier type de bibliographie paraît toujours sous la forme d'une revue : les bibliographies nationales courantes en sont l'illustration la plus connue. En France, la *Bibliographie de la France/Biblio* est produite automatiquement à partir des notices entrées dans le catalogue collectif national à la Bibliothèque nationale. Elle signale chaque semaine tous les titres nouvellement parus et dont le dépôt légal a été effectué.

Les répertoires de ce genre concernent essentiellement les documents sur papier : livres, thèses, publications officielles et administratives, cartes et plans, gravures, estampes et photographies, partitions de musique, périodiques et articles de périodiques. La masse des publications contemporaines pose cependant un problème sérieux : quoique de plus en plus finement spécialisés, ces répertoires voient s'accroître les délais entre la parution des documents et le moment où ils les signalent, cela à une époque où, justement, les exigences en matière de rapidité de l'information sont impératives à tous les niveaux et particulièrement dans les domaines scientifiques.

Les problèmes posés par l'explosion documentaire depuis l'après-guerre ne peuvent plus être résolus par des moyens traditionnels : quelques chiffres donnent une idée de l'ampleur de ce phénomène, qui touche particulièrement les domaines scientifiques. Une estimation de l'Unesco fixe à une centaine le nombre des périodiques scientifiques existant en 1800. Ce chiffre est passé à 1 000 vers 1850, il dépassait les 10 000 vers 1900 pour atteindre aujourd'hui 100 000 titres. Dans le seul domaine de la chimie, on estime qu'il existe actuellement plus de 13 000 revues d'un intérêt certain. Au total, 10 millions de documents paraissent chaque année, et cet ensemble s'accroît de 4 à 5 % par an. L'énoncé de ces chiffres amène deux constatations : une bibliothèque, si riche soit-elle, ne peut plus tout posséder ; un chercheur ne peut plus tout lire. Dans ces conditions, il est nécessaire de mettre en commun les ressources documentaires et d'aider à l'analyse et à la sélection de l'information.

Réseaux documentaires

C'est à ces deux impératifs que l'on a tenté de répondre par la constitution des réseaux documentaires, qui représentent un nouvel aspect de la coopération entre bibliothèques ou centres de documentation : il ne s'agit plus d'échanger des services ou les documents eux-mêmes, comme dans le cas des réseaux de gestion, mais des informations sur l'existence et, surtout, sur le contenu des documents. Plusieurs types peuvent être distingués en fonction de leur organisation.

L'exemple type du réseau très centralisé est le *Chemical Abstracts Service* (C.A.S.) qui constitue une gigantesque unité de production. Il emploie, en effet, à Colombus, dans l'Ohio, aux U. S. A., plus de 1 000 employés. Il dépouille 12 000 périodiques en provenance de plus de 100 pays et publiés en 54 langues. Il examine en outre les brevets déposés dans 25 pays. Grâce aux quelque 3 300 analystes du monde entier dont il utilise les services, il effectue annuellement l'analyse de 200 000 documents et de 70 000 brevets. Toute l'information est centralisée à Colombus et traitée par des moyens informatiques en vue de la diffusion de différents types de revues, dont les *Chemical Titles :* index bibliographique bimensuel qui signale rapidement les documents en limitant l'information sur leur contenu à un index KWIC (Keyword in Context), réalisé par une sélection automatique de mots clefs à partir des mots contenus dans le titre des documents.

Le C.A.S. diffuse également d'autres revues, dont la plus célèbre est *Chemical Abstracts*, hebdomadaire qui donne une analyse substantielle des articles. Et surtout, il met maintenant à la disposition des utilisateurs le contenu de ses fichiers en accès direct et conversationnel grâce à la téléinformatique.

L'organisation du réseau MEDLINE est moins centralisée et fait appel à la collaboration de centres extérieurs. Depuis 1964, la National Library of Medecine (N.L.M.), dans le Maryland, aux U. S. A., a mis au point un système de recherche documentaire automatisé dénommé MEDLARS (Medical Litterature Analysis and Retrieval System) qui permet la recherche dans un fonds spécialisé d'un million et demi de documents, s'accroissant chaque année de 200 000 textes nouveaux, extraits de près de 3 000 périodiques du monde entier. Très rapidement, les utilisateurs du monde entier se sont adressés au centre MEDLARS. Aussi, dès 1967, la N.L.M. entreprit de se décentraliser en créant des centres aux États-Unis (actuellement, on en compte 13), puis au niveau international. Cette décentralisation, d'abord limitée à la recherche bibliographique, est maintenant étendue au dépouillement et à l'analyse des documents. Chaque centre national traite ainsi la littérature biomédicale de son pays. En France, c'est le centre de documentation de l'INSERM (Institut national de la santé et de la recherche médicale) qui assure cette fonction.

Le réseau a connu, à partir de 1971, un nouveau développement grâce au système MEDLINE (MEDLARS on Line) qui permet désormais l'accès instantané, en mode conversationnel, aux articles de 1 100 périodiques médicaux mondiaux à partir de terminaux d'ordinateur. Le réseau MEDLARS est fondé ainsi sur le principe du partage des tâches et des responsabilités, avec toutefois une direction à la N.L.M. où est installé l'ordinateur central auquel les centres accèdent par téléphone ou par télex.

Le réseau INIS (International Nuclear Information System) est, lui, encore plus complètement décentralisé et représente le dernier type qui sera présenté ici. Ce réseau international de documentation nucléaire est le premier à se fonder sur la participation active de la quasi-totalité des pays du monde. Le développement d'un tel réseau n'a été possible que dans un climat politique de détente ; c'est l'Agence internationale de l'énergie atomique qui en a été le support à partir de 1968.

La Section INIS est située à la Division de l'information scientifique et technique de l'Agence internationale de l'énergie atomique. Elle est le point central, localisé à Vienne en Autriche, et a la responsabilité du bon fonctionnement de l'ensemble : elle assure donc la mise à jour des documents de référence (thesaurus, listes des organismes et laboratoires, listes des titres de périodiques...), elle vérifie toutes les entrées des pays membres et leur fait faire les corrections nécessaires ; enfin elle

Recon Bibliographic File Summary									
File n°	File name	Supplier	Abstract Journal	Subject coverage	Time span	N° refs dec 1975	N° refs yearly	Update	Abstracts
1	NASA	National Aeronautics and Space Administration, U.S.A.	Scientific and technical Aerospace Reports (STAR); International Aerospace Abstracts (IAA)	Multidisciplinary; science/technology; aerospace; materials; electronics.	1962	765 000	65 000	Monthly	No
2	CHEMABS	Chemical Abstracts Service, U.S.A.	Chemical Abstracts	Biochemistry; organic macromolecular, applied, physical, analytic chemistry; chemical engineering.	1969	2 005 000	400 000	Quarterly	No
3	METADEX	American Society for Métals, U.S.A.	Metals Abstracts	Applied/theoretical metallurgy; properties of metals/alloys.	1969	187 000	30 000	Monthly	No
4	COMPENDEX	Engineering Index Inc., U.S.A.	Engineering Index	Civil, electrical, mechanical, metallurgical, engineering; electronics.	1969	450 000	110 000	Monthly	Yes
6	NTIS	National Technical Information Service U.S.A.	Governments Reports Announcements.	Multidisciplinary; science/technology.	1970	186 000	60 000	Monthly	No
7	NUCLEAR	Energy Research and Development Agency, U.S.A.	Nuclear Science Abstracts	Multidisciplinary; nuclear science/technology; physics.	1968	480 000	60 000	Monthly	No
8	INSPEC	Institute of Electrical Engineers, G.B.	Physics Abstracts; Electrical Engineering and Electronics Abstracts; Computer and Control Abstracts	Multidisciplinary; physics; electrical engineering; electronics; computers; control; automation.	1971	650 000	140 000	Monthly	Yes
9	ALUMINIUM	American Society for Metals, U.S.A.	World Aluminium Abstracts	Aluminium science, technology, applications.	1968	45 000	6 000	Monthly	Yes
11	ENVIRON	Environment Information Center, U.S.A.	Environment Abstracts	Environmental engineering; energy; pollution; resources.	1971	48 000	18 000	Monthly	No
17	ISI	Institute for Scientific Information, U.S.A.	Science Citation Index	Physical, chemical, engineering sciences.	1972	560 000	160 000	Monthly	No

▲ ***Les principaux fichiers documentaires européens que l'on peut interroger en direct à Frascati grâce au réseau de l'agence spatiale européenne (A.S.E.).***

fabrique et diffuse les produits qui sont de trois catégories, dont les documents imprimés comme la revue bibliographique *INIS Atomindex* et les documents de référence. Le deuxième type de produits est constitué par la « bibliothèque » d'INIS sous forme de microfiches qui permet la diffusion de tous les résumés et du texte des documents rares.

Enfin INIS produit des bandes magnétiques contenant ses fichiers complets, diffusées chaque mois gratuitement aux centres nationaux qui les demandent. Le correspondant français d'INIS est le Centre d'études nucléaires de Saclay. La section INIS de Vienne a donc uniquement un rôle de coordination. L'alimentation du fichier est assurée par les pays membres qui dépouillent et analysent chacun la documentation nationale et entrent directement l'information dans le système en respectant des règles strictes de traitement. En effet, plus le fonctionnement d'un réseau est décentralisé, plus la normalisation du traitement doit être précise et rigoureusement appliquée.

Banques de données

La description de ces différents réseaux amène à formuler quelques remarques permettant de définir leurs caractéristiques essentielles. En effet, quel que soit le type de leur organisation ou la nature des documents qu'ils produisent, le fondement des réseaux documentaires est la constitution d'une banque de données, autrement dit l'accumulation d'une masse d'informations. La nature des informations rassemblées détermine trois types de banques de données : celles qui contiennent les données elles-mêmes et sont à même de fournir une réponse directe à une question précise (par exemple, en France, la banque ARIANE qui fournit des réponses précises à des questions touchant les techniques du bâtiment) ; celles qui contiennent des références bibliographiques, qui sont les plus nombreuses et que l'on appelle en général, en France, les bases de données ; celles qui fournissent les textes mêmes des documents.

Ces informations devront être traitées en vue de leur diffusion générale vers d'autres centres, ou sélective vers des laboratoires spécialisés ou vers des chercheurs. Pour répondre aux impératifs de rapidité et de précision, ce traitement ne peut être envisagé que d'une manière automatisée, donc fondé sur l'utilisation d'un système informatique ; c'est là sa deuxième caractéristique.

Enfin, si la diffusion par publications périodiques ou microfiches se poursuit, la tendance est de plus en plus (ce sera la troisième caractéristique que nous retiendrons) à l'utilisation des possibilités d'interrogation directe des fichiers offertes par le développement de la téléinforma-

E. Lessing - Magnum

▲ ***La conservation de l'information est aussi réalisée par les musées et galeries de peinture ; ici, une peinture de David Teniers le Jeune (1655) représentant l'archiduc Léopold-Guillaume contemplant les tableaux de sa galerie de Bruxelles (Kunsthistorisches Museum, Vienne, Autriche).***

tique. Cette interrogation en conversationnel se fait par l'intermédiaire d'un terminal muni d'un écran de visualisation et d'une imprimante reliée à l'ordinateur central qui peut être fort éloigné. Ainsi, de n'importe quelle bibliothèque de France équipée pour de telles recherches, comme, pour ne citer que quelques exemples, la bibliothèque nationale et universitaire de Strasbourg, celles de l'université de Rennes ou de Nice, on peut accéder à l'ordinateur de l'Agence spatiale européenne à Frascati, près de Rome, qui contient notamment les fichiers CHEMABS (Chemical Abstracts), N. A. S. A., PASCAL du C. N. R. S., et ceux de neuf autres banques de données scientifiques représentant un total de 6 500 000 références.

Certaines bibliothèques, comme celles de l'université de Paris-Sud ou de l'université de technologie de Compiègne, donnent de plus accès aux banques et bases de données américaines de Lockheed Missil System (L.M.S.) et de System Development Corporation (S.D.C.) : c'est ainsi l'ensemble des publications mondiales qui est mis à la disposition de leur public.

On pourra en outre prochainement accéder aux banques et aux bases de données françaises comme ARIANE (bâtiment), THERMODATA (physico-chimie métallurgique), BIAM (médicaments), SABIR (recherche contre le cancer), TITUS (textile), aux bases de données du Bureau national de la météorologie, du Bureau des recherches géologiques et minières, du Centre de documentation de l'armement, du Centre national d'études des télécommunications, du Centre national pour l'exploiploitation des océans, du Centre national de la recherche scientifique dans le domaine biomédical, de l'Institut national de la recherche agronomique, etc.

Toute l'information accessible à tous

L'essor des réseaux documentaires a rendu indispensable la normalisation du traitement de l'information au niveau international. C'est ce à quoi s'est employé l'ISO (International Standardisation Organisation), organisme international de normalisation. Ces efforts ont été vigoureusement encouragés par l'Unesco, qui a élaboré le programme UNISIST dans le dessein de favoriser la circulation de l'information.

L'ensemble de ces efforts a abouti à la création et au développement de réseaux documentaires spécialisés comme INIS ou AGRIS (domaine de l'agriculture), mais aussi à un début de contrôle bibliographique universel par la constitution, dans un certain nombre de pays, de banques de données nationales et par la création d'un code international d'identification des documents, grâce à l'International Standard Book Number et à l'International Standard Serial Number. Ainsi, des efforts conjugués et concrets et l'utilisation de techniques modernes adaptées devraient permettre de reprendre ou de garder le contrôle de l'ensemble de l'information produite dans le monde, malgré son expansion considérable, avec l'unique objectif de la rendre accessible à chacun.

BIBLIOGRAPHIE

CHAUMIER J., *Systèmes informatiques de documentation,* Paris, Entreprise Moderne d'Édition, 1972, 116 p. - COMTE H., *Les Bibliothèques publiques en France,* Villeurbanne, Presses de l'École Nationale Supérieure de Bibliothécaires, 1977, 447 p. - FAVIER J., *Les Archives,* Paris, Presses Universitaires de France, 1975, 124 p., Que sais-je ?, n° 805. - FLIEDER F., *La conservation des documents graphiques, recherches expérimentales,* Paris, Eyrolles, 1969, 288 p., Travaux et publications du Centre international d'études pour la conservation des biens culturels et du Comité de l'ICOM pour les laboratoires de Musées, volume IX. - MARTIN H.-J., *Le Livre et la civilisation écrite,* Paris, École Nationale Supérieure de Bibliothécaires, 1968, t. 1 et 3, 190 + 209 p. - *Réseaux et systèmes de documentation,* Paris, Gauthier-Villars, 1975, 347 p., Documentation et information.

DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Les cours sur l'intelligence artificielle se généralisent actuellement dans les universités américaines; il existe un journal scientifique consacré à ce sujet, et nombreuses sont les conférences dans divers pays du monde. Le sujet ainsi nommé, « intelligence artificielle », est assez difficile à définir; on peut y inclure les rubriques suivantes : démonstration des théorèmes, prise de décision, résolution de problèmes, reconnaissance de formes, adaptation, création de langages naturels. Les mots « intelligence » et « artificielle » sont d'ailleurs assez mal regroupés dans cette expression, car il faudrait savoir ce qu'intelligence veut dire. Les psychologues utilisent une définition plutôt pragmatique : l'intelligence est l'entité que mesurent les tests... d'intelligence ! En fait, nous pensons qu'il ne faut pas attacher au vocable une importance qu'il n'a pas. Suivant le schéma proposé par Earl B. Hunt, nous placerons dans l' « intelligence artificielle » tous les domaines répertoriés ci-dessus en écartant toute discussion philosophique sur l'intelligence des machines. Dans cette partie, nous ne traiterons pas de manière exhaustive tous ces sujets; nous nous contenterons d'en indiquer le but, et nous consacrerons un développement plus complet à deux d'entre eux.

Qu'entend-on par **« résolution de problème »**? Un problème est défini par un état initial, un état final désiré et une suite d'opérations permettant d'aller de l'état initial à l'état final. Cette formulation est apparentée à celle du contrôle d'un système, avec un état initial, un état final et une trajectoire dans l'espace d'état. Quelques exemples simples permettent de voir la diversité des situations possibles. Dans le problème classique des missionnaires et des cannibales, trois missionnaires et trois cannibales doivent traverser une rivière, il n'y a qu'un seul bateau à deux places, tous peuvent ramer. Le problème est de n'avoir à aucun instant ni sur la rive de départ ni sur la rive d'arrivée plus de cannibales que de missionnaires. Il convient aussi de minimiser le nombre de traversées de la rivière. Pour formaliser ce problème, on définit un état par le nombre de missionnaires et le nombre de cannibales sur la rive de départ et la position du bateau (arrivée ou départ). L'état initial est (3, 3, Départ), l'état final est (0, 0, Arrivée). Dans la démonstration automatique de théorèmes, on se donne des prémisses et une affirmation dont le caractère exact n'est pas sûr (autrement dit, le théorème à démontrer). Il s'agit donc de développer un chemin composé d'affirmations vraies issues de règles algébriques, pour aller des prémisses à l'affirmation recherchée. Un autre exemple, simple à comprendre, mais difficile à mettre en œuvre, est fondé sur le jeu d'échecs. Comment arriver à partir d'une position des pièces, bien définie au départ, en un nombre de coups fini, à mettre « mat » le roi de l'adversaire, compte tenu des possibilités de déplacement de chacune de ses pièces et des ripostes possibles de l'adversaire ?

Dans ce domaine, les travaux ont débuté à la Rand Corporation et au Carnegie Institute of Technology (Newell, H. Simon, J. C. Shaw). Les premières recherches étaient essentiellement fondées sur la méthode appliquée par l'esprit humain pour résoudre les problèmes : établir une relation entre les entrées et les sorties d'un programme et les stimuli et réponses observés dans le domaine psychologique. Actuellement, les deux modes d'approche divergent et, tout au moins pour la résolution des problèmes, on ne cherche plus à calquer des raisonnements humains — dans la mesure où ils ont été bien compris. Ce domaine est extrêmement développé au Massachusetts Institute of Technology (MIT) et au Stanford Research Institute. Par opposition à celles de la Rand Corporation, les études du MIT sont très orientées vers les représentations formelles (jeu d'échecs, etc.). L'équipe de Mc Carthy et Minsky a considéré l'intelligence artificielle comme une extension des mathématiques et plus particulièrement de la logique; elle en a donc abandonné l'aspect lié à la psychologie. J. A. Robinson développe, à partir de 1965, une nouvelle approche de la logique formelle. L'idée est de prouver qu'une affirmation est vraie si sa négation est fausse... ce qui peut apparaître comme une évidence ! Prenons un exemple simple : soit à démontrer que $A \supset B$ (A implique B) est vraie (A est l'hypothèse, B la conclusion). La méthode de Newell et Simon consisterait, à partir d'un ensemble d'axiomes A_0, à générer par certaines règles A_1, puis A_2... ainsi de suite jusqu'à trouver un ensemble A_i qui contienne B. Une autre méthode possible consiste à montrer que la négation de $A \supset B$ est fausse. Désignons par $\overline{A}$ la négation de A .

$$\overline{A \supset B} = \overline{\overline{A} \cup B} = A \cap \overline{B}$$

Il faut donc démontrer que $(A \cap \overline{B})$ est faux, c'est-à-dire montrer que l'affirmation simultanée de A et de $\overline{B}$ est inexacte. Robinson a proposé une méthode de résolution du problème posé de cette façon-là. Pour conclure ce paragraphe, disons que l'on s'éloigne de plus en plus de la « copie » du raisonnement humain pour s'orienter vers des méthodes typiquement « machine », c'est-à-dire vers un formalisme mathématique sur la logique.

La **reconnaissance d'objet** par l'homme semble très simple, du moins pour les situations courantes. L'homme différencie facilement un véhicule d'une marque d'un autre véhicule répondant pourtant à la même fonction. C'est un problème qu'il ne se pose généralement pas. Pourtant une même voiture peut admettre des couleurs différentes, avoir des aménagements intérieurs plus ou moins recherchés... bref, pour des modèles identiques, on peut trouver des différences. Néanmoins, l'homme effectue sans peine un classement et range dans la classe du modèle X toutes les variantes élaborées par le

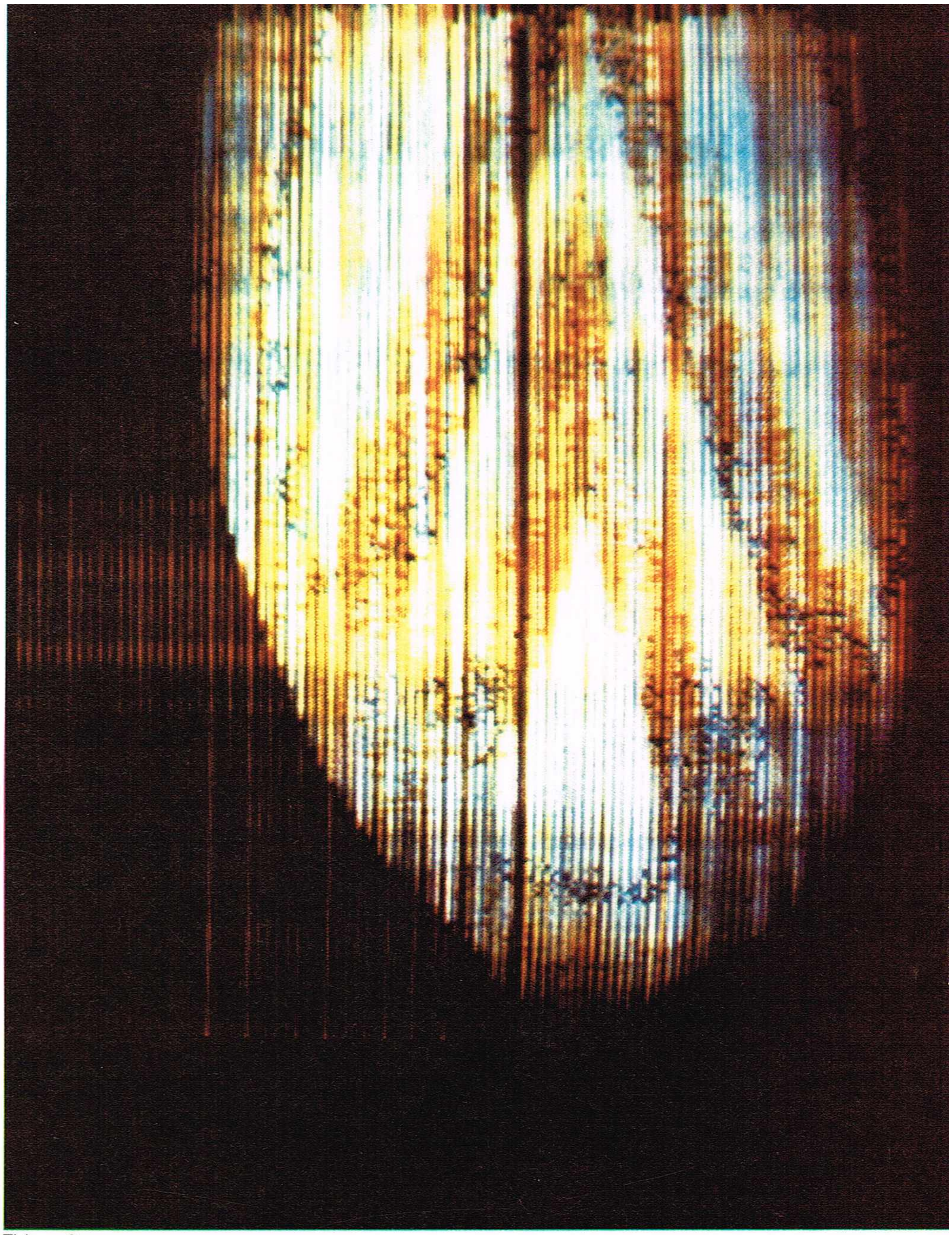

Tiziou - Sygma

▲ ***Une image de Jupiter transmise par Pionneer 10 situé à une distance de 1 100 000 km de cette planète; Jupiter étant plus gros que le champ de vision de l'appareil, celui-ci balaie la surface de la planète, entraînant ainsi une déformation en V de l'image.***

fig. 1

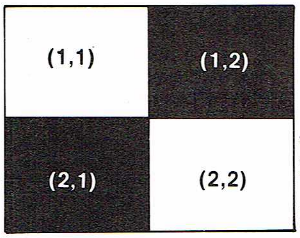

Richard Colin

vecteur représentatif (0110)

▲ *Figure 1 : un exemple de définition d'une image en noir et blanc ; le plan de l'image est divisé en quatre cellules ; la cellule à majorité noire est affectée d'un 1 ; ici, il y a quatre descriptifs, et le vecteur représentatif est (0110).*

▶ *Comment dans le jeu d'échecs (à gauche), à partir d'une position des pièces bien définie au départ et en un nombre de coups fini, arriver à mettre « mat » le roi de l'adversaire, compte tenu des possibilités de déplacement de chacune des pièces et des ripostes possibles de l'adversaire ? Un tel problème est défini par un état initial, un état final et une suite d'opérations permettant d'aller de l'un à l'autre de ces états ; sa formulation s'apparente à celle du contrôle d'un système. On a donc essayé de faire jouer des machines (à droite) ; à l'occasion d'un congrès de cybernétique le joueur français d'origine russe Tartakover a joué et perdu contre la machine mise au point en 1922 par l'ingénieur espagnol Torres-Quevedo.*

Parimage - Colin Davey

Keystone

constructeur. Pourtant tout n'a pas été appris du jour au lendemain. Qui ne s'est amusé à enseigner à son jeune enfant la notion de formes et de volumes relatifs ? Les jeux de bébé du type cubes empilables ont ce rôle, et cet apprentissage se fait, avec l'aide des parents ou parfois seul, suivant des règles internes que le père ou la mère seraient bien en peine de définir.

La reconnaissance des formes est la science qui s'occupe de définir des algorithmes permettant de classer des objets dont l'aspect a varié par rapport à un objet type. Ce que l'homme effectue naturellement, il s'agit ici de le faire faire par une machine. Ainsi, par exemple, on voudra reconnaître automatiquement l'objet « cube » au milieu d'un ensemble d'autres objets ; l'œil de la machine est une caméra, le cube à reconnaître peut avoir subi une homothétie, être un peu déformé (angles non parfaitement droits)... Malgré toutes ces modifications, l'algorithme doit pouvoir associer à cet objet inconnu le label de cube qui lui a été défini par un ensemble de propriétés. Le problème, en fait, est le suivant : pour un calculateur, comment définir qu'un changement dans la forme visualisée est négligeable et que cette dernière se rattache donc à un objet connu, ou qu'au contraire les modifications sont telles qu'il est nécessaire de définir une nouvelle classe ?

En 1958, Selfridge proposait de résoudre ce problème en calculant une certaine fonction d'éléments de base, caractères primitifs de la forme à reconnaître. On représente la forme par un vecteur à n dimensions, chaque composante étant la valeur prise pour la forme visualisée par un caractère défini (longueur d'une arête, angle de deux bords...). Dans un espace de dimension n, la forme est alors représentée par un point. Si on sait partager cet espace en régions, chacune correspondant à une forme définie, on saura effectuer la classification. Ces techniques sont en général des applications des statistiques multivariées. La première « machine » à effectuer ce travail était fondée sur le modèle d'un neurone idéal. On modélise un neurone comme un circuit à seuil basculant d'un état à l'autre lorsque la somme des excitations en entrée dépasse un certain niveau. De même, on peut imaginer un circuit ou un logiciel qui effectuent une dichotomie : si la somme pondérée des descriptifs de base de la forme est inférieure à un seuil, on « reconnaît » une forme A ; si elle est supérieure, on « reconnaît » une forme B. Cette méthode simple de reconnaissance est une méthode linéaire (travaux de Nilsson en 1965, Minsky en 1969).

En fait, les descriptifs de base dont nous avons parlé peuvent s'obtenir soit par des méthodes heuristiques, soit par des méthodes mathématiques (recherche des meilleurs éléments caractéristiques selon un certain critère). Un exemple simple de caractérisation est indiqué sur la *figure* 1. Il s'agit de définir une image noir et blanc. Le plan de l'image est divisé en cellules ; si la cellule (i, j) est à majorité noire, on affecte un « 1 » au descriptif correspondant. Sur notre exemple, l'image est définie par quatre descriptifs, donc par un point dans un espace à quatre dimensions. Le problème de classement devient un problème de classement de vecteurs. Signalons en dernière remarque que les algorithmes développés sont souvent indépendants des applications.

Programmes de jeu. Une autre application de l'intelligence artificielle, très séduisante pour l'esprit, est de faire jouer des machines. Il s'agit d'établir un programme susceptible de définir le coup suivant de manière optimale pour chaque phase de jeu. A l'heure actuelle, personne ne sait écrire un programme qui puisse atteindre les résultats humains pour des jeux complexes. Apprendre à jouer à des machines n'est pas un simple amusement (si l'on peut ainsi dire, étant donné la complexité des problèmes posés) ; cet apprentissage apporte beaucoup d'informations dans d'autres domaines de la recherche. La résolution de ces problèmes permet de définir des solutions parfois suboptimales, mais satisfaisantes pour des commandes ou des contrôles de systèmes extrêmement complexes. Une des premières applications de ce type d'étude est la définition de techniques d'apprentissage. Apprendre à quelqu'un, en effet, les règles du jeu d'échecs n'en fait pas un joueur expérimenté. Il faut jouer de nombreuses parties avec des adversaires différents pour acquérir une certaine « expérience » du jeu (on peut d'ailleurs se demander comment définir l'expérience dans un domaine). De même, pour une machine, il faut construire des logiciels auto-adaptables, qui évoluent à mesure que l'ordinateur enrichit sa connaissance. Samuel a conçu de tels logiciels répondant à la fonction « jeu d'échecs » et, bien que le jeu d'échecs soit le support de ces travaux, il n'en est nullement la finalité.

On peut aussi rattacher à l'« intelligence artificielle » la compréhension ou la reconnaissance par un calculateur du langage naturel. Là encore, il s'agit d'une application importante dont l'intérêt est évident. La particularité des ordinateurs est de nécessiter l'écriture de programmes dans un langage spécialisé avec un certain formalisme, ce qui implique la mobilisation, assez importante, du personnel adéquat. Il serait bien agréable que les machines comprennent directement des ordres écrits ou oraux énoncés dans un langage naturel. En l'état actuel des recherches, on est loin d'être arrivé à ce stade.

Un autre problème, un peu différent, mais qui concerne également la linguistique, est celui de la traduction automatique de textes d'une langue dans une autre. Au départ, on a cru qu'il relevait simplement de la capacité mémoire de l'ordinateur et qu'il suffisait d'avoir assez de place pour engranger le contenu d'un dictionnaire très complet. Aujourd'hui, cette vue optimiste n'est plus partagée, et les progrès dans ce domaine restent extrêmement faibles. Par contre, des essais sont tentés dans le domaine du tri d'information. Pouvoir réduire l'énorme flot de données circulant dans le monde, pouvoir rapidement connaître l'état d'une question à partir de l'amas de publications, congrès, réunions diverses ayant eu lieu dans ce domaine, etc., voilà qui présenterait un grand intérêt. C'est un problème d'information : il s'agit de réduire notre langage naturel, empli de redondances, à l'état d'un squelette qui définisse exactement l'information sans la réduire. Cette perspective nécessite également un important travail de recherche.

Nous terminerons cette introduction d'ensemble sur l'intelligence artificielle par quelques notions rapides sur ses **liens** possibles **avec la cybernétique.** La partie cybernétique proprement dite sera développée dans les chapitres consacrés aux systèmes, mais il est d'ores et déjà évident qu'il existe des liens entre l'intelligence artificielle et les machines automatiques susceptibles d'évoluer. Un système en mesure de s'adapter aux modifications de son environnement est un système typiquement cybernétique. Cependant, pour qu'un système soit auto-organisable, il ne lui suffit pas d'avoir des informations sur ses sorties ; une simple régulation serait alors « intelligente » ! La définition de l'auto-adaptabilité est délicate : elle doit inclure le fait que le système, non seulement, reçoit et exploite des informations sur l'extérieur et sur ses réponses, mais aussi doit pouvoir modifier sa structure pour répondre aux évolutions extérieures. Nous n'en sommes pas encore là.

Une application immédiatement perceptible est celle de la robotique ; un véhicule automatique, évoluant en milieu hostile, sur une autre planète par exemple, doit pouvoir s'adapter et éventuellement modifier son mode de « pensée » en fonction des actions extérieures. La science-fiction a déjà vulgarisé ce type de recherche. Mais, plus simplement, essayer, par exemple, de faire saisir par un bras mécanique un objet type cube placé au milieu de formes différentes n'est pas un problème facile.

Le robot construit à Stanford University et présenté en 1968 avait pour « cerveau » un ordinateur Digital Equipment PDP 11/40, pour « oreille » un microphone classique, pour « œil » une caméra de télévision et pour « bras » un bras mécanique. A partir de cette description d'un robot déjà réalisé, on perçoit nettement les difficultés propres de la robotique : technologie de miniaturisation des mémoires informatiques, traitement de données captées (images, sons...), reconnaissance de formes, commande automatique et rapide d'organes de préhension. Certaines de ces questions rejoignent celle de l'intelligence artificielle ; il est toutefois évident que nous n'allons pas traiter ici tous ces sujets. Nous focaliserons le développement sur certains points seulement.

La reconnaissance de formes

La reconnaissance de formes a été brièvement définie plus haut ; nous allons maintenant décrire les méthodologies mathématiques utilisées. Un des objectifs de la reconnaissance de formes est la *classification*, qui est une des bases de l'intelligence. Cela nous paraît si aisé que nous serions bien en peine d'en formaliser les règles. Prenons un exemple simple : soit à reconnaître la lettre **H** parmi un ensemble de lettres. Une règle pourrait être : j'identifie la lettre **H** si la figure examinée comporte deux traits verticaux reliés par une ligne horizontale (*fig.* 2a). On s'aperçoit qu'avec cette description claire et évidente, la *figure* 2b ne sera pas identifiée comme la lettre **H**, alors que l'esprit humain s'est adapté et n'a pas tenu compte du fait que, dans la *figure* 2b, le trait horizontal ne touchait pas exactement l'un des deux traits verticaux.

Prenons deux autres exemples : lorsqu'un médecin effectue un diagnostic, il ne cherche pas en fait le nom de la maladie, il doit déterminer si le patient examiné se rattache à une classe de patients pour lesquels tel traitement est recommandé. Lorsqu'un radariste examine un écho radar, il doit décider si cet écho est dû à un avion, par exemple, ou bien s'il est simplement provoqué par un phénomène aléatoire (bruit par exemple). La simple détection du phénomène est insuffisante, il y a nécessité d'une prise de décision.

Ces trois exemples sont différents : le premier relève de la perception, le second du raisonnement logique, le troisième de la théorie de la détection. Cependant, la résolution du problème posé dans chacun des cas peut nécessiter des méthodologies identiques. L'observateur dispose d'un ensemble d'objets décrits par un nombre fini d'attributs (par exemple, la définition de la lettre **H**). Chaque objet se rattache au moins à une classe. On peut alors distinguer trois problèmes : celui de la classification (l'observateur range la forme observée dans une des classes selon des règles très précises) ; celui de l'élaboration des règles de classement précédemment utilisées à partir d'un ensemble-test dont l'appartenance à une classe est connue ; enfin celui du regroupement (on établit les règles à partir d'un ensemble dont on ne connaît pas le classement).

Définissons plus complètement le problème de l'**élaboration des règles de classement** à partir d'un ensemble-test de classes connues. On peut distinguer deux procédures d'utilisation de l'ensemble-test. Il est tout d'abord possible de scinder l'ensemble-test en deux sous-ensembles, d'élaborer une règle de classement avec le premier sous-ensemble, puis de tester le deuxième sous-ensemble avec la règle du premier. Cette méthode

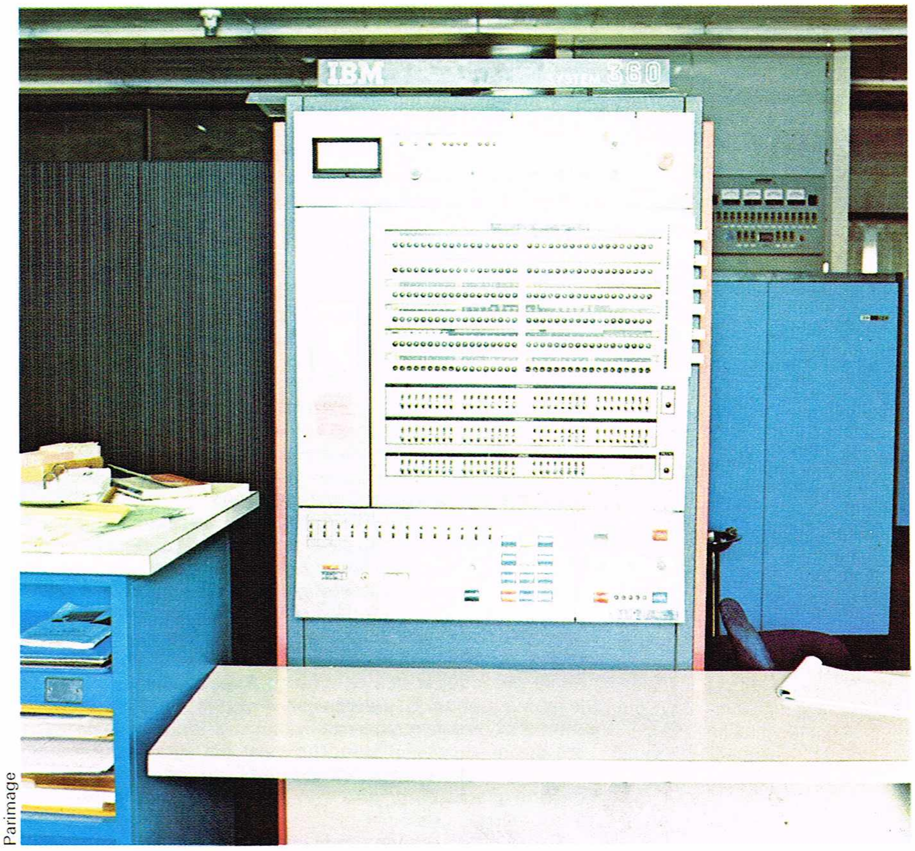

Parimage

▲ ***Le service du traitement de l'information de l'E.D.F. à Issy-les-Moulineaux (France) fonctionne à l'aide d'ordinateurs.***

▼ ***Figure 2 : un exemple simple de reconnaissance de formes, celle de la lettre*** H ***parmi un groupe d'autres lettres ; la simple définition de*** H ***comme l'ensemble de deux traits verticaux et un trait horizontal n'est pas suffisante ; en*** a, ***il s'agit bien d'un*** H, ***mais pas en*** b ***car le trait horizontal ne touche pas les deux barres verticales.***

fig. 2

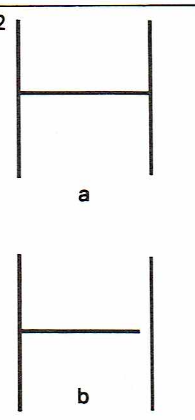

Richard Colin

permet de calculer une probabilité d'erreur de l'organe de classement ainsi élaboré. Une deuxième possibilité est de présenter les éléments de l'ensemble-test de façon séquentielle et d'adapter successivement la règle de classement jusqu'à vérifier un critère de qualité. La deuxième procédure relève typiquement de l'intelligence artificielle, puisqu'elle se développe à partir de la possibilité d'adaptation des machines (il y a évolution à mesure que l'expérience s'enrichit). En réalité, dans les expériences courantes, on ne change pas la règle de classement chaque fois que l'on décèle une erreur ; sinon on imagine facilement l'anarchie qui s'ensuivrait rapidement. Il n'y a modification que lorsque la fréquence d'erreur dépasse un certain seuil. La façon dont l'organe de reconnaissance modifie ses règles de classement est surtout déterminée par la prise en compte de l'information apportée par chaque élément de l'ensemble-test. Il peut y avoir soit mémorisation de l'information issue de l'objet-test au moment où celui-ci se présente, soit calcul statistique sur les données et mise à jour de ces statistiques.

Considérons un organe de classement fonctionnant de la manière suivante : partant d'une règle de classification arbitraire, il modifie cette règle à mesure que s'enrichit son information par la présentation de nouveaux objets-tests dont la classe est connue. Si, à un moment donné, quel que soit l'objet présenté, il n'y a plus modification des règles, on dit qu'il y a eu convergence. Si donc on se donne un algorithme d'association des règles de décision à l'information présentée, il importe de se préoccuper des conditions à respecter pour assurer la convergence. Si de plus la règle vers laquelle l'algorithme converge permet de maximiser un critère de qualité donné *a priori*, l'algorithme est dit optimal. Le critère de qualité le plus fréquemment choisi est la probabilité de bon classement, que l'on cherche à avoir supérieure à une certaine valeur.

On peut distinguer deux grands ensembles de règles de classification. Il a été précisé plus haut que tout objet pouvait être défini par un vecteur de caractères. On peut alors définir des règles dont le fonctionnement est dit parallèle ou séquentiel. Dans le premier cas, on teste toutes les composantes du vecteur, et l'appartenance de l'objet à une classe est déterminée par le résultat de tous les tests. Au contraire, dans le second cas, on teste un sous-ensemble de composantes : ou bien on peut, d'après ces tests, classer l'objet, ou bien on prend un deuxième sous-ensemble de composantes auquel on applique d'autres tests.

Concrétisons la procédure de la *méthode parallèle* : soit $\mathbf{x} = (x_1, x_2, ..., x_n)$ le vecteur descriptif de l'objet et m le nombre de classes. Dans le cas de la méthode parallèle, on connaît un ensemble de fonctions

$$F = \{f_i\}, i \text{ allant de } 1 \text{ à } m \text{ avec } f_i = f_i\ (x_1, ..., x_n)$$

un objet déterminé sera classé dans la classe k si $\max f_i\ (x_1, ..., x_n) = f_k\ (x_1, ..., x_n)$ pour i de 1 à m. Le temps nécessaire au classement d'un objet est donc égal au temps de calcul des m fonctions f_i, ce calcul pouvant être réalisé dans n'importe quel ordre.

Une description formelle de la *méthode séquentielle* est plus délicate. C'est une méthode très utilisée dans le domaine médical : on peut très bien comprendre son fonctionnement à l'aide d'un graphe (*fig.* 3). Avec le même ensemble de tests, cette méthode nécessite en moyenne moins de calculs que la méthode parallèle. On peut utiliser plusieurs types de descripteurs pour les objets. Dans la plupart des cas, ceux-ci sont définis par des mesures (par exemple, en nombre n). En utilisant un espace à n dimensions, l'objet se trouve représenté par un point dont les n coordonnées sont les valeurs des n mesures. Une classe pourra alors être représentée par une zone de cet espace, repérée par un objet type appartenant à cette classe. La méthode de classement pourra être fondée sur une notion de distance : on placera l'objet observé dans la classe la plus « proche ». Cependant, cette notion de distance n'est pas toujours précise. Ainsi, par exemple, dans le cas où les « mesures » sont des identificateurs du type sexe, race..., la description est constituée d'une liste de caractères et non de mesures, la représentation par un vecteur restant toutefois possible.

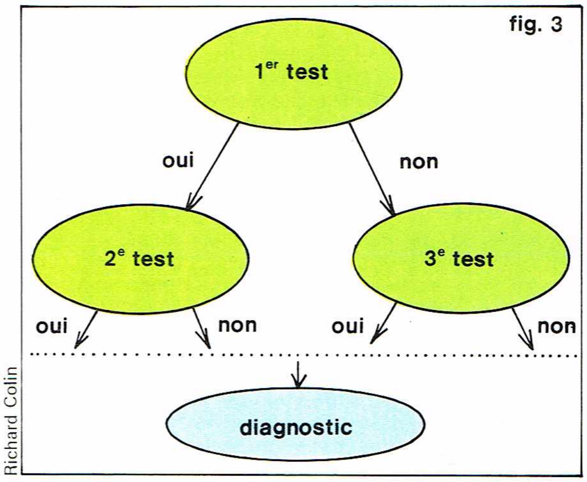

▶ *Figure 3 : un exemple d'application au domaine médical de la méthode séquentielle de classement, l'établissement d'un diagnostic à partir d'une série de tests.*

Il est également possible de réaliser une *description structurelle* des objets : l'objet est défini non par des mesures absolues comme précédemment, mais par des relations entre les composantes du vecteur. Ce type de description est particulièrement utilisé dans le domaine de la linguistique. On conçoit très bien que la description d'une phrase par son nombre de mots, de verbes ou de compléments ne présente que peu d'intérêt. Il faut préciser les liens structurels existant entre les différents composants comme pour une analyse grammaticale. Ce n'est pas la seule application de cette description ; on l'a également utilisée pour des images, dans l'informatique graphique, etc.

Les méthodes de reconnaissance et de classification dans un espace euclidien

Pour illustrer le type de problèmes auxquels nous nous intéressons, étudions l'exemple suivant, purement imaginaire. Supposons que l'on désire trier deux pièces métalliques polies de manière automatique. Le système utilisé est représenté par la *figure* 4. Une caméra prend une image de la pièce, un appareil choisit certains caractères représentatifs de l'image, un organe permet la décision après classification. Le problème réside dans l'élaboration des organes permettant d'extraire les informations contenues dans les images et d'en faire la classification. Exploitant le fait que les deux pièces « brillent » de façon différente, on va utiliser la brillance comme premier caractère. On espère que, par exemple, l'une des pièces réfléchira la lumière plus intensément que l'autre et que l'on pourra effectuer la séparation à l'aide d'un seuil. On réalise donc des mesures de brillance sur un échantillon type ; les histogrammes obtenus ne permettent visiblement pas une séparation évidente (*fig.* 5). L'étude de la brillance ne suffit donc pas.

Un examen plus attentif permet de constater que les deux pièces ont un grain différent. Ce caractère est plus

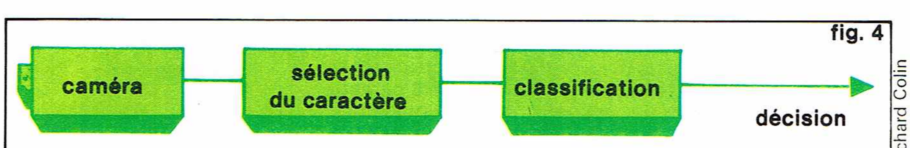

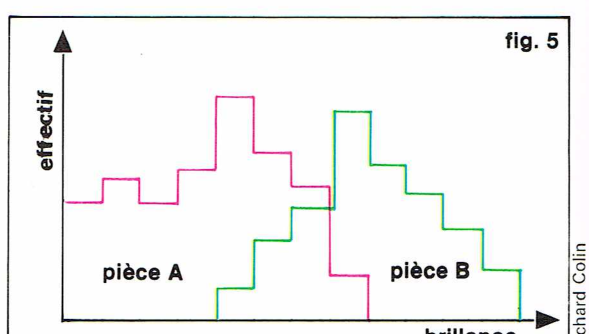

▼▶ *Figure 4 : processus utilisé pour trier automatiquement deux pièces métalliques polies ; une caméra prend une image des pièces, un appareil choisit certains caractères représentatifs de l'image, et un organe permet la décision après classification.*
Figure 5 : histogramme de la brillance d'échantillons types de pièces métalliques triées par une machine automatique ; la séparation des pièces n'est pas évidente.

délicat à mesurer, mais peut-être se déduit-il des passages du blanc au noir sur l'image. On va donc exploiter simultanément ces deux caractères : x_1 = brillance ; x_2 = grosseur du grain. Pour un échantillon choisi au hasard, on représente les diverses valeurs obtenues par un point dans le plan $(x_1 x_2)$. On constate que les points se rassemblent en deux nuages à peu près distincts que l'on peut séparer par une droite (les deux groupes sont dits linéairement séparables). Une fois connue l'équation de cette droite, l'organe de classification est élaboré, et il ne reste plus qu'à tester l'appareil construit et à estimer sa probabilité d'erreur en effectuant le classement de nouveaux échantillons dont on sait s'ils sont du type A ou B. Cet exemple simple permet de comprendre les problèmes que cherchent à résoudre les méthodes de reconnaissance de formes.

Nous supposerons dans toute la suite de ce paragraphe que les objets sont représentés par un *vecteur* dont chaque composante correspond à une mesure. Un objet est donc figuré par un point dans un espace dont la dimension est égale au nombre de composantes du vecteur représentatif. Soit *m* le nombre de classes $C_1, ..., C_m$ mutuellement exclusives, soit **x** le vecteur de l'objet dans l'espace à *n* dimensions. A chaque classe C_i correspond une région R_i de l'espace ; si l'objet à identifier a son point représentatif dans la région R_i, on l'affecte à la classe C_i. On pourra caractériser la règle de classification ainsi définie par le nombre d'erreurs commises, c'est-à-dire le nombre d'objets mal classés. Ce que nous allons développer repose sur la notion de *distance* : suivant la valeur que va prendre la fonction distance de deux objets, ceux-ci pourront être déclarés proches ou éloignés, donc placés dans la même classe ou dans deux classes différentes. Prenons comme distance la distance euclidienne classique entre **x** et **y**, $d\,(\mathbf{x}, \mathbf{y})$:

$$d\,(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \left(\sum_{i=1}^{n} (x_i - y_i)^2\right)^{1/2} \qquad (fig.\ 6)$$

x_i et y_i sont les composantes de **x** et de **y**.

Deux points **x** et **y** sont à la même distance que les points **x'** et **y'** si $x_i - y_i = x'_i - y'_i$ pour toutes les valeurs de i ; c'est une condition suffisante mais non nécessaire. Dans ce cas particulier, il suffit donc de comparer les coordonnées sur chaque axe. Cette comparaison n'est pas toujours possible, par exemple dans le cas où les descriptifs de la forme représentent une qualité et non une mesure quantitative. Ainsi, si un axe indique le caractère plus ou moins sombre d'un objet avec une échelle cardinale (un objet noir est plus sombre qu'un objet jaune), la comparaison de x_i et de y_i n'a aucun sens. C'est ce cas que nous avons écarté au départ. Au contraire, lorsqu'un axe indique par exemple une longueur, la différence entre $x_i + h$ et x_i est indépendante de la valeur de x_i ; faire cette comparaison a donc un sens. En plus de la propriété précédente, on demandera aux échelles d'être invariantes dans une transformation linéaire, ce qui simplifiera les traitements.

La technique de classification est fondée sur le *théorème de Bayes* que nous allons rappeler. Fixons-nous des hypothèses mutuellement exhaustives $H_1 ... H_n$:

$$P\,(H_i \cdot H_j) = 0 \qquad \text{pour } i \neq j$$

$$\sum_{i=1}^{n} P\,(H_i) = 1$$

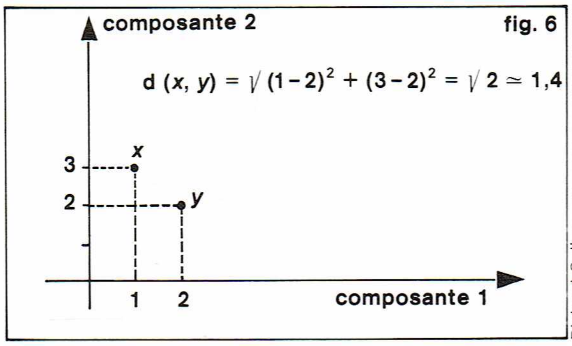

Richard Colin

◀ ***Figure 6 : notion de distance entre deux objets*** x ***et*** y ***: dans ce cas précis elle est de :***
$d(\mathrm{x}, \mathrm{y}) = \sqrt{(1-2)^2 + (3-2)^2} = \sqrt{2} \simeq 1{,}4.$

On ne peut savoir directement à partir des mesures quelle hypothèse est vraie. L'ensemble des observations est constitué de $E_1 ... E_m$. On connaît la probabilité pour que l'événement E_i se produise si l'hypothèse H_j est vraie : cette probabilité $(P\,(E_i \mid H_j)$ est une probabilité conditionnelle. Les résultats E_i sont considérés comme mutuellement exhaustifs.

$$\left.\begin{array}{l} P\,(E_i \cdot E_j \mid H_k) = 0 \\ \displaystyle\sum_{i=1}^{n} P\,(E_i \mid H_k) = 1 \end{array}\right\} \quad \forall\, k = 1, n$$

Par l'axiome des probabilités totales :

$$P\,(E_i) = \sum_{i=1}^{n} P\,(E_i \mid H_j) \times P\,(H_j)$$

Pour concrétiser ces notions, prenons un exemple simple. Soit deux hypothèses :

H_1 : l'étudiant réussit un examen ;
H_2 : l'étudiant échoue.

Les probabilités respectives de ces deux hypothèses sont 0,7 et 0,3 ; on observe trois événements E_1, E_2, E_3.

E_1 : l'étudiant a suivi tous les cours ;
E_2 : l'étudiant n'a suivi aucun cours ;
E_3 : l'étudiant a suivi 50 % des cours.

On se donne le tableau des probabilités conditionnelles :
$P\,(E_1 \mid H_1)$ = rapport du nombre d'étudiants ayant suivi tous les cours et réussi à l'examen au nombre d'étudiants ayant réussi à l'examen : 0,4.

$P\,(E_2 \mid H_2)$ = rapport du nombre d'étudiants n'ayant suivi aucun cours et ayant échoué au nombre d'étudiants ayant échoué : 0,75.

On définit de même les autres probabilités conditionnelles :

$$P\,(E_2 \mid H_1) = 0{,}2 \qquad P\,(E_3 \mid H_1) = 0{,}4$$
$$P\,(E_1 \mid H_2) = 0{,}05 \qquad P\,(E_3 \mid H_2) = 0{,}2.$$

On se pose alors le problème suivant : on a constaté que l'étudiant au cours de l'année n'a assisté à aucun cours ; quelle est la probabilité qu'il réussisse à l'examen ? Il faut donc évaluer $P\,(H_1 \mid E_2)$. D'après les définitions des probabilités :

$$P\,(E_2 \cdot H_1) = P\,(H_1 \mid E_2) \times P\,(E_2) = P\,(E_2 \mid H_1) \times P\,(H_1)$$

$$P\,(H_1 \mid E_2) = \frac{P\,(E_2 \mid H_1) \times P\,(H_1)}{P\,(E_2)}$$

D'après l'axiome des probabilités totales :

$$P\,(E_2) = P\,(E_2 \mid H_1) \times P\,(H_1) + P\,(E_2 \mid H_2) \times P\,(H_2)$$

Donc :

$$P\,(H_1 \mid E_2) = \frac{P\,(E_2 \mid H_1) \times P\,(H_1)}{P\,(E_2 \mid H_1) \times P\,(H_1) + P\,(E_2 \mid H_2) \times P\,(H_2)}$$

Pour notre exemple, on obtient :

$$P\,(H_1 \mid E_2) = \frac{0{,}2 \times 0{,}7}{0{,}2 \times 0{,}7 + 0{,}75 \times 0{,}3} = 0{,}38$$

L'exemple précédent est une application du théorème de Bayes :

$$P\,(H_i \mid E_j) = \frac{P\,(E_j \mid H_i) \times P\,(H_i)}{\displaystyle\sum_{k=1}^{n} P\,(E_j \mid H_k) \times P\,(H_k)}$$

Revenons au problème de reconnaissance de formes ; soit **x** l'objet à classer dans une des *m* classes. **x** sera placé dans la classe C_k si

$$P\,(C_k \mid \mathbf{x}) > P\,(C_i \mid \mathbf{x}) \qquad \forall\, i \neq k.$$

On sépare l'espace à *n* dimensions en *m* régions $R_1 ... R_m$; dans R_k la relation précédente est vérifiée. Appliquons le théorème de Bayes

$$P\,(C_k \mid \mathbf{x}) = \frac{P\,(\mathbf{x} \mid C_k) \times P\,(C_k)}{\displaystyle\sum_{i=1}^{n} P\,(\mathbf{x} \mid C_i) \times P\,(C_i)}$$

L'inégalité précédente s'écrit donc :

$$P\,(\mathbf{x} \mid C_k) \times P\,(C_k) > P\,(\mathbf{x} \mid C_i) \times P\,(C_i) \qquad \forall\, i \neq k.$$

Prenons un exemple avec deux classes C_1 et C_2, supposons l'objet représenté uniquement par un caractère, donc monodimensionnel. Si l'objet appartient à la classe C_1,

▶ *Figure 7 : qu'il appartienne à la classe* C_1 *ou à la classe* C_2*, l'objet x à classer suit une loi de Gauss de moyenne* m_1 *ou* m_2*.*

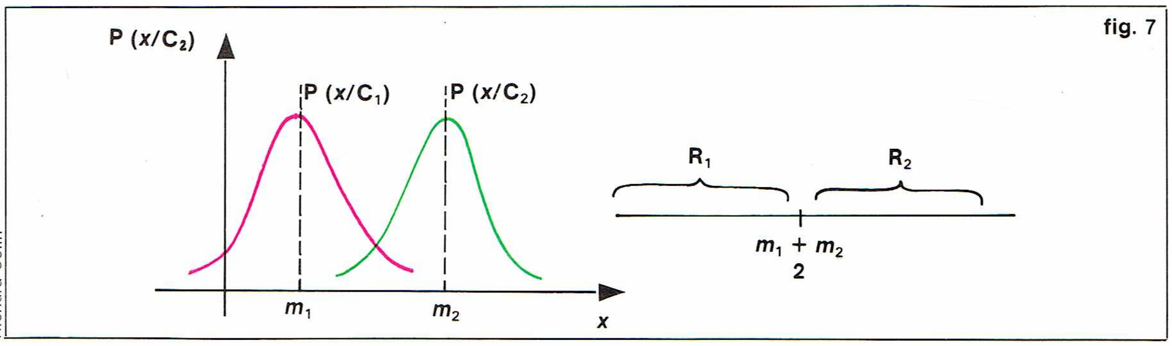

x suit une loi de Gauss de moyenne m_1 et de variance σ^2, s'il appartient à la classe C_2, **x** suit une loi de Gauss de moyenne m_2 et de variance σ^2 avec $m_2 > m_1$, donc :

$$P(\mathbf{x} \mid C_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(x - m_1)^2}{2\sigma^2}\right]$$

$$P(\mathbf{x} \mid C_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(x - m_2)^2}{2\sigma^2}\right]$$

Supposons les deux classes équiprobables :

$$P(C_1) = P(C_2) = 0{,}5\,;$$

l'application de la règle précédente conduit à classer **x** en C_1 si :

$$P(\mathbf{x} \mid C_1) \times P(C_1) > P(\mathbf{x} \mid C_2) \times P(C_2)$$

soit :

$$\exp\left[-\frac{(x - m_1)^2}{2\sigma^2}\right] > \exp\left[-\frac{(x - m_2)^2}{2\sigma^2}\right]$$

soit encore :

$$-(x - m_1)^2 > -(x - m_2)^2\,;$$

toutes simplifications effectuées, on obtient la règle suivante : **x** est classé en C_1 si $x < \frac{m_1 + m_2}{2}$.

Nous avons représenté les deux lois (*fig.* 7), ainsi que les deux régions R_1 et R_2 dans l'espace des observations, qui est ici une droite. La réponse semble logique : l'objet est classé dans C_1 si x est plus petit que la demi-somme des moyennes. Il est à remarquer que les lois de Gauss sur lesquelles nous avons raisonné ont des variances, donc des dispersions identiques, et que les classes sont équiprobables. Si cette dernière propriété, par exemple, n'était pas satisfaite, il y aurait destruction de l'aspect symétrique du problème.

La règle définie ci-dessus ne tient pas compte d'une donnée importante : le coût particulier d'une mauvaise classification. Par exemple, il peut être très grave pour un patient que le médecin ne diagnostique pas un état alarmant — d'autres erreurs de classification peuvent avoir des conséquences moins graves. Pour tenir compte de ces coûts, il suffit de modifier légèrement la règle de Bayes énoncée. Introduisons des fonctions de pondération $f(C_i/C_j)$ = coût du classement de **x** dans la classe C_i alors qu'il appartient à la classe C_j. Si **x** est classé dans C_i, le coût moyen de mauvais classement vaut :

$$\bar{f}(\mathbf{x} \in R_i) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{m} P(\mathbf{x} \mid C_j)\, P(C_j)\, f(C_i \mid C_j)\,;$$

on partage donc l'espace des observations en régions $R_1 \ldots R_m$ de façon à minimiser $\bar{f}$.

La méthode de Bayes suppose connues les probabilités *a priori* des classes et les probabilités conditionnelles $P(\mathbf{x} \mid C_i)$. Ces informations ne sont pas toujours disponibles dans certains problèmes de reconnaissance de formes. On peut alors chercher à estimer les probabilités *a priori* $P(C_i)$, à l'aide d'un échantillon type, par le rapport du nombre d'éléments de la classe C_i à la taille de l'échantillon. Encore faut-il que l'échantillon soit doublement représentatif, d'une part, de chaque classe, d'autre part, de leur fréquence d'apparition. On peut également, pour les probabilités conditionnelles $P(\mathbf{x} \mid C_i)$, faire l'hypothèse d'une loi de Gauss généralement multidimensionnelle et estimer à partir de l'échantillon type les paramètres de cette loi. C'est l'approche dite statistique.

Quand les hypothèses afférentes à cette approche ne sont pas valides, on a recours à des méthodes non paramétriques qui consistent à **classer les objets suivant leur proximité.** La distance d'un point **x** à un point **y** a été définie par :

$$d^2(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_{i=1}^{n} (x_i - y_i)^2.$$

Un point **x** est dit « proche » d'un ensemble Y de n_y points si :

$$d_1^2(\mathbf{x}, Y) = \frac{1}{n_y} \sum_{i=1}^{n_y} d^2(\mathbf{x}, \mathbf{y}_i) \qquad \text{pour } y_i \in Y$$

est faible. $d_1(\mathbf{x}, Y)$ représente la moyenne des carrés des distances de **x** aux points $\mathbf{y}_i$ de Y (*fig.* 8).

Pour comparer deux ensembles X et Y, composés respectivement de n_x et n_y points, on définit la distance moyenne inter-ensembles par

$$d_2^2(X, Y) = \frac{1}{n_x n_y} \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_y} d^2(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_j)$$

▶ *Figure 8 : définition de la distance d'un point x à un ensemble de points y.*

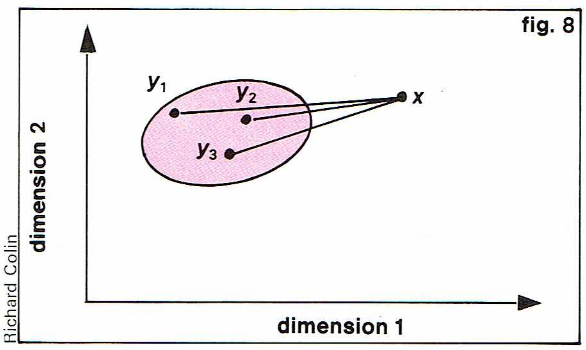

▶ *Figure 9 : un exemple de calcul de la distance inter-ensembles (distance entre les ensembles X et Y).*

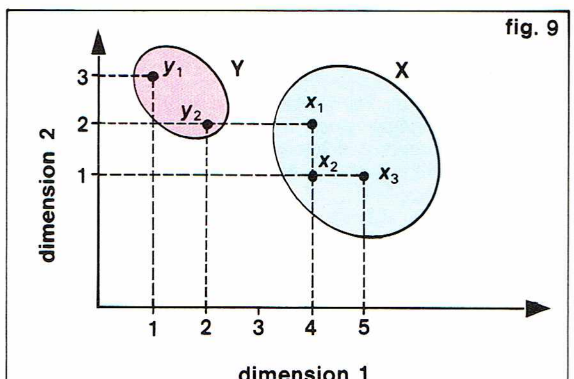

$d^2(y_1, y_2) = 2$

$d^2(x_1, y_1)$	= 10	$d^2(x_1, x_2)$	= 1
$d^2(x_1, y_2)$	= 4	$d^2(x_1, x_3)$	= 2
$d^2(x_2, y_1)$	= 13	$d^2(x_2, x_3)$	= 1
$d^2(x_2, y_2)$	= 5	$d_3^2(X)$	= 0,67
$d^2(x_3, y_1)$	= 20	$d_3^2(Y)$	= 1
$d^2(x_3, y_2)$	= 10	$d_3^2(X, Y)$	= 10,33

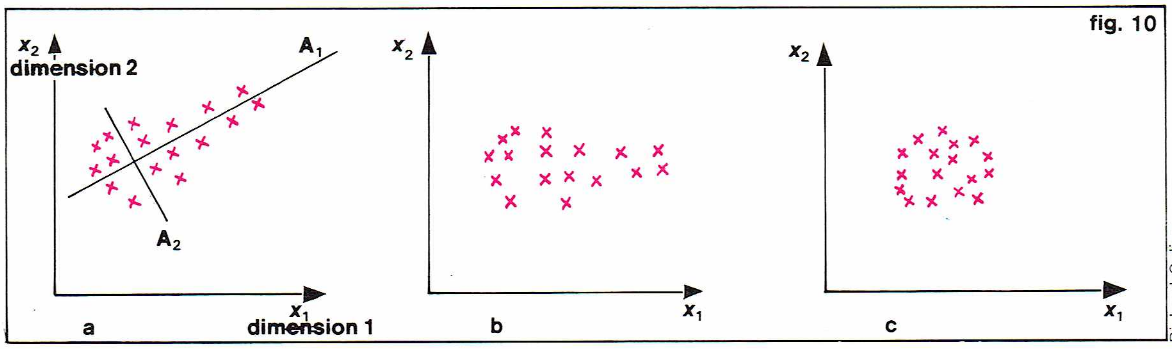

◀ *Figure 10 : transformation linéaire avec conservation des surfaces dans le cas particulier d'un espace à deux dimensions ;*
a, le groupe de points est considéré comme une ellipse ;
b, rotation des axes de coordonnées de façon à les rendre parallèles aux axes de l'ellipse ;
c, transformation de l'ellipse en cercle par changement des échelles de chaque axe.

La *figure* 9 donne un exemple de calcul de cette distance inter-ensembles. On peut enfin caractériser la notion de rassemblement de points pour un ensemble X par :

$$d_3^2(\mathrm{X}) = \frac{1}{n_x(n_x - 1)} \sum_{i=1}^{n_x - 1} \sum_{j=1}^{n_y} d^2(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$$

d_3^2 (X) est la moyenne des carrés des distances des points d'un ensemble, cette grandeur est faible si les points sont proches les uns des autres.

Pour améliorer le traitement, une idée simple est d'effectuer une transformation de l'espace des observations dans un autre espace, dans lequel les groupes correspondant à des classes différentes seraient très séparés et les points dans chaque groupe très liés. La transformation généralement cherchée est linéaire en raison des propriétés de ces transformations. Une première idée est de trouver une transformation linéaire qui minimise d_3^2 (X), autrement dit qui regroupe bien les données de chaque classe. Sans aucun développement mathématique, nous allons décrire les différentes phases de la méthode. Pour éviter une transformation triviale, on impose à la transformation de conserver les volumes d'un espace à l'autre. En fait, il suffit de trouver une transformation qui regroupe les points images dans un volume sphérique ; en effet, d_3 (X) est minimal lorsque X est une sphère. Cette transformation est représentée sur la *figure* 10, dans le cas d'un espace à deux dimensions. Au départ, le groupe de points est considéré comme formant un ellipsoïde, une ellipse dans le cas à deux dimensions *figure* 10a. On détermine les axes de cette ellipse. On effectue une rotation des axes de coordonnées de manière à les rendre parallèles aux axes de l'ellipsoïde (*fig.* 10b). Le volume n'est évidemment pas modifié par cette rotation. En changeant les échelles de chaque axe, on déforme l'ellipsoïde jusqu'à le transformer en une hypersphère (un cercle dans l'espace à deux dimensions, *fig.* 10c). Il faut simplement faire attention à ce que toute augmentation d'échelle sur un axe soit compensée par une diminution d'échelle sur un autre axe afin de préserver le volume.

On peut présenter deux objections à l'utilisation de d_3 (X) : la première est qu'il faut opérer une transformation différente pour chaque classe, ce qui complique le processus de classification ; la seconde est qu'à prendre séparément chaque classe on ne peut pas tenir compte des éventuels contrastes au sein de l'espace de départ des observations. Aussi préfère-t-on souvent un autre critère : majorer la séparation de points se trouvant dans des classes différentes en maintenant constantes les sommes des distances entre points de chaque classe. Cette méthode est appelée *analyse discriminante*. En raisonnant intuitivement, on doit aboutir à un nouvel ensemble de mesures où les éléments d'une même classe ont des valeurs semblables, les éléments de classes différentes des valeurs dissemblables. Nous ne détaillerons cette analyse parfois complexe qu'à travers un exemple dans le paragraphe consacré au diagnostic médical.

La première méthode de classification exposée supposait la connaissance des différentes lois de probabilités (règle de Bayes) ; la seconde méthode ne nécessite pas cette connaissance, elle est fondée sur des minorations ou majorations de distances moyennes. Nous allons exposer une troisième méthode qui ne fait appel à aucune de ces quantités, la **règle** dite **du « *k*-ième voisin le plus proche »**. Cette méthode est particulièrement

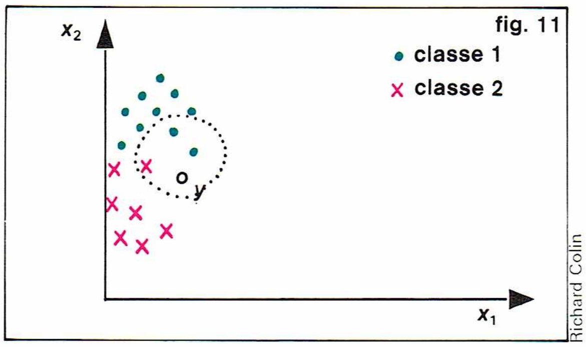

◀ *Figure 11 : méthode de classification par la règle du k-ième voisin le plus proche dans le cas d'un espace à deux dimensions et de k = 3 voisins proches ; dans ce cas, y est affecté à la classe 1, car sur trois voisins, deux appartiennent à cette classe.*

simple. Supposons que, dans l'espace à n dimensions, nous disposions d'un ensemble de formes $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, ..., \mathbf{x}_n$ dont la classe est connue. Soit **y** l'élément à classer (pour simplifier le raisonnement, nous nous placerons dans le cas d'une dichotomie, où sont données deux classes). En se fixant une distance, on examine quels sont les *k* « voisins » les plus proches : si, parmi ces *k* « voisins », il y en a plus de la classe 1 que de la classe 2, **y** est affecté à la classe 2, et réciproquement. *k* est fixé par l'utilisateur : plus il est grand, plus l'algorithme est lent. La *figure* 11 donne un exemple avec $n = 2$ et $k = 3$; l'élément **y** est affecté à la classe 1, car sur trois « voisins » deux éléments appartiennent à cette classe. Cette règle présente une propriété très intéressante. Soit p la probabilité d'erreur caractéristique de cette règle, et p_{opt} la probabilité d'erreur pour le théorème de Bayes. Si la taille l'échantillon est infinie, la probabilité p est majorée par $2\,p_{\text{opt}}\,(1 - p_{\text{opt}})$. Cette propriété est performante pour une règle simple.

Enfin, nous allons donner un exemple de **méthode adaptative** de classification : **le perceptron.** Cette machine est très connue depuis le premier article de Rosenblatt paru en 1958. Nous la présentons pour deux classes. Le principe de départ est fondé sur le modèle du neurone élaboré par Mc Culloch et Pitts en 1943. Le neurone est approché par un modèle cellulaire, un noyau dans un corps et un axe le long duquel se propagent des impulsions électriques, du corps vers les autres neurones. Arrivant à un neurone, une impulsion peut déclencher ou inhiber une impulsion le long de son axe, suivant que la dose d'excitation reçue pendant un temps Δt dépasse ou non un seuil fixé (*fig.* 12). Soit $x_1 \ldots x_n$ les excitations reçues par un neurone ; $\sum_{i=1}^{n} x_i$ est supérieur au seuil,

▼ *Figure 12 : modèle de propagation électrique le long d'un neurone ; ce modèle, qui ne tient pas compte des considérations chimiques ou neurophysiologiques, a servi de base à un algorithme adaptatif.*

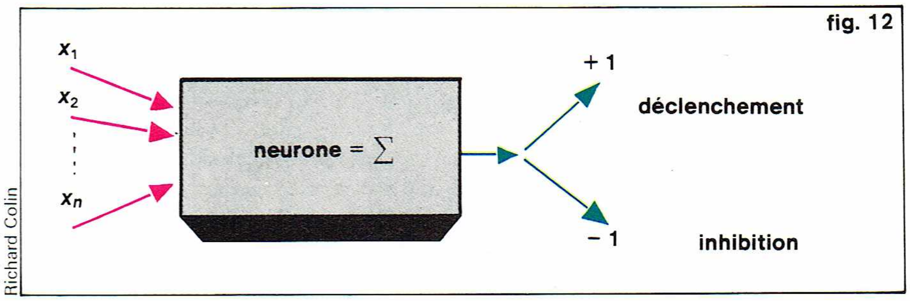

il y a déclenchement d'une impulsion. Ce modèle, qui ne tient pas compte de considérations chimiques ou neurophysiologiques, a servi de base à l'algorithme adaptatif que nous allons présenter.

On dispose d'un ensemble de formes **x** de la classe C_1 et d'un deuxième ensemble de la classe C_2 ; on recherche $N+1$ valeurs $w_1 \dots w_N, w_{N+1}$ telles que *si* $\mathbf{x} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_N \end{Bmatrix}$ est un élément de C_1, $\sum_{i=1}^{N} w_i x_i + w_{N+1} > 0$ et si **x** est un élément de C_2, $\sum_{i=1}^{N} w_i x_i + w_{N+1} < 0$. On désire obtenir les valeurs w_i, appelées poids, de manière itérative. Afin d'unifier l'écriture, ajoutons une $(N+1)$-ième composante à chaque vecteur $\mathbf{x}_i$ et prenons-la égale à 1. En ce cas, la condition vue plus haut s'écrit :

$$\sum_{i=1}^{N+1} w_i x_i > 0 \qquad \text{si } \mathbf{x} \in C_1$$

Dans ce qui suit, **x** (k) représente le vecteur **x** utilisé au k-ième pas de l'algorithme, $w_i\,(k)$ la valeur de w_i lors de ce pas. L'algorithme fonctionne comme suit :

— si à la k-ième étape $x\,(k)$ est un élément de C_1 et si $\sum_{i=1}^{N+1} w_i\,(k)\,x_i\,(k) > 0$, on ne change pas les poids w_i puisque **x** (k) est bien classé ; mais si

$$\sum_{i=1}^{N+1} w_i\,(k)\,x_i\,(k) < 0,$$

alors il faut modifier les poids w_i, ce que l'on fait suivant la règle $w_i\,(k+1) = w_i\,(k) + cx_i\,(k)$ pour $i = 1$ à $N+1$ $(c > 0)$;

— si à la k-ième étape **x** (k) est un élément de C_2 et si $\sum_{i=1}^{N+1} w_i\,(k)\,x_i\,(k) < 0$, on ne modifie pas les poids w_i, car $x\,(k)$ est bien classé ; mais si

$$\sum_{i=1}^{N+1} w_i\,(k)\,x_i\,(k) > 0,$$

il faut modifier les poids w_i suivant la règle

$$w_i\,(k+1) = w_i\,(k) - cx_i\,(k) \qquad c > 0$$

C'est une constante fixée par l'utilisateur. On peut unifier l'exposé et n'avoir qu'une règle de modification des w_i en convenant de multiplier par (-1) les vecteurs **x** de C_2. Dans ces conditions, on doit toujours avoir $\Sigma\, w_i x_i > 0$ que $\mathbf{x} \in C_1$ ou $\mathbf{x} \in C_2$. On peut démontrer que l'algorithme converge en un nombre fini de pas si l'ensemble des formes est linéairement séparable.

Prenons un exemple pour mieux comprendre le raisonnement du perceptron. Soit deux classes C_1 et C_2 et quatre formes dans un espace à deux dimensions.

$$C_1 \begin{cases} \mathbf{x}_1 = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \\ \mathbf{x}_2 = \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \end{Bmatrix} \end{cases} \quad \text{que l'on transforme en} \quad \mathbf{x}_1 = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad \mathbf{x}_2 = \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix}$$

$$C_2 \begin{cases} \mathbf{x}_3 = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \\ \mathbf{x}_4 = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \end{cases} \quad \text{que l'on transforme en}$$

$$\mathbf{x}_3 = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad \mathbf{x}_4 = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad \text{puis en} \quad \mathbf{x}_3 = \begin{Bmatrix} -1 \\ 0 \\ -1 \end{Bmatrix} \quad \mathbf{x}_4 = \begin{Bmatrix} -1 \\ -1 \\ -1 \end{Bmatrix}$$

On prend comme valeurs initiales des poids

$$w_1 = w_2 = w_3 = 0 \quad \text{et} \quad c = 1.$$

1^er^ pas : on calcule $\sum_{i=1}^{3} w_i\,(1)\,x_i\,(1) = 0$; on modifie les poids $w_i\,(2) = w_i\,(1) + x_i\,(1)$

soit $w_1\,(2) = 0 + 0 = 0$
$w_2\,(2) = 0 + 0 = 0$
$w_3\,(2) = 0 + 1 = 1$

2^e^ pas : $\sum_{i=1}^{3} w_i\,(2)\,x_i\,(2) = 1 > 0$; les poids ne sont pas modifiés :

$w_1\,(3) = w_1\,(2) = 0$
$w_2\,(3) = w_2\,(2) = 0$
$w_3\,(3) = w_3\,(2) = 1$

3^e^ pas : $\sum_{i=1}^{3} w_i\,(3)\,x_i\,(3) = -1 < 0$

donc $w_1\,(4) = 0 - 1 = -1$
$w_2\,(4) = 0 + 0 = 0$
$w_3\,(4) = 1 - 1 = 0$

4^e^ pas : $\sum_{i=1}^{3} w_i\,(4)\,x_i\,(4) = 1 > 0$

$w_1\,(5) = w_1\,(4) = -1$
$w_2\,(5) = w_2\,(4) = 0$
$w_3\,(5) = w_3\,(4) = 0$

Puisqu'on ne possède plus d'échantillon, on réitère le processus avec $\mathbf{x}_1$, puis $\mathbf{x}_2$, etc., jusqu'à obtenir une solution stable ($\Sigma\, w_i x_i > 0$ quel que soit **x**).

5^e^ pas : $\sum_{i=1}^{3} w_i\,(5)\,x_i\,(5) = 0$

$w_1\,(6) = -1 + 0 = -1$
$w_2\,(6) = 0 + 0 = 0$
$w_3\,(6) = 0 + 1 = 1$

6^e^ pas : $\sum_{i=1}^{3} w_i\,(6)\,x_i\,(6) = 1 > 0$

$w_1\,(7) = w_1\,(6) = -1$
$w_2\,(7) = w_2\,(6) = 0$
$w_3\,(7) = w_3\,(6) = 1$

7^e^ pas : $\sum_{i=1}^{3} w_i\,(7)\,x_i\,(7) = 0$

$w_1\,(8) = -1 - 1 = -2$
$w_2\,(8) = 0 + 0 = 0$
$w_3\,(8) = 1 - 1 = 0$

8^e^ pas : $\sum_{i=1}^{3} w_i\,(8)\,x_i\,(8) = 2$

$w_1\,(9) = w_1\,(8) = -2$
$w_2\,(9) = w_2\,(8) = 0$
$w_3\,(9) = w_3\,(8) = 0$

9^e^ pas : $\sum_{i=1}^{3} w_i\,(9)\,x_i\,(9) = 0$

$w_1\,(10) = -2 + 0 = -2$
$w_2\,(10) = 0 + 0 = 0$
$w_3\,(10) = 0 + 1 = 1$

10^e^ pas : $\Sigma\, w_i\,(10)\,x_i\,(10) = 1 > 0$
$w_i\,(11) = w_i\,(10)$

11^e^ pas : $\Sigma\, w_i\,(11)\,x_i\,(11) = 1 > 0$
$w_i\,(12) = w_i\,(11)$

12^e^ pas : $\Sigma\, w_i\,(12)\,x_i\,(12) = 1 > 0$
$w_i\,(13) = w_i\,(12)$

13^e^ pas : $\Sigma\, w_i\,(13)\,x_i\,(13) = 1 > 0$
w_i est stable

On constate donc, après avoir passé plusieurs fois l'échantillon dans l'algorithme, que les poids w_i ne sont plus modifiés passé une certaine étape ; la séparation optimale déterminée d'après l'échantillon est :

$$w_1 = -2, \quad w_2 = 0, \quad w_3 = 1.$$

La séparatrice est donc la droite d'équation $-2\,x_1 + 1 = 0$. En restituant les vecteurs d'origine, un nouvel élément **x** sera classé dans C_1 si $-2\,x_1 + 1 > 0$, dans C_2 si $-2x_1 + 1 < 0$. La *figure* 13 montre la séparatrice obtenue.

Cet algorithme exposé sur un cas trivial possède plusieurs généralisations, en particulier si le nombre de

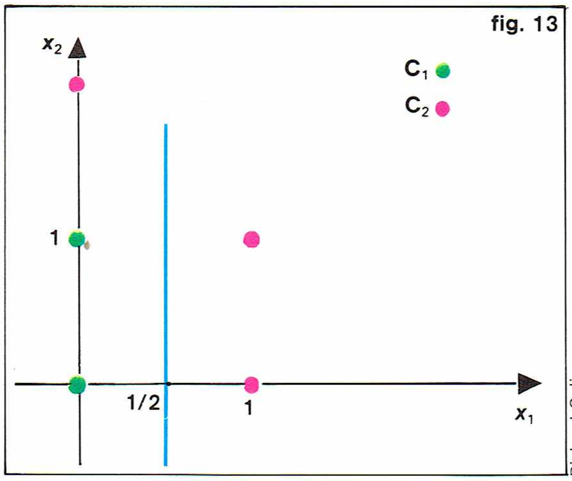

Richard Colin

◀ ***Figure 13 : la séparatrice calculée est — $2x_1 + 1 = 0$ (voir développement dans le texte).***

classes est supérieur à deux. Rappelons sa principale limite : il faut que les classes soient linéairement séparables, mais cet algorithme n'en permet pas la vérification.

Nous ne nous sommes préoccupés jusqu'à présent que du problème de la classification, c'est-à-dire de trouver une règle qui permette de décider à quelle classe appartient un nouvel objet. Nous avons vu successivement des règles de classification statistiques (théorème de Bayes), puis de critères de proximité (minimisation de fonctions distance, k-ième voisin le plus proche), et enfin le perceptron où la discrimination linéaire est déterminée de façon adaptative à partir d'un échantillon de classification connue. Dans ce dernier cas, en particulier, on doit disposer d'échantillons en nombre suffisant de chacune des classes. Ou bien les classes sont évidentes de par des raisons physiques (propriétés particulières des mesures par exemple), ou bien elles ne sont pas apparentes, et on doit alors déterminer quelles classes peuvent être réalisées à partir des mesures : c'est le but du **regroupement (« clustering »).** Le problème est de déterminer quelles formes sont suffisamment semblables pour les regrouper au sein d'une même classe. Ce problème intéresse un grand nombre de disciplines scientifiques. En psychiatrie par exemple, le classement des différentes détériorations de la personnalité en troubles psychiques dépressifs, en schizophrénie, etc., n'est pas toujours évident. Mais c'est peut-être en biologie que les techniques de regroupement ont eu le plus d'applications. Il est admis en effet que le groupement des espèces en familles et genres traduit une commune évolution. Auparavant, cette évolution avait été repérée selon un certain nombre de caractères arbitrairement choisis; actuellement, l'emploi des méthodes numériques du « clustering » a permis le développement de la taxinomie (la taxinomie ou taxonomie est la science des lois de la classification des formes vivantes).

Comme exemple d'algorithme de clustering, nous donnerons une méthode adaptative simple. On dispose d'observations $\mathbf{x}_1 \ldots \mathbf{x}_m$ dans un espace à n dimensions, et on suppose qu'il existe k classes. Chaque classe peut être représentée par un point particulier M_i analogue à un centre de gravité. L'algorithme comprend les étapes suivantes :

* Prendre les k premiers vecteurs $\mathbf{x}_1 \ldots \mathbf{x}_k$ et les utiliser comme valeurs initiales de $M_1 \ldots M_k$ que nous appellerons M_1 (0) ... M_k (0).

* Quand le vecteur $\mathbf{x}$ (i) $(1 < i < m)$ se présente, l'affecter au groupe dont il est le plus proche, c'est-à-dire au groupe représenté par M_j pour lequel la distance de $\mathbf{x}$ (i) à M_j soit minimale pour $1 \leqslant j \leqslant k$.

* Calculer les nouveaux points représentatifs M_l $(i+1)$ (centre de gravité des groupes créés) :

- si $\mathbf{x}$ (i) n'a pas été mis dans le groupe l, M_l (i) est inchangé;
- si $\mathbf{x}$ (i) a été affecté au groupe l, on détermine

$$M_l\ (i+1) \text{ par } \mathbf{OM}_l\ (i+1) = \frac{1}{n_l\ (i)+1}\ (n_l\ (i)\ \mathbf{OM}_l\ (i) + x\ (i))$$

n_l (i) est le nombre de points du groupe l quand se présente $\mathbf{x}$ (i). Un exemple va permettre de mieux comprendre le fonctionnement de cet algorithme. Soit la disposition de points présentés sur la *figure* 14 ; au départ $\mathbf{OM}_1$ (0) $= x_1$ $\mathbf{OM}_2$ (0) $= \mathbf{x}_2$ — on cherche à réaliser deux classes :

* on présente $\mathbf{x}_1$, il est affecté à la classe 1, donc rien de changé : $\mathbf{OM}_1$ (1) $=$ $\mathbf{OM}_1$ (0), $\mathbf{OM}_2$ (1) $=$ $\mathbf{OM}_2$ (0)

* on présente $\mathbf{x}_2$, il est affecté à la classe 2, rien n'est changé : $\mathbf{OM}_3$ (2) $=$ $\mathbf{OM}_1$ (1) $=$ $\mathbf{OM}_1$ (0) et
$\mathbf{OM}_2$ (2) $=$ $\mathbf{OM}_2$ (1) $=$ $\mathbf{OM}_2$ (1) $=$ $\mathbf{OM}_2$ (0)

* on présente $\mathbf{x}_3$, il est affecté à la classe 1 car M_1 (2) est le plus proche, donc $\mathbf{OM}_2$ (3) $=$ $\mathbf{OM}_2$ (2)

$$\mathbf{OM}_1\ (3) = \frac{1}{1+1}\ (1 \cdot \mathbf{OM}_2\ (2) + \mathbf{x}_4) = \binom{1}{0{,}5}$$

* on représente $\mathbf{x}_4$, il est affecté au groupe représenté par M_2 (3), c'est-à-dire à la classe 2, et en ce cas :

$$\mathbf{OM}_1\ (4) = \mathbf{OM}_1\ (3)$$

$$\mathbf{OM}_2\ (4) = \frac{1}{1+1}\ (1 \cdot \mathbf{OM}_2\ (3) + \mathbf{x}_4) = \binom{2}{0{,}5}$$

Si on continue, on constate que les groupes formés de $\{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_3\}$ et de $\{\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_4\}$ ne changent plus. En fait, si on avait posé d'autres conditions initiales ($\mathbf{x}_1$ et $\mathbf{x}_3$ par exemple), on aurait obtenu d'autres groupes, ce qui montre la sensibilité de cet algorithme. Mais il faut préciser aussi que dans notre exemple les calculs sont simples et qu'on peut former les groupes de deux vecteurs comme on le veut à cause du caractère symétrique de la figure.

Nous conclurons cette description rapide et non exhaustive des méthodes de reconnaissance des formes par la présentation des **techniques de sélection des caractères.** Trouver les caractères essentiels d'une forme permet souvent de franchir un grand pas vers la résolution du problème : qu'appelle-t-on « caractère » ? Une forme peut être représentée par un ensemble de mesures qui, s'il est important, demande une modélisation dans un espace de grande dimension. Trouver les caractères principaux ou essentiels, c'est obtenir un nombre plus faible de mesures représentatives afin de diminuer l'espace de modélisation. Prenons un exemple : la reconnaissance de

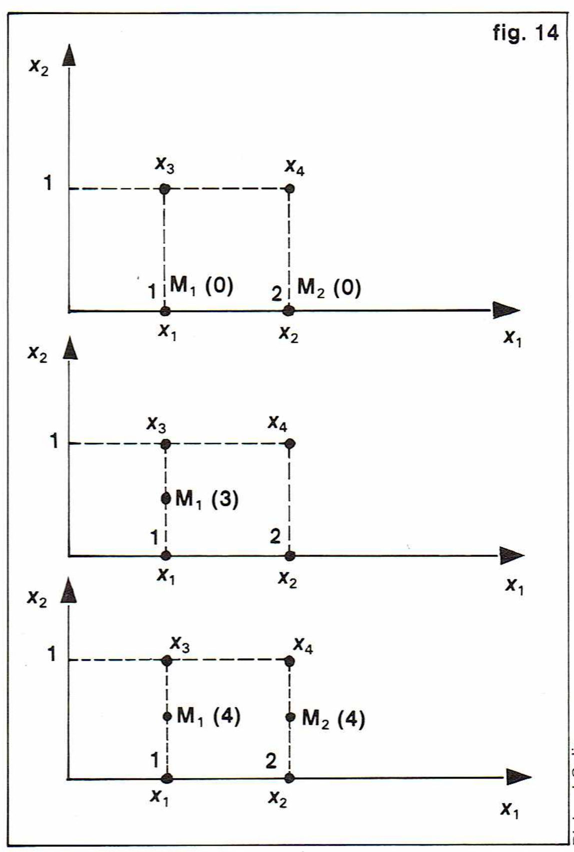

Richard Colin

◀ ***Figure 14 : évolution de l'algorithme de « clustering » développé dans le texte.***

▶ *Figure 15 : un exemple de technique de sélection des caractères, la reconnaissance des caractères écrits (voir développement dans le texte).*

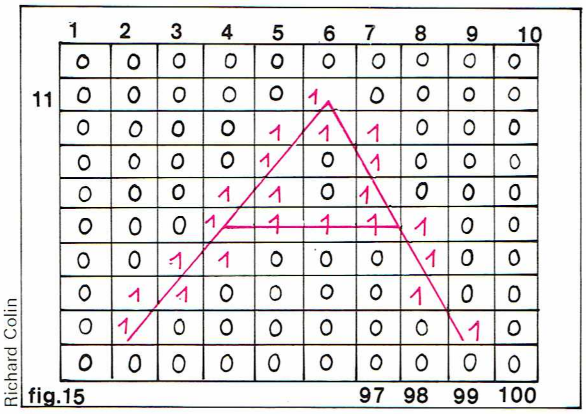

fig.15

Richard Colin

caractères écrits. On va définir chaque lettre dans un carré 10 × 10 (*fig.* 15). Chaque carré élémentaire correspond à une composante d'un vecteur de dimension 100 : chaque composante du vecteur vaut 1 ou 0 suivant que le trait de la lettre passe ou non dans le carré correspondant. L'espace de représentation a donc pour dimension 100. Il peut être intéressant de diminuer cet espace pour le ramener à une dimension plus faible. Sans réfléchir, on pourrait proposer une grille de dimension plus réduite au départ, mais on diminuerait de ce fait la précision de la lecture. Aussi préfère-t-on essayer de recouper dans des lettres similaires les points permanents que l'on sélectionnera comme caractères. Plusieurs méthodes sont possibles.

Constituons une matrice X de dimension $n \times m$, chaque ligne représentant un objet par m mesures. Ainsi l'objet $\mathbf{x}_i$ est décrit par $(x_{i1}, x_{i2}, ..., x_{im})$. Supposons que chaque terme x_{ij} représente en fait la somme pondérée de $k < m$ facteurs primitifs :

$$x_{ij} = a_{1j}f_{i1} + a_{2j}f_{i2} + ... + a_{kj}f_{ik}$$

Le terme a_{lj} représente la contribution du l-ième facteur à la j-ième mesure ; la valeur f_{ip} est une indication du lien entre l'objet i et le caractère primitif p. En se donnant la matrice F de dimension $n \times k$ des facteurs, A la matrice des poids de dimension $k \times m$, on peut écrire :

$$X = F \cdot A.$$

Le problème est de déterminer F et A à partir des mesures. La solution n'est pas unique, à moins d'imposer des contraintes supplémentaires.

Dans cet esprit, la méthode la plus utilisée est l'analyse en composantes principales dont nous allons donner les grandes lignes. On part de la matrice des corrélations des mesures R, c'est-à-dire de terme général r_{ij} défini par :

$$r_{ij} = \frac{1}{n\sigma_x \times \sigma_y} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})\ (y_i - \bar{y})$$

avec : $\bar{x} = \frac{1}{n} \Sigma x_i$ et $\bar{y} = \frac{1}{n} \Sigma y_i$.

▼ *Figure 16 : représentation géométrique utilisée dans l'analyse en composantes principales (cas d'un espace à trois dimensions) ; a, le nuage de points a la forme d'un ellipsoïde allongé dans les directions principales (1) et (2) ; l'analyse en composantes principales conservera deux axes et le nuage de points sera représenté par sa projection dans le plan (1, 2) ; b, l'ellipsoïde est allongé et étroit dans deux directions ; l'analyse ne conservera que l'axe (1) et l'ensemble des points sera représenté par sa projection sur cet axe.*

fig. 16

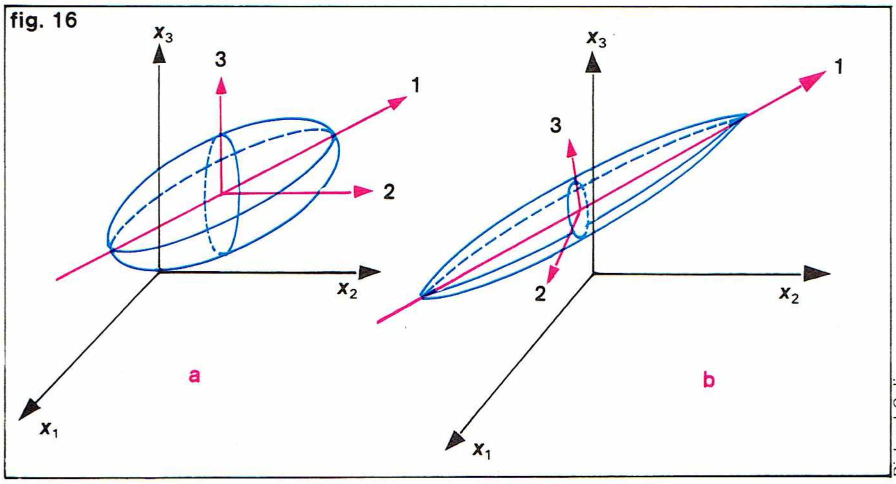

Richard Colin

Cette matrice est diagonalisée en une matrice

$$\Delta = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & & \cdots \\ 0 & \ddots & & \cdots \\ \cdots & & \ddots & \cdots \\ \cdots & & & 0 \\ \cdots & \cdots & 0 & \lambda_n \end{pmatrix}$$

Rangeons les valeurs propres λ_i par ordre décroissant, c'est-à-dire $\lambda_1 \geqslant \lambda_2 \geqslant ... \geqslant \lambda_n$. Soit Q la matrice formée des k vecteurs propres associés aux k valeurs propres les plus grandes. L'espace associé à ces k vecteurs propres est l'espace des k caractères.

Comment choisir k ? On sait qu'il y a conservation de la trace, c'est-à-dire la somme des éléments diagonaux de la matrice dans toute transformation orthogonale. En ce cas, un bon indice de détermination de k est la valeur exprimée en pourcentage du rapport

$$\frac{\sum_{i=1}^{k} \lambda_i}{\sum_{i=1}^{n} \lambda_i}$$

On prend l'ordre k qui donne à ce rapport une valeur comprise entre 0,8 et 1. La méthode des composantes principales possède une représentation géométrique très simple : on modélise en fait l'ensemble des points-objets par un ellipsoïde dans l'espace à n dimensions. Chaque facteur correspond à un des axes du volume. Celui correspondant à la valeur la plus grande est le grand axe, etc. Un exemple est donné sur la *figure* 16 dans le cas où $n = 3$. La *figure* 16a modélise le nuage de points par un ellipsoïde allongé dans deux directions (1) et (2), la troisième ayant peu d'importance. Par l'analyse en composantes principales, on conservera deux axes et on représentera le nuage de points par sa projection dans le plan (1, 2). Au contraire, dans la *figure* 16b, le nuage peut être modélisé par un ellipsoïde très allongé mais étroit dans deux directions. L'analyse en composantes principales ne conservera que l'axe (1), et l'ensemble des points sera représenté par sa projection sur cet axe : on est passé d'un espace à trois dimensions à un espace à une dimension.

Les combinaisons variées de techniques de détermination de caractères et de classification permettent de multiplier les solutions aux problèmes. Cependant, quand on recherche les caractères à utiliser pour un problème de classification, il semble logique d'éviter les méthodes mathématiques et d'utiliser les composants de base décrivant l'objet. Ainsi, un être humain est composé de bras, de jambes, d'une tête... Cependant, il y a de nombreux cas où une analyse plus poussée a montré que telle n'était pas la bonne voie et que de meilleures descriptions étaient possibles. Ainsi, de nombreux exemples montrent que certains caractères sont très utiles pour la classification, sans être de manière évidente descriptifs de l'objet. Reprenons le problème de la reconnaissance de caractères imprimés et limitons-nous aux dix chiffres. Le but est de reconnaître automatiquement un chiffre après l'avoir centré sur un cache sur lequel on a créé au préalable un réseau de lignes. Chaque ligne représente un caractère de l'objet. Le fait que la ligne i soit coupée par le chiffre à reconnaître donne la valeur 1 à la i-ième composante du vecteur descriptif. Les différents chiffres produisent différents vecteurs descriptifs, ce qui permet la classification.

Dans ce paragraphe, nous n'avons qu'esquissé les méthodes utilisables en reconnaissance de formes ; ce domaine est en pleine évolution, comme le montre le nombre important de congrès consacrés à ce sujet dans le monde.

Un exemple d'emploi de la méthode de reconnaissance des formes : le tri des grains

La méthode et l'application présentées ici ont été réalisées par William L. Brogan et Allen R. Edison à l'université de Nebraska. L'étude a été publiée dans la revue *Pattern Recognition* (vol. 6, 1974). Le problème est celui

du tri automatique de grains de céréales. Lors de la récolte ou du stockage des grains d'une espèce donnée, il se mélange souvent d'autres grains ou des impuretés. La qualité de pureté d'un stock est très importante : si le degré d'impureté est trop grand, il peut s'ensuivre une baisse du prix de vente. Étant donné les énormes quantités manipulées, la détermination de ce degré de pureté est particulièrement délicate.

La méthode employéeest fondée sur l'échantillonnage : on prélève suffisamment d'échantillons pour avoir une idée représentative du lot. Ces échantillons sont mesurés avec soin afin de déterminer le pourcentage d'impuretés. La méthode est coûteuse parce que fastidieuse et longue. Les auteurs ont alors proposé un appareil réalisant la classification automatique et rapide des grains en six espèces différentes. Pour résoudre ce problème, on a procédé en trois phases : saisie d'une grande quantité de données, c'est-à-dire, ici, de grains dans les six variétés considérées ; puis plusieurs méthodes de sélection des caractères et de classification ont été essayées du point de vue de leur fiabilité sur les échantillons précédents ; ensuite l'organe réalisant la classification a été construit et testé. L'organe effectue la prise mécanique des grains, la mesure optique, l'élaboration des informations pour le tri. Parmi les six variétés de grain considérées (maïs, blé, soja, avoine, seigle, orge), quatre présentent des formes elliptiques quasi équivalentes, ce qui ne simplifie pas le problème.

Quelles sont les contraintes ? Tout d'abord déterminer le pourcentage réel de blé contenu dans une cargaison de blé ainsi que les pourcentages éventuels des cinq autres grains. Pour l'instant, on ne se préoccupe pas de tri, mais simplement de la composition. La période d'échantillonnage a été fixée arbitrairement à une seconde : durant ce temps il faut donc effectuer les mesures nécessaires. Enfin, tous les calculs doivent être réalisés par un minicalculateur, car, sur le site, il est hors de question d'utiliser les possibilités d'un gros calculateur. Compte tenu de ces contraintes, il fut décidé de se limiter à quelques caractères principaux seulement. Ainsi, à partir des mesures de la longueur L, de la largeur *l*, de l'épaisseur *e* et de la surface de projection *a* (*fig.* 17), on élabore diverses fonctions $\frac{L}{l}$, $\frac{L}{e}$, $L\frac{l}{a}$, $\frac{a}{l}$, $\frac{a}{e}$, L*e* ; d'autres mesures, quant au poids et aux propriétés de réflexion optique, avaient été prises, mais comme on n'était pas assez sûr de la qualité des capteurs employés, elles furent abandonnées ; il en fut de même pour les propriétés diélectriques des grains. En fait, les quatre mesures de base sont suffisantes pour opérer la classification, comme on va le voir par la suite. Afin d'élaborer les corrélations, mille échantillons de chaque variété ont été mesurés. Cependant, chaque variété présente une dizaine de sous-variétés (à l'exception du seigle qui n'en a que six). On compte donc une centaine d'échantillons pour chaque sous-variété. On enregistre pour chaque échantillon les quatre mesures caractéristiques ; ces mesures sont converties en binaire et mémorisées. Pour chaque sous-variété et variété, on élabore les valeurs moyennes, variances et corrélations données par les formules respectives :

fig. 17

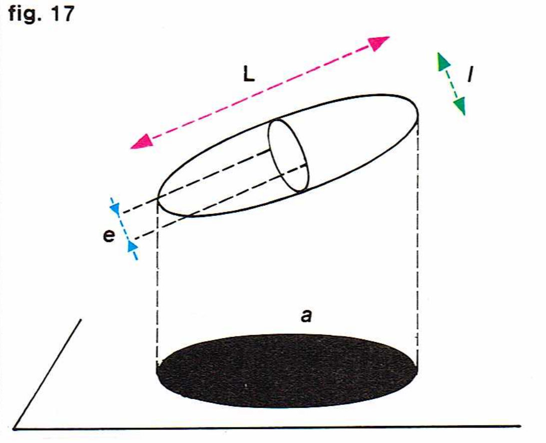

Richard Colin

◀ ***Figure 17 : les paramètres d'un grain de céréale utilisés lors du tri de grains en vue de la détermination de la pureté d'un lot de céréales.***

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \Sigma x_i \qquad \sigma_x = \frac{1}{N-1} \Sigma (x_i - \bar{x})^2$$

$$\rho_{xy} = \frac{\Sigma (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sigma_x \sigma_y}$$

Les quatre mesures L, *l*, *e* et *a* sont les composantes du vecteur caractère **x**. Notons les classes C_1 ... C_6. On fait l'hypothèse que pour chaque classe C_i, le vecteur **x** suit une loi de Gauss multidimensionnelle (c'est-à-dire ici de dimension 4). Cette loi est entièrement caractérisée si on se donne le vecteur moyenne $\mathbf{m}_i$ et la matrice de covariance Γ_i c'est-à-dire $\mathbf{m}_i = E(\mathbf{x} \mid C_i)$; Γ_i est la matrice de terme général ρ_{kl}, covariance des mesures des éléments de la classe *i*, et sa diagonale est formée des variances.

Le but de la sélection de caractères est de repérer les mesures ou combinaisons de mesures qui permettent la meilleure séparation des classes, pour laquelle il faut choisir un critère qui la précise. L'un est classique, il est fondé sur la distance de Mahalanobis [distance de la classe C_i à la classe $C_j = (\mathbf{m}_i - \mathbf{m}_j)' \Gamma_j' (\mathbf{m}_i - \mathbf{m}_j)$; le signe ' indique la transposition]. L'autre critère est une indication des recouvrements partiels éventuels :

$$e_{ij} = \frac{P(\mathbf{x} \mid C_j) \mid \mathbf{x} = \mathbf{m}_i}{P(\mathbf{x} \mid C_j) \mid \mathbf{x} = \mathbf{m}_j}.$$

Ces deux quantités furent utilisées pour évaluer l'effet de fonction des mesures du type de celles énumérées ci-dessus $\left(\frac{L}{l}, \frac{L}{e} ...\right)$. En fait, quelle que soit la quantité utilisée, les mesures originelles de base suffisent amplement pour assurer la séparation.

A titre d'exemple, donnons quelques valeurs de e_{ij}. Pour le maïs $e_{ii} = 1$ évidemment, $e_{\text{maïs-blé}} = 0{,}00$, $e_{\text{maïs-soja}} = 0{,}79 \times 10^{-2}$, $e_{\text{seigle-avoine}} = 0{,}026$, $e_{\text{blé-orge}} = 0{,}18$.

Les valeurs fortes des coefficients e_{ij} indiquent un risque de recouvrement. Ainsi, des échantillons d'orge peuvent souvent se trouver proches de ceux du blé. Le deuxième critère est en effet un bon indicateur de recouvrement : il calcule le rapport de la probabilité que **x** égale la moyenne de la classe C_i, alors que c'est un élément de la classe C_j, à la probabilité que **x** égale la moyenne de la classe C_j, alors que c'est un élément de C_j. Si ce nombre est très faible, il y a peu de recouvrement. Pour l'ensemble des variétés, le recouvrement est en général faible, sauf dans le cas blé-orge, ce qui indique bien que le choix des mesures directes est bon.

Il reste à résoudre maintenant le problème de la classification : à partir d'un grain dont on mesure les quatre quantités caractéristiques, il faut construire la suite de calculs permettant d'affecter ce grain à une classe donnée avec un risque minimal d'erreur. Plusieurs méthodes ont été testées. La plus simple d'entre elles a été d'utiliser une règle de proximité : on affecte le grain **x** à la classe C_i dont la moyenne $\mathbf{m}_i$ est la plus proche. Rappelons que **x** est un vecteur dont chaque composante représente une des mesures effectuées sur le grain, $\mathbf{m}_i$ est un vecteur représentant la classe C_i, dont la première composante représente la longueur moyenne des grains de cette classe, la seconde composante la largeur moyenne, la troisième l'épaisseur moyenne et la dernière la surface moyenne de projection plane. La *figure* 18 représente la règle dans le cas de trois classes. Il faut donc se fixer une distance de $d(\mathbf{x}, \mathbf{m}_i)$ et en chercher le minimum pour les différents vecteurs moyennes $\mathbf{m}_1$ ... $\mathbf{m}_6$. La distance utilisée, dont nous ne détaillerons pas le calcul, tient compte des matrices de corrélation de chaque classe. Les résultats obtenus par cette méthode simple furent plutôt médiocres : les probabilités d'erreur de classement atteignaient pour certaines variétés 30 à 40 %. On ne peut dépasser une probabilité moyenne de succès de 0,85.

La seconde méthode fut fondée sur le théorème de Bayes :

$$P(C_j \mid \mathbf{x}) = \frac{P(\mathbf{x} \mid C_j)\, P(C_j)}{\sum_{j=1}^{6} P(\mathbf{x} \mid C_j)\, P(C_j)}$$

Un échantillon **x** est classé dans le groupe C_i si

$$P(C_i \mid \mathbf{x}) = \max P(C_j \mid \mathbf{x}),$$

▶ *Figure 18 : voir développement dans le texte.*

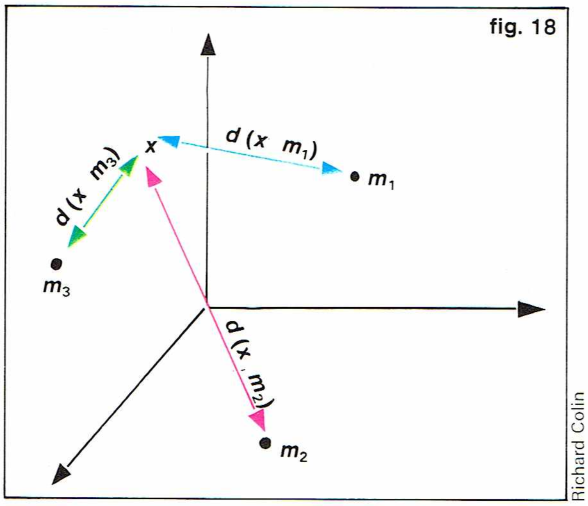

c'est-à-dire dans la classe qui est pour lui la plus probable. L'emploi de cette règle demande que l'on connaisse les P (C_i) probabilités *a priori* des classes C_1 ... C_6. En fait, ces probabilités ne peuvent être connues de façon exacte, il faut donc les estimer à partir d'échantillons. Les auteurs ont proposé une méthode adaptative relativement complexe pour estimer ces probabilités *a priori*. A partir d'un échantillon de départ, les P (C_i) sont estimés, par exemple, pour la classe « blé », par le rapport

$$\frac{\text{nombre de grains de blé}}{\text{nombre total de grains}},$$

puis ces valeurs P (C_1) ... P (C_6) sont actualisées au fur et à mesure que se présente un nouveau vecteur **x** et qu'il est affecté à une classe ; on peut aussi partir de valeurs initiales P (C_1) ... P (C_6) arbitraires. Afin de tester l'ensemble, divers échantillons de grains de tailles différentes appartenant à des variétés délicates à trier ont été collectés. Au départ, $P(C_1) = P(C_2) = ... = P(C_6) = \frac{1}{6}$, c'est-à-dire que l'on suppose l'équiprobabilité des classes.

Les résultats obtenus sont particulièrement intéressants. Il n'y a pratiquement aucune erreur pour le maïs et pour le soja ; en revanche, les autres variétés sont relativement semblables, et le taux d'erreur augmente. On peut cependant faire descendre ce taux d'erreur jusqu'à 2 % si on applique avec soin la méthode décrite. Précisons que le processus est automatisé depuis la saisie de données jusqu'au classement.

Cet exemple montre bien la variété des domaines dans lesquels les techniques de reconnaissance des formes peuvent s'appliquer.

Une autre application : le contrôle de qualité

Le contrôle de qualité joue un grand rôle dans la production industrielle : il permet de vérifier une fabrication par sa conformité aux normes. Comme, dans les productions de grande série, il est hors de question de vérifier chaque pièce, on procède encore par échantillonnage ; des propriétés du lot mesuré, on déduit la qualité de la production. Au contraire, dans le cas d'une production limitée, on peut vérifier chaque élément de la fabrication et effectuer ainsi un contrôle de qualité exhaustif. Ce domaine a donné et donne encore lieu à de nombreux travaux. En général, on ne classe pas un produit en « bons » ou « mauvais » : il existe une gradation pour aller de l'un à l'autre.

Pourquoi ne pas employer des algorithmes de reconnaissance de formes ? Le vecteur-objet est constitué par les différentes mesures effectuées sur l'élément, et les classes traduisent les différents degrés de qualité. Le problème, bien que simplement posé, est généralement complexe à résoudre ; l'exemple que nous allons exposer ne s'applique qu'à un produit fini simple. Nous supposerons également résolus les différents problèmes de mesure : tous les facteurs intervenant dans le niveau de qualité sont mesurés quantitativement, ce qui est loin d'être toujours le cas pour les produits industriels. En fait, on peut distinguer deux sortes de variations sur le produit fini : les variations dues à la qualité du produit servant à la fabrication, les facteurs humains que l'on ne peut contrôler et les variations repérables que l'on peut identifier ou contrôler. Le contrôle de qualité a pour but de séparer ces deux causes de variations. Dans un système de reconnaissance de formes, il convient de sélectionner ce que nous avons appelé les caractères. Dans le cas présent, ils vont être extraits des distributions des fréquences des mesures.

Dans un premier temps, la production est divisée en lots, de manière que, dans un lot, les causes de variation soient les mêmes pour chaque objet produit : par exemple, la production d'une machine forme un lot. Plaçons-nous maintenant dans un lot et supposons, pour simplifier, qu'on ne réalise que deux mesures statistiques, la moyenne et l'écart-type d'une cote. Pour la première composante $x_1 = m$, on remarque que la plus grande partie des valeurs trouvées sont dans un intervalle $[m_0 - \delta, m_0 + \delta]$. Si la valeur mesurée sur la pièce se trouve dans cet intervalle, on décide que le premier caractère X_1 vaut 1 ; sinon qu'il vaut 0. De la même façon, on peut constater généralement dans l'intervalle

$$[\sigma_0 - \varepsilon, \sigma_0 + \varepsilon].$$

Si tel est le cas, on affecte la valeur 1 au deuxième caractère X_2 ; sinon on lui affecte la valeur 0. Dans le plan (x_1, x_2), on peut alors définir quatre niveaux de qualité (*fig.* 19) :

Qualité 1 : $m_0 - \delta \leqslant m \leqslant m_0 + \delta$
et $\sigma_0 - \varepsilon \leqslant \sigma \leqslant \sigma_0 + \varepsilon$

Qualité 2 : $m_0 - \delta \leqslant m \leqslant m_0 + \delta$
$\sigma < \sigma_0 - \varepsilon$ ou $\sigma > \sigma_0 + \varepsilon$

Qualité 3 : $m < m_0 - \delta$ ou $m > m_0 + \delta$
$\sigma_0 - \varepsilon \leqslant \sigma \leqslant \sigma_0 + \varepsilon$

Qualité 4 : complémentaire de 1, 2, 3.

A chaque qualité on associe donc un mot X_1X_2 dont les différentes valeurs sont les suivantes : qualité 1 (11), qualité 2 (10), qualité 3 (01), qualité 4 (00). A chaque mot on peut associer une action : à « 11 », aucune correction à apporter, la production est bonne ; à « 10 », il faut jouer sur les dispersions de fabrication, ce qui peut être

▼ *Figure 19 : exemple de contrôle de qualité d'un lot de pièces par l'étude des moyennes m et de l'écart-type d'une cote, et la définition de quatre niveaux de qualité. Figure 20 : classification des éléments lors du contrôle de qualité ; les éléments 3, 4, 5 sont attribués à la classe 1 et les autres à la classe 2.*

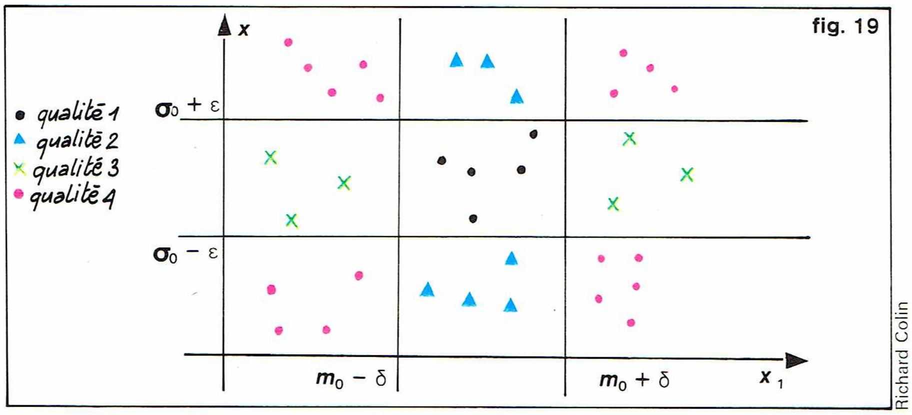

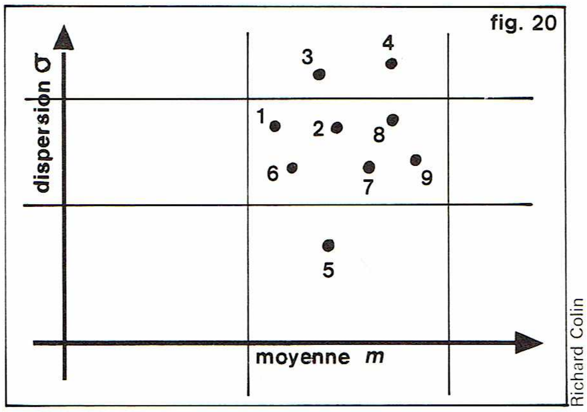

coûteux ; à « 01 », il faut agir sur la moyenne de la production ; à « 00 » il faut tout revoir : rien ne va plus !

Le lecteur familiarisé avec le contrôle de qualité reconnaît ici des cartes de contrôle à deux dimensions. Sans entrer dans le détail de l'élaboration de ces cartes, nous constatons que le problème ainsi défini est un problème de reconnaissance des formes. Il suffit donc, par exemple, de vérifier que les vecteurs objet sont bien dans le cercle de centre (m_0, σ_0) et de rayon $\sqrt{\delta^2 + \varepsilon^2}$ pour dire que la production se classe dans la qualité 1. Dans ce problème simplifié, n'importe quel algorithme peut être utilisé. Il faut cependant faire attention à un point : le contrôle de qualité est un problème statistique et, sur un échantillon, la majorité des vecteurs observés peut appartenir à la qualité 1 tandis que certains autres peuvent être de qualité 3 ou 4 ou l'inverse. Il faut donc élaborer des algorithmes de classement, soit séquentiels, soit à décision majoritaire.

Dans le premier cas, chaque élément de l'échantillon est repéré par son temps de fabrication : ainsi, les quelques éléments de l'échantillon qui ne sont pas classés de la même façon que les autres peuvent être attribués à des phénomènes transitoires. Sur la *figure* 20, les éléments 3-4-5 (ordre historique) sont mis en classe 2, tandis que la majorité est en classe 1 ; cela pourra peut-être s'expliquer en examinant s'il n'y a pas eu, par exemple, une modification de réglage.

Ce bref paragraphe avait pour but de montrer une autre application, moins attendue, de la reconnaissance des formes. Les algorithmes n'ont pas été développés, et seul un exemple simple a été esquissé. L'emploi de ces techniques peut avoir pour effet de permettre un classement plus rapide et plus fiable dans les différents niveaux de qualité. De plus, la précision des algorithmes laisse espérer une sophistication du contrôle de qualité entraînant une meilleure exploitation des moyens de production.

Traitement d'images

Notre propos est ici de présenter succinctement les méthodes automatiques d'analyse d'images, dont le but est de pouvoir exploiter une image fournie par une caméra, c'est-à-dire de pouvoir décrire la scène vue. Une des premières applications développée fut la reconnaissance optique de caractères : c'est plus un problème de classification que de description, on peut donc se référer au paragraphe précédent. D'autres applications particulièrement importantes sont fournies par la physique (exploitation des clichés des chambres à bulles, par exemple) ou le domaine biomédical (exploitation des images fournies par des microscopes). Le problème du traitement d'image est complexe : actuellement, sa résolution n'est pas toujours possible. Reprenons le premier exemple ci-dessus, la reconnaissance automatique de caractères, que nous avons paru présenter comme simple. Sont-ce des caractères manuscrits ou conçus par des machines ? Dans le second cas, quel type de machine ? Dans le premier cas, sera-ce toujours la même personne qui écrit ou y aura-t-il plusieurs personnes ? Autant de questions dont les solutions permettent ou non de simplifier les solutions proposées. L'étendue des problèmes est telle qu'il serait naïf de croire qu'un ensemble de techniques bien répertoriées suffirait à résoudre tous les cas.

La première étape à franchir est de transformer une image, représentée peut-être par des dizaines de milliers de bits d'information, en une description qui tienne en quelques dizaines de bits seulement. Nous présenterons dans ce court exposé quelques techniques utilisées pour simplifier les images en éliminant les détails jugés sans importance et en caractérisant mieux les formes et volumes.

Supposons donc qu'on dispose d'un négatif photographique et qu'on désire l'analyser par un calculateur digital. La première transformation nécessaire est de trouver une représentation que la machine puisse comprendre. Il y a plusieurs façons de procéder ; la plus simple est encore de dire qu'une image noir et blanc peut se représenter par une fonction $f(x, y)$ à deux arguments : $f(x, y)$ est proportionnelle à l'intensité lumineuse au point (x, y) de l'image. Une fois l'image remplacée par un tableau des valeurs de la fonction $f(x, y)$, les différentes représentations possibles dans un calculateur

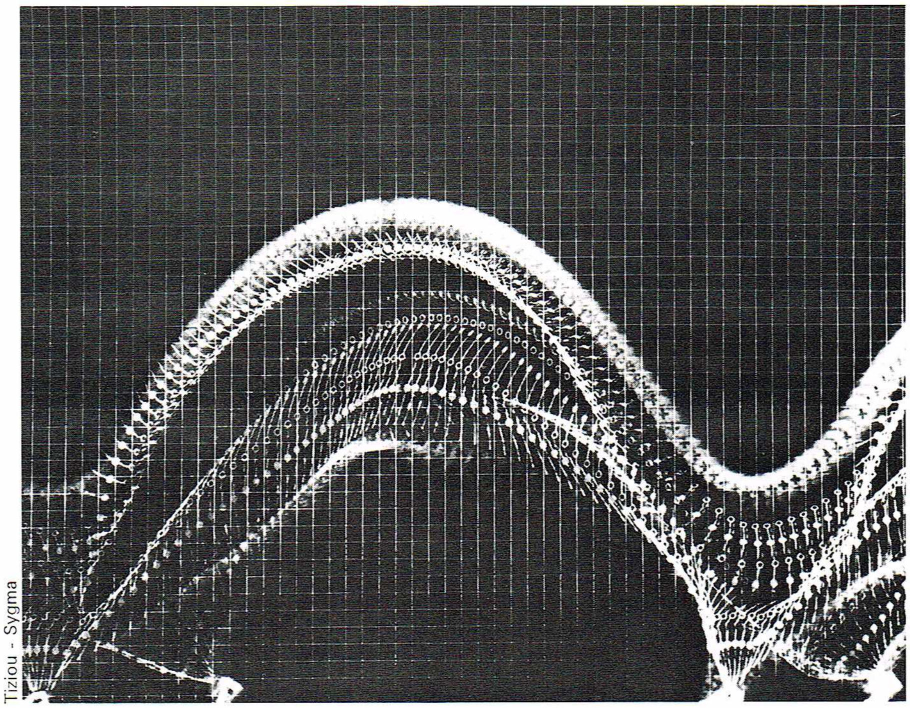

Tiziou - Sygma

▲ *La radiographie d'un squelette de dinosaure ? En fait, il s'agit de l'étude photographique d'un homme sautant sur un simulateur de gravité humaine (étude réalisée à Northrop Space Laboratories, en Californie, en accord avec la NASA) ; de telles études nécessitent l'utilisation de méthodes automatiques d'analyses d'images car elles ne sont pas parlantes et prêtent à confusion.*

correspondent aux différentes représentations d'une fonction. En général, il est rare qu'une fonction d'image $f(x, y)$ ait une expression analytique connue. Aussi, le plus simplement du monde, échantillonne-t-on $f(x, y)$ en un certain nombre de points du plan de l'image et mémorise-t-on les valeurs obtenues : c'est le **procédé de quantification.** Ce procédé repose sur la position des points choisis. Généralement, on couvre l'image d'un quadrillage et on prend les valeurs de $f(x, y)$ au centre de chaque carré élémentaire. Cependant, d'une part, il y a une infinité de nuances entre le noir et le blanc, d'autre part, la représentation digitale des nombres en machine est limitée. On doit donc aussi quantifier les valeurs de $f(x, y)$. Ce travail effectué, l'image est représentée par un ensemble de nombres, chacun rendant compte de la luminosité en un point précis. Pour quantifier $f(x, y)$, il y a plusieurs solutions. Une première idée est de diviser l'échelle entre « noir » et « blanc » en intervalles égaux, mais rien n'oblige à une augmentation linéaire. Ainsi, si les images étudiées ont une forte tendance au noir, on peut désirer une échelle fine dans les « noirs » et, au contraire, moins précise pour les « blancs ». On peut aussi, si on n'a aucun *a priori*, utiliser le modèle fourni par l'œil humain, qui semble présenter une réponse approximativement logarithmique à la lumière. En d'autres termes, des modifications logarithmiques de l'intensité lumineuse sont ressenties par l'œil humain comme apparemment arithmétiques. Si on prend l'œil pour modèle, il vaut donc mieux quantifier de façon uniforme $\log f(x, y)$ que $f(x, y)$.

La seconde quantification qui intervient est, on l'a vu, le quadrillage de l'image. A la différence du problème précédent, il existe ici un support théorique constitué par le théorème de Shannon, puisqu'on procède en fait à un échantillonnage à deux dimensions. La discussion nous entraînerait dans des développements trop importants, puisqu'elle fait appel à la transformée de Fourier de fonctions à deux arguments. On verra plus loin que le quadrillage présente certains inconvénients : en particulier, deux carrés peuvent avoir un angle commun sans avoir de côté commun, ce qui est gênant pour des problèmes d'identification de formes. Aussi certains auteurs ont-ils préconisé une partition en hexagones élémentaires plutôt qu'en carrés, mais les gains obtenus ne compensent pas la complexité du problème. Dans la suite de cet exposé, l'image sera représentée par un tableau ou une matrice de terme général $f(i, j)$, valeur quantifiée de $f(x, y)$ au centre du carré (i, j). Les valeurs faibles de $f(i, j)$ correspondront au « noir », les valeurs fortes au « blanc ». Tout le traitement d'images va s'effectuer à partir de la matrice : si l'échantillonnage est mauvais, des objets pourront être confondus, des frontières imprécises, etc.

fig. 21

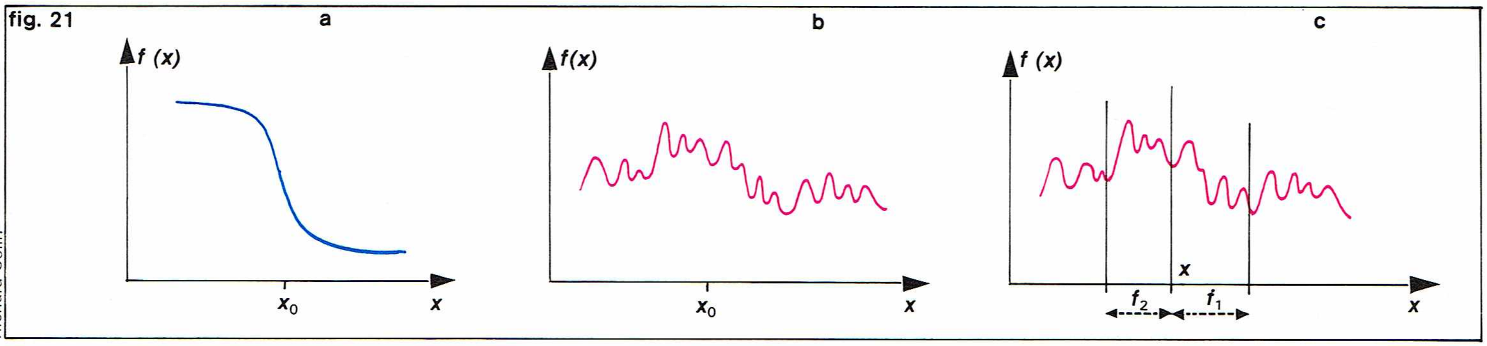

Richard Colin

▲ *Figure 21 : problème de l'obtention d'une transition lors de l'étude des tracés des contours d'objets (dans le cas d'une représentation monodimensionnelle) ; a, f (x) théorique ; la transition est bien marquée ; b, f (x) réelle, la transition est difficile à observer ; c, on réalise deux fenêtres de largeur f_1 et f_2, puis des moyennes afin de repérer la transition.*

Le processus du traitement d'images est en général un processus de simplification : un objet relativement complexe, l'image, est transformé en une forme plus simple par toute une succession d'étapes. Une de ces premières étapes est de convertir l'image en un dessin de silhouette. S'il est souhaitable, évidemment, que l'image transformée conserve la majeure partie de l'information dont on disposait, les calculs qui suivent pourront, grâce à cette transformation, être de beaucoup simplifiés. L'expérience montre d'ailleurs que l'homme concentre énormément d'attention visuelle sur les contours des objets.

Examinons maintenant comment obtenir le **tracé des contours** des objets, sans se préoccuper du but ultérieur poursuivi. Un tracé des contours peut être obtenu en amplifiant les zones de l'image où il y a des transitions noir-blanc et en éliminant ou estompant les zones d'intensité lumineuse homogène. En effet, les contours sont des arêtes, et les arêtes sont par définition des zones de transition entre deux parties d'intensité lumineuse différente. Traduite en termes mathématiques, une arête est une région du plan de l'image où $f(x, y)$ présente un gradient important (rappelons que pour une fonction $g(x, y)$, le vecteur gradient est le vecteur formé par les dérivées partielles $\frac{\partial g}{\partial x}, \frac{\partial g}{\partial y}$; un gradient important marque donc une transition dans les valeurs de la fonction). Il suffit donc, pour résoudre notre problème, de calculer le gradient de la fonction intensité $f(x, y)$. On peut l'estimer à l'aide de la fonction suivante :

$$\|\nabla f(i,j)\| \sim R(i,j) = \sqrt{[f(i,j) - f(i+1, j+1)]^2 + [f(i,j+1) - f(i+1,j)]^2}$$

$\nabla f(i,j)$ se lit gradient de f au point (i,j). (« ∇ » est le symbole « nabla » ; $\|\cdot\|$ indique la norme du vecteur.) Cette fonction $R(i,j)$ a été très utilisée. Examinons les différents cas possibles. Si le point (i,j) est dans une région d'intensité lumineuse homogène, $R(i,j)$ vaut alors 0, car $f(i,j)$ est peu différent de $f(i+1, j+1)$ et $f(i, j+1)$ de $f(i+1, j)$. S'il y a une discontinuité lumineuse entre la colonne $(j+1)$ et la colonne j, $R(i,j)$ prend une grande valeur, de même pour une discontinuité entre la ligne i et la ligne $(i+1)$. Pour simplifier les calculs, on emploie souvent $G(i,j)$ où la valeur absolue remplace l'élévation au carré :

$$G(i,j) = |f(i,j) - f(i+1, j+1)| + |f(i,j+1) - f(i+1,j)|.$$

On a :

$$R(i,j) \leqslant G(i,j) \leqslant \sqrt{2}\, R(i,j),$$

mais $G(i,j)$ est beaucoup plus rapide à calculer.

Il y a un *problème de seuil :* à partir de quelle valeur de $G(i,j)$ ou $R(i,j)$ décide-t-on qu'il y a arête ? Si on place ce seuil trop haut, on va manquer des arêtes ; si on le place trop bas, l'effort de simplification ne servira à rien. Examinons plus attentivement ce problème : la difficulté vient de ce qu'on n'a jamais une transition nette comme indiqué *figure* 21a (où on a figuré une transition uniquement sur la dimension x). En reprenant le schéma utilisé dans la partie consacrée à l'analyse du signal, on peut représenter $f(i,j)$ comme somme de deux termes :

$$f(i,j) = s(i,j) + n(i,j) ;$$

$s(i,j)$ représente une fonction intensité idéale réalisant des transitions brusques sur les arêtes ; $n(i,j)$ représente un terme de bruit. L'idéal serait donc pour nous d'estimer le gradient de s et non celui de f.

Ainsi, pour donner une représentation monodimensionnelle, la *figure* 21a représente $s(x)$ et la *figure* 21b $f(x)$ observé. Le problème est d'estimer x_0 au point de transition du « blanc » au « noir » malgré le terme $n(i,j)$. Intuitivement on peut effectuer une opération de type moyenne comme celle qui a été décrite pour extraire un signal du bruit. Nous pourrions lisser la fonction f de façon à minimiser l'effet du bruit : l'inconvénient d'un tel lissage est qu'il risque de faire disparaître aussi la transition. Pour le pallier, on peut opérer sur deux zones mobiles de la fonction $f(x, y)$.

Reprenons un exemple de cas monodimensionnel comme indiqué sur la *figure* 21c. On effectue une moyenne du signal sur $[x, x+f_1]$ et une autre sur $[x-f_2, x]$, donc sur deux « *fenêtres* » de longueur respective f_1 et f_2 autour du point x. En déplaçant le point x et en effectuant systématiquement la différence des moyennes obtenues, on peut espérer repérer la transition. Le choix de la largeur des fenêtres est critique, puisqu'elles ne doivent pas être trop étroites, et donc inférieures à la durée de la transition qui n'est jamais instantanée, ni trop grandes, et qu'elles doivent intégrer le passage du « blanc » au « noir ». Nous avons fait le raisonnement à une dimension : les résultats obtenus sont généralement bons dans le cas de cette méthode.

Dans le cas bidimensionnel, il faut utiliser les deux méthodes décrites : d'une part, le moyennage, d'autre part, des opérations de type fenêtre. Donnons un exemple, suggéré par I. Sobel, où le gradient est mesuré à l'aide d'une fenêtre 3 × 3. Pour simplifier, nous n'avons représenté sur la *figure* 22 que la partie de l'image dans la fenêtre considérée. Le gradient au point (2, 2) est défini par $\|\nabla f_{22}\| = \sqrt{A^2 + B^2}$

avec $A = (f_{13} + 2f_{23} + f_{33}) - (f_{11} + 2f_{21} + f_{31})$

et $B = (f_{31} + 2f_{32} + f_{33}) - (f_{11} + 2f_{12} + f_{13})$.

En fait, A représente une estimation de la dérivée partielle de la fonction intensité dans la direction x : on crée en effet la différence de deux estimations de la fonction intensité en (2, 3) et (2, 1). Ces deux estimations sont pondérées par les valeurs qui les entourent. De même, on peut dire que B représente l'estimation de la dérivée partielle dans la direction orthogonale. Il est à noter que les valeurs données aux poids pour tenir compte des valeurs qui entourent le point considéré sont ici intuitives.

▼ *Figure 22 : cas bidimensionnel (voir développement dans le texte).*

fig. 22

f_{11}	f_{12}	f_{13}
f_{21}	f_{22}	f_{23}
f_{31}	f_{32}	f_{33}

Richard Colin

Dans le paragraphe précédent, nous avons utilisé la technique éprouvée du **moyennage** pour combattre le bruit dans le but d'obtenir les contours des objets représentés sur une image. Cette technique peut être aussi employée pour combattre tout effet de bruit. Comme auparavant, l'idée est de remplacer la valeur de la fonction luminosité en un point, valeur entachée de bruit, par une fonction pondérée des valeurs prises autour de ce point. Le moyennage ne doit pas être trop important afin de ne pas tout estomper.

Pour simplifier l'exposé sans détruire la généralité, nous nous placerons encore dans le cas monodimensionnel. Pour toute fonction $f(x)$, on définit

$$f_u(x) = \frac{1}{u}\int_{x-\frac{u}{2}}^{x+\frac{u}{2}} f(z)\, dz.$$

$f_u(x)$ représente la valeur moyenne de $f(x)$ sur l'intervalle $\left(x - \frac{u}{2}, x + \frac{u}{2}\right)$.

Prenons quelques exemples pour constater l'effet de cette opération. Sur la *figure* 23a, nous avons représenté une fonction $f(x)$ discontinue en un point : le résultat est la disparition de cette discontinuité. Par contre, une fonction $f(x)$ continue est transformée en une fonction continue à dérivée continue (*fig.* 23b). Le rôle de la largeur de fenêtre est prédominant. Plus u est faible, moins l'effet de l'opération moyenne se fait sentir, et $f_u(x)$ est très proche de $f(x)$: $f_u(x)$ s'appelle *moyenne mobile* de $f(x)$.

Étendons maintenant la définition précédente au cas bidimensionnel ; on se donne une fenêtre spatiale de surface S_u, et on définit la moyenne mobile de $f(x, y)$ par $f_u(x, y) = \frac{1}{S_u} \iint_{u(x,y)} f(u, v)\, du dv$; [($u(x, y)$ est la fenêtre de surface S_u centrée en (x, y)]. Puisqu'on opère sur des valeurs échantillonnées, la double intégrale précédente se ramène à une somme double :

$$f_u(i, j) = \sum_{kl} \frac{f(k, l)}{S_u}$$

Si on se fixe une fenêtre de forme rectangulaire de base $(2a + 1)$ et de hauteur $(2b + 1)$, la moyenne mobile de $f(i, j)$ s'écrit :

$$f_u(i, j) = \frac{1}{(2a+1)(2b+1)} \sum_{-b < k < b} \; \sum_{-a < l < a} f(i + k, j + l).$$

Pour les lecteurs familiers de la technique photographique, remplacer la fonction intensité par sa moyenne mobile provoque le même effet sur l'image que de détruire la mise au point d'un objectif. Mais le but poursuivi, lorsqu'on effectue une photographie, est en général contraire (à moins de rechercher le « flou artistique ») : on désire une photo nette dont les éléments aient des contours précis. Aussi l'opération moyenne mobile décrite n'est-elle employée que pour certains buts bien délimités.

L'une des applications qui rendent cette transformation nécessaire est le traitement des images binaires. Une image est dite binaire si on n'autorise la fonction $f(i, j)$ à prendre que deux valeurs : 0 (noir) et 1 (blanc). La fonction intensité renforce donc les contrastes. En général, on appelle sujet de l'image l'ensemble des carrés élémentaires où $f(i, j)$ vaut 1 ; le reste est appelé le fond. Ces images binaires sont obtenues à partir de l'image mère, soit après un traitement de l'image digitalisée (ainsi l'image des contours est une image binaire), soit directement ($f(i, j)$ est fixée dès le départ à deux valeurs). Pour lisser $f(i, j)$ dans une image binaire, il suffit de comparer $f_u(i, j)$ à un seuil. Si ce seuil est dépassé, la valeur de la fonction intensité en ce point vaudra 1, sinon elle vaudra 0.

Prenons un exemple simple extrait de l'ouvrage de O. Duda et E. Hart : une image est représentée dans un quadrillage 7×7 (*fig.* 24a). Choisissons une fenêtre de dimensions 3×3 et un seuil de 0,4. Ainsi, au point A de la *figure* 24a, $f(i, j)$ vaut 1 ; calculons $f_u(i, j)$:

$$f_u(i, j) = \frac{1}{9}(1 + 0 + 0 + 0 + 1 + 1 + 0 + 1 + 1) = 0{,}56 > 0{,}4.$$

Donc, au point A' de la *figure* 24b, homologue du point A, la fonction intensité est fixée à la valeur 1. Effectuons le même calcul pour le point B de la *figure* 24a, $f(i, j) = 1$:

$$f_u(i, j) = \frac{1}{9}(0 + 0 + 0 + 1 + 0 + 0 + 0 + 1 + 1) = \frac{3}{9} = 0{,}33.$$

En B', $f(i, j)$ vaudra donc 0. La *figure* 24b donne l'équivalent de la *figure* 24a après l'opération moyenne mobile. Prenons maintenant l'image de la *figure* 24c où existent deux taches séparées. Ici en A, $f(i, j)$ vaut 1. Calculons $f_u(i, j)$:

$$f_u(i, j) = \frac{1}{9}(0 + 1 + 1 + 0 + 0 + 0 + 0 + 1 + 1) = \frac{4}{9} = 0{,}44 > 0{,}4.$$

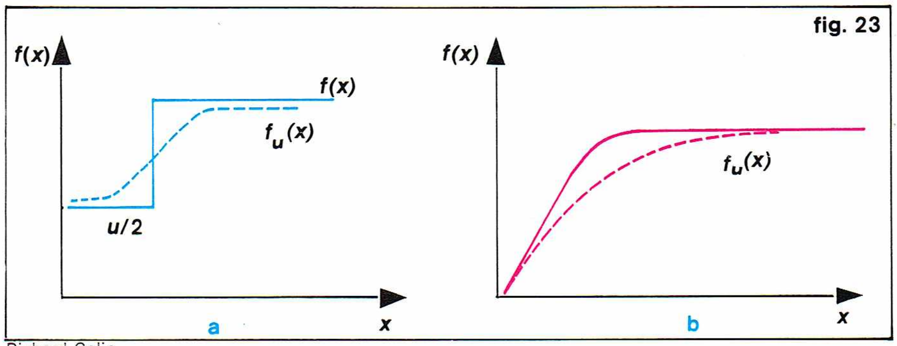

Richard Colin

▲ *Figure 23 : utilisation de la technique du moyennage pour le traitement d'images dans le cas monodimensionnel :* **a**, *fonction f (x)* [*discontinue*] *en un point et $f_u(x)$* [*disparition de la discontinuité*] *;* **b**, *fonction f (x)* [*continue*] *et fonction $f_u(x)$ moyennée* [*avec dérivée continue*].

Donc, en A' de la *figure* 24d, $f(i, j)$ vaut 1. On constate alors sur la *figure* 24d que le résultat est une image où les deux taches ne sont plus séparées. Si cette séparation avait un intérêt, l'opération moyenne mobile a fait perdre de l'information.

Ces deux exemples montrent bien les précautions à prendre en effectuant l'opération moyenne mobile.

Dans le cas particulier d'images binaires, il existe une autre transformation dont le résultat est aussi un lissage, mais plus contrôlable que le précédent, le **lissage logique.** La fonction $f(i, j)$ ne prenant dans les cellules élémentaires que les valeurs 0 ou 1, on peut la considérer comme une variable booléenne : la valeur lissée de la fonction intensité est alors choisie comme résultat d'une fonction booléenne, et le problème du seuil n'existe plus.

Soit l'exemple suivant : la valeur de la fonction lissée vaudra 1 si la valeur antérieure de la fonction valait 0 et si tous les carrés limitrophes étaient à la valeur 1 ; la valeur de cette fonction lissée vaudra 0 si la valeur antérieure était 1 et si tous les carrés voisins étaient à la valeur 0. Dans les autres cas, la fonction lissée est égale à la fonction antérieure.

Des exemples sont donnés sur la *figure* 25. Il y a en fait complémentation des valeurs isolées aux valeurs qui les

▼ *Figure 24 : un exemple de traitement d'image binaire ;* **a**, *représentation de l'image dans un quadrillage 7 × 7 ;* **b**, *choix d'une fenêtre de dimensions 3 × 3 et d'un seuil de 0,4 ;* **c**, *cas d'une image avec deux taches séparées ;* *, après calcul de la moyenne mobile, les deux taches ne sont plus séparées.*

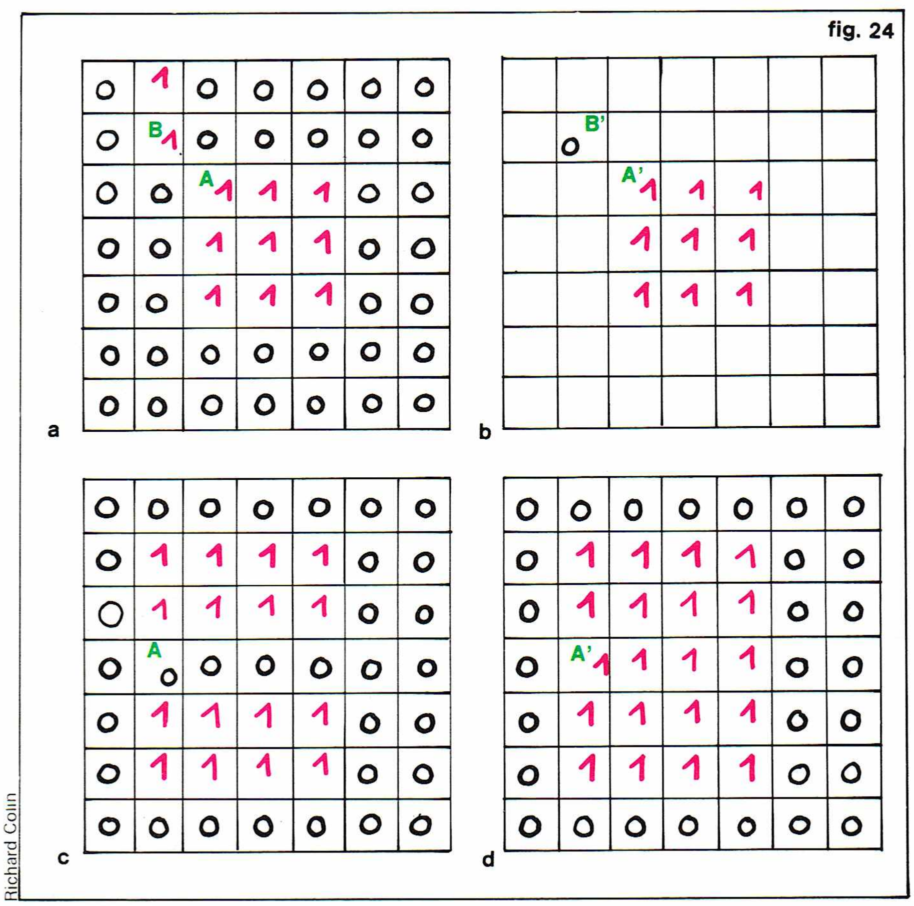

Richard Colin

fig.25

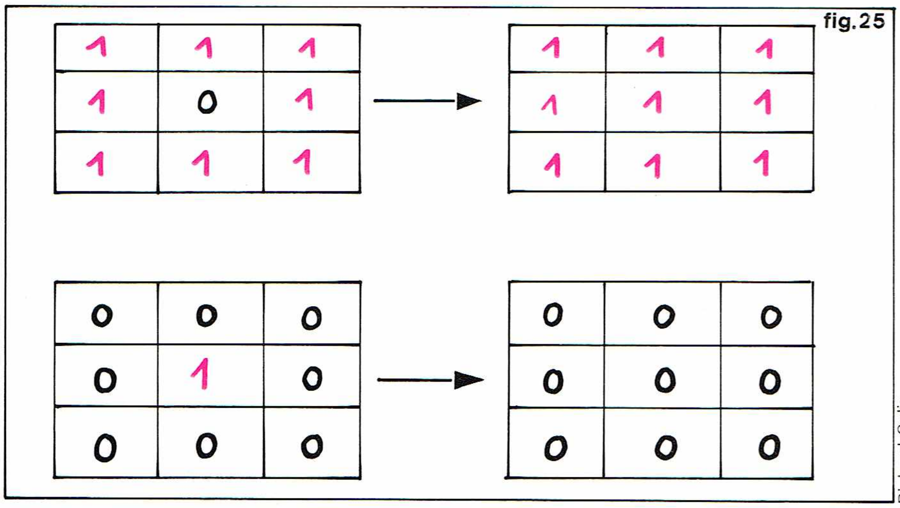

▲ *Figure 25 : quelques exemples de transformations par lissage logique dans le cas particulier d'images binaires.*

entourent ; c'est un bon procédé pour lutter contre certains bruits dont l'effet est de changer aléatoirement certaines valeurs de $f(i,j)$. Pour l'image de la *figure* 26, le point où $f(i,j)$ valait f_{22} prend la valeur f_{u22} donnée par la formule suivante :

$$f_{u22} = \bar{f}_{22}\,(f_{11} \cdot f_{12} \cdot f_{13} \cdot f_{23} \cdot f_{21} \cdot f_{31} \cdot f_{32} \cdot f_{33}) + f_{22}\,(f_{11} + f_{12} + f_{13} + f_{21} + f_{23} + f_{31} + f_{32} + f_{33})$$

(« · » : opération ET, « + » : opération OU).

Ainsi, si

$$f_{11} = f_{12} = f_{13} = f_{21} = f_{23} = f_{31} = f_{32} = f_{33} = 1$$

et si f_{22} vaut 0, alors :

$$f_{u22} = 1\,(1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1) + 0\,(1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1) = 1.$$

Si $f_{11} = f_{12} = f_{13} = f_{21} = f_{23} = f_{31} = f_{32} = f_{33} = 0$

et si $f_{22} = 1$, alors :

$$f_{u22} = 0\,(0 \cdot 0 \cdot 0 \cdot 0 \cdot 0 \cdot 0 \cdot 0 \cdot 0) + 1\,(0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0) = 0.$$

Prenons maintenant le cas où

$f_{11} = f_{13} = f_{21} = f_{23} = f_{31} = f_{32} = f_{33} = 1, f_{22} = f_{12} = 0.$

alors :

$$f_{u22} = 1\,(1 \cdot 0 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1) + 0\,(1 + 0 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1) = 0,$$

il n'y a donc aucun changement. La définition de la fonction booléenne prise correspond bien aux contraintes fixées plus haut. Puisqu'on sait définir quantité de fonctions booléennes, le processus de lissage est beaucoup plus contrôlable quand on utilise ce genre de technique.

fig. 26

f_{11}	f_{12}	f_{13}
f_{21}	f_{22}	f_{23}
f_{31}	f_{32}	f_{33}

▲ *Figure 26 : lissage logique dans le cas d'images binaires (voir développement dans le texte).*

Reconnaissance d'objets. Le traitement d'images est utilisé en tant que traitement d'un signal d'un capteur particulier : une caméra de télévision saisit la scène devant elle et des algorithmes sont utilisés pour reconnaître des objets. Si un objet recherché s'y trouve, une action s'ensuivra. Comme illustration, on peut imaginer un bras mécanique dont la fonction est d'assembler plusieurs pièces (deux cylindres concentriques par exemple). Sur l'image fournie par la caméra, il faut reconnaître tout d'abord le plus grand cylindre, le saisir, l'amener sur une plate-forme, reconnaître et aller chercher le petit cylindre. L'exploitation d'une image exige donc la reconnaissance d'objets. Nous allons maintenant traiter de ce sujet.

La technique utilisée est encore l'homologue d'une méthode d'analyse du signal, l'adaptation à une forme type. Afin de simplifier l'exposé, raisonnons encore sur des images binaires et partons d'une image de contours qui en est un bon exemple. On désire reconnaître un carré, par exemple. Une méthode simple consiste à créer une forme type (*fig.* 27a) et à la déplacer sur l'image dans toutes les positions possibles. Si, dans une des positions, le « creux » du carré type est rempli de blanc, on pourra décider qu'on a repéré un carré. Cette méthode suppose que la dimension du carré type correspond exactement à celle de la forme que nous recherchons. Si la forme type est, par exemple, plus petite, il peut exister des positions dans l'image où le « creux » sera rempli de blanc sans pour cela qu'on soit certain d'avoir reconnu un carré. Pour remédier à cette incertitude, on peut essayer de retrouver directement une région blanche entourée de zones sombres. C'est ce que nous indiquons sur la *figure* 27b. En utilisant ce carré type, on dit qu'on reconnaît un carré si les zones successives A, B, C correspondent sur l'image à des zones respectives 0, 1, 0. Notons que cette forme type est aussi celle d'une image binaire et que la taille du carré type doit être plus faible que celle de l'image, puisqu'on recherche un sous-ensemble de celle-ci.

Dans les applications réelles, on n'a jamais l'accord parfait indiqué ci-dessus, et on doit se donner une mesure du degré d'accord entre un sous-ensemble de l'image et la forme type. Soit $f(i,j)$ la fonction intensité de l'image, $c(i,j)$ celle du carré type, D son domaine de définition (D est plus faible que l'image). Une indication du degré d'accord peut être donnée par la fonction suivante :

$$A\,(m,n) = \sum_{i,j} |\,f(i,j) - c(i-m, j-n)\,|.$$

La somme est effectuée sur tous les indices (i,j) tels que $(i-m, j-n)$ soit un élément de D. On déplace la forme type sur tous les points de la surface et on compte les carrés où l'image et la forme type diffèrent. On doit donc calculer $A(m,n)$ pour trouver les positions de la forme type et rechercher celles où $A(m,n)$ est faible. On reconnaît la méthode d'adaptation d'un signal à un signal-type : ici, on recherche la portion d'image ressemblant à une image type. Le principe repose donc simplement sur une image type et une fonction indicatrice de similitude.

Il y a diverses fonctions de similitude utilisables, nous en avons donné un exemple ; on aurait pu tout aussi bien prendre :

$$d^2\,(m,n) = \sum_{i,j} (f(i,j) - c(i-m, j-n))^2$$

qui est la distance euclidienne de deux vecteurs. Examinons plus complètement $d^2(m,n)$:

$d^2(m,n) =$

$$\sum_i \sum_j (f^2(i,j) - 2f(i,j)\,c(i-m, j-n) + c^2(i-m, j-n))$$

La somme sur les indices (i,j) est effectuée sur le domaine précédemment défini.

$$\sum_i \sum_j c^2\,(i-m, j-n)$$

est constant puisque uniquement lié à la fonction intensité de la forme type, donc indépendant de sa position m, n. Par contre, $\sum_i \sum_j f^2(i,j)$ est la somme des carrés de la fonction intensité sur l'emplacement testé de la forme type, c'est un terme homogène à une énergie, variant évidemment avec chaque couple de valeurs (m,n). Supposons cette variation assez faible pour qu'on puisse la négliger et considérer $\sum_i \sum_j f^2(i,j)$ comme constant. Donc $d^2(m,n)$ est faible, c'est-à-dire qu'il y a une grande ressemblance entre la portion d'image et la forme type si le terme :

▼ *Figure 27 : essai de reconnaissance d'un carré ; a, forme type qui sera déplacée sur l'image dont on veut reconnaître la forme ; b, grâce au carré type, on essaie de retrouver une région blanche entourée de zones sombres.*

fig. 27

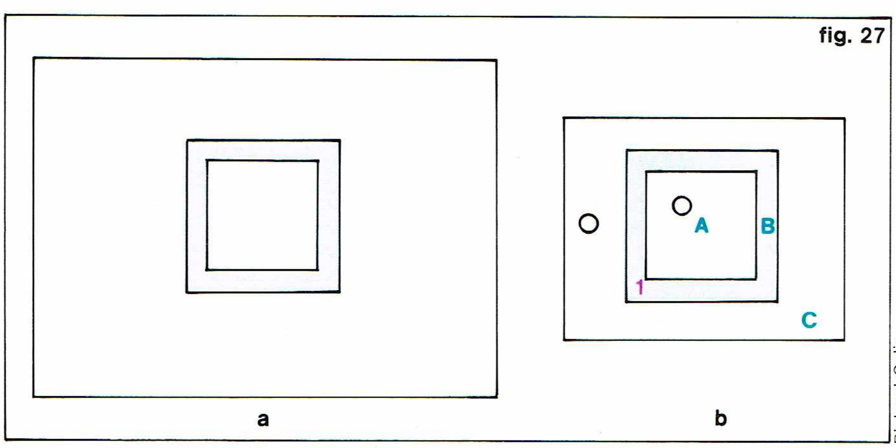

Richard Colin

$$\sum_i \sum_j f(i,j)\ c\,(i-m, j-n),$$

est grand. Or ce terme est homogène à une corrélation : la ressemblance est donc grande lorsque la corrélation est forte (voir partie consacrée à l'analyse du signal). On pourrait même, sans se préoccuper de règle de distance, se donner uniquement la corrélation pour avoir une indication entre les deux portions d'image. Rappelons-nous cependant que nous avons fait une hypothèse sur le terme énergétique qui peut se révéler grossière. Pour en tenir compte, on peut calculer une corrélation normée définie par :

$$\frac{\sum_i \sum_j f(i,j)\ c\,(i-m, j-n)}{\sqrt{\sum_i \sum_j f(i,j)^2}}$$

Cette corrélation est maximale lorsque l'accord est parfait (elle ressemble à un coefficient de corrélation). En résumé, lorsque le terme énergétique varie peu, on peut employer directement la corrélation ; dans le cas contraire, il vaut mieux revenir à la notion de distance. Il existe un moyen bien simple pour rendre invariant $\sum_i \sum_j f^2(i,j)$ dans le cas d'une image binaire. Il suffit de coder le « blanc » par « 1 » et le « noir » par « — 1 » au lieu de 0 ; en ce cas, quelles que soient les valeurs de m et n, $\sum_i \sum_j f^2(i,j)$ est constant et égal au nombre de carrés de la forme type.

Ce type de détection apparaît dans un ensemble de problèmes qui semblent différents, mais qui sont en fait équivalents. Le raisonnement a été effectué sur des images binaires, mais il peut être étendu à des images plus riches en informations. On peut remarquer que cette technique ne fait appel qu'à l'information locale de l'image : on ne lit que les fonctions intensité de la portion du plan de l'image correspondant à la forme type. Cet aspect local entraîne une simplicité d'application, mais aussi limite les possibilités.

Nous avons traité du problème de renforcement des arêtes des figures ; nous allons maintenant développer une analyse complémentaire : simplifier une image en la partageant en un **ensemble de zones disjointes.** Ainsi, pour un cas très simple, une zone sera composée de cellules élémentaires pour lesquelles la fonction intensité a des valeurs identiques. Chaque zone est reliée aux autres. Les connexions peuvent être de deux types : ou bien une cellule est reliée aux huit cellules qui l'entourent, ou bien simplement aux quatre qui ont une arête commune. La distinction paraît subtile, et nous allons l'illustrer dans un exemple représenté par l'image binaire de la *figure* 28a. Les cellules élémentaires où $f(i,j)$ vaut 1 et qui ont un côté commun sont reliées : la figure est connexe. Si on considère les cellules où $f(i,j)$ vaut 0, on s'aperçoit qu'elles sont toutes liées et que le fond « extérieur aux 1 » est lié au fond « intérieur ». Ainsi il semble que nous ayons une figure sans intérieur ni extérieur. En précisant maintenant qu'une cellule ne peut être reliée à une autre que si elle a un côté commun, nous éliminons les liens par les angles. En ce cas, la figure n'est connexe ni par les zones où $f(i,j)$ vaut 1 ni par celles où $f(i,j)$ vaut 0. Nous sommes pratiquement dans le même embarras que précédemment ! En fait, toutes les difficultés proviennent du choix du quadrillage ; elles n'existeraient pas si on avait pris un découpage en cellules hexagonales, mais ce gain ne compense pas toujours la complexité qu'il induit.

Nous nous limiterons, dans ce qui suit, aux liaisons effectuées par les côtés des cellules élémentaires. On dira qu'un sous-ensemble S de l'image forme une région si :

- tout les cellules de ce sous-ensemble ont la même valeur de fonction intensité ;
- tout couple de cellules de S est lié par une suite de cellules adjacentes ;
- tout sous-ensemble de l'image contenant S ne vérifie pas les deux propriétés ci-dessus. Par cette dernière propriété, on s'assure que la région définie est la plus grande possible.

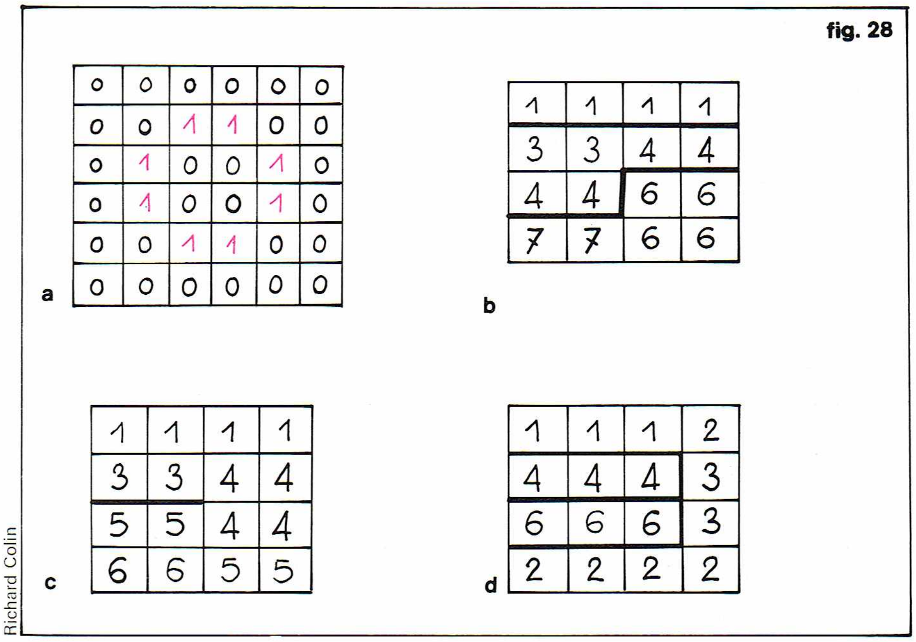

▲ ***Figure 28 : problème de la simplification d'une image en la partageant en un ensemble de zones disjointes (voir développement dans le texte).***

Si on applique cette définition à l'image étudiée, on va délimiter un ensemble de zones, chacune correspondant à un ensemble de cellules où $f(i,j)$ prend la même valeur. On va donc distinguer les unes des autres aussi bien les zones franchement différentes (faces d'un objet par exemple) que celles qui le sont peu (modifications dues à l'ombre). Il y a deux façons d'éviter ces distinctions.

On peut se fixer un seuil et décider de ne pas considérer comme différentes deux régions adjacentes où les fonctions $f(i,j)$ diffèrent d'une valeur inférieure à ce seuil : cela permet de regrouper des zones où la différence d'intensité est faible. Un exemple est donné sur la *figure* 28b avec un seuil de 1. La ligne renforcée indique le contour trouvé (les différences de fonction intensité sont supérieures à 1). Cependant, en examinant la *figure* 28c, on constate que cette procédure entraîne parfois le regroupement en mêmes régions de zones où l'intensité est très différente. Aussi une modification de la méthode précédente consiste-t-elle, dans un premier temps, à opérer de la même façon, puis à ne regrouper dans une même région que les zones adjacentes où un critère est satisfait.

Prenons un exemple : on décide de regrouper deux régions adjacentes si la différence moyenne des fonctions intensité des cellules de chacune d'entre elles est inférieure ou égale à 1. Soit la *figure* 28d : les zones où $f(i,j)$ vaut respectivement 1, 2, 3 sont regroupées en une seule région ; il apparaît une arête qui sépare la zone des 1 et des 4, puis une autre pour les 4, les 6 et les 2. En fait, le regroupement en régions dépend beaucoup de l'ordre dans lequel sont prises les premières zones définies. Sur la *figure* 28d, on peut très bien arriver à séparer complètement la zone où $f(i,j)$ vaut 4 de celle où $f(i,j)$ vaut 3.

Au lieu de prendre un critère de séparation fondé sur le noir et blanc, on peut, si l'image le permet, utiliser la couleur comme critère. On se donne une fonction intensité analogue à $f(i,j)$, mais qui devra maintenant représenter en plus la couleur : l'ensemble de toutes les couleurs peut être représenté par un vecteur de dimension 3. Pour chaque point (x, y) de l'image, on donne une valeur à un vecteur noté $\mathbf{g}\ (x, y)$ tel que

$$\mathbf{g}'\ (x,y) = (g_1\ (x,y),\ g_2\ (x,y),\ g_3\ (x,y))\ ;$$

g_1, g_2, g_3 sont les coordonnées, c'est-à-dire les pourcentages des couleurs fondamentales (rouge, bleu, vert). Pour donner les valeurs à g_1, g_2, g_3, il faut donc « filtrer » l'image respectivement dans le rouge, le bleu, le vert. On peut alors chercher à séparer l'image en zones telles que les coordonnées g_1, g_2 et g_3 soient respectivement identiques. Puis on peut regrouper ces zones en régions suivant un critère, qui serait une extension de celui défini pour le noir et blanc. On peut aussi étendre les techniques que nous avons vues, comme le renforcement des arêtes, l'accord avec une forme type, à des images colorées.

fig. 29

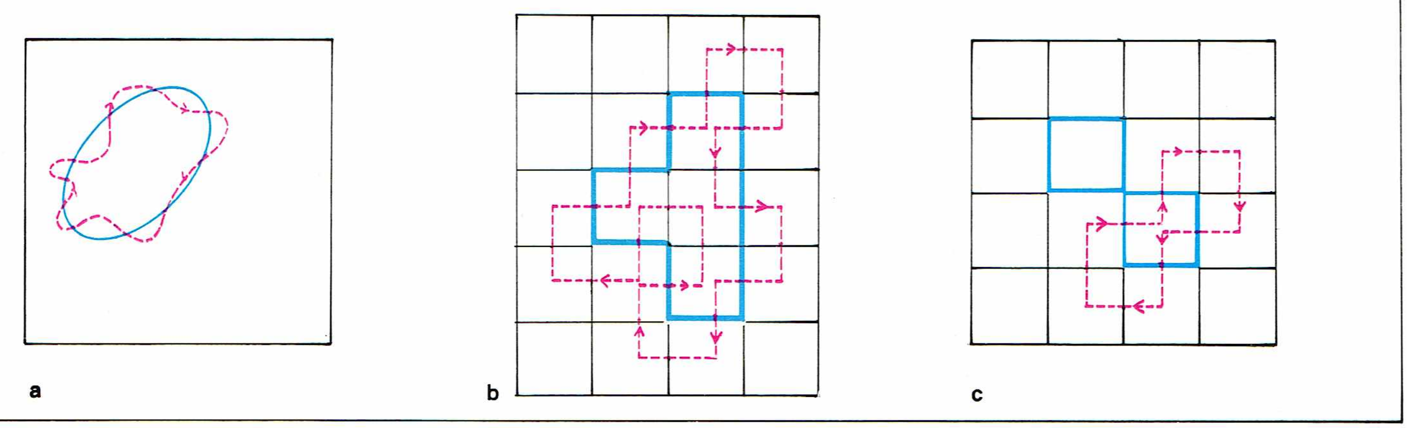

▲ *Figure 29 : problème de la simplification d'une image par la mise en évidence de contours ; a, exemple « algorithme de la fourmi » : trajet possible sur l'image ; b, exemple d'approximation du contour recherché dans le cas d'une image binaire ; c, exemple où une zone est oubliée.*

▼ *On a beaucoup cherché à utiliser les méthodes de reconnaissance de formes pour résoudre le problème du diagnostic médical ; un exemple bien connu est celui de l'électroencéphalogramme, réalisé ici sur Raymond Poulidor.*

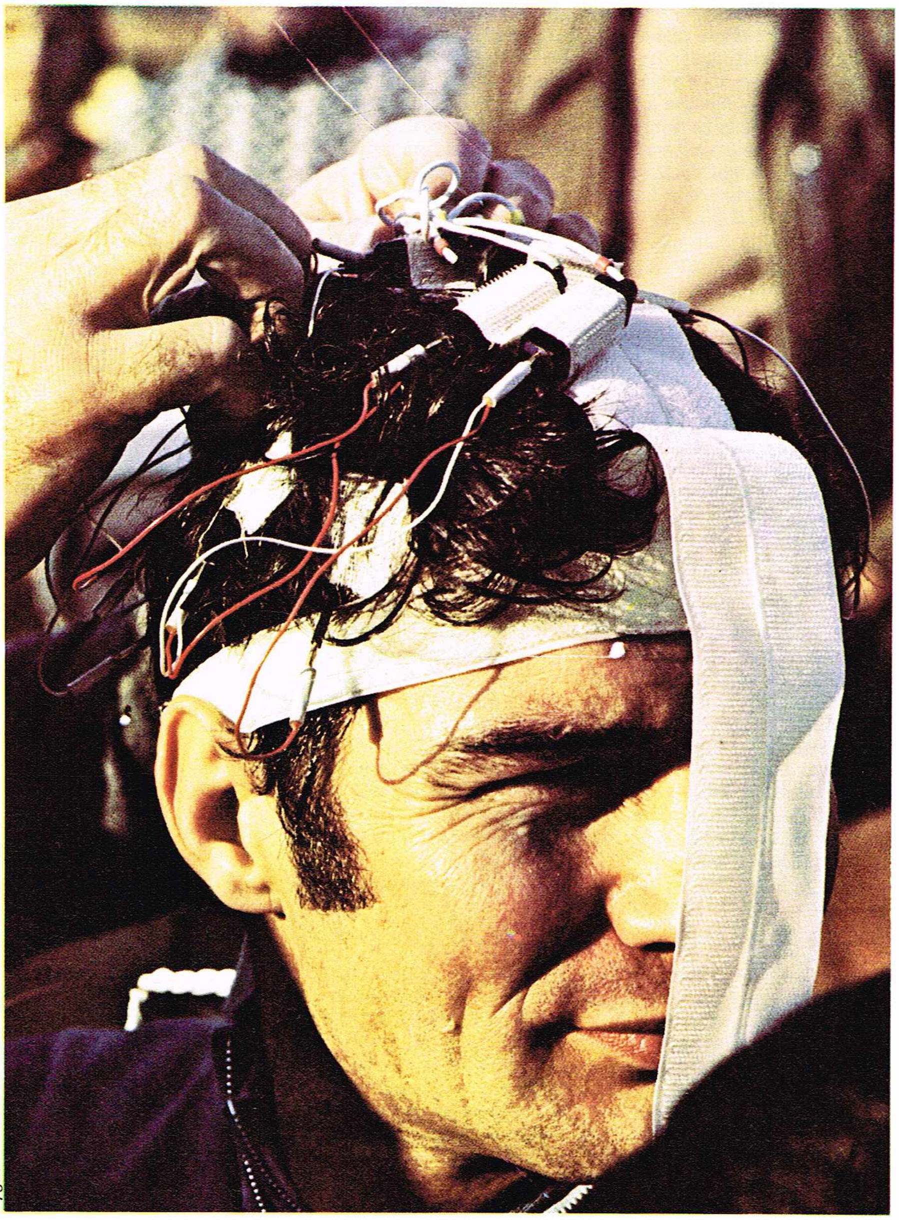

Nous avons décrit la méthode qui consiste à simplifier une image en effectuant le tracé des contours des objets (technique du gradient). Une autre méthode consiste à suivre les contours, c'est-à-dire la **séparation entre un objet sur l'image et le fond.** Nous allons étudier un cas très simple avec un algorithme facile à mettre en œuvre. Imaginons une fourmi se promenant sur une image jusqu'à rencontrer une partie foncée ; elle incurve alors son chemin sur la gauche jusqu'à quitter cette partie ; elle repart aussitôt sur la droite jusqu'à rencontrer à nouveau la partie foncée. Cette partie foncée est censée représenter la figure dont on veut suivre le contour. Au moment où la fourmi aura rejoint un point proche de son point de départ, le contour sera bouclé. Nous avons imaginé ce processus sur la *figure* 29a.

Sans entrer dans tous les détails de mise en place, on peut faire plusieurs remarques sur cet algorithme. D'abord, le rayon de courbure des changements de direction de la fourmi traduit la précision du tracé du contour. Ainsi, les zones « aiguës » par rapport à ce rayon de courbure échapperont complètement à la fourmi. De même, si la figure est « trouée », il peut arriver que la fourmi tombe dans un de ces « trous » proches du contour et perde ainsi complètement la ligne qu'elle suivait.

Simplifions encore l'exposé en prenant le cas d'une image binaire. L'algorithme se précise mieux, et une des objections précédentes n'a plus de raison d'être ; les différents pas de l'algorithme sont les suivants :

* parcourir l'image jusqu'à se trouver dans une cellule de la figure, tourner alors à gauche et rechercher une autre cellule ;
* si la cellule n'est pas une de celles de la figure, tourner à droite et rechercher une autre cellule ;
* arrêter ce tracé itératif quand le dernier point de chute est à moins d'une cellule du point de départ.

La *figure* 29b indique bien une approximation du contour recherché. Cependant la *figure* 29c donne un exemple où la fourmi « oublie » une zone : une cellule est omise, mais nous remarquons qu'elle n'est reliée au reste de la figure que par un angle. On peut noter aussi, en reprenant ce même exemple, que le contour obtenu sera différent suivant la position du point de départ.

En fait, il ne faut pas attacher plus d'importance qu'il n'est nécessaire à cet algorithme simple. Dans le cas d'une image à plus de deux niveaux d'intensité, la détermination de tels algorithmes suppose que plusieurs conditions sont vérifiées. Tout d'abord, il convient de déterminer de quelle figure on veut suivre le contour en se fixant, par exemple, un seuil d'intensité (la différence entre l'intensité de la figure et celle du fond doit dépasser ce seuil). Ensuite, la figure doit être relativement simple ou ne pas présenter de trop grandes variations. Ainsi, même dans une figure binaire, si la boucle d'un 9 n'est pas fermée, on peut être surpris du résultat obtenu par un algorithme chargé d'en suivre le contour (on peut parfois lever des ambiguïtés en effectuant un lissage préalable de l'image). Pour conclure, les algorithmes décrits sont de type série, donc une erreur à une étape se répercute aux étapes suivantes. Ce sont des méthodes tout à fait différentes de celles, par exemple, de la recherche d'accord avec une forme type, qui travaillent de manière parallèle. En fait, on limite

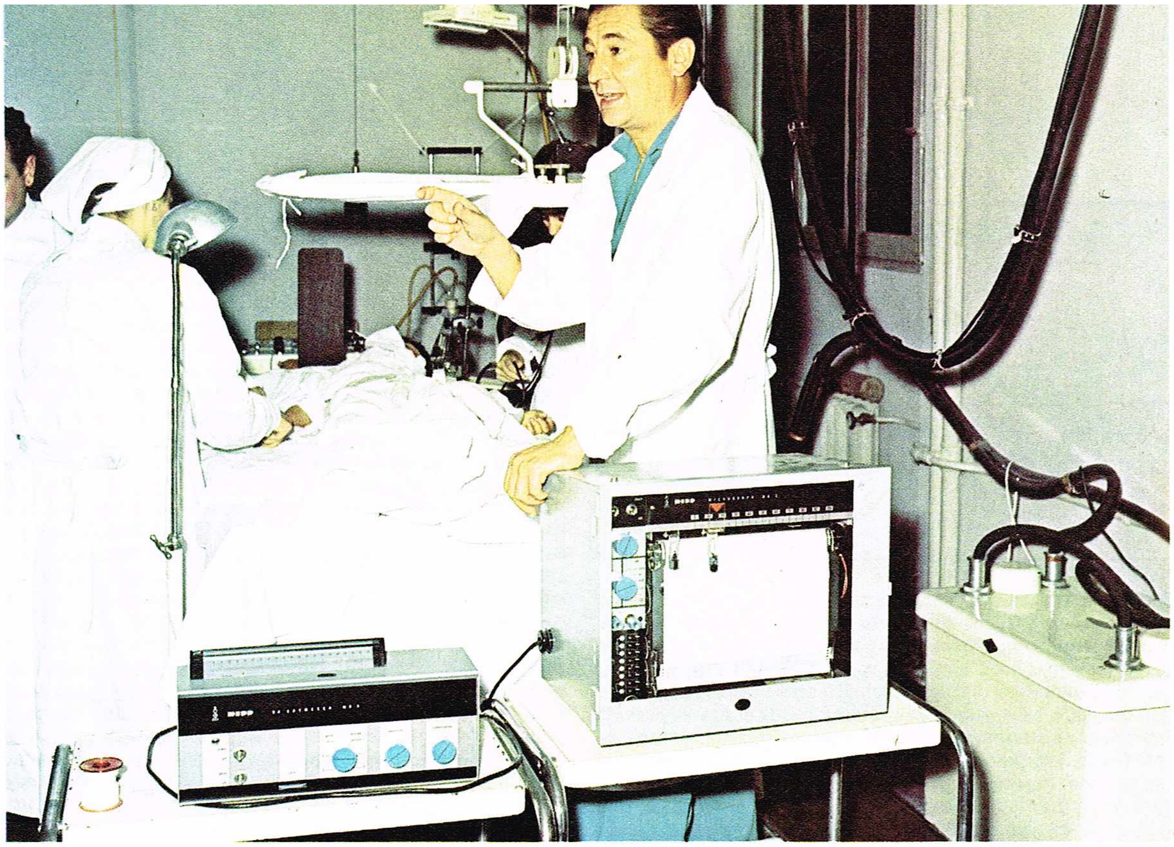

◀ ***La surveillance des malades en milieu hospitalier nécessite souvent le contrôle de paramètres importants comme la pression artérielle ou le rythme cardiaque et implique l'utilisation d'appareils enregistreurs, voire même d'ordinateurs.***

l'emploi d'un algorithme de contour à des figures nettes et peu marquées par du bruit.

Nous avons présenté, dans ce paragraphe, quelques méthodes élémentaires de traitement d'images. Les techniques employées aujourd'hui sont parfois très complexes (obtention de perspectives, d'ombres...), et ce domaine est en pleine évolution.

Le diagnostic médical

On a beaucoup cherché à utiliser les méthodes de reconnaissance des formes pour résoudre le problème du diagnostic médical. Les applications sont nombreuses et diverses. En effet, ce domaine correspond parfaitement à ce que nous avons précédemment défini : le médecin examine un ensemble de paramètres et leur associe une maladie. Dans le jargon de la reconnaissance des formes, chaque paramètre est une composante du vecteur forme et chaque maladie une classe ; il s'agit donc d'associer une classe aux valeurs prises par les composantes du vecteur pour un malade donné. Historiquement, les premiers travaux ont été effectués à partir de signaux comme l'électrocardiogramme, le vectocardiogramme et l'électro-encéphalogramme : on pouvait en effet disposer immédiatement de valeurs numériques fournies par des capteurs, tandis que pour d'autres données, il n'existe pas toujours de capteurs suffisamment fiables. A l'heure actuelle, si les applications connues en milieu hospitalier sont nombreuses en électrocardiographie ou en électro-encéphalographie, on n'en est pas resté là, et le médecin utilise de plus en plus un matériel sophistiqué qui l'aide à préparer son diagnostic (par exemple, les méthodes de traitement d'images décrites ci-dessus sont utilisées pour le traitement automatique de radiographies pulmonaires).

Il faut toutefois s'entendre sur le terme de *diagnostic automatique*. Il ne s'agit en aucun cas de remplacer le médecin et de confier le malade à une machine, non pas tant à cause du problème moral que du problème de sûreté. En effet, actuellement, aucune machine n'est capable d'intégrer toutes les données que le médecin « lit » dans son patient : ce n'est pas le volume qui est en cause (les possibilités de mémoire des ordinateurs sont énormes), mais l'adaptation de l'homme : le médecin, au bout de nombreuses années de pratique, acquiert une connaissance qui lui permet d'associer à certains symptômes observés un cas antérieur et donc de définir facilement un diagnostic. L'ordinateur n'est là qu'à titre d'auxiliaire du médecin ; il lui évite, par exemple, la lecture fastidieuse de tracés électro-encéphalographiques en isolant certains phénomènes, ce qui va accélérer la procédure de détermination. Si le malade nécessite une grande quantité d'examens, l'ordinateur pourra, en associant, par exemple, à certains examens, des fourchettes, proposer plusieurs diagnostics possibles. Le médecin choisira l'un d'eux en fonction de sa propre connaissance, ou les rejettera tous. Insistons donc sur le fait que l'ordinateur n'est pas encore à même de remplacer l'homme dans ce domaine .

Un autre exemple d'emploi de l'ordinateur en milieu hospitalier est le problème de la *surveillance*. Des malades ayant subi une opération importante doivent être surveillés pour un ensemble de paramètres (pression artérielle, rythme cardiaque, etc.). L'ordinateur est à même de surveiller de manière continue plusieurs malades et de donner l'alerte dès que certains paramètres de l'un d'entre eux sortent de zones fixées. Cette surveillance était auparavant effectuée de manière discontinue par un personnel infirmier. L'emploi de l'ordinateur permet ici d'utiliser le personnel à d'autres tâches parfois moins routinières.

Nous pourrions donner l'exemple de nombreuses applications au domaine médical des méthodes exposées ci-dessus. Parce qu'elles intègrent bien les techniques de reconnaissance des formes, nous avons choisi l'**électrocardiographie** et la **vectocardiographie.** En effet, la reconnaissance des formes y a été utilisée et mise en place tôt et avec succès. Cependant, comme il est courant dans de nombreuses applications, les caractères choisis pour la reconnaissance des symptômes n'ont évidemment pas été définis par des mathématiciens, mais sont ceux qu'ont toujours utilisés les médecins. L'exemple que nous allons décrire en détail montre un cas où les méthodes générales appliquées à un problème pratique donnent de bons résultats, à condition d'exploiter l'expérience de nombreuses années de travail humain.

L'électrocardiogramme et sa variante, le vectocardiogramme, qui sont des signaux électriques mesurables sur le corps humain, peuvent fournir des informations sur l'état du cœur. D'un point de vue non médical, ces signaux sont parfaitement adaptés au traitement machine, puisque leur amplitude est assez grande (de l'ordre de 50 mV), la zone de fréquence utilisée assez basse (0-100 Hz), qu'ils peuvent être enregistrés sans être trop marqués par du bruit et que, d'un battement cardiaque à l'autre, ils sont assez reproductibles. Enfin, c'est une technique médicale dont les critères sont suffisamment bien établis pour que les systèmes automatiques mis en place aient un pourcentage de succès assez fort pour des personnes saines ou malades (70 %). Cependant, les cas difficiles échappent en général à ces systèmes automatiques ; aussi ne les considère-t-on, rappelons-le, que comme des aides au diagnostic. Comme c'est souvent le cas en médecine, le signal électrocardiographique ou vectocardiographique peut être utilisé de différentes façons, ce qui change le système de reconnaissance de formes à élaborer.

Dans une première application, une population importante est examinée rapidement. Il peut s'agir soit d'un seul examen, soit d'une étape dans un examen de bilan

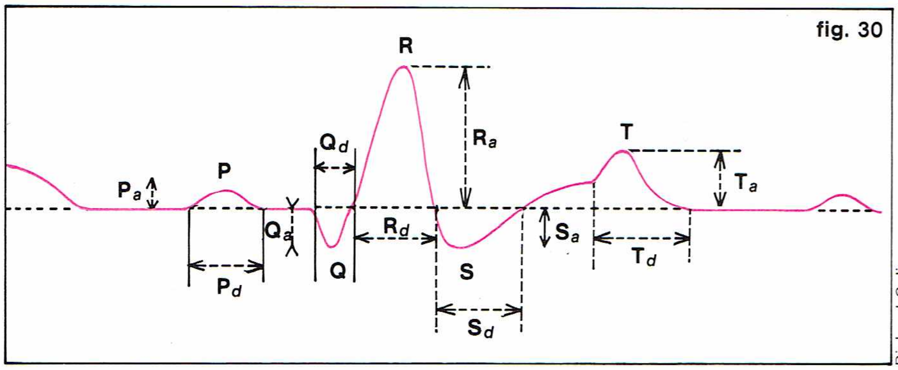

Richard Colin

▲ ***Figure 30 : une période typique du signal électrocardiographique tel qu'il est capté entre deux électrodes sur le torse.***

de santé par exemple. Dans ce cas, la population étant importante, elle ne comporte le plus souvent qu'une faible proportion de malades ; la seule décision attendue est : « normal » ou « malade », sans avoir à préciser plus complètement ce dernier point. On choisit donc une règle de décision telle que la probabilité de dire que le patient ne présente aucune anormalité — alors que cela est faux — est faible. Les patients classés « malades » doivent ensuite subir des examens plus poussés qui augmenteront la précision du diagnostic.

L'aide au diagnostic de maladies déterminées est la poursuite de l'application précédente et constitue aussi une deuxième application. Dans ce cas, le malade est examiné plus complètement, soit parce qu'on a le sentiment qu'il présente certains symptômes de maladie, soit parce qu'il demande un bilan plus poussé ou plus localisé. Il faut donc choisir une des maladies possibles ; et dans cette application, le pourcentage de patients malades examinés est important, aussi le coût peu élevé et la rapidité qui étaient les caractéristiques de la première application n'ont-ils évidemment aucune utilité. Dans ce cas aussi, et peut-être plus encore que précédemment, la machine fournira une aide au médecin présent. On pense élaborer une règle décisionnelle qui permette de choisir entre toutes les classes (leur nombre varie entre 8 et 13) ; en fait, étant donné que la décision appartient en dernier ressort au médecin et que celui-ci demandera peut-être d'autres examens complémentaires, la sortie fournie par l'ordinateur sera en général de ce type :

— maladie i avec la probabilité p_i
— maladie j avec la probabilité p_j, etc.

La dernière application que nous allons citer est la **surveillance.** Le patient est affecté d'une maladie qui nécessite un contrôle parfois constant ; dans ce cas, il est placé sous un régime hospitalier particulier : tous les traitements antérieurs sont connus, etc. Le but de la surveillance automatique est de déterminer certains changements de rythmes cardiaques annonciateurs d'une éventuelle attaque. La plupart du temps, la sortie fournie par la machine est un signal d'alarme destiné au personnel infirmier ou au médecin de service. Ici encore, comme dans la première application, le signal est : « normal » ou « anormal ». Si la probabilité de dire que le signal est « anormal » alors que c'est faux est élevée, le personnel hospitalier est fréquemment dérangé sans raison. Au contraire, si on dit que le signal est « normal » alors même qu'on est dans la phase qui précède la crise, la conséquence peut être la mort du patient. Le constructeur se trouve donc devant un problème extrêmement délicat. On procède généralement, bien que cela paraisse complètement étranger aux circonstances, en définissant des « coûts » pour chacune des situations précédentes. Toutefois, si la première peut se chiffrer (coût du dérangement d'un médecin pour rien), la seconde revient à donner une valeur finie à la vie humaine.

A l'avenir, les systèmes tels que celui que nous allons décrire vont se généraliser. La reconnaissance des formes verra ses applications grandir dans le domaine médical, mais il n'est pas souhaitable que le contrôle ultime en échappe à l'homme. Nous allons tout d'abord définir le signal électrique recueilli. La *figure* 30 représente une période typique du signal électrocardiographique tel qu'il est capté entre deux électrodes sur le torse. On peut y distinguer plusieurs ondes auxquelles le médecin a donné les noms de P, Q, R, S, T. Il y a plusieurs positions standards pour enregistrer ce signal sur le corps humain, un des plus connus est le système de Frank. Le cœur a pour fonction d'assurer la circulation du sang dans le corps humain. Le sang amené par le système veineux entre dans l'oreillette droite. Commandé par une activité électrique périodique, le muscle de l'oreillette se dépolarise et chasse le sang dans le ventricule droit. Simultanément, l'oreillette gauche reçoit le sang des poumons et l'envoie dans le ventricule gauche. C'est la partie correspondant à l'onde P. La dépolarisation électrique des ventricules correspond au signal complexe Q R S. Cet effet électrique entraîne la contraction des ventricules, et le sang est envoyé du ventricule droit au poumon via l'artère pulmonaire et du ventricule gauche dans le corps via le système artériel. Il peut y avoir repolarisation des ventricules, ce qui se traduit par l'onde T.

Le maximum d'amplitude du signal observé est d'environ 70 mV. Les amplificateurs utilisés pour l'enregistrement du signal ont une fréquence haute de 100 Hz. Pour traitement par un calculateur digital, le signal est échantillonné à une fréquence comprise entre 200 et 500 Hz (respect du théorème de Shannon). Le signal perturbateur, hormis le traditionnel signal de fréquence 50 Hz provenant du réseau, peut être un signal électrique d'origine musculaire si le patient est actif. La précision demandée au nombre binaire résultat de la conversion analogique numérique est faible, et beaucoup d'applications se sont contentées de nombres binaires de sept ou huit chiffres. Mais la détermination de la ligne de base, c'est-à-dire de la ligne de référence par rapport à laquelle sont mesurées les amplitudes des ondes, est délicate (de plus, elle peut évoluer au cours du temps) : aussi les applications actuelles utilisent-elles des convertisseurs standards à dix ou douze chiffres. Nous avons représenté sur la *figure* 30 quelques-uns des paramètres mesurés : amplitudes des ondes P, Q, R, S, T par rapport à une ligne de référence, durée de chaque onde. Il faudrait y ajouter les intervalles : intervalle début onde P-début onde Q, intervalle début onde Q-fin onde T, intervalle entre deux sommets d'ondes R successives, intervalle fin onde S-début onde T.

Lors de la dépolarisation du muscle cardiaque, la distribution des charges électriques à la surface du corps évolue. Une des modélisations utilisées a consisté à décrire ce phénomène par un ensemble de dipôles électriques. Quoi qu'il en soit, ce phénomène a pour conséquence la circulation de microcourants électriques dans le corps humain et donc l'évolution du potentiel électrique à la surface. Cette distribution de potentiel peut être mesurée par des ensembles d'électrodes. Les plus utilisés sont ceux d'Einthoven et de Frank. Dans le premier système, on mesure ce potentiel par des électrodes disposées sur le corps (bras gauche, bras droit, jambe gauche, poitrine). Les connexions sont réalisées en utilisant divers

E. Schwab - Parimage

▼ ***Les tracés de l'électrocardiogramme montreront si le cœur de ce jeune enfant du Kenya a été lésé au cours d'une crise de rhumatisme articulaire aigu. D'un point de vue non médical, ces signaux sont parfaitement adaptés au traitement machine puisque leur amplitude est assez grande, leur zone de fréquence assez basse, qu'ils peuvent être enregistrés sans être trop marqués par du bruit et qu'ils sont assez reproductibles.***

points de référence, et douze valeurs de potentiel sont recueillies. En fait, ces douze informations sont redondantes, et on pourrait les simplifier pour les ramener à un noyau moins important.

Définissons maintenant ce qu'on entend par vectocardiogramme. Le vectocardiogramme consiste en l'enregistrement de trois versions enregistrées de façon à former un système orthogonal. Le système d'électrodes est déterminé de façon à saisir au mieux l'activité électrique cardiaque. Pipberger a pu montrer en 1961 que le système de saisie de douze potentiels pouvait en fait être synthétisé par une combinaison linéaire sur une base à trois composantes. C'est ainsi qu'est né l'ensemble d'électrodes dit système de Frank. On enregistre simultanément trois potentiels X, Y, Z [*fig.* 31a et b]. Par la méthode de Lissajous, on peut les tracer les uns en fonction des autres pour donner la variation du vecteur dans le plan XY (frontal), YZ (sagittal) et YZ (transversal) (*fig.* 31c). Cette représentation vectorielle du signal cardiaque apporte beaucoup d'informations ; de plus, l'enregistrement simultané des trois signaux permet une réalisation du logiciel et du « hardware » plus simple.

Le problème de la reconnaissance des formes repose sur un bon choix du vecteur représentatif. Nous avons esquissé la difficulté de ce problème (la sélection de caractères), difficulté dont on peut se rendre compte soit par des méthodes heuristiques soit par des méthodes mathématiques. Utiliser la connaissance physique du phénomène est une possibilité intermédiaire. Nous allons ainsi décrire une méthode appliquée au problème qui nous intéresse ; elle est fondée sur la théorie électromagnétique des champs, mais elle a un rapport très net avec les méthodes mathématiques directes de sélection de caractères. Il est extrêmement difficile de construire une théorie pour relier à l'activité cardiaque les distributions de potentiel à la surface du corps. D'une part, le cœur n'est pas une simple source électrique isolée. C'est en réalité une distribution de charges variant dans le temps, que l'on peut décrire comme le résultat d'un moment dipolaire distribué dans le volume cardiaque. Une première approximation consiste à approcher ce caractère distribué par une suite discrète de dipôles électriques. Sans entrer dans les détails mathématiques, on peut faire un développement de cette source en une série de dipôles, quadrupôles, multipôles (de manière analogue à un développement en série de puissance).

D'autre part, il existe une seconde difficulté ; en effet, même si le cœur est complètement décrit dans son activité électrique, on doit aussi décrire le corps en tant que système de transmission du flux de courants. Or le corps est un volume conducteur linéaire, non homogène, anisotrope et dont les propriétés évoluent au cours du temps ! De plus, les valeurs de certains paramètres changent d'un individu à l'autre. Le problème est donc pratiquement insoluble, et on en cherche une approximation en considérant les propriétés électriques du corps comme homogènes et constantes au cours du temps. On le considère donc comme un conducteur linéaire purement résistif aux fréquences utilisées dans cette application. Le problème est amplement simplifié, puisque les distributions de potentiel de surface sont ainsi à chaque instant des fonctions linéaires des sources et ne dépendent donc pas des événements antérieurs. On constitue une source équivalente (modèle cardiaque équivalent) qui donnerait les mêmes distributions de potentiel pour un conducteur homogène et isomorphique. En ce cas, pour un point du corps repéré en coordonnées cylindriques par (ρ, θ, φ) et à l'instant t, le potentiel $V(\rho, \theta, \varphi, t)$ s'obtient en appliquant le principe de superposition :

$$V(\rho, \theta, \varphi, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{i} [H_{ij}^{a}(\rho, \theta, \varphi)\, a_{ij}(t) + H_{ij}^{b}(\rho, \theta, \varphi)\, b_{ij}(t)]$$

H est homogène à la fonction de transfert reliant le potentiel en un point (ρ, θ, φ) au coefficient du multipôle unitaire : c'est une caractéristique du corps humain. Au contraire, les a_{ij}, b_{ij} sont les composantes du signal fournies par le modèle équivalent du cœur, ce sont des fonctions du temps pour tenir compte du fait que ses propriétés ne sont pas constantes. En pratique, on mesure en N points du corps le potentiel et on résout le système de N équations obtenu pour connaître les coefficients. Cependant, il est difficile de relier les propriétés physiques

fig. 31

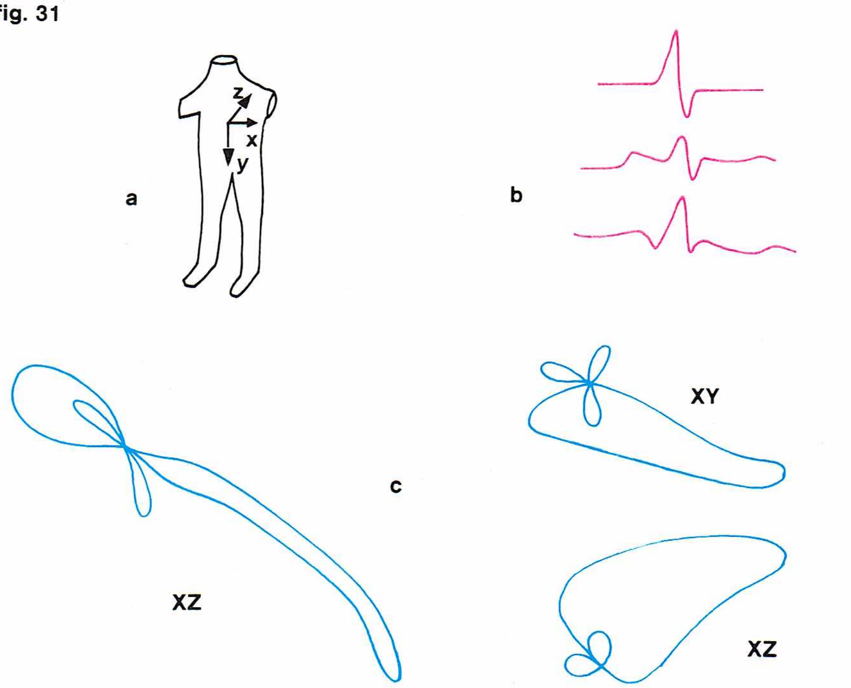

▲ *Figure 31 : principe du vectocardiogramme ;*
a, *axes de référence ;*
b, *les trois enregistrements ;*
c, *tracé des potentiels les uns en fonction des autres dans les différents plans.*

observées à celles d'une source équivalente multipolaire. Aussi Young et Huggins ont-ils proposé en 1962 de partir directement du potentiel $V(\rho, \theta, \varphi, t)$ et de l'exprimer comme un développement sur un ensemble de fonctions orthonormales, les fonctions $\varphi_i(t)$, c'est-à-dire :

$$V(\rho, \theta, \varphi, t) = \sum_{i=1}^{n} a_i(\rho, \theta, \varphi)\, \varphi_i(t)$$

où les fonctions $\varphi_i(t)$ satisfont

$$\int \varphi_i(u)\, \varphi_j(u)\, du = 0 \qquad \text{pour } i \neq j$$
$$\int \varphi_i(u)\, \varphi_j(u)\, du = 1.$$

Prenons N mesures de l'onde cardiaque de durée T : $y_1(t)\; y_2(t) \ldots y_N(t)$. Une méthode pour obtenir les fonctions $\varphi_i(t)$ est de prendre les valeurs propres et les vecteurs propres de la matrice de corrélation des mesures. Soit [R] cette matrice, de terme général R_{ij}. En supposant que nos mesures $y_i(t)$ satisfont les propriétés d'ergodicité (voir partie consacrée à l'analyse du signal), on a :

$$R_{ij} = E[y_i(t)\, y_j(t)] \rightarrow \int_0^T y_i(u)\, y_j(u)\, du$$

Rappelons qu'on définit le vecteur propre $\mathbf{v}_i$ associé à la valeur propre λ_i par $R\mathbf{v}_i = \lambda_i \mathbf{v}_i$. Cette équation traduit le fait que la transformation $R\mathbf{v}_i$ se réduit à une homothétie. On supposera ici que les N valeurs propres $\lambda_1, \ldots \lambda_N$ et les vecteurs propres $\mathbf{v}_i \ldots \mathbf{v}_N$ sont calculés par un algorithme numérique approprié. Convenons de les ranger par ordre décroissant, c'est-à-dire $\lambda_1 \geqslant \lambda_2 \geqslant \ldots \geqslant \lambda_N$. On construit alors les fonctions $\varphi_i(t)$ par :

$$\varphi_i(t) = \sum_{j=1}^{N} v_{ji}\, y_j(t) = \mathbf{v}_i'\, \mathbf{y}(t)$$

(le signe ' indique l'opération de transposition). On peut montrer que les fonctions ainsi définies sont orthogonales. En effet :

$$\int_0^T \varphi_k(t)\, \varphi_l(t)\, dt = \int_0^T \sum_{j=1}^{N} \sum_{m=1}^{N} v_{jk}\, y_j(t)\, v_{ml}\, y_m(t)\, dt$$
$$= \sum_{j=1}^{N} \sum_{m=1}^{N} v_{jk}\, v_{ml} \int_0^T y_j(t)\, y_m(t)\, dt$$
$$= \sum_{j=1}^{N} \sum_{m=1}^{N} v_{jk}\, v_{ml}\, R_{jm}$$

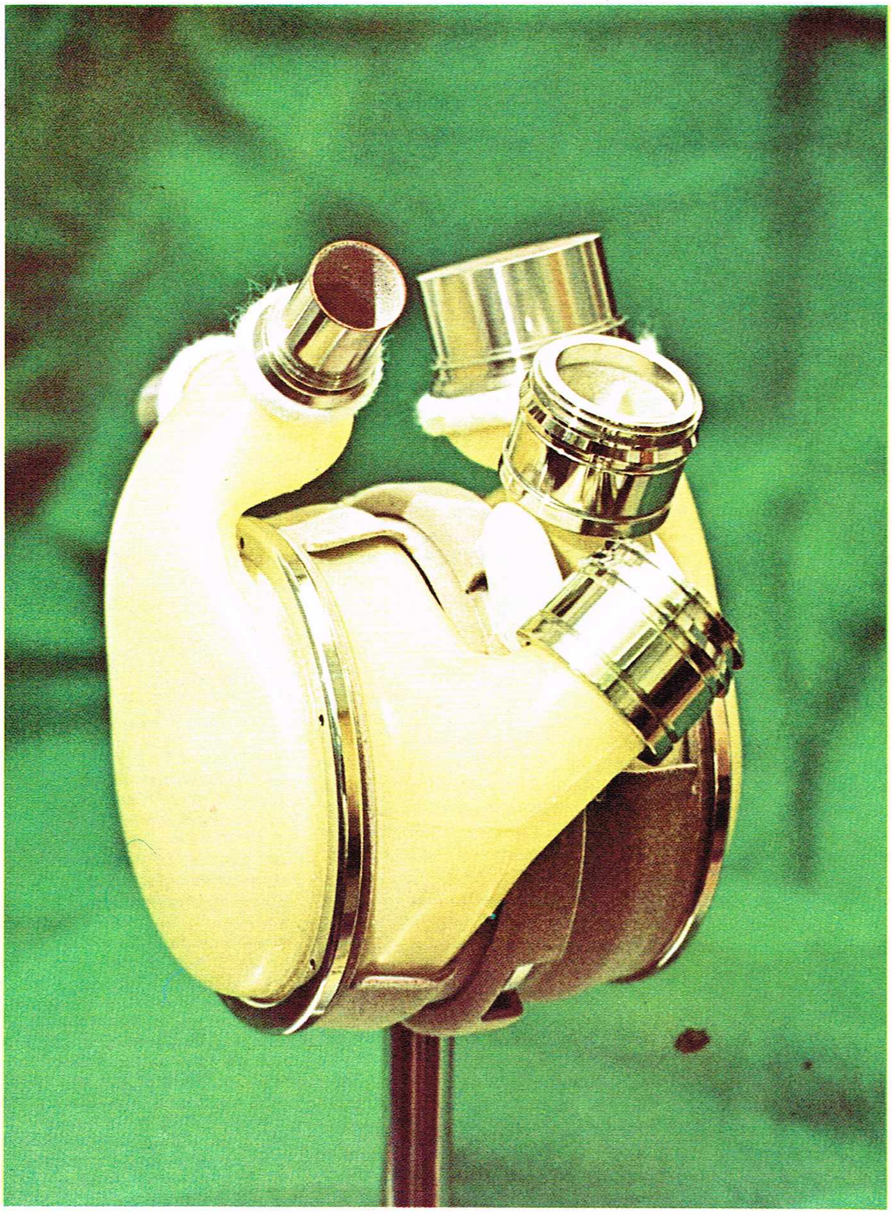

J.-P. Laffont - Gamma

▲ ***Un cœur artificiel.***

Reprenons l'équation définissant vecteurs et valeurs propres :

$$\mathrm{R}v_i = \lambda v_i \Rightarrow \sum_j \mathrm{R}_{jm}\, v_{jk} = \lambda_k\, v_{mk}.$$

En multipliant cette équation par v_{ml} et en sommant sur l'indice m, on obtient :

$$\int_0^{\mathrm{T}} \varphi_k(t)\, \varphi_l(t)\, dt = \sum_{m=1}^{\mathrm{N}} \lambda_k\, v_{mk}\, v_{ml}.$$

Or les vecteurs propres sont par définition orthogonaux. Donc :

$$\sum_{m=1}^{\mathrm{N}} v_{mk}\, v_{ml} = 0 \qquad \text{pour } l \neq k.$$

Il y a bien orthogonalité des fonctions $\varphi_i(t)$ construites. Cependant, comme les N points de mesures ne sont pas indépendants, le rang de la matrice n'est pas N, et il y a donc un certain nombre de valeurs propres nulles. Soit n ($\leqslant$ N) le nombre de valeurs propres non nulles [à cause des propriétés de la matrice R, ces valeurs propres sont strictement positives ; elles représentent d'ailleurs le carré de la norme des fonctions $\varphi_i(t)$]. Il n'y aura donc aussi que n fonctions $\varphi_i(t)$, puisque $\varphi_{n+1}(t)$ ... $\varphi_{\mathrm{N}}(t)$ ont des normes nulles. Pour compléter notre fonction-potentiel au point (ρ, θ, φ), il reste à calculer les coefficients $a_i(\rho, \theta, \varphi)$ [à noter que ces coefficients, caractéristiques des propriétés physiques du corps de chaque individu, sont indépendants du temps] ; on les obtient en résolvant :

$$a_i(\rho, \theta, \varphi) = \int_0^{\mathrm{T}} v(\rho, \theta, \varphi, t)\, \varphi_i(t)\, dt.$$

Par cette méthode, l'activité cardiaque électrique peut être décrite à l'aide d'une dizaine de fonctions $\varphi_i(t)$; l'avantage est que ces fonctions sont orthogonales entre elles.

Plaçons-nous maintenant dans le cas de la vectocardiographie, où seules trois mesures sont prises. Quand on applique la méthode précédente, on constate qu'on peut ne conserver que deux fonctions $\varphi_1(t)$, $\varphi_2(t)$. Bien que nous ne soyons pas entrés dans tous les détails mathématiques, théoriques ou numériques, cet exemple montre comment on peut réduire la dimension du vecteur-forme, donc de l'espace d'observation. La méthode exposée (diagonalisation de la matrice de covariance) est analogue à la méthode de statistiques multivariées, appelée analyse en composantes principales. Si le gain paraît faible dans le cas de la vectocardiographie (passage de trois composantes à deux), il devient beaucoup plus intéressant si N est plus grand ; le gain est toutefois ici d'un tiers.

Dans l'exposé général sur la reconnaissance des formes, nous avons évoqué les méthodes permettant de regrouper les vecteurs-formes d'une même classe tout en amplifiant les séparations de classes différentes. Il est difficile de trouver des méthodes linéaires réalisant ces transformations. Dans le cas des vectocardiogrammes, Kelly a proposé en 1971 une méthode permettant d'éliminer les effets parasites, dus au corps humain, sur le vectocardiogramme, ce qui permet de reconcentrer les formes d'une même classe. Le signal électrique cardiaque est transformé de façon supposée linéaire par le corps humain. Cette transformation varie d'un individu à l'autre, de par un ensemble complexe de paramètres : système vasculaire, position exacte du cœur, appareil musculaire, taille et structure des os, capacité pulmonaire, etc. Par suite, des cœurs identiques placés dans des corps différents produisent des vectocardiogrammes différents. Remarquons au passage le problème ardu qui se pose au cardiologue amené à tenir étroitement compte de tous ces paramètres, sans pouvoir les mesurer, pour interpréter le signal visualisé.

Si on pouvait donc réduire, ou même réussir à supprimer l'effet du corps humain sur le signal vectocardiographique, les vecteurs correspondant à une même classe seraient plus liés, et on pourrait employer des algorithmes dits de regroupement (en anglais, « clustering »). Ces algorithmes ont pour but de former des groupes de vecteurs en regroupant les formes apparemment « semblables » suivant un certain critère. Pour qu'ils soient performants, il est bon que tous les « bruits » ou parasites soient éliminés. Soit $\mathbf{y}(t)$ le signal observé sur un patient (ce vecteur a, rappelons-le, trois composantes) et $\mathbf{c}(t)$ le signal cardiaque réel que l'on recueillerait au niveau du corps. Si la transformation est linéaire, il existe une matrice A de dimension 3×3 telle que $\mathbf{y}(t) = \mathrm{A}\mathbf{c}(t)$, soit, en explicitant :

$$y_1(t) = \sum_{j=1}^{3} a_{1j}\, c_j(t)$$

$$y_2(t) = \sum_{j=1}^{3} a_{2j}\, c_j(t)$$

$$y_3(t) = \sum_{j=1}^{3} a_{3j}\, c_j(t).$$

Cette matrice est caractéristique de chaque patient. Pour un ensemble de patients, on observera les vecteurs $\mathbf{y}_1(t)$ $\mathbf{y}_2(t)$, $\mathbf{y}_3(t)$ ... correspondant aux signaux cardiaques $\mathbf{c}_1(t)$, $\mathbf{c}_2(t)$, $\mathbf{c}_3(t)$... avec chacun une matrice de transformation A_1, A_2, A_3... Si notre hypothèse est bonne, les signaux $\mathbf{c}_1(t)$, $\mathbf{c}_2(t)$, $\mathbf{c}_3(t)$ sont, pour une même classe, plus groupés que les signaux $\mathbf{y}_i(t)$, et la séparation entre des classes différentes est plus grande au niveau des $\mathbf{c}_i(t)$ qu'au niveau des $\mathbf{y}_i(t)$.

Cependant, on ne voit pas comment déduire des caractéristiques du torse de chaque individu la matrice A_i qui le caractérise. Puisqu'on ne peut opérer directement, on doit donc avoir recours à des méthodes plus mathéma-

tiques. Une technique simple qui vient à l'esprit est de se donner un « signal type » moyen et de calculer la matrice A par comparaison entre le signal recueilli et le signal modèle (technique analogue à la recherche d'un signal connu dans du bruit). Soit donc un signal type $\mathbf{s}\ (t)$, choisi parce que bien représentatif des signaux qu'on peut recueillir sur une population non malade. Ce signal provient d'une activité cardiaque $\mathbf{c}_s\ (t)$ par l'intermédiaire d'une matrice A_s :

$$\mathbf{s}\ (t) = A_s\, \mathbf{c}_s\ (t).$$

On va chercher une matrice T_i pour l'individu i de manière à transformer le signal recueilli sur lui, $\mathbf{y}_i\ (t)$, en un signal $\mathbf{z}_i\ (t)$ proche du signal type $\mathbf{s}\ (t)$ (à noter ici que la transformation utilisée est linéaire) :

$$\mathbf{z}_i\ (t) = T_i \mathbf{y}_i\ (t)$$

Si $\mathbf{s}\ (t)$ et $\mathbf{y}_i\ (t)$ sont produits par le même signal cardiaque $\mathbf{c}\ (t)$, donc s'ils appartiennent à la même classe, alors la fonction erreur $\varepsilon\ (t)$ définie par :

$$\varepsilon\ (t) = \mathbf{c}_s\ (t) - \mathbf{z}_i\ (t)$$

sera nulle, et :

$$\mathbf{c}_s\ (t) = T_i \mathbf{y}_i\ (t)$$

$$A_s\, \mathbf{c}_s\ (t) = T_i\, A_i\, \mathbf{c}_s\ (t)$$

Donc : $T_i = A_s\, A_i^{-1}$.

Ainsi, la méthode consiste à trouver la transformation qui rapproche le signal $\mathbf{y}_i\ (t)$ d'un signal standard, au lieu de rechercher la transformation due au corps : c'est une opération de normalisation. Remarquons que, dans leur principe, les deux techniques sont équivalentes.

La mise en place nécessite la définition précise de M signaux types $\mathbf{s}_1\ (t) \ldots \mathbf{s}_M\ (t)$, un par catégorie (non malade, malade 1, malade 2, ...). Un signal reçu $\mathbf{y}\ (t)$ est corrélé avec chacun des $s_i\ (t)$, et on retient le $s_i\ (t)$ avec lequel il présente le plus de liens (c'est-à-dire pour lequel la fonction erreur est la plus faible). En fait, les résultats ont montré qu'on obtient le meilleur résultat en définissant un signal modèle unique de la classe des patients non malades et en normalisant tous les signaux recueillis par rapport à ce signal.

Actuellement, on utilise des calculateurs digitaux pour procéder à cette normalisation. Par souci de simplification, la fonction erreur est une fonction quadratique définie par $\int_0^T \varepsilon'\ (u)\ \varepsilon\ (u)\ du$, où T est la période du signal vectocardiographique.

On peut montrer alors que T_i est donné par

$$T_i = \left[\int_0^T \mathbf{c}_s\ (t)\quad (t)\ \mathbf{y}_i dt\right] \left[\int_0^T \mathbf{y}'_i\ (t)\ \mathbf{y}_i\ (t)\ dt\right]^{-1}$$

On reconnaît une quantité homogène à une corrélation normée. La technique de normalisation telle que nous l'avons définie est une technique de corrélation, c'est-à-dire d'adaptation à un signal type (analogue à l'extraction d'un signal connu d'un bruit ou à la recherche d'une figure dans une image).

Dès 1968, cette méthode de normalisation a été appliquée par Brown sur des signaux cliniques au moyen d'un système analogique avec réglage manuel. Les résultats ont montré qu'un cardiologue, auquel étaient soumis les signaux normalisés, donnait des diagnostics identiques à ceux obtenus sur les signaux bruts, et parfois plus rapidement.

En 1966, une étude systématique a été menée par H.V. Pipberger sur la base de données comportant des vectocardiogrammes de sujets normaux et de sujets malades (treize maladies étaient distinguées). En utilisant un signal type issu d'une famille de sujets normaux, vingt éléments de chaque classe ont été normalisés. On a pu constater que la normalisation, bien que l'opération n'utilisât pas un signal standard différent pour chaque classe, renforçait les caractères spécifiques de chaque classe. La normalisation semble donc améliorer les possibilités de classification d'un homme ou d'une machine. L'implémentation par logiciel informatique n'étant pas difficile, ce traitement devrait pouvoir être utilisé systématiquement en milieu hospitalier. Remarquons que le traitement de caractérisation n'est pas terminé avec la normalisation, puisqu'on peut continuer en traitant le signal normalisé de façon à en extraire les caractéristiques principales.

Dans ce court développement, nous avons mis l'accent sur le fait particulièrement important que l'opération de normalisation était menée sur des bases fournies par les principaux utilisateurs, les médecins, ce qui explique peut-être l'excellence des résultats obtenus.

Traitons maintenant un problème un peu différent : celui de la simplification du vecteur-forme obtenu après digitalisation du signal analogique recueilli. En général, on saisit environ quatre ou cinq battements cardiaques, en quatre secondes : ce signal est échantillonné à une fréquence de 500 Hz, soit donc 500 points par seconde. Dans un système à 12 enregistrements en série, chaque enregistrement correspond à 2 000 échantillons, et, au total, nous avons 24 000 points. Pour le vectocardiogramme, chaque composante fournit 2 000 points, et il y a 6 000 échantillons au total. Si l'on se limite à la sélection d'un seul battement cardiaque, cela permet de n'utiliser qu'environ 4 800 échantillons dans le premier cas et 1 200 dans le deuxième. Ces échantillons décrivent complètement la forme, ils sont donc utilisables comme vecteurs-formes en entrée d'un système de reconnaissance des formes. Cependant on constate que l'espace des représentations est alors de dimension soit 4 800 soit 1 200, ce qui exclut évidemment toute visualisation ! D'autre part, certains échantillons amènent peu d'information, comme ceux qui correspondent, par exemple, à l'espace séparant les ondes T et P ; on doit donc pouvoir réduire la dimension de ce vecteur en employant une méthode de sélection de caractères.

Les systèmes implantés en hôpital ont utilisé des caractères mesurés directement sur les ondes, ce qui revient à traduire en version automatique les critères utilisés par les médecins. Plutôt que d'utiliser en effet des critères qu'ils ne peuvent contrôler eux-mêmes, ces derniers préfèrent des mesures où ils retrouvent les méthodes qu'ils ont toujours employées. Il n'y a donc pas eu de tentative purement mathématique de sélection de caractères, il n'y a pas de comparaisons possibles entre les deux approches. Ainsi, les caractères retenus sont les amplitudes des ondes P, Q, R, S, T à des instants bien définis, ainsi que certains intervalles comme indiqué sur la *figure* 47. Pour le vectocardiogramme, on utilise 15 points remarquables pour chaque composante, ce qui donne une représentation par 45 points, à laquelle s'ajoute la durée des ondes QRS, d'où un vecteur à 46 composantes. En 1970, Pipberger, en étudiant des techniques de discrimination entre vectocardiogrammes normaux et pathologiques (donc pour une dichotomie), avait sélectionné au départ 333 valeurs pour chaque mesure. Cet ensemble fut réduit à 30 par un système de sélection. Une technique d'analyse appelée analyse discriminante le réduisit à 14. Soit en effet une discrimination linéaire définie par

$$d\ (\mathbf{x}) = w'\mathbf{x} = \sum_{i=1}^{30} w_i x_i.$$

On garde alors les 14 valeurs de x_i les plus fortes.

L'ensemble des caractères sélectionné par le U.S. Public Health Service comprenait des mesures d'amplitude ou de durée auxquelles s'ajoutaient le rapport Q/S et le rythme de battement cardiaque, soit un total de 18. Pour le système à 12 enregistrements, on dispose donc de 216 caractères. Pour le vectocardiogramme, des mesures scalaires aussi bien que vectorielles (longueur de vecteurs, angle, etc.) étaient saisies, de même que des caractères comme la surface de la trajectoire QRS. En 1970, Mucciardi et Gose ont fait une étude pratiquement exhaustive des méthodes de sélection de caractères à partir des ensembles de caractères généralement utilisés. Aux 147 caractères de Pipberger ils en ajoutèrent 10 de leur crû. A l'aide de la même banque de données séparées en un ensemble de calcul de discriminateur de taille 247 et un ensemble de test de taille 240 répartis sur neuf classes, ils arrivèrent aux résultats suivants : si on utilise simplement 15 caractères (soit environ un sur dix), on obtient un taux d'erreur de classement de 20 % sur l'ensemble de calcul et de 40 % sur l'ensemble de test. Ce taux décroît assez peu si on ajoute d'autres caractères (de plus, sa décroissance est lente). L'importance de ces résultats est relative, puisque les tailles d'échantillons étaient faibles. Depuis lors, d'autres études ont permis de préciser des tailles « optima » du vecteur-forme pour discriminer

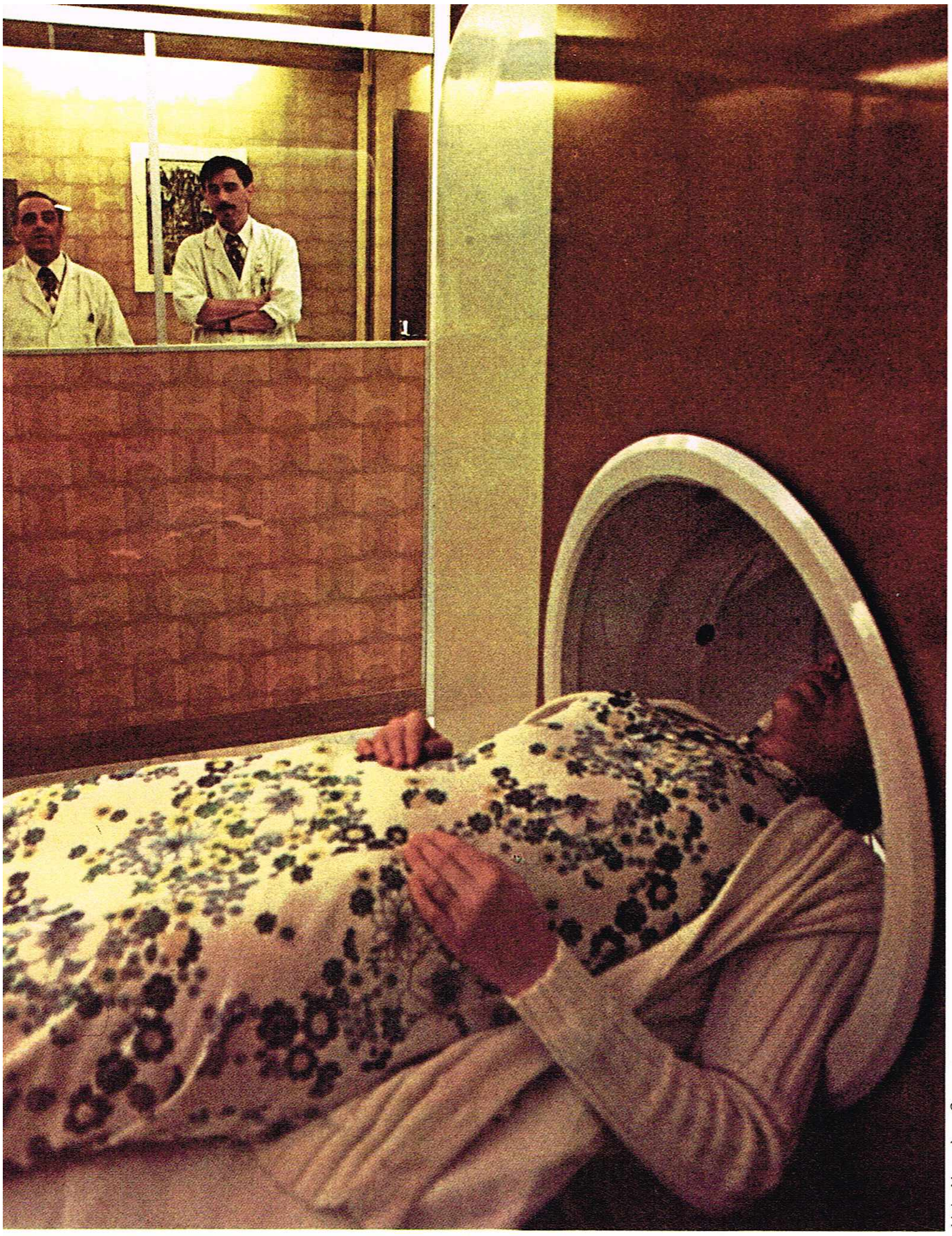

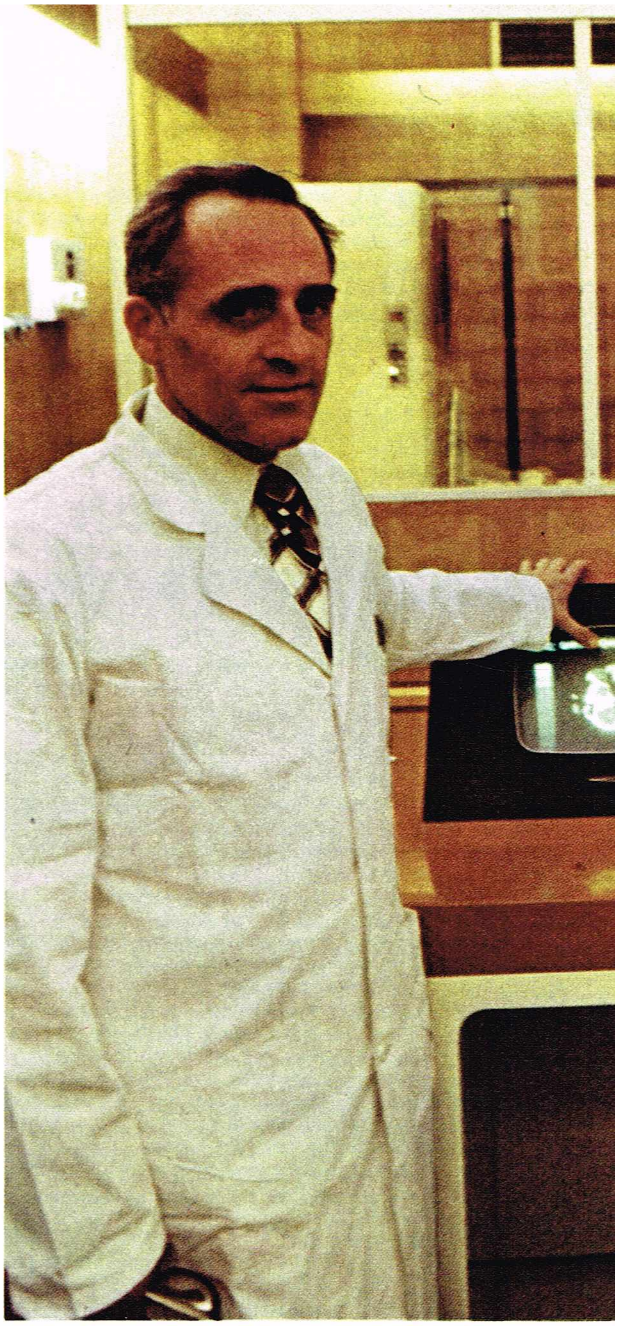

Alain Noguès - Sygma

▲ *Une autre application de l'utilisation de la reconnaissance des formes au diagnostic médical, le densitome; cet appareil permet de déceler des lésions cérébrales; la tête de la patiente est introduite dans l'appareil radiographique (à gauche) dont le faisceau de rayons X balaie la boîte crânienne tranche par tranche; l'image du cerveau est reconstituée sur un écran par l'intermédiaire d'un ordinateur (au milieu); des clichés sont réalisés qui permettent l'observation et le diagnostic (à droite).*

certaines maladies. Ces quelques chiffres et exemples ont montré l'importance d'un examen attentif des caractères; ainsi, une étude scrupuleuse peut réduire de beaucoup la dimension de l'espace d'observation et diminuer de ce fait le coût du traitement tout en augmentant sa rapidité.

Pour conclure cette application au diagnostic médical, il nous reste à décrire les procédures de classification utilisées. Pratiquement, tous les systèmes implantés sur une grande échelle utilisent des critères fournis par les médecins pour chacun des caractères ou paramètres. Le processus de décision est donc mis en place à l'aide de tables de décisions ou d'arbres décisionnels. On pose la question : le paramètre 1 est-il supérieur à une valeur x_0 ? Si oui, tester le paramètre 2 ; sinon, tester le paramètre 3 ; on parcourt ainsi un arbre, et le chemin se termine par la détermination d'un ou plusieurs diagnostics. Les critères, c'est-à-dire, par exemple, la valeur x_0 ci-dessus, sont fixés grâce à l'expérience des médecins. Des méthodes différentes de celles que nous avons exposées ont été employées, mais seulement au niveau de la recherche : elles n'ont pas encore été utilisées de façon intensive et journalière en hôpital.

La première est celle de Pipberger (1965-1970), fondée sur l'analyse multivariée; elle a été menée au Research Center of Cardiovascular Data Processing du V. A. Hospital de Washington, qui avait l'avantage de disposer d'une très importante banque de données de vectocardiogrammes : plus de 30 000 enregistrements; un diagnostic individuel, qui a été souvent vérifié par une autopsie, est attaché à chacun. La classification doit se faire en neuf groupes (un normal et huit malades). On suppose que chaque classe i peut être représentée par une loi de Gauss multidimensionnelle, c'est-à-dire caractérisable par un vecteur moyenne $\mathbf{m}_i$ et une matrice de covariances R_i de dimension $N \times N$ (N est la taille du vecteur-forme $\mathbf{x}$).

On dispose de N_i échantillons par classe et on peut donc estimer pour chacune d'elles les valeurs de $\mathbf{m}_i$ et de R_i, $\widehat{\mathbf{m}}_i$ et $\widehat{R}_i$

$$\mathbf{m}_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} \mathbf{x}_j$$

$$R_i = \frac{1}{N_i - 1} \sum_{j=1}^{N_i} (\mathbf{x}_j - \widehat{\mathbf{m}}_j)' \, (\mathbf{x}_j - \widehat{\mathbf{m}}_j)$$

c'est-à-dire, pour le terme R_{kl} :

$$\widehat{R}_{kl} = \frac{1}{N_i - 1} \sum_{j=1}^{N_i} (x_{jk} - m_{jk}) \, (x_{jl} - m_{jl})$$

x_{jk} est la k-ième composante du vecteur $\mathbf{x}_j$,

x_{jl} — l-ième — — $\mathbf{x}_j$,

de même

m_{jk} pour $\mathbf{m}_j$

m_{jl} — $\mathbf{m}_j$.

Les critères de décisions sont fondés sur les distances suivantes (distances de Mahalanobis) :

$$D_i(\mathbf{x}) = (\mathbf{x} - \mathbf{m}_i)' \, R_i^{-1} \, (\mathbf{x} - \mathbf{m}_i)$$

$D_i(\mathbf{x})$ est l'exposant de l'exponentielle dans l'expression

Alain Noguès - Sygma

Alain Noguès - Sygma

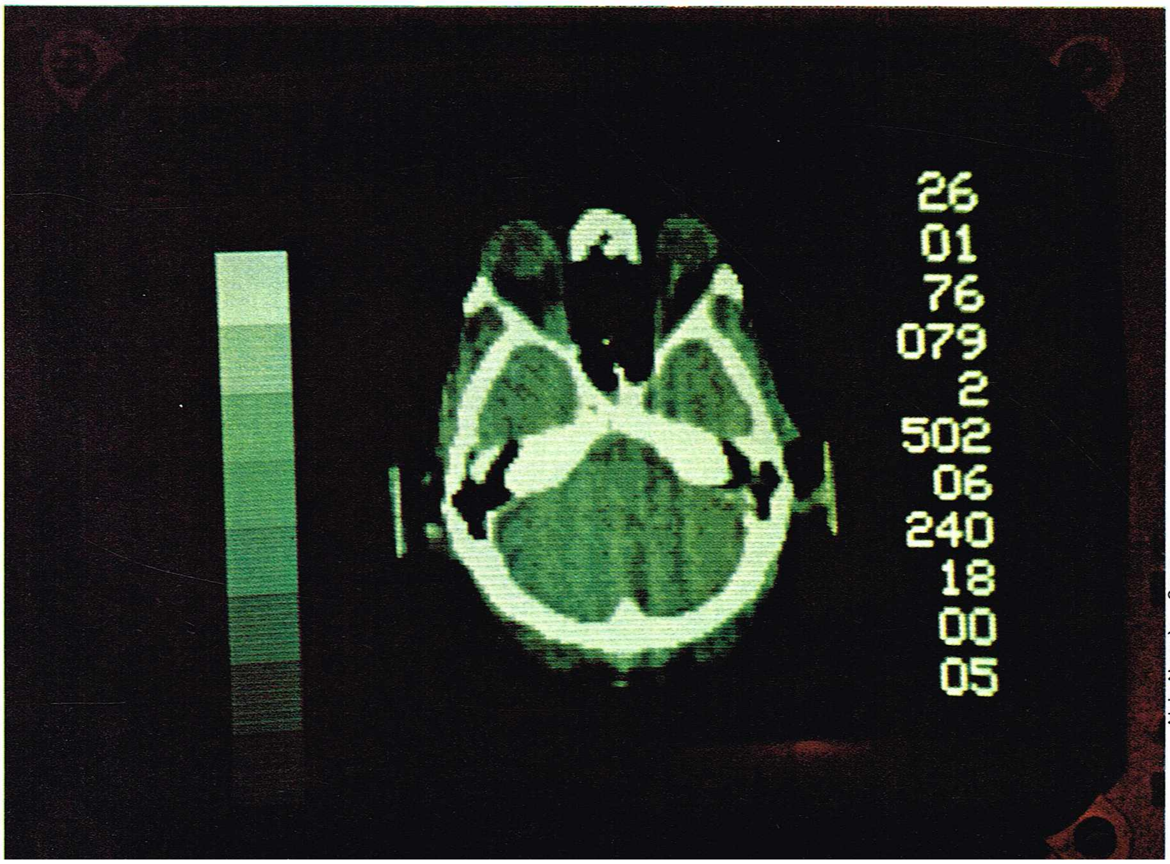

Alain Noguès - Sygma

◀ ***Un exemple d'image formée sur l'écran du densitome ; cet appareil, dont la réalisation est due à la Compagnie générale de radiologie, a été installé à l'hôpital de la Pitié à Paris.***

L. Herschtritt - Parimage

▲ *On ne peut pas parler d'intelligence ou d'entendement à propos d'un ordinateur ; il n'est en effet pas possible de dire qu'une machine comprend parce qu'elle a su résoudre tel ou tel problème, même ardu, de reconnaissance de formes ; elle n'a su que traduire de façon ordonnée des ordres précis, écrits dans un langage spécialement conçu pour elle.*

de la loi de Gauss multidimensionnelle de la classe i. $\mathbf{x}$ est classé dans le groupe i si :

$$D_i(\mathbf{x}) > D_j(\mathbf{x}) \qquad \forall j \neq i.$$

Pour minimiser la probabilité de mauvais classement, il a été aussi proposé de travailler sur une fonction :

$$D'_i(\mathbf{x}) = D_i(\mathbf{x}) + d_i$$

où les d_i sont déterminés par programmation linéaire. Pipberger et son équipe ont appliqué cette méthode à des cas très divers en utilisant plusieurs types de caractères. Parmi les neuf diagnostics possibles, seuls les cinq ayant la plus grande probabilité étaient imprimés en sortie de l'ordinateur. On donnait aussi la longueur du vecteur différence entre le vecteur-forme et le vecteur moyenne de chaque classe : les diagnostics donnés en tête correspondent évidemment aux différences les plus faibles. On pourrait croire que l'hypothèse gaussienne prise pour chaque classe est restrictive ; en réalité, l'approximation n'est pas mauvaise en cas de distribution unimodale (un seul maximum).

Specht, en 1967, a mis au point une méthode non linéaire de séparation, différente de la précédente parce que non statistique. La fonction discriminante est une fonction polynômiale de $D_i(\mathbf{x})$

$$D(\mathbf{x}) = a_{n+1} + \mathbf{a}'\mathbf{x} + \mathbf{x}'A\mathbf{x} + \ldots$$

Si on se fixe l'ordre du polynôme au départ, il existe des algorithmes permettant d'obtenir les coefficients à partir d'un échantillon type de classement connu. On peut même rendre le problème linéaire en utilisant comme caractères des puissances ou des produits des anciens caractères. La méthode d'obtention des coefficients du polynôme dépasse le cadre de cet exposé : nous ne la développerons pas. Disons simplement qu'on a intérêt à utiliser un ordre du polynôme faible pour minimiser les calculs.

Bien que de nombreux groupes de chercheurs aient travaillé dans ce domaine, les systèmes complètement automatiques mis en place en milieu hospitalier sont encore peu nombreux. Les caractères utilisés pour le vecteur-forme sont toujours déduits des mesures que le médecin effectuait auparavant. Il est à souligner que le médecin a toujours cherché à garder le contrôle de l'organe de classification, au point que certains caractères n'ont jamais été utilisés parce qu'ils ne donnaient pas d'interprétation directe sur le tracé. Les calculateurs utilisés effectuent deux traitements : le premier pour mesurer les différentes amplitudes et intervalles de temps, le second pour effectuer le diagnostic, c'est-à-dire la classification. Cette dernière est généralement obtenue par comparaison de caractères à des valeurs fixées par les médecins.

La sortie proposée au médecin comprend, d'une part, le diagnostic proposé par la machine, d'autre part, les différentes valeurs de caractères, ce qui permet au médecin de confirmer ou d'infirmer ce qui lui a été proposé. Ainsi, le Medical System Development Laboratory of the U. S. Public Health Service a mis au point un système de diagnostic automatique pour électrocardiogramme en 1970. Le système, logiciel et périphérique compris, coûtait environ 70 000 dollars ; il a été implanté dans plusieurs hôpitaux américains. Il existe une version « temps partagé » de ce système, qui permet à plusieurs hôpitaux de se brancher sur un centre. Le signal recueilli est représenté par 216 caractères d'amplitude et de durée (les divers signaux sont échantillonnés durant 3,72 secondes au rythme de 500 échantillons par seconde ; il y a douze voies d'enregistrement).

Il existe aussi un système de diagnostic automatique d'électrocardiogramme et vectocardiogramme (système proposé par IBM et la Mayo Clinic à Rochester dans le Minnesota). Le taux d'accord médecin-ordinateur dépasse généralement, pour les différents tests effectués, 80 % (on a même eu des taux de 95 %). C'est l'un des systèmes les plus utilisés de par le monde.

L'électrocardiogramme, puis le vectocardiogramme sont des signaux biologiques à partir desquels on a très tôt tenté de faire des diagnostics automatiques. C'est aussi dans ce domaine que les meilleurs succès ont été obtenus. C'est pour cette raison que nous avons choisi cet exemple, qui permet de mieux se rendre compte, d'une part, des difficultés, d'autre part, des méthodes de résolution choisies en étroite relation avec les utilisateurs, les médecins.

Conclusion

Nous n'avons pas tenté de décrire toutes les techniques impliquées sous le vocable d'intelligence artificielle. En particulier, si nous avons développé la méthodologie de reconnaissance des formes, nous n'avons rien dit des méthodes de résolution automatique de problèmes. Pourtant, on leur a consacré beaucoup d'attention et on a proposé de nombreuses manières de les résoudre. L'originalité de ce type d'approche réside dans l'extrême diversité, aussi bien des problèmes que des solutions. La reconnaissance des formes que nous avons étudiée en est un bon exemple : pour expliquer la méthodologie employée, on raisonne sur des techniques mathématiques, statistiques... puis, lorsqu'on cherche à explorer le perceptron, on fait appel à des modèles biologiques, et, si on continuait, à la logique formelle (travaux de Hunt). En fait, ce type de problèmes requiert moins des connaissances approfondies dans un certain domaine que de très bonnes notions dans des domaines divers. Effectuer un bon traitement d'images, par exemple, demande des connaissances en filtrage, théorie du bruit, informatique, analyse du signal. C'est pourquoi se sont constituées et se constitueront de plus en plus des équipes pluridisciplinaires attachées à résoudre un projet donné tant soit peu important.

Nous n'avons pas mentionné dans ce court exposé une expression qui fait couler beaucoup d'encre : l'« intelligence » des ordinateurs ou, plus simplement, leur art de comprendre. On ne peut en discuter que sous l'aspect du langage. On ne dit pas qu'une machine comprend parce qu'elle a su résoudre tel ou tel problème, même ardu, de reconnaissance de formes; en réalité, dans ce cas, elle n'a su que traduire de façon ordonnée des ordres précis, écrits dans un langage spécialement conçu pour ce type de machine : on ne peut vraiment pas parler d'intelligence ou d'entendement. Pour les membres de notre espèce, le langage est la principale source de communication, c'est lui qui nous différencie de manière décisive des animaux. Aussi disposons-nous d'organes spéciaux comme le pharynx et le larynx, dont le contrôle est réservé à certaines zones de notre cerveau et qui n'existent pas chez les espèces animales. Si donc les ordinateurs doivent être utilisés au mieux de nos besoins, ils doivent accepter le seul type de transmission que, non seulement nous connaissons bien, mais encore nous utilisons toujours.

Il est possible — l'avenir tranchera — que l'impossibilité de communiquer avec les machines soit la limite ultime de la révolution actuelle dans le traitement de l'information. Nous ignorons si, actuellement, nous sommes proches ou éloignés de cette limite, si même elle existe — d'ailleurs, si nous en étions proches, nous éviterions peut-être cette discussion... Le traitement de l'information a vraisemblablement encore beaucoup de progrès à faire, donc de beaux jours devant lui. Un rapport du Département d'État chargé de la Défense, aux États-Unis, annonce que, dans les années 1985-90, on devrait pouvoir construire un ordinateur capable de répondre à des ordres énoncés en langage naturel, et ce, pour des problèmes non triviaux. En lisant la conclusion de ce rapport, on peut se demander, d'une part, ce que ses auteurs entendent par problèmes non triviaux, d'autre part, si cette réalisation verra effectivement le jour dans la prochaine décennie. Mais ce ne sont pas là les points qui nous arrêtent : c'est le fait qu'un groupe de personnes, qu'on peut avec raison croire très bien informées, envisagent avec une bonne probabilité que les machines comprennent le langage humain. Bien que certaines prévisions aient été infirmées, il en existe un nombre raisonnable qui se sont révélées fondées.

Cet exposé sur les dernières extensions du traitement de l'information a pu aussi décevoir ceux pour qui le terme d'intelligence artificielle avait un aspect un peu « mythique ». En effet, nous avons orienté ce texte, volontairement, vers les algorithmes et parfois vers les traitements mathématiques; nous n'avons pas donné d'exemples de parties d'échecs jouées par un ordinateur ou de démonstration d'un théorème délicat effectuée par une machine, parce que nous ne voulions pas créer de confusion entre des exemples extrêmement délicats à présenter, d'une part, et les principes des méthodes, d'autre part. Le lecteur aura pu trouver ici les grandes lignes du travail possible en matière de reconnaissance des formes. Un algorithme tel que le perceptron est relativement aisé à comprendre, c'est pourquoi nous avons choisi arbitrairement de le décrire plutôt que de prendre un exemple difficile, qui aurait nécessité des modifications complexes pour être compris. Si nous avions choisi de décrire le programme de jeu d'échecs le plus sophistiqué, nous aurions eu certainement des illustrations plus étonnantes; mais pour l'expliquer nous aurions dû entrer dans un luxe de détails; enfin, au moment même de la parution de ce texte, un nouveau programme de jeu aurait été créé et aurait périmé notre description d'une technique en pleine évolution. Aussi avons-nous préféré insister sur l'aspect méthodologique et ne donner des exemples que dans des domaines plus restreints.

Nous ne sommes pas non plus entrés dans des descriptions de robots, organes complexes faisant appel à beaucoup de techniques (intelligence artificielle, donc

J. Drysdale - Parimage - Camera Press

▲ ***Une des applications de la reconnaissance d'objets, l'utilisation de robots pour prélever des objets; ici, le professeur Meredith Thring observe son robot en train de débarrasser une table.***

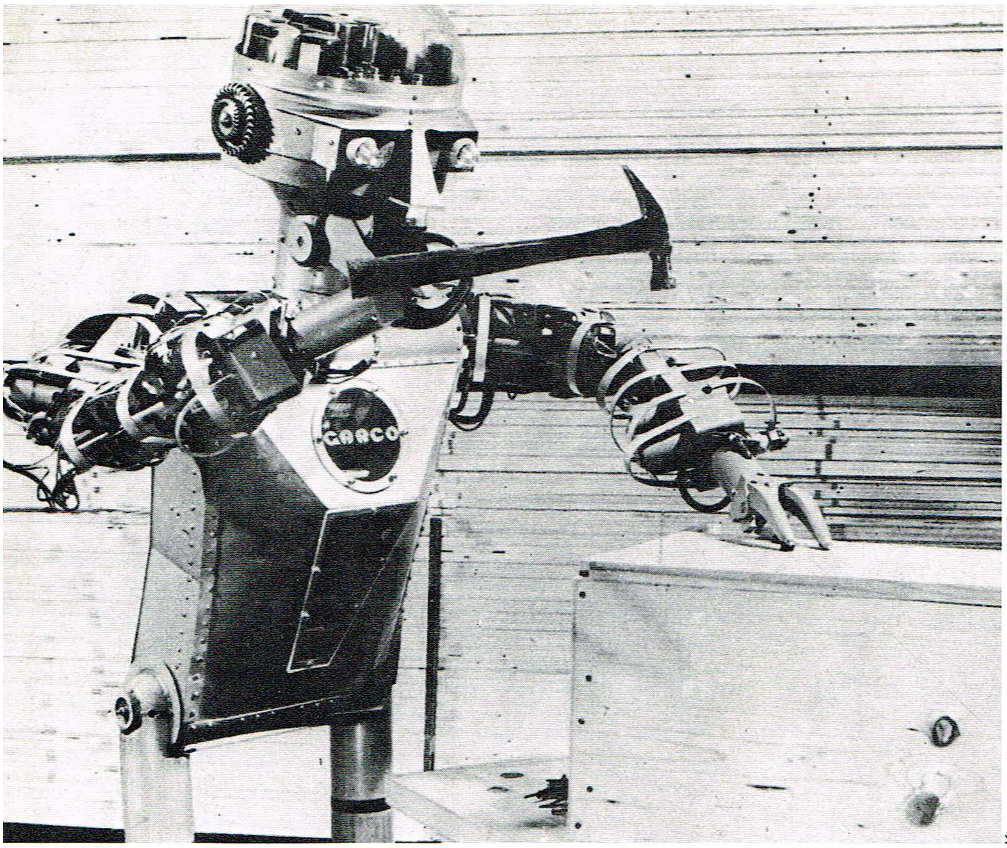

Keystone

▲ *Le robot américain construit par Harvey Chapman.*

reconnaissance des formes, traitement d'images, diagnostic automatique, mécanique, etc.) Il existe actuellement, bien sûr, des machines qui effectuent des travaux sous le contrôle de signaux commandés par un ordinateur. L'image captée par une caméra de télévision est interprétée : ainsi le prochain mouvement de la machine est-il décidé. Mais sous ces aspects futuristes, que trouvons-nous ? L' « œil » du robot est une caméra, l'interprétation de la scène relève du traitement d'images, dont les techniques, sinon les buts, sont indépendantes de cette application. Les méthodes de recherche d'objet sont des méthodes de reconnaissance des formes... En fait, le robot, sous son aspect attrayant et même excitant, n'est qu'un des domaines d'application de ce que nous avons appelé l'intelligence artificielle. Le scientifique anglais Lighthill a écrit en 1970 que le fait que la recherche scientifique se soit polarisée sur les robots a pu avoir pour conséquence de faire oublier certains aspects essentiels ; l'image est certainement caricaturale, mais un peu vraie.

Quand on discute d'intelligence artificielle, on peut aussi bien s'occuper uniquement de techniques que se poser des problèmes philosophiques sur les « machines pensantes ». Les philosophes se posent, *grosso modo,* deux types de questions sur l'intelligence artificielle. La première est : Comment la pensée peut-elle être représentée par un organe mécanique ? C'est le problème de la représentation interne symbolique de mots externes ; c'est donc encore une question technique, mais du point de vue philosophique. Ainsi, on désire savoir comment représenter dans un ordinateur le fait qu'une action particulière peut avoir de multiples conséquences. Ce problème est énorme et encore peu exploré étant donné sa complexité.

La seconde question est : Comment une machine pense-t-elle ? Elle a fait couler beaucoup d'encre, entraîné de nombreux débats sans toujours recevoir de réponse claire. On devrait commencer par répondre à la question : Une machine peut-elle penser ? Mais cette question abrupte est justement formulée de façon trop directe et trop imprécise pour recevoir une réponse nette. On a alors essayé de formuler la question ainsi : Quand et comment peut-on décider qu'une machine pense ? La réponse n'est, là encore, pas du tout triviale. Le concept de « pensée » présente d'ailleurs des définitions assez différentes selon les écoles, ce qui ne simplifie pas l'obtention de la réponse, aussi certains philosophes et psychologues préfèrent-ils ne pas utiliser ce terme. Ils souhaitent plutôt rechercher des actions types, représentatives d'un certain formalisme mental que d'autres baptisent « pensée ». En partant de cette définition, la réponse à la question peut s'obtenir à la suite d'un ensemble de tests précis. Les machines peuvent-elles résoudre des problèmes aussi bien que le font les mathématiques ? On répondra : non. Peut-on écrire des programmes tels que les machines sachent résoudre les tests du type des tests d'intelligence (ces problèmes sont en général des problèmes de reconnaissance des formes) ? Oui. Les machines comprennent-elles actuellement le langage humain ? Non, mais peut-être le feront-elles demain. Pour répondre à une question si générale et si vague, il faudrait au moins savoir quels tests sont nécessaires et quels tests sont suffisants pour dire qu'une machine « pense », c'est-à-dire disposer d'une définition précise de ce que l'on appelle « penser ».

On peut d'ailleurs formuler la question différemment : une machine pense-t-elle comme (de la même façon que) un humain ? Il semble qu'un test rapide permette de répondre : si un logiciel a un mode de raisonnement analogue à celui de l'homme, alors ce logiciel doit en être un modèle, argumentation qui a permis de développer beaucoup de recherches sur la simulation. Mais le mode de fonctionnement de la réflexion humaine est fondé sur tout un système physiologique assez mal connu : reconnaître des similitudes de fonctionnement paraît très difficile. De plus un modèle de la réflexion ne peut certainement pas se réduire simplement à un modèle physiologique. D'autre part, un programme peut fort bien imiter l'esprit humain pour résoudre un problème nettement défini et avoir des performances désastreuses pour des problèmes différents ; on ne peut vraiment pas dire, en ce cas, qu'il se comporte comme l'esprit humain. Comme on peut le constater, les questions posées en recouvrent d'autres, et le débat risque d'être sans fin.

Il est généralement admis qu'on peut trouver un comportement intelligent dans des systèmes de traitement de l'information : machines à démontrer des théorèmes, machines d'aides à la décision par exemple. De nombreuses personnalités, qui s'occupent de la science nommée « théorie générale des systèmes », se sont mises d'accord sur un nombre minimal de lois, non évidentes, que l'organisation de tels systèmes doit respecter. Si leurs conclusions sont exactes, la théorie des systèmes doit être applicable aussi bien à la « conception » et à la « fabrication » de machines intelligentes qu'à celles de systèmes biologiques, sociaux ou physiques. Ainsi trouverait-on un lien très étroit entre la théorie et le contrôle des systèmes, d'une part, et le domaine de l'intelligence artificielle, d'autre part. Un problème se ramènerait en fait à un ensemble de six composantes $\{E, C, N, A, S_D, S_I\}$: E est l'ensemble des situations possibles, C l'ensemble des lois de contrôle applicables à ces situations, N les phénomènes non contrôlés du type bruit, A une application de $E \times C \times N$ dans E, c'est-à-dire d'une situation plus une loi de contrôle plus un phénomène non contrôlé dans une nouvelle situation ; S_D et S_I sont les situations désirées ou autorisées et indésirables. Ce formalisme très général a été appliqué à de multiples situations différentes : ainsi ont surgi des liens entre des situations qui semblaient différentes à l'origine. Ces développements très généraux ont en effet l'avantage d'ignorer les situations particulières et, présentant des résultats globaux, ils permettent de mieux comprendre des problèmes plus spécialisés.

Cette dernière note indique qu'il y a certainement un lien entre la question de l'intelligence artificielle et l'étude ou la théorie des systèmes complexes. Ces deux domaines qui avançaient jusqu'à présent en parallèle vont certainement, dans l'avenir, échanger leurs idées, et leurs théories se servir mutuellement.

En conclusion, bien que nos machines effectuent des calculs de plus en plus difficiles, qu'elles nous aident à prendre nos décisions, elles sont encore loin des possibilités d'adaptation de l'homme, car nous ignorons toujours comment fonctionne le raisonnement humain. En définitive, sur ce plan-là du moins, nous avons fait peu de progrès depuis Descartes !

BIBLIOGRAPHIE

HUNT E.B., *Artificial Intelligence*, Academic Press, 1975 - DUDA R.O., HART P.E., Pattern Classification and Scene Analysis, Wiley, 1973. - YOUNG, TZAY Y., CALVERT T.W., Classification, Estimation and Pattern Recognition, Elsevier, 1974.

ENCYCLOPÉDIE DES SCIENCES

TECHNOLOGIE

III

GRANGE BATELIÈRE

LEXIQUE DE TECHNOLOGIE (MATÉRIAUX)

SUPPLÉMENT AU VOLUME XVIII DE LA GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

ABRÉVIATIONS

adj.	adjectif	*n.*	nom	*par ext.*	par extension
ex.	exemple	*p. ex.*	*par exemple*	*syn.*	synonyme

A

abattage. *n.* Opération par laquelle des blocs de roche sont détachés du massif à l'aide soit d'un explosif, soit d'une « machine d'abattage ».

accumulateur. *n.* Transformateur d'énergie réversible : énergie chimique $\rightleftharpoons$ énergie électrique.

acier. *n.* Matériau ferreux contenant du carbone qui peut être dissous, à l'état solide, à une température donnée (en général C $<$ 1,5 %). Les propriétés des aciers dépendent de leur composition chimique et de leur mode d'élaboration, ou de traitements thermiques et mécaniques.

acier à l'oxygène. Acier obtenu après combustion du carbone de la fonte ou des minerais préréduits dans un vent d'oxygène soufflé à la base ou sur les flancs d'un convertisseur ou par une lance placée à l'intérieur.

actifs miniers. Biens meubles et immeubles constituant le patrimoine d'une société minière.

action. *n.* En construction, dans le calcul des ouvrages, désigne tout ce qui est susceptible d'agir sur l'ouvrage (le vent, le trafic, la neige, le poids propre, etc.), créant des forces et des couples ou encore des déformations imposées.

adjuvant du béton. Produit qui, incorporé à faible dose dans le béton, modifie sensiblement ses propriétés.

adoucissement. *n.* Diminution de la contrainte d'écoulement σ d'un métal au cours d'un recuit. L'adoucissement peut résulter de la restauration ou de divers types de recristallisation.

adsorption. *n.* Fixation d'atomes étrangers sur une surface solide.

aérage. *n.* Action de faire circuler de l'air dans toutes les parties de la mine et plus particulièrement « à front », pour évacuer les gaz nocifs, toxiques ou explosibles, les poussières et les calories.

aggloméré. *n.* Assemblage de particules de poudre réalisé par pressage dans une matrice de forme appropriée ; on utilise également le terme de *comprimé,* voire de *pastilles,* quand la morphologie est celle de disques cylindriques de faible hauteur.

allonge. *n.* Arbre articulé à ses deux extrémités transmettant le mouvement du moteur aux cylindres de laminage.

âme. *n.* *Voir* cœur.

amorce ou **détonateur.** *n.* Dispositif d'initiation de la détonation d'une charge explosive.

amorphe. *adj.* Se dit d'un liquide rapidement refroidi en dessous du point de fusion et jusqu'à une température où la vitesse de cristallisation est trop lente. *Ex. :* le verre.

armure. *n.* Mode de tissage d'un tissu, *p. ex. :* satin, taffetas.

atomisation. *n.* Procédé permettant d'élaborer des poudres à partir d'un matériau à l'état fondu ; consiste à pulvériser un jet liquide de ce matériau s'échappant au travers d'une buse, au moyen d'un courant énergique de gaz ou d'eau sous pression.

austénite. *n.* (structure métallurgique austénitique). Solution solide de chrome, nickel, cobalt ou manganèse dans le fer γ. Après trempe rapide, cette phase, généralement non magnétique et résistante à la corrosion, reste stable à la température ordinaire. Les aciers inoxydables au chrome-nickel (ou manganèse), les alliages fer-nickel-cobalt sont souvent utilisés sous forme austénitique ductile.

B

bainite. *n.* Du nom de A.C. Bain. Composant de l'acier obtenu par refroidissement à partir de 1 000 °C et à une vitesse comprise entre celle de formation de la martensite et celle qui conduit à l'état stable (ferrite et perlite). La bainite a une bonne résistance à la rupture et une faible ductilité.

balance du commerce extérieur. Solde résultant de la comparaison, en valeur, des exportations et des importations d'un pays.

bande de conduction. Première bande non pleine dans la structure électronique d'un matériau cristallisé.

bande interdite. Zone d'énergie inaccessible aux électrons d'un matériau cristallisé.

bande de valence. Dernière bande pleine dans la structure électronique d'un matériau cristallisé.

battitures. *n.* Fragments d'oxyde de fer ou de métal qui se détachent des lingots d'acier au cours du forgeage.

blister (spécialement de cuivre). *n.* Petit lingot de cuivre brut, destiné à subir un raffinage avant utilisation. *Par ext. :* cuivre blister = cuivre non raffiné.

bloom. *n.* En métallurgie, semi-produit de section carrée dont le côté est supérieur à 12 cm, destiné à l'élaboration de produits longs.

bore. *n.* En terme de matériaux composites, utilisé pour « fibre de bore ». Filament de bore obtenu par dépôt en phase vapeur (CVD), à hautes performances mécaniques.

Borsic. Marque déposée. Fibre de bore gainée de carbure de silicium par dépôt en phase vapeur, pour améliorer la tenue chimique et thermique.

bouchon. *n.* Partie centrale d'une « volée » d'abattage à l'explosif constituée de quelques coups de mine spécialement disposés pour faciliter le travail d'abattage des autres coups de mine de la volée.

boulon. *n.* Dispositif de soutènement constitué par une tige d'acier de quelques mètres de longueur, ancrée dans la roche soit à son extrémité, soit sur toute sa longueur.

brame. *n.* En métallurgie, demi-produit rectangulaire dont l'aire est supérieure à 144 cm² et l'épaisseur supérieure à 4 cm.

C

cage de laminoir. Élément de base d'un train de laminage comprenant deux cylindres (ou plus) et un bâti.

calibrage. *n.* Technique consistant à recomprimer un fritté pour augmenter sa densité et lui conférer des cotes plus précises. Cette opération peut être suivie d'un second frittage.

cannelure. *n.* Profil particulier du cylindre de laminage permettant d'imposer au produit laminé le contour désiré (*p. ex. :* poutrelle, rail).

caoutchouc. *n.* Matériau macromoléculaire subissant de très grandes déformations élastiques.

capacité de production (d'extraction, d'exportation, etc.). Quantité théorique que peut annuellement produire (extraire, exporter) une installation ou une entreprise ; *par ext. :* cette installation elle-même.

carbure de silicium. En termes de matériaux composites, utilisé pour « fibre de carbure de silicium ». Filament de carbure de silicium obtenu par dépôt en phase vapeur (CVD), à hautes performances mécaniques.

carreau. *n.* Ensemble des installations de surface d'une mine souterraine.

carrière. *n.* 1° Entreprise qui a pour objectif d'exploiter un gisement de substance non concessible (matériaux de construction, graviers, sables...). 2° Ensemble des travaux de l'exploitation aussi bien à ciel ouvert qu'en souterrain dès lors que la substance exploitée n'est pas concessible.

cartel. *n.* Regroupement d'États producteurs d'une même matière première, tendant à la formation d'un monopole, en vue de contrôler un marché, et d'obtenir des profits accrus (par disparition de la concurrence entre ces États, un prix de vente commun étant fixé). Il existe aussi des cartels d'entreprises privées, qui diffèrent des *trusts* par l'absence d'interpénétration financière entre ces entreprises.

cédage. *n.* Caractérise, sur une cage de laminage, la différence entre l'épaisseur du produit en sortie et l'écartement des cylindres à vide; cette différence résulte des déformations élastiques des cylindres, du bâti et du rattrapage des jeux.

cellules d'écrouissage. Parties d'un cristal à faible densité de dislocations, séparées par des écheveaux ou enchevêtrements de dislocations.

cémentation. *n.* Phénomène naturel d'enrichissement en métal de la partie supérieure d'un gisement sulfuré sous l'action des eaux d'infiltration.

cémentite. *n.* Carbure de fer Fe_3C, qui est un constituant des alliages fer-carbone; sa structure est orthorhombique.

céramique. *n.* Matériau polygranulaire (*voir* ce mot).

chambre. *n.* Lieu où l'on abat le minerai (on dit aussi *chantier,* ou *taille*). Deux chambres sont séparées par un pilier.

chapeau de fer. Partie affleurante, essentiellement composée d'hydroxyde de fer, d'un gisement métallique soumis aux phénomènes d'oxydation supergène.

chargement. *n.* 1° Action de charger les produits abattus (minerai ou stérile) sur un engin de transport. 2° Mise en place des charges explosives dans les trous de mine (on dit aussi *minage*).

chargeur. *n.* Engin mobile, muni d'un godet frontal, qui charge la roche abattue sur un engin de transport situé à proximité immédiate (chargeur pur) ou à quelques centaines de mètres (chargeur-transporteur). *Syn.* de chargeuse frontale.

chutes neuves ou **déchets neufs.** Morceaux de métal inutilisables, produits au cours de la transformation des demi-produits métallurgiques.

ciel ouvert. Exploitation en surface par mine ou carrière. S'oppose à souterrain.

ciment Portland artificiel ou **C.P.A.** Ciment résultant de la cuisson d'un mélange convenable de chaux, de silice, d'alumine et d'oxyde de fer. Le produit de la cuisson (clinker) est broyé et additionné de gypse.

clark. *n.* Teneur géochimique moyenne d'un élément dans la lithosphère solide.

coalescence. *n.* Groupement, par un processus de diffusion, de défauts cristallins distincts pour former une configuration plus dense et énergétiquement plus stable.

coercitif (champ). Valeur du champ magnétique pour laquelle l'induction magnétique B s'annule dans un matériau magnétique.

cœur ou **âme.** *n.* Dans une structure sandwich, couche centrale épaisse, en général légère et de faibles propriétés mécaniques, située entre les deux peaux.

coextrusion. *n.* Technique de transformation utilisée lors de la mise en œuvre des matières thermoplastiques, qui permet d'obtenir des profilés ou des plaques comportant plusieurs couches de matières différentes ou de structures complémentaires.

composite (matériau). Matériau hétérogène composé d'une matrice à faibles caractéristiques mécaniques, armée par des éléments de renforcement (fibres, mats ou tissus) à hautes caractéristiques.

composite stratifié. Matériau composite formé par un empilement de monocouches de nature, d'épaisseur et d'orientation différentes.

composite tridirectionnel. Matériau renforcé dans trois directions orthogonales : son armature est obtenue par des procédés délicats et onéreux et son usage réservé à des applications spéciales.

composite unidirectionnel. Matériau renforcé par des fibres toutes parallèles; très anisotrope, il est réservé à des usages particuliers.

compression. *n.* En métallurgie des poudres, opération au cours de laquelle la poudre est mise en forme pour donner un aggloméré (on parle parfois de compactage, quand la pression utilisée est faible). La poudre est comprimée dans une matrice à l'aide de poinçons. La compression est le plus souvent réalisée à la température ambiante; elle peut être unilatérale (simple effet), bilatérale (double effet), ou isostatique (quasi hydrostatique). On opère parfois par compression à chaud.

comptant. *adj.* et *n.* Vente ou achat au comptant : opération de bourse prenant immédiatement effet (contraire : terme).

concentration ou **enrichissement.** *n.* Ensemble des opérations de séparation des matériaux utiles et de la gangue par différents procédés physico-chimiques, pour isoler un produit plus concentré.

concession minière. Périmètre délimité dans lequel une société est autorisée par l'Administration, moyennant une redevance annuelle, à effectuer des recherches minières, sans que le propriétaire du sol puisse s'y opposer.

conductivité diélectrique. Caractéristique d'un matériau définie par le rapport de la capacité d'un condensateur dont le diélectrique est constitué par le matériau étudié à celle d'un condensateur vide identique.

conductivité extrinsèque. Conductivité d'un matériau semi-conducteur « dopé » par des impuretés trivalentes ou pentavalentes. Elle peut être 1 000 fois plus forte que la conductivité intrinsèque.

conductivité intrinsèque. Conductivité d'un matériau semi-conducteur pur, d'origine uniquement thermique.

contraction Le Chatelier. Diminution relative du volume absolu de l'ensemble eau-ciment; accompagne l'hydratation du ciment et résulte du fait que le volume absolu de l'hydrate est inférieur à la somme des volumes absolus de ses constituants. Provoque une auto-dessiccation de la pâte de ciment.

contraintes principales. Ce sont les trois contraintes de traction ou de compression correspondant aux directions principales orthogonales du tenseur d'ordre 2 des contraintes.

contreplaqué. *n.* Panneau multicouches obtenu par collage, en contrariant le fil de chaque couche par rapport à celui de la précédente. La feuille constitutive du panneau est généralement obtenue par déroulage d'une grume.

contrôle du toit. Manière de garantir la stabilité d'ensemble d'une exploitation souterraine. Il existe trois grandes méthodes de contrôle du toit : par chambre vide de forme appropriée, par foudroyage ou par remblayage.

convertisseur. *n.* Cornue en acier, à revêtement intérieur réfractaire, dans laquelle on brûle le carbone et certains autres composants de la fonte, tels le silicium, le manganèse, le phosphore, le soufre, en utilisant l'énergie contenue dans celle-ci pour la transformer en acier. Depuis 1949, on souffle couramment de l'oxygène pour activer la réaction.

convoyeur. *n.* Dispositif de transport continu, soit par glissement dans des bacs métalliques (convoyeur blindé), soit par défilement d'une courroie sur un ensemble de rouleaux (convoyeur à bande).

corrosion sous tension. Détérioration d'un métal soumis à une contrainte de traction assez stable et élevée, et placé simultanément dans un milieu agressif (effets interagissants).

coulée continue. Système de coulée permettant de passer directement du métal liquide en poche au demi-produit (bloom, brame) en supprimant le stade du lingot.

coupe. *n.* Toute opération de mise en forme par enlèvement de copeaux. Principaux procédés : fraisage, tournage, perçage; procédés secondaires : rabotage, taraudage, mortaisage, brochage.

courbe TRC. Courbe de transformation en refroidissement continu des aciers et alliages métalliques.

courbe TTT. Courbe de transformation des aciers et alliages métalliques en fonction du temps et de la température; la transformation se fait en condition isotherme après un refroidissement quasi instantané.

covalence (liaison de). Mise en commun des électrons externes des atomes d'un matériau.

crazing. *n.* Mot anglais qui signifie microfissuration; s'applique surtout aux thermoplastiques.

C.S.H. Principal hydrate formé lors de l'hydratation du ciment, et dont la formule chimique est de la forme :

$$(CaO)_m(SiO_2)_n(H_2O)_p.$$

D

déblocage. *n.* Ensemble des opérations de chargement et de transport des produits abattus hors d'un chantier de mine. *Syn.* de marinage.

découverte. *n.* Exploitation à ciel ouvert dans laquelle le gisement se développe horizontalement sous une épaisseur à peu près régulière de stériles. Les travaux préparatoires consistent alors à « découvrir » le minerai.

déformations principales. Ce sont les trois déformations de contraction ou de dilatation correspondant aux directions principales orthogonales du tenseur d'ordre 2 des déformations.

dégazage. *n.* (Terme courant en technique du vide.) Phénomène lié à l'interaction gaz/solide, lorsque la pression est notablement abaissée à l'intérieur d'un récipient. Le flux de dégazage est la résultante entre, d'une part, la désorption des molécules et atomes adsorbés en surface ou absorbés dans la masse du matériau et, d'autre part, l'adsorption des gaz et vapeurs contenus dans l'atmosphère résiduelle. Le dégazage ne peut être évité. Toutefois son intensité, susceptible de mesures précises, peut être limitée par un choix judicieux des matériaux et des traitements de surface.

densification. *n.* Accroissement de la densité par rapport à la densité à vert; cette augmentation traduit l'efficacité du phénomène de frittage.

densité théorique. Densité d'un matériau à l'état massif sans défaut; se dit aussi de la densité calculée à partir des caractéristiques cristallographiques de ce matériau.

densité à vert. Densité d'un aggloméré après compression de la poudre.

dépilage. *n.* Opération principale de l'exploitation minière qui comporte l'abattage et l'évacuation (ou déblocage) de la plus grande partie du minerai (une petite partie de ce minerai a été enlevée lors des travaux préparatoires ou des traçages).

dépôt en phase vapeur (en anglais : **Chemical Vapor Deposition, CVD**). Procédé utilisé notamment pour la fabrication des fibres de bore, de carbure de silicium et de Borsic.

descenderie. *n.* Galerie inclinée d'environ 15°, qui peut servir d'accès au gisement si elle débouche à la surface ou qui relie deux niveaux différents dans le gisement; *syn.* de plan incliné.

détonateur. *n.* *Voir* amorce.

deuxième fusion. Se dit d'un métal qui provient de la fusion affinante de déchets (chutes d'usines) ou de débris (métaux contenus dans des objets hors d'usage).

diélectrique. *n.* Isolant électrique caractérisé par le champ maximum qu'il peut supporter sans se détériorer : c'est le matériau des condensateurs.

diffraction. *n.* Résultat des phénomènes d'interférence entre l'état solide cristallisé et le rayonnement électromagnétique.

diffusion. *n.* Mécanisme impliquant des déplacements d'atomes ou de lacunes. Quand seul un type d'atomes est en cause, il s'agit d'*autodiffusion*, quand des atomes d'espèce différente sont concernés, on parle d'*hétérodiffusion* ou de diffusion chimique.

diffusion (coefficient de). Caractérise la faculté d'un atome à se déplacer dans un solide.

diffusion du rayonnement électromagnétique. Propriété des rayonnements de se propager à travers la matière.

directions principales. Ce sont les directions des vecteurs propres associés aux valeurs propres distinctes d'un tenseur. Si le tenseur est symétrique, les directions principales sont orthogonales.

dislocation. *n.* Imperfection d'un cristal, favorisant la déformation irréversible à l'échelle macroscopique grâce à sa facilité de mouvement à l'échelle des atomes. Le blocage du mouvement des dislocations augmente la contrainte à partir de laquelle on peut obtenir une déformation irréversible.

dislocation coin. Imperfection linéaire qui résulte du fait que les files d'atomes situées de part et d'autre d'un certain plan ne sont pas en nombre égal.

dislocation vis. Imperfection linéaire qui résulte d'un cisaillement de deux portions d'un cristal l'une par rapport à l'autre, effectué le long d'un plan cristallographique ; la ligne de dislocation limite le plan de cisaillement.

ductile. *adj.* Se dit d'un polymère quand celui-ci, à température ordinaire, subit sous contrainte élevée une déformation plastique.

ductilité. *n.* Aptitude d'un matériau à subir une grande déformation sans se rompre.

durcissement. *n.* Augmentation de la limite d'élasticité ou de la résistance à la rupture d'un métal. Le durcissement peut être obtenu par écrouissage ou par formation de très petits cristaux, « précipités » capables de bloquer les mouvements des dislocations.

E

écrouissage. *n.* Déformation d'un métal, entraînant une augmentation de sa limite d'élasticité. L'écrouissage peut être obtenu par étirage, laminage ou torsion à des températures inférieures à 100 °C. Du point de vue microscopique, multiplication des dislocations au sein du métal pendant la déformation.

effet Rehbinder. Interaction entre les dislocations émergentes et le champ de forces existant à la surface d'un cristal.

électret, *n.* Diélectrique chargé de façon quasi permanente (à la température ambiante, durée de vie supérieure à dix ans).

électro-érosion. *n.* (usinage par électro-érosion). Technique relativement récente d'usinage non conventionnel, utilisant l'arc électrique pour percer, découper ou rayonner un matériau électroconducteur. L'arc est produit entre la pièce à usiner et une électrode de forme ; son action est localisée en opérant dans un liquide diélectrique. L'électro-érosion et l'usinage électrochimique présentent fréquemment des possibilités complémentaires.

éléments alphagènes. Éléments d'addition qui favorisent l'existence de la phase α ferritique dans les alliages de fer.

éléments gammagènes. Éléments d'addition qui favorisent l'existence de la phase γ austénitique dans les alliages de fer.

embargo. *n.* Mesure de rétorsion, décidée par un pays ou un groupe de pays à l'encontre d'un autre, et visant à empêcher l'acheminement vers ce dernier d'une substance normalement importée.

emboutissage. *n.* Opération de mise en forme consistant à transformer une pièce plate découpée dans une tôle laminée (flan) en un produit non développable (*p. ex. :* carrosserie d'automobile).

endurance. *n.* Contrainte déterminée par plusieurs essais de fatigue suivant la méthode de Wöhler (avec σ_{min} constant d'un essai à l'autre). C'est la contrainte maximale en deçà de laquelle on n'obtient pas de rupture par fatigue.

énergie d'activation. Paramètre permettant de caractériser les variations de la contrainte d'écoulement d'un matériau vis-à-vis de la température.

énergie de défaut d'empilement. Paramètre caractérisant la largeur de dissociation des dislocations et, par suite, leur aptitude à se déplacer : plus l'énergie de défaut d'empilement est forte, et plus les dislocations sont mobiles.

enrichissement. *n. Voir* concentration.

ensimage. *n.* Apprêt chimique liquide, très spécifique, dont on enduit les fibres de renforcement pour permettre les opérations textiles et éventuellement faciliter l'adhésion à une matrice.

entraîneur d'air. Adjuvant permettant de stabiliser de petites bulles d'air à l'intérieur du béton ; en cas de gel, ces petites bulles permettent à la glace de se former sans briser les parois des pores.

épitaxie. *n.* Propriété structurale d'un revêtement. Croissance d'un dépôt respectant et prolongeant la structure cristalline du substrat. Une structure épitaxique, souvent bénéfique, ne peut toutefois être obtenue que si les paramètres réticulaires du dépôt et du substrat sont suffisamment voisins.

épithermal. *adj.* Qualifie un minéral dont la température de formation est inférieure à 150 °C.

éponte. *n.* Terrain stérile qui borde et délimite une couche ou un filon.

étirage. *n.* Opération de mise en forme consistant à réduire la section d'une barre en la tirant à travers une filière.

étude de faisabilité (néologisme). Étude des caractéristiques techniques et financières d'un projet industriel ou minier, permettant de déterminer si celui-ci peut être économiquement réalisable.

eutectoïde. *n.* Mélange de deux types de cristaux différents, juxtaposés de telle sorte que leurs proportions relatives restent constantes dans un petit volume.

évaporite. *n.* Dépôt de sels divers dû à des phénomènes d'évaporation, au sein soit de lagunes continentales ou littorales, soit de bassins marins fermés.

exhaure. *n.* Action d'évacuer les eaux drainées par les travaux miniers.

exotique (minerai). Minerai importé, par opposition à « indigène » (minerai produit sur le territoire national).

F

fatigue. *n.* Variation des propriétés mécaniques d'un matériau sous l'effet de charges répétées.

fatigue-corrosion. Détérioration d'un métal placé dans un milieu agressif et soumis simultanément à une contrainte variant au cours du temps, de façon périodique (effets interagissants).

fatigue oligocyclique. Processus de dégradation rapide des matériaux cyclés dans le domaine plastique. On admet que les ruptures par fatigue oligocyclique apparaissent pour un nombre de cycles inférieur à 10^4.

fer. *n.* Métal qui peut prendre plusieurs formes cristallines à l'état solide. Le *fer* α, stable jusqu'à 910 °C environ, a une structure cubique centrée. Le *fer* γ, stable entre 910 et 1 500 °C environ, a une structure cubique à faces centrées.

ferrimagnétique. *adj.* Qualifie un matériau divisé en domaines magnétiques possédant une aimantation en l'absence de champ extérieur, et comportant plusieurs types de dipôles magnétiques.

ferrite. *n.* Solution solide de carbone dans le fer α, stable en dessous de 735 °C environ, dont les cristaux sont de type cubique centré.

ferro-électricité. *n.* Matériau ionique constitué de petits domaines pourvus chacun d'une polarisation non nulle (*p. ex. :* titanate de baryum $BaTiO_3$).

ferro-électrique. *adj.* Qualifie un matériau possédant un moment dipolaire électrique en l'absence de champ électrique extérieur.

ferromagnétique. *adj.* Qualifie un matériau divisé en domaines magnétiques possédant une aimantation en l'absence de champ extérieur et ne comportant qu'un seul type de dipôles magnétiques.

feutre. *n. Voir* mat.

fibres de renforcement. Fibres de faible diamètre (autour de 1/10 de mm), à hautes caractéristiques mécaniques, utilisées en nappes parallèles, en mats ou en tissus, pour le renforcement des matériaux composites.

fibrille. *n.* Structure microscopique généralement monocristalline, caractérisée par un élancement très grand. L'amiante, de nombreux végétaux, certains tissus animaux possèdent des structures fibrillaires. Il faut remarquer qu'une fibre macroscopique ne possède pas nécessairement une structure fibrillaire (cas des fibres textiles synthétiques) et qu'inversement un assemblage de fibrilles n'a pas forcément une structure fibreuse macroscopique (amiante, feutre).

filière électronucléaire. Désigne dans une centrale nucléaire la séquence : matériau fissile — modérateur — fluide caloporteur. *P. ex.*, filière G.C.R. : uranium naturel — graphite — gaz carbonique.

filler. *n.* Très fine poudre de roche (en général calcaire), utilisée comme additif à certains bitumes ou asphaltes pour en accroître la consistance.

filon. *n.* Fracture plus ou moins rectiligne recoupant les strates de la roche encaissante, à remplissage divers, contenant parfois des substances utiles, économiquement exploitables.

flan. *n.* Tôle (mince en général) obtenue par laminage pour être ensuite usinée en un produit de forme complexe (carrosserie, gobelet, etc.).

flicker. *n.* Fluctuation rapide de la valeur efficace de la tension, prenant la forme soit de variations permanentes dans une bande de fréquence de 0,5 à 25 hertz, soit de variations brusques à intervalles de temps supérieurs à 1 seconde (définition donnée par Meynaud).

flottation. *n.* Le plus important des procédés de concentration des minerais, fondé sur les différences de propriétés de surface des grains de minéraux utiles et des grains de gangue.

fluage. *n.* Variation de la déformation d'un matériau sous l'effet d'une force ou d'une contrainte maintenue constante.

fluide caloporteur. Gaz (CO_2) ou liquide (eau, eau lourde, sodium fondu) assurant le transfert de la chaleur du cœur du réacteur vers le générateur de vapeur, dans une centrale nucléaire.

fluorescence. *n.* Phénomène de photoluminescence qui disparaît en même temps que la radiation excitatrice. Les spectres de fluorescence sont caractéristiques du corps qui les émet sous l'action d'un rayonnement X, ultra-violet ou corpusculaire.

fond. *n.* Ensemble des travaux d'une exploitation souterraine. S'oppose à « jour ».

fonte. *n.* Matériau ferreux mis en forme par moulage à partir de l'état liquide et contenant du carbone en

sursaturation (C > 2 % en général) à l'état solide. La *fonte d'aluminium* est un alliage mis en forme par moulage.

foration. *n.* Lors des travaux miniers, opération de creusement de trous de faible diamètre pour y mettre l'explosif.

forgeabilité. *n.* Ductilité à chaud. Aptitude d'un matériau à être mis en forme à chaud sans se rompre.

foudroyage. *n.* Action de faire écrouler les terrains surplombant une excavation minière. *Par ext.*, zone dans laquelle les vides sont comblés par l'écroulement des terrains sus-jacents.

four à atmosphère (ou **à atmosphère contrôlée**). Four dans lequel l'atmosphère a une composition bien précise, soit neutre, soit au contraire active, c'est-à-dire qui participe effectivement à la réalisation du traitement recherché. *Ex. :* four de cémentation gazeuse ou de carbonitruration gazeuse.

four PITS. Four permettant de réchauffer et d'homogénéiser la température des lingots avant leur passage dans les laminoirs dégrossisseurs *(blooming, slabbing)*.

four U.H.P. Four électrique moderne, généralement triphasé ultra-haute puissance, alimenté en courant à fréquence industrielle.

fragile. *adj.* Qui subit sous contrainte une rupture brutale sans déformation macroscopique visible.

fragilisation. *n.* Abaissement de la capacité de déformation d'un métal. La fragilisation d'un acier peut être due à l'abaissement de la température ou, dans certains cas, à l'introduction d'hydrogène dans ce métal.

fraisage. *n.* Opération de coupe réalisée à l'aide d'un outil rotatif massif appelé fraise et destiné à modifier la forme d'une pièce.

frittage. *n.* Opération thermique ayant pour but de réaliser la soudure des particules de poudre et d'éliminer la porosité ; s'accompagne généralement d'une recristallisation et d'un accroissement des propriétés mécaniques. On distingue le *frittage naturel :* sans pression externe exercée ; le *frittage sous charge :* avec pression concomitante ; le *frittage-extrusion :* filage d'une poudre placée dans un container ; le *frittage en phase liquide :* l'échantillon, au cours du frittage, est constitué d'un squelette solide baigné par une phase liquide (sans que sa morphologie globale en soit modifiée).

fritté. *n.* Échantillon ou pièce résultant du frittage d'un aggloméré ; on rencontre également l'expression de *compacts frittés*.

front. *n.* Surface limitant le chantier du côté où il progresse. *Par ext.*, ensemble des chantiers en cours d'exploitation (d'où l'expression *à front*).

frottement. *n.* Interaction entre deux corps en mouvement relatif, caractérisée mécaniquement par la contrainte tangentielle s'exerçant à l'interface, dite cission de frottement.

G

galvanoplastie au tampon (dépôt électrolytique spécial). Technique d'électrocristallisation utilisant l'anode comme réservoir d'électrolyte. Cette anode, recouverte d'un manchon poreux, généralement en ouate ou gaze de coton imbibée d'électrolyte concentré, est déplacée régulièrement sur la pièce reliée au pôle cathodique du générateur. Cette méthode permet notamment le revêtement ou la retouche locale d'une pièce non démontable.

gangue. *n.* Ensemble des minéraux stériles accompagnant un minerai exploitable.

gélification. *n.* Passage d'un état solide à un état fluide visqueux. S'emploie surtout à propos des machines de transformation, qui doivent bien « gélifier » la matière première en poudre ou en granulés avant la mise en forme.

gemme. *n.* Résine du pin telle qu'on la récolte en provoquant une blessure sur l'arbre. C'est la matière de base de toute une chaîne de transformations chimiques, aboutissant à la térébenthine, la collophane, etc.

géochimie. *n.* Étude des distributions des divers éléments chimiques dans les différentes zones de la Terre.

gisement. *n.* Zone minéralisée assez importante pour que l'exploitation puisse en être envisagée économiquement.

gisement épigénétique. Gisement dans lequel la minéralisation s'est surimposée à une roche préexistante.

gisement syngénétique. Gisement dans lequel la minéralisation s'est formée en même temps que la roche encaissante dans laquelle elle se trouve.

glissements intracristallins. Ce sont les glissements relatifs des plans cristallins à l'intérieur des cristaux constituant l'agrégat polycristallin.

gradin. *n.* Lorsque le gisement s'étend sur une grande hauteur, le front comporte généralement plusieurs gradins d'une dizaine de mètres de hauteur. C'est le cas général des exploitations à ciel ouvert lorsque le gisement n'est pas constitué par une seule couche horizontale peu profonde.

granulats. *n.* Terme générique, désignant tous les matériaux naturels de petites dimensions (sables, graviers, gravillons, ballasts, etc.) obtenus par criblage d'alluvions ou concassage de roches en carrière.

granule. *n.* Désigne d'une façon générale une particule de poudre ; les granules sont de faibles dimensions et généralement constitués de très petits cristallites (quelques milliers d'angströms).

granulométrie. *n.* Terme qui symbolise sans la préciser la distribution en taille des granules ; il lui est associé le plus souvent des adjectifs tels que *grossière* (dimension moyenne supérieure à 50 μm) ou *fine* (dimension moyenne de l'ordre de quelques μm).

graphite. *n.* En termes de matériaux composites, désigne des fibres de graphite à hautes performances mécaniques, obtenues par pyrolyse et graphitisation de fibres organiques ou de carbone.

greisen. *n.* Roche formée essentiellement de quartz et de mica blanc, résultant d'une métasomatose d'un granite sous l'action de constituants volatils tardifs émanant d'un granite voisin.

grippage. *n.* Blocage entre un outil et un matériau (entre deux pièces mobiles l'une par rapport à l'autre), soit par manque de lubrification, soit à cause d'une déformation trop grande.

grisou. *n.* Gaz hydrocarboné (le plus souvent méthane) emprisonné dans les couches de charbon et les terrains adjacents, et qui se libère au moment de l'exploitation. Un *coup de grisou* est une explosion du mélange air-grisou.

H

haldes. *n.* Amoncellements constitués des résidus d'exploitation d'anciennes mines métalliques.

hétérocharge. *n.* Charge de polarité opposée à celle de l'électrode qui lui fait face lors de la polarisation d'un électret dans un condensateur.

holding. *n.* Société — privée ou d'État — qui détient tout ou partie des actions d'autres sociétés (filiales), effectue les opérations financières relatives à ces filiales, et en dirige l'activité.

homocharge. *n.* Charge de même polarité que celle de l'électrode qui lui fait face lors de la polarisation d'un électret dans un condensateur.

hydratation du ciment. Ensemble des processus — chimiques et physico-chimiques — qui se produisent entre le ciment et l'eau et transforment la suspension dense de ciment dans l'eau en une pierre artificielle (pâte de ciment durcie). On distingue une phase d'accélération des processus (la prise) puis une phase de ralentissement qui correspond au durcissement.

hygroscopie. *n.* Qui a rapport à la teneur en eau du bois. L'hygroscopie caractérise l'humidité du bois et, par conséquent, détermine nombre de ses propriétés physiques.

hypothermal. *adj.* Qualifie un minéral dont la température de formation est supérieure à 300-350 °C.

hystérésis. *n.* Caractérise la dépendance d'un phénomène physique cyclique par rapport au nombre de cycles ; *p. ex. :* autoéchauffement d'un caoutchouc sous l'effet de charges et de décharges, polarisation d'un diélectrique dépendant des états antérieurs, etc. Un corps présente un phénomène d'hystérésis élastique si, le torseur des forces extérieures appliquées évoluant suivant un cycle fermé, il subsiste une déformation à l'équilibre.

I

imprégnation. *n.* Technique consistant à remplir la porosité ouverte d'un fritté par un lubrifiant (cas des coussinets, *p. ex.*).

inducteur. *n.* Ensemble composé d'un circuit magnétique en tôles magnétiques et d'enroulements électriques traversés par le courant qui produit le champ électrique. Dans la plupart des cas, l'inducteur qui est exposé au flux de chaleur doit être puissamment refroidi, par exemple par circulation d'eau à l'intérieur des conducteurs, qui sont alors creux.

induction (chauffage par). Procédé qui consiste à placer la pièce à chauffer dans une bobine électrique ; la pièce est alors traversée par un courant électrique qui provoque son échauffement. L'intérêt du procédé réside dans sa grande rapidité.

infiltration. *n.* Technique consistant à réduire, voire à annuler la porosité résiduelle, en faisant pénétrer — à température élevée — une phase métallique liquide dans un fritté.

intégration verticale. Structure caractéristique d'un groupe industriel qui réalise, dans un secteur économique donné, toutes les opérations et activités conduisant d'une matière première brute aux produits finis (s'oppose à la concentration « horizontale » : réunion, dans un même groupe financier, de tout ou partie des entreprises effectuant un même travail).

ion. *n.* Atome chargé électriquement par perte ou acquisition d'un ou plusieurs électrons. *P. ex. :* Na^+, Cl^-, Al^{3+}, O^{2-}.

ionisation. *n.* Propriété des gaz de devenir conducteurs sous l'impact d'un rayonnement.

J - K

joint de grain. Surface de jonction entre deux grains ; c'est une zone de fragilité mécanique.

jour. *n.* Ensemble des installations de surface d'une mine souterraine comprenant le carreau et éventuellement l'usine de traitement.

kératinisation. *n.* Processus de formation de la couche superficielle de la peau, et plus généralement de la carapace des animaux, à partir des protéines contenues dans les cellules épithéliales.

Kevlar. *n.* Nom commercial d'une fibre organique à hautes performances mécaniques, fabriquée par DuPont de Nemours et utilisée pour le renforcement des résines.

L

laboratoire (d'un four). Zone d'un four dans laquelle se produisent les réactions de réduction ou d'affinage.

lacune. *n.* Défaut physique à l'échelle atomique qui correspond à un atome manquant sur site normal. Les lacunes sont créées en certains endroits (sources) et sont éliminées en certains lieux (puits). Lorsque leur concentration excède celle de l'équilibre thermodynamique, on parle de sursaturation de lacunes.

latté. *n.* Panneau reconstitué, comportant une âme obtenue par collage de petites lattes exemptes de défauts. Cette âme est recouverte d'une mince feuille de bois déroulé. Ce procédé permet d'obtenir un panneau remarquablement stable exempt de défauts.

laverie. *n.* Usine dans laquelle s'effectuent la préparation mécanique et la concentration du minerai. Dans le cas du charbon, on dit plutôt *lavoir*.

leucogranite. *n.* Granite riche en minéraux clairs (quartz, feldspaths alcalins et calco-sodiques), pauvre en minéraux ferro-magnésiens. *Leucogranite albitique :* leucogranite dans lequel le feldspath sodique est dominant.

liaison covalente. Liaison forte entre deux atomes s'effectuant dans une direction bien précise (liaison directive). Elle résulte de la mise en commun de deux électrons par les deux atomes.

liaison hydrogène ou **liaison par pont hydrogène.** C'est une liaison de faible énergie, de nature essentiellement électrostatique, intervenant entre un atome d'hydrogène déjà lié et un élément électronégatif (tel que F, O, N, etc.).

liaison ionique. Liaison forte, non directive, purement électrostatique, entre plusieurs ions.

liaisons de Van der Waals. Forces de cohésion qui unissent entre elles les molécules d'une substance. Elles ne peuvent être considérées, en toute rigueur, comme des liaisons chimiques proprement dites.

liant. *n.* Substance mélangée en faible quantité à une poudre pour faciliter sa mise en forme lors du pressage ; doit ensuite pouvoir être éliminée aisément avant ou pendant le chauffage précédant le frittage.

liant hydraulique. Liant capable de faire prise et de durcir sous l'eau en donnant des composés stables ; le plâtre n'est pas un liant hydraulique, car le gypse formé en présence d'eau est soluble dans l'eau.

libre parcours moyen (cinétique des gaz). En milieu gazeux plus ou moins raréfié, représente la moyenne statistique du parcours qu'une particule peut effectuer entre deux chocs successifs avec d'autres particules. Il dépend évidemment de la nature de la particule, de la température et surtout de la pression. Encore inférieur au centimètre pour des pressions voisines du pascal, il dépasse le kilomètre pour les très basses pressions.

lit fluidisé. Bain fluide de particules calibrées en suspension dans un courant gazeux qui circule contre les parois d'un four. Le courant gazeux, composé d'air et de carburant, apporte l'énergie calorifique nécessaire à la fluidisation.

lixiviation. *n.* Procédé chimique ou biochimique d'extraction d'un métal par mise en solution de celui-ci, grâce à la percolation naturelle ou provoquée d'un liquide dans le minerai. Cette hydrométallurgie (traitement des minerais par voie humide) s'oppose à la pyrométallurgie (traitement par fusion).

loi de comportement. Relation entre la contrainte d'écoulement σ d'un matériau, la température T, la vitesse $\dot{\bar{\varepsilon}}$ et la quantité $\bar{\varepsilon}$ de déformation.

lubrifiant. *n.* Substance mélangée en faible quantité à une poudre pour minimiser le frottement de cette poudre sur les parois de la matrice et faciliter l'éjection des agglomérés obtenus.

lubrifiant de mise en forme. Produits divers destinés en général à limiter le frottement métal-outil et l'usure de l'outillage. *P. ex. :* émulsions, huiles minérales ou végétales, savons métalliques, verres, graphite.

M

machine d'abattage. Engin mobile comportant une tête garnie d'outils capables de désagréger la roche en place. La *haveuse* et le *rabot* sont utilisés pour le dépilage en taille, tandis que le *mineur continu* et le *tunnelier* creusent des galeries.

macle mécanique ou **macle de déformation.** Macle apparaissant au cours de la déformation d'un métal, en général lorsque les dislocations ont peu de possibilités de glissement.

maille atomique. Édifice élémentaire contenant tous les atomes constitutifs d'un matériau et dont la répétition formera le cristal.

mandrin. *n.* Outillage imposant à un produit la transformation de sa forme intérieure (formage de tubes).

martensite. *n.* Solution solide sursaturée de carbone dans la ferrite des aciers ; elle s'obtient par trempe de l'austénite et a la même composition en carbone que celle-ci. La maille de la martensite est quadratique. A une grande résistance mécanique et une faible capacité de déformation.

mat ou **feutre.** *n.* Désigne essentiellement, dans le cas du verre, un assemblage sans tissage de fibres plus ou moins longues.

matrice. *n.* 1° Outillage imposant sa forme extérieure à un produit à transformer. 2° Dans un matériau composite, matériau de liaison entre les éléments de renforcement (fibres, mats ou tissus).

matte. *n.* Composé sulfuré complexe, semi-métallique dans certains cas, résultant de la première fusion d'un concentré sulfuré polymétallique.

Meissner (effet). Annulation de la valeur de l'induction magnétique B dans un supraconducteur placé dans un champ magnétique H inférieur au champ critique.

merrain. *n.* Pièce de bois servant à la confection des tonneaux ou des réservoirs et obtenue généralement par fendage du chêne ou du châtaignier.

mésothermal. *adj.* Qualifie un minéral dont la température de formation est comprise entre 150 et 300 °C.

métal vierge (ou **de première fusion**). Métal issu uniquement de la fusion de minerais, et non de déchets métalliques.

métallogénie. *n.* Étude des processus de formation et de l'évolution des concentrations minérales.

métasomatose. *n.* Changement de composition chimique globale d'une roche à l'exception des modifications de H_2O et CO_2.

métaux carbonyles (dépôt chimique en phase gazeuse). Produits utilisés en CVD pour produire un revêtement par pyrolyse à température moyenne. Ce sont des combinaisons de certains métaux (Fe, Ni, Co, Pt) avec l'oxyde de carbone. Leur toxicité est très élevée.

méthode d'exploitation. Façon d'exploiter un gisement. Cette notion recouvre la géométrie (formes et dimensions) et la chronologie (phases successives) des différentes excavations.

microbillage. *n.* (préparation des surfaces). Technique récente de modification des surfaces par projection de particules solides. Contrairement au sablage et au grenaillage qui opèrent par abrasion, le microbillage utilise l'impact élastique de microsphères de verre. Il conduit donc à un corroyage homogène assurant à la fois un excellent état microgéométrique de surface et la formation de contraintes régulières en compression (donc bénéfiques en ce qui concerne la tenue en fatigue). Très favorable sur le plan du dégazage, il trouve une large utilisation comme moyen de préparation en technique du vide.

milieu dispersif. Un milieu est dit dispersif vis-à-vis d'un phénomène déterminé, si la vitesse de phase correspondante est fonction de la pulsation ou du nombre d'onde.

minage. *n.* *Voir* chargement.

mine. *n.* 1° Entreprise qui a pour objectif d'exploiter un gisement de substance concessible (combustibles fossiles, minerais métalliques). 2° Ensemble des travaux de l'exploitation. 3° Trou foré dans la roche pour y introduire un explosif (on dit aussi *trou de mine*).

minerai. *n.* Roche naturelle présentant un intérêt économique grâce aux minéraux utiles qu'elle contient en quantité notable.

minerai polymétallique. Minerai complexe dont on peut séparer, par des opérations minéralurgiques adéquates, plusieurs concentrés métalliques différents.

minéralurgie. *n.* Ensemble des opérations physico-chimiques de premier traitement du minerai à sa sortie de la mine pour en faire un produit commercialisable (préparation mécanique et concentration).

mise au mille. Quantité de matière à prendre au départ pour obtenir 1 000 kg de produit utilisable, *p. ex.*, après transformation sur un train de laminoirs.

monocouche. *n.* Constituant élémentaire d'un matériau composite stratifié formé d'une mince couche de matrice avec un seul renforcement : soit une trame de fibres unidirectionnelle, soit un tissu, soit un mat.

monomère. *n.* Composé chimique à partir duquel se constitue une chaîne ou un réseau macromoléculaire par polymérisation.

morphologie. *n.* Caractérise la forme des particules de poudre ; selon le mode d'élaboration des poudres, on précise cette forme en usant des terminologies suivantes : poudres en paillettes, soucoupes, aiguilles ; sphérules ; poudre d'éponge ; poudre dendritique.

mur. *n.* Terrain géologiquement plus ancien que le minerai (généralement situé en dessous).

N

niveau de Fermi. Représente l'énergie maximale du dernier niveau occupé lors du remplissage des bandes d'énergie électronique dans un solide.

nombres quantiques. Certaines grandeurs physiques ne sont pas susceptibles de variation continue. Elles prennent un certain nombre de valeurs bien précises. Chacune de ces valeurs est caractérisée par un nombre appelé nombre quantique. *Ex. :* 1) L'énergie de l'électron de l'atome d'hydrogène est de la forme : $E = E_0/n$ (n nombre entier) ; 2) l'énergie d'un oscillateur harmonique est $E = h\,(v + 1/2)$; v est le nombre quantique de vibration, nombre entier positif.

O

oolithe. *n.* Particule de forme ellipsoïdale, de dimension inférieure à 2 mm, constituée de deux parties : un noyau et une enveloppe (cortex) formée de feuillets concentriques.

open pit (américanisme). Exploitation minière à ciel ouvert, présentant l'aspect d'une excavation conique à flancs en gradins.

opérateur minier. Entreprise qui effectue les travaux de reconnaissance et de développement sur un gisement, sans en posséder la propriété totale (les associés fournissant seulement des fonds).

orbitale ou **fonction d'onde.** Fonction mathématique des coordonnées de position d'une particule ; la norme de cette fonction représente la probabilité de présence de la particule.

organométalliques. *n.* (dépôt chimique en phase gazeuse). Combinaisons organiques (acétylacétonate, triisobutyle, etc.) utilisées en CVD pour déposer par pyrolyse à basse température des matériaux tels que Al, Cu, etc.

orthotropie. *n.* En terme de mécanique, désigne un type de symétrie identique à la symétrie orthorhombique (3 plans de symétrie orthogonaux).

outils. *n.* Éléments actifs d'une machine d'abattage ; ce sont soit des *pics*, soit des *molettes*.

P

panneau de particules. Panneau reconstitué à base de copeaux calibrés (particules) dont la cohésion est assurée par un liant synthétique (résine, urée-formol ou phénol-formol habituellement). On emploie généralement deux techniques de fabrication, soit le pressage à chaud, soit l'extrusion.

paragenèse. *n.* Ensemble des minéraux constitutifs d'un minerai.

passivation. *n.* Phénomène qui traduit la formation, dans certains milieux chimiques, d'un film très mince et protecteur à la surface d'un métal ou d'un alliage et qui ralentit fortement la corrosion.

peau ou **semelle.** *n.* Dans une structure sandwich, couche de surface mince, rigide et résistante, recouvrant le cœur du sandwich.

pelle. *n.* Engin de chargement de la roche abattue, par un godet fixé à l'extrémité d'un bras mobile. A la différence du chargeur, la pelle ne se déplace pas pendant le chargement, le positionnement du godet étant assuré par la rotation du bras. Dans la *roue-pelle*, le godet unique est remplacé par une roue garnie de plusieurs godets sur toute sa périphérie.

pendage. *n.* Inclinaison d'une couche (ou d'un filon, ou d'une faille) par rapport au plan horizontal.

perçage. *n.* Opération de coupe permettant, par avance d'un outil rotatif appelé *foret*, de faire des trous cylindriques dans une pièce.

perméabilité magnétique. Coefficient de proportionnalité liant l'induction magnétique dans un matériau au champ magnétique dans lequel il est placé.

pertes diélectriques. Ensemble de l'énergie dissipée dans un diélectrique par induction ionique, orientation du dipôle, ou mouvements d'électrons libres.

pied de bain. Quantité minimale de métal liquide que l'on doit conserver dans un four pour permettre son fonctionnement ultérieur (après la coulée en particulier). *Par ex.*, dans les fours à induction d'élaboration, pour que le secondaire du transformateur constitué par le métal proprement dit permette la circulation du courant, il faut maintenir une certaine quantité de métal liquide.

piézo-électricité. *n.* L'application d'une compression sur un cristal de quartz à faces métallisées fait apparaître une différence de potentiel. L'inverse existe également.

piézo-électrique. *adj.* Qualifie un matériau dont la polarisation électrique peut être modifiée par une contrainte mécanique.

pilier. *n.* Roche laissée en place entre deux chambres dans une phase initiale de l'exploitation. Le pilier peut être constitué de minerai, auquel cas il est souvent réexploité dans une phase ultérieure.

placer. *n.* Gisement sédimentaire détritique, en général d'origine alluvionnaire, contenant des minéraux denses et/ou des métaux natifs (cassitérite, rutile, monazite, diamants, or, platine, etc.).

plastifiant. *n.* Additif qui, additionné à un thermoplastique, abaisse la température de ramollissement au point de transition vitreuse. Facilite, par exemple, la mise en place du béton hydraulique.

polarisation de concentration (électrolyse). En électrocristallisation, désigne un phénomène provoqué par l'appauvrissement de l'électrolyte en ions métalliques au voisinage immédiat de la cathode. Il limite la densité de courant cathodique à des valeurs au-dessus desquelles la croissance du dépôt devient anarchique, conduisant à une structure fragile dite « brûlée ».

polarisation électrique. Réponse d'un matériau à un champ électrique. Son analogue magnétique est l'aimantation.

polygranulaire (matériau). Matériau constitué de grains (de 1 μm à 1 000 μm) assemblés et soudés par des techniques de pressage et de cuisson. *P. ex. :* céramique.

pore. *n.* Espace vide dans certains matériaux, telles les céramiques.

porosité. *n.* Ensemble des pores (cavités ou canaux) présents au sein d'un aggloméré : représente donc le volume des trous microscopiques contenus dans un comprimé. On distingue la porosité ouverte (pores interconnectés et reliés à la surface libre) et la porosité fermée (pores isolés) : la somme de ces deux porosités représente la porosité totale. On distingue également : la *porosité initiale*, au sein de l'aggloméré ; la *porosité résiduelle*, au sein du fritté ; la *porosité primaire*, vides entre particules au contact après mise en forme par compression, la *porosité secondaire*, vides créés du fait de processus diffusionnels complexes.

poussières. *n.* Les poussières qui se trouvent dans l'atmosphère de la mine peuvent être nocives (silice pouvant provoquer la silicose), ou même explosives (poussières de certains charbons pouvant donner lieu à des explosions très violentes appelées *coups de poussières*).

pouvoir de répartition (propriété d'un dépôt). Souvent appelé de façon impropre « pouvoir de pénétration », désigne, pour un procédé de revêtement, l'aptitude plus ou moins grande de bâtir uniformément le dépôt sur un substrat de forme irrégulière. Dans le cas particulier de l'électrocristallisation, c'est une propriété qui varie avec le choix du matériau, de l'électrolyte et de certaines conditions opératoires (densité cathodique du courant, température, agitation, distance entre électrodes...). Ne doit pas être confondu avec le pouvoir couvrant, qui correspond à la capacité de déposer dans des orifices, surtout lorsque l'opération s'effectue avec une faible densité cathodique.

préparation mécanique. Ensemble des opérations de réduction de dimension et classification des blocs du minerai brut, par des moyens mécaniques (concassage, broyage, criblage, tamisage, cyclonage, etc.), pour le rendre apte à la concentration.

préréduction. *n.* Opération de réduction partielle du minerai de fer, généralement sur le lieu d'extraction, qui fait passer à l'état métallique une partie importante d'un minerai, le plus souvent à haute teneur en fer (la réduction est en général opérée par du gaz naturel).

prise de fer. Différence entre l'épaisseur du produit avant une passe de laminage et après cette passe.

prix producteur. Prix auquel les fondeurs de non-ferreux vendent effectivement le métal qu'ils produisent.

produit national brut. Valeur globale des services et des biens, effectués ou produits dans un pays au cours d'une année.

produit pouzzolanique. Produit susceptible de faire prise et de durcir sous l'eau en présence de chaux (et notamment en présence de la chaux libérée par l'hydratation du ciment) ; *p. ex. :* laitiers, cendres volantes récupérées des centrales thermiques ou pouzzolanes naturelles.

puissance. *n.* Épaisseur d'une couche ou d'un filon.

puits. *n.* Accès au gisement à partir de la surface. Les puits sont toujours verticaux ou peu inclinés sur la verticale.

purgeage. *n.* Élimination de blocs de roches instables sur les parois des chantiers, soit manuellement, à l'aide d'une pince à purger, soit mécaniquement, à l'aide d'une purgeuse ou « machine à purger ».

pyrométallurgique. *adj.* Qualifie un traitement d'extraction d'un métal, à partir de son concentré, faisant intervenir une fusion.

Q - R

quartier. *n.* Dans une mine souterraine, secteur d'extraction de dimensions restreintes.

quotas d'exportation. Quantités réglementairement fixées pour l'exportation d'une matière première (selon la politique poursuivie, il s'agira de minima ou de maxima).

recristallisation. *n.* Apparition de nouveaux grains dans un matériau écroui, conduisant à un édifice cristallin entièrement nouveau contenant une faible densité de dislocations.

recyclage. *n.* Retour d'un déchet ou d'un débris à son circuit d'origine. *P. ex. :* chutes de fonderie d'aluminium ou vieux emballages en feuilles d'aluminium récupérés et renvoyés dans une fonderie d'affinage d'aluminium.

relaxation. *n.* Variation de la contrainte nécessaire pour maintenir une déformation constante.

remblayage. *n.* Action de remplir un vide avec un matériau stérile.

rente minière. Profits exceptionnellement élevés, retirés par une entreprise de l'exploitation d'un gisement particulièrement riche et/ou facilement valorisable.

réserves. *n.* Tonnage de minerai reconnu exploitable dans des conditions économiques données.

résilience. *n.* Aptitude d'un matériau à résister aux chocs.

ressources. *n.* S'agissant de substances minérales, désignent l'ensemble des quantités de minerais connues ou à découvrir dans l'écorce terrestre, et pouvant être exploitées actuellement ou dans l'avenir.

restauration. *n.* Réarrangement des dislocations dans un matériau écroui, conduisant à des annihilations, donc à une diminution de la densité de dislocations, et souvent à la formation de sous-joints.

retrait. *n.* Contraction de l'aggloméré qui découle du frittage et plus particulièrement de l'élimination de la porosité ; on parle de retrait linéaire ou de retrait volumique.

retrait du béton. Diminution relative du volume apparent ou de la longueur d'une pièce de béton.

retrait hydraulique du béton. Phénomène résultant à la fois d'une contraction de la phase solide et d'une diminution de la porosité du béton. Peut se produire en l'absence d'hydratation et correspond, généralement, à une évaporation de l'eau interne.

rhéologie. *n.* Branche de la physique étudiant la déformation ou l'écoulement de la matière.

riblon. *n.* Chute d'acier produite au cours des opérations sidérurgiques ; peut être recyclée en aciérie.

rigidité diélectrique. Champ électrique le plus élevé susceptible d'être appliqué à un matériau sans provoquer son claquage.

roche-minerai. *n.* Roche dont il est possible d'extraire plusieurs concentrés métalliques, et dont les constituants non métalliques sont eux-mêmes valorisables pour des usages industriels.

S

salbande. *n.* Zone argileuse située parfois aux épontes d'un filon.

sandwich. *adj.* Se dit d'une structure stratifiée particulière, composée de trois couches : un cœur épais, léger, à faibles caractéristiques mécaniques, enserré entre deux peaux minces, denses, à propriétés mécaniques élevées.

semelle. *n. Voir* peau.

semi-conducteur. *n.* Matériau caractérisé par une résistivité intermédiaire entre celle des isolants et celle des métaux.

serre-flan. *n.* Outillage servant à tenir en place le produit (flan) pendant sa déformation.

siccatif. *adj.* Caractérise un produit liquide susceptible de durcir par polymérisation lors d'un séchage

à l'air libre. De nombreuses exsudations végétales sont des huiles siccatives.

skarn. *n.* Roche formée de silicates calciques fréquemment ferrifères et/ou magnésiens, souvent organisée en zone monominérale, toujours à limite nette et due à des phénomènes de métasomatose en milieu carbonaté.

skin-pass. *n.* Passe de laminage de finition destinée à durcir le métal en surface et à en améliorer l'aspect extérieur.

slabbing. *n.* Laminoir transformant les lingots en brames.

sole. *n.* Partie inférieure d'un four sur laquelle est placée la charge ou les pièces à traiter.

sollicitation. *n.* En construction, dans le calcul des ouvrages, une sollicitation est un effort ou un moment résultant d'une *action* (*voir* ce mot).

solution solide. Matériau solide cristallisé dans lequel la majorité des atomes sont d'une nature donnée (solvant) et quelques atomes d'une autre nature (soluté) sans être décelables par des moyens visuels ou microscopiques.

soutènement. *n.* Tout dispositif qui permet de consolider les parois des excavations creusées par le mineur. Le *soutènement marchant* est constitué par un ensemble de vérins hydrauliques, calés entre toit et mur, et dont le déplacement est assuré par d'autres vérins hydrauliques.

spectre de charge. Dans une construction en service, c'est le diagramme des forces subies en fonction du temps. Ces forces ne sont pas constantes et elles ont souvent une certaine périodicité.

sphérolite. *n.* Texture de cristallisation à symétrie radiale, fréquemment rencontrée dans les polymères semi-cristallins.

spiegel (fonte spiegel, de l'allemand *Spiegeleisen :* « fer à miroir »). Fonte au manganèse (Mn inférieur à 25 %), à cassure très brillante, élaborée en haut fourneau ou par électrothermie.

statut du mineur. Ensemble de dispositions légales et réglementaires qui régissent le métier de mineur et qui comportent des avantages spécifiques (durée du travail, avantages en nature, etc.), pour en compenser la pénibilité.

stérile. *adj.* Qualifie une roche sans intérêt économique à l'endroit et à l'époque considérés.

stot. *n.* Partie de gisement volontairement abandonnée pour maintenir la stabilité de certains édifices en surface (carreau, ouvrages surplombant le gisement) ou au fond (galeries d'accès, puits).

stratifié. *adj.* *Voir* composite stratifié.

stratiforme. *adj.* Se dit d'une concentration minérale concordante ou subconcordante avec la stratification de la roche encaissante.

substrat. *n.* (terme courant en traitement des surfaces). Pour le praticien en traitement des surfaces, le substrat est le matériau qui va être soumis à une opération de modification de surface par apport ou enlèvement de matière.

supraconductivité. *n.* Disparition complète de la résistivité de certains matériaux à très basse température.

surrégénérateur. *n.* Type de réacteur nucléaire, dit « à neutrons rapides », utilisant un combustible riche (uranium très enrichi, plutonium) et du sodium fondu comme caloporteur, et qui peut produire plus de matière fissile, par transmutations, qu'il n'en est introduit au départ.

susceptibilité électrique. Coefficient de proportionnalité entre la polarisation d'un matériau et le champ électrique qui la produit.

sylviculture. *n.* Ensemble des techniques de type agricole employées pour permettre à la forêt de se développer tout en produisant un matériau ligneux apte à telle ou telle application (bois d'œuvre, papeterie, etc.).

T

tapures de trempe. Fissures provoquées dans une pièce métallique par l'importante dilatation qui accompagne la transformation martensitique.

taux de découverture. Dans l'exploitation à ciel ouvert, nombre de mètres cubes de stériles à déplacer pour rendre accessible un mètre cube de minerai.

taux de défruitement. Rapport de la quantité de minerai abattu à la quantité de minerai en place dans un panneau, ou dans le gisement entier.

taux de réduction. Rapport entre la section initiale d'un produit et sa section après déformation (rapport de surfaces).

taxe parafiscale. Versement obligatoire, distinct par nature d'un impôt, qui est perçu sous l'autorité de l'État par un organisme agréé, sans toutefois apparaître au budget de l'État. La taxe parafiscale sur les granulats est perçue et gérée par le Bureau de recherches géologiques et minières.

ténacité. *n.* Caractéristique mécanique correspondant à la capacité d'un métal à résister à la rupture par fissuration. Parmi les différents paramètres de ténacité, le plus utilisé est le facteur critique d'intensité de contrainte K_{IC}.

teneur. *n.* Proportion de minéral utile, ou de métal, dans le minerai. La *teneur de coupure* est la plus basse teneur économiquement exploitable.

tenseur. *n.* C'est une forme multilinéaire formée avec les composantes de vecteurs appartenant à un espace vectoriel ou à son espace dual.

tension de vapeur (technique du vide). Pression partielle d'un gaz ou d'une vapeur dans le récipient qui contient ce gaz ou cette vapeur. Pour les matériaux utilisables en technique du vide, il est indispensable de connaître leur tension de vapeur en fonction de la température d'emploi.

terme. *n.* Vente ou achat au terme : opération de bourse dont l'exécution n'intervient effectivement qu'au terme d'une période de durée convenue (un à trois mois), commençant au jour auquel l'ordre a été passé.

terpènes. *n.* Corps de formule générale $(C_5H_8)_n$, cycliques ou non, qui sont des constituants de nombreuses sécrétions végétales (résines, huiles, gommes, etc.). Ils polymérisent très facilement avec pour motif monomère (théorique) l'isoprène C_5H_8.

théorie des bandes. Théorie électronique des solides qui consiste à expliquer la formation de bandes d'énergie à partir des niveaux atomiques.

thermo-ionique (émission). Électrons émis par un corps porté à haute température.

thermoplastiques. *n.* Polymères constitués de chaînes macromoléculaires non liées entre elles, et pouvant être déformés plastiquement au-dessus d'une certaine température.

tir. *n.* Opération d'abattage à l'explosif qui comporte le chargement des coups de mine, l'amorçage et la mise à feu.

tissu de renforcement. La plupart des fibres de renforcement s'utilisent aussi tissées, avec diverses armures, seules ou en mélange. Un *tissu équilibré* comporte autant de fibres de chaîne que de fibres de trame, de même nature. Un *tissu unidirectionnel* a des fils de trames très espacés.

titre. *n.* Grandeur servant à caractériser la finesse d'un fil ou d'une fibre. Les unités de titre les plus employées sont le *décitex* et le *denier*.

toit. *n.* Terrain géologiquement plus récent que le minerai (donc généralement situé au-dessus).

torseur. *n.* En tout point d'un corps, le système des forces extérieures appliquées peut être remplacé par le torseur équivalent : la résultante générale et le moment résultant en ce point.

tournage. *n.* Opération de coupe destinée à obtenir un produit axisymétrique ou fileté.

train de laminoirs. Ensemble composé d'une ou de plusieurs cages de laminoirs successives permettant d'effectuer toute une phase de laminage (*p. ex.*, du bloom à la billette).

transition vitreuse. Point de transition thermique au-dessous duquel le matériau se comporte comme un verre, et au-dessus duquel il se déforme comme un caoutchouc ou une pâte.

travaux préparatoires. Ensemble des travaux d'accès aux différentes parties du gisement et de découpage des panneaux à exploiter. Cette dernière phase s'appelle aussi traçage.

travers-banc. *n.* Galerie qui recoupe les bancs ou couches.

tréfilage. *n.* Opération de mise en forme consistant à réduire le diamètre d'un fil en le tirant à travers une filière.

trempe. *n.* Traitement qui consiste à chauffer un alliage pour l'amener à l'équilibre à la température considérée puis à le refroidir très rapidement pour éviter toute transformation au cours du refroidissement. Ce traitement permet d'obtenir la martensite.

tube à rayons X. Un pinceau d'électrons accélérés par un champ électrique sous vide bombarde une cible métallique (anticathode). L'énergie cinétique des électrons se transforme pour une faible part en rayonnement X et pour une part importante en chaleur.

typologie. *n.* Méthode de caractérisation et de classification des gisements par types, à partir de critères relatifs au minerai et à son environnement géologique. *Par ext. :* le résultat de cette classification.

U

usinage. *n.* Toute opération de mise en forme par enlèvement de matière. Principaux procédés : découpage, cisaillage, coupe, travail par abrasion, usinage physico-chimique.

usinage par abrasion. Toute opération de mise en forme par enlèvement de microcopeaux. Principaux procédés : travail à la meule (meulage, rectification) et finition à l'abrasif (rodage, polissage).

V

valence. *n.* Nombre d'électrons qu'un atome peut capter ou céder pour atteindre la structure électronique au gaz rare qui lui est proche. *P. ex. :*

$$Cl_2 + 2e^- \rightarrow 2cl^-$$

valorisation. *n.* Opérations effectuées sur un minerai tout-venant, en vue d'obtenir un produit plus pur et plus riche. *Syn. :* enrichissement, concentration.

verre. *n.* 1° Matériau amorphe. 2° En terme de matériau composite, utilisé pour « fibre de verre ». Fil composé de filaments obtenus généralement à la filière. *Verre E* : fibre de qualité courante. *Verre R*, *verre S* : fibres de hautes qualités mécaniques.

visco-élasticité. *n.* Un corps est dit visco-élastique si sa loi de comportement élastique fait intervenir le paramètre temps.

volcano-sédimentaire. *adj.* Se dit d'un gisement formé en milieu sédimentaire sous l'influence de phénomènes volcaniques dont on retrouve la trace dans les sédiments.

volée. *n.* Ensemble des coups de mine, disposés suivant un certain « schéma de tir », qui sont tirés en une seule fois grâce à un amorçage en série et une mise à feu le plus souvent électrique.

voûte. *n.* Partie supérieure d'un four ayant pour mission de réfléchir la chaleur à la surface du métal.

W - Z

Weiss (domaine de). Zone où l'aimantation d'un matériau est constante ; la division d'un matériau en domaines correspond au minimum de son énergie libre.

zone de raccordement. Volume reliant deux particules qui se soudent ; on utilise également les termes de pont, col, cou.

INDEX DES NOMS CITÉS

Les références sont données par l'indication du numéro de la page où se trouve le terme, suivi, le cas échéant, des lettres *a* et *b* se rapportant respectivement à la colonne de gauche et à la colonne de droite de chaque page.

Les références sont données, pour les illustrations, par le numéro de la page en caractères gras et, pour le texte, par le numéro de la page en caractères maigres pour une simple citation, et en italique pour un développement plus complet.

Pour les différentes variantes se rattachant à un même terme, un astérisque indiquera le renvoi à ce dernier. *Ex.* :
C.V.D.
* dépôt chimique en phase gazeuse
dépôt chimique en phase gazeuse (C.V.D.) 244, **244**, 246 a

E

F

G

H

I

J

K

L

M

ERRATA

Page 86 - 2e paragraphe, lire :
Cette tâche a été confiée au B.R.G.M. (Bureau de recherches géologiques et minières, qui a le statut d'établissement public) ; les crédits affectés à cet inventaire s'élèvent à 125 millions de francs sur 5 ans (9 millions de francs engagés en 1975, 28 en 1976).

Page 86 - lignes 49 à 52, lire :
Le « *plan cuivre* » mis en place en 1973 a obtenu des crédits renforcés (10 millions de francs en 1973, 25 à 30 millions de francs/an depuis 1975).

Page 242 - dans la légende, lire :

A gauche, cellule pour revêtement localisé d'un connecteur (dorure après gravure).

Page 261 - colonne de droite,

— sous la 1e formule lire :
où a_i est l'activité de l'espèce *i*, et ν_i son coefficient stoechiométrique ; E_o est le potentiel standard.

— 2e formule :

$$\varepsilon = E_o - 0{,}059\ \mathrm{pH} + \frac{RT}{ZF} \mathrm{Log} \frac{(ox)}{(red)}$$

UNITÉS DE MESURE

Grandeur	Dénomination	Symbole	Équivalences	Dimension
Longueur	mètre mille	m	 1 852 m	L
Aire	mètre carré	m^2		L^2
Volume	mètre cube litre stère	m^3 l st	 10^{-3} m^3 1 m^3	L^3
Masse	kilogramme tonne	kg t	 10^3 kg	M
Temps	seconde	s		T
Fréquence	hertz	Hz		T^{-1}
Vitesse	mètre par seconde nœud	m/s	 1 mille par heure	LT^{-1}
Accélération	mètre par seconde carrée	m/s^2		LT^{-2}
Force	newton dyne	N dyn	 10^{-5} N	LMT^{-2}
Énergie, travail ou quantité de chaleur	joule erg watt-heure calorie thermie frigorie	J Wh cal th fg	 10^{-2} J 3 600 J 4,1855 J $4{,}1855 \times 10^6$ J $-4{,}1855 \times 10^3$ J	L^2MT^{-2}
Puissance	watt cheval-vapeur	W ch	 735 W	L^2MT^{-3}
Pression	pascal bar atmosphère centimètre de mercure	Pa atm. cm Hg	 10^5 Pa 1,013 25 bar 1 bar = 75 cm Hg	$L^{-1}MT^{-2}$
Viscosité (dynamique)	poiseuille poise	Pl Po	 10^{-1} Pl	L^{-1} MT^{-1}
Intensité de courant électrique	ampère	A		A
Force électromotrice et différence de potentiel	volt	V		$ML^2T^{-3}A^{-1}$
Résistance électrique	ohm	Ω		$ML^2T^{-3}A^{-2}$
Quantité d'électricité	coulomb	C		AT
Intensité de champ électrique	volt par mètre	V/m		$MLT^{-3}A^{-1}$
Flux magnétique	weber	Wb		$ML^2T^{-2}A^{-1}$
Température	degré Kelvin degré Celsius	°K °C	t (°C) = T (°K) — 273	
Intensité lumineuse	candela	cd		
Flux lumineux	lumen	lm		
Éclairement	lux	lx		
Luminance	candela par m^2	cd/m^2		
Activité nucléaire	$seconde^{-1}$ curie	s^{-1} Ci	 $3{,}7 \times 10^{10}$ s^{-1}	
Quantité de rayonnement X ou γ	rœntgen	R		

GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

TECHNOLOGIE III

GRANGE BATELIÈRE, ÉDITIONS ATLAS, PARIS - ÉDITIONS KISTER, GENÈVE
ÉDITIONS ÉRASME, BRUXELLES-ANVERS

Publiée sous le haut patronage de :
Messieurs les professeurs :
Jean DORST, membre de l'Institut,
Charles FEHRENBACH, membre de l'Institut,
Roger HEIM, membre de l'Institut,
Monsieur l'amiral André JUBELIN,
Messieurs les professeurs :
Pierre LÉPINE, membre de l'Institut,
Louis LEPRINCE-RINGUET, de l'Académie française,
Jean-François LEROY, professeur au Muséum national d'histoire naturelle,
Henri NORMANT, membre de l'Institut,
Monsieur Jacques PICCARD, docteur ès sciences h.c.

Réalisation	IDÉES ET ÉDITIONS 16, avenue de Friedland, 75008 Paris.
Comité de direction	Simone DEVAUX, Uberto TOSCO.
Rédaction	Françoise MENU, Monique LIONS-GENTIL Marie-Noëlle PAILLETTE.
Recherche de l'illustration	Mathilde RIEUSSEC.
Mise en pages	Tito TOPIN et Serge BROCHE.
Illustrations techniques	Richard COLIN.
Coordinateur des dessins	Mario LOGLI.
Fabrication	Sylvia COLIN, Jocelyne TÉPÉNIER.
Directeur de la publication	Bernard BOSC.

Les schémas portant la référence Richard Colin
ont été réalisés d'après des croquis fournis par les auteurs.

Dans ce volume :

LA TECHNOLOGIE (III)
LES MATÉRIAUX

- Structures et propriétés des matériaux
- Matières premières d'origine minérale (non énergétiques)
- Gisements de minerais et prospection minière
- L'extraction des minerais. Mines et carrières
- Principaux types de matériaux usuels
- Technologie et exploitation des fours industriels

T. Poggio

Ont collaboré à ce volume :

pour les structures et les propriétés des matériaux :

G. BÉRANGER et F. MONTHEILLET, pour de l'atome au cristal.

G. BÉRANGER, pour les diagrammes d'équilibre.

F. X. de CHARENTENAY, pour la structure des polymères.

M. LEGRAND, pour les céramiques et les verres, et les propriétés électriques et magnétiques.

M. STASI, pour les propriétés mécaniques.

pour les matières premières d'origine minérale (non énergétiques) :

P. GENTILHOMME.

pour les gisements de minerais et la prospection minière :

R. SERMENT, en collaboration avec F. LAUZAC.

pour l'extraction des minerais et les mines et carrières :

M. DUCHÊNE, en collaboration avec C. CARON, J. FAVREAU, M. LEBRUN, E. TSEMO.

pour les principaux types de matériaux usuels

— pour les matériaux de construction :

M. BRACHET, en collaboration avec M. BARON et A. RAHARINAIVO.

— pour les matières plastiques :

F. X. de CHARENTENAY.

— pour les matériaux amorphes ; isolants :

A.-M. ANTHONY.

— pour les matériaux d'origine biologique :

G. KROTKINE.

— pour les matériaux composites :

G. VERCHERY.

— pour les métaux et alliages

Principes de l'élaboration des métaux :

C. FRANTZ.

Mise en forme des métaux :

J.-L. CHENOT, J. DURIAU, E. FELDER, D. FÉNOT, D. JOUANIQUE, B. LAVARENNE, F. MONTHEILLET.

G. CIZERON, pour la métallurgie des poudres.

G. BÉRANGER, C. LEMAITRE, pour les traitements thermiques.

R. DORÉ, pour les traitements de surface.

Contrôle et comportements des matériaux :

J. DRIOLE, pour les contrôles physico-chimiques — Analyse.

M. AUCOUTURIER, C. BATHIAS, G. BÉRANGER, pour le comportement des matériaux dans les conditions réelles d'utilisation.

pour la technologie et l'exploitation des fours industriels :

J.-L. THOUVENIN.

A.-M. ANTHONY, pour les fours en milieu oxydant.

Dépôt légal : 4e trimestre 1977.
Imprimé en Italie par I.G.D.A. Officine Grafiche, Novara.

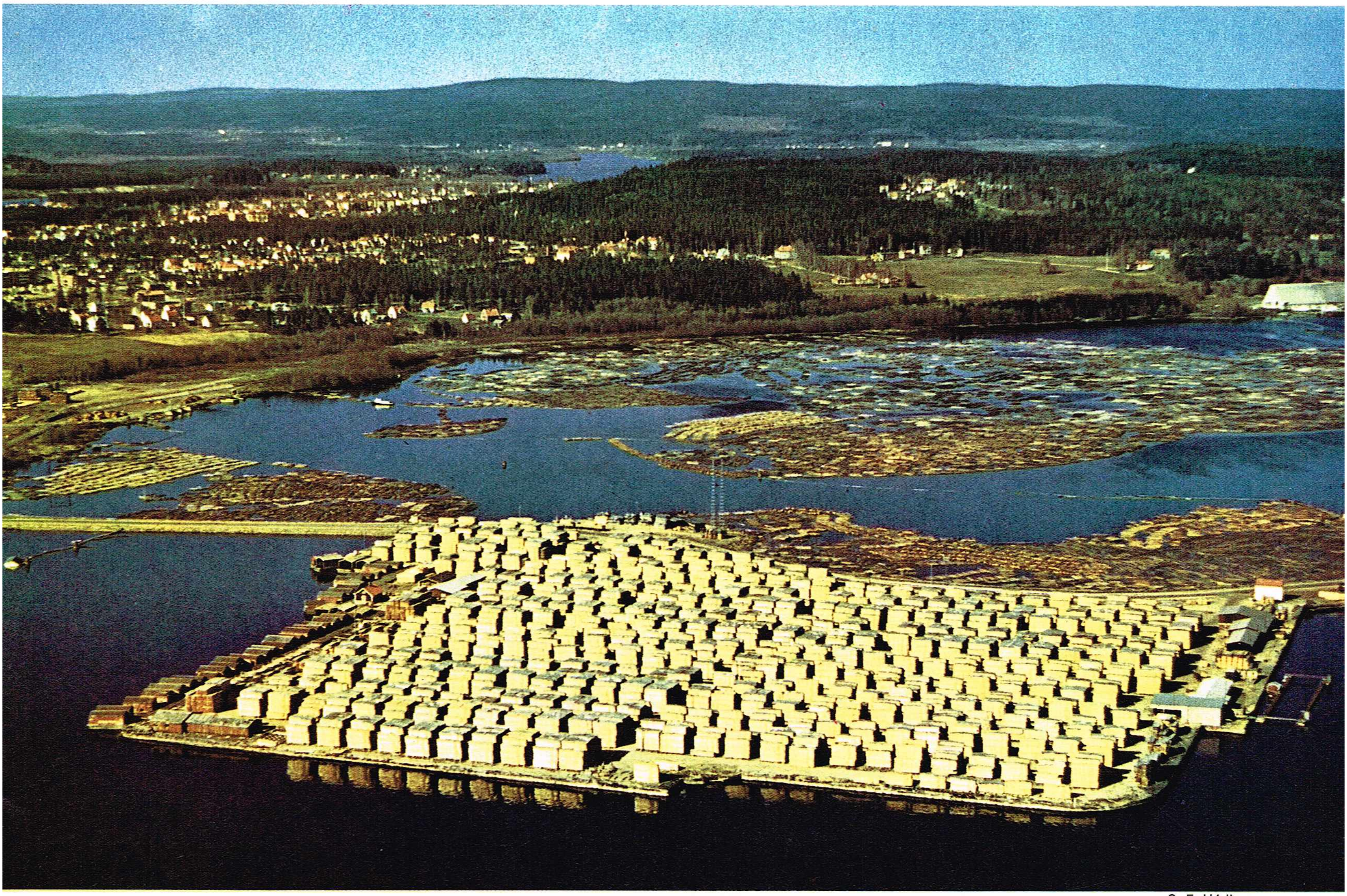

S. E. Hédin

▲ *Scierie aux environs de Sundsvall, centre de l'industrie forestière suédoise. Au premier plan, dépôt de bois en cours de dessiccation.*

LES MATÉRIAUX - STRUCTURES ET PROPRIÉTÉS

Les matériaux, l'homme les fabrique et les utilise chaque jour ; ils font donc partie de notre environnement et, à ce titre, il devrait être facile de les définir. Pourtant, des difficultés surgissent dès que l'on veut le faire d'une façon à la fois précise et complète. Dans une première approche, nous pouvons percevoir un matériau par le toucher ; il est aisé de se rendre compte que le qualificatif de « solide » est approprié. Selon la thermodynamique, l'état solide constitue l'un des trois états fondamentaux de la matière, les deux autres étant l'état gazeux et l'état liquide. Or il y a, à ce niveau, déjà, une difficulté à définir le terme « solide », car les différentes disciplines scientifiques en donnent des définitions différentes. Ainsi, selon les physiciens, ce terme doit être employé pour définir des corps dont les atomes constitutifs présentent un arrangement bien ordonné, c'est-à-dire les corps qui ont une structure cristalline. Or, les matériaux sont très variés ; ils comprennent notamment les métaux, les céramiques, les minéraux, les verres, les textiles, le bois, les polymères et les matériaux composites. Nous constatons ici que certains des matériaux énumérés ne peuvent répondre au terme de « solide » pris au sens physique, dans la mesure où ils ont une structure à caractère amorphe.

Donc, cette notion de matériau, si facile à percevoir, est en fait très variée. Dans un souci de clarification, les matériaux ont été classés pendant très longtemps en catégories distinctes que nous avons brièvement énumérées ci-dessus ; dans chacune de ces catégories se retrouvaient les matériaux qui présentaient de grandes similitudes du point de vue de leurs propriétés, de leurs méthodes d'élaboration et de leurs utilisations. Chaque catégorie était bien séparée des autres dans la mesure où elle avait sa propre nomenclature, sa méthodologie, ses normes. Toute comparaison s'avérait donc très difficile et empêchait toute présentation globale. Or pourquoi ces matériaux sont-ils si différents les uns des autres dans leur aspect ? Pourquoi ont-ils des propriétés mécaniques, physiques, électriques (tableau I) *différentes ? Pour tenter de répondre à de telles questions, une science nouvelle, dite des matériaux, est apparue ; elle a pour but, compte tenu de tout l'acquis scientifique, de développer une théorie unifiée des matériaux en partant d'un niveau fondamental, à savoir celui de la constitution de la matière, et d'expliquer leurs propriétés en termes de structure : expliquer, par exemple, pourquoi tel corps est ductile ou fragile, tel autre isolant ou conducteur, etc.*

Tableau I

Résistivité électrique de quelques matériaux à la température ambiante

Résistivité (en ohms)	Nature du matériau	Désignation
10^{18}	Polyéthylène	Isolants
10^{15}	Sélénium amorphe	
10^{8}	Bromure d'argent	Semi-conducteurs
10^{4}	Silicium pur	
10^{2}	Germanium pur	
1	Germanium dopé (transistor)	
10^{-4}	Bismuth	
10^{-5}	Nickel	Métaux
10^{-6}	Argent, cuivre	

E. Lessing - Magnum

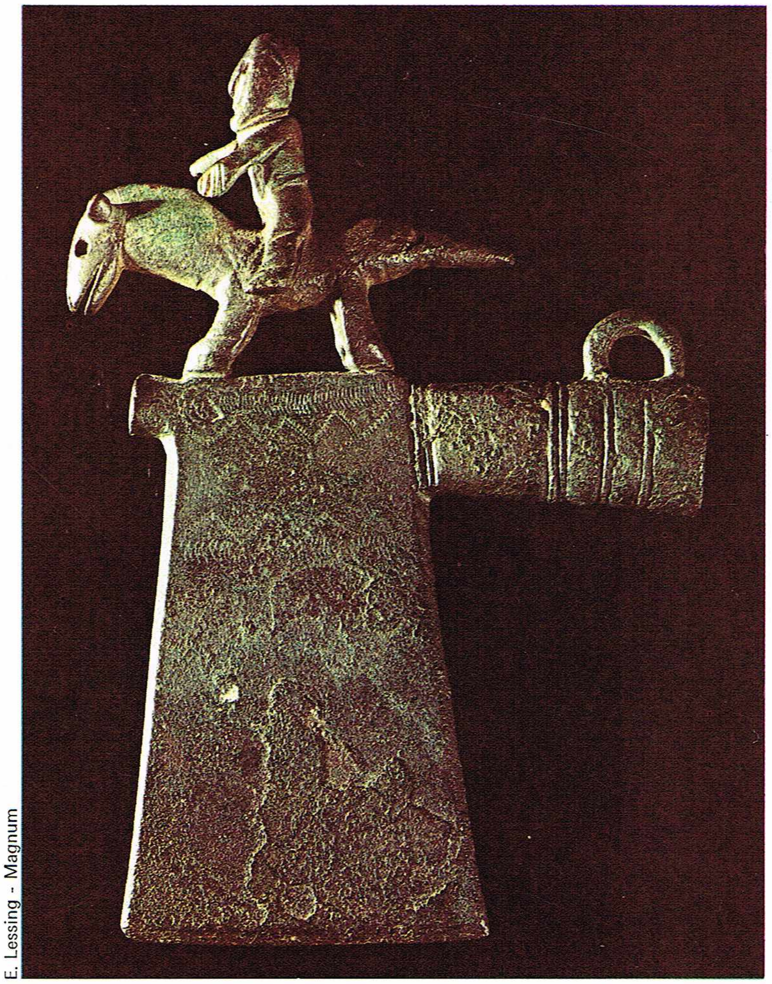

▲ ***Tableau I : résistivité électrique de quelques matériaux à la température ambiante. Hache d'apparat en bronze (850-450 av. J.-C.) [Naturhistorisches Museum, Vienne].***

Cependant, la théorie est plus ou moins développée suivant les domaines concernés, ce qui empêche, là encore, une présentation globale et complète des matériaux. Il faut en effet remarquer que, si les matériaux conditionnent la vie de l'homme et sont de tout temps étroitement associés aux progrès de la civilisation, la science des matériaux est en revanche une science encore jeune. Cela tient au fait que l'homme a disposé pour satisfaire ses besoins de matériaux indispensables comme l'argile, le bois, la laine, etc., qu'il trouvait aisément dans la nature. Il est d'ailleurs significatif de constater que certaines peuplades vivant encore actuellement à l'état « primitif » utilisent toujours ces seuls matériaux. Puis, l'homme a pris conscience qu'il pouvait les transformer pour en obtenir d'autres dont les propriétés étaient plus intéressantes ou différentes. Les premières transformations furent ainsi opérées sur les céramiques par des traitements de cuisson.

De même, après avoir utilisé tout d'abord les métaux à l'état natif comme le cuivre, l'homme en vint à extraire les métaux des minerais, puis à faire des alliages. Ainsi le bronze, alliage de cuivre et d'étain, fut mis au point 3 000 ans av. J.-C. Au bronze succédèrent le fer, l'acier et la fonte, puis apparurent les premières méthodes de mise en forme des métaux et alliages. Pendant des siècles, on utilisa essentiellement les mêmes méthodes et les mêmes alliages. C'est surtout à la fin du XIX^e siècle et au début du XX^e siècle que de nouveaux alliages furent inventés pour répondre à des conditions d'utilisation spécifiques ; toutefois, des raisons technologiques en limitèrent le développement. Ainsi, les aciers inoxydables qui avaient été découverts en 1821 par Bertier (il avait constaté l'effet bénéfique du chrome sur la résistance du fer à la corrosion) ne furent développés industriellement qu'au début du XX^e siècle ; jusque-là, le ferrochrome dont on disposait était trop carburé pour être utilisé comme matière première. On voit comment le développement de nouveaux alliages est très lié au niveau des connaissances.

Les matériaux sont très nombreux et très divers. Leur consommation annuelle en France, par exemple, donne lieu à un classement qui est différent suivant que l'on considère le chiffre d'affaires, le volume ou le tonnage ; en effet, de nombreux paramètres interviennent dans cette comparaison : le prix des matières premières, de l'élaboration et de la transformation des matériaux, les propriétés comme la densité, etc. Lorsque l'ingénieur doit choisir un matériau pour une application donnée, les facteurs technologiques et économiques guident son choix ; mais certaines propriétés sont spécifiques, d'où parfois l'existence de contraintes qui orientent ce choix. La concurrence entre les matériaux, donc entre les secteurs économiques, est très dure.

Pour tous les matériaux, même les plus traditionnels, les progrès survenus permettent d'améliorer leurs propriétés et d'élargir ainsi leurs marchés ou d'en ouvrir de nouveaux. Le classement varie donc énormément d'une année à l'autre ; certains matériaux connaissent des progrès spectaculaires, comme les matières plastiques. Toute nouvelle découverte peut donc à tout moment bouleverser le marché.

DE L'ATOME AU CRISTAL

L'atome

L'ambition de la science des matériaux est d'établir une relation entre leurs propriétés macroscopiques et leur structure microscopique : arrangement des atomes, imperfections dans cet arrangement, forces interatomiques. Les matériaux que nous utilisons chaque jour et ceux qui nous entourent sont en fait des arrangements plus ou moins parfaits d'atomes identiques ou différents. Le type d'arrangement dépend de la nature des atomes et des liaisons qui les unissent.

La structure de l'atome a été traitée en chimie. Rappelons seulement que l'atome est formé d'un noyau entouré d'électrons qui se répartissent en diverses couches et qui sont caractérisés par des nombres quantiques *n, l, m, s*. Ils sont en mouvement continuel sur des trajectoires appelées orbitales, et leur localisation n'est définie que par une probabilité de présence liée au carré de la fonction d'onde ; leur énergie varie de manière discontinue de niveau en niveau.

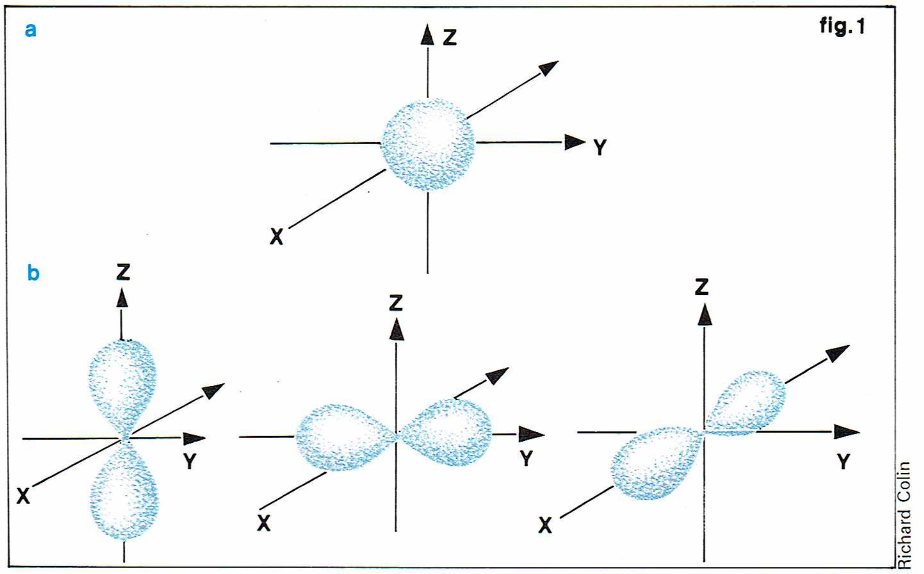

▲ *Figure 1 ; domaine de probabilité de présence : a, d'un électron s (l = 0) ; b, d'un électron p (l = 1).*

Les liaisons chimiques

La façon selon laquelle un atome se liera à un autre atome dépendra très étroitement de la symétrie de la trajectoire des électrons périphériques. Ainsi, suivant la symétrie des domaines de probabilité de présence (*fig.* 1), les liaisons interatomiques seront non orientées ou, au contraire, orientées, ce qui aura une influence très grande sur la structure des « assemblages » d'atomes et sur les propriétés des matériaux, puisqu'elles dépendent étroitement du type de liaison. La connaissance actuelle de la structure atomique et de la liaison chimique doit beaucoup aux travaux de savants prestigieux, créateurs de la théorie des quanta, qui, notamment au cours des Conférences de physique Solvay, firent le point sur leur nouvelle vision de la matière.

Lorsque plusieurs atomes sont en présence, des forces d'attraction et de répulsion s'exercent entre eux. Les premières étendent leur influence sur des distances de plusieurs diamètres atomiques, alors que les secondes ne jouent un rôle qu'aux très faibles distances. Cela explique notamment les difficultés rencontrées pour comprimer la matière dans son état condensé et, en particulier, à l'état solide. Pour une certaine distance optimale entre les atomes, il y a équilibre entre ces forces, et l'énergie potentielle est minimale. La force de liaison F entre des atomes peut être exprimée approximativement par l'équation :

$$F(r) = \frac{A}{r^M} - \frac{B}{r^N} \qquad (N > M)$$

où r représente la distance interatomique mesurée entre les centres des atomes ; A, B, M et N sont des constantes qui dépendent du type de liaison. La *figure* 2 montre la force résultante des deux forces élémentaires ; la position d'équilibre correspond à la distance r_0 pour laquelle cette force résultante est nulle : r_0 varie de 1 à 4 Å suivant le type de liaison ; l'énergie potentielle y est minimale.

Dans un solide, les atomes sont disposés suivant un ordre régulier tridimensionnel définissant le réseau cristallin, où chaque atome est maintenu à sa position d'équilibre par le jeu des forces de cohésion qu'exercent sur lui ses voisins. Par rapport à cette position, l'atome peut se déplacer légèrement, mais moins librement qu'il ne le ferait à l'état gazeux ou même à l'état liquide. On peut, d'une façon imagée, représenter les atomes par des boules empilées et rattachées les unes aux autres par des ressorts (*fig.* 3) qui matérialisent les forces de cohésion ; tous les atomes peuvent vibrer autour de leur position d'équilibre. C'est ce mouvement de vibration qui définit la température du corps solide.

Collection Roger-Viollet

◀ *Conseil de physique Solvay à Bruxelles en 1911 ; debout de gauche à droite : Goldschmidt, Planck, Rubens, Sommerfeld, Lindemann, de Broglie, Knudsen, Hasenhorl, Hostelet, Herzen, Jeans, Rutherford, Kamerlingh, Onnes, Einstein, Langevin. Assis de gauche à droite : Nernst, Brillouin, Solvay, Lorentz, Warburg, Perrin, Wien, Madame Curie et Poincaré.*

▶ *Figure 2 : force interatomique F en fonction de la distance interatomique r.*

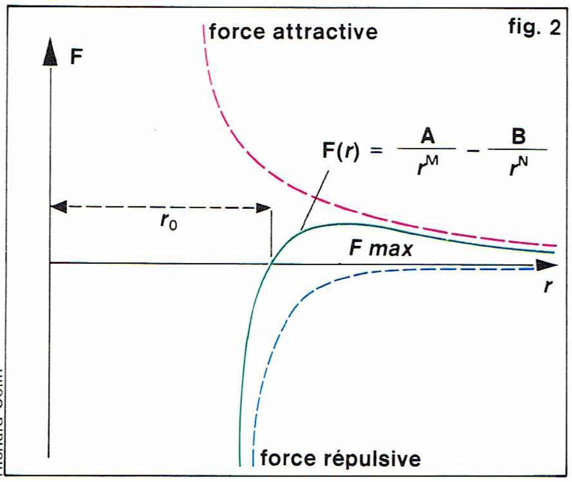

▶ *Figure 3 : forces de cohésion schématisées par des ressorts qui maintiennent les atomes de cristal (d'après K. Mendelssohn). Figure 5 : a, carbone tétraédrique ; b, structure du diamant.*

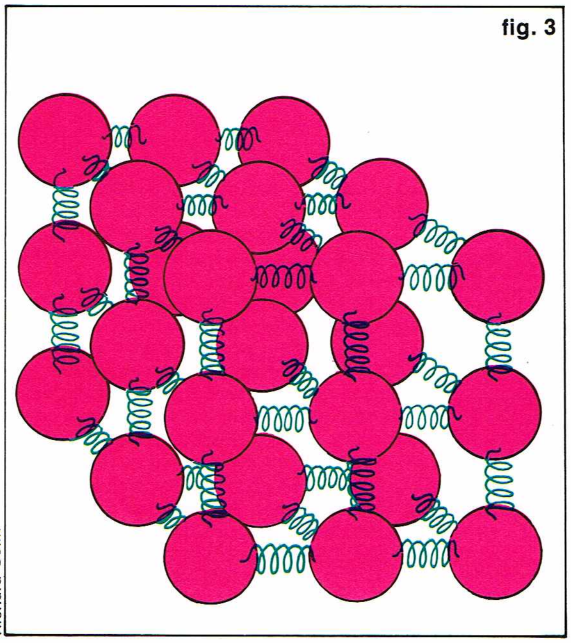

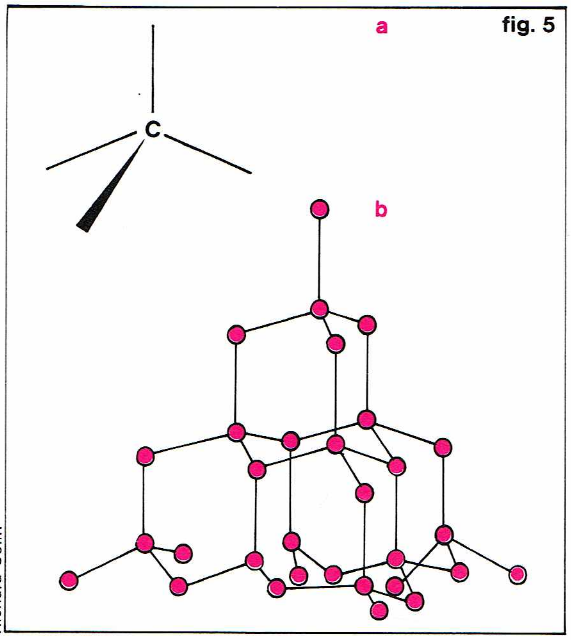

L'énergie potentielle entre deux atomes est définie comme le travail fourni par les forces agissantes quand le système revient à une configuration donnée :

$$U = \int F(r)\, dr = \int \left(\frac{A}{r^M} - \frac{B}{r^N}\right) dr$$

$$= -\frac{a}{r^m} + \frac{b}{r^n}$$

a et b sont deux constantes liées à A et B ; $m = M - 1$, et $n = N - 1$ (d'où $n > m$, car $N > M$).

$\frac{dU(r)}{dr} = F(r)$; pour $r = r_0$, $F(r) = 0$. De plus,

$$\frac{d^2U(r)}{dr^2} = \frac{dF(r)}{dr}.$$

Cela représente la pente de la tangente à la courbe F (r). Pour la position $r = r_0$, cette pente est positive. Il en résulte que la distance d'équilibre stable de l'atome dans tout solide correspond à une configuration d'énergie potentielle minimale. Pour écarter l'atome de cette position d'équilibre, il faut fournir de l'énergie au système. L'énergie de liaison est l'énergie nécessaire pour séparer totalement les atomes. Cette énergie est donnée par l'expression :

$$U(r) = \int_{r_0}^{\infty} F(r)\, dr,$$

soit encore l'aire de la surface sous-tendue par la courbe F (r) depuis la position d'équilibre r_0 jusqu'à l'infini.

La nature de la liaison entre deux ou plusieurs atomes, c'est-à-dire l'origine des forces mises en jeu, conduit à distinguer plusieurs cas.

Les liaisons directionnelles

Si nous considérons deux atomes, il peut y avoir partage des électrons de liaison entre deux noyaux, formant ainsi une liaison résistante nommée la *liaison covalente*. La distribution spatiale des électrons est modifiée, que les orbitales soient de type *s*, *p* ou *d* (*fig.* 4) ; elle est commune aux deux atomes. Cette mise en commun d'électrons est possible, que les atomes soient de même nature ou de nature différente.

La liaison covalente est très fréquente. Ainsi, dans l'eau, il y a partage des électrons entre deux orbitales 2p de l'oxygène et les orbitales 1s de deux atomes d'hydrogène. De même, dans le diamant, qui est constitué de carbone, chaque atome est hybridé sp^3, c'est-à-dire que les quatre électrons de la couche de valence occupent quatre orbitales hybrides dont les axes font entre eux des angles de 109° 28′. Le carbone est tétravalent. Chaque atome de carbone échange donc quatre liaisons de force égale avec quatre atomes de carbone voisins ; ces quatre liaisons dessinent un tétraèdre régulier (*fig.* 5) ; on obtient ainsi une structure très rigide et très dure. D'une façon générale, le nombre de liaisons possibles pour un atome donné est limité par la valence de l'atome et, de plus, la liaison est directionnelle, c'est-à-dire que l'angle formé entre les liaisons est déterminé.

Ce type de liaison se retrouve également dans les composés à base de carbone et d'hydrogène. Le composé le plus simple est le méthane CH_4, obtenu en plaçant des atomes d'hydrogène aux sommets du tétraèdre ; on peut aussi unir deux carbones entre eux en assemblant les tétraèdres par le sommet, et obtenir C_2H_6, l'éthane ; puis trois carbones, on obtient le propane C_3H_8, et ainsi de suite ; on peut encore assembler les tétraèdres par une arête ou par une face. On obtient ainsi toute une variété de composés avec des liaisons simples, doubles ou triples, qui peuvent constituer de longues chaînes. La liaison

▼ *Figure 4 : orbitales moléculaires par mise en commun d'électrons ; a, cas de la molécule d'hydrogène ; b, cas de la molécule de chlore.*

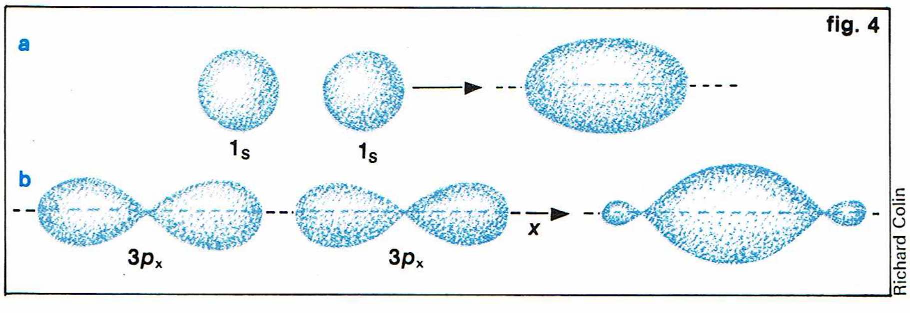

covalente est localisée et dirigée dans l'espace. De plus, il résulte des propriétés de cette liaison que les composés covalents n'ont pas d'électrons libres : ils sont donc de mauvais conducteurs de la chaleur et du courant électrique.

Les molécules covalentes se comportent souvent comme des dipôles électriques; cela provient du fait que les barycentres des charges positives et négatives ne sont pas confondus. Dans la molécule d'eau, par exemple, qui est une molécule coudée, la charge négative est proche de l'oxygène, alors que la résultante des charges positives est située entre les atomes d'hydrogène (*fig.* 6). Ce dipôle peut attirer d'autres dipôles ou être attiré par des ions (cas de l'hydratation ou, plus généralement, de la solvatation). Ces liaisons sont également orientées. Du fait de sa petite taille, l'hydrogène joue un rôle particulier comme pôle positif : c'est ce qu'on appelle la *« liaison hydrogène »,* qui se manifeste dans le cas de la glace. Il s'agit d'une liaison faible.

Les liaisons non directionnelles

Deux liaisons répondent à cette caractéristique : la liaison ionique et la liaison de Van der Waals. Certains atomes ont une grande affinité pour les électrons : ils sont électronégatifs. Ils vont donc avoir une forte tendance à s'ioniser négativement. C'est le cas des métalloïdes et plus particulièrement des halogènes (éléments de la septième colonne de la classification périodique : fluor, chlore, brome et iode). Au contraire, d'autres éléments auront une forte tendance à céder un ou plusieurs électrons et donc à s'ioniser positivement; ils sont électropositifs. Ce caractère plus ou moins électronégatif ou, au contraire, plus ou moins électropositif des éléments est caractérisé par une valeur dans l'échelle dite de Pauling. La proximité de deux ions de charges opposées va entraîner une attraction, d'où une force de liaison d'origine coulombienne : c'est la *liaison ionique*. En fait, le rapprochement des ions provoque des interactions entre les orbitales et donc une force de répulsion. Pour une certaine position, il y aura équilibre, et l'énergie potentielle sera alors minimale. Cette liaison est non directionnelle. Comme dans le cas de la liaison covalente, les matériaux ioniques ne possèdent pas d'électrons libres : ils sont de mauvais conducteurs de la chaleur et du courant électrique.

La liaison ionique et la liaison covalente constituent les liaisons fondamentales. Les liaisons qui interviennent dans les composés ne sont pas forcément pures; ces deux types de liaisons peuvent interférer : on a alors un phénomène de résonance. Si, dans le fluorure de lithium, la liaison est purement ionique, par contre, dans la silice SiO_2, elle est à moitié ionique et à moitié covalente.

Nous avons vu, dans le cas des liaisons directionnelles, qu'il pouvait exister des dipôles. Dans certains cas, il peut y avoir formation aléatoire et fluctuante de dipôles, à cause de la répartition non homogène des électrons autour du noyau à un instant donné : il y a plus d'électrons d'un côté que de l'autre. Il en résulte à cet instant donné la formation d'un dipôle qui peut en attirer un autre; l'instant suivant, ce dipôle sera modifié. La *liaison* qui en résulte est dite *de Van der Waals*. Cette liaison est très faible, plus faible que la liaison hydrogène. Pourtant, elle joue un rôle important dans la structure des polymères à qui elle permet, à la température ordinaire, d'être à l'état solide. Ce sont ces liaisons qui expliquent aussi pourquoi il est possible de solidifier les gaz rares par refroidissement à basse température, alors que leurs atomes, chimiquement inertes, à cause de la saturation qui caractérise leur structure électronique, ne constituent pas de molécules à l'état gazeux.

La liaison métallique

Cette liaison est considérée à part, car, pour la décrire, il faut prendre en compte non pas un atome individuel mais tout un ensemble d'atomes. Elle résulte, comme la liaison covalente, du partage d'un électron entre plusieurs noyaux, ce qui entraîne une diminution d'énergie. Mais là s'arrête l'analogie, car il faut considérer la mise en commun des électrons par tous les atomes : ces derniers vont constituer des ions baignés par un gaz d'électrons, lequel a une grande mobilité et assure la liaison entre les ions.

fig. 6

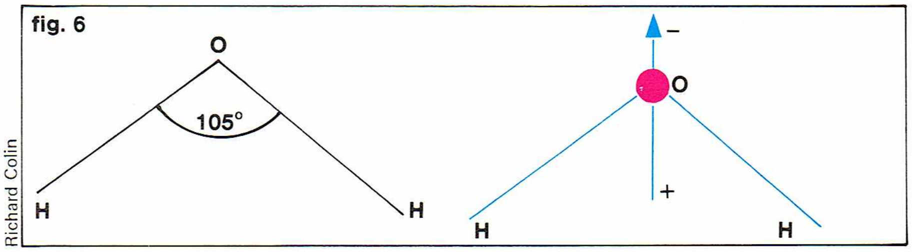

Richard Colin

▲ *Figure 6 : la molécule d'eau, et représentation en dipôle.*

▼ *Tableau II : consommation de différents matériaux en France (1967).*

Tableau III : classification périodique des éléments.

Tableau II
Consommation de différents matériaux en France (1967)

Matériaux	Consommation en millions de tonnes	Consommation en milliards de francs
Métaux ferreux	16	12,3
Métaux non ferreux	1	3,6
Produits minéraux et matériaux pour la construction	≃ 300	9,2
Verres	1,9	2
Caoutchouc et matières plastiques	1,2	2,9
Textiles	0,5	6,5
Bois	1,7	2
Papiers et cartons	44	4

Tableau III
Classification périodique des éléments

Groupes / Périodes	I A	II A	III A	IV A	V A	VI A	VII A	VIII			I B	II B	III B	IV B	V B	VI B	VII B	0
1	H 1																	He 2
2	Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
3	Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
4	K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
5	Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
6	Cs 55	Ba 56		Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86
7	Fr 87	Ra 88																
			Lanthanides →	La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71
			Actinides →	Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lw 103

fig. 7

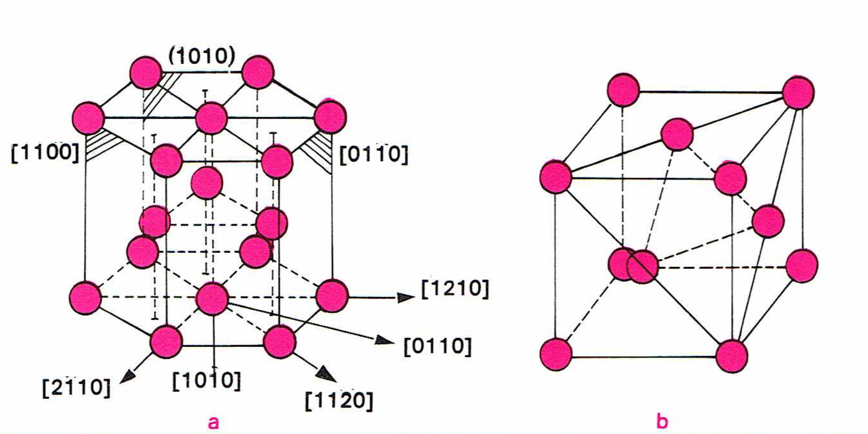

Richard Colin

▲ *Figure 7; empilements compacts :* *a, structure hexagonale compacte (h. c.);* *b, structure cubique à faces centrées (c. f. c.).*

L'attraction des électrons sur les ions l'emporte sur la répulsion des ions entre eux et des électrons entre eux. La liaison métallique est d'autant plus forte que l'atome métallique perd plus facilement ses électrons de valence, c'est-à-dire qu'il en a moins. Ainsi, la liaison métallique sera très forte pour le sodium, le potassium, le cuivre et l'argent. Par contre, les atomes qui possèdent plusieurs électrons de valence les perdent moins aisément : il y a alors compétition entre la liaison métallique et la liaison covalente; les métaux de transition tels que le fer, le nickel et le titane présentent cette particularité. Cette compétition entre les deux types de liaison est en faveur de la liaison métallique, comme pour le plomb, ou en faveur de la liaison covalente, comme pour le silicium et le germanium. L'étain existe sous deux formes, l'une à caractère métallique, l'autre à caractère covalent.

Ce type de liaison implique que les matériaux métalliques auront des conductibilités thermiques et électriques élevées; il peut également expliquer les propriétés optiques des métaux : ces matériaux sont opaques, car les électrons libres absorbent les photons lumineux; toutefois, ils sont brillants, car ces électrons réémettent l'énergie absorbée sous forme de photons. De même, les propriétés mécaniques des matériaux métalliques découlent des caractéristiques de cette liaison.

Les structures des matériaux

La structure cristalline

▼ *Tableau IV : métaux de structure simple. Ci-dessous à droite, cristaux de pyrite : exemple de structure cubique à face centrée.*

Les matériaux les plus compacts, les mieux ordonnés, sont les corps cristallisés dans lesquels les atomes se disposent de telle manière que le système soit dans un état d'énergie potentielle minimale. Pour cela, il suffit de considérer les atomes comme des sphères dures et de les empiler de la façon la plus compacte. Si nous considérons le cas de matériaux comportant des liaisons non directionnelles et constitués d'atomes de même diamètre, le nombre maximal de sphères qui peuvent être mises en contact avec une sphère centrale est douze. Cette disposition peut se répéter et constituer un ensemble ordonné à grande distance. Rappelons que le cristal est un ensemble d'atomes distribués régulièrement dans l'espace selon trois directions. Deux structures cristallines présentent cet empilement compact : la structure hexagonale compacte (*fig.* 7a) et la structure cubique à faces centrées (*fig.* 7b). Dans certains cas, l'obtention de ces structures très compactes n'est pas réalisable; la structure est alors moins dense, comme dans le cas de la structure cubique centrée où le nombre de voisins autour d'un atome donné est de huit. Ces structures sont fréquentes dans le cas des métaux et des cristaux ioniques (*tableau* IV). En général, à basse température, les structures compactes sont les plus stables et se transforment en structures moins compactes à haute température; mais cette règle souffre de nombreuses exceptions.

Examinons rapidement ces structures afin de préciser la position des atomes.

● *Structure cubique à faces centrées (c. f. c.).* Dans cette structure, il y a 4 atomes par maille. La coordinence est 12, et la distance interatomique $\frac{a\sqrt{2}}{2}$. Les plans denses (111) sont au nombre de quatre. Les directions denses ⟨110⟩ sont au nombre de trois dans chaque plan (111). Dans ce plan, les atomes sont ordonnés de façon à constituer un hexagone centré.

● *Structure hexagonale compacte (h. c.).* On considère le prisme droit à base hexagonale, bien qu'en fait la maille élémentaire soit un prisme droit à base losange; il y a deux atomes par maille. La coordinence est 12; les plans denses sont les plans de base (0001) dans lesquels la distance interatomique est *a*. Les directions denses ⟨1120⟩ sont au nombre de trois dans chaque plan dense. On caractérise cette structure par deux paramètres cristallins *a* et *c*. Chaque atome a donc six voisins à la distance *a* dans le plan de base (0001) et six voisins hors du plan de base à la distance d : $d^2 = \frac{c^2}{4} + \frac{a^2}{3}$. Si la structure est idéale, $d = a$:

$$\frac{c^2}{4} = a^2 - \frac{a^2}{3} = \frac{2\,a^2}{3}$$

et

$$\frac{c}{a} = \sqrt{\frac{8}{3}} = 1{,}633.$$

Certains métaux, comme le béryllium $\left(\frac{c}{a} = 1{,}658\right)$, ont un rapport $\frac{c}{a}$ inférieur à celui de l'empilement compact idéal; pour d'autres au contraire, comme le zinc il est supérieur $\left(\text{pour le zinc, par exemple, } \frac{c}{a} = 1{,}856\right)$.

Tableau IV
Métaux de structure simple

Structure hexagonale centrée (h · c)	Structure cubique à faces centrées (c · f · c)	Structure cubique centrée (c · c)
Be, Mg	Mnγ	Alcalins
Tiα, Zrα, Hfα	Feγ, Coβ, Ni	Alcalino-terreux
Tc, Re	Rh, Pd, Ir, Pt	Tiβ, Zrβ, Hfβ
Feε, Ru, Os	Cu, Ag, Au	V, Nb, Ta
Coα	Al	Cr, Mo, W
Zn, Cd		Mnδ
		Feα, Feδ
		Uγ

H. Chaumeton - Jacana

Ces deux structures h. c. et c. f. c. présentent une distribution identique des atomes dans les plans compacts : (111) pour la structure c. f. c. et (0001) pour la structure h. c. Par contre, elles diffèrent dans la succession des plans compacts, donc dans l'empilement des atomes. On définit les deux types d'empilement par les désignations ABC ABC ... pour la structure c. f. c., ABABAB ... pour la structure h. c. Des erreurs peuvent se produire dans l'empilement des atomes : on les appelle défauts d'empilement.

● *Structure cubique centrée*. Elle comporte deux atomes par maille. La structure n'est pas compacte. Chaque atome a huit proches voisins situés à la distance $\frac{a\sqrt{3}}{2}$ et six seconds voisins à la distance *a*.

Certains métaux ne cristallisent pas dans l'un de ces trois systèmes, mais dans un système de symétrie plus faible. Ainsi, l'uranium α est orthorhombique (*fig.* 8).

Dans les cristaux à caractère covalent, le nombre de liaisons contractées par chaque atome est le facteur le plus important. L'exemple type est celui du diamant, dans lequel chaque atome de carbone est entouré par quatre autres atomes de carbone ; la coordinence est quatre. Ces quatre atomes de carbone vont se disposer autour de l'atome central en constituant un tétraèdre régulier. Le cristal de diamant est constitué d'un assemblage de tels tétraèdres qui confère à la structure une grande résistance, une grande dureté et sa rigidité. D'autres éléments de la famille du carbone (silicium, germanium notamment), qui ont aussi quatre électrons de valence, donnent naissance à des cristaux semblables.

Les cristaux non métalliques

Dans le cas des composés ioniques, nous nous trouvons en présence d'ions. Leur grandeur relative va déterminer le nombre d'ions entourant un ion donné de signe contraire. Ainsi, dans le chlorure de sodium, le rayon ionique de l'ion Cl^- est 1,81 Å, tandis que celui de Na^+ est 0,98 Å, soit la moitié environ. Dans ce cas, six ions Cl^- seulement peuvent être groupés autour d'un ion Na^+ et, puisque le nombre des deux espèces d'ions doit être le même, pour assurer la neutralité électrique, la structure sera cubique, constituée de deux structures c. f. c. imbriquées. Par contre, dans le cas du chlorure de césium CsCl pour lequel les rayons ioniques sont respectivement de 1,70 Å pour Cs^+ et 1,81 Å pour Cl^-, donc de grandeurs voisines, on peut placer huit ions Cl^- autour de chaque ion Cs^+. On obtient une structure cubique dans laquelle l'ion Cs^+ est au centre du cube et les ions Cl^- sur les sommets. La répulsion cation-cation (du fait de l'effet de taille du cation par rapport à l'anion) conditionne la stabilité de l'édifice cristallin, et, par conséquent, plus la charge des cations est faible, plus la structure sera compacte. Si le cation comporte deux charges positives, les forces de répulsion ne sont pas encore suffisamment énergiques pour empêcher la formation d'une structure compacte ; c'est le cas de la magnésie MgO par exemple.

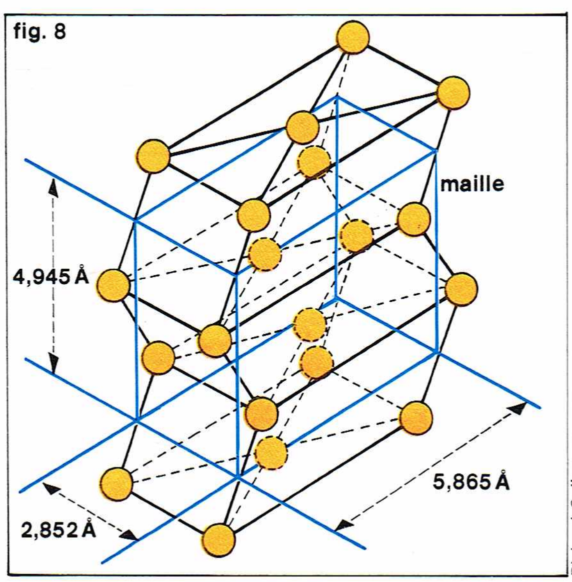

Si la charge du cation augmente, la structure devient de moins en moins compacte. Parfois, le composé n'existe que rarement sous forme cristalline ; c'est le cas de l'oxyde de bore B_2O_3 qui existe plutôt à l'état vitreux. On pourrait de même discuter de la structure de la silice SiO_2 cristalline.

Certains éléments sont situés à la limite séparant les métaux des non métaux et ont tendance à former des structures issues de la combinaison des liaisons métalliques et covalentes : le graphite en constitue un exemple. Les atomes de carbone utilisent seulement trois de leurs liaisons covalentes ; il subsiste un électron de valence susceptible de participer à une liaison métallique. Il en résulte que chaque atome de carbone va être entouré dans un plan de trois atomes de carbone disposés en triangle ; les atomes sont ainsi à 1,42 Å de l'atome central, et la disposition d'ensemble constitue des feuillets hexagonaux (*fig.* 9). La liaison métallique fait intervenir le quatrième électron libre et maintient les feuillets à une distance de 3,4 Å les uns des autres. L'antimoine, le mica ainsi que le talc présentent un réseau analogue.

▼ ***En bas à gauche, figure 8 : maille orthorhombique de l'uranium α. Ci-dessous : monocristaux de diamant brut. En bas, à droite : micrographie électronique de graphite pyrolytique bombardé par des ions oxygène sous un angle de 90°.***

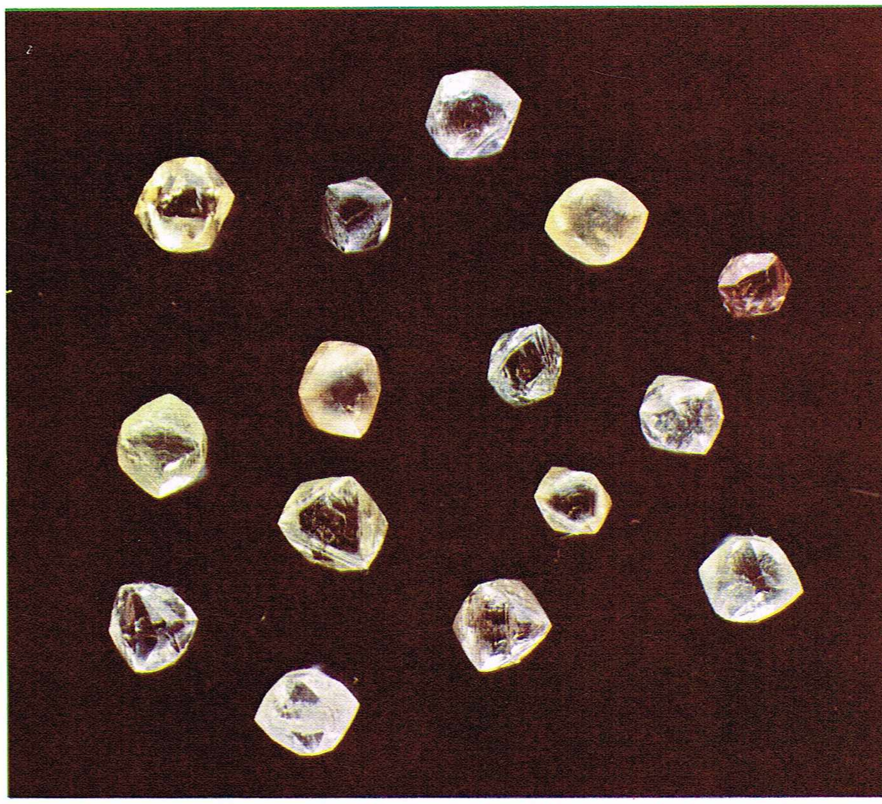

Lab. de physique des matériaux de Bellevue - Centre national de la recherche scientifique

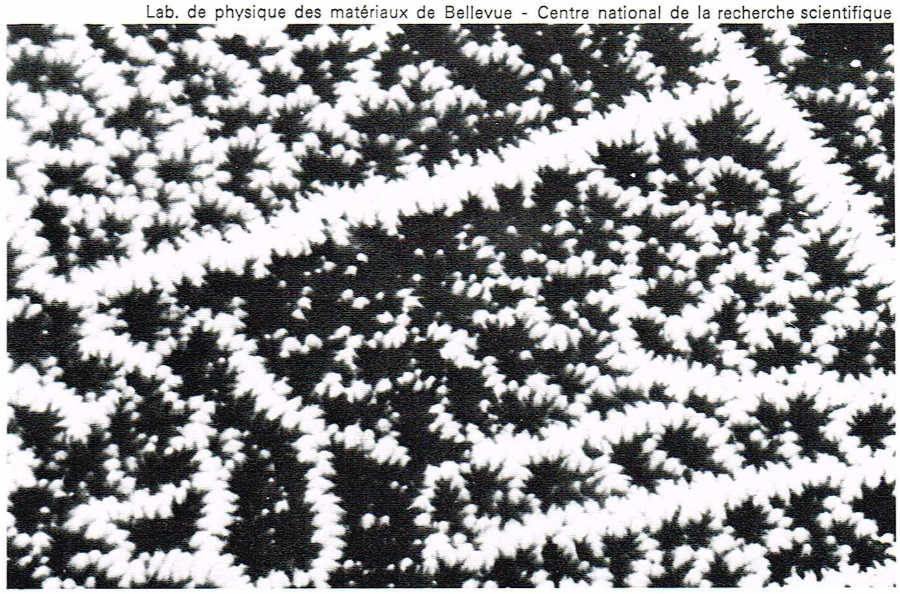

▶ *Figure 9 : structure du graphite.*

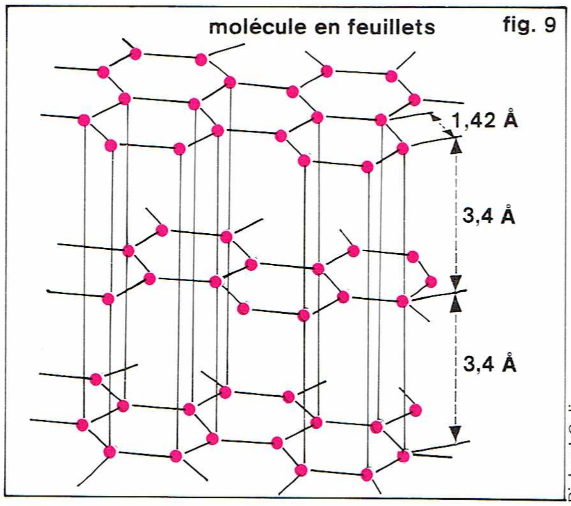

Richard Colin

Les cristaux moléculaires

Lorsque deux atomes sont liés entre eux par une liaison très forte, ils peuvent former une molécule et conserver ce caractère d'individu moléculaire dans une structure rigide cristalline. On obtient des cristaux moléculaires dont la cohésion est assurée par des liaisons faibles, soit de Van der Waals, soit hydrogène. Ainsi, dans la glace, les liaisons hydrogène vont lier les molécules d'eau entre elles et conférer à l'ensemble une structure hexagonale.

Les liaisons de Van der Waals vont intervenir dans le cas des molécules organiques à longue chaîne et lier celles-ci entre elles. Si la symétrie transversale est suffisante, les composés peuvent cristalliser suivant des systèmes de faible symétrie. On peut alors obtenir des structures monocliniques ou orthorhombiques. Ainsi les chaînes de polyéthylène peuvent-elles se disposer parallèlement les unes aux autres et constituer une structure orthorhombique. Il est important de remarquer que cette distribution ordonnée ne s'étend pas sur de grandes distances, car les chaînes, au-delà de quelques centaines d'angströms, s'enchevêtrent ; on obtient de petits cristallites séparés par des zones plus désordonnées, dites amorphes. On a pu isoler des cristaux de polyéthylène.

Les matériaux non cristallins

De très nombreux matériaux ne sont pas cristallisés : ils ne présentent pas de distribution ordonnée sur une moyenne ni, à plus forte raison, sur une grande distance. Toutefois, à courte distance, ils présentent un certain état d'ordre, ce qui leur confère leur rigidité. Ces matériaux sont appelés *corps amorphes* ou *vitreux*. Ils sont constitués de molécules ou d'individus chimiques bien structurés, mais assemblés d'une façon peu ordonnée. Ainsi le réseau de la silice amorphe présente une grande irrégularité par comparaison avec le quartz cristallin pour lequel on observe un réseau bien régulier (*fig.* 10). Dans cette catégorie, on retrouve aussi de nombreux polymères ainsi que des composés minéraux.

Les matériaux amorphes n'ont pas de point de fusion bien défini ; l'élévation de la température provoque un phénomène de ramollissement.

Certains corps vitreux sont transparents, car ils ne possèdent pas d'électrons libres susceptibles d'absorber les photons lumineux. Pour la même raison, ils sont de mauvais conducteurs. Un exemple très intéressant à signaler dans cette catégorie de matériaux est celui du verre.

Mentionnons toutefois que l'état vitreux est à un niveau d'énergie supérieur à celui de l'état cristallisé — il devrait donc être moins stable ; mais la mise en ordre requiert que les ions puissent se déplacer dans le solide pour lui conférer la structure cristalline ; ce déplacement, appelé phénomène de diffusion, requiert de l'énergie. Or, la température étant faible, l'activation thermique est faible et le système conserve sa structure métastable.

Le cristal réel - Les défauts cristallins

Dans la description d'un solide cristallin, nous avons supposé que l'arrangement des atomes était parfait. Or tout solide cristallin présente des défauts : défauts ponctuels, défauts à une dimension et défauts bidimensionnels.

Les défauts ponctuels

Il s'agit ici des défauts qui intéressent les sites atomiques individuels. Certaines positions atomiques ne sont pas occupées, ou bien des atomes occupent des positions interstitielles, c'est-à-dire les vides laissés par les atomes entre eux (*fig.* 11). Les défauts correspondants seront

▼ *Figure 10 : structure de la silice ; a, à l'état cristallin ; b, à l'état vitreux. Exemples de quartz cristallin, le quartz citrin (à gauche), et de silice amorphe, l'opale (à droite).*

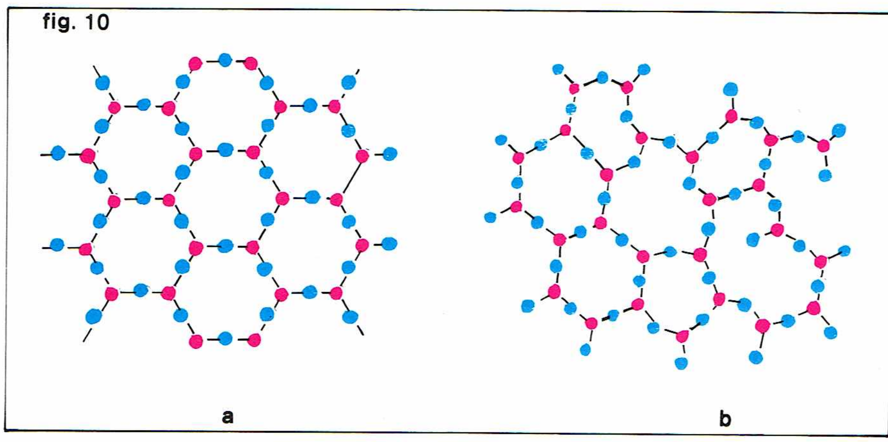

Richard Colin

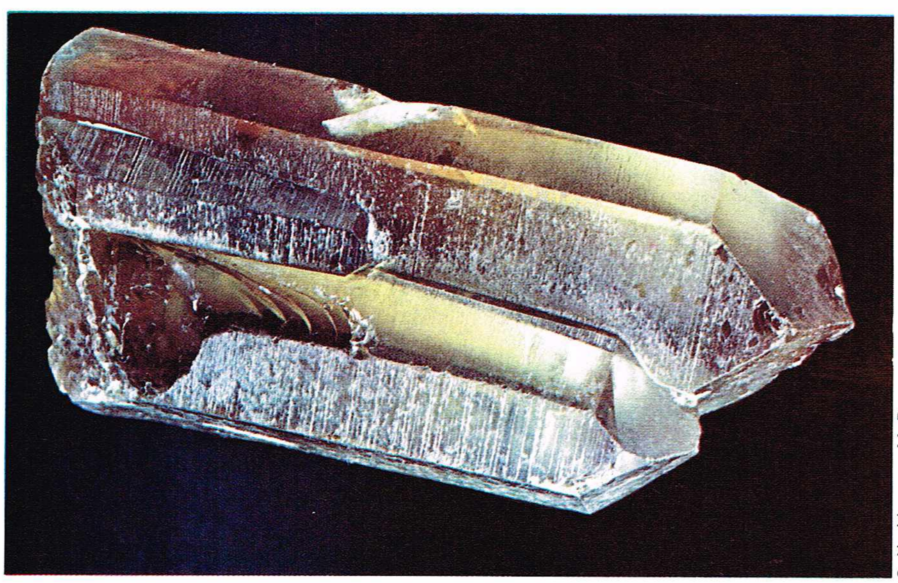

C. Nuridsany et M. Perennou

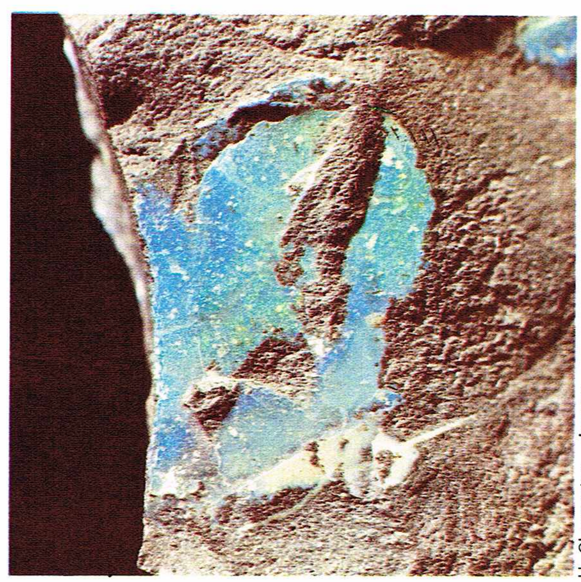

H. Chaumeton - Jacana

appelés respectivement des *lacunes* et des *interstitiels*. Certains défauts peuvent coalescer et constituer des défauts plus complexes, comme les bilacunes, constituées de deux lacunes en position de premiers voisins. Les atomes étrangers sont aussi des défauts ponctuels; ces atomes peuvent être en insertion ou en substitution dans le réseau. Afin d'éviter toute confusion, lorsqu'un atome du réseau de base est en insertion, on parle d'auto-interstitiel; cela permet une distinction avec les atomes étrangers en position interstitielle (carbone dans le fer, oxygène dans le titane).

De nombreux faits expérimentaux montrent que les lacunes et les interstitiels sont créés dans les matériaux soit par déformation plastique (écrouissage), soit par irradiation, soit encore par agitation thermique. La façon commode de créer des défauts ponctuels est en effet de chauffer le réseau; à toute température supérieure au zéro absolu (0 °K), le réseau en équilibre thermodynamique comporte un nombre bien déterminé de lacunes. A chaque défaut créé, il correspond une variation de l'enthalpie libre du cristal ΔG_f, suivant la relation thermodynamique : $\Delta G_f = \Delta H_f - T\Delta S_f$, ce qui revient à calculer la variation d'enthalpie ΔH_f et d'entropie ΔS_f lors de la formation du défaut. Lors de la création d'une lacune, il faut tenir compte de la réduction de volume, δV_f, grandeur appelée volume de relaxation et qui traduit le fait que le volume de la lacune est inférieur au volume atomique; à la relaxation des atomes voisins de la lacune est associé un gain d'énergie élastique.

Si un site est vacant, l'atome voisin va pouvoir l'occuper; il en résulte qu'au saut de l'atome va correspondre un saut inverse de la lacune. Pour ce faire, l'atome migrant doit écarter les atomes voisins, c'est-à-dire effectuer un certain travail. Autrement dit, l'atome doit franchir une barrière d'énergie pour passer de son propre site au site vacant; cette barrière d'énergie correspond à l'enthalpie de migration ΔH_m. On pourrait faire la même description pour les interstitiels. Le *tableau* V donne les valeurs de ΔH_f et ΔH_m d'après les évaluations théoriques dans le cas du cuivre.

A chaque température correspond une concentration d'équilibre de ces défauts. En effet, on peut écrire pour la variation d'enthalpie libre du cristal causée par la formation de n_l lacunes à la température T :

$$\Delta G = n_l \Delta G_f - T\Delta S\,;$$

or, d'après la relation de Boltzmann, $\Delta S = k \log P$, où k est la constante de Boltzmann et P le nombre de façons de distribuer les lacunes sur les sites du cristal.

L'état d'équilibre du cristal sera défini par :

$$\left(\frac{\partial \Delta G}{\partial n_l}\right)_T = 0.$$

On aboutit ainsi à la relation : $N_l = \exp \dfrac{\Delta S_f}{k} \exp -\dfrac{\Delta H_f}{kT}$

où N_l est la fraction atomique de lacunes. Cette relation montre que la concentration en lacunes croît avec la température selon une loi exponentielle (*fig.* 12). Dans le cas des auto-interstitiels, on aboutit à une relation du même type. Les concentrations de défauts dans le cuivre sont indiquées dans le *tableau* VI. On constate que dans un métal les seuls défauts atomiques ponctuels créés par agitation thermique sont les lacunes.

Diverses méthodes expérimentales permettent d'observer les défauts et d'en mesurer la concentration : mesures dimensionnelles, thermodynamiques, électriques, par

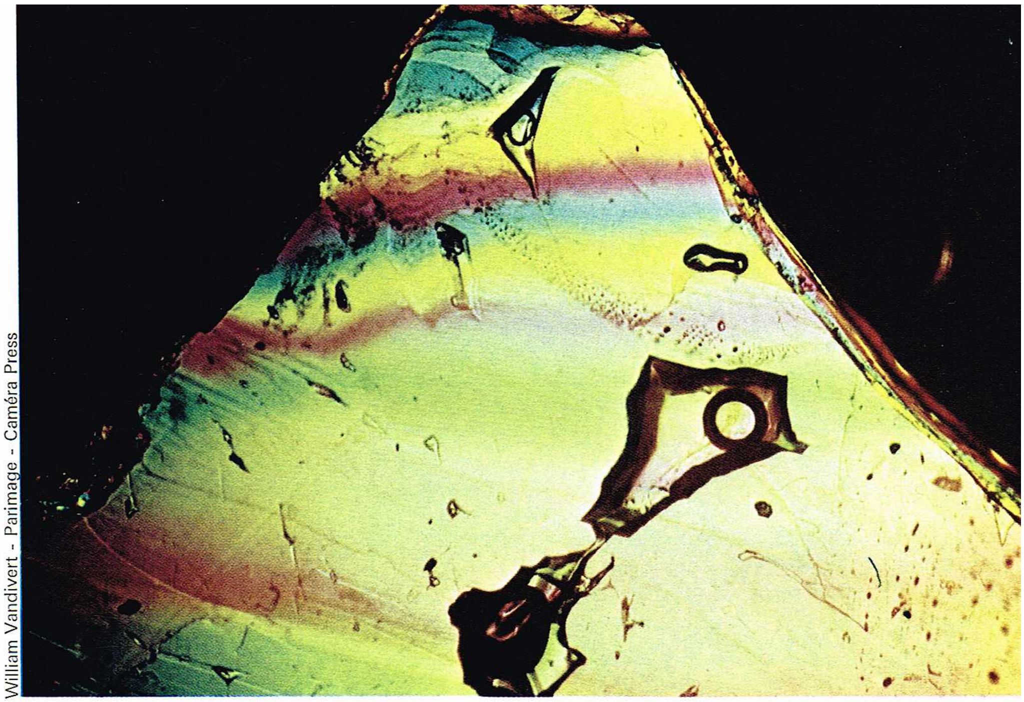

William Vandivert - Parimage - Caméra Press

▲ *Inclusion dans une topaze. Les deux parties sont encore reliées par un tube fin. L'une contient une grosse bulle de gaz, l'autre une plus petite.*

Tableau V - Variations de H_f et H_m dans le cas du cuivre

Défauts	Variations d'enthalpie ΔH_f (en eV)	Variations de l'enthalpie de migration ΔH_m (en eV)
Lacunes	1	1
Auto-interstitiels	4	0,1

◀ *Tableau V : variations de H_f et H_m d'après des évaluations théoriques dans le cas du cuivre.*

fig. 12

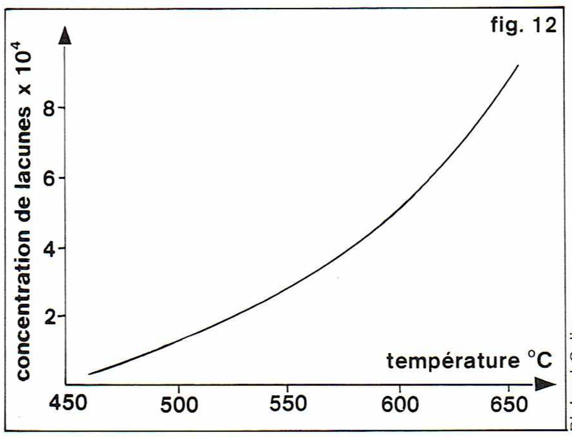

Richard Colin

◀ *Figure 12 : variation de la concentration en lacunes à l'équilibre dans l'aluminium en fonction de la température.*

fig. 11

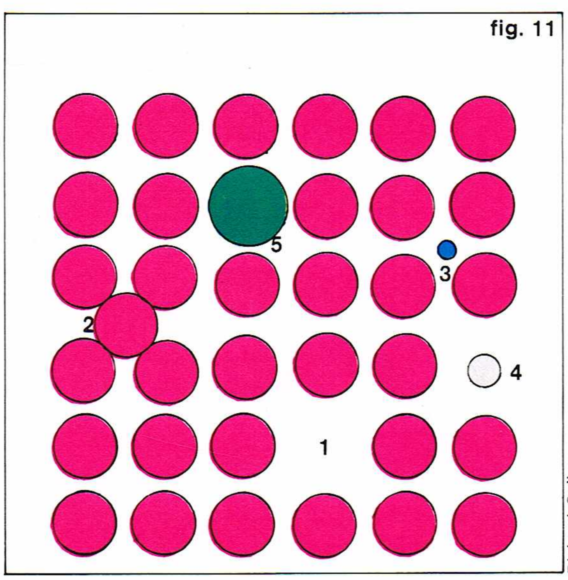

Richard Colin

Tableau VI
Concentration de défauts dans le cuivre en fonction de la température

Défauts \ Température (en °K)	300	800	1300
Lacunes	10^{-17}	$6 \cdot 10^{-7}$	$1{,}3 \cdot 10^{-4}$
Interstitiels	10^{-67}	10^{-25}	10^{-15}

◀ *Figure 11 : différents types de défauts atomiques ponctuels ; 1, lacune ; 2, auto-interstitiel ; 3, atome interstitiel étranger ; 4 et 5, atomes étrangers substitutionnels de taille respectivement inférieure et supérieure à celle de l'atome de base. Tableau VI : concentration de défauts dans le cuivre en fonction de la température.*

▶ *Deux structures micrographiques observées après polissage et attaque : à gauche, acier XC 38 ; à droite, fonte à graphite sphéroïdal (matrice ferritique).*

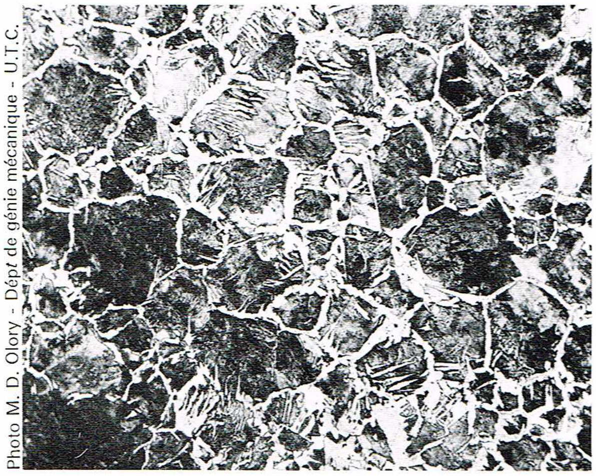

Photo M. D. Olory - Dépt de génie mécanique - U.T.C.

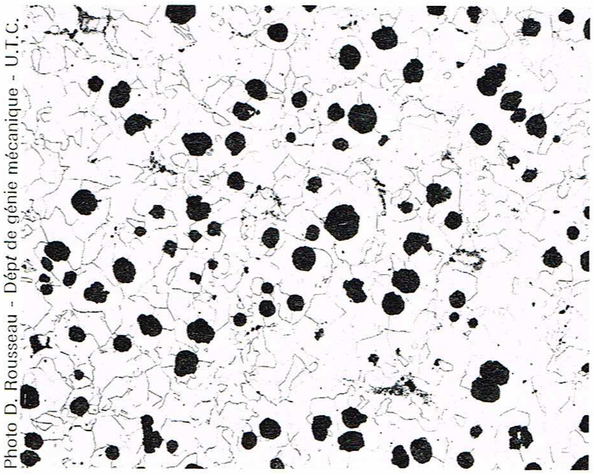

Photo D. Rousseau - Dépt de génie mécanique - U.T.C.

exemple. La microscopie électronique en transmission permet, quant à elle, l'observation directe de certains défauts. En dehors des essais à l'équilibre thermique, les défauts peuvent être conservés hors d'équilibre par trempe de l'échantillon depuis la température d'équilibre.

Dans les métaux et alliages, ces défauts peuvent être créés individuellement. Par contre, dans les cristaux ioniques, il est impératif de maintenir la neutralité électrique du cristal, ce qui entraîne, si l'on veut conserver une composition donnée, la création de paires de défauts. Ainsi peuvent apparaître :

— le *défaut de Schottky,* constitué d'une lacune anionique et d'une lacune cationique. Ce type de défaut se rencontre dans le chlorure de sodium NaCl ;

— le *défaut de Frenkel,* constitué d'une lacune cationique et d'un interstitiel cationique. Le bromure d'argent AgBr présente ce type de défaut. Remarquons que dans un métal, le défaut de Frenkel est l'ensemble lacune + auto-interstitiel.

Dans les matériaux ioniques (surtout les oxydes), une autre éventualité pour la création de défauts est possible. Dans ce cas-là, la composition varie. Prenons l'exemple de l'oxyde de nickel NiO : il peut y avoir création de lacunes cationiques □ Ni, qui seront compensées, afin d'assurer la neutralité électrique de l'ensemble, par des trous électroniques ⊕ suivant l'équilibre quasi chimique :

$$1/2\ O_2 \leftrightarrows \square\ Ni + O^{=}\ (\text{dans le réseau de NiO}) + 2\ \oplus$$

L'oxyde est déficitaire en métal ; il constitue un composé non stœchiométrique, et sa formule s'écrit $Ni_{1-x}O$. (Un composé stœchiométrique est en effet caractérisé par le fait que le rapport des fractions atomiques est égal au rapport inverse des valences.) D'autres oxydes seront, suivant les cas, déficitaires en oxygène (lacunes d'anions oxygène), excédentaires en métal (interstitiels cationiques) ou encore excédentaires en oxygène (interstitiels d'anions oxygène). Ces défauts ponctuels jouent un grand rôle dans les processus de corrosion par les gaz des métaux et alliages.

Les défauts à une dimension : les dislocations

Limite d'élasticité théorique d'un cristal

Considérons un monocristal de structure cubique simple soumis à un effort de cisaillement $\vec{F}$ augmentant progressivement (*fig.* 13a). Lorsque $\vec{F}$ atteint une valeur critique $\vec{F}_c$, le cristal subit une déformation irréversible, dite *déformation plastique* (*fig.* 13b). Tout se passe comme si la partie supérieure A du cristal avait glissé sur la partie inférieure B : la déformation est entièrement localisée dans

▼▶ *A gauche, structure micrographique d'un acier inoxydable (15 % Cr et 3 % Ni ; ferrite et martensite), révélée par oxydation superficielle à l'aide du réactif de Groesbeck. Figure 13 : on peut imaginer le cisaillement* (a) *comme s'effectuant d'un seul bloc* (b) *ou progressivement par propagation de dislocations* (c).

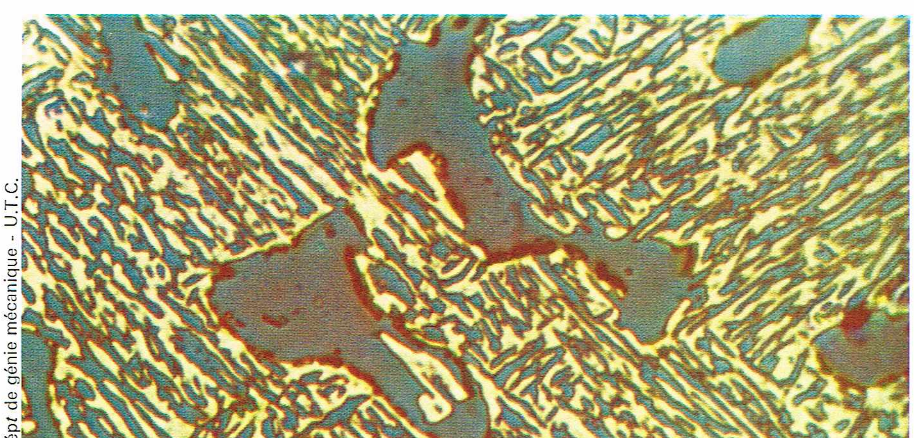

Photo C. Lemaitre - Dépt de génie mécanique - U.T.C.

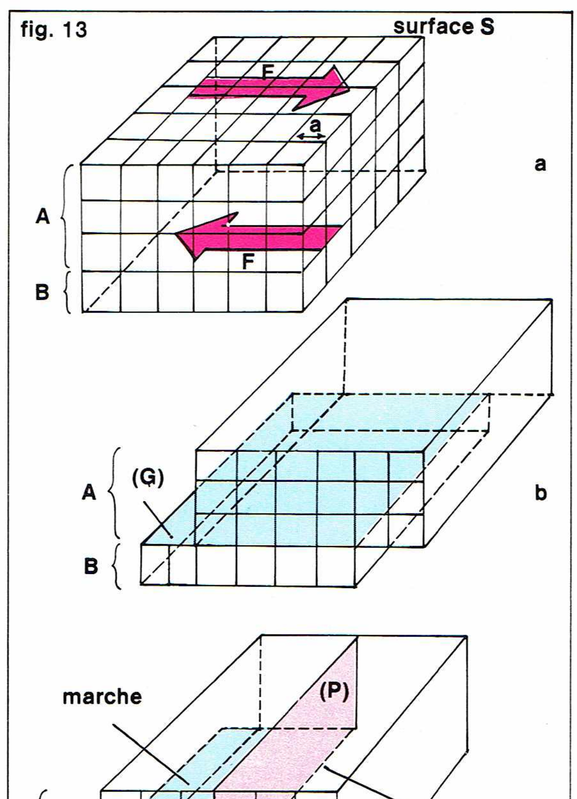

Richard Colin

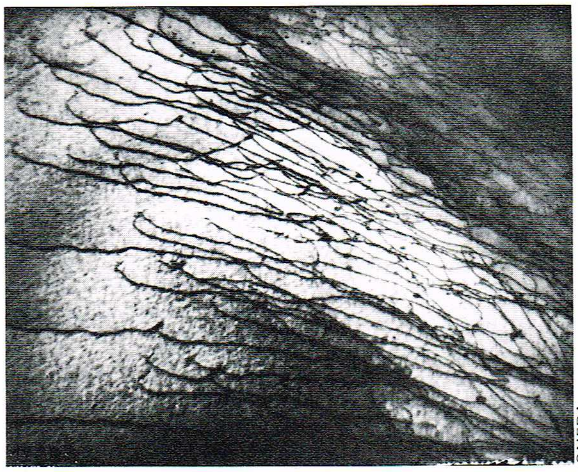

ONERA

le plan (G) qui sépare A et B. Pour déformer le cristal, il a fallu distendre toutes les liaisons atomiques qui s'exercent entre la surface inférieure de A et la surface supérieure de B. En supposant que le morceau de cristal A a glissé d'un seul bloc sur le cristal B, on peut évaluer la force τ_c nécessaire pour déformer un cristal de surface unité, ou encore scission résolue critique :

$$\tau_c = \frac{F_c}{S} \simeq 0{,}16\ \mu$$

où μ désigne le module élastique de cisaillement du cristal. Les valeurs de τ_c obtenues expérimentalement pour la plupart des matériaux sont beaucoup plus petites, 10 000 fois plus petites dans le cas des cristaux métalliques par exemple. Cette constatation conduisit vers 1934 les physiciens Orowan, Taylor et Polanyi à introduire la notion de dislocation, à partir d'une théorie élaborée par Volterra une trentaine d'années auparavant.

Dislocation coin

Imaginons maintenant un glissement du cristal A sur le cristal B, d'amplitude *a* égale à l'arête du cube élémentaire. Nous venons de voir qu'un tel mouvement ne se produit certainement pas d'un seul bloc. Au contraire, on peut penser qu'il se propage de proche en proche d'une extrémité à l'autre du cristal : la déformation plastique s'effectue progressivement. A tout instant, le cristal est partagé en deux régions (*fig.* 13c) : dans la région I, le glissement s'est déjà produit; dans la région II, le glissement ne s'est pas encore produit. La portion de cristal A comporte, à l'aplomb de la ligne (D) du plan (P) séparant les deux régions précédentes, un demi-plan atomique supplémentaire. La ligne (D) est appelée dislocation coin, car ce demi-plan est placé dans le cristal à la manière d'un coin. Lorsque la dislocation (D) se déplace de gauche à droite dans le plan (G), le cristal se cisaille progressivement. Le nombre de liaisons atomiques affectées à chaque instant est maintenant réduit à celles qui se situent au voisinage de (D), ce qui diminue considérablement l'effort critique de cisaillement.

A l'aide de réseaux plans constitués de bulles de savon, le physicien anglais Bragg (1862-1942) a donné une excellente image des dislocations coin et de leur propagation dans un cristal (*fig.* 14).

fig. 14

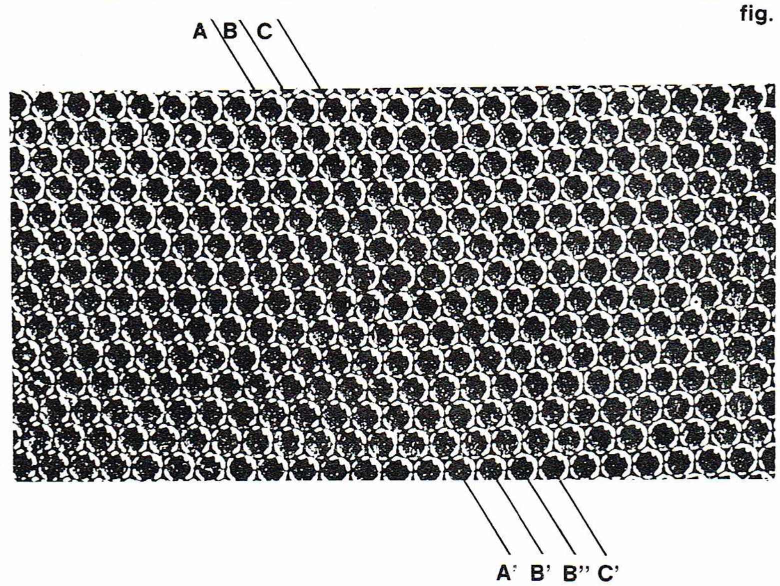

Richard Colin

▲ *A gauche, dislocation coin.*
A droite, figure 14 : bulles de Bragg donnant l'image d'un arrangement compact avec une dislocation limitée à un seul plan atomique (d'après Bénard, Métallurgie générale, *Masson, 1969).*

Dislocation vis

Dans le cas précédent, la direction du cisaillement (ou direction de l'effort $\vec{F}$ exercé) est perpendiculaire à la ligne de dislocation (D). Mais il existe une autre manière de déformer le cristal (*fig.* 15), en exerçant l'effort parallèlement à (D) : la ligne (D) est alors appelée dislocation vis, car tout plan atomique perpendiculaire à (D) tel que (R) prend la forme d'une rampe hélicoïdale.

Les dislocations observées dans les cristaux ne sont pas toujours rectilignes et peuvent présenter des parties coin [(D) est perpendiculaire à $\vec{F}$] et des parties vis [(D) est parallèle à $\vec{F}$]. Lorsque (D) n'est ni parallèle ni perpendiculaire à $\vec{F}$, la portion de dislocation correspondante est dite **mixte.**

fig. 15

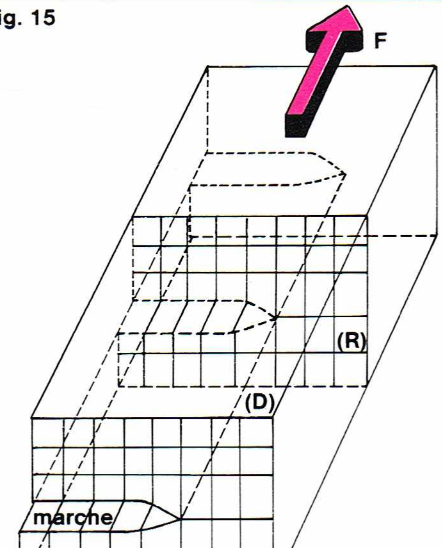

Richard Colin

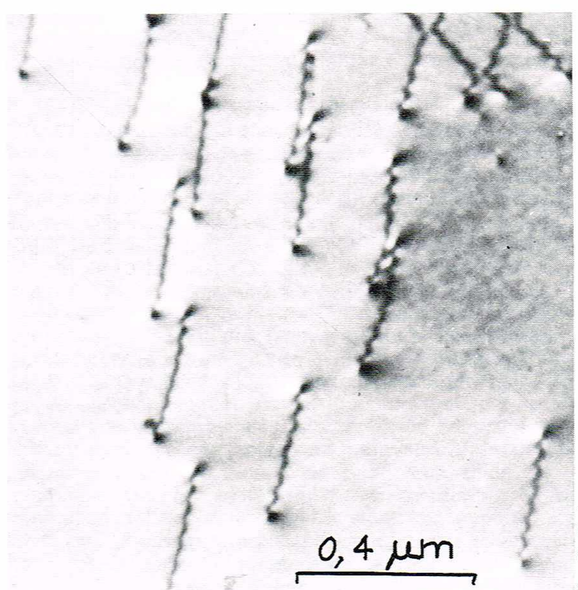

F. Montheillet

◀ *A gauche : figure 15 : représentation schématique d'une dislocation vis* (D) *dans un cristal. Tous les plans atomiques tels que* (R) *prennent la forme d'une rampe hélicoïdale.*
A droite, aspect de dislocations observées en microscopie électronique ; ces dislocations sont rectilignes, et les « zigzags » résultent d'effets de contraste spécifiques.

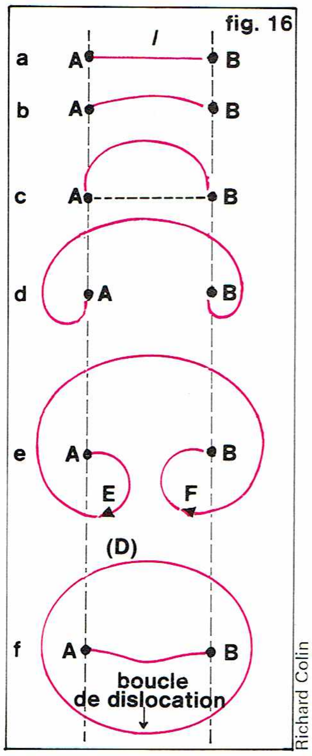

▲ *Figure 16 : fonctionnement d'une source de Frank et Read (voir développement dans le texte)* [*d'après Bénard,* **Métallurgie générale,** *Masson, 1969*].

▼ *Figure 17 : empilement compact et représentation des vecteurs de Burgers d'une dislocation parfaite* $\vec{b}$ *et de deux dislocations partielles* $\vec{b}_1$ *et* $\vec{b}_2$.

Vecteur de Burgers et plan de glissement

Le vecteur de Burgers $\vec{b}$ d'une dislocation caractérise le cisaillement qu'elle produit en traversant le cristal. Lorsque le cristal possède des surfaces libres, le passage de la dislocation fait naître des *marches* de hauteur b à sa surface, comme on peut le voir sur les *figures* 13c et 15.

Le vecteur de Burgers est une caractéristique essentielle de la dislocation, car il se conserve tout au long de celle-ci. En tout point M d'une ligne de dislocation, on définit aussi son *plan de glissement* local : c'est le plan contenant la tangente en M à la ligne et le vecteur de Burgers. Très souvent, et c'est notamment le cas pour les dislocations rectilignes, le plan de glissement est unique pour toute la dislocation. Notons qu'il n'est pas défini dans le cas d'une dislocation vis pure.

La structure périodique des cristaux impose aux plans de glissement d'être des plans atomiques de forte densité, et donc largement espacés. Ce seront par exemple les plans (111) dans la plupart des métaux de structure cubique à faces centrées. De même, pour des raisons énergétiques, les vecteurs de Burgers correspondent en général aux plus faibles distances interatomiques, par exemple $\vec{b} = \frac{1}{2}\langle 110\rangle$ pour les métaux cubiques à faces centrées.

Énergie élastique d'une dislocation

La distorsion des plans atomiques au voisinage d'une dislocation se traduit mathématiquement par un champ de déformations [ε]. Pour des points situés à une distance $r > r_c$ de la ligne de dislocation, ces déformations sont faibles et relèvent de la théorie de l'élasticité. On peut ainsi associer à [ε] un champ de contraintes [σ]. Les calculs montrent que la *pression hydrostatique*

$$p = -\frac{1}{3}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})$$

est nulle dans le cas d'une dislocation vis, qui n'introduit aucun changement local de volume dans le cristal. Par contre, dans le cas d'une dislocation coin, le demi-espace qui contient le demi-plan atomique supplémentaire est en compression ($p > 0$), tandis que l'autre demi-espace est en tension ($p < 0$).

A partir de [ε] et [σ], on calcule une énergie élastique à l'aide des formules de l'élasticité.

Pour les points tels que $r < r_c$, c'est-à-dire situés à l'intérieur du cœur de la dislocation, les déformations sont considérables, et la théorie de l'élasticité ne s'applique pas. Différents modèles permettent d'estimer la contribution du cœur à l'énergie totale de la dislocation. Le rayon r_c du cœur est souvent considéré comme égal à 2 b. Au total, l'énergie W d'une dislocation par unité de longueur est de l'ordre de μb^2. Dans le cas de l'aluminium :

$$\mu = 2{,}7 \cdot 10^{11} \text{ dynes/cm}^2$$
$$b = 2{,}86 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$$

d'où l'on tire :

$$W \simeq 2{,}2 \cdot 10^{-4} \text{ erg/cm} \simeq 1{,}38 \text{ eV/Å}.$$

Observation des dislocations

L'existence des dislocations, supputée par la théorie pour expliquer la déformation plastique des cristaux, fut ensuite confirmée par de nombreuses observations expérimentales. Parmi les méthodes de mise en évidence indirecte des dislocations, nous citerons les *figures d'attaque chimique* qui révèlent les dislocations débouchant à la surface d'un cristal. Dans certains cas, des phénomènes de ségrégation ou de précipitation peuvent se produire sur les dislocations présentes dans des cristaux de solution solide. Les méthodes classiques de visualisation des précipités permettent alors de mettre en évidence les dislocations, qui sont dites *décorées*. Enfin, la microscopie électronique en transmission permet une observation « directe » des dislocations ; dans ce cas, c'est le champ de déplacement introduit par la dislocation dans le réseau cristallin qui est responsable du contraste observé.

Ces différentes observations montrent que les cristaux ordinaires contiennent de très nombreuses dislocations. La densité de dislocations ρ est la longueur de dislocation par unité de volume d'un cristal. Elle s'exprime en général en cm/cm³ ou cm⁻². Des ordres de grandeur caractéristiques sont $\rho = 10^6$ à 10^7 cm^{-2} pour un cristal métallique recuit et $\rho = 10^{10}$ à 10^{12} cm^{-2} (soit 10^7 km/cm³ !) pour le même cristal fortement déformé. Il semble de même que les cristaux de semi-conducteurs contiennent des densités de dislocations élevées.

Dislocations et déformation plastique des cristaux

La déformation plastique des cristaux est conditionnée par la multiplication et le déplacement des dislocations. Nous ne donnerons qu'un aperçu de ces phénomènes très complexes.

● Le principal mécanisme de *multiplication des dislocations* semble être, dans de nombreux cas, la source de Frank et Read (*fig.* 16) : considérons un segment de dislocation fixé en ses deux extrémités A et B (A et B seront par exemple des nœuds triples, c'est-à-dire des points de jonction de trois dislocations). Si nous soumettons le cristal à un effort de cisaillement croissant, le segment AB va se courber dans son plan de glissement jusqu'à atteindre la forme d'un demi-cercle de diamètre AB. La contrainte appliquée τ est alors de l'ordre de $\frac{\mu b}{l}$ où l = AB. Une augmentation infiniment petite de τ provoque alors le mouvement spontané de la dislocation, décrit par la *figure* 16 d à f. Les segments de dislocation E et F ont même vecteur de Burgers, mais ils sont d'orientations opposées : ils correspondent donc à des cisaillements opposés du cristal et vont s'annuler. La source de Frank et Read a ainsi donné naissance à une *boucle de dislocation* (D). Le même processus peut se reproduire un grand nombre de fois en un temps très court.

● La vitesse de déformation totale macroscopique $\dot{\varepsilon}$ d'un cristal est reliée à la vitesse de *déplacement des dislocations* v par la formule :

$$\dot{\varepsilon} = \frac{b}{\sqrt{3}}\rho v.$$

Il existe deux types de mouvement des dislocations :

— le *glissement*, seul envisagé jusqu'ici, se produit dans le plan déterminé en un point de la ligne par sa tangente et le vecteur de Burgers (plan de glissement). Les vitesses de glissement peuvent atteindre des valeurs considérables, voisines de la vitesse du son dans le cristal considéré ;

— la *montée* fait appel à des processus diffusionnels et par conséquent n'est possible qu'à température élevée. Elle correspond à un recul (montée positive) ou au contraire à une progression (montée négative) du demi-plan atomique supplémentaire. Les vitesses de montée sont en général assez faibles, de l'ordre du millimètre par seconde.

● L'effort nécessaire pour provoquer le déplacement d'une dislocation isolée dans un cristal est en général très faible. Mais on a vu que les cristaux contiennent toujours une densité de dislocations très élevée, surtout lorsqu'ils sont déformés. Ces dislocations *interagissent* entre elles, soit à distance par l'intermédiaire de leurs champs de contraintes respectifs, soit par intersection. En fin de compte, ce sont ces interactions complexes qui déterminent l'effort nécessaire pour déformer un cristal.

Les défauts plans (bidimensionnels)

Empilements compacts et défauts d'empilement

De très nombreux cristaux métalliques (Al, Cu, Ni...) présentent une structure dite cubique à faces centrées. Un tel édifice cristallin peut être considéré comme un

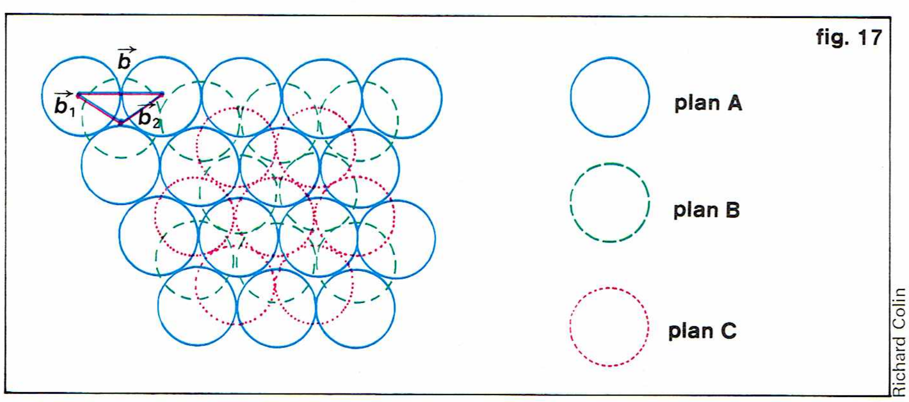

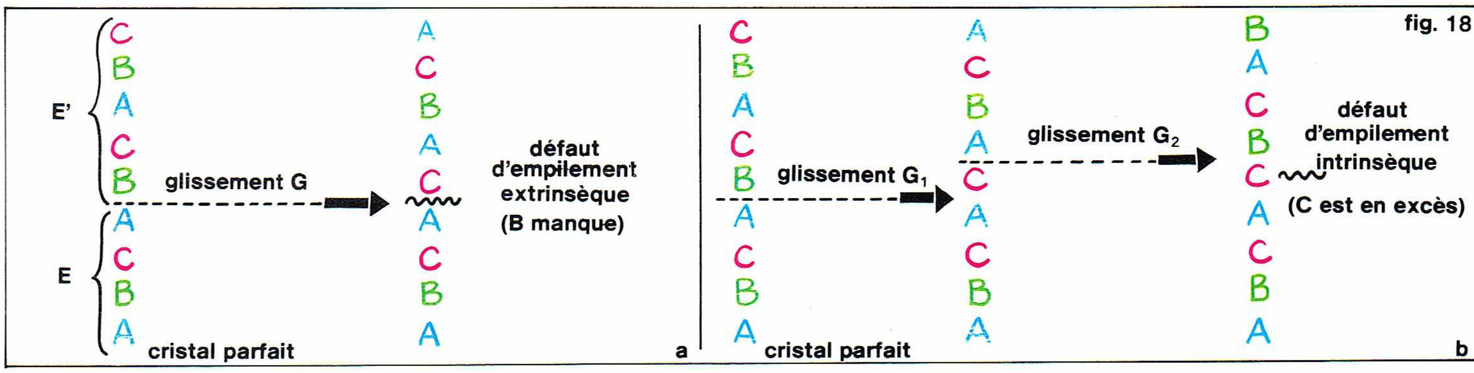

empilement compact de sphères dures, réparties en plans de types A, B, C (*fig.* 17). Dans un *cristal parfait*, l'ordre de succession ABCABC ... est toujours le même. Dans certains cas, par exemple sous l'effet de contraintes extérieures, des glissements peuvent se produire au sein de cet empilement, qui viennent détruire son ordonnance régulière en créant des *défauts d'empilement*. Ainsi, sur la *figure* 18a, la partie supérieure E' du cristal a glissé sur la partie inférieure E ; dans E', chaque plan A devient un plan B et de même B → C et C → A. Tout se passe comme si un plan B avait été supprimé entre E et E'. Un tel défaut d'empilement est dit *intrinsèque*. Par deux glissements se produisant sur deux plans consécutifs (*fig.* 18b), on peut créer de même un défaut d'empilement *extrinsèque*, qui équivaut à introduire un plan supplémentaire dans l'empilement.

Une description analogue pourrait être faite pour la structure hexagonale compacte (Zn, Cd, Mg ...) que l'on peut aussi décrire comme un empilement compact du type ABAB ...

Au voisinage des défauts d'empilement, les liaisons atomiques sont modifiées par rapport au reste du cristal, ce qui correspond toujours à un accroissement d'énergie proportionnel à la surface de défaut. L'accroissement d'énergie γ par unité de surface est appelé *énergie de défaut d'empilement*. Nous allons voir dans le paragraphe suivant que ce paramètre joue un rôle fondamental dans la déformation plastique des cristaux.

Dissociation des dislocations

Dans une structure cubique à faces centrées, les plans compacts A, B, C, ... sont, du point de vue cristallographique, les plans d'indices (111), c'est-à-dire les plans de glissement habituels des dislocations. Une dislocation (D) de vecteur de Burgers $\vec{b} = \frac{1}{2}[10\bar{1}]$ est susceptible de se dissocier dans ce plan en deux dislocations partielles (D_1) et (D_2) de vecteurs de Burgers.

$$\vec{b}_1 = \frac{1}{6}[11\bar{2}] \quad \text{et} \quad \vec{b}_2 = \frac{1}{6}[2\bar{1}\bar{1}] \qquad (fig.\ 19).$$

En effet, $\vec{b} = \vec{b}_1 + \vec{b}_2$ donc le cisaillement total du cristal n'est pas modifié ; $\vec{b}^2 > \vec{b}_1^2 + \vec{b}_2^2$, et cette dissociation conduit donc à une diminution de l'énergie élastique du cristal (voir plus haut). Il est aisé de voir (*fig.* 19) que le passage de la dislocation (D_1) dans le cristal fait apparaître un défaut d'empilement intrinsèque, tandis que la dislocation (D_2) restitue le cristal parfait. (D_1) et (D_2) sont donc séparées dans leur plan de glissement par un *ruban de défaut d'empilement*. On peut montrer que la largeur δ de ce ruban est inversement proportionnelle à l'énergie de défaut d'empilement γ du cristal. Notons que la dissociation des dislocations est observée également dans des édifices non compacts, comme la structure cubique centrée (Fe α, Nb, Cr...).

A titre d'exemple numérique, nous citerons trois cas :

aluminium	$\gamma \simeq$ 200 ergs/cm^2	$\delta \simeq$ 2 Å ($\simeq r_c$)
cuivre	$\gamma \simeq$ 40 ergs/cm^2	$\delta \simeq$ 12 Å
alliage Cu + 7 % Al	$\gamma \simeq$ 4 ergs/cm^2	$\delta \simeq$ 114 Å.

On conçoit que le déplacement des dislocations dans le cristal (glissement ou montée) sera d'autant plus difficile que δ est plus grand, donc γ plus faible, ce qui explique l'importance accordée à ce paramètre.

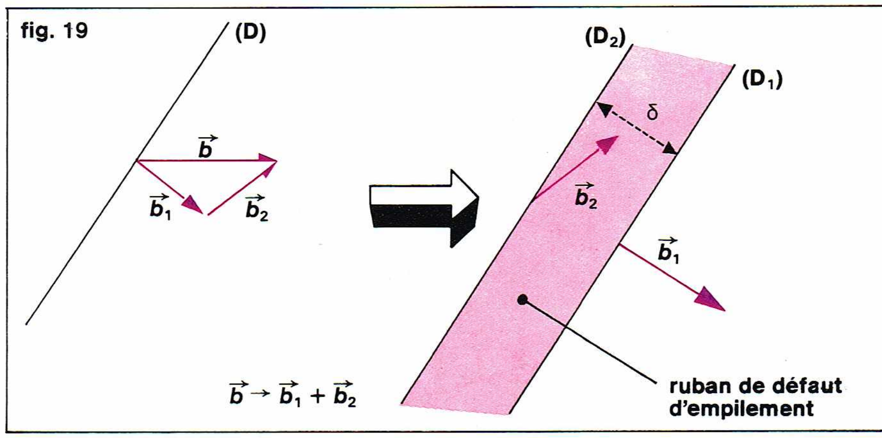

▲ *Figure 18 : formation de défauts d'empilement intrinsèque* (a) *et extrinsèque* (b).
Figure 19 : dissociation d'une dislocation parfaite D *en deux dislocations partielles* D_1 *et* D_2.

Joints et sous-joints

Nous n'avons considéré jusqu'ici que des monocristaux. En réalité, la plupart des édifices cristallins sont constitués par un assemblage de cristaux, ou *grains*. Les parois séparant ces grains ont une influence importante sur les caractéristiques mécaniques de l'assemblage. Suivant que les cristaux adjacents sont ou non de même nature, on les appelle *joints de grains* ou *joints de phase*. En général, la déformation d'un polycristal aux basses températures s'effectue plus facilement à l'intérieur des grains qu'aux joints, tandis qu'à partir d'une température critique (température d'équicohésion), c'est la déformation aux joints qui devient prépondérante.

Les joints séparent en général des grains fortement désorientés. Il existe cependant des joints dits à faible désorientation (< 10°) ou sous-joints, qui peuvent être considérés comme des arrangements réguliers et très denses de dislocations. Les cristaux adjacents sont alors qualifiés de sous-grains, car ils résultent souvent de la subdivision d'un même grain initial. Comme dans le cas des autres défauts cristallins, la présence de joints ou de sous-joints augmente l'énergie de l'édifice cristallin.

Observation des défauts plans

Un matériau cristallin, un métal par exemple, observé à l'aide d'un microscope métallographique révèle en général la présence de grains, qui, parfois, peuvent aussi être vus à l'œil nu. Si le matériau est constitué d'une seule phase, ces grains sont de même nature et ont la même structure ; cependant ils n'ont pas la même orientation, ce qui se traduit par des différences de propriétés d'un grain à l'autre. Il est aisé de révéler une telle structure micrographique en soumettant le matériau métallique à un polissage mécanique, chimique, voire électrolytique : les différences de dureté et de réactivité font apparaître les grains. De plus, les joints de grains qui constituent des zones désorientées constituent des sites préférentiels où viennent se rassembler les impuretés ; ils sont aisément mis en évidence par légère attaque avec un réactif chimique, qui entraîne alors l'apparition d'un sillon intergranulaire. On peut également révéler la structure micrographique à l'aide d'une légère oxydation superficielle, ainsi que la structure d'un alliage polyphasé. Dans certains cas, on observe une précipitation de seconde phase, observation qui doit être rapprochée des caractéristiques du diagramme d'équilibre correspondant.

▶ *Figure 21 : différents types de sauts élémentaires en diffusion. L'atome migrant est représenté en bleu. 1, échange direct; 2, échange cyclique; 3, mécanisme laculinaire; 4, interstitiel direct; 5, interstitiel indirect; 6, « Crowdion ».*

La diffusion

Les phénomènes de diffusion, c'est-à-dire de migration des atomes dans le réseau cristallin, jouent un rôle important — et souvent même primordial — dans l'élaboration et dans les transformations des matériaux cristallisés.

Une expérience simple de diffusion intermétallique consiste à accoler selon une surface plane deux échantillons de deux métaux de nature différente et à chauffer l'ensemble. La première expérience de ce type a été réalisée en 1896 entre l'or et le plomb. Ce genre d'expérience est en général fort complexe à analyser, car souvent les deux métaux A et B ne sont pas miscibles en toutes proportions; on voit apparaître alors des phases stables à la température où a été réalisée la diffusion. Choisissons le cas apparemment plus simple de deux métaux miscibles en toutes proportions; la variation de la concentration en fonction de la distance est schématisée sur la *figure* 20. Cette expérience apparemment simple est en fait assez délicate à interpréter. Pour s'en convaincre, il suffit d'isoler par la pensée un atome de B qui migre vers le solide A. Au début, cet atome est entouré uniquement d'atomes de B, puis, au fur et à mesure qu'il va se déplacer, il va être de plus en plus entouré d'atomes de A. Il en résulte que les forces interatomiques exercées sur cet atome B changent d'une façon continue.

On distingue :

— l'*hétérodiffusion* qui correspond à la diffusion d'un atome de nature différente de celle des éléments de la matrice. Ainsi, la diffusion du cuivre dans le nickel ou du zinc dans l'argent;

— l'*autodiffusion* qui correspond à la diffusion d'un atome de nature identique à celle de l'un des éléments de la matrice. Le cas le plus simple est par exemple la diffusion du fer dans le fer; pour l'étudier, on a recours aux traceurs radio-actifs, ce qui revient donc à étudier la diffusion de Fe dans Fe ou encore Ag dans Ag. La diffusion du zinc dans les laitons (Cu-Zn) constitue un autre exemple d'autodiffusion; là encore on a recours aux traceurs radio-actifs pour l'étudier.

Sur le plan cinétique, on repère la vitesse de diffusion d'un élément donné dans une matrice donnée, par le coefficient de diffusion D :

$$D = \lim_{t \to \infty} \frac{\langle X^2(t) \rangle}{2t}$$

où $\langle X^2(t) \rangle$ est le parcours quadratique moyen des atomes et t le temps. Généralement, le coefficient D, dont l'équation aux dimensions est L^2T^{-1}, est exprimé en cm^2/s.

La diffusion est activée thermiquement : le coefficient de diffusion croît avec la température. La loi de variation pour un mécanisme donné se traduit par la formule d'Arrhénius :

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

où D_0 est le facteur de fréquence (cm^2/s), Q l'énergie d'activation exprimée en calories/mole et R = 1,93 calorie/mole × degré, la constante des gaz parfaits.

Si l'on considère, par exemple, le cas de l'autodiffusion par lacunes, l'énergie d'activation Q est la somme des enthalpies de formation ΔH_f et de migration ΔH_m des lacunes. Dans un cristal donné, le déplacement macroscopique d'atomes se produit par sauts élémentaires (schématisés sur la *figure* 21). L'énergie nécessaire mise en jeu pour effectuer ces sauts est fournie par l'agitation thermique. On constate donc que les défauts jouent un très grand rôle dans la diffusion.

fig. 20

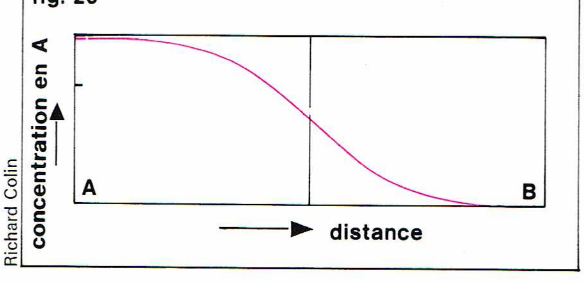

▶ *Figure 20 : répartition de la concentration en élément A, exprimée en pourcentage dans le couple A/B après un recuit de diffusion. Figure 22 : représentation schématique de l'effet Kirkendall.*

fig. 21

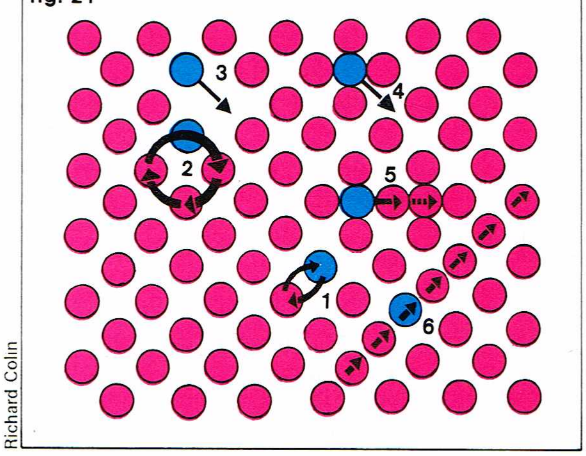

L'évolution de la distribution d'un soluté dans un solide est donnée par la première loi de Fick si l'on considère la diffusion selon une direction x :

$$J = -D \frac{\partial c}{\partial x}$$

où J est le flux exprimé en atomes/cm^2 × s, et c la concentration exprimée en atomes/cm^3. En fait, la première loi de Fick n'est pas d'utilisation aisée pour déterminer le coefficient de diffusion. C'est pourquoi on préfère utiliser la deuxième loi de Fick, qui découle de la précédente, en appliquant le principe de conservation de la matière :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D \frac{\partial c}{\partial x}\right)$$

où t est le temps.

Dans le cas de la diffusion dans des systèmes homogènes, cette équation se simplifie, car D est alors une constante :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

Les solutions $c(x)$ de cette équation aux dérivées partielles dépendent des conditions initiales et aux limites. Ces solutions sont en général bien connues; cette dernière relation est identique à l'équation de Fourier pour la transmission de la chaleur.

Dans le cas de l'autodiffusion ou de la diffusion dans les systèmes dilués, on peut considérer, en première approximation, que les atomes constituent un réseau fixe dans lequel se déplace l'atome qui diffuse. Dans le cas des systèmes plus concentrés, le problème devient beaucoup plus compliqué. Pour un couple A/B, on déduit des expériences un coefficient de diffusion chimique $\tilde{D}$ qui représente une moyenne entre les coefficients des éléments A et B.

Si les éléments A et B diffusent à des vitesses différentes, les plans du réseau sont mobiles par suite de l'effet Kirkendall. Ce déplacement de plans réticulaires est bien

fig. 22

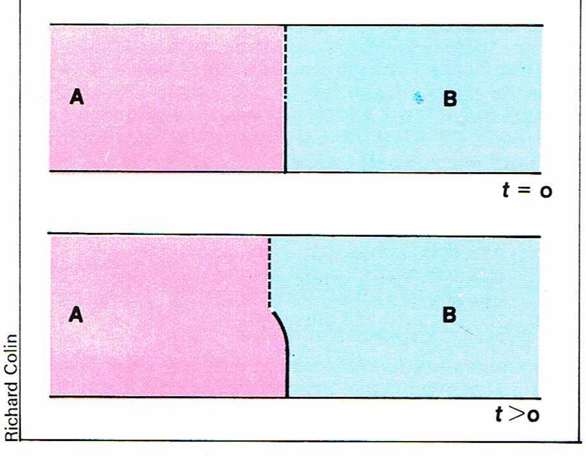

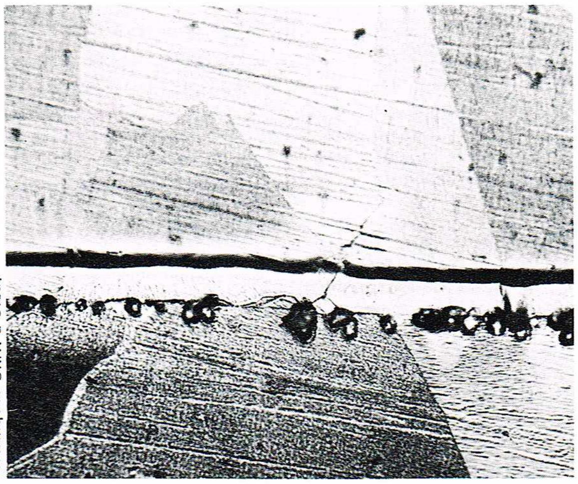

Photo R. Dessieux - Lab. de structure des matériaux métalliques Univ. d'Orsay

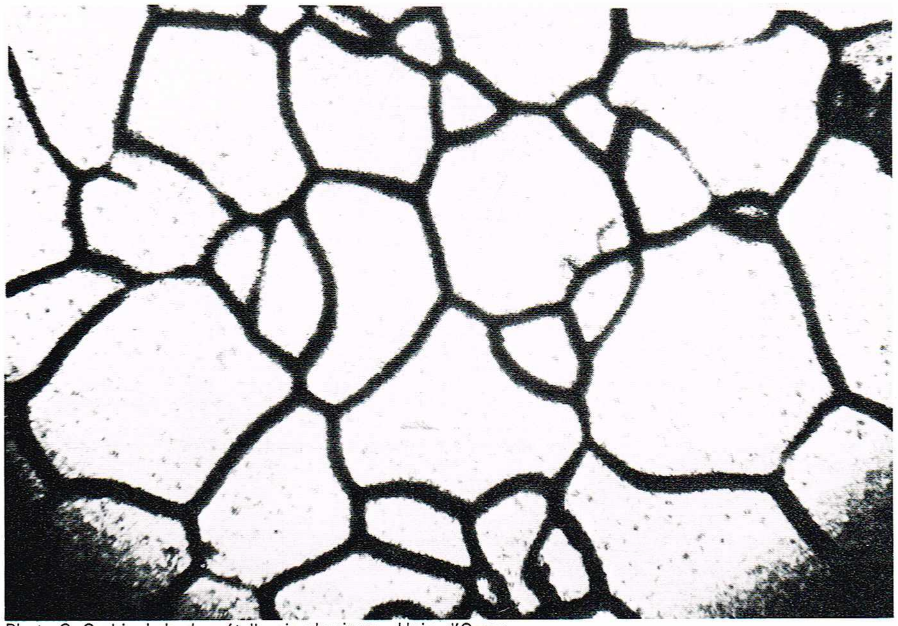

Photo G. Orabi - Lab. de métallurgie physique - Univ. d'Orsay

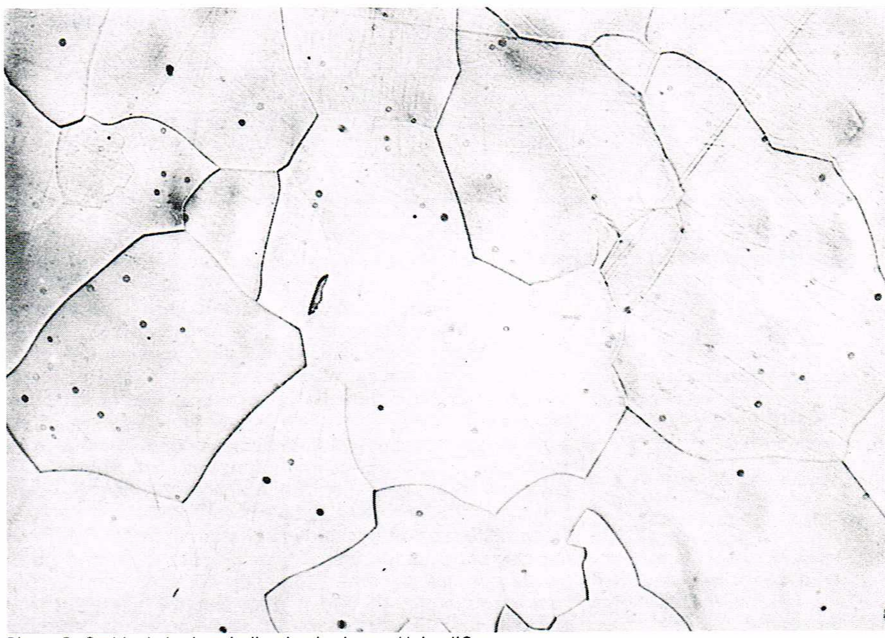

Photo G. Orabi - Lab. de métallurgie physique - Univ. d'Orsay

▲ ***En haut à gauche, formation de pores au cours du recuit de diffusion d'un couple Ni/Cu (OFHC) pendant 248 h à 896 °C. En haut à droite, diffusion intergranulaire révélée par autoradiographie (autodiffusion de ^{63}Ni dans l'alliage Fe-Ni 2 %) ; ci-dessus, micrographie correspondante.***

mis expérimentalement en évidence en repérant initialement le plan de soudure A/B à l'aide d'une mince feuille et de petits fils, tous en tungstène ; cette feuille bloque la diffusion dans une partie du couple et fournit ainsi une référence fixe (*fig.* 22). Par contre, après l'expérience, les fils se sont déplacés, montrant ainsi que les plans du réseau se sont eux-mêmes déplacés. L'effet Kirkendall est souvent accompagné de la formation de pores du côté du métal le plus rapide. Lorsque la diffusion s'opère par l'intermédiaire des lacunes ou des interstitiels, on parle de diffusion en volume. Toutefois, la diffusion peut s'effectuer selon des voies plus faciles : les courts-circuits de diffusion. Parmi ceux-ci figurent les joints de grains ; ils ont une importance pratique très grande, car ils vont accélérer la diffusion. L'énergie d'activation correspondante est inférieure à celle de la diffusion en volume. La diffusion préférentielle le long des joints de grains est clairement mise en évidence par autoradiographie.

Les propriétés électroniques

Un cristal est décrit, dans une première approche, comme un empilement de sphères dures en contact suivant certaines directions. Cependant, cette description très simple est incapable de rendre compte de certaines propriétés physiques, et notamment de la conductibilité électrique. Il faut donc, dans une deuxième approche, considérer le modèle électronique. Les électrons sont parfois liés aux noyaux, dans d'autres cas ils sont libres ; sous l'influence d'un champ électrique extérieur, les premiers ne peuvent pas se déplacer, et le solide est un isolant ; les seconds par contre sont mobiles et assurent la conduction électrique : c'est le cas des métaux. Pour rendre compte de cette différence, il faut s'intéresser au mouvement des électrons et faire appel à la mécanique quantique, la mécanique classique étant dans ce cas insuffisante.

Dans la théorie électronique des solides, on considère que les électrons se déplacent sans interaction ni entre eux, ni avec les ions du réseau. Dans cette approximation dite à un électron, ce dernier se déplace dans un potentiel dont la seule partie variable est le potentiel dû aux noyaux, le potentiel moyen dû aux autres électrons étant constant. Le potentiel variable possède les mêmes éléments de symétrie que la structure cristalline. On constate alors que l'énergie des électrons ne peut prendre que certaines valeurs dans des bandes d'énergies permises, à l'exclusion de bandes d'énergies interdites, d'où le nom de *théorie des bandes* donné à cette approximation. La formation des bandes elles-mêmes peut être expliquée simplement de la façon suivante : soit un cristal hypothétique constitué de N noyaux identiques placés à de grandes distances les uns des autres, mais occupant la même position relative que dans le cristal réel. Les électrons sont liés aux noyaux pour former des atomes en occupant les niveaux d'énergie 1 *s*, 2 *s*, 2 *p*, etc. Tous ces niveaux sont donc identiques pour les N atomes et sont donc N fois dégénérés. Si nous rapprochons maintenant les atomes pour les placer à la même distance les uns des autres que dans le cristal réel, la dégénérescence des niveaux est levée, et les niveaux d'énergie s'écartent en donnant naissance à des bandes d'énergies permises et interdites. L'ordre de grandeur des énergies mises en jeu est de l'ordre de quelques électrons-volts.

Pour préciser la différence entre conducteurs et isolants, il faut faire appel à la notion de remplissage des bandes. La statistique quantique de Fermi-Dirac permet, à l'aide de la fonction de distribution, de calculer le taux d'occupation d'un niveau d'énergie en fonction de la température. Cette fonction fait intervenir l'*énergie de Fermi* du système d'électrons qui, au zéro absolu, représente l'énergie maximale du dernier niveau occupé (*fig.* 23) ; quand la température s'élève, la discontinuité

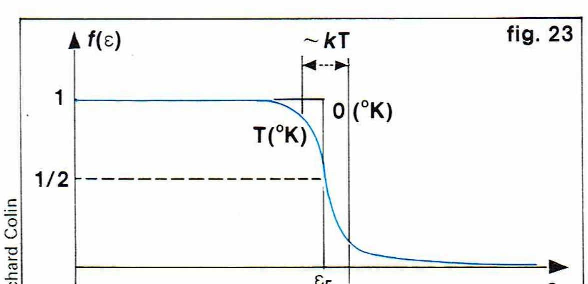

Richard Colin

◀ ***Figure 23 : variation de la fonction de Fermi-Dirac en fonction de l'énergie électronique ε. L'expression de cette fonction est :***

$$f(\varepsilon) = \left(1 + \exp\frac{\varepsilon_F - \varepsilon}{KT}\right)^{-1}$$

où ε_F est l'énergie de Fermi.

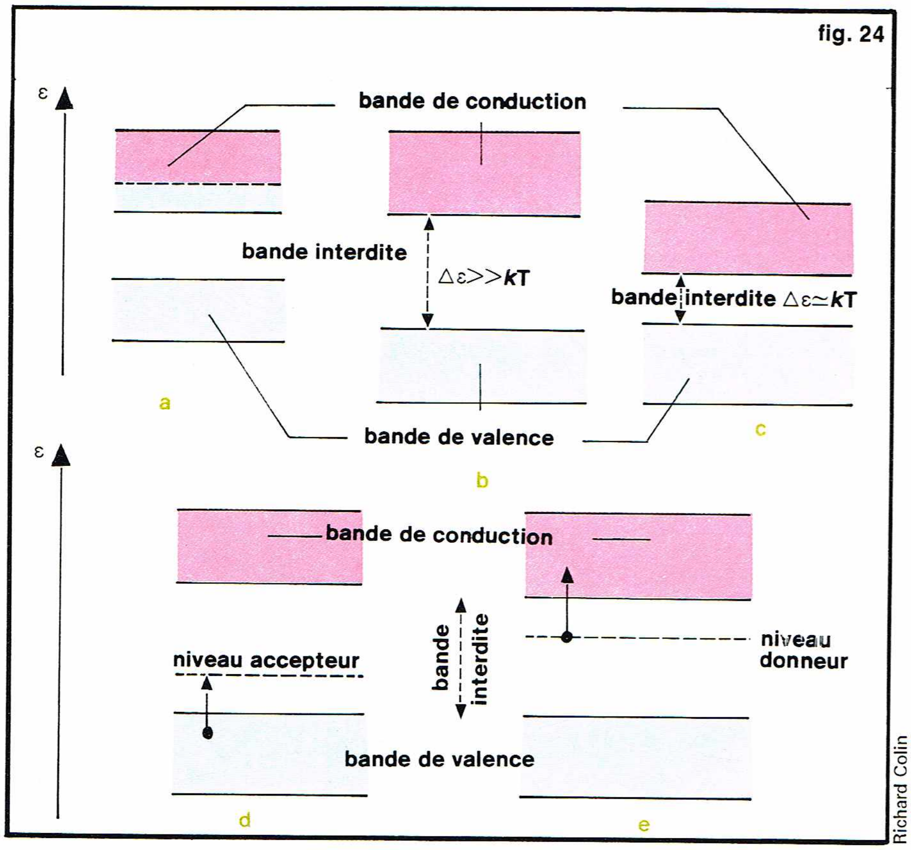

▲ ***Figure 24 : différents cas de remplissage des bandes d'énergie ; a, conducteur ; b, isolant ; c, semi-conducteur intrinsèque ; d, semi-conducteur*** p ***à impureté ; e, semi-conducteur*** n ***à impureté.***

dans la variation de la fonction de Fermi-Dirac en fonction de l'énergie est moins brutale ; cette discontinuité se produit sur un certain domaine d'énergie qui est de l'ordre de l'énergie d'agitation thermique kT, où k est la constante de Boltzmann et T la température absolue. Si le niveau de Fermi est situé au zéro absolu à l'intérieur d'une bande permise, le solide est un métal, et il est *conducteur*. Par contre, si le niveau de Fermi est situé exactement au sommet d'une bande permise, celle-ci est entièrement remplie ; le solide ne peut conduire le courant électrique : c'est un *isolant*. Toutefois, cet isolant peut présenter une bande interdite, immédiatement supérieure à la bande pleine, assez étroite pour permettre à certains électrons sous l'influence de l'agitation thermique (kT) de franchir cette bande interdite et d'occuper le fond de la bande permise suivante : le solide correspondant est un *semi-conducteur*. Le départ d'un électron laisse un trou électronique au voisinage du sommet de la dernière bande occupée ; ce trou transporte une charge positive $+|e|$, qui peut se déplacer en sens inverse des électrons sous l'effet du champ électrique. Dans un solide, la dernière bande d'énergie permise et entièrement pleine au zéro absolu s'appelle la *bande de valence*, et la bande suivante s'appelle la *bande de conduction*. Les différents cas de remplissage des bandes sont schématisés sur la *figure* 24. Un solide est donc conducteur si sa structure électronique présente au moins une bande partiellement pleine.

Dans le cas d'un *isolant*, pour lequel la bande d'énergie interdite est bien supérieure à l'énergie de l'agitation thermique kT, il existe une alternative permettant des sauts d'électrons. A cet effet, ajoutons au cristal une impureté qui possède un niveau discret d'énergie dans cette bande interdite et qui est susceptible d'accepter un électron ; un électron de la bande pleine peut sauter sur ce niveau, laissant un trou électronique. Ce trou va assurer la conduction : le solide correspondant est un semi-conducteur de type p (positif). Une autre impureté peut jouer le rôle de donneur d'électrons par fixation d'un électron dans la bande vide supérieure : cet électron assure la conduction : le solide est un semi-conducteur de type n (négatif).

Pour comprendre plus complètement la différence entre un métal, un isolant et un semi-conducteur, il est nécessaire d'étudier le mouvement des électrons sous l'influence d'une force électrique extérieure $\vec{F} = e\vec{E}$ où e est la charge électronique et $\vec{E}$ le champ électrique. En plus de cette force $\vec{F}$, l'électron est soumis aux forces dues au potentiel cristallin. On peut simplifier le problème et ne pas expliciter ces forces en remplaçant la masse réelle m_0 de l'électron par la masse effective m^* qui est différente de m_0. L'équation du mouvement s'écrit alors $\vec{F} = m^* \dfrac{d\vec{v}}{dt}$ où v est la vitesse et t le temps. Dans les métaux la masse effective au niveau de Fermi est voisine de la masse réelle ; il n'en est pas de même dans le cas des isolants et des semi-conducteurs. Indiquons enfin que la théorie électronique, qui permet de prévoir certaines propriétés physiques comme les conductibilités électrique et thermique, les chaleurs spécifiques, le paramagnétisme, permet également, en principe, de calculer l'*énergie de cohésion*, c'est-à-dire l'énergie nécessaire au zéro absolu pour séparer les atomes du cristal en les portant à l'infini pour éliminer toute interaction.

LES DIAGRAMMES D'ÉQUILIBRE

Les propriétés des alliages dépendent de leur constitution et de leur structure. Or la compréhension de la structure des alliages métalliques implique que l'on connaisse les diagrammes d'équilibre, d'où le grand intérêt de déterminer et d'étudier ces derniers.

Diagramme de solidification

Sous une pression constante, un métal pur, que l'on refroidit depuis l'état liquide, se solidifie à une température θ_s bien définie et constante pendant tout le changement d'état (*fig.* 25a) ; cette température est appelée *température de solidification*. La courbe température-temps au cours du refroidissement est déterminée par analyse thermique. La solidification s'accompagne en général d'une diminution de volume : le *retrait ;* parmi les exceptions à cette règle, citons l'argent, la glace.

Cas des alliages quelconques

Si on considère maintenant un alliage de composition quelconque, la solidification opérée à pression constante commence à une température θ_1 et s'achève à une température θ_2 telle que $\theta_2 < \theta_1$ (*fig.* 25b) ; c'est-à-dire que le premier cristal apparaît dans le bain liquide à θ_1 et que les dernières traces de liquide se solidifient à θ_2. Souvent le métal, ou l'alliage, est encore à l'état liquide en dessous de sa température de solidification θ_s ou de début de solidification θ_1 ; ce phénomène de retard est la *surfusion*. Un refroidissement très lent est nécessaire pour l'observer. Pour faire passer un kilogramme de métal de l'état solide à l'état liquide, il faut fournir au système une quantité de chaleur (*tableau* VII). Au cours de la solidification, cette énergie est restituée au milieu extérieur.

Cas des alliages binaires

Considérons le cas des alliages binaires cuivre-nickel, et examinons les différentes courbes de refroidissement en fonction de la composition (*fig.* 26). On remarque des paliers de solidification isothermes à 1 083 et 1 453 °C pour les deux métaux purs. Par contre, tous les alliages

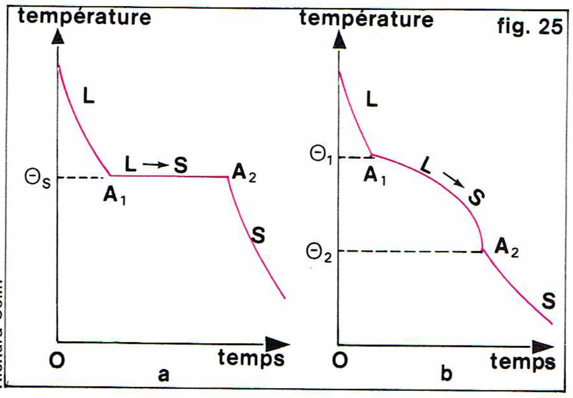

▶ ***Figure 25 : courbes de solidification d'un métal pur*** (a) ***et d'un alliage quelconque*** (b).

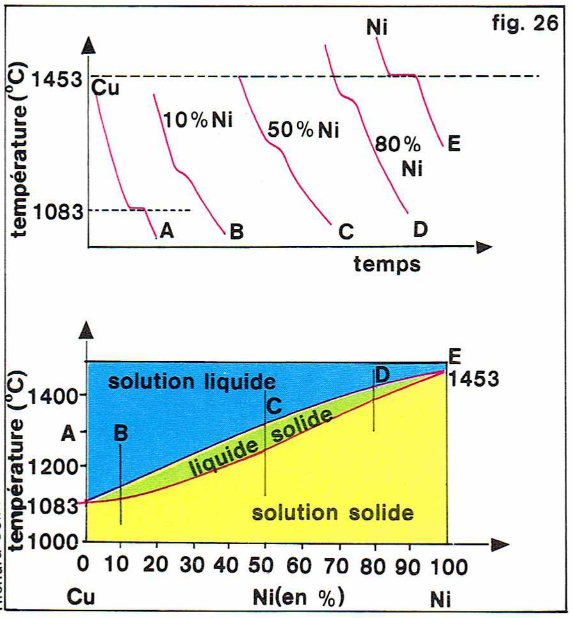

présentent un intervalle de solidification non isotherme. Si l'on représente les lieux des températures de début et de fin de solidification, on obtient deux courbes appelées respectivement *liquidus* et *solidus* (*fig.* 27). Ces courbes définissent pour les alliages d'une même famille les limites des domaines de coexistence des phases, mais également la composition de celles-ci. Précisons que tout point au-dessus du liquidus correspond à un alliage entièrement liquide, tandis que tout point au-dessous du solidus correspond à un alliage entièrement solide. Sur le même exemple du cuivre-nickel, considérons le refroidissement de l'alliage de composition globale C_1, depuis la phase liquide. A la température T_1 (*fig.* 27) apparaît le premier cristal de la phase solide dont la composition est C'_1. Au fur et à mesure qu'on va refroidir le système, le point représentatif de la composition globale invariable va rester sur la verticale passant sur C_1, mais les compositions de la phase liquide et de la phase solide en équilibre décrivent respectivement les courbes de liquidus et de solidus. Ainsi, le liquide et le solide en équilibre à la température T_2 auront pour compositions respectives C_2 et C'_2. Donc le liquide et le solide s'appauvrissent tous deux en nickel quand la température décroît. A la température T_3, la dernière goutte de liquide de composition C_3 va se solidifier, et le solide aura alors la composition C_1. Cela est valable uniquement si le système est constamment en état d'équilibre. Donc, à une température donnée, les compositions des phases solide et liquide sont données respectivement par les intersections de l'horizontale à la température considérée avec les courbes de solidus et de liquidus : c'est la *règle de l'horizontale*. Ces diagrammes indiquent en outre le pourcentage de phase liquide et de phase solide en équilibre. En effet, selon la règle dite des « segments inverses », le pourcentage de liquide à la température T_2 est $\frac{MS}{LS}$ et celui de solide est $\frac{ML}{LS}$. La composition du mélange solide + liquide varie avec la température à l'intérieur du fuseau ainsi tracé (*tableau* VIII).

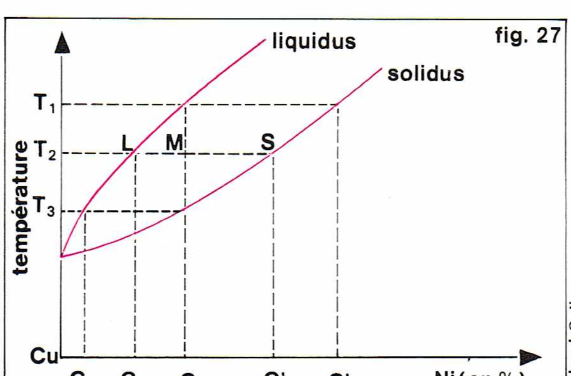

Tableau VII
Chaleur latente de fusion de quelques métaux

Métaux	Chaleur latente (en cal/g)
Plomb	5,9
Étain	14,5
Zinc	24,4
Argent	25
Cuivre	49
Fer	63,7
Nickel	71,6
Chrome	75,6
Magnésium	88
Aluminium	94,5

Tableau VIII
Composition du mélange solide liquide dans le cas d'un alliage binaire

Température (en °C)	Pour 1 000 kg d'alliage	
	solide (en g)	liquide (en g)
1 050	0	1 000
1 017	0	1 000
1 010	360	640
997	1 000	0
950	1 000	0

Les différents diagrammes d'équilibre présentent selon les cas les caractéristiques suivantes :

● *Miscibilité totale dans l'état solide.*

— *Diagrammes à un seul fuseau :* les températures de solidification de ces alliages sont toujours intermédiaires entre celles des métaux purs correspondants. En dehors du système Cu-Ni décrit précédemment, citons encore Cu-Pd, Ag-Au, Ge-Si, Bi-Sb.

— *Diagrammes à deux fuseaux :* les courbes des phases liquide et solide possèdent un point de contact à tangente horizontale; l'alliage dont la composition correspond à ce point de contact se comporte comme un corps pur. Comme exemples, citons : Fe-Cu, Cu-Mn, Sb-As, Au-Cu.

● *Miscibilités partielles dans l'état solide.* Dans la majorité des cas, il n'y a pas en effet miscibilité totale des constituants. Le cas le plus simple est celui de deux séries distinctes de solutions solides; il y a raccordement des deux fuseaux de solidification dans la région centrale du diagramme, et il apparaît un point d'équilibre invariant entre une phase liquide commune et deux phases solides appartenant aux deux séries de solutions solides. Suivant la température de ce point invariant par rapport aux températures de fusion des corps purs, on distingue :

— Les *diagrammes avec point eutectique :* la température du point invariant est inférieure à la température de fusion des deux constituants purs (*fig.* 28). A la température du point invariant, il peut exister sur les courbes de refroidissement un palier isotherme qui correspond à l'équilibre :

$$\text{liquide } E_2 \leftrightarrows \text{solide } E_1 + \text{solide } E_3$$

▲ ***Figure 26 :*** ***courbes de refroidissement d'alliages binaires Cu-Ni de différentes compositions*** (a) ***et diagramme d'équilibre correspondant*** (b).
Tableau VII : ***chaleur latente de fusion de quelques métaux.***
Tableau VIII : ***composition du mélange solide-liquide pour différentes températures dans le cas d'un alliage binaire.***

◀ ***Figure 27 :*** ***courbes de liquidus et de solidus d'un alliage binaire Cu-Ni de composition*** C_1***; solidification par refroidissement lent.***

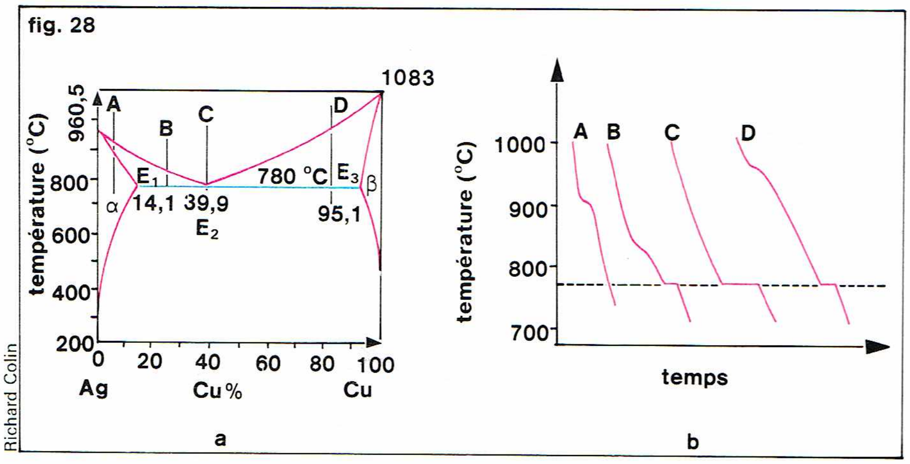

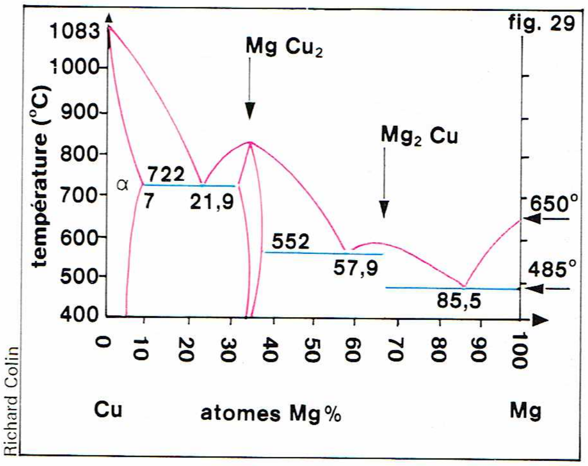

▲ *Figure 28 : a, diagramme d'équilibre du système binaire Ag-Cu (point eutectique E_2) ; b, courbes de refroidissement pour différentes compositions. Figure 29 : diagramme d'équilibre du système Cu-Mg.*

La morphologie des phases solides dans de tels alliages reflète les caractéristiques de la solidification. Citons comme exemples d'alliages présentant un diagramme de ce type : Ag-Cu, Pb-Sn. On retrouve les mêmes caractéristiques pour des alliages présentant des miscibilités très faibles, voire négligeables, à l'état solide ; ainsi les alliages Ag-Si.

— Les *diagrammes avec point péritectique :* dans ces diagrammes, la température du point invariant est comprise entre les points de fusion des deux corps purs. A la température du point invariant correspond l'équilibre :

$$\text{liquide } P_1 + \text{solide } P_3 \leftrightarrows \text{solide } P_2$$

Le système Ag-Pt présente un diagramme de ce type.

● *Phases intermédiaires.* De nombreux systèmes binaires présentent des combinaisons chimiques définies qui se traduisent par des maximums sur la courbe de la phase liquide. Ces phases intermétalliques n'existent qu'à l'état solide et possèdent une structure cristalline différente de celle des métaux purs constitutifs. Ces phases existent souvent sur un certain domaine de composition, mais on les désigne par la formule stœchiométrique comprise dans ce domaine. Des systèmes peuvent même comporter plusieurs combinaisons intermétalliques : ainsi, dans le système Mg-Cu, existent les deux combinaisons $MgCu_2$ et Mg_2Cu (*fig.* 29).

Cas des alliages ternaires

Les principes que nous venons d'exposer pour les systèmes binaires sont applicables aux systèmes ternaires. On utilise toutefois pour les représenter un triangle équilatéral dans lequel un alliage de composition donnée est représenté par un point, la température étant portée perpendiculairement au plan du triangle. L'étude des équilibres de phases au cours du refroidissement se fait en projetant sur un même plan les différentes coupes isothermes selon les méthodes utilisées habituellement en cartographie.

Bases thermodynamiques des diagrammes d'équilibre

Soit un système chimique renfermant plusieurs constituants à l'équilibre à une température donnée. L'interprétation thermodynamique des diagrammes d'équilibre consiste à prévoir, pour cette température, la nature, le nombre et les compositions des phases en présence. L'état d'équilibre correspondant du système est réalisé dans les conditions considérées quand l'enthalpie libre G est minimale. Or on sait que G est reliée à l'enthalpie H et à l'entropie S par la relation : $G = H - TS$, où T est la température absolue.

L'approche thermodynamique va donc consister à étudier les variations ΔG en fonction de la concentration à la température considérée. Pour ce faire, on étudie séparément les variations ΔH et ΔS. Le cas le plus simple est celui d'un alliage binaire dont les deux constituants sont miscibles en toutes proportions. Pour le terme d'entropie, on ne conserve en général que la contribution de l'entropie de désordre, et on montre que la variation est continue en fonction de la composition. Quant à l'enthalpie, il faut tenir compte des types de liaisons, suivant que les voisins d'un atome donné sont de même nature ou de nature différente. A chacune des liaisons est associée une enthalpie élémentaire négative, calculée par rapport à un état de référence, par exemple celui des atomes isolés à l'état gazeux. Suivant les valeurs comparées de ces enthalpies élémentaires, nous aurons une solution solide ou un phénomène de démixtion ; dans ce dernier cas, le système est constitué par des agrégats d'atomes de même espèce.

A l'aide de la relation $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$, on peut donc calculer la variation de l'enthalpie libre ΔG correspondant à la formation d'une phase. En superposant sur un même diagramme $\Delta G = f$ (composition) les courbes de variations d'enthalpie libre pour les différentes phases et en traçant les tangentes communes à ces courbes, on délimite l'étendue des domaines mono-, bi- ou triphasés.

La *figure* 30 représente deux exemples correspondant au cas d'une miscibilité totale à l'état liquide et à l'état solide pour un diagramme à un seul fuseau et au cas d'une transformation eutectique.

▼ *Figure 30 : diagrammes d'équilibre d'un alliage binaire A-B et variations correspondantes de l'enthalpie libre des solutions liquides et solides à une température T_1 donnée, en fonction de la composition de l'alliage ; a, diagramme à un seul fuseau ; b, diagramme dans le cas d'une transformation eutectique.*

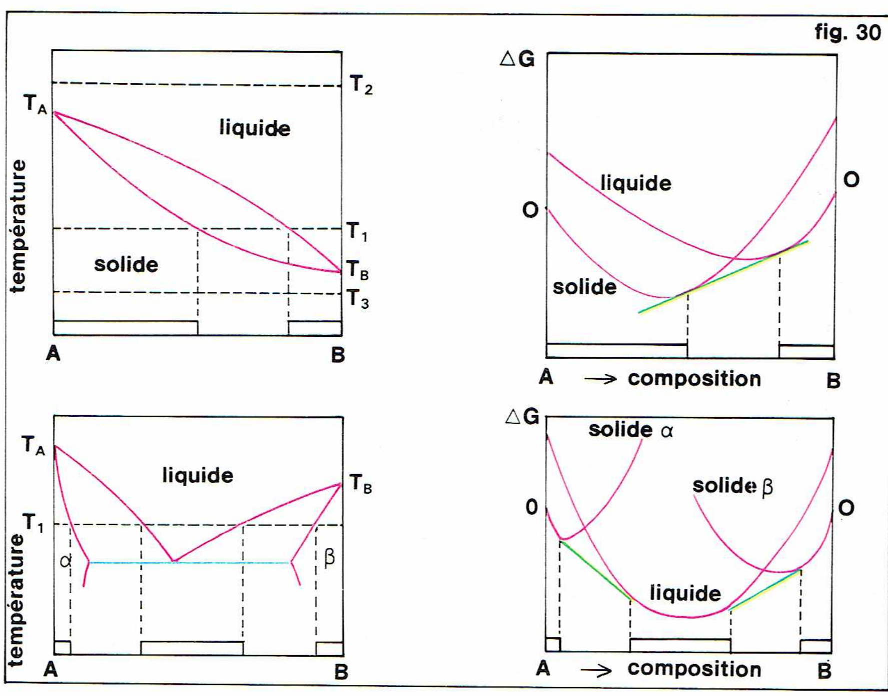

Conditions réelles de solidification

Les diagrammes précédents correspondent au cas où les différents systèmes considérés passent au cours du refroidissement par une succession d'états très proches de l'état d'équilibre à chaque température. En pratique, on est assez éloigné de ces conditions. On observe ainsi un phénomène de *ségrégation* dite *primaire,* qui va se traduire par une variation de la composition du cristal au cours de sa croissance. Les éléments étrangers ont tendance à se

rassembler dans les régions externes des cristaux. Cette ségrégation est gênante pour le métallurgiste, et il sera nécessaire, dans la mesure du possible, de la faire disparaître par des traitements thermiques et mécaniques. On observe également la *ségrégation* dite *secondaire,* ou encore majeure, qui se produit à l'échelle du *lingot*. Les impuretés, notamment celles qui donnent avec le métal de base des phases dont la température de fusion est faible, vont migrer vers la région centrale du lingot, la dernière à subir la solidification. Celle-ci s'accompagne en outre d'une accumulation de gaz occlus. Ces phénomènes jouent un rôle important dans les divers processus de solidification des lingots ; on y observe également la ségrégation inverse

Transformations à l'état solide

L'analyse de la solidification ne permet pas toujours de connaître la structure et les propriétés d'un système à température ordinaire. En effet, l'alliage est souvent le siège de transformations telles que la modification du nombre de phases, le changement de structure cristalline, qui se produisent à l'état solide.

Les transformations à l'état solide sont en général étudiées expérimentalement à l'aide des principales techniques suivantes : l'*analyse thermique* simple ou différentielle, l'*analyse dilatométrique* (*fig.* 31), et la *thermomagnétométrie*. Ces méthodes enregistrent les changements brutaux, plus ou moins importants, d'une ou plusieurs propriétés de l'alliage considéré, lorsqu'on atteint la température correspondant à un point de transformation ; il suffit donc de tracer en fonction de la composition de l'alliage le lieu de ces points pour établir les *lignes de transformations* et tracer le diagramme correspondant. L'étude d'autres propriétés physiques ou encore les essais chimiques et mécaniques permettent de compléter les informations obtenues. En outre, les observations micrographiques et la radiocristallographie sont souvent indispensables pour préciser certaines parties du diagramme et connaître la structure. La détermination des diagrammes est un travail de laboratoire délicat et méticuleux, mais indispensable pour les applications industrielles. La première étude fut réalisée sur les aciers aux laboratoires Schneider du Creusot et publiée en 1883.

Parmi toutes les transformations pouvant se produire à l'état solide, citons celles qui correspondent à la formation d'une nouvelle phase au sein d'un milieu monophasé et homogène : la *transformation allotropique* d'un métal pur ou d'un alliage, la *précipitation* d'un composé intermétallique et l'apparition de deux phases nouvelles au sein d'une solution solide *(transformation eutectoïde)*.

Du point de vue morphologique, ces transformations procèdent de la même façon. Au cours du refroidissement d'une phase homogène, à la température où cette phase devient instable, on voit apparaître des **germes,** petits individus cristallins constitués de la phase nouvelle ; ces germes vont ensuite croître aux dépens de la matrice dans laquelle ils se sont formés, d'où le nom de réaction par « germination et croissance ». Dans le cadre de la théorie classique de la *germination homogène,* pour que tout germe soit stable et puisse se développer ultérieurement, il doit avoir une taille critique. Si l'on considère la phase B qui se forme à partir de la phase A, le rayon critique r_0 est donné par :

$$r_0 = \frac{-2\,\sigma}{\Delta G\,(A \rightarrow B)}$$

σ étant l'enthalpie libre superficielle de l'interface entre les phases A et B, et ΔG la variation d'enthalpie libre associée à la formation de la phase B à partir de la phase A. La valeur de r_0 dépend de la température, car ΔG (A → B) en dépend aussi.

Indiquons qu'il existe d'autres théories pour ces transformations et notamment celle de la décomposition spinodale.

Dans ce qui précède, les germes apparaissent au hasard au sein de la phase mère par suite des fluctuations de composition : c'est la germination homogène. Cependant, toutes les imperfections (joints de grain, dislocations) vont constituer des sites préférentiels pour l'apparition des germes : on parlera alors de processus de *germination hétérogène*.

La croissance des germes met en jeu la diffusion. Le système a tendance à réduire son enthalpie libre en diminuant la surface totale de la nouvelle phase ; le nombre de particules va décroître tandis que la taille moyenne de ces particules va croître. Si la transformation est réalisée à température modérée, on peut observer un développement des germes sous forme de plaquettes ou d'aiguilles parallèles à certains plans de la matrice.

Lignes de transformations

Les modifications subies par un alliage à l'état solide se traduisent sur le diagramme d'équilibre par des lignes de transformations. Examinons quelques exemples de transformations.

Les transformations allotropiques

Elles correspondent à un changement de structure. Par exemple, les transformations du fer pur :

$$\text{Fer } \alpha \text{ (c. c.)} \xrightarrow{910\ °C} \text{fer } \gamma \text{ (c. f. c.)} \xrightarrow{1\,400\ °C} \text{fer } \delta \text{ (c. c.)}$$

Ces points de transformation varient quand on ajoute des éléments d'addition (*fig.* 32).

fig. 31

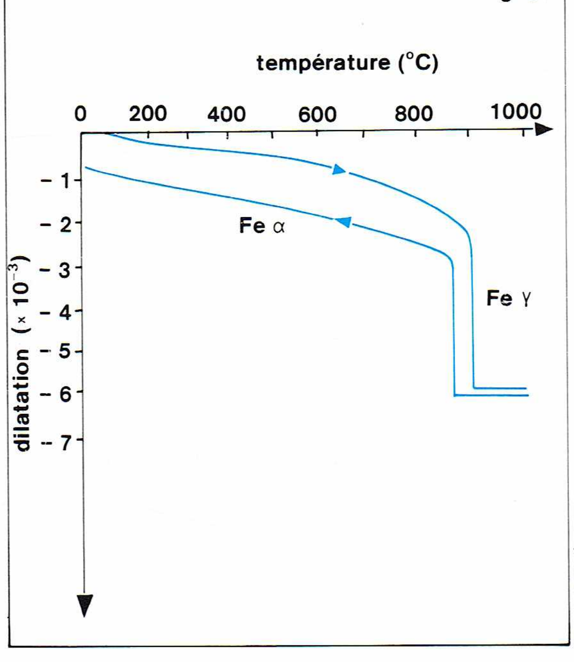

fig. 32

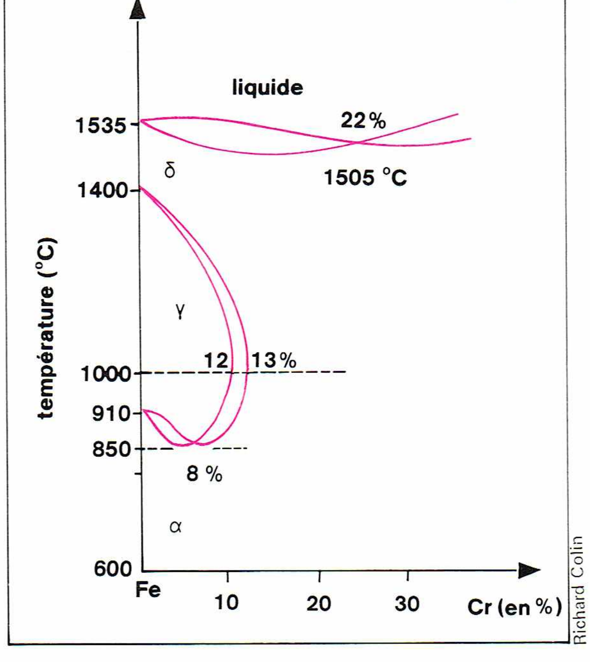

◀ *Figure 31 : courbe dilatométrique différentielle du fer mettant en évidence la transformation α → γ à 910 °C (d'après P. Lehr).*
Figure 32 : diagramme du système Fe-Cr du côté riche en fer, mettant en évidence l'influence du chrome sur les points de transformation allotropique du fer.

▶ *Structure perlitique dans un acier au carbone de composition eutectoïde.*

Photo G. Raclin - Lab. de métallurgie physique - Univ. d'Orsay

▶ *Figure 33 : représentation schématique du mécanisme de germination et de croissance de la perlite.*

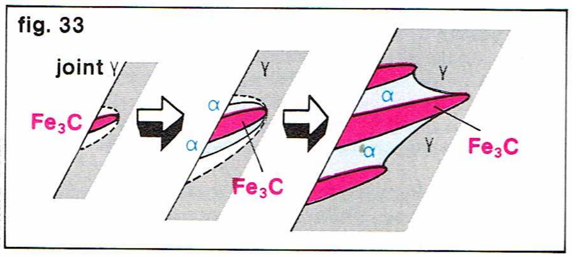

▶ *Figure 34 : diagramme d'équilibre fer-cémentite (rouge) et fer-graphite (vert).*

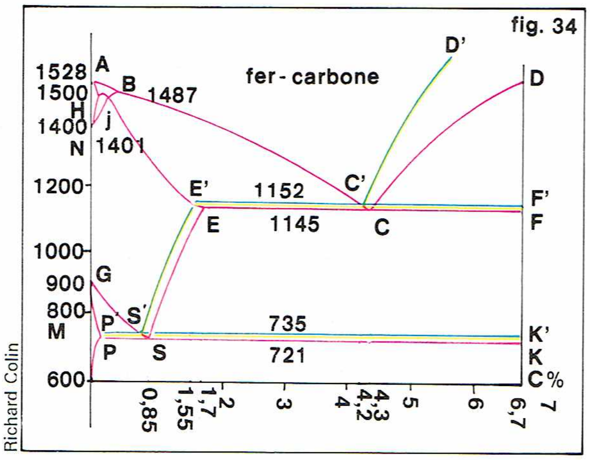

Les transformations eutectoïdes

Au cours du refroidissement, une solution solide donne naissance, dans ce cas, à deux nouvelles phases qui diffèrent l'une de l'autre et de la matrice, à la fois du point de vue chimique et structural. A titre d'exemple, considérons des alliages Fe-C; l'austénite α, de structure c. f. c., à 0,85 % de carbone, donne à 721 °C la perlite formée de ferrite (c. c.) et de cémentite Fe_3C suivant la réaction :

$$\text{solution solide } \gamma \leftrightarrows \text{solution solide } \alpha + Fe_3C.$$

On observe une succession de lamelles alternées des deux phases (*fig.* 33) ; l'espacement entre lamelles dépend de la température. La croissance des lamelles implique la diffusion du carbone vers la cémentite.

Les transformations péritectoïdes

La réaction est la suivante :

$$\text{solution solide } \alpha + \text{composé} \leftrightarrows \text{solution solide } \beta$$

▼ *Figure 35 : classification des alliages fer-carbone selon la teneur en carbone.*

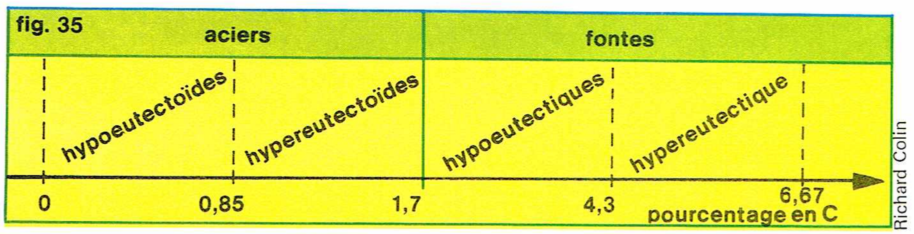

Diagrammes d'équilibre des alliages fer-carbone

A titre d'exemple, décrivons ces diagrammes qui ont évidemment une très grande importance, sur le plan pratique, puisqu'ils définissent les constituants des aciers et des fontes; ils sont nécessaires pour la compréhension des traitements thermiques correspondants. Deux diagrammes d'équilibre peuvent être établis (*fig.* 34) : le diagramme fer-cémentite Fe-Fe_3C ou *diagramme métastable* et le diagramme fer-graphite Fe-C ou *diagramme stable*. La cémentite Fe_3C peut au cours du refroidissement être décomposée suivant la réaction :

$$Fe_3C \rightarrow 3\ Fe + C;$$

la réaction inverse ne se produit jamais à l'état solide. Le graphite est considéré comme la phase stable et la cémentite comme la phase instable.

Diagramme fer-cémentite

- Les lignes de solidus et de liquidus font apparaître :
  — un eutectique (4,3 % C, 1 145 °C) appelé la lédéburite ; deux phases sont alors en présence : l'austénite à 1,7 % de carbone, et la cémentite ;
  — une solution solide de carbone dans le fer γ (c. f. c.) : l'austénite ;
  — un composé défini (6,67 % C) : la cémentite Fe_3C.
- Les lignes de transformation en phase solide indiquent l'existence :
  — d'un eutectoïde (0,85 % C, 721 °C) : la perlite constituée de ferrite à 0,02 % de carbone et de cémentite Fe_3C ;
  — d'une solution solide de carbone dans le fer α (c. c.) : la ferrite.

Remarquons que la solubilité maximale du carbone dans l'austénite (1,7 %, 1 145 °C) est bien supérieure à celle qu'il connaît dans la ferrite (0,02 % à 721 °C).

Les alliages fer-carbone sont classés en *aciers* (alliages qui contiennent jusqu'à 1,7 % de carbone) et en *fontes* (alliages contenant de 1,7 à 6,67 % de carbone) [*fig.* 35].

Diagramme fer-graphite

Ce diagramme est analogue au précédent et présente d'ailleurs avec lui une partie commune : les phases sont du même type que celles rencontrées précédemment ; il faut toutefois remplacer la cémentite par le graphite. Quelques petites différences apparaissent quant aux coordonnées des points eutectique (4,2 % C, 1 152 °C) et eutectoïde (0,7 % C, 735 °C).

Dans les fontes, on distingue :

— les *fontes blanches,* ainsi appelées en raison de l'aspect de leur cassure ; elles se refroidissent suivant les lignes du diagramme fer-cémentite ;

— les *fontes grises,* dont la cassure a une couleur grise ; elles effectuent une partie au moins de leur refroidissement suivant le diagramme stable fer-graphite. La fonte grise a l'inconvénient d'être fragile. Pour améliorer sa résistance, on peut ajouter au métal de base des éléments d'alliages (Ni, Cr, Mn) ou encore modifier la morphologie du graphite ; ainsi, au lieu d'avoir des lamelles, on peut obtenir le graphite sous forme sphérique : c'est la fonte à graphite sphéroïdal.

Dans le cas des aciers non alliés, la lecture du diagramme fer-cémentite indique les phases formées à une température donnée par refroidissement lent.

Les lignes de transformations du diagramme fer-cémentite sont symbolisées par la lettre A, affectée d'un indice qui correspond aux transformations observées au chauffage : A_1 : ligne de transformation eutectoïde (721 °C) ; A_2 : ensemble des points de Curie du fer pur et de ses solutions ferritiques ; A_3 : courbe de dissolution de la ferrite primaire dans l'austénite ; A_{cm} : ligne de dissolution de la cémentite secondaire dans l'austénite.

En pratique, les transformations ne s'effectuent jamais exactement aux températures lues sur le diagramme d'équilibre. On observe en effet un certain retard. Ainsi, au cours du chauffage, la transformation correspondant au point A_3 se produira au point A_{c3} situé à une température supérieure. Au refroidissement, on observe le même retard : le phénomène est inversé et le point correspondant est A_{r3}. L'écart entre les points A_{c3} et A_{r3} est d'autant plus grand que la vitesse de chauffage ou de refroidissement est grande. Cet effet d'hystérésis peut atteindre 20 °C.

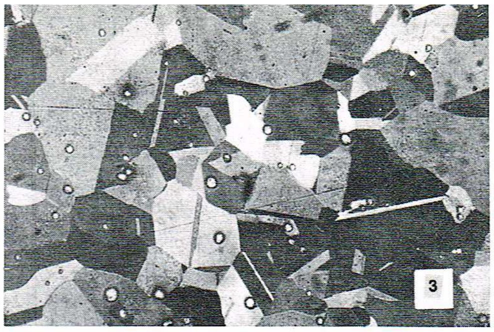

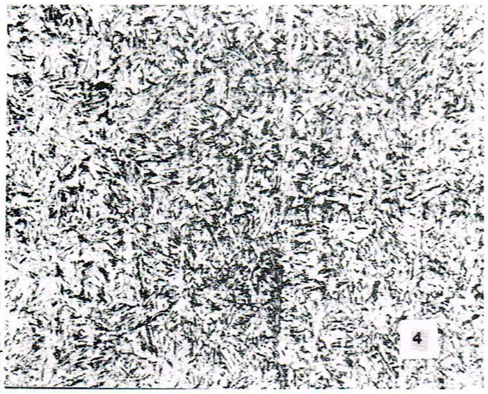

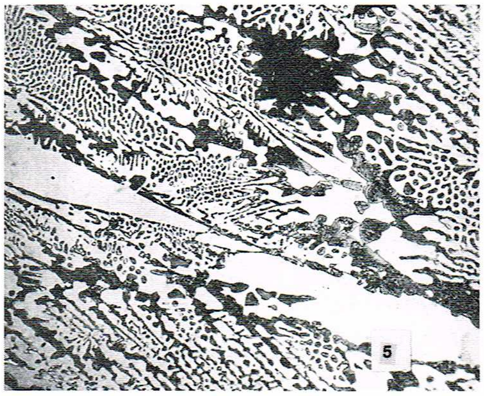

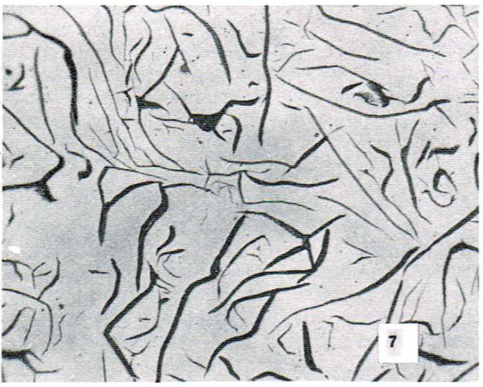

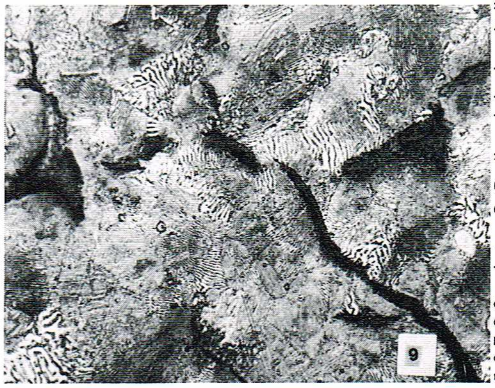

1-2-3-4 : photos M. D. Olory - Dépt de génie mécanique - U.T.C.

5-6-7-8-9 : photos G. Raclin - Lab. de métallurgie physique - Univ. d'Orsay

▲ 1, *acier à 0,1 % C ;*
2, *acier à 0,48 % C ;*
3, *acier à 0,48 % C (grossissement supérieur) ;*
4, *acier à structure martensitique ;*
5, *fonte blanche hypereutectique ;*
6, *fonte blanche hypo-eutectique ;*
7, *fonte grise-graphite en lamelles à distribution isotrope ;*
8, *fonte grise-distribution du graphite en rosettes ;*
9, *fonte grise perlitique.*

Autres transformations à l'état solide

Nous avons décrit précédemment des transformations où intervient la diffusion et qui sont dites transformations par germination et croissance. Elles figurent sur les diagrammes d'équilibre et correspondent à un refroidissement lent. Parmi ces transformations, nous avons signalé les réactions de précipitation et les réactions eutectoïdes. Mais d'autres transformations peuvent se produire sans diffusion ; ce sont les transformations martensitiques.

Les transformations martensitiques

La transformation d'une phase donnée en une nouvelle phase de même composition s'y effectue sans diffusion. Elle intervient dans la formation de la martensite des aciers à partir de l'austénite (d'où son nom). Elle se produit brutalement au refroidissement à partir d'une certaine température (point M_s pour les aciers). Presque toute la phase martensitique susceptible de se former à une température donnée apparaît d'emblée dès qu'on atteint cette température ; et si on maintient cette température, la transformation cesse. Par contre, si on diminue la température, le processus reprend par formation de nouveaux cristaux de martensite, et non par croissance des précédents. Le taux de transformation est fonction de la température. La martensite se présente en lamelles ou encore en aiguilles qui surgissent en un temps très court (10^{-4} s environ). Les transformations martensitiques ont lieu à des températures assez faibles pour lesquelles la mobilité des atomes est faible.

Dans certains cas, cette transformation caractérisée par un changement de volume s'accompagne d'un cliquetis audible. Du point de vue structural, la transformation martensitique résulte d'un mouvement coopératif des atomes ; le mécanisme est assimilable à un cisaillement. A cause du mouvement coordonné des atomes, il existe une relation cristallographique entre les deux phases.

Autres transformations

Il existe des transformations intermédiaires dans lesquelles interviennent à la fois un phénomène de diffusion à courte distance et une transformation martensitique. Citons la *transformation bainitique* rencontrée dans le cas des aciers et la *transformation massive* observée dans les aciers Maraging.

▼ *A gauche et au milieu, structures micrographiques d'une fonte à graphite sphéroïdal à matrice ferritoperlitique (grossissements faible et fort). A droite, aiguille de martensite (acier à 1,2 % C).*

Photo D. Rousseau - Dépt de génie mécanique - U.T.C.

Photo R. Dessieux Univ. d'Orsay

▶ *Martensite massive Fe-Ni 28.*

Photo R. Dessieux - Lab. de structure des matériaux métalliques - Univ. d'Orsay

STRUCTURES PARTICULIÈRES

Les polymères

Les polymères apparaissent comme des matériaux très différents de ceux qui sont extraits du milieu minéral.

Bien avant les progrès spectaculaires de la chimie organique à la fin du XIX^{e} siècle, bien avant la découverte de leur structure particulière, des matériaux organiques polymériques étaient utilisés. Laque, vernis, enduit, gomme et autres produits extraits de la nature ont tenu une place importante dans la vie quotidienne de l'homme. Plus récemment le caoutchouc extrait de l'hévéa a vu ses débouchés se développer considérablement de par l'avènement de la civilisation technologique au XIX^{e} siècle. Quelques dizaines d'années avant, Joule avait étudié les curieuses propriétés d'élasticité de ce composé, sans pouvoir expliciter clairement l'origine de ce comportement.

Avant de participer de manière décisive au développement des polymères, les chimistes organiciens avaient constaté que, lors de certaines expériences, ils obtenaient au fond de leurs ballons des masses solides plus ou moins plastiques, quelquefois caoutchoutiques, qu'il était très difficile de dissoudre mais dont la composition chimique n'était pas différente de celle d'un composé organique classique. De même il avait été constaté que le caoutchouc extrait de l'hévéa répondait à la formule chimique C_5H_8 et que par pyrolyse on obtenait un liquide volatil répondant à la même formule : l'isoprène. Les solutions de ces masses solides présentaient des comportements bizarres, en particulier des viscosités très importantes pour des concentrations relativement faibles. Les phénomènes de coagulation de ces solutions amenèrent la théorie des micelles, sorte d'agrégats de molécules qui expliquait l'identité des compositions associée à des propriétés différentes. Ce n'est qu'en 1930, à la suite de travaux de plusieurs chercheurs dont le plus important fut Staudinger, que le concept de *macromolécule* s'est imposé.

▼ *Sphérolites de polyoxy-éthylène (microscope polarisant).*

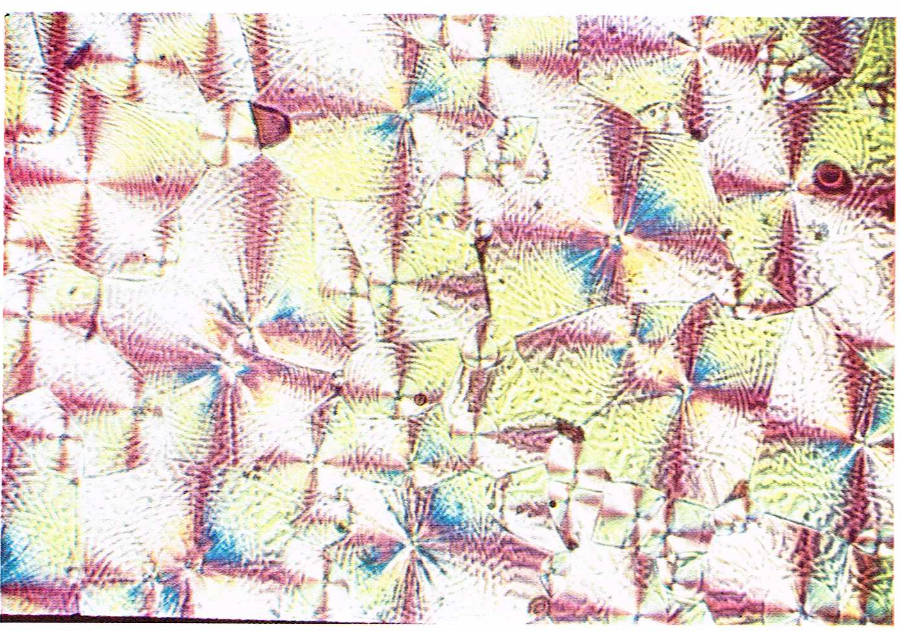

Centre de recherche sur les macromolécules de Strasbourg
Centre national de la recherche scientifique

La structure de base d'un polymère est la macromolécule ou molécule géante. L'image d'une chaîne de grande longueur représente bien cette structure et les spécialistes utilisent souvent le terme « chaîne macromoléculaire ». La molécule de base d'un polymère, c'est-à-dire l'élément constitutif de la chaîne macromoléculaire, est répétée un grand nombre de fois suivant un mode plus ou moins régulier selon les méthodes d'obtention. D'après cette structure, les maillons élémentaires ont donc des interactions fortes avec leurs voisins situés dans la même chaîne mais des interactions beaucoup plus faibles avec les maillons d'une autre chaîne voisine. Dans le polyéthylène, par exemple, l'élément constitutif — CH_2 — est lié à ses voisins de la même chaîne par de fortes liaisons C—C et à d'autres éléments —CH_2— d'autres chaînes par des liaisons beaucoup plus labiles.

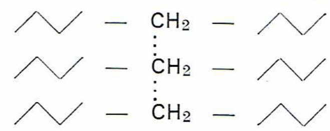

La chaîne macromoléculaire, comme une ficelle ou une chaîne classique, possède des propriétés de flexibilité. A l'état fondu, en solution et souvent à l'état solide, la grande flexibilité des chaînes macromoléculaires entraîne une structure en pelote repliée, chaque chaîne étant très fortement enchevêtrée avec ses voisines. A partir de cette structure de base en pelote repliée et enchevêtrée, il est possible d'expliquer le comportement des matériaux polymériques, qu'ils soient constitués de chaînes indépendantes comme dans les thermoplastiques ou d'un réseau, sorte de filet tridimensionnel, comme dans les composés dits thermodurcissables. En particulier, le comportement caoutchoutique, spécifique d'une structure macromoléculaire, s'explique par l'élasticité de caractère entropique, liée aux possibilités de repliement et dépliement des chaînes.

Depuis 1930, des progrès considérables ont été effectués dans la connaissance des polymères et en particulier sur l'état solide. Il a été montré très tôt que certains des polymères synthétiques alors connus présentaient des zones ordonnées, microcristallines, mises en évidence par la diffraction des rayons X. Ce n'est qu'à partir des années 1950 que la structure exacte de ces zones fut démontrée. Les chaînes macromoléculaires peuvent, si elles sont régulières et sans défaut, constituer un réseau cristallin sous la forme de lamelles où elles se trouvent perpendiculaires au plan de chaque lamelle et sous forme repliée. Un polymère semi-cristallin est un assemblage complexe de ces lamelles élémentaires et de matériau non ordonné dit amorphe. Un polymère dont la chaîne constitutive est irrégulière ne pourra s'organiser en unités ordonnées et gardera ainsi une structure amorphe.

Au cours des années d'après-guerre se sont précisés, outre la structure semi-cristalline, les propriétés et comportements des nombreux polymères que la chimie mettait à la disposition des utilisateurs. Citons : la transition vitreuse, point de transition entre le solide rigide et le solide caoutchoutique ; le comportement visco-élastique ou l'influence du temps sur la déformation des polymères ; la viscosité à l'état fondu.

Cet accroissement rapide des connaissances a été favorisé par le développement considérable, presque explosif, des matériaux polymériques. Presque nulle avant 1939, la consommation mondiale est actuellement supérieure à 30 millions de tonnes. On est loin des tonnages des métaux, mais en prix, le chiffre atteint la moitié de celui des aciers. Il n'est pas un secteur de l'industrie et de la consommation qui ne soit très fortement pénétré par ces matériaux. Un des facteurs dominants de leur succès est lié à leur facilité de transformation en produits finis. Les techniques de moulage, formage, filage, enduction...,

permettent un gain considérable sur le coût de fabrication. Allié à d'autres propriétés telles que légèreté, aspect, résistance à la corrosion, ce facteur explique le boom des matières plastiques de ces trente dernières années.

La création de ces produits synthétiques nouveaux ne doit pas faire oublier que les matériaux naturels, laine, coton, cuir, bois, chanvre, jute, etc., possèdent tous une structure de base macromoléculaire. Les progrès dans le domaine des polymères ont permis une connaissance maintenant précise de ces substances. Ceci est vrai également dans le cas des matériaux biologiques tels que les os et cartilages ou les constituants de tendons, artères, membranes, etc. La compréhension de ces structures d'origine naturelle a beaucoup apporté à l'homme. C'est peut-être un des facteurs de développement actuel de nouveaux matériaux comportant des structures complexes à plusieurs phases.

En effet, l'association de deux matériaux peut non seulement combiner deux propriétés désirées, par exemple rigidité et résistance chimique, mais aussi faire apparaître des comportements nouveaux. Un des exemples les plus simples est celui des composites résine-fibre de verre où l'association du verre très fragile et d'une résine peu rigide permet la préparation de structures dont le rapport résistance mécanique sur poids est supérieur à celui de tous les métaux.

Les progrès actuels et futurs sont liés à l'obtention de structures de plus en plus complexes et spécifiques. Parmi les réalisations développées ou en voie de l'être, citons : les mélanges polyphasiques pour une meilleure résistance au choc, les fibres à base de chaînes macromoléculaires ultra-orientées, les mousses et leur utilisation dans des structures de type sandwich.

Et l'homme, dans sa quête éternelle d'innovation, refera ces structures compliquées que la nature fabrique seule et si facilement.

Les céramiques et les verres

La céramique apparaît, sous forme de briques, en Égypte, vers 6000 avant Jésus-Christ. Le verre, quant à lui, est un matériau plus « jeune ». On en trouve les premières traces en Orient au quatrième millénaire avant notre ère. Ces deux types de matériaux comptent donc parmi les plus anciens utilisés par l'homme. Cependant, ils n'ont rien perdu de leur intérêt et connaissent même depuis peu des développements entièrement nouveaux. Les céramiques ont vu leurs matières premières se diversifier considérablement, tandis que l'on comprenait beaucoup mieux la structure physico-chimique du verre.

Les céramiques

Il est devenu très difficile de donner une définition générale des céramiques. On peut cependant qualifier ainsi l'ensemble des substances obtenues par chauffage à haute température de matières minérales non métalliques. Une telle définition « macroscopique » comprend les verres comme cas particulier. C'est seulement au niveau microscopique qu'une distinction sera possible.

L'histoire de la céramique traditionnelle, obtenue par cuisson des argiles, commence, nous l'avons vu, au sixième millénaire avant J.-C. Bien que ce matériau ait considérablement évolué, des vases grecs et étrusques aux porcelaines du XVI^{e} siècle, et de la faïence italienne aux porcelaines dures de la fin du XVIII^{e} siècle, il n'avait cependant servi jusqu'à une date récente qu'à fabriquer des briques, de la vaisselle et des produits réfractaires. Ce n'est qu'après la Seconde Guerre mondiale que les besoins de l'aéronautique, de l'électronique et des techniques nucléaires amenèrent le développement de nouveaux produits.

La céramique traditionnelle

La matière première essentielle pour la fabrication de la céramique traditionnelle est la kaolinite ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) que l'on utilise sous forme plus ou moins pure : le kaolin donne des produits à pâte blanche, tandis que les diverses argiles donnent des produits colorés. Le kaolin est habituellement mélangé à des produits siliceux, tels le feldspath et le quartz. L'argile additionnée d'eau donne au mélange sa plasticité avant cuisson, tandis que le quartz finement broyé évite le retrait lors du séchage. Le feldspath joue également un rôle essentiel en abaissant la température de cuisson du mélange. On distingue habituellement deux types de produits.

- *Les produits à pâte poreuse,* qui présentent une cassure opaque et terreuse. Ils sont perméables aux liquides et aux gaz et constituent des adsorbants. Ces propriétés s'expliquent par l'existence, dans la masse du matériau qui n'est pas fondu, de pores communicants. On rangera dans cette catégorie, à côté des terres cuites, des faïences et des briques, les matériaux réfractaires caractérisés par leur inertie thermique et chimique.
- *Les produits vitrifiés,* qui, au contraire des précédents, sont imperméables aux fluides. Leur cassure est luisante et ils ne sont pas adsorbants, car ils ne comportent que des pores fermés. Parmi les modifications induites par la cuisson dans ces produits, les deux plus importantes sont la formation de mullite à partir des silicates d'alumine portés à haute température et l'apparition d'un verre jouant le rôle de liant des matériaux originels non fondus comme le quartz.

Les céramiques à pâte vitrifiée comprennent les porcelaines, à pâte blanche, dures ou tendres suivant la température de cuisson, et les grès, que l'on qualifie de naturels s'ils sont composés d'une seule argile, et d'artificiels si on les obtient à partir d'un mélange d'argiles approprié.

Nous ne nous étendrons pas ici sur les diverses techniques de moulage qui permettent de donner au mélange plastique la forme souhaitée. Cette opération laisse en effet la structure du matériau inchangée. Il n'en est pas de même du séchage, au cours duquel on élimine l'eau des produits argileux, suffisamment lentement pour qu'il n'y ait pas rupture du matériau.

Lab. de physique des matériaux - Centre national de la recherche

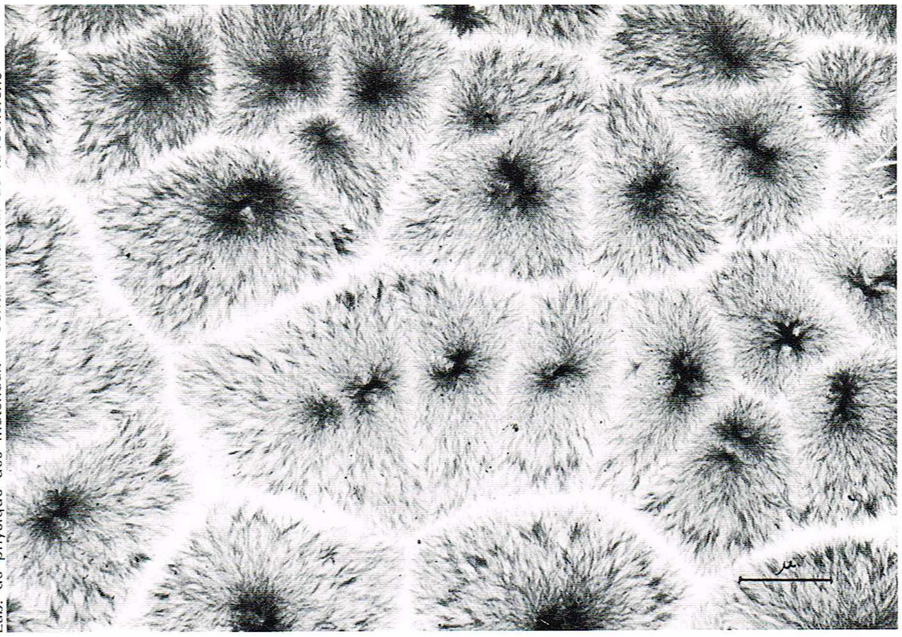

▲ ***Sphérolites dans un film de rilsan.***

E. Lessing - Magnum

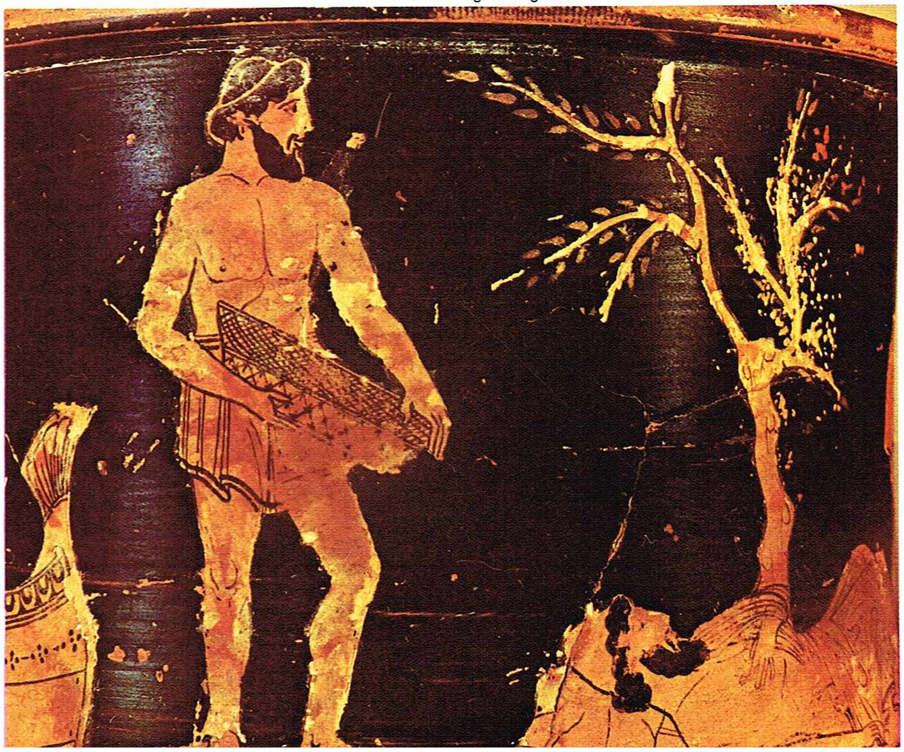

▼ ***Vase grec en céramique montrant Ulysse rapportant des cadeaux à Ithaque.***

La cuisson des objets façonnés s'effectue dans des fours dont on estime la température soit à l'aide de pyromètres électriques ou optiques, soit de façon plus spécifique en observant le ramollissement des cônes de Seger. Des modifications importantes du matériau ont lieu au cours de la cuisson : bien que son poids diminue, le phénomène de retrait augmente sa densité, tandis que sa solidité s'accroît. Le produit présente aussi d'importants changements de coloration, passant du blanc au crème, au rouge ou au brun foncé.

La cuisson provoque également des transformations chimiques considérables au sein du matériau. Après élimination de l'eau, les produits argileux sont transformés en mullite ($3Al_2O_3$, $2SiO_2$) et silice. On observe d'importantes variations dans la cristallisation de la mullite suivant la nature et la masse de la phase liquide qui se transforme au cours du refroidissement en une phase vitreuse. Cette vitrification est d'ailleurs plus ou moins complète suivant la vitesse de refroidissement.

La céramique se compose donc principalement de cristaux de mullite et de silice dispersés dans une phase amorphe. A ces constituants majeurs s'ajoutent diverses impuretés et des gaz.

Les produits céramiques récents

Céramiques nucléaires

L'uranium est un métal dont la température de fusion est assez basse, il présente un grand nombre de transformations de phases et une certaine anisotropie en phase α. De surcroît, il est pyrophorique et se corrode dans certains milieux tels que l'eau. Le thorium présente également un grand nombre d'inconvénients et n'est pas supérieur à l'uranium sur le plan mécanique. On a donc eu l'idée de pallier ces inconvénients en utilisant des céramiques à base d'oxydes ou de carbures de matériaux fissiles. Malheureusement, la proportion de matière active y est plus faible que dans le métal et la résistance aux chocs thermiques est moins bonne. Le monocarbure d'uranium est meilleur conducteur thermique que l'oxyde et a de bonnes qualités mécaniques quand il est fritté ; cependant, il reste pyrophorique. On l'utilise en général dans les réacteurs refroidis au sodium fondu où il est plus stable qu'en présence de gaz carbonique.

Céramiques pour outils

Les carbures, borures, siliciures, nitrures et oxydes sont extrêmement durs, mais ont une très faible résistance mécanique, il n'est pas question d'en faire des outils de coupe. Par ailleurs, on sait que des carbures métalliques donnent une très grande dureté à certains alliages dont le type même est l'acier. On a donc songé à réaliser des céramiques de coupe en mélangeant des produits céramiques (oxydes, nitrures, carbures) et des métaux : ce sont les cermets.

Verres céramiques

Ces matériaux sont intermédiaires entre le verre et la céramique. Du premier ils ont les caractéristiques de moulage, et de la seconde ils ont la texture finale. Ce sont des produits initialement amorphes comme les verres, auxquels on a fait subir une cristallisation partielle et contrôlée. Ils ont d'excellentes propriétés mécaniques, thermiques et électriques, et constituent des matériaux de choix pour l'industrie aérospatiale.

▼ ***Tableau IX : composition d'un verre industriel.***

Tableau IX
Composition d'un verre industriel

Composants	Pourcentages
Silice (SiO_2)	70
Alumine (Al_2O_3)	2
Oxyde de sodium (Na_2O)	14
Oxyde de potassium (K_2O)	0,5
Chaux (CaO)	10
Magnésie (MgO)	3,5

Les verres

Les verres sont caractérisés par l'isotropie de leurs propriétés qui les distingue des autres matériaux dont la plupart sont cristallisés. Cette isotropie est le reflet d'une absence d'ordre microscopique : le verre est un matériau amorphe. On conçoit actuellement un verre comme un réseau désordonné. Cependant, l'état vitreux, en raison même de son absence d'ordre, reste encore mal connu.

Composition

Le *tableau* IX donne la composition d'un verre industriel moyen. Cette composition finale est obtenue à partir d'un mélange de minéraux naturels portés à haute température :

— le sable de Fontainebleau ou le quartz naturel broyé fournit la silice ;

— le feldspath très pur produit de l'alumine, que l'on peut également introduire sous forme d'alumine hydratée chimique obtenue à partir de la bauxite ;

— la soude et la potasse donnent des oxydes alcalins ; on peut également utiliser des carbonates ;

— enfin, le calcaire et la dolomie fournissent la chaux et la magnésie, que l'on peut d'ailleurs ajouter directement au mélange.

Structure

Dans la silice pure, chaque atome de silicium est lié à quatre atomes d'oxygène, et chaque atome d'oxygène est lié à deux atomes de silicium. Il n'y a pas de liaison Si—Si ni de liaison O—O. La longueur de la liaison Si—O est de 1,62 Å, mais les angles valentiels n'ont pas des valeurs absolument fixes. Deux atomes de silicium sont placés de part et d'autre d'un atome d'oxygène, et l'angle valentiel de deux liaisons Si—O est voisin de 110°. Ces caractéristiques conduisent à la formation du réseau périodique du quartz. Mais, comme les angles valentiels peuvent être différents, le matériau peut former un réseau désordonné : c'est le verre de silice, dont la température de fusion est voisine de 1 750 °C. Une valeur aussi élevée s'explique par le grand nombre de liaisons fortes à détruire dans le matériau pour le faire passer à l'état liquide.

La présence d'oxydes alcalins dans le milieu modifie profondément cet état de choses. On a des réactions du type :

$$—Si—O—Si + Na_2O \rightarrow —Si—O^-Na^+ + Na^+O^-—Si—$$

La liaison O^-Na^+ est presque purement électrostatique : la température de fusion tombe à 1 050 °C. Malheureusement, la résistance du matériau aux attaques chimiques diminue, et il devient soluble dans l'eau. Pour résoudre ce problème, on construit des liaisons nouvelles, également à caractère ionique, à partir des ions Ca^{++} ou Mg^{++} que l'on introduit dans le matériau. Ce procédé augmente la température de fusion. Un des problèmes principaux de la fabrication du verre réside donc dans le choix d'un compromis entre une température de fusion basse et une grande inertie chimique. Il faut par ailleurs éviter la cristallisation des silicates de calcium et de magnésium. Les ions sont souvent obtenus à partir des carbonates, il se dégage donc du gaz carbonique au cours de la fabrication du verre. Les bulles produites sont favorables au maintien du désordre dans le matériau, mais il est indispensable de les éliminer. C'est le but de l'affinage, fusion prolongée que subit le verre avant d'être mis en forme et refroidi.

BIBLIOGRAPHIE

ADDA Y. et PHILIBERT J., *la Diffusion dans les solides,* P.U.F., Paris, 1966. - AZAROF L.D., *Introduction to Solides,* Mc Graw Hill, New York, 1960. - FICINI J., LUMBROSO-BADER N., et DEPEZAY J.-C., *Éléments de chimie physique, Structure de la matière,* Hermann, Paris, 1969. - JANOT C., GERL M., GRILHÉ J., et CAISSO J., *Propriétés électroniques des métaux et alliages,* Masson, 1973. - KINGERY W.D., *Introduction to Ceramics,* J. Wileyand Sons, New York. - LASZLO P., *les États de la matière,* coll. Enseignement des sciences (21), Hermann, Paris, 1974. - MERCOUROFF W., *Aspects modernes de la physique des solides,* Masson, Paris, 1969. - PEGUINS P., *la Physique des matériaux,* coll. Que sais-je ?, P.U.F., Paris, 1974. - RICHARDS C.W., *la Science des matériaux de l'ingénieur,* Dunod, 1961.

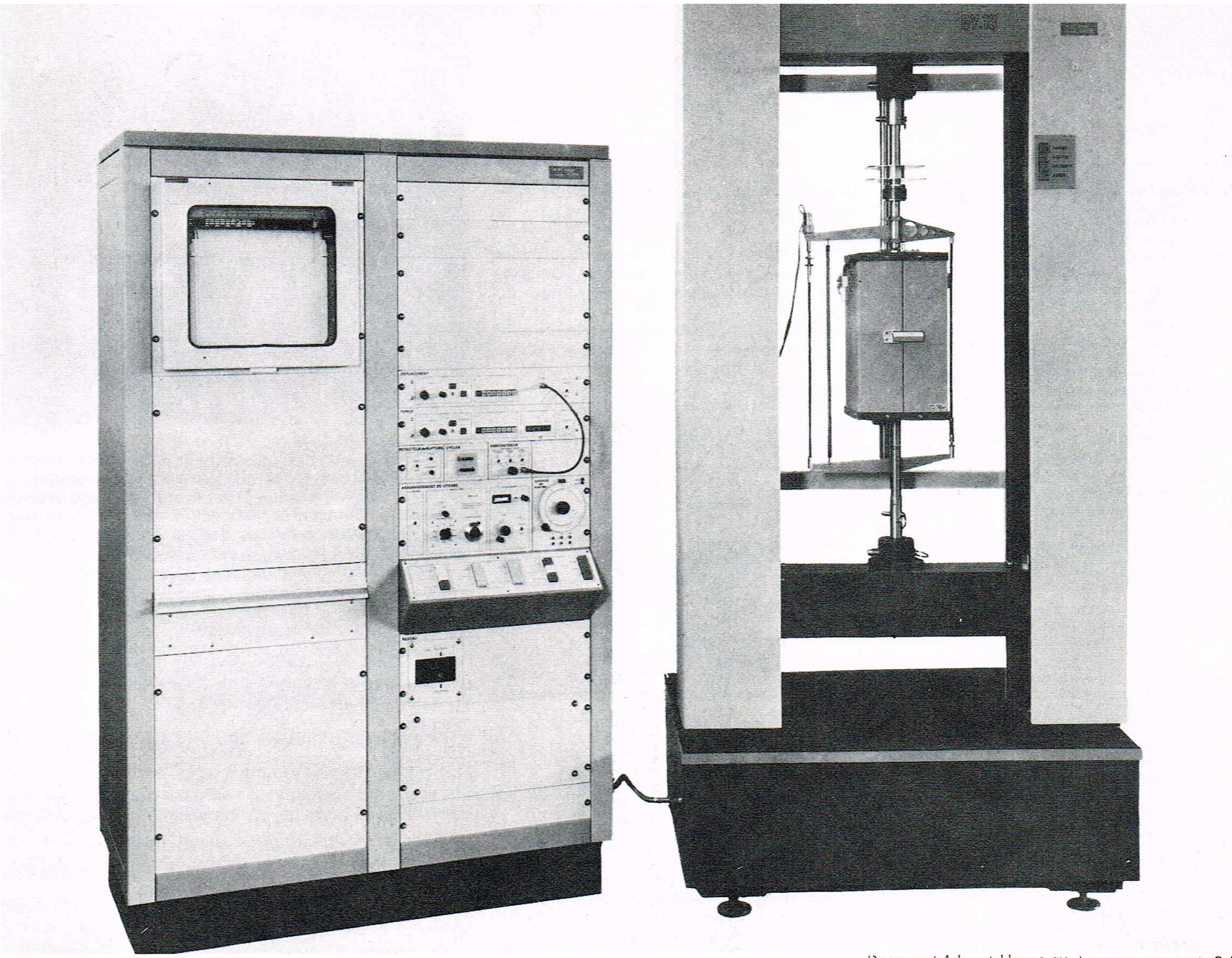

Document Adamel-Lhomargy division instruments S.A.

▲ *Machine universelle électronique pour essais de traction, compression, flexion... disposant d'une gamme complète d'accessoires : attaches et lignes d'amarrage, enceinte climatique, four, extensomètre, détecteur d'amorçage de fissuration, suiveur de fissure.*

PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES MATÉRIAUX

La notion de propriétés mécaniques des matériaux solides est liée à la constatation des faits expérimentaux suivants : déformation temporaire (élastique) ; déformation permanente (plastique) ; rupture partielle ou totale d'un corps solide.

Le comportement mécanique d'un matériau est déterminé par la relation qui existe entre le torseur des forces appliquées à la pièce et la déformation qui en résulte. De nombreux paramètres et facteurs physiques peuvent modifier la tenue mécanique du matériau ; ces facteurs d'influence, dont l'importance n'a été mise en évidence qu'au cours du temps, sont apparus souvent comme la conclusion logique de catastrophes subies par les constructions des ingénieurs.

Les facteurs d'influence importants sont les suivants :

— La vitesse de mise en charge ou de déformation, l'intervalle d'influence allant de la sollicitation statique jusqu'au choc adiabatique. Le *caractère de fragilité* des ruptures en sera une conséquence.

— La variation répétée dans le temps des efforts et des déformations, qui est la cause du phénomène dit de *fatigue* des matériaux solides.

— La température du solide lors de la sollicitation, l'intervalle d'influence allant de quelques degrés Kelvin à la température de fusion. Le phénomène de *fragilité* est lié à l'abaissement de la température, tandis que celui de *fluage* accompagne l'élévation de la température de sollicitation.

— La nature du milieu entourant le solide, et les échanges ayant lieu au niveau de l'interface, avec par exemple les phénomènes de *corrosion* gazeuse, liquide ou solide, de *fragilisation* par l'hydrogène ou d'*irradiation* par un flux de particules.

— La géométrie des contacts de la pièce considérée avec les solides voisins, qui détermine des états de contrainte locaux remarquables (état de contrainte de Hertz).

— La géométrie du corps, qui peut entraîner des distorsions de contrainte de très grande amplitude dans un volume très faible : c'est le phénomène de *concentration de contrainte*.

Contrainte et déformation d'un solide

L'étude des propriétés mécaniques des matériaux nécessite la définition de deux grandeurs nouvelles, liées, l'une à l'effort (forces) appliqué au solide, l'autre à la distorsion du solide qui en résulte. Ces deux grandeurs sont la *contrainte* et la *déformation*.

Contrainte

Position du problème

Nous voulons connaître et mesurer le mode de répartition, dans le matériau, des forces appliquées par des systèmes agissant sur la pièce considérée. Ces systèmes influencent la pièce soit par contact, et c'est le cas le plus usuel, soit à distance, et c'est le cas des forces de gravité ou des forces électromagnétiques.

Exemple 1 :

Une corde soumise à un état de traction est un système simple, et il est possible de décrire aisément la répartition de l'effort dans chaque section de la corde.

Exemple 2 :

Un rectangle de tôle soumis à un état de traction suivant une de ses diagonales est un système compliqué, et décrire la répartition de l'effort en tout point de la tôle est un problème complexe.

Définition physique

Nous allons représenter la force agissant sur une surface infiniment petite, isolée à l'intérieur de la matière solide. Autour du point M, l'élément de surface dS est représenté par le vecteur normal $\overrightarrow{dS}$. La force $\overrightarrow{df}$ est appli-

ONERA

▶ *Microfissures observées dans une tôle d'alliage de titane (base titane, avec 6 % d'aluminium et de vanadium) [le TACV] dans laquelle 80 % des grains ont leur plan (0001) perpendiculaire au plan de la tôle et parallèle à la direction de laminage ; cette tôle a été soumise à une corrosion par NaCl à 400 °C durant 96 heures et sous contrainte ; l'effort a été dirigé perpendiculairement à la direction de laminage ; soit ici dans le sens de la flèche.*

quée par la partie supérieure I du solide sur la partie inférieure II au travers de la surface dS.

La connaissance en *un point du solide* du vecteur $\vec{df}$ associé à un vecteur $\vec{dS}$ quelconque permet de calculer l'état de contrainte autour du point considéré. Cet état de contrainte local peut être représenté par un tenseur du deuxième ordre σ_{ij}.

De façon symbolique, on peut dire que la force f est égale au « produit tensoriel » de la contrainte par la surface $\vec{dS}$:

$$df_i = \sigma_{ij} \otimes dS_j$$

les vecteurs $\vec{df}$ et $\vec{dS}$, ou tenseurs du premier ordre, étant rapportés à une base orthonormée.

La *valeur numérique de la contrainte* en un point est proportionnelle à $\frac{|\vec{df}|}{|\vec{dS}|}$, elle apparaît bien comme une généralisation de la notion de pression.

Connaître l'état de contrainte d'un solide, c'est par conséquent être capable de calculer ou de déterminer expérimentalement le tenseur des contraintes pour chaque point de ce solide.

Exemples simples d'états de contrainte

— **État de contrainte hydrostatique.** Il est obtenu, par exemple dans un fluide, non visqueux, sous pression et au repos. En tout point du fluide les vecteurs $\vec{df}$ et $\vec{dS}$ sont parallèles et le rapport $\frac{|\vec{df}|}{|\vec{dS}|}$ est constant pour un point déterminé, quelle que soit l'orientation de $\vec{dS}$ (*fig.* 1a).

$$\sigma_{(M)} = \frac{|\vec{df}|}{|\vec{dS}|} \quad \forall \frac{\vec{dS}}{|\vec{dS}|}$$

L'état de contrainte en un point peut être représenté dans ce cas par un scalaire : la pression (tenseur d'ordre 0).

Remarque : nous avons pris comme exemple un milieu fluide, l'état de contrainte hydrostatique existe aussi dans un corps solide, mais il est moins évident.

— **État de contrainte normale (traction simple).** Il est obtenu en soumettant, par exemple, une barre rectiligne de section circulaire à deux forces opposées appliquées sur l'axe de la barre ; de plus, nous supposerons la dimension transversale très petite devant la longueur de la barre. En tout point de la barre, un élément de surface ayant une normale parallèle à $\vec{x'x}$ sera soumis à une force parallèle à $\vec{x'x}$ et d'intensité telle que $\frac{|\vec{df}|}{|\vec{dS}|}$ sera constant (*fig.* 1b).

— **État de contrainte de cisaillement simple.** Il peut être obtenu par la torsion d'un tube de section circulaire et d'épaisseur faible devant son rayon. En tout point du tube, un élément de surface ayant une normale parallèle à $\vec{x'x}$ sera soumis à une force perpendiculaire à $\vec{x'x}$ d'intensité telle que $\frac{|\vec{df}|}{|\vec{dS}|}$ sera constant (*fig.* 1c).

▼ *Figure 1 : quelques exemples simples d'états de contrainte ; a, état de contrainte hydrostatique (obtenu dans un fluide non visqueux sous pression) ; b, état de contrainte de traction simple (une barre rectiligne de section circulaire est soumise à deux forces opposées appliquées sur l'axe de la barre) ; c, état de contrainte de cisaillement simple (il s'agit d'un tube de section circulaire et d'épaisseur faible devant son rayon).*

fig. 1

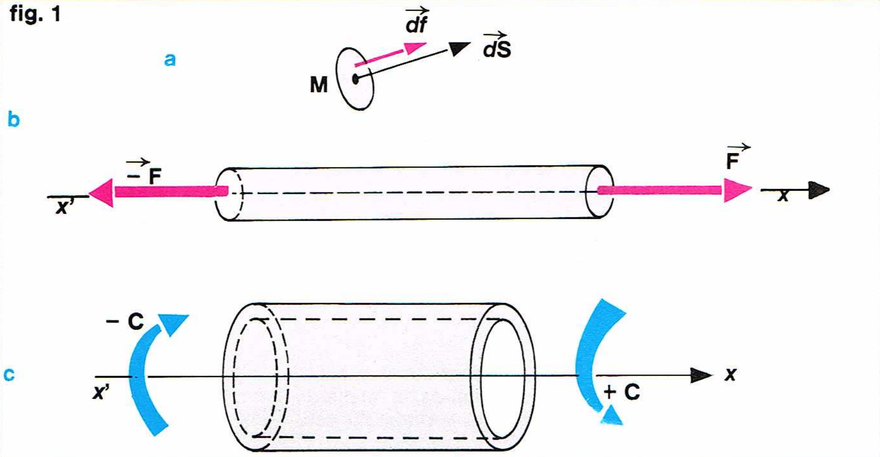

Richard Colin

Remarque. Les états de contrainte présentés ci-dessus sont dits *homogènes ;* en effet, le tenseur des contraintes est le même quel que soit le point envisagé dans le corps. Les états de contraintes homogènes sont particulièrement appréciés lors de la mesure des caractéristiques mécaniques des matériaux car ils permettent de mettre en évidence les phénomènes de façon plus claire et rendent les interprétations et les calculs plus simples.

État de contrainte complexe

— **Décomposition d'un état de contrainte.** Un état de contrainte donné peut toujours être représenté de façon univoque comme la somme de trois états de contrainte distincts si on applique le principe de superposition.

— *Contrainte normale et contrainte de cisaillement.* Soit un élément dS soumis à la force $\vec{df}$. Dans le cas général, dS et $\vec{df}$ sont quelconques l'un par rapport à l'autre, mais il est toujours possible de décomposer de façon unique la force $\vec{df}$ en deux composantes, l'une, $\vec{df_n}$, étant une force normale à l'élément dS, l'autre, $\vec{df_t}$, étant une force tangente à l'élément de surface dS.

Cette décomposition est valable quelle que soit l'orientation de la normale $\vec{dS}$ pour un même point M.

— *Contrainte normale et contrainte hydrostatique.* La composante $\vec{df_n}$ trouvée au point M dépend de l'orientation de $\vec{dS}$. Il est possible de calculer la contrainte normale moyenne au point M :

$$\langle \sigma_n \rangle = \frac{1}{4\pi} \int \frac{df_n}{dS} \cdot d\Omega$$

$$\langle \sigma_n \rangle = \frac{1}{2\pi^2} \int\int \frac{df_n}{dS} \cdot d\theta \cdot d\varphi$$

Cette contrainte normale moyenne représente la composante hydrostatique de l'état de contrainte au point M, mais des états de contrainte différents peuvent avoir la même composante hydrostatique. La contrainte normale pour une direction $\vec{dS}$ sera obtenue en soustrayant $\langle \sigma_n \rangle$ de la contrainte précédemment trouvée $\frac{|\vec{df_n}|}{|\vec{dS}|}$.

Finalement, l'état de contrainte le plus général apparaît comme la superposition de trois états : un état de contrainte hydrostatique ; un état de traction ou de compression simple ; un état de cisaillement simple.

Représentation tensorielle

Nous nous contenterons d'énoncer des résultats généraux en laissant au lecteur le soin de manipuler le tenseur des contraintes dans les cas simples puis de lire les ouvrages spécialisés.

★ *Représentation de l'état de contrainte autour d'un point.* C'est un tenseur symétrique d'ordre 2.

$$[\sigma_{ij}] = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$

Le nombre d'éléments indépendants est donc de six.

★ *Signification d'un élément du tenseur.* C'est un scalaire négatif, nul ou positif, ayant la dimension d'une pression.

L'élément σ_{21} représente la composante, suivant l'axe 2 d'un repère orthonormé, de la force par unité de surface qui s'exerce sur un élément dont la normale est parallèle à la direction 1 du même repère. Le tenseur étant symé-

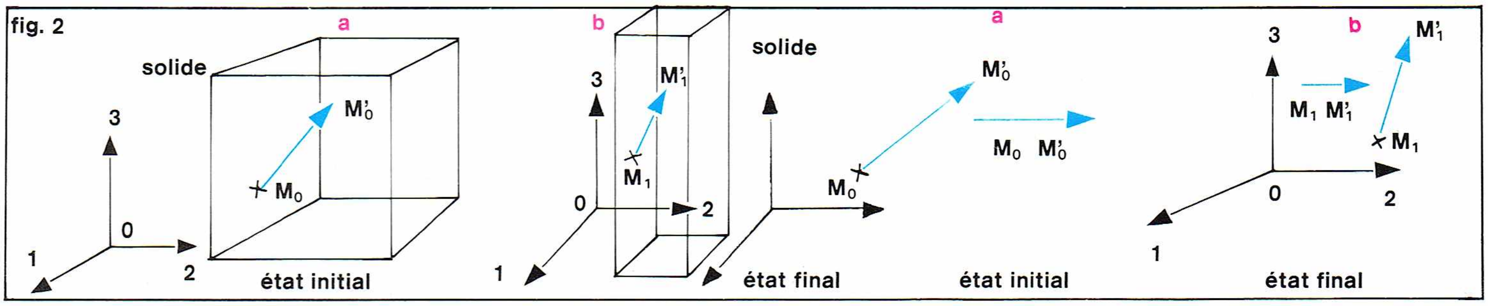

▲ *Figure 2 : changement de position de deux points d'un solide infiniment rapprochés, repérés par rapport à un trièdre orthonormé, lorsque le solide est soumis à un état de contrainte (le vecteur $\overrightarrow{M_0M'_0}$ s'est transformé en $\overrightarrow{M_1M'_1}$) ; a, état initial ; b, état final.*

trique, $\sigma_{12} = \sigma_{21}$, et l'on peut intervertir l'indice de la composante de la force et celui de la normale à l'élément de surface. Les éléments de la diagonale principale représentent des contraintes normales de traction ou de compression.

Les éléments restant de part et d'autre de la diagonale représentent les contraintes de cisaillement relatives aux directions indiquées par les indices.

* *Tension sur une surface quelconque.* Connaître la tension sur une surface déterminée, c'est connaître le vecteur force s'exerçant sur la surface d'aire unité. Au point M, la surface unité est connue par sa normale $\vec{l}$, et l'état de contrainte par le tenseur des contraintes $[\sigma_{ij}]$, les grandeurs utilisées étant repérées par rapport à un trièdre orthonormé.

La force appliquée sur la surface unité sera représentée par le vecteur de composantes :

$$f_{i(\vec{l})} = \sigma_{ij} \cdot l_j$$

les l_j sont les cosinus directeurs du vecteur $\vec{l}$ par rapport au trièdre orthonormé.

Déformation

Position du problème

Nous voulons connaître et mesurer la répartition de la distorsion du matériau lorsque des forces lui sont appliquées.

Définition physique

Étudions le changement de position de deux points du corps infiniment rapprochés, repérés par rapport à un trièdre orthonormé, lorsqu'un nouvel état de contrainte, entraînant une nouvelle distorsion du solide, lui est imposé. Les deux points du solide repérés dans l'état initial sont M_0 et M'_0 ; les deux *mêmes points* du solide repérés dans l'etat final sont M_1 et M'_1 (*fig.* 2).

Nous pouvons dire que le vecteur $\overrightarrow{M_0M'_0}$ s'est transformé en $\overrightarrow{M_1M'_1}$.

Il est possible de négliger l'aspect déplacement de la transformation $\overrightarrow{M_0M'_0} \rightarrow \overrightarrow{M_1M'_1}$. En effet, le déplacement d'un corps n'entraîne pas pour celui-ci de distorsion ; traçons donc le vecteur $\overrightarrow{M_0M''_1}$ tel que $\overrightarrow{M_0M''_1} = \overrightarrow{M_1M'_1}$. On pose : $\overrightarrow{M'_0M''_1} = \overrightarrow{du}$ et $\overrightarrow{M_0M'_0} = \overrightarrow{dl}$ (*fig.* 3).

Nous voyons que la connaissance, en tout point du corps solide, du couple des vecteurs $\overrightarrow{dl}$ et $\overrightarrow{du}$ permet de connaître la déformation du corps entraînée par le passage de l'état initial à l'état final.

Cet état de déformation local peut être représenté par un tenseur du deuxième ordre ε_{ij}.

De façon symbolique, on peut dire que la distorsion u est égale au « produit tensoriel » de la déformation par le vecteur initial $\overrightarrow{dl}$:

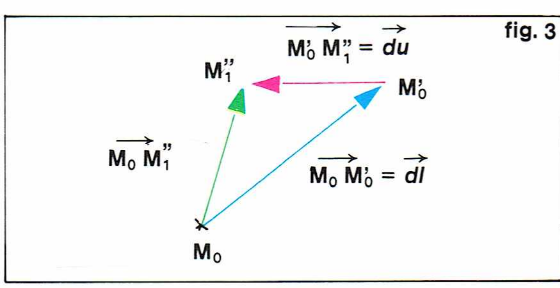

◀ *Figure 3 : voir développement dans le texte.*

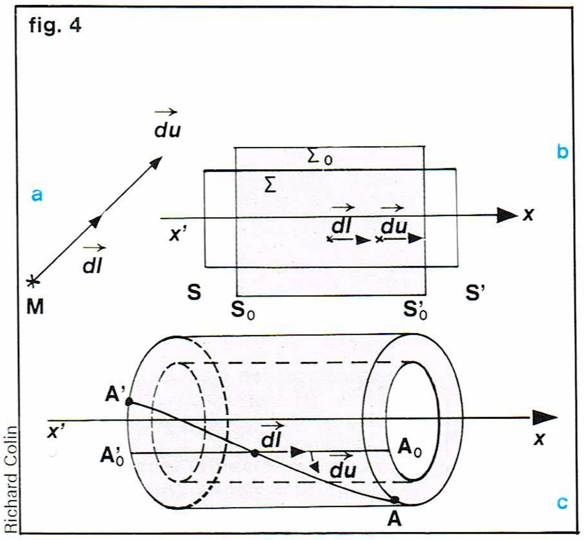

◀ *Figure 4 : quelques exemples simples d'états de déformation ; a, état de déformation hydrostatique (obtenu par la variation de pression d'un fluide non visqueux au repos) ; b, état de déformation de traction simple (dans une barre cylindrique soumise à un état de traction) ; c, état de déformation de cisaillement dans le cas de la torsion d'un tube mince ; la génératrice A'_0A_0 de l'état initial est transformée en une hélice A'A à l'état final.*

$$du_j = \varepsilon_{ij} \otimes dl_i$$

les vecteurs $\overrightarrow{dl}$ et $\overrightarrow{du}$, ou tenseurs du premier ordre, étant rapportés à une base orthonormée.

La *valeur numérique* de la déformation en un point donné sera proportionnelle à $\dfrac{|\overrightarrow{du}|}{|\overrightarrow{dl}|}$; cette grandeur n'a pas de dimension.

Connaître l'état de déformation d'un solide, c'est être capable de calculer ou de déterminer expérimentalement le tenseur des déformations pour chaque point de ce solide.

Exemples simples d'états de déformation

— **État de déformation hydrostatique.** Il est obtenu, par exemple par une variation de pression d'un fluide non visqueux et au repos. En tout point du fluide les vecteurs $\overrightarrow{du}$ et $\overrightarrow{dl}$ sont parallèles et le rapport $\dfrac{|\overrightarrow{du}|}{|\overrightarrow{dl}|}$ est constant, quelle que soit l'orientation du vecteur $\overrightarrow{dl}$ (*fig.* 4a).

$$\varepsilon_{(M)} = \frac{|\overrightarrow{du}|}{|\overrightarrow{dl}|} \quad \forall \quad \frac{\overrightarrow{dl}}{|\overrightarrow{dl}|}$$

L'état de déformation en un point peut être représenté dans ce cas par un scalaire ou tenseur d'ordre 0.

Remarque : l'action de la température sur un solide isotrope vis-à-vis de cette propriété a pour conséquence un état de déformation hydrostatique, une élévation de la température entraînant un état de dilatation, une diminution un état de condensation.

— **État de déformation de traction simple.** Reprenons l'exemple de la barre cylindrique d'élancement infini soumise à un état de traction. En tout point du corps, l'élément $\overrightarrow{dl}$ parallèle à l'axe de la barre est associé à une distorsion $\overrightarrow{du}$ qui lui est parallèle, et telle que $\dfrac{|\overrightarrow{du}|}{|\overrightarrow{dl}|}$ soit constant (*fig.* 4b).

Un tel état de déformation est dit normal suivant l'axe $\overrightarrow{x'x}$. Il peut être de compression ou de traction.

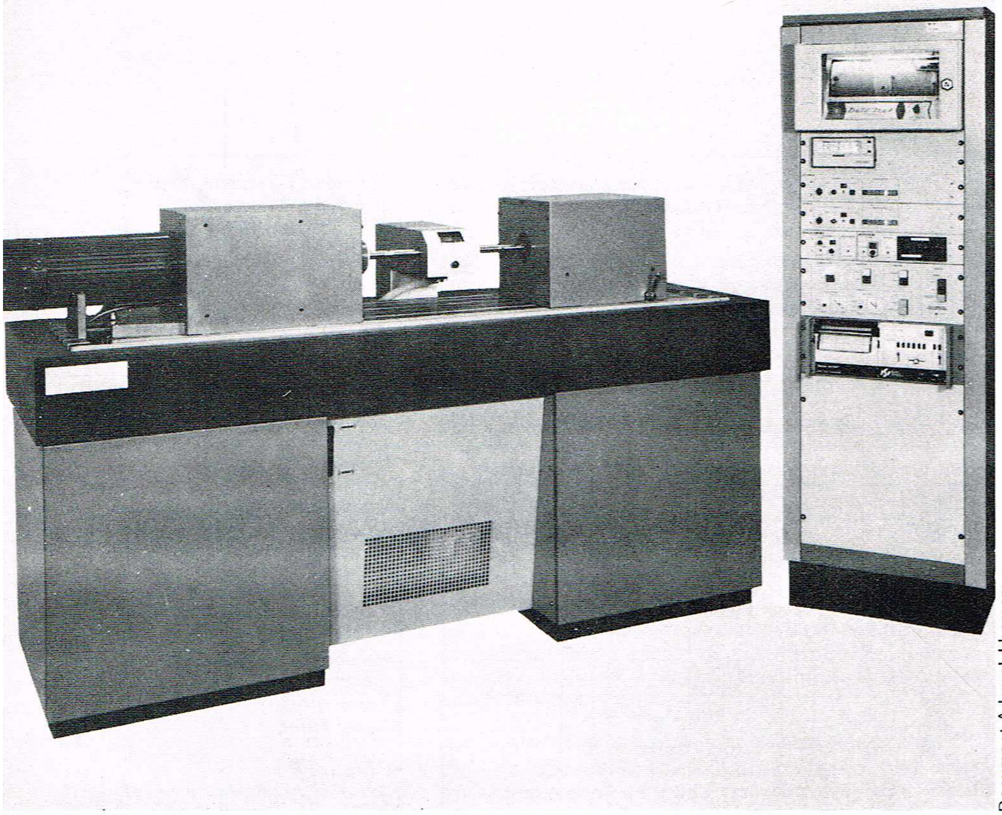

Document Adamel-Lhomargy division instruments S.A.

▲ *Machine de torsion pour la réalisation de l'essai de torsion à la température ambiante ou à chaud (couple maxi : 5 m ∧ daN ; température maxi : 1 400 °C).*

Remarque : la comparaison des états de déformation normale et hydrostatique fait apparaître une similitude des phénomènes, mais la symétrie sphérique du cas hydrostatique simplifie le phénomène.

— **État de déformation de cisaillement.** Reprenons l'exemple de la torsion du tube mince. En tout point du tube, un élément $\overrightarrow{dl}$, parallèle à l'axe $\overrightarrow{x'x}$, est associé à une distorsion $\overrightarrow{du}$ perpendiculaire et telle que $\frac{|\overrightarrow{du}|}{|\overrightarrow{dl}|}$ soit constant.

Un tel état de déformation est dit de cisaillement.

Remarque : les états de déformation décrits ci-dessus sont aussi homogènes. Ils présentent les mêmes avantages que les états de contrainte homogènes (*fig.* 4c).

▼ *Figure 5 : notations tensorielle et matricielle des contraintes et des déformations.*

fig. 5

NOTATION TENSORIELLE tenseur symétrique de rang 2		**NOTATION MATRICIELLE** matrice 1.6 ou 6.1
loi sur les indices		
le couple (*ij*)	⟷	indice unique *k*
(11)	⟷	1
(22)	⟷	2
(33)	⟷	3
(23) = (32)	⟷	4
(13) = (31)	⟷	5
(12) = (21)	⟷	6
loi sur les contraintes		
σ_{ij}	⟷	σ_k k = 1, 2, 3, 4, 5, 6
loi sur les déformations		
ε_{11}	⟷	ε_1
ε_{22}	⟷	ε_2
ε_{33}	⟷	ε_3
$\varepsilon_{23} = \varepsilon_{32}$	⟷	$\frac{1}{2}\varepsilon_4$
$\varepsilon_{13} = \varepsilon_{31}$	⟷	$\frac{1}{2}\varepsilon_5$
$\varepsilon_{12} = \varepsilon_{21}$	⟷	$\frac{1}{2}\varepsilon_6$

Richard Colin

État de déformation complexe

— **Décomposition d'un état de déformation.** Un état de déformation donné peut toujours être représenté comme la somme de trois états de déformation distincts, si on applique le principe de superposition.

— *Déformation normale et déformation de cisaillement.* Soit un élément $\overrightarrow{dl}$ distordu de la valeur $\overrightarrow{du}$. Décomposons de façon unique $\overrightarrow{du}$ en deux composantes, l'une, $\overrightarrow{du_n}$, étant la partie normale de la déformation, l'autre, $\overrightarrow{du_t}$, étant la partie tangentielle ou de cisaillement.

— *Déformation normale et déformation hydrostatique.* Par le même processus que celui utilisé pour les contraintes, il est possible de faire apparaître la déformation hydrostatique comme étant la valeur moyenne de la déformation normale autour du point considéré.

Finalement, l'état de déformation le plus général apparaît comme la superposition de trois états : un état de déformation hydrostatique ; un état de traction ou de compression simple ; un état de cisaillement simple.

Remarque : la décomposition de la contrainte et de la déformation en composantes normale, hydrostatique et de cisaillement est extrêmement importante pour la compréhension des phénomènes qui régissent les propriétés mécaniques des matériaux.

Représentation tensorielle

Nous nous contenterons, comme pour la représentation tensorielle des contraintes, d'énoncer des résultats généraux en laissant au lecteur le soin de manipuler le tenseur des déformations dans les cas simples puis de lire les ouvrages spécialisés.

⋆ *Représentation de l'état de déformation autour d'un point.* C'est un tenseur symétrique d'ordre 2.

$$[\varepsilon_{ij}] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix}$$

Le nombre d'éléments indépendants est donc de six.

⋆ *Définition d'un élément du tenseur.* C'est un scalaire, négatif, nul ou positif, sans dimension. Par rapport à un trièdre orthonormé $\overrightarrow{0x_1}$, $\overrightarrow{0x_2}$, $\overrightarrow{0x_3}$, et avec les notations utilisées, l'élément du tenseur est :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)$$

⋆ *Signification des éléments du tenseur.* Les éléments de la diagonale correspondent soit à des déformations normales, soit au cas particulier des déformations hydrostatiques. La variation relative de volume d'un élément spatial centré sur le point considéré, lors d'une déformation représentée par le tenseur $[\varepsilon_{ij}]$, est égale à :

$$\Delta = \varepsilon_{ii} = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}.$$

Les éléments non diagonaux correspondent à des mouvements de cisaillement. Il est possible de donner une signification physique simple à un terme ε_{ij}.

Deux vecteurs élémentaires $\overrightarrow{dx_i}$ et $\overrightarrow{dx_j}$, parallèles aux axes *i* et *j*, et par là perpendiculaires entre eux avant la déformation, feront, après que le corps aura été déformé, un angle γ_{ij}. On a alors :

$$\gamma_{ij} = \frac{\pi}{2} - 2 \cdot \varepsilon_{ij}.$$

Remarques :

1 — L'écriture tensorielle de la contrainte et de la déformation est la forme de présentation la plus logique, car elle met en valeur le « produit » de deux espaces et est généralisable à la majorité des phénomènes physiques.

Les tenseurs représentant les contraintes et les déformations étant de rang deux et symétriques, il est possible d'en présenter les termes dans des matrices déduites des tenseurs initiaux (*fig.* 5).

2 — En chaque point du solide le tenseur des contraintes et le tenseur des déformations sont réductibles à leurs axes principaux, que l'on nomme aussi *directions propres.* Les *directions principales* forment en chaque point un trièdre orthonormé (R'), qui, pris comme trièdre de référence local, donne au tenseur correspondant une forme particulièrement simple (*fig.* 6) :

$$[\sigma_{ij}] = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$

σ_{11}, σ_{22}, σ_{33} sont les contraintes principales au point considéré.

3 — La recherche de la contrainte appliquée à une surface de direction quelconque (recherche de la tension sur une surface) a été étudiée par Mohr qui en donne une solution géométrique très intéressante mais non évidente.

Comportement d'un matériau sous une sollicitation statique

Comportement élastique

En un point M d'un matériau au repos, à l'état initial nous supposons avoir un état de tension représenté par la contrainte $[\sigma_0]$ et un état de distorsion représenté par la déformation $[\varepsilon_0]$.

Appliquons au corps un torseur de forces tel qu'au point M l'état de contrainte change et soit augmenté de $[\sigma_1]$ tandis que l'état de distorsion augmente de $[\varepsilon_1]$. Le comportement du corps sera dit *élastique* si, l'action extérieure ayant cessé, la déformation en M reprend la valeur initiale $[\varepsilon_0]$ tandis que la tension est de nouveau égale à $[\sigma_0]$.

Exemple :

Dans les cas simples où les tenseurs $[\sigma]$ et $[\varepsilon]$ se réduisent à deux scalaires, on peut tracer la courbe reliant la contrainte et la déformation.

Élasticité linéaire (*fig.* 7a)

Le comportement le plus simple est donné par le cas de l'*élasticité linéaire.*

Dans le cas général, l'élasticité linéaire se traduit par une relation tensorielle linéaire :

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl}$$

Avec σ_{ij} : tenseur des contraintes, du deuxième ordre et symétrique.

ε_{kl} : tenseur des déformations, du deuxième ordre et symétrique.

C_{ijkl} : tenseur des rigidités élastiques, du quatrième ordre.

Cette loi de comportement est dite *loi de Hooke.* La symétrie des tenseurs $[\sigma]$ et $[\varepsilon]$ entraîne que le tenseur des rigidités n'a que trente-six éléments indépendants sur les quatre-vingt-un qui le composent.

La loi de Hooke peut aussi s'écrire :

$$\sigma_{ij} = C'_{ijkl} \cdot \frac{\partial u_l}{\partial x_k}$$

avec $C'_{ijkl} = \frac{1}{2} C_{ijkl}$ si $k \neq l$

et $C'_{ijkl} = C_{ijkl}$ si $k = l$.

Élasticité non linéaire

La relation entre $[\sigma]$ et $[\varepsilon]$ peut être non linéaire, par exemple un corps ayant un comportement linéaire pour des sollicitations infiniment lentes pourra, si la vitesse de mise en charge ou la vitesse de déformation augmentent, voir sa loi de comportement décrire le cycle donné par la *figure* 7.

Remarques :

1 — L'état de contrainte au repos $[\sigma_0]$, sans système de forces extérieures appliqué, correspond à un état de contraintes résiduelles.

2 — L'état de déformation $[\varepsilon_0]$ au repos, sans système de forces extérieures appliqué, correspond à un état de déformation résiduelle. Il est possible de mesurer expérimentalement cet état de déformation, et, en utilisant la loi de Hooke, de calculer l'état de contraintes résiduelles $[\sigma_0]$.

3 — Dans le cas du corps élastique linéaire le passage de l'état I à l'état II nécessite un travail des forces appliquées. L'énergie accumulée à l'état II est dite énergie potentielle de déformation élastique. On montre qu'elle est égale à :

$$\Phi = \frac{1}{2} C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{ij} \cdot \varepsilon_{kl}$$

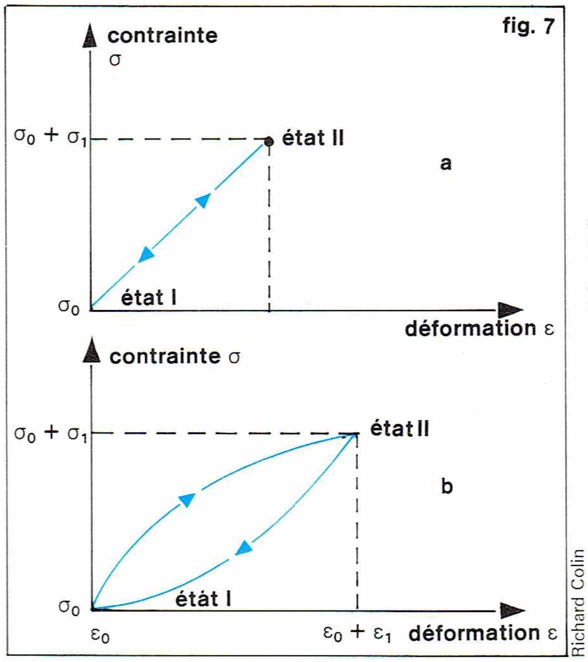

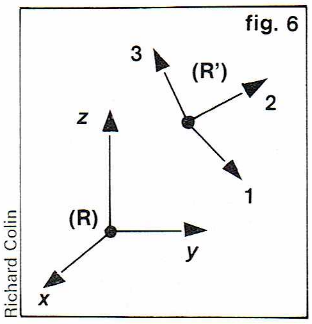

▲ ***Figure 6 : voir développement dans le texte.***

◄ ***Figure 7 : relations entre la contrainte (σ) et la déformation (ε) dans le cas du comportement élastique d'un solide :***
a, élasticité linéaire ;
b, élasticité non linéaire.

Avec Φ = densité d'énergie potentielle de déformation élastique.

ε_{ij}, ε_{kl} = accroissement de la déformation entre l'état I et l'état II.

4 — Si un corps élastique non linéaire subit un cycle I → II → I, l'énergie élastique emmagasinée à l'état II n'est pas intégralement restituée lors du passage de l'état II à l'état I. Cette énergie élastique, dont la grandeur est proportionnelle à l'aire de la boucle du cycle σ, ε, peut être transformée en chaleur ou provoquer des changements structuraux dans le matériau.

Homogénéité et isotropie

Vis-à-vis d'une propriété physique Φ, un corps sera dit *homogène* si la propriété Φ est indépendante du point considéré. Dans le cas de l'élasticité, le tenseur des rigidités d'un corps homogène vis-à-vis des propriétés élastiques ne sera pas une fonction de point.

Vis-à-vis d'une propriété physique Φ, un corps sera dit *isotrope* si, en un point donné, la propriété Φ est indépendante de la direction considérée.

Remarque : l'isotropie d'un corps ne peut être définie que pour une propriété ou un phénomène particuliers.

* *Propriétés d'élasticité et isotropie.*

Le comportement élastique d'un corps solide est représentable par la relation :

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl}.$$

Avec σ_{ij} = tenseur des contraintes, symétrique du deuxième ordre et à six éléments indépendants.

ε_{kl} = tenseur des déformations, symétrique du deuxième ordre et à six éléments indépendants.

C_{ijkl} = tenseur des rigidités élastiques, du quatrième ordre et à trente-six coefficients indépendants.

Les relations de symétrie étant :

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji}\,; \quad \varepsilon_{kl} = \varepsilon_{lk}\,; \quad C_{ijkl} = C_{jikl}, \quad C_{ijkl} = C_{ijlk}$$

Il est d'autre part possible de montrer que $C_{ijkl} = C_{klij}$ ce qui réduit à vingt et un le nombre d'éléments indépendants caractérisant le comportement élastique du corps le plus général, c'est-à-dire le moins isotrope. Il est facile de démontrer que plus un corps est isotrope, c'est-à-dire plus il possède de directions où les propriétés physiques sont équivalentes, moins il faudra de constantes indépendantes pour décrire un phénomène (le comportement élastique par exemple).

Le degré de symétrie d'un corps, cristallisé ou non, peut être représenté par la figure géométrique ayant exactement les mêmes symétries. On utilise pour cela la maille des

Tableau I
Relation entre l'isotropie d'un corps et le nombre de constantes indépendantes permettant de décrire son comportement élastique

Corps	Type de symétrie	Nombre de constantes d'élasticité indépendantes
Fluide isotrope non visqueux	Sphérique	2 dont 1 est nulle
Solide isotrope	Sphérique	2
Solide	Cubique	3
Solide	Hexagonale	5
Solide	Tétragonale	6 ou 7
Solide anisotrope	Triclinique	18

▲ *Tableau I : relation entre l'isotropie d'un corps et le nombre de contraintes indépendantes permettant de décrire son comportement élastique.*

réseaux cristallins, en y ajoutant la sphère dans le cas du corps isotrope (*tableau* I).

Remarques :

1 — Il est possible d'utiliser la notation matricielle de rang 6 pour représenter la loi de Hooke. Dans ce cas, et avec les mêmes notations que celles définies précédemment pour la contrainte et la déformation, l'élasticité du corps est représentée par une matrice carrée symétrique d'ordre 6.

2 — L'étude des caractéristiques mécaniques des matériaux à isotropie faible est extrêmement importante pour l'industrie. Le développement des calculateurs permet maintenant d'aborder ces problèmes pour des solides tels que le bois, les matériaux renforcés par fibres, les sols et les matériaux métalliques à structure orientée.

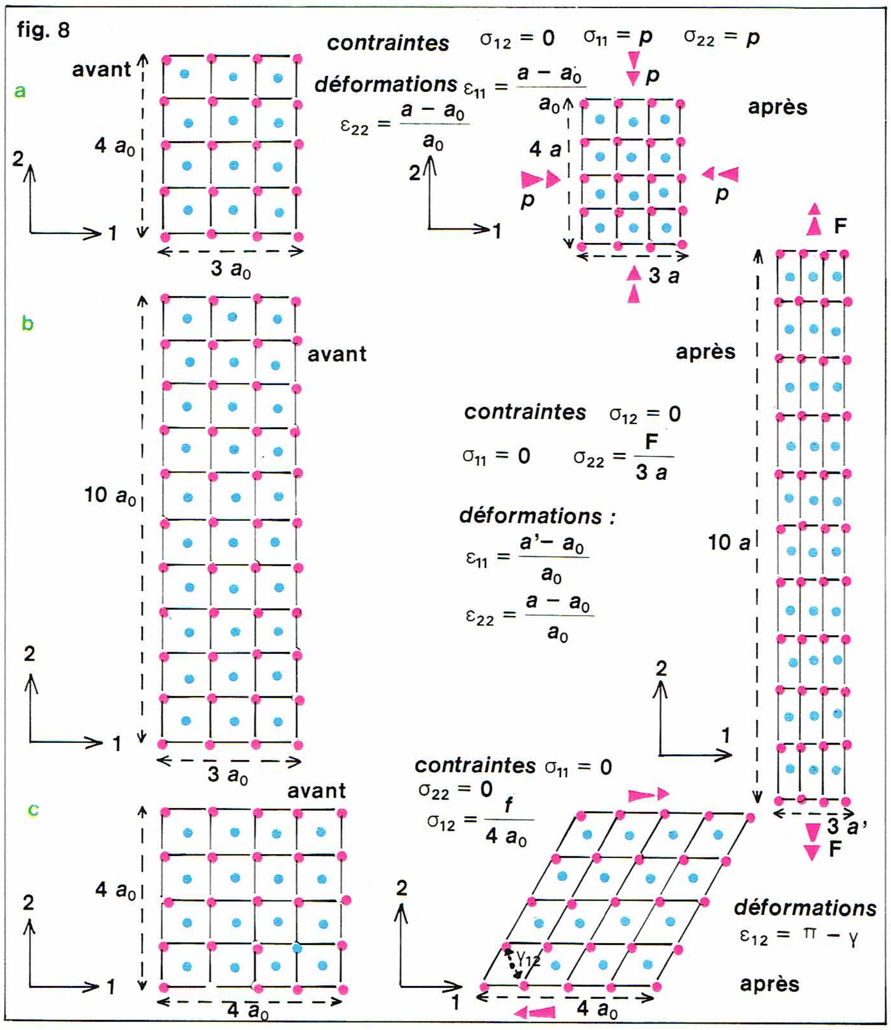

Description microscopique

Il est intéressant d'étudier sur un modèle de matériau le mouvement microscopique des éléments qui le composent.

Nous utiliserons un corps cristallisé à deux dimensions, le système de cristallisation étant le carré centré, avec un atome à chaque nœud du réseau.

Nous allons soumettre cet échantillon à différents états de contrainte et de déformation (*fig.* 8).

Remarque : les exemples ci-dessus peuvent être complétés en se fixant un tenseur d'élasticité ; il sera alors facile de calculer les contraintes et les déformations pour différentes directions.

Il est évident que si par un procédé adapté on peut mesurer la distance entre les atomes pour une direction connue, il est alors possible de connaître la déformation correspondante en comparant le résultat de la mesure avec la valeur théorique calculée en appliquant les lois de la cristallographie. On utilise actuellement la diffraction des rayons X pour mesurer en particulier les contraintes résiduelles des corps cristallisés.

Comportement plastique

En un point M d'un matériau au repos, à l'instant initial nous supposons avoir un état de tension représenté par la contrainte $[\sigma_0]$ et un état de déformation représenté par $[\varepsilon_0]$. Appliquons au corps un torseur de forces tel qu'au point M l'état de contrainte change et soit augmenté de $[\sigma_1]$ tandis que l'état de déformation augmente de $[\varepsilon_1]$. Le comportement du matériau sera dit *plastique* si, l'action des forces extérieures ayant cessé, la déformation en M ne reprend pas sa valeur initiale.

Plus précisément, si l'on fait croître lentement le torseur des forces appliquées au corps, le comportement du solide sera d'abord élastique, puis, à partir d'un certain état de contrainte, la région du solide entourant le point M considéré sera déformée plastiquement.

Exemple :

Dans les cas simples où les tenseurs des déformations et des contraintes autour du point M se réduisent à deux scalaires, on peut représenter l'évolution du système par une courbe (*fig.* 9).

Loi de comportement plastique

Le comportement d'un matériau dans le domaine plastique peut toujours être décrit ponctuellement par son état de contrainte et sa déformation, malheureusement la relation entre ces deux grandeurs n'est plus linéaire. Nous aborderons ce problème dans le cas simple de la traction.

Limite élastique

Il est extrêmement important de connaître à partir de quel état de contrainte le matériau ne suit plus le comportement élastique et entre dans le domaine plastique. En effet, une déformation plastique entraîne la ruine permanente du mécanisme qui la subit ; d'un autre point de

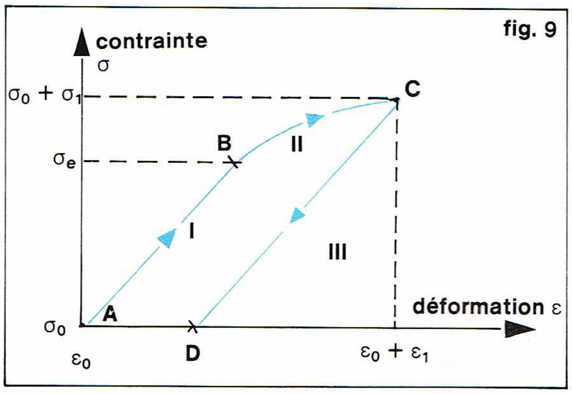

Richard Colin

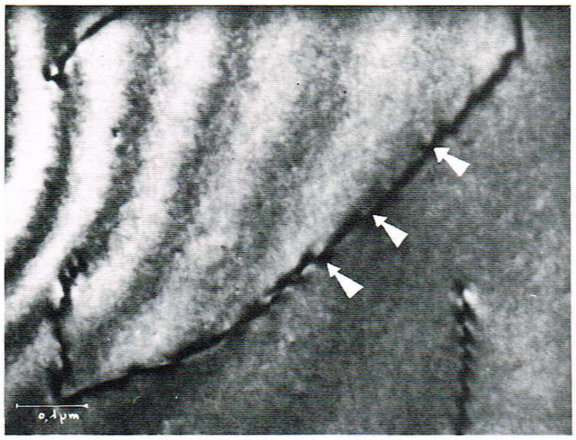

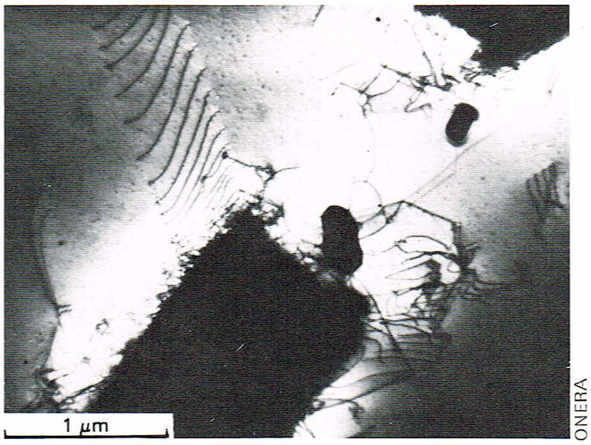

◀ *A gauche, une microphotographie montrant des décrochements dans une dislocation coin. Ces décrochements qui se propagent à grande vitesse ont été observés sur un alliage Ni Al lors d'une étude sur sa limite d'élasticité. A droite, clivage des fibres dû à la déformation plastique de la matrice dans un alliage Cotac (clichés en microscopie électronique).*

vue, il est nécessaire d'aborder le domaine plastique pour pouvoir former des objets par déformation d'un matériau.

Ce comportement limite est mesuré en général par la contrainte à la limite d'élasticité, ou contrainte d'écoulement plastique. S'il est possible de mesurer cette limite dans les cas particulièrement simples de la compression hydrostatique, de la traction simple ou du cisaillement, la connaissance de la limite d'élasticité lors d'un état de contrainte complexe fait nécessairement appel à de nouvelles hypothèses, qui sont les critères de plasticité.

Critères de plasticité

Dans le cas des matériaux isotropes, il est correct de considérer que la limite d'écoulement n'est pas atteinte tant qu'une fonction f de la différence des contraintes principales au point considéré n'a pas atteint une valeur maximale caractéristique du matériau.

Soit $f((\sigma_{11}-\sigma_{22}), (\sigma_{22}-\sigma_{33}), (\sigma_{33}-\sigma_{11})) = \text{constante}$

Il est évident que la composante hydrostatique n'apparaît pas dans un tel critère, puisque l'état de contrainte peut s'écrire :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma'_{11}+\sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & \sigma'_{22}+\sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & \sigma'_{33}+\sigma_m \end{bmatrix}$$

avec $\sigma_m = \dfrac{\sigma_{11}+\sigma_{22}+\sigma_{33}}{3}$

$$(\sigma_{11}-\sigma_{22}) = (\sigma'_{11}-\sigma'_{22})$$

La composante hydrostatique de l'état de contrainte n'apparaît donc pas.

★ *Critères de Tresca et de von Mises.*

Tresca admet comme critère de plasticité $|\sigma_{ii}-\sigma_{jj}| =$ constante avec $i \neq j$.

Cette constante peut être mesurée par des expérimentations simples.

— Si l'état de contrainte est de la traction simple :

$$\sigma_{22} = \sigma_{33} = 0 ; \quad |\sigma_{33}-\sigma_{11}| = |\sigma_{11}| = \sigma_{et} > 0$$

σ_{et} = contrainte à la limite d'élasticité en traction simple (résultat d'expérience).

— Si l'état de contrainte est du cisaillement simple :

$$\sigma_{11} = -\sigma_{33} \quad \text{et} \quad \sigma_{22} = 0$$

$$|\sigma_{33}-\sigma_{11}| = 2\,|\sigma_{11}| = 2\,\sigma_{ec.} > 0.$$

$\sigma_{ec.}$ = contrainte à la limite d'élasticité en cisaillement simple (résultat d'expérience).

On en déduit que :

$$\sigma_{et} = 2\,\sigma_{ec}.$$

Nous savons donc que la limite d'élasticité en cisaillement est moitié de la limite d'élasticité en traction, si l'on admet le critère de Tresca.

Von Mises préfère la relation :

$$(\sigma_{11}-\sigma_{22})^2 + (\sigma_{22}-\sigma_{33})^2 + (\sigma_{33}-\sigma_{11})^2 = \text{constante}.$$

Expérimentons. En état de traction simple :

$$\left|\begin{array}{l} \sigma_{22} = \sigma_{33} = 0 \\ (\sigma_{11}-\sigma_{22})^2 + (\sigma_{22}-\sigma_{33})^2 + (\sigma_{33}-\sigma_{11})^2 = 2\,\sigma_{et}^2 \end{array}\right.$$

En état de cisaillement simple :

$$\left|\begin{array}{l} \sigma_{11} = -\sigma_{33} \quad \sigma_{22} = 0. \\ (\sigma_{11}-\sigma_{22})^2 + (\sigma_{22}-\sigma_{33})^2 + (\sigma_{33}-\sigma_{11})^2 = 6\,\sigma_{ec}^2 \end{array}\right.$$

On en déduit que $\sigma_{et} = \sqrt{3} \cdot \sigma_{ec}$

Nous savons donc que la limite d'élasticité en cisaillement est racine de trois fois plus petite que la limite d'élasticité en traction si l'on adopte le critère de von Mises.

★ *Représentation graphique des critères de plasticité.*

Il est possible de représenter graphiquement la relation liant l'état de contrainte en un point à la limite d'écoulement. Nous prendrons le cas simple d'un tube mince soumis à un état de traction et de torsion combinés (*fig.* 10a).

Ce problème à deux dimensions peut être étudié en regardant l'état de tension d'un élément de tube (voir *fig.* 10b).

L'état de traction se traduit par les contraintes σ_{11} sur les faces 1. L'état de torsion se traduit par les contraintes σ_{12} sur les faces 1. L'équilibre de l'élément nécessite un état de contrainte σ_{12} sur les faces 2.

La valeur des contraintes principales σ'_{11} et σ'_{22} peut être calculée et l'on trouve :

$$\left|\begin{array}{l} \sigma'_{11} = \dfrac{1}{2}\,\sigma_{11} + \left(\dfrac{\sigma_{11}^2}{4} + \sigma_{12}^2\right)^{1/2} \\ \sigma'_{22} = \dfrac{1}{2}\,\sigma_{11} - \left(\dfrac{\sigma_{11}^2}{4} + \sigma_{12}^2\right)^{1/2} \end{array}\right.$$

◀▼ *Page ci-contre en bas, à gauche, figure 8 : mouvement microscopique des éléments d'un corps cristallisé à deux dimensions soumis à différents états de contrainte et de déformation (cas du comportement élastique) ; a, état de déformation hydrostatique ; b, état de traction simple ; c, cisaillement. Page ci-contre, en bas, à droite, figure 9 ; déformation d'un corps : relation entre la contrainte (σ) et la déformation (ε) dans le cas du comportement plastique d'un solide ; de A à B, il y a évolution élastique linéaire, de B à C évolution plastique, et de C à D évolution élastique linéaire ; la pente quasi identique des parties I et III est une fonction des coefficients d'élasticité ; le passage du domaine élastique au domaine plastique se traduit toujours par une diminution de la pente dans les coordonnées σ et ε. Ci-dessous, figure 10 : a, cas d'un tube mince soumis à un état de traction et de torsion combinées ; b, simplification par l'étude de la tension d'un élément du tube.*

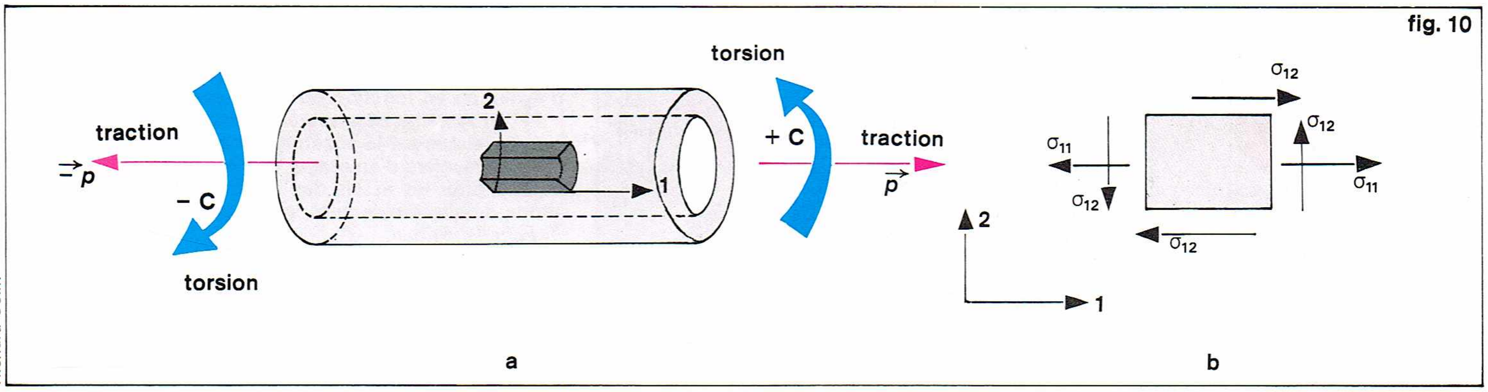

▶ *Figure 11 : critères de plasticité pour un problème à deux dimensions ; la signification des domaines est la suivante :*
I, comportement élastique suivant Tresca ;
II ∪ III, comportement plastique suivant Tresca ;
I ∪ II, comportement élastique suivant von Mises ;
III, comportement plastique suivant von Mises.

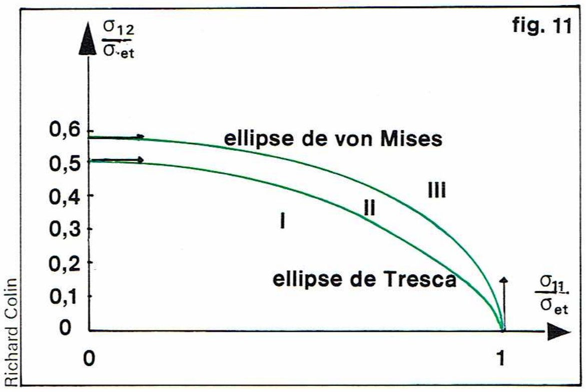

▶ *Figure 12 : déplacement microscopique des éléments dans un corps cristallisé (cas du comportement plastique) ;*
a, état initial ;
b, déformation plastique par glissement local sous un état de contrainte de traction.

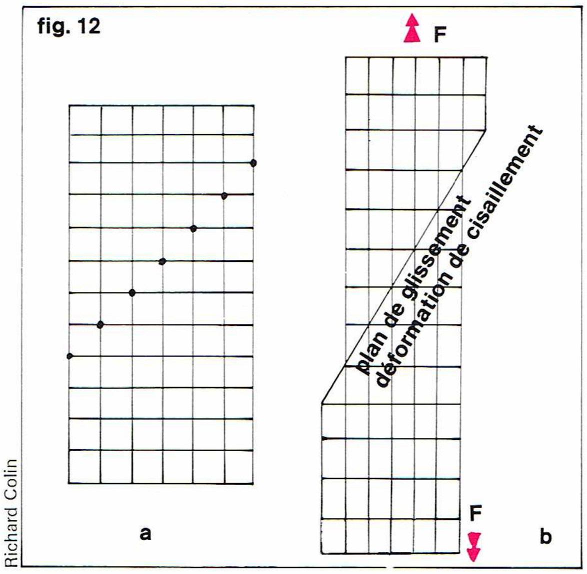

L'application du critère de plasticité de Tresca permet d'écrire :

$$|\sigma'_{11} - \sigma'_{22}| = 2\left(\frac{\sigma_{11}^2}{4} + \sigma_{12}^2\right)^{1/2} = \sigma_{et}$$

ce qui peut s'écrire :

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{\sigma_{et}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{\left(\frac{\sigma_{et}}{2}\right)}\right)^2 = 1$$

L'application du critère de von Mises permet d'écrire :

$$(\sigma'_{11} - \sigma'_{22})^2 + (\sigma'_{22} - \sigma'_{33})^2 + (\sigma'_{33} - \sigma'_{11})^2 = 2\,\sigma_{11}^2 + 6\,\sigma_{12}^2 = 2\,\sigma_{et}^2$$

ici, $\sigma'_{33} = 0$, car le problème est à deux dimensions.

Ce qui peut s'écrire :

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{\sigma_{et}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{\left(\frac{\sigma_{et}}{\sqrt{3}}\right)}\right)^2 = 1.$$

▼ *Figure 13 : principe général de la mesure de la dureté d'un matériau.*

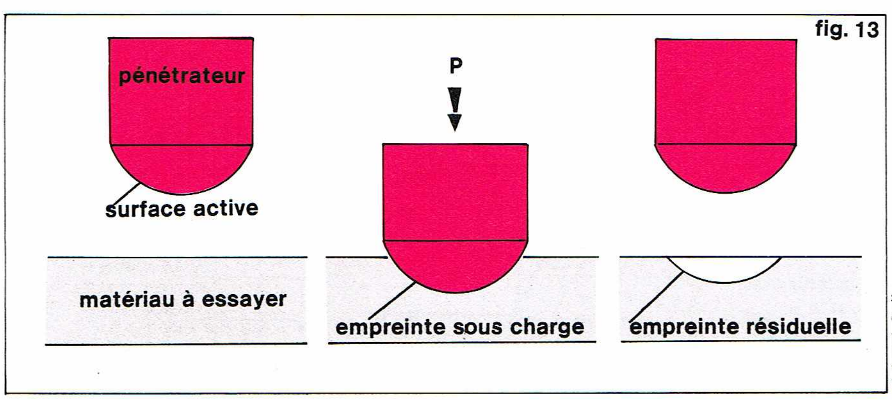

Nous pouvons donc tracer le diagramme de la *figure* 11 :

Remarques :

1 — Il est possible d'utiliser de nouveaux critères de plasticité. L'étude des matériaux anisotropes a permis de développer ce genre d'étude.

2 — La description microscopique de la déformation plastique est convenablement connue dans le cas des matériaux cristallisés ; elle fait appel à la théorie des dislocations. Cependant, la naissance et le déplacement des dislocations se traduisent par le phénomène de glissement intracristallin (*fig.* 12).

Comportement des matériaux : paramètres et facteurs d'influence

Essais des matériaux

Le constructeur ayant besoin de matériaux pour réaliser des projets élaborés, la nécessité d'essayer les matériaux disponibles afin de les comparer entre eux puis d'établir la nomenclature de leurs caractéristiques est très rapidement apparue au cours des siècles.

Les essais sur les matériaux ont actuellement quatre buts principaux :

— Mesurer les paramètres caractérisant le comportement mécanique de ces solides afin de pouvoir calculer les éléments vitaux des constructions à réaliser.

— Contrôler les matériaux après élaboration et avant leur emploi (contrôle non destructif).

— Rechercher les causes de dégradation ou de ruine des ouvrages après une catastrophe (expertise de compréhension et expertise judiciaire).

— Approfondir notre connaissance des mécanismes régissant les caractéristiques mécaniques des matériaux (travail de recherche pure ou appliquée).

L'aspect pragmatique des essais mécaniques utilisés par diverses industries est dû à la grande variété des facteurs et paramètres à étudier et à mesurer, à la diversité des matériaux dans leur forme et leurs propriétés, et à leurs multiples utilisations.

Si une bonne analyse des phénomènes mis en jeu dans les essais technologiques est extrêmement difficile, elle est cependant primordiale si l'on veut comprendre les phénomènes et énoncer des lois générales de comportement.

Actuellement, dans la variété des essais mécaniques usuels, seuls certains essais parfaitement définissables, et aboutissant à des modes de sollicitation simples, ont pu être développés et bénéficier des progrès de la métrologie ; l'essai de traction, agrémenté de tous les paramètres imaginables, en est l'exemple typique, alors que la flexion d'un barreau n'est utilisée que lorsque l'on ne peut pas procéder d'une autre façon.

Dureté d'un matériau

La notion intuitive de dureté d'un corps est largement connue mais le fait de la transformer en grandeur mesurable est difficile.

Résistance à la pénétration statique

La notion de « dureté » peut être reliée à celle de la résistance à la pénétration statique du corps à étudier par un autre corps plus « dur ». Plusieurs types d'essais ont été définis sur ce principe.

Dans tous les processus on utilise (*fig.* 13) :

— un *pénétrateur :* c'est un corps dur, en acier, en carbure ou en diamant, ayant une géométrie et des dimensions bien définies ;

— une *force d'application* dont la grandeur et la loi d'évolution en fonction du temps sont connues ;

— un *système de mesure* permettant de mesurer l'empreinte laissée par le pénétrateur dans le matériau à tester.

Cette manière d'envisager la mesure de dureté est celle utilisée pour les essais des matériaux métalliques. Nous allons décrire rapidement les principales méthodes.

★ *Échelle Brinell.*

Symbole : H_B (Brinell Hardness).

Pénétrateur : bille en acier (une bille en carbure de tungstène peut être tolérée). Le diamètre D de la bille est variable.

Charge : variable, en relation avec le diamètre de la bille utilisée et le matériau à étudier.

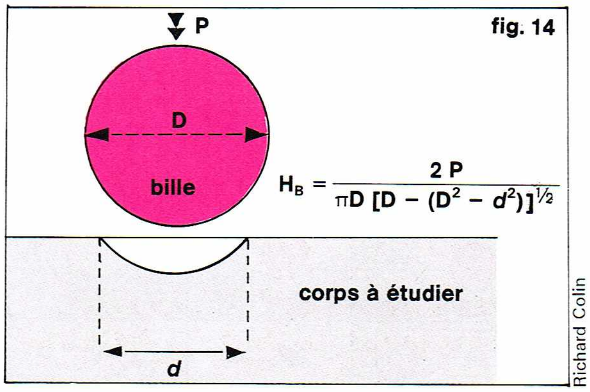

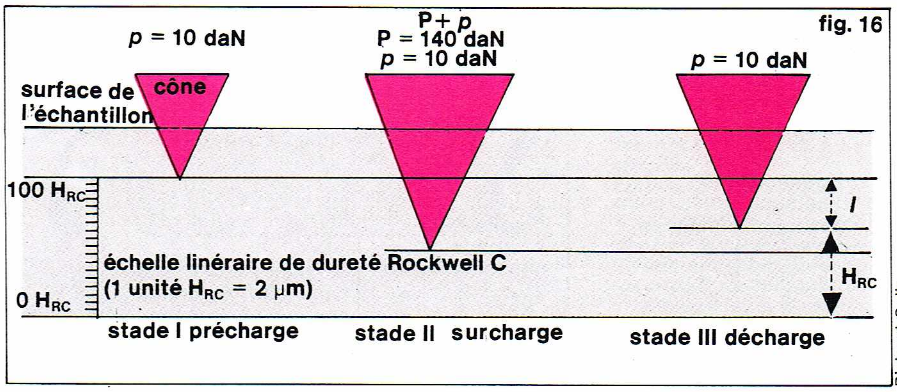

Processus d'essai : mise en charge progressive durant 15 s ; maintien de la charge pendant 15 s ; décharge (*fig.* 14).

Mesure : on mesure le diamètre *d* de l'empreinte après décharge.

Dureté Brinell : $H_B = \frac{P}{S}$

P : charge appliquée en décanewtons (daN).
S : surface de la calotte sphérique d'une sphère de diamètre D (la bille) limitée par un cercle de diamètre *d* (l'empreinte). L'unité est le millimètre carré.

Relation charge-diamètre de la bille : l'ensemble pièce-bille ne formant pas une figure semblable au fur et à mesure de la pénétration, on recommande pour les essais Brinell d'observer les relations suivantes :

$\frac{P}{D^2} = 30$ daN/mm² pour les matériaux ferreux ;
10 daN/mm² pour les alliages cuivreux ;
5 daN/mm² pour les alliages légers ;
2 daN/mm² pour les alliages mous.

Ce qui sous-entend que la dureté des alliages de fer est plus grande que celle des alliages de cuivre, elle-même plus élevée que celle des alliages d'aluminium.

Remarque : la non-similitude de l'ensemble bille-échantillon permet de mesurer la plasticité de l'échantillon. On démontre la relation suivante :

$$P = \frac{K \cdot d^n}{D^{n-2}}$$

avec : P = charge ; *d* = diamètre de l'empreinte ; D = diamètre de la bille ; n = coefficient de Meyer caractéristique du matériau ; K = constante.

On montre que l'indice de Meyer n est relié à une grandeur caractérisant l'écrouissage du matériau. Cette grandeur, le coefficient d'écrouissage, si elle n'est pas facilement mesurable, est par contre très bien interprétable au point de vue théorique. L'intérêt de l'indice de Meyer est évident, car il est facilement accessible par l'expérience et donne une valeur approchée du coefficient d'écrouissage.

* *Échelle Vickers.*

Symbole : H_{VP} (Vickers Hardness).

Pénétrateur : pyramide en diamant à base carrée et d'angle au sommet 136°.

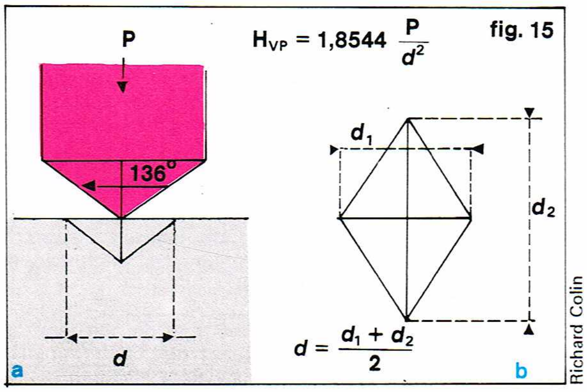

Charge : variable de 0,01 à 250 daN.

Processus d'essai : semblable à l'essai Brinell (*fig.* 15).

Mesure : on mesure les diagonales de l'empreinte carrée.

Dureté Vickers : $H_{VP} = \frac{P}{S}$.

P : charge appliquée en daN.
S : surface latérale de l'empreinte, mesurée sur la pyramide théorique, en mm².

Remarque : l'extrême souplesse de la méthode Vickers en fait la méthode de mesure par pénétration statique par excellence. Cependant, pour un matériau parfaitement homogène, la dureté dans l'échelle de Vickers augmente lorsque la charge diminue, ceci pour des charges inférieures à 0,3 N. Cette méthode peut aussi servir de mesure à l'anisotropie des matériaux si le pénétrateur est un diamant dont la base est un losange. La méthode est alors celle de Knoop.

* *Échelles Rockwell.*

Les échelles Rockwell sont nombreuses et adaptées à des cas particuliers. Chaque échelle est repérée par une lettre : A, B, C, D, E, F, G, L, M, P, R, S, V.

Décrivons l'*échelle* H_{RC} la plus utilisée pour les corps durs.

Pénétrateur : cône en diamant dont l'angle au sommet est de 120°.

Processus d'essai : voir *figure* 16.

Mesure : on mesure l'enfoncement rémanent du diamant au stade III, l'origine de la mesure étant la position du diamant au stade I.

Dureté Rockwell C :

$$H_{RC} = \frac{200 - l}{2}$$

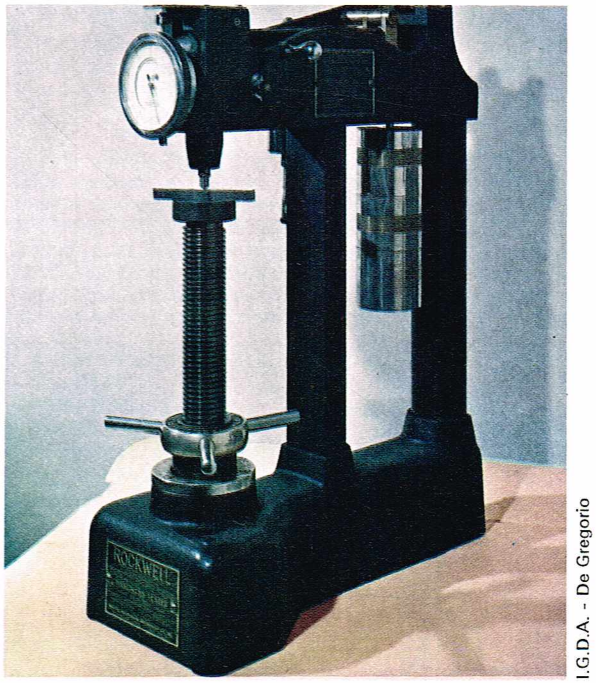

▲ *Figure 14 : principe de la mesure de la dureté par la méthode Brinell. Figure 16 : principe de la mesure de dureté par la méthode Rockwell.*

◀ *Figure 15 : principe de la mesure de dureté par la méthode Vickers. a. vue en coupe ; b. vue de dessus. A droite, un duromètre Rockwell.*

▶ *Figure 17 : mesure de la dureté par rebondissement d'une bille.*

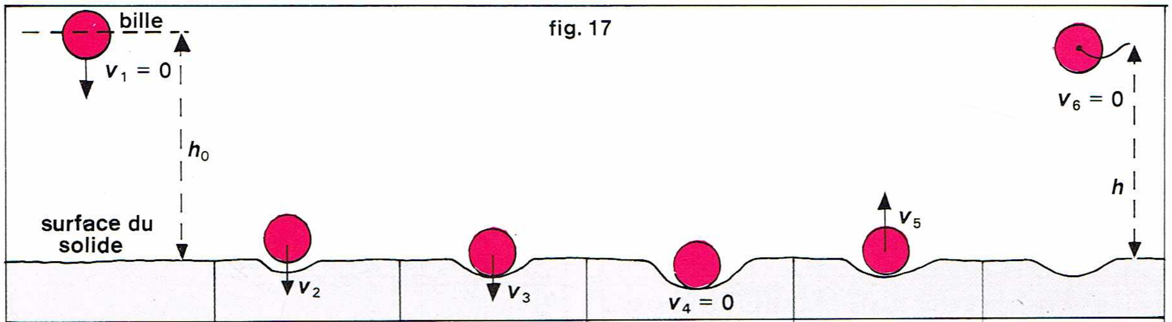

	I	II	III	IV	V	VI
	départ	contact	déformation élastique	déformation élastique et plastique	déformation plastique	arrivée
état énergétique de la bille	énergie potentielle	énergie cinétique	énergie cinétique + déformation plastique	déformation élastique	énergie cinétique	énergie potentielle
état énergétique du corps	référence	référence	déformation élastique	déformation élastique + déformation plastique	déformation plastique	déformation plastique

Richard Colin

avec l = pénétration du cône entre l'état I et l'état III exprimé en μm.

Dureté maximale : $H_{RC} = 100$; dureté minimale : $H_{RC} = 0$.

Coefficient de restitution

La notion de dureté peut être reliée au coefficient de restitution utilisé par les mécaniciens lors de l'étude des chocs élastiques.

Le coefficient de restitution est le rapport h/h_0 (voir *fig.* 17). Il traduit bien la part de l'énergie initiale qui a servi à déformer plastiquement le solide à étudier. Pratiquement cette méthode est utilisée grâce au dispositif expérimental dû à Shore. L'échelle de dureté Shore va de 0 à 100.

▼ *Tableau II : correspondance entre les cinq grandeurs non indépendantes utilisées pour l'étude de l'élasticité des matériaux isotropes.*

Tableau II

Correspondance entre les cinq grandeurs non indépendantes utilisées pour l'étude de l'élasticité des matériaux isotropes

Constantes données / Constantes à calculer	E, ν	E, G (= μ)	ν, G (= μ)	λ, μ	λ, ν
E	E	E	$2\mu(1+\nu)$	$\frac{\mu(3\lambda+2\mu)}{\lambda+\mu}$	$\frac{\lambda(1+\nu)(1-2\nu)}{\nu}$
G = μ	$\frac{E}{2(1+\nu)}$	μ	μ	μ	$\frac{\lambda(1-2\nu)}{\nu}$
ν	ν	$\frac{E-2\mu}{2\mu}$	ν	$\frac{\lambda}{2(\lambda+\mu)}$	ν
B	$\frac{E}{3(1-2\nu)}$	$\frac{\mu E}{3(3\mu-E)}$	$\frac{2\mu(1+\nu)}{3(1-2\nu)}$	$\lambda+\frac{2\mu}{3}$	$\frac{\lambda}{3}\left(\frac{2}{\nu}-1\right)$
λ	$\frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$	$\frac{\mu(E-2\mu)}{3\mu-E}$	$\frac{2\mu\nu}{1-2\nu}$	λ	λ

Méthode pendulaire

Une autre méthode de mesure de la dureté est la méthode pendulaire. Elle peut être résumée comme étant une mesure de la résistance à la rayure. Pratiquement, on compare les périodes de deux pendules de gravité réputés identiques; les couteaux soutenant le pendule de référence reposent sur un corps très dur, le diamant, alors que ceux du pendule de mesure reposent sur le corps à étudier. La différence de comportement élastique et plastique du matériau à étudier et du diamant fait que les conditions d'oscillation des deux pendules sont différentes.

Il faudra donc considérer la mesure de dureté comme une méthode de repérage des propriétés mécaniques d'un corps. La mesure de dureté est particulièrement utile, car elle est rapide et non destructive. Elle est irremplaçable sous forme de microdureté pour comparer les limites élastiques ou les limites de rupture des composants microscopiques d'un agrégat (dont la taille moyenne est de l'ordre d'une dizaine de microns).

Propriétés élastiques

Nous appellerons mesure des propriétés élastiques des matériaux la recherche des termes du tenseur d'élasticité.

Cas des matériaux isotropes

Le comportement élastique des matériaux isotropes est entièrement défini par la connaissance de deux constantes indépendantes.

La multiplicité des travaux sur l'élasticité et les différentes motivations qui présidaient à ces recherches ont fait qu'il existe cinq grandeurs non indépendantes utilisées pour l'étude de l'élasticité des matériaux isotropes. Ce sont : E : module d'élasticité longitudinale ou module d'Young; G : module d'élasticité transversale ou module de Coulomb; ν : coefficient de Poisson; B : module de compressibilité; λ et μ : « coefficients » de Lamé.

Il est utile de connaître les correspondances entre ces différentes grandeurs (voir *tableau* II).

Méthodes de mesure des caractéristiques élastiques

Les méthodes présentées sont des méthodes types; il existe actuellement de très nombreuses méthodes de mesure des constantes élastiques.

* *Méthodes statiques*

Les méthodes statiques permettent de mesurer les « coefficients » d'élasticité statique. L'état de déformation et l'état de contrainte sont prévisibles et mesurables; les

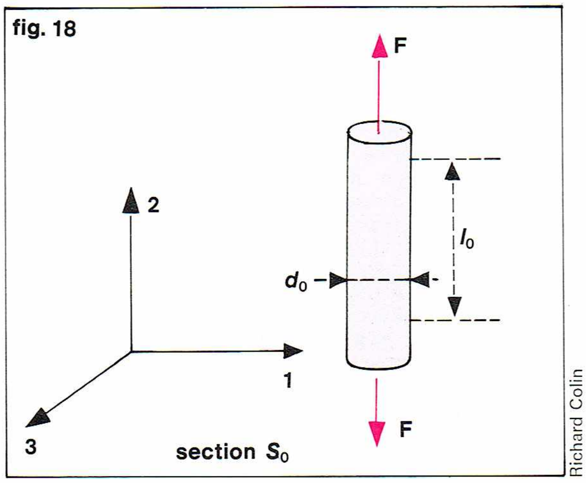

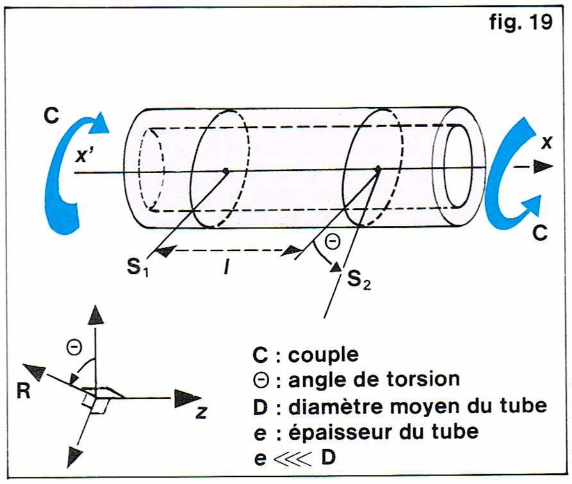

◄ *Figure 18 : principe de la mesure du* **module d'élasticité longitudinale E** *et du* **coefficient de Poisson** ν *dans un barreau cylindrique soumis à un état de traction simple.*
Figure 19 : principe de la mesure du **module d'élasticité transversale G** *dans un tube cylindrique infiniment mince soumis à un couple de torsion ; on mesure la torsion relative de deux sections droites* S_1 *et* S_2.

vitesses de sollicitation peuvent être infiniment lentes. Ces méthodes permettent d'atteindre et de mesurer des états de contrainte et de déformation extrêmement faibles.

Module d'élasticité longitudinale E. Un barreau cylindrique est soumis à un état de traction simple, en restant dans le domaine élastique. On mesure l'allongement suivant la direction 2, la contraction suivant une direction perpendiculaire (1 par exemple), la force de traction. La mesure des déformations est effectuée avec des extensomètres optiques, pneumatiques ou électroniques (voir *fig.* 18).

On considère l'état I, déchargé, caractérisé par $F = 0$, l_0, d_0, et l'état II, chargé, correspondant à F, $l_0 + \Delta l$, $d_0 - \Delta d$. L'état de contrainte est $\sigma_{22} = \frac{F}{S_0}$ et l'état de déformation est $\varepsilon_{22} = \frac{\Delta l}{l_0}$ et $\varepsilon_{11} = -\frac{\Delta d}{d_0}$. On obtient :

Module d'Young pour la direction 2 :

$$E_2 = \frac{\sigma_{22}}{\varepsilon_{22}}$$

Coefficient de Poisson pour les directions 1 et 2 :

$$\nu_{12} = -\frac{\varepsilon_{11}}{\varepsilon_{22}}$$

Module d'élasticité transversale G. Un couple de torsion est appliqué à un tube cylindrique infiniment mince afin d'obtenir un état de contrainte uniforme. On mesure pour un couple donné la torsion relative de deux sections droites (voir *fig.* 19).

Sous charge, l'état de contrainte est :

$$\sigma_{\theta z} = \frac{2\,C}{\pi D^2 e}$$

et l'état de déformation est $\varepsilon_{\theta z} = \frac{\theta D}{2\,l}$.

On obtient :
Module de Coulomb pour la direction z :

$$G_z = \frac{\sigma_{\theta z}}{\varepsilon_{\theta z}}$$

* *Méthodes dynamiques*

L'avantage des méthodes dynamiques est de faire apparaître le paramètre vitesse de sollicitation qui, dans le cas des vibrations, est alors relié directement à la fréquence. Il est heureux que les coefficients d'élasticité puissent être considérés en première approximation comme indépendants de la fréquence dans le cas des phénomènes harmoniques.

Cependant, on sait mettre en évidence l'influence du paramètre fréquence sur le comportement élastique du matériau. En effet, les solides sont des milieux faiblement dispersifs vis-à-vis des ondes élastiques, et l'on doit parfois adjoindre à la notion de vitesse de phase celle de vitesse de groupe. De plus, les milieux réels étant faiblement anélastiques, c'est-à-dire dissipatifs vis-à-vis de la propagation des ondes élastiques, c'est en fait la vitesse de transfert d'énergie qui doit être retenue en toute rigueur.

— *Méthode dynamique par résonance.* Elle consiste à faire vibrer un corps à ses différentes fréquences de résonance. La géométrie de l'échantillon étant choisie relativement simple (sphère, cylindre, disque), il est possible de relier théoriquement le tenseur d'élasticité aux fréquences de résonance. Ce sont ces fréquences qui, mesurées avec une grande précision, permettent de calculer les C_{ijkl} (tenseur des rigidités élastiques du 4e ordre).

Cette méthode permet de mesurer le caractère anélastique du milieu. En effet, le spectre de fréquence d'un corps linéairement élastique est un « spectre de barres », alors que les spectres réels ont une certaine étendue de part et d'autre des fréquences centrales (*fig.* 20).

Il est possible de relier l'écart des corps réels à l'élasticité linéaire par la grandeur :

$$Q_0^{-1} = \frac{\Delta f_0}{f_0} \quad \text{ou} \quad Q_3^{-1} = \frac{\Delta f_3}{f_3}$$

— *Méthode dynamique par ultrasons.* La mesure du temps de parcours d'une impulsion permet de calculer sa vitesse dans le matériau et d'obtenir les modules d'élasticité correspondants (*fig.* 21).

La mesure du temps T de propagation permet d'obtenir la vitesse de propagation V. La décroissance des amplitudes des échos est aussi une façon de caractériser le comportement anélastique du matériau.

▼ *Figure 20 : spectre de résonance longitudinale d'un barreau cylindrique infiniment long.*
Figure 21 : principe de la mesure des caractéristiques élastiques d'un solide par la méthode dynamique aux ultrasons.

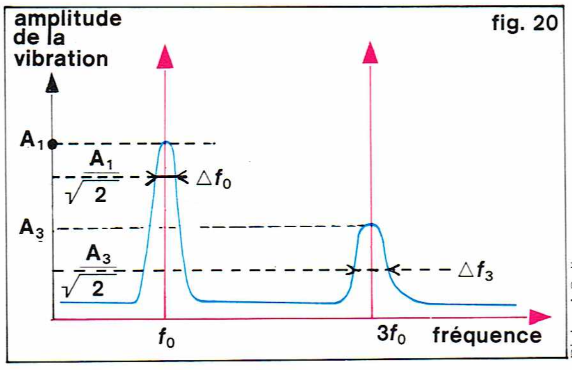

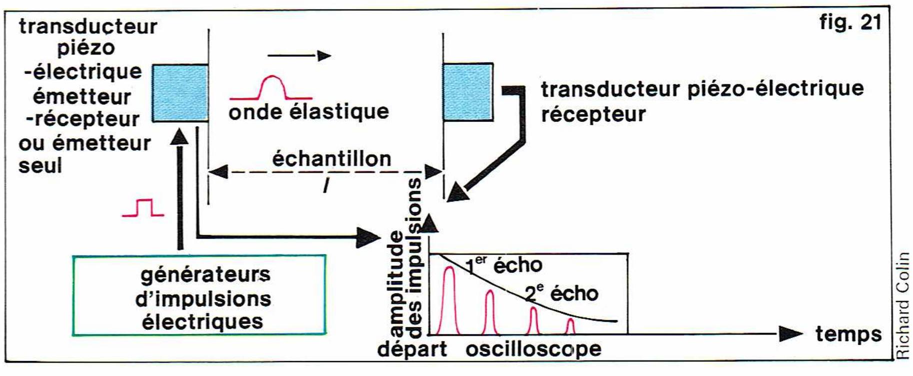

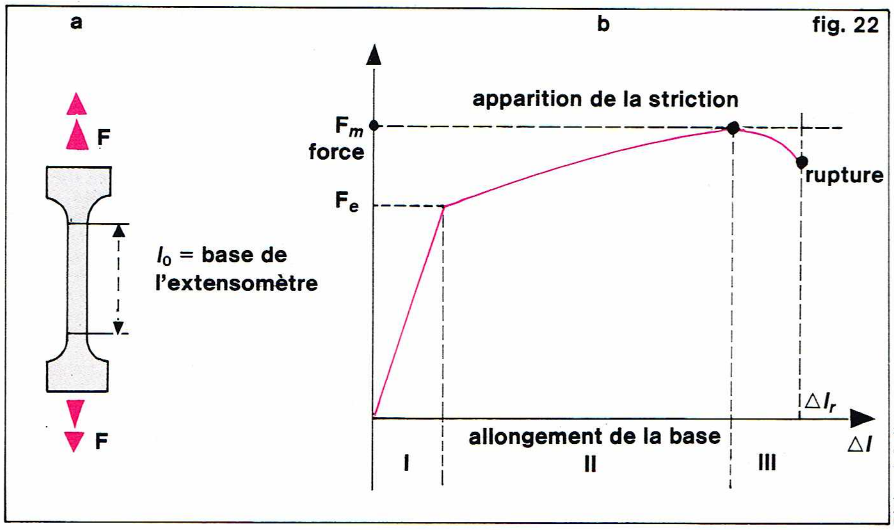

▲ *Figure 22 : essai de traction sur un matériau : a, éprouvette de section initiale S_0 servant à l'essai ; b, courbe brute ou conventionnelle de traction donnant la variation de la force en fonction de l'allongement ; la période I correspond à une déformation élastique réversible, et les périodes II et III à une déformation plastique ; au cours de la période II, la déformation est uniformément répartie, et au cours de la période III, elle est localisée dans la zone de striction.*

Le spectre de fréquence de l'impulsion injectée par le transducteur piézo-électrique dans le matériau est centré sur une fréquence de plusieurs mégahertz.

Essai de traction-écrouissage

Essai de traction

Faire un essai de traction est une excellente façon de caractériser un matériau. L'analyse de l'état de sollicitation est simple mais limitée aux contraintes de traction ; les équipements d'essais ont largement bénéficié des méthodes modernes de la métrologie, spécialement pour la mesure des forces, des allongements, des températures et de leurs dérivées par rapport au temps.

* *Courbe brute ou conventionnelle de traction*

C'est la courbe fournie par la machine et donnant la variation de la force en fonction de l'allongement, le temps pouvant apparaître comme paramètre (*fig.* 22).

On calcule les caractéristiques suivantes :

Le module d'Young : $E = \dfrac{\dfrac{F_1}{S_0}}{\dfrac{\Delta l_1}{l_0}}$

F_1 et Δl_1 : coordonnées d'un point du domaine élastique.

La limite de proportionnalité : $\left[\dfrac{F_e}{S_0}\right]$

La résistance maximale : $\left[\dfrac{F_m}{S_0}\right]$

L'allongement pour cent à la rupture :

$$A\,\% = \frac{\Delta l_r}{l_0} \times 100$$

Le coefficient de striction :

$$\Sigma\,\% = \frac{S_0 - S_r}{S_0} \times 100$$

Striction d'une éprouvette : dans la phase III, la déformation plastique de l'éprouvette est localisée dans la zone de striction où l'état de contrainte est fortement triaxial.

Remarques :

1 — La définition du module d'élasticité et de la limite d'élasticité ne pose pas de problème particulier lorsque le corps a un comportement élastique linéaire ; il n'en est plus de même si la loi de comportement est plus complexe, aussi trouve-t-on des définitions de : module tangent (1) ; module tangent à l'origine (2) ; module sécant (3) ; limite de proportionnalité ; limite conventionnelle à *a* % (voir *fig.* 23 et 24).

Il faut attribuer à certains corps des lois de comportement beaucoup plus complexes que la loi de Hooke. Il existe par exemple les corps visco-élastiques, ayant des lois de déformation du type : $f(\sigma, \dot{\sigma}, \varepsilon, \dot{\varepsilon}, \ddot{\sigma}, \ddot{\varepsilon}, \text{etc.}) = 0$. Le corps visco-élastique le plus simple a pour équation $\sigma = E\varepsilon + b\dot{\varepsilon}$.

Il est souhaitable de ne pas compliquer et multiplier les définitions des grandeurs caractéristiques, mais d'admettre qu'il est nécessaire d'utiliser par exemple deux constantes E et *b* pour décrire le comportement du matériau dans le domaine élastique.

2 — La mesure de la limite d'élasticité nécessite, pour être en accord avec la définition, un cyclage de l'éprouvette. Compte tenu de la précision de l'appareillage, elle ne peut être obtenue qu'en admettant une déformation résiduelle donnée (*fig.* 24).

* *Courbe rationnelle de traction*

Si l'on veut étudier le comportement intrinsèque du matériau, c'est-à-dire la relation $\sigma = f(\varepsilon)$, il est nécessaire de transformer la courbe brute $F = \Phi(\Delta l)$.

Supposons que lors de l'essai de traction nous ayons mesuré, grâce à deux extensomètres, l'allongement Δl_3 et la contraction transversale ΔD pour toute valeur de la force F.

Nous obtenons donc les triplets

$$F_i,\ \Delta l_i,\ \Delta D_i < 0$$

qui se transforment en :

État de contrainte :

$$\sigma_{33i} = \frac{F_i}{S_0\,(1 + \varepsilon_{11})^2}$$

État de déformation :

$$\varepsilon_{11i} = \int_{l_0}^{l_i} \frac{dD}{D} = \operatorname{Log} \frac{D_i}{D_0} = \operatorname{Log}\left(\frac{D_0 + \Delta D_i}{D_0}\right)$$

$$\varepsilon_{33i} = \int_{l_0}^{l_i} \frac{dl}{l} = \operatorname{Log} \frac{l_i}{l_0} = \operatorname{Log}\left(\frac{l_0 + \Delta l_i}{l_0}\right)$$

Nous pouvons donc calculer les couples de valeurs σ_i et ε_i pour chaque point de la courbe.

Qualitativement, cette double correction tient compte de la contraction transversale de l'éprouvette par effet Poisson pour le calcul de la contrainte, et de l'allongement cumulé de l'éprouvette pour le calcul de la déformation.

La méthode précédente, la plus rigoureuse, suppose l'enregistrement simultané de trois paramètres, ce qui n'est pas toujours réalisable, d'autant plus que la contraction transversale est de dix à vingt fois plus petite que

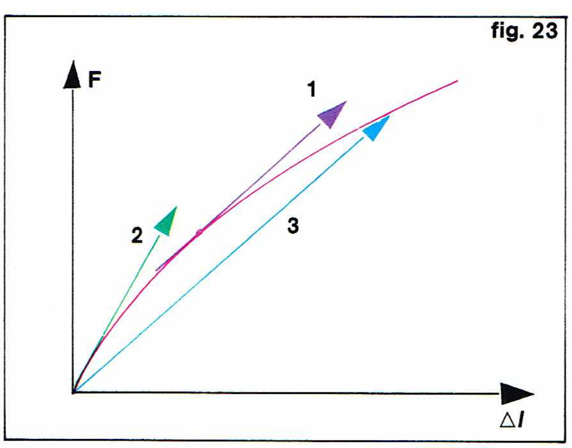

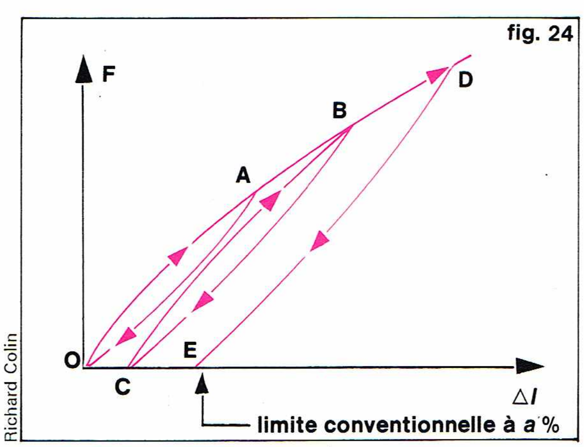

▶ *Figure 23 : quelques caractéristiques dans le cas d'un comportement élastique non linéaire : 1, module tangent ; 2, module tangent à l'origine ; 3, module sécant. Figure 24 : détermination de la limite conventionnelle à a % dans le cas d'un comportement élastique non linéaire ; dans un premier temps on cycle l'éprouvette (OAO : déformation résiduelle nulle), ensuite on augmente la charge maximale (OBC : déformation résiduelle < a %), puis on augmente encore la charge (CDE : la déformation résiduelle vaut a %).*

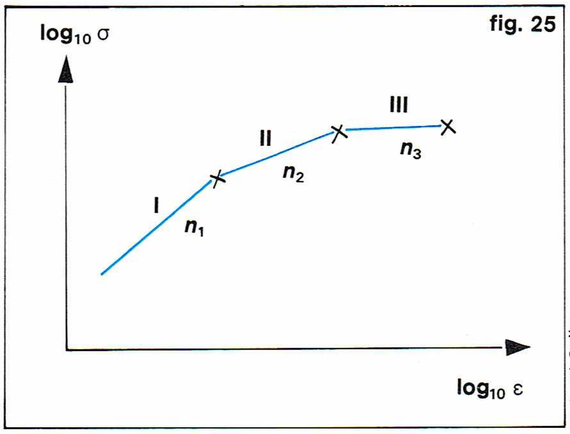

◀ ***Figure 25 :*** ***courbe rationnelle de traction dans le domaine plastique (coordonnées logarithmiques).***

l'allongement longitudinal. Nous pouvons aussi calculer la courbe rationnelle de traction à partir de la courbe brute si l'on tient compte des deux faits expérimentaux suivants :

— Dans le domaine élastique, on peut négliger la variation de dimension de l'éprouvette comparativement à celle ayant lieu dans le domaine plastique.

— Dans le domaine plastique, la déformation se fait sensiblement à volume V constant :

$$V = Sl = \text{cte} \rightarrow \frac{dl}{l} = -\frac{dS}{S}$$

ce qui permet de calculer l'aire S de la section en connaissant la variation de longueur dl.

$$\varepsilon_{33i} = \varepsilon_i = \int_{l_0}^{l_i} \frac{dl}{l} = -\int_{S_0}^{S_i} \frac{dS}{S_0} = \text{Log}\,\frac{S_0}{S_i}$$

La courbe rationnelle de traction a, dans le domaine plastique et en coordonnées logarithmiques, l'allure indiquée sur la *figure* 25.

Les segments, au nombre de un, deux, parfois trois, peuvent être représentés chacun par une équation du type :

$$\sigma = \sigma_n\,(\varepsilon)^n$$

ou $$\text{Log}\,\sigma = \text{Log}\,\sigma_n + n\,\text{Log}\,\varepsilon$$

Le coefficient n est le coefficient d'écrouissage, il relie l'accroissement de la contrainte à l'accroissement de la déformation, ces deux grandeurs étant mesurées dans des échelles logarithmiques :

$$\Delta\,(\text{Log}\,\sigma) = n\Delta\,(\text{Log}\,\varepsilon)$$

Ce qui peut se traduire par l'énoncé : une variation de la *déformation plastique* $\Delta\varepsilon$ entraîne une variation de la *limite d'élasticité* $\Delta\sigma$ telle que

$$\Delta\,(\text{Log}\,\sigma) = n\Delta\,(\text{Log}\,\varepsilon)$$

Pratiquement, dans le cas des aciers, $n = 0{,}2$ (XC 10 recuit), et on peut montrer que le coefficient d'écrouissage n est relié à l'indice de Meyer N obtenu en dureté Brinell par la relation :

$$N = 2 + n$$

Chaque portion rectiligne de la courbe rationnelle de traction correspond à un mécanisme de déformation plastique déterminé; la pente de la droite mesure la consolidation du métal, ou phénomène d'écrouissage.

Les courbes rationnelles de traction sont particulièrement utiles pour étudier la plasticité des métaux et les mécanismes de la déformation plastique.

Remarque : il est nécessaire de faire des hypothèses supplémentaires si l'on veut rationaliser une courbe de traction au-delà du point de striction. Les calculs présentés ci-dessus ne sont valables que pour un état de traction simple, ce qui n'est pas le cas dans la striction qui est une zone de forte triaxialité des contraintes.

Phénomène de fatigue

Description du phénomène

Le phénomène de fatigue des matériaux est un mode de dégradation du solide qui aboutit à la ruine de la pièce. Ce processus apparaît lorsque l'état de contrainte ou de déformation est une fonction périodique du temps. L'état maximal de contrainte est toujours inférieur à la contrainte de rupture du matériau et souvent inférieur à sa limite élastique; c'est la répétitivité de la mise sous tension qui entraîne la dégradation du matériau.

Exemple : flexion rotative. Sollicitons un barreau cylindrique de section circulaire par deux couples + C et — C, tels que l'on obtienne l'état de contrainte représenté sur la *figure* 26.

Si nous faisons tourner le cylindre autour de son axe, les couples appliqués ne bougeant pas, l'état de contrainte des points à la surface du cylindre entre les sections S_A et S_A' sera une fonction harmonique du temps (voir *fig.* 27).

La contrainte maximale étant supposée inférieure à la limite d'écoulement en traction, le cylindre reste dans le domaine élastique et l'axe $\overrightarrow{x_0'x_0}$ devient $\overrightarrow{x'x}$ (portion de cercle entre les sections S_A et S_A').

Si pour un même matériau nous effectuons plusieurs essais de fatigue dans les conditions décrites ci-dessus, nous pourrons rassembler les résultats sur une courbe dite *courbe de Wöhler* (*fig.* 28).

Chaque essai est défini par sa contrainte maximale et dure jusqu'à la rupture de la pièce après N cycles.

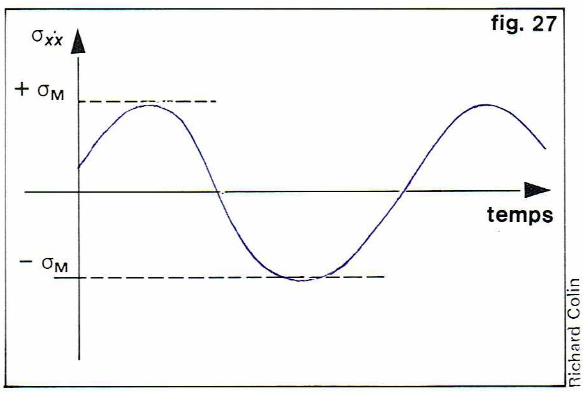

◀ ***Figure 27 :*** ***variation de la contrainte*** $\sigma_{x'x}$ ***en fonction du temps à la surface du cylindre de la figure 26.***

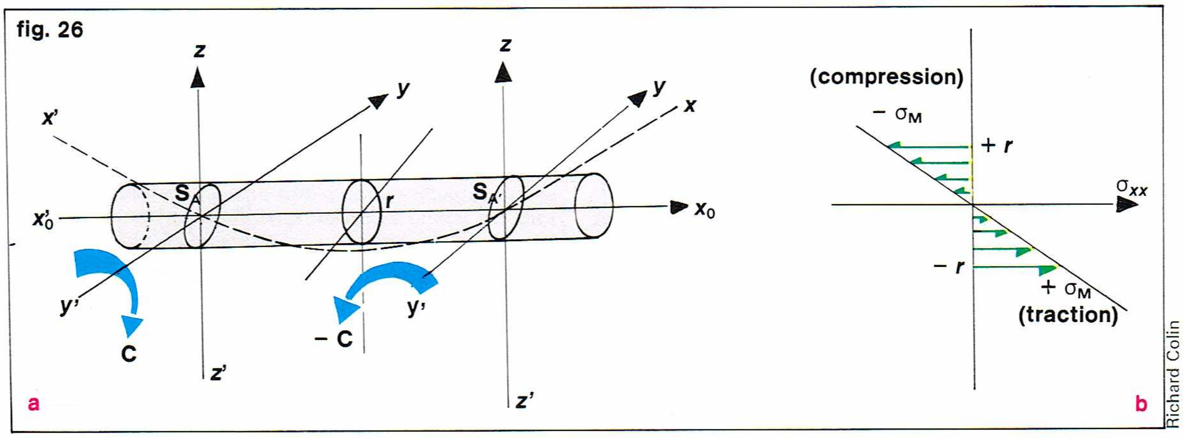

◀ ***Figure 26 ; flexion rotative :*** ***a, état de déformation ;*** ***b, répartition des contraintes dans une section.***

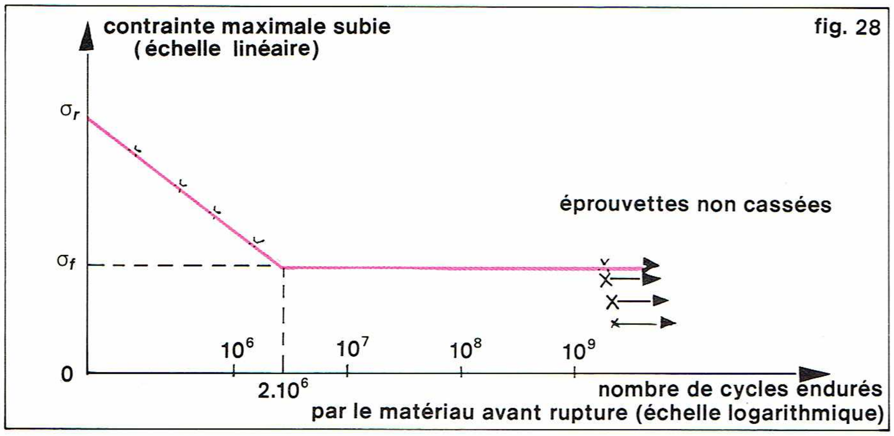

Richard Colin

▲ *Figure 28 : courbe de Wöhler pour un acier.*

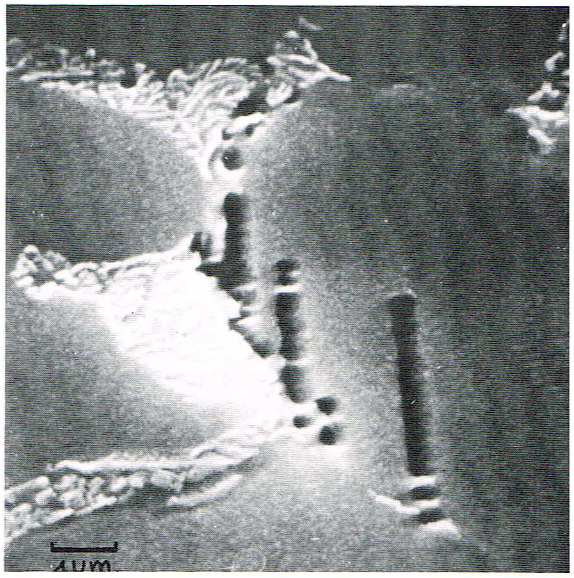

ONERA

▶ *Lignes de dégâts parallèles, prenant généralement naissance à l'interface eutectoïde-matrice, observées dans certains grains de l'alliage de titane TU2 lors d'essais de fatigue en traction répétée (photo réalisée au microscope à balayage).*

▼ *Figure 29 : représentation graphique des limites de fatigue pour un matériau : a, diagramme de Goodmann; b, état de contrainte en fonction du temps.*

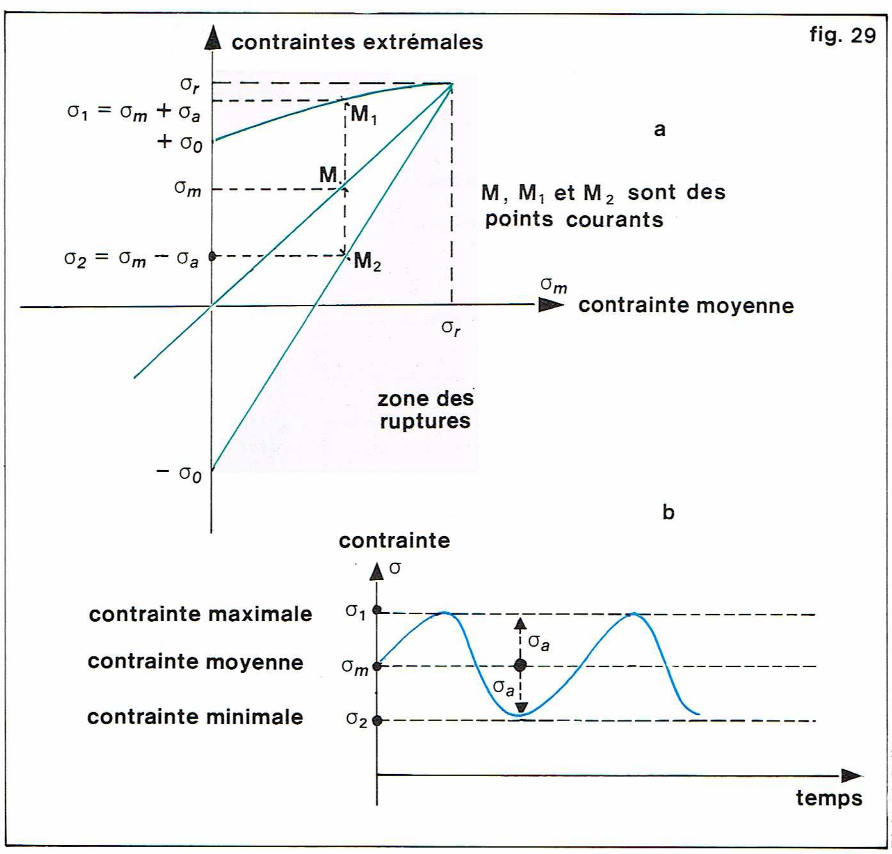

Richard Colin

On peut définir deux types de comportements :

- si $\sigma_M > \sigma_f$, la rupture a lieu après quelques millions de cycles. C'est la partie descendante de la courbe de Wöhler ;
- si $\sigma_M \leqslant \sigma_f$, il n'y a jamais rupture du matériau.

Origine du phénomène de fatigue

Le phénomène de fissuration par fatigue ou fissuration progressive n'est pas encore entièrement expliqué.

On montre qu'un matériau polycristallin, isotrope par compensation réciproque au niveau macroscopique (échelle de la pièce), reste anisotrope à l'échelle du grain. Il en résulte qu'un solide, dont l'état de contrainte est macroscopiquement inférieur à la limite d'élasticité, peut présenter des zones microscopiques plastifiées.

De nombreux facteurs interviennent dans cette répartition des contraintes à l'échelle des grains : la taille des grains ; les orientations de part et d'autre des joints de grains (cohérence) ; les caractéristiques anisotropes des grains tant au point de vue élastique qu'au point de vue limite d'élasticité ; la « propreté » et la composition de la barrière des joints de grains ; la densité des dislocations et leur possibilité de mouvement.

Actuellement l'évolution du phénomène de fatigue est divisée en trois stades :

— *Premier stade*. Déformations plastiques et ruptures isolées en certains points, les plus sollicités, de l'agrégat polycristallin. L'observation d'une surface métallique polie révèle ces points singuliers. Le processus est à l'échelle cristalline et représente 10 % de la durée de vie du matériau.

— *Deuxième stade*. Formation de fissures locales par un processus de coalescence des défauts primaires créés lors du premier stade. Le phénomène est à l'échelle cristalline et représente 60 % de la durée de vie du matériau.

— *Troisième stade*. Développement des fissures en rapport avec le champ de contrainte existant. On observe une propagation rapide et régulière de la fissure. La durée de ce stade représente 30 % de la durée totale de vie du matériau.

Durant les trois stades de l'évolution du phénomène, le rôle des dislocations en tant que mécanisme élémentaire de la déformation plastique est primordial.

Facteurs et paramètres d'influence

— *Loi de variation de la contrainte par rapport au temps*. La variation de la contrainte par rapport au temps peut être harmonique, périodique ou quelconque. Par décomposition en série de Fourier ou en série intégrale de Fourier, on peut toujours, théoriquement, transformer le problème le plus général en celui, plus simple, des sollicitations harmoniques. Cependant, il n'est pas évident que l'on puisse appliquer le principe de superposition nécessaire pour justifier une telle décomposition.

— *Nature de la contrainte*. Nous avons vu que les limites d'élasticité et les charges de rupture sont, pour un même matériau, des caractéristiques dépendant du type de contrainte ou de déformation. Il en est de même pour les limites de fatigue.

— *Contrainte moyenne*. Goodman a proposé de réunir sur un seul diagramme les variations de la limite de fatigue d'un matériau, pour un type de sollicitation déterminé, en fonction des deux paramètres que sont la contrainte moyenne et l'amplitude de la contrainte (*fig.* 29).

Il est possible de simplifier un tel diagramme en faisant l'hypothèse que l'amplitude σ_a est une fonction linéaire de la contrainte moyenne.

$$\sigma_a = \sigma_0 \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_r}\right)$$

$$\sigma_1 = \sigma_m + \sigma_a$$

$$\sigma_1 = \sigma_m + \sigma_0 \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_r}\right)$$

$$\sigma_1 = \sigma_0 + \sigma_m \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_r}\right)$$

σ_r : contrainte de rupture statique du matériau, mesurée dans les mêmes conditions de contrainte.

La mesure de σ_0 et de σ_r permet donc de connaître la limite de fatigue pour un état de contrainte moyen déterminé.

On montre que :

$$-\frac{\sigma_0}{\sigma_r} \leqslant \frac{d\sigma_a}{d\sigma_m} < 0$$

— *Fréquence de sollicitation.* Le rôle de la fréquence sur le phénomène de fissuration progressive est complexe. Il est cependant possible de distinguer deux phénomènes principaux.

★ *Phénomène de relaxation.* Le comportement dynamique d'un matériau réel n'est pas toujours très bien représenté par la loi de Hooke : $\sigma = \mathrm{E}\varepsilon$. On lui préfère souvent une loi de comportement du type :

$$\sigma = \mathrm{E}\varepsilon + b\dot{\varepsilon}$$

Si nous imposons un état de contrainte :

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \cos \omega t$$

Nous pouvons calculer la déformation :

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{\sqrt{\mathrm{E}^2 + b^2\omega^2}} \cdot \cos (\omega t + \varphi)$$

Avec $\varphi = \mathrm{Arg}\,(\mathrm{E} + jb\omega)$

L'amplitude de la déformation est donc

$$\frac{\sigma_0}{\sqrt{\mathrm{E}^2 + b^2\omega^2}}$$

c'est-à-dire que, l'amplitude σ_0 de la contrainte étant fixée, la déformation décroît lorsque la pulsation augmente. Une augmentation de la pulsation entraînant une diminution de la déformation du matériau, la tenue à la fatigue doit en être améliorée (*fig.* 30).

On constate expérimentalement une augmentation de la limite de fatigue en fonction de la fréquence de sollicitation, si la contrainte maximale n'est pas trop élevée.

★ *Phénomène d'échauffement.* Un matériau soumis à un état de contrainte cyclique s'échauffe. Le modèle rhéologique retenu rend compte de ce phénomène. Il est facile de démontrer que la perte d'énergie par cycle et par unité de volume est égale à :

$$\Delta \mathrm{W} = \frac{\pi b \sigma_0^2 \omega}{(\mathrm{E}^2 + b^2\omega^2)}$$

Cette énergie mécanique perdue est en fait transformée principalement en chaleur, une faible proportion servant à la transformation de la structure du matériau par différents processus, dont la microplasticité. Le matériau s'échauffant, sa température d'équilibre sera sous la dépendance de sa conductivité thermique et des conditions aux limites du refroidissement.

Si la température de la pièce croît fortement (+ 200 °C), les caractéristiques mécaniques décroissent et la limite de fatigue diminue.

Si la température augmente légèrement (+ 20 °C), les caractéristiques mécaniques restent constantes, ainsi que le comportement à la fatigue.

Il faut noter que la mesure de la température est une connaissance moyenne du phénomène, alors que les sources de chaleur sont, par suite de l'anisotropie cristalline, réparties de façon discrète dans les zones les plus sollicitées.

La puissance moyenne thermique du matériau sollicité est égale à :

$$\mathrm{P} = \frac{\Delta \mathrm{W}}{\mathrm{T}} = \frac{b\sigma_0^2\,\omega^2}{2\,(\mathrm{E}^2 + b\omega^2)}$$

avec T = période du phénomène : $\frac{2\pi}{\omega}$.

— *Influence du milieu.* La nature du milieu entourant le corps sollicité a une très grande influence sur le phénomène de fissuration progressive, ce milieu pouvant être gazeux, liquide ou solide.

On observe, en général, une tenue maximale des matériaux lorsqu'ils sont sollicités dans le vide. La présence d'un milieu liquide ou gazeux modifie le champ de force existant sur la surface, la migration des dislocations en est changée, ainsi que la tenue à la fatigue qui en dépend (effet Rehbinder).

Un autre mécanisme d'influence est l'irréversibilité des fissures formées lors des deux premiers stades du processus de fissuration. L'adsorption d'atomes sur les surfaces formées par l'ouverture des fissures empêche leur fermeture lors du changement de signe de la contrainte.

La présence d'un liquide corrosif, surtout si l'attaque chimique est localisée mais très pénétrante, a un effet extrêmement nocif sur la tenue à la fatigue du matériau.

Dans le cas d'un environnement solide (cas du frettage de deux pièces par exemple), on observe dans certaines conditions une corrosion de contact qui est l'amorce d'une rupture de fatigue. Ce phénomène, connu souvent sous le nom de « fretting-corrosion », est encore mal élucidé ; on sait qu'il est spécifique de certains couples solides de matériaux, qu'il est favorisé par de grandes pressions de contact et qu'il apparaît pour des mouvements entre des pièces d'une dizaine de microns.

Remarque : lorsque le cycle de contrainte soumet le matériau à une déformation macroscopiquement plastique, le phénomène de fatigue qui en découle est dit de fatigue oligocyclique. Ce type de fatigue intéresse certaines constructions très sollicitées mais dont la durée de vie est volontairement limitée, ou apparaît comme étant lié à l'utilisation exceptionnelle d'un mécanisme.

Phénomène de fluage

Définition

On dit qu'un matériau présente un phénomène de fluage si, ce solide étant sollicité sous un état de contrainte constant σ, on observe une déformation plastique ε_p, mesurable et croissant en fonction du temps.

Pour un matériau donné, les paramètres principaux du fluage sont la température du corps et la valeur de la contrainte imposée.

fig. 30

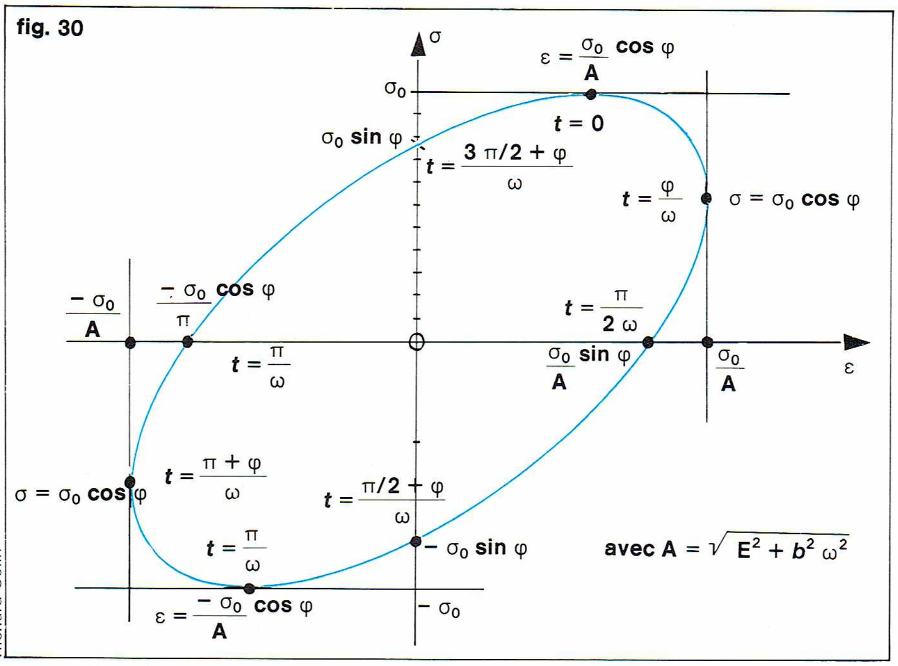

Richard Colin

▲ *Figure 30 : variation de la contrainte et de la déformation en fonction du temps pour un corps visco-élastique.*

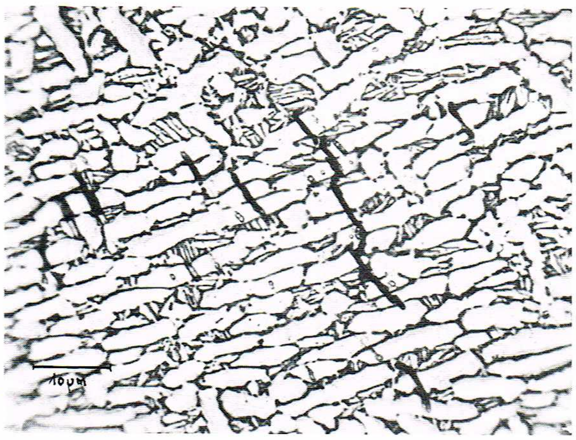

ONERA

◀ *Début de fissures observées en microscopie optique dans une éprouvette d'alliage de titane TA 6V soumise à un essai de fatigue en traction répétée.*

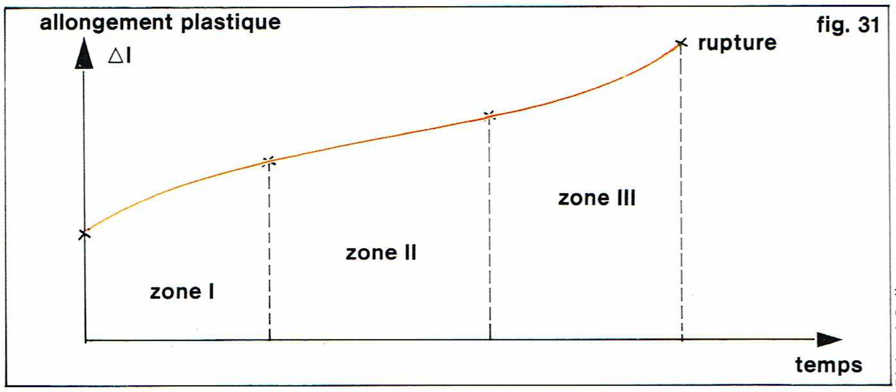

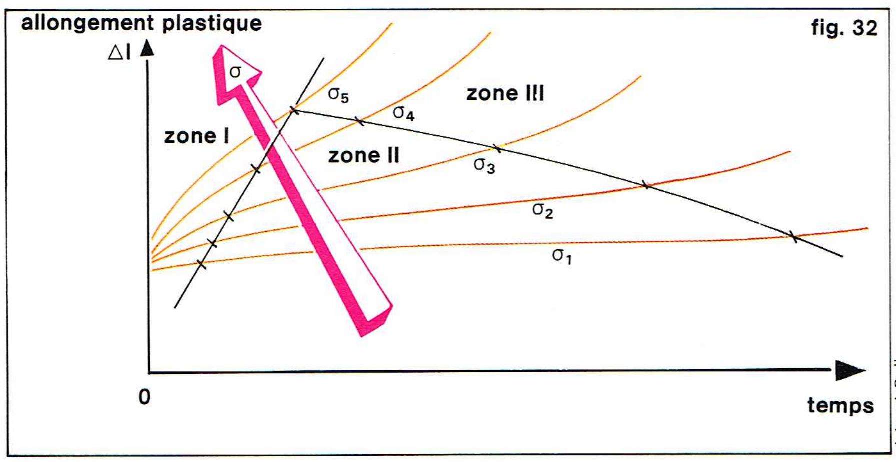

▲ *Figure 31 : évolution de l'allongement d'une éprouvette en fonction du temps pendant le fluage.*
Figure 32 : influence de la contrainte sur l'évolution de la déformation de fluage en fonction du temps.

▼ *Figure 33 : exemples de modèles rhéologiques ; a, de Hooke (ressort parfait) ; b, de Newton (amortisseur fluide parfait) ; c, de Maxwell ; d, de Kelvin-Vorgt ; e, de Boltzmann-Thomson.*

Exemple :
Maintenons une éprouvette de traction sous une charge constante P_0 à la température T et enregistrons son élongation Δl en fonction du temps t (voir diagramme de la *figure* 31).

On décompose l'évolution du phénomène en trois stades :

— *Premier stade.* Fluage primaire : zone I. La vitesse de déformation est une fonction décroissante du temps.

— *Deuxième stade.* Fluage secondaire : zone II. Le phénomène est stabilisé, l'évolution se fait à vitesse constante.

— *Troisième stade.* Fluage tertiaire : zone III. La vitesse de déformation est une fonction croissante du temps, et l'essai se termine par la rupture de l'éprouvette.

Avec les mêmes coordonnées, il est possible de représenter l'influence de la contrainte ; on obtient alors un réseau de courbes de fluage (voir *fig.* 32).

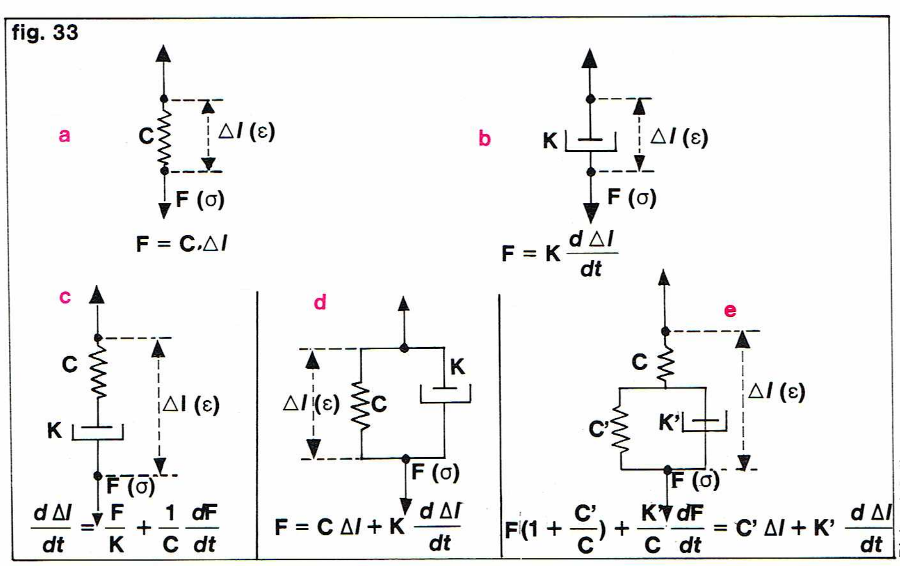

Origines du fluage

Les origines du fluage sont nombreuses, cependant, dans le cas des matériaux métalliques, il est surtout le résultat macroscopique de deux phénomènes microscopiques antagonistes :

★ *Premier phénomène : l'écrouissage.* Nous avons vu que la déformation plastique d'un métal était représentable par :

$$\sigma = \sigma_n \, (\varepsilon)^n$$

avec n : coefficient d'écrouissage.

Nous savons qu'une augmentation relative de la déformation plastique $\left(\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon}\right)$ s'accompagne d'une augmentation relative de la limite élastique $\left(\frac{\Delta\sigma}{\sigma}\right)$ telle que :

$$\left(\frac{\Delta\sigma}{\sigma}\right) = n \left(\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon}\right)$$

Ce phénomène de consolidation est l'écrouissage, et il assure la stabilité du système déformé plastiquement.

★ *Deuxième phénomène : la restauration.* La mise sous contrainte dans le domaine élastique puis l'écrouissage d'un matériau correspondent à une augmentation de l'énergie interne du corps. En effet la mise sous contrainte correspond à une énergie potentielle élastique proportionnelle au carré de la contrainte, et la déformation plastique, en créant des dislocations, élève l'énergie interne d'une quantité proportionnelle au carré du vecteur de Burgers moyen. Il ne faut pas oublier, en outre, que, les dislocations créées n'étant pas libres, il existe une énergie mutuelle d'interaction supplémentaire.

Un tel système hors d'équilibre évoluera s'il le peut vers une configuration moins énergétique.

Si la température du corps hors d'équilibre thermodynamique est suffisante pour que les éléments constitutifs du polycristal (atomes, ions, lacunes, dislocations) puissent diffuser, nous observerons le phénomène dit de restauration. Ce phénomène de restauration est un retour vers l'état initial, et parmi les caractéristiques mécaniques on observe une diminution de la limite d'élasticité qui permettra une nouvelle déformation plastique.

Suivant la température du corps, le système cristallin déformé évoluera de deux façons différentes : soit une polygonisation qui est une réorganisation des dislocations à l'intérieur des cristallites existants, soit une recristallisation qui créera une nouvelle cristallisation.

Nous voyons donc que ces deux mécanismes, en apparaissant alternativement, vont régir le phénomène de fluage. Les paramètres en sont : l'état de contrainte σ ; le coefficient d'écrouissage n ; la température T et la vitesse de restauration.

Modèles rhéologiques

Le modèle élastique de Hooke $\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl}$ ne peut pas rendre compte du comportement d'un corps lors du processus de fluage. La rhéologie, qui a pour but d'étudier l'écoulement des matériaux « solides », a proposé divers modèles mécaniques ou électriques ayant, par analogie, un comportement identique à celui des matériaux « solides ». Ces modèles rhéologiques (*fig.* 33) sont justifiés par le fait que le comportement macroscopique de matériaux divers est sensiblement le même si l'on remplace le paramètre température par le coefficient réduit :

$$\Theta = \frac{T}{T_f}$$

où T_f est la température de fusion du corps.

Fragilité des matériaux

Un corps soumis à un état de contrainte croissant se déforme d'abord suivant un processus réversible, et le comportement est dit élastique, puis, au-delà d'un taux de contrainte critique, la déformation devient permanente, et le comportement est dit plastique, la résistance au glissement (cisaillement) du matériau régissant dans tous les cas l'évolution du système. Si la contrainte augmente encore, on observe la rupture du matériau par décohésion (*fig.* 34).

Un tel matériau a un comportement ductile, c'est-à-dire une déformation plastique, tant que la déformation

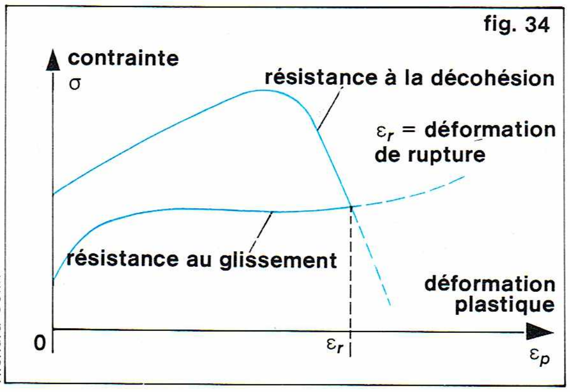

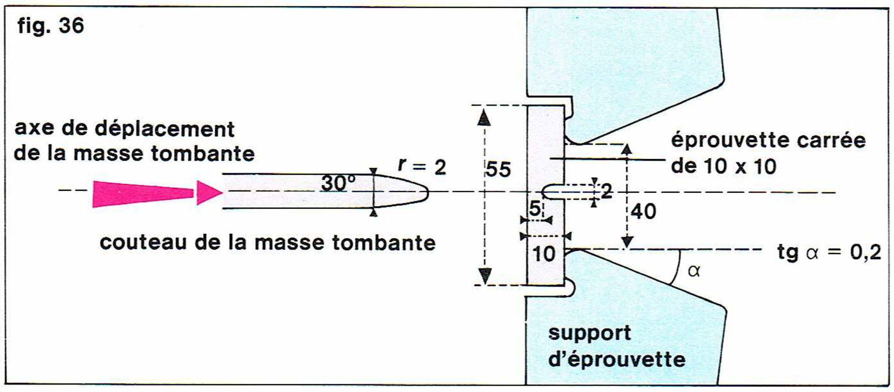

est inférieure à la déformation de rupture ε_r. Pour cette déformation, on observe une rupture par décohésion sans déformation plastique supplémentaire. Le comportement est alors dit fragile pour ce point critique.

Facteurs fragilisants

La fragilité d'un matériau est conditionnée par plusieurs facteurs qui vont modifier la position relative des courbes de résistance au glissement et à la décohésion.

Les facteurs fragilisants sont : une capacité de déformation plastique faible; une température basse; une vitesse de sollicitation élevée; un état de contrainte triaxial; une grande vitesse de propagation des déchirures; une résistance à la rupture élevée.

Essai de résilience

L'essai de résilience constitue encore actuellement le mode de mesure de la fragilité d'un matériau le plus utilisé. Son principe est la mesure de l'énergie nécessaire pour entraîner la rupture d'un barreau entaillé ou non par une masse tombant d'une certaine hauteur (*fig.* 35).

La résilience K est l'énergie nécessaire à la rupture exprimée en joules et ramenée à l'unité de surface de la section de rupture macroscopique mesurée en centimètres carrés.

Dans le cas des matériaux fragiles, telles les fontes phosphoreuses à graphite lamellaire, il n'est pas souhaitable d'utiliser un barreau entaillé pour augmenter la fragilité.

Dans le cas des matériaux ductiles, il est nécessaire d'entailler le barreau afin d'obtenir à fond d'entaille une triaxialité des contraintes et une concentration de la déformation qui favorisent le comportement fragile.

Malheureusement, l'essai de résilience est un essai comparatif, les valeurs mesurées sur un matériau étant fonction du type d'éprouvette et de la nature du mouton-pendule utilisé pour l'essai. C'est en particulier pour cette raison qu'il existe de nombreux types d'éprouvettes et que chaque utilisateur entend conserver celle qui correspond le mieux à son problème ainsi qu'à ses habitudes (*fig.* 36).

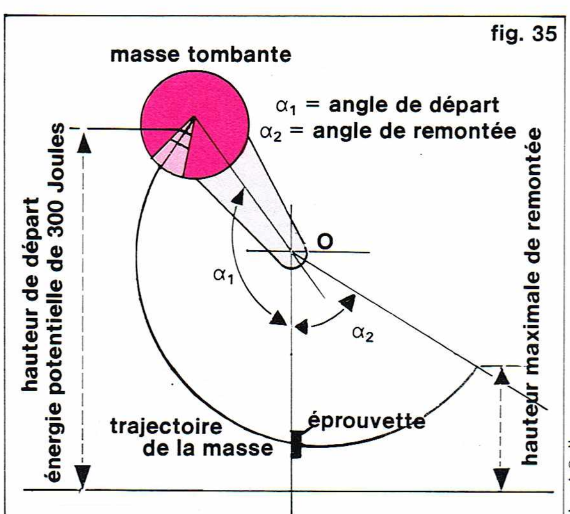

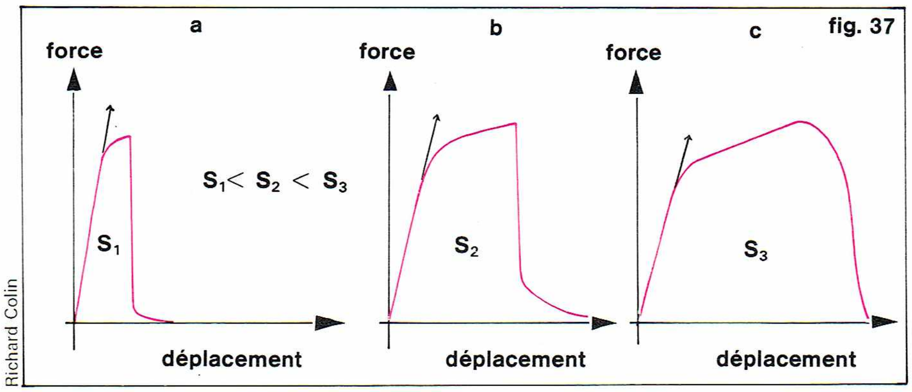

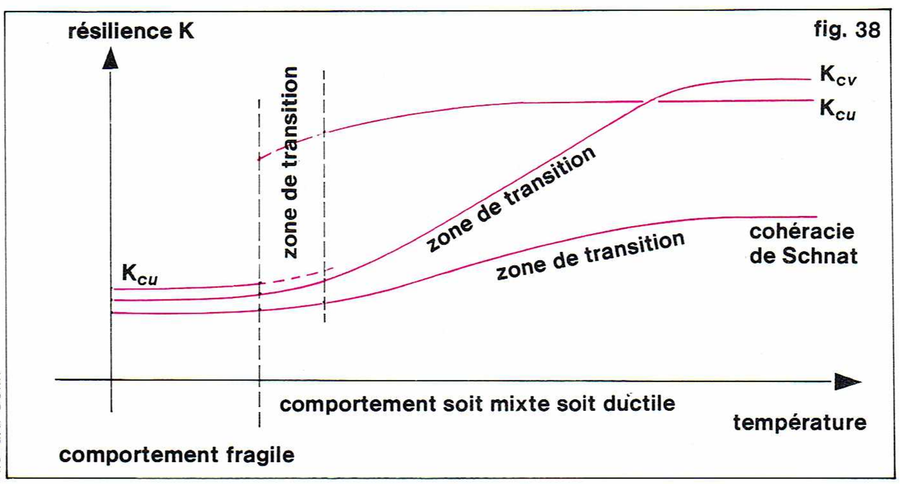

— *Mouton-pendule « instrumenté ».* L'utilisation de jauges extensométriques permettant la mesure de déformations évoluant rapidement en fonction du temps a permis de mesurer deux paramètres importants pendant l'essai de résilience : la force appliquée sur l'éprouvette et sa déformation macroscopique.

On obtient par cette technique des courbes effort/déplacement qui illustrent les comportements des différentes classes de matériaux (*fig.* 37).

— *Influence de la température sur la valeur de la résilience.* La connaissance de la température de l'éprouvette au moment de l'essai est extrêmement importante. Si l'on résume les résultats obtenus par différents expérimentateurs utilisant des éprouvettes et des moutons différents, on obtient le graphique de la *figure* 38.

On observe :

— Une zone à comportement ductile pour les hautes températures. La résilience est élevée.

— Une zone à comportement fragile pour les basses températures. La résilience est basse.

— Une température ou un domaine de transition entre les deux zones précédentes.

— La température de transition est fonction de l'acuité de l'entaille. Elle n'est donc pas une grandeur caractéristique du matériau.

▲ ***Figure 34 :** variations de la résistance à la décohésion et au glissement d'un matériau en fonction de sa déformation plastique.*
***Figure 36 :** disposition de l'éprouvette normalisée de résilience K_{cu} sur son support.*
***Figure 37 :** courbes effort-déplacement lors de l'essai de résilience :*
a, rupture fragile;
b, rupture mixte;
c, rupture ductile.
***Figure 38 :** comparaison de l'influence de la température sur divers types de résiliences.*

◀ ***Figure 35 :** principe de l'essai de résilience par la méthode du mouton-pendule de Charpy.*

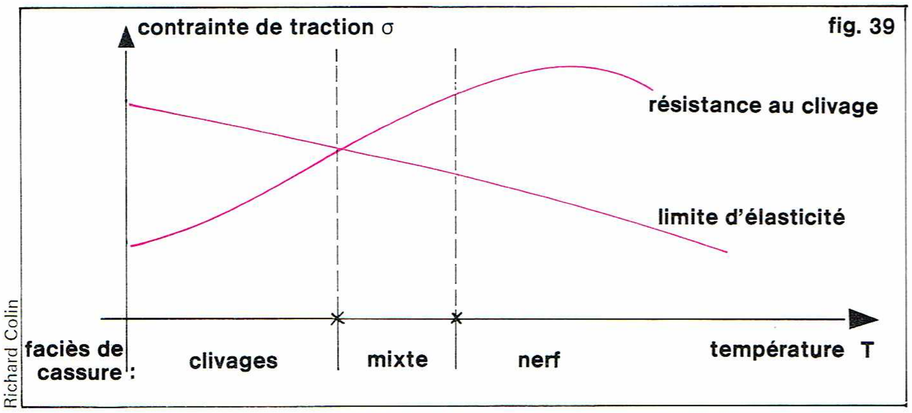

Richard Colin

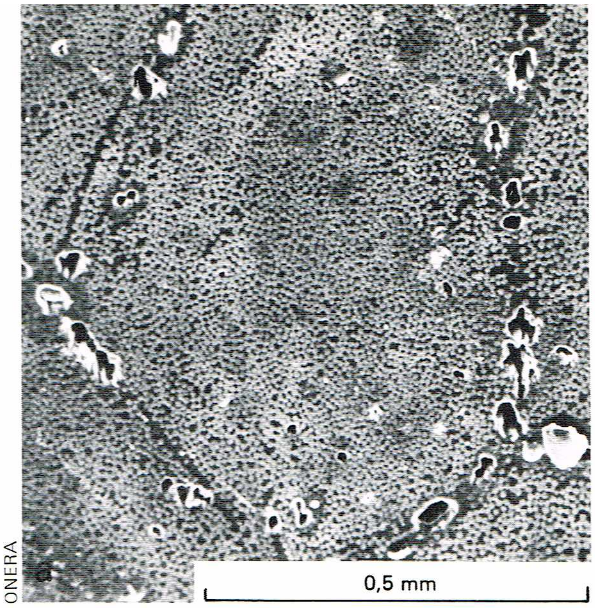

ONERA

▲ *Figure 39 : diagramme de Noren. A droite, un matériau composite à fibres de carbone, obtenu par double imprégnation (phénolique/époxyde) ; la résilience supérieure des composites obtenus par double imprégnation a pu être attribuée à l'existence d'une fine porosité confinée aux interfaces entre les unités structurales travaillantes.*

▼ *Figure 40 : éprouvette à entaille centrale (type IRWIN) servant à l'étude de la propagation des fissures dans un matériau.*

— Les résiliences obtenues dans le domaine ductile diffèrent suivant les types d'essais. Là aussi, la grandeur n'est pas caractéristique.

— Les résiliences obtenues dans le domaine fragile sont identiques. On a mesuré une grandeur caractéristique du matériau.

— *Analyse du faciès de la cassure.* Il est extrêmement instructif d'analyser le faciès de la cassure.

Une *rupture dans le domaine fragile* permet de reconstituer l'éprouvette initiale par rapprochement des deux morceaux qui ne sont pas déformés plastiquement. La surface de la cassure est une juxtaposition de surfaces planes et brillantes qui sont les plans de clivage dans le cas des ruptures intragranulaires, et les surfaces des joints de grains dans le cas des ruptures intergranulaires. Cet aspect de la cassure est dit cristallin, rappelant par là que l'on observe parfaitement la disposition des cristaux qui constituent l'agrégat.

Une *rupture dans le mode ductile* ne permet pas de reconstituer le barreau de départ par rapprochement des deux morceaux qui sont déformés plastiquement. Le faciès de la cassure est mat et sans formes géométriques planes. L'écoulement du métal lors de la déformation plastique fait que ce faciès de rupture est dit « à nerfs ».

Si la rupture a lieu à une température située dans la zone de transition, son faciès est constitué de deux zones. Sur la périphérie le faciès est à nerfs, au centre il est cristallin.

On vérifie donc que la triaxialité est bien un facteur fragilisant.

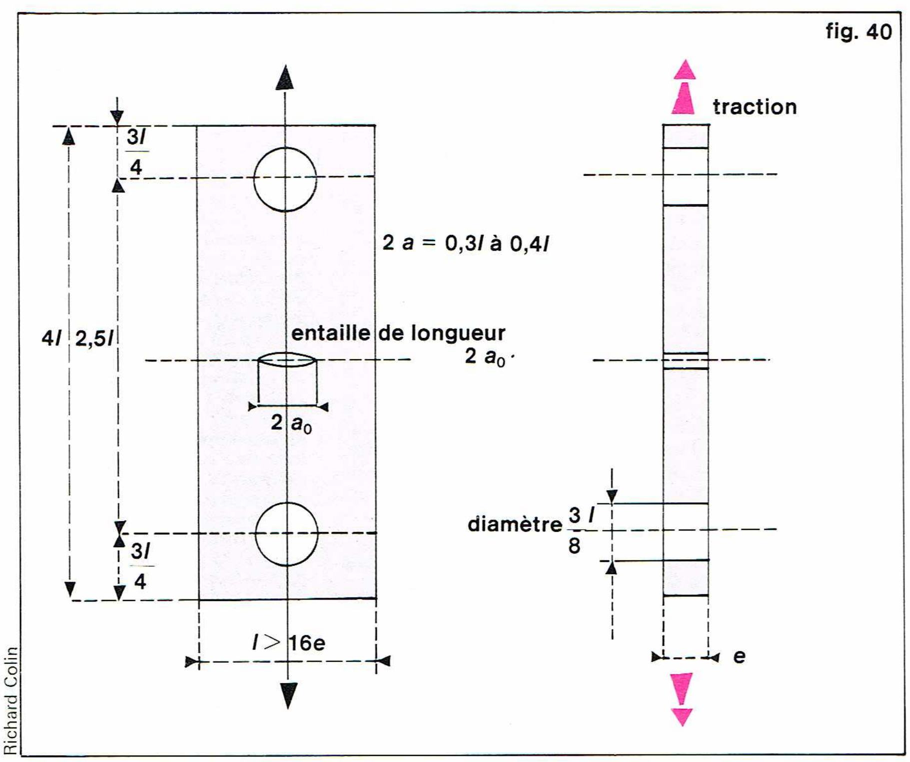

Richard Colin

L'influence de la température sur la résilience peut être expliquée par le *diagramme de Noren,* qui relie la limite élastique et la résistance au clivage d'un matériau en fonction de la température (*fig.* 39).

La résistance au clivage est mesurée par un essai de traction sur le matériau étudié. L'éprouvette est revêtue d'une soudure dure et fragile servant de générateur de fissure. Lorsque la contrainte moyenne de traction atteint la valeur de la résistance au clivage, les fissures existant dans la soudure se propagent dans l'éprouvette.

Essai de propagation de fissure sur éprouvette entaillée

Il est extrêmement intéressant de savoir si une fissure préexistant dans un matériau soumis à un état de contrainte est stable ou non. Cette préoccupation découle des problèmes suivants : certains matériaux utilisés ne sont pas parfaits, il existe en leur sein de nombreuses fissures ; quelle est la taille critique de ces fissures ? que peut-on accepter et que doit-on rejeter comme défauts ?

— *Position du problème* (*fig.* 40).

— Si la fissure, de longueur initiale a, augmente de dimension, il est nécessaire de fournir une énergie pour créer cette interface. L'énergie de déchirure par unité de surface est G_c.

— L'augmentation de la longueur de la fissure entraîne une relaxation de l'état de contrainte, c'est-à-dire qu'il y a libération d'énergie élastique.

— Si le matériau est parfaitement fragile, il n'est pas nécessaire d'envisager un échange énergétique correspondant à une plastification à fond d'entaille.

— Dans le cas d'un matériau ductile, on observe une plastification à fond d'entaille dont il faudra tenir compte dans le calcul de la stabilité de la fissure.

— *Stabilité de la fissure*

Tant que l'énergie libérée par la relaxation de la contrainte est plus faible que l'énergie absorbée par la propagation de la fissure qui l'a engendrée, le système est stable, et la fissure croît lorsque la contrainte moyenne augmente.

Dans le cas contraire, l'équilibre est rompu, et la rupture devient catastrophique.

Ces problèmes sont étudiés par la discipline relativement nouvelle qu'est la *mécanique de la rupture.* On montre en particulier que la grandeur K, qui est le facteur d'intensité de contrainte, est primordiale.

$$K = \sigma\, (\pi \cdot a)^{1/2}$$

avec : σ = contrainte moyenne de traction ; $2\,a$ = longueur de la fissure ; K = facteur d'intensité de contrainte.

La grandeur K augmente lorsque l'état de contrainte σ croît. Elle atteint une valeur maximale critique K_c à partir de laquelle l'équilibre est rompu.

On montre que :

$$K_c = (EG_c)^{1/2} = \sigma_i\, (\pi a_i)^{1/2}$$

avec : σ_i = contrainte moyenne critique ; $2\,a_i$ = longueur critique ; E = module d'Young ; G_c = énergie spécifique de la déchirure.

Pratiquement, on mesure σ, a, et $\frac{da}{dt}$ lorsque la déchirure devient catastrophique. Le relevé des mesures ultimes permet de calculer K_c, le facteur d'intensité de contrainte critique.

PROPRIÉTÉS ÉLECTRIQUES DES MATÉRIAUX

Au début du siècle, alors que l'électricité apparaissait comme l'énergie de l'avenir, le comportement électrique des matériaux, tel qu'on savait le mettre en évidence, permettait de les classer dans deux catégories : les conducteurs et les isolants. Placé dans un champ électrique, un corps conducteur est parcouru par un courant. Un corps isolant, dans les mêmes conditions, se contente d'emmagasiner de l'énergie électrostatique. Cette classification se révéla rapidement insuffisante pour deux raisons. Tout d'abord, en 1911, à Leyde, Kammerlingh Onnes mit en évidence la disparition complète de la résistivité du mercure à 4,2 °K. Ce phénomène mystérieux, la supraconductivité, devait rester inexpliqué jusqu'à ce que Bardeen, Cooper et Schrieffer en fournissent une théorie quantique générale en 1957. Par ailleurs, on s'aperçut rapidement qu'entre les bons conducteurs que sont les métaux (résistivité de l'ordre de $10^{-6}\,\Omega$. cm) et les isolants (10^{14} à 10^{22} Ω. cm), il y avait place pour une troisième catégorie de corps, les semi-conducteurs (10^{-2} à $10^{9}\,\Omega$. cm). A côté de leur résistivité intermédiaire, ces derniers ont un comportement très particulier en fonction de la température : alors qu'un bon conducteur comme l'argent voit sa résistance diminuer rapidement lorsque la température décroît, celle d'un semi-conducteur comme le germanium augmente et devient énorme au voisinage de 0 °K.

Nous envisagerons successivement les propriétés des conducteurs et supraconducteurs, celles des semi-conducteurs et enfin les propriétés des isolants ou diélectriques. Cette dernière partie sera la plus importante, car, si les matériaux semi-conducteurs ont révolutionné l'électronique à partir de 1945, il n'est pas exagéré de dire qu'une meilleure compréhension des propriétés des diélectriques sera peut-être à l'origine du développement de produits aussi étonnants que le transistor en son temps. La preuve en est que l'introduction des électrets — qui sont des diélectriques chargés — dans la technologie des microphones a complètement bouleversé le marché de ces composants.

Conducteurs et supraconducteurs

Résistivité des métaux

Nous rappellerons brièvement ici quelques caractéristiques de la structure des métaux qui expliquent leur faible résistivité. La conductivité est essentiellement liée au nombre de porteurs de charges libres de se déplacer dans le volume du matériau. Dans un métal, ces porteurs sont des électrons de valence que l'on appelle électrons de conduction. On peut se demander pourquoi la phase condensée constituée par les cations du métal se laisse si aisément traverser par les électrons de conduction qui se comportent comme un gaz sans interactions. Il faut chercher la réponse à notre question dans la mécanique quantique. Tout d'abord, la nature ondulatoire de l'électron lui permet de se propager librement dans une structure périodique telle que le réseau des cations. Ensuite, un électron de conduction n'est que rarement diffusé par un autre électron de conduction en raison du principe de Pauli qui interdit à deux électrons de se trouver dans le même état quantique.

A ce stade, on pourrait croire que tous les cristaux sont conducteurs, puisque les atomes y sont ordonnés suivant un réseau périodique. En fait, les électrons d'un cristal sont localisés dans des bandes d'énergie permises séparées par des bandes interdites. Le « remplissage » de ces bandes dépend du nombre d'électrons du cristal. Si ce nombre est tel que les bandes d'énergie sont soit pleines, soit vides, aucun électron ne peut se déplacer dans un champ électrique, et le matériau est *isolant*. Si, au contraire, une ou plusieurs bandes sont partiellement remplies, les électrons de ces bandes pourront se déplacer dans un champ électrique, et le cristal aura les propriétés d'un métal : il sera *conducteur*.

Le roi des conducteurs industriels est le cuivre, qui constitue la majeure partie des circuits de distribution énergétiques et des bobinages de circuits magnétiques.

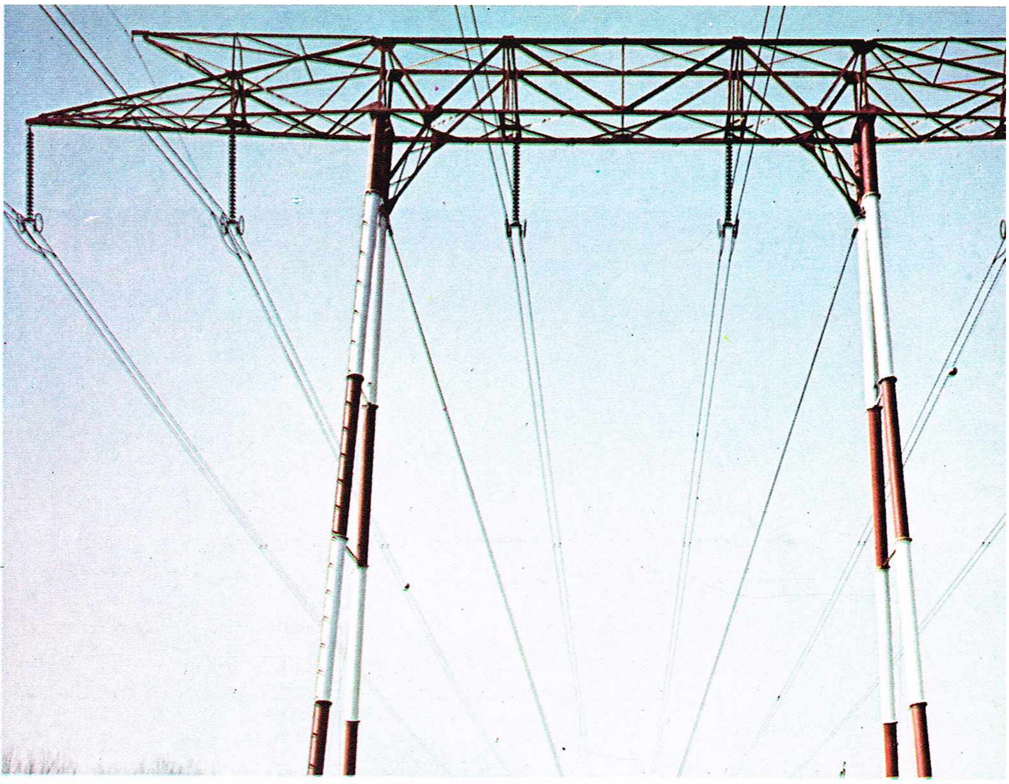

Photothèque E.D.F. - Sodel - G. Jaumotte

▲ ***Les lignes aériennes de transport d'énergie sont constituées de matériaux conducteurs de faible résistivité (cuivre ou aluminium sur âme d'acier).***

Il est concurrencé par l'aluminium et par des conducteurs hétérogènes (cuivre ou aluminium sur âme d'acier) dans la fabrication des lignes aériennes de transport d'énergie. Le prix élevé de l'argent, meilleur conducteur que le cuivre, en fait réserver l'usage à des cas spéciaux.

D'autres métaux sont utilisés pour leurs propriétés conductrices dans le cas où celles-ci doivent s'accompagner de caractéristiques physico-chimiques particulières. C'est le cas de l'or déposé sur certains contacts pour éviter qu'ils ne s'altèrent par oxydation.

Les supraconducteurs

Lorsque l'on refroidit certains métaux ou alliages à des températures suffisamment basses, on constate que leur résistivité électrique est si voisine de zéro que l'on peut observer des courants électriques persistants dans les anneaux supraconducteurs pendant plus d'un an sans apport d'énergie extérieur. Les temps d'amortissement des supracourants, évalués par des méthodes de résonance magnétique nucléaire, ne sont pas inférieurs à 100 000 ans.

Les températures de transition observée s'étendent de 21 °K pour l'alliage Nb_3 $(Al_{0,8}\ Ge_{0,2})$ à 0,01 °K pour les

▼ ***Cristaux de cuivre.***

Lab. de physique des matériaux du Centre national de la recherche scientifique

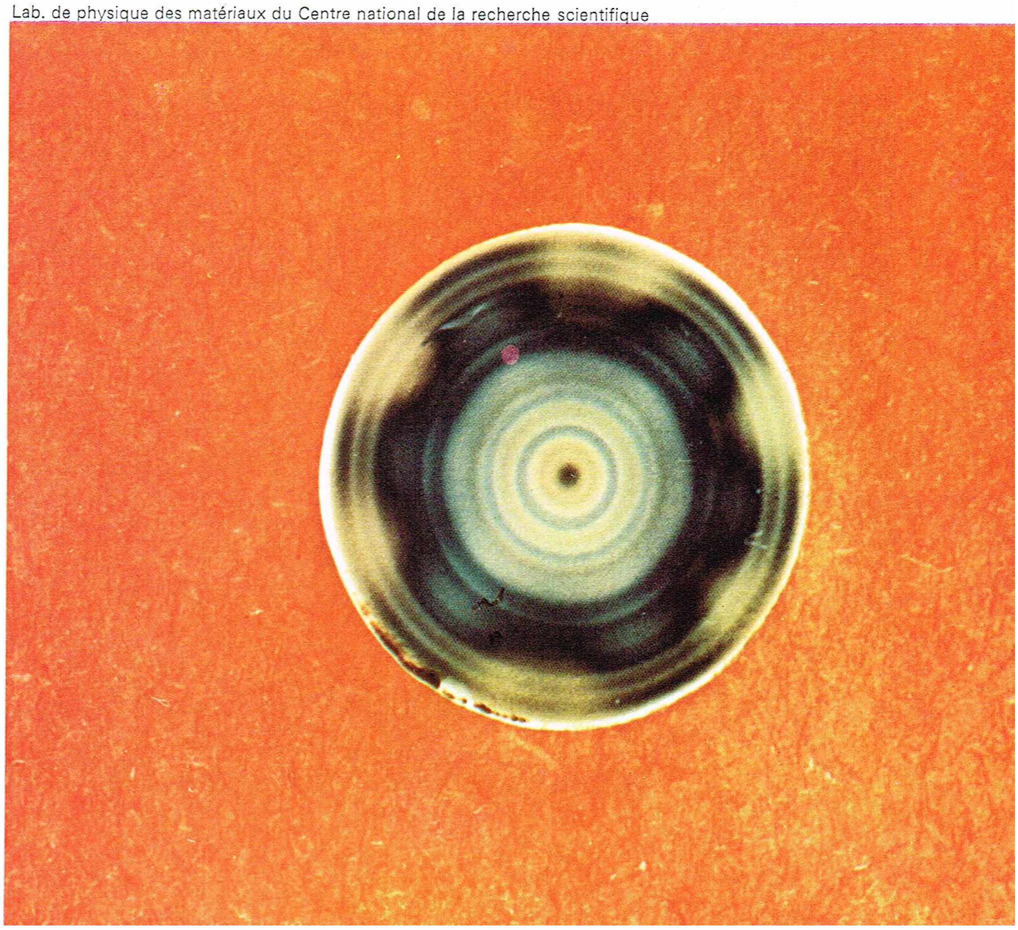

Tableau I
Températures de transition de quelques composés supraconducteurs

Composés	Tc (°K)	Composés	Tc (°K)
Nb_3Sn	18,05	V_3Ga	16,5
$Nb_3(Al_{0,8}Ge_{0,2})$	20,9	V_3Si	17,1
Nb_3Al	17,5	UCo	1,7
Nb_3Au	11,5	Ti_2Co	3,44
NbN	16,0	La_3In	10,4
MoN	12,0	InSb	1,9

▲ *Tableau I : températures de transition de quelques composés supraconducteurs.*

semi-conducteurs. On donne les températures de transition de quelques composés supraconducteurs dans le *tableau* I. Un champ magnétique suffisamment élevé a pour effet de détruire la supraconductibilité. On note H_c la valeur critique du champ magnétique qui détruit la supraconductibilité; elle dépend de la température et tombe à zéro à la température de transition de l'état supraconducteur à l'état normal du matériau. Dans la mesure où les supraconducteurs ont pour principale application la production de champs magnétiques élevés dans les bobines supraconductrices, une valeur élevée de H_c est souhaitable.

L'état supraconducteur s'accompagne d'une autre propriété magnétique particulière : la valeur de l'induction magnétique B d'un supraconducteur plongé dans un champ magnétique inférieur à H_c est identiquement nulle dans une catégorie de supraconducteurs que l'on appelle les supraconducteurs de type I. Il faut noter que ce comportement, qualifié d'effet Meissner, du nom du physicien qui le mit en évidence, ne peut se déduire de la résistivité nulle du matériau. Les supraconducteurs de type II présentent une induction magnétique identiquement nulle pour $H = H_{c1}$ et conservent des propriétés électriques supraconductrices entre H_{c1} et H_{c2}, valeur à laquelle se produit la transition vers l'état normal. Entre H_{c1} et H_{c2}, l'effet Meissner est incomplet, mais le grand intérêt de ces matériaux réside dans la valeur très élevée de H_{c2} qui permet d'utiliser les propriétés électriques supraconductrices du matériau pour produire des champs magnétiques élevés.

Un champ H_{c2} de 41 kG a été atteint dans un alliage (Nb, Al, Ge) à la température d'ébullition de l'hélium. Des solénoïdes constitués de fil supraconducteur de type II soumis à un traitement mécanique particulier ont permis d'obtenir des champs de l'ordre de 100 kG.

Les semi-conducteurs

Nous avons vu que la résistivité d'un semi-conducteur augmente lorsque la température diminue. Un tel comportement se comprend aisément si l'on revient au modèle de bandes déjà envisagé dans le cas des métaux. La différence essentielle qui sépare les semi-conducteurs des isolants est la largeur de bande interdite E_g séparant la bande de valence de la bande de conduction. Au zéro absolu, la bande de valence est pleine, et la bande de conduction vide : le matériau est isolant. Si E_g est grande, l'agitation thermique des électrons de valence, à température non nulle, ne pourra les faire passer de la bande de valence à la bande de conduction : le matériau sera isolant à toute température. Par contre, si E_g est suffisamment petite pour que certains électrons puissent passer de la bande de valence à la bande de conduction par agitation thermique, le matériau aura une résistivité décroissant avec la température : ce sera un *semi-conducteur*.

La conductivité ainsi décrite est la conductivité intrinsèque du matériau pur. Mais si l'on introduit dans le matériau (Si ou Ge quadrivalent) une très petite quantité d'un atome pentavalent (Sb, As), quatre de ses électrons de valence le lient aux quatre atomes de Si ou de Ge voisins, et le cinquième est disponible pour la conduction. C'est la conductivité extrinsèque, qui peut être 1 000 fois plus forte que la conductivité intrinsèque. L'atome pentavalent est alors dit donneur, et l'on a affaire à un semi-conducteur de type *n* où se trouvent des électrons libres.

Par ailleurs, si l'on introduit des impuretés trivalentes (Al, In) dans le matériau, elles vont prendre des électrons dans la bande de valence, y laissant ainsi des « trous » qui se comportent comme des charges positives. Le semi-conducteur est de type *p* et contient des trous positifs libres.

Du point de vue des applications, il est très important de considérer la situation créée par la mise en contact de deux éléments semi-conducteurs, l'un de type *p* et l'autre de type *n* (jonction *p-n*). Du côté *p*, les porteurs majoritaires sont des trous, et du côté *n* des électrons. La diffusion tendrait à égaliser les concentrations d'électrons et de trous de deux côtés de la jonction. Mais comme chacun des deux éléments est électriquement neutre,

▼ *A gauche, une dynamo de grande puissance; à la surface du rotor de la dynamo, dans le sens longitudinal, sont contenus des conducteurs, qui, réunis entre eux, constituent les spires d'un circuit induit.* *Figure 1 : différence de potentiel électrostatique au niveau d'une jonction p-n sans tension appliquée.*

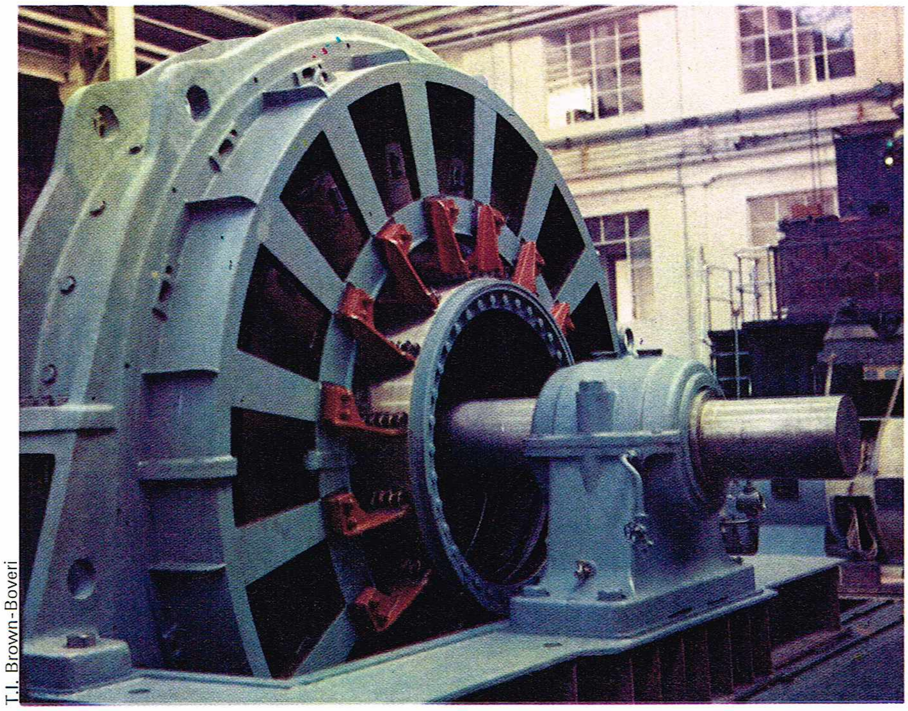

T.I. Brown-Boveri

fig. 1

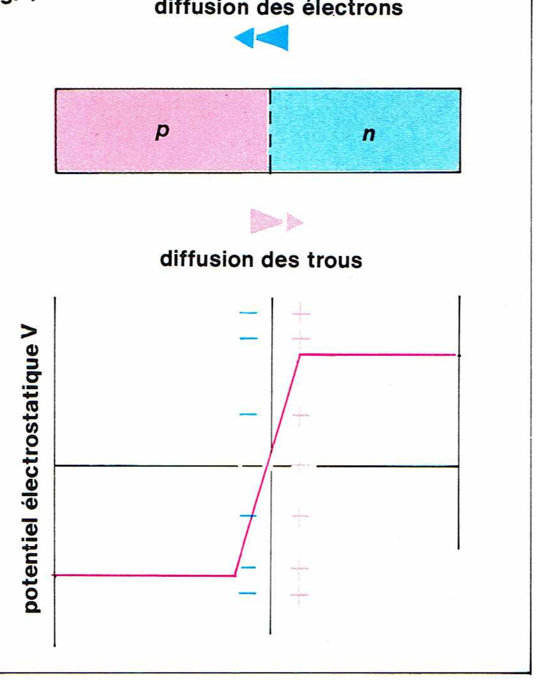

Richard Colin

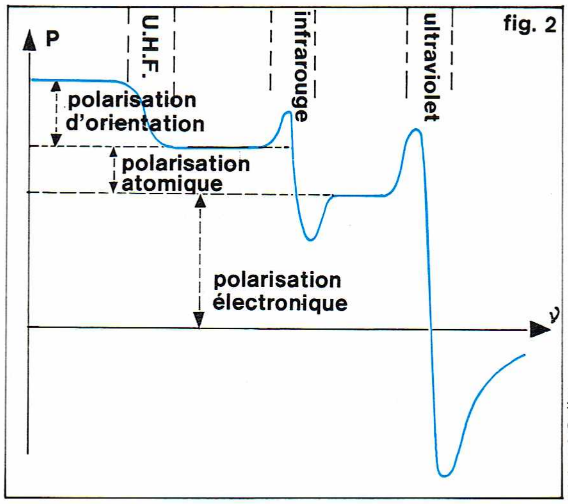

le départ d'un trou vers le côté *n* laisse une charge négative du côté *p*, et le départ d'un électron vers le côté *p* laisse une charge positive du côté *n*. On voit ainsi apparaître une double couche qui crée un champ électrique s'opposant au passage des porteurs (*fig.* 1). Il existe donc une différence de potentiel électrostatique entre les deux éléments de la jonction, différence de potentiel à laquelle un voltmètre n'est pas sensible, puisque, à strictement parler, il mesure une différence de potentiel électrochimique.

Supposons que les extrémités de la jonction soient reliées à un circuit et que nous éclairions la jonction. L'absorption d'un photon crée un électron et un trou. S'ils sont créés à la jonction, le champ électrique entraîne le trou vers la région *n*, d'où l'apparition d'un courant électrique dans le circuit extérieur. Les cellules solaires montées sur les satellites artificiels fonctionnent sur ce principe.

Par ailleurs, si l'on applique une tension inverse à la jonction, c'est-à-dire qu'on impose un potentiel négatif à la région *p* et un potentiel positif à la région *n*, on ne fait qu'augmenter la hauteur de la marche de potentiel entre les deux régions : aucun courant ne passe. Une tension appliquée dans le sens direct abaisse au contraire la barrière de potentiel et augmente le courant de recombinaison : on dit que la jonction est passante. Un tel comportement est comparable à celui d'une diode à vide. Il est à l'origine de l'intense développement qu'ont connu les dispositifs à semi-conducteurs en électronique.

Les cristaux semi-conducteurs les plus utilisés sont le germanium et le silicium. L'oxyde de cuivre et le sélénium ont eu leur heure de gloire, puisqu'ils ont constitué les premiers redresseurs à semi-conducteurs. On peut également citer Pb Te, PbS, SiC, InSb, GaAs et le graphite.

Les composés semi-conducteurs de formule chimique AB où A est un élément trivalent et B un élément pentavalent sont appelés composés (III, V). C'est le cas de l'antimoniure d'indium et de l'arséniure de gallium. Si A est divalent et B hexavalent, le composé est (II, VI). C'est dans cette catégorie que se rangent le sulfure de zinc et le sulfure de cadmium. Si et Ge sont souvent appelés semi-conducteurs du type diamant en raison de leur structure cristalline.

Les diélectriques

Les diélectriques sont des matériaux susceptibles d'emmagasiner de l'énergie électrostatique. Nous envisageons successivement les différentes grandeurs caractérisant les diélectriques et quelques aspects théoriques de leur étude.

Polarisation

Lorsqu'on soumet un isolant à un champ électrique E*n* chacune de ses molécules répond à ce champ. C'est la somme de ces réponses étendues à tout le matériau que l'on appelle la polarisation diélectrique. Un certain nombre de mécanismes interviennent dans la polarisation. On distinguera :

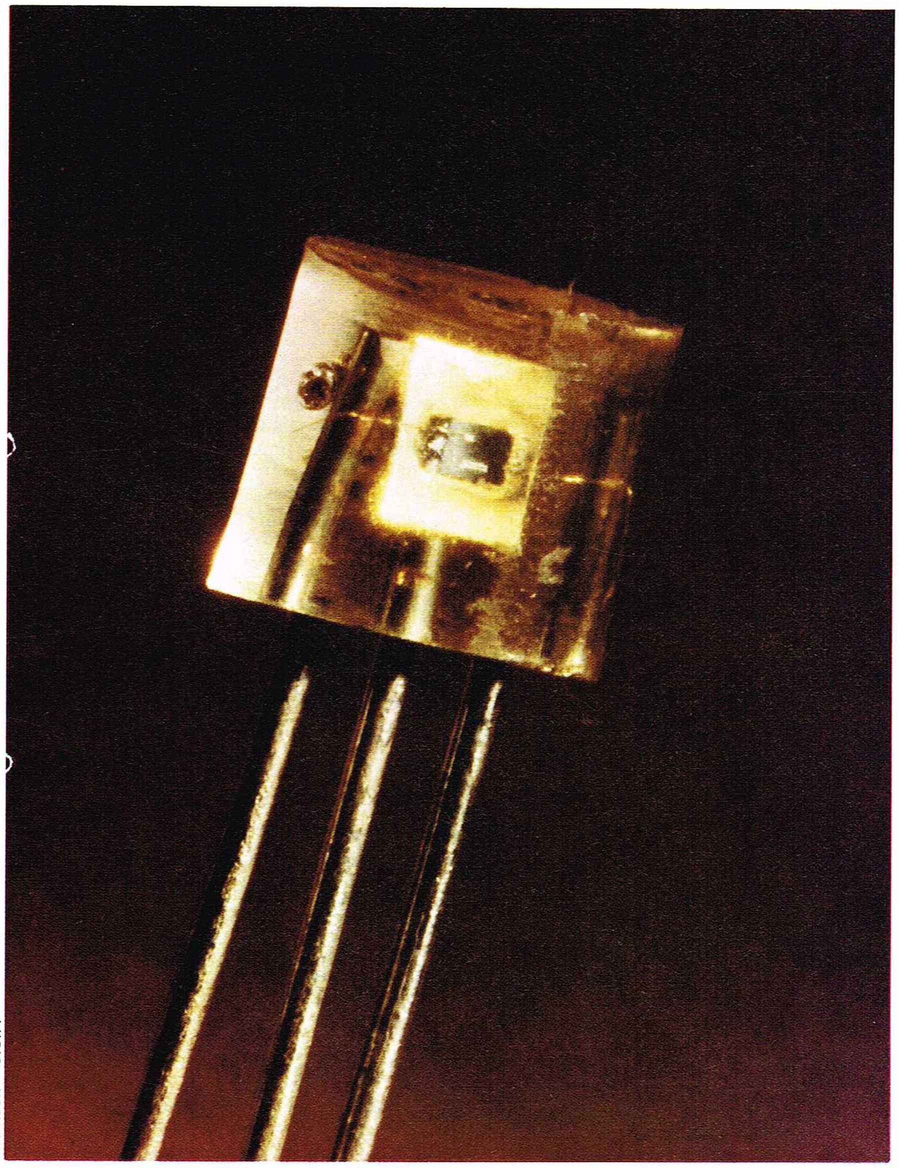
Thomson - C.S.F.

▲ ***Figure 2 :** comportement de la polarisation diélectrique* P *en fonction de la fréquence ν. A droite, la découverte des semi-conducteurs a été à la base de la fabrication puis de la grande commercialisation des transistors.*

* La **polarisation électronique.** Elle résulte de la déformation des cortèges électroniques dans un champ électrique et se produit dans la totalité des matériaux. Dans une large mesure, elle ne dépend ni de la fréquence de E ni de la température.

* La **polarisation atomique** correspond à la variation du moment dipolaire moléculaire qui résulte de l'allongement des liaisons chimiques dans certaines molécules soumises à un champ électrique. Ce phénomène n'intervient donc que pour des fréquences inférieures à celles des vibrations moléculaires (10^{12} à 10^{14} Hz).

* La **polarisation d'orientation** fait intervenir un phénomène qui est l'analogue électrique du paramagnétisme : des dipôles électriques présents dans le matériau s'alignent partiellement dans un champ électrique. La polarisation résulte alors d'un compromis entre, d'une part, l'énergie électrique $\mu_e \cdot E$ où μ_e est le moment dipolaire électrique élémentaire et E le champ électrique, et, d'autre part, l'énergie d'agitation thermique $k \cdot T$. On sait que dans ces conditions la polarisation à basse fréquence dépend de la température.

* La **polarisation dite de charge d'espace** est un phénomène qui n'intervient que lorsque les porteurs de charge présents dans le diélectrique se déplacent sur des distances appréciables tout en restant piégés dans le matériau. Dans ces conditions, on constate une distorsion du champ moyen. On peut résumer le comportement de la polarisation diélectrique en fonction de la fréquence par la courbe de la *figure* 2.

En tant que grandeur physique, la polarisation est un vecteur dont la dimension est celle d'un moment dipo-

laire par unité de volume. Sa mesure s'exprime en C/m^2 dans le système international.

Susceptibilité électrique

Soit $\vec{P}$ la polarisation d'un matériau dans le champ électrique $\vec{E}$. Si ce champ n'est pas trop intense, la relation liant la réponse du matériau à l'excitation sera linéaire : $\vec{P} = \varepsilon_0 \chi_E \vec{E}$. Dans cette expression, le paramètre χ_E que l'on appelle la susceptibilité électrique du matériau, est multiplié par la permittivité du vide ε_0. Cela permet de donner une expression simple du vecteur déplacement électrique $\vec{D}$:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \varepsilon_0 (1 + \chi_E) \vec{E}$$

Rigidité diélectrique

Cette grandeur est d'une grande importance technique : c'est le champ électrique le plus élevé susceptible d'être appliqué au matériau sans provoquer son claquage. Les matériaux isolants habituels ont une rigidité diélectrique variant entre 10^4 et 10^7 V/cm à basse fréquence et à la température ambiante. Lorsque la température augmente, on constate une diminution de la rigidité diélectrique.

Pertes diélectriques

C'est l'énergie dissipée dans un diélectrique par conduction ionique, orientation de dipôle ou même mouvements d'électrons libres. L'énergie électrique cédée par le champ apparaît alors sous forme thermique. Il existe plusieurs grandeurs caractérisant les pertes diélectriques. On peut définir la conductivité γ telle que $\vec{J} = \gamma \vec{E}$, où $\vec{J}$ est la densité de courant consécutive à l'application du champ $\vec{E}$; le facteur de perte ε'' qui est la partie imaginaire de la permittivité ; le facteur de puissance $\cos \varphi$, rapport du courant en phase avec la tension appliquée et le courant total qui parcourt le circuit. Enfin la tangente de l'angle de perte $\operatorname{tg} \delta$ est le rapport entre le courant en phase et le courant en quadrature avec la tension. Si ε est la permittivité complexe $\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$

$$|\varepsilon| = \sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2}$$

Dans ce cas,

$$\gamma = \omega \varepsilon''$$

$$\delta = \frac{\pi}{2} - \varphi$$

$$\cos \varphi = \frac{\varepsilon''}{|\varepsilon|} \quad \text{et tg } \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}.$$

On notera que seule γ a un sens dans le cas du courant continu ; dans le cas du courant alternatif, elle représente la densité de courant en phase avec la tension appliquée dans un champ unité.

Si les pertes diélectriques sont faibles, $\varepsilon'' \ll \varepsilon'$ et $|\varepsilon| \simeq \varepsilon'$ d'où $\cos \varphi \simeq \operatorname{tg} \delta$.

La puissance dissipée dans le matériau s'écrit :

$$W = |\vec{J}| \cdot |\vec{E}| \cos \varphi.$$

Dans de nombreux cas, les pertes augmentent avec la fréquence, ce qui présente un intérêt technologique important (four à micro-ondes).

Constante diélectrique

C'est le rapport entre la capacité d'un condensateur dont l'espace interélectrode est entièrement occupé par le matériau et la capacité du même condensateur où le même espace est vide. On désigne cette grandeur par le symbole ε_1. Les valeurs de ε_1 pour les champs continus varient de 1 à plus de 10 000. Les gaz ont des constantes diélectriques faibles (la polarisation est uniquement électronique). Mais de nombreux liquides polaires et certains solides ioniques ont des constantes diélectriques très élevées.

Aspects théoriques de l'étude des diélectriques

Théorie classique de la polarisabilité électronique

Un électron lié harmoniquement à un atome et placé dans un champ électrique statique E subit un déplacement x tel que $-eE = \beta x$, où e est la charge de l'électron et β la constante de force de l'oscillateur. Si la fréquence de résonance est ω_0, on aura :

$$\beta = m\omega_0^2$$

d'où :

$$-eE = m\omega_0^2 x$$

Si p est le moment dipolaire produit par l'application du champ E, on a $p = \alpha_E E$, où α_E est la polarisabilité électronique statique. Ici $p = -ex$. On en déduit que

$$\alpha_E = \frac{p}{E} = -\frac{ex}{E} = \frac{e^2}{m\omega_0^2}$$

Un calcul plus complet montre que, dans le cas d'un champ électrique oscillant de fréquence ω, la polarisabilité électronique s'écrit :

$$\alpha(\omega) = \frac{e^2}{m(\omega_0^2 - \omega^2)}$$

La divergence de la polarisabilité en $\omega = \omega_0^2$, inacceptable physiquement, s'explique par la simplicité du modèle utilisé.

Polarisabilité orientationnelle

Si des dipôles électriques permanents sont présents dans le matériau, on peut envisager leur orientation dans un champ électrique contrecarrée par l'énergie d'agitation thermique.

L'énergie $\mathcal{E}$ d'un moment permanent $\vec{p}$ dans le champ $\vec{E}$ s'écrit : $\mathcal{E} = -\vec{p} \cdot \vec{E} = -pE \cos \theta$

où θ est l'angle $(\vec{p}, \vec{E})$. La polarisation totale du matériau s'écrit : $P = Np\,\overline{\cos \theta}$ où N est la concentration en dipôles, et $\overline{\cos \theta}$ la moyenne de $\cos \theta$ à l'équilibre thermique. Les dipôles à l'équilibre thermique suivent une distribution de Boltzmann : la probabilité de trouver un dipôle dans un élément d'angle solide $d\Omega$ est proportionnelle à $e^{-\frac{\mathcal{E}}{kT}}$.

Par conséquent :

$$\overline{\cos \theta} = \frac{\int e^{-\frac{\mathcal{E}}{kT}} \cos \theta \, d\Omega}{\int e^{-\frac{\mathcal{E}}{kT}} d\Omega}$$

d'où

$$\overline{\cos \theta} = \frac{\int_0^{\pi} \sin \theta \cos \theta \, e^{\frac{pE \cos \theta}{kT}} d\theta}{\int_0^{\pi} \sin \theta \, e^{\frac{pE \cos \theta}{kT}} d\theta}$$

soit, en posant $s = \cos \theta$ et $x = \frac{pE}{kT}$

$$\overline{\cos \theta} = \frac{\int_{-1}^{+1} e^{sx} s\,ds}{\int_{-1}^{+1} e^{sx} ds}$$

$$= \frac{d}{dx} \operatorname{Log} \int_{-1}^{+1} e^{sx} ds$$

$$= \frac{d}{dx} \operatorname{Log} (e^x - e^{-x}) - \frac{d}{dx} \operatorname{Log} x$$

$$\overline{\cos \theta} = \coth x - \frac{1}{x} = L(x)$$

fig. 3

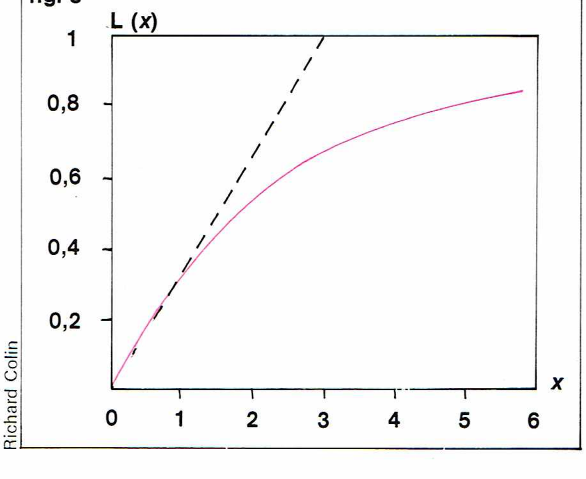

▶ *Figure 3 : la fonction de Langevin* L (*x*).

L (x) est la fonction de Langevin représentée *figure* 3. On constate un phénomène de saturation pour $pE \gg kT$. En fait, pour un champ électrique de 3 000 V/m et à la température ambiante, x est beaucoup plus petit que l'unité, si l'on considère un moment dipolaire de l'ordre de 10^{-29} C · m, courant en pratique. Dans ces conditions la fonction de Langevin tend vers $\frac{x}{3}$, c'est-à-dire que $P = Np\overline{\cos\theta} = Np^2 \frac{E}{3\,kT}$ et la polarisabilité du dipôle s'écrit : $\alpha_d = \frac{p^2}{3\,kT}$.

Propriétés particulières de certains diélectriques

Ferro-électricité

De même qu'un matériau ferromagnétique possède une aimantation rémanente en l'absence de tout champ magnétique externe, un cristal ferro-électrique possède un moment dipolaire électrique en l'absence de champ électrique extérieur. Dans l'état ferro-électrique, le barycentre des charges positives dans le matériau ne coïncide pas avec le barycentre des charges négatives. La courbe donnant la polarisation d'un matériau ferro-électrique en fonction du champ électrique appliqué est représentée *figure* 4. C'est une boucle d'hystérésis analogue à celle d'un ferromagnétique. Un matériau diélectrique normal ne présente pas d'hystérésis notable quand le champ électrique varie.

En général, la ferro-électricité disparaît au-dessus d'une température dite température de transition ferro-électrique. Au-dessus de cette température, le cristal est para-électrique, c'est-à-dire que sa permittivité diélectrique décroît rapidement quand la température augmente. Le *tableau* II donne la liste d'un certain nombre de cristaux ferro-électriques. On y trouve également la température de transition de l'état ferro-électrique à l'état para-électrique, ainsi que les valeurs de la polarisation spontanée P_s.

On classe les cristaux ferro-électriques en deux catégories principales. Dans la première, la transition ferro-électrique est associée à une transition ordre-désordre. Dans la seconde, la transition ferro-électrique correspond au déplacement de deux sous-structures cristallines l'une par rapport à l'autre. Dans les cristaux ferro-électriques à liaison hydrogène, qui sont du type ordre-désordre, le mouvement des protons est relié aux propriétés ferro-électriques. C'est le cas de KH_2PO_4 et des sels isomorphes. L'autre catégorie de ferro-électriques comprend des structures ioniques proches de la perovskite et de l'ilménite. Le plus simple d'entre eux a la structure du chlorure de sodium : c'est le tellurure de germanium.

Piézo-électricité

Un matériau est dit piézo-électrique si une contrainte σ appliquée au cristal change la polarisation électrique. Symétriquement, ces matériaux se déforment lorsqu'on leur applique un champ électrique. Les équations fondamentales de la piézo-électricité s'écrivent donc :

$$(1) \qquad \begin{cases} P = \sigma d + E \varepsilon_0 \chi \\ e = \sigma s + E d \end{cases}$$

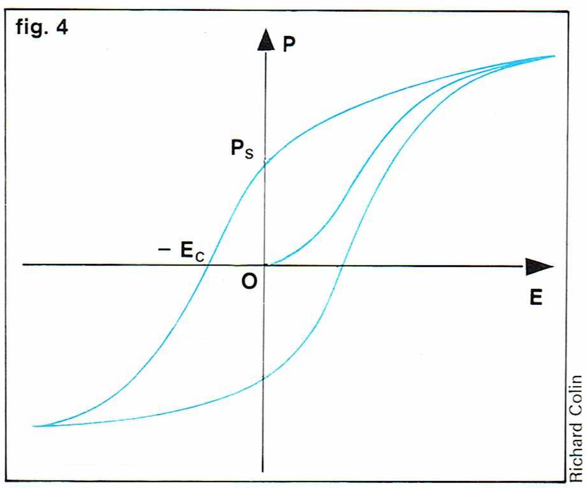

Tableau II
Températures de transition et polarisation spontanée de deux groupes de cristaux ferro-électriques

Cristaux		Température de transition (en °K)	Polarisation spontanée (en u.e.s.)	Température de référence (en °K)
Groupe de KH_2PO_4	KH_2PO_4	123	16 000	96
	KD_2PO_4	213	13 500	—
	RbH_2PO_4	147	16 800	90
	RbH_2AsO_4	111	—	—
	KH_2AsO_4	96	15 000	80
	KD_2AsO_4	162	—	—
	CsH_2AsO_4	143	—	—
	CsD_2AsO_4	212	—	—
Groupe des pérovskites	$BaTiO_3$	393	78 000	296
	WO_3	223	—	—
	$KNbO_3$	712	90 000	523
	$PbTiO_3$	763	> 150 000	300
	$LiTaO_3$	—	70 000	720
	$LiNbO_3$	1 470	900 000	—

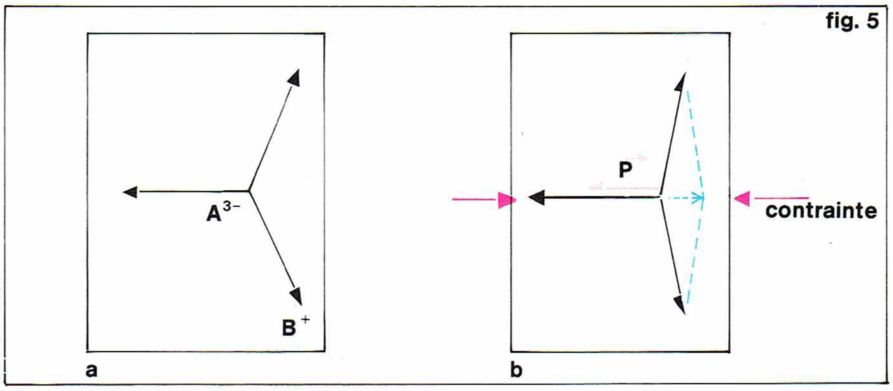

▲ *Tableau II :* ***température de transition et polarisation spontanée de deux groupes de cristaux ferro-électriques.***
Figure 5 :
a, cristal comportant des groupements $A^{3-}B_3^{+}$ ***dont la somme des moments dipolaires est nulle (le cristal n'est pas ferro-électrique) ;***
b, lorsqu'une contrainte est appliquée, les groupements se déforment, et une polarisation apparaît (le cristal devient piézo-électrique).
Un cristal ferro-électrique est toujours piézo-électrique, mais l'inverse n'est pas vrai.

où P est la polarisation, σ la contrainte, d la constante piézo-électrique, E le champ électrique, χ la susceptibilité diélectrique, s le coefficient d'élasticité, et e la déformation élastique.

Un cristal ferro-électrique est toujours piézo-électrique, mais l'inverse n'est pas vrai, comme on peut le voir *figure* 5. Le quartz est piézo-électrique mais non ferro-électrique, alors que le titanate de baryum possède les deux propriétés.

On notera que les relations (1) impliquent l'apparition d'une polarisation sous l'effet d'une contrainte appliquée et celle d'une déformation sous l'effet d'un champ électrique. Le premier effet est utilisé pour détecter des ondes ultrasonores ou pour la construction de jauges de contrainte.

Le deuxième effet permet d'engendrer des ondes ultrasonores. Historiquement, la première détection des ondes ultrasonores produites par un quartz et propagées dans l'eau fut effectuée par Paul Langevin. Il faut noter que la réception des ultrasons n'utilisait pas l'effet piézo-électrique, mais la pression de radiation des ultrasons agissant sur une lame de mica.

L'ordre de grandeur des constantes piézo-électriques est donné par les deux valeurs typiques suivantes :

$$d \text{ quartz} = 3 \cdot 10^{-12} \text{ m/V}$$

$$d \text{ Ba Ti O}_3 = 3 \cdot 10^{-10} \text{ m/V}.$$

Les électrets

L'électret est l'équivalent électrostatique d'un aimant. C'est un élément qui stocke de façon permanente ou quasi permanente un ensemble de charges électriques, l'électret le plus général pouvant être décrit par une densité de charge superficielle σ, une densité volumique de charge ρ et une polarisation en volume P.

C'est en 1924 que le physicien japonais Eguchi obtint les premiers électrets, fabriqués à partir d'un mélange de cire de Carnauba et de résine chauffé au-delà du point de fusion dans un champ électrique d'une dizaine de milliers de volts/cm. Le manque de reproductibilité des

◀ *Figure 4 :* ***la courbe de polarisation P d'un matériau ferro-électrique en fonction du champ électrique appliqué E est une boucle d'hystérésis ;*** E_c ***représente le champ coercitif et*** P_s ***la polarisation spontanée.***

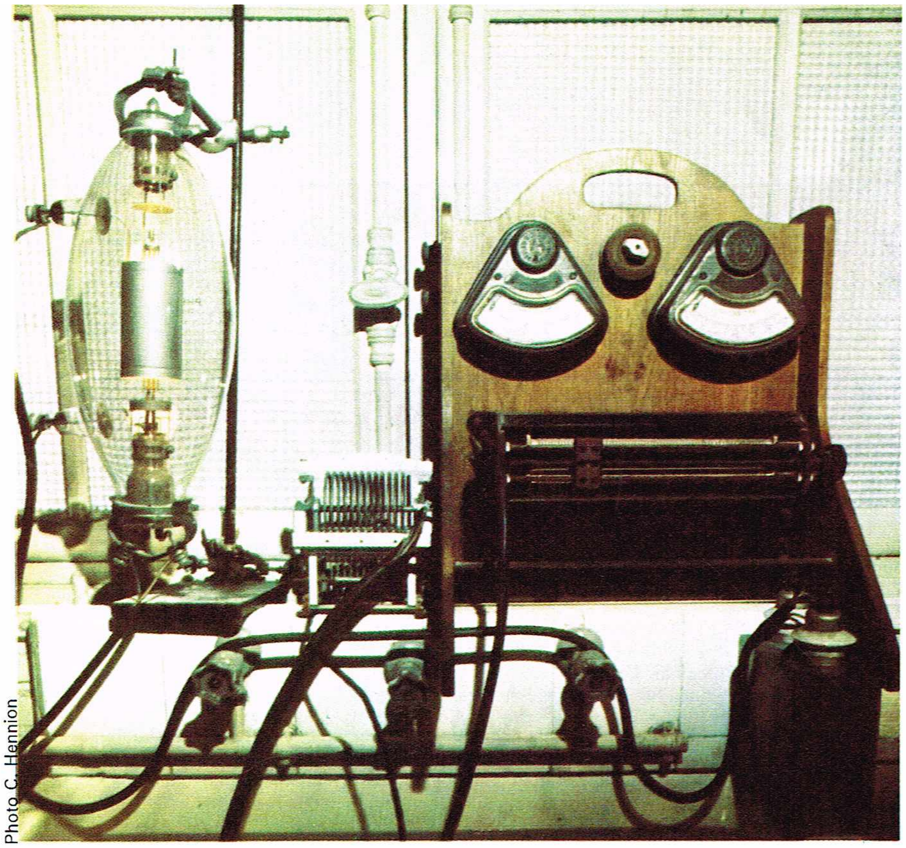

Photo C. Hennion

▲ *Le laboratoire où Paul Langevin (1872-1946) observa pour la première fois la propagation dans l'eau des ultrasons produits par un cristal de quartz (l'émission des ultrasons est une application de l'effet piézo-électrique).*

mesures et la faible durée de vie de ces éléments devaient leur donner un caractère de curiosité scientifique qui persista jusqu'à ces dernières années ; l'apparition de matériaux susceptibles de stocker des densités de charges très élevées, jointe à la mise au point de nouvelles méthodes d'élaboration, a permis de faire passer les électrets du laboratoire à l'industrie.

Les électrets sont utilisés soit pour mettre à profit le champ externe qu'ils produisent (microphones, filtres électrostatiques, dispositifs électromécaniques), soit en raison de leurs propriétés intrinsèques de piézo- et pyroélectricité. Ces dernières propriétés ont été mises en évidence successivement dans des électrets constitués de matériaux de caractère hautement polaire tels que le fluorure de polyvinylidène et, de façon plus surprenante, dans des électrets constitués de matériaux non polaires tels que le polypropylène. L'interprétation microscopique de ces propriétés est actuellement peu avancée, et plusieurs hypothèses, d'ailleurs controversées, restent en présence.

La première méthode employée pour fabriquer un électret rappelle celle de l'obtention d'un aimant permanent : un champ extérieur oriente les dipôles présents dans le matériau. Malheureusement, on n'explique pas ainsi les renversements de polarité qui s'observent au bout d'un certain temps sur les électrets obtenus de cette façon. En réalité, un autre processus se superpose à l'orientation des dipôles. Les électrodes du condensateur utilisé pour produire le champ électrique de polarisation sont susceptibles d'injecter des charges électriques dans le matériau. Ces charges ont la même polarité que celles de l'électrode dont elles sont issues : elles sont nommées homocharges, par opposition aux hétérocharges qui sont dues à la réorientation des dipôles et ont évidemment une charge opposée à celle de l'électrode qui leur fait face. On observe donc la superposition de deux phénomènes, dont l'un peut être dominant à l'instant initial, donnant ainsi à l'électret sa polarité initiale. Si la durée de vie des charges dominantes à l'instant initial est plus faible que celle des autres charges, celles-ci peuvent dominer au bout d'un certain temps, donnant ainsi lieu à un renversement de polarité. On qualifie souvent d'homo-électret un électret dont la charge résulte essentiellement des homocharges, et d'hétéro-électret un électret dont la charge est due principalement aux hétérocharges.

L'hétérocharge peut résulter de processus différents : réorientation des dipôles, que nous avons envisagée, création de dipôles, dissociation ou déplacement d'impuretés ioniques. Toutefois, ces processus exigent tous la présence d'un champ électrique statique de polarisation. Par ailleurs, pour faciliter la réorientation des dipôles ou la migration des charges, on peut chauffer le matériau, ou opérer en présence d'un solvant, ou encore soumettre le matériau à un champ électrique pendant la polymérisation. D'une façon générale, en l'absence de précautions spéciales, les électrets ainsi obtenus ne sont pas purement hétérochargés : des charges externes provenant des électrodes sont injectées dans le matériau.

Pour éliminer, autant que faire se peut, l'apparition d'hétérocharges, on est amené à injecter des charges dans le matériau de façon contrôlée. Deux types de techniques sont utilisés, qui ont pour but de produire des charges électriques et de les accélérer suffisamment pour qu'elles puissent pénétrer dans l'échantillon.

★ *Injection de charges par effet Corona.* Lorsqu'on applique une tension aux bornes d'un condensateur placé dans une enceinte contenant un gaz, on crée des ions qui sont accélérés par le champ électrique régnant entre les armatures. L'échantillon à polariser est placé entre les électrodes du condensateur, et une tension est appliquée de façon que le champ dans les couches de gaz entourant l'électret dépasse la tension seuil de claquage dans le gaz, mais en s'assurant que la tension de claquage du matériau lui-même n'est pas atteinte.

★ *Bombardement électronique.* Dans le cas de l'injection de charges par bombardement électronique, la charge injectée est purement électronique. Elle est produite par un canon à électrons avec lequel on bombarde l'échantillon à traiter.

Un matériau destiné à être transformé en électret doit évidemment avoir une résistivité élevée, faute de quoi des charges dues à la conduction propre du matériau viendraient écranter les charges injectées. Les matériaux utilisables comprennent des corps inorganiques (céramiques, verres, quartz, soufre, titanates), et surtout des polymères (polyéthylène, polypropylène, polychlorure de vinyle) qui sont pratiquement les seuls à être employés industriellement.

PROPRIÉTÉS MAGNÉTIQUES DES MATÉRIAUX

Les propriétés magnétiques des solides comptent parmi les aspects les plus fascinants de la physique de la matière condensée. On connaît en effet, à côté des structures magnétiques désordonnées (dia- et paramagnétiques), un certain nombre de structures ordonnées qui donnent lieu aux différents types de magnétisme des solides : ferromagnétisme, ferrimagnétisme, antiferromagnétisme et hélimagnétisme.

Seuls le ferromagnétisme et le ferrimagnétisme ont des applications industrielles. Du point de vue technologique, on distingue les produits magnétiques durs, qui constituent les aimants, et les matériaux magnétiques doux, qui composent les noyaux de la majorité des composants bobinés. Nous envisagerons donc successivement la théorie du ferromagnétisme, quelques aspects du ferrimagnétisme, les matériaux magnétiques durs et les matériaux magnétiques doux.

Théorie du ferromagnétisme

Il a fallu attendre 1907 et les travaux de Weiss pour qu'une première explication des propriétés particulières des ferromagnétiques soit fournie. Weiss avait admis que, dans ces matériaux, les interactions particulières existant entre les moments élémentaires tendent à les maintenir parallèles les uns aux autres, donnant ainsi naissance à une aimantation spontanée du matériau. A l'époque, Weiss ne pouvait comprendre la nature de ces interactions dont l'origine est purement quantique, mais il les représenta par un champ magnétique : le champ moléculaire. A cette hypothèse il dut ajouter celle de la division du matériau en un ensemble de régions aimantées à saturation (domaines de Weiss) dont les directions d'aimantation sont différentes. La résultante des aimantations peut alors être nulle et le matériau globalement non aimanté.

Mécanisme du champ moléculaire

Les corps ferromagnétiques et paramagnétiques possèdent une propriété commune qui les distingue des corps diamagnétiques : leurs atomes présentent un moment magnétique permanent en l'absence de tout champ magnétique extérieur. Ce moment magnétique a deux origines différentes. Tout d'abord, dans une image classi-

que de l'atome, les électrons tournent autour du noyau sur les orbites fermées. Ils sont donc assimilables à une boucle de courant que l'on peut décrire par un moment magnétique : c'est le moment magnétique orbital. D'autre part, la mécanique quantique attribue à chaque électron un moment cinétique propre, le spin, auquel est associé un moment magnétique. Dans les deux cas, le moment magnétique est un multiple du magnéton de Bohr ($\mu_B = 9{,}27 \times 10^{-24}$ J/T), contrairement au moment résultant qui n'est pas une simple somme des moments orbitaux et de spin des électrons.

Dans une couche électronique donnée, il ne peut y avoir qu'un nombre déterminé d'électrons. Les couches internes des atomes sont complètement remplies, et les moments orbitaux et de spin sont alors répartis entre les différentes orientations possibles : la résultante en est nulle.

La couche externe, au contraire, est souvent incomplète, mais dans un cristal, les électrons célibataires, qui sont les électrons de valence, participent à des liaisons chimiques et donnent donc une contribution nulle au magnétisme atomique. Dans certains groupes d'éléments, cependant, la couche la plus externe commence à se remplir avant une couche interne. Un tel atome peut donc être impliqué dans une liaison chimique par l'intermédiaire des électrons célibataires de sa couche externe, alors que certains électrons d'une couche interne restent non appariés. L'atome présente alors un moment magnétique résultant. C'est ce qui se produit par exemple dans le groupe du fer où les électrons commencent à remplir la couche 4s avant que la couche 3d soit pleine.

Si l'on place un ensemble de moments magnétiques élémentaires sans interactions dans un champ magnétique, chacun de ces moments va avoir tendance à s'orienter parallèlement au champ. Mais, comme d'une façon générale l'énergie thermique kT est beaucoup plus grande que l'énergie magnétique μH d'un moment magnétique μ dans le champ H, un moment magnétique élémentaire est faiblement orienté, et l'aimantation reste faible. Ce comportement est caractéristique des corps paramagnétiques dont la susceptibilité magnétique est faible et positive.

Le comportement des corps ferromagnétiques ne peut s'expliquer que si l'on admet qu'il existe une forte interaction entre les moments magnétiques élémentaires tendant à les orienter parallèlement les uns aux autres. Dans la théorie de Weiss, on représente cette interaction par le champ moléculaire H_m qui est proportionnel à l'aimantation. L'existence du champ moléculaire entraîne celle d'une aimantation spontanée. Au zéro absolu, l'aimantation spontanée résulte de l'alignement de tous les moments élémentaires. A une température critique dite température de Curie du matériau, l'énergie thermique devient supérieure à l'énergie magnétique, et l'ordre magnétique disparaît ainsi que l'aimantation spontanée. L'origine de l'interaction entre les moments élémentaires est d'ordre quantique. On a vu que les atomes qui présentent un moment magnétique comportent obligatoirement des électrons célibataires. Lorsqu'on écrit l'énergie d'un système de deux atomes comportant chacun un électron célibataire, en prenant en compte le principe d'exclusion de Pauli qui exige que la fonction d'onde totale d'un système électronique soit antisymétrique, on voit apparaître un terme supplémentaire que l'on appelle l'énergie d'échange. Ce terme dépend du spin des deux électrons. Il y a donc ferromagnétisme lorsque l'énergie d'échange a une forme telle que la configuration où les deux spins sont parallèles donne l'énergie totale la plus basse.

Le calcul rigoureux de l'intégrale d'échange étant le plus souvent inextricable, l'approximation du champ moléculaire reste une excellente méthode d'étude des substances magnétiques. Elle permet en particulier d'étudier le cas où les moments élémentaires sont différents. C'est le ferrimagnétisme, dont Néel a fait la théorie complète.

Domaine de Weiss

La division d'un matériau en domaines provient d'un des principes généraux de la physique : l'état d'équilibre d'un système correspond au minimum de son énergie libre. Dans le cas d'un matériau magnétique, celle-ci comprend d'une part l'énergie de champ et l'énergie de champ démagnétisant, d'autre part l'énergie correspondant à la division du matériau en domaines. On la décrit par :

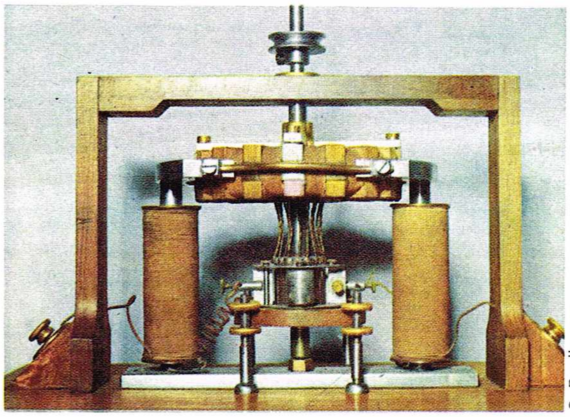

C. Bevilacqua

◀ *La machine magnéto-électrique de Pacinotti construite en 1863 (musée des Sciences et des Techniques, Milan, Italie).*

L'énergie magnétocristalline

Dans le cas des matériaux polycristallins, chaque petit cristal est anisotrope. En particulier, l'aimantation spontanée M_s tend à s'orienter suivant certaines directions privilégiées : les axes de facile aimantation. L'énergie nécessaire pour faire prendre à l'aimantation une direction différente s'appelle l'énergie magnétocristalline F_{MC}. Dans le cas d'un matériau appartenant à un système uniaxe (hexagonal ou quadratique), on peut l'écrire :

$$F_{MC} = K_1 \sin^2 \theta + K_2 \sin^4 \theta,$$

où K_1 et K_2 sont des constantes dépendant du matériau et θ est l'angle entre $\overrightarrow{M_s}$ et l'axe de symétrie. L'écriture de ce terme de l'énergie libre dépend donc essentiellement de la symétrie cristalline.

L'énergie magnéto-élastique

Lorsqu'un matériau ferromagnétique est soumis à une contrainte mécanique, sa courbe d'aimantation est modifiée. Il faut se souvenir, en effet, que la création de l'aimantation spontanée s'accompagne d'une déformation du réseau cristallin qui dépend de la direction de $\overrightarrow{M_s}$. Tout changement de direction de l'aimantation spontanée met donc en jeu une énergie élastique F_σ. L'importance de la déformation peut être chiffrée, connaissant le coefficient de magnétostriction longitudinal λ, qui est la variation relative de longueur produite dans la direction du champ quand le matériau est aimanté à saturation à partir d'un état désaimanté. λ peut être positif ou négatif. Dans les matériaux à perméabilité élevée, λ est voisin de 10^{-6} tandis que les valeurs les plus élevées de ce coefficient sont de l'ordre de 10^{-4}.

En première approximation, l'énergie magnéto-élastique par unité de volume est donnée par l'expression :

$$F_\sigma = \frac{3}{2} \lambda \sigma \sin^2 \varphi$$

où $\vec{\sigma}$ est la traction exercée sur le matériau dont on suppose la magnétostriction isotrope, et φ l'angle entre $\overrightarrow{M_s}$ et cette traction.

L'énergie d'anisotropie induite

Lorsque les défauts du réseau cristallin sont susceptibles de se déplacer, ils ont en général tendance à prendre une configuration liée à la direction de l'aimantation spontanée (ordre directionnel). Réciproquement, lorsque les défauts ont une configuration donnée, $\overrightarrow{M_s}$ tend à prendre une direction déterminée par rapport à ses défauts. Comme la mobilité des défauts dépend considérablement de la température, on produit facilement un état d'ordre directionnel en appliquant au matériau un champ magnétique à une température suffisante pour que les défauts soient relativement mobiles.

Lorsqu'on refroidit le matériau, on conserve l'ordre directionnel qui subsiste après suppression du champ. On a ainsi créé une anisotropie uniaxiale dans la direction du champ initial.

L'énergie de parois

Le passage d'une direction d'aimantation à une direction différente se fait progressivement sur une distance qui constitue l'épaisseur de la paroi entre deux domaines.

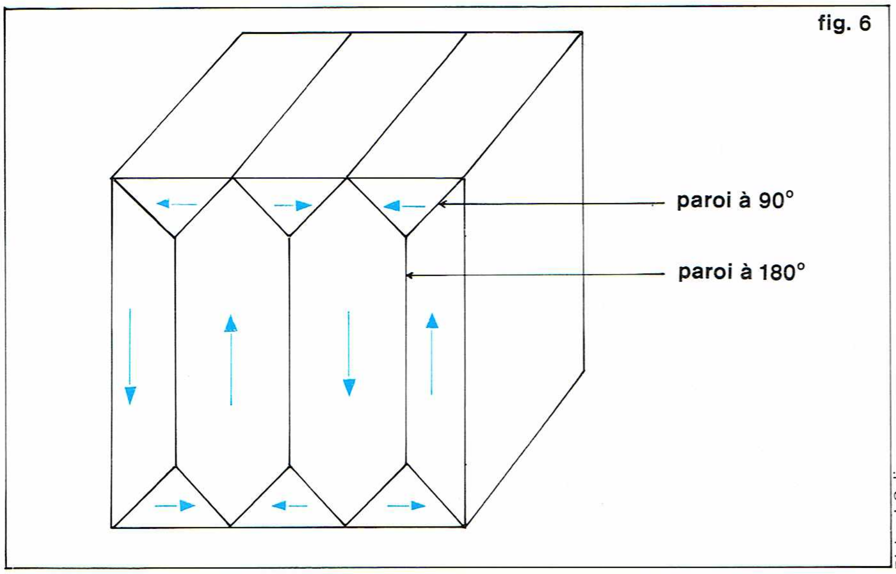

▲ *Figure 6 : la structure en domaines d'un matériau ; des parois à 180° séparent les domaines aimantés antiparallèlement, et des parois à 90° permettent l'existence de petits domaines où l'aimantation est perpendiculaire aux parois à 180°.*

Une transition brutale correspondrait en effet à une énergie d'interaction très importante entre deux aimants élémentaires antiparallèles.

L'épaisseur de la paroi dépend du compromis qui s'établit entre l'énergie d'échange et les différentes énergies d'anisotropie. Ce compromis se traduit par une énergie propre de la paroi, proportionnelle à sa surface. Lorsque l'aimantation change de direction en restant dans le plan de la paroi, on appelle cette dernière paroi de Bloch ; on en rencontre dans les matériaux massifs. Par ailleurs, on distingue les parois à 180° séparant des domaines où les aimantations sont opposées, des parois à 90° où les aimantations font des angles voisins de 90° (dans le nickel, ces angles sont de 71 ou 109°). On donne un exemple très simple de structure des domaines en *figure* 6. Des parois à 180° séparent les domaines aimantés antiparallèlement et des parois à 90° permettent l'existence de petits domaines où l'aimantation est perpendiculaire aux parois à 180°, diminuant ainsi considérablement l'énergie du matériau.

Aimantation d'un matériau ferromagnétique

Le moment magnétique total d'un échantillon ferromagnétique placé dans un champ magnétique H apparaît par suite de deux phénomènes.

Déplacements de parois

Lorsqu'une paroi se déplace en balayant le volume dV et que les aimantations spontanées dans les deux domaines qu'elle sépare font les angles θ_1 et θ_2 avec $\vec{H}$, la variation du moment magnétique dans la direction du champ s'écrit :

$$d\mathcal{M} = M_s (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)\, dV.$$

En principe, on peut déplacer une paroi sans apport d'énergie, mais, en réalité, l'énergie du matériau dépend de la position de la paroi par l'intermédiaire des inhomogénéités du milieu. Cependant, les déplacements de parois sont relativement faciles et donnent donc une perméabilité élevée au matériau.

Rotation de l'aimantation

Si, dans un domaine de volume V, l'aimantation spontanée tourne d'un angle $d\theta$, la variation du moment magnétique s'écrit :

$$d\mathcal{M} = M_s V\, d(\cos \theta).$$

Il faut un champ magnétique intense pour produire une rotation, car la variation MH cos θ de l'énergie du champ doit équilibrer les variations des énergies d'anisotropie et du champ démagnétisant qui dépend de la forme de l'échantillon. Ce phénomène n'a donc lieu qu'à la saturation ou dans les particules monodomaines.

Courbes d'aimantation

Caractéristiques principales des ferromagnétiques

- La perméabilité relative μ_r, très élevée, varie en fonction du champ. La courbe B = « f » (H) n'est donc pas une droite. C'est en fait une courbe de saturation ; B atteint une limite pour les champs élevés.
- Les guillemets dans B = « f » (H) rappellent que B n'est pas une fonction de H au sens mathématique pour deux raisons. Tout d'abord, B ne prend pas la même valeur pour H donné selon que le champ augmente ou diminue. D'autre part, B dépend de l'histoire du matériau et des champs qui ont agi antérieurement.
- Le matériau devient paramagnétique au-dessous d'une température caractéristique, dite température de Curie.

Cycle d'hystérésis

En faisant varier H entre $-H_m$ et $+H_m$, on décrit un cycle d'hystérésis auquel correspond une induction rémanente B (valeur de B à champ nul) et un champ coercitif H_c (valeur du champ qui annule B) [*fig.* 7].

L'hystérésis correspond à la partie irréversible de l'aimantation. Dans les matériaux doux, l'aimantation est essentiellement due aux déplacements de parois. Certains de ces déplacements sont irréversibles ; ce sont eux qui empêchent le retour du système à l'état initial lorsque le champ reprend sa valeur originelle.

Perméabilité

C'est le rapport B/H que l'on exprime en général indépendamment du système d'unité par la perméabilité relative

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H} \text{ (dans le SI, } \mu_0 = 4\,\pi\,10^{-7}).$$

Il est évident que cette grandeur dépend de H, puisque la courbe d'aimantation B = « f » (H) [*fig.* 8] n'est pas une droite.

Suivant le mode d'utilisation du matériau, on est amené à définir différemment la perméabilité :

- La perméabilité moyenne μ pour une valeur quelconque de H est la pente de la droite OP.
- La perméabilité initiale μ_i est la pente de la tangente à la courbe d'aimantation pour H = 0. Elle intervient en champ faible. Son rôle est fondamental en électronique.

▶ *Figure 7 : cycle d'hystérésis ferromagnétique ; B_r représente l'induction rémanente et H_c le champ coercitif. Figure 8 : courbe d'aimantation B = « f » (H) d'un matériau ferromagnétique permettant d'établir les diverses définitions de la perméabilité magnétique d'un matériau ; μ est la perméabilité moyenne, μ_i la perméabilité initiale, μ_s la perméabilité incrémentale, et la limite de μ_s quand $\Delta H \to 0$ est la perméabilité réversible.*

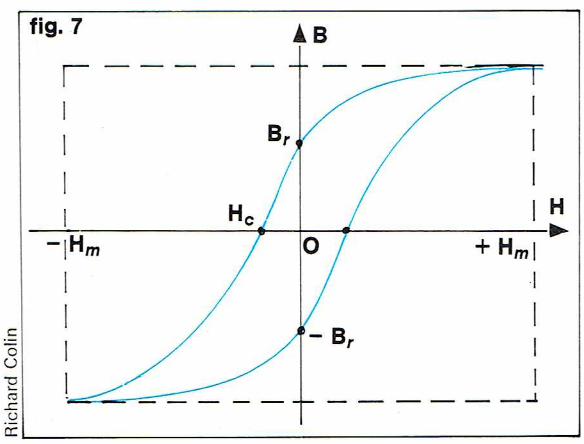

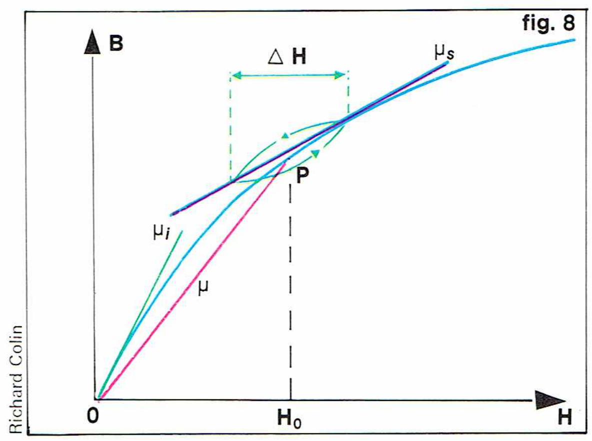

● La perméabilité incrémentale μ_Δ est la pente moyenne du cycle décrit autour d'une valeur H_0 du champ lors de petites variations ΔH.

● La perméabilité réversible est la limite de la perméabilité incrémentale quand ΔH tend vers zéro.

Il semble évident, après ce que nous avons déjà vu, que ce sont les déplacements de parois qui fournissent les perméabilités les plus élevées. On sera donc amené à tenter d'obtenir des matériaux très homogènes dans lesquels les défauts susceptibles de s'opposer aux mouvements de parois seront aussi peu nombreux que possible.

Champ coercitif

Des matériaux à champ coercitif très élevé sont indispensables pour la fabrication des aimants. On peut donner rapidement une idée des conditions dans lesquelles un matériau aura un champ coercitif élevé. Tout d'abord, on peut supprimer les parois dont les déplacements sont faciles. Une solution simple consiste à employer des grains monodomaines. On peut également gêner les mouvements des parois en augmentant l'hétérogénéité du matériau par modification de sa composition ou à l'aide de divers traitements thermiques.

Enfin, dans le cas où l'on a pu supprimer les parois ou gêner leurs mouvements, il faut encore rendre les rotations le plus difficiles possible en réalisant une anisotropie élevée. Les anisotropies magnétocristallines les plus fortes se produisent dans les cristaux uniaxes des systèmes hexagonaux et quadratiques. Par ailleurs, on obtient une forte anisotropie magnéto-élastique en utilisant des matériaux présentant une forte magnétostriction.

Quelques aspects du ferrimagnétisme

Les matériaux ferrimagnétiques sont groupés sous le nom de ferrites. Ce sont des composés d'oxydes qui ont la structure cristalline du spinelle $Mg\,Al_2\,O_4$. Les ions oxygène forment un empilement cubique compact, tandis que les ions magnétiques (Mn, Fe, Ni, Co ...) ont à leur disposition des sites tétraédriques d'une part (sites A) et des sites octaédriques d'autre part (sites B). Les ions se distribuent entre les deux types de sites en fonction de leur rayon ionique, de leur configuration électronique et de l'énergie électrostatique du réseau.

D'après les études théoriques menées par Néel, si les interactions AB sont beaucoup plus intenses que les interactions AA ou BB, il se forme deux sous-réseaux magnétiques distincts comportant, l'un les ions situés en A, et l'autre les ions situés en B. Les intégrales d'échange ont un signe tel que les ions disposés en A ont des moments antiparallèles à ceux des ions disposés en B.

Il faut noter que le réseau d'un tel matériau comporte une grande quantité d'oxygène, inactif au point de vue magnétique, et que le moment résultant est la différence de deux moments. Dans ces conditions, on comprend que les ferrites ne permettent pas d'atteindre des valeurs d'induction magnétique très élevées par rapport aux alliages magnétiques habituels.

Le grand intérêt technologique des ferrites réside dans leur résistivité élevée qui permet de les employer à l'état massif sans craindre les pertes par courant de Foucault.

Matériaux magnétiques durs

Généralités

Les matériaux magnétiques durs ont considérablement évolué depuis cinquante ans. Au début du siècle, les seuls matériaux à aimant convenable étaient les aciers martensitiques au chrome-cobalt. Depuis lors, on a développé une grande variété de matériaux aux performances très supérieures. Ces produits se distinguent aussi bien par leur composition (alliages métalliques, céramiques d'oxydes) que par leur présentation (certains aimants actuels sont souples) ou leur forme. On peut dire que l'utilisateur des matériaux modernes s'intéresse non seulement à leurs propriétés magnétiques, mais également à leurs propriétés mécaniques, physiques et autres, qui interviennent directement dans les applications.

Les propriétés magnétiques caractérisant un matériau dur sont les suivantes :

● Le produit d'énergie spécifique $(BH)_{max}$ qui définit l'énergie magnétostatique du matériau par unité de volume.

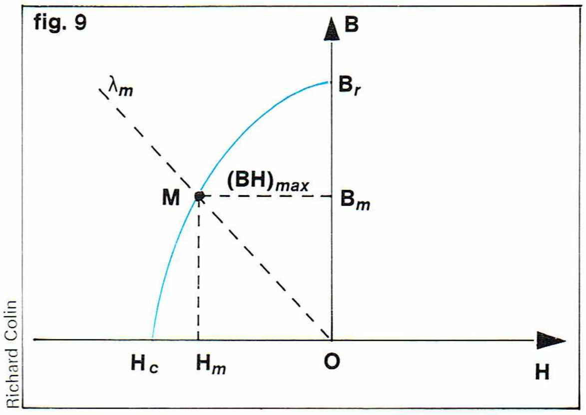

◀ *Figure 9 : courbe de désaimantation d'un matériau magnétique dur, donnant les propriétés magnétiques.*

● L'induction rémanente B_r en circuit fermé.

● Le champ coercitif H_c, c'est-à-dire le champ démagnétisant qui annule l'induction.

● Les valeurs H_m et B_m du meilleur point de fonctionnement correspondant à $(BH)_{max}$ à partir desquelles on définit la perméance unitaire optimale $\lambda_m = \dfrac{B_m}{H_m}$.

On notera que la donnée de la courbe de désaimantation (*fig.* 9) inclut ces valeurs.

Au point de vue économique, la masse volumique du matériau est un paramètre important : le coût d'un aimant croît avec sa masse totale, tandis que son énergie est proportionnelle à son volume. A énergie spécifique et volume constants, le coût d'un aimant croît donc avec sa masse volumique. On notera enfin que la température limite d'emploi d'un matériau magnétique est pratiquement la température limite de stabilité de sa structure.

Classification

Les matériaux magnétiques durs sont caractérisés par une structure hétérogène à deux phases dispersées. On distingue deux catégories :

● Les produits métalliques, dans lesquels la phase dispersée apparaît à la suite d'une transformation martensitique, d'une précipitation, ou d'une transformation ordre-désordre.

● Les agglomérats de particules fines constituant un domaine élémentaire séparé par une substance inerte, des pores, ou des joints de grains.

Les alliages obtenus par le premier procédé sont en général d'une grande dureté. Les produits de la seconde catégorie, rigides et non ductiles, sont agglomérés et moulés ou bien frittés. L'amélioration des matériaux a permis d'augmenter l'énergie spécifique $(BH)_{max}$ et le champ coercitif. On a recherché une aimantation à saturation élevée, accompagnée d'un champ coercitif important et d'une grande convexité de la courbe de désaimantation.

Alliages ductiles

Les propriétés magnétiques de ces matériaux sont en général faibles, mais ils ont le grand avantage d'être usinables.

* *Aciers martensitiques*. Leur composition est très voisine de celle des aciers à outils. Leur énergie spécifique $(BH)_{max}$ atteint à peine 800 J/m^3, tandis que leur champ coercitif est de l'ordre de 300 gauss. En raison du faible intérêt de leurs caractéristiques, ces matériaux ont presque disparu. Toutefois, ils restent utiles dans les cas où on désire un matériau à faible champ coercitif et facile à saturer.

* *Alliages Fe Co Mo*. Ces alliages sont les premiers à avoir été obtenus par précipitation. On ne les utilise pratiquement plus en raison de leurs faibles qualités magnétiques, voisines de celles des aciers martensitiques.

* *Alliages Cu Ni Fe* et *Cu Ni Co*. Leur induction rémanente est assez faible, ainsi que leur énergie magnétique, mais ils sont très ductiles et peuvent être laminés et étirés. Les performances de Cu Ni Fe sont améliorées par étirage. Celui-ci produit une anisotropie axiale.

* *Alliages Fe Co Va*. Leur rémanence est élevée et ils ont des propriétés intéressantes à l'état orienté. On les utilise sous forme de fils ou de rubans dans les appareils de mesure.

D'une façon générale, ces alliages ductiles sont produits en faibles quantités et pour des usages spéciaux.

Alliages Fe Ni Al

Cette catégorie d'alliages est la plus importante parmi les matériaux à aimants. La coercitivité est due à la présence d'une phase dispersée dont l'apparition est provoquée par un traitement thermique (trempé et revenu). On a amélioré l'alliage initial par addition de cobalt, de cuivre et de titane. Mais le progrès essentiel, qui date de 1940, consiste à orienter les particules de la phase dispersée au moment de la germination à l'aide d'un champ magnétique élevé. On obtient ainsi des aimants anisotropes dont les propriétés sont très intéressantes dans la direction de l'aimantation (cycle d'hystérésis presque rectangulaire, $(BH)_{max}$, B_r et H_c très élevés). D'une façon générale, les alliages Fe Ni Al sont préparés par fusion et coulée directe de la pièce finale. L'usinage en est difficile par suite de la grande dureté et de la fragilité du produit.

Ferrites dures

Ce sont des matériaux céramiques à base d'oxyde de fer ($6\ Fe_2O_3$, BaO) où le baryum peut être remplacé par du plomb ou du strontium. Les pièces sont généralement obtenues par frittage. Les propriétés magnétiques, assez basses dans le cas du produit isotrope, deviennent convenables si l'on fait subir une orientation aux particules de poudre au moment de la compression, en soumettant le matériau à un champ magnétique.

On obtient ainsi des aimants en ferrite orientée. Leurs propriétés sont assez différentes de celles des alliages Fe Ni Al envisagés ci-dessus. Les énergies spécifiques sont plus faibles, et le matériau est isolant, ce qui élimine la possibilité de courants de Foucault.

Ferromagnétiques agglomérés

Cette catégorie de produits a été mise au point pour étendre les possibilités de mise en forme. On obtient des matériaux rigides en agglomérant les particules d'un matériau ferromagnétique broyé à l'aide d'une résine thermodurcissable. Les aimants ainsi obtenus ont des caractéristiques magnétiques assez faibles mais ne nécessitent aucun usinage.

Si l'on utilise comme liant un élastomère, on obtient un produit flexible. Ce procédé est essentiellement employé avec les ferrites, car on évite ainsi le problème du frittage.

Aimants à base de micropoudres

Les poudres ultrafines de fer-cobalt présentent un champ coercitif très élevé. Cette propriété est due aux grains fins monodomaines et subsiste lorsque l'on agglomère la poudre. On obtient ainsi des propriétés voisines de celles des alliages Al Ni Co. On peut même orienter la poudre dans un champ magnétique pour améliorer ses propriétés. Ces matériaux, bien qu'assez difficiles à fabriquer, sont très intéressants en raison de leur fabrication par moulage qui évite tout usinage ultérieur. Par ailleurs, leur énergie par unité de masse est assez élevée.

On a également développé un autre groupe de matériaux magnétiques du même type, il s'agit des alliages samarium-cobalt dont le champ coercitif est extrêmement élevé.

Matériaux magnétiques doux

Les matériaux magnétiques doux sont caractérisés par des champs coercitifs très faibles, de l'ordre de quelques gauss. Ils se divisent en deux catégories très différentes. La première est constituée par des alliages ferromagnétiques dont l'emploi se limite aux basses fréquences par suite de leurs pertes importantes par courants de Foucault. La seconde se compose des diverses ferrites, mélanges frittés d'oxydes ferrimagnétiques employés aux fréquences supérieures à 50 kHz en raison de leur grande résistivité électrique.

Alliages ferromagnétiques doux

Nous ne parlerons pas ici des quelques utilisations du fer pur comme matériau magnétique, en raison de son importance industrielle réduite.

Alliages Fe-Si

Les tôles Fe Si peuvent être orientées ou non. Dans le premier cas, on obtient une structure dite de Goss où les plans cristallographiques (110) sont parallèles au plan de la tôle et la direction [001] de facile aimantation parallèle à la direction de laminage. Dans le second cas, on obtient des tôles utilisées principalement dans la construction des machines où les courants de Foucault jouent un rôle important. Il s'agit de bandes minces souvent revêtues d'un isolant sur chaque face. Il est inutile d'essayer de trop réduire l'épaisseur des tôles : les pertes cessent de diminuer au-delà d'une certaine épaisseur.

A côté des tôles à texture Goss, il existe des tôles à grains orientés plus courantes : il s'agit d'alliages magnétiques à 3,2 % de silicium. On les emploie surtout dans la construction de transformateurs où l'on peut utiliser au mieux leurs propriétés magnétiques dans le sens du laminage.

La fabrication des tôles à grains orientés est très complexe. De plus, leur usinage doit obligatoirement être suivi d'un recuit à 800 °C.

Alliages Fe Ni

Ces alliages cristallisent dans le système cubique à faces centrées et ne subissent aucune transformation de phase lorsqu'ils comportent plus de 28 % de nickel. On peut donc les laminer à froid et leur faire subir un grand nombre de traitements thermiques destinés à améliorer leurs caractéristiques magnétiques.

Parmi les alliages Fe Ni, il faut au moins citer la catégorie très particulière que constituent les alliages à haute perméabilité. En effet, entre 70 et 80 % de nickel, l'anisotropie et la magnétostriction des alliages Fe Ni s'annulent. Dans ces conditions, la perméabilité devrait être très élevée et le champ coercitif très faible. Malheureusement, la magnétostriction et l'anisotropie ne s'annulent pas simultanément. En outre, les alliages à 70-80 % de nickel ont une résistivité très faible. On peut cependant améliorer les caractéristiques du matériau obtenu par addition de chrome ou de molybdène.

Alliages Fe Co

Ces alliages présentent l'aimantation à saturation la plus élevée des alliages ferromagnétiques. Par ailleurs, leur constante d'anisotropie peut être rendue assez faible. Malheureusement, ils ont un diagramme de phase peu favorable aux traitements thermiques.

Ferrites douces

Matériaux à forte perméabilité

Ce sont en général des ferrites de Fe Mn Zn dont les points de Curie sont supérieurs à 130 °C. En effet, la ferrite de manganèse a une perméabilité de 200 à 20 °C et un point de Curie de 300 °C. Lorsque l'on ajoute de la ferrite de zinc à la ferrite de manganèse, le point de Curie diminue tandis que la perméabilité augmente. On obtient ainsi des perméabilités élevées, de l'ordre de 10^4. La perméabilité de ces matériaux est liée au diamètre des cristallites. Les matériaux à très haute perméabilité ont donc une résistivité assez faible et des pertes par courants de Foucault non négligeables.

Par ailleurs, il est indispensable d'avoir un matériau très homogène. Dans le cas contraire, les dimensions de la maille cristalline sont différentes d'une maille à l'autre, ce qui entraîne des tensions internes qui diminuent la perméabilité.

Matériaux à faibles pertes

Pour diminuer les pertes, on est amené à utiliser des cristaux de faible diamètre. La composition de ces ferrites diffère peu de celle des ferrites à perméabilité élevée. Comportant moins de zinc et plus de manganèse, elles ont en général un point de Curie plus élevé.

On cherche également à augmenter la résistivité du matériau en y ajoutant du calcium et de la silice. Ces deux minéraux se localisent aux joints de grains et y augmentent la résistivité.

BIBLIOGRAPHIE

Propriétés électriques : KITTEL C., *Introduction à la physique de l'état solide*, Dunod, 1972.

Propriétés magnétiques : *Techniques de l'ingénieur*, 26, place Dauphine, 75001 Paris.

MATIÈRES PREMIÈRES D'ORIGINE MINÉRALE

L'actualité politique et économique des cinq dernières années a placé sur le devant de la scène internationale la question des matières premières, et cela d'une façon aiguë, amplifiée par l'écho qu'en ont donné les moyens d'information auprès d'opinions publiques sensibilisées, directement concernées par certaines « retombées » des événements internationaux.

Qu'il s'agisse des citoyens subissant une vive hausse des prix des biens de consommation et d'équipement, des responsables d'industries de base confrontés à un approvisionnement en matières premières plus coûteux, des gouvernements, en charge du budget des États et des relations économiques et financières entre les nations, ou simplement de « l'honnête homme » qui s'interroge sur les conséquences d'une consommation croissante de substances non renouvelables, ou sur le devenir du tiers monde et des sociétés industrielles, bien peu de personnes ont pu demeurer indifférentes aux implications humaines, financières, matérielles, géopolitiques de ces questions d'actualité : risque d'épuisement des réserves minérales et énergétiques ; dépendance croissante du monde occidental vis-à-vis des producteurs de matières premières, relations entre producteurs-exportateurs et consommateurs-importateurs, qui se formulent trop souvent en termes de rapports de force, plus conflictuelles que contractuelles ; coût des approvisionnements extérieurs, et incidence sur la balance des comptes des nations ; utilisation optimale des ressources.

Que cette prise de conscience du rôle des matières premières ne se soit généralement révélée, hormis chez quelques spécialistes clairvoyants qui s'en souciaient déjà au début de la décennie, qu'à la suite de la « crise pétrolière » de 1973, masque parfois le fait que sont en cause pratiquement toutes les matières premières, aussi bien les substances énergétiques que les produits végétaux ou les minerais métalliques et non métalliques.

Le présent fascicule se propose de traiter des matières premières minérales non énergétiques, sur le plan de leurs ressources, dans une première partie, de leur rôle dans les relations internationales ensuite, puis des questions de prix et de marchés en troisième partie, et, en dernier volet, de la situation spécifique de la France.

Définition et classification

Dans l'acception la plus communément admise, est considérée comme matière première minérale toute substance solide, liquide ou gazeuse, contenue dans les formations géologiques continentales ou sous-marines, et qui est susceptible d'en être extraite pour alimenter les activités industrielles et agricoles.

Ainsi, les phosphates naturels, le diamant, le kaolin, les charbons, les marbres sont des matières premières minérales, au même titre que les pétroles bruts ou les minerais de cuivre. En revanche, l'eau n'en fait pas partie, quoiqu'elle puisse présenter, à certains égards, les caractères d'une matière première dans divers processus industriels.

Olivier Martel - Rapho

◀ ***Le puits de la première mine de diamant, actuellement épuisée, à Kimberley, en Afrique du Sud.***

Classification des matières premières minérales

La dénomination même de matières premières minérales et leur définition mettent explicitement l'accent sur leur utilité, et il est donc logique d'user de critères utilitaires pour marquer les articulations essentielles de cet ensemble — au demeurant fort vaste et diversifié — que sont les matières premières minérales.

Celles-ci sont classées en quatre catégories : substances énergétiques, minerais métalliques, minerais non métalliques, et matériaux de carrière.

Les substances énergétiques : combustibles fossiles (gazeux, liquides, et solides) et minerais des métaux fissiles (uranium et thorium, ce dernier métal n'étant toutefois pas utilisé, actuellement, dans les filières électronucléaires), sont les sujets d'autres chapitres de cette Encyclopédie ; elles ne seront pas traitées ici.

Minerais métalliques

On peut en donner une définition naturaliste valable d'ailleurs pour la plupart des minerais non métalliques : « toute association, plus ou moins complexe, d'une ou de quelques espèces minérales utiles (dites valorisables), et d'un ou plusieurs autres minéraux non utiles, ou non utilisables, constituant la gangue et le stérile. »

Cette formulation ne rend cependant pas compte du contexte technique et économique responsable du fait que, de deux minerais d'un même métal, l'un peut être exploité, et l'autre se révéler parfaitement inexploitable.

Il est donc nécessaire de faire appel à une conception technico-économique de la notion de minerai : « association minérale naturelle dont la technologie minéralurgique et métallurgique actuelle permet d'extraire avec profit, dans les conditions économiques du moment, un ou plusieurs éléments utiles à l'activité industrielle. »

Cela implique qu'une accumulation d'une matière première minérale ne représente un amas de minerai, en ce sens technico-économique, que s'il existe des techniques pour traiter ce minerai, et que si l'ensemble des opérations effectuées présente un bilan financier bénéficiaire (du moins dans un contexte économique normal, hors des périodes de profonde dépression, dont l'incidence sera développée ultérieurement).

Les classifications chimiques et minéralogiques ne sont guère utilisables, dans l'optique d'une application à l'analyse des ressources et des marchés des matières premières minérales. Il apparaît préférable de proposer les coupures suivantes :

— *minerais des métaux de base :* fer, aluminium, cuivre, plomb, zinc, le plus souvent mis en œuvre purs ou peu alliés ;

— *minerais des métaux d'alliage et de revêtement :* cobalt, manganèse, molybdène, tungstène, silicium, vanadium, nickel, chrome, étain, et, plus spécifiquement liés aux alliages non ferreux : magnésium, antimoine, bismuth, etc. ;

— *minerais des métaux rares et des métaux précieux,* aux usages étroitement délimités, mais peu substituables : titane, zirconium, niobium, tantale, lithium, germanium, or, argent, mercure, platine et « métaux de la mine de platine » : iridium, osmium, palladium, rhodium, ruthénium.

Minerais non métalliques (voir le volume **Géologie I** *pour les caractéristiques des espèces minérales citées)*

Comme pour les minerais métalliques, l'approche naturaliste se révèle insuffisante, au regard du géologue économiste. On définira donc un minerai non métallique comme une roche dont les techniques minéralurgiques actuelles permettent de retirer, avec profit, dans le contexte économique du moment, un composé utile (parfois plusieurs) aux activités industrielles et agricoles.

Cette formulation indique implicitement que les minerais non métalliques ne subissent pas d'opérations de fusion, à la différence des minerais métalliques, dont les concentrés subissent, dans le cas le plus général, une fusion pour libérer le métal recherché.

Ces minerais non métalliques sont extrêmement divers, tant sur le plan de l'origine géologique et de la constitution chimico-minéralogique, que sur celui de la destination finale du produit obtenu.

Une demi-douzaine de groupes se dégagent de cet ensemble :

— *sels destinés à l'agriculture et à l'industrie chimique :* potasse, phosphates, halite, borax ;

— *fondants métallurgiques :* cryolithe, fluorite (qui est aussi la matière première unique pour la préparation de l'acide fluorhydrique) ;

— *groupe du soufre :* soufre natif et pyrite (ce sulfure de fer est un minerai de soufre, et non de fer) pour la chimie et l'industrie du caoutchouc ;

— *charges et pigments,* pour les industries des peintures, des émaux, du papier-carton, des plastiques : talc, oxydes de titane, kaolin, ocres naturels, barytine, etc. ;

— *substances réfractaires :* micas, amiante, graphite et matières premières des réfractaires artificiels : chromite, bauxite, dolomie ;

— *abrasifs :* grenats, corindons, diamants industriels ;

— *minéraux précieux* pour la joaillerie-bijouterie.

Certaines de ces substances appartiennent soit aux minerais métalliques, soit aux minerais non métalliques, selon l'usage qui en sera fait. Par exemple, la chromite ($FeCr_2O_4$) est destinée à la sidérurgie (élaboration directe de ferrochrome pour la production d'aciers alliés) si la teneur en chrome est élevée (voisine de 33 %), ou à la préparation de réfractaires artificiels si cette teneur est plus faible. Le cas du sel gemme est à l'opposé : s'il est, pour l'essentiel de la production, utilisé tel quel par l'industrie soudière, il est aussi la seule source effective de sodium, et représente donc le minerai de ce métal (la demande en sodium, encore très réduite, pourrait s'accroître de façon importante si la filière des surrégénérateurs se développait dans les années prochaines : le sodium fondu est le fluide caloporteur dans ces équipements électronucléaires).

Matériaux de carrière

Cet ensemble est pour le moins aussi divers que le précédent ; il comprend toutes les substances minérales naturelles utilisées avec profit par les activités industrielles, agricoles et du bâtiment, soit sans modification autre que de forme (matériaux bruts), soit après cuisson plus ou moins poussée (matériaux manufacturés).

Ces substances ne subissent donc pas de traitement d'enrichissement avant leur mise en œuvre, à la différence des minerais métalliques et non métalliques.

Matériaux bruts

Leurs débouchés principaux, et de loin, sont offerts par le bâtiment, la voirie, le génie civil et les ouvrages de viabilité ; les débouchés agricoles sont très secondaires.

On distingue trois grands groupes :

— blocs de construction et d'ornementation, où tous les types de roches sont représentés : calcaires, grès, granites, marbres, laves, roches éruptives et métamorphiques diverses ;

— granulats (selon la granulométrie : fillers, sables, graviers, ballasts...), provenant de carrières d'alluvions où le tout-venant est simplement criblé et lavé, ou de carrières de roches dures, par concassage en plusieurs étapes et criblage de la roche abattue à l'explosif. D'énormes tonnages de ces granulats sont livrés aux chantiers du bâtiment et du génie civil (bétons), et aux chantiers routiers (couches d'assises et couches de roulement, gravillonnées, ou en enrobés bitumineux) ;

— tourbes, marnes, craies..., pour amendements horticoles et agricoles.

Matériaux manufacturés

Ils subissent un traitement thermique qui modifie de façon contrôlée les propriétés physiques et chimiques des roches initiales : gypse et anhydrite (industries du plâtre) ; calcaires divers pour l'industrie des ciments et chaux (chaux agricoles, chaux industrielles destinées à la sidérurgie et aux sucreries) ; argiles de toute nature, mises en œuvre pour la fabrication des porcelaines, faïences, grès, et des tuiles et briques.

Notions de teneur et de gisement

Les matières premières minérales se présentent à l'état plus ou moins dispersé dans les formations géologiques ; les zones de moindre dispersion — dont les dimensions peuvent s'étendre de l'échelle décamétrique à l'échelle

kilométrique — représentent un ensemble d'accumulations, dont certaines seulement constituent des gisements.

Quantitativement, la plus ou moins grande dispersion se traduit par la *teneur,* qui est le pourcentage, en poids, de métal ou de composé utile présent dans un minerai donné.

Le critère de teneur, s'il est important, n'est pas suffisant pour caractériser un gisement. Celui-ci n'existe, en tant que tel, que dans la mesure où des conditions techniques et économiques précises se trouvent satisfaites. D'où la définition proposée pour le concept de gisement : « toute accumulation continentale ou sous-marine dont la localisation, la nature, le tonnage et la teneur permettent, avec la technologie extractive et minéralurgique disponible et dans les conditions économiques présentes, de retirer avec profit un minerai valorisable. »

La notion de profit, à laquelle cette définition fait référence, est très relative. Le plus souvent, il s'agit du bénéfice financier apparaissant au compte d'exploitation des sociétés minières, mais des considérations de politique nationale peuvent modifier cette conception, dans des pays à économie planifiée et/ou vivant dans un régime d'autarcie plus ou moins strict.

Le profit recherché pourra alors être l'obtention de devises, par l'exploitation de gisements non rentables dans un contexte de libre entreprise, mais qui permettront l'exportation de matières premières ou de biens élaborés ; en situation de manque d'une matière première, il pourra aussi se révéler intéressant, pour éviter des sorties de devises et maintenir une certaine autarcie économique, d'exploiter de tels gisements.

Certaines mines polymétalliques de Pologne, par exemple, illustrent parfaitement cette remarque : plus d'une douzaine de métaux y sont récupérés, certains à des teneurs extrêmement faibles, pour couvrir la demande nationale, alors que sous le régime de l'entreprise privée, trois ou quatre métaux seulement seraient extraits du minerai, et à des teneurs de coupure (teneur limite, en dessous de laquelle la valeur marchande du minerai obtenu ne compense plus les frais d'exploitation) notablement plus élevées, sans nul doute.

Il convient enfin de noter qu'un gisement est toujours une singularité d'extension plus ou moins vaste, mais délimitée, au sein d'un environnement de nature bien différente ; le terme de gisement est de ce fait inusité en ce qui concerne la plupart des matériaux de carrière, à peu près semblables à eux-mêmes sur de vastes étendues.

Les ressources en matières premières minérales

Concepts de ressources et de réserves

La diversité des définitions proposées pour les ressources et les réserves, la multiplicité des qualificatifs appliqués à ces termes (ressources ou réserves prouvées, mesurées, démontrées, identifiées, exploitables, probables, conditionnelles, potentielles, ultimes, hypothétiques, spéculatives, etc.), sont à l'origine d'un certain manque de cohérence entre les documents traitant de ces questions — d'où, parfois, de fâcheuses confusions dans l'interprétation des chiffres cités à propos du montant des ressources minérales.

La nomenclature la plus précise en ce domaine est celle qu'a formulée l'*U. S. Geological Survey* (Service géologique fédéral des États-Unis), en 1973. En raison de sa clarté, elle tend à être adoptée par la plupart des spécialistes concernés.

Les auteurs distinguent quatre catégories de ressources : ressources identifiées exploitables (= réserves) ; ressources identifiées non exploitables (= ressources conditionnelles) ; ressources hypothétiques ; ressources spéculatives.

Ressources identifiées

Il s'agit, pour une matière première minérale donnée, des quantités cumulées de minerais, dont la localisation et les caractéristiques dimensionnelles et minéralogiques sont connues, les gisements en question ayant fait l'objet de campagnes de sondage, de mesures, et d'échantillonnage.

Cette identification des gisements est conduite sur critères géologiques, et ne concerne donc que leurs propriétés physiques et minéralogiques. Selon que l'étude technico-économique d'exploitabilité (dite « étude de faisabilité ») conclut ou non à l'intérêt économique d'une éventuelle mise en exploitation, ces ressources identifiées appartiendront à l'une ou à l'autre des catégories suivantes :

— Les *réserves,* qui sont des accumulations exploitables avec profit, dans les conditions techniques et économiques prévalant lors de leur évaluation ; les réserves sont donc les seules quantités de minerai immédiatement disponibles avec certitude, à ceci près que les aléas des politiques et des marchés miniers peuvent toujours, ultérieurement à l'étude de faisabilité, modifier la valeur de ces réserves, de façon favorable ou défavorable (cette restriction sera développée dans le chapitre suivant) ;

— Les *ressources conditionnelles,* dont la mise en exploitation n'est pas envisageable dans le contexte technique ou économique du moment, mais pourrait intervenir à condition que ce contexte évolue de façon propice.

Doc. Ardoisières d'Angers

▲ ***L'exploitation et le travail de l'ardoise à Angers (France) ; d'après une gravure de Houfnaglius (1561).***

▼ ***Une carrière de calcaire dans les Ardennes belges ; l'abattage est obtenu par dynamitage de la base des strates inclinées.***

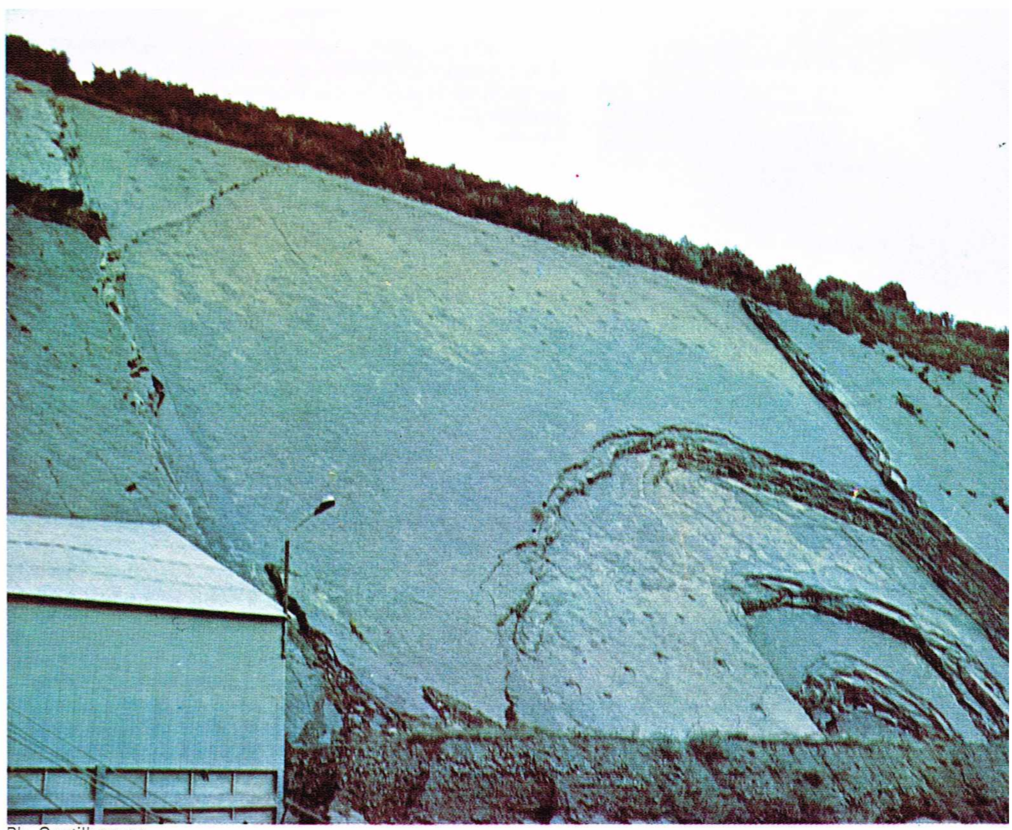

Ph. Gentilhomme

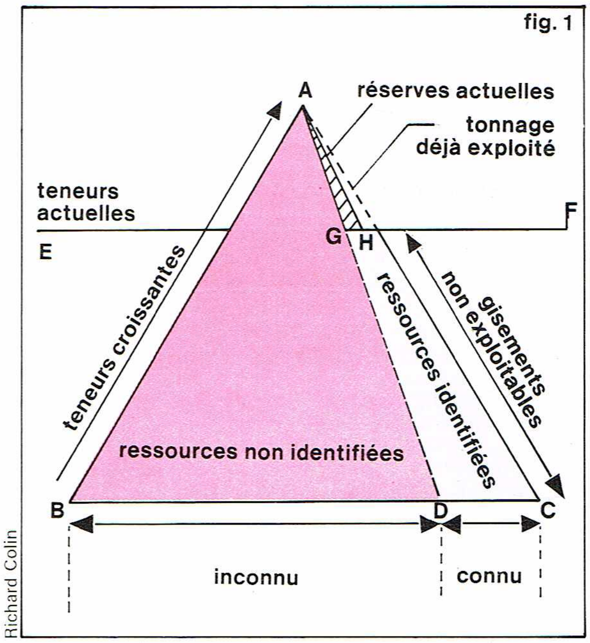

▲ *A gauche, le chargement du minerai de nickel à Népoui (Nouvelle-Calédonie); un convoyeur d'alimentation, au premier plan, conduit le minerai jusqu'au portique de chargement. A droite, figure 1 : représentation schématique des réserves et des ressources minières sur un diagramme triangulaire; la zone hachurée représente les réserves qui diminuent par l'exploitation (déplacement de* AH *vers la gauche) et se reconstituent d'une part par la prospection (déplacement de* AGD *vers la gauche), d'autre part par l'exploitation de gisements plus pauvres ou plus difficiles (déplacement de* EF *vers le bas)* [*d'après* Annales des Mines, *janvier 1975, p. 13*].

Par exemple, dans un gisement de cuivre classé comme ressource conditionnelle — à un moment où, la teneur en cuivre étant ce qu'elle est, la valeur du métal extrait n'aurait pu couvrir les frais d'extraction et de valorisation — une hausse du cours du cuivre conduira à décider l'exploitation du gisement si les calculs financiers montrent que l'entreprise pourra dégager un bénéfice.

D'autres conditions peuvent être liées à la mise au point de techniques de valorisation appropriées à la nature du minerai découvert, ou à l'implantation d'infrastructures indispensables à l'évacuation des produits de l'exploitation (voie ferrée, port maritime, etc.), non disponibles au moment de l'étude du gisement.

Ressources non identifiées

Elles comprennent toutes les accumulations dont l'existence n'est que supposée mais pourrait devenir effective (tout aussi bien que rester fictive) par suite des progrès de l'exploitation minière.

La vraisemblance de cette existence repose sur des déductions d'ordre géologique et métallogénique, ou sur des raisonnements d'ordre statistique qui utilisent les connaissances et l'expérience acquises sur les gisements antérieurement découverts.

— Les *ressources hypothétiques* sont celles qu'on peut raisonnablement espérer découvrir, dans des districts miniers déjà assez bien connus (un district minier est un territoire de quelques centaines de kilomètres carrés, dans lequel plusieurs gisements de même type ou de types voisins ont été ou sont exploités). Il est en effet classique qu'un gisement soit accompagné de « satellites », d'importance plus ou moins subordonnée. C'est sur la présence éventuelle de telles associations que l'on compte pour inférer l'existence de ressources hypothétiques aux environs de districts métallifères.

Les Vosges moyennes sont un bon exemple de cette situation : plusieurs districts miniers y sont connus (notamment des districts filoniens à plomb-zinc-cuivre-argent, sous forme sulfurée) depuis plusieurs siècles; l'importance des travaux miniers anciens (apogée aux XVII^e et XVIII^e siècles) et le fait que ceux-ci n'affectaient souvent que la tête du filon (partie proche de la surface d'affleurement) permettent de supputer qu'il existe dans ces districts des ressources hypothétiques en métaux non ferreux.

— Les *ressources spéculatives* ont une probabilité de présence moindre que les ressources hypothétiques; ce sont des raisonnements d'ordre géologique et statistique qui conduisent à supposer l'existence de telles ressources : eu égard à ce qui est connu de la typologie des gisements et des caractéristiques géologiques de certaines régions, on peut être amené à penser que, dans certaines zones de ces régions, il serait statistiquement peu probable qu'aucune concentration minérale n'existât.

Comme ressources spéculatives, on peut signaler les accumulations de minerais de cuivre, de plomb-zinc ou d'uranium que l'on peut espérer découvrir dans des régions, peu ou pas connues sur le plan métallogénique, comprenant des séries détritiques continentales, dites « red beds » (complexes conglomératiques, gréseux et argileux de couleur fréquemment rougeâtre, d'où leur dénomination). Ces couches rouges sont en effet connues pour constituer des pièges métallogéniques, dans des conditions physico-chimiques définies, qui fixent — et donc concentrent — les métaux tels que cuivre, plomb-zinc, uranium extraits par l'érosion et l'altération de zones continentales où ils étaient contenus à une très basse teneur.

La prospection des red beds, qui ne s'est développée intensément qu'au cours des deux dernières décennies, a été à l'origine de la mise en évidence de plusieurs grands gîtes métallifères, tels que ceux d'Arlit (Niger) pour l'uranium, ou d'Oudokan (au sud de la Sibérie centrale, U. R. S. S.) pour le cuivre. Moins important, le gisement de plomb-zinc-argent exploité à Largentière (Ardèche) appartient également à ce type.

Pour chaque matière première minérale, les différents types de ressources peuvent être représentés sous forme de diagramme triangulaire. L'aire totale du triangle correspond à l'ensemble des quantités de minerais que l'on suppose disponibles actuellement et pour le futur, dans toutes les accumulations connues ou à découvrir, et des quantités déjà extraites des gisements anciens ou en activité. Les teneurs sont décroissantes du sommet vers la base du triangle, la sécante horizontale matérialisant la teneur de coupure (teneur limite d'exploitabilité) moyenne dans les gisements connus (*fig.* 1).

Évolution dynamique des ressources

Les ressources sont des grandeurs variables dans le temps, par essence; ce fait est pourtant mal connu, voire totalement ignoré.

Les ressources exploitables (réserves), continûment soumises aux prélèvements nécessaires à l'alimentation des industries minérales, ne s'amenuisent pas progressivement et inéluctablement; elles sont renouvelées de façon plus ou moins irrégulière, sous la poussée de trois facteurs essentiels : recherche et développement de nouveaux gisements; élévation des prix des matières premières minérales sur les marchés mondiaux; mise au point de procédés nouveaux de valorisation, applicables à des concentrations minérales réfractaires aux techniques classiques.

Cela ne doit toutefois pas laisser croire à un renouvellement perpétuel des ressources : globalement, leur quantité est finie au sein de l'écorce terrestre, donc susceptible

d'épuisement physique à très long terme. Cette question, fort discutée depuis quelques années, et ce, parfois, passionnément, sera examinée ultérieurement.

Rôle de la prospection minière

Ce rôle est probablement le plus méconnu, quoique la prospection soit la seule voie d'accroissement réel des réserves, en en démontrant l'existence là où aucune ressource n'était identifiée, les innovations techniques ou les évolutions favorables des marchés n'ayant pour effet que de transformer des ressources conditionnelles connues en réserves exploitables. Cette méconnaissance est d'ailleurs l'une des critiques fondamentales portées à l'encontre des travaux effectués par le *Massachusetts Institute of Technology,* à l'initiative du Club de Rome (publiés sous le titre *Halte à la croissance,* en édition française), et elle conduit, *ipso facto,* à sous-évaluer la progression quantitative des réserves.

Au cours des phases successives de la prospection, des indices minéralisés sont découverts; leur étude détaillée précisera ensuite leur valeur économique : réserve, immédiatement exploitable, ou ressource conditionnelle, dans les conditions du moment, mais dont l'exploitabilité devra être réexaminée si ces conditions, techniques ou plus souvent économiques, se modifient.

Le bilan général de la prospection se traduit donc par un glissement des ressources, des catégories « non identifiées » vers les catégories « identifiées ». Sur le diagramme triangulaire, cela correspond à un déplacement vers la gauche du segment AD.

Effets des fluctuations économiques

Il s'agit de l'influence qu'ont les variations des prix des matières premières minérales sur le montant des réserves et des ressources conditionnelles.

Dans une mine, la teneur limite d'exploitabilité est en effet étroitement dépendante du prix du métal : si celui-ci est payé plus cher sur les marchés internationaux des matières premières, l'exploitant minier peut extraire du minerai dans des quartiers plus pauvres sans que le coût supplémentaire soit prohibitif (quand la teneur est abaissée, il faut abattre et traiter davantage de minerai pour récupérer un même tonnage de concentrés, la teneur de ceux-ci étant imposée et fixe à court terme). Dans ces conditions, les réserves en tonnage de minerais et donc de métal contenu augmentent. *A contrario,* en période de bas cours, le mineur orientera autant qu'il est possible l'extraction vers les quartiers les plus riches de la mine, afin d'éviter une exploitation déficitaire. Les réserves effectives de la mine s'amenuisent donc dans ces conditions, au profit des ressources conditionnelles.

Parmi les ressources identifiées, la coupure entre réserves et ressources conditionnelles est donc pour l'essentiel gouvernée par le prix marchand de la matière première, donc par la teneur. Les variations des réserves du cuivre, au cours des récentes années, illustrent parfaitement ce propos :

— en 1970, l'évaluation des réserves donnait un résultat de 192,3 millions de tonnes, et le cours du métal au *London Metal Exchange* (bourse de métaux de Londres, où sont cotés le cuivre, le plomb, le zinc, l'étain) était de 450 £/t (cours moyen fin 1970) ;

— ces réserves ont atteint 279,4 millions de tonnes en 1973, puis 393 millions de tonnes au milieu de l'année 1974, suivant en cela la croissance plus ou moins régulière du prix du cuivre, qui parvenait alors à 1 240 £/t, cours record jusqu'à présent.

Cette interdépendance réserves-prix peut aussi être appliquée à la prévision des réserves dans un contexte économique différent de l'actuel : quelles seraient les réserves d'une substance minérale, si son prix de marché était multiplié par un facteur donné ?

L'U. S. Bureau of Mines (organisme fédéral responsable des questions minières aux États-Unis) a pu ainsi estimer, il y a quinze ans, les réserves de mercure sur le territoire de l'Union à :

— 140 000 bouteilles (4 800 t), au prix de 200 $ par bouteille, référence à l'époque de l'étude,

— 827 000 bouteilles (28 300 t), soit 6 fois plus, si le prix était porté à 500 $ par bouteille, deux fois et demie le prix précédent. (Le mercure est vendu et coté en dollars par bouteille de 76 livres anglaises, soit 34 kg.)

Tableau I
Dynamique de la prospection minérale
Évolution des réserves de quelques substances minérales entre 1950 et 1970

Substances minérales	Réserves (en milliers de t.) en 1950	Réserves (en milliers de t.) en 1970	% d'augmentation
Fer	10 000 000	251 000 000	2 410
Manganèse	500 000	635 000	27
Chromite	100 000	775 000	675
Tungstène	1 903	1 328	— 30
Cuivre	100 000	279 000	179
Plomb	40 000	86 000	115
Zinc	70 000	113 000	61
Étain	6 000	6 600	10
Bauxite	1 400 000	5 300 000	279
Potasse	5 000 000	118 000 000	2 260
Phosphates	26 000 000	1 178 000 000	4 430
Pétrole	75 000 000	455 000 000	507

▲ *Tableau I : dynamique de la prospection minérale — évolution des réserves de quelques substances minérales entre 1950 et 1970 (d'après* **les Matières premières minérales,** *collection Études de politique industrielle, publié en 1975 par le ministère de l'Industrie, du Commerce et de l'Artisanat, à la Documentation française).*

De même, pour l'uranium, les réserves des États-Unis passeraient de 160 000 tonnes à 2 700 000 tonnes si le prix de la livre d'oxyde d'uranium (U_3O_8) était porté de 10 à 70 $, ce qui correspond à multiplier les réserves par 17 en septuplant le prix marchand.

En fait, seules les variations durables — ou, du moins, perçues comme devant l'être — des prix des matières premières minérales ont une répercussion sur le montant des réserves; les fluctuations à court terme, irrégulières, qui affectent les cours des bourses de métaux, ne donnent pas lieu à des révisions du montant des réserves.

Influence des progrès techniques

Les méthodes d'extraction, de transport et, surtout, de valorisation des minerais ne sont pas immuables; elles évoluent sous l'action conjointe ou indépendante de deux phénomènes : tendance au gigantisme dans les opérations minières et, par voie de conséquence, minéralurgiques, et amélioration des connaissances techniques en matière de traitement des minerais. L'un et l'autre de ces phénomènes jouent dans le sens d'un accroissement des réserves, aux dépens des ressources conditionnelles, le premier en abaissant les teneurs exploitables, le second en permettant l'emploi de minerais précédemment inutilisables.

Tendance au gigantisme

Il est bon nombre de gisements importants de cuivre, de cobalt, de diamant, de fer, de nickel, etc., dont l'exploitation n'est concurrentielle qu'au prix d'une mécanisation poussée, et, concomitamment, d'un gigantisme des travaux.

Des gisements de plus en plus pauvres peuvent être ainsi mis en valeur et produire des tonnages croissants de métal, grâce à des abattages journaliers de plus en plus énormes de minerai, qu'il convient d'enrichir sur place, tant pour satisfaire aux normes de teneur imposées par les techniques de fonderie que pour obvier au transport onéreux de tonnes de stérile sans valeur.

Historiquement, la chute des teneurs exploitées est remarquable, tout autant que l'augmentation des dimensions des gisements les plus typiques.

En ce qui concerne le cuivre, ce métal était extrait, au milieu du XIXe siècle, presque exclusivement de gisements du type « filons », et les teneurs signalées en France à cette époque étaient voisines de 8 %. Les dimensions de ces exploitations étaient décamétriques à hectométriques, au plus.

Au début du XXe siècle, les gisements présentaient encore couramment des teneurs de 2,5 à 3 % en cuivre. Actuellement, la teneur moyenne pondérée des minerais extraits dans le monde est voisine de 1,03 %, et la plupart des grands gisements — source de l'essentiel du cuivre produit — sont exploités non plus en mines souterraines,

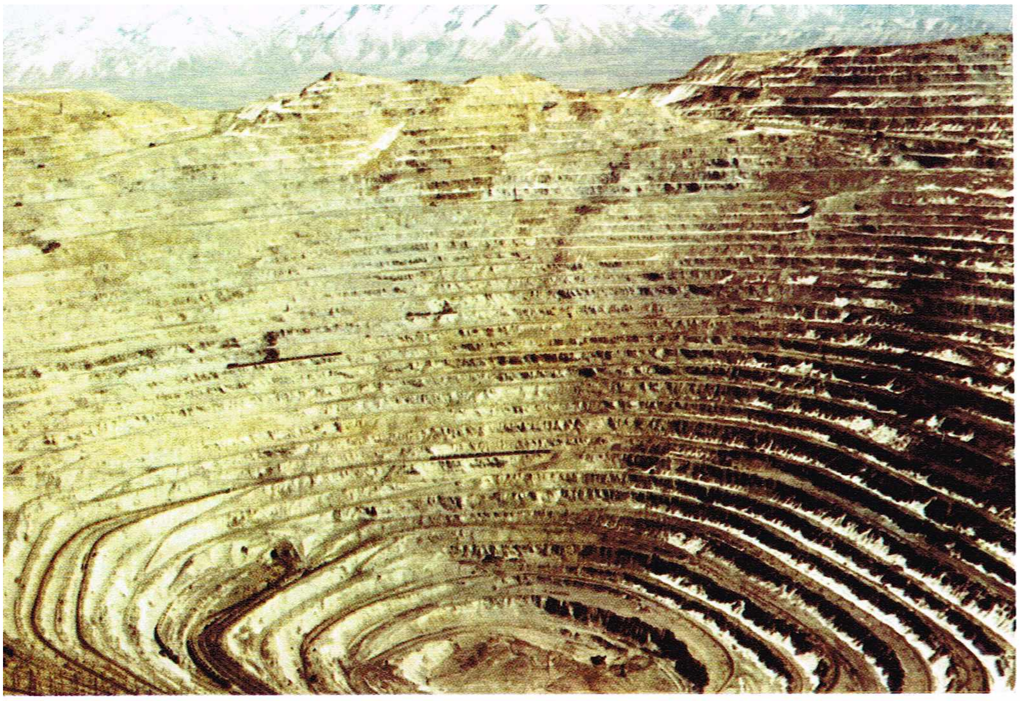

Doc. Kennecott Copper corp-E./L.M.

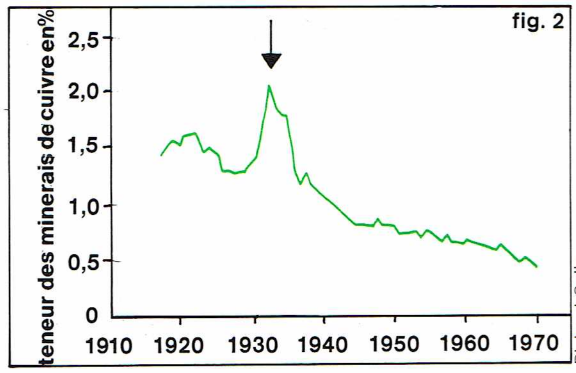

Richard Colin

▲ *La mine à ciel ouvert de Bingham (Utah, États-Unis) est la plus vaste du monde; son diamètre atteint 2 km et sa profondeur 800 m.*

▶ *Figure 2 : évolution de la teneur des minerais de cuivre extraits aux États-Unis; l'élévation des teneurs entre 1929 et 1933 est une conséquence directe de la crise économique (in Bailly, 1975, d'après documents U. S. B. M.).*

mais en mines à ciel ouvert (« open pits » des auteurs de langue anglaise), le diamètre et la profondeur de ces vastes excavations en gradins étant de l'ordre du kilomètre.

Aux États-Unis, où pratiquement tous les gisements appartiennent au type « porphyry copper », les coûts d'exploitation sont assez bas pour que les accumulations de grande dimension, contenant 0,6 % de cuivre seulement, soient bénéficiaires.

Une mécanisation très poussée est la condition *sine qua non* de la rentabilité de telles opérations, pour éviter des frais de personnel prohibitifs. Dans une mine à ciel ouvert, où le minerai abattu est évacué par camions jusqu'à l'atelier de valorisation, les besoins en personnel de conduite diminuent au fur et à mesure de l'accroissement de la capacité de ces camions; cet accroissement est rapide : alors qu'il y a dix ans, les équipements les plus performants étaient des camions de 55-60 t de charge utile, le parc actuel des grands open pits comprend de plus en plus de véhicules de 150 t de capacité, et plus.

Amélioration des techniques de traitement des minerais

A toutes les époques de l'histoire minière, des minerais parfois riches n'ont pas été mis en exploitation, soit volontairement, parce qu'il n'existait pas de méthode satisfaisante et rentable pour les traiter et les réduire, soit inconsciemment, les mineurs ignorant la nature et les propriétés de certains minerais.

Une illustration typique de cette dernière situation est fournie par les mines de zinc des « Anciens ». Jusqu'à la fin du XIXe siècle, approximativement, le zinc ne fut extrait que des minerais oxydés (« calamines » des anciens auteurs); le sulfure de zinc (sphalérite = blende), qui est maintenant le principal minerai de ce métal, n'avait pas été alors reconnu comme tel, et, lorsqu'il apparaissait dans les produits extraits des mines, était rejeté avec le stérile dans les haldes.

Quelques exploitants miniers ont, ultérieurement, multiplié les réserves de leurs concessions, le jour où ils s'avisèrent que les haldes des exploitations anciennes étaient riches en sphalérite et pouvaient être reprises et traitées comme un minerai classique avec l'avantage que ce minerai était déjà extrait et concassé.

Si ce cas est devenu un exemple historique (les minéraux nouveaux découverts chaque année sont des raretés, aucun d'entre eux — et depuis assez longtemps — n'ayant d'intérêt économique), il n'en va pas de même pour ce qui concerne les méthodes de traitement de certains minerais. Dans le monde, de nombreuses accumulations métalliques restent inexploitées, faute qu'aient pu être développées des méthodes de valorisation techniquement efficaces, et satisfaisantes sur le plan économique. Cette situation est notamment celle de minéralisations polymétalliques finement disséminées, plus ou moins réfractaires aux procédés classiques d'enrichissement que l'on applique avec succès aux minerais moins complexes et de granulométrie plus grossière.

Ces minerais constituent alors des réserves conditionnelles, dont la mise en exploitation, et donc la transformation en réserves, sont suspendues à l'amélioration des procédés existants, ou à une innovation technologique.

Le massif de leucogranite d'Échassières (Allier) est un exemple typique d'accumulation polymétallique, d'un type non classique, actuellement inexploitée en raison des difficultés rencontrées au cours des essais de valorisation. Malgré l'existence de très importants tonnages d'une roche contenant de nombreux métaux rares (béryllium : 0,2 à 0,3 kg/t de roche; lithium : 6 à 12 kg/t; césium : 2 à 3 kg/t; rubidium : 8 kg/t; étain : 1,5 kg/t; tantale et niobium : 0,2 à 0,3 kg/t chacun; tungstène : 1 à 2 kg/t) et dont les constituants essentiels, quartz et feldspath, peuvent être utilisables, ce gisement reste potentiel, mais son passage en réserves exploitables peut être raisonnablement envisagé dans un avenir proche.

Il faut souligner que ce genre d'exploitation intégrée, qui permettrait une valorisation presque complète de la roche-minerai, concourrait à une meilleure gestion des ressources en matières premières minérales.

En manière de conclusion, on constatera que les réserves sont des grandeurs variables, caractérisées par la dynamique de leur renouvellement. Mais il faut noter que celui-ci est statistique, et n'a de réalité effective qu'au niveau de l'ensemble du globe.

Au niveau des districts miniers, des gisements s'épuisent, et ceux qui leur succèdent dans le temps peuvent être situés en d'autres régions et appartenir à des types métallogéniques différents : le renouvellement s'accompagne d'un glissement géographique et typologique pour la plupart des matières premières minérales.

Incidences de la situation politique des pays producteurs

On ne peut, enfin, passer sous silence l'influence des événements politiques sur la valeur pratique des réserves et la sécurité de leur utilisation : pour les sociétés minières, des minerais techniquement et économiquement exploitables perdent de leur intérêt si le pays qui les possède est politiquement instable, de tendance nationaliste ou en conflit plus ou moins ouvert avec ses voisins. « Les réserves de cuivre détenues par le Chili, par exemple — pays que l'on considérait il y a dix ans comme parmi les plus stables de l'Amérique du Sud — n'ont plus aujourd'hui, pour les pays occidentaux, la même valeur qu'à cette époque », remarquait très pertinemment C. Guillemin (1974).

En effet, les investissements qu'exigent les grands projets miniers sont très lourds, de l'ordre du milliard de francs; leur amortissement sera d'autant plus lent que la teneur des gisements sera moins élevée : huit à quinze ans, quelquefois plus, sont nécessaires pour rembourser les sommes initialement dépensées, avant l'obtention effective de bénéfices. Les sociétés minières hésitent donc à engager de tels fonds, pour le long terme, dans des pays où la sécurité des investissements ne serait pas assurée; elles se rabattent donc sur des gisements très riches, pour lesquels l'amortissement des investissements est plus rapide, ou sur des pays assurant la garantie des investissements étrangers.

C'est ainsi que, en dehors de tout problème d'extraction, de valorisation ou de commercialisation du minerai, les teneurs exigées pour que les responsables de sociétés minières décident d'investir dans la mise en valeur d'un gisement peuvent être dans un rapport de 1 à 10, selon que le pays d'implantation sera tenu pour politiquement très stable ou, au contraire, peu sûr.

Importance quantitative et longévité des ressources

Méthodes d'évaluation des ressources

L'évaluation des réserves d'une matière première minérale passe par la collecte et l'analyse des données propres à chaque gisement exploité ou exploitable : tonnage récupérable dans les conditions du moment, type de minerai, teneur.

Cela présente des difficultés, parfois insurmontables, provenant :

— du manque d'informations précises, pour certains pays et certaines substances (le montant des réserves de certaines d'entre elles est tenu secret dans quelques pays), auquel il faut remédier en se contentant d'estimations ;

— de la disparité des modalités de calcul des tonnages et des teneurs, due aux méthodes diverses de mesure des teneurs et tonnages et aux modèles géologiques et mathématiques utilisés pour l'interprétation des résultats ;

— de l'incertitude fondamentale quant au tonnage réellement récupérable dans un gisement en cours d'exploitation — et *a fortiori* non encore exploité — liée à la variabilité des conditions économiques.

Une bonne évaluation des réserves des matières premières minérales, exhaustive et critique, requiert donc un très important travail, surtout si l'on désire une ventilation des réserves par type de gisements et régions du globe.

L'estimation des ressources est un exercice encore plus périlleux, puisque, par définition, les caractéristiques des ressources sont mal connues géologiquement ou dépendent de phénomènes extrinsèques (économiques et technologiques).

Il faut donc faire la part, dans toute estimation quantitative des ressources :

— de l'incertitude géologique, en premier lieu ;

— de l'évolution future des facteurs économiques, technologiques, politiques, etc., qui prévaudront à une certaine échéance ;

— des hypothèses et conventions méthodologiques retenues ;

— de l'élément humain : tendance optimiste ou pessimiste des auteurs, qui se reflétera dans le choix des données et leur interprétation.

Montant des réserves et ressources globales

Les tonnages des différents types de ressources, pour les principaux métaux et quelques minerais non métalliques essentiels, ont été rassemblés dans le *tableau* II ; y figurent également les chiffres de production minière (pour l'année 1974) et les rapports réserves ou ressources/production minière, afin de mettre en relief la plus ou moins grande longévité de chacune des catégories de ressources.

Ce tableau nécessite quelques mises en garde :

— les tonnages de réserves et de ressources, établis à partir de sources d'information très diverses, n'ont pas la même fiabilité pour toutes les matières premières minérales concernées ; il faut tenir ces chiffres pour des ordres de grandeur, et non pour des quantités précises ;

— la production minière est croissante au fur et à mesure des années, d'une façon plus ou moins marquée et régulière selon les matières premières minérales, ce qui contribuerait à diminuer la longévité des réserves et ressources, par rapport aux chiffres indiqués dans ce tableau.

Ainsi, à raison de 3 % de croissance annuelle pour la production minière de plomb, les réserves actuelles n'auraient plus qu'une longévité de 25 ans, au lieu des 37 années citées. Pour la fluorite, dont la production minière augmente de 9 % par an, les réserves passeraient, alors, de 30 à 15 ans.

Mais la progression — bien connue — des productions se double d'un accroissement des réserves (phénomène souvent ignoré ou sous-estimé dans son ampleur) plus irrégulier (du fait des aléas de la prospection minière et

▼ *Tableau II : estimation des ressources identifiées à la fin de 1974, et des ressources totales (identifiées et non identifiées) pour les principales substances minérales (d'après* les Matières premières minérales, *collection Études de politique industrielle, publié en 1975 par le ministère de l'Industrie, du Commerce et de l'Artisanat, à la Documentation française).*

Tableau II
Estimation des ressources identifiées (à la fin de 1974) et des ressources totales (identifiées et non identifiées) pour les principales substances minérales (en millions de tonnes, sauf indications contraires)

Substances minérales	Production minière actuelle	Réserves	Longévité des réserves (en années)	Ressources identifiées	Longévité des ressources identifiées (en années)	Ressources hypothétiques et spéculatives (non identifiées)	Ressources totales estimées	Longévité des ressources totales estimées (en années)
Fer (1)	830	200 000	240	250 000	300	500 000	750 000	900
Aluminium (2)	13	3 000	230	4 000	300	1 000	5 000	385
Cuivre	7,5	320	42	350	47	600	950	126
Plomb	3,5	130	37	150	43	200	350	100
Zinc	5,7	230	40	250	44	300	550	96
Étain	0,22	10	45	20	91	15	35	150
Chrome (3)	6,5	1 300	200	1 500	230	1 000	2 500	385
Nickel	0,67	80	119	100	150	100	200	300
Cobalt	0,024	4	166	5	200	10	15	625
Manganèse (4)	20	4 000	200	5 000	250	10 000	15 000	750
Molybdène	0,06	5	83	6	100	5	11	183
Tungstène	0,04	1,4	35	1,5	38	1	2,5	62
Vanadium (5)	0,011	8	727	10	900	10	20	1 800
Antimoine	0,072	3	41	4	55	5	9	125
Bismuth (6)	4	150	37	200	50	100	300	75
Lithium	0,012	2	166	3	250	3	6	500
Niobium	0,606	10	1 666	15	2 500	20	35	5 830
Tantale (6)	1	75	75	100	100	10	20	200
Titane	2	400	200	500	250	1 000	1 500	750
Zirconium	0,4	25	62	30	75	30	60	150
Terres rares	0,025	5	200	7	280	5	12	480
Argent (6)	9,6	150	15	170	18	200	370	38
Or (6)	1,5	31	21	31	21	30	61	40
Mercure (6)	8,7	300	34	500	57	500	1 000	115
Uranium	0,02	0,9	45	1,5	75	1,5	3	150
Amiante	5	180	36	200	40	200	380	76
Barytine	4,2	150	35	200	48	100	300	64
Fluorine (7)	4,7	140	30	150	32	150	300	64
Phosphates	97	120 000	1 237	150 000	1 500	20 000	170 000	1 752

(1) Minerais (toutes teneurs).
(2) Dans les bauxites seulement.
(3) Minerai à 30-50 % de Cr_2O_3.
(4) Minerai à 30-50 % de Mn.
(5) Sous forme d'oxyde.
(6) Milliers de tonnes.
(7) Minerai à 50-55 % de CaF_2.

▶ *Page ci-contre, tableau IV : consommation* per capita *de quelques substances d'origine minérale, dans les grandes zones économiques du monde (d'après W. Malenbaum,* Materials Requirements abroad in the Year 2000, *1973, partiellement repris dans* les Matières premières minérales, *collection Études de politique industrielle, publié en 1975 par le ministère de l'Industrie, du Commerce et de l'Artisanat, à la Documentation française).*

des conditions économiques), mais qui reste du même ordre de grandeur que celui de la production (ou lui est, parfois même, très supérieur). H. Pélissonnier a ainsi montré, à partir de l'analyse des caractéristiques de 1 400 exploitations minières de cuivre dans le monde, qu'entre 1963 et 1972, la production minière cumulée depuis les origines était passée de 135 à 190 millions de tonnes (+ 41 %), et que les réserves mondiales avaient progressé de 92 % (263 millions de tonnes en 1963 et 510 en 1972). La méconnaissance du renouvellement et de la progression des réserves explique certaines conclusions particulièrement alarmistes du Club de Rome quant à l'épuisement des réserves.

A la production minière s'ajoute celle des métaux de deuxième fusion, provenant du retraitement des déchets (chutes de fabrication des industries) et des débris (métaux des biens de consommation obsolescents ou accidentés), qui contribue aussi à alimenter la demande. (En France, le recyclage couvre 30 % des besoins totaux en métal, pour le cuivre, 38 % pour le plomb, 30 % pour le zinc, 19 % pour l'étain.) Cet appoint diminue la ponction sur les gisements minéraux et améliore donc la longévité apparente des réserves.

Parmi les 29 substances répertoriées, on relèvera, d'une part, l'importance des réserves et des ressources pour l'aluminium, le fer et la plupart des métaux d'alliage, ainsi que pour les phosphates, et d'autre part, la faiblesse relative des réserves des principaux métaux non ferreux (cuivre, plomb, zinc, étain) et des métaux précieux (mercure et, surtout, or et argent, ce qui n'a rien d'étonnant pour ce dernier, très généralement lié métallogéniquement au groupe plomb-zinc et/ou au cuivre).

On notera aussi que les ressources non identifiées ne paraissent offrir qu'un appoint assez modeste, d'un ordre de grandeur voisin de celui des ressources identifiées (sauf pour le fer, le cuivre, le manganèse et le titane) ou même nettement inférieur. Cela refléterait la prudence des estimations de ces ressources, plutôt qu'une basse probabilité d'identifier des ressources nettement plus importantes que celles déjà reconnues. D'autres auteurs, utilisant des hypothèses différentes pour leurs estimations, ont d'ailleurs proposé des chiffres beaucoup plus élevés pour les ressources non identifiées.

En ce qui concerne les matériaux de carrière, il n'existe pas d'évaluation au niveau mondial des réserves — et *a fortiori* des ressources ; la question est, en pratique, sans objet, eu égard aux quantités considérables de ces roches dans tous les pays du monde (sauf rarissimes exceptions, pour des matériaux d'usages et de propriétés très particuliers).

Enfin, il ne faut pas perdre de vue que les chiffres globaux avancés pour les réserves et ressources mondiales recouvrent des disparités locales extrêmement marquées : ainsi, les réserves de niobium, de phosphates, etc., sont considérables et ne posent aucun problème au niveau mondial même à long terme, mais la France en est presque entièrement dépourvue (les questions d'approvisionnement de la France sont développées dans le dernier chapitre de cet exposé).

▼ *Tableau III : quantité de métaux contenus dans les roches ignées et cristallophylliennes de l'écorce terrestre (1) et dans la mer (2) [d'après* Annales des Mines, *janvier 1971, p. 14].*

Tableau III	dans l'écorce terrestre (1)		dans la mer (2)		Longévité apparente au rythme actuel de consommation (en millions d'années)
Métaux	Teneur (en grammes par tonne)	Tonnage virtuel (10^{12} tonnes)	Teneur (en grammes par tonne)	Tonnage virtuel (10^{12} tonnes)	
Aluminium	81 300	15 000	0,1	0,14	1 500
Argent	0,1	0,02	0,4	0,56	65
Chrome	200	36	—	—	20
Cobalt	23	4,2	—	—	220
Cuivre	70	12,7	0,2	0,28	2
Étain	40	7	—	—	25
Fer	50 000	9 000	2	2,80	25
Manganèse	1 000	180	5	7	25
Mercure	0,5	0,1	0,03	0,04	15
Molybdène	15	2,7	0,5	0,7	50
Nickel	80	14,5	0,1	0,14	25
Or	0,005	0,001	0,004	0,006	3,5
Platine	0,005	0,001	—	—	9
Plomb	16	3	—	—	1
Tungstène	69	12,5	—	—	400
Uranium	4	0,8	1,5	0,2	100
Vanadium	150	27,5	0,3	0,04	2 500
Zinc	132	24	5	7	6

La question de l'épuisement des matières premières minérales

Il a déjà été souligné que de nouvelles réserves sont plus ou moins régulièrement identifiées, sous l'impulsion des travaux de prospection et de reconnaissance, et qu'il y a donc un remplacement statistique des réserves au fur et à mesure de leur utilisation. La longévité virtuelle des réserves (tonnage connu de réserves à un moment donné/production minière annuelle) se maintient, pour pratiquement toutes les matières premières, à une valeur assez stable au cours des années.

Il serait donc gravement erroné d'imaginer que, si les réserves actuelles de tel minerai ont par exemple une longévité de 30 ans, il y aura inéluctablement une pénurie physique à cette échéance. Bien des malentendus, et des argumentations sans fondement, procèdent de la méconnaissance de la dynamique des réserves.

En revanche, sur le plan des ressources totales, le problème se pose en termes très différents : les tonnages de métaux contenus dans l'ensemble des roches (et non pas seulement des gisements *stricto sensu*) de la croûte terrestre — jusqu'à un ou deux kilomètres de profondeur — (*tab.* III) assureraient la couverture des besoins de l'humanité pour plusieurs millions ou dizaines de millions d'années (même dans le cas d'une forte croissance exponentielle de la consommation). Ce genre d'argument, trop souvent mis en avant par des esprits optimistes pour démontrer l'inanité des risques de pénurie de matières premières minérales, passe sous silence tous les problèmes humains, technologiques, énergétiques et autres, certains insurmontables, que soulèverait la récupération des éléments ou des composés dispersés à très basse teneur dans les roches banales constituant l'essentiel de la croûte superficielle.

Il faut donc compter que les ressources en matières premières minérales sont limitées physiquement; des pénuries apparaîtront à très long terme, en premier lieu pour les quelques métaux et minerais métalliques dont les ressources estimées sont les plus faibles. L'échéance de raréfactions sensibles dépend, outre des ressources qui seront disponibles dans les décennies ou siècles à venir, de l'évolution de la consommation mondiale.

Celle-ci, historiquement, a été et reste en croissance exponentielle. Dans les pays fortement industrialisés, la progression de la démographie devient plus modérée, et certains indices révèlent que la consommation *per capita* tend à plafonner au fur et à mesure que le niveau de vie s'élève. La demande dans ces pays pourrait, dans l'avenir, ne progresser que très lentement. En revanche, dans tous les pays en voie de développement, si la demande actuelle est faible, son taux de croissance *per capita* est important, et l'inflation démographique ne fait que renforcer ce phénomène. Ce sont donc ces pays qui, en première analyse, détiennent la clef du problème de la raréfaction des disponibilités en matières premières minérales. Toute la question — sans réponse possible actuellement sans doute — est de savoir si à long terme ces pays atteindront ou non les niveaux de consommation en matières minérales des pays industrialisés (*tableaux* IV, V et VI).

Quelques auteurs ont émis l'hypothèse selon laquelle les disponibilités en matières premières minérales pourraient être limitées, non par l'insuffisance des ressources minières, mais par celle des ressources énergétiques. La consommation d'énergie exigée par l'extraction et la concentration des minerais, ramenée à la tonne de métal contenu, est inversement proportionnelle à la teneur de ces minerais (alors que la consommation pour la fusion des concentrés est peu variable, ou même décroissante, du fait de progrès techniques) ; les besoins énergétiques du secteur minier ne peuvent que croître dramatiquement au fur et à mesure que les teneurs d'exploitabilité chutent. Certains calculs préliminaires tendraient à démontrer le bien-fondé de cette hypothèse, en ce qui concerne les métaux dont les ressources sont très abondantes (les autres métaux risquant de se raréfier, à moindre échéance, par amenuisement des ressources avant même que des contraintes sévères n'affectent les disponibilités énergétiques [*tableau* VII]).

Selon un rapport du *Comité des ressources minérales et de l'environnement* de la National Academy of Sciences (États-Unis, 1975), il serait déraisonnable de penser que des minerais de cuivre de teneur inférieure à 0,1 % Cu puissent un jour faire l'objet d'une extraction minière,

Tableau IV

Consommation *per capita* de quelques substances d'origine minérale dans les grandes zones économiques du monde (I : moyenne 1951-1955 ; II : moyenne 1966-1969)

Zones économiques	Acier brut (en tonnes) I	Acier brut (en tonnes) II	Cuivre raffiné (en kg) I	Cuivre raffiné (en kg) II	Aluminium vierge (en kg) I	Aluminium vierge (en kg) II	Zinc (en kg) I	Zinc (en kg) II	Fluorite (en kg) I	Fluorite (en kg) II
Europe occidentale (1)	0,16	0,33	3,68	5,69	1,93	5,41	2,38	3,65	0,85	2,35
Japon	0,07	0,49	1,12	6,46	0,46	5,78	0,99	4,90	0,27	4,10
États-Unis	0,56	0,66	7,97	9,30	7,46	16,87	5,28	5,96	3,15	5,52
Autres pays industrialisés à économie de marché (2)	0,22	0,34	3,87	5,91	2,16	5,31	2,79	4,27	1,75	3,37
Union soviétique	0,20	0,42	1,94	3,68	1,51	5,00	1,27	1,99	0,88	2,09
Europe orientale	0,20	0,28	1,15	2,51	0,69	4,08	1,06	2,84	0,28	0,88
Moyenne des pays industrialisés (A)	0,24	0,47	3,55	5,65	2,55	7,34	2,40	3,78	1,19	2,93
Afrique	0,01	0,01	0,03	0,04	0,005	0,06	0,004	0,02	—	0,01
Amérique latine	0,03	0,05	0,45	0,56	0,14	0,59	0,25	0,51	0,06	0,15
Asie communiste (4)	0,003	0,02	0,01	0,18	0,005	0,16	0,01	0,16	0,09	0,18
Autres pays d'Asie (3)	0,01	0,01	0,05	0,06	0,02	0,17	0,04	0,15	0,01	0,02
Moyenne des pays peu industrialisés (B)	0,095	0,018	0,072	0,20	0,025	0,15	0,045	0,17	0,043	0,090
Rapport (A)/(B)	25,3	26,2	49,3	36,7	104	37,7	53,3	22,2	27,7	32,6

(1) Y compris Espagne, Portugal, Grèce et Turquie.
(2) Australie, Canada, Nouvelle-Zélande, Israël, République d'Afrique du Sud.
(3) Non compris Israël, Japon, Mongolie, Corée du Nord, Chine, Viêt-Nam.
(4) Chine, Mongolie, Corée du Nord, Viêt-Nam.

▼ Tableau V : comparaison de la consommation par habitant de quelques substances minérales dans les différentes régions du monde en l'an 2000.

Tableau VI : comparaison des ressources totales (identifiées et non identifiées) pour quelques substances minérales avec les consommations cumulées jusqu'à l'an 2000 (tableaux V et VI d'après W. Malenbaum, Materials Requirements abroad in the Year 2000, *1973, cité dans* les Matières premières minérales, *collection Études de politique industrielle, publié en 1975 par le ministère de l'Industrie, du Commerce et de l'Artisanat, à la Documentation française).*

Tableau VII : coût énergétique du cuivre en fonction de la teneur du minerai, par tonne de métal contenu dans le concentré.

eu égard à des contraintes d'ordre minéralogique et énergétique.

Les espoirs, dans l'avenir, reposent donc sur :

— l'abaissement des teneurs d'exploitation (du moins jusqu'à un certain point, au-delà duquel il deviendrait physiquement très difficile de valoriser les minerais), qui ferait rentrer dans les réserves de vastes concentrations pauvres actuellement dédaignées ;

— la mise au point et le développement de méthodes d'extraction des métaux moins dispendieuses en énergie et plus efficaces, permettant de les récupérer dans des minerais très finement disséminés et pauvres (réfractaires aux techniques traditionnelles de traitement minéralurgique). La mise en solution d'éléments utiles dans des minerais en place ou foudroyés (lixiviation) peut être une voie prometteuse : elle a déjà donné d'intéressants résultats dans plusieurs grandes exploitations de cuivre et d'uranium, où des minerais normalement trop pauvres ont ainsi pu être valorisés ;

— la découverte de types de gisements non conventionnels, polymétalliques, dans lesquels l'intérêt de la récupération conjointe de nombreux métaux et minerais non métalliques compense le handicap de teneurs généralement basses.

Tableau V - Comparaison de la consommation par habitant de quelques substances minérales dans les zones économiques du monde en l'an 2000

(en kilogrammes)

Zones économiques	Acier	Aluminium	Cuivre	Zinc	Fluorite
États-Unis	890	52,25	14,63	9,41	13,59
Europe occidentale	710	20,24	10,50	6,83	7,59
Japon	1 450	45,86	21,40	13,19	19,11
U.R.S.S.	850	22,32	11,98	8,58	9,53
Europe de l'Est	610	17,47	7,84	3,92	6,94
Autres pays industrialisés à économie de marché (1)	680	13,87	5,41	5,92	3,46
Moyenne des pays industrialisés	834	27,33	11,14	7,19	9,26
Afrique	20	0,24	0,16	0,07	0,08
Asie (2)	30	0,50	0,22	0,31	0,06
Amérique latine	100	1,72	0,91	0,95	0,48
Chine (3)	60	0,79	0,63	0,54	0,52
Moyenne des pays en voie de développement	49	0,71	0,42	0,42	0,24
Moyenne mondiale	241	7,27	3,06	2,07	2,47
Rapport pays industrialisés/pays en voie de développement	17	38,5	26,5	17,1	38,5

(1) Australie, Canada, Nouvelle-Zélande, Afrique du Sud, Israël.
(2) Non compris Japon, Israël, Chine, Mongolie, Viêt-Nam et Corée du Nord.
(3) Chine, Mongolie, Corée du Nord, Viêt-Nam.

Tableau VII

Coût énergétique du cuivre en fonction de la teneur du minerai (par tonne de métal contenu dans le concentré)

Teneur en cuivre (en %)	Énergie consommée par l'extraction et le traitement du minerai (en kWh thermiques)
1,0	14 000
0,5	35 000
0,3	83 000

Tableau VI

Comparaison des ressources totales (identifiées et non identifiées) pour quelques substances minérales avec les consommations cumulées jusqu'en l'an 2000 (en millions de tonnes)

Estimations	Fer (minerai)	Aluminium	Cuivre	Zinc	Fluorite
Réserves en 1973	200 000	3 000	320	230	140
Ressources potentielles totales	750 000	5 000	950	550	300
Production en 1973	830	13	7,5	5,7	4,7
Production en 2000	2 000	46,7	19,7	13,5	15,87
Consommations cumulées jusqu'en 2000	36 500	708	305	248	253
Solde ressources	713 500	4 292	545	302	47
Nombre d'années de consommation 2000	356	92	27	22	3

Tableau VIII
Évolution du commerce extérieur des principales régions économico-politiques du monde entre 1968 et 1975 (en millions de dollars des États-Unis)

Ensembles de pays	Importations (c.i.f.) (I)	Exportations (f.o.b.) (E)	Solde (E-I)
Pays à économie de marché			
1968	179 400	168 700	— 10 700
1975	614 600	578 600	— 36 000
Pays en voie de développement			
1968	45 300	43 800	— 1 500
1975	188 600	211 400	+ 22 800
dont pays de l'O.P.E.P.			
1968	7 800	14 200	+ 6 400
1975	53 100	112 000	+ 58 900
dont autres pays			
1968	37 500	29 600	— 7 900
1975	135 500	99 400	— 36 100
Union soviétique + Europe orientale			
1968	25 100	25 200	+ 100
1974 (1)	70 900	65 500	— 5 400

(1) Résultats du commerce extérieur non disponibles pour 1975.
c.i.f. : cost insurance & freight (coût assurance et prêt)
f.o.b. : free on board (rendu à bord)

Tableau IX
Production et consommation des substances minérales dans les trois ensembles du monde en 1973

Ensembles de pays	Production (1) (en %)	Consommation (2) (en %)	Population (en %)
Pays à économie de marché	42,6	69,8	19,8
Pays à économie planifiée	24,8	24	31,9
Pays en voie de développement	32,6	6,2	48,3

(1) Calculée en pourcentage de la production globale des minerais des six principaux métaux : fer, aluminium, cuivre, étain, plomb et zinc.
(2) Calculée en pourcentage de la consommation globale des six métaux précités.

▼ *Figure 3 : évolution entre 1950 et 1973 de l'importance relative des différentes zones dans la production de minerais et de substances énergétiques (d'après* Annales des Mines, *décembre 1975, p. 35).*

fig. 3

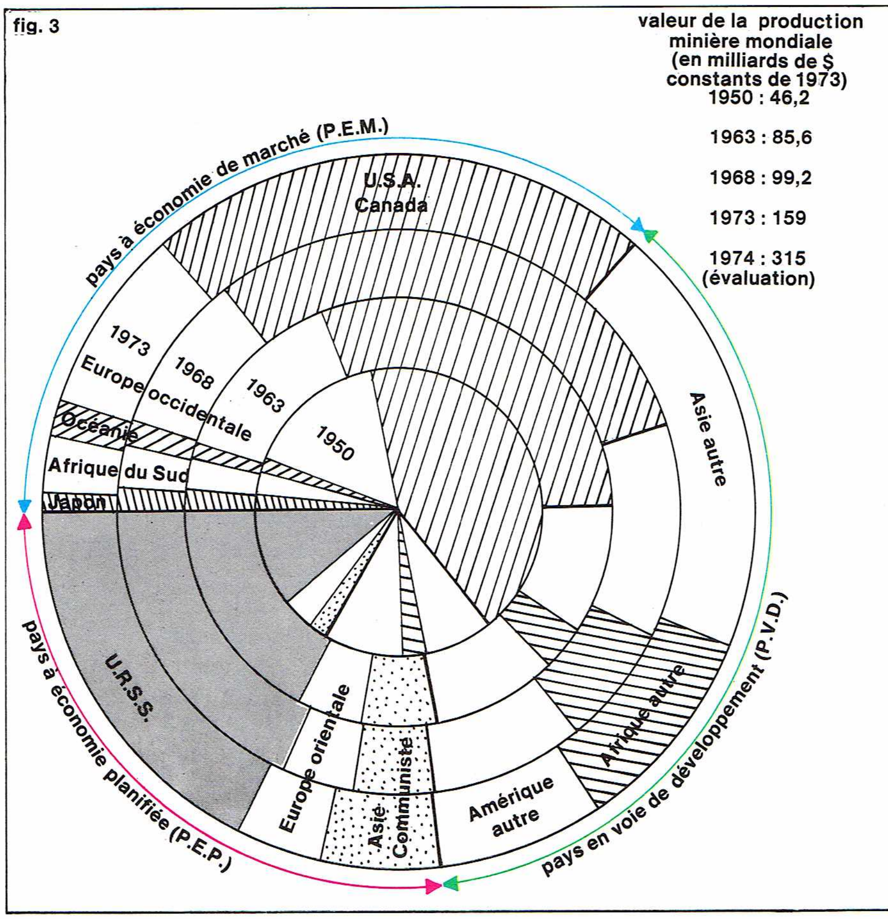

Richard Colin

Les matières premières minérales dans les relations internationales

Il est maintenant habituel de répartir les États du monde en trois ensembles, en fonction de leur type de système économique et de leur degré de développement industriel (*tabl.* VIII) :

● *Pays à économie peu développée,* ou « pays en voie de développement », selon une expression bien établie, mais dont l'emploi, à propos de la plupart d'entre eux, relève d'un optimisme certain. En effet, si, entre 1968 et 1975, les exportations des pays en voie de développement autres que les membres de l'O.P.E.P. (Organisation des pays exportateurs de pétrole) ont progressé de 69,8 milliards de $ (+ 236 %), leurs importations se sont accrues de 98 milliards de $ (+ 261 %), portant ainsi le déficit du commerce extérieur de ces pays de 7,9 à 36,1 milliards de $ (+ 357 %). Sont classés parmi les pays en voie de développement tous les États : d'Afrique, sauf la république d'Afrique du Sud, d'Amérique centrale et méridionale, et d'Asie, à l'exception du Japon et des pays socialistes.

● *Pays industrialisés à économie libérale,* ou pays à économie de marché. Ce sont le Japon, les États-Unis et les 18 nations d'Europe occidentale et méditerranéenne (y compris la Yougoslavie), d'une part, et de l'autre, le Canada, l'Afrique du Sud, et les pays constituant l'Océanie. Les trois premiers secteurs ont une production de matières premières minérales insuffisante, très nettement pour le Japon et l'Europe, modérément pour les États-Unis, les trois autres étant des exportateurs nets.

● *Pays à économie planifiée :* l'Union soviétique et l'Europe orientale forment une première entité économique, la Chine populaire et les pays socialistes d'Asie en constituent plus ou moins nettement une seconde, parvenue à un développement moindre.

Cette classification peut paraître quelque peu abstraite : parmi les pays à économie planifiée, certains sont fortement industrialisés et d'autres fort peu, et les plus industrialisés des pays en voie de développement arrivent au niveau des pays européens à économie de marché les plus défavorisés : il y a un fossé bien plus marqué entre la Haute-Volta et le Nigeria qu'entre celui-ci et la Suède. Cependant, elle est assez commode, lorsqu'il s'agit de dresser les grandes lignes des relations internationales dans le domaine des échanges de matières premières.

Répartition régionale des productions et des consommations ; interdépendance des nations

Répartition actuelle et évolution

Quelques chiffres rendent compte de façon très expressive des places qu'occupent les trois grands ensembles précédemment définis. Ils ne concernent malheureusement que l'année 1968. Pour 1973, seuls des résultats partiels, concernant les six métaux principaux, sont disponibles (*tabl.* IX).

* Les pays en voie de développement rassemblent 48 % de la population mondiale sur 49,75 % de la superficie des terres. Pourtant, leur production de matières premières minérales (minerais métalliques et non métalliques seulement, à l'exclusion des matériaux de carrière) ne représente que 32 % en tonnage, et 26,4 % en valeur, de la production minérale mondiale ; quant à leur rôle de consommateurs, il est des plus minces : 6 % de la production mondiale (calculée au niveau des métaux bruts ou des minerais non métalliques concentrés), seulement, sont repris pour la satisfaction des besoins de ces pays.

Les pays à économie planifiée groupent près du tiers de la population mondiale (32 %) sur le quart des terres ; la présence de la Chine populaire dans cet ensemble rend compte de cette densité élevée. Leur production (24 % en tonnage, et 25,5 % en valeur) et leur consommation (25 %) se situent à des niveaux remarquablement voisins.

Les pays industrialisés à économie de marché, qui n'accueillent sur près du quart des terres (24,6 %) que 20,5 % des habitants de la planète, apparaissent bien comme les plus nantis en capacités d'extraction et d'utilisation : ils assurent 44 % en tonnage, et 48,1 % en valeur, de la production minérale mondiale, et interviennent pour 69 % dans la consommation. Cela implique une origine importée pour environ 36 % des besoins (en volume).

* L'évolution des positions relatives de ces trois ensembles, au cours du dernier quart de siècle, est instructive, en ce sens qu'elle va à l'encontre de bon nombre d'idées préconçues. Les pays en voie de développement ont assuré une part étonnamment stable, en pourcentage, de la production mondiale de matières premières minérales (31 à 32 % en tonnage), alors que l'on eût pu s'attendre à un progrès substantiel. Celui-ci a en fait été réalisé par les pays à économie planifiée, qui, de 1950 à 1963, ont hissé leur production de 14 % à 25 % de celle du monde, et il y a donc eu, concomitamment, un déclin relatif des pays occidentaux qui ont perdu au cours de cette période leur prééminence : leur part dans la production mondiale, en tonnage, est descendue de 55 % à 44 %. Depuis, le glissement relatif s'est atténué, et de l'examen des douze dernières années se dégage l'impression très nette d'un maintien des positions respectives acquises au milieu de la décennie 1960 (*fig.* 5).

Situation dans chaque ensemble et relations mutuelles

L'examen de ces chiffres appelle quelques remarques sur la situation de chacun des trois groupes de pays, et sur leurs relations mutuelles.

* Les pays à économie planifiée, globalement, ont réalisé un équilibre pratiquement parfait entre leur production et leurs besoins. Cet équilibre correspond à une situation effective d'autarcie — qui se justifie par des raisons historiques et politiques — et non à un nivellement statistique de structures de production et de consommation, qui seraient différentes pour chaque pays considéré séparément. Le bien-fondé de cette analyse est confirmé par la très faible participation des pays à économie planifée aux échanges internationaux de matières premières : dans la valeur totale des exportations des dix minerais métalliques et non métalliques principaux, réalisées dans le monde en 1970, les pays à économie planifiée n'intervenaient que pour 5 %.

En revanche, et cela n'apparaît pas dans ces statistiques générales, il existe des échanges internes aux deux « entités » composant l'ensemble « pays à économie planifiée » : le flux de matières premières minérales est important de l'Union soviétique vers l'Europe orientale (déficitaire pour tous les métaux et minerais non métalliques majeurs, globalement) ; il est bien moindre entre la Chine et les pays socialistes d'Asie.

* Les pays à économie planifiée se trouvant pratiquement en circuit fermé, l'essentiel des relations internationales dans le domaine des matières premières minérales a pour protagonistes les pays à économie de marché et les pays en voie de développement. Mieux qu'en termes de consommateurs et de producteurs, ces deux ensembles se définissent en termes de possesseurs, respectivement, de capacités de transformation et de capacités d'exportation de minerais. Même lorsque les pays en voie de développement assurent la plus grande partie de l'extraction d'un minerai métallique, ils demeurent des producteurs très secondaires de métal. Seul l'étain fait exception à cette règle : 76 % du minerai et 64 % du métal proviennent des pays en voie de développement.

◄ *Page ci-contre, à gauche, tableau VIII : évolution du commerce extérieur des principales régions économico-politiques du monde entre 1968 et 1975 (d'après les annuaires 1975 et 1976 du Comité professionnel du pétrole). Page ci-contre, à droite, tableau IX : production et consommation des substances minérales en 1973 dans les trois grands ensembles du monde (d'après Annales des Mines, décembre 1975, p. 52).*

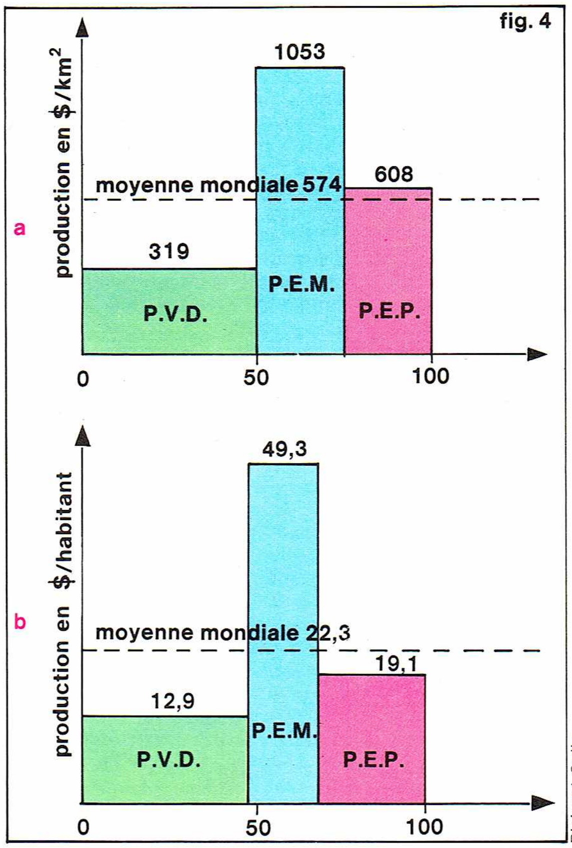

◄ *Figure 4 : production minière en dollars par kilomètre carré* (a) *et en dollars par habitant* (b) *dans les trois grands ensembles de pays, et moyenne mondiale en 1968 ; les largeurs des rectangles sont proportionnelles, respectivement, aux superficies et aux populations de ces ensembles de pays (d'après* Annales des Mines, *janvier 1975, p. 22).*

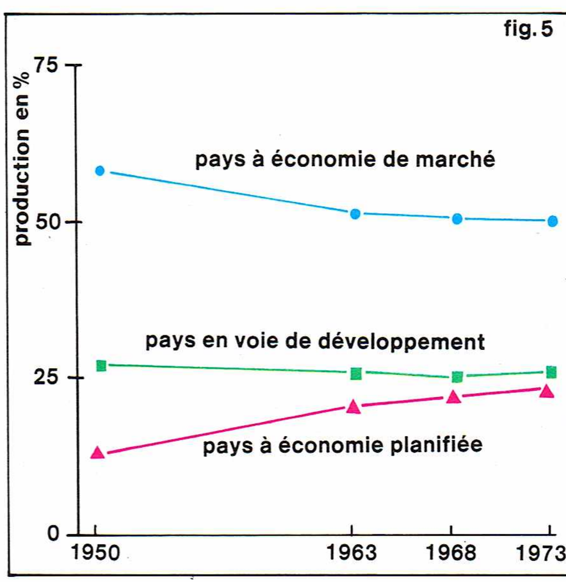

◄ *Figure 5 : évolution de la part relative de chacun des trois grands ensembles de pays dans la production de minerais (d'après* Annales des Mines, *décembre 1975).*

▶ *Figure 6 : consommation de métaux (calculée sur l'ensemble des six métaux principaux : Fe, Al, Cu, Pb, Zn, Sn) par habitant dans les différentes zones du monde. Chaque zone est représentée par une bande dont la largeur est proportionnelle à sa population et dont la hauteur est proportionnelle à sa consommation relative par habitant ; la surface de chaque bande est donc proportionnelle à la consommation globale de la zone (d'après* Annales des Mines, *décembre 1975, pp. 56-57, modifié).*

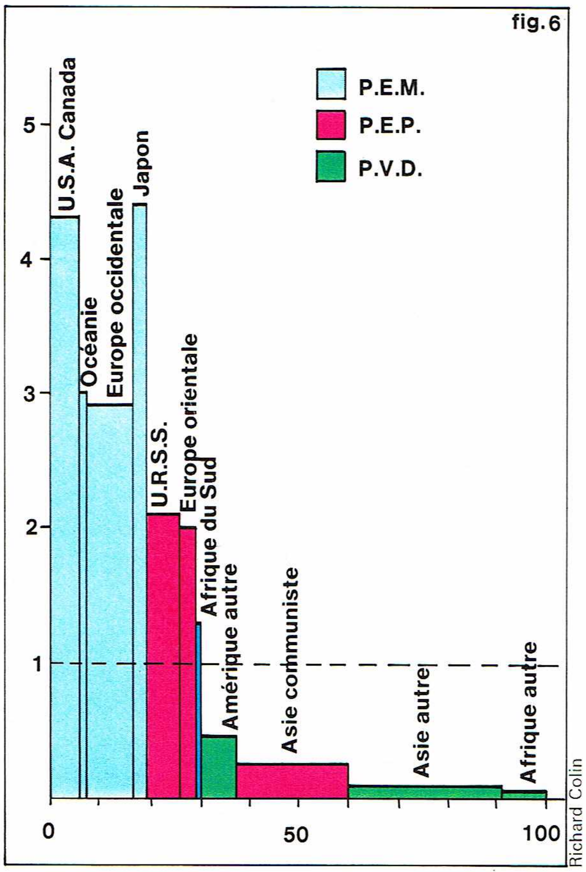

▶ *Tableau X : part des trois grands ensembles de pays dans les exportations mondiales des principaux minerais et métaux en 1970 ; on notera la prééminence générale des pays à économie de marché (P.E.M.), tant dans l'exportation des minerais que dans celle des métaux, et la très faible part des pays à économie planifiée (P.E.P.) dans les échanges mondiaux (d'après le document A/9544/Add. 1 du 3 avril 1974, établi par le secrétariat des Nations unies pour la VI[e] session extraordinaire, cité dans* Annales des Mines, *janvier 1975, p. 27).*

Tableau X
Part des trois grands ensembles de pays dans les exportations mondiales des principaux minerais et métaux en 1970

Minerais et métaux	Valeur des exportations mondiales (en milliards $)	P.V.D. (en %)	P.E.M. (en %)	P.E.P. (en %)
Aluminium				
bauxite	0,29	88	12	—
métal	2,44	5	84	11
Chrome				
minerai	0,10	22	37	41
Cuivre				
minerai	0,56	42	58	—
métal	5,62	44	54	2
Étain				
minerai	0,05	64	36	—
métal	0,60	77	23	—
Fer				
minerai	2,20	42	58	—
Manganèse				
minerai	0,15	51	34	15
Nickel				
minerai	0,48	24	76	—
métal	1,02	7	93	—
Plomb				
minerai	0,12	12	88	—
métal	0,40	11	84	5
Zinc				
minerai	0,25	14	86	—
métal	0,39	12	74	14
Engrais brut	0,45	43	22	35
Ensemble	15,12	33,7	61,8	4,5
dont { minerais	4,65	40,7	54,4	4,9
dont { métaux	10,47	30,6	65,0	4,4

Il faut en premier lieu noter que les chiffres de consommation des pays à économie de marché se trouvent artificiellement gonflés, en ce sens que les statistiques de consommation portent sur des métaux bruts ou raffinés ou des minerais non métalliques préparés et incluent la partie qui en est utilisée pour produire des biens d'équipement et de consommation destinés à l'exportation. Corrélativement, les statistiques de consommation des pays en voie de développement sont sous-évaluées, puisqu'elles ne comprennent pas les produits métalliques importés sous forme élaborée. La disproportion des niveaux de consommation entre pays industriels et pays en voie de développement est donc moins marquée qu'il n'y paraît à l'examen des chiffres bruts.

Si les pays développés restent, globalement, les premiers producteurs de matières premières minérales — quoique cette prééminence ait considérablement décru dans les dernières décennies —, il existe de notables différences entre ces pays, considérés individuellement : la dépendance des États-Unis reste modeste, et l'ensemble Canada-États-Unis, uni par des liens économiques privilégiés, est autonome ou même exportateur pour beaucoup de matières premières ; l'Australie et l'Afrique du Sud sont globalement exportateurs, mais l'analyse de leur production et de leur consommation révèle des disparités : quelques grandes productions (fer, plomb-zinc, bauxite, etc., pour l'Australie, or, diamant, etc., pour l'Afrique du Sud) permettent de larges exportations, et de couvrir, et au-delà, les importations d'autres matières premières. Restent l'Europe occidentale et le Japon, très médiocrement pourvus, et qui doivent s'approvisionner à l'extérieur pour pratiquement toutes les matières premières. La situation de dépendance des pays industriels à économie de marché pourrait cependant s'améliorer, à moyen terme, ou tout au moins ne pas se dégrader davantage : la prospection et le développement miniers tendent depuis quelques années à se reporter davantage sur ces pays, qui garantissent mieux les capitaux investis que ne le font — ou ne seraient supposés le faire dans l'avenir — les pays en voie de développement à vocation minière, et qui deviennent de toute façon plus désireux d'obtenir sur leur territoire les ressources nécessaires à leur industrie. Cette réaction a pris corps, sans doute, à la suite de nationalisations avec compensation financière insuffisante de la part de certains États africains ou sud-américains.

★ En ce qui concerne les pays en voie de développement, la statistique globale indique clairement qu'ils arrivent, dans leur ensemble, assez loin derrière les pays développés à économie de marché, pour ce qui est de la production, tant en valeur qu'en tonnage. De plus, l'examen des statistiques d'exportation de minerais montre que les pays en voie de développement ne parviennent également qu'au second rang, avec 40,7 % des exportations mondiales pour 1970, contre 54,4 % pour le groupe des pays à économie de marché. Il faut donc faire justice à cette idée reçue, fort répandue, selon laquelle les pays en voie de développement seraient le « grenier à minerais du monde » (*tabl.* X).

A moyen terme, il ne semble guère probable qu'intervienne un renversement de cette situation ; les pays à économie de marché demeureront sans doute en tête, même compte tenu du fait que les pays en voie de développement ont davantage de réserves minérales (42 % du total mondial, tous minerais cumulés) que les pays développés à économie libérale (35 %) : cette répartition des réserves identifiées — parmi lesquelles se trouvent les futures mines des prochaines décennies — ne prend pas suffisamment en considération certaines conditions économiques et politiques, qui rendent moins attrayante la mise en exploitation des réserves lorsqu'elles sont situées dans des pays en voie de développement « instables » ou « politiquement peu sûrs » (il s'agit là d'une question de garantie des investissements).

Dans le détail des productions, substance par substance, la position secondaire des pays en voie de développement se confirme. Pour l'année 1973, le recensement des valeurs des productions par pays effectué par F. Callot (1975), concernant quarante-cinq minerais métalliques et non métalliques importants, fait apparaître que l'ensemble « pays en voie de développement » est prédominant pour neuf substances seulement : bauxites (45 %),

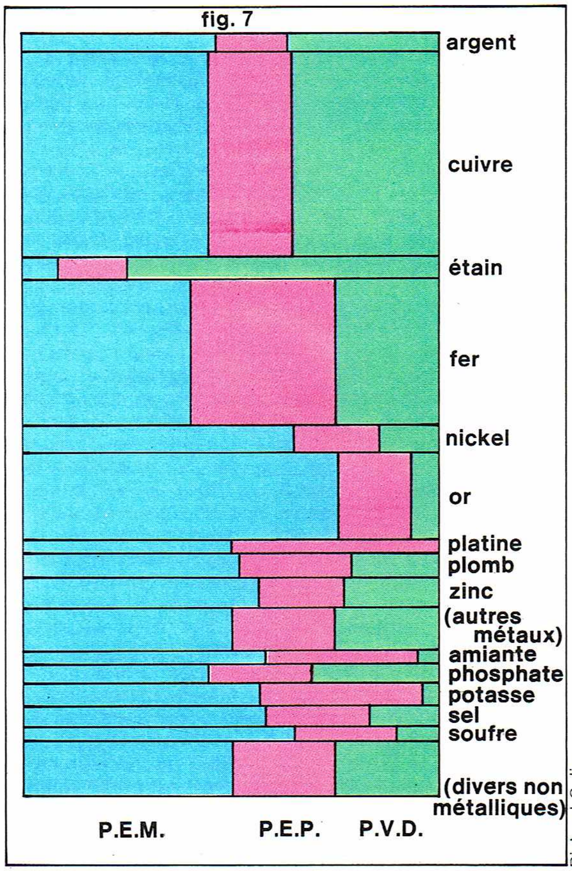

◀ *Figure 7 : part des trois grands ensembles de pays dans la production 1973 des divers minerais (en pourcentage pondéral) ; la hauteur de chaque tranche est proportionnelle à la valeur de la production mondiale pour la substance considérée (d'après* Annales des Mines, *décembre 1975, p. 45).*

minerais d'étain (75 %), d'antimoine (41 %), de cobalt (80 %), de niobium-tantale (84 %), chromite (40 %), phosphates (37,5 %), nitrates naturels (100 %) et diamants (53 %).

Il ne faudrait pas pour autant tenir le rôle des pays en voie de développement pour marginal : leur groupe constitue, pour les pays industrialisés importateurs, le principal fournisseur, avant les pays exportateurs à économie de marché comme le Canada, l'Australie et l'Afrique du Sud. Cette capacité d'exportation est considérable : 80 %, en valeur, de la production minière des pays en voie de développement sont tirés hors de ces pays, et les disponibilités en matières premières minérales ainsi mises sur les marchés sont le moteur de la croissance des grandes nations industrielles européennes et du Japon. En effet, cette croissance repose de plus en plus sur la transformation en produits manufacturés à haute valeur ajoutée de matières premières brutes ou peu élaborées (minerais, concentrés, ou métaux en lingots) importées.

Ce système pourrait être, partiellement au moins, modifié par le fait d'une orientation nouvelle des pays en voie de développement à vocation minière. Ceux-ci transforment peu eux-mêmes leurs minerais (à l'exception de l'étain) et leur capacité d'exportation reflète surtout leur sous-équipement en industries métallurgiques et de transformation, dans l'état actuel des choses. Une évolution se dessine nettement, dans le sens d'une prise en main par les pays miniers en voie de développement, non seulement des activités extractives qui s'effectuent sur leur territoire (question qui fait l'objet du chapitre suivant), mais aussi de la transformation des minerais produits : le désir d'exporter des produits plus élaborés, à valeur ajoutée rémunératrice, plutôt que des substances brutes à faible valeur, est général dans ces pays. Par l'application d'une telle politique d'équipement industriel, les pays en voie de développement entendent améliorer les termes de l'échange avec les pays industriels, en obtenant des ressources d'exportation plus importantes, et en remplaçant par des productions nationales certaines importations. Encore faut-il disposer des moyens de cette politique : des personnels techniques et d'encadrement, des investissements et achats d'équipements importants, des approvisionnements accrus en énergie — éventuellement dépendant de l'extérieur — etc., sont indispensables. Ces moyens peuvent sans doute être réunis, à plus ou moins proche échéance, et progressivement, par les pays en voie de développement les mieux dotés en matières premières minérales (ou énergétiques), qui reçoivent d'importants revenus de l'exportation de leurs productions. Ces pays sont donc susceptibles de parvenir, à terme, à un niveau de développement économique satisfaisant.

Malheureusement, pour la grande majorité d'entre eux, les pays en voie de développement ne possèdent pas de productions minières (ou énergétiques) assez importantes pour obtenir un solde positif du commerce extérieur, et l'expérience montre que l'exportation de produits agricoles — aléatoires en prix et en volume — ne fournit généralement pas des ressources suffisantes (il y a cependant quelques exceptions ; les Philippines, la Thaïlande, le Brésil, etc., enregistrent un solde positif du commerce extérieur grâce à des exportations agricoles : produits végétaux ou animaux à usage alimentaire ou industriel).

On assiste donc à une persistance du sous-développement, et à une paupérisation indubitable des pays les plus pauvres du tiers monde, qui ont été regroupés sous le nom de « quart monde », et dont les fragiles économies nationales sont constamment menacées par de nécessaires importations de produits énergétiques, de biens d'équipement, d'engrais, etc., augmentant en volume, suivant la croissance de la population, et en prix unitaire surtout.

Politique de contrôle des États miniers

C'est au cours de la période 1950-60 qu'apparaît la question du contrôle de l'exploitation et de l'utilisation des ressources minières par les États producteurs, avec les deux premières nationalisations de groupes privés étrangers :

— 1951 : nationalisation des actifs de l'Anglo-Iranian (compagnie exploitant les gisements pétroliers d'Iran) par décision du cabinet Mossadegh ;

— 1952 : nationalisation par le gouvernement bolivien des mines d'étain, appartenant principalement au groupe Patino, qui fournissaient alors la majeure partie de la production mondiale.

Tableau XI
Taux de couverture de la consommation par la production dans les zones économiques du monde en 1973

Zones économiques	Production / Consommation × 100 (en %)
Europe occidentale	27
Japon	8
Europe orientale	45
États-Unis-Canada	91
Asie communiste	115
Afrique du Sud	200
U.R.S.S.	124
Asie autre	290
Océanie	550
Afrique autre	2 280
Amérique autre	430
P.E.M.	61
P.E.P.	103
P.V.D.	525

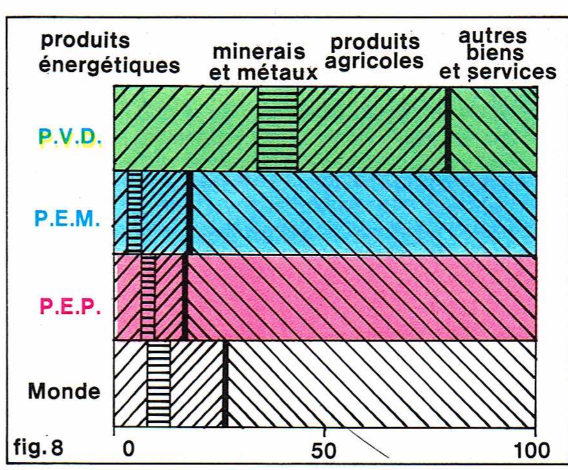

◀ *Tableau XI : taux de couverture de la consommation par la production dans les grandes zones économiques du monde en 1973 (calculée sur l'ensemble des six métaux principaux : Fe, Al, Cu, Pb, Zn, Sn) [d'après* Annales des Mines, *décembre 1975, p. 54]. Figure 8 : importance relative des diverses matières premières dans les exportations de chacun des trois grands ensembles de pays, en 1970. La prépondérance des matières premières dans les exportations des P.V.D. s'oppose à celle des biens manufacturés et services dans les exportations des P.E.M. et P.E.P. (d'après* Annales des Mines, *janvier 1975, p. 29).*

Ces mesures procédaient d'une volonté de ramener sous le contrôle de l'État l'exploitation des ressources minérales, afin de limiter l'emprise des intérêts étrangers, et de faire réintégrer à l'État les bénéfices résultant de l'extraction et de l'exportation de minerais. Cette politique sera très largement reprise — et affirmée comme l'un des éléments du développement national — par les anciennes colonies d'Afrique et d'Asie, après leur accession à l'indépendance : beaucoup de ces nouveaux pays s'assureront rapidement le contrôle plus ou moins strict et total des groupes miniers étrangers exploitant les gisements situés sur leur territoire. Cela explique peut-être que l'on associe souvent très étroitement procédure de nationalisation et accession à l'indépendance, alors que les nationalisations effectuées en Amérique latine (Bolivie, déjà citée, plus récemment Pérou et Chili) et les contrôles accrus décidés par l'Australie et le Canada sont le fait de pays depuis longtemps indépendants.

L'intervention des États peut revêtir des modalités extrêmement diversifiées, reflétant les disponibilités financières, l'idéologie politique et les préoccupations économiques des pays concernés ; on peut y définir en première analyse trois types :

— prise de participation dans le capital des groupes miniers ;

— création d'un monopole d'État pour la commercialisation ;

— nationalisation totale des actifs miniers.

Prise de participation

L'État rachète une partie des actions du ou des groupes miniers qui exercent leur activité minière et éventuellement métallurgique sur son territoire ; le droit d'extraire et de disposer de la production leur est conservé. Sa participation peut être minoritaire, mais est plus souvent paritaire (50 %) ou majoritaire. Cette procédure permet à l'État d'exercer son contrôle sur la gestion de son patrimoine minier, et de percevoir des bénéfices en tant qu'actionnaire, sans avoir à réaliser les opérations lui-même.

Dans certains cas, les capitaux nécessaires à la prise de participation sont d'origine privée, et non pas publique. Cela est rare dans les pays en voie de développement, où les individus ne possèdent qu'exceptionnellement des capitaux suffisants pour constituer un actionnariat privé — à moins encore que celui-ci n'existe pas pour des raisons de régime politique ; les participations privées sont cependant importantes dans quelques pays en voie de développement, parmi les plus riches : Brésil, Mexique, par exemple. En revanche, ce système de participation par capitaux privés est la règle en Australie, puisque des dispositions législatives imposent une présence majoritaire de capitaux locaux privés dans les filiales de groupes miniers étrangers installés en Australie.

Création d'un monopole commercial d'État

Dans ce cas, le contrôle de l'État s'effectue essentiellement en aval de l'exploitation minière, au stade de la vente des produits miniers bruts ou transformés : les sociétés exploitantes sont légalement obligées de céder leur production à un monopole d'État qui en assure seul la commercialisation et l'exportation, à des prix fixés par lui. L'État, possesseur des ressources, en délègue ainsi l'exploitation aux sociétés, tout en limitant leur droit à disposer des substances extraites, ce qui le dispense d'avoir à investir de lourdes sommes dans le rachat d'actifs miniers.

Ce système est beaucoup plus contraignant que la prise de participation ; des monopoles de ce type existent au Pérou, pour tous les minerais et métaux, au Maroc, pour les phosphates, au Canada, pour la potasse : dans le Saskatchewan, où se trouvent de vastes gisements de potasse, le gouvernement provincial a imposé aux producteurs des quotas et un prix plancher pour les exportations. Le Canada revient ainsi sur des dispositions nettement plus libérales, qui avaient été instaurées antérieurement pour favoriser les investissements dans l'exploitation minière et développer ses capacités de production.

Nationalisation des sociétés exploitantes étrangères

La nationalisation consiste en une acquisition par l'État de la majorité ou de la totalité des actifs miniers d'une ou de plusieurs compagnies privées, opérant sur son territoire ; parmi les plus importantes nationalisations survenues depuis 1960, on peut signaler celles qui ont concerné les mines de cuivre au Zaïre, puis au Chili, en Zambie et au Pérou, de bauxite en Guyana (ex-Guyane anglaise) et en Jamaïque, de phosphates au Togo, de fer en Mauritanie, au Venezuela et en Algérie, de manganèse au Gabon.

La nationalisation donne toujours lieu, en droit, au versement d'une indemnité financière équitable aux sociétés expropriées. Cependant, si aucun État n'a jamais dénié, jusqu'à présent, le droit à l'indemnisation, des artifices comptables (retenues de sommes pour bénéfices antérieurs excessifs, malgestion des ressources, par exemple) ont parfois été utilisés pour réduire la compensation due aux groupes nationalisés.

Dans les cas simples, les nationalisations débouchent assez rapidement sur l'obtention d'un « gentlemen agreement » entre les deux parties en présence, des contrats pouvant éventuellement maintenir les anciennes sociétés minières dans certains secteurs bien définis de leur activité antérieure ; c'est le cas du Zaïre, du Chili (première étape de la « chilianisation », à partir de 1954), de la Zambie.

En ce qui concerne cette dernière, par exemple, les négociations pour la nationalisation des mines de cuivre (1969) et de la mine de plomb-zinc de Broken Hill (1971) ont été menées à l'amiable et de façon rapide. L'État zambien n'a repris que 51 % des intérêts des groupes miniers privés (anglais, américains et sud-africains), lesquels sont restés contractuellement associés à lui, au sein d'une entreprise d'État, pour l'extraction, le traitement et la vente des minerais et métaux. A la différence du Zaïre, qui n'a pas encore pu régler le solde des indemnités dues à l'Union minière du Haut-Katanga après sa nationalisation en 1967, la Zambie a effectué de façon diligente les règlements prévus à titre de compensation (il est vrai que ceux-ci portaient sur des sommes bien moins importantes qu'au Zaïre).

Dans d'autres cas (Algérie, Pérou, Chili dans la deuxième phase de la nationalisation), il apparaît des situations de contentieux graves, entre un État trop radical dans ses exigences et des sociétés qui s'estiment lésées ou spoliées ; des actions judiciaires et diplomatiques peuvent être engagées, et le conflit déborde le cadre strict des deux parties en présence. Cependant, même dans les situations les plus difficiles, il y a toujours eu un compromis après des tractations plus ou moins laborieuses, obtenu par l'intervention indirecte ou ouverte d'organismes extérieurs, ou des gouvernements dont les compagnies sont ressortissantes.

Un exemple, parmi les plus marquants, de nationalisation avec conflit est celui des mines de cuivre chiliennes, sous la présidence de M. Allende. La « chilianisation », décidée dès 1964 et appliquée en 1970 sous la présidence de M. Frei, avait donné à l'État chilien, sans grands heurts, des participations minoritaires ou majoritaires dans les exploitations de cuivre appartenant aux trois groupes américains (Kennecott Copper Corporation, Anaconda, Cerro Corporation). En 1971, le nouveau régime décide une expropriation totale de ces compagnies qui seront indemnisées sur la base de la valeur comptable de leurs biens, corrigée par des retenues tenant compte de la vétusté des équipements, de la valeur ajoutée par l'État chilien depuis sa prise de participation, et surtout des « bénéfices antérieurs excessifs » des compagnies. La procédure entre celles-ci et l'État chilien s'engagea lorsque furent connus les montants de ces déductions, montants tels que les compagnies se trouvaient, en fin de compte, débitrices vis-à-vis du Chili. Ainsi, pour sa mine d'El Teniente, évaluée à 320 millions de $, la Kennecott était finalement redevable de 310 millions de $. Deux années plus tard, lors du renversement gouvernemental au Chili, le conflit demeurait entier ; la Kennecott avait engagé des actions judiciaires en vue d'obtenir la mise sous séquestre de cargaisons de cuivre chilien arrivées dans les ports des pays consommateurs, en manière de rétorsion, actions qui restaient en cours. L'intervention du gouvernement américain et des créanciers extérieurs du Chili a conduit en 1974 à un compromis, et il semble que le contentieux soit en cours de résolution : des accords d'indemnisation ont été conclus en effet entre les trois compagnies nationalisées et l'État chilien.

Ces difficultés expliquent le souci croissant qu'ont les compagnies minières de garantir leurs investissements à

l'étranger; plusieurs tendances se manifestent, selon que ceux-ci vont être ou sont réalisés :

— report des investissements dans des pays plus « sûrs », en particulier et depuis plusieurs années le Canada et l'Australie. Mais ces pays, comme on l'a déjà signalé, ont resserré le contrôle sur l'exploitation de leurs ressources et deviennent eux aussi moins attrayants (le Canada a même procédé assez récemment, par l'intermédiaire d'une entreprise publique, à la prise en main d'actifs canadiens de la Texas Gulf, compagnie américaine spécialisée dans l'exploitation du soufre, pour limiter dans ce secteur de l'industrie minérale l'implantation des capitaux étrangers) ;

— intervention des compagnies exploitantes auprès des États dont elles dépendent juridiquement, afin que ceux-ci concluent, avec les États producteurs où travaillent ces compagnies, des protocoles intergouvernementaux de garantie des investissements et actifs miniers. Ce processus a été mis en application entre la France et certains des pays étrangers dont des ressources sont mises en valeur par des entreprises françaises;

— souscription par quelques compagnies de polices d'assurance auprès d'organismes spécialisés, couvrant le risque de spoliation ou d'indemnisation partielle à la suite de nationalisations. Les groupes américains expropriés de leurs mines de cuivre au Chili ont ainsi reçu plusieurs dizaines de millions de $.

Les groupements de pays producteurs

La nationalisation des entreprises minières donne aux États producteurs le contrôle de l'extraction et de la commercialisation de leurs ressources, et leur assure des bénéfices, plus ou moins importants selon les cours des marchés internationaux, résultant de la vente des minerais ou métaux obtenus. Mais les États peuvent être désireux d'étendre leur emprise aux marchés eux-mêmes, en fixant les prix, afin de vendre dans les conditions les plus favorables pour eux.

Il est fort rare qu'un État isolé se trouve en position de force telle qu'il puisse imposer unilatéralement le prix de vente de ses matières premières; le cas du Maroc, qui couvre près de la moitié des exportations mondiales de phosphates, a été assez exceptionnel à cet égard. En revanche, regroupés judicieusement, les pays producteurs peuvent être en mesure d'imposer leur volonté. Ces regroupements d'États producteurs sont qualifiés de cartels ou d'ententes, et ont été légitimés dans les documents adoptés lors de la VI^{e} session spéciale de l'Organisation des Nations unies (1974), puis dans la charte des « Droits et Obligations des États », signée en décembre 1974 à l'O.N.U. Il est évident que certaines puissances industrielles eussent vivement souhaité que cette reconnaissance des cartels n'eût pas lieu. Mais il faut noter que la constitution d'ententes de pays producteurs avait été depuis longtemps précédée par celle d'ententes de producteurs privés, dans quelques secteurs des matières premières minérales et énergétiques dont ils régissaient la production, la transformation et/ou la commercialisation.

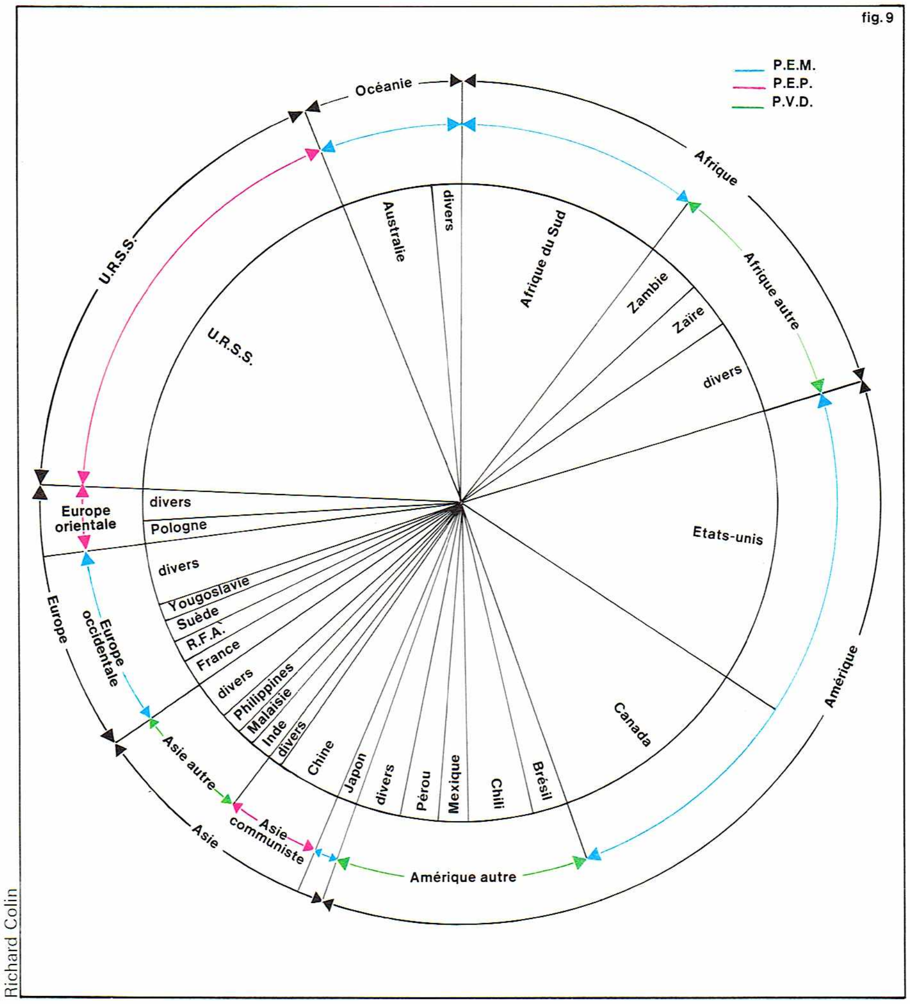

Richard Colin

▲ *Figure 9 : part des divers pays dans la production mondiale de minerais métalliques et non métalliques (en % de la valeur totale) [d'après Annales des Mines, décembre 1975, annexe II].*

Camera Press - Parimage - Marion Kaplan

◀ *Une mine de cuivre à ciel ouvert à Kolwezi dans la province du Shaba au Zaïre ; le Zaïre appartient au Conseil intergouvernemental des pays exportateurs de cuivre (C. I. P. E. C.).*

Conditions de formation et objectifs des cartels

Une entente de producteurs a pour objectifs de contrôler le marché international des matières premières exportées et de fixer les prix à un niveau plus rémunérateur pour les États membres. Ceci ne peut être atteint qu'à trois conditions :

— que les pays membres du cartel aient ensemble, au plan des exportations, une position de force réelle. En pratique, il leur faut contrôler au moins la majorité des tonnages disponibles à l'exportation ;

— qu'une unité assez marquée existe entre ces pays, sur le plan des structures politiques et des motivations économiques, pour que les décisions prises le soient de façon coordonnée. Il va de soi que plus les producteurs sont nombreux et diversifiés dans un cartel, et plus les risques de dissensions sont importants ;

— que la substance faisant l'objet de l'entente ne soit pas susceptible d'être produite en remplacement à court terme par d'autres pays demeurant à l'extérieur du cartel.

Types de cartels

Cartels de pays en voie de développement

Seuls des pays en voie de développement font partie de l'entente ; leurs ressources proviennent essentiellement de la vente d'une substance dont ils entendent retirer un bénéfice important permettant le développement de leur économie nationale.

L'O.P.E.P. (Organisation des pays exportateurs de pétrole) est l'archétype de ce genre d'entente. Dans le domaine des minerais et métaux, un bon exemple est celui du C.I.P.E.C. (Conseil intergouvernemental des pays exportateurs de cuivre) qui regroupe le Chili, le Pérou, le Zaïre et la Zambie, soit les quatre principaux pays en voie de développement, producteurs de cuivre, qui assurent 35 % de la production et 60 % des exportations de ce métal dans le monde.

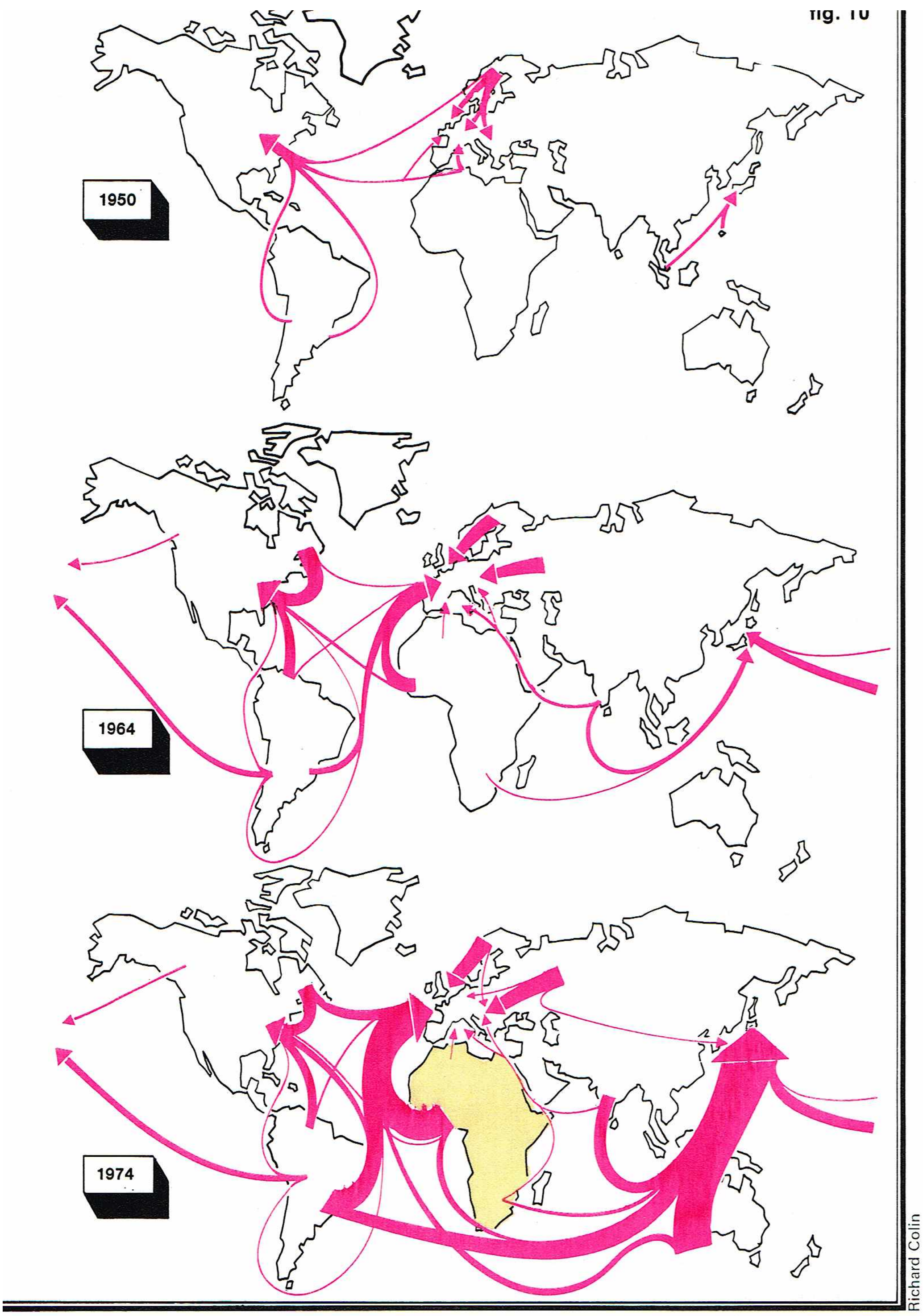

▲ *Figure 10 : principaux courants d'exportation des minerais de fer dans le monde en 1950, 1964 et 1974 (d'après les rapports annuels de la L. K. A. B.).*

La création du C.I.P.E.C., en 1967, avait été motivée en grande partie par les effets désastreux, pour ces producteurs en particulier, de la profonde dépression des cours du cuivre en 1966 et au début de 1967, contre laquelle ils n'avaient, isolés, aucune possibilité d'action. Les statuts du C.I.P.E.C. mettent en relief la volonté des pays membres d'harmoniser leur politique et leurs plans de développements miniers, d'établir des conditions de marché qui leur soient plus favorables, et de coordonner leurs politiques commerciales. L'action du C.I.P.E.C. a permis de parvenir à certains de ces objectifs, grâce notamment à la cohésion entre ses membres, mais il reste des aspects négatifs : la proposition d'établir un prix plancher du cuivre n'a jamais pu être concrétisée, et les restrictions des ventes du C.I.P.E.C. n'ont pu enrayer véritablement la chute des cours à partir du deuxième semestre de 1974, consécutive au marasme économique des industries occidentales et japonaises.

Cartels mixtes

L'exemple en sera fourni par l'I.B.A. *(International Bauxite Association)* qui comprend, côte à côte, des pays en voie de développement : Jamaïque, Surinam, Guyana, Guinée et Sierra Leone, et deux pays développés : Yougoslavie et Australie, l'ensemble de ces sept pays intervenant pour 75 % dans la production de bauxite du monde non communiste (et pour 4 % seulement dans celle de l'aluminium). La France, producteur important (5e rang mondial) mais non exportateur, n'avait pas été invitée aux réunions de constitution de l'I.B.A., en 1973 (Belgrade) et mars 1974 (Conakry).

La faiblesse de l'I.B.A. découle de la disparité des préoccupations des producteurs, dont certains tirent l'essentiel de leurs ressources de l'exportation de la bauxite, alors que, pour d'autres, cette production n'est qu'accessoire et ne revêt pas d'importance vitale ; de la disparité des mesures prises individuellement par les producteurs avant, mais aussi après, la conférence de Belgrade vis-à-vis des compagnies exploitantes (imposition des bénéfices à 70 % en Guinée, taxe à l'exportation avec quota d'enlèvements en Jamaïque, prise de participation majoritaire en Australie, projet de nationalisation puis relèvement de la taxe à l'exportation en Guyana, etc.) ; et enfin, du fait que les pays producteurs dépendaient des compagnies traitantes pour les débouchés de la bauxite, faute de pouvoir investir les sommes considérables qu'aurait exigées l'installation de capacités de production d'aluminium suffisantes pour utiliser sur place la bauxite.

Un rapprochement entre les exportateurs de minerais de fer s'est amorcé en 1974, présentant bien des traits communs avec l'I.B.A. : la présence de trois pays développés grands producteurs (Australie, Canada, Suède) aux côtés de seize pays en voie de développement, et des divergences de conceptions entre les pays, quant aux mesures à adopter. Il semble que la sous-consommation de minerais de fer, due à la crise sidérurgique depuis 1975, ne place guère les producteurs en situation favorable pour augmenter fortement les prix.

Autres rapprochements en cours, évolution de la cartellisation

Six producteurs de mercure : Algérie (instigatrice de la réunion), Espagne, Italie, Turquie, Yougoslavie et Mexique, ont décidé en 1974 de relever le prix de leur production, mais cette décision n'a pu se concrétiser, eu égard à la mévente qui sévit pour ce métal. Les prix réellement pratiqués restent très inférieurs aux prix affichés. Mais un contrôle des tonnages mis sur le marché pourrait être décidé, pour soutenir les cours grâce à une diminution de l'offre.

Le regroupement intervenu en 1974 entre certains États et des sociétés privées, producteurs de tungstène, est un cas original. Le but recherché est, apparemment, de promouvoir une meilleure connaissance du marché, sans qu'il soit question (pour le moment !) d'une action autoritaire sur les prix.

La multiplication récente des ententes, notamment en 1974, pourrait laisser prévoir une généralisation de ce type de structure dans l'avenir. (D'autres cartels se constituent, certains avec difficulté, en ce qui concerne des matières premières non minérales, également.) Une cartellisation n'est pas exclue pour des productions minérales telles que le tungstène, l'antimoine, l'amiante, les terres rares, le cobalt, etc., d'autant plus que la Conférence des Nations unies sur le Commerce et le Développement offre son égide à des réunions de producteurs.

Mais le nombre de matières premières minérales pour lesquelles un ensemble homogène de producteurs pourrait imposer unilatéralement et efficacement ses décisions reste très limité. L'exemple de l'O.P.E.P. est, en ce sens, exceptionnel.

Prix et marchés des matières premières minérales

Les mécanismes de fixation des prix des matières premières minérales sont très divers, selon la nature des substances échangées, leur provenance, l'identité des vendeurs et des acheteurs : producteurs indépendants, groupes multinationaux, entreprises d'État, groupements d'importation, organismes d'import-export, courtiers.

Les marchés, qui sont l'expression concrète, sur le plan commercial, de ces mécanismes — et en reflètent donc la diversité —, se rattachent en première analyse à deux catégories bien distinctes par les modalités de leur fonctionnement : marchés « libres », animés par un grand

nombre de professionnels, où les prix fluctuent au jour le jour, marchés « fermés », qui ne concernent que des protagonistes relativement peu nombreux, et pour lesquels les prix, fixés contractuellement ou unilatéralement, sont stables à court ou moyen terme (quelques semaines à un an, en général). Le premier type correspond aux bourses des métaux, le second est représenté par les marchés dits oligopolistiques, captifs, et de gré à gré.

Les matières premières qui font l'objet de ces marchés ne sont pas échangées uniquement sous leur forme brute naturelle, bien au contraire; sauf pour les bauxites, les minerais de manganèse et de fer à haute teneur, et quelques minerais non métalliques, les transactions portent généralement sur des concentrés ou des métaux bruts ou affinés.

La teneur des minerais et concentrés et la pureté des métaux sont variables, et il en est tenu compte, évidemment, dans toutes les cotations, où sont répertoriés, selon les cas :

— des gammes de prix, chacun d'eux correspondant à une qualité de la substance ; pour l'amiante, par exemple, dix qualités (producteurs du Québec) sont cotées en fonction de la longueur des fibres, les prix s'échelonnant de 115 à 1 325 $ par tonne ;

— des prix par unité pondérale de métal ou d'oxyde contenu dans un concentré : les prix des concentrés de molybdénite (sulfure de molybdène) de la mine de Climax (aux États-Unis, la plus importante du monde) sont donnés en U.S. $ par livre anglaise de molybdène contenu, ce qui permet d'ajuster le prix de vente de la tonne de concentré en cas de variation de sa teneur ;

— des prix par unité de tonne, pour certains minerais ou concentrés métalliques — l'unité de tonne équivaut à 1/100 de tonne : selon les pays, il s'agit de tonne métrique, de tonne longue de 1 016 kg (au Royaume-Uni surtout) ou de tonne courte de 907 kg (marchés américains) ; le prix d'une tonne d'un minerai est le produit de sa teneur en pour cent par le cours en $, £ ou F de l'unité de tonne : ainsi, un minerai de manganèse à 48 % Mn, coté 1,50 $/unité de tonne longue, vaudrait 1,50 × 48 = 72 $/tonne longue, soit environ 345 F/tonne métrique.

Il faut enfin noter que les prix auxquels sont négociées les matières premières dans le monde peuvent, selon les cas, inclure ou non les frais de livraison. Dans le premier cas, les prix sont dits c. a. f. (« coût, assurance et fret », par analogie avec l'abréviation anglaise c. i. f. : *cost, insurance & freight*) et comprennent donc, outre le prix de la marchandise elle-même, celui du transfert jusqu'au port de destination finale, assurance comprise. Dans le second, les prix sont qualifiés de f. o. b. (*free on board :* « rendu à bord »), et le prix convenu ne comporte, en sus de celui de la marchandise, que les frais d'acheminement du lieu de production au navire désigné par l'acquéreur. En règle générale, les statistiques du commerce extérieur d'un pays recensent en prix c. a. f. les matières premières importées, et en prix f. o. b. celles dont le pays est producteur.

Les types de marchés

Les marchés libres

L'exemple le plus typique en est le *London Metal Exchange* (bourse des métaux de Londres). Cette institution est, dans son fonctionnement, très comparable aux bourses des valeurs mobilières, en ce sens qu'il ne s'y traite généralement qu'une très petite fraction des quantités physiques de métal disponibles à la vente à un moment donné (de même qu'à la corbeille de la Bourse, l'ensemble des actions échangées journellement ne constitue qu'une part infime du capital des sociétés cotées) et que les ordres d'achat et de vente peuvent y être donnés au comptant : livraison le lendemain de l'opération (cette formule est assez peu usitée au L.M.E.), ou à terme : la livraison est différée, le délai maximal étant de trois mois. Seules sont publiées les cotations au comptant et à trois mois. En pratique, il n'y a pas toujours livraison effective du métal acheté au terme, qui peut être plus ou moins rapidement revendu sans qu'il ait, à un quelconque moment, transité chez son acquéreur.

Le marché d'étain de Penang (Malaisie) présente une caractéristique originale, par rapport aux bourses *stricto sensu :* les opérations, qui portent exclusivement sur

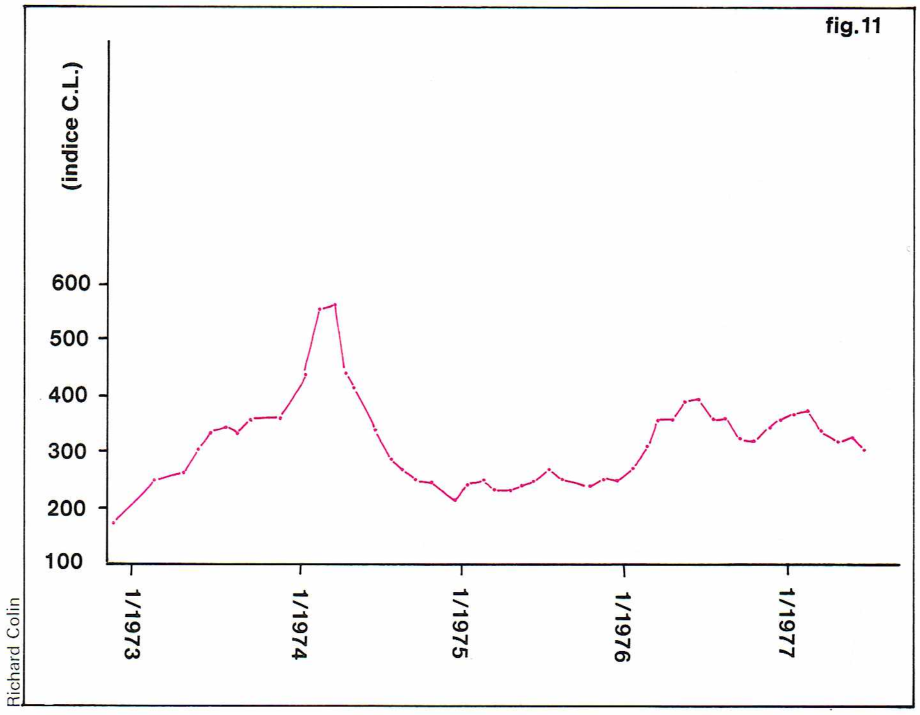

▲ ***Figure 11 : évolution de l'indice mensuel des cours du cuivre à la bourse des métaux de Londres entre janvier 1973 et juillet 1977 (la base 100 équivaut au cours moyen de 1961).***

l'étain métal (au titre de 99,9 %), n'y sont admises qu'au comptant ; il y a donc enlèvement immédiat des stocks de métal acquis, mais eu égard aux délais du transport maritime de Malaisie vers les États-Unis et l'Europe (principaux consommateurs), la réception n'intervient que cinq ou six semaines après l'achat. Penang est aussi l'un des rares exemples de cotations de matières premières effectuées non sur une place financière internationale, mais sur le principal lieu de production mondial.

Le rôle du *London Metal Exchange* est de rendre compte, d'une façon centralisée, et au jour le jour, des prix auxquels les quatre principaux métaux non ferreux (cuivre, étain, plomb, zinc) sont offerts et recherchés. Ces prix reflètent donc à tout moment les fluctuations à très court terme du marché international, et constituent une référence pour la plupart des contrats d'échange de ces métaux dans le monde (sauf aux États-Unis), qui utilisent les cours du L.M.E. comme base d'indexation. Par ailleurs, le L.M.E. permet aux industriels transformateurs de métaux d'ajuster le prix d'acquisition des lingots et le prix de vente des produits transformés, grâce à des achats effectués à un terme judicieusement choisi. En effet, les produits métallurgiques sont souvent négociés à un prix indexé sur le cours du L.M.E. au jour de la vente ; il suffit alors à l'industriel, si la durée de fabrication d'une livraison complète est de deux mois, d'acheter le métal brut à deux mois de terme pour se prémunir contre toute distorsion des prix d'achat et de vente, et maintenir un écart rémunérateur.

Ces remarques sur le L.M.E., qui pourraient s'appliquer aussi bien aux bourses des métaux en général, pourraient laisser supposer que leur rôle essentiel est de régulariser les marchés métalliques. Cela n'est que très peu vérifié : comme à la corbeille des valeurs mobilières, bon nombre d'opérations réalisées au terme sont purement spéculatives ; cette présence de capitaux spéculatifs est cependant nécessaire, au moins en partie, pour maintenir l'équilibre financier entre les ventes et les achats journaliers, les quantités concernées étant souvent fort éloignées l'une de l'autre, surtout en période de tension sur les marchés.

En pratique, ce caractère fortement spéculatif fait que les cours subissent, d'un jour sur l'autre, des variations très vives et aléatoires, génératrices de graves désordres sur les marchés des métaux cotés (et, par contrecoup, sur ceux des autres matières premières et produits métalliques indexés sur les cours boursiers). Les opérateurs anticipent en effet toujours sur l'évolution des cotations, et cela ne peut qu'en amplifier la tendance à la hausse ou à la baisse. Cela rend compte d'ailleurs de certains écarts, parfois considérables, existant entre les cotations du L.M.E. et les prix producteurs d'un même métal (on appelle prix producteurs les prix auxquels les fondeurs de

▶ ***Figure 12 : évolution mensuelle des prix du marché du zinc en 1973 et 1974 ; noter la hausse des cours à la bourse des métaux de Londres dès le deuxième semestre 1973, lorsque le prix des producteurs américains était bloqué (d'après*** Annales des Mines, ***janvier 1975, p. 42).***

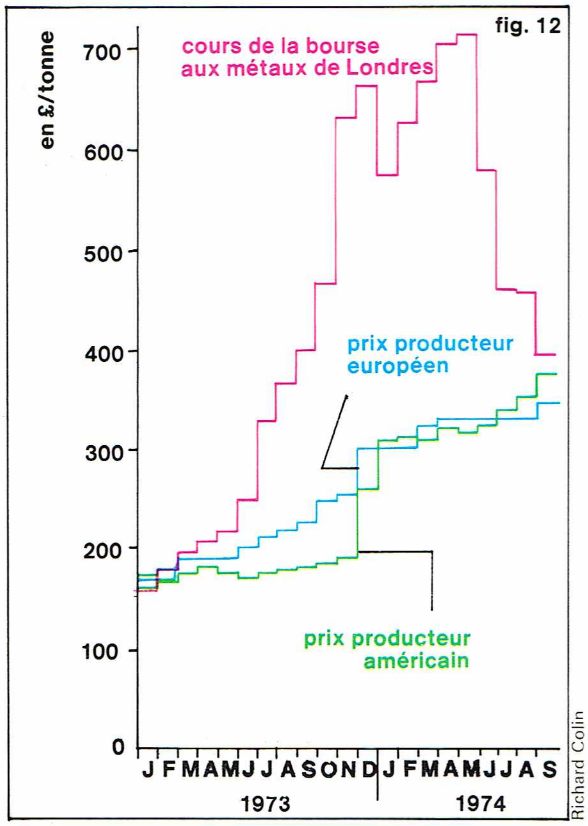

non-ferreux vendent effectivement leur production de métal). Les cotations du zinc ont récemment fourni un exemple de ces distorsions, à la fin de 1973 et au début de 1974, les cours au L.M.E. s'élevant au-delà du double des cours des producteurs américain et européen (*fig.* 12).

Cette instabilité quasi permanente à court et moyen terme des prix boursiers est préjudiciable aussi bien aux producteurs de minerais et de métaux qu'aux industriels utilisateurs : elle contrecarre la réalisation des programmes d'investissement des exploitants miniers ; elle empêche les transformateurs de métaux de déterminer des prix fermes pour leurs productions à moyen terme ; enfin, et surtout, elle a des conséquences parfois catastrophiques sur l'économie nationale des États producteurs de minerais, lorsque ceux-ci en tirent l'essentiel de leurs revenus d'exportation (ainsi, la part des minerais et métaux dans l'ensemble des exportations est, en valeur, de 97 % pour la Zambie, 86 % pour le Chili, 72 % au Zaïre, trois producteurs exportateurs majeurs de cuivre, de 55 % pour la Jamaïque, second producteur mondial de bauxite, etc.). En période de dépression des cours, la valeur des exportations chutant, ces pays doivent, ou réduire leurs achats de biens d'équipement, ou recourir à l'emprunt. Dans un cas comme dans l'autre, cela est préjudiciable à leur développement.

La stabilisation du pouvoir d'achat des recettes d'exportation est une des revendications essentielles des pays en voie de développement, producteurs de matières premières.

Ainsi, bien que les marchés libres ne concernent directement qu'une fraction très marginale des échanges de matières premières métalliques, ils ont une action indirecte fort importante sur les économies nationales.

Les marchés de gré à gré

Ils se caractérisent par des prix librement négociés entre les partenaires concernés — producteurs miniers et consommateurs industriels —, dans le cadre de contrats à moyen terme (le plus souvent d'une durée d'un an, parfois davantage). L'originalité de ce système réside donc dans ce mécanisme bipartite, concerté, d'établissement des termes de l'échange.

Les avantages du marché de gré à gré sont évidents, pour les deux parties :

— producteurs et consommateurs n'ont pas à pâtir des incertitudes pesant sur le niveau des cours des bourses ni des opérations spéculatives ;

— les producteurs sont assurés de prix rémunérateurs, et d'enlèvements fermes et réguliers : ils disposent donc ainsi de revenus d'exportation déterminés dans le temps, ce qui permet de suivre des programmes d'investissement à moyen terme et de favoriser le développement économique de ces pays ;

— les clients ont une garantie de fait, sinon de droit, contre toute hausse brutale et immodérée des prix, qui placerait *ipso facto* le producteur prenant l'initiative d'une telle mesure en situation non concurrentielle vis-à-vis des autres exportateurs ;

— enfin, en cas de modification drastique des conditions économiques, des clauses de révision permettent d'adapter les termes des contrats en cours.

Pour que ce type d'accord puisse se réaliser, et fonctionner de façon satisfaisante, quelques conditions doivent être réunies :

— producteurs peu nombreux, sans prédominance marquée de l'un d'eux,

— acheteurs peu nombreux également,

— existence de bonnes relations entre ces partenaires,

— connaissance précise de l'offre et de la demande, et de l'évolution de la consommation et des capacités de production.

Ces conditions sont en même temps la source potentielle d'une certaine fragilité de l'équilibre — entre les producteurs eux-mêmes, et entre ceux-ci et leurs clients — nécessaire au maintien de ces accords de gré à gré. En effet, que le nombre des partenaires augmente, et la diversité des intérêts particuliers en cause fera de même, très vraisemblablement, d'où des risques de dissension accrus lors de la négociation des contrats. *A contrario,* si l'un des producteurs, ou des utilisateurs, arrivait à se trouver en nette position de force vis-à-vis des autres partenaires, la tentation serait grande pour lui d'imposer des conditions d'échange satisfaisant exclusivement ses intérêts propres : le marché acquerrait alors une structure oligopolistique.

Le commerce international des minerais de manganèse, qui est régi par des contrats (généralement annuels) de gré à gré, en constitue un exemple typique. Six pays : Union soviétique, République sud-africaine, Gabon, Brésil, Australie et Inde, réalisent près de 95 % de la production mondiale, mais les cinq derniers, seulement, sont des exportateurs importants, responsables de l'approvisionnement de l'ensemble du monde non communiste (soit une demande annuelle moyenne de l'ordre de 12 millions de tonnes). Quatre importateurs : États-Unis, Japon, République fédérale d'Allemagne et France (c'est-à-dire les quatre « grands » de la sidérurgie) absorbent les 2/3 du minerai disponible. La production de fonte Spiegel et de ferromanganèse (utilisatrice de 85 % du minerai, en tonnage, le solde étant livré à la chimie : sels, oxyde pour accumulateurs électriques secs) y est concentrée entre les mains de quelques grands groupes industriels, et les acheteurs sont donc peu nombreux (ce nombre est d'autant plus restreint que les utilisateurs de minerais peuvent se regrouper, c'est le cas notamment en France, et faire négocier au mieux par un intermédiaire unique les contrats d'approvisionnement nécessaires à l'ensemble de la profession).

En pratique, le producteur unique gabonais (Compagnie minière de l'Ogooué) et le groupe sidérurgique allemand Thyssen jouent le rôle de chefs de file pour la fixation contractuelle des prix des livraisons, dont le niveau sert de référence pour la négociation des autres contrats, y compris de minerais non gabonais.

Les écarts de prix entre les différents marchés restent modestes ; ceux que l'on constate sur la tonne de minerai marchand sont à imputer essentiellement à des inégalités de teneur (le minerai est payé à l'unité de tonne de manganèse), et de distance de transport maritime (les prix de base sont f.o.b. Pointe Noire).

Les marchés oligopolistiques

Ces marchés sont entièrement dépendants, tant en ce qui concerne le niveau des prix que l'ampleur des livraisons, de la politique unilatéralement imposée par une société minière puissante et, en règle générale, intégrée verticalement (c'est-à-dire procédant elle-même à l'extraction, à la concentration et à la fusion du minerai, à l'affinage du métal et parfois à l'élaboration de demi-

produits), politique sur laquelle s'aligne celle des autres producteurs, très peu nombreux et d'importance plus ou moins subordonnée.

Malkin et Sarbib (1975) notent que « les raisons d'une telle situation (...) peuvent tenir à l'avance technologique qu'une entreprise a acquise par rapport à ses concurrentes. La rente qu'elle détient de ce fait lui permet d'abaisser ses prix, tout en les maintenant à un niveau rémunérateur, de façon à éliminer ses concurrents moins favorisés. La même situation peut se présenter lorsqu'une société exploite des gisements sensiblement plus riches ou plus faciles à traiter, ou lorsqu'elle a, à sa disposition, un marché vaste et protégé lui permettant de se développer à l'abri de la concurrence ».

Les matières premières minérales dont les structures de production et de vente suivent ce schéma sont assez rares; il est en effet peu commun que l'essentiel des réserves d'une substance donnée ne soit réparti qu'entre quelques gisements majeurs, détenus par un, deux ou trois groupes miniers. On peut citer comme marchés oligopolistiques :

— *le marché du molybdène,* dominé par la compagnie américaine AMAX, qui exploite en particulier l'énorme porphyre molybdifère de Climax, Colorado (minéralisation analogue au type « porphyre cuprifère », mais dans laquelle le cuivre est subordonné par rapport au molybdène). Le minerai a une teneur de 0,18 % Mo, ce qui est considérable, et des réserves qui ne le sont pas moins : l'exploitation est un modèle de valorisation complète d'une « roche-minerai », puisqu'on y récupère aussi des concentrés de tungstène, d'étain, de cuivre, de zinc, de divers minerais non métalliques, etc. AMAX, qui fournit à elle seule près du tiers de la production mondiale et plus de la moitié de celle des États-Unis, a l'initiative totale de la fixation des prix;

— *le marché du platine,* contrôlé par la société sud-africaine Rustenburg Platinum Mines, détentrice des seuls gisements importants à platine dominant du monde occidental. Les autres groupes miniers : Impala Platinum et Western Platinum (filiale de Falconbridge) en Afrique du Sud, et au Canada INCO, Falconbridge et Sheritt Gordon, n'ont qu'une place secondaire. La république d'Afrique du Sud et l'Union soviétique (qui exploite surtout des placers) se répartissent 91 % de l'extraction mondiale de platine, mais la première est de loin le principal exportateur;

— *le marché du nickel,* dont trois groupes d'envergure internationale se partagent l'extraction dans le monde occidental : INCO (= *International Nickel Company,* qui assure 50 % des ventes mondiales de nickel pur), et Falconbridge qui exploitent au Canada des minerais sulfurés, et la Société métallurgique le Nickel-S.L.N., qui utilise les minerais silicatés de Nouvelle-Calédonie (et reste le premier producteur mondial de ferronickel, cet alliage étant obtenu directement au terme du traitement pyrométallurgique du minerai silicaté garniéritique).

Ce dernier exemple est le plus typique. L'INCO, bien qu'apparue après la S.L.N., s'est rapidement développée grâce aux particularités du minerai de Sudbury : valorisation facile, teneur assez élevée, présence de coproduits aisément récupérables et rémunérateurs (cuivre, argent et platine en particulier), et à sa politique financière et commerciale, consistant à fixer les prix à un niveau tel que l'entreprise dégage de substantiels bénéfices (pour l'exercice 1973, 230 millions de $ can. de bénéfices, pour un chiffre d'affaires de 1 milliard de $ can.) permettant un autofinancement à 100 % des investissements, mais que la mise en valeur de nouveaux gisements, dont l'exploitation pourrait concurrencer l'INCO, reste non rentable. Sur ce dernier point, l'INCO a partiellement échoué — puisque la société Falconbridge a réussi à s'implanter fortement sur le marché du nickel — mais elle reste maître de la fixation des prix pour l'ensemble des ventes de ce métal dans le monde.

Ce système, parfaitement conforme aux intérêts du producteur majeur, présente divers inconvénients, en particulier une incertitude, pour les acheteurs, quant à l'évolution à moyen terme des prix, l'initiative de toute révision appartenant à l'INCO : à des périodes de stabilité parfois longues, peuvent succéder coup sur coup des hausses importantes, un risque de blocage de la recherche, et surtout du développement de nouvelles ressources; en revanche, les utilisateurs ont une garantie de fait que tout relèvement exorbitant de prix par l'INCO est exclu, car les producteurs concurrents pourraient, en n'appliquant pas — ou en n'appliquant que partiellement — cette hausse, renforcer facilement leur position sur les marchés internationaux, aux dépens de l'INCO (cela est encore plus vérifié dans le cas inverse : relèvement de prix par les producteurs secondaires, non suivi par l'INCO).

Les marchés captifs

Une matière première minérale fait l'objet d'un marché qualifié de captif lorsque les transactions la concernant s'effectuent entre des sociétés filiales d'un même holding, à un prix de cession fixé par celui-ci (dit « prix d'ordre »). (On entend par *holding* toute société — privée ou d'État, selon l'origine des capitaux — qui détient tout ou partie des actions d'autres sociétés, effectue les opérations financières relatives à ces filiales, et en dirige l'activité).

Les marchés captifs ne concernent pas exclusivement des matières minérales brutes; ils régissent souvent tous les échanges intervenant dans une filière minérale, du minerai au produit fini métallurgique. Typiquement, un holding minier sera constitué d'un certain nombre de filiales, engagées chacune dans une activité spécifique : les unes assurent l'extraction minière et vendent le minerai ou le concentré à d'autres, qui produisent le métal brut et le rétrocèdent, encore plus en aval de la filière, aux filiales effectuant la transformation; dans certains cas, cette intégration s'étend jusqu'à la commercialisation des produits finis auprès des utilisateurs finals (intégration dite « verticale »), et à plusieurs filières minérales.

La production de l'aluminium consommé en France — avec toutes les opérations préalables que cela suppose — est ainsi sous le contrôle d'un holding d'envergure internationale (Péchiney-Ugine-Kuhlmann).

De même, pratiquement tout le commerce du métal utilisé hors des pays à économie planifiée est assuré par six grands groupes, qui possèdent les 3/4 des capacités de production d'aluminium.

La large extension de ces holdings, internationale (dispersion des actifs dans de nombreux pays) et industrielle (contrôle d'activités minières, industrielles et commerciales diversifiées), leur donne une certaine insensibilité vis-à-vis de conditions économiques défavorables, soit locales : alourdissement de la fiscalité imposée par les pays producteurs aux sociétés exploitant sur leur territoire, nationalisation d'actifs miniers étrangers, dépression de l'économie dans un pays, etc.; soit sectorielles : marasme commercial pour tel ou tel produit, élévation des coûts opératoires dans une activité donnée, etc. En effet, lorsqu'une filiale locale ou un secteur industriel se trouve en difficulté, cela ne compromet généralement que fort peu l'activité générale du groupe.

Les transactions s'effectuant à prix d'ordre, de façon interne aux holdings, il n'y a pas de marché libre, ni de cotisations internationales pour la bauxite et l'alumine. Pour l'aluminium en lingots, il existe un marché libre, animé par quelques opérateurs indépendants, mais son importance financière et quantitative est négligeable, trop faible pour constituer une référence internationale.

Les holdings ont tout avantage à fixer à des niveaux artificiellement et arbitrairement bas les prix d'ordre de la bauxite et de l'alumine. En 1972, par exemple, la bauxite

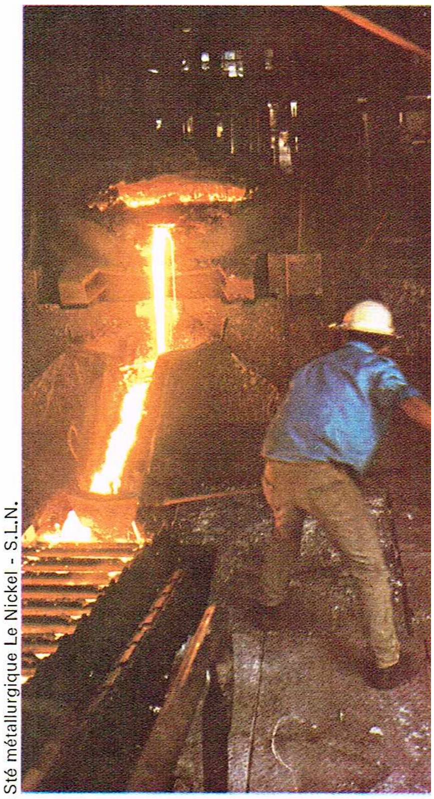

Sté métallurgique Le Nickel - S.L.N.

▲ *Une coulée de ferro nickel en lingotières à l'usine S.L.N. de Doniambo en Nouvelle-Calédonie ; trois grands groupes, la Société métallurgique Le Nickel - S. L. N., INCO et Falconbridge, assurent la quasi-totalité de l'extraction du nickel dans le monde occidental.*

▼ *Une mine de bauxite à ciel ouvert aux Baux-de-Provence (Bouches-du-Rhône) ; la production de l'aluminium consommé en France (avec toutes les opérations préalables d'extraction et de transformation du minerai) est sous le contrôle d'un holding d'envergure internationale, Péchiney-Ugine-Kuhlmann.*

Doc. P.U.K.

▶ *Le dégagement des morts-terrains et l'extraction des phosphates par dragline dans une mine à ciel ouvert de la compagie des phosphates de Taïba, au Sénégal.*

exportée par le producteur français majeur était vendue environ 62 F/tonne f.o.b., alors que le prix d'ordre de la même bauxite pour les producteurs d'alumine du groupe était de 30 F/t. Lorsqu'il s'agit de rétrocéder la production de bauxite d'une filiale exploitante à une filiale utilisatrice, cette politique de prix d'ordre bas permet de réduire le chiffre d'affaires et les bénéfices de la filiale productrice, et, conséquence logique, de diminuer la somme due au Trésor au titre de l'imposition sur les bénéfices des entreprises. De plus, si la cession se fait à destination de l'étranger, le montant des taxes à l'exportation est lui aussi moins élevé, puisque calculé également *ad valorem*.

Cela est à l'origine de l'une des principales critiques que le système suscite de la part des pays sur le territoire desquels s'effectue l'extraction de minerais vendus à prix d'ordre; ils estiment que l'appropriation des ressources minérales n'est pas, dans ces conditions, justement rémunératrice pour eux. Pour y remédier, la Jamaïque, par exemple, a mis en place une taxation calculée au prorata du tonnage exporté, et indexée sur le prix de vente de l'aluminium produit par les compagnies exploitantes, américaines en l'occurrence.

M. Renaudeau - TOP

Variabilité et évolution des prix

Fluctuations de prix et régulation des marchés

On a noté, dans les développements précédents, que les prix des matières premières minérales subissaient, sur les divers marchés intérieurs et internationaux, des variations rapides, à court terme, dont l'ampleur vers la hausse ou la baisse pouvait être importante.

Les causes de ces fluctuations sont multiples, et, selon les cas, correspondent à des déséquilibres physiques, réels ou provoqués, des marchés, ou découlent d'interventions politiques, de décisions des producteurs, ou de manœuvres spéculatives.

Des phénomènes d'autorégulation, tenant à la structure même de certains marchés, ainsi que des actions gouvernementales et des accords internationaux de stabilisation, limitent plus ou moins efficacement l'amplitude de ces fluctuations.

Causes et limites des fluctuations

* *Sur les marchés non libres,* les fluctuations ressenties trouvent le plus souvent leur origine dans des décisions unilatérales des sociétés exploitantes ou des gouvernements des États producteurs.

Les hausses de prix peuvent être justifiées par :

● Le besoin de réajuster les prix de vente d'une matière première ou d'un métal, après une élévation des coûts de production. Une entreprise affectée par une majoration des charges salariales, ou du prix de l'électricité qu'elle consomme pour l'extraction du minerai et son traitement, est amenée à brève échéance à relever ses prix de vente, pour préserver une marge normale de profit. Ce relèvement ne peut cependant dépasser un certain seuil, sous peine pour l'entreprise de ne plus être en position concurrentielle vis-à-vis d'autres producteurs, non confrontés à un relèvement de leurs coûts de production.

● La volonté d'un État exportateur de maintenir le « pouvoir d'achat » des matières premières minérales qu'il cède en contrepartie de devises affaiblies par l'inflation et/ou la dévaluation. Cet argument a été avancé par les ministres de l'O.P.E.P. (Organisation des pays exportateurs de pétrole) pour rendre compte des augmentations successives des prix de cession du brut, payé en dollars, et par le Maroc, lors du triplement des prix des phosphates naturels décidé à la fin de 1973 (première étape d'une série de hausses qui a porté le prix f.o.b. de 14 $/t, en 1973, à 68 $/t en janvier 1975). Dans cet exemple, on relève que la tonne de phosphate était vendue en 1952 14,2$, soit à un prix courant identique à celui de 1973, alors que la monnaie américaine s'était fortement dépréciée en vingt ans, et que les prix des produits manufacturés vendus par les nations industrielles avaient, eux, progressé à peu près parallèlement à l'inflation. La multiplication brutale du prix des phosphates ne faisait, en pratique, que ramener celui-ci à son niveau de 1950, en dollars constants. Cette *dégradation des termes de l'échange,* maintes fois constatée par les producteurs exportateurs de matières premières, et désignée par eux comme la cause essentielle des difficultés de leur développement, est à l'origine de la plupart des redressements de prix décidés isolément (cas du Maroc) ou conjointement (dans le cas de cartels constitués) depuis 1973.

● Le désir des États en voie de développement de tirer davantage profit de leurs richesses minières, exploitées et exportées par des tiers (groupes miniers étrangers). Ces États ne sont pas tous propriétaires et opérateurs des installations d'extraction, de traitement et d'expédition de leurs minerais, comme l'est le Maroc, par l'intermédiaire de l'Office chérifien des phosphates, entreprise à capitaux publics. Ils sont donc conduits à augmenter l'imposition fiscale et douanière frappant les sociétés exploitantes, et il est bien évident que celles-ci tendent à répercuter ces charges dans leurs prix de vente, autant que faire se peut.

Il faut en effet souligner que toute hausse, qu'elle soit le fait de sociétés privées ou d'États, a des limites intrinsèques. Un producteur qui déciderait une hausse importante de ses tarifs, sans avoir une position très largement prépondérante sur le marché international, s'exposerait à une chute sensible et rapide de ses ventes, les acheteurs se reportant sur ses concurrents pour la satisfaction de leurs approvisionnements. Si les hausses se produisent à l'initiative d'un groupe de producteurs, contrôlant l'essentiel de l'offre mondiale d'une substance, c'est alors le phénomène des substitutions qui entre naturellement en jeu, dès que le niveau des prix de cette substance vient à dépasser celui d'autres produits, disponibles en suffisance et rendant les mêmes services. C'est ainsi qu'en conserverie alimentaire, le conditionnement en boîtes d'aluminium se développe aux dépens du classique conditionnement en fer étamé. Cependant, ce mécanisme, qui implique des transformations de l'équipement des industries utilisatrices, ne peut intervenir immédiatement après un renversement des coûts relatifs de matériaux concurrents.

Cette restriction à la hausse ne s'applique évidemment qu'à certaines matières premières. Pour toutes celles qui sont strictement irremplaçables dans leur(s) usage(s), les producteurs n'ont pas à craindre un tel glissement des utilisations. Sans insister sur l'exemple du pétrole (qui sera encore, pour quelques décennies au moins, la source principale d'énergie, et restera l'irremplaçable matière première dans la plupart des branches de la chimie organique), on peut citer les phosphates et la potasse (engrais simples et composés, dont le monde consomme des tonnages en rapide croissance), les métaux de la mine de platine (élaboration de catalyseurs chimiques), le bismuth (préparations pharmaceutiques), la fluorite (synthèse de l'acide fluorhydrique, intermédiaire obligé pour l'enrichissement de l'uranium en phase gazeuse UF_6), etc.

Dans les deux cas — augmentation de prix isolée suivie de report sur d'autres fournisseurs, ou concertée, avec substitution partielle entre substances —, les producteurs sont donc souvent obligés de revenir à des niveaux de prix plus attractifs. Même le Maroc, fort pourtant de sa position de premier exportateur mondial, et dont la décision d'augmenter les prix avait été suivie par les autres exportateurs, a dû diminuer en 1975 ses prix de

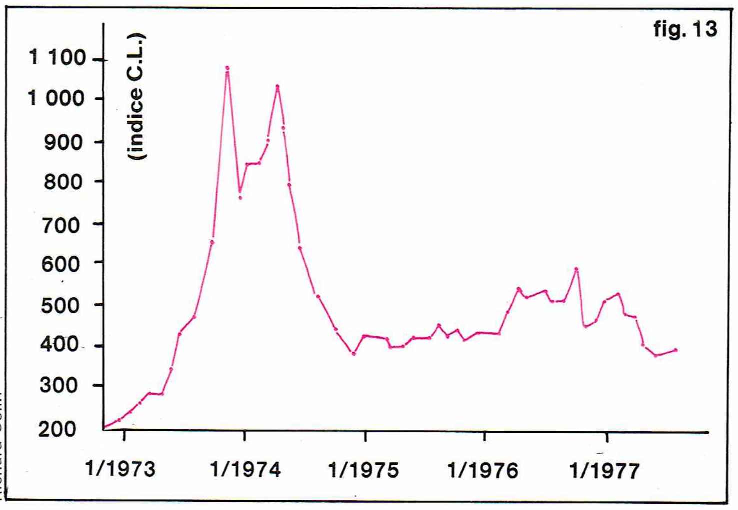

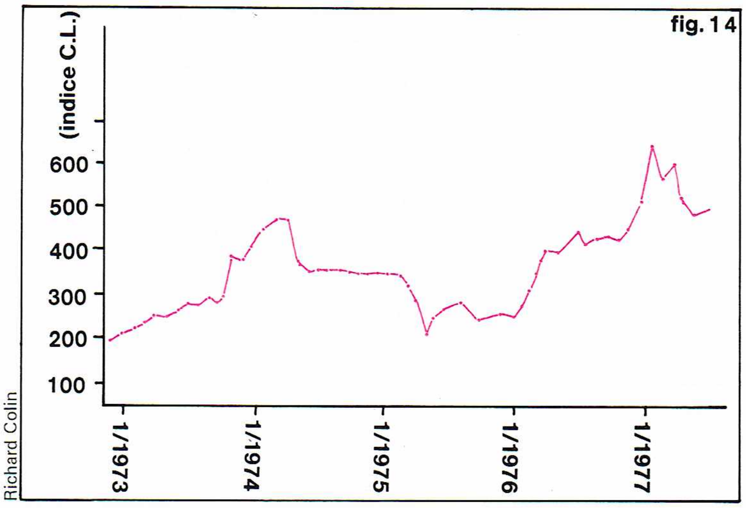

▲ *Figure 13 : évolution de l'indice mensuel des cours du zinc, à la bourse des métaux de Londres, entre janvier 1973 et juillet 1977.*
Figure 14 : évolution de l'indice mensuel des cours du plomb à la bourse des métaux de Londres entre janvier 1973 et juillet 1977 (pour ces deux figures, la base 100 équivaut au cours moyen de 1961).

30 % (rabais officiel), contraint à cela par la faiblesse de la demande phosphatière (les revenus agricoles, qui ont été fort médiocres ces dernières années, ne permettaient pas de payer des importations croissantes de phosphate aux prix affichés).

Cette politique de rabais, rarement appliquée par un État producteur majeur d'une matière première, est par contre d'usage assez courant de la part de sociétés productrices confrontées à une demande affaiblie. Ces sociétés, notamment dans le cadre des marchés oligopolistiques, diminuent leurs prix officiels ou consentent des ristournes sur des enlèvements importants, afin de placer leur production au maximum et d'éviter ainsi des mises en stock trop importantes — qui sont improductives et coûteuses — ou des réductions de l'activité minière.

* *Sur les marchés libres,* la plupart des fluctuations procèdent de l'inadéquation de l'offre vis-à-vis de la demande, et de comportements spéculatifs.

La condition nécessaire, mais non suffisante, d'une relative stabilité des prix des matières premières minérales sur les marchés est, en effet, la réalisation et le maintien d'un certain équilibre entre les capacités de production, qui déterminent l'offre et la demande des utilisateurs intermédiaires et finals.

Si un décalage apparaît, dans le sens d'un excès de demande par rapport à l'offre, il se manifeste une tension des marchés, génératrice de hausses de prix; dans le cas contraire : offre supérieure à la demande, les marchés connaissent une dépression plus ou moins intense, d'où une décroissance ou même un effondrement des prix. Ces hausses ou baisses portent en elles-mêmes leurs propres mécanismes régulateurs : des prix devenant excessifs dissuadent certains acheteurs, et la demande tend à retomber; des prix bas incitent les utilisateurs — et les spéculateurs — à effectuer des achats, ce qui contribue à redresser le marché.

Tous ces mécanismes sont étroitement interdépendants, mais l'action de chacun d'eux est décalée de façon variable dans le temps, par rapport aux sollicitations initiales. A l'échelle de quelques mois ou d'une année, ces marchés présentent donc des oscillations d'ampleur aléatoire, traduisant l'alternance de périodes de demande excédentaire et de demande faible vis-à-vis de l'offre.

Ces déséquilibres sont essentiellement créés par la variabilité de la demande des utilisateurs finals, difficilement prévisible, et qui conditionne pourtant les besoins des utilisateurs intermédiaires transformateurs de métaux, et par l'inélasticité de l'offre, qui va grandissant. Cette inélasticité (on utilise également le terme de « rigidité ») de l'offre trouve son origine dans la convergence de plusieurs phénomènes; parmi les plus déterminants, il faut citer :

— la tendance au gigantisme et à la mécanisation du secteur des industries minérales (mines, fonderies, cimenteries, etc.), d'où une prépondérance croissante des frais fixes (amortissements et frais financiers) dans les prix de revient. Les gestionnaires tentent donc d'augmenter les taux de charge, en rapprochant la production réelle de la capacité de production théorique; ces entreprises travaillent ainsi avec une marge d'adaptation aux aléas du marché très réduite;

— la diminution des stocks de matières premières des entreprises, qui est justifiée par la nécessité d'éliminer ces immobilisations de capitaux que représentent les stocks, mais qui va à l'encontre d'une lutte contre la rigidité du système industriel;

— le comportement de certains groupes miniers ou métallurgiques, lorsque les marchés se trouvent fortement dégradés par des surproductions persistantes : les entreprises décident l'arrêt d'ateliers à coût marginal élevé, et/ou renoncent à des projets d'extension et à certains investissements de modernisation; elles diminuent ainsi les coûts opérationnels et les charges, et s'accommodent mieux des bas prix de vente provoqués par la faiblesse de la demande. Mais cela pèse lourdement sur la rigidité de l'offre future, lorsque le marché revient en état plus équilibré : la non-réalisation des investissements prévus peut créer alors une insuffisance des capacités de production face à une demande redevenue normale.

Dans de telles conditions de rigidité, il suffit par exemple qu'une grève de longue durée paralyse une ou plusieurs mines importantes pour que, l'offre s'effondrant, les prix s'emballent : les autres entreprises, travaillant plus ou moins à la limite de leur capacité théorique, sont alors incapables de fournir rapidement le surcroît de production qui aurait été nécessaire à la constance de l'offre.

Il faut enfin ne pas méconnaître les réactions spécifiques des exploitants miniers à des fluctuations du prix des métaux, réactions qui vont généralement dans le sens d'un renforcement de ces fluctuations : si les cours montent (offre insuffisante), des panneaux de minerai plus pauvre, jusque-là délaissés, deviennent rentables et sont mis en exploitation; la capacité des installations de traitement du minerai restant ce qu'elle est, la production de concentrés, et donc de métal contenu, chute; inversement, en période de bas prix (demande faible), les exploitants ont intérêt à concentrer l'activité sur les zones les plus riches des gisements, d'où une production métallique accrue, si le tonnage de minerai traité n'est pas volontairement diminué.

▼ *Figure 15 : influence du prix de l'or sur l'activité du groupe minier sud-africain « Anglo-American »; depuis 1969, l'augmentation du prix de l'or (courbe rouge) a permis un abaissement de 22 % de la teneur d'exploitation (courbe verte) entraînant une diminution de 12 % de la production (courbe bleue) malgré une augmentation de 10 % des tonnages traités (courbe violette)* [*d'après* Annales des Mines, *janvier 1975, p. 44*].

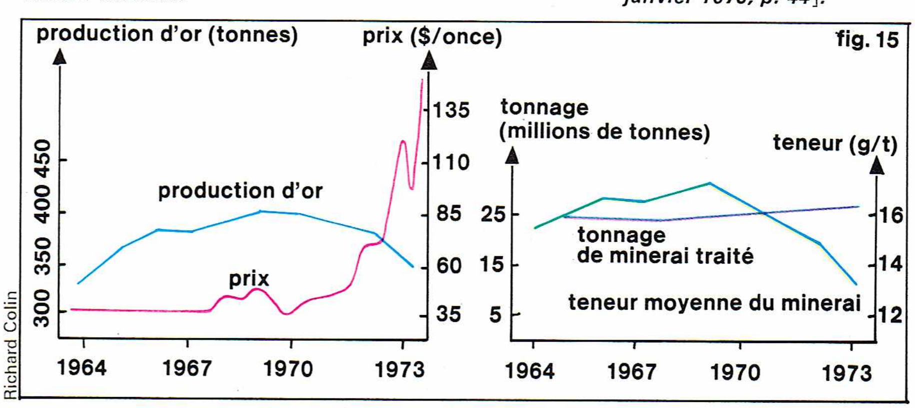

▶ *Figure 16 : évolution mensuelle des cours du cuivre à la bourse des métaux de Londres et du prix des producteurs américains en 1973 et 1974 (d'après* Annales des Mines, *janvier 1975, p. 50).*

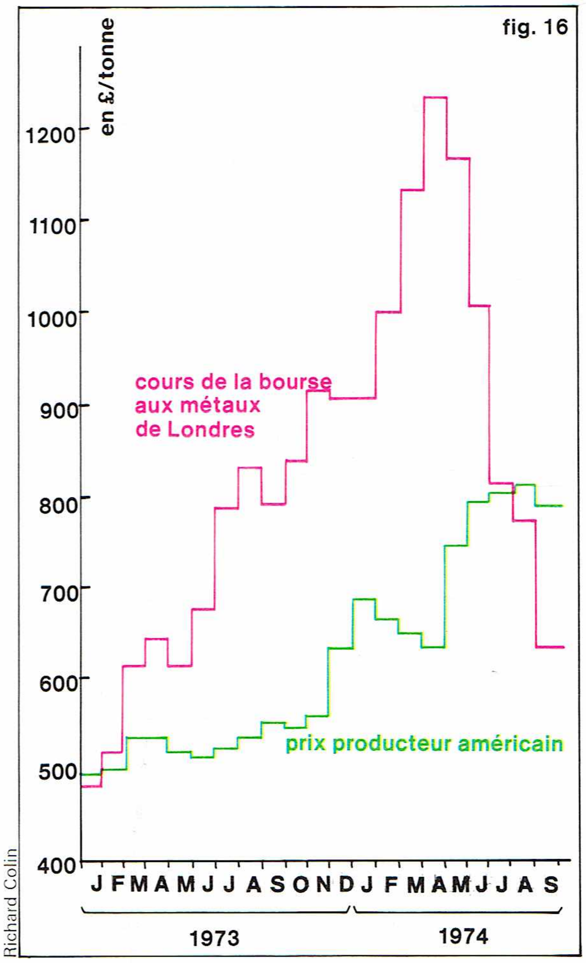

* *Spéculation.* A ces fluctuations, liées à l'évolution de la conjoncture, et à l'analyse que les producteurs font de cette conjoncture, de leur position de force mutuelle, et de leurs intérêts économiques et politiques, se superposent les effets, beaucoup plus pernicieux à bien des égards, de manœuvres spéculatives.

La spéculation à la hausse ou à la baisse sur les métaux cotés en bourse est guidée, bien sûr, par la tendance que montre à tout moment le marché, mais aussi et surtout par l'interprétation de « rumeurs » et d'informations (qui seront ultérieurement vérifiées, ou se révéleront parfaitement controuvées !) circulant dans les milieux boursiers, et sur lesquelles les opérateurs s'appuient pour essayer de prévoir l'évolution à court ou à très court terme des cotations et placer de la façon la plus rémunératrice leurs capitaux.

Ces rumeurs et informations font état de certains événements — ou laissent supposer leur imminence — intéressant les marchés des métaux et des matières premières minérales : diminution des exportations de tel pays, besoins accrus des consommateurs, censés donc effectuer des achats supplémentaires, nationalisation décidée ou prévue d'actifs miniers, modifications par les pays producteurs de la fiscalité ou des taxes à l'exportation, ventes ou constitutions de stocks par les nations industrielles, découverte d'un important gisement, récession et fermeture d'usines dans une branche industrielle utilisatrice de métaux, développement de grèves minières, etc. Qui plus est, l'euphorie ou le marasme régnant à un moment donné sur le marché d'un métal transparaît souvent sur les marchés des autres métaux, voire des matières premières non minérales : la spéculation n'est pas une « activité spécialisée », elle peut concerner, simultanément ou successivement, différents marchés, selon leur conjoncture.

Des comportements spéculatifs graves sont parfois directement créés par des décisions politiques prises, paradoxalement (du moins en apparence), dans un dessein de stabilisation des prix et de contrôle de l'inflation. En témoigne la violente flambée des cours au *London Metal Exchange* en 1973-74, alors que le gouvernement fédéral des États-Unis avait instauré un contrôle des prix intérieurs américains, y compris ceux des métaux non ferreux, pour parer à l'inflation ; les fondeurs américains voyant leurs ventes sur le marché intérieur devenir moins rémunératrices, puisque les cours producteurs étaient pratiquement bloqués, ont exporté des fractions croissantes de leur production : les prix restant libres pour le commerce extérieur, ils bénéficiaient ainsi des prix élevés alignés sur les cotations du marché libre. En corollaire, des achats de cuivre, de zinc, etc., ont dû être effectués à Londres pour satisfaire les besoins des industries transformatrices américaines, avec, pour conséquence directe, une tension aggravée au L.M.E., y entretenant l'ascension des cotations. Le retour progressif à une similitude des niveaux de prix sur le marché intérieur américain et au L.M.E. intervint dès juin-juillet 1974, après que l'Administration fédérale eut renoncé au contrôle des prix intérieurs (*fig.* 16).

Conséquences des fluctuations de prix

De telles irrégularités, qu'elles procèdent de la confrontation des intérêts des États, du déséquilibre physique de l'offre et de la demande, de la spéculation sous toutes ses formes ou d'autres causes, désorganisent considérablement les marchés internationaux des matières premières concernées. Par voie de conséquence, elles compromettent parfois gravement le développement économique des nations qui tirent une part majeure de leurs revenus de l'exportation de minerais, et la gestion des entreprises minières — tout au moins pour celles qui n'ont pas une envergure internationale et des ressources de trésorerie suffisantes pour « tenir » pendant les périodes de mauvaise conjoncture, en attendant des jours meilleurs.

Tous les protagonistes concernés par les échanges de matières premières : États industriels importateurs et États producteurs-exportateurs, s'accordent à reconnaître la nécessité d'une régulation des marchés, les uns et les autres ne trouvent aucun avantage dans la permanence des crises — tantôt de surproduction, tantôt de pénurie —, qui sont une source de désordres (inflation généralisée, mouvements aberrants des prix) bien plus graves qu'une progression régulière des prix des marchés.

Reste qu'au-delà de ces intentions touchant à l'économie et à la politique internationales, les intérêts nationaux en jeu sont divers, souvent contradictoires à l'intérieur de chaque « clan » (clan des exportateurs, clan des consommateurs), et en tout état de cause opposés, presque systématiquement, entre un clan et l'autre. De plus, il apparaît un hiatus économique croissant entre les exportateurs « riches » (pays à revenu minier *per capita* important) et les exportateurs « pauvres », beaucoup plus nombreux, dont les exportations minières ne compensent que bien mal les importations de biens manufacturés, d'énergie, d'engrais. Obtenir, dans un tel contexte, un consensus général quant à une organisation plus efficace des marchés internationaux tient, à bien des égards, de la gageure ou de l'utopie. Les résultats de la « Conférence Nord-Sud » sont là pour le rappeler, s'il le fallait.

Régulation des marchés

Cette régulation s'avère particulièrement nécessaire pour les principaux métaux non ferreux (et, selon les stades d'élaboration auxquels existent des échanges, leurs concentrés, s'il y a lieu), qui sont les plus sujets aux variations de prix et représentent, en valeur, une part essentielle des échanges mondiaux de matières minérales. Le problème est d'un intérêt moins général pour les substances minérales secondaires, et inexistant pour les matériaux — pratiquement absents du commerce international.

Deux moyens peuvent être mis en œuvre pour parvenir à une certaine maîtrise des fluctuations des marchés : l'accord international de régulation (moyen actif) et la constitution de stocks métalliques (moyen passif).

* A titre d'exemple d'*accord international de régulation,* l'on ne peut guère présenter que celui qui a été institué en 1956 pour l'étain, et périodiquement reconduit depuis. Il reste en effet, à l'heure actuelle, le seul de son espèce.

Cet accord, conclu entre les producteurs et les consommateurs d'étain, se propose de stabiliser autant que faire se peut les prix auxquels ce métal se vend dans le monde, tout en offrant des garanties appréciables aux deux parties :

— garantie de prix rémunérateurs pour les producteurs-exportateurs d'étain,

— garantie d'approvisionnement sans à-coups pour les utilisateurs.

Pour cela, le Conseil international de l'étain — qui rassemble des experts représentant, paritairement, les producteurs et les consommateurs — fixe périodiquement, en fonction de la conjoncture internationale, une « fourchette » de prix dans laquelle doivent se maintenir les cours de l'étain sur les marchés libres (début 1975, par exemple, les prix planchers et plafonds étaient fixés à 900 et 1 100 M$/picul — l'étain est coté en dollars malais [environ 2 F/M$] par picul de 133 livres [60,3 kg], à Penang, et en livres sterling par tonne au L.M.E. : ces prix correspondaient donc sensiblement à, respectivement, 30 000 et 36 500 F/t). S'ils s'en écartent, le Conseil, qui dispose d'un stock d'étain (de l'ordre de 10 % de la production annuelle du monde non communiste) et d'une réserve de trésorerie, décide de vendre du métal ou d'en acheter, pour déprimer les cours s'ils s'envolent, ou les soutenir s'ils chutent.

De plus, le Conseil fixe régulièrement les quantités physiques de métal offertes à l'exportation, pour chacun des pays producteurs signataires de l'accord, et peut les contingenter, s'il apparaît une surproduction notable. Ceci est nécessaire au maintien des cours, et assure les producteurs d'enlèvements réguliers et de revenus stabilisés et prévisibles à court ou moyen terme. A l'opposé, l'Accord n'a pas retenu d'obligations en cas de pénurie d'étain ; il est bien évident, dans ce cas, que les producteurs savent parfaitement quelles mesures prendre pour pousser leur production, autant qu'il serait nécessaire et possible.

En pratique, le Conseil ne dispose pas toujours des moyens qu'exigerait la réalisation de ses objectifs :

— les cours arrivent à dépasser le prix plafond, malgré une liquidation progressive du stock régulateur : celui-ci est d'un montant trop modeste (20 000 t en moyenne). Ainsi, en 1974, le cours moyen à Penang fut de 1 137 M$/picul, alors que le prix plafond avait été fixé à 760 M$ (jusqu'à fin mai), puis à 1 050 M$ (à partir de juin) ;

— historiquement, au cours des vingt années d'existence de l'Accord international de l'étain, la fourchette de prix n'a jamais pu être révisée autrement qu'en hausse.

Cela va évidemment dans le sens de l'intérêt des producteurs, mais peut représenter, aux yeux des consommateurs, un certain élément d'échec, puisque le prix plafond n'est garanti que de droit, point de fait.

Il serait sans doute souhaitable au plan de l'intérêt général que ce genre d'accord, malgré ses imperfections, s'étende aux marchés d'autres métaux « sensibles ».

Font cependant plus ou moins obstacle à une telle extension les réticences que manifestent quelques pays producteurs-exportateurs suivant une ligne assez radicale en matière de politique d'exportation et de commercialisation de leurs substances minérales. En fait, ils redoutent que de telles institutions ne soient éventuellement « manipulées » par les consommateurs dominants, et ne constituent pour ceux-ci une arme pour imposer une stabilisation des prix à leur avantage — c'est-à-dire à un niveau relatif trop bas. Ces producteurs sont beaucoup plus généralement partisans de la constitution de cartels. Il y a bien là un certain paradoxe, pourtant, puisque l'Algérie — l'un de ces pays « radicaux » — soutenait dans le même temps la thèse selon laquelle « l'on n'avait jamais vu les consommateurs faire la loi sur un marché ».

* *Les stocks de sécurité.* La masse métallique dont dispose le Conseil international de l'étain est le seul exemple, actuellement, de stock international géré de façon bipartite producteurs/consommateurs. En revanche, il existe des stocks de métaux plus ou moins importants, dont la constitution, le renouvellement et la gestion sont du ressort d'entreprises productrices ou utilisatrices, d'organismes professionnels ou d'administrations gouvernementales.

Il importe de bien établir la distinction entre les stocks de sécurité et les stocks régulateurs. Les seconds agissent sur les marchés internationaux, tant sur le volume des échanges réalisés entre producteurs et consommateurs, que sur le niveau des prix de vente. Les premiers, au contraire, sont des stocks de précaution, constitués en vue d'assurer la permanence de l'approvisionnement des

C.E. Ostman - Hedin

▲ *Une drague permettant l'exploitation des alluvions stannifères à Kuala-Lumpur en Malaisie ; l'atelier de concentration du minerai est installé sur la drague elle-même.*

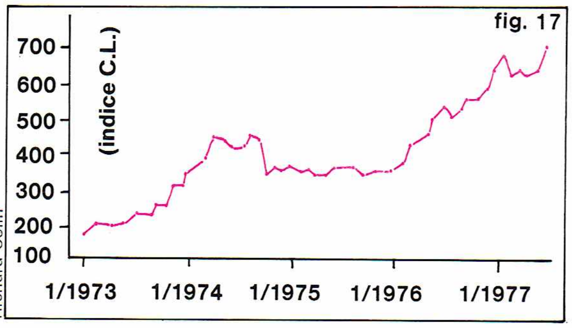

Richard Colin

◄ *Figure 17 : évolution de l'indice mensuel des cours de l'étain à la bourse aux métaux de Londres entre janvier 1973 et juillet 1977 (la base 100 équivaut au cours moyen de 1961).*

entreprises industrielles ; leur rôle est de contribuer, au cours de pénuries temporaires, à la continuité de l'activité industrielle. Pour cela, ces stocks doivent être maintenus au-dessus d'une certaine quantité minimale (par exemple, un mois ou six semaines de consommation), à la différence du stock de l'Accord de l'étain, qui est une « masse de manœuvre », fluctuante par destination.

Les stocks des entreprises productrices et utilisatrices de matières minérales sont souvent des stocks « obligés » : minerais et concentrés en attente de chargement pour l'exportation, de traitement, ou lingots de métaux en attente de livraison ou de transformation ; le transport maritime moderne, à grande capacité, est générateur de stocks obligés de plus en plus importants : les livraisons sont espacées dans le temps, mais portent sur de grosses quantités (20 000 t à 100 000 t et plus, selon les parcours, sont des capacités courantes), ce qui impose la disponibilité de stocks du même ordre de grandeur, au moins, au départ pour assurer un chargement rapide et continu de tout navire, et à l'arrivée pour disposer le minerai en attendant sa répartition vers les utilisateurs. Ces stocks ont donc un rôle tampon à très court terme.

Les stocks constitués par les organismes professionnels et/ou les administrations gouvernementales sont d'importance plus sensible, sur le plan de la sécurité et de la régularité de l'approvisionnement national.

En France, le G.I.R.M. (Groupement d'importation et de répartition des métaux) a une double vocation :

— organisme professionnel, mis en place et animé par les chambres syndicales des industries transformatrices de métaux non ferreux, il regroupe les besoins à terme de l'ensemble des utilisateurs concernés, passe pour leur compte les contrats d'approvisionnement nécessaires, et rétrocède progressivement ses réceptions de métaux aux industriels. En pratique, cette activité concerne essentiellement le cuivre, qui reste le problème le plus délicat, et l'élément le plus onéreux, de nos importations de minerais et métaux ;

— plus récemment, le G.I.R.M. a été chargé par l'État de la constitution, sur fonds publics, et de la maintenance

▶ ***Figure 18 :*** ***évolution de la production mondiale de minerai de fer entre 1850 et 1970 (d'après*** **Survey of World Iron Ore Ressources,** ***O. N. U., 1970, et*** **Anuário Mineral Brasiliero,** ***de 1975).***

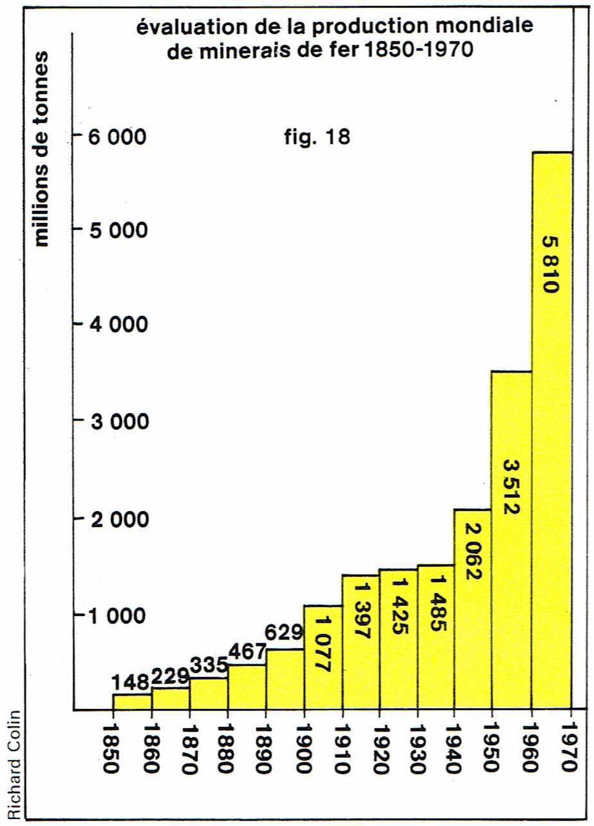

d'un stock permanent de précaution, comprenant divers métaux vis-à-vis desquels la France est en position de vulnérabilité marquée.

Ces dispositions, arrêtées par le gouvernement en 1971, sont entrées en application progressivement depuis 1975.

La constitution de ces stocks de précaution répond à trois préoccupations :

— assurer la régularité de l'approvisionnement de l'industrie nationale, obviant ainsi à des ruptures d'approvisionnement, aux conséquences parfois graves, qui peuvent apparaître en période de forte demande ;

— obtenir, grâce au regroupement des besoins, des contrats à moyen terme plus avantageux, auprès des producteurs de métal ;

— disposer d'une masse métallique, en réserve, dans laquelle on peut effectuer des prélèvements en période de pénurie transitoire et de hauts cours pour éviter d'avoir à acquérir au prix fort sur des marchés parallèles les matières premières indispensables à la poursuite de l'activité dans le pays.

La détermination du niveau quantitatif des stocks résulte d'un compromis économique : la réserve doit être assez importante pour couvrir la consommation nationale pendant la durée d'une crise de l'offre, durée qui peut être de l'ordre de quelques mois ; l'ampleur du stock est directement limitée par celle des fonds que l'on peut dégager pour acquérir les métaux, compte tenu du fait que ces fonds seront immobilisés, et que des frais de gestion sont à prévoir (en 1975, 250 millions de F ont été consacrés à la constitution du stock national de sécurité de métaux non ferreux) ; le stock devra être plus important si le métal concerné est sensible à la spéculation.

En conclusion, il semble que l'on puisse dégager deux lignes d'action en matière de stocks :

● *Des stocks nationaux* (créés sur fonds publics, ou éventuellement interprofessionnels), destinés à garantir la continuité physique de l'approvisionnement des utilisateurs, sont nécessaires. Leur montant devrait représenter l'équivalent de plusieurs mois de consommation pour qu'ils soient réellement efficaces (ainsi l'obligation légale faite aux raffineurs opérant en France de maintenir un minimum de 3 mois de stocks de pétrole ; cette décision a été prise après le conflit du Kippour [1973] et l'instauration d'un embargo plus ou moins sélectif par les producteurs arabes de l'O.P.E.P.). Le fait qu'on y effectue des prélèvements en période de pénurie et qu'on reconstitue ces stocks en période d'offre excédentaire et de bas prix contribuerait à stabiliser les marchés et à désamorcer certaines crises de surconsommation et de surproduction.

● *Des stocks internationaux,* gérés à la fois par des producteurs et des consommateurs, sont également nécessaires pour contenir les prix dans des limites acceptables et régulariser l'offre et la demande sur les marchés.

Divers experts internationaux ont cité des chiffres concernant l'ampleur moyenne que l'on devrait donner à de tels stocks ; les évaluations les plus basses se situent autour de 20 à 25 % de la quantité de métal annuellement disponible à l'exportation, les plus élevées l'avoisinent ou même la dépassent. Il est certain que ce montant pourrait rester modéré (de l'ordre de 3 à 4 mois de capacité d'exportation, par exemple) sans diminuer l'efficacité du stock régulateur, dans la mesure où les interventions régulatrices par achat/vente de métal seraient renforcées par des dispositions de contrôle de l'offre à court terme (instauration de quota d'exportations) et à moyen ou long terme (harmonisation des investissements et des projets des producteurs et des utilisateurs grâce à une bonne circulation de l'information entre ces protagonistes).

Évolution des prix à moyen et long terme

Une élévation générale des prix des minerais — et par conséquent des métaux — est assez probable dans les décennies à venir. Il n'est pas sûr qu'il puisse être remédié à certaines tensions apparaissant dans le domaine de la production minérale, à l'origine desquelles se trouvent l'augmentation de la demande, le coût croissant de la prospection et de l'exploitation minières, l'incertitude quant à la réalisation en temps utile des investissements qu'exige la progression de la production.

Augmentation de la demande

La demande est, pratiquement pour toutes les matières premières minérales, en croissance exponentielle plus ou moins forte. Il est vraisemblable qu'elle se ralentisse quelque peu dans les nations industrielles : les économistes signalent qu'à partir d'un certain degré de développement, la consommation par habitant en matières de base tend à plafonner, mais la poussée démographique, même modérée, suffira à maintenir en tout état de cause une certaine progression de la demande.

De toute façon, le nécessaire et souhaitable décollage économique des pays en voie de développement, conjugué à leur puissante expansion démographique, conduira à une augmentation de la demande globale. L'offre devra donc suivre cette tendance, régulièrement, faute de quoi il pourrait s'installer un état quasi permanent de crise dans le domaine de l'approvisionnement minéral, et par contrecoup dans l'économie internationale, situation qui serait génératrice de conflits graves.

Coût croissant de la prospection et de l'exploitation

Pour que la production soit à même de satisfaire ces besoins, des efforts de taille seront indispensables.

La prospection s'avère de plus en plus longue et coûteuse ; le temps des découvertes fortuites est maintenant à peu près révolu, et la mise en évidence de gisements affleurants, donnant en surface des structures et indices caractéristiques, est de plus en plus rare (sauf dans des régions encore peu explorées), car peu de ces indices ont échappé à la sagacité des mineurs au cours des siècles passés. La recherche minière devient donc indirecte, elle s'intéresse de plus en plus aux gisements cachés (non affleurants) et aux types nouveaux de gîtes, qui exigent de puissants investissements en temps, en argent, en matériel et en matière grise.

Les gisements, surtout ceux des non-ferreux courants, montrent, au fur et à mesure de leur remplacement dans le temps, des caractéristiques de teneur de moins en moins favorables. Ce point a déjà été analysé dans le premier chapitre ; nous rappellerons seulement que, pour obtenir une production métallique faiblement croissante malgré cet appauvrissement, l'extraction minière doit porter sur des tonnages de minerais fortement accrus, et que les capacités des installations de concentration de ces minerais doivent être prévues en conséquence.

Il résulte de l'inflation des coûts d'équipement des mines et des laveries, et des coûts de leur fonctionnement, que les prix de revient des concentrés, et donc des métaux, augmenteront sans doute dans de notables proportions.

Sté minière et métallurgique de Peñarroya

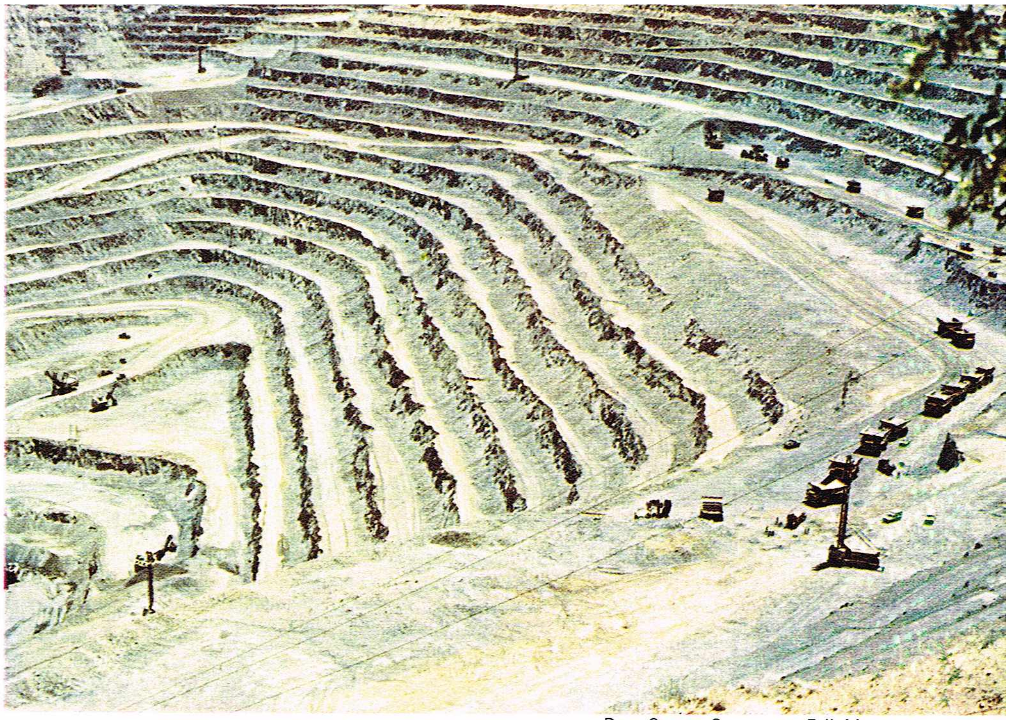

Doc. Cyprus Copper co.-E./L.M.

▲ *A gauche, la fonderie de plomb-zinc et l'usine de transformation de Noyelles-Godault (Pas-de-Calais) ; il s'agit là du premier complexe métallurgique européen de plomb-zinc. A droite, une vue partielle de la mine de cuivre à ciel ouvert de Pima en Arizona (États-Unis).*

Incertitude sur les investissements

A ce renchérissement, dû aux coûts de revient croissants, pourrait s'en superposer un autre, dû à la déficience de la production minière, si tous les investissements (pour développer la prospection et créer des capacités d'extraction, de concentration, d'expédition maritime, et de fusion supplémentaires) qu'exigerait la satisfaction de la demande future n'étaient pas réalisables en temps utile, faute des disponibilités financières adéquates. Il apparaîtrait alors en effet une pénurie assez durable (jusqu'à ce que les capacités indispensables soient installées), génératrice de tensions sur les marchés et de rigidité sévère de l'offre.

Pour un certain nombre de matières premières minérales, l'éventualité d'une insuffisance des investissements n'est pas écartée, loin de là, par les experts. Trois raisons essentielles l'expliquent :

— les grands groupes miniers internationaux, dans bien des pays, disposent de ressources financières moins importantes que par le passé ; certaines rentes minières (gisements exceptionnellement riches, dont l'exploitation procure des profits particulièrement élevés) s'amenuisent ou ont été nationalisées, et les bénéfices sont amputés par une pression fiscale accrue de la part des pays sur le territoire desquels s'effectue l'extraction (notamment dans les pays en voie de développement) ; les entreprises minières sont donc moins aptes à assurer elles-mêmes le financement de nouveaux projets ou d'extensions de capacités ;

— les pays en voie de développement qui ont pris le contrôle de leurs industries extractives n'ont pas relayé complètement les sociétés étrangères dans le domaine des investissements miniers. Ils ne donnent pas l'impression de maintenir ceux-ci à un niveau suffisant pour garantir une progression de la production future ; il est vrai qu'une part importante des bénéfices réalisés à l'exportation de minerais est souvent consacrée à l'importation de biens d'équipement et au développement d'autres secteurs de l'économie nationale, alors qu'auparavant, les bénéfices des sociétés minières étaient dans une large mesure réinvestis dans la prospection et l'équipement de nouveaux gisements ;

— enfin, les capitaux n'appartenant pas en propre aux sociétés minières sont placés présentement plus communément dans les industries de transformation et les activités de services, à forte valeur ajoutée, nettement plus rémunératrices que les activités de base, minières et métallurgiques.

Or, il faut être bien conscient que les gisements qui seront en pleine production à la fin du siècle sont ceux dont la prospection se fait actuellement ou va commencer, et que les nouveaux équipements opérationnels en 1985-90 (mines, laveries, ports minéraliers, fonderies, etc.) sont ceux dont la création se décidera — ou ne se décidera pas — dans les deux ou trois années à venir : les investissements présents gouvernent donc les disponibilités supplémentaires en matières premières minérales à quinze ou vingt ans d'échéance. Leur insuffisance, si elle se vérifie, sera cause de pénurie à la fin du siècle, et de tension très vive des prix sur les marchés.

Reste la question du recyclage des revenus extrêmement importants que les producteurs de pétrole reçoivent des pays importateurs (« petrodollars ») : il serait très souhaitable qu'une partie en soit investie dans des projets miniers, sur le territoire de pays en voie de développement, en particulier. Quelques exemples d'apports de capitaux arabes dans le financement de développements miniers en Afrique Noire ont été signalés récemment.

L'approvisionnement de la France

Place de la France minière dans le monde

Si la France possède les structures d'un grand pays industriel — elle occupe le 5e rang mondial, en termes de produit national brut (904 milliards de F), derrière les États-Unis, l'Union soviétique, le Japon et la République fédérale allemande — elle n'a pas des capacités minières à cette mesure : la valeur de sa production minière (2,46 milliards de F en 1973, hors substances énergétiques et matériaux, soit 1,34 % de la production minière mondiale) ne place notre pays qu'au 13e rang mondial.

La situation est plus médiocre encore si l'on inclut les substances énergétiques : avec 6,9 milliards de F en 1973, la France est au 22e rang mondial et contribue seulement pour 0,87 % à la production totale du monde. Cette position se dégrade rapidement, d'ailleurs : en 1968, les chiffres correspondants étaient : 7,04 milliards de F, 14e rang (1,42 %) ; et en 1950 : 5,79 milliards de F, 7e rang (2,51 %). Ce déclin résulte pour partie de la relative stagnation de l'extraction, et pour partie de l'apparition de grands producteurs (Australie, Canada, pays pétroliers) dans les vingt-cinq dernières années (*tabl.* XII).

Cependant, la France est le premier producteur du continent européen pour les matières premières minérales non énergétiques et assure 13 % de la production dans cette zone (en valeur, année 1973) [*tabl.* XIII].

Éléments de la situation nationale, bilan physique

Ces éléments sont, d'une part, la consommation nationale (pour les besoins intérieurs et pour l'exportation) et, d'autre part, les disponibilités provenant de la production minière — en métropole et dans les départements et territoires d'outre-mer — et du recyclage des chutes et déchets métalliques.

Les chiffres de consommation et de production des principaux minerais et métaux sont rassemblés dans un tableau général, avec le solde du commerce extérieur.

La consommation

Il est toujours fort délicat de l'appréhender correctement : il n'existe en pratique de données que sur la consommation « apparente », c'est-à-dire la somme algébrique de la production nationale et du solde, positif ou négatif, du commerce extérieur. Les mouvements des stocks, parfois importants, sont souvent mal connus.

Tableau XII
Valeur de la production minérale française en 1973

Substances	Valeur (en millions de francs)	Rang mondial en valeur	Rang mondial en tonnage
Substances énergétiques	4 431	21^e	
combustibles solides	3 100		
gaz naturel	950		
uranium	216	5^e	
Minerais métalliques	1 221	20^e (3^e rang européen)	
minerai de fer	925	10^e	9^e
bauxite	138	6^e	7^e
minerai de plomb	41 5	25^e	25^e
minerai de zinc	17,5	38^e	38^e
minerai d'étain	6,5	23^e	23^e
minerai de nickel	520	3^e (16,4 % de la production mondiale)	3^e
vanadium	5	8^e	8^e
minerai de tungstène	19,5	13^e	14^e
or	42	21^e	21^e
argent	23,5	21^e	21^e
Minerais non métalliques	1 246	6^e (2^e rang européen)	
potasse	720	4^e (13 % de la production mondiale)	6^e
sel	155,5	8^e	7^e
soufre	175,5	6^e	5^e
kaolin	32,5	7^e	8^e
talc	30,5	7^e	5^e
feldspath	24,0	3^e	4^e
asphaltes	6,0	3^e	4^e
fluorite	90,0	3^e	4^e
barytine	11,5	10^e	15^e
Ensemble des minerais métalliques et non métalliques	2 467	13^e (1^{er} rang européen)	
Ensemble de la production minière	6 900	22^e (0,87 % de la valeur produite dans le monde)	

Tableau XIII
Production, consommation et solde du commerce extérieur (en tonnage et en valeur) des minerais et métaux en France en 1975

Minerais et métaux	Production (kt= milliers tonnes) (Mt= millions tonnes)	Consommation (kt= milliers tonnes) (Mt= millions tonnes)	Solde du commerce extérieur (+ exportateur — importateur) en tonnage	Solde du commerce extérieur en millions de francs (MF)	
Aluminium					
bauxite	2 563 kt	3 600 kt	—1 410 kt	— 157,2 MF	
alumine	1 112 kt	805 kt	+ 285 kt	+ 258,0 MF	—129,6 MF
métal	382,6 kt	399,2 kt	— 52,8 kt	— 230,4 MF	
Chromite	0	322 kt	— 354 kt	— 163,1MF	
Cuivre (raffiné)	39 kt	364,5 kt	— 345,9 kt	—1 969,4 MF	
Étain (arrêt de la production en 1975)	ε	9,275 kt	— 9,70 kt	— 309 MF	
Fer					
minerai	49,65 Mt	40,38 Mt	+ 2,55 Mt	— 663 MF	+ 713 MF
acier brut	23,7 Mt	21,53 Mt	+ 1,24 Mt	+1 376 MF	
Manganèse	0	1 156 kt	—1 162 kt	— 269 MF	
Nickel					
minerai	6 693 kt (1)	4 038 kt (1)	+ 2 466 kt (1)	+ 265,3 MF	
mattes et ferronickel (Ni contenu)	71,07 kt (1)	16,4 kt (3) [ferronickel]	+ 70,23 kt (2)	+ 531,8MF	+ 571,7 MF
nickel pur et oxyde (Ni contenu)	10,75 kt (3)	23,01 kt	— 13,06 kt (3)	— 225,4 MF	
Plomb					
concentrés	30,3 kt	152,5 kt	— 122,3 kt	— 101,5 MF	—182,5 MF
métal affiné	150,7 kt	174,1 kt	— 32,2 kt	— 81,0 MF	
Tungstène					
concentrés	1 126 t	2 200 t	—1 057 t	— 31,6 MF	
Zinc					
concentrés	24,5 kt	394 kt	— 369,8 kt	— 352,9 MF	—525,3 MF
métal (et poussière)	189,6 kt	232,1 kt	— 47,2 kt	— 172,4 MF	
Phosphates	ε	3,47 Mt	— 3,45 Mt	—1 031,4 MF	
Potasse	1 920 kt	1 675 kt	+ 245 kt	+ 124,4 MF	
Soufre	1 827 kt	1 340 kt	— 21,2 kt	— 6,9 MF (estimé)	
Fluorite (CaF_2 contenu)	328 kt	255,4 kt	+ 93,5 kt	+ 23,6 MF	

(1) Nouvelle-Calédonie. (2) France et Nouvelle-Calédonie. (3) France.

Tableau XIV
Origine des importations françaises de minerais de fer en 1974

Pays d'origine		Importations (en milliers de tonnes)
Pays en voie de développement		10 520
dont	Mauritanie	2 450
	Libéria	2 070
	Angola	460
	Brésil	4 090
	Venezuela	600
	Pérou	350
	Divers	500
Pays à économie de marché		5 380
dont	Suède	2 650
	Australie	1 600
	Canada	650
	Espagne	480
Ensemble des importations		15 900

Cette consommation apparente n'est évidemment qu'une approximation : une partie plus ou moins importante des métaux « consommés » par les industries est en fait réexportée sous forme de biens manufacturés (cela explique que la consommation par habitant au Japon soit, pour le minerai de fer, la plus élevée du monde : l'acier produit est en grande partie exporté par les industries mécaniques et la construction navale). Il faut donc utiliser avec circonspection les données relatives à la consommation, sensible non seulement à l'évolution du niveau de vie du pays, mais aussi à la conjoncture des exportations.

Tous les minerais et métaux ne connaissent pas une même croissance de leur consommation.

L'analyse des statistiques de 1960 à 1974 indique que ces taux de croissance annuels s'échelonnent de moins de 0,1 % (étain) à plus de 10 % (soufre, fluorite brute).

Les métaux usuels présentent dans l'ensemble des taux voisins de 3 à 4 % : plomb raffiné, 2,8 % par an ; cuivre raffiné, 4,1 % ; zinc, 4,1 % (métal et poussière) ; acier brut, 3,2 %.

L'aluminium, métal nouveau (son emploi ne remonte qu'au début de ce siècle), et qui tend à remplacer d'autres métaux (cuivre en électrotechnique, étain en conserverie), a de ce fait un taux de croissance élevé : 6 % par an.

Ces valeurs restent inférieures à la progression annuelle du produit intérieur brut français (6,2 % en moyenne dans la période 1960-1973).

En revanche, la consommation de minerais non métalliques et de matériaux de construction progresse plus rapidement : potasse, 6,3 % par an ; phosphate, 8 % ; soufre, 10,5 % ; ciment, 6,2 % ; matériaux d'alluvions, 9,5 % ; ces rythmes soutenus reflètent la forte expansion de la chimie, de l'agriculture intensive (engrais) et du secteur bâtiment-génie civil, au cours des quinze dernières années.

Globalement, la valeur de la consommation nationale en matières premières minérales (non énergétiques) peut être évaluée à 13 milliards de F (1974) dont environ $1/5^e$ pour les matériaux de carrière (les granulats d'alluvions représentaient à eux seuls 1,85 milliard de F en 1972).

Les disponibilités

La France souffre d'un manque général de matières premières ; ce fait est bien connu — les moyens d'information s'en font souvent l'écho — mais doit être nuancé.

Production métropolitaine

Elle est inférieure aux besoins pour pratiquement toutes les substances minérales.

- La France n'est autonome, en ce qui concerne les matières premières essentielles, que pour trois minerais non métalliques : soufre, fluorite, potasse.

— Le *soufre* est obtenu comme sous-produit du gaz de Lacq, à raison de 1 800 000 à 1 900 000 t/an ; la consommation est voisine de 1 500 000 t, et le solde est exportable (en fait, le marasme actuel du marché du soufre a conduit à stocker le soufre excédentaire). Un

problème apparaîtra dans une dizaine d'années, avec l'épuisement progressif du gisement de Lacq, dont la relève ne semble pas pouvoir être assurée.

— La production de *fluorite* dépasse de 40 % les besoins (330 000 tonnes CaF_2 contenu) et une centaine de milliers de tonnes est annuellement exportée. Il existe de faibles importations pour certaines qualités spéciales.

— La production de *potasse* marchande oscille entre 1 900 000 t et 2 100 000 t (en K_2O contenu), dont 1/5e est exporté, mais 120 à 180 milliers de tonnes doivent être importés (il s'agit pour partie de sulfate de potassium). Le gisement alsacien se trouve dans une situation comparable à celle de Lacq : déclin prévisible dès la fin de la prochaine décennie, relève très improbable.

On peut aussi signaler quelques substances de moindre importance dont la production est excédentaire (talc) ou suffisante (sel, asphaltes, ardoises). Pour les matériaux de construction bruts et manufacturés, la production et la consommation sont égales : ces substances pondéreuses et à faible valeur unitaire n'entrent pratiquement pas dans le commerce extérieur ; seuls les marbres et granites (ornementation) sont importés (Italie, Espagne, Afrique du Sud, Scandinavie).

En ce qui concerne les minerais de fer, la France n'est qu'apparemment autonome. Le solde du minerai est, en tonnage, exportateur (à hauteur de 2,6 millions de t), mais, en métal contenu comme en valeur, les échanges sont nettement déficitaires, les minerais riches importés coûtant, en moyenne, 3,5 fois plus cher que le minerai lorrain pauvre exporté (au Luxembourg principalement) [*tabl.* XIV].

En pratique, la sidérurgie française n'est autonome qu'à 70 %, puisque les installations de Fos-sur-Mer et de Dunkerque ne peuvent utiliser que des minerais riches exotiques.

● Il existe par ailleurs des productions importantes, quoique insuffisantes, pour les substances suivantes :

— *Bauxite :* la France en fut, au début du siècle, le premier producteur mondial, mais est devenue importatrice nette : l'autonomie est d'environ 70 %, mais il faut noter qu'une partie de l'alumine produite avec ces bauxites est réexportée. Les gisements actuellement exploités (Var, Hérault, Bouches-du-Rhône) tendent à s'épuiser ; la prospection en cours pourrait apporter une solution à cette dégradation des réserves.

— *Barytine :* jusqu'en 1976, la production ne couvrait que la moitié des besoins. La mise en valeur de deux grands gisements, qui s'achève, va porter rapidement l'offre à un niveau permettant des exportations notables.

— *Tungstène :* l'exploitation des gisements découverts au cours des vingt dernières années permet à la France de couvrir maintenant 50 % de ses besoins. Mais, faute de capacités de traitements adéquates, les 2/3 des concentrés produits doivent être envoyés à l'étranger pour l'élaboration du métal ou de ses composés. Il serait souhaitable de remédier à cette carence (*fig.* 19).

— *Plomb-zinc :* l'autonomie est encore faible (11 et 6 % respectivement), mais peut s'améliorer grâce à l'entrée en production de nouveaux gisements zincifères ou plombo-zincifères.

— Le *cadmium* (autonomie 54 %), le *vanadium* (17 %) et l'*argent* (11 %) sont des sous-produits du traitement des concentrés de zinc, des bauxites et des concentrés de plomb, respectivement. Leur production dépend donc des quantités de zinc, bauxite et plomb traitées en France. L'autonomie réelle est cependant plus faible, surtout pour le cadmium, puisque les concentrés de zinc sont en grande partie importés.

● Enfin, la métropole manque totalement — ou presque — des autres métaux et minerais non métalliques. Pour certains, la situation peut s'améliorer à court ou à moyen terme : des gisements en cours d'étude ou de développement pourront fournir des métaux non encore exploités en France (titane-zirconium, niobium-tantale-lithium-béryllium, etc.) ou qui ne l'étaient plus (cuivre, antimoine, étain) depuis plus ou moins longtemps.

Des considérations géologiques et métallogéniques, en revanche, excluent pratiquement toute découverte, en métropole, de gisements capables d'assurer une part significative de la demande, pour les minerais de chrome, nickel, manganèse et molybdène, le mercure, les métaux du groupe du platine, et parmi les substances non métalliques, pour les phosphates, l'amiante, le graphite, les diamants industriels, etc.

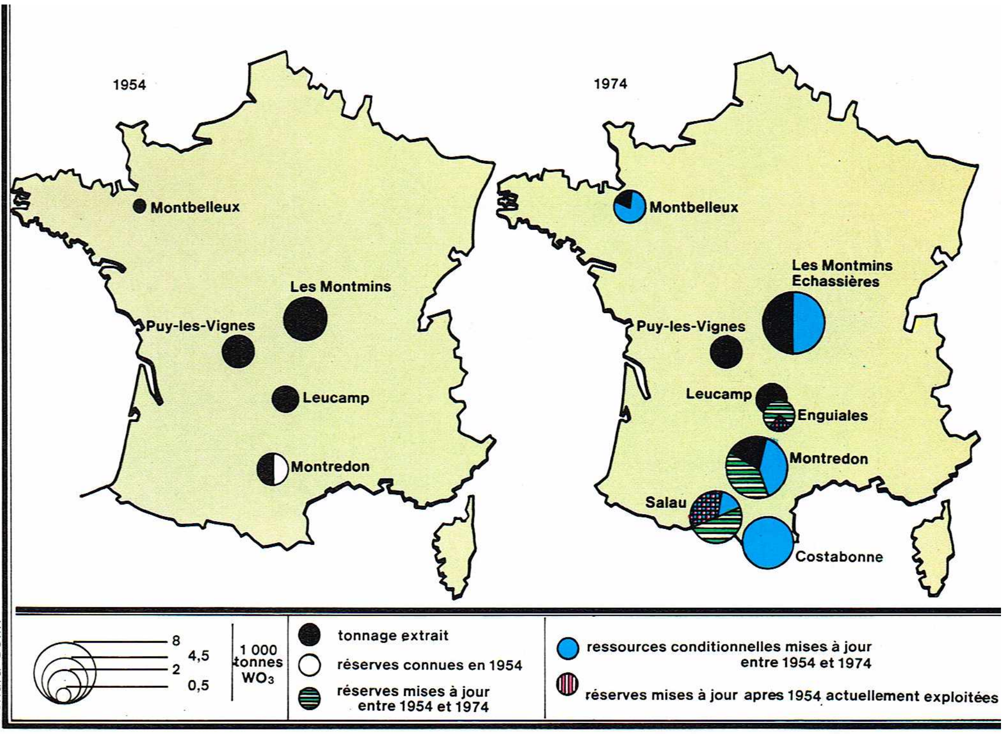

▲ *Figure 19 : évolution des ressources et de la production de tungstène ; le tonnage de métal contenu dans le gisement est proportionnel à la surface du cercle (d'après* les Matières premières minérales, *collection* Études de politique industrielle, *publié en 1975 par le ministère de l'Industrie, du Commerce et de l'Artisanat, à la Documentation française).*

Appoint des départements et territoires d'outre-mer

Les productions des D. T. O. M. sont peu diversifiées (mais cela peut être dû à l'insuffisance de la prospection dans certains d'entre eux). La Guyane ne produit qu'un peu d'or (30 à 75 kg/an), et le condominium des Nouvelles-Hébrides exporte une petite production de manganèse (30 000 à 40 000 t de minerai à 40 % Mn par an).

La Nouvelle-Calédonie, en revanche, apporte une contribution de premier plan : sa production de minerai de nickel (135 000 t de métal contenu : 2e rang mondial derrière le Canada) permet à la France d'être exportatrice de minerais et de métal (consommation métropolitaine : 40 000 t de nickel pur ou sous forme de ferro-alliage).

Le principal client de la Nouvelle-Calédonie est le Japon, qui importe 30 à 45 % du minerai produit, et une partie des mattes (composé semi-métallique complexe, à 75 % Ni, issu directement de la fusion du minerai).

Apports de la récupération

La récupération ne s'applique guère qu'aux métaux utilisés en tant que tels : les usages des autres substances minérales sont, sauf exception, dissipatifs.

Le recyclage pallie partiellement l'insuffisance ou l'absence de production minière de métal vierge ; son apport représente 20 à 40 % de la consommation totale, selon les métaux :

— *Fer :* les ferrailles entrent pour 35 % (7,7 Mt) dans l'approvisionnement (en fer contenu) de la sidérurgie. Il importe de souligner que 70 % de ce tonnage sont en fait composés de chutes neuves (déchets « obligés », tels que riblons, extrémités inutilisables de lingots, battitures, etc.) : il s'agit d'un recyclage interne à la sidérurgie. Les 30 % restant, seuls, viennent effectivement de la récupération de vieux métaux.

— *Non-ferreux :* pour le cuivre, 30 % de la consommation sont couverts par le recyclage ; pour le plomb, 38 % ; le nickel, 28 % ; le zinc, 30 % ; l'étain, 19 %.

◀ *Page ci-contre, tableau XII : valeur de la production minérale française en 1973 (d'après* Annales des Mines, *décembre 1975, annexes I et II). Tableau XIII : production, consommation et soldes du commerce extérieur des minerais et métaux en France, en 1975 (d'après* Annales des Mines, *septembre-octobre 1976). Tableau XIV : origine des importations françaises de minerais de fer en 1974 (d'après les statistiques douanières).*

▼ *Une mine de nickel à ciel ouvert (plateau de Thio, Nouvelle-Calédonie).*

Sté métallurgique Le Nickel - S.L.N.

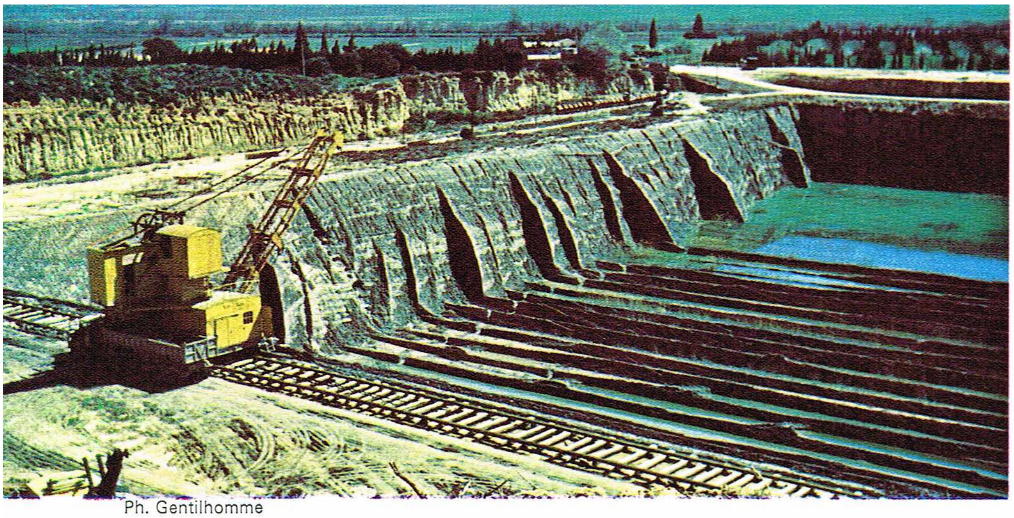

Ph. Gentilhomme

▲ ***Une carrière d'argile à tuiles et à briques exploitée par drague (Mas Briquet, Gard).***

Comme pour le fer, ces chiffres reflètent surtout le recyclage interne dans les usines de transformation et les fonderies. Pour l'étain seulement, il s'agit d'une récupération de vieux métal (soudures), le désétamage de chutes de fer-blanc ne représentant que 15 % du métal de deuxième fusion obtenu par recyclage.

S'il peut — et doit — être intensifié, le recyclage reste cependant limité.

La production de « déchets neufs » par les industries est directement proportionnelle à la quantité de métal qui y est fondue ou transformée ; si celle-ci fléchit — du fait d'une pénurie d'approvisionnement, par exemple — la diminution concomitante des tonnages recyclés ne peut que renforcer la pénurie. En tout état de cause, la bonne gestion des entreprises industrielles devrait viser à y réduire le pourcentage de déchets au cours des opérations, car la production de métal non marchand (chutes, déchets, « loupés ») utilise en pure perte de la main-d'œuvre, des équipements et de l'énergie.

La récupération des vieux métaux, moins sensible aux variations de production des métaux vierges, est susceptible d'un notable développement, mais se heurte à deux obstacles : dispersion spatiale de la « matière première », et mélange des métaux dans les objets manufacturés ; ainsi, le cuivre et le fer sont étroitement associés dans tous les appareils électriques, et doivent être séparés avant l'envoi à la fonderie, car le cuivre est un « poison » dans les aciers.

Bilan financier de l'approvisionnement national

Les développements précédents ont brossé un bilan physique de l'approvisionnement français ; il est nécessaire d'en examiner aussi les répercussions financières, sur le plan des comptes de la nation.

Les importations (c. a. f.) de minerais, d'engrais bruts et de métaux non ouvrés se sont élevées en 1974 à 15,1 MF *(milliards de francs)* contre 4,7 en 1971. Cette progression de 220 % est à imputer surtout au cuivre (dont les cours en 1973-1974 ont atteint un niveau exceptionnel ; près de 4 MF ont été consacrés aux achats de cuivre en 1974, contre à peine 2 en 1975) et aux phosphates (dont les prix ont plus que quadruplés entre 1973 et 1974), et au fait que toutes les matières premières ont vu peu ou prou leur prix s'envoler depuis 1973.

Dans le même temps, les exportations (f. o. b.) sont passées de 2,9 à 7,4 MF, soit une progression de 155 % seulement : le progrès du solde exportateur de l'acier est le plus notable (+ 1 450 millions de francs).

Le déficit global a donc été porté de 1,8 MF à 7,7 MF au cours de la période 1971-1974 (+ 330 %), et intervient à hauteur de 42 % dans le déficit total du commerce extérieur français en 1974 (18,3 MF).

Cette remarque est souvent utilisée pour souligner le rôle important qu'ont les matières premières minérales dans la balance du commerce extérieur français. En fait, il n'est pas inutile de rappeler quelques éléments de comparaison :

— Les matières premières minérales (non énergétiques) ne représentent que 5,9 % de la valeur totale de nos importations (257,1 MF en 1974), et 3,1 % de celle de nos exportations (238,8 MF), alors que les produits énergétiques comptent pour 22 % des importations en 1974.

— Le déficit du poste « produits agricoles à usage industriel », avec 7,3 MF, se trouve très proche de celui des matières premières minérales.

— Les importations de produits alimentaires « de luxe » : café, thé, épices, cacao et ses dérivés, ont causé une sortie de devises équivalant à 2,75 MF, somme supérieure à celle qui a été affectée aux achats de plomb, de zinc, d'étain, et d'argent.

Eu égard au caractère vital des importations de matières premières minérales pour la métallurgie de transformation (et toutes les industries qui s'y rattachent en aval) et l'agriculture — secteurs dont les excédents commerciaux couvrent, et au-delà, le coût des achats d'engrais, de minerais, et de métaux — les dépenses exposées pour l'approvisionnement minéral n'apparaissent pas inconsidérées. Il ne faut pas, cependant, en inférer que chercher à les réduire soit inutile, ni que les efforts pour développer la production sur le territoire métropolitain soient superfétatoires.

Ces efforts sont nécessaires, autant pour restreindre le déficit commercial que pour diminuer la vulnérabilité de la France vis-à-vis des contraintes physiques et politiques pesant sur son approvisionnement.

La vulnérabilité des approvisionnements

L'examen en termes de quantités physiques et de coûts financiers ne suffit pas à décrire pleinement la situation de l'approvisionnement extérieur français ; il n'apporte guère d'informations sur l'aspect qualitatif et prospectif de sa sécurité et de sa continuité .

L'analyse en termes de vulnérabilité, elle, prend en considération les éléments prospectifs d'ordres politique, minier, industriel, financier, commercial, législatif, monétaire, etc., qui peuvent avoir une incidence, directe ou indirecte, sur l'évolution des structures et des conditions d'approvisionnement du pays.

La vulnérabilité de la France, pour les diverses matières premières minérales dont elle est importatrice, dépend de trois phénomènes :

— L'état et l'évolution des marchés internationaux : tendances de la production (en fonction des investissements en capacités minières et métallurgiques, et des ouvertures ou fermetures d'exportations) et de la demande ; équilibre ou déséquilibre de l'offre et de la demande ; tendance des prix à la hausse ou à la baisse ; tension ou dépression des échanges internationaux ; risque de cartellisation de telle ou telle production.

— La structure de l'approvisionnement français : en plus du degré d'autonomie, pour chaque substance, il faut tenir compte de l'identité et de la diversité des fournisseurs (plus celle-ci est réduite, et plus les variations du prix ou de l'offre décidées par un fournisseur sont directement ressenties par le pays client), et de facteurs plus subjectifs tels que la qualité des relations diplomatiques entre les pays fournisseurs et la France, leur situation économique, leur orientation politique, etc. L'implantation plus ou moins forte d'entreprises françaises dans ces pays peut aussi jouer un rôle important, en créant des relations commerciales et financières privilégiées.

— Le degré de gravité qu'auraient une interruption ou une restriction plus ou moins longues des importations, ou une brutale augmentation des prix, sur l'activité industrielle. A cette question se rattache celle de la capacité des entreprises à faire jouer, en cas de pénurie, le recyclage et les substitutions, et à s'adapter à une situation nouvelle grâce à l'innovation technologique et commerciale.

Ces éléments d'appréciation conduisent à qualifier notre vulnérabilité de :

— très forte pour les métaux précieux, certains métaux d'alliages ferreux tels que cobalt, vanadium, niobium, le titane et le zirconium, les phosphates, les diamants ;

— forte pour le cuivre, le manganèse, le molybdène, l'antimoine, l'amiante — substances également indisponibles sur notre territoire, mais qui proviennent des pays plus « sûrs » ou liés à nous par des accords ;

— modérée ou faible pour des productions telles que la bauxite, l'étain, le plomb-zinc, le fer, le nickel, la potasse, le soufre, la barytine.

Notons que le concept de vulnérabilité peut être étendu aux débouchés de nos exportations, qui sont susceptibles d'être plus ou moins menacées, par exemple du fait du développement d'autres exportateurs, d'où saturation de la demande et mévente. C'est le cas du soufre depuis l'essor de la production canadienne.

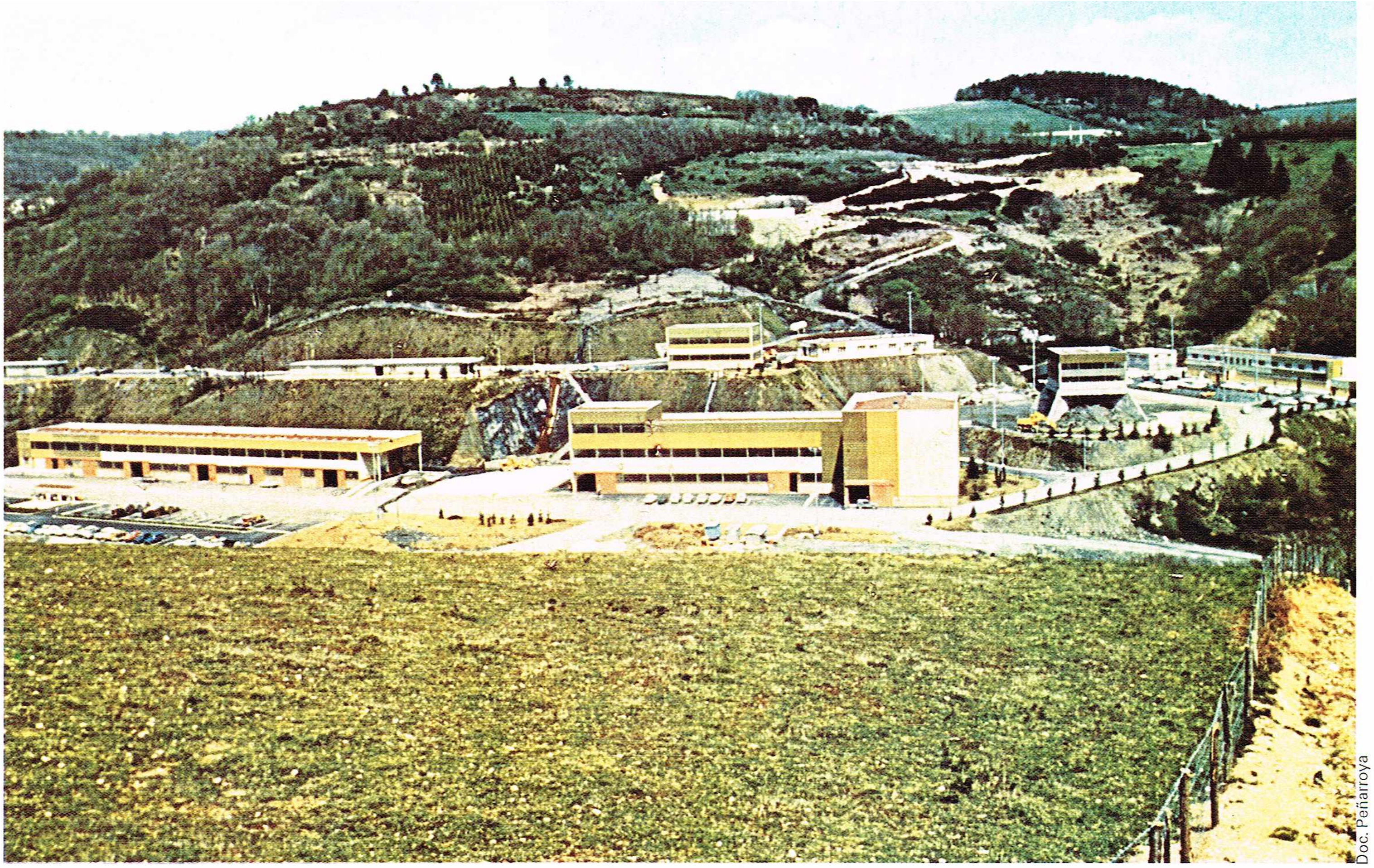

Doc. Peñarroya

▲ *Les installations de la nouvelle mine de plomb-zinc de Noailhac-Saint-Salvy (Tarn).*

La politique d'approvisionnement minéral de la France

Bien qu'il existât depuis longtemps les éléments d'une politique minérale, c'est le conseil de planification du 21 janvier 1975 qui a défini et rassemblé dans un cadre homogène les décisions et orientations générales devant guider, dans un contexte international en rapide évolution, la politique minérale intérieure et étrangère de la France dans les dix ans à venir.

Les principes fondamentaux retenus sont la recherche d'une sécurité accrue des approvisionnements, le développement de la coopération avec les pays producteurs peu industrialisés et la volonté de participer à une plus équitable répartition des richesses minérales.

Nous présenterons dans ce qui suit les mesures et les résolutions constituant les lignes maîtresses de cette politique sous trois rubriques.

Mesures intérieures

Ces mesures doivent avoir pour effet de remédier, par tous les moyens possibles mais à des coûts proportionnés à l'importance des problèmes, à l'insuffisance des activités minières en France.

Mise en valeur des ressources nationales

L'objectif qui a été fixé est un doublement en dix ans de l'actuelle production métropolitaine de matières premières minérales autres qu'énergétiques, permettant de couvrir 20 % des besoins globaux du pays en 1985, et ce grâce à la prospection géologique, à la recherche technologique et à des mesures financières et fiscales.

★ L'inventaire minier est certainement la disposition la plus remarquable ; ce travail, qui doit être mené à bien en cinq ans (1975-1980), comprend :

— La réalisation d'une prospection détaillée pour mettre en évidence de nouveaux gisements, avec remise ultérieure des résultats ainsi accumulés aux opérateurs miniers (privés ou publics) intéressés.

— L'acquisition d'une meilleure connaissance des ressources identifiées et de leur exploitabilité (y compris celle des concessions inactives et des anciens travaux), en fonction des niveaux de prix des minerais et métaux, actuels et à terme.

— L'évaluation, ou la réévaluation, des réserves et de leur longévité : beaucoup de gisements en exploitation vont décliner dans le cours de la prochaine décennie, et il faut prévoir l'échéance à laquelle une relève doit être

▼ *Figure 20 : évolution des ressources et de la production de plomb-zinc-argent en France entre 1954 et 1974 ; le tonnage de métal contenu dans le gisement est proportionnel à la surface du cercle (d'après* les Matières premières minérales, *collection* Études de politique industrielle, *publié en 1975 par le ministère de l'Industrie, du Commerce et de l'Artisanat, à la Documentation française).*

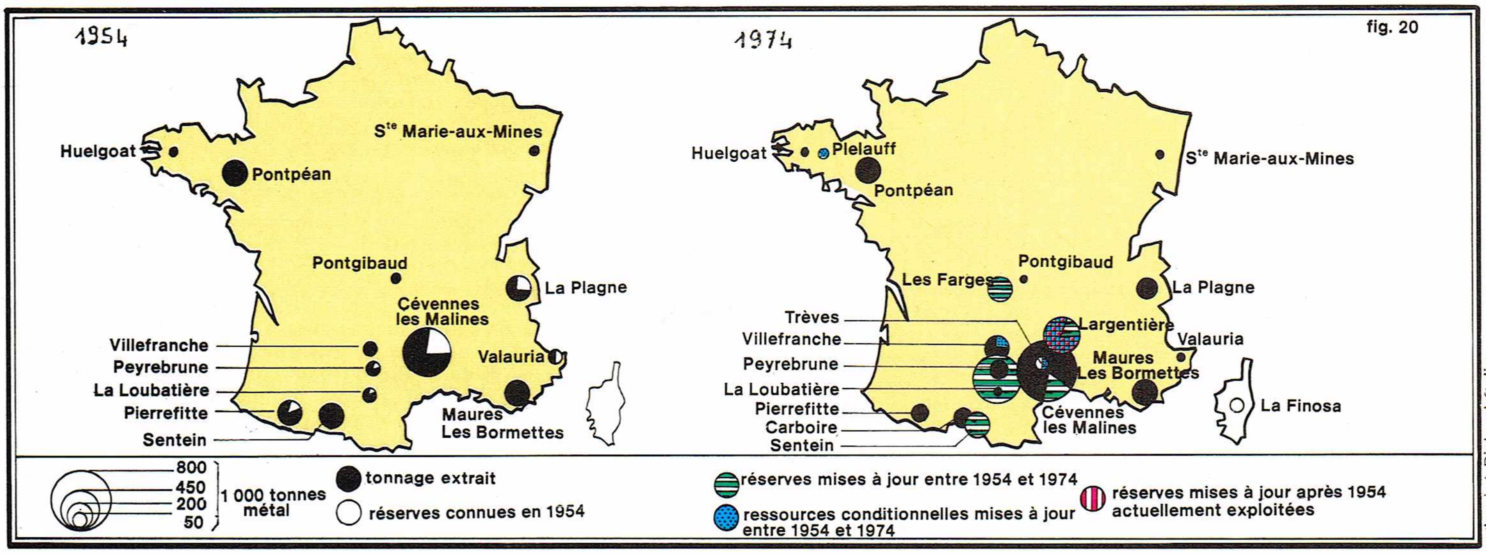

redessiné Richard Colin

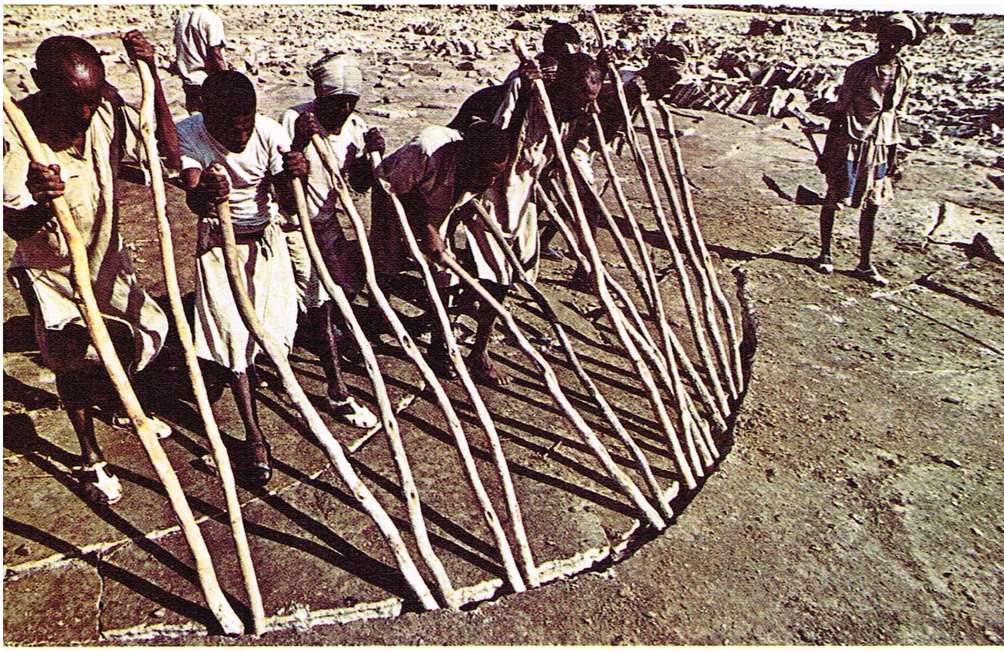

G. Gerster - Rapho

▲ *L'exploitation artisanale des plaques de sel dans la dépression Danakil (Éthiopie) ; au second plan, les pavés de sel découpés sont bien visibles.*
▼ *Tableau XV : rôle des différentes zones économiques dans l'approvisionnement français en minerais et en métaux (d'après* les Matières premières minérales, *collection Études de politique industrielle, publié en 1975 par le ministère de l'Industrie, du Commerce et de l'Artisanat, à la Documentation française).*

Tableau XV
Rôle des différentes zones économiques dans l'approvisionnement français en minerais et en métaux

Zones économiques	Rôle apparent (1)		Rôle réel (2)	
	Valeur des importations		Valeur des importations	
	(en millions de francs)	(en %)	(en millions de francs)	(en %)
Pays occidentaux et assimilés				
C.E.E. à 9	997	11,4	247	2,8
Reste de l'Europe occidentale	384	4,4	384	4,4
États-Unis	315	3,6	340	3,9
Canada	444	5,1	464	5,3
Japon	71	0,8	71	0,8
Océanie	593	6,8	593	6,8
Afrique du Sud Rhodésie	306	3,5	431	4,9
sous total	3 110	35,6	2 530	29,0
Pays socialistes				
U.R.S.S. et Europe orientale	338	3,9	348	4,0
Asie communiste	92	1,1	92	1,1
sous total	430	5,0	440	5,1
Pays en voie de développement				
Zaïre - Zambie	569	6,5	889	10,2
Algérie - Tunisie - Maroc	298	3,4	298	3,4
Autres franco-phones	1 317	15,1	1 317	15,1
Autres pays d'Afrique	747	8,6	747	8,6
Asie du Sud-Est	149	1,7	149	1,7
Autre Asie	163	1,9	163	1,9
Caraïbes	43	0,5	43	0,5
Amérique latine	1 835	21,1	1 965	22,6
sous total	5 121	58,8	5 571	64,0
Non classé	47	0,6	167	1,9
Total	8 708	100,0	8 708	100,0

(1) Somme des soldes importateurs pour les 27 substances minérales principales.
(2) Chiffres de la colonne précédente corrigés pour tenir compte de ce que les 3/4 des exportations de la C.E.E. vers la France proviennent en fait d'autres zones géographiques auxquelles on s'est efforcé de les réimputer.

assurée, si possible (cas du soufre de Lacq, de la potasse d'Alsace, du plomb-zinc de Largentière en Ardèche, de la fluorite de certains gisements du Massif central et du Sud-Est).

Cette tâche a été confiée au B. R. G. M. (Bureau de recherches géologiques et minières, qui a le statut d'établissement public) ; les crédits affectés à cet inventaire s'élèvent à 125 milliards de francs sur 5 ans (9 milliards de francs engagés en 1975, 28 en 1976).

Les zones plus particulièrement concernées par cet inventaire minier sont le Massif armoricain (pour cuivre, plomb-zinc, étain, titane-zirconium et terres rares), certaines zones du Massif central (or, barytine, plomb-zinc, fluorite, antimoine, divers métaux rares associés, etc.), les Pyrénées centrales et orientales (plomb-zinc, phosphates, tungstène) ; cependant, tous les massifs anciens sont concernés, ainsi que certains secteurs sédimentaires (phosphates de Picardie). Une attention spécifique est aussi portée à la Guyane, vaste territoire (20 % de la superficie métropolitaine) encore peu important sur le plan minier, mais prometteur.

L'ensemble de ces travaux conduira donc à développer certaines productions actuelles (plomb-zinc, tungstène, barytine, fluorite, kaolin), à réactiver des productions anciennes (antimoine, cuivre, phosphates, etc.) et à lancer des productions nouvelles (titane-zirconium, terres rares, niobium-tantale, béryllium-lithium).

★ La recherche technologique vient en aval de ces activités et doit créer des procédés de traitement originaux, efficaces et économiques pour certains minerais non conventionnels ou difficiles, tels que :

— les latérites nickélifères de Nouvelle-Calédonie (des minerais semblables sont d'ailleurs mis en exploitation dans plusieurs pays étrangers) ;

— le leucogranite albitique d'Échassières (Allier) à minéralisation polymétallique ;

— les formations volcano-sédimentaires à sulfures finement disséminés (cuivre, plomb, zinc, argent) de Bretagne, type de minerai classique dans certains pays étrangers, mais difficile à valoriser ;

— les grès quartzites à rutile et zircon de Bretagne.

★ Diverses mesures financières et fiscales complètent cet ensemble. Une *taxe parafiscale* sur les granulats (sables et graviers d'alluvions) a été instituée ; elle est versée par les exploitants, et son produit est affecté à l'inventaire et à l'évaluation de nouveaux gisements de granulats, dans les vallées des grands cours d'eau et dans les dépôts côtiers marins, et à des études et essais de restauration des sites d'anciennes exploitations. Le *« plan cuivre »* mis en place en 1973 a obtenu des crédits renforcés (10 milliards de francs en 1973, 25 à 30 milliards de francs/an depuis 1975) ; sa vocation, grâce à des subventions et des incitations financières, est de favoriser et de soutenir la recherche de gisements de cuivre en France et à l'étranger et de développer les infrastructures métallurgiques sur le territoire : jusqu'à présent, faute d'usines à cuivre importantes, la France est dans l'obligation d'acheter du cuivre déjà raffiné (au lieu de concentrés ou de métal brut [blister], moins chers) et de faire retraiter à l'extérieur l'essentiel des déchets cuivreux collectés dans le pays.

Enfin, la fiscalité minière dans les départements et territoires d'outre-mer (Guyane et Nouvelle-Calédonie) fait l'objet d'adaptations, afin d'inciter les entreprises minières françaises à y implanter des exploitations, ou à développer celles qui existent déjà.

Économies de matières premières

La prospection et le développement des gisements, qui apportent des ressources supplémentaires, sont essentiels pour améliorer l'approvisionnement national, mais cette voie n'est pas la seule envisageable ; une politique d'économies et de meilleure utilisation des produits d'origine minérale peut participer aussi à l'augmentation de l'autonomie du pays par :

— Une utilisation plus complète des matières premières dans les ateliers de transformation (réduction quantitative des chutes de fabrication et des « loupés »).

— La récupération et le recyclage des déchets industriels « obligés » et des métaux (entre autres substances) contenus dans les rejets ménagers et dans certains sous-produits ou effluents industriels, sous une forme plus ou moins dégradée ou mixteuse. Des techniques de sépara-

tion et de valorisation originales sont opérationnelles pour les résidus ménagers; des efforts doivent être faits au niveau de la collecte des vieux objets métalliques (ferreux et non ferreux), encore trop dispersée dans une multitude de petites entreprises artisanales, et trop peu performante, en termes de pourcentage récupéré.

— Une amélioration de la durée d'usage des biens manufacturés, soit directement par une conception plus solide des produits leur assurant une longévité accrue, soit indirectement, par une conception telle que d'éventuelles réparations soient possibles (avec les modifications des structures de fabrication et les méthodes de commercialisation que cela suppose).

En fait, on se heurte dans ce domaine à l'une des caractéristiques maîtresses des systèmes de consommation moderne, fondés sur la production intensive de biens peu durables, remplaçables et non pas réparables.

Les dispositions d'ordre international

Coopération bilatérale avec les pays en voie de développement

L'instauration et l'extension d'accords de coopération avec les pays en voie de développement — en premier lieu, avec les États nouvellement indépendants d'Afrique, mais aussi, maintenant, avec certains pays d'Amérique latine et d'Asie du Sud-Est — sont une constante de la politique étrangère de la France.

Cette coopération, en ce qui concerne les matières premières minérales, revêt différents aspects :

— Assistance technique et financière dans le domaine géologique — prospections minières, travaux hydrogéologiques (reconnaissance et exploitation des ressources en eau) — et dans celui de l'ingéniérie — études de valorisation de minerais, création et maintenance d'installations minières, minéralurgiques et métallurgiques.

— Création, plus récemment, du C. E. S. M. A. T. (Centre d'études supérieures des matériaux), qui a pour vocation d'accueillir les futurs responsables miniers des pays en voie de développement pour des stages de formation de haut niveau.

— Mise en place, récente également, de fonctionnaires spécialisés (attachés miniers) dans les ambassades françaises situées dans certains pays à importante activité minière; leur rôle sera, dans le domaine des exploitations minérales, calqué sur celui des attachés commerciaux.

Ces actions resserrent les liens entre les pays en voie de développement concernés et la France, liens qui contribuent à accroître ou maintenir la sécurité des actifs et investissements des entreprises minières françaises à l'étranger.

Accords d'approvisionnement d'État à État

Dans un ordre d'idées un peu différent, il convient aussi de rappeler l'essor des contrats d'État à État entre la France et les pays à économie planifiée (Union soviétique et Europe orientale), prévoyant la fourniture étalée sur plusieurs années de minerais, de métaux ou de substances énergétiques (gaz, charbon) par ces pays, en échange, généralement, de produits agricoles, dont la France est largement exportatrice.

Actions multilatérales

Elles ressortissent pour partie au domaine de la politique étrangère et pour partie à celui du système économique international, et se situent dans le cadre de réunions internationales, telles que la C. N. U. C. E. D. (Conférence des Nations unies pour le commerce et le développement) ou la Conférence Nord-Sud, tenue à l'instigation de la France. Appuyée par diverses autres nations, la France y défend sa conception d'une politique de concertation et de coopération étroite entre pays producteurs et pays consommateurs, pays en voie de développement et pays industrialisés — politique dont les répercussions débordent largement la seule question des échanges de matières premières minérales.

Les mesures de précaution

Elles comportent deux volets : la constitution d'un stock métallique de sécurité et la recherche d'une diversification des sources d'approvisionnement extérieures.

Les modalités de fonctionnement du **stock de métaux non ferreux** ont déjà été développées dans le chapitre consacré aux prix et marchés des matières premières minérales; nous rappellerons que cette réserve, propriété de l'État, est destinée à approvisionner l'industrie transformatrice nationale en période d'approvisionnement difficile (pénuries transitoires résultant d'offre insuffisante, d'embargos décidés par certains producteurs, de grèves paralysant l'activité minière ou métallurgique d'un pays fournisseur, telle celle qui, en 1970, dans le secteur du nickel, a duré 5 mois au Canada...) ou trop onéreux (du fait d'une surconsommation créant une forte tension sur les prix, ou de manœuvres spéculatives, comme dans l'hiver 1973-1974).

La **diversification des sources d'approvisionnement** a pour but de réduire, non la dépendance générale du pays, mais sa dépendance pour telle ou telle matière première minérale, issue de la prééminence d'un fournisseur. En fait, la dépendance, due à la nécessité d'approvisionnements extérieurs, n'est pas un phénomène intrinsèquement grave, du moins si les origines géopolitiques des importations sont suffisamment variées et équilibrées les unes par rapport aux autres. Mais dans le cas d'achats effectués auprès d'un petit nombre de fournisseurs, l'approvisionnement du pays client sera immédiatement, et fortement, affecté par toute chute de production ou relèvement brutal du prix survenant du fait d'un des fournisseurs (*tabl.* XV).

Maintenir une diversification efficace des importations devient évidemment très malaisé lorsqu'il existe un cartel de producteurs (exemple typique du pétrole) ou un oligopole (minerais de titane...) détenant la quasi-totalité du marché international.

Actuellement, la diversité des approvisionnements de la France reste insuffisante pour plusieurs matières premières minérales. Les raisons de cette situation sont variées : petit nombre d'exportateurs dans le monde (platine [Afrique du Sud et Union soviétique], titane [Australie et Canada, etc.]) ; impératifs technologiques (les spécifications recherchées ne sont offertes que par un ou deux producteurs [minerai de cobalt, exclusivement acheté au Maroc]) ; implantation géographique des filiales des groupes français (cas des bauxites) ; considérations historiques : approvisionnement préférentiel auprès des anciennes colonies, devenues producteurs indépendants et liées à la France par des accords économiques et monétaires (phosphates du Maghreb, du Togo et du Sénégal ; minerai de manganèse du Gabon ; uranium du Niger et du Gabon).

A titre d'exemples, on peut citer comme structures d'approvisionnement équilibrées, celles :

— du tungstène (aucun des huit principaux fournisseurs ne détient plus de 20 % du marché français) ;

— de l'antimoine, neuf zones géographiques (comprenant chacune un ou plusieurs pays) participant à l'approvisionnement français, chacune à hauteur de 4 à 20 % ;

et comme approvisionnements insuffisamment ou pas du tout diversifiés, ceux :

— des borates (73 %, en valeur, sont fournis par les États-Unis) ;

— du manganèse (Gabon, 50 %, et Afrique du Sud, 32 %) ;

— des phosphates bruts (Maroc, 50 %, Togo-Sénégal, 40 %) ;

— des concentrés de terres rares (Australie pour 85 %) ;

— des concentrés de titane (98 % fournis par le dipole Australie-Canada).

BIBLIOGRAPHIE

BOURRELIER P. et al., *Matières premières minérales et Relations internationales, Annales des Mines,* Paris, janvier 1975. - CALLOT F., *Production et Consommation mondiales de minerais en 1973, Annales des Mines,* Paris, décembre 1975. - GUILLEMIN C., *Les ressources minérales et énergétiques vont-elles manquer?, Revue du palais de la Découverte,* n° spécial 3, Paris, mars 1974. - MALKIN D., SARBIB J.-L., *les Matières premières minérales, Perspectives mondiales et politiques d'approvisionnement,* la Documentation française, Paris, 1975. - *L'Énergie, les minerais et les métaux en France en 1975, Annales des Mines,* Paris, sept.-oct. 1976. - *Matières premières et Développement,* dossier Jeune Afrique/Economia, n° 1, Presse africaine associée éd., Paris, 1974. - *Statistique de l'industrie minérale,* ministère de l'Industrie (S. T. I. S. I.), Imprimerie nationale, Paris, 1974.

R. Serment

▲ *Un ancien plateau de broyage dans la mine d'Imiter (Maroc); les minéraux d'argent étant finement disséminés dans la roche, les mineurs du XVII^e siècle broyaient le minerai à la main dans ces jarres de terre cuite.*

GISEMENTS DE MINERAIS ET PROSPECTION MINIÈRE

Très tôt dans son histoire, l'homme a compris l'utilisation qu'il pouvait faire des métaux. Il emploie dans un premier stade les métaux natifs (cuivre, or, argent) qu'il recherche dans les alluvions (placers aurifères), dans les parties superficielles et oxydées de divers gîtes (cuivre, argent).

La découverte de la fusion lui permit d'extraire les métaux de certaines roches : apparition du minerai. Par la fusion de minerai contenant plusieurs minéraux, il découvrit les alliages. L'âge du bronze marque une étape importante dans l'évolution de l'homme.

Constatant la relative rareté de certains métaux, il utilisa ceux-ci soit pour battre de la monnaie ou confectionner des bijoux (argent, or), soit pour la fabrication d'objets utilitaires ou d'armes (cuivre, fer, plomb).

Comme la demande s'accroît, il se met à la recherche d'autres sources de minerai, les exploitant d'abord en surface, puis en travaux souterrains : l'*art de la mine* est né. Cet art est très ancien. Les mines du Sinaï, connues plus tard sous le nom de « mines du roi Salomon » dans la Bible, étaient exploitées par les anciens Égyptiens dès 2800 avant J.-C. A cette époque lointaine, les Grecs exploitaient des filons aurifères (mines de Cassandre). Au Moyen Age et pendant la Renaissance, les exploitations se développèrent. En France, certaines régions furent les lieux privilégiés d'une intense activité minière : Massif armoricain, Massif central, Vosges. A l'étranger, ce furent surtout la Saxe, la région du Hartz et les Monts Métallifères (Erzgebirge). Les mines de Saxe ont donné naissance au capitalisme moderne. En 1556 paraît le premier ouvrage traitant de l'art des mines, c'est le célèbre *De re metallica* du Saxon Georgius Agricola.

Parallèlement à cette intense activité, les mineurs accumulent de nombreuses observations sur la nature des roches, les liaisons préférentielles de celles-ci avec certains gîtes, le contrôle des structures minéralisées, l'importance des fractures : la *géologie* naît ainsi. L'œuvre de Werner à la fin du XVIII^e siècle en marque l'éclosion, deux siècles après celle de son compatriote Agricola.

Dès le XVII^e siècle, paraissent les premiers ouvrages sur les gîtes minéraux; ce sont des répertoires de gisements métalliques accompagnés parfois d'une petite description. Citons, parmi les plus célèbres en France, pour la Bretagne la liste de la baronne de Beausoleil reproduite par Gobet dans *les Anciens minéralogistes,* et pour le Languedoc l'*Histoire naturelle de la province du Languedoc* de De Gensanne.

Les premières études expérimentales datent du début du XIX^e siècle. En 1849, Daubree, à partir de la synthèse de la cassitérite (SnO_2), met en évidence le rôle que jouent des vapeurs venant des profondeurs, contenant eau, chlore, fer, dans le dépôt des minerais d'étain. Élie de Beaumont (1847) avait souligné la liaison minéralisation-roches ignées. Toutes les connaissances acquises sont synthétisées par E. Fuchs et L. de Launay (1893), puis par L. de Launay (1913) dans son traité *Gîtes minéraux et métallifères.* Ce dernier a créé le concept de *métallogénie* pour cette branche des sciences géologiques.

L'accroissement de la demande en métaux provoqué par le développement industriel favorise la prospection et la découverte de nouveaux gîtes parfois très différents de ceux jusqu'alors exploités. Les études se succèdent : monographies sur un gîte ou un type de gîte. Répondant à un besoin de synthèse, apparaissent des classifications où les gîtes de différents métaux ou d'un seul métal sont classés suivant certains paramètres génétiques ou morphologiques.

Le rôle des paramètres génétiques dans la genèse des gîtes suscite des discussions parfois animées entre les différentes écoles. Il en est de même pour les origines de certaines minéralisations stratiformes sans liaison apparente avec une roche ignée à propos desquelles *syngénétistes* (tenants d'un dépôt des minéraux métalliques contemporain de la formation de la roche encaissante) et *épigénétistes* (tenants d'une mise en place des dépôts métalliques postérieure à la formation des roches encaissantes) s'affrontent, toutes ces discussions n'ayant en fait qu'un seul but, mieux comprendre la genèse des gîtes minéraux et déterminer les facteurs qui leur donnent naissance.

Si, à une certaine époque, les découvertes minières ont été le fruit du hasard — le gîte important de Sudbury, au Canada, fut découvert en 1895, lors du creusement d'une tranchée de chemin de fer — actuellement, le développement des connaissances sur les gisements, d'une part, et la géologie des pays, d'autre part, permettent, à une certaine échelle, de définir les zones où des recherches approfondies seraient susceptibles de mettre en évidence de nouveaux gîtes. C'est la *gîtologie* prévisionnelle.

Les gisements de minerai

Définition d'un gisement

Deux définitions peuvent être données : l'une purement économique, l'autre géochimique.

Dans une définition économique, un minerai est une roche contenant un ou plusieurs métaux à une teneur suffisante et sous une forme minéralogique telle que l'exploitation puisse en être envisagée avec rentabilité. Conséquence logique, un gisement est une accumulation de minerai d'un tonnage suffisant pour que l'exploitation puisse en être effectuée avec profit. On voit donc immédiatement qu'en fonction de la localisation géographique, de la situation politique, économique, etc., d'un pays, une même concentration sera ou non un gisement, et que des changements économiques, géopolitiques ou technologiques (nouvelles utilisations de certains métaux, par exemple du titane dans l'aérospatiale) peuvent rendre, au moins temporairement, une concentration donnée exploitable ou non.

Dans une définition géochimique, tous les éléments sont normalement contenus à l'état plus ou moins dispersé dans les différentes roches constituant l'écorce terrestre. Huit éléments seulement (O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg) représentent 98,3 % en poids des constituants des roches ignées. Un gisement minier sera donc une *concentration anormale* en certains éléments. La métallogénie est l'étude de la formation et de l'évolution de ces concentrations anormales.

Les classifications

Parmi les plus anciennes tentatives de classification, signalons celle d'A. von Groddeck (1878) dans *Die Lehre von der Lagerstatten der Erde*.

Il n'est pas possible de donner dans les limites de ce fascicule une vue d'ensemble des différentes classifications proposées depuis le début du siècle. Nous rappellerons brièvement un certain nombre d'auteurs qui ont fait date.

L. de Launay (1913) utilise comme paramètre principal le contenu chimico-minéralogique des divers gîtes et leurs associations avec des roches ignées. W. Schneiderhohn (1944) classe les gîtes selon des critères minéralogiques

et morphologiques mais ne tient pas compte de l'enveloppe géologique des gisements. E. Raguin (1961), dans sa 3e édition de la *Géologie des gîtes minéraux,* suit la même voie, mais insiste sur le fait que les classifications futures « devraient être à base physico-chimique ». Parmi les autres auteurs, citons R. Beck (1904), W. E. Petrascheck (1961), A. M. Bateman (1950), I.-A. Bilibin (1955), H. Borchert (1952).

Sous l'influence de F. Blondel (1942) apparaît la définition de classement par types (classification typologique), c'est-à-dire une classification analogique où les gisements sont regroupés par caractères communs « observables et non supposés : l'analogie doit porter sur l'ensemble des caractères observables; les différences entre deux gisements d'un même type doivent être faibles au total ». F. Blondel (1955) utilise cette méthode pour les gisements de fer et définit ainsi une quinzaine de types de gîtes. P. Routhier (1958) reprend cette idée, la développe et établit une typologie générale pour l'ensemble des gîtes minéraux (1963). Dans le même esprit, une série de typologie est proposée pour les gisements d'un même métal par : J. Geffroy et J. Sarcia (1969) pour l'uranium; I. M. Varentsov (1964), J. Bouladon (1970), A. Wissink (1972) pour le manganèse; J. Bouladon (1969), C. Bauchau (1971) pour le plomb-zinc; H. Pelissonnier (1972) pour le cuivre.

Nous allons examiner quelques exemples de classifications.

Un exemple de classification génétique : classification par températures de formation

Pour W. Lindgren, la concentration des éléments métalliques est liée étroitement aux conditions de température et de pression qui règnent dans le milieu de formation. Le paramètre température est déterminé par la présence dans les différentes paragenèses (association de divers minéraux) de certains minéraux dont la température de formation serait significative. Celle-ci est évaluée par synthèse expérimentale de certains d'entre eux, par des modifications importantes de structure à certaines températures (point d'inversion : passage du quartz α au quartz β à 573 °C par exemple), par des changements de couleur, etc. Par ces méthodes, P. Ramdohr sélectionne 49 minéraux qu'il considère comme des thermomètres géologiques.

Parmi les gisements, W. Lindgren distingue deux grands groupes : le premier comprend les gisements dont l'origine est due à des procédés mécaniques de concentration (gîtes détritiques, placers, etc.) formée à température et pression modérées; le second, le plus important, réunit les gîtes issus de processus chimiques de concentration et dont la température et la pression varient dans de larges limites. Dans ce second groupe, il distingue trois sous-groupes, en fonction : du milieu de formation sédimentaire, des relations avec des roches plutoniques, avec des magmas. Au sein de ces sous-groupes, il définit les phénomènes de concentration des différents gîtes par l'évaluation de la température et de la pression mises en jeu, accordant la prédominance au paramètre température, la pression n'intervenant qu'en second lieu.

Deux exemples de classifications typologiques

Classification de l'ensemble des gisements par cadres géologiques

P. Routhier, dans son ouvrage *les Gisements métallifères* (1963), définit ainsi l'intérêt d'une classification : « Faciliter la connaissance en constituant des groupements sur la base d'*analogies*. Du point de vue pédagogique, exposer en évitant le plus possible les répétitions; faciliter la découverte de nouveaux gisements, c'est-à-dire orienter la prospection. Pour remplir ce deuxième but, il faut utiliser les analogies. »

Analysant, parmi les différentes classifications génétiques existantes, les critères géologiques ou physico-chimiques (température, pH) utilisés, il souligne d'une façon pertinente l'insuffisance des classifications physico-chimiques, insuffisance qui se traduit par une certaine hétérogénéité due à la nécessité d'introduire, outre les paramètres physico-chimiques, d'autres points de vue, en particulier géologiques, pour distinguer les différents gîtes. Cette hétérogénéité rend toute comparaison difficile. Reprenant et complétant la liste des défauts généraux des classifications génétiques déjà soulignés par F. Blondel, P. Routhier constate : que l'histoire géologique des roches encaissantes est mal connue pour beaucoup de gisements; que les relations chronologiques existant entre la formation d'un gîte et celle de son enveloppe sont souvent discutées, cet état de fait débouchant en particulier sur la querelle syngenèse-épigenèse; qu'un grand nombre de gisements se sont formés non pas en une phase de concentration unique, mais en une succession de phases qui peuvent s'échelonner dans le temps. Cette dernière constatation explique les nombreuses divergences qui existent entre les auteurs des différentes classifications génétiques, divergences ayant pour origine le choix, variant d'un auteur à l'autre, du processus concentrateur.

P. Routhier aboutit donc « à un constat de carence partielle des classifications génétiques de gisement », et propose une classification naturelle. Il montre l'intérêt du *type* dans la définition du gisement métallifère. Remarquant que la notion de type « s'impose souvent au praticien au même titre que la physionomie », il souligne le caractère délicat de la définition du type par l'ensemble convergent des caractères communs. Il propose donc un premier stade : la rédaction, par gisements connus, de fiches où les caractéristiques perceptibles seront mises en évidence. A partir de celles-ci, on dégagera, pour chaque métal, des types définis à partir des caractères « appartenant en propre aux gisements et à l'enveloppe du gisement » (voir *les Gisements métallifères,* tome I, p. 44). Cette idée extrêmement féconde a été reprise par beaucoup de métallogénistes.

Dans le désir de rester très proche des préoccupations premières du géologue minier qui se résument dans ces deux questions : quelles substances minérales peut-on espérer découvrir dans des conditions géologiques déterminées, d'une part? et dans quelles conditions géologiques peut-on espérer découvrir tel ou tel métal, d'autre part? il répond à cette dernière question en établissant une classification où il met l'accent sur la lithologie (roches encaissantes) et la morphologie des gîtes. Le contenu chimico-minéralogique n'intervient qu'en second lieu. Dans ce cadre, chaque type est caractérisé par une dénomination lithologique ou minéralogique, ou quelquefois simultanément par les deux termes « évoquant d'emblée quelques-uns des principaux caractères du type. Par exemple, pour le manganèse : type oxydé-carbonaté à la base de transgressions à dominante siliceuse, ou type Tchiatoura ».

Ces types sont regroupés dans des tableaux généraux indépendants des hypothèses génétiques et mettent l'accent sur la liaison avec les roches encaissantes. Le contenu chimico-minéralogique n'intervient qu'après la roche encaissante et la forme morphologique.

Classification des gisements d'un même métal selon des caractères chimico-minéralogiques

H. Pelissonnier (1972) fonde sa classification sur des distinctions chimico-minéralogiques, la structure intervenant comme deuxième paramètre. En analysant les éléments entrant en jeu dans la mise en place d'un gîte et en les comparant avec les nombreux paramètres géologiques liés au gisement lui-même, à l'enveloppe locale et régionale suivant les différentes échelles, trois d'entre eux lui apparaissent comme fondamentaux :

— l'association minéralogique (paragenèse), qui marque l'apport au sens le plus large et rend compte d'une manière indirecte de la zone source ;

— la structure locale, ou, d'une manière plus précise, la singularité dans la structure régionale qui exprime l'*étranglement,* assure la concentration et peut lui donner sa morphologie ;

— le milieu local, c'est-à-dire les roches encaissantes.

Ces paramètres ne sont pas indépendants les uns des autres (liaisons éventuelles entre structure locale et réceptacle, même origine indirecte du gisement et du réceptacle dans le cas de manifestations signées connexes par exemple). De plus, ils s'intègrent dans des enchaînements plus larges, représentés par divers paramètres induits mis en honneur par d'autres auteurs, température de formation, profondeur de mise en place, position dans l'évolution orogénique.

Pour H. Pelissonnier, une classification doit répondre à un triple désir : rendre compte des continuités spatiales (des minéralisations liées dans l'espace ne doivent pas être séparées dans une classification) ; saisir les filiations entre

Tableau I
Définition des types de gisements de cuivre avec leur importance relative en quantité de métal (Q*c*) et en indice de concentration (*i* = quantité de métal × teneur)

N° type	Désignation des types de gisements de cuivre	Éléments majeurs S, Fe	Éléments primaires marqueurs	Éléments mineurs fréquents	Minéraux typiques primaires	Gisements caractéristiques	Q*c* %	*i* %
1	Amas pyriteux associés à des roches volcaniques	I		Zn, Pb, Ag, Au, Se, Te, Ba	Pyrite, chalcopyrite, blende	Huelva, Flin-Flon, Timmins, Chypre, Mount Lyell, Murgul, Röros, Lökken...	9,90	12,52
2	Imprégnations stratiformes associées à des roches volcaniques pauvres en pyrite	II-III		Ag, Zn	Bornite, chalcosine	Kosaka, Hanaoka, Cavallo, Bagacay, Mantos Blancos, Diablo...	0,77	0,92
3	Gisements de cuivre natif associés à des laves basiques	III		Ag	Cuivre natif, chalcosine	Lac Supérieur	2,29	1,26
4	Gisements stratiformes au sein de schistes, marnes et et grès	III		Ag, Co	Chalcosine, bornite, chalcopyrite, cuivre natif	Mansfeld, Dzhezkazgan, Zambie, Shaba, Boléo, White Pine, Timna, Corocoro...	26,85	42,46
5	Gisements d'étain cuprifères	II	Sn	Bi, W, Ag	Cassitérite, stannite, chalcopyrite	Cornouailles, Akenobé, Ashio, Mount Pleasant...	0,61	0,69
6	Gisements porphyriques avec molybdène	II	Mo	Au, Re	Pyrite, chalcopyrite	Braden, Chuquicamata, Cananea, Bingham, Bisbee, Kounrad, Agarak, Majdanpek, Medet...	48,36	29,13
7	Gisements à énargite	II	S, As	Ag, Pb, Zn	Énargite, pyrite	Butte, Cerro de Pasco, Morococha, Bor...	4,02	5,50
8	Gisements à fer oxydé et associés à des roches intrusives basiques	II	O (oxydes métalliques)	Co, Ni, Au	Chalcopyrite, oligiste, magnétite	Craigmont, La Africana, Tamaya, Messina, O'Okiep, Cornwall...	2,38	2,61
9	Gisements associés à des intrusions basiques et ultrabasiques avec nickel abondant	I	Ni	Pt, Co	Pyrrhotite, chalcopyrite, pentlandite	Sudbury, Norilsk, Petchenga, Kambalda, Empress...	2,26	1,38
10	Gisements de quartz à chalcopyrite	II	?	Co, Au	Chalcopyrite, pyrite, quartz	Allihies, Bou Skour...	0,05	0,07
11	Gisements avec sidérose	II	Co_3Fe, Sb	Ni, Ba, Ag, Bi, Hg	Sidérose, chalcopyrite, tétraédrite, barytine	Mitterberg, Banca, Alzen...	0,05	0,12
12	Gisements à mispickel ou pyrrhotite et or	I à II	Fe, As	Au, Ag, Bi	Mispickel, pyrrhotite, chalcopyrite	Cabor, Boliden, Salsigne, Rossland...	0,30	0,46
13	Gisements à tennantite avec germanium	III	Ge, As	Pb, Zn, Co, U, V, Mo, Ag, Cd	Tennantite, chalcosine, reniérite	Tsumeb, Kipushi...	0,70	2,26
	Divers non classés						1,35	0,63

Dans la 3e colonne : I = excès de S et Fe
II = S et Fe normal
III = déficit de S et Fe

▲ ***Tableau I :* *définition des types de gisements de cuivre avec leur importance relative en quantité de métal (Qc) et en indice de concentration (i = quantité de métal extérieur)* [*d'après* **H. Pélissonnier,** Annales des Mines, *mars 1974*].**

minéralisations variées (les cas de transition en particulier doivent être étudiés) ; rendre compte d'une façon synthétique des différents aspects d'un gisement.

Développant sa pensée dans *les Dimensions des gisements de cuivre dans le monde* (1972), il aboutit à la conclusion que la paragenèse, qui permet d'appréhender d'une manière indirecte la *source* à l'origine du gîte, sera le « paramètre primaire fondamental définissant la série la plus complète de types ». L'ordonnancement de la classification tiendra compte des liaisons dans l'espace (formation à la surface ou en profondeur) et dans le temps (position dans l'évolution orogénique). Les types principaux se situeront à certains nœuds de l'intersection entre classification structurale et paragénétique.

La définition des différentes paragenèses se fait par l'intermédiaire des éléments majeurs et des éléments mineurs. En effet, dans l'association minéralogique, les éléments majeurs toujours présents et à teneurs élevées, exprimés minéralogiquement, permettent quelques grandes coupures. Ils seront semi-quantifiés selon les minéraux et les proportions respectives. Quant aux éléments mineurs, si certains existent d'une façon très constante dans les gisements d'un même type, on ne peut pas, malgré tout, les considérer comme caractéristiques, car ils peuvent exister exceptionnellement dans des gisements d'autres types. L'élément mineur considéré est « un marqueur du type ».

Ce mode de classification a été établi pour les gîtes de cuivre (Pelissonnier, 1972), où 13 types ont été distingués (*tabl.* I), et pour les gîtes de plomb-zinc-argent (Bauchau, 1971), où 10 types de gîtes ont été mis en évidence, certains étant les mêmes que ceux définis pour le cuivre, notamment pour les gîtes où Pb-Zn-Cu sont associés (amas pyriteux, par exemple).

Les différents types de gisements

La formation des gisements minéraux est étroitement liée à l'évolution de l'écorce terrestre. Depuis une vingtaine d'années, il est admis que celle-ci est due à deux phénomènes fondamentaux : la dérive des continents et l'expansion des fonds océaniques. L'interprétation de l'ensemble de ces phénomènes a donné naissance à la tectonique des plaques.

La preuve de la dérive des continents, déjà perçue dans le passé par Wegener, fut apportée vers les années cin-

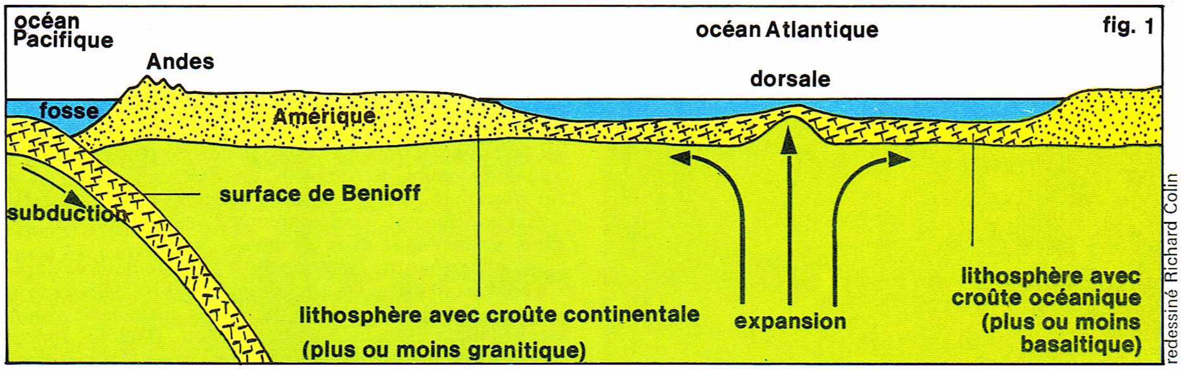

◀ *Figure 1 : représentation schématique du principe de la tectonique des plaques ; l'expansion a lieu au niveau de la dorsale océanique ; les plaques lithosphériques se déplacent, et leur affrontement dans les zones de subduction, le long d'un plan appelé « plan de Benioff », provoque des plissements et la formation de chaînes dites liminaires (d'après M. Lemoine,* la Recherche, *nº 33, avril 1973).*

quante par les géophysiciens. Au moment de leur formation, les roches sédimentaires ou ignées acquirent et conservèrent un magnétisme fossile (appelé aussi rémanent) dû au champ magnétique, donc à la position du pôle géomagnétique à l'époque de leur formation. Les mesures effectuées sur des roches de même âge de deux continents ont montré que la position des pôles ainsi déterminée ne coïncidait pas. L'existence de déplacements relatifs entre deux continents est ainsi prouvée.

Parallèlement, l'expansion du plancher océanique, à partir d'une zone médiane appelée dorsale, fut prouvée par l'existence d'anomalies magnétiques symétriques et parallèles à celle-ci ; cette dorsale présente dans sa partie médiane un fossé d'effondrement appelé *rift.* Ces anomalies dues à des inversions du champ magnétique sont bien connues et ont pu être datées. Elles ont permis de mettre en évidence le fait que l'âge du plancher océanique augmentait progressivement de cette dorsale vers le bord des océans. L'expansion est ainsi prouvée. La vitesse de déplacement est de l'ordre de quelques centimètres par an. Le mouvement est dû à des courants magmatiques de convection provenant du manteau sous-jacent.

Comme le diamètre de la Terre ne subit pas d'augmentation, il faut bien admettre que certaines portions de la lithosphère sont réabsorbées dans le manteau. Cela se fait au niveau des fosses océaniques, le long d'un plan dit de subduction, appelé aussi plan de Benioff (*fig.* 1).

La partie supérieure de l'écorce terrestre, ou lithosphère, est divisée en un certain nombre de plaques (16 principales) délimitées par les grandes lignes de séismicité. Ces plaques s'écartent au niveau des dorsales et se rapprochent dans les zones de subduction. Leurs « collisions » provoquent la formation de chaînes. On distingue :

— les chaînes de collision, qui résultent de l'affrontement de plaques portant du matériel continental ; c'est le cas du domaine mésogéen ;

— les chaînes liminaires, dues à l'enfoncement d'une plaque lithosphérique océanique sous une plaque dont la croûte peut être soit continentale, soit océanique.

L'enfoncement de la plaque océanique le long du plan de subduction provoque la fusion du matériel superficiel. Les produits de fusion les plus légers se séparent sous forme de magma calco-alcalin andésitique et de basaltes tholéitiques, et s'élèvent vers la surface où ils forment un arc volcanique.

Un sillon sous-marin très profond marque le départ du plan de subduction. Sa profondeur est fonction de la vitesse de subduction et de la masse de sédiment qu'il reçoit. Émergés, si la quantité reçue est importante, ou non, ces sédiments d'origine soit océanique, soit volcano-détritique, forment un bourrelet appelé arc sédimentaire, qui double l'arc volcanique vers l'Océan. Il contient des lames d'ophiolites provenant de l'arrachement de lambeaux du fond océanique le long du plan de subduction. L'arc sédimentaire subit un métamorphisme général de haute pression qui est caractéristique.

Dans le cas où les deux plaques lithosphériques sont à croûte océanique, il y a formation au milieu du domaine océanique d'un arc insulaire, pouvant être uniquement volcanique ou associé à un arc sédimentaire. Dans le cas où une plaque océanique descend sous une marge continentale, la chaîne formée est dite cordilléraine. Comme une chaîne insulaire, elle possède un arc volcanique et magmatique continu à volcanisme calco-alcalin et à magma intrusif granodioritique, générateur de minéralisations.

Le régime de subduction, sous la marge continentale, par des phénomènes de distorsion, provoque le volcanisme de l'arc magmatique et la formation de bassins de sédimentation subsidents. Les plus proches de l'arc se comblent de sédiments de type grauwackes associés à quelques émissions volcaniques. Le remplissage est parfois traversé par des intrusions granodioritiques tardives. Les bassins les plus éloignés sont comblés par des sédiments banals.

Sur le côté océanique, la proximité du sillon de subduction amène soit des effondrements de la marge continentale à remplissage de sédiments volcano-détritiques passant latéralement aux sédiments du sillon, soit des phénomènes de soulèvement faisant apparaître le socle sialique sans couverture.

Le cycle d'une chaîne liminaire peut être schématisé par quatre étapes :

altération érosion	⟵	orogenèse
↓		↑
sédimentation	⟶	subsidence

Au cours de celles-ci interviennent éventuellement dans chaque cycle des phénomènes volcaniques, métamorphiques, mise en place de granite, de roches grenues basiques et ultrabasiques. Parallèlement, des concentrations métallifères sont susceptibles de se mettre en place aux divers stades de ces cycles.

On peut faire une première distinction entre minéralisation exogène formée à la surface de la lithosphère, et minéralisation endogène formée à l'intérieur de la lithosphère. Les gisements relevant de la première seront dus soit à des processus d'altération sur des roches en place ou sur des minéralisations préexistantes, soit à des processus de sédimentation détritiques, chimiques et biochimiques. Les gisements dus à la seconde comprennent ceux qui sont formés à une profondeur plus ou moins grande ; ils sont liés aux granites, au métamorphisme, au volcanisme, aux circulations d'eaux thermales en profondeur, et aux roches grenues basiques ou ultrabasiques.

Il faut remarquer, pour ce second groupe, que si certains types de minéralisation restent présents et à peu près identiques à travers l'histoire de la Terre, amas sulfurés par exemple, d'autres types se situent préférentiellement à certaines époques géologiques : Précambrien ancien pour les épanchements ultrabasiques à nickel sulfuré, or, Mésozoïque à Tertiaire pour les porphyry coppers. Cet état de fait est dû à l'évolution de l'écorce et de l'atmosphère terrestres.

Minéralisations formées à la surface de la lithosphère : minéralisations exogènes

Gisements dus à des phénomènes d'altération superficielle

Deux conditions sont nécessaires à la formation de ces concentrations : un climat chaud et humide d'une part, un relief peu accentué d'autre part. On les trouvera donc sur des surfaces pénéplanées où règne, ou a régné anciennement, un climat tropical. Ces régions doivent en outre présenter une certaine stabilité crustale, un abaissement du niveau de base pouvant détruire ces concentrations par reprise de l'érosion. Ce phénomène d'altération superficielle est à l'origine de concentrations importantes de fer, nickel, aluminium, manganèse, magnésium.

★ *Les gisements de nickel en Nouvelle-Calédonie* sont le résultat de l'altération d'une péridotite partiellement serpentinisée contenant *in situ* 0,25 % de nickel. Peut-on préciser le phénomène concentrateur ?

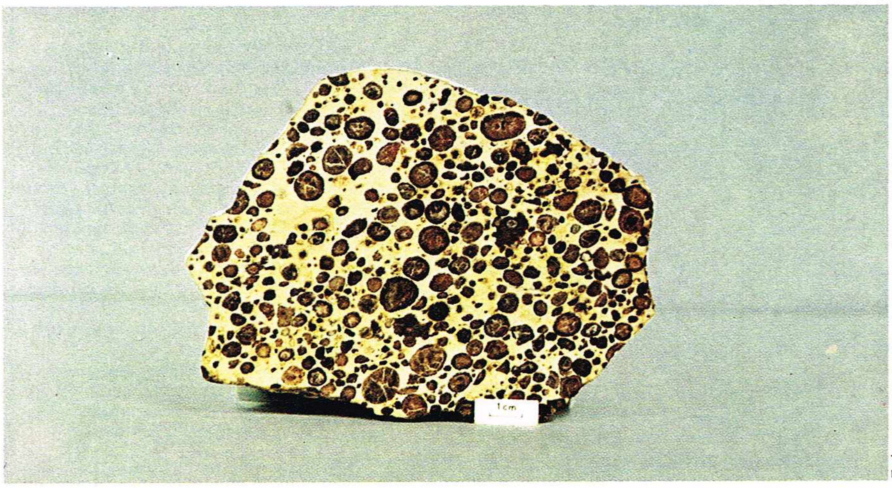

F. Lauzac

▲ ***Un échantillon de bauxite pisolithique provenant d'Umjat (Ariège).***

Dans une première phase, Si et Mg, constituants de la roche mère, sont partiellement lessivés. Il en résulte la formation d'un matériau limonitique (terre rouge ou jaune) contenant 0,8 à 1 % de nickel considéré comme inexploitable et pouvant être éventuellement surmonté d'une cuirasse d'oxyde de fer compact. Les eaux météoriques percolent à travers cette formation, entraînent une partie du nickel, le déposent au contact de la roche saine, amenant la formation d'un minerai de couleur verdâtre dit serpentineux, contenant 1,3 à 1,6 % de nickel (rarement 3 à 9 %) et 0,10 à 0,15 % de cobalt. Ce minerai est constitué par des hydroxydes et des silicates de Ni (garniérite).

Il est évident que, pour aboutir à des concentrations économiquement exploitables, ce processus doit se dérouler durant une période de temps importante. A Cuba, l'altération a commencé au Tertiaire et se poursuit actuellement. Elle peut être aussi fossilisée. C'est le cas des gisements grecs; l'altération date du Jurassique supérieur et a été stoppée, c'est-à-dire fossilisée par une transgression au Crétacé supérieur.

L'âge des gîtes de nickel latéritique varie du Précambrien (Brésil, Madagascar) au Tertiaire (Nouvelle-Calédonie). La localisation géographique est contrôlée par la mise en place de roches ultrabasiques d'une part, par les phénomènes climatiques d'autre part.

▼ ***Figure 2 : carte de localisation des bauxites varoises (d'après J. Nicolas, Annales de l'Institut géologique de Hongrie, vol. LIV, fasc. 3, 1969).***

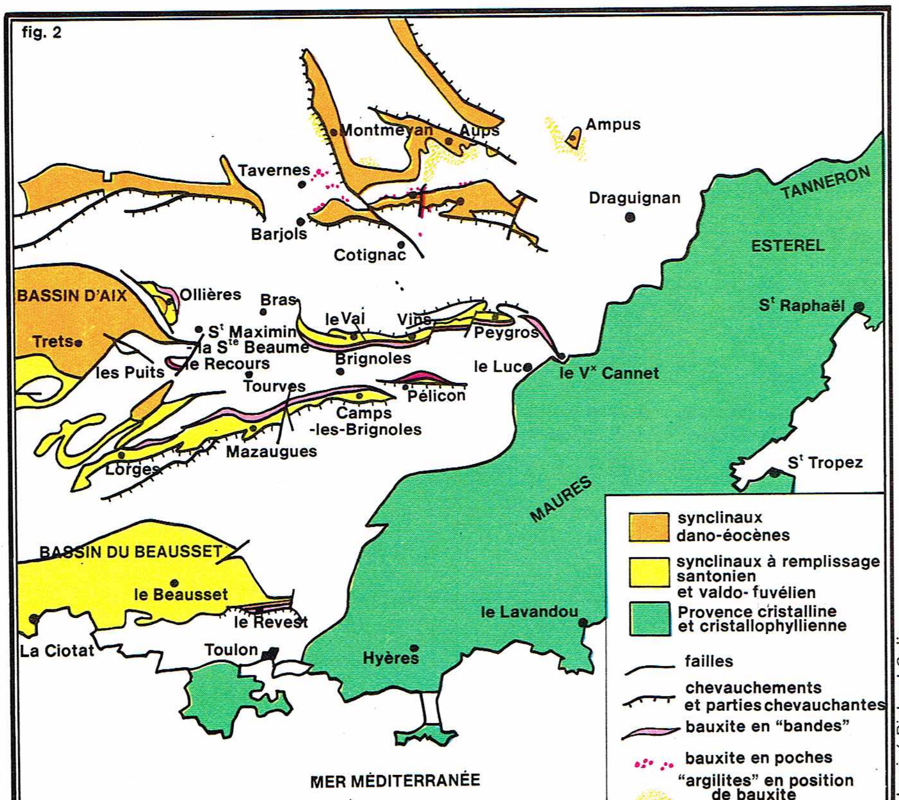

redessiné Richard Colin

★ *Les gisements résiduels d'aluminium sont constitués par les bauxites* résultant de l'altération par les eaux météoriques de roches alumineuses diverses. La bauxite (du village célèbre des Baux où ce minerai fut découvert en 1821) est formée par l'association de plusieurs hydroxydes d'aluminium (gibbsite, boehmite, diaspore) et de fer (goethite, lépidocrocite) associés à des minéraux argileux. Suivant l'environnement pétrographique des gîtes, on distingue deux groupes :

— *Les bauxites latéritiques à gibbsite prédominante.* Ce sont les bauxites les plus alumineuses formées dans les pays tropicaux aux dépens de roches silicatées : syénite néphélinique (Brésil), basalte, dolérite (Guinée, Indes), ou sur des schistes métamorphiques. Ce sont les gisements de bauxites les plus importants économiquement.

— *Les bauxites karstiques à boehmite prédominante,* localisées sur des roches carbonatées, calcaires ou dolomitiques au sein de poches karstiques. Les bauxites françaises sont de ce type (*fig.* 2).

La bauxitisation est un processus d'altération des roches caractérisé par une rupture complète des silicates d'alumine. La silice libérée ainsi que les bases alcalines et alcalino-terreuses sont éliminées par les eaux. L'évolution de la phase résiduelle (hydroxyde d'alumine et de fer) conduira à la formation des bauxites. Si la transformation *in situ* des roches alumineuses en bauxite latéritique dans les pays tropicaux est admise, l'origine du matériau initial alumineux des bauxites dans les gisements karstiques suscite de vives controverses.

J. de Lapparent (1930) développe la théorie d'une origine éluviale *(autochtonie);* les bauxites résultent de l'évolution sur place d'argiles de décalcification. M. Ehrart (1956) et E. Roch (1956) sont partisans de l'*allochtonie*. Le matériau initial, provenant de surfaces latéritiques situées sur des massifs de roches éruptives ou métamorphiques (Massif central, Maures), est transporté par voies éoliennes ou fluviales sur des terrains carbonatés émergés (isthme durancien pour les bauxites de Provence).

Pour J. Nicolas (1969), les bauxites du sud-est de la France sont des formations d'origine sédimentaire. Le matériel proviendrait d'anciennes latérites bauxitiques alumineuses et ferrugineuses démantelées, transportées et déposées en milieu aqueux. Durant le transport, effectué par étapes, le matériel continue à subir le phénomène de bauxitisation. Les bauxites se déposent en même temps que les sédiments qui forment le toit de ces gisements auquel elles passent progressivement.

La forme de ces gisements peut être différente : couches plus ou moins continues, poches de dimensions variables. Parmi les gisements les plus importants pour le type sur calcaire, citons ceux du midi de la France, d'Italie, de Grèce, de Yougoslavie et de Turquie.

D'autres métaux peuvent être concentrés par ce processus. Citons les gisements manganésifères des Indes, dus à l'altération des schistes cristallins à spessartite et rhodonite, de Côte-d'Ivoire, provenant de l'altération de séries volcano-sédimentaires, de Moanda (Gabon). Par le même processus se forme l'écume de mer (magnésite) sur certaines serpentines et péridotites en Grèce et dans l'Oural.

Gisements dus à une altération de minéralisations préexistantes sulfurées par circulation d'eaux vadoses

Ce mode de concentration aboutit à la formation de deux types de gisement : par enrichissement supergène, et par concentration en milieu karstique.

★ *Les gîtes d'enrichissement supergène* par oxydation et cémentation. Un gisement primaire généralement sulfuré peut subir un enrichissement dû à des phénomènes d'oxydo-cémentation sous l'action des eaux vadoses et des agents météoriques. Ces eaux mettent en solution des substances métalliques provenant de l'oxydation de gisements primaires, et les redéposent sous forme d'oxydes, mais surtout de sulfures enrichis, dans une partie plus profonde du protore (minerai primaire).

Ce processus de concentration revêt un intérêt économique par enrichissement des parties lessivées en une substance précieuse (or par exemple), par perte de matière

stérile, et des parties profondes, tant du point de vue de la teneur en minerai que de celui du contenu métal, par substitution d'une espèce minérale plus riche à une autre préexistante.

Ces gîtes d'oxydo-cémentation présentent une zonalité verticale nette, essentiellement liée à la circulation des eaux. Elle s'exprime par des changements minéralogiques sur le plan du chimisme et de la structure. Dans le sens de la circulation des eaux descendantes, on distingue un certain nombre de zones caractéristiques dont l'importance est variable (*fig.* 3).

● *La zone oxydée* peut se diviser en deux parties, suivant l'intensité du phénomène d'oxydation :

— Le chapeau de fer : composé essentiellement de limonite et de minéraux résiduels peu altérables. Il est dû à l'action menée à terme des phénomènes d'oxydation qui continuent à se dérouler dans les parties profondes du gisement. Le chapeau de fer reproduit, dans ses grandes lignes, la surface initiale des minéralisations sulfurées à l'affleurement qu'il surmonte. Une certaine prudence est néanmoins nécessaire : en effet, sa formation par précipitation donne lieu parfois à un phénomène d'expansion trompeur. Une évaluation à vue du gîte caché par l'importance du chapeau de fer conduit donc à une surestimation du gîte primaire. C'est le cas, en particulier, pour une minéralisation en stockwerk dont les chapeaux de fer fusionnés auront le même développement que celui qui pourrait surmonter un filon important.

— La zone oxydée (s. st.), toujours lessivée dans sa partie supérieure, mais qui peut receler des minéralisations enrichies en oxydes dans sa partie profonde. Le niveau hydrostatique limite vers le bas cette zone. Les minéraux déposés sont essentiellement des métaux natifs (cuivre, argent), des carbonates (azurite, malachite, cérusite, smithsonite), des silicates, des oxydes (cuprite, ténorite).

● *La zone de cémentation :* enrichie en sulfures pauvres en soufre, située en dessous de la surface hydrostatique. Sa base est irrégulière et consiste en un passage au minerai primaire par appauvrissement progressif et continu. L'extension verticale du phénomène de cémentation est comprise entre 1 et 100 mètres.

● *Le gisement primaire ou protore,* dont la composition minéralogique n'a pas été modifiée par la circulation des eaux superficielles.

La position du niveau hydrostatique conditionne l'importance verticale du phénomène d'oxydo-cémentation. Au-dessus de la nappe phréatique, l'oxydation par les eaux vadoses de sulfures ferrifères (pyrite, pyrrothite, mispickel, chalcopyrite) aboutit à la formation d'acide sulfurique et de sulfates ferreux. Par réaction chimique, d'autres sulfures métalliques sont lessivés et donnent naissance à des solutions acides sulfatées contenant certains métaux percolant à travers la structure minéralisée ou les roches encaissantes.

Les eaux sont capables de déposer des sulfures plus riches. Le dépôt se fait suivant la solubilité des différents composés formés, la nature de la gangue ou des roches encaissantes. Le plomb peu soluble se dépose rapidement sous forme de cérusite et d'anglésite. Le cuivre, particulièrement soluble s'il n'est pas piégé par suite d'affinité avec les roches encaissantes, atteint la zone de cémentation où il effectue une série de remplacement par un phénomène de métasomatose. Au cours de ces remplacements, le rapport métal-soufre a tendance à augmenter et les sulfures formés à atteindre leur stade de teneur maximale en métal. Ainsi, dans le cas du cuivre, la chalcopyrite sera remplacée par la chalcocite :

$$\underset{\text{chalcopyrite}}{CuFeS_2} + \underset{\text{sulfate de Cu}}{CuSO_4} \longrightarrow \underset{\text{chalcocite}}{2\,CuS} + \underset{\text{sulfate ferreux}}{FeSO_4}$$

On aboutit ainsi à la formation de gîtes très riches en teneur métal, mais dont l'importance peut être variable en fonction de l'amplitude de la zone de cémentation.

★ *Les minéralisations en milieu karstique.* Les eaux d'infiltration riches en CO_2 s'infiltrant dans des roches carbonatées provoquent, au sein de ces dernières, des phénomènes de dissolution par transformation du carbonate très peu soluble en bicarbonate plus facile à dissoudre, suivant la réaction :

$$CaCO_3 + CO_2 \underset{\text{précipitation}}{\overset{\text{dissolution}}{\rightleftharpoons}} Ca(CO_3H)_2$$

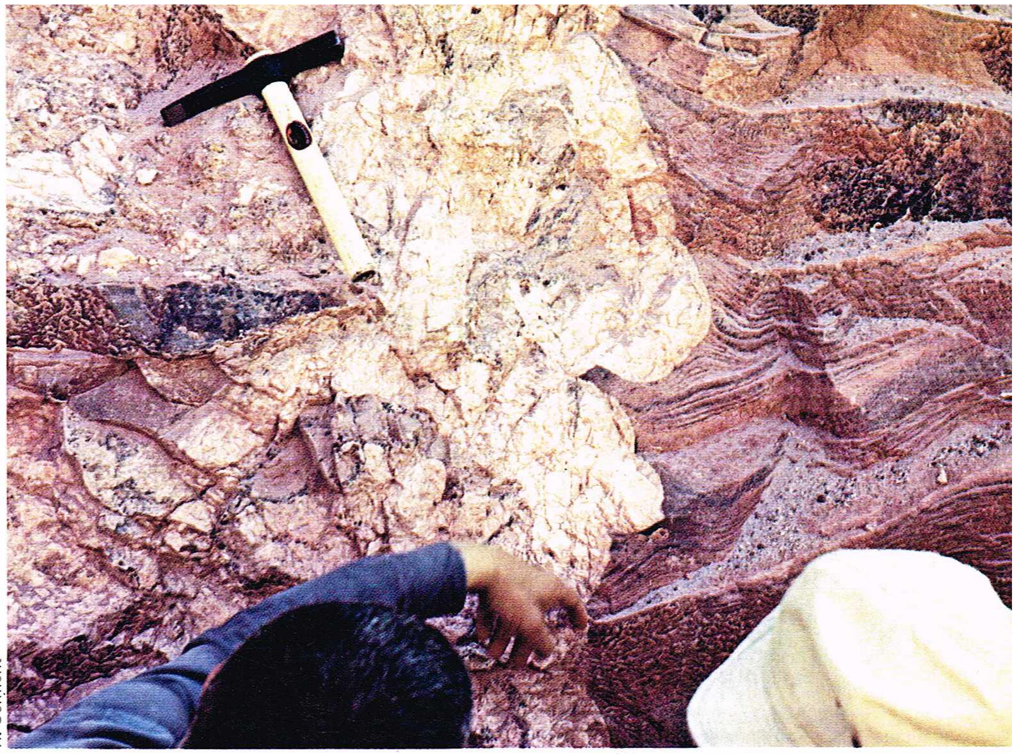

R. Serment

▲ *Une poche de barytine dans la mine du Djebel Irkound (Maroc) ; ce minerai est utilisé comme matière de charge pour les peintures, vernis, résines et matières plastiques.*

La totalité du CO_2 dissous n'intervient pas dans cette réaction. La quantité de CO_2 dissous reste en effet constamment en équilibre avec la teneur locale de l'air en CO_2, et seul l'excédent pourra se combiner avec les carbonates selon la réaction précédente. Celle-ci étant réversible, une diminution de la pression partielle du CO_2 entraînera la précipitation de la calcite qui avait été dissoute. Outre l'acide carbonique dissous, les acides organiques du sol (acides humiques), l'acide nitrique dû à l'ionisation de l'air au cours des orages et la silice dissoute dans les eaux superficielles pourront aussi contribuer à rendre l'eau agressive.

Ce mécanisme régit l'érosion karstique. En ce qui concerne le karst minier, il faut tenir compte aussi du fait que l'eau d'infiltration, outre les acides dont il vient d'être question, contient également de l'oxygène dissous. Lorsqu'il attaque une minéralisation sulfurée, il va donc y avoir oxydation des sulfures.

La pyrite, pratiquement toujours associée à la blende et à la galène, sera de loin le sulfure jouant le rôle le plus important. Comme dans les gîtes d'oxydo-cémentation, les sulfates métalliques de zinc (goslarite), et de plomb (anglésite) ou de cuivre, solubles en milieu acide, passeront donc en solution et seront déplacés.

Une fois le milieu neutralisé par la réaction de l'acide sulfurique sur le calcaire, ils reprécipiteront selon les réactions réversibles suivantes :

$$CaCO_3 + ZnSO_4 \rightleftharpoons ZnCO_3 + CaSO_4$$

$$CaCO_3 + PbSO_4 \rightleftharpoons PbCO_3 + CaSO_4$$

$CaSO_4$ pouvant ensuite être dissous et disparaître à son tour.

Ce mécanisme d'érosion particulier du karst minier appelle la remarque suivante : tandis que le transport de la calcite à l'état de bicarbonate dissous peut se faire sur de longues distances (pourvu que la pression partielle du CO_2 de l'atmosphère ambiante reste suffisante pour maintenir suffisamment de CO_2 en solution), il n'en va pas de même pour le transport des produits d'oxydation de la pyrite, de la galène et de la blende. L'acidité du milieu, indispensable à la dissolution des sulfates provenant de l'oxydation de ces minéraux, ne peut se maintenir très longtemps dans un milieu carbonaté. Le déplacement de ces minéralisations sera donc toujours faible, et les karsts miniers oxydés se trouvent toujours à proximité des minéralisations sulfurées dont ils dérivent, même si, le plus souvent, il n'y a pas de continuité de la minéralisation à l'échelle des travaux miniers.

La blende étant plus facilement oxydable et ses dérivés oxydés plus solubles par rapport à la galène, le zinc migrera plus facilement que le plomb. Alors que la blende sera toujours détruite, la galène subsistera dans de nombreux cas, oxydée en surface seulement.

Au cours de leur trajet souterrain, les eaux vont voir leurs propriétés physico-chimiques se modifier par suite de leur action sur les roches traversées. L'agressivité des

▼ *Figure 3 : coupe schématique d'un gîte de cémentation montrant la zonalité verticale : 1, gossan ou chapeau de fer ; 2, zone oxydée lessivée ; 3, zone oxydée avec enrichissement éventuel ; 4, zone des sulfures enrichis ; 5, protore.*

Richard Colin

fig. 3

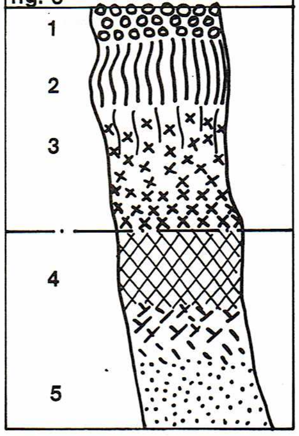

▶ *Figure 4 : zonalité verticale du karst minier (d'après V. A. Approdov).*

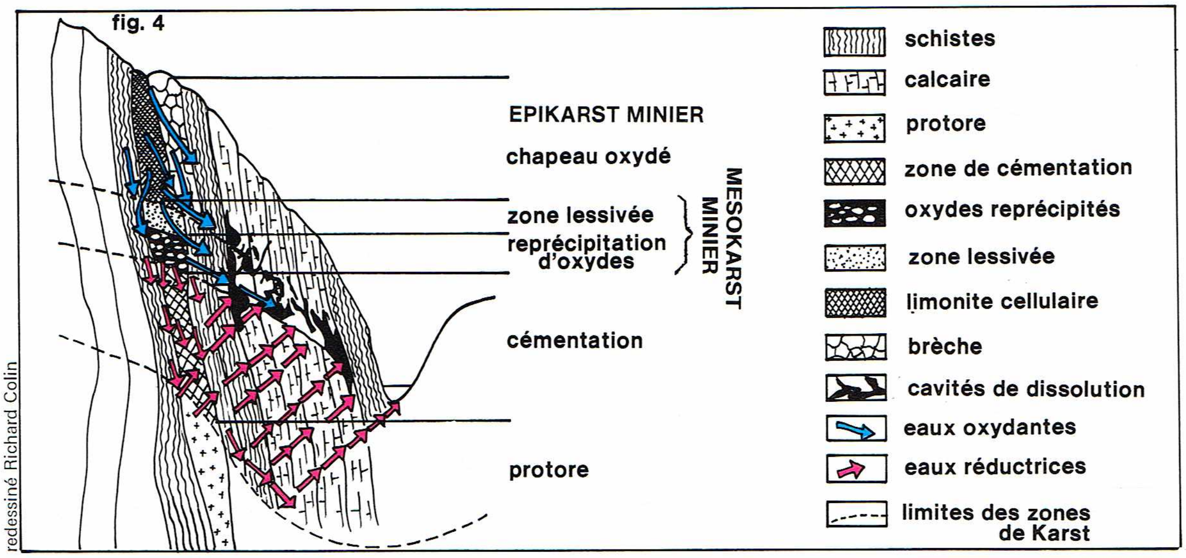

▼ *Figure 5 : coupe des dolines du Yun-nan (Chine), gisements de type karstique contenant du plomb (d'après F. Searls Jr.).*
Figure 6 : coupe du gisement d'Encantada Mine; exemple type de « wall-rock deposit » (nom donné par les auteurs anglo-saxons aux gisements d'éponte); un minerai sulfuré mixte plombo-zincifère a donné, par oxydation et migration différentielles du plomb et du zinc, un ensemble constitué d'un gîte stratiforme de plomb, conservé in situ, *sous lequel des amas calaminaires se sont installés le long des fissures de la roche encaissante (d'après A. M. Bateman).*

eaux va tendre à disparaître, les propriétés oxydantes vont également s'affaiblir. On distinguera trois zones de karst minier (V. A. Approdov, 1962) [*fig.* 4] :

— *Épikarst minier,* zone la plus superficielle. Elle est entièrement oxydée.

— *Mésokarst minier,* situé sous le précédent. C'est une zone de lessivage où ne se rencontrent guère que les produits insolubles dégagés du calcaire.

— *Hypokarst minier,* les eaux circulantes ayant perdu tout pouvoir oxydant; il est caractérisé par une zone de cémentation à sulfures.

On retrouve la zonalité des gisements d'oxydo-cémentation.

Liés étroitement aux phénomènes d'altération des masses carbonatées, les gisements miniers seront liés aux formes d'altérations karstiques. On distinguera :

— Les gisements de lapiez. Il s'agit de cannelures, de chenaux, gouttières parallèles ou anastomosées de tailles variables minéralisées en zinc (Bertha Mines, Virginie, U. S. A.), en plomb (Arenas et Su Sollu, en Sardaigne).

— Les gisements de dolines. Ce sont des dépressions formées à la surface du karst, dues à l'infiltration de l'eau dans les fissures du calcaire. L'évolution se fait par affaissement-dissolution *in situ* des blocs constituant le fond de la doline. Les gisements de plomb de Yun-nan sont de ce type (*fig.* 5).

— Les gisements au sein de cavités souterraines, extrêmement variés par leur forme et la nature de leurs minéralisations oxydées ou sulfurées suivant les cas. Parmi les plus célèbres, citons, pour les gisements oxydés : le Laurion en Grèce; pour les gîtes sulfurés, « les riches en argent » de Sardaigne (*fig.* 6).

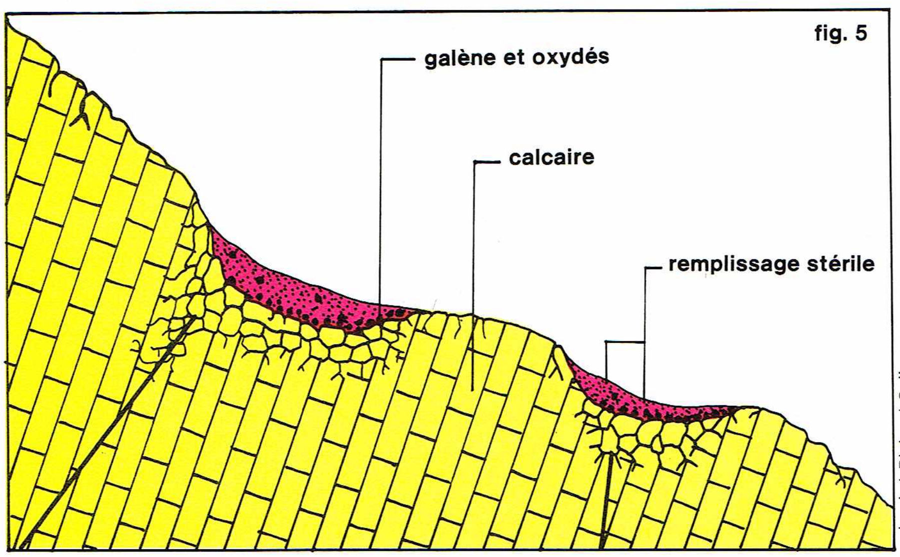

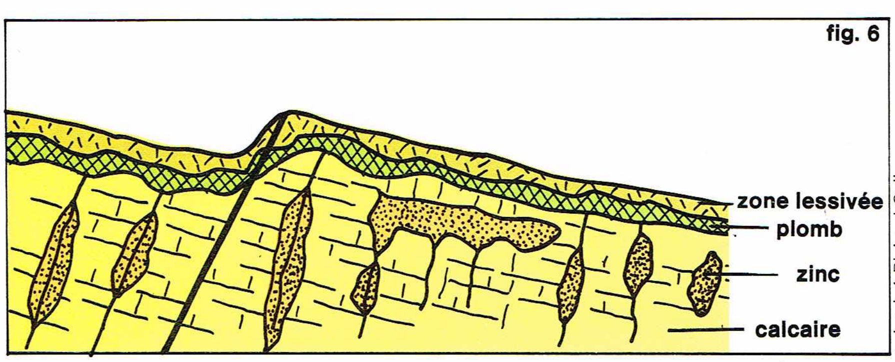

Gisements sédimentaires

★ *Les gisements de type détritique. Placers fluviatiles et marins.* Par l'action des divers phénomènes d'altération et d'érosion, certains éléments (minéraux peu altérables et lourds, métaux natifs) peuvent être libérés. Entraînés, ils se reconcentrent au sein d'autres éléments détritiques et forment ainsi des placers.

En dehors des considérations économiques, il y a deux conditions nécessaires pour qu'il se forme un gisement détritique : l'existence d'une minéralisation, source primaire concentrée ou diffuse, et des circonstances favorables pour l'enlèvement, le transport, le dépôt et la concentration du minerai. Ainsi, un bon gisement primaire ne donne pas toujours un gisement détritique intéressant si la deuxième condition n'est pas réalisée, et une minéralisation primaire diffuse et non appréciable peut contribuer à former d'excellents gisements détritiques. Inversement, l'existence d'un placer (dépôts de graviers, sables, argiles ou autres alluvions contenant des particules de minerais en quantités exploitables) ne suppose pas forcément qu'il existe quelque part un gisement en place.

Le minerai peut provenir de filons exploitables, de veinules non exploitables (cas des veinules de cassitérite), de minéralisations disséminées (platine, chromite, or), de minéraux constituants des roches (magnétite, zircon, disthène, etc.), d'une roche-magasin (base du grès pour le diamant de l'Oubangui occidental), du remaniement d'anciens placers.

Pour subsister dans les alluvions, les minéraux doivent résister à la destruction chimique, par les agents atmosphériques en particulier, ainsi qu'à la destruction mécanique au cours de leur transport par les cours d'eau (usure, casse). Cependant, certains minéraux tendres, mais très lourds et peu altérables (cinabre, par exemple), peuvent se trouver dans les alluvions probablement assez près de la source.

Une dureté égale ou supérieure à 7 (dureté du quartz qui constitue la majeure partie des alluvions) favorise la conservation du minéral. L'existence d'un clivage n'im-

plique pas toujours la fragilité (cas du diamant et de la topaze). L'or minéral mou se conserve dans les alluvions grâce à sa malléabilité qui lui permet de se réduire en paillettes naviguant entre deux eaux, d'où une usure réduite.

Le processus de formation peut être divisé en trois phases.

● *La destruction des roches en place ou érosion.* On distingue deux formes d'érosion : l'érosion *linéaire,* érosion de l'eau courante sur le fond du lit ; l'érosion *aérolaire,* qui agit en surface. Les agents de cette dernière sont multiples : agents atmosphériques dont l'attaque varie avec les divers climats, agents biologiques et eaux de ruissellement.

● *Le transport des débris.* Amenés dans les lits des cours d'eau par la gravité et l'eau de ruissellement, ils sont emportés par les courants pour être redéposés à une distance plus ou moins grande en aval. Le transport peut se faire : *en suspension* dans le fluide, et il ne concerne que les matériaux fins et légers et n'intéresse la minéralisation des placers que dans le cas de l'or ; *en saltation,* les grains sautillant le long du fond ou bien étant mis en mouvement directement ou indirectement par d'autres grains rebondissant ; *par charriage* de fond, les matériaux roulant ou glissant le long du fond avec lequel ils restent en contact quasi permanent.

● *Le dépôt et le classement des alluvions.* Les matériaux solides charriés au fond se déposent si le courant n'a pas plus de force pour les transporter par suite d'une diminution de sa vitesse, ou s'ils sont piégés par les irrégularités du fond. Dans le cas général d'une brutale rupture de pente d'une rivière (rivière descendant d'un massif et arrivant dans la pénéplaine par exemple), la vitesse se réduit brusquement. D'abord se déposent les plus gros blocs (boulders), puis progressivement les dépôts plus ou moins bien classés.

A certains moments (décrues), les éléments lourds vont se déposer au milieu d'éléments plus gros de densité normale. Les minéraux lourds, plus petits, vont descendre entre les interstices des autres éléments ; leur descente sera facilitée par une granulométrie de plus en plus grossière vers le bas (granuloclassement des sédimentologistes). Ils pourront ainsi descendre jusqu'à la base de la lamina, au milieu d'éléments grossiers qui les protègent lors d'une nouvelle crue. Des éléments lourds déposés lors de cette deuxième crue viendront les rejoindre. Plusieurs reprises de ce phénomène peuvent donc aboutir à des concentrations exploitables. Le schéma est valable pour les minéraux lourds par excellence.

Dans le cas où le cours d'eau pénètre dans un lac ou aboutit dans la mer, il y a un brusque changement dans les courants et rupture de charge avec dépôt abondant (delta). Les minéraux se déposent par ordre de densité décroissante. Les irrégularités de bed-rock, barrages rocheux, marmites et canyons retiennent les minéraux lourds. Ces pièges sont très importants pour le diamant et l'or.

Schématiquement, les alluvions des bons placers sont bien classées. On trouve déposés sur un bed-rock uni, légèrement altéré : une couche de *graviers* dont la grosseur moyenne décroît dans le sens ascendant ; un *recouvrement* sablo-argileux avec une discontinuité nette dans le sens ascendant ; de la terre végétale. Les épaisseurs de graviers minéralisés peuvent être considérables (24 m sous 6 m de stérile en Malaisie).

Les flats (placers fluviaux) peuvent avoir plusieurs centaines de mètres de largeur sur une longueur de plusieurs kilomètres, d'un seul tenant ou subdivisés en tronçons par des seuils rocheux ou des rétrécissements (flats en chapelets). Certains flats contiennent plusieurs couches de graviers minéralisés parfois différemment, séparées par de « faux bed-rocks » que constituent les recouvrements argileux de graviers sous-jacents. Parmi les autres types de flats, citons :

— les marmites (*fig.* 7), cavités naturelles creusées par des galets pris dans un tourbillon ; importantes pour les minéralisations de forte valeur comme le diamant ;

— les canyons : tranchées creusées par l'eau dans un bed-rock tendre, orientées dans le sens du cours d'eau et pouvant être remplies de graviers exploitables (*fig.* 8) ;

— les terrasses.

L'existence des grands placers est conditionnée par la libération d'une quantité importante de minerai du gîte primaire profondément érodé, un transport assez faible pour éviter les dispersions, un régime hydraulique efficace mais non violent. Cela correspond à des pays dont le relief arrive à maturité, subit un rajeunissement lent mais continu, en même temps qu'une altération profonde sous un climat non désertique.

L'importance des gisements détritiques est grande, 70 % de l'étain produit par les pays autres que ceux du monde soviétique est fourni par des exploitations alluviales (Malaisie en particulier).

★ *Gîtes chimiques d'origine sédimentaire.* Nous citerons rapidement les *gisements d'évaporation,* dus, comme leur nom l'indique, à des phénomènes d'évaporation entraînant une concentration anormale de certaines substances en solution et leur précipitation. Ce sont en particulier les gisements de sel et de potasse, dont l'extension et la puissance peuvent être considérables. Les couches de halite, de gypse ou d'anhydrite, généralement très pures, alternent avec des bancs argileux plus ou moins

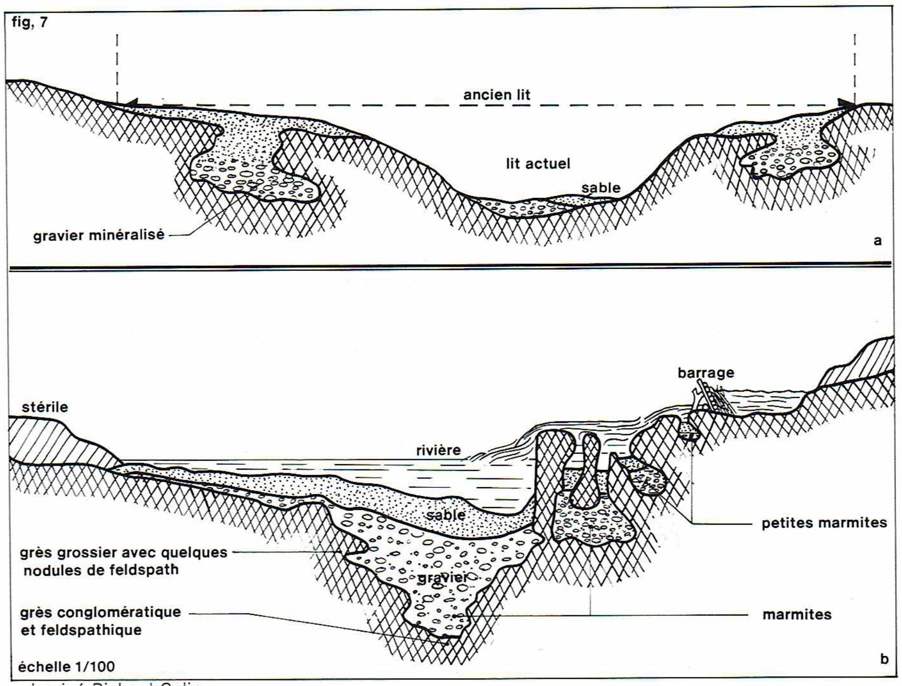

redessiné Richard Colin

▲ ***Figure 7 :** deux exemples de gisements sédimentaires de type détritique présentant des marmites ; a, coupe transversale du lit d'une rivière montrant deux marmites de terrasses ; b, coupe longitudinale du lit d'une rivière présentant de petites et de grandes marmites (a, d'après K. D. Phan,* **les Gisements détritiques,** *1968 ; b, d'après Delamy et Berthoumieux).*

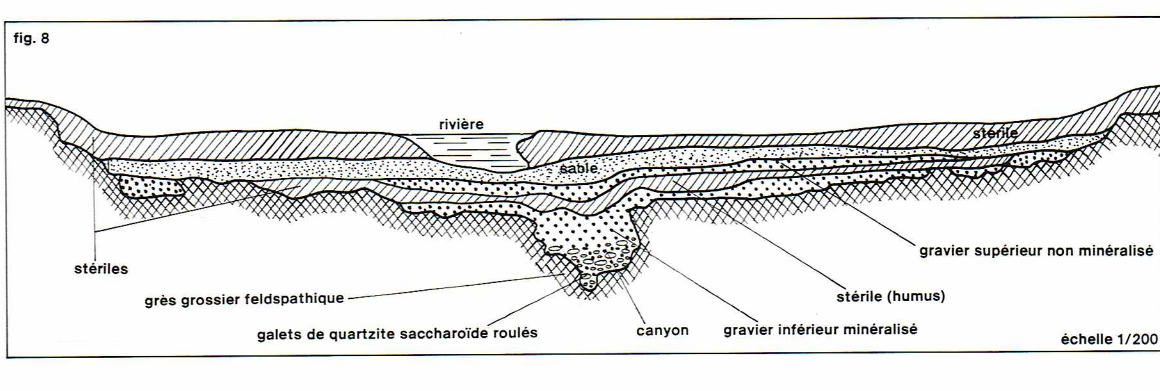

redessiné Richard Colin

◀ ***Figure 8 :** coupe transversale d'un gisement détritique de type « flat » et « canyon » (d'après Delamy et Berthoumieux).*

salifères sur plusieurs centaines de mètres d'épaisseur. Pour expliquer cette puissance, on admet que les bassins d'évaporation ont été le siège de phénomènes de subsidence importants.

L'origine de ces gisements est essentiellement marine. L'eau de mer, contenant un grand nombre de sels dissous (Na, Cl, Mg, K, etc.), est piégée dans des bassins ou des lagunes d'évaporation en bordure de mer et en relation intermittente avec celle-ci. Cette condition est importante, car il faut un renouvellement périodique des solutions salines pour aboutir à une telle concentration. Le dépôt de ces sels obéit à des équilibres dépendant de la concentration, de la température et de la pression. Le phénomène d'évaporation provoque une modification de ces conditions d'équilibre et, parallèlement à ces modifications, les différents sels contenus se déposent suivant un ordre déterminé qu'on retrouve au sein des divers gisements d'évaporite.

Il faut signaler aussi l'existence de concentrations de type évaporitique dans des bassins de moindre importance situés dans des pays désertiques. L'apport en sels minéraux divers se fait par les eaux météoriques de ruissellement qui lessivent les terrains environnants de nature généralement volcanique.

Parmi les gisements les plus importants d'évaporites, citons les gisements permiens de potasse et de sel gemme d'Allemagne centrale et septentrionale, de Stassfurt en particulier, de l'ouest de l'Oural, les potasses d'Alsace, d'âge sannoisien, et les gîtes de sel triasique de Lorraine et du Canada.

D'autres éléments, en particulier fer et manganèse, provenant de l'altération et du lessivage de reliefs émergés, peuvent être entraînés en solution, transportés à une plus ou moins grande distance et précipités ensuite par action chimique directe, ou par l'intermédiaire de micro-organismes. Leurs conditions de dépôt sont régies par certains caractères chimiques (concentration, pH, Eh).

Le manganèse libéré par altération météorique des roches est soit directement en solution sous forme de MnO dans les eaux de ruissellement légèrement acides, soit, dans le cas le plus fréquent, oxydé sur place et transporté ensuite en suspension sous forme de particules de MnO_2. Arrivant dans le bassin, lacustre ou marin, les eaux de ruissellement subissent une modification brutale du pH, l'eau de mer étant plus basique. A pH 8, condition de formation de la dolomie, au bord du bassin (ambiance oxydante), il y a précipitation d'hydroxyde de manganèse, alors que, dans les zones profondes, les plus éloignées du rivage, se déposent des boues carbonatées manganésifères. Ainsi, à partir d'un matériau originel de 0,10 % de Mn, teneur moyenne de l'écorce terrestre, la nature aura fabriqué un sédiment meuble à 21-30 %. La diagenèse (réarrangement accompagnant la transformation du sédiment meuble en une nouvelle roche compacte, dure) entraînera encore une augmentation de la teneur.

A ce type de gisement correspond le bassin de Tchiatoura en U. R. S. S., qui est l'un des plus grands gîtes de manganèse du monde. La minéralisation provenant de l'altération et du lessivage du socle granitique et volcanique s'est concentrée dans un bassin épicontinental.

La minéralisation d'âge éocène, dont la puissance exploitable oscille entre 2 et 3 mètres, est formée par une série de strates (3 à 15) alternant avec des grès fins reposant soit sur des formations calcaires par l'intermédiaire d'un petit niveau conglomératique, soit directement sur des grès. La minéralisation la plus riche se trouve au bord de l'ancien rivage, le minerai oolithique passe à un minerai où les oolithes disparaissent. Les oolithes de 1 à 10 millimètres sont formées de couches concentriques alternantes de pyrolusite (MnO_2), psilomélane, manganite, centrées sur un grain de quartz ou un débris de fossile. En s'éloignant du rivage, la manganite se développe alors que la pyrolusite régresse. Plus au large, succède au minerai oxydé un minerai carbonaté oolithique à rhodocrosite, manganocalcite et opale, barytine, gypse et sulfure de fer.

La formation des gisements de fer marin est régie par les mêmes lois; seul varie le pH qui ici est d'ordre 7, pH correspondant au milieu carbonaté calcaire. Les minéraux ferrifères précipitent suivant les conditions d'oxydoréduction qui s'établissent en fonction de l'éloignement du rivage. Tatarinov (1955) établit ainsi les conditions de dépôt des différents minéraux ferrifères :

— Si le potentiel d'oxydoréduction est négatif et le pH d'ordre 7, le fer à l'état ferreux se combine au CO_2 pour former de la sidérite CO_3Fe. Si dans le milieu, par suite de la présence de matières organiques, il y a dégagement d'hydrogène sulfuré H_2S, il y a formation de pyrite FeS_2.

— Si le potentiel d'oxydoréduction évolue dans un sens positif avec diminution du pH, la silice en solution sous forme de silicates alcalins réagit sur les sels ferreux et en partie sur les sels ferriques, et donne des silicates de fer du groupe des chlorites.

— Si le potentiel d'oxydoréduction est franchement positif et le pH égal à 2 ou 3, l'oxyde de fer $Fe(OH)_3$ se dépose et se transforme ensuite en limonite.

Le minerai de ces gîtes est généralement oolithique.

Parmi les gisements de ce type, citons ceux de Normandie (*fig.* 9), de Bretagne, de Thuringe d'âge ordovicien, de Clinton dans les Appalaches, datés du Silurien,

▼ A gauche, un échantillon de potasse (provenant des mines d'Alsace), minerai de type évaporitique. Figure 9 : coupe géologique réalisée au sud de l'Orne, de Pierrevillers à Droitaumont (Meurthe-et-Moselle), permettant la localisation du minerai de fer de Lorraine.

F. Lauzac

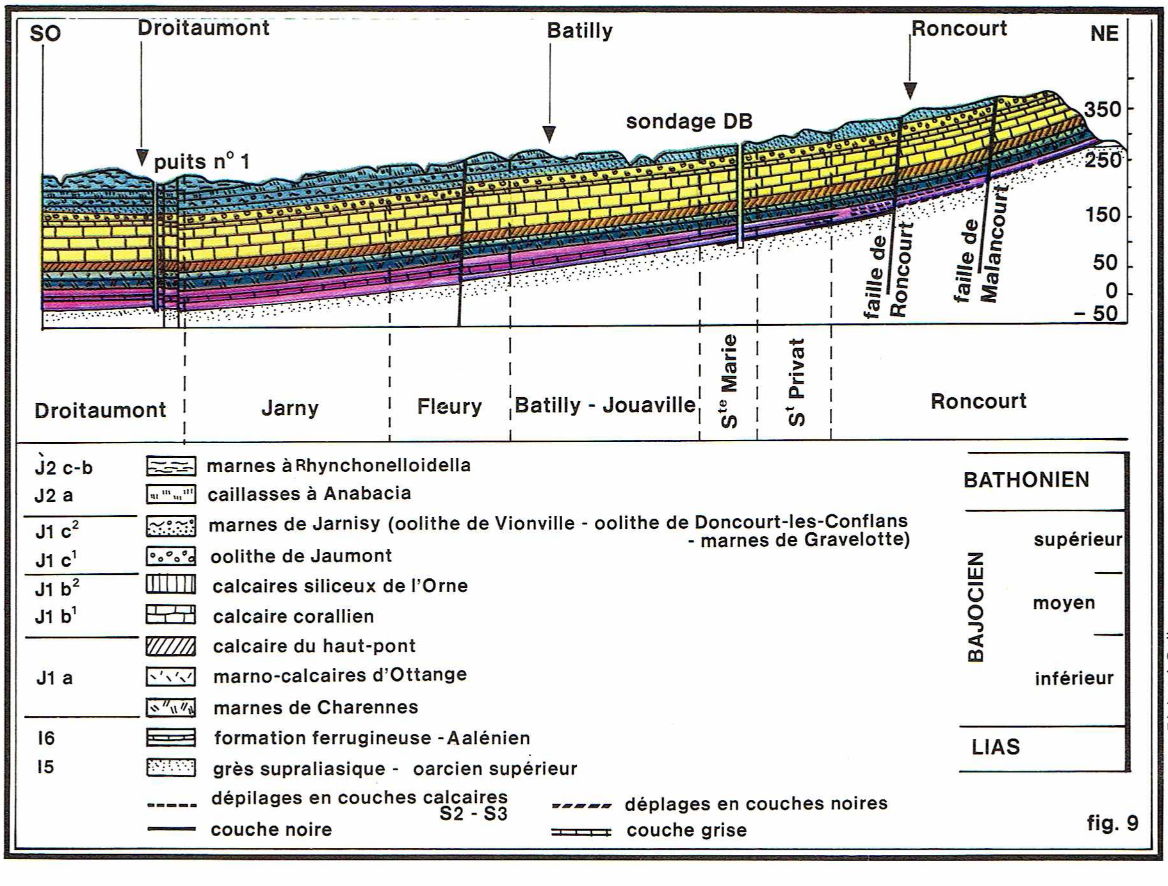

Richard Colin

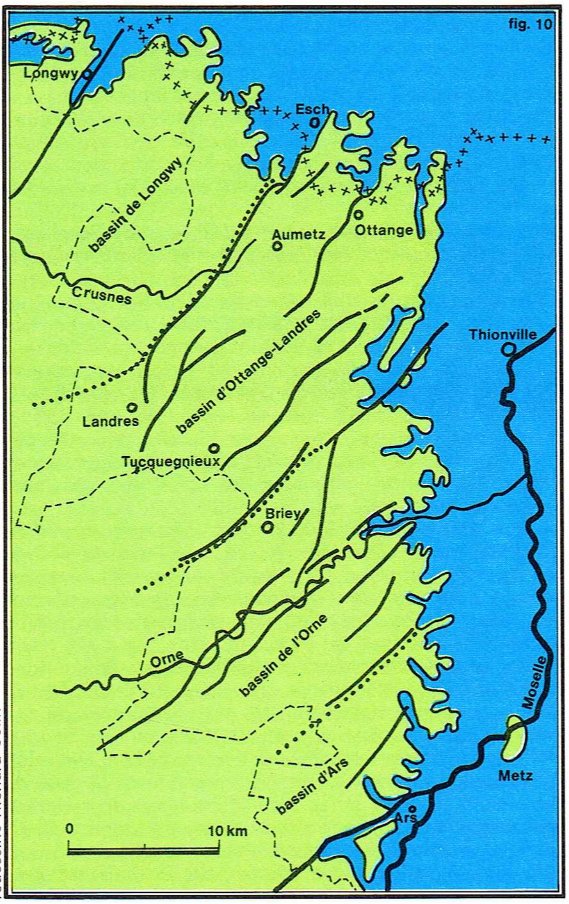

redessiné Richard Colin

◀ *Figure 10 : carte du gisement ferrifère de Lorraine (d'après J. Bichelonne et P. Angot, publié dans E. Raguin,* **Géologie des gîtes minéraux,** *Masson).*

de Lorraine, d'âge liasique. Le gisement de Lorraine est d'une grande importance économique, puisqu'en 1960, il représentait une réserve de 10,5 milliards de tonnes, à 28-29 % de fer. Il est constitué de minerai oolithique, appelé aussi « minette », réparti en couches exploitables (8 à 10) interstratifiées à la base des formations calcaires d'âge aalénien. Le bassin ferrifère est divisé en deux unités, le bassin de Briey-Longwy au nord, celui de Nancy au sud, séparés par un haut-fond N.E.— S.O. passant aux environs de Pont-à-Mousson, haut-fond dû à une surélévation du socle hercynien. La puissance totale de la série aalénienne où se situent les couches ferrifères varie énormément selon les bassins : 60 m dans le bassin nord, 12 au maximum dans le bassin sud. Dans chaque bassin, une série de failles parallèles à l'anticlinal de Pont-à-Mousson divise les deux bassins en une série de bassins secondaires d'allure synclinale. Il faut remarquer que le maximum de minéralisation coïncide avec les zones profondes synclinales (*fig.* 10).

Le minerai est fait d'oolithes formées autour d'un nucleus pouvant être un grain de quartz, un débris de coquille, ou même une fraction d'oolithe brisée. L'analyse des structures sédimentaires, stratifications entrecroisées, remaniements du minerai peu après son dépôt, oolithes brisées, ripple-marks, débris organiques roulés, met en évidence l'existence d'un milieu agité au moment du dépôt. Ces oolithes concentrent le fer, mais celui-ci est aussi plus ou moins abondant dans le ciment.

L'analyse du niveau aalénien minéralisé montre qu'il est formé d'une série de séquences, 11 au total, de puissance variable avec des caractéristiques lithologiques bien particulières. Pour chaque séquence, on a, de bas en haut : un joint de stratification correspondant à une surface d'émersion avec, au sommet de ce joint, des éléments des couches sous-jacentes traduisant une reprise ou un phénomène de ravinement; des argiles fines litées; des grès argileux fins surmontés de calcaires gréseux fins présentant de très nombreuses stratifications entrecroisées; un niveau ferrifère; des calcaires gréseux; une formation spéciale appelée « crassin » : il s'agit d'une lumachelle formée de débris de coquilles d'animaux marins. La surface de ce crassin est ravinée. La répétition de ces séquences implique donc une sédimentation qui s'effectue par saccades dues à un phénomène de subsidence.

Au sein de l'ensemble de la minéralisation ferrifère, on constate une oxydation croissante de bas en haut. C'est ainsi qu'on distingue en remontant vers la surface des niveaux vert, noir, brun, gris, jaune, rouge, coloration qui rend visible une évolution minéralogique, la proportion des minéraux chloriteux étant plus grande dans les formations les plus profondes; inversement, la limonite est plus importante dans les formations supérieures. L. Bubenicek (1960) attribue ce phénomène à une évolution diagénétique d'un matériel oxydé au départ et qui, par réduction, aboutit à la formation de chlorite, sidérose, et pyrite. Cela est lié à la nature du minerai plus argileux

F. Lauzac

▲ *Les gisements de plomb de type « red beds » de la région de Zeida (Maroc) ; le minerai est localisé dans les bancs gréso-conglomératiques en relief, surmontés par des buttes témoins du Quaternaire (à l'arrière-plan) ; tout au fond, couronné de neiges, le Haut Atlas est bien visible (Djebel Ayachi).*

dans les parties profondes qui, en fixant la matière organique, favorise le développement d'un milieu réducteur. On peut envisager que le stock métal a son origine dans une altération des formations marneuses riches en pyrite du Toarcien, affleurant sur le continent voisin émergé.

Gisements en milieu sédimentaire

Ces gisements suscitent de vives discussions entre métallogénistes, quant à l'époque de leur formation par rapport à la roche encaissante. Pour les tenants de la syngenèse, les minéraux métalliques se déposent en même temps que les sédiments encaissants. Les métaux proviennent soit de l'altération, puis du lessivage des reliefs émergés préexistants, soit d'un drainage souterrain du socle sous-jacent par mise en charge des eaux douces par les reliefs avoisinants. Arrivant dans les bassins de sédimentation, les éléments lessivés ou drainés précipitent par changement de milieu chimique.

Pour les tenants de l'épigenèse, les minéraux se déposent en remplacement dans les sédiments déjà consolidés sous l'action soit de solutions supergènes (eaux météoriques ou connées), le stock de métal dans ce cas étant fourni par l'érosion du continent ou le fond géochimique des couches voisines, soit de solutions juvéniles d'origine magmatique plus ou moins lointaines (télémagmatiques).

★ *Minéralisations situées dans des séries détritiques : conglomérats, grès arkoses.* Ces formations sédimentaires détritiques peuvent contenir disséminées des minéralisations à plomb, zinc, uranium, cuivre. Mis à part les gisements d'uranium du plateau du Colorado, les minéralisations de ce type ont été jusqu'à ces dernières décennies considérées comme marginales, en particulier pour le cuivre et le plomb-zinc. La découverte des gisements de cuivre d'Oudokan (U. R. S. S.), de Lubin (Pologne) et des gîtes d'uranium du Niger leur confère actuellement un intérêt économique certain.

Par suite de la fréquente couleur rouge des séries encaissantes, ce type de gisement est souvent désigné sous l'appellation de « red beds ».

Les formations détritiques sont d'âge varié. En Europe, elles se développent en particulier au Permien et au Trias. Elles appartiennent à des séries de couverture déposées

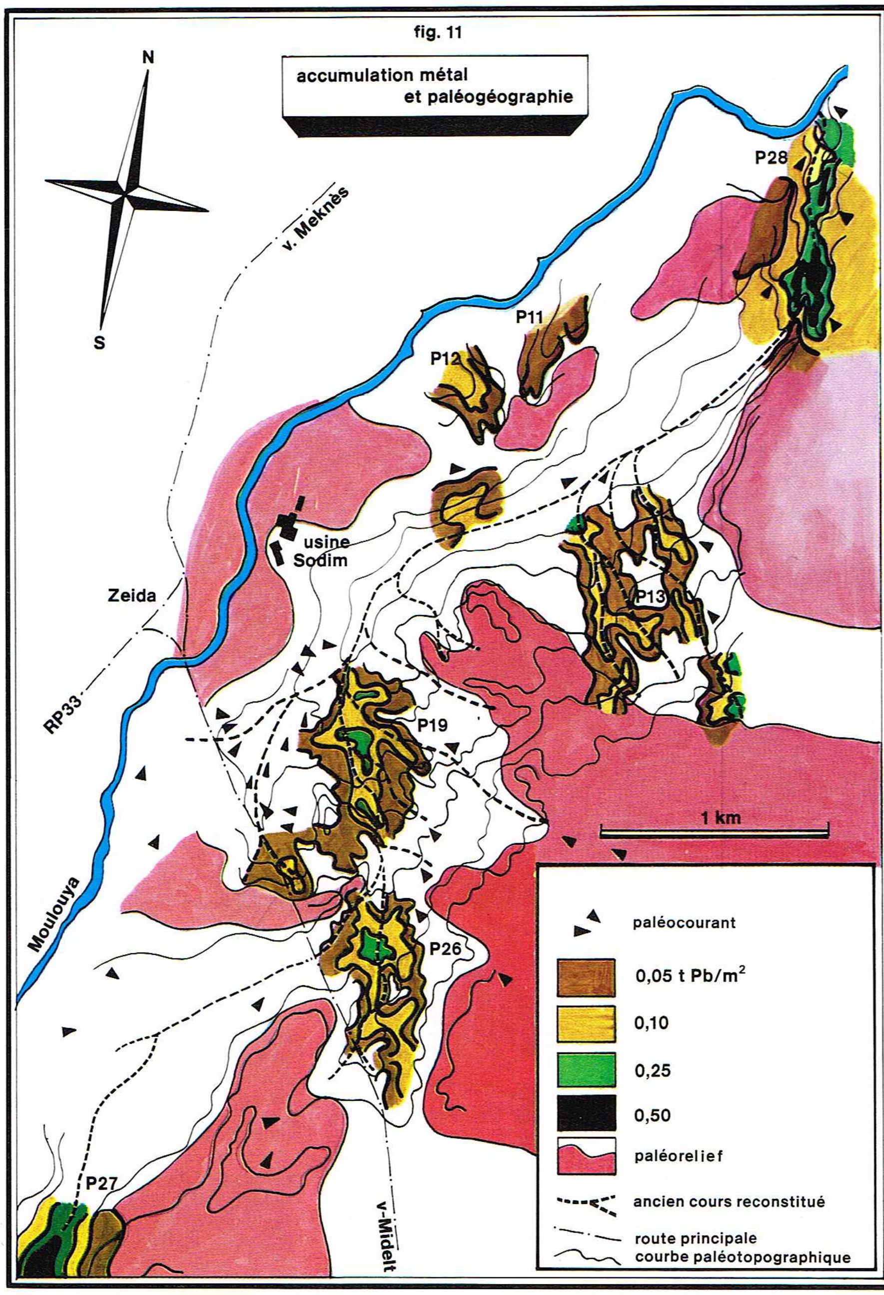

▲ *Figure 11 :* *carte de la localisation de la minéralisation en plomb de la série triasique de Zeida (Maroc) ; on notera la relation étroite entre les paléocourants et la localisation de la minéralisation (d'après J. M. Schmitt,* Sédimentation, paléoaltération, géochimie et minéralisation en plomb de la série triasique de Zeida, Maroc, *thèse du Centre de géologie minière, École nationale supérieure des mines de Paris).*

dans des bassins continentaux ou bien sur des plates-formes continentales. Le matériel constitutif provient du démantèlement de massifs émergés. Leur formation se place donc dans un cadre postorogénique ou épiorogénique.

Les séries minéralisées sont formées de conglomérats, de grès, d'argillites souvent de couleur rouge. Parfois, s'individualisent de petits bancs de carbonates et des niveaux d'évaporites. Les dépôts sont soit purement continentaux, lacustres, soit subcontinentaux, littoraux, lagunaires ou deltaïques, formés dans des golfes ou baies, sur les marges des bassins sédimentaires.

Les roches encaissantes contiennent souvent, et parfois en abondance, des débris végétaux, de la matière charbonneuse ou bitumineuse favorisant la concentration de la minéralisation. Dans les red beds, elle est étroitement liée aux débris végétaux. Il en est de même pour les hydrocarbures dont la présence favorise la concentration de l'uranium sous forme de carburane. Les minerais n'ont pas ou peu de gangue, à l'exception d'un peu de gypse, de barytine et de calcite.

Les concentrations minéralisées sont généralement localisées dans la zone de mélange entre les eaux continentales de ruissellement, toujours oxygénées, et les eaux plus ou moins réductrices. C'est le cas des eaux d'un lac de lagune dont le pouvoir réducteur varie avec les saisons (voir J. Bouladon). La présence de seuils sur le tracé d'un chenal donnant naissance à des cuvettes peut, par le même phénomène, concentrer les éléments métalliques. A ce type de minéralisation, appartiennent :

— les gisements de plomb-zinc guidés par des chenaux au sein des grès. Citons le gîte de Largentière, en France, dans le Trias, le gîte de Kroussou, au Gabon, dans le Crétacé inférieur, et le gîte de Zeida, au Maroc, dans le Trias (*fig.* 11).

— les gisements d'uranium du Niger et du Colorado ;

— les gisements de cuivre associés à des formations gréseuses. On peut, avec L. Guilloux et H. Pelissonnier (1974), distinguer trois sous-types : des gisements importants et autonomes localisés dans des séries deltaïques continentales — ce sont les gisements d'Oudakan, Corocoro, et de Djerkazgan ; des corps directement reliés aux schistes et marnes minéralisés (Kupferschiefer), généralement en zonalités verticales vers le bas, parfois en zonalités latérales (Lubin gréseux, Old White Pine) ; de petits corps isolés en lentilles, spatialement liés à des accidents cassants — ce sont les classiques red beds (Colorado, Oural, Maroc).

● *Un exemple de minéralisation cuivreuse en milieu détritique :* le gîte d'Oudokan, province de Tchite, U. R. S. S. La région d'Oudokan est formée de roches sédimentaires datées du Protérozoïque inférieur. Les géologues russes distinguent deux séries au sein des formations sédimentaires encaissant le gisement. Une série de base, appelée série de Sadoukan, comprend de bas en haut des quartzites à intercalations de grès finement lités à hématite, des grès gris quelquefois arkosiques à intercalations de fer, des grès quartzo-carbonatés. Cette série de Sadoukan est surmontée par des roches formées d'aleurolite (silts), de grès et de schistes, qui constituent la série de Naminga. Les deux séries sont plissées en un synclinal de forme elliptique dont le grand axe est orienté N.-O. Dans sa partie sud-est, ce synclinal est couché.

La minéralisation cuivreuse est située dans les grès quartzo-carbonatés dont l'affleurement dessine parfaitement le contour de l'ellipse (25 km environ). La puissance de la série porteuse varie de 1 à 2 000 mètres. Elle est maximale sur le flanc nord. Les corps minéralisés forment des dépôts en lentilles ou couches de puissance variable, la moyenne étant de l'ordre de 70 mètres environ. Le caractère stratiforme de la minéralisation est très net dans certains secteurs.

Le gisement est monométallique : la minéralisation cuivreuse se trouve sous forme d'oxydes (malachite, azurite, brochantite) ou de sulfures, principalement à chalcocite et bornite. La chalcopyrite est d'importance secondaire. Les sulfures de cuivre sont uniformément répartis dans l'horizon minéralisé. Les minéraux oxydés se situent plutôt vers la surface et à proximité d'accidents tectoniques.

● *Un exemple de minéralisation uranifère en milieu détritique.* Les gisements d'uranium sont situés au nord d'Agadès, république du Niger, sur la bordure occidentale du Massif cristallin de l'Aïr. Les formations sédimentaires s'appuient sur le socle cristallin et pendent faiblement vers l'ouest et le sud-ouest. Les faciès de la série sont épicontinentaux et marins jusqu'à la fin du Carbonifère inférieur (Viséen), puis deviennent continentaux jusqu'à la transgression de la mer cénomanienne (*fig.* 12).

La structure de la région, où se trouve toute une série de gîtes, est déterminée par de grandes rides tectoniques N.-E. et N.-O. déterminant des bassins continentaux dans lesquels s'accumulent des grès poreux, feldspathiques d'origine fluviatile à forte perméabilité contenant de la matière organique d'origine végétale, en particulier dans les grès.

Dans la région d'Arlit, la stratigraphie montre de bas en haut, reposant sur des formations argileuses noires du Viséen supérieur (série de Talak), une série carbonifère, formée de formations lithologiques bien différenciées : les grès du Guezouman, les argilo-grès de Tchinezogue, les grès de Tarat, les argilo-grès de Madaouela. L'ensemble est surmonté par les arkoses permo-triasiques d'Izegouanda. L'ensemble de cette série est perturbé par la grande faille-flexure nord-sud d'Arlit-Afasto à l'ouest, par des flexures nord-est dites failles à faible rejet de direction E.-S.-E. La minéralisation principale est continue dans la formation de Tarat-Madaouela. Ce sont des grès

de granulométrie variée à ciment kaolinitique, avec de rares carbonates. Des niveaux argilo-micacés noirs s'intercalent dans les grès.

La reconstitution paléogéographique a mis en évidence la présence dans la région d'Arlit d'un paléodome et d'un ensemble de chenaux venant du nord-ouest et s'écoulant de part et d'autre de l'extrémité nord du paléodome. Le gisement d'Arlit est situé à cheval sur le paléodome et sur un chenal situé au nord-ouest à l'endroit où celui-ci s'infléchit vers l'ouest.

La minéralisation, sous forme principalement de coffinite, disséminée dans le gisement des grès, la pechblende étant accessoire, se situe dans tous les faciès de la série de Tarat-Madaouela. Le gîte d'Arlit contient, d'après les estimations effectuées en 1966, 20 000 tonnes d'uranium à une teneur de l'ordre de 2,5 % pour une teneur de coupure de 1 °/₀₀.

★ *Gisements dans les séries schisteuses : cuivre, uranium, cobalt.* Appelés aussi Kupferschiefer (schistes cuprifères), la minéralisation la plus importante étant cuivreuse, ces gisements se situent dans des fossés d'effondrement tardi- à post-tectoniques à sédimentation de type molassique : ils constituent le type de gisement caché par excellence. Les sédiments postorogéniques sont formés d'argiles, de grès à ciment carbonaté souvent rouges, d'évaporites. Les séries sont tabulaires, peu tectonisées (failles normales), à l'exception des gîtes du Katanga, de Zambie, de Bolivie, soumis à une tectonique diapirique.

La minéralisation, parfaitement concordante sur la stratification, s'étend sur des surfaces considérables avec une puissance faible (1 000 km^3 avec une puissance de 20 cm pour le Mansfeld par exemple). Particulièrement fine, elle se trouve dans des niveaux marneux, argileux, noirs, gris, verdâtres, souvent finement variés au sein d'une série transgressive.

Les concentrations économiquement exploitables sont contrôlées sur le plan vertical par un changement brutal de sédimentation : passage des grès aux shales, des grès aux carbonates. A ce contrôle sédimentologique s'associe un contrôle chimique très important : passage d'un milieu oxydant rouge à un milieu réducteur noir. Les irrégularités du substratum (hauts-fonds), sur lequel se développe la transgression, favorisent les concentrations. Si les hauts-fonds sont restés en milieu oxydant (émersion ou faibles profondeurs), ceux-ci sont stériles. Ce sont les « Röte Faule » bien connus dans ces gisements. Une minéralisation particulièrement riche se développe à leur périphérie. Si, au droit du haut-fond, le milieu est réducteur, la minéralisation se concentre au top de celui-ci.

Comme la minéralisation suit le développement de la transgression, dans un même district les niveaux minéralisés ne sont pas synchrones mais accompagnent la progression du biseau transgressif. Dans ces gîtes, les minéraux primaires de cuivre marquent horizontalement une zonalité nette : pyrite, chalcopyrite, bornite, chalcocite. W. G. Garlick (1961) rattache cette zonalité à la paléogéographie : la pyrite se situe au large, la chalcocite étant proche du littoral. Verticalement, la zonalité est moins nette. Le plus souvent, on a de bas en haut : bornite, chalcopyrite, pyrite.

Le plomb-zinc, souvent présent dans ces gîtes (Mansfeld, Lubin), se localise au toit de la minéralisation cuivreuse en corrélation directe avec l'augmentation de la teneur en carbonates au sein de la série sédimentaire. De même horizontalement, autour des « Röte Faule », existe une zonalité nette cuivre, plomb, zinc. Dans les gîtes cobaltifères, le cobalt sous forme de carrollite (CO_2Cu, S_4) est associé aux zones à chalcopyrite et bornite (Zambie).

A ces minéralisations stratiformes s'associent de nombreuses fractures minéralisées. Ce sont les fameux « Rücken » qui soulèvent encore de nombreuses discussions concernant leur genèse. On y trouve, outre les minéraux déjà cités précédemment, des minéraux riches en arsenic, rammelsbergite, skuttérudite, nickeline.

Les gîtes de ce type sont d'âge varié, allant du Précambrien au Tertiaire supérieur. Ces âges sont cependant ordonnés et sont en corrélation étroite avec l'évolution orogénique correspondant à des époques tardi- ou légèrement postorogéniques, fin des cycles précambrien, calédonien, hercynien, alpino-laramien. Les gîtes les plus importants sont ceux du Shaba, de la Zambie, de l'Allemagne de l'Est et de Pologne.

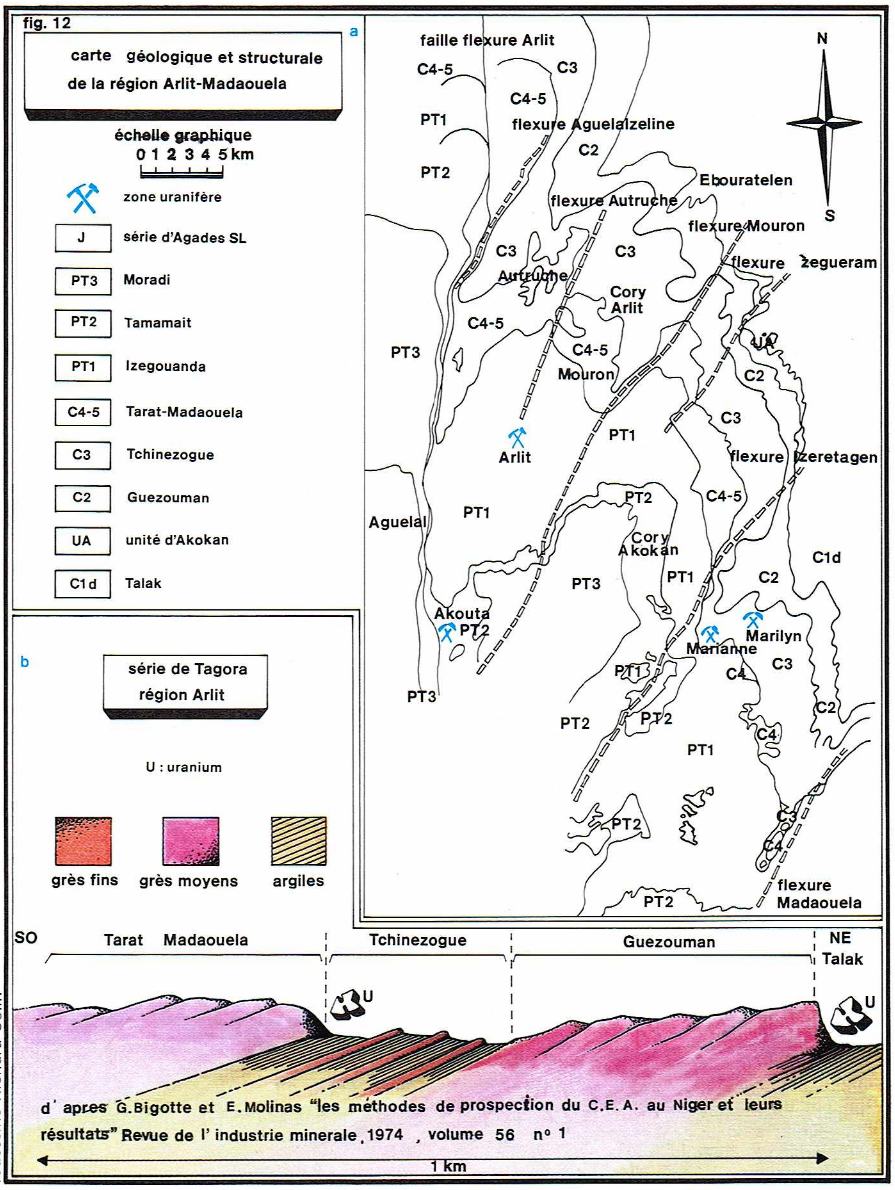

redessiné Richard Colin

▲ *Figure 12 : a, carte géologique et structurale de la région Arlit-Madaouela au nord d'Agadès (Niger) ; dans cette région sont localisés des gisements d'uranium ; b, coupe géologique de la région d'Arlit.*

▼ *Le gîte de cuivre de Tizert dans l'Anti-Atlas (Maroc) ; le niveau cuprifère situé à la base de la falaise dolomitique est jalonné ici par les tranchées et les galeries.*

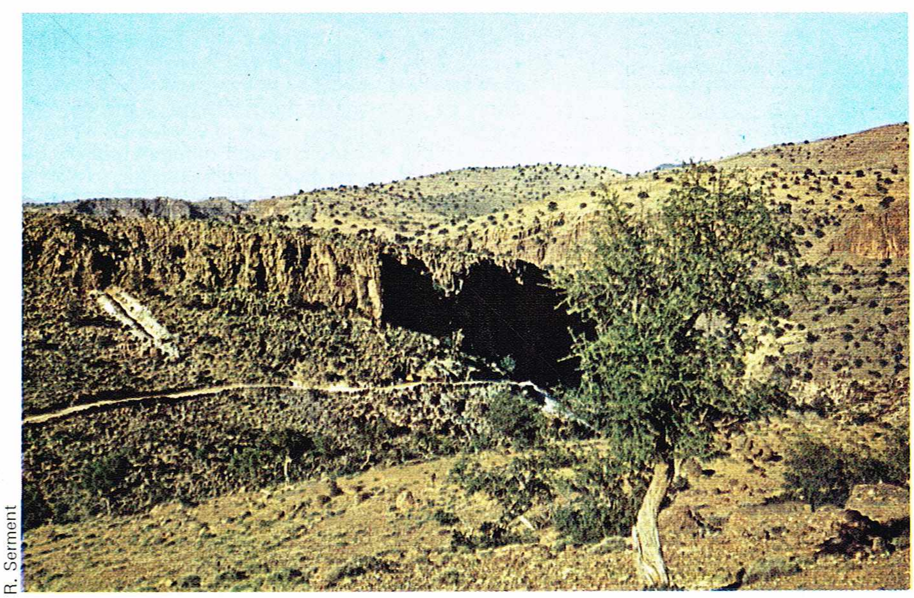

R. Serment

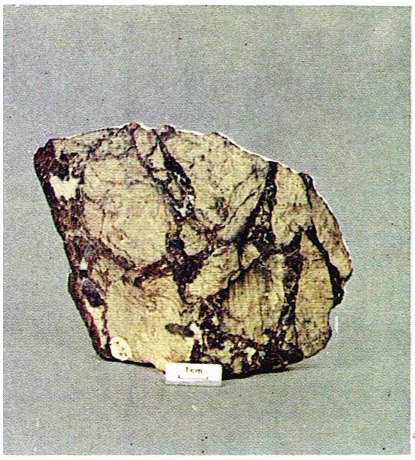

F. Lauzac

▲ ***Un échantillon de minerai de zinc provenant du gisement de Figeac (Lot); les éléments calcaréo-dolomitiques de la brèche sédimentaire sont cimentés par une minéralisation plombo-zincifère.***

▶ ***Page ci-contre, figure 13 : schéma synthétique montrant la localisation de dépôts métalliques en relation avec un massif granitique « post-tectonique » ou circonscrit (d'après P. Routhier,*** **les Gisements métallifères,** ***Masson, 1963). Figure 14 : carte du massif péridotique de Tiebaghi en Nouvelle-Calédonie, gisement de chromite encore exploité actuellement (d'après les levés de P. Routhier, reproduit avec l'autorisation de la Société géologique de France).***

Si tout le monde est d'accord pour un mode de dépôt syngénétique, le problème de la source des métaux n'est pas encore résolu. Trois hypothèses principales ont été envisagées : un apport continental par drainage superficiel, un apport continental par drainage souterrain relié ou non à des exhalaisons magmatiques, un apport d'eau marine du large.

Les minéralisations exploitées actuellement le sont pour le cuivre, le cobalt (75 % de la production mondiale), le zinc, le plomb, l'uranium et parfois le vanadium.

★ *Gisements liés aux roches carbonatées.* Celles-ci, calcaires ou dolomies, renferment de nombreux gisements de substances variées, en particulier plomb et zinc... Ces gîtes, longtemps dits « de substitution », ont particulièrement alimenté les controverses entre épi- et syngénétistes. Leurs caractéristiques géologiques souvent ambiguës peuvent en effet être considérées, avec juste raison, comme autant d'éléments de preuve de leur nature syn- ou épigénétique. Leur liaison avec certains horizons sédimentaires bien précis, la nature pétrographique du minerai en général dépourvu de gangue et constitué uniquement de minéraux métalliques intimement mélangés à la matrice carbonatée de la roche-hôte, les figures sédimentaires visibles dans le minerai, plaident pour une origine purement sédimentaire. Leur liaison avec la tectonique cassante, leur localisation très fréquente au contact d'horizons lithologiquement différents, le fait qu'ils sont toujours dans le détail discordants avec la stratification, tout cela conduit à leur attribuer une origine et un âge différents de ceux de la roche carbonatée encaissante.

La distinction entre origine syn- et épigénétique de ces minéralisations peut apparaître, pour le profane, sans intérêt sur le plan pratique, ne débouchant que sur des considérations scientifiques abstraites. Mais en fait, les guides de recherche utilisés par le géologue-prospecteur seront radicalement différents selon l'hypothèse de travail retenue. A titre d'exemple, on sera amené à rechercher, dans un cas, certains horizons d'âge et de nature lithologique particuliers, dans l'autre des failles appartenant à un épisode bien défini de tectonique cassante, recoupant les horizons calcaires ou dolomitiques. Ces deux manières de voir, inconciliables durant de longues années, ont maintenant évolué vers un terrain d'entente, à mi-chemin entre les positions extrêmes.

A la lumière des études récentes faites sur ces gisements, on admet généralement que certains d'entre eux se sont formés à partir d'un stock métal déjà présent dans la roche lors de la sédimentation, mais que l'expression minéralogique et la morphologie des amas minéralisés ont été, dans la majorité de ces cas, considérablement modifiées au cours de l'histoire géologique de la roche encaissante, et ce dès le stade de la diagenèse, les éventuels épisodes de tectonique souple ou cassante postérieurs contribuant eux aussi à donner à une minéralisation primitivement stratiforme un aspect discordant à différentes échelles. Selon l'évolution postérieure à la sédimentation proprement dite, les caractères épigénétiques seront plus ou moins apparents.

D'autre part, il est bien évident que des minéralisations n'ayant aucun rapport avec le processus sédimentaire peuvent se mettre en place dans des roches carbonatées par l'action de solutions hydrothermales. Dans ce cas, les caractères épigénétiques seront d'emblée dominants, même si un niveau lithologiquement différent, plus favorable à la mise en place d'une minéralisation (dolomie interstratifiée dans un calcaire par exemple), est alors seul minéralisé. La liaison des amas minéralisés avec les failles, diaclases, joints de stratification et, d'une façon générale, toutes les fissures affectant le massif rocheux constituera le principal contrôle des minéralisations. Les gîtes minéraux inclus dans des roches carbonatées ne forment donc pas, à proprement parler, un type de minéralisation au sens génétique du terme, mais expriment plutôt une possibilité de convergence de processus radicalement différents qui aboutissent à un résultat pratiquement identique (désigné dans la littérature sous le nom de « Mississippi Valley », du fait de la localisation dans cette région d'un certain nombre de gros gisements de Pb-Zn de ce type).

Ce n'est toutefois pas si loin que nous nous rendrons pour avoir des exemples de tels gisements qui sont également abondants en Europe et en Afrique du Nord. Citons, en France : Figeac, Les Malines; en Espagne : Reocin; en Italie : Raibl et les gisements sardes de l'Iglesiente; en Autriche : Bleiberg; au Maroc : Mibladen, Touissit-Boubecker, etc., pour ne parler que des plus connus.

● *Le gisement de Figeac (Lot, France).* Situé à quelques kilomètres au nord-ouest de la ville de Figeac, ce gisement de zinc est encaissé dans des calcaires dolomitiques sinémuriens. La zone minéralisée se trouve sur un talus correspondant à un brutal épaississement du Sinémurien, d'est en ouest. L'instabilité des vases calcaréo-dolomitiques, lors de leur sédimentation sur ledit talus, se traduit actuellement par l'existence d'une zone de brèches sédimentaires due au glissement des sédiments non encore parfaitement consolidés sur le flanc du talus. Les éléments de cette brèche sont cimentés par de la blende. Ph. Launey et R. Leenhardt ont montré que la minéralisation est contrôlée par la variation d'épaisseur du Sinémurien, et que le dépôt de la blende est contemporain ou subcontemporain de la sédimentation : des trous de mollusques lithophages perforant le sommet du Sinémurien sont remplis par la blende.

Comme les contrôles de la minéralisation sont ici purement sédimentologiques, on est en présence d'une minéralisation syngénétique n'ayant subi pratiquement aucune modification ultérieure. Quant à l'origine du métal, on ne peut qu'avancer des hypothèses. La plus vraisemblable est que le talus du socle sur lequel s'est déposé le Sinémurien a été déterminé par l'existence d'une faille affectant le socle, et que cette faille a permis, pendant la sédimentation sinémurienne, la montée de solution de sels de plomb et zinc qui sont venus cristalliser dans les sédiments sus-jacents.

● *Les gisements de l'Iglesiente.* Situés dans le sud-ouest de la Sardaigne, ces gisements ont eu, depuis l'Antiquité (les Carthaginois en exploitaient déjà les parties plombifères et argentifères), une importance économique considérable. On peut estimer à 3 millions de tonnes-métal environ leur production de plomb et zinc depuis l'origine de l'exploitation.

Ces minéralisations sont encaissées dans une puissante série calcaréo-dolomitique cambrienne, reposant sur des grès d'âge géorgien qui sont les plus anciennes roches connues en Sardaigne, et surmontées d'une série schisteuse d'âge acadien. L'ensemble a subi deux phases principales de plissement, l'une à la fin du Cambrien (phase sarde de l'orogenèse calédonienne), l'autre postcarbonifère et anté-permienne, donc hercynienne. Plusieurs phases de tectonique cassante s'y superposent également, dont une phase alpine. Nous sommes donc loin de l'histoire géologique tranquille du Sinémurien de Figeac, et l'allure des minéralisations s'en ressent.

Celles-ci se présentent sous forme d'amas plus ou moins réguliers, groupés en champs de dimension de l'ordre du kilomètre. A noter tout de suite que le chimisme des minéralisations varie en fonction de leur position stratigraphique : vers le bas de la série carbonatée se trouvent des amas à pyrite et blende (Campo Pisano), auxquels succèdent, en montant dans la série, des minerais blendeux pauvres en plomb (San Giovanni), pour arriver enfin, au contact des schistes, à des minerais uniquement plombeux (San Giovanni-Contact). Au minerai pyriteux de la base de la série sont associées des roches éruptives basiques, rendant possible une origine volcano-sédimentaire de celles-ci. Un contrôle tectonique lui est également associé : la présence de grandes failles N.-N.O.—S.-S.E., failles d'importance régionale.

Les minerais blendeux sont le plus souvent au contact d'un calcaire cambrien et d'une dolomie secondaire, cette dernière au toit du minerai, et les amas minéralisés sont allongés le long d'une direction correspondant à l'intersection du plan de stratification et d'une direction de diaclases. Des traces de recristallisation en géodes plates orientées comme les amas minéralisés sont visibles dans la dolomie du toit. Quant aux minerais plombeux du sommet de la série, ils sont rigoureusement stratiformes en grand, discordants dans le détail.

Près de la surface topographique actuelle, ces minerais sont évidemment oxydés, et leur contrôle par les directions de fracturation de la roche encaissante devient alors prépondérant. En ce qui concerne les minerais blendeux, à noter la présence d'amas à basse teneur en Zn, rigoureusement stratiformes en grand, et encaissés dans une roche très peu fracturée, ainsi que l'existence à l'opposé

de véritables filons très riches strictement liés à l'existence de failles ou de diaclases (Seddas, Moddizzia). Le caractère syngénétique de telles minéralisations est donc loin d'être évident, à cause de l'histoire géologique postcambrienne compliquée de la région.

Gisements formés à plus ou moins grandes profondeurs, liés aux granites, au métamorphisme, au volcanisme, à l'hydrothermalisme, à des roches grenues basiques ou ultrabasiques

On regroupe ici un certain nombre de types de gisements toujours impérativement liés à la présence de roches plutoniques ou volcaniques. Cette liaison n'est pas purement spatiale mais constitue la condition *sine qua non* de l'existence du minerai. L'origine de la réserve métal de ces roches n'est pas toujours bien perçue. Si, pour certaines roches basiques ou ultrabasiques, la réserve métal provient de l'origine de la roche elle-même, il n'en est pas de même pour les minéralisations liées à des plutons granitiques granitoïdes par exemple.

Actuellement, avec E. Raguin (1977), on peut admettre que la réserve métallique disponible dans le cas d'un pluton granitique peut avoir deux origines. Pour la plus simple, elle provient du granite lui-même et est « liée à son élaboration et véhiculée par lui à partir de zones profondes indéterminées ». Ce fut l'idée première.

La seconde origine fait intervenir un phénomène de drainage. Certains métaux contenus « à clarke élevé » (teneur moyenne de l'écorce terrestre en un élément donné) dans les formations encaissantes sont remis en mouvement lors de la mise en place du pluton. Ces éléments métalliques peuvent soit passer dans celui-ci, cas d'un granite « subautochtone de transformation », soit, dans le cas le plus général, se concentrer à proximité par des circulations hydrothermales centripètes. Quant au phénomène de concentration, il peut être dû soit à l'expulsion hors du granite, au moment de sa consolidation, de fluides résiduels chargés d'éléments métalliques (C. J. Sullivan, 1948) et qui se déposent en fonction de l'abaissement de la température suivant le schéma classique de W. H. Emmons (1933), soit, dans le cas d'un drainage des métaux, à des circulations ascendantes de solutions latérales le long de failles péribatholitiques (E. Raguin, 1976). On peut aussi envisager des circulations *per descendum* si, à l'époque de la « métallogénie », existait au-dessus du pluton un relief élevé aujourd'hui érodé (*fig.* 13).

Les gisements de ségrégation

On appelle gisements de ségrégation des gisements formés par différenciation lors de la cristallisation des roches plutoniques encaissantes, le minerai formant alors des poches, des colonnes, des lits, etc., à l'intérieur de ladite roche. La structure du minerai peut être variable : rubanée, massive, en nodules (chromite léopard de Nouvelle-Calédonie). Les minéraux peuvent être soit des oxydes (magnétite, ilménite, chromite), soit des sulfures (pyrite, pyrrhotite, chalcopyrite). On observe au sein de la roche une certaine zonalité. Les minéraux oxydés se trouvent répartis dans la masse, les minéraux sulfurés se concentrant principalement à la bordure de cette dernière.

En général, ces gisements sont associés à des roches basiques (gabbros) ou ultrabasiques (péridotites), plus rarement à des roches acides : pour celles-ci, citons le célèbre gisement de Kiruna (Suède), gisement de forme stratoïde, composé de magnétite non titanifère, intercalée entre une rhyolite et une syénite porphyrique.

Parmi les gîtes les plus classiques, on peut citer les gisements de chromite, tel celui de Tiebaghi situé dans la partie nord de la Nouvelle-Calédonie (*fig.* 14). Ce gisement est lié à un petit massif de péridotite (harzburgite) plus ou moins serpentinisée, d'âge probablement oligocène. La chromite forme ici deux corps minéralisés stratoïdes.

On peut considérer comme un cas particulier de ces gîtes les gisements dits d'inclusions dans lesquels le ou les minéraux utiles sont disséminés dans la roche et n'en sont qu'un constituant. La teneur est alors souvent très basse, et seules des substances de grande valeur marchande peuvent être exploitées dans de telles conditions. C'est le cas, par exemple, du platine, et surtout des diamants.

Les gisements de pegmatites

R. Haüy (1801) créa le terme de pegmatite pour désigner « le feldspath avec quartz enclavés ». Delesse (1849) l'utilise pour désigner des remplissages filoniens « d'une structure granitoïde à grandes parties ». Cette définition est proche de celle en cours actuellement, à savoir : amas ou filons où les minéraux habituels de certaines roches plutoniques cristallisent avec une texture à gros grains.

On connaît, outre des pegmatites granitiques, des pegmatites associées à des syénites néphéliniques et même à des roches basiques : gabbros et norites. Du point de vue économique, les pegmatites granitiques sont les plus importantes. Issues de la cristallisation résiduelle du bain magmatique, elles se situent soit à l'intérieur, soit surtout à la périphérie immédiate de la roche plutonique. Les corps pegmatitiques sont de formes variables. Si, d'une manière générale, la plupart se présentent sous forme d'amas ovoïdes, certains prennent une allure filonienne. On observe souvent dans ces amas une structure zonée.

Ces pegmatites contiennent un grand nombre d'espèces minérales. On en a dénombré 280 pour les pegmatites granitiques (A. E. Fersmann, 1931), et plus encore pour les pegmatites syéno-néphéliniques. Ces minéraux appartiennent à des groupes chimiques très variés : oxydes, carbonates, fluorures, borates, uranates, silicates de zinc, thorium et terres rares, titano-silicates, et présentent un grand intérêt industriel, pour les métaux rares en particulier. A. E. Fersmann a étudié la cristallisation de ces espèces minérales qui se fait suivant l'évolution du bain résiduel magmatique en fonction du refroidissement progressif. Schématiquement, on peut dire que les pegmatites les plus profondes lors de leur cristallisation contiennent du thorium, du niobium, du tantale, du titane, de l'uranium. Ce sont les pegmatites à terres rares. Les plus externes renferment des micas, du béryl, du lithium, de l'étain.

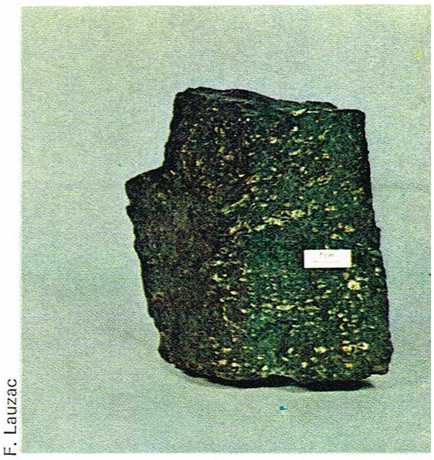

F. Lauzac

▲ ***Dans le minerai de Sudburry (Ontario, Canada), la minéralisation se présente sous forme de petites amandes, essentiellement composées de pyrrhotite, disséminées dans la roche encaissante.***

fig. 13

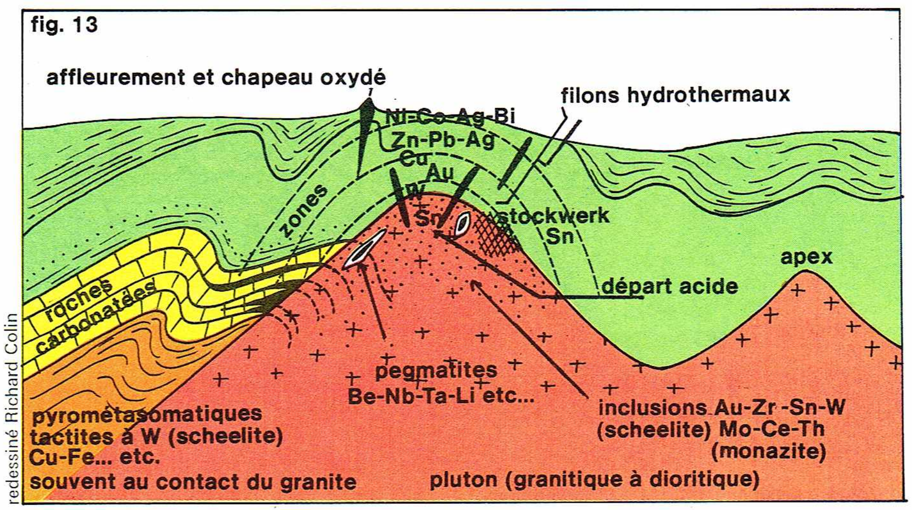

redessiné Richard Colin

fig. 14

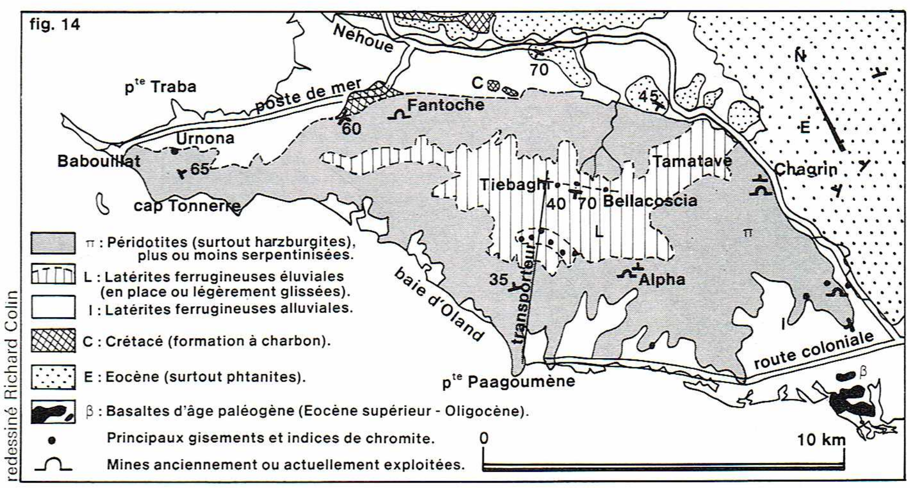

redessiné Richard Colin

R. Serment

▲ ***Le filon de l'Aouam (Maroc); le passage du filon en surface est matérialisé par les anciens travaux de décapage (taches sombres); l'effondrement au premier plan est dû aux travaux souterrains récents.***

Les gisements de pegmatites sont recherchés pour leur richesse en gemmes, mais aussi pour les terres rares, les micas et le feldspath de céramique. Il est intéressant de rappeler que les premières prospections pour l'uranium, en France, débutèrent par la recherche de minéraux uranifères dans les pegmatites granitiques du Massif central.

Du point de vue géologique, les grands champs pegmatitiques se situent principalement dans les aires anciennes. Une érosion profonde étant nécessaire pour leur mise en affleurement, leur formation se fait en profondeur dans la lithosphère. Ils se situeront donc dans les aires antécambriennes où se localisent les provinces pegmatitiques de Suède, du sud de la Norvège, de Madagascar, du Sud-Ouest africain (Namibie), du Colorado et d'Australie occidentale. Certaines zones hercyniennes peuvent contenir des pegmatites : l'Oural, le Massif central français (Haute-Vienne), les Appalaches.

★ *La lentille d'Angarf-Sud dans la plaine de Tazenakht* (Anti-Atlas marocain) fournit un excellent exemple de ce type de gisement. Dans la plaine de Tazenakht, formée de micaschistes et de migmatites attribués au Précambrien I, affleurent deux massifs granitiques : le granite d'Azguemerzi au nord, le granite leucocrate de Tazenakht qui recoupe le précédent, et qui affleure dans toute la plaine. Dans la partie sud, le granite de Tazenakht forme le massif de l'Adrar.

Dans le granite lui-même et dans sa zone de bordure, se localisent des amas pegmatitiques, parmi lesquels la lentille d'Angarf-Sud. Au contact, les micaschistes et migmatites présentent une auréole à tourmaline continue. Dans l'amas lui-même, on observe une très belle zonalité. Au contact de l'encaissant, il y a un développement important de muscovite en bordure d'une zone à feldspaths alcalins et quartz. Le noyau est formé de quartz. Le béryl forme un chapelet d'amas, certains atteignant plusieurs mètres dans la zone feldspathique dans laquelle on trouve également des amas verdâtres composés de fer, phosphates et manganèse.

Gisements de départ acide

Par ce terme dû à L. de Launay, on souligne la liaison étroite qui existe entre certains filons ou filonnets en stockwerk et des plutons granitiques ou granitoïdes. On les appelle aussi *gisements pneumatolytiques*. Ces gisements sont minéralisés principalement en étain et tungstène. Ce sont des dépôts tardi-magmatiques formés à partir des résidus volatils de fin de cristallisation des plutons. Ils sont encaissés dans ceux-ci ou à leur périphérie immédiate. Aux minéralisations en étain et tungstène rarement associées dans un même filon, s'ajoutent souvent du molybdène et plus rarement du bismuth dont la zone de répartition est beaucoup plus vaste. La gangue est quartzeuse avec présence de minéraux tels que topaze, fluorite, lépidolite et zinnwaldite (micas lithinifères). Les terrains encaissants subissent parfois, aux épontes des filons, des modifications importantes : développement de tourmaline, kaolinisation par altération des feldspaths du granite.

De même origine sont également les formations de *greisens*. Ce sont des roches qui se forment par destruction des feldspaths du granite sous l'influence des résidus volatils *(autopneumatolyse)*. La transformation donne naissance à une roche à quartz, muscovite ou mica lithinifère : le greisen. Les roches encaissant le pluton granitique subissent éventuellement ce phénomène (gisement d'Abbaretz en Bretagne). Parfois, certaines concentrations stannifères se développent dans les greisens avec tourmaline, topaze, apatite et fluorine.

Les coupoles et les protubérances des batholites ainsi que les terrains encaissants situés à proximité sont les lieux préférentiels de ces gisements. Par suite de l'érosion, ces gisements sont rares dans les chaînes très anciennes antécambriennes. Les principaux gîtes se localisent dans les chaînes plus récentes, hercyniennes, névadiennes, laramiennes. Ces deux dernières contiennent les minéralisations les plus importantes dans le Sud-Est asiatique.

Les gîtes de type porphyrique

Définis par Parson (1933 et 1956), ils se caractérisent par : leur association avec des intrusions subvolcaniques complexes, leurs grandes dimensions, leur basse teneur (d'où l'appellation anglo-saxonne : « disseminated copper ore ») ; une minéralisation cuprifère en multiples veinules (stockwerk) riche en pyrite associée à la chalcopyrite (la gangue [quartz et séricite] se développe en larges auréoles autour des corps minéralisés) ; la présence de molybdène en faibles quantités, irrégulièrement répartie mais constante (*fig.* 15).

Ce type de gîte se localise au sein de zones orogéniques mobiles. Les grandes ceintures de porphyres cuprifères sont associées à un linéament (limite entre deux unités ayant des histoires géologiques très différentes) moyen à la limite de zones géosynclinales du côté où le plan de Benioff s'enfonce (H. Pélissonnier, 1973). Le remplissage de ces géosynclinaux à évolution complexe est en totalité (Chili) ou en partie volcanique.

Assez tardivement par rapport aux phénomènes orogéniques principaux affectant ces géosynclinaux, apparaissent, avec un certain échelonnement dans le temps, un grand nombre d'intrusions successives issues d'un même foyer magmatique, généralement granodioritiques. La mise en place de ces intrusions s'est faite à faible profondeur, d'où leur caractère porphyrique. Ces intrusions présentent des différenciations : granitiques, dioritiques, monzonitiques. Les intrusions tardives ou finales, souvent monzonitiques, subissent une fracturation intense. Des minéralisations leur sont généralement associées. Il y a une liaison étroite entre fracturation et minéralisation. Ainsi que le souligne H. Pelissonnier (1972), « il y a toujours une corrélation positive entre la densité de fracturation ou de bréchification et l'importance de la minéralisation ». C'est une condition *sine qua non*. Cette minéralisation en stockwerk forme des amas, des groupes d'amas irréguliers, des lentilles dans et autour des intrusions à l'intérieur des roches encaissantes (roches ignées ou sédimentaires à l'exclusion des roches calcareuses).

Dépassant cette définition restrictive, le développement des connaissances sur ce type de gîte amène à inclure dans celui-ci toutes les minéralisations « non directement encaissées dans des porphyres mais cependant reliées à ceux-ci à l'échelle du champ » (H. Pélissonnier, 1972). C'est ainsi qu'au gîte porphyrique *sensu stricto*, on rattache : des skarns purs en liaison directe avec les roches calcareuses encaissant les intrusions et où la minéralisation forme des amas irréguliers, des lentilles plus ou moins stratiformes; des filons, de formes et de longueurs variables, certains atteignant plusieurs kilomètres. Les relations entre gîtes porphyriques *sensu stricto* et skarns sont souvent très étroites : dans ce cas, le gîte est dit mixte.

Parmi les minéraux primaires, dans tous les gîtes, la pyrite est dominante et associée à la chalcopyrite. La bornite, également associée à la chalcopyrite, est présente sauf dans les filons. La molybdénite, en faibles quantités, est un satellite constant, sauf dans les filons où sa présence n'a pas toujours été décelée.

A ces minéraux s'associent dans les gîtes *sensu stricto* et mixtes la blende et, en moindres quantités, la galène, la magnétite, l'oligiste, l'énargite. La gangue est à quartz séricite, avec, pour le type mixte, de la calcite et des

silicates de calcium. Pour le type porphyrique *sensu stricto*, une tourmalinisation intense affecte les gîtes situés dans les cheminées de brèches volcaniques, en Amérique du Sud en particulier.

Dans les skarns, la minéralisation est semblable avec un accroissement parfois important de la proportion d'oligiste et de magnétite et quelquefois de blende. La gangue est essentiellement formée de calcite et de silicates de calcium, grenat, trémolite, diopside. Les filons se caractérisent par un accroissement variable du pourcentage de blende et de galène. Dans les parties filoniennes éloignées des intrusions, apparaissent des minéraux d'argent et de manganèse. La gangue est à dominante de quartz avec parfois de la séricite et des carbonates. Les phénomènes d'oxydation et de cémentation sont très importants et se traduisent par l'apparition de minéraux oxydés (carbonates et silicates de cuivre) et de sulfures riches (chalcocite et covellite), économiquement très intéressants.

Une altération hypogène (séricitisation et silicification) intense liée à la minéralisation se développe autour des gîtes. Cette altération est un guide de prospection.

Les gisements du type « skarns »

D'origine suédoise, le terme de « skarns » signifie « matériaux sans valeur ». Il s'appliquait pour les mineurs de Persberg à des agrégats de silicates de calcium, de magnésium, de fer et de manganèse intimement associés à la magnétite qui devaient être triés manuellement pour ne pas abaisser la teneur des minerais. Son introduction dans la littérature géologique serait due à A. E. Tornebohm vers les années 1880-1881.

Dans la géologie récente, on désigne sous le nom de skarns « les roches formées de zones à limites très tranchées monominérales ou constituées par un petit nombre de minéraux, essentiellement des silicates calciques fréquemment ferrifères, alumineux ou magnésiens » (K. D. Phan, 1967). Cette appellation essentiellement descriptive s'oppose au terme « tactite » créé en 1919 par F. L. Hess qui implique la connaissance préalable de l'origine et du mode de formation des minéraux présents ; il définit ainsi un sens plus restrictif. Actuellement, il semble préférable de n'utiliser que le terme skarn, en donnant des précisions sur le mode de formation, quand il est connu, des roches auxquelles il s'applique. Les idées sur la genèse des skarns et l'explication des caractéristiques principales de ces roches, à savoir la réduction du nombre de phases et les limites tranchées entre zones, ont été énoncées en 1954 par l'auteur russe Korjinski.

Situés très souvent au contact des roches plutoniques, généralement granitiques, les skarns contiennent parfois d'importantes concentrations métalliques sous forme d'oxydes ou de sulfures dues à une métasomatose puissante d'origine pneumatolytique, à température élevée ; d'où parfois l'appellation de gisements pyrométasomatiques. En fonction de leur position par rapport au pluton, on distingue les exoskarns localisés à l'extérieur des plutons, par opposition aux endoskarns inclus dans ces derniers.

La minéralogie des skarns est très variée. Les constituants essentiels sont grenat, pyroxène, épidote, magnétite, quartz, calcite, etc., avec comme minéraux accessoires ceux qui sont liés à des minéralisateurs tels que fluor, chlore, bore, hydroxydes. Les minéraux sulfurés sont communs.

On peut distinguer deux types de skarns. Les skarns formés par échange local d'éléments entre une roche carbonatée et une roche alumino-silicatée contiguë sont appelés skarns d'échange local ou skarns de réaction. Constituant le premier type, ce sont des skarns de couleur claire, presque toujours zonés, à limites nettes. Ces zones parallèles les unes aux autres sont constituées d'un petit nombre de minéraux et sont même monominérales. Leur puissance varie de quelques millimètres à quelques mètres. Les éléments entrant dans la composition des minéraux sont essentiellement Si, Ca, Mg et Al. Le fer joue un rôle moins important, ce qui le distingue de l'autre type de skarn. Qualitativement et quantitativement, leur formation peut être due à un emprunt aux roches déjà en place ; on admet ainsi l'existence de migration d'éléments. Celle-ci peut se produire par une réaction à sec entre roche silicatée et roche carbonatée en contact ; on aura dans ce cas un mince liséré de néo-formation, ce qui arrive quelquefois lors de formations peu puissantes. Plus généralement, vu leur puissance relativement élevée, on suppose qu'ils se sont formés aux mêmes conditions de pression et de température grâce à un fluide aqueux qui imprègne toutes les roches, fluide aqueux pouvant contenir certains éléments volatils : F, Cl, B, etc. Ce type de skarn est rarement minéralisé.

Le deuxième type, le plus intéressant du point de vue économique, est constitué de skarns formés par un apport massif d'éléments d'origine plus ou moins lointaine. Ce type est généralement lié à des intrusions plutoniques. Cependant, certains gisements de skarns sont situés assez loin de toute intrusion. C'est le cas de Sangdong en Corée.

L'intrusion d'un pluton granitique ou granitoïde au sein de formations préexistantes contenant des assises carbonatées peut provoquer de profondes modifications de ces dernières. Par suite de la solubilité des carbonates, les « solutions » émanant des intrusions subissent une modification du pH et amènent la précipitation de certains des ions qu'elles transportent. De même, par réaction avec les carbonates, d'autres ions peuvent se fixer. La fracturation souvent associée à la mise en place du pluton au sein des assises carbonatées est un phénomène favorable.

Les skarns ainsi formés sont de formes très irrégulières, le plus souvent en amas, parfois de grandes dimensions (plusieurs centaines de mètres), plus ou moins allongés avec des protubérances. On observe une zonalité grossière. Les minéraux constitutifs sont principalement des silicates ferrocalciques : andradite, hédenbergite associée à de l'ilvaïte, vésuvianite, diopside, etc., traduisant un apport de fer assez intense. Presque toujours, ces skarns contiennent, en quantités plus ou moins grandes, des oxydes de fer (magnétite) et des sulfures (pyrite et chalcopyrite).

Les plutons favorables sont des massifs circonscrits de faibles dimensions à l'affleurement (quelques kilomètres). La minéralisation dépend de la nature de l'intrusion plutonique. Les skarns à scheelite, molybdénite, chalcopyrite, sont en relation avec des plutons, granitiques ou parfois de roches intermédiaires. Les roches

▼ ***Figure 15 : carte du district minier de Bingham (États-Unis) [d'après R. N. Hunt et H. G. Peacock, simplifié; publié dans E. Raguin, les Gîtes minéraux, Masson].***

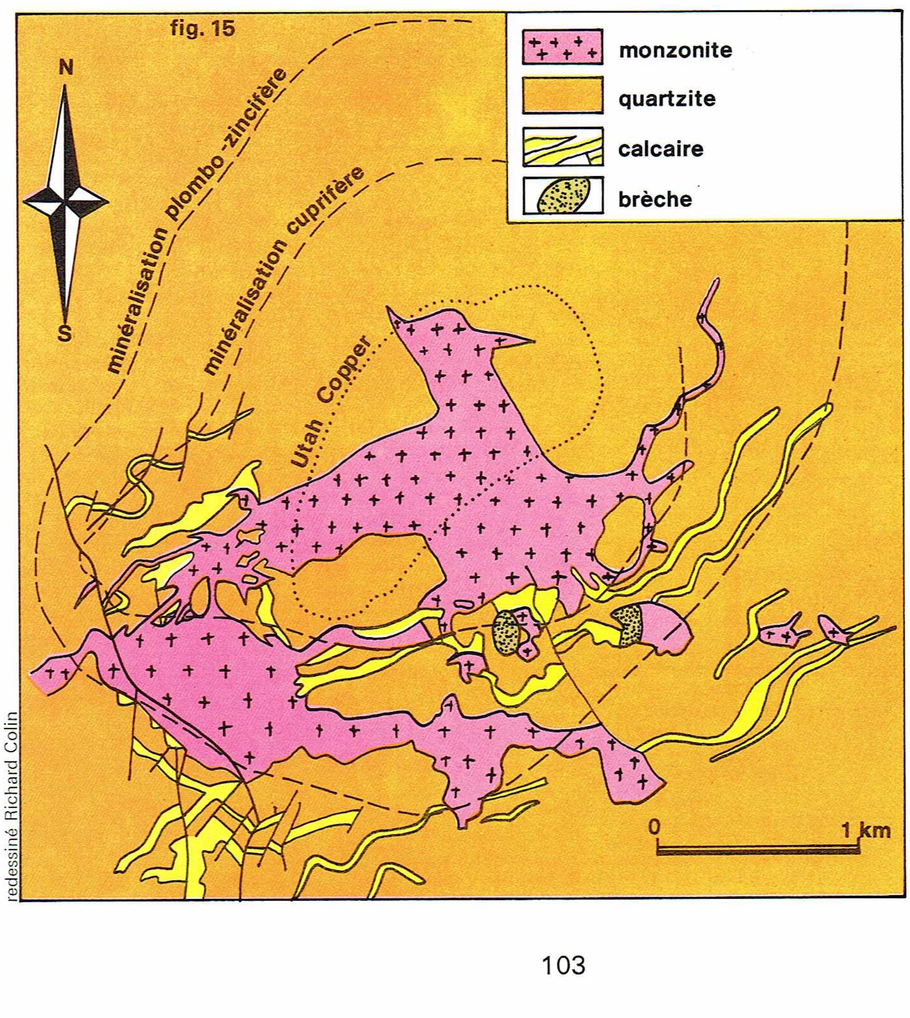

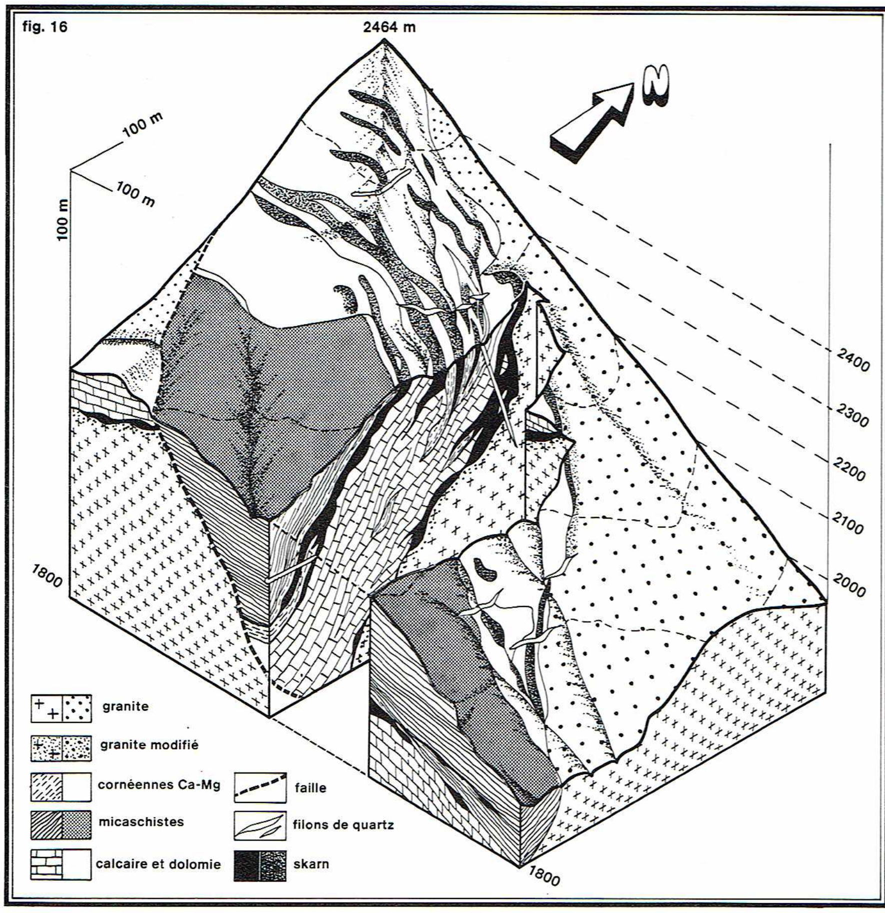

redessiné Richard Colin

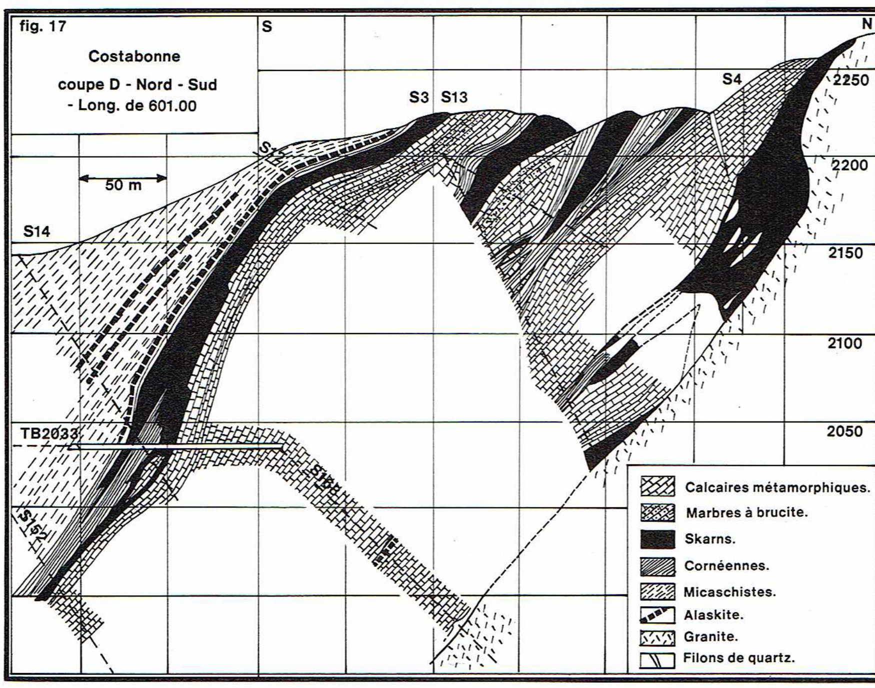

redessiné Richard Colin

▲ ***Gisement de tungstène de Costabonne (Pyrénées-Orientales, France); figure 16 : bloc diagramme; figure 17 : coupe nord-sud du gîte (fig. 16 et 17, d'après G. Guitard et P. Laffitte, Sciences de la Terre, Nancy, t. VI, nº 1-2, 1958).***

basiques ne produisent pas de skarns par suite de leur pauvreté en eau, silice et éléments minéralisateurs indispensables à leur formation.

★ *Un exemple de gîte de type skarn. Le gisement de tungstène de Costabonne, Pyrénées-Orientales (France)*, d'après G. Guitard et P. Laffitte (1960). Il représente un gisement de type skarn « classique », car, après la période métallogénique, il n'a été affecté par aucun phénomène endogène ou tectonique important, à l'exception de quelques failles et d'une surrection qui l'amènent en affleurement (*fig.* 16 et 17).

Situé dans la partie orientale de la zone axiale des Pyrénées, le gisement de Costabonne se localise au contact d'un granite intrusif post-tectonique hercynien et de niveaux calcaires dolomitiques interstratifiés dans des formations cambriennes affectées par le métamorphisme général hercynien. Les assises encaissantes n'ont été que fort peu dérangées lors de l'intrusion de ce dernier. Les phénomènes de rebroussement de schistosité et de linéation sont inexistants. Ce granite est homogène à grains réguliers assez grossiers (1 à 4 mm) à quartz, plagioclase, biotite et feldspath potassique, et à phénocristaux centimétriques de microcline. Le métamorphisme de contact sur les niveaux carbonatés amène, à partir de niveaux calcaréo-dolomitiques par dédolomitisation, la formation de marbre à minéraux magnésiens. Les niveaux plus alumineux se transforment en cornéennes à grenat. Des solutions provenant de granite percolent suivant le contact et, par métasomatose, provoquent la formation de skarns minéralisés.

On distingue deux venues : une venue métasomatique principale avec apport des éléments Si, Al, Fe, W; une venue métasomatique tardive apportant Si, OH, et des sulfures. Ultérieurement se formeront des filons de quartz tardihercyniens recoupant l'ensemble. Ces phénomènes métasomatiques de skarnification par action sur le granite lui-même provoquent de profondes modifications sur une puissance de 1 à 10 mètres. Cette zone se caractérise par l'absence de microcline, la pauvreté en biotite primaire, la basicité des plagioclases non zonées, l'abondance du quartz et la présence éventuelle de minéraux calciques. En relation avec cette modification, et à partir du granite lui-même, se forme un premier type de skarn à grenat et magnétite appelé aussi endoskarn, par opposition aux skarns formés aux détriments des niveaux calcaréo-dolomitiques appelés exoskarns.

Dans les formations carbonatées, les skarns sont largement développés. On peut distinguer :

— une masse principale au contact granite-horizon calcaréo-dolomitique; elle forme un amas de grandes dimensions, plaqué sur le granite, à contact irrégulier et parfois peu net avec celui-ci; par contre, le contact avec l'horizon carbonaté est net et suit en général la stratification;

— une vaste lentille plate d'aspect interstratifié entre les dolomies et la couverture de micaschiste;

— entre ces deux ensembles, au sein des cornéennes rubanées, se localisent un certain nombre de lentilles de skarns de dimensions variables.

Le grain de la roche est toujours grossier, d'ordre centimétrique. Les minéraux sont des grenats calciques (grossulaire, andratite) contenant en inclusions pyroxène et scheelite, des pyroxènes de type salite et ferrosalite, de la scheelite souvent idiomorphe. La formation de ces minéraux correspond à la venue métasomatique principale. On observe un certain rubanement particulièrement bien développé dans les lentilles de skarns intercalées dans les cornéennes, et formées de grenats (grenatite), de pyroxènes (pyroxénite).

Les sulfures et aussi une partie de la scheelite sont liés à la venue métasomatique tardive. C'est ainsi que le molybdène se rencontre dans les grenatites en quantités peu importantes. Les pyroxénites renferment, en proportions assez faibles, blende, pyrite, pyrrhotite, bismuthinite ou chalcopyrite.

Les filons

Les filons constituent peut-être le type de gîte le plus anciennement connu et exploité, et, en tout cas, celui qui a eu jusqu'au début de ce siècle la plus grande importance économique. D'où l'expression populaire : « Avoir trouvé le filon... » Malgré la mise en exploitation de gisements de types autrefois inconnus ou inexploitables, les filons continuent d'être activement prospectés et exploités. A titre d'exemple, deux gisements filoniens nouveaux (Les Farges en Corrèze, Saint-Salvy dans le Tarn) ont été découverts et mis en exploitation ces dernières années en France.

Les filons sont susceptibles de renfermer de très nombreuses substances, principalement Pb, Zn, Ag, Cu, Au, Sn, Sb, etc.

Un gisement filonien résulte du remplissage, par des gangues et des minéraux utiles, de cassures plus ou moins rectilignes subverticales, de pendage varié, de

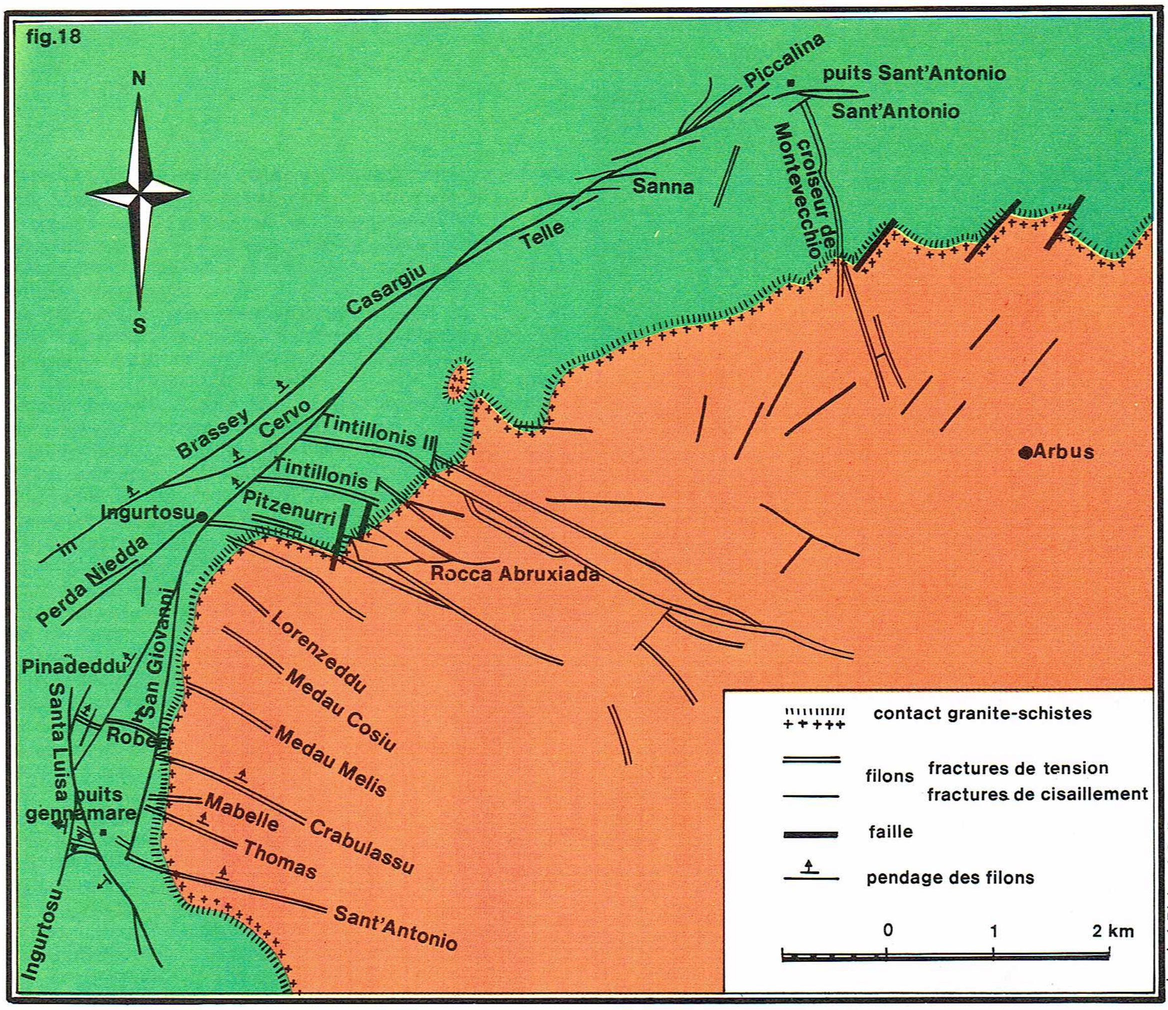

redessiné Richard Colin

◄ ***Figure 18** : le champ filonien plombo-zincifère d'Ingurtosu-Montevecchio (Sardaigne) ; encaissés dans des schistes paléozoïques, les principaux filons entourent un massif granitique hercynien, en affectant une disposition en pelure d'oignon. D'autres filons radiaux sont normaux au contact schistes-granite. Les premiers représentent des fractures de cisaillement, postérieures à une première phase de fracturation responsable des fractures de tension, sur lesquelles sont installés les filons radiaux. Cela illustre un cas particulièrement complexe de fracturation en deux temps, due à la différence de compétence entre deux roches, et pour lequel les contraintes responsables de la fracturation varient dans l'espace, l'une des contraintes principales restant normale au contact (d'après F. Lauzac, thèse 1969).*

dimensions pouvant atteindre plusieurs kilomètres pour la longueur, et plusieurs dizaines de mètres pour la *puissance*, c'est-à-dire l'épaisseur du filon (*fig.* 18).

On appelle *éponte* la partie du filon qui vient immédiatement en contact avec la roche encaissante. Aux épontes du filon existe parfois une zone argileuse, la *salbande*.

Un filon peut contenir plusieurs *veines* minéralisées, parallèles ou séparées par des septums stériles. On désigne alors l'ensemble sous le nom de *caisse filonienne*. De même, il peut exister des *colonnes* riches, plus ou moins inclinées dans le plan du filon. On appelle « pitch » cette inclinaison des colonnes riches, réservant le terme *pendage* à l'angle que fait le filon lui-même avec l'horizontale.

La structure du minerai est variable d'un filon à l'autre. Elle peut être rubanée parallèlement aux épontes, en cocardes, bréchique, etc. On rencontre fréquemment des morceaux des terrains encaissants arrachés aux épontes lors de la formation de la fracture contenant le filon, enrobés et plus ou moins « digérés » par les minéraux constituant le remplissage filonien. Il n'est pas rare non plus que des vides subsistent dans le filon, ces vides pouvant alors être tapissés de cristaux automorphes, parfois magnifiques, tels que les fluorites de Peyrebrune (Tarn) ou les pyromorphites de Vézis (Aveyron).

La minéralogie du remplissage des filons est souvent complexe, au moins en ce qui concerne les minéraux métalliques, et il n'est pas rare qu'une étude soignée au microscope à réflexion montre l'existence dans un seul et même filon de plusieurs dizaines de ces minéraux.

Le minéral de gangue le plus courant est le quartz. Sont également fréquents la calcite, la sidérite, la dolomite, la barytine, la fluorite, ces deux derniers minéraux pouvant être, selon leur abondance, minéraux de gangue ou constituer la minéralisation utile.

Compte tenu de la position verticale ou subverticale des gîtes filoniens, les phénomènes d'oxydation et de cémentation y sont généralement bien marqués. Ces zones d'altération dues aux circulations d'eaux *en direction du bas* (on dit plus scientifiquement « circulation *per descensum* ») se surimposent à la zonalité verticale primaire du filon. En effet, en règle générale, la composition minéralogique du remplissage filonien varie avec la profondeur de la zone considérée.

Il peut exister aussi des zonalités horizontales, la composition du remplissage d'un filon pouvant varier, à un même niveau, d'une extrémité à l'autre de celui-ci. Ce phénomène, moins fréquemment décrit et moins souvent observable, n'entraîne pas en général de changements radicaux dans la composition minéralogique du filon.

Il existe enfin parfois une zonalité d'une éponte à l'autre, dans le cas de filons à structure rubanée. Cette zonalité, symétrique par rapport à l'axe du filon, est l'expression de l'*ordre de cristallisation* des minéraux ayant peu à peu bouché la fracture, le dépôt étant bien entendu centripète, c'est-à-dire progressant des épontes vers le centre de la fracture. De beaux exemples d'un tel remplissage peuvent être observés à la mine de Peyrebrune (Tarn), au filon dit « des Romains ».

Quels sont les « contrôles » des minéralisations filoniennes, c'est-à-dire les règles que doit suivre le géologue pour tenter de déterminer si tel ou tel filon mérite une reconnaissance par géochimie, géophysique, sondage, travaux miniers ? La morphologie, l'anatomie allions-nous dire, d'un gisement filonien ayant été définie ci-dessus, il faut parler maintenant du mécanisme de formation des filons.

Pour qu'il y ait filon, il faut donc, comme condition première, qu'il y ait une *fracture ouverte* de l'écorce terrestre dans laquelle viendront se déposer les minéraux de remplissage. Les géologues distinguent deux types de fractures pouvant donner naissance à des filons : les fractures de tension et les fractures de cisaillement. Les fractures de tension, généralement assez courtes, sont caractérisées par leur absence de rejet (voir volume *Géologie II*), tant horizontal que vertical. De plus, les épontes sont régulières, la puissance des filons faible (maximum : 1 à 2 mètres).

Les fractures de cisaillement ne sont pas à proprement parler des fractures ouvertes, mais des zones broyées, permettant, par conséquent, le passage des fluides minéralisateurs. La puissance peut atteindre plusieurs dizaines de mètres. Les filons installés dans de telles fractures sont le plus souvent complexes, formés de plusieurs veines minéralisées.

Fractures de tension et fractures de cisaillement coexistent presque toujours à l'intérieur d'un même champ filonien. En effet, un régime de contrainte donné,

F. Lauzac

▲ ***Le minerai de fluorite d'El Hamman (Maroc) présente une structure filonienne rubanée.***

▲ ***Les déblais des différents niveaux tracés dans le plan du filon de fluorite d'El Hamman (Maroc) jalonnent l'affleurement de celui-ci sur les flancs de la montagne; au premier plan, on aperçoit les installations de traitement du minerai.***

appliqué à un massif rocheux, provoquera l'apparition d'une direction de fractures de tension et de deux directions de fractures de cisaillement, ces dernières étant symétriques de part et d'autre de la direction des fractures de tension et faisant entre elles un angle inférieur ou égal à 90°, du moins théoriquement. Dans la pratique, seules deux directions de fractures seront bien développées, soit les deux directions de cisaillement, soit l'une de celles-ci et la direction de fracture de tension.

Pour que la fracturation ait lieu en respectant le schéma théorique exposé ci-dessus, deux conditions sont nécessaires : que le régime de contraintes appliquées à la roche soit uniforme, et que la roche soit suffisamment homogène pour que ses propriétés mécaniques soient constantes quel que soit le point considéré. Or ces deux conditions ne seront jamais remplies, ce qui se traduira sur le terrain par des changements de direction et/ou de pendage des filons, des variations de puissance, etc., ces variations pouvant avoir des répercussions sur le contenu-métal du filon, tant quantitativement que qualitativement. Seule l'expérience d'un champ filonien donné permettra de définir quels sont les facteurs favorables liés à la fracturation elle-même.

Chimiquement, et bien que cette théorie soit actuellement controversée par certaines écoles métallogéniques, le remplissage d'un filon s'effectue *per ascensum*, c'est-à-dire grâce à des solutions minéralisées circulant de bas en haut. Le schéma classique d'une telle circulation d'eaux est le suivant : l'eau météorique s'infiltrant dans un massif montagneux se réchauffe et se charge en éléments métalliques, par dissolution des minéraux rencontrés. A la faveur de faille, cette eau chaude, donc plus légère, pourra remonter par effet de thermosiphon, jusqu'à un exutoire évidemment situé moins haut que la zone de collecte de l'eau météorique. Se refroidissant au fur et à mesure de sa remontée, cette eau abandonnera petit à petit, par précipitation sur les parois du vide emprunté, des minéraux métalliques. La cristallisation des différents minéraux dissous ne sera bien évidemment pas simultanée, mais se fera de façon fractionnée, ce qui rend compte de la zonalité verticale des filons. C'est le phénomène hydrothermal.

De nombreux métallogénistes envisagent maintenant la possibilité de formation *per descensum* des filons, le dépôt se faisant alors à partir de solutions d'origine très superficielle lors de la phase de descente des eaux, ce qui explique alors facilement la fermeture vers le bas des filons.

Dans les deux cas, formation *per ascensum* ou *per descensum*, l'eau doit obligatoirement circuler, ce qui impose sa mise en charge et la présence d'exutoires, donc la présence de reliefs suffisamment élevés. Les périodes postorogéniques seront donc, en tout état de cause, les plus favorables à la formation de gisements filoniens.

La température des solutions responsables de la naissance de tels gisements est très variable. Elle peut varier de quelques dizaines de degrés Celsius à 450-500 °C. Classiquement, on distingue trois domaines de températures, correspondant chacun à des types de gisements différents :

— gisements épithermaux, dont la température de formation est en gros inférieure à 150 °C; c'est le domaine de nombre de filons de barytine, mercure, antimoine;

— gisements mésothermaux, formés entre 150 et 300 °C; la plupart des gisements de plomb-zinc se trouvent dans ce domaine de températures;

— gisements hypothermaux, formés à plus de 300-350 °C, ce qui est le cas de nombreux gisements d'étain et de tungstène. Ces températures de formation peuvent être évaluées avec assez de précision par différentes méthodes, dont les plus classiques sont : l'étude des inclusions fluides des minéraux et celle de la présence, décelable au microscope, d'associations minérales dont le domaine de stabilité est limité à certains domaines de températures.

Les gisements volcano-sédimentaires

Sous l'eau, les épanchements et projections volcaniques, ainsi que d'éventuelles intrusions subvolcaniques, peuvent apporter des éléments chimiques. Après sédimentation, ceux-ci peuvent former des gisements dits volcano-sédimentaires. Cette dénomination rappelle l'origine volcanique des éléments métalliques, leur mode de dépôt sédimentaire.

La nature du volcanisme associé permet de distinguer (d'après J. Bouladon et P. Picot, 1976) :

— des minéralisations volcano-sédimentaires liées à un volcanisme calco-alcalin différencié avec termes acides abondants; ce volcanisme peut être qualifié d'« épicontinental », c'est-à-dire sur socle sialique (*voir* Rocci et Juteau, 1973);

— des minéralisations volcano-sédimentaires liées aux ophiolites, c'est-à-dire à des associations stratiformes d'ultra-basites, gabbros et laves basiques avec peu ou pas de terme acide, qui sont typiquement océaniques.

▼ ***Figure 19 : les minéralisations liées au volcanisme insulaire (d'après J. Bouladon, Conférence à l'École nationale supérieure des mines de Paris).***

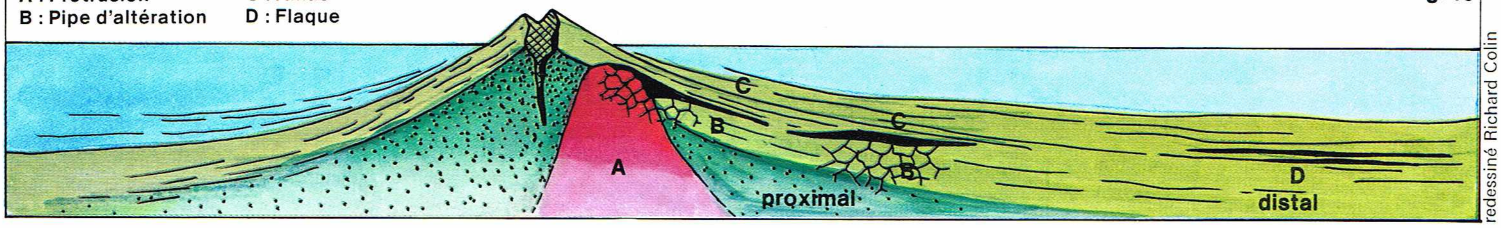

De même, la position de ces gisements par rapport au phénomène volcanique générateur permet de distinguer les gisements dits proximaux (proches ou en liaison directe avec celui-ci), les gisements dits distaux, situés à quelques kilomètres, et où la liaison avec le volcanisme est plus discrète (*fig.* 19).

★ *Gisements volcano-sédimentaires sur écorce sialique*. Le volcanisme calco-alcalin épicontinental est générateur de plusieurs types de minéralisations. Parmi les plus importantes, citons :

● *Les amas sulfurés massifs à cuivre, plomb-zinc avec or et argent.* Ces amas sont concordants sur la stratification. Morphologiquement, on peut distinguer l'amas lui-même enveloppé d'un chert (zone siliceuse) et le « pipe d'altération » qui correspond à une minéralisation en stockwerk située sous la minéralisation massive. Ces amas sont généralement zonés. Le zinc et le plomb s'accumulent à la partie supérieure, la barytine est répartie à la périphérie. Le cuivre se localise à la base et dans le stockwerk du pipe où il est parfois plus abondant que dans l'amas lui-même. La pyrite est ubiquiste.

Dans le cas d'une localisation proche du centre d'émission, la minéralisation se situe parfois sur le flanc d'une protrusion dacitique, tardive, intrusive au centre de l'appareil émetteur. L'amas peut être plus éloigné, mais reste toujours enraciné sur son pipe d'altération. Dans ces deux cas, le gisement est dit proximal.

Si la minéralisation se développe à quelques dizaines de kilomètres du centre émetteur, elle se présentera alors sous forme de couches minéralisées, minces, régulières, parfois répétées et formant une sorte de « flaque » sans pipe d'altération. Elle se situera dans des séries détritiques fines (flyschs, grauwackes, calcschistes, schistes carbonés), dans un bassin confiné. L'épisode volcanique est discret et se manifeste généralement par la présence de tufs. La barytine, le zinc et le plomb s'accumulent à la périphérie de la flaque métallifère, tandis que le cuivre et la pyrite occupent le centre. Ce type de minéralisation est dit distal. C'est le cas des gîtes de Carboire et de Bodennec en France. Soumis très généralement à une tectonique souple dans les zones orogéniques, ils paraissent s'être mis en place au cours de la phase précoce de l'orogenèse.

Ce type de gisement est connu tout au long de l'histoire géologique avec des caractères généraux semblables. On ne peut distinguer qu'une augmentation relative de la proportion de plomb qui, par rapport au total des métaux, cuivre, plomb et zinc, passe de moins de 1 % dans les gisements archéens à 10 % dans les gisements récents miocènes. De même, dans les gîtes récents, il y a développement de sulfates : barytine, gypse, qui sont inconnus dans l'Archéen. Parmi les gîtes les plus importants, citons ceux de l'Archéen (Canada, Australie), de l'Ordovicien au Dévonien inférieur (Bodennec en Bretagne, Oural), du Dévonien supérieur et Carbonifère inférieur (Huelva, Meggen) au Miocène (Japon, Algérie).

● *Les formations ferrifères rubanées appelées aussi itabirites*, dont certaines sont interstratifiées dans des formations volcano-sédimentaires d'âge archéen au Canada.

● *Les formations manganésifères à gondites :* ces roches métamorphiques à spessartite, rhodonite et quartz renferment des oxydes et des carbonates de manganèse. Elles sont souvent associées à des tufs volcaniques.

● *Les gisements de fer de type Lahn et Dill*, d'âge dévonien, situés dans le Massif schisteux rhénan.

★ *Gisements volcano-sédimentaires sur croûte océanique*. Le volcanisme intervenant est un volcanisme basaltique issu du manteau, générateur de la croûte océanique. Les minéralisations sont liées aux ophiolites considérées comme des lambeaux de croûte océanique, arrachés et déformés par une tectonique en plis couchés et écaillés. Une série ophiolitique comprend de bas en haut : une semelle de péridotite affectée de déformations intramagmatiques, appelées parfois tectonites ; des cumulats péridotitiques parfois serpentinisés pouvant contenir de la chromite ; des cumulats gabbroïques ; des laves basiques à pillow-lava (basaltes et spilites). Le tout est surmonté par des formations à radiolarite.

Les minéralisations associées apparaissent au sommet des spilites dans une zone de passage de tufs basiques aux tufs acides (kératophyre) par une série d'alternances. La minéralisation est dite distale : c'est le cas du gîte de cuivre de Bleida (Maroc), de Diaguili (Mauritanie), de Poli (Cameroun). D'autres apparaissent au sommet des gabbros. C'est le cas des gîtes de cuivre d'Akjoujt en Mauritanie (500 000 t de cuivre-métal), Erganie en Turquie (200 000 t de cuivre-métal). D'une manière générale, et à part ces exceptions, ces types de gîte sont de faible tonnage-métal.

Les gisements de carbonatites

Bien que connues depuis fort longtemps des pétrographes, les carbonatites n'ont acquis un intérêt économique que récemment. Ce sont des roches grenues de genèse mal connue, composées de carbonates (calcite, dolomite, sidérite), de néphéline, olivine, feldspath, etc. Dans leurs gisements, elles sont toujours associées à des roches hyperalcalines, le tout organisé en structures concentriques, les roches les plus basiques étant les plus centrales. Ces massifs à carbonatites sont en général alignés à proximité de grandes zones de fractures.

Classiquement, les minéralisations qui leur sont associées sont essentiellement de l'apatite (presqu'île de Kola, U. R. S. S., Kenya), des minéraux de Nb-Tl (Alnö en Suède, Kenya), et des minéraux de terres rares (pyrochlore, monazite, cérite) comme à Mountain Pass (Californie). Mais on peut également y rencontrer des occurrences de Zr, Th-U, Cu, F, Ti, etc.

La prospection minière

Elle a pour but de mettre en évidence de nouvelles concentrations minérales exploitables. Si, dans le passé, la découverte de nouveaux gisements, affleurants ou subaffleurants, était souvent le fait d'un heureux hasard — ce fut le cas par exemple, en 1885, du très important gisement de nickel de Sudbury (Ontario), mis en évidence lors des travaux de creusement d'une tranchée de chemin de fer —, il n'en est plus de même aujourd'hui. D'une manière générale, on peut dire que, jusqu'à la Seconde Guerre mondiale, la recherche minière se préoccupait uniquement de déterminer l'extension de gîtes déjà connus. Cette démarche peut être qualifiée de « centrifuge » (J. Bertraneu, 1973).

Depuis la Seconde Guerre mondiale, la prospection minière, par suite du développement des connaissances sur les divers types de gisements (conditions de formation, relations avec le cadre géologique local et régional) ainsi que sur la géologie générale des diverses régions du globe, est orientée vers la recherche des mêmes conditions géologiques dans une démarche que l'on peut qualifier de « centripète et indirecte » (J. Bertraneu, 1973).

La gîtologie prévisionnelle selon les critères énoncés précédemment sélectionne les zones où la découverte de nouveaux gisements peut être envisagée avec quelques chances de succès. Les travaux de P. Lafitte et P. Rouveyrol (1964-1965) ont mis en évidence la concentration des gîtes minéraux sur des zones réduites. Étudiant statistiquement la concentration des métaux (tonnage-métal produit + réserves), ils ont remarqué que celle-ci diffère suivant les métaux. Certains sont très concentrés dans un petit nombre de gisements localisés dans un nombre restreint de districts ; c'est le cas du mercure, dont 95 % du tonnage exploité et des réserves connues se répartissent en 5 gros districts, et de l'antimoine (75 % en 5 districts). D'autres substances, comme le plomb, présentent une répartition plus diffuse. Les cinq plus gros districts plombifères ne représentent que 30 % du tonnage-métal connu et exploité. D'un point de vue prévisionel, cela amènera la prospection, pour les métaux concentrés, à s'intéresser à une zone déjà productrice, tandis que, pour les métaux moins concentrés, la prospection de zones judicieusement choisies permettra d'espérer d'heureuses découvertes.

La prospection minière se fait par étapes, mettant en jeu une série de méthodes techniques complémentaires. Leur application dans le cadre de chaque étape permet de recueillir des données qui, après synthèse, rendent possible le passage à l'étape suivante. Nous définirons rapidement ces différentes méthodes. Leurs conditions d'application seront exposées dans le schéma général d'une prospection minière dont les différentes méthodes s'imbriquent étroitement les unes dans les autres.

Doc. E./M.J.

▲ *Une photographie aérienne en infrarouge prise par satellite de la région de Monterey (Californie, États-Unis). Sur cette photo ont été reportées des indications d'ordre géographique et géologique, comme la localisation des villes (Salinas, San José, Hollister, etc.), des zones de cultures (farms) dans Joaquim Valley, des chaînes de montagnes (Diablo et Santa Lucia Ranges), et les failles, notamment celle de San Andreas (San Andreas Fault). De telles photographies constituent une aide précieuse pour le géologue en permettant par la « restitution » (l'établissement de cartes) de combler l'insuffisance des documents topographiques et de dégager les structures et les anomalies qu'il lui appartiendra de déterminer sur le terrain.*

Les différentes méthodes de prospection

Les méthodes géophysiques

La géophysique étudie les propriétés physiques de l'écorce terrestre : résistivité électrique, intensité de la pesanteur, rigidité, susceptibilité magnétique, chiffrables à l'aide de paramètres particuliers. Ces propriétés peuvent être dues soit à des phénomènes *intrinsèques* ou *spontanés* dans l'écorce : courants telluriques, polarisation électrique spontanée, magnétisme terrestre, soit à des phénomènes *provoqués* ou *induits :* envoi de courant électrique dans le sol, explosion sismique.

Le choix des propriétés utilisées par la prospection minière, donc de la méthode, dépend de la nature de la minéralisation recherchée, du relief, de la superficie de la zone prospectée. Ainsi, les prospections aéroportées magnétiques et scintillométriques sont toujours des méthodes régionales. Les mesures obtenues après certaines corrections sont reportées sur des cartes. Les variations par rapport à une distribution régulière des valeurs, appelées anomalies, sont concrétisées par le tracé de courbes dites d'isoanomalies. Le report sur carte facilite l'interprétation.

La prospection géophysique est utilisée pour déceler la présence éventuelle d'un gisement dans le cas où le minerai qui le compose présente des caractéristiques physiques permettant de le distinguer nettement des roches encaissantes. La méthode est dite directe.

Dans le cas le plus général, la géophysique détecte des structures géologiques susceptibles d'être plus ou moins en rapport avec la présence éventuelle de concentrations minérales : système de failles, remontées du socle. La méthode est dite alors indirecte.

L'interprétation des anomalies décelées nécessite toujours l'intervention d'un spécialiste qualifié.

Les méthodes de prospection géochimique

J. S. Webb (1953) définit ainsi la prospection géochimique : « Les méthodes géochimiques de prospection sont fondées sur une prémisse : la présence d'un gisement minéral masqué peut être révélée par des variations peu sensibles, et cependant symptomatiques de la composition chimique des minéraux accessibles. Des variations locales de ce genre, qui modifient la distribution géochimique normale des éléments d'une région, constituent une anomalie géochimique de même qu'il existe des anomalies géophysiques. »

La teneur moyenne des éléments dans les différentes roches de la lithosphère ou clarke est bien connue. On peut considérer comme une anomalie significative une variation de l'ordre de 300 % du clarke. Les anomalies n'ont de signification que statistiquement : un point anomal n'a pas de valeur. Ces anomalies ont pour origine une dispersion des divers éléments. D'un point de vue génétique, on distinguera des *dispersions primaires* formées dans les roches encaissantes en même temps que le gisement, et des *dispersions secondaires* dues à des facteurs superficiels : altération météorique, érosion, sédimentation. On classe aussi les dispersions suivant leur mode (Cl. Granier, 1973) :

— chimique : le transport de l'élément d'un point à un autre comprend un stade de mise en solution ;

— mécanique : l'élément transporté d'un point à un autre l'est par des actions mécaniques ; l'état chimique à l'arrivée est identique à celui du départ ;

— gazeuse : importante surtout pour les hydrocarbures et l'uranium (émission de radon).

En fonction de l'échelle de la prospection et de l'anomalie, on distingue deux types de prospection :

— la prospection dite *stratégique :* elle a pour but la reconnaissance générale d'une région étendue et la détection d'anomalies éventuelles provenant soit d'indices localisés, soit de massifs différenciés ;

— la prospection dite *tactique :* affectant de petites superficies, elle a pour but de définir et de résoudre des problèmes locaux. Son application nécessite une connaissance géologique et métallogénique précise de la zone traitée.

Les méthodes de prospection géochimique se sont développées et affinées ces dernières décennies, tant pour la définition des méthodes que pour les moyens d'analyse. Elles constituent actuellement un bon outil de prospection.

Les méthodes radiométriques

Elles utilisent la radio-activité naturelle, de certains minéraux uranifères en particulier ; elles trouvent donc leur application dans la prospection des gisements d'uranium. Elles se pratiquent à l'aide soit de compteurs Geiger, soit de scintillomètres qui détectent les rayons gamma, soit d'émanomètres utilisant le rayonnement alpha *(prospection radon)*.

Les méthodes de photographie aérienne

Les photographies aériennes constituent une aide précieuse pour tout géologue. Elles permettent, par utilisation directe et « restitution » (établissement de cartes), de combler l'insuffisance de documents topographiques, indispensables à tout travail sérieux. De plus, leur interprétation par des spécialistes (photo-interprètes) permet de dégager des structures, des anomalies, qu'il appartiendra au géologue de déterminer sur le terrain. Certains pays, comme la France, possèdent une couverture aérienne complète à une échelle voisine de 1/25 000. Lorsque cette couverture fait défaut, il est nécessaire d'envisager une mission photographique.

La technique des photographies aériennes a subi un développement extraordinaire, ces dernières années, par l'utilisation des photographies prises à partir de satellites, et l'emploi de pellicules de natures et de sensibilités variées, infrarouge en noir et blanc, en couleurs (appelées aussi fausses-couleurs). Dans le cas de photographie en couleurs, les variations des colorations permettent parfois de mettre en évidence la présence de minéralisations par variations de la couleur du sol avec l'environnement, ces variations étant dues à la présence soit de chapeau de fer, soit d'auréoles d'altération.

Le rôle du géologue

Le géologue doit, tout au long de la campagne de prospection, en être la « cheville ouvrière ». Il effectue sur le terrain un travail de cartographie géologique de plus en plus détaillée suivant les différentes étapes de la prospection ; en outre, il synthétise les résultats obtenus en liaison avec les différents spécialistes géophysiciens, géochimistes, photo-interprètes, sélectionne les zones les plus favorables et définit les prochaines étapes.

Il sera présent même au stade de la mise en exploitation du gisement nouvellement découvert. En effet, dans une exploitation en plein rendement, la présence du géologue est nécessaire : il étudiera le gisement, aidera le mineur et recherchera les prolongements éventuels. Un gisement n'est bien connu que lorsque son exploitation est terminée. Les connaissances acquises permettront éventuellement la recherche d'un nouveau gîte. Si la présence permanente d'un géologue dans une exploitation minière est admise et reconnue nécessaire depuis longtemps dans de nombreux pays anglo-saxons et pays à régime socialiste, l'importance du rôle du géologue et des services qu'il peut rendre n'a été perçue en France que depuis quelques dizaines d'années.

Les différentes étapes de la prospection minière

La recherche minière met en jeu des capitaux importants. Sa mise en œuvre est le fait soit d'organismes privés (grandes compagnies minières), soit d'organismes associés à l'État. C'est le cas, en particulier, des pays en voie de développement où les revenus provenant de l'exploitation des richesses naturelles sont considérés comme prépondérants pour le développement du pays.

Les différentes étapes suivent un ordre logique, elles ne sont pas l'objet d'une inspiration subite. Dans le cadre d'une prospection rigoureuse, le passage à l'étape suivante est conditionné par les résultats obtenus. C'est ainsi que l'on peut distinguer une phase d'exploration, suivie d'une phase de reconnaissance. Dans le cas d'impacts positifs, on passera à une phase de prospection systématique. A la fin de chaque étape, la décision de poursuivre la recherche sera prise en fonction des résultats obtenus.

La phase d'exploration

On appelle exploration la phase initiale de la recherche minière au cours de laquelle le géologue s'efforce de sélectionner les zones favorables à la minéralisation.

Durant cette phase, il prépare les fonds topographiques de la région envisagée. Il se procurera, pour cela, les documents topographiques disponibles; dans le cas de carence, il utilisera les photographies aériennes existantes ou obtenues à la suite d'une mission spéciale; les documents photographiques sont interprétés. Une première esquisse est proposée que le géologue va vérifier sur le terrain. Il effectue également une synthèse des travaux de recherches entrepris antérieurement. La position et la nature de toutes les exploitations, les divers travaux miniers effectués sont reportés sur des cartes.

A ce stade s'effectue une prospection géophysique générale de type aéroporté. Dans le cadre d'une prospection uranifère, on utilisera la méthode scintillométrique. D'une manière plus générale, on utilisera le magnétisme aéroporté. Inventé au début des années 1940 pour la détection des sous-marins, il se révéla très efficace. Ultérieurement, cette technique a été appliquée d'abord à la recherche pétrolière, puis à celle d'autres substances minérales.

L'avion effectue à une altitude spécifiée d'avance une série de profils magnétiques le long de lignes de vol espacées suivant les exigences géologiques. En règle générale, les lignes de vol sont implantées perpendiculairement à la direction générale des formations géologiques de la région. Après le report sur carte des mesures effectuées, le tracé des courbes isoanomales permet le dégrossissage rapide de régions très étendues en révélant les traits géologiques majeurs soulignés par des roches de susceptibilité magnétique différente. C'est une méthode de grande reconnaissance préliminaire.

La synthèse des résultats obtenus permet de décider de passer, ou non, au stade ultérieur, dit stade de reconnaissance.

La phase de reconnaissance

A ce stade apparaît la recherche d'indices. Le géologue appelle indice de minéralisation tout ce qui suggère la présence d'un minerai caché. Nous allons décrire brièvement les principales méthodes mises en application.

Les méthodes géochimiques

En prospection stratégique, elles décèlent les zones privilégiées et les indices. Les prélèvements peuvent s'effectuer dans les eaux (hydrogéochimie), dans les alluvions, dans les sols.

Les méthodes géophysiques

Elles présentent l'avantage d'apporter des informations sur la profondeur de l'anomalie décelée. Suivant la nature du minerai recherché, on appliquera telle ou telle méthode. Voici les plus communément utilisées.

★ La *prospection magnétique* mesure la susceptibilité magnétique des roches. Celle-ci varie dans le rapport de 1 (roches sédimentaires) à 10 (roches éruptives), 100 (roches éruptives basiques), 3 000 pour la magnétite. La sensibilité des appareils, appelés magnétomètres, est très grande. On les utilise pour la recherche des gisements de fer magnétique, mais aussi pour déceler la présence de roches et minéraux faiblement aimantés.

★ Les *méthodes de prospection électrique* comprennent :

● *La méthode de résistivité*. Elle sert à la recherche de minéraux communs. On établit des cartes de résistivité.

● *La méthode de la polarisation spontanée*. C'est une des méthodes les plus fréquemment utilisées. Elle consiste à observer les champs électriques sous forme de courants électriques produits naturellement par certains corps minéraux, en particulier sulfurés. Le principe est celui d'une pile naturelle. Les sulfures enfouis dans le sol fournissent l'élément métallique analogue à celui d'une pile. Au-dessus du niveau hydrostatique, l'eau riche en oxygène, associée à la présence d'humus et de CO_2 contenu dans le sol, provoque, par oxydation des sulfures, une acidité des solutions entourant le gisement. En profondeur, sous le niveau hydrostatique, l'eau contenue dans les roches est habituellement alcaline par action chimique des minéraux rocheux. Ces solutions en contact avec le conducteur métallique (amas de sulfures, filons) produisent un courant qui circule de haut en bas dans le minerai, pénètre dans les roches encaissantes d'où il revient de bas en haut pour se fermer au sommet du corps métallique. « En s'écoulant dans le sol, le courant donne lieu à une chute ohmique de potentiel; de sorte que le potentiel du sol, pris égal à zéro en un point éloigné, se trouve avoir une valeur négative au sommet du gisement » (P. Geoffroy et P. Charrin). Le passage du courant détermine donc un centre négatif au-dessus du sommet du gisement. L'écart potentiel entre celui-ci et celui du sol environnant peut varier entre 0,1 et 0,7 volt. Les mesures, effectuées à l'aide d'un appareil appelé potentiomètre-millivoltmètre relié à deux électrodes impolarisables, l'une fixe, l'autre mobile, sont reportées sur des cartes. On trace les courbes d'équipotentialité.

★ La *méthode gravimétrique* consiste à mesurer les anomalies de l'accélération de la pesanteur, anomalies dues à des différences de densité dans les roches du sous-sol. Plusieurs corrections sont nécessaires (correction d'altitude et de latitude du lieu, correction de Bouguer) avant report sur cartes. L'appareil utilisé est un gravimètre. Cette méthode est peu appliquée en recherche minière. Elle n'a été utilisée que pour la détection de gros amas de minerai dense, comme la chromite située dans des pays à faible relief, à Cuba par exemple.

★ Les *méthodes électromagnétiques* sont nombreuses et utilisées dans la recherche des sulfures.

Parallèlement à cette activité, le géologue effectue des levers géologiques détaillés sur les zones prospectées (cartes à moyenne échelle). Les levers ainsi effectués aident à la compréhension des anomalies éventuellement décelées par les méthodes géophysiques et géochimiques. Si, dans cette phase, des anomalies significatives sont mises en évidence, la campagne de prospection passe au stade suivant, à savoir une prospection systématique des indices décelés.

Phase de prospection systématique

On procède à des levers géologiques détaillés à petite échelle : 1/100 à 1/2 000 des indices reconnus. Les méthodes géophysiques et géochimiques de la phase de reconnaissance sont appliquées, mais à une maille beaucoup plus réduite : on affine. Un certain nombre de travaux permettent de reconnaître *de visu* la minéralisation : série de tranchées de profondeur moyenne, 3 à 4 mètres, perpendiculaires à la direction générale de l'indice dans le cas d'un champ filonien par exemple, série de puits de petites dimensions et de profondeur moyenne dans le cas de gîtes stratiformes.

L'indice ayant été bien localisé, l'implantation des sondages est réalisée. Ces sondages, carottés ou percutants, donnent des renseignements sur la minéralisation en profondeur. Le géologue les étudie, et la synthèse des renseignements recueillis permet l'établissement d'un bloc-diagramme plus ou moins précis, donnant une idée générale de la morphologie de la minéralisation.

En fonction des résultats acquis, la décision de « passer en travaux miniers » est prise. Ces travaux, puits, galeries, permettent de reconnaître la minéralisation, de déter-

R. Serment

▲ *Lors de la prospection minière, si les phases d'exploration et de reconnaissance ont révélé des anomalies significatives, la prospection systématique est réalisée, faisant appel par exemple à des méthodes de sondage percutant ; les poudres sont régulièrement recueillies lors de la foration, et leur analyse permet de déterminer la nature et la teneur des minéralisations cachées.*

▼ *Si les résultats acquis lors des sondages sont favorables, la décision de passe en travaux miniers est prise ; les travaux souterrains de recherche (puits, galerie) nécessitent alors l'implantation d'un matériel lourd mais néanmoins mobile ; l'accès au puits est protégé par un boisage, et l'évacuation des déblais s'effectue à l'aide d'une grue spécialement adaptée à cet emploi.*

miner les panneaux minéralisés, de procéder à des échantillonnages serrés en vue de l'évaluation de la teneur-métal du minerai ainsi que de la quantité de minerai exploitable. Ils servent à déterminer les dimensions géométriques du gisement. Celui-ci ayant été reconnu et défini, la nature de la minéralisation déterminée, le tonnage-métal et la teneur précisés, le mineur intervient : les travaux préparatoires en vue de l'exploitation peuvent commencer.

BIBLIOGRAPHIE

CHAURIS L. et GUIGUES J. (1969), *le Massif armoricain* dans *Gîtes minéraux de la France*, vol. I, Mem. Bur. Rech. Géol. et Min., 96 p., 3 planches h. t. - GRANIER Cl. (1973), *Introduction à la prospection géochimique de gîtes métallifères*, Masson, 1 vol., 143 p. - LANG A. H. (1960), *la Prospection au Canada*, Série de la géologie économique, nº 7, 421 p., ministère des Mines et des Relevés techniques, Canada. - PÉLISSONNIER H. (1972), *les Dimensions des gisements de cuivre du monde*, Mem. Bur. Rech. Géol. et Min., nº 57, 405 p., 5 cartes h. t. - PHAN K. D. (1968), *la Formation et les Principes de l'étude et de l'exploitation des gisements détritiques*, notes provisoires, B. R. G. M., 181 p. - PHAN K. D. (1969), *Skarns et Minéralisations associées*, Chron. Mines Rech. Min., octobre, p. 291, et novembre-décembre, p. 349. - RAGUIN E. (1961), *Géologie des gîtes minéraux*, 3e éd., Paris, Masson, 686 p. - RAGUIN E. (1977), *Réflexions sur la métallogénie granitique*, Chr. de la Rech. Min., nº 435, pp. 15-19, B. R. G. M. - ROUTHIER P. (1963), *les Gisements métallifères*, Paris, Masson, 2 vol., 1 282 p.

R. Serment

L'EXTRACTION DES MINERAIS - MINES ET CARRIÈRES

Généralités

Histoire

C'est pour assurer sa survie immédiate que l'homme préhistorique a pris l'habitude d'extraire du sol les premiers minéraux utiles : silex et sel (chlorure de sodium). Progressivement, il s'est intéressé à d'autres minéraux pour leur aspect (or, pierres précieuses, pigments) ou leur utilité (cuivre), et, le besoin aidant, il est allé les chercher de plus en plus loin et dans des conditions de plus en plus difficiles, jusque dans les profondeurs du sous-sol, creusant les premières galeries souterraines (15 000 ans avant J.-C.) et inventant les premières méthodes d'exploitation systématique de « gisements » découverts au hasard de ses déplacements. Parallèlement, il s'est mis à transformer ces produits bruts en outils de plus en plus perfectionnés : taille des silex, forgeage des cuivres, puis fusion (3700 avant J.-C.).

La suite de l'histoire n'est que le perfectionnement des méthodes de recherche des gisements, d'extraction et de traitement des minéraux utiles. L'âge de bronze (— 3800 à — 1400) voit le développement des exploitations de minerais oxydés de cuivre par les Sumériens, puis l'extraction de pierres, de métaux précieux et de sel dans tout le Moyen-Orient sous l'influence égyptienne. Les roches tendres sont arrachées à la main ou avec des outils rudimentaires, tandis que les roches dures nécessitent l'emploi du feu : la roche, chauffée à haute température, puis arrosée d'eau, se désagrège par dilatation différentielle de ses éléments hétérogènes ; la prospérité des mines de cette époque dépend déjà, outre le gisement, de certaines conditions extérieures : forêt fournissant le bois de chauffage et main-d'œuvre « taillable et corvéable à merci » pour résister aux conditions de travail infernales (on emploie surtout des condamnés de droit commun et des prisonniers). Les mines de sel de Hallstadt, en Autriche, étaient déjà exploitées à cette époque (— 2500), et les mines de cuivre du roi Salomon, aujourd'hui redécouvertes, employaient déjà plusieurs milliers d'esclaves.

Avec la métallurgie du fer, apparue en Arménie vers — 1400, s'ouvre une autre époque qui durera jusqu'au milieu du XVIIIe siècle : perfectionnement des outils à main, organisation des conditions de travail... et destruction systématique des forêts. La civilisation gréco-romaine développe les exploitations souterraines par puits et galeries avec soutènement en bois ou en pierres plates. Les machines d'exhaure (roues à godets) et de ventilation (soufflets géants) sont mues à bras d'homme. En 1185, les premières chartes codifient les droits et obligations des mineurs du Hartz. En 1556, Agricola publie le premier traité d'exploitation des mines, le *De re metallica*, toujours célèbre, qui précise la technologie de l'abattage du soutènement, du transport et du traitement des minerais, de l'exhaure et de la ventilation, ainsi que le cadre juridique et social d'alors. La plupart des mines métalliques européennes actuelles ont connu une première exploitation au cours de cette période.

Au XIXe siècle, l'énergie mécanique des machines à vapeur vient renforcer considérablement l'énergie humaine, tandis que le « charbon de terre » remplace le charbon de bois et permet ainsi la révolution industrielle. A la fin du siècle, Alfred Nobel parvient à stabiliser la nitroglycérine sous forme de dynamite (1867), créant ainsi le premier explosif véritablement industriel : la poudre noire était connue depuis longtemps, mais son emploi restait essentiellement militaire. Au cours de ce siècle, la production minière de certaines substances a été multipliée par 100 : la Grande-Bretagne produisait 60 000 tonnes de fer en 1790 et 8 millions de tonnes en 1880 !

Au XXe siècle, l'énergie est utilisée sous toutes sortes de formes : air comprimé, moteurs hydrauliques et surtout électricité autorisent le développement spectaculaire de l'industrie minière que nous connaissons aujourd'hui : exploitations jusqu'à 3 500 m de profondeur en Afrique du Sud, excavateurs géants pouvant déplacer 200 000 m^3 par jour en République fédérale d'Allemagne, camions de 200 tonnes de charge utile, carrières pouvant produire près de 50 millions de tonnes par an.

A partir de 1956, un nouvel explosif remplace progressivement la dynamite : le nitrate-fuel (mélange de nitrate d'ammoniaque et de fuel domestique), qui permet, grâce à son faible prix (trois fois moins cher que la dynamite à puissance égale), l'abattage d'énormes volumes de roches.

Dans les années 1960, les chargeuses et camions à moteurs Diesel complètent, puis remplacent la gamme des engins électriques dans les exploitations souterraines. L'exploitation minière est devenue à peu près entièrement mécanisée par adaptation de matériels spécifiques à chacune des tâches du mineur : foration, abattage, chargement, transport, purgeage, soutènement.

Au milieu des années 1970, environ 27 milliards de tonnes de matériaux sont remuées chaque année, soit 7 tonnes par habitant. Il faut d'ailleurs remarquer qu'une bonne partie de ces 7 tonnes est remise en place immédiatement (3 tonnes de stériles des exploitations à ciel ouvert et 1 tonne de stériles provenant de la concentration des minerais pauvres), tandis que les 3 dernières tonnes sont des matériaux pour le bâtiment et les travaux publics.

Législation minière

Très tôt, les États se sont préoccupés d'assurer la continuité de leurs approvisionnements en substances minérales, ce qui les a conduits à réglementer d'abord les droits de propriété sur les richesses du sol et du sous-sol, puis les conditions d'exploitation et de recherche de nouveaux gisements. Cette réglementation est d'ailleurs souvent dérogatoire par rapport au régime général de la propriété. En outre, les conditions particulières du travail dans les mines ont donné naissance à un statut particulier du mineur.

Les différentes législations se rattachent à trois grands courants :

— *Ou bien le gisement appartient au propriétaire du sol* (on dit encore que la propriété de la surface comporte la propriété du tréfonds). Adaptée à l'exploitation de petits gisements superficiels, cette règle présente le grave inconvénient de morceler les gisements présentant une importance économique majeure.

— *Ou bien le gisement est attribué à son inventeur.* Résultat de la thèse selon laquelle le gisement serait *res nullius,* le système favorise la découverte de nouveaux gisements dans les pays neufs, mais ne permet pas de garantir la capacité technique et financière des futurs exploitants.

— *Ou bien l'État a des droits étendus sur le gisement.* En droit régalien, le gisement est toujours *res nullius;* c'est l'État seul qui peut en attribuer l'usage et en fixer les conditions d'exploitation. En droit domanial, le gisement appartient à l'État, qui peut l'exploiter lui-même, ou en confier l'exploitation à des tiers. De plus en plus fréquemment, c'est la première de ces deux thèses qui est adoptée, dans presque tous les pays soucieux de la valorisation de leurs ressources minérales.

La législation minière française

En France, sous l'Ancien Régime, le droit d'exploiter était généralement attribué suivant le principe du droit régalien. La Révolution y met fin en laissant la prérogative au propriétaire du sol. Quelques années plus tard, la loi du 21 avril 1810 revient au droit régalien et pose les bases du régime actuel. Ce régime est remis en question par la loi du 9 septembre 1919, qui supprime la perpétuité de la concession (99 ans au plus) et prévoit une participation de l'État aux superbénéfices. De ce fait, la recherche se trouve considérablement freinée. Les décrets du 20 mai 1955, dont l'un abroge la loi de 1919, reviennent au régime précédent, en lui apportant toutefois quelques améliorations. Quelques mois plus tard, une codification des textes existants donne naissance au *Code minier* (décret du 16 août 1956).

Les dernières réformes sont apportées par la loi du 2 janvier 1970, qui supprime la classe des minières et établit la nécessité d'une autorisation préfectorale pour exploiter les carrières, et précise la distinction entre mines et carrières.

Distinction mines-carrières

Sont exploités par des mines les combustibles minéraux solides (charbon, lignite, mais pas la tourbe), les hydrocarbures liquides ou gazeux et autres composés du carbone (graphite, diamant, gaz carbonique), les métaux (fer, cobalt, nickel, cuivre, aluminium), les éléments radioactifs (radium, uranium, thorium...), et diverses autres substances (soufre, sels de sodium et de potassium, phosphates, arsenic, antimoine, fluorine...), dont l'intérêt économique et stratégique est manifeste.

Les autres substances sont exploitées par des carrières. Il s'agit des matières premières de la construction (granulats, gypse, ardoises, argiles, kaolin, feldspath, dolomie) ou de l'agriculture (carbonate de chaux).

Le passage dans la classe des mines d'une substance préalablement classée dans la classe des carrières peut être décidé par décret en Conseil d'État. La distinction entre mines et carrières repose donc uniquement sur la nature des substances, et pas du tout sur le mode d'exploitation. C'est ainsi qu'il existe des mines à ciel ouvert (fer, bauxite, charbon), et des carrières souterraines (gypse, calcaires à ciment, ardoises...).

▼ *Au XIX^e^ siècle, l'énergie mécanique des machines à vapeur vient renforcer l'énergie humaine pour l'exploitation des mines (gravure du XIX^e^ siècle représentant le carreau d'une mine dans le Straffordshire en Angleterre).*

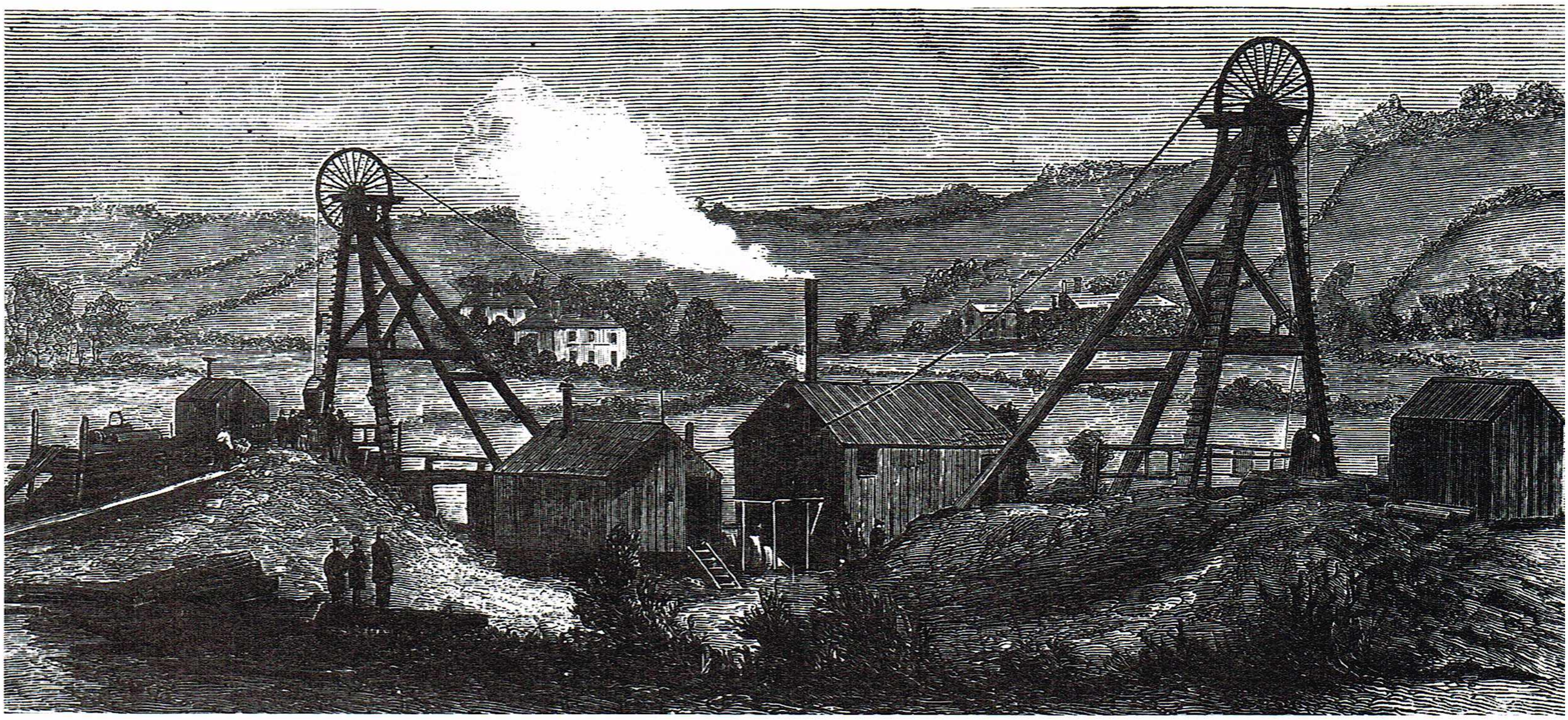

Camera Press - Parimage

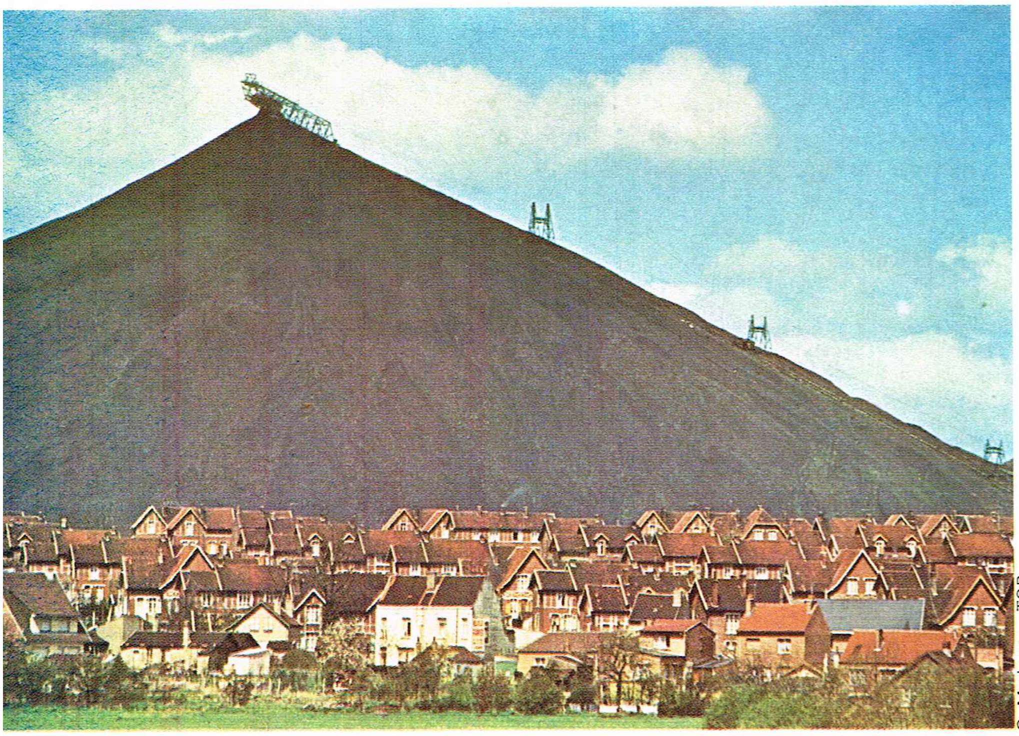

▲ ***Les corons de la ville de Liévin (Pas-de-Calais) au pied des crassiers de charbon ; généralement, le personnel des exploitations minières et assimilées est logé et chauffé par l'entreprise ou reçoit une prime équivalente.***

Le régime des mines

Les travaux de *recherche* pour découvrir les mines peuvent être entrepris soit par le propriétaire de la surface, ou avec son consentement, moyennant déclaration au préfet ; soit en vertu d'une autorisation de recherche, donnée par le ministre chargé des Mines, à défaut de consentement du propriétaire ; soit en vertu d'un permis exclusif de recherche qui confère à son détenteur le droit d'effectuer des recherches dans un périmètre donné, à l'exclusion de toute autre personne. Attribué par décret en Conseil d'État, pour une durée de 3 ou 5 ans, il est renouvelable deux fois. « Les mines ne peuvent être *exploitées*, même par le propriétaire de la surface, que, soit en vertu d'une concession ou d'un permis d'exploitation, soit par l'État » (article 21 du Code minier).

La *concession* est gratuite, perpétuelle (50 ans pour les hydrocarbures liquides ou gazeux), attribuée par décret en Conseil d'État, après enquête et avis du Conseil général des mines. Le concessionnaire bénéficie de droits étendus pour l'occupation du terrain. Il peut, à l'exclusion de toute autre personne, effectuer des recherches sur le périmètre concédé. Il doit cependant exploiter à une cadence suffisante, en assurant la bonne utilisation du gisement et la conservation de la mine. Les travaux ne doivent pas compromettre la sécurité et la salubrité publiques, et respecter la sûreté et l'hygiène des ouvriers mineurs. La surveillance de l'exploitation est assurée par les ingénieurs des Mines, sous l'autorité du ministre chargé des Mines et des préfets. Le concessionnaire est en outre tenu de verser une redevance symbolique au propriétaire de la surface, et des redevances communales et départementales dont le montant est proportionnel au tonnage extrait. Tout manquement à l'une de ces obligations peut se traduire par la déchéance du concessionnaire.

Le *permis d'exploitation* a été institué par une loi du 28 juin 1927, afin de définir une procédure simplifiée pour la mise en exploitation de gisements de moindre importance. Il est attribué par arrêté du ministre chargé des Mines, après enquête publique et avis conforme du Conseil général des mines, pour une durée de cinq ans au maximum. Il peut faire l'objet de deux prolongations. Les droits et obligations du titulaire du permis sont sensiblement les mêmes que ceux du concessionnaire.

Depuis la création de l'Entreprise minière et chimique en remplacement des Mines domaniales de potasse d'Alsace (décret du 20 septembre 1967), il n'y a plus en France d'exploitation directe par l'État. Les mines de charbon et d'uranium sont exploitées sous le régime de la concession par des sociétés nationales dotées de l'autonomie de gestion.

Le régime des carrières

D'une manière générale, les carrières sont laissées à la disposition du propriétaire du sol. Pourtant, la loi du 17 juillet 1941 a prévu l'institution de zones où les droits des propriétaires peuvent être considérablement restreints. Les deux régimes persistent de nos jours.

★ *Dans le régime normal,* le propriétaire du sol — ou son ayant-droit — est tenu, pour exploiter, de demander une autorisation préfectorale, qui lui est accordée ou refusée après consultation des services administratifs compétents (directeurs départementaux de l'agriculture et de l'équipement, architectes des Bâtiments de France et, dans certains cas, directeurs des antiquités historiques et préhistoriques) et des collectivités locales. L'autorisation ne peut être refusée que si l'exploitation est susceptible de faire obstacle à l'application d'une disposition d'intérêt général (abords des monuments historiques inscrits ou classés, sites classés, zones de protection des captages d'eau, zones interdites sur le plan d'occupation des sols).

L'autorisation mentionne en outre toutes les dispositions que l'exploitant s'engage à mettre en œuvre pour respecter l'environnement, et en particulier le mode de remise en état des terrains après exploitation. L'exploitant est astreint aux obligations de sécurité du régime des mines, la surveillance étant également assurée par les ingénieurs des Mines.

★ *Un régime spécial* est prévu par le Code minier (article 109) « lorsque la mise en valeur des gîtes d'une substance appartenant à la classe des carrières ne peut, en raison de l'insuffisance des ressources connues de cette substance ou pour toute autre cause, prendre ou garder le développement nécessaire pour satisfaire les besoins des consommateurs, l'économie générale ou celle de la région ». Des décrets en Conseil d'État peuvent alors définir des zones où le ministre chargé des Mines peut accorder, au propriétaire de la surface ou à toute autre personne, des autorisations de recherche et des permis d'exploitations de carrières.

Les autorisations de recherche et les permis d'exploitation sont donnés respectivement pour trois ans et dix ans au maximum, et renouvelables successivement pour la même durée. Ils confèrent à leurs possesseurs sensiblement les mêmes droits et obligations qu'aux titulaires d'autorisations de recherche et de permis d'exploitation des mines.

La protection du personnel

Les conditions très particulières du travail dans les mines et carrières, et, en particulier, dans les exploitations souterraines, ont nécessité le renforcement des dispositifs de protection du personnel et l'attribution d'avantages substantiels.

Les *délégués mineurs* ont deux fonctions distinctes. En tant que délégués de la sécurité, ils sont chargés d'examiner les conditions d'hygiène et de sécurité et, s'il survient un accident, les conditions dans lesquelles il s'est produit. Ils jouent en outre le rôle de délégués du personnel, en signalant les infractions à diverses dispositions du Code du travail (travail des enfants et des femmes, durée du travail et repos hebdomadaire). Les délégués mineurs, élus par l'ensemble du personnel ouvrier, perdent, pendant leur mandat de trois ans, la qualité de salarié de l'exploitant. Ils sont investis d'une mission de service public, et de ce fait rattachés au Service des mines.

Les grandes lignes de la réglementation du travail dans les exploitations minières et assimilées (mines et ardoisières) sont définies dans le décret du 14 février 1946 qui constitue le *statut du mineur.* Les dispositions sont du type de celles qu'on rencontre habituellement dans les conventions collectives (conditions d'embauchage et de licenciement, durée du travail, échelle des salaires, conditions de rémunération...), mais comportent des avantages spécifiques. Le mineur a droit à la pleine retraite lorsqu'il cumule 55 ans d'âge et 30 ans de travail. Si, dans les 30 ans de travail, l'intéressé compte 20 ans de travail au fond, l'âge de la retraite est avancé à 50 ans. Le personnel des exploitations minières et assimilées est logé et chauffé par l'entreprise, ou reçoit une prime équivalente. Les frais médicaux sont gratuits, les praticiens agréés par l'exploitant percevant une rémunération forfaitaire pour les soins distribués aux travailleurs et à leurs familles. Le principe du tiers payant est appliqué pour les produits pharmaceutiques.

S.E. Hedin

▲ *Mine de fer à ciel ouvert à Kiruna, Suède.*

Objectifs et contraintes de l'exploitation minière

Dans le cadre juridique ainsi défini, mineurs et carriers doivent exploiter des gisements. Un *gisement* est un gîte de minéraux utiles assez important pour que l'exploitation puisse en être envisagée économiquement. Un gîte minéral est une formation géologique qui présente une concentration ou teneur en un ou plusieurs minéraux nettement supérieure à la moyenne terrestre. Si ces minéraux présentent un intérêt économique, la roche qui les contient est appelée *minerai*. Les autres minéraux, sans valeur économique, qui constituent le minerai, sont appelés la *gangue*. Une roche est dite *stérile* si ses composants minéraux ne présentent pas d'intérêt économique actuel.

Les gisements se présentent à l'état de filons ou de couches, avec comme forme particulière, dans les deux cas, des amas (*fig.* 1). Un *filon* est une cassure interne du massif rocheux qui a été minéralisée soit au moment de sa formation, soit ultérieurement en un ou plusieurs minéraux utiles. Son épaisseur peut varier du centimètre au mètre. L'or et la plupart des minerais métalliques se présentent sous cette forme. Une *couche*, ou veine, ou banc, est une assise sédimentaire comprise entre un mur (assise inférieure) et un toit (assise supérieure), grossièrement parallèles. La couche, horizontale au moment de son dépôt, peut ensuite avoir été déformée, plissée, érodée, ce qui fait qu'on la retrouve dans n'importe quelle position : en plateure si son pendage (c'est-à-dire sa pente) est inférieur à 20°, en dressant pour les pendages supérieurs à 45°, et en semi-dressant pour les pendages intermédiaires. On appelle puissance l'épaisseur de la couche ;

▼ *Figure 1 : les gisements se présentent à l'état de filons* (a) *ou de couches* (b) *avec, comme forme particulière, dans les deux cas, des amas* (c).

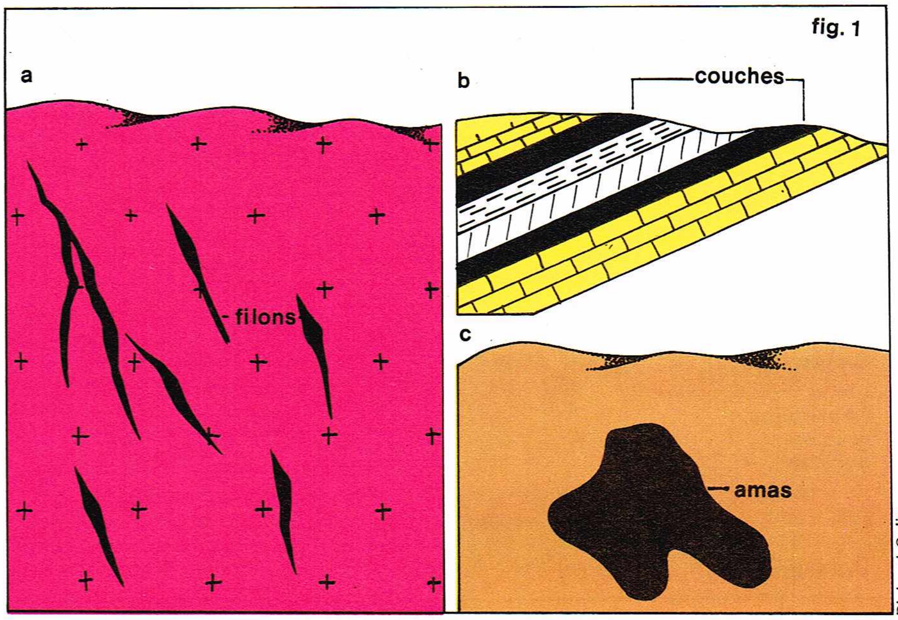

Richard Colin

elle peut varier de 1 à 10 m. Le charbon en général, la potasse et parfois le fer ont des gisements de ce type.

Alors que filons et couches ont toujours deux dimensions prépondérantes par rapport à la troisième, un amas est étendu dans les trois dimensions. Il peut être constitué de sédiments très épais, ou de filons et filonnets entrecroisés et rapprochés qui ne peuvent être séparés des terrains encaissants lors de l'exploitation, ou d'une imprégnation diffuse par des minéraux utiles d'une roche mère stérile. C'est le cas des gisements de molybdène et de cuivre porphyrique.

Un gisement peut affleurer à la surface du sol ou être recouvert de morts-terrains; dans le premier cas, les affleurements peuvent être cachés par la végétation ou les éboulis, ce qui fait que la prospection est toujours difficile.

Pour le mineur, le gisement est d'abord caractérisé par sa profondeur, qui conditionne le choix de l'exploitation en souterrain ou à ciel ouvert, puis par sa forme (amas, filon ou couche), qui détermine les grandes lignes de la méthode d'exploitation, ensuite par sa régularité (puissance, pendage et teneur) et ses discontinuités (failles), qui déterminent les dimensions des panneaux d'exploitation, enfin par la nature des roches, qui fixe les dimensions des galeries et unités d'exploitation. En outre, la nature de la minéralisation (espèce minéralogique et formule chimique) détermine le traitement qui devra être appliqué au minerai brut pour en extraire le métal.

Il faut remarquer que le mineur n'a qu'une *connaissance très fragmentaire et imprécise* du gisement qu'il doit exploiter. La reconnaissance préalable par sondages ne concerne au mieux que la millionième partie du volume minéralisé, et l'existence du gisement repose toujours sur une hypothèse de continuité des minéralisations entre les points de sondage, hypothèse, hélas! souvent démentie par la réalité. L'analyse des résultats de la prospection, soit par des techniques simples (extrapolation linéaire entre points de sondage), soit par des techniques très élaborées (géostatistique), permet plus ou moins de deviner les variations des caractéristiques de la minéralisation, mais une incertitude subsiste toujours sur leurs valeurs exactes, jusqu'à l'exploitation proprement dite. Si, dans les grands gisements sédimentaires très réguliers, ces variations restent faibles (10 à 20 % sur la puissance, la teneur, les discontinuités, la résistance des roches), par contre, dans les gisements de minerais métalliques filoniens ou en amas, ces mêmes caractéristiques peuvent varier de 50 ou 100 % en quelques mètres!

Cette incertitude sur toutes les données caractérisant le gisement n'est levée que progressivement, au fur et à mesure des travaux de reconnaissance par galeries, puits, tranchées, qui doivent se poursuivre pendant toute la durée de l'exploitation : un gisement n'est véritablement connu que quand on a fini de l'exploiter.

Les méthodes d'exploitation doivent être assez souples pour s'adapter à des conditions changeantes tout en permettant au mineur d'atteindre son objectif qui est *d'extraire un produit économiquement intéressant.* Ce produit n'est d'ailleurs généralement pas le minerai brut, soit qu'impur, il doive être lavé (cas du charbon), soit que sa teneur trop faible exige une concentration avant le transport vers les usines métallurgiques (cas des minerais de plomb, zinc, cuivre, uranium).

La notion de teneur est elle-même assez complexe parce qu'un gisement n'a pas *une teneur* définie, mais, en général, la concentration des roches en minéraux utiles varie de façon continue et plus ou moins régulière d'un point à l'autre du gisement. Le mineur doit se fixer une *teneur de coupure* qui est la limite inférieure de ce qu'il peut exploiter dans les conditions économiques du moment. Pour obtenir une rentabilité donnée — qui peut être fixée arbitrairement à n'importe quel niveau, selon les objectifs recherchés par la compagnie minière —, il faut n'exploiter que les minerais de teneur supérieure à la teneur de coupure, laquelle diminue lorsque le prix de vente du minerai augmente ou lorsque les coûts de production sont abaissés, et inversement. Du choix de cette teneur de coupure résulte en pratique une teneur moyenne des minerais extraits et livrés à la concentration.

L'économie à prendre en considération est donc celle de l'ensemble mine plus premier traitement, ce qui conduit le mineur à rechercher préférentiellement, tantôt la *sélectivité* (fournir à la laverie un minerai aussi pur que possible, même au prix d'une exploitation plus difficile, lorsque le traitement s'adapte mal aux variations de qualité), tantôt *l'exploitation systématique,* moins coûteuse (au prix d'un salissage plus grand et donc de frais de traitement accrus lorsque ce traitement est simple et relativement bon marché). Ce compromis est toujours difficile, et sa réalisation est parfois compliquée par une recherche simultanée de la *récupération maximale du gisement* peu compatible avec la sélectivité et avec la mécanisation systématique. (L'exploitation de filons étroits, en minimisant le salissage, ne peut se faire que manuellement.)

En outre, l'exploitation minière, comme toute activité humaine, comporte des nuisances contre lesquelles elle doit lutter; certaines sont habituelles à l'industrie : bruit, poussières, dangers liés aux machines; d'autres sont spécifiques : présence de gaz nocifs, ou toxiques ou explosifs dans les chantiers, chutes de blocs de roche qu'on ne peut jamais empêcher totalement, éboulements au fond et affaissements des terrains en surface.

L'exploitation minière réalise entre toutes ces contraintes un compromis variable dans le temps selon qu'on accorde plus d'importance aux coûts, aux conditions de travail, à la valorisation maximale des ressources du sous-sol, ou au profit.

Exploitation à ciel ouvert

L'exploitation minière à ciel ouvert, au moins telle qu'elle se présente aujourd'hui, remonte à 1905 : c'est à cette date que l'ingénieur américain Javeling utilisa une méthode de ce genre pour le gisement de Bingham aux États-Unis; il s'agissait de lutter contre la diminution de la production de cuivre métal, conséquence de l'exploitation de minerais de teneurs de plus en plus faibles. Depuis lors, la part des exploitations à ciel ouvert dans la production mondiale de minerai n'a cessé de croître : c'est ainsi que, dès 1964, 50 % des minerais métalliques extraits dans le monde et 85 % des minerais non métalliques provenaient de mines à ciel ouvert. Aux États-Unis, la proportion de minerais extraits à ciel ouvert est variable selon les substances, mais elle atteint 96 % pour le fer (*tableau* I).

Pour le seul minerai de cuivre et l'année 1974, le pourcentage de minerai extrait à ciel ouvert dans les différentes parties du monde était généralement supérieur à 50.

En ce qui concerne l'avenir, on peut citer les prévisions d'extraction du charbon aux États-Unis : elle devrait atteindre 60 % en 1985.

Caractéristiques de l'exploitation minière à ciel ouvert

Cadence élevée et faibles coûts. Si toutes les substances minérales sont susceptibles, dans certaines conditions, d'être exploitées à ciel ouvert, ce type d'exploitation est surtout utilisé à grande échelle pour les gise-

▼ ***Tableau I :* évolution de la part (en %) des mines à ciel ouvert dans la production de minerais aux États-Unis (d'après la Revue de l'industrie minérale, décembre 1976).**

Tableau I

Évolution de la part (en %) des mines à ciel ouvert dans la production de minerais aux États-Unis

Minerais \ Années	1935	1940	1945	1950	1955	1960	1965	1970	1973
Fer	60	72	74	77	80	85	90	94	96
Cuivre	70	61	68	81	83	81	83	87	89
Charbons gras et lignites	6	9	19	24	24	30	34	37	47
Anthracites									82
Uranium									70

ments de charbon, de certains métaux abondants (fer, cuivre, aluminium), de substances non métalliques (phosphates) et de matériaux pour les travaux publics (granulats, sables). Ces gisements se présentent le plus souvent sous forme d'énormes amas de plusieurs centaines de millions de tonnes de minerais permettant une cadence d'exploitation très élevée, mais il existe aussi une multitude de petites exploitations à ciel ouvert, de dimensions plus modestes. A Hambach, en Allemagne fédérale, on produit annuellement 50 millions de tonnes de lignites; la mine de fer de Caoué, dans le Minas Gerais au Brésil, et la mine de fer de Mount Newman, en Australie occidentale, produisent chacune 40 millions de tonnes de minerai de fer à haute teneur; la mine de cuivre de Bingham, déjà citée, est la plus ancienne et la plus grande mine à ciel ouvert du monde. Elle déplace 100 millions de tonnes de matériaux par an pour en extraire 30 millions de tonnes de minerai de cuivre.

L'exploitation à de telles cadences n'est possible que grâce à l'emploi d'engins de grande capacité. Les rendements en substance utile des mines à ciel ouvert varient de 30 tonnes par homme et par poste pour les plus petites mines métalliques à plus de 500 tonnes pour les grandes mines de charbon (10 fois plus que dans les mines souterraines). Il en résulte des différences importantes entre les prix de revient pour les deux modes d'exploitation : suivant les conditions, les coûts d'extraction peuvent varier considérablement, mais, à titre indicatif, on peut fixer les ordres de grandeur suivants : à ciel ouvert, les coûts d'extraction sont compris entre 2 et 10 francs par tonne de minerai, tandis qu'en souterrain la fourchette se situe entre 10 et 250 francs.

La teneur du minerai est basse. Les exploitations à ciel ouvert peuvent ainsi exploiter des gisements moins riches, et la teneur de coupure — qui est la teneur limite au-dessous de laquelle l'exploitation n'est plus rentable — est plus basse pour les mines à ciel ouvert que pour les mines souterraines. Actuellement, aux États-Unis, cette teneur limite est, pour les mines de cuivre, de 0,4 % en ciel ouvert, contre un minimum de 0,7 % pour les mines souterraines les plus faciles.

Les taux de découverture sont variables. Même pour les gisements qui affleurent, il est nécessaire de déplacer une certaine quantité de roches stériles ou pauvres en matière utile pour extraire le minerai. Le *taux de découverture* est le rapport entre le tonnage de ces stériles à déplacer et celui du minerai récupérable. C'est un paramètre fondamental de l'exploitation, car il a une influence déterminante sur le prix de revient du minerai extrait. En effet, si on représente par C le coût d'extraction d'une tonne à ciel ouvert (stérile ou minerai), par r le taux de découverture, le coût d'extraction d'une tonne de minerai, $C(1+r)$, s'accroît avec la profondeur. En outre, ce coût doit rester inférieur à la valeur de la tonne de minerai, laquelle est à peu près proportionnelle à sa teneur. On conçoit bien que, lorsque la valeur du minerai est assez faible (teneur basse ou prix du minerai utile peu élevé), le taux de découverture r doive être limité et que la totalité du gîte minéral ne puisse être exploitée. Dans les mines de cuivre à ciel ouvert, le taux de découverture admissible passe de 1 à 5 selon que la teneur moyenne du gisement est 0,4 % ou 0,8 %.

Le choix entre exploitation à ciel ouvert et exploitation souterraine résulte de la comparaison des coûts d'extraction par l'une ou l'autre méthode. Ce choix doit être fait au commencement de l'exploitation, et il conduit normalement à passer en souterrain lorsque le taux de découverture devient trop important. Cependant, comme on a consenti des investissements très lourds sur du matériel spécifique et qu'en outre la technique de l'exploitation souterraine est très différente de celle du ciel ouvert, pour laquelle le personnel est devenu compétent, on continue souvent à exploiter à ciel ouvert. Cela explique que ce type de mine descende parfois à des profondeurs qui ne se justifient pas toujours économiquement, au moins en apparence.

Il faut d'ailleurs noter qu'on est souvent amené à modifier en cours d'exploitation les décisions qui ont été prises pendant la période d'établissement du projet, soit que la connaissance que l'on avait du gisement lui-même se soit améliorée, soit que la variation des cours et des prix de revient unitaires oblige à revoir teneur limite et taux de découverture maximal.

Structure générale du ciel ouvert

Suivant la disposition de la minéralisation, on distingue deux types d'exploitation : les gisements à une ou plusieurs couches horizontales ou subhorizontales — c'est essentiellement le cas des gisements de charbon et de phosphate; et les gisements en forme d'amas, de configuration et d'orientation variables — c'est le cas général des mines métalliques.

Lorsque le gisement est à peu près horizontal, l'exploitation consiste d'abord à creuser une **tranchée** dans le recouvrement stérile afin d'accéder au toit de la couche, et cela sur toute la longueur du panneau à exploiter. Ensuite commence l'exploitation proprement dite, qui consiste à extraire le matériau utile. Dans les exploitations du type des lignites allemands, une roue-pelle extrait les stériles à l'avant du front d'extraction du lignite, et elle les dépose en arrière de ce front de manière à reconstituer les terrains dans leur état d'origine; la roue-pelle se déplace sur le toit de la couche de lignite. Une deuxième roue-pelle de capacité inférieure à la première, et qui se pose sur le mur de la couche, réalise l'abattage et le chargement du charbon. Lorsque plusieurs couches de charbon sont superposées, on adopte le même schéma d'exploitation pour la couche supérieure, mais, au lieu de remettre les stériles en place, on les transporte plus loin en arrière pour permettre d'accéder aux couches inférieures. Il en est de même lorsque le recouvrement stérile est trop épais pour être enlevé en une seule fois : les tranches supérieures doivent être stockées assez loin en arrière pour ne pas gêner l'exploitation du charbon. C'est le cas de certaines parties du gisement de lignites de la Ruhr où la couche exploitée peut descendre jusqu'à 300 m de profondeur (et même 550 m dans les derniers projets). Cette méthode s'apparente alors à la méthode des gradins. L'exploitation à ciel ouvert par tranchée est la méthode la plus facile et la plus productive. La mécanisation peut y être poussée à l'extrême; les coûts de production sont très bas, aussi peut-on exploiter avec des taux de découverture très élevés. Dans certaines découvertes de charbon, dans l'est des États-Unis, on déplace 30 tonnes de stériles par tonne de charbon.

La plupart des mines à ciel ouvert sont des **mines à gradins.** La mine a l'aspect d'un *cratère* qui s'approfondit régulièrement par gradins successifs, certains découpés dans la masse minéralisée, d'autres dans le stérile. Les dimensions de ces gradins, hauteur et largeur, dépendent de la nature des terrains et des caractéristiques des engins d'abattage et de chargement. L'exemple type est la mine de Bingham : avec 2 km de diamètre, et une profondeur de 800 m environ, c'est le plus grand cratère artificiel du monde; il comporte plus de 40 gradins de 20 m de largeur et de 15 à 25 m de hauteur. Ce cratère est parcouru par une voie ferrée électrifiée qui passe de gradin à gradin par des rampes à 4 % et qui sert à l'évacuation des produits. Ceux-ci sont chargés en wagons à déversement latéral de 90 à 100 tonnes, par des pelles de 5 à 15 m^3. L'entrée des trains se fait par l'intermédiaire de trois tunnels creusés à flanc de coteau à trois niveaux différents et débouchant dans le cratère : les trains entrent par la galerie située à un niveau supérieur à celui du gradin exploité et sortent par la galerie située à un niveau inférieur de manière que les trains en charge ne circulent jamais sur une rampe montante. Les routes pour la circulation des engins sur pneus ont une pente qui peut atteindre 15 %.

Techniques de l'exploitation du ciel ouvert

Les techniques d'exploitation à ciel ouvert sont très variées; la nature et les caractéristiques mécaniques de la roche interviennent dans le choix des techniques d'abattage et de chargement, tandis que la localisation et la structure de la mine conditionnent le choix du mode de transport. Bien entendu, les capacités horaires prévues sont également déterminantes.

L'abattage

L'abattage à l'explosif est utilisé dans les mines métalliques où la roche est trop dure pour être chargée en attaque directe, par pelle excavatrice, par scraper ou par des excavateurs à roue ou à godet comme pour le

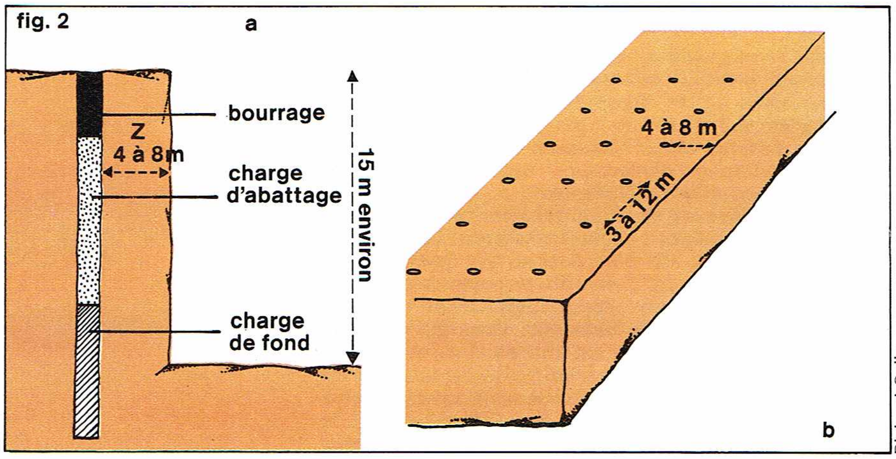

Richard Colin

▲ ***Figure 2 : disposition des trous de mines* (b) *et chargement d'un coup* (a) *; le schéma de tir est constitué par une maille de trous couvrant toute la surface à abattre.***

charbon. L'utilisation de l'explosif pour l'abattage des roches nécessite la foration de *trous de mines* suivant une certaine disposition géométrique dont les principes sont précisés dans la partie consacrée à l'abattage en souterrain. Ces trous de mines sont forés *parallèlement* à la pente de chaque gradin qui est généralement *verticale* ou légèrement inclinée sur la verticale (pour des gradins creusés dans des terrains de mauvaise tenue). Le diamètre des trous peut varier de 100 à 400 mm ; il augmente avec l'emploi des sondeuses plus puissantes et la recherche de rendements élevés. De la distance du trou de mine au bord du gradin (Z) dépend l'efficacité du tir ; pour des gradins de 15 m de hauteur, elle peut varier de 4 à 8 m suivant la résistance de la roche. Le trou a en général une longueur supérieure de 10 à 15 % à la hauteur du gradin, car l'expérience montre que si elle était égale à cette hauteur, la partie inférieure ne serait pas abattue.

Le schéma du tir est constitué par une maille de trous couvrant toute la surface à abattre. L'espacement entre trous est voisin de la distance au bord du gradin de la première rangée, soit de 3 à 12 m. L'explosif couramment utilisé est le nitrate fuel amorcé par une cartouche de dynamite, par cordeau détonant et amorce électrique. On consomme 80 à 400 g d'explosif par tonne abattue suivant la dureté de la roche, et une volée peut abattre plus de 300 000 t lorsqu'il s'agit de minerai ; mais ce tonnage est très supérieur quand il s'agit de stériles, car aucune contrainte de sélectivité n'intervient plus alors pour limiter le volume abattu en une seule fois (*fig.* 2).

La foration des mines est effectuée par des machines de foration, ou **sondeuses ;** dans les *sondeuses à percussion* ou *rotopercussion,* le taillant de la sondeuse mû par un marteau pneumatique frappe la roche, rebondit sous le choc pour la refrapper dans une phase ultérieure ; il est également animé d'un mouvement de rotation. La roche est brisée sous l'action du choc et de la poussée axiale du marteau. Une telle machine peut forer des trous de plus de 25 cm de diamètre à une vitesse de 10 m/h. L'usure des taillants peut être rapide en roche abrasive. Le marteau peut être placé en tête du train de tige ou directement derrière le taillant en fond de trou.

Les *sondeuses rotatives* sont les plus utilisées dans l'industrie minière et les forages pétroliers ; leur vitesse d'avancement varie de 15 m/h dans des roches dures à 150 m/h dans les argiles et les calcaires meubles.

Les *sondeuses « jet Piercing »* sont utilisées pour la foration dans les roches extrêmement dures, comme les taconites du Mesabi Range, aux États-Unis (minerai de fer à gangue siliceuse).

La tête foreuse est un brûleur en bronze où arrivent trois conduites, respectivement de fuel, d'oxygène et d'eau. Le mélange oxygène-fuel enflammé à la sortie du brûleur fait éclater sous l'effet de la température la roche en éléments fins ; il faut éviter que la roche ne fonde et ne se vitrifie. La vapeur d'eau augmente le volume de gaz produit qui entraîne les débris à l'extérieur, ce qui permet d'augmenter la vitesse d'avancement.

Lorsque la roche, sans être très résistante, est tout de même un peu dure pour le chargement en attaque directe, on peut éviter l'abattage systématique à l'explosif, soit en pratiquant des *tirs d'ébranlement,* soit en *défonçant* préalablement le terrain au moyen d'une dent de « ripper » fixée à l'arrière d'un bulldozer. En roche de dureté moyenne, ces modes opératoires peuvent conduire à des économies sensibles par rapport à l'abattage classique à l'explosif.

Les exploitations de matériaux pour le bâtiment et les travaux publics, qui sont juridiquement des produits de carrière, rentrent le plus souvent dans le cadre des méthodes générales du ciel ouvert (sables, granulats, roche concassée), mais, dans quelques cas particuliers, l'abattage a pour objet de séparer de très gros blocs, et non pas de briser finement la roche : l'ardoise, le marbre, la pierre à bâtir sont ainsi détachés du massif rocheux en blocs de plusieurs mètres cubes qui peuvent ensuite être retaillés ou fendus aux dimensions commerciales. On utilise alors soit les techniques du *prédécoupage :* des trous de mine très rapprochés ou même jointifs sont forés sur tout le pourtour du bloc à extraire ; soit le *sciage* au fil : un fil sans fin trempé dans un bain abrasif use la roche sur toute la face à découper ; soit le *havage :* une chaîne garnie de pics diamantés découpe une saignée. Toutes ces méthodes d'abattage peuvent également être utilisées en souterrain dans les rares cas où les matériaux concernés ont une valeur marchande suffisante pour supporter le coût d'extraction en carrière souterraine.

Le chargement

On peut classer les engins de chargement en deux groupes principaux :

- Les *engins cycliques* travaillent par séquences ; chaque séquence comporte le remplissage du godet, une rotation sur le socle, le déversement du godet dans l'engin de transport ; une seconde rotation en sens inverse termine le cycle en amenant le godet en face du tas de minerai à charger. Les pelles et les « draglines » sont les engins types de cette classe, mais les chargeuses frontales sur pneus ou sur chenilles et les scrapers en font aussi partie.
- Les *engins à chargement continu* abattent et chargent sans interruption. Ce sont les roues-pelles et les excavateurs à godet des mines de charbon et de lignite ou des mines alluvionnaires.

La pelle. C'est l'engin classique de chargement dans les exploitations à ciel ouvert, surtout s'il s'agit de minerais métalliques. Les pelles de dimensions petite ou moyenne se déplacent sur chenilles. Les pelles de grosse dimension se déplacent grâce à un mécanisme dit marchant, qui les rend plus stables, mais ne leur permet de se déplacer que plus lentement.

La pelle est actionnée quelquefois par un moteur Diesel, mais le plus souvent elle est alimentée en courant électrique par un câble : dans ce cas, un groupe convertisseur sur la machine permet d'alimenter en courant continu les moteurs d'entraînement des différents mouvements, à savoir l'avancement des chenilles, la rotation de la plate-forme portant la cabine de commande et la flèche, le relevage du godet (levage) et la translation

▼ ***La pelle est l'engin classique de chargement dans les exploitations à ciel ouvert.***

Egal - Charbonnages de France

du bras porteur du godet (cavage) ; ces deux derniers mouvements sont commandés par câbles et treuils placés dans la cabine de commande.

Pour le *chargement du minerai,* on utilise normalement des pelles à godets relativement petits, de 1 à 15 m^3 de capacité. La capacité du godet est déterminée surtout par la capacité demandée, mais également par l'épaisseur des couches, ou par la capacité du camion de transport. Dans les taconites du lac Supérieur, la capacité de 8 m^3 des pelles de chargement correspond souvent à la taille du plus gros bloc que peut recevoir le concasseur giratoire. La durée du cycle de chargement est influencée par le choix de la taille du godet : plus le godet est grand, plus le cycle est long (30 secondes pour une pelle de 6 m^3 et 60 secondes pour une grosse pelle de découverture de 45 m^3) [*tableau* II].

On utilise, pour le *déblayage des morts-terrains,* des pelles dont la caractéristique essentielle est leur taille gigantesque, qui n'a d'ailleurs cessé d'augmenter. Dans les années 50, la plus grosse pelle était la pelle Marion modèle 5760, de 45 m^3, avec un poids total de 2 350 t. Actuellement, la plus grande pelle du monde, qui se trouve dans une mine de charbon de l'Illinois, pèse 12 200 t ; son godet a une capacité de 140 m^3 ; elle est spécialement étudiée pour les conditions d'exploitation particulières à cette mine. Les grosses pelles de découverture sont capables d'excaver sur une hauteur de 30 m, et de charger 200 tonnes environ. Leur hauteur est supérieure à 50 m. Elles travaillent en moyenne 50 mn par heure en continu avec un temps d'arrêt mensuel pour l'entretien qui ne dépasse pas 5 à 8 % du temps de travail.

La dragline. Les pelles, situées au pied du gradin en exploitation, travaillent en principe *en butte* alors que les draglines sont équipées pour travailler *en fouille.* Le godet des draglines n'a pas de fond ouvrant, mais, grâce à un jeu de câbles, il se vide par renversement. La flèche d'une dragline peut avoir une longueur double de celle d'une pelle de même capacité. Le godet peut ainsi travailler à de grandes distances et, d'autre part, charger en contrebas par rapport à la position de l'engin. Son champ d'application est donc considérablement plus étendu ; de plus, le godet, n'ayant pas de pièce mobile, est à la fois moins délicat et plus léger, et sa manœuvre est beaucoup plus rapide. Par contre, le positionnement du godet, tant au chargement qu'au déchargement, est beaucoup moins précis que celui de la pelle.

Si les petites draglines sont encore montées sur chenilles, les grosses sont du type « marchant ». Le châssis inférieur sert de plate-forme d'assise sur le sol pendant le travail, ce qui donne une meilleure stabilité à la machine et diminue la pression au sol. Des engins de plus de 2 000 t ont une pression de moins de 2 kgf/cm^2. Ils sont munis de patins ou de semelles actionnés par excentriques ou de systèmes mécaniques à levier pour la marche. Les draglines marchantes ont été mises au point pour le travail dans des terrains meubles où la pression de 4 kgf/cm^2 des draglines à chenilles ne peut être supportée. Elles perdent en mobilité ce qu'elles gagnent en stabilité. Leur vitesse en déplacement n'est que de 200 à 300 m/h contre 2 km/h pour les pelles.

Les parties électrique et mécanique des draglines sont identiques à celles des pelles ; les draglines sont quelquefois équipées d'un moteur Diesel autonome lorsqu'elles sont utilisées dans des endroits isolés pour le dragage. La durée du cycle de travail est très variable et dépend de sa nature. C'est la chute libre du godet (dans laquelle intervient l'adresse du machiniste) qui donne la puissance d'attaque sur le massif rocheux. La gamme de capacité des draglines est plus large que celle des pelles. La plus grosse dragline a un godet de 170 m^3 avec une flèche de 95 m. Les coûts de chargement sont sensiblement les mêmes pour les draglines et les pelles : de l'ordre de 0,4 à 0,8 F par m^3 chargé (*tableau* II).

Les chargeuses frontales. La chargeuse sur chenilles est essentiellement un engin utilisé dans les terrains difficiles et irréguliers. De ce fait, elle reste dans les grandes mines un engin secondaire réservé à des tâches spécifiques de préparation et de terrassement.

La chargeuse sur pneus est utilisée pour le chargement dans des conditions qui nécessitent souplesse et vitesse ; c'est là son principal avantage, qui a fait son succès au point qu'on la trouve dans la plupart des chantiers de génie civil, les mines à ciel ouvert et les mines souterraines. De dimensions modestes par rapport à celui des pelles, le godet a, dans les modèles courants, une capacité inférieure à 10 m^3. Un constructeur américain vient de lancer un modèle de 18 m^3. La chargeuse offre l'avantage d'être, contrairement à la pelle et à la dragline, très mobile ; elle peut transporter le produit sur une distance de 100 à 200 m suivant la capacité du godet. Cette limitation de distance est due à la baisse rapide de la production et à l'accroissement des coûts unitaires lorsque la longueur du parcours s'accroît. Les plus grosses chargeuses permettent des débits plus importants à un coût légèrement inférieur : elles peuvent donc en principe transporter leur charge un peu plus loin tout en restant économiques.

Les pelles hydrauliques. Alors qu'elles s'étaient pendant longtemps cantonnées dans le domaine des petites dimensions (1 à 2 m^3), elles ont eu tendance, ces dernières années, à se développer et atteindre une capacité de godet de 8 m^3, ce qui les rend comparables aux chargeuses frontales sur pneus. Leur ambition est de constituer un moyen terme entre la pelle excavatrice classique et la chargeuse frontale ; elles voudraient avoir la robustesse des premières tout en conservant un peu de la souplesse et de la mobilité des secondes.

Le scraper. C'est à la fois un engin de chargement et de transport qui est chargé par raclage sur le sol. Quelquefois, une chaîne releveuse (système Johnson) aide au chargement. De ce fait, le scraper est un engin mieux

Tableau II

Capacité de production des pelles et des draglines

Pelles		Draglines	
Capacité du godet (en m^3) (1)	Production (en m^3/heure) (2)	Capacité du godet (en m^3)	Production (en m^3/heure)
4,6	350	11	200 - 300
6	500	30	550 - 750
20	750	65	1 200 - 1 500
46	1 700	100	1 800 - 2 300
80	2 900	150	2 700 - 3 500
100	3 400	170	3 100 - 4 000

(1) Coefficient de remplissage de godet : 75 à 80 %.
(2) Durée effective de travail : 50 mn/h.

▲ *Tableau II : capacité de production des pelles et des draglines.*

M. Renaudeau - TOP

▼ *Dragline en action ; la longue flèche des draglines leur permet de travailler à distance et aussi de charger en contrebas par rapport à la position de l'engin.*

Tableau III

Caractéristiques de quelques roues-pelles en exploitation dans le monde

Pays	Matériaux exploités	Capacité du godet (en m^3)	Nombre de godets sur la roue	Diamètre de la roue (en m)	Production (en m^3/h)	Puissance installée (en kW)	Masse (en tonnes)
Allemagne	lignite	6,5	10	22	13 000	2 500	13 000
États-Unis							
Floride	phosphates	2	10	10	6 300	1 490	800
Illinois	charbon	1,5	10	12	4 700	5 000	3 500
Californie	dragage	1,4	8	9	3 460	1 050	607
Inde	sable	0,35	9	7,2	3 000	1 870	1 250
Mauritanie	fer	0,65	8	6,3	1 380	663	565
Yougoslavie	lignite	0,46	8	6	1 260	715	460
Afrique du Sud	cuivre	0,35	8	6	1 260	715	460
Maroc	phosphates	0,09	8	3,3	540	130	133

Note : la vitesse de rotation de la roue est généralement comprise entre 3 et 6 tours par minutes.

▲ ***Tableau III : caractéristiques de quelques roues-pelles en exploitation dans le monde.***

adapté aux travaux de génie civil, où il convient parfaitement pour le déblayage et le terrassement. Dans la mine, il est utilisé pour enlever les morts-terrains ou pour l'exploitation du charbon, mais, en général, son coût d'exploitation est supérieur à celui de la pelle ou de la dragline couplée avec des camions et augmente rapidement avec la distance : le scraper s'accommode mal de fortes pentes.

Il existe plusieurs types de scrapers; sans parler des scrapers à basculement par l'avant et tractés par engins sur chenille, qui deviennent maintenant très rares, le scraper à déversement inférieur classique peut n'avoir qu'une tête de traction, et, dans ce cas, il est toujours nécessaire de le pousser avec un bulldozer lors du chargement, à moins qu'il ne soit équipé d'un élévateur Johnson ; ou bien il peut être muni de deux trains moteurs (push-pull).

La roue-pelle. Elle est utilisée dans les roches tendres (charbon, phosphates, sables, schistes bitumineux) pour l'enlèvement des morts-terrains et du minerai si la puissance de la couche est suffisante. La roue excavatrice est une roue à godets de grandes dimensions (les plus grandes roues-pelles ont plus de 20 m de diamètre) placée à l'extrémité d'une flèche relevable et orientable. L'ensemble est monté sur une tourelle qui permet de l'orienter et qui repose elle-même sur un bâti à chenilles. Pour équilibrer la roue à godets, le groupe d'entraînement est placé en porte à faux loin à l'arrière.

Les godets de la roue — dont le nombre varie de 6 à 12 suivant les machines — attaquent le massif rocheux après leur passage au point bas de leur trajectoire, se remplissent et, après le passage au point haut, se déversent sur le convoyeur à bande circulant à travers la flèche. Les produits sont ensuite transférés vers l'arrière de la machine par un second convoyeur porté par un pont intermédiaire orientable et de longueur variable (longueur de 100 m sur les roues-pelles des lignites allemands). Le pont intermédiaire aboutit souvent à une sauterelle sur chenille qui rejette les produits vers l'arrière. Dans certains cas, la sauterelle est remplacée par un dispositif de chargement en wagons, circulant sur une voie ferrée.

Les exploitations de lignites de la vallée du Rhin fournissent de multiples exemples d'utilisation des roues-pelles : certaines travaillent en butte pour exploiter des gradins de 50 m de haut en 3 passes. D'autres travaillent jusqu'à 25 m en fouille. Les appareils couramment utilisés ont des puissances de 7 500 kW et un poids de 5 000 t pour une production de 6 000 t/h. Ce ne sont pourtant pas les plus gros; la nouvelle génération en exploitation en février 1976 à la carrière Fortuna-Garsdorf en R. F. A. présente des caractéristiques encore plus impressionnantes : 13 000 t/h avec des puissances installées de 15 000 kWh (*tableau* III).

En 1972, les coûts directs d'exploitation par roues-pelles étaient compris entre 20 et 26 centimes/m^3 aux États-Unis, et entre 10 et 50 centimes en R. F. A. Cependant, suivant les conditions climatiques et géologiques, ces prix peuvent monter jusqu'à 2 francs. L'entretien des dents des godets est le poste le plus coûteux; dans des conditions de travail difficiles, il est nécessaire de les changer une fois par jour. La roue-pelle est l'engin le plus économique pour l'exploitation à grande échelle; le prix de revient est très faible dans les systèmes intégrés d'abattage en continu à roue-pelle couplée avec un transport par convoyeur à bande sur de grandes distances, mais il faut que le terrain soit suffisamment tendre pour permettre l'attaque directe.

Les excavateurs à chaîne à godets. Leur conception est très voisine de celle des roues-pelles; mais la flèche portant la roue à godets est remplacée par une chaîne à godets de 4 à 6 tronçons relevables. Les godets sont en forme de coquilles munies sur le bord d'attaque d'une chaîne en acier qui racle le terrain sur une épaisseur de 15 cm. La chaîne à godets déverse les matières extraites sur des convoyeurs à bande qui aboutissent à l'engin de transport. La machine est conçue pour travailler en butte ou en fouille, mais elle est surtout utilisée pour des travaux en fouille en matériaux tendres et pour le dragage de sables alluvionnaires.

Elle est utilisée en France dans l'exploitation de lignite d'Arjuzanx (Landes) où elle exploite une couche de lignite de 3 à 6 m de puissance après enlèvement de morts-terrains par roue-pelle. La capacité de production est de 400 t/heure.

Le transport

Trois types de transport de matériaux sont utilisés couramment dans les exploitations à ciel ouvert : le transport par voie ferrée, qui est le plus ancien, le transport par camions dont l'usage s'est considérablement développé dans tous les pays, et le transport par convoyeurs à bande, plus récemment en expansion. Il faut aussi signaler le transport hydraulique en conduite qui commence à être employé pour le transport de charbon et les concentrés de minerai de fer, mais peu dans le transport de minerai brut. Le principe consiste à mélanger le minerai à transporter à une boue support et à pomper l'ensemble à travers une conduite qui peut être en acier, en fonte, avec quelquefois un revêtement antiabrasif (basalte).

Le transport par voie ferrée. La voie ferrée a été longtemps considérée comme le moyen de transport le plus économique, mais le coût d'infrastructure dans les zones à topographie difficile est très élevé : un kilomètre de voie ferrée posée peut coûter plus de 1,5 million de francs. Ce handicap n'est pas toujours compensé par le faible niveau des coûts d'exploitation : moins de 0,10 franc par tonne-kilomètre utile (TKU).

Le transport par camions. Dans les années 1950-70, on est passé des camions de 36 tonnes de charge utile aux camions de 300 tonnes. Le transport par camions s'est révélé une méthode de transport très souple dans les grandes exploitations à ciel ouvert. En effet, le camion circule facilement sur des pentes élevées (plus de 10 %) et accepte un tracé très sinueux. En outre, la construction des pistes ne nécessite pas un investissement aussi élevé que la pose d'une voie ferrée.

Dans la plupart des cas, il s'agit non pas des camions classiques construits pour circuler sur les routes, mais de camions spéciaux pour carrière, beaucoup plus robustes, et adaptés à la circulation sur les pistes. Ils peuvent être à déversement arrière ou, plus rarement, à déversement par le fond. Ils sont entraînés par moteur Diesel à transmission mécanique pour les types les plus petits, à transmission hydraulique pour les moyennes dimensions (jusqu'à 100 tonnes environ de capacité), et à transmission électrique au-delà. Dans ce dernier cas, l'entraînement est assuré par un moteur électrique indépendant pour chacune des quatre roues.

Aux autres avantages s'ajoute la souplesse qu'offrent les camions pour l'organisation de l'exploitation et du transport : un camion tombe-t-il en panne? On l'envoie à l'atelier d'entretien, et on le remplace par le camion de secours. La route de transport est-elle défoncée à la suite d'un roulage intensif par des camions dont le poids total en charge excède 300 tonnes? En un temps très court, un bulldozer aura terrassé une déviation permettant au trafic de ne pas être interrompu.

L'important dans le transport par camions est l'organisation du mouvement. Il faut déterminer le nombre de camions nécessaire pour un roulage déterminé de façon que la pelle marche sans interruption et qu'il y ait le moins possible d'attente pour les camions, soit sous la pelle, soit au déversement. Pour cela, il faut connaître les capacités instantanées et horaires des différentes machines, et le cycle des camions, compte tenu de leur vitesse en rapport avec la topographie de la route.

Les constructeurs de camions donnent des abaques permettant de calculer les capacités de transport en fonction de la charge totale (poids du camion + charge utile), de la longueur du trajet et du profil de la route. L'inconvénient majeur du transport par camions est son prix de revient, qui est élevé; tandis que les transports par rail et par convoyeurs ont un coût direct qui peut être inférieur à 10 centimes par TKU, le transport par camions revient souvent à plus de 1,25 franc la tonne; en outre, si les immobilisations dans le cas du transport par camions sont inférieures à celles de la voie ferrée, elles sont supérieures à celles du transport par convoyeurs. Pour diminuer ce coût, on augmente la dimension des camions et leur charge utile. Des camions de 150 à 200 tonnes de charge utile équipent actuellement les grandes mines : Bougainville, Cuajone, et différentes mines aux États-Unis.

Le transport par convoyeurs à bande. C'est un concurrent sérieux pour le transport par rail. Ils ont les mêmes caractéristiques de conception : une infrastructure rigide (les rails dans un cas, l'infrastructure du transporteur dans l'autre) ; le convoyeur à bande offre l'avantage d'être moins cher à l'installation et plus facile à poser; on peut le rallonger aisément au fur et à mesure des besoins; il admet des pentes très supérieures à celles qui sont admises par le chemin de fer, mais son tracé doit être constitué de tronçons rectilignes. Il convient dans l'exploitation de vastes gîtes horizontaux de lignite et de charbon où on l'utilise derrière une roue-pelle, soit pour la mise au terril des stériles, soit pour le transport du minerai. Il permet des débits très élevés. C'est pourquoi il l'emporte sur la voie ferrée pour toutes les exploitations qui ont une extraction de plus de 200 000 m³/jour en place. Les exploitations de lignites allemandes utilisent des convoyeurs à bande sur des distances de plus de de 20 km (*tableau* IV). Le coût de transport est très faible (de 2 à 10 centimes par tonne-kilomètre, plus les dépenses d'immobilisations qui peuvent être de l'ordre de 4 centimes par tonne annuelle). L'usure de la bande est un élément important du coût, surtout si les produits sont abrasifs ou agressifs par leur forme. On doit veiller, lors de l'établissement d'un projet de transport par convoyeur, à respecter des rapports bien définis entre la capacité et la granulométrie des produits à transporter d'une part, et la largeur de la bande d'autre part.

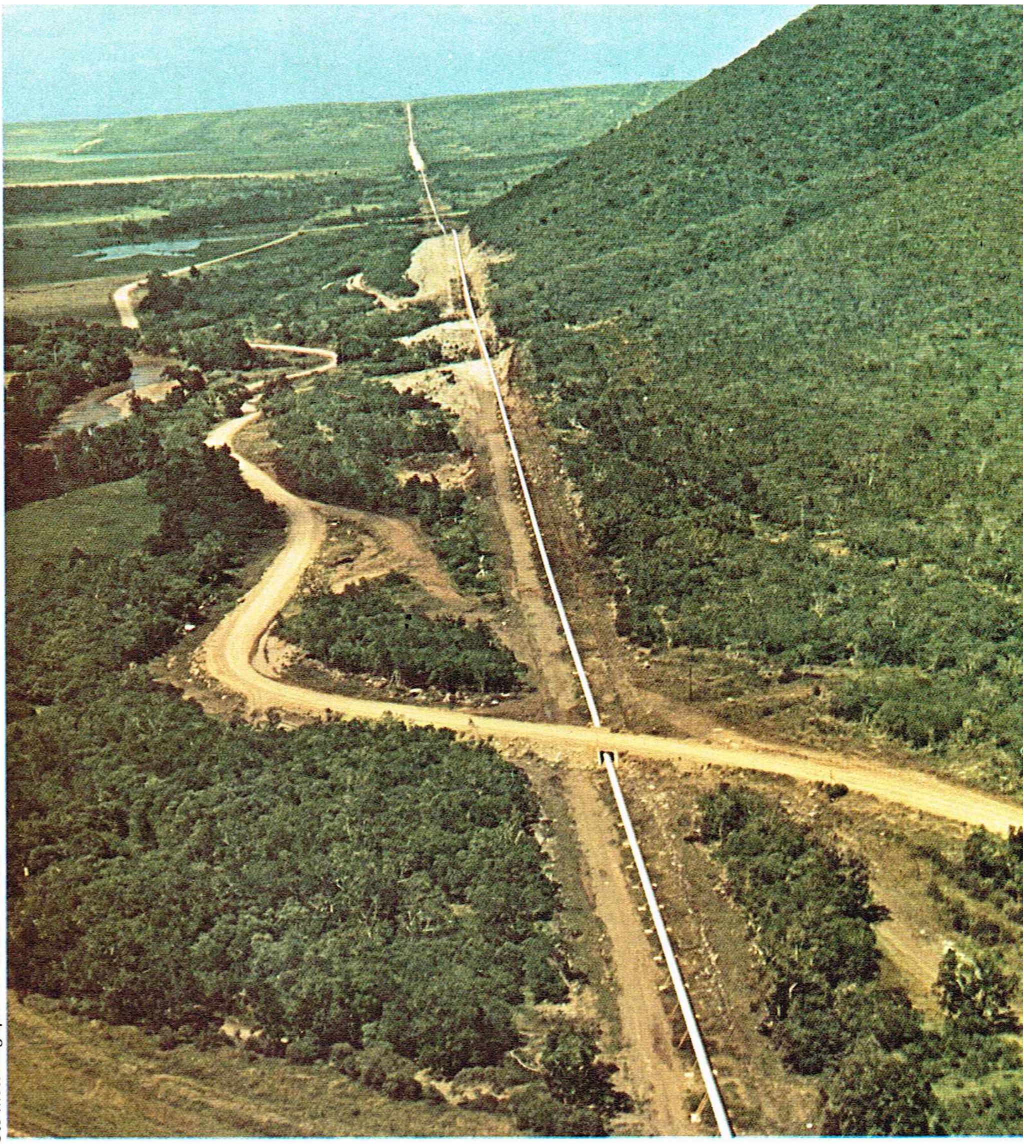
Sté métallurgique Le Nickel - S.L.N.

▲ ***Transport de minerai de nickel vers les postes de chargement portuaire par un convoyeur à bande de 13 km, l'un des plus longs du monde, à Népoui, Nouvelle-Calédonie.***

Une étude préalable des coûts de transport par les différentes méthodes permet de choisir celle qui est la mieux adaptée à chaque cas particulier. Sur de très longues distances, le train est le moyen le plus approprié. Il est concurrencé par le transport hydraulique en conduite, mais celui-ci est encore réservé à certains cas particuliers, et par le transporteur à courroie (transport sur 100 km du phosphate de Bou Craa). Le transport par camions est souvent avantageux sur de courtes distances, surtout quand le chargement et/ou le déchargement ne sont pas localisés en un point unique. La souplesse du camion le rend alors plus économique. Le transport par bandes est dans la plupart des cas un transport à grand débit sur des distances moyennes (1 à 3 km) [*tableau* V].

▼ ***Tableau IV : caractéristiques des convoyeurs à bande.***

Tableau IV

Caractéristiques des convoyeurs à bande

Caractéristiques des produits transportés	Largeur de la bande (en mm) — Vitesse maximale de la courroie (en m/s)					
	350	600	900	1 200	1 500	1 800
Fines de granulométrie inférieure au centimètre	2	3	3,75	4,5	4,5	4,5
Charbon	1,25	1,5	1,75	2	2	2
Produit abrasif	1,5	2,25	2,75	3	3	3
Produit abrasif et coupant	1,25	1,75	2,25	2,75	2,75	2,75

Tableau V Exemple de comparaison des coûts des différents moyens de transport (capacité : 2 à 6 millions de tonnes/an)		
Moyens de transports	**Coûts en centimes par tonne-kilomètre**	**Observations**
Rails	1,25 - 3,00	Sur une distance de plus de 600 km
Camion	15,60 - 25,00	Retour à vide sur la même route
Convoyeur à bandes	6,25 - 18,75	Moins de 25 km
Transport hydraulique en conduites	0,90 - 2,15	Plus de 80 km

▲ *Tableau V : exemple de comparaison des coûts des différents moyens de transport. Une étude préalable des coûts des différentes méthodes permet de choisir celle qui est la mieux adaptée à chaque cas particulier.*

▼ *A gauche, tableau VI : exemple du matériel nécessaire à l'exploitation d'une mine métallique (20 000 tonnes de minerais et 50 000 tonnes de stérile par jour). A droite, placers d'or en Afrique du Sud.*

Matériels divers. Services généraux

On regroupe ici tout le matériel annexe qui n'est pas utilisé directement pour l'abattage, le chargement ou le transport du minerai ou des stériles de découverture. Ce sont des engins et des machines dont le rôle est soit de maintenir la mine dans de bonnes conditions de sécurité, soit d'assurer l'entretien et la marche des gros engins d'exploitation (*tableau* VI).

La liste ci-après n'est pas exhaustive; la variété et la quantité de matériel secondaire dépendent des particularités de chaque exploitation.

● Les *engins de terrassement* (bulldozers, wheeldozers, niveleuses, compacteurs, chargeuses sur pneus). Le rôle de ces engins est de construire, puis d'entretenir les routes et les pistes de roulage dans la mine et entre la mine et l'usine de concentration. Les bulldozers sont également utilisés à côté des pelles pour rassembler en tas le minerai et augmenter ainsi l'efficacité du chargement; en outre, ils ont souvent pour mission la préparation de futurs chantiers. Les chargeuses sur pneus sont quelquefois utilisées comme engins de secours en cas de défaillance de la pelle, mais également pour de nombreuses opérations diverses.

● Les *engins de servitude*. On regroupe ici tous les engins de transport de fournitures et d'accessoires des engins de chantier :

— le camion-citerne fournit l'eau pour la foration;

— le camion de graissage et de fuel approvisionne la mine en carburants et graisse;

— des groupes compresseurs mobiles fournissent l'air comprimé aux foreuses;

— des camions équipés d'un bras de levage transportant des postes de soudures ou des pièces de rechange vont d'engin en engin pour assurer l'entretien.

● *Matériel de sécurité*. Ce sont pour l'essentiel les pompes d'exhaure pour l'évacuation des eaux. En outre, la dynamitière où l'on stocke les explosifs se trouve en général à une certaine distance de l'exploitation, ce qui nécessite un camion spécial pour le transport des quantités d'explosifs nécessaires jusqu'au front d'abattage.

L'exploitation des placers

Les *placers* sont des dépôts de minéraux détritiques contenant des métaux récupérables sous forme de grains discrets. Ils se présentent souvent sous forme de sédiments plus ou moins consolidés. Ils sont le résultat d'un long processus géologique cyclique qui aboutit à la concentration des métaux lourds et dans lequel les cours d'eau de surface, la mer et le vent ont joué un rôle de premier plan : les placers formés sous l'action de l'érosion éolienne ont été recouverts de dépôts marins; les placers marins ont été recouverts après le retrait de la mer soit par des alluvions, soit par des dépôts éoliens, soit par des moraines de l'âge glaciaire, soit enfin par des laves.

L'exploitation des placers consiste à récupérer dans les sédiments les grains de métaux utiles. L'abattage est suivi d'une concentration grossière qui élimine les stériles les plus légers. Les méthodes d'exploitation dépendent de la nature du placer. On distingue :

— les *placers résiduels,* résultant d'une altération chimique *in situ* des roches suivie d'un transport des minéraux légers laissant sur place les métaux lourds;

— les *placers éoliens;* l'érosion éolienne, après avoir déconsolidé les minéraux, emporte les plus légers et laisse les plus lourds;

Tableau VI Matériels nécessaires pour l'exploitation d'une mine métallique (type porphyry copper) de 20 000 t/jour de minerai et de 50 000 t/jour de stérile		
Engins et caractéristiques	**Nombre d'engins**	**Prix unitaire (en milliers de dollars 1975)**
Foreuse Bucyrus 45R	4	400
Pelle de chargement PH/1600 de 8 cubic yard	3	885
Camion de transport (65 tonnes c.u.)	20	254
Bulldozer sur chenille Caterpillar D8K	1	145
Bulldozer sur pneu 814	3	90
Chargement frontal sur pneu 992B	1	305
Compacteur sur pneu 815	1	96
Niveleuse sur pneu 12 G	2	75
Camion citerne	2	64
Camion fuel et graissage	1	9
Camion grue	1	7
Camion transport des pièces de rechange	3	10
Poste de soudure	2	4
Compresseurs	2	96
Pompes d'exhaure	variable	—
Autobus de transport du personnel	2	37
Pick-up de surveillance	5	6

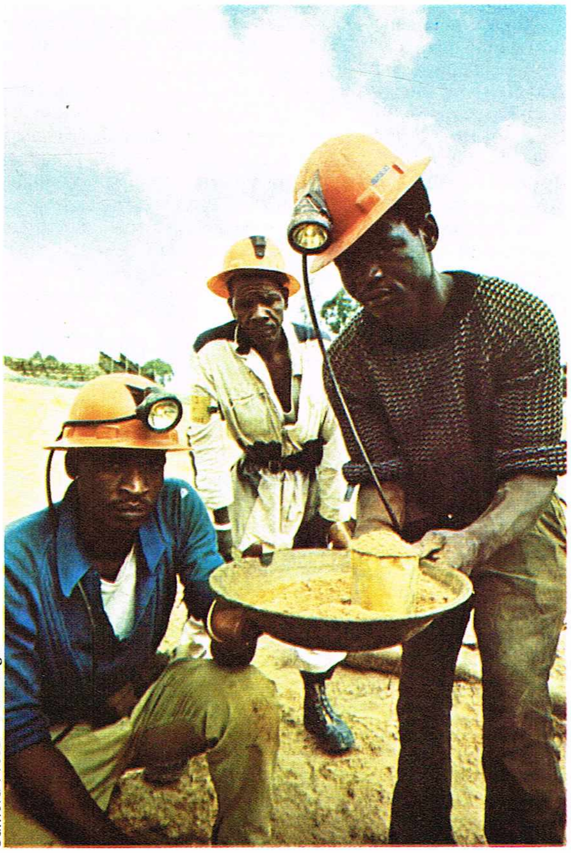
Camera Press - Parimage

— les *placers des plages,* nés de l'action des vagues sur des placers préexistants ou de la destruction de massifs rocheux sur place, suivie d'une concentration de métaux lourds; ils viennent en second lieu en ce qui concerne la fréquence;

— les *placers offshores,* qui reposent au fond de la mer (les fameux nodules de manganèse), et dont on commence seulement à évaluer l'importance comme ressources minérales disponibles.

Historiquement, l'or a été le premier métal exploité sous cette forme à cause de son prix et de l'extrême facilité de sa récupération. Les placers d'or sont actuellement épuisés. 80 % de la production mondiale de diamant provient de placers. La cassitérite, principal minerai de l'étain, provient à 90 % des placers fluviaux et alluvionnaires de la Malaisie et de la Thaïlande. Le rutile, l'ilménite, le zircon, la monazite se trouvent en concentrations exploitables uniquement dans les sables des plages. Les métaux lourds de la famille du platine, la scheelite, la columbite, les éléments radio-actifs et les pierres précieuses sont aussi des minéraux de placers.

Méthodes d'exploitation des placers

Elles vont de l'exploitation à la pelle d'alluvions aurifères des chercheurs d'or du siècle passé à l'exploitation mécanisée par draglines.

- En Afrique du Sud, l'exploitation des placers de diamant se fait soit à la main, soit à l'aide des engins classiques du ciel ouvert (pelles, bulldozers, etc.).
- Les placers d'étain d'Extrême-Orient sont exploités au moyen de puissantes dragues à godets multiples.
- Les mines de platine du Ghana, du Brésil, de Grèce et d'Alaska sont exploitées par dragues.

Quand le placer ne se trouve pas sous l'eau, les méthodes d'exploitation ne diffèrent pas de celles de ciels ouverts conventionnels, sinon par la nature géologique du placer. Le matériel le plus souvent employé dans ces gisements est la dragline. Mais, quand il s'agit de dépôts peu consolidés, l'*abattage hydraulique* peut être intéressant. Cette technique consiste à désintégrer le minerai *in situ* par un jet d'eau sous forte pression (monitor). Les particules sont ensuite poussées vers un canal de transport. Plus de 1 000 mines d'étain du Sud-Est asiatique utilisent cette méthode. Mais les rendements obtenus restent faibles et la consommation d'eau est élevée.

Lorsque le placer est sous l'eau, on utilise des dragues pour remonter le minerai du fond de la mer ou du fleuve. La pulpe remontée du fond est traitée directement sur l'installation flottante d'exploitation ou bien transportée par canalisations jusqu'à des installations situées sur la terre ferme.

La drague à godets multiples est une machine très performante pour l'exploitation sous l'eau : sur son immense plate-forme flottante, on concentre immédiatement le minerai exploité. D'abord utilisée pour l'exploitation de l'or, elle est maintenant largement utilisée pour l'exploitation du platine en Alaska, du diamant au Brésil, de l'étain en Malaisie et en Indonésie. Elle exploite à des profondeurs de plus de 45 m avec des cadences de 100 000 m^3 par jour.

Problèmes spécifiques du ciel ouvert

La tenue des gradins. Elle est évidemment essentielle pour l'exploitation, car un glissement de terrain aurait des conséquences très graves. Aussi s'en préoccupe-t-on avant et pendant l'exploitation de la mine. La stabilité des pentes de la mine exploitée par la méthode des gradins et cratères dépend de l'inclinaison des parois. Des études expérimentales sur la résistance mécanique de la roche sont effectuées dans la phase d'étude du gisement. Elles aboutissent à la détermination de l'inclinaison optimale des pentes, qui, dans les grandes mines à ciel ouvert, est comprise entre 40 et 60°. Les facteurs qui interviennent dans son calcul sont : la résistance mécanique des roches *in situ;* la consolidation des terrains (présence de failles, diaclases, plans de glissement) ; les conditions climatiques (dans les régions très pluvieuses, on diminue la pente pour éviter les risques de glissement de terrain); la présence des nappes souterraines).

Plus la pente est faible, plus grande est la quantité de stérile à déblayer; le prix de revient de l'exploitation s'en trouve augmenté d'autant; on cherche à se rapprocher le plus possible de la pente optimale. Les dimensions et la forme des gradins devront être choisies suivant cette contrainte qui accompagne les contraintes d'exploitation : largeur suffisante pour permettre la circulation du matériel, hauteur adaptée aux types d'engins utilisés, etc.

La sélectivité. Une autre difficulté des exploitations à ciel ouvert est la sélectivité, c'est-à-dire la séparation du minerai et des produits considérés comme stériles pendant l'abattage et le chargement. L'emploi de très gros engins mécanisés, loin de résoudre ce problème, le complique plutôt.

Dans les mines de lignite et de charbon, où le combustible se présente sous forme de couches régulières, les grandes roues-pelles enlèvent les morts-terrains, tandis que les scrapers et les pelles de taille moyenne extraient le combustible. En général, dans la mesure où la puissance des couches est faible (entre 1 et 3 m), les petits engins d'abattage, souples et sous conduite humaine, améliorent la sélectivité au détriment du rendement.

Dans les mines métalliques par contre, la minéralisation est le plus souvent très irrégulière et disséminée dans un grand volume de stériles; malgré les travaux de reconnaissance avant l'exploitation, on ne connaît pas avec exactitude la distribution de la minéralisation. Ce n'est qu'au cours de l'exploitation qu'on la découvre. La sélection, dans ces conditions, peut être difficile. Dans beaucoup de mines à gradins, on exploite suivant le système des doubles gradins : les gradins exploités en minerais alternent avec les gradins exploités en stériles. Cette méthode rationnelle a l'inconvénient de laisser des fronts très irréguliers, ce qui est préjudiciable à la stabilité de la mine; en revanche, elle a l'avantage de conduire à des coûts moindres. Dans certaines mines de très grande capacité, une sélection peut se faire après l'abattage (on maintient ainsi des rendements abattage très élevés) soit lors du chargement, soit à l'entrée de la laverie lorsque le transport n'est pas trop onéreux.

Toute amélioration dans la connaissance du gisement avant le début de l'exploitation est favorable à la sélectivité minerai-stériles : c'est dans ce sens que s'orientent des études en cours dans les grandes sociétés minières et les laboratoires de recherche (utilisation de la géostatique).

L'environnement. La mine à ciel ouvert est toujours une perturbation sérieuse des équilibres naturels : elle détruit le sol et le sous-sol sur une surface au moins égale à celle du cratère et modifie complètement le paysage et le relief.

La présence d'un cratère de 700 m de profondeur et de 2 km de diamètre (Bingham) bouleverse complètement la flore et, dans une grande mesure, la faune, de la région une fois la mine épuisée et abandonnée.

Pendant l'exploitation, la mine est source de nuisances : d'abord, le bruit des engins qui serait intolérable dans les zones urbanisées; ensuite, les poussières qui sont dégagées lors du tir en grandes masses, mais également lors du chargement et du transport; ces poussières, transportées par le vent, ne se déposent pas seulement dans les abords immédiats de la mine, mais peuvent avoir des effets à des distances importantes de l'exploitation.

La pollution des cours d'eau et des nappes souterraines voisines est essentiellement le fait de ces poussières, mais aussi des rejets des engins d'exploitation tels qu'huiles et combustibles.

Depuis une décennie, les gouvernements, les citoyens et les industriels eux-mêmes ont pris la mesure de ces atteintes à l'environnement. Les gouvernements ont été amenés à réglementer l'émission des polluants et à prescrire la reconstitution des sites touchés par les exploitations. Ainsi, aux États-Unis, la teneur d'anhydride sulfureux dans l'air ambiant est limitée à 0,1 ppm (partie par million) ; elle est de 0,005 ppm au Japon.

Une loi récemment votée aux États-Unis et en France oblige les exploitants à remettre en état les terrains après l'exploitation, de façon que le paysage retrouve son aspect initial. Les exploitants devront reboucher le cratère et replanter la végétation détruite. Le coût de telles opérations est parfois assez élevé pour qu'il soit plus économique d'exploiter en souterrain. La récente prise de conscience de la nécessité de protéger notre environnement ne manquera pas de favoriser l'exploitation souterraine, dans laquelle les nuisances sont mieux circonscrites.

▶ La Rouge Mine de Saint-Nicolas, *par H. Gross, école allemande du XVI^e^ siècle (École des beaux-arts, Paris).*

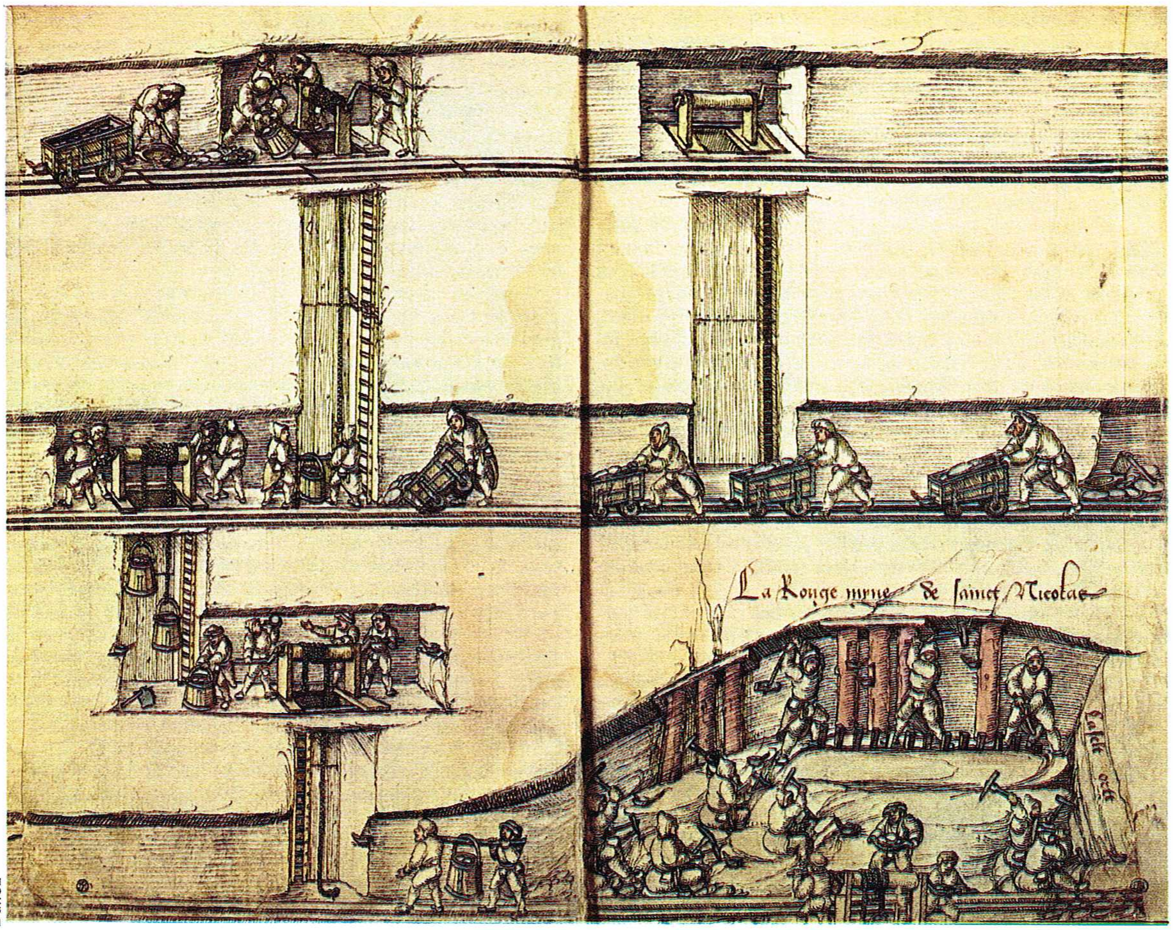

Bulloz

L'exploitation souterraine

Importance de l'exploitation souterraine

Contrairement aux apparences, l'exploitation souterraine est aussi importante pour l'approvisionnement minéral que l'exploitation à ciel ouvert (sauf pour les sables et graviers exclusivement exploités en surface, et pour quelques minerais très abondants, comme le fer et la bauxite, surtout exploités à ciel ouvert). A ciel ouvert, les tonnages remués sont beaucoup plus importants et spectaculaires, mais ils comportent une forte proportion de stériles qui atteint, comme on l'a vu, jusqu'à dix ou trente fois les quantités de minerais. En souterrain, on extrait presque toujours une quantité de stériles inférieure à la quantité de minerais, et dans certains cas la totalité des creusements est effectuée dans le minerai.

En outre, les minerais extraits en souterrain sont toujours plus riches que ceux qu'on extrait à ciel ouvert à la même époque. De ce double fait, moins de stériles remués et minerais plus riches, les quantités de minéraux utiles produites en souterrain sont relativement plus importantes qu'à ciel ouvert. Quelques chiffres relatifs aux grands pays miniers permettent de confirmer ce point : 50 % du charbon aux États-Unis, 60 % du charbon en Australie et 50 % des métaux au Canada proviennent d'exploitations souterraines, quoique, dans ce dernier cas, les exploitations à ciel ouvert soient à l'origine de 75 % des tonnages de minerais bruts.

Tous les types de gisements peuvent être exploités en souterrain, mais, bien entendu, on n'exploite ainsi que ceux qui ne peuvent pas l'être à meilleur compte à ciel ouvert. En effet, comme on l'a vu, le coût d'extraction d'une tonne en surface est peu élevé, tandis qu'en souterrain de nombreux éléments spécifiques contribuent à accroître ce coût : l'accès aux zones minéralisées est plus difficile; la dimension des galeries, et donc celle des machines qu'on peut y introduire, est limitée par des conditions de stabilité du massif rocheux; un soutènement artificiel est presque toujours nécessaire pour garantir la sécurité des mineurs; il faut souvent pomper des débits importants d'eau; il faut toujours assurer une ventilation, et parfois une réfrigération de l'air. Limitation de la dimension des machines et mesures de sécurité spécifiques conduisent à des coûts d'extraction de trois à vingt fois supérieurs à ceux du ciel ouvert : cela explique qu'on exploite le plus possible à ciel ouvert et que l'exploitation souterraine ne prenne le relai qu'à partir d'une certaine profondeur. En pratique, la limite entre les deux formes d'exploitation est donnée par $(r+1)\ C < C'$, avec : C' = coût d'extraction d'une tonne en souterrain; C = coût d'extraction d'une tonne à ciel ouvert; r = taux de découverture.

L'exploitation sera économiquement réalisable si la valeur marchande de la tonne de minerai est supérieure au coût d'extraction. Ainsi, pour un minerai de valeur V_1, toutes les parties du gisement moins profondes que Z_1 seront exploitables (en souterrain entre Z_I et Z_1, à ciel ouvert si le gisement existe à des profondeurs plus faibles). Par contre, un gisement dont la tonne de minerai a une valeur V_2 ne sera exploité que dans sa partie peu profonde, à ciel ouvert, ou pas du tout; on peut tirer de cette schématisation graphique plusieurs conclusions importantes, notamment : les gisements affleurants sont presque toujours exploitables à ciel ouvert, même pour des minerais de faible valeur marchande (c'est le cas des granulats pour travaux publics et, dans une moindre mesure, des minerais très abondants, tel le fer) ; les gisements profonds ne sont exploitables, en souterrain, que si la valeur marchande du minerai est assez élevée, en pratique plus de 15 F/t pour les gisements les plus faciles, et plus de 30 F/t dans le cas général; plus la valeur d'un minerai augmente, et plus les possibilités d'exploitation se diversifient : de très nombreux gisements connus — et encore plus de gisements inconnus — n'attendent pour devenir exploitables qu'une élévation suffisante du niveau de prix du minerai (*fig.* 3).

L'évolution récente a été favorable aux exploitations à ciel ouvert, mais, à long terme, la part du souterrain devrait s'accroître. Au cours des cinquante dernières années, la dimension des engins de transport et de char-

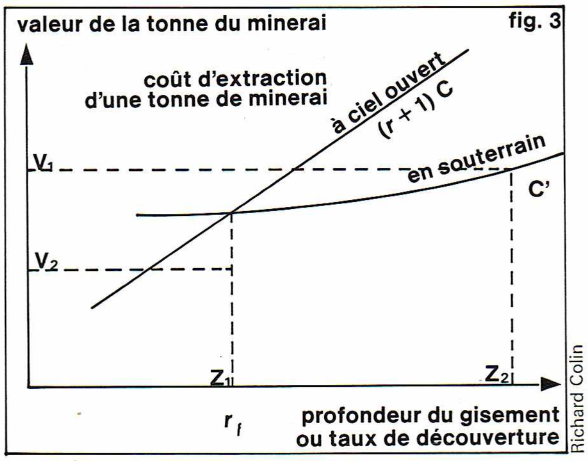

gement s'est considérablement accrue, permettant une diminution des coûts d'extraction à ciel ouvert, et donc un accroissement de la part des gisements exploitables de cette manière. En outre, la demande très rapidement croissante de métaux et de combustibles a conduit à mettre en exploitation les gisements qui pouvaient produire le plus rapidement, c'est-à-dire parmi les gisements connus ceux qui étaient les moins profonds, même si leur teneur était parfois très faible, la haute productivité des matériels suffisant à les rendre compétitifs.

Le progrès technique dans les exploitations souterraines est beaucoup plus récent et reste limité par les dimensions des ouvrages miniers, mais, depuis 1960, certains rendements ont pu être multipliés par dix grâce à la mécanisation progressive de toutes les opérations et à la mise au point de méthodes nouvelles. Les exploitations de surface doivent affronter des difficultés nouvelles pour que soit conservé ou reconstitué l'environnement; les économies d'échelle obtenues en passant des camions de 20 t aux grosses bennes de 100 ou 200 t, ou des petites carrières de 2 Mt aux excavations géantes de 40 Mt, semblent actuellement trouver leurs limites en faisant surgir de nouveaux problèmes techniques, financiers ou sociaux. La recherche de nouveaux gisements débouche d'abord sur les prolongements profonds des gisements connus, ensuite sur des gisements « cachés » (sans manifestation apparente en surface) qui devront être exploités en souterrain. C'est ainsi que toutes les grandes réserves de charbon, en Australie comme dans l'ouest des États-Unis, seront exploitées en souterrain à des profondeurs de plusieurs centaines de mètres.

En définitive, la limite entre ciel ouvert et souterrain est loin d'être fixe, chacun des éléments qui contribue à déterminer cette limite à un moment donné étant susceptible de très grandes variations : il est à peu près certain que d'ici à vingt ans on exploitera en souterrain jusqu'à des teneurs voisines des teneurs actuelles du ciel ouvert

Structure générale d'une exploitation souterraine

Une mine souterraine comporte toujours un certain nombre d'installations de surface, et un réseau d'ouvrages souterrains qui permettent d'accéder au gisement, de le découper en étages et en panneaux, et de l'exploiter.

* Le *carreau de la mine* est caractérisé par les installations d'extraction, chevalements des puits qui peuvent s'élever à 70 m de hauteur, et machines d'extraction. Les chevalements anciens sont des structures en acier qui supportent les molettes sur lesquelles s'appuient les câbles d'extraction. Ces câbles portent les cages et s'enroulent à l'autre extrémité sur un treuil mû par des moteurs électriques, situé dans un bâtiment séparé. Les chevalements modernes sont des tours en béton au sommet desquelles un tambour cylindrique supporte le câble et l'entraîne par frottement; dans ce système, dit à poulie Koepe, le poids de la cage est équilibré par un contrepoids pour éviter le glissement du câble sur la poulie. Sur le carreau, on trouve aussi la plupart du temps un atelier de mécanique pour l'entretien du matériel, les compresseurs qui fournissent l'air comprimé aux chantiers par l'intermédiaire d'une conduite en acier, les stocks d'explosifs et de matériels divers et, bien entendu, les bureaux, les vestiaires et les douches.

* Les *accès au niveau du gisement* sont le plus souvent des puits verticaux, mais aussi parfois des descenderies (galeries inclinées à 17° ou 30 % environ), ou des galeries à flanc de coteau lorsque la topographie des lieux s'y prête. Ces accès doivent assurer plusieurs fonctions : extraction du minerai, des stériles et de l'eau, transport de matériel et éventuellement de remblais, circulation du personnel, alimentation en air frais et évacuation de l'air vicié; pour cette dernière raison (et aussi pour des raisons de sécurité), il y a toujours au moins deux accès à un gisement souterrain. Les gisements de grande extension horizontale peuvent comporter jusqu'à 8 ou 10 puits.

Le fonçage d'un puits est une opération longue et coûteuse. Généralement creusé à l'explosif (voir *Abattage à l'explosif*) à partir de la surface, le puits doit traverser tous les terrains de recouvrement du gisement, dont les caractéristiques géotechniques peuvent être très variables : la traversée de terrains mous peut exiger un bétonnage immédiat des parois ou la mise en place d'un cuvelage en fonte; la traversée de couches aquifères nécessite souvent l'injection de ciment dans les terrains, parfois la congélation complète de ces terrains, de manière à travailler en terrain gelé.

Le puits est équipé de l'installation d'extraction : une ou deux cages pouvant recevoir le personnel, le matériel et des wagons (ou berlines), ou dans certains cas un ou deux skips ne pouvant recevoir que du minerai (le skip est une caisse qui se remplit par le haut au fond et qui se vide par le fond à la surface). En outre, le puits est équipé de dispositifs de guidage des cages ou skips, et il est parcouru par les canalisations et câbles qui assurent les liaisons entre jour et fond (eau, électricité, air comprimé, télécommunication). Les puits équipés les plus profonds atteignent 1 800 m. Au-delà de cette profondeur, le poids des câbles est tel qu'ils se rompraient sous leur propre poids : en conséquence, dans les mines très pro-

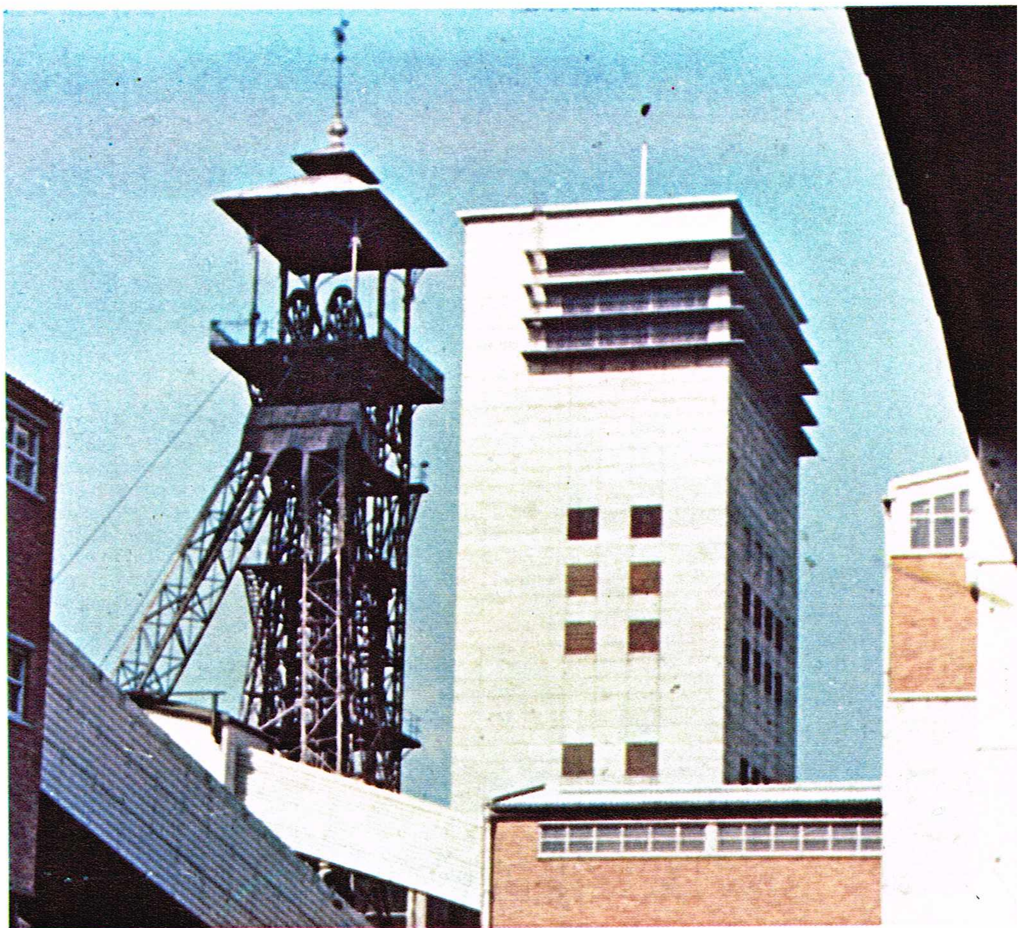
Charbonnages de France

▲ A gauche, figure 3 : le coût d'extraction est moins élevé en surface qu'en souterrain; aussi exploite-t-on le plus possible à ciel ouvert, l'exploitation souterraine ne prenant le relais qu'à partir d'une certaine profondeur. A droite, carreau de la mine (installation de surface); les chevalements des puits peuvent s'élever jusqu'à 70 m de hauteur.

fig. 4

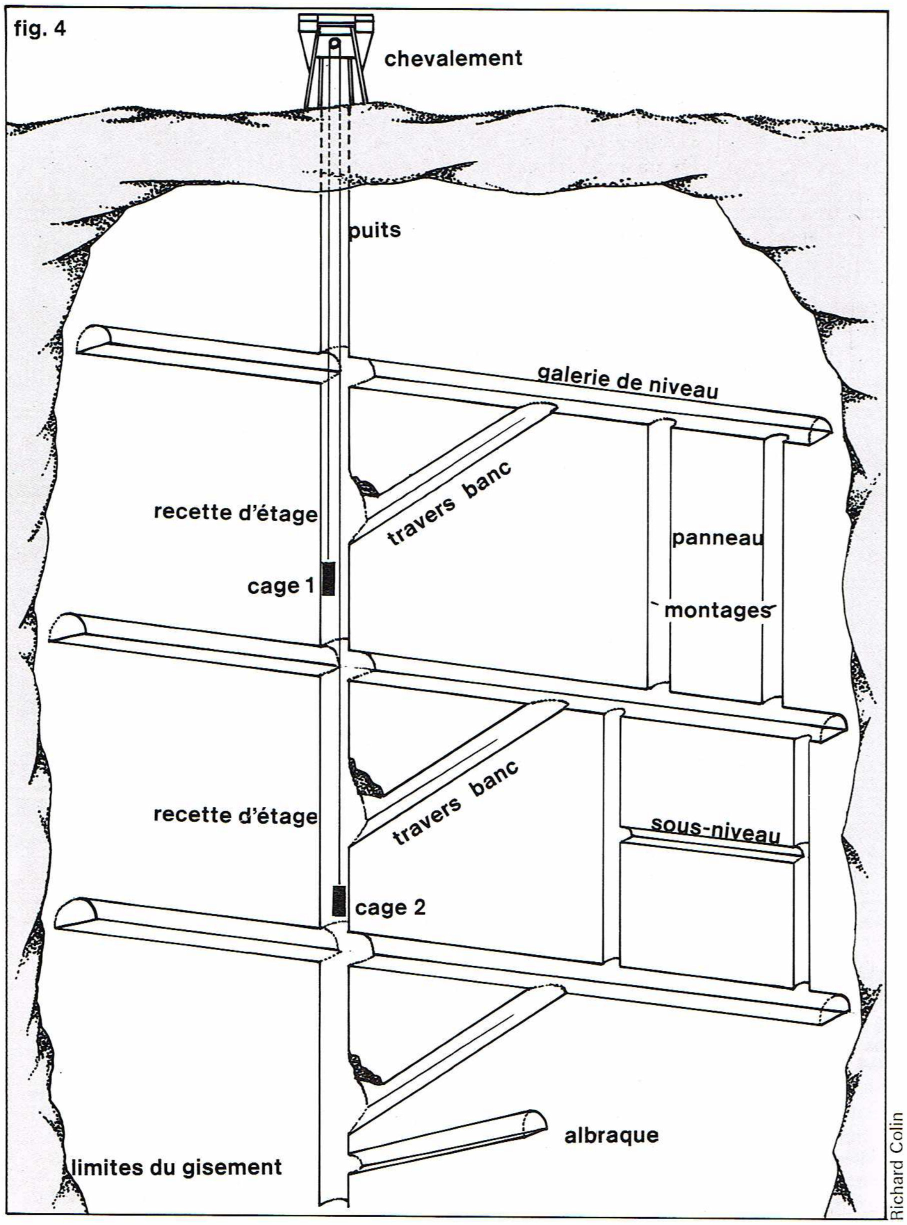

▲ ***Figure 4 : infrastructure de la mine.***

fondes (3 500 m dans les mines d'or d'Afrique du Sud), on a recours à deux puits successifs pour atteindre le fond (*fig.* 4).

Les descenderies, qui peuvent être creusées à l'explosif ou par une machine d'abattage (tunnellier ; voir *Abattage mécanique*), ont généralement un équipement plus sommaire : convoyeur à bande caoutchoutée pour l'évacuation du minerai et rails pour la circulation de berlines de matériel.

Lorsqu'une galerie à flanc de coteau (subhorizontale) est utilisée pour l'extraction du minerai, elle est équipée soit d'un chemin de fer, soit d'une sole bétonnée pour la circulation de camions.

* Lorsque le gisement s'étend en profondeur, il est généralement *découpé en étages* distants verticalement de 25 à 150 m. A chaque étage une infrastructure de niveau relie le gisement à la *recette* du puits : galerie principale de niveau le plus souvent parallèle à la minéralisation ou même tracée dans le minerai ; et *travers-bancs* qui recoupent le minerai.

* Si le gisement a une grande extension horizontale, l'espace est souvent divisé en champs d'exploitation. C'est le cas dans les mines sédimentaires de charbon, par exemple.

* *Entre deux étages, le gisement est découpé en panneaux* qui sont les unités d'exploitation, délimitées soit par des discontinuités naturelles (failles, disparition de la minéralisation), soit arbitrairement pour que l'on ait des dimensions compatibles avec la méthode d'exploitation et les engins utilisés : les galeries creusées dans le minerai pour rejoindre deux étages sont des *montages*. Longtemps creusés à l'explosif sans mécanisation, à partir de l'étage inférieur (en montant, d'où leur nom), ces montages sont actuellement creusés soit par une machine appelée « raise borer », soit avec l'aide d'une infrastructure « Alimak ».

Le « raise borer » fore à partir de l'étage supérieur un trou pilote de 150 à 300 mm de diamètre. Lorsque la tête de foration atteint l'étage inférieur, on la décroche, et on la remplace par un outil aléseur de diamètre beaucoup plus grand. Cet outil est mis en rotation et tiré vers le haut par le train de tiges qui a servi à la foration du trou pilote. On creuse ainsi, à la vitesse de 2 à 4 m par heure, des trous jusqu'à un diamètre de 3,6 m et jusqu'à des dénivellations de 700 m. Cette technique est également utilisée pour le creusement de bures (puits ne débouchant pas à la surface) et de puits d'aérage ou de service à partir de la surface : la seule contrainte est la nécessité d'un accès par le fond pour mettre en place l'aléseur.

L'« Alimak » est une cabine qui grimpe dans le montage sur une crémaillère, équipée de manière à permettre la foration et le minage dans le montage. Au moment du tir, la cabine est redescendue et effacée dans la galerie inférieure. Les matériaux abattus tombent spontanément dans cette galerie, et la cabine peut remonter pendant que les déblais sont chargés. Cette technique est une amélioration remarquable de la méthode de creusement traditionnelle qui nécessitait des échelles et un plancher de travail qu'il fallait reconstruire après chaque tir.

Lorsque les étages sont assez espacés (pour diminuer le nombre de recettes) et que la méthode d'exploitation exige des panneaux plus petits, des galeries intermédiaires, appelées sous-niveaux, sont creusées parallèlement aux niveaux.

La mine peut ne comporter qu'un étage lorsque le gisement est tabulaire et peu penté. L'ensemble des opérations se déroule alors dans un plan à peu près horizontal, et il n'y a plus de travers-bancs (seuls les puits recoupent la couche). Les différentes galeries creusées dans le minerai pour accéder aux panneaux et pour les délimiter sont alors appelées galeries principale (ou primaire), secondaire et tertiaire.

* Dès les premiers stades de la préparation d'une exploitation souterraine, certaines installations doivent être aménagées pour garantir la sécurité des mineurs. Au point le plus bas du gisement (généralement à proximité du puits le plus profond), des *albraques* sont creusées pour servir de réservoirs et de bassins de décantation des eaux de la mine ; ces albraques, qui collectent toutes les eaux et les boues, doivent ensuite être périodiquement nettoyées. Un ensemble de pompes assure l'exhaure, c'est-à-dire le pompage vers la surface. La recette d'étage, qui est aménagée en gare pour recevoir les berlines transportées par les cages, et qui comprend souvent la salle des pompes et un petit atelier d'entretien, est protégée d'une venue d'eau brutale dans la mine par une porte étanche à fermeture manuelle ou automatique. De même, dans les mines grisouteuses, les différents quartiers de la mine sont séparés entre eux et séparés des recettes par des barrages de protection coupe-feu.

On aura une idée de l'importance de tous les creusements d'ossature générale de la mine en remarquant que les charbonnages français ont entretenu jusqu'à 3 500 km de galeries pour produire 50 millions de tonnes par an, ou encore que la mine de zinc de Saint-Salvy doit creuser chaque jour 15 m de galeries au rocher pour produire 1 000 tonnes de minerai.

Les méthodes d'exploitation

L'exploitation d'un gisement consiste à extraire le minerai dans tout le volume où il a été identifié. La manière dont le minerai est abattu et transporté sera précisée ultérieurement au chapitre des techniques minières. Il importe d'abord de préciser comment l'excavation minière progresse à partir du moment où les travaux préparatoires ont permis d'atteindre et de circonscrire les panneaux à exploiter : globalement, on peut dire que l'exploitation consiste à creuser des *chambres* séparées entre elles par des *piliers* de minerai ; ces piliers sont

éventuellement *dépilés*, c'est-à-dire repris dans une phase ultérieure. Une *méthode d'exploitation* particulière est caractérisée par la dimension, la forme, l'orientation, et la juxtaposition des différentes chambres, le mode de contrôle du toit utilisé et la chronologie de creusement de ces chambres (appelées encore chantiers, ou tailles).

Les méthodes d'exploitation souterraines sont extrêmement variées, puisqu'elles doivent s'adapter à la diversité des gisements et à leurs irrégularités. En pratique, chaque gisement nécessite la mise au point d'une ou même de plusieurs méthodes d'exploitation spécifiques. En outre, les traditions minières locales conduisent souvent à donner des appellations particulières à des méthodes générales, pour peu qu'il s'agisse de substances différentes, et, à plus forte raison, en cas de localisations géographiques éloignées. On verra toutefois qu'il est possible de regrouper toutes ces méthodes en trois grandes catégories, à condition de choisir un critère de classement convenable.

Critères de choix d'une méthode

Choisir une méthode d'exploitation consiste donc à définir géométriquement les chambres ou chantiers élémentaires de la mine, et à préciser comment ils peuvent être maintenus ouverts malgré le poids des terrains sus-jacents.

Trois éléments principaux sont à prendre en compte pour faire ce choix : le contexte géologique, qui donne, outre la localisation du gisement, des indications précieuses sur les qualités du massif rocheux ; le comportement mécanique des roches, qui fixe les limites du possible en matière de dimension et de forme des excavations ; les caractéristiques des équipements susceptibles d'être utilisés pour réaliser les différentes opérations d'abattage, de chargement et de transport du minerai.

Les éléments géologiques déterminants sont nombreux : la forme du gisement autorise des chambres vastes dans les amas et dans les couches épaisses, et, au contraire, des chambres basses et allongées dans les filons et dans les veines minces ; la nature du massif rocheux minéralisé permet de grandes ouvertures dans les roches massives et compactes, mais exige un soutènement important et des chambres exiguës dans les bancs schisteux ou marneux. La tectonique en grand (grandes failles) limite les panneaux et fixe leur orientation ; en petit (fissuration systématique), elle limite les dimensions des excavations, mais facilite le foudroyage contrôlé. L'existence de contraintes résiduelles (lorsque les terrains ont été déformés ou continuent de se déformer, comme c'est le cas à proximité des massifs montagneux récents) peut faire rejeter certaines méthodes et exiger un soutènement renforcé. Le caractère fortement aquifère de certains bancs peut interdire toute méthode qui fissurerait les bancs imperméables et laisserait l'eau s'écouler dans la mine.

Le comportement mécanique des roches est scientifiquement étudié par la mécanique des roches (voir au chapitre *Techniques minières*). Pour le choix de la méthode d'exploitation, il importe de connaître la résistance et la déformabilité du minerai, mais aussi des roches environnantes ; des modèles sont élaborés pour déterminer la stabilité à court ou à long terme des édifices creusés dans le rocher, à partir de ces caractéristiques. On peut ainsi tester *a priori* différentes formes et dimensions de chambres, ainsi que l'incidence du creusement d'une chambre sur les chambres voisines, ou encore l'effet d'un soutènement particulier.

Le plus souvent, plusieurs méthodes sont possibles dans un gisement donné. Le choix, parmi tous les équipements miniers, de ceux qui ont les meilleures performances permet généralement de lever l'indétermination. Ces performances peuvent être soit la souplesse si le gisement est très irrégulier, soit le rendement (gros équipements) si l'on cherche à réduire les coûts d'extraction, soit la sélectivité (petits équipements) si l'on cherche à réduire les coûts de concentration.

Différentes méthodes d'exploitation en souterrain

Toutes les mines ont un point commun : leur durée est limitée. De ce fait, les ouvrages que l'on doit creuser dans la roche sont toujours *temporaires*. Pour les grandes voies d'infrastructure (puits, galeries principales), cette durée peut atteindre quelques dizaines d'années, mais, pour les chambres d'exploitation, la longévité nécessaire se mesure en mois, voire en jours ou même en heures : une chambre n'a besoin d'être stable que pendant le temps où on l'exploite, et éventuellement pendant l'exploitation des chambres voisines s'il y a un risque de gêne mutuelle. Au-delà de cette limite, une chambre peut s'écrouler sans inconvénient, la seule restriction étant qu'on ignore généralement quand elle s'écroulera ; cette restriction peut être levée en interdisant l'écroulement par un remblayage systématique ou en provoquant volontairement cet écroulement de manière à le contrôler.

C'est par ces différentes manières de contrôler la stabilité des excavations souterraines qu'il est le plus facile de classer les méthodes d'exploitation. En effet, les autres caractéristiques des méthodes varient de façon continue d'un gisement à l'autre, tandis que le *contrôle du toit* ne comporte que trois possibilités : chambre vide, foudroyage ou remblayage, avec, il est vrai, quelques variantes qui seront examinées au passage.

Les méthodes par chambre vide (« open stopes »)

Dans l'exploitation en chambres vides, les excavations terminées sont abandonnées sans remplissage. Pendant la durée de l'exploitation, un soutènement léger peut être utilisé pour prévenir la chute de blocs ou d'écailles de roche qui pourraient se détacher des parois. En pratique, c'est le boulonnage, technique qui sera explicitée ultérieurement. Ces méthodes sont très répandues dans les gisements stratiformes horizontaux ou peu pentés (jusqu'à 30° environ) sous le nom de *piliers abandonnés*, ainsi que dans les gisements massifs en roches compactes où les chambres peuvent atteindre jusqu'à 50 m de hauteur, et où la dénomination précise généralement la méthode d'abattage : chambres par sous-niveaux, chambres par longs trous, ou carrières souterraines.

Dans les exploitations par *piliers abandonnés* (room and pillars), les dimensions les plus courantes sont 5 à 8 m de largeur pour les chambres, et autant pour les piliers. La puissance des couches ainsi exploitées peut atteindre 10 m. L'exploitation se ramène à un creusement de galeries parallèles (chambres) et de recoupes (perpendiculaires aux chambres), qui peut être facilement réalisé à l'explosif ou mécaniquement. Le problème essentiel dans ces exploitations est le calcul des dimensions de chambres et de piliers qui permettent de garantir une stabilité à court ou à long terme.

Le calcul traditionnel, le plus simple, consiste à comparer le poids des terrains sus-jacents à la résistance des piliers en faisant l'hypothèse simplificatrice que la charge du recouvrement se reporte de façon homogène sur les piliers (*fig.* 5).

En posant : H = hauteur du recouvrement, ρ = masse volumique du recouvrement, R = résistance du minerai, τ = taux de défruitement, le taux de défruitement limite,

▼ *Système chambres et piliers : cette méthode est répandue dans les gisements stratiformes horizontaux ou peu pentés.*

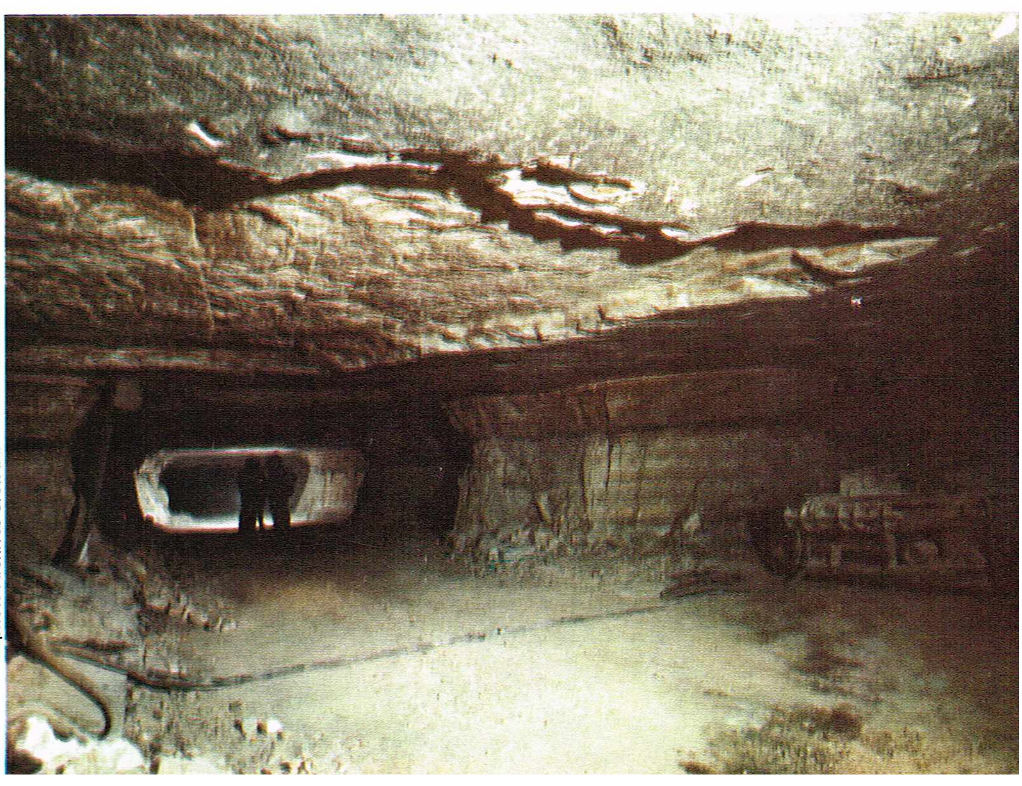

photo Archives S.C.P.A.

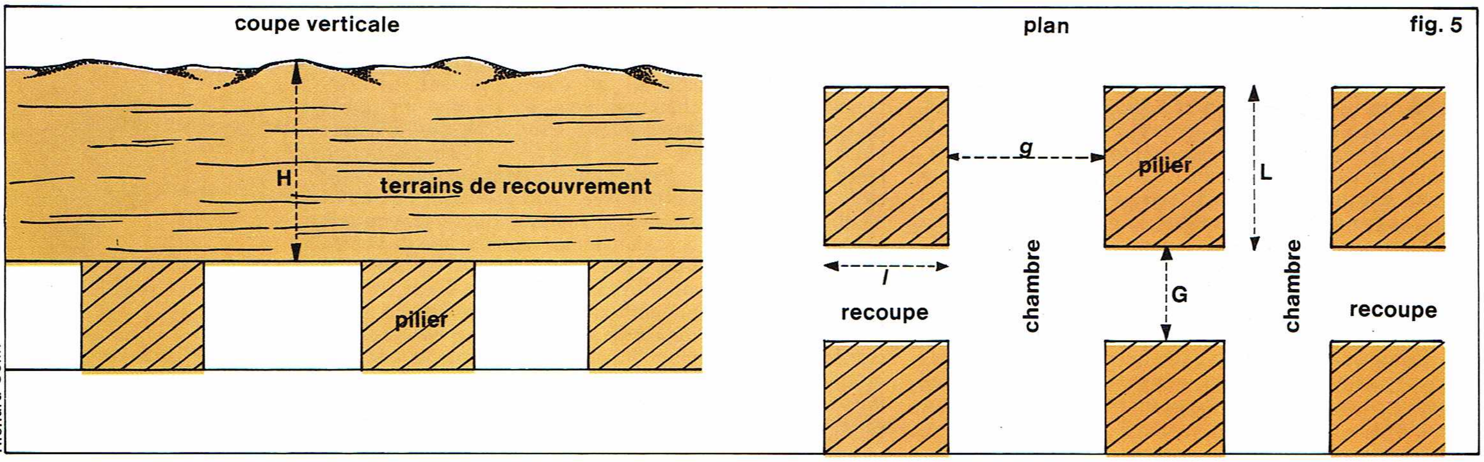

▲ *Figure 5 : schéma permettant un calcul simplifié du taux de défruitement et des dimensions des piliers.*

c'est-à-dire la proportion de minerai récupérée, est donné en % par : $\rho g H < R\,(1 - \tau)$.

Par exemple : H = 200 m, ρ = 2 500 kg/m³, R = 12,5 MPa, donnent τ = 60 %.

Une fois défini le taux de défruitement, qui ne donne que le rapport entre les dimensions des chambres et des piliers, il reste à définir les quatre grandeurs : longueur des piliers L, largeur des piliers *l*, largeur des chambres *g*, largeur des recoupes G, qui sont reliées à τ par :

$$1 - \tau = \frac{Ll}{(L + G)\,(l + g)}$$

Les largeurs de chambres et recoupes (galeries perpendiculaires aux chambres) sont déterminées par l'encombrement des matériels que l'on utilise et par l'aptitude des bancs du toit à rester stables. Les dimensions de piliers sont choisies aussi massives que possible, et on retient soit des carrés, soit des rectangles.

La difficulté d'application de ce calcul réside dans la détermination de la résistance R de la roche. On reviendra sur ce point dans le chapitre consacré à la mécanique des roches, en même temps qu'on critiquera l'hypothèse de répartition homogène de la charge. On peut toutefois retenir l'ordre de grandeur du taux de défruitement qui met en lumière l'un des défauts de la méthode d'exploitation par chambres et piliers : 60 % seulement du minerai est récupéré. L'autre défaut majeur de la méthode est que la stabilité à long terme de l'édifice ne peut que rarement être garantie, sauf en restreignant considérablement le taux de défruitement et la largeur des chambres, parce que les caractéristiques mécaniques des roches ne sont pas stables dans le temps. La formule met également en évidence que le taux de défruitement admissible diminue lorsque la profondeur du gisement s'accroît. En pratique, dans les roches sédimentaires de résistance moyenne, cette méthode ne peut dépasser 400 m de profondeur.

▼ *Figure 6 : exploitation par chambres et piliers d'un gisement horizontal épais.*

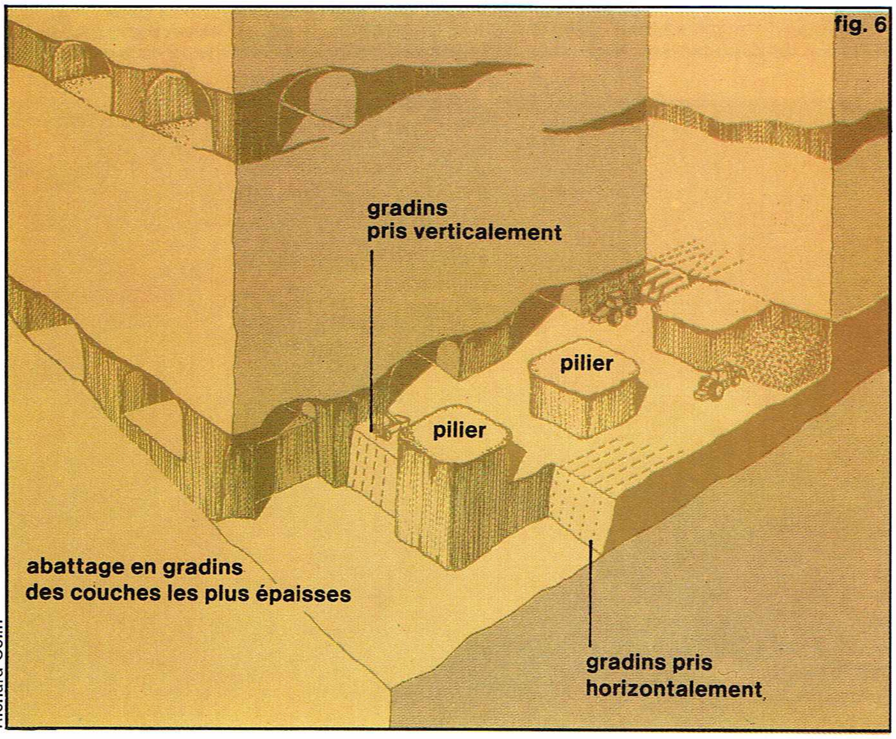

Cette méthode est cependant très utilisée, car c'est l'une des moins coûteuses, grâce au caractère systématique du découpage et à la possibilité d'utilisation d'engins mobiles à haute performance. Les rendements obtenus varient de 15 à 50 tonnes par homme poste, et les prix de revient de 15 à 30 F/t.

Lorsque les couches sont puissantes, ou encore dans les amas, cette même méthode par chambres vides est utilisée, mais on peut rarement abattre en une seule fois le minerai sur toute la hauteur voulue (de 10 à 50 m), et on cherche à réaliser des chambres de plus grande surface (20 m × 20 m). Lorsque la roche qui constitue le toit est compacte et stable, on peut commencer par exploiter une tranche immédiatement sous le toit par la méthode des piliers abandonnés. On approfondit ensuite chaque chambre en abattant des tranches successives par gradins comme à ciel ouvert, jusqu'à atteindre la profondeur désirée. D'où le nom de *carrière souterraine* parfois donné à cette méthode. L'abattage est aussi parfois réalisé par tranches verticales à partir de la tranche supérieure en forant des longs trous de mine sur toute la hauteur de la chambre ; cette technique a été récemment rendue possible par l'utilisation de marteaux-fond-de-trou qui donnent une très bonne précision dans la foration à grande longueur. Le minerai est alors récupéré par une galerie située à la base de la chambre, soit au fur et à mesure, soit suivant la méthode des chambres magasins (voir plus loin).

Les piliers doivent être calculés en tenant compte de leur élancement, ce qui n'était pas le cas précédemment, et ils nécessitent généralement un soutènement plus important. Dans certains cas, on évite ce problème en abandonnant des piliers très massifs, quitte à les réexploiter dans une phase ultérieure (*fig.* 6).

Quand le toit ne permet pas de réaliser l'ouverture de la chambre sur toute sa surface sans risque d'effondrement, on peut utiliser cette aptitude à l'effondrement en abattant le minerai par le bas, puis à partir de galeries d'accès transversales à différents *sous-niveaux*. On évite la présence de personnel dans la chambre en creusant préalablement à sa base des trémies qui débouchent sur une galerie située quelques mètres plus bas : le minerai s'écoule par ces trémies au fur et à mesure de son abattage (*fig.* 7).

La méthode des *chambres magasins* est dérivée des précédentes pour l'exploitation des amas ou des couches fortement pentées. Le minerai abattu est partiellement laissé en place dans la chambre, d'une part pour assurer un certain soutènement des parois verticales, et d'autre part pour servir de plancher de travail aux mineurs qui abattent le minerai par tranches horizontales successives en montant. En cours d'exploitation, on ne soutire que la quantité de minerai correspondant au foisonnement (une tonne de minerai en place occupe un volume **V** ;

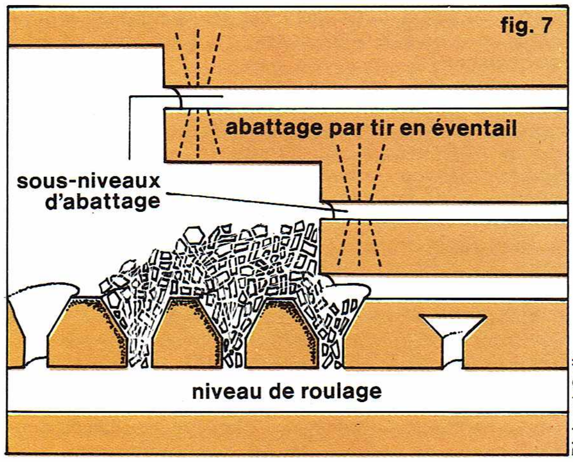

Richard Colin

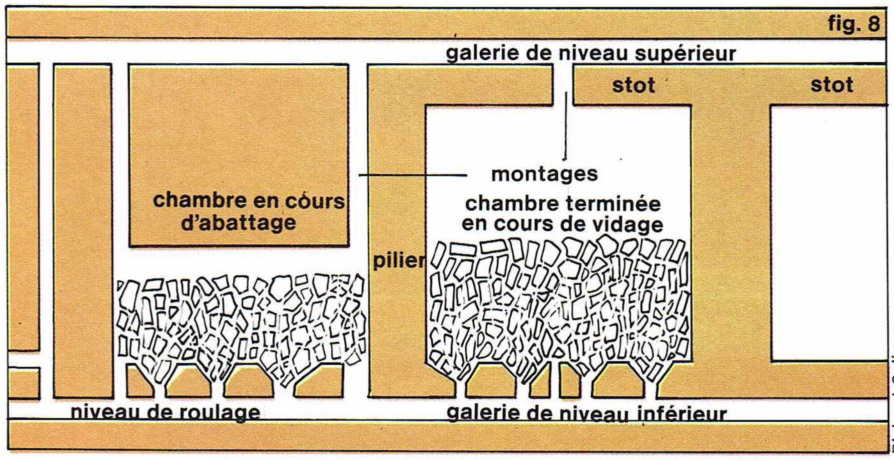

Richard Colin

lorsqu'il est abattu, il foisonne et occupe un volume 1,6 V environ; il suffit de soutirer 0,6 V pour maintenir le minerai entassé à une distance constante du front d'abattage), et ce n'est qu'après abattage de toute la chambre qu'on récupère le minerai restant. Cette méthode est utilisée lorsqu'une méthode par chambre vide normale n'est pas possible avec une tenue correcte des parois; il faut toutefois être sûr que la déformation des terrains ne sera pas telle que le minerai abattu dans la chambre soit recomprimé et ne puisse plus s'écouler (*fig.* 8). La méthode d'abattage par longs trous signalée plus haut peut aussi être utilisée pour réaliser une chambre magasin, le soutirage intermédiaire étant limité au foisonnement.

Toutes les méthodes par chambre vide sont parmi les moins coûteuses, surtout lorsqu'on peut utiliser la technique des carrières souterraines. Les rendements peuvent dépasser 50 et atteindre 100 à 150 tonnes par homme poste. Au Canada, la moitié des mines souterraines utilise ces méthodes. Comme on l'a indiqué dans le cas des piliers abandonnés, elles présentent deux défauts majeurs : le défruitement du gisement est limité, à moins qu'on n'envisage la récupération ultérieure des piliers; la stabilité à long terme n'est pas garantie, à moins qu'on ne remblaie systématiquement les vides après l'exploitation. Récupération de piliers et remblayage systématique seront réexaminés comme cas particuliers des autres méthodes d'exploitation.

Les méthodes avec foudroyage du toit (« caving »)

Lorsque la stabilité du toit de la chambre en exploitation ne peut être assurée même pendant la durée de cette exploitation, on préfère généralement provoquer le foudroyage de ce toit en le contrôlant et en ne maintenant ouverte que la partie strictement indispensable de la chambre grâce à un soutènement particulier. Comme les précédentes, ces méthodes s'appliquent aux gisements stratiformes minces ou épais et aux amas, avec des variantes adaptées à chaque cas.

* Dans les *couches minces et peu pentées*, deux méthodes sont particulièrement répandues, la longue taille, qui utilise pour contrôler le foudroyage un soutènement artificiel hydraulique, et la méthode dite traçage et dépilage, qui utilise des piliers de minerai judicieusement disposés pour contrôler le toit.

● La *longue taille* est surtout utilisée dans les mines de charbon, mais elle tend à accroître son champ d'action dans tous les minerais assez fissurables pour être abattus mécaniquement. Le panneau à exploiter est limité par une voie de tête et une voie de base distantes de 100 à 300 m. Un montage a été creusé pour relier les deux galeries, et le chantier d'exploitation (appelé longue taille) consiste à élargir indéfiniment ce montage sur toute sa longueur, toujours du même côté. Selon que le front de taille progresse en direction du puits, ou au contraire en s'en éloignant, la taille est dite rabattante ou chassante. Dès que le chantier atteint une largeur de quelques mètres, le toit a tendance à s'écrouler. On protège par un soutènement robuste les 3 ou 4 mètres les plus proches du front, et on laisse s'écrouler le reste. Ce foudroyage en arrière du chantier doit être régulier et immédiat de manière à décharger le soutènement qui, autrement, serait rapidement écrasé. Ce soutènement est constitué de piles, ensembles de 4 à 6 étançons maintenus en pression entre toit et mur par un fluide sous pression. Dans l'intervalle ainsi soutenu, on peut mettre en place tout ce qui est nécessaire à l'abattage et à l'évacuation du charbon : la machine d'abattage est une haveuse (fraise de 0,60 à 1,20 m de diamètre et 0,80 m de profondeur) ou un rabot (couteau qui arrache un copeau de minerai) qui se déplacent d'un bout à l'autre de la taille en abattant le minerai par passes successives; le minerai est évacué par glissement sur un couloir métallique sous l'action de raclettes également métalliques qui sont mises en mouvement par une chaîne sans fin; le personnel (5 à 8 hommes) peut circuler soit à l'intérieur des piles, soit entre piles et convoyeur. Après chaque passe d'abattage, tout l'ensemble machine, convoyeur et piles est ripé vers le nouveau front, et le foudroyage se produit spontanément (*fig.* 9 et 10).

La longue taille exige un investissement coûteux en matériel et s'accommode mal des irrégularités de la couche. Par ailleurs, le soutènement doit être adapté à la nature des terrains du toit immédiat, ce qu'on ne sait pas toujours très bien faire. Lorsqu'un panneau est terminé, le démantèlement de la taille et le démarrage du chantier suivant immobilisent tout le matériel pendant plusieurs jours. Cette lourdeur est toutefois partiellement

▲ *A gauche, figure 7 : abattage par sous-niveaux en chambre vide.*
A droite, figure 8 : chambres magasins, coupe verticale; la méthode des chambres magasins est utilisée pour l'exploitation des amas ou des couches fortement pentées.

▼ *En haut, figure 9 : schéma d'exploitation par longue taille en plateure (vue en plan).*
En bas, figure 10 : coupe schématique d'une longue taille.

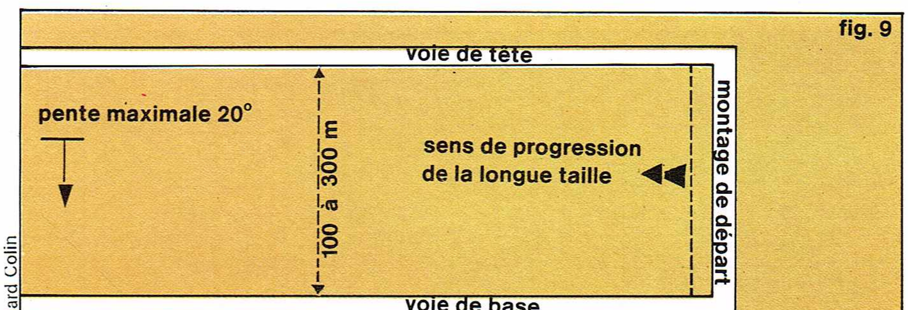

Richard Colin

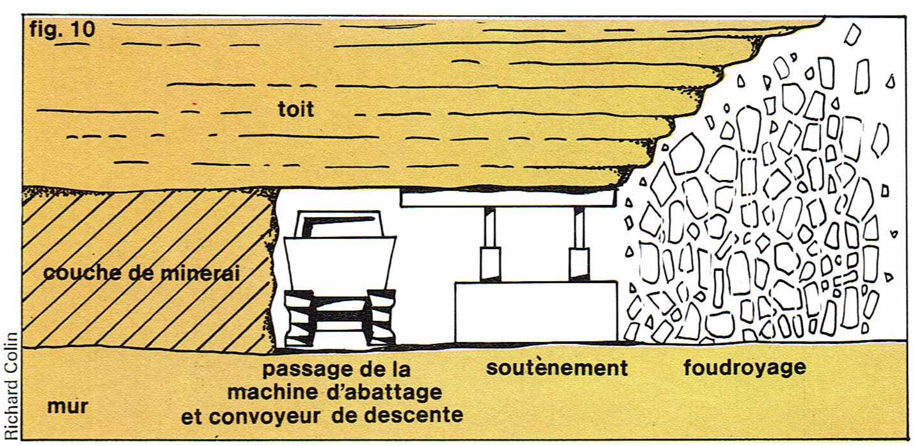

Richard Colin

▶ *Figure 11 : exploitation par traçage et dépilage dans les mines de fer de Lorraine ; a, découpage en panneaux ; b, traçage des chambres ; c, dépilage.*

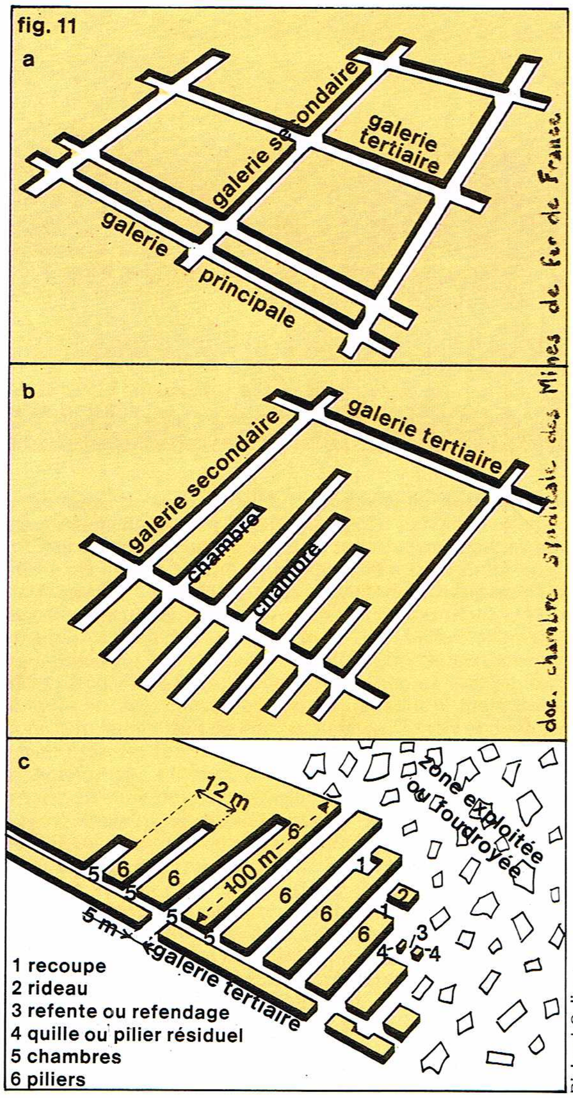

▼ *Figure 12 : exploitation par sous-niveaux foudroyés.*

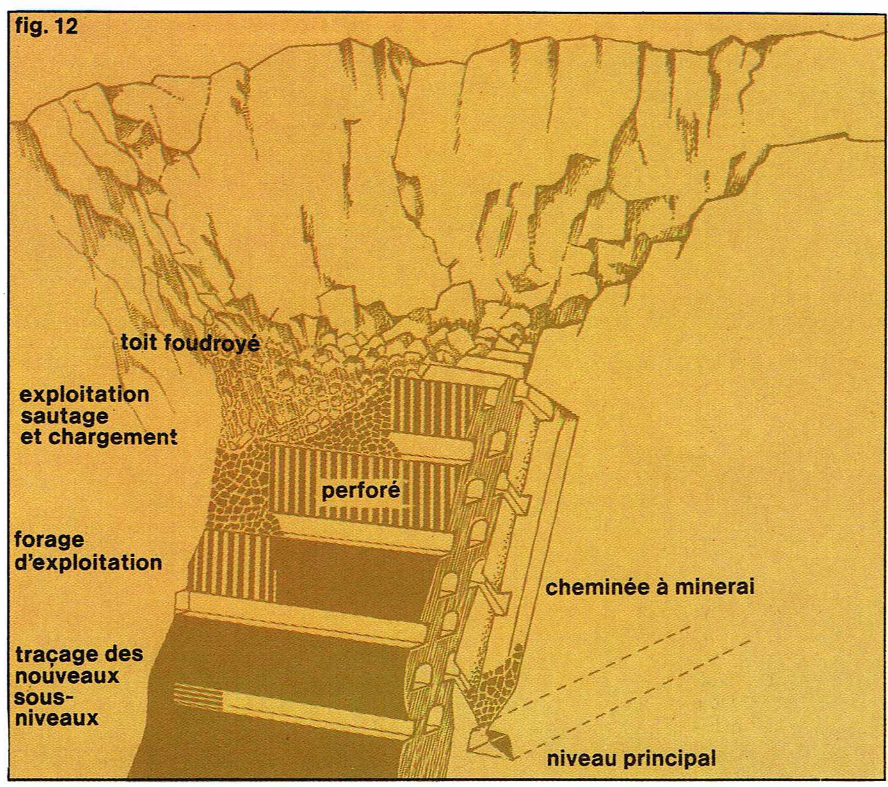

compensée par le débit très élevé du chantier en régime normal : jusqu'à 8 000 tonnes par jour pour un seul équipement.

La longue taille est bien adaptée à des puissances de couche comprises entre 1,5 m et 3,5 m. Au-dessous, les possibilités sont limitées par l'encombrement des machines d'abattage. Au-dessus, le soutènement par étançons voit son efficacité limitée par les risques de flambage et de basculement des piles. Il existe toutefois une adaptation de la méthode pour l'exploitation de couches épaisses de charbon dans les houillères françaises. La taille, de hauteur normale, progresse au mur de la couche. Les piles de soutènement ont été adaptées pour contenir le foudroyage ; un élément mobile côté foudroyage permet de soutirer à la demande le charbon foudroyé sur un deuxième convoyeur. Cet équipement permet de récupérer 70 à 85 % du charbon dans des couches de 10 à 20 m de puissance.

● La *méthode par traçage et dépilage* est utilisée pour l'exploitation de couches de 2 à 8 m de puissance, peu pentées. Elle est particulièrement développée dans le gisement de fer de Lorraine. Le panneau à exploiter est délimité par deux faisceaux de galeries tertiaires, distants d'une centaine de mètres. Perpendiculairement à ces galeries de base, on creuse des chambres de 4 à 8 m de largeur qui laissent entre elles des piliers de 12 à 15 m d'épaisseur. C'est la phase *traçage*, au cours de laquelle on s'efforce de maintenir les fronts alignés sur une droite inclinée à 45° par rapport aux tertiaires (*fig.* 11).

Aussitôt qu'un traçage est terminé, on procède au *dépilage* du pilier voisin, qui comporte 4 opérations : creusement d'une recoupe de 6 à 8 m de largeur, qui laisse un rideau de 4 m le long du foudroyage, refente du rideau, amaigrissement des piliers résiduels, enfin torpillage des piliers, qui provoque le foudroyage d'une nouvelle tranche. Les différents fronts en dépilage sont maintenus strictement alignés pour des raisons de pression des terrains, ce qui contribue à l'appellation « chapeau de gendarme » de la méthode. Pendant toute l'exploitation, la protection du chantier est assurée par des piliers de minerai, avec un soutènement par boulonnage plus ou moins dense dans les chambres et recoupes.

Dans certains cas, chambres et recoupes ne sont pas creusées directement à la puissance totale de la couche, mais à 3 ou 4 mètres seulement. Ce n'est qu'au moment du percement de la refente qu'on abat en même temps la planche au toit, ou qu'on défonce la sole pour récupérer tout le minerai.

L'abattage est généralement effectué à l'explosif par volées successives, mais l'abattage mécanique par mineur continu est également possible.

Le succès de cette méthode repose sur la possibilité d'ouverture de chambres et de recoupes assez larges pour permettre le passage de gros engins : jumbos de foration et de boulonnage, chargeuses et camions. Elle ne doit pas être confondue avec la méthode des piliers abandonnés, même quand ceux-ci s'effondrent après l'exploitation. Le dépilage n'est possible en sécurité que parce que le traçage a été réalisé avec un faible taux de défruitement en conservant des piliers assez rigides pour assurer un foudroyage régulier.

Malgré les difficultés spécifiques des méthodes comportant une fissuration notable du toit (venues d'eau, problèmes de soutènement), la méthode de traçage et dépilage est pratiquement compétitive avec les méthodes par piliers abandonnés, dès lors que les terrains se foudroient régulièrement.

* Les *amas* et *couches puissantes* peuvent être exploités par *tranches horizontales descendantes* foudroyées, ce qui signifie que chaque tranche passe sous le foudroyage de la tranche supérieure. Dans ce cas, on prend généralement la précaution de disposer sur la sole, avant le foudroyage, un plancher qui servira de toit à la tranche suivante. Cependant, une méthode plus commune est le *foudroyage par sous-niveaux* dans laquelle une tranche sur deux est exploitée normalement tandis que les tranches intermédiaires sont récupérées dans le foudroyage (*fig.* 12). Le *foudroyage en masse* se développe considérablement depuis que les chargeurs sont devenus très mobiles et capables de prendre de très gros blocs (1 m^3 ou davantage). Cette méthode consiste à souscaver toute la surface d'un bloc de minerai qui peut avoir plusieurs dizaines de mètres de hauteur pour provoquer

son foudroyage en masse. D'abord appliquée sur des blocs de quelques dizaines de mètres de largeur (« block caving ») [*fig.* 13], la méthode est maintenant élargie à des panneaux entiers (« panel caving »).

La préparation consiste à creuser à la base du bloc une série d'entonnoirs qui canaliseront l'écoulement du minerai foudroyé, et, immédiatement au-dessus de ces entonnoirs, à dépiler une tranche de manière à amorcer le foudroyage. En cas de nécessité, des sous-niveaux sont aménagés pour tirer quelques coups de mine et faciliter le foudroyage. L'inconvénient de la méthode réside dans l'existence de gros blocs qu'il faut réduire avant transport, ou même qui bouchent les entonnoirs. Le pétardage de ces gros blocs est une opération dangereuse et coûteuse : l'accroissement de capacité des chargeuses sur pneus permet, en agrandissant les cheminées, de réduire sensiblement l'importance relative des blocs nécessitant un pétardage.

Cette méthode s'appliquant dans le cas où il n'est pas possible d'exploiter par chambres vides à cause d'une tenue insuffisante du toit, il est évident que les stériles qui surmontent le minerai sont foudroyés en même temps. Une surveillance de la nature des éboulis récupérés est donc nécessaire pour déterminer le moment où arrivent les stériles de recouvrement. Pour assurer une bonne récupération du minerai sans salissage excessif (10 à 30 %), il est nécessaire de programmer le soutirage aux différents points, ce qui permet une descente régulière de la limite entre minerai et stérile. Cette méthode, comme les méthodes par chambre vide, permet d'excellents rendements dès lors que le minerai se foudroie bien. C'est sur ce point que portent les recherches actuelles pour la développer.

Dans toutes les méthodes par foudroyage, les terrains de surface s'affaissent d'une hauteur à peu près égale à celle du minerai extrait. Ce fait limite le domaine d'utilisation du foudroyage aux zones désertes ou peu peuplées. Un contrôle des affaissements est toujours nécessaire et, en prenant quelques précautions, il est possible de foudroyer même sous des habitations. Le gros avantage de cette technique est qu'après deux ou trois ans les terrains foudroyés sont parfaitement stables et de nouveau aptes à l'urbanisation, ce qui ne peut être le cas pour les exploitations par piliers abandonnés.

Les méthodes avec remblayage (« cut and fill »)

Lorsque la qualité des roches qui constituent le gisement n'est pas suffisante pour réaliser des chambres vides et lorsque leur structure ne garantit pas un foudroyage régulier, on est amené à supporter des parois de chambres pendant l'exploitation avec un remblayage systématique. Cette méthode est également utilisée dans certains cas où le foudroyage serait techniquement possible mais où l'on souhaite limiter la fissuration des bancs sus-jacents (en présence d'une nappe aquifère par exemple) et/ou les affaissements de surface (en zone urbaine notamment).

Le gisement filonien vertical ou très penté est le domaine d'application typique de la méthode des *tranches montantes remblayées*. Les couches en dressant d'épaisseur inférieure à 10 mètres sont aussi exploitées de cette manière. Dans cette méthode, on a découpé dans le gisement des panneaux de 100 à 300 m d'extension latérale, par creusement de montages. Le filon est attaqué à une dizaine de mètres au-dessus de la voie de niveau inférieure, par enlèvement d'une tranche horizontale. Lorsqu'une tranche horizontale de minerai est enlevée, on remplit le volume vide ainsi créé avec un remblai, et on commence l'exploitation d'une nouvelle tranche au-dessus de ce remblai. Le minerai est évacué vers le bas soit par les montages latéraux, soit par un montage central creusé au fur et à mesure de l'avancement de l'exploitation et noyé dans le remblai (*fig.* 14).

Par tranches successives, l'exploitation progresse vers le niveau supérieur. De même qu'à la base du panneau on a abandonné un *stot* pour protéger la voie de base, de même au sommet du panneau on laisse souvent un stot de quelques mètres pour protéger la voie de tête qui est utilisée pour l'accès du personnel, l'approvisionnement en matériel et en remblais, et la circulation de l'air.

Cette méthode, extrêmement courante en mine métallique (30 % des mines canadiennes souterraines l'utilisent sous le nom de « cut and fill »), comporte quelques

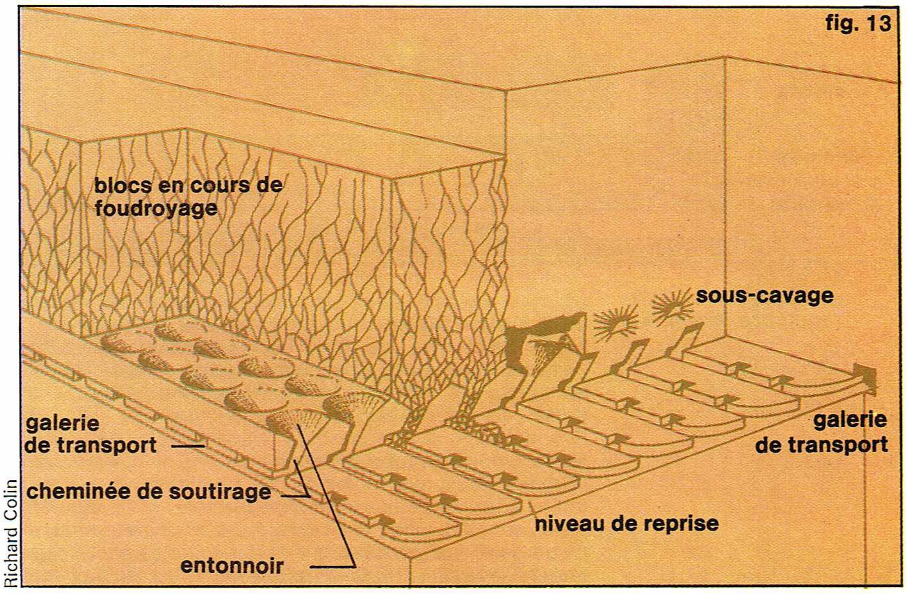

▲ ***Figure 13 : exploitation par blocs foudroyés.***

variantes intéressantes. Lorsque la puissance du filon (ou de la couche) exploité autorise l'emploi d'engins de grande capacité, on est parfois amené à *consolider le remblai* devant servir de chemin de roulement au moins en surface en lui ajoutant une certaine proportion de ciment ou de tout autre liant hydraulique (cendres volantes des centrales thermiques). Dans quelques cas, on fait circuler les engins sur des flotteurs lorsque le remblai a été mis en place hydrauliquement et se comporte comme un fluide très visqueux.

Dans les amas qui ne peuvent être exploités par les méthodes de chambre vide ou avec foudroyage, on utilise cette technique en juxtaposant sur le même niveau plusieurs tranches exploitées et remblayées successivement avant de passer au niveau supérieur. La mise en place des remblais peut alors exiger la pose de barrages provisoires. Une méthode de chambres et piliers abandonnés peut également être utilisée pour l'exploitation de chaque niveau. Les piliers sont ensuite noyés dans le remblai ; dans les amas de grande extension verticale (100 m et davantage), les piliers acquièrent aussi une très grande hauteur, d'où le nom de piliers colonnes (« post pillars ») donné à cette méthode utilisée dans quelques mines australiennes et américaines.

Un autre type de variante réside dans l'inversion du sens de progression de l'exploitation : après remblayage d'une tranche, on exploite la tranche située immédiatement *au-dessous*. Cette méthode des *tranches descendantes remblayées* (« under cut and fill ») est utilisée lorsque le minerai n'est pas assez consistant pour constituer un toit sûr pendant la durée de l'exploitation d'une tranche : on construit alors un toit artificiel plus facilement contrôlable ; ce toit peut être le remblai de la tranche précédente : il faut alors le soutenir avec un plafond de palplanches et un soutènement porteur ; on évite cette difficulté en rendant le remblai autoporteur par consolidation au ciment. Pour réduire le coût de cet additif, on en arrive à la *méthode descendante sous dalle* pratiquée en particulier dans les mines d'uranium du Limousin : au lieu de remblayer toute la tranche, on se contente de couler une dalle de béton de 0,40 à 1 m d'épaisseur pour servir de toit à la tranche inférieure.

On peut également utiliser le remblai dans l'exploitation par longue taille lorsqu'on souhaite éviter une trop grande fissuration des bancs au toit et limiter les affaissements en surface.

La méthode des *chambres charpentées*, dans laquelle un soutènement systématique en bois équarris et soigneusement assemblés est mis en place au fur et à mesure de l'exploitation, se rapproche des méthodes remblayées à la fois par la densité du soutènement et par le coût de mise en œuvre. Cette méthode est réservée aux cas très difficiles où la roche n'a qu'une très médiocre résistance et pour des minerais de très grande valeur (nickel au Canada). La chambre charpentée est en règle

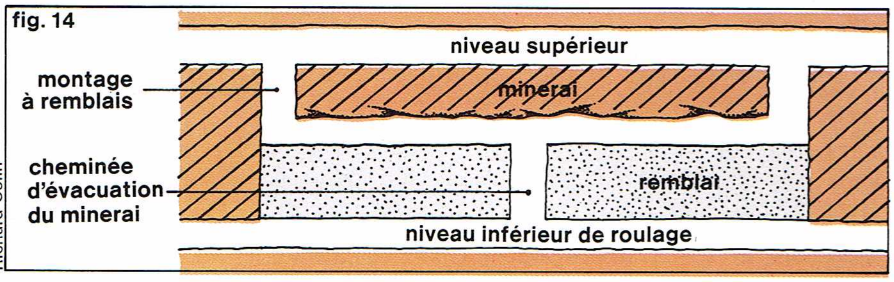

▲ *Figure 14 : tranche montante remblayée.*

générale remblayée le plus rapidement possible pendant ou après l'exploitation.

Les méthodes avec remblayage sont toujours plus chères que les autres, la préparation, le transport et la mise en place du remblai constituant presque l'équivalent d'une deuxième exploitation.

La récupération des piliers

Lorsque la première phase de l'exploitation a abandonné des piliers en proportion notable, et lorsque les piliers sont riches, on envisage généralement leur récupération dans une deuxième phase. La méthode par traçage et dépilage prévoit cette récupération (c'est le dépilage) et organise la phase traçage en conséquence (disposition des piliers la plus favorable et faible taux de traçage). Lorsque cette récupération n'a pas été envisagée dès la première phase de l'exploitation, il faut le plus souvent mettre au point une méthode spécifique qui se rapproche plus ou moins des méthodes avec foudroyage ou avec remblayage.

Dans l'exploitation de minerai de fer de Meramec à Sullivan (Missouri), l'exploitation par chambres vides avait laissé des piliers massifs de 30 m × 30 m qui représentaient les 2/3 du minerai. Le niveau d'exploitation supérieur étant terminé, la récupération des piliers se fait par abattage de ces piliers en un seul tir, sur le niveau inférieur, et la récupération du minerai se fait par soutirage à la base. On espère ainsi récupérer la plus grande partie du minerai.

Dans d'autres cas, les chambres exploitées ont été remblayées (ou on les remblaie spécialement pour cela en ajoutant du ciment pour consolider le remblai), et on réexploite les piliers par une méthode de chambre vide dont les parois sont constituées par le remblai des chambres précédentes. Si ce remblai n'est pas suffisamment consolidé pour permettre la chambre vide (c'est le cas le plus fréquent), on peut exploiter par tranche montante remblayée ou, mieux, par tranche descendante sous remblai consolidé, ou encore par chambre charpentée.

La récupération des piliers exige donc le plus souvent une méthode chère et difficile à mettre en œuvre, contrepartie de l'intérêt économique des méthodes à piliers abandonnés.

Coût des méthodes d'exploitation

Lorsque le mineur peut choisir techniquement entre différentes méthodes d'exploitation, il lui importe évidemment de sélectionner celle qui permet le moindre coût. Le *tableau* VII résume les principales caractéristiques des méthodes décrites, y compris l'ordre de grandeur des coûts d'extraction auxquels on peut s'attendre. On retiendra que ce coût double quand on passe d'une catégorie de méthodes à la suivante, dans l'ordre : ciel ouvert — chambres vides — chambres magasins — foudroyages — remblayages — chambres charpentées.

Les techniques de l'exploitation souterraine

Les techniques mises en œuvre dans l'exploitation souterraine pour accéder au gisement, abattre le minerai, le charger et le transporter jusqu'à l'usine de traitement ne sont pas véritablement spécifiques. Ces mêmes problèmes se retrouvent dans les mines à ciel ouvert, mais aussi sur les chantiers de travaux publics, la différence essentielle résidant dans les conditions de mise en œuvre qui imposent des machines de dimensions plus modestes en souterrain et certains aménagements de détail.

La seule technique réellement caractéristique du souterrain est le soutènement des ouvrages et le contrôle du toit des chambres et galeries qui exigent la connaissance des mécanismes de déformation de la roche : la mécanique des roches s'est développée récemment pour étudier le comportement des édifices rocheux soumis à divers types de contraintes.

La mécanique des roches

La mécanique des roches n'est pas une technique minière mais « l'art de concevoir et de réaliser des ouvrages dans les masses rocheuses », c'est-à-dire la base scientifique des méthodes d'exploitation.

A la différence des autres constructeurs, le mécanicien des roches n'a pas le choix de son matériau : celui-ci lui est imposé par la nature et les lois qui gouvernent son comportement sont encore mal connues. De ce fait, les études sont orientées sur l'analyse du comportement du

▼ *Tableau VII : caractéristiques des méthodes d'exploitation minière et ordre de grandeur des coûts d'extraction.*

Tableau VII

Caractéristiques des méthodes d'exploitation minière et ordre de grandeur des coûts d'extraction

Méthodes	Conditions d'utilisation	Taux de récupération du gisement	Sélectivité	Fourchette de coûts par tonne
Ciel ouvert	profondeur, valeur minerai	100	possible	de matériau* 2 à 5
Carrières souterraines	roche saine	60	peu	de minerai : 5 à 20
Piliers abandonnés	couche, toit et mur résistants	60	oui	10 à 30
Chambres magasins	épontes peu déformables	80	non	20 à 60
Longue taille foudroyée	régularité de couche	80	non	40 à 100
Traçage et dépilage	aptitude au foudroyage du toit	80	non	20 à 100
Foudroyage en masse	roche fissurée en masse	90	salissage	30 à 100
Tranches montantes remblayées	filons et couches verticaux	90	oui	50 à 150
Tranches descendantes sous remblai consolidé	épontes résistantes, minerai de mauvaise tenue	90	oui	70 à 200
Chambres charpentées	roche de très mauvaise tenue	100	peu	150 à 250

* En francs 1977 par tonne ; prix de revient amortissements techniques compris minerai extrait au carreau.

massif rocheux, la mise au point de modèles qui permettent de prévoir la stabilité des édifices, la définition et la mesure de caractéristiques de déformation des roches, soit au laboratoire, soit *in situ*.

Le comportement des massifs rocheux

Pratiquement, aucune roche n'est exempte de *défauts de structure* importants : depuis les diaclases et joints de grains qui sont des hétérogénéités au niveau des minéraux élémentaires, jusqu'aux failles qui peuvent avoir des rejets de plusieurs mètres ou dizaines de mètres, en passant par les fissures et fractures dont l'épaisseur est comprise entre le dixième de millimètre et dix centimètres, toute cette gamme de discontinuités interdit de considérer la roche comme un matériau continu *stricto sensu*. Par ailleurs, beaucoup de roches sont litées, c'est-à-dire composées d'un empilement de strates plus ou moins différenciées et régulières dues soit à l'origine sédimentaire du dépôt, soit à des manifestations tectoniques ou orogéniques. Il en résulte une *anisotropie* marquée de toutes les caractéristiques qu'on peut définir : une roche est plus *déformable* lorsqu'elle est sollicitée perpendiculairement à son plan de litage que dans toute autre direction.

La dimension des hétérogénéités et leurs orientations ont des conséquences très importantes sur le comportement des roches; en particulier, leur résistance est soumise à un *effet d'échelle :* plus le volume considéré est important, plus il a de chances de comporter des discontinuités de grande dimension, et plus sa résistance est faible. Les caractéristiques mesurées sur des échantillons de quelques décimètres au laboratoire ne sont donc pas directement utilisables pour qualifier les comportements à l'échelle des édifices réels.

En fait, dans beaucoup de cas (gradins de ciel ouvert, chambres en exploitation), la stabilité s'apparente davantage à celle d'un *amoncellement de blocs* plus ou moins imbriqués qu'à celle d'un milieu continu : la déformabilité dépend alors surtout des possibilités de glissement des blocs les uns par rapport aux autres.

La *présence d'eau* dans les roches vient encore perturber leur comportement à court et à long terme : la présence d'eau dans la matrice rocheuse diminue la résistance globale du massif en lubrifiant les joints et fissures, et éventuellement en élargissant les fissures sous l'effet de la pression. Certaines roches, tels le sel, le gypse, les calcaires, sont pratiquement détruites par solubilisation; d'autres sont altérées de manière temporaire (les marnes humidifiées deviennent de la boue qui peut être de nouveau solidifiée si l'eau disparaît) ou définitive (altération des feldspaths en argile, formation de latérites). Enfin, la circulation de l'eau induit des contraintes qui s'ajoutent aux contraintes naturelles dues à la gravité. Ces dernières ne sont d'ailleurs généralement pas celles qu'on pourrait prévoir en appliquant les lois de la mécanique des milieux continus (élasticité), surtout à grande profondeur. Avant tout creusement dans la roche, si le massif rocheux n'était soumis à aucune perturbation orogénique, les contraintes en un point quelconque devraient être : une compression verticale égale au poids des terrains sus-jacents; une compression transversale égale à une certaine proportion (voisine de 1/3, en tout cas inférieure à 1) de la contrainte verticale. Or on observe souvent que la compression verticale est différente du poids des terrains (en particulier lorsque la topographie de surface est tourmentée) et que la compression transversale en est une proportion très variable (de 0 à 2 ou 3).

L'alternance de bancs rocheux ayant des déformabilités différentes crée en outre, au contact entre ces bancs, des contraintes spécifiques qui contribuent à l'affaiblissement du massif dans son ensemble.

Le comportement des massifs rocheux est donc extrêmement complexe et nécessiterait l'établissement de lois spécifiques. A défaut de ces lois, on s'efforce d'utiliser les outils existants, essentiellement la mécanique des milieux continus (élasticité et plasticité) et l'expérience accumulée par les hommes de l'art.

Les modèles de comportement des roches

Pour prévoir le comportement d'un édifice rocheux quelconque, on peut établir soit des modèles physiques, soit des modèles mathématiques.

Le problème général à résoudre est le suivant : des forces extérieures sont appliquées sur une structure; il en résulte des déformations et des contraintes dans cette structure; en comparant ces contraintes à un critère de stabilité préalablement défini, on peut déterminer si, oui ou non, la structure est stable. Ce problème peut être entièrement résolu si l'on connaît parfaitement : le système des forces extérieures; les modalités de réponse des différentes parties de la structure à ces perturbations; un critère de stabilité (ou, à la limite, de rupture) de ce type de structure. Établir un modèle consiste à choisir un mode de représentation particulier pour chacun de ces trois éléments. Ce modèle sera d'autant meilleur que la représentation sera plus proche de la réalité.

Les *modèles physiques* sont des maquettes à échelle réduite sur lesquelles on simule les perturbations que l'on pense devoir s'appliquer sur l'édifice réel. Le respect des conditions de similitude peut poser des problèmes difficiles, en particulier dans la représentation des forces de gravité : si on utilise le matériau réel, la pesanteur doit être artificiellement accrue dans la proportion inverse du rapport de réduction de la maquette; cette difficulté conduit le plus souvent à utiliser un matériau différent du matériau réel pour conserver la gravité naturelle. Quoi qu'il en soit, les maquettes présentent le grand intérêt de visualiser les phénomènes, ce qui est particulièrement précieux pour la connaissance des mécanismes de rupture des roches.

Les *modèles mathématiques* sont fondés sur les lois admises de la mécanique des milieux continus. On écrit les différentes équations qui sont censées reproduire le comportement du matériau (équations de Lamé-Clapeyron), et on s'efforce de les résoudre soit analytiquement, soit le plus souvent par des méthodes numériques. Les systèmes d'équations différentielles auxquelles on aboutit nécessitent, pour être résolus, la connaissance des conditions aux limites du modèle et, bien entendu, la connaissance des caractéristiques de déformabilité : E, coefficient de Poisson ν, résistances à la compression et à la traction ou, mieux, courbe intrinsèque du matériau. Dans quelques cas simples, une solution analytique est possible, mais le plus souvent ce n'est que par des méthodes numériques qu'on peut obtenir une solution approchée.

Les méthodes numériques ont pris une importance considérable avec le développement des ordinateurs de calcul. Certaines se limitent à la résolution du système d'équations différentielles par une technique de « différences finies » (les éléments différentiels, au lieu d'être considérés comme infiniment petits, sont rendus finis, et le problème se ramène à la solution d'un système d'équations linéaires). Les méthodes les plus répandues modifient le modèle initial de la structure en le discrétisant : la structure continue (ou pseudo-continue) est fictivement découpée en un nombre fini d'éléments raccordés entre eux en un nombre N de nœuds. Les forces agissant sur la structure sont réduites à N forces nodales, et la déformation de l'ensemble induit N déplacements nodaux. On peut démontrer dans le cas de l'élasticité qu'il existe une relation linéaire entre force et déplacement, le coefficient de proportionnalité étant la « raideur » de la structure qui est une fonction connue des caractéristiques du matériau.

Le système d'équations différentielles habituel est alors remplacé par un système linéaire de 3 N équations à 3 N inconnues (N peut être de l'ordre de 300). La résolution de ce système donne les déplacements des nœuds, à partir desquels on peut remonter aux déformations et aux contraintes. Le champ de contraintes étant défini, la confrontation avec la courbe intrinsèque du matériau permet de juger de la stabilité.

Les lois de comportement plus complexes que l'élasticité (plasticité, visco-élasticité) peuvent être introduites de la même manière, ainsi que les lois de propagation d'ondes : cependant, la solution des équations correspondantes exige un grand nombre d'itérations, ce qui soulève d'importantes difficultés de précision, de convergence des solutions et de temps de calcul.

Les limites de ces modèles sont apparentes : les modèles physiques ont l'avantage d'une certaine cohérence, puisque le matériau choisi réagit réellement aux sollicitations extérieures, et on peut observer ses limites réelles de stabilité; mais la difficulté réside dans le choix

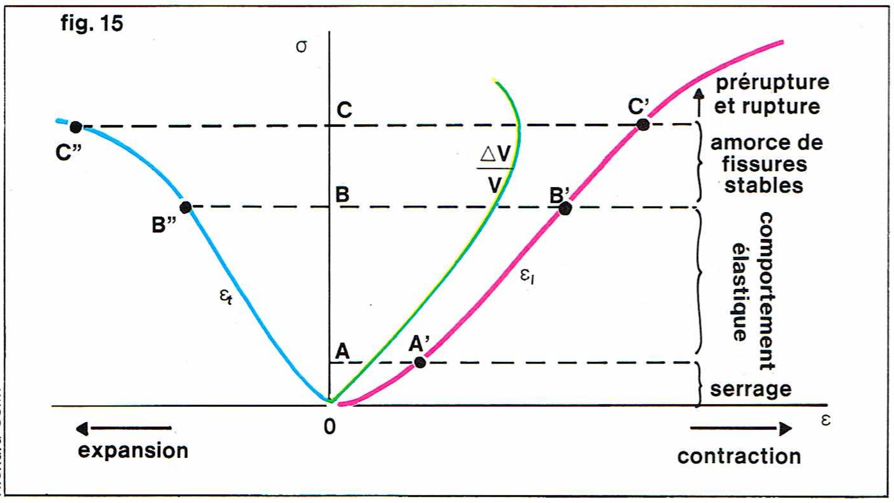

Richard Colin

▲ *Figure 15 : courbes de déformation d'une éprouvette de roche sous compression simple : déformation longitudinale ε_l, déformation transversale ε_t, déformation en volume $\Delta V/V$.*

▼ *Figure 16 : mesure de résistance en traction par l' « essai brésilien ».*

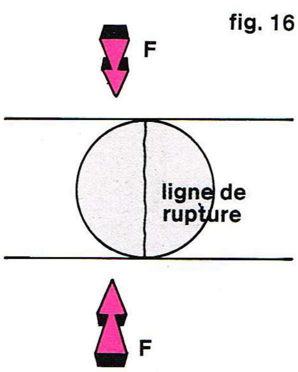

Richard Colin

▼ *Figure 17 : modes de travail du pic* (a) *et de la molette* (b).

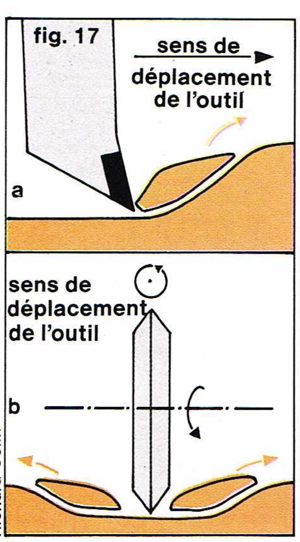

Richard Colin

du matériau « équivalent » et des forces extérieures « équivalentes » aux forces réelles. On en tire cependant des indications qualitatives intéressantes. Les modèles mathématiques sont limités par la faible aptitude des formules mathématiques à représenter des phénomènes complexes : ni les réactions internes de la structure, ni les critères de stabilité réels ne peuvent être simplement formalisés. Ces modèles sont toutefois très précieux, car ils permettent de déterminer les parties de la structure dans lesquelles le champ de contraintes peut devenir défavorable.

Les caractéristiques de déformabilité des roches

Les principales « caractéristiques » auxquelles on s'intéresse sont celles qui définissent le comportement élastique (réaction de la structure rocheuse à des perturbations extérieures) et celles qui définissent la limite de stabilité (critère de rupture).

Le *module de déformabilité* est obtenu à partir d'un essai de compression simple sur une éprouvette de roche représentative du massif rocheux étudié. L'éprouvette est en général un cylindre de 5 à 10 cm de diamètre et de hauteur double de ce diamètre que l'on comprime progressivement entre les plateaux d'une presse. Le report sur un graphique des valeurs de la contrainte et des valeurs correspondantes de la déformation longitudinale de l'éprouvette donne la courbe effort-déformation. La pente de la partie linéaire est le module cherché E. On note à cette occasion que la roche n'a pas un comportement élastique (la courbe serait une droite passant à l'origine). Il y a presque toujours une période de serrage au début de la compression (OA) correspondant à la fermeture des fissures et microfissures. Ensuite, dans un certain domaine (AB), la courbe est à peu près linéaire, puis, au-delà, elle s'incurve de nouveau, jusqu'à la rupture (BC). En même temps, on peut mesurer les déformations transversales et constater de la même manière une zone linéaire qui se termine au point D. Le rapport des pentes de AB et OD définit le *coefficient de Poisson* ν (*fig.* 15).

Cette même courbe permet de définir la *résistance en compression instantanée* R_c, qui est la contrainte provoquant la rupture immédiate, et la *limite élastique*, qui est soit R_L correspondant à l'élasticité longitudinale, soit R_T correspondant à l'élasticité transversale.

La justification du choix de ces limites élastiques réside dans l'observation du comportement différé des roches soumises à une compression pendant un temps assez long. Si cette compression permanente est inférieure à R_T, la déformation croît quelque temps, puis se stabilise. Si la compression est supérieure à R_T mais inférieure à R_L, la déformation se poursuit indéfiniment jusqu'à la rupture qui intervient dans un délai fini, mais difficile à préciser. Enfin, si la compression est supérieure à R_L, la rupture de l'éprouvette par écrasement est imminente.

Dans le cas des exploitations par piliers abandonnés, où l'on cherche à garantir une stabilité à long terme, il ne faut pas charger la roche au-delà de R_T. Et, de plus, pour tenir compte de la dispersion du phénomène (une deuxième éprouvette prélevée dans le même bloc de roche donne des résultats différents), on est amené à prendre pour résistance ultime non pas R_T mais une valeur inférieure qui dépend de l'importance de la dispersion. En pratique, l'expérience montre que les taux de défruitement peuvent être déterminés à peu près correctement en prenant pour résistance ultime $R_T - \sigma_{R_T}$ (σ_{R_T} étant l'écart-type de la distribution de R_T).

Si l'on se contente encore parfois de la méthode de calcul simplifiée indiquée au chapitre des *Méthodes d'exploitation,* on adopte le plus souvent une méthode plus élaborée : on construit sur le papier un modèle représentant l'exploitation par piliers abandonnés d'une certaine dimension par un assemblage d'éléments finis. Le calcul permet de prévoir — avec les hypothèses retenues pour le comportement de la roche, élasticité par exemple — la valeur des contraintes et déformations en tout point des piliers, du toit et du mur. En choisissant un critère de stabilité judicieux, on peut déterminer si la dimension choisie permet de garantir la stabilité. Dans la négative, on modifie les dimensions des piliers et chambres, et on refait le maillage d'éléments finis jusqu'à obtenir une structure stable.

Dans le cas des exploitations par traçage et dépilage, où la durée de vie des rideaux et piliers résiduels est limitée, on se place dans le cas où la contrainte est comprise entre R_T et R_L : si l'on ne torpillait pas les piliers résiduels, ils finiraient par être écrasés.

L'examen de ces courbes de déformation différée permet aussi de fonder certaines méthodes de contrôle de la stabilité. Dans une exploitation par piliers abandonnés où l'on craint un écrasement des piliers, on peut mesurer les déformations des piliers, avec une grande précision. Ces piliers ne pourront être considérés comme stables que si la courbe qui traduit l'évolution de leur hauteur ressemble à la courbe de stabilité du graphique.

La détermination d'une courbe intrinsèque pour une roche donnée s'effectue de façon classique en soumettant des éprouvettes de roches à un champ de contraintes triaxial dans des cellules spéciales. Les cercles de Mohr limites correspondant à la rupture sous étreinte latérale permettent la construction point par point de cette courbe intrinsèque. Là encore, on est gêné par l'hétérogénéité des massifs rocheux et la dispersion consécutive des résultats de mesure. De nouvelles méthodes sont en cours de développement pour déterminer toute la courbe intrinsèque sur une seule éprouvette, ce qui devrait donner des résultats plus cohérents.

La *résistance à la traction* des roches est toujours faible (environ 10 fois inférieure à la résistance à la compression instantanée). Ce « défaut », qui limite la stabilité des excavations, est par contre utilisé de façon systématique pour l'abattage et la comminution des roches. La résistance à la traction est mesurée le plus souvent par l'*essai brésilien,* qui consiste à écraser un cylindre de roche en le soumettant à une compression le long d'une génératrice, ce qui crée une traction indirecte sur le plan diamétral. Le cylindre se brise selon ce plan, et on montre que la résistance en traction R_t *dans ce plan diamétral* est liée à la force F qui provoque la rupture par (*fig.* 16) :

$$R_t = \frac{2}{\pi} \frac{F}{Dh}$$

avec : D = diamètre de l'éprouvette ; h = longueur de l'éprouvette.

Cette mesure donne une valeur par excès de la résistance en traction parce qu'une roche soumise à une traction directe se brise toujours dans la section la plus faible, alors que, dans l'essai brésilien, on l'oblige à se briser suivant un plan donné.

Toutes ces caractéristiques sont mesurées en laboratoire, donc sur des éprouvettes de dimension réduite qui constituent un échantillon plus ou moins représentatif du massif rocheux. Certaines mesures peuvent aussi être effectuées *in situ* soit ponctuellement, soit à grande échelle. Ainsi, l'*essai à la plaque,* qui consiste à appliquer avec une force connue une plaque rigide sur une zone plane du massif rocheux, et à mesurer l'enfoncement de cette plaque, permet d'estimer le module de déformabilité E. D'autres techniques permettent d'accéder aux contraintes à l'intérieur du massif rocheux en mesurant les déformations, par exemple au fond d'un trou circulaire.

Le rôle de la mécanique des roches dans la mine

Parfois confondue avec la géologie dans la mesure où cette discipline apporte des informations sur la structure des terrains, la mécanique des roches s'en distingue toutefois par la possibilité qu'elle a de répéter les expériences. C'est aussi une science plus jeune, puisqu'elle n'a pris de l'importance en tant que telle que depuis deux décennies. Beaucoup reste à faire pour arriver à décrire le comportement des roches, mais, dans l'état actuel, on peut estimer que la mécanique des roches est indispensable pour résoudre certains problèmes tels que :

— la stabilité des gradins de ciel ouvert (choix de l'inclinaison et de la hauteur) ;

— la stabilité des exploitations par piliers abandonnés et plus généralement par chambres vides;

— le calcul de certains soutènements;

— l'étude de stabilité des chambres remblayées avec différents types de remblais;

— l'étude de stabilité de certaines structures particulières, tels les carrefours de galeries ou les stots de protection.

L'abattage des roches

L'abattage des roches, c'est-à-dire la déconsolidation des massifs rocheux pour en extraire des blocs de dimensions compatibles avec les engins de chargement, de transport et de traitement, est le plus souvent effectué soit directement par des machines, soit en utilisant des explosifs. Dans ce dernier cas, il est nécessaire de forer des trous au préalable pour y introduire les charges d'explosif suivant un schéma déterminé.

L'abattage mécanique

Le pic du mineur est l'ancêtre de tous les moyens d'abattage mécanique qui sont constitués de machines rotatives garnies d'outils qui tour à tour entrent en contact avec la roche pour la briser.

Deux types d'outils sont couramment utilisés : le pic et la molette (*fig.* 17). Le *pic* se déplace sur la roche à une vitesse de quelques mètres par seconde en creusant une saignée devant lui. Il périt par choc ou par usure lorsque la roche devient trop dure, ou hétérogène ou abrasive. La *molette* est un disque qui roule librement sur la roche à laquelle il est appliqué par une forte pression : la roche éclate de part et d'autre de la saignée ainsi creusée. Le passage répété de ces outils sur la roche en suivant des trajectoires bien définies en provoque la destruction progressive.

* *Les outils.* Trois types de pics sont couramment utilisés (*fig.* 18) :

— Le *pic à plaquette,* de section rectangulaire, pour les roches tendres. La plaquette de carbure de tungstène protège le corps de l'outil, qui s'userait très vite dans les roches abrasives.

— Le *pic à bâtonnet,* de section rectangulaire, dans les roches comportant des insertions dures, ou dans des roches tenaces.

— Le *pic conique,* de section circulaire, qui concentre les efforts sur la pointe de l'outil. Il est adapté aux roches dures, mais fragiles. Il ne peut pourtant être utilisé dans les roches tenaces, où il s'échauffe beaucoup trop. Il est libre de tourner autour de son axe. L'usure est donc théoriquement la même en tout point du cône et conserve à l'outil sa forme initiale. On le rencontre de ce fait sous la dénomination de « pic auto-affûtant ».

Tous ces pics se définissent par l'angle d'attaque (α) toujours faible, l'angle de dégagement ou de dépouille (γ) supérieur à 7° et l'angle d'outil ($2\,\theta$) qui est le complément des deux précédents (*fig.* 19).

De même, trois types de molettes sont utilisés :

— La *molette à disque* (Disc Cutter), la plus courante, qui se compose d'un ou plusieurs anneaux de carbure sertis sur un roulement. Elle se définit par son diamètre (compris entre 150 et 300 mm) et son angle de coupe (compris entre 60° et 105°).

— La *molette à denture axiale* (Roller Cutter), qui se présente sous la forme d'un engrenage tronconique monté sur roulement. Le processus d'abattage est moins continu, le départ d'éclats correspondant à la pénétration de chaque dent dans la roche. Elle est utilisée principalement pour les sondages pétroliers à grande profondeur. On la rencontre parfois près de l'axe de rotation des tunneliers, là où le rayon de courbure est trop faible pour permettre l'utilisation de molettes à disque.

— La *molette à picots* (Button Cutter), qui est un cylindre (ou un tronc de cône) serti de petites billes de carbure de tungstène; il s'agit essentiellement d'un outil de broyage, utilisé là où les autres types de molettes échouent. On la rencontre uniquement au centre des tunneliers.

Les machines à pics sont très souvent utilisées dans la mine, tandis que les machines à molettes sont cantonnées dans le creusement des galeries d'infrastructure et surtout de tunnels pour les travaux publics.

* *Les machines d'abattage.* Elles sont utilisées dans la mine pour le creusement de galeries (ou de montages) et pour l'abattage en taille essentiellement du charbon et de la potasse. Dans ce cas, il s'agit de rabots ou de haveuses.

— Le *rabot* est un socle équipé de gros pics qui agit comme le rabot du menuisier. Il est halé par une chaîne et glisse sur le convoyeur à une vitesse comprise entre 0,5 et 3 m/s. Parallèlement, des vérins pousseurs le plaquent contre le front par l'intermédiaire du convoyeur. A chaque passe, il abat une épaisseur de 3 à 10 cm sur toute la longueur du front. Le rabot ne comporte aucun élément moteur. Il est entièrement solidaire de la chaîne qui est elle-même tractée par deux moteurs installés aux extrémités de taille. Le rabot est limité dans son domaine d'emploi aux roches fissurées, peu cohérentes. En pratique, il est utilisé presque exclusivement dans le charbon. En outre, les risques de basculement limitent sa hauteur à 1,10 m environ.

— La *haveuse* est un ensemble comportant un ou deux tambours de 1,5 m à 2 m de diamètre équipés de pics tournant à une vitesse de 20 à 50 tr/mn. Elle glisse ou roule sur le convoyeur à une vitesse de 1 à 3 m/mn en se halant soit sur une chaîne tendue entre les extrémités de taille, soit sur une poutre solidaire du convoyeur (système des mains pinçantes). Dans chacun de ces cas, l'élément moteur des tambours et de la traction est incorporé à la haveuse. La puissance installée atteint 600 à 800 kW. A chaque passe, la haveuse abat une épaisseur voisine de la largeur du tambour (600 à 800 mm en pratique). Son encombrement la fait utiliser dans des couches de puissance supérieure à 1,60 m et jusqu'à 5 mètres. La haveuse peut abattre toute roche ni trop hétérogène, ni trop abrasive. Elle est limitée par la tension maximale que peut supporter la chaîne de halage.

Pour le creusement des galeries, on trouve deux types de machines : les mineurs continus à attaque ponctuelle et les tunneliers, à attaque globale, plutôt réservés aux chantiers de travaux publics, mais adaptables à certains chantiers miniers.

— Dans les *mineurs continus,* l'abattage est réalisé par un tambour équipé de pics, fixé au bout d'un bras mobile. L'ensemble est porté par un châssis monté sur chenilles, et mû par une série de moteurs électriques. L'axe de la tête mobile de coupe peut être directement dans l'axe du bras ou perpendiculaire à cet axe. Dans le second cas, les efforts de coupe sont en partie encaissés par le poids de la machine, ce qui en accroît la stabilité. Les puissances disponibles sur la tête sont couramment de 100 kW, elles varient cependant entre 30 kW pour les plus petites et 350 kW pour les plus grosses. Le poids des mineurs continus se situe entre 5 et 70 tonnes. La puissance de coupe des machines à attaque ponctuelle est limitée par leur stabilité. Elles abattent difficilement une roche dure, s'inclinent toujours devant une roche hétérogène.

— Les *tunneliers* comportent un plateau circulaire garni de molettes qui a les dimensions de la galerie à creuser. De ce fait, ils sont surtout adaptés au creusement de longues galeries à peu près rectilignes ne nécessitant pas de changement de section. Dans la mine, ce peut être le cas de certaines galeries principales, en particulier les travers bancs, mais c'est surtout le cas des puits verticaux ou des montages entre étages.

Sur les tunneliers utilisés pour le *creusement de travers bancs,* la tête d'abattage est constituée d'un plateau tournant à une vitesse de 0 à 6 tr/mn, équipé de molettes. L'effort de poussée est beaucoup plus important que pour les machines à pics (environ 700 t contre 30 à 50 t) ; il est obtenu en ancrant la machine sur les parois de la galerie à l'aide de patins. La combinaison de patins d'ancrage, de patins d'appui, et de vérins à double effet,

fig. 18

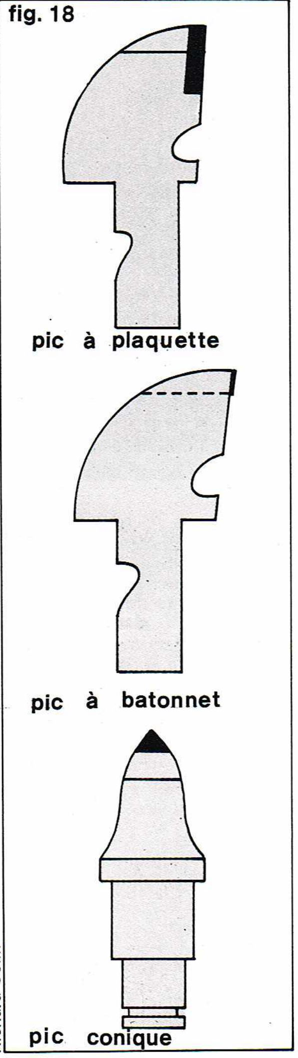

▲ ***Figure 18 : différents types de pics.***

▼ ***Figure 19 : caractéristiques du travail d'un pic : un pic se définit par l'angle d'attaque α, l'angle de dégagement γ et l'angle d'outil $2\,\theta$, complément des deux précédents.***

fig. 19

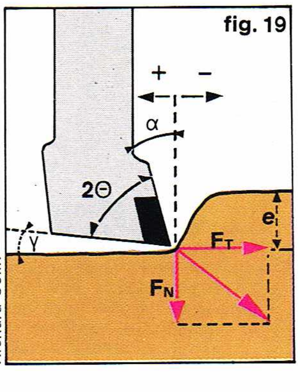

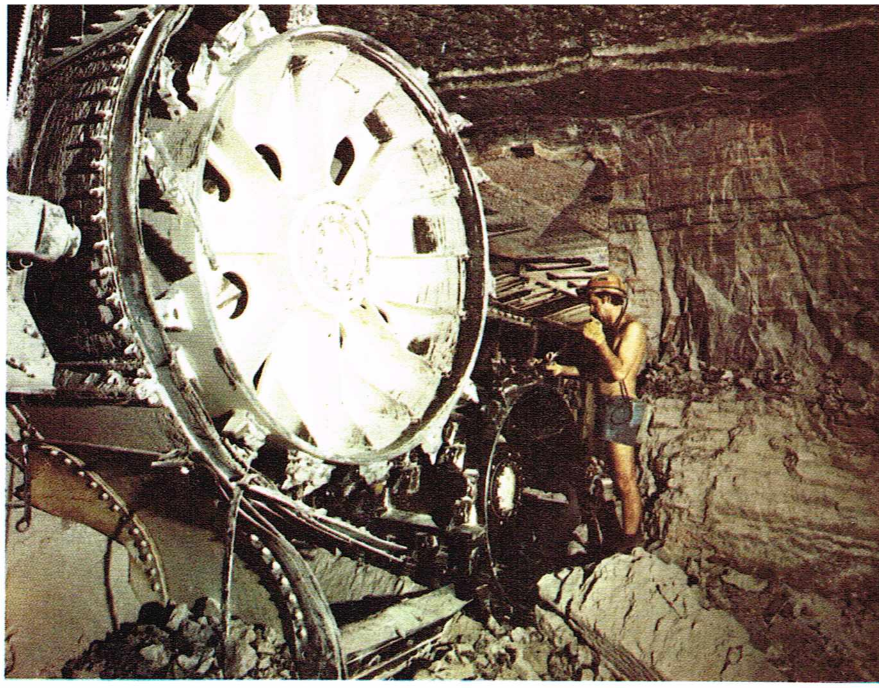

photo Archives S.C.P.A.

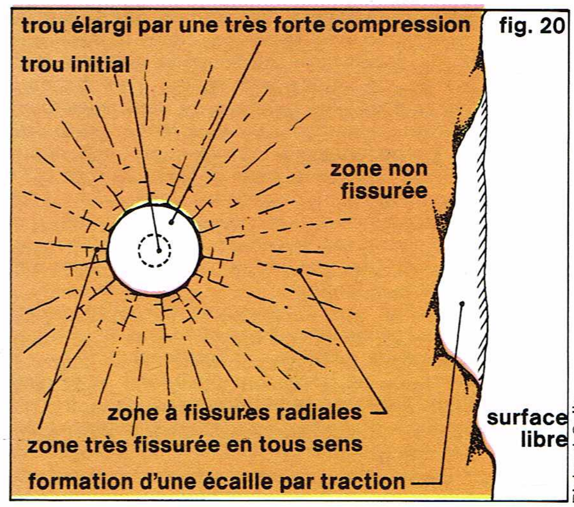

Richard Colin

▲ *A gauche, haveuse à tambours dans une mine de potasse. A droite, figure 20 : effets de l'explosion dans la roche.*

permet à la machine d'avancer par passes de 1 m à 1,50 m. La rotation du plateau est assurée par moteurs hydrauliques (procédé allemand) ou électriques (procédé américain). La puissance totale installée avoisine 600 kW.

Le tunnelier ne semble pas limité dans la foration de roches dures. Paradoxalement, il est peu adapté aux roches tendres ou fissurées, où il ne peut s'ancrer correctement. L'état actuel de la technique permet de creuser des galeries de diamètre compris entre 2 et 8 m. Le tunnelier demande cependant un investissement lourd (2 MF 1976 par mètre de diamètre) qui reste un frein à son développement.

Le *creusement de puits verticaux ou montages par tunnelier* fait appel au procédé par alésage montant dit « raise borer », décrit précédemment pour le creusement des infrastructures de la mine.

* *Domaine d'emploi de l'abattage mécanique*. Le coût de l'investissement et de la main-d'œuvre ne rend possible l'introduction d'une machine d'abattage que si elle est capable de fournir un débit instantané suffisant. Une fois cette condition posée, l'abattage sera économique si la consommation d'outils reste dans la plage fixée par l'exploitant. Les deux conditions ont une égale importance pour décider de l'emploi d'un matériel donné.

Le débit instantané d'une machine est directement lié à la résistance à la pénétration de la roche en place. L'abattage n'est souvent possible que parce que le massif est extrêmement fissuré. Le travail de la machine se limite alors à la séparation de blocs durs qu'elle ne pourrait fracturer.

La consommation d'outils reflète la capacité d'usure de la roche. Elle est liée à la microstructure et au pourcentage de grains abrasifs qu'elle contient. L'abrasivité des grains n'est pourtant pas la cause principale de consommation d'outils dans les roches hétérogènes, où l'outil casse au contact d'insertions dures. Différents critères synthétiques sont proposés soit par les constructeurs, soit par les centres de recherche de l'industrie minière pour tenter de caractériser l'aptitude d'une roche à être abattue mécaniquement. On peut citer celui du CERCHAR (Centre d'études et recherches des Charbonnages de France), établi pour des machines à pics et des roches homogènes et peu fracturées, qui consiste à mesurer selon des modalités définies une « résistance de la roche à la pénétration » et une « capacité d'usure » de cette roche.

Le résultat de ces mesures est un point caractéristique de la roche dans un diagramme (résistance à la pénétration, capacité d'usure) sur lequel les possibilités de chaque machine sont représentées par un certain domaine. La roche est considérée comme abattable mécaniquement si son point caractéristique tombe à l'intérieur du domaine d'une machine.

De même, le Centre de recherches minières des Charbonnages allemands définit un coefficient d'usure qui permet de classer les roches en trois catégories : abattables par pics, abattables par molettes, abattables à l'explosif.

L'abattage à l'explosif

Toutes les roches peuvent être abattues à l'explosif, particulièrement les roches dures, pour peu qu'on puisse y forer les trous nécessaires à la mise en place correcte des charges d'explosif.

* *Les effets de l'explosif dans la roche*. Un explosif est un corps, ou un mélange de corps, susceptible de dégager en un temps très court (quelques millionièmes de seconde) une grande quantité de gaz portés à très haute température (3 000 °C). C'est généralement une combustion, c'est-à-dire la combinaison avec de l'oxygène d'éléments réducteurs (hydrogène, carbone, azote), qui se propage dans la masse d'explosifs à une très grande vitesse (2 000 à 7 000 m/s). Les effets destructeurs de l'explosif proviennent de la brutalité de cette réaction, qui engendre une onde de pression à front très raide (onde de choc) susceptible de se propager dans la roche, et non pas de l'énergie totale dégagée (un litre d'essence peut dégager en brûlant 7 fois plus d'énergie qu'un kilogramme d'explosif).

L'onde de compression, d'amplitude très forte dans l'explosif lui-même, se propage dans la roche en s'affaiblissant et en se déformant pour donner naissance à une onde de traction d'amplitude plus faible. Tant que l'amplitude de ces ondes est supérieure à la résistance de la roche, il y a formation de fissures et même broyage complet au voisinage du point d'explosion (*fig.* 20). A une certaine distance de ce point, l'onde de compression devient incapable de casser la roche qui résiste bien à la compression. Mais si cette onde rencontre une surface libre, elle s'y réfléchit, se transforme en onde de traction et alors brise facilement la roche qui résiste peu à la traction. Si la surface libre n'est pas trop éloignée du lieu d'explosion, les deux zones de rupture (onde directe et onde réfléchie) peuvent se rejoindre, et l'explosion forme un *cratère*. Ce cratère se produit encore lorsque les deux zones de rupture provoquées par le passage de l'onde, sans se rejoindre tout à fait, ne sont pas trop distantes. En effet, les gaz formés lors de l'explosion s'infiltrent dans les fissures créées par l'onde de pression et sont capables d'ouvrir et de prolonger ces fissures jusqu'à formation du cratère.

On peut ainsi montrer que, pour l'abattage du massif rocheux, il existe une disposition optimale de la charge d'explosif par rapport à la surface libre. Lorsque la charge d'explosif est allongée (sous la forme habituelle des cartouches), la disposition idéale est parallèle à la surface libre et à une distance qui dépend du diamètre des cartouches et de la fragmentation recherchée.

Dans l'exploitation à ciel ouvert et dans certaines phases de l'exploitation souterraine, il est possible de forer les trous parallèles à la surface libre. Le seul paramètre à déterminer est alors l'espacement des trous pour une charge d'explosif donnée (ou, à l'inverse, la charge d'explosif à utiliser pour un schéma de foration donné). Cependant, en souterrain, le cas le plus général est le creusement de galeries par volées successives, et les trous ne peuvent pas être forés parallèlement au front qui constitue la seule surface libre utilisable. Il faut alors avoir recours à des techniques spécifiques de tir avec

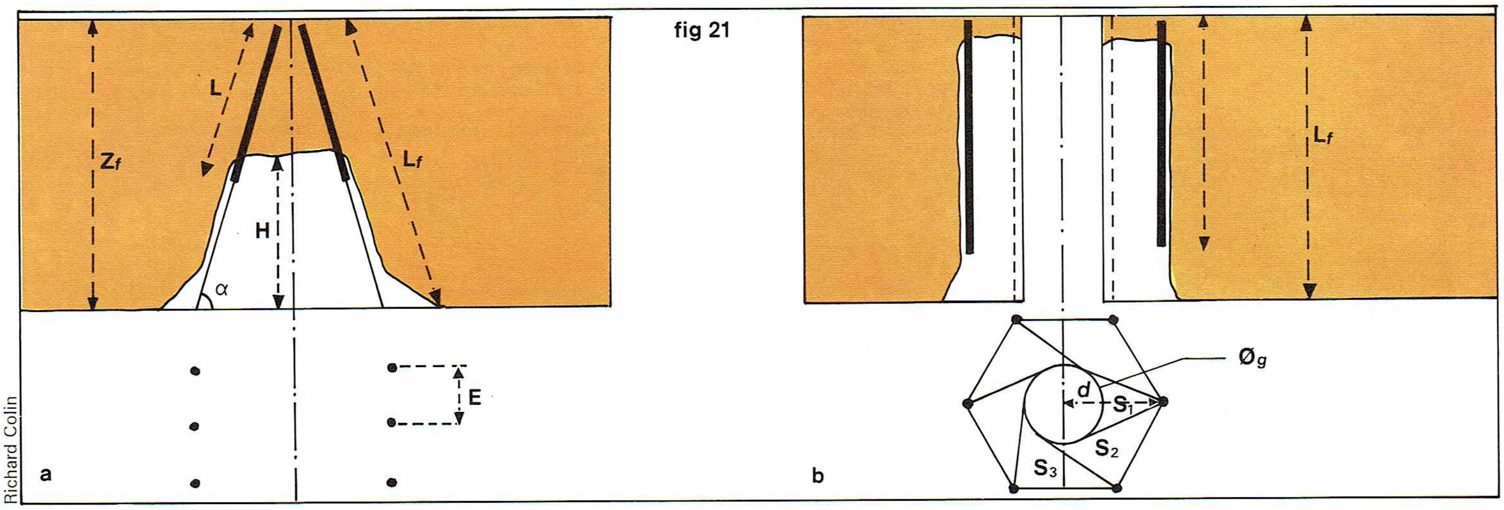

▲ ***Figure 21 :***
a, bouchon prismatique ;
b, bouchon cylindrique à gros trou vide.

bouchon. C'est aussi le cas pour le creusement des puits et plus généralement pour tous les ouvrages où la progression se fait au fond d'un cul-de-sac.

★ *Les schémas de tir en galerie.* Les *bouchons* ont pour objet de créer une surface libre dans la direction de l'avancement de la galerie. Le reste de la volée sera alors parallèle à cette surface libre. Trois types de bouchons sont couramment utilisés (*fig.* 21).

— Le *bouchon convergent* (ou conique, ou pyramidal) comporte 6 ou 8 coups de mine, inclinés à 60-70° sur le front. Le tir *simultané* de ces 6 ou 8 coups provoque la formation d'un cratère assez profond (2/3 environ de la profondeur forée, quoique dans ce cas le rendement de l'explosif soit mauvais), et les coups de mine suivants utilisent ce cratère comme surface libre. La limite de ce bouchon, utilisable dans toutes roches, réside dans l'encombrement des jumbos de foration qui ne peuvent forer des trous sous une inclinaison inférieure à 60° (qui serait plus favorable pour le résultat du tir). En pratique, on peut ainsi tirer des volées dont la longueur est au maximum égale à 60 % de la largeur de la galerie.

— Le *bouchon canadien* (ou « burn-cut ») ne comporte que des trous parallèles entre eux et perpendiculaires au front. Il existe une grande variété de dispositions possibles pour ces trous et pour l'ordre d'amorçage, mais le résultat ne présente d'intérêt que dans les roches très dures où l'on peut utiliser un explosif très brisant, condition pour que le tir de coups perpendiculaires à la surface libre soit efficace. L'avancement d'un tel bouchon est toutefois limité à 3 m environ dans de bonnes conditions. En roche tendre, ce bouchon ne donne aucun résultat. L'explosif utilisé doit être insensible à la compression si tous les coups ne partent pas rigoureusement en même temps.

— Le *bouchon à gros trou foré* (ou cylindrique) comporte la foration préalable d'un ou plusieurs gros trous perpendiculaires au front et destinés à servir de surface libre pour les coups chargés, eux-mêmes parallèles à ces gros trous vides (diamètre de 150 à 400 mm). Il s'ajoute toutefois ici une condition supplémentaire pour le bon rendement du schéma : la disposition des trous chargés et la chronologie de leur mise à feu doivent être soigneusement respectées pour se placer dans les conditions de *foisonnement dynamique :* aussitôt après le tir d'un coup, la roche brisée est dispersée dans la cavité centrale et progressivement éjectée vers la sortie. Le tir du coup suivant doit intervenir assez vite pour que l'éjection soit continue, mais pas trop tôt pour que la cavité ait eu le temps de se vider en partie. Si cette dernière condition n'est pas respectée, la roche ne dispose pas d'un volume suffisant pour foisonner (la roche brisée en morceaux a une densité apparente inférieure à la roche en place et donc occupe plus de place), et la cavité peut se reboucher en partie ou en totalité. La condition de foisonnement doit tenir compte de l'aspect dynamique du phénomène, ce qui peut être exprimé par la formule générale (*fig.* 22) :

$$s_i \leqslant \frac{\rho_1}{\rho_0 - \rho_1} \frac{L_v}{L_f} S_{i-1}$$

s_i = section à abattre par le coup i ; S_{i-1} = section abattue par les coups précédant le i-ième ; ρ_0 = masse volumique de la roche en place ; ρ_1 = masse volumique de la roche foisonnée ; L_f = longueur des coups de mine ; L_v = longueur de la cavité centrale qui est vidée lorsque part le i-ième coup.

Pour une longueur et un diamètre de gros trou donnés, les positions des coups successifs sont définies par les s_i. Ces coups doivent être d'autant plus rapprochés que la longueur L_f est plus grande. Comme, en pratique, la limitation qui intervient est la précision de la foration, on peut en conclure que l'avancement possible avec un tel bouchon dépend de la section du (ou des) gros trous. Par ailleurs, l'expérience montre que la longueur de cavité vidée est maximale lorsque les tirs des coups successifs sont espacés d'environ 50 ms (la vitesse d'éjection des déblais hors du trou est de l'ordre de 40 à 50 m/s).

— Le *bouchon coromant* se rapproche de ce dernier type, puisqu'il comporte deux « gros » trous sécants vides et des trous chargés parallèles, mais la disposition des trous chargés et la faible section du double gros trou (équivalente à un seul trou de diamètre 100 mm environ) en font un bouchon de type canadien qui travaille surtout par arrachement perpendiculaire au front. La nécessité d'un gabarit spécial pour la foration et les progrès dans la foration de trous de gros diamètre, même en roche dure, font abandonner ce schéma pour le véritable bouchon cylindrique.

Dans certains cas, le bouchon peut être remplacé par une saignée horizontale (10 à 20 cm d'épaisseur) découpée par une haveuse spéciale sur toute la surface de la volée à abattre.

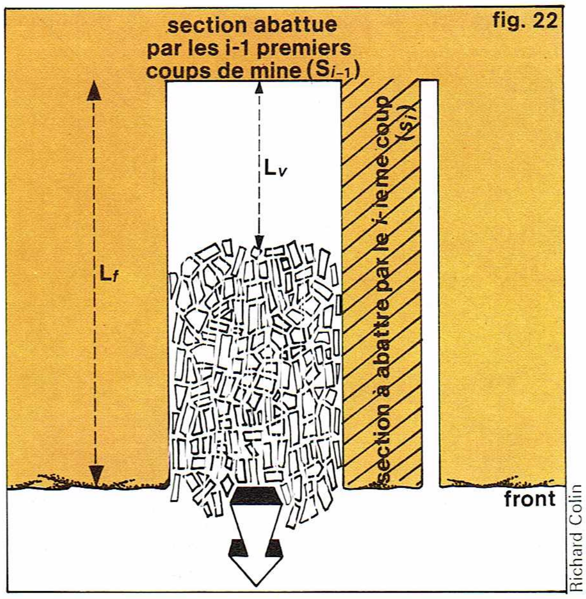

◀ ***Figure 22 :***
tir autour d'un gros trou vide ; l'intervalle entre les coups de mine successifs doit être suffisant pour que la cavité ait le temps de se vider, au moins partiellement.

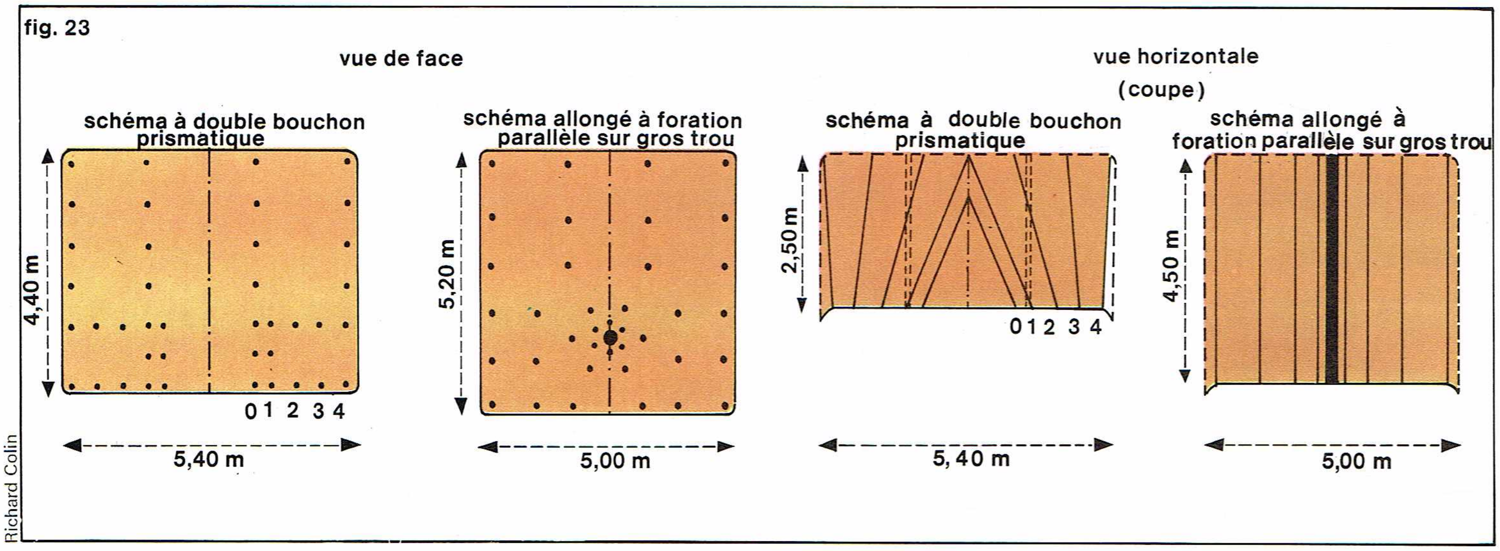

▲ ***Figure 23 :* *schéma de volées avec deux types de bouchons.***

Le *reste de la volée* est foré parallèlement à la surface libre créée par le bouchon (avec une inclinaison progressivement décroissante dans le cas du bouchon convergent). Les trous sont disposés en *rangées* successives, s'éloignant du bouchon vers les parements de la galerie. Les derniers trous sont disposés de manière à découper la galerie à la forme voulue (*fig.* 23).

Dans certains cas où l'on cherche à obtenir une forme particulièrement précise (par exemple en vue de la mise en place d'un soutènement bétonné d'épaisseur constante), on peut rapprocher les coups de mine de parement de façon à obtenir un *découpage soigné* (« smooth blasting »). Ce résultat peut également être obtenu, et cela permet surtout de limiter l'ébranlement des terrains, en pratiquant le *prédécoupage :* l'ensemble des coups de découpage est alors tiré en une seule fois, *avant* le tir des rangées pour provoquer la formation d'une véritable fracture continue sur tout le pourtour de la galerie.

La *consommation d'explosif* dépend de la compacité des roches et de la section des galeries (le bouchon exige une densité de chargement plus grande). Dans les cas les plus courants, il faut entre 0,5 et 1,5 kg d'explosif par mètre cube de roche (ou 200 à 600 g/t).

Les *équipements de foration* des trous de mine en galerie sont des jumbos équipés de 2 à 5 bras qui forent indépendamment des trous de 3 à 6 m de longueur à une vitesse comprise entre 0,5 et 10 m/mn.

En roche tendre, la foration est rotative (une mèche torsadée pénètre par rotation dans la roche avec une poussée réduite). En roche plus dure, il faut passer à la foration rotopercutante. La rotation est assurée par un moteur électrique ou hydraulique. La percussion par air comprimé tend à être supplantée par la percussion hydraulique, ce qui permet d'avoir des engins autonomes tout hydrauliques (l'air comprimé nécessitant une alimentation par conduite dans tous les chantiers) dont les vitesses de foration sont deux à trois fois plus élevées.

▼ ***Jumbo de foration :* *ces équipements de foration des trous de mine en galerie ont plusieurs bras équipés de perforatrices qui forent les trous nécessaires à la mise en place correcte des charges d'explosifs.***

* *Explosifs et artifices de tir.* Beaucoup de substances peuvent être explosives ou le devenir dans certaines conditions, mais les explosifs industriels doivent avoir certaines caractéristiques : ne détoner que sous l'effet d'une initiation spécifique (c'est une condition de sécurité évidente) ; ne pas produire de gaz exagérément toxiques (les oxydes de carbone et d'azote produits par les explosifs industriels sont toxiques, mais les explosifs chlorates autrefois utilisés sont maintenant interdits en souterrain) ; pouvoir être conservés et transportés sans perdre leurs caractéristiques; pouvoir être mis en œuvre facilement, soit sous forme de cartouches, soit en vrac ; être d'un coût aussi bas que possible. De ce fait, les explosifs actuellement utilisés, tant en souterrain qu'à ciel ouvert, sont surtout le nitrate-fuel, les dynamites et les nitratés.

— Le *nitrate-fuel* est un mélange, constitué au moment de l'emploi ou à l'avance, de nitrate d'ammoniaque en granulés et de fuel domestique dans une proportion variant de 6 à 10 %. Ce mélange est chargé en vrac dans les trous de mine et présente de nombreux avantages : faible coût; élimination facile en cas de ratés de tir (le nitrate est soluble dans l'eau) ; nécessité d'un amorçage spécifique pour initier une détonation. Cet explosif est le plus couramment utilisé à ciel ouvert et, dans les mines souterraines, il remplace les autres explosifs, tous plus coûteux, dès que les conditions d'aérage de la mine le permettent. En effet, la détonation du nitrate-fuel produit une assez grande quantité d'oxydes d'azote qui doivent être éliminés par une ventilation adéquate. Un autre défaut de cet explosif est qu'il est inutilisable dans l'eau par suite de sa solubilité.

— Les *dynamites* sont des mélanges à base de nitroglycérine stabilisée qui sont également très utilisés sous forme de cartouches, surtout en roches dures. Dans la gamme des dynamites, on trouve en effet, à côté de dynamites faibles (Minex à 10 % de nitroglycérine et 79 % de nitrate d'ammoniaque), des dynamites fortes (gomme A à 92 % de nitroglycérine) qui sont les explosifs industriels les plus brisants (ceux qui donnent une onde de compression à front le plus raide et le plus élevé). Les dynamites ont le défaut de mal vieillir, et elles doivent être utilisées rapidement. Elles ont par ailleurs de nombreux avantages à l'exception de leur prix (3 à 4 fois plus que le nitrate-fuel, à puissance comparable).

— Les *nitratés* sont des mélanges dans lesquels la nitroglycérine est remplacée par du trinitrotoluène et la proportion de nitrate d'ammoniaque toujours élevée. De performances plus modestes que les dynamites, ils sont aussi moins chers, ce qui explique l'usage important qui en est fait dans les roches tendres. Ils présentent comme le nitrate-fuel le défaut d'être facilement rendus insensibles par compression : ce phénomène peut être gênant lorsqu'on doit tirer successivement plusieurs coups

de mine rapprochés, comme c'est le cas dans les bouchons du type « canadien ».

Une présentation nouvelle des dynamites connaît quelque succès dans certains cas où le nitrate-fuel n'est pas utilisable, il s'agit de *bouillies*, substances visqueuses constituées de dynamite allégée et gélifiée. Ces bouillies sont utilisables en vrac comme le nitrate-fuel, mais leur prix très supérieur pour des performances comparables ne les rend compétitives qu'en présence d'eau.

L'explosif à oxygène liquide, constitué d'une cartouche de sciure de bois qu'on imbibe d'oxygène par trempage dans un bac, a été beaucoup utilisé dans le passé, mais des difficultés de mise en œuvre le font abandonner pour le nitrate-fuel malgré son coût peu élevé.

Aucun de ces explosifs ne peut détoner spontanément : la détonation doit être initiée par une amorce. Les amorces les plus couramment employées sont les *détonateurs électriques*, petits tubes en aluminium ou en cuivre qui contiennent quelques grammes d'explosifs très sensibles pouvant détoner par simple échauffement. Une résistance électrique prolongée par deux fils qui sortent du tube est destinée à provoquer cet échauffement au passage d'un courant électrique. Un détonateur est introduit dans la première cartouche qu'on enfile dans le trou de mine en maintenant à l'extérieur les fils, qui seront ensuite reliés en série par l'intermédiaire d'une ligne de tir à une source de courant. Dans le cas du nitrate-fuel, une petite cartouche de dynamite est nécessaire pour servir de relai entre le détonateur et l'explosif lui-même.

Dans les ciels ouverts où l'on tire de très longs trous, une charge d'explosifs continue peut ne pas être nécessaire. On introduit alors des espaceurs inertes entre deux éléments de charge et, plutôt que de mettre un détonateur à chaque fois, on utilise pour transmettre la détonation un *cordeau détonant* qui est une mèche dont l'âme en penthrite joue le rôle d'un détonateur continu. Il suffit alors que tous les cordeaux soient rattachés à un même cordeau-maître qui, lui, est amorcé par un détonateur électrique.

La mise à feu des détonateurs (et donc le tir de la volée) est assurée par un *exploseur :* c'est un condensateur préalablement chargé par une dynamo dont le courant de décharge à travers le circuit constitué par les fils des détonateurs crée l'échauffement nécessaire, à condition, bien sûr, que la résistance totale du circuit de la volée ne dépasse pas la valeur permise.

Les détonateurs électriques peuvent être munis de relais de retard qui permettent de décaler les détonations des différents trous, quoique la mise à feu ait lieu au même instant pour tous. Ces décalages ou retards peuvent être des multiples de 25 ms (dits « microretards ») ou de la demi-seconde (dits « retards ordinaires »).

Autres modes d'abattage

Le marteau-piqueur n'est plus utilisé pour l'abattage à main, mais une version mécanisée du même principe est susceptible de se développer : c'est le *brise-roche hydraulique* composé d'un marteau (dont l'énergie de percussion est fournie par un compresseur hydraulique) fixé à l'extrémité du bras d'une pelle hydraulique.

L'abattage hydraulique est une technique différente, qui consiste à déconsolider la roche par un jet d'eau sous forte pression. Cette technique est utilisée notamment dans une mine de charbon canadienne. Le jet d'eau sous pression peut être utilisé également pour forer des trous de mine. Des essais sont aussi effectués pour associer le jet d'eau à l'abattage par molettes sur les tunneliers.

Soutènement et contrôle du toit

Il n'est pas question, quelle que soit la profondeur des mines, de supporter intégralement le poids des terrains de recouvrement pour maintenir ouverts les édifices miniers. En effet, à 100 m de profondeur, le poids des terrains est de 250 t/m^2 de toit ; pour une galerie de 5 m de largeur et 100 m de longueur, c'est donc 125 000 t de roches qui reposent sur le toit et les parois de cette galerie. Le *contrôle du toit* consiste donc non pas à porter les terrains, mais à choisir la forme des excavations qui permettra aux parois des chambres et aux piliers de porter eux-mêmes la plus grande partie de ces énormes masses. C'est la méthode d'exploitation telle qu'elle a été présentée précédemment qui définit le mode de contrôle du toit à grande échelle dans la mine : chambres vides, foudroyage ou remblayage. Cependant, il est nécessaire de contrôler les mouvements du toit à une échelle plus réduite, celle du chantier où l'on travaille, celle de la galerie où l'on circule. C'est le rôle du *soutènement* de maintenir la cohésion des blocs de roche au voisinage immédiat des excavations.

Le contrôle du toit

Dans les exploitations par chambre vide, c'est le calcul préalable de répartition des contraintes tout autour de l'excavation qui permet de prévoir la stabilité de l'ensemble. L'imperfection des modèles fournis par la mécanique des roches, même corrigés par l'expérience des hommes de l'art, conduit à vérifier en permanence pendant l'exploitation que le massif rocheux se comporte bien comme prévu. C'est l'objet des différentes mesures de déformation qui sont effectuées de plus en plus fréquemment :

— Mesures de convergence des galeries par convergencemètres de divers types. Le plus simple est constitué de deux tubes ancrés respectivement au toit et au mur coulissant l'un dans l'autre. Un repère fixe sur chacun des tubes permet de contrôler le mouvement de rapprochement du toit et du mur.

— Mesures de dilatation des piliers du toit et du mur. Le système le plus simple est une tige d'acier ancrée à une extrémité au fond d'un trou foré ; on mesure le mouvement de l'autre extrémité par rapport à la paroi. L'évolution de ces convergences ou dilatations reportée sur un graphique permet de juger de la stabilité de l'édifice (les courbes se rapprochent de l'un des types indiqués au chapitre consacré à la mécanique des roches).

Dans les exploitations *foudroyées*, les conditions de sécurité dans le chantier sont d'autant meilleures que l'éboulement des terrains est plus régulier et monte plus haut ; l'affaissement de la surface du sol est le meilleur moyen de contrôle de ce qui se passe dans la zone foudroyée.

Dans les exploitations *remblayées*, le mouvement du toit est d'autant mieux contrôlé que le remblai est plus dense et remplit totalement les vides. Cette condition n'est pas satisfaite de la même façon par tous les modes de remblayage. Dans le *remblayage mécanique*, le matériau de nature variée est mis en place par gravité ou par un bulldozer, ou éventuellement par un lanceur (petit convoyeur à bande rapide). Le compactage du remblai et le clavage au toit sont nécessaires pour obtenir un bon remplissage des vides. Cette méthode est utilisée le plus souvent pour remblayer des chambres vides après l'exploitation, mais aussi dans les tranches montantes remblayées lorsque la dimension de l'exploitation ne justifie pas une installation de remblayage hydraulique. Le matériau est alors très souvent du sable provenant de l'usine de traitement du minerai. Le *remblayage* peut être *pneumatique ;* dans ce cas, le matériau est constitué de blocs de roche calibrés. A proximité du chantier, il est introduit dans une remblayeuse qui le projette à travers une tuyauterie sous l'effet d'un jet d'air comprimé. Cette méthode, coûteuse, est réservée au remblayage de certaines longues tailles en plateure. Elle permet de limiter l'affaissement de surface à 50 % de la puissance des couches exploitées. Le *remblayage hydraulique* est le plus efficace ; le matériau est alors un sable calibré qui est transporté par gravité depuis la surface en suspension dans l'eau dans des canalisations résistant à l'usure. Au chantier, l'eau se sépare du sable par décantation et est récupérée par exhaure. Cette méthode s'applique particulièrement dans les gisements pentés (tranches montantes remblayées). Les affaissements en surface sont alors limités à 10 % de la puissance des couches exploitées.

Le remblayage pneumatique et le remblayage hydraulique se prêtent bien à l'adjonction d'un liant (ciment, cendres volantes) pour consolider les remblais. Le lait de ciment est généralement introduit vers la fin du circuit pour éviter qu'un arrêt de l'installation ne provoque une prise dans l'ensemble des tuyauteries.

Le soutènement

Les différents types de soutènement utilisés ont pour rôle d'accompagner la déformation d'ensemble du massif

photo Archives S.C.P.A.

▲ *Mines de potasse d'Alsace : exploitation par havage intégral avec soutènement marchant ; on distingue, à droite, les traces laissées par les tambours de la haveuse et, au centre, le convoyeur à chaîne qui évacue le minerai.*

sans s'y opposer, mais en maintenant la cohésion des roches à la paroi des excavations.

Le *bois* est toujours utilisé sous forme de rondins ou de bois équarris, soit en galerie où des cadres comprenant deux montants et un chapeau sont répartis tous les mètres environ, soit dans les chantiers : chambre charpentée en terrain difficile, soutènement provisoire dans les tranches remblayées. L'un de ses avantages majeurs est qu'il rend sensible la déformation des terrains (par craquements et par flexion).

Le bois est cependant remplacé par des éléments métalliques rigides ou coulissants partout où la récupération ultérieure est possible. En galerie, les *cadres métalliques* sont réalisés avec des profilés de forme diverse, le plus souvent coulissants pour absorber la déformation. Dans les chantiers de faible hauteur, les étançons télescopiques comportent un fût dans lequel coulisse un poinçon ajusté à la manière d'un piston dans un cylindre. Un liquide injecté sous pression dans le fût permet de mettre l'étançon en serrage entre toit et mur.

En taille, les étançons hydrauliques sont groupés par 4 ou par 6 pour former des *piles marchantes* de différents types. Ces piles sont dites marchantes parce qu'elles utilisent un système de vérins hydrauliques pour se déplacer.

Le mode de soutènement le plus répandu en dehors des longues tailles est le *boulonnage*. Ces boulons sont des tiges d'acier de 20 à 30 mm de diamètre et de 1 à 3 m de longueur que l'on introduit dans des trous analogues aux trous de mines et que l'on ancre solidement soit au fond du trou (boulons à fente et coin et boulons à coquille d'expansion), soit sur toute la longueur de la tige. Dans ce dernier cas, l'ancrage est réalisé soit par une résine synthétique introduite dans le trou en même temps que le boulon, soit par un lait de ciment. L'extrémité libre du boulon est généralement pourvue d'un filetage qui permet de visser une plaque métallique mettant ainsi le boulon en serrage (*fig.* 24).

Le rôle des boulons est complexe : d'abord conçus comme « soutènement suspendu » (on accroche la partie superficielle de la roche déconsolidée à un banc plus solide), ils ont été utilisés dans les terrains où l'ancrage ponctuel était possible ; puis on s'est rendu compte que le fait de serrer la plaque avait un effet de reconsolidation des terrains sur toute l'épaisseur correspondant à la longueur du boulon : le même résultat est obtenu avec le boulon à ancrage réparti, sans plaque. On peut dès lors estimer que le boulonnage d'une galerie, par exemple, constitue tout autour de cette galerie un anneau cohérent qui freine la déformation du massif en profondeur : c'est donc plus de contrôle du toit que de soutènement proprement dit qu'il s'agit.

Le mode d'action du *béton projeté* est très voisin : il s'agit d'un mélange d'eau, de sable et de ciment qui est projeté sur les parois à soutenir au moyen d'une pompe à air comprimé sur une épaisseur de quelques centimètres, constituant ainsi un anneau étanche. Aux effets de consolidation s'ajoute un effet d'isolation très intéressant lorsque la roche est altérable.

▼ *Figure 24 : différents types de boulons ; a, boulon à fente et coin ; b, boulon à coquille d'expansion ; c, boulon scellé à la résine.*

fig. 24

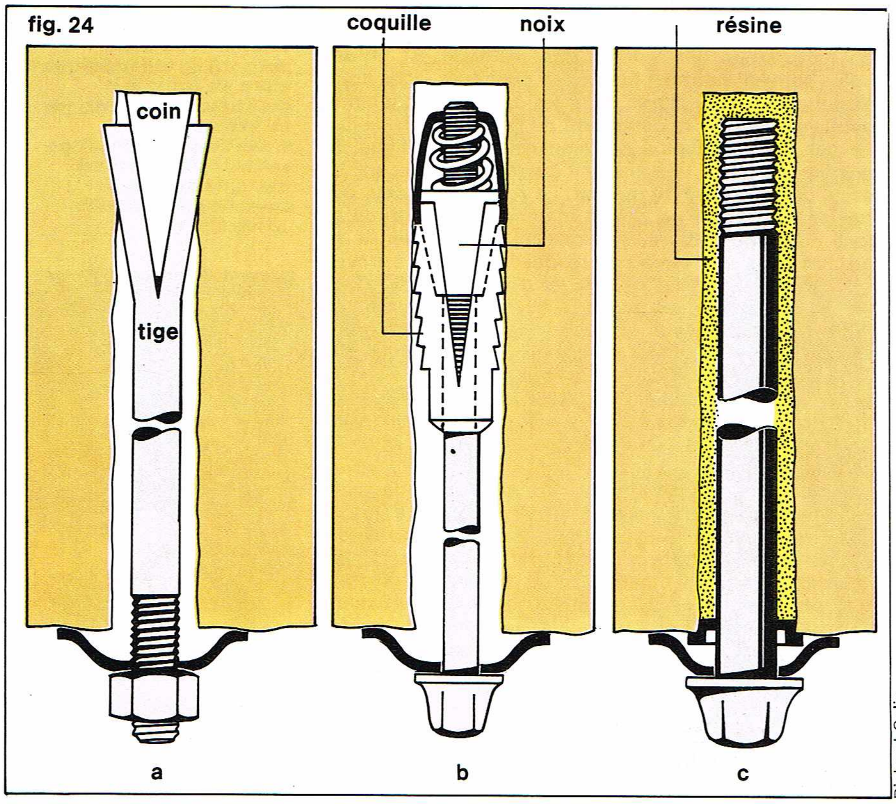

Richard Colin

Le purgeage

Il reste toujours nécessaire de purger les toits, les parements de chambres et galeries, et les fronts d'avancement, quelle que soit la qualité du soutènement. Cette opération, qui consiste à détecter les blocs de mauvaise tenue et à les abattre préventivement, restait l'une des dernières tâches manuelles, et pénibles, du mineur. Si la détection des blocs douteux n'est pas encore résolue de façon satisfaisante, par contre le purgeage est depuis très peu de temps bien assuré par des machines munies d'un bras mobile qui peut opérer jusqu'à des hauteurs de 6 à 8 m.

Chargement et transport

Les problèmes de transport sont rendus plus difficiles dans la mine souterraine à cause des limitations apportées par les dimensions des excavations et de la variété des « produits » à transporter. Il faut en effet :

— acheminer le minerai abattu (et la plus grande partie des stériles qui ne peuvent être réutilisés au fond) depuis le chantier jusqu'à la surface ;

— acheminer le matériel nécessaire à l'exploitation (bois, explosifs, soutènements divers, mèches de foration, fuel, eau, etc.) depuis la surface jusqu'au chantier, entre chantier et atelier de réparation, ou encore entre chantiers ;

— acheminer le personnel jusqu'au lieu de travail et retour en fin de poste — assurer le déplacement des équipes d'entretien ;

— transporter les remblais depuis le point de production jusqu'au chantier. Il n'est pas étonnant dès lors que pratiquement tous les moyens de transport connus soient utilisés peu ou prou, comme le montre le *tableau* VIII

Comme en surface, le transport est une opération dangereuse. Alors qu'un homme sur trois est occupé au transport, c'est presque la moitié des accidents qui trouve sa source dans les engins en mouvement.

* Le *chargement du minerai* et des stériles au chantier est le plus souvent effectué par une chargeuse, aussi mobile que possible. Les anciennes chargeuses sur chenilles (telles les chargeuses à pinces, à grand débit et peu polluantes parce qu'électriques) sont encore très

utilisées lorsque les tas à charger sont importants et n'entraînent pas de fréquents déplacements, mais elles sont rapidement supplantées par les *chargeuses frontales* à pneus, totalement autonomes grâce à leur moteur Diesel. Ces chargeuses, utilisées depuis longtemps dans les travaux publics, s'imposent en souterrain grâce à une gamme de dimensions très variées : les godets vont de 1 m³ à 10 m³, ce qui leur permet de s'adapter à la dimension des galeries et à celle des blocs à charger. Très mobiles, elles peuvent transporter leur charge sur une certaine distance et assurer ainsi la première partie du transport jusqu'à un point de déversement dans un autre engin de transport à plus longue distance.

Lorsque la roche est abattue par une machine, celle-ci assure automatiquement le chargement sur l'engin de transport.

Lorsque la méthode d'exploitation comporte le stockage de minerai (chambres magasins, foudroyage en masse, chambres vides avec soutirage), celui-ci est généralement repris par un extracteur sous les trémies situées à la base du panneau.

* Le *transport* du minerai, des stériles et des matériaux de remblai peut être effectué par des dispositifs discontinus (berlines, camions) ou continus (convoyeurs blindés ou à courroie, transport hydraulique). Le minerai est le plus souvent transporté depuis une station de chargement au quartier jusqu'au puits par des *trains de berlines* traînés par des locomotives Diesel ou électriques. Capacité des berlines et puissance des locomotives ont tendance à s'accroître autant que la dimension des galeries de roulage le permet, et le trafic peut être dans certains cas entièrement automatisé.

L'adaptation pour le fond de *camions* de grande capacité autorise un développement de ce mode de transport particulièrement souple. Les pistes sont alors aménagées (béton ou bitume), et les camions chargés au chantier peuvent aller se déverser à des distances atteignant 2 ou 3 km. Le déversement par basculement de la benne, qui exige beaucoup de place, est parfois remplacé par un système à lame pousseuse.

Les *transporteurs continus* sont surtout utilisés pour desservir les machines d'abattage qui fournissent automatiquement un matériau de granulométrie convenable pour les convoyeurs blindés (dans les longues tailles) et les convoyeurs à courroie (dans les galeries rectilignes). Ces derniers peuvent être utilisés sur de grandes distances et même remonter le minerai jusqu'à la surface lorsqu'il existe une descenderie. Lorsque l'abattage est effectué à l'explosif, un concassage primaire est nécessaire en amont du convoyeur à courroie.

Le *transport hydraulique* n'est actuellement utilisé que pour amener des remblais depuis la surface jusqu'aux chantiers, mais on peut envisager l'extension du procédé au transport du minerai, en particulier dans des mines à fortes venues d'eau où il faut de toute façon pomper un débit important.

Les *transports auxiliaires* — matériel, personnel — utilisent la voie ferrée, des monorails suspendus, des camions, des télésièges, etc., selon la topographie des lieux.

L'extraction est le transport du minerai jusqu'à la surface par un puits ou une descenderie. Les équipements correspondants — cage ou skip pour le puits, convoyeur pour la descenderie — ont déjà été décrits.

Les services généraux

On désigne sous ce nom l'ensemble des services fonctionnels qui, sans participer directement aux opérations de production, sont indispensables au bon déroulement de l'exploitation.

Les services généraux de la mine sont, d'une part, ceux que l'on trouve dans toute entreprise : services du personnel, services financiers et comptables, services sociaux, services commerciaux; d'autre part, certains services propres aux entreprises industrielles : ateliers d'entretien et de réparation, magasin d'approvisionnement en pièces de rechange, services de distribution de l'énergie sous toutes ses formes, services de contrôle et essais, qui peuvent être liés à la qualité des produits, mais aussi à la sécurité du personnel; enfin quelques services particuliers à la mine, tels ceux qui assurent l'aérage ou l'exhaure.

photo Archives S.C.P.A.

▲ ***La Jeep est un des moyens de transport du personnel de fond; la photo montre aussi un convoyeur à bande (à droite) et un transporteur à câble (en haut).***

▼ ***Tableau VIII : moyens de transport utilisés dans les mines et carrières souterraines.***

Tableau VIII
Moyens de transport utilisés dans les mines et les carrières souterraines

	Moyens de transport	Transport dans le chantier	Transport dans le quartier	Transport entre les quartiers et le puits	Minerai	Stériles	Matériel	Personnel
Systèmes discontinus	Berlines poussées à bras	×	×		×	×	×	
	Berlines avec traînage		×		×	×	×	
	Berlines tractées par locomotives (Diesel trolley)			××	×	×	×	
	Berlines tractées par locomotives à batteries		×		×	×	×	
	Scrapers	××			×			
	Camions et chargeuses frontales	××	××	×	×	×		
	Engins divers sur pneus	×	×	×			×	×
	Seccam, couloirs roulants			×	×			
	Treuils à cage (puits et bures)			××	×	×	×	×
	Treuils à skip (puits et bures)			××	×	×	×	×
	Treuils de plans inclinés		×		×	×	×	
	Monorail à câble		×	×			×	
	Monorail à loco suspendue			×			×	×
	Télésiège, télémine			×				×
Systèmes continus	Convoyeurs blindés	××	×		×			
	Transporteurs à courroie		××	××	×	×		×
	Transport hydraulique	×	×	×	×	××		
	Transport pneumatique	×	×			××		

Ateliers et services d'entretien du matériel

Dans la mine moderne, l'entretien des machines et des installations prend une importance croissante. En effet, que l'objectif soit de produire le plus possible avec un matériel donné ou de réaliser une production fixée en utilisant le minimum d'équipements, il importe toujours que ces équipements restent en ordre de marche. Pour atteindre les coefficients d'utilisation qui ont été indiqués, notamment pour les grosses machines de ciel ouvert (50 mn/h), l'entretien doit être parfaitement organisé : entretien préventif qui consiste à réaliser avec une périodicité définie certaines opérations courantes (graissage, remplacement des pièces d'usure, contrôles divers); dépannage et réparations qui doivent laisser les engins immobilisés le moins longtemps possible; politique d'engins de rechange, qui permet de remplacer immédiatement un engin indispensable à la production lorsque la durée de la panne risque d'être longue, mais aussi pour permettre à tous les engins de passer en entretien par roulement; politique d'approvisionnement en pièces de rechange, qui doit éviter les longs délais d'attente, notamment lorsque le matériel n'est pas fabriqué dans le pays d'utilisation.

Dans les effectifs d'une mine, il est courant que le personnel affecté à l'entretien représente 25 à 35 % du total.

Services de contrôles et d'essais

En pratique, tous les matériels utilisés dans la mine, surtout souterraine, nécessitent une adaptation aux conditions particulières du gisement : de ce fait, les services d'études et d'essais peuvent avoir une certaine importance, au moins dans les grandes sociétés minières. Mais c'est surtout le contrôle du bon fonctionnement des engins et installations et celui des conditions de sécurité qui sont susceptibles de mobiliser des effectifs importants, notamment en ce qui concerne la sécurité dans les mines de charbon.

Une intéressante réalisation des charbonnages est le *télévigile*, qui, en enregistrant systématiquement soit des intensités électriques, soit des tensions sur l'alimentation des différents engins, permet à un seul individu de suivre à distance le fonctionnement de tous les matériels à énergie électrique : machines d'abattage, convoyeurs, concasseurs... Ainsi une défaillance en un point peut-elle être rapidement détectée, ses conséquences possibles analysées et des mesures prises en conséquence. Le développement des *télécommunications* au fond est certainement responsable d'une amélioration considérable dans le fonctionnement global de la mine souterraine où les communications à vue sont extrêmement limitées.

De même, les installations de *télégrisoumétrie* permettent de regrouper toutes les informations disponibles à chaque instant sur la teneur en grisou en différents points de la mine. Le grisou est un gaz, formé essentiellement de méthane, qui est présent dans la plupart des roches sédimentaires contenant des matières organiques : on le trouve surtout dans les mines de charbon, mais aussi parfois dans les dépôts de potasse. Ce gaz peut exploser lorsque sa teneur dans l'atmosphère est comprise entre 6 et 16 %, donnant lieu à un « coup de grisou ». Des automatismes relativement simples permettent de couper automatiquement l'électricité et de déclencher une alarme dans les chantiers lorsque la teneur atteint un seuil de danger préalablement fixé. Bien entendu, avant d'en arriver là, on aura utilisé tous les moyens classiques de lutte contre le grisou : dégazage préalable, aérage, suppression des causes d'inflammation.

Dans les mines de charbon, un autre danger est plus grand encore que le coup de grisou parce qu'il est plus violent et d'extension parfois très grande : c'est le « coup de poussière », qui est une explosion de la poussière de charbon (parfois provoquée par un coup de grisou préalable). La sécurité dans ces mines exige que toutes les poussières de charbon soient « neutralisées » soit par arrosage, soit par schistification (on les mélange à des matériaux stériles finement pulvérisés).

Des contrôles permanents sont donc nécessaires non seulement pour localiser et éliminer d'éventuels dépôts de poussières inflammables, ou des dégagements de grisou, mais aussi (et ce dans toutes les mines souterraines) pour détecter la présence de gaz toxiques (H_2S amené par les eaux d'infiltration, oxyde de carbone provenant des combustions, oxydes d'azote provenant de la décomposition des explosifs ou des gaz d'échappement des moteurs Diesel) ou simplement nocifs (gaz carbonique).

La stabilité des ouvrages miniers doit également être contrôlée par des mesures appropriées de déformation des terrains ou d'affaissements en surface.

Aérage

Les besoins en air frais dans une exploitation minière souterraine sont importants : non plus tellement pour amener l'oxygène nécessaire à la respiration des hommes, mais surtout pour diluer les gaz nocifs qui se dégagent du massif rocheux (grisou, gaz carbonique) ou qui sont produits par les engins munis d'un moteur à explosion (gaz d'échappement des moteurs Diesel), ou encore pour évacuer les calories produites par la roche elle-même ou par les engins mécaniques. Les débits d'air nécessaires peuvent ainsi être évalués de manière à satisfaire les besoins en chaque point de la mine.

Dans les petites mines métalliques, quelques dizaines de mètres cubes par seconde peuvent suffire, mais dans les mines profondes plus chaudes et dans les mines de charbon très grisouteuses, c'est plusieurs centaines de mètres cubes d'air qu'il faut faire circuler chaque seconde : ces débits sont tels que le tonnage d'air en mouvement est beaucoup plus élevé que les tonnages de minerai, ou même d'eau (voir *Exhaure*).

L'air s'échauffe dans les travaux souterrains à cause de la température de la roche qui s'accroît avec la profondeur (plus de 50 °C à 1 000 m de profondeur dans les mines de potasse d'Alsace), et aussi à cause des importants dégagements de chaleur qui accompagnent les combustions des moteurs Diesel et le fonctionnement des moteurs électriques. A l'inverse, dans les mines humides, l'évaporation de l'eau est une cause de refroidissement de l'atmosphère. L'air chaud a tendance à s'échapper par les voies ascendantes, appelant de l'air froid par celui des accès de la mine dont la cote topographique est la plus basse : il s'établit ainsi un aérage naturel qui, avec un débit de quelques mètres cubes par seconde, suffisait généralement aux petites mines métalliques.

Dans les mines modernes, qui nécessitent des débits beaucoup plus importants, la circulation de l'air est forcée par des ventilateurs principaux installés le plus souvent à la surface sur les orifices d'accès (puits et descenderies), mais aussi parfois au fond. En outre, certains points particuliers de la mine, qui ne sont pas balayés par le courant d'air principal (galeries en cul-de-sac), doivent être aérés au moyen de ventilateurs secondaires. De manière générale, la circulation de l'air au fond doit être organisée de manière à orienter le flux d'air frais en priorité vers les zones qui en ont le plus besoin.

Ce résultat n'est obtenu économiquement qu'au prix d'aménagements spéciaux pour canaliser le courant d'air : en effet, la répartition qui s'établit spontanément en fonction de la résistance offerte par les galeries et chantiers n'est pas nécessairement la plus favorable; pour que le chantier le plus défavorisé reçoive la quantité d'air qui lui est nécessaire, il faut soit envoyer un débit surabondant dans les autres chantiers, soit modifier cette répartition naturelle en établissant des barrages et portes régulatrices sur les parties du circuit où le débit serait excessif. On peut même être amené à creuser des galeries spécialement pour le passage de l'air (les machines de creusement par alésage montant ont considérablement amélioré les possibilités en ce domaine).

Les lois de la circulation de l'air — ce sont les lois générales de la mécanique des fluides, adaptées au cas particulier de l'air — permettent de prévoir et de tester ces aménagements, soit sur modèle analogique, soit en résolvant numériquement les équations, qui malheureusement ne sont pas linéaires.

Dans certains cas, le contrôle et la régulation de l'aérage peuvent être entièrement automatisés par centralisation des informations (mesures, en différents points de la mine, des débits, des pressions, et du degré de pollution de l'air) sur un ordinateur qui élabore et transmet les directives de modification de certains paramètres (ouverture ou fermeture de portes régulatrices, démarrage d'un ventilateur supplémentaire, etc.).

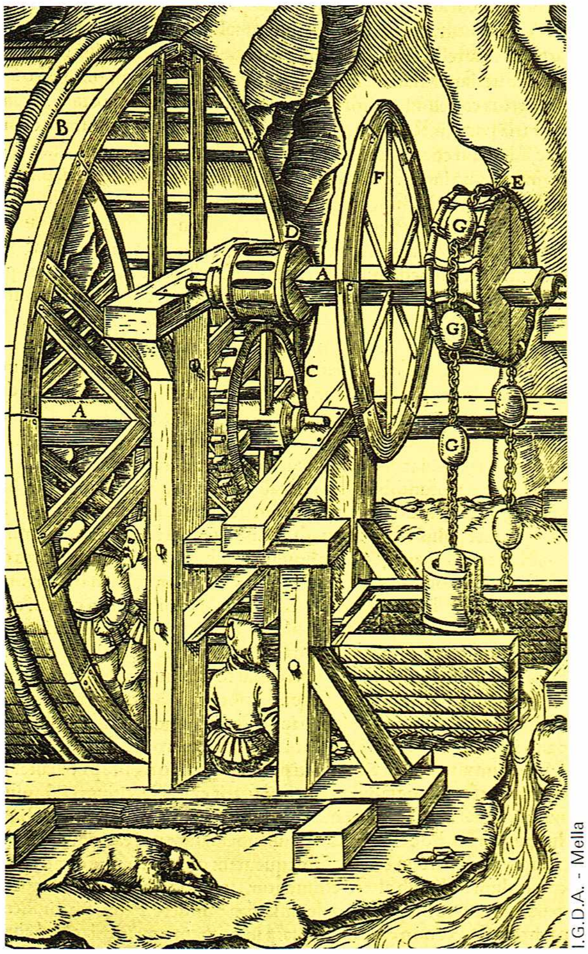

◀ *La machine d'exhaure, gravure extraite du* **De re metallica,** *Agricola (1494-1555).*

Exhaure

A ciel ouvert comme en souterrain, l'eau est généralement au fond de la mine, où elle peut constituer un obstacle important à l'exploitation.

Dans le passé, des mines ont été noyées faute de disposer d'installations d'exhaure suffisantes, mais les précautions prises actuellement permettent en général de ne pas en arriver à cette extrémité. Ce n'est qu'au cours du creusement d'ouvrages descendants qu'on peut encore rencontrer des difficultés quasi insurmontables, en particulier dans les terrains karstifiés où les venues d'eau peuvent être brutales.

La situation la plus courante est celle où l'eau ruisselle sur les parements des chambres ou des gradins et la sole des galeries, constituant une gêne pour la circulation des engins dont l'usure peut être considérablement accrue par la présence d'eau boueuse, surtout lorsque le matériau est abrasif : les engins à chenilles sont alors particulièrement exposés, et il n'est pas rare que le coût d'extraction soit accru de plusieurs francs par tonne du fait de l'eau.

Pour se prémunir contre les inconvénients de l'eau au fond, on s'efforce, lorsque c'est possible, d'empêcher l'eau d'atteindre les chantiers, par exemple en adoptant une méthode d'exploitation qui ne fissure pas les terrains aquifères, ni surtout les écrans imperméables; il est également possible dans certains cas de rabattre la nappe aquifère en pompant en amont de l'exploitation; cette méthode est fréquente dans les exploitations à ciel ouvert.

Lorsqu'on ne peut empêcher l'eau d'arriver dans les chantiers, on s'efforce de la canaliser vers les points bas où elle est alors rassemblée, décantée et pompée. En souterrain, des ouvrages doivent être creusés spécialement pour recevoir les eaux et servir de réservoir tampon entre l'écoulement et le pompage : ce sont les albraques, dont le volume est en général prévu pour accumuler les eaux pendant au moins 48 heures. La prévision des débits d'exhaure exige une connaissance hydrogéologique des terrains.

* *Origine des eaux d'exhaure*

Les eaux d'exhaure proviennent soit de circulations souterraines, soit d'infiltration directe des eaux de surface, soit de l'exploitation où elles ont été apportées volontairement par le mineur.

Les *nappes aquifères souterraines*, qui constituent la source de notre approvisionnement en eau douce, se constituent dès que la structure géologique est favorable (couche perméable en contact avec des circulations souterraines, ou alimentée par des eaux de surface).

Le gisement à exploiter peut se trouver sous la nappe aquifère (c'est le cas des mines de charbon et de fer de Lorraine, et des carrières de gypse de la région parisienne) ou être le substratum imperméable de la nappe (c'est le cas de mines de bauxite du sud de la France), ou encore être au-dessus d'une nappe en pression (certaines mines de bauxite). S'il est relativement facile d'exploiter la couche au-dessus d'une nappe en évitant de la faire jaillir, il l'est moins d'exploiter sous une nappe aquifère sans provoquer des arrivées d'eau massives au front d'exploitation. Les mines de bauxite du Var remontent en moyenne 10 à 16 m^3 d'eau par tonne de minerai exploitée; dans les mines de fer et de charbon de Lorraine, ce chiffre est parfois dépassé pour atteindre 20 à 25 m^3/t (*fig.* 25).

Les eaux de surface proviennent des infiltrations des cours d'eau qui traversent le bassin minier et des précipitations.

En période d'étiage, le niveau des nappes souterraines diminue. Les eaux de surface s'infiltrent dans les régions perméables de leurs cours et alimentent les nappes. En outre, pendant la période des pluies, une partie importante des précipitations s'infiltre dans le sol et, par le réseau complexe des canalisations souterraines, arrive au fond de la mine. Une partie non négligeable de l'eau de la mine y pénètre directement par les orifices d'accès au fond (puits, descenderie, cratère des mines à ciel ouvert).

La méthode d'exploitation par remblayage hydraulique nécessite un apport d'eau important pour la confection et le transport du remblai jusqu'au fond de la mine. Une fois le remblai déposé et décanté, l'eau récupérée se mélange avec les eaux souterraines et doit par la suite être pompée au jour sous forme d'eau d'exhaure.

* *La prévision du débit d'exhaure*

Avant et pendant l'exploitation de la mine, des études hydrogéologiques sont effectuées pour prévoir le débit d'eau arrivant au fond de la mine et apprécier les perturbations qu'entraînera la présence de la mine dans l'équilibre hydrogéologique de la région.

Ces études sont fondées sur quelques lois théoriques (mécanique des fluides) ou empiriques (notion de perméabilité).

fig. 25

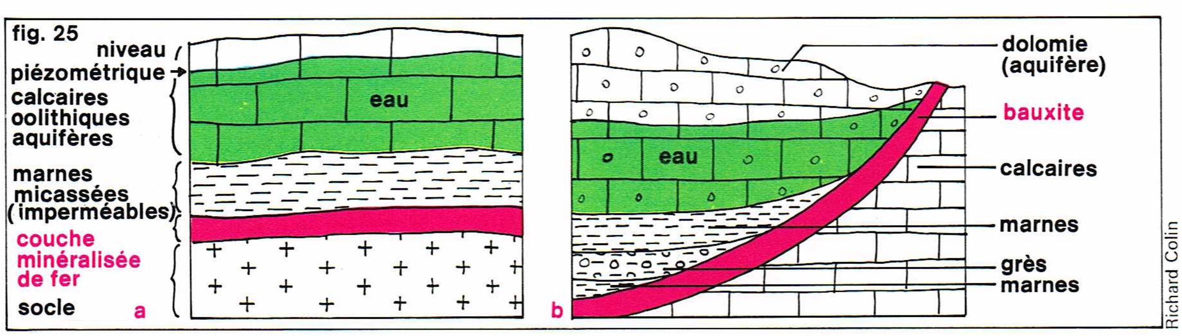

◀ *Figure 25 : nappes aquifères; a, coupe schématique du gisement de fer de Lorraine : la couche minéralisée se trouve séparée de la nappe aquifère des calcaires oolithiques par un banc de marnes micassées; b, coupe schématique de la mine de bauxite de Peygros : la couche de bauxite est le substratum de la nappe aquifère des dolomies.*

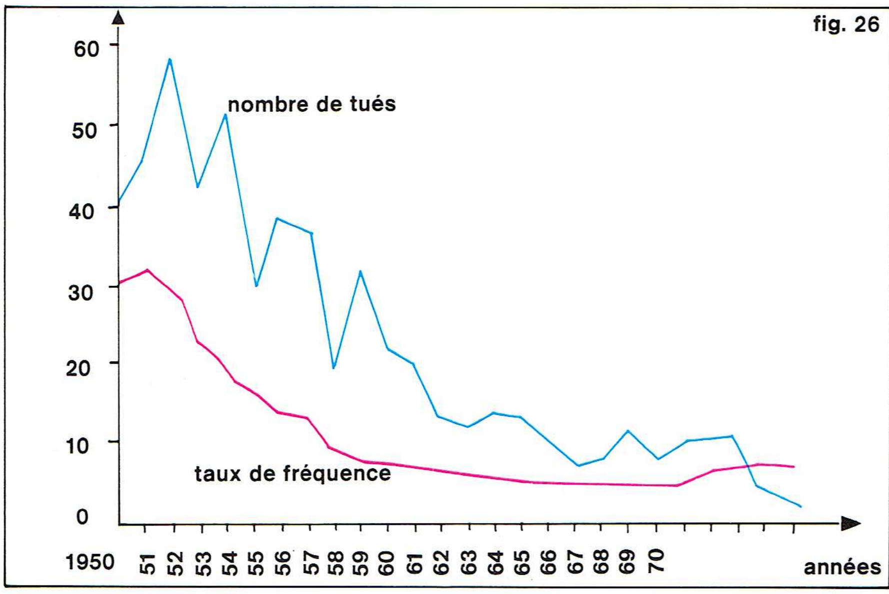

Richard Colin

▲ *Figure 26 : graphique donnant l'évolution du taux de fréquence (nombre d'accidents par 100 000 heures de travail) et du nombre d'accidents mortels (Chambre syndicale des mines de fer de France ; SAMIFER).*

▼ *Document photographique ancien illustrant la descente des ouvriers dans la mine.*

● *La charge piézométrique h* de l'eau en mouvement est la somme de la pression statique et de la cote du point considéré.

● Cette charge *h* peut être théoriquement connue en tout point et à tout instant en résolvant l'*équation de diffusivité :*

$$\Delta h = \frac{S}{T}\frac{\delta h}{\delta t}$$

S = coefficient d'emmagasinement des roches aquifères (lié à la porosité des roches) ; T = transmissivité (liée à la perméabilité de la roche et à l'épaisseur de l'aquifère).

● *La loi expérimentale de Darcy* constate que la vitesse d'écoulement est proportionnelle au gradient de la charge hydraulique :

$$\vec{V} = -k\,\overrightarrow{\text{grad}}\,h$$

où k est la perméabilité, variant de 1 à 10^{-3} quand on passe des graviers aux argiles.

En d'autres termes, l'eau s'écoule toujours d'un point à charge élevée vers un point à charge plus faible, et ce avec une vitesse d'autant plus grande que la différence de charge est importante.

● Le débit Q qui s'écoule à travers une surface donnée S (par exemple, la surface dépilée de la mine) est défini par Q = VS.

La difficulté des calculs pratiques de débit d'exhaure réside dans la résolution de l'équation de diffusivité pour laquelle il est nécessaire de connaître les conditions aux limites : description des nappes souterraines existantes, de leur alimentation, des infiltrations d'eau de surface... Les valeurs des coefficients S, T et k peuvent être déterminées à partir de quelques expériences particulières (essais de pompage ou d'injection).

La résolution proprement dite de l'équation de diffusivité est effectuée de façon approchée, soit analogiquement (on représente l'écoulement de l'eau par une analogie électrique dans laquelle la charge est simulée par le potentiel électrique, et le débit par l'intensité du courant ; des mesures sur le modèle électrique permettent de retrouver la valeur des paramètres de l'écoulement), soit numériquement par la technique dite des « différences finies ».

★ *La pratique de l'exhaure*

La mine est aménagée de façon à canaliser les venues d'eau vers la station de pompage et à protéger les installations vitales en cas de coup d'eau brutal.

L'eau s'écoule dans des *rigoles* creusées en pente douce de 1 à 5 % au mur de la couche des mines en plateure, ou dans les galeries de niveau vers les points bas où elle est stockée dans des réservoirs de chantier de capacité variable suivant l'intensité des venues au front. La construction et l'entretien de ces rigoles sont assurés par un personnel spécialisé, hors exploitation.

Les rigoles convergent vers les *albraques :* ce sont des galeries en cul-de-sac dont la capacité correspond à environ 48 h de venues d'eau. Pour économiser l'énergie électrique en pompant aux heures creuses de la nuit, on surdimensionne la capacité des albraques en en construisant plusieurs séries.

Outre les gains sur le coût de l'énergie électrique, ce système a l'avantage de laisser les eaux se décanter pendant 3 à 4 jours. Elles perdent ainsi la boue qui diminue le rendement des pompes et use leurs aubes. Les installations du puits et les recettes sont généralement protégées de coups d'eaux par des portes étanches.

La station de pompage principale se compose de plusieurs groupes motopompes en parallèle à commande automatique suivant le niveau d'eau dans le puisard. L'eau stockée dans les albraques principales déborde progressivement dans le puisard où le niveau d'eau augmente jusqu'au seuil de pompage, déclenchant la mise en route d'une première pompe. Si celle-ci ne parvient pas à abaisser, puis maintenir le niveau au-dessous du seuil, la deuxième se met en marche. L'alarme est donnée par la sirène de la mine si le niveau d'eau a atteint le seuil critique au-delà duquel la capacité de pompage installée est insuffisante.

L'installation classique de pompage est une *pompe centrifuge* aspirant directement dans le puisard par l'intermédiaire d'une canalisation d'aspiration ; cette méthode présente plusieurs inconvénients, en particulier les pertes de charge à l'aspiration et les risques de désamorçage ; aussi les crépines sont-elles munies d'un clapet antiretour.

La deuxième génération des installations remplace le tuyau d'aspiration dans le puisard par une *pompe nourricière* verticale auto-amorçante couplée à la pompe principale. Le rendement de ces installations reste faible, bien qu'il soit supérieur à celui de l'exhaure classique.

Les stations d'exhaure principales plus récentes sont équipées de *pompes verticales haute pression* à plusieurs étages en série plongeant directement dans le puisard. Elles éliminent toute perte de charge à l'aspiration et tout risque de désamorçage. Leur rendement s'en trouve accru ; il est de l'ordre de 85 à 90 %. Leur inconvénient réside dans le fait que le corps de la pompe est difficile d'accès à l'entretien.

Boyer - Viollet

L'apparition des *pompes immergées* de grand débit et à grande hauteur de refoulement bouleverse la pratique de l'exhaure traditionnelle. Elle permet de suspendre la pompe par la canalisation de refoulement dans un puits isolé situé au point bas de la mine où on fera converger toutes les eaux d'exhaure. On peut ainsi supprimer la station d'exhaure au fond de la mine qui nécessite des travaux importants de génie civil et d'équipement.

On distingue sous le nom d'installations d'*exhaure secondaire* l'ensemble des pompes et canalisations qui font converger l'eau vers la station d'exhaure principale. Dans des mines étendues ou accidentées, un nombre important de pompes, dans une large plage de débit et de puissance, peut être nécessaire : la mine de Largentière, dont le débit d'exhaure principale est de 5 000 m^3/h, possède 77 pompes d'exhaure secondaire de 20 m^3/h à 360 m^3/h de débit et de 2 ch à 30 ch de puissance. Elles pompent les eaux de la mine dans cinq stations d'exhaure secondaire qui, à leur tour, les remontent à la station d'exhaure principale équipée de quatre pompes d'une capacité totale de 1 160 m^3/h située à 150 m de la surface.

* *Le coût de l'exhaure*

Les installations d'exhaure effectuées à l'ouverture de la mine ont une durée de vie égale à celle de la mine. Dans les mines ouvertes au début du siècle, on utilise encore des pompes de l'époque. Le poids des investissements d'exhaure est par conséquent faible comparativement à d'autres immobilisations, tels les engins d'abattage et de transport. Cependant, le coût en est variable d'une mine à l'autre, compte tenu de la capacité installée et de la profondeur. Pour des débits et des profondeurs moyennes, on investit pour l'exhaure 5 à 8 F par m^3/h de capacité et par mètre de refoulement.

Les frais de pompage représentent 2 à 5 % du prix de revient du minerai exploité ; ce sont des dépenses d'entretien des installations et d'énergie de pompage (1 kWh/m^3 pour une profondeur de 200 m).

Les hommes dans la mine

Le tragique bilan des grandes catastrophes collectives, depuis les 1 099 victimes du coup de poussière de Courrières en 1906, jusqu'aux 262 morts de Marcinelle en 1956, et plus près de nous les 40 morts de Liévin, est pour l'opinion publique l'image la plus forte des dangers du travail de mineur (*fig.* 26).

Fort heureusement, de telles catastrophes sont extrêmement rares et, de surcroît, donnent une fausse idée des conditions du travail. En fait, le travail au fond est moins meurtrier que celui de beaucoup de chantiers du bâtiment et des travaux publics, et aussi moins dangereux, proportionnellement au temps passé, que le trajet entre le domicile et la mine...

Mais, en se mécanisant, la mine fait apparaître de nouveaux dangers : alors qu'autrefois les accidents proprement miniers (chutes de blocs de roche, éboulements, explosions) représentaient le risque principal, aujourd'hui, dans la mine comme ailleurs, les accidents liés au déplacement d'engins, ou aux mouvements des individus eux-mêmes, sont largement majoritaires : c'est que la proportion des mineurs qui sont impliqués dans les opérations directement productives décroît lentement (elle est partout inférieure à 50 %), tandis que les catégories des services généraux et de l'entretien deviennent prépondérantes.

Le mineur au marteau piqueur est maintenant bien loin, et si la main-d'œuvre représente encore environ la moitié du prix de revient de l'extraction, c'est essentiellement de salaires de techniciens spécialisés dans la conduite de machines qu'il s'agit.

La mine sans hommes n'est pas encore pour demain, mais une évolution très nette se dessine, y compris dans le choix des méthodes d'exploitation, pour éliminer en priorité les travaux les plus pénibles, les plus dangereux et les moins mécanisables.

Ultérieurement, la *gazéification du charbon* (par injection d'air hydrogéné depuis la surface et récupération du carbone sous forme gazeuse), la *lixiviation in situ* (par injection dans le gisement préfracturé de solvants appropriés et pompage de solutions enrichies) ou l'*exploitation de placers sous-marins* éloigneront définitivement le mineur du front de taille.

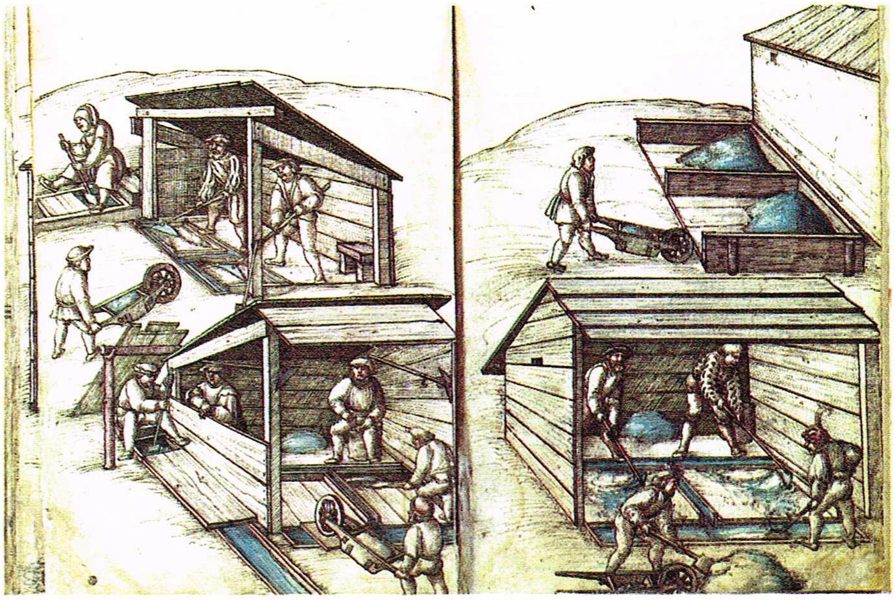
Bulloz

▲ *La mine Saint-Nicolas.* **Les Laveurs de mine,** ***par H. Gross. École allemande du XVIe siècle ; Paris, École des beaux-arts.***

La minéralurgie

Le minerai extrait du gisement n'est pratiquement jamais commercialisable ni même transportable en l'état : il doit subir dès la sortie de la mine une certaine préparation. Parfois limitée à une classification par granulométrie, cette préparation consiste le plus souvent à purifier le minerai par élimination de la gangue stérile, qui peut alors être abandonnée sur place ou même renvoyée dans la mine comme remblai. Cette opération se déroule dans la laverie (mines métalliques) ou le lavoir (charbon). L'élimination des constituants stériles permet d'obtenir un produit plus riche en minéraux utiles (on dit aussi : plus concentré, et on appelle souvent « concentré » ce minerai enrichi) et donc de plus grande valeur.

Seul, ce concentré peut être économiquement transporté dans le cas des minerais à faible teneur, tels les minerais de plomb et zinc dont la teneur habituelle est de l'ordre de 10 %, les minerais de cuivre (teneur 1 %), les minerais d'uranium (teneur 0,1 %), les minerais d'or (teneur 0,001 %). Dans tous ces cas, on opère sur le carreau même de la mine un enrichissement (ou concentration) qui donne un concentré de teneur beaucoup plus élevée : 30 % pour le cuivre, 60 à 70 % pour le plomb et le zinc. Ces chiffres sont assez éloignés de 100 % parce que, dans le concentré, le métal reste sous sa forme minéralogique et chimique d'origine, c'est-à-dire sous forme de sulfure, d'oxyde, de silicate, etc. Ce concentré devra donc encore être traité pour en extraire le métal pur, ce qui fera l'objet de la métallurgie extractive.

L'enrichissement est également pratiqué pour des minerais déjà passablement riches à l'état naturel, tels les minerais de fer (30 à 60 %) ou les phosphates (à 60 % de phosphate tricalcique), parce que les tonnages à transporter sont considérables, et les minerais d'assez faible valeur : le coût du transport est alors aussi important que celui de l'extraction, et les transactions ne portent que sur des produits de teneur normalisée. A l'inverse, on peut citer comme exception le minerai de nickel de Nouvelle-Calédonie (teneur voisine de 2 %) dont une partie est expédiée en l'état vers le Japon, faute d'un procédé de concentration assez bon marché.

La minéralurgie est l'ensemble des méthodes mécaniques, physiques et chimiques qui permettent de séparer les minéraux utiles de leur gangue et de les séparer entre eux. L'existence d'un procédé de séparation est souvent déterminante pour la mise en valeur d'un gisement, particulièrement dans le cas des minerais complexes : c'est ainsi que les gisements de plomb-zinc-argent ont longtemps été exploités pour l'argent et le plomb, sans récupération du zinc. Ce n'est qu'après la mise au point d'un procédé de séparation adapté (flottation différentielle) que les minerais de zinc ont pu être valorisés, d'abord à partir des haldes (stériles) des anciennes mines de plomb, ensuite en tant que gisements autonomes.

Tableau IX Chronologie des principales méthodes de concentration des minerais (d'après Tsémo, École Nat. Supérieure des Mines de Paris, 1976)					
Dates	Propriétés physico-chimiques utilisées				
	Densité	Caractéristiques électro-magnétiques	Propriétés de surface	Propriétés chimiques	Biologie
Avant Jésus-Christ	Triage manuel				
Après Jésus-Christ	Tables dormantes				
1300	Tables à secousses			Alchimie	
1876				Hydro-métallurgie, lixiviation	
1888		Séparateur basse-intensité			
1900		Électrostatique			
1915			Flottation		
1930	Milieu dense, cyclonage	Radio-activité			
1948	Spirale Humphreys				
1955					Biominé-ralurgie
1960		Séparateur haute-intensité	Floculation sélective		

▲ *Tableau IX : chronologie des principales méthodes de concentration des minerais.*

L'évolution des techniques contribue ainsi à expliquer que certains gisements aient pu être abandonnés puis réexploités plusieurs fois au cours des siècles.

Définie en 1872 par Littré comme « art de traiter les minéraux pour les rendre utiles », la minéralurgie puise ses sources jusqu'aux origines de l'exploitation des mines. L'homme a commencé par séparer manuellement le métal noble — or, argent — du stérile à partir de sa couleur caractéristique. Au XIII^{e} siècle apparaissent les tables dormantes et les tables à secousses permettant de classer les différents minéraux suivant la densité, les dimensions et la forme des particules. Les alchimistes, par leurs recherches en vue de fabriquer de l'or à partir de différentes substances minérales, sont les premiers à introduire la chimie dans la minéralurgie. La demande croissante en substances minérales, avec pour corollaire l'exploitation des gisements de plus faibles teneurs, a conduit à la mise au point récente de nouvelles méthodes d'enrichissement de minerai utilisant les propriétés électriques, magnétiques, physico-chimiques; depuis peu, on utilise même les bactéries comme agents de concentration (*tableau* IX).

La minéralurgie comporte deux phases successives :

— La préparation mécanique des minerais, au cours de laquelle la roche est brisée en morceaux de dimension appropriée à la séparation. La partie correspondante de l'usine de traitement est appelée atelier de préparation ou de comminution.

— La séparation proprement dite, qui utilise les différences de propriétés physiques, mécaniques ou physico-chimiques des minéraux et de la gangue pour les séparer. Cette opération se déroule dans l'atelier de concentration. Les opérations minéralurgiques se terminent généralement par un conditionnement du concentré (séchage, bouletage...).

Chaque opération de traitement est effectuée par un appareil adapté, lequel est suivi d'un second appareil (le classificateur) dont la fonction est de contrôler la bonne qualité du travail du premier en classant les produits résultants en deux catégories distinctes. La première est la fraction de minerai satisfaisant aux normes fixées, qui poursuivra le circuit normal de l'usine. La seconde catégorie est recyclée pour être retraitée soit directement en tête de l'appareil, soit plus en amont, selon l'écart par rapport aux normes.

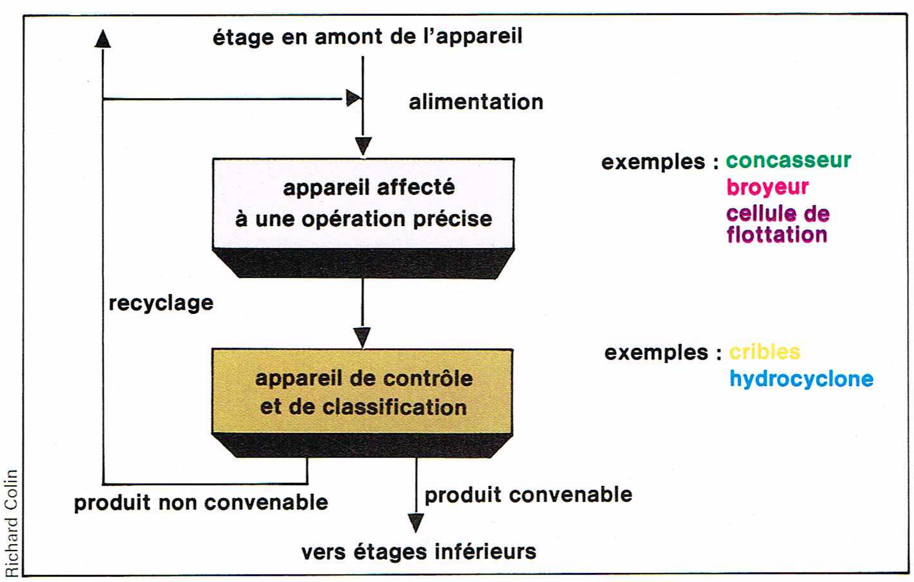

▼ *Figure 27 : schéma d'une opération minéralurgique. Un appareil effectue une opération, nécessairement imparfaite; l'appareil de contrôle et de classification sépare le produit traité en deux parties selon les normes fixées.*

La préparation mécanique du minerai

Le minerai tout venant à la sortie de la mine se présente sous forme d'un agglomérat de blocs dont les plus gros peuvent atteindre deux mètres dans les exploitations à ciel ouvert. Par une suite continue d'opérations mécaniques, ils doivent être entièrement réduits à une granulométrie fine caractérisée par une taille des grains égale à celle des différents minéraux à séparer (de 1 à 100 µm selon les minéraux). Cette taille est appelée « dimension de libération ».

Pour atteindre cette dimension de « libération », le minerai est concassé puis broyé par plusieurs machines successives. A chaque étape de la préparation, un triage adapté (voir *fig.* 27) permet de séparer les grains fins — pour les envoyer à l'étage suivant — des grains plus gros qui ont échappé à la réduction et sont renvoyés en amont.

Le concassage

Les opérations de concassage réduisent les blocs de minerais jusqu'à une granulométrie de l'ordre du centimètre, à partir de laquelle le minerai sera broyé. Le déroulement de ces opérations dépend de nombreux paramètres. On peut citer parmi les plus importants :

— Le débit de l'alimentation, les dimensions des plus gros blocs des produits initiaux et des produits finals à obtenir. Ces paramètres conditionnent les dimensions du concasseur.

— La dureté, l'humidité et le caractère plus ou moins abrasif et/ou collant du minerai dont dépendent l'efficacité et l'usure du concasseur.

— La régularité de l'alimentation qui assure la bonne marche du concasseur.

Plusieurs concasseurs disposés en cascade et entre lesquels sont installés des cribles permettent de réduire progressivement la granulométrie. Comme la fragmentation des roches est un phénomène sur lequel les connaissances sont insuffisantes, l'expérience et les essais préalables sont indispensables pour déterminer le nombre optimal et les rapports de réduction des différents étages. Dans les circuits classiques des laveries de minerais métalliques, on dispose de deux ou trois concasseurs (*fig.* 28). Le premier constitue l'étage du concassage primaire. Il reçoit le tout-venant de la mine.

Dans la majorité des cas, c'est un concasseur à mâchoires dont la capacité peut atteindre 2 000 t/h.

Ce concasseur, très robuste, est constitué par deux mâchoires en forme de V disposées face à face, dont l'une est fixe et l'autre animée d'un mouvement alternatif produit au moyen d'un système bielle-excentrique; deux volants d'inertie régularisent le mouvement; la matière à concasser est introduite à la partie supérieure. Le rappro-

chement de la mâchoire mobile fait éclater les blocs par compression et son écartement les libère à la partie inférieure. Deux types de concasseurs à mâchoires sont fréquemment utilisés : le type Blake, datant de 1858, qui présente l'avantage d'avoir une grande ouverture permettant une alimentation en gros blocs, mais avec un rapport de réduction faible (de l'ordre de 4/1) ; et le type Dodge, à grand rapport de réduction (10/1), mais qui consomme beaucoup plus d'énergie, avec en outre un risque d'engorgement supérieur.

- Les étages inférieurs de concassage sont équipés de concasseurs de capacités plus faibles :

— Les concasseurs giratoires (type Symmons ou Gates) sont les plus fréquents : dans ces appareils, le minerai est réduit par écrasement entre la paroi circulaire fixe et un bloc tronconique monté sur un arbre vertical et mû à sa base par un excentrique. La vitesse de rotation de l'arbre est de l'ordre de 200 tr/mn, et le rapport de réduction de 6/1 à 20/1.

— Le concasseur à cylindres se compose de deux cylindres montés sur deux arbres moteurs horizontaux tournant en sens inverse. Les produits concassés ont une très bonne régularité granulométrique, mais le rapport de réduction est faible, pratiquement de 2/1 à 5/1.

— Le concasseur à marteaux utilise le choc pour faire éclater les blocs. Le rapport de réduction est très élevé (100/1), et pour des substances de moindre dureté, il peut remplacer deux ou trois étages d'autres types de concasseurs. Toutefois, l'usure des marteaux est rapide et le coût élevé.

Le broyage

Le broyage est l'opération la plus onéreuse de la préparation mécanique du minerai à cause de sa consommation d'énergie (le rendement énergétique très faible n'est que de 2 à 3 % de l'énergie consommée) et d'acier (par usure des corps broyants). Dans le cas des minerais de cuivre, concassage et broyage consomment 27 % de toute l'énergie dépensée dans l'exploitation minière, la minéralurgie et la métallurgie.

Le broyage s'effectue en un ou deux étages en phase humide; le minerai provenant du circuit de concassage mis en pulpe (minerai + eau) passe dans une série de broyeurs qui réduisent sa granulométrie jusqu'à la dimension de « libération ». Un classificateur permet de renvoyer en tête du circuit les produits insuffisamment broyés (voir *fig.* 28).

Les broyeurs sont des cylindres, de diamètre compris entre 1 et 4 m, disposés horizontalement ou légèrement inclinés, tournant autour de leur axe. Les plus répandus dans l'industrie minière sont les broyeurs à barres et les broyeurs à boulets qui ont des rapports de réduction pouvant atteindre 500/1. Dans ces broyeurs, le roulement des barres ou des boulets sur eux-mêmes, provoqué par la rotation du cylindre, broie le minerai par chocs, frottement et attrition.

L'usure des corps broyants (barres et boulets) est très importante et dépasse de loin celle des pièces du concasseur; pour un même rapport de réduction de 50/1, la consommation d'acier au manganèse est de 50 g/t au concassage et 2 500 g/t au broyage d'un quartz minéral particulièrement dur et abrasif. Lorsque le minerai est très dur, les corps broyants peuvent être constitués par de gros blocs du minerai lui-même, ce qui évite l'emploi de boulets ou de barres métalliques.

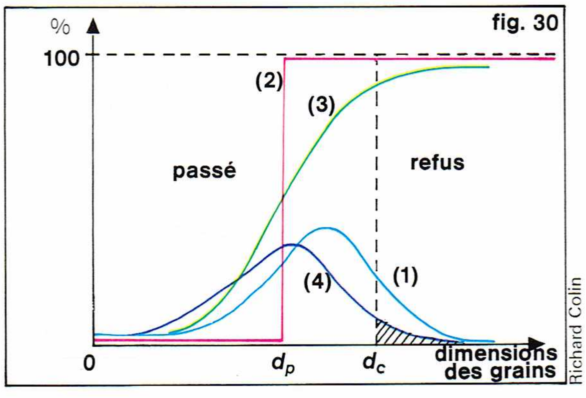

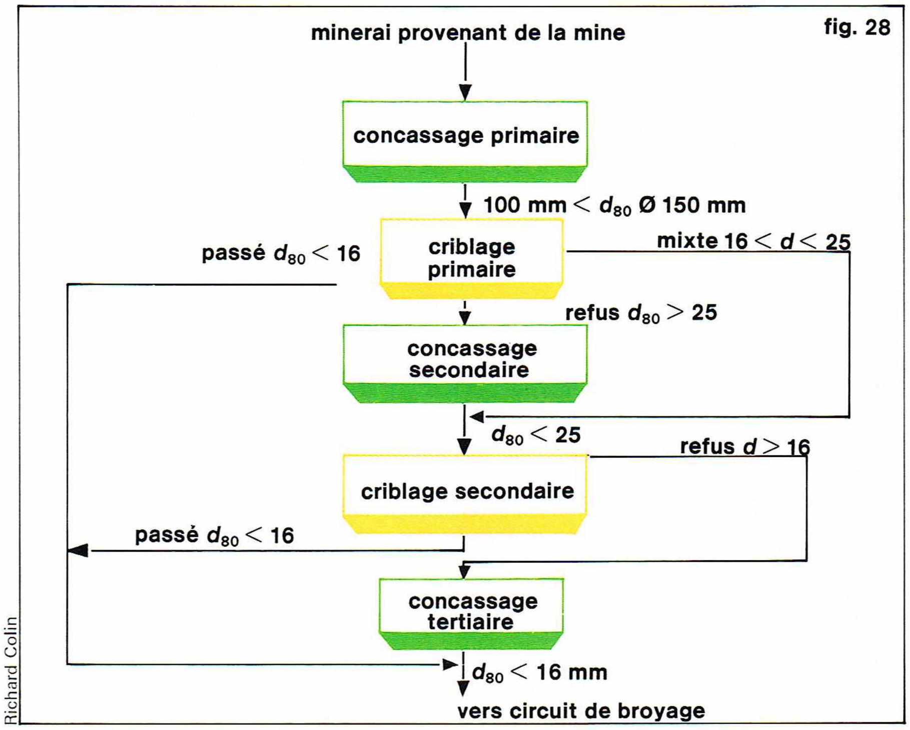

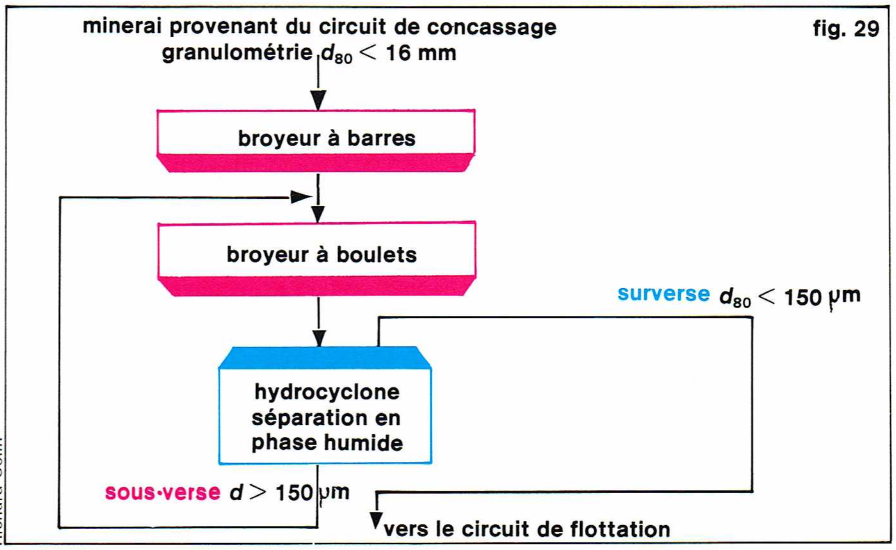

La classification

La classification a pour but de séparer, dans une alimentation constituée de grains de dimensions différentes — voir la courbe **(1)** de distribution granulométrique de la *fig.* 30 —, d'un côté ceux dont la dimension est inférieure à une dimension de coupure d_c et, de l'autre, ceux dont la dimension est supérieure à cette dimension de coupure.

Les appareils de classification ne permettent pas de réaliser une séparation parfaite; ils sont caractérisés par une courbe de partage. Pour un appareil parfait, celle-ci aurait la forme d'un échelon : tout grain de dimension inférieure à d_p (dimension de partage) se retrouverait dans le « passé », et tout grain de dimension supérieure dans le « refus » — courbe **(2)**. Pour obtenir une coupure à la dimension d_c, il suffirait donc de choisir l'appareil tel que sa dimension de partage soit précisément égale à d_c. Malheureusement, pour les classificateurs industriels, la séparation n'est pas aussi nette. La probabilité pour un grain de dimension inférieure à d_p de passer dans le « refus » n'est pas négligeable (et inversement). La courbe de partage a la forme d'un S. La dimension de partage du classificateur réel est alors définie comme étant celle des grains que l'appareil ne sait pas trier : la moitié va dans le « refus », et la moitié dans le « passé » — courbe

▲ En haut, figure 28 : exemple schématique d'un circuit de concassage; d_{80} < 16 signifie que 80 % des particules sont de dimension inférieure à 16 mm.
Ci-dessus, figure 29 : schéma d'un circuit de broyage; à l'entrée, 80 % des grains sont de dimension inférieure à 16 mm; à la sortie, 80 % des grains sont de dimension inférieure à 150 µm.

***◀ Figure 30 : distribution granulométrique de l'alimentation d'un classificateur* [1]*; courbe de partage d'un classificateur parfait (en cumulé)* [2]*; et d'un classificateur réel (en cumulé)* [3]*; distribution granulométrique du « passé » (en %)*[4].**

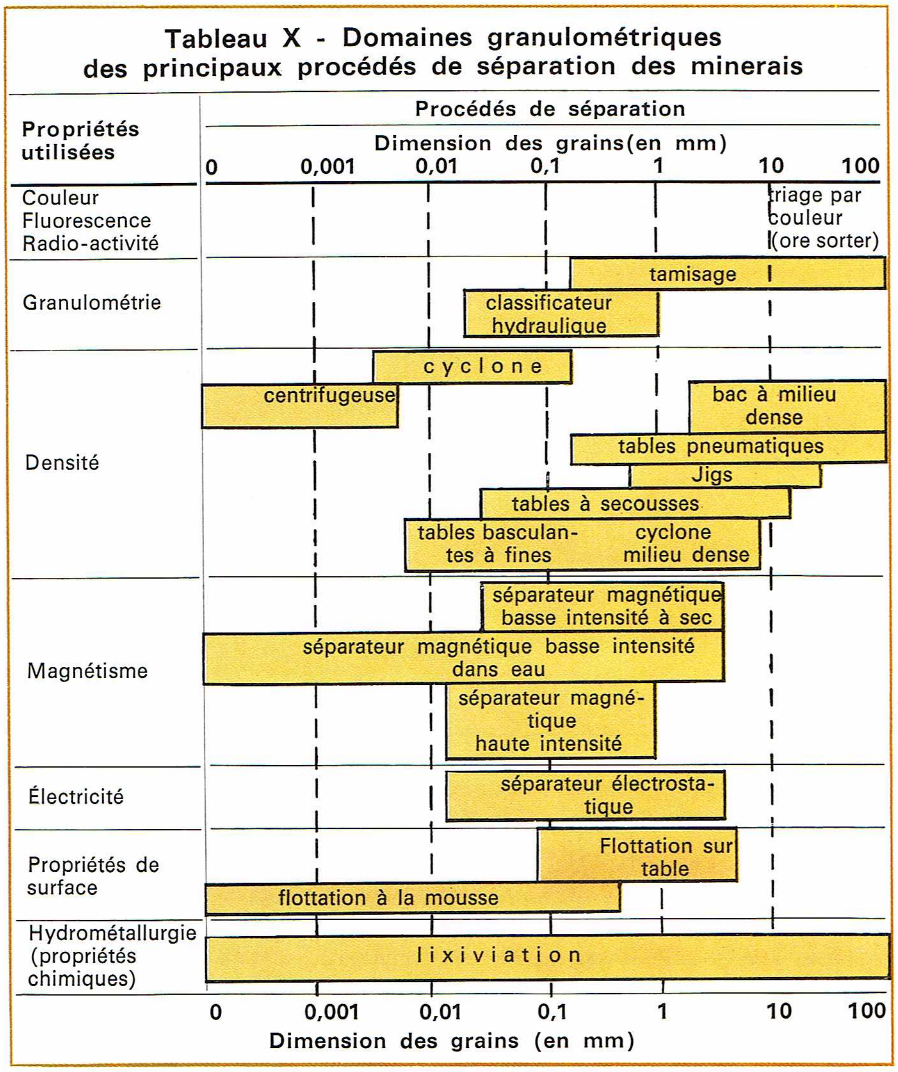

▲ ***Tableau X : domaines granulométriques des principaux procédés de séparation des minerais.***

(**3**). Les grains sont d'autant mieux classés que leur dimension est plus éloignée de d_p.

On est donc amené, pour classer les grains, à choisir un appareil dont la dimension de partage est inférieure à d_c, si l'on veut privilégier la pureté du « passé ». La courbe (**4**) donne la distribution granulométrique de ce « passé » dont la pureté est mesurée par l'aire hachurée. Dans la pratique industrielle, on appelle d_{80} la dimension telle que 80 % des grains du « passé » soient plus petits que ce d_c (l'aire hachurée représente alors 20 % de l'aire totale de la courbe du « passé »).

Les classificateurs les plus employés dans les laveries modernes sont les cribles et les hydrocyclones.

Les cribles (tamis) sont des classificateurs pour grains assez gros (supérieurs à 1 cm) et fonctionnent à sec aux différentes étapes du concassage. Les cribles à secousses sont des plaques de tôles perforées ou de toile métallique inclinées de 15 à 20°, couplées à un moteur qui les fait vibrer à une fréquence de 1 000 vibrations par minute. Les cribles vibrants ont des fréquences plus élevées : 1 000 à 3 600 vibrations par minute. Ils ont sur les cribles à secousses l'avantage d'une capacité supérieure et de frais d'entretien moindres.

Les hydrocyclones classent les grains de petites dimensions en phase humide selon leur taille et leur densité (ils sont souvent utilisés à la sortie des broyeurs). La pulpe est injectée, sous pression, tangentiellement dans un cylindre qui peut atteindre 50 cm de diamètre ; elle est soumise à des accélérations centrifuges 1 000 fois supérieures à la gravité terrestre. Les grains grossiers et denses descendent dans la partie inférieure conique de l'appareil où ils sont évacués, constituant la sous-verse du cyclone. Les grains fins et légers sont évacués dans la partie supérieure du cylindre avec la plus grande partie de l'eau et constituent la surverse (*fig.* 31).

Les différents procédés de concentration

Ces procédés sont très nombreux et très variés. Il s'agit dans tous les cas de profiter des différences de comportement entre minéraux de nature différente, lorsqu'ils sont soumis à une sollicitation extérieure, pour les séparer. Ces sollicitations peuvent être de nature purement physique (optique, électrique, magnétique, mécanique) ou physico-chimique (flottation, hydrométallurgie). Pour un même minerai, plusieurs procédés sont généralement utilisés en série, suivant la finesse de broyage : les procédés les moins élaborés (densimétriques et gravimétriques) permettent de faire une première coupure sur des granulométries grossières. Les produits plus fins sont traités par des procédés plus sophistiqués comme la flottation (*tableau* X).

Principes de la concentration

Quel que soit le procédé adopté, le but est de produire, à partir des minerais de faible teneur, des concentrés de teneur plus élevée. Dans l'atelier de concentration entre un minerai brut broyé, et il en sort deux produits : les concentrés riches en métal et les « stériles », qui, dans le cas idéal, devraient être dépourvus de métal. En fait, la concentration de minerai est une opération chère, et les coûts seraient rapidement prohibitifs si l'on cherchait à récupérer tout le métal contenu dans le minerai. De ce fait, les produits appelés « stériles » ont toujours une certaine teneur en métal. Le taux de récupération du métal, qui est le rapport entre la quantité de métal récupéré et la quantité de métal contenu dans le minerai, mesure la performance de la laverie. Ce taux est compris entre 80 et 95 % pour les grands ateliers de flottation des minerais sulfurés ; il tombe à 70 % et même 60 % pour certains procédés gravimétriques (Jigs).

Toujours pour des raisons économiques, la teneur des concentrés est limitée : certaines laveries de phosphates se contentent de concentrer du minerai de 58 % à 62 %, rejetant des stériles ayant une teneur de plus de 45 %. Ces « stériles » riches en substances nobles, mais actuellement non économiques, sont susceptibles d'une réexploitation ultérieure. C'est ainsi qu'on exploite actuellement des « minerais » à 0,4 % de cuivre qui sont des « stériles » rejetés il y a quarante ou cinquante ans.

Schéma économique d'un atelier de concentration

Une quantité M_0 de minerai à la teneur T_0 entre en tête de laverie. Il en sort une quantité M_1 de concentrés à la teneur T_1 et une quantité M_2 de « stérile » à la teneur T_2 :

— $M_0 = M_1 + M_2$; conservation de la masse ;

— $M_0T_0 = M_1T_1 + M_2T_2$; conservation en masse de la substance noble ;

— $\rho = \dfrac{M_1T_1}{M_0T_0}$; taux de récupération du métal contenu : mesure l'efficacité de la laverie ;

— $R = \dfrac{M_1}{M_0}$, rendement pondéral de la laverie : donne le tonnage des concentrés.

Ces huit grandeurs sont reliées entre elles par quatre relations. On ne peut donc fixer arbitrairement que quatre d'entre elles. Pour un minerai donné, on connaît M_0 et T_0. La laverie est donc définie par deux paramètres indépendants, qui peuvent être la teneur des concentrés T_1 et le taux de récupération métal ρ. Alors $R = \dfrac{T_0}{T_1}$

et
$$T_2 = \frac{(1-\rho)\,T_0}{1-\rho\,\dfrac{T_0}{T_1}}$$

Les procédés fondés sur la gravité

Les procédés de concentration par gravité utilisent simultanément les variations de densité, de volume et de forme des particules pour obtenir une séparation soit dans l'air, soit sur un plan incliné, soit dans un milieu dense statique ou en mouvement. Trois méthodes ont été mises au point et exploitées industriellement.

La méthode de la nappe pelliculaire fluante. Une nappe d'eau de faible épaisseur (quelques centimètres) s'écoule sur un plan incliné. Les particules, suivant leur vitesse et leur résistance au mouvement, se séparent en classes densimétriques.

Les *tables dormantes,* dont le type le plus répandu est la table « canvas », sont des surfaces inclinées à fond rugueux. Elles sont utilisées pour le traitement des boues aurifères. La récupération de l'or est obtenue en lavant la surface rugueuse avec de l'eau propre; la capacité de ces tables varie de 0,1 à 1,5 t/m^2 · h de minerai traité. On l'utilise encore quelquefois pour récupérer la cassitérite (minerai d'étain).

La *spirale Humphreys* a connu un succès industriel remarquable. C'est une goulotte de section arrondie enroulée autour d'une hélice dans laquelle on laisse écouler la pulpe broyée à une granulométrie de 2 à 0,05 mm. Sous l'effet des forces centrifuges, de la pesanteur, du frottement et du courant d'eau, il se produit une classification; les grains les plus denses cheminent à l'intérieur, les plus légers à l'extérieur de la spirale. Le fait que la spirale n'utilise pas de force motrice, qu'elle soit peu encombrante et d'entretien facile explique son succès. En 1966, on en dénombrait 25 000 appareils dans l'industrie minière occidentale concentrant du charbon, des minerais de fer, de wolframite, de tungstène, de chrome, de phosphates de titane, de plomb et de zinc, de l'or, du manganèse, du talc, de la pyrite, etc. La capacité d'une spirale est de 0,5 à 2,5 t/h. Son inconvénient réside dans le fait que ses « stériles » sont riches en métal et doivent être retraités.

La méthode de l'accélération différentielle. Les particules sont soumises à des oscillations périodiques qui provoquent une sédimentation différentielle entre les particules lourdes et les particules légères. Les tables inclinées à secousses et les jigs, dont l'origine remonte au Moyen Age dans les exploitations de plomb-zinc du Hartz en Allemagne, relèvent de cette technique. Ils ont l'inconvénient, comme les tables dormantes et les spirales Humphreys, d'avoir de faibles capacités (1 t/h-m^2), et ils ne peuvent efficacement équiper des laveries dont la taille ne cesse d'augmenter.

Les milieux denses. Le procédé gravimétrique le plus simple à imaginer consiste à introduire le minerai broyé dans un liquide de densité intermédiaire entre celle de la gangue et celle des minéraux valorisables. Les produits les moins denses surnagent, tandis que les plus denses se déposent et sont récupérés au fond de l'appareil. La difficulté réside dans le choix du médium de densité appropriée, qu'on régénère facilement une fois la séparation effectuée. A l'origine, on utilisait l'argile, la barytine et la galène pour confectionner ce médium, mais, rapidement, on est passé aux matériaux magnétiques (magnétite et surtout ferrosilicium) dont les médiums sont plus stables et plus faciles à récupérer ou à épurer grâce à une séparation magnétique.

Pour des minerais de cristallisation grossière, ce procédé est susceptible de donner des concentrés définitifs à une granulométrie comprise entre 1 et 100 mm. L'emploi des cyclones à milieu dense, qui ajoute les forces centrifuges à la pesanteur, permet de traiter des granulométries inférieures au dixième de millimètre. Le milieu dense est utilisé pour la concentration du charbon, du fer, des minerais métalliques (plomb-zinc, étain, chrome), des minerais non métalliques (fluorite, magnésite, sels, diamants, bauxite) et des matériaux de construction (gravier, sable, pierre ponce).

L'inconvénient majeur de tous les procédés gravimétriques est leur faible taux de récupération (30 à 60 %), mais, à cause de leurs coûts très bas, ils sont utilisés en combinaison avec d'autres méthodes et constituent les premiers étages des circuits de concentration; ils permettent de séparer la partie la plus facile à récupérer des minéraux valorisables.

Procédés magnétiques et procédés électriques

Procédés magnétiques. Ils consistent à soumettre les grains de minerais en mouvement à un champ magnétique. Suivant leurs propriétés magnétiques, les minéraux sont déviés sur des trajectoires différentes, ce qui permet leur séparation. On utilise ces techniques pour traiter les minerais à forte susceptibilité magnétique comme les oxydes de fer (magnétite), de manganèse, certaines espèces de chromites ferrifères, etc. La séparation peut être effectuée à sec ou en phase humide. L'intensité du champ magnétique créé par l'électro-aimant du séparateur est un paramètre important. C'est ainsi qu'on distingue des séparateurs basse intensité et des séparateurs haute intensité, pour les minéraux moins magnétiques.

Procédés électrostatiques. On utilise la plus ou moins grande aptitude des particules à se charger électriquement (par induction, conduction ou sous l'effet d'un gaz ionisé) pour les séparer dans un champ électrostatique; soumises à ce champ, les particules en mouvement sont plus ou moins déviées selon la charge qu'elles ont acquise. La séparation électrostatique exige l'existence d'un champ électrique de forte intensité. Sur le plan industriel, la principale application est le traitement des sables de plages titanifères. Après un traitement préalable à la spirale, qui élimine les éléments légers, l'électrostatique permet la séparation des substances conductrices (ilménite et rutile). On peut aussi l'utiliser dans le traitement de la chromite, de l'hématite, de la magnétite, de la scheelite, de la colombite et de la cassitérite. Ce procédé est moins répandu que les procédés magnétiques, plus faciles à mettre en œuvre.

La radio-activité. Les substances radio-actives émettent des rayonnements α, β et γ qui peuvent être utilisés pour les séparer de leur gangue silicatée. Le rendement de ce procédé de séparation est toujours médiocre, c'est pourquoi il est peu utilisé.

La flottation

La flottation est la méthode d'enrichissement de minerai la plus utilisée dans le monde. On l'emploie industriellement pour concentrer les minerais de toutes les substances minérales métalliques ou non métalliques, particulièrement les minerais sulfurés qui constituent la fraction la plus importante des ressources minérales exploitables.

Principe. La flottation est fondée sur les propriétés physico-chimiques de surface des minéraux. En effet, certains minéraux, plongés dans un liquide, sont hydrophobes; leur surface ne mouille pas et ils ont tendance à s'attacher à des bulles d'air qui remontent à la surface du bain. D'autres espèces minérales, par contre, sont hydrophiles; elles ne suivent pas les bulles d'air et restent en suspension dans le bain. La flottation consiste à séparer dans une cellule les minéraux valorisables de la gangue en les rendant hydrophobes. De l'air est injecté au fond de la cellule de flottation; l'emploi de moussants favorise la formation et la stabilité de bulles d'air qui se réunissent à la surface et forment la mousse, laquelle contient les minéraux valorisables (*fig.* 32).

Les difficultés de la flottation résident dans le choix des réactifs chimiques permettant la meilleure séparation des minéraux valorisables de la gangue et le contrôle de la cinétique de la flottation dans les grandes cellules industrielles.

Les réactifs chimiques de la flottation. Les connaissances empiriques et théoriques acquises depuis 1915, début de la flottation industrielle, n'ont pas encore permis d'élucider complètement le comportement des interfaces solide-liquide-air. De ce fait, le choix des réactifs chimiques adaptés à la flottation d'un minerai donné est encore largement empirique. On peut cependant classer les différents réactifs suivant leur fonction.

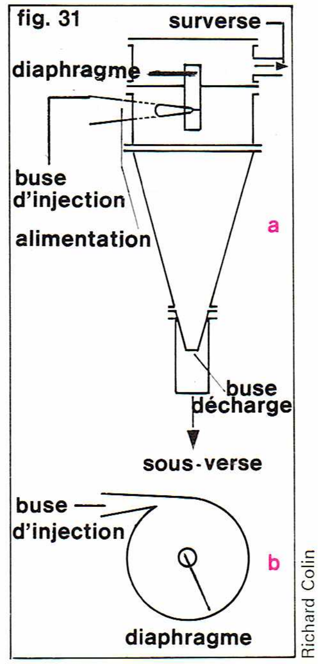

▲ *Figure 31 : représentation schématique d'un hydrocyclone ; a, coupe verticale, b, coupe transversale.*

▼ *Figure 32 : principe de flottation d'un sulfure de cuivre composite contenant du molybdène.*

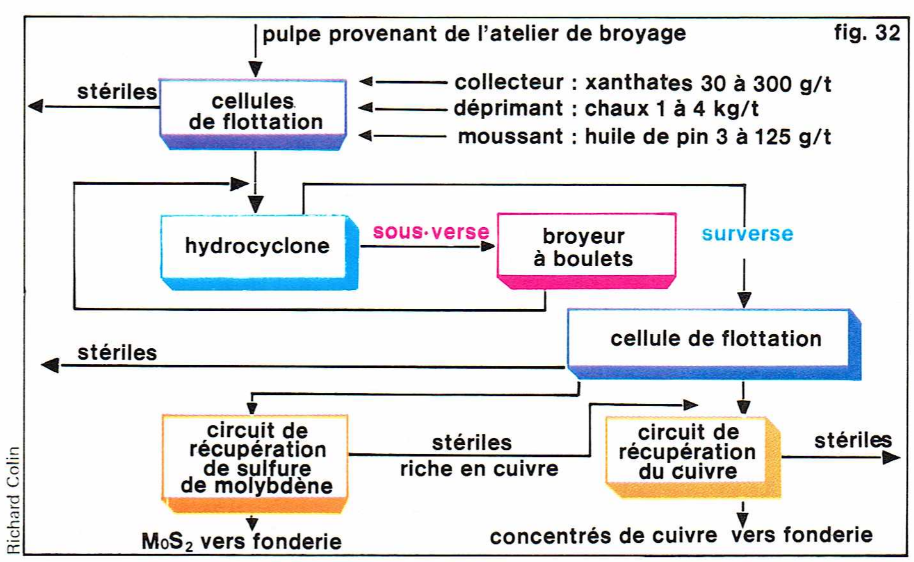

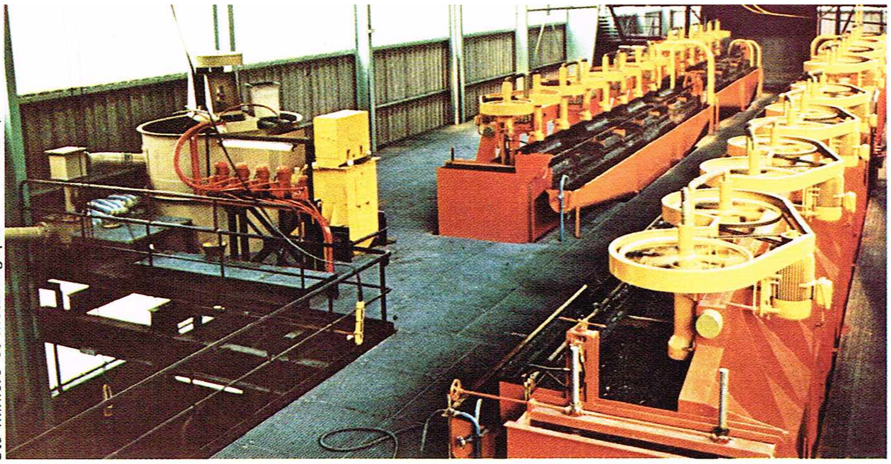

Sté minière et métallurgique de Peñarroya

▲ *Atelier de flottation d'une laverie moderne de zinc. Dans les grandes laveries, il peut y avoir plusieurs centaines de cellules de flottation.*

Les *collecteurs :* ce sont des substances chimiques organiques ayant la propriété de rendre certains minéraux hydrophobes. Les collecteurs à base d'amines sont utilisés dans la flottation de nombreux minéraux silicatés. Les collecteurs des minerais sulfurés sont essentiellement des xanthates, huiles provenant du pétrole. Il faut en moyenne 150 g de xanthates pour flotter une tonne de minerai sulfuré de cuivre.

Les *moussants :* le rôle des moussants est de produire de la mousse en quantité suffisante pour piéger les particules hydrophobes. L'huile de pin est le principal moussant utilisé ; on emploie aussi des alcools pour la flottation des silicates, et l'acide crésylique pour les minerais métalliques oxydés.

Les *déprimants* et les *activants :* dans la flottation différentielle des minéraux composites, on récupère successivement les différentes substances nobles. Le rôle des déprimants est d'empêcher le collecteur de se fixer sur les faces d'une ou de plusieurs espèces minérales qu'on ne veut pas encore récupérer. La laverie de Largentière (Ardèche) traite un minerai composite constitué de galène, de cérusite et de blende. La première phase de la flottation consiste à récupérer la galène et la cérusite en déprimant la blende qui, dans la deuxième phase, est réactivée par un ajout de sulfate de cuivre, puis flottée et récupérée à son tour. Les principaux déprimants et activants (dont le rôle est l'opposé de celui des déprimants) sont les sels des métaux (sulfates essentiellement pour les minerais sulfurés) ; la consommation est de 250 à 500 g/t.

Les *régulateurs :* ils ont pour fonction de maintenir la cellule de flottation à un pH constant. La flottation d'une tonne de sulfures de cuivre consomme de 500 à 2 500 g de soude. La flottation de la blende et de la galène consomme de la chaux dans les mêmes proportions. La flottation des silicates se faisant en milieu acide à un pH compris entre 2 et 5, on utilise comme régulateur l'acide sulfurique.

Les cellules de flottation. Une laverie moderne est constituée de dizaines de cellules de flottation en série ou en parallèle. La laverie de la mine de cuivre de Bougainville a 216 cellules. Il existe plusieurs types de cellules selon les procédés d'alimentation en pulpe et en air sous pression et de récupération de la mousse. Tous ces procédés comportent une injection d'air au fond de la cellule et une agitation mécanique du bain (*fig.* 33).

Ces dernières années, le développement de l'industrie minérale a provoqué l'augmentation de la taille des cellules de flottation à agitation mécanique : elle est passée de 1,5 m^3 à 15 m^3. L'augmentation de la productivité en a été le corollaire ; de 30 t par homme-poste dans les petites laveries, elle s'élève à plus de 1 000 t par homme-poste dans les grandes laveries qui bénéficient d'un contrôle automatique perfectionné du processus de flottation. On a pu ainsi maintenir compétitif le coût de la flottation, qui reste de loin la méthode minéralurgique la plus répandue.

▼ *Figure 33 : coupe schématique d'une cellule de flottation (type Fagergren) [d'après P. Blazy,* la Valorisation des minerais, *P. U. F., Paris, 1970].*

fig. 33

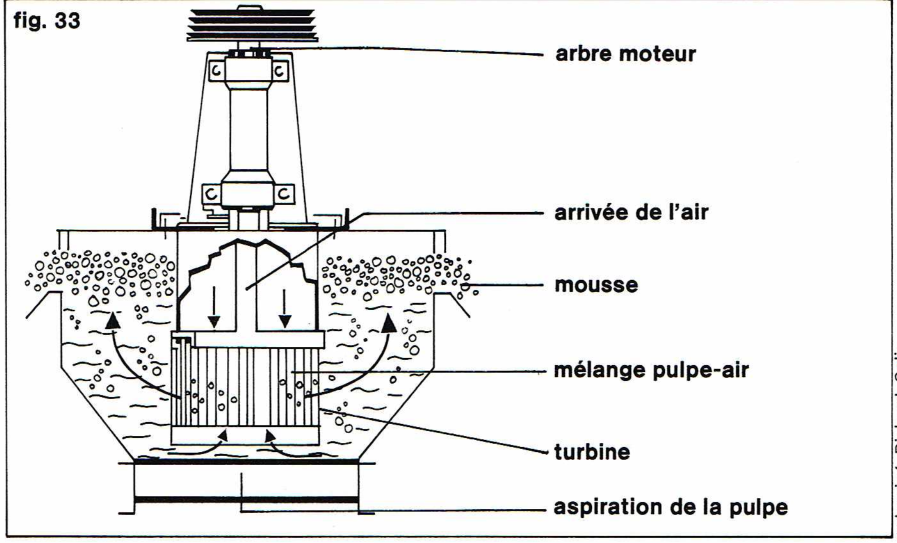

redessiné Richard Colin

La lixiviation

La lixiviation relève de l'hydrométallurgie, procédé chimique de traitement des substances minérales qui dépasse le cadre de la concentration des minerais, puisqu'elle se prolonge jusqu'à l'électroraffinage et la production du métal pur.

La lixiviation, pratiquée depuis longtemps sur les minerais oxydés de cuivre qui se prêtent mal à la flottation, connaît un regain d'intérêt parce qu'elle est moins polluante que la pyrométallurgie et offre des possibilités nouvelles à l'exploitation minière (lixiviation *in situ* ou en tas). Elle consiste à arroser le minerai broyé à une granulométrie convenable avec un produit chimique capable de dissoudre sélectivement le métal. La solution résultante est récupérée après filtration, puis raffinée pour en retirer le métal pur.

Des essais sont en cours aux États-Unis et au Canada pour lixivier directement le minerai à la mine (lixiviation *in situ*). Cette voie nouvelle, très prometteuse, est particulièrement adaptée pour l'exploitation des petits gisements de substances métalliques ou d'uranium, facilement solubles.

Une autre voie de la minéralurgie est la biolixiviation des minerais, en utilisant la propriété que possèdent certains micro-organismes de s'attaquer à des substances minérales spécifiques. Le *Thiobacillus ferrooxidans* oxyde le fer ferreux en fer ferrique. Le *Thiobacillus thiooxidans* oxyde le soufre des minéraux sulfurés en ion sulfate SO_4^{2-} dans les milieux acides, ce qui permet de traiter les minerais sulfurés comme la chalcopyrite (cuivre), la galène (plomb), la sphalérite (zinc), ainsi que les sulfures de cadmium, de nickel et de cobalt.

Le conditionnement des concentrés

A la sortie de la flottation, les minerais enrichis se présentent sous forme d'une pulpe très diluée. Les opérations de conditionnement se limitent la plupart du temps à un épaississage de ces pulpes sur filtre à vide rotatif suivi d'un séchage. Dans quelques cas particuliers, le transport est facilité par une dernière opération : le concentré sec auquel on adjoint un liant est transformé en boulets (charbon) ou en boulettes (minerais de fer) qui sont soumis à une cuisson à température modérée.

Dans le cas du fer, ce bouletage constitue en réalité la *première phase des traitements* métallurgiques ultérieurs.

BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages

BLAZY P., *Valorisation des minerais*, Paris, 1970. - MULLER Y., *Mines*, 2 vol., Paris, 1964. - SME, *Mining Engineering Handbook*, New York, 1973. - VIDAL V., *Exploitation des mines*, Paris, 1962. - *Exploitation des mines métalliques*, Société de l'industrie minérale, Saint-Étienne, 1961.

Revues

Annales des mines, Paris. - *Bulletin technique des mines de fer*, Saint-Étienne. - *Canadian Mining Journal*, Québec. - *Engineering and Mining Journal*, New York. - *Gluckauf*, Essen. - *Mining Engineering*, New York. - *Revue de l'industrie minérale*, Saint-Étienne.

Cours, thèses, mémoires

Cours de l'École des mines, Paris. - *Cours d'exploitation des mines*, Alès. - *Publications du Centre de mécanique des roches*, Fontainebleau.

MATÉRIAUX USUELS

MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

Parmi les matériaux de construction — bois, pierres, briques, bétons, aciers et autres métaux —, les produits dont l'usage est le plus développé et commun aux constructions de bâtiment et de génie civil sont actuellement les bétons et les aciers « de construction ».

Les bétons hydrauliques sont fabriqués à partir de constituants considérés eux-mêmes comme matériaux élémentaires de construction : liants hydrauliques et granulats naturels ou de synthèse.

Les aciers « de construction » comportent trois grandes catégories de produits : les aciers pour constructions métalliques (produits sidérurgiques plats), les aciers pour béton armé (produits sidérurgiques longs) et les armatures de précontrainte (classées dans les produits de transformation de l'acier).

Ce sont donc ces matériaux qui feront l'objet des plus longs développements; les autres seront présentés rapidement, non parce que leur importance est moindre, mais parce que leur emploi est réservé à des domaines plus limités. Le bois sera traité dans le cadre du texte relatif aux matériaux d'origine biologique.

L'utilisation optimale des matériaux de construction, du point de vue de l'économie d'un pays et de la sécurité des usagers, implique évidemment que l'on tienne compte des caractéristiques propres de ces matériaux et de leurs conditions d'emploi. Il faut donc faire la synthèse des connaissances acquises par les producteurs, les constructeurs et les organismes de recherche :

— d'une part, celles qui concernent la constitution, les propriétés intrinsèques et les comportements des matériaux vis-à-vis des sollicitations auxquelles ils sont exposés au cours des phases successives de construction d'un ouvrage et au cours de la vie de cet ouvrage;

— d'autre part, les connaissances relatives aux sollicitations (effort normal, tranchant, etc.) qui résultent des procédés de construction employés et des actions subies par les ouvrages telles que l'action du poids propre, des charges d'exploitation, du vent, de la neige, des vagues, des chocs thermiques ou mécaniques.

Pour tenter de donner une vue d'ensemble de ce que l'on sait sur les matériaux de construction, seront abordés les points suivants :

* *leur constitution*, c'est-à-dire leur composition et leur structure, qui dépendent du mode de fabrication dans une certaine mesure;

* *leurs propriétés fondamentales*, pour le constructeur, dont la connaissance permet de fixer les possibilités et conditions d'emploi dans une construction donnée. A ces propriétés appartiennent : les relations de comportement; les types de rupture; les propriétés physiques;

* *l'influence du temps et de l'environnement sur les principales caractéristiques initiales des matériaux;*

* les facteurs à prendre en considération dans le *choix d'un matériau pour un emploi donné*, et la détermination des valeurs des caractères des matériaux à prendre en compte dans le calcul d'un type de construction déterminé.

Les données relatives à ces différents points sont extrêmement nombreuses. Ici, elles ne peuvent être présentées de façon exhaustive. Nous nous contenterons d'exposer des idées générales sur l'ensemble du sujet, et surtout de fournir un cadre qui permette au lecteur de comprendre et d'assimiler des textes plus spécialisés.

Caractéristiques générales

Les paramètres essentiels pour définir un matériau sont sa constitution, la composition de ses constituants et ses structure et texture qui dépendent, dans une assez grande mesure — pour une composition donnée — du processus de fabrication.

Les changements de processus de fabrication, dus, d'une part, aux progrès technologiques des moyens de fabrication et aux impératifs économiques qui entraînent une réduction continue des temps de production, et, d'autre part, aux besoins des constructeurs, provoquent une évolution continue de ces paramètres de définition des matériaux de fabrication industrielle et, par conséquent, de leurs propriétés.

Propriétés fondamentales

Relations de comportement

Tout matériau soumis à une sollicitation, qui résulte d'une action imposée, se déforme ou est le siège de forces internes, selon la nature de l'action. L'intensité et la répartition des déformations (ou des contraintes) provoquées, dans un corps d'épreuve de matériau donné, par une sollicitation déterminée, dépendent de la vitesse d'application et de l'intensité de la sollicitation, de la température et de l'histoire du matériau, c'est-à-dire des sollicitations qu'il a déjà subies avant celle dont on étudie l'effet.

La manière dont la matière constituant un corps d'épreuve réagit aux sollicitations peut être représentée par des relations entre les variables de sollicitations et d'état de déformation ou de contrainte, qui sont appelées « relations de comportement ». Celles-ci doivent être déterminées expérimentalement, car on n'est pas encore parvenu à établir des lois générales reliant la constitution d'un matériau et ses relations de comportement. La rhéologie est la science qui traite de ces questions, de manière théorique et expérimentale.

Dans les constructions traditionnelles en acier ou en béton armé, la connaissance de l'ensemble des relations de comportement correspondant à une large gamme des valeurs des paramètres de vitesse d'application des sollicitations et de température n'était pas nécessaire. Le constructeur se contentait généralement des lois de déformation caractérisant le comportement d'une éprouvette (corps d'épreuve) du matériau soumise, à la température ambiante, à une force de compression ou de traction dont la variation dans le temps, jusqu'à rupture de l'éprouvette, s'effectue à une vitesse moyenne représentative des conditions normales d'application des actions.

Les essais effectués pour déterminer les lois de déformation, respectivement en traction (pour les aciers) et en compression (pour les bétons), consistent à soumettre une éprouvette, de forme appropriée, à une force d'intensité croissante jusqu'à l'obtention de la rupture de l'éprouvette, en notant, ou en enregistrant, les valeurs de la déformation correspondant aux différentes valeurs de la force. Ces essais, dits « de traction » ou « de compression », permettent :

— de tracer la courbe représentative de la variation de la déformation en fonction de la force, c'est-à-dire de la relation de comportement dans les conditions fixées (à température donnée et vitesse de variation donnée);

— de déterminer la courbe représentative de la variation de déformation relative, en fonction de la contrainte calculée à partir de la force et de la section de l'éprouvette à laquelle la force est appliquée (il n'est peut-être pas inutile de souligner que les forces et les déformations sont des grandeurs physiques mesurables, alors que le concept de contrainte a été créé pour la commodité des calculs);

— de déduire soit directement, soit à partir des courbes contraintes-déformations, selon des règles normalisées pour chaque matériau, les caractères de base pour le calcul des constructions, appelés « caractères mécaniques ». Ce sont : les résistances à la compression et à la traction; les limites d'élasticité en compression ou en traction; les modules d'élasticité en compression ou en traction; les allongements à la limite d'élasticité, sous charge maximale, à la rupture.

Mais l'évolution des procédés de construction, des moyens et méthodes de calcul ainsi que la diversification des types de constructions et des natures d'actions auxquelles elles sont soumises ont conduit le constructeur à faire « travailler » les matériaux dans des conditions éloignées de celles du domaine exploré par les seuls essais de traction et compression; par conséquent, il a dû développer l'étude d'autres caractéristiques de comportement des matériaux.

Ainsi, il faut citer l'invention du « béton précontraint ». Le procédé consiste à imposer au béton une force quasi permanente de compression telle que ce dernier ne soit soumis, sous l'effet des différentes actions que subit l'ouvrage, qu'à des sollicitations de compression ou, à

la rigueur, à des sollicitations de traction très faibles. En effet, le matériau béton a une bonne résistance à la compression, mais une capacité de déformation par traction très faible qui entraîne systématiquement, dans la construction dite en « béton armé », la fissuration du béton par dépassement de sa capacité d'extension.

La force de « précontrainte » est généralement imposée par des « armatures de précontrainte » (fils, câbles ou barres en acier à haute résistance à la traction) mises en tension mécaniquement jusqu'à un niveau de déformation correspondant à la force voulue et bloquées à cette longueur, de façon à reporter sur le béton l'effort de tension dans l'armature. Il en résulte que, dans ce type de construction, le béton est soumis à une sollicitation de compression permanente, assez élevée en certains points pour que des sollicitations de traction ne se développent pas en d'autres points; quant aux armatures de précontrainte, il leur est imposé une sollicitation de traction qui est élevée — à la fois pour des raisons économiques et à cause du principe même du procédé —, et dont la permanence est nécessaire au fonctionnement de la construction. Il est donc nécessaire de connaître les lois d'évolution en fonction du temps, respectivement, de la déformation du matériau béton soumis à une force constante (la tension dans l'armature) et de la tension de l'armature maintenue à déformation constante (par l'élément en béton auquel elle est géométriquement liée).

On appelle *fluage* le comportement d'un matériau qui se déforme dans le temps sous l'effet d'une force imposée permettant de maintenir la contrainte constante, et *relaxation* le phénomène de diminution dans le temps du niveau de contrainte dans un élément maintenu à longueur constante. Pour leur emploi en béton précontraint, le fluage du béton et la relaxation des armatures sont donc des caractères « rhéologiques » aussi importants que les caractères mécaniques.

Mais la réalité est encore plus complexe : ces matériaux sont soumis à un « programme de sollicitations », dépendant notamment du mode d'exécution de la construction; aussi serait-il nécessaire, pour prévoir avec précision le comportement de la construction, de connaître leurs relations de comportement correspondant à des programmes de sollicitations effectifs ou du moins représentatifs de ceux qui sont susceptibles de leur être imposés.

Dans une construction, les matériaux peuvent être également soumis à des sollicitations rapidement variables, répétées un grand nombre de fois, appelées généralement « sollicitations dynamiques ». L'application de ces sollicitations répétées (qui peuvent être d'origine aussi bien thermique que mécanique) à un matériau peut provoquer un phénomène dit de « fatigue ». Un exemple de relation de comportement d'un matériau soumis à un programme de sollicitations répétées est donné dans le cas des aciers. Les facteurs importants de la réponse du matériau sont l'amplitude de la variation de la sollicitation et la valeur de la contrainte maximale imposées, ainsi que la vitesse de variation de la sollicitation.

Enfin, avec des vitesses d'application des sollicitations extrêmement grandes, on arrive au choc. Les relations de comportement des matériaux soumis aux chocs sont mal connues; on prend donc des dispositions pratiques pour éviter ce phénomène.

Rupture

Le stade ultime de la réaction du matériau vis-à-vis des sollicitations est la rupture. Celle-ci peut être définie comme la séparation en fragments distincts d'un corps d'épreuve initialement monolithique; les surfaces de séparation créées par la rupture sont les cassures.

Les données fondamentales sont ici celles de la structure de la matière et de la mécanique de la rupture, science jeune mais qui a déjà permis de progresser rapidement dans la connaissance des conditions de propagation d'une fissure, la fissure étant définie comme une surface de discontinuité de la structure à l'intérieur du corps d'épreuve.

Ce sont les modifications de structure du matériau, induites par les sollicitations imposées, qui entraînent la rupture par des processus spécifiques à chaque matériau et au programme de sollicitation. Elles peuvent être classées en deux grandes catégories :

— les modifications statistiquement réversibles; cela signifie soit qu'il n'y a pas de rupture de liaison entre les éléments constitutifs du matériau ou à l'intérieur de ceux-ci, soit que des liaisons sont ponctuellement détruites mais remplacées à courte distance par des liaisons équivalentes; dans ce cas, les modifications de structure sont des variations de distance entre les éléments constitutifs ou à l'intérieur de ceux-ci (par exemple une distorsion de réseaux cristallins) ou des mouvements de certains éléments par rapport aux autres (par exemple de l'eau à l'interface des granulats et du liant dans les bétons);

— les modifications irréversibles, c'est-à-dire les ruptures de liaison sans rétablissement d'autres liaisons à courte distance.

Lorsqu'un matériau ne peut opposer que des évolutions de structure réversibles aux sollicitations auxquelles il est soumis, il a un comportement purement élastique jusqu'à la rupture. Celle-ci se produit alors sans déformation résiduelle (après rupture) et sans variation de volume du corps d'épreuve à l'échelle macroscopique : la rupture et la cassure sont dites « fragiles ».

Au contraire, lorsqu'un matériau peut opposer aux sollicitations des modifications de structure irréversibles qui se développent progressivement dans les zones les plus sollicitées, il a un comportement dit « plastique » avant la rupture qui est qualifiée de « ductile ». Elle est accompagnée de déformations, localisées dans le volume de matériau proche de la cassure, importantes à l'échelle macroscopique (donc visibles à l'œil nu). Ces variations dimensionnelles macroscopiques sont caractéristiques des cassures ductiles.

Un matériau est d'autant plus ductile que sa structure tolère une plus grande densité de modifications irréversibles, c'est-à-dire, en termes non spécialisés, « s'adapte ». Les processus selon lesquels se produisent et se développent les modifications irréversibles de structure sont spécifiques du matériau, et plus précisément de ses « défauts » de constitution.

Le comportement à la rupture d'un matériau peut être caractérisé intrinsèquement :

— d'une part, par l'énergie de déchirure, c'est-à-dire l'énergie nécessaire pour entraîner la propagation instable d'une fissure interne, qui est une surface de discontinuité de la structure résultant du développement des modifications irréversibles; les méthodes de détermination de ce caractère qui rend compte de la « ténacité » des matériaux, mises au point notamment pour les métaux, sont actuellement en cours de généralisation au cas d'autres matériaux tels que les bétons;

— d'autre part, par le faciès de la cassure à l'échelle macroscopique par observation visuelle, et à l'échelle microscopique par microfractographie, c'est-à-dire examen au microscope électronique des surfaces des cassures ou de leurs répliques. Cette technique a permis de faire d'importants progrès dans la connaissance des modifications de structure qui précèdent et accompagnent la rupture, et dans celle des mécanismes des ruptures respectivement dites « ductiles », « fragiles » ou « semi-fragiles » à l'échelle macroscopique.

En pratique, à l'heure actuelle, le comportement à la rupture est seulement caractérisé, pour les métaux et pour les usages courants, par les variations dimensionnelles du corps d'épreuve dans la zone comportant la cassure par essai de traction, ou par l'énergie de rupture d'éprouvettes entaillées soumises à un essai de choc, ou par la « cristallinité » de la cassure. Ce sont ces caractères qui sont retenus comme critères de ductilité (ou de fragilité) du matériau, critères importants d'aptitude à l'emploi dans certains types de constructions (construction métallique soudée notamment).

Toutefois, pour quelques utilisations de matériaux à haute résistance mécanique, les critères de taille critique de fissures, ou d'énergie de déchirure, sont à l'étude.

Propriétés physiques

La principale propriété physique de tout matériau utilisé dans une construction, quelle qu'elle soit, est son coefficient de *dilatation thermique*. En effet, cette constante, pour un matériau donné, détermine les variations dimensionnelles des éléments de structure sous l'effet des variations de température d'exploitation de la construction. Elle doit donc être prise en considération pour fixer

les dispositions constructives relatives aux joints de construction et aux modalités d'assemblage permettant d'éviter les phénomènes de flambement ou de fissuration. Elle joue un rôle important dans le comportement des constructions hyperstatiques.

Le coefficient de dilatation thermique conditionne également la possibilité d'association de deux matériaux dans un même élément de structure. A titre d'illustration, nous attirons l'attention sur le fait que la construction dite en béton armé n'a été possible que grâce à la faible différence de coefficient de dilatation, respectivement, des aciers et des bétons. Il en est de même pour la construction « mixte acier-béton », qui associe des dalles en béton à des poutres en acier.

D'autres propriétés peuvent être importantes dans certains types de constructions : ce sont notamment les coefficients d'*isolation thermique* et *acoustique*.

Influence du temps et de l'environnement

En pratique, les matériaux sont caractérisés par leurs propriétés à l'état initial, c'est-à-dire tels qu'ils sortent de la chaîne de fabrication, ou après une conservation dans des conditions données qui ne les altèrent pas. Mais l'expérience a mis en évidence, indépendamment de toute sollicitation mécanique ou thermique, une évolution dans le temps de ces propriétés due aux modifications de la constitution du matériau sous l'effet des « paramètres d'environnement »; les principaux sont : la température du matériau; l'eau et les éléments en solution; la composition de l'atmosphère; les radiations.

Ces facteurs provoquent généralement une détérioration des propriétés initiales, mais ils peuvent aussi, exceptionnellement, en améliorer certaines (par exemple la limite élastique).

Enfin, pour certains matériaux soumis à des programmes de sollicitations particuliers, une interaction entre la sollicitation et les facteurs d'environnement peut provoquer des altérations particulières de la constitution des matériaux, qui modifient profondément leurs relations de comportement et leurs processus de rupture. Les phénomènes de ce type les plus connus à ce jour sont désignés sous les termes de « fatigue-corrosion » et « corrosion sous tension ».

Choix d'un matériau et conditions d'emploi pour une construction donnée

Le choix d'un matériau pour un emploi précis devrait se faire sur la base de plusieurs catégories de données :

— d'une part, l'ensemble des propriétés fondamentales ainsi que l'influence du temps et de l'environnement sur ces propriétés;

— d'autre part, les programmes de sollicitations auxquels seront soumis ces matériaux au cours de l'exécution des travaux et de la vie escomptée de la construction, et les facteurs d'environnement auxquels ils seront exposés au cours de cette même période.

Les conditions d'emploi du matériau choisi peuvent être définies, d'une part, par les « taux de travail » ou valeurs maximales des contraintes ou déformations du matériau pendant les phases de construction et pendant toute la vie de l'ouvrage; d'autre part, par les modalités de mise en œuvre qui déterminent le « programme de sollicitations » avant la mise en service de la construction (dont il a été souligné que le matériau gardait la « mémoire »).

Elles dépendent de l'ensemble des actions, qui comprennent les facteurs d'environnement, auxquelles seront soumis les éléments de la construction, et des « valeurs garanties » des caractères des matériaux. L'expression « valeurs garanties » signifie ici valeurs sur lesquelles le constructeur peut compter, quels que soient l'instant et l'origine de son approvisionnement en matériau, par opposition à « valeurs effectives », constatées par des essais sur un corps d'épreuve particulier; en effet, les caractères d'un matériau d'une production donnée présentent une variabilité liée à leur mode de fabrication et à la variabilité des constituants.

L'objet des spécifications normatives et réglementaires est de donner une garantie des bases d'hypothèses de calcul et du respect de ces hypothèses concernant les caractères des matériaux.

C'est par rapport à ces valeurs garanties (ou requises) des caractères spécifiés contractuellement que sont fixés les taux de travail maximaux des matériaux, avec des marges de sécurité qui dépendent de la nature du matériau, de ses conditions de fabrication et du type de la construction.

En pratique, pour les constructions courantes, les hypothèses et règles de calcul sont fixées par des textes appropriés, normatifs, réglementaires ou professionnels, qui tiennent implicitement compte de l'expérience acquise (parfois malheureuse) concernant le comportement des matériaux soumis à un programme de sollicitations et à des facteurs d'environnement déterminés. Ils ne sont établis qu'après une expérience suffisamment longue et générale; pour l'emploi de matériaux de construction traditionnels dans des types de constructions nouveaux, ou pour l'emploi de matériaux non traditionnels, c'est-à-dire dont les références d'emploi sont peu nombreuses et de courte durée dans l'emploi considéré, il y a donc lieu d'expérimenter systématiquement les propriétés fondamentales ainsi que l'influence du temps et de l'environnement sur les caractéristiques initiales des matériaux avant de fixer les conditions d'emploi spécifiques à une construction déterminée.

Le béton hydraulique

Le béton est un mélange de pierres, de sable et d'eau avec un liant qui résulte lui-même de la cuisson d'une pierre (gypse pour le plâtre, calcaire pour la chaux) ou d'une pierre calcaire et d'une argile (ciment Portland artificiel, ou CPA). Dans son principe au moins, le béton peut être défini comme le mélange habile des constituants les plus communs à la surface de la terre. C'est pourquoi il peut être, à la fois, très ancien mais adaptable aux nécessités futures, universellement utilisé et pourtant mal accepté par le public.

On ne saurait dire quand le béton fut découvert; ses constituants sont si courants qu'ils ont pu être réunis par hasard. L'homme fit sans doute son premier liant sans le vouloir, dès qu'il eut maîtrisé le feu, en calcinant les pierres de son foyer. Les premiers Égyptiens utilisèrent le plâtre; les Grecs et les Romains développèrent l'emploi de la chaux. Assez vite, probablement, on ajouta du sable, puis des morceaux de pierres, de briques et de tuiles. On constata que certains sables volcaniques, comme celui de l'île de Santorin (Grèce) ou celui de Pouzzoles, près du Vésuve, donnaient des mortiers et des bétons plus résistants et plus durables, capables de durcir sous l'eau. De nombreux monuments romains comprennent des parties en béton. Ainsi le Panthéon de Rome, pour ne prendre qu'un seul exemple : ses murs, épais de six mètres, sont en béton; le granulat (sable, gravillon, cailloux) est d'origine volcanique, et le liant un mélange de chaux et de sable de Pouzzoles.

▼ ***Le Panthéon de Rome, dont les murs épais de six mètres sont en béton.***

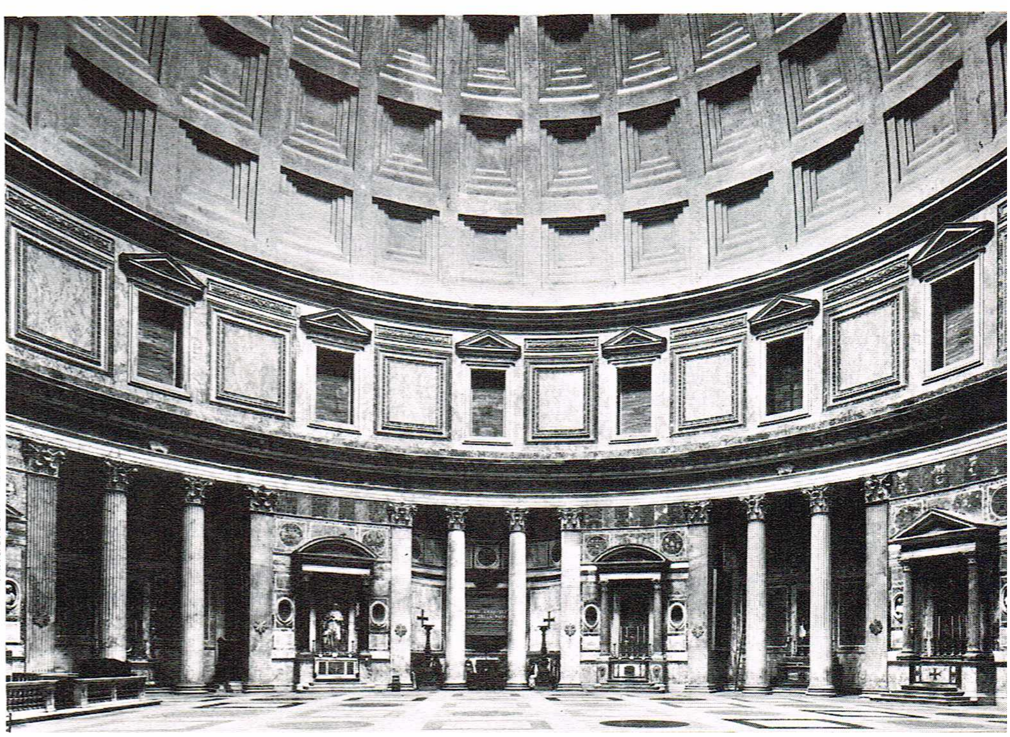

Anderson - Giraudon

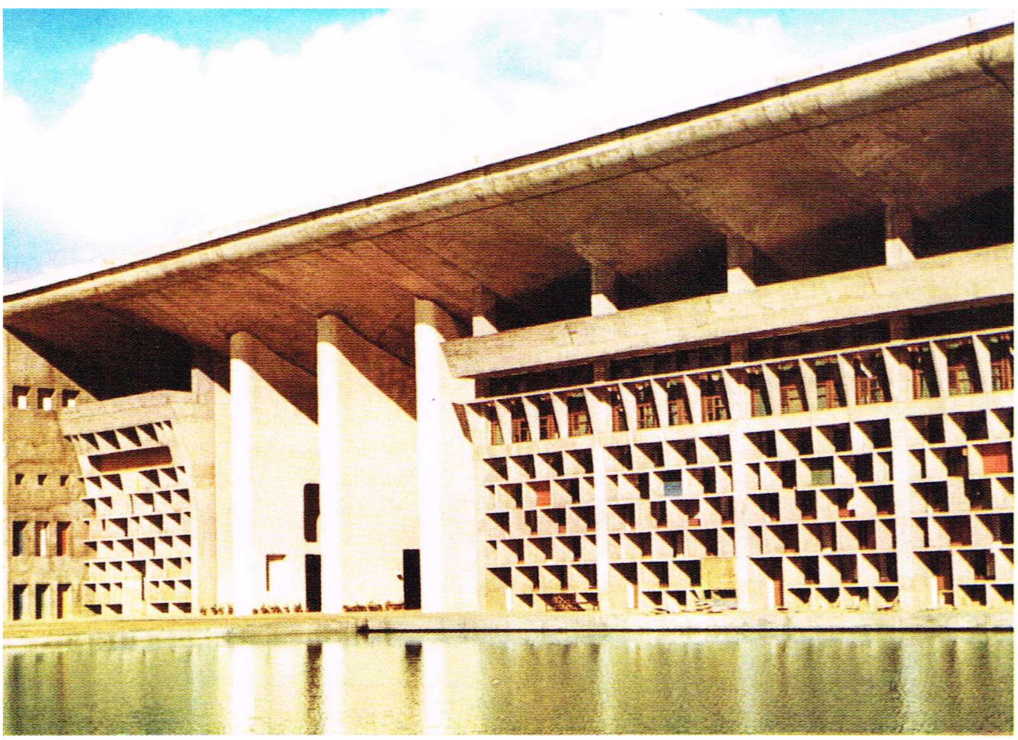

Rapho

▲ *Le palais de justice de Chandigarh. Ici, l'architecture a largement utilisé le béton.*

Le béton d'aujourd'hui n'est pas très différent; il n'est pas toujours plus résistant, il est parfois moins durable. Est-ce à dire qu'il n'y eût aucun progrès? Bien au contraire, mais ce progrès est simplement celui de la vocation même du béton : une utilisation de plus en plus spécifique, économique, sûre et facile de constituants de plus en plus courants, en vue d'aboutir à un matériau de mieux en mieux adapté à des fonctions qui tendent à se diversifier. Ainsi, le ciment hydraulique durcit sous l'eau aujourd'hui comme il y a 2 000 ans, et ce sont à peu près les mêmes réactions chimiques, mais il n'est plus nécessaire d'aller chercher le sable de Santorin ou de Pouzzoles; au cours des siècles, on trouva d'autres ressources, et notamment des calcaires argileux donnant par cuisson une chaux naturellement « hydraulique » (c'est-à-dire, par définition, capable de faire prise sous l'eau comme dans l'air), mais, comme on ne savait à quoi attribuer cette propriété particulière, on restait tributaire des circonstances favorables offertes par la nature au hasard des formations géologiques. Enfin, en 1818, Vicat montra qu'il était possible de fabriquer un ciment hydraulique en mélangeant un calcaire et une argile en proportion convenable; dès lors, il suffisait de disposer d'une carrière de calcaire et d'un banc d'argile pour fabriquer du ciment, et les possibilités d'implantation de cimenteries s'élargissaient du même coup. Bien entendu, les gisements les plus homogènes furent les premiers exploités, mais, il y a vingt ans, pour satisfaire à la demande croissante en ciment, on ouvrit des cimenteries exploitant des carrières très hétérogènes, le cru étant préhomogénéisé avant d'être traité. En même temps, fait remarquable, grâce au développement des méthodes de contrôle et d'asservissement, la dispersion des valeurs des caractères du ciment n'a cessé de diminuer. On peut gager que d'autres progrès suivront, préparés par les recherches en cours; par exemple, les propriétés du ciment dépendent encore aujourd'hui, dans une certaine mesure, de la composition du gisement en amont de la cimenterie : tous les gisements ne permettent pas de faire commodément des ciments à prise rapide, ou des ciments résistant à l'attaque de l'eau de mer. Or, on peut espérer faire un jour, en maîtrisant les formes cristallographiques, les structures des solutions solides, les teneurs et répartitions des constituants mineurs (oxydes de chrome, nickel, vanadium, etc.), un ciment adapté à l'usage souhaité, à partir de n'importe quel cru. Comme, par ailleurs, des recherches sont faites pour une meilleure utilisation de l'énergie sous des formes de plus en plus variées, on voit donc que la tendance est bien celle annoncée pour le béton en général : faire économiquement et avec régularité le ciment le mieux adapté à l'usage souhaité, à partir du gisement le plus banal.

Ce qui vient d'être dit du ciment pourrait l'être aussi des granulats (sable, gravillons et cailloux). Les ressources alluvionnaires, jusqu'à maintenant préférées aux autres, tendent à se raréfier. Des recherches sont en cours pour apprendre à utiliser en toute sécurité des granulats d'autres provenances, dont certains jusqu'à présent proscrits par les règlements (granulats marins, granulats de calcaires « tendres »), ou encore des granulats de synthèse, obtenus par cuisson d'une argile, frittage des cendres volantes récupérées dans les centrales thermiques, etc. Là, comme pour le ciment, le même mouvement qui tend à banaliser les ressources potentielles entraîne, corrélativement, une diversification des possibilités d'emploi et une meilleure adaptation aux besoins de la construction : ainsi, le béton léger porteur permettra de concevoir des portées d'ouvrage encore plus grandes.

Il existe des pays pauvres en minerais de toutes sortes, mais partout (ou presque) on peut faire du béton; il n'est même pas nécessaire que le pays soit fortement industrialisé. C'est pourquoi le béton est le matériau de construction le plus universellement utilisé; on estime sa consommation mondiale annuelle à $3 \cdot 10^9$ t, soit une tonne par habitant et par an (cinq à dix fois la consommation d'acier selon les pays). Seule l'eau est consommée en plus grande quantité ! Ce matériau, conçu pour l'utilisation ingénieuse des restes, n'a pas à craindre les pénuries dont, dit-on, l'avenir nous menace. Il pourrait être beau (ciment sans oxyde de fer, entraîneurs d'air, etc.) et symboliser notre capacité de tirer le meilleur parti des ressources du milieu. Mais, lorsque cette capacité s'exalte, lorsqu'elle prétend satisfaire les besoins matériels aux dépens des autres (besoin de permanence, d'harmonie, d'élévation, pour ne parler que des sentiments que l'on éprouve à la vue des constructions anciennes), alors le béton reste gris, couleur de l'insatisfaction et du malaise d'une époque.

Fabrication, mise en œuvre et structure

Dans un béton, la cohésion est assurée par la pâte de ciment (ciment + eau + adjuvants), et le remplissage par le granulat (cailloux, gravillons, sables). Ces deux fonctions sont importantes, comme le montre la formule de Féret (1896) : $R_c = kc^2/(1-g)^2$. La résistance à la compression du béton R_c est d'autant plus forte que le ciment est plus liant (facteur de proportionnalité k), que la teneur volumique en ciment c est plus élevée et, enfin, que le granulat (teneur volumique g) emplit mieux le coffrage.

Le ciment est, pour des raisons historiques, qualifié de Portland artificiel et désigné par les initiales CPA. Il est caractérisé par sa classe : la résistance à la compression (en bars) d'un mortier normalisé, âgé de 28 jours. Actuellement, il s'agit d'une résistance minimale (400 bars, par exemple, pour un CPA 400), mais on envisage dans une norme future de fixer des limites maximales et minimales correspondant à certaines probabilités de dépassement. Le CPA est essentiellement un mélange de silicates de calcium (70 à 90 %), d'aluminates ou de ferro-aluminates de calcium (5 à 20 %) additionnés de gypse (2 à 8 %) pour régulariser la prise. Le ciment peut contenir également des constituants dits secondaires, désignés actuellement par les lettres L (pour laitier), C (pour cendre volante), Z (pour pouzzolane), et dans la future norme par la lettre unique J. Un CPJ pourra contenir jusqu'à 35 % d'un constituant secondaire J. Ces constituants secondaires jouent, au début, un rôle de remplisseur, comme le granulat, mais ils peuvent manifester avec le temps des propriétés liantes analogues à celles du CPA (propriétés pouzzolaniques). Pour des travaux souterrains, il peut être intéressant d'utiliser des ciments contenant plus de 90 % de constituants secondaires (CLK).

Les sables, gravillons et cailloux doivent surtout être inaltérables et propres. Leur aptitude à remplir les coffrages dépend de leur forme (granulats roulés ou concassés) et de leur taille (granulométrie). Lorsqu'on mélange deux granulats, il existe en général une proportion optimale pour laquelle le remplissage du coffrage est maximal (*fig.* 1). Généralisant ce résultat, Caquot (1938) a jeté les bases d'une théorie de la granulométrie optimale; cette théorie a été appliquée par Faury, Joisel, Dreux, qui proposèrent des courbes de référence susceptibles de guider en pratique le choix des meilleures proportions entre les différents granulats. Pour les ouvrages importants, on préfère toujours, cependant, faire une étude expérimentale complète qui peut montrer les conséquences, sur la qualité finale du béton, des variations

▶ *Page ci-contre, en haut* *figure 1 : mélange de deux granulats. Lorsqu'un gros grain remplace une partie du granulat fin, la porosité du mélange diminue (droite AO), mais la présence des gros grains perturbe l'arrangement du granulat fin et augmente sa porosité (effet de paroi, droite AD). Inversement, lorsque les grains fins se logent dans les interstices du gros granulat, la porosité diminue également (droite CC'), mais les grains fins écartent les gros grains, ce qui augmente la porosité (effet d'interférence, courbe BC). Finalement, ABC est la courbe représentative de la variation de la porosité lorsqu'on fait varier la proportion des granulats gros et fins et le remplissage du coffrage est optimal en B. Figure 2 : dosage optimal en eau pour la mise en place.*

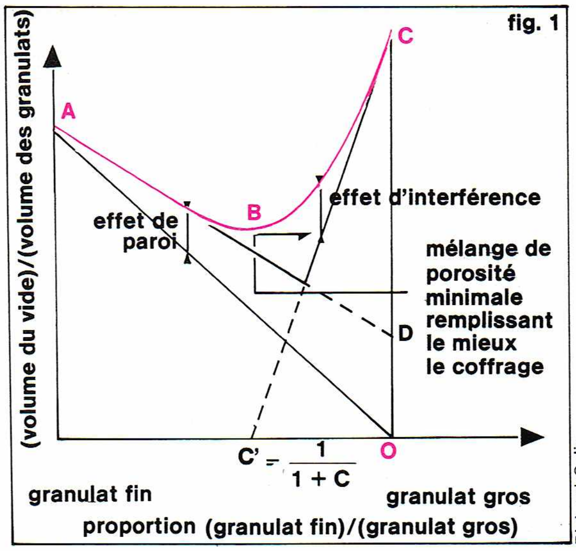

Richard Colin

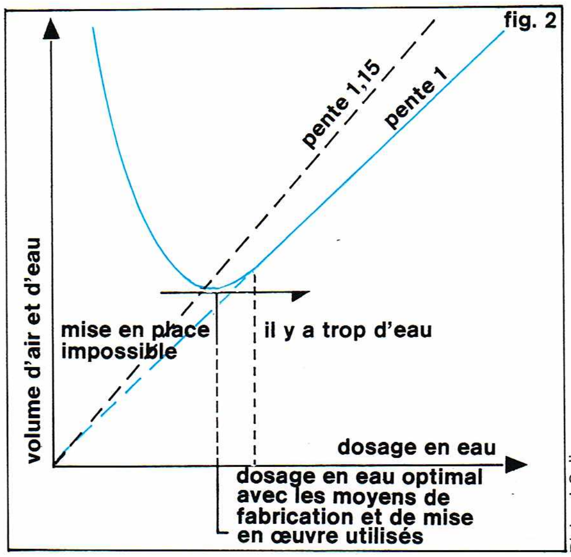

Richard Colin

▼ *Ci-dessous, une bétonnière dans le chantier de construction d'une digue. On remarquera les malaxeurs qui fournissent le béton prêt à l'emploi. En bas, figure 3 : aspects physiques de l'hydratation selon T. C. Powers;* a, *mouvement des ions à travers l'amas d'hydrates;* b, *croissance de ce dernier;* c, *rupture de la ceinture d'hydrates sous l'effet de la pression osmotique.*

accidentelles des valeurs caractéristiques des constituants, et des écarts par rapport aux proportions nominales.

Les adjuvants sont des produits qui, ajoutés en petite quantité dans le mélange, peuvent améliorer les qualités du béton, faciliter sa fabrication ou sa mise en œuvre. Certains agissent sur les propriétés liantes de la pâte de ciment (accélérateurs ou retardateurs de prise, par exemple), d'autres sur la facilité et la qualité du remplissage des coffrages (plastifiants et fluidifiants), d'autres encore stabilisent des microbulles d'air qui favorisent la résistance au gel (entraîneurs d'air).

Le mélange des constituants (eau, ciment, granulat, adjuvants) se fait dans un malaxeur ou une bétonnière. La puissance et la durée du malaxage doivent être suffisantes pour permettre une bonne répartition de la pâte de ciment entre les grains du granulat, l'introduction d'un film d'eau entre les grains de ciment et la formation de petites bulles d'air enrobées d'une fine pellicule de résine lorsqu'un produit entraîneur d'air est utilisé. Le transport du béton depuis le malaxeur peut se faire par bennes, bétonnières portées (appelées communément camions-malaxeurs), tuyauteries (béton pompé). La mise en place dans les coffrages se fait, en général, par vibration. Sous l'effet de la vibration, chaque grain de ciment et de granulat est entouré d'un film d'eau et se meut plus librement; la facilité de mise en place dépend évidemment de la teneur en eau. Le remplissage du coffrage est maximal pour une teneur en eau optimale qui dépend à la fois des constituants solides et des moyens de mise en place (*fig.* 2).

Les caractères du béton, et notamment sa porosité, ne sont pleinement définis que lorsqu'il est en place dans le coffrage. C'est pourquoi, pour ce matériau, on ne peut distinguer la fabrication de la mise en œuvre. Aussitôt après sa mise en place, le béton est une suspension dense à consistance molle. Il devient une sorte de pierre artificielle cohérente grâce aux réactions chimiques entre le ciment et l'eau : l'hydratation du ciment. On observe une phase de transformation rapide : la prise, qui commence le plus souvent deux à trois heures après le malaxage et dure quelques heures; vient ensuite une phase de transformation de plus en plus lente : le durcissement, qui peut durer plusieurs mois, voire plusieurs années.

Ceretti - Tanfani

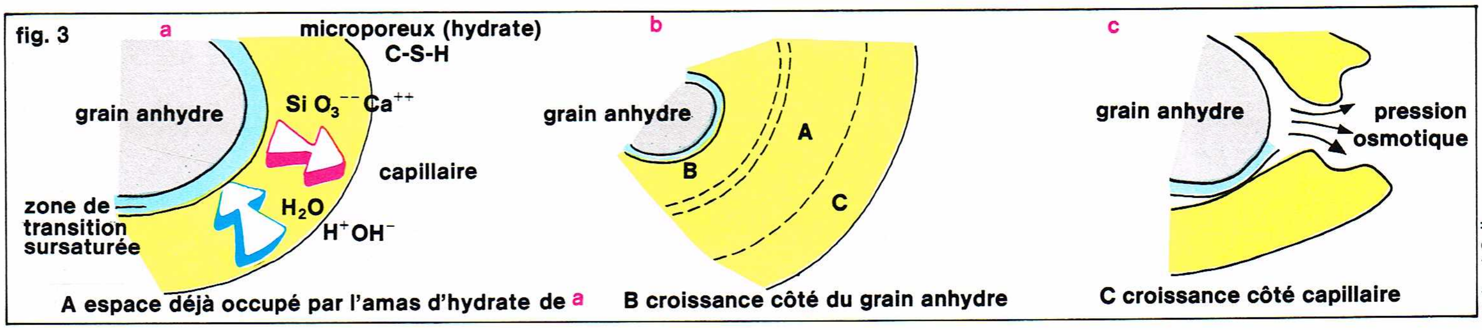

Richard Colin

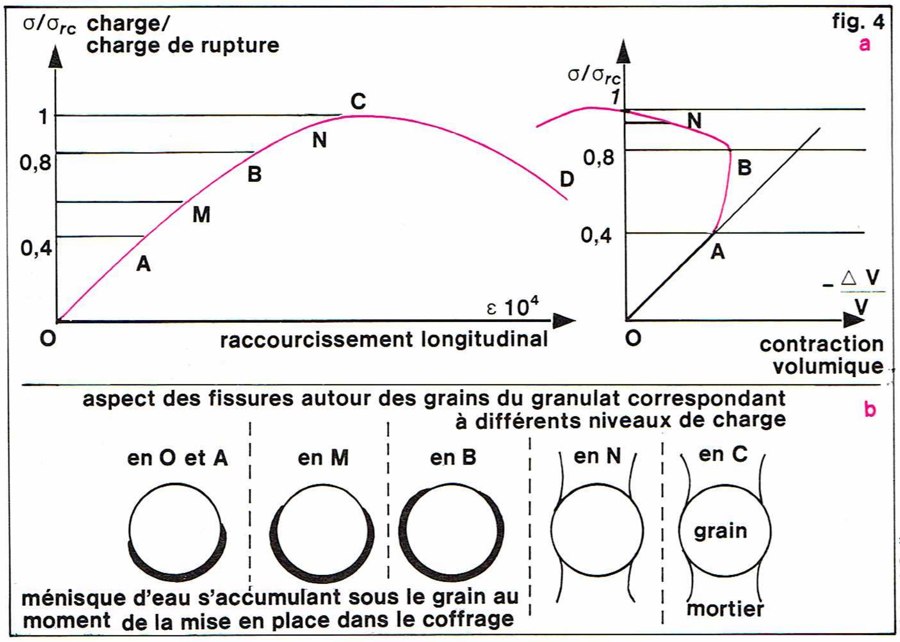

Richard Colin

▲ *Figure 4 : a, représentation graphique des quatre phases du comportement; b, aspects des fissures des grains du granulat correspondant à différents niveaux de charge.*

▼ *Ci-dessous, fractographie d'une éprouvette de ciment rompue en traction-flexion après sept jours d'hydratation (microscope électronique à balayage) :* **o**, *feuillets enroulés de silicate hydraté C-S-H;* **x**, *aiguilles d'ettringite $Ca_3Al_2O_6.3CaSO_4.31\ H_2O$;* **Δ**, *cristaux de portlandite $Ca(OH)_2$.*
Ci-contre, figure 5 : aspect des éprouvettes rompues en compression; a, aspect usuel, rupture en sablier due au frittage des plateaux; b, rupture obtenue lorsque des précautions sont prises pour réduire le frottement contre les plateaux.

C.E.R.I.B.

A la fin du siècle dernier, Le Chatelier a donné un schéma de l'hydratation qui est aujourd'hui largement admis : les constituants du ciment anhydre sont dissous et réagissent en solution; les hydrates formés, moins solubles que les anhydres, précipitent. Ils enveloppent le grain anhydre d'une couche qui atteint vite sa structure définitive avec une porosité minimale de 26 %; les pores sont alors si fins qu'aucun nucléus ne peut plus s'y former et que de nouveaux hydrates ne peuvent plus y précipiter. Au fur et à mesure du durcissement, cette couche d'hydrates s'étend à la fois du côté des capillaires qu'elle obstrue en partie et du côté du grain de ciment anhydre qui tend à disparaître; mais elle conserve toujours plus ou moins la forme de ce grain de ciment initial (*fig.* 3). L'étude des pores du béton durci montre la juxtaposition de deux structures, l'une à l'échelle des interstices de la suspension initiale avant prise (de l'ordre du micron), l'autre à l'échelle des hydrates formés (quelques dizaines d'angströms).

L'hydratation s'accompagne :

— d'une diminution de la porosité globale de 50 à 26 % pour la pâte de ciment (soit de 20 à 12 % pour un béton d'ouvrage d'art) ;

— d'un dégagement de chaleur (environ 100 calories par gramme de ciment anhydre) ;

— d'une autodessiccation interne provoquant un retrait sensible en cours de prise, mais négligeable en cours de durcissement ;

— d'une augmentation considérable de la surface spécifique de la phase solide de 1 à 100 m² par gramme de ciment anhydre ;

— enfin de variations du volume apparent de la pâte de ciment, gonflement et retrait (outre celui qui résulte de l'autodessiccation) ; le gonflement est fortement diminué lorsque la pâte se dessèche en s'hydratant; le retrait, non compensé par le gonflement, est cause de microfissures à l'échelle des grains du granulat et parfois de fissures précoces des ouvrages.

Le principal hydrate formé est appelé C—S—H (C pour CaO, S pour SiO_2 et H pour H_2O). Il se présente sous forme de lamelles mal déployées, longues d'un millier d'angströms, larges d'une trentaine (trois feuillets composés chacun de trois couches monomoléculaires). Ce n'est pas les quelques liaisons solides covalentes, formant des ponts entre les lamelles, qui suffisent à assurer la cohésion du béton. En fait, cette cohésion provient surtout des forces de surface, forces de Van der Waals entre les lamelles d'une part, entre les lamelles et l'eau d'autre part. La résistance mécanique du béton tient donc surtout à la surface spécifique énorme des hydrates (100 m²/g). L'adhérence entre la pâte de ciment et les grains du granulat fait intervenir des phénomènes mécaniques (relief), physiques (porosité du grain), chimiques et cristallins (épitaxies). Il existe, à l'interface du grain et de la pâte, une « auréole de transition » ayant ses caractéristiques propres qui influent notablement sur la résistance mécanique et la durabilité du béton.

Déformation et rupture

Le béton est un matériau composite à matrice fragile (granulats enrobés d'une pâte de ciment). C'est pourquoi sa résistance en compression est environ quinze fois plus grande que sa résistance en traction. On montre en effet que, pour un matériau fragile uniformément microfissuré, les fissures commencent à se propager en traction sous une contrainte huit fois plus faible qu'en compression; de plus, la propagation instable en traction conduit à la ruine immédiate de la pièce, tandis qu'en compression la propagation est stable, et la fissure cesse de se propager si l'effort n'augmente plus. Il est vraisemblable que la présence des grains des granulats accentue encore cet effet, car ces grains doivent retarder davantage la propagation des fissures en compression qu'en traction.

En raison de sa fragilité, le béton est surtout utilisé en compression dans les ouvrages. Les efforts de traction sont repris par les armatures (béton armé) ou annulés par superposition d'une contrainte de compression (béton précontraint). Nous insisterons donc surtout sur le comportement du béton en compression et traiterons rapidement du comportement en traction, d'ailleurs encore assez mal connu.

Comportement en compression

Lorsqu'on comprime une éprouvette en maintenant constante la vitesse de déformation longitudinale, on distingue quatre phases du comportement (*fig.* 4).

★ *Phase de déformation élastique* OA. Jusqu'à 30 % environ de la charge de rupture (limite élastique A), la déformation s'annule lorsqu'on relâche l'effort. La valeur du module d'élasticité E (couramment de l'ordre de 350 000 bars ou 35 000 MPa) peut être empiriquement reliée à celle de la résistance en compression R_c, car l'une et l'autre dépendent surtout de la porosité du béton à l'âge considéré :

$$E = 17\,500\sqrt{R_c} \qquad (E \text{ et } R_c \text{ en bars})$$

Le coefficient de Poisson est voisin de 0,2.

★ *Phase de compression irréversible* AB. Au-delà de la limite élastique, il devient de plus en plus facile de déformer l'éprouvette. Des microfissures commencent à se propager en contournant les grains des granulats. Le coefficient de Poisson augmente de 0,2 en A à 0,5 en B où la déformation se produit à volume constant.

★ *Phase d'expansion.* Toute compression au-delà de B produit une augmentation de volume de l'éprouvette. Les microfissures se propagent dans la matrice et tendent à s'aligner parallèlement à l'effort de compression. Si l'on maintient l'effort à une valeur constante supérieure à B, l'éprouvette finit par se rompre, et il semble que B corresponde approximativement à la limite de rupture par fluage en compression (70 à 80 % de la charge de rupture dans un essai de courte durée).

★ *Phase de rupture.* Au-delà de C (charge de rupture), il n'est plus nécessaire d'augmenter la charge pour que

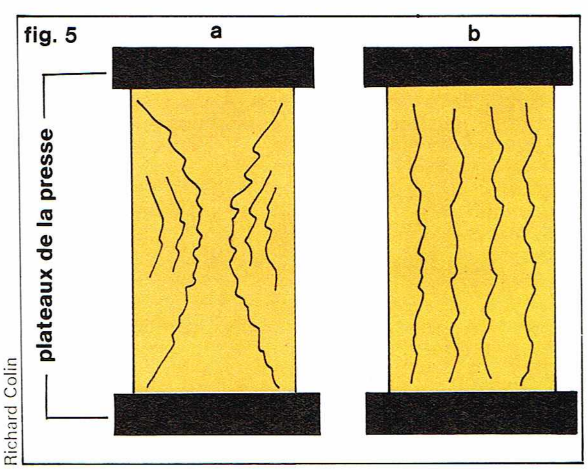

Richard Colin

les fissures se propagent et que la déformation longitudinale de l'éprouvette augmente. Toutefois, celle-ci n'est pas encore rompue ; il faut encore fournir de l'énergie pour que les fissures, en se rejoignant, forment une surface de discontinuité traversant complètement l'éprouvette.

Dans un essai de compression réel, le frottement des extrémités de l'éprouvette sur le plateau de la presse s'oppose à l'expansion transversale et crée un état de compression triaxial. De ce fait, au voisinage des extrémités, les fissures se propagent plus tard et moins vite qu'au centre, et ces parties sont encore presque intactes, alors que la partie centrale est déjà détruite. De là vient le profil habituel en sablier des éprouvettes rompues (*fig.* 5) ; cependant, quand le frottement sur les plateaux est faible, on vérifie que les fissures sont approximativement parallèles à l'effort de compression.

Le point A correspond approximativement à la « contrainte de compression admissible », définie par le règlement du béton armé, d'ailleurs en cours de révision. On tend maintenant, et c'est déjà recommandé pour le calcul des ouvrages en béton précontraint, à se référer à la « résistance ultime en compression » qui correspond approximativement au point B. Le passage du point A au point B en tant que référence de calcul permet une explicitation plus détaillée des coefficients de sécurité, et donc une meilleure utilisation du béton.

Comportement en traction et résistance à la propagation de fissure

La courbe effort-déformation du béton en traction est semblable à celle du béton en compression (mais contraintes et déformations sont environ 15 fois plus petites). Il existe une limite élastique correspondant approximativement à 50 % de la charge de rupture. On ne sait pas encore exactement à quoi il faut attribuer la partie inélastique de la déformation avant rupture : peut-être à un arrêt momentané de la fissure par les grains du granulat ; ou encore à un processus de diffusion de l'eau interne qui accompagnerait nécessairement la rupture et ralentirait la propagation de fissure. Quoi qu'il en soit, l'essai de traction simple ne permet pas de caractériser le comportement du béton en traction au-delà de la limite élastique, et il est préférable d'étudier directement la propagation de fissure.

On connaît encore mal les phénomènes qui accompagnent la propagation d'une fissure dans le béton, car les essais doivent être faits sur de très grosses éprouvettes. L'énergie nécessaire pour faire progresser une fissure dans une poutre de béton non armé épaisse de 10 cm augmente progressivement au fur et à mesure que la fissure se propage. Elle atteint une valeur stationnaire, à peu près triple de la valeur initiale, quand la fissure a progressé de 50 cm. L'énergie de rupture est utilisée à microfissurer une zone de béton s'étendant sur une vingtaine de centimètres à la pointe de la fissure.

Fluage

Jusqu'à présent, nous n'avons étudié que le comportement sous un chargement de courte durée. Mais, si l'on maintient la charge constante, la déformation du béton augmente avec le temps (courbe de fluage) ; la déformation après une durée donnée d'essai est proportionnelle à la charge tant que celle-ci ne dépasse pas 50 % environ de la charge de rupture. Le fluage se manifeste même sous les charges les plus faibles et résulte probablement d'échanges énergétiques entre les phases solide et liquide. Il est partiellement irréversible (outre l'effet du durcissement en cours d'essai), sans doute du fait de l'extension des ponts entre les lamelles de C—S—H.

Le fluage du béton est d'autant plus petit que le béton est sec avant chargement ; en revanche, une dessiccation en cours d'essai augmente le fluage proportionnellement à la charge appliquée. La vitesse de fluage est minimale à — 5 °C et à + 105 °C ; elle est maximale à 50 °C et vaut alors le triple de sa valeur à 20 °C.

Souvent, mais pas toujours, la variation d'un paramètre qui tend à augmenter la résistance à la compression tend, par là même, à diminuer la valeur du fluage (par exemple, une diminution de la porosité). Le fluage ne dépend alors approximativement que du chargement relatif initial, c'est-à-dire du rapport entre la charge et la charge de rupture mesurée au moment de l'application.

Fatigue

La succession de cycles de chargement et de déchargement diminue la résistance du béton, et notamment sa résistance en compression ; celle-ci peut être divisée par 2 et plus après 10^6 cycles. Il n'existe probablement pas de limite d'endurance, et, quel que soit le niveau du chargement, il y a toujours un risque de rupture après un nombre de cycles suffisant.

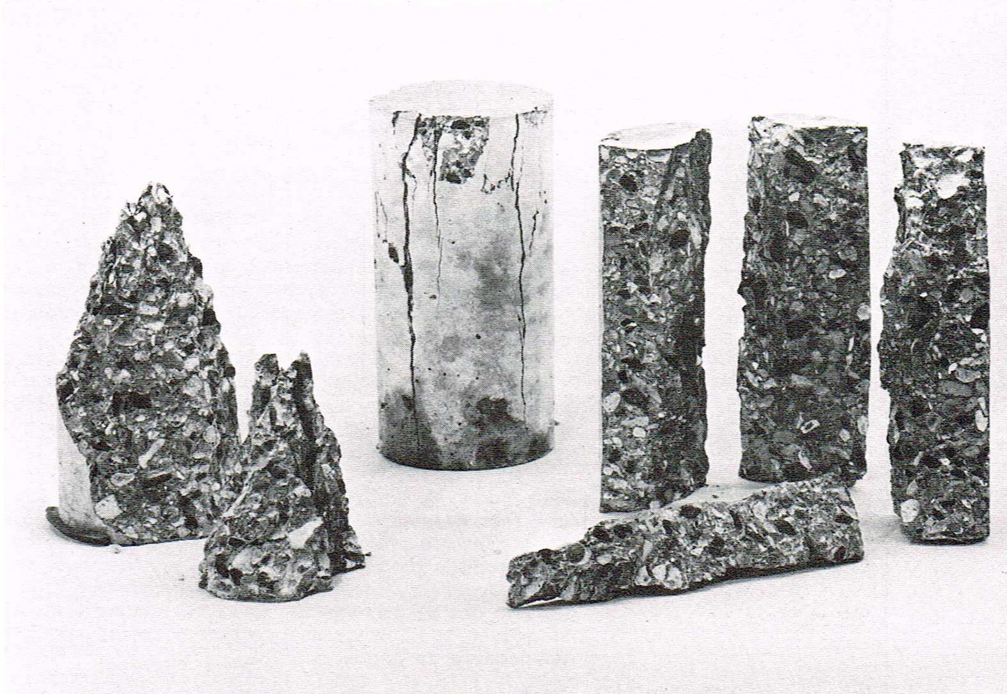

Lab. central des Ponts-et-Chaussées

▲ *Aspects après essai de compression : à gauche, d'une éprouvette surfacée au mélange soufré ; au centre, d'une éprouvette surfacée à la paraffine ; à droite, aspect de cette dernière après séparation des éléments. Avec la paraffine, le frottement entre les plateaux et l'éprouvette est réduit ; l'allure de la rupture, dite « en colonnettes », est conforme à ce que prévoit la théorie.*

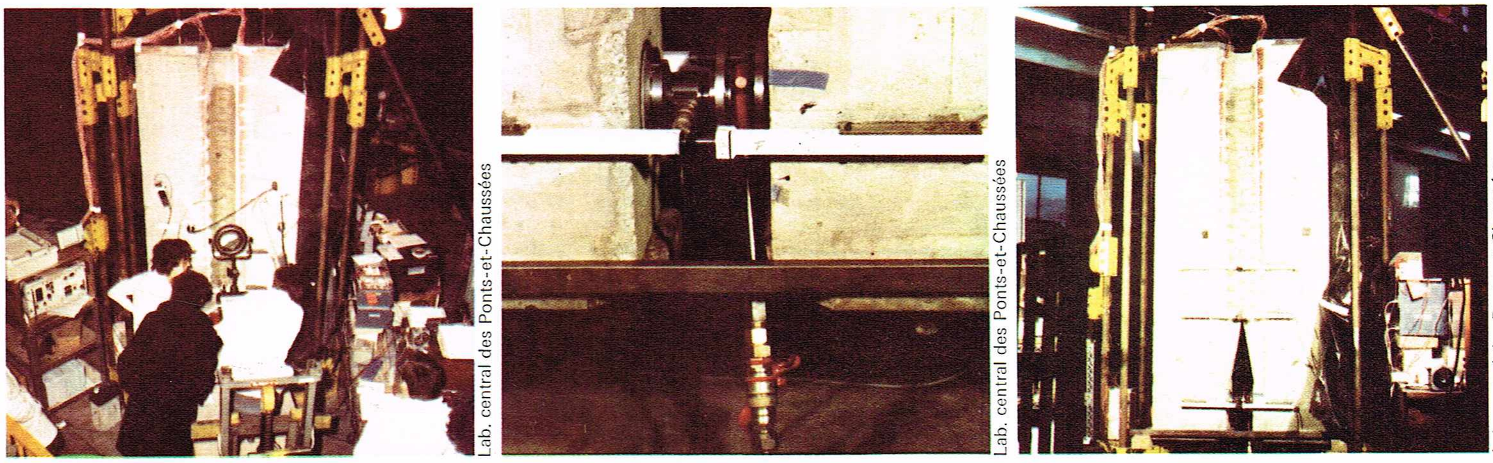

Lab. central des Ponts-et-Chaussées

Lab. central des Ponts-et-Chaussées

▼ *Essai de propagation de fissure sur grosse éprouvette DCB : l'éprouvette, longue de 2,70 m (à gauche), est écartelée par un vérin placé dans l'entaille (au centre) ; la fissure se propage du bas vers le haut dans des conditions de propagation stable (à droite).*

La répartition des cycles de chargement et de déchargement en compression produit une extension importante des microfissures, ce qui provoque une augmentation de volume considérable. Si celle-ci est empêchée, comme dans un ouvrage massif, la durée de vie de la partie sollicitée peut être multipliée par 100 et plus.

Propriétés physiques et technologiques

Résistance au feu

La résistance du béton au feu laisse en général un délai suffisant pour l'évacuation des lieux et l'intervention des secours, mais, après l'incendie, une partie des pièces en béton peut être irrécupérable ou, du moins, nécessiter des réparations importantes.

Au-dessus de 100 °C, l'eau interne du béton tend à s'évaporer, ce qui ralentit l'échauffement du béton et des armatures. Après une heure d'incendie par exemple, bien que la température ambiante atteigne 900 °C, la température interne est seulement de 400 °C à 4 cm de profondeur et de 120 °C à 7 cm. Ces forts gradients fissurent les poutres, ce qui, pendant l'incendie, est plutôt salutaire; les fissures créées facilitent en effet l'évacuation de la vapeur d'eau et autres gaz, comme le gaz carbonique produit par la décarbonatation des granulats calcaires. A défaut, les gaz se mettent en pression, et on observe des éclatements du béton qui mettent à nu les armatures superficielles et les exposent directement à la température ambiante.

Protection contre les radiations

Le béton est communément utilisé en tant que matériau de protection contre les radiations : rayons X, rayons gamma, neutrons (enceinte de protection des centrales nucléaires). L'absorption des rayons gamma et le ralentissement des neutrons rapides sont d'autant plus efficaces que le béton est plus dense, et il y a avantage à utiliser des granulats lourds comme les barytes. L'absorption des neutrons lents et le ralentissement des neutrons intermédiaires sont assurés par l'hydrogène de l'eau chimiquement combinée et de l'eau libre.

Retraits et fissurations

Le béton peut se rompre sans chargement mécanique excessif visible, sous l'effet de sollicitations parasites qui ont leurs origines dans les retraits de la pâte de ciment avant prise, en cours de prise, en cours de durcissement et à long terme, car ces retraits, s'ils sont empêchés, induisent des contraintes de traction.

Avant prise, le béton, qui est une suspension, tend à se densifier et se tasse dans les coffrages (ressuage). Un obstacle, fréquemment le lit d'armature supérieur, provoque un tassement différentiel qui peut entraîner des cassures du béton frais, visibles parfois déjà à travers la pellicule d'eau de ressuage.

● *Précautions :* augmenter l'épaisseur de béton au-dessus du lit supérieur d'armature, réduire le dosage en eau, augmenter le dosage en ciment ou ajouter un sable fin convenable.

En cours de prise (parfois avant), la dessiccation et l'autodessiccation de la pâte de ciment provoquent un retrait dit « hydraulique ». L'enthalpie libre spécifique de l'eau diminue jusqu'à devenir égale à celle de la vapeur extérieure : les grains solides se compriment et se rapprochent.

● *Précaution :* pulvériser sur la surface exposée un produit de cure efficace ou arroser (mais pas avec une eau trop froide).

Après la prise, on observe un retrait de durcissement lié à l'avancement des réactions d'hydratation et dont la vitesse et l'ampleur suivent beaucoup suivant les ciments.

● *Précautions :* choisir un ciment à faible vitesse de retrait (mais il faudra renoncer à avoir très tôt des résistances importantes), soigner la régularité de la fabrication et de la mise en œuvre.

A long terme, le retrait hydraulique devient à nouveau important, car l'eau qui peut encore s'évaporer est bien plus liée au solide que celle qui est partie juste après la prise; en outre, la dessiccation atteint des couches de plus en plus profondes. Le mécanisme reste cependant le même qu'en cours de prise.

● *Précaution :* prévoir, dès le projet, les joints et les armatures nécessaires.

En résumé, les fissures du béton sont souvent évitables et toujours maîtrisables, car on peut au moins limiter leurs ouvertures et leurs progressions.

Influence du milieu

Altérations d'origine chimique

L'hydratation du ciment libère de la chaux, et c'est pourquoi il faut craindre toutes les solutions qui peuvent dissoudre celle-ci : l'eau non dure ou contenant du gaz carbonique, les solutions de sels d'ammonium, d'acides organiques, etc. Parfois, la dissolution est accompagnée de la formation d'un précipité qui pourra être plus ou moins protecteur : sels de magnésium, graisses, huiles, lubrifiants, solutions sucrées, etc.

Les solutions de sulfates solubles (sodium, potassium, ammonium, magnésium) décalcifient également le ciment, mais, de plus, elles forment un sulfate de calcium qui réagit avec l'aluminate tricalcique hydraté contenu dans le ciment pour former un trisulfoaluminate de calcium hydraté, ou ettringite, ou sel de Candlot. La formation de ce sel est fortement expansive et détruit le béton.

De tous les constituants de l'eau de mer, le sulfate de magnésium est le plus dangereux; non seulement il conduit à la formation de sel de Candlot expansif et destructeur, mais de plus il transforme le C—S—H, par substitution de MgO à CaO, en M—S—H, qui est dépourvu de propriétés liantes.

Il peut également se produire des altérations en phase gazeuse avec, par exemple, l'anhydride sulfureux ou le gaz carbonique; ce dernier, en carbonatant la chaux, densifie le béton en surface et augmente sa dureté superficielle, ce qui peut être avantageux; cependant, cette réaction s'accompagne d'un retrait (retrait de carbonatation).

Dans certains cas, rares jusqu'à présent en France, il peut se produire des réactions entre les granulats et la pâte de ciment. Par exemple, entre la silice amorphe de certains granulats et les alcalis du ciment (alcali-réactions), il se forme un gel alcalino-siliceux qui gonfle fortement en présence d'eau et développe une pression suffisante pour détruire la cohésion du béton.

● *Précautions :*

— Contre la dissolution de la chaux, utiliser des ciments contenant des constituants secondaires (laitiers, cendres volantes, pouzzolanes) doués de la propriété, dite « pouzzolanique », de fixer la chaux (on aura, par exemple, souvent intérêt à utiliser du CLK pour les fondations).

— Contre la formation du sel de Candlot, outre les précautions précédentes, choisir un ciment contenant peu d'aluminate tricalcique, moins de 8 % pour les ouvrages à la mer (à noter que l'aluminate tricalcique cristallise sous plusieurs formes qui ne sont peut-être pas toutes aussi dangereuses).

— Contre les réactions entre granulat et pâte, éviter l'emploi de certains granulats et choisir des ciments contenant peu d'alcalis (Na_2O et K_2O).

A noter qu'en règle générale, un béton résiste d'autant mieux qu'il est plus compact, plus riche en ciment et plus sec.

Altérations d'origine physique

Lorsque l'eau interne gèle, la glace, en augmentant de volume, peut briser les parois solides et ruiner la cohérence du béton. Celui-ci résiste d'autant mieux au gel qu'il est plus résistant et plus sec. Un procédé très efficace consiste à ajouter au béton, au moment de sa fabrication, un adjuvant « entraîneur d'air ». L'effet d'un tel produit est de stabiliser, au moment du malaxage et de la vibration, de petites bulles d'air (quelques μm), enrobées de résine et bien réparties (distance moyenne inférieure à 100 μm), qui serviront de vase d'expansion quand l'eau se transformera en glace.

La présence de ces petites bulles d'air entraînées dans les pores ralentit la pénétration des sels, comme les sels de déverglaçage répandus l'hiver sur les routes. La fusion endothermique de la glace par les sels refroidit le béton (souvent jusqu'à — 20 °C). Il en résulte un gradient de température important entre la couche supérieure du béton du revêtement, dont l'eau libre est salée et fondue, et la couche inférieure dont l'eau libre est gelée. L'air entraîné, en empêchant la pénétration de la

Tableau I - Choix du béton et variété des usages				
Propriétés requises et exemples d'applications	Sur quoi agir			Risques
	Choix des constituants	Proportions	Fabrication et mise en œuvre	
Résistance mécanique à long terme (ex. : ponts)	Ciments de classe 400 ou 500 à hydratation progressive Ajout d'un plastifiant	Dosage en eau et rapport *s/g* optimaux	Vibration puissante de durée suffisante	
Résistance aux agents agressifs (ex. : égouts)	Ciments à constituants secondaires et faible teneur en C_3A Entraîneur d'air	Dosage en eau et rapport *s/g* optimaux	Vibration puissante de durée suffisante	
Résistance à court terme pour démoulage rapide, manutention, mise en service immédiate, etc. (ex. : préfabriqué)	Ciments à hydratation rapide, adjuvants accélérateurs de prise et de durcissement Ciment alumineux	Peu d'eau	Traitements thermiques	Fissures, faibles résistances aux altérations, chute de résistance mécanique à long terme, corrosion, transformations cristallines
Résistance mécanique et légèreté (ex. : dalle de pont suspendu)	Granulats légers (1 t/m³) Sable de rivière	Compromis entre la légèreté et les résistances mécaniques	Durée de malaxage prolongée, vibration modérée	Ségrégation ; attrition des granulats au cours de la fabrication, du transport et de la mise en œuvre
Protection contre les radiations (ex. : enceintes nucléaires)	Granulats lourds (4 t/m³)	Compromis entre le poids et les risques de ségrégation	En grande masse, vibration puissante et de durée suffisante	Ségrégation
Résistance au feu (ex. : revêtements réfractaires des fours)	Ciments alumineux ou magnésiens	Peu d'eau	Doit être confiée à des spécialistes	
Drainage	Choisir le ciment selon la composition de l'eau drainée	Diminution, voire suppression du sable	Vibration légère ou damage	
Étanchéité (ex. : terrasses)	Adjuvants plastifiants entraîneurs d'air, hydrofuges de masse	Dosages en ciment et en eau, rapport *s/g* optimaux	Vibration puissante et de durée suffisante	
Isolation thermique (ex. : murs d'habitations)	Granulats très légers (0,6 t/m³)	Compromis entre la légèreté et les risques de ségrégation	Béton cellulaire	Faibles résistances mécaniques
Esthétique (ex. : façades)	Ciment blanc sans oxydes de fer	Granulats fins, de couleur, colorants liquides	Coffrages soignés	

▲ *Tableau I : choix du béton et variété des usages.*

saumure, limite la portée du gradient à une mince couche superficielle et assure ainsi une protection efficace.

Il existe d'autres cas, moins importants en pratique, d'altérations par gonflement ou par gradient de température. Comme pour les altérations d'origine chimique, le béton résiste d'autant mieux qu'il est plus âgé, plus riche en ciment et plus sec.

Choix du béton pour un usage donné

Pour adapter le béton à l'usage souhaité, on peut jouer sur le choix des constituants (ciment, granulats, adjuvants) ou sur celui des proportions, ou encore sur la fabrication et la mise en œuvre. Le *tableau* I montre, par quelques exemples, la variété des usages auxquels le béton peut prétendre et indique comment atteindre l'objectif recherché.

Matériau très ancien, le béton peut satisfaire les besoins de tous les temps (résistance mécanique, cohésion) comme les plus modernes (protection contre les radiations). Mélange issu de la terre, il peut résister aux altérations physiques et chimiques, et même être réfractaire pour les revêtements de four. Bon marché, banal même, le béton enfin peut s'adapter aux cadences rapides de fabrication industrielle ; mais il peut aussi, en même temps, être beau, pour peu qu'on le veuille.

Les pierres naturelles

Leur composition, leur structure et leurs propriétés dépendent de leur nature (roches éruptives comme les basaltes, sédimentaires comme les calcaires, métamorphiques comme les schistes, avec un liant chimiquement constitué comme la meulière) et de leur provenance (suivant le gisement, le calcaire, par exemple, est siliceux, argileux ou marneux). La structure des pierres diffère suivant leur nature ; elle peut être semblable à celle d'un métal (grains apparemment jointifs) ou à celle d'un béton (grains disséminés dans une pâte homogène plus ou moins poreuse). Certaines pierres ont d'ailleurs, comme le béton, des pores de deux ordres de grandeur distincts. L'adhérence des pierres au mortier pose les mêmes problèmes que celle de la pâte aux grains du granulat à l'intérieur du béton.

Le comportement mécanique des roches est en général du type fragile, semblable donc à celui qui a été étudié en détail pour le béton. Pour les calcaires, la résistance mécanique augmente avec la densité, ce qui est à rapprocher de la loi de Féret énoncée pour les bétons. On attache de l'importance à la dureté des pierres que l'on caractérise par une échelle de dureté analogue à celle de Mohs.

Les roches poreuses peuvent être gélives. On considère qu'il est favorable d'avoir une certaine proportion de gros pores bien répartis qui se vident dès que l'hygrométrie n'est plus saturée ; ces pores jouent le rôle de l'air entraîné, volontairement introduit dans le béton. Les

C.E.R.I.L.H.

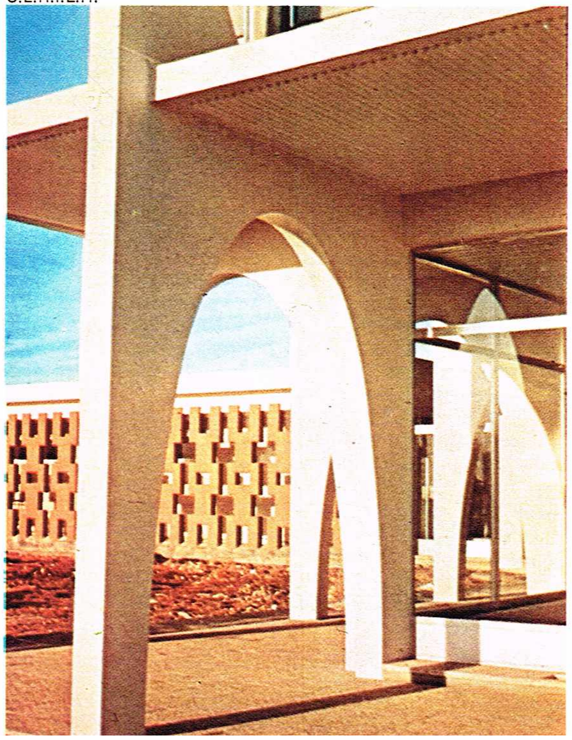

◀ *Le béton peut être beau. Ici, arches en béton poli ceinturant le bâtiment administratif du C.E.R.I.B. (centre d'étude et de recherche de l'industrie du béton manufacturé).*

▲ *Les produits de terre cuite trouvent des emplois variés : briques, hourdis, ou tuiles.*

Fotogram

roches doivent être stables, et il faut redouter la présence de feldspaths et de micas. Les calcaires sont lentement dissous par l'eau de pluie chargée en gaz carbonique; ils sont aussi attaqués par les fumées industrielles ou domestiques (chauffage au mazout) qui contiennent du gaz sulfureux; celui-ci forme, avec l'humidité, de l'acide sulfurique, lequel réagit avec le carbonate de calcium des calcaires et forme un sulfate de calcium soluble. On peut se prémunir contre ces attaques par un traitement de surface qui consiste à boucher les pores superficiels; les pierres ainsi traitées se salissent moins vite.

La pierre, matériau naturel, extrait mais non fabriqué, ne peut pas être adaptée à volonté à des emplois diversifiés comme le béton ou la brique. Si l'on souhaite utiliser la pierre locale, il faut l'accepter telle qu'elle est (ou à peu près) avec ses caractéristiques physiques, mécaniques, technologiques et esthétiques propres. Si l'on souhaite une propriété particulière (homogénéité, teinte, dureté, poli, etc.), il faut, parfois, aller chercher loin la carrière convenable et en payer le prix.

Les terres cuites

Les produits de terre cuite trouvent des emplois variés dans les constructions : briques pour les murs et cloisons, hourdis pour les planchers, tuiles pour les toits, conduits de fumées et de ventilation, etc. : en tout, 0,1 à 0,2 tonne par habitant et par an.

La terre cuite résulte de la cuisson d'une argile commune à 1 000 ou 1 200 °C. Sa structure peut être caractérisée par la granulométrie des pores, la répartition et la granulométrie des grains qui subsistent après cuisson, et par les distributions des défauts (bulles, microfissures, etc.). Elle dépend de la composition de l'argile (plus ou moins siliceuse ou calcaire, par exemple), de la préparation de la pâte (quantité d'eau ajoutée, choix et proportions des « dégraissants », etc.), du façonnage (pressage, filage, etc.) du séchage (vitesse, homogénéité), et enfin de la cuisson (vitesse de montée en température, température du palier, vitesse de refroidissement, etc.).

Dans les conditions usuelles, le comportement de la terre cuite est élastique et fragile. Son comportement à la rupture dépend non seulement du matériau constitutif, mais aussi de la taille et de la localisation des défauts. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, il n'est pas toujours souhaitable que les défauts soient les plus petits possible. Dans certaines conditions de déformation imposée, un défaut trop petit peut donner une propagation brutale de fissure, celle-ci traversant toute la pièce sous sa lancée; un défaut plus important donnerait dans ce cas une propagation stable, la fissure commençant à se propager plus tôt, mais s'arrêtant avant que la pièce soit entièrement rompue. Il est donc préférable de ne pas énoncer de lois générales, l'important étant de bien distinguer, grâce aux méthodes de la mécanique de la rupture, ce qui est propre au matériau lui-même et ce qui dépend des défauts, de leur taille et de leur localisation. En pratique, on se contente le plus souvent d'indiquer la résistance en compression de l'élément considéré (par exemple, d'une brique creuse), compte tenu de sa géométrie et de ses vides.

Les terres cuites, obtenues par cuisson, ont une bonne tenue au feu et sont réfractaires. Étant sèches immédiatement après leur fabrication, elles gonflent à l'humidité (phénomène inverse du retrait hydraulique des bétons). Parfois, la présence de chaux mal répartie est cause de gonflements anormaux et d'éclatements. La gélivité de la terre cuite dépend de sa porosité, de sa résistance mécanique et de son degré de saturation.

En jouant sur la composition de la pâte, sur les paramètres de fabrication, sur la forme, sur l'évidement des éléments, on peut satisfaire à des exigences variées : résistances mécaniques, légèreté, isolation thermique, esthétique, etc.

Matériaux ferreux

Fabrication et structure

Définition des fontes et des aciers

Les premiers objets en fer ont été fabriqués directement à partir de météorites tombées du ciel en Égypte ou à Sumer, au nord du golfe Persique. De là vient l'étymologie du mot « sidérurgie » (*sidus* = astre, en latin), industrie de l'acier.

Les premières transformations de minerais tirés du sol ont apparu au sud du Caucase, chez les Chalybes, vers 1700 avant l'ère chrétienne. Les objets fabriqués à partir d'une pâte étaient des couteaux et des outils, le métal obtenu étant analogue à de l'acier extra-doux (fer presque pur) mélangé à des scories.

Au Ve siècle avant notre ère en Chine, au Moyen Age en Europe, l'amélioration des techniques industrielles a permis d'élever la température de traitement des minerais et d'obtenir un métal à l'état liquide : la fonte. Il s'agit d'un matériau à base de fer, contenant plus de 2 % environ de carbone, qui se moule facilement. Actuellement, des éléments tels que le silicium, le nickel ou le chrome sont parfois introduits dans la fonte pour modifier ou renforcer l'action du carbone, qui reste l'élément essentiel.

Le forgeage de la fonte est très difficile, c'est pourquoi celle-ci est affinée; le produit obtenu au XVIIIe siècle était du fer puddlé, c'est-à-dire une masse pâteuse, ou « loupe », obtenue à partir de la fonte liquide mélangée à un oxydant à une température inférieure au point de fusion du fer, et hors de laquelle les scories ont été chassées par battage. C'est vers cette époque que s'est imposée l'utilisation des matériaux ferreux dans le bâtiment, notamment pour les clous, les grilles et la serrurerie.

Au milieu du XIXe siècle, H. Bessemer, d'une part, P.-E. Martin, d'autre part, ont imaginé d'autres procédés d'affinage de la fonte permettant d'obtenir un acier,

fig. 6

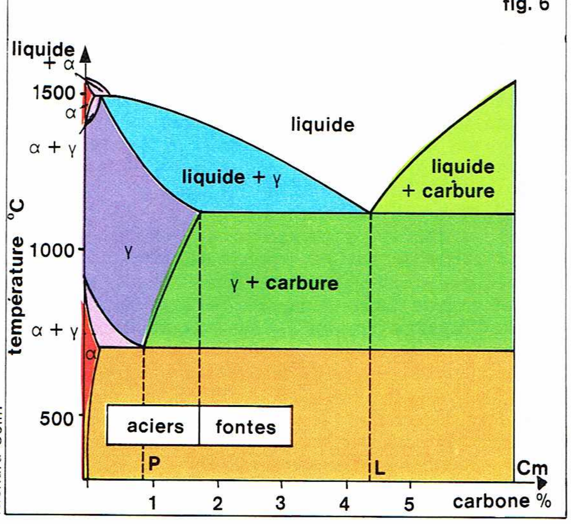

Richard Colin

▶ *Figure 6 : diagramme d'équilibre fer-carbone. En vert, Cm : carbure Fe_3C « cémentite »; en rouge, α, ferrite; en bleu, γ, austénite; P, eutectoïde « perlite »; L, eutectoïde « ledeburite ».*

mélange ferreux assez homogène, dans lequel la teneur en carbone est inférieure à 1,7 %. Cette teneur frontière entre les fontes et les aciers s'explique physiquement à l'aide du diagramme fer-carbone (*fig.* 6) qui indique les différents cristaux (« phases ») stables aux diverses températures suivant la teneur en carbone dans l'alliage.

Les aciers de construction sont des aciers au carbone non alliés ou très faiblement alliés, au chrome, au silicium, au molybdène ou au vanadium, de sorte qu'ils contiennent de fins précipités durcissants de carbures, de nitrures ou de composés intermétalliques.

Traitements thermiques

Les cristaux composant l'acier, obtenus par refroidissement à partir des hautes températures jusqu'aux températures ordinaires (20 °C), dépendent de la vitesse de refroidissement. Le diagramme fer-carbone est insuffisant pour expliquer la nature de l'acier.

Vers 1 000 °C, les aciers sont composés d'une seule sorte de cristaux. Cette phase, appelée austénite, présente un réseau cubique à faces centrées de fer ayant dissous du carbone, qui n'est donc pas visible par microscopies optique ou électronique. Si un acier est refroidi lentement à partir de 1 000 °C, il convient de tenir compte de sa teneur en carbone C.

Pour une teneur C inférieure à 0,80 %, la transformation, commençant entre 91 °C et 732 °C, entraîne la formation de cristaux de ferrite, qui possède un réseau cubique centré de fer pouvant dissoudre jusqu'à 0,035 % de carbone. Si cette teneur limite n'est pas dépassée, l'acier ne comportera que cette phase unique. Dans le cas contraire, il se forme un eutectoïde, mélange en proportion définie de deux types de cristaux (ferrite et carbure de fer appelé cémentite), appelé perlite.

Pour une teneur C comprise entre 0,80 % et 1,7 %, un refroidissement lent de l'acier entraîne la formation de perlite et de cémentite.

Lorsque le refroidissement est rapide, le carbure de fer n'a pas le temps de se former, l'austénite se transforme en martensite, qui est d'autant plus dure et fragile qu'elle contient du carbone. L'acier est alors dit « trempé ». Un chauffage ultérieur à une température inférieure à 732 °C (« revenu ») provoque, par formation de cémentite, le retour à un état proche de l'équilibre. Le procédé de durcissement de l'acier par trempe suivie ou non de revenu est très courant. Certains aciers pour armatures de précontrainte sont durcis de cette façon.

Le comportement exact d'un acier au refroidissement se traduit par un diagramme établi soit en refroidissement continu (diagramme TRC = transformation en refroidissement continu), soit en conditions isothermes (diagramme TTT, transformation-température-temps). Il apparaît également entre 525 °C et 275 °C environ une formation d'un composant de l'acier appelé bainite dont la dureté est comprise entre celle de la ferrite-perlite et celle de la martensite (*fig.* 7).

Par ailleurs, le refroidissement des fontes entraîne la formation soit de perlite et cémentite (« fonte blanche »), soit d'austénite et de carbone pur à l'état de graphite (en « lamelles » ou en « sphères »), soit encore, dans le cas de fontes alliées, de bainite ou de martensite et de graphite.

Traitements mécaniques

La mise en forme des matériaux ferreux est obtenue par moulage dans le cas des fontes et des aciers. Mais ces derniers subissent généralement d'autres traitements d'ordre mécanique avant leur utilisation.

Les différents modes de formage à chaud sont le forgeage, tel celui, très ancien, des clous, le laminage à chaud, tel celui qui permet d'obtenir des tôles, des ronds à béton ou des poutrelles profilées, l'emboutissage à chaud et d'autres opérations qui concernent rarement les aciers de construction.

Le refroidissement après formage à chaud est assez lent pour que l'on puisse considérer cette opération comme n'étant qu'une modification de la forme de l'acier sans changement de ses caractéristiques.

En revanche, les opérations de mise en forme à froid, à l'exception de l'usinage, modifient les caractéristiques mécaniques de l'acier. Il s'agit du laminage à froid et du pliage des tôles, de l'étirage des barres et du tréfilage des fils.Une déformation à froid de l'acier provoque un mouvement des dislocations qui peuvent s'ancrer ou provoquer des glissements entraînant la modification de la géométrie des cristaux. Il apparaît donc un écrouissage, qui se traduit par l'augmentation de la limite d'élasticité dans le sens de la déformation, mais diminue la ductilité de l'acier et sa tenue au choc (« résilience »).

C'est ainsi que les fils en acier à haute résistance pour câbles de précontrainte ou de ponts suspendus sont souvent durcis par tréfilage, et la plupart des barres à haute adhérence pour béton armé sont durcies par torsion à froid. L'utilisation de ces produits, notamment en cas de chocs ou de sollicitation mécanique transversale, nécessite des précautions plus importantes que dans le cas des produits obtenus par laminage.

Comme pour les autres matériaux métalliques, les caractéristiques mécaniques des fontes et aciers de construction résultent d'un compromis entre la résistance mécanique et la ductilité, sans compter les autres spécifications propres à chaque utilisation. La résistance mécanique est obtenue par la présence de particules dures dans le matériau. Il s'agit en l'occurrence de carbure (cémentite), de carbone à l'état de graphite, de martensite ou d'autres cristaux. Ainsi, pour les aciers mis en forme à chaud et refroidis lentement, la résistance mécanique augmente avec la teneur en carbone.

En revanche, la ductilité des aciers est obtenue par la présence de cristaux malléables de ferrite ou d'austénite. Pour les fontes, une amélioration de la ductilité est obtenue en donnant aux cristaux de graphite une forme particulière, dite « nodulaire », laquelle augmente la cohésion entre la matière ferritique et les particules de graphite.

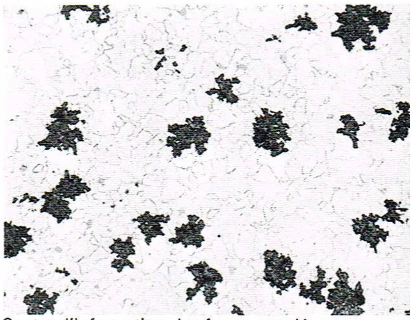

Centre d'information des fontes moulées

▲ ***Fonte malléable à cœur noir : nodules de graphite et matrice de ferrite.***

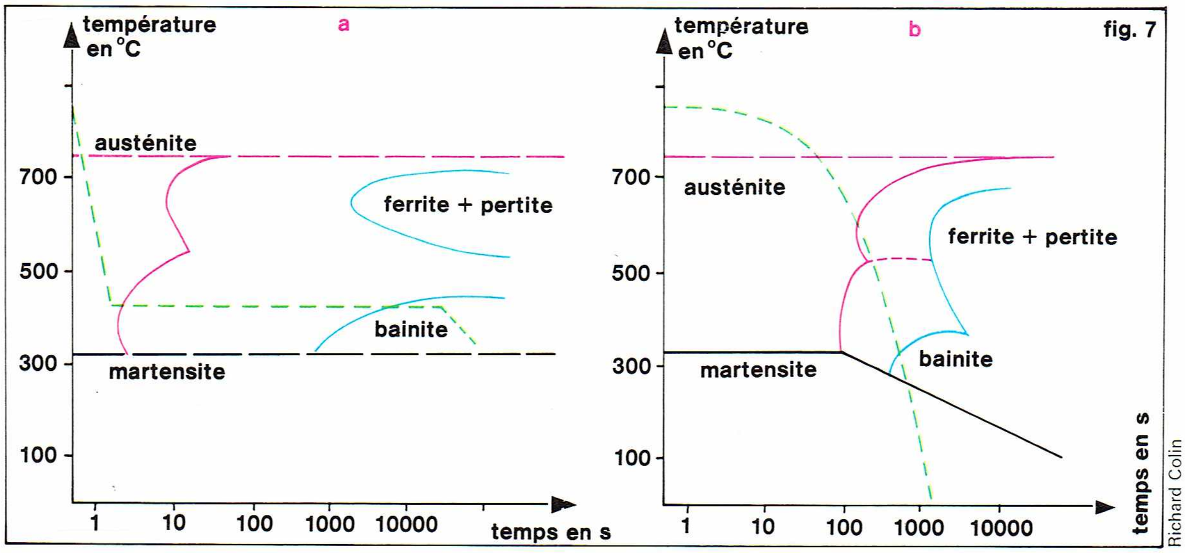

Richard Colin

◀ ***Figure 7 : diagrammes de transformation d'un acier allié pour construction mécanique (35 CD4) ; a, diagramme TTT ; b, diagramme TRC. En vert, température de l'éprouvette ; en rouge, fin de la stabilité de l'austénite ; en noir, apparition de la martensite ; en bleu, fin de la transformation entraînant l'apparition de ferrite et de bainite.***

Tableau II
Caractéristiques mécaniques et technologiques de quelques aciers de construction d'après les réglementations françaises

Produit	Nuance	Limite d'élasticité minimale (en MPa)	Résistance à la traction (en MPa)	Allongement minimal (en %)	Diamètre minimal du mandrin de pliage à 180°	Résilience (sens long) mini	
						KCV (en J/cm²)	KCV (en J/cm²)
Rond lisse (diamètre *d* = 16 mm) pour béton armé	Fe E 22	215	335 à 490	22	2*d* = 32 mm	—	—
	Fe E 34	335	590 à 710	16	—	—	—
Barre à haute adhérence (*d* = 16 mm) pour béton armé	Fe E 40	410	480 et plus	14	3*d* = 48 mm	—	—
	Fe E 50	490	560 et plus	10	45*d* = 72 mm	—	—
Tôle (épaisseur *e* = 30 mm) pour construction soudée (acier de qualité 4 ou de type C)	E 24 (A 37)	235	360 à 440	28	1,5*e* = 45 mm	—	—
	E 26 (A 42)	255	410 à 490	27	1,5*e* = 45 mm		35 à — 20 °C
	E 36 (A 52)	355	510 à 610	22	3,5 *e* = 105 mm	—	50 à — 20 °C
	E 460	450	590 à 710	17	4 *e* = 120 mm	—	45 à — 20 °C
Rond pour rivet	A 42 R	255	410 à 490	24	—	70 à + 20 °C	—
Acier pour boulon à haute résistance pour ouvrage d'art	42 C D 4	785	980 à 1 180	11	—	40 à — 20 °C	—

▲ *Tableau II : caractéristiques mécaniques et technologiques de quelques aciers de construction.*

▼ *Figure 8 : diagramme de traction d'aciers. En bleu, rond lisse (nuance FeE22) pour béton armé; en vert, tôle (nuance E36) pour construction soudée; en rouge, armatures de précontrainte;* L_0 *: longueur initiale de l'éprouvette;* S_0 *: section initiale;* L *: longueur sous une charge* F. *L'allongement maximal varie en raison inverse de la charge maximale à la rupture.*

fig. 8

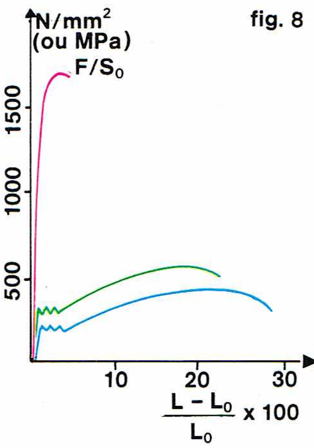

Richard Colin

Déformation et rupture

Résistance mécanique

Les caractéristiques de résistance mécanique prises en compte pour les matériaux ferreux de construction sont la limite d'élasticité et la résistance à la rupture, qui sont déterminées par des essais de traction (*tableau* II).

Ces essais consistent à tirer, à une température voisine de 20 °C, une éprouvette de dimensions normalisées, dont une dimension transversale (épaisseur, diamètre, etc.) est souvent celle du produit à l'état d'utilisation, à l'aide d'une machine spéciale. La force appliquée est notée en fonction de l'allongement obtenu sur l'éprouvette. Pour que la courbe obtenue, appelée diagramme de traction, ne dépende pas des dimensions de l'éprouvette, la force est divisée par l'aire de la section droite initiale de l'éprouvette pour donner la « charge unitaire » exprimée en N/mm² (ou MPa); de même, l'allongement mesuré est divisé par la longueur initiale de l'éprouvette et exprimé en pour cent (*fig.* 8). Le rapport entre la charge unitaire et la déformation est appelé module d'Young. Pour les aciers, il est constant jusqu'à une certaine valeur de la charge.

La *limite d'élasticité* est égale à la charge unitaire au-delà de laquelle l'éprouvette subit une déformation irréversible notable. Pour les aciers de structure ferrite-perlite, la détermination de la limite d'élasticité est plus facile, du fait que l'allongement croît nettement, alors que la charge unitaire se stabilise au niveau de cette limite d'élasticité où des plans de glissement forment des bandes dites de Piobert-Lüders dans l'éprouvette.

Pour les autres aciers ou les fontes, il convient de mesurer l'allongement rémanent qui apparaît lorsque l'éprouvette est déchargée après avoir subi une charge donnée pendant un certain temps. Ainsi, on définit les limites conventionnelles d'élasticité correspondant à des allongements permanents résiduels de 0,1 %, ou plus communément de 0,2 %.

La *résistance à la rupture* est la charge unitaire maximale que subit une éprouvette avant de se rompre. Cette rupture ne survient pas instantanément. En effet, une faiblesse locale (défaut superficiel, inclusions non métalliques, etc.) du métal provoque un allongement supérieur à celui du reste de l'éprouvette. Une diminution locale de l'aire de la section droite (striction) se produit alors et augmente encore la contrainte locale, la charge globale appliquée restant constante. En d'autres termes, la rupture est localisée au niveau de cette zone de striction. Elle est amorcée au centre de l'éprouvette par rupture des cristaux durs (carbure, inclusions non métalliques) et décohésion de la matrice malléable (ferrite) créant de petites cavités dont les dimensions sont de l'ordre du μm ou plus. La cassure obtenue comporte ainsi des cratères appelés « cupules », caractéristiques d'une rupture ductile.

Pour les aciers martensitiques ou essayés à froid, l'amorçage de la rupture peut être obtenu par clivage des cristaux. La surface de la cassure comporte alors des facettes planes parallèles séparées par de petites marches appelées « rivières » et de petites surfaces dites « languettes » faisant un angle, cristallographiquement défini, avec la plupart des plans de clivage.

Ces caractéristiques, obtenues par essais de traction d'éprouvettes de section droite uniforme, ne suffisent pas toujours pour évaluer la résistance des matériaux de construction sous diverses sollicitations mécaniques. Ainsi, il arrive que les aciers se fissurent en service, et les méthodes trop simples de calcul ne permettent pas d'évaluer l'état de contrainte aux extrémités de ces fissures et, par voie de conséquence, la sollicitation maximale entraînant la rupture du matériau fissuré.

La mécanique linéaire élastique de la rupture définit une *ténacité* caractéristique du matériau, appelée facteur critique d'intensité de contrainte (K_{IC}, exprimée en MPa $\sqrt{m}$), proportionnelle au produit de la contrainte nominale par la racine carrée de la profondeur de la fissure à la rupture, et liée à l'énergie nécessaire pour faire croître l'aire de la fissure jusqu'à la rupture (en J/mm²), appelée force d'extension de fissure G_{IC}.

Cette ténacité à la rupture par fissuration est déterminée dans les cas extrêmes, où l'éprouvette est sollicitée en traction, perpendiculairement au plan de la fissure, ses dimensions transversales étant assez grandes pour que l'état de déformation en fond de fissure soit plan

(pas de déformation parallèle au plan de la fissure). Les valeurs obtenues permettent de calculer la taille maximale de fissure provoquant la rupture pour une contrainte nominale appliquée.

Des mesures faites sur des familles d'aciers, pour diverses applications, ont montré que la ténacité à la rupture diminue lorsque la limite d'élasticité augmente : pour une même contrainte appliquée, la taille maximale de fissures est plus faible pour les aciers plus résistants que pour les aciers de moindre résistance mécanique.

Cependant, lorsque la comparaison se limite à des aciers destinés aux mêmes usages, tels que les aciers pour charpente métallique, d'une part, les aciers de précontrainte, d'autre part, les conclusions sont beaucoup moins nettes. En effet, la structure de l'acier, la forme et la teneur en inclusions non métalliques ainsi que l'état de contrainte interne résiduelle peuvent modifier l'état local de contrainte en fond de fissure, calculée dans l'hypothèse d'un solide homogène isotrope.

Lorsque les éléments de construction ont une épaisseur nettement plus faible que celle des éprouvettes de mesure K_{IC}, la ténacité peut être mesurée par la méthode de l'intégrale de Rice, dont la valeur critique J_{IC}, valable pour toutes les épaisseurs courantes, est égale à G_{IC} dans le cas des fortes épaisseurs.

On peut encore étudier la ténacité des aciers de construction en mesurant l'énergie critique nécessaire pour amorcer l'extension d'une fissure déjà existante, de façon brutale entraînant la rupture ou de façon quasi stable (croissance subcritique). Il s'agit de tracer une courbe dite courbe R permettant de définir les conditions de croissance stable d'une fissure (*fig.* 9). Cette méthode permet d'étudier les conditions de service, car il n'est plus nécessaire, comme pour les déterminations de K_{IC}, de considérer le cas unique d'une fissure sollicitée en traction pure avec un champ de déformation plane. Les déterminations de courbes R sont en accord avec les mesures de K_{IC}, ces dernières étant plus fréquemment effectuées que les premières.

Une autre caractéristique de la résistance mécanique des matériaux ferreux est leur tenue aux chocs, appelée résilience.

L'essai correspondant consiste à soumettre une éprouvette parallélépipédique à un essai de flexion en trois points, cette éprouvette étant appuyée près de ses extrémités alors que la force est appliquée brutalement en son milieu à l'aide d'un mouton-pendule. L'énergie consommée par la rupture de l'éprouvette se traduit par une diminution de l'énergie potentielle du mouton-pendule. Dans le cas des fontes, l'éprouvette est un simple parallélépipède, alors que, pour les aciers, une entaille est usinée sur la face opposée au point d'application de la force. L'acuité de l'entaille influe fortement sur les résultats d'essais ; aussi les normes prévoient-elles deux types d'entailles, en forme de V ou de trou de serrure (dite entaille en U pour l'essai Charpy).

La rupture est amorcée soit à partir des cristaux durs, essentiellement le graphite dans le cas des fontes, soit par concentration des contraintes en fond d'entaille. Elle progresse par clivage des cristaux dans le cas des fontes ou des aciers à basse température. A cette rupture de type fragile correspondent une faible énergie consommée (faible résilience) et un faciès de cassure comportant des facettes brillantes (rupture « cristalline »).

I.G.D.A. - Poggio

▲ *Le téléphérique Courmayeur-Chamonix : la suspension est réalisée avec des câbles d'acier, eux-mêmes accrochés à d'autres câbles transversaux, ancrés aux cimes du Grand et du Petit-Flambeau.*

Dans le cas où les aciers résistent bien aux chocs (forte résilience), la rupture, amorcée par la rupture des cristaux durs, carbure, inclusions non métalliques, et leur décohésion de la matrice ferritique, progresse par formation de microvides (« cupules »). Le faciès de cette rupture « ductile » est du type ligneux.

La transition entre le faciès fragile et le faciès ductile se produit à une température qui est caractéristique de l'acier. Comme cette transition ne se fait pas brutalement, la température choisie correspond à 50 % de la cassure ayant un faciès fragile. Cette température correspond également à une énergie (résilience) de niveau défini.

Dans les constructions réelles, les aciers ne comportent pas d'entaille de dimension préalablement définie, l'utilisation des résultats d'essais de résilience est donc délicate. Une autre méthode de mesure de la résistance aux chocs des aciers consiste à essayer au mouton-pendule des éprouvettes prismatiques préalablement fissurées (entaille de rayon nul) jusqu'à différentes profondeurs.

L'énergie consommée par la rupture de chaque éprouvette est portée en fonction de la profondeur de fissure (*fig.* 10). La courbe obtenue est extrapolée jusqu'à la profondeur nulle qui correspond à une énergie critique

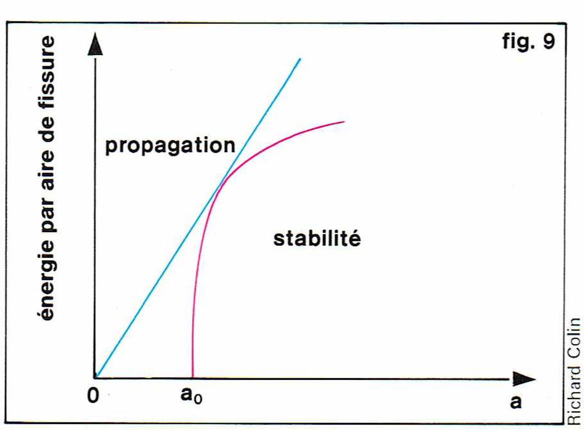

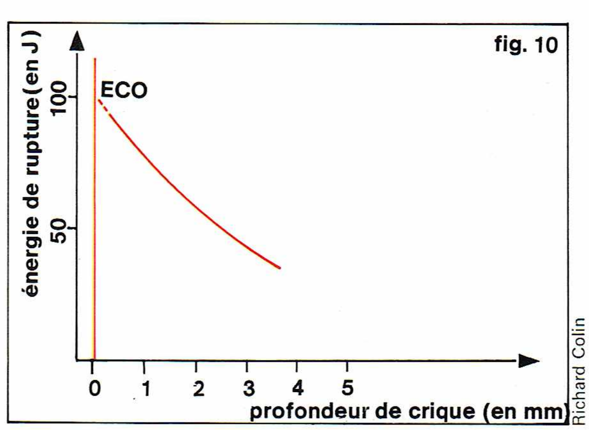

◄ *Figure 9 : stabilité d'une fissure préexistante. a_0, longueur initiale de la fissure ; a, longueur sous une charge donnée (donc pour une énergie donnée) : en rouge, courbe R ; en bleu, tangente délimitant la stabilité ou la propagation de la fissure.*
Figure 10 : détermination de l'énergie de crique nulle notée ECO *pour un acier de construction mécanique allié (35 CD4). En rouge, axe et courbe dont l'intersection donne* ECO *(d'après B. Marandet et G. Sanz).*

▶ ***Figure 11 :* relation entre la résistance à la traction et la limite d'endurance (à 10 millions de cycles) pour la plupart des aciers.**

appelée « énergie de crique nulle », notée ECO, qui est liée à la ténacité à la rupture par fissuration. Ces essais sont peu fréquents.

Ductilité

Les seules caractéristiques de résistance mécanique des matériaux ferreux ne justifient pas leur emploi dans le bâtiment et le génie civil. Il convient, en effet, de s'assurer qu'une augmentation accidentelle locale de la force appliquée provoquera une déformation suffisante pour être encaissée par le reste de la construction sans entraîner la ruine de celle-ci.

Les paramètres habituels de ductilité sont obtenus par essai de traction : il s'agit de l'allongement (sous la charge maximale ou mesuré après rupture à l'aide de deux repères situés de part et d'autre de la cassure) et du coefficient de striction (diminution de l'aire de la section droite au niveau de la cassure, rapportée à l'aire avant essai de traction).

D'une façon générale, la ductilité varie en raison inverse de la résistance mécanique. En effet, une augmentation de l'allongement (ou de la déformation) avant rupture correspond à des mouvements amples des dislocations, alors que l'augmentation de la résistance mécanique du même matériau est obtenue par blocage des dislocations. C'est pourquoi les aciers de construction comportent le plus souvent, à la fois, des cristaux durs, résistants (carbures), et des cristaux malléables (ferrite), et ont donc une structure de ferrite-perlite. Une amélioration des caractéristiques de la ferrite a une grande influence sur celles de l'acier.

Ainsi, une diminution de la taille des cristaux de ferrite augmente sa limite d'élasticité dans de très fortes proportions et améliore aussi sa tenue aux chocs. De même, les éléments d'addition qui peuvent être dissous dans la perlite sont susceptibles de modifier les caractéristiques mécaniques de l'acier.

D'autres paramètres de ductilité sont utilisés dans des cas particuliers comme le forgeage par refoulement des têtes de boulons ou des rivets. Il s'agit de critères définis par des essais particuliers tels que ceux d'écrasement ou de boutonnage ou des combinaisons d'essais classiques tels que l'essai de traction d'éprouvettes préalablement écrouies par torsion avec différents taux de déformation (le critère est alors le coefficient de striction).

Relaxation

Les aciers à haute résistance mécanique qui sont utilisés comme câbles de précontrainte (tirants d'ancrage dans les sols, précontrainte du béton) sont tendus à un niveau de contrainte proche de la limite d'élasticité et sont maintenus à longueur à peu près constante.

Comme la limite d'élasticité correspond à une déformation notable de l'acier, les mouvements des dislocations se produisent à des contraintes inférieures à cette limite et au-delà d'un certain seuil qui dépend à la fois des contraintes internes résiduelles dans le matériau et de la précision des mesures. Lorsque l'acier est tendu au-delà de ce seuil et maintenu à longueur constante, un réarrangement des dislocations se produit ; il transforme progressivement une partie de la déformation élastique appliquée en déformation plastique non récupérable. Macroscopiquement, la contrainte dans l'acier tendu diminue au cours du temps ; c'est le phénomène de relaxation.

Le comportement en relaxation des aciers dépend donc, non seulement de leur composition chimique et de leur structure métallographique, mais surtout de l'arrangement interne des dislocations. Lorsque celles-ci sont préalablement bloquées par un traitement de vieillissement accéléré sous contrainte (traitement dit de « stabilisation »), la relaxation des aciers est diminuée, toutes les autres conditions étant égales par ailleurs.

C'est pourquoi les aciers de précontrainte sont presque toujours traités après tréfilage par vieillissement, de préférence sous contrainte.

Résistance à la fatigue

La fatigue des aciers de construction provoque une détérioration brute par amorçage et propagation de fissures. Le nombre de cycles entraînant la rupture dépend de la durée de ces deux phases et de la ténacité à la rupture des matériaux.

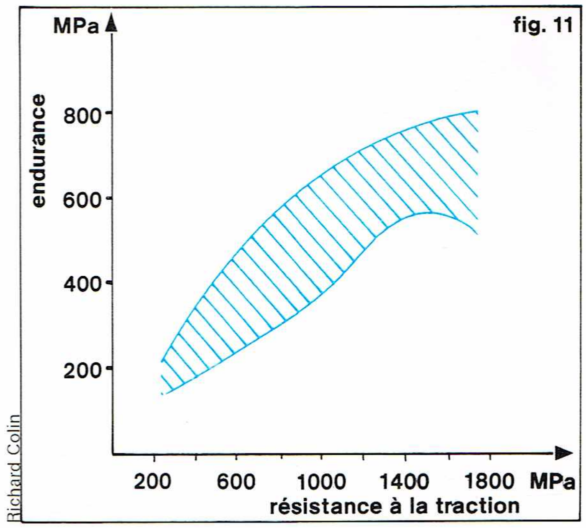

La durée de l'amorçage dépend surtout des imperfections de surface du matériau. Pour les aciers utilisés dans le bâtiment ou le génie civil, la rugosité superficielle provient de leur mise en forme qui ne comporte pas d'usinage ; les défauts superficiels qui jouent un rôle sont alors les nervures des aciers de béton armé, les changements brusques de section ou les défauts géométriques des cordons de soudure pour les charpentes métalliques.

Les méthodes habituelles d'étude de la fatigue sont applicables aux aciers de construction. Dans la méthode de Wöhler, la contrainte imposée suit une loi du type

$$\sigma = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} + \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \sin (2 \pi f t)$$

f étant la fréquence (nombre de cycles pour une durée égale à l'unité) ; le nombre total de cycles au temps t est $N = ft$, σ_{max} est la valeur maximale de la contrainte appliquée et σ_{min} sa valeur minimale. La limite d'endurance (σ_{max} n'entraînant pas de rupture pour σ_{min} donné) augmente avec la résistance mécanique, d'une façon générale (*fig.* 11). Cependant, pour des aciers destinés aux mêmes usages, cette limite d'endurance dépend d'autres facteurs tels que leur propreté interne et leur structure métallographique.

Dans le bâtiment ou le génie civil, les contraintes que subissent les constructions suivent rarement la loi de la méthode de Wöhler. C'est pourquoi des essais de fatigue avec des sollicitations très voisines de celles rencontrées en service sont parfois effectués. Pour cela, les « spectres de charge » sont relevés sur des structures types et peuvent être mathématiquement traités suivant diverses méthodes telles que celle des « blocs programmés ».

Toutes les méthodes d'essais qui viennent d'être décrites utilisent des éprouvettes semblables à celles qui sont en service et ne comportent pas de défaut. Il est cependant important de déterminer la forme et la dimension des défauts préexistants qui risquent de se développer et de se transformer en fissures de fatigue. Si ΔK est l'amplitude des facteurs d'intensité de contrainte au cours d'un cycle de fatigue d'une éprouvette préalablement fissurée, cette fissure ne se propage pas tant que ΔK est inférieur à un certain seuil, ΔK_S, qui est de l'ordre de 10 MPa $\sqrt{m}$ pour les aciers au carbone non allié ayant une limite d'élasticité légèrement supérieure à 360 MPa.

Propriétés physiques et technologiques

Tenue au feu

La résistance au feu des aciers et des fontes dépend de la quantité de chaleur produite par l'incendie et de la durée de celui-ci. Les éléments de structure maintenus à une température de 700 °C ou plus ne peuvent plus supporter les contraintes habituelles appliquées, alors que, si leur température ne dépasse pas 200 °C, ces éléments restent intègres.

Ainsi, la tenue au feu des éléments métalliques est fortement liée à la qualité des matériaux et procédés

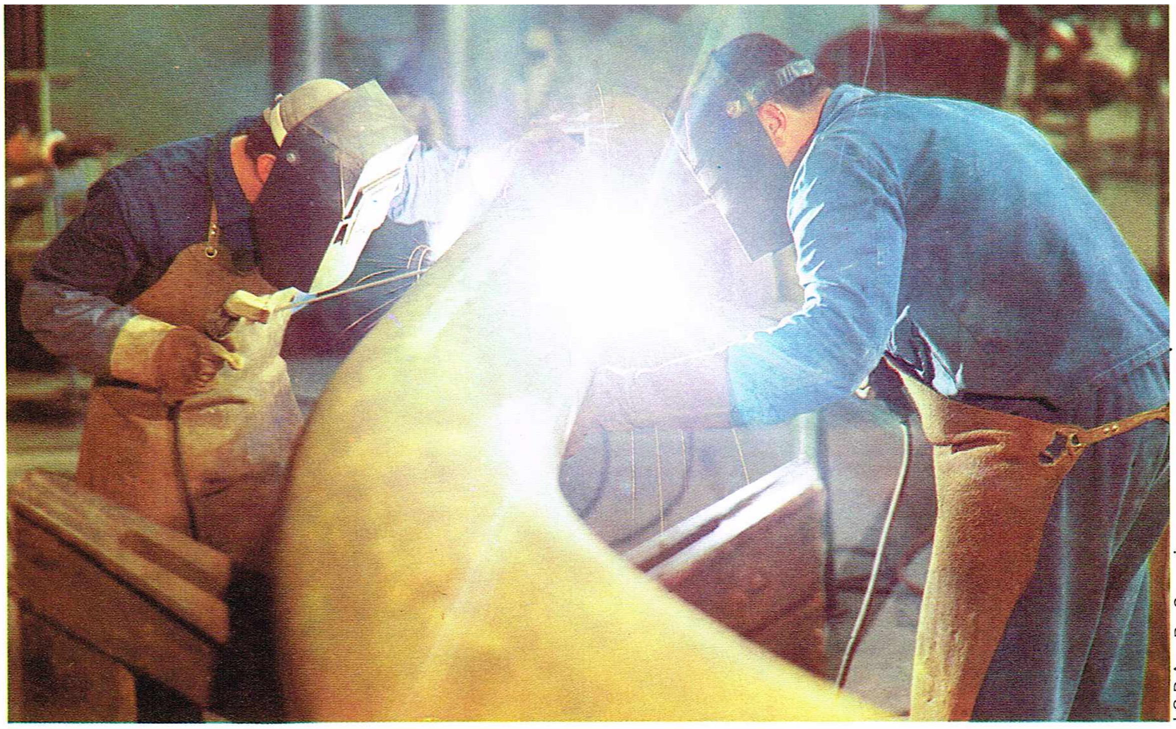

◀ ***Soudure manuelle à l'arc électrique, avec électrode métallique enrobée, exécutée sur une canalisation.***

d'isolation thermiques (amiante, bétons, etc.) qui permettent de limiter l'échauffement durable des aciers ou des fontes.

Soudabilité

Le soudage consiste à assembler des éléments métalliques en réalisant une fusion des bords de ces éléments avec, généralement, utilisation d'un métal d'apport; la continuité de l'ensemble est assurée après refroidissement par les parties fondues. Lorsque le métal de base et le métal d'apport sont de même nature, la soudure est homogène ou « autogène ». Lorsqu'ils sont différents, la soudure est hétérogène, ce qui est le cas du brasage, dans lequel le métal d'apport fond à une température très inférieure à celle du métal de base.

Un matériau métallique est dit soudable lorsque, après une opération de soudage effectuée selon un procédé donné et dans des conditions données, notamment de vitesse de refroidissement, les caractéristiques mécaniques de l'assemblage ne sont pas modifiées par la présence du joint soudé.

Pour les fontes, les modifications de la taille et de la forme des cristaux sont dues à un refroidissement très différent de celui qui est obtenu par moulage. Elles entraînent des variations importantes de la résistance mécanique des fontes utilisées dans le génie civil ou le bâtiment; c'est pourquoi ces soudages sont très rares.

Quant aux fers puddlés, la présence de grandes inclusions non métalliques peut entraîner des amorces de ruptures par fissuration. Il convient alors de préparer les bords à souder en effectuant une première fusion (« beurrage ») avec métal d'apport, avant d'effectuer le soudage proprement dit.

Les armatures de béton armé sont parfois soudées par un procédé à l'arc ou par résistance électrique. Les paramètres de soudage doivent être choisis de sorte qu'il ne se forme pas de composé fragile tel que la martensite au voisinage de la soudure.

Pour les aciers de charpente ou de canalisations soudés à l'arc électrique, les critères de soudabilité sont plus sévères. Il s'agit de vérifier que les conditions de soudage (refroidissement) ne provoquent pas la formation de composés fragiles, mais aussi de s'assurer que les métaux d'apport (électrodes) ne contiennent pas de l'hydrogène qui pourrait fragiliser les cristaux formés au refroidissement; cet hydrogène peut provenir de la décomposition de l'eau contenue dans les électrodes mal séchées. Par ailleurs, le cordon ne doit pas comporter de défauts qui pourraient amorcer une fissuration par fatigue ou par chocs, surtout par temps froid. Si de tels défauts sont difficiles à éliminer totalement, il convient de s'assurer que ces fissures sont arrêtées par l'acier dont la structure n'a pas été perturbée par le soudage. C'est pourquoi les critères de soudabilité peuvent être groupés schématiquement en trois familles : selon les propriétés métallurgiques au refroidissement, la résistance aux chocs ou la capacité d'arrêt d'une fissure.

Dans la première famille de critères, la composition chimique, notamment les teneurs en carbone et manganèse, permet de classer les aciers suivant leur susceptibilité à former de la martensite au refroidissement. Mais la propreté interne des aciers a également son importance; les plus fortes teneurs en soufre et phosphore correspondent à la présence d'inclusions non métalliques qui, surtout en présence d'hydrogène, amorcent des fissures dans l'acier.

Dans le cas des tôles épaisses, ces fissures sont parallèles au plan du laminage et peuvent provoquer un feuilletage (« arrachement lamellaire ») après soudage.

La résistance aux chocs des aciers est évaluée non seulement par les essais de résilience, mais aussi par d'autres types d'essais portant sur des éprouvettes comportant des entailles pressées et non usinées (essais Schnadt), sur des éprouvettes sur lesquelles a été déposé un cordon de soudure ultérieurement entaillé par usinage (essai Pellini), ou sur d'autres éprouvettes. Il s'agit de déterminer, pour chaque type d'essai, la température de transition entre la rupture fragile et la rupture ductile : un acier est d'autant apprécié que cette température est basse.

La capacité d'arrêt de fissure est évaluée par l'essai Robertson qui permet de définir une température au-dessus de laquelle une fissure dans une éprouvette définie de façon stricte mais arbitraire ne se propage pas.

Influence du milieu environnant - Corrosion

Mécanismes de corrosion

La corrosion des matériaux métalliques dans les constructions de génie civil ou les bâtiments est due à l'eau ou à des milieux aqueux. Elle comporte plusieurs réactions élémentaires, complémentaires et simultanées.

La première réaction élémentaire décrit la dissolution du métal qui passe en solution. Cette réaction de dissolution est du type

$$\mathrm{Me} \rightarrow \mathrm{Me}^{V+} + Ve^- \qquad \textbf{(1)}$$

où Me^{V+} représente l'ion métallique de valence V passant en solution, et où les électrons e^- sont en excès dans le métal Me. Cette réaction, dite d'oxydation ou « anodique », doit être compensée par une autre qui consomme les électrons (réaction de réduction). Les réactions les plus courantes sont dues aux ions H^+ et OH^- de décomposition de l'eau :

$$2\,H^+ + 2\,e^- \rightarrow H_2 \text{ (hydrogène gazeux)} \qquad \textbf{(2)}$$

$$O_2 + 2\,H_2O \rightarrow 4\,OH^- \qquad \textbf{(3)}$$

Elles se produisent en des sites liés à ceux de la réaction **(1)** par une jonction métallique. Elles traduisent le fait que l'oxygène gazeux dissous dans l'eau favorise la réaction **(3)**, donc la corrosion du métal; mais la possibilité de la réaction **(2)** indique que la présence d'oxygène n'est pas toujours indispensable.

Les ions Me^{V+} et OH^- dissous dans l'eau peuvent réagir et se redéposer sur le métal en formant une couche d'hydroxyde $\mathrm{Me(OH)}_V$ ou d'oxyde hydraté $\mathrm{Me_2O_V V \cdot H_2O}$

▶ *Figure 12 : diagramme de Pourbaix du fer dans l'eau. En bleu, domaine de non-dissolution (« immunité »); en vert, domaine de dissolution (« corrosion »); en brun, domaine de formation d'oxydes (« passivation »).*

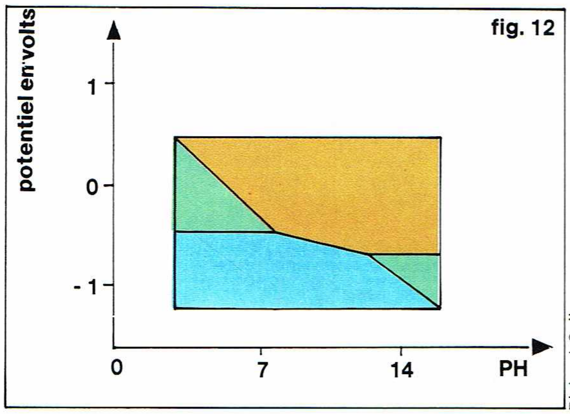

Richard Colin

qui, pour les matériaux ferreux, s'appelle la rouille. Cette formation d'oxyde (« passivation ») sur le métal ralentit les réactions **(1)** et **(2)** d'autant plus efficacement que cette pellicule est étanche.

L'ensemble des relations de corrosion se traduit par un diagramme, dit de Pourbaix, ayant en abscisse le pH du milieu aqueux et en ordonnée la différence de potentiel entre le métal et une électrode dite de référence ne participant pas à des réactions de corrosion (*fig.* 12). Il apparaît sur ce diagramme un domaine où la dissolution du métal est impossible (« immunité ») alors que la réaction **(2)** est possible. Pour les aciers sensibles à la fragilisation par l'hydrogène et soumis à une contrainte de traction assez élevée, ce domaine correspond à un risque de rupture différée par fragilisation par l'hydrogène. Par ailleurs, le domaine de dissolution sans formation d'oxyde (« corrosion ») est divisé en deux et correspond aux milieux très acides ou très basiques. Les oxydes se forment (« passivation ») dans les milieux proches de la neutralité.

La vitesse de corrosion, qui est liée à celles des réactions élémentaires, dépend de la mobilité des ions (conductivité électrique) dans le milieu aqueux. Toutefois, sa détermination par perte de matière pendant une durée donnée n'a d'utilité que pour une forme de corrosion et pour un type de construction donnés.

La corrosion peut produire une dissolution uniforme du matériau métallique; mais ce cas est une simplification de la forme suivante qui est très répandue dans le cas des aciers de construction. La ferrite est le siège de la dissolution (réaction **1**), alors que les réactions de réduction **(2)** ou **(3)** ont lieu au niveau des carbures : il se produit ainsi des dissolutions localisées provoquant des « piqûres » dans le cas d'un liquide homogène. Une autre forme de dissolution sélective apparaît dans des aciers alliés, peu utilisés dans les constructions, où les joints de cristaux sont fortement attaqués (dissolution intergranulaire). Enfin, un acier à haute résistance, tendu dans un milieu aqueux à peu près neutre, peut se fissurer par corrosion sous tension; cette corrosion est amorcée par les imperfections des oxydes formés et se propage lentement par fragilisation par l'hydrogène d'un petit volume d'acier au fond de la fissure de corrosion.

La corrosion atmosphérique des métaux est due aux intempéries (pluie, neige, etc.) et à l'humidité contenue dans l'air. Elle est accélérée ou ralentie par la présence de divers éléments dans l'atmosphère : par exemple, les chlorures ou l'anhydride sulfureux, qui diminuent l'efficacité de la protection apportée par les oxydes (rouille) formés sur les aciers ou les fontes et accélèrent ainsi leur corrosion.

Ces oxydes protègent mieux les aciers lorsque ceux-ci contiennent des éléments correctement choisis pour des atmosphères données. Ainsi, dans une ambiance sans chlorure, une addition de chrome (à plus de 13 %) ou de nickel dans l'acier produit une couche d'oxyde très mince et invisible, suffisante pour le protéger (aciers « inoxydables »), alors que le phosphore et le cuivre, dans les aciers « patinables », donnent une pellicule brune pratiquement étanche lorsque son épaisseur approche le demi-millimètre.

Pour les aciers les plus couramment utilisés dans le bâtiment ou le génie civil, la corrosion par « piqûres » peut être évitée par application de systèmes de protection tels que les peintures ou les revêtements métalliques (galvanisation, etc.).

La corrosion par les eaux concerne soit les canalisations en fonte ou en acier, soit des constructions en eau douce ou en mer. Cette corrosion peut être ralentie de deux façons. D'abord, dans les canalisations, l'eau peut être traitée de sorte que le produit formé sur le matériau métallique protège celui-ci de façon continue. Ensuite, la composition du matériau métallique peut être étudiée pour obtenir le même effet. C'est ainsi que des silicates introduits dans l'eau ou résultant de la dissolution de la fonte ralentissent ce type de corrosion. Les principes électrochimiques énoncés précédemment servent de base à l'étude de la corrosion par les eaux.

La corrosion par les sols concerne les canalisations enterrées et les aciers utilisés dans les ouvrages de fondation et de soutènement. Comme pour les eaux naturelles, il convient de distinguer les milieux ayant une activité biologique (humus, etc.) des autres environnements. En l'absence d'organismes vivants, les sols corrodent les métaux par l'action de l'eau qu'ils retiennent (eau excédentaire « gravifique » ou retenue par capillarité) : la corrosion s'étudie suivant la méthode électrochimique habituelle. En présence d'organismes vivants, le milieu corrosif évolue au cours du temps, et il convient d'étudier l'action des produits de métabolisme de ces organismes (acide sulfhydrique, etc.) sur les matériaux métalliques.

▼ *Détail d'une ossature métallique de construction. Ces aciers sont destinés à supporter des sollicitations statiques et dynamiques sans se déformer au-delà de limites déterminées.*

M. Pedone

Choix d'un matériau ferreux pour un usage donné

Les différents emplois

Les éléments de maçonnerie et les bétons résistent mal à des efforts de traction, ils sont donc associés à des matériaux ferreux ou remplacés par ceux-ci dès que les charges subies ne sont pas uniquement de compression. Le choix d'un matériau ferreux pour un usage donné dépend des caractéristiques mécaniques de résistance et de ductilité souhaitées, mais aussi de la facilité de fabrication, de transport et de mise en place des éléments.

Ainsi, les armatures ordinaires de béton armé se présentent sous forme de ronds lisses ou nervurés facilitant leur transport et leur mise en forme par cintrage. Les résistances à la rupture, presque toujours inférieures à 600 MPa, sont associées à une grande ductilité. En revanche, les armatures de précontrainte se présentent sous forme de fils assemblés en câbles utilisés pour le béton précontraint ou comme tirants d'ancrage dans les sols; ils ont une résistance à la rupture supérieure à 950 MPa, et leur ductilité est environ deux fois moins

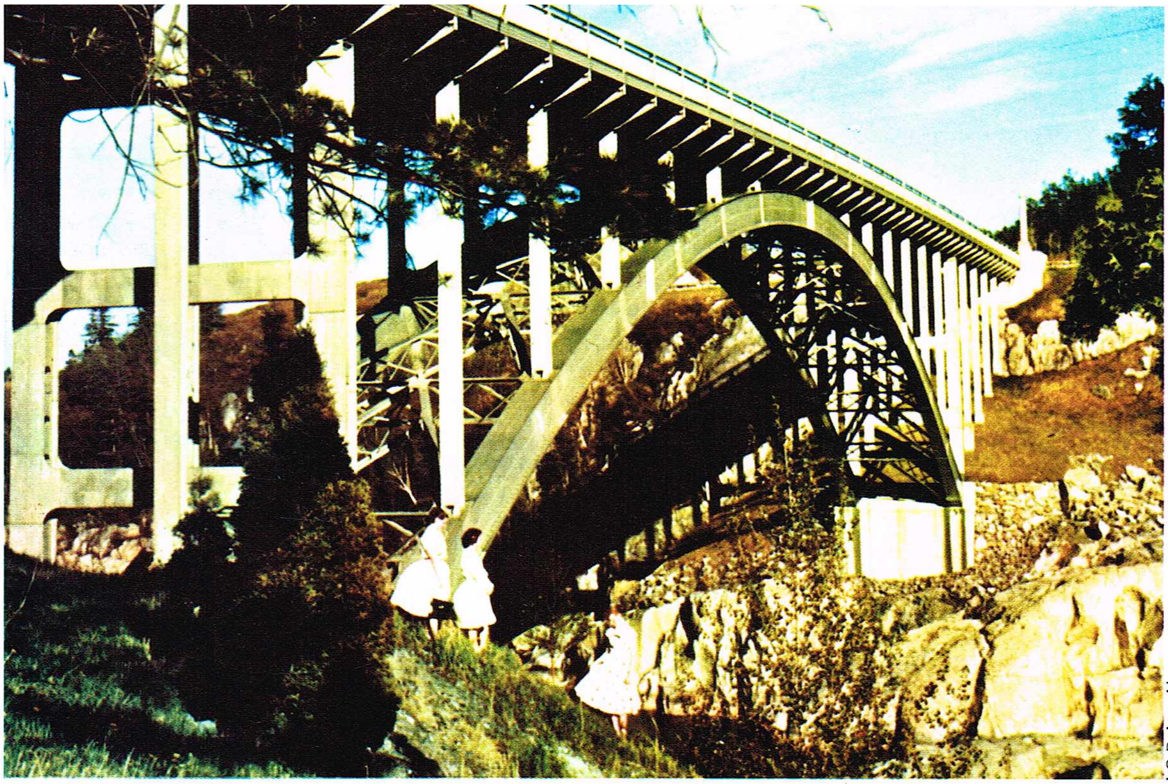

◀ *Le pont d'Arvida sur le fleuve Saguenay au Canada. Il a été le premier pont du monde construit entièrement en aluminium.*

importante que celle des aciers de béton armé. Les autres câbles en acier à haute résistance ont une résistance mécanique un peu moins élevée que celle des armatures de précontrainte.

Les ossatures de construction sont en profilés et tôles d'acier au carbone assemblés par soudage, rivetage ou boulonnage. Ces produits sont utilisés à l'état de livraison, puis protégés, généralement par peinture, pendant leur mise en service.

Les couvertures, façades et bardages de bâtiment peuvent être en aciers ordinaires ou à résistance améliorée vis-à-vis de la corrosion. Leur résistance mécanique est assez faible.

Les éléments en acier ou en fonte enterrés ou immergés ont souvent une surépaisseur sacrifiée à la corrosion, ou une protection convenable. Leurs caractéristiques mécaniques dépendent du type de construction : canalisations, palplanche, caisson de soutènement, lanière pour armature de remblai, buse, etc.

Autres matériaux métalliques

Alliages d'aluminium

L'aluminium est utilisé sous forme d'alliages dans des constructions du génie civil ou du bâtiment. Les éléments d'alliages sont choisis pour améliorer la résistance mécanique (cas du magnésium ou du cuivre) ou la tenue à la corrosion (cas du chrome).

Les pièces sont obtenues par moulage (« fonte d'aluminium » ou « alliage moulé »), par laminage, forgeage, tréfilage ou extrusion (« alliage corroyé »). Leur durcissement peut être obtenu par écrouissage ou, pour certains alliages, par traitement thermique de chauffage suivi d'une trempe et de vieillissement (durcissement structural) entraînant la précipitation de composés intermétalliques (Al_2Cu, etc.) ou non (Mg_2Si, etc.). L'effet des éléments d'alliage sur les caractéristiques du matériau est très variable. Le silicium, associé au magnésium, améliore la coulabilité des alliages moulés et donne une teinte d'une esthétique appréciée après anodisation.

La corrosion des alliages d'aluminium peut être étudiée à l'aide d'un diagramme de Pourbaix indiquant que la formation d'oxyde (alumine) se produit dans les milieux à peu près neutres (pH entre 4 et 10). La qualité protectrice de cette couche dépend de la composition de l'alliage. Dans certains cas, il convient d'augmenter artificiellement son épaisseur (« anodisation ») ; la pellicule obtenue, qui est souvent poreuse, est teinte et colmatée.

Lorsque les alliages ont été bien choisis, aucune protection autre que celle de l'oxyde formé naturellement n'est nécessaire.

Les principaux emplois des alliages d'aluminium sont les menuiseries métalliques, des bardages de façades, les équipements routiers tels que les panneaux de signalisation, des ossatures de ponts (*fig.* 10) ou des bâtiments.

Cuivre

Le cuivre est utilisé pur ou allié au zinc (laiton), à l'étain (bronze) ou à d'autres éléments (aluminium, nickel, etc.) donnant des alliages à durcissement structural.

Dans l'industrie du bâtiment, le cuivre est utilisé sous forme de tubes pour canalisations d'eau et dans la serrurerie. Les tubes peuvent être écrouis ou non ; à cause de la facilité de leur brasage à l'étain, ils sont très généralement utilisés. Leur tenue à la corrosion est, de plus, très satisfaisante pour la plupart des eaux de ville.

Zinc

Le zinc non allié se présente, pour l'industrie du bâtiment, sous forme de tôle fine facile à plier et à souder. Il est utilisé notamment pour les couvertures, car il résiste bien à la corrosion atmosphérique ordinaire.

Le zinc allié, par exemple, à l'aluminium est utilisé en fonderie, les pièces obtenues étant utilisées en serrurerie.

En outre, le zinc peut s'appliquer sur l'acier pur trempé à chaud (vers 460 °C) et protéger celui-ci dans différents milieux environnants tels que l'atmosphère ou les bétons. Dans ce dernier cas, une réaction de corrosion dégageant de l'hydrogène peut se produire au contact du zinc dans le béton non encore durci ou, éventuellement, maintenu sursaturé d'eau : le zinc se dissout au profit de l'acier.

BIBLIOGRAPHIE

ALVISET L. et BERBESSON H., *Matériaux de terre cuite*, in *Techniques de l'ingénieur*, A 2010. - DREUX G., *Nouveau Mémento du béton précontraint*, Paris, Eyrolles, 1975 ; *Pratique du béton précontraint*, Paris, Eyrolles, 1966 ; *Guide pratique du béton*, Paris, Eyrolles, 1970. - DURIEZ M. et ARRAMBIDE J., *Nouveau Traité de matériaux de construction*, Paris, Dunod, 1961. - FAURY J., *le Béton*, Paris, Dunod, 1958. - JOISEL A., *les Fissures du ciment*, Star, 1961 ; *les Adjuvants du ciment*, Auteur, 1973. - NEVILLE A. M., *Hardened Concrete : Physical and Mechanical Aspects*, ACI monographie n° 6, 1971. *Creep of Concrete*, Amsterdam, North Holland, 1970. - PAPADAKIS M. et VENUAT M., *Industrie de la chaux, du ciment et du plâtre*, Paris, Dunod, 1970 ; *Fabrication et utilisation des liants hydrauliques*, 1966 ; *Manuel du laboratoire d'essais des ciments, mortiers, bétons*, Paris, Eyrolles, 1969 ; *Contrôle et essais des ciments, mortiers, bétons*, Paris, Eyrolles, 1961. - POWERS T. C., *Properties of Fresh Concrete*, New York, London, Wiley, 1968. - STEOPOE A., *la Durabilité du béton*, Paris, Eyrolles, 1970. - VENUAT M., *Ciments et Bétons*, Paris, Presses universitaires de France, 1969 ; *Adjuvants et traitements des mortiers et bétons*, CERILH, 1971 ; *la Pratique des ciments et des bétons*, in *le Moniteur*, 1976.

MATÉRIAUX D'ORIGINE BIOLOGIQUE

L'appellation « matériaux d'origine biologique » couvre l'ensemble des produits industriels dérivés de matières premières directement issues du monde vivant, du règne végétal ou du règne animal.

Il s'agit principalement :

- *Des produits ligneux*, bois et dérivés, qui non seulement occupent une place importante dans l'industrie moderne (la France en produit environ 8 millions de tonnes par an, y compris les papiers-cartons), mais présentent en outre des perspectives de développement non négligeables.
- *Du caoutchouc naturel*, improprement dénommé « gomme », dont la consommation mondiale devrait atteindre et même dépasser 3 millions de tonnes en 1980, et qui possède des propriétés irremplaçables pour certaines applications industrielles.
- *Des fibres textiles*, que la chimie moderne ne peut totalement remplacer par des produits de synthèse, et qui représentent une production annuelle d'environ 400 000 t en France.
- *Du cuir*, qui reste le matériau par excellence de l'industrie de la chaussure, et dont le confort et la résistance n'ont pu être égalés par aucun matériau de synthèse. La production annuelle française atteint environ 40 000 t.

Ces produits, connus et utilisés depuis les origines de l'activité humaine sur notre planète, possèdent l'énorme avantage d'être indéfiniment renouvelables par synthèse biologique. Pourtant, ils n'ont pas encore bénéficié de l'approche scientifique rigoureuse qui a permis de mettre au point les matériaux industriels modernes, tels l'acier, les matières plastiques, les céramiques et ciments. De ce fait, leur structure reste assez mal connue. Parallèlement, leur emploi et la technologie de leur transformation sont relativement peu élaborés, bien qu'ils soient les héritiers d'une longue et remarquable tradition artisanale. Si l'on considère, d'une part, le chemin parcouru entre la technologie des maîtres de forges d'autrefois et les méthodes actuelles de fabrication par forgeage lourd, et, d'autre part, les gestes du compagnon charpentier d'autrefois, qui sont bien souvent répétés encore aujourd'hui, cette comparaison ne peut manquer d'étonner.

Toutefois, l'utilisation des méthodes d'investigation de la physique et de la chimie modernes nous révèle de jour en jour non seulement l'incroyable complexité de structure des matériaux biologiques, mais également leurs possibilités d'emploi dans des domaines jusqu'alors ignorés. C'est pourquoi ces produits, riches d'un passé prestigieux et de traditions qui les ont peu à peu conduits à faire partie intégrante de notre vie — au point qu'on les qualifie de matériaux « naturels » (encore qu'ils soient fort éloignés de la matière brute produite par la plante ou l'animal) — sont également promis à un avenir plein de développements potentiels. En un mot, les matériaux d'origine biologique sont des matériaux « neufs ».

Très schématiquement, la structure chimique des principaux constituants des produits d'origine biologique peut être résumée de la façon suivante.

Pour les matériaux issus du règne animal, ce sont les protéines qui servent de constituants de base. Il s'agit de hauts polymères appelés polypeptides, qui, du point de vue chimique, résultent de l'accrochage bout à bout d'acides aminés :

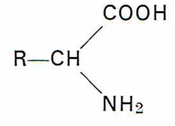

Il existe une vingtaine de motifs R différents dans la synthèse biologique, et c'est à partir de ces seules « briques » élémentaires qu'est construite la quasi-totalité des tissus animaux vivants, des enzymes, et que s'élabore la vie.

La chaîne polypeptidique se forme par élimination d'une molécule d'eau entre les fonctions acide et amine des acides aminés qui la composent :

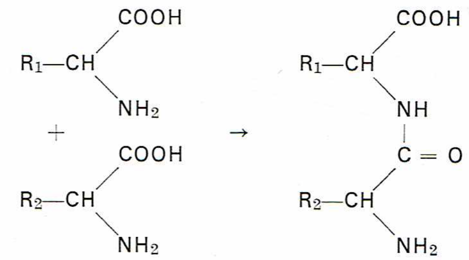

La chaîne se construit donc pas à pas, puisqu'il reste toujours à chaque extrémité une fonction amine NH_2 et une fonction acide COOH (séparées par des fonctions amide NH—C(=O)) qui restent susceptibles de réagir avec la fonction amine ou acide d'un acide aminé supplémentaire. On peut se rendre compte, sachant que les masses moléculaires atteintes dépassent le kilogramme, voire la tonne, de l'extraordinaire complexité des macromolécules ainsi formées. En effet, seuls la nature et l'ordre de succession des motifs R_1, R_2, etc., le long de la chaîne définissent le polymère.

En ce qui concerne les matériaux issus du règne végétal, c'est essentiellement la cellulose qui sert de constituant de base. Il s'agit également d'un haut polymère, dont nous détaillerons la structure au chapitre *Bois*. Toutefois, en ce qui concerne les gommes, en particulier, et la lignine, qui est l'autre constituant principal du bois, d'autres polymères, tels le polyisoprène, les polybenzéniques et polyterpéniques, se rencontrent également. Difficiles à étudier, ces matériaux possèdent des propriétés physiques et chimiques extrêmement variées qui sont bien souvent supérieures à celles des produits résultant de la seule imagination humaine. Par exemple, le bois de pin est le matériau qui possède une des longueurs de rupture les plus élevées, avec 18 km (longueur à partir de laquelle un matériau casse sous son propre poids). L'aluminium, l'acier, le verre et les matières plastiques se situent pratiquement tous au-dessous de 8 km, et il faut des produits très spéciaux (fil d'acier spécial étiré à froid, composite polyester-fibres de verre orientées) pour dépasser le bois.

Malheureusement, la production des matériaux d'origine biologique n'est guère industrialisable. La synthèse biologique ne peut accroître instantanément sa production pour suivre l'évolution des besoins humains, encore que l'exploitation équilibrée et rigoureuse de toutes les ressources terrestres et maritimes puisse permettre de disposer à moyen terme des matières premières nécessaires sans diminuer le capital écologique indispensable à leur renouvellement.

C'est pourquoi l'industrie moderne a cherché à copier les matériaux comme le caoutchouc, la soie (au début, pour des raisons stratégiques), et a élaboré les matières de synthèse qui se substituent aux matériaux traditionnels dans de nombreux emplois. Toutefois, l'obtention de propriétés aussi contradictoires que l'imperméabilité à l'eau liquide associée à une bonne perméabilité à la vapeur d'eau (le cuir), la résistance élevée aux chocs alliée à une extrême légèreté (le bois), l'autorenforcement sous l'effet d'une contrainte de plus en plus élevée (le caoutchouc naturel), etc., n'est pas possible actuellement avec les matériaux de synthèse.

C'est certainement en s'attachant à comprendre comment le ver à soie coextrude et synthétise la séricine et la fibroïne, comment l'arbre parvient à élaborer la cellulose avec une parfaite orientation, et comment le caoutchouc naturel cristallise de manière réversible (et pratiquement sans hystérésis) sous contrainte, qu'il sera possible, non seulement d'améliorer l'emploi des matériaux biologiques en profitant de l'acquis empirique des traditions artisanales, mais aussi de créer des matériaux nouveaux, associant synthèse biologique et synthèse industrielle, pour obtenir des propriétés exceptionnelles. Ainsi on peut penser que, demain, l'écart qui existera entre ces matériaux et les polymères de base (biologiques ou synthétiques) sera encore plus grand que celui qui existe aujourd'hui entre les minerais et les alliages les plus élaborés ayant subi les traitements thermiques les plus complexes.

Gomme

Le terme « gomme » désigne habituellement le caoutchouc naturel sous sa forme crue, dont l'aspect est celui de la gomme à crayon utilisée par les dessinateurs. Il s'agit en fait d'un abus de langage, car les gommes (ou, comme l'on dit parfois, les mucilages) constituent une catégorie de produits qui résultent tous de l'exsudation des végétaux. Ces substances, de nature essentiellement glucidique, peuvent être qualifiées d'antiseptiques naturels, en ce sens qu'elles permettent à la plante de cicatriser les blessures provoquées par une attaque parasitaire, la sécheresse ou une lésion mécanique.

Elles sont utilisées comme matières premières dans l'industrie pharmaceutique, les colles et vernis, et l'imprimerie. C'est la gomme arabique, produite notamment par les acacias d'Afrique, qui est la plus connue.

Il faut dissocier ces produits des résines et des latex, dont la nature chimique est tout à fait différente.

- Les *résines*, produites essentiellement par les conifères, contiennent surtout des composés aromatiques benzéniques et terpéniques et sont exploitées industriellement par la chimie et la pharmacie (récolte de la gomme du pin maritime dans les Landes, en particulier).
- Les *latex* sont, comme leur nom l'indique, des « laits végétaux », composés surtout de carbures d'hydrogène, d'alcaloïdes et d'amidon. Produits par de nombreuses espèces de plantes, ils permettent d'obtenir, outre le caoutchouc et la gutta-percha, de nombreuses laques. Utilisés tels quels, ils entrent dans la composition de peintures ou revêtements divers, ou servent à fabriquer des objets « au trempé » (gants, ustensiles médicaux, etc.).

C'est en fait le caoutchouc naturel qui est le matériau d'origine biologique le plus intéressant dans cette série de produits, et qui sert de matière de base à toute une industrie extrêmement développée.

Obtention et composition du caoutchouc

Une grande diversité de familles botaniques donne des « plantes à caoutchouc » dont on peut tirer un latex utilisable comme matière première. Les plus connues sont les Euphorbiacées (hévéa, euphorbia, manihot), les Composées, les Moracées et les Apocyanées. On peut également mentionner à titre anecdotique que des plantes aussi communes que la laitue ou la chélidoine donnent du latex.

C'est d'*Hevea brasiliensis* qu'on tire industriellement le latex donnant le caoutchouc. Il s'agit d'un arbre monoïque, à fleurs unisexuées, de la famille des Euphorbiacées, qui croît dans la forêt amazonienne et qui a été acclimaté en Extrême-Orient (Vietnam, Malaisie, etc.), où sa culture intensive a remplacé la récolte méthodique initialement développée au Brésil. Par sélection génétique, on améliore constamment les espèces (ou clones), et par conséquent le rendement du latex.

Le caoutchouc résulte d'un traitement complexe du latex. Après filtration, addition d'un antiferment et coagulation à l'acide (formique ou acétique le plus souvent), on obtient des plaques qu'il faut laver, presser et gaufrer, puis enfin sécher et fumer pour éviter l'attaque par moisissures. On a ainsi éliminé l'amidon, les alcaloïdes et l'eau, qui constituaient la plus grande partie du latex. La feuille fumée, forme commerciale sous laquelle est vendu le caoutchouc cru, ne contient donc plus que les carbures d'hydrogène.

En fait, le caoutchouc naturel est un haut polymère de l'isoprène dont la masse moléculaire est variable selon le traitement subi par le latex. Il s'agit du polyisoprène cis 1-4. Mentionnons que la gutta-percha est constituée de polyisoprène trans 1-4, et que c'est un corps aux propriétés assez différentes du caoutchouc naturel, principalement utilisé comme isolant dans l'industrie électrique.

Le caoutchouc est soluble dans le benzène, ce qui permet de l'utiliser à l'état pur en « dissolution » pour coller les pièces de caoutchouc manufacturé ou pour enduire les tissus. Ce fut d'ailleurs grâce à cette technique, mise au point par Mac Intosh en Angleterre en 1823, que le caoutchouc prit son essor industriel dans la confection de vêtements de pluie demeurés fameux.

L'élaboration d'objets manufacturés en caoutchouc naturel (comme d'ailleurs en caoutchouc synthétique) fait appel à la technique de vulcanisation, initialement mise au point par Goodyear en 1839.

Vulcanisation du caoutchouc, haute élasticité caoutchoutique

La réaction de vulcanisation consiste à créer un réseau polymérique thermiquement stable, par ouverture des doubles liaisons et pontage intermoléculaire (le plus souvent grâce à un agent de réticulation). Industriellement, c'est tout d'abord la vulcanisation au soufre qui fut développée, opération qui permet d'apporter au produit manufacturé diverses propriétés importantes, dont la résistance aux solvants, une résistance accrue au vieillissement, de bonnes caractéristiques, et surtout la haute élasticité caoutchoutique. Cette propriété est essentielle : c'est elle qui permet à un morceau de caoutchouc vulcanisé d'accepter de très grandes déformations et de revenir ensuite à son état initial avec une très faible hystérésis. Macroscopiquement, cette pièce possède un comportement élastique jusqu'à une déformation de 800 % (typiquement) avec un module d'Young E de l'ordre de 0,1 kg/mm^2. De plus, lors de l'allongement, le caoutchouc vulcanisé s'échauffe, et il se refroidit lorsqu'on le laisse se raccourcir. Enfin, la force nécessaire pour maintenir un allongement constant croît avec la température.

L'analyse thermodynamique classique du phénomène met en évidence la nature essentiellement entropique de la haute élasticité caoutchoutique. A température T et à pression P constantes, le travail dW à fournir pour déformer l'échantillon d'une longueur dl est

$$dW = \sigma dl - PdV$$

où σ est la contrainte (force par unité de surface) et dV la variation de volume de l'échantillon. Par conséquent, on peut exprimer σ comme étant la différentielle $\frac{\partial W}{\partial l}$ à volume, pression et température constants :

$$\text{(1)} \qquad \sigma = \left(\frac{\partial W}{\partial l}\right)_{V,T,P}$$

Or, d'après le premier principe de la thermodynamique, l'énergie interne du système s'écrit $dU = dW + dQ$ où dQ est la quantité de chaleur échangée au cours de la transformation. Cela s'exprime, en introduisant l'entropie S :

$$\text{(2)} \qquad dU = dW + TdS$$

Par conséquent, d'après **(1)** et **(2)** :

$$\sigma = \left(\frac{\partial U}{\partial l}\right)_{T,V,P} - T\left(\frac{\partial S}{\partial l}\right)_{T,V,P}$$

On voit donc, sous cette forme, que la force nécessaire à la déformation dépend non seulement de l'énergie interne du système (premier terme), mais aussi d'une variation de son entropie. L'analyse thermodynamique statistique du phénomène permet d'interpréter ces deux termes de la manière suivante. La quantité $\left(\frac{\partial U}{\partial l}\right)_{T,V,P}$ peut être assimilée à une variation des distances interatomiques dans le réseau, et le terme $\left(\frac{\partial S}{\partial l}\right)_{T,V,P}$ à une transition réversible ordre-désordre des macromolécules. Ce dernier point peut être vérifié expérimentalement en faisant varier le taux de réticulation du caoutchouc (c'est-à-dire le degré de vulcanisation). Dans un échantillon faiblement réticulé, les macromolécules possèdent une grande liberté de mouvement. On peut les schématiser au repos comme pelotonnées sur elles-mêmes, ce qui autorise de grandes déformations, la réversibilité étant assurée par les quelques ponts introduits lors de la vulcanisation. La transition ordre-désordre est prépondérante. Au contraire, lorsque toutes les liaisons —C = C— ont été ouvertes et que toutes les possibilités de pontage ont été utilisées, les chaînes macromoléculaires n'ont plus aucune liberté de mouvement, et l'édifice ne peut se déformer que par variation des distances interatomiques (*fig.* 1*a*). Un exemple de matériau totalement vulcanisé est fourni par l'ébonite, qui est très dure, cassante et pratiquement indéformable.

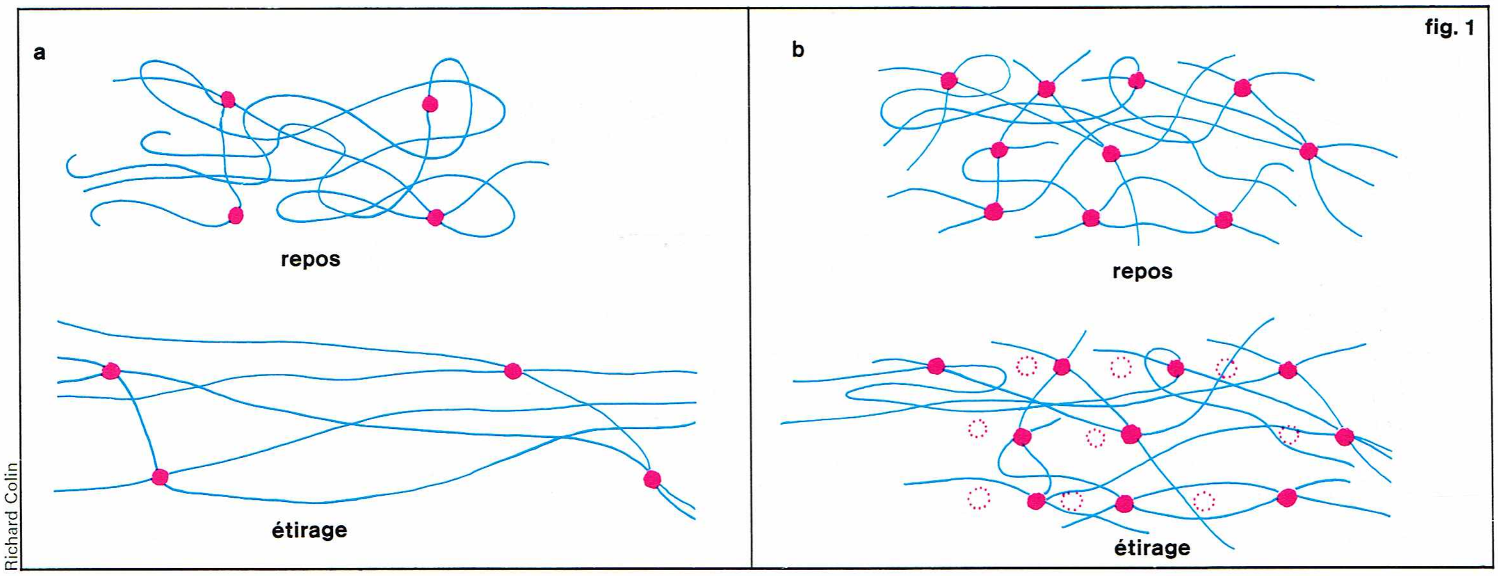

▲ *Figure 1 : haute élasticité caoutchoutique ;* a, *réticulation faible ;* b, *réticulation forte.*

Le mécanisme de la vulcanisation au soufre, tel qu'il avait été découvert par Goodyear, consistait à mélanger intimement le caoutchouc et la fleur de soufre, puis à chauffer le tout pendant plusieurs heures à 140 °C. Si l'on effectue cette opération, on s'aperçoit que la viscosité apparente du mélange en fonction du temps augmente, puis se stabilise (effet « plateau »). La réaction est alors terminée, et, si l'on continue le chauffage, des risques de dégradation du produit apparaissent. C'est le réseau tridimensionnel soufre-carbone ainsi formé qu'on appelle ébonite, matériau qui a des propriétés mécaniques, électriques et chimiques remarquables. La réaction est très lente (4 à 5 h) et son mécanisme mal connu.

Le schéma (*fig.* 2) habituellement proposé suppose la formation de soufres activés S° tout le long de la chaîne à partir de composés soufrés qui seraient obtenus en trois étapes. La liaison permettant le pontage interchaînes est ensuite obtenue par ouverture d'une double liaison sur une chaîne voisine.

Divers perfectionnements apportés au procédé initial ont permis d'améliorer le temps de réaction, notamment en employant l'oxyde de zinc comme catalyseur, ou divers accélérateurs. Les plus connus sont le diméthyldithiocarbamate de zinc, le disulfure de tétraméthylthiurame et le mercaptobenzothiazol. La réaction de pontage interchaînes peut être limitée par la formation de polysulfures et de cycles intramoléculaires lorsqu'on emploie ces accélérateurs.

La vulcanisation sans soufre est possible à l'aide de peroxydes, mais ce procédé est généralement réservé aux caoutchoucs synthétiques.

▼ *Figure 2 : les étapes du mécanisme de la vulcanisation du soufre. 1, 2, 3, formation du soufre activé S° ; 4, pontage interchaînes.*

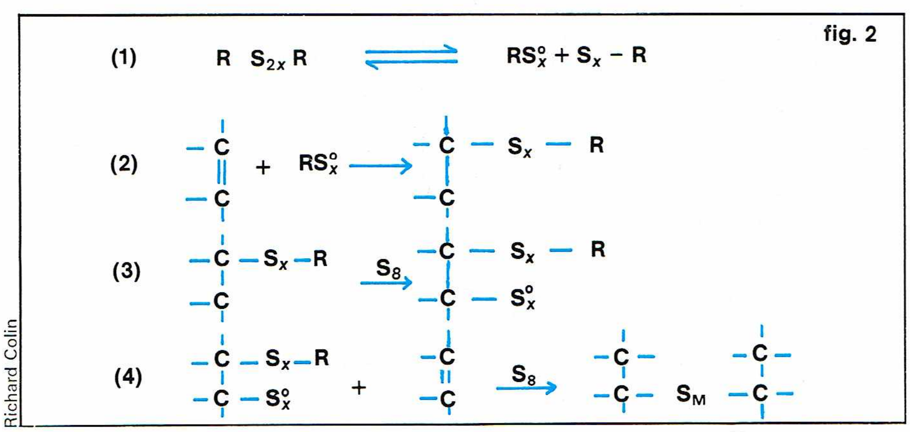

Mise en œuvre du caoutchouc, utilisations

L'adjonction de charges diverses permet de donner au produit fini des propriétés physiques et chimiques particulières, telles que résistance au fluage, à l'abrasion, à la chaleur, à l'oxydation, etc. Ces charges sont, outre les lubrifiants (acide stéarique, huiles minérales) et les ingrédients de vulcanisation (soufre, ZnO, accélérateurs), les noirs de carbone, la silice, les fibres d'amiante, le kaolin, la craie, etc.

Avant la vulcanisation, il est nécessaire d'obtenir un mélange homogène. Pour cela, on utilise des appareils appelés malaxeurs. On distingue les appareils à cylindres chauffants, dits mélangeurs à cylindres, qui permettent toute une procédure de mélange et qui font appel à un personnel hautement qualifié, et les mélangeurs à pales, dits mélangeurs internes, dans lesquels on charge tous les ingrédients à la fois. Les premiers sont utilisés afin d'élaborer des produits spéciaux très délicats à mettre en œuvre à cause des risques de « grillage » du caoutchouc (décomposition à la chaleur et par réaction chimique avec certains constituants du mélange). Les seconds permettent au contraire de fabriquer les mélanges industriels avec une excellente reproductibilité.

Après mélange, on obtient un produit hautement déformable et « plastique ». Il s'agit en fait d'un liquide visco-élastique de très forte viscosité, comparable à un polymère thermoplastique fondu. On comprendra donc aisément que l'on puisse rencontrer dans un atelier de transformation du caoutchouc les mêmes machines que dans un atelier de transformation de matières plastiques (extrudeuses, encore appelées boudineuses, calandres, presses à injecter, etc.).

On peut également profiter de l'autocollage du mélange élastomérique pour confectionner des objets complexes, le plus souvent composites caoutchouc-tissus. C'est ainsi que sont fabriqués les pneumatiques, par assemblage d'une multitude de pièces (représentant généralement autant de mélanges différents) qui permettent de confectionner un patron, ensuite pressé et vulcanisé.

Les pièces formées et moulées, le caoutchouc étant encore « plastique », sont enfin vulcanisées, soit *in situ* dans le moule, soit en étuve.

Par rapport aux caoutchoucs de synthèse disponibles sur le marché, le caoutchouc naturel possède l'avantage essentiel de présenter une très faible hystérésis et de cristalliser de manière réversible sous tension. Il est donc « autorenforçant » et ne s'échauffe pas lorsqu'il est soumis à des cycles allongement-raccourcissement répétés. Il est ainsi irremplaçable comme base de roulement dans les pneumatiques (partie située entre la bande externe gravée et l'armature tissée ou la carcasse radiale) et partout où l'auto-échauffement en cours d'utilisation est à proscrire.

Le polyisoprène cis 1-4 a pu être obtenu par synthèse chimique, mais ce dérivé du pétrole n'a pas d'aussi bonnes propriétés que le produit tiré de l'hévéa. Il semble donc que la physique du solide du caoutchouc naturel ne soit pas encore assez bien connue, et que de nombreuses propriétés intéressantes puissent encore être apportées aux élastomères de synthèse par son étude approfondie.

Les fibres

De tout temps, l'homme a utilisé des matériaux fibreux comme liens, cordages, supports pour l'écriture et, sous leur forme la plus élaborée, les textiles. Ils ont supplanté les peaux de bêtes de l'homme des cavernes, autorisé l'essor des transports maritimes grâce à la voile, et largement participé au développement industriel des États modernes. Aujourd'hui, les fibres de synthèse ont pris dans bien des cas le relais, mais les marchés de la laine, de la soie, du coton, du lin et du jute restent toujours actifs, et, pour de nombreux emplois, les qualités de ces matières restent irremplaçables.

Géométriquement parlant, une fibre est un corps pratiquement unidimensionnel, c'est-à-dire quasi cylindrique, de longueur infiniment grande par rapport à son diamètre moyen. On peut la caractériser par son *élancement*, grandeur sans dimension, égale au rapport de sa longueur au diamètre.

D'autres caractéristiques font intervenir la densité du matériau constituant la fibre, et sont utilisées pour apprécier la finesse d'un fil textile (on parle en général du *titre* d'un fil). Les grandeurs couramment employées sont le *décitex* (1 dtex est l'unité employée pour caractériser un fil de 10 000 m de long pesant 1 g) et le *denier* (1 denier est le titre d'un fil de 9 000 m de long, qui pèse 1 g).

L'élancement sert surtout à caractériser les fibres utilisées pour le renforcement des matériaux composites. En effet, on a pu montrer que le pouvoir renforçant d'une fibre croît lorsque son élancement augmente. Il faut donc, pour pouvoir comparer divers matériaux, se placer de telle sorte que les élancements des fibres renforçantes soient identiques. En revanche, le titre est utilisé dans l'industrie textile pour caractériser les fils servant de base à la confection des tissus, lesquels sont ensuite définis par leur *grammage* (poids au mètre carré).

Sans entrer dans le détail des opérations de fabrication des textiles ou des cordages, auxquelles des ouvrages fort spécialisés sont consacrés, il est extrêmement intéressant de passer en revue les caractéristiques structurales des matériaux de base que nous fournit la synthèse biologique.

Il faut distinguer les fibres d'origine animale (laine et soie), essentiellement polypeptidiques, des fibres d'origine végétale (lin, jute, coton, etc.), essentiellement polyosidiques, et plus précisément constituées de cellulose.

Fibres végétales

Peu de chose différencie les fibres végétales du point de vue de la structure de base. Toutefois, sur le plan technologique, les qualités macroscopiques des produits obtenus sont tout à fait différentes, selon que l'on a de la cellulose presque pure (cas du coton) dont on tire des fils extrêmement solides et « confortables », ou au contraire des filasses « revêches » (cas du jute et du chanvre).

Botaniquement parlant, le **jute** est une plante annuelle de 2 à 4 m de haut (genre *Corchorus*, famille des Tiliacées), dont la principale source de production industrielle est le Bangla Desh. La filasse qu'on en tire (et que l'on peut également obtenir à partir de l'hibiscus) est aussi appelée jute par extension; elle est utilisée dans l'industrie de l'emballage (sacs à pommes de terre), du revêtement de sol (type linoléum) et du tapis.

Le **lin** est une plante herbacée (famille des Linacées, ordre des Géraniales) haute de 60 cm environ, dont la graine donne une huile siccative bien connue, et les tiges une fibre textile de qualité supérieure. On sépare les fibres de cellulose pratiquement pure du tissu ligneux qui les entoure, lors de l'opération de « teillage » (battage de la tige ayant subi préalablement le « rouissage », sorte d'amollissement par l'eau, obtenu par trempage en cuve ou rivière, ou par exposition prolongée aux intempéries). On obtient ainsi l'étoupe (85 % du lin sec) et le lin teillé utilisable directement en filature.

Le **coton** est une fibre de cellulose pure (c'est d'ailleurs les linters de coton qui fournissent la matière constituant l'étalon de référence à partir duquel on a établi la structure de la cellulose I). Cette fibre entoure la graine du cotonnier, nom qui recouvre plusieurs espèces de plantes arbustives, dont les plus cultivées sont *Gossypium herbaceum* et *Gossypium barbadense* (famille des Malvacées). Les fibres obtenues sont de longueur variable selon l'espèce (15 à 70 mm), et les graines, une fois pressées, donnent une huile comestible employée le plus souvent dans les industries du savon, de la margarine et des conserves.

L'industrie utilise également le **chanvre** (ou *Cannabis*), qui donne une fibre moins fine que le lin, pour la fabrication de cordages, la **ramie**, dont la fibre est la plus longue et la plus résistante des fibres végétales (utilisée pour les tissus damassés, les fils à coudre et les cordons), et le **sisal** (nom d'un port d'Amérique centrale), qui est tiré de diverses plantes (genre *Agave*) et qui sert à tresser des cordes et des chapeaux.

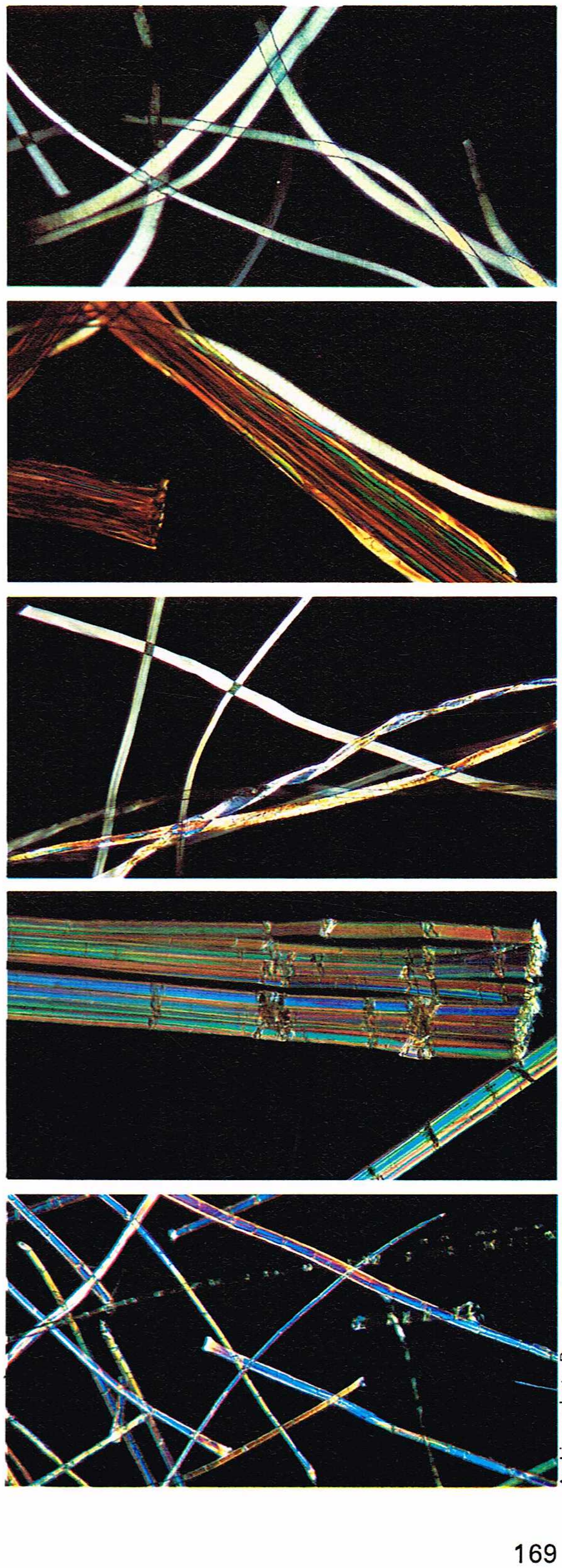

Archives photo B

◄ ***Fibres textiles observées au microscope en lumière polarisée; de haut en bas, laine, soie, coton, chanvre et lin.***

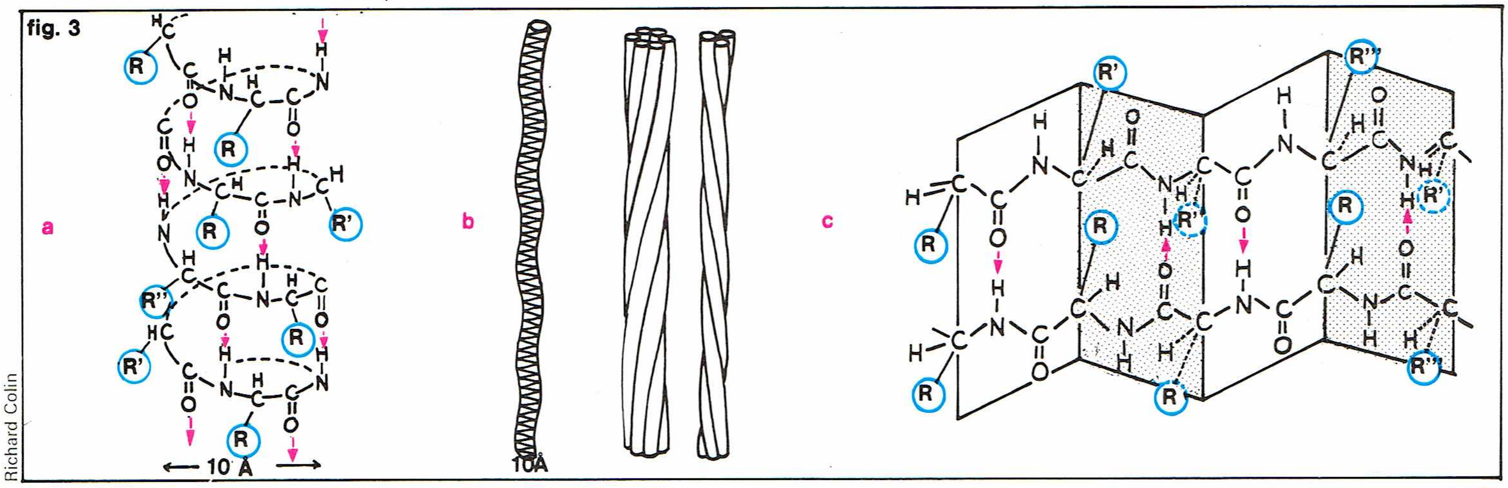

▲ *Figure 3 : a) schéma de l'hélice α ; b) structure β : chaînes polypeptidiques dans les feuillets plissés ; c) structure γ : hélice secondaire et câbles à plusieurs bras (d'après Pauling et Corey).*

▼ *Figure 4 : a) structure de la fibroïne (domaines cristallins) ; b) domaines amorphes et cristallins de la fibroïne de la soie : G, glycocolle ; A, alanine ; T, tyrosine ; S, sérine ; X, Y, Z amino-acides divers.*

Fibres animales

Les fibres animales sont beaucoup mieux différenciées au point de vue structural.

La **laine**, qui est produite par les bulbes pileux situés sous la peau de l'animal, est en fait un filament « coextrudé » à base de fibrilles de protéines liées entre elles par le suint, sécrété par les glandes sébacées et sudoripares.

Elle constitue la toison des moutons (1 200 à 9 000 poils au centimètre carré), et certaines espèces de lapins, chats ou chèvres (laines angora, mohair et cachemire en particulier) en fournissent également. Selon sa qualité, qui s'apprécie à la longueur, la souplesse et le degré d'emmêlement des fibres, la laine s'utilise dans diverses applications textiles (tissus, fil pour tricots, etc.). Il faut signaler que son excellente aptitude au feutrage la désigne comme matière première pour l'industrie du béret (le feutre étant obtenu par battage mécanique d'un tricot).

Le suint est un produit de composition chimique assez mal connue qui représente, selon les qualités, de 15 à 75 % du poids de la laine. Partiellement soluble dans l'eau froide, il est probablement constitué par des acides gras. C'est de plus un excellent tensio-actif qui nettoie à merveille les mains et les outils du tondeur. Le suint joue un rôle de conservation et de protection des fibres lainières ; il est totalement éliminé lors de la préparation textile, afin d'éviter les attaques par les insectes. A ce rôle s'ajoute celui de lubrifiant de filage, puisqu'on est obligé d'« ensuiner » la fibre débarrassée du suint avec un corps gras (huile d'olive généralement) ou de filer directement la laine suinée.

La fibre lainière a une longueur de 35 à 350 mm et un diamètre de 16 à 50 μm. Les fibrilles protéiniques qui la constituent représentent 25 à 85 % du poids de laine brute, le reste étant le suint. C'est la kératine α qui est le principal constituant fibrillaire de la laine. Il s'agit d'un polymère d'acides aminés dont la structure n'est pas encore totalement élucidée. Les principaux motifs de répétition sont ceux de l'acide glutamique (14 %), de la cystine (12 %), de la leucine (11 %), de la sérine (10 %) et de l'arginine. Il est impossible, avec les polypeptides, de dissocier la structure propre des macromolécules (on parle généralement de conformation) de la nature chimique et de l'enchaînement des motifs qui les composent si l'on veut expliquer leurs propriétés physiques.

Très schématiquement, on peut définir deux conformations de base, l'une en hélice, dite α, et l'autre en feuillets plissés, dite β (voir *fig.* 3 a et b). L'hélice α est la conformation la plus probable des chaînes de kératine de la laine. Toutefois, sous l'effet d'un étirement mécanique, il est possible de passer de la conformation en hélice à la conformation en feuillets plissés. On ne peut s'empêcher de rapprocher cela du phénomène de feutrage mécanique de la laine, encore qu'aucune explication définitive n'ait été fournie sur ce point, à notre connaissance.

De plus, les chaînes polypeptidiques peuvent se combiner entre elles pour donner des hélices beaucoup plus complexes que l'hélice α. On parle alors de structure de type γ, dont quelques exemples sont donnés par la *figure* 3 c. Ce type d'arrangement à l'échelle moléculaire n'est pas sans rappeler la structure d'un cordage ou d'une ficelle et permet peut-être d'expliquer, non seulement la bonne résistance mécanique des filaments que nous procure la synthèse biologique, mais aussi la possibilité même de fabriquer un fil unidirectionnel à partir d'un amas compact et enchevêtré comme peut l'être une toison de mouton.

La **soie** est un fil particulièrement résistant produit par les glandes contenues dans l'abdomen de la larve du bombyx du mûrier *(Bombyx mori)* et de certaines araignées (*Antherea pernyi, Araphe infracta*, etc.).

C'est lors du passage au travers d'une véritable « filière » que le fil se forme et s'oriente. On pense que la fibroïne, principal constituant du fil de soie, est « gainée » par de la séricine au moment du passage dans la filière « anatomique ». La cristallisation intervient aussitôt après et

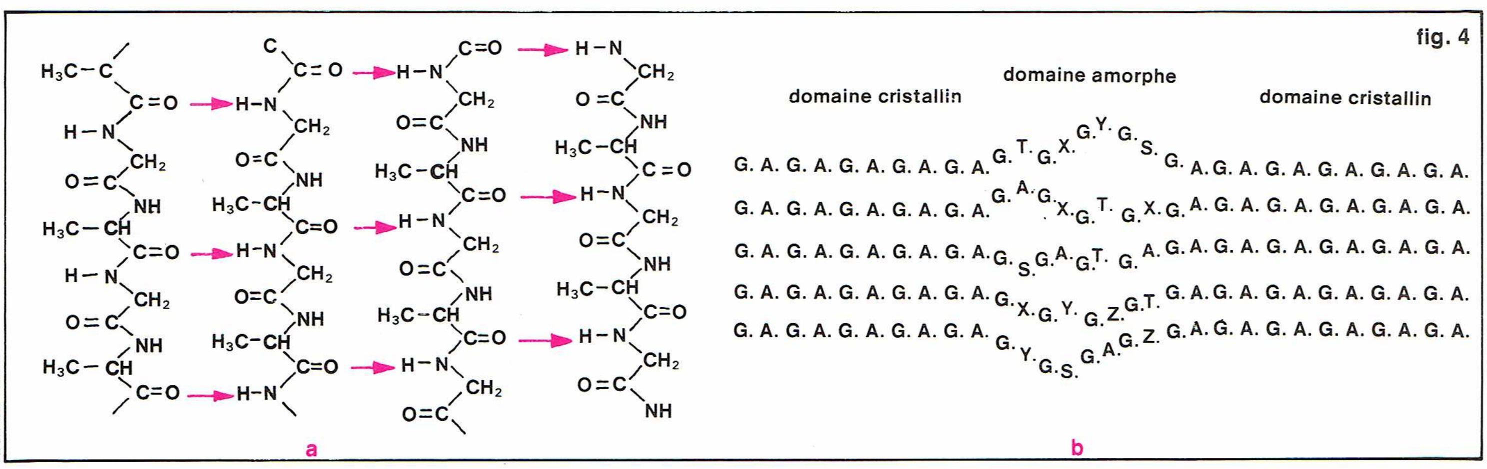

confère au fil ses remarquables propriétés mécaniques (ténacité de 40 à 50 kg/mm², allongement à la rupture de 13 à 20 % pour un diamètre moyen de 10 à 15 μm) utilisées par l'animal pour confectionner son cocon ou la toile qui lui servira à capturer sa nourriture. Mentionnons qu'au sortir du ver à soie, le fil a une consistance élastomérique. 800 à 1 500 m suffisent à la confection du cocon.

La séricine est de composition chimique assez mal connue. La fibroïne est, de même que la kératine de la laine, une protéine dont la composition en acides aminés diffère fortement selon l'origine. Le glycocolle (24 à 43 %) et l'alanine (26 à 53 %) sont prépondérants, mais de faibles quantités de sérine (2 à 10 %), d'acide aspartique, de thréonine et d'autres acides aminés (arginine, tryptophane, etc.) composent les molécules de fibroïne qui possèdent une conformation en feuillets plissés (de type β).

La *figure* 4 montre la structure complexe de la fibroïne de la soie, où l'alternance de domaines cristallins (ne contenant vraisemblablement que des motifs alanine et glycocolle) et de domaines amorphes n'est pas totalement élucidée.

Obtention du fil textile

Seul le fil de soie est « livré » pratiquement utilisable par la synthèse biologique. La séricine est en effet soluble dans l'eau chaude, et il suffit de dévider le fil du cocon qu'on retord ensuite avec plusieurs autres fils dévidés simultanément.

Pour les autres fibres, qui sont généralement discontinues et assez courtes, on oriente les amas obtenus (toison, coton en balle, etc.) par cardage et peignage, puis on tord régulièrement un fil continu en tirant petit à petit la matière au cours de l'opération de filage. Il va sans dire que l'extraordinaire agilité des bergères d'autrefois, qui parvenaient à tirer de la quenouille un fil fin et régulier, est à présent remplacée par la complexité des machines modernes.

I.G.D.A. - B.P.D.

▲ *L'atelier de peignage d'une industrie lainière.*

Le cuir

Le cuir est, parmi les matériaux biologiques, celui dont les propriétés permettent certainement d'énoncer les paradoxes les plus saisissants. En schématisant à peine, on peut en effet dire de lui que c'est un matériau poreux et imperméable, à la fois souple et rigide, formable à volonté, mais conservant définitivement la forme acquise, et dans tous les cas d'une exceptionnelle résistance mécanique. Matériau « noble », il s'agit en fait d'un produit de récupération de l'élevage de boucherie, et mis à part les utilisations en ganterie, sellerie, bourrellerie, habillement et ameublement, les trois quarts de la production mondiale de cuir servent à fabriquer la plupart des quelque deux milliards et demi de paires de chaussures « mises en service » chaque année.

Le cuir n'est pas un matériau industriel, au sens où cet adjectif recouvre un ensemble de qualités pratiquement constantes, ou ne fluctuant que dans de très faibles proportions. En effet, la peau de l'animal varie en épaisseur, du « croupon » (partie dorsale) aux « flancs », et c'est elle qui subit les agressions mécaniques (blessures) et parasitaires (trous de larves, etc.). Le cuir que l'on tire des peaux n'est donc pas constant en qualité et reste très dépendant de la race, de la méthode et du lieu d'élevage de l'animal dont il provient.

L'industrie du cuir est finalement, en quelque sorte, une industrie de récupération des sous-produits de l'industrie de la viande. Son extrême technicité (qui constitue à la limite tout un art) lui permet, pour notre plus grand confort, de pallier les irrégularités de la matière première afin de nous offrir ce matériau exceptionnel. Le cuir que nous utilisons presque quotidiennement est en effet l'héritier d'une tradition artisanale, puis industrielle, qui a su rendre la peau animale imputrescible et, de surcroît, en améliorer peu à peu les propriétés mécaniques.

Structure de la peau - Constituants du « cuir vivant »

Le cuir est tiré de la peau des animaux par la transformation physique et chimique de l'une de ses « couches » : le derme.

C'est à partir de la couche basale que s'opère l'élaboration des cellules épithéliales où a lieu le processus de *kératinisation*, par lequel les protéines du protoplasme cellulaire cristallisent sous forme de kératine et assurent la résistance mécanique de l'enveloppe externe.

En fait, le rôle biologique de la peau ne se limite pas à celui d'un simple « produit d'emballage », et les fonctions d'échange (respiration, transpiration) sont aussi importantes que les fonctions de protection.

Le *derme*, à partir duquel est élaboré le cuir, est essentiellement constitué d'un produit fibrillaire, le collagène, noyé dans un liquide biologique appelé « substance fondamentale » (il s'agit en fait d'un réseau polymérique gonflé qui sert probablement de milieu réactionnel à la synthèse biologique en assurant de plus les fonctions d'échange).

La *substance fondamentale* est de composition chimique très complexe, riche en acides aminés. Le *collagène* est la protéine principale des tissus conjonctifs animaux (chez l'homme, elle représente à elle seule plus du tiers des protéines). Les principaux acides aminés qui la composent sont le glycocolle (33 %), la proline et l'hydroxyproline, qui, à elles deux, forment 22 % de la molécule. La biosynthèse du collagène fait encore actuellement l'objet de recherches très poussées, afin d'expliciter la structure chimique de la macromolécule. On sait que l'unité structurale de base est une imbrication de trois chaînes polypeptidiques en triple hélice, chaque chaîne comportant environ un millier de motifs acides aminés, et dans laquelle l'environnement d'un motif acide aminé est fixé par la biosynthèse.

En fait, la séquence complète des acides aminés du collagène n'a pas encore été déterminée, et seules des séquences partielles comportant trois ou quatre motifs ont pu être établies (en particulier, on retrouve fréquemment la succession : glycocolle — proline — hydroxyproline — glycocolle). Par contre, la structure fibrillaire du collagène est bien connue, comme le montrent la *figure* 5. On comprend mieux, devant la complexité de cette structure, pourquoi le derme peut posséder des

▼ *Figure 5 : organisation du collagène (d'après* **Structure du collagène,** *in* **Cahiers médicaux lyonnais,** *51, 1975).*

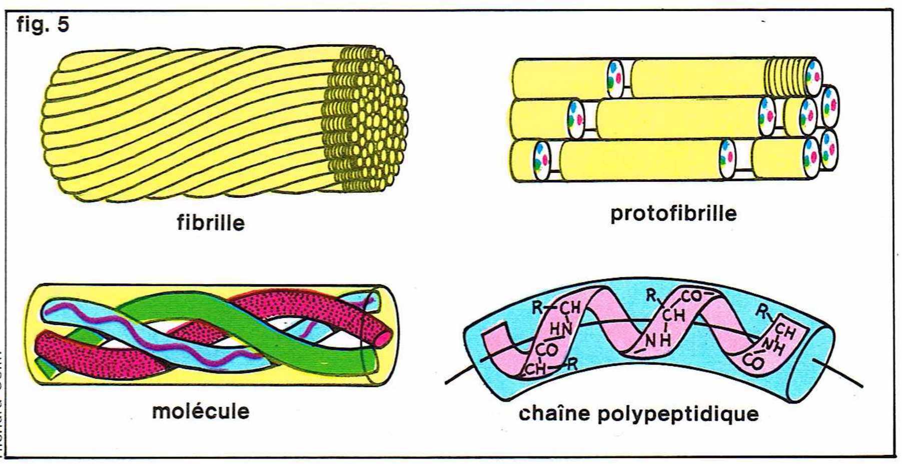

Richard Colin

propriétés aussi contradictoires que celles mentionnées ci-dessus. Par exemple, l'échange de vapeur d'eau avec l'extérieur est possible par fixation et relâchement des molécules H_2O sur les sites de la chaîne polypeptidique, tandis que la cohésion des tissus fibrillaires la rend imperméable aux liquides.

Traitement des peaux, élaboration du cuir

Après la mort de l'animal, la peau non traitée est un milieu exceptionnellement favorable à la prolifération bactérienne, notamment au niveau du derme où le collagène gonflé par la substance fondamentale constitue un aliment de choix. On comprend donc toute la difficulté du traitement permettant l'élaboration du cuir, à partir d'une matière première de base vouée à la putréfaction.

La dépouille de l'animal fraîchement abattu doit tout d'abord être préservée telle quelle. Cette conservation est assurée par un salage ou un séchage rigoureux à l'air libre. Trois étapes successives permettent ensuite de transformer la peau en cuir utilisable par l'industrie.

Il s'agit tout d'abord de séparer le derme des autres tissus cutanés. On obtient ce résultat grâce au « travail de rivière » qui fournit la « peau en tripe » (derme à peu près pur).

Il faut ensuite assurer l'imputrescibilité du derme en stabilisant les acides aminés du derme et de la substance fondamentale susceptibles de se décomposer. C'est le but du tannage, qui donne le « cuir en croûte ».

Enfin la finition (corroyage et finissage proprement dit) donne au cuir son aspect et les propriétés spécifiques requises par son utilisation finale.

Il n'est pas inutile de détailler un peu les diverses opérations de transformation de la peau fournie par la biosynthèse, afin de se rendre compte de la perfection technologique à laquelle sont parvenus de façon empirique les artisans qui ont donné au cuir ses lettres de noblesse.

Le **travail de rivière** commence par le reverdissage des peaux salées ou séchées ; c'est simplement un brassage mécanique dans l'eau. Suit l'épilage qui permet d'éliminer la kératine de l'épiderme et les poils, puis on procède généralement à une légère hydrolyse du derme par trempage dans des solutions de chaux ou sulfure de sodium. Cette opération est appelée pelanage. Lors de l'écharnage, on gratte mécaniquement le tissu sous-cutané qui adhère encore au derme. Enfin, l'échaulage permet d'éliminer les résidus chimiques subsistant après le pelanage (on procède généralement à une neutralisation par trempage dans des bains d'acide formique ou acétique).

On obtient alors la peau en tripe, où l'on distingue déjà le côté chair du cuir (partie du derme précédemment au contact du tissu sous-cutané) du côté fleur (partie du derme au contact de l'épiderme).

Le **tannage** assure l'imputrescibilité des peaux en tripes. Le procédé le plus anciennement connu est le tannage végétal qui est toujours employé pour les cuirs de gros bovins destinés aux semelles et doublures de chaussures et à la maroquinerie.

Les tannins végétaux sont extraits de l'écorce de certains arbres (chêne, châtaignier, quebracho, etc.) et sont principalement constitués d'hétérosides polyphénoliques. On soumet les peaux à une simple macération, ce qui permet de fixer les fonctions aminées et acide pouvant encore réagir dans les peaux.

D'autres procédés de tannage sont très utilisés. Il s'agit du tannage au chrome (action d'une solution basique de sulfate chromique) qui est plus spécialement destiné aux peaux de chevreau, mouton, vache et vachette, et du tannage à l'alun, aux sels d'aluminium ou aux huiles (chamoisage) qui sont plus particulièrement utilisées en mégisserie (préparation de peaux pour l'industrie du gant et de l'habillement).

De plus en plus, l'emploi des tannins synthétiques se généralise, et on fait également appel aux propriétés tannantes de produits chimiques divers comme le formol, le sulfate de zirconium, la quinone, etc. Ces procédés permettent de raccourcir très sensiblement les temps de traitement et d'obtenir diverses propriétés telles que l'extrême souplesse.

Le **corroyage** et le **finissage** permettent enfin de donner au cuir ses propriétés et son aspect définitif. Tout un vocabulaire riche de traditions permet de décrire les différentes opérations de mise à dimension (refendage, dérayage), de séchage (mise au vent), de renforcement ou assouplissement (battage, cylindrage, palissonnage), et de décoration (teinture, nourriture, apprêtage, lissage, grainage, etc.), qui donnent le produit fini correspondant à la fantaisie de l'utilisateur, et qui n'a plus grand-chose à voir avec la peau brute du départ.

L'avenir du cuir peut paraître incertain. Les traitements traditionnels semblent avoir atteint un degré de perfection tel que l'évolution technologique de l'industrie des cuirs et peaux soit réduite à sa plus simple expression. D'autre part, la croissance démographique mondiale devrait faire croître la demande, au point que l'on peut se demander si l'élevage sera capable de combler les besoins (il semble toutefois que, plus un pays se développe, plus sa consommation de viande augmente). Enfin, les matériaux synthétiques ont fait d'énormes progrès, même si le cuir de synthèse directement issu de la pétrochimie n'est pas encore parfaitement au point.

Sans prétendre donner une réponse complète, on peut indiquer que le cuir traditionnel conserve une image de marque extrêmement forte associée à la notion de confort, ce qui devrait lui permettre de conserver sa place dans l'industrie de la chaussure et de l'ameublement, par exemple. D'autre part, les techniques modernes d'élevage permettent d'accroître la surface utilisable de peau par animal et la qualité de celle-ci. Enfin, la connaissance de plus en plus poussée de la structure du collagène et la maîtrise de plus en plus parfaite des polymères de synthèse devraient permettre de fabriquer un cuir reconstitué à partir des déchets de peaux animales.

L'avenir pourrait donc être grand ouvert au matériau composite à moitié synthétique (polyuréthane, P. V. C.) et à moitié d'origine biologique (fibrilles de collagène). Quelques essais ont d'ores et déjà été tentés et ont permis d'élaborer des produits satisfaisant à l'appellation de « synderme » (ou derme synthétique).

Le bois

Premier combustible utilisé, le bois fut de tout temps et demeure encore aujourd'hui le matériau de construction par excellence. Les habitations passées ou présentes y font largement appel, et il est plaisant de signaler que le béton est coulé dans des coffrages en bois dès qu'il s'agit de lui donner des formes complexes. C'est lui qui a permis de développer les transports terrestres et maritimes, et l'avion à ses débuts était en bois. Grâce au bois, dont on tire la plus grande partie du papier fabriqué dans le monde, les idées et courants de pensée ont pu s'échanger et se rencontrer. C'est également lui qui constitue notre mobilier, et s'il fallait du jour au lendemain lui trouver un matériau de remplacement, nous ne saurions que faire.

Cependant, les siècles et les siècles de tradition, du maître charpentier ou ébéniste à l'architecte et au bureau d'études moderne, n'ont pu épuiser toutes les possibilités d'emploi de ce matériau complexe, à la structure et aux propriétés encore imparfaitement connues et maîtrisées.

L'origine même du bois en fait une matière première indéfiniment renouvelable sur le même sol. Les progrès de la biologie végétale et les nouvelles méthodes de la sylviculture permettent d'en maîtriser dans une large

▼ Le quartier des tanneurs à Fès (Maroc).

F. Molinier - Pitch

mesure la production et les propriétés. Il faut d'ailleurs signaler qu'on est loin d'avoir tiré tout le parti des possibilités offertes par les quelque trente-huit millions de km^2 qui constituent la surface boisée du globe (soit environ 34 % des terres émergées).

Le bois est certainement le matériau le plus abondant dont nous disposons, et sans entrer dans le détail de l'économie forestière, on peut affirmer que, grâce à lui, lorsque les règles sont respectées, nous bénéficions d'énormes avantages « secondaires » de la forêt : reconstitution des sols épuisés par l'agriculture intensive et « chimique »; fixation des déserts, assainissement des zones marécageuses, régulation de l'hydrologie, du climat et de l'érosion; protection du biotope animal et végétal.

Bien plus, la forêt est en elle-même une entité biologique. Elle possède un équilibre propre et d'excellentes facultés d'adaptation. Il est ainsi possible de stocker sur pied la production surabondante à un moment donné, ou, au contraire, de donner un « coup de fouet » à un peuplement vieillissant grâce à des méthodes sylvicoles éprouvées. Il faut néanmoins insister sur le fait que le maintien de l'équilibre forestier est fort délicat et que la moindre erreur peut être fatale, qu'il s'agisse d'une surexploitation de type « minier » ou au contraire d'une sous-exploitation systématique (conservation des « jardins botaniques » et maintien à tout prix des peuplements vieillissants).

La situation actuelle est globalement satisfaisante, puisque, sur les trois milliards de m^3 d'accroissement annuel estimés, dus à la seule biosynthèse, seuls 2 milliards de m^3 sont sortis de la forêt après abattage. Cela est rassurant si l'on songe que le capital forestier mondial est estimé à environ 100 milliards de m^3. Pourtant, il est vital de prévoir l'avenir à l'échelle d'une génération, et plus si possible, afin de ne pas puiser dans ce potentiel inappréciable. Même si l'on sourit en se rappelant que les chênes de Colbert plantés il y a trois siècles devaient servir à la Marine de Sa Majesté pour constituer les mâts de sa flotte de guerre en l'an de grâce 1950, le principe même de telles prévisions force l'admiration et le respect.

Formation

Botaniquement parlant, le bois s'identifie au *xylème* secondaire, c'est-à-dire à la partie des plantes ligneuses comprise entre la moelle et l'assise cambiale. C'est en fait le principal constituant du tronc et des branches des arbres, mais aussi de nombreuses plantes herbacées, auxquelles il sert de tissu de soutien.

Son exploitation industrielle est faite à partir des arbres, plantes constituées d'une tige unique, le tronc, très bien différenciée de l'appareil nutritif (les racines) et respiratoire (les feuilles), et qui, de plus, ne comporte que très peu de moelle et d'écorce. Toutefois, et plus particulièrement en ce qui concerne les besoins papetiers, on cherche de plus en plus à tirer le bois de plantes herbacées ou arbustives à croissance très rapide (canne de Provence, par exemple).

Deux grandes familles botaniques donnent les plantes arborescentes.

- *Les Gymnospermes* donnent les Conifères (pins, sapins, cyprès, etc.), les éphédras, les ginkgos, etc. Ces arbres ont en général des feuilles persistantes et donnent un bois relativement tendre (d'où leur nom anglo-saxon de « softwoods »).
- *Les Angiospermes* donnent tous les autres arbres. En fait, la plupart des arbres autres que les Conifères sont des Dicotylédones, c'est-à-dire des plantes à graine « double ». Seuls les palmiers et quelques isolés sont des Monocotylédones. Les Dicotylédones rassemblent tous les arbres à feuilles caduques (feuillus européens, acajous...), lesquels possèdent généralement un bois assez dur (d'où leur nom anglo-saxon de « hardwoods »).

En fait, ces quelques caractéristiques sont très imprécises, car il existe des feuillus à feuilles persistantes, des résineux à feuilles caduques (le mélèze, par exemple), et il est toujours possible de trouver un bois de sapin plus dur que le bois de certains chênes, en choisissant bien les conditions de croissance.

Seule l'étude anatomique permet en général de reconnaître sans doute possible l'essence dont est tiré un bois donné.

N. Cirani

▲ *Une scierie à Vancouver (Canada).*

Le bois se forme par un mécanisme d'« ossification » des parois des cellules végétales. Celles-ci sont des « tubes » disposés parallèlement à l'axe du tronc ou des branches et constituent des tissus très nettement différenciés selon leur fonction (conduction, soutien, etc.), la famille botanique et les caractères génétiques de l'espèce (voir *Anatomie végétale*, volume de *Biologie II*, pages 18 à 39). Ces particularités (forme des vaisseaux, ponctuations, etc.) sont d'ailleurs à la base de l'étude anatomique d'un bois.

On distingue généralement deux types de cellules dans l'arbre :

— Les cellules de type parenchymateux sont les réserves de stockage des éléments nutritifs, et restent vivantes plusieurs années après leur formation.

— Les cellules constituant les tissus de soutien et de conduction meurent après dégénérescence de leur protoplasme, dans l'année où elles ont été formées (on les qualifie parfois de cellules de type prosenchymateux).

Les deux espèces de cellules peuvent coexister dans les rayons du bois de certains Conifères.

La production proprement dite du bois débute immédiatement après la croissance primaire, lorsque l'arbre commence à croître en diamètre et en hauteur. Très schématiquement, la coupe d'une jeune pousse permet de distinguer nettement l'assise génératrice, à partir de laquelle s'opèrent la division et la différenciation des cellules (*fig.* 6).

A partir de l'assise cambiale, la division cellulaire donne vers la périphérie les cellules du phloème secondaire, à partir desquelles se forme l'écorce (et le liège dans certaines essences). Vers l'intérieur, c'est une prolifération beaucoup plus rapide qui permet de former le xylème secondaire. En gros, pour une seule cellule de phloème formée, il se forme six à huit cellules de xylème. Cela explique le faible accroissement relatif de l'écorce.

Les cellules du cambium sont extrêmement fragiles. Elles sont à parois fines et gorgées d'eau. Leur activité de division est maximale au printemps dans les zones tempérées où elle décroît ensuite pour cesser presque totalement en hiver. Cela n'est pas le cas dans les pays tropicaux. Dans de nombreuses essences, la distinction entre bois de printemps et bois d'été est possible. En effet, outre la différence de couleur liée à une modification de la composition chimique, la structure chimique des

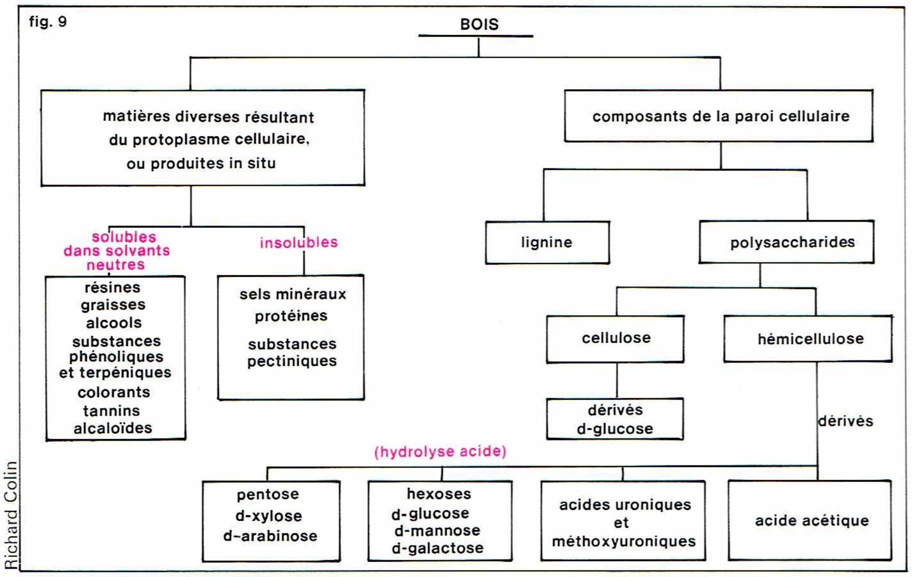

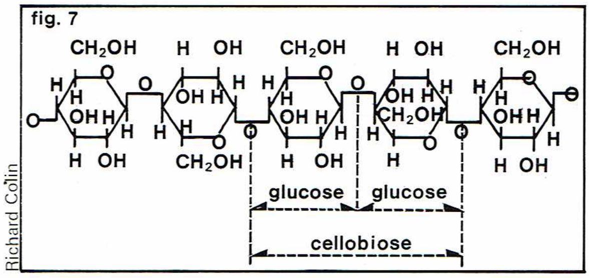

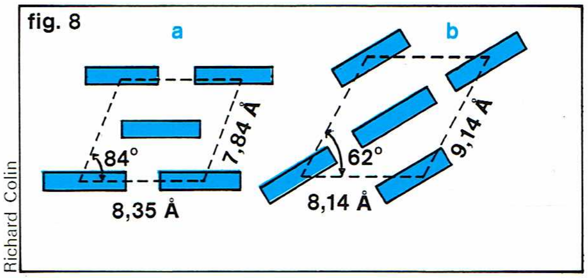

▲ *Ci-dessus, figure 9 : schéma de la composition chimique du bois. A droite, figure 7 : structure du poly-β-D-1,4 glucopyrannose. Figure 8 : schéma du passage du réseau de la cellulose I* (a) *à celui de la cellulose II* (b).

cellules peut varier considérablement, ce qui permet de distinguer les cernes d'accroissement. Le rapport du bois d'été au bois total est appelé texture du bois. Il existe toutefois des bois homogènes tels que le hêtre pour lesquels la distinction entre bois d'été et bois de printemps est pratiquement impossible (les autres, tels le chêne et les résineux, sont dits « hétérogènes »).

Les cellules produites par le cambium sont tout d'abord non différenciées. Dans le xylème secondaire, elles évoluent très rapidement en s'épaississant par formation d'une membrane cellulosique à l'intérieur de la paroi cellulaire, qui elle-même dégénère et donne la lignine.

A maturité, la cellule initiale a donc deux parties bien distinctes : une zone interne, constituée essentiellement de cellulose et d'hémicelluloses, est entourée d'une ceinture ligneuse, qui sert d'ailleurs de « ciment » intercellulaire. Ensuite, la cellule meurt, son protoplasme s'évaporant ou étant absorbé.

Le bois ainsi formé est appelé « bois primaire ». Il constitue l'aubier des gros arbres, et continue à évoluer au cours du temps pour donner le « bois parfait », ou duramen, situé au centre de l'arbre (bois de cœur), et pratiquement imputrescible. Nous passerons sous silence l'évolution des cellules du phloème qui suivent un processus parallèle pour donner l'écorce, véritable « peau » du bois.

Composition chimique

On peut, en simplifiant à l'extrême, considérer le matériau bois comme un composite fibreux dont la matrice est la lignine, substance polyphénolique dont les fibres de renfort sont essentiellement constituées de cellulose.

La cellulose est un polyholoside de formule brute $(C_6H_{10}O_5)_n$ où n est de l'ordre de 10 000, ce qui correspond à une masse moléculaire de 1 500 000 à 2 000 000. Il s'agit en fait d'un polymère dont la macromolécule est

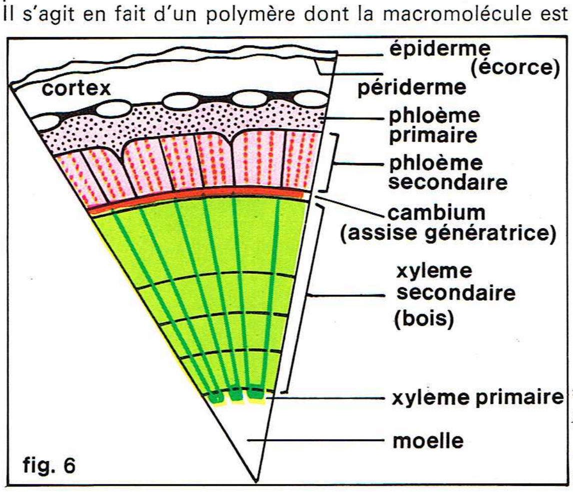

▶ *Figure 6 : coupe d'une jeune pousse de bois.*

formée par la répétition du motif β-cellobiose : le poly-β-D-1,4 glucopyrannose (*fig.* 7).

Toutefois, la molécule peut comporter quelques motifs aberrants autres que le motif glucose, ce qui constitue autant de points faibles dont profite l'industrie papetière qui dégrade aisément les fibres du bois et obtient une cellulose « technique » de degré de polymérisation 600 environ.

La structure cristalline de la cellulose est à présent bien connue. La maille est monoclinique, et les chaînes sont disposées parallèlement à l'axe $\vec{b}$ dans le plan ab en nappes résultant de l'assemblage des macromolécules par ponts hydrogène. Selon les cas, l'orientation des domaines cristallins est extrêmement forte (cellulose de ramie), la diffraction des rayons X donne alors un cliché de fibre caractéristique, ou bien, au contraire, aucune orientation préférentielle n'est décelable (linters de coton, algues).

Toutes les celluloses obtenues par biosynthèse (arbres, algues, fibres végétales, etc.) ont la même maille cristalline, celle de la cellulose I décrite ci-dessus. Il existe d'autres structures de la cellulose, obtenues par traitements chimiques de la cellulose I suivis d'une « régénération » (mercerisation par exemple). La maille cristalline est légèrement différente, comme le montre le schéma de la maille de la cellulose II (*fig.* 8).

Il existe également une cellulose III dont la maille, toujours monoclinique, a des paramètres sensiblement différents, ainsi que d'autres variétés dont les structures sont encore assez mal établies (on admet généralement a = 7,87 Å, b = 10,3 Å, c = 10,13 Å et β = 58° pour la cellulose III).

Dans le bois, toute la cellulose n'est pas cristalline, et il est probable que l' « ossification » de la paroi cellulaire correspond à une lente cristallisation au cours du temps.

Les autres composants du bois sont moins connus, et sa composition chimique est extrêmement complexe. La *figure* 9 en donne un schéma.

Grossièrement, on peut considérer que 50 % du bois sont constitués par la cellulose, 15 à 30 % par la lignine (souvent plus abondante dans les résineux), et 10 à 30 % par les hémicelluloses, polyhétérosides assez mal connus, dont le rôle biologique n'est pas définitivement établi. Enfin, la présence de substances benzéniques et d'alcaloïdes peut limiter l'emploi de certaines essences (makoré, bété, etc.) dont le bois est à l'origine de maladies professionnelles graves (eczéma, allergies).

Propriétés physiques

Les propriétés physiques du bois font de ce matériau un véritable « don de la nature ». Il faut signaler en préambule que ces propriétés sont extrêmement variables d'une essence à l'autre et même dans une essence donnée. Cela s'explique par la grande complexité de structure que nous n'avons fait qu'esquisser, la présence

de défauts (bois de réaction, blessures du cambium, attaques parasitaires, etc.) et l'influence des conditions de croissance (nature du sol, du climat, traitement sylvicole en futaie ou taillis sans futaie, etc.).

En toute généralité, quelques idées-forces peuvent être dégagées.

- **Anisotropie :** cette propriété est à la fois un avantage et un inconvénient. Elle est due à la nature fibreuse du tissu ligneux.
- **Hétérogénéité :** c'est de loin l'inconvénient majeur du bois dans les emplois pour lesquels sont exigées de bonnes propriétés mécaniques. Elle est due soit à la structure propre des tissus (présence de rayons, vaisseaux, poches de résine...), soit à des causes externes (défauts, blessures...).
- **Porosité :** cette propriété fait du bois l'un des meilleurs isolants phoniques et acoustiques, mais rend également son séchage délicat.
- **Variabilité :** elle est due à l'origine biologique du bois. L'arbre fraîchement abattu ne « meurt » pas instantanément, et les tissus continuent à évoluer. De plus, les contraintes internes, accumulées au cours de la croissance, qui ont permis aux géants comme aux plus petits de vaincre la pesanteur, se relaxent, soit instantanément (cas du hêtre), soit au cours du temps, et se combinent avec le « travail » du bois sec lors des diverses reprises d'humidité. C'est, avec l'hétérogénéité, la source de bien des déboires de plus d'un charpentier, ébéniste ou menuisier amateur.
- **Densité** (*tableau* I) : c'est grâce à un excellent compromis densité-résistance que le bois trouve de nombreuses applications pour lesquelles il est quasi irremplaçable. Sa légèreté en fait le matériau de choix pour les structures de grande portée (charpentes traditionnelles et lamellées-collées) et son exceptionnelle résistance est à la base du développement de l'aéronautique, même si cette application est aujourd'hui marginale (aviation de tourisme, vol à voile). A titre d'exemple, on peut signaler que la canne de l'aveugle ou du vieillard, si elle était construite avec le meilleur acier, n'aurait pas, à poids égal, les caractéristiques de solidité et de « sécurité » de la canne en bois.
- **Combustibilité :** le bois est un matériau combustible qui possède un excellent pouvoir chauffant. Cela constitue *a priori* un handicap de taille dans son utilisation comme matériau de construction, et les incendies « historiques » de Londres et de Moscou, pour ne citer que les plus fameux, sont là pour le prouver. Toutefois, la résistance d'une structure en bois à l'incendie est très nettement supérieure à celle des bâtiments en treillis métallique ou en béton armé, par exemple. En effet, s'il brûle, le bois ne se dilate que très peu, n'a donc pas tendance à « écarter les murs », et il conserve très longtemps ses propriétés mécaniques. Ainsi, les pompiers savent d'expérience qu'il leur est très dangereux d'intervenir sous une charpente métallique qui peut s'écrouler à tout moment, tandis que leur marge de manœuvre est beaucoup plus large sous une charpente traditionnelle en bois.

Ce très rapide survol des propriétés physiques du bois montre combien il est difficile de maîtriser ce matériau ; c'est grâce à l'ingéniosité et aux efforts de générations de bûcherons, scieurs de longs, maîtres charpentiers, ébénistes, charrons, etc., que le bois a acquis ses lettres de noblesse.

Et pourtant, à partir de ces traditions ancestrales, fondées sur des technologies complexes mais empiriques, on peut penser que l'apport des techniques nouvelles les plus avancées laisse au bois des perspectives de développement exceptionnel. Ces dernières décennies ont d'ailleurs vu cette évolution se confirmer, avec un passage progressif du bois massif, qui devrait rester le matériau traditionnel des métiers d'art (sculpture, ébénisterie traditionnelle, etc.), aux matériaux ligneux reconstitués, produits nettement plus industriels, aux caractéristiques mieux définies.

Toutefois, ce ne sont là que les premiers pas de développements qui devraient croître de façon gigantesque, à mesure que la structure des tissus ligneux et la physique du solide du matériau bois seront mieux connues. Aussi paradoxal que cela paraisse, c'est probablement grâce aux progrès de la biologie végétale, de la mécanique des composites, de la physique et chimie des macromolécules, que l'on parviendra à rendre les matériaux industriels tirés du bois beaucoup plus performants que les actuels contre-plaqués, lattés et panneaux reconstitués.

Parmi les solutions susceptibles d'être trouvées, la confection de composites bois-polymères synthétiques est déjà une réalité. Les exemples les mieux connus sont le bois lamellé-collé et les panneaux de fibres et particules. Le liant est généralement une résine synthétique du type urée-formol, mélanine phénol-formol ou résorcine-formol, utilisée comme colle, et qui, en fait, joue un peu un rôle de matrice chargée avec des produits ligneux. Il est ainsi possible d'améliorer très nettement certaines propriétés physiques du bois massif (notamment l'absorption phonique).

Toutefois, les propriétés mécaniques de ces matériaux, considérées en tant que telles, sont relativement médiocres comparées à celles du bois (surtout en ce qui concerne les panneaux reconstitués).

L'amélioration des propriétés liées à l'hygroscopicité est possible soit par imprégnation du bois massif, soit par isolation de celui-ci avec une résine synthétique (cas du lamellé-collé) ou par contre-collage (panneau latté ou contre-plaqué, contrariant les fibres afin de compenser les retraits). Il est ainsi possible de supprimer l'influence du débit des planches de bois massif, dont le comportement au séchage dépend du lieu de prélèvement dans le tronc (voir *fig.* 10).

En ce qui concerne l'**eau dans le bois,** notons que c'est la biosynthèse qui impose une grande quantité d'eau dans l'arbre vivant, car les tissus ligneux sont élaborés uniquement à partir des matières en solution tirées du sol. On distingue principalement :

— *L'eau de constitution*, qui est liée chimiquement aux molécules de cellulose essentiellement, et qui ne peut être éliminée lors du séchage. Elle rentre dans le poids du « bois anhydre ».

— *L'eau de saturation* est l'eau qui est absorbée par la cellulose et qui gonfle les tissus. C'est elle qui est responsable du « travail » du bois (retrait, fissuration, voilement) lors des variations de température et d'humidité de l'air (variations saisonnières ou liées au chauffage des habitations).

— *L'eau libre* est l'eau qui circule dans les tissus. C'est le principal constituant de la sève. Cette eau est totalement éliminée par séchage à l'air libre.

La localisation de l'eau dans l'arbre vivant est variable au cours de l'année (« montée » de la sève au printemps). Elle constitue 25 à 80 % de son poids total, et les techniques de séchage artificiel doivent être employées avec une extrême prudence pour éviter de détériorer les planches sciées (gerces, « collapses », etc.).

Tableau I
Densité de différentes essences de bois

Résineux	Densité	Feuillus	Densité
Western red cedar	0,30	Peuplier	0,35
Spruce	0,35	Orme	0,46
Épicéa de Sitka	0,37	Chêne mou	0,5-0,6
Cyprès	0,42	Noyer	0,51
Eastern red cedar	0,43	Chêne dur	0,6-0,3
Douglas	0,45	Hêtre	0,62
Pin laricio	0,48	Hickory	0,64
		Doucier	0,80

Le bois le plus léger semble être celui d'un genre de sureau *(Aeschynomena hispida)* avec une densité de 0,071, et le plus lourd est le « bois de fer » *(Krugiodendron ferreum)*, avec une densité de 1,42, qui croît au Honduras britannique.

▲ *Tableau I : densité de différentes essences de bois.*

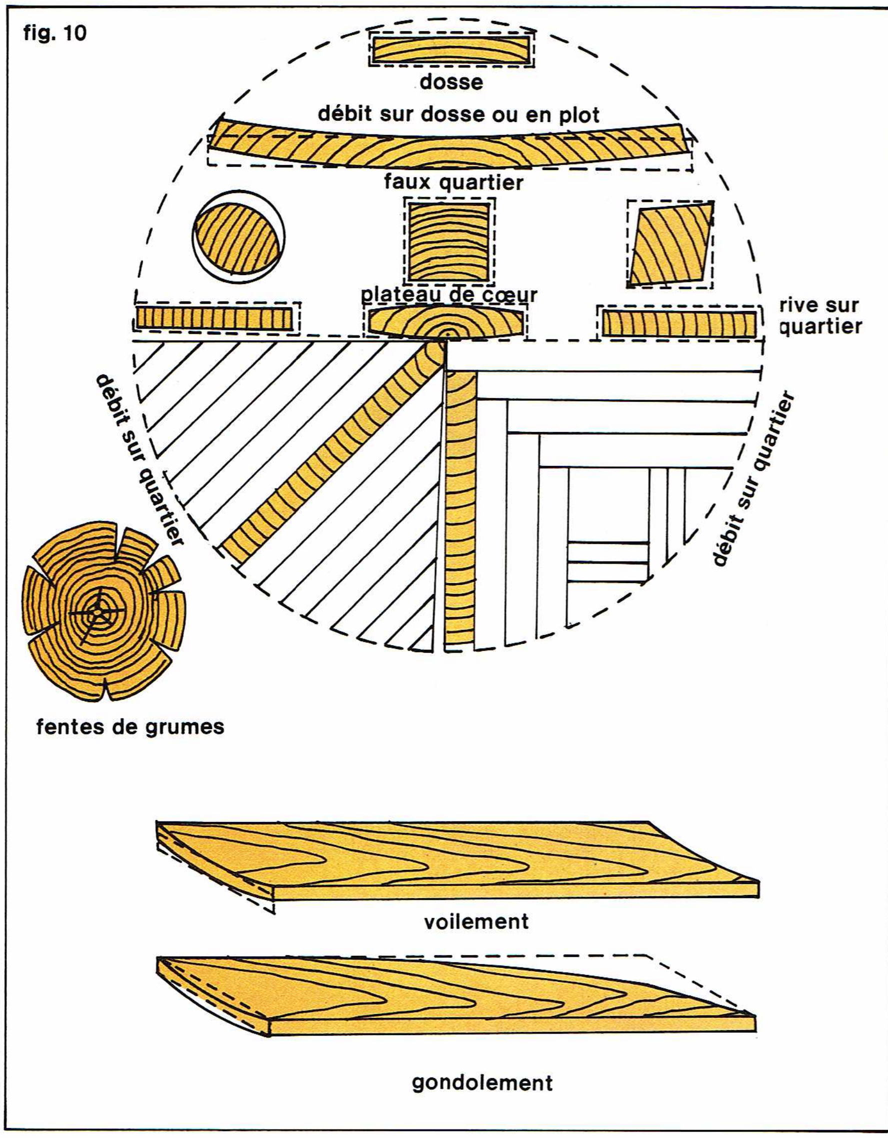

▲ *Figure 10 : retrait et déformations du bois au séchage (d'après Collardet).*

▼ *Tableau II : perspectives d'avenir du bois.*

Le retrait axial est extrêmement faible (0,1 % environ). Le retrait tangentiel est deux à trois fois plus élevé que le retrait radial, et les variations sont extrêmement importantes selon l'humidité du bois.

Mentionnons que le bois imprégné (procédés Bethell, Ruping, Baucherie) est utilisé en génie civil (ponts et passerelles aux États-Unis, poteaux téléphoniques, etc.), en agriculture (étables, abreuvoirs) et en électricité, sous une forme, il est vrai, un peu particulière (bois bakélisé). Généralement, les agents d'imprégnation sont mélangés à des antifongiques, insecticides et produits ignifuges pour accroître la qualité des bois traités.

Tableau II
Perspectives d'avenir du bois

Propriétés caractéristiques	Évolution prévisible
Renouvellement indéfini, faible coût d'exploitation	Systématisation de l'exploitation et mise en valeur du capital forestier grâce à des techniques sylvicoles de plus en plus performantes
Légèreté, facilité d'usinage et d'assemblage, faible prix de revient pour une résistance à la flexion, à la traction et à la compression, bon comportement au feu	Industrialisation de matériaux ligneux composites à hautes performances (type lamellé-collé) et emplois de plus en plus nombreux dans le bâtiment, le génie civil, etc.
Composition chimique	Matière première pour l'industrie pharmaceutique et chimique

Propriétés mécaniques

L'utilisation du bois comme matériau de construction dépend essentiellement de ses propriétés mécaniques. Leur détermination est d'autant plus délicate que le bois est anisotrope et généralement pourvu de défauts. Cela explique que la « mécanique des matériaux ligneux » n'ait pas atteint l'efficacité de la mécanique des fluides, par exemple. Bien souvent, l'architecte doit procéder à une simulation sur maquette pour tester la résistance de sa charpente, en appliquant ensuite un coefficient de sécurité confortable pour réaliser l'édifice en vraie grandeur.

Il faut par ailleurs signaler que toutes les « constantes » d'élasticité dépendent fortement de la densité, de la texture, de l'humidité et des défauts du bois, et l'on doit le plus souvent se contenter d'appliquer quelques règles semi-empiriques qui se sont dégagées au cours de nombreux siècles d'utilisation.

Si l'on exprime toutes les grandeurs mécaniques en kg/cm^2, on peut approximativement considérer que, pour un bois à 12 % d'humidité : la *résistance en compression axiale* est égale à 700 à 800 fois la densité ; la *résistance en compression transversale* vaut 300 fois le carré de la densité ; la *résistance en traction axiale* est égale à 1 500 à 2 000 fois la densité ; la *résistance en traction transversale* vaut 60 fois le carré de la densité.

La *résistance à la flexion* semble être une caractéristique spécifique de l'essence ainsi que la *résistance au cisaillement* (feudage).

Frêne et hickory ont ainsi une exceptionnelle résistance à la flexion (âme des skis, manches d'outils), et le chêne et le châtaignier se fendent remarquablement (confection de merrains pour tonnellerie).

Généralement, les résineux sont d'autant plus résistants qu'ils ont crû plus lentement (sapin du Nord), et les feuillus hétérogènes sont au contraire plus solides lorsqu'ils possèdent des accroissements larges (chêne de charpente : larges cernes ; chêne d'ébénisterie : faibles accroissements).

En fait, le comportement rhéologique du bois est très mal connu, et les propriétés ultimes remarquables de ce matériau devraient pouvoir être à terme beaucoup plus prévisibles.

Schématiquement, le bois est un solide hautement visco-élastique, anisotrope, fibreux et hétérogène, ce qui rend toute étude rhéologique systématique très délicate. Il est ainsi pratiquement impossible d'arriver à obtenir une sollicitation en traction simple sans flexion et cisaillement parasites qui faussent toute mesure.

Un travail gigantesque reste à entreprendre, d'une part pour effectuer la « simple » détermination des constantes d'élasticité de nombreuses essences, et surtout pour déterminer leur variation avec la température et l'humidité.

La loi de comportement du matériau ligneux reste un magnifique sujet d'étude.

Ce sera d'ailleurs notre conclusion, après ce bref survol des caractéristiques des matériaux d'origine biologique, que de dire qu'après des siècles et des siècles d'utilisation, ces matériaux sont beaucoup plus « neufs » qu'il n'y paraît.

L'avenir pourrait bien nous gratifier de quelque matériau aux propriétés surprenantes lorsqu'on s'intéressera de plus près aux poutres séculaires, aux tissus de toujours et aux cuirasses des anciens, avec les yeux de la physique moderne (*tableau* II).

BIBLIOGRAPHIE

CAMPREDON, J. *Le Bois,* collection «Que sais-je ?», P. U. F., Paris, 1963. - CHAMPETIER et al., *Chimie macromoléculaire,* Hermann, Paris, 1970. - HOLZ, *Westermann Tabellen,* G. Westermann Verlag, Braunschweig, 1969. - *Encyclopedy of Polymer Science & Technology,* Interscience, 1971.

MATÉRIAUX AMORPHES ET POLYGRANULAIRES : ISOLANTS - CONDUCTEURS

Les matériaux amorphes et polygranulaires sont une classe de matériaux représentés par les céramiques et les verres, et récemment étudiés en vue d'applications nouvelles pour leurs propriétés électriques. Longtemps utilisés comme éléments passifs (revêtements de fours ou récipients), ils sont actuellement recherchés comme éléments actifs, par exemple, pour leurs propriétés ioniques ou diélectriques.

L'étude de ces matériaux complexes a bénéficié, d'une part des progrès de la physique du solide et des techniques de caractérisation des matériaux et, d'autre part, de la demande de plus en plus pressante de matériaux à performances nouvelles. Les propriétés électriques de ces matériaux ne sont pas simples et elles doivent être examinées et discutées. La mesure de ces mêmes propriétés est très délicate et est source de nombreuses erreurs dues à des effets parasites qui masquent trop souvent les propriétés réelles du matériau. Les applications concernent les problèmes de l'énergie, la réalisation des hautes températures et quelques utilisations dans le domaine de l'électricité et de l'électronique.

Propriétés électriques des matériaux

La classification des solides ainsi que leurs propriétés reposent sur les forces de liaison qui maintiennent entre eux les atomes dont les solides sont formés. Les propriétés électriques dépendent de ces forces. La liaison métallique est due à la mise en commun de l'ensemble des électrons de valence constitutifs du solide : ces électrons sont libres ; les métaux ont une très bonne conductivité de type électronique. La liaison ionique est due à l'attraction électrostatique d'ions de signes opposés avec transfert d'électrons. Ce sont les ions qui assurent la conduction par l'intermédiaire des défauts cristallins. Les cristaux ioniques ont une conductivité faible de nature ionique. La liaison covalente est la mise en commun, entre deux atomes semblables, de leurs électrons externes. A l'état pur, ces composés présentent une faible conductivité mais l'introduction d'impuretés modifie profondément leurs caractéristiques électriques. Enfin, l'attraction entre molécules conduit à la liaison moléculaire dont la nature électrique fait intervenir les notions de « polarité » et de polarisabilité. La plupart des solides présentent un de ces types de liaisons, mais certains sont mixtes et la *figure* 1 indique les zones frontières.

Ce chapitre n'expose que des phénomènes liés à la conduction électrique des matériaux. Il distingue les propriétés en champs faibles dans le régime linéaire des propriétés en champs forts. Il néglige volontairement les phénomènes de couplage des propriétés électriques avec d'autres propriétés physiques des matériaux : électroluminescence, lasers semi-conducteurs, photo-émission, photoconduction, ferro-électricité, piézo-électricité.

fig. 1

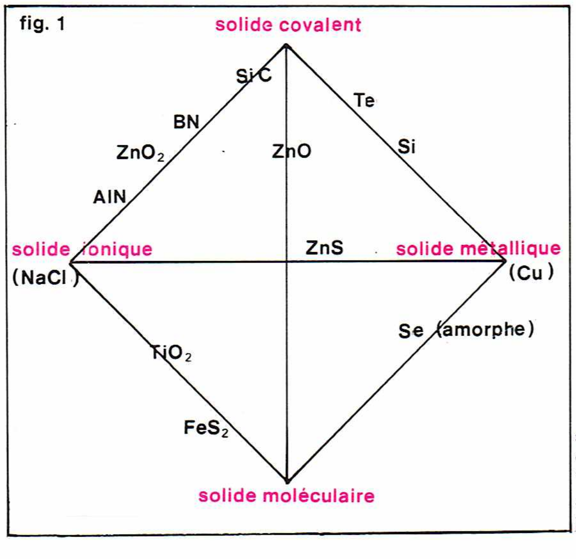

Richard Colin

◀ Figure 1 : classification des solides en fonction de leurs liaisons; mise en évidence de liaisons mixtes.

fig. 2

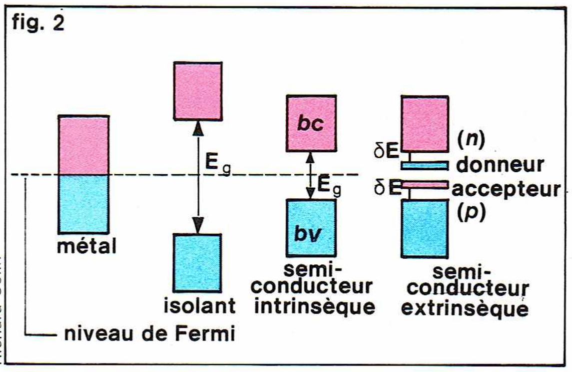

Richard Colin

◀ Figure 2 : schéma des structures de bandes dans les solides.

Phénomène de conduction électrique

On définit la densité de courant électrique j comme la charge transportée par unité de surface et de temps (il s'agit de grandeurs vectorielles mais nous emploierons une notation non vectorielle, souvent plus simple pour le lecteur). Si le nombre de particules par unité de volume est n, leur vitesse v, leur charge ze avec z la valence et e la charge électrique, la densité de courant pour la i-ième particule est : $j_i = n_i z_i e v_i$; la conductivité électrique est : $\sigma = j_i/\mathrm{E}$; E est le champ électrique appliqué.

La vitesse est directement proportionnelle au champ. On définit la mobilité comme la vitesse par unité de champ : $\mu_i = v_i/\mathrm{E}$. Ainsi, la conductivité d'une particule est : $\sigma_i = n_i z_i e \mu_i$.

Dans un matériau contenant plusieurs sortes de particules chargées (électrons ou ions), on a : $\sigma = \sum_i n_i z_i e \mu_i$.

On définit le nombre de transport t comme égal à σ_i/σ. Il donne la contribution d'un type de porteurs à la conduction totale. Ainsi, la conductivité électrique dépend de la concentration des porteurs et de leur mobilité.

Électrons et ions sont les deux types essentiels de porteurs.

Conduction électronique

Porteurs électroniques. Ils peuvent être décrits en termes de structure de bande d'énergie (*fig.* 2). Dans le vide, un électron a un spectre d'énergie continu. Sur un atome isolé, il a un état énergétique défini par 4 nombres quantiques n, l, m, s, et un électron ne peut occuper qu'un état énergétique donné dans un système quelconque (principe d'exclusion de Pauli). Les électrons sont ainsi répartis sur des niveaux successifs correspondant chacun à une valeur de n. Ces niveaux comprennent plusieurs couches ou sous-couches suivant les valeurs de l, m, s.

Lorsque la matière est condensée, les interactions entre les corpuscules deviennent très puissantes, et il est impossible de continuer à parler d'atomes isolés. Les électrons de chaque atome s'intègrent dans un système électronique unique couvrant le volume de matière considéré. Chacun des niveaux des atomes supposés isolés s'intègre dans une « bande d'énergie » ou zone comprenant autant de niveaux qu'il y a de mailles atomiques élémentaires dans le volume.

Certains électrons sont liés à un noyau atomique, d'autres peuvent atteindre un état d'énergie supérieure, sous l'action d'un champ électrique, de la chaleur et du rayonnement ; ils sont alors libres de circuler dans le réseau atomique qui constitue le solide.

Le taux d'occupation d'un niveau d'énergie ε donné est représenté en fonction de la température T par la fonction de distribution de Fermi-Dirac.

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{1 + e \exp\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_F}{kT}\right)}$$

ε_F est l'énergie de Fermi : c'est l'énergie maximale du dernier niveau occupé à — 273 °C (0 °K).

Les métaux sont caractérisés par une bande partiellement remplie ou par une bande pleine qui chevauche une bande vide. Les électrons sont libres de se mouvoir, et les métaux sont de bons conducteurs. Le déplacement des électrons n'est contrarié que par les impuretés et l'agitation thermique des ions : ces deux facteurs sont à l'origine de la résistance électrique. Ainsi, les traces d'impuretés

Tableau I
Valeur de l'énergie E_g de divers semi-conducteurs intrinsèques

Semi-conducteurs	E_g (en eV)	Semi-conducteurs	E_g (en eV)
$BaTiO_3$	2,5-3,2	TiO_2	3,05-3,8
C (diamant)	5,2-5,6	CaF_2	12
Si	1,1	BN	4,8
— SiC	2,8-3	CdO	2,1
PbS	0,35	LiF	12
PbSe	0,27-0,5	Ga_2O_3	4,6
PbTe	0,25-0,30	CoO	4
Cu_2O	2,1	GaP	2,25
Fe_2O_3	3,1	Cu_2O	2,1
AgI	2,8	CdS	2,42
KCl	7	GaAs	1,4
MgO	> 7,8	ZnSe	2,6
Al_2O_3	> 8	CdTe	1,45

▲ *Tableau I : valeurs de l'énergie E_g de divers semi-conducteurs intrinsèques.*
▼ *Tableau II : mobilité des électrons et des trous pour divers matériaux.*

diminuent la conductivité, et les alliages métalliques sont moins conducteurs que les métaux purs.

Les semi-conducteurs sont des solides où la dernière bande pleine (bande de valence) est séparée de la bande suivante qui est vide (bande de conduction). Le niveau de Fermi se trouve exactement entre les deux bandes. La conduction apparaît si un électron de la bande de valence acquiert une énergie suffisante E_g pour atteindre la bande de conduction et s'y déplacer. Dans ce cas, le trou qu'il laisse joue le rôle de charge positive *p*, qui participe également à la conduction dans la bande de valence. La conductivité s'exprime par $\sigma = |e| (n_e\mu_e + n_h\mu_h)$, avec n_e ou n_h densité des électrons *e* ou des trous *p* ; μ_e ou μ_h : mobilité des électrons ou des trous. Ce type de conducteur s'appelle le *semi-conducteur intrinsèque ;* la concentration des électrons n_e et n_h est donnée par :

$$\text{état fondamental} = e + p \qquad K_i = [e]\,[h]$$

$$\text{comme } [e] = [h] \text{ on a } [e] = K_0 \exp\left(-\frac{E_g}{2\,kT}\right)$$

avec K_0 = constante ; *k* = constante de Boltzmann ; T = température absolue ; [.] = concentration.

L'isolant est un semi-conducteur possédant une large bande interdite, c'est-à-dire une valeur élevée de E_g. Pour les semi-conducteurs réfractaires tels que le carbure de silicium ou le nitrate d'aluminium, E_g est de l'ordre de 2 à 4 eV, tandis que, pour des isolants tels que la magnésie ou l'alumine, E_g est supérieur à 8 eV (*tableau* I).

Qu'il s'agisse de semi-conducteurs ou d'isolants, ces solides ont leurs propriétés très influencées par la présence des impuretés. Celles-ci font apparaître des niveaux intermédiaires qui peuvent soit accepter des électrons de la bande de valence (semi-conducteur *p*), soit faire passer des électrons dans la bande de conduction (semi-conducteur *n*). Alors, les énergies mises en jeu sont très inférieures à l'énergie E_g. Aussi, ce type de conduction, dite *extrinsèque*, apparaît-il à des températures inférieures à la conduction intrinsèque. Il est à l'origine de l'apparition d'une conduction notable dans les isolants portés à haute température (T > 1 500 °C). Les impuretés peuvent être de nature physique ou chimique. Parmi les imperfections physiques, citons : les lacunes, les atomes interstitiels, les dislocations, les joints de grain et les états de surface. Les imperfections chimiques sont, essentiellement, la présence d'atomes étrangers.

Étant donné l'importance du rôle joué par les défauts, et dans la valeur de la conduction électrique, et dans le type des porteurs de charges responsables de la conduction, il semble intéressant de rappeler ici le principe de l'analyse des défauts dans un matériau tel qu'un oxyde MO. Le réseau MO peut être représenté par une succession d'ions positifs M^{2+} et négatifs O^{2-} formant un édifice électriquement neutre. L'élévation de la température permet à certains ions d'acquérir une énergie suffisante pour occuper un site interstitiel (défaut de Frenkel) ou pour quitter le réseau (défaut de Schottky). Ces défauts peuvent être considérés comme des ions dans le solide, et en équilibre thermodynamique. On suppose MO en équilibre avec ses espèces vapeurs M et O_2 et ne contenant que des défauts de Schottky.

La formation d'une lacune d'oxygène $\square_O$ s'écrit :

$$MO \rightarrow M_M + O_O \rightarrow M_M + \square_O + 2\,e + 1/2\,O_2$$

($\square_O$ ↓ apparition d'un porteur ionique ; $2\,e$ ↓ apparition de 2 porteurs électroniques)

Il existe une relation simple qui relie la concentration des défauts à la pression d'oxygène : $[\square_O]\,[e]^2 = Kp_{O_2}^{-1/2}$.

L'introduction d'une impureté ayant un cation de valence différente, tel Li_2O, s'écrit : $Li_2O \rightarrow 2\,Li_M + O_O + \square_O$ Li_2O prend la place de 2 MO.

Ainsi, par le jeu des défauts ou des impuretés, on pourra, dans un matériau, modifier la contribution ionique ou électronique de la conductivité électrique. Cela est très important pour les applications.

Mobilité électronique. Si l'on désigne par τ le temps de libre parcours moyen entre deux collisions des électrons, la mobilité est donnée par : $\mu = e\tau/m^*$. m^* est la masse de l'électron qui tient compte du potentiel cristallin. Quand la température croît, l'agitation thermique fait apparaître une énergie proportionnelle à la température, et la mobilité décroît.

Dans le cas des matériaux suffisamment polaires, on a à faire à des électrons localisés sur un ion, et leur déplacement est lié à leur probabilité de saut. Dans ce cas, la mobilité est faible mais augmente avec la température. Le *tableau* II donne des exemples de la mobilité des électrons et des trous pour divers matériaux.

Tableau II
Mobilité des porteurs (électrons et trous) pour divers matériaux à la température ordinaire

Matériaux	Mobilité (en $cm^2/V{\cdot}s$)		Matériaux	Mobilité (en $cm^2/V{\cdot}s$)	
	électrons	trous		électrons	trous
Diamant	1 800	1 200	PbS	600	200
Si	1 600	400	PbSe	900	700
Ge	3 800	1 800	PbTe	1 700	930
InSb	10^5	1 700	AgCl	50	
InAs	23 000	200	KBr (100 °K)	100	
InP	3 400	650	CdTe	600	
GaP	150	120	GaAs	8 000	3 000
AlN		10	SnO_2	160	
FeO			$SrTiO_3$	6	
MnO			Fe_2O_3	0,1	
CoO		≃ 0,1	TiO_2	0,2	
NiO			Fe_3O_4	—	0,1
GaSb	2 500-4 000	650	$CoFe_2O_4$	10^{-4}	10^{-8}

Conduction ionique

Quand deux éléments, un électropositif comme le sodium et l'autre électronégatif comme le chlore, le brome ou l'iode, se combinent, les électrons sont transférés des atomes électropositifs aux atomes de type électronégatif.

Porteurs de charge. Dans un matériau, l'amplitude des vibrations thermiques des ions constituant le cristal augmente avec la température : cela conduit au départ de certains atomes de leur site normal. Il existe ainsi un certain nombre de sites vacants : les uns forment les défauts de Frenkel, les autres les défauts de Schottky. Ces défauts sont en équilibre thermique, et grâce à ces sites vacants les ions peuvent se mouvoir d'un site à l'autre. La concentration des défauts n dans un matériau à N sites est donc : $\frac{n}{N} \simeq \exp\left(-\frac{\Delta H}{kT}\right)$; H est l'enthalpie de formation du défaut. Quelques exemples figurent dans le *tableau* III.

Mobilité des porteurs ioniques. En l'absence de champ électrique, les ions se déplacent de manière désordonnée. Quand un champ électrique est appliqué, les charges positives se meuvent dans une direction et les charges négatives dans l'autre.

Le processus élémentaire est le mouvement d'un ion sur une position voisine ayant exactement la même énergie ; pour ce faire, il faut qu'il saute une barrière d'énergie U. La probabilité de sauter la barrière est $\nu e^{-U/kT}$ par seconde, où ν est la fréquence de vibration de l'atome. Quand un champ électrique E est appliqué, la barrière de potentiel est modifiée selon le sens du champ de $\pm$ 1/2 Eea (a est la distance entre deux positions adjacentes).

La probabilité par unité de temps qu'une charge se meuve dans une direction donnée est : $\nu e^{-(U - \frac{1}{2} Eea)/kT}$ et dans la direction opposée : $\nu e^{-(U + \frac{1}{2} Eea)/kT}$

La vitesse moyenne $\bar{u}$ est :

$$\bar{u} = a\nu \{e^{-(U - \frac{1}{2} Eea)/kT} - e^{-(U + \frac{1}{2} Eea)/kT}\}$$

Avec des valeurs raisonnables pour le champ, $Eea \ll kT$, on obtient :

$$\bar{u} = \frac{Eea^2}{kT} \nu e^{-U/kT}$$

La mobilité μ est alors :

$$\mu = \frac{ea^2}{kT} \nu e^{-U/kT}$$

La relation de Nernst-Einstein relie cette mobilité au coefficient de diffusion D : $D/\mu = kT/e$. La *figure* 3 compare les matériaux entre eux du point de vue de la résistivité.

Autres caractéristiques électriques

Nous allons exposer comment on peut les déterminer : le nombre de transports permet de séparer σ_e et σ_i ; l'effet Hall et le pouvoir thermo-électrique donnant le signe des porteurs de charges et parfois leurs mobilités ; l'émission thermo-électronique est une donnée sur la loi de variation de la concentration des électrons.

Nombre de transport

On définit le nombre de transport d'une espèce k par rapport aux autres espèces par l'expression :

$$t_k = \frac{n_k}{\sum_k n_k} = \frac{\sigma_k}{\sigma}$$

La connaissance du coefficient de diffusion D_i d'une espèce permet d'atteindre la contribution ionique σ_i de cette espèce à la conduction totale (relation de Nernst-Einstein).

On peut également étudier le transport d'une des espèces en insérant le matériau MX dans une pile du type p'_x/MX/p''_x ; p'_x et p''_x définissent deux pressions de l'espèce gazeuse x qui contrôle les défauts dans le matériau. Il apparaît une force électromotrice E, et le nombre de transport ionique moyen t_i est alors : $t_i = E/E_0$, avec E_0 force électromotrice qui apparaît lorsque le matériau est entièrement ionique. Elle satisfait à la loi de Nernst :

$$E_0 = \frac{RT}{zF} \ln \frac{p'_x}{p''_x}$$

(R = constante des gaz parfaits ; F = constante de Faraday ; z = valence de l'espèce x).

Tableau III
Énergie de formation de défauts pour quelques matériaux

Matériaux	Défauts	Énergie (en eV)
AgBr	$Ag_i + \square_{Ag}$	1,1
BeO	$\square_{Be} + \square_O$	6
MgO	$\square_{Mg} + \square_O$	6
NaCl	$\square_{Na} + \square_O$	2,3
LiF	$\square_{Li} + \square_F$	2,6
CaO	$\square_{Ca} + \square_O$	6
CaF_2	$\square_F + \square_{F_i}$	2,5
	$\square_{Ca} + \square_{Ca_i}$	7
	$\square_{Ca} + 2\,\square_F$	5,5
UO_2	$\square_O + O_i$	3
	$\square_U + U_i$	9,5
	$\square + 2\,\square_O$	6,4

L'indice i indique un atome en position interstitielle.
$\square_O$ correspond à une absence d'atome d'oxygène sur un site normal d'oxygène.

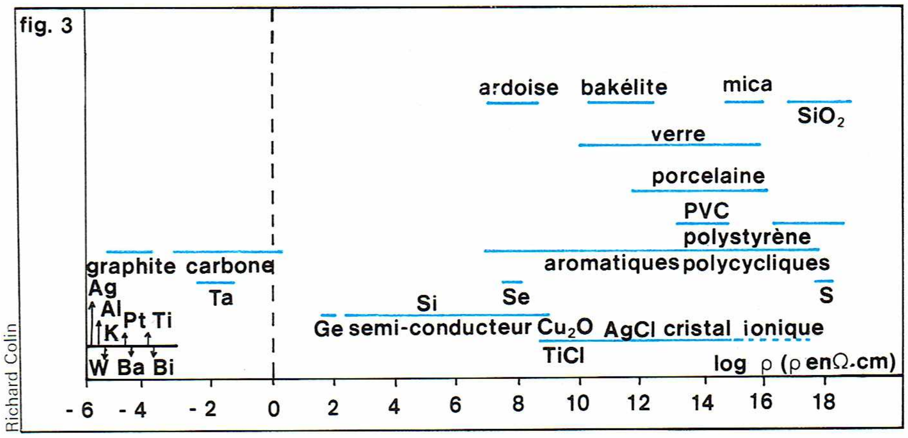

Richard Colin

▲ *En haut, tableau III : exemples d'énergies de formation de défauts. Ci-dessus, figure 3 : comparaison de la résistivité électrique de différents matériaux.*

Dans le cas des oxydes, les potentiels sont définis par la pression d'oxygène située de part et d'autre du matériau. Jusqu'à 1 200 °C, on utilise des équilibres du type $Cu-Cu_2O$, Ni-NiO, Fe-FeO. A température plus élevée, on a recours à des équilibres de gaz $CO-CO_2$, H_2-H_2O.

La représentation, dans le plan complexe, de l'admittance d'une cellule à deux électrodes identiques du type : (Me) p_x / MX/p_x (Me) comporte deux arcs de cercle caractéristiques de l'électrolyte. L'étude de l'évolution de ces cercles permet de décrire simplement le comportement de l'électrolyte solide étudié à l'aide de circuits électriques équivalents.

Le *tableau* IV indique le nombre de transport des anions (t^-) et des cations (t^+), et par trous ou électrons $t_{e,h}$ dans divers matériaux.

Mobilité électronique - Effet Hall

Si une plaque mince parcourue par un courant J est placée dans un champ magnétique H qui lui est normal, il apparaît à travers l'échantillon une différence de potentiel E. R_H la constante de Hall est définie par : $R_H = 1/Nec$ (N, la concentration des porteurs ; c, la vitesse de la lumière).

Pour les métaux ou les semi-conducteurs classiques, on obtient : $R_H\sigma = -\mu/c$, et on peut calculer la mobilité

Tableau IV
Nombre de transport par les anions (t^-) et les cations (t^+) et par les trous ou les électrons $t_{e,h}$ dans divers matériaux

Matériaux	Température (en °C)	t^+	t^-	$t_{e,h}$
NaCl	400	1,00	0,00	
	600	0,95	0,00	
KCl	600	0,88	0,12	
AgCl	350	1,00	0,00	
BaF_2	500	0,00	1,00	
CuCl	20			1,00
ZrO_2-7 % CaO	1 500	0,00	1,00	
ZrO_2-18 % CeO_2	1 500		0,52	0,48
ZrO_2-70 % CeO_2-2 % Ta_2O_5	1 500		0,05	0,95

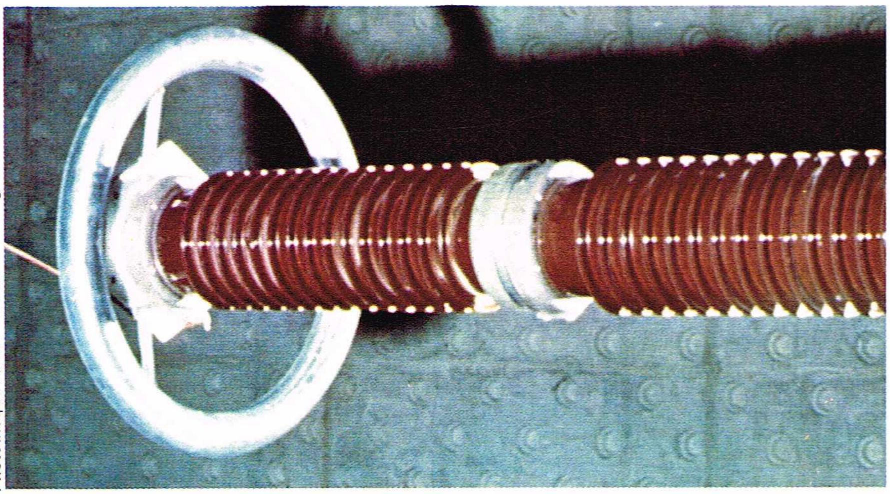

Photothèque E.D.F. - Sodel - M. Brignaud

▲ *En haut, tableau IV. Ci-dessus, un isolant électrique (Laboratoire de mesures des Renardières, E. D. F.).*

électronique. Dans le cas d'un matériau complexe, la tension mesurée a un signe caractéristique du porteur de charges : par convention, la constante de Hall est positive pour les porteurs négatifs.

Pouvoir thermo-électrique - Effet Seebeck

Le signe de l'effet Seebeck (noté S_{AB}) est la mesure de la différence de potentiel V_{AB} qui apparaît sur un matériau placé dans un gradient de température entre les points A et B. Le traitement théorique de cet effet permet d'exprimer S_{AB} dans le cas des semi-conducteurs classiques en fonction du niveau de Fermi, de la largeur de la bande interdite et des mobilités des porteurs de charge. Pour les matériaux réfractaires, la signification de S_{AB} est souvent complexe, car on a un conducteur mixte où les porteurs électroniques et ioniques interfèrent dans la mesure de S_{AB}. La contribution de chacun des porteurs à l'effet Seebeck n'est pas symétrique. Conformément à l'approche théorique, le signe de l'effet Seebeck, mesuré en fonction de la pression d'oxygène, s'inverse au changement de conduction. Une jonction chaude électriquement positive indique un porteur de charges négatif et une jonction chaude négative indique un porteur positif.

Émission thermo-électronique

La mesure de la densité de courant J_S qui apparaît entre une anode et une cathode portée à haute température est : $J_S = A \exp(-\Phi/kT)$ [A, constante qui varie peu avec la température ; Φ, travail de sortie des électrons].

Dans le cas d'un semi-conducteur, $J_S = \beta n \exp(-\chi/kT)$ [n, concentration des électrons dans la bande de conduction ; χ affinité électronique reliée à Φ par l'expression : $\Phi = \chi + E - E_g$; E est l'énergie nécessaire aux électrons pour atteindre la bande de conduction].

La mesure de J_S donne donc une information sur les électrons présents dans le matériau et leur origine.

Effets non linéaires en champ fort

Il en existe deux types : les effets réversibles (effet tunnel) et les effets d'hystérésis (effet mémoire). A basse température, l'émission thermo-ionique devient négligeable, mais on peut observer une émission froide (effet tunnel), sous l'action d'un champ électrique suffisant, en particulier dans des configurations de pointe qui concentrent le champ pour un voltage donné ou dans des jonctions de deux conducteurs métalliques ou semi-conducteurs séparés par une région isolante très mince (< 100 Å).

En présence d'un champ électrique suffisant, il arrive que les porteurs d'un semi-conducteur s'accélèrent plus vite qu'ils ne peuvent céder d'énergie aux ions du réseau par chocs ; ils peuvent alors prendre une « température » différente et supérieure à celle des ions du réseau. Ce phénomène est susceptible de multiplier le nombre de porteurs en excitant les électrons ou trous positifs liés à des défauts, ou même en excitant des électrons à travers la bande interdite. Dans certains semi-conducteurs amorphes, des phénomènes de ce genre semblent produire un état métallique, par réarrangement de l'ordre local et des liaisons.

Supraconductivité

C'est en 1911 que l'on a montré que la résistance d'un échantillon de mercure s'annule à — 270 °C. A présent, on connaît un grand nombre de métaux et d'alliages dont la résistance chute en dessous d'une certaine température critique T_C (< — 250 °C). Cette température dépend également du champ magnétique existant. Cette propriété ne sera pas développée, car elle intéresse essentiellement les métaux et les alliages. Il s'agit là d'un domaine de la physique très développé dans ces dernières années : l'intérêt porte sur la recherche de matériaux à température critique élevée. Le transport du courant, la réalisation de champs magnétiques intenses et la réduction des dimensions des moteurs-générateurs sont des applications potentielles.

Isolants et propriétés diélectriques

Les isolants possèdent très peu de porteurs de charges. Ils sont caractérisés par des propriétés diélectriques. Sous l'action d'un champ extérieur, ces porteurs se polarisent. Le déphasage entre le courant et la tension se mesure par l'angle de perte δ, tel que $\mathrm{tg}\,\delta = \varepsilon''/\varepsilon'$ (ε', valeur réelle de la constante diélectrique ; ε'', sa composante imaginaire).

L'énergie dissipée dans un diélectrique soumis à un champ alternatif est proportionnelle à $\mathrm{tg}\,\delta$. En général, pour les condensateurs, on recherche des diélectriques à faible angle de perte.

▼ *Figure 4 : méthodes de mesure de la conductivité électrique.*

fig. 4

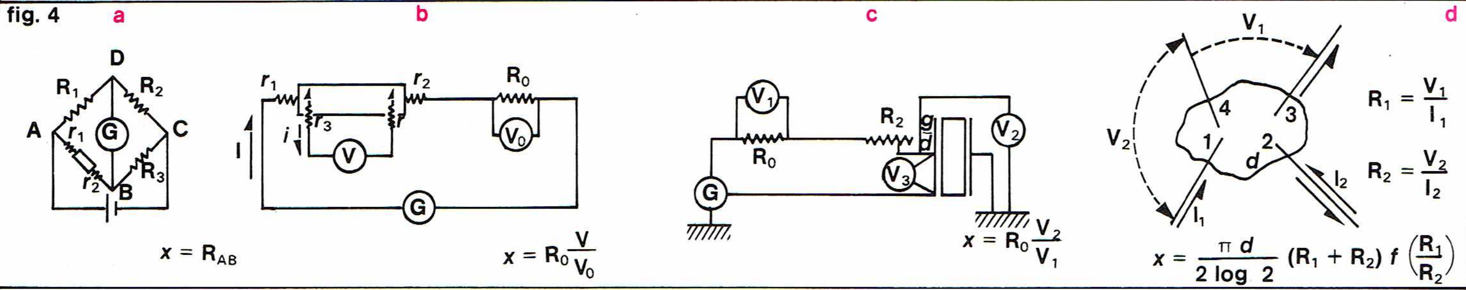

Richard Colin

Technologie de la mesure des propriétés électriques

De la *figure* 3, il résulte que la résistivité électrique des matériaux s'étend sur 24 ordres de grandeur : de 10^{-6} ohm · cm (métaux) à 10^{18} ohms · cm (verres de silice). Il ne peut pas exister de méthode de mesure unique pour toute cette gamme. Si la mesure sur les matériaux à faible résistivité (< 1 ohm · cm) est relativement simple par une méthode à pont de Wheatstone, il n'en est pas de même pour des matériaux plus isolants, voire très isolants comme les céramiques et les verres. Après un bref rappel des montages possibles, les résultats seront discutés, et les influences de divers facteurs seront examinées.

Montage. Pour mesurer la conductivité totale, il existe deux techniques (*fig.* 4) : l'une utilise deux électrodes (*fig.* 4 a), l'autre quatre (*fig.* 4 b, c, d). La méthode à deux points, qui est la plus simple, consiste à mettre la résistance x dans les branches d'un pont de Wheatstone ou d'un pont double de Kelvin. Dans ce cas, on mesure la résistance R_{AB} entre les points A et B, et elle vaut : $R_{AB} = x + r_1 + r_2$. On atteint x par la mesure de R_{AB} si r_1 et r_2 sont très faibles : cela est réalisé en appliquant une pression sur l'échantillon. Cette méthode est rapide, mais souvent imprécise.

La méthode à quatre électrodes compare la résistance à mesurer x avec une résistance connue R_0, en évaluant les chutes de tension V et V_0 aux bornes de celle-ci. On mesure $V = x\,(I - i) + (r_3 + r_4)\,i$ et $V_0 = R_0 I$. On obtient : $x = R_0\,(V/V_0)$, si l'intensité i qui passe dans le voltmètre de mesure est faible devant le courant principal. Cette condition est remplie si l'impédance d'entrée du voltmètre est très grande devant la résistance de l'échantillon. A haute température, l'émission thermo-ionique du matériau lui-même peut créer des résistances en parallèle sur l'échantillon, et le montage avec un anneau de garde (*fig.* 4 c) est le seul valable aux températures élevées. L'anneau de garde g, porté au même potentiel que l'électrode protégée d, élimine tous les phénomènes de surface et permet d'obtenir la résistance x de la partie centrale.

Pour les petits échantillons (quelques mm) de forme quelconque mais d'épaisseur définie, par exemple pour des monocristaux, la méthode de Van der Pauw donne de bons résultats. Elle consiste à évaluer la résistivité d'un matériau à partir de deux mesures de résistances. L'échantillon doit avoir quatre contacts électriques (*fig.* 4 d) petits par rapport à ses dimensions et situés le plus près possible de son bord. Quand un courant I_1 passe entre les électrodes 1 et 2, la tension est V_1 entre les électrodes 3 et 4. Le rapport $\frac{V_1}{I_1}$ donne R_1. On détermine R_2 en faisant passer le courant entre les électrodes 2 et 3 et en prenant la tension entre les électrodes 1 et 4. Il existe une relation qui permet d'atteindre la résistivité ρ du matériau quand l'épaisseur est connue :

$$\rho = \frac{\pi e}{2 \log 2}\,(R_1 + R_2)\, f\left(\frac{R_1}{R_2}\right)$$

$f\left(\frac{R_1}{R_2}\right)$ est une fonction qui a été calculée par Van der Pauw et présentée sous forme de graphique.

Tableau V
Résistivité de la magnésie MgO

Grosseur des grains (en mm)	Résistivité (en Ω · cm) 1 250 °C	Résistivité (en Ω · cm) 1 550 °C
0,00-0,08	3 100	88
0,48-0,60	36 900	91
0,75-0,90	39 600	97
1,20	43 400	117

▲ *Tableau V : résistivité de la magnésie MgO.*

Facteurs influençant la mesure. Les résultats donnés dans la littérature montrent une divergence de plusieurs ordres de grandeur entre les valeurs publiées par divers auteurs, surtout dans les cas des isolants, comme l'atteste la *figure* 5 sur la résistivité électrique de l'alumine : à 1 000 °C, la résistivité de l'alumine est comprise entre 10^6 et 10^{10} ohms · cm. Les causes d'erreurs dans les mesures sont telles que les valeurs mesurées contiennent la résistivité du matériau, mais aussi des résistances parasites, qui peuvent avoir essentiellement quatre origines : la structure du matériau ; les résistances de contact ; l'émission thermo-ionique ; l'atmosphère ambiante (d'un four par exemple).

Structure du matériau

La pureté des composés influe directement sur la concentration des porteurs de charge, et les variations qui apparaissent dans les mesures ont un sens physique. Par contre, lorsque le matériau est à l'état fritté (céramique), il existe, dans la masse, des joints de grains et des pores, et la résistivité du matériau dépend de son passé thermique qui a fixé la densité, la taille des grains, les contacts entre grains et les pores ; tous ces facteurs jouent des rôles analogues à des défauts. Plus la surface des grains est grande, moins le composé est résistant, comme le montre l'exemple du *tableau* V.

La pression de mise en forme et la température de frittage sont importantes pour déterminer la porosité et les contacts intergranulaires. Des études sur l'alumine montrent que les résistances croissent avec la température de frittage, c'est-à-dire avec une diminution de la porosité. A 1 200 °C, une alumine frittée a une résistivité de 10^6 ohms · cm pour un matériau fritté à 1 800 °C et de 10^5 ohms · cm si le matériau a été fritté à 1 500 °C.

Dans le cas de mélange de matériaux réfractaires, on est en présence d'un système à plusieurs phases, les unes conductrices, les autres isolantes, et la conductivité résultante dépend de la proportion de chaque phase et de leur structure (grains, fibres).

Résistances de contacts

Les résistances de contacts interviennent d'autant plus que le matériau à tester est plus isolant. Le contact métal-isolant conduit, dans le cas d'un échantillon électronique, au passage des électrons d'un niveau d'énergie faible (métal) au niveau d'énergie élevé du matériau. Dans le cas d'une conduction ionique, les ions de l'isolant s'accumulent au niveau de l'électrode et freinent le passage du courant. Ces résistances de contact peuvent être si élevées qu'elles faussent la mesure des résistivités et conduisent souvent à des distorsions dans les caractéristiques courant-voltage.

fig. 5

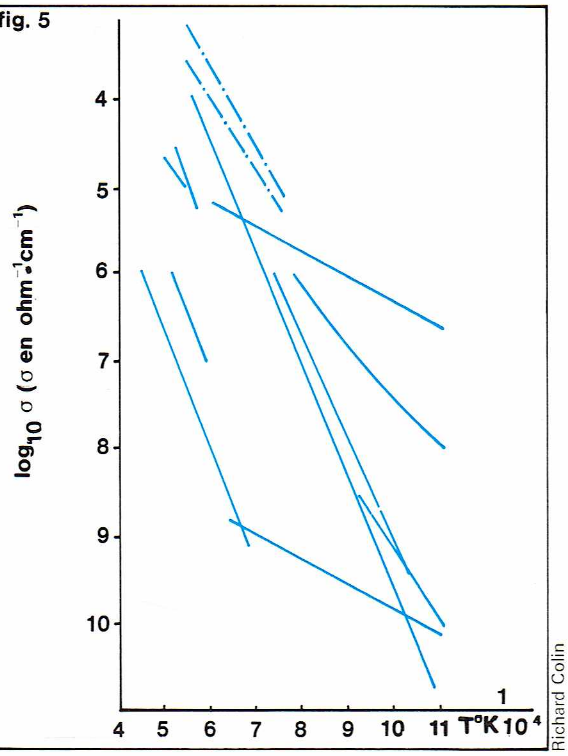

◀ *Figure 5 : résultats des valeurs publiées sur la conductivité électrique de l'alumine.*

fig. 6

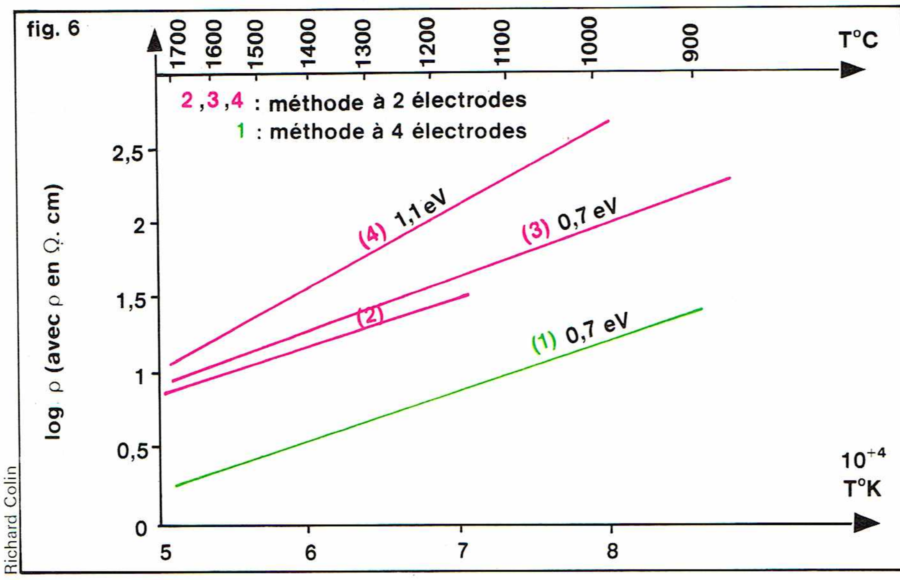

Richard Colin

Lab. de physique des matériaux de Bellevue du Centre national de la recherche scientifique

▲ *Ci-dessus, figure 6 : influence des résistances de contact sur la résistivité électrique d'un échantillon de ZrO_2 - 10 mol % Y_2O_3. A droite, microradiographie d'un réfractaire alumine-silice-zircone. Tension 12 kV, anode Or, g 350.*

▼ *Figure 7 : progrès enregistrés depuis 1960 dans le domaine des performances de céramiques ; exemple de la zircone.*

La *figure* 6 compare les résultats obtenus par les deux principales méthodes de mesure, après démontage et remontage de l'échantillon et sans précaution particulière. La méthode des quatre électrodes apporte des résultats reproductibles, tandis que la méthode à deux électrodes donne des résultats peu cohérents.

Émission thermo-ionique

Dans un four, à haute température, l'émission thermo-ionique des parois devient suffisamment importante pour créer des résistances parasites. Il a été mis en évidence qu'entre un fil de platine situé au centre d'un four et la paroi du four, il existe une résistance de 500 000 ohms à 1 400 °C, qui n'est plus que de 8 000 ohms à 1 600 °C. Si on applique une tension, cette résistance de fuite augmente.

Les électrons émis par les parois du four ionisent l'atmosphère de celui-ci et créent une résistance parasite R_f en parallèle sur l'échantillon et de valeur comparable, surtout dans le cas d'un isolant, à la résistance x à mesurer. On évalue alors une résistance apparente R_α telle que :

$$\frac{1}{R_\alpha} = \frac{1}{x} + \frac{1}{R_f}$$

Dans le cas de la magnésie, à 1 600 °C, la résistance de fuite R_f est égale à la résistance du matériau, et, à 1 700 °C, elle est trois fois plus faible. Pour atteindre x, il faut, soit opérer sous tension élevée ($\sim$ 200 V) afin d'accroître la résistance de fuite, soit mesurer séparément la résistance apparente R_α et R_f et calculer x avec l'expression ci-dessus. Dans le cas de composés assez conducteurs tels que CeO_2 ou les nitrures, carbures, borures, les résistances mesurées ne sont pas affectées par les résistances de fuite R_f, mais par l'émission propre du matériau qui conduit à une charge d'espace qui enveloppe le solide et qui est équivalente à une résistance de fuite de surface placée en parallèle à une résistance en volume : l'emploi d'anneau de garde (*fig.* 4 c) élimine cet effet.

fig. 7

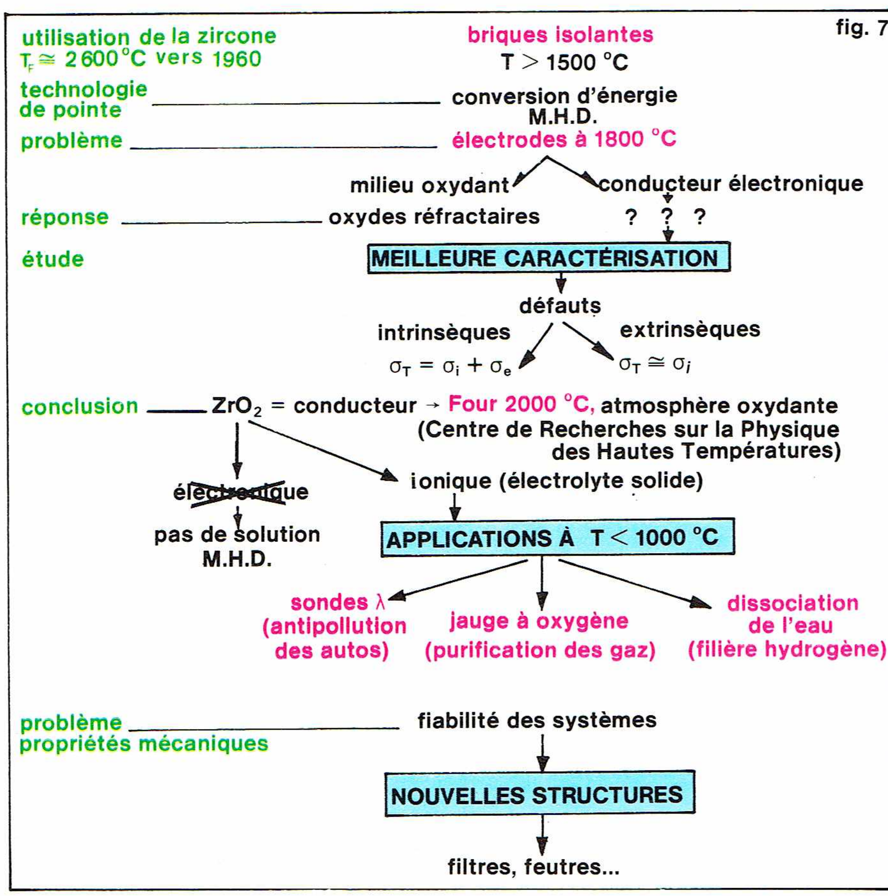

Richard Colin

Les céramiques et les verres - Applications

Les céramiques et les verres occupent une place tout à fait privilégiée parmi les matériaux, et cela tient à la très grande diversité de leur composition, qui permet de modifier leurs propriétés.

Une *céramique* est un matériau polygranulaire obtenu par une succession d'opérations : mélange de produits qui sont souvent des oxydes, pressage, frittage (cuisson). La texture d'un polygrain de la céramique est faite de pores et de grains polycristallins. La structure est celle d'un solide qui présente un ordre à courte distance et un ordre à longue distance ; elle est identifiée par diffraction aux rayons X. Les propriétés d'une céramique sont liées à ses constituants et à sa texture. A température ordinaire, une céramique à base d'oxydes est un isolant électrique et thermique.

Un *verre* est un matériau intermédiaire entre le liquide et le solide. Il est obtenu par fusion d'un mélange de produits et refroidissement rapide pour éviter la cristallisation. La structure est plus voisine de celle du liquide que de celle du solide ; il n'existe qu'un ordre à courte distance, et l'examen aux rayons X ne permet pas de révéler les raies périodiques des composés initiaux.

En raison de leur complexité et de l'influence de leur passé thermique sur leurs propriétés, l'étude fondamentale de ces matériaux, céramiques et verres, ne suscite pas d'enthousiasme. Toutefois, les performances de plus en plus élevées exigées des matériaux ont conduit les scientifiques à examiner ces matériaux complexes, susceptibles

de pallier la défaillance des métaux dans certains domaines : haute température en atmosphère oxydante ou conduction ionique. C'est ainsi que les progrès réalisés dans le domaine des céramiques et des verres trouvent tous leur origine dans un problème posé par certaines technologies de pointe. Dans cet ordre d'idée, les recherches sur la zircone sont exemplaires : elles illustrent bien l'évolution de l'étude des céramiques et des verres pendant ces dix dernières années. La *figure* 7 résume les résultats obtenus depuis 1960. A cette époque, ce matériau est une brique isolante qui tapisse les fours à haute température. La réalisation d'une veine pour la conversion d'énergie par voie magnétohydrodynamique (M. H. D.) exige une électrode à conduction électronique qui résiste à 2 000 °C en atmosphère oxydante. L'enjeu est tel (augmenter de 20 % le rendement des centrales thermiques), et le nombre de matériaux possibles si faible, qu'une grande concentration de moyens s'est faite sur la zircone. Grâce à une meilleure caractérisation, on découvre qu'elle est d'une part un excellent conducteur et d'autre part un conducteur ionique. Même si l'électrode M. H. D n'a pas été tout à fait réalisée, cette étude a eu pour retombées de nombreuses applications à haute et moyenne température : four en atmosphère oxydante pour l'espace et pour l'industrie, pile à combustible, capteurs pour l'antipollution des automobiles et l'économie d'énergie.

Ainsi, les céramiques et les verres ne sont plus seulement des matériaux supports : leurs propriétés trouvent des applications. Celles concernant la conduction électrique touchent la conversion de l'énergie, la réalisation des hautes températures et les applications électroniques.

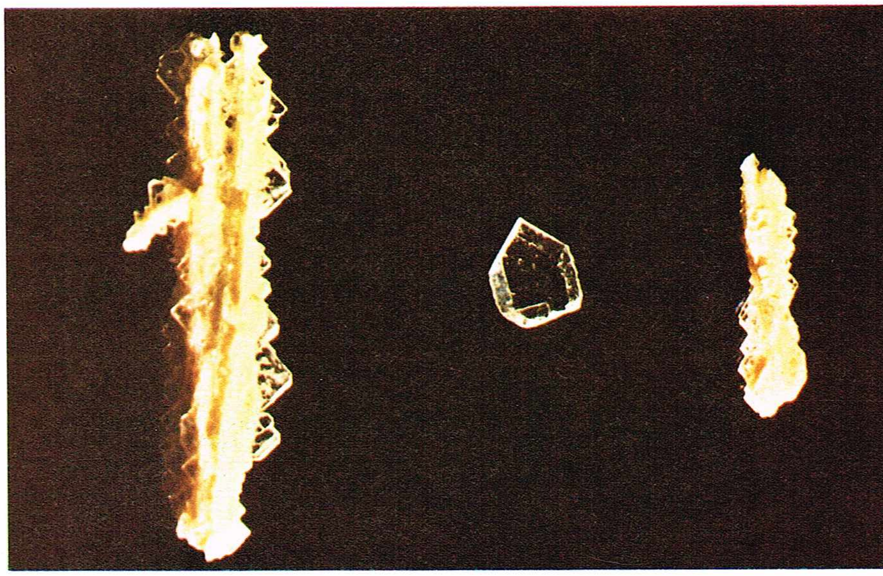

Centre de recherche sur la physique des hautes températures Orléans - Centre national de la recherche scientifique

▲ ***Quelques échantillons de zircone.***

Conversion de l'énergie

L'analyse de l'influence des impuretés et des défauts dans les matériaux permet de maîtriser le type de conduction, ionique ou électronique, qui les caractérise. A chaque conduction correspondent des applications bien spécifiques.

Électrolyte solide ou superconducteur ionique

Il existe différentes classes de conducteurs ioniques qui correspondent à divers processus de transport des ions.

Classification

● *Conducteurs par défauts dans le réseau* (AgCl, AgI, LiI, CaF_2, ZrO_2). Le mode de fonctionnement de ces matériaux peut être expliqué par la théorie classique de la migration des ions dans un cristal ionique. La concentration en défauts et leur mobilité déterminent la conductivité électrique. On distingue, dans ces conducteurs, une conduction intrinsèque liée à la concentration des défauts créés thermiquement et une conduction extrinsèque liée à la concentration des impuretés qui induisent l'apparition d'un défaut bien défini ; Mg^{2+} dans l'iodure de lithium crée des lacunes de Li^+ qui l'emportent sur les lacunes de I^- et provoquent une conductivité par Li^+. Dans cette catégorie se trouve la zircone, stabilisée dans sa structure cubique, stable à haute température, par addition d'ions portant soit deux charges positives (CaO), soit trois charges positives (Y_2O_3). Ces oxydes introduisent des lacunes d'oxygène en grand nombre qui permettent le transport des ions oxygène. Pour stabiliser la zircone, il faut environ 10 à 15 moles % de dopant. Toutefois, la conductivité n'est importante qu'au-dessus de 800 °C, et c'est l'inconvénient majeur de ce conducteur.

● *Conducteurs par désordre d'un des ions* (AgI, Ag_3SI, $RbAg_4I_5$). Une des espèces ioniques assure la cohérence du réseau ; c'est le cas de l'iodure d'argent dans lequel seuls les ions I^- sont ordonnés dans un réseau cubique centré. Les cations sont distribués au hasard sur un grand nombre de positions interstitielles. Ils sont comme une phase liquide dans un squelette solide d'anions. $RbAg_4I_5$ est, à ce jour, le composé qui présente la plus grande conductivité ionique (0,8 $\Omega^{-1} \cdot cm^{-1}$). Les cations sont dans un état virtuellement fondu, d'où l'expression « fusion interne ».

● *Conducteurs par échangeurs d'ions* (βAl_2O_3). Ce matériau a la formule empirique 8,5 Al_2O_3, Na_2O. Il a une structure hexagonale, et, dans la direction de l'axe C, la maille élémentaire contient deux blocs d'ions oxygène et aluminium dans une structure type spinelle. Les ions sodium sont mobiles dans le plan perpendiculaire à l'axe C qui sépare les deux blocs. L'alumine β ressemble à un échangeur d'ions. Les ions Na^+ peuvent être remplacés par les ions Ag^+, Tl^+, Rb^+, Li^+, Cs^+, K^+. Ce matériau est étudié pour la traction électrique au moyen d'une pile $Na/\beta Al_2O_3/S$. Les réactions sont les suivantes :

anode $2\,Na \rightarrow 2\,Na^+ + 2\,e^-$

cathode $2\,Na^+ + 2\,e^- + 3\,S \rightarrow Na_2S_3$

● *Conducteurs ioniques à structure bronze de tungstène*. Ces matériaux sont du type hollandite où les ions R^+ se déplacent dans les tunnels de la structure quadratique. Parmi les composés étudiés actuellement, citons

$$K_xMg_{\frac{x}{2}}Ti_{8-\frac{x}{2}}O_{16}$$

avec x compris entre 1,6 et 2. Dans ces structures, la conductivité électronique reste importante. Des composés tels que M_xTiS_2 ou M_xZrS_2 avec M alcalin sont actuellement prometteurs. La *figure* 8 montre la conductivité électrique de ces divers conducteurs ioniques.

Applications en voie de développement

Les tensions mesurées en circuit ouvert pour différentes piles sont :

$Ag/RbAg_4I_5/I_2$	0,56 V
$Li/HI/I_2$	2,8 V
$Na/Al_2O_3/Br_2$	3,6 V
H_2/ZrO_2 stabilisée/air	1,15 V

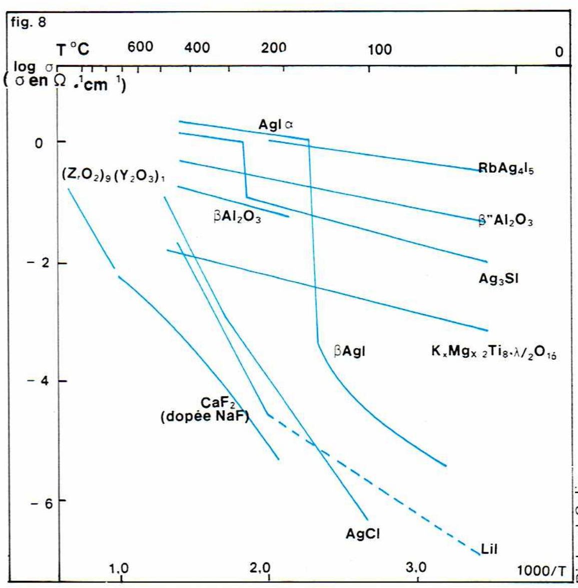

◀ ***Figure 8 : conductivité électrique des électrolytes solides.***

▶ A gauche, figure 9 : caractéristique des sources de puissance motrice pour un véhicule de 910 kg et une source d'énergie de 227 kg.
A droite, figure 11 : schéma d'une pile à combustible.

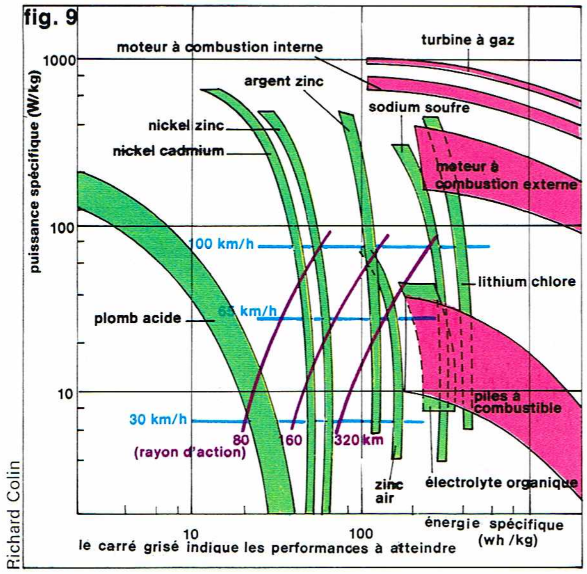

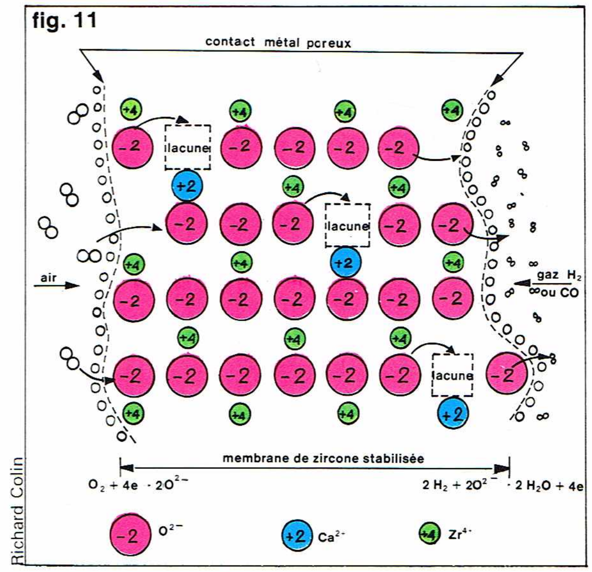

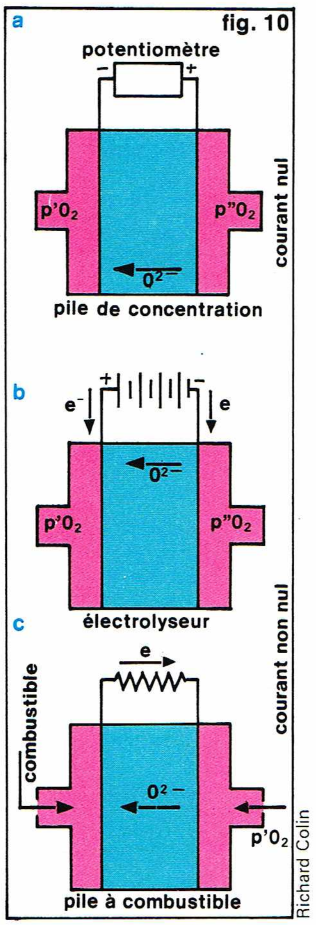

▲ Figure 10 : fonctionnement d'une pile à zircone stabilisée.

Cette tension n'est pas la seule caractéristique importante des générateurs électrochimiques lorsque l'on considère leurs applications, en particulier, à la traction électrique. Il convient de prendre en considération : la capacité massique exprimée en Wh/kg ; la puissance massique en W/kg ; la durée de vie (nombre de cycles charge-décharge) ; le prix de revient.

Il apparaît qu'une amélioration de la capacité massique par rapport aux batteries actuellement disponibles, sans sacrifier la puissance massique, est nécessaire pour qu'un véhicule électrique transportant des passagers devienne techniquement possible. Une voiture électrique ayant un rayon d'action de l'ordre de 300 km et des possibilités d'accélération compatibles avec une circulation comportant encore des voitures classiques nécessite une batterie ayant une capacité massique pratique minimale de l'ordre de 150 Wh/kg et une puissance spécifique pratique minimale de 80 W/kg. La longévité du système d'accumulateur envisagé doit correspondre à un minimum de deux ans d'utilisation du véhicule.

Le diagramme représenté *figure* 9 donne la comparaison entre les divers types d'accumulateurs actuellement en production ou à l'étude ; on constate que l'utilisation du couple sodium-soufre offre une possibilité de satisfaire aux impératifs exposés ci-dessus. Les systèmes argent-zinc et zinc-air sont en cours de développement. La technique lithium-chlore paraît technologiquement très difficile, en particulier à cause des problèmes soulevés par l'utilisation du chlore gazeux et du lithium liquide à la température de 650 °C nécessaire pour le fonctionnement de l'accumulateur.

La zircone entièrement stabilisée peut constituer l'électrolyte solide d'un générateur électrochimique, mais elle peut également jouer le rôle de contrôleur d'oxygène, car sa conduction ionique est due au transport de l'oxygène. La cellule constitutive est : $Pt\,p'_{O_2}$/zircone stabilisée/$p''_{O_2}Pt$.

Il apparaît une force électromotrice : $E = \frac{RT}{4F} \ln \frac{p'_{O_2}}{p''_{O_2}}$

(F : constante de Faraday ; R : constante des gaz parfaits ; T : température absolue.)

Cette cellule peut fonctionner de trois façons différentes selon que le courant est nul ou non. A courant nul (*fig.* 10 a), elle sert à mesurer des pressions d'oxygène. En effet, si on connaît p' et non p'', la mesure de E de la cellule permet d'obtenir p''. Ces jauges sont très utiles pour l'analyse de l'oxygène contenu dans un bain métallique (sidérurgie). Il s'agit d'un tube de zircone stabilisée muni à l'intérieur d'une plaque de platine, servant à la prise de potentiel.

Si on impose une tension E à la pile (*fig.* 10 b), celle-ci fonctionne en pompe à oxygène et permet de réaliser des modifications de compositions. Dans ce cas, $E_{mesuré}$ est différent de E_{eq} à l'équilibre, et il circule, dans le circuit ainsi formé, un courant I qui aura pour effet de modifier p' et p'' jusqu'à ce que les nouvelles pressions soient telles que $E_{mesuré} = E_{eq}$. A l'intérieur de la membrane, le courant est transporté par des ions oxyde obtenus par réduction électrochimique de l'oxygène à une électrode

(cathode) $\frac{1}{2} O_2 + 2\,e^- = O^{2-}$

et réoxydés en oxygène à l'autre électrode

(anode) $O^{2-} = \frac{1}{2} O_2 + 2\,e^-$

Si on mesure la quantité d'électricité nécessaire pour réaliser cette opération, on connaît la quantité d'oxygène qui a quitté la demi-cellule de gauche pour gagner la demi-cellule de droite. On est limité, pour la tension à imposer, par le potentiel de décomposition de la zircone.

Enfin, la pile peut fonctionner en générateur (*fig.* 10 c). Si la cellule débite dans une résistance de charge, il y a production d'un courant I jusqu'à ce que p' égale p'', à moins que les gaz ne soient renouvelés : on a alors une pile à combustible (*fig.* 11). On peut ainsi utiliser un mélange d'hydrogène et d'oxyde de carbone dans un des compartiments et de l'air dans l'autre. La production d'eau et de gaz carbonique libérerait une énergie récupérable sous forme d'énergie électrique. Des essais sur des petits tubes en zircone stabilisée à l'oxyde d'yttrium, de diamètre 1 cm, ont conduit à une production de 300 watts par kilogramme de pile. La conversion atteint 1 $A \cdot cm^{-2}$ sous 0,5 V soit 0,5 watt · cm^{-2}. L'intérêt de ces piles, à haute température (~ 1 000 °C), réside dans la possibilité de traiter directement les hydrocarbures ou le gaz naturel et l'élimination des métaux nobles comme électrode-catalyseur. Aux États-Unis, une centrale de 1 000 MW est à l'étude.

Conducteurs électroniques

Conversion magnétohydrodynamique (M. H. D.)

La magnétohydrodynamique est un procédé de production d'énergie qui consiste à déplacer un fluide conducteur mis en vitesse dans une tuyère et soumis à l'influence d'un champ magnétique : on recueille ainsi une tension qui peut débiter dans une charge.

La première expérience de ce type de conversion fut réalisée par Faraday au XIXe siècle. En contemplant la Tamise (hydro = eau), à Londres, il observa qu'elle était ionisée par la pollution et possédait une certaine vitesse (dynamique). Sa direction était perpendiculaire au champ magnétique terrestre (magnéto). Il calcula la force électromotrice qu'il pouvait obtenir et vérifia ce résultat expérimentalement. Actuellement, deux types de conversions sont étudiés : l'un, dit à cycle ouvert, utilise comme fluide les gaz de combustion de produits fossiles, gaz conducteurs vers 2 000 °C, auxquels est ajouté du potassium pour accroître l'ionisation ; l'autre, dit à cycle fermé, emploie une circulation de gaz nobles plus facilement ionisables, donc à moins haute température.

La tuyère à cycle ouvert est prévue pour constituer un étage de conversion en amont d'une centrale thermique. En 1959, l'A. V. C. O. annonçait la possibilité de faire passer le rendement d'une telle centrale de 40 % au voisinage de 60 %. La *figure* 12 montre le principe de fonctionnement, et la *figure* 13 le schéma d'une centrale M. H. D. en circuit ouvert, comprenant un étage M. H. D. (1) suivi d'un étage turbine à vapeur.

Les difficultés de mises en œuvre reposent surtout sur un problème de matériaux et sur leur fiabilité. Il s'agit d'élaborer des électrodes réfractaires à conduction électronique au voisinage de 2 000 °C et de séparer les deux pôles électriques par un isolant électrique à cette même température. La présence d'une pression d'oxygène, non négligeable, est une donnée importante pour le choix des matériaux. Ceux-ci doivent avoir :

— un haut point de fusion ($T > 2\,400$ °C) et une faible tension de vapeur ;

— une forte résistance à l'abrasion due au jet de plasma ;

— une réactivité chimique faible au regard de l'ensemencement (potassium) ;

— une grande résistance à l'oxydation ;

— une bonne tenue mécanique face au choc thermique.

De plus, pour les électrodes, on doit avoir une conductivité de type électronique et une émission thermo-électronique élevée. Pour les murs isolants, on cherche un matériau à faible conductivité électrique : 10 à $10^3\,\Omega \cdot$ cm à 2 000 °C.

Les solutions proposées pour les électrodes sont des solutions intermétalliques telles que le borure d'hafnium ou de zirconium HfB_2 ou ZrB_2, des zircones stabilisées à l'oxyde de cérium, des composés définis du type $LaCrO_3$ ou $FeAl_2O_3$-Fe_3O_4.

Dans les meilleurs cas, la tenue des tuyères n'a pas excédé quelques centaines d'heures, alors que la fiabilité d'une telle conversion exige un fonctionnement continu de 10 000 h.

Pour les parois isolantes, il a été montré que tout matériau, même très isolant, a une conductivité électrique qui croît avec la température, à cause de la formation de défauts ionisés. On peut s'attendre à ne plus trouver d'isolants au-dessus d'une certaine température. Celle-ci est de l'ordre de 1 800 °C pour les meilleurs isolants (la magnésie).

Du fait que la conductivité électrique dépend de la température, celle-ci ne doit pas dépasser 1 500 °C pour les parois isolantes. Dans ces conditions, des matériaux comme la magnésie (MgO), la thorine, la glucine (BeO) et les composés $MgAl_2O_4$, $SrZrO_3$ ont donné satisfaction.

En France, après un effort important de 1960 à 1970, ce type de conversion ne fait plus l'objet de recherches. Il est, en revanche, extrêmement étudié en Union soviétique, où une centrale de 25 MW est opérationnelle, tandis qu'une autre, de 580 MW, est à l'étude. Au Japon, le Mark 5 a délivré une puissance de 482 MW pendant une heure. Aux États-Unis, les études sont en plein développement afin d'aboutir en 1981 à la mise en place d'une centrale de 100 MW. Une collaboration s'est instaurée entre l'U. R. S. S. et les U. S. A. Cette conversion est primordiale pour les pays qui possèdent du charbon et qui en recherchent la valorisation.

Conversion thermo-électrique et thermo-ionique

L'élément fondamental de la conversion thermo-électrique est un couple de deux semi-conducteurs de types respectifs *n* et *p*, aux bornes desquels une différence de température ΔT cause l'apparition d'une différence de potentiel $Q\Delta T$, Q désignant le pouvoir thermo-électrique. Cette tension donne naissance à un courant dans une résistance extérieure R_e, et la puissance électrique recueillie sera d'autant plus grande que la résistance R des semi-conducteurs sera plus faible. L'énergie primaire est essentiellement constituée par un flux de chaleur $K\Delta T$, où K désigne la conductance thermique du couple, et, en première approximation, le rendement est :

$$\eta = \frac{R_e Q^2 \Delta T^2}{(R + R_e)^2} \cdot \frac{1}{K\Delta T}$$

Si on choisit $R_e = R$, cela s'écrit :

$$\eta = \frac{Q^2}{KR} \cdot \Delta T = \frac{Q^2}{KR} \cdot T_c \frac{\Delta T}{T_c}$$

Le rendement est donc essentiellement limité par le rendement de Carnot et par les propriétés intrinsèques des matériaux, à qui on demande d'avoir le facteur de mérite $Z = Q^2/K\rho$ le plus élevé possible, à une température T_c la plus élevée possible (K = conductivité thermique, ρ = résistivité). Le rendement de ce type de conversion est assez faible avec les semi-conducteurs classiques (< 3 %). Avec des composés tels que AlB_{12}, ou SiB_{14} dont la conduction se fait par sauts, il est possible d'espérer des rendements qui atteindraient 20 %. Des études sont en cours. Les applications de ces générateurs autonomes d'électricité sont les balises marines, le pompage de l'eau, l'éclairage familial, les appareils de contrôle le long des pipe-lines ; une application importante est la thermopile solaire. C'est le Soleil qui créerait le gradient thermique nécessaire à la conversion.

Dans le procédé de conversion thermo-ionique, la source chaude est solidaire d'une cathode à température θ élevée, de l'ordre de 1 200 à 2 000 °C. Cette cathode émet des électrons, qui sont captés par une anode, jouant le rôle de source froide à 1 100 °C. Une différence de potentiel, de l'ordre du volt, apparaît entre ces deux élec-

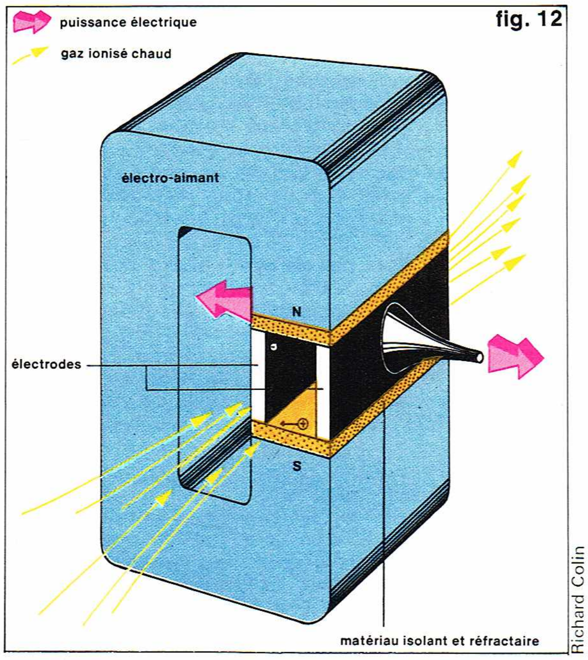

Richard Colin

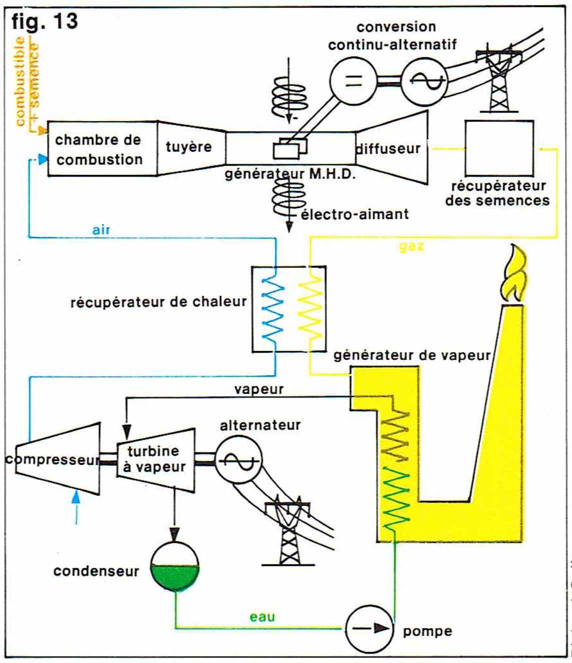

Richard Colin

◀ A gauche, figure 12 : principe de la conversion M. H. D. A droite, figure 13 : schéma d'une centrale M. H. D. en circuit ouvert.

▶ *Figure 14 : températures limites des éléments chauffants des fours en fonction de leur atmosphère.*

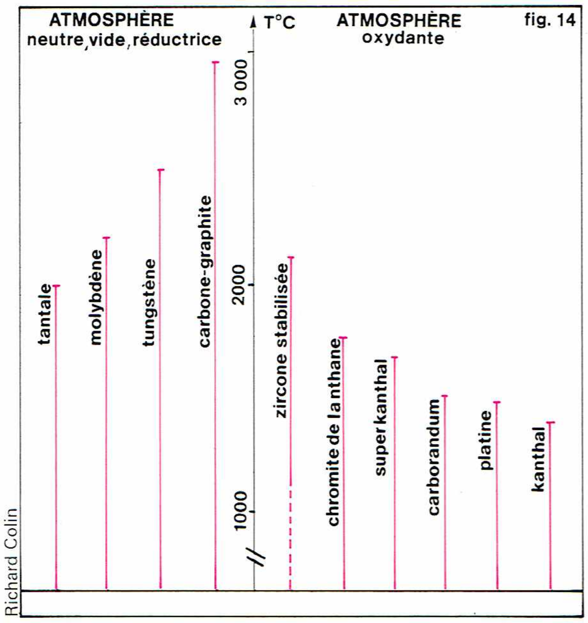

trodes, et un courant peut circuler dans une charge extérieure. Entre les deux électrodes, de la vapeur de césium favorise l'émission électronique en cassant la charge d'espace. La source de chaleur peut être quelconque, mais l'idéal, pour donner à ce générateur une autonomie complète, est de lui associer un réacteur nucléaire. On obtient ainsi une machine qui ne contient aucune pièce tournante et ne nécessite aucune opération de maintenance.

Le matériau émissif est un métal réfractaire, tantale ou tungstène, recouvert d'oxydes alcalino-terreux. Bien que ce type de conversion puisse donner lieu à des rendements de l'ordre de 25 %, la durée de vie des électrodes ne le rend pas fiable actuellement.

Réalisation de hautes températures : éléments chauffants

Les fours électriques permettant des études en milieu oxydant sont assez différents de ceux travaillant sous vide, en atmosphère inerte ou réductrice. Les éléments chauffants ne sont plus métalliques : le dernier métal résistant à l'oxydation est le platine, et il est très onéreux. La *figure* 14 donne la température limite et l'atmosphère de travail des différents éléments chauffants. Il est certain que ce sont les métaux qui se façonnent le plus facilement, et c'est faute d'en avoir qui résistent à l'oxydation à haute température que l'emploi de certains semi-conducteurs ou de composés intermétalliques s'est révélé utile. C'est le cas des fours à baguette de carborandum, moins onéreuse que le platine, de superkanthal et de chromite de lanthane, qui permettent, d'une part, d'accéder au domaine 1 500 °C-1 800 °C en atmosphère oxydante, et, d'autre part, de concevoir des fours de grand volume comparativement moins chers que les fours à résistance de platine rhodié. Enfin, les fours à résistance d'oxydes réfractaires permettent d'agrandir le domaine de température accessible en atmosphère oxydante et d'atteindre 2 500 °C.

Le *tableau* VI donne les caractéristiques des éléments en céramiques permettant la réalisation de hautes températures en atmosphère oxydante.

Les réalisations technologiques des divers fours possibles seront données dans le chapitre *Technologie des fours.*

▼ *Tableau VI : caractéristiques des éléments en céramiques en atmosphère oxydante.*

Tableau VI

Résistivité des éléments céramiques en atmosphère oxydante

Composition	Forme	Résistivité (en Ω · cm) 20 °C	800 °C	1 200 °C	1 700 °C	Température maximale en °C	Atmosphère
Carborandum C Si	Baguettes, tubes	3	1	1,4		1 550	Oxydante, réductrice ou neutre
Superkanthal Mo Si_2	Baguettes	$29 \cdot 10^{-6}$	$200 \cdot 10^{-6}$	$300 \cdot 10^{-6}$		1 750	Oxydante réductrice ou neutre
Chromite de lanthane $LaCrO_3$	Baguettes, tubes	10^3		10	10^{-1}	1 800	
Zircone stabilisée ZrO_2 - 4 % CaO ZrO_2 - 6 % Y_2O_3	Baguettes, tubes	$\simeq 10^{13}$	10^3	10	1	2 500	Oxydante, faiblement réductrice ou neutre

Applications à l'électricité et à l'électronique

L'électronique poursuit son essor impressionnant avec l'accélération bien connue due à la guerre chaude, puis à la guerre froide : ses exigences concernent les performances et la fiabilité des systèmes.

Les céramiques

Isolants-condensateurs

La propriété isolante (10^8 à 10^{18} Ω · cm) des céramiques est un critère important pour leurs applications.

En fréquence industrielle, et aussi en tension continue, les isolants doivent réunir les caractéristiques suivantes : résistance mécanique ; tenue à la perforation diélectrique ; faible facteur de perte.

Il existe des céramiques à très haute constante diélectrique, jusqu'à 20 000. Elles sont utilisées pour les condensateurs de filtrage et de découplage, avec plusieurs centaines de « perovskites », dont l'élément le plus représentatif est le titanate de baryum et ses solutions solides avec des zirconates, stannates, cériates alcalino-terreux.

Les vitrocéramiques sont, dans ce domaine, appelées à un avenir certain, en raison même des multiples variantes de composition qu'elles autorisent.

Semi-conducteurs thermistances

Contrairement aux céramiques précédentes pour lesquelles un excellent isolement électrique est nécessaire, celles-ci sont conductrices de l'électricité. Leur composition est en effet à base d'oxydes instables des métaux à valence variable, tels le fer, le manganèse, le cobalt, le cuivre et le nickel. Ces céramiques sont frittées dans des conditions d'atmosphères et de vitesses de refroidissement telles que l'on crée, dans les monocristaux constitutifs, de nombreuses lacunes d'oxygène. Il existe de ce fait, à froid, un déséquilibre des valences électriques qui ne peut être comblé que par des migrations d'électrons provenant des cations voisins des lacunes. Ces électrons, relativement mobiles, sont donc des porteurs de type *n*. L'application d'un champ électrique provoque leur migration orientée, c'est-à-dire qu'un courant électrique s'établit, répondant assez grossièrement à la loi d'Ohm, à une température donnée. Toutefois, comme on a affaire à un semi-conducteur, la résistivité ρ est une fonction exponentielle en 1/T, de la forme $\text{Log}\,\rho = A + B/T + C\,\text{Log}\,T$. C, étant petit, est parfois négligé. Le coefficient B est fonction de la composition en oxyde semi-conducteur et en oxyde stabilisant tel que l'alumine. Ses valeurs varient de 3 000 à 5 000. Les oxydes utilisés sont :

TiO_2, Ta_2O_5, V_2O_5, WO_3 (type *n*)

NiO, CuO, V_2O_3, Cu_2O (type *p*).

Ce sont les oxydes du dernier groupe qui ont un grand coefficient de température. L'intérêt technique de ces céramiques est d'utiliser la valeur importante de ce coefficient de température dans les problèmes de régulation par « thermistances » : régulation des températures (sondes thermométriques), des intensités (protection des filaments), des tensions, des puissances, etc.

La présentation des thermistances dépend de la quantité d'énergie reçue de l'extérieur et de la dissipation de chaleur, puisque la température du composé, donc son point de fonctionnement, dépend de cet équilibre.

Les verres

Les principales applications consistent à utiliser le verre comme enveloppe ou comme support d'éléments actifs. Toutefois, on peut utiliser les propriétés de l'état amorphe dans deux applications principales.

Verres semi-conducteurs

Les verres semi-conducteurs se divisent en verres d'oxyde et en chalcogénures. Ces derniers, appartenant aux systèmes Ge—Sb—Se et Si—Ge—As—Te, ont été l'objet d'études poussées, car ils montrent la présence d'effets de commutation et de mémoire. Les résistivités des divers verres de chalcogénures varient de 10^{10} à $10^4\ \Omega \cdot cm$ à 25 °C.

Deux types de dispositifs existent à ce jour :

• *Commutateur à seuil.* Ce dispositif possède deux états résistifs distincts, placés de part et d'autre d'une tension de seuil (de l'ordre de 40 V/mn) ; ces deux états résistifs sont séparés par un facteur 10^8. Le dispositif retrouve spontanément son état initial très résistant si la tension à laquelle on le soumet est inférieure à son potentiel de maintien.

• *Commutateur à mémoire* (*fig.* 15). Ce dispositif possède, comme le précédent, deux états résistifs, mais ne retrouve pas spontanément son état initial très résistant. Le retour à l'état hautement résistant, ou effacement de la mémoire, ne peut s'opérer que sous l'action d'une impulsion brève de haut potentiel.

Ces dispositifs possèdent donc des propriétés dont les plus intéressantes sont :

— une vitesse de commutation rapide : $1{,}5 \cdot 10^{-10}$ s ;

— une zone à résistance différentielle négative ;

— une insensibilité à la polarité de la tension appliquée.

Pour expliquer ces phénomènes de mémoire, il semblerait que la conduction électrique se fasse suivant un canal, donc soit générée par un phénomène thermique avec un phénomène électronique lui ayant donné naissance tel que : effet tunnel double, formation de charge d'espace.

Les applications de ces dispositifs concernent : les *mémoires classiques* (fonctionnement écriture, lecture, effacement) ; les *mémoires « mortes »* (stockage de l'information) ; les *commutateurs* (automatisme).

Ces systèmes prometteurs manquent encore de fiabilité pour accéder à la commercialisation. Les applications à des effets optiques semblent très prometteuses.

Émission d'électrons secondaires

L'émission d'électrons secondaires est caractérisée par le rapport δ des électrons secondaires aux électrons primaires. Le *tableau* VII résume divers résultats.

Malgré la faiblesse de δ, on peut atteindre ainsi des gains de 10^5 à 10^6. On a ainsi fabriqué des multiplicateurs à microcanaux. Par exemple, l'un de ceux-ci est constitué par une dynode à résistivité continue, formée à l'intérieur d'un tube de verre de phosphovanadate environ 50 fois plus long que large (5 cm de longueur, 1 mm de diamètre).

Si une différence de potentiel d'environ 3 kV est appliquée entre les extrémités du tube, tout électron pénétrant dans l'extrémité à bas potentiel arrachera une cascade d'électrons secondaires de la paroi du tube. Le nombre d'électrons émis par l'extrémité à haut potentiel du tube par rapport à celui des électrons primaires peut atteindre un facteur 10^5.

Le multiplicateur électronique est particulièrement apte à la direction des électrons isolés, mais réagit également aux particules, aux ions gazeux, aux rayons X et UV.

Étant donné qu'il est possible de réaliser des multiplicateurs électroniques de dimensions très diverses, on peut en disposer en rangées parallèles en grand nombre et produire des images à amplification point par point. Ces dispositifs sont appelés des galettes à microcanaux, obtenues par soudure de tubes les uns contre les autres. Les faisceaux ainsi obtenus peuvent alors être étirés et combinés avec d'autres faisceaux déjà étirés. Après la coupe, on procède au polissage des surfaces parallèles d'entrée et de sortie. Ces galettes, dont le diamètre peut atteindre de 10 à 12 cm, comprenant de nombreux canaux de faible diamètre, sont utilisées dans les convertisseurs d'image radiologique. Cette utilisation, qui a éveillé récemment beaucoup d'intérêt, a été rendue possible non seulement grâce aux propriétés des matériaux vitreux, mais également grâce aux possibilités de façonnage, soufflage, moulage, étirage, particulièrement diversifiés, des verres.

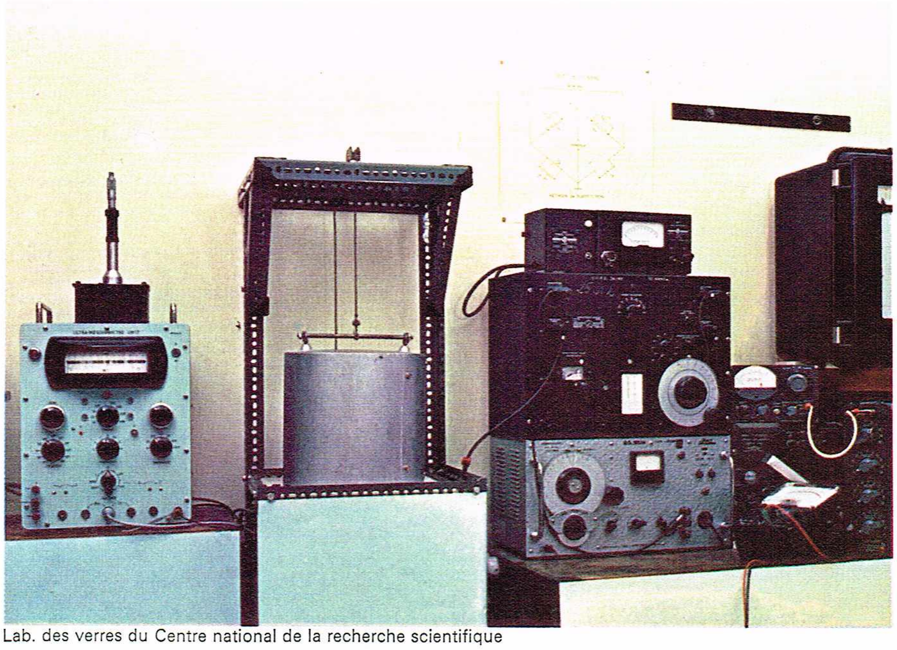

Lab. des verres du Centre national de la recherche scientifique

▲ ***Dispositif de mesure de la conductibilité électrique et de la permittivité du verre en fonction de la température.***

▼ ***Figure 15 : caractéristiques schématiques courant-tension des dispositifs à base de verre As_2Se_3 et As_2Se_5 en couches minces. Tableau VII : émission d'électrons secondaires de différents verres.***

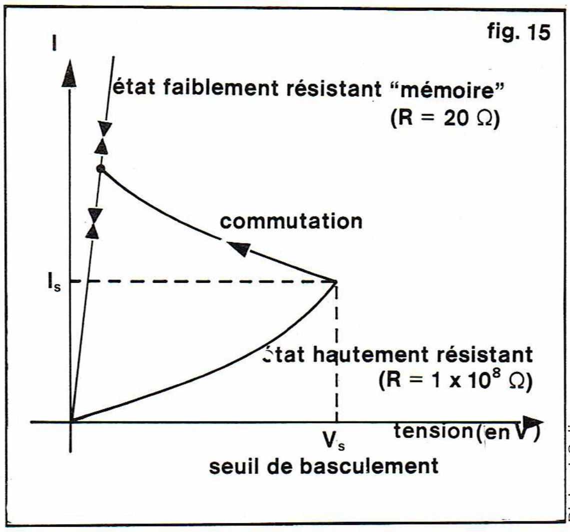

Richard Colin

Tableau VII
Émission d'électrons secondaires de différents types de verres

Verres	δ_{max}	E_{max} (en volts)
Pyrex	2,3	400
Silice	2,1	400
Borate	2,5	300
Phosphate de vanadium	2,1	300
Séléniure d'arsenic	1,6	750

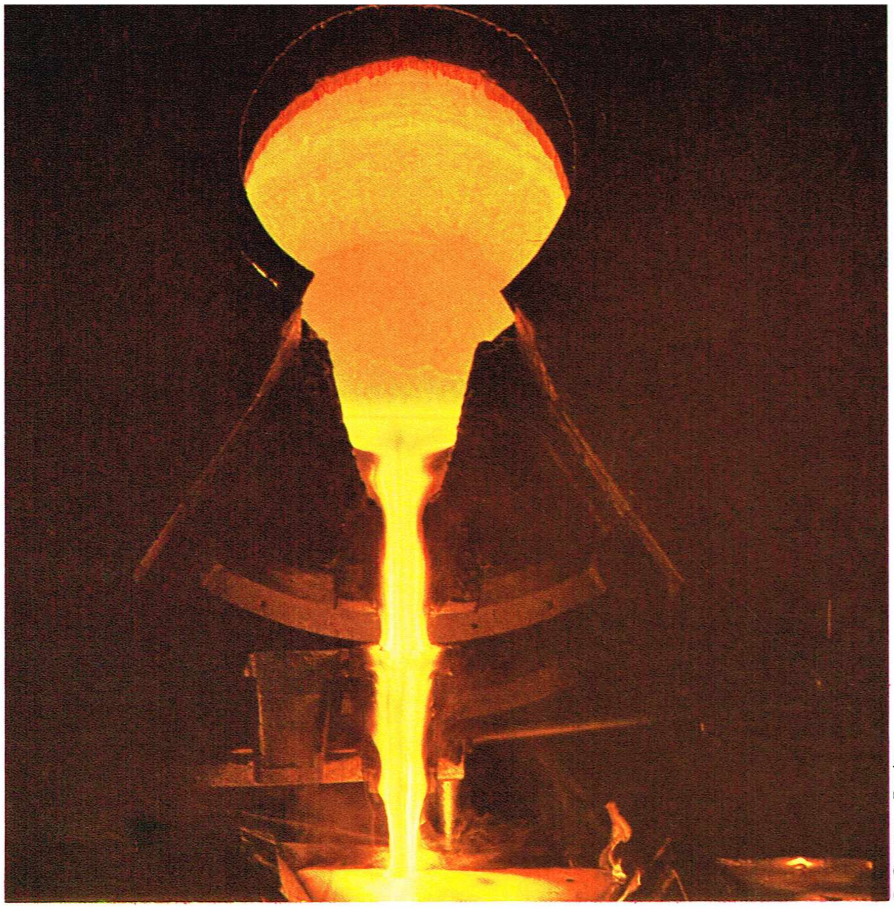

G. Gerster - Rapho

▲ *Une coulée d'or dans une unité de traitement du métal en Afrique du Sud.*

MÉTAUX ET ALLIAGES

PRINCIPES DE L'ÉLABORATION DES MÉTAUX

Le domaine de la métallurgie extractive s'étend de la sortie du minerai de la mine jusqu'à l'obtention du métal de très haute pureté.

En général, le minerai subit un certain nombre de traitements qui visent à l'enrichir en le débarrassant d'une partie de sa gangue *(concentration ou enrichissement du minerai)*; ces traitements consistent d'abord en une *comminution* ou *fragmentation* du minerai, permettant une séparation plus aisée des différents constituants minéralogiques *(traitements préliminaires)*, puis en une ou plusieurs opérations de triage *(traitements physiques)* dont le principe repose sur les différences de propriétés physiques entre les phases en présence (masse volumique, propriétés superficielles, magnétiques et électriques). Après récupération, séchage, puis souvent agglomération du concentré, commence l'extraction proprement dite du métal; celle-ci s'effectue par pyrométallurgie, par hydrométallurgie ou par électrométallurgie.

● **La pyrométallurgie** met en œuvre des réactions s'effectuant à températures élevées. Par exemple : la *calcination* et le *grillage* se font à des températures inférieures au point de fusion du composé; la *liquation* correspond à la fusion du métal, qui est alors susceptible de se débarrasser d'une partie de ses impuretés; la *fusion* complète du minerai peut conduire à une séparation en deux ou plusieurs couches liquides, dont l'une contient la majeure partie du métal à extraire. D'autres opérations pyrométallurgiques sont parfois nécessaires, par exemple lors de la *conversion* d'un sulfure fondu en métal ou de la fonte en acier par soufflage oxydant, ou lors de la distillation de certains métaux (Zn, Mg).

● **L'hydrométallurgie** consiste d'abord à *dissoudre* le constituant minéralogique intéressant dans un solvant aqueux, puis à *précipiter* le métal soit par voie chimique, soit par électrolyse (électrométallurgie). Ces dernières années, l'hydrométallurgie s'est enrichie d'autres procédés, qui utilisent des *solvants organiques* et des *résines échangeurs d'ions*.

● **L'électrométallurgie** consiste à extraire le métal par électrolyse en solution aqueuse ou en bain de sels fondus. En général, l'extraction du métal brut est suivie d'une purification qui le rend alors apte à des applications courantes *(affinage)* ou lui confère, pour des applications particulières, un degré de pureté très élevé *(raffinage)*. Cette purification du métal est obtenue par pyrométallurgie ou par électrométallurgie; dans le premier cas, elle consiste souvent en une oxydation des impuretés suivie d'une désoxydation poussée du métal. Comme nous le verrons, il est difficile d'atteindre un degré de pureté élevé de cette manière. Il est alors nécessaire, si une grande pureté est exigée, d'avoir recours à d'autres méthodes (fusion de zone, raffinage électrolytique, métallurgie sous vide, etc.).

Notons que les méthodes pyro-, hydro- et électrométallurgiques sont parfois utilisées successivement lors de l'extraction de certains métaux. Tout procédé d'extraction correspond à une séquence d'opérations dont chacune a pour objet de préparer le matériau, aussi bien et à aussi bon marché que possible, à l'opération suivante. Cela explique pourquoi certains procédés d'élaboration des métaux, séduisants sur le plan scientifique, ne trouvent pas d'application pratique : c'est le cas, en particulier, de l'élaboration électrochimique, possible pour tous les métaux, mais en réalité appliquée, pour des raisons économiques, surtout aux métaux très réactifs qui ne peuvent être préparés autrement.

Principes de l'extraction du métal brut de son minerai

Dans le concentré de minerai, le métal est à l'état d'ions M^{n+}; son élaboration consiste alors en une réduction du type :

$$M^{n+} + ne^- \rightarrow M^\circ$$

Extraction pyrométallurgique

Réduction des oxydes métalliques

De nombreux métaux sont extraits à partir de minerais oxydés. C'est le cas, par exemple, du fer, du manganèse, du chrome et de l'étain qui sont préparés presque exclusivement à partir de minerais d'oxydes. Lorsque le minerai est un hydrate, comme $Mg(OH)_2$, $Zn(OH)_2$, $Cd(OH)_2$, $FeO(OH)$, un carbonate ($CaCO_3$, $FeCO_3$) ou un sulfure (ZnS, PbS), il est le plus souvent traité thermiquement de manière à être transformé en oxyde (opérations de calcination et de grillage).

Seuls les oxydes des métaux les plus nobles peuvent se dissocier thermiquement pour donner le métal pur. C'est le cas, par exemple, de l'oxyde d'argent Ag_2O qui se dissocie dès 200 °C ou de l'oxyde de platine PtO qui se décompose au-dessus de 500 °C. Les oxydes de métaux moins nobles ne peuvent libérer le métal pur que par réduction par un agent réducteur, comme le montre la *figure* 1

fig. 1

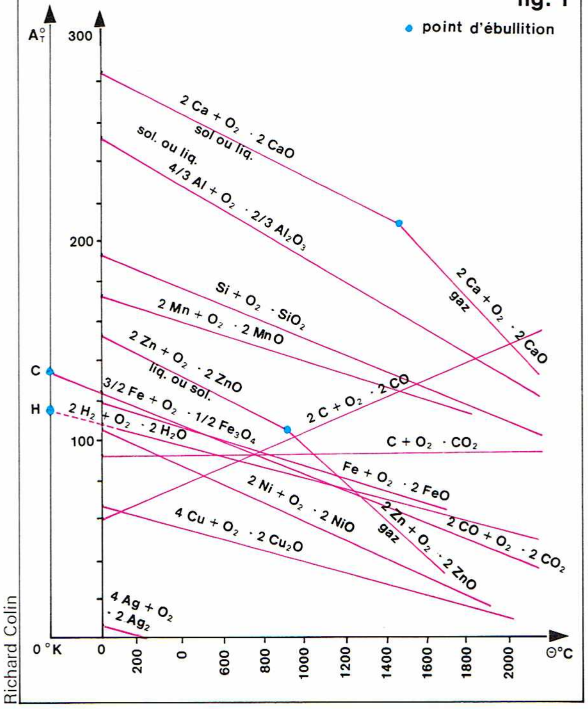

Richard Colin

▶ *Figure 1 : diagramme d'Ellingham-Richardson. Variations, avec la température, de l'affinité de différents éléments pour l'oxygène (pression standard : 1 atm).*

représentant les variations, avec la température, de l'affinité standard A_T° des différents métaux pour l'oxygène (diagramme d'Ellingham-Richardson). Cet agent réducteur peut être le carbone, le monoxyde de carbone, l'hydrogène ou, dans certains cas, un autre métal qui présente une plus grande affinité pour l'oxygène. C, CO et H_2 sont les agents réducteurs dont l'intérêt industriel et économique est le plus grand, car ils peuvent être produits à partir de matières premières telles que la houille, le pétrole et le gaz naturel.

● *Réduction des oxydes libres par C et CO*

Comme pour toute réaction métallurgique, la réduction par le carbone ou le monoxyde de carbone est régie par un équilibre chimique et par une cinétique de réaction. A partir des données thermodynamiques, l'affinité standard

$$A_T^\circ = - \Delta G_T^\circ = T\Delta S_T^\circ - \Delta H_T^\circ$$

et la constante d'équilibre

$K = \exp \frac{A_T^\circ}{RT}$ peuvent être calculées pour toutes les réactions du type :

$$MO + CO \rightleftarrows M + CO_2.$$

La *figure* 2 représente le rapport des pressions partielles d'équilibre $\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}}$ pour quelques systèmes métal-oxyde métalliques. Tant que le métal et l'oxyde coexistent sous la forme de phases condensées avec une activité égale ou proche de l'unité (phases pures), le rapport des pressions partielles $\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}}$ a une valeur bien définie à une température donnée : il varie de 10^5 pour la réduction de Cu_2O en Cu ou de Fe_2O_3 en Fe_3O_4 à des valeurs inférieures ou égales à 10^{-5} pour la réduction de MnO ou de SiO_2. La réduction de l'oxyde de zinc ZnO représente un cas particulier : à basse température, ZnO est réduit en Zn liquide, et $\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}}$ ne dépend que de la température. A température plus élevée, la réduction conduit à du zinc vapeur et, dans ce cas, $\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}} = \frac{K}{P_{Zn}}$ où K est la constante d'équilibre de la réaction de réduction :

$$ZnO\ (s) + CO\ (g) \rightleftarrows Zn\ (g) + CO_2\ (g)$$

et P_{Zn}, la pression partielle de zinc.

K ne dépend que de la température, mais P_{Zn} peut prendre toute une série de valeurs. Sur la *figure* 2, $\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}}$ est porté en fonction de $\frac{1}{T}$ pour $P_{Zn} = 1$ atm. Pour $P_{Zn} < 1$ atm, la courbe $\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}}$ est déplacée vers le haut ; inversement, elle est déplacée vers le bas pour $P_{Zn} > 1$ atm. La réduction de ZnO par CO est donc plus facile lorsque la pression partielle de zinc est maintenue à des valeurs inférieures à 1 atm (procédé New Jersey).

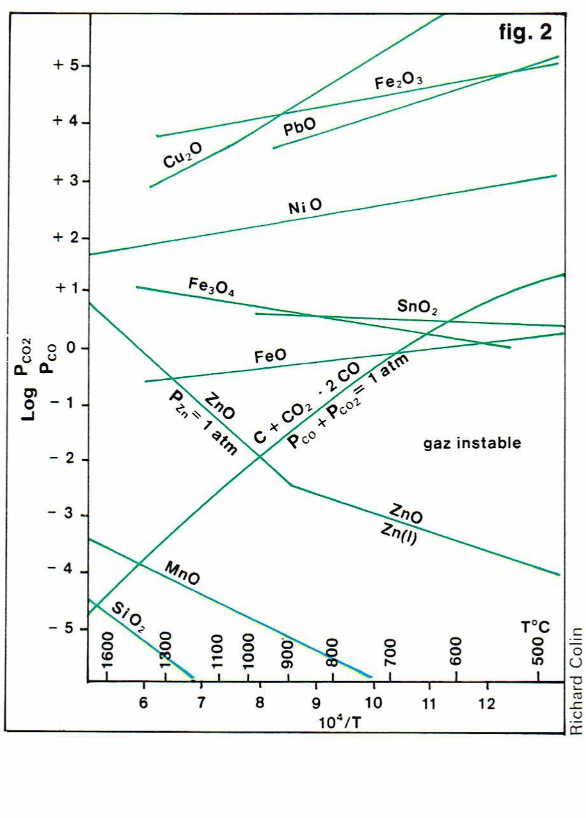

◀ ***Figure 2 : rapport d'équilibre $\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}}$ en fonction de l'inverse de la température pour la réduction de différents oxydes métalliques.***

Sur la *figure* 2 est représenté également, pour une pression totale $P_{CO} + P_{CO_2} = 1$ atm, le rapport des pressions partielles $\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}}$ relatif à l'équilibre de Boudouard

$$C + CO_2 \rightleftarrows 2\ CO.$$

Dans ce cas, le rapport $\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}} = \frac{P_{CO}}{K}$ est une fonction de la température et de la pression totale. Selon que les pressions totales seront supérieures ou inférieures à 1 atm, la courbe $\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}}$ se placera au-dessus ou au-dessous de celle qui est relative à $P_{CO} + P_{CO_2} = 1$ atm. Dans le cas de la réduction des oxydes métalliques par CO, en l'absence de carbone solide, on n'a pas à tenir compte de la réaction de Boudouard : la réduction de l'oxyde intervient dès que le rapport $\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}}$ de l'atmosphère devient inférieur à la valeur définie par la courbe d'équilibre. C'est ainsi que les oxydes de cuivre, de plomb et de nickel seront réduits pour des valeurs de $\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}}$ comprises entre 10^5 et 10^2, c'est-à-dire pour de faibles proportions de CO. Cela signifie que si, initialement, du CO pur est utilisé, il sera presque entièrement transformé en CO_2 avant que la réaction de réduction soit terminée. On remarquera que les oxydes de manganèse et de silicium nécessitent une atmosphère réductrice exempte de toute trace de CO_2 : par conséquent, si, initialement, du CO pur est utilisé, la réaction de réduction s'arrêtera dès que du CO_2 sera formé. Autrement dit, la réduction des oxydes de chrome, de manganèse et de silicium par du CO gazeux est, en pratique, impossible.

En revanche, si du carbone solide est présent dans le milieu réactionnel, les deux équilibres

(a) $\qquad MO + CO \rightleftarrows M + CO_2 \qquad$ et

(b) $\qquad C + CO_2 \rightleftarrows 2\ CO$

interviennent simultanément. MO, M et C seront en équilibre à la température où les courbes $\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}}$ relatives à ces deux réactions se coupent. Par exemple, SnO_2, Sn et C peuvent être en équilibre avec une atmosphère

$$P_{CO} + P_{CO_2} = 1 \text{ atm}$$

à environ 610 °C. Donc, SnO_2 peut être réduit par le carbone à toute température supérieure à 610 °C. De même, Fe_3O_4 sera réduit en FeO au-dessus de 650 °C et FeO en fer au-dessus de 700 °C. Remarquons qu'il est en général incorrect de parler de réduction par le carbone selon la réaction $MO + C \rightleftarrows M + CO$, sauf dans le cas de la réduction des oxydes les plus stables pour lesquels la pression partielle d'équilibre P_{CO_2} est extrêmement faible. La *figure* 2 montre que, pour les oxydes des métaux plus nobles (NiO...), les courbes $\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}}$ relatives aux équilibres **(a)** et **(b)** ne se rencontrent pas, même à basse température. Dans ce cas, la température de réduction et la composition du gaz sont déterminées par des considérations cinétiques. En général, la réduction des oxydes métalliques nécessite au moins une température de 500 °C. L'enthalpie standard ΔH_T° des différentes réactions du type **(a)** peut être déduite des pentes des courbes $\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}}$ (*fig.* 2) par la relation de Van't Hoff :

$$\frac{d \ln K}{d\left(\frac{1}{T}\right)} = - \frac{\Delta H_T^\circ}{R} = \frac{d\ (P_{CO_2}/P_{CO})}{d\left(\frac{1}{T}\right)}$$

On voit que la réduction par CO des oxydes de métaux relativement nobles est exothermique (ΔH_T° négatif), alors qu'elle devient de plus en plus endothermique (ΔH_T° positif) lorsque les oxydes appartiennent à des métaux

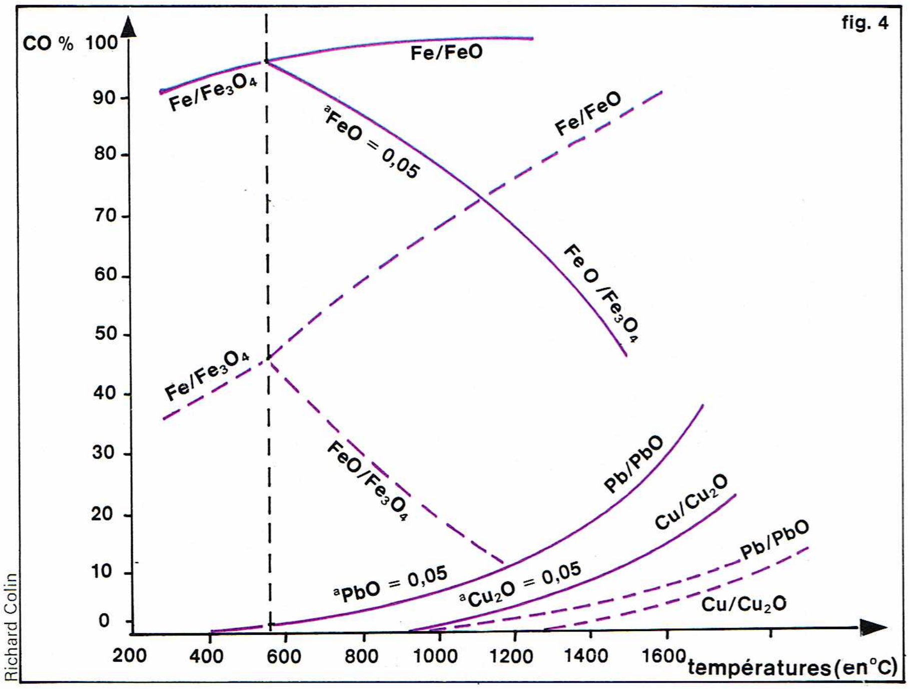

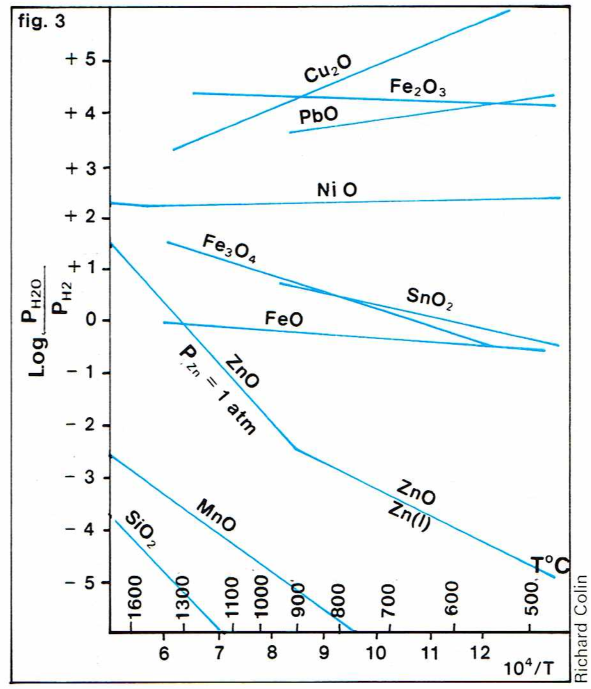

▲ *Figure 4 : courbes d'oxydoréduction de quelques oxydes métalliques en équilibre avec le mélange CO-CO₂ ; - - - : l'oxyde est libre ; — : l'oxyde est en solution ($a_{MO} = 0{,}05$). Figure 3 : rapport d'équilibre $\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2}}$ en fonction de l'inverse de la température pour la réduction de différents oxydes métalliques.*

de moins en moins nobles. La réaction entre C et CO_2 pour former du CO (réaction de Boudouard) est, elle aussi, fortement endothermique. Par conséquent, la réduction des oxydes stables nécessite non seulement une température élevée, mais aussi un apport important de chaleur à cette température. Sur le plan pratique, cela signifie que la dépense d'énergie augmente considérablement avec la stabilité de l'oxyde.

● *Réduction des oxydes libres par l'hydrogène*

L'hydrogène présente moins d'intérêt que le carbone et le monoxyde de carbone dans la réduction des oxydes métalliques ; cependant, il peut être utilisé dans certaines conditions particulières. Le rapport des pressions partielles d'équilibre $\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2}}$ en fonction de l'inverse de la température est représenté *figure* 3 pour la réduction de quelques oxydes métalliques importants. Les courbes ont une allure analogue à celles relatives à la réduction par CO et sont disposées de manière identique les unes par rapport aux autres.

Cependant, la réaction $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightleftarrows H_2O$ (*g*) étant moins exothermique que la réaction $CO + \frac{1}{2} O_2 \rightleftarrows CO_2$, la réduction d'un oxyde métallique MO par H_2 sera moins exothermique que par CO ; cela est visible sur la pente des courbes *figures* 2 *et* 3. Il en résulte que l'hydrogène est un réducteur plus efficace que le monoxyde de carbone à température élevée et, au contraire, moins efficace à basse température. Si la réduction a lieu en présence de CO et de H_2O, la réaction se fera de manière que l'équilibre du gaz à l'eau, $CO + H_2O \rightleftarrows CO_2 + H_2$, soit satisfait. Cet équilibre est déplacé vers la droite à basse température, ce qui est une autre façon d'exprimer que le monoxyde de carbone est un meilleur réducteur que l'hydrogène à basse température.

● *Réduction métallothermique des oxydes libres*

Dans certains cas, un oxyde métallique sera réduit par un autre métal dont l'affinité pour l'oxygène est plus élevée : sur la *figure* 1, tout métal M dont la courbe d'affinité pour l'oxygène est placée au-dessus de celle qui est relative à un autre métal M′ peut jouer le rôle de réducteur vis-à-vis de l'oxyde M′O de ce dernier. Les éléments les plus fréquemment utilisés en métallothermie sont le silicium, l'aluminium et le magnésium. Remarquons qu'en général les réactions de réduction métallothermique sont incomplètes : un équilibre s'établit dans lequel une partie du métal réducteur et une certaine quantité de l'oxyde métallique coexistent. Leur proportion dépend beaucoup des différentes affinités pour l'oxygène de l'agent réducteur et du métal en question. Les réactions de réduction métallothermique sont habituellement exothermiques, et ce d'autant plus que l'agent réducteur est plus efficace. Dans certains cas, par exemple pour la réduction aluminothermique de Cr_2O_3 ou de FeO, la chaleur de réduction suffit à échauffer le mélange réactionnel depuis la température ordinaire jusqu'à plus de 2 000 °C et à fondre ainsi complètement les produits de la réaction. Dans ces conditions, ces réactions peuvent être conduites sans apport extérieur de chaleur.

● *Réduction des oxydes dissous ou combinés*

Considérons le cas de la réduction par le monoxyde de carbone :

$$MO + CO \rightleftarrows M + CO_2$$

Contrairement à ce que nous avons vu précédemment, l'oxyde MO n'est plus à l'état pur et possède une activité $a_{MO} \neq 1$.

A l'équilibre, $\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}} = K(T) \cdot a_{MO}$; comme $a_{MO} < 1$, on voit que la réduction est plus difficile lorsque l'oxyde est en solution dans une scorie fondue (laitier) ou dans un métal fondu, ou lorsqu'il est entré en solution solide ou dans une phase mixte. A titre d'exemple, la *figure* 4 permet de comparer les courbes d'équilibre obtenues lorsque l'oxyde est pur à celles qui sont valables lorsque l'oxyde, en solution, possède une activité $a_{MO} = 0{,}05$. Souvent la réduction d'un oxyde dissous ou combiné n'est pas sélective, et si le métal obtenu est fondu, il peut dissoudre certaines impuretés qui, elles aussi, ont été réduites de leurs oxydes. C'est ainsi que l'acier contient du manganèse, du silicium, du phosphore, du soufre, notamment.

Réduction des halogénures métalliques

Les procédés d'extraction à partir des halogénures ont rendu possible la préparation de certains métaux parmi les plus rares, utilisés, en particulier, dans l'industrie nucléaire : c'est le cas, par exemple, de l'uranium, du béryllium, du niobium, du zirconium, du titane. Plusieurs de ces métaux ne peuvent pas être réduits par le carbone, car il se formerait immédiatement un carbure. L'utilisation d'autres halogénures est possible, mais le prix élevé des halogènes et de leur régénération dans les procédés d'extraction fait qu'à l'exception de la production électrolytique de l'aluminium et du magnésium, la métallurgie des halogénures ne s'est pas étendue à l'élaboration des métaux courants.

Les halogénures métalliques sont facilement préparés par plusieurs méthodes, mais l'halogène seul est habituellement incapable de réduire les oxydes. Les chlorures sont formés par grillage des oxydes dans un courant de chlore en présence de carbone ou d'hydrogène. Parfois, l'oxyde est préréduit en métal, ou en carbure, qui est ensuite

grillé dans un courant de chlore. Le diagramme d'Ellingham fait apparaître que la plupart des chlorures métalliques les plus courants sont stables jusqu'à des températures relativement élevées; ils ne peuvent alors pas être facilement décomposés thermiquement.

$TaCl_5$ et $NbCl_5$ ne se décomposent qu'à 2 000 °C environ, sous pression réduite (procédé Van Arkel) : ce n'est donc pas la méthode courante utilisée pour leur réduction. En revanche, certains iodures, en particulier ceux de titane et de zirconium, se décomposent aisément sous vide, ce qui fournit un moyen efficace de préparation de ces métaux dans un état de pureté élevée. Certains chlorures peuvent être réduits par l'hydrogène, à condition qu'un rapport élevé $\frac{P_{H_2}}{P_{HCl}}$ puisse être maintenu à haute température, mais, souvent, il faut recourir à la métallothermie grâce à l'utilisation de l'aluminium, du magnésium et du calcium. C'est ainsi que sont préparés le titane, le zirconium et le hafnium suivant la réaction $MCl_4 + 2\ Mg \rightarrow 2\ MgCl_2 + M$ (procédé Kroll); l'éponge du métal M doit être ensuite purifiée : on la sépare du magnésium et du chlorure de magnésium qu'elle renferme par distillation sous vide, puis on la refond dans un four à arc.

Lors de l'élaboration de l'uranium, c'est le calcium qui agit sur le fluorure : $UF_4 + 2\ Ca \rightarrow 2\ CaF_2 + U$. La chaleur de cette réaction ($\Delta H = -84\,000$ cal) est suffisante pour que CaF_2 et U soient fondus. Ces phases se séparent alors par gravité.

Signalons que la stabilité de certains chlorures est telle (magnésium, calcium, sodium, lanthane, entre autres) qu'ils ne peuvent être réduits que par électrolyse ignée.

Extraction du métal de mattes fondues

Elle constitue un exemple de préparation du métal directement à partir de ses minerais sulfurés. Les mattes sont, en effet, des solutions de sulfures métalliques possédant une bonne conductibilité électrique, ce qui laisse penser que leur structure est ionique ou partiellement métallique. Elles fondent à des températures plus faibles que les scories, sont plus denses que ces dernières et sont insolubles à la fois dans la phase scorie et dans la phase métallique. Les mattes cuivre-fer et nickel-cuivre sont de loin les plus importantes commercialement dans le cas de l'extraction du cuivre et du nickel.

Le principe de la métallurgie du cuivre est le suivant : après concentration, le minerai sulfuré subit un grillage partiel au cours duquel la pyrite FeS_2, généralement présente dans le minerai (chalcopyrite), est transformée en FeS avec libération de soufre qui s'oxyde le premier sous forme de SO_2 (synthèse de l'acide sulfurique). Le fer, ayant une plus grande affinité pour l'oxygène que le cuivre, s'oxyde pratiquement seul. Le produit grillé (calcine) est donc formé essentiellement de FeO, Cu_2S, FeS, de la gangue et d'un peu de Cu_2O. La phase suivante est la fusion de la matte : chauffée au-dessus de 1 100 °C, la calcine fond. A cette température, l'affinité du cuivre pour le soufre étant plus grande que celle du fer, il en résulte une réaction d'échange entre les oxydes de fer et de cuivre qui, avec la gangue, participent à la formation de la scorie, et les sulfures qui constituent la matte; cette réaction d'échange peut s'écrire :

$$(Cu_2O)_{scorie} + (FeS)_{matte} \rightleftarrows (Cu_2S)_{matte} + (FeO)_{scorie}$$

La constante de cet équilibre est de l'ordre de 4 000 à 1 200 °C, ce qui signifie que la majeure partie du cuivre se trouve sous forme de Cu_2S dans la matte, et la majeure partie du fer sous forme de FeO dans la scorie qui surnage. Le succès du procédé réside surtout dans un parfait contrôle du grillage partiel et de la fluidité de la scorie qui doit permettre une bonne séparation de la matte. La température de fusion de la matte doit donc être, elle aussi, bien contrôlée. Cette fusion peut se faire dans un four à cuve (minerai en morceaux) ou à réverbère (minerai pulvérulent concentré par flottation).

Enfin, la dernière phase conduit au cuivre brut après convertissage de la matte : ce dernier consiste en une oxydation de la matte qui, par grillage partiel accompagné de fusion scorifiante, élimine le fer sous forme d'oxyde dans la scorie suivie de la transformation de Cu_2S en cuivre par grillage et réaction : $Cu_2S + \frac{3}{2} O_2 \rightarrow Cu_2O + SO_2$ et $2\ Cu_2O + Cu_2S \rightarrow SO_2 + 6\ Cu$, soit globalement :

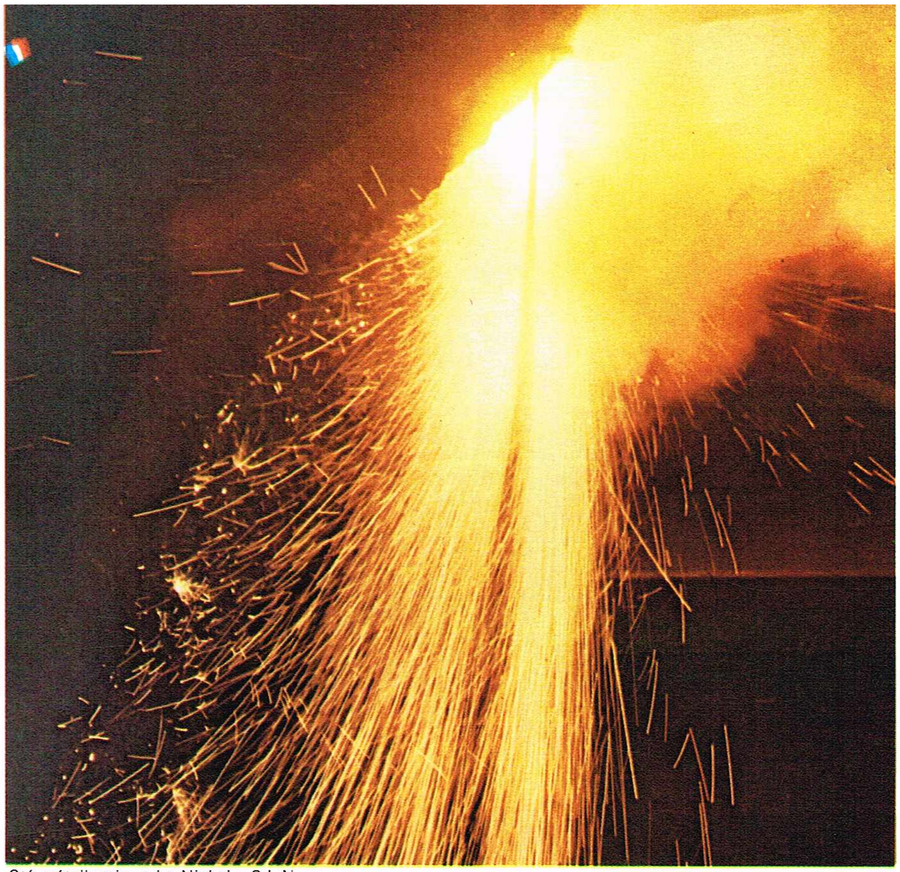

Sté métallurgique Le Nickel - S.L.N.

▲ ***Une coulée de nickel à l'usine de Doniambo (Nouvelle-Calédonie).***

$Cu_2S + O_2 \rightarrow 2\ Cu + SO_2$. Le cuivre brut doit enfin être purifié (affinage oxydant ou électrolytique).

Dans le cas de l'extraction du nickel, on procède également à une fusion pour matte; cependant, on ne peut pas, partant de la matte, aller jusqu'au métal comme pour le cuivre, car le sulfure de nickel ne réagit pas sur l'oxyde dans les conditions de l'opération : on doit donc opérer par grillage et réduction.

Extraction hydrométallurgique

D'un intérêt particulier dans le cas des minerais pauvres, l'hydrométallurgie met en jeu un liquide : eau, solutions acides, basiques... Il faut toutefois considérer à part l'électrolyse par voie humide qui fait l'objet du prochain paragraphe. On notera d'ores et déjà que les métallurgies intéressées utilisent souvent des opérations pyro- et hydrométallurgiques. Il faut distinguer principalement l'extraction par dissolution et précipitation et l'extraction par solvants organiques ou résines échangeurs d'ions.

Dissolution

La *dissolution,* qui a trait au minerai lui-même ou à un produit de transformation *(grillage oxydant partiel des sulfates en sulfates solubilisables)*, peut être simple ou combinée à une oxydation. Deux exemples du premier type sont fournis par la dissolution de l'oxyde cuivrique CuO dans l'acide ou l'ammoniac suivant la réaction :

$$CuO + 2\ H^+ \rightleftarrows Cu^{2+} + H_2O$$

ou $$CuO + 2\ H^+ + 4\ NH_3 \rightleftarrows Cu\ (NH_3)_4^{2+} + H_2O$$

et par la dissolution des mattes grillées de cuivre-nickel dans H_2SO_4. Dans ce cas, l'oxyde de cuivre se dissolvant beaucoup plus vite que l'oxyde de nickel, la dissolution devient sélective, ce qui rend la séparation possible. Un exemple du deuxième type est donné par la dissolution de l'oxyde ou du sulfure de cuivre dans l'acide suivant la réaction :

$$2\ Cu_2O + 8\ H^+ + O_2 \rightleftarrows 4\ Cu^{2+} + 4\ H_2O$$

ou $$2\ Cu_2S + 4\ H^+ + 5\ O_2 \rightleftarrows 4\ Cu^{2+} + 2\ SO_4^{2-} + 2\ H_2O.$$

Aux fortes concentrations en ions, ce qui correspond aux conditions industrielles, la vitesse de réaction est augmentée par une élévation de la pression d'oxygène (procédés de dissolution sous pression) ou par la présence d'ions Fe^{2+} dans la solution. Au contact de l'air, Fe^{2+} est oxydé en Fe^{3+} qui joue alors le rôle d'un agent oxydant sur le sulfure de cuivre. Un phénomène intéressant est que l'oxydation de Fe^{2+} semble être facilitée par la présence de certaines bactéries. L'expérience a montré, en effet, que la vitesse de dissolution des sulfures peut être multipliée par un facteur 10 ou 100 en présence de bactéries provenant des eaux de la mine. Des recherches sont faites

actuellement pour apprendre à utiliser ces « travailleurs silencieux » en hydrométallurgie.

Précipitation

La *précipitation* à partir de solutions aqueuses est souvent, elle aussi, tributaire de phénomènes cinétiques. Elle peut être une précipitation d'hydroxydes par modification du pH sans changement du potentiel oxygène P_{O_2} — cas de la précipitation de Mg $(OH)_2$ à partir de l'eau de mer par action de Ca $(OH)_2$ —, une précipitation de composés insolubles ou de sels par action de certains agents chimiques ou par refroidissement — cas de la précipitation de CuS à partir d'une solution de Cu^{2+} par action de H_2S — ou une précipitation par réduction ou oxydation — précipitation de Fe $(OH)_3$ par oxydation d'une solution de Fe^{2+} ou de cuivre par réduction de Cu^{2+} par le fer ou l'hydrogène. Dans le cas où la précipitation est homogène (la réaction a lieu entre des espèces dissoutes), la germination du précipité peut contrôler la vitesse de réaction qui est alors augmentée par l'addition de faibles quantités du composé désiré (ensemencement) ; un exemple typique est donné par le procédé Bayer de préparation de l'alumine pure à partir de la bauxite traitée par la soude chaude sous pression. L'aluminium est solubilisé sous la forme d'un aluminate de sodium $AlO_2^-Na^+$ qui est hydrolysé en Al $(OH)_3$ par addition d'une faible quantité d'alumine servant à amorcer la réaction. L'alumine hydratée est séchée, puis calcinée à 1 200 °C, pour donner l'alumine non hygroscopique, qui est ensuite mise en solution dans la cryolithe fondue, puis électrolysée.

Extraction par solvants organiques

Certains ions métalliques complexes sont très solubles dans les solvants organiques (éthers, esters, cétones, amines), et leur solubilité est parfois très sélective, ce qui rend possible la séparation entre les différents métaux. L'utilisation de solvants a trouvé une application intéressante dans le cas de l'extraction de l'uranium à partir de minerais pauvres ou de la séparation, par ailleurs difficile, du zirconium, du hafnium ou de certaines terres rares. La dissolution acide (H_2SO_4 dilué), dans des conditions oxydantes, des minerais d'uranium conduit à la formation de l'ion uranyle UO_2^{2+} qui est plus ou moins complexé suivant l'équilibre :

$$UO_2^{2+} + nSO_4^{2-} \rightleftarrows UO_2\,(SO_4)_n^{2-2n}$$

$n = 1$, 2 ou 3 ; pour $n \geqslant 2$, $UO_2\,(SO_4)_n^{2-2n}$ est un anion.

Par action d'une alkylamine, seul l'ion sulfate entre en solution, et l'équilibre ci-dessus est déplacé vers la droite. Le coefficient de partage, rapport de la concentration de l'uranium dans le solvant et dans la phase aqueuse, peut être de l'ordre de 100. L'uranium est alors extrait du solvant, qui est ensuite recyclé.

Extraction par résines échangeurs d'ions

Ce sont des résines organiques dans lesquelles certains ions (anions ou cations), faiblement liés, peuvent s'échanger avec les ions de la solution aqueuse contenant le métal intéressant. Ainsi, pour l'absorption de l'anion sulfate d'uranyle, l'équilibre suivant s'établit :

$$4\,R^+X^- + UO_2\,(SO_4)_3^{4-} \rightleftarrows (R^+)_4\,UO_2\,(SO_4)_3^{4-} + 4\,X^-$$

R^+ : cation de la résine ; X^- : anion (Cl^-, NO_3^-...).

Lorsque tous les sites d'échange disponibles de la résine sont occupés par les ions complexes métalliques, celle-ci est lavée par une solution concentrée d'ions X^-, ce qui libère les ions métalliques et régénère la résine.

▼ ***Hall d'électrolyse de l'alumine.***

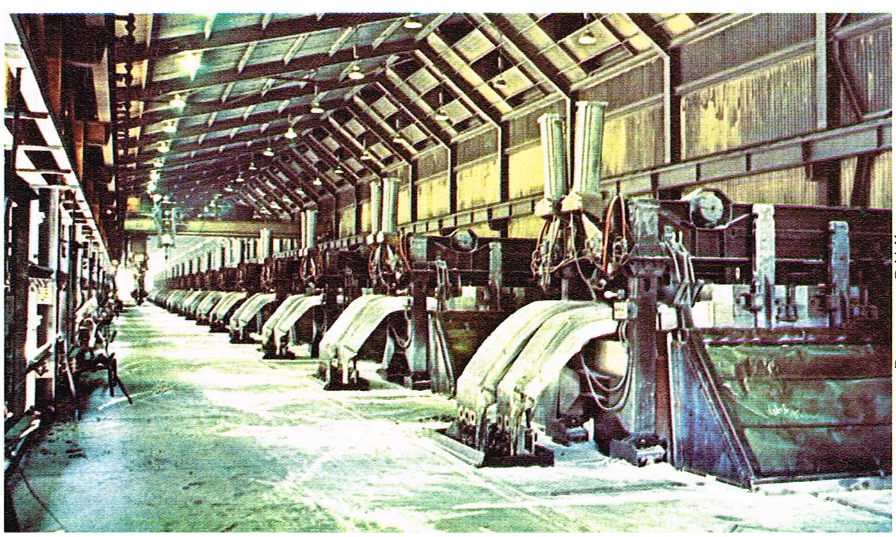

Document P.U.K.

Extraction électrométallurgique

Outre la purification des métaux (affinage électrolytique avec anode soluble), la préparation de métaux ultra-purs (Zn, Cr...) et la récupération de métaux coûteux à partir de solutions diluées, l'électrolyse est réservée à la préparation de métaux réactifs (Al, Mg...) qui ne peuvent pas être obtenus autrement. Dans ce cas, l'anode est inattaquable dans l'électrolyte (anode insoluble), qui est soit une solution aqueuse, soit un mélange de sels fondus (électrolyse ignée). Le métal dissous dans cet électrolyte se dépose sur la cathode, dans certaines conditions que nous allons préciser, suivant la réaction : $M^{n+} + ne^- \rightarrow M^\circ$.

La tension à appliquer aux bornes de la cellule à électrolyse peut se décomposer en cinq termes.

1 — **La différence de potentiel** E_R relative à la réaction globale qui intervient au cours de l'électrolyse et qui est égale à la différence des potentiels d'électrodes anodique (E_a) et cathodique (E_c). Ces derniers peuvent être déterminés grâce à la formule de Nernst :

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln a$$

qui donne la différence de potentiel existant à l'équilibre entre le métal M et la solution d'un de ses sels comportant l'ion M^{n+} d'activité a. Lorsque $a = 1$, $E = E_0$: potentiel électrochimique normal qui est repéré par rapport au potentiel-étalon H/H^+ pris comme zéro et peut être évalué à partir de l'affinité standard de la réaction intervenant à l'électrode considérée par la relation : $E_0 = \frac{A_0}{nF}$ où n est le nombre de charges portées par l'ion, et F le faraday (96 560 coulombs). Notons que les potentiels électrochimiques normaux des métaux très électropositifs (alcalins et alcalino-terreux) sont de l'ordre de — 2 volts, ceux des métaux de transition de l'ordre de — 1 à — 0,3 volt, et ceux des métaux plus nobles ou faiblement électropositifs (Pb, Cu, Ag), de l'ordre de — 0,1 à + 0,3 volt.

La concentration des ions en solution agissant sur les potentiels d'équilibre, il en résulte que l'électrolyse n'est pas sélective : pour un même potentiel cathodique, plusieurs ions peuvent se décharger selon leur concentration, et souvent les électrolytes seront purifiés avant et pendant l'électrolyse afin d'assurer une bonne pureté du métal ; en effet, tous les métaux qui, dans les conditions de concentration de leurs ions en solution, ont un potentiel de dépôt inférieur à celui des ions H^+ (donc de l'hydrogène, $E_{H^+} = 0 - \frac{RT}{nF}\,pH$), ne peuvent théoriquement pas être électrolysés. Fort heureusement, grâce à des phénomènes de polarisation des électrodes, il n'en est pas toujours ainsi.

2 et 3 — **Surtensions anodique et cathodique.** En ce qui concerne l'hydrogène, il existe une importante surtension cathodique ST_c due à la difficulté de la réaction $2\,H^+ + 2\,e^- \rightarrow H_2$ qui dépend de la nature du métal constituant la cathode. C'est ainsi qu'on peut néanmoins envisager le dépôt des métaux en solution aqueuse jusqu'à un potentiel électrochimique de — 1 V (Mn) : c'est le cas, par exemple, du fer, du cobalt, du nickel, du cadmium, du zinc. Un cas exceptionnel est fourni par l'électrolyse du sodium à partir de solutions aqueuses sur cathode de mercure : la surtension cathodique très élevée de l'hydrogène et l'activité très faible du sodium en solution diluée dans le mercure permettent la formation d'un amalgame à partir duquel le sodium est extrait. Cette technique est d'ailleurs applicable à d'autres métaux.

Concernant l'oxygène, il existe également une importante surtension due à la difficulté de la réaction

$$OH^- \rightarrow \frac{1}{2}\,O_2 + H^+ + 2\,e^-.$$

Ainsi, dans le cas de l'électrolyse d'une solution normale de sulfate de cuivre, $E_a = 1{,}80$ V au lieu de 0,81 V. Cette surtension anodique de l'oxygène peut être atténuée par agitation du bain, par l'utilisation d'un catalyseur ou d'un agent réducteur.

4 — **Tension** E_Ω due à la résistance ohmique de l'électrolyte. On cherchera à la rendre minimale par un bon ajustement de la composition de l'électrolyte et par une bonne conception de l'électrolyseur.

5 — **Tension de contact** E_K au niveau des électrodes et des liaisons entre les électrodes.

Dans ces conditions, la tension d'électrolyse requise sera :

$$E_{\text{électrolyse}} = (E_a + ST_a) - (E_c + ST_c) + E_\Omega + E_K$$

Elle est en général nettement plus élevée que la tension théorique $E_R = E_a - E_c$ relative à la réaction électrochimique globale, parfois deux à trois fois plus grande. Par exemple, dans le cas de l'électrolyse du cuivre, elle sera d'environ 2 V, alors que $E_R = 0{,}47$ V; elle sera de 5 V dans le cas de l'aluminium, alors que $E_R = 1{,}05$ V. Néanmoins, ces exemples montrent que les tensions d'électrolyse sont faibles (quelques volts). Les intensités devront donc être élevées si l'on veut que la quantité de métal déposé soit importante. Ainsi, l'électrolyse de l'aluminium nécessite environ 15 000 kWh/tonne. Le rendement en courant de l'électrolyse, défini par le rapport du poids de métal déposé à celui qui le serait si la loi de Faraday était suivie, est compris suivant les cas entre 0,60 et 0,95, car des réactions annexes interviennent; par exemple, la redissolution de la cathode avec l'augmentation de la teneur en acide, le dépôt d'autres éléments et en particulier le dégagement d'hydrogène, des pertes électriques (courts-circuits anode-cathode lorsque des dendrites poussent sur cette dernière), des pertes à la terre, des pertes par échauffement (électrolyse ignée en particulier).

Lorsque le dépôt des métaux à partir de leurs solutions aqueuses est rendu impossible par la décharge des protons, on a alors recours à l'électrolyse ignée qui s'applique particulièrement bien aux bains de chlorures fondus (Mg et Ca). L'aluminium s'obtient par électrolyse d'une solution d'alumine dans la cryolithe fondue; il se rassemble à la cathode, et l'oxygène se dégage à l'anode de graphite qui s'oxyde progressivement avec dégagement de CO_2 et de CO et doit être renouvelée (électrodes continues : procédé Söderberg).

Notons que la préparation des métaux par électrolyse ignée se heurte à des difficultés liées au choix de l'électrolyte qui doit présenter des caractéristiques électrochimique, thermique, électrique, de densité, chimique et économique convenables, au choix du matériau pour les électrodes et les cellules, et enfin à la protection du métal en cours d'électrolyse.

Principes de l'obtention du métal de pureté commerciale et du métal très pur (affinage et raffinage)

Les différents procédés d'extraction des métaux conduisent à des matériaux de pureté plus ou moins grande. Aussi doivent-ils être purifiés, soit parce qu'ils sont inutilisables même pour des usages courants, soit parce qu'ils sont destinés à des applications particulières dans les industries nucléaire, électronique, mécanique ou chimique, qui exigent, pour de hautes caractéristiques, une pureté élevée.

Les procédés de purification des métaux sont toujours fondés sur le principe que des éléments différents se répartissent différemment dans différentes phases et que ces phases peuvent être séparées physiquement. On peut alors distinguer les procédés de purification des métaux par séparation métal-scorie, par séparation métal-métal et par séparation métal-gaz, qui relèvent tous de la pyrométallurgie. Une place à part sera réservée à la purification par électrolyse et par décomposition d'un produit volatil.

Purification par séparation métal-scorie (ou laitier)

C'est la méthode la plus importante; elle fait intervenir, le plus souvent, une réaction d'oxydation sélective des impuretés présentes dans le métal liquide et qui possèdent une affinité plus grande pour l'oxygène que le métal à purifier (affinage de la fonte et de l'acier, du plomb, du cuivre...). L'oxyde M'O de l'impureté M' à éliminer du métal M participe alors à l'équilibre $M' + MO \rightleftarrows M'O + M$, fonction de la température.

L'agent oxydant le plus courant est l'oxygène (ou l'air éventuellement suroxygéné), parfois un oxyde métallique ou la vapeur d'eau. Si les oxydes formés sont gazeux (C, S, As, Zn), ils s'éliminent facilement; s'ils sont liquides

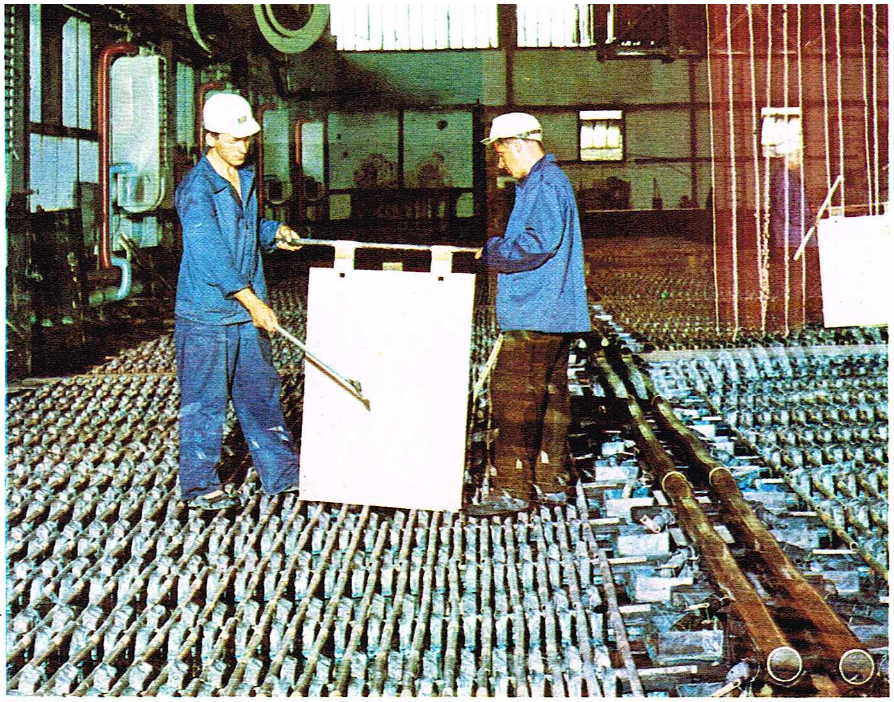

I.G.D.A. - photo Turisticka - Stampa

▲ *Traitement de purification du cuivre dans une usine yougoslave.*

(Si, Mn, P, Fe, Pb) ou solides (Al), ils sont généralement plus légers que le métal et se séparent par décantation. Cependant, ils sont souvent partiellement dissous dans le métal M, et il faut les amener à se rassembler dans une scorie surmontant le métal et présentant pour eux une forte affinité (scorification). Ainsi, un laitier basique à base de chaux permet l'élimination du phosphore de l'acier liquide sous la forme d'anhydride phosphorique P_2O_5. Inversement, un laitier acide pourra absorber les oxydes de fer FeO et MnO.

En réalité, le bain métallique contient plusieurs impuretés qui s'éliminent dans un certain ordre. Ainsi, lors de l'affinage de la fonte, le carbone s'élimine avant le phosphore. Il est évident que seules les impuretés moins nobles que le métal à purifier sont susceptibles d'être éliminées par oxydation; c'est ainsi que le cuivre, le nickel, l'étain et l'antimoine ne pourront pas être éliminés de l'acier par les méthodes classiques.

L'élimination par oxydation d'une impureté ne peut jamais être tout à fait complète, et si l'on cherche qu'elle soit la plus poussée possible, elle entraîne l'oxydation du métal lui-même. Ainsi, lors de l'affinage de la fonte par l'oxygène, le carbone et l'oxygène dissous dans le bain métallique participent à l'équilibre : $C + O \rightleftarrows CO\ (g)$, la pression de CO formé étant proche d'une atmosphère, le produit de solubilité $a_C \times a_O = 0{,}002\,3$ à 1 600 °C. On voit qu'une teneur en carbone très faible ne peut être atteinte que si la teneur en oxygène du bain augmente. Les mêmes considérations s'appliquent à tous les autres cas : le cuivre, par exemple, présente une teneur élevée en oxyde Cu_2O lorsqu'il est débarrassé de son fer et de son zinc. L'agent d'affinage le plus efficace serait celui dont la solubilité dans le métal à purifier serait le plus faible.

La solubilité de l'oxygène est habituellement faible, mais l'effet de l'oxygène sur les propriétés d'emploi des métaux est souvent très important. Il faut donc en général éliminer cet oxygène en excès avant la coulée du métal en employant un désoxydant puissant : Mn, Si et Al dans le cas de l'acier, alliage Cu-P ou perchage pour le cuivre. L'opération de *perchage* consiste à plonger des grumes de sapin vert dans le bain; il se produit un bouillonnement dû au dégagement de vapeur d'eau, d'hydrogène et d'hydrocarbures qui réduisent en partie l'oxyde Cu_2O et se dissolvent partiellement dans le cuivre. On achève de désoxyder le bain en le saupoudrant avec du charbon de bois. Par brassage, les gaz dissous se dégagent.

Purification par séparation métal-métal

On peut distinguer la liquation, qui est une méthode d'affinage d'importance beaucoup moins grande que l'affinage par oxydation, et la fusion de zone, qui est une technique de raffinage utilisée pour la préparation des métaux de haute pureté.

Affinage par liquation

Fondé sur la forme du diagramme de solidification métal-impureté, il peut s'appliquer à plusieurs métaux fusibles pour lesquels les impuretés élèvent la température de fusion. En chauffant le métal impur à une température

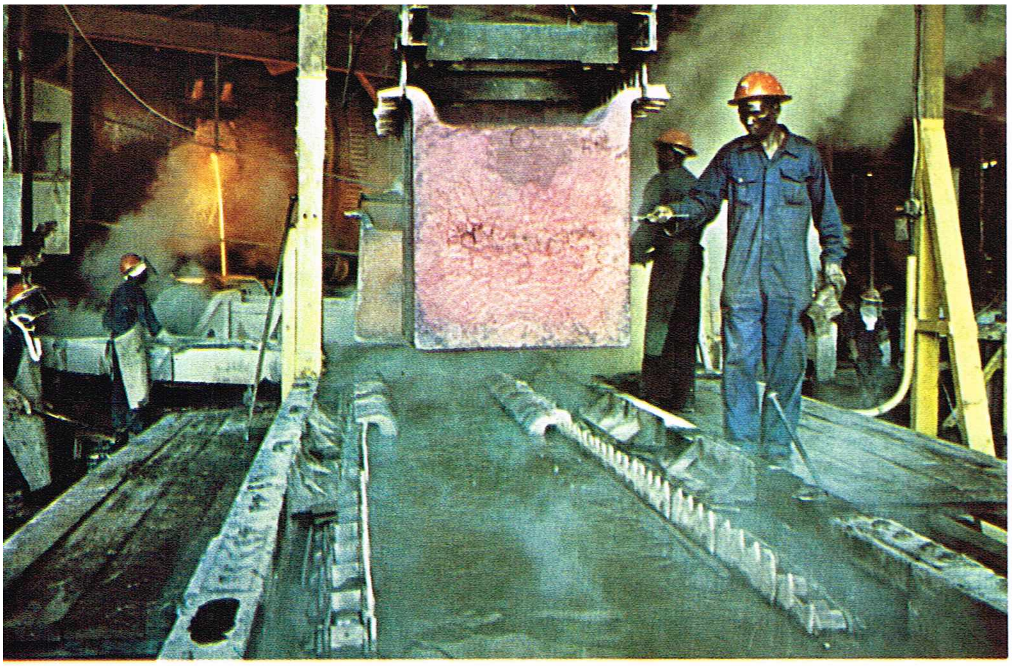

M.C. Bernheim - Rapho

▲ ***Une unité de raffinage électrolytique du cuivre en Zambie.***

légèrement supérieure à la température de fusion du métal pur, seul le métal purifié fond et peut être séparé de la phase impure. Cette technique s'applique en particulier à la purification du plomb, de l'étain et du zinc, qui peuvent contenir respectivement comme impureté principale : 0,05 % de cuivre, 0,1 % de fer et 0,5 % de plomb. Ces métaux liquatés sont alors utilisables pour de nombreuses applications. Signalons qu'une technique similaire peut être parfois utilisée dans le traitement des minerais pour éliminer un sulfure fusible de la gangue (Sb et Bi).

Raffinage par fusion de zone

Le principe de la purification par la technique de la zone fondue repose sur le partage du soluté (impureté) entre les phases liquide et solide en équilibre. Si le soluté élève le point de fusion du métal, il est plus soluble dans la phase solide que dans la phase liquide (le coefficient de partage k défini par le rapport des solubilités de l'impureté dans le solide et dans le liquide est supérieur à l'unité) ; si, au contraire, il abaisse le point de fusion du métal, il est plus soluble dans le liquide que dans le solide ($k < 1$). La technique de raffinage par fusion de zone consiste donc à déplacer lentement d'une extrémité à l'autre d'un barreau de métal impur, maintenu sous vide, sous hydrogène ou sous atmosphère neutre et chauffé par induction ou par faisceau électronique, une zone fondue d'un centimètre environ. En se déplaçant, la zone fondue entraîne vers la queue du barreau les impuretés avec $k < 1$; quant aux impuretés avec $k > 1$, elles se rassemblent en tête de barreau. Compte tenu de la lenteur des phénomènes de diffusion et parfois aussi des faibles écarts à l'unité des coefficients de partage relatifs à certaines impuretés, plusieurs passages pratiqués toujours dans le même sens sont nécessaires. Après chutage des extrémités du barreau, il est possible de cette façon d'obtenir un métal extrêmement pur dont le total des impuretés est inférieur à 1 p. p. m. (partie par million). Coûteuse à grande échelle, la technique de la zone fondue est cependant la plus efficace des techniques de raffinage.

Purification par séparation métal-gaz

Outre la distillation et la sublimation, qui sont des méthodes de raffinage, il faut mentionner les techniques modernes de la métallurgie sous vide qui sont utilisées à la fois pour l'affinage et pour le raffinage des métaux.

Distillation et sublimation

La pression de vapeur p (mm Hg) d'un métal pouvant se mettre sous la forme approximative

$$\log p = \frac{-\text{L}}{2{,}303\ \text{RT}} + \text{cte},$$

où L est la chaleur latente d'évaporation du liquide ou de sublimation du solide concerné, il apparaît que les techniques de distillation ou de sublimation s'adresseront de préférence aux métaux les plus volatils : les métaux courants présentant les températures d'ébullition les plus faibles sont, à la pression atmosphérique, Hg (357 °C), Cd (765 °C), Zn (905 °C), Mg (1 107 °C). Ainsi la sublimation, sous pression réduite (0,1 mm Hg), du magnésium (à 600 °C) et du calcium (à 800 °C) extraits par électrolyse permet d'obtenir respectivement des métaux à 99,99 et 99,3 % de pureté. La distillation est couramment employée pour la purification du mercure, et parfois aussi pour la purification du zinc (Pb, Cd, In) obtenu par réduction de l'oxyde ZnO. On obtient ainsi du zinc titrant mieux que 99,99 %.

Métallurgie sous vide

Parmi les procédés de purification sous vide, la désoxydation et le dégazage de l'acier liquide sont d'un intérêt particulier. Le carbone, sous une pression de CO de 1 atm, est un désoxydant d'une efficacité assez faible ; par contre, sous pression réduite, la réaction $\text{C} + \text{O} \rightleftarrows \text{CO}\ (g)$ est déplacée vers la droite, et pour $P_{\text{CO}} = 10^{-3}$ atm, le produit de solubilité $a_{\text{C}} \times a_{\text{O}} = 2 \cdot 10^{-6}$: le carbone devient alors un meilleur désoxydant que l'aluminium.

En pratique, le produit de solubilité est supérieur à la valeur théorique, surtout pour des raisons cinétiques : on cherchera donc toujours, dans les problèmes de désoxydation et de dégazage, à augmenter la surface libre du métal à partir de laquelle, seule, les gaz peuvent s'échapper. Plusieurs méthodes se sont développées dans ce sens. Dans tous les procédés, une pression de l'ordre de 1 mm Hg est utilisée. C'est ainsi qu'il est possible d'envisager, dans le cas de l'acier, la désulfuration sous vide en présence de silicium ou l'élimination du cuivre, du zinc et du manganèse. En particulier pour le cuivre, la métallurgie sous vide est pratiquement la seule méthode possible. L'étain, qui est un élément indésirable dans l'acier, peut, lui aussi, être éliminé sous vide sous la forme d'un sulfure volatil. Enfin, la métallurgie sous vide utilisant le fait que la réaction entre un carbure et un oxyde est favorisée par une faible pression, a trouvé une application intéressante dans la préparation des ferro-alliages à bas carbone (réduction sous vide) et dans la purification de certains métaux rares (V, Nb...).

Purification par électrolyse

C'est un procédé de raffinage en solutions aqueuses ou en bains de sels fondus dont le principe est le même que celui rappelé lors de l'étude de l'extraction électrométallurgique, avec la différence fondamentale qu'il est fondé sur la technique de l'anode soluble. Dans la cellule à électrolyse, l'anode est constituée du métal impur, et la cathode, du métal pur ; le bain est une solution d'un sel de ce métal, le métal pur se dépose sur la cathode tandis que l'anode se dissout progressivement. La tension d'électrolyse peut être très faible, puisque tout revient à un transfert du métal de l'anode à la cathode sans réaction chimique. Il suffit de vaincre la résistance ohmique de l'électrolyte. Il en résulte que ce procédé est peu onéreux. En réalité, on augmente la tension d'électrolyte afin d'accroître l'intensité, donc le débit de l'installation, sans dépasser toutefois une valeur maximale à partir de laquelle des impuretés seraient susceptibles d'être électrolysées. Au cours de l'électrolyse, certaines impuretés sont solubles dans l'électrolyte et doivent être éliminées périodiquement par une purification du bain, d'autres, insolubles (métaux nobles), tombent au fond de la cuve.

Le raffinage électrolytique peut être utilisé pour tous les métaux soit en solution aqueuse (Cu, Fe, Zn, Pb), soit en solution de sels fondus (Al, U, Be). Il permet d'obtenir des métaux très purs titrant de 99,5 à 99,995 % (par exemple Al).

Purification par décomposition d'un produit volatil

Outre la décomposition thermique de certains halogénures métalliques volatils, en particulier les iodures, qui constitue la base du procédé Van Arkel de préparation du titane, du zirconium, du chrome, etc., de haute pureté, il convient de mentionner également la décomposition thermique de certains métaux carbonyles $\text{M}_x\ (\text{CO})_y$ dérivant d'un métal de transition qui permet d'obtenir le métal M très pur : c'est par exemple le cas du nickel qui, sous l'action de CO sous pression à basse température, forme le carbonyle $\text{Ni}\ (\text{CO})_4$; les principales impuretés du nickel, en particulier le cobalt et le fer, ne réagissent pas dans les conditions opératoires utilisées. Le composé volatil $\text{Ni}\ (\text{CO})_4$ est alors décomposé à température plus élevée (procédé Mond) pour donner le nickel purifié.

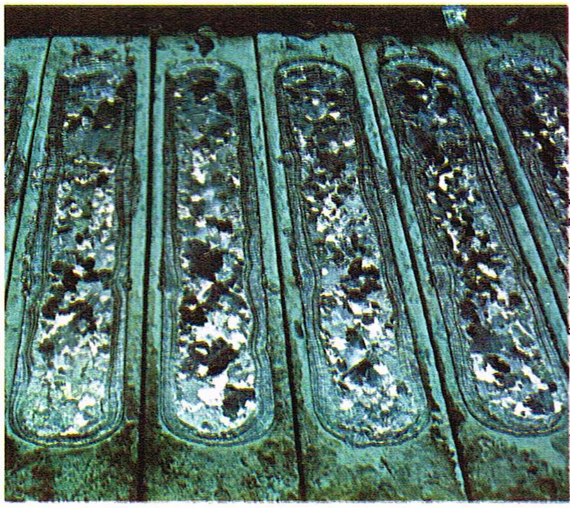

Sté minière et métallurgique de Peñarroya

◀ ***Des lingots de plomb brut.***

LA MISE EN FORME DES MÉTAUX

La mise en forme des métaux est l'ensemble des transformations permettant de passer du lingot métallique brut de coulée au produit « utilisable ». On distingue généralement deux étapes principales dans ces transformations : les premières tranformations, qui aboutissent au *demi-produit;* les transformations secondaires successives, qui aboutissent au *produit final.* Cette classification n'est pas sans défaut, certains procédés technologiques étant voisins, sinon identiques dans les deux cas. Les premières transformations sont essentiellement fondées sur les propriétés de *déformation plastique à chaud des métaux,* c'est-à-dire à une température comprise entre environ 0,6 T_f et 0,8 T_f (T_f : température absolue de fusion).

Si l'on exclut arbitrairement les procédés de frittage, qui seront décrits ultérieurement, ces opérations ont pour but de transformer une structure métallurgique brute de coulée (lingot, ou plus récemment demi-produit de coulée continue), dont les propriétés mécaniques sont médiocres, en une *structure corroyée* d'un demi-produit de géométrie mieux définie. Cette structure corroyée rend le métal apte à subir toutes les transformations successives qui aboutissent au produit utilisable (fil, tôle, pièce mécanique, etc.). Ces transformations font appel aux propriétés de *déformation plastique à chaud et à froid,* c'est-à-dire à température ambiante, *des métaux,* mais aussi à leurs propriétés de *soudabilité* et d'*usinabilité.* On peut enfin inclure dans cette classification les procédés de *fonderie,* qui proposent un « raccourci » intéressant dans la suite de ces diverses transformations, dans la mesure où on s'accommode de la structure métallurgique et de la géométrie qui en résultent. La *figure* I propose un schéma synoptique de cette classification des transformations du métal dans le cas représentatif de l'acier.

Chacune de ces chaînes s'arrête si le produit est jugé suffisamment transformé, c'est-à-dire *utilisable.* C'est ainsi que l'on s'efforce en principe d'éviter les usinages onéreux (perte de copeaux, coût de main-d'œuvre élevé). D'une manière générale, ce sont tous les impératifs technico-économiques qui décideront de la chaîne des transformations. Si l'une des techniques fait un certain progrès, l'équilibre des utilisations de ces techniques est remis en cause, entraînant souvent un progrès dans les techniques concurrentes. Ces progrès se font dans deux directions.

● *Il faut faire des produits moins chers.* A qualité donnée, il s'agit de diminuer le prix de revient du produit pour améliorer sa compétitivité commerciale. On peut songer soit à raccourcir le plus possible la chaîne des transformations, soit à produire une plus grande quantité de pièces par unité de capital machine investi. La deuxième tendance conduit cependant à envisager de travailler davantage dans les vingt-quatre heures quotidiennes, ou d'utiliser l'outillage plus longtemps avant périssement. On se heurte très vite aux problèmes inhérents à la qualité de la vie, ou bien on multiplie les séquences de contrôle de la qualité technique. La première tendance vient aussi rapidement buter contre les difficultés techniques de réalisation (synchronisation aciérie-laminage ou aciérie-forgeage en coulée continue par exemple), ou encore engendre des idées de techniques « mixtes » (ébauches moulées pour forgeage par exemple) tout aussi difficiles à appliquer.

● *Il faut faire des produits de meilleure qualité.* C'est là le principal moteur de la compétition entre les diverses techniques. Quelques exemples en précisent les difficultés :

— vouloir améliorer la précision dimensionnelle en déformation plastique à froid pour supprimer l'usinage conduit à des problèmes d'outillage, de lubrification, de débitage précis des lopins, etc. ;

— vouloir améliorer les caractéristiques structurales conduit à maîtriser les processus théoriques de solidification en fonderie, les propriétés de la zone affectée par la chaleur en soudage, ou encore les interactions structure-histoire thermomécanique en déformation plastique à chaud ; les problèmes scientifiques liés à ces difficultés sont loin d'être résolus ;

— vouloir améliorer la gamme des nuances métalliques susceptibles d'être mises en forme conduit à progresser dans l'élaboration de métaux plus déformables, plus soudables, plus usinables, d'une part, et dans celle de matériaux de plus en plus performants pour l'outillage, d'autre part.

Une combinaison plus poussée avec la technique concurrente du frittage (produits frittés-laminés, etc.) est une idée prometteuse, car elle peut amener un progrès à tous les niveaux de la chaîne des transformations (élaboration de la matière première, stockage, etc.). Enfin, celle d'une déformation dans un état de gelée intermédiaire entre les états solide et liquide est séduisante, mais seulement au stade expérimental.

Approches scientifiques

La mécanique des procédés

Pour prévoir le comportement macroscopique du métal au cours de sa mise en forme, les calculs théoriques permettent essentiellement : du point de vue global, de prévoir les efforts dans les machines et dans les outils, et la forme finale de la pièce ; du point de vue local, de déterminer l'histoire des déformations, des contraintes et des températures en chaque point de la pièce (en vue de prévoir l'évolution de la structure microscopique en particulier).

Déformation

Soit une barre homogène AB de longueur l_0 que l'on allonge d'une quantité Δl. Montrons que Δl ne caractérise pas, à lui seul, la notion intuitive que l'on a de la déformation. Pour cela, considérons une barre CD,

▼ ***Figure 1 : schéma synoptique de la classification des transformations dans le cas de l'acier.***

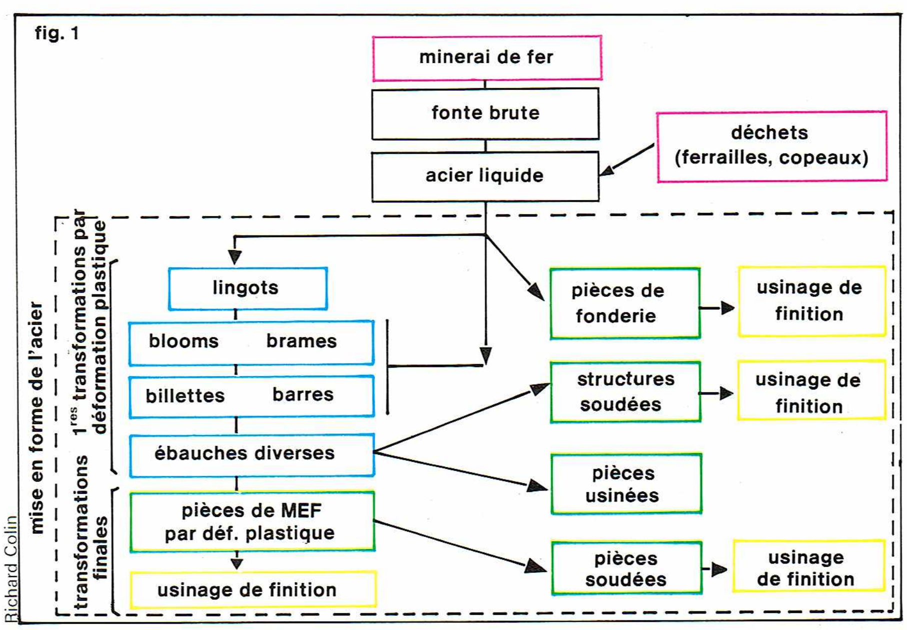

Richard Colin

ayant les mêmes caractéristiques que AB, mais de longueur 2 l_0. Pour obtenir la même déformation de CD, il est naturel de considérer qu'il faut lui faire subir un allongement de 2 Δl (on peut imaginer que CD est constitué de 2 barres analogues à AB, et jointives). Ces remarques élémentaires suggèrent de rapporter l'allongement à la longueur initiale, pour définir la déformation par la formule : $\varepsilon = \Delta l / l_0$.

L'étape suivante consiste à étudier la *déformation homogène* d'un corps quelconque. Pour simplifier les schémas, nous prendrons le cas à deux dimensions. Afin de visualiser la déformation, traçons un maillage carré sur la pièce initiale P_0. Une déformation homogène transforme ce maillage en parallélogrammes identiques. Isolons un carré ABCD de côté d et comparons-le à son transformé A′B′C′D′. On peut décomposer la déformation totale selon la séquence simple suivante (*fig.* 2) : écrasement selon Ox (de la quantité — a) ; allongement selon Oy (de b) ; cisaillement (c) ; translation et rotation d'ensemble qui, n'affectant pas la forme, ne contribuent pas à la déformation. Seules les trois premières phases sont donc des déformations, que l'on note respectivement :

$$\varepsilon_{xx} = \frac{-a}{d} \qquad \varepsilon_{yy} = \frac{b}{d} \qquad e_{xy} = \frac{1}{2}\frac{c}{d}$$

Comme précédemment, on a rapporté les déplacements au côté du carré initial.

Imaginons maintenant une petite barre AE quelconque à l'intérieur du carré ABCD (*fig.* 2), de longueur initiale $l_0 = 1$. Nous allons montrer que la connaissance des trois quantités ε_{xx}, ε_{yy} et ε_{xy} permet de calculer sa déformation (à condition que celle-ci soit assez faible, c'est-à-dire que a, b, c soient petits devant d). Pour cela, il suffit d'étudier l'évolution des coordonnées α et β du vecteur AE au cours des trois premières phases ; on montre que cela conduit à :

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \\ \beta \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \alpha - \alpha\frac{a}{d} \\ \\ \beta \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \alpha - \alpha\frac{a}{d} \\ \\ \beta + \beta\frac{b}{d} \end{bmatrix} \rightarrow$$

$$\begin{bmatrix} \alpha' \# \ \alpha - \alpha\frac{a}{d} + \beta\frac{c}{d} \\ \\ \beta' \# \ \beta - \beta\frac{b}{d} \end{bmatrix}$$

la longueur de l'éprouvette après déformation étant :

$$l' = \alpha'^2 + \beta'^2$$

la déformation de l'éprouvette s'écrit :

$$\varepsilon = \frac{l' - l_0}{l_0} = \alpha'^2 + \beta'^2 - 1$$

ce qui donne, sachant que $\alpha^2 + \beta^2 = 1$, et en négligeant les termes du second ordre :

$$\varepsilon \# - \frac{a}{d}\alpha^2 + \frac{b}{d}\beta^2 + \frac{c}{d}\alpha\beta$$

ou encore, compte tenu des notations précédentes :

$$\varepsilon \# \ \varepsilon_{xx}\alpha^2 + \varepsilon_{yy}\beta^2 + 2\ \varepsilon_{xy}\alpha\beta$$

Le cas le plus général est celui du solide S (à trois dimensions), qui se déforme en un solide S′, la déformation n'étant plus nécessairement homogène. Pour définir mathématiquement la transformation, il faut introduire le vecteur déplacement correspondant à chaque point M (x, y, z) du solide initial S et à son transformé M′ de S′ : c'est le vecteur $\overrightarrow{MM'}$. Ses composantes seront les fonctions U (x, y, z), V (x, y, z), W (x, y, z). On définit alors six nombres qui permettent de caractériser la déformation locale autour du point M, soit :

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial U}{\partial x} \qquad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial V}{\partial y} \qquad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial W}{\partial z}$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x}\right) \qquad \varepsilon_{xz} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x}\right)$$

$$\varepsilon_{yz} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y}\right)$$

Pour rattacher cette définition aux notions précédentes, il suffit de considérer que l'on a construit autour du point M un maillage assez fin (dans les trois directions x, y, z) pour que la déformation puisse y être considérée comme homogène. Les dérivations sont introduites par le passage à la limite lorsque le maillage devient de plus en plus fin.

Les six nombres définis précédemment sont généralement rangés sous forme d'un tableau symétrique, appelé *tenseur des déformations* et noté :

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} & \varepsilon_{yz} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix}$$

Pour caractériser, par une seule quantité, la déformation subie par un point matériel, on introduit la *déformation généralisée ;* pour une petite déformation définie par le tenseur $[\Delta\varepsilon]$, la déformation généralisée sera :

$$\Delta\bar{\varepsilon} = \left(\frac{2}{3}\left(\Delta\varepsilon_{xx}^2 + \Delta\varepsilon_{yy}^2 + \Delta\varepsilon_{zz}^2 + 2\ \Delta\varepsilon_{xy}^2 + 2\ \Delta\varepsilon_{xz}^2 + 2\ \Delta\varepsilon_{yz}^2\right)\right)^{1/2}$$

Pour une succession de petites déformations, la déformation généralisée sera la somme :

$$\bar{\varepsilon} = \Sigma\,\Delta\,\bar{\varepsilon}$$

En passant à la limite, cette somme devient une intégrale, et on peut montrer que pour une barre rectiligne (incompressible, c'est-à-dire que $\Delta\varepsilon_{xx} + \Delta\varepsilon_{yy} + \Delta\varepsilon_{zz} = 0$) :

$$\bar{\varepsilon} = \ln\frac{l_0 + \Delta l}{l_0}$$

qui, dans le cas de petite déformation, se réduit à $\bar{\varepsilon} \# \varepsilon$.

Si l'on considère le temps Δt pendant lequel la matière a subi l'incrément de déformation, on peut introduire la *vitesse de déformation :* $[\dot{\varepsilon}] = \left(\frac{\Delta\varepsilon}{\Delta t}\right)$.

De façon plus précise :

$$\dot{\varepsilon}_{xx} = \frac{d\varepsilon_{xx}}{dt}, \qquad \dot{\varepsilon}_{xy} = \frac{d\varepsilon_{xy}}{dt}, \text{ etc.}$$

et la vitesse de déformation généralisée :

$$\dot{\bar{\varepsilon}} = \left(\frac{2}{3}\left(\dot{\varepsilon}_{xx}^2 + \dot{\varepsilon}_{yy}^2 + \dot{\varepsilon}_{zz}^2 + 2\ \dot{\varepsilon}_{xy}^2 + 2\ \dot{\varepsilon}_{yz}^2 + 2\ \dot{\varepsilon}_{xz}^2\right)\right)^{1/2}$$

Si l'on se donne un champ de vitesses en tout point défini par :

$$\vec{V} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}$$

$$\dot{\varepsilon}_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \qquad \dot{\varepsilon}_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \qquad \dot{\varepsilon}_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z}$$

$$\dot{\varepsilon}_{xy} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) \qquad \dot{\varepsilon}_{xz} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)$$

$$\dot{\varepsilon}_{yz} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right).$$

fig. 2

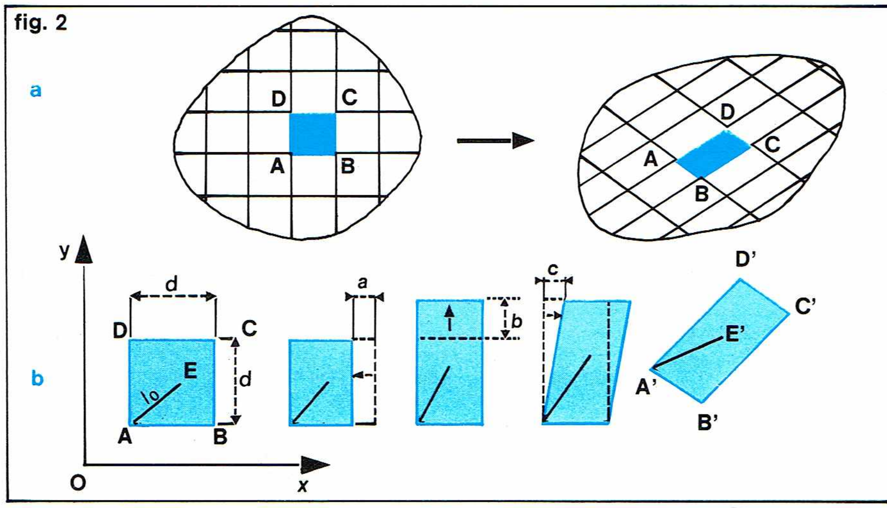

Richard Colin

▼ ***Figure 2 :*** ***décomposition de la transformation homogène d'un corps quelconque.***

Contraintes

Nous introduisons les contraintes par une méthode voisine de celle que nous avons utilisée pour les déformations, mais en tenant compte des lois de la dynamique. Considérons tout d'abord une barre AB soumise aux deux forces opposées $-\vec{F}$ et $\vec{F}$. Soit un point quelconque entre A et B. Pour expliquer l'équilibre du tronçon AI (resp. IB), il faut postuler l'existence d'une force interne $\vec{F}$ (resp. $-\vec{F}$) exercée en I par l'autre tronçon. Si maintenant on considère deux barres identiques superposées, équivalentes à une barre de section double, pour obtenir la même déformation de chacune des barres, on admet qu'il faut appliquer à l'ensemble les forces $-2\vec{F}$ et $2\vec{F}$. Au lieu de forces internes, il est donc préférable d'utiliser la notion de contrainte définie par : $\sigma = F/S$, où S est la section de la barre. On adoptera la convention $\sigma > 0$ pour une traction, $\sigma < 0$ pour une compression.

Soit un corps quelconque (C) soumis à un ensemble de forces extérieures (*fig.* 3 a). On peut également montrer l'existence de forces internes, en séparant (C) en deux parties (C_1) et (C_2) par une surface quelconque (S) et en admettant que l'action de (C_2) sur (C_1) a lieu uniquement par l'intermédiaire de la surface (S) [*fig.* 3 b]. Il s'agit donc de forces de contact, que nous caractérisons en tout point M par leur action sur une surface dS entourant M : soit $\vec{df}$ la force élémentaire correspondante. Tout naturellement, d'après ce qui précède, nous définirons le vecteur contrainte par : $\vec{T} = \dfrac{\vec{df}}{dS}$.

Dans le cas général, le vecteur $\vec{T}$ dépend de la position du point M et de l'orientation de dS, ou plus précisément du vecteur $\vec{n}$ unitaire normal à dS (de composantes α, β, γ) ; on peut l'écrire $\vec{T}(M, \vec{n})$.

D'après le principe de l'égalité de l'action et de la réaction, on vérifie immédiatement $\vec{T}(M, \vec{n}) = -\vec{T}(M, -\vec{n})$.

Contrainte normale : c'est la projection de $\vec{T}$ sur $\vec{n}$: $\sigma_n = \vec{T} \cdot \vec{n}$ (traction pour $\sigma_n > 0$).

Cission : c'est la contrainte tangentielle : $\tau = (\vec{T}^2 - \sigma_n^2)^{\frac{1}{2}}$.

Pour simplifier les raisonnements qui suivent, nous reprendrons le cas à deux dimensions, et nous donnerons les formules finales pour le cas général. Calculons, en un point M fixé, le vecteur contrainte correspondant à une normale $\vec{n}$ (α, β) quelconque. Pour cela, nous construisons (*fig.* 4a) le triangle MRS, dont deux côtés seront parallèles aux axes de coordonnées, et le troisième perpendiculaire à $\vec{n}$. Les longueurs des côtés du triangle sont assez faibles pour que tout vecteur contrainte puisse être considéré comme constant à l'intérieur. En l'absence de forces de masse, les forces appliquées à chacun des côtés du triangle seront respectivement ($\vec{i}$ et $\vec{j}$ sont les vecteurs unitaires sur Ox et Oy) :

côté MS : $\Delta\vec{f}_y = \vec{T}(M, -\vec{i})\,\Delta y = -\vec{T}(M, \vec{i})\,\Delta y$

côté MR : $\Delta\vec{f}_x = \vec{T}(M, -\vec{j})\,\Delta x = -\vec{T}(M, \vec{j})\,\Delta x$

côté RS : $\Delta\vec{f} = \vec{T}(M, \vec{n})\,\Delta l$

L'équilibre du triangle s'écrit alors :

$$\vec{T}(M, \vec{n})\,\Delta l - \vec{T}(M, \vec{i})\,\Delta y - \vec{T}(M, \vec{j})\,\Delta x = 0$$

Sachant que les composantes de $\vec{n}$ vérifient :

$$\alpha = \Delta y/\Delta l \qquad \text{et} \qquad \beta = \Delta x/\Delta l,$$

le vecteur contrainte peut donc être calculé quel que soit $\vec{n}$ par la formule : $\vec{T}(M, \vec{n}) = \alpha\vec{T}(M, \vec{i}) + \beta\vec{T}(M, \vec{j})$ formule qui se généralise alors au cas à trois dimensions en :

$$\vec{T}(M, \vec{n}) = \alpha\vec{T}(M, \vec{i}) + \beta\vec{T}(M, \vec{j}) + \gamma\vec{T}(M, \vec{k})$$

On introduit les composantes de ces vecteurs :

$$\vec{T}(M, \vec{n}) = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} \qquad \vec{T}(M, \vec{i}) = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yx} \\ \sigma_{zx} \end{bmatrix}$$

$$\vec{Y}(M, \vec{j}) = \begin{bmatrix} \sigma_{xy} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zy} \end{bmatrix} \qquad \vec{T}(M, \vec{k}) = \begin{bmatrix} \sigma_{xz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

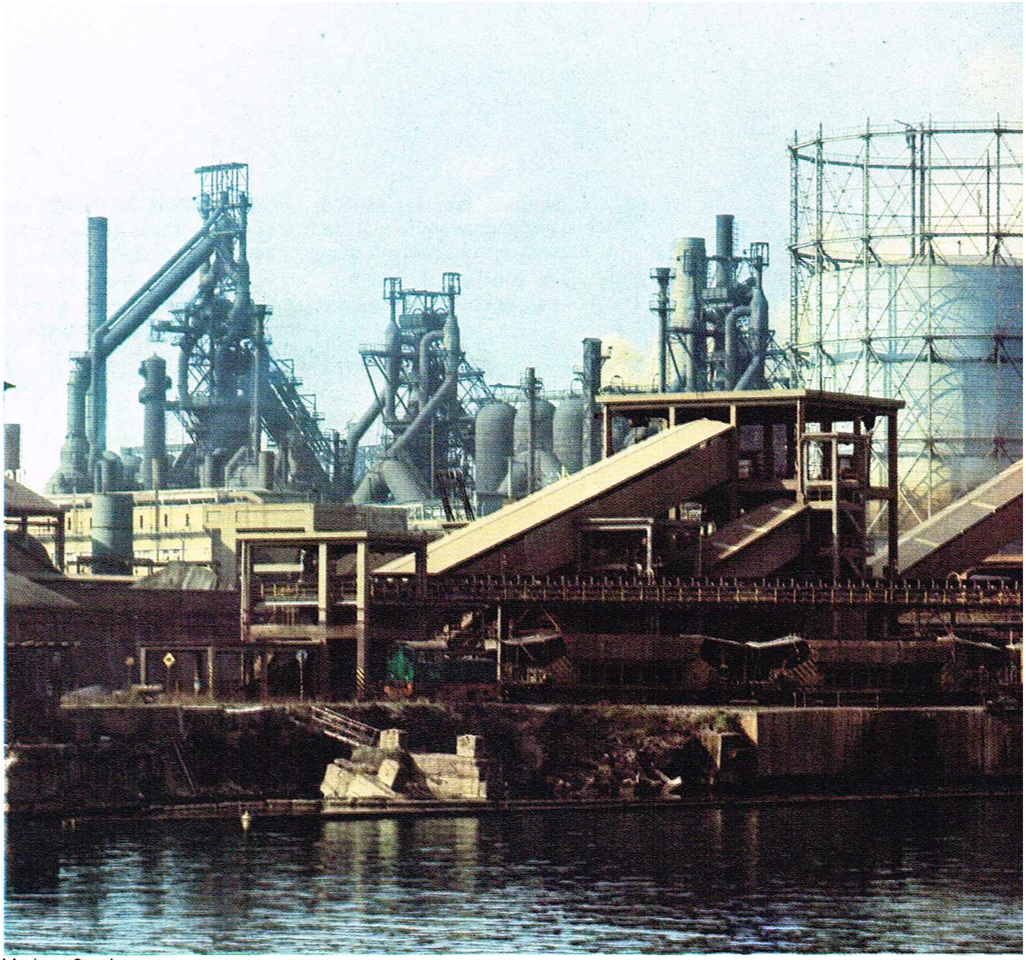

Marka - Cascio

Alors l'égalité vectorielle précédente est équivalente à 3 relations que l'on résume sous forme tensorielle (ce résultat reste valable même si l'on introduit des forces de masse : accélération, pesanteur) : $\vec{T} = [\sigma]\,\vec{n}$.

$[\sigma]$ est appelé *tenseur des contraintes,* c'est le tableau :

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

Montrons maintenant que les 9 composantes du tenseur $[\sigma]$ ne sont pas indépendantes. Reprenons le cas à deux dimensions, et étudions l'équilibre du rectangle de la *figure* 4 b. Désignons les côtés du rectangle par leurs inter-

▲ ***Hauts fourneaux de la société Italsider à Piombino (Italie).***

▼ ***Figure 3 : pour mettre en évidence l'existence d'efforts internes, on peut séparer un solide en deux parties par une surface quelconque S et définir le vecteur contrainte*** $\vec{T} = \vec{df}/dS$.
Figure 4 : on simplifie l'étude de la contrainte en étudiant d'abord le cas à deux dimensions.

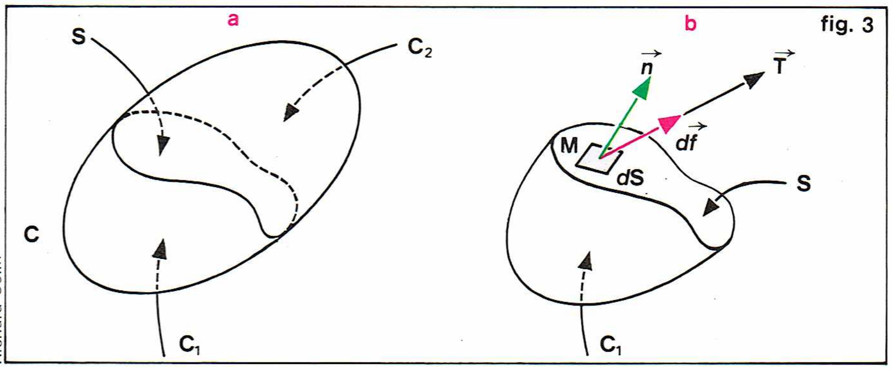

Richard Colin

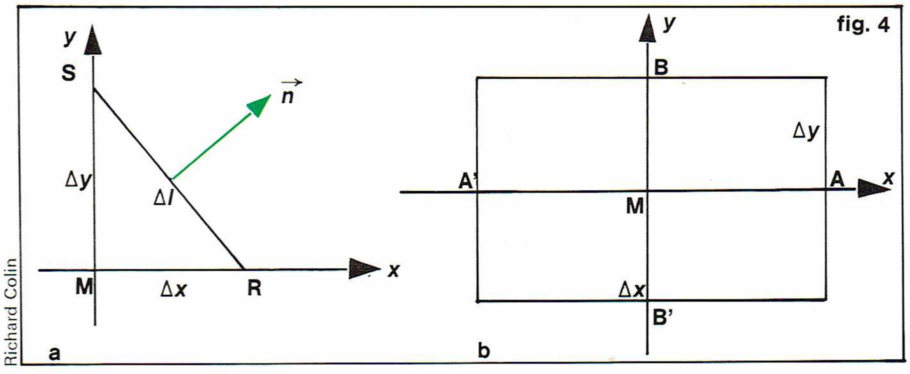

Richard Colin

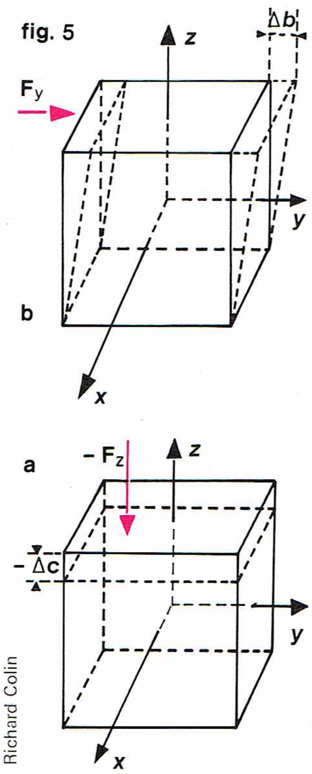

Richard Colin

▲ ***Figure 5 :* calcul de la puissance dissipée par déformation (voir développement dans le texte).**

sections avec les axes de coordonnées A, A′, B, B′. On vérifie sans peine que les forces élémentaires sur les côtés sont, en utilisant un développement au premier ordre :

$$\text{sur A} \qquad \Delta\vec{f}_A = \left(\vec{T}\,(M, \vec{i}) + \frac{\Delta x}{2}\frac{\partial \vec{T}\,(M, \vec{i})}{\partial x}\right)\Delta y$$

$$\text{sur A}' \qquad \Delta\vec{f}_{A'} = \left(\vec{T}\,(M, -\vec{i}) - \frac{\Delta x}{2}\frac{\partial \vec{T}\,(M, -\vec{i})}{\partial x}\right)\Delta y$$

$$\text{sur B} \qquad \Delta\vec{f}_B = \left(\vec{T}\,(M, \vec{j}) + \frac{\Delta y}{2}\frac{\partial \vec{T}\,(M, \vec{j})}{\partial y}\right)\Delta x$$

$$\text{sur B}' \qquad \Delta\vec{f}_{B'} = \left(\vec{T}\,(M, -\vec{j}) - \frac{\Delta y}{2}\frac{\partial \vec{T}\,(M, -\vec{j})}{\partial y}\right)\Delta x$$

L'équilibre du rectangle implique les 2 équations vectorielles :

$$\Delta\vec{f}_A + \Delta\vec{f}_{A'} + \Delta\vec{f}_B + \Delta\vec{f}_{B'} = 0 \qquad \text{(forces)}$$

$$\left(\frac{\Delta x}{2}\vec{i}\right) \wedge \Delta\vec{f}_A + \left(-\frac{\Delta x}{2}\vec{i}\right) \wedge \Delta\vec{f}_{A'} + \left(\frac{\Delta y}{2}\vec{j}\right) \wedge \Delta\vec{f}_B + \left(-\frac{\Delta y}{2}\vec{j}\right) \wedge \Delta\vec{f}_{B'} = 0 \quad \text{(moments)}$$

où le signe $\wedge$ représente le produit vectoriel.

Compte tenu des équations précédentes, on vérifie que :

— l'équilibre des moments se traduit par la relation : $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}$,

— l'équilibre des forces se traduit alors par :

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} = 0 \qquad \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} = 0$$

Dans le cas général à trois dimensions, le même raisonnement (appliqué à un parallélépipède rectangle) montre que le tenseur $[\sigma]$ est symétrique : $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}$, etc.

On vérifie en outre que div $[\sigma] = 0$.

La *pression hydrostatique* est définie par :

$$P = -\frac{1}{3}\,(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})$$

et nous utilisons en plasticité le *déviateur des contraintes* $[s]$ dont les composantes sont définies par :

$$s_{xx} = \sigma_{xx} + p \qquad s_{yy} = \sigma_{yy} + p \qquad s_{zz} = \sigma_{zz} + p$$

$$s_{xy} = \sigma_{xy} \qquad s_{yz} = \sigma_{yz} \qquad s_{xz} = \sigma_{xz}$$

Calcul de la puissance dissipée par déformation

Calculons tout d'abord le travail dépensé au cours d'une compression faible selon Oz (*fig.* 5 a). Soit un cube de côté *d*, auquel on applique la force $-F_z$ qui provoque un déplacement faible $-\Delta c$. La seule composante non nulle de $[\sigma]$ est σ_{zz} vérifiant : $\sigma_{zz}d^2 = -F_z$ dont le travail est :

$$\Delta W' = (-F_z)\,(-\Delta c) = -\sigma_{zz}d^2\Delta c$$

D'autre part, on voit que la seule composante non nulle de $[\Delta\varepsilon]$ est : $\Delta\varepsilon_{zz} = -\dfrac{\Delta c}{d}$

dont on déduit immédiatement : $\Delta W' = \sigma_{zz}\Delta\varepsilon_{zz}d^3$.

Le travail de déformation par unité de volume est donc :

$$\Delta W = \sigma_{zz}\Delta\varepsilon_{zz}$$

Pour un cisaillement simple (*fig.* 5 b), un raisonnement analogue fournit l'expression : $\Delta W = 2\,\sigma_{yz}\Delta\varepsilon_{yz}$.

Dans le cas général, on a donc :

$$\Delta W = \sigma_{xx}\Delta\varepsilon_{xx} + \sigma_{yy}\Delta\varepsilon_{yy} + \sigma_{zz}\Delta\varepsilon_{zz} + 2\,(\sigma_{xy}\Delta\varepsilon_{xy} + \sigma_{xz}\Delta\varepsilon_{xz} + \sigma_{yz}\Delta\varepsilon_{yz})$$

En divisant par Δt, on obtient la puissance dissipée :

$$\dot{W} = \sigma_{xx}\dot{\varepsilon}_{xx} + \sigma_{yy}\dot{\varepsilon}_{yy} + \sigma_{zz}\dot{\varepsilon}_{zz} + 2\,(\sigma_{xy}\dot{\varepsilon}_{xy} + \sigma_{xz}\dot{\varepsilon}_{xz} + \sigma_{yz}\dot{\varepsilon}_{yz}).$$

Rhéologie

Nous avons montré que l'on peut déterminer les déformations à partir de trois fonctions, les composantes du vecteur déplacement, puis nous avons introduit six fonctions, les composantes du tenseur des contraintes — liées par trois équations. Au total, on dispose ainsi de six fonctions pouvant être choisies arbitrairement. Pour que le problème soit déterminé, il faut six équations. On se donnera donc une relation entre $[\sigma]$ et $[\varepsilon]$ ou $[\Delta\varepsilon]$ qui détermine la rhéologie du matériau considéré. Il ne reste plus alors qu'à préciser les conditions aux limites, c'est-à-dire les conditions de contact des outils sur le métal travaillé, pour que le problème soit — au moins théoriquement — soluble.

Élasticité linéaire isotrope

Considérons tout d'abord le cas simple d'une barre soumise à une force F : la loi élastique la plus simple prévoit un allongement Δl proportionnel à la force, soit : $F = K_1\Delta l$.

Pour 2 barres de longueurs initiales l_0 et $2\,l_0$ respectivement, les allongements seront Δl et $2\,\Delta l$, ce qui conduit à :

$$F = K_2\frac{\Delta l}{l_0} = K_2\varepsilon$$

Enfin, pour allonger de la même quantité deux barres de même nature et de même longueur, mais de sections S_0 et $2\,S_0$, il faudra développer des forces respectives F et 2 F, ce qui impose de rapporter la force à la section initiale, et d'écrire une relation entre contrainte et déformation, soit : $\sigma = E\varepsilon$.

Si l'on envisage maintenant la variation ΔS de la section initiale de la barre, nous poserons qu'elle est proportionnelle à ε, soit : $\dfrac{\Delta S}{S_0} = -2\,\nu\varepsilon$. Les coefficients E (module d'Young) et ν (coefficient de Poisson) caractérisent le matériau considéré.

Pour un corps massique isotrope (C), on doit envisager un comportement identique (avec les mêmes coefficients) pour toute « petite barre » que nous supposons isolée à l'intérieur, quelles que soient sa position et son orientation. A partir de ces considérations très simples, on peut montrer que la relation entre les tenseurs $[\sigma]$ et $[\varepsilon]$ doit s'écrire :

$$[\varepsilon] = \frac{1+\nu}{E}\,[\sigma] + \frac{3\,\nu}{E}\,p\,[1]$$

$[1]$ est le tenseur unité ne comportant que des 1 dans sa diagonale.

Cette écriture symbolique est équivalente aux six équations :

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{E}\sigma_{xx} - \frac{\nu}{E}\sigma_{yy} - \frac{\nu}{E}\sigma_{zz}, \quad \varepsilon_{yy} = -\frac{\nu}{E}\sigma_{xx} + \frac{1}{E}\sigma_{yy} - \frac{\nu}{E}\sigma_{zz}$$

$$\varepsilon_{zz} = -\frac{\nu}{E}\sigma_{xx} - \frac{\nu}{E}\sigma_{yy} + \frac{1}{E}\sigma_{zz}, \quad \varepsilon_{xy} = \frac{1+\nu}{E}\sigma_{xy}$$

$$\varepsilon_{yz} = \frac{1+\nu}{E}\sigma_{yz}, \quad \varepsilon_{xz} = \frac{1-\nu}{E}\sigma_{xz}$$

Pour l'acier, on a E = 21 000 hb, $\nu = 0{,}28$.

Plasticité isotrope

★ *Éprouvette de traction.* La caractéristique essentielle de la plasticité est l'irréversibilité, que l'on peut mettre en évidence lors de l'expérience de traction d'une éprouvette cylindrique. On enregistre la contrainte en fonction de la déformation généralisée $\bar{\varepsilon}$ (*fig.* 6 a). Sur cette courbe, trois domaines sont distingués :

(A) la zone d'élasticité linéaire dans laquelle la déformation reste faible ($10^{-4} < \bar{\varepsilon} < 10^{-3}$), et s'annule si l'on supprime la contrainte ;

(B) la zone de plasticité où, lorsque l'on annule la contrainte, l'éprouvette ne reprend pas sa longueur initiale (trajet MM′) ; il subsiste une déformation résiduelle

▼ ***Figure 6 :* enregistrement de la contrainte σ en fonction de la déformation généralisée $\bar{\varepsilon}$.**

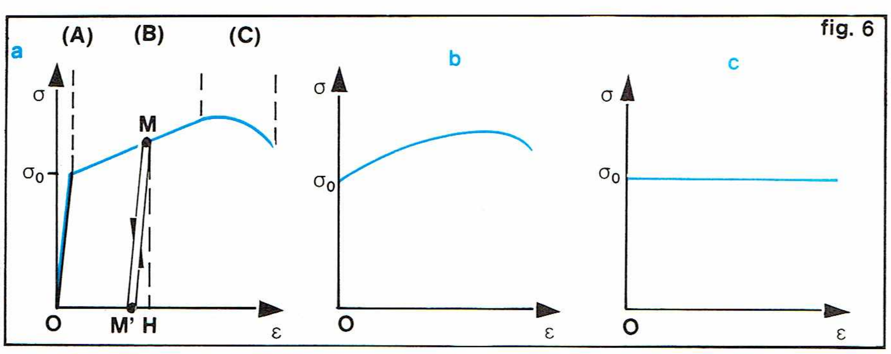

Richard Colin

importante $\varepsilon^p = OM'$ dite déformation plastique ($\varepsilon^e = M'H$ est la déformation élastique) ;
(C) une zone qui correspond à un amincissement localisé de l'éprouvette (striction) et qui aboutit à sa rupture.
La valeur σ_0 est la contrainte d'écoulement (initiale) du matériau considéré. Pour simplifier les raisonnements et les calculs, on introduit souvent des simplifications dans ce comportement :
— corps rigide plastique ; c'est une approximation dans laquelle on néglige la partie élastique, ce qui est licite lorsque la déformation plastique est grande : on a alors la courbe RP (*fig.* 6 b) dans laquelle, ici, la contrainte augmente avec la déformation ; on dit que le corps est écrouissable.
— corps rigide parfaitement plastique RPP (*fig.* 6 c) ; c'est un corps RP non écrouissable, c'est-à-dire dont la contrainte d'écoulement reste constante au cours de la déformation.

Ce cas unidimensionnel illustre les deux caractères essentiels de la plasticité :
— elle n'a lieu qu'à partir d'un certain état de contrainte (notion de critère de plasticité) ;
— elle est irréversible, c'est-à-dire qu'il n'est plus possible d'établir une relation entre contrainte et déformation, qui implique la réversibilité, comme en élasticité.

Dans ce qui suit, nous ne considérerons que les lois associées au critère de von Mises.

★ *Critère de plasticité.* Il s'agit d'un procédé qui permet de déterminer si, pour un état de contrainte donné, il y a, ou non, déformation plastique. Le critère de von Mises s'écrit, en fonction du déviateur des contraintes :

$$f([s]) \equiv s_{xx}^2 + s_{yy}^2 + s_{zz}^2 + 2\,s_{xy}^2 + 2\,s_{xz}^2 + 2\,s_{yz}^2 - \frac{2}{3}\sigma_0^2$$

avec les conditions :

$f([s]) < 0$ pas de déformation plastique ;
$f([s]) = 0$ on a plastification, et en général une déformation plastique ;
$f([s]) > 0$ est impossible, c'est-à-dire qu'au cours de la déformation plastique $|s|$ évolue de telle sorte qu'on ait toujours $f([s]) = 0$.

★ *Lois d'écoulement (pour un corps rigide plastique).* Lorsque le critère est satisfait, le métal se déforme plastiquement de telle sorte que, pour une petite déformation $[\Delta\varepsilon]$, on ait l'incompressibilité, c'est-à-dire :

$$\Delta\varepsilon_{xx} + \Delta\varepsilon_{yy} + \Delta\varepsilon_{zz} = 0$$

et

$$[\Delta\varepsilon] = [s]\,\Delta\lambda.$$

Souvent, on préfère utiliser la vitesse de déformation $[\dot\varepsilon]$, et les lois précédentes prennent alors la forme (on a divisé par Δt) :

$$\dot\varepsilon_{xx} + \dot\varepsilon_{yy} + \dot\varepsilon_{zz} = 0$$

$$[s] = \frac{2}{3}\sigma_0 \frac{|\dot\varepsilon|}{\dot{\bar\varepsilon}}$$

★ *Exemples.* Si l'on reprend le cas de l'*éprouvette de traction* (axe Oz), on vérifie immédiatement que :

$$[\dot\varepsilon] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}\dot\varepsilon_{zz} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2}\dot\varepsilon_{zz} & 0 \\ 0 & 0 & \dot\varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \qquad [\sigma] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

$$[s] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{3}\sigma_{zz} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{3}\sigma_{zz} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{3}\sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

$$f([s]) = \frac{2}{3}(\sigma_{zz}^2 - \sigma_0^2)$$

Donc, la plastification a lieu dès que $\sigma_{zz} = \sigma_0$.
— Cas d'une *pression hydrostatique*, c'est-à-dire que :

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} -p & 0 & 0 \\ 0 & -p & 0 \\ 0 & 0 & -p \end{bmatrix} \quad \text{donc } [s] = [0] \text{ et } f([s]) < 0$$

Il n'y a jamais plastification.
— Cas du *cisaillement homogène* : le seul terme non nul du tenseur des déformations est $\Delta\varepsilon_{xy}$; alors la deuxième loi d'écoulement montre que $[s]$ a tous ses termes nuls, sauf $s_{xy} = \sigma_{xy}$, que l'on reporte dans l'expression du critère pour obtenir :

$$|\sigma_{xy}| = \frac{\sigma_0}{\sqrt3} = K \text{ (K est appelé la scission limite).}$$

★ *Théorème de la borne supérieure.* C'est le théorème le plus employé pour les calculs en plasticité, car la solution directe (incrémentale) pose beaucoup de problèmes techniques, sauf dans le cas où l'on se limite aux très faibles déformations (ce qui n'est pas le cas en mise en forme). Si on utilise les lois de la plasticité, l'expression de la puissance dissipée par unité de volume, et la définition de $\dot{\bar\varepsilon}$, on vérifie que $\dot W = \sigma_0\dot{\bar\varepsilon}$. Les hypothèses du théorème sont alors : on cherche un champ de vitesse $\vec V$ (associé à $[\dot\varepsilon]$) solution du problème dans un corps (C) [*fig.* 7] où l'on impose :
$\vec V = \vec V^D$ sur S_V (vitesse donnée)
$\vec T = \vec T^D$ sur S_T (force par unité de surface donnée)
Dans ces conditions, si $\vec V^*$ est un champ de vitesse (associé à $[\dot\varepsilon^*]$), vérifiant les conditions :

$$\vec V^* = \vec V^D \text{ sur } S_V$$

et

$$\dot\varepsilon^*_{xx} + \dot\varepsilon^*_{yy} + \dot\varepsilon^*_{zz} = 0$$

alors :

$$\iiint_D \sigma_0\dot{\bar\varepsilon}^*\,d\tau - \iint_S \vec V^*\vec T^D dS \geqslant \iiint_D \sigma_0\dot{\bar\varepsilon}\,d\tau - \iint_{S_T} \vec V\vec T^D dS$$

ce qui signifie que la puissance dissipée totale est minimale pour la solution.

★ *Variation de la contrainte d'écoulement.* Variation avec la déformation : c'est l'écrouissage, on la représente souvent sous la forme :

$$\sigma_0 = \sigma_{00}\,(\bar\varepsilon)^n \quad \text{ou} \quad \sigma_0 = \sigma_{00}\,(\varepsilon_0 + \bar\varepsilon)^n$$

La sensibilité à la vitesse de déformation se manifeste très peu à froid ; à chaud, il n'en va pas de même, et la loi qui est la plus utilisée est : $\sigma_0 = \sigma'_{00}\,(\dot{\bar\varepsilon})^m$, où en général, $0{,}1 < m < 0{,}2$.

Influence des phénomènes thermiques

Thermo-élasticité

Un échauffement s'accompagne d'une dilatation, ce qui modifie l'état des contraintes. La relation entre $[\sigma]$ et $[\varepsilon]$ donnée dans le cas de l'élasticité linéaire isotrope devient :

$$[\varepsilon] = \frac{1+\nu}{E}[\sigma] + \left(\frac{3\,\nu}{E}p + \alpha\Delta T\right) \quad [1]$$

où ΔT est l'échauffement et α le coefficient de dilatation cubique (de l'ordre de $3 \cdot 10^{-5}$/°C pour un acier).

Signalons également que E, ν et α dépendent (en général assez faiblement) de T.

Influence de la température sur la contrainte d'écoulement

En général, une élévation de la température diminue la contrainte d'écoulement : c'est l'adoucissement thermique. Les lois les plus classiques pour modéliser cet effet sont :

$$\sigma_0 = \sigma_1 e^{\frac{\beta}{T}}$$

ou bien :

$$\sigma_0 = \sigma_2 e^{-\delta T}$$

Aperçu sur les méthodes de calcul

Calculs élastiques, thermiques et thermo-élastiques

Ces types de calculs s'appliquent essentiellement au comportement des machines (bâti de presse, cage de laminoir, etc.) et aux outils dont les déformations doivent rester faibles et réversibles. En utilisant de façon approximative les lois énoncées plus haut, on peut obtenir un ordre de grandeur raisonnable des déformations. Mais de nos jours, grâce à l'apparition des ordinateurs à hautes

fig. 7

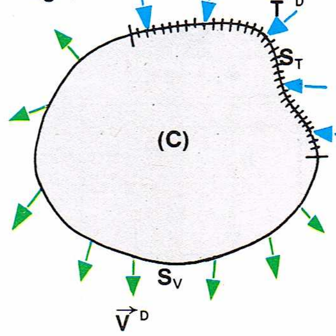

Richard Colin

▲ ***Figure 7 :*** ***théorème de la borne supérieure (voir développement dans le texte).***

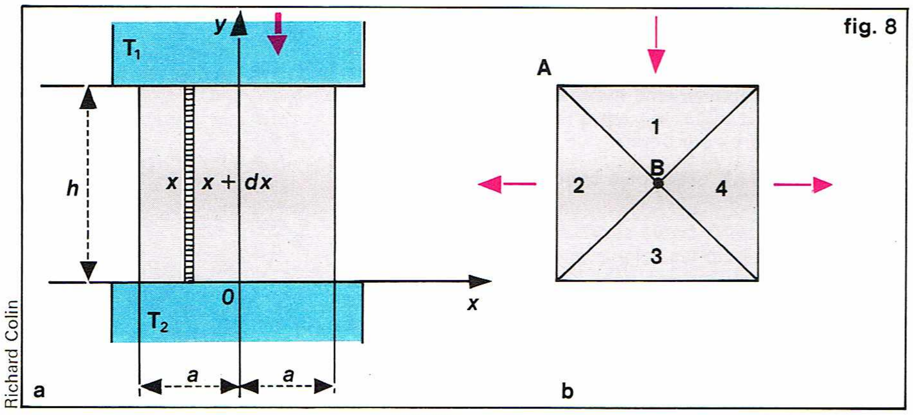

▲ *Figure 8 : calcul des déformations plastiques (voir développement dans le texte).*

performances et de codes de calcul extrêmement raffinés, tous ces calculs peuvent être faits avec une très bonne approximation.

Calcul des déformations plastiques

Certaines des méthodes que nous venons d'évoquer traitent également la plasticité, mais uniquement dans le cas où les déformations restent faibles, ce qui limite beaucoup leur emploi. C'est pourquoi l'on continue à utiliser de nombreuses méthodes très approchées : nous en donnerons trois exemples.

★ *Méthode des tranches.* Nous prendrons le cas de l'écrasement d'une pièce rectangulaire (*fig.* 8 a), en admettant un frottement de Tresca sur les tas de presse T_1 et T_2. On admet que les seules composantes non nulles du tenseur des déformations sont ε_{xx} et ε_{yy} ; on vérifie sans peine, en utilisant les lois d'écoulement et l'expression du critère de plasticité, que l'on obtient :

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \end{bmatrix} \qquad \sigma_{yy} - \sigma_{xx} = \frac{2\,\sigma_0}{\sqrt{3}}$$

On considère que les contraintes ne dépendent que de x, et l'on étudie une « tranche » comprise entre x et $x + dx$; les forces horizontales qui lui sont appliquées sont :

- contraintes :

$$-2\,h\sigma_{xx}(x) + 2\,h\sigma_{xx}(x - dx) = 2\,h\,\frac{d\sigma_{xx}(x)}{dx}$$

- forces de frottement :

$$\pm\, 2\,\overline{m}\,\frac{\sigma_0}{\sqrt{3}}\,dx \qquad (+ \text{ pour } x > 0 \text{ et} - \text{ pour } x < 0).$$

L'équilibre des forces horizontales conduit donc à l'équation :

$$\frac{d\sigma_{xx}(x)}{dx} = \pm\,\overline{m}\,\frac{\sigma_0}{\sqrt{3}}$$

dont la solution est, sachant que $\sigma_{xx}(\pm a) = 0$:

$$\sigma_{xx} = \pm\,\overline{m}\,\frac{\sigma_0}{\sqrt{3}}\,(x \mp a)$$

et par conséquent (voir *fig.* 8 b) :

$$\sigma_{yy} = \frac{2\,\sigma_0}{\sqrt{3}} \pm \overline{m}\,\frac{\sigma_0}{\sqrt{3}}\,(x \mp a).$$

★ *Méthode de la borne supérieure.* Cette méthode utilise un champ de vitesses dépendant en général de un ou plusieurs paramètres, dont on cherche les valeurs optimales en minimisant la puissance dissipée. Même pour des champs de vitesses assez simples, les formules sont souvent compliquées et nécessitent le recours au calcul sur ordinateur. Reprenons comme exemple l'écrasement plan du rectangle de la *figure* 8 a. Nous prendrons comme champ de vitesses, dépendant du paramètre α :

$$u = \left(+\,(1 + \alpha) - 2\,\alpha\,\frac{y}{h}\right) x$$

$$v = \frac{y}{h}\left(-\,(1 + \alpha) + \alpha\,\frac{y}{h}\right)$$

qui vérifie l'incompressibilité et les conditions aux limites : $u = 0$ pour $x = 0$, $v = 0$ pour $y = 0$, $v = -v_0$ pour $y = h$ et, par dérivation, on obtient :

$$[\dot{\varepsilon}] = \begin{bmatrix} (1 + \alpha) - 2\,\alpha\,\frac{y}{h} & \alpha\,\frac{x}{h} \\ \alpha\,\frac{x}{h} & -\,(1 + \alpha) + 2\,\alpha\,\frac{y}{h} \end{bmatrix}$$

d'où : $$\dot{\bar{\varepsilon}} = \frac{2}{\sqrt{3}}\left|\left((1 + \alpha) - 2\,\alpha\,\frac{y}{h}\right)^2 + \alpha^2\,\frac{x^2}{h^2}\right|^{1/2}$$

Si l'on ajoute les termes de frottement, on obtient donc la puissance dissipée totale sous la forme :

$$\dot{W}_T = \int_{-a}^{a}\int_{0}^{h} \sigma_0\dot{\bar{\varepsilon}}\,dx\,dy + \overline{m}\,\frac{\sigma_0}{\sqrt{3}}\int_{-a}^{a} |(1 + \alpha)\,x|\,dx + \overline{m}\,\frac{\sigma_0}{\sqrt{3}}\int_{-a}^{a} |(1 - \alpha)\,x|\,dx$$

Trouver le minimum d'une telle fonction nécessite effectivement le recours au calcul numérique : on préfère souvent idéaliser l'écoulement du métal par des blocs rigides qui glissent les uns sur les autres (voir *fig.* 8 c). Dans ces conditions, la déformation est concentrée aux interfaces des blocs ; par exemple, la puissance dissipée par glissement des blocs 1 par rapport à 2 avec une vitesse relative tangentielle V_{12} est : $\frac{\sigma_0}{\sqrt{3}}\,|V_{12}| \times |AB|$.

★ *Méthode expérimentale de visualisation.* La technique consiste généralement à imprimer sur la pièce un marquage (souvent un quadrillage) [voir *fig.* 9] qui permet, après mise en forme, de visualiser et même de calculer les déformations locales.

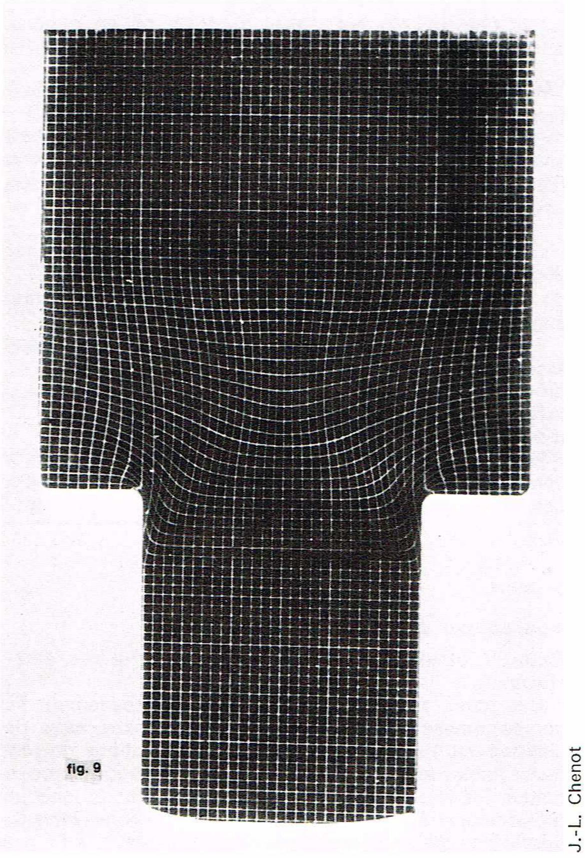

▶ *Figure 9 : méthode expérimentale de visualisation. La technique consiste à imprimer sur la pièce un marquage (quadrillage, par exemple) qui permet de visualiser la déformation après la mise en forme.*

La métallurgie de la mise en forme

Le comportement physique du métal au cours d'une opération de mise en forme doit être bien connu pour deux raisons essentielles :

— La résistance opposée par le matériau à la déformation plastique détermine les *efforts* (effort et couple de laminage, effort de filage, etc.) et la *puissance* à fournir pour effectuer la déformation. Cette résistance dépend, bien entendu, du matériau et de son état initial, mais aussi de la vitesse et de la température de déformation.

— La structure métallurgique du matériau après déformation conditionne ses propriétés d'emploi. Elle résulte de toute l'histoire mécanique et thermique qu'il a subie depuis sa solidification. Le cycle de mise en forme de presque toutes les pièces métalliques comporte d'abord une ou plusieurs déformations à chaud suivies très souvent de déformations à froid, puis de traitements thermiques. Les évolutions structurales qui accompagnent ces opérations sont donc très complexes, d'autant plus que le matériau y est soumis à des vitesses de déformation ou à des températures variables au cours du temps.

Avant de décrire l'évolution du métal dans les opérations de mise en forme à froid, puis à chaud, nous examinerons les différentes méthodes expérimentales utilisées en laboratoire pour aborder ces problèmes.

Méthodes expérimentales

Deux grands types d'essais sont couramment utilisés : en *fluage*, on impose à l'échantillon une *contrainte* (ou un effort), et on mesure sa déformation ; dans les autres essais (traction, compression, torsion), on impose au contraire une *déformation*, et on mesure l'effort nécessaire. (Voir plus loin : *Propriétés mécaniques des matériaux.*)

Ces divers procédés permettent d'étudier la déformation des métaux dans une gamme de vitesses très étendue (*fig.* 10). On remarquera cependant que les vitesses de déformation rencontrées dans les processus industriels ne sont pas atteintes, en général, par les procédés de laboratoire, sauf avec quelques techniques particulières encore peu utilisées (barres de Hopkinson, plastomètre à came).

Fluage

L'éprouvette de métal portée à une température T est soumise à un effort de traction F constant. Son allongement $\Delta L = L - L_0$ (L_0 longueur initiale) est enregistré en fonction du temps, d'où l'on déduit la *courbe de fluage*, c'est-à-dire les variations de :

$$\dot{\bar{\varepsilon}} = \frac{\Delta \dot{L}}{L} = \frac{\frac{d}{dt}(\Delta L)}{L_0 + \Delta L}$$

en fonction du temps.

On peut également en déduire la *durée de vie* de l'échantillon soumis à une température et à une contrainte initiale données : c'est le temps qui s'écoule entre le chargement et la rupture de l'éprouvette. Les essais de fluage concernent en principe les faibles vitesses de déformation.

Traction et compression

Ces essais permettent d'effectuer des essais à vitesse plus élevée. Certains essais de compression utilisant un *plastomètre à came* permettent même d'atteindre des vitesses de déformation de plusieurs centaines de s^{-1}.

Dans l'essai de traction, qui est généralement effectué à *vitesse d'allongement* $\Delta\dot{L}$ constante, mais aussi parfois à *vitesse de déformation* $\frac{\Delta \dot{L}}{L}$ constante, on enregistre l'effort F fourni pour déformer l'éprouvette à une température donnée, en fonction de l'allongement ΔL de celle-ci. On en déduit la courbe $\sigma(\bar{\varepsilon})$ donnant les variations de la contrainte d'écoulement du matériau en fonction de la déformation subie, au moyen des formules suivantes :

$$\begin{cases} \bar{\varepsilon} = \text{Log}\left(1 + \dfrac{\Delta L}{L_0}\right) \\ \sigma = \dfrac{F}{S_0}\left(1 + \dfrac{\Delta L}{L_0}\right) \end{cases}$$

où L_0 et S_0 désignent respectivement la longueur et la surface initiales de l'éprouvette.

L'essai de compression est réalisé sur des échantillons dont la hauteur est voisine du diamètre, pour des raisons de stabilité (risque de flambage). ΔL est alors négatif ($L < L_0$), et les formules ci-dessus deviennent :

$$\begin{cases} \bar{\varepsilon} = -\text{Log}\left(1 + \dfrac{\Delta L}{L_0}\right) \\ \sigma = \dfrac{F}{S_0}\left(1 + \dfrac{\Delta L}{L_0}\right) \end{cases}$$

Notons que, dans ces essais, la déformation est *homogène*, c'est-à-dire identique à un instant donné en tout point de l'échantillon.

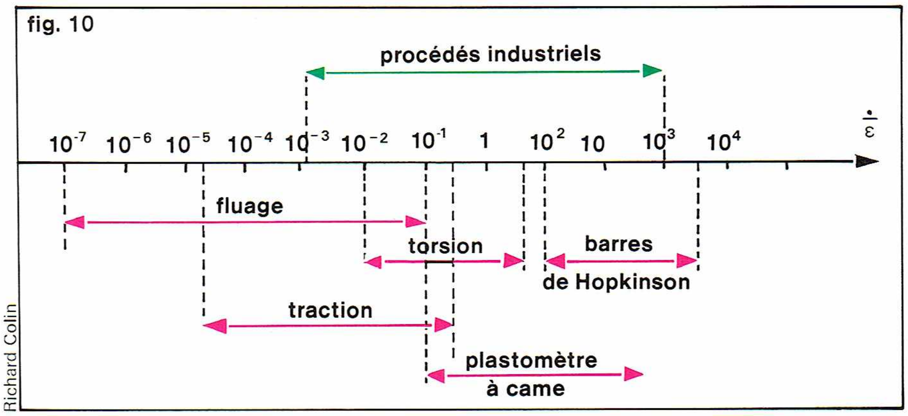

▲ *Figure 10 : gamme des vitesses de déformation obtenues par différentes méthodes d'essai en laboratoire.*

Torsion

L'essai est réalisé à vitesse de rotation $\dot{N}$ constante. Contrairement au cas des essais de traction et de compression, la déformation $\bar{\varepsilon}$ n'est pas homogène : elle est toujours nulle sur l'axe de l'éprouvette et, à un instant donné, croît linéairement le long du rayon de celle-ci pour atteindre une valeur maximale $\bar{\varepsilon}_M$ à la surface. On enregistre le couple Γ nécessaire pour tordre l'éprouvette en fonction du nombre N de tours effectués. On en déduit au moyen des formules suivantes la courbe $\sigma(\bar{\varepsilon})$, donnant les variations de la contrainte d'écoulement en fonction de la déformation subie :

$$\begin{cases} \bar{\varepsilon}_M = \dfrac{2\pi R}{\sqrt{3}\, L} N \\ \sigma_M = \dfrac{\sqrt{3}}{2\pi R^3}\,\Gamma\,(3 + m + n) \end{cases}$$

où R et L désignent le rayon et la longueur de l'éprouvette cylindrique. Il faut noter que $\bar{\varepsilon}_M$ et σ_M représentent la déformation et la contrainte d'écoulement à la surface de celle-ci. Les coefficients m et n sont définis par les relations :

$$m = \left(\frac{\partial\, \text{Log}\, \Gamma}{\partial\, \text{Log}\, \dot{N}}\right)_N \quad \text{et} \quad n = \left(\frac{\partial\, \text{Log}\, \Gamma}{\partial\, \text{Log}\, N}\right)_{\dot{N}}$$

Ils sont appelés respectivement coefficient de *sensibilité à la vitesse de déformation*, et coefficient de *sensibilité à la quantité de déformation* ou coefficient d'*écrouissage*. Si n peut être déterminé à partir d'une seule courbe de torsion Γ (N), il faut plusieurs courbes pour calculer m. Autrement dit, un essai de torsion unique est insuffisant pour déterminer la courbe $\sigma(\bar{\varepsilon})$.

Les essais de traction, compression et torsion donnent dans les mêmes conditions de vitesse et de température des courbes $\sigma(\bar{\varepsilon})$ très voisines, ce qui justifie l'utilisation de la déformation totale $\bar{\varepsilon}$. Complétés par les essais de fluage, ils permettent d'étudier d'une part la *rhéologie* des métaux, c'est-à-dire les variations de σ avec $\bar{\varepsilon}$, $\dot{\bar{\varepsilon}}$ et T, d'autre part leur *évolution structurale* au cours de la déformation.

Métallurgie de la mise en forme à froid

Mise en forme à froid

Précisons tout d'abord ce qu'il est convenu de désigner par cette expression pour un matériau métallique. Du point de vue de la pratique industrielle, elle concerne des procédés dans lesquels le métal n'est pas réchauffé *volontairement*, ni avant ni pendant la déformation. Notons cependant que la déformation elle-même peut engendrer des échauffements importants, dépassant couramment la centaine de degrés ; dans le cas de l'*usinage* des aciers, le copeau peut même atteindre une température de l'ordre de 1 000 °C. Le point de vue du physicien est différent : il parlera de déformation « à froid » si les phénomènes de diffusion sont négligeables. Par suite, la montée des dislocations est impossible, ainsi que tout processus de recristallisation ou de précipitation pendant ou après la déformation.

Pratiquement, on pourra considérer que la mise en forme « à froid » concerne le domaine de températures $T < 0{,}3\, T_f$, si T désigne la température absolue du matériau déformé et T_f sa température absolue de fusion. Donnons trois

▶ *Figure 11 : évolution de la structure cellulaire avec la déformation (cas d'un alliage à forte énergie de défaut d'empilement).*

fig. 11

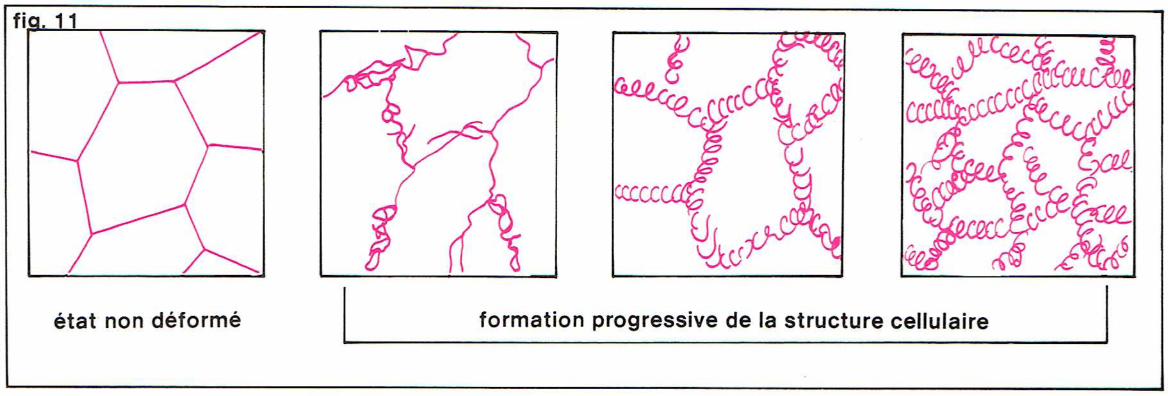

fig. 12

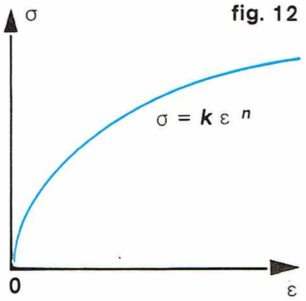

▲ *Figure 12 : courbe d'écrouissage typique dans le cas de la déformation à froid d'un échantillon polycristallin.*

exemples caractéristiques (en degrés Celsius) : Al, $\theta < 7$ °C ; Cu, $\theta < 134$ °C ; Fe, $\theta < 270$ °C.

Il est par conséquent évident que, dans la plupart des procédés de mise en forme « à froid », le comportement du métal sera plus ou moins influencé par l'échauffement résultant de la déformation et pourra sortir facilement du domaine « froid » défini par le physicien.

En allant du microscopique au macroscopique, nous allons voir que la déformation à froid provoque des modifications du métal au niveau de sa *structure cristalline,* de sa *texture* et, par suite, de ses *propriétés macroscopiques.*

Modifications de la structure cristalline

Au cours d'une opération de mise en forme à froid, les quantités et les vitesses de déformation subies par le matériau sont très variables suivant le procédé et, pour certains procédés (matriçage), suivant le point considéré dans la pièce (la déformation est très hétérogène). Par exemple, en laminage à froid : $\bar{\varepsilon} \simeq 0{,}2$ à 1 par passe ; $\dot{\bar{\varepsilon}} \simeq 10$ à 10^3 s^{-1}.

La déformation provoque l'apparition de très nombreuses *dislocations* dans les grains du métal. C'est le phénomène d'*écrouissage.*

● Si l'énergie de défaut d'empilement γ est faible (quelques dizaines d'ergs/cm²), les dislocations sont fortement *dissociées* et par suite *peu mobiles.* Elles restent donc réparties uniformément dans les grains. C'est par exemple le cas du fer.

La densité de dislocations, voisine de 10^6 cm^{-2} dans un métal recuit, passera par exemple à 10^{11} ou 10^{12} cm^{-2} pour des déformations de l'ordre de 0,2 (20 %).

● Si l'énergie de défaut d'empilement est forte (quelques centaines d'ergs/cm²), les dislocations s'assemblent en *écheveaux* délimitant des *cellules d'écrouissage.* C'est le cas de l'aluminium. La *figure* 11 montre ainsi l'évolution de cette structure cellulaire lorsque la déformation augmente : les cellules deviennent plus petites et tendent vers une taille limite, voisine de 1 µm pour l'aluminium ; elles présentent entre elles de faibles désorientations cristallographiques (< 1°) qui augmentent avec la déformation. En même temps, les parois deviennent plus épaisses et plus enchevêtrées.

Dans certains cas, notamment lorsqu'il existe peu de possibilités de glissement (c'est-à-dire de mouvement des dislocations), la déformation peut engendrer des *macles* dites *mécaniques* (ou macles de déformation). C'est le cas du zinc.

Enfin parfois apparaissent des changements plus ou moins complets de structure cristalline. Citons par exemple la formation de *martensite d'écrouissage* dans certains aciers inoxydables.

▼ *Inclusions de sulfure de manganèse déformées par une opération de filage.*

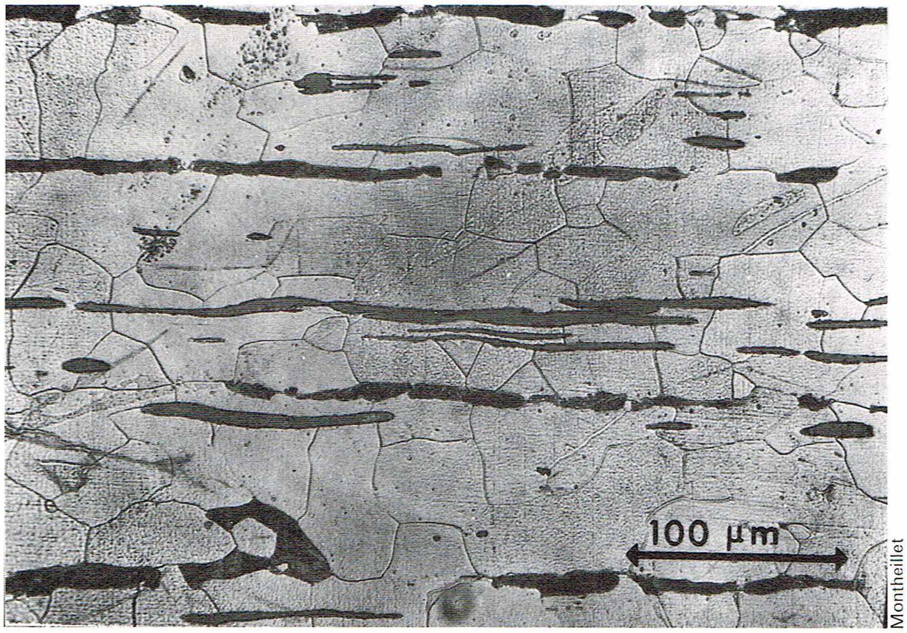

Modifications de la texture

● *La forme des grains* évolue au cours de la déformation. Les grains déformés ne sont plus *équiaxes.* L'*hypothèse de Taylor* consiste à dire que chaque grain subit la même déformation que l'ensemble de l'échantillon.

De même, si le matériau contient des inclusions (ou des porosités), la déformation va introduire une *anisotropie* du matériau, comme l'illustre, par exemple, le filage d'un acier contenant du sulfure de manganèse MnS *(photo).*

Dans tous les cas, on peut parler de l'apparition d'une *« texture morphologique ».*

● Rappelons que, dans un échantillon polycristallin, si la distribution des orientations des grains n'est pas aléatoire, on dit que le matériau possède une ou plusieurs orientations préférentielles, appelées également *textures cristallographiques.* Au cours de la déformation à froid, la texture initiale (texture résultant de la déformation à chaud ou du recuit antérieurs) évolue progressivement vers une texture stable appelée *texture d'écrouissage,* qui dépend du matériau et du processus de déformation.

Ainsi, il existe deux textures de laminage à froid pour les métaux de structure cubique à faces centrées :

— Si γ est très faible, on observe la texture dite « du laiton », caractérisée par l'*orientation idéale* $\{110\}\langle 112\rangle$. Cela signifie que les grains ont tendance à présenter un plan $\{110\}$ parallèlement au plan de laminage et une direction $\langle 112\rangle$ (contenue dans ce plan) parallèlement à la direction de laminage.

— Si γ est moyenne ou forte, on rencontre la texture dite « du cuivre », pour laquelle on peut proposer différentes orientations idéales voisines, par exemple :

$$\{146\}\langle 112\rangle.$$

De même, le filage conduit à une *texture de fibre* caractérisée par une orientation cristallographique privilégiée, par exemple $\langle 110\rangle$ pour les métaux cubiques centrés.

Évolution des propriétés mécaniques

Si la plupart des propriétés physiques sont plus ou moins affectées par la déformation plastique, les caractéristiques mécaniques sont toujours profondément modifiées par suite des changements de structure et de texture.

L'*écrouissage* augmente la résistance du métal à la déformation. Ainsi la *figure* 12 montre que la contrainte d'écoulement d'un échantillon de métal polycristallin augmente avec la déformation plastique subie $\bar{\varepsilon}$. En négligeant l'élasticité, cette variation peut être décrite dans la plupart des cas par une loi du type : $\sigma = k\bar{\varepsilon}^n$, pratiquement indépendante de la vitesse de déformation. n désigne

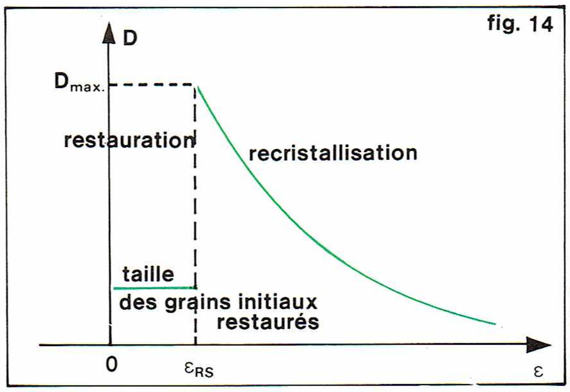

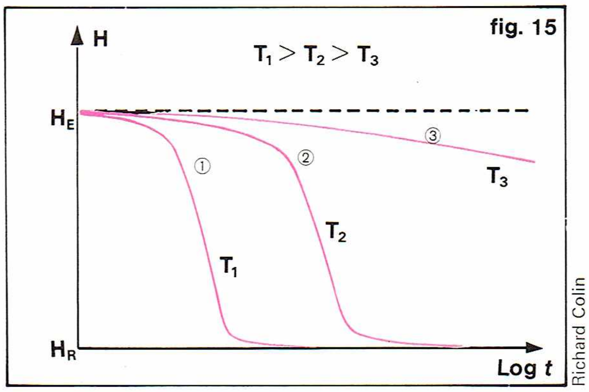

◀ ***Figure 14 :*** ***taille des grains recristallisés en fonction de la déformation antérieure*** $\bar{\varepsilon}$.
Figure 15 : évolution de la dureté d'un métal initialement écroui en fonction du temps de recuit (H_E ***: dureté de l'état écroui;*** H_R ***: dureté de l'état entièrement recristallisé).***

le *coefficient d'écrouissage*, compris généralement entre 0,1 et 0,2.

De même, l'écrouissage augmente la *dureté* du métal et améliore sa *résistance au fluage*, mais diminue sa *ductilité* et sa *résilience*, surtout lorsque l'énergie de défaut d'empilement γ est faible (pas de structure cellulaire). Ces phénomènes sont étroitement liés à l'augmentation de la densité de dislocations ρ provoquée par la déformation plastique, ce qui se traduit par la relation : $\sigma = \alpha\mu b \sqrt{\rho}$ où α est une constante voisine de l'unité, μ le module de cisaillement du métal, et b le vecteur de Burgers des dislocations.

Quant à la *texture d'écrouissage* induite par la déformation, elle entraîne une anisotropie des propriétés mécaniques, particulièrement accentuée, par exemple, dans le cas des tôles laminées à froid.

Effets d'un recuit après déformation à froid

Dans la pratique, une opération de mise en forme à froid est très souvent suivie d'un traitement de recuit qui permet de retrouver au moins partiellement les caractéristiques initiales du métal. Nous examinerons successivement l'effet d'un tel traitement sur la structure cristalline, la texture et les propriétés macroscopiques.

● *Évolution de la structure.* Au cours de la déformation, le métal a emmagasiné une certaine quantité d'énergie élastique sous forme de dislocations. Au cours du recuit, l'agitation thermique favorise un retour plus ou moins complet vers l'état d'origine plus stable, parce que moins énergétique. Cette évolution peut s'effectuer suivant trois mécanismes :

— *La restauration statique.* A partir de la structure d'écrouissage, cellulaire ou non, les dislocations se réarrangent, tandis que se produisent des phénomènes d'*annihilation* (dislocation $\vec{b}$ + dislocation $-\vec{b} \rightarrow$ cristal parfait) pour former des *sous-joints* qui limitent des *sous-grains*. La *figure* 13 montre la structure d'un *sous-joint de flexion* constitué d'une seule famille de dislocations coin parallèles ; il existe aussi des sous-joints complexes faisant intervenir plusieurs familles de dislocations. Lorsque le recuit est prolongé, les sous-grains peuvent grossir par coalescence, mais ce phénomène est en général masqué par la recristallisation.

— *La recristallisation statique* n'intervient que si la déformation antérieure $\bar{\varepsilon}$ dépasse une valeur critique $\bar{\varepsilon}_{RS}$, et ne commence qu'après un *temps d'incubation* t_{RS}. C'est l'apparition dans le métal écroui de nouveaux cristaux, d'orientation différente de celle des grains déformés dans lesquels ils se développent, et qui remplacent peu à peu complètement la structure de déformation initiale. La taille des grains ainsi produits dépend fortement de la déformation antérieure (*fig.* 14) ; lorsque $\bar{\varepsilon}$ est légèrement supérieure à $\bar{\varepsilon}_c$, les grains recristallisés peuvent être de grande taille (recristallisation grossière). Les structures à grains fins sont au contraire recherchées, car elles conduisent à une limite d'élasticité plus élevée, une meilleure ductilité et un meilleur aspect de surface si l'on soumet le matériau ainsi recuit à une nouvelle déformation à froid (emboutissage des tôles laminées et recuites).

— *Le grossissement du grain.* Si le recuit est prolongé après une recristallisation statique totale, certains grains se développent aux dépens d'autres grains plus petits. Ce phénomène peut être *homogène* ou *hétérogène :* dans le deuxième cas, quelques grains envahissent la quasi-totalité du métal recristallisé. On parle alors souvent de *recristallisation secondaire.*

● *Évolution de la texture.* La restauration statique ne modifie ni la forme des grains, ni la texture cristallographique. Par contre, la recristallisation donne naissance à une *texture de recristallisation* qui vient remplacer la texture d'écrouissage. Cette nouvelle texture dépend de nombreux paramètres, et il existe de nombreuses orientations idéales suivant les cas.

● *Évolution des propriétés mécaniques.* Le recuit produit un *adoucissement* du métal. La *figure* 15 montre de façon schématique l'évolution de la *dureté* en fonction du temps de recuit pour une déformation antérieure donnée. Les courbes comportent en général trois parties (courbes 1 et 2) : la première partie à pente faible est d'autant plus courte que la température de recuit est plus élevée ; elle correspond au phénomène de restauration statique ; la deuxième partie à pente forte correspond à la recristallisation statique ; la troisième partie à pente presque nulle correspond au grossissement du grain. Si la température de recuit est trop faible, la recristallisation ne se produit pas, et l'on voit que la restauration seule ne permet pas au matériau de retrouver sa dureté initiale (courbe 3) : l'adoucissement n'est que partiel.

Pour obtenir des propriétés mécaniques bien déterminées, on peut combiner écrouissage et recuit, en effectuant un traitement de *recristallisation partielle* (recuit contrôlé), ou d'*écrouissage partiel* (déformation contrôlée). En général, pour une même résistance mécanique, le premier procédé donne un matériau plus homogène et donc plus ductile.

Notons enfin que, tout comme la texture d'écrouissage, la texture de recristallisation entraîne en général une anisotropie des propriétés mécaniques. Les *cornes d'emboutissage*, qui apparaissent en nombre et importance variables suivant le matériau utilisé, résultent également des textures de recristallisation.

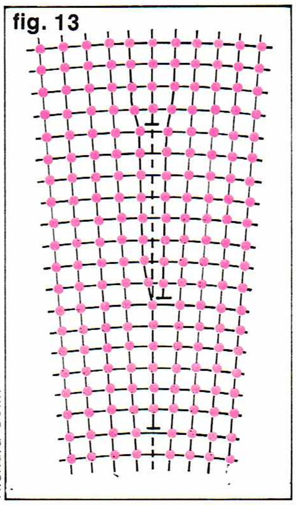

▲ ***Figure 13 :*** ***schéma d'un sous-joint de flexion.***

Métallurgie de la mise en forme à chaud

Mise en forme à chaud

Elle concerne les opérations de déformation plastique effectuées à une température absolue $T > 0{,}5\ T_f$ (T_f température absolue de fusion du matériau). Donnons trois exemples (en degrés Celsius) : Al, $\theta > 193$ °C ; Cu, $\theta > 405$ °C ; Fe, $\theta > 631$ °C. Le domaine intermédiaire défini par $0{,}3\ T_f < T < 0{,}5\ T_f$ (déformation « à tiède ») est actuellement peu utilisé dans la pratique industrielle.

Presque toutes les pièces métalliques commencent par subir une ou plusieurs déformations à chaud au cours de leur cycle de mise en forme. Certaines sont utilisées telles quelles, et c'est donc la déformation à chaud qui détermine leur structure métallurgique et leurs propriétés d'emploi. La plupart sont déformées ensuite à froid, et, dans ce cas, la déformation à chaud antérieure peut modifier les conditions de cette deuxième transformation.

Nous avons vu plus haut que l'évolution du métal au cours d'un recuit succédant à une déformation à froid s'effectue par restauration et éventuellement recristallisation statiques. Au cours d'une déformation à chaud, la structure du métal évolue suivant des processus sensiblement analogues : la *restauration dynamique*, et éventuellement la *recristallisation dynamique*. Nous commencerons par décrire ces mécanismes.

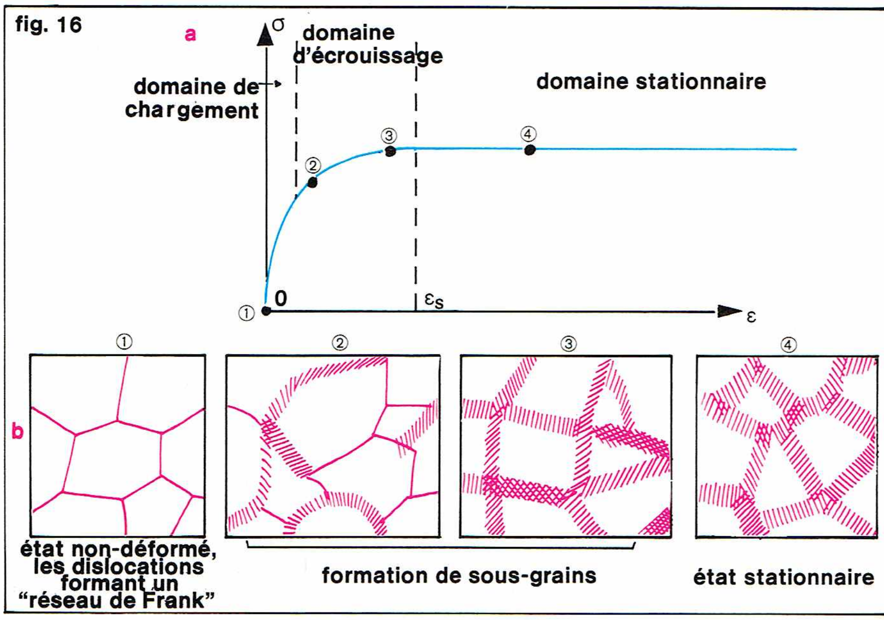

▲ *Figure 16 : restauration dynamique ;* a, *allure de la courbe* σ ($\bar{\varepsilon}$) *;* b, *évolution structurale correspondante.*
▼ *Figure 17 : recristallisation dynamique : allure des courbes* σ ($\bar{\varepsilon}$) *et évolutions structurales correspondantes ;* a, *vitesse de déformation faible ;* b, *vitesse de déformation élevée.*

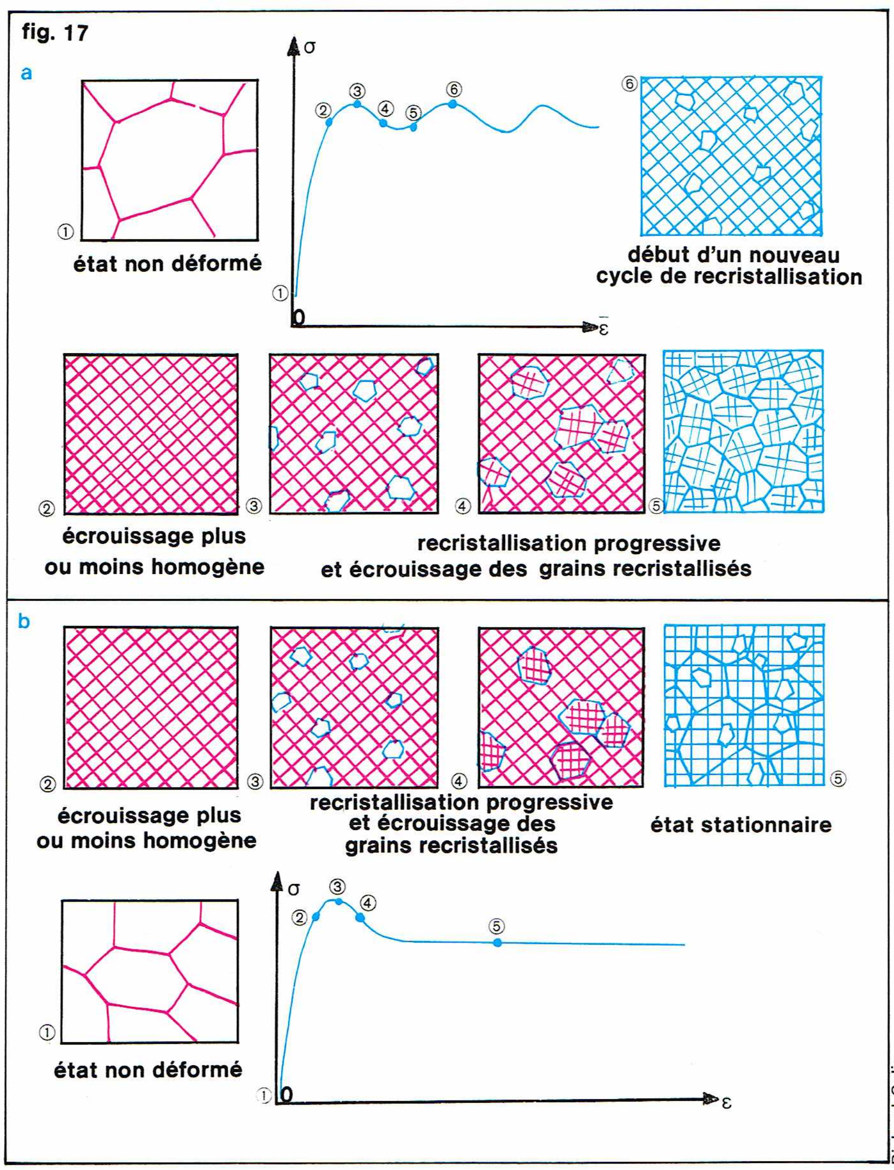

Évolution structurale

● Pour les métaux ou alliages à forte énergie de défaut d'empilement (quelques centaines d'ergs/cm^2), le seul mécanisme d'évolution structurale au cours de la déformation à chaud est la *restauration dynamique*. Dans ce cas, la courbe σ ($\bar{\varepsilon}$), décrivant les variations de la contrainte d'écoulement en fonction de la déformation totale, présente l'allure décrite par la *figure* 16 a. On peut la diviser en trois domaines :

— *Le domaine de chargement,* compris entre $\bar{\varepsilon} = 0$ et $\bar{\varepsilon} = 10^{-3}$ à 10^{-2} (soit 0,1 % à 1 %) suivant la température et la vitesse de déformation, est approximativement *linéaire*. Si E désigne le module d'élasticité du matériau à la température de l'essai, la pente de la courbe est comprise entre E/50 et E/5. Par conséquent, il ne s'agit pas d'un domaine élastique ; on le qualifie parfois de stade de « microdéformation plastique ». Bien que peu d'informations soient disponibles concernant l'évolution structurale dans ce domaine, on pense que la plupart des dislocations sont mobiles de façon réversible entre leurs points d'ancrage. On observe cependant une légère augmentation de la densité de dislocations qui passe, par exemple, de 10^6 à 10^7 cm^{-2}.

— *Le domaine d'écrouissage* est caractérisé par une pente beaucoup plus faible, comprise entre E/500 et E/100. Les dislocations forment progressivement une *structure cellulaire* assez analogue à la structure en écheveaux de la déformation à froid (*fig.* 16 b).

— *Le domaine stationnaire,* qui commence pour une déformation $\bar{\varepsilon}_S$ de l'ordre de 0,2 à 0,4 (soit 20 % à 40 %), est caractérisé par une contrainte d'écoulement σ_S constante, qui ne dépend que de la vitesse $\dot{\bar{\varepsilon}}$ et de la température T de la déformation. La structure est alors constituée de *sous-grains* approximativement équiaxes (alors que les grains initiaux subissent une déformation croissante avec $\bar{\varepsilon}$). La perfection des sous-joints, la taille (quelques microns) et la désorientation (quelques degrés) des sous-grains dépendent du métal, de $\dot{\bar{\varepsilon}}$ et de T, mais pas de $\bar{\varepsilon}$, du moins en première approximation. Ainsi, tout comme la contrainte d'écoulement, la structure apparaît comme *stationnaire*. Cela amène à admettre qu'un *équilibre dynamique* est réalisé entre la destruction des sous-grains par écrouissage et la création de nouveaux sous-grains par restauration : c'est le processus de *« repolygonisation »*. La taille des sous-grains augmente lorsque T augmente ou lorsque $\dot{\bar{\varepsilon}}$ diminue.

● Pour les métaux ou alliages à faible énergie de défaut d'empilement (quelques dizaines d'ergs/cm^2), les domaines de chargement et d'écrouissage sont analogues au cas précédent (bien que la structure cellulaire soit d'autant moins nette que γ est plus faible). En revanche, si la vitesse de déformation n'est pas trop faible, à partir d'une déformation critique $\bar{\varepsilon}_{RD}$, la *recristallisation dynamique* vient concurrencer et même masquer la restauration dynamique.

La courbe σ ($\bar{\varepsilon}$) peut présenter deux aspects suivant que la vitesse de déformation $\dot{\bar{\varepsilon}}$ est faible ou élevée (*fig.* 17) :

— lorsque $\dot{\bar{\varepsilon}}$ est faible, la courbe σ ($\bar{\varepsilon}$) présente une allure pseudo-périodique, correspondant à une alternance de cycles d'écrouissage (σ croissante) et de recristallisation (σ décroissante) [*fig.* 17 a] ;

— lorsque $\dot{\bar{\varepsilon}}$ est élevée, la courbe σ ($\bar{\varepsilon}$) présente un maximum suivi d'un palier où σ conserve une valeur σ_S constante. L'écrouissage est dans ce cas assez rapide pour qu'un nouveau cycle de recristallisation commence avant la fin du précédent. Le régime stationnaire correspond donc ici à un équilibre dynamique entre écrouissage et recristallisation (*fig.* 17 b).

Lois de comportement

Les lois de comportement relient la contrainte d'écoulement σ aux paramètres $\dot{\bar{\varepsilon}}$ et T qui caractérisent la déformation, ainsi qu'à la quantité de déformation $\bar{\varepsilon}$. Lorsqu'il s'agit du calcul des efforts à fournir pour une opération de mise en forme, on utilise des relations du type $\sigma = f\,(\dot{\bar{\varepsilon}}, T, \bar{\varepsilon})$. Cependant, lorsque l'on cherche à expliquer le comportement du matériau à l'aide de modèles faisant intervenir le mouvement des dislocations et leurs interactions mutuelles, on aboutit plutôt à des lois de la forme $\dot{\bar{\varepsilon}} = g\,(\sigma, T, \bar{\varepsilon})$. Ce sont d'ailleurs des relations de

cette forme qui, historiquement, ont été établies les premières, au moyen d'expériences de fluage.

La plupart des lois de comportement connues concernent le *domaine stationnaire*. Elles sont généralement établies de façon empirique et, dans certains cas, justifiées par des modèles théoriques. La plus universelle semble être la loi en sinus hyperbolique :

$$\dot{\varepsilon} = A\,(\text{sh}\,\alpha\sigma_S)^n\, e^{-\frac{Q}{RT}}$$

où A, α, n et Q sont des constantes; α est en général voisin de $5 \cdot 10^{-5}\ \text{Pa}^{-1}$ (σ_S étant exprimé en Pa) et n de l'ordre de 5.

— Pour les *faibles contraintes* (soit $\alpha\sigma_S < 0{,}8$), cette expression se simplifie pour donner :

$$\dot{\varepsilon} = A\,\alpha^n\sigma_S^n\, e^{-\frac{Q}{RT}} = A'\,\sigma_S^n\, e^{-\frac{Q}{RT}}$$

$\dot{\varepsilon}$ est alors une *fonction puissance* de σ_S.

— Pour les *fortes contraintes*, on obtient une nouvelle formule simplifiée :

$$\dot{\varepsilon} = \frac{A}{2^n}\, e^{n\alpha\sigma_S}\, e^{-\frac{Q}{RT}} = A''\, e^{\beta\sigma_S}\, e^{-\frac{Q}{RT}}$$

et $\dot{\varepsilon}$ est une *fonction exponentielle* de σ_S.

Inversement, σ_S est une fonction puissance de $\dot{\varepsilon}$ (d'exposant voisin de 0,2) pour les faibles vitesses de déformation et une fonction logarithme de $\dot{\varepsilon}$ pour les fortes vitesses. Autrement dit, le coefficient de sensibilité de la contrainte à la vitesse de déformation, soit

$$m = \frac{\partial\, \text{Log}\, \sigma_S}{\partial\, \text{Log}\, \dot{\varepsilon}}$$

diminue lorsque $\dot{\varepsilon}$ augmente.

En ce qui concerne la dépendance de $\dot{\varepsilon}$ vis-à-vis de la température, elle revêt l'apparence d'une loi d'Arrhénius. Q désigne l'*énergie d'activation apparente* de la déformation. Le *tableau* I donne des valeurs numériques de Q dans le cas du fluage (faible vitesse), de la déformation à vitesse imposée (vitesse plus élevée), et à titre de comparaison l'*énergie d'activation de l'autodiffusion* dans le matériau considéré.

Dans tous les cas, les énergies d'activation du fluage et de l'autodiffusion sont très proches. On peut en déduire que le *fluage* et, plus généralement, les déformations à chaud à faible vitesse font intervenir le *mouvement des lacunes*. Plus précisément, c'est la *montée des dislocations* qui nécessite un apport de lacunes (montée positive) ou au contraire fournit des lacunes (montée négative), et qui « contrôle » le mécanisme de déformation, à savoir dans ce cas la *restauration dynamique*.

Le cas des déformations à vitesse moyenne ou élevée est plus complexe :

— pour l'aluminium et le fer α, l'énergie d'activation ne diffère pas de l'énergie d'activation de l'autodiffusion, ce qui traduit le fait que ces métaux à forte énergie de défaut d'empilement ne subissent pas de recristallisation dynamique;

— pour le cuivre, on observe au contraire une énergie d'activation très supérieure à celle de l'autodiffusion, ce que l'on rapprochera du fait que ce métal à faible énergie de défaut d'empilement subit la recristallisation dynamique;

— enfin, pour le fer γ, bien que les mécanismes de déformation à faible vitesse (restauration dynamique) et à forte vitesse (recristallisation dynamique) soient différents, on retrouve à peu près les mêmes valeurs d'énergie d'activation. Cela montre bien que ces énergies d'activation *apparentes* peuvent résulter de divers mécanismes simultanés, et donc qu'une très grande prudence s'impose dans l'interprétation physique des valeurs déterminées expérimentalement.

Effet sur les propriétés mécaniques

La déformation plastique à chaud modifie la *structure* du métal et, par conséquent, agit sur ses *propriétés mécaniques*. Ainsi, la présence de sous-grains résultant de la restauration dynamique augmente la limite d'élasticité à la température ambiante, suivant une loi du type : $\sigma_0 = \sigma_0^1 + Kd^{-p}$ où σ_0^1 désigne la limite d'élasticité en l'absence de sous-grains et d la taille des sous-grains. Dans le cas de l'aluminium et du fer, p est voisin de 1. Cette relation est analogue à la loi de Hall et Petch relative à la taille des grains D :

$$\sigma_0^1 = \sigma_0^2 + k'D^{-\frac{1}{2}}$$

Tableau I
Énergie d'activation apparente de la déformation lors de la mise en forme à chaud de quelques métaux

Métaux	Énergie d'activation apparente (en Kcal/mole)		
	Déformation à vitesse imposée (moyenne ou élevée)	Déformation à faible vitesse (fluage)	Autodiffusion
Aluminium	37	33-36	33
Fer α	66	68	57-67
Cuivre	72	47-56	44-56
Fer γ	67	61	65-74

▲ ***Tableau I : énergie d'activation apparente de la déformation lors de la mise en forme à chaud de quelques métaux.***

Cela montre que la présence de grains fins résultant de la recristallisation dynamique augmente également la limite d'élasticité à la température ambiante.

Ajoutons pour terminer que les sous-grains formés par restauration dynamique à une température T peuvent améliorer considérablement la résistance au fluage à une température T′ < T, surtout s'ils sont *stabilisés* par des phénomènes de précipitation sur les dislocations qui constituent les sous-joints (cas de certains superalliages à base de nickel).

Aspects tribologiques de la mise en forme des métaux

Très généralement, la *tribologie* étudie le *frottement* entre deux corps massifs glissant l'un sur l'autre, les possibilités de *lubrification* de l'interface correspondante et l'*usure* induite. Les problèmes associés sont de nature très diverse : mécanique, thermique, physico-chimique. La mise en forme des métaux pose des problèmes de ce type, particulièrement importants d'un point de vue pratique, comme le montrent les exemples suivants, illustrés par la *figure* 18.

● Le glissement du métal sur l'outil induit à l'interface métal-outil une cission de *frottement* (*fig.* 18 a) qui dissipe une énergie qui lui est proportionnelle : l'énergie d'une mise en forme augmente avec le frottement.

● Le forgeage d'une aube de compresseur est un cas particulièrement spectaculaire où la majeure partie de l'*effort de mise en forme* est due au frottement. L'analyse des contraintes par la méthode des tranches met en évidence la *colline de frottement :* la valeur absolue de la contrainte normale à l'interface aube-matrice croît des bords au centre où sa valeur élevée est due à l'aplatissement important du produit. *La maîtrise des dimensions finales de l'aube* nécessite la prise en compte de la déformation élastique de l'outillage.

● Le frottement et les échanges thermiques entre le métal et l'outil conditionnent la morphologie de l'écoulement du métal et, de ce fait, les propriétés mécaniques et métallurgiques du produit;

— le filage des aciers est lubrifié par du verre qui assure un frottement limité et diminue le refroidissement du métal par l'outillage; l'écoulement s'amorce très près de la filière et ne comprend pas de zone morte;

— le filage du cuivre n'est pas lubrifié, mais l'oxyde de cuivre assure un frottement modéré; le refroidissement du métal, plus important, durcit sa périphérie et introduit une zone morte de faible étendue;

— pour les laitons, le fort frottement induit par l'oxyde de zinc et le refroidissement du métal provoquent la formation d'une zone morte très étendue.

● Pour limiter le frottement, on lubrifie l'opération de mise en forme. Toutefois, certains procédés nécessitent un niveau minimal de frottement *(Forgeage d'une nervure)*. Ainsi, l'entraînement du métal dans la cage de laminage est assuré par la cission de frottement (*fig.* 18 b).

● La rugosité du produit dépend de la nature du *lubrifiant* utilisé.

● L'usure de l'outillage dépend d'une manière complexe des sollicitations mécaniques et thermiques induites par la mise en forme. Les premières dépendent directement de la colline de frottement et du glissement

▼ ***Figure 18 : exemples d'aspects tribologiques de la mise en forme des métaux; a, interface métal-outil (σ : contrainte normale, τ : cission de frottement); b, entraînement en laminage.***

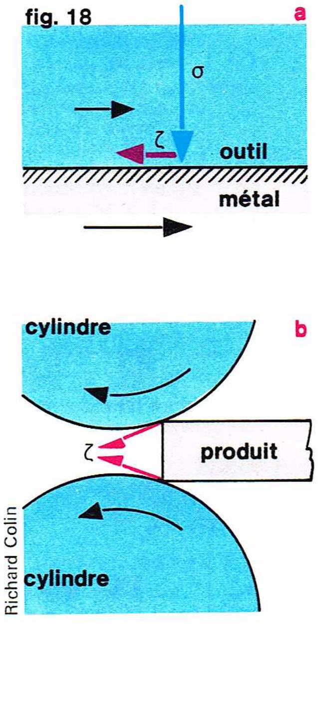

fig. 20

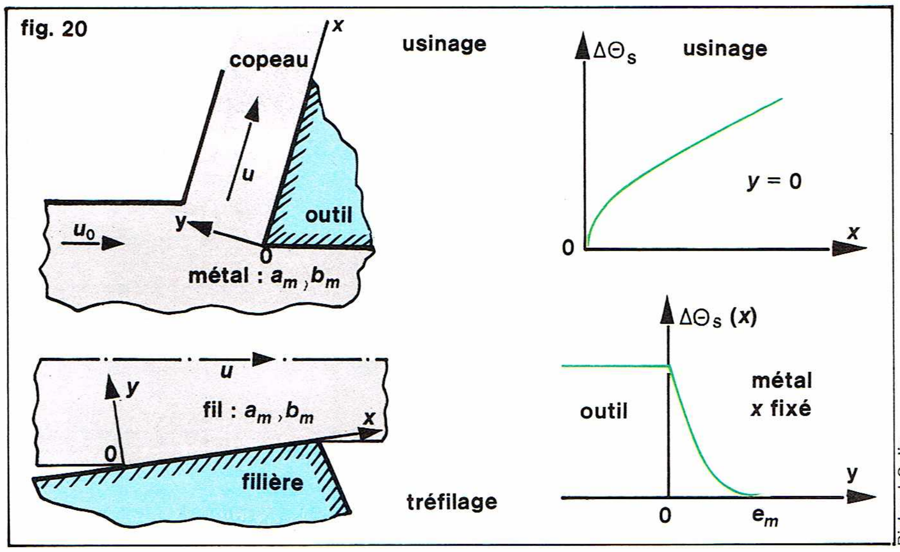

▲ *Figure 20 : échauffement dû au frottement dans les procédés à outil fixe (usinage, tréfilage). Les courbes indiquent la distribution de l'échauffement.*

du métal sur l'outil, les secondes des transferts thermiques du métal vers l'outil et de l'énergie dissipée en frottement.

Frottement

Modèles de frottement

Deux modélisations sont utilisées pour définir quantitativement l'intensité du frottement.

Sous contrainte normale modérée, Coulomb a établi expérimentalement que la cission de frottement τ est proportionnelle à la contrainte normale σ (*fig.* 18 a) : $\tau = \mu\,|\sigma|$; μ est le coefficient de frottement de Coulomb. Sous forte contrainte normale, comme en mise en forme, cette loi n'est plus forcément vérifiée. Mais on peut toujours poser :

$$\tau = \begin{cases} \mu\,|\sigma| & \text{si } \tau \leqslant \sigma_0/\sqrt{3} \\ \sigma_0/\sqrt{3} & \text{sinon} \end{cases}$$

La restriction est imposée par le critère de plasticité de von Mises.

Le modèle de Tresca, mieux adapté à la mise en forme, suppose que τ est une fraction de la cission maximale $\sigma_0/\sqrt{3}$ (selon von Mises) :

$$\tau = \overline{m}\,\sigma_0\sqrt{3} \quad (0 \leqslant \overline{m} \leqslant 1)$$

$\overline{m}$ est le coefficient de frottement de Tresca.

Mesure du frottement

Le frottement est éminemment variable et dépend, notamment, de la nature des antagonistes (métal, outil, lubrifiant), de l'état de surface du métal et de l'outillage, de la cinématique du procédé, de la contrainte normale et de la température.

Dans la mise en forme à chaud non lubrifiée, le frottement est souvent proche du frottement maximal $\overline{m} = 1$. Toutefois, les oxydes de certains métaux (cuivre, fer) peuvent assurer un frottement plus faible. La mise en forme à froid est généralement lubrifiée ; le frottement est plus faible : $\overline{m}$ varie typiquement entre 0,05 et 0,2.

On mesure expérimentalement le frottement à l'aide de *tests* dont le plus utilisé est le test de l'anneau (*fig.* 19) : lors de l'écrasement d'un anneau entre tas plats, le frottement gêne l'écoulement centrifuge du métal, et, à écrasement donné, le diamètre interne est d'autant plus petit que le frottement est important.

Une abaque théorique permet de déduire de l'évolution des dimensions l'ordre de grandeur du coefficient de frottement de Tresca.

On peut également instrumenter la machine de mise en forme et déduire l'ordre de grandeur du frottement des résultats des mesures, éventuellement avec l'aide d'un modèle mécanique du procédé. Les coûts correspondants sont évidemment plus élevés.

▼▶ *Figure 19 : mesure du frottement en mise en forme. Principe du test de l'anneau.*
Figure 21 : échauffement dû au frottement en laminage et dans les procédés non stationnaires ; a, géométrie ; b, distribution de l'échauffement.

fig. 19

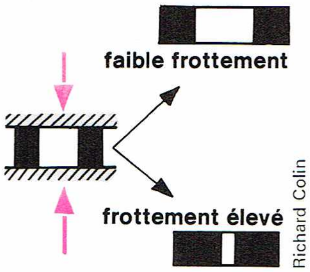

Échauffement induit

Le frottement dissipe à l'interface métal-outil une puissance par unité de surface (*fig.* 20 a) :

$$\Phi = \tau\,|\Delta\vec{u}| = \overline{m}\,\frac{\sigma_0}{\sqrt{3}}\,|\Delta\vec{u}|$$

où $\Delta\vec{u}$ est la vitesse relative du métal par rapport à l'outil. Cette énergie va se répartir par conduction thermique dans le métal et l'outil et échauffer leur superficie. Appelons K, ρ et c respectivement la conductivité thermique, la masse volumique et la chaleur massique. On définit : la diffusivité thermique $a = \mathrm{K}/\rho c$ et l'effusivité thermique $b = \sqrt{\mathrm{K}\rho c}$. Les indices m et o sont respectivement relatifs au métal et à l'outil. Deux cas se présentent :

— L'outil est fixe (usinage, tréfilage). Le flux thermique absorbé par l'outil est constant et généralement petit devant Φ. Alors, l'échauffement superficiel dû au frottement vaut (*fig.* 20 b) :

$$\Delta\theta_S\,(x) \simeq 0{,}7\,\frac{\overline{m}\sigma_0\sqrt{ux}}{b_m}$$

Le métal subit un échauffement d'allure sensiblement parabolique sur une profondeur $e_m\,(x) = \sqrt{6\,a_m\,\frac{x}{u}}$

La résolution de l'équation de la chaleur fournit la distribution de température de l'outil.

— L'outil est mobile (laminage) ou l'opération est discontinue (filage, forgeage) [*fig.* 21 a]. Le flux Φ se répartit au prorata des effusivités thermiques :

$$\Phi_m = \frac{b_m\,\Phi}{b_m + b_0} \qquad \Phi_0 = \frac{b_0\,\Phi}{b_m + b_0}$$

L'échauffement superficiel vaut, après une durée t de glissement (*fig.* 21 b) :

$$\Delta\theta_s \simeq 0{,}7\,\frac{\overline{m}\sigma_0\,|\Delta\vec{u}|\,\sqrt{t}}{(b_m + b_0)}$$

Chaque antagoniste subit un échauffement d'allure parabolique sur une profondeur $e = \sqrt{6\,at}$.

Lubrification

Lubrifiants de mise en forme

Il en existe une grande variété ; leurs fonctions sont généralement multiples : diminuer le frottement ; limiter les transferts thermiques du métal vers l'outil (écran thermique) ; refroidir l'outillage et minimiser son usure ; imposer au produit un état de surface désiré (lisse, rugueux) ; lubrifier les mécanismes annexes (par exemple, roulements des cages de laminoir) ; faciliter les opérations ultérieures, permettre la conservation du produit, etc.

On peut regrouper les lubrifiants en trois catégories :

— Les lubrifiants à base d'eau (eau pure, émulsions) s'imposent dans les procédés où le refroidissement de l'outillage est un problème primordial (laminage et forge à chaud), ou lorsque les problèmes de frottement ne sont pas critiques (par exemple, tréfilage du cuivre). Leur coût est faible. Le film lubrifiant est mince (h < 1 μm), et le produit obtenu lisse.

— Les lubrifiants à base visqueuse : il s'agit, à froid, des huiles et graisses minérales, végétales ou synthétiques, des savons métalliques (sels métalliques d'acides gras) ; à chaud, des verres. Ils engendrent un film plus épais, dit film hydrodynamique. Leur coût est plus élevé.

— Les lubrifiants spécifiques : goudrons, lanoline, suif, sciure, cires, etc.

fig. 21

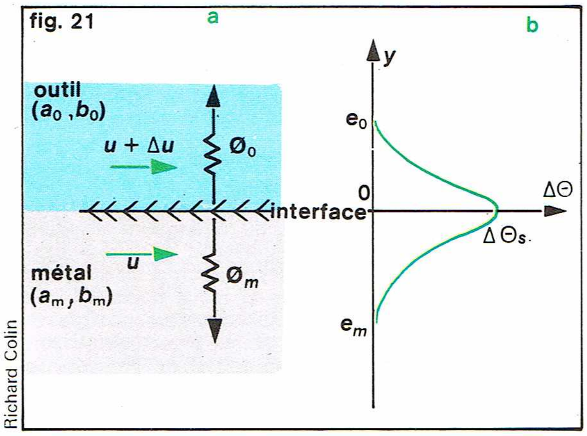

Tous ces lubrifiants sont généralement additivés. Dans certains cas, leur efficacité dépend directement des revêtements déposés sur le métal. Le plus important est le revêtement de phosphatation qui est utilisé pour la mise en forme à froid des aciers au carbone, lubrifiée par les savons (forge, tréfilage, étirage).

D'autres types de revêtements sont utilisés dans des problèmes spécifiques : cuivrage des pièces frappées à froid, étamage des boîtes de conserves étirées sur mandrin, film polymérique sur les tôles embouties.

Lubrification hydrodynamique

Elle est due à la viscosité du lubrifiant et à son augmentation avec la pression p selon la loi de Barus : $\eta = \eta_0 e^{\gamma p}$.

Le lubrifiant est capable d'interposer entre l'outil et le métal un film dont l'épaisseur, de l'ordre du µm, augmente avec la vitesse et la viscosité.

Les conséquences pratiques sont les suivantes :

— le frottement décroît quand h augmente et atteint une faible valeur ($\mu \simeq 0{,}02$ à $0{,}05$) en film complet (peu de contacts directs métal-outil [*fig.* 22 a]) ;

— l'usure de l'outillage est très faible en régime complet ;

— la rugosité augmente avec h. En film complet, le produit obtenu est mat et très rugueux.

Additifs de frottement

Ils agissent à faible concentration (quelques pour cent) et ont pour rôle de diminuer le frottement au niveau des contacts directs métal-outil (*fig.* 22 b). Il en existe une grande variété :

— *Additifs limite :* alcools gras, acides gras, etc. Ils s'adsorberaient jusqu'à une certaine température sur les surfaces métalliques pour former des couches plus ou moins ordonnées et protectrices, ayant une épaisseur de l'ordre de 0,1 µm.

— *Additifs anti-usure et extrême pression :* produits soufrés, chlorés, phosphorés, etc. Ils réagissent chimiquement avec les métaux à haute pression ou haute température pour former avec eux un film lubrifiant solide de quelques µm d'épaisseur.

— *Solides lamellaires :* graphite, bisulfure de molybdène, utilisés surtout dans la mise en forme à chaud ou à tiède. Ainsi, l'eau graphitée assure dans le forgeage à chaud de courte durée $\overline{m}$ voisin de 0,2.

Transferts thermiques du métal vers l'outil

Contact parfait

Lorsqu'on met en contact deux corps de surface plane et de température uniforme, mais différente, la température de surface, supposée identique pour les deux corps, se fixe instantanément à la moyenne des températures initiales, pondérée par leur effusivité thermique :

$$\theta_{sp} = \frac{b_0 \theta_{oo} + b_m \theta_{mo}}{b_0 + b_m}$$

La distribution de température dans chaque corps est perturbée sur une profondeur $e \simeq \sqrt{12at}$ (*fig.* 23 a).

Contact réel

On n'observe pratiquement jamais les faits précédents. En effet, il existe à l'interface un certain nombre de causes de perturbation (rugosité, lubrifiant, oxydes superficiels) qui réduisent les transferts thermiques. Tout se passe comme si la température subissait une discontinuité $\Delta\theta_s$ (*fig.* 23 b). On écrit alors que le flux traversant l'interface est proportionnel à $\Delta\theta_s$: $\Phi = \overline{\alpha}\Delta\theta_s$; $\overline{\alpha}$ est la conductance thermique de l'interface : son inverse est la résistance thermique superficielle.

Les températures de surface tendent asymptotiquement vers θ_{sp}. Ainsi, la profondeur de pénétration et la température de surface du métal valent :

$$\begin{cases} \theta_{sm} = \theta_{sp} + X\,(\theta_{mo} - \theta_{sp}) \\ e_m = \sqrt{\dfrac{6\,a_m}{U}}\left(\dfrac{1}{X} - 1\right) \end{cases}$$

où

$$\begin{cases} U = \dfrac{3}{2}\left[\overline{\alpha}\left(\dfrac{1}{b_m} + \dfrac{1}{b_0}\right)\right]^2 \\ X^2 \exp\left(\dfrac{1}{X^2}\right) = \exp\,(2\,Ut + 1) \end{cases}$$

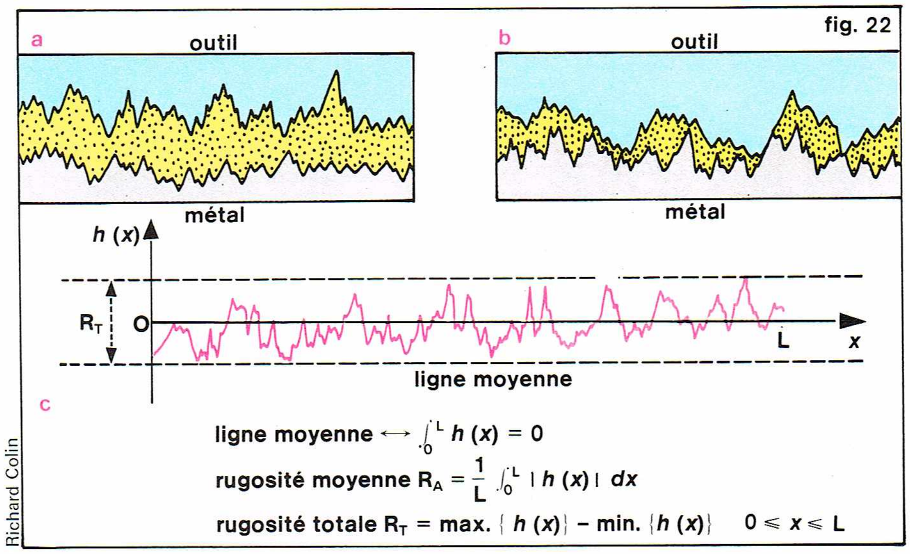

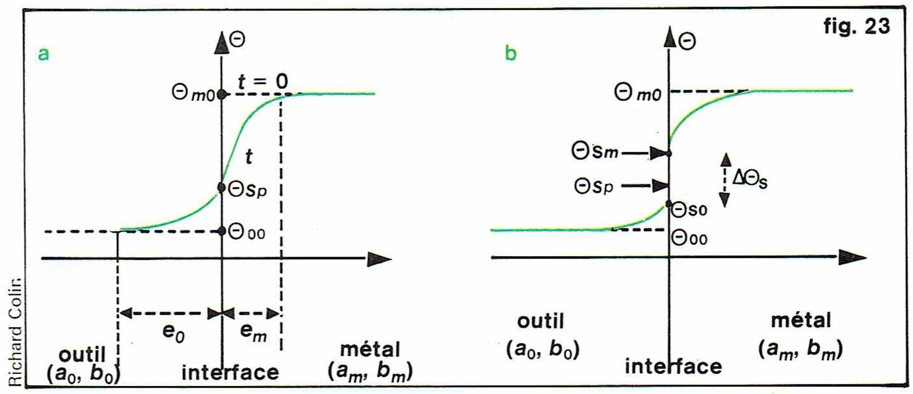

▲ ***Figure 22 :*** ***régimes de lubrification et rugosité ;*** ***a, régime hydrodynamique ;*** ***b, régime de lubrification mixte ;*** ***c, rugosité d'une surface.***
Figure 23 : échange thermique entre deux corps de températures différentes ; ***a, contact parfait ;*** ***b, contact imparfait.***

Les valeurs de $\overline{\alpha}$ se situent entre 10^4 et 10^5 $Wm^{-1} \cdot {}^\circ C^{-1}$. En particulier, une couche d'oxyde de conductibilité thermique K d'épaisseur e_c a une conductance : $\overline{\alpha} = K/e_c$.

État de surface

Notion d'état de surface

Ce terme recouvre diverses propriétés de la superficie du corps considéré, en général différentes de celles du cœur du matériau : la rugosité (*fig.* 22 c) ; la composition chimique ; la structure cristallographique et métallurgique ; les propriétés électriques (potentiel de surface) ; la dureté ; les contraintes résiduelles. Les propriétés superficielles du métal et de l'outil conditionnent le frottement et l'usure de l'outillage. Elles évoluent au cours de la mise en forme soit par suite de la déformation plastique du métal, soit par suite d'opérations annexes comme les traitements thermiques, chimiques ou électrochimiques.

Rugosité du métal

Cette notion est particulièrement importante dans le domaine des tôles d'acier laminées à froid où il existe une normalisation de la rugosité moyenne des états de livraison. Les rugosités peuvent être imprimées à la tôle par une opération de skin-pass ou passe de finition (réduction de ~ 1 %) à l'aide de cylindres grenaillés.

L'influence de la rugosité sur les conditions de mise en forme est multiple : le métal et l'outil sont en contact direct seulement sur une fraction de leur surface en regard (*fig.* 22 b). Dans la mise en forme à chaud, cela limite les transferts thermiques du métal vers l'outil. L'analyse de la déformation plastique des microcontacts a permis à Tabor de justifier théoriquement la loi de Coulomb découverte expérimentalement $\tau = \mu\,|\sigma|$. Le piégeage de lubrifiant dans les creux de la rugosité du métal augmente la portance des aspérités et diminue le frottement apparent.

La contribution des contacts métalliques au frottement est négligeable dès que l'épaisseur du film lubrifiant due à la viscosité ou à la réactivité chimique du lubrifiant vaut : $h > 2{,}5\sqrt{R_{Am}^2 + R_{Ao}^2}$. On est alors en film complet.

Composition chimique superficielle

Une série d'exemples permet de comprendre l'importance de ce paramètre.

- Le métal déformé à chaud est couvert d'une couche d'oxydes plus ou moins épaisse qui peut jouer un double rôle : un rôle de lubrifiant si cette couche est moins dure que le métal, un rôle d'écran thermique, car les oxydes sont en général moins bons conducteurs de la chaleur que le métal.
- A froid, les oxydes métalliques superficiels sont généralement abrasifs. On les élimine donc par grenaillage ou immersion dans une solution acide. On produit ainsi une surface propre, d'une haute réactivité chimique, qui accroche bien le lubrifiant ou un revêtement.
- Dans l'étirage sur mandrin d'un godet en acier étamé, à paroi mince, on maximise le frottement mandrin-godet qui est moteur en déposant sur la paroi interne un film d'étain mince qui laisse déboucher partiellement l'acier en surface. En revanche, le film d'étain plus épais qui recouvre la paroi externe minimise le frottement filière-godet qui est résistant.
- La composition chimique superficielle de l'outillage peut évoluer fortement : soit par accumulation à sa surface d'un film de transfert mince, constitué par exemple des débris formés par l'abrasion du métal sur les aspérités de l'outillage (le frottement peut être ainsi fortement diminué) ; soit sous l'effet des contraintes et des échauffements induits par la mise en forme, par diffusion de certains éléments constitutifs du métal ou du lubrifiant dans l'outil. Dans le cas du forgeage à chaud, la dureté superficielle est ainsi fortement augmentée.

Usure de l'outillage

Dans tous les procédés de mise en forme, on rencontre de l'usure par adhésion-rupture, fatigue mécanique et attaque chimique par le lubrifiant. Dans la mise en forme à chaud s'introduisent en outre la fatigue thermique et le fluage (ou déformation plastique).

Un exemple particulièrement critique est celui de la forge à chaud où la durée de vie des outillages est très limitée (quelques milliers de pièces). La *figure* 24 a donné à titre d'exemple la répartition des divers modes d'usure sur une gravure de forge à chaud. Les principaux moyens de limiter cette usure sont les suivants :

— Choix de la nuance de l'outillage (aciers à outil, aciers rapides, carbures métalliques, diamant, etc.). Le matériau idéal est celui qui allie la plus forte dureté à la plus forte ténacité.

— Choix du traitement thermique pour obtenir le meilleur compromis dureté-ténacité.

— Frettage de l'outil pour limiter les contraintes de traction induites par la mise en forme (tréfilage, forge à froid, filage, etc.).

— Traitement superficiel de l'outillage : revêtements de carbure de titane très dur sur les plaquettes pour usinage, durcissement par nitruration des outillages de forge, grenaillage des surfaces pour limiter l'adhésion et augmenter la résistance à la fatigue.

— Modification du dessin des outillages ou des conditions d'utilisation pour limiter les sollicitations thermomécaniques : optimisation du refroidissement pour la mise en forme à chaud, amélioration de la lubrification. Pour ce dernier point, il faut noter toutefois qu'en forgeage à chaud, une diminution du frottement entraîne parfois une augmentation de l'usure. C'est le cas du forgeage entre tas plats de cylindres : à sec, le cylindre s'aplatit surtout par bombement de sa surface latérale, car le frottement est élevé. A frottement plus faible, le métal glisse sur l'outil et l'use par abrasion.

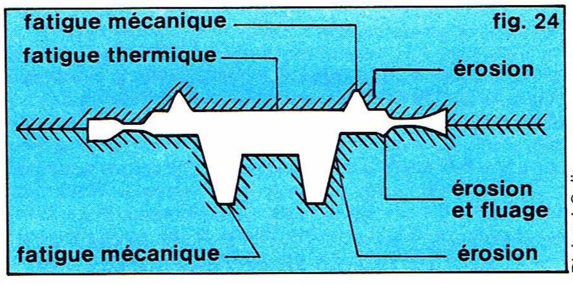

▶ ***Figure 24 :** répartition des modes d'usure le long d'une gravure de matrice.*

Premières transformations

Le laminage

En toute généralité, le laminage est une opération de mise en forme consistant à rétrécir, par déformation plastique, un écoulement de métal ayant une direction préférentielle. A partir de cette définition, de nombreuses variantes peuvent être envisagées, couvrant une large gamme de produits finis.

Ce procédé peut être étudié sous ses différents aspects, intéressant chacun une catégorie de personnel bien précise :

— *économique :* la commercialisation de produits de grande série et la recherche de coûts de production aussi bas que possible ;

— *technique :* la conception des outils nécessaires pour obtenir un produit déterminé ;

— *mécanique :* la détermination (en particulier par la théorie de la plasticité) de certaines grandeurs caractéristiques (effort et couple de laminage) ;

— *métallurgique :* l'étude des transformations internes du matériau et la recherche d'un produit de caractéristiques satisfaisantes (résistance, aspect de surface, etc.) ;

— *automatique :* la programmation des trains de laminage et diverses opérations de contrôle.

Données économiques

Les produits de départ, à l'entrée du laminoir, sont soit des lingots (blocs d'acier pouvant atteindre 35 t), soit de l'acier provenant de coulée continue : dans ce dernier cas, le métal passe directement de l'état liquide en poche au stade de demi-produit (bloom ou brame). Entre l'acier brut et les produits finis laminés interviennent deux catégories de laminoirs : les *laminoirs dégrossisseurs* et les *laminoirs finisseurs*.

Les premiers transforment les produits de départ en demi-produits. On distingue ceux-ci par leurs dimensions, qui sont fonction de l'usage auquel ils sont destinés :

— les *blooms*, de section carrée dont le côté est supérieur à 12 cm, pour les profilés lourds (poutrelles, rails) ;

— les *brames*, de section rectangulaire, dont l'aire est supérieure à 144 cm^2 pour les tôles et plaques ;

— les *billettes*, de section carrée ou rectangulaire, dont l'aire est comprise entre 12,25 et 144 cm^2, pour les petits profilés (fers marchands et fil machine) ;

— les *largets*, de section rectangulaire très aplatie pour le forgeage.

Le second groupe de laminoirs (finisseurs) transforme ces demi-produits en produits destinés à la commercialisation, qui peuvent être classés, selon leur forme, entre :

— les *produits longs :* fers marchands (ronds, ronds à béton, carrés, cornières, profilés en U, T, etc.), poutrelles, rails, palplanches, etc. ;

— les *produits plats :* tôles, fer noir et fer blanc, etc.

Des laminoirs de type spécial sont utilisés pour la production de tubes, engrenages, filetages.

Types de laminoirs

L'ensemble d'une chaîne de laminage constitue un *train de laminoirs* dont les éléments constitutifs de base sont des cages (*fig.* 25).

Les cages les plus classiques sont composées de deux cylindres à axes parallèles, tournant en sens inverse, entre lesquels le métal s'écoule : ce sont des cages *duo* (*fig.* 25 a).

Une cage *trio* est composée de trois cylindres à axes parallèles, situés dans un même plan vertical (voir *fig.* 25 b). Cette disposition permet de faire subir au produit des passes en aller-retour sans changer le sens de rotation des cylindres, sur deux plans de laminage superposés ; toutefois, le cylindre central, subissant des efforts opposés, est plus sollicité que les autres.

Une cage *quarto* est constituée de deux groupes de deux cylindres à axes parallèles. Les deux cylindres extrêmes servent d'appui aux deux cylindres internes, ou de travail : on diminue ainsi le fléchissement et la tendance à la séparation des cylindres (*fig.* 25 c).

Une cage *Sendzimir* possède des cylindres de travail de très petit diamètre soutenus par un grand nombre de cylindres d'appui (18 sur la *fig.* 25 f) : ce système sert surtout pour le laminage à froid du feuillard.

Un laminoir *planétaire* est constitué de deux gros cylindres porteurs sur lesquels tournent les cylindres de travail (de petit diamètre). On peut faire subir au métal de fortes réductions, mais à la sortie le produit n'est pas plat, la surface est bosselée.

Les cages universelles sont dotées de cylindres horizontaux et de cylindres verticaux, pour la production de poutrelles ou de profilés de formes variées.

Citons encore : les cages à cylindres à action convergente, destinées au laminage de ronds ou fils, les laminoirs obliques pour tubes, les laminoirs « pas de pèlerin » pour la finition des tubes.

Technologie

Les bloomings-slabbings sont les laminoirs les plus puissants et ont un rôle vital, puisqu'ils effectuent la première mise en forme de l'acier. Une installation classique de blooming comprend :

— des fours de réchauffage (fours « Pits ») pour amener les lingots à la température de laminage (1 000 à 1 200 °C pour l'acier) ;

— des rouleaux d'alimentation, pour transporter les lingots vers les cages ;

— le blooming proprement dit, qui est un duo réversible, sur lequel le produit effectue plusieurs aller-retour pour être amené aux dimensions désirées ;

— devant et derrière cette cage, on trouve des règles et des culbuteurs qui positionnent le lingot et lui font faire un quart de tour entre certaines passes (c'est « faire quartier ») ;

— une cisaille régularise les blooms en éliminant les parties en creux ou en bombé ;

— des rouleaux d'évacuation font la liaison entre le blooming et le train suivant, un train à billettes ou à gros profilés ;

— un poste de flammage permet d'éliminer les défauts superficiels des demi-produits.

Les trains à produits longs ou à profilés disposent de plusieurs cages duo ou trio, et éventuellement de cages universelles, de postes de sciage, de dressage, de refroidissement.

Les tôles minces (d'épaisseur inférieure à 2 mm) sont laminées à froid, pour éviter l'oxydation et obtenir un état de surface satisfaisant ; il faut alors effectuer un certain nombre d'opérations annexes, telles que :

— décalaminage pour supprimer l'oxyde formé en surface pendant le laminage à chaud ;

— laminage à froid proprement dit, avec apport de lubrifiant ;

— dégraissage de la surface du produit ;

— recuit pour supprimer l'effet de l'écrouissage et redonner au métal sa structure initiale ;

— skin-pass, ou passe de finition, avec une très faible réduction, pour écrouir le matériau en surface seulement ;

— opérations de finition: revêtement de surface (chromage, étamage), cisaillage, planage, huilage, emballage, etc.

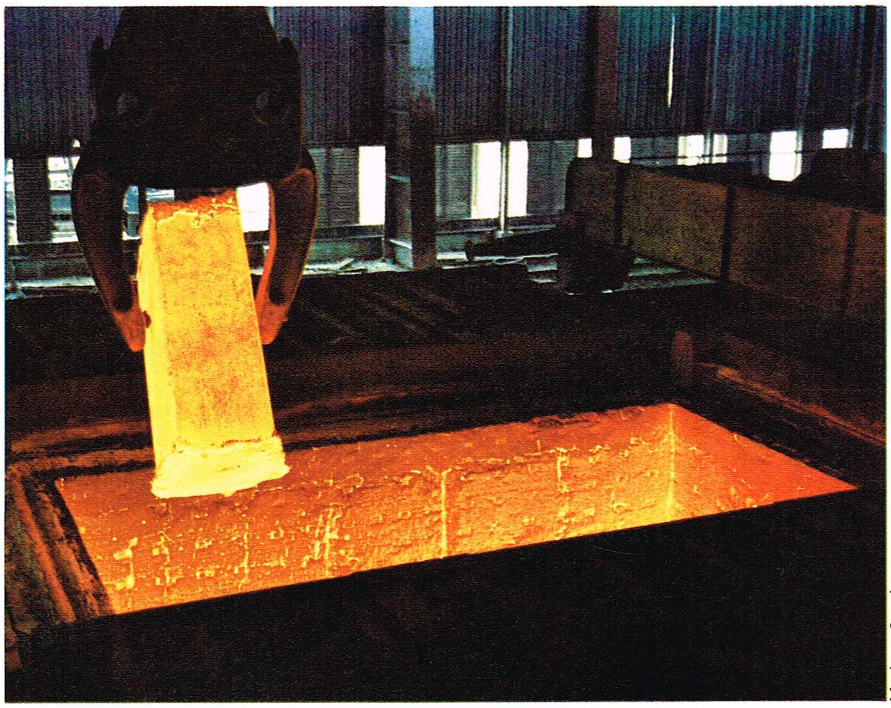

Marka - Cascio

▲ *Sortie du four d'un lingot porté à la température nécessaire au processus de laminage.*

fig. 25

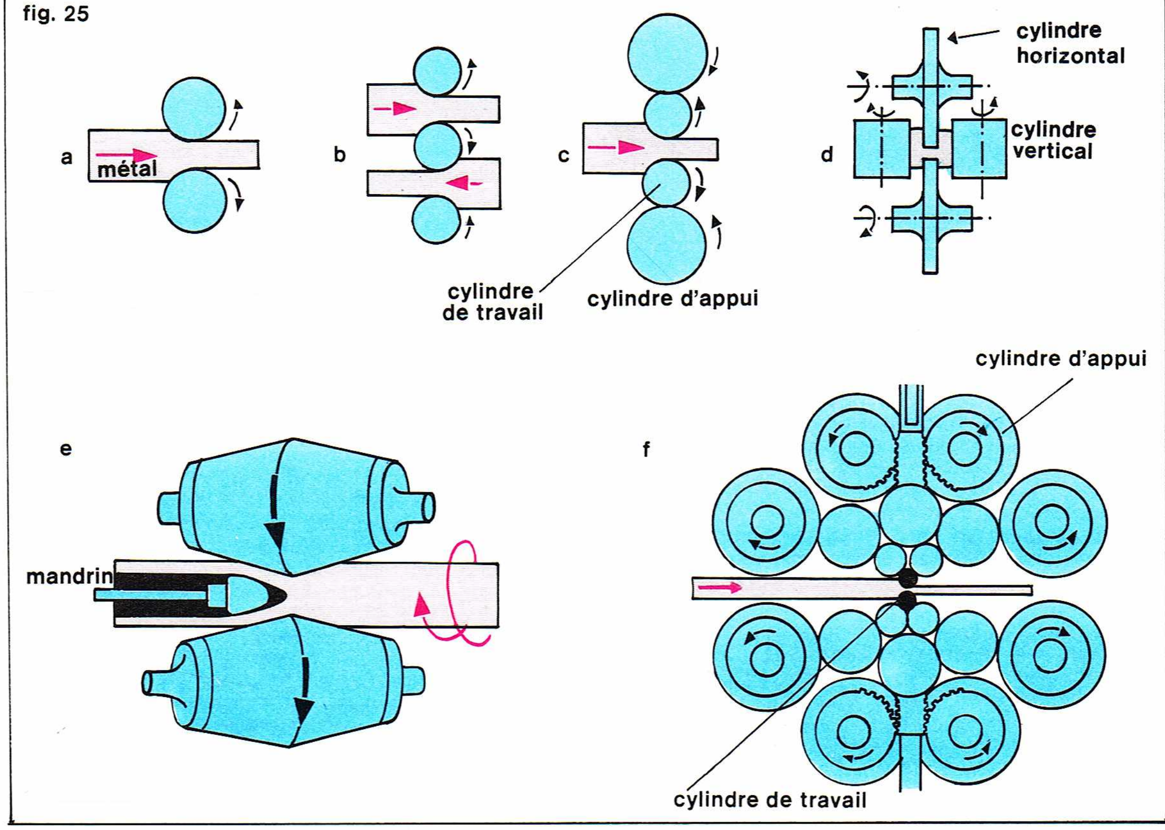

Richard Colin

◀ *Figure 25 : différents types de laminoirs ;* a, *duo ;* b, *trio ;* c, *quarto ;* d, *cage universelle (pour poutrelle) ;* e, *laminoir oblique à tubes ;* f, *cage Sendzimir.*

▶ *Figure 26 : analyse mécanique. Figure 28 : colline de frottement. On voit l'effet d'une traction et d'une contre-traction sur la tôle.*

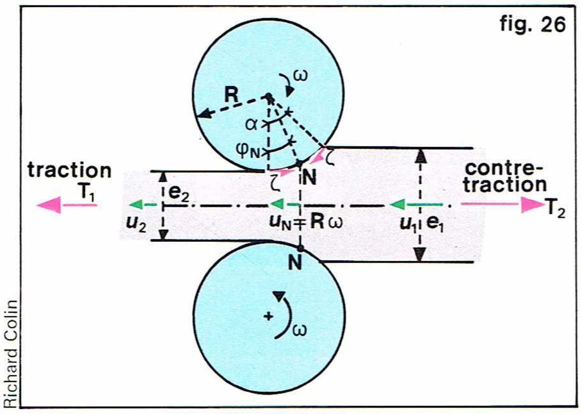

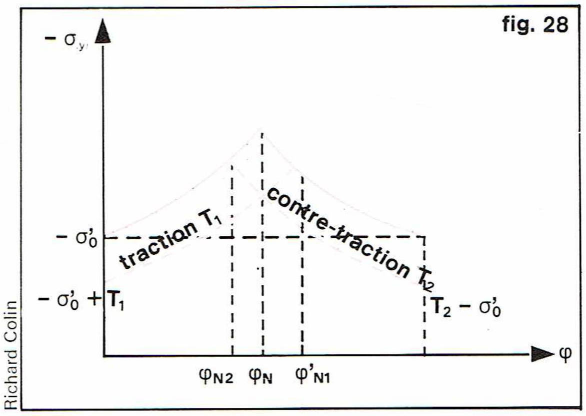

Analyse mécanique

Les lois mécaniques régissant le comportement du métal permettent de déterminer avec une bonne précision les principales inconnues, pour une passe donnée : force et couple de laminage, contraintes dans le matériau, évolution géométrique du produit. Elles expliquent également certains types de défauts (décohésions dues à une dépression à cœur, par exemple). L'engagement dans l'emprise du laminoir ne peut se faire sans l'existence d'un certain frottement entre les cylindres et le matériau. L'angle d'attaque α ne doit pas dépasser un angle limite α_{max} tel que tg $\alpha_{max} = \mu$ (coefficient de frottement de Coulomb).

Le métal à l'état solide étant incompressible, les vitesses d'entrée u_1 et de sortie u_2 sont liées par la relation

$$u_1 \cdot e_1 = u_2 \cdot e_2$$

(e_1 et e_2 étant respectivement les épaisseurs d'entrée et de sortie), tout au moins lorsque l'élargissement du produit est négligeable, ce qui est notamment le cas des produits larges. Dans l'emprise entre les cylindres, la vitesse moyenne u, dans une section d'épaisseur e, est telle que $u \cdot e = u_1 \cdot e_1$. La vitesse du produit croît de u_1 à u_2, la vitesse périphérique des cylindres $R \cdot \omega$ est comprise entre ces deux limites, et il existe un point neutre N où elle est égale à la vitesse du produit, c'est-à-dire $R \cdot \omega = u_N$; en amont de N, les cylindres entraînent le produit, en aval ils le freinent (*fig.* 26).

L'angle d'emprise α est en général faible (quelques degrés) ; une première approche globale consiste à considérer le laminage comme un écrasement par un coin mobile, nécessitant un effort F incliné sur la verticale d'un angle $\alpha/2$. L'équilibre est assuré par un effort horizontal $F' \simeq F\alpha$ transmis par les cylindres par l'intermédiaire du frottement. Le couple de laminage exercé par chaque cylindre vaut donc $C = R \cdot F'/2 \simeq RF\,\alpha/2$. Le laminage présente une ressemblance certaine avec un écrasement entre deux tas plats, ou bipoinçonnement ; on peut établir une équivalence en prenant une épaisseur e comprise entre e_1 et e_2 et une emprise $2\,a = \sqrt{R\,(e_1 - e_2)}$. On peut ainsi transposer des modèles mécaniques du bipoinçonnement au laminage (*fig.* 27).

Les modèles mécaniques propres au laminage, selon qu'ils sont plus ou moins sophistiqués, permettent de calculer avec plus ou moins de précision les grandeurs mécaniques recherchées (principalement le couple et l'effort de laminage). Le modèle des tranches, par exemple, fait l'hypothèse de la constance des contraintes principales σ_x et σ_y dans des tranches verticales. Une tranche d'épaisseur dx est soumise aux forces dues aux tranches voisines ; aux forces dues à la contrainte exercée par le cylindre ; aux forces de frottement sur le cylindre.

▼ *Figure 27 : effort de laminage, analogie avec le bipoinçonnement.*

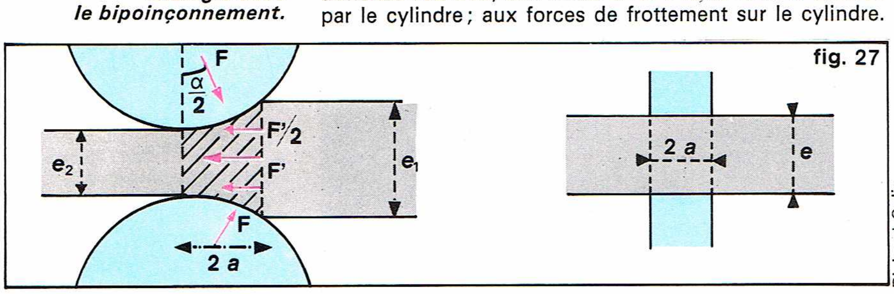

L'équilibre d'une telle tranche s'écrit :

— sur l'horizontale :

$$(h + dh)\,\sigma_x\,(x + dx) - h\sigma_x\,(x) + 2\,s\,(\text{tg}\,\varphi \pm \mu) = 0$$

— sur la verticale : $\sigma_y = s\,(1 \mp \mu \text{tg}\,\varphi) \simeq s$

(μ tg φ est négligeable devant 1 en général) [s est la contrainte normale au cylindre ; dans $\pm$ et $\mp$ le signe supérieur concerne la sortie, avec frottement résistant, et le signe inférieur l'entrée, avec frottement moteur].

Le critère de plasticité de von Mises s'écrit :

$$|\sigma_x - \sigma_y| = 2\,\sigma_0/\sqrt{3}$$

La résolution de ce système d'équations donne l'évolution des contraintes dans l'emprise ; en particulier, sous l'effet du frottement, σ_y est plus compressif au point neutre qu'à l'entrée et à la sortie de l'emprise. La représentation de la variation de σ_y est appelée « colline de frottement ». L'aire de la colline de frottement est, à un facteur multiplicatif près, l'effort de laminage :

$$F = L \int_{\text{arc}} |\sigma_y|\,dx \quad \text{(L est la largeur).}$$

La *figure* 28 montre l'effet d'une traction et d'une contre-traction sur la tôle : une traction T_1 augmente l'angle neutre, diminue l'aire de la colline, donc l'effort de laminage ; une contre-traction T_2 diminue l'angle neutre, ainsi que l'effort de laminage.

Des modèles plus élaborés ont été développés, notamment par Sims et Orowan. Les analyses par lignes de glissement ou par éléments finis sont plus précises, mais réclament des développements mathématiques beaucoup plus compliqués.

Analyse métallurgique

Tous les matériaux ne réagissent pas d'une manière identique aux déformations imposées par le laminage. L'évolution de la température au cours de l'opération, le schéma des passes de laminage, la composition exacte de l'alliage laminé influent énormément sur la structure finale du produit obtenu. C'est pourquoi l'obtention de matériaux de caractéristiques mécaniques élevées nécessite la prise en compte du comportement métallurgique propre à chaque alliage et le développement de la technique du laminage contrôlé.

Alors que, dans le laminage à chaud classique des aciers, on passe rapidement, et à haute température (1 100-1 200 °C), d'une brame à la tôle d'épaisseur désirée en un nombre de passes optimal du point de vue économique, le laminage contrôlé recherche en particulier la finesse des grains de la structure ferrite-perlite, pour obtenir une amélioration des propriétés mécaniques (limite élastique, résilience, soudabilité, etc.). Les passes sont effectuées dans certains domaines précis de température, qu'on peut répartir en trois zones :

— *zone I*, de température élevée (supérieure à 1 000 °C), où se forment des grains d'austénite (γ) grossiers ;

— *zone II* (850-1 000 °C), où les grains sont affinés par recristallisation statique ;

— *zone III* (au-dessous de 850 °C) ; les grains sont écrouis et s'allongent. Au cours du refroidissement se forment des grains ferritiques (α) fins.

De nombreux paramètres influent sur les propriétés mécaniques finales : la présence d'éléments de micro-

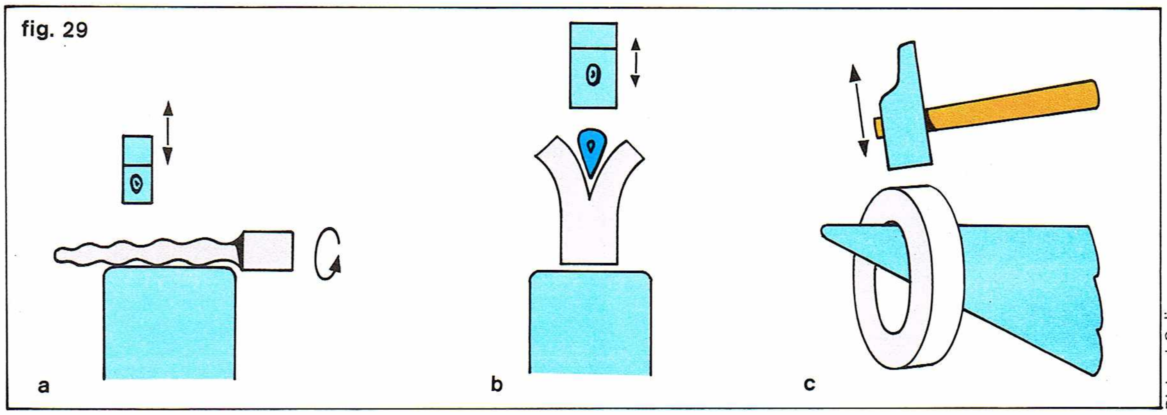

◀ *Figure 29 : quelques aspects du forgeage ;*
a, étirage par roulage ;
b, fendage ;
c, bigornage.

alliage (niobium, vanadium, titane, etc.), les réductions imposées à chaque passe, les temps d'attente entre passes successives, les températures de préchauffage et de laminage final, la vitesse de refroidissement. Un schéma de laminage contrôlé doit tenir compte de tous ces facteurs pour obtenir un bon compromis entre les impératifs économiques et les propriétés mécaniques requises.

Automatisation des laminoirs

De plus en plus, les trains de laminoirs tendent à être automatisés et sont commandés à partir d'une unité centrale pour accroître la productivité des installations, et les qualités métallurgiques et dimensionnelles des produits laminés.

Les fonctions que peut remplir un ordinateur dans un train de laminoir sont multiples :

— contrôle de la progression de chaque pièce dans le train ;

— régulation de l'alimentation du train en fonction de la cadence de production, de la capacité des fours de réchauffage, etc. ;

— détermination de la vitesse de rotation des cylindres, de l'écartement à afficher sur chaque cage, et contrôle de ces paramètres ;

— contrôle de la largeur, de l'épaisseur, de la température du produit en cours de laminage ;

— enregistrement d'informations sur le cédage de la cage, le couple et l'effort de laminage, les moteurs d'entraînement ;

— utilisation de modèles mathématiques déterminant les valeurs optimales de l'écartement et la vitesse de rotation des cylindres pour chaque passe.

Les conséquences de l'automatisation sont très appréciables :

— réduction des pertes, par l'élimination des erreurs de manipulation, et une plus grande régularité des dimensions ;

— amélioration des schémas de passes ;

— accroissement de la productivité ;

— durée de vie accrue pour l'installation, grâce à la diminution du risque de fracture accidentelle des cylindres à cause d'une erreur de réglage.

Divers degrés d'automatisation se rencontrent dans l'industrie : certains trains de laminoirs sont à commande programmée, c'est-à-dire qu'un programme fixe détermine toujours le même schéma de passes pour tous les lingots ou blooms, sans tenir compte d'une éventuelle diversité (en température, en dimensions) de ces produits. En revanche, un train automatisé par un ordinateur s'adapte aux légères variations qui peuvent survenir et offre de plus grandes possibilités.

Le forgeage

Sous le nom de forgeage sont désignés en fait de nombreux procédés différents. Historiquement, c'est un procédé manuel : l'artisan forgeron frappe avec son marteau une pièce chaude (environ 1000 °C) posée sur l'enclume et tenue à la tenaille. Son but est généralement d'étirer un barreau par roulage ; mais il peut aussi refouler, fendre, cambrer, bigorner, etc. (*fig.* 29). Hormis pour les faibles séries de petites pièces artisanales, le forgeage est aujourd'hui mécanisé : le pilon ou la presse accroissent l'énergie à mettre en jeu.

▲ *Une des phases de la mise en forme d'un lingot.*

Le premier objectif du forgeage est de passer d'une forme géométrique brute (lingot, barre préalablement formée, etc.) à une forme plus évoluée, pouvant même être une pièce mécanique finie. C'est ainsi que le même terme de *forgeage* désigne un certain nombre de procédés bien différents, dont le seul lien est la parenté des outils nécessaires (presse ou pilon). On fait généralement deux types de distinctions.

Grosse forge et procédés de forgeage de finition

★ *La grosse forge*, c'est l'extrapolation du procédé manuel de l'artisan, qui passe du lingot au demi-produit à une plus grande échelle, compatible avec la rentabilité des aciéries. La grosse forge a pour mission essentielle de *corroyer* (c'est-à-dire déformer à chaud) le lingot initial, dont le volume et la structure métallurgique brute de coulée le rendent impropre à toute utilisation mécanique.

★ *Les procédés de forgeage de finition* servent à transformer les demi-produits d'origines diverses (grosse forge, laminage, etc.) en pièces mécaniques plus ou moins élaborées.

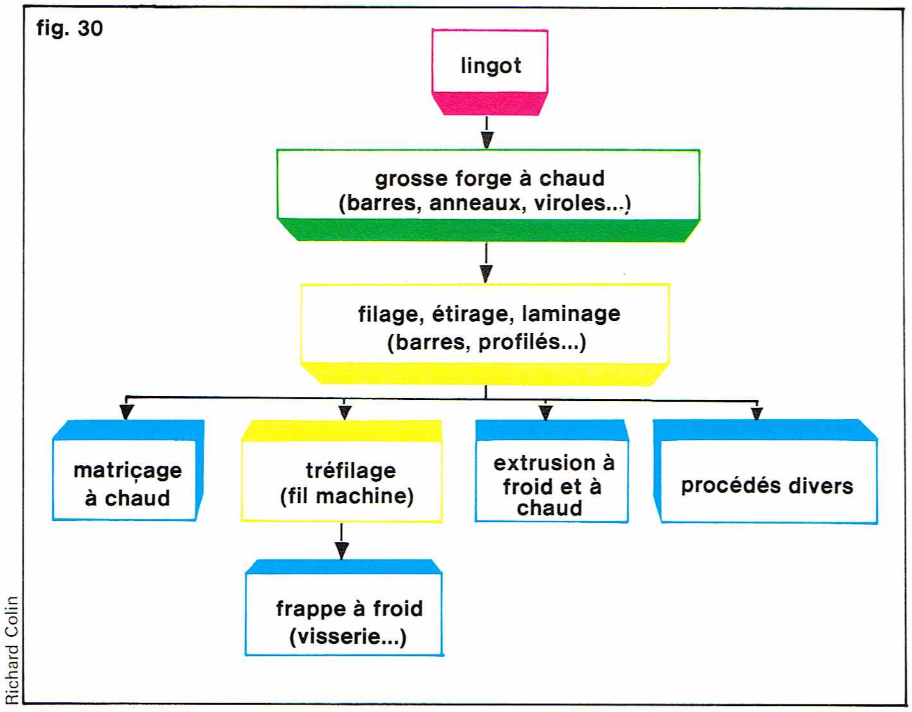

▲ *Figure 30 : schéma de la chaîne de transformations en forgeage.*

Forgeage à chaud et forgeage à froid

Le forgeage est initialement un procédé de mise en forme à chaud, c'est-à-dire à température voisine des 3/4 de la température de fusion du métal forgé, et cela pour des raisons inhérentes à la ductilité métallique (corroyage du lingot, géométries de pièces conduisant à de grandes déformations) ainsi qu'à l'énergie à mettre en jeu et à la tenue des outillages. Les progrès récents en matière d'aciers à outillage ont permis d'étendre le domaine du forgeage à froid (c'est-à-dire à température ambiante). Les avantages et inconvénients respectifs sont très schématiquement les suivants :

★ *Forgeage à chaud*

Avantages :
- — importante déformation du métal possible ;
- — efforts engendrés relativement faibles.

Inconvénients :
- — faible précision géométrique, reprises en usinage importantes ;
- — traitements thermiques ultérieurs souvent nécessaires si on recherche de bonnes caractéristiques mécaniques.
- — énergie de chauffage nécessaire.

★ *Forgeage à froid*

Avantages :
- — bonne précision géométrique ;
- — bonnes caractéristiques mécaniques obtenues par écrouissage.

Inconvénients :
- — déformation du métal limitée ;
- — efforts engendrés importants ;
- — traitements de surface au préalable souvent nécessaires pour une lubrification correcte.

▼ *Figure 31 : les principaux procédés classiques du forgeage.*

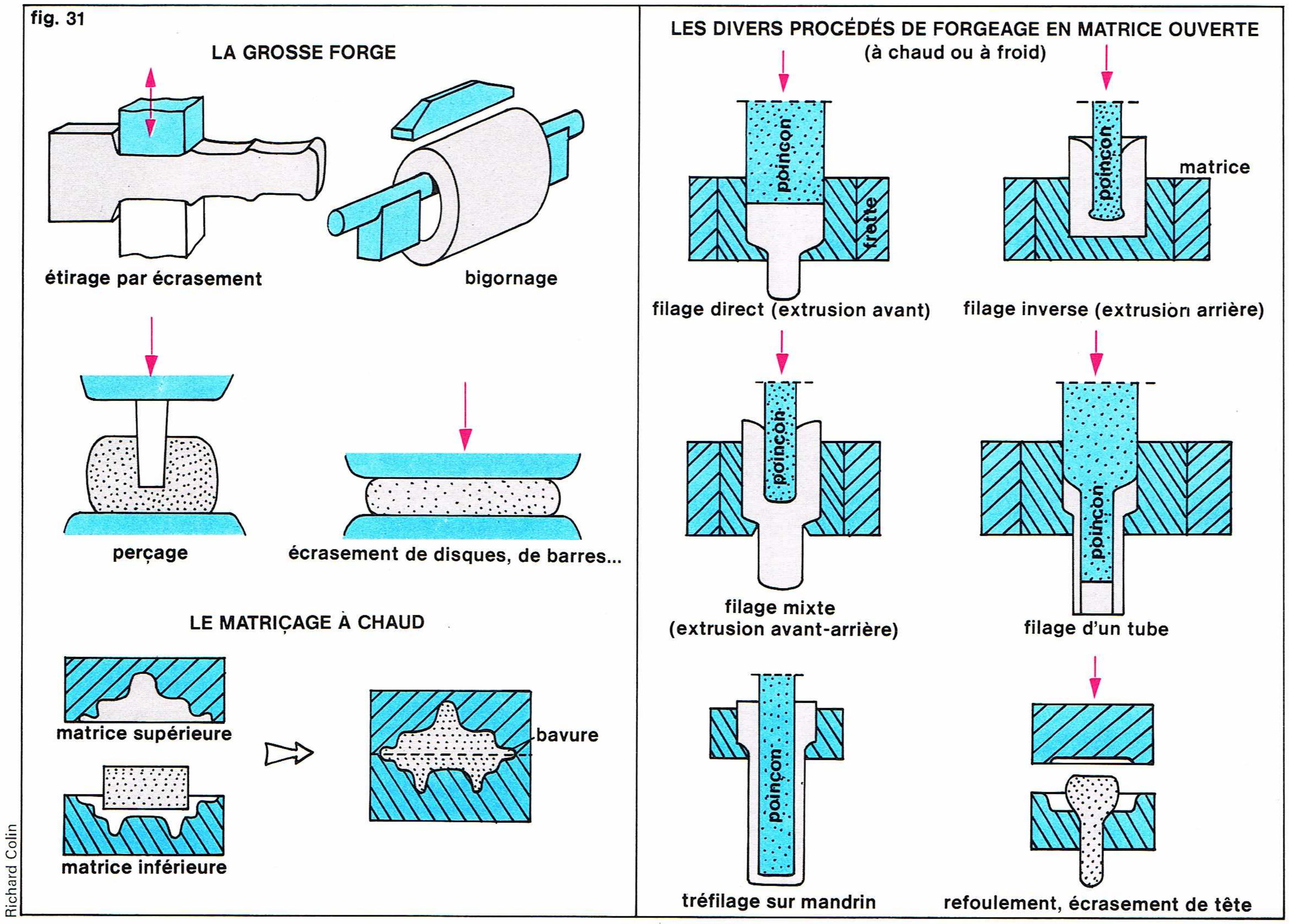

Dans le domaine restreint du forgeage de certains aciers, le *forgeage à tiède* (environ 650 °C) tente aujourd'hui de cumuler les avantages des forgeages à chaud et à froid tout en évitant leurs inconvénients. La *figure* 30 tente de schématiser la chaîne des transformations en forgeage.

Les outils

L'énergie nécessaire au forgeage est obtenue grâce à deux types d'outils, les pilons et les presses.

Les pilons : ce sont des machines à choc, comme en forgeage manuel. Le marteau est une masse tombante accélérée la plupart du temps par un cylindre à vapeur ou à air comprimé. Leurs performances se chiffrent en termes de vitesse d'impact (quelques m/s) et d'énergie nominale (jusqu'à 10^5 J).

Les presses : ce sont des machines à faible vitesse de travail (< 1 m/s). On distingue essentiellement les presses hydrauliques, caractérisées par une vitesse relativement lente et constante, les presses mécaniques (à excentrique ou à vilebrequin), dont la vitesse est imposée par la cinématique, et les presses à vis qui dissipent l'énergie emmagasinée par un volant d'inertie. Leurs performances s'expriment en termes d'effort maximal possible (jusqu'à quelque 10^4 t).

Le type d'outil est à adapter au type de travail à réaliser; les paramètres de ce choix sont la nature et la température du matériau forgé, le type de déformation envisagé, les performances géométriques visées, les structures métallurgiques à obtenir, ainsi que les notions de cadence, de rentabilité, etc.

Les principaux procédés classiques

Ils sont représentés sur la *figure* 31.

Quelques procédés moins classiques

Le forgeage à haute énergie : il s'agit d'utiliser les propriétés rhéologiques à grande vitesse de déformation. A l'inverse des pilons — grosse masse tombante à faible vitesse — on anime une masse assez faible à grande vitesse (jusqu'à 25 m/s), grâce à un gaz comprimé ou un moteur à explosion. Le procédé reste encore expérimental, et sa rentabilité par rapport aux techniques classiques n'est démontrée que dans le cas des produits très plats et pour des séries assez faibles.

Le forgeage superplastique : il s'agit au contraire d'utiliser les propriétés superplastiques de certains alliages afin d'obtenir de très importantes déformations à de très faibles vitesses de déformations.

Le forgeage d'ébauches coulées ou frittées : il s'agit de combiner des procédés de mise en forme complémentaires, essentiellement pour des questions de nécessité (par exemple : ébauches de tungstène fritté forgées à chaud).

Le forgeage austénitique des aciers : il s'agit de figer par refroidissement rapide certaines structures métallurgiques susceptibles de conférer aux pièces forgées une bonne résistance mécanique sans fragilisation. C'est un cas particulier des traitements thermomécaniques. Ce procédé s'étend également aux superalliages de titane, d'aluminium, etc.

Les métaux forgeables

La plupart des aciers sont forgeables, c'est-à-dire qu'il existe à peu près toujours un domaine de températures où la ductilité du métal est suffisamment importante. Les problèmes sont d'ordre technologique : chauffage, tenue des outillages, etc. Une des tendances actuelles consiste à élargir le domaine du forgeage à froid (nuances plus sophistiquées, pièces plus complexes).

Le cuivre et les laitons sont forgeables, ainsi que la plupart des alliages légers. On forge les alliages de titane, les superalliages, etc.

La *forgeabilité* d'un métal est très difficile à cerner à l'aide d'un simple test de laboratoire. Il s'agit essentiellement de caractériser la ductilité du métal subissant une histoire mécanique donnée (un certain chemin de déformation sous un certain régime de contraintes à une certaine température). Néanmoins, d'intéressantes corrélations ont pu être faites entre la rupture en torsion d'une éprouvette cylindrique et la forgeabilité à chaud, ainsi qu'entre l'écrasement de lopins cylindriques et certaines séquences de forgeage à froid.

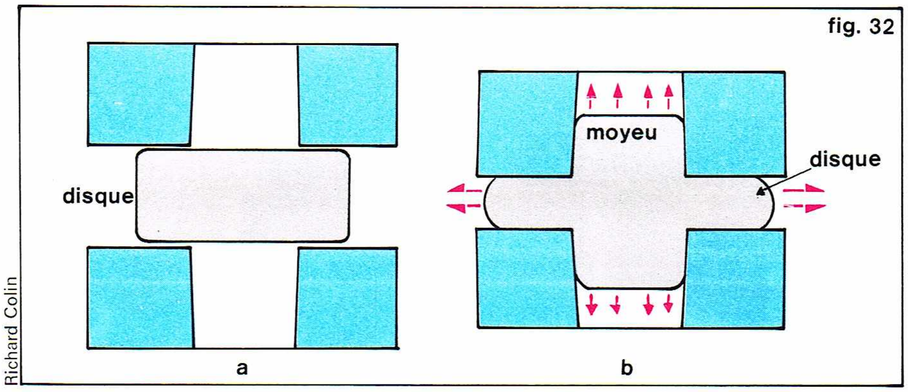

Richard Colin

▲ ***Figure 32 : forgeage d'un disque à moyeu central. Le degré de liberté est ici le rapport élargissement du disque/montée du moyeu.***

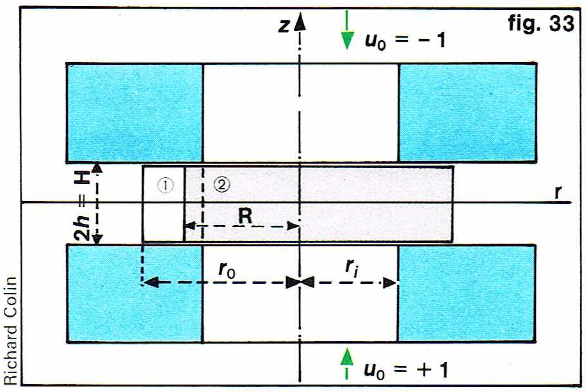

Richard Colin

◀ ***Figure 33 : évolution géométrique du produit forgé. Voir l'explication des deux zones dans le texte.***

Approche scientifique

En raison de l'extrême diversité des formes « forgeables », l'approche scientifique du forgeage en général est remarquable par sa complexité. L'antagonisme entre l'empirisme de l'atelier et les tentatives théoriques de modélisation des phénomènes métallurgiques et mécaniques qui interviennent est par ailleurs un frein à un développement scientifique du forgeage. L'ingénieur des méthodes en forgeage doit connaître la *métallurgie*, le *traitement de surface*, la *résistance des matériaux*, le *transfert thermique*, la *plasticité*, etc. Comme il est illusoire de prétendre donner un aperçu des progrès récents dans toutes ces disciplines, nous avons choisi ce dernier domaine scientifique (la plasticité) pour illustrer l'apport d'une réflexion scientifique dans la conception des gammes de forgeage.

Lorsqu'à une course donnée de l'outillage correspond une géométrie parfaitement définie du produit, l'écoulement plastique du métal est connu séquentiellement (filage direct, filage inverse). Si tel n'est pas le cas (matriçage, filage mixte), il est *indéterminé*. Lorsqu'on veut forger ainsi un produit de géométrie finale donnée, la connaissance séquentielle de l'écoulement plastique est nécessaire, afin d'éviter au maximum la suppression technologique par l'outillage du (des) degré(s) de liberté de l'écoulement. Le forgeage d'un disque à moyeu central illustre cela schématiquement (*fig.* 32). Le degré de liberté est ici le rapport élargissement du disque/montée du moyeu. Les paramètres tels que géométrie et frottement gouvernent le processus de l'écoulement. On pourrait bloquer technologiquement soit la montée, soit l'élargissement en vue d'une géométrie finale visée, mais on augmenterait alors l'énergie de mise en forme. Les considérations ci-après permettent au contraire de prévoir l'évolution géométrique du produit forgé (*fig.* 33).

La zone **1** $|r_0 < r < r_i|$ du produit est telle que la vitesse verticale au contact de la matrice est imposée. Dans la zone **2**, c'est une inconnue. Près du bord du disque ($r = r_0$), l'écoulement se fait vers l'extérieur; près du centre, il se fait vers l'intérieur. Il existe donc un rayon neutre $r = R$ de séparation entre ces deux processus; c'est précisément le paramètre R d'élargissement. Il caractérise le rapport élargissement/montée. A chaque valeur de R est associée une puissance de déformation W (R) qu'il est naturel de chercher à minimiser pour connaître l'écoulement réel.

fig. 35

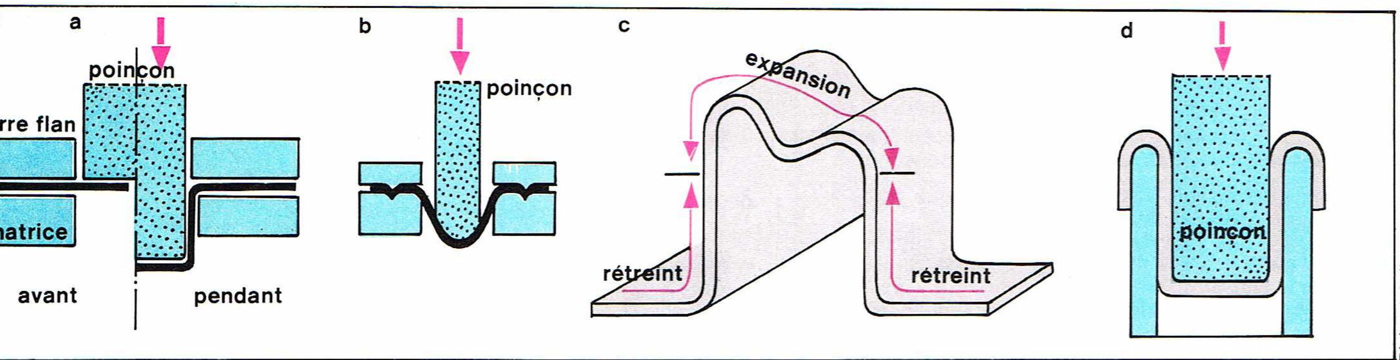

Richard Colin

▲ *Figure 35 : diverses opérations de l'emboutissage : a, rétreint ou emboutissage profond ; b, expansion ; c, emboutissage d'un pare-chocs d'automobile ; d, réemboutissage profond d'un godet.*

Dans la zone **1**, la vitesse d'une particule $\vec{u}$ (u_z, u_θ, u_r) est telle que :

$$\begin{cases} u_z = -\dfrac{z}{h} & \text{(conditions } u_z\ (z=0) \text{ et } u_z\ (z = \pm h) \text{ respectées)} \\ u_\theta = 0 & \text{(par raison de symétrie)} \\ u_r = \dfrac{1}{2h}\left(r - \dfrac{R^2}{r}\right) & \text{(par respect de l'incompressibilité du métal).} \end{cases}$$

On en déduit une vitesse de déformation totale pour la zone **1** :

$$\dot{\bar{\varepsilon}}_1 = \frac{1}{h}\sqrt{1 + 2\left(\frac{R}{r}\right)^2}$$

De même pour la zone **2**, un champ de vitesse incompressible et respectant la continuité de u_r à la frontière $r = r_i$ des deux zones s'écrit :

$$\begin{cases} u_z = -\dfrac{z}{h}\left[1 - \left(\dfrac{R}{r_i}\right)^2\right] \\ u_\theta = 0 \\ u_r = \dfrac{r}{2h}\left[1 - \left(\dfrac{R}{r_i}\right)^2\right] \end{cases}$$

La discontinuité des vitesses verticales s'écrit :

$$u_z^1\ (r_i) - u_z^2\ (r_i) = \frac{z}{h}\left(\frac{R}{r_i}\right)^2$$

La vitesse de déformation de la zone **2** est :

$$\dot{\bar{\varepsilon}}_2 = \frac{1}{h}\left[\left(\frac{R}{r_i}\right)^2 - 1\right]$$

La puissance dissipée totale est la somme de :
— la puissance dissipée dans le volume :

$$\dot{W}_v = \int_v \sigma_0 \dot{\bar{\varepsilon}}\, dv = 2\int_0^h \int_{r_i}^0 \dot{\bar{\varepsilon}}_2\, 2\pi r\, dr\, dz + 2\int_0^h \int_{r_i}^{r_0} \dot{\bar{\varepsilon}}_1\, 2\pi r\, dr\, dz$$

— la puissance dissipée sur la discontinuité :

$$\dot{W}_D = 2\,\frac{\sigma_0}{\sqrt{3}}\int_0^h 2\,\pi\, r_i^2\, \frac{z}{h}\left(\frac{R}{r_i}\right)^2 dz$$

— la puissance dissipée par frottement (supposé collant) :

$$\dot{W}_f = 2\int_{r_i}^{r_0} u_z\,(h)\; 2\,\pi\, r\, dr$$

Le calcul du minimum $\dot{W}$ (R) $= \dot{W}_v + \dot{W}_D + \dot{W}_f$ est réalisé numériquement et présenté sous forme d'abaque (*fig.* 34). A toute géométrie initiale (r_0, r_i, h) correspond donc un rayon neutre R définissant le processus initial de l'écoulement (champs des vitesses des zones **1** et **2**).

Cet exemple simple illustre sommairement ce domaine peu connu de considérations mécaniques, apporté par la théorie de la plasticité en forgeage.

fig. 34

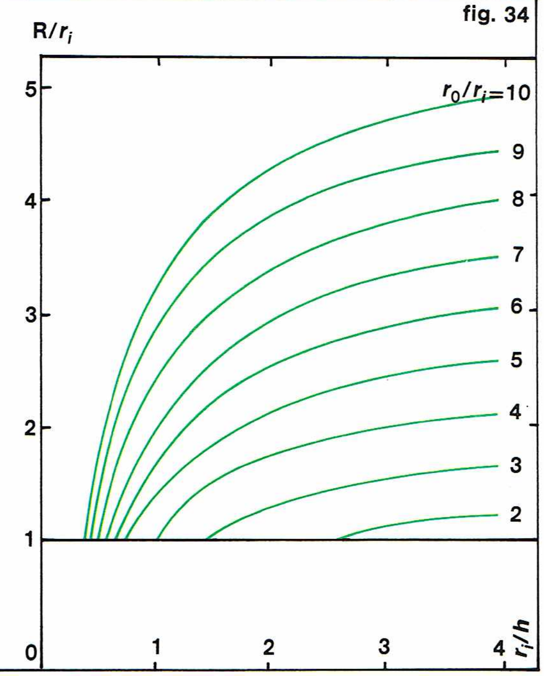

Richard Colin

▶ *Figure 34 : le calcul du minimum $\dot{W}$ (R) est réalisé numériquement et présenté ici sous forme d'abaque.*

Emboutissage des tôles

Principe

L'opération s'effectue sur presse mécanique ou hydraulique et consiste à transformer une pièce plate découpée dans une tôle laminée et appelée *flan* en un produit non développable.

Les deux cas les plus simples d'emboutissage sont :
— l'opération de *rétreint,* ou d'emboutissage profond (*fig.* 35 a), où un flan circulaire est transformé en un godet à fond plat par avancée du poinçon dans la matrice ; l'épaisseur du flan est maintenue constante par le serre-flan ;
— l'opération d'*expansion* (*fig.* 35 b) : le serre-flan empêche tout glissement du métal. Un poinçon vient former une coupole par amincissement de la partie non comprimée.

Les opérations d'emboutissage courantes sont une combinaison de rétreints et d'expansions (*fig.* 35 c). Elles peuvent également introduire du cintrage comme l'opération de réemboutissage profond schématisée sur la *figure* 35 d. Généralement, l'obtention d'un produit nécessite plusieurs opérations successives d'emboutissage et de découpe.

Outillages

Il en existe une grande variété :
● Les outillages à simple action sont constitués uniquement d'un poinçon et d'une filière (*fig.* 36 a).
● Les outillages à double action comportent en outre un serre-flan et sont analogues à celui de la *figure* 36 a. Ils sont généralement montés sur des presses à double action et permettent d'obtenir une réduction en rétreint plus élevée.
● Les outillages combinés permettent de réaliser successivement et au même endroit plusieurs opérations. Dans le cas de la *figure* 36 b : découpe du flan, emboutissage profond, perçage du fond, ébavurage.
● Les outillages combinés à suivre sont limités, pour des raisons d'encombrement et de coût, à la production de petites pièces de grande série (*fig.* 36 c) : la pièce n'est individualisée qu'en fin de formage.

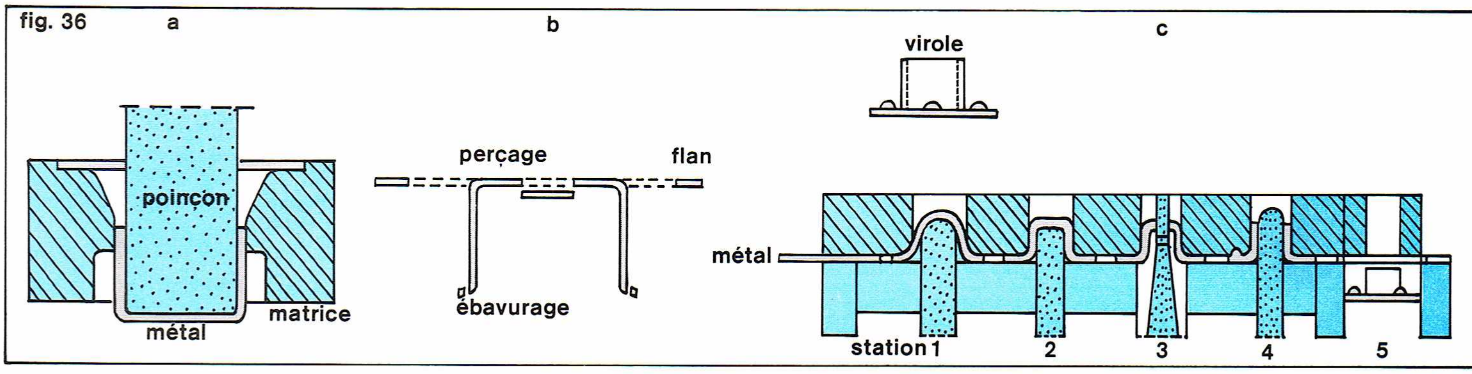

Richard Colin

● Les outillages combinés à cames sont utilisés, en conjonction avec des dispositifs de transfert, à la production de pièces plus importantes et de grande série.

Lubrification

Le frottement joue un rôle important :

● L'effort d'emboutissage profond d'un godet à fond plat (*fig.* 35 a) vaut, pour un corps rigide, parfaitement plastique, de contrainte d'écoulement σ_0 :

$$F = 2\,\pi\, ah\, \frac{2\,\sigma_0}{\sqrt{3}} \left(\text{Log}\, \frac{R}{a} + \overline{m} \left(\frac{R - a}{h} \right) \right)$$

où $\overline{m}$ est le coefficient de frottement de Tresca du flan sur le serre-flan. Il est maximal en début d'emboutissage (R = *b*) où il ne doit pas dépasser la force de rupture en traction du godet : $2\,\pi\, ah\, \frac{2\,\sigma_0}{\sqrt{3}}$. La réduction $\rho = 1 - \frac{a}{b}$ ne peut dépasser une valeur limite, d'autant plus faible que le frottement est important.

● Dans l'expansion par un poinçon à large rayon de courbure, le faible frottement assuré par le téflon permet d'homogénéiser les déformations et l'épaisseur du produit : la rupture se produit pour une hauteur emboutie plus importante.

Aspects métallurgiques

Ils ont également une grosse influence par l'intermédiaire de la capacité d'écrouissage et de l'anisotropie de la tôle.

Influence de l'écrouissage

L'écrouissage est caractérisé par l'exposant *n* de la relation empirique décrivant l'évolution de la contrainte d'écoulement avec la déformation totale imposée $\bar{\varepsilon}$:

$$\sigma_0 = \sigma_1\, \bar{\varepsilon}^n$$

n vaut 0,2 pour l'aluminium, 0,5 pour l'acier.

Les risques de rupture dans les zones en expansion sont d'autant plus faibles que *n* est élevé, car une augmentation de *n* tend à homogénéiser la déformation et l'épaisseur du produit.

Influence de l'anisotropie

Si l'on tractionne une éprouvette plate découpée dans une tôle laminée, on constate que l'épaisseur ne subit pas la même déformation que la largeur, et que $r = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_2}$, dit coefficient d'anisotropie de Lankford, dépend de l'angle entre la direction de laminage et l'axe de l'éprouvette.

On définit : $\Delta r = \dfrac{r_{0°} + r_{90°} - 2\, r_{45°}}{2}$ anisotropie plane

$\bar{r} = \dfrac{r_{0°} + r_{90°} + 2\, r_{45°}}{4}$ anisotropie moyenne

En général, $\bar{r}$ et Δr varient dans le même sens. Cette anisotropie est due à l'orientation des grains par le laminage (texture). A l'anisotropie plane est associée la formation des cornes d'emboutissage (*fig.* 37) dans l'opération de rétreint, car les variations d'épaisseur ne seront pas uniformes sur le pourtour du godet. La réduction limite par rétreint est d'autant plus importante que $\bar{r}$ est élevée.

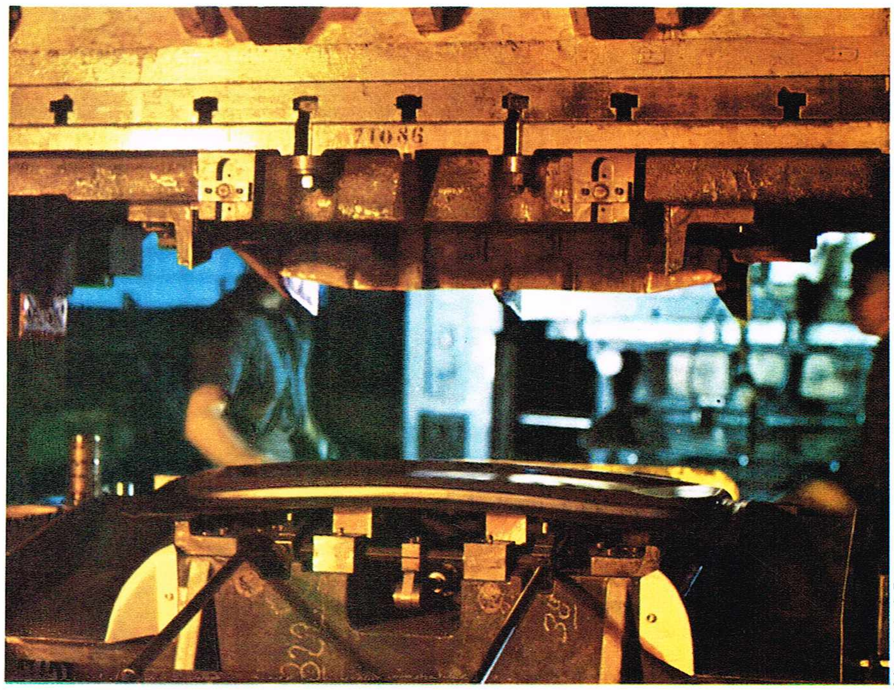

Mondadori-Press

▲ ***Figure 36** : outillages et gammes d'emboutissage ; a, outillage à simple action ;*
b, fabrication d'un godet avec un outillage combiné ;
c, fabrication d'une virole à bord tombé en acier avec un outillage combiné à suivre.
Presse gigantesque utilisée par Fiat pour l'emboutissage des carrosseries.
▼ ***Figure 37** : influence de l'anisotropie de la tôle sur l'emboutissage ;*
a, cornes à 0-90° ; b, aucune corne ; c, cornes à 45°.

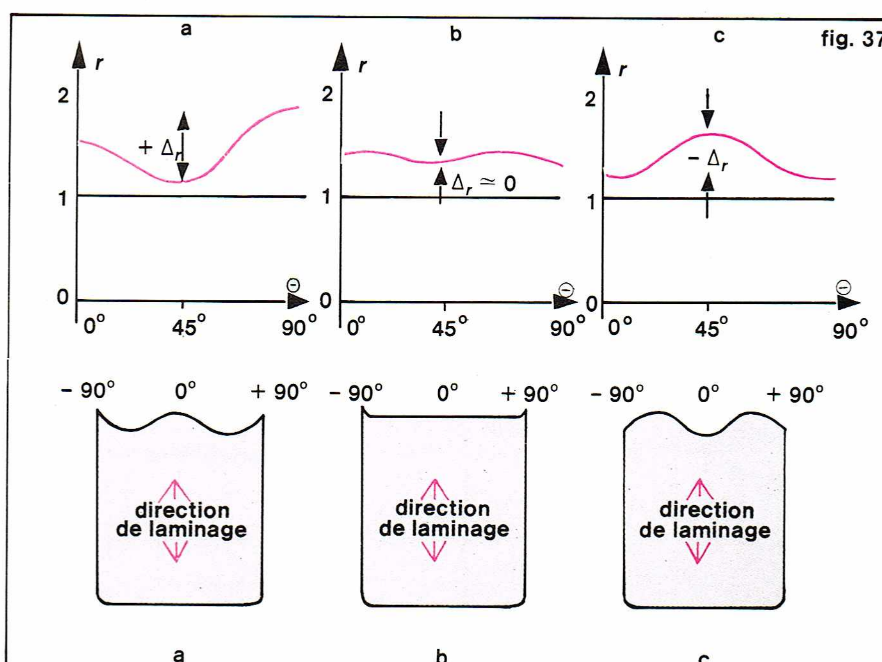

Richard Colin

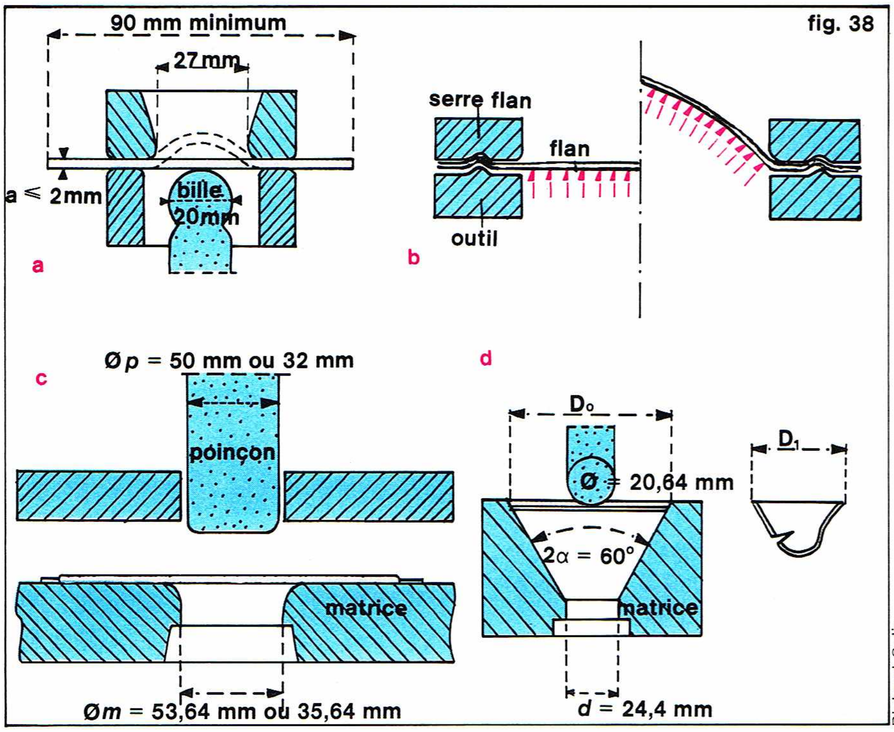

▲ *Figure 38 : principaux tests d'emboutissabilité ;* a, *essai Erichsen ;* b, *principe de l'essai Jovignot ;* c, *essai Swift ;* d, *essai Fukui.*

▼ *Figure 39 : étude de la déformation par visioplasticité ;* a, *réseau de cercles déposés sur le flan ;* b, *transformation lors de l'emboutissage ;* c, *courbe limite de formage.*

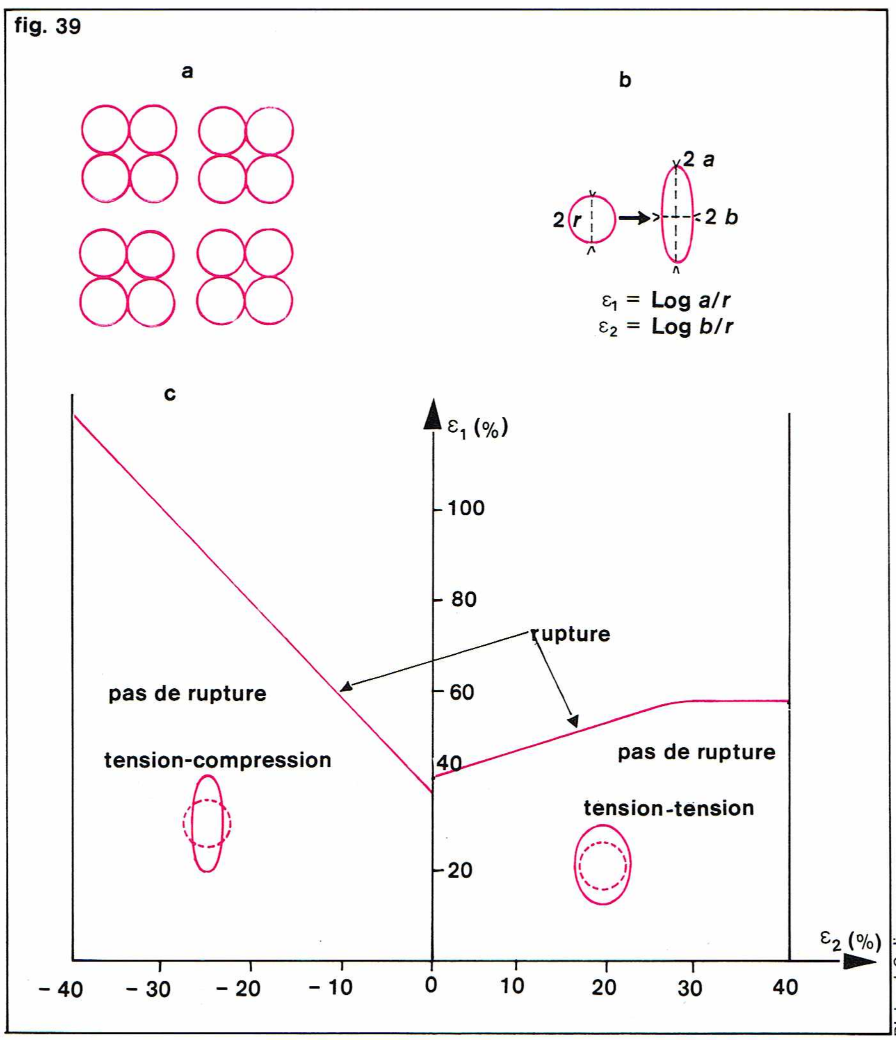

Tests d'emboutissabilité

On essaie couramment de caractériser l'emboutissabilité des tôles à l'aide de tests simples (*fig.* 38).

Essai d'expansion Erichsen (*fig.* 38 a)

La norme NF A 03652 (novembre 1967) fixe les conditions suivantes : pour les épaisseurs de tôle $\leqslant$ 2 mm, le poinçon est une bille de ∅ 20 mm en acier traité et poli, la matrice une bague de diamètre intérieur 27 mm. La plus petite dimension du flan doit être $\geqslant$ 90 mm. Le poinçon et les faces de la tôle doivent être enduits de graisse graphitée spéciale.

Au serre-flan sont appliqués 1 000 kgf. La pénétration s'effectue entre 5 et 20 mm/mn. L'indice Erichsen I_E est la profondeur de pénétration exprimée en millimètres.

Essai de gonflement hydraulique Jovignot (*fig.* 38 b)

Le flan de ∅ 100 à 300 mm est fortement pressé sous serre-flan. Une pression hydraulique *p* vient former une calotte sphérique. On mesure soit la hauteur de l'embouti au maximum de pression, soit la hauteur à la rupture. Ce test permet de déterminer la loi d'écrouissage.

Essai de coupelle Swift (*fig.* 38 c)

Cet essai de rétreint est pratiqué ainsi : poinçon plat $\varnothing_p$ 50 ou 32 mm (r_p respectivement 5 et 4,5 mm) ; matrice circulaire $\varnothing_m$ 53,64 ou 35, 64 mm ($r_m \sim$ 13 mm) ; charge de serre-flan de 50 à 75 % supérieure à la charge où l'on note la disparition des plis ; lubrification Esso TSD 996 ;

$$\text{critère L. D. R.} = \frac{\text{diamètre critique du flan.}}{\text{diamètre du poinçon } (\varnothing_p)}$$

Essai de coupelle conique Fukui (*fig.* 38 d)

C'est un essai d'emboutissage combinant rétreint et expansion, et pratiqué comme suit, avec un outillage à simple action : poinçon hémisphérique ∅ 20,64 mm ; matrice conique d'angle $2\,\alpha = 60°$, de diamètre $d = 24{,}4$ mm ; surface d'outil polie. Le coefficient d'emboutissage $\gamma_0 = D_1/D_0$ est le rapport du diamètre de la coupelle rompue D_1 au diamètre du flan initial D_0.

Étude de la déformation et courbes limites de formage

Pour déterminer la répartition de la déformation dans la pièce, on dépose par photogravure un réseau de cercles à la surface du flan (*fig.* 39 a). Ces cercles se transforment au cours de l'emboutissage en des ellipses dont on peut déduire la déformation imposée au métal (*fig.* 39 b). On précise ainsi l'influence des paramètres opératoires, par exemple l'influence de *n* sur les opérations d'expansion. Si l'on représente graphiquement les résultats obtenus aux divers points de la pièce (*fig.* 39 c), on trouve que les points associés aux déformations ne produisant pas la rupture du métal sont situés en dessous d'une « courbe », dite courbe limite de forgeage. Les résultats obtenus aux points de rupture sont situés sur cette courbe. Cette courbe limite dépend avant tout de l'alliage considéré, mais aussi d'autres facteurs comme le frottement. Une fois déterminée, elle permet de guider la conception de l'opération d'emboutissage étudiée.

Le filage

Présentation

C'est un procédé de mise en forme simple

● *Filage direct.* On place une billette à l'intérieur d'un conteneur, et on la comprime à l'aide d'un grain de poussée avec une force suffisante pour que le métal s'écoule au travers de l'orifice de la filière (*fig.* 40a). En général, le rayon du conteneur est voisin de 10 cm, et la capacité d'une presse à filer est comprise entre 500 et 5 000 tonnes.

● *Filage inverse.* Une variante consiste à comprimer la billette avec la filière elle-même (*fig.* 40 b) : il s'agit du filage inverse. La différence entre les deux procédés est la suivante : on supprime, par le filage inverse, tout déplacement relatif entre la billette et le conteneur, donc un frottement éventuel. Le support de la filière doit être élancé : sa longueur doit être voisine de celle du conteneur. Il a la forme d'un manchon creux et doit supporter des efforts très importants. En raison du risque de flambage,

fig, 40

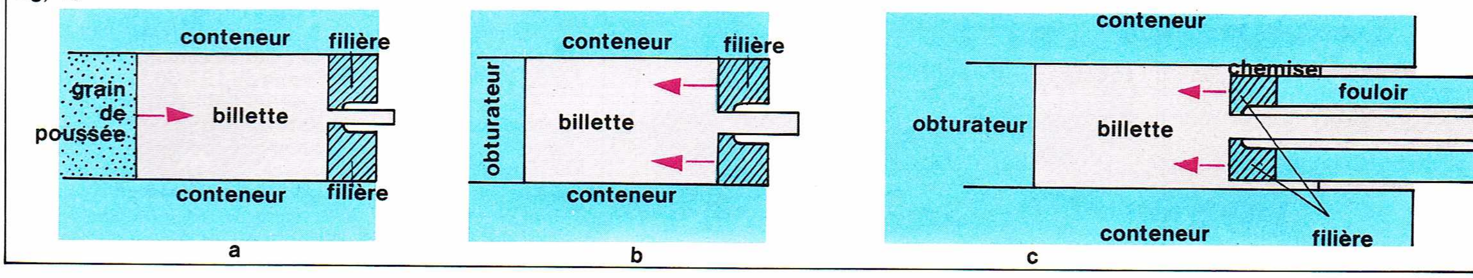

le trou central doit être aussi petit que possible. La technique du filage inverse n'est ainsi appliquée qu'à des profils massifs tels que les barres ou les tubes.

Bien que désignée par un même nom, cette opération de mise en forme à chaud est tout à fait distincte de l'opération de forge en matrice ouverte appelée également « extrusion arrière ».

● *Filage lubrifié.* Très vite, on a cherché à diminuer le frottement entre la billette et l'outillage (conteneur ou filière). Le filage inverse résout partiellement ce problème ; son principe est connu depuis longtemps (depuis 1870 environ), mais une autre technique avait été mise au point auparavant : le filage lubrifié. Initialement appliqué aux alliages cuivreux, puis aux alliages d'aluminium, il consiste à enrober de graisse la surface des billettes. La pression nécessaire au filage est diminuée, mais la qualité des produits obtenus est médiocre : tous les défauts de la surface de la billette brute de coulée (oxydes, impuretés, etc.) apparaissent sur la barre ; la surface de la barre présente souvent des cloques dues à des intrusions de lubrifiants sous la peau du produit. Actuellement, cette technique n'est employée couramment ni pour les alliages cuivreux, ni pour les alliages d'aluminium. En revanche, depuis 1941, la technique du filage des aciers lubrifiés au verre (procédé Ugine-Sejournet) s'est beaucoup développée.

● *Filage chemisé.* C'est le procédé couramment utilisé pour les alliages cuivreux et les alliages d'aluminium. Il consiste à laisser un certain jeu entre le diamètre intérieur du conteneur et le diamètre du grain de poussée (filage direct) ou de la filière (filage inverse). Au cours du filage, une pellicule épaisse d'environ 1 mm est donc découpée dans la billette et reste collée contre les parois du conteneur (*fig.* 40 c). Lorsque ce jeu devient trop important (du fait, par exemple, de l'usure du grain de poussée), il se produit quelquefois un filage de la chemise (extrusion arrière).

Les principaux avantages de ce procédé sont l'utilisation directe de la billette brute de fonderie (les imperfections de la surface restent en effet dans la chemise), et le bel aspect de surface des produits, en raison de l'absence d'un lubrifiant.

En revanche, un modèle mécanique simple peut nous montrer que ce type de filage équivaut au frottement billette-conteneur maximal ($\overline{m} \sim 1$) dans le cas du filage direct : une part importante de la force disponible sert à former la chemise par cisaillement. Le filage inverse paraît beaucoup mieux adapté à la technique du filage chemisé.

C'est un procédé relativement récent. Le filage est employé depuis le début du XIXe siècle (Bramah, 1797). Initialement, il était utilisé pour l'obtention de fils de plomb, de zinc ou d'alliages mous (Pb-Sn, etc.). Vers 1840, la mise au point de l'accumulateur hydropneumatique a permis d'améliorer sensiblement le système hydraulique et, par conséquent, la capacité des presses. On a pu ainsi commencer à filer des métaux plus résistants tels que les alliages cuivreux. Vers 1870, Hamon met au point la première presse à piston interne porte-aiguille, pouvant filer des *tubes*, et le principe du filage inverse est posé par Haines et Weems.

Au cours de la guerre de 1914-1918, de nombreux progrès ont été réalisés dans le domaine du filage de tubes en alliages de cuivre (filage chemisé). Cette technique fut transposée à l'industrie naissante des alliages d'aluminium. Le filage lubrifié au verre des aciers est une technique encore très récente (1940 environ).

C'est un procédé économique. Le filage est préféré au laminage lorsqu'il s'agit de produire en petites séries des barres, des tubes ou des profilés en alliages cuivreux ou d'aluminium. L'investissement correspondant à l'installation d'une presse à filer entièrement équipée (fours, table de réception, etc.) est en effet nettement inférieur (au moins d'un facteur 10) à celui qui correspond, par exemple, à l'installation d'un train à fils.

fig. 41

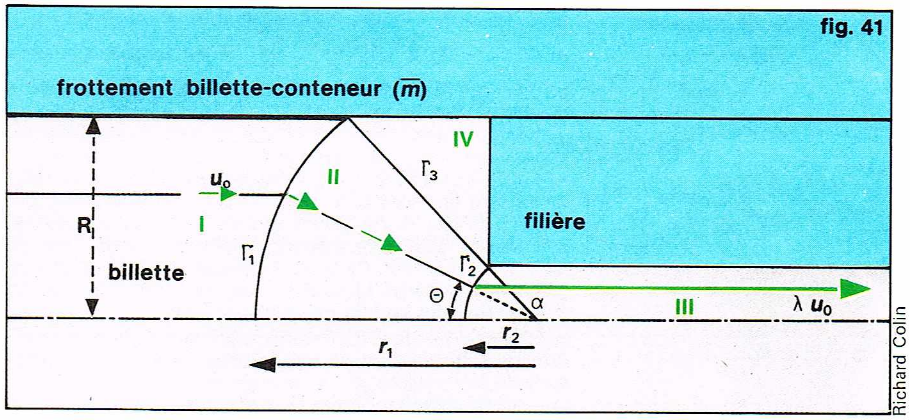

▲ *Figure 40 :*
a, filage direct ;
b, filage inverse ;
c, filage chemisé.
Figure 41 :
écoulement d'Avitzur.

Spécificité du filage

Le filage se trouve en amont du cycle de transformation. La plus grande partie de la production de produits filés se compose de barres et de tubes. Mais le filage est aussi tout à fait adapté :

— pour obtenir des profilés de forme complexe (menuiserie métallique) ;

— pour obtenir des tubes sans soudure (fabrication en continu grâce à l'utilisation de « filières à pont », dans le cas des alliages d'aluminium) ;

— pour déformer des matériaux fragiles : en dehors de certaines conditions géométriques défavorables qui ne se rencontrent qu'en fin de filage, le procédé est partout *compressif.* La technique du *filage des poudres* utilise d'ailleurs cette caractéristique qui permet d'accélérer la coalescence des grains (frittage sous charge).

L'approche scientifique

Sollicitations mécaniques du métal. Expérimentalement, on observe dans la billette plusieurs zones déformées différemment. B. Avitzur a proposé un champ de vitesses décrivant de façon satisfaisante l'écoulement du métal. Il est composé (*fig.* 41) :

● *de trois blocs rigides :*

— la partie non déformée de la billette **(I)** ; la vitesse uniforme est égale à u_0 ; nous l'appellerons vitesse de filage ;

— la barre **(III)** ; la vitesse y est égale à λu_0 (λ rapport de filage = rapport des sections) ;

— la zone morte **(IV)** comprise entre la filière et le dernier bloc appelé *convergent ;*

● *d'un convergent de forme conique :* de demi-angle α, limité par deux portions de sphères Γ_1 et Γ_2 (bloc **II**).

A partir de ce champ, on peut évaluer la pression de filage P_F :

$$\frac{P_F}{\sigma_0} = f(\alpha) \operatorname{Log} \lambda + \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \operatorname{cotg} \alpha \left\{ 1 + \overline{m} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \right) - \operatorname{Log} \sqrt{\lambda} \right\} \right] + \frac{2}{\sqrt{3}} \overline{m} \frac{L}{R}$$

▶ *Figure 42 : principe du tréfilage et de l'étirage.*

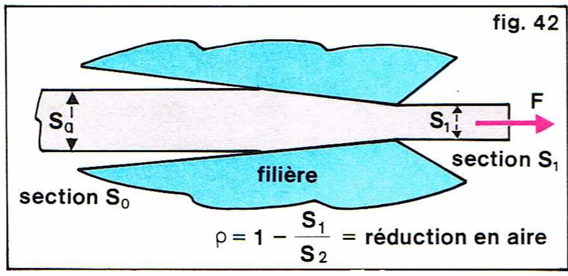

Richard Colin

où : σ_0 est la contrainte d'écoulement du métal à filer; $f(\alpha)$ est une fonction monotone croissante de α variant de 1 ($\alpha = 0$) à 1,17 $\left(\alpha = \frac{\pi}{2}\right)$; $\overline{m}$ est le coefficient de frottement; R le rayon du conteneur et L la longueur de la billette, et la vitesse de déformation moyenne au cœur de l'écoulement :

$$\dot{\varepsilon} \sim \frac{3\,u_0}{R}\,\text{Log}\,\lambda\,\sin\alpha$$

Par ailleurs, on remarque que cette vitesse de déformation est multipliée par $\lambda^{3/2}$, soit en général près de 10^3, entre l'entrée dans le convergent et la sortie au niveau de la barre. Le métal subit donc une sollicitation mécanique très brutale au cours du filage.

Sollicitations thermiques. En général, les phénomènes thermiques se produisant au cours du filage sont de trois ordres :

— gradients thermiques dus aux différences de températures initiales de la billette et de l'outillage;

— échauffement dû éventuellement au frottement le long du conteneur et de la filière;

— auto-échauffement dû à la déformation : celui-ci se traduit par une brusque montée en température juste avant la sortie de la filière.

Conséquences sur la structure métallurgique. Les sollicitations thermiques et mécaniques sont très brusques, mais très courtes, et l'on peut s'attendre à une certaine hystérésis dans le comportement du métal. De plus en plus, on cherche à mettre à profit cet état où la structure du métal se trouve hors d'équilibre : technique du filage-étirage consistant à enrouler un fil à une vitesse supérieure à la vitesse de sortie de filière.

Notons d'autre part deux phénomènes typiques liés au filage direct chemisé.

● *Hypercorroyage :* entre le convergent et la zone morte existe une zone très déformée où les impuretés et les éléments en solution solide précipitent au moment du refroidissement sous une forme fine et orientée.

● *Effet de presse :* comme pour le laminage, les produits obtenus par filage ont une texture caractéristique qui leur confère une résistance mécanique en long supérieure à celle mesurée en travers.

Enfin notons que la principale cause de rebut des produits filés est un défaut nommé *tronc de palmier.*

▼▶ *Ci-dessous, défaut en tronc de palmier. A droite, figure 43 : tête de tréfilage sur machine à accumulation.*

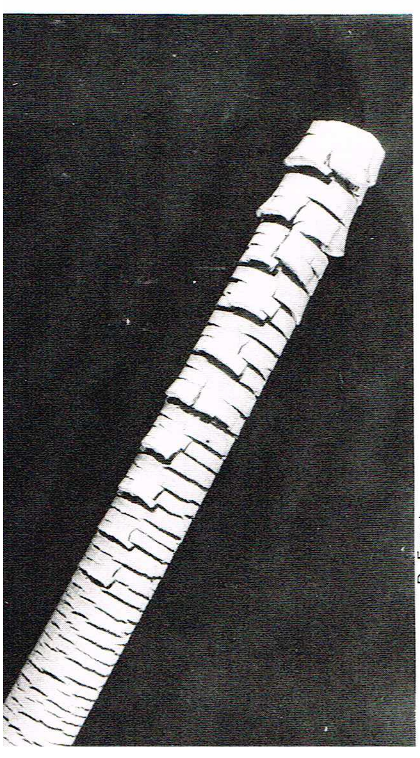

D. Fenot

Tréfilage des fils et étirage des barres

Principe

Il s'agit de réduire la section d'un produit long en le tirant à travers une filière (*fig.* 42).

L'étirage concerne des produits ronds de fort diamètre (∅ > 12 mm) ou des produits de section plus complexe (rectangle, par exemple). L'effort est exercé par un mandrin. L'opération est donc discontinue, elle s'effectue à faible vitesse (⩽ 1 m/s) sur des machines monopasses et produit des *barres* droites de quelques mètres de longueur. C'est souvent une opération de finition des produits de la mise en forme à chaud destinée à leur donner une bonne précision dimensionnelle et une faible rugosité.

Le tréfilage concerne les produits ronds de « plus petit » diamètre (∅ < 12 mm). L'effort est exercé par un cabestan sur lequel s'enroule le *fil.* L'opération est continue (moyennant soudure bout à bout des couronnes) et s'effectue à forte vitesse (⩾ 1 m/s). Elle transforme le fil machine produit par laminage à chaud (5 ⩽ ∅ ⩽ 10 mm) en un fil de diamètre moyen (5 ⩽ ∅ ⩽ 1 mm) ou en un fil fin (1 ⩽ ∅ ⩽ 0,1 mm).

Machines de tréfilage

Mis à part les opérations de finition effectuées sur des tréfileuses monopasses à vitesse modérée (⩽ 3 m/s), les machines effectuent 5 à 20 réductions de diamètre successives, chacune de l'ordre de 10 à 30 %.

Il existe trois grands types de tréfileuses multipasses :

Machines à accumulation : le schéma de principe est celui de la *figure* 43 : sur chaque cabestan est enroulée une grande quantité de spires, qui varie selon les différences de débit des diverses passes. On refroidit fortement le fil entre passes à l'aide d'une circulation d'eau à l'intérieur des cabestans et d'une circulation d'air à l'extérieur. On produit ainsi le fil d'acier au carbone, de diamètre moyen, car un échauffement excessif y provoque des transformations structurales indésirables.

Machines à traction directe : chaque cabestan ne porte qu'un petit nombre de spires qui sont refroidies par un système analogue. Le débit de métal doit être constant sur chaque tête pour éviter la casse du fil; chaque cabestan est entraîné à cet effet par un moteur à courant continu, avec une régulation de vitesse. On produit ainsi les fils de diamètre moyen d'acier inoxydable et d'aluminium.

Machines à glissement : il n'y a également qu'un petit nombre de spires sur chaque cabestan, dont la vitesse de rotation est fixe. La conservation du débit de métal est assurée approximativement en jouant sur le diamètre des cabestans. Les écarts (quelques pour cent) sont compensés par le glissement du fil sur les cabestans. La lubrification et le refroidissement du fil sont assurés par un fluide projeté sur le fil en divers points. On tréfile sur de telles machines, dites « immergées », tous les fils (∅ < 1 mm) et les gros fils de cuivre.

En amont et en aval de telles machines se trouvent des dispositifs plus ou moins complexes assurant le dévidement et l'enroulement du fil.

Les filières de tréfilage

Elles sont constituées d'un noyau fretté dans une monture en acier (*fig.* 44). Le noyau est couramment du carbure de tungstène fritté lié par 6 % de cobalt, ou un diamant monocristallin. L'utilisation de ce dernier matériau est limitée pour des raisons économiques au tréfilage des fils de diamètre < 2,5 mm. Depuis peu, on utilise des diamants polycristallins synthétiques, dits « compacts », pour le tréfilage de fil non ferreux de diamètre ⩽ 5 mm.

Lubrification du tréfilage

Pour les aciers, les vitesses actuelles sont limitées par des problèmes de lubrification et de qualité métallurgique du produit; pour les alliages non ferreux, par des problèmes de recuit à la sortie de la tréfileuse, ou de conception mécanique des tréfileuses. La durée de vie des filières en diamant est beaucoup plus élevée que celle des filières en CW-Co, mais leur coût est plus élevé.

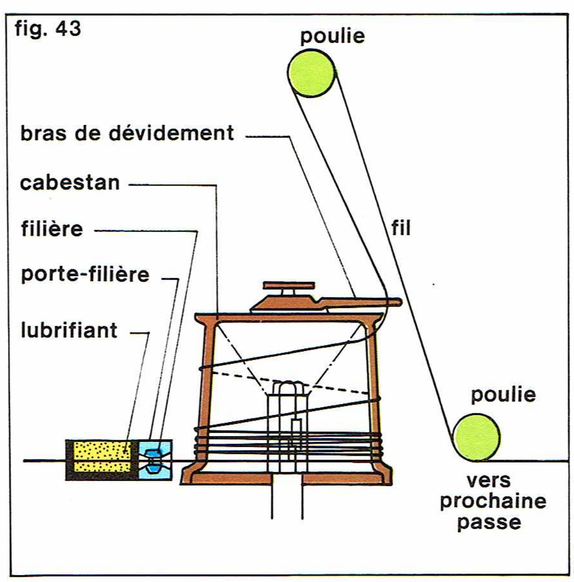

Richard Colin

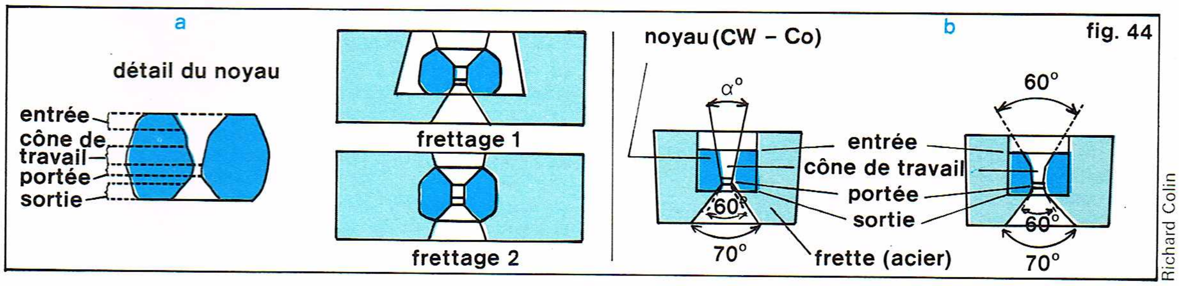

◀ *Figure 44 : filières de tréfilage ; a, filière diamant ; b, filière carbure (frettée).*

Opérations annexes au tréfilage

Avant chaque tréfilage multipasse, le fil est soumis, soit en défilé, soit en couronne, à un traitement de recuit destiné à restaurer sa ductilité, suivi, pour les alliages ferreux, d'un décapage et d'un traitement de revêtement (phosphatation, oxalatation, etc.).

Avant utilisation, le fil est soumis à un traitement thermique de normalisation et parfois revêtu d'un film métallique (cuivre pour les fils destinés à la frappe à froid, laiton pour les fils destinés aux pneumatiques, zinc pour protection antirouille) ou polymérique (pour les fils destinés aux applications électriques et téléphoniques).

A une tréfilerie est souvent associée une câblerie.

Aspects scientifiques du tréfilage

L'effort de tréfilage peut être estimé à l'aide de l'expression :

$$\left\{\begin{array}{l} F = \pi R_1^2 \, \sigma_{0m} \operatorname{Log}\left(\frac{R_0}{R_1}\right)^2 \left(\psi + \frac{\overline{m}}{\sqrt{3}} \operatorname{cotg} \alpha\right) \\ \psi = 0{,}88 + 0{,}195 \left(\frac{R_0 + R_1}{R_0 - R_1}\right) \operatorname{tg} \alpha \end{array}\right.$$

où R_0 (R_1) est le rayon initial (final) du fil ; α le demi-angle de la filière supposée conique ; σ_{0m} la contrainte d'écoulement moyenne du fil (demi-somme des valeurs initiale et finale) ; $\overline{m}$ le coefficient de frottement de Tresca.

On a intérêt à tout point de vue à minimiser le frottement qui est purement résistant : sa contribution à F est de 30 à 50 % en pratique. Surtout, il induit un échauffement du fil et de la filière qui peut atteindre quelques centaines de degrés Celsius lors de tréfilages rapides du fil d'acier ; les savons et les huiles imposent des films lubrifiants épais qui limitent $\overline{m}$ et l'usure de la filière pour le tréfilage des aciers. Dans le tréfilage des fils non ferreux lubrifiés par les émulsions, l'usure est limitée par l'utilisation de noyaux en diamant, peu réactifs chimiquement et de très grande dureté. L'un des problèmes critiques pour la qualité du fil est l'efficacité du refroidissement du fil entre passes. Il tend à généraliser l'emploi de machines immergées.

Élaboration finale

Usinage

Le terme d'usinage est très général et désigne toutes les opérations de mise en forme par enlèvement de matière. On peut les répartir en quatre grandes catégories :

— découpage : cisaillage des produits longs (*fig.* 45 a) ; découpe des produits emboutis ;

— coupe (*fig.* 45 b), où l'enlèvement de matière se fait sous forme de copeaux ;

— travail par abrasion, où un abrasif enlève des microcopeaux (*fig.* 45 c) ;

— procédés physico-chimiques, où l'enlèvement de matière est assuré par une action non mécanique : électro-érosion, meulage électrolytique, usinage chimique, etc.

Cet article est essentiellement consacré à la coupe des métaux. Nous le terminerons en présentant brièvement les divers procédés de travail physico-chimiques et par abrasion.

Coupe des métaux

Importance économique

On essaie de plus en plus de réduire le coût de la production des produits de grande série en ayant recours aux procédés de mise en forme sans enlèvement de matière, comme le forgeage à froid. Toutefois, la coupe des métaux reste le procédé de mise en forme le plus important : les dépenses correspondant aux travaux de coupe représentent environ 5 % du produit national brut des pays industrialisés, soit, pour la France, 30 milliards de francs environ. C'est en effet le procédé de choix pour l'obtention de produits de forme complexe, notamment de petite série.

Du fait de son importance économique, la coupe a vu ses techniques évoluer considérablement dans le sens d'une productivité sans cesse accrue : augmentation des vitesses de coupe ; introduction de nouveaux matériaux à outil ; commande numérique et programmation automatique des machines-outils ; amélioration des fluides de coupe et de l'usinabilité des alliages métalliques.

Principaux procédés

La *figure* 45 b définit les différentes grandeurs géométriques d'une opération de coupe simple, dite coupe

▼ *Figure 45 : procédés mécaniques d'usinage ; a, cisaillage d'un produit long ; b, coupe orthogonale pure des métaux ; c, travail par abrasion (exemple : meulage d'un angle)* [b, *d'après R. Weill,* Techniques d'usinage, *Dunod 1971*].

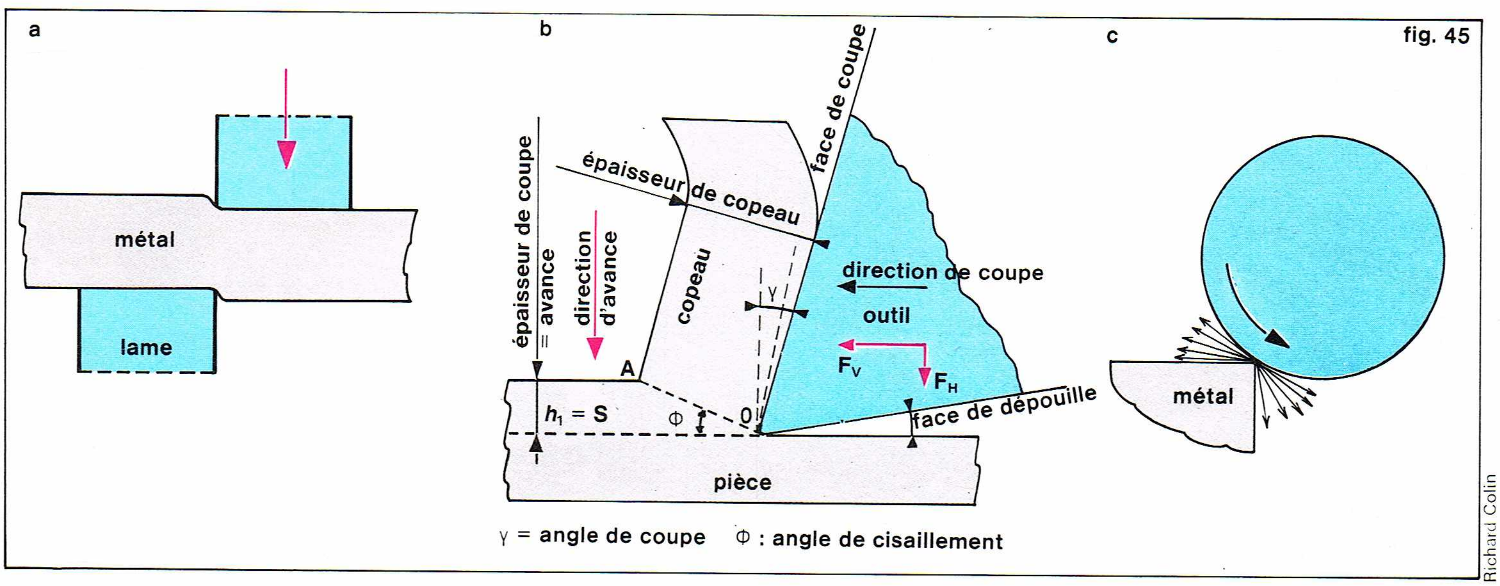

Tableau II Les trois principales opérations de coupe des métaux			
Opérations	**Mouvement de coupe assuré par**	**Mouvement d'avance assuré par**	**Pièce produite**
Tournage (*fig.* 46 a)	rotation de la pièce autour de son axe	déplacement de l'outil parallèlement à l'axe	axisymétriques filetées
Fraisage (*fig.* 46 b)	rotation de la fraise	déplacement de la pièce	de toutes formes
Perçage (*fig.* 46 c)	rotation du foret	avance du foret	trous cylindriques

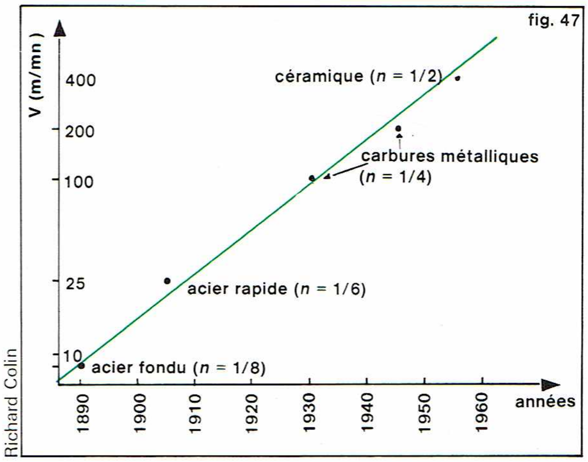

▲ *Tableau II : les trois principales opérations de coupe des métaux.*
Figure 47 : évolution des outillages et des vitesses de coupe depuis 1890 (d'après R. Weill, Techniques d'usinage, *Dunod 1971).*

orthogonale pure, où la déformation imposée au métal est plane. Les trois principales opérations sont décrites au *tableau* VI et sur la *figure* 46.

Il existe des opérations de coupe d'une importance moindre : rabotage, mortaisage, brochage et taraudage. On donne à la pièce la forme souhaitée soit en faisant suivre à l'outil une trajectoire adéquate (procédé de génération), soit en utilisant un outil de forme qui reproduit le profil dans la pièce.

Matériaux pour outils de coupe.

Pour concevoir une opération de coupe et choisir, en particulier, la vitesse de coupe, on tient essentiellement compte de la puissance de la machine-outil et de la résistance à l'usure de l'outil utilisé. L'importance du choix du matériau de l'outil est illustrée par la *figure* 47 qui représente l'évolution des vitesses de coupe depuis 1890 : la croissance exponentielle a été rendue possible par l'introduction de matériaux à outils de plus en plus durs :

— Les outils en acier rapide ont été introduits par l'Américain Taylor vers 1900. L'un des plus classiques est l'acier 18-4-1 (18 % W-4% Cr-1% V-0,5 % C). Actuellement, ils sont surtout utilisés pour les outils de forme complexe (fraises, forets, tarauds, etc.).

— Les carbures métalliques frittés permettent les vitesses de coupe les plus élevées. On utilise le carbure de tungstène lié par du cobalt pour la coupe des alliages non ferreux, des carbures mixtes de tungstène et de titane liés par du cobalt pour la coupe des alliages ferreux.

— Enfin les outils céramiques, constitués en général d'alumine, permettent la coupe à vitesse élevée des fontes et de certains aciers spéciaux.

Tous ces matériaux périssent en coupe selon la loi mise en évidence expérimentalement par Taylor : $T^nV = Cte$ où T est la durée de vie de l'outil, c'est-à-dire le temps nécessaire pour provoquer l'affaissement de l'arête de l'outil par échauffement excessif, et V la vitesse de coupe. La valeur de l'exposant n pour les différents matériaux est précisée sur la *figure* 47. On voit que l'augmentation de dureté augmente n, c'est-à-dire diminue la sensibilité de la durée de vie à la vitesse. La coupe s'effectue en général à la vitesse V_{60} correspondant à une durée de vie de l'outil de 60 minutes.

Lubrification de la coupe

Les principales fonctions du lubrifiant sont les suivantes :

— augmenter la durée de vie de l'outil par refroidissement de l'arête de coupe et diminution du frottement du copeau sur l'outil ;

— faciliter le dégagement du copeau dans les opérations comme le perçage ou le taraudage ;

— refroidir la pièce pour respecter les tolérances dimensionnelles et améliorer l'état de surface ;

— lubrifier certains organes de la machine-outil ; on utilise à cet effet des émulsions et des huiles minérales additivées. Leur choix dépend avant tout de la nature de l'opération considérée.

Usinabilité des métaux

Pour apprécier l'aptitude des métaux à être usinés, il faut tenir compte de divers aspects de la coupe : efforts de coupe ; vitesse d'usure des outils ; état de surface du produit usiné ; morphologie du copeau. Augmenter l'usinabilité, c'est minimiser les efforts de coupe, la vitesse d'usure de l'outil, la rugosité superficielle et la longueur des copeaux. Ces divers aspects sont évidemment liés, mais ne varient pas forcément dans le même sens. La notion d'usinabilité est donc parfois difficile à cerner précisément.

Les produits usinés en grande série ont le plus souvent subi au préalable une mise en forme par déformation plastique sans enlèvement de matière, où la probabilité d'apparition de défauts est d'autant plus faible que la ductilité du métal est plus grande. Or la ductilité, c'est-à-dire l'aptitude à subir de grandes déformations plastiques sans décohésion, et l'usinabilité varient en général en sens inverse, ce qui oblige à adopter un compromis.

Les différents moyens de régler l'usinabilité sont les suivants :

— la structure métallographique : taille des grains — forme des inclusions ; faire passer la taille des grains d'un

▼ *Figure 46 : principaux procédés de coupe ; a, tournage longitudinal ; b, fraisage ; c, perçage (d'après R. Weill,* Techniques d'usinage, *Dunod 1971).*

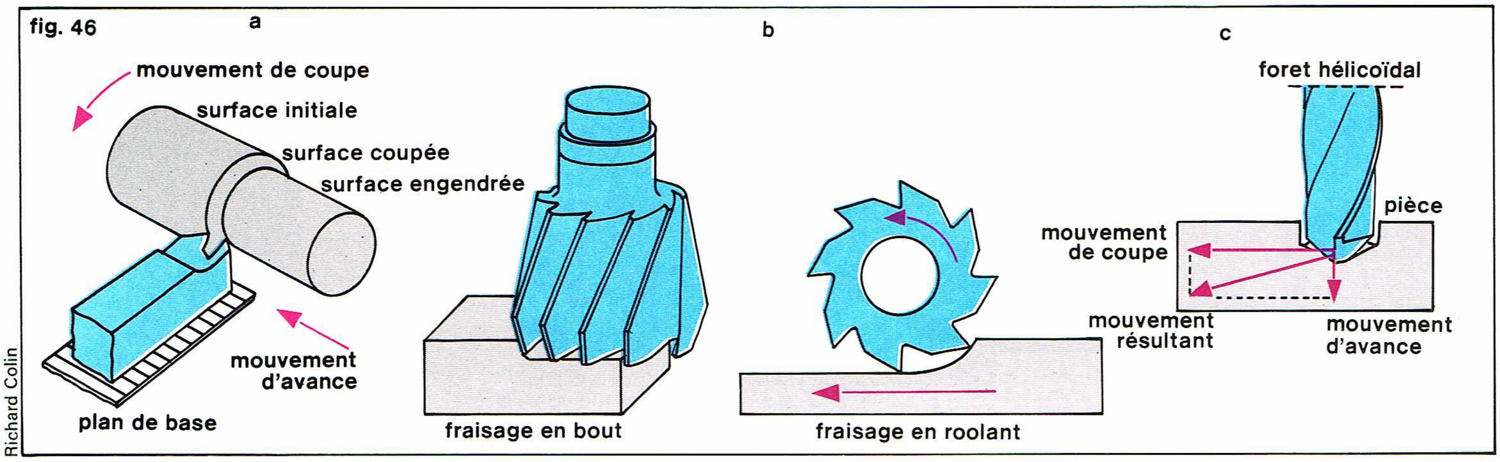

acier au carbone de 15 µm à 200 µm peut diviser la vitesse d'usure par un facteur 6 ; la présence de perlite lamellaire est favorable jusqu'à une teneur en carbone de 0,35 % ; au-delà, c'est la structure avec perlite globulaire qui est la plus intéressante ;

— les inclusions : diverses inclusions sont réputées favorables (sulfure de manganèse, plomb, phosphore, sélénium, tellure et même oxydes) ;

— l'état d'écrouissage : en général, l'usinabilité d'un alliage métallique augmente avec la déformation (un métal recuit est moins usinable que le même métal fortement écroui).

Rugosité des surfaces coupées

La rugosité des pièces dépend avant tout du procédé considéré, comme le montre le *tableau* III.

A procédé donné, elle dépend de la géométrie et des vibrations de l'outil, de l'avance, des caractéristiques métallurgiques du métal usiné et surtout de la vitesse d'usinage ; les fortes rugosités obtenues aux vitesses moyennes sont dues à la présence d'une zone morte le long de l'outil, qui peut adhérer fortement à celui-ci et former alors l'arête rapportée. La rugosité varie dans le même sens que la taille de cette zone morte qui dépend, entre autres, de la vitesse de coupe, du lubrifiant et de l'angle de coupe.

Efforts de coupe

Considérons la coupe orthogonale pure de la *figure* 45 b et appliquons-lui la méthode de la borne supérieure avec les deux hypothèses suivantes : le métal subit une discontinuité de vitesse le long de OA ; le copeau frotte sur l'outil sur une longueur *l*, avec un frottement de Tresca. La composante horizontale de l'effort de coupe F_V, qui seule dissipe de la puissance, vaut :

$$F_V = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} S \frac{1}{\cos(\Phi - \gamma)} \left(\frac{\cos\gamma}{\sin\Phi} + \frac{\overline{m}l}{S}\sin\Phi\right)$$

l'angle de cisaillement Φ étant défini par la relation implicite : $\cos(2\Phi - \gamma) = \frac{\overline{m}l}{S}\sin^2\Phi$. L'angle Φ et l'épaisseur du copeau varient en sens inverse ; le copeau est d'autant plus épais que $\frac{\overline{m}l}{S}$ est grand.

L'application de ce modèle ou de modèles analogues est difficile, car la longueur *l* est en général de l'ordre de l'épaisseur du copeau, mais indéterminée *a priori*, et la valeur de la contrainte d'écoulement est difficile à évaluer. La déformation totale

$$\bar{\varepsilon} \simeq \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\cos\gamma}{\sin\Phi\cos(\Phi - \gamma)}$$

est de l'ordre de l'unité ; la vitesse de déformation est très élevée, dépassant couramment $10^3\ s^{-1}$; les échauffements peuvent atteindre plusieurs centaines de degrés Celsius.

Usinage par abrasion

On peut classer les procédés en deux catégories.

Travail à la meule

● Dans le *meulage*, on ne contrôle pas avec précision les mouvements de la pièce, et l'on réalise des opérations du type ébarbage ou polissage.

● La *rectification* confère à la pièce une forme géométrique précise et une faible rugosité par un contrôle précis des mouvements de la meule et de la pièce.

Finition à l'abrasif

● Dans le *rodage*, on confère à une surface plane ou axisymétrique une forme géométrique très précise et une faible rugosité en faisant glisser à faible vitesse à sa surface soit de l'abrasif en poudre, soit de l'abrasif aggloméré.

● Le *polissage* diminue la rugosité de la surface par des techniques analogues.

Les abrasifs utilisés dans le travail à la meule sont les poudres d'alumine, de carbure de silicium ou de bore, de diamant. La rugosité finale obtenue est d'autant plus faible que la taille des grains est plus fine. Les agglomérats des meules industrielles sont constitués d'une porcelaine préparée à l'aide d'argile, de sable et de feldspath. L'abrasion à grande vitesse (⩾ 30 m/s) nécessite l'emploi de liants résines, type bakélite ou caoutchouc. Pour le polissage, on utilise des abrasifs plus tendres, comme l'émeri, l'alumine, le rouge d'Angleterre, le vert de chrome. Les grains d'abrasifs sont collés sur des disques tournant à grande vitesse.

Tableau III
Rugosité des pièces métalliques en fonction du procédé d'usinage

Procédé	Rectification	Meulage	Tournage	Brochage	Rabotage
Rugosité (en µm)	0,9	2,3	2,5	6	16

▲ *Tableau III : rugosité des pièces en fonction du procédé de coupe.*

Usinages physico-chimiques

Il en existe une grande variété. Leurs domaines d'élection sont le travail des matériaux très durs et le micro-usinage de précision.

Usinage par ultrasons. La pièce est usinée par des particules abrasives, comme le carbure de bore, mises en mouvement par un poinçon vibrant avec une fréquence très élevée. Ce procédé est surtout réservé aux opérations de finition.

Usinage électrochimique. La pièce, qui est l'anode d'une cellule électrolytique, est dissoute par le passage du courant électrique ; sa forme tend à se rapprocher de celle de la cathode, qui joue donc le rôle d'un outil pratiquement inusable. On peut ainsi reproduire en grande série des formes complexes, comme les gravures de matrice.

Usinage chimique. On protège les parties de la pièce que l'on veut préserver en les recouvrant d'un vernis. L'immersion de la pièce dans une solution acide ou basique enlève aux parties non vernies une certaine profondeur de métal. Ce procédé est utilisé pour le façonnage des pièces de faible épaisseur (dont un bon exemple est le circuit imprimé où l'on utilise une technique de photogravure).

Électro-érosion. Ce procédé repose sur le fait que l'étincelle électrique éclatant entre deux conducteurs use préférentiellement l'anode. La cathode confère ainsi peu à peu sa forme à l'anode.

Usinage par bombardement électronique ou par laser. L'impact du faisceau d'électrons ou de lumière cohérente échauffe fortement la pièce, ce qui permet, notamment, de la percer, de la découper, de réaliser des microsoudures.

▼ *Opération de rectification cylindre extérieure. La rectification confère à la pièce une forme géométrique précise et une faible rugosité par un contrôle précis des mouvements de la meule et de la pièce.*

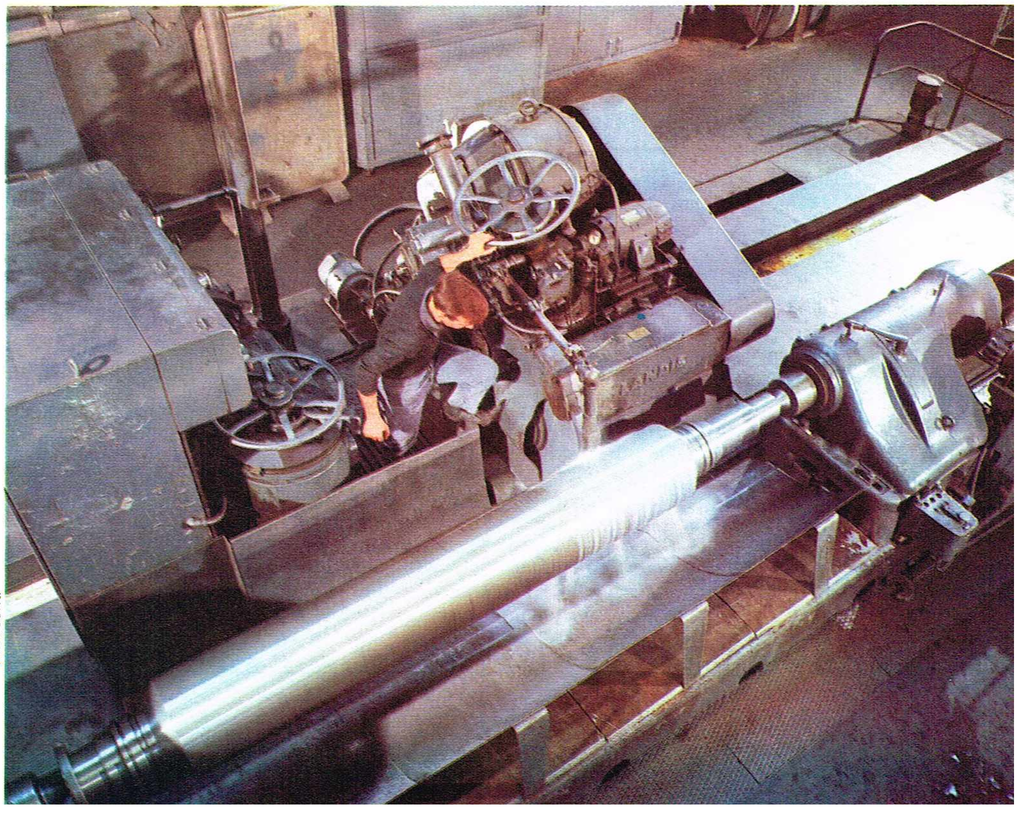

Innocenti

fig. 48

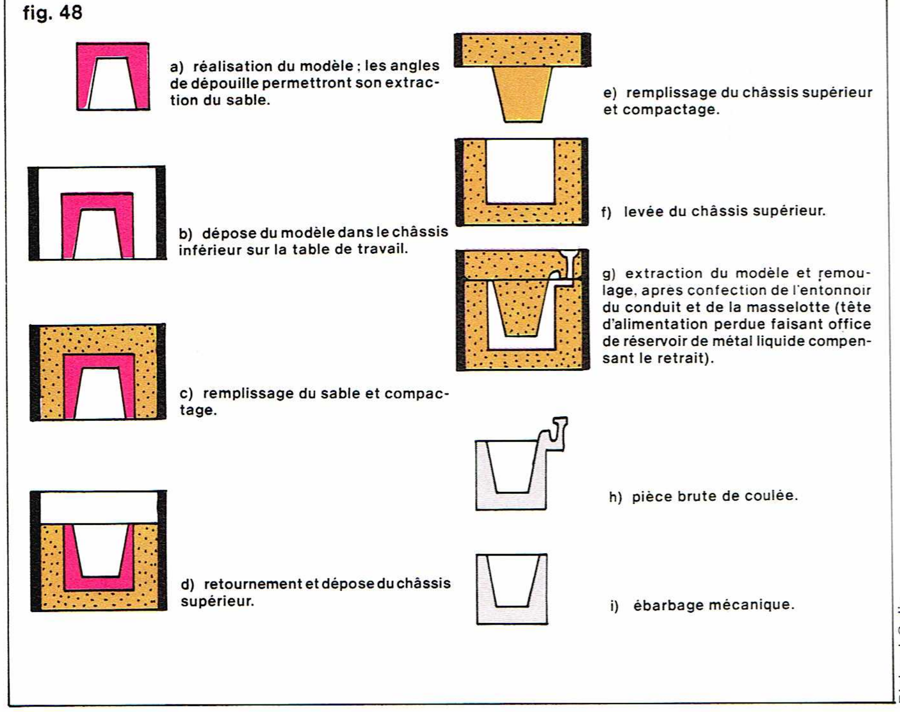

▲ ***Figure 48 : principes fondamentaux du moulage manuel en moules perdus.***

La fonderie

Procédé de mise en forme concurrent du forgeage dans l'Antiquité, la fonderie concernait alors essentiellement le bronze. Ce n'est qu'à la fin du Moyen Age qu'on réussit à couler le fer (la fonte en l'occurrence), lorsqu'on sut produire des températures suffisamment élevées. Le développement de cette technique est dû classiquement aux besoins militaires (boulets, canons), mais elle s'étendit assez vite aux objets d'utilisation courante (fourneaux, statues, etc.). La production industrielle de fonte vit le jour au XIVe siècle, avec les premiers hauts fourneaux à charbon de bois ; au XVIIIe siècle, le coke remplaça le charbon de bois et permit l'obtention de fontes aux caractéristiques mécaniques prédéterminées. Parallèlement se développa la technique des traitements thermiques des métaux (trempe, recuit), qui permit en particulier de rendre les fontes « malléables ». Ce n'est qu'au début du XIXe siècle qu'apparurent les premières pièces moulées en acier ; les difficultés à résoudre concernaient essentiellement le matériau réfractaire des moules, qui devait résister à des températures plus élevées que pour la fonte.

Aujourd'hui, la fonderie intéresse la plupart des alliages métalliques, et représente en poids un pourcentage assez important des pièces mises en forme (environ un tiers). L'économie de cette technique explique qu'en valeur ajoutée, le pourcentage concernant la fonderie est nettement plus faible (environ 1/10). La variété quasi illimitée des formes possibles, la précision dimensionnelle atteinte sont les principaux avantages ; l'inconvénient qui freine son utilisation universelle réside dans les caractéristiques mécaniques relativement faibles des structures métalliques brutes de coulée. Néanmoins, la fonderie connaît aujourd'hui un essor important lié aux industries de pointe (aéronautique) : fonderie d'alliages légers, d'alliages de titane, etc. Nous pouvons enfin inclure, dans la description des différents procédés, la coulée continue en tant que technique apparentée à la fonderie conventionnelle ; la production de blooms en coulée continue se révèle aujourd'hui un procédé capable de faire évoluer notablement l'industrie sidérurgique classique.

Les différents procédés

Le moulage en moules perdus

● *Le moulage manuel.* La *figure* 48 illustre les principes fondamentaux du moulage dans le cas d'une pièce très simple. Pour prévenir les défauts dus à la solidification, on est souvent conduit à rattacher à la pièce de nombreux *évents* (canaux d'arrivée d'air frais) et des *masselottes* diverses. Les défauts classiques sont les *retassures* (retraits à l'état liquide) et les *criques,* dues aux fortes contraintes de traction développées par les différents retraits. En particulier, les différences brutales d'épaisseur sont à proscrire.

Le modèle est généralement en bois, gypse ou résine synthétique. Il existe également des modèles métalliques, surtout dans le cas des grandes séries. Il est parfois en plusieurs parties pour pouvoir être extrait. Le sable est en fait constitué d'un mélange de sable réfractaire proprement dit, d'un liant (argile, résine) et d'adjonctions (graphite, amidon) susceptibles d'influencer les réactions entre la paroi et le métal liquide. Pour le moulage des pièces creuses, on utilise un noyau, généralement en sable lié de résine et compacté dans la boîte à noyau.

● *Le moulage à la machine.* Les principes fondamentaux sont identiques ; la plupart des opérations précédemment décrites peuvent être mécanisées pour les grandes séries.

● *Le moulage à modèle perdu (ou en cire perdue).* Dans ce procédé, qui donne une remarquable précision dimensionnelle, le modèle est fait en cire ou en matière plastique fusible. On le plonge dans une masse de moulage (sable), où il se recouvre d'une carapace, qui constitue le moule proprement dit, après fusion ou calcination du modèle. La pièce est débarrassée du sable adhérent par grenaillage. Ce procédé s'applique à la production de pièces compliquées et précises, sans bavure et avec un excellent fini de surface.

Le moulage en moules permanents (ou en coquilles)

Dès la fin du siècle dernier, on a cherché pour les grandes séries à fabriquer des moules « permanents », c'est-à-dire d'une durée de vie relativement importante (10^4 à 10^5 pièces environ). Le moule permanent est constitué de plusieurs parties séparables pour l'évacuation de la pièce. La *figure* 49 illustre les opérations élémentaires d'un cycle de fabrication.

Le moule, en fonte ou en acier réfractaire, subit des cycles thermiques qu'il convient, par réchauffage ou refroidissement, de maintenir stationnaires en cours de fabrication (*fig.* 50).

Pour accélérer la cadence de production, il s'agit de réduire la durée des opérations élémentaires précédemment décrites. Les opérations mécaniques peuvent être accélérées en améliorant la technologie ; la seule précaution à prendre est de toujours chercher à maintenir le moule entre θ_{max} et θ_{min}. Les opérations d'attente (remplissage et solidification) ont une durée fonction de la vitesse de remplissage et du temps d'échange thermique entre le métal se solidifiant et le matériau du moule.

Pour obtenir un remplissage correct, il faut que l'échange thermique soit faible pendant le remplissage (pas de solidification prématurée) et important pendant la solidification. Ces principes sont mis en application dans le moulage centrifugé et le moulage sous pression, où l'on accélère le remplissage classique à gravité tout en maintenant en action le système de refroidissement.

● *Le moulage centrifugé.* Dans le cas de pièces axisymétriques (tubes, anneaux), la centrifugation qui agit jusqu'à la solidification permet de réaliser des formes intérieures dans un moule extérieur.

● *Le moulage sous pression.* Les procédés technologiques permettant de couler sous pression sont très variés. On utilise un gaz comprimé qui injecte le métal liquide

▼ ***Figure 49 : moulage en moules permanents ; opérations élémentaires d'un cycle de fabrication ; a, mise d'un enduit protecteur de surface ; mise en place d'éventuels noyaux destructibles ; fermeture et blocage du moule ; b, remplissage avec l'alliage liquide par gravité ; refroidissement et solidification de l'alliage ; ouverture et éjection de la pièce ; c, décochage (destruction des noyaux), ébarbage mécanique.***

fig. 49

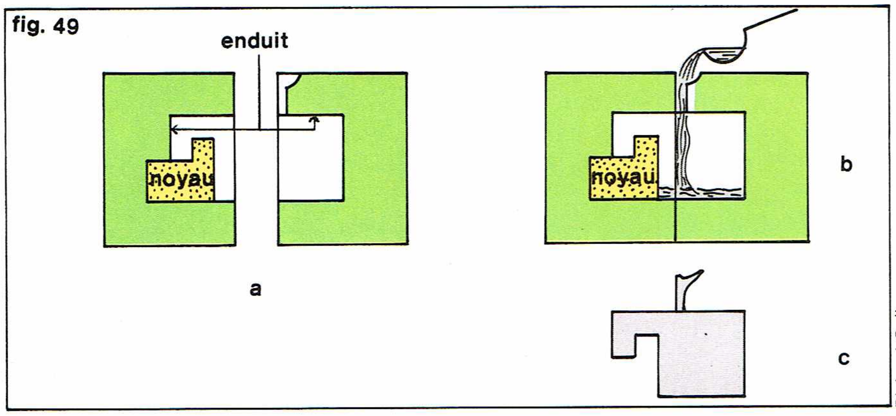

Richard Colin

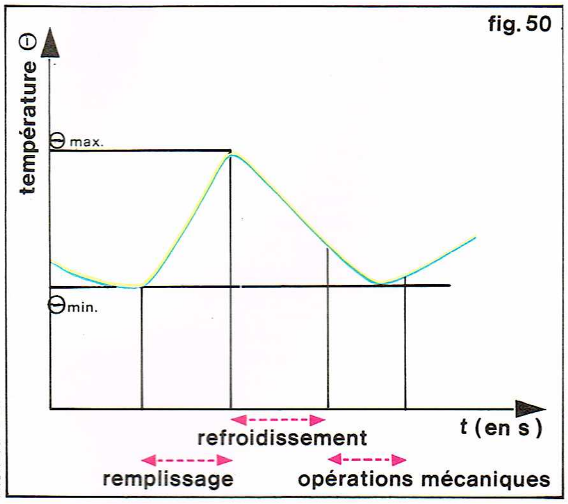

Richard Colin

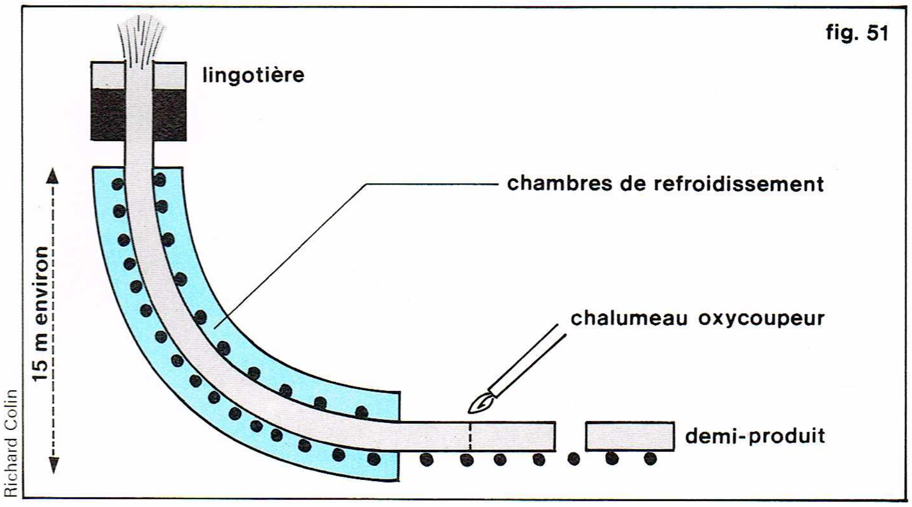

▲ ***Figure 50 :*** ***cycle thermique du moule. Le moule en fonte ou en acier réfractaire subit des cycles thermiques qu'il convient, par réchauffage ou refroidissement, de maintenir stationnaires en cours de fabrication.***
Figure 51 : ***la coulée continue. Dès les années 1950 se sont développées les coulées continues d'acier ; les premières machines étaient verticales, mais dès 1960, on a su en courber le profil et abaisser la hauteur des installations.***

sous une pression plus ou moins grande. Une faible pression (quelques bars) augmente déjà la productivité de 30 % environ. Avec les fortes pressions apparaît le défaut de « *cloquage* » : le centre de la veine reste longtemps liquide en raison de la poussée, alors que les parois se solidifient rapidement au contact du moule. Au refroidissement final, le cœur rétreint fortement. Par ailleurs, les bulles de gaz fortement comprimé, entraînées par l'écoulement turbulent, y seront écrasées. Tout traitement thermique ultérieur tend à dilater ces bulles et à « cloquer ».

La maîtrise de ce problème n'est pas évidente. Les tendances actuelles sont la coulée sous vide et la coulée sous oxygène pour les alliages d'aluminium : la formation immédiate d'oxyde Al_2O_3 évite la formation de bulles.

La coulée continue

Classiquement, en amont des opérations de grosse forge ou de laminage, le métal liquide est coulé en lingots plus ou moins volumineux qui sont transformés en demi-produits (blooms, billettes, brames) au cours des premières transformations. L'idée d'obtenir continûment, à partir du métal liquide, les formes géométriques des demi-produits de mise en forme en amont d'une chaîne de transformations successives a d'abord été appliquée aux métaux non ferreux : au lieu de couler dans une lingotière, on tire le métal à travers un moule sans fond fortement refroidi.

Dès les années 1950 se sont développées les coulées continues d'acier, qui, aujourd'hui, bouleversent les structures classiques de la sidérurgie. Les premières machines étaient verticales, mais dès 1960 on a su courber le produit et abaisser la hauteur des installations (*fig.* 51). Un tel procédé semble rentable quelle que soit la taille de l'installation, de la grande aciérie d'importance nationale à la miniaciérie d'intérêt régional à partir d'un acier produit au four électrique avec les ferrailles locales.

Les propriétés des pièces coulées

Propriétés des pièces de fonderie

Si le métal est sensiblement homogène, l'alliage solidifié se présente généralement comme la juxtaposition de nombreuses phases solides de composition et de structure très distinctes. La plupart de ces hétérogénéités sont dues au phénomène de solidification gouverné par les gradients thermiques au sein du matériau. A chaque instant de la solidification, la composition du solide est différente de celle du liquide dont il provient, si bien que la composition du liquide se modifie peu à peu, et que celle du solide résultant varie au cours du temps. La structure dendritique est ainsi liée aux cinétiques des transferts de matière (convection, diffusion, ségrégation) dans le liquide et le solide.

Parallèlement aux transformations métallurgiques, le refroidissement provoque une contraction du métal : le *retrait*. Du point de vue de la géométrie finale du produit, il faut donc prévoir des alimentations surabondantes (masselottes) ainsi que des « astuces » de praticiens pour éviter les défauts (retassures). Du point de vue de l'homogénéité mécanique, en revanche, les inévitables gradients thermiques provoquent des retraits locaux très divers, et le métal solidifié est le siège de contraintes résiduelles importantes. Ces contraintes peuvent elles-mêmes provoquer des défauts (tapures) si leur intensité est suffisante pour provoquer la rupture.

L'ensemble de ces hétérogénéités physiques et mécaniques confère aux pièces de fonderie des propriétés assez différentes de celles rencontrées sur des pièces dont le matériau a subi des traitements thermomécaniques divers. Les progrès réalisés dans l'étude théorique de la solidification permettent aujourd'hui d'orienter ces propriétés et de les adapter — plus ou moins — aux conditions de travail des pièces.

D'une façon très générale, les alliages de fonderie ont des caractéristiques mécaniques plus faibles que les métaux corroyés : résistance à la rupture, ténacité, allongement. En revanche, les alliages de fonderie présentent souvent des performances intéressantes en sollicitation dynamique (fatigue), en résistance à l'usure (et notamment à chaud), en résistance à la corrosion, etc. Ils sont également aptes à subir des traitements thermiques divers (recuit, trempe, revenu, traitements de « malléabilisation »). On sait enfin leur conférer de bonnes propriétés d'usinabilité et de soudabilité rendant la technique de fonderie très rentable dans bien des cas de fabrication de série.

Le soudage et les procédés d'assemblage

Historiquement, l'assemblage de deux pièces métalliques s'est d'abord réalisé par *forgeage* (martelage des deux pièces chauffées au rouge), puis par *brasage* (réunion des deux pièces par un métal d'apport à bas point de fusion). Lorsque la technique a permis de porter n'importe quel métal à son point de fusion (en particulier l'acier), le *soudage par fusion,* c'est-à-dire la jonction des deux pièces portées localement à l'état liquide, a pu se développer ; c'est aujourd'hui le procédé d'assemblage le plus répandu, mais les progrès technologiques sont constants : il s'agit de tendre vers la soudure idéale pour tous les métaux, c'est-à-dire celle qui modifie le moins possible l'homogénéité du métal. Dans cet objectif, des procédés de soudage sans fusion se sont aussi développés : soudage par diffusion, soudage par résistance.

Le soudage par fusion

Les surfaces à souder sont localement fondues. Le soudage peut être *autogène* (pas de métal d'apport) ou *homogène* (le métal d'apport est différent du métal de base). Les moyens de chauffage sont divers et différencient les procédés.

Le soudage oxyacétylénique. La combustion de l'acétylène est fortement exothermique ; l'acétylène ne présente aucun danger physiologique et s'emmagasine facilement ; la flamme oxyacétylénique est très réductrice. L'ensemble de ces données explique le fait que le procédé soit très répandu, car il est très souple d'utilisation.

Le soudage à l'arc électrique. Ce deuxième procédé est aussi très répandu. La haute température (environ 3 200 °C) d'un arc électrique obtenu dans l'air entre une électrode et l'ensemble à souder maintenus à la distance

▼ ***Soudure oxyacétylénique sur tubes de petit diamètre et de faible épaisseur.***
I.G.D.A. - Costa

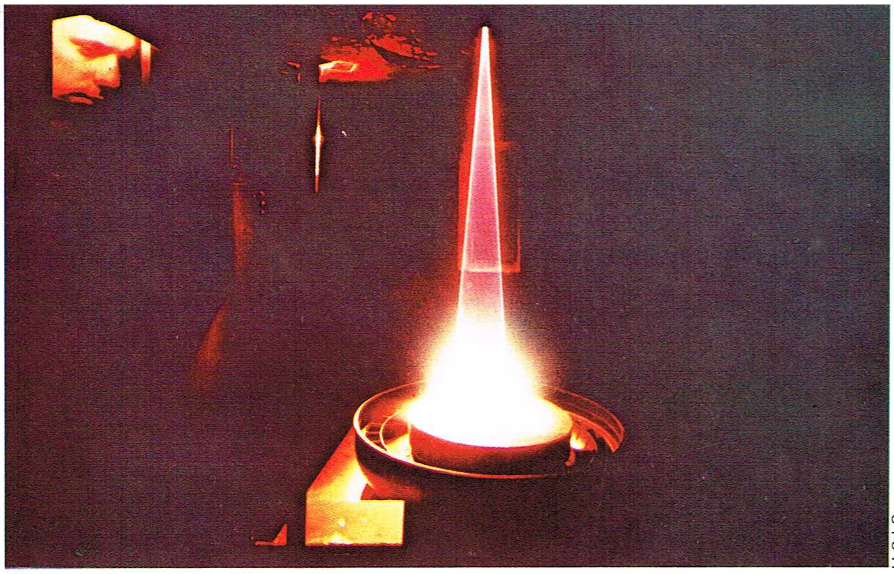

U.S.I.S.

▲ *Soudage par bombardement électronique. L'énergie cinétique d'un faisceau d'électrons de haute énergie est transformée en chaleur à l'impact, entraînant la fusion locale.*

adéquate est utilisée pour leur fusion simultanée. L'électrode est généralement enrobée, l'enrobage ayant un rôle de protection mécanique et métallurgique. La nature de l'enrobage (basique, cellulosique, oxydant) est adaptée à la nature du métal à souder (*fig.* 52). Selon les caractéristiques du poste de soudage (nature du courant, caractéristique tension/intensité) et de l'installation, le procédé peut être manuel ou automatique.

fig. 52

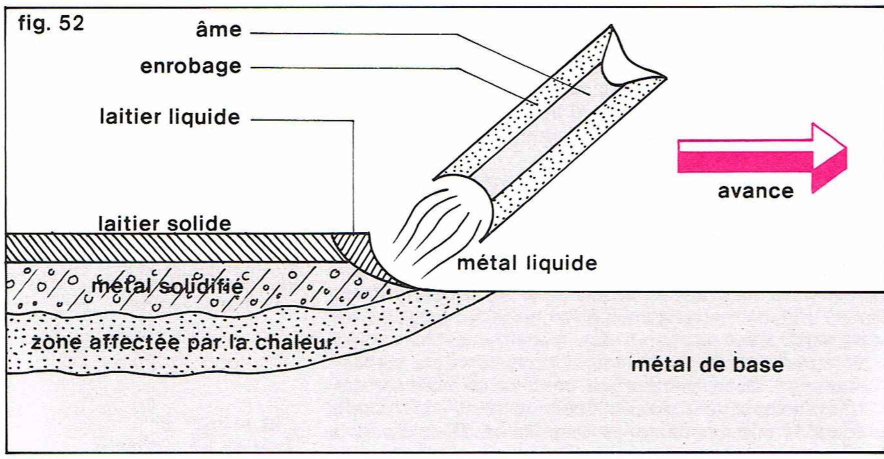

▲ *Figure 52 : soudage à l'arc électrique ; l'électrode est généralement enrobée, l'enrobage ayant un rôle de protection mécanique et métallurgique.*

▶ *Figure 53 : soudage par bombardement électronique ; le générateur électronique.*

▼ *Figure 54 : soudage par friction. L'énergie mécanique de frottement dissipée en chaleur est utilisée pour fondre les surfaces en regard des deux pièces en rotation l'une par rapport à l'autre.*

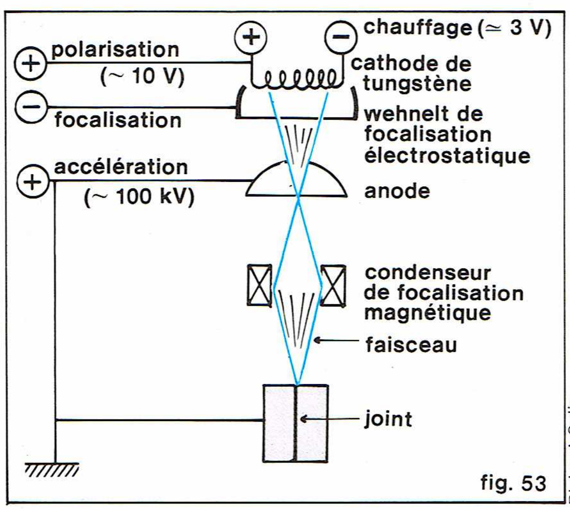

fig. 53

fig. 54

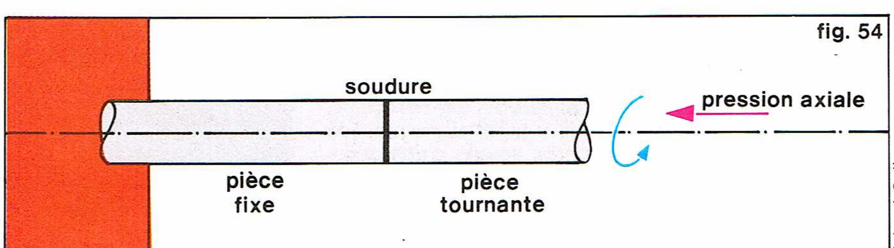

Le soudage sous atmosphère protectrice. Sans protection contre la corrosion atmosphérique du bain de soudure, le soudage de certains alliages très oxydables serait impossible (alliages très légers, par exemple). Mis au point pour cette raison, le soudage à l'arc sous atmosphère d'argon sert également à obtenir des soudures d'excellente qualité sur les aciers au carbone, les aciers inoxydables, les alliages légers, les alliages cuivreux, les alliages de nickel, de titane, etc.

Il y a deux techniques principales :

— l'électrode ne fond pas, et on met ou non un métal d'apport (procédé TIG : « Tungsten-Inert Gas ») ;

— l'électrode fond (procédé MIG : « Metal-Inert Gas »).

Remarque : l'argon est parfois remplacé par du gaz carbonique, moins cher (procédé MAG : « Metal-Active Gas »).

Le soudage par torche à plasma. Initialement destinées au découpage, les torches à plasma sont d'utilisation récente en soudage (1965). Le principe de ces torches est simple : une buse en cuivre constitue la cathode et entoure l'anode axiale en tungstène ; dans l'espace inter-électrodes, un gaz plasmagène (argon, hélium) est envoyé ; l'arc électrique ionise alors le gaz, qui devient conducteur électrique et libère de l'énergie thermique par effet Joule qui s'ajoute à la chaleur de l'arc.

L'arc plasma diffère de l'arc TIG par sa forme, beaucoup plus mince, sa température, plus élevée, et la vitesse d'éjection des gaz, plus grande. Ces caractéristiques expliquent les avantages essentiels de l'arc plasma : possibilité de souder en bout à bout (sans chanfrein) des tôles jusqu'à 10 ou 12 mm d'épaisseur, alors que le procédé TIG est limité à environ 3 mm d'épaisseur avec chanfrein en une passe.

Par ailleurs, l'arc plasma étant beaucoup plus stable sous faible intensité, on l'utilise aussi pour souder des tôles très minces (quelques dixièmes, voire quelques centièmes de mm) non soudables en procédé TIG : c'est le soudage dit « microplasma ».

Le soudage par bombardement électronique. Le récent procédé de soudage BE consiste à bombarder le joint des pièces à souder par un faisceau d'électrons de haute énergie, dont l'énergie cinétique est transformée en chaleur à l'impact, en entraînant la fusion locale. Le déplacement du faisceau le long du joint réalise le cordon de soudure. Le générateur électronique est classique ; le vide, de l'ordre de 10^{-5} mm de mercure, est réalisé soit dans une enceinte fixe englobant tout l'appareillage et la pièce, soit dans une enceinte locale se déplaçant avec le point de soudure (*fig.* 53).

Les avantages de ce procédé sont dus :

— au vide : les soudures sont très « propres » ; le soudage de métaux différents est possible (cuivre-acier, cuivre-aluminium, etc.) ;

— à la focalisation : le point de soudure est très localisé et très profond (jusqu'à 50 mm d'acier) ; on soude en bout à bout sans chanfrein ;

— à la puissance de chauffe : la rapidité de la fusion élimine les hétérogénéités de la zone affectée par la chaleur ; les métaux à haut point de fusion (réfractaires, tungstène) sont soudables.

Indépendamment de son coût élevé, les inconvénients du procédé sont d'ordre physiologique (émission de rayons X) ou d'ordre physique lors du soudage de métaux à haute tension de vapeur qui peuvent donner lieu à l'ionisation de cette vapeur (formation d'arcs).

Le soudage par étincelage. Les deux pièces, généralement longues, sont mises au contact en bout et traversées par un courant électrique. L'effet Joule pour partie, mais surtout les arcs ainsi créés fondent les surfaces en regard, et les deux pièces sont repoussées l'une contre l'autre. De telles soudures sont très saines. Les surfaces en regard ne sont pas usinées et peuvent avoir des sections très différentes. Le procédé s'applique très bien aux rails de chemin de fer, au soudage en bout des arbres, des tubes, etc.

Le soudage par friction. L'énergie mécanique de frottement dissipée en chaleur est utilisée pour fondre les surfaces en regard des deux pièces en rotation l'une par rapport à l'autre (*fig.* 54). Une pression axiale assure alors le soudage des pièces. Le procédé est très séduisant, mais se limite aux pièces pouvant entrer en rotation sans dommage.

Le soudage par résistance

Le soudage par résistance dit par « points » utilise les effets conjugués d'une pression mécanique et d'un courant très bref de forte intensité (effet Joule) sur des surfaces en regard présentant une résistance électrique prédominante par rapport aux autres résistances du montage (*fig.* 55a). Les avantages du procédé, utilisé surtout pour la tôlerie, résident dans sa très grande souplesse. Néanmoins, les épaisseurs soudables sont limitées, et les électrodes laissent une certaine empreinte.

En continu, le procédé s'intitule « soudage à la molette ». Les points de soudure successifs correspondent à des émissions régulières de courant (*fig.* 55b).

Le soudage par diffusion

La diffusion à l'état solide de deux métaux, à une température inférieure à celle de leur fusion, est utilisable pour le soudage de leur interface lorsque celui-ci est difficile ou impossible par les procédés classiques précédemment décrits.

La liaison est obtenue en jouant sur les paramètres température, pression mécanique exercée, temps de maintien au contact. Le processus physico-chimique de cette liaison est mal connu et certainement complexe : la déformation plastique des aspérités des surfaces suffit à appliquer exactement les deux surfaces l'une sur l'autre ; la migration atomique, activée thermiquement, tend alors à annuler l'interface soit par diffusion volumique au sein des grains, soit par diffusion aux joints des grains, ou par recristallisation à l'ancien plan de joint.

Les avantages du procédé sont liés à la possibilité de souder tous les métaux sans risque de fragilisation ou d'altérations dans les zones de liaison, en l'absence de déformation macroscopique et de contraintes résiduelles. L'inconvénient majeur réside dans sa mise au point très empirique.

Le brasage

La réunion permanente de deux métaux identiques, ou de nature différente, par un métal d'apport dont le point de fusion est inférieur au point de fusion le plus bas des deux métaux à lier constitue leur *brasage*. C'est la capillarité qui permet au métal d'apport en fusion de mouiller toutes les surfaces au contact. Le choix du métal d'apport est capital. Il en existe une liste très complète capable de résoudre à peu près tous les problèmes ; le plus connu est l'étain, qui fond à 232 °C.

Les moyens de chauffage sont divers :

— le chalumeau oxyacétylénique ou oxypropane, très souple d'emploi, mais nécessitant un flux protecteur (borax) à nettoyer après brasage ;

— l'induction électromagnétique, très facilement automatisable ;

— le four à atmosphère contrôlée ;

— le four à bain de sel.

Lorsque les sollicitations mécaniques et thermiques de l'assemblage le permettent, le brasage remplace très avantageusement le soudage et étend de plus en plus son domaine d'applications industrielles.

Les défauts et le contrôle des soudures

Pour chaque métal ou alliage métallique, tous ces procédés s'appliquent avec plus ou moins d'opportunité ; on peut définir ainsi pour chaque matériau une « *soudabilité* », c'est-à-dire l'ensemble des conditions opératoires optimales pour réaliser des soudures dans un objectif donné (santé métallurgique, prix de revient, etc.). Les recherches actuelles concernent les métaux rares, les alliages réfractaires, etc.

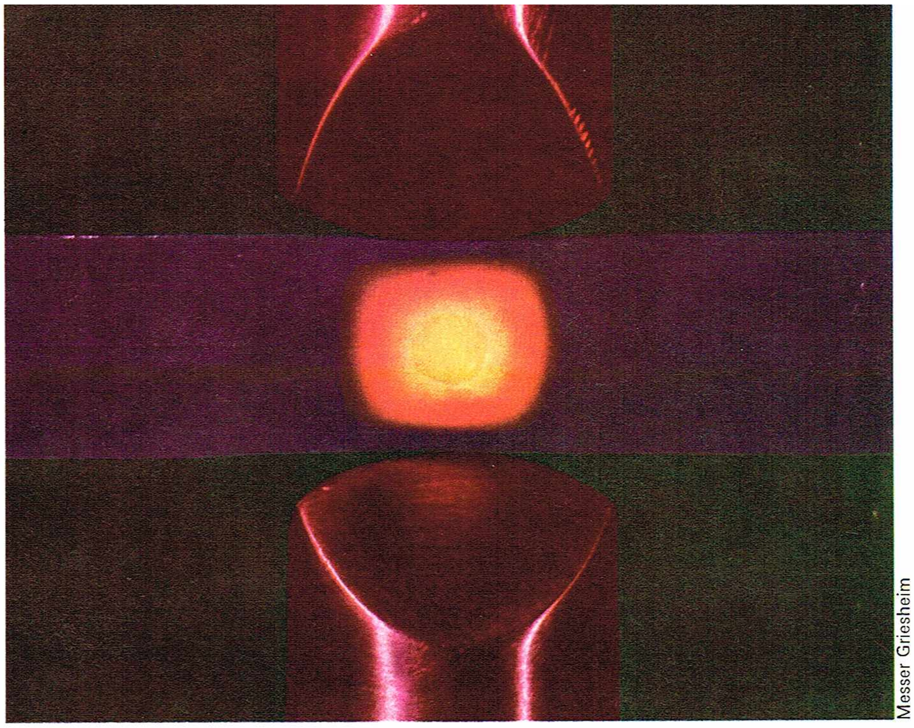

▲ *Soudage électrique par résistance. C'est un procédé économique et qui peut s'automatiser facilement.*

Dans tous les cas, une soudure se présente schématiquement sous l'aspect suivant :

— une *zone fondue,* où le métal a été liquéfié ;

— une *zone affectée par la chaleur,* où la structure métallurgique a été modifiée par la température atteinte et le temps de maintien à cette température (recristallisation, grossissement du grain, précipitations, etc.) ;

— une *zone de liaison,* qui raccorde les deux premières.

Les propriétés mécaniques d'une soudure sont liées au fait que, dans sa composition comme sa structure, le cordon diffère du métal de base. Les causes physiques de cette hétérogénéité sont :

— la *volatilisation* de certains constituants (métaux volatils, gaz tels que l'oxygène, l'azote, l'hydrogène entraînant la présence de soufflures, de fissurations diverses, et la fragilisation de la soudure) ;

— la *solidification du cordon,* lui conférant une structure dendritique ; les grains naissent à la périphérie et s'allongent vers le centre dans le sens du refroidissement. Par ailleurs, du fait de la progression de la source de chaleur, les grains sont incurvés le long du cordon selon cette progression.

La zone affectée par la chaleur subit parallèlement un grossissement du grain, et éventuellement une recristallisation. La largeur de cette zone est d'autant plus importante que le chauffage y a été plus poussé (plus grande dans le cas du soudage oxyacétylénique que dans le cas du soudage à l'arc).

Enfin, le soudage peut avoir lieu en plusieurs passes, chaque passe régénérant par recuit la passe précédente ; un martelage à froid du cordon entre chaque passe accentue cet effet en entraînant une structure à grains fins.

Les **défauts opératoires** sont des conditions de soudage inadéquates. On peut citer : le manque de pénétration du cordon ; le manque de métal (cordon creux) ; l'excès de métal (bourrelet) ; le collage de la soudure (la fusion n'a pas été atteinte) ; les inclusions d'oxydes ; les caniveaux (sillons dans le cordon dus à une hétérogénéité de chauffage) ; les fissures à chaud (criques) ou à froid (tapures). Il résulte de ces hétérogénéités diverses qu'un cordon de soudure est une véritable anomalie au sein d'une structure. En particulier, le soudage engendre la présence de contraintes résiduelles dues d'une part à ces hétérogénéités structurales et d'autre part, et surtout, aux retraits lors de la solidification du cordon.

▼ *Figure 55 : soudage par résistance dite* **par points (a).** *En continu, le procédé s'intitule* **soudage à la molette (b).**

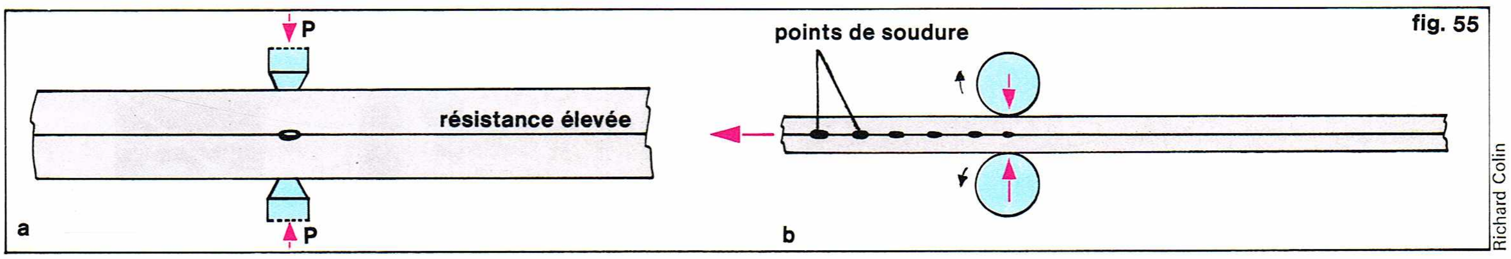

▶ *Figure 56 : procédé de rétreinte. C'est une mécanisation du roulage destiné à réduire par endroits la section de tubes ou de barres, ou à changer sa forme (la position ouverte est représentée en pointillés).*

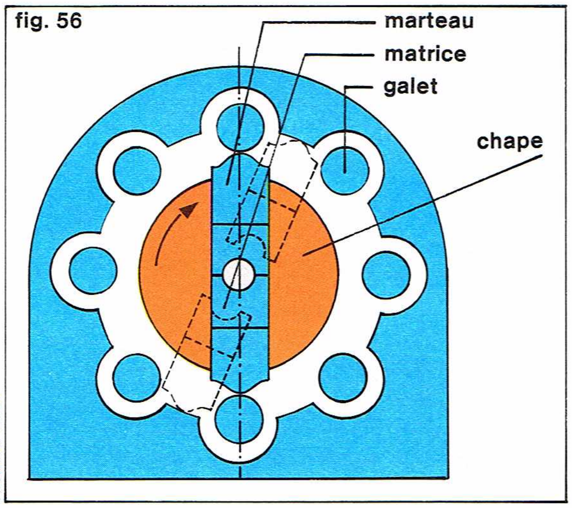

Si l'estimation quantitative de telles contraintes est difficile, le contrôle physique non destructif de la santé des soudures est réalisé classiquement dans l'industrie : par rayons X ou γ (inclusions gazeuses, fissures) ; contrôle magnétique pour les métaux ferromagnétiques (défauts superficiels ou peu profonds) ; contrôle aux ultrasons.

Quelques procédés particuliers

Le procédé de **rétreinte** est une mécanisation du roulage, destiné à réduire par endroits la section de tubes ou de barres, ou à changer sa forme. Une chape, portant des marteaux qui appuient des matrices, tourne à l'intérieur de la machine ; dans cette machine est placée une couronne de galets sur lesquels les marteaux viendront prendre appui pour frapper le métal (*fig.* 56). C'est la force centrifuge due à la rotation qui ramène marteaux et matrices en position ouverte entre chaque passage de galet.

La conception même de ce procédé le limite à de petites réductions ; on est donc souvent amené à travailler en plusieurs passes, en interposant entre marteau et matrice soit des cales, soit un système de coins que l'on enfonce progressivement. Un grand soin doit être apporté à la conception de la forme de la face du marteau en contact avec les galets, pour réduire l'usure de l'outillage, et à la forme des matrices (l'angle d'attaque doit être inférieur à 30° pour éviter un échauffement trop grand de la pièce et un risque de grippage du métal sur les matrices).

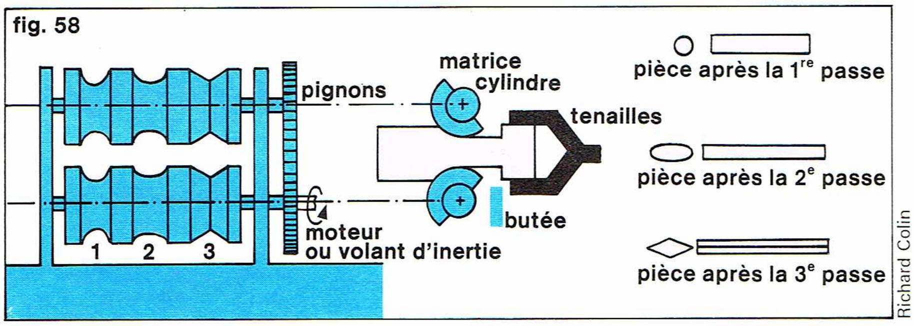

▲ *Figure 58 : laminage à retour (voir développement dans le texte).*

La rétreinte a, dans de nombreux cas, permis d'augmenter les cadences et de diminuer les coûts d'outillage ou de matière par rapport à d'autres procédés tels que matriçage, usinage ou fluotournage ; ses grands inconvénients restent le bruit et l'usure des outillages (galets, marteaux, matrices).

Le **laminage transversal** comporte deux cylindres gravés au milieu desquels la pièce à forger est roulée ; une autre technologie consiste à dérouler ces deux cylindres sur un plan, et donc à faire rouler la pièce entre deux plans gravés *(transverse rolling with straight dies)* [*fig.* 57]. Cette technique, assez récente, permet une grande automatisation ; elle est utilisée pour des premières passes ou pour des passes de finition, sur des barres en général chauffées préalablement par induction. Le procédé permet de réaliser en une seule opération des gravures à géométrie complexe sur une pièce.

Le **laminage à retour** comporte deux cylindres sur lesquels sont fixées deux matrices (recouvrant la moitié du diamètre), qui portent différentes cannelures, correspondant aux passes successives du lopin à travailler. Les deux cylindres sont rendus solidaires par des pignons ; l'opérateur (machine automatique ou personnel) engage le lopin entre les cylindres en position ouverte, et en venant en appui sur une butée, déclenche la rotation des cylindres et le retour de la pièce (*fig.* 58).

On peut donc concevoir sur une machine de petite dimension une gamme complète de forgeage ; la finition se fait en général par estampage ou par reprise à l'usinage. Ainsi sont formés des clefs plates, des leviers ou d'autres petites pièces d'automobile, sur machines automatiques ou manuelles.

Les **procédés de formage à haute énergie** (aussi appelés « à haute vitesse » : 250 à 300 m/s) ont pour caractéristiques essentielles une déformation, d'une part extrêmement rapide et d'autre part uniforme dans toute la tôle. Le mécanisme de la déformation est très différent de celui des procédés classiques : la rapidité de l'opération la rend adiabatique (pas d'échange de chaleur avec l'extérieur), et, de ce fait, l'augmentation de la température de la pièce favorise sa déformation. Les propriétés rhéologiques du matériau déformé à grande vitesse sont mal connues, mais l'on peut voir apparaître d'un point de vue structural : un métal à structure très maclée ; des caractéristiques mécaniques souvent supérieures à celles qui sont obtenues par emboutissage classique ; un durcissement superficiel notable.

Le **formage par explosion** tire son énergie d'explosifs soit « déflagrants « (vitesse de propagation sonique ; pic de pression d'environ 200 hectobars), soit « brisants » (TNT, dynamite ; vitesse de propagation élevée : plusieurs milliers de m/s, pic de pression de l'ordre de 1 000 hectobars).

La charge est placée à une certaine distance du flan ; l'onde de choc se déplace dans un milieu intermédiaire (eau, sable, aluminium fondu) et engendre une pression sur la tôle qui épouse alors les formes de la matrice placée en dessous. Les problèmes techniques sont liés à la répartition et à la position des charges d'explosifs, et à l'absorption par la matrice de l'onde de choc (*fig.* 59).

Le procédé est intéressant pour des pièces de petite série, devant respecter des cotes précises, et de grandes dimensions. Ses inconvénients sont le coût de la main-d'œuvre, la cadence relativement faible et le risque élevé du point de vue de la sécurité.

Le **formage par décharge électrique** est fondé sur le même principe, mais l'apport d'énergie est constitué par le passage d'une étincelle à travers deux électrodes

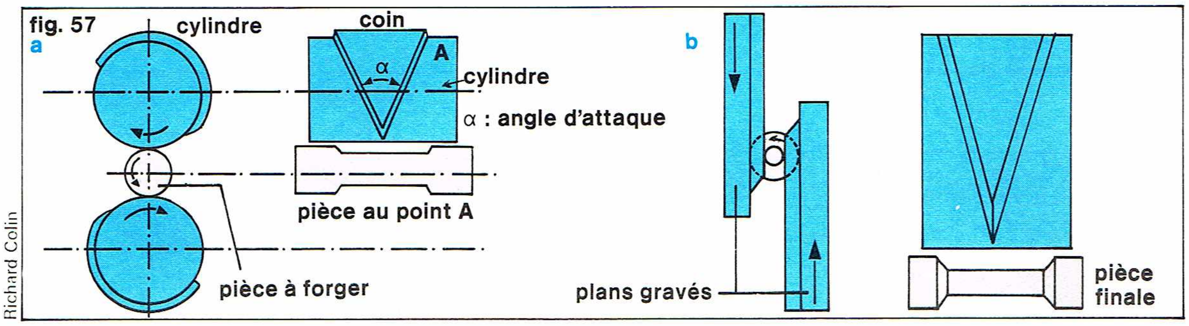

▶ *Figure 57 : laminage transversal ; a, à matrices cylindriques ; b, à matrices planes.*

plongées dans l'eau, qui se vaporise alors à grande vitesse à cet endroit et produit la pression nécessaire à la déformation. Le principal avantage de ce procédé par rapport au précédent est sa sécurité, mais la capacité des condensateurs en limite l'emploi à la fabrication de pièces plus petites (*fig.* 60).

Le **formage électromagnétique** consiste à induire dans la pièce à former des courants de Foucault qui provoquent des forces répulsives entre cette pièce et la bobine, permettant de plaquer le métal contre un mandrin ou une matrice, ou de provoquer l'expansion d'un tube (*fig.* 61). Si le métal n'a pas une conductivité électrique suffisante, on utilise une tôle « de poussée » à haute conductivité (aluminium), qui applique la pièce sur la matrice.

L'application principale du procédé reste le sertissage de tubes. Il a l'avantage de permettre de grandes cadences de fabrication, mais les contours de la partie déformée ne peuvent avoir une grande précision (le champ magnétique variant d'une manière continue).

Le **repoussage** est un procédé manuel ou mécanisé de mise en forme de pièces axisymétriques à parois minces à partir de tôle : on applique sur un mandrin tournant, qui a la forme intérieure de la pièce à obtenir, un flan circulaire, et l'on repousse ce flan sur le mandrin à l'aide d'un poussoir ; la tôle ne varie pas d'épaisseur pendant l'opération ; ce procédé est intéressant pour de petites séries de pièces à formes compliquées, mais reste lié à l'habileté de l'ouvrier repousseur (*fig.* 62) en travail manuel. Sur un tour à repousser automatique, le poussoir est remplacé par un ou plusieurs galets (ou molettes) qui décrivent une trajectoire parallèle à la génératrice du mandrin. On peut aussi obtenir des pièces à section ovale sur des mandrins excentrés.

Le **fluotournage** ressemble technologiquement au repoussage automatique, mais l'épaisseur de paroi est imposée par une loi théorique. Dans le cas du fluotournage d'un tronc de cône, cette loi est sinusoïdale : $t_2 = t_1 \sin \alpha$, où t_1 et t_2 sont les épaisseurs initiale et finale, et où α est le demi-angle du cône. Cette contrainte et les efforts sur les outillages obligent souvent à effectuer plusieurs passes pour obtenir la pièce finale. La déformation a surtout lieu par cisaillement. L'écart à la loi sinusoïdale par une réduction trop forte va provoquer une extrusion inverse sous le galet et donc un renflement à la base du cône, tandis qu'une réduction trop faible provoquera des variations d'épaisseur ou un pliage de la tôle. Dans le cas de formation d'hémisphères ou de pièces génératrices curvilignes, on est obligé de préformer le flan et de faire varier son épaisseur de telle sorte que le produit final sorte avec une épaisseur constante. La « fluotournabilité » d'un métal correspond à l'angle α minimal avant rupture. On le détermine en fluotournant un flan plat sur un ellipsoïde.

Le procédé de fluotournage est aussi appliqué sur des tubes pour réduire leur diamètre externe sur toute la longueur ou par endroits ; la loi sinusoïdale ne s'applique plus, le processus de la déformation étant très différent. On distingue le fluotournage direct et le fluotournage inverse (*fig.* 63).

BIBLIOGRAPHIE

BAQUE et al., *Mise en forme des métaux*, Dunod, Paris, 1973. - BAQUE P., DELAMARE F., FELDER E. et coll., *Mise en forme des métaux. Frottement, Lubrification, Usure*, séminaire mai 1975, à paraître chez Dunod. - BONZEL, *le Tréfilage de l'acier*, Dunod, 1958. - HILL R., *The Mathematical Theory of Plasticity*, Oxford University Press, 1950. - KEELER S. P., *Understanding Sheet Metal Formability*, Machinery Magazine, février à juillet 1968. - MANDEL, *Cours de mécanique des milieux continus*, Gauthier-Villars, Paris, 1966. - SCHEY J. A., *Metal Deformation Process : Friction and Lubrification*, Marcel Dekker Inc., New York, 1970. - SOKOLNIKOFF I. S., *Mathematical Theory of Elasticity*, Mc Graw Hill Book Company, New York, 1956. - WEILL R., *Techniques d'usinage : Données de base et Mise en œuvre pratique*, Dunod, 1971. - *Metals Handbook : Forming*, vol. IV, American Society for Metal, Metals Park, Ohio 44073, 8e édition, 1969. - *Le Tréfilé*, n° 97, septembre 1972, 8630 Coburg, Allemagne.

fig. 59

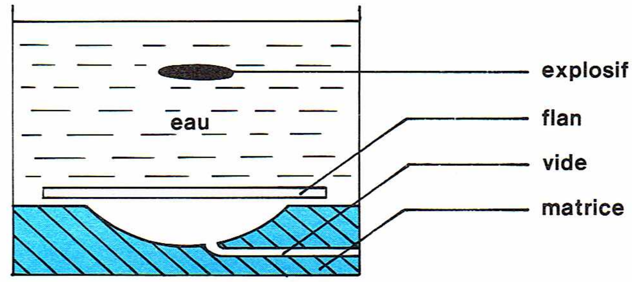

fig. 60

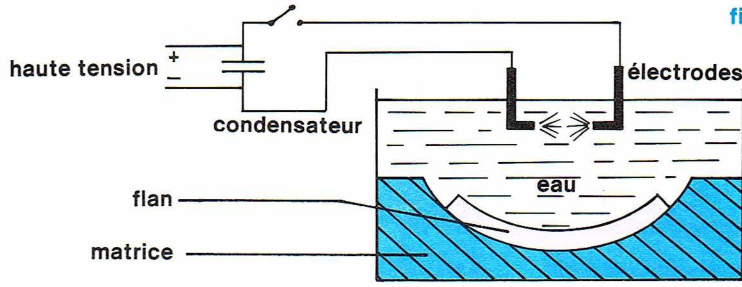

fig. 61

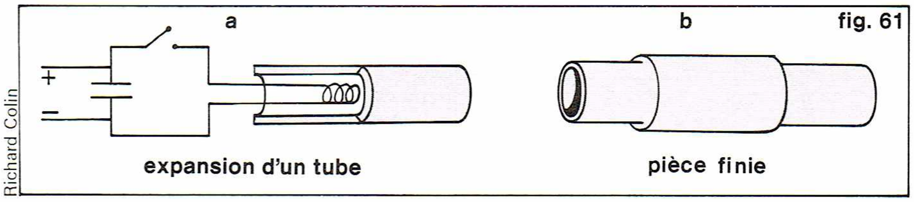

▲ *Figure 59 : formage par explosion.*
Figure 60 : formage par décharge électrique.
Figure 61 : formage électromagnétique.

fig. 62

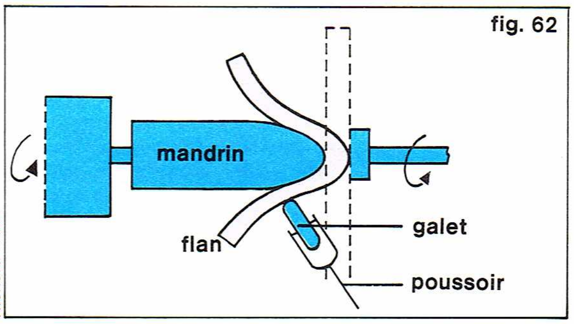

◀ *Figure 62 : le repoussage est un procédé manuel ou mécanisé de mise en forme, à partir de tôle, de pièces axisymétriques à parois minces.*

fig. 63

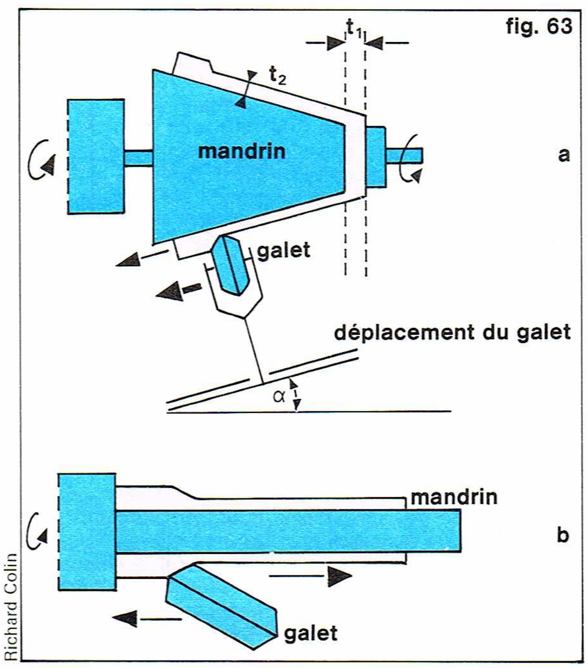

◀ *Figure 63 : fluotournage ; a, direct ; b, inverse.*

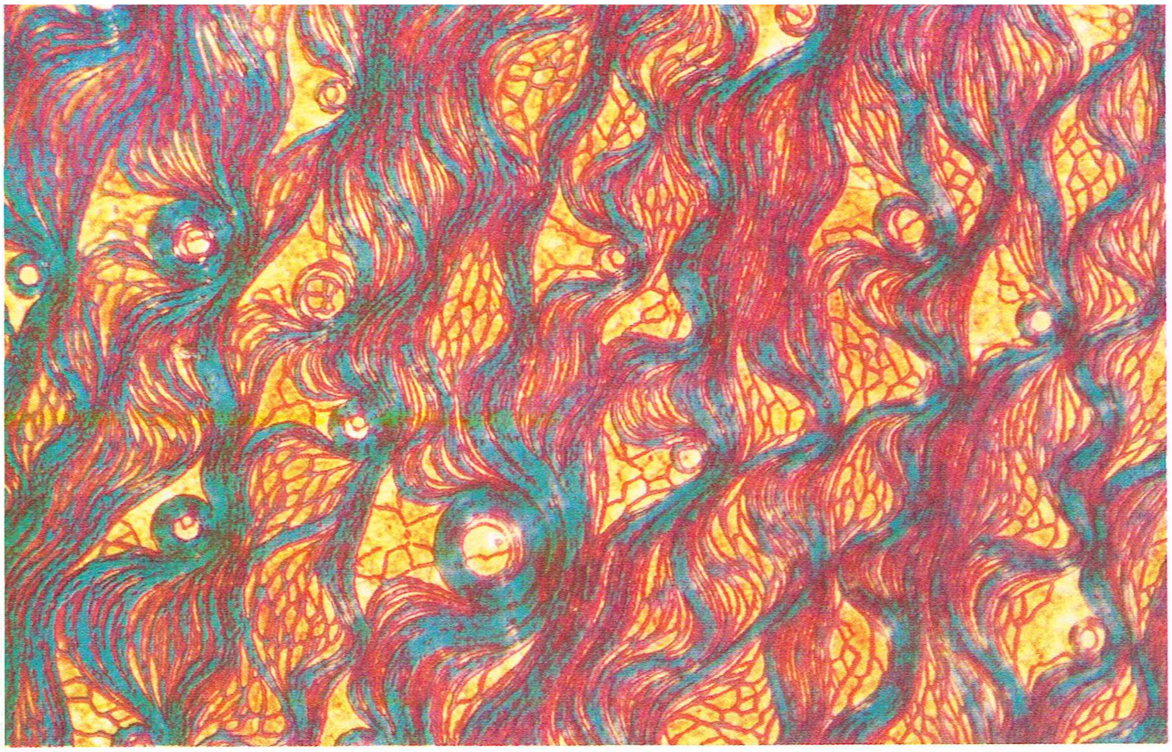

CEA - R. Hasson

▶ *Vue, en fond clair, de la surface d'un alliage fer-chrome, après un traitement à haute température en atmosphère H_2-H_2O, suivi d'une oxydation à l'air, à haute température (Études effectuées à l'École Nationale Supérieure de chimie de Paris par les professeurs Bénard et Oudar).*

▼ *Figure 1 : trois exemples de courbes de transformation isotherme d'un alliage.*

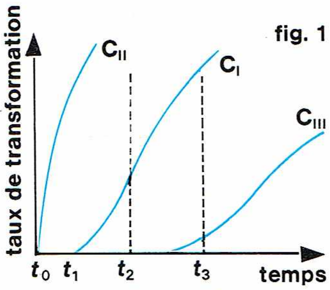

Richard Colin

LES TRAITEMENTS THERMIQUES

Les traitements thermiques ont pour but de conférer aux matériaux, et tout particulièrement aux métaux et alliages, des propriétés déterminantes pour leur comportement vis-à-vis des sollicitations qui leur seront imposées. Ces traitements, qui modifient les structures dont dépendent les propriétés des matériaux, comprennent des opérations de chauffage suivi de refroidissement plus ou moins rapide. Pour connaître l'état structural, il est nécessaire de se référer aux diagrammes d'équilibre. Or, l'établissement de ces diagrammes requiert la connaissance précise de l'état d'équilibre thermodynamique dans des conditions déterminées, c'est-à-dire quand on laisse suffisamment de temps au système pour atteindre l'équilibre. En fait, cette connaissance ne fournit pas suffisamment de renseignements sur la constitution réelle d'un alliage après un traitement thermique : en effet, l'aspect cinétique des transformations à l'état solide est important; leur vitesse dépend de facteurs spécifiques, qui peuvent même faire évoluer le système dans un sens contraire à celui qu'on aurait pu prévoir à partir du diagramme d'équilibre. On imagine aisément, par exemple, que, si l'on n'attend pas suffisamment longtemps, les transformations sont incomplètes. De nouvelles phases non définies sur un tel diagramme peuvent également apparaître.

L'aspect cinétique des transformations est donc primordial pour aborder les traitements thermiques. On peut, de ce point de vue, faire les remarques suivantes : l'amorçage des réactions est difficile, d'où des retards à la transformation; les défauts du réseau jouent un rôle important sur l'amorçage; la diffusion des espèces réagissantes intervient dans les transformations; comme la diffusion est un phénomène thermiquement activé, la température sera un facteur prépondérant dans la cinétique des transformations; en revanche, certaines transformations se produisent sans diffusion : c'est le cas des transformations martensitiques qui ont lieu à des températures relativement basses pour lesquelles la mobilité des atomes est faible; ainsi, si on le souhaitait, on ne pourrait pas les éviter, même par refroidissement rapide.

Les traitements thermiques ne peuvent être dissociés des traitements mécaniques subis par les métaux et alliages, notamment lors des opérations de mise en forme; c'est la raison pour laquelle on parle souvent de traitements thermomécaniques.

Les traitements thermiques ne modifient pas en général la composition de l'alliage, sauf pour les traitements sous vide, ou encore dans des atmosphères bien définies qui visent, dans ce dernier cas, par exemple, à changer la composition des couches superficielles. Les traitements thermiques affectent les paramètres suivants : la nature et le nombre des phases; la structure — taille du grain et répartition des phases —; l'état mécanique.

La cinétique globale des transformations à l'état solide

Pour cette étude indispensable, le métallurgiste dispose de techniques déjà mises en œuvre pour l'établissement des diagrammes d'équilibre.

Cinétique globale isotherme

Dans le cas d'une transformation par germination et croissance d'un alliage hors d'équilibre, la courbe représentant les variations du taux de transformation en fonction du temps, pour une température donnée, a la forme d'une sigmoïde (*fig.* 1). Sur chacune de ces isothermes, on distingue trois périodes. Sur l'isotherme C_I, par exemple, on relève :

— une période dite d'incubation ($t < t_1$) pendant laquelle on ne met rien en évidence, compte tenu de la sensibilité des méthodes expérimentales utilisées;

— une période d'accélération ($t_1 < t < t_2$), où le taux de transformation varie en $t^{3/2}$, c'est-à-dire varie comme le cube de la vitesse de déplacement de l'interface entre les deux phases, elle-même proportionnelle à $\sqrt{Dt}$, où D est le coefficient de diffusion;

— une période de décélération ($t > t_2$) : la vitesse se ralentit au-delà du temps t_2 qui correspond au point d'inflexion. Cela résulte de l'interférence des centres de croissance entre eux. Pour obtenir la transformation complète, il faut attendre très longtemps; dans certains cas même, on ne peut l'atteindre, et le système reste quasi indéfiniment dans un état hors d'équilibre. En pratique, de nombreux alliages, dans des conditions usuelles d'utilisation, sont dans cet état hors d'équilibre; les transformations y sont inhibées pour diverses raisons.

Diagrammes température-temps-taux de transformation : courbes TTT

Il est nécessaire de tracer un ensemble de courbes de transformation isotherme afin d'établir un diagramme complet de l'état structural. Cet ensemble de courbes est traduit sous une forme condensée appelée courbe TTT. Pour cela, on détermine à une température donnée à partir d'une isotherme le temps t_s nécessaire pour qu'un certain taux minimal de transformation soit réalisé : ce taux est compris entre 1 et 5 %; de même, on définit le temps t_f nécessaire pour que la transformation soit presque complète : le taux correspondant est choisi entre 95 et 99 %. Si l'on porte sur un diagramme température-temps l'ensemble des couples (t_s, t_f) pour toutes les températures, on obtient un diagramme TTT (*fig.* 2) qui est, en fait, essentiellement constitué de deux courbes, lieux des points t_s et t_f. Commentons ce diagramme : l'alliage, porté tout d'abord à une température supérieure à T_0 (température de transformation), est refroidi brutalement à une température quelconque $T_i < T_0$, à laquelle il est maintenu. L'évolution de l'alliage en fonction du temps fait apparaître trois domaines :

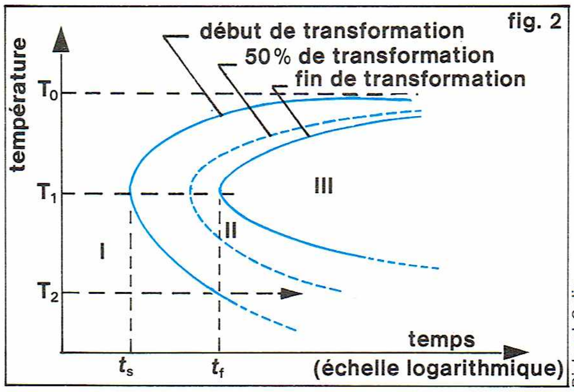

Richard Colin

— *Domaine I* : l'alliage y conserve l'état métastable qu'il avait à haute température.

— *Domaine II* : au temps t_s débute la transformation qui va se poursuivre jusqu'au temps t_f auquel elle prend fin. Il y a donc coexistence de deux états, l'un métastable à haute température et l'autre stable à la température T_i.

— *Domaine III* : l'alliage y est entièrement à l'état stable.

Les courbes de début et de fin de transformation présentent une protubérance, encore appelée « nez »; à la température T_1 correspondante, la vitesse de la transformation y est la plus grande. Cette température est suffisamment basse pour être éloignée de la température de transformation T_0 et suffisamment élevée pour que la diffusion, qui joue un rôle important dans cette transformation, soit encore rapide. A la température T_2, au contraire, la diffusion est lente.

Ce type de diagramme correspond à une composition donnée, mais les courbes TTT se déplacent d'une façon continue quand le rapport des constituants change.

Divers traitements thermiques

A partir des diagrammes TTT, il est possible de maintenir, par des traitements thermiques convenables, l'alliage à un état d'équilibre métastable. Ces traitements thermiques seront définis par : les températures de traitement, la durée de maintien à chaque température, la vitesse de passage de la température initiale de traitement à la température normale.

Sur l'exemple précédent, définissons les traitements thermiques auxquels on peut soumettre un alliage porté à une température T supérieure à la température de transformation T_0.

La trempe. L'alliage est amené très rapidement de la température T à la température T_3, de façon à traverser à grande vitesse le domaine de la transformation et à empêcher celle-ci de se produire. On peut figer ainsi à la température T_3 l'état correspondant à la température T : l'alliage ainsi trempé est donc dans un état instable à la température T_3.

La trempe étagée. On amène brusquement l'alliage à la température T_2, inférieure à la température T_1 qui correspond à la température de transformation la plus rapide, mais supérieure à la température T_3. L'alliage se transforme partiellement vers l'état d'équilibre. En jouant sur le temps de maintien à T_2, on peut doser les états intermédiaires.

Le revenu. Après la trempe totale, on reporte l'alliage à la température T_2, et on l'y maintient pendant un certain temps. Les effets du revenu sont analogues à ceux de la trempe étagée, mais sa réalisation pratique est en général plus simple.

Le recuit. L'alliage qui est hors d'équilibre est porté à une température voisine de T_1 de façon à lui faire atteindre l'état d'équilibre. L'état hors d'équilibre est soit un état trempé, soit un état revenu. Le terme de recuit est très général : il désigne tout traitement qui permet à un métal ou à un alliage de se rapprocher de l'état d'équilibre.

Ces diagrammes TTT sont très utiles pour réaliser les traitements isothermes, qui comportent essentiellement un refroidissement quasi instantané suivi d'un maintien à température constante. Les conditions de ces traitements correspondent bien en effet aux conditions d'établissement des diagrammes TTT.

Diagrammes de transformation en refroidissement continu : courbes TRC

On utilise aussi les diagrammes de transformation en refroidissement continu, dont les coordonnées sont la température et le temps (en échelle logarithmique). Sur ces diagrammes sont reportées les diverses courbes de refroidissement à partir d'une température déterminée (par exemple la température d'austénitisation) sur lesquelles on note les points de début et de fin de transformation. On trace les lieux de ces points; ces diagrammes permettent de suivre le mécanisme de décomposition de la phase de haute température en fonction de l'allure de refroidissement (*fig.* 3). On précise également sur ces diagrammes la dureté obtenue à la température ambiante (exprimée en général en H_{RC}) ; en outre, sur les courbes de refroidissement, on indique quand cela est possible les proportions de constituant formé dans chaque domaine traversé. Le tracé des courbes TRC est effectué à partir d'éprouvettes creuses d'épaisseur très faible.

Il ne faut pas confondre les diagrammes TTT et TRC. En effet, on pourrait être tenté de tracer sur un même diagramme la courbe TTT de début de transformation (5 %) et la courbe de refroidissement continu de l'acier. Or, au cours du refroidissement continu, on peut considérer que l'acier subit une suite de séjours isothermes de durée infiniment courte, suivis de trempes; la phase de haute température reste donc plus longtemps dans des domaines de température où les temps d'incubation sont plus élevés que si elle est portée brutalement à la température de maintien pour y étudier la décomposition isotherme. Il en résulte que la phase de haute température va commencer à se transformer au cours du refroidissement continu à une température inférieure (*fig.* 4). Le temps d'incubation est plus grand lors d'un refroidissement continu que lors d'un traitement thermique.

Traitements thermiques des aciers

Les aciers constituent une classe importante des matériaux; à ce titre, ils sont un bon exemple pour illustrer les traitements thermiques et les transformations induites.

Constituants des aciers obtenus par refroidissement rapide

Lorsque le refroidissement est rapide, l'austénite ne se transforme plus en perlite (transformation $\{A_1\}$). Suivant la vitesse de refroidissement, de nouveaux constituants vont apparaître; ils sont hors d'équilibre :

— à vitesse de refroidissement moyenne : la troostite;

— à vitesse assez rapide : la bainite;

— à vitesse très rapide : la martensite.

Décrivons brièvement ces transformations et les phases qui en résultent.

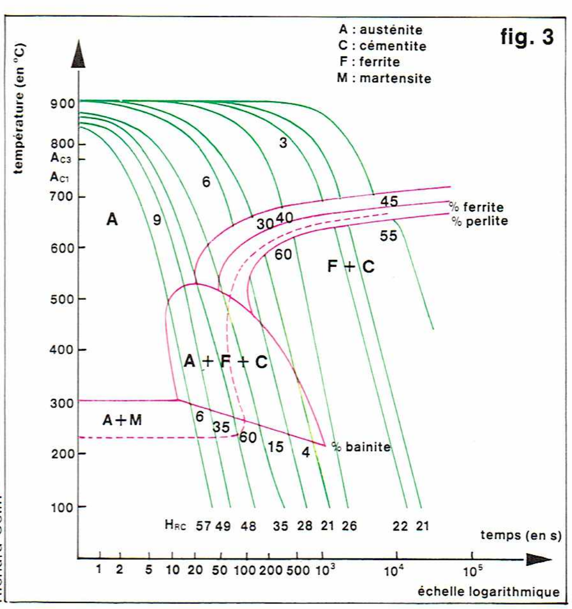

Richard Colin

◀ *Figure 3 : courbes de transformation en refroidissement continu* (TRC).

◀ ***Figure 2 : courbes température-temps-taux de transformation, appelées plus brièvement* diagramme TTT.**

fig. 4

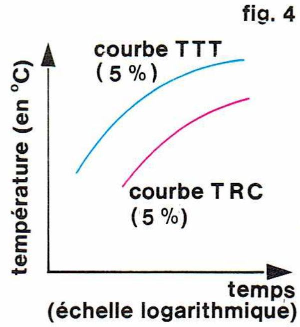

Richard Colin

▲ *Figure 4 : temps d'incubation pour la transformation d'un acier.*

La troostite

Elle est constituée de lamelles minces de ferrite et de cémentite disposées en éventail et constituant des nodules. L'espace interlamellaire est inférieur au pouvoir séparateur des microscopes. La dureté de la troostite est supérieure à celle de la perlite. La transformation de l'austénite en troostite, notée {Ar'}, se produit à une température inférieure à celle de $\{A_1\}$:

$$\text{austénite} \xrightarrow{\{Ar'\}} \text{troostite}$$

Lorsque la vitesse de refroidissement augmente, la température de la transformation Ar' diminue; la structure obtenue est alors plus fine, et la dureté augmente.

La bainite

Elle est constituée d'un agrégat de ferrite et de carbure; elle se présente le plus souvent sous forme d'aiguilles plus ou moins ramifiées. La transformation bainitique notée {Ar''} correspond à la transformation de l'austénite en bainite à température constante :

$$\text{austénite} \xrightarrow{\{Ar''\}} \text{bainite}$$

Comme précédemment, une augmentation de la vitesse de refroidissement se traduit par une diminution de la température (Ar'') et une augmentation de la dureté Brinell qui passe ainsi de 400 à 600. La bainite ne se forme que dans le cas des aciers alliés. Si la transformation perlitique débute par la germination de la cémentite, en revanche la transformation bainitique débute par celle de la ferrite.

La martensite

C'est une solution sursaturée de carbone dans le fer α; elle a la même teneur en carbone que l'austénite qui lui donne naissance. La maille n'est cependant pas cubique, car les atomes interstitiels de carbone qui occupent les milieux des arêtes produisent une déformation quadratique d'axe [001]; la structure de la martensite est alors quadratique. Les dimensions de la maille quadratique dépendent de la teneur en carbone : le paramètre *c* croît, alors que le paramètre *a* décroît avec la teneur croissante en carbone; la variation du rapport *c/a* serait la suivante :

$$c/a = 1 + 0{,}046 \times C\ \%\ \text{(en poids)}$$

La martensite se présente micrographiquement sous forme d'aiguilles; elle est très dure et très fragile.

La transformation martensitique est notée {Ar'''}; elle est caractérisée par son indépendance vis-à-vis du temps. La proportion d'austénite transformée est uniquement fonction de la température. Elle débute à une température bien déterminée M_s et progresse quand la température est abaissée, pour s'achever à une température M_f. Ces températures dépendent de la composition de l'acier et de la température de chauffage; elles sont d'autant plus basses que les teneurs en carbone et en éléments d'addition sont plus importantes. La martensite n'est pas stable, et un traitement de revenu peut amener sa disparition d'autant plus vite que la température de maintien est élevée. Rappelons que cette transformation se produit sans diffusion, par réarrangement coopératif des atomes; à ce titre, elle s'apparente à une déformation (cisaillement, maclage).

Dans de nombreux aciers, les domaines des transformations précédentes se chevauchent plus ou moins; il peut donc y avoir superposition de deux transformations; c'est la cinétique qui favorisera telle ou telle structure.

Courbes TTT des aciers

Les courbes TTT des aciers faiblement alliés présentent généralement la forme approximative d'un « S », d'où leur nom de courbes en S. Si nous choisissons le cas de l'acier eutectoïde, on peut tracer le diagramme TTT qui indique les différents domaines ainsi que les duretés obtenues après maintien isotherme (*fig.* 5). On remarque que les domaines perlitique et bainitique ne sont pas délimités, ce qui est aussi le cas des aciers non alliés. A 450 °C, la décomposition isotherme de l'austénite commence au bout de 1 seconde (période d'incubation) et se termine après 4 secondes; à 300 °C, ces deux temps deviennent respectivement 15 et 200 secondes.

Les éléments d'addition, d'une façon générale, repoussent fortement les courbes TTT vers la droite, à l'exception toutefois du cobalt qui les déplace vers la gauche; le déplacement est d'autant plus marqué que la teneur est plus élevée.

Les éléments carburigènes (Cr, Mo, W, V et Ti, qui forment des carbures) étendent le domaine d'existence des solutions solides ferritiques : ils sont appelés alphagènes. Ils modifient de façon importante la forme des courbes TTT. Aussi, à des teneurs faibles, provoquent-ils la délimitation des domaines perlitique et bainitique; ainsi le molybdène repousse surtout le domaine perlitique, alors que le chrome influe principalement sur le domaine bainitique. Pour des teneurs plus élevées, les deux domaines peuvent être séparés, laissant apparaître entre eux une zone où l'austénite est stable (entre 400 et 600 °C). Cette particularité peut être mise à profit pour effectuer un traitement thermomécanique dit d'austénitoformage (ausforming) [*fig.* 6], qui consiste à refroidir l'acier assez rapidement à la température correspondant à l'intervalle entre les domaines perlitique et bainitique, puis à le déformer plastiquement par laminage. La température est trop faible pour entraîner la recristallisation. L'acier est ensuite trempé à assez basse température et devient entièrement martensitique. La structure, grâce au grand nombre de défauts introduits lors de l'écrouissage de l'austénite, est très fine; cette structure fine est conservée par revenu à température pas trop élevée pour éviter la coalescence des carbures.

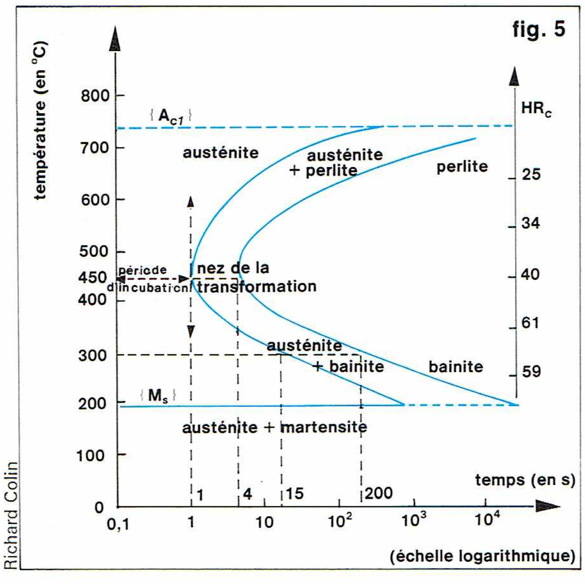

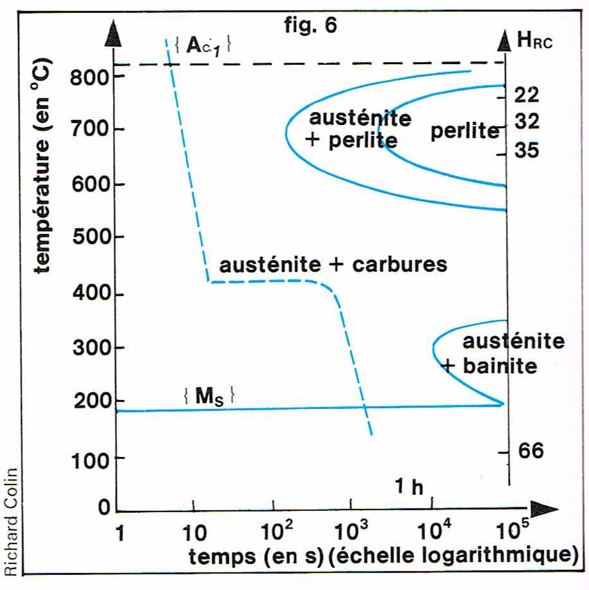

▶ ***Figure 5 :* diagramme TTT de l'acier eutectoïde.**
***Figure 6 :* diagramme TTT et traitement d'austénitoformage.**

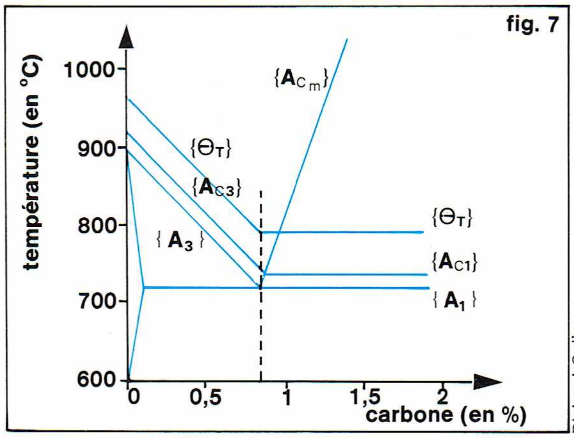

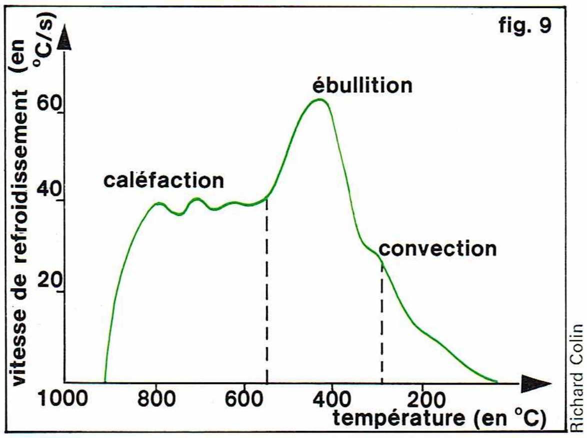

◄ *Figure 7 : température de trempe des aciers en fonction de la teneur en carbone. {A_3}, courbe de dissolution de la ferrite primaire dans l'austénite; {Ac_3}, courbe {A_3} correspondant au chauffage. La différence entre les deux courbes traduit le retard à la transformation; {Ac_m}, ligne de dissolution de la cémentite secondaire dans l'austénite. Figure 9 : courbes de refroidissement en fonction de la température.*

En revanche, les éléments non carburigènes, comme le nickel, le cuivre et le manganèse, changent peu l'aspect des courbes TTT. Indiquons qu'ils étendent le domaine d'existence des solutions solides austénitiques et sont appelés gammagènes.

Ces courbes TTT permettent de prévoir le déroulement des traitements isothermes des aciers. Elles peuvent également fournir des indications sur les constituants que fournirait le refroidissement continu d'un acier.

Les courbes TRC, quant à elles, serviront en fait à définir de façon précise les refroidissements critiques pour obtenir les constituants souhaités. Aussi pourra-t-on déterminer des refroidissements critiques martensitique, bainitique ou encore de recuit. Les courbes TRC des aciers alliés sont souvent déplacées de façon considérable par rapport à celles des aciers au carbone; on en déduit qu'il est aisé d'obtenir l'état martensitique.

La trempe

Ce traitement consiste à conférer à l'acier une grande dureté par transformation de l'austénite en martensite. Le traitement de trempe comporte trois étapes successives :

— le chauffage à une température correspondant à l'état austénitique;

— le maintien à cette température pendant un temps suffisant pour que la structure soit homogène;

— un refroidissement rapide par immersion dans un milieu convenable. Il faut éviter la transformation prévue par le diagramme d'équilibre.

Le chauffage

La température de chauffage est encore appelée température de trempe. Sur le plan pratique, son choix dépend de la nature de l'acier. Aussi, dans le cas des aciers au carbone (*fig.* 7), faut-il éviter la formation de ferrite, qui est un constituant doux, tandis que la cémentite non dissoute par le chauffage contribue à la dureté et à l'usure de l'acier :

- acier eutectoïde : $Ac_3 + 50$ °C;
- acier hypo-eutectoïde : $Ac_3 + 50$ °C;

dans ces deux cas, la température de trempe est choisie pour que l'acier soit à l'état d'austénite;

- acier hypereutectoïde : l'acier est composé d'austénite et de cémentite.

Dans le cas des aciers alliés, en raison de l'influence des éléments d'alliages, la température de trempe est particulière à chaque nuance; elle est indiquée par l'aciériste.

Le chauffage est réalisé à l'aide de fours, dont l'atmosphère est souvent plus ou moins oxydante; il peut en résulter une diminution de la teneur en carbone dans la zone superficielle entraînant une diminution de la dureté dans cette zone de la pièce. Ce phénomène de décarburation augmente avec la température et la durée du chauffage. Pour remédier à cet inconvénient, on prévoit une surépaisseur que l'on usinera après le traitement. On peut éviter la décarburation en utilisant des fours à bain liquide, de sels notamment, ou encore des fours à atmosphère contrôlée (gaz pauvre, hydrocarbure craqué, etc.). On doit aussi éviter l'oxydation au chauffage, qui entraîne d'une part une décarburation superficielle par combustion du carbone, et d'autre part la formation d'une couche de calamine. Cette couche nuit au bon contact des surfaces avec les fluides de trempe, ce qui peut causer une trempe irrégulière. Une nouvelle technique de chauffage, sous vide, permet d'obtenir des produits de très bonne qualité; cette technique coûteuse ne s'applique cependant qu'à des aciers ne nécessitant pas une trempe trop énergique.

La durée de maintien à la température de trempe dépend de plusieurs facteurs, et notamment des dimensions de la pièce, du type de four et de l'atmosphère, ainsi que de la composition de l'acier.

Le refroidissement

Il faut réaliser un refroidissement au moins aussi rapide que le refroidissement critique martensitique, c'est-à-dire que l'acier ne doit pas contenir de perlite (ni de troostite) mais il peut comporter une certaine quantité d'austénite qui n'a pas été transformée : c'est l'austénite résiduelle.

La vitesse de refroidissement d'une pièce diminue de la surface vers le cœur. On peut donc observer, dans une barre de gros diamètre par exemple, l'existence de diverses zones délimitées par les valeurs des vitesses critiques (*fig.* 8). La dureté diminue jusqu'au centre avec accroissement de la taille du grain; la pièce obtenue est donc hétérogène. Comme la grosseur de la pièce limite la pénétration de la trempe, ce défaut est présenté par toutes les pièces massives en acier au carbone. Pour y remédier, on peut utiliser des aciers alliés qui prennent la trempe à cœur; pour les aciers autotrempants, la trempe a lieu par refroidissement à l'air.

On utilise comme fluides de refroidissement l'eau froide et chaude, les solutions aqueuses (eau saturée de sel marin, par exemple), les bains métalliques fondus, les huiles (le pétrole, le suif) ou encore l'air, suivant que la trempe doit être plus ou moins énergique. Compte tenu des remarques précédentes, la vitesse de refroidissement dépendra de la forme et des dimensions de la pièce; ainsi, un fil d'acier trempé dans un bain doux peut être bien plus dur qu'une barre de gros diamètre trempée dans l'eau froide.

Le transfert de chaleur entre le métal porté à température élevée et le fluide de refroidissement est un phénomène complexe. On y distingue : la transmission de chaleur dans le solide, le transfert de chaleur à l'interface solide-fluide et la transmission de chaleur dans le fluide.

Si le fluide est un liquide, l'eau par exemple, il se produit, dans les premiers instants après l'immersion, un régime transitoire caractérisé par une vaporisation de liquide; la gaine de caléfaction ainsi produite s'oppose au transfert de chaleur. La vitesse de refroidissement à ce stade n'est pas très élevée. Lorsque la température superficielle est suffisamment abaissée, il y a formation de bulles de gaz qui se dispersent dans le liquide froid : c'est le régime d'ébullition; c'est alors que la vitesse de refroidissement est la plus grande, et il en résulte de forts gradients thermiques dans la pièce. Ensuite, l'écart de température entre la pièce et le fluide diminue, et la vitesse de refroidissement se ralentit. La forme des courbes de refroidissement et de vitesse de refroidissement (*fig.* 9) dépend du métal et du fluide. En dehors des facteurs dimensionnels, la chaleur spécifique et la

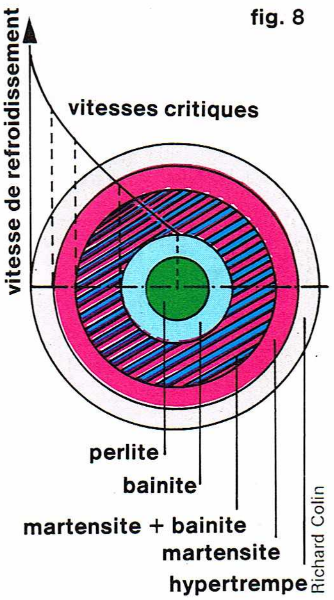

▲ *Figure 8 : structures et vitesses critiques.*

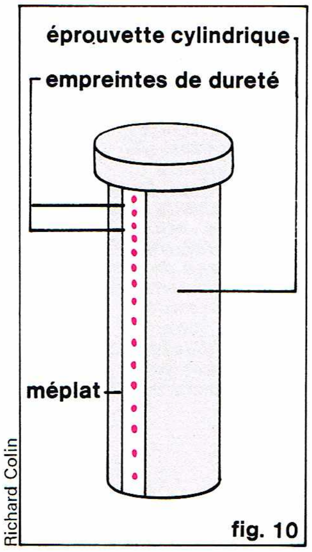

▲ *Figure 10 : éprouvette pour essai Jominy.*

conductibilité thermique de la pièce jouent un rôle important. En ce qui concerne le fluide, les paramètres sont nombreux : la température initiale de fluide, sa température d'ébullition, sa chaleur latente de vaporisation, sa tension superficielle, sa chaleur spécifique, sa viscosité ainsi que sa réactivité chimique. Il résulte de ce bref examen que la trempe à l'eau conduit à des lois de refroidissement beaucoup plus rapides que la trempe à l'huile. La pratique de la trempe est le fruit d'une longue expérience qui permet de choisir les meilleures conditions.

Parmi les différents fluides, l'huile est couramment utilisée, car elle offre une grande sécurité sur le plan métallurgique. On utilise trois catégories d'huiles :

— les huiles minérales, qui proviennent de la distillation du pétrole brut;

— les huiles animales extraites de matières organiques (tissus d'animaux) ;

— les huiles végétales (colza notamment).

Les premières sont les mieux appropriées aux traitements thermiques. L'huile la plus fluide donne la trempe la plus dure.

Pour se prémunir contre tout risque d'inflammabilité, on utilise un volume d'huile suffisant et une réfrigération efficace, qui est réalisée par soufflage d'air comprimé, par immersion d'un serpentin d'eau froide, par utilisation d'une chambre à double paroi ou encore d'un réfrigérateur industriel automatique. Il faut éviter que l'huile ne s'oxyde et perde son pouvoir trempant. Différents systèmes existent pour assurer le refroidissement convenable des bases de trempe. Les capacités de ces derniers dépendent de la nature du fluide. Ainsi :

— pour l'eau : 5 fois le poids des pièces trempées;

— pour l'huile : 10 fois.

Défauts consécutifs à la trempe

La différence des vitesses de refroidissement entre le cœur et la partie extérieure de la pièce provoque des contraintes. Aussi la couche superficielle se contracte-t-elle plus vite que la partie centrale et la comprime-t-elle; au contraire, cette dernière tend à empêcher l'extérieur de se contracter et le met sous tension.

En outre, la transformation Ar''' se fait avec une dilatation de 1,2 % environ. Il va en résulter que l'état des contraintes subit en chaque point des variations à la fois d'intensité et de sens au cours du refroidissement.

Les contraintes résultantes peuvent, si elles dépassent la limite d'élasticité, créer des déformations permanentes à la fois de forme et de dimensions. Si ces contraintes dépassent la charge de rupture, des fissurations et des cassures vont se produire : ce sont les *tapures de trempe*.

C'est donc au début du refroidissement que se produisent les déformations en raison de la plasticité plus grande à chaud; les tapures de trempe interviennent au cours de la transformation martensitique par suite de l'importante dilatation qui l'accompagne.

▼ *Figure 11 : résultats de l'essai Jominy et trempabilité pour différentes nuances d'aciers.*

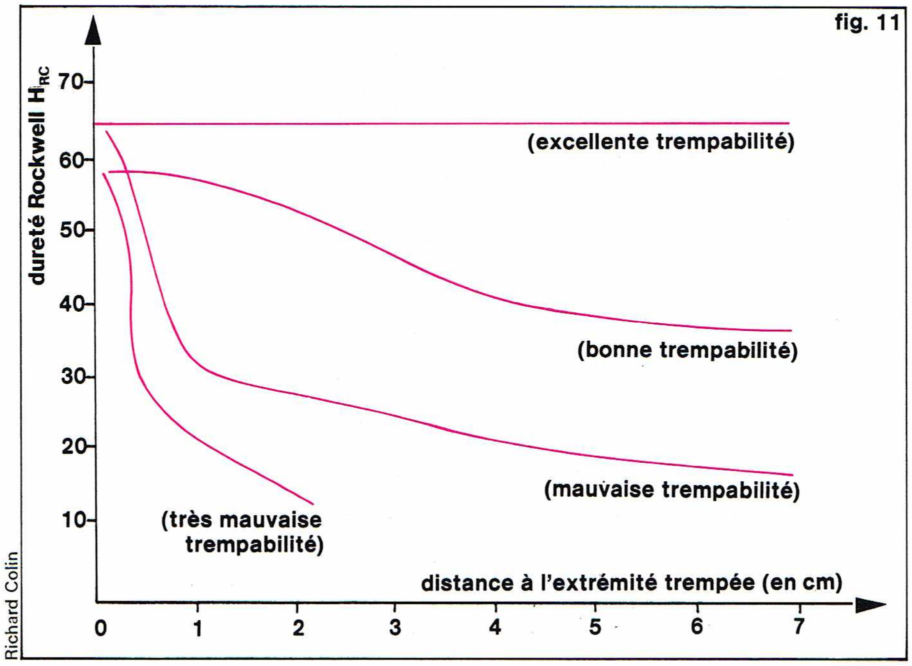

Trempabilité d'un acier

La trempabilité caractérise l'aptitude d'un acier à former de la martensite en tout point d'une pièce, après refroidissement à partir d'une température où il était à l'état d'austénite. Pour des conditions données de trempe, la trempabilité peut se définir directement par des mesures de dureté, faites par exemple sur une section transversale d'un barreau cylindrique; cela revient à déterminer la pénétration de trempe.

La trempabilité devant être déterminée pour chaque coulée, on s'est préoccupé de mettre au point un essai simple : c'est l'*essai Jominy*. Sur une éprouvette cylindrique (100 mm de long et 25 mm de diamètre), on usine un méplat parallèle à l'axe du cylindre (*fig.* 10); l'éprouvette est chauffée à la température de trempe pendant 30 minutes pour être amenée à l'état d'austénite. L'extrémité inférieure est ensuite soumise à un jet d'eau froide. On mesure la dureté Rockwell en différents points du méplat que l'on porte graphiquement en fonction de la distance à l'extrémité trempée; on obtient la courbe Jominy qui définit la trempabilité. Celle-ci est d'autant plus grande que la courbe descend moins rapidement (*fig.* 11). Ainsi, un acier non allié ayant une teneur en carbone inférieure à 0,4 % ne « prend pas la trempe »; un acier à 0,7 % de carbone comprend à température ambiante une forte proportion d'austénite résiduelle; en revanche, des aciers au chrome présentent une bonne trempabilité.

La trempe superficielle

De nombreuses pièces mécaniques doivent présenter de bonnes caractéristiques de surface pour résister à l'usure, à la fatigue et au grippage. Il faut pour cela leur faire subir des traitements qui n'affectent que les couches superficielles (1 à 10 mm environ), tout en conservant à la partie centrale une bonne résilience. Parmi ces traitements, le métallurgiste dispose de la trempe superficielle.

Il existe plusieurs procédés qui diffèrent par leur mode de chauffage. L'un d'eux utilise le chalumeau oxyacétylénique. La partie chauffée est refroidie énergiquement par une douche ou par une immersion afin d'y réaliser l'état martensitique. Le chauffage, dans ce cas, peut intéresser l'ensemble de la surface (trempe continue) ou s'effectuer de proche en proche, la pièce défilant sous le dispositif de chauffage, puis sous celui d'arrosage (trempe de proche en proche ou « au défilé »). Ce dernier procédé est utilisé pour les glissières de banc de tour, ou les dents d'engrenage. L'autre mode de chauffage est assuré par induction; il utilise le fait qu'un courant alternatif de haute fréquence circulant dans un inducteur proche de la pièce y crée un champ magnétique variable. Il en résulte que l'acier est chauffé superficiellement sur une épaisseur d'autant plus faible que la fréquence est élevée (effet de peau) ; 8 mm pour une fréquence de $3 \cdot 10^3$ Hz, 0,7 mm pour une fréquence de 10^6 Hz. Les inducteurs sont en cuivre et refroidis intérieurement par une circulation d'eau. Le refroidissement est assuré par un arrosage.

D'une façon générale, la trempe au chalumeau est utilisée pour les pièces de formes compliquées, tandis que la trempe par induction est employée pour les pièces plus simples, celles présentant notamment une surface de révolution.

Le revenu

Il s'agit d'un traitement pratiqué après la trempe, qui a pour but de diminuer la fragilité; il augmente l'allongement et surtout la résilience, mais diminue la dureté. Cela est réalisé par un chauffage à une température comprise entre 180 °C et Ac_1 et par un maintien à cette température pendant 2 heures environ. Cette durée doit être augmentée en présence de certains éléments d'addition, le molybdène notamment. La température de revenu est choisie de façon à assurer un compromis entre deux aspects contradictoires : augmenter la résilience et l'allongement sans trop diminuer la dureté et la résistance à la traction. La pièce subit ensuite un refroidissement par immersion dans l'huile.

Les modifications structurales qui interviennent au cours du revenu dépendent surtout de la température. On distingue les étapes principales suivantes :

— jusqu'à 200 °C : la martensite initiale α' se décompose en carbure de fer ε et en martensite α'' à 0,25 % environ de carbone : $\alpha' \rightarrow \varepsilon + \alpha''$;

— de 200 à 400 °C : l'austénite résiduelle se transforme à son tour en un mélange de ferrite et de carbure ε;

— au-dessus de 400 °C : le carbure ε et la martensite α'' se transforment en ferrite et en cémentite. En réalité, la décomposition de carbure ε est un peu plus complexe et comprend d'autres étapes intermédiaires.

Le prolongement du chauffage à 500 °C entraîne un adoucissement dû au grossissement des particules de cémentite; celles-ci ne peuvent cependant être résolues : c'est la *sorbite*, qui est analogue à la troostite, mais est obtenue à température ascendante. Un chauffage jusqu'à la température Ac_1 aurait pour conséquence de détruire les effets de la trempe : l'adoucissement serait alors excessif.

Parmi les facteurs qui peuvent affecter l'état de l'acier après ce traitement, mentionnons :

— La durée de revenu : pour une température de revenu donnée, la dureté décroît d'abord rapidement, puis lentement quand le temps augmente. Il apparaît ainsi une durée limite de revenu qu'il n'est pas utile de dépasser.

— La température de revenu : l'effet du revenu croît en rapidité avec la température. En fonction des différentes étapes structurales décrites ci-dessus, on constate d'abord une augmentation, puis une diminution de la température quand la température augmente pour une durée de maintien correspondant à la durée limite. L'évolution des propriétés mécaniques avec la température de revenu pour chaque nuance est fournie par les aciéristes.

— La vitesse de refroidissement : elle n'a en principe aucune influence sur les caractéristiques des aciers non alliés, notamment du fait que la température de revenu est inférieure à Ac_1. Toutefois, il ne faut pas refroidir trop rapidement, car cela entraînerait des contraintes nouvelles, ce qui irait à l'encontre du but du revenu, à savoir atténuer ou faire disparaître les contraintes propres.

Le recuit

Ce traitement a pour objet de ramener un acier à une structure d'équilibre. Il comprend trois étapes :

— Un chauffage à une certaine température, dite de recuit. Ce chauffage est réalisé dans des fours à bains de sel ou à atmosphère contrôlée afin d'éviter la décarburation ou la formation de calamine.

— Un maintien de durée variable à cette température ou autour de cette température (oscillations).

— Un refroidissement lent à l'air, dans le four éteint ou encore dans des cendres.

On distingue plusieurs types de recuit.

Recuit d'homogénéisation

Il a pour but d'éliminer, sur un acier brut de coulée, les hétérogénéités chimiques de l'austénite en carbone et en autres éléments. Il est pratiqué avant le laminage ou le forgeage sur des aciers bruts de coulée. L'acier est porté à une température très supérieure à celle du point Ac_3 (Ac_3 + 200 °C), de façon à accélérer la diffusion des éléments. Après un maintien de plusieurs heures à la température de recuit, la durée étant fonction de la grosseur de la pièce, l'acier est refroidi à l'air.

Il faut éviter de dépasser le solidus, ce qui entamerait la fusion locale des parties les plus fusibles, notamment les joints de grains : c'est le phénomène de brûlure de l'acier. En outre, le chauffage à température élevée risque d'entraîner un grossissement des grains : c'est le phénomène de surchauffe qui se traduit par une augmentation de la fragilité. Certains éléments d'addition (Cr, Mo, W et Ti) atténuent ce phénomène.

Recuit de régénération

Il a pour but de réduire le diamètre des grains d'un acier ayant subi une surchauffe au cours du moulage, d'un recuit d'homogénéisation, du forgeage à chaud, ou encore du soudage.

Les éléments d'addition agissent sur les dimensions du grain; certains éléments comme Mn, P et Si laissent

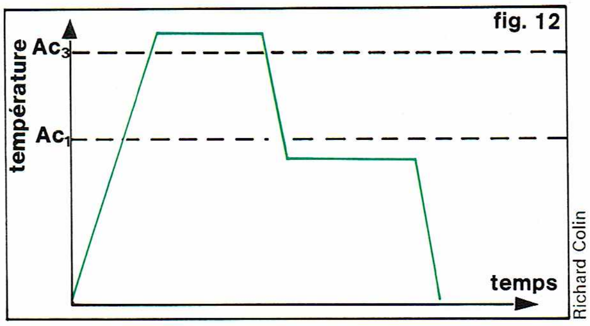

◄ ***Figure 12 : recuit d'adoucissement.***

grossir le grain, tandis que d'autres, qui donnent naissance à de fines particules de carbures (sauf Ni), s'opposent aux effets de surchauffe. Le moyen le plus efficace pour limiter la grosseur du grain austénitique consiste à ajouter de l'aluminium à la fin de l'élaboration, qui, avec l'azote de l'air, donne une précipitation très fine de nitrure d'aluminium.

En pratique, ce recuit est réalisé à Ac_3 + 75 °C pendant le temps nécessaire pour que le cœur de la pièce ait atteint la température de recuit. Le refroidissement ne doit pas être trop lent, pour éviter le grossissement de la ferrite.

Recuit complet

Ce traitement s'effectue sur des pièces qui ont subi des traitements thermiques et mécaniques variés, en vue de faciliter leur usinage ou la déformation à froid. Pour cela, on chauffe l'acier à Ac_3 + 50 °C de façon à faire disparaître totalement les constituants qui causent la dureté; la pièce est maintenue à cette température pendant 30 minutes, puis refroidie suffisamment lentement à l'air ou dans le four. C'est ce traitement qui est désigné par le mot « recuit » sans aucune précision. En fait, on distingue des variantes :

— Le *recuit de coalescence :* il s'applique aux aciers très riches en carbone (aciers pour outils et pour roulements) pour lesquels il est nécessaire d'atteindre l'adoucissement maximal; ce dernier est obtenu quand la perlite est sous forme globulaire.

— Le *recuit d'adoucissement :* il consiste à maintenir l'acier pendant plusieurs heures à une température située à quelques dizaines de degrés au-dessous du point de transformation inférieure (*fig.* 12). Il s'applique en particulier aux aciers autotrempants.

Recuit de détente ou de stabilisation

Il a pour but de relâcher plus ou moins complètement les contraintes propres dues à la solidification, aux traitements thermomécaniques, ou encore aux assemblages. Il évite les déformations ultérieures en stabilisant les dimensions des pièces. Ce recuit s'effectue à 600-650 °C pendant une heure; dans le cas de certains aciers alliés, ce traitement est réalisé à température plus basse. Dans le cas des pièces parfaitement calibrées (jauges, calibres), ce recuit est conduit à basse température (100-200 °C) pendant un temps assez long, afin d'obtenir une parfaite stabilité dimensionnelle.

Recuit de recristallisation

Ce traitement remédie à l'écrouissage résultant d'un travail à froid, c'est-à-dire d'un travail effectué au-dessous de A_1 et non pas uniquement à la température ordinaire. L'écrouissage correspond à la déformation permanente du métal, qui se présente alors sous forme d'un agrégat de cristallites désorientés les uns par rapport aux autres et de tailles variées. On peut distinguer, suivant le taux d'écrouissage :

- *La restauration :* il n'y a pas de modification apparente de l'architecture cristalline, bien qu'il se produise un léger déplacement des atomes; les propriétés mécaniques sont partiellement restaurées.
- *La recristallisation :* au-dessus d'un seuil d'écrouissage (écrouissage critique), la structure écrouie est remplacée par une nouvelle structure. La température de début de recristallisation est d'autant plus basse que l'écrouissage est plus important. La nouvelle structure apparaît par l'intermédiaire d'un mécanisme de germination et croissance. Le métal déformé par laminage,

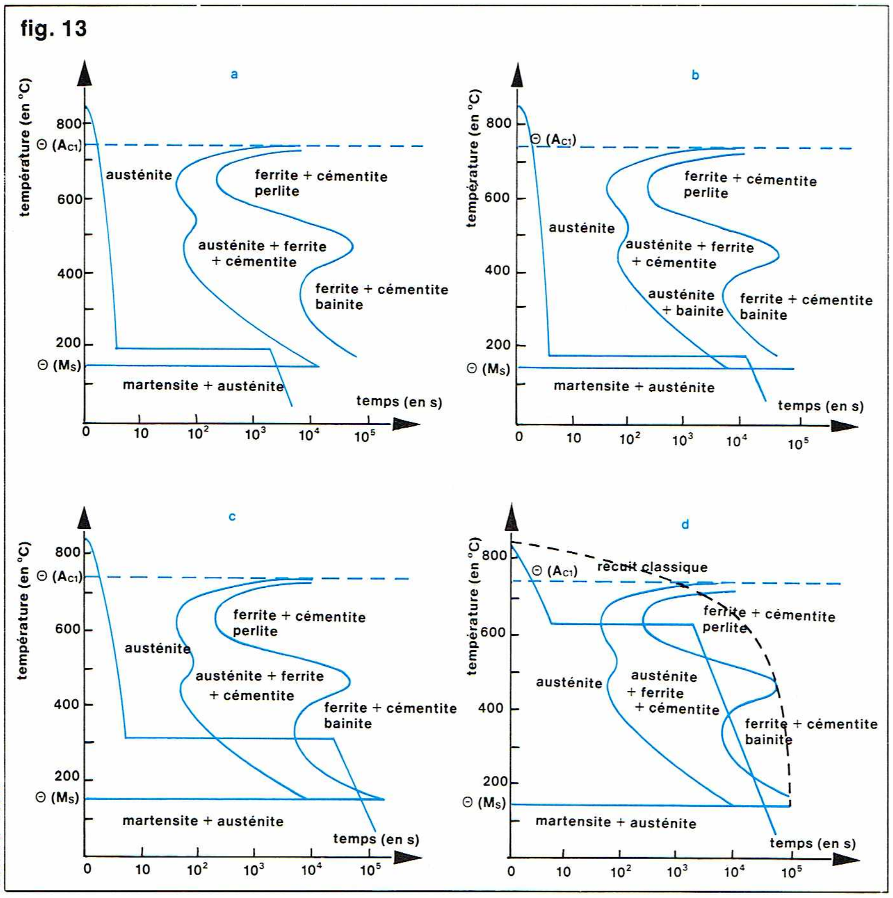

Richard Colin

R. Penelle - lab. de métallurgie physique - Orsay

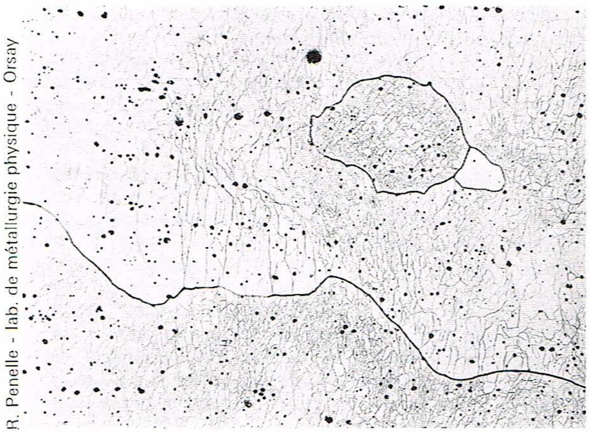

R. Penelle - lab. de métallurgie physique - Orsay

▲▶ ***A droite, en haut : structure de recristallisation ; en bas : structure de polygonisation. A gauche, figure 13 : trempe étagée des aciers ; a, étagée martensitique ; b, étagée mixte ; c, étagée bainitique ; d, recuit isotherme.***

▼ ***Structure écrouie (Al).***

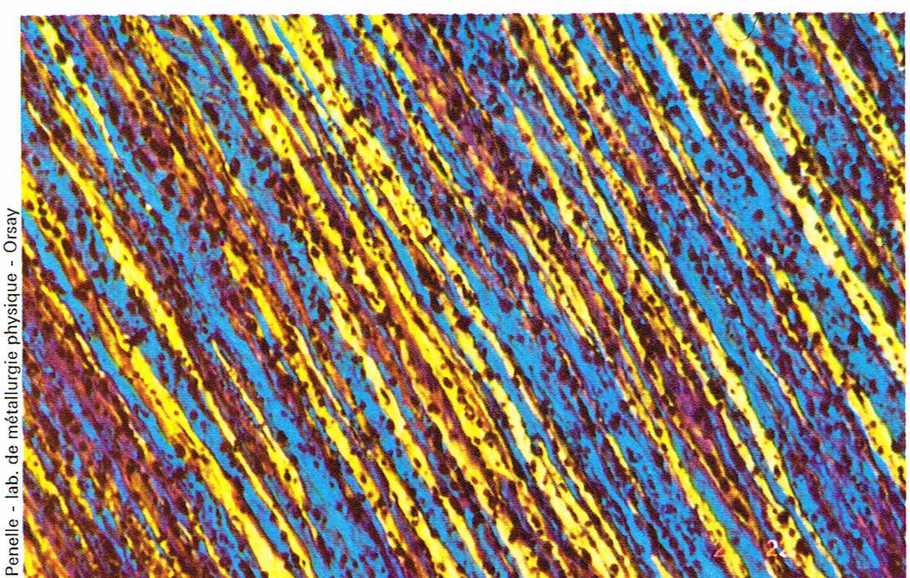

R. Penelle - lab. de métallurgie physique - Orsay

par exemple, possède, après un tel traitement, une texture dite de recristallisation, c'est-à-dire que certaines orientations sont renforcées. Si l'écrouissage n'est pas suffisamment important, la structure après recuit est polygonisée : il y a formation de sous-grains limités par des sous-joints qui sont constitués par des parois d'empilements de dislocations.

● *Le grossissement du grain :* après recristallisation, le grain tend à grossir. Sur le plan pratique, il faut assurer la recristallisation et limiter la grosseur du grain. Le choix de la température est imposé par la nuance de l'acier et le degré d'écrouissage.

Les traitements isothermes des aciers

Ce sont des traitements thermiques dont la phase de refroidissement comprend trois étapes :

— refroidissement quasi instantané ;
— maintien isotherme plus ou moins prolongé ;
— refroidissement lent, généralement à l'air.

La trempe étagée martensitique

Après chauffage de la pièce pour obtenir l'austénitisation, la pièce est portée dans un bain de sel dont la température est légèrement supérieure à M_s (200 °C par exemple). La courbe de refroidissement ne doit pas couper la courbe TTT afin d'éviter un début de transformation de l'austénite (*fig.* 13a). Le maintien isotherme, quant à lui, est interrompu avant que l'austénite se transforme en bainite. Le refroidissement est effectué à l'air. Il se forme alors la martensite. Ce traitement est suivi d'un revenu qui augmente la résilience. Il permet de réduire les gradients de température avant la transformation martensitique, et, de plus, cette dernière s'effectue régulièrement dans toute la pièce ; il subsiste toutefois de l'austénite résiduelle.

Les contraintes propres sont plus faibles et les risques de défauts de trempe (déformations et tapures) diminués. Ce type de traitement est pratiqué pour des pièces utilisées à froid (outils à découper, ciseaux, roulements à billes, ressorts).

La trempe étagée mixte

Ce traitement ne diffère du précédent que par le temps de maintien isotherme qui est plus long (*fig.* 13b). La structure obtenue comporte de la martensite accompagnée d'austénite résiduelle et de la bainite. Le mélange est d'autant plus pauvre en martensite que le maintien isotherme est plus long.

La trempe étagée bainitique

Le maintien isotherme est effectué à une température comprise entre 450 °C et M_s (*fig.* 13c) ; il est prolongé jusqu'à la transformation complète de l'austénite en bainite ; l'acier est ensuite refroidi par trempe à l'eau et ne subit pas alors de transformation.

La structure ainsi obtenue présente une bonne ductilité. Cependant, ce traitement présente, par rapport à la trempe étagée martensitique, l'inconvénient d'être beaucoup plus long, bien qu'il ne nécessite pas de revenu.

Le recuit isotherme

L'acier chauffé à la température d'austénitisation est placé dans un bain à une température comprise entre 600 et 700 °C, donc inférieure à Ac_1 (*fig.* 13d). La transformation isotherme donne une structure — après transformation complète en perlite accompagnée du constituant pro-eutectoïde — qui est plus uniforme. La durée de ce type de recuit peut être plus courte que celle du recuit classique. Le refroidissement est quelconque. Le choix de la température d'austénisation est conditionné par l'obtention de perlite globulaire ou lamellaire. Il s'agit d'un traitement étagé d'adoucissement avant usinage. Il est appliqué aux aciers très alliés, notamment les aciers inoxydables.

Le phénomène de vieillissement

Les propriétés mécaniques des métaux et alliages sont susceptibles d'évoluer dans le temps, et cela, non seulement à cause des propriétés chimiques de ces matériaux (résistance à la corrosion ou à l'oxydation par exemple), mais aussi par modification de leur structure. Ce phénomène s'appelle le « vieillissement ».

Précipitation dans les alliages

Pour expliquer le vieillissement, il est nécessaire d'aborder la notion de précipitation. Prenons l'exemple d'un alliage aluminium-cuivre. Le diagramme d'équilibre de ces deux éléments fait apparaître entre 0,2 % et 10 % de cuivre et, à température ambiante, un large domaine où coexistent la solution solide (de structure cubique faces centrées) et un composé défini : Al_2Cu (*fig.* 14). En revanche, à la température correspondant au point eutectique (550 °C), la solution solide existe jusqu'à une concentration en cuivre atteignant 6 %. Donc la solubilité du cuivre dans l'alliage au cours du refroidissement diminue de 6 % (à 550 °C) à 0,2 % (en dessous de 200 °C). Par suite, si nous laissons refroidir lentement cet alliage, le reste du cuivre diffuse dans le matériau et se retrouve combiné avec l'aluminium sous la forme du composé défini Al_2Cu qui précipite. C'est l'évolution de cette précipitation dans le temps qui modifie la résistance mécanique du matériau.

Les mécanismes de précipitation sont très divers et peuvent provoquer l'apparition de précipités de structure différente suivant la température à laquelle diffuse l'élément d'addition (le cuivre dans notre exemple). En effet, un procédé simple pour mettre en évidence cette précipitation consiste à chauffer le matériau dans le domaine de la solution solide, et à refroidir brusquement afin de la ramener à température ambiante sans permettre à l'élément d'addition de diffuser dans l'alliage, puis d'étudier l'évolution de la dureté dans le temps qui suit cette trempe.

Par exemple, prenons un alliage aluminium-4 % cuivre, et chauffons-le à 550 °C, pour le refroidir ensuite brusquement. On constate que la dureté immédiatement après trempe est très faible et que cette dureté augmente ensuite avec le temps, passe par un maximum pour diminuer plus tard (*fig.* 14). D'autre part, si on accélère le processus par un revenu pour augmenter les vitesses de diffusion, on constate que le maximum est atteint d'autant plus rapidement que la température de revenu est élevée et que la valeur du maximum n'est pas une constante ; elle dépend du domaine de température où s'effectue le revenu (*fig.* 15).

On en déduit que la vitesse de précipitation est accélérée par la température, ce qui confirme que le mécanisme est activé thermiquement, et que la dureté maximale obtenue à une certaine température correspond à une dispersion critique des précipités, comprise entre la solution sursaturée (dispersion maximale des atomes de cuivre) et la ségrégation maximale (fortes concentrations localisées en cuivre).

De plus, la variation de la dureté au maximum s'explique par la différence de nature du précipité obtenu à diverses températures. Pour notre exemple, un revenu à basse température fera apparaître des zones de précipitation où le réseau cristallin sera déformé, mais non rompu : on les appelle précipités cohérents ou zones de Guinier-Preston. Il y en a deux sortes, appelées GP1 si la température est inférieure à 100 °C, et GP2 si l'on se situe vers 150 °C. A 250 °C, une phase quadratique, incohérente, apparaît, la phase θ', et pour 350 °C les rayons X montrent l'existence d'une autre phase Al_2Cu, la phase θ, quadratique, elle aussi incohérente. C'est pour la dispersion critique des zones GP2 que l'on observe la plus grande dureté.

Signalons toutefois qu'au cours d'un même revenu, des précipités différents peuvent apparaître successivement, car plus la zone de précipitation s'agrandit, plus les déformations du réseau sont importantes, et on observe alors la coalescence de précipités incohérents.

On peut citer, à titre d'exemple d'application, le traitement de « maturation » d'un alliage Duralumin (aluminium, 4 % de cuivre, et 1 % de magnésium) : après la trempe à 495 °C dans l'eau tiède, ce traitement dure 4 jours à 20 °C, 10 heures à 190 °C, et 4 heures à 200 °C. D'autres traitements thermiques d'un type voisin ont été normalisés.

Interactions dislocations-impuretés

Cas d'impuretés atomiques : vieillissement des aciers doux

Si des atomes étrangers au métal s'introduisent par insertion dans le réseau, le mouvement des dislocations est gêné. Les impuretés ont alors tendance à se rassembler dans la partie tendue du cœur des dislocations (atmosphère de Cottrel).

Il faut donc fournir une énergie supplémentaire pour déplacer les dislocations ainsi décorées, ce qui provoque l'augmentation de la dureté du métal.

C'est ce qui explique par exemple le vieillissement des aciers doux, où l'azote et le carbone fixent les dislocations, provoquant l'augmentation de la limite élastique et l'apparition d'un certain nombre d'oscillations sur la courbe de traction, et une fragilisation de l'acier.

Quand la contrainte augmente, les dislocations acquièrent suffisamment d'énergie pour se libérer brusquement du nuage de Cottrel, provoquant l'apparition du décrochement sur la courbe de traction.

▼ *A gauche, figure 14 : début du diagramme Al-Cu. A droite, figure 15 : variation de la dureté avec le temps de revenu* **(AS 10 G).**

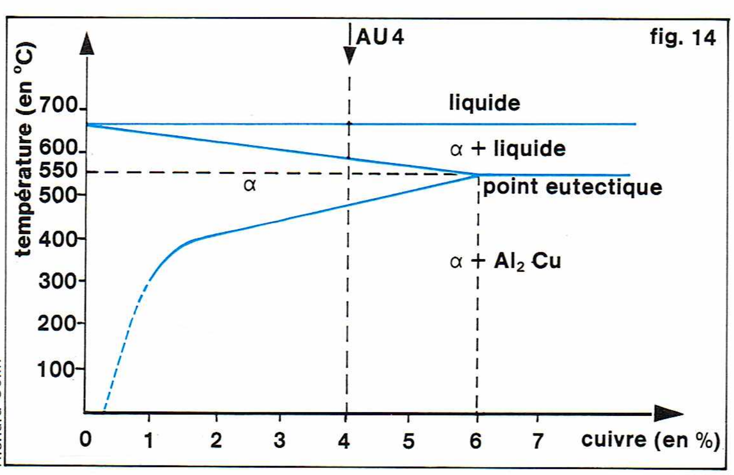

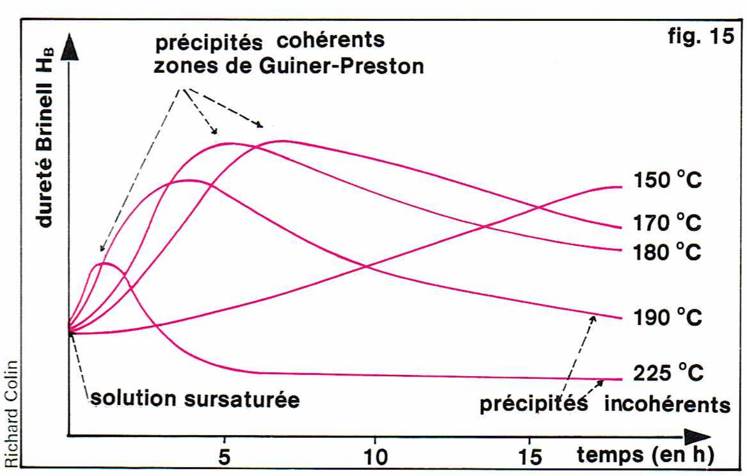

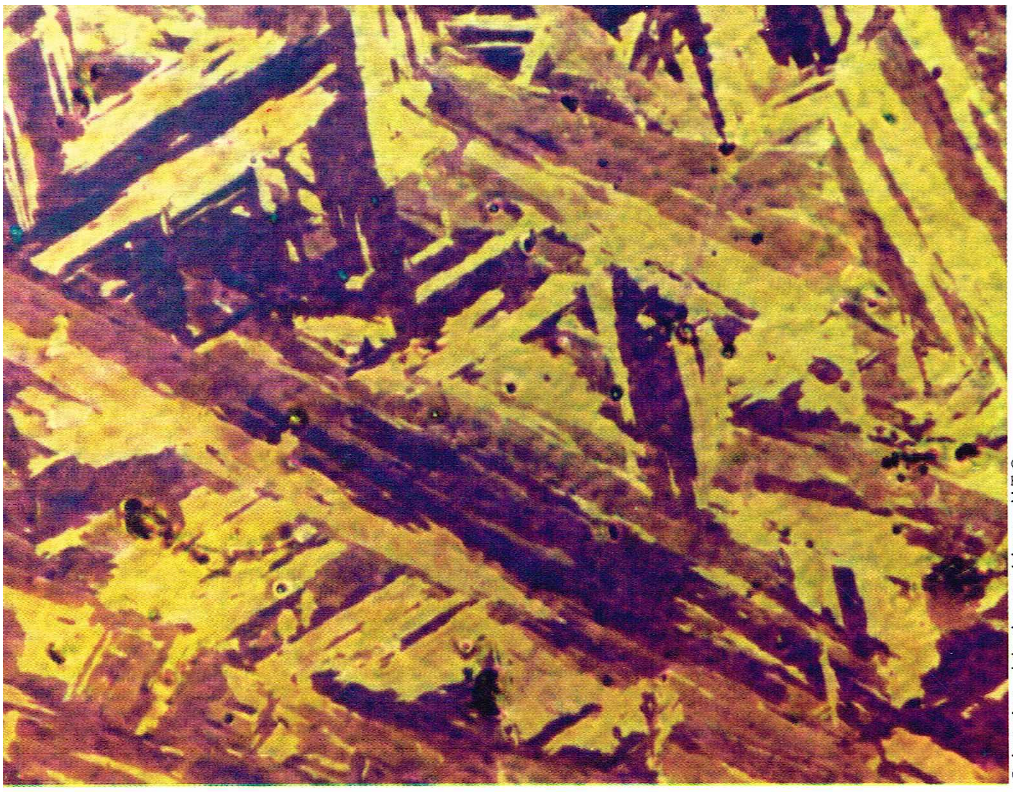

C. Lemaître - lab. des matériaux - U.T.C.

▲ ***Martensite de vieillissement.***

Cas de précipités : durcissement structural

Dans un alliage où se produit la précipitation, on constate une évolution de la dureté dans le temps. Ces changements sont également dus aux dislocations qui interagissent non plus avec les atomes interstitiels, mais avec les précipités qui se forment dans l'alliage.

On conçoit aisément qu'une dislocation se propageant dans l'alliage et rencontrant une zone de précipitation doit vaincre des forces supplémentaires, soit pour traverser des précipités cohérents, soit pour se frayer un passage entre des précipités incohérents. Dans ce dernier cas, plus les précipités sont rapprochés, plus la dislocation aura des difficultés à se frayer un chemin. Le passage d'une dislocation laissera alors derrière elle des boucles autour des précipités.

C'est donc l'énergie nécessaire pour vaincre les obstacles constitués par ces précipités qui provoque ce qu'on appelle le durcissement structural.

Un exemple important : les aciers Maraging

Les aciers Maraging contiennent très peu de carbone ; ce sont en fait des alliages du type ferronickel, dont une des compositions types est la suivante : nickel : 18 % ; cobalt : 8 % ; molybdène : 5 % ; titane : 0,5 % ; aluminium : 0,1 %.

La présence de nickel favorise, au cours du refroidissement, la transformation martensitique de l'alliage. Cette martensite est peu dure. La présence de molybdène, de titane et d'aluminium provoque l'apparition de précipités du nickel avec ces éléments qui, situés dans l'alliage, favorisent le durcissement structural.

La photographie représentant la martensite de vieillissement montre la structure d'un acier Maraging mise en évidence par formation d'un film mince interférentiel d'oxyde. La structure martensitique est clairement révélée, et l'on distingue nettement les précipités qui se sont formés dans l'alliage.

L'intérêt pratique de ces alliages est important, car on peut usiner les pièces lorsque l'alliage est peu dur, puis faire subir au matériau un léger revenu qui lui confère une bien meilleure résistance mécanique.

BIBLIOGRAPHIE

BENARD et coll., *Métallurgie générale*, Paris, Masson, 1969. - BENSIMON, *les Aciers*, Paris, Pyc Édition, 1971. - *les Matériaux métalliques*, Paris, Pyc Édition, 1970. - BOUJU et RENOUX, *Métallurgie*, Paris, Nathan, 1973. - CHAUSSIN C. et HILLY G., *Métallurgie*, Paris, Dunod, 1973. - GUILLET et POUPEAU, *Transformations à l'état solide des métaux et alliages métalliques*, Paris, Dunod, 1973. - QUEVRON et OUDINÉ, *Cours de métallurgie*, Paris, Eyrolles, 1972. - DE SY et VIDTS, *Métallurgie structurale*, Paris, Dunod.

LES TRAITEMENTS INDUSTRIELS DE SURFACE

Dans l'esprit du praticien, le terme « traitements de surface » couvre habituellement l'ensemble des procédés contribuant à la modification des propriétés superficielles d'une pièce pour lui conférer des qualités nouvelles mieux adaptées aux conditions d'utilisation.

Ce sont des techniques largement industrialisées, s'insérant logiquement dans une gamme de fabrication, et dont on est en droit d'attendre des résultats de plus en plus variés et performants.

Champ d'application

L'opportunité et le choix des traitements de surface trouvent généralement leur justification dans un ou plusieurs des besoins suivants :

● *Modification des propriétés mécaniques.* Un changement de structure ou de dureté dans les couches superficielles peut agir favorablement sur certaines propriétés mécaniques (notamment les caractéristiques en fatigue), ou sur les phénomènes de frottement, d'érosion, donc d'usure.

● *Amélioration de la résistance à la corrosion.* Le traitement sera alors choisi parmi les procédés augmentant l'inertie chimique de la pièce vis-à-vis des milieux agressifs rencontrés en utilisation.

● *Aide éventuelle aux opérations de transformation.* Certains traitements (mise en place d'un film mince à la fois ductile et relativement mou) facilitent les opérations de tréfilage et laminage. D'autres (élimination de la couche superficielle écrouie, soit par recuit thermique, soit par dissolution électrochimique) diminuent l'altération du métal à l'occasion de déformations plastiques particulièrement intenses et brutales (emboutissage, repoussage).

● *Création de propriétés spécifiques.* Des propriétés moins courantes, mais parfaitement caractérisées, peuvent être demandées aux surfaces dans certaines applications, généralement récentes, d'industries telles que l'optique, l'électrotechnique, l'électronique, la construction aéronautique, la technologie nucléaire ou spatiale, le magnétisme ou l'ultra-vide. La réflectance, la soudabilité, la résistance de contact, la semi-conduction, l'émissivité, la capacité de désorption ou de diffusion, la susceptibilité magnétique, l'émission thermo-ionique constituent alors quelques-unes des qualités recherchées.

● *Modification des caractéristiques géométriques.* Les méthodes traditionnelles d'usinage se heurtent de plus en plus fréquemment à des difficultés souvent insurmontables : inusinabilité plus ou moins totale des matériaux à caractéristiques mécaniques très élevées, dans leur état métallurgique final (grande dureté intrinsèque, fragilité, formation de criques, etc.) ; formes recherchées (notamment en défonçage prismatique) incompatibles avec les possibilités des machines-outils, précision inhabituelle en mécanique (composants en micro-électronique). Nombreux sont alors les problèmes résolus soit par usinage électrochimique ou par photolithographie (gravure chimique, ionique ou électronique).

● *Comportement thermique de la pièce.* Un revêtement bien choisi peut contribuer à augmenter sensiblement la température d'utilisation d'un matériau sensible au milieu agressif dans lequel il fonctionne (par exemple gaz chauds et oxydants). De même, un film bien déterminé, capable de diffuser dans le substrat, peut conduire à des composés (par exemple d'aluminium, de chrome, de silicium) particulièrement réfractaires.

Importance industrielle

Pendant très longtemps, l'application d'un traitement de surface à une pièce déterminée était considérée comme une simple opération de finition décorative qui, accessoirement, apportait quelques propriétés protectrices contre la corrosion. Les paramètres liés aux états de surface n'étaient définis que vaguement, et rarement mesurables avec une précision suffisante.

Laboratoires et ateliers disposent maintenant de moyens d'investigation permettant la connaissance rigoureuse de ces valeurs, et les traitements de surface

sont progressivement devenus des opérations parfaitement codifiées conduisant à des résultats facilement vérifiables et à des performances industriellement reproductibles. Ils sont de plus en plus appréciés par les utilisateurs en raison :

— de leur intérêt économique : prix de revient généralement faible par rapport au coût de la pièce traitée, large choix de procédés à propriétés très variées, remplacement d'un matériau coûteux par un produit plus courant revêtu en fin de gamme ;

— de nombreuses considérations techniques : propriétés spécifiques des surfaces traitées, possibilités nouvelles dans la modification des formes et de l'état géométrique des surfaces, protection des matériaux à caractéristiques mécaniques élevées employés dans les techniques avancées.

Principaux procédés utilisés

Parmi les méthodes connaissant un développement industriel suffisamment reconnu ou présentant des caractéristiques susceptibles d'intérêt, les plus utiles peuvent être arbitrairement classées de la façon suivante.

Méthodes procédant par enlèvement de matière

● *Procédés permettant l'élimination de la contamination superficielle :*

— techniques mécaniques de mise à vif : sablage, grenaillage, émerisage, microbillage ;

— techniques chimiques et électrochimiques : dégraissage et décapage.

● *Procédés permettant la modification de l'état géométrique :*

— techniques mécaniques de polissage à l'abrasif ;
— polissage chimique ;
— polissage électrolytique ;
— usinage électrochimique et par étincelage ;
— gravure chimique et électrochimique.

Les trois premiers procédés concernent surtout la surface des matériaux, les deux derniers agissant le plus souvent en profondeur.

● *Procédés divers.* L'usinage par ultrasons, par laser, par bombardement ionique ou électronique, le dégazage ionique sont également des techniques dignes d'intérêt.

Méthodes procédant par apport de matière

● *Procédés par voie humide :*

— passivation et anodisation ;
— dépôt chimique par déplacement ou contact ;
— dépôt chimique par réduction non catalytique ;
— dépôt chimique par réduction autocatalytique ;
— dépôt électrochimique (revêtements électrolytiques classiques, électroformage, électrophorèse).

● *Procédés par voie sèche :*

— projection au pistolet de métaux, alliages, cermets ;
— immersion en bains fondus (galvanisation à chaud) ;
— électrochimie en sels fondus ;
— dépôts physiques en phase gazeuse (évaporation, pulvérisation, dépôt ionique) ;
— dépôts chimiques en phase gazeuse (pyrolyse, réduction, déplacement) ;
— émaillage, vitrification, dépôts organiques ;
— dépôts thermochimiques (cémentation, nitruration ; calorisation, shérardisation, procédés Galmiche).

Remarque

Cette nomenclature, volontairement incomplète, fait apparaître une très large diversité de méthodes, disons plutôt une très grande variété de procédés, quand on sait, par exemple, que la simple électrocristallisation couvre l'obtention électrolytique de plus de vingt métaux, d'un nombre au moins égal d'alliages et d'autant de matériaux dispersés, sur une vingtaine de substrats différents. Elle laisse également deviner la perplexité du praticien appelé à choisir le procédé le plus adapté techniquement et économiquement à son problème. Nous contribuerons à la simplification de son choix en limitant notre analyse à la comparaison des méthodes industrielles les plus courantes, ce qui d'ailleurs nous est imposé par le cadre obligatoirement restreint du présent chapitre.

Traitements procédant par enlèvement de matière

Modification de l'état physico-chimique des surfaces

Contamination des surfaces

Après les opérations d'élaboration, d'usinage, de manutention et de stockage, les pièces sont recouvertes de divers contaminants : les uns de nature organique : graisses, huiles, etc. ; les autres étant des combinaisons d'origine minérale : oxydes, sulfures, carbonates, etc.

Tentative de définition de la propreté

L'élimination plus ou moins complète de ces contaminants conduit :

— à une surface physiquement propre lorsque les contaminants résiduels d'origine organique ne représentent plus que quelques couches adsorbées lacunaires, soit 10^{-5} à 10^{-7} kg · m^2 ;

— à une surface chimiquement propre lorsque la propreté physique précédemment caractérisée est complétée par la disparition la plus complète possible des contaminants d'origine minérale.

Enlèvement des contaminants graisseux

Procédés

● *Prédégraissage aux solvants.* Des quantités importantes de contaminants graisseux peuvent être dissoutes dans des solvants appropriés. Les produits industriels (ininflammables) habituellement utilisés à cet effet sont le trichloréthylène, le perchloréthylène, le trichloréthane et toute la gamme des Fréons. Après prédégraissage, la quantité de contaminants graisseux résiduels ne dépasse pas 10^{-3} kg · m^2.

● *Dégraissage en solution.* Des solutions alcalines combinant l'action détergente de divers produits actifs (soude, savons, carbonate, phosphate ou silicate de sodium, agents tensio-actifs et éventuellement séquestrants) à une concentration totale comprise entre 50 et 100 g/l sont capables, dans les conditions courantes d'emploi (quelques minutes d'immersion entre 60 et 90 °C), d'assurer l'élimination de ces contaminants organiques résiduels jusqu'à 10^{-7} kg · m^2.

● *Procédés complémentaires.* Une action mécanique (jet sous forte pression) ainsi que la présence d'un champ (électrique ou ultrasonore) augmentent l'efficacité du traitement et en abrègent la durée.

Technologie

● *Prédégraissage aux solvants.* Le traitement s'effectue habituellement en cuve, la pièce étant immergée dans un solvant froid ou de préférence porté à sa température d'ébullition. On peut encore provoquer la condensation de la vapeur du solvant sur la pièce froide ou partiellement refroidie après la première opération. Des résultats équivalents sont obtenus par pulvérisation sous forte pression d'un solvant ininflammable ou même d'un produit inflammable (kérosène) émulsifié dans une solution aqueuse.

● *Dégraissage en solution.* Pour les pièces dont la forme, l'encombrement ou le poids ne permettent pas la classique immersion en cuves, il est possible d'utiliser des techniques d'aspersion par jet ou de circulation du détergent liquide ou sous forme de mousses, ou encore par application de pâtes.

Évaluation de la contamination graisseuse résiduelle

Les *méthodes chimiques* (test au ferricyanure ou dépôt de cuivre par déplacement) et *gravimétriques* (pesée avant et après traitement) présentent une sensibilité médiocre (au mieux 10^{-4} kg · m^2).

Fondé sur la rupture du film d'eau, le test classique de *mouillabilité*, bien que très pratique, ne se révèle guère plus performant. En revanche, le même essai effectué avec de la vapeur d'eau ou une pulvérisation très fine d'eau pure additionnée d'un colorant conduit à une sensibilité remarquable, supérieure à 10^{-7} kg · m^2.

Les *traceurs* peuvent être également employés :

— test de fluorescence utilisant la propriété que

présentent les huiles minérales d'être fluorescentes en lumière ultraviolette ; l'emploi est facile, mais la sensibilité est limitée à 10^{-4} kg · m^2 ;

— traceurs radio-actifs : cette méthode très sensible (10^{-8} kg · m^2 pour des radio-éléments tels que ^{14}C) reste cependant un test de laboratoire.

Signalons que la plupart des problèmes industriels concernant la propreté des surfaces se contentent d'une contamination résiduelle voisine de 10^{-5} kg · m^2. Par conséquent, tout procédé d'évaluation dont la sensibilité dépasse 10^{-6} kg · m^2 peut être vivement recommandé.

Facteurs susceptibles de compromettre l'efficacité du dégraissage

Portés à haute température pendant le recuit des semi-produits métallurgiques, les résidus graisseux peuvent libérer, par cracking, des molécules hydrocarbonées très stables, fermement accrochées aux surfaces métalliques par d'importantes forces de chimisorption. Elles ne se prêtent pas à la saponification ou à l'émulsification et ne s'éliminent parfaitement qu'en détruisant l'épiderme métallique qu'elles recouvrent.

De même, certains additifs contenant du carbone, du soufre libre (fleur de soufre) ou combiné (bisulfure de molybdène) ou des produits siliconés sont utilisés, dans certains ateliers, pour faciliter la déformation plastique (emboutissage, repoussage, tréfilage, laminage) ou l'usinage (perçage, taraudage). Par la suite, ils ne peuvent être éliminés ni par dissolution dans un solvant, ni par émulsification dans une solution détergente, ni même par attaque acide.

Dans les procédés où une grande propreté est requise (revêtements métalliques, technique des basses pressions, applications nucléaires et aérospatiales), il convient donc d'observer strictement les impératifs suivants : dégraisser le plus parfaitement possible les semi-produits avant tout traitement thermique ; proscrire l'utilisation des lubrifiants contenant des additifs non éliminables par dégraissage classique. Les dépenses supplémentaires provoquées par ces mesures, certes contraignantes, se révèlent généralement, de très loin, inférieures aux frais occasionnés par la présence des additifs incriminés, générateurs de nombreux rebuts ou imposant une opération supplémentaire de transformation mécanique ou mieux électrochimique des couches superficielles du substrat.

Enlèvement des contaminants d'origine minérale. Mise à vif

A quelques rares exceptions près (métaux précieux), la surface des matériaux métalliques ne présente pas une inertie chimique suffisante vis-à-vis des milieux dans lesquels les produits sont élaborés, transformés, stockés et utilisés. Des réactions plus ou moins intenses se produisent avec l'oxygène, la vapeur d'eau et, de façon générale, avec les produits actifs en contact avec la pièce, provoquant la formation de combinaisons métalliques telles qu'oxydes, hydroxydes, carbonates, sulfures, etc. De nombreux procédés ne peuvent s'accommoder de la présence d'un tel film parasite, et il est très souvent indispensable d'éliminer la couche superficielle incriminée, sans altérer ou tout au moins sans modifier notablement les propriétés (géométriques, mécaniques ou autres) du substrat.

Procédés de mise à vif

Selon l'origine, l'épaisseur, la solidité et l'inertie chimique du film superficiel, selon également l'état micro-géométrique initial et final imposé ou recherché, divers procédés sont utilisables. Il est commode de les grouper en deux catégories principales : les méthodes opérant

▼ Tableau I : quelques gammes de décapage des métaux.

Tableau I

Quelques gammes de décapage des métaux

Groupes	Matériaux	Composition du bain	Température (en °C)	Temps moyen (en mn)	État final
Ferreux	Acier doux ou faiblement allié	ClH, 10 à 50 % en volume + inhibiteur SO_4H_2, 30 à 50 % en volume SO_4H_2, 10 à 20 % en volume + ClH, 5 à 10 % PO_4H_3, 10 à 20 % en volume	$20 < t < 40$ $30 < t < 60$ $t \leqslant 30$ $t \leqslant 80$	2 à 10 2 à 10 2 à 10 5 à 30	mat
	Inoxydable austénitique	NO_3H, 10 % + FH, 3 % (ou FNa, 5 %) en volume NO_3H, 20 % + PO_4H_3, 40 % + CH_3COOH, 40 %	$20 < t < 40$ $40 < t < 60$	20 à 30 30	mat brillant
	Inoxydable autre	SO_4H_2, 8 à 10 % + ClH, 2 à 4 % en volume	$50 < t < 60$	10 à 20	brillant
Cuivreux	Cuivre-laitons	SO_4H_2, 20 à 30 % + NO_3H, 10 % + CrO_3, 200 g/l	froid	1 à 2	mat
	Cupro-béryllium	SO_4H_2, 40 % + NO_3H, 20 % + ClH, 0,1 % SO_4H_2, 12 % + $Cr_2O_7Na_2$, 25 g/l SO_4H_2, 5 à 10 % + $(SO_4)\ Fe_2$, anhydre, 50 g/l SO_4H_2, 10 à 15 % + $Cr_2O_7Na_2$, 20 à 25 g/l	froid $\leqslant 70$ $60 < t < 70$ $\leqslant 60$	0,5 1 à 2 1 à 5 1 à 5	brillant mat satiné satiné
Légers	Aluminium et alliages	SO_4H_2, 10 à 15 % + FNa, 10 g/l PO_4H_3, 80 % + NO_3H, 5 % + CH_3COOH, 5 % + H_2O, 10 %	froid 85 à 95	1 à 5	mat brillant
Ultra-légers	Magnésium et alliages	CrO_3, 150 à 200 g/l	90 à 100	variable selon l'état initial du matériau	mat
	Nickel-alliages	H_2O, 60 à 70 % + NO_3H, 25 à 30 % + FH, 3 à 5 % SO_4H_2, 5 % + sel de seignette, 5 % ClH, 25 à 30 % + Cl_2Cu, 20 g/l	$65 < t < 75$ $70 < t < 80$ indifférente		satiné satiné satiné
	Titane	NO_3H, 5 % + FH, 2 à 3 %	indifférente		

par voie sèche et celles où la dissolution du film s'effectue par voie humide.

● *Procédés de mise à vif par voie sèche*

* *Action mécanique :*

— sablage, grenaillage, agissant par abrasion plus ou moins ménagée;

— microbillage, où l'abrasion est remplacée par l'impact élastique de microsphères de verre;

— meulage : élimination des couches superficielles par arrachement;

— polissage-avivage par abrasion du film extérieur et fluage épidermique du substrat.

Les pièces microbillées ou polies présentent un aspect satiné ou glacé susceptible de satisfaire la plupart des exigences en ce qui concerne la microgéométrie des surfaces.

* *Action thermique ou thermochimique*

— nettoyage à la flamme d'un chalumeau,

— recuit des semi-produits ou des pièces terminées,

— décapage en sels fondus.

Le premier procédé s'adresse surtout aux surfaces recouvertes de films organiques. Le recuit en atmosphère réductrice permet l'élimination des oxydes et de certaines autres combinaisons métalliques (surtout avec l'utilisation d'atmosphères halogénées). Le décapage en sels fondus est essentiellement employé par les sidérurgistes pour la mise à vif de semi-produits (laminés à chaud, tôles d'acier inoxydable ou de titane, etc.).

● *Procédés de mise à vif par voie humide*

* *Action mécanique :* sablage humide. Comme il s'effectue sans échauffement local de la pièce, il est évidemment mieux adapté que le sablage sec ou le grenaillage au traitement des échantillons délicats ou des matériaux se recouvrant rapidement à l'air d'une couche naturelle d'oxyde (alliages légers, titane).

* *Action chimique :* décapage chimique. C'est le procédé industriel le plus employé aussi bien pour la mise à vif des semi-produits (fil - barre, feuillard, tôle, profilés divers) que pour les pièces terminées. Les conditions opératoires les plus courantes sont résumées dans le *tableau* I.

* *Action électrochimique :* décapage électrochimique. La dissolution des combinaisons superficielles peut être nettement accélérée par un décapage électrolytique anodique ou cathodique où se combinent l'action du champ électrique et l'effet mécanique d'un fort dégagement gazeux.

Technologie en décapage chimique

Comme pour les opérations de dégraissage, les pièces de formes et dimensions courantes sont simplement immergées dans des cuves contenant la solution décapante. Les petits objets peuvent être traités en vrac dans des paniers ou des tonneaux rotatifs. Le matériel lourd et encombrant est décapé au jet ou, de préférence, par circulation ainsi que, dans certains cas, par des mousses ou par application de pâtes.

Évaluation de la contamination résiduelle

Actuellement, il n'existe aucune méthode simple utilisable industriellement (c'est-à-dire avec les moyens habituels d'un atelier de traitement) pour l'évaluation quantitative des faibles quantités de combinaisons métalliques encore présentes sur une pièce après mise à vif. On se contente, généralement, de mesurer la diminution de résistivité d'une eau très pure mise en contact pendant 10 à 30 minutes avec la pièce traitée, ce qui traduit la présence plus ou moins importante de contaminants divers solubles dans l'eau, y compris les produits de traitement insuffisamment éliminés par rinçage.

Modification de la géométrie des pièces

Dans le cadre restreint du présent chapitre, tous les procédés que nous avons énumérés plus haut ne peuvent être décrits. Il semble toutefois indispensable de souligner quelques aspects importants des trois techniques permettant l'enlèvement de matière en opérant par voie humide : le polissage électrolytique, l'usinage électrochimique, l'usinage photochimique. Ces méthodes, d'usage industriel relativement récent mais en forte croissance, procurent des résultats qui ne peuvent être

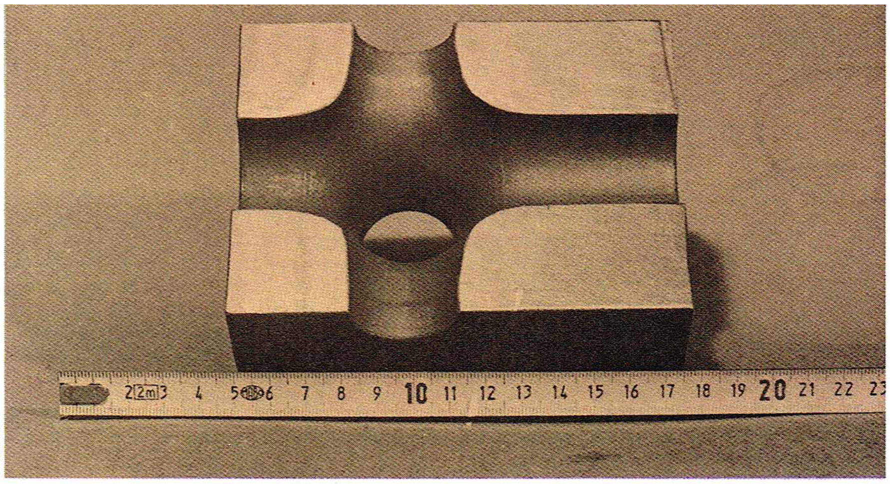

CERES

▲ *Usinage électrochimique ; rayonnage intérieur d'une pièce pour très hautes pressions obtenu par usinage électrochimique.*

obtenus par procédés mécaniques classiques (abrasion, enlèvement de copeaux, etc.).

Polissage électrolytique

Inventé vers 1930 par Pierre Jacquet et largement développé entre 1940 et 1960 à la suite de travaux dans lesquels la participation universitaire et industrielle française fut importante, le procédé, bien connu maintenant, présente un ensemble de qualités très intéressantes :

— possibilités relativement larges de modelage de l'état microgéométrique jusqu'à l'obtention d'une surface parfaitement lisse;

— nettoyage et stérilisation de la surface; l'élimination des couches chimisorbées permet, notamment en technique du vide, l'abaissement sensible du temps consacré au dégazage;

— passivation électrochimique de la surface traitée (donc augmentation de la résistance à la corrosion);

— absence totale de risque de fragilisation par l'hydrogène;

— diminution des contraintes superficielles;

— non-perturbation de la surface sous-jacente, alors que les opérations mécaniques classiques transforment brutalement, non seulement l'épiderme, mais également le derme des matériaux, sur des épaisseurs dépassant la centaine de μm.

Initialement utilisé comme méthode métallographique, puis comme traitement de référence dans la technique des très basses pressions, le polissage électrolytique a maintenant conquis de vastes marchés, aussi bien dans les industries dites « avancées » (aéronautique, semi-conducteurs) que dans le génie chimique et même certaines fabrications mécaniques de grande série (engrenages, construction automobile).

Usinage électrochimique

Proche parent du polissage électrolytique par le principe et la nature des phénomènes mis en jeu, mais radicalement différent par la valeur des paramètres opératoires (densité de courant, distance entre électrodes, choix et déplacement de l'électrolyte), l'usinage électrochimique est sensiblement plus récent que le polissage électrolytique et l'usinage par électro-érosion. Les premiers résultats pratiques semblent liés aux travaux de Lucien Gauthier dans des applications mises en œuvre industriellement vers 1956 (chambrage et ébavurage d'injecteurs pour moteurs Diesel).

Le procédé réunit toutes les qualités précédemment énumérées pour le polissage électrolytique. De plus, il permet d'obtenir, dans des conditions d'exploitation plus favorables que l'électro-érosion, d'importantes modifications de cotes et de formes. Sa tendance à arrondir les angles le destine tout naturellement aux applications où interviennent des problèmes d'aéro- ou d'hydrodynamique. Il est de plus en plus utilisé pour l'ébavurage, le perçage, le défonçage, la mise en forme finale, le polissage, le rayonnage, l'affûtage, le meulage et maintenant la rectification plane ou cylindrique.

Les spécialistes estiment, à juste titre semble-t-il, que, dans dix à quinze ans, une fraction notable du parc mondial des machines-outils (25 à 35 %) emploiera l'action électrolytique plutôt que l'arrachement de copeaux, l'abrasion ou l'usure. Il est souvent reproché à l'usinage électrochimique sa relative imprécision (de l'ordre de 0,05 mm pour la plupart des paramètres géométriques). Cet inconvénient est essentiellement lié à deux problèmes :

— le fait que le centrage et le déplacement de la partie électriquement active de l'outillage soient assurés

par un dispositif mécanique plus ou moins complexe limite *ipso facto* la précision du procédé à celle du système qui guide l'électrode ;

— les électrolytes à base de chlorure et nitrate de sodium, pratiquement utilisés pour presque toutes les opérations d'usinage sur divers matériaux, ne semblent pas spécialement convenir à des travaux de grande précision. Des recherches sont activement menées pour la mise au point d'électrolytes plus adaptés à des travaux spécifiques sur des matériaux déterminés.

Usinage photochimique

Réétudiée industriellement pendant la Dernière Guerre à partir de recettes artisanales et souvent anciennes, la dissolution chimique d'un matériau sur lequel la partie à graver a été tracée avec précision par voie photomécanique (photolithographie) s'applique maintenant à de nombreuses techniques :

— l'électronique, et notamment les semi-conducteurs ; des millions de composants actifs ou passifs, de micromodules, de contacts, etc., sont ainsi élaborés chaque jour ;

— l'électrotechnique légère : pièces minces et de forme complexe (en remplacement du découpage mécanique), circuits imprimés, codeurs, connexions, etc. ;

— l'aéronautique : allègement des voilures, usinage de certaines pièces.

Ce procédé est intéressant techniquement et économiquement ; il permet, en effet, l'obtention de pièces en matériaux divers (réfractaires, austénitiques, nickel et alliages, cuivre et alliages, métaux légers), dans des dimensions allant de la connexion miniaturisée à l'aile d'avion de transport, de toutes formes extérieures et intérieures, et cela avec une excellente précision lorsque l'épaisseur de l'objet est faible. Pour des épaisseurs inférieures à 100 μm, les différentes tolérances géométriques peuvent être assurées à 2, 3 ou 5 μm près, sur des distances de l'ordre de 10 cm. Des perçages de toutes formes peuvent être effectués, avec la seule restriction que leur diamètre minimal ne peut guère descendre au-dessous de l'épaisseur de la pièce.

Industriellement, des motifs extrêmement fins et complexes peuvent être reproduits à plusieurs milliers d'exemplaires par dm^2 sur des feuillards de 25 à 100 μm d'épaisseur.

Traitements procédant par apport de matière

Nous avons indiqué que de nombreuses méthodes permettent la création d'un film plus ou moins épais sur une pièce. Nous ne pouvons aborder ici que les techniques largement industrialisées, ainsi que les procédés dont les résultats actuels ou en cours de développement élargissent notablement les propriétés des traitements plus classiques. Nous nous limiterons également aux revêtements de métaux, alliages et combinaisons métalliques. Nous sommes donc conduits à examiner :

- dans les méthodes procédant par *voie humide :* les couches de passivation et d'anodisation ; les dépôts chimiques obtenus par réduction autocatalytique ; les revêtements électrolytiques ;
- dans les techniques procédant par *voie sèche :* les dépôts physiques en phase gazeuse (évaporation, pulvérisation, dépôt ionique) ; les dépôts chimiques en phase gazeuse (C V D).

Passivation. Anodisation

Après dégraissage et décapage, la réactivité chimique des surfaces métalliques est très élevée (ce qui d'ailleurs est indispensable pour assurer la bonne adhérence d'un revêtement éventuel). En revanche, le matériau ainsi activé se révèle particulièrement sensible à l'action des produits agressifs avec lesquels il va se trouver en contact. L'acier, le cuivre, les alliages ferreux et cuivreux se recouvrent de couches non protectrices d'oxydes, sulfures, carbonates ; les légers, les ultra-légers et le titane élaborent, en un temps très court, une couche naturelle d'oxyde, trop mince pour assurer une protection efficace.

Il convient donc de prévoir, selon les cas : une passivation chimique freinant l'attaque du métal sous-jacent, et la formation par anodisation d'une couche épaisse et homogène d'oxydes protecteurs.

Passivation

Quand on immerge une surface fraîchement décapée dans une solution peu concentrée de produits oxydants (chromates, phosphates, oxalates, etc.), elle se recouvre rapidement d'une couche mince (environ 1μm) de composés freinant à la fois l'attaque par corrosion et même la diffusion dans le métal des gaz adsorbés à l'interface. Cette technique s'applique à la plupart des matériaux métalliques courants. Toutefois, l'instabilité des couches au-dessus de 100 °C en exclut l'emploi dans un environnement chaud.

Pour les métaux ferreux habituels, des couches plus épaisses, possédant également des propriétés mécaniques intéressantes (bas coefficient de frottement), peuvent être obtenues par phosphatation.

Anodisation

Les métaux et alliages légers ou ultra-légers ainsi que le titane se prêtent à une opération électrochimique anodique particulière. Un choix judicieux de l'électrolyte et des conditions opératoires conduit à la formation d'un film pouvant atteindre et dépasser une épaisseur de quelques dizaines de μm, et présentant des propriétés très appréciées : constante diélectrique élevée (tension de claquage supérieure à 1 000 V) ; résistance excellente à certaines formes de corrosion ; dureté importante (voisine de 1 000 vickers pour certaines couches sur aluminium) ; aucune altération notable des cotes géométriques (et notamment pas de surépaisseur) ; possibilité de coloration dans la masse.

L'anodisation est un traitement aussi largement employé dans la construction aéronautique que dans les industries du bâtiment ou de l'automobile.

Dépôt chimique autocatalytique

Parmi les revêtements obtenus (sous divers noms commerciaux) par réduction autocatalytique contrôlée, le plus utilisé est le nickel, dont les propriétés mécaniques présentent un intérêt indéniable.

La réduction d'un sel de nickel par un hypophosphite est une réaction connue depuis fort longtemps, mais ce n'est qu'à la fin de la Dernière Guerre mondiale qu'un marché industriel important s'ouvrit au procédé, lorsque fut maîtrisée la réduction autocatalytique contrôlée.

Principales caractéristiques du dépôt

Obtenu à des vitesses de 0,3 à 0,5 μm par minute, le dépôt contient toujours une certaine quantité de phosphore (5 à 11 % selon le procédé et les conditions opératoires) ou de bore, lorsque les hypophosphites sont remplacés par des dérivés du bore. Un traitement thermique fait apparaître des couches cristallisées stratifiées mettant en évidence deux phases :

— une solution solide de phosphore dans le nickel ;

— un composé intermétallique Ni_3P dont les dimensions cristallines augmentent avec la température du recuit.

La température de fusion varie de 850 à 1 200 °C selon la teneur en phosphore, et les dépôts contenant plus de 8 % de phosphore ne sont pas magnétiques (*fig.* 1). Toutefois, leur perméabilité varie en fonction de la dureté et du traitement thermique. Lorsque de bonnes conditions opératoires sont respectées, l'épaisseur du dépôt est très régulière, même sur des pièces de forme complexe. En ce qui concerne la porosité, l'expérience montre qu'à épaisseur égale, le revêtement n'est ni plus ni moins poreux que le nickel électrolytique. La dureté est une caractéristique importante ; déjà élevée (450 à 650 vickers), elle peut être portée à 1 000 ou 1 100 vickers par chauffage à 400 °C pendant 40 minutes et refroidissement lent jusqu'à 200 °C.

D'ailleurs, le traitement thermique modifie profondément la plupart des propriétés de ce revêtement : recuit à 400 °C pendant 1 h en atmosphère inerte pour obtenir la dureté maximale ; recuit à 600 °C pendant 1 h 30 en atmosphère inerte : la dureté reste suffisante, et l'élasticité s'améliore ; la résistance à l'usure est maximale

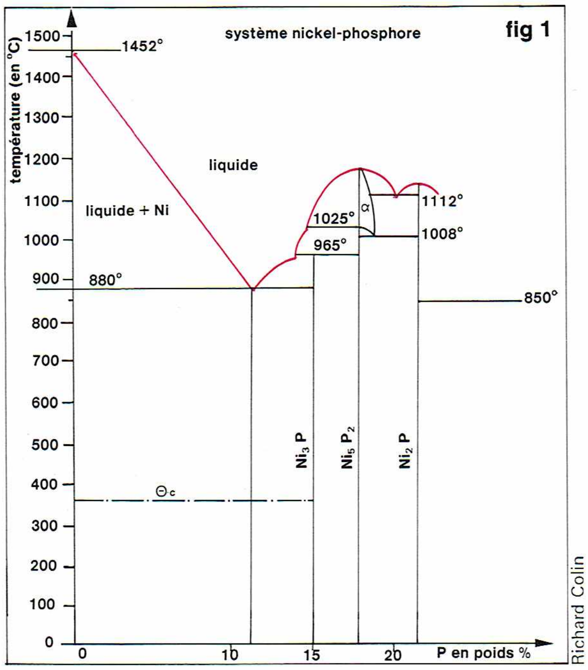

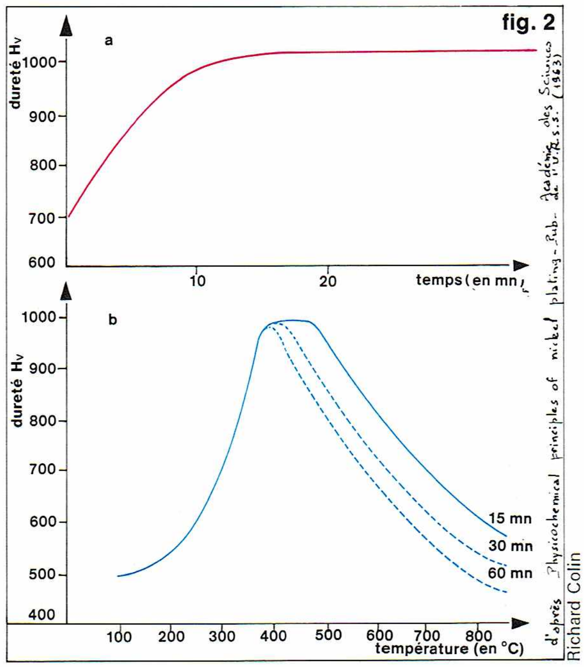

◀ *A gauche, figure 1 : diagramme d'analyse thermique du système nickel-phosphore (d'après Konstantinov). A droite, figure 2 : évolution de la dureté de Ni-P. en fonction de la température du traitement ; a, traitement à 400 °C (d'après Zusmanovich) ; b, en fonction de la température et du temps de traitement (d'après Van Royen).*

(*fig.* 2) ; recuit à 750 °C pendant 5 h en atmosphère inerte, puis refroidissement lent, pour assurer la meilleure tenue à la corrosion et la diminution des contraintes.

Remarque : pour un dépôt d'épaisseur courante (20 μm environ), non traité thermiquement, la plupart des propriétés mécaniques du *substrat* (résistance à la traction, élongation, compression transversale) ne sont pas altérées. On constate en revanche que le comportement en fatigue varie en fonction du traitement thermique, de la composition du substrat, du type de procédé de dépôt et de l'épaisseur du revêtement, ce qui est probablement lié à la perméabilité du dépôt vis-à-vis de l'hydrogène qui diffuse ensuite dans le substrat.

Dépôt électrolytique

Le principe, la mise en œuvre, les diverses possibilités et applications des revêtements électrolytiques sont des éléments trop connus pour que nous les abordions ici. Il est toutefois nécessaire d'examiner comment cette technique, très largement adoptée par la plupart des secteurs industriels, doit actuellement évoluer pour résoudre les *problèmes nouveaux posés par ses utilisateurs.*

Depuis plusieurs générations de praticiens et pour la quasi-totalité des travaux industriels, le *revêtement galvanique* s'effectue dans une série de cuves où les pièces sont immergées (en vrac dans un tonneau rotatif, ou individuellement par crochets et montages).

Ce procédé classique et rentable se révèle déficient et très coûteux lorsque l'on se trouve en présence d'un des cas suivants : pièces volumineuses ou pesantes, et de façon générale difficilement déplaçables ; recherche d'un dépôt sélectif parfaitement localisé ; nécessité d'une grande rapidité d'électrocristallisation.

Sachant, par ailleurs, que l'ensemble de la profession œuvrant dans le dépôt électrolytique a résolu de façon satisfaisante ses problèmes courants : maîtrise des procédés de préparation et revêtement, contrôle et pilotage automatiques des installations, rejet des effluents, etc., il convient d'examiner comment les recherches récemment menées apportent une solution plus ou moins complète aux préoccupations nouvelles des utilisateurs.

Augmentation de la vitesse d'électrocristallisation

Dans la plupart des ateliers industriels, la vitesse de croissance des électrodépôts de Ni, Cd, Zn, Sn, etc., est voisine de 1 μm/mn (les valeurs étant moins élevées pour les métaux précieux). En se rappelant que l'on obtenait déjà couramment 0,5 μm/mn il y a trente ou quarante ans, et mieux que 0,2 μm/mn à la fin du siècle dernier, on ne peut que regretter l'absence de progrès notables dans ce domaine.

Les électrochimistes savent que la densité maximale de courant cathodique (et par conséquent la vitesse d'électrocristallisation) est limitée par le phénomène de polarisation de concentration, correspondant à l'appauvrissement local de l'électrolyte (en cations métalliques) près des électrodes et se traduisant par la formation d'un dépôt fragile, voire pulvérulent, d'aspect brûlé. Retarder l'apparition de ce phénomène permet d'augmenter la densité cathodique limite et, à rendement « Faraday » égal, d'améliorer la vitesse de croissance du dépôt.

Des résultats relativement satisfaisants ont été obtenus en utilisant un ou plusieurs des palliatifs suivants : mise au point d'électrolytes concentrés, plus performants (fluoborates, sulfamates, etc.) ; modification des conditions électriques : inversion périodique du courant, superposition d'alternatif, signaux rectangulaires, addition d'un champ ultrasonore ; création d'un mouvement relatif entre la cathode et l'électrolyte (agitation du bain ou des pièces) ; renouvellement de la couche limite par frottement léger (galvanoplastie au tampon).

Mais les progrès les plus marquants furent récemment constatés en Suisse, par l'utilisation de courant pulsé à très haute fréquence ; aux États-Unis, en disloquant la couche limite au moyen d'abrasifs puissants ; en France, en renouvelant l'électrolyte par effet hydrodynamique. Cette dernière méthode, utilisant l'action hydraulique d'un jet d'électrolyte chargé ou non de particules solides, conduit à des résultats industriels à la fois originaux et spectaculaires.

L'électrolyse ne s'effectue pas dans une cuve, mais à l'intérieur d'une cellule où un déplacement relatif de 100 à 2 000 m/mn est créé entre l'électrolyte propulsé par

▼ *Atelier classique d'électrolyse ; dimensions moyennes.*

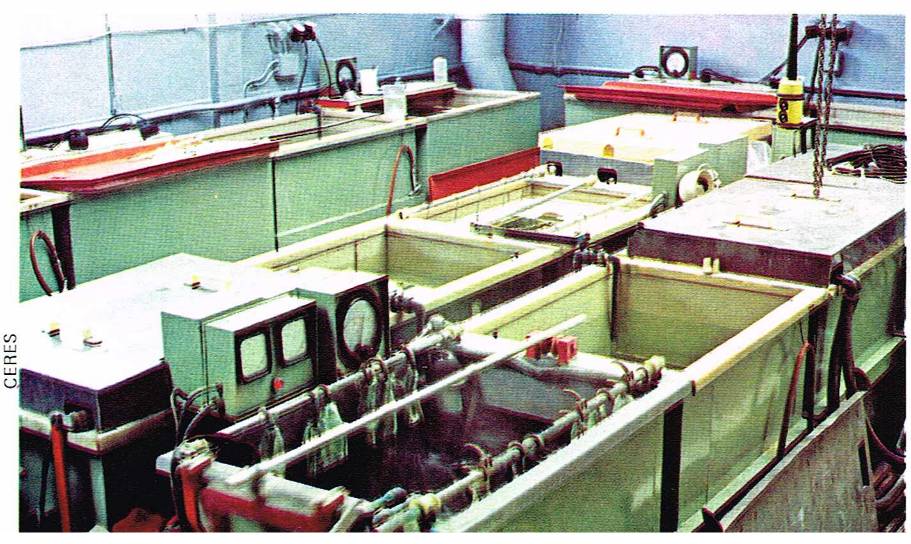

une pompe et la cathode fixe ou mobile, la distance entre les électrodes étant faible pour se trouver dans tous les cas en régime turbulent correspondant à un nombre de Reynolds élevé. Dans ce cas, la croissance du revêtement atteint, dans des conditions industrielles courantes, 50 à 60 m/mn, avec une densité cathodique pouvant dépasser 300 A/dm^2 (pour les électrodépôts habituels : Ni, Cu, Sn, Zn, Cr).

Dépôt localisé sur pièces de grandes dimensions

Les réalisateurs et utilisateurs de gros matériel convenant au génie chimique ou nucléaire ainsi qu'à la technique du vide souhaiteraient vivement, et cela dans l'avenir le plus proche, remplacer, dans toute la mesure du possible, les divers métaux ou alliages inoxydables, condamnés à devenir rares et coûteux, par de l'acier de construction revêtu. Ce matériau est non seulement plus économique, plus facile à usiner, mais présente très souvent des propriétés mécaniques plus intéressantes. L'acier plaqué, avant découpage, mise en forme et soudure, ne répond que partiellement à cette question. En pratique, le chaudronnier souhaiterait disposer, dans son atelier, d'un appareillage mobile permettant : la réparation localisée d'un dépôt, ou le revêtement d'un cordon de soudure ; le dépôt d'un matériau protecteur sur des surfaces de toutes dimensions et de diverses formes qu'il rencontre habituellement (viroles, fonds bombés, raccordements, brides, entretoises, etc.) ; si possible, le découpage, le perçage, le doucissage et le polissage (soudures notamment).

Le procédé français de traitements électrochimiques rapides en cellules apporte à ces problèmes un ensemble de solutions satisfaisantes. La *figure* 3 et la photo ci-dessous montrent, par exemple, les principaux éléments d'un équipement destiné au revêtement du plan de joint sur des brides de grand diamètre. L'appareil peut opérer en position indifférente (bride horizontale, verticale ou oblique, et même en position horizontale inversée, avec la pièce suspendue par la face opposée à la bride).

Dépôts sélectifs

Dans de nombreux cas, la présence d'un revêtement n'est indispensable que sur une zone bien délimitée d'une pièce. S'il s'agit de faibles séries et d'un revêtement peu coûteux, on se contente le plus souvent d'un dépôt sur l'ensemble de la pièce ou d'un masquage des parties à épargner, par des cires ou des films plastiques. En revanche, dans le cas des grandes séries et pour le dépôt de métaux nobles, il convient d'adapter les techniques de galvanoplastie pour ne revêtir que les parties utiles, à la vitesse la plus élevée possible.

Un exemple caractéristique est la dorure de différents composants électroniques pour en assurer la soudabilité, et pour lesquels la surface à revêtir représente souvent moins du dixième de la surface totale. Plusieurs techniques peuvent alors être mises en œuvre : l'électroplastie au tampon, ou le placage sélectif avec circulation d'électrolyte. Le premier procédé est presque toujours manuel et nécessite un renouvellement périodique de l'électrolyte absorbé dans le tampon. C'est pourquoi les machines actuellement en service pour la dorure en série de contacts électriques utilisent le second principe.

Si l'investissement fait pour de telles installations se justifie actuellement dans le cas des séries importantes et du dépôt de métaux précieux, il est prévisible que l'accroissement des coûts de nombreuses matières premières élargira bientôt le champ de leurs applications à des dépôts plus différenciés.

Revêtements en continu pour produits de grande longueur

De patients travaux, commencés bien avant la Dernière Guerre, ont déjà permis la mise au point de procédés et technologies concernant la préparation et le revêtement en continu sur fils, feuillards et tôles. C'est ainsi que la première installation industrielle pour la production du fer-blanc commença à travailler à Andernach (Allemagne) en 1934. Sa capacité était de 6 m/mn. Peu après s'implantèrent des ateliers similaires aux États-Unis. Actuellement, 80 à 90 usines produisent, dans le monde, douze millions de tonnes de fer-blanc par an, les vitesses de défilement atteignant ou dépassant 500 m/mn. De même, de nombreux ateliers sont consacrés au revêtement électrolytique de milliers de tonnes par mois de fils et feuillards. L'inconvénient majeur de ces ensembles est leur gigantisme (300 à 400 m de long pour le fer-blanc), car la rapidité de croissance du dépôt est insuffisante.

N'espérant pas un progrès spectaculaire pour ce paramètre important du procédé, les technologues ont concentré leurs efforts sur les dispositifs permettant d'immerger dans l'électrolyte la plus grande longueur possible du produit. Des procédés en festons dans une cuve haute (Autriche), en spirales allongées superposées (R. F. A.), en spirales à axe horizontal (États-Unis, France) conduisent effectivement à des installations plus compactes. Toutefois, chacun ne s'adresse qu'à une catégorie de produits, soit très souple lorsque de nombreux renvois sont nécessaires, soit rigide pour qu'une spirale régulière puisse se former et se déplacer.

Le procédé français mentionné plus haut, qui s'applique déjà aux dépôts localisés ou sélectifs, permet, aussi bien d'ailleurs pour les diverses opérations de préparation que pour le dépôt, de revêtir des produits de toutes dimensions et toutes caractéristiques mécaniques, avec une vitesse de croissance de l'ordre de 50 à 60 μm/mn. Les installations correspondantes sont évidemment très compactes (*fig.* 4), et leur simplicité de conception permet de faciliter considérablement les opérations de maintenance.

Des perfectionnements très récents permettent maintenant le dépôt en cellule sur feuillard ou divers profilés de pistes dont la nature, la largeur, le profil et l'écartement peuvent se conformer aux besoins de l'utilisateur.

Dépôts physiques en phase gazeuse

L'utilisation de techniques physiques pour obtenir des revêtements par voie sèche en passant par la phase gazeuse s'est industrialisée dans les quelques années précédant la Dernière Guerre. Dans l'état actuel de son développement, la *métallisation sous vide* permet de déposer sur des pièces, conductrices ou non, des couches minces ou relativement minces (quelques Å à quelques μm) de métaux, alliages ou composés métalliques.

▼ A droite, figure 3 : revêtement électrolytique de nickel sur plan de joint d'une bride de grand diamètre. A gauche, cellule de nickelage pour traiter la bride dessinée sur la figure 3.

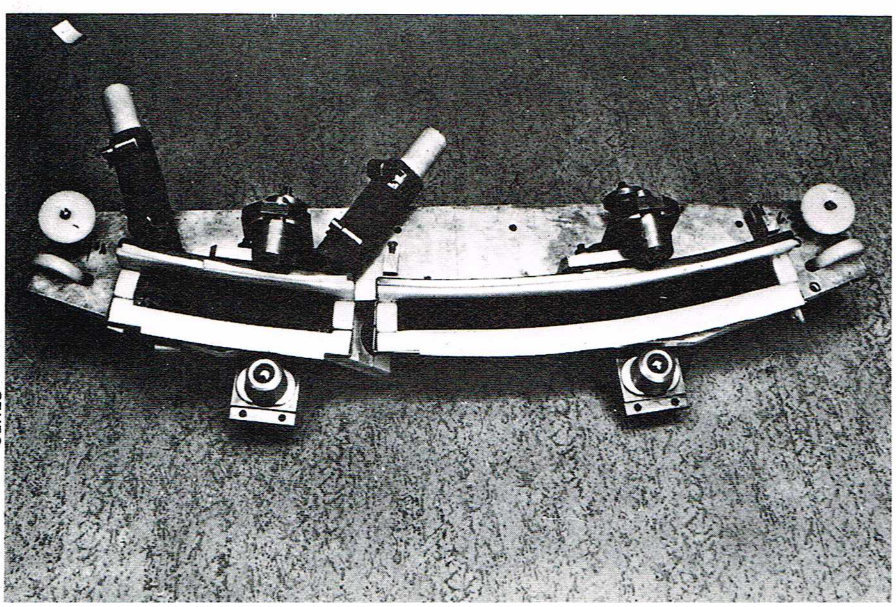

CERES

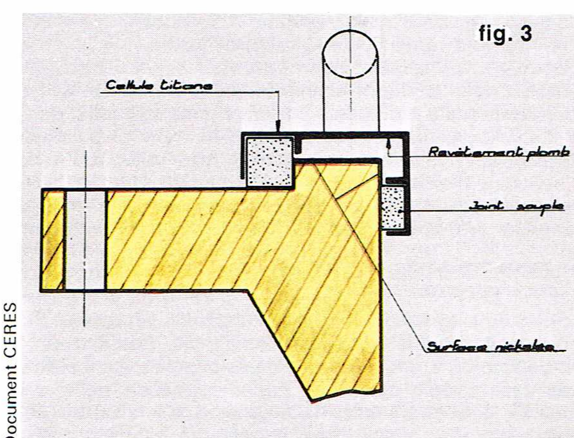

fig. 3

Document CERES

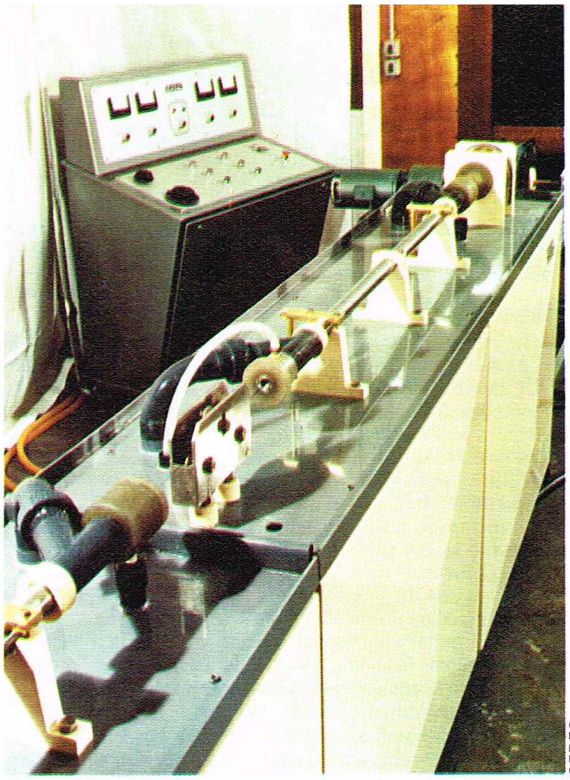

CERES

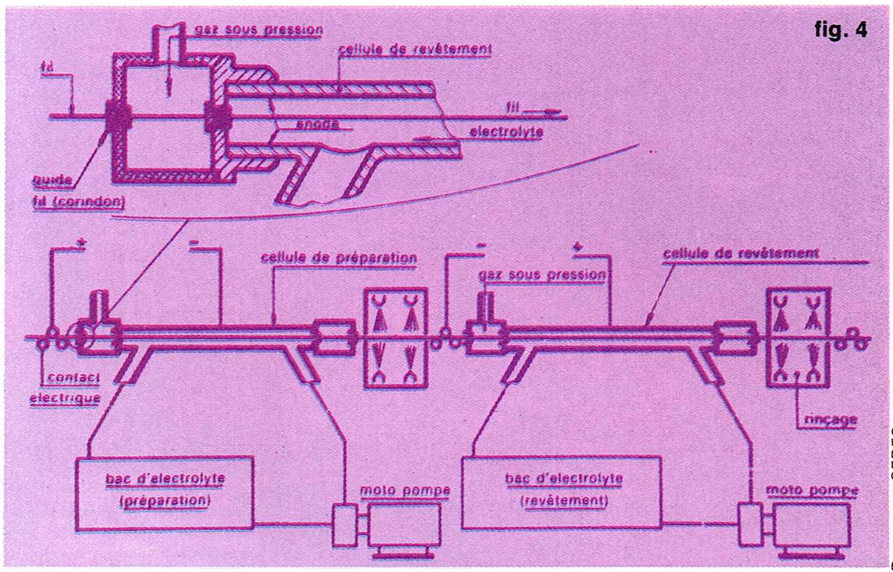

Document CERES

▲ *A gauche, installation de petite production pour traitement du fil en continu.*
A droite, figure 4 : schéma de fonctionnement de l'installation ci-contre.

Le revêtement s'élabore sur la surface d'une pièce placée dans un récipient étanche, où la pression des gaz résiduels est abaissée à une très faible valeur (1 à 10^{-7} Pa, soit environ 10^{-2} à 10^{-9} torr), nécessitée par le procédé. L'appareillage comprend donc le matériel permettant d'obtenir et de mesurer ces basses pressions, en plus du générateur de vapeurs métalliques.

Principe

Si de très petites particules (vaporisées ou émises sous forme atomique, puis ionisées) sont lancées dans un milieu gazeux raréfié, où la pression est suffisamment basse pour que les dimensions de l'enceinte restent faibles devant le libre parcours moyen des gaz résiduels et des corpuscules métalliques, ceux-ci suivront des trajectoires rectilignes appelées « rayons moléculaires ».

Si la source métallique est de petites dimensions, un écran interposé sur le trajet des particules portera une ombre à contours nets, et l'épaisseur du métal déposé sera inversement proportionnelle au carré de la distance séparant l'objet du point d'émission.

Mise en œuvre du procédé

Plusieurs techniques différentes peuvent être utilisées.

Pulvérisation cathodique (sputtering)

Si un métal est soumis à un bombardement intense, les atomes superficiels sont extraits, s'ionisent et se déposent sur une cible lorsque leur trajectoire, accélérée par un champ approprié, rencontre une surface, conductrice ou non.

De la configuration initiale, dite « diode » (*fig.* 5), le matériel a progressivement évolué vers la pulvérisation triode, puis tétrode, les champs électriques à haute tension étant émis sous des fréquences diverses (jusqu'aux radiofréquences), l'ionisation s'effectuant dans des gaz raréfiés de différentes natures, y compris des milieux réactifs (oxygène notamment).

Évaporation thermique

Opérant sous des pressions beaucoup plus basses qu'en pulvérisation (10^{-3} à 10^{-7} Pa au lieu de 10 à 10^{-1} Pa), le principe de l'évaporation sous vide est bien connu (*fig.* 6). L'émission est obtenue par distillation (évaporation ou sublimation) d'un matériau placé dans un creuset réfractaire. Le chauffage est fréquemment assuré par effet Joule, mais le bombardement au moyen d'un canon à électrons est de plus en plus employé. La masse du produit évaporé est donnée (au rendement près) par la formule de Langmuir :

$$m = 0{,}44\ p \sqrt{\frac{M}{T}}$$

où m s'exprime en $kgm^{-2}s^{-1}$, T en °K, p (tension de vapeur du produit) en pascals; M est la masse molaire du produit. Le calcul de la quantité de métal, et par conséquent de l'épaisseur du film déposé, est donc facile, en tenant compte du fait que l'épaisseur est uniforme si la surface à recouvrir est tangente à une sphère ayant la source pour centre.

Dépôt ionique

Parmi les améliorations apportées aux techniques initiales de métallisation sous vide, par addition de champs électriques ou magnétiques divers, formation de plasma, etc., le procédé qui accède actuellement à un développement industriel prometteur et concerne des applications de plus en plus nombreuses, est le dépôt ionique *(ion plating)*.

Apparu il y a une douzaine d'années, le dépôt ionique combine les avantages de l'évaporation (rapidité de formation des couches) et de la pulvérisation (adhérence du dépôt).

La source et le substrat à revêtir sont placés dans une même atmosphère de gaz raréfié (environ 10^{-2} torr), et le substrat est fortement polarisé négativement de manière à former une décharge dans l'espace compris entre la pièce et la source. On évapore le produit (placé à la source) par chauffage, ou plus souvent par bombardement électronique. En passant dans le plasma, les atomes évaporés se chargent et sont attirés vers le substrat où ils arrivent avec des énergies suffisantes pour s'y implanter, aussi bien sur les parties en vue directe de la source que sur les surfaces cachées.

Pour déposer des métaux, l'atmosphère utilisée est généralement un gaz neutre (argon), mais son rempla-

▼ *A gauche, figure 5 : schéma d'une installation de pulvérisation diode (cloche à métalliser par pulvérisation cathodique).*
A droite, figure 6 : schéma d'une installation de métallisation sous vide par évaporation thermique.

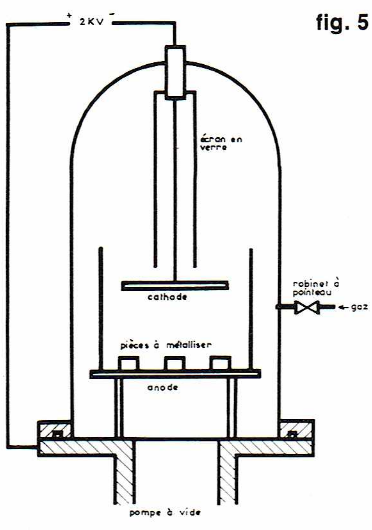

cloche à métalliser par pulvérisation cathodique

Document CERES

cloche à métalliser par évaporation

fig. 6

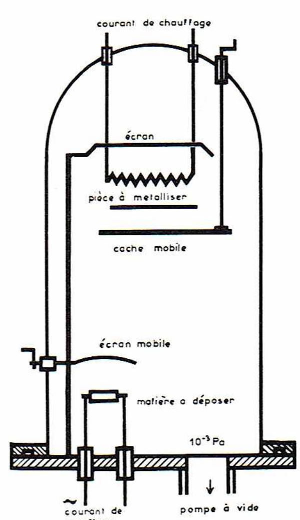

Document CERES

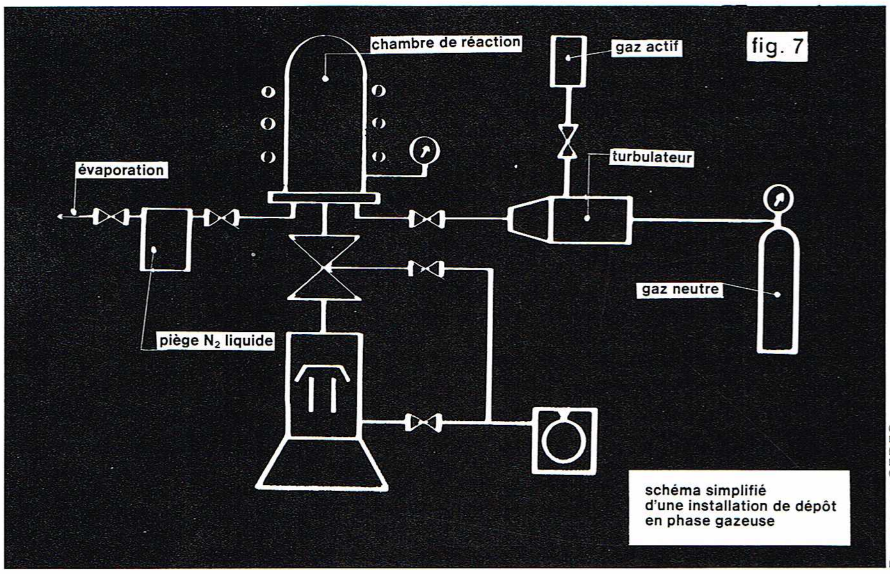

Document CERES

▲ *Figure 7 : schéma d'une installation de dépôts en phase gazeuse (CVD).*

cement partiel ou total par un gaz actif (oxygène) permet l'obtention des composés correspondants. Ces caractéristiques de vitesse de formation, adhérence, pouvoir de répartition et possibilité de déposition réactive permettent d'envisager de nombreuses applications, notamment la mise en place de composés durs, de réfractaires, de revêtements anticorrosion, de couches de frottement, etc.

Technologie des installations

Tous les éléments relèvent de la technique du vide classique :

— groupes de pompage primaire, moléculaire ou ultra-vide permettant d'obtenir dans des conditions industrielles des pressions de 10^{-1} Pa (pulvérisation) à 10^{-7} Pa (évaporation en ultra-vide) ;

— jauges correspondantes pour contrôle de ces pressions ;

— cloche étanche contenant à la fois les pièces à revêtir et les sources émettrices ;

— accessoires, passages tournants étanches, chauffage des sources, etc.

Bref aperçu des principales applications

Elles s'étendent à des domaines très divers :

● *techniques avancées :* réalisation des microcircuits, industrie des semi-conducteurs, cellules solaires, revêtements thermoptiques pour satellites ;

● *optique :* couches antireflet, miroirs, filtres absorbants, projecteurs, lunetterie, graduation des appareils de haute précision ;

● *industries mécaniques :* élaboration de couches de frottement ;

● *électrotechnique :* réalisation de condensateurs, résistances de précision, redresseurs de courant ;

● *décoration :* vitres semi-transparentes, accessoires de bijouterie de fantaisie ou de parfumerie, marques publicitaires sur automobiles ou matériel électroménager.

Dépôts chimiques en phase gazeuse (CVD)

Faisant appel à des équilibres chimiques tels que réduction et dissociation, le procédé récent de dépôt chimique en phase vapeur se révèle intéressant, à la fois par les propriétés nouvelles des couches réalisées et par la complémentarité remarquable des résultats avec ceux présentés par les techniques traditionnelles.

Il permet l'obtention de revêtements très divers :

— de la plupart des métaux, y compris les réfractaires et les légers ;

— de nombreux alliages binaires et ternaires de composition prédéterminée ;

— de métalloïdes (C et Si en particulier) ;

— de composés métalliques : oxydes, carbures, nitrures, sulfures, borures, siliciures, etc.

Il se prête à une éventuelle diffusion intermétallique avec le substrat, soit pendant l'élaboration des couches, soit après l'opération.

Principe

Un composé volatil du matériau à déposer est mis en contact avec la pièce à revêtir, chauffée à la température pour laquelle la vapeur est réduite ou décomposée au voisinage du substrat, réalisant ainsi un film adhérent sur cette surface.

Le produit à déposer doit donc former un composé volatil susceptible de se dissocier ou d'être réduit à des températures inférieures au point de fusion tant du revêtement que du substrat, mais se révélant toutefois suffisamment stable pour ne pas réagir avant d'atteindre la surface à recouvrir.

Dans le cas où le métal de la pièce traitée participe à la réaction, par exemple comme réducteur du gaz introduit, et où le matériau déposé diffuse dans le substrat, en limitant ainsi la cinétique de la réaction, le procédé pourra être considéré comme une *cémentation* par le chrome, l'aluminium, le tantale, etc. (procédés Galmiche-ONERA). Si le substrat ne participe pas chimiquement à la réaction, il peut recevoir n'importe quel dépôt, dans la mesure, bien entendu, où il supporte sans dommage les températures nécessaires à la réaction de dépôt.

Mise en œuvre du procédé

Une installation correspondante comprend schématiquement (*fig.* 7) :

— un réacteur de dépôt ;

— un groupe de pompage abaissant initialement la pression dans le réacteur à des valeurs qui permettent ensuite d'éviter les interactions entre l'oxygène de l'air et les gaz de procédé ou les parois de la pièce ;

— un bâti de purification, mélange et introduction des gaz ;

— un bâti d'extraction des produits de réaction ;

— un système d'analyse instantanée des gaz contenus dans le réacteur (chromatographie en phase gazeuse, analyseur quadripolaire ou cyclotron simplifié).

Applications actuelles et potentielles

Le CVD est de plus en plus utilisé dans des domaines très divers :

● *techniques avancées :* élaboration ou protection de matériaux composites, barrières thermiques pour rentrée dans l'atmosphère des satellites, dépôt et dopage de semi-conducteurs ;

● *génie chimique :* protection de circuits vis-à-vis d'agents très agressifs ou très chauds ;

● *mécanique :* plaquettes d'outils de coupe revêtues de carbures, nitrures, borures, oxydes ou siliciures.

Ces techniques, dont l'implantation industrielle est encore récente, sont appelées à connaître un essor important dans tous les secteurs « de pointe », où la demande en matériaux nouveaux et propriétés de haut niveau est pressante, et où le prix de revient n'est pas le facteur primordial.

Les recherches menées actuellement pour diminuer les températures de procédé en utilisant des matières premières nouvelles vont dans le sens des préoccupations techniques et économiques des utilisateurs.

Les résultats déjà constatés permettent d'envisager bientôt des applications importantes dans d'autres domaines que celui des techniques très performantes, sans toutefois laisser espérer, à moyen terme, une possibilité de concurrence véritable avec les techniques traditionnelles de revêtement, dans les secteurs où ces procédés sont déjà fermement implantés.

Problèmes industriels communs aux divers traitements

Le choix et la mise en œuvre du traitement le mieux adapté à un problème déterminé impliquent évidemment la comparaison entre les possibilités de chacune des méthodes en présence et, pour chaque procédé, la connaissance des conditions optimales de travail.

Nous ne pourrons aborder ici que quelques aspects

significatifs de ce volumineux problème en examinant successivement :

— l'influence, sur la qualité du traitement, de la nature et de la préparation du substrat ;

— les performances et limitations des principaux procédés de traitement ;

— les défauts majeurs susceptibles d'affecter les propriétés mécaniques des couches.

La comparaison cantonnée au domaine des revêtements métalliques ne portera que sur les procédés les plus fréquemment utilisés (dépôts chimiques et électrochimiques par voie humide, métallisation sous vide) ou dont l'industrialisation à court terme se précise (CVD).

Influence du substrat sur la qualité du traitement

Nature du substrat

Lorsqu'un type de matériau est imposé *a priori* en tant que revêtement, le choix des procédés d'application sera d'abord déterminé par la nature du substrat, et notamment par un ou plusieurs des aspects suivants :

— conductibilité électrique ;

— place dans la classification électrochimique et dans les séries thermodynamiques ;

— porosité ou homogénéité structurale ;

— propriétés physiques (par exemple, coefficient de dilatation) ;

— propriétés mécaniques et état métallurgique (dureté, contraintes, état recuit, écroui, trempé, etc.).

On sait en effet :

- qu'il est impossible d'obtenir l'électrocristallisation en phase aqueuse d'un matériau très électronégatif (Al-Mg) ;
- que le dépôt galvanique sur pièce isolante ne peut s'effectuer qu'après mise en place d'une première couche conductrice ;
- que les alliages légers, le titane, les aciers inoxydables et les réfractaires (W-Mo-Ta) nécessitent une préparation spéciale conférant un état actif à la surface, après mise à vif ;
- que la possibilité de dépôt chimique en phase gazeuse d'un matériau sur un substrat participant à la réaction n'est réalisable que si les natures respectives de donneur, d'accepteur ou d'amphotère des deux matériaux correspondent aux règles de la classification thermodynamique ;
- que les substrats poreux ne peuvent être métallisés sous vide par suite du dégazage important qu'ils provoquent (par dépôt en voie humide, le danger se situe au niveau des rétentions de liquide dans les porosités) ;
- qu'un revêtement épais ne sera pas adhérent sur un substrat dont le coefficient de dilatation linéaire est très différent si l'ensemble est appelé à subir des cycles thermiques ;
- que la possibilité de diffusion mutuelle d'un revêtement et d'un substrat, avec par exemple formation d'une solution solide, améliore l'adhérence du dépôt et souvent ses propriétés protectrices (par contre, la formation de composés intermétalliques fragiles diminue les propriétés mécaniques de l'ensemble) ;
- qu'un revêtement dur, même peu fragile, ne présente pas une grande utilité si le substrat est beaucoup plus mou et se déforme plastiquement.

Préparation du substrat

Avant traitement, il convient de choisir (ou modifier si besoin est) plusieurs caractéristiques de la surface et même de l'intérieur du substrat ;

- *l'état géométrique de surface*, le revêtement amplifiant fréquemment (et de toute façon n'annulant jamais) les irrégularités ; les angles vifs, notamment, constituent toujours un point faible, et il est indispensable de les éliminer ;
- *l'état physico-chimique de surface :* on conçoit facilement que la présence, même à l'état de traces, d'un contaminant graisseux résiduel, compromet gravement l'adhérence d'un dépôt. De même, l'existence d'une hétérogénéité structurale (ou parasite) en surface provoque la formation de nodules fragiles.

Un revêtement construit sur une surface très écrouie et soumise à des contraintes triaxiales ne peut posséder les qualités que ses propriétés intrinsèques laisseraient prévoir. En revanche, l'épitaxie se révèle généralement favorable. Il est prévisible que le phénomène ne peut apparaître que si plusieurs conditions sont simultanément remplies, et notamment si les paramètres réticulaires du substrat et du revêtement sont suffisamment voisins (différence inférieure à 15 %) et si la structure ordonnée du substrat est mise à nu par une préparation appropriée.

Performances et limitations des procédés de dépôt

Principales performances techniques et données économiques

(voir *tableau* II et remarques correspondantes).

Limitations des procédés

Électrocristallisation

On connaît déjà une importante limitation de principe : impossibilité de déposer en solution aqueuse les métaux particulièrement électronégatifs (Al - Mg). On sait également que le revêtement sur matériaux électriquement isolants ne peut s'effectuer que par l'intermédiaire d'opérations généralement complexes et n'assurant pas toujours une adhérence suffisante pour les besoins des mécaniciens.

Le procédé se prête au dépôt d'alliages, dont certains sont très employés : laiton ou bronze électrolytiques, étain-plomb, étain-nickel, alliages d'or ou d'argent. La reproductibilité des teneurs en certains éléments pose toutefois certains problèmes.

Par électrocristallisation, on n'a pas encore obtenu des couches de véritables composés chimiques prédéterminés, mais des dispersions *(cermets)* sont produites sans difficulté. Le pouvoir de répartition peut être moyen (Au, Ag, Cu), faible (Cd, Sn, Zn, Pb, Ni) ou très faible (Cr), et l'épaisseur locale des couches varie selon la forme des surfaces. Il est donc souvent indispensable, pour obtenir des revêtements d'épaisseur sensiblement uniforme, de concevoir et utiliser des outillages spéciaux capables d'unifier la densité de courant en tout point de la pièce.

Nickelage chimique autocatalytique

La première limitation des procédés opérant par réduction autocatalytique contrôlée est qu'ils ne permettent pas le dépôt de nombreux matériaux. En plus du nickel (contenant également des composés du phosphore ou du bore) et à une moindre échelle du cobalt, l'industrie utilise aussi l'or qui trouve des applications relativement importantes dans les semi-conducteurs, lorsque les deux qualités maîtresses du procédé (grand pouvoir de répartition, absence de contacts électriques) jouent en sa faveur.

La faible vitesse de dépôt (paramètre qui ne semble pas très perfectible) et la difficulté de principe pour revêtir certains substrats métalliques constituent également deux limitations à l'extension des applications.

Pour les utilisations mécaniques, le choix entre les divers traitements thermiques que nous avons indiqués permet d'adapter certaines propriétés (dureté, coefficient de frottement) aux problèmes posés. Toutefois, ces opérations, en plus de leur coût relativement élevé, posent des problèmes lorsque l'état métallurgique de certains matériaux risque d'être modifié par le traitement thermique.

Métallisation sous vide

Une première limitation concerne les dépôts d'alliages. En évaporation, par exemple, il sera toujours difficile d'obtenir de façon reproductible des alliages dont les constituants présentent des caractéristiques très éloignées en ce qui concerne la tension de vapeur à une température donnée. La vitesse du dépôt est relativement faible, et l'obtention de couches dépassant une dizaine de µm en épaisseur est rarement une opération de caractère industriel. De plus, la structure de ces films évolue fréquemment avec le temps, et leur adhérence est rarement suffisante lorsque des efforts mécaniques sont prévus. De toute

▼ *Tableau II : principales performances techniques de différents procédés de dépôt métallique ; remarques :*
— Épaisseur moyenne : ***épaisseur obtenue pendant la durée d'un cycle industriel moyen et correspondant à un revêtement pour utilisation normale.***
— Vitesse moyenne de dépôt : ***obtenue avec rendement optimal.***
— Durée de cycle : ***comprend non seulement le dépôt, mais également les opérations préliminaires (mise sous vide par exemple).***
— Surface moyenne des charges : ***valables pour appareillage industriel de bonne taille courante.***
— Prix du métal : ***coût relatif de la matière première usée au cours du traitement, par rapport au prix du matériau sous forme métallurgique habituelle.***

façon, l'adhérence des couches ne peut soutenir la comparaison avec celle que l'on constate dans les dépôts galvaniques. Elle est toutefois meilleure en pulvérisation et en dépôt ionique.

Une autre limitation importante réside dans le fait que le procédé ne peut s'accommoder ni techniquement ni économiquement de substrats poreux ou impurs qui résorbent des quantités importantes de gaz.

Dépôt chimique en phase gazeuse

Le remarquable pouvoir de répartition présenté par le CVD devient paradoxalement un sérieux handicap lorsque l'on recherche une certaine localisation du dépôt.

Par ailleurs, pour les revêtements obtenus par réduction, et même par pyrolyse dans certains cas, la température élevée imposée au substrat élimine *a priori* un certain nombre de matériaux.

Du point de vue de la mise en œuvre du procédé, une difficulté importante réside dans l'obligation, pour obtenir des couches régulières, de chauffer de façon homogène toutes les surfaces à traiter.

Dans l'état actuel de la technique, il faut reconnaître également que l'extrapolation des résultats entre l'échantillon et la pièce en vraie grandeur impose généralement une laborieuse mise au point.

Sur le plan économique, la plupart des matières premières utilisées (organométalliques notamment) sont encore très coûteuses. Enfin, certains produits nécessitent d'importantes précautions opératoires, compte tenu de leur agressivité (halogénures) ou de leur toxicité (carbonyles). Ils doivent également être transformés avant rejet.

Propriétés des revêtements

Propriétés structurales

Pureté

On sait qu'en électrocristallisation, la pureté du dépôt est essentiellement liée à la contamination du bain, tant par les produits qu'il contient que par la dissolution des anodes, la dégradation des matières organiques employées comme additifs, la pollution atmosphérique et accidentelle. Tous les praticiens connaissent ces difficultés et les précautions draconiennes qu'ils doivent mettre en œuvre pour que les revêtements obtenus restent relativement purs et présentent ainsi les qualités recherchées. Le problème est à peu près semblable pour le nickelage chimique autocatalytique. Par contre, la métallisation sous vide, surtout lorsque la pression est inférieure à 10^{-4} à 10^{-5} Pa (10^{-6} à 10^{-7} torr) et lorsque l'on utilise le bombardement électronique pour éliminer la pollution due au creuset, assure une très grande pureté des couches, aussi bien en évaporation qu'en pulvérisation.

Dans le CVD, la pureté des revêtements obtenus est en principe très élevée. Elle peut cependant être altérée : par les gaz utilisés (gaz actif et gaz porteur) qui doivent être très soigneusement purifiés et par la réaction elle-même : par exemple, la dissociation du nickel carbonyle libère de l'oxyde de carbone. Si ce gaz n'est pas rapidement évacué, il se dissocie lui-même partiellement au contact de la pièce chauffée, provoquant ainsi un dépôt de carbone pulvérulent.

Porosité

Les revêtements obtenus par voie humide sont toujours affectés par la présence de porosités congénitales dont

Tableau II

Principales performances techniques des différents procédés de dépôts métalliques

Principales données	Électroplastie	Nickel chimique	Métallisation	CVD
Gamme de matériaux déposables M = métaux A = alliages C = combinaisons métalliques	M + A	M (Ni + P)	M + A + C	M + A + C
Substrats faciles à revêtir	Fe - Cu	Fe - Ni - Al - Au	Verre, plastique	tous (sauf température)
Substrats difficiles à revêtir	Inox	Cu		
Substrats impossibles à revêtir			poreux	
Adhérence habituelle	bonne	bonne	faible (sauf pulvérisation et dépôt ionique)	excellente
Épaisseur moyenne	10 à 50 μm	20 à 50 μm	0,1 à 2 μm	10 à 200 μm
Épaisseur minimale	0,5 à 1 μm	1 μm	quelques Å	1 μm
Épaisseur maximale	# cm	# 150 μm	quelques μm	cm
Pouvoir de répartition	faible à moyen	excellent	très faible	remarquable
Vitesse moyenne de dépôt (en μm/mn)	0,5 à 1,5	0,3 à 0,6	0,1	0,1 à 50
Vitesse maximale de dépôt (en μm/mn)	50 à 100 (DHC)	# 1	1 à 2	100 à 200
Température normale du substrat (en °C)	$20 < t \leqslant 100$	$90 < t < 100$	$20 < t < 150$	$100 < t < 1\,500$
Durée du cycle moyen de traitement (en h)	0,1 à 0,5	0,5 à 1	0,3 à 0,6	0,5 à 2
Surface moyenne des pièces traitées par charge (en m^2)	⩽ 1 à 5	⩽ 1 à 5	$0{,}1 < S < 1$	$0{,}1 < S < 1$
Prix du métal (par rapport au prix métallurgique)	voisin	élevé	élevé	très élevé
Coût relatif d'une charge	industriellement normal	un peu plus élevé	élevé (sauf séries importantes)	très élevé
Investissement initial	normal	normal	élevé	très élevé
Problèmes d'écologie	cyanures-acides chromates-vapeurs	rejet de liquides et de gaz	nul	rejet de gaz, toxicité des produits

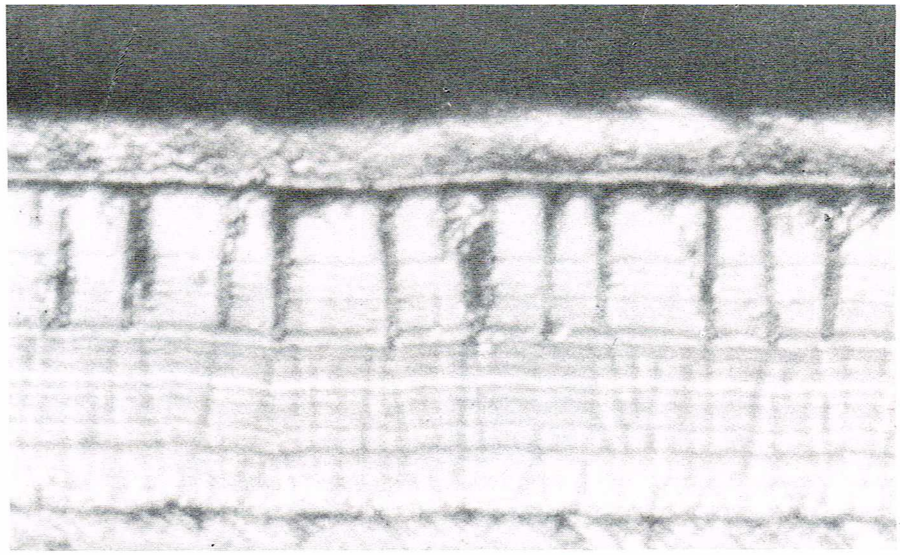

CERES

▲ ***Fissures résultant de contraintes internes dans un dépôt de nickel chimique épais non traité thermiquement. État de la pièce 2 mois après dépôt.***

le nombre diminue heureusement lorsque, toutes choses égales par ailleurs, l'épaisseur de la couche augmente (sans négliger les problèmes liés à la pureté des bains et à la préparation du substrat).

Les dépôts effectués au tampon ou en cellules hors cuves sont très peu poreux (ce qui est certainement dû à l'action mécanique du tampon ou du jet hydrodynamique). Les dépôts sous vide présentent, surtout les plus minces, un nombre élevé de porosités, les unes provoquées par les poussières non éliminées sur la surface, les autres ayant pour origine le réarrangement moléculaire.

Les examens métallographiques et les tests chimiques (ou électrochimiques) effectués sur revêtements obtenus par CVD montrent que ces dépôts sont presque toujours exempts de piqûres.

Propriétés mécaniques

Adhérence. A de rares exceptions près, cette propriété est essentiellement liée à la préparation des surfaces. Il faut toutefois rappeler que les couches obtenues par métallisation sous vide (et surtout en évaporation) présentent souvent une adhérence inférieure à celle montrée par les électrodépôts, et que certains substrats nécessitent l'emploi de couches intermédiaires facilitant l'adhérence du revêtement. Les dépôts chimiques en phase gazeuse présentent naturellement de bonnes qualités d'adhérence, surtout si le substrat a été préalablement dégazé. Si la surface à recouvrir est capable de supporter un traitement thermique ultérieur au dépôt (et pouvant alors être effectué dans la même atmosphère protectrice ou sous vide), on réussit à provoquer un début de diffusion qui assure une adhérence parfaite.

Ductilité-Usinabilité. Un revêtement électrolytique plus ou moins épais de Ni, Sn, Au, Ag, Cu et alliages, exécuté dans des conditions correctes, est ductile et accepte toute opération d'usinage; il en est de même pour les dépôts correspondants obtenus par CVD. En revanche, l'adhérence souvent insuffisante des dépôts obtenus par évaporation (et également leur faible épaisseur) les rend inaptes à l'usinage. Des matériaux intrinsèquement moins ductiles (chrome, par exemple, déposé en forte épaisseur par voie électrolytique) admettent cependant des opérations mécaniques telles que la rectification.

Dureté et résistance à l'usure. Il est évident que les films de carbures, nitrures, siliciures et borures présentent un très grand intérêt pour les applications où interviennent les problèmes de dureté élevée et de résistance à l'usure.

Propriétés protectrices. En dépit de leur faible épaisseur, les couches métallisées sous vide présentent des propriétés protectrices intéressantes. En effet, l'absence d'impuretés évite les microcouples locaux, fréquents dans les dépôts classiques.

Les dépôts électronégatifs par rapport au substrat assurent une meilleure protection, parce que leur rôle « sacrificiel » est indépendant de la porosité.

Les couches obtenues par CVD, étanches et de grande pureté, présentent d'excellentes qualités de protection.

Défauts des revêtements

Après avoir analysé dans les chapitres précédents les qualités de certains traitements et les limites des procédés permettant de les mettre en œuvre, il serait fastidieux d'aborder maintenant leurs défauts, considérés simplement comme des qualités « négatives », en opposant des chiffres ou des qualificatifs aux indications qui viennent d'être apportées. Nous croyons qu'il est plus utile de s'attacher à des phénomènes plus importants, affectant les conditions d'emploi et la durée de vie des pièces.

La préoccupation permanente du mécanicien travaillant pour des techniques avancées est d'éviter par tous les moyens de produire des pièces dites « fragiles ». Or, la *rupture fragile*, tant redoutée, correspond à l'abaissement important des qualités mécaniques, et notamment de la limite de fatigue.

Phénomène complexe, à caractère différé (donc difficilement décelable à l'origine), la rupture fragile résulte du caractère additif de facteurs fragilisants : des facteurs de forme, amenant des concentrations de contraintes; des facteurs de transformation; des facteurs d'emploi : cycles thermiques, corrosion intergranulaire ou sous contraintes, etc. Il n'est pas rare que les traitements de surface soient impliqués dans les facteurs de transformation, notamment dans les phénomènes de fragilisation par l'hydrogène, et de libération des contraintes internes.

Il est donc judicieux d'aborder maintenant ces problèmes, d'autant plus qu'interviennent habituellement des interactions entre substrat et revêtement : le revêtement peut induire certaines de ses caractéristiques fragiles dans le substrat, un substrat fragile peut provoquer une destruction rapide du revêtement.

Contraintes internes affectant les revêtements

La plupart des revêtements, et notamment ceux obtenus par voie humide, sont affectés de contraintes susceptibles de compromettre considérablement leurs qualités mécaniques. La nature, le sens et l'intensité de ces contraintes sont liés, d'une part, au choix des matériaux déposés et, d'autre part, aux conditions opératoires (par exemple, pour l'électrolyse, la nature des bains, la composition de l'électrolyte, les paramètres électriques, le traitement thermique éventuel).

La libération brutale de contraintes en extension, d'une intensité supérieure aux forces d'adhérence fixant le revêtement sur le substrat, provoque l'arrachement de la couche. Mais le phénomène le plus redouté, parce qu'insidieux, est la transmission de ces contraintes dans le substrat. Pour ce dernier, les contraintes ainsi induites agissent pratiquement comme une entaille, et provoquent les mêmes conséquences sur le comportement en fatigue de la pièce.

En électrocristallisation, le choix judicieux des paramètres de travail permet maintenant d'obtenir certains revêtements peu contraints en extension (contraintes < 10 hbars), ou même affectés de contraintes en compression (qui, généralement, ne présentent aucun danger).

En métallisation sous vide, le revêtement est en général tellement mince que les contraintes en extension ne peuvent guère se manifester. On constate seulement, et surtout sur les couches d'épaisseur inférieure à 0,1 μm, un réarrangement moléculaire se produisant dans les quelques heures qui suivent le dépôt.

L'examen des dépôts chimiques en phase gazeuse ne semble pas révéler la présence de contraintes d'intensité égale ou supérieure à la limite élastique du matériau. En revanche, des contraintes élevées d'origine thermique et souvent provoquées par la diffusion peuvent affecter les matériaux réfractaires.

Pour le nickel chimique autocatalytique, les traitements thermiques recommandés après dépôt montrent que les contraintes à l'origine ne sont pas négligeables.

Fragilisation par l'hydrogène

Dans la mise en œuvre des traitements de surface, et notamment ceux qui opèrent par voie humide, les pièces sont fréquemment mises en présence d'hydrogène naissant, par exemple au cours du décapage et dans toutes les séquences cathodiques. Le proton s'adsorbe très facilement en surface, puis en raison de sa mobilité et de ses faibles dimensions, diffuse rapidement dans le matériau et s'accumule aux endroits favorables (microporosités notamment). Sa transformation en hydrogène moléculaire s'effectue plus tard, en développant des pressions énormes qui disloquent le métal. Un métal ductile sensibilisé par l'hydrogène n'accepte plus de déformations plastiques et se comporte alors comme un

matériau dur et fragile. Le caractère particulier de la fragilisation par l'hydrogène est que la fragilité augmente avec des contraintes appliquées lentement, et dans une zone de températures peu éloignées de la température ambiante (de — 50 à + 150 °C en général). Ce sont les raisons essentielles pour lesquelles les accidents provoqués par ce type de fragilisation se produisent habituellement à la température ordinaire et par rupture différée, sous des contraintes très largement inférieures à la charge de rupture. Le phénomène affecte surtout les aciers à haute résistance (R > 140 hbars), mais également certains alliages de titane ou d'aluminium. D'importants travaux ont été menés depuis une vingtaine d'années par ceux qui étudient ou utilisent les structures à propriétés mécaniques élevées (aéronautique surtout). Ces recherches ont conduit à mieux connaître le phénomène de fragilisation, à savoir mesurer la « prise » d'hydrogène par un métal, et à recommander un certain nombre d'actions portant sur les conditions opératoires et le « dégazage » final. Ces résultats contribuent à diminuer les conséquences néfastes du phénomène mais ne constituent pas un remède absolu pour le supprimer.

Dans le cas du nickel chimique autocatalytique, la fragilité apparaît dès que l'épaisseur du dépôt atteint ou dépasse 10 μm, par actions combinées du chargement en hydrogène et des contraintes : le remède est le traitement thermique de relaxation (à 750 °C).

Le phénomène ne peut pas se produire en métallisation sous vide, puisque l'hydrogène tant atomique que moléculaire y est absent. On comprend ainsi pourquoi la N. A. S. A. préconisa le cadmiage des aciers de plus de 140 hbars par métallisation sous vide. Pour le dépôt chimique en phase gazeuse, le problème est un peu différent. L'hydrogène intervient dans certaines réactions : réduction d'un halogénure par l'hydrogène; pyrolyse d'un carbonyle en présence d'hydrogène ou d'un hydrocarbure; pyrolyse de composés organiques.

L'hydrogène peut alors se dissoudre dans le dépôt si celui-ci (Pd, Ta, Ti, Zr) est avide de ce gaz. Il peut également s'y trouver sous forme de composé interstitiel.

Mais en fait, le chauffage de la pièce sous gaz inerte et surtout sous bon vide élimine facilement l'hydrogène dès le début de sa diffusion dans le matériau, et aucun incident marquant n'a été signalé dans ce domaine.

Conclusion

Entre plusieurs traitements de surface présentant des résultats théoriquement très voisins, le choix de l'utilisateur ne doit pas être seulement guidé par des considérations économiques immédiates; son intérêt, en mettant à part les cas classiques et industriellement éprouvés, est d'abord de procéder à une analyse très approfondie du problème, en tenant compte de tous les éléments suivants :

— caractéristiques initiales de la pièce (forme, nature du matériau, état géométrique, physico-chimique et métallurgique) ;

— performances et limitations des procédés envisagés pour chaque traitement proposé;

— qualités et défauts conférés par chacune de ces techniques, tant au revêtement qu'à la pièce.

L'utilisateur limitera ainsi les risques souvent importants causés par la méconnaissance des phénomènes conduisant à la dégradation notable des caractéristiques mécaniques.

BIBLIOGRAPHIE

BURKART, *la Pratique moderne du polissage et de l'avivage*, Éd. B. P. I. - LA COURCELLE, *Protection contre la corrosion par revêtements électrolytiques*, Éd. B. P. I. - MORTIER, *Contrôle des revêtements électrolytiques*. - MORISSET, *Chromage. Technique et applications*, Éd. Marval. - SALAUZE J., *Traité de galvanoplastie*, Éd. Dunod. - WILMOTTE et BESENECH, *Dégraissage, Décapage*, Éd. B. P. I. - *C.R. des Congrès Interfinish*, 1969-1972, Éd. Forster Verlag. - JOURNÉES TECHNIQUES du S.I.T.S., *État et transformation des surfaces*, 1971. **Périodiques :** *Galvano-organo - Traitements de surface - Surfaces - Le Vide*.

MÉTALLURGIE DES POUDRES

Le terme de *métallurgie des poudres* désigne un ensemble de techniques susceptibles de conduire à l'obtention de divers matériaux (métaux purs, alliages métalliques, oxydes, carbures, nitrures, verres, plastiques) sous forme très divisée, et de les mettre en œuvre de façon à disposer des produits semi-finis ou finis. Dans le premier cas, les matériaux ainsi façonnés se présentent sous forme de lingots, tôles, plaques, ronds, fils ou profilés; dans le second cas, des pièces de formes plus ou moins complexes sont directement obtenues aux dimensions souhaitées, donc sans qu'un usinage ou une finition poussée soit nécessaire.

La métallurgie des poudres diffère de la plupart des techniques métallurgiques, en ce sens qu'elle n'implique jamais la fusion complète du matériau mis en œuvre. Elle est spécifique dans le cas de la fabrication de certains produits qui ne peuvent pas (ou très difficilement) être obtenus par les méthodes traditionnelles : lingots de métaux réfractaires, filtres, coussinets poreux, matériaux de friction, outils pratiquement inusinables, céramiques réfractaires, certains combustibles nucléaires, meules diamantées, ainsi que certains matériaux magnétiques, composants électroniques, contacts électriques, balais pour moteurs électriques, filières, etc. Elle peut être, par ailleurs, un moyen plus économique de fabriquer certaines pièces, généralement de faibles dimensions, qui pourraient être obtenues par des méthodes classiques — se révélant en l'espèce non compétitives, par suite du coût prohibitif des opérations de transformation et d'usinage : pièces mécaniques diverses, pièces polaires, bagues, isolants.

La métallurgie des poudres est très ancienne, et, dans un certain sens, elle a même précédé la métallurgie classique tant que l'homme n'a pas été capable de maîtriser les techniques d'obtention des températures élevées (> 1 400 °C) nécessaires à la fusion de certains éléments réfractaires. Ainsi, environ 3 000 ans avant notre ère, les Égyptiens ont fabriqué des instruments à base de fer par des techniques s'apparentant étroitement à la métallurgie des poudres. Toutefois, les premières expériences rationnelles qui ont jeté les bases de ce que l'on désigne actuellement par ce vocable datent du début du XIXe siècle (platine malléable préparée en 1809 par Wollaston à partir de poudre), puis du début du XXe siècle (brevet de Coolidge, en 1909, relatif à la fabrication de filaments de lampes à base de tungstène ou de molybdène). Par la suite, durant la Première Guerre mondiale et dans les années ultérieures, la métallurgie des poudres a poursuivi son développement dans le domaine des catalyseurs à base de poudre de nickel, des coussinets poreux imprégnés à l'huile, des filières, outils de tours, métaux lourds. Entre 1930 et 1940, de nouvelles voies ont été explorées visant la fabrication des coussinets denses, des balais de moteurs électriques, de certains aimants, de contacts électriques améliorés, de pièces mécaniques pour l'automobile.

Durant la Seconde Guerre mondiale et depuis, les applications de la métallurgie des poudres se sont tellement étendues et diversifiées qu'il est impossible d'en dresser ici une liste exhaustive. Il est cependant bien clair qu'elle ne saurait d'aucune façon se substituer intégralement à la métallurgie traditionnelle en ce qui concerne l'obtention des demi-produits façonnés en général, ainsi que des grosses pièces destinées à la mécanique lourde.

Mettre en œuvre la métallurgie des poudres consiste d'abord à disposer de matériaux sous forme pulvérulente, ensuite à agglomérer ces poudres, enfin à réaliser par traitement thermique une liaison cohérente entre les particules élémentaires, de façon à conférer au produit final obtenu des caractéristiques convenables.

Le terme de **frittage** désigne l'ensemble des processus physico-chimiques qui se développent au cours de cette opération thermique; de façon schématique, on définit deux types de frittages : le premier est désigné par le vocable de *frittage à l'état solide* (éventuellement opéré sous charge) parce qu'il s'effectue à température telle qu'aucun des constituants en présence n'est porté à fusion; le second, connu sous le nom de *frittage en phase liquide*, intervient lorsque les agglomérés résultent du

pressage d'un mélange de poudres différentes dont les températures de fusion sont relativement éloignées : la température de frittage est alors choisie de sorte que le constituant à plus bas point de fusion soit porté à l'état liquide et baigne la phase solide résiduelle pendant tout ou partie de la durée de l'opération.

Élaboration des poudres

Différentes techniques peuvent être mises en œuvre pour obtenir des poudres utilisables dans le contexte de la métallurgie des poudres. En effet, pour que le frittage ultérieur s'opère convenablement, les poudres doivent satisfaire à certaines conditions : faible taille des particules, morphologie adaptée des granules, degré de pureté, état de surface. Ces différentes techniques peuvent être regroupées en quatre types principaux : méthodes mécaniques, chimiques, électrolytiques et atomisation.

Méthodes mécaniques

Elles concernent principalement les matériaux à caractère métallique, ni trop durs ni trop ductiles, et font intervenir des *processus d'abrasion et de choc* par grattage, limage, broyage, martelage, friction, etc. Les appareils utilisés sont essentiellement des concasseurs ou broyeurs à mâchoires, à marteaux, à billes, à disques abrasifs : ces appareils conviennent en particulier pour les matières premières fragiles (matériaux non alliés : Mn, Sb, Bi, Cr, Co, ou alliages : Fe-Al, Al-Mg, Ni-Al, Fe-Cr, Fe-Si).

Dans le cas de matières premières plus ductiles, on emploie généralement des broyeurs à hélice (Fe-Cu-Al-Ag-Fe-Ni) ou à tambours hérissés de pointes en acier (Mg par exemple). Ces méthodes mécaniques sont également utilisées pour fragmenter les dépôts cathodiques ou désagréger les agglomérats constituant les poudres obtenues sous forme d'éponge. Cette *attrition* ou pulvérisation de matériau s'opère le plus souvent soit sous atmosphère protectrice (les poudres obtenues pouvant être pyrophoriques), soit en condition humide, soit encore en milieu spécial — permettant d'agir sur certaines caractéristiques du matériau à traiter (par exemple avec des additions de kérosène, cyclohexanol, méthanol, alcool isoamylique).

Méthodes chimiques

Différents types de processus physico-chimiques peuvent être considérés pour préparer des poudres (métalliques ou non).

Réduction des oxydes par une phase gazeuse ou un métal; les procédés développés reposent sur la variation d'enthalpie libre associée à la réaction, qui peut être déduite des données thermodynamiques ou de diagrammes classiques (diagramme d'Ellingham par exemple). Les principaux réducteurs gazeux utilisés sont l'hydrogène, le monoxyde de carbone, le gaz naturel cracké, l'ammoniac cracké; les oxydes qui peuvent relever de réactions de ce type sont ceux de fer, cuivre, nickel, cobalt, molybdène, tungstène; dans le cas où l'obtention de poudres très fines est souhaitée, il est préférable de réduire des formiates ou des oxalates (Fe, Ni, Co par exemple). Les deux réducteurs métalliques les plus employés sont le magnésium et le calcium : ils peuvent être en particulier utilisés pour réduire les oxydes Cr_2O_3, ZrO_2, ThO_2, UO_2 et élaborer les poudres métalliques correspondantes.

On peut signaler — à titre de remarque — que la réduction peut ne pas conduire nécessairement au métal mais à un oxyde moins riche en oxygène : ainsi, la réduction des oxydes UO_3 ou U_3O_8 par l'hydrogène se limite à l'obtention de la poudre d'UO_2 nécessaire à l'élaboration de certains combustibles nucléaires.

Précipitation de cuivre, de nickel ou de cobalt à partir de solutions des sulfates correspondants, par barbotage d'hydrogène; de même, il est possible de précipiter du zirconium ou du béryllium — à partir de certains de leurs sels fondus ($ZrCl_4$, $BeFe_2$ ou ThF_4) — en faisant réagir du magnésium ou du calcium métallique. Par ailleurs, les halogénures gazeux de métaux très réactifs vis-à-vis de l'oxygène et de l'azote peuvent être convertis en poudre par réaction avec du magnésium fondu : il s'agit là du procédé Kroll applicable à l'élaboration de poudres de titane, zirconium, hafnium, vanadium. Enfin, diverses poudres de composés réfractaires sont communément préparées par précipitation (à l'aide d'ammoniaque) de solutions aqueuses d'oxydes hydratés ou d'hydroxydes; les gels obtenus sont ensuite calcinés et convertis en poudres cristallisées (d'alumine ou de zircone, par exemple).

Décomposition de composés carbonyles. Par réaction sous haute pression ($\simeq$ 150 atm) de CO avec Fe ou Ni, on forme $Fe(CO)_5$ ou $Ni(CO)_4$ qui sont ensuite condensés sous forme liquide à 20 °C; les points d'ébullition de ces composés sont bas (respectivement 103 et 43 °C) : par suite, un simple chauffage entraîne leur dissociation en CO recyclé et en poudre métallique de forme quasi sphérique.

Réaction de poudres métalliques avec du graphite, du bore, du silicium, de l'azote (ou de l'ammoniac cracké), dans le dessein de préparer des poudres de carbures (WC, Mo_2C, TiC, TaC), de borures, siliciures, nitrures, etc.

Méthodes électrolytiques

Pour l'essentiel, on procède par électrolyse de solutions aqueuses; dans ce cas, le dépôt cathodique est favorisé par l'emploi de fortes densités de courant ($\simeq$ 9 A/dm^2), de faibles concentrations, d'une certaine acidité du bain, d'une température basse, et en évitant toute agitation. Par cette technique, on élabore couramment des poudres de Cu, Fe, Zn, Sn, Ni.

Divers types de cathodes peuvent être employés selon que le dépôt doit ensuite être gratté ou doit se séparer spontanément sous forme d'éponge (barreaux de cuivre, plaques d'aluminium, de niobium, de molybdène ou de tungstène, tubes en laiton nickelé). Lorsque les solutions aqueuses ne sont pas utilisables, on peut opérer à partir de sels fondus ($TiCl_4$, K_3MoCl_6, KUF_5, K_2ZrF_6), dispersés dans un électrolyte composé d'un mélange d'halogénures fondus (KCl, NaCl, $CaCl_2$, LiCl). De cette façon, on peut disposer de poudre de Ti, Zr, W, Mo, Be, Th, U, Nb : une telle technique est connue sous le vocable d'*électrolyse ignée*.

Un autre cas particulier peut être également signalé, qui consiste à utiliser une cathode de mercure; en effet, de nombreux métaux sont très peu solubles dans

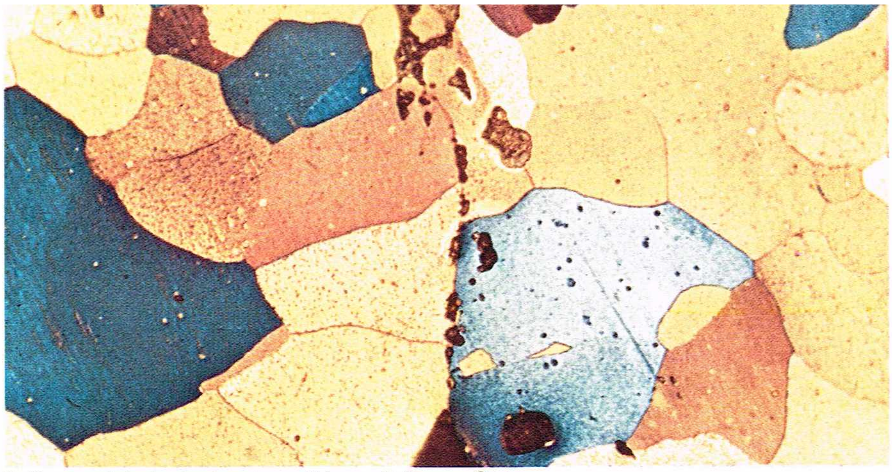

G. Cizeron - Lab. de structure des matériaux métalliques - Orsay

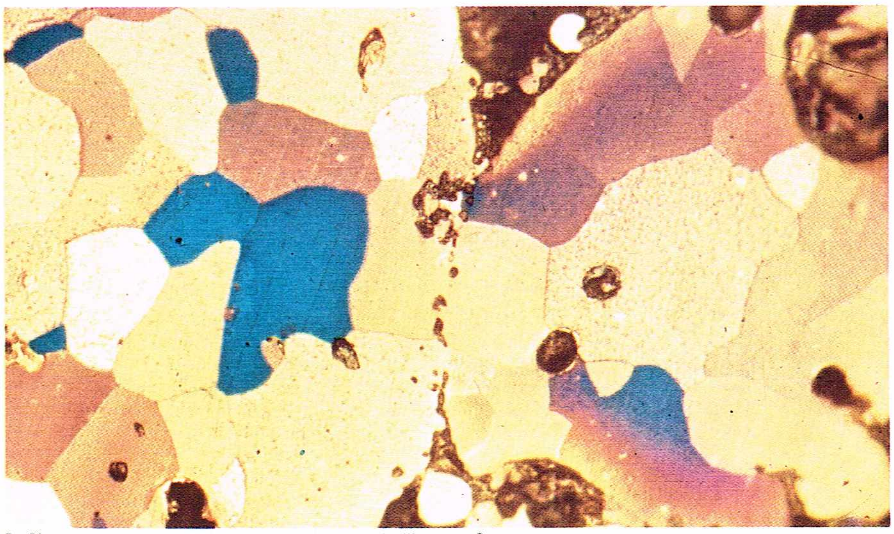

G. Cizeron - Lab. de structure des matériaux métalliques - Orsay

▲ ***Fritté de fer élaboré à partir de poudre atomisée ; en haut, contact entre particules sans soudure (les joints de grains ne franchissent pas l'interface entre granules) ; en bas, soudure entre particules ; un joint de grain franchit sans discontinuité l'interface séparant primitivement les granules.***

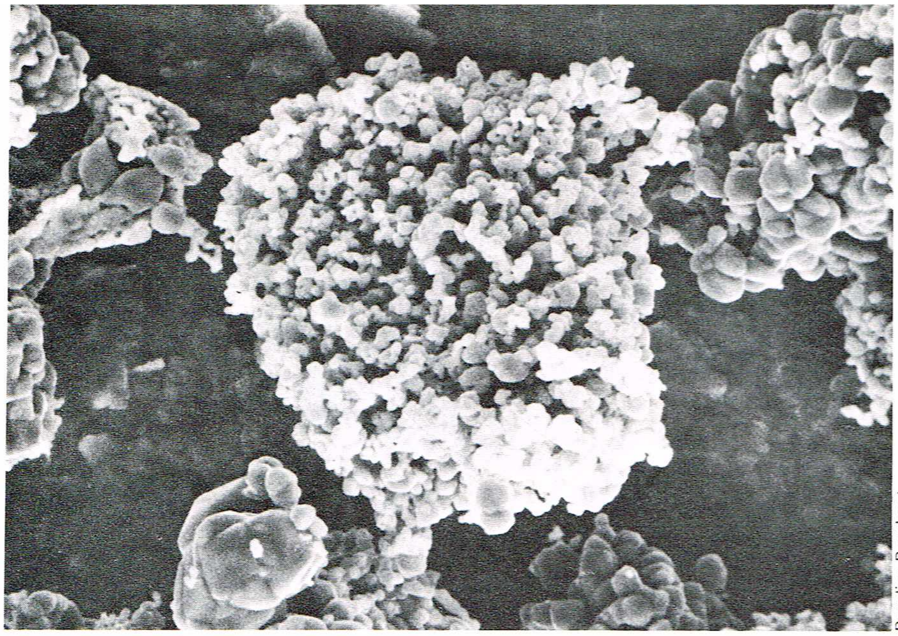

Baudier-Poudmet

▲ *Poudre de cobalt obtenue par réduction.*

cet élément et sont donc facilement mouillés, puis dispersés à la surface d'une telle cathode : le procédé s'applique à la préparation de poudres de fer, nickel, cobalt, manganèse.

Atomisation

La cohésion d'un matériau métallique est fortement réduite dans l'état liquide, ce qui facilite sa désintégration sous l'action d'un jet énergique d'eau ou de gaz (air, azote, argon, hélium). Diverses dispositions peuvent être utilisées : pulvérisation verticale ou horizontale, effet de centrifugation après chute sur disques tournants. Par effet de tension superficielle, les gouttelettes résultant de la fragmentation du jet liquide prennent généralement une forme sphérique avant de se solidifier ; une des difficultés du procédé est de maîtriser la granulométrie des poudres obtenues — dont l'éventail est souvent important ; de même, les granules peuvent parfois présenter des cavités internes nuisibles pour l'emploi ultérieur. Pratiquement, n'importe quelle nature de poudre métallique peut être préparée par cette technique ; les applications les plus répandues concernent toutefois les poudres d'aluminium, de cuivre, d'étain, de fer et surtout de certains alliages classiques élaborés à partir de ces éléments (laitons, bronzes, aciers les plus divers).

Les méthodes précédemment évoquées ne sont pas exclusives, et d'autres techniques de moindre intérêt industriel peuvent aussi être mises en œuvre, telles la distillation suivie de condensation (Zn et Cd), la dissociation d'hydrures sous basse pression (U).

Les poudres obtenues sont conventionnellement caractérisées par un certain nombre de paramètres physico-chimiques.

Masse volumique avant ou après tassement (masse volumique apparente) ; ainsi, suivant le mode d'élaboration, le fer pulvérulent présente les valeurs réunies au *tableau* I.

Analyse granulométrique : traduite par les courbes de distribution en taille (s'échelonnant de 0,1 à 400 μm). Ces courbes sont établies à partir de mesures impliquant une séparation, par tamis ($60 < \varnothing < 200$ μm), par élutriation ($5 < \varnothing < 100$ μm), par sédimentation ($1 < \varnothing < 100$ μm), un décompte soit par microscopie optique ($0,3 < \varnothing < 100$ μm), soit par microscopie électronique ($5 \cdot 10^{-3} < \varnothing < 1$ μm), ou une mesure de la surface totale effective des granules de poudre (adsorptiométrie : $\varnothing < 10$ μm).

Morphologie des granules : paillettes, soucoupes (broyage), sphérules (poudres atomisées, ex-carbonyle), dendritique (poudres électrolytiques), éponge, aiguilles.

Facteur d'écoulement, évalué à partir de la quantité de poudre susceptible de passer dans un temps donné au travers d'un orifice calibré ; ce facteur, assez empirique, est pour autant d'une grande importance pour prévoir les cadences de travail des presses mécaniques.

Compressibilité, qui permet d'estimer l'aptitude à la mise en forme (stabilité ou friabilité des arêtes) ainsi que la détermination de l' « indice de compression » (valeur du quotient de la masse volumique d'agglomérés mis en forme sous une pression donnée, rapportée à la masse volumique du matériau à l'état massif). A titre d'exemple, dans le cas d'une poudre d'argent élaborée par réduction de l'oxyde, les masses volumiques mesurées après compression sous 2, 4, 6 t/cm^2 (ou 200, 400, 600 MPa) sont respectivement de 7,2, 8,6, 9,1 g $\cdot$ cm^{-3} ; les indices de compression valent donc dans ces trois cas : 68,5, 82,5, 86,7 (la masse volumique théorique de ce métal étant de 10,5 g/cm^{-3}).

Pureté chimique : les principales impuretés contenues dans les poudres, et répertoriées dans leur analyse chimique classique, sont l'oxygène (présent soit sous forme d'un film adsorbé en surface, soit comme constituant d'inclusions, soit en solution dans la matrice), le carbone (présent à l'état libre sous forme de graphite, en solution solide, ou encore en tant que carbure), le fer (poudres obtenues par broyage), le silicium (combiné sous forme de silice, qui entraîne des risques d'abrasion de la surface des outillages de compression), le soufre (susceptible de libérer ultérieurement du SO_2 ou du SH_2, provoquant des gonflements parasites au sein des agglomérés).

Mise en forme des poudres

Le simple *tassement* des poudres dans une matrice ou dans un moule, même avec application de vibrations, ne conduit qu'à un empilement imparfait des granules constituants et laisse persister une porosité plus ou moins notable. Par suite, pour réduire la porosité initiale des amas de poudre et surtout augmenter le nombre ainsi que les dimensions des surfaces de contact, il est nécessaire de procéder à une mise en forme par *compression*. A la faveur de cette opération, la cohésion de l'édifice pulvérulent se trouve aussi très notablement renforcée ; cela résulte de la superposition de différents phénomènes tels que l'adhésion, l'imbrication, le feutrage, la déformation plastique des particules.

Le rapprochement intime de deux surfaces entraîne l'apparition de forces du type Van der Waals (inversement

▼ *Tableau I : masse volumique apparente du fer pulvérulent (avant et après tassement) et valeur théorique. A droite, poudre d'acier inoxydable du type dendritique.*

Tableau I
Masse volumique apparente du fer pulvérulent (avant et après tassement) et valeur théorique

Technique utilisée	Masse volumique (en g/cm^3)		Valeur théorique (en g/cm^3)
	avant tassement	après tassement	
Carbonyle	3,45	4,50	7,86
Électrolytique	2,70	4,20	
Réduction	2,20	3,20	
Broyage	2,40	3,00	

Baudier-Poudmet

proportionnelles à la quatrième puissance de leur interdistance), qui sont responsables de l'attraction maintenant accolées les surfaces en contact : sauf cas très particuliers, il ne s'agit pas d'une soudure, mais seulement d'un accolement. Schématiquement, sur la base du formalisme de Hertz, le rayon *a* de l'aire de contact développée en appliquant une force F entre deux particules sphériques lisses de rayon *r* et de module d'Young égal à E, vaut :

$$a = K \left(\frac{F \cdot r}{E}\right)^{1/3}$$

Tant que la force appliquée ne crée, dans l'aire de contact, qu'une contrainte inférieure à la limite d'élasticité du matériau, la déformation demeure évidemment élastique ; au-delà de cette valeur de la pression *p* exercée sur l'aire de contact, la déformation devient localement plastique ; elle s'étend à la zone avoisinante dès que *p* excède le triple de la limite d'élasticité : dès lors, il y a écrasement notable des particules, et il devient possible de réduire la porosité au sein des agglomérés.

Dans la pratique, les phénomènes sont plus complexes, du fait que la surface des particules est hérissée d'aspérités qui gênent la formation de contacts parfaits, et surtout en raison de la présence inévitable de films à la surface des granules : oxydes, sulfures ou gaz adsorbés (vapeur d'eau, parfois anhydride carbonique), voire souillures diverses. En particulier, un des rôles essentiels exercé par la pression est de rompre les films d'oxyde, et donc de créer des surfaces fraîches permettant l'adhésion. On comprend intuitivement que l'augmentation de la pression appliquée doit se traduire par un accroissement de la densité de l'aggloméré ; la variation de cette caractéristique devient d'autant plus faible que la pression appliquée est élevée : ainsi, une poudre de cuivre dont les particules ont un diamètre moyen de 2 μm conduisent à des agglomérés dont la densité croît de 8,5 à 8,7 quand la pression utilisée passe de 1 500 mégapascals à 3 000 MPa (densité du cuivre massif : 8,94) ; cet exemple montre par ailleurs qu'à la limite, on ne peut dépasser une densité à l'état comprimé (densité « à vert ») de l'ordre de 96 % de la densité théorique. Dans la pratique, le risque d'usure intense des outillages conduit à limiter habituellement les pressions utilisées à des valeurs comprises entre 500 et 1 000 MPa.

L'efficacité de la compression dépend en outre de nombreux facteurs : forme des particules, distribution granulométrique, adjonction d'un lubrifiant, caractéristiques mécaniques de l'élément constituant la poudre. En particulier, l'expérience a clairement montré que le fait d'utiliser des poudres constituées d'un *mélange* de deux ou trois classes de granules de dimensions relatives appropriées permettait d'améliorer très sensiblement la densité des comprimés obtenus après compression sous une pression moyenne (600 MPa). Dans ces conditions, une formulation simple (qui résulte des travaux de Torre-Shapiro et Voce) permet d'estimer la densité relative D conférée à une poudre de densité relative initiale D_0 sous une pression *p*, soit :

$$\frac{1 - D}{1 - D_0} = \exp(- K \cdot p)$$

(K étant une constante liée à la nature du matériau considéré).

La densité des agglomérés n'est en réalité pas toujours homogène, et elle dépend du mode d'application de la pression — compression unilatérale ou bilatérale, compression isostatique — entraînant des distributions plus ou moins symétriques des contraintes exercées. Dans la pratique, il est courant de mettre en œuvre une compression bilatérale, ce qui n'évite pas, pour autant, l'existence de zones de moindre densité, au voisinage des faces terminales et de la section médiane des agglomérés (les variations relatives de densité entre de telles zones et le reste de l'échantillon étant de l'ordre de 5 à 10 %). Ce fait conduit à limiter le rapport hauteur/diamètre à des valeurs de l'ordre de l'unité ; ce comportement est en particulier lié au frottement qui se produit au contact des parois de la matrice. On peut y remédier de diverses façons, entre autres en supportant les matrices par des dispositifs munis de ressorts et en incorporant des lubrifiants à la poudre.

Parallèlement, des poudres de médiocre compressibilité doivent être préalablement mélangées avec un *liant ;* un choix judicieux des adjuvants permet dans certains cas de cumuler les effets de liant et de lubrifiant. Les principaux produits utilisés à cette fin sont des stéarates (Zn, Ca, Mg, Al, Pb, Li), du camphre, de la paraffine, de la glycérine, des acides organiques (benzoïque, salicylique), du bisulfure de molybdène ; dans le cas des poudres de carbure, on emploie également de simples solvants (acétone, éther, alcool, benzène, tétrachlorure de carbone). Ces adjuvants ne sont ajoutés qu'en quantité limitée (< 1 %) et doivent être éliminés pendant le traitement thermique ultérieur, sous peine de contaminer le produit fritté final.

Les *hauteurs de remplissage* des matrices avant compression sont en général de deux à six fois supérieures à celles des agglomérés que l'on cherche à obtenir. A l'éjection des comprimés, une certaine relaxation se produit, qui se traduit par des variations dimensionnelles de l'ordre de 0,2 % sur le diamètre et de 0,4 % sur la hauteur des comprimés.

La *compression bilatérale* s'opère classiquement dans des outillages (poinçons, matrices) en acier spécial traité ou en carbures, montés sur des presses mécaniques ou hydrauliques. La *compression isostatique* est réalisée en enfermant de la poudre dans des conteneurs élastiques (caoutchouc, plastiques), eux-mêmes placés au sein d'enceintes remplies d'un fluide transmetteur permettant d'appliquer une pression hydrostatique sur les parois du conteneur. Dans certains cas, il est avantageux de réaliser la *compression à chaud*, à l'aide de dispositifs appropriés (outillages spéciaux chauffés par un système adéquat) ; en fait, comme il se produit simultanément un frittage de l'échantillon (ou de la pièce) ainsi élaboré, ce type de mise en œuvre sera considéré ultérieurement plus en détail.

En dehors de ces modes très classiques de mise en forme, il est utile d'évoquer brièvement certaines techniques utilisées pour résoudre des cas particuliers. Ainsi l'élaboration de filtres peut être réalisée en faisant *vibrer* des poudres versées dans des moules et en chauffant ensuite l'ensemble pour développer la cohésion nécessaire ; ces moules doivent être en acier spécial au chrome permettant, d'une part, de supporter le traitement thermique sans se dégrader, d'autre part, d'éviter — grâce à la mince couche d'oxyde de chrome formée en surface — que le produit fritté n'adhère au moule. On fabrique de la sorte des filtres de différentes formes (disques, tubes, cônes), principalement en laiton, en bronze, en Monel ou en acier inoxydable.

D'autres techniques, dites de *coulage*, sont aussi fréquemment utilisées pour fabriquer des pièces de forme relativement simple et de dimensions le plus souvent assez importantes : on conçoit en effet que, dans de tels cas, il serait prohibitif de réaliser des outillages trop volumineux, et surtout peu aisé de disposer de presses de puissance suffisante. Il s'agit en particulier de la technique de *Slurry Casting*, consistant à mélanger une poudre avec un liant liquide de façon à réaliser une sorte de pâte ou de crème, qui est désaérée avant d'être admise dans un

Baudier-Poudmet

▲ ***Poste d'atomisation à l'eau.***

▼ ***Disque élaboré par pressage isostatique à chaud de poudres préalliées en alliage type IN 100 (Aciéries d'Imphy).***

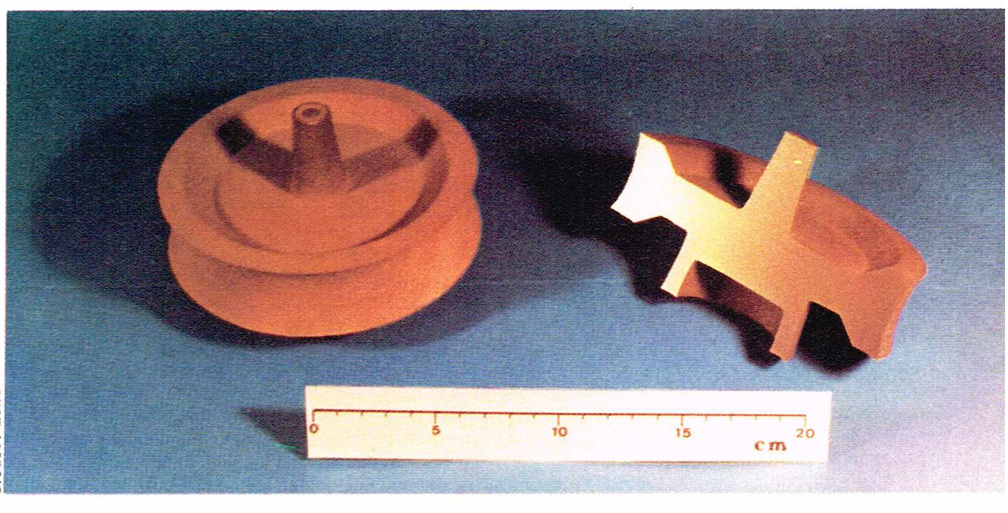

Creusot-Loire

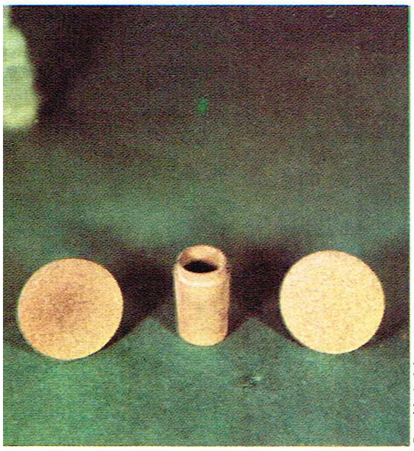

Société Metafram

▲ *Filtres en bronze fritté.*

▼ *Ci-dessous, fracture intergranulaire d'un fritté de fer traité 3 heures à 870 °C, sous hydrogène : intérieur d'un pore ; réplique observée en microscopie électronique (× 20 000). En bas : fracture transgranulaire d'un fritté de fer traité 18 heures à 870 °C, puis 6 heures à 930 °C ; réplique examinée en microscopie électronique (× 10 000).*

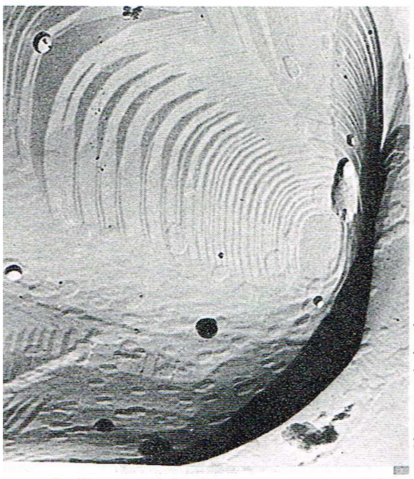

G. Cizeron - Lab. de structure des matériaux métalliques - Orsay

G. Cizeron - Lab. de structure des matériaux métalliques - Orsay

moule par injection ou par aspiration (avec éventuellement vibration concomitante) ; après remplissage, le moule est refroidi à — 40 °C, la pièce est extraite, pour être frittée dans un four classique.

Une autre technique, dite du *Slip Casting*, consiste à réaliser une suspension de fines particules de la poudre (< 5 μm) dans un milieu adéquat de faible viscosité, par exemple eau + amidon et antifloculant ; cette préparation est versée dans un moule en plâtre reproduisant en creux la forme de la pièce recherchée ; le plâtre absorbe la majeure partie du liquide constituant le milieu dispersant de la solution. Après séchage, la pièce ainsi mise en forme est démoulée par simple renversement, puis frittée. Des techniques de ce genre sont couramment appliquées pour fabriquer des creusets, barquettes, tubes en molybdène, bisiliciure de molybdène, alumine, carbures de titane ou de silicium, borure de zirconium, etc.

Frittage des produits préalablement mis en forme

Le terme de frittage désigne l'opération thermique qui a pour but d'augmenter la résistance mécanique des produits comprimés ou simplement agglomérés par les techniques précédemment décrites. Dans ce contexte, trois processus interviennent conjointement : soudure effective entre les particules de poudre, recristallisation avec — éventuellement — grossissement du grain, élimination plus ou moins notable de la porosité permettant au produit d'acquérir une densité proche de la valeur théorique.

Frittage en système monophasé solide

En premier lieu, il est plus simple et plus logique de considérer les différents phénomènes qui interviennent dans le cas du frittage naturel (c'est-à-dire sans pression exercée durant le traitement thermique), et en système monophasé solide (c'est-à-dire quand le seul phénomène perturbateur ne peut résulter que d'une allotropie — changement de symétrie cristalline — ou d'une transformation invariante ; par exemple : réaction eutectoïde ou péritectoïde).

Aux basses températures (< 300 °C en général), se développent principalement les processus suivants : résorption des contraintes internes résultant de la compression, élimination des liants et lubrifiants, réduction des oxydes et diminution du taux des impuretés (C, S, P). Aux températures intermédiaires (en général 400 < θ < 1 000 °C) débute le frittage proprement dit (température seuil de frittage définie par Tammann, ou température d'adhérence de Dawihl) ; le frittage se traduit par un retrait s'accusant d'autant plus que la température croît en s'accompagnant d'une notable diminution de la porosité ; dans ce même intervalle de températures, le matériau est généralement le siège d'une recristallisation et d'un grossissement de grain assez limité. Enfin, aux températures supérieures, et surtout durant les maintiens isothermes qui sont pratiqués à ces températures, la porosité continue de décroître, cette fois plus progressivement, tandis que l'on peut parfois observer un grossissement de grain notable (lequel n'est généralement pas recherché sur le plan de l'utilisation). Il est évident que ce schéma est volontairement simplifié et doit être ajusté en fonction de la température de fusion du matériau considéré, sa pureté (oxydes non réductibles en particulier), la morphologie des poudres mises en œuvre, la dimension moyenne des granules constituants, la pression de mise en forme utilisée.

Il est très important de maîtriser les phénomènes qui interviennent au début du traitement, avant même que le frittage proprement dit ait débuté ; de fait, une mauvaise élimination des liants peut conduire, non seulement à une pollution préjudiciable du produit final, mais encore au maintien d'une porosité excessive qui ne pourra être résorbée pendant le frittage. De même, une trop forte pression de mise en forme peut conduire à un fritté de moindre densité que celle observée avec un comprimé préalablement obtenu sous une pression plus faible ; ce fait est à relier à la persistance de gaz demeurant occlus : ces gaz proviennent, soit des enveloppes de gaz adsorbés à la surface des particules (de l'ordre de 10 à 25 mg d'air pour 100 g de poudre de fer, par exemple), soit des gaz dissous au sein des granules (de l'ordre de 2 à 10 cm³ par 100 g de poudre de cuivre, par exemple).

Les températures usuelles de maintien isotherme, dites **températures de frittage,** sont généralement comprises entre 0,6 et 0,8 fois la température de fusion du matériau à fritter ; elles varient donc très notablement selon la nature de ce matériau : ainsi, elles sont de l'ordre de 600 à 800 °C dans le cas des bronzes, de 900 à 1 300 °C dans le cas des alliages ferreux, de 1 400 à 1 600 °C pour ce qui est des carbures, de l'ordre de 1 700 à 1 800 °C pour l'alumine et de nombreux composés réfractaires, tandis qu'elles peuvent largement dépasser 2 000 °C dans le cas du frittage de métaux tels que le molybdène, le tantale ou le tungstène.

Selon le domaine de températures à atteindre, les **fours industriels** sont de différents types : fours à résistance électrique (Ni-Cr ou Fe-Cr-Al) jusqu'à 1 150 °C environ, fours à éléments chauffants en CSi entre 1 200 et 1 350 °C, fours à résistance de molybdène (sous atmosphère réductrice ou neutre) entre 1 300 et 1 600 °C, fours à éléments chauffants de tungstène, tantale, niobium, graphite ou fours à haute fréquence pour les températures supérieures à 1 700 °C (fonctionnant dans ce cas généralement sous vide). Compte tenu de la difficulté de réaliser des éléments mobiles aux très hautes températures, les fours destinés à cet usage sont généralement des fours « cloche » à fonctionnement discontinu ; par contre, aux températures inférieures à 1 150 °C, il est fréquent d'utiliser des fours continus à passage, comportant des convoyeurs à chaînes ou à rouleaux, qui sont du type multizone (préchauffage, traitement, recuit, refroidissement).

Mis à part le vide (type d'atmosphère qui n'est généralement retenu que dans le cas des frittages à très haute température) ou les gaz rares (argon, hélium) [relativement peu employés en raison de leur coût], les principales **atmosphères protectrices** mises en œuvre sont : l'hydrogène, l'ammoniac cracké, le gaz de ville ou le gaz naturel, certains hydrocarbures crackés (CH_4, C_3H_8), de sorte qu'ils conduisent à un mélange essentiellement formé de (H_2 + CO).

Les **durées de frittage** sont limitées aux temps minimaux nécessaires pour réduire les coûts de production, tout en permettant d'atteindre des densités aussi proches que possible de la densité théorique. Elles sont cependant très variables selon les matériaux : dans le cas des coussinets poreux, elles sont généralement de l'ordre de 15 mn ; les métaux réfractaires sont frittés en 30 mn environ ; en revanche, les alliages durs, les aimants et les céramiques doivent être traités durant une à plusieurs heures.

Au fur et à mesure que la densification progresse, la **porosité globale** diminue ; en fait, cette porosité est la somme de deux composantes : porosité ouverte (pores interconnectés entre eux ou reliés aux surfaces libres) et porosité fermée (pores isolés et indépendants de leurs voisins). Après compression (par exemple sous 500 MPa), la porosité totale est de l'ordre de 30 %, tandis que la porosité fermée n'est que de 2 % environ ; lorsque la porosité totale est devenue de l'ordre de 9 %, les pourcentages des deux types de porosités sont équivalents ; enfin, lorsque la porosité totale est sensiblement de 6 %, on peut pratiquement considérer qu'il ne s'agit que de pores isolés, et il est très difficile d'éliminer cette porosité résiduelle.

Les **propriétés physiques ou mécaniques** des matériaux frittés dépendent directement de la densité conférée au terme du traitement thermique : quand cette dernière est suffisamment proche de la valeur théorique, on constate que les frittés ont des caractéristiques similaires à celles des mêmes matériaux élaborés par métallurgie traditionnelle (fonderie, suivie de transformation et de recuit). Il est toutefois nécessaire de signaler que les propriétés mécaniques usuelles sont le plus souvent mesurées à partir d'éprouvettes de forme spéciale, directement frittées et non usinées après traitement.

En dehors de ce cas particulièrement simple du frittage en système monophasé solide, il existe diverses autres possibilités d'opérer auxquelles il peut être fait appel — ce qui accroît très sensiblement l'intérêt des techniques de frittage.

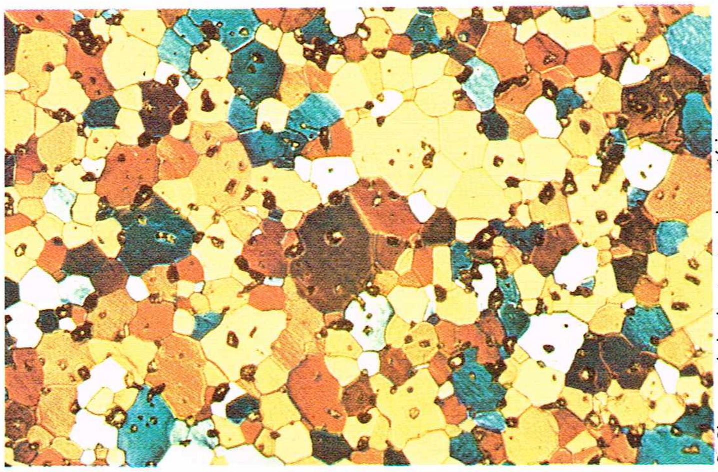

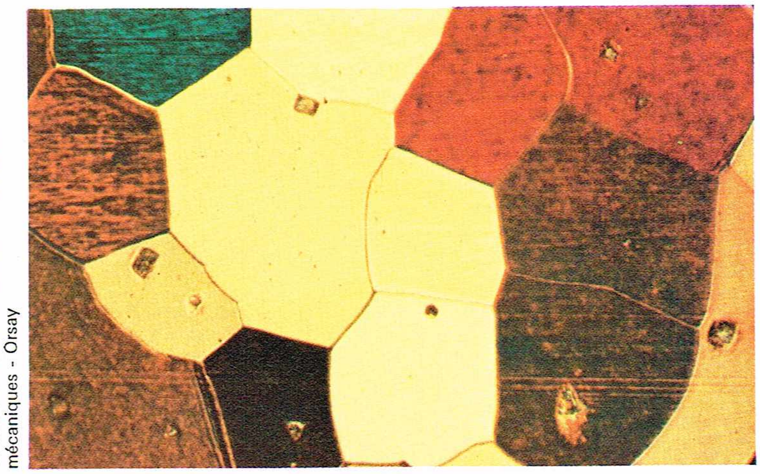

G. Cizeron - Lab. de structure des matériaux mécaniques - Orsay

▲ ***Fritté de fer élaboré à partir de poudre ex-carbonyle : à gauche, traité 10 heures à 800 °C (fin du premier stade du frittage) ; à droite, traité 100 heures à 880 °C : le deuxième stade est largement atteint, ainsi qu'en témoigne le grossissement du grain et la faible porosité résiduelle.***

Frittage en système polyphasé solide

Dans ce cas, au minimum deux poudres d'espèce différente sont préalablement mélangées de façon intime avant compression et frittage. Si les divers constituants du système n'interdiffusent pas, ou très peu ($W\text{-}ThO_2$, W-Cu, W-Ag, Fe-Ag, Mo-Ag), le retrait observé pour une concentration donnée du mélange sera inférieur à celui que prévoirait la règle simple des mélanges ; on peut approximativement l'évaluer (dans le cas d'un mélange binaire A-B) à partir d'une équation du type :

$$R = R_A C_A^2 + R_B C_B^2 + 2\, R_{AB} C_A C_B$$

avec : R_A et R_B retraits respectifs des éléments A et B purs ;
R_{AB} retrait associé aux particules A et B en contact ($R_{AB} \simeq 0$) ;
C_A, C_B proportions volumiques des constituants A et B.

Si les divers constituants du système peuvent interdiffuser de façon plus ou moins notable, des solutions solides ou des composés intermétalliques peuvent se former : le frittage constitue donc un moyen d'élaborer des alliages sans passer par l'état liquide, et ce dans des temps tout à fait acceptables, du fait de l'extrême dissémination des constituants au début du traitement thermique.

L'équation précédente montre qu'en l'absence de tout autre phénomène, et du fait que le terme R_{AB} devient important, on pourra cette fois observer (pour une concentration donnée du mélange) un retrait supérieur à celui que prévoirait la règle simple des mélanges. En fait, deux phénomènes modifient plus ou moins notablement ce comportement de base ; d'une part, lorsqu'ils sont susceptibles de se former, certains composés intermétalliques se développent en provoquant un gonflement ou une contraction parasite (c'est le cas, par exemple, du composé Fe_7W_6 dans le cas des mélanges Fe + W) ; d'autre part, lorsque les mobilités des atomes en présence sont sensiblement différentes, il se produit un effet du type Smigelskas-Kirkendall, qui a pour conséquence de provoquer à la fois un gonflement perturbateur et le développement d'une porosité dite secondaire (par condensation des lacunes excédentaires sous forme de cavités, distinctes des pores résultant de la compression des poudres [porosité primaire]). De nombreux cas de ce type ont été observés (Cu-Au, Cu-Zn, Cu-Ni, Fe-Ge, Fe-Ni) ; il est alors nécessaire de compliquer le cycle de frittage ou d'utiliser des poudres préalliées (obtenues par broyage ou atomisation de l'alliage visé) pour minimiser ou éliminer ces effets perturbateurs.

Frittage en phase liquide

Il s'agit là d'un frittage en système polyphasé au cours duquel apparaît, de façon transitoire ou durable, une phase liquide (le reste du comprimé demeurant pour autant à l'état solide et constituant un squelette maintenant la cohésion de l'ensemble). L'aggloméré de départ est donc un mélange d'une poudre à haut point de fusion et d'assez fine granulométrie, avec une poudre à plus bas point de fusion et de granulométrie quelconque.

De nombreux phénomènes interviennent alors : mouillage du squelette solide par la phase liquide, remplissage des pores par cette phase, réarrangement des particules demeurées solides, diffusion en phase liquide, processus de dissolution locale suivie de reprécipitation en d'autres endroits, soudure entre particules de la phase solide indépendamment de la phase liquide et croissance de la taille moyenne du grain final, entre autres.

La structure des frittés ainsi élaborés est généralement constituée de grains plus ou moins sphéroïdaux ou prismatiques, cimentés par une seconde phase qui correspond au liquide solidifié au cours du refroidissement. Le frittage en phase liquide présente certains avantages : durée de l'opération en général plus courte, pression moindre de mise en forme préalable des agglomérés, possibilité de réaliser des pièces de grandes dimensions, réduction de la porosité globale à une valeur pratiquement nulle. Un exemple classique de cette technique trouve son application dans le cas des alliages du type WC-Co.

Frittage sous charge

Dans ce cas, les deux étapes précédemment décrites (compression et frittage) sont réunies en une seule opération. Il est donc nécessaire de disposer d'un appareillage spécial consistant en un four dans l'axe duquel se trouvent placés une matrice et des poinçons raccordés mécaniquement aux éléments mobiles d'une presse. Pour minimiser les risques d'oxydation, l'outillage se trouve à l'intérieur d'une enceinte dans laquelle règne une atmosphère protectrice ou le vide. L'ensemble matrice-poinçons est généralement en graphite ou en carbures ; un système de chauffage par effet Joule peut également être utilisé pour élever la température de l'échantillon durant l'opération. Les pressions mises en œuvre peuvent varier de 8 à 30 MPa, selon que la température à laquelle les pièces sont conjointement portées est respectivement supérieure ou égale à 1 400 °C, ou inférieure à 1 300 °C.

Cette technique est par exemple employée pour élaborer des alliages durs du type WC-Co, des combustibles nucléaires type monocarbure d'uranium, des coussinets massifs, des alliages diamantés. Son avantage principal est que la densité finale atteinte est pratiquement égale à la densité théorique, ce qui confère au matériau des propriétés mécaniques supérieures à celles qui ont été obtenues par frittage naturel ; de même, la précision sur les cotes est bien meilleure. L'inconvénient majeur est le coût plus élevé de l'opération.

Forgeage à chaud

Le but poursuivi est similaire au but évoqué ci-avant, seule la façon d'y parvenir diffère. Le procédé consiste en effet à réaliser une ébauche, en comprimant à 20 °C (sous 300 à 400 MPa) le matériau pulvérulent, puis en le préfrittant durant 30 mn ou 1 h à 1 100 °C environ. Ce fritté naturel est ensuite forgé à chaud (1 000-1 150 °C) en un seul coup de presse ($p \simeq 250$ à 400 MPa) avec une matrice de forme appropriée, puis refroidi (éventuellement un traitement thermique complémentaire peut lui être appliqué pour modifier sa structure et améliorer ses propriétés mécaniques).

Tableau II

Mécanismes contribuant à la formation des « ponts » de soudure et à leur croissance, lors du frittage

Mécanismes	Lois de croissance des ponts		Lois de retrait	Auteurs
	p	q	n	
Évaporation Condensation	3	1	pas de retrait	Kuczinski
Diffusion superficielle	7	3		
Écoulement visqueux	2	1	1	Frenkel
Diffusion en volume	5	2	2/5	Kuczinski
	4,19	1,19	0,49	Johnson Clarke
Diffusion intergranulaire	6	2	1/3	Kuczinski
	6,33	2,33	0,32	Johnson Clarke

▲ *Tableau II : mécanismes contribuant à la formation des « ponts » de soudure et à leur croissance, lors du frittage.*

Cette technique est utilisée pour élaborer des pièces mécaniques à base de fer, contenant, le cas échéant, du carbone (0,2 à 0,5 %), du nickel (0,25 à 2 %), du chrome (0,5 à 1,5 %), du molybdène (0,2 à 0,5 %), ajoutés indépendamment en tant que second élément, ou simultanément pour réaliser des alliages plus complexes. On peut ainsi façonner directement des engrenages, des pignons, des roues dentées, des bielles pour l'industrie automobile ; suivant leur composition, ces matériaux peuvent présenter des caractéristiques très variables : les charges de rupture varient, par exemple, de 400 à 2 100 MPa, les allongements de rupture variant parallèlement de 50 à 3 %.

Frittage-extrusion

Certains matériaux ne peuvent être élaborés ni par les techniques traditionnelles de la métallurgie classique, ni par les méthodes de frittage décrites jusqu'ici. On a donc imaginé de loger les poudres de base dans des conteneurs scellés et de filer l'ensemble dans une presse adaptée, susceptible de fonctionner à chaud. Ce procédé s'applique, par exemple, aux matériaux composites constitués d'une matrice au sein de laquelle se trouve finement dispersée une phase non soluble ; les principaux effets recherchés sont le durcissement de la matrice ou le simple effet de dispersion (par exemple, composés fissiles du type UO_2, composés neutrophages du type bore ou carbure de bore, distribués uniformément dans une matrice d'acier inoxydable).

On peut ainsi élaborer les composites $Al\text{-}Al_2O_3$ en partant de fines paillettes d'aluminium que l'on oxyde de façon ménagée, de sorte que la teneur globale en Al_2O_3 soit de l'ordre de 10 à 13 % ; on comprime d'abord cette poudre à froid ou à chaud sans que cette compression entraîne de rupture appréciable des films d'oxyde superficiels (0,1 μm) ; après mise en conteneur sous vide et scellement, il suffit d'extruder à 500 °C (sous forme de ronds, de tubes, de profilés, etc.), de sorte que l'écrouissage conféré soit de l'ordre de 2 000 à 5 000 pour cent. Au cours de cette extrusion, il se produit une fragmentation très notable des barrières d'alumine et une soudure efficace des « cœurs » d'aluminium. Le matériau obtenu présente à 20 °C une résistance à la rupture de 360 MPa et un allongement à la rupture de 10 % ; il peut être utilisé jusqu'à 400 °C environ, ce qui n'est pas le cas pour les alliages d'aluminium classiques.

Techniques complémentaires

Le frittage naturel laisse subsister une certaine porosité ; de même, les hétérogénéités de densité initiale conduisent à des retraits non homogènes, et par suite à des difficultés pour tenir les tolérances dimensionnelles.

Dans le premier cas, on peut avoir recours à l'**infiltration** pour combler la quasi-totalité de la porosité ; on réalise d'abord par compression et frittage un squelette poreux cohérent à pores interconnectés ; ce squelette est ensuite « infiltré » par un élément ou alliage à point de fusion inférieur, susceptible de mouiller les joints de grains et les parois des pores ; d'autre part, l'infiltrant doit être peu soluble dans l'infiltré. Cette technique est classiquement appliquée au cas des squelettes de fer que l'on infiltre au cuivre, avec l'alliage Cu à 3 % Fe ou avec un alliage Cu-5 % Fe-5 % Mn. De même, des squelettes de carbure de titane peuvent être infiltrés avec du nickel, du cobalt ou des alliages Ni-14 % Cr-6 % Fe ; des squelettes de tungstène fritté peuvent être infiltrés par du cuivre ou de l'argent ; la méthode a été étendue à de nombreux autres types d'infiltrants à points de fusion échelonnés :

alliages 70 Pb-30 Sn (200 °C), 95 Pb-5 Fe (400 °C), 65 Au-35 Ni (1 000 °C), 50 Cu-50 Ni (1 275 °C).

Dans le second cas, on peut mettre en œuvre une technique de **calibrage** suivie ou non d'un deuxième frittage : elle consiste à recomprimer à 20 °C — dans une matrice aux cotes finales visées — les pièces préfrittées ; cela permet, non seulement de respecter sans difficulté les tolérances imposées, mais encore d'accroître les propriétés mécaniques (au prix d'une légère augmentation du coût de production).

Mécanismes contrôlant le frittage

Dans la pratique, le nombre de paramètres susceptibles d'intervenir est considérable : caractéristiques propres des poudres, modes de mise en forme, conditions dans lesquelles les traitements thermiques sont effectués, etc. Aussi tous les modèles imaginés sont-ils fondés sur des hypothèses simplificatrices, consistant, par exemple, à considérer les particules sphériques isodimensionnelles, constituées d'une seule espèce d'atomes dont l'assemblage constitue un réseau cristallin comportant des défauts physiques classiques : lacunes, dislocations en particulier. Les énergies motrices principalement prises en compte sont respectivement : l'énergie de surface, qui diminue au fur et à mesure que les granules se soudent entre eux, et les variations locales d'énergie associées à la courbure des surfaces. L'énergie excédentaire que possède un système de granules en voie de frittage est toutefois faible (quelques calories par mole) : elle n'est donc pas susceptible de faire spontanément se transformer ce système, mais seulement d'en orienter l'évolution ; pour cette raison, il faut apporter une activation, ce qui justifie la nécessité du traitement thermique de frittage.

La plupart des mécanismes envisagés sont fondés sur le modèle simple de deux sphères en contact entre lesquelles peut se développer une *zone de raccordement ;* cet ensemble présente des éléments de surface soit concaves, soit convexes. On peut montrer (équation de Thomson) qu'au voisinage d'une surface convexe la pression de vapeur à l'équilibre est supérieure à celle qui règne à proximité immédiate d'une surface plane (et, inversement, plus faible au voisinage d'une surface concave) ; de même, au sein du matériau, la concentration des défauts ponctuels (lacunes) excède la concentration d'équilibre quand la surface limite est concave (et, inversement, est abaissée quand la surface limite est convexe). Il en résulte que des transferts d'atomes se produiront — soit par la phase vapeur, soit au sein de la phase solide — en raison de l'existence de gradients de pression ou de lacunes.

Une fois les « ponts » de soudure suffisamment développés, il reste à éliminer progressivement la porosité résiduelle : les raisonnements sont alors fondés sur le fait qu'au voisinage des surfaces concaves des pores existent des sursaturations faibles de lacunes (fonction inverse du rayon de ces pores) ; par suite, à nouveau, existent des gradients locaux de lacunes tendant à faire cheminer les lacunes excédentaires vers les joints de grain où elles s'élimineront. En bref, les pores doivent être considérés comme des sources de lacunes, et les joints comme des « puits ».

Les principaux mécanismes susceptibles de contribuer à la formation des « ponts » et à leur croissance sont regroupés dans le *tableau* II et schématisés dans les *figures* 1, 2 et 3. Ils conduisent tous à des relations du type :

$$\frac{x^p}{r^q} = \mathrm{K\ (T)} \cdot t$$

Certains s'accompagnent d'un rapprochement des centres des particules, donc d'un retrait, qui s'explicite par une relation du type :

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \mathrm{K'\ (T)} \cdot t^n$$

(les différentes valeurs de p, q, n sont indiquées à titre d'exemple).

Pour traiter le problème de l'élimination de la porosité au sein des agglomérés, on assimile les grains du matériau à des tétrakaïdécaèdres (cubes-octaèdres) dont l'accolement peut en effet conduire à un assemblage compact représentatif de la structure du matériau (*fig.* 4). Les pores sont considérés comme étant soit des cylindres axés sur les arêtes, soit des sphères localisées aux nœuds du réseau constitué par les arêtes de ces éléments de volume. En supposant que l'élimination de tels pores peut intervenir par diffusion des lacunes (soit en volume, soit aux joints), Coble a abouti à des relations du type :

$$\mathrm{P} \simeq -\mathrm{K\ (T)} \cdot t^m$$

avec $m = 2/3$ (pores cylindriques) ou $m = 1$ (pores sphériques).

Dans le cas du *frittage en phase liquide,* divers phénomènes ont été considérés, qui sont essentiellement : le réarrangement visqueux des particules solides, le processus de dissolution du solide (aux points de contact entre particules) suivi de reprécipitation (sur les surfaces solides non en contact), et la coalescence des grains de la phase solide (augmentation de leur taille moyenne et diminution de leur nombre). Ces mécanismes (traités en particulier par Kingery) conduisent à des équations traduisant les retraits qui en découlent, selon les formulations indiquées dans le *tableau* III.

BIBLIOGRAPHIE

GOETZEL C. G., *Treatise on Powder Metallurgy*, Éd. Interscience Publishers, 4 vol., New York and London, 1949-1968. - HAUSNER H. H., *Modern Developments in Powder Metallurgy*, Éd. Plenum Press, New York, 1966. - JONES W. D., *Fundamental Principles of Powder Metallurgy*, Éd. E. Arnold, London 1960, Éd. St. Martin's, New York, 1960. - KIEFFER D. R., HOTOP D. W., *Métallurgie des poudres*, Éd. Dunod, Paris, 1947. - LESZINSKY W., *Powder Metallurgy*, Éd. Interscience, 1960-1961. - SCHREINER H., *Pulvermetallurgie*, Éd. Springer, Berlin, 1964.

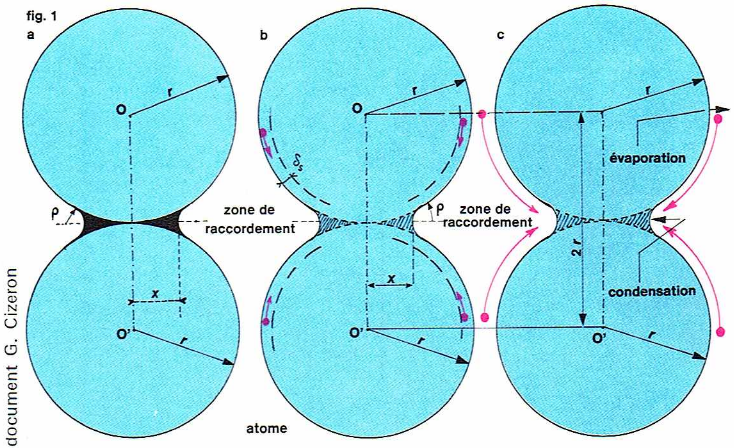

document G. Cizeron

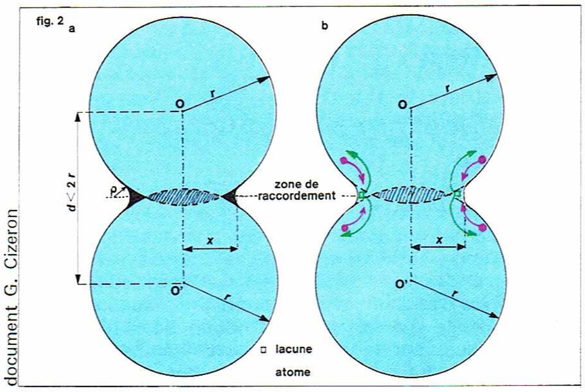

document G. Cizeron

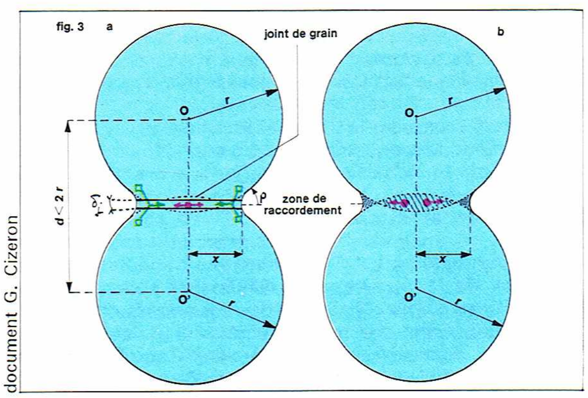

document G. Cizeron

▲ *Figure 1 :* *a, formation des ponts sans rapprochement des centres ; b, mécanisme de diffusion superficielle ; c, mécanisme d'évaporation-condensation.*

◀ *Figure 2 :* *a, formation des ponts avec rapprochement des centres ; b, mécanisme de diffusion en volume.*

◀ *Figure 3 :* *a, mécanisme de diffusion intergranulaire ; b, mécanisme d'écoulement visqueux.*

▼ *A gauche, figure 4 : tétrakaïdécaèdre de Kelvin simulant un grain avec les pores localisés sur les arêtes ou aux sommets. A droite, tableau III : mécanismes et équations traduisant le retrait lors du frittage en phase liquide.*

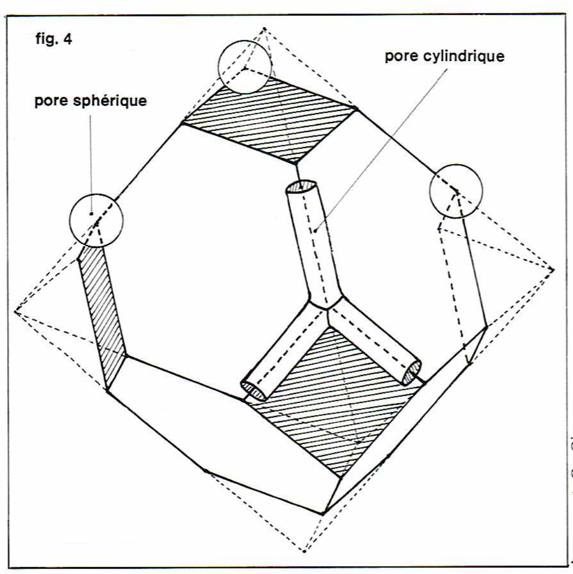

document G. Cizeron

Tableau III
Mécanismes et équations traduisant le retrait lors du frittage en phase liquide

Mécanismes	Retrait associé $\frac{\Delta l}{l_0}$
Réarrangement géométrique	Pores ouverts : K (T) · log t Pores fermés : K (T) · $t^{1/3}$
Diffusion du solide au sein du liquide	K (T) · $r^{-4/3} \cdot t^{1/3}$
Dissolution-reprécipitation	K (T) · $r^{-1} \cdot t^{1/2}$
Coalescence	Diffusion dans le liquide $r^3 - r_0^3 = \mathrm{K\ (T)} \cdot t$ Dissolution-reprécipitation $r^2 - r_0^2 = \mathrm{K\ (T)} \cdot t$

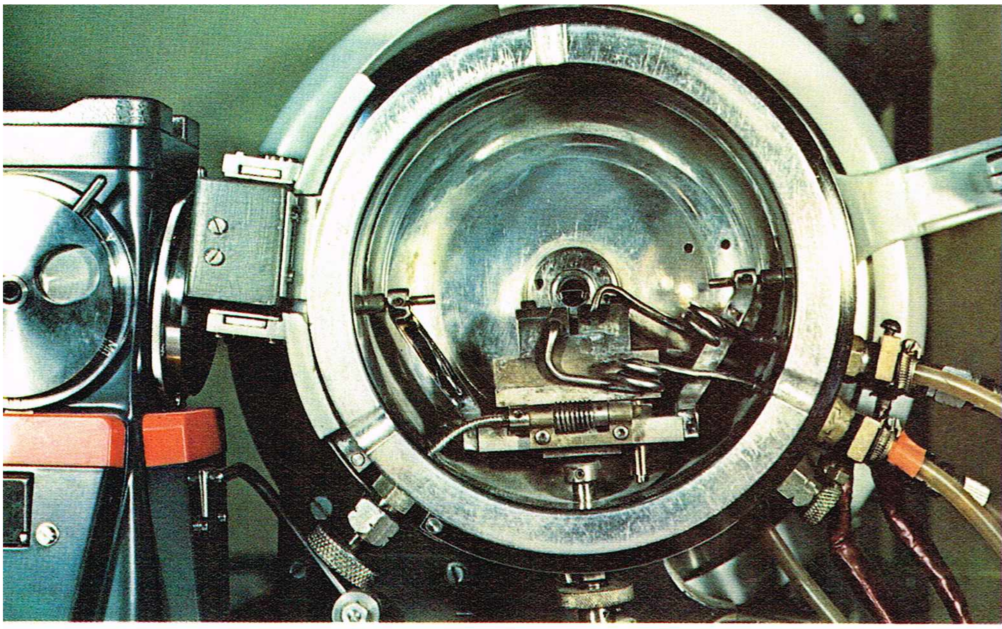

Lab. des ultra-réfractaires de Font-Romeu - Centre national de la recherche scientifique

▲ *Chambre de diffraction des rayons X à haute température (gros plan).*

CONTROLE ET COMPORTEMENT DES MATÉRIAUX

Contrôles physico-chimiques - Analyse

Pour déterminer la composition et la structure des matériaux, de nombreuses méthodes mettant en jeu des phénomènes physiques d'origine différente ont été développées. Celles qui reposent sur des interactions entre rayonnement et matière ont connu un essor important, et ont permis d'accroître d'une façon considérable les connaissances sur la structure de la matière. On sait, en effet, que, suivant la nature du rayonnement, électromagnétique ou corpusculaire, les interactions s'interprètent différemment. La diffusion fait appel à l'aspect ondulatoire, l'ionisation à l'aspect corpusculaire. Aussi les méthodes de contrôle et d'analyse physico-chimique des matériaux ont-elles été classées en deux groupes. On les dit :

— *diffractométriques* si elles utilisent la diffusion cohérente du rayonnement dans les matériaux cristallisés ;

— *spectrométriques* lorsqu'elles exploitent les informations apportées par les transferts d'énergie entre le rayonnement et la matière.

Dans le premier cas, les renseignements obtenus sont d'ordre géométrique : ils permettent de déterminer la structure de la matière, c'est-à-dire les paramètres du réseau cristallin et la distribution des atomes dans la maille (diffraction des rayons X, électrons, neutrons), et de mettre en évidence des propriétés morphologiques invisibles à l'œil et au microscope optique (microscopie électronique).

▼ *Figure 1 : schéma de principe d'un diffractomètre à rayons X.*

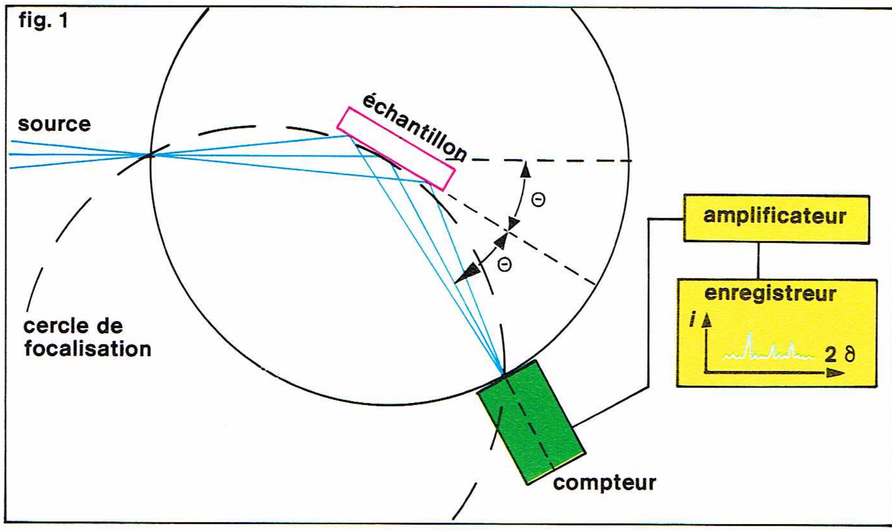

Richard Colin

Dans le deuxième cas, ces méthodes renseignent sur la nature et la concentration des éléments dans les matériaux solides, qu'ils soient cristallisés ou vitreux. Il s'agit des méthodes de spectrométrie d'émission des rayons X et d'électrons : fluorescence X, microscopie électronique à balayage, microanalyse par rayons X.

Méthodes diffractométriques

La diffraction des rayons X

Les techniques de diffraction des rayons X se sont développées à partir de 1912, date à laquelle Max von Laue et ses collaborateurs réussirent à obtenir le premier diagramme de diffraction de rayons X par un cristal, confirmant ainsi la structure périodique des milieux cristallins. Quelque temps après, W. L. Bragg, partant de l'hypothèse qu'un cristal parfait était constitué par une répétition de matière diffusante suivant un réseau tridimensionnel, a montré que la condition de diffraction pouvait s'écrire :

$$2\,d\,(h, k, l)\,\sin\theta = n\lambda$$

n, entier, ordre de diffraction ; $d\,(h, k, l)$, équidistance des plans (h, k, l) du réseau direct ; θ, angle que fait le rayon incident avec le plan réflecteur ; λ, longueur d'onde du rayonnement.

Quant à la condition de résolution de la famille de plans, elle s'écrit $d\,(h, k, l) \geqslant \lambda/2$.

Cette équation comporte 3 paramètres, dont le premier, $d\,(h, k, l)$, est déterminé par la nature du cristal. Pour réaliser les conditions de diffraction sur une famille de plans (h, k, l), un des 2 paramètres restants θ ou λ peut être fixé, l'autre étant alors variable. Le choix du paramètre détermine 2 groupes de méthodes de diffraction :

— θ fixé, λ variable : méthode de Laue ;

— λ fixé, θ variable : méthode des poudres et méthode du cristal tournant.

Méthode de Laue. Le rayonnement incident polychromatique est produit par une anticathode en élément lourd excité par une tension d'accélération de plusieurs keV (tungstène avec une tension de 50 à 69 keV). L'échantillon monocristallin à étudier est monté sur une tête goniométrique, et disposé perpendiculairement au faisceau incident. On recueille alors le rayon diffracté sur un film placé derrière l'échantillon dans le montage en transmission, et devant dans le montage en réflexion. A partir de la géométrie du système, et de la position des taches de diffraction, on mesure les angles caractéristiques du réseau quelle que soit la forme extérieure du cristal échantillon.

Méthode du cristal tournant. Cette méthode utilise un rayonnement X monochromatique, formé à partir du rayonnement K_α caractéristique d'un élément. L'échantillon étant monocristallin, pour faire varier l'angle θ, on fait subir au cristal un mouvement de rotation autour d'un axe, ce qui l'amène en position de réflexion pour certaines orientations. Le cristal échantillon est donc fixé sur une tête goniométrique, placé au centre d'une chambre photographique cylindrique dont l'axe est l'axe de rotation.

A partir du diagramme de diffraction, on peut alors :

— par mesures des positions des taches, connaître les paramètres des cristaux ;

— par mesures d'intensité des réflexions, déterminer le groupe de symétrie et la structure du cristal.

Méthode des poudres. On utilise un rayonnement X monochromatique et un échantillon *polycristallin*. Le montage le plus répandu, type Debye-Scherrer, comprend un faisceau fin et parallèle de rayons X monochromatique, qui intercepte l'échantillon monté sur une tête goniométrique simplifiée. Les cônes de diffraction sont interceptés par un film photographique cylindrique dont l'axe est perpendiculaire au faisceau incident. L'axe des cônes de diffraction étant perpendiculaire à celui de la chambre, le film étalé présentera des raies symétriques par rapport au point d'impact du faisceau incident.

Pour éliminer les erreurs dues au film et avoir une mesure précise de l'intensité, une solution consiste à remplacer le film par un détecteur, dont le signal amplifié et intégré conduira à un diagramme I (2 θ) formé de pics correspondant aux réflexions (*hkl*) [*fig.* 1].

Cette méthode, qui porte sur un grand nombre de cristaux contenus dans l'échantillon, est une méthode

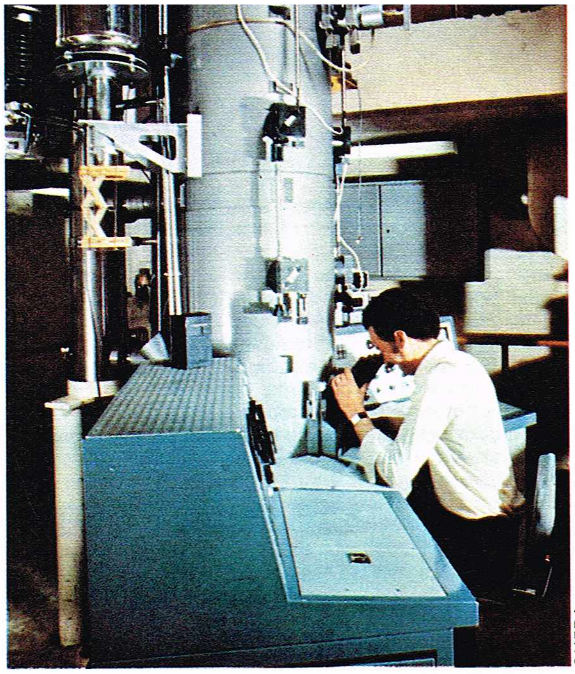

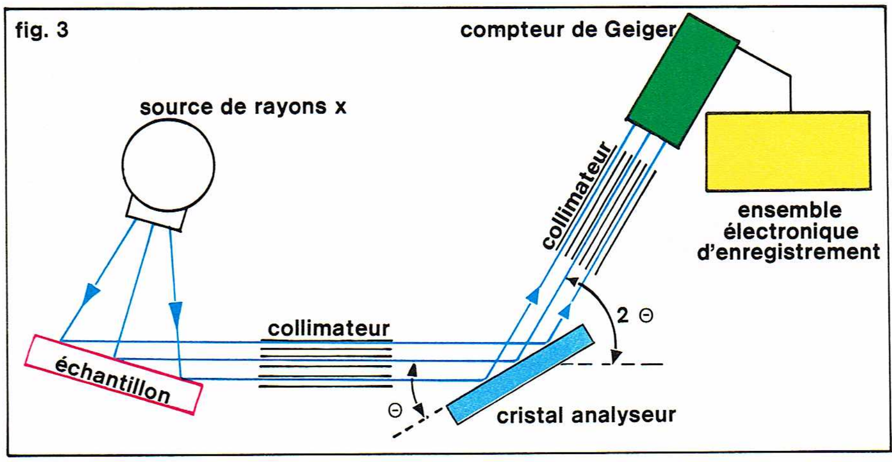

▲ *A gauche, microscope électronique à très haute tension (1 MV) du C. N. R. S. A droite, figure 3 : fluorescence X, spectromètre à cristal plan.*

globale et met en évidence des propriétés moyennes, que ce soit au point de vue géométrique ou au point de vue chimique. Mais elle est très précieuse par sa simplicité de mise en œuvre.

La microscopie électronique

La microscopie électronique est une technique fondamentale dans l'étude des matériaux. Le microscope électronique traditionnel utilise des électrons, dits rapides, d'énergie moyenne comprise entre 10 et 100 keV, et dont la longueur d'onde associée λ est donnée par la relation : $\lambda = h/mv$ avec h, constante de Planck ; m est la masse, et v la vitesse des électrons.

Le pouvoir séparateur de tout microscope, défini comme la plus petite distance entre 2 points de l'objet qui permet encore la séparation de leurs images données par l'objectif, est lié à la longueur d'onde λ, à l'indice de réfraction n du milieu entre objet et objectif, et à l'ouverture α de l'objectif par la relation : $d = 0{,}61\ \lambda/n \sin \alpha$.

Pour un courant d'électrons de 100 keV, la longueur d'onde associée est d'environ $4 \cdot 10^{-2}$ Å, à laquelle correspond une limite de résolution de l'ordre de quelques Å.

Sur la *figure* 2 est présenté le schéma de principe d'un microscope électronique à transmission. Les électrons produits par un canon à électrons et accélérés par une haute tension stabilisée forment un faisceau monocinétique dont la propagation nécessite un vide de 10^{-5} torr. Le canon produit une première focalisation en un « cross-over » d'environ 100 µm de diamètre. La première lentille d'un condenseur double magnétique donne une image réduite du cross-over (environ 1 µm), cette image étant transférée sur l'objet par la seconde lentille avec un grandissement 1. Le double condenseur permet d'obtenir un faisceau très fin sur la préparation, ce qui a l'avantage de limiter la partie soumise au bombardement électronique.

L'*éclairage* a *la plus faible cohérence* lorsque l'image de la source est formée sur la préparation : c'est le mode utilisé pour effectuer la *micrographie de corps amorphes* ou de *corps cristallisés,* quand on désire une *image morphologique fidèle.*

L'*éclairage le plus cohérent* possible est obtenu par surfocalisation maximale du condenseur : ce mode renforce les *effets de diffraction ;* il est utilisé pour mettre en évidence les *propriétés liées à la périodicité.*

Après avoir traversé l'échantillon à étudier, les électrons traversent deux lentilles électroniques : la première, la lentille objectif, permet de mettre au point sur l'objet en faisant varier l'intensité du courant d'excitation ; la seconde, la lentille de projection, permet de faire varier le grandissement.

L'observation visuelle a lieu normalement sur un écran fluorescent. Pour l'enregistrement des images, on utilise des films plans ou plaques photographiques spéciales à émulsion mince et grain très fin permettant l'agrandissement nécessaire à l'exploitation de la résolution de l'appareil. En effet, le grandissement direct maximal est en général de l'ordre de 200 000 à 300 000, insuffisant pour distinguer à l'œil nu 2 points séparés par la distance de résolution limite.

L'effet de contraste, qui résulte de la diffusion des électrons par la matière à examiner, dépend de l'épaisseur et de la densité de cette matière, les rayons cathodiques ayant un très faible pouvoir de pénétration vis-à-vis des matériaux solides (500 à 1 000 Å seulement). Compte tenu de cette contrainte, et suivant la nature des études à effectuer, il faudra opérer soit sur des lames minces, soit sur répliques.

Un support sera donc nécessaire pour amener et maintenir la préparation dans le plan objet de l'appareil. Il devra être transparent aux électrons, supporter le bombardement du faisceau et ne pas introduire de perturbation dans l'image ou le diagramme de diffraction. On utilise en général des membranes amorphes, carbone ou matières plastiques, supportées elles-mêmes par des grilles métalliques très fines.

L'échantillon, quant à lui, devra subir divers stades de préparation variant avec la nature du matériau et le but à atteindre. Il peut provenir soit du broyage et de la récupération de fines particules du matériau de départ, soit de la découpe par ultramicrotome dans le cas de préparations biologiques, soit carrément de l'amincissement d'un matériau massif. Cette dernière technique fait appel à plusieurs méthodes allant de l'abrasion et du polissage mécanique au bombardement ionique, en passant par les phénomènes de dissolution chimique et électrolytique.

Dans le cas de l'observation de la topographie de surface d'échantillons massifs, la technique des répliques est avantageusement utilisée. Il s'agit de confectionner une empreinte de la surface à examiner, et cela dans des conditions respectant un très grand degré de fidélité et une extrême rigidité afin d'éviter toute déformation lors de l'extraction. Divers produits sont employés : des films organiques : collodion, formvar, mowital, etc. ; des couches amorphes de « SiO » ou de carbone ; des revêtements métalliques à structure fine.

L'utilisation de ces différentes techniques rend alors possibles de nombreuses études, celles-ci s'adressant en particulier à la caractérisation des défauts cristallins (lacunes, dislocations), à l'identification des précipités (morphologie, distribution, relation d'épitaxie, nature), et plus généralement à l'exploration de l'état de surface des matériaux (microfractographie électronique).

Méthodes spectrométriques

Ces méthodes exploitent les informations apportées par les transferts d'énergie caractéristiques entre le rayonnement et la matière. Dans le cas où le faisceau incident est un faisceau de rayons X primaires, on analyse les rayons X secondaires émis par l'échantillon : c'est la méthode de spectrométrie d'émission secondaire des rayons X, ou fluorescence X. Dans le cas où le faisceau incident est un faisceau d'électrons, on a affaire aux techniques de microscopie électronique à balayage, la microanalyse par sonde électronique devenant une variante.

La fluorescence X

Schématiquement, un ensemble de spectroscopie X comprend, comme il est représenté sur la *figure* 3 : une

▼ *Figure 2 : schéma de principe d'un microscope électronique à transmission. 1, condenseur ; 2, préparation ; 3, objectif ; 4, lentille de projection ; 5, écran fluorescent, film, photo.*

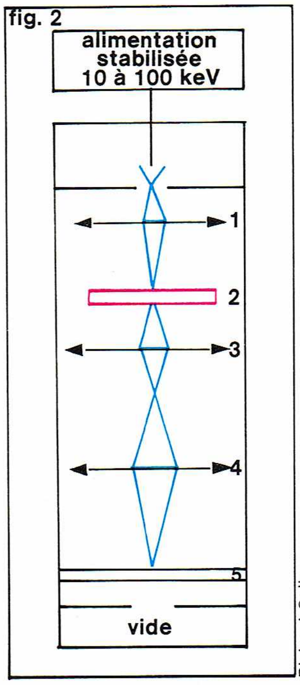

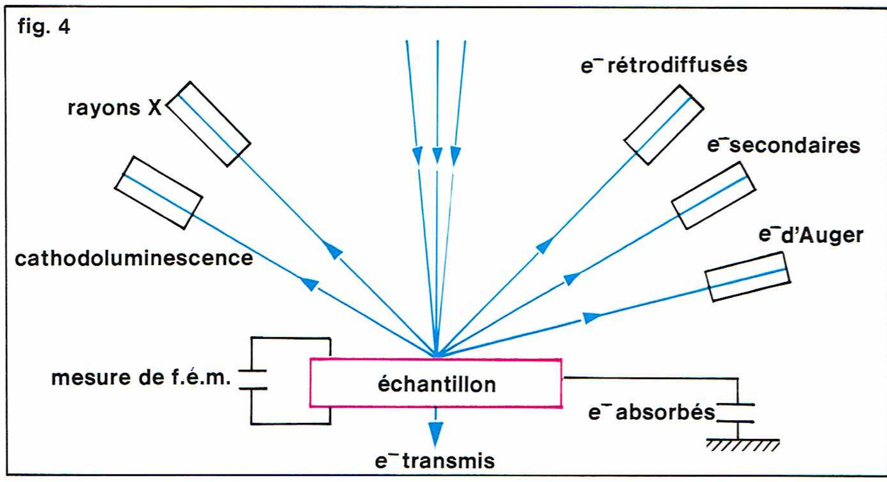

Richard Colin

▲ *Figure 4 : signaux émis par les interactions entre les électrons incidents et l'échantillon.*

source de photons ou d'électrons; un support d'échantillon; un système dispersif avec un goniomètre; un détecteur; un ensemble de comptage et d'enregistrement.

● Dans le cas le plus général, la *source excitatrice* est un générateur de haute tension stabilisée alimentant un tube à rayons X dont l'anticathode est choisie selon le problème posé.

● Le *support d'échantillon* doit convenir pour des échantillons massifs ou pulvérulents, des liquides ou des films minces.

● L'*ensemble d'analyse* du rayonnement sortant de l'échantillon et formant le spectromètre comprend le plus souvent un cristal analyseur plan associé à des collimateurs à fentes de Soler, ou quelquefois un cristal analyseur courbe type Johanson. Suivant le cas, le cristal sera disposé au centre du goniomètre ou sur le cercle de celui-ci, et tournera d'un angle double de celui du cristal pour respecter les conditions de réflexions de Bragg.

● La *détection* et la *mesure* des intensités des raies d'émission se font à l'aide de tubes compteurs. Il en existe deux types principaux : les tubes à gaz (Geiger-Muller et compteur proportionnel) et les compteurs à scintillation.

Tube à gaz : il est constitué d'un fil métallique tendu dans une enceinte cylindrique, percée d'une fenêtre en béryllium ou en mica laissant passer les photons X. Ceux-ci sont absorbés par le mélange gazeux de l'enceinte (Ar, Kr, Xe et halogène au méthane) en donnant naissance à un électron de conversion. La haute tension qui existe entre le fil et l'enceinte provoque la formation d'autres ions par collision avec les molécules du gaz. Le phénomène peut s'étendre et provoquer une décharge dans tout le compteur, un photon X pouvant donner naissance à 10^7 électrons en 100 μs. Le compteur Geiger fonctionne de cette façon dans le domaine de longueur d'onde de 1 Å (Xe) et 3 Å (Ar).

Compteur à scintillation : il est constitué d'un cristal de NaCl activé au Tl, et d'un tube photomultiplicateur d'électrons. Ici, le photon X, en pénétrant dans le cristal, donne naissance à un photo-électron ou à des électrons Auger, qui provoquent à leur tour l'émission de photons lumineux. Concentrés sur la cathode, ils provoquent l'émission d'un électron qui sera envoyé dans le tube photomultiplicateur. On obtient ainsi un coefficient d'amplification de l'ordre de 10^5 à 10^6.

Dans ces dispositifs, l'amplitude de l'impulsion sortant du compteur est proportionnelle à l'énergie du photon incident. A la sortie du compteur, l'impulsion est envoyée dans un ensemble électronique qui mesure son intensité (nombre de coups), et son amplitude (énergie, tension).

On démontre que l'intensité du rayonnement de fluorescence s'exprime en fonction des concentrations C_1 de l'élément considéré et C_2 de la matrice, ou du deuxième constituant, des coefficients d'absorption, μ_1 et μ_2 pour le rayonnement incident, μ'_1 et μ'_2 pour le rayonnement de fluorescence, par une expression de la forme :

$$I_1 = \alpha \frac{\mu_1 C_1}{(\mu_1 + \mu'_1)\, C_1 + (\mu_2 + \mu'_1)\, C_2}$$

avec $$C_1 + C_2 = 1 \quad \text{soit} \quad K = \frac{\mu_2 + \mu'_2}{\mu_1 + \mu'_1}$$

$$I_1 = \frac{\alpha C_1}{K_1\,(1 - K)\, C_1}$$

Il n'y a donc pas proportionnalité entre la concentration et l'intensité, sauf dans le cas de l'émission directe, où $K = 1$ ($\mu_1 = \mu_2$ et μ'_1 et μ'_2 négligeables).

Pratiquement, on ne calcule pas l'intensité de fluorescence, mais on la compare à une intensité de référence, celle d'un élément en teneur connue. On a alors le choix entre trois méthodes qui consistent soit à tracer des courbes d'étalonnage, soit à faire appel à un étalon externe ou enfin à utiliser un étalon interne. Suivant le cas, l'une ou l'autre de ces méthodes conviendra le mieux. Il faut toutefois noter que les facteurs de concentration et de coefficient d'absorption ne sont pas les seuls à jouer. Les interactions entre éléments présents sont à prendre en compte, de même que les effets dus à l'échantillon lui-même, tels que son homogénéité et la planéité de sa surface.

En conclusion, la fluorescence X est une méthode d'analyse élémentaire globale, dont la sensibilité permet l'analyse de traces jusqu'à des concentrations de l'ordre de quelques ppm.

La microscopie électronique à balayage

Le principe de la microscopie électronique à balayage est fondé sur le fait que l'intensité des signaux résultant de l'interaction entre le matériau à étudier et un faisceau d'électrons finement focalisé, effectuant un balayage sur l'échantillon, est visualisée par un système à balayage sur un écran identique à un tube à rayons cathodiques.

La caractéristique essentielle du MEB réside dans sa correspondance « point par point », et « en même temps » entre l'objet et l'image. Cet instrument est ainsi capable de traiter toutes sortes de signaux provenant d'une interaction entre les électrons incidents et le matériau à étudier. La *figure* 4 rappelle les différents signaux qui peuvent être utilisés pour obtenir des renseignements importants sur l'échantillon. La *figure* 5 donne un schéma de principe de l'appareil qui comprend les éléments suivants : sonde électronique, système de balayage, échantillon, formation électronique de l'image, et éventuellement traitement de l'image.

La sonde électronique est produite par un canon électronique, dans lequel les électrons sont soumis à une tension d'accélération de quelques dizaines de keV. Un système de condenseurs produit une image très réduite du cross-over, qui est projetée à son tour par une lentille objectif sur l'objet. Suivant la nature du canon, la sonde atteint divers diamètres : 50 à 100 Å avec un canon à filament de tungstène, 5 Å avec un canon à émission thermo-ionique (hexaborure de lanthane) ou à émission de champ.

La sonde est alors déplacée sur l'objet par un système de déflexion classique, alimenté par un générateur à balayage à gamme très large (50 à 1 600 lignes, durée de balayage de 10^{-3} à 5 s). L'appareil comporte en outre un oscilloscope dont le balayage est synchrone de celui de la préparation.

L'échantillon massif est monté sur une platine goniométrique; il doit supporter le vide et présenter une conductibilité superficielle pour écouler les charges électriques.

▼ *Figure 5 : schéma de principe d'un microscope électronique à balayage.*

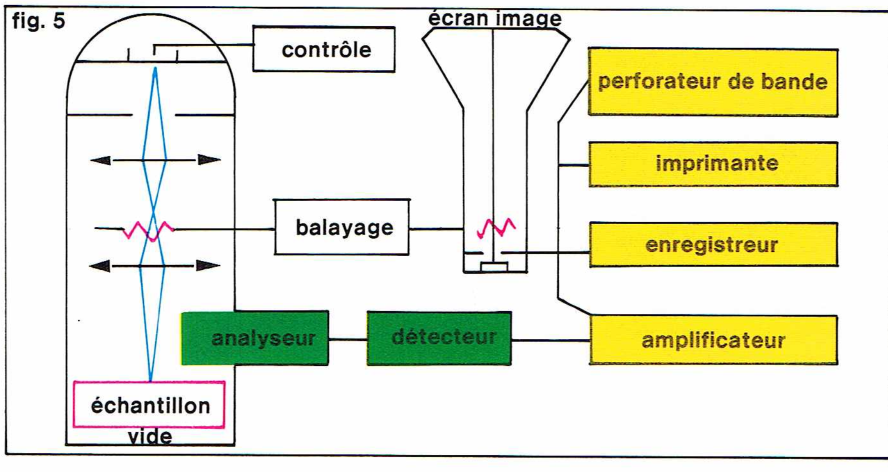

Richard Colin

Le signal choisi, issu de l'interaction électrons-matière, est détecté, amplifié et sert à moduler le faisceau de l'oscilloscope. Le grandissement est variable suivant la largeur du balayage de l'échantillon, celle de l'écran étant fixe. Quant au contraste, il résulte des variations du pouvoir émissif d'un point à l'autre de l'objet pour le rayonnement étudié.

Le MEB peut fonctionner soit par réflexion, soit par transmission.

Mode de fonctionnement par réflexion. Les rayonnements pris en compte le plus souvent sont l'émission d'électrons secondaires et rétrodiffusés, et l'émission de rayons X; l'émission d'électrons Auger, l'émission de lumière ou cathodoluminescence, la mesure du courant absorbé ne sont utilisées que dans des cas particuliers avec des dispositifs spéciaux.

• *Émission d'électrons secondaires et rétrodiffusés.* Du fait de la très faible ouverture angulaire du faisceau incident d'électrons, la profondeur de champ du MEB est très grande : 5 000 à 7 000 µm pour une résolution de 1 µm. Inversement, si on se limite à une profondeur de champ de 1 µm seulement, le MEB permet d'obtenir une résolution allant jusqu'à 100 Å. Ces caractéristiques, mises à profit pour l'observation de la topographie des surfaces, correspondent justement aux effets produits par l'émission des électrons secondaires et rétrodiffusés.

Des dispositifs appropriés et des conditions opératoires convenables permettent de régler l'importance relative du contraste topographique, du contraste de potentiel, du contraste chimique et du contraste cristallographique, ces quatre contrastes concourant tous à la formation de l'image.

Le contraste topographique est dû aux irrégularités de surface entraînant des variations locales de l'angle d'incidence du faisceau primaire qui se répercutent sur le taux d'émission des électrons secondaires et sur le coefficient de rétrodiffusion.

Le contraste de potentiel résulte de la variation des trajectoires des électrons sous l'influence du potentiel de surface de l'échantillon.

Le contraste chimique dépend du taux de rétrodiffusion des électrons, qui est une fonction croissante du numéro atomique Z, alors que le taux d'émission des électrons secondaires varie peu avec Z. Pour observer un tel contraste, on utilise en général deux détecteurs en additionnant les signaux de chacun, alors que leur différence fait apparaître au contraire la topographie.

Le contraste cristallographique dépend des électrons rétrodiffusés, le coefficient de rétrodiffusion d'un monocristal étant fonction de son orientation par rapport au faisceau direct.

• *Émission de rayons X.* L'image est formée à l'aide du rayonnement X caractéristique d'un élément choisi dans l'échantillon. Cet aspect sera étudié plus en détail lorsque nous décrirons le dispositif d'analyse par sonde électronique. Disons cependant que la sélection du rayonnement a lieu par un spectromètre qui peut être soit à dispersion de longueur d'onde par un cristal analyseur, soit à dispersion d'énergie par un cristal semi-conducteur Si (Li), mais demande un dispositif d'adaptation spécial.

• *Émission Auger.* L'analyse par spectrométrie d'électrons Auger, qui fournit une analyse de la surface, de quelques Å d'épaisseur, exige un ultravide propre de l'ordre de 10^{-9} torr. C'est donc à une conception nouvelle de MEB qu'elle s'adresse.

• *Cathodoluminescence.* Le bombardement électronique provoque pour certains composés minéraux naturels, oxydes, semi-conducteurs, l'émission de photons lumineux liés à la présence de défauts dans les cristaux.

• *Le courant absorbé.* L'image formée à partir de ce courant est l'image complémentaire de celle formée à partir des électrons secondaires et rétrodiffusés. Elle ne présentera pas de contraste d'ombrage.

Mode de fonctionnement par transmission. Le MEB travaille comme un microscope électronique classique, sur un échantillon suffisamment mince. Les avantages qui en résultent sont les suivants :

— optique plus simple, le changement de grandissement étant réalisé par le changement du balayage;

— aberration chromatique supprimée;

— contamination globale de l'échantillon plus faible;

— traitement de l'image facilité : l'enregistrement sur magnétoscope peut avoir lieu directement;

— filtrage d'énergie réalisé facilement.

En conclusion, on peut dire qu'en fonctionnement de base par image électronique, mode de fonctionnement le plus commun, et même unique sur certains appareils, le MEB a un champ d'applications très vaste : faciès et texture des minéraux, microfissures et microcavités, texture microscopique de matériaux, faciès de rupture, recristallisation, état de surface, corrosion, traces d'usure, analyse quantitative.

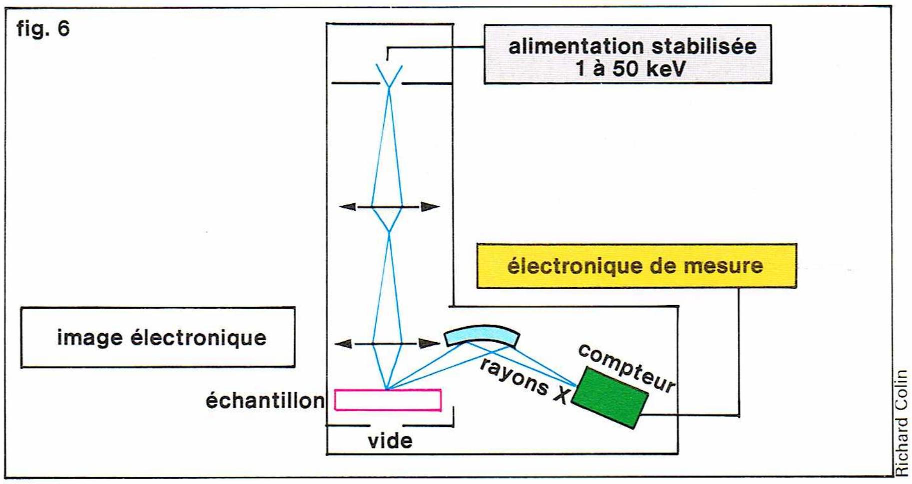

▲ *Figure 6 : schéma de principe du microanalyseur à sonde électronique.*

La microanalyse par sonde électronique

Initialement conçue et réalisée en 1951 par le professeur Castaing, la microsonde servait uniquement à la microanalyse de matériaux d'origine minérale, celle-ci étant fondée sur l'analyse spectrale à émission directe de rayons X. L'évolution rapide de l'appareil, due en partie à l'application du balayage électronique pour la formation de l'image, fait qu'il constitue à présent un instrument remarquable de plus en plus utilisé pour l'étude des matériaux.

Une microsonde comporte généralement trois ensembles principaux (*fig.* 6) :

— un canon à électrons où règne un vide poussé, son principe de base étant le même que celui du microscope électronique : diamètre du faisceau électronique de l'ordre de 1 µm;

— un spectographe à rayons X qui peut soit explorer toute la gamme de longueurs d'onde émises accessibles, soit, pour l'analyse quantitative d'un élément donné, être fixé sur la longueur d'onde caractéristique correspondante, A · K_α par exemple, associé à un détecteur; on peut alors compter le nombre d'impulsions émises pendant un temps donné;

— des dispositifs électroniques de balayage et de détection des électrons secondaires et rétrodiffusés, concourant, comme pour le MEB, à la formation de l'image.

Pour l'**analyse qualitative,** on recherche les conditions de fonctionnement qui assurent l'intensité d'émission X maximale (valeur optimale de la tension d'accélération des électrons, l'émission variant avec la composition de la matrice). Il sera donc très important de connaître les dimensions du volume d'émission X pour tenir compte des possibilités de fluorescence.

A la limite, la microsonde permet de détecter un élément de concentration 10^{-4} à 10^{-3} dans un volume de l'ordre du micromètre cube.

Pour l'**analyse quantitative,** on procède par comparaison avec des témoins d'éléments purs ou de composition connue, l'intensité du rayonnement X émis par unité de masse et par électron incident étant proportionnelle à la concentration de l'élément. On peut écrire alors :

$$\frac{C_{\text{échantillon}}}{C_{\text{témoin}}} = K \frac{\text{I mesurée sur l'échantillon}}{\text{I mesurée sur le témoin}}$$

K est un facteur de correction. Il comprendra : le facteur K_Z, correction de numéro atomique; le facteur K_A, correction d'absorption; le facteur K_F, correction de fluorescence.

▶ *Figure 7 : les différents stades de la courbe de déformation par fluage.*

Cette méthode à corrections successives est, de ce fait, appelée méthode ZAF : elle conduit à un ensemble de relations complexes dont la résolution est effectuée par voie informatique, mais donne des résultats expérimentaux satisfaisants.

Une autre méthode a été mise au point : elle permet de suivre les électrons sur leur trajectoire individuelle, cette dernière étant déterminée par des calculs de probabilités : d'où le nom de méthode « de Monte-Carlo », la meilleure précision étant cependant contrebalancée par d'importants temps de calculs sur ordinateur.

Par ses performances (analyse non destructive, limite de détection inférieure à 1 000 ppm, précision de l'ordre de 1 %), la microanalyse par sonde électronique est l'une des techniques qui conviennent le mieux pour l'étude des matériaux solides, cristallisés ou vitreux, et en particulier en rapport avec les domaines d'applications suivants :

— analyse de grains, de phases, de précipités et d'inclusions ;

— étude de diffusion aux joints de grains, de la diffusion, altération, corrosion à la surface des matériaux.

Autres méthodes d'analyse

Pour mémoire, on peut citer deux méthodes actuellement en cours de développement, mais ayant un grand avenir en sciences des matériaux :

● La première met à profit, lors de l'interaction rayonnement-matière, les électrons issus des niveaux atomiques ionisés. Sur ce principe, deux techniques ont été récemment mises au point : la spectrométrie des photo-électrons, ou méthode ESCA, et la spectrométrie des électrons Auger, qui s'adressent toutes deux à l'analyse de couches superficielles, quelques Å seulement.

● La seconde fait appel à l'analyse des ions secondaires émis par pulvérisation cathodique superficielle d'un échantillon soumis à un bombardement ionique. Les ions sont analysés à l'aide d'un spectromètre de masse. C'est une méthode d'analyse destructive, mais qui permet d'étudier la répartition des éléments, même légers, suivant la surface et en profondeur.

Comportement des matériaux en conditions réelles d'utilisation

En pratique, au cours de leur utilisation, les matériaux sont susceptibles de se déformer, par fluage par exemple, ou encore de se dégrader sous l'effet de trois causes principales : l'usure, la fatigue et la corrosion.

Le fluage

Aspect fondamental

Phénoménologie et lois du fluage. Le fluage est un phénomène de déformation plastique lié à un processus activé thermiquement, et dont la vitesse peut s'écrire en première approximation :

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = f\,(\sigma, \varepsilon, T)$$

où ε est la déformation, σ la contrainte et T la température absolue.

La forme de cette équation suggère plusieurs approches selon deux paramètres maintenus constants :

— $\dot{\varepsilon}$ et T constants : essais de traction simple ; on enregistre σ et ε ;

— σ et T constants : essais de fluage classiques ; on enregistre ε en fonction du temps à charge constante plutôt qu'à contrainte constante ;

— $\dot{\varepsilon}$ et σ constants : essais d'autostabilisation thermique ; on enregistre la température en fonction du temps.

Aux températures hautes, c'est-à-dire au-dessus de 0,4 T_f (T_f étant la température absolue de fusion), ces trois approches montrent qu'au bout d'une certaine période transitoire (fluage primaire), on atteint un régime stationnaire (fluage secondaire), avant d'observer la phase finale qui conduit à la rupture (fluage tertiaire) [*fig.* 7]. Une des théories les plus simples du fluage est celle d'Orowan. Il considère que le fluage est un équilibre entre baisse de consolidation par restauration et reconsolidation par déformation :

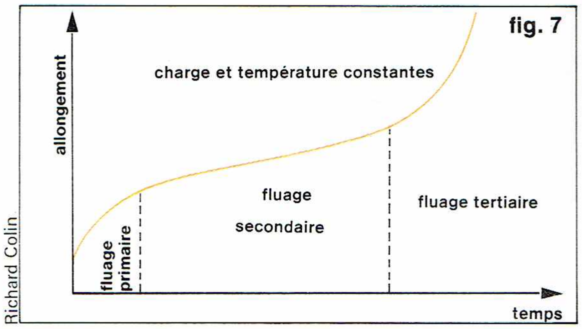

Richard Colin

$$\dot{\varepsilon} = \left(\frac{\partial \sigma}{\partial t}\right)\left(\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon}\right)^{-1}$$

D'autres modèles plus complexes ont été proposés pour expliciter la vitesse de fluage secondaire. Deux d'entre eux sont présentés dans ce qui suit.

● *Modèle de Garofalo.* Il donne la vitesse de fluage en fonction de la contrainte et de la température :

$$\dot{\varepsilon} = A\,(\mathrm{Sh}\,\alpha\sigma)^{n}\, e^{-\frac{\Delta H}{kT}}$$

ΔH est l'énergie d'activation apparente du phénomène à haute température. Pour $T > 0{,}5\ T_f$, le fluage est contrôlé par la diffusion. On a alors $\Delta H = Q_D$ énergie d'autodiffusion. Entre 0,3 et 0,5 T_f, le fluage est contrôlé par le glissement dévié.

● *Modèle de Nabarro-Herring.* Dans le cas du fluage à haute température avec diffusion, Nabarro propose la relation suivante :

$$\dot{\varepsilon} = A\,\frac{1}{L^2}\,\frac{\sigma\Omega}{kT}\,D$$

où L est la taille de grain, Ω le volume atomique,

$$D = D_0 e^{-\frac{Q_D}{kT}}$$

le coefficient de diffusion.

Rupture par fluage. L'accélération du fluage, constatée après le fluage secondaire, et qui conduit à la rupture, est attribuée à l'augmentation de la contrainte due à une diminution de la section, mais aussi à un changement de structure. Celui-ci consiste essentiellement en la formation de pores et de cavités intergranulaires. De petits pores apparaissent près des précipités, dans les joints ; des cavités se forment d'abord à la jonction de trois grains dans les joints triples. La rupture intergranulaire par fluage est le fait de la plupart des alliages technologiques.

Les métaux purs ou certains alliages portés à très haute température sous forte contrainte peuvent se rompre par striction grâce à une restauration locale par migration des joints de grain ou par recristallisation. A la température ambiante, les alliages sont d'autant plus résistants que le grain est plus fin. A haute température, c'est l'inverse qui se produit. Entre les deux, on trouve une température d'équicohésion, où la résistance des grains est égale à celle des joints.

Aspect métallurgique. L'influence de la taille du grain a été étudiée en détail par Crussard et Sherby, qui trouvent que la vitesse stationnaire de fluage en fonction du diamètre du grain passe par un minimum pour des diamètres de l'ordre de 0,3 mm.

La structure du joint de grain a une influence. A grosseur de grain égale, la vitesse de fluage est plus importante dans les grains désorientés au hasard. Cette propriété est le fondement de la métallurgie des alliages résistant au fluage.

Aspect technologique

Les alliages résistant au fluage. Les principaux alliages résistant au fluage sont à base de fer, de nickel ou de cobalt ; de bonnes propriétés en fluage sont obtenues dans des matériaux à haut point de fusion, à forte cohésion de réseau et à faible coefficient de diffusion, à précipités stables, fins et durs, à seconde phase fine et oblongue (1 à 10 μm × 0,2 μm), et à solutés en atmosphère pour bloquer les glissements.

Sur le plan pratique, les technologies avancées permettent d'utiliser des alliages à des températures de l'ordre de 1 000 °C pour les moteurs à turbine et de 700 °C pour les centrales nucléaires.

La métallurgie des alliages résistant au fluage. Différentes techniques spécifiques sont mises en œuvre pour la recherche de caractéristiques optimales à chaud : monocristaux, solidification unidirectionnelle et métallurgie des poudres, de façon à obtenir des alliages qui satisfont les propriétés précitées, et en particulier des gros grains orientés.

Propriétés mécaniques. Exploitation des résultats. L'essai de fluage à rupture le plus commun consiste à appliquer une charge morte à une éprouvette maintenue à température constante et à mesurer l'allongement en fonction du temps jusqu'à la rupture.

Les essais de fluage secondaire qui dépendent de quatre variables (contrainte, déformation, temps, température) sont souvent représentés à l'aide d'un paramètre d'équivalence temps-température-P(σ). Le paramètre le plus utilisé est celui de Larson-Miller :

$$P(\sigma) = T(20 + \log t)$$

Dans cette relation, t est le temps, T la température.

Effet de l'environnement. L'environnement peut avoir une influence sur la décohésion intergranulaire. L'oxygène, par diffusion intergranulaire, peut abaisser l'énergie de décohésion, entraîner la formation d'oxyde et exercer une pression dans les cavités.

L'irradiation par les neutrons conduit généralement à la production d'hélium qui fragilise les joints de grain, bloque les joints et crée des cavités intergranulaires.

La corrosion des matériaux métalliques

La corrosion correspond à l'attaque d'un matériau métallique par les agents chimiques du milieu environnant; le matériau perd alors ses propriétés d'origine. Ces agents chimiques sont, par exemple, les agents atmosphériques (cas des infrastructures routières et ferroviaires, des charpentes), l'eau sous forme liquide ou vapeur (cas des navires, des chaudières, des turbines, des installations de dessalement de l'eau de mer, des canalisations) et les produits chimiques (cas des industries chimiques, papetières, alimentaires). La formation de la rouille sur le fer et ses alliages est un exemple spectaculaire et fréquent de corrosion.

L'usage du terme corrosion (du latin *corrodere* : ronger) est essentiellement réservé au cas des métaux et des alliages; toutefois, selon la tendance actuelle, son usage serait également étendu au cas d'autres matériaux comme les polymères, les ciments, les verres et les céramiques. Cependant, les phénomènes mis en jeu diffèrent selon les matériaux, et la corrosion se rapporte alors plus spécialement aux conséquences communes : par exemple, diminution de poids, altération des propriétés de surface, diminution de la résistance mécanique, fissuration. Il faut noter que, souvent, le problème se complique par l'intervention supplémentaire d'un paramètre physique ou mécanique : on parlera ainsi de corrosion sous contrainte, de fatigue-corrosion, de frottement-corrosion, de corrosion-érosion ou encore de cavitation. Toutes ces causes, qui entraînent donc une perte des propriétés des matériaux en conditions d'utilisation, font partie de ce que l'on désigne actuellement par l'expression « phénomènes de ruine des matériaux ».

L'importance des problèmes de corrosion est très grande : aspects économiques, sécurité des installations, conservation des matières premières et économies d'énergie. Du point de vue économique, on distingue deux types de pertes par corrosion :

— les pertes directes, illustrées, par exemple, par les coûts de remplacement des structures corrodées, de réfection des peintures protectrices, ou encore de protection cathodique des canalisations;

— les pertes indirectes, qui correspondent à l'arrêt d'exploitation des installations pendant la durée de remplacement des parties corrodées, à la perte de produits, à la diminution des rendements, à la contamination des produits, au surdimensionnement des installations pour garder une marge suffisante de sécurité.

En France, on estime que le coût total annuel de la corrosion représente 8 à 10 % de la production d'acier.

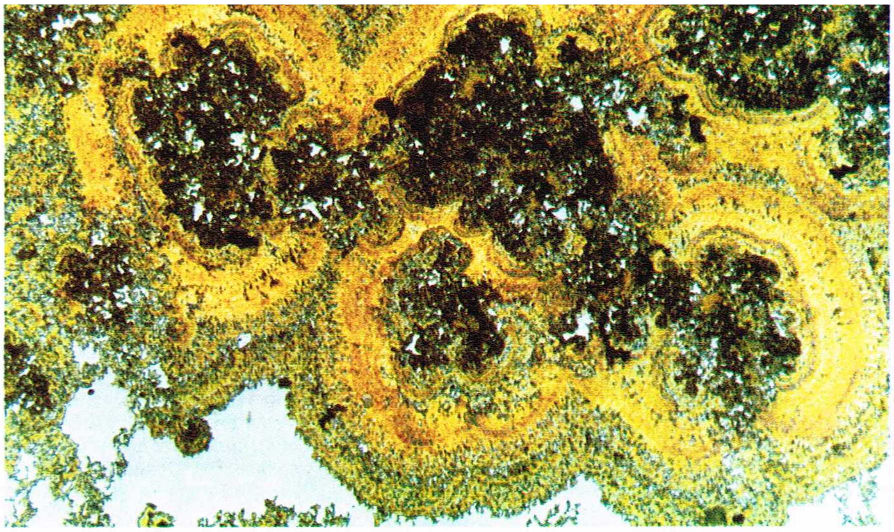

C.E.A. - Photo R. Hasson

▲ ***Oxydation à l'air (rouille), du fer Armco, surface en cours de recouvrement. Ce cliché est centré préférentiellement sur les inclusions de SMn.***

Aux États-Unis, les dégâts causés par la corrosion sont évalués à 5,5 milliards de dollars par an, soit 2 % environ du produit national brut.

L'agent de corrosion peut être soit liquide, soit gazeux. Dans le premier cas, qui correspond à des températures relativement basses ($t < 100$ °C), on parle de corrosion électrochimique, ou encore de corrosion aqueuse, car l'eau est le solvant le plus courant; toutefois, d'autres milieux liquides comme les milieux organiques (ou les métaux liquides) jouent aussi un rôle important en corrosion. Dans le second cas, on parle de corrosion par les gaz, ou encore de corrosion sèche; la température y est généralement beaucoup plus élevée que dans le cas de la corrosion électrochimique.

Corrosion électrochimique

Les recherches en corrosion sont relativement anciennes, et, dès 1830, le physicien De La Rive en proposait une théorie électrochimique. Cependant, les recherches n'ont connu un grand développement que depuis une cinquantaine d'années; elles ont révélé que les phénomènes de corrosion sont complexes et que les facteurs métallurgiques y jouent un rôle important.

Considérons une électrode, à savoir un métal pur, qui plonge dans une solution, l'interface étant le siège d'une seule réaction électrochimique : $M \rightleftarrows M^{Z+} + Ze^-$; des ions M^{Z+} passent en solution jusqu'à l'équilibre, où le système, alors, n'évolue plus d'un point de vue macroscopique; le métal adopte un potentiel ε dit d'équilibre qui est donné par la relation de Nernst :

$$\varepsilon = E_0 + \frac{RT}{ZF} \text{Log } a_i^{\nu_i}$$

où a_i est l'activité de l'espèce, et ν_i son coefficient stœchiométrique; E_0 est le potentiel standard.

L'influence du pH sur ce potentiel se traduit par la relation suivante :

$$\varepsilon = E_0 - 0{,}059 \text{ pH} + \frac{RT}{ZF} \log \frac{(\text{ox})}{(\text{red})}$$

Graphiquement, l'influence du pH sur le potentiel pour un métal donné, pour lequel on considère toutes les espèces ioniques et solides correspondantes, se traduit par un diagramme dit de Pourbaix. Ce diagramme permet de distinguer pour tous les métaux trois domaines distincts : domaine de corrosion, domaine d'immunité, domaine de passivité.

Cependant, on ne peut décrire la corrosion en simples termes de thermodynamique électrochimique à l'équilibre. En effet, il faut tenir compte des aspects cinétiques, dus à l'intervention des phénomènes de polarisation. Sur une pièce métallique qui se corrode, il existe des sites anodiques et cathodiques. Sur un site anodique, il se produit une réaction d'oxydation du métal, à savoir, pour le fer, par exemple :

(1) $$Fe \rightarrow \underset{\text{(en solution)}}{Fe^{2+}} + 2\,e^-$$

le métal passe donc en solution sous forme d'ions. Cette réaction peut avoir lieu, car, simultanément, sur un site cathodique, il se produit une réduction qui, dans le cas de l'eau, correspond soit à la réduction de l'oxygène dissous :

(2) $$1/2\ O_2 \text{ (dissous)} + 2\,e^- + H_2O \rightarrow 2\ OH^-$$

soit à la réduction des protons H^+ :

(3) $$2\ H^+ \text{ (en solution)} + 2\,e^- \rightarrow H_2 \nearrow$$

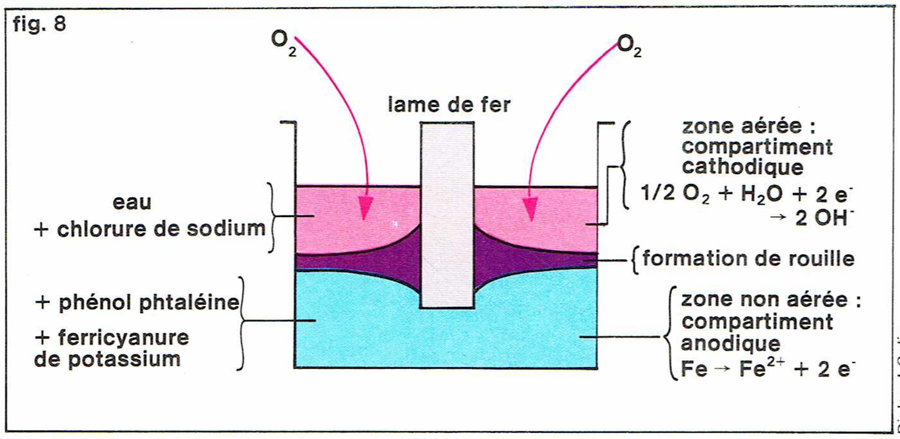

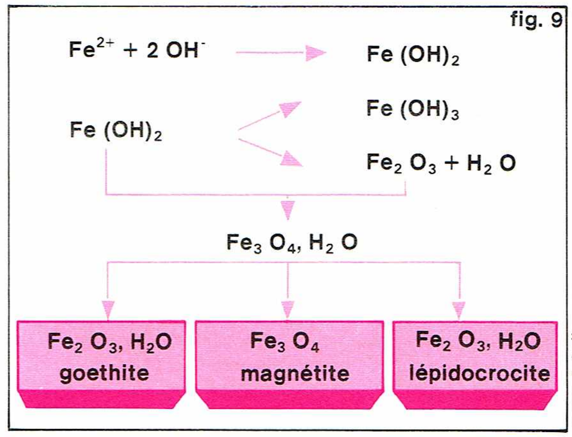

▲▶ *A gauche, figure 8 : expérience « d'aération différentielle ». Elle consiste à créer une hétérogénéité dans le milieu de corrosion, d'où l'apparition de zones cathodique et anodique, et effet de pile qui entraîne la corrosion de l'anode. En haut, à droite, figure 9 : schéma indiquant comment va se former la rouille à la rencontre des compartiments anodique et cathodique de la figure 8.*
▼ *En haut : formation de poils (trichites) à la surface d'une couche d'oxyde de titane (rutile) obtenue par oxydation du titane à 850 °C dans une atmosphère contenant de la vapeur d'eau ; en bas, fissuration caractéristique d'une couche de zircone formée sur un alliage de zirconium.*

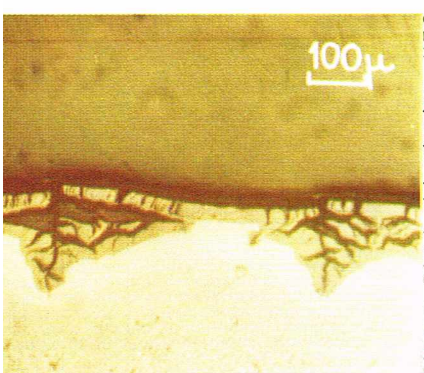

L'intervention des réactions **(1)** et **(2)** peut être mise en évidence à l'aide de l'expérience dite « d'aération différentielle » (encore appelée pile d'Evans) [*fig.* 8]. Cette expérience consiste à créer une hétérogénéité dans le milieu de corrosion, d'où l'apparition de zones cathodique et anodique ; il en résulte un effet de pile qui entraîne la corrosion de l'anode. A la rencontre des compartiments anodique et cathodique va se former de la rouille, selon le schéma de la *figure* 9. Ce type de corrosion se manifeste également dans le cas d'une goutte d'eau salée déposée à la surface d'une plaque de fer.

Les bactéries peuvent, elles aussi, produire des modifications locales de concentration par suite de leur cycle de vie ; il en résulte donc, par hétérogénéité du milieu, un phénomène de corrosion dite bactérienne. Celle-ci se manifeste dans le cas des canalisations enterrées. De nombreux facteurs comme l'agitation du milieu, sa température jouent en outre un rôle important sur la vitesse d'attaque. Toute hétérogénéité dans le matériau conduit également à un effet de corrosion : les inclusions, les différences d'orientation cristalline ou de taux d'écrouissage vont en effet constituer des piles locales. Ainsi, la précipitation de carbure de chrome, $Cr_{23}C_6$, dans les aciers inoxydables austénitiques peut causer une corrosion intergranulaire sévère qui se manifeste en particulier dans le cas des structures soudées de part et d'autre du cordon de soudure. Des additions de titane ou de niobium permettent de lutter contre ce phénomène. Du point de vue géométrique, la corrosion se manifeste de plusieurs façons.

La passivation. Dans certaines conditions, l'attaque d'un métal est fortement ralentie par suite de la formation d'une pellicule superficielle protectrice. Ce film de passivation est très mince : de l'ordre de quelques angströms à quelques dizaines d'angströms. Les métaux de transition comme le fer, le nickel, le chrome et le titane, par exemple, sont susceptibles de se passiver. Ce phénomène est mis en pratique dans le développement d'alliages devant résister à la corrosion, comme les aciers inoxydables.

Moyens de lutte contre la corrosion électrochimique. L'addition d'un élément, même à faible teneur, peut améliorer à la fois les propriétés mécaniques et la résistance à la corrosion du métal de base. Citons comme exemple les aciers inoxydables, pour lesquels on ajoute au fer, suivant le type d'acier considéré, du chrome, du nickel et du molybdène. On peut par ailleurs protéger un acier ordinaire par un revêtement constitué d'un métal ou d'un alliage résistant bien au milieu de corrosion. Ainsi, on utilise des revêtements de zinc, d'étain, de nickel, de chrome.

Au lieu d'agir directement sur le matériau, on peut agir sur le milieu en ajoutant en très petites quantités un inhibiteur (1 °/₀₀ en volume). Celui-ci forme à la surface du métal un film étanche, donc protecteur. Ces inhibiteurs peuvent être des composés minéraux comme les phosphates et les chromates, ou des composés organiques comme les amines.

Cependant, le mode de protection le plus élégant est de nature électrochimique. Il consiste à coupler le matériau à protéger avec un métal moins noble qui jouera le rôle d'anode : c'est la protection cathodique. Ainsi, en utilisant des anodes en zinc ou en magnésium, on protège

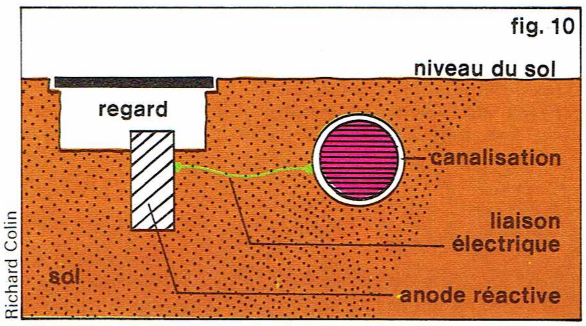

les coques de navires, ou encore les canalisations enterrées (*fig.* 10). Ce type de protection peut être également réalisé en imposant au métal à protéger un potentiel convenable à l'aide d'une source extérieure de courant.

Corrosion sèche

La corrosion sèche est la formation d'un produit de corrosion C, le plus souvent solide, résultant de l'attaque d'un métal M par un gaz G : M + G → C. Tous les métaux et alliages, à l'exception des métaux nobles (l'or par exemple), sont attaqués par les gaz. Cela traduit le fait que ces métaux ont une tendance spontanée à repasser à l'état d'ion, état sous lequel ils existent dans la nature sous forme de minerais.

Dans le cas de l'action de l'oxygène, il s'agit d'une *oxydation*. Cependant, tous les éléments électronégatifs, qu'ils soient sous forme libre ou combinée, peuvent provoquer une attaque. Il en résulte la formation, dans la plupart des cas, d'une couche superficielle protectrice constituée d'un ou plusieurs composés. La nature de ceux-ci dépend des conditions expérimentales, c'est-à-dire que seuls les produits stables d'un point de vue thermodynamique seront susceptibles d'exister.

En pratique, il est important de considérer la *vitesse d'oxydation ;* le plus souvent, pour la caractériser, on détermine la variation d'épaisseur de la couche d'oxyde ou l'augmentation de poids du matériau en fonction du temps. Différents types de lois de vitesse, appelées lois cinétiques, sont observés expérimentalement.

La vitesse d'attaque dépend en outre de la température, de la pression partielle et de la composition du gaz, de la pureté et de la structure du métal ainsi que de son état de surface. L'effet de la température est traduit par la relation d'Arrhénius $k = k_0 \exp(-Q/RT)$, où k est la constante de vitesse, et Q l'énergie d'activation du phénomène.

Du point de vue des mécanismes, la corrosion sèche est souvent régie par les phénomènes de diffusion à travers la couche de corrosion. Suivant la nature d'un oxyde, par exemple, c'est la diffusion du métal sous forme cationique ou la diffusion de l'oxygène sous forme anionique qui imposera sa vitesse. Ce phénomène de migration résulte de l'existence de défauts atomiques dans l'oxyde qui traduisent des écarts possibles de composition. En dehors de ces aspects diffusionnels, les paramètres structuraux, et surtout mécaniques, jouent un rôle important, parfois primordial ; ainsi, des fissures

formées dans la couche pour relâcher les contraintes de croissance font perdre à celle-ci son caractère *protecteur*.

Moyens de lutte contre la corrosion sèche. D'un point de vue pratique, de nombreux alliages présentent à la fois de bonnes propriétés mécaniques et une bonne résistance à la corrosion sèche. Cependant, la mise au point de ces alliages est une opération délicate dans la mesure où de nombreux paramètres sont à prendre en considération. Pour lutter efficacement contre la corrosion sèche, on peut aussi utiliser des revêtements, mais ceux-ci devraient avoir un ensemble de caractéristiques que l'on ne peut réaliser ; aussi s'oriente-t-on le plus souvent vers une solution de compromis. Ces revêtements sont constitués soit de métaux (aluminium, chrome, nickel ou silicium), soit aussi de matériaux céramiques (oxydes, nitrures, carbures).

La corrosion sous contrainte

Les besoins du développement industriel ont conduit les métallurgistes à rechercher et à mettre au point des alliages métalliques à hautes caractéristiques mécaniques ; d'autre part, les utilisateurs, dans leur désir d'améliorer le rapport résistance mécanique/poids de leurs constructions, ont été amenés à concevoir des structures dans lesquelles le taux des contraintes appliquées à ces alliages se rapproche de plus en plus de leur résistance mécanique réelle. Un mode nouveau de dégradation des matériaux est alors apparu : leur rupture sous l'action *simultanée* d'une contrainte et d'un milieu environnant plus ou moins agressif.

La première manifestation spectaculaire de ce phénomène fut sans doute les accidents survenus aux *Liberty Ships* américains que l'on vit se briser en deux parties dans les ports des États-Unis lors de la Dernière Guerre ; cependant, tous les alliages métalliques à haute résistance proposés depuis trente ans risquent de subir dans certaines conditions les effets de ce mode de destruction extrêmement pernicieux.

Définition et caractéristiques générales

La corrosion sous contrainte est, par définition, l'initiation et/ou la propagation d'une fissure dans un matériau sous l'action conjointe d'une contrainte et d'un milieu agressif — généralement spécifique du matériau — et dans des conditions où ni l'action de la contrainte seule, ni celle du milieu environnant seul ne provoquerait de dégradation notable. Il s'agit d'une *rupture différée ;* cela signifie que l'initiation d'une fissure de corrosion sous contrainte ainsi que la propagation par corrosion sous contrainte d'une fissure initiée par le même phénomène ou préexistante ne sont pas instantanées. Globalement, la rupture se décompose en trois étapes : initiation d'une piqûre aiguë à partir de la surface, progression lente d'une fissure à partir de cette piqûre sous l'action de contraintes en traction, et finalement rupture brutale lorsque la fissure a atteint une profondeur suffisante pour pouvoir se propager sous l'action des seules contraintes dans le matériau.

Pour caractériser le phénomène, les métallurgistes tracent généralement un diagramme, dans lequel on reporte en abscisse le temps de rupture d'une éprouvette, et en ordonnée la contrainte appliquée pendant l'essai (*fig.* 11 a). Ces diagrammes font généralement apparaître une « contrainte de non-rupture » σ_{nR}, au-dessous de laquelle aucune fissure ne progresse dans le matériau en présence du milieu considéré. Un essai plus élaboré consiste à placer une éprouvette normalisée de mécanique de rupture, au préalable préfissurée (par exemple par fatigue), sous un coefficient de contrainte K_{Ii} dans le milieu agressif. On mesure le temps de rupture (*fig.* 11 b). Il existe généralement une valeur de K_{Ii}, notée K_{Iscc}, qui représente la limite de non-propagation de la fissure initiale.

Manifestations

Nous donnons ici quelques exemples, parmi les plus connus, de couples alliage métallique-milieu de corrosion, qui ont donné lieu, ces dernières années, à des recherches de mécanismes approfondies.

Aciers à haute résistance. Les aciers de construction dits « à haute résistance » subissent, en présence d'atmosphères plus ou moins acides (eau ou milieux acides) et de contraintes inférieures ou égales à la limite d'élasticité, une fissuration dont l'initiation est toujours intergranulaire. Le phénomène présente une importance industrielle non négligeable, puisqu'il concerne, notamment, les câbles de ponts suspendus et les fils de béton précontraint. Sa détection est particulièrement délicate, car il débute dans les zones non aérées, donc peu accessibles, des structures.

Aciers inoxydables en milieu chloruré. Placés sous contraintes extérieures en tension dans des milieux contenant des ions chlorurés, la plupart des aciers inoxydables sont sujets à une corrosion fissurante, intergranulaire pour les aciers ferritiques et martensitiques, transgranulaire (au moins dans les premiers stades) pour les aciers austénitiques.

Aciers austénitiques en milieux basiques chauds. Un phénomène relativement nouveau de fissuration par corrosion sous contrainte a été récemment mis en évidence pour les aciers austénitiques et les alliages à base de nickel placés en présence de milieux alcalins à température supérieure à l'ambiante. La fissuration est intergranulaire et particulièrement sévère.

Alliages d'aluminium en milieu chloruré. Certains alliages d'aluminium à durcissement structural sont, en milieux contenant des ions halogénures, le siège d'une fissuration sous contrainte. Bien que la propagation soit intergranulaire, il ne faut pas confondre ce phénomène avec la corrosion intergranulaire sans contrainte des mêmes alliages. Cette remarque s'applique d'ailleurs également aux aciers inoxydables.

Alliages de cuivre. Le très ancien phénomène de fissuration intergranulaire des laitons en atmosphère ammoniacale n'a toujours pas trouvé d'explication théorique.

Alliages de titane. En milieu chloruré, certains alliages de titane présentent un risque de propagation sous contrainte de fissures préexistantes. Cette propagation est fonction de la texture du matériau et se produit par clivage de la phase hexagonale riche en titane. Ces mêmes alliages, mis en présence de certains solvants organiques, sont extrêmement sensibles à la rupture différée.

Mécanismes

Les mécanismes de la corrosion sous contrainte sont loin d'être élucidés. Les diverses étapes du phénomène n'ont d'ailleurs pas la même importance pour les différents couples alliage métallique-milieu corrosif. On peut tout au plus séparer les paramètres principaux qui interviennent dans le déroulement du processus.

Paramètres électrochimiques. Les réactions électrochimiques de corrosion pure interviennent tout d'abord de façon primordiale au niveau de l'initiation des fissures, puisque celle-ci ne peut s'expliquer que par une réaction de corrosion extrêmement localisée, soit en raison d'une hétérogénéité de surface du matériau, soit en raison d'une rupture locale des couches protectrices *(passivantes)*.

Pendant la propagation des fissures, on admet généralement qu'une micropile se forme, le fond de la fissure étant l'anode de cette pile. De plus, le milieu corrosif se trouve à cet endroit confiné et devient rapidement beaucoup plus acide que le milieu initial, cela en raison même de l'accumulation des produits de corrosion (ions métalliques hydrolysés). Cette acidification rend en particulier possible un dégagement intense d'hydrogène, dont l'action nocive sur les propriétés mécaniques sera évoquée plus loin.

Propriétés des couches protectrices (passivantes). On sait que les alliages « inoxydables » (aciers inoxydables, alliages d'aluminium ou de titane) sont normalement recouverts d'une très fine couche protectrice, dite *passivante*, dont l'efficacité dépend du milieu agressif. La présence d'ions chlorurés rend, en particulier, cette couche beaucoup moins efficace. En corrosion sous contrainte, cette couche est localement détruite par la déformation du métal qui provoque en surface l'apparition de marches de glissement qui sont dues au mouvement des dislocations. Ce phénomène peut expliquer aussi bien l'initiation des fissures en certains points de la surface particulièrement déformés, que leur propagation en raison de la concentration de contrainte qui se produit au fond d'une fissure soumise à des tensions extérieures.

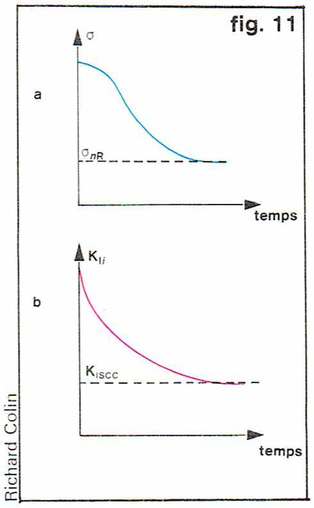

Richard Colin

▲ *Figure 11 : courbes caractéristiques du phénomène de rupture (voir développement dans le texte).*

◀ *Page ci-contre, figure 10 : protection cathodique d'une canalisation enterrée.*

▼ *En haut, faciès de rupture sous hydrogène d'un acier « Maraging ». En bas, microfissure due à l'hydrogène dans un alliage Fe-0,15 % Ti ; microscope électronique à 1 000 kV en transmission (C. N. R. S. - ONERA) sur lame mince et autoradiographie au tritium.*

G. Lapasset - Lab. de métallurgie - Orsay

M. Aucouturier - Lab. de métallurgie - Orsay

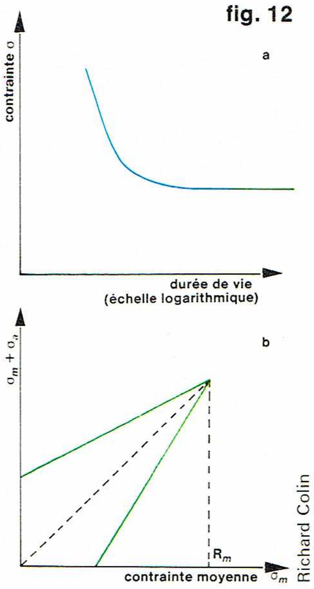

▲ *Figure 12 : essais d'endurance : a, courbe de Wöhler ; b, diagramme de Goodman.*

Fragilisation en pointe de fissure. Il existe un certain nombre de cas où la propagation des fissures ne peut s'expliquer que par une modification des propriétés mécaniques du matériau en pointe de fissure.

L'un des mécanismes possibles est une fragilisation de l'alliage par l'hydrogène issu des réactions de corrosion. On admet en effet que, pour certains matériaux (aciers à haute résistance, alliages de titane), l'acidification du milieu corrosif à fond de fissure provoque, par réaction électrochimique, le dégagement d'hydrogène en quantités importantes. Cet hydrogène diffuse dans l'alliage et vient, pour des raisons thermodynamiques, se concentrer dans la zone de concentration de contraintes maximales, qui se situe légèrement en avant de la pointe de fissure. Si les vitesses de diffusion sont suffisamment grandes, la concentration d'hydrogène en ce point devient rapidement importante et provoque une fragilisation irréversible du matériau, en particulier à l'aplomb des défauts structuraux (joints de grains, par exemple). Pour que ce mécanisme soit possible, il faut que la vitesse de migration de l'hydrogène dans le réseau cristallin du métal soit grande. Cela n'est pleinement le cas que dans les alliages de symétrie cubique centrée (aciers ferritiques et martensitiques).

Pour d'autres alliages, il a été suggéré que l'action simultanée des contraintes et des réactions électrochimiques (dégagement d'hydrogène en particulier) provoque au fond de la fissure l'apparition d'une seconde phase : martensite dans les aciers inoxydables austénitiques, hydrures dans les alliages à base de nickel ou de titane. C'est cette seconde phase qui servirait de chemin préférentiel à la propagation des fissures.

Paramètres microstructuraux. Quel que soit le mécanisme invoqué pour expliquer la corrosion sous contrainte, la microstructure du matériau y joue un rôle fondamental. Ainsi, la cinétique de la destruction locale et de la réparation éventuelle des couches passivantes dépend de la composition de l'alliage et de l'arrangement des dislocations dans cet alliage. De même, la sensibilité à une fragilisation par l'hydrogène est fonction de la répartition des défauts (précipités, joints de grains, interfaces, dislocations) dans le matériau. L'existence d'hétérogénéités microstructurales, comme les zones présentant des gradients de précipitation autour des joints de grains des alliages légers, par exemple, est toujours néfaste. Enfin, les impuretés des alliages jouent un rôle fondamental, puisqu'il a pu être montré, par exemple, qu'un acier inoxydable de haute pureté est totalement insensible à la corrosion sous contrainte dans des conditions où un alliage industriel de composition analogue est fissuré irrémédiablement.

Lutte contre la corrosion sous contrainte

Les remarques ci-dessus définissent bien le cadre dans lequel peut s'exercer l'action du métallurgiste dans la recherche de matériaux résistant mieux à la corrosion sous contrainte. Ainsi, c'est une amélioration des couches passivantes qui est le plus souvent recherchée dans les aciers inoxydables ; l'adjonction d'éléments comme le molybdène à ces aciers en est un exemple. Toujours dans le domaine des modifications de composition, l'adjonction de certains éléments permet quelquefois d'agir sur la configuration des dislocations, ce qui diminue la hauteur des marches de glissement, sources d'attaques localisées. De plus, dans les aciers inoxydables austénitiques, on peut, par une légère augmentation de la teneur en nickel, par exemple, diminuer la probabilité de formation de martensite d'écrouissage en pointe de fissure.

▼ *Figure 13 : essais de fatigue oligocyclique, courbe de Manson-Coffin.*

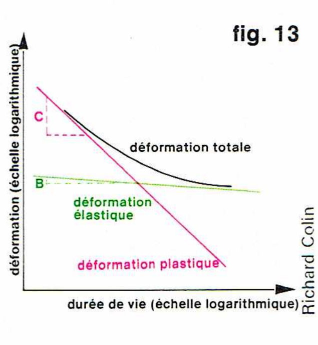

Le second paramètre sur lequel peut agir l'utilisateur est le traitement thermique du matériau. Il a pu ainsi être démontré qu'un traitement thermique approprié (léger surrevenu des alliages légers ou des aciers martensitiques, par exemple) améliore considérablement la tenue d'un alliage donné à la corrosion sous contrainte sans trop dégrader sa résistance mécanique intrinsèque. L'explication d'une telle amélioration est sans doute à trouver dans les modifications microstructurales provoquées par ce traitement : diminution des gradients de concentration localisés autour des joints dans les alliages légers, modification de la répartition des sites de piégeage de l'hydrogène dans les aciers martensitiques.

Enfin, l'amélioration de la pureté des alliages conduit non seulement à une probabilité moindre d'amorçage des microfissures autour des inclusions, mais aussi à une amélioration de la tenue intrinsèque à la propagation de ces microfissures.

Sans aller jusqu'à affirmer, comme certains spécialistes, que la corrosion sous contrainte est en passe de devenir le problème numéro un de l'utilisation des matériaux métalliques, il est certain que la mise au point de matériaux nouveaux passe par la recherche des mécanismes de ce phénomène et des remèdes spécifiques qui peuvent y être apportés. Le métallurgiste comprend encore mal les paramètres de ce mode de destruction extrêmement coûteux. Il est à souhaiter que le développement des recherches en cours puisse apporter quelques réponses aux questions encore posées.

La fatigue des matériaux

C'est un fait d'expérience que les matériaux dans les conditions réelles d'utilisation peuvent se rompre sous une contrainte inférieure à la résistance à la traction, voire même à la limite d'élasticité, lorsque la sollicitation est répétée un grand nombre de cycles. Qui n'a pas tenté de casser un fil de fer en lui impliquant à la main quelques cycles de flexion ? Le comportement des matériaux sous sollicitation cyclique est appelé « fatigue ».

L'histoire de la fatigue des matériaux remonte aux années 1850, époque à laquelle des cas de rupture par fatigue sont relatés dans la littérature, mais plus de cent ans après que le physicien français René de Réaumur eut fait ses premières observations, au microscope optique, sur des cassures dans l'acier. L'expression « fatigue des métaux » date de 1854. Elle a été proposée par F. Braithwaite. Quant à la notion de « limite d'endurance », elle revient à Wöhler et date de 1858.

On peut distinguer trois étapes importantes dans la connaissance intime des phénomènes de fatigue. La première remonte à 1930 environ : elle correspond aux premiers travaux de Gough par microscopie optique, lesquels mettent en évidence le rôle prépondérant des glissements dans les déformations de surface. La deuxième étape date de 1950, avec les progrès de la métallographie tant optique qu'électronique et l'application du polissage électrolytique. Il convient de citer parmi les pionniers de cette seconde étape Zapffe, Hempel, Forsyth, Wood, Cazaud. A partir de ce moment, la fatigue sort du domaine technique pour être abordée d'un point de vue plus fondamental. Les premières observations portent sur l'évolution des déformations de surface et la naissance de microfissures dans des bandes de glissements permanentes. Vers 1945, Zapffe découvre que les cassures par fatigue d'éprouvettes en alliage léger et en acier doux sont couvertes de stries qu'il appelle « structure lamellaire ». Depuis 1960, seuil de la troisième étape, un nombre considérable de publications ont paru sur ce sujet, et il serait vain d'en faire un examen complet. Sur le plan mécanique, c'est à partir de 1960 que les travaux de Mc Clintock, Paris et Rice portent leurs fruits et permettent d'aborder le phénomène de la fatigue sous l'angle de la mécanique de la rupture.

D'une façon générale, lorsqu'un métal est soumis à une contrainte cyclique voisine de la limite d'endurance, le corps du matériau restant dans un domaine macroscopiquement élastique n'est que très faiblement déformé. On n'observe pas de modification géométrique, pas plus qu'un changement notable, à l'échelle microscopique, de la densité de dislocations. Cependant, un trait caractéristique de la sollicitation cyclique est la formation de crans et de boucles de dislocations, témoignant de l'interaction des dislocations animées d'un mouvement de va-et-vient.

La déformation plastique proprement dite est localisée à la surface et autour de la fissure, à moins que la contrainte appliquée ne dépasse la limite d'élasticité ; dans ce dernier cas, où la plastification s'étend à tout le volume du matériau, on dit qu'il s'agit de fatigue plastique ou oligocyclique. Il convient d'insister sur le fait que la fissuration par fatigue se déroule, sauf en ce qui concerne la fatigue oligocyclique, en régime de plastification limitée et confinée.

La déformation plastique en surface ou à fond de fissure a pourtant un rôle essentiel en fatigue. Deux cas peuvent se produire :

— le métal durcit sous sollicitation cyclique, c'est le cas des structures en équilibre (métal recuit) ;

— le métal s'adoucit, c'est le cas des structures de trempe, ou bien encore des structures écrouies initialement.

Dans ces conditions, les premiers endommagements par fatigue se produisent à la surface sur laquelle apparaîtront les premières microfissures qui caractérisent la phase d'amorçage. Partant de la surface, la fissure progresse d'abord en contraintes planes sur une fraction de millimètre, c'est le stade I de la fissuration, puis en déformations planes, c'est le stade II, au cours duquel se développe une fissure macroscopique. La fissuration et l'amorçage en fatigue sont presque toujours transgranulaires.

Actuellement, on tend à séparer nettement les processus d'amorçage, auxquels on attache la notion d'endurance, de ceux de la fissuration. Pratiquement, le comportement du matériau est défini par une durée de vie liée à l'amorçage de la fissure et par une durée de vie associée à la progression de la fissure. On définit une limite d'endurance qui est la sollicitation la plus élevée qui ne conduira pas à l'amorçage d'une fissure nocive, et un seuil de fissuration au-dessus duquel une fissure existante pourra se propager.

Les différents moyens d'investigation

On aborde actuellement la fatigue des métaux de quatre façons différentes, à savoir : par le relevé des courbes de Wöhler, par la méthode de Coffin, par l'étude de l'écrouissage cyclique et par la mesure de la vitesse de fissuration en fonction du facteur d'intensité de contrainte.

La première de ces méthodes est de loin la plus utilisée, car elle permet de déterminer une limite d'endurance au-dessous de laquelle on est, en principe, à l'abri des ruptures par fatigue. L'inconvénient est que la limite d'endurance ainsi déterminée ne donne pas une idée convenable de l'influence des défauts, qui peuvent exister initialement dans une structure ou bien y apparaître en service, ni du développement ultérieur des fissures correspondantes.

L'exemple suivant atteste que la limite d'endurance, considérée sans précaution, peut effectivement être insuffisante. Un acier Maraging, dont la limite d'endurance est de 70 daN/mm^2, semble bien supérieur à un acier inoxydable austénitique 16-13 qui ne résiste en fatigue qu'à 19 daN/mm^2. En fait, l'étude de la propagation des fissures montre bien que le seuil du facteur d'intensité de contrainte ΔK_S à partir duquel il y a propagation est de l'ordre de 4 MPa $\sqrt{m}$ pour le premier de ces aciers, alors qu'il atteint 13 MPa $\sqrt{m}$ pour le second. Cela veut dire qu'en principe, pour un microdéfaut de taille donnée, il y aura fissuration dans l'acier Maraging pour une contrainte environ trois fois plus faible que dans l'acier inoxydable.

Cette comparaison montre bien que l'essai d'endurance ne peut pas, à lui seul, caractériser de manière réaliste la tenue à la fatigue. Il est donc essentiel de le compléter par l'étude de la propagation de la fissure, qui seule renseigne de façon précise sur le risque de fissuration d'une pièce en service, l'initiation la plus redoutable se faisant sur un défaut accidentel de la surface ou dans une région de concentration de contrainte. Dans une pièce en service, il faut d'ailleurs entendre par défaut aussi bien une piqûre de corrosion ou une empreinte accidentelle qu'un défaut congénital d'usinage, de soudage ou de fonderie. Les inclusions habituellement présentes dans les matériaux n'offrent, en revanche, pas le même intérêt; leur influence est en effet mieux connue, parce qu'elle est prise en compte dans l'essai d'endurance lui-même.

Les essais d'endurance. La courbe de Wöhler. Les essais d'endurance sont effectués en général sous effort sinusoïdal $F = F_0 \sin \omega t$, en traction, en flexion plane, en flexion rotative et parfois en torsion. Ils ont pour but de déterminer le nombre de cycles à la rupture en fonction de la contrainte appliquée. La courbe représentative, ou courbe de Wöhler, présente une asymptote à partir de 10^6 ou 10^7 cycles. La valeur asymptotique de la contrainte σ_d est appelée limite d'endurance (*fig.* 12 a). La courbe de Wöhler définit ainsi deux domaines : l'un de rupture, l'autre de non-rupture. Elle permet, de plus, d'évaluer une durée de vie probable pour une contrainte donnée.

Par nature, les résultats des essais d'endurance sont dispersés, et on les traite habituellement par des méthodes statistiques. La plus fréquemment utilisée est celle dite « de l'escalier ». Elle permet de déterminer la limite d'endurance ou une durée de vie à N cycles avec un petit nombre d'éprouvettes (9 à 25 éprouvettes).

La courbe de Wöhler dépend des paramètres de la sollicitation : fréquence, contrainte moyenne, contrainte alternée. Sauf en traction répétée, on trace en principe la courbe de Wöhler en fonction de la contrainte alternée pour une contrainte moyenne donnée. L'ensemble des résultats peut être représenté dans un diagramme de Goodman (*fig.* 12 b), ce diagramme n'étant qu'un moyen commode de rassembler d'une façon condensée les résultats des essais d'endurance (nombre de cycles à la rupture en fonction de la contrainte moyenne et de la contrainte alternée). Dans ce diagramme, la relation proposée par l'auteur est :

$\sigma_a = \sigma_0 \left(1 - \frac{\sigma_m}{R}\right)$, où σ_a : contrainte alternée; σ_m : contrainte moyenne; σ_0 : contrainte alternée pour $\sigma_m = 0$; R : résistance à la traction.

L'équation de la courbe de Wöhler est de la forme :

$$\log (N_f + B) = a - b \log (\sigma_a - E)$$

N_f : nombre de cycles à la rupture; B, a, b, E : coefficients empiriques.

Les essais de fatigue oligocyclique. La loi de Manson-Coffin. Lorsque les déformations sont importantes, on préfère rapporter le nombre de cycles à la rupture à l'amplitude de la déformation plutôt qu'à la contrainte. C'est essentiellement le domaine de la fatigue oligocyclique (*fig.* 13). Manson et Coffin ont établi empiriquement la relation suivante :

$$\frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \varepsilon'_f\,(2\,N_f)^c$$

$\Delta\varepsilon_p$ est l'amplitude de la déformation plastique.

Dans le domaine élastique, on a :

$$\frac{\Delta\varepsilon_a}{2} = \frac{\sigma'_f}{E}\,(2\,N_f)^b$$

soit au total :

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_a}{2} = \varepsilon'_f\,(2\,N_f)^c + \frac{\sigma'_f}{E}\,(2\,N_f)^b$$

N_f : nombre de cycles à la rupture; c : exposant qui dépend de la ductilité ($0{,}05 < c < -0{,}7$); b : exposant qui dépend de l'endurance ($0{,}005 < b < -0{,}15$); ε_f : paramètre lié à la ductilité.

Pour $2\,N_f = 1$, on a : $\frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \varepsilon_f = \log \frac{S_0}{S}$: déformation vraie à la rupture en traction; σ'_f : paramètre lié à l'endurance.

Pour $2\,N_f = 1$, on a : $\sigma_a = \sigma'_f = \sigma_f$: contrainte vraie à la rupture en traction.

Les essais d'écrouissage cyclique. Les essais d'écrouissage cyclique conduisent à la détermination de la courbe de consolidation cyclique, caractéristique de l'état stable des déformations sous sollicitation cyclique. On obtient cette courbe en traçant le lieu des sommets des boucles stables d'hystérésis correspondant à des essais de fatigue commandés en déformation (*fig.* 14).

L'équation de la courbe de consolidation cyclique est de la forme :

$$\sigma_a = k' \left(\frac{\Delta\varepsilon_p}{2}\right)^{n'}$$

n' est le coefficient d'écrouissage cyclique.

La position de la courbe de consolidation cyclique par rapport à la courbe de consolidation monotone permet de savoir si le métal durcit ou s'adoucit sous sollicitation cyclique.

Les essais de fissuration par fatigue. La vitesse de fissuration par fatigue est exprimée par l'accroissement de la fissure à chaque cycle. Elle est reliée à l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte ΔK (*fig.* 15). Les essais de fissuration par fatigue sont donc effectués dans des éprouvettes calibrées, les mêmes que celles qui sont utilisées pour les essais de ténacité.

Paris a montré que la vitesse de fissuration $\frac{dl}{dN}$ est reliée à ΔK par la relation suivante :

fig. 14

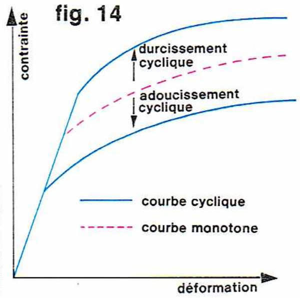

Richard Colin

▲ *Figure 14 : écrouissage cyclique.*

▼ *Figure 15 : vitesse de fissuration.*

fig. 15

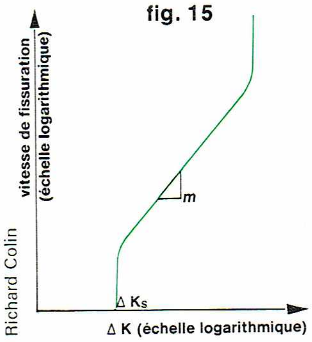

Richard Colin

$\frac{dl}{dN} = C\ (\Delta K)^m$; *m* est un exposant qui varie de 2 à 10.

Pour les faibles vitesses, ΔK tend vers un seuil ΔK_S et, au moment de la rupture, ΔK est de l'ordre de grandeur de K_{1c}.

Une approximation convenable pour l'ensemble de la courbe est donnée par la relation de Forman :

$$\frac{dl}{dN} = B\ \frac{\Delta K^m}{(1 - R)\ K_c - \Delta K}$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$

Influence des conditions réelles d'utilisation

Sur le plan pratique, il convient de souligner que la tenue des matériaux à la fatigue ne dépend pas seulement des facteurs métallurgiques (taille de grain, inclusions, nature des glissements, précipitation, consolidation) qui règlent l'endommagement, mais également des conditions réelles d'utilisation, que l'on a l'habitude de classer en trois catégories : les facteurs liés à l'état de surface, les facteurs liés à l'environnement, les facteurs mécaniques de la sollicitation.

Dans la mesure où l'amorçage des fissures de fatigue est un phénomène de surface, tous les traitements affectant la géométrie de la surface ou les contraintes résiduelles ont une influence sur l'endurance. Les rayons profonds d'usinage et les congés de raccordement trop aigus sont connus pour abaisser la limite d'endurance. On ne doit pas pour autant en conclure qu'une surface rectifiée est recommandable dans tous les cas, à cause des contraintes résiduelles de traction qui y sont souvent associées. Un compromis est alors à trouver pour aboutir à une solution satisfaisante. Un des traitements de surface les plus efficaces pour améliorer la durée de vie à l'amorçage des fissures est le grenaillage. Il consiste à introduire superficiellement des contraintes résiduelles de compression résultant de la projection de particules calibrées.

Alors que l'état de surface ne joue que sur l'amorçage des fissures, l'environnement agit tant sur l'amorçage que sur la fissuration. En fatigue-corrosion dans une solution d'eau salée, on n'observe plus d'asymptote horizontale sur la courbe de Wöhler des alliages usuels, et la vitesse de fissuration est accrue d'un facteur atteignant parfois un ordre de grandeur. Inversement, une atmosphère pauvre en vapeur d'eau améliore nettement la tenue à la fatigue de la plupart des alliages. L'effet d'environnement est principalement marqué pour les sollicitations de faible amplitude et de faible fréquence.

Enfin, en pratique, il y a lieu de déterminer au mieux les paramètres de la sollicitation. Nous avons vu précédemment que, lorsque la contrainte moyenne augmente, la limite d'endurance diminue, et la vitesse de fissuration croît. Notons de plus que les sollicitations réelles d'une machine ou d'une structure sont rarement uniformes mais présentent généralement des régimes transitoires de sous-charge ou de surcharge. Ces variations temporaires de la sollicitation sont à prendre en compte pour prévoir le comportement des matériaux en service. Par exemple, une fissure en cours de propagation est ralentie lorsqu'elle subit périodiquement une surcharge. Par conséquent, l'ingénieur doit connaître précisément les conditions réelles d'utilisation pour déterminer correctement le comportement des matériaux vis-à-vis de la fatigue qui dépend, en somme, des facteurs métallurgiques, de l'état de surface, de l'environnement et de la sollicitation.

BIBLIOGRAPHIE

BÉNARD J., *l'Oxydation des métaux*, Gauthier-Villars, Paris, 1962. - CAZAUD M., POMEY G., RABBÉ P. et JANSSEN C., *la Fatigue des métaux*, Dunod, Paris, 1969. - GAROFALO, *Déformation et rupture par fluage*, Dunod, Paris, 1970. - HACHE A., *la Corrosion des métaux*, P.U.F., Paris, 1966. - PHILIBERT P., LACOURCELLE L. et BENSIMON R., *Protection contre la corrosion*, P.U.F. Paris, t. I, 1973, t. II, 1976, t. III, 1976. - RICHARDS C. W., *la Science des matériaux de l'ingénieur*, Dunod, Paris, 1965. - UHLIG H. M., *Corrosion and Corrosion Control*, John Wiley, New York, 1971.

MATÉRIAUX COMPOSITES

Définir les matériaux composites n'est pas chose aisée; ce sont des matériaux hétérogènes, formés de deux types de constituants qui ont des propriétés et des rôles mécaniques différents, une *matrice* jouant le rôle de liant entre des *éléments de renforcement;* nous considérerons comme éléments de renforcement des fibres plus ou moins longues et très fines, incorporées dans la matrice par un procédé mécanique artificiel.

De façon concrète, on peut dire simplement que le prototype du matériau composite est le plastique renforcé par des fibres de verre. D'autres fibres de renforcement et diverses matrices, qui seront présentées ici, peuvent être utilisées pour former des matériaux composites semblables.

On notera que le béton armé et les eutectites orientés ne rentrent pas dans le cadre délimité ici; cela est discutable, et, de fait, ces matériaux possèdent un certain nombre des caractères que nous présentons, en particulier en ce qui concerne les propriétés mécaniques. D'autres matériaux encore sont dans le même cas : l'amiante-ciment, le ferrobéton, les caoutchoucs renforcés; ils possèdent tous des caractéristiques particulières qui les ont fait écarter de ce texte.

Cette présentation des matériaux composites comportera d'abord une partie descriptive (les fibres, les matrices, les procédés de fabrication); ensuite, un exposé de leurs propriétés mécaniques : d'abord les monocouches, puis les stratifiés, ensuite les matériaux et structures sandwich, enfin les composites à renforcement tridirectionnel.

Les matériaux de renforcement

Les éléments de renforcement utilisés dans les matériaux composites sont très variés. Il s'agit souvent de matériaux ayant des propriétés mécaniques élevées lorsqu'ils sont sous forme fibreuse, et, en général, de matériaux fragiles (leur courbe de traction ne présente pas de zone plastique) avec une capacité d'allongement faible. Les fibres longues et leurs tissus sont les renforts les plus utilisés, et nous passerons en revue leurs diverses catégories : les fibres minérales et céramiques (verre, silice, amiante, bore et carbure de silicium), les fibres organiques et leurs dérivés (carbone et graphite, Kevlar, autres fibres naturelles ou synthétiques), les fibres métalliques (*tableau* I).

On utilise aussi des charges dispersées, sous forme de paillettes ou de petits grains dont le rôle de renforcement est négligeable ou secondaire; il peut s'agir de pigment, de particules de carbone destinées à rendre le composite conducteur de l'électricité, de petites billes de verre pour augmenter la rigidité en compression, de particules minérales donnant une résistance à l'abrasion, ou, plus simplement, de charges bon marché permettant de réduire la proportion de résine employée. Dans la plupart des cas, les propriétés mécaniques sont assez faibles, conditionnées par la liaison entre la charge et la résine, elle-même fortement dépendante du procédé et des soins apportés à la réalisation du composite. Ces charges dispersées ne seront pas examinées en détail ici.

Mentionnons également les trichites (ou *whiskers* en anglais), qui sont des monocristaux quasi parfaits : grâce à cette absence de défauts cristallins, leur résistance à la traction atteint des valeurs très élevées, proches de la limite théorique, évaluée à environ un dixième de leur module d'Young (rappelons que, pour les matériaux habituels, cette résistance va de quelques millièmes du module d'Young pour les qualités courantes à un ou deux centièmes pour les meilleures qualités). On sait fabriquer de tels monocristaux de métaux ou de matériaux inorganiques, mais ils n'ont pas réalisé les espoirs placés en eux pendant les années 1960-1970 où ils ont fait l'objet de nombreuses études, car leur incorporation dans des matrices s'est jusqu'à présent révélée décevante.

Les fibres de verre

Depuis la haute antiquité, le verre est un des produits les plus utiles de l'industrie humaine. Connu des Égyptiens et des Phéniciens, il a toujours passé, au cours des millénaires, pour un matériau fragile, un des symboles

mêmes de la fragilité. Utilisé tous les jours dans la gobeleterie, les vitres et les glaces, les lentilles d'optique, on l'imagine mal comme matériau à usages structuraux nécessitant de bonnes propriétés mécaniques.

Cette impression résulte pour une part d'une conception naïve de ce que sont de bonnes propriétés mécaniques : ainsi le verre sous toutes ses formes a un module d'Young de l'ordre de celui de l'aluminium ou du tiers de celui de l'acier; sa faible densité lui confère donc une *rigidité* rapportée à la masse de matière qui permet de le comparer favorablement à ces métaux. En revanche, sous forme de verre massif, il possède une *résistance* très faible, le dixième de la résistance des aciers courants. On a pu montrer que cela résulte d'une grande sensibilité à la fissuration : des fissures microscopiques, toujours présentes dans le verre, s'élargissent sous l'effet d'une traction et provoquent la rupture à des charges de l'ordre de 50 à 150 MPa; une compression, au contraire, referme ces fissures, ce qui explique la résistance beaucoup plus élevée (600 à 1 200 MPa) obtenue en compression. L'amélioration de la résistance du verre peut donc s'obtenir en refermant les microfissures : c'est le but de la trempe; ou en diminuant leur nombre en fabriquant des fibres de verre; le résultat en est spectaculaire, puisque ces fibres ont des résistances s'étendant de 600 à 6 000 MPa, valeurs jamais atteintes par les meilleurs aciers.

La possibilité de filer le verre fondu est connue depuis longtemps : on cite les fibres obtenues par les verriers italiens du XVII[e] siècle, et le tissu de verre filé présenté à l'Académie des sciences par Réaumur en 1713. Cependant, c'est au XX[e] siècle seulement que des procédés efficaces de production de fibres ont été mis au point : fabrication à la filière (1908), par centrifugation (1929), par entraînement (1933). Les sociétés américaines Owens Illinois Glass Company et Corming Glass Work formèrent en 1938 une filiale commune, Owens-Corming Fiberglass Corporation, pour produire et commercialiser la fibre de verre et ses dérivés. D'autres sociétés comme Saint-Gobain et Fiberglass (société britannique) produisent maintenant des fibres de verre.

Propriétés générales des fibres de verre

Rappelons que « verre » est un terme générique pour désigner des solides amorphes à base de silice, mais avec des variations de composition assez larges. Bien que leurs propriétés physiques et chimiques dépendent de cette composition et des procédés d'élaboration, ces différentes fibres de verre ont en commun des caractéristiques intéressantes : elles ont une résistance à la rupture élevée, pour une masse volumique assez faible; elles sont parfaitement élastiques, et la déformation à la rupture atteint 5 %; incombustibles, elles conservent des résistances intéressantes à température élevée (environ 50 % à 350 °C et 25 % à 550 °C, par rapport à la résistance à température ambiante); elles ont un coefficient de dilatation thermique faible et une conductivité thermique élevée; elles ont de bonnes propriétés diélectriques, elles présentent une bonne résistance à l'humidité et à la corrosion (pour tous les solvants organiques et pour la plupart des acides et des bases); enfin, d'un point de vue économique, à performances égales, elles sont d'un bas prix de revient.

Fabrication des fibres

Trois procédés de production de fibres de verre conduisent à des produits différents : la *centrifugation* donne de courts filaments (2 cm et plus), principalement utilisés en vrac pour l'isolation; les *fibres discontinues* (ou *verranne*), de 20 à 40 cm de long, sont obtenues à partir du verre fondu par entraînement par un gaz chaud sous pression, qui peut être de l'air ou de la vapeur surchauffée; les *fibres continues* (ou *silionne*) de longueur indéfinie (plusieurs km) sont formées à la filière avec étirage mécanique. Toutes ces fibres sont ensuite mises en œuvre dans les opérations textiles classiques pour former des fils et des tissus. Toutefois, c'est la silionne qui est habituellement utilisée pour le renforcement des matériaux composites.

La silionne est fabriquée à la filière suivant le procédé schématisé à la *figure* 1. La filière en platine, chauffée par effet Joule, est alimentée en billes de verre ou directement en verre fondu. Le fond de ce récipient est percé de nombreux trous identiques (200, 400, 800, 1 600 ou même

Tableau I
Caractéristiques de quelques types de fibres

Types de fibres	Aspect et couleur	Diamètre (en µm)	Masse volumique (en kg/m³)	Résistance à la rupture (en MPa)	Module d'Young (en MPa)
Verre E Verre R ou S	Aspect soyeux, blanc	5 à 20 5 à 20	2 540 2 490	3 400 4 600	72 000 85 000
Bore	Éclat vitreux ou métallique, brun noir	100 ou 140	2 650	1 800 à 3 500	360 000 à 420 000
Carbure de silicium		100	3 300	2 500	490 000
Graphite à haute résistance	Aspect soyeux, noir	8	1 920	2 500 à 3 200	250 000 à 300 000
Graphite à haut module		8	1 750	2 000	420 000
Kevlar à haute résistance	Aspect soyeux, doré	12	1 450	3 500	84 000
Kevlar à haut module		12	1 450	2 700	130 000

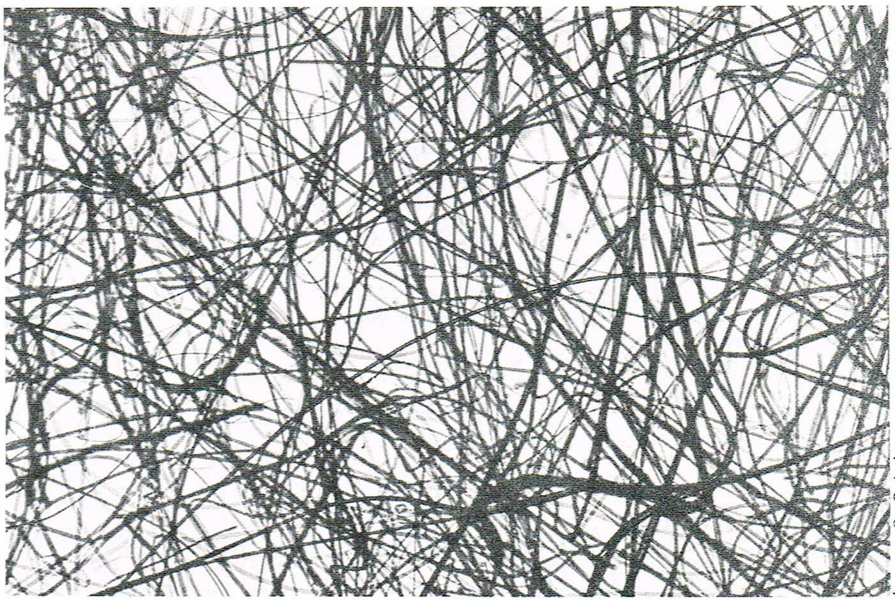

Isover - St-Gobain

▲ *Tableau I : caractéristiques de quelques types de fibres. Ci-dessus, fibres de verre*

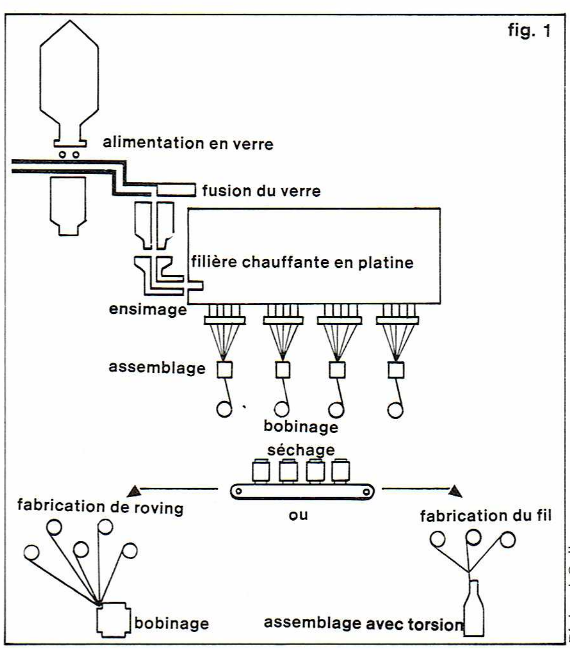

Richard Colin

◀ *Figure 1 : processus de fabrication des fibres de verre.*

Tableau II Caractéristiques physiques des fibres de verre E, S et D			
Caractéristiques	Verre E	Verre S	Verre D
Masse volumique (en kg/m³)	2 540	2 490	2 160
Module d'Young (en MPa)	72 000	85 000	52 000
Résistance à 20 °C (en MPa)	3 400	4 600	2 400
Allongement à rupture à 20 °C (en %)	4,7	5,4	4,6
Limite élastique à 540 °C (en MPa)	830	1 900	
Résistance à 540 °C (en MPa)	1 700	2 400	
Coefficient de dilatation thermique linéaire en $°C^{-1}$ à 20 °C	$5{,}0 \cdot 10^{-6}$	$2{,}9 \cdot 10^{-6}$	$3{,}1 \cdot 10^{-6}$
Température (en $°C^{-1}$) donnant une viscosité de 10^{13} poises	660	810	520
Vitesse du son (en m/s)	5 300	5 900	4 900
Indice de réfraction	1,547	1,523	1,47
Constante diélectrique à 10^6 Hz	5,8	4,5	3,6
Constante diélectrique à 10^{10} Hz	6,1	5,2	4
Tangente de perte à 10^6 Hz	10^{-3}	$2 \cdot 10^{-3}$	$0{,}5 \cdot 10^{-3}$
Tangente de perte à 10^{10} Hz	$4 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$

▲ ***Tableau II :** caractéristiques physiques des fibres de verre* **E, S et D.**

plus) ; généralement, le diamètre de ces orifices va de 0,8 à 3,2 mm, suivant la filière. Les filaments sortent à une température de 1 300 °C environ, ce qui permet leur étirage, par entraînement par le bobinoir. Ils sont d'un diamètre beaucoup plus fin que les trous de filière : 5 à 20 µm ; ce diamètre dépend, bien sûr, de celui des trous mais aussi de la pression du verre fondu dans le bac de filière, de la vitesse d'étirage (plus de 100 m/s) et de la viscosité du verre. La nappe de filaments reçoit un *ensimage*, enduit liquide destiné à faciliter son utilisation, puis est assemblée en un seul fil bobiné sur un manchon. Un fil de verre comprend donc de 200 à 1 600 filaments. Les *« gâteaux »* obtenus sur les manchons sont ensuite séchés pour enlever l'eau ou le solvant provenant de l'ensimage. Ils sont alors prêts pour les opérations textiles.

Composition des verres

Constituant principal des verres usuels, la silice (SiO_2) possède à l'état cristallisé une configuration tétraédrique où chaque atome de silicium est entouré par quatre atomes d'oxygène. Dans les verres solides amorphes, ce réseau est déformé ou rompu par la présence d'oxydes métalliques en proportion variable. On utilise pour les matériaux composites deux types principaux de verres : le verre E, de qualité courante, et un verre à performances mécaniques accrues (le verre S d'Owens Corming, le verre R de Saint-Gobain). D'autres qualités de verre sont utilisées pour leurs propriétés particulières.

Le **verre E** était primitivement destiné à des applications électriques ; actuellement, c'est lui qui fournit la plupart des fibres utilisées dans le renforcement des plastiques, surtout pour les applications les plus courantes. A base principalement de silice, de chaux, d'alumine, d'oxyde borique, sa composition peut varier sans influencer de façon significative ses propriétés mécaniques ou électriques, ce qui facilite la production en fonction des matières premières disponibles et des procédés de production. La proportion (pourcentage en masse) des constituants principaux est la suivante : SiO_2 : 52 à 56 ; Al_2O_3 : 12 à 16 ; CaO : 16 à 25 ; B_2O_3 : 8 à 13 ; MgO : 0 à 6.

On peut trouver aussi, en proportions beaucoup plus faibles, Na_2O, K_2O, TiO_2, Fe_2O_3, etc.

Les propriétés du verre E sont récapitulées dans le *tableau* II. Quelques commentaires sont à faire, valables pour les trois qualités de verre présentées :

— la résistance à la rupture à la température ambiante est mesurée sur les fibres vierges à la sortie de filière ; cette résistance peut être amoindrie dans une grande proportion par le stockage, le contact avec des gaz ou des liquides ; de plus, la valeur donnée dans le tableau est une valeur moyenne ; les fibres, étant fragiles à la température ambiante, présentent des valeurs de résistance dispersées sur une plage assez large ; les caractéristiques statistiques de ces valeurs ne sont généralement pas publiées par les fabricants ;

— le verre, solide amorphe, n'a pas de point de fusion défini, mais acquiert avec la température une fluidité de plus en plus grande ; à 540 °C, sa viscosité lui confère déjà un comportement nettement plastique, comme en témoigne la différence entre limite élastique et résistance ultime ;

— le coefficient de dilatation, l'indice de réfraction et les propriétés diélectriques ont été mesurés sur des échantillons massifs, tandis que les autres caractéristiques ont été obtenues sur les fibres.

Les verres S et R sont des verres à hautes caractéristiques mécaniques : leur module d'élasticité est environ 20 % plus grand que celui du verre E ; pour la résistance, l'amélioration est encore plus sensible, de l'ordre de 35 %. De plus, ils conservent mieux leurs caractéristiques à température élevée et possèdent une meilleure tenue à la fatigue. La composition en masse du verre S est la suivante, compte non tenu d'additifs en très faible proportion : SiO_2 : 65 ; Al_2O_3 : 25 ; MgO : 10.

Le **verre D** a été développé pour les applications électroniques nécessitant de faibles constantes diélectriques, comme les radomes d'avions. D'autres verres sont produits sous forme de fibres. On peut noter que le verre à vitres, contenant une forte proportion de soude, est très sensible à l'humidité et ne convient pas au renforcement des plastiques. Des verres pour usages chimiques (résistants aux acides), des verres au plomb pour la protection contre les radiations sont disponibles. En général, ces propriétés particulières s'obtiennent au détriment des propriétés mécaniques, comme on le voit sur le tableau pour le verre D.

Présentation des fibres de verre

Les fibres de verre, de quelques µm de diamètre, ne sont jamais utilisées isolées ; dès la sortie de filière, elles sont assemblées en fil (avec une torsion) ou en « roving » (sans torsion), suivant les utilisations prévues. Elles peuvent subir encore d'autres transformations, et on utilise, pour le renforcement des résines, diverses présentations, essentiellement les rovings, les fils, les fibres coupées, les mats, les tissus et les rovings tissés.

● Le *roving* ordinaire résulte de l'assemblage parallèle de mèches ou « bouts » de fibres dans des proportions variables (10 à 100 bouts de quelques centaines de fibres chacun).

Le roving bouclé est obtenu en faisant faire des boucles aux bouts lorsqu'on les assemble ; un apprêt à base de résine et une légère torsion sont nécessaires.

Les rovings sont utilisés pour faire des structures par enroulement filamentaire (pièces bobinées servant de tuyaux, de récipients, etc.) et pour la fabrication de pièces nécessitant un renfort unidirectionnel (joncs, profilés). Ce sont également les produits de base pour les fibres coupées et pour les tissus lourds (rovings tissés).

● Les *fibres coupées* sont obtenues à partir de bouts ou de rovings, par découpe en petites longueurs (3 à 50 mm) faite par l'utilisateur ou directement par le fabricant de fibres. Leurs usages essentiels sont le renforcement des thermoplastiques moulés et des thermodurcissables par projection au pistolet.

● Les *mats de verre,* sortes de feutres, sont des couches assez épaisses de fibres coupées ou entières distribuées de façon aléatoire ; pour obtenir la cohésion du mat, les fibres sont liées chimiquement ou aiguilletées. Ces mats sont utilisés dans divers procédés de moulage, en particulier le moulage au contact (moulage manuel) et certaines productions en continu.

On fabrique également des « mats de surface » très minces, dont le rôle n'est pas d'apporter un renforcement mécanique mais un aspect de surface régulier ; dans certaines pièces, ils servent de couche de finition avec beaucoup de résine.

● Les *fils* sont essentiellement destinés aux usages textiles ; ils sont obtenus à partir de bouts tordus assemblés eux-mêmes avec une torsion inverse de la torsion des bouts. L'industrie produit une grande variété de fils,

repérés par une nomenclature précise.

• Les *tissus* sont produits par les techniques textiles traditionnelles à partir de fibres, de bouts ou de fils, selon différentes armures, c'est-à-dire différents systèmes de croisement de la trame et de la chaîne; les plus employés sont le taffetas, le sergé et les satins. Les tissus avec des proportions égales en chaîne et en trame sont dits « équilibrés »; si, au contraire, une des directions a une proportion de fibres beaucoup plus grande que la direction transversale, le tissu est dit « tissu unidirectionnel ».

• On produit également, par tissage d'armures simples, des tissus plus lourds et plus épais à partir de rovings : ce sont les *rovings tissés*.

Tous ces tissus sont utilisés pour les pièces de grande taille en plastiques thermodurcissables.

• L'*ensimage des fibres de verre* assure une certaine cohésion interfilamentaire entre les fibres élémentaires pour donner une tenue suffisante aux bouts, fils et rovings; il lubrifie la surface du verre et le protège ainsi contre l'abrasion due au frottement des fibres entre elles ou avec les outils; il empêche l'apparition des charges électrostatiques sur les fibres ou permet leur écoulement rapide; il facilite l'imprégnation des fibres par les résines, ce qui est important avec les résines se gélifiant rapidement ou dans les procédés en continu dont la vitesse dépend de la facilité de mouillage des mèches par la résine; enfin — et c'est là un rôle très important — il peut améliorer dans une grande proportion l'adhérence entre fibre et matrice, qui conditionne la bonne résistance à la rupture des matériaux composites.

Les ensimages, auxquels tant de fonctions sont dévolues, sont formés de mélanges de produits chimiques suivant des formules très diverses dont le détail est généralement gardé secret par le fabricant de fibres ou l'utilisateur; en pratique, il en existe un très grand nombre, car chaque type de résine, chaque qualité de verre et chaque technique de mise en œuvre nécessite une formulation d'ensimage spécifique.

Les fibres de silice et de quartz

Certaines applications nécessitent des propriétés thermomécaniques ou électriques supérieures à celles des verres habituels. Des verres formés de silice presque pure doivent alors être utilisés; on distingue essentiellement trois formes :

• le *verre lavé*, obtenu à partir d'un verre contenant une proportion de silice de 65 %; par action d'un acide concentré chaud, il perd pratiquement toutes ses impuretés (il reste un squelette de silice pure à plus de 99 %); ses propriétés mécaniques sont faibles, mais il peut supporter, pendant de courtes périodes, des températures très élevées (1 000 °C et plus);

• la *fibre de silice*, qui s'obtient par étirage de baguettes de silice de pureté 95 à 99,4 %;

• la *fibre de quartz*, obtenue également par étirage de baguettes de quartz très pur (99,95 % en SiO_2).

Les fibres de quartz et de silice ont d'excellentes propriétés électromagnétiques (elles servent à la construction d'antennes et de radomes en plastique renforcé), ainsi que des propriétés remarquables de tenue en température : elles supportent très bien les chocs thermiques. On les utilise avec des résines phénoliques pour constituer des boucliers thermiques destinés à subir des températures très élevées pendant des temps de service très courts : l'effet de ces sollicitations se manifeste par une ablation du matériau, et la résistance à l'ablation est d'autant meilleure que la teneur en silice de la fibre employée est plus élevée.

Ces fibres sont fabriquées en filaments de diamètre 10 μm environ. Les fibres de quartz ont des propriétés mécaniques remarquables : pour une masse volumique de 2 200 kg/m^3, elles ont un module d'Young de l'ordre de 70 000 MPa; leur résistance à la traction, de 9 000 MPa à la température ambiante, est encore de 7 000 MPa à 200 °C. Ces fibres de quartz sont utilisées comme les fibres de verre sous forme de rovings, de fibres coupées, de fils, de tissus, etc.

Les fibres d'amiante

Amiante est un terme générique pour désigner une trentaine de minéraux naturels fibreux de la famille de la serpentine et de l'amphibole; c'est une serpentine, le *chrysotile*, un silicate de magnésium hydraté, qui est la plus fréquente et la plus utilisée : elle représente environ 95 % de la production mondiale, l'U. R. S. S., suivie par le Canada, étant le premier producteur mondial. Les autres variétés utilisées dans le renforcement des plastiques sont l'*amosite* et la *crocidolite*.

L'intérêt industriel de l'amiante réside dans une inaltérabilité remarquable à la chaleur, à la flamme, aux acides et produits chimiques, à l'humidité, pour un prix de revient faible.

On peut séparer l'amiante en fibres classées en diverses qualités suivant leur longueur : on l'emploie sous forme de fibres courtes et de mats, ou on l'assemble en mèches, rubans et tissus. Typiquement, le chrysotile se présente sous forme de fibres d'une vingtaine de μm de diamètre, de longueur atteignant 2 cm et plus pour les qualités supérieures. Il se prête bien aux opérations textiles; toutefois, on lui préfère généralement la crocidolite, qui présente des fibres longues plus abondantes et plus économiques. Bien que ce soit la forme d'amiante qui fournisse les fibres les plus longues (jusqu'à 30 cm), l'amosite est, elle, peu propre aux opérations textiles et s'utilise sous forme de mats et de non-tissés, ou de fibres coupées. Les propriétés de ces trois variétés d'amiante sont présentées dans le *tableau* III.

Le degré de pureté des fibres d'amiante a une influence notable sur leurs propriétés mécaniques et, en particulier, sur la tenue en température.

L'amiante est utilisé seul pour le *renforcement des plastiques*, ou en association avec d'autres fibres. Sa présence peut abaisser sensiblement le prix de revient

▼ *Tableau III : caractéristiques des trois variétés d'amiante.*

Tableau III

Caractéristiques des trois variétés d'amiante

Caractéristiques	Chrysotile	Crocidolite	Amosite
Composants principaux	Silicates hydratés de magnésium ($3\ MgO \cdot 2\ SiO_2 \cdot 2\ H_2O$)	Silicates hydratés de sodium et de fer	Silicates de magnésium et de fer
Couleur, aspect	Blanc, gris, vert ou jaunâtre	Bleu	Gris, verdâtre ou brun
Masse volumique (en kg/m^3)	2 400 à 2 600	3 200 à 3 300	3 100 à 3 250
Longueur	Variable, jusqu'à 2 cm et plus	Variable	Variable, de 5 à 30 cm
Flexibilité	Excellente	Très bonne	Bonne
Résistance en tension (en MPa)	500 à 700	700 à 3 500	100 à 1 200
Résistance aux acides	Médiocre	Bonne	Bonne
Résistance à la chaleur	Bonne, devient cassant aux hautes températures	Médiocre, matériau fusible	Bonne, devient cassant aux hautes températures
Chaleur spécifique (en J/kg/°C)	1 110	840	810

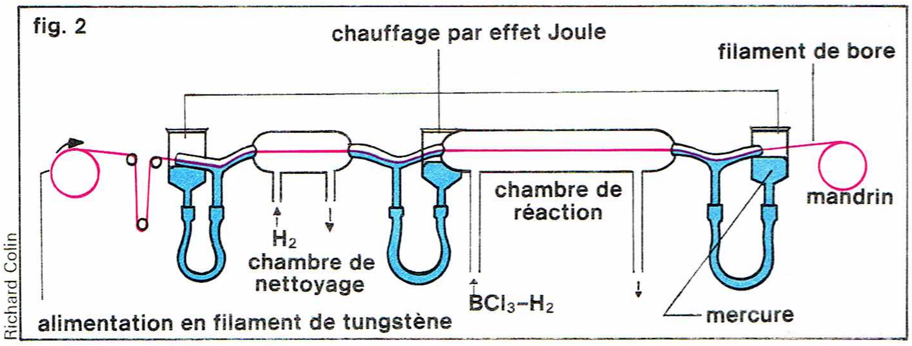

▲ *Figure 2 : principe du processus de dépôt du bore (procédé au tungstène).*

des plastiques renforcés au verre ; ses propriétés propres apportent de plus certains avantages : des fibres d'amiante courtes finement divisées rendent la résine plus visqueuse au moment de la mise en œuvre, améliorent l'état de surface et la tenue aux intempéries, améliorent la liaison entre le verre et la résine, diminuent la fissuration de la résine due au retrait et le coefficient de dilatation thermique.

En association avec des fibres naturelles comme le sisal, l'amiante donne des *produits moulés* économiques, faciles à démouler, et ayant une bonne tenue à l'impact et à l'humidité.

Les fibres d'amiante, seules ou en association, peuvent *renforcer* ou *charger* une grande variété de *résines thermoplastiques* ou *thermodurcissables*. Les résines phénoliques ont de remarquables propriétés chimiques et électriques et une bonne liaison avec les fibres d'amiante obtenue pour de basses pressions de moulage. On s'intéresse de plus en plus à l'amiante comme renforcement des thermoplastiques (Nylons, vinyles et surtout polypropylènes).

Il faut aussi citer, bien qu'il soit à la limite des matériaux composites proprement dits, l'*amiante-ciment*, obtenu par incorporation de fibres d'amiante dans des ciments. La variété des produits obtenus — avec, en conséquence, une variété aussi grande des propriétés et des coûts — fait figurer les composites à base d'amiante dans de nombreux secteurs de l'industrie : le bâtiment utilise des plaques et panneaux ondulés, des gaines en amiante-ciment ; la construction automobile construit des tuyauteries, des carters de radiateurs, des tableaux de bord en résines phénoliques armées de sisal et d'amiante ; l'industrie chimique, l'industrie électrique, l'industrie des missiles mettent à profit dans de nombreuses applications les bonnes propriétés de résistance aux agents chimiques et d'isolation thermique et électrique. Sans être un produit de renforcement aussi noble que certaines autres fibres, l'amiante, dont la consommation pour le renforcement des plastiques était de l'ordre du million de tonnes au début des années 70, est donc largement utilisé.

Les fibres de bore et de carbure de silicium

▼ *Fibres de bore dans une matrice d'aluminium ; microscope optique à balayage.*

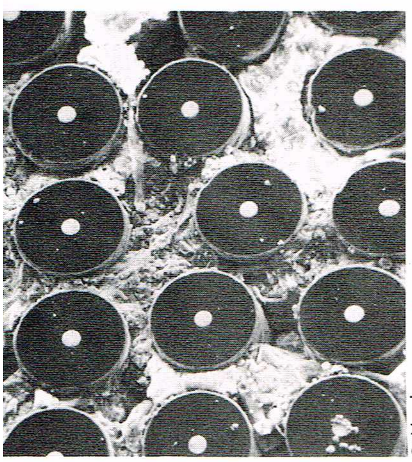

C'est en 1959 qu'un chercheur de Texaco, aux États-Unis, a mis en évidence les excellentes propriétés de résistance et de rigidité du bore obtenu par dépôt en phase vapeur ; c'est l'origine des études sur les matériaux composites à hautes performances. Ce procédé de dépôt en phase vapeur (ou CVD : *Chemical Vapor Deposition*) est applicable à divers autres matériaux réfractaires et céramiques (carbures, nitrures, borures, etc.), dont la mise au point et l'industrialisation ont fait l'objet de nombreuses recherches (États-Unis et France).

La commercialisation des fibres de carbone ou même de Kevlar leur fait actuellement une forte concurrence ; aussi seules les fibres de bore et, dans une certaine mesure, celles de carbure de silicium (SiC) et celles de bore gainées de carbure de silicium sont-elles produites de manière industrielle ou pilote.

Fabrication des fibres de bore

Le principe du dépôt de bore est la réduction par l'hydrogène d'un halogénure : c'est la réaction de Van Arkel, qui se produit à haute température. En pratique, on utilise le trichlorure de bore (BCl_3), seul halogénure à avoir donné satisfaction. La réaction globale s'écrit :

$$2\,BCl_3 + 3\,H_2 \rightarrow 2\,B + 6\,HCl$$

Le procédé au tungstène est représenté sur la *figure* 2. C'est un procédé en continu qui tire son nom du substrat utilisé : filament de tungstène de diamètre 12,7 µm qui défile dans une série de réacteurs en verre où il est chauffé à une température de l'ordre de 1 100 à 1 300 °C. Dans la première chambre, il subit un nettoyage en atmosphère réductrice qui le débarrasse des impuretés (oxydes et lubrifiants de filière) provenant de sa fabrication. Il défile ensuite dans une ou plusieurs chambres alimentées en mélange réactif envoyé dans le sens de défilement ou à contre-courant. La réaction se fait au niveau du filament incandescent de tungstène qui se gaine de bore amorphe tout au long du réacteur, jusqu'à former une fibre de 100, 140 ou 200 µm de diamètre. Le taux de réaction est très faible, et il est nécessaire de recycler les produits réactifs pour obtenir des conditions de production économiques.

Les divers réacteurs sont assemblés par des embouts en forme de T contenant du mercure, ce qui permet le défilement du fil tout en assurant l'étanchéité. Le mercure assure également un contact électrique pour le chauffage par effet Joule du fil dans les réacteurs. C'est là le procédé traditionnel de chauffage, celui utilisé dans les installations de production commerciale ; récemment, on lui a substitué ou ajouté un chauffage par fours électriques entourant les réacteurs, chauffage plus uniforme qui permet de préparer des fibres de plus grande résistance (4 600 MPa de résistance moyenne) à une vitesse plus élevée.

D'une façon générale, la qualité du produit obtenu est très sensible aux conditions d'élaboration. Il faut maintenir un flux gazeux assez rapide pour évacuer de la périphérie de la fibre en cours de croissance le sous-produit de réaction (HCl) qui bloquerait la réaction ; on peut alors atteindre une croissance du diamètre de l'ordre de 2,5 µm par seconde de séjour dans le réacteur. La température du réacteur est déterminée par deux facteurs contradictoires : son augmentation favorise le rendement de la réaction, mais une température excessive produit un dépôt de bore nettement cristallin conduisant à une fibre cassante. Les impuretés gazeuses dans le mélange réactif et les impuretés et défauts de forme sur le substrat de tungstène sont à l'origine de défauts affaiblissant la résistance de la fibre.

Ces problèmes techniques sont maintenant maîtrisés par les producteurs, et ce sont les aspects économiques qui sont les plus importants. Il est impossible de donner de façon certaine les prix de revient des fibres de bore au tungstène, et de prédire leur évolution. Malgré une diminution spectaculaire de leur coût, ces fibres restent dans la catégorie des matériaux très onéreux : de 10 000 F le kg au début des recherches dans les années 60, il est passé en 1971, au début de la commercialisation, à environ 2 500 F le kg et pourrait descendre prochainement jusqu'à 800 à 1 000 F/kg. Cette évolution résulte, bien sûr, d'une amélioration du rendement des installations mais aussi, dans une large mesure, de la baisse des matières premières nécessaires à la fabrication : trichlorure de bore et surtout tungstène. Ce dernier, qui intervient (dans les fibres de diamètre de 100 µm) pour 1,6 % seulement en volume, contribue pour 12 % en masse et pour 30 à 40 % en prix de revient, tant à cause de son prix élevé à l'état massif qu'à cause du coût de tréfilage pour produire les filaments servant de substrat. Ces filaments de diamètre 12,7 µm (0,5 millième de pouce anglais) ont été retenus lors des premières recherches parce que déjà fabriqués pour les filaments d'ampoules électriques. En raison de la demande créée par la fabrication des fibres de bore (1 kg de fibre nécessite 120 g de tungstène, ce qui correspond à 50 km de filament de tungstène, quantité suffisante pour équiper des millions d'ampoules...), le prix du filament de tungstène a été divisé par deux depuis le début de son utilisation et peut encore baisser.

Ces données permettent de comprendre les diverses tentatives faites depuis quelques années pour remplacer le tungstène par un substrat moins lourd et moins onéreux. Ces recherches ont conduit à deux procédés de fabrication analogues au procédé au tungstène : un procédé à la silice et un procédé au carbone qui est déjà commercialisé. Les filaments de silice sont utilisés gainés

de carbone pour être conducteurs de l'électricité; les filaments de carbone, de diamètre 32,5 µm, permettent un gain de vitesse de production de 30 à 50 % par rapport à l'âme en tungstène, gain pouvant être accru encore en revêtant ces filaments par du graphite pyrolytique. Vitesse accrue et coût plus faible des matières premières permettent une réduction du prix des fibres obtenues par ces procédés. Les propriétés obtenues sont comparables à celles des fibres à âme de tungstène, comme on le voit sur le *tableau* IV; la masse volumique est plus avantageuse (rappelons que le tungstène a une masse volumique de 19 000 kg/m³, soit 7 à 10 fois plus grande que les autres substrats); au contraire, les propriétés mécaniques sont abaissées, ce qui s'explique en partie par les excellentes caractéristiques mécaniques du tungstène (module d'Young de 350 000 MPa et résistance de l'ordre de 2 000 MPa à l'état vierge) et en partie par la nouveauté des autres procédés d'élaboration : une meilleure maîtrise de la production devrait améliorer sensiblement les valeurs de la résistance à la traction.

Tableau IV
Caractéristiques des diverses fibres de bore

Nature du substrat	Diamètre (en µm)	Masse volumique (en kg/m³)	Résistance à la traction (en MPa)	Module d'Young (en MPa)
Tungstène	100 140	2 620 2 520	3 500 3 500	415 000 405 000
Carbone	100 140	2 240 2 270	3 000 3 000	365 000 385 000
Silice		2 340	2 300	370 000

▲ *Tableau IV : caractéristiques des diverses fibres de bore.*

Caractéristiques des fibres de bore

Les propriétés des fibres de bore dépendent de la structure du matériau et de la morphologie de la fibre, caractéristiques qui sont déterminées par les conditions exactes d'élaboration. La structure des fibres de bonne qualité est qualifiée d'amorphe, ce qui désigne en fait une structure microcristalline. Les figures de diffraction aux rayons X présentent des halos diffus typiques des matériaux amorphes ou vitreux; l'analyse de la largeur des raies a permis de déterminer la taille des cristallites constituant cette structure : leur diamètre est de l'ordre de 20 à 30 Å. Si la température de réaction est un peu trop élevée, le bore peut se déposer sous forme de cristaux beaucoup plus gros, observables au microscope optique. La présence d'impuretés sur le substrat ou dans les gaz réactifs a le même effet. D'un point de vue pratique, ces gros cristaux constituent des points faibles du filament et doivent être évités.

L'élaboration modifie notablement la structure de l'âme dans les fibres à âme de tungstène. En effet, la température élevée provoque une diffusion du bore dans le tungstène et la formation de borures : WB, WB_4 et W_2B_5; le tungstène peut même être complètement boruré. Cette transformation s'accompagne d'une dilatation sensible de l'âme et de sa fragilisation. La morphologie de la fibre est très typique : la surface a un aspect d'épi de maïs résultant de la juxtaposition de nodules très lisses séparés par des rides; ces nodules résultent d'une croissance en cône du bore à partir de sites de nucléation sur l'âme. Une température de réaction trop basse provoque l'apparition de sites de nucléation secondaires qui se traduisent par une morphologie en chou-fleur, et une perte de résistance.

Les résultats d'essais de laboratoire pour étudier l'effet de la température d'élaboration sur la résistance en traction ont montré que l'on enregistre une chute brutale de résistance lorsque la température est excessive. Chaque valeur de résistance portée sur ce graphique est la moyenne de plusieurs essais de traction sur une même production. Un seul essai de rupture n'aurait, en effet, aucun sens, car les fibres de bore sont des matériaux fragiles; elles rompent dans leur domaine d'élasticité à des valeurs présentant une grande dispersion, et les ruptures ne sont pas dues aux propriétés intrinsèques du bore mais à la présence dans les échantillons de défauts plus ou moins graves, qui sont répartis le long de la fibre de façon aléatoire; leur gravité est elle-même aléatoire. C'est donc, plutôt qu'une valeur unique de résistance, une probabilité de rupture qui devrait être utilisée pour caractériser la résistance des fibres. La *figure* 3 donne la fréquence de rupture pour une production typique de fibres, obtenue par un très grand nombre d'essais. La valeur moyenne de cet histogramme est de 3 170 MPa, et l'écart quadratique moyen de 630 MPa; en fait, plus que ces valeurs, c'est la distribution des faibles valeurs (c'est-à-dire la fréquence des défauts rares mais graves) qui a sans doute le plus d'influence sur les propriétés des matériaux composites fabriqués avec les fibres de bore. L'histogramme de rupture dépend largement des conditions pratiques de production (soins et surveillance apportés à la conduite du réacteur).

Notons toutefois que tous ces résultats sont relatifs à la fibre nue, en sortie de réacteur. L'incorporation dans une matrice pour former un matériau composite dégrade la fibre dans une proportion à peu près inconnue mais qui dépend largement de la température d'élaboration du composite et du soin apporté à la fabrication.

Le module d'Young, caractérisant la rigidité du matériau, est en revanche bien défini et insensible aux conditions de production des fibres. Le module de la fibre, qui est la moyenne volumique des modules du substrat et du bore, varie dans une faible mesure suivant la nature du substrat employé et suivant sa proportion dans la fibre, mais, pour chaque cas, il a une valeur unique (*tabl.* IV), de l'ordre de deux fois celle des aciers (210 000 MPa) et de six fois celle de l'aluminium et de ses alliages (70 000 MPa) pour une masse volumique légèrement inférieure à celle de l'aluminium et trois fois plus faible que celle des aciers. Les propriétés mécaniques sont insensibles à la fatigue mécanique : des essais en traction alternée entre zéro et la demi-résistance moyenne d'un lot de fibres n'ont pas modifié l'histogramme de leurs résistances après plus d'un million de cycles.

En revanche, ces propriétés sont sensibles à la température comme au vieillissement thermique. Le module d'Young décroît de façon sensiblement linéaire de 420 000 à 220 000 MPa lorsque la température croît de l'ambiante jusqu'à 520 °C. La résistance en traction décroît également, puis chute brutalement vers 600-650 °C, où elle est pratiquement nulle. Le coefficient de dilatation thermique, de $4{,}7 \cdot 10^{-6}/1$ °C à l'ambiante, passe à $5{,}0 \cdot 10^{-6}/1$ °C vers 300 °C.

Lorsque les fibres sont chauffées dans l'air à des températures inférieures à 200 °C, les propriétés mécaniques subsistent même pour de longues durées d'exposition. Au-delà, on observe une perte de résistance de plus en plus grande avec la température : 70 % de perte pour un séjour de 1 000 heures dans l'air à 3 000 °C, par exemple. Cette perte de résistance est due pour partie à la grande réactivité du bore aux températures élevées; ainsi, un séjour de 1 000 heures à 300 °C dans une atmosphère inerte comme l'argon ne diminue que de 30 % la résistance à la traction.

Cette réactivité du bore en température se manifeste aussi avec les métaux, en particulier l'aluminium et ses alliages utilisés pour les composites « bore-aluminium ». Leur fabrication, qui se fait toujours à chaud (pressage à chaud ou infiltration du métal fondu), doit être aussi brève que possible. Par contre, le bore est relativement inerte à la température ambiante.

Les fibres de carbure de silicium

Les fibres de carbure de silicium SiC sont fabriquées suivant le même principe que celles de bore, dans des installations de même type, par dépôt en phase vapeur sur filaments de tungstène de 12,7 µm de diamètre; c'est le méthyltrichlorosilane en présence d'hydrogène à 1 200 °C qui donne les meilleurs résultats. A la température ambiante, les fibres de carbure de silicium sont sensiblement plus rigides que les fibres de bore (module d'Young de 450 000 MPa environ), mais leur masse volumique est supérieure de 30 %, si bien que, rapportée à la masse de produit, la rigidité est moins bonne que celle du bore (*tabl.* V). De plus, la résistance à la traction est inférieure : typiquement, sa valeur moyenne est de 2 400 à 2 800 MPa. Par contre, le carbure de silicium a une excellente tenue à la température. A 1 300 °C, il possède encore 70 % de la résistance à la traction qu'il a à la température ambiante. De même, il est très peu sensible à un séjour prolongé dans l'air à haute tempé-

▼ *Figure 3 : histogramme de rupture pour une production typique de fibres obtenues à partir d'un très grand nombre d'essais.*

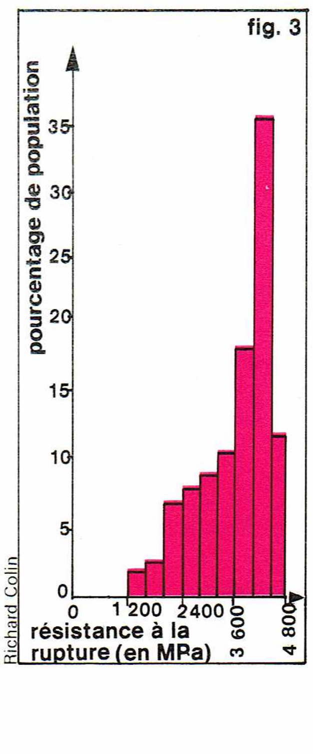

Tableau V
Comparaison des caractéristiques des fibres de bore, des fibres de bore gainées de carbure de silicium (borsic) et des fibres de carbure de silicium

Fibres	Masse volumique (en kg/m³)	Module d'Young (en MPa)	Rapport du module à la masse volumique (en m·N/kg)
Bore	2 630	415 000	$1{,}58 \cdot 10^8$
Borsic	2 680	400 000	$1{,}50 \cdot 10^8$
Carbure de silicium	3 460	450 000	$1{,}30 \cdot 10^8$

▲ *Tableau V : comparaison des caractéristiques des fibres de bore, des fibres de bore gainées de carbure de silicium (borsic) et des fibres de carbure de silicium.*

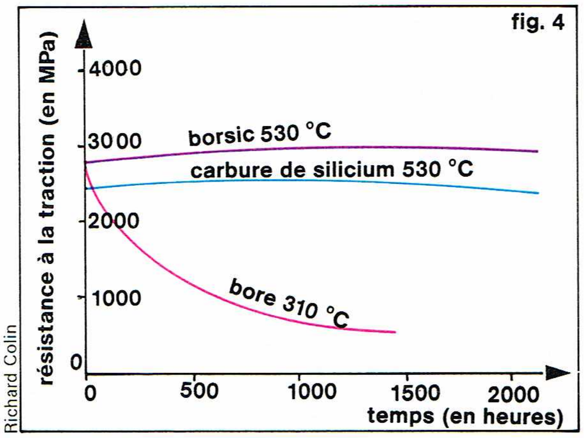

▶ *Figure 4 : résistance à la traction, à température ambiante, en fonction de la durée de séjour dans de l'air à haute température.*

rature, contrairement au bore ; la *figure* 4 illustre ce comportement.

Ces caractéristiques le rendent particulièrement apte au renforcement des métaux pour des applications à température élevée. Toutefois, ce type de matériau composite a pour l'instant été peu étudié, si bien que les fibres de carbure de silicium ne sont pas fabriquées à grande échelle, ce qui grève leur prix actuel (plusieurs fois celui du bore).

Les fibres de bore gainées

Compte tenu des caractéristiques très favorables du bore (hormis la tenue en température), il était normal de chercher à améliorer ses propriétés thermiques. Une solution consiste à gainer les fibres de bore d'un matériau peu réactif à haute température. Le carbure de silicium (SiC) et le carbure de bore (B_4C) peuvent être utilisés. Le revêtement de la fibre de bore s'obtient en ajoutant une courte chambre supplémentaire au réacteur de la *figure* 2 ; par dépôt en phase vapeur, on obtient un gainage de 3 à 4 µm d'épaisseur.

▼ *Tableau VI : caractéristiques de diverses formes de carbone et de graphite.*

Tableau VI
Caractéristiques de diverses formes de carbone et de graphite

Nature	Masse volumique (en kg/m³)	Résistance à la traction (en MPa)	Module d'Young (en MPa)
Graphite massif		35	14 000
Fibres de carbone		700 à 1 000	55 000
Fibres de graphite : — Thornel 40 — Graphil HM	1 560 1 950	1 750 1 800 à 2 500	280 000 350 000 à 410 000
Trichites		20 000	700 000
Valeur limite théorique			1 000 000

Les fibres de bore gainées de carbure de silicium, désignées sous le nom commercial de *borsic*, allient pratiquement les avantages du bore à ceux du carbure de silicium, comme on le voit sur le *tableau* V : masse volumique faible, bonne résistance à la traction, préservation de la tenue mécanique aux températures élevées.

Les fibres de graphite et de carbone

C'est en 1959 que des fibres de carbone destinées au renforcement de la résine ont été introduites sur le marché par Union Carbide ; elles étaient produites par carbonisation de tissus de rayonne. Elles ont été utilisées, et le sont encore, pour le renforcement de pièces en résine phénolique pour fusées (parois de tuyères), ainsi que pour l'isolation thermique de fours travaillant en atmosphère neutre ou réductrice. Ces fibres possèdent des caractéristiques mécaniques moyennes (module d'Young de 55 000 MPa et résistance à la traction allant de 700 à 1 000 MPa environ), surtout par rapport à d'autres fibres en carbone étudiées dès 1960 et commercialisées à partir de 1965 : les fibres de graphite. Celles-ci sont élaborées par divers procédés à partir de fibres cellulosiques ou de fibres acryliques qualifiées de *« précurseurs »* et possèdent des modules d'Young allant de 180 000 à 700 000 MPa, des résistances allant de 1 200 à 3 500 MPa pour des masses volumiques comprises entre 1 500 et 2 000 kg/m³.

Que des filaments en carbone ou en graphite puissent avoir des caractéristiques mécaniques si élevées peut paraître étonnant quand on connaît les faibles caractéristiques du graphite massif. En fait, ces faibles propriétés sont dues à la structure du graphite : à l'échelle microscopique, il est constitué de plans faiblement liés entre eux, chaque plan étant au contraire formé d'atomes de carbone liés très solidement entre eux suivant un réseau hexagonal par des liaisons covalentes ; l'anisotropie de rigidité et de résistance est très grande, et c'est des caractéristiques dans la direction perpendiculaire aux plans d'atomes que proviennent les faibles propriétés du graphite massif. Sous forme de filament, lorsque les liaisons covalentes sont convenablement orientées, on obtient des valeurs très élevées, et même des valeurs qui approchent les propriétés théoriques de la liaison covalente.

Le *tableau* VI compare les valeurs de diverses formes : graphite massif, fibres de carbone, deux exemples de fibres de graphite (le Thornel 40 fabriqué par Union Carbide à partir de rayonne, et le Graphil HM fabriqué par Courtaulds à partir de polyacrylonitrile), enfin des trichites — ou *whiskers*.

Fabrication des fibres de graphite

Les techniques de fabrication étant à la fois très variées et encore en évolution, ces fibres constituent toute une gamme de produits dont les caractéristiques sont très étalées. Toutefois, un produit déterminé possède des caractéristiques bien définies, et les fourchettes de valeurs indiquées correspondent donc à des produits variés et non pas à une dispersion des propriétés.

Fibres à précurseur cellulosique. Elles sont produites à partir de fibres de rayonne ou d'acétate, suivant des procédés américains. Un traitement préliminaire à l'acide permet de réduire la durée et la température des phases suivantes de la fabrication. En effet, on effectue ensuite une carbonisation à des températures allant jusqu'à 1 300 °C sous atmosphère inerte (azote) ou en présence d'acide chlorhydrique gazeux qui accélère le processus. Enfin, on termine par la graphitisation du fil par pyrolyse à haute température (1 800 °C à 3 000 °C) ; cette opération se fait sous gaz inerte avec étirage du fil, ce qui améliore nettement la rigidité et la résistance du fil.

Fibres à précurseur acrylique. Le procédé a été mis au point en Grande-Bretagne. Il utilise le polyacrylonitrile (PAN). Le principe de la fabrication est le suivant : on commence par une préoxydation sous tension du fil, à 200 °C (la tension exercée améliore la rigidité du produit fini), suivie par une carbonisation entre 1 100 °C et 1 500 °C, en atmosphère inerte ou réductrice ; enfin, on termine par la graphitisation, qui s'effectue entre 2 500 °C et 3 000 °C.

Fibres fabriquées à base de brai. Au Japon et aux États-Unis, des procédés de fabrication à partir de brai

ont été étudiés et se développent. Le brai est un résidu des cokeries ou des raffineries d'hydrocarbures. Il est filé puis préoxydé à 200 ou 300 °C; on procède ensuite à une carbonisation sous tension en atmosphère d'azote à 1 000 °C, et on termine par la graphitisation à 2 000-3 000 °C. L'intérêt de ce procédé, qui ne donne pas, pour l'instant, des fibres d'aussi bonnes performances que les procédés précédents, est le faible coût de la matière première employée.

D'autres fibres synthétiques ont été essayées comme précurseurs, mais ces tentatives n'ont pas débouché jusqu'à présent.

Utilisation et caractéristiques des fibres de graphite

Les procédés de fabrication décrits ci-dessus produisent des filaments noirs, d'aspect soyeux, très fins (7 à 10 μm de diamètre), continus ou semi-continus (c'est-à-dire de grande longueur). On assemble ces filaments en fils retordus ou non jusqu'à 1 mm de diamètre, soit plusieurs centaines de filaments. Ces fils peuvent être tissés, seuls ou mélangés à une autre fibre.

Les fibres de graphite sont actuellement fabriquées par plus de vingt producteurs aux États-Unis, en Grande-Bretagne, en Allemagne de l'Ouest, au Japon et en France, sous une quarantaine de variétés. Comme on ne peut donner les caractéristiques de l'ensemble de ces produits, on se contentera ici d'indications générales. Pour les fibres déjà bien au point, on trouve deux catégories : les fibres à haut module et les fibres à haute résistance; en effet, si on augmente leur taux de graphitisation, par augmentation de la température de traitement, on obtient des fibres plus denses (jusqu'à 2 000 kg/m^3) ayant un module d'Young plus élevé (jusqu'à 400 000 ou 500 000 MPa), et une résistance dépassant 1 800 MPa; au contraire, si le traitement de graphitisation est fait à température plus modérée, on obtient des fibres moins denses (1 600 à 1 800 kg/m^3), avec un module d'Young plus faible (200 000 à 280 000 MPa) mais des résistances plus élevées (jusqu'à 3 000 MPa). Ces fibres sont parfaitement élastiques, et la tendance est actuellement de préférer les fibres à haute résistance, car leur allongement à la rupture (rapport de la résistance au module d'Young) est plus élevé (jusqu'à 1,5 % contre 0,5 % pour les fibres à haut module), ce qui permet une meilleure compatibilité avec les résines utilisées comme matrices. Cependant, les fabricants mettent au point de nouveaux types de fibres de graphite dont les performances annoncées allient celles des fibres à haut module et celles des fibres à haute résistance, ou même les dépassent (Union Carbide prépare une fibre de module d'Young 700 000 MPa et de résistance 7 000 MPa, soit un allongement à la rupture de 1 % très convenable).

Signalons enfin que les fibres de graphite sont bonnes conductrices de la chaleur et de l'électricité, qu'elles ont un coefficient de dilatation thermique faible et une excellente résistance à l'humidité.

La fabrication de matériaux composites renforcés par fibres ou tissus de graphite se développe rapidement. Elle est favorisée par le coût relativement faible de ces fibres (leur prix est passé de 6 000 F/kg en 1965 à 500 F/kg en 1975), et leurs applications se sont étendues d'un secteur de pointe, les industries aéronautiques et spatiales, à un secteur de grande diffusion, l'industrie des loisirs : divers articles de sport à hautes performances (raquettes de tennis, cannes à pêche, clubs de golf) sont maintenant en résine renforcée par fibres de graphite.

Les fibres de Kevlar

Le Kevlar PRD-49 est l'appellation commerciale d'une fibre organique commercialisée depuis 1972 par la société DuPont de Nemours. Il s'agit d'un polyamide aromatique dont la structure, non publiée à ce jour par le fabricant, serait du type poly-p-benzamide :

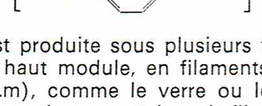

Cette fibre est produite sous plusieurs formes à haute résistance et à haut module, en filaments de très faible diamètre (12 μm), comme le verre ou le carbone. Les fils de Kevlar, de quelques centaines de filaments, d'aspect soyeux doré, sont utilisés tels quels ou en tissus. Le module d'Young varie de 84 000 à 130 000 MPa (soit de une fois à une fois et demie celui du verre ou de l'aluminium), tandis que la résistance varie en sens inverse de 3 500 à 2 700 MPa. L'avantage décisif du Kevlar réside dans sa faible densité (masse volumique de 1 450 kg/m^3), si bien que ses propriétés massiques sont remarquables : en particulier, son rapport résistance/masse volumique est le meilleur de toutes les fibres de renforcement. Ses autres avantages sont : une bonne résistance chimique; une bonne tenue à la flamme et en température (les propriétés mécaniques sont sensiblement préservées jusqu'à 300 °C); une bonne résistance à la fatigue et une bonne absorption des vibrations.

En revanche, le Kevlar est très sensible à l'humidité. A température ambiante, la fibre absorbe 2 % d'humidité. Elle doit donc être conservée en récipient hermétique ou étuvée avant emploi. De plus, les composites renforcés par le Kevlar possèdent une résistance à la compression nettement plus faible (20 à 30 %) que la résistance en traction. Cette relative inefficacité du renforcement en compression peut être attribuée à une imprégnation médiocre des fibres de Kevlar par les résines habituellement utilisées.

Malgré ces défauts, la fibre de Kevlar est un sérieux concurrent pour les autres fibres, y compris la fibre de verre, grâce à un coût assez peu élevé. Ses applications croissantes devraient favoriser encore l'abaissement de son coût, et la commercialisation de fibres analogues par d'autres sociétés.

Les autres fibres de renforcement

On passe en revue ici diverses fibres d'usage plus restreint ou particulier.

Les fibres organiques naturelles. On utilise les fibres de jute, de lin, de sisal, de coton. Ce dernier, employé tissé, est très utilisé comme renfort des résines phénoliques pour des applications n'exigeant pas beaucoup de caractéristiques mécaniques : tableaux de bord, boîtiers, pièces isolantes, etc. Le sisal a été utilisé dans les premières constructions de radômes en plastique renforcé, en mélange avec d'autres fibres comme l'amiante et le verre; son faible prix de revient compense ses faibles propriétés mécaniques (sa résistance à la traction n'est que de 50 MPa).

Les fibres organiques synthétiques. Ce sont principalement les fibres de polyester, les polyamides et les fibres de polypropylène. Les fibres de polyester s'utilisent, par exemple, dans une matrice de méthacrylate de méthyle pour le raidissement de verrières de cockpits d'avions. Les polyamides dans des résines phénoliques constituent d'excellents matériaux ablatifs : capables d'absorber beaucoup de chaleur, ils peuvent résister convenablement à des températures très élevées (2 000 °C et plus) pendant des durées limitées.

Les fibres métalliques. Des fils d'acier, de cuivre ou d'aluminium servent parfois, avec des résines, à fabriquer des moules et des outillages évacuant bien la chaleur, pour obtenir des parois réfléchissant les ondes radar, pour réaliser des cages de Faraday, toutes applications mettant en jeu les propriétés conductrices (thermiques ou électriques) de ces métaux.

Enfin les fils d'acier, employés sous forme de tresses, reçoivent une utilisation très importante dans les carcasses de pneumatiques; ce caoutchouc renforcé, qui est un matériau composite bien particulier à cause de la grande déformabilité du caoutchouc, n'est pas étudié dans ce texte.

Les matrices

Le rôle de la matrice dans un matériau composite est complexe : ses fonctions mécaniques sont d'assurer un lien entre les fibres, de créer la rigidité et la cohésion du matériau en maintenant invariables les distances et orientations mutuelles des éléments de renforcement, enfin de transmettre au renfort les efforts s'exerçant sur la structure. Il faut donc rechercher une bonne adhérence entre le renfort et la matrice, par un choix judicieux des constituants et par des traitements appropriés lors de l'élaboration du composite (ensimage pour le verre).

▶ *Tableau VII : comparaison des caractéristiques de matrices résines, d'un élastomère et de l'aluminium. On notera leur faible rigidité (modules d'Young environ 20 fois plus petits que celui de l'aluminium).*

Tableau VII
Comparaison des caractéristiques de matrices résines, d'un élastomère et de l'aluminium

Matériaux constituant les matrices		Résistance à la traction (en MPa)	Module d'Young (en MPa)
résines	Polyester	60	2 500
	Époxyde	80	3 500
	Phénolique		5 000
	Polyimide		4 000
	Élastomère		20
	Aluminium	300	74 000

De plus, vis-à-vis du milieu extérieur, la matrice sert de protection, que ce soit contre les chocs (les renforts sont souvent des matériaux fragiles très sensibles aux impacts) ou contre l'environnement non mécanique : produits chimiques, humidité, etc.

Enfin, l'aspect de surface, la couleur, la transparence ou l'opacité dépendent généralement de la matrice et d'additifs non renforçants.

Les divers types de matrices

Les propriétés des matrices ne seront pas exposées en détail ici ; contrairement aux fibres de renforcement, les matrices dans les composites ont sensiblement les mêmes propriétés que les matériaux massifs correspondants. On pourra donc se reporter aux autres parties de cette *Encyclopédie* pour obtenir plus de détails.

Les matrices utilisées dans les matériaux composites sont essentiellement les résines (que l'usage courant appelle « matières plastiques »). On trouve, pour des usages dans les techniques de pointe, des composites à *matrice métallique,* principalement l'aluminium et ses alliages. Le magnésium, le titane, le nickel ont aussi fait l'objet d'études. Ces métaux sont utilisés sous forme de feuilles très minces (épaisseur de l'ordre du 1/10 de mm), de poudre, de projection au chalumeau à plasma, etc. et sont mis en œuvre par pressage à chaud. En raison du coût très élevé de leur fabrication, les matériaux composites à matrice métallique sont réservés à des usages particuliers (aérospatiaux) et sont encore souvent à l'état de prototypes. On emploie aussi des matrices de carbone, obtenues d'ailleurs par carbonisation de résines, pour certains matériaux composites tridirectionnels.

Enfin, il faut citer des types de matériaux non étudiés ici, mais qui peuvent légitimement être considérés comme des matériaux composites : les caoutchoucs et élastomères armés, en particulier dans l'industrie des pneumatiques ; les bétons de fibres, les ferrociments et l'amiante-ciment, dans l'industrie du bâtiment, qui sont constitués d'une matrice de ciment renforcé par des fils de verre ou d'acier, ou des paillettes d'amiante ; les panneaux de verre armé, et sans doute bien d'autres matériaux, tant la définition des matériaux composites est élastique.

Les matrices résines

Ce sont les polyesters, les époxydes, les phénoliques, les silicones, les mélamines, noms génériques recouvrant chacun une certaine diversité de matériaux.

Les **polyesters** sont les résines les plus utilisées en raison de leur prix avantageux et de leur facilité d'emploi. Fournies sous forme de liquide qu'un inhibiteur de polymérisation permet de stocker pendant quelques mois, elles s'utilisent avec adjonction d'un catalyseur et d'un accélérateur de réaction. La réaction est nettement exothermique, ce qui peut nécessiter une mise en œuvre en plusieurs étapes pour des épaisseurs importantes. Les défauts principaux de ces résines sont leur retrait important pendant et après polymérisation et leur sensibilité au feu, hormis traitements particuliers.

Les **époxydes** se mettent en œuvre directement par adjonction d'un catalyseur. Elles ont des propriétés supérieures à celles des polyesters (caractéristiques mécaniques plus élevées, peu de retrait, faible inflammabilité, bonne tenue en température), mais n'atteignent pleinement leurs caractéristiques que si elles sont l'objet d'une fabrication soignée, en particulier sous forme d'un cycle de cuisson pour polymérisation, puis de postcuisson. Leur prix est plus élevé que celui des polyesters. Elles sont utilisées pour les applications mécaniques soignées, en particulier en aéronautique.

Les **phénoliques, silicones, mélamines** sont fournies sous forme de solution et se mettent en forme par moulage. Les résines phénoliques ont une bonne tenue à la chaleur ; leur module élevé (grande rigidité), vu leur mode de mise en œuvre par moulage, peut constituer plutôt un inconvénient. Les résines silicones et mélamines sont utilisées couramment pour leurs bonnes propriétés d'isolation électrique.

Les **polyimides** ont de bonnes propriétés mécaniques accompagnées d'une excellente tenue en température. Ils sont cependant de mise en œuvre délicate et nécessitent parfois, en raison de leur toxicité, des installations de fabrication spéciales.

Le tableau VII donne les caractéristiques mécaniques des matrices résines, comparées à celles de l'aluminium qui est la matrice métallique la plus utilisée ; on notera leur faible rigidité.

Ces propriétés, pour les résines du moins, ne sont qu'indicatives ; elles peuvent varier dans une assez large mesure en fonction de la nature exacte de la résine et du soin de la mise en œuvre.

Fabrication des matériaux composites

La fabrication des matériaux composites présente plusieurs originalités : ils peuvent être produits avec des constitutions très diverses, par de nombreux procédés, allant du plus rudimentaire au plus élaboré ; on ne fabrique pas les matériaux, puis, à l'aide de ces matériaux, des pièces, par un procédé de mise en forme ou d'usinage, on fabrique directement les pièces, et il serait plus exact de parler de fabrication des *structures* en matériaux composites. On peut donc choisir, en fonction des impératifs économiques et techniques, la nature, la proportion et la disposition des constituants, et également le mode de fabrication. Ainsi, on peut utiliser sous forme de renfort dispersé des matériaux dotés de propriétés mécaniques intéressantes, mais qui ne sont pas disponibles ou pas utilisables sous forme massive ; pour un matériau de renfort onéreux, on peut adapter sa répartition à l'usage envisagé ; on peut aussi, suivant les besoins, faire une fabrication industrialisée ou artisanale.

Cette souplesse a des contreparties : une fois réalisée, une pièce en matériau composite est très difficile à modifier. En particulier, un matériau composite se prête mal aux usinages : sa nature hétérogène nuit au bon fonctionnement des outils, et il perd parfois une partie de ses propriétés mécaniques. De plus, les assemblages de matériaux composites entre eux ou avec d'autres matériaux sont délicats à réaliser ; le meilleur des procédés, y compris dans les techniques de pointe, est le collage. En revanche, pour les matériaux à matrice résine, les réparations des parties endommagées peuvent être réalisées de façon artisanale, en rapportant de la matière sous forme d'un matériau composite de matrice compatible avec celle de la pièce à réparer.

Le choix des associations des deux constituants, matrice et renfort, n'est pas totalement libre ; il dépend de la méthode retenue pour l'élaboration et des caractéristiques d'emploi du matériau : les deux constituants doivent être compatibles chimiquement (le bore, par exemple, réagit avec beaucoup de métaux à chaud) ; leurs propriétés thermomécaniques doivent être, elles aussi, compatibles pour éviter l'apparition de précontraintes (d'origine thermique, par exemple). Enfin, l'utilisation de semi-produits est assez fréquente lors de l'élaboration de composites : monocouches de fibres de bore enrobées d'aluminium, fibres diverses préimprégnées de résine.

Les semi-produits, fabriqués à l'avance et stockés, facilitent la manipulation des matériaux de renfort, qui

est sans cela délicate en raison des faibles dimensions et de la fragilité des particules de renforcement.

Les composites métalliques sont essentiellement représentés par le « bore-aluminium », dont certaines propriétés rivalisent avec celles de l'acier pour une masse volumique trois fois plus faible. Il est obtenu par pressage à chaud d'un empilement de trames de fibres disposées sur un mince feuillard de métal et éventuellement enrobées d'aluminium par projection au chalumeau à plasma.

Les procédés de fabrication des composites à matrice résine sont plus variés; ils vont des méthodes artisanales aux techniques industrielles automatisées : moulage au contact ou en double moule, moulage sous pression, bobinage filamentaire sur un mandrin, extrusion ou stratification en continu. On obtient ainsi les « polyesters verre » pour les applications courantes, les « époxydes-bore », « époxydes-carbone » et « époxydes-Kevlar » réservés aux applications spéciales de prix de revient beaucoup plus élevé.

Propriétés mécaniques des matériaux et des structures composites

Les matériaux composites, on l'a vu, sont des matériaux hétérogènes dans lesquels les éléments de renforcement ont été placés en proportions définies suivant des orientations privilégiées, ce qui leur confère une anisotropie de comportement; du fait qu'un matériau composite est fabriqué pour un usage donné, les fibres, au moins en principe, sont dirigées suivant les efforts à supporter dans la pièce fabriquée; en réalité, pour un composite, la fabrication de la structure et la fabrication du matériau sont simultanées et indissociables. Cet *aspect de structure* est une des trois caractéristiques clefs qui conditionnent la mécanique des composites, avec l'*aspect hétérogène* et l'*aspect anisotrope*, déjà indiqués.

On examinera d'abord les propriétés élémentaires d'une *monocouche*, c'est-à-dire d'une couche unique de fibres dans une matrice. Cette monocouche, sans être complètement une vue de l'esprit, n'a pas d'existence isolée : avec les fibres habituellement utilisées, son épaisseur est de l'ordre d'au plus quelques dixièmes de millimètre.

Les monocouches empilées et soudées les unes au autres forment des *plaques* et coques stratifiées; elles peuvent aussi constituer les peaux des *structures sandwich*, qui ajoutent ou substituent au renforcement d'origine matérielle (par les fibres) obtenu dans les structures stratifiées ordinaires un renforcement de nature géométrique par la disposition de leurs couches. Enfin, on présentera brièvement les structures composites à *renfort tridirectionnel*.

Propriétés mécaniques des monocouches

L'anisotropie des monocouches

Pour la plupart des applications pratiques, on s'intéresse à des déformations et des contraintes moyennes, la moyenne étant faite sur une étendue petite par rapport aux dimensions de la couche, mais grande par rapport aux dimensions transversales des éléments de renfort. Dans de tels cas, il est logique d'idéaliser la couche élémentaire hétérogène par une couche de matériau homogène ayant la même réponse moyenne aux sollicitations : on choisit pour cela un matériau équivalent homogène *anisotrope*. Le type d'anisotropie dépend de l'arrangement du renfort dans la couche élémentaire. Le cas le plus fréquent est celui d'une couche renforcée par des fibres toutes parallèles ou par un tissu, c'est le cas de l'*orthotropie*.

Par suite de cette anisotropie, il est indispensable, pour décrire ou mesurer ses propriétés mécaniques, de définir un *repère de référence lié au matériau*, orienté suivant les directions privilégiées de la monocouche. C'est ainsi que, dans le cas d'une monocouche renforcée par fibres, l'axe Ox est orienté selon la direction des fibres, l'axe Oy est pris perpendiculaire dans le plan des fibres, et l'axe Oz, perpendiculaire aux deux premiers axes, donc à la monocouche, est choisi de façon à avoir un trièdre orthonormé direct.

Dans ce système d'axes, les propriétés élastiques sont décrites par neuf constantes élastiques, au lieu de deux pour les matériaux isotropes habituels; en effet, les déformations ε_{xx}, ε_{yy}, ..., ε_{xy} sont proportionnelles aux contraintes σ_{xx}, ..., σ_{xy} suivant la loi de Hooke généralisée :

$$(1)\quad \begin{cases} \varepsilon_{xx} = S_{xxxx}\sigma_{xx} + S_{xxyy}\sigma_{yy} + S_{xxzz}\sigma_{zz} \\ \varepsilon_{yy} = S_{xxyy}\sigma_{xx} + S_{yyyy}\sigma_{yy} + S_{yyzz}\sigma_{zz} \\ \varepsilon_{zz} = S_{xxzz}\sigma_{xx} + S_{yyzz}\sigma_{yy} + S_{zzzz}\sigma_{zz} \\ \varepsilon_{yz} = 2\,S_{yzyz}\sigma_{yz} \\ \varepsilon_{zx} = 2\,S_{zxzx}\sigma_{zx} \\ \varepsilon_{xy} = 2\,S_{xyxy}\sigma_{xy} \end{cases}$$

Les neuf quantités S_{xxxx}, ..., S_{xyxy} sont des constantes de souplesse ayant la dimension inverse d'une contrainte.

La loi de Hooke généralisée est aussi utilisée sous la forme inverse qui exprime les contraintes en fonction des déformations à l'aide de neuf quantités C_{xxxx}, ..., C_{xyxy}, les constantes de rigidité (ou d'élasticité), qui ont la dimension d'une contrainte :

$$(2)\quad \begin{cases} \sigma_{xx} = C_{xxxx}\varepsilon_{xx} + C_{xxyy}\varepsilon_{yy} + C_{xxzz}\varepsilon_{zz} \\ \sigma_{yy} = C_{xxyy}\varepsilon_{xx} + C_{yyyy}\varepsilon_{yy} + C_{yyzz}\varepsilon_{zz} \\ \sigma_{zz} = C_{xxzz}\varepsilon_{xx} + C_{yyzz}\varepsilon_{yy} + C_{zzzz}\varepsilon_{zz} \\ \sigma_{yz} = 2\,C_{yzyz}\varepsilon_{yz} \\ \sigma_{zx} = 2\,C_{zxzx}\varepsilon_{zx} \\ \sigma_{xy} = 2\,C_{xyxy}\varepsilon_{xy} \end{cases}$$

En fait, on peut donner, par analogie avec le comportement des matériaux isotropes habituels, une signification physique aux coefficients de proportionnalité en écrivant la loi sous une troisième forme :

$$(3)\quad \begin{cases} \varepsilon_{xx} = \dfrac{1}{E_x}\sigma_{xx} - \dfrac{\nu_{xy}}{E_x}\sigma_{yy} - \dfrac{\nu_{xz}}{E_x}\sigma_{zz} & \varepsilon_{yz} = \dfrac{1}{2\,G_{yz}}\sigma_{yz} \\ \varepsilon_{yy} = -\dfrac{\nu_{yx}}{E_y}\sigma_{xx} + \dfrac{1}{E_y}\sigma_{yy} - \dfrac{\nu_{yz}}{E_y}\sigma_{zz} & \varepsilon_{zx} = \dfrac{1}{2\,G_{zx}}\sigma_{zx} \\ \varepsilon_{zz} = -\dfrac{\nu_{zx}}{E_z}\sigma_{zz} - \dfrac{\nu_{zy}}{E_z}\sigma_{yy} + \dfrac{1}{E_z}\sigma_{zz} & \varepsilon_{xy} = \dfrac{1}{2\,G_{xy}}\sigma_{xy} \end{cases}$$

E_x, E_y et E_z sont les 3 modules d'Young dans les directions x, y, z respectivement;

G_{yz}, G_{zx}, G_{xy} sont les 3 modules de cisaillement dans les plans yz, zx, xy respectivement;

ν_{xy} et ν_{yx}, ν_{xz} et ν_{zx}, ν_{yz} et ν_{zy} sont les six coefficients de Poisson dans les plans xy, zx et yz; ils ne sont pas indépendants mais liés par trois relations :

$$\frac{\nu_{xy}}{E_x} = \frac{\nu_{yx}}{E_y} \qquad \frac{\nu_{xz}}{E_x} = \frac{\nu_{zx}}{E_z} \qquad \frac{\nu_{yz}}{E_y} = \frac{\nu_{zy}}{E_z}$$

ce qui donne bien au total 9 coefficients indépendants pour la loi de Hooke.

Remarquons bien que ces expressions de la loi de comportement sont valables uniquement dans le repère de symétrie O_{xyz} et que, dans un repère quelconque O_{XYZ}, elle prend une forme encore plus complexe : chacune des déformations mesurées dans le nouveau repère est proportionnelle à l'ensemble des contraintes mesurées dans le nouveau repère, par exemple :

$$(4)\quad \overset{*}{\varepsilon}_{YY} = \overset{*}{S}_{YYXX}\overset{*}{\sigma}_{XX} + \overset{*}{S}_{YYYY}\overset{*}{\sigma}_{YY} + \overset{*}{S}_{YYZZ}\overset{*}{\sigma}_{ZZ} + 2\,\overset{*}{S}_{YYYZ}\overset{*}{\sigma}_{YZ} + 2\,\overset{*}{S}_{YYZX}\overset{*}{\sigma}_{ZX} + 2\,\overset{*}{S}_{YYXY}\overset{*}{\sigma}_{XY}$$

et 5 autres relations analogues. Les symboles * ont pour objet de mettre en évidence le fait que les grandeurs ε, S ou σ sont mesurées dans un repère différent du repère de symétrie. Les 36 coefficients S de ces relations ne sont pas indépendants entre eux, mais se calculent à partir des 9 quantités S_{xxxx}, ..., S_{xyxy} qui permettent d'écrire la loi de comportement élastique dans le repère de symétrie. Ils s'obtiennent d'après les règles du calcul

tensoriel ; en effet, ces coefficients S sont les composantes d'un tenseur d'ordre 4. On écrit généralement les six relations du type **(4)** de façon symbolique :

(5) $$\varepsilon^*_{IJ} = S^*_{IJKL}\sigma^*_{KL}$$

où les indices I, J, K, L représentent x, y ou z, et où une sommation double par rapport à K et L est sous-entendue. Ces relations s'inversent sous la forme :

(6) $$\sigma^*_{IJ} = C^*_{IJKL}\sigma^*_{KL}$$

qui généralise les équations **(2)** à un repère quelconque. Les 36 coefficients C sont également les composantes d'un tenseur.

On peut également écrire les relations **(4)** ou **(5)** en donnant une signification physique aux coefficients (modules d'Young, de cisaillement, coefficients de Poisson, etc.). En pratique, on se borne à des axes O_{XYZ} obtenus à partir des axes O_{xyz} par rotation d'un angle θ ; et on définit en particulier le module d'Young E^*_X dans cette direction OX à θ par rapport à Ox ; compte tenu des relations de transformation des constantes S, on l'obtient à partir des constantes des relations **(3)** :

(7)

$$E^*_X(\theta) = \frac{1}{\dfrac{\cos^4\theta}{E_x} + \left(\dfrac{1}{G_{xy}} - \dfrac{2\,\nu_{xy}}{E_x}\right)\cos^2\theta\sin^2\theta + \dfrac{\sin^4\theta}{E_y}}$$

Les courbes polaires représentatives de ce module d'Young dans une direction arbitraire sont données plus loin pour divers matériaux.

Pour conclure, il faut indiquer que, malgré leurs noms de modules d'Young, de modules de cisaillement, de coefficients de Poisson, les constantes introduites ici ne satisfont pas aux relations et conditions valables dans le cas d'un matériau isotrope

$$\left(2\,G = \frac{E}{1+\nu} \text{ et } 0 < \nu < \frac{1}{2}\right)$$

en particulier, les coefficients de Poisson généralisés, bien que limités, peuvent dépasser 1/2.

Prévision des caractéristiques élastiques d'une monocouche

Dès le début de l'utilisation des composites, les praticiens comme les théoriciens ont étudié les monocouches à partir de la connaissance des caractéristiques des fibres qui les constituent ; cela les a conduits à diverses formules de prévision, qui diffèrent entre elles par des termes petits, souvent de l'ordre de grandeur de l'erreur due aux incertitudes sur les caractéristiques des constituants et de l'erreur due à l'ignorance de la répartition exacte des fibres dans la matrice. En général, on ne connaît même que la proportion volumique de fibres (ou *fraction volumique*), et encore peu précisément. On peut retenir les formules dues à Puck, qui ont été obtenues à la fois par des considérations théoriques et par ajustement à des résultats expérimentaux, et qui ont l'avantage d'être assez proches de la réalité, tout en restant simples. Elles utilisent les quantités suivantes : V_f et V_m les fractions volumiques en fibres et en matrice ($V_f + V_m = 1$) ;

$$E_f,\ V_f,\ G_f = \frac{E_f}{2\,(1+\nu_f)} \qquad E_m,\ V_m,\ G_m = \frac{E_m}{2\,(1+\nu_m)}$$

les modules d'Young, coefficients de Poisson et modules de cisaillement des fibres et de la matrice.

On a alors, pour les constantes dans le repère de symétrie :

(8)

$$\begin{cases} E_x = E_fV_f + E_mV_m \\ E_y = \dfrac{E_m}{1-\nu_m^2} \dfrac{1 - 0{,}85\,V_f^2}{(V_m)^{1,25} + V_f\dfrac{E_m}{E_f\,(1+\nu_m^2)}} \\ E_{xy} = \nu_fV_f + \nu_mV_m \\ G_{xy} = G_m\,\dfrac{1 + 0{,}6\,(V_f)^{0,5}}{(V_m)^{1,25} + V_f\dfrac{G_m}{G_f}} \end{cases}$$

On complète généralement ces formules par $E_z = E_y$

$$\nu_{xz} = \nu_{xy} \qquad G_{xz} = G_{xy} \qquad G_{yz} = \frac{E_y}{2\,(1+\nu_{yz})}$$

La première formule, donnant E_x, est connue sous le nom de *loi des mélanges*. Elle est très bien confirmée par les résultats expérimentaux.

Dans le cas d'une matrice résine, les rapports E_m/E_f et G_m/G_f sont très petits, et, pour les fractions volumiques habituelles (de 40 à 60 %), on voit d'après ces formules que, pratiquement, le module longitudinal E_x ne dépend que des fibres ($E_x \# E_fV_f$), tandis que le module transversal E_y et le module de cisaillement ne dépendent que de la matrice ; ainsi, pour une monocouche à matrice résine, les propriétés transversales et de cisaillement sont les mêmes avec des fibres à hautes performances (et à prix élevé) qu'avec des fibres de verre. Ce fait est confirmé par l'expérience.

Les *figures* 5 a et 5 b représentent les courbes polaires représentatives du module d'Young $E^*_X(\theta)$ pour des cas typiques, tracées avec les valeurs données par les formules de Puck et la formule de rotation **(7)**. On remarquera, dans le cas des matrices résines, les faibles valeurs du module d'Young dès qu'on s'écarte un peu de la direction des fibres ; au contraire, les composites à matrice métallique ont un module présentant peu de variation en fonction de la direction.

Pour terminer, il convient de dire quelques mots des propriétés de rupture des monocouches, problème certes important, mais sur lequel nos connaissances sont encore mal établies. D'une façon générale, dans le sens des fibres, les propriétés de rupture sont déterminées par celles-ci, et sont donc élevées, tandis que, dans le sens transversal, elles sont déterminées par la matrice et son adhésion avec les fibres, elles sont donc en général assez basses : c'est là un des points faibles des matériaux composites.

Propriétés mécaniques des plaques

L'hypothèse de base de la théorie élémentaire des plaques composites consiste à considérer l'empilement des couches de fibres enrobées de matrice comme un empilement de lames orthotropes et à substituer à chaque couche de fibres parallèles une couche élastique homogène orthotrope, ayant même épaisseur et mêmes directions d'orthotropie que la couche réelle. Cette hypothèse change le niveau d'hétérogénéité au sein du matériau : dans le modèle, l'hétérogénéité a lieu entre des couches de propriétés et d'orientations différentes.

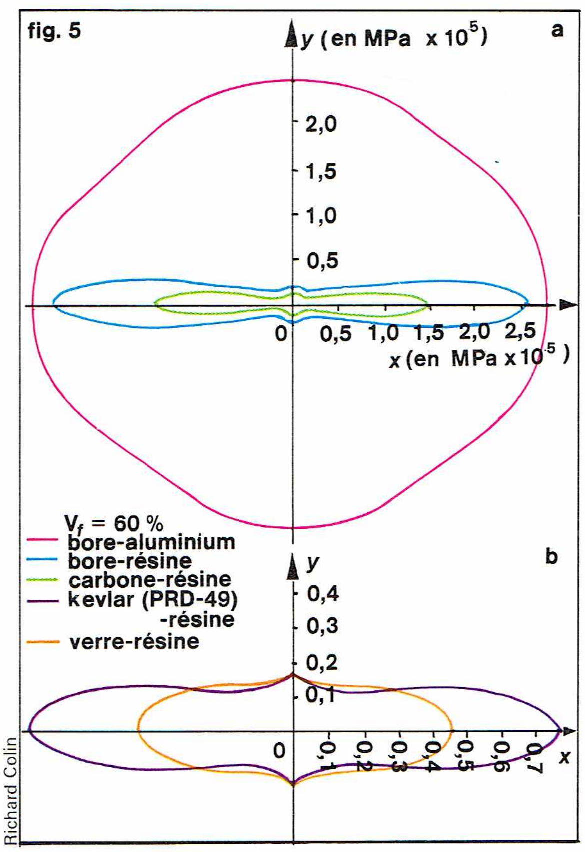

Richard Colin

▶ *Figure 5 : courbes polaires représentatives du module d'Young pour différents matériaux (d'après Verchery,* Guide des matières plastiques en mécanique, *C. E. T. I. M., 1976).*

A ce modèle de milieu stratifié on applique ensuite des hypothèses simplificatrices : pour décrire la plaque comme un corps à deux dimensions seulement, on utilise, au lieu des contraintes σ_{ij} et des déformations ε_{ij}, des forces et des déplacements généralisés.

Forces généralisées

Ce sont les éléments de réduction par rapport au plan moyen des efforts réels dans l'épaisseur de la plaque :

$$(9)\quad \begin{cases} N_{ij} = \int \sigma_{ij}\, dz & \text{contraintes résultantes} \\ Q_i = \int \sigma_{iz}\, dz & \text{efforts tranchants} \\ M_{ij} = \int \sigma_{ij}\, z dz & \text{moments résultants} \end{cases}$$

Les indices i et j prennent les valeurs x et y. Les intégrales s'étendent de h_0 à h_n. Les *figures* 6 a et 6 b représentent ces forces généralisées sur un élément de plaque.

Ces grandeurs satisfont à des équations d'équilibre qu'on peut établir directement en considérant l'élément de plaque, ou qu'on obtient en intégrant les équations d'équilibre des contraintes σ_{ij}.

- *Équilibre des contraintes résultantes*

$$(10)\quad \begin{cases} \dfrac{\partial N_{xx}}{\partial x} + \dfrac{\partial N_{xy}}{\partial y} = 0 \\ \dfrac{\partial N_{xy}}{\partial x} + \dfrac{\partial N_{yy}}{\partial y} = 0 \end{cases}$$

- *Équilibre des efforts tranchants*

$$(11)\quad \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} + q = 0$$

- *Équilibre des moments résultants*

$$(12)\quad \begin{cases} \dfrac{\partial M_{xx}}{\partial x} + \dfrac{\partial M_{xy}}{\partial y} - Q_x = 0 \\ \dfrac{\partial M_{xy}}{\partial x} + \dfrac{\partial M_{yy}}{\partial y} - Q_y = 0 \end{cases}$$

- *Par élimination des* Q_i entre **(10)** et **(11)**, on obtient une équation unique pour les moments :

$$(13)\quad \frac{\partial^2 M_{xx}}{\partial x^2} + 2\,\frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x\, \partial y} + \frac{\partial^2 M_{yy}}{\partial y^2} + q = 0$$

Déplacements généralisés

Les hypothèses cinématiques (généralisant celles de Love-Kirchhoff) supposent que les déformations dans l'épaisseur de la plaque varient linéairement avec la distance au plan moyen et sont définies par les déformations et les courbures de ce plan moyen :

$$\varepsilon_{ij}\,(x, y, z) = \varepsilon_{ij}\,(x, y, 0) + z\, K_{ij}\,(x, y, 0)$$

ou encore :

$$(14)\quad \varepsilon_{ij} = \varepsilon^0_{ij} + z\, K_{ij} \text{ pour } i, j = x, y.$$

Les autres déformations ε_{xz}, ε_{yz}, ε_{zz} ne sont pas prises en compte : on admet en effet que les couches orthotropes constituant la plaque sont en état de contrainte plane.

Les courbures se calculent, pour les petits déplacements, par les dérivées secondes de la flèche w prise par le plan moyen :

$$(15)\quad K_{ij} = -\frac{\partial^2 w}{\partial x_i\, \partial x_j}$$

La formule **(14)** introduit donc, comme différence avec les plaques homogènes, le terme ε^0_{ij} de déformation du feuillet moyen : *il n'y a pas de surface neutre.*

La loi de comportement élastique

Supposant que chaque couche a un comportement élastique linéaire orthotrope, on peut calculer à partir de la formule **(14)** les contraintes σ_{ij} dans l'épaisseur de la plaque ; puis, portant ces valeurs dans les définitions **(9)** des efforts résultants, on obtient la relation entre les forces généralisées N_{ij}, M_{ij} et les déplacements généralisés ε_{ij} et K_{ij}.

Cette démarche nécessite d'abord le calcul des coefficients d'élasticité de chaque couche dans le repère de la plaque. En effet, toutes les couches sont orthotropes, mais leurs axes d'orthotropie sont en général différents des axes de la plaque et différents entre eux.

Pour la p-ième couche, on doit exprimer les coefficients $C^{*(p)}_{ijkl}\,(\theta_p)$ en fonction des coefficients $C^{(p)}_{ijkl}$ dans le repère privilégié et de l'angle θ_p avec le repère de la plaque, par les formules de changement de repère des tenseurs de rang 4.

Tout calcul fait, on obtient la loi de comportement sous la forme d'une relation linéaire entre les forces et les déplacements généralisés. On peut l'écrire sous forme matricielle condensée :

$$(16)\quad \begin{bmatrix} N \\ \hline M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ \hline B & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon^0 \\ \hline K \end{bmatrix}$$

où N, M, ε, K sont des vecteurs colonnes où sont rangées les composantes des tenseurs correspondants. A, B et D sont des matrices carrées dont les termes se calculent par les formules :

$$(17)\quad \begin{cases} A_{ijkl} = \displaystyle\sum_{p=0}^{n} (h_p - h_{p-1})\; C^{*(p)}_{ijkl}\,(\theta) \\ B_{ijkl} = \dfrac{1}{2} \displaystyle\sum_{p=0}^{n} (h_p^2 - h_{p-1}^2)\; C^{*(p)}_{ijkl}\,(\theta) \\ D_{ijkl} = \dfrac{1}{3} \displaystyle\sum_{p=0}^{n} (h_p^3 - h_{p-1}^3)\; C^{*(p)}_{ijkl}\,(\theta) \end{cases}$$

Cette loi de comportement appelle les commentaires suivants :

— Un *couplage* entre les effets dans le plan et en flexion est induit par la présence des rigidités de couplage B_{ijkl}. Par exemple, une plaque sollicitée en traction peut avoir tendance à se vriller ; au contraire une plaque fléchie peut avoir tendance à s'allonger ou se raccourcir.

— Les rigidités de flexion D_{ijkl} ne sont pas proportionnelles aux rigidités planes A_{ijkl} alors que, dans une plaque homogène d'épaisseur h, on a :

$$[D] = \frac{h^2}{12}\,[A]$$

Ces différences avec les plaques classiques se traduisent pour les caractéristiques en flexion (rigidité apparente, fréquences propres de vibration transverse, charges de flambage) par une diminution par rapport à une plaque qui aurait les mêmes rigidités de flexion D_{ijkl}.

Enfin, la loi **(16)** montre qu'il faut en principe 18 coefficients indépendants pour caractériser le comportement élastique linéaire de la plaque.

Cependant, un nombre plus réduit est souvent suffisant. Ainsi les termes de couplage diminuent quand le nombre de couches augmente et peuvent alors être négligeables. Ils disparaissent même complètement si l'empilement est symétrique par rapport au plan moyen ; une telle séquence d'empilement doit être recherchée, dans la mesure du possible, pour éliminer les effets gênants du couplage.

Propriétés mécaniques des matériaux stratifiés

Compte tenu des faibles épaisseurs et des caractéristiques mécaniques des monocouches, on utilise généralement des stratifiés composés par l'assemblage de monocouches ; on forme ainsi des structures minces en forme de plaques et de coques, qui ont un comportement mécanique original par rapport aux structures en matériau de construction classique, homogène et isotrope. Pour les mettre en évidence, quelques développements de mécanique des milieux continus sont nécessaires. On présente ci-dessous le cas des plaques composites stratifiées en se limitant à la théorie la plus simple.

Des études approfondies sur les structures stratifiées prennent en compte, notamment, des effets de cisaillement transversal qu'on a négligés dans la théorie exposée ci-dessus. En fait, l'expérience montre que les plaques stratifiées périssent souvent par *délaminage,* c'est-à-dire par décollement des strates entre elles ; cela signifie qu'il y a des contraintes de cisaillement importantes entre les monocouches. Leur analyse fait encore l'objet de recherches à l'heure actuelle, mais on peut en donner une description qualitative. Les résultats de l'étude des effets

fig. 6

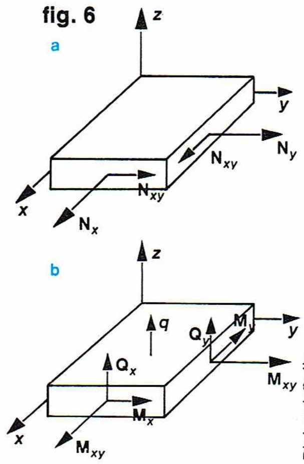

Richard Colin

▲ ***Figure 6 :***
forces généralisées sur un élément de plaque ;
a, travail en membrane ;
b, travail en flexion.

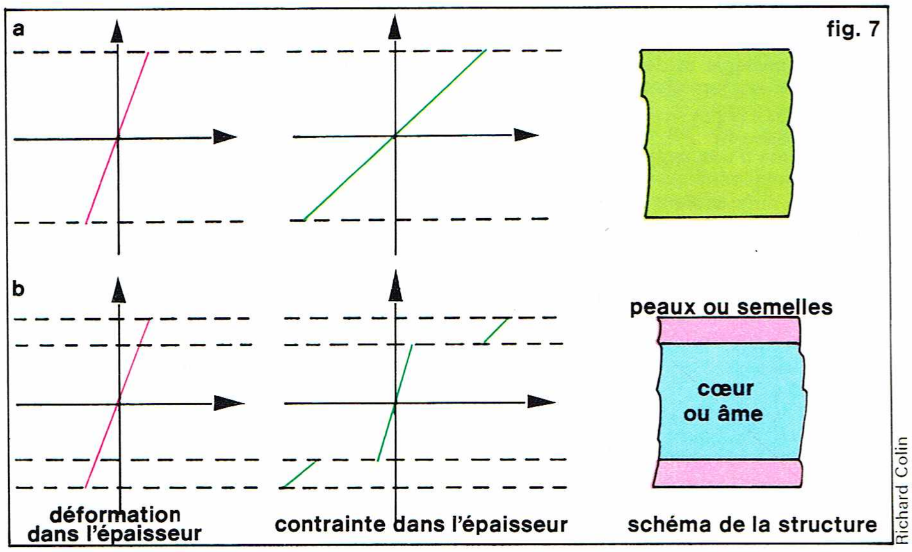

▲ *Figure 7 : efforts de flexion ; a, structure massive ; b, structure sandwich.*

de cisaillement transversal, faite pour les poutres, plaques et coques en matériaux homogènes isotropes peuvent servir à estimer ces effets dans les structures anisotropes stratifiées. En effet, le cisaillement transversal est négligé dans les structures classiques, mais son influence relative peut être évaluée ; elle est de l'ordre de

$$\frac{E_L}{G_T}\left(\frac{e}{L}\right)^2 \qquad (18)$$

où E_L est le module d'Young longitudinal de la structure, G_T son module de cisaillement transversal, e l'épaisseur et L la longueur ou la largeur de la structure ($\frac{L}{e}$ est l'*élancement*). On voit clairement sur cette formule que, pour les structures classiques où $\frac{E_L}{G_T}$ est de l'ordre de 2, l'influence est tout à fait négligeable dès que l'élancement atteint 10 ou 20. Par contre, dans les structures stratifiées, le rapport $\frac{E_L}{G_T}$ est de l'ordre de grandeur du rapport du module d'Young des fibres à celui de la matrice ; il peut donc être très grand dans le cas d'une matrice résine, et la formule **(18)** ne donne pas forcément un terme négligeable. D'une façon générale, les contraintes de cisaillement dans les stratifiés sont plus importantes que dans les structures homogènes et, tout en restant modérées, peuvent devenir grandes par rapport aux contraintes de cisaillement admissibles (rappelons que ces caractéristiques sont faibles), et par suite entraîner la rupture du matériau.

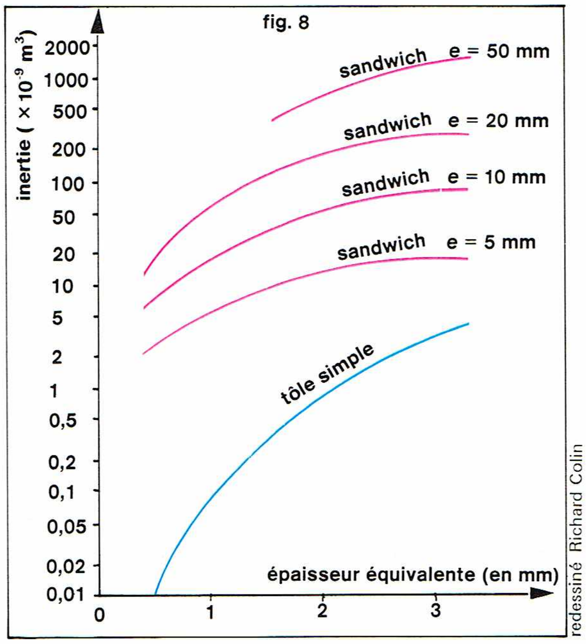

▶ *Figure 8 : inertie géométrique de la structure en fonction de l'épaisseur totale des peaux (épaisseur équivalente) pour diverses épaisseurs du cœur (d'après M. S. Dzalba-Lyndis,* Matériaux sandwich aérospatiaux, *École nationale supérieure de l'aéronautique et de l'espace).*

Terminons par une remarque sur les méthodes de calcul des structures composites. Les méthodes classiques de calcul, par des développements analytiques, sont mal adaptées ; au contraire, les méthodes modernes de calcul sur ordinateurs, en particulier la méthode des éléments finis, s'adaptent facilement à ces structures composites.

Matériaux et structures sandwich

Les constructions sandwich peuvent être qualifiées de composites à deux égards : il s'agit de structures minces hétérogènes formées de trois couches ou plus ; en outre, les matériaux constituant ces couches sont souvent eux-mêmes des matériaux hétérogènes, en particulier des résines renforcées de fibres.

Comme on l'a déjà indiqué, les structures, en particulier (mais pas seulement) dans la construction aérospatiale, doivent concilier deux qualités *a priori* contradictoires : la légèreté et la rigidité. On peut donc chercher à accroître l'une ou l'autre, d'où l'intérêt des matériaux composites, qui présentent un bon rapport module d'Young/masse volumique. Une autre façon d'aborder le problème est de tenter d'améliorer le rendement des matériaux dans les structures : en effet, toutes les parties d'une structure remplissant un rôle déterminé ne travaillent pas de la même façon, et l'on conçoit bien que l'emploi du matériau composite le plus perfectionné, le plus léger, le plus raide, à un endroit de la structure où ses qualités de résistance et de raideur sont sous-utilisées, ne se justifie absolument pas. C'est même le cas pour la majorité des applications ; en effet, la plupart des structures subissent des efforts de flexion, au cours desquels ce sont leurs couches superficielles qui sont les plus sollicitées, tandis que la partie du matériau située dans l'épaisseur travaille à un taux réduit. La *figure* 7 illustre ce comportement de façon schématique pour une poutre en flexion constituée d'un matériau massif.

L'idée vient alors de remplacer ce matériau (massif, donc lourd), dans la partie centrale, par un matériau léger qui sera, bien sûr, moins rigide, mais susceptible cependant de supporter les sollicitations de la zone centrale : on réalise ainsi une structure composée d'un cœur en matériau léger de faible rigidité et de faible résistance, pris en sandwich entre deux peaux en matériau dense, rigide et résistant ; la masse totale de cette structure est beaucoup plus faible que celle de la structure massive pour une efficacité à la flexion du même ordre. La partie *b* de la *figure* 7 schématise le comportement d'un tel sandwich.

Un exemple typique se trouve dans les panneaux aluminium-balsa utilisés en construction aéronautique ou navale de plaisance : l'épaisseur des peaux en aluminium est de 1/10 à 1/20 de celle du cœur en balsa ; le rapport des modules d'Young est de 25 (70 000 MPa pour l'aluminium, 2 700 MPa pour le balsa), celui des masses volumiques est de 27 (2 700 kg/m^3 pour l'aluminium contre 100 pour le balsa), le rapport des résistances est de 10 ou plus suivant la qualité d'aluminium utilisée.

L'intérêt de ces constructions dépend de la façon dont elles travaillent. On voit immédiatement qu'en traction, une plaque sandwich ne présente aucun avantage sur une tôle d'épaisseur égale à l'épaisseur totale des peaux ; c'est en flexion — et dans les phénomènes annexes, comme le flambage local ou le flambage d'ensemble — que le comportement est amélioré. Les formules **(17)** données plus haut pour les plaques stratifiées permettent d'évaluer simplement cette amélioration ; en considérant un tricouche constitué comme le sandwich (c'est-à-dire avec une couche centrale de rigidité pratiquement négligeable), on voit que la rigidité à la traction — caractérisée par les coefficients A_{ijkl} — est sensiblement la somme de celles des peaux, car, en traction, chaque couche intervient proportionnellement à son épaisseur ; au contraire, en flexion, chaque couche intervient proportionnellement au *cube* de sa distance à la couche centrale : ainsi, les peaux éloignées du plan moyen de la structure donnent une contribution beaucoup plus grande qu'une couche équivalente dans le plan moyen. La contribution croît approximativement comme le cube de l'épaisseur du cœur ; dans le cas isotrope, elle est caractérisée

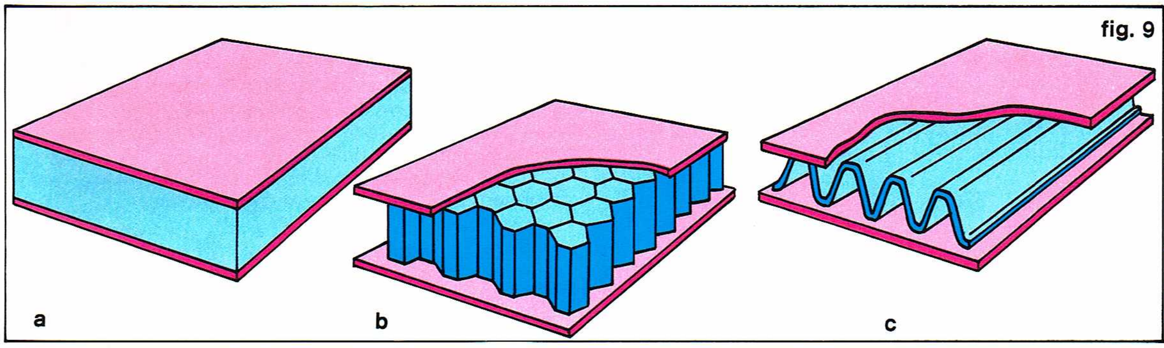

◀ *Figure 9 : architectures possibles des sandwiches ;* a, *âme pleine ;* b, *nid d'abeille ;* c, *âme ondulée ; (d'après M. S. Dzalba-Lyndis,* Matériaux sandwich aérospatiaux, *École nationale supérieure de l'aéronautique et de l'espace).*

par l'inertie géométrique de la structure (grandeur dont la dimension est le cube d'une longueur), et la *figure* 8 donne cette inertie en fonction de l'épaisseur totale des peaux (épaisseur équivalente) pour diverses épaisseurs du cœur ; on voit que les sandwiches ont des inerties de près de 10 fois à plus de 1 000 fois supérieures à la tôle de même masse en même métal.

Les types de matériaux sandwich et leur construction

L'architecture des sandwiches est très variée ; en pratique, on rencontre surtout des structures à trois couches : un cœur épais entre deux peaux minces de même épaisseur.

Le cœur. Il peut être un matériau plein ou alvéolaire ; par extension, ce peut être une structure ondulée ou en nids d'abeille (*fig.* 9). Il est généralement considéré dans les analyses mécaniques (au moins en première approximation) comme équivalent à un matériau homogène anisotrope.

Les *cœurs pleins* ou *alvéolaires* sont principalement choisis parmi les matériaux organiques naturels (balsa) ou industriels : résines (polystyrènes, uréthannes, phénoliques, etc., expansées ou non), caoutchoucs et élastomères durs ou expansés (*tableau* VIII).

Les matériaux utilisés pour les *cœurs ondulés* ou *en nids d'abeille* sont divers : on trouve des matériaux organiques pour les utilisations à température ambiante et des métaux et alliages pour les utilisations de l'ambiante aux températures élevées. Parmi les matériaux organiques, on peut citer les polyesters renforcés de fibres de verre, les papiers traditionnels (papier kraft, carton) et les papiers Nylon et polyamide ; ces derniers (dont un exemple type est le papier Nylon NOMEX de DuPont de Nemours) sont fabriqués suivant les techniques habituelles de la papeterie : un mélange intime de deux formes d'un même polymère, composé de fibres courtes de fines particules fibreuses formant le liant, alimente une machine à papier ; on obtient ainsi un produit du type papier buvard qui est ensuite calandré à chaud pour obtenir un papier compact.

Les cœurs métalliques sont en alliage d'aluminium, en titane pur ou allié, plus rarement en aciers, en superalliages (base nickel ou base cobalt), en alliages réfractaires.

Les nids d'abeille et les cœurs ondulés, qu'ils soient organiques ou métalliques, sont élaborés essentiellement à partir de tôles, de feuillards ou de feuilles, par collage ou par soudage. Ce dernier, beaucoup plus délicat et onéreux, n'est utilisé que pour les utilisations aux hautes températures et nécessite au préalable une mise en forme à la presse des rubans ondulés destinés à constituer le cœur. Le collage, utilisé par exemple pour les nids d'abeille en aluminium ou en matériaux organiques, est de réalisation simple : à partir du matériau en feuilles de grande largeur, des raies de colle parallèles sont déposées à intervalles réguliers ; les feuilles sont empilées les unes sur les autres et pressées à chaud, ce qui assure un bon collage ; le bloc ainsi obtenu est découpé en tranches perpendiculairement aux raies de colle ; en déployant ces tranches, on obtient des cellules dont la forme dépend de l'expansion donnée aux tranches.

Les peaux. Divers matériaux servent à les fabriquer : cartons, contre-plaqués, métaux et alliages, mais aussi plaques minces en matériaux composites (la structure sandwich est alors composite à deux niveaux). Dans leur choix interviennent des considérations de coût et de propriétés : tenue aux efforts et à la température. Remarquons que les peaux sont souvent anisotropes, soit par la constitution même de leur matériau (plaques composites, contreplaqués), soit par leur mise en forme (les tôles obtenues par laminage présentent souvent une légère anisotropie entre la direction de laminage et les autres directions).

Tableau VIII

Caractéristiques de variétés courantes de cœurs pleins ou alvéolaires des matériaux sandwich

Matériaux	Masse volumique (en kg/m³)	Résistance à la compression (× 10⁸ Pa)	Résistance au cisaillement (× 10⁵ Pa)	Module d'Young transversal (× 10⁸ Pa)	Module de cisaillement (× 10⁸ Pa)
Balsa	111 à 203	50 à 133	9 à 22	21 à 53	1 à 2,3
Cellulose cellulaire	80	4	—	0,3	0,04
Acétate cellulaire	111	11	—	1	0,25
Caoutchouc dur	148	11	—	0,7	0,28

▲ *Tableau VIII : caractéristiques de variétés courantes de cœurs pleins ou alvéolaires de matériaux sandwich.*

Les procédés d'assemblage. Les procédés d'assemblage du cœur et des peaux dépendent des matériaux utilisés et des températures de service du sandwich construit. Pour les utilisations à températures élevées, le soudage est nécessaire ; il est parfois fait sur des machines automatiques spéciales, en même temps que le soudage des rubans constituant les alvéoles. Pour la plupart des autres utilisations, l'assemblage par collage est le procédé le plus répandu.

Dans tous les cas, compte tenu de l'importance d'un bon assemblage entre le cœur et les peaux, on procède au contrôle de la qualité de l'interface entre peaux et cœur, notamment par ultrasons, par thermographie, par radiographie X, par holographie.

Les propriétés mécaniques des sandwiches

Le premier paragraphe a décrit de façon schématique (voir *fig.* 7) le comportement mécanique des sandwiches ; il s'agit d'une simplification de la répartition réelle des déplacements et des contraintes, répartition qui ne peut être obtenue qu'au prix de calculs considérables d'élasticité tridimensionnelle. Divers modèles approchés — mais plus exacts que ces considérations — mettent en évidence le fait que l'efficacité de la construction en sandwich à la flexion est légèrement inférieure à ce que nous avons dit ci-dessus, à cause d'une déformation notable du cœur en cisaillement. La *figure* 10 montre la différence entre la déformation en flexion d'une structure massive et celle d'une structure sandwich : cette dernière est un peu moins rigide que la structure massive de même épaisseur, mais reste beaucoup plus rigide que la structure massive de même masse totale.

Les *figures* 11 a b c illustrent sur un exemple la répartition du déplacement et des contraintes obtenue par un modèle approché récemment mis au point, comparée à la répartition exacte, dans un des rares cas où cette dernière est connue. On notera l'excellente concordance des

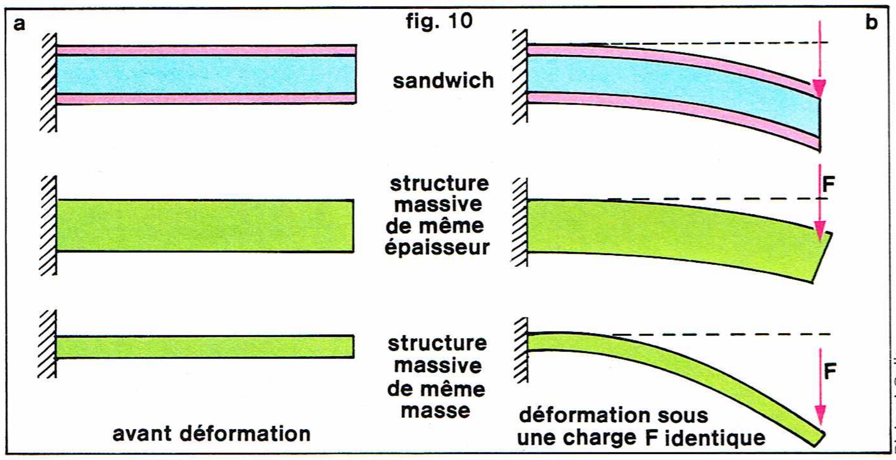

▲ *Figure 10 : différence entre la déformation en flexion d'une structure massive et celle d'une structure sandwich (a, avant déformation ; b, déformation sous une charge* F *identique).*

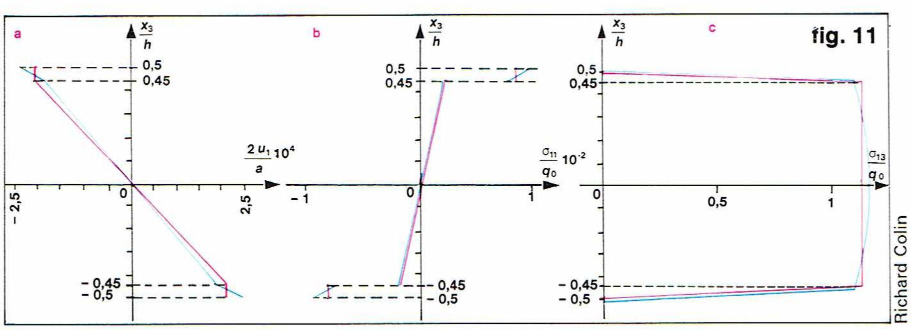

▼ *Figure 11 : exemple de la répartition du déplacement et des contraintes obtenues par un modèle approché (en rouge) comparée à la répartition exacte (en bleu). Distribution selon l'épaisseur : a, du déplacement* u_1*; b, de la contrainte* σ_{11}*; c, de la contrainte de cisaillement transversal* σ_{13}.

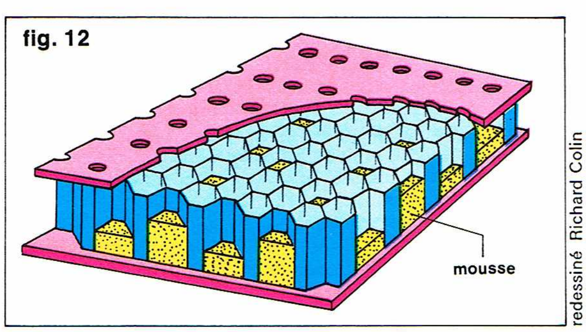

▶ *Figure 12 : panneau insonorisant en nid d'abeille à profondeur variable (d'après M. S. Dzalba-Lyndis,* Matériaux sandwich aérospatiaux, *École nationale supérieure de l'aéronautique et de l'espace).*

répartitions, ainsi que la valeur élevée de la contrainte de cisaillement dans le cœur et à l'interface ; expérimentalement, on constate effectivement que ces interfaces entre cœur et peaux sont les points faibles des structures sandwich.

L'utilisation des structures sandwich

On rencontre des structures sandwich dans la vie courante comme dans les technologies avancées : citons le carton ondulé d'emballage et les portes de type isoplane constituées d'un nid d'abeille en carton entre deux plaques de contre-plaqué assemblées sur un cadre. L'industrie des transports fait usage de citernes et récipients sandwich avec des peaux en plastique renforcé par fibres de verre et un cœur en balsa ou en plastique expansé (polyuréthanne, polystyrène), qui allie un rôle mécanique et un rôle d'isolant thermique. La construction navale utilise le balsa avec des peaux en aluminium ou en plastique renforcé pour des embarcations légères (péniches de débarquement, bateaux de plaisance).

L'industrie aérospatiale emploie de plus en plus les sandwiches : on les rencontre déjà sur des avions de ligne en service *(Boeing* 747, *Concorde)* et sur les avions militaires ; les projets à l'étude prévoient en particulier l'utilisation des peaux en matériaux composites (bore, résine ou carbone-résine).

Les matériaux sandwich à caractéristiques mécaniques moyennes ou faibles servent à l'aménagement intérieur de la cellule (planchers, cloisons, etc.), tandis que les sandwiches à hautes performances se rencontrent dans les structures résistantes et les revêtements de la voilure et du fuselage, dans les gouvernes, les bords d'attaque et de fuite des surfaces portantes, dans les pales de rotor d'hélicoptère. Une utilisation intéressante, à fonction à la fois mécanique et acoustique, est celle des sandwiches à peaux perforées pour les carters de réacteur (*fig.* 12) : chaque alvéole joue le rôle d'un résonateur de Helmholtz possédant une fréquence d'amortissement déterminée ; par remplissage partiel des cellules à des profondeurs variables par une mousse, on réalise l'amortissement de toute une plage de fréquences.

Les composites tridirectionnels

Les matériaux composites stratifiés et les matériaux sandwich présentent de hautes caractéristiques mécaniques unidirectionnelles ou bidirectionnelles ; ils sont donc indiqués pour des applications où les efforts s'exercent essentiellement suivant une seule direction ou dans un plan, ce qui est le cas des structures minces : barres, poutres, plaques, coques. Mais leurs faibles caractéristiques transversales les rendent peu adaptés à certaines constructions massives sollicitées dans toutes les directions. Naturellement, l'idée vient à l'esprit de fabriquer un matériau composite où les fibres sont orientées dans trois directions orthogonales. Sa réalisation pratique en est extrêmement délicate et plusieurs procédés sont utilisés, si complexes que nous ne pouvons en donner ici une description précise : disons simplement qu'il s'agit, notamment, de procédés d'implantation manuelle ou automatique de fibres dans des couches de tissus, ou de procédés s'apparentant au tricotage. Ces méthodes extrêmement onéreuses limitent l'utilisation de ces matériaux à un petit nombre d'applications très spéciales, comme les cônes de rentrées d'engins balistiques ou le bouclier thermique de la navette spatiale ; ces structures doivent supporter des efforts aérodynamiques intenses et une élévation de température importante lors de la rentrée dans les couches de l'atmosphère.

Les matériaux composites tridirectionnels sont formés de fibres de verre ou de silice dans une matrice de résine, ou de fibres de carbone dans une matrice de carbone obtenue par des cycles d'imprégnation de la trame de fibres de carbone par des résines, suivie de carbonisation de ces résines.

Applications

Pour terminer, il faut citer rapidement quelques applications des matériaux composites (nous en avons déjà mentionné quelques-unes). Les composites bon marché du type polyester-verre sont maintenant utilisés couramment dans l'industrie des transports (carrosserie ou éléments de carrosseries d'automobiles, pare-chocs, citernes routières autoportantes), en génie civil et équipement (canalisations, citernes fixes, tuyauteries, cheminées et réacteurs pour l'industrie chimique), tandis que les composites à hautes performances le sont surtout dans l'industrie aérospatiale (récipients pour les blocs de poudre des propulseurs, boucliers de protection thermique ; éléments d'équipement ou de structures d'avions ou d'hélicoptères, etc.). Un secteur intermédiaire se développe : celui de l'utilisation des composites à hautes performances dans certains secteurs de grande diffusion, comme les articles de sport (skis, raquettes, perches de saut), où, à côté des articles fabriqués depuis longtemps en matériaux composites bon marché, apparaissent des articles de haut de gamme utilisant les fibres de carbone ou de Kevlar.

D'une façon générale, les matériaux composites actuels sont de deux sortes : des matériaux bon marché, comme le plastique armé de fibres de verre, utilisés jusqu'à présent de façon assez empirique, et des matériaux mis au point pour les technologies avancées, comme le bore-aluminium ou le carbone-époxy. L'évolution des coûts des fibres à hautes performances et la nécessité d'une meilleure efficacité de la production des composites verre-résine tendent à unifier ce domaine de la technique. Incontestablement, les méthodes d'analyse et de calcul mises au point pour les composites à hautes performances vont permettre une fabrication moins coûteuse des structures composites ou sandwich et une utilisation plus efficace des propriétés mécaniques de leurs matériaux constitutifs.

LES MATIÈRES PLASTIQUES

L'expression « matières plastiques » fait maintenant partie du langage courant, et, pourtant, elle ne définit que partiellement les matériaux que l'on réunit habituellement sous ce sigle ; il serait en effet plus correct de parler de « matériaux macromoléculaires », en englobant ainsi tous les matériaux dont la structure est à base de chaînes ou de réseaux macromoléculaires. « Plastique », mot simple, entré dans l'usage, s'est au cours de ces trente dernières années chargé de multiples significations ; léger, brillant, cassant, isolant, bon marché, polluant, « jetable » sont quelques-uns des qualificatifs, positifs ou négatifs, qu'on épingle sur le dos des matières plastiques. Si, pour les générations d'avant-guerre, ces produits apparaissent encore, et dans certains cas avec raison, comme des succédanés, les jeunes, au contraire, ont été plongés d'un seul coup dans la civilisation des plastiques. La laine, le coton, le cuir, le chanvre, le jute et bien d'autres matières naturelles sont progressivement relégués au rang de produits de luxe et remplacés par des produits synthétiques sous des formes très variées. Il suffit de regarder autour de soi pour prendre conscience de l'intervention des matières plastiques dans la vie quotidienne : de l'alimentation (bouteilles, sacs, poubelles) au bâtiment (conduites, joints, panneaux), en passant par l'automobile (de 30 à 100 kg par voiture), l'ameublement (mousse, revêtements), l'électroménager, l'électricité et l'électronique, l'habillement, l'agriculture, les matières plastiques sont omniprésentes. Elles interviennent de plus en plus dans les équipements industriels pour les industries de production et de transformation, en particulier dans l'industrie chimique.

Pourquoi cette pénétration aussi rapide dans tous les domaines de l'activité humaine ? Cette progression suit le « boom » technologique qui a suivi la Seconde Guerre mondiale. Jusque-là, quelques matériaux synthétiques étaient utilisés soit comme produits de remplacement (Celluloïd), soit dans un certain nombre d'applications nouvelles (téléphone, automobile). La mise au point des nouveaux procédés de transformation (par exemple l'injection) et l'adaptation au problème spécifique des matières plastiques de procédés déjà connus (extrusion, calandrage) ont permis la production de produits finis ou semi-finis dans d'excellentes conditions de rentabilité. C'est essentiellement par leur facilité de mise en œuvre que ces matériaux ont pu s'imposer : malgré un coût matière plus important, l'économie sur le façonnage est telle que le remplacement des métaux par les matières plastiques est rentable pour de très nombreuses pièces ou ensembles. Un corps de pompe pour machine à laver comportait une dizaine de pièces complexes en bronze ou laiton ; en matière plastique, une pompe ne nécessite plus que trois éléments.

Ces matériaux présentent également, comparés aux matériaux traditionnels, des performances accrues et quelquefois des propriétés nouvelles : en premier lieu, le gain de poids, facteur très important dans de nombreux secteurs de l'industrie (transport, manutention) ; en second lieu, la résistance à la corrosion, fléau qui dégrade de nombreux matériaux ; c'est pourquoi leur emploi s'est considérablement développé dans certains domaines (génie civil, emballages). En outre, les matières plastiques ont apporté des facteurs d'amélioration dans divers champs d'applications : citons, par exemple, l'isolation thermique et phonique avec les mousses et les structures sandwich, la diminution des frottements par l'utilisation de paliers en matières plastiques, la mise au point de charnière intégrale en polypropylène, la possibilité de préparer des éléments à la fois transparents et résistants au choc, l'obtention de structures composites possédant des propriétés mécaniques supérieures à celles des métaux.

Mais toute médaille a son revers. Les matières plastiques ont des insuffisances, et même quelquefois des défauts. Le plus grave est leur sensibilité à la température ; la résistance à la chaleur est médiocre : 100 °C est une limite supérieure pour de très nombreux produits, et très rares sont ceux qui résistent jusqu'à 200 °C. Pour des températures supérieures, il faut des produits très élaborés, et donc de coût très élevé ; on les appelle thermostables. Un autre défaut est leur inflammabilité. De nombreuses matières plastiques sont combustibles et

I.G.D.A. - S.I.R.

▲ *Objets en polystyrène.*

leur utilisation mal contrôlée a été responsable de catastrophes présentes dans toutes les mémoires. Enfin, les plastiques vieillissent, se fissurent sous l'action de certains agents chimiques, et quelques-uns sont sensibles aux chocs. D'autre part, leur présence dans les déchets pose des problèmes de dégradation et de combustion : la question de leur recyclage commence à se poser.

Ce chapitre sur les matières plastiques se divisera en une partie scientifique et une partie technologique, la première étudiant la structure et le comportement du matériau, la seconde décrivant les méthodes d'essai, les procédés de transformation et les grandes familles de produits.

Structure et comportement des matières plastiques

Chaîne et réseau macromoléculaire

Toute matière plastique est constituée de macromolécules, c'est-à-dire de molécules géantes, soit sous forme d'une chaîne plus ou moins régulière, soit sous forme d'un réseau. La caractéristique principale d'une chaîne macromoléculaire est sa longueur, qu'on exprime sous forme de la masse moléculaire. Dans le cas d'un réseau, c'est le nombre de « nœuds » ou points de réticulation qui définit la structure (*fig.* 1).

Thermoplastiques et thermodurcissables

Les thermoplastiques sont constitués de chaînes macromoléculaires indépendantes les unes des autres, c'est-à-dire non liées entre elles par des liaisons chimiques covalentes ; cela permet une grande plasticité à partir d'une certaine température.

Les thermodurcissables sont constitués par un réseau plus ou moins serré de chaînes macromoléculaires. Ces composés ne peuvent subir de déformation plastique irréversible par l'action de la chaleur, car il n'y a pas de déplacement possible, à cause des liens interchaînes.

Dans la première famille, on trouve les polyéthylènes, les chlorures de polyvinyle, les polystyrènes, pour ne citer que les plus importants. Dans la deuxième famille se classent tous les produits, souvent appelés résines, tels que les résines urée-formol, phénol-formol, polyester, époxy, les polyuréthannes.

Un « thermoplastique » peut donc être mis en forme par moulage à chaud dans un domaine de températures où son comportement est plastique. Par refroidissement, le produit durcit sous la forme imposée par le moulage, qui s'effectue sans transformation chimique et peut ainsi être répété sans inconvénient : leur recyclage est donc possible. Au contraire, un « thermodurcissable » n'acquiert sa constitution chimique (réseau) qu'au moment de sa mise en forme, et celle-ci est alors définitive sans possibilité de modification plastique ultérieure ; il n'y a pas de possibilités de recyclage. Le terme « thermodurcissable » implique une cuisson à chaud pour former la structure en réseau. Par extension, ce terme est aussi utilisé pour les résines durcissant à froid, par exemple les résines à deux composants comme les colles époxy.

Structure repliée

Il faut se représenter les chaînes macromoléculaires (ou les segments de chaînes entre deux points de réti-

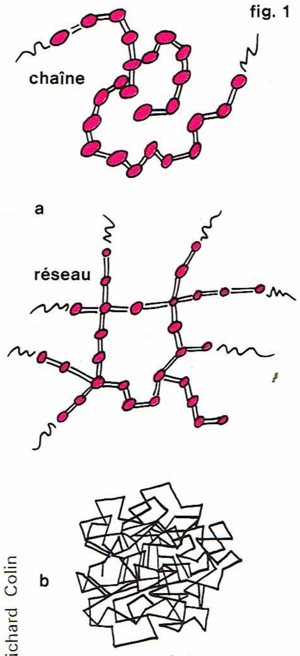

▲ *Figure 1 : a, schéma de définition d'une chaîne, d'un réseau; b, structures repliées; les chaînes macromoléculaires sont plus semblables à des pelotes désordonnées et enchevêtrées qu'à des schémas simples. Tableau I : propriétés des polymères amorphes.*

Tableau I
Propriétés des polymères amorphes

	T croissant →	(T_g)			
État ou transition entre états	Solide vitreux	Transition vitreuse	État caoutchoutique	Polymère non réticulé	Fluide
Mouvements moléculaires	Pas de mouvement dans la chaîne	Mise en mouvement de portions de chaîne	Mouvement comme dans un liquide		Glissement des enchevêtrements
Comportement mécanique	Élasticité de type Hookien	Comportement visco-élastique de type « cuir »	Élasticité de type caoutchoutique		Liquide visco-élastique
				Polymère réticulé : conserve l'élasticité caoutchoutique	

Pas de réticulation	Réticulation croissante →	
Enchevêtrements importants Réversibilité assurée si les sollicitations sont de courte durée	Déformation très importante mais toujours réversible	Déformation faible, module élevé
	Cas des élastomères vulcanisés	Cas des thermodurcissables

culation dans le cas d'un réseau) non pas comme sur le schéma de la *figure* 1 a, mais plutôt comme des pelotes très désordonnées et très enchevêtrées (*fig.* 1 b). Les chaînes sont constituées de maillons qui peuvent se déplacer autour de leurs points de liaisons avec une certaine liberté, pourvu que la température soit suffisante pour que l'énergie kT soit de l'ordre de ou supérieure aux barrières de potentiel qui limitent ce mouvement. Ces chaînes, de grande flexibilité (sauf structures particulières), ont une conformation repliée et désordonnée — on dit « statistique ».

Ordre et désordre

A basse température, les mouvements moléculaires se ralentissent, et les maillons se fixent dans des dispositions qui correspondent soit à une position thermodynamique stable, c'est le cas des chaînes régulières, avec constitution de zones ordonnées par repliement suivant des cellules cristallines à mailles régulières, soit à un blocage, c'est le cas des chaînes irrégulières (atactiques) ou de portions de chaînes exclues des zones cristallines, ou encore de réseau serré où les empêchements stériques sont nombreux, avec une structure repliée en pelote où les mouvements sont figés dans des positions non régulièrement disposées. Il s'agit alors d'un solide amorphe ou vitreux.

Cristallinité partielle

A ce stade, il faut insister sur les difficultés des repliements réguliers, car les chaînes macromoléculaires présentent de très nombreux facteurs d'irrégularités, irrégularités qui sont partie structurale de la chaîne, et ne peuvent donc être exclues par le cristal en formation. Ainsi, dans pratiquement tous les cas, les « cristallites » sont de très petite taille et très imparfaits. D'autre part, une grande partie du solide ne peut se solidifier dans une position moléculaire régulière et constitue la matrice amorphe qui entoure les cristallites.

Deux sortes de matériaux solides sont donc à considérer : les polymères semi-cristallins et les polymères amorphes (*tableaux* I et II).

On rencontre également deux types de transitions en fonction de la température : la fusion, où les cristallites se transforment par une transition du premier ordre en pelote désordonnée, et dont les maillons sont en mouvement, et la transition dite vitreuse, où les maillons composant les pelotes désordonnées des parties amorphes se mettent en mouvement comme le font les molécules d'un verre à la température de ramollissement.

Comportement caoutchoutique, comportement plastique

Au-dessus de cette température de ramollissement, les chaînes macromoléculaires sont en constante agitation, chacun des maillons se déplaçant comme dans un liquide. Une sollicitation mécanique, par exemple en extension, entraîne un dépliement des chaînes; l'arrêt de cette sollicitation se traduit par une contraction avec retour à l'état replié qui constitue l'équilibre stable. C'est sur ce phénomène que repose l'élasticité de type caoutchoutique. Si la sollicitation mécanique est appliquée pendant une longue période de temps ou à une température plus élevée, les enchevêtrements qui maintenaient la cohésion élastique de type caoutchoutique peuvent se dénouer, permettant ainsi le glissement des chaînes les unes par rapport aux autres. C'est alors une déformation plastique irréversible, et la suppression de la sollicitation n'entraînera qu'un retour partiel vers la géométrie initiale. Dans le cas d'un réseau, les points de réticulation sont chimiquement stables, maintiennent le réseau et empêchent les déformations irréversibles. Les déplacements des portions de chaînes entre points de réticulation restent les seuls mouvements possibles et confèrent au produit une élasticité de type caoutchoutique.

Le temps, paramètre essentiel

Le comportement mécanique en fonction de la température dépend des mouvements moléculaires qui entraînent les changements de configuration. Ces mouvements de rotation, dont la manifestation à l'échelle d'une chaîne macromoléculaire se traduit par des dépliements et repliements, ne peuvent pas être instantanés et sont donc soumis à une cinétique bien déterminée. Autrement dit, pour une température donnée, la déformation consécutive à une contrainte donnée en vue de réaliser l'équilibre thermodynamique ne s'établit que progressivement. La vitesse de déformation peut être très grande comme

▼ *Tableau II : propriétés des polymères semi-cristallins.*

Tableau II
Propriétés des polymères semi-cristallins

	T croissant →		(T_f)	
État ou transition entre états	Solide : cristallites noyés dans une matrice amorphe	Transition vitreuse de la matrice amorphe (étalée sur un grand domaine de température à cause de l'environnement microscristallin)	Fusion	État fondu
Mouvements moléculaires	Pas de mouvement dans la chaîne	Mise en mouvement de portions de chaînes dans la matrice amorphe		Mouvement type liquide glissement des enchevêtrements
Comportement mécanique	Élasticité de type Hookien	Comportement visco-élastique de type « cuir ». Chute régulière du module en fonction de T et passage à élasticité d'un réseau très serré (les cristallites constituent les points de réticulations)		Liquide visco-élastique

dans le cas des élastomères réticulés, si la température est suffisamment élevée. Cette vitesse peut être infiniment petite, comme dans le cas d'un polymère amorphe à l'état vitreux : c'est alors un état métastable.

Ainsi, au même titre que la température, le temps est un paramètre essentiel pour définir l'état d'un matériau macromoléculaire. La rhéologie est la discipline qui étudie les matériaux en considérant les quatre paramètres, contrainte, déformation, température et temps :

$$f(\sigma, \varepsilon, T, t) = 0$$

Comportement original des polymères

On voit donc apparaître des différences très marquées entre les matériaux classiques de type cristallin (métaux, céramiques) et les matériaux organiques macromoléculaires. Tout au long de cette étude, notre raisonnement s'appuiera sur trois faits :

- la grande irrégularité des chaînes macromoléculaires défavorise la formation de structures bien ordonnées ;
- le dépliement et le repliement des chaînes macromoléculaires font apparaître dans un certain domaine de températures un comportement tout à fait original : l'état caoutchoutique ;
- le comportement, qui dépend des mouvements moléculaires, doit être défini en fonction du temps.

Structure des polymères semi-cristallins

A basse température, la plupart des corps purs organiques ou minéraux sont dans l'état solide. Ces structures organisées, dites cristallines, présentent une répétition régulière et ordonnée des motifs chimiques, éléments de base du composé, construction qui s'effectue sans restrictions particulières dans le cas de corps purs ; dans le cas de mélange, plusieurs phénomènes peuvent se produire, soit une cristallisation qui inclut les éléments différents dans une même structure cristalline, le plus souvent avec une composition définie, soit la ségrégation en plusieurs phases cristallines. Dans le cas des polymères, la situation est bien différente. Une chaîne macromoléculaire, même si elle n'est constituée que d'un seul type de monomère, présente très rarement une régularité parfaite dans ses enchaînements. D'autre part, ses extrémités sont en elles-mêmes des impuretés, c'est-à-dire des éléments différents du reste de la chaîne. Enfin, le degré de liberté de chaque élément de la chaîne est, à cause de ses voisins, beaucoup plus faible. Toutes ces raisons font que la construction d'un édifice cristallin à partir d'un polymère n'est pas chose facile. De nombreux polymères présentent cependant des propriétés de corps organisés, telle la présence de raies dans les expériences de diffraction des rayons X ; seuls les polymères dont la chaîne est régulière (par exemple isotactique dans le cas de polymères vinyliques) contiennent une certaine proportion de zones cristallines.

Lamelles et sphérolites

Des études fondamentales sur monocristaux de polymères (1958) ont permis d'expliquer la constitution de base de l'édifice cristallin. Un monocristal se présente sous forme de lamelles, et les chaînes macromoléculaires sont perpendiculaires au plan de la lamelle. Il est donc nécessaire d'admettre que ces chaînes sont repliées, les repliements constituant les deux surfaces planes de la lamelle. L'épaisseur est de l'ordre de 200 Å, et les dimensions longitudinales sont supérieures au μm. Le rapport taille sur épaisseur est à peu près celui d'une feuille de papier.

Dans le solide semi-cristallin, on observe des structures sphériques, appelées sphérolites, qui résultent d'une croissance radiale à partir d'un germe. Dans certains cas, on peut les observer au microscope optique. Il a été montré que les sphérolites sont formées de fibrilles radiales dont l'élément de base est un ruban constitué, comme les lamelles, de chaînes repliées et orientées perpendiculairement au ruban, c'est-à-dire suivant une tangente à la structure sphérolitique.

Les sphérolites occupent l'ensemble du solide. Dans les joints intersphérolitiques existent de nombreux liens fibrillaires qui relient une sphérolite à l'autre. La sphérolite n'est pas une structure complètement organisée : l'« armature » fibrillaire d'orientation radiale baigne dans une matrice de matériau non organisé, c'est-à-dire amorphe. Un polymère semi-cristallin est donc un matériau composite complexe.

Les études de la structure et de la morphologie des polymères semi-cristallins font appel à des techniques très variées. A l'échelle de l'arrangement cristallin, on utilise la diffraction des rayons X et la diffraction électronique, qui peut être mise en œuvre dans un microscope électronique à transmission. A l'échelle de la lamelle, c'est la diffraction des rayons X aux petits angles qui permet d'en mesurer l'épaisseur. A l'échelle de la sphérolite, la microscopie optique et la diffusion de la lumière permettent de déterminer le diamètre et d'apprécier la déformation en cas d'orientation.

Les structures fibrillaires

Des morphologies différentes de la morphologie sphérolitique sont obtenues par orientation. C'est en particulier le cas des fibres textiles, domaine dans lequel les polymères ont pris une place primordiale. Dans leur grande majorité, les fibres synthétiques sont obtenues par des procédés d'étirage qui provoquent, d'une part, des changements de structure cristallographique et, d'autre part, l'orientation des fibrilles cristallines (lamelles et rubans). Dans les cas courants, les taux d'étirage sont de l'ordre de 4. Les conditions de l'opération, vitesse et température, ainsi que l'état du produit avant étirage, sont des paramètres très importants pour l'obtention des propriétés maximales. Des taux d'étirage plus élevés entraînent la transformation progressive des structures cristallines repliées en structures fibrillaires où les chaînes macromoléculaires sont orientées non plus perpendiculairement à l'axe, mais parallèlement à celui-ci. On conçoit aisément que la résistance et la rigidité d'une fibre idéale, où toutes les chaînes seraient orientées dans le sens de la fibre, seraient très importantes. Il n'est pas possible d'y parvenir par cette voie, bien que des essais récents avec des taux d'étirage supérieurs à 30 aient produit des fibres de très haute performance dans le cas du polyéthylène.

La cristallisation sous forme étendue, c'est-à-dire sans repliement des chaînes macromoléculaires, n'est possible que si, dans un premier temps, les pelotes repliées sont dépliées. On y parvient en soumettant une solution de polymère à un écoulement forcé. Le champ de contrainte créé entraîne un dépliement partiel des pelotes statistiques. La méthode a été appliquée au polyéthylène et a permis de produire des fibres dont le module d'Young dépasse 10^5 MPa, le module théorique d'une chaîne de polyéthylène étant de $2{,}2 \cdot 10^5$ MPa.

Dans le cas de chaînes macromoléculaires très peu flexibles, c'est-à-dire dont les rotations entre maillons sont très fortement empêchées (encombrement stérique, liaisons chimiques), il est possible d'obtenir des cristallisations en chaînes étendues en orientant par filage des solutions concentrées et en coagulant sous étirage ces solutions. Cette méthode est appliquée aux polyamides aromatiques et permet d'obtenir des fibres à très haut module et à très haute résistance (par exemple, les fibres Kevlar de la Société Du Pont de Nemours). Le rapport

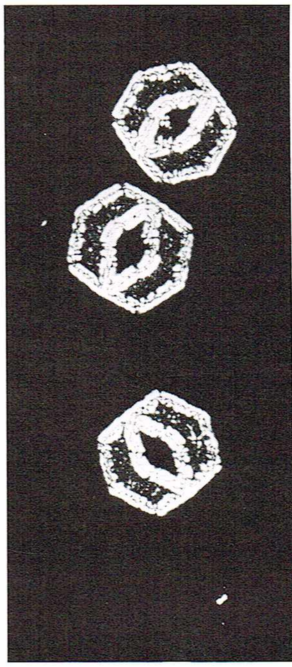

Centre de recherche sur les macromolécules de Strasbourg - Centre national de la recherche scientifique

▲ *Croissance de monocristaux de polyoxyéthylène.*

▼ *Monocristal de polyoxyméthylène (croissance en spirale) [microscopie électronique].*

Lab. de physique des matériaux de Bellevue - Centre national de la recherche scientifique

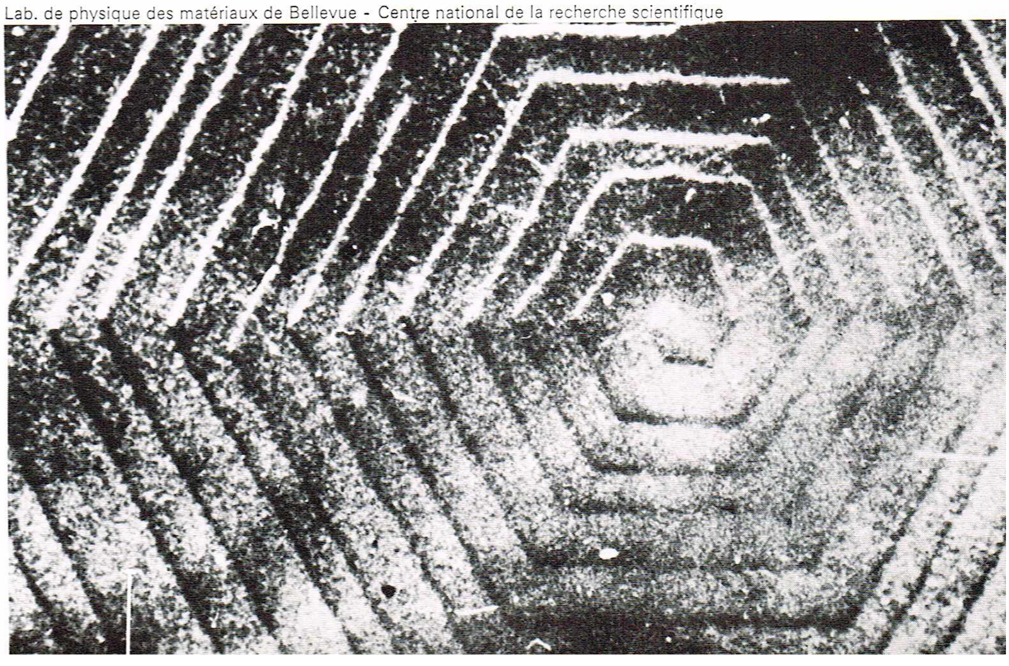

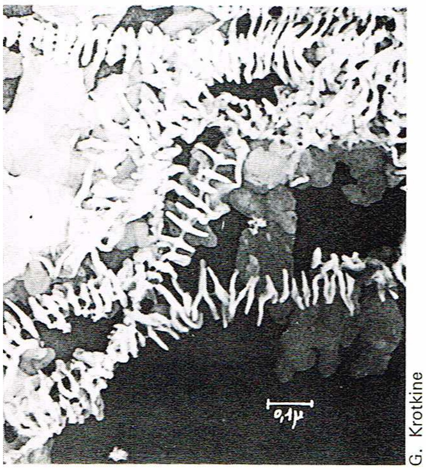

G. Krotkine

▲ *Morphologie en « schisch kebab » d'un polyéthylène cristallisé en solution par induction hydrodynamique (tirage négatif).*

entre propriétés mécaniques et poids spécifiques dépasse largement celui des meilleurs métaux.

Taux de cristallinité

Les polymères dits cristallins n'étant en fait que partiellement organisés, il importe d'étudier leur taux de cristallinité, qui est défini comme le rapport de la masse cristalline présente à la masse totale de l'échantillon observé :

$$\theta = \frac{\text{M cristalline}}{\text{M totale}}$$

Plusieurs méthodes sont utilisées pour évaluer θ; les plus simples sont les mesures de densité et les mesures de chaleur de fusion. La densité est reliée directement au taux de cristallinité, car la phase cristalline, par son arrangement ordonné, est plus compacte que la phase amorphe. Un exemple courant est la mesure des cristallinités des polyéthylènes à l'aide d'une colonne à gradient de densité qui permet des mesures très précises. En mesurant la chaleur de fusion (ΔH), il est possible d'obtenir le taux de cristallinité : $\theta = \Delta H/\Delta H_{100\,\%}$, si l'on connaît la chaleur de fusion $\Delta H_{100\,\%}$ du même produit cristallisé complètement.

Ces évaluations sont très importantes, par exemple en contrôle de matières premières dans une industrie de transformation, car nous verrons que le taux de cristallinité influence directement les performances mécaniques. Une illustration en est donnée par la comparaison entre les polyéthylènes haute et basse densité (PEHD et PEBD). Le premier, fabriqué par catalyse de coordination, comporte une chaîne beaucoup plus régulière; il a aussi un taux de cristallinité plus élevé, donc une rigidité plus grande que le second.

Fusion des polymères semi-cristallins

La température de fusion des polymères semi-cristallins est moins bien définie que celle des corps de faible masse moléculaire. En effet, à cause de la texture fibrillaire, le rapport surface sur volume est très élevé, et la température réelle de fusion peut s'étendre sur une dizaine de degrés au-dessous de la température théorique définie par l'équilibre thermodynamique. Celle-ci est d'une grande importance pour les applications, car elle constitue la limite d'utilisation. Le *tableau* III résume les points de fusion de quelques thermoplastiques. En moyenne, les points de fusion des polymères contenant des groupes polaires sont plus élevés que ceux des polymères hydrocarbonés. Cela traduit l'influence des interactions entre les chaînes à l'état cristallisé. Les liaisons hydrogène (polyamides) jouent un rôle important.

Cristallisation

Lors du refroidissement d'un polymère (de structure régulière, donc susceptible de cristalliser), un phénomène de surfusion se produit, c'est-à-dire que la cristallisation ne survient, avec des vitesses mesurables, qu'à plusieurs dizaines de degrés en dessous du point de fusion. La forte viscosité du milieu ainsi que la difficulté de réaliser les empilements repliés des chaînes expliquent cette lenteur dans le déroulement du phénomène. Si la température est abaissée au point de ralentir les mouvements moléculaires des chaînes, la vitesse de cristallisation diminue; à très basse température, la cristallisation ne peut se poursuivre. Il y a ainsi pour de nombreux polymères des possibilités de trempe où une partie du composé restera sous forme amorphe. Un réchauffage, c'est-à-dire un recuit, permettra à la cristallisation de s'effectuer jusqu'à l'équilibre.

▼ *Tableau III : température de fusion, température de transition vitreuse (T_g) de quelques polymères.*

Tableau III
Température de fusion, température de transition vitreuse (T*g*) de quelques polymères

Polymères hydrocarbonés	Température de fusion (en °C)	Température de transition vitreuse (en °C)	Polymères contenant des groupes polaires	Température de fusion (en °C)	Température de transition vitreuse (en °C)
Polybutadiène cis 1-4	-4	-112	Polyépoxypropane	–	-75
			Acétate de polyvinyle	–	32
Polybutadiène trans 1-4	74	- 80	Polychlorure de vinyle	–	80
Polyéthylène	137	–	Polyméthacrylate de méthyle	–	108
Polypropylène	174	-10 à 0	Polyamide 11	190	46
Polystyrène	–	100	Polyéthylène téréphtalate	265	69
Polyméthyl 4, pentène 1	250	50	Polycarbonate	240	142
			Polytétrafluoroéthylène	327	–

État vitreux

Si le polymère est constitué de chaînes irrégulières, soit à cause de la nature chimique des éléments (copolymère statistique), soit à cause d'irrégularités d'enchaînement (isomère cis-trans, tacticité), il n'y a pas de possibilité d'arrangements ordonnés, donc d'édifice cristallin. A basse température, le composé restera sous forme amorphe dans un état appelé vitreux. Dans le cas des homopolymères ou des copolymères statistiques, la structure est celle d'un verre, c'est-à-dire isotrope et homogène jusqu'à une échelle très faible.

Le cas des copolymères séquencés mérite d'être mentionné. Dans ces produits, il se produit souvent des phénomènes de séparation de phases tels qu'on peut les rencontrer dans les émulsions. La structure la plus connue est celle des polystyrènes dits « chocs » et des ABS (acrylonitrile, butadiène, styrène) qui forment une dispersion d'une phase caoutchoutique en fines sphères (diamètre de 1 à 5 µm) dans une matrice vitreuse. Dans certains cas, il est possible de préparer des dispersions de cylindres, et, lorsque ceux-ci sont orientés dans une direction préférentielle, apparaît une forte anisotropie des propriétés, en particulier des propriétés mécaniques.

Transition vitreuse

Lorsqu'un polymère à l'état vitreux est réchauffé, surviennent, dans un certain domaine de températures, des transformations physiques dont la plus évidente est un ramollissement important. A l'aide d'un dilatomètre, on constate une nette augmentation du coefficient de dilatation. La chaleur spécifique augmente également, comme le montrent les courbes d'analyse thermique différentielle. Ces modifications de paramètres physiques sont caractéristiques d'une transition de deuxième ordre, par opposition aux transitions de premier ordre comme la fusion. En effet, alors qu'un apport de calories est nécessaire pour effectuer la transformation de fusion qui s'accompagne d'un changement de volume spécifique, seules les dérivées de ces paramètres par rapport à la température, c'est-à-dire le coefficient de dilatation et la chaleur spécifique, sont modifiées dans la transition que nous étudions (c'est pourquoi elle est dite de deuxième ordre). Dans le cas des polymères, cette transition est appelée transition vitreuse et écrite T_g *(glass transition)*.

Cette température est la limite d'utilisation à la chaleur des polymères amorphes. C'est donc un paramètre important qui fait l'objet de déterminations de caractère technologique sous la forme du point Vicat ou de la température de fléchissement sous charge.

Les températures T_g, telles qu'elles ont été mesurées par dilatométrie ou par analyse thermique différentielle, sont données dans le *tableau* III pour quelques polymères bien connus.

A l'échelle moléculaire, la transition vitreuse correspond au seuil d'énergie kT nécessaire pour que les rotations moléculaires puissent être très probables, permettant ainsi les changements de configuration des pelotes macromoléculaires. La transition correspond donc à un passage entre un état vitreux dur et l'état de déformation caoutchoutique.

L'influence de la structure sur le point de transition vitreuse n'est pas évidente. Notons cependant que plus les interactions sont fortes, plus la température de transition vitreuse est élevée. D'autre part, les mouvements sont d'autant plus aisés, donc la température de transition d'autant plus basse, que les degrés de liberté de la chaîne sont plus nombreux et le « volume » occupé plus grand (sous la forme d'un encombrement).

Les composés comportant deux phases, mélanges ou copolymères séquencés, présentent deux températures de transition vitreuse, une pour chacune des phases. Au contraire, les mélanges ou les copolymères statistiques,

de phase homogène, ne comportent qu'un seul point de transition qui est situé entre les deux points des constituants.

Les polymères semi-cristallins comportant une certaine quantité de produit sous forme amorphe devraient manifester les phénomènes de transition vitreuse dans cette phase. En fait, nous avons vu que phases cristalline et amorphe étaient extrêmement dispersées, à une échelle inférieure à 200 Å. A cette échelle, les mouvements moléculaires dans la phase amorphe sont très sérieusement restreints par la présence de la phase cristalline. Ainsi, le point de transition vitreuse est alors une zone de transition très étalée entre le point théorique d'une phase complètement amorphe et le point de fusion des zones cristallines.

La température de transition vitreuse est fortement influencée par des additifs particuliers qu'on appelle *plastifiants*. Ces produits, en abaissant de façon considérable la température de transition vitreuse, permettent des utilisations nouvelles pour certains matériaux. Le cas le plus important est celui du chlorure de polyvinyle (PVC), dont la température de transition vitreuse est de 80 °C. L'addition de plastifiant de type ester aromatique fournit des produits dont le point de ramollissement est de l'ordre de 10 °C ou moins. Les tuyaux d'arrosage et les films sont deux exemples d'application du PVC plastifié.

Visco-élasticité

Le temps est un facteur essentiel dans le comportement des matières plastiques, en particulier pour les thermoplastiques. Aux températures d'utilisation de ces produits, les mouvements moléculaires se produisent à des vitesses très lentes. Sous sollicitation mécanique, ces mouvements se traduisent à long terme par une déformation supplémentaire non prévue par les essais mécaniques classiques. Ce type de comportement, ainsi que l'essai pour le caractériser, s'appelle **fluage** (en anglais *creep*) [*fig.* 2]. Sous l'influence d'une contrainte σ appliquée à un instant donné ($t = 0$, p. ex.), la déformation s'établit en deux étapes. L'une, instantanée, correspond à l'élasticité classique d'un corps solide. L'autre, retardée, est la conséquence des mouvements moléculaires qui tendent vers des changements de configuration dans le sens de la contrainte. Plus la température d'utilisation du produit est proche de la température de transition vitreuse, plus la déformation retardée est importante parce que les mouvements moléculaires sont plus fréquents.

Les courbes de la *figure* 3 sont extraites des documents fournis par un producteur sur le comportement mécanique de son produit. Ces abaques sont utilisés par les bureaux d'étude pour la conception des pièces. Sur ces courbes, on peut remarquer qu'une pièce soumise à un effort de longue durée, une année par exemple, peut subir des déformations deux à trois fois plus importantes que celles qui auraient été mesurées dans un essai classique, essai qui correspond à un temps de l'ordre de la minute.

Depuis longtemps, les théoriciens de la rhéologie ont cherché à modéliser les phénomènes. L'un des modèles les plus simples est celui de Voigt, composé d'un couple ressort-amortisseur en série avec un ressort. Cet ensemble, soumis à une force f établie au temps zéro, se déforme suivant la courbe de fluage décrite précédemment. La déformation du ressort de rigidité E_1 s'établit instantanément, et elle s'accompagne d'une déformation retardée par la viscosité η_2 de l'amortisseur situé en parallèle du ressort E_2 (*fig.* 4). Ce type de modèle n'est représentatif que si la raideur E_1 est beaucoup plus grande que la raideur E_2.

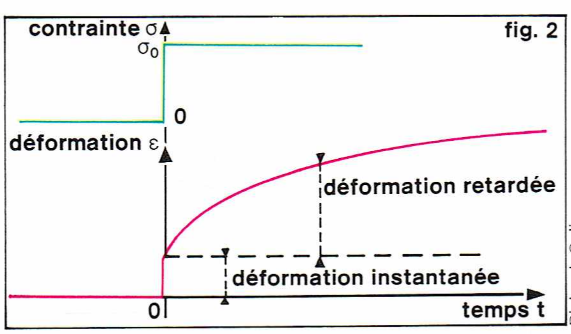

◄ *Figure 2 : phénomène de fluage ; déformation ε en fonction du temps sous l'effet d'une contrainte σ appliquée brusquement.*

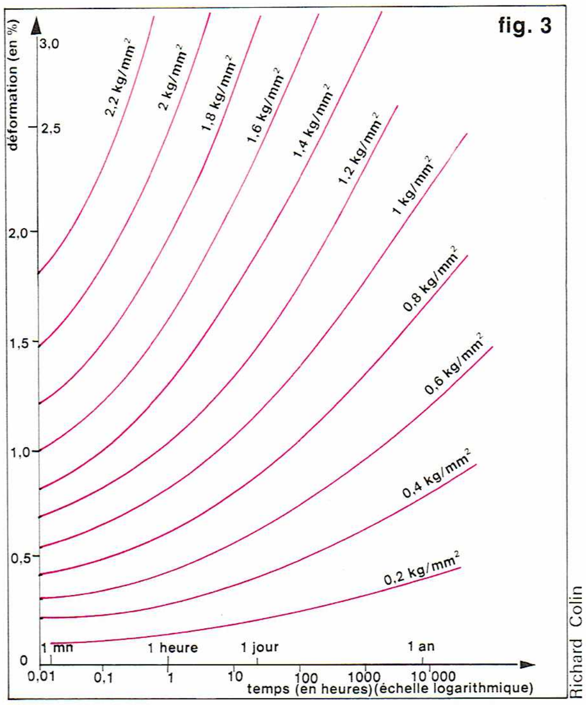

◄ *Figure 3 : abaques utilisés par les bureaux d'étude, donnant le comportement mécanique (déformation) d'un produit en fonction du temps et de la contrainte.*

Le couple ressort-amortisseur (E_2, η_2) définit un temps de relaxation $\tau = \eta_2/E_2$ et la déformation totale peut être décrite par :

$$\varepsilon = \frac{f}{E_1} + \frac{f}{E_2}\,[1 - \exp\,(-t/\tau)]$$

Le premier terme traduit les déplacements instantanés des éléments moléculaires autour de leur position d'équilibre, le second représente les changements de configuration dus aux mouvements moléculaires effectués par sauts activés thermiquement.

Dans la réalité, comme l'échelle de temps est limitée par nos capacités d'observation, seule une petite partie de l'histoire des déformations est observée. Par exemple, les abaques présentés décrivent le premier terme et une partie du second où t reste très inférieur à τ.

Une deuxième forme d'intervention du facteur temps se manifeste dans le **comportement des polymères sous sollicitation cyclique.** En effet, un échantillon soumis à une déformation sinusoïdale subit une contrainte sinusoïdale qui n'est pas en phase avec la déformation. Cela est dû à la viscosité interne du matériau, conséquence des mouvements moléculaires qui tendent à suivre les déformations macroscopiques imposées. En sollicitation dynamique, le module peut être décomposé en un module de type élastique E' et un module de type visqueux E″. La composante élastique représente l'énergie potentielle, la composante visqueuse l'énergie perdue par frottement visqueux. Le module E est la somme vectorielle de ces deux modules :

$$E = \sqrt{E'^2 + E''^2}.$$

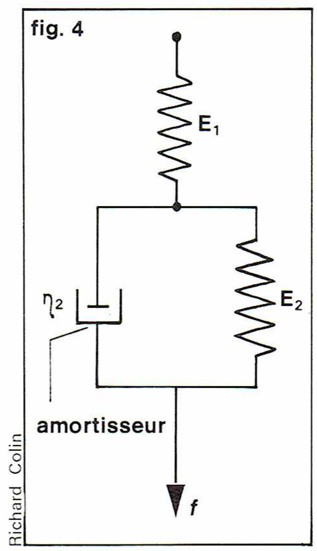

▲ *Figure 4 : modèle de Voigt.*

Le déphasage est d'autant plus grand que la contribution visqueuse est grande. Il est défini par l'angle δ de perte mécanique : $\operatorname{tg} \delta = E''/E'$.

En reprenant l'analogie du modèle de Voigt, avec un couple ressort-amortisseur caractérisé par un temps de relaxation τ, l'amortissement maximal se produit pour une pulsation ω_0 telle que $\omega_0\tau = 1$ ($\omega = 2\pi f$, f étant la fréquence). L'amortissement maximal se produit quand la pulsation est égale à l'inverse du temps de relaxation du mouvement moléculaire : l'analyse de l'amortissement est un moyen de spectroscopie mécanique, qui permet de détecter la manifestation de mouvements moléculaires.

Ces problèmes d'amortissements sont importants dans les applications : rebond et échauffement interne dans les élastomères, par exemple les pneumatiques ; pour les matières plastiques, absorption des chocs, amortissement des vibrations, isolement phonique.

Tous ces phénomènes, rassemblés sous le nom de visco-élasticité, dépendent de la température. En effet, celle-ci agit directement sur la fréquence des mouvements molé-

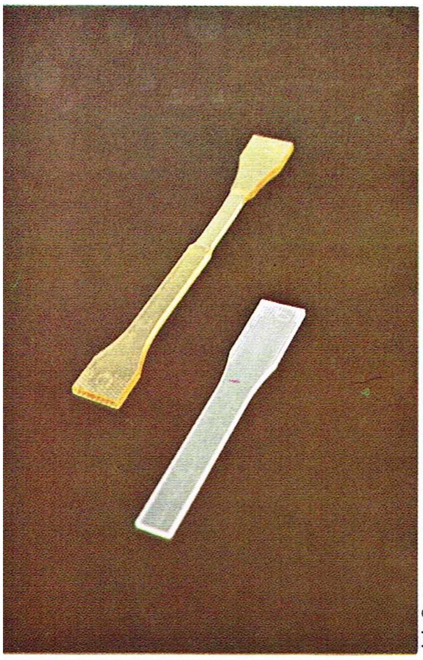

A.L.G.

▲ *Deux éprouvettes en thermoplastique présentant les deux types de comportements : à gauche, comportement ductile ; à droite, comportement fragile.*

culaires, activés par un effet analogue à l'activation thermique d'une réaction classique sous la forme que lui a donnée Eyring : exponentielle du rapport — E_A/kT (où E_A est la barrière énergétique qui s'oppose au changement de configuration). En reprenant le modèle de Voigt, la température, en agissant sur la viscosité η_2 de l'amortisseur placé en parallèle, modifie le temps de relaxation propre du modèle. En réalité, la température a pour effet de modifier l'ensemble des temps de relaxation. Aussi, dans un essai d'amortissement à fréquence *f* fixe, le changement de température permettra-t-il d'observer les amortissements dus aux mouvements moléculaires au moment où leurs temps de relaxation correspondront à l'inverse de la pulsation ω de l'essai.

L'effet de la température sur un essai en fonction du temps (ou de la fréquence) est de contracter l'échelle des temps si la température augmente, de la dilater si la température diminue. Si l'échelle des temps est en logarithmes, l'effet est alors celui d'un décalage. Cette propriété est utilisée pour réaliser des courbes maîtres, construites par glissement le long de l'échelle logarithmique en temps, glissement qui est une fonction de la température. Cela permet d'obtenir des résultats à long terme par équivalence temps-température.

Les mesures expérimentales pour la détermination des caractéristiques du comportement visco-élastique dépendent de l'échelle de temps considérée. Pour le comportement à long terme sont utilisés les essais de fluage ou de relaxation. Les caractéristiques sont mesurées couramment jusqu'à une durée d'une année, mais nécessitent un matériel relativement complexe, étant donné la stabilité nécessaire. Pour les courtes échelles de temps, seules les méthodes cycliques sont utilisables. Citons le pendule de torsion et les méthodes de vibrations libres et entretenues pour les essais qui font intervenir la résonance autour d'une fréquence propre d'un ensemble mécanique. La méthode des vibrations forcées (hors résonance) permet l'exploration d'une large échelle de fréquences, 0,01 hertz à plusieurs kilohertz.

Comportement mécanique

Les essais mécaniques de traction sur une éprouvette de thermoplastique, par exemple, font apparaître deux types de comportements, l'un dit fragile, l'autre dit ductile. Une rupture est dite fragile quand l'éprouvette se casse brutalement en présentant des surfaces de fracture macroscopiquement lisses. Une rupture est dite ductile quand l'éprouvette subit une striction, puis un étirement plus ou moins prononcé avant la rupture finale (*fig.* 5). A partir de ces courbes, on définit la résistance et la déformation à la rupture dans le cas fragile, la résistance au seuil d'écoulement (σ_y) et la déformation à la rupture dans le cas ductile.

Pourquoi deux modes de rupture aussi différents ? L'analyse des mécanismes d'apparition des déformations irréversibles permet de mieux comprendre les phénomènes. A partir des hétérogénéités à l'échelle microscopique (100 à 200 Å) naissent des microglissements suivant les lignes de cisaillement maximal. Quand la contrainte croît, deux possibilités se présentent : ou bien ces lignes de glissement s'agrandissent jusqu'à devenir visibles macroscopiquement, et leur multiplication provoque un écoulement macroscopique conduisant à une striction ; ou bien ces microglissements entraînent la formation de microvides par cavitation. Les microvides sont des points de concentration de contrainte, ils se transforment donc rapidement en fissures dont la propagation rapide conduit à la rupture brutale. Ce dernier mode sera précisé un peu plus loin par l'introduction de la notion de microfissures.

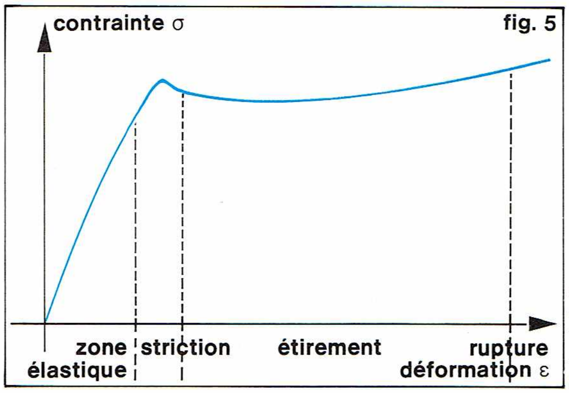

Richard Colin

▶ *Figure 5 : rupture ductile ; une rupture est dite ductile, par opposition à fragile, quand l'éprouvette subit, lors d'un effet de traction, une striction puis un étirement plus ou moins prononcé avant la rupture.*

Selon la valeur de la contrainte critique de cavitation par rapport à la contrainte critique de glissement, il y a rupture suivant l'un ou l'autre mode. Lors d'un test de traction sur éprouvette lisse, le polystyrène, le polyméthacrylate de méthyle, la plupart des résines thermodurcissables sont fragiles, le polyéthylène, le polypropylène, les polyamides, le polycarbonate sont ductiles. Plusieurs paramètres peuvent intervenir pour déterminer le mode de rupture :

- *L'état de contrainte*. Plus la composante hydrostatique est importante dans le sens de la compression, plus le matériau a tendance à se déformer de façon ductile. L'inverse, triaxialité des contraintes avec composante hydrostatique négative, entraîne une tendance à la fragilité. C'est le cas des éprouvettes entaillées par rapport aux éprouvettes lisses. L'effet de l'état de contrainte explique également qu'une augmentation de l'épaisseur des éprouvettes peut entraîner un mode de rupture fragile (ex. : PVC).
- *La température*. L'augmentation de température abaisse le seuil critique de déformation plastique. Par échauffement, un produit fragile devient ductile à une température inférieure à la température de transition vitreuse. Inversement, il y a fragilisation à froid.
- *Le temps*. La vitesse de sollicitation augmente le seuil critique de déformation plastique. A grande vitesse de sollicitation, un produit ductile peut se rompre fragilement. Les essais de choc sous précontrainte sur le PVC illustrent bien ce phénomène : une éprouvette est mise sous contrainte, puis soumise au choc latéral d'un couteau monté sur un pendule. Au-delà d'une certaine contrainte, le choc entraîne la rupture brutale de l'éprouvette, alors qu'à cette même contrainte une éprouvette comportant une entaille préexistante résiste à la rupture. La vitesse du choc est suffisante pour créer au fond de l'entaille naissante une situation de contrainte où le seuil de fragilité est plus bas que le seuil de plasticité. La propagation rapide de la fissure maintient cette situation pendant tout son trajet jusqu'à la rupture.
- *L'environnement*. Au contact de certains produits, de nombreux thermoplastiques, jusqu'alors ductiles, deviennent fragiles (polyéthylène, polycarbonate, etc.). Le changement d'état à la surface du polymère ou en fond de fissure favorise le mécanisme de rupture fragile.

La mécanique de la rupture

Cette technique a permis de bien mieux comprendre les mécanismes de rupture dans les matériaux, précisant les données mécaniques, c'est-à-dire essentiellement l'état de contrainte au voisinage du fond d'une fissure dans une pièce ou une éprouvette quelconque.

Historiquement, Griffith a d'abord abordé le problème sous l'angle énergétique. Quand une fissure croît, l'énergie globale du système est modifiée : une énergie élastique est restituée (changement d'énergie potentielle du système mécanique), et une énergie de rupture est absorbée pour la création d'une nouvelle surface. Nous négligeons ici l'énergie cinétique et l'énergie mécanique. Si l'énergie élastique restituée est supérieure à l'énergie de création de la surface de rupture, alors la fissure progresse. Dans le cas inverse, le système est stable. Donc, si G, énergie de déformation élastique libérée, est supérieur à un seuil critique G_c, la fissure progresse. G peut être calculé à partir des paramètres de l'éprouvette, la longueur de fissure, les contraintes appliquées et le module du matériau.

Le problème a été abordé par Irwin à l'aide de l'analyse mécanique des contraintes en fond de fissure. Il a montré que les contraintes en un point pouvaient être définies par une fonction des coordonnées de ce point par rapport au fond de fissure, multipliée par un facteur K appelé facteur d'intensité de contrainte, qui contient les paramètres géométriques de l'éprouvette et de la fissure ainsi que les paramètres de contrainte définis en l'absence de fissure. Par exemple, dans le cas d'une fissure de longueur 2 *a* dans une plaque de dimensions très supérieures à 2 *a* et soumise à une contrainte de traction

$K = \sigma\sqrt{\pi a}$. Quand le facteur K atteint une valeur critique K_c, la fissure progresse. K_c est un facteur intrinsèque au matériau.

Les deux approches sont donc équivalentes, l'une étant directement accessible par l'expérience (G_c), l'autre étant le résultat d'un calcul mécanique. Les calculs de K sont publiés pour un grand nombre de types d'éprouvettes. Dans le cas des métaux, une norme ASTM est consacrée à la détermination expérimentale de la contrainte critique σ_c qui permet de calculer K_c. La connaissance de K_c permet, à partir de la contrainte maximale, de préciser la taille maximale des défauts admissibles.

Irwin a amélioré les techniques en incluant dans les calculs la taille de la zone plastique en fond de fissure. En effet, dans le schéma précédent, la contrainte devient infinie en fond de fissure idéale de rayon nul. En fait, le fond de fissure subit une déformation plastique dont la taille dépend de l'aptitude du matériau à se déformer plastiquement. Un matériau macroscopiquement fragile est donc en fait microscopiquement ductile. Plus la taille de cette zone est petite, plus l'énergie de propagation de fissure est faible.

Fissuration lente

La mécanique de la rupture explique donc que la fissuration dite fragile est en fait la conséquence, comme le comportement ductile, d'une déformation plastique mais qui reste confinée dans un volume très faible. Cela permet de mieux comprendre les effets du temps et de la température sur le mode de rupture ainsi que sur la vitesse de fissuration. Ces deux facteurs agissent directement sur la contrainte au seuil d'écoulement, c'est-à-dire sur le point où commencent les déformations plastiques irréversibles. Cette influence est de la forme :

$$\tau = \tau_0 \exp (U_0 - \gamma^{\sigma})/RT$$

où τ est le temps d'apparition de la déformation plastique, U_0 une énergie d'activation, σ la contrainte, T la température, γ une constante qui a la dimension d'un volume. Cette relation rend bien compte du temps d'amorçage de la propagation sous une contrainte donnée et aussi du temps d'apparition des microfissures. Cette expression peut s'expliquer par la théorie d'activation d'Eyring appliquée aux mouvements moléculaires à l'état solide.

Dans les applications industrielles, cela se traduit par des ruptures retardées, qui surviennent au bout d'un temps d'autant plus long que la contrainte est plus faible. La *figure* 6 illustre ce phénomène sous la forme de diagramme logarithmique entre la contrainte de rupture et le temps à la rupture dans le cas de tuyau de polyéthylène soumis à une pression interne constante. Les courbes tracées s'étendent pour certaines jusqu'à 50 ans. Plusieurs températures ont été utilisées, non seulement pour connaître le comportement à chaud, mais aussi pour pouvoir extrapoler le comportement à température ambiante jusqu'à des périodes supérieures à cinquante ans, durée courante en génie civil. A l'aide de ces courbes est déterminée une contrainte limite, à ne pas dépasser pour pouvoir assurer aux conduites une durée de vie supérieure à cinquante années.

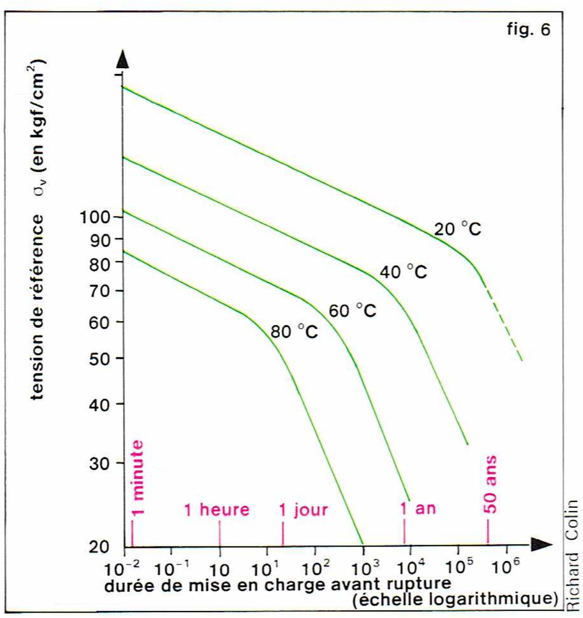

◄ ***Figure 6 :** diagramme logarithmique entre la contrainte de rupture et le temps à la rupture dans le cas des tuyaux de polyéthylène soumis à une pression interne constante (d'après un document Hoechst).*

La microfissuration

Les thermoplastiques soumis à des sollicitations mécaniques subissent fréquemment le phénomène de microfissuration, qui se traduit par l'apparition de très fines craquelures brillantes bien visibles dans les produits transparents. Vous pourrez les obtenir facilement en déformant les gobelets en polystyrène transparent, et, si vous prenez l'avion, vous en verrez dans presque tous les hublots. Ces microfissures sont en fait extrêmement fines, et les deux faces qui les délimitent sont reliées entre elles par de multiples filaments, la « densité » apparente n'étant réduite qu'à la moitié de la densité du matériau non déformé.

Ces microfissures sont des précurseurs pour la fissure dont la propagation entraînera la rupture. Cependant, ce phénomène de microfissuration est, paradoxalement, un facteur de renforcement de ces matériaux. En effet, les déformations plastiques nécessaires à la formation des microfissures demandent une grande dépense d'énergie, beaucoup plus grande qu'une simple séparation de surface. D'autre part, dans une pièce fissurée, la création sous contrainte d'un grand nombre de microfissures en avant du front de fissure permet, en modifiant l'état de contrainte local, de ralentir la progression de la fissure.

Cet aspect positif doit être tempéré par un inconvénient important. Les microfissures sont des chemins privilégiés pour la pénétration au cœur du matériau de gaz ou de liquide. Certains de ceux-ci ont la propriété de fragiliser à des degrés divers les thermoplastiques en modifiant superficiellement leurs propriétés mécaniques.

Résistance au choc

L'utilisation, au début du développement des matières plastiques, de produits dont la mise au point laissait à désirer, a provoqué, à cause des nombreuses pièces cassées, un sentiment de méfiance et introduit l'idée d'une grande fragilité de ces matériaux. Si cela reste vrai dans le cas de certaines matières telles que le polystyrène, des recherches ont amené le développement de nouveaux matériaux possédant une résistance au choc très améliorée. Il faut citer le polycarbonate dont les performances lui permettent de résister même aux pavés des manifestations de rues.

Un des moyens d'amélioration de la résistance au choc est la réalisation d' « alliages » de polymères dont la structure est composée d'une phase rigide contenant des sphères de phase caoutchoutique d'un diamètre de l'ordre du µm. Dans cette structure, présente dans les polystyrènes choc et les ABS, un choc fait apparaître une multitude de microfissures qui absorbent une énergie suffisante pour éviter une rupture macroscopique.

Les matériaux polymériques sont également sensibles, comme les matériaux métalliques, aux phénomènes de *fatigue*. Des fissures, en effet, se développent et progressent lentement sous l'action de sollicitations alternées dont l'intensité peut être notablement plus faible que celles qui conduiraient à une rupture brutale.

Les ruptures peuvent être également dues à l'*environnement* de la pièce en service. Si les métaux sont sensibles aux acides, par exemple, les matières plastiques peuvent être fissurées par des solvants, des hydrocarbures, des alcools, des détergents tensio-actifs, et cette action s'accomplit par la voie des microfissures, comme nous l'avons vu précédemment. L'action de la *lumière* est aussi un facteur d'évolution des matières vers sa dégradation. En effet, les rayons ultraviolets de la lumière solaire provoquent des cassures de chaînes macromoléculaires. La modification des seuils de ductilité se traduit rapidement par une fragilisation accrue.

L'ensemble de ces problèmes de rupture et de vieillissement prend actuellement une importance particulière, car l'évolution industrielle tend vers une plus grande *sûreté* dans le fonctionnement et l'utilisation des produits dans tous les domaines. De plus, le souci d'économie de l'énergie et des matériaux laisse une place prépondérante aux qualités de *durabilité*.

Caractérisation des matières plastiques

Pour utiliser un matériau dans une structure mécanique, quelle qu'elle soit, il faut en connaître les caractéristiques. A partir des paramètres mécaniques, rigidité, résistance à la rupture, etc., l'ingénieur de conception pourra calculer les pièces qui constituent la structure en respectant un certain nombre de règles, telles que déformation maximale autorisée, coefficient de sécurité imposé. Mais les paramètres mécaniques ne sont pas les seuls à prendre en compte; bien d'autres conditions vont guider le choix des matériaux et le calcul de la structure. Citons les plus courantes : températures de fonctionnement, environnement, irradiation solaire, résistance au feu, isolement électrique, caractéristiques optiques. Suivant les cas, des spécifications seront imposées à l'ingénieur, et c'est l'ensemble de ces caractéristiques qui va guider son travail.

Il est donc indispensable d'évaluer avec beaucoup de précision et de sûreté les paramètres qui mesurent les performances de chaque type de matériau dans tous les domaines. L'utilisateur en a besoin pour son travail de conception, et le producteur cherche à évaluer la qualité de ses produits pour les améliorer et en assurer la promotion dans les domaines les plus divers. Ces paramètres sont déterminés par des *essais normalisés* — ce qui est indispensable pour permettre le dialogue entre les différents utilisateurs et les producteurs. Les normes d'essais sont étudiées et mises au point dans chaque pays : en France, c'est l'Association française de normalisation (AFNOR), en Grande-Bretagne les British Standards, en Allemagne les normes DIN, aux États-Unis l'American Society for Testing Materials (ASTM). A l'échelle internationale, on trouve les normes ISO, International Standards Organization. Le système métrique (que l'ASTM n'a jusqu'ici pas suivi) prend de plus en plus d'importance.

Nous allons passer en revue quelques-uns des essais les plus importants et, en même temps, insister sur les caractéristiques qu'il est important de déterminer dans le cas des matières plastiques : comportements mécaniques, électriques, optiques, comportement au vieillissement, au feu.

Caractérisation du comportement mécanique

Nous avons décrit précédemment le comportement mécanique d'une matière plastique, et nous avons distingué le cas des matériaux ductiles (ils s'étirent) de celui des matériaux fragiles (ils se cassent). Les essais normalisés consistent à évaluer quantitativement ce comportement en mesurant avec précision certains paramètres caractéristiques définis par le type d'essai et la norme en vigueur.

Par exemple, l'**essai de traction** fournit le module de rigidité en traction, la résistance au seuil d'écoulement ou la résistance à la rupture (cas fragile) et la déformation à la rupture (voir *Propriétés mécaniques des matériaux*, p. 29 à 46, *Technologie* III). Il est effectué par une machine d'essai équipée pour la traction où l'éprouvette, dont les dimensions sont précisées par la norme, est soumise à une déformation progressive, et où la machine enregistre la force nécessaire pour assurer cette déformation. La norme, outre les dimensions, précise la vitesse de traction, la température, la précision minimale des mesures, le nombre d'éprouvettes, la façon de rendre correctement les résultats, et bien d'autres paramètres.

Ainsi, suivant la norme ISO R 175, le polyéthylène haute densité n° X de la société Y présente les résultats suivants : module : 1 090 MPa (écart-type 105 MPa); résistance au seuil d'écoulement : 31 MPa (6 MPa); déformation à la rupture : 650 % (120 %).

L'essai mécanique peut être réalisé en **flexion** suivant d'autres normes, en général avec le même type de machine d'essai. On obtiendra alors le module de rigidité en flexion et la résistance à la rupture en flexion.

Le facteur temps fait l'objet d'un test particulier appelé **fluage**, qui est défini par des normes. Les courbes de fluage définissent la déformation du matériau sous une certaine contrainte au cours du temps. Elles comportent une échelle logarithmique du temps; cela permet de rassembler sur la même courbe les effets à court et à long terme. Pour une utilisation mettant en jeu des contraintes de longue durée (réservoir ou tuyau sous pression, par exemple), ces courbes permettent à l'ingénieur de conception de mieux prévoir les déformations à long terme.

Les essais de fluage sont étendus jusqu'à la rupture; les résultats peuvent alors être exprimés sous la forme du temps nécessaire à la rupture sous une contrainte donnée. La courbe σ-log t_R est la plus utilisée.

Les producteurs et les utilisateurs réalisent également des essais réels sur des tuyaux sous pression pour mieux préciser les travaux sur éprouvettes. Dans ce cas, la courbe, contrainte d'éclatement (ou de fuite) en fonction du temps d'éclatement, exprime clairement le résultat des essais.

Dans les utilisations, les efforts sont souvent, non pas statiques, mais cycliques, principalement dans les pièces en mouvement tournant : pompes, roues, axes, etc., mais aussi pour un grand nombre d'utilisations : chaises, poignées, outils, véhicules (freinage, accélération, virage). Il faut donc connaître et caractériser le comportement sous sollicitations cycliques, d'autant plus que la rupture peut alors se produire à des contraintes très inférieures à celles déterminées par un essai statique. Il existe peu de normes pour ce type d'essai; chaque producteur entreprend cependant la caractérisation des performances en **fatigue** (c'est en effet par ce nom que l'on désigne les phénomènes sous *sollicitations cycliques*). Les résultats sont exprimés sous la forme de la courbe dite de Wöhler, qui relie la contrainte maximale appliquée au nombre de cycles nécessaire à la rupture. Ces essais ne peuvent être réalisés à haute fréquence (supérieure à 10 Hz), car alors la rupture survient par échauffement interne apporté par le fort facteur de perte dynamique de nombreuses matières plastiques.

Il est souvent difficile d'appliquer à des structures les résultats d'essai de fatigue sur éprouvettes. En effet, le comportement en fatigue dépend beaucoup des défauts du matériau ou de la structure. Si une bulle ou une crique existe dans la matière, s'il y a un congé ou un raccord trop aigu dans la structure, ces points sont des sources d'amorçage privilégiées pour les fissures de fatigue, et leur existence peut raccourcir fortement la durée de vie d'une pièce. La perfection du moulage et un bon dessin sont essentiels pour obtenir de bonnes performances dans ce domaine.

A l'opposé des sollicitations de longue durée, auxquelles se rapportent les essais de fluage et de fatigue, les **phénomènes de choc** mettent en jeu des vitesses de sollicitation élevées. De nombreuses matières plastiques sont cassantes sous un choc, et cette caractéristique doit être évaluée de façon objective. La méthode générale appliquée dans de nombreux essais normalisés consiste à mesurer l'énergie consommée au cours d'un choc. Plus la **résilience**, ou résistance au choc, est grande, plus l'énergie utilisée par la fracture au cours du choc est grande. Cette énergie est mesurée à l'aide d'un pendule qui porte un marteau; cette masse tourne dans un cercle vertical, et la hauteur de chute définit l'énergie apportée; après cassure, au point mort bas, le marteau remonte d'une hauteur proportionnelle à l'énergie qui lui reste après le choc ! Des graduations permettent d'évaluer l'énergie consommée.

Les divers dispositifs des appareils permettent de mesurer la résilience sous différentes formes de rupture : en flexion entre deux appuis (Charpy), en flexion sur éprouvette encastrée (Izod), et également en traction.

Les éprouvettes testées en flexion peuvent être entaillées. Les normes sont très diverses, et les résultats sont difficilement comparables d'une norme à l'autre. Notons, par exemple, que la norme ASTM Izod, qui exprime les résultats en livres-pieds par pouce, est impossible à transformer en kg · cm par cm^2 de la norme DIN Charpy. La concertation internationale a encore quelques progrès à faire !

Pour tous les essais, mais plus particulièrement ceux de résistance, les résultats ne sont que des moyennes statistiques sur un échantillonnage d'éprouvettes, ce qui pose le grave problème des prises d'échantillons et des statistiques des résultats. Un résultat isolé n'a aucune valeur.

Nous avons ainsi passé en revue les principaux essais mécaniques ; il faut encore y inclure l'**influence de la température.** En effet, ce facteur intervient sur le comportement mécanique, par l'intermédiaire de son action sur les mouvements moléculaires, de façon beaucoup plus directe que dans le cas d'autres matériaux. On le détermine très souvent par la mesure de l'évolution du module de rigidité. Un des essais les plus simples est celui de la rigidité en torsion dans un bain à température variable ; il fournit la courbe du module de torsion en fonction de la température, qu'on peut faire varier dans une large gamme, même dans les basses températures.

Certains essais plus rustiques et plus rapides évaluent une température dite de transition entre un état rigide à basse température et un état plus mou, plus plastique à haute température. Ces essais utilisent un seuil de caractéristique mécanique : quand le paramètre choisi devient inférieur à ce seuil, la température est alors supérieure au point dit de transition. Un des essais normalisés s'effectue en flexion sous charge constante et permet de déterminer un point appelé température de fléchissement sous charge. Un autre essai, fondé sur la pénétration d'un indenteur, fournit le point Vicat. Concrètement, ces températures sont supérieures aux limites à ne pas dépasser lors de l'utilisation. Ces points permettent cependant de comparer les comportements à la chaleur des différents produits.

Autres caractérisations

De multiples autres essais sont nécessaires pour bien caractériser un produit. Parmi ceux-ci, les **essais électriques** sont indispensables pour certaines applications. C'est essentiellement le caractère isolant qui fait l'objet d'évaluation sous des formes diverses : on détermine ainsi la conductibilité électrique, transversale et superficielle ; elle peut ne pas dépasser 10^{-16} ohm^{-1} · cm^{-1} pour les meilleurs isolants. On détermine également la tension de claquage, ou rigidité diélectrique, c'est-à-dire la tension maximale que peut supporter une certaine épaisseur d'isolant sans formation d'arc. La constante diélectrique et le facteur de perte diélectrique caractérisent le comportement des isolants en courant alternatif. Un autre essai d'isolement évalue la capacité de résister au cheminement de l'arc entre deux électrodes ; ces arcs ou étincelles tendent à charbonner la surface des isolants et à y créer des chemins conducteurs, provoquant alors un court-circuit. Une dernière caractéristique est le **comportement électrostatique** des matières plastiques ; c'est un point important : d'une part, le frottement peut entraîner de fortes charges électrostatiques, d'où création d'étincelles qui peuvent être dangereuses (moquettes, voitures) ; d'autre part, les matériaux chargés électrostatiquement attirent les poussières, d'où une tendance fâcheuse au salissement rapide. Pour certains traitements de surface ou mélanges dans la masse, il est possible d'abaisser ces propriétés de chargement électrostatique.

Les **effets du feu** ont été mis en évidence par des catastrophes au cours desquelles se sont déclarés des incendies très rapides et d'autant plus meurtriers que la combustion des matériaux produisait une fumée très opaque et des gaz toxiques. Depuis quelques années, un effort considérable a été entrepris pour évaluer correctement la tenue au feu des matériaux. Une série d'essais normalisés permet de les classer en six classes M_0 à M_5 suivant une inflammabilité décroissante ; suivant les utilisations, les matériaux doivent appartenir à une certaine classe. De leur côté, les producteurs ont mis au point des variétés peu inflammables, ou même classées « auto-extinguibles », c'est-à-dire n'entretenant pas la flamme, grâce à des additifs ou à des compositions spécialement étudiées.

Est considéré également comme un paramètre important le **comportement au vieillissement.** En effet, si les contraintes provoquent à long terme la fissuration et la rupture d'un certain nombre de matières plastiques, l'environnement est aussi un facteur de dégradation, tout comme la corrosion dans le cas des métaux. En particulier, la lumière ultraviolette contenue dans le spectre solaire attaque en surface la structure chimique du matériau et entraîne l'apparition de microfissures superficielles qui vont conduire à une rupture prématurée si la pièce est soumise à des contraintes. D'autres facteurs peuvent intervenir, par exemple, la vapeur d'eau, les cycles thermiques (jour, nuit), le gel, certains composés polluants de l'atmosphère et de nombreux produits particuliers : essence (automobile), acide ou base (usine chimique, traitement des eaux), hydrocarbures légers (transport de gaz). Il faut aussi mentionner les micro-organismes qui ont su s'adapter aux nombreux matériaux ! Ces comportements dans les conditions les plus diverses font l'objet d'un grand nombre d'essais dont la normalisation n'est pas encore au point.

La mise au point de la méthode permettant, à partir d'essais effectués dans des conditions artificielles, de prévoir avec précision le comportement dans les conditions réelles, reste le grand problème.

Mise en œuvre des matières plastiques

Pour tous les matériaux, deux procédés de fabrication des pièces sont utilisés : la mise en forme par déformation plastique ou moulage, la mise en forme par enlèvement de matière ou usinage. Dans le cas des matières plastiques, la quasi-totalité des pièces est mise en forme par moulage, et souvent dans des conditions très favorables : température peu élevée, pressions moyennes, obtention de formes complexes, cadences importantes, etc. C'est la principale raison du succès des matières plastiques depuis 1945.

Ce type de mise en forme demande un état intermédiaire malléable, plastique, puis la transformation en l'état final, plus ou moins rigide. Dans le cas des thermodurcissables, c'est un polymère sous forme liquide ou pâteuse (quelquefois sous forme solide, qui se ramollit en chauffant) qui est mis sous la forme désirée, puis durcit par polymérisation et réticulation à chaud ou même à froid ; il y a ici simultanément mise en forme et complétion des réactions chimiques. Dans le cas des thermoplastiques, la chaleur fait passer le produit dans un état plastique (mouvements moléculaires très faciles) ; la mise en forme peut alors se faire ; elle est suivie par un refroidissement qui permet, en quelque sorte, de figer le produit dans la forme voulue (*fig.* 7).

Moulage par compression (fig. 7 a)

Cette méthode s'applique surtout aux thermodurcissables : résine polyester, époxy, urée-formol, mélamine, etc. Les presses sont munies de moules chauffants, et un dispositif d'ouverture et de fermeture sert à établir la pression de moulage. Les cadences de moulage sont assez faibles, car la pression de moulage doit persister tout le temps de la « cuisson » de la pièce.

La boudineuse

Pour les thermoplastiques, l'élément principal de nombreuses méthodes de transformation est la boudineuse, vis sans fin entourée d'un fourreau chauffant. Cette vis a pour objet de réchauffer la matière qui est sous forme de granulés ou de poudre, de la malaxer de manière à assurer un état homogène sans masse infondue, et de la transporter dans une filière ou un moule. Les profils de la vis sont divers ; celui des filets et leur profondeur sont étudiés pour assurer les trois fonctions décrites, ce qui correspond souvent à trois zones : une zone de transport à partir de la trémie, une zone de plastification, une zone de compression. Un puissant moteur, en général hydraulique, assure la rotation de la vis. A partir de la boudineuse sont conçues deux grandes classes de moyens de mise en œuvre, l'extrusion et l'injection.

L'extrusion (fig. 7 b)

L'extrusion est l'opération qui produit des profils à l'aide d'une filière située à la sortie de la boudineuse. L'extrudeuse comprend donc une boudineuse, son moteur et son système de chauffage, et une filière qui impose la géométrie de la section du profilé ; cela est complété par un banc de refroidissement associé à un conformateur pour mettre le profilé aux cotes définitives.

Ce procédé permet de réaliser n'importe quel profilé, même très complexe, comme des huisseries creuses. Le profilé le plus fréquent est le tuyau, du tuyau d'arrosage au tuyau d'adduction d'eau de grand diamètre. Par extrusion, on produit également des plaques à l'aide de filières plates dont les largeurs dépassent trois mètres. Ces plaques sont calibrées par des rouleaux.

On réalise maintenant ce qu'on appelle la coextrusion, c'est-à-dire la réalisation de profils, en général de plaques comportant deux ou trois matières en couches distinctes,

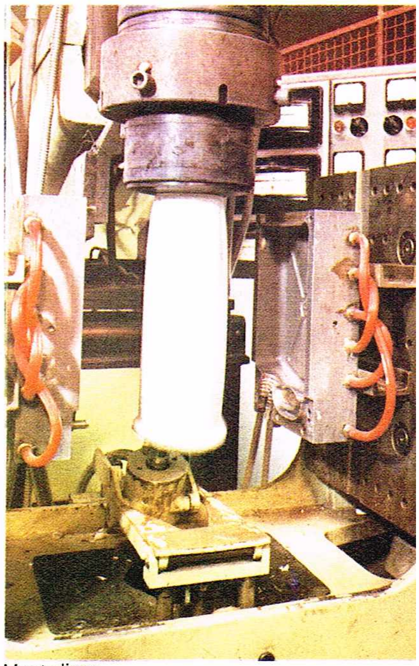

Montedison

▲ ***Fabrication d'un récipient en matière plastique par le procédé d'extrusion-soufflage.***

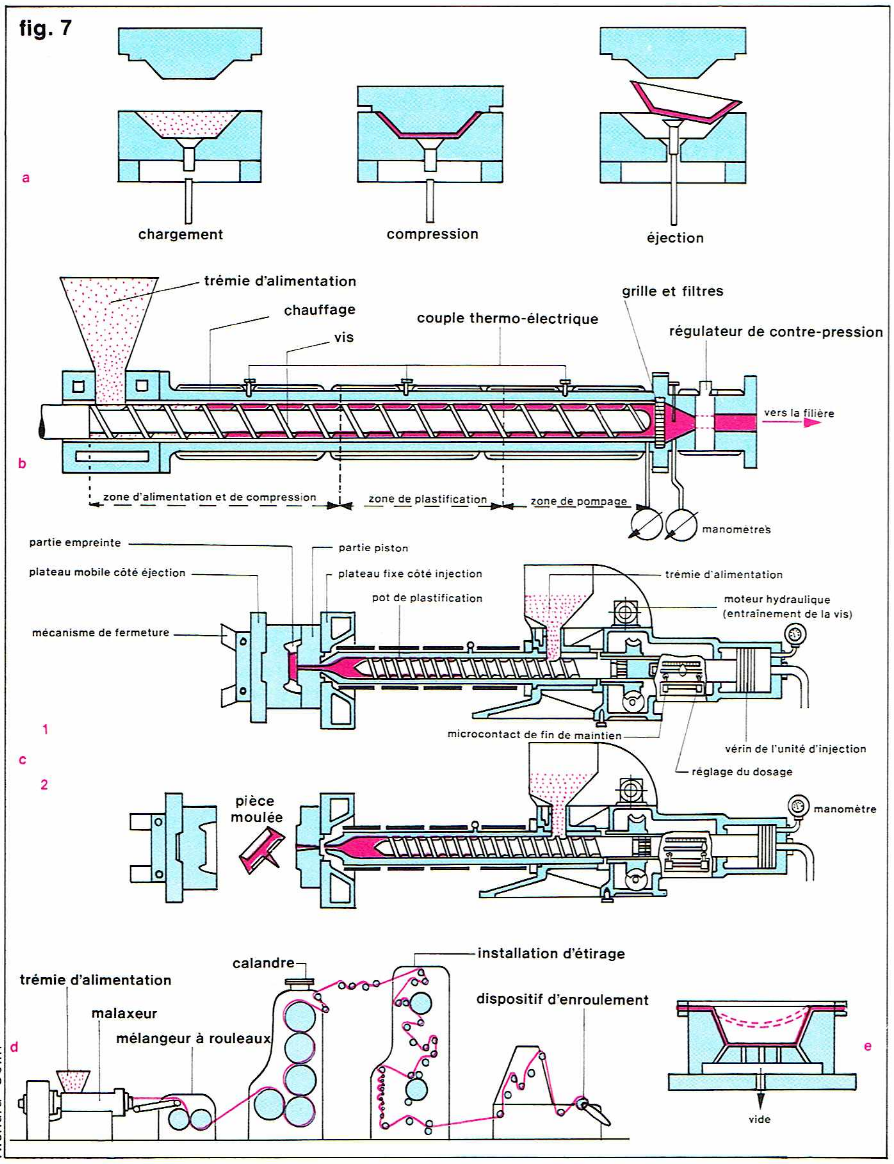

▲ ***Figure 7 :*** *mise en œuvre des matières plastiques ; a, moulage par compression ; b, cylindre de plastification d'une extrudeuse ; c, moulage par injection unité à vis-piston. Injection (1), éjection (2) ; d, schéma d'une installation de calandrage à 5 cylindres pour la fabrication de feuilles de PVC rigide ; e, exemple de thermoformage : formage en moule négatif sans préétirage (d'après un document Hoechst).*

mais bien assemblées. Un côté de la plaque assure un rôle de protection ou d'étanchéité, l'autre sert à l'impression ; l'intérieur, qui peut provenir de déchets plastiques récupérés, n'a qu'un rôle mécanique. Ces plaques sont destinées à la préparation d'emballages par thermoformage.

L'extrusion a deux applications : le soufflage de gaine et le moulage de corps creux. Dans le premier, l'extrusion d'un anneau fin de matière est suivie d'une expansion sous pression interne pour former une sorte de bulle qui est ensuite repliée et enroulée. Le film (ou gaine) ainsi préparé peut avoir des épaisseurs d'un vingtième de mm à 1 mm et des largeurs supérieures à 2 m. Les sacs plastiques qui ont remplacé les poubelles dans de nombreuses villes sont fabriqués par cette méthode. C'est essentiellement le polyéthylène qui subit ce type de transformation.

Le moulage de corps creux se réalise à partir d'un morceau de tuyau extrudé, le paraison. Ce paraison est maintenu à l'état plastique dans un moule et plaqué sur les parois du moule sous l'action d'une forte pression d'air injecté à l'intérieur. Le corps creux ainsi fabriqué a la forme imposée par le moule. Pratiquement, tous les corps creux en matières plastiques sont préparés de cette manière, depuis le petit flacon de ménage jusqu'au bidon de 200 litres type baril de pétrole ; le chlorure de polyvinyle et le polyéthylène sont les principales matières transformées ainsi.

L'injection (*fig.* 7 c)

L'injection utilise également la boudineuse, mais c'est un procédé discontinu. Le principe est celui de la vis-piston. La vis de malaxage, après avoir accumulé une certaine quantité de matière en tête du fourreau, agit comme piston et remplit un moule en deux parties maintenues fermées par un dispositif hydraulique puissant. Pendant que la matière se refroidit dans le moule, la vis tourne et recule, permettant ainsi le stockage en tête du fourreau de la quantité de matière malaxée prête pour la prochaine injection. Le moule s'ouvre, les éjecteurs poussent la pièce en dehors du moule, celui-ci se referme, et le cycle recommence avec une nouvelle injection.

C'est une méthode qui permet des cadences très rapides : la période du cycle peut être de l'ordre de la seconde pour des quantités de matière inférieures à 50 g, mais atteint trois à cinq minutes pour des pièces d'une dizaine de kg. Les moules font l'objet de soins tout particuliers, puisque c'est de leur état que dépend l'aspect extérieur des pièces finies. Leur prix varie de 5 000 à 1 million de francs et constitue donc un investissement important : c'est une méthode adaptée aux grandes séries. De très nombreux objets sont fabriqués par injection, depuis les très petites pièces pour l'électronique jusqu'aux casiers à bouteilles ou bacs de manutention. L'injection nécessite une matière fluide afin d'accélérer les cadences et de diminuer les tensions internes des pièces. Le polyéthylène et les polystyrènes sont les principales matières transformées par cette méthode.

Le calandrage (*fig.* 7 d)

Le calandrage permet de préparer des feuilles et des films. L'ensemble d'une installation de calandrage comporte une unité d'alimentation où la matière et les additifs subissent un premier malaxage sur un mélangeur à cylindres. La calandre proprement dite est constituée en général de quatre cylindres, dont deux sont ajustés avec grande précision pour régler l'épaisseur du film. Une série de cylindres assure le refroidissement et le stockage du film. La largeur des films produits dépasse 2 m. Il est possible de préparer avec des dispositifs analogues des films composés de deux couches, des tissus enduits, des impressions, des feuilles grainées pour imitation, etc. Le chlorure de polyvinyle, principal produit transformé par calandrage, permet de préparer des similicuirs, des feuilles étanches pour réaliser des objets gonflés ou des réservoirs, des toiles cirées, des panneaux d'habillage intérieur pour automobiles ou habitations.

Le moulage par rotation

Après avoir introduit de la matière plastique sous forme de poudre dans un moule constitué de deux demi-coquilles, on chauffe ce moule tout en le faisant tourner autour de deux axes perpendiculaires. La matière se répartit sur toute la surface de la paroi du moule et se plastifie sous l'effet de la chaleur. Après refroidissement, le démoulage livre un corps creux qui peut être de grande dimension ; c'est l'avantage de cette technique, qui produit, par exemple, des réservoirs en polyéthylène haute densité de capacité supérieure à 200 litres.

Le thermoformage (*fig.* 7 e)

Le thermoformage utilise un produit semi-fini, plaque ou feuille obtenue par extrusion à la filière plate. La feuille, ou la plaque, est réchauffée par radiateurs infrarouges pour atteindre un état caoutchoutique. Des poinçons et une aspiration d'air impriment la forme choisie à cette feuille, par étirement de certaines zones. Le refroidissement rigidifie la forme avant le démoulage. Pots de yaourt, emballages divers, cuves de réfrigérateurs, bateaux peuvent être préparés ainsi. Cette méthode s'applique surtout aux polystyrènes et à leurs dérivés résistants au choc.

Autres opérations de transformation

Sur des produits demi-finis ou presque finis, de très nombreuses techniques peuvent être appliquées pour parvenir au produit final. Citons rapidement : l'usinage, comme pour tout autre matériau, mais il est très peu utilisé pour des pièces de série ; le soudage, soit à chaud à l'aide d'un chalumeau à air chaud et une soudure en même matière (exemple du chlorure de polyvinyle), soit par ultrasons qui ramollissent la zone de contact entre deux pièces ; le collage par dissolution ou par apport d'adhésif étranger ; l'impression décorative, qui apporte une note finale à de nombreux objets en matières plastiques.

L'ensemble de l'industrie de transformation des matières plastiques occupe un grand nombre de personnes dans des entreprises souvent de petites dimensions et très spécialisées.

L'industrie des matières plastiques

Les matières plastiques ont une place industrielle de premier ordre dans les pays développés. Le secteur de production est intégré à l'industrie chimique, et les grands groupes mondiaux se nomment Du Pont de Nemours, Union Carbide, Monsanto aux États-Unis, Imperial Chemical Industry en Grande-Bretagne, Hoechst et Bayer en Allemagne, Rhône-Poulenc et Péchiney-Ugine-Kuhlmann en France, Montedison en Italie, sans oublier les grands groupes japonais. La production mondiale dépasse maintenant 30 millions de tonnes.

En examinant le *tableau* IV pour 1974 à 1976, on constate que trois familles occupent à elles seules la moitié du marché, le chlorure de polyvinyle, les polyoléfines (éthylène et propylène) et les polystyrènes. Le polyméthacrylate de méthyle, pourtant bien connu sous le nom de marque Plexiglass, n'est produit qu'en faibles quantités (les silicones encore plus faibles).

Les polyéthylènes

C'est la régularité de la chaîne, conséquence du procédé de polymérisation, qui distingue les hautes densités des basses densités. En effet, une meilleure régularité entraîne un fort taux de cristallinité, donc une plus haute densité et des paramètres mécaniques plus élevés. C'est cependant le polyéthylène basse densité (PEBD) qui est de loin le plus utilisé, principalement pour l'emballage et toutes les utilisations des films : pratiquement tous les sacs plastiques sont en PEBD, de même que les emballages rétractables, où l'objet est emprisonné dans une gaine plastique qui le protège mais le laisse voir. Les films utilisés en agriculture (serre) sont également en PEBD. Outre quelques utilisations sous forme de film, le PEHD sert surtout au moulage d'objets courants par injection ou extrusion-soufflage : bidons, flacons, bassines, poubelles, etc.; mais il y a aussi des pièces plus techniques en automobile (réservoir), en électricité (isolant de gaines), en génie civil (alimentation en eau).

Dans cette famille des polyoléfines, le polypropylène se développe rapidement et tend à concurrencer des produits plus nobles comme les polyamides. Sa bonne résistance à la chaleur et aux composés chimiques lui ouvre de nouveaux débouchés : en automobile (ventilateur), en électroménager (pompe et capot) et dans l'industrie chimique (réservoir, tuyauterie).

Le polychlorure de vinyle

C'est le champion, en France et dans de nombreux autres pays. Son prix de revient assez faible, son inertie chimique, le fait qu'il soit auto-extinguible, sa capacité à prendre des formes variées par addition de plastifiants expliquent donc son succès malgré ses défauts : le principal est la difficulté à le stabiliser pour la mise en œuvre. Sous forme de profilé, il est surtout utilisé dans le bâtiment (huisseries, gouttières, tuyaux divers), dans le génie civil (adduction d'eau, égouts) et en gainage de fil. Sous forme de feuilles ou de films, on l'emploie en décoration, en équipement automobile, en habillement, en agriculture et dans les loisirs. Sous forme d'objets injectés, il sert principalement en électricité pour l'équipement des bâtiments.

Les polystyrènes

Le troisième groupe, un peu détaché des deux leaders, est constitué par l'ensemble des polystyrènes, parmi lesquels il faut distinguer le polystyrène homopolymère, souvent appelé « cristal » parce qu'il est transparent, le polystyrène choc qui est un copolymère avec du butadiène (5 à 10 %), l'ABS, c'est-à-dire l'acrylonitrile-butadiène-styrène, qui est un copolymère à plusieurs séquences, et le SAN, c'est-à-dire le styrène-acrylonitrile, autre copolymère.

Le polystyrène « cristal » est moulé par injection et fournit des pièces transparentes d'un bel aspect. L'automobile, le ménage, les jouets sont de gros débouchés de ces produits moulés. Le polystyrène homopolymère est utilisé aussi pour préparer le polystyrène expansé : les billes fines provenant de la polymérisation en suspension du styrène sont mises en présence d'un liquide de faible point d'ébullition; après absorption de ce liquide volatil, elles peuvent être expansées par la chaleur. Cette expansion peut être réalisée dans un moule, ce qui permet de préparer toute sorte d'objets. Les principaux débouchés sont le bâtiment (isolement thermique) et l'emballage (protection contre les chocs).

Le polystyrène choc est une variété qui contient un peu de polybutadiène sous la forme d'une « émulsion » qui, à l'état solide, donne un aspect laiteux à ces produits quand ils ne sont pas colorés. La présence d'une multitude de petites billes (diamètre de l'ordre du µm) favorise l'apparition de microfissures, donc augmente fortement l'énergie de rupture. Le produit est ainsi beaucoup plus résistant au choc que le polystyrène « cristal ». Il trouve ses principales utilisations dans l'emballage alimentaire. L'ABS est un produit du même type, mais où l'acrylonitrile augmente les propriétés mécaniques et la résistance à la chaleur; il sert entre autres à faire des carrosseries de voiture, des valises. Le SAN n'est pas très développé, ses utilisations sont plutôt celles du polystyrène « cristal ».

Les autres produits cités dans les tableaux ont des utilisations extrêmement diversifiées, l'exemple le plus représentatif étant celui des polyuréthannes où l'on rencontre des thermoplastiques, des caoutchoucs, des fibres et des mousses. Les polyamides et polycarbonates sont des thermoplastiques qu'on appelle quelquefois techniques, car leurs propriétés mécaniques leur ouvrent des applications plus sophistiquées dans l'automobile, l'aviation, l'électromécanique, etc. Cependant, les polyamides et les polyesters saturés sont souvent utilisés dans l'industrie des fibres textiles. En effet, ces polymères de forte cristallinité peuvent être étirés et fournissent des fibres de très grande résistance. Le Nylon est un nom de marque de la famille des polyamides.

Les aminoplastes, phénoplastes et résines diverses constituent la grande famille des thermodurcissables dont les champs d'applications se sont fortement élargis depuis les premiers cendriers en Bakélite (encore un nom de marque !). Ces produits ont des débouchés dans les équipements ménagers (vaisselle), les composants électriques, les matériaux composites, les colles, les enduits, etc.

Les matières plastiques interviennent donc dans tous les domaines de la vie quotidienne; il faut apprendre à mieux les connaître pour mieux les utiliser.

▼ *Tableau IV : consommation des matières plastiques en France (moyenne 1974-1975-1976) et prix de quelques matériaux non transformés.*

Tableau IV
Consommation des matières plastiques en France (moyenne 1974-75-76) et prix de quelques matériaux non transformés

Types de matières plastiques	Consommation (en milliers de tonnes)	Prix (en F/kg)
Chlorure de polyvinyle	600	3
Polyéthylène basse densité	500	3,2
Polyéthylène haute densité	150	4
Polypropylène	80	4
Polystyrène et dérivés choc	200	4 (PS choc : 5)
ABS-SAN	40	7
Polyacétate de vinyle	40	—
Polyméthacrylate de méthyle	15	20
Aminoplastes	200	6 à 10
Phénoplastes	70	4 à 8
Polyesters insaturés	70	6 à 12
Polyamides	50	10 à 30
Polyuréthannes	100	très variable
Résines époxy	15	10 à 20
Silicones	7	très variable
Polycarbonates	5	12
Polyphénylène oxyde	5	12
Japon	6 000	
États-Unis	13 000	
Total Europe	≃ 10 000	
Total mondial	> 30 000	

TECHNOLOGIE DES FOURS

Si l'ensemble des moyens de transport utilise environ 20 à 25 % de l'énergie consommée en France sous toutes ses formes, l'élaboration et le traitement thermique des métaux et alliages en emploient une part sensiblement égale et constituent dans notre pays, avec le chauffage des locaux, les grands pôles d'utilisation de l'énergie dont nous sommes si modestement pourvus.

Cette consommation énergétique élevée est liée d'une façon étroite à la quantité de matières premières, et particulièrement de minéraux, mise en œuvre. En France, il ne faut pas oublier que les importations de matières premières minérales non énergétiques se situent environ à la moitié de celles des matières premières énergétiques.

Tout cela concourt à montrer, si besoin était, l'importance des fours dans lesquels ces matières sont élaborées, traitées et mises en forme. Leur perfectionnement continu est un souci majeur des concepteurs et des utilisateurs. Aussi ne faut-il pas s'étonner si des progrès importants ont été accomplis ces dernières décennies. Dans le présent chapitre, nous rappellerons rapidement la technologie et les caractéristiques des principaux types de fours d'agglomération, ou de préréduction (en nous limitant au minerai de fer), puis d'élaboration des métaux, et plus particulièrement des fontes et des aciers. Cette partie constitue un complément au chapitre *Méthodes d'élaboration*. Nous examinerons ensuite les fours de traitements thermiques des aciers, dont les gammes de températures d'emploi ne dépassent guère 1 600 °C ; cette partie venant s'ajouter aux chapitres *Traitements thermiques* et *Traitements de surface*. Les fours à plus hautes températures (t > 1 600 °C) opérant en milieu oxydant font l'objet d'une rubrique spéciale, faisant suite à celle-ci.

Les fours - Définition

On trouve dans le *Larousse* les définitions suivantes : *Four* (du latin *furnus*) : ouvrage en maçonnerie voûté, qui sert à la cuisson de diverses substances ou à la production de températures très élevées, alors que *Fourneau* est défini comme une construction en maçonnerie ou ustensile portatif pour contenir du feu. Le *Haut fourneau* est une construction spéciale établie pour effectuer la fusion et la réduction des minerais de fer en vue d'élaborer la fonte.

On voit donc que les fours feront appel à des matériaux réfractaires. La résistance pyroscopique de ces derniers doit au moins être égale à 1 500 °C d'après l'AFNOR. Le rôle des réfractaires est d'isoler les appareils d'élaboration des liquides ou des gaz portés à haute température suivant leur nature chimique.

Matériaux réfractaires

On distinguera quatre classes de matériaux réfractaires. Ceux-ci sont employés généralement sous forme de :
— briques, par exemple pour constituer des parois verticales et l'essentiel des parois horizontales de fours ;
— mortiers ou coulis, ou ciments, qui constituent les matériaux de jointoiement ;
— pisés, qui sont des mélanges granuleux non cohérents avant emploi et qui peuvent contenir un liant chimique ou organique ; la mise en œuvre d'un pisé — par exemple du sable — pour une poche Thomas se fait généralement par damage ou à la main ;
— bétons réfractaires, qui sont des mélanges non cohérents avant emploi, contenant un liant hydraulique, et dont la mise en œuvre se fait par calage, vibrage ou damage ; il faut noter que ces bétons réfractaires ne sont guère utilisables pour des températures supérieures à 800 °C en raison de leur faible résistance mécanique.

Matériaux acides

La *silice*, que l'on trouve en particulier dans les sables naturels extraits de carrières, fond à 1 800 °C, elle résiste donc aux températures les plus élevées des fours métallurgiques. C'est un produit qui convient pour le métal, pour l'acier liquide ou la fonte en l'absence de laitier jusqu'à des températures maximales de 1 600 °C.

L'*argile*, silicate d'alumine à base de kaolinite (2 SiO_2, Al_2O_3, 2 H_2O), donne avec l'eau une pâte très plastique. Le point de fusion de la kaolinite pure est de 1 830 °C. Il peut s'abaisser à 1 700 °C par un excès de silice, et à 1 200 °C en présence de mica, de chaux ou de fer. L'argile peut être considérée comme réfractaire si elle contient moins de 10 % de matières étrangères. On peut l'utiliser à partir de chamotte pour fabriquer des briques réfractaires par pressage ou damage. A la suite d'étuvage, puis d'une opération de cuisson à 1 650 °C, la résistance mécanique est bonne, ainsi que la résistance à la corrosion par les laitiers. En revanche, les produits argileux sont sensibles au cycle thermique et sont à l'origine de fissurations.

Matériaux basiques

Ces matériaux s'emploient dans les fours en contact avec des matières basiques ou pour permettre l'exécution de certains traitements.

La *magnésie* est employée sous forme de carbonate de magnésie neutre (CO_3Mg). Elle subit à 1 600 °C une transformation avec un retrait important. Il faut donc la cuire au-dessus de cette température en la malaxant avec un peu d'eau et 3 ou 4 % d'argile. La brique obtenue par cuisson à 1 700 °C a une grande résistance mécanique mais, comme les produits argileux, est sensible aux chocs thermiques. On améliore cette tenue aux chocs thermiques par adjonction de chromite (Cr_2O_3, FeO).

La *dolomie*, ou carbonate de chaux et de magnésie (CO_3Ca, CO_3Mg), est un produit naturel que l'on trouve dans des carrières. La dolomie est calcinée pour éliminer le CO_2 et diminuer le retrait à 1 800 °C. Le produit obtenu contient des impuretés (silice, alumine et oxyde de fer) qui jouent le rôle de liant entre les grains de magnésie et de chaux. Après concassage, criblage et malaxage avec du goudron, le pisé obtenu est mis en forme soit par pressage pour obtenir des briques, soit par vibrage pour réaliser le fond des convertisseurs. Le produit obtenu résiste bien aux chocs thermiques et mécaniques. Sa température d'emploi maximale est de l'ordre de 1 600 °C.

Matériaux neutres

Le *carbone à l'état de graphite* est une matière réfractaire neutre. On l'utilise dans les creusets de hauts fourneaux sous forme de briques mélangées avec de l'argile. On ne peut malheureusement pas utiliser les briques de graphite dans les fours à flamme oxydante dans lesquels elles seraient brûlées.

Matériaux réfractaires spéciaux

Dans cette catégorie, nous rangerons les matériaux suivants : *carborandum, zircone, silicate de zirconium, silice pure, platine rhodié, tungstène, alumine fondue, glucine, thorine*, etc.

Fours d'agglomération ou de préréduction des minerais de fer

Fours Smidth

Ces fours ont pour objet de récupérer et de valoriser les fines produites lors du concassage du minerai, et de les agglomérer en les portant à une température voisine de leur point de ramollissement, de telle sorte qu'elles puissent se souder entre elles pour former un produit analogue au mâchefer.

Il est à noter que ces fours sont de plus en plus remplacés dans les opérations d'agglomération par le procédé dit d'agglomération sur bande.

Fours et matériels divers d'élaboration

Nous bornerons notre propos à l'élaboration de la fonte, de l'acier et de quelques métaux tels que l'aluminium, en nous limitant aux matériels les plus importants.

On a assisté, ces 25 dernières années, à une évolution importante et rapide des industries sidérurgiques, tant en ce qui concerne leur implantation géographique que l'évolution des caractéristiques, de la taille et de la technologie des moyens de production proprement dits.

C'est ainsi qu'il s'est produit un déplacement vers les bords de mer des usines sidérurgiques — implantées traditionnellement sur les gisements de minerai de fer ou de charbon — en raison de la baisse considérable des coûts de transport maritime grâce à l'utilisation des minéraliers de taille de plus en plus colossale. Cela a permis de traiter des minerais à teneur plus élevée, mais extraits parfois fort loin des usines sidérurgiques (Mauri-

tanie, par exemple). De plus, des complexes sidérurgiques se sont implantés dans des pays neufs.

En outre, le processus d'élaboration de l'acier a notablement évolué, ainsi que le montre ce tableau :

Procédés	1860 (%)	1880 (%)	1955 (%)	1960 (%)	1969-70 (%)	1980 (%)
Acier puddlé	100	4	—	—	—	—
Bessemer	0	83	3	3	—	—
Martin	0	20	78	71	40	15
Thomas	0	1	12	12	5	
Convertisseur à l'oxygène	0	0	1	4	40	45
Four électrique	0	—	6	10	15	40

Alors qu'après la Dernière Guerre la plus grande partie de l'acier était fabriquée au four Martin, on prévoit qu'à la fin de ce siècle ce type d'élaboration aura pratiquement disparu, et que l'acier sera réalisé très prochainement par moitié au convertisseur à l'oxygène, et par moitié au four électrique : deux moyens de production qui n'existaient pratiquement pas il y a 25 ans.

L'insufflation d'oxygène a donné un renouveau au convertisseur, dont la capacité de production s'est considérablement développée. C'est ainsi qu'à capacité égale, les productions annuelles d'acier ordinaire élaboré respectivement au four Martin, au four à arc UHP (ultra-haute production) et au convertisseur à l'oxygène sont dans les proportions 1-3-10.

La guerre du Kippour a eu pour conséquence de valoriser la production de l'acier au four électrique en raison de l'augmentation plus modérée de l'énergie électrique comparativement à celle des autres combustibles.

D'autres facteurs ont aussi influé sur les modifications de l'industrie sidérurgique ; il s'agit de l'introduction des préréduits et de mini-aciéries près des centres de consommation.

Nous étudierons les trois plus importants schémas d'élaboration de l'acier, à savoir :

— première filière : haut fourneau produisant la fonte brute, mélangeur transformant celle-ci en fonte alliée, convertisseur ou four Martin transformant celle-ci en acier ;

— deuxième filière : four électrique ou four à induction à l'air ou sous vide ;

— troisième filière (*fig.* 1), préconisée par l'Institut de recherche de la sidérurgie française (IRSID), qui pourrait se développer dans les prochaines années : haut fourneau ; réacteur ; décanteur ; nuanceur.

Nous ne ferons que mentionner le réacteur à plasma, filière prometteuse qui fait l'objet de nombreuses études.

Fours à coke

Le coke remplit dans le haut fourneau le triple rôle d'agent réducteur (soit directement, soit par l'intermédiaire du CO provenant de sa combustion), d'agent énergétique (grâce à son pouvoir calorifique élevé) et d'agent mécanique (support permettant la circulation des gaz de combustion).

Le principe de la cokéfaction est la cuisson à l'abri de l'air du charbon à coke pour ne conserver que les composants solides.

Actuellement, les fours de cokerie sont tous du type horizontal. Ils comportent souvent des galeries de visite latérales. Ils sont composés de chambres parallélépipédiques de l'ordre de 12 à 15 m de long, 0,45 m de large et 4 à 6 m de hauteur, à parois en briques de silice, et pouvant contenir 20 t ou plus de charbon. Une batterie est constituée d'un grand nombre de ces chambres (20 à 100) accolées. Le chauffage est assuré par la combustion de gaz de cokerie, de haut fourneau ou de gazogène. L'air insufflé dans le four est préalablement chauffé.

La température de combustion est de l'ordre de 1 200 °C, le défournement se faisant à 1 000 °C. Les houilles utilisées sont des houilles grasses à courte flamme contenant 20 à 24 % de matières volatiles ; elles doivent de plus avoir un pouvoir agglomérant suffisant, ainsi qu'un retrait au refroidissement pour faciliter la sortie du four.

Tandis que le charbon s'agglomère dans le four à coke, celui-ci produit un gaz, dont la composition en volume est la suivante : H_2 (50 à 55 %) ; CO (5 à 8 %) ; CH_4 (25 à 35 %) ; CO_2 (1,5 à 3 %) ; N (8 à 10 %) ; hydrocarbures lourds (1 à 5 %).

fig 1

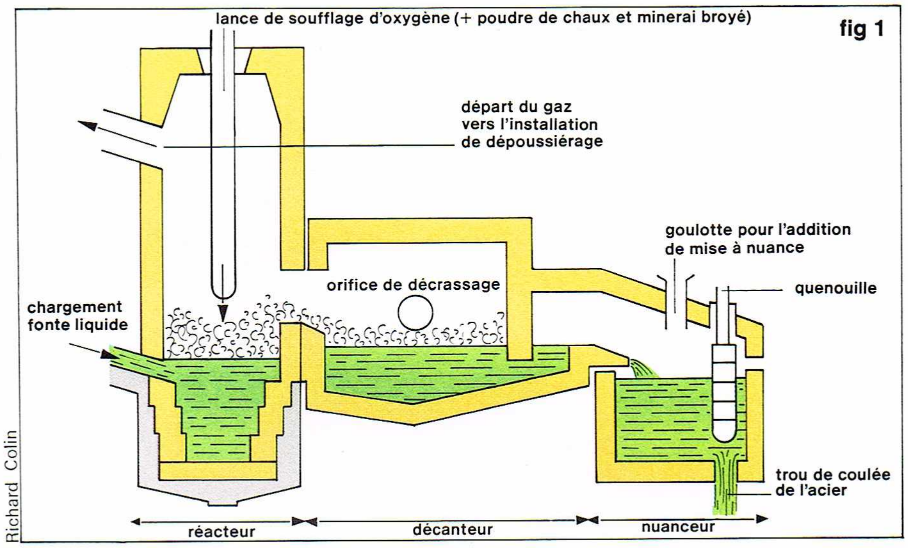

▲ *Figure 1 : affinage continu type* IRSID ; *cette filière permet une coulée continue de l'acier.*

Hauts fourneaux

Le haut fourneau (*fig.* 2) est appelé à fabriquer la fonte à partir principalement du coke, du minerai de fer, et d'additifs introduits par sa partie supérieure (gueulard).

On trouve successivement, en allant du haut vers le bas du haut fourneau, les appareils de conduite et de prise de

fig. 2

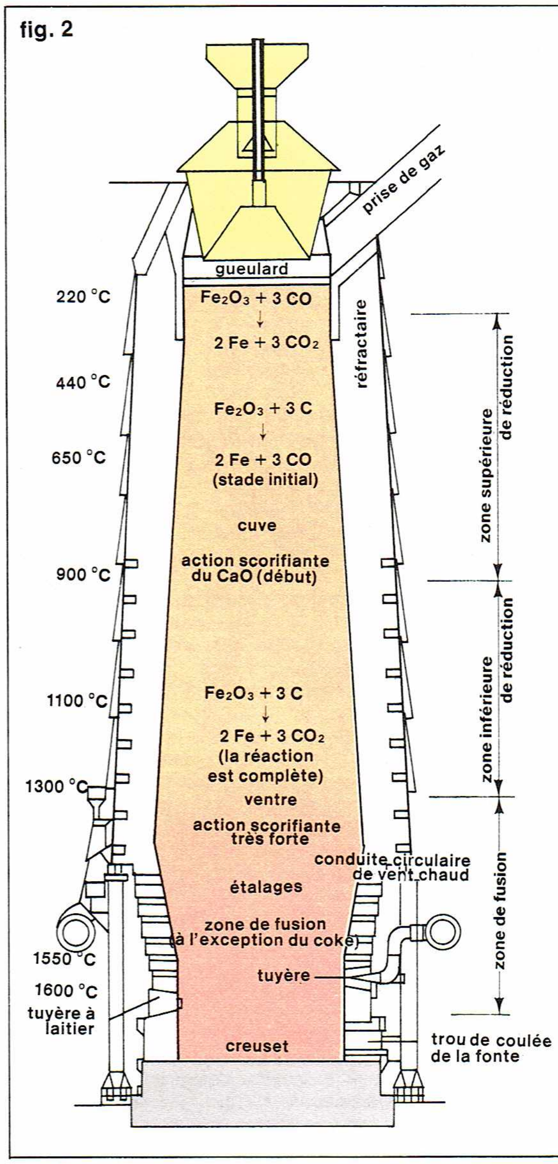

◀ *Figure 2 : schéma d'un haut fourneau (HF).*

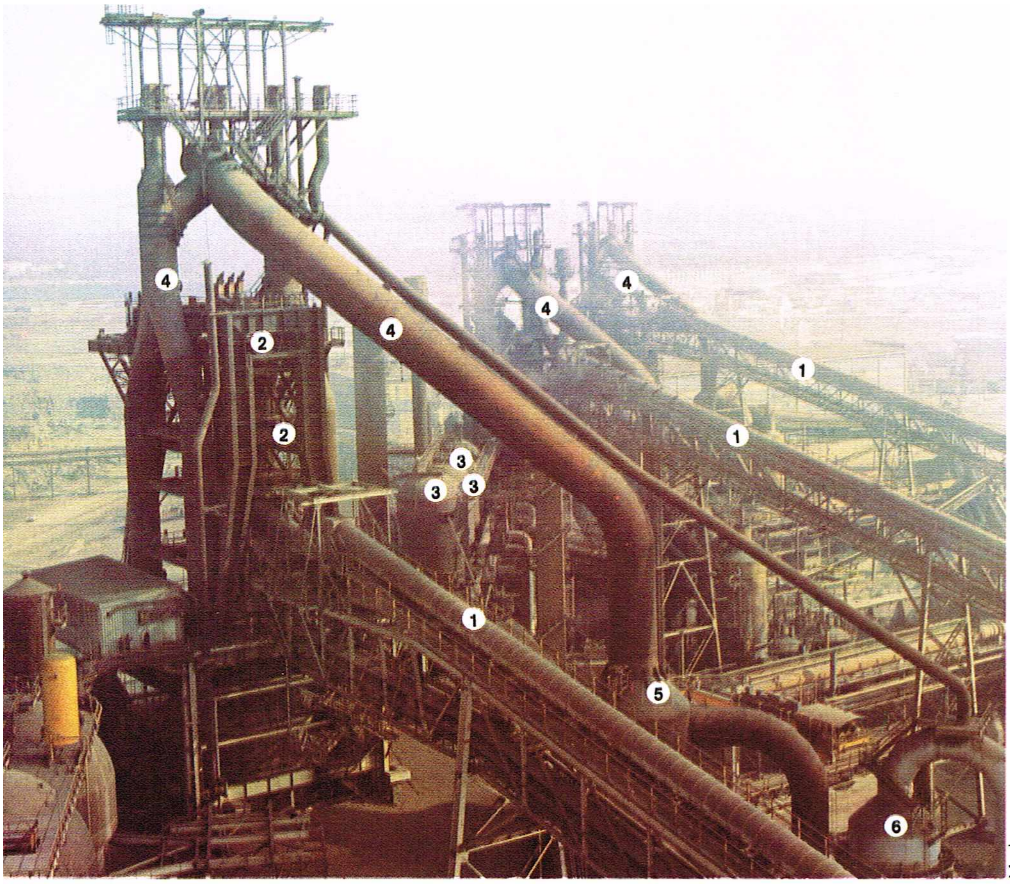

▲ *Haut fourneau d'Italsider à Tarente ; 1, convoyeur de minerai et de coke ; 2, gueulard ; 3, cowpers ; 4, circulation et évacuation des gaz ; 5, dépoussiéreur ; 6, laveur. Tableau I : quelques-uns des plus grands hauts fourneaux mis en service depuis 1969.*

gaz, les trémies, le cône de chargement, le gueulard, la cuve, le ventre, les étalages, le creuset, la sole. C'est dans le creuset que se placent le trou de coulée de la fonte, à la partie inférieure, et la tuyère à laitier.

Les différentes parties d'un haut fourneau doivent être indépendantes les unes des autres pour faciliter l'entretien et les réparations, et pour permettre d'encaisser élastiquement l'effet des dilatations. La plupart de ces diverses parties sont ceinturées par un frettage circulaire ou par un blindage cylindrique ou conique en tôle d'acier.

Briquetage. Les parois intérieures du haut fourneau sont constituées de briques réfractaires, qui étaient autrefois silico-alumineuses (à 30 à 40 % d'Al_2O_3), mais dont la nature varie maintenant suivant la partie considérée. C'est ainsi que le creuset est généralement formé de briques argileuses de forte épaisseur (jusqu'à 2 m pour le fond, et près de 1 m pour les parois), alors que les étalages, qui sont exposés à des températures élevées, pouvant atteindre 1 300 °C, et à l'action corrosive des laitiers, sont faits de briques à 42 à 62 % d'Al_2O_3. La cuve, qui est soumise à des températures plus faibles, inférieures à 1 000 °C, est en général constituée de briques à teneur plus faible en Al_2O_3.

Appareils à chauffer le vent : cowpers. C'est au siècle dernier qu'il a été montré que l'on avait intérêt à utiliser un vent chaud pour augmenter le rendement du haut fourneau. A partir de ce moment-là se sont développés des fours permettant de récupérer la chaleur évacuée par les gaz à la sortie du gueulard, pour chauffer le vent soufflé au niveau des étalages. Dans ces appareils, appelés cowpers, l'air froid parcourt un circuit constitué de briques réfractaires qui a été préalablement chauffé par les gaz sortant du haut fourneau. Bien entendu, il faut au moins deux cowpers, l'un alimenté par l'air à réchauffer, et l'autre par les gaz de haut fourneau. Lorsque ce dernier a été complètement mis en température, on procède à une inversion des rôles.

Évolutions technologiques. Ces dernières années, sous l'influence notamment des Japonais et des Russes, le haut fourneau a subi des améliorations considérables. Il n'est pas sans intérêt d'attirer l'attention sur le fait que, depuis plus d'une décennie, le Japon a construit tous les deux ans, en bord de mer, un complexe sidérurgique aussi important que celui de Fos-sur-Mer. Aussi, au Japon, la production d'acier, qui, en 1955, était inférieure à 20 millions de tonnes, a-t-elle atteint, en 1976, 120 millions de tonnes, soit le cinquième de la production mondiale.

Le *tableau* I donne un aperçu des grands hauts fourneaux mis en service depuis 1969.

Le diamètre du haut fourneau est passé successivement de 9 m (au niveau du creuset) en 1960 à 14 m

Tableau I
Quelques-uns des plus hauts fourneaux mis en service depuis 1969

Pays	Année de mise en service	Hauteur utile (en m)	Volume utile (en m^3)
Espagne	1970	25,50	1 713
France			
Dunkerque	1969	25,90	1 852
Dunkerque	1973		4 615
Japon	1969	27,00	2 605
	1969	25,50	2 508
	1969	29,90	
	1975	—	> 5 000
Luxembourg	1970	25,50	1 786
Pays-Bas	1967	26,12	1 854
R.F.A.	1970	25,10	2 200
U.R.S.S.	1969	30,45	2 400
	1974		5 000

en 1972, et on prévoit 19 à 20 m pour la période 1985-1990. Le volume utile a atteint 2 000 m^3 autour des années 1963 et dépasse maintenant 5 000 m^3. La température des vents est actuellement de 1 250 à 1 300 °C, et est limitée par la tenue des matériaux réfractaires. La productivité nominale atteint 2,5 t/m^3/j, ce qui, pour les gros hauts fourneaux, conduit à une production journalière supérieure à 10 000 t/j.

Des progrès considérables ont été effectués dans la préparation de la charge : minerais criblés, agglomération des fines, pelletisation, préparation du coke, etc., enrichissement du vent en oxygène, remplacement partiel du coke par des combustibles liquides ou gazeux naturels ou synthétiques (gaz réformés). Toutes ces améliorations ont permis d'abaisser la consommation de combustible à un équivalent coke d'environ 450 kg par tonne de fonte produite, contre 650 kg par tonne autour des années 1960. En outre, la conduite des hauts fourneaux est aujourd'hui entièrement automatisée ; le transport des minerais, leur pesée, leur introduction dans le gueulard sont télécommandés, et souvent visualisés sur un écran cathodique. Ces progrès techniques se sont accompagnés d'une amélioration constante des conditions de travail.

Convertisseurs

L'affinage de la fonte pour en faire de l'acier au convertisseur a été découvert en 1855 par Bessemer. C'est lui qui comprit le premier que les impuretés de la fonte, dans une proportion convenable, pouvaient fournir, à elles seules, l'énergie nécessaire à l'affinage de la fonte en vue de l'obtention de l'acier.

Ce procédé consiste donc à faire traverser un bain de fonte liquide par un courant d'air sous pression, dans un appareil dénommé convertisseur, sorte de cornue à garnissage acide, siliceux ou silico-alumineux. L'oxygène de l'air brûle les impuretés et, si la combustion est assez rapide, la température du bain s'élève ; le bain reste fluide malgré l'élévation progressive de son point de fusion au fur et à mesure du départ des impuretés. Ces dernières servent donc de combustible, leur affinité par rapport à l'oxygène étant un facteur essentiel de l'ordre dans lequel elles interviennent. C'est ainsi que brûlent successivement le silicium, le manganèse, le phosphore, le soufre et enfin le carbone. Ces deux derniers corps donnant lieu, avec l'acide ferreux, à des réactions endothermiques.

La technique mise au point par Bessemer ne permettait pas d'obtenir l'acier à partir des fontes à haute teneur en soufre et en phosphore qui étaient fréquentes en France. C'est quelques années plus tard que les frères Martin mettaient au point, pour obtenir un acier de qualité, un nouveau procédé pour fondre de la ferraille dans un four destiné initialement à la fusion du verre (procédé Thomas ou Bessemer basique).

En 1878, Thomas remplaça le réfractaire acide des fours Bessemer par un réfractaire basique (*fig.* 3), et permit ainsi la désulfurisation et la déphosphorisation des fontes réfractaires ; cela fut utilisé dans le four Martin.

Enfin, au début du XXe siècle apparut le four électrique qui permit d'obtenir, dans les premiers temps, surtout des aciers spéciaux à partir de la fusion de la ferraille.

La production d'acier n'évolua pas sensiblement jusqu'à la Dernière Guerre. Elle se répartissait entre les fours Martin (75 %), les fours Thomas-Bessemer (18 %) et les fours électriques (7 %) [voir *tableau* II]. Un renouveau des convertisseurs s'est produit après la Dernière Guerre lorsque le 3 janvier 1949 eut lieu à Lintz, en Autriche, une insufflation volontaire d'oxygène dans la poche en fonte, qui fut suivie le 25 janvier 1949 d'une insufflation d'oxygène parfaitement réussie dans un convertisseur. A partir de ce moment-là, on a assisté à un développement considérable des convertisseurs à oxygène, et on a vu naître plusieurs procédés, dont les principaux sont décrits ci-après :

Convertisseurs à l'oxygène

● *Procédé LD classique* (LD, de Linz et Durer, inventeurs du procédé). Ce procédé s'applique aux fontes non phosphoreuses. Le convertisseur bascule autour de deux tourillons. Le chargement de la fonte et des ferrailles est effectué lorsque le convertisseur est en position inclinée, et l'insufflation d'oxygène se fait lorsque le convertisseur est en position verticale par des lances éclipsables passant par le trou de coulée. La pression d'oxygène est de 10 à 15 bars. Le débit maximal d'oxygène dans les convertisseurs modernes dépasse 1 000 Nm^3/minute.

● *Procédé OLP* (de oxygène, lance, poudre). Ce procédé a été mis au point en 1957 par l'Institut français de recherche de la sidérurgie à Saint-Germain-en-Laye. Les premiers essais industriels furent réalisés à Denain dans un convertisseur Thomas classique de 30 tonnes dont on avait remplacé le fond classique par un fond plein. Dans ce procédé, on injecte de la poudre de chaux finement broyée du début à la fin de l'opération, et on procède à un décrassage intermédiaire de la scorie riche en P_2O_5.

● *Procédé Kaldo* (de Kaling, inventeur du procédé, et Domnavet, lieu où il fut mis en œuvre). Alors que le procédé LD ne permet que de traiter la fonte hématite, le procédé Kaldo permet d'utiliser toutes les fontes, y compris les fontes phosphoreuses ; en fait, il est surtout intéressant dans ce second cas. On procède à la combustion du CO pour donner du CO_2, ce qui nécessite un four tournant dont l'axe est incliné par rapport à l'horizontale (17°), de sorte qu'à chaque rotation le briquetage soit refroidi au contact du métal. La rotation, dont la vitesse peut atteindre 30 tr/mn, s'effectue généralement par deux ceintures circulaires sur des galets dont certains sont moteurs. L'ensemble de ces galets est disposé sur un berceau capable de pivoter autour de l'axe horizontal pour assurer les différentes opérations de chargement, décrassage, qui se font toutes par le bec. Comme on le voit, le briquetage de ce four est beaucoup plus sollicité, et on ne peut guère espérer dépasser 60 coulées avec une maçonnerie en dolomie goudronnée, ou 150 coulées avec un briquetage en dolomie de magnésie cuite.

— *Technologie des convertisseurs.* La cornue est en acier de construction résistant au vieillissement. Les tôles utilisées pour la fabrication des convertisseurs ont de 50 à 100 mm d'épaisseur. Elles sont tapissées à l'intérieur de briques réfractaires en dolomie. En raison des conditions de travail très dures du convertisseur, ce briquetage intérieur doit être repris toutes les 300 coulées environ. Une amélioration a été apportée par l'utilisation d'un briquetage manganeux en oxyde de manganèse MgO, qui permet d'obtenir 500 à 700 coulées sans réfection.

— *Avantages et inconvénients des convertisseurs à oxygène.* L'utilisation de l'oxygène a eu une influence déterminante sur la consommation énergétique dans l'élaboration des aciers. L'acier de convertisseur exige en effet peu de combustible. Un autre intérêt des convertisseurs réside dans leur très haute productivité. L'exécution d'une coulée requiert selon le type de convertisseur entre 30 et 60 mn, et il est possible d'en réaliser une dizaine de milliers par an. Suivant les procédés, il est possible d'opérer toutes les opérations de déphosphorisation, de désulfurisation, etc.

On a assisté ces dernières années à une augmentation considérable de la taille et de la capacité des matériels. Les gros convertisseurs, jusqu'en 1960, étaient susceptibles d'élaborer 100 t d'acier. De 1960 à 1968, on a construit 35 nouveaux convertisseurs, dont 17 fournissent 100 à 280 t d'acier. On cite maintenant des projets de convertisseurs de plus de 400 t. A partir de 1962, la production d'acier dans les grands convertisseurs à oxygène de plus de 150 t a fortement augmenté, pour atteindre 27 % en 1968, et probablement assurer 40 à 50 % de la production d'acier dans les années 1980-85. Ce développement des convertisseurs s'est effectué au détriment des fours Martin et a permis une diminution de la consommation énergétique de plusieurs centaines de thermies par tonne d'acier.

En 1974, la capacité mondiale totale des aciéries équipées de convertisseurs à oxygène a atteint 420 millions de t/an. Avec les équipements en cours de construction ou en projet, on estimait récemment que cette capacité serait portée en 1980 à 560 millions de t (*tableau* II). La plus importante aciérie intégrée doit être actuellement celle d'Italsider à Tarente, en Italie, équipée depuis 1974 de 3 convertisseurs susceptibles de produire 8 millions de t d'acier par an. L'aciérie française récemment installée à Fos-sur-Mer comporte 2 convertisseurs, dont l'un est en service pendant que l'autre est en réfection de briquetage, ce qui permet une production annuelle de l'ordre de 3,5 millions de tonnes d'acier liquide.

fig. 3

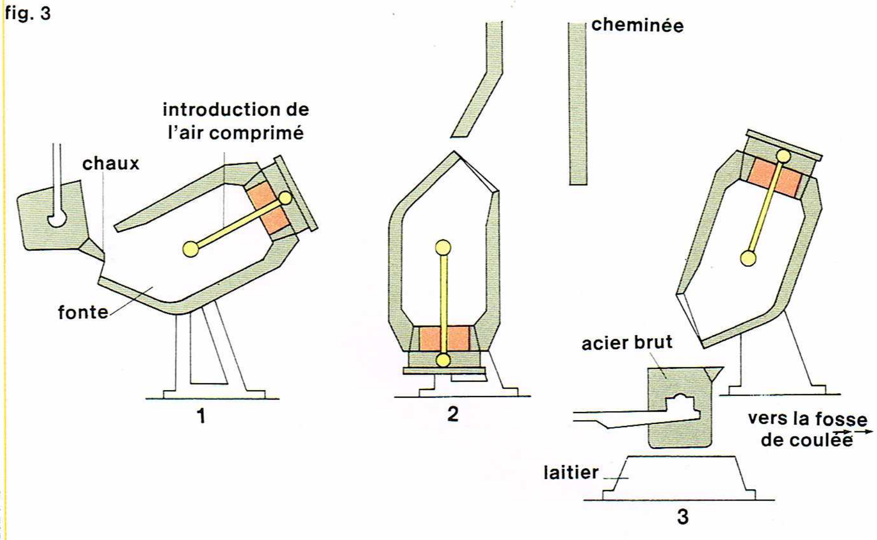

▲ *Figure 3 : représentation schématique du fonctionnement d'un convertisseur Thomas ; positions : 1, décharge ; 2, de soufflage ; 3, de coulée.*

Four Martin

C'est l'ancêtre des fours d'élaboration de l'acier ; il en est aussi le « géant », puisque sa capacité peut atteindre quelque 1 000 t (900 t à Magnitogorsk). A l'inverse des convertisseurs, c'est généralement un four fixe, susceptible d'utiliser comme matières premières aussi bien la fonte que la ferraille, et cela dans une proportion quelconque.

C'est le maître de forges français Pierre Martin qui eut l'idée de transposer à l'élaboration de l'acier la récupération de la chaleur des fumées, utilisée par Frédéric et Guillaume Siemens en 1856 dans les fours verriers. En 1865, il utilisa le gaz de gazogène dans un four de sa forge de Sireuil, près d'Angoulême, devenant ainsi le premier constructeur d'un four de ce type produisant de l'acier.

Un four Martin comprend un *laboratoire* (composé d'une sole supportant le bain, d'une voûte le plus souvent suspendue qui réfléchit la chaleur, de murs comportant des portes de chargement et le trou de coulée), des *brûleurs* et des *récupérateurs de chaleur*.

Le four Martin est un gros consommateur d'énergie. La température de réaction est élevée, et l'action corrosive du bain attaque les matériaux réfractaires.

Des soles acides, puis basiques, ont été successivement mises au point, permettant d'utiliser n'importe quelle matière première. Le revêtement intérieur, réalisé autrefois en silice, est de plus en plus souvent constitué de briques ; la sole est toujours en briques de magnésie recouvertes d'une couche de magnésie ou de dolomie. La vie moyenne d'un four est de 200 à 400 coulées, soit à peu près 2 à 4 mois de marche ; la réfection dure environ 12 jours. Le temps d'élaboration est de plusieurs heures (généralement 4 à 6 heures).

▼ *Tableau II : évolution des productions française et mondiale d'acier depuis 1962 (tous procédés confondus).*

Tableau II	Production (en Mt)	
Année	France	Monde
1962	17	358
1966	20	471
1970	24	591
1976 *	20	650
1980 *		800
1985 *		> 1 000

* Estimations.

I.G.D.A. - De Gregorio

▲ *A gauche, production d'acier dans un four Martin Siemens de 50 tonnes, phase de chargement. A droite, production d'acier dans un four électrique à arc type Héroult de 50 tonnes. Ici, les électrodes sont soulevées et le four découvert pour permettre le chargement.*

La marche du four Martin est fonction de son alimentation qui, en général, est l'une des suivantes : *ore process* (60 à 70 % de fonte liquide, 30 à 40 % de ferraille ; la consommation énergétique est alors de 800 à 900 thermies par tonne d'acier) ; *scrap process* (30 % de fonte solide ou liquide, 70 % de ferraille ; la consommation d'énergie est dans ce cas de 1 200 à 1 400 thermies par tonne d'acier).

Les brûleurs jouent un rôle déterminant en permettant d'obtenir une flamme régulière au-dessus du bain en fusion. Le combustible utilisé peut être du gaz pauvre de récupération ou des gaz riches, par exemple du fuel ou du mazout. Le mélange du combustible et du carburant doit être rapide et régulier, aussi de nombreux perfectionnements ont-ils été apportés, et divers procédés concurrents sont utilisés.

La production horaire des fours Martin est plus faible que celle des convertisseurs ; elle peut varier, suivant les capacités, entre 12 t/h et 50 t/h, pour des fours de 100 à 500 t, en scrap process, et entre 18 t/h et 60 t/h, pour des fours de 100 à 500 t, en ore process.

De même que pour les convertisseurs, l'insufflation d'oxygène au-dessus du bain métallique s'est généralisée ces dernières années, pour améliorer la productivité des fours Martin ; on utilise soit des lances non refroidies traversant les portes des fours, soit des lances refroidies traversant la voûte. Dans certains cas, on est arrivé à augmenter la productivité de 400 %, mais au détriment de la tenue des réfractaires.

Le four Martin permet d'obtenir des aciers très variés : aciers ordinaires au carbone ; aciers fins ; aciers spéciaux.

Fours électriques d'élaboration

On distingue 3 grandes catégories de fours électriques : à arc, à résistance, à induction.

Nous étudierons les fours à arc et à induction qui sont les plus répandus pour l'élaboration de l'acier ordinaire, de l'aluminium, des aciers spéciaux et de la fonte.

Fours à arc

Clerc, puis Moisson et Stassano ont créé les premiers modèles industriels de fours à arc. Dans ces fours, les électrodes sont placées au-dessus du métal, et l'arc électrique jaillit entre les électrodes au-dessus du bain. La chaleur est fournie à celui-ci principalement par rayonnement. Actuellement, la quasi-totalité des fours à arc de ce type est alimentée au courant alternatif triphasé et est utilisée pour l'élaboration de la fonte, des aciers spéciaux et des aciers ordinaires.

Dans le four Héroult, le courant électrique jaillit d'une électrode en direction du bain, ou plutôt de la scorie qui le recouvre, et traverse celui-ci avant de retrouver une autre électrode.

Suivant le cas, la sole peut être ou non conductrice. Les fours à sole entièrement conductrice sont utilisés dans la fabrication par électrolyse ignée de l'aluminium et des ferro-alliages.

Dans les fours à arc, la puissance électrique est fournie par des transformateurs (en général, 2 transformateurs en cascades) comportant des dispositifs de réglage de la tension, laquelle doit être variable soit continûment, soit par valeurs discrètes (gradins), entre moins de 100 V et plus de 400 V. De plus, le facteur de phase étant relativement faible, il est nécessaire de prévoir de puissantes batteries de relèvement du cos φ.

On estime actuellement que la puissance électrique installée doit être comprise suivant les cas entre 200 et 600 kVA par tonne d'acier.

On entend par UHP les fours modernes à ultra-haute puissance dont la productivité est élevée. C'est ainsi que le four de 70 t installé à Thionville par Usinor est capable de fournir annuellement plus de 200 000 t de lingots. Les plus gros fours UHP connus actuellement ont une capacité de 400 t.

Dans un UHP, la cuve repose sur un berceau en tôle soudée. Elle comporte de puissants vérins qui assurent le basculement du four au moment de la coulée. Elle est réalisée en tôle d'acier soudée renforcée par des nervures donnant une grande rigidité à l'ensemble. La virole supérieure peut être ou non solidaire de la partie inférieure. Cette disposition facilite les opérations d'entretien et de réfection de la virole supérieure, qui peut être déposée et remplacée par une autre. La partie supérieure de la cuve (voûte) a la forme d'une calotte sphérique maçonnée à l'intérieur et refroidie par circulation d'eau dans les grands fours.

Les revêtements réfractaires intérieurs sont, en général, pour la voûte, en SiO_2, ou plus récemment en Al_2O_3, les épaisseurs de revêtement variant de 250 à 350 mm et permettant de réaliser 50 à 250 coulées, et pour la cuve, en dolomie goudronnée de forte épaisseur (500 mm).

Les électrodes, quant à elles, sont constituées de cylindres en graphite dont le diamètre varie, avec la puissance des fours, de 100 à 610 mm pour une longueur de 1 à 3 m. La consommation d'électrodes est un poste important dans le coût de l'acier électrique. Elle varie de 5 à 10 kg par tonne d'acier élaboré. Les électrodes sont raboutées entre elles par filetage interne.

Le *coût de l'acier électrique UHP* est conditionné par deux postes : la consommation d'électrodes et la consommation d'électricité, qui se situe de nos jours entre 400 et 550 kWh/t pour les élaborations classiques, et jusqu'à 700 kWh pour les élaborations spéciales.

Jusqu'à la Dernière Guerre, l'acier électrique était plus cher que les aciers élaborés au four Martin ou au convertisseur, et son utilisation était réservée à des usages particuliers, principalement à la fabrication des aciers spéciaux. Actuellement, il n'en est plus ainsi, et l'acier électrique explique le succès des mini-aciéries qui ont vu le jour ces dernières années dans tous les pays, et particulièrement en Italie.

Un perfectionnement récent a été apporté au four électrique en utilisant des ferrailles préalablement pré-

chauffées à 500 °C, voire 700 à 800 °C, ce qui réduit de plus de 10 % la consommation d'électricité et d'électrodes.

Fours à induction

Les fours à induction peuvent être alimentés en basse, moyenne ou haute fréquence et être formés d'une poche (ou creuset) entourée de l'enroulement inducteur, ou comporter un ou plusieurs canaux. Les fours à canaux peuvent être comparés à un transformateur dont le primaire est constitué de l'enroulement électrique et le secondaire d'un ou plusieurs canaux, ou anneaux, de métal liquide, ce qui signifie que cette dernière catégorie de four nécessite la présence, en permanence, d'un bain de métal liquide appelé « *pied de bain* ».

Les fours à induction d'élaboration comme ceux de réchauffage se différencient des autres types de fours par le fait que les calories sont générées dans le métal lui-même, permettant ainsi d'atteindre des rendements énergétiques élevés et des possibilités de fusion très rapides.

Comme les autres fours électriques, les fours à induction sont de conduite facile. Le choix de la fréquence pose les mêmes problèmes dans les fours de fusion que dans les fours de réchauffage. En fait, pour les fours à creuset, les fréquences sont liées à la capacité du four :

Capacité du four en t	> 20	1 à 0,5	0,5 à 0,05	0,05 à 0,01
Fréquence pour l'acier en Hz	50 à 500	500 à 1 000	1 000 à 3 000	3 000 à 10 000

- *Fours à canal* (50 Hz)

Les consommations de ces fours en kWh par tonne de métal fondu sont pour : les laitons ,180 à 240 ; le bronze, 250 à 290 ; le cuivre pur, 280 à 380 ; les métaux légers, 350 à 450 ; le zinc, 90 à 100 ; la fonte (fusion), 400 à 500 ; la fonte (surchauffe de 100 °C), 40 à 45.

- *Fours à creuset, moyenne fréquence*

Ces fours, très utilisés dans l'élaboration des aciers spéciaux, peuvent atteindre des capacités importantes, comprises entre 50 et 100 t. La puissance installée est liée à la capacité (P en MW # capacité en t, 1,5 à 2), la fréquence pouvant varier entre 500 et 10 000 Hz, et la durée d'élaboration de 30 mn à 4 h.

Le courant alternatif, qui était, jusqu'à ces dernières années, fourni par des alternateurs, l'est maintenant, de plus en plus fréquemment, par des groupes statiques à thyristors. Les conducteurs électriques ceinturant la cuve réfractaire sont en général en cuivre creux, traversés et refroidis par circulation d'eau. Deux technologies d'inducteurs s'affrontent : certains constructeurs isolent d'une façon très sérieuse les conducteurs en cuivre pour éviter les amorçages entre spires qui dégénèrent souvent en accident grave (jusqu'à la destruction du four par explosion). D'autres, en raison de la faible tension entre spires (quelques volts), préfèrent disposer de conducteurs nus indéformables ; cela permet de diminuer considérablement le flux de fuite et augmente donc la puissance massique, le prix du four se trouvant abaissé (jusqu'à 20 %).

Ce type de four peut démarrer avec des charges froides, alors que, pour un four basse fréquence, il est nécessaire de prévoir un pied de bain.

- *Fours à creuset à fréquence industrielle*

Ces fours sont de plus en plus utilisés, notamment dans la fabrication des fontes spéciales à graphite sphéroïdal. Les capacités sont en constante évolution.

La construction proprement dite de ces fours se rapproche de celle des fours moyenne fréquence. Elle est relativement légère et peu encombrante. A partir du centre du four, en allant vers l'extérieur, on trouve successivement le pisé ou réfractaire, l'inducteur, le circuit magnétique, la cuve métallique protégée ou non par des écrans amagnétiques ayant pour objet de limiter les pertes dues au flux de fuite. Toujours pour limiter les pertes, les circuits magnétiques sont réalisés en tôle de faible épaisseur et à pertes extra-réduites. Le garnissage réfractaire constitue une des parties les plus importantes de ce type de four. C'est en général un pisé placé entre l'enroulement et une forme en tôle représentant le contour du creuset à réaliser. L'agglomération du pisé se fait lors d'un fonctionnement du four, préalable à son utilisation, sans que l'on ait à opérer une cuisson ou un séchage particulier. Suivant les cas, le pisé peut être basique ou acide.

De même que pour les autres fours électriques, il est nécessaire d'adjoindre des batteries de condenseurs destinées à relever le facteur de puissance.

Dans la plupart des fours de construction européenne, la seule évacuation possible d'une fuite éventuelle d'eau, à la suite du percement (usure mécanique, amorçage électrique, etc.) d'un conducteur refroidi par eau, est l'intérieur du creuset après percement du pisé. Ce type d'incident conduit à une vaporisation extrêmement violente et à une projection hors du creuset du métal liquide, accident heureusement peu courant. Cela explique néanmoins que ces fours soient équipés de nombreux dispositifs de sécurité.

En contrepartie, ces fours présentent de nombreux avantages associés à l'utilisation du courant électrique : facilité de conduite, rapidité d'élaboration, non-pollution, marche intermittente possible, etc.

Les fours de traitements thermiques jusqu'à 1 600 °C

On appelle traitement thermique l'opération qui consiste à obtenir un changement de propriété d'un produit ou d'une pièce métallique en surface ou dans la masse, ou à modifier sa forme sous l'effet de la température. Certaines de ces modifications de forme ou de propriété peuvent certes être obtenues à froid, mais nous ne considérerons ici que celles qui mettent en œuvre un chauffage total ou partiel des pièces traitées. En règle générale d'ailleurs, la température facilite ce changement de propriété ou de forme et lui est même indispensable (voir chapitres *Traitements thermiques* et *Traitements de surface*).

Il existe en France environ 15 000 fours destinés aux traitements thermiques.

On peut classer les fours suivant plusieurs critères : le mode de chauffage et le combustible utilisé ; la température maximale de service ; la fonction remplie ; la forme et le principe de fonctionnement du four ou ses caractéristiques particulières.

Éclairons ces différents aspects.

Mode de chauffage. On distingue :

les *fours à flamme :* fours alimentés en gaz pauvre (gaz de haut fourneau par exemple) ; fours à gaz ; fours à combustible liquide (fuel, mazout) ;

les *fours électriques :* à résistance ; à induction ; à arc ; à haute fréquence ; à micro-ondes ;

les *fours divers :* à bombardement électronique ; à effluve, etc.

En fait, trois types d'énergie sont essentiellement utilisés, comme le montre le *tableau* III. Les combustibles liquides et gazeux alimentent les très gros fours de traitement thermique ou de réchauffage ; les fours électriques sont en général de faible ou de moyenne puissance.

Température et fonction remplie. Pour chaque métal ou alliage, un traitement thermique déterminé se fait à une température bien précise ; par exemple :

— Entre 150 et 300 °C :

Stabilisation des aciers ; revenu des aciers à haute teneur en carbone ; revenu et vieillissement des alliages légers ; bleuissage des aciers ; traitement de relaxation des contraintes.

— Entre 300 et 550 °C :

Relaxation des contraintes résiduelles de soudures ; recuit du cuivre ; traitement des alliages légers ; nitruration.

— Entre 500 et 750 °C :

Traitement de relaxation des contraintes ; recuit des soudures et de certains aciers ; recuit des métaux cuivreux ; stabilisation de la fonte ; revenu des aciers ordinaires.

— Entre 750 et 900 °C :

Recuit de certains aciers ; trempe des aciers ; cémentation au carbone, carbo-nitruration ; recuit du maillechort et du cupronickel.

— Entre 900 et 1 000 °C :

Recuit et trempe des aciers spéciaux ; cémentation au carbone ; traitement des aciers inoxydables et réfractaires ; traitement des fontes malléables à cœur blanc et à cœur noir ; traitement d'homogénéisation.

— Entre 1 000 et 1 350 °C :

Traitement des aciers rapides.

Tableau III

Fonctions remplies par les fours de traitement thermique en France et énergies de chauffage utilisées

Traitement	Énergies de chauffage utilisées	$\frac{Pi}{Pt} \times 100$ (1)	$\frac{Pu}{Ptu} \times 100$ (1)
Recuit haute température (θ > 800 °C)	Électricité Gaz Fuel	14 49 37	28 41 31
Trempe	Électricité Gaz Fuel	31 48 21	52 33 15
Revenu	Électricité Gaz Fuel	44 29 27	66 18 16
Recuit basse température (θ < 800 °C)	Électricité Gaz Fuel	32 27 41	53 19 28
Cémentation	Électricité Gaz Fuel	22 70 8	41 53 6
Carbonitruration	Électricité Gaz	7 93	16 84
Nitruration	Électricité	100	100
Nitruration douce Sulfimisation...	Électricité Gaz	47 53	70 30
Total (*)	Électricité Gaz Fuel	26 46 28	46 34 20

(*) Peu représentatif à cause de la non-pondération des branches entre elles.
(1) Pi = puissance installée à l'énergie considérée
Pt = puissance installée totale pour les trois énergies
Pu = puissance utile = Pi × η avec : η = 1 pour l'électricité
η = 0,40 pour le gaz et le fuel
Ptu = puissance totale utile installée = Pi électricité + 0,40 Pi combustible.

▲ *Tableau III : fonctions remplies par les fours de traitement thermique en France, et énergies de chauffage utilisées.*

Formes, principes de fonctionnement, caractéristiques particulières. Un des éléments de classement des fours, souvent pris en compte, est l'atmosphère dans laquelle est placée la pièce à traiter. C'est ainsi qu'on distingue les fours à atmosphère contrôlée, à vide, à bain de sel, etc.

Les *fours à atmosphère contrôlée* sont utilisés généralement pour la réalisation de traitements thermochimiques, l'atmosphère étant alors active, ou pour l'exécution de traitement de masse sous une atmosphère neutre ou protectrice.

Les *fours sous vide* permettent d'obtenir de meilleurs résultats quant à l'état des surfaces des pièces traitées.

Les *fours à bain de sel* dans lesquels le chauffage de la charge est effectué par immersion dans un sel produit à l'état liquide, permettent d'obtenir des températures très précises. Suivant leur composition chimique, les sels sont aussi employés pour des opérations simultanées de revenu ou recuit et de cémentation, nitruration, etc.

Il en est de même de tous les fours à atmosphère contrôlée qui permettent d'obtenir par la présence d'un gaz approprié des traitements superficiels d'oxydation, de réduction, de décarburation, etc.

On peut aussi classer les fours d'après leur mode de fonctionnement (continu, discontinu, à tunnels, à passage, etc.), d'après leur forme ou leur principe de fonctionnement.

Il est exclu de décrire la totalité des technologies des fours, dont le nombre est trop élevé. On se limitera aux fours les plus importants et à leurs principaux organes constitutifs.

Principaux organes constitutifs - Caractéristiques

— *Carcasse*

Suivant les cas, les fours sont entièrement réalisés en maçonnerie ou sont faits d'un assemblage de tôles et de panneaux métalliques recouverts intérieurement de briques réfractaires ou d'une enceinte métallique en acier réfractaire. C'est ce dernier mode de construction qui est le plus répandu, en particulier dans les très gros fours.

La rigidité des fours conditionne leur robustesse, compte tenu des variations de température et des dilatations qui apparaissent. Ils sont en général très massifs et comportent des armatures, des profilés et des tirants métalliques. De plus, dans le corps des fours à atmosphère contrôlée ou à vide, se pose un problème d'étanchéité qui conduit à des constructions entièrement soudées qui font l'objet de vérifications précises.

— *Chambre de chauffe*

C'est le conteneur de la chaleur, ou si l'on préfère l'enceinte qui doit conserver au mieux la chaleur pour limiter les dépenses de combustible. Il est bien évident que le four idéal serait, de ce point de vue, un vase de Dewar.

La chambre de chauffe est réalisée en tôlerie d'acier ordinaire dans le cas des fours à température basse ou moyenne, en aciers réfractaires ou en matériaux réfractaires silico-alumineux pour les températures élevées.

Les matériaux généralement utilisés sont des aciers : à 17 % de chrome pour les températures entre 550 et 600 °C; des aciers austénitiques 18/8 jusqu'à 650 °C; des aciers 25/20 (25 % chrome, 25 % nickel) pour des températures un peu supérieures. Au-delà de 650 °C, les chambres de chauffe sont toujours réalisées en ou tapissées de briques réfractaires silico-alumineuses. Depuis peu de temps, on voit apparaître des matériaux réfractaires, dénommés réfractaires légers, qui permettent d'augmenter les performances des fours, électriques en particulier.

— *Brûleurs*

Dans les fours à flamme, le brûleur est un organe très important qui conditionne la bonne marche du four.

Il existe deux catégories de *brûleurs à gaz* suivant que le mélange est effectué préalablement ou au contraire réalisé à la sortie du brûleur. On distingue aussi les brûleurs à flamme longue et les brûleurs à flamme courte.

Les *brûleurs pour combustible liquide* peuvent être répartis, pour les fours de traitements thermiques à combustible liquide, de la façon suivante : brûleurs à pulvérisation à air moyenne pression; brûleurs à pulvérisation autopression; brûleurs à pulvérisation par la vapeur; brûleurs à pulvérisation par pression d'huile; brûleurs mixtes à combustible liquide ou gazeux.

— *Résistances électriques*

Leur composition chimique est fonction de la température de service. Jusqu'à 500 °C, on utilise des alliages à base de fer et nickel, éventuellement avec des additions de chrome ou de cuivre, telles que 10-12 % nickel, 12-20 % chrome, le reste en fer. Pour les températures de l'ordre de 1 000 à 1 200 °C, on emploie des alliages à base de fer, nickel, chrome ou de nickel-chrome, et de 1 200 à 1 350 °C des alliages à base de fer, chrome, aluminium, avec parfois des additions de terres rares. Pour les températures supérieures, on fait usage de métaux spéciaux tels que le platine, le platine rhodié, le molybdène, le rhodium, le tungstène, etc.

Pour la constitution des résistances des fours, les normes AFNOR C 31-711 et C 31-712 donnent les caractéristiques et les dimensions des fils, tiges et bandes d'alliages en nickel-chrome, fer-nickel-chrome, fer-aluminium-chrome. Les résistances les plus utilisées en France sont en alliage Kanthal (Fe-Cr-Al).

Une nouvelle norme en cours de préparation (fin 1977) doit traiter des résistances électriques moulées pour fours industriels, dans le cas des alliages 65/15 et 70/30 (*tabl.* IV). Les deux sections de résistances normalisées seront 240 et 200 mm². La valeur moyenne de résistance par unité de longueur à la température de 20 °C, pour le modèle « 240 », est de $5 \cdot 10^{3}\ \Omega \cdot m^{-1}$, et, pour le modèle « 200 », de $6 \cdot 10^{-3}\ \Omega \cdot m^{-1}$. Les températures limites d'utilisation sont de 1 150 °C et de 1 250 °C, pour les alliages 65/15 et 70/30 respectivement.

Les structures relativement massives permettent un emploi dans une atmosphère corrosive. La norme prévoit

un contrôle des caractéristiques des résistances et, dans une annexe, une méthode de calcul d'une installation de traitements thermiques utilisant de telles résistances.

Cette nouvelle norme devra permettre l'interchangeabilité des résistances dans les fours électriques.

En dehors des résistances moulées, des résistances électriques peuvent être utilisées soit sous forme boudinée, soit placées à l'intérieur de tubes blindés comportant une résistance hélicoïdale, soit sous forme d'éléments cylindriques de rubans, de tiges ou de barres, soit éventuellement sous forme de chaînes ou de grillages. Elles sont aussi présentées, dans certains cas, emprisonnées dans un tissu d'amiante déformable.

— *Mesures des températures, régulation*

Les mesures des températures à l'intérieur des fours sont nécessaires si l'on veut obtenir une régulation convenable de fonctionnement. Il existe plusieurs méthodes de régulation, notamment les méthodes de « tout ou rien » ou « tout ou veilleuse » (pour les fours à flamme), les méthodes de régulation par action préventive ou sur programme qui peut être modulé, les méthodes de régulation proportionnelle à l'écart. Le choix entre ces diverses méthodes est fonction de la nature et de la précision du traitement thermique effectué.

La régulation proportionnelle à l'écart de température est en général la plus simple, mais elle ne permet pas de passer rapidement — ou lentement suivant le cas — certaines températures correspondant à des points de transformation. Dans ce cas, il faut choisir une régulation sur programme. En outre, pour assurer une bonne homogénéisation des températures, il est nécessaire de prévoir le dépassement de la température visée si l'on ne veut pas que le temps d'obtention de celle-ci soit trop long (*fig.* 4).

La mesure des températures est généralement opérée par un thermocouple (fer-constantan jusqu'à 500 °C, chromel-alumel jusqu'à 1 050 °C, nickel, nickel-chrome jusqu'à 1 200 °C et platine, platine rhodié jusqu'à 1 400 °C). Elle peut néanmoins être aussi opérée par les méthodes classiques, thermostats à dilatation, résistances thermométriques ou lunettes à radiation totale (à partir de 900 °C).

— *Transmission de la chaleur*

Celle-ci est effectuée suivant le cas par conduction, rayonnement ou convection. Le transport des calories implique l'existence de différences ou gradients de température entre la source chaude (flamme ou atmosphère du four électrique, par exemple, ou résistance) et le corps à chauffer.

— *Atmosphère*

L'ambiance dans laquelle la charge ou la pièce est traitée a une grande importance.

En dehors des fours à vide, cette ambiance peut être la suivante : solide (pièce placée sur une plaque chauffante, sur un cément en poudre, etc.) ; liquide (par exemple, dans un bain de sel en vue d'assurer une protection à l'oxydation ou un chauffage plus rapide ou des températures plus précises) ; gazeuse (dans ce cas, l'atmosphère peut être soit naturelle, soit artificielle). Dans ce dernier cas, l'atmosphère peut être active — par exemple hydrogène ou atmosphère réductrice, azote pour la nitruration — ou inactive — cas des fours à trempe à haute température, en vue d'empêcher toute attaque chimique ou oxydation.

Fours continus (fig. 5)

Il s'agit de fours à fonctionnement continu dans lesquels le déplacement de la charge est assuré par des dispositifs aussi nombreux que variés. L'énergie calorifique peut aussi bien être apportée par une flamme que par un chauffage électrique.

Fours à traction

Quand les pièces à traiter en continu se présentent sous forme de bandes ou de fils, on peut tout simplement les tirer à travers le four au moyen d'une bobineuse ou d'une enrouleuse placée côté sortie.

Citons ici le traitement des feuillards et bandes en acier (recuit et trempe), en cuivre et laiton (recuit), et celui des fils d'acier (recuit, patentage, hypertrempe des fils d'acier inoxydable), etc.

Les fours de recuit de bandes sont soit verticaux, soit horizontaux, la bande formant une ou plusieurs boucles verticales ou horizontales suivant la production à assurer

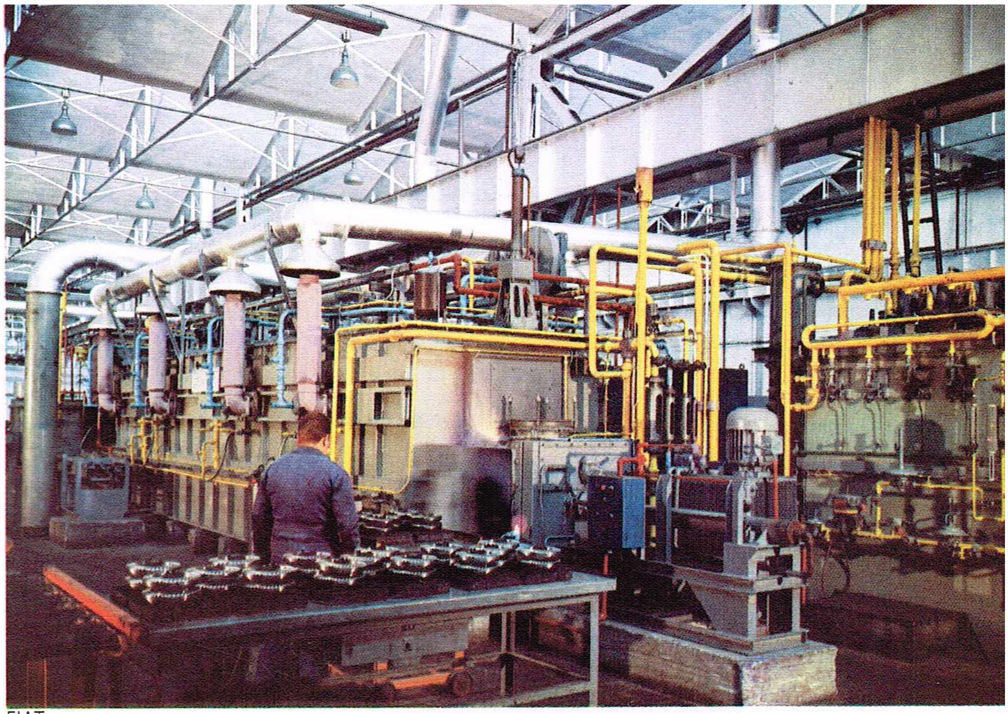

FIAT

▲ ***Four de traitement thermique à flamme.***

(*fig.* 5 a). Ces fours sont à atmosphère contrôlée. Ils peuvent être suivis de fours de galvanisation ou d'étamage permettant, par un seul passage, d'assurer successivement le recuit des produits et le revêtement métallique.

Les fours de trempe de feuillards d'acier sont le plus souvent horizontaux. Une installation complète comprend : une dérouleuse, une soudeuse par points, le four de chauffage avant trempe, le bac de trempe à l'huile, le four de revenu, une cisaille, une enrouleuse.

Quant aux fours de recuit de fils, ils sont en général du type dit à tubes-moufles, analogue à celui de la *figure* 5 f_3. Le dispositif d'entraînement est placé à la sortie du four (enrouleuse).

Les fours de patentage comprennent un four de chauffage à 900 °C environ avant trempe (four à tubes-moufles), suivi d'un bain de plomb à 450 °C dans lequel les fils plongent à leur sortie du four.

Fours à convoyeur à fils

Ces fours sont dérivés directement du four à chaînes. Les pièces y sont entraînées, posées sur des câbles commandés par tambours extérieurs (*fig.* 5 b). Beaucoup d'étuves (par exemple pour séchage de pièces ou produits relativement légers avant émaillage) sont équipées de ce convoyeur dont l'avantage essentiel est le faible poids par rapport au poids des pièces séchées. Pour le traitement thermique, la principale application est le recuit des tôles et produits plats en alliages légers.

Fours à chaînes

Les fours continus à chaînes sont des fours à passages, dans lesquels l'avancement des produits est assuré par une ou plusieurs chaînes. Les chaînes peuvent être porteuses et se trouvent alors chauffées en totalité, ou simplement tractrices ; dans ce dernier cas, elles peuvent être placées en zone relativement froide, et elles entraînent les pièces soit par des doigts (chaînes placées sur la

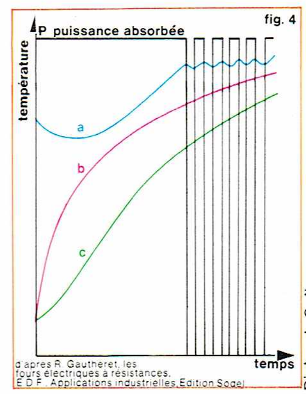

Richard Colin

▲ ***Figure 4 : pour un four discontinu (intermittent), allure de la remontée de la température de la chambre de chauffe*** (a), ***de la température à la surface de charge*** (b) ***et de la température à l'intérieur de ladite charge*** (c).

▼ ***Tableau IV : composition des alliages 65/15 et 70/30 utilisés pour la fabrication de résistances de fours électriques de traitement thermique.***

Tableau IV

Composition des alliages 65/15 et 70/30 utilisés pour la fabrication des résistances de fours électriques de traitement thermique

Composants	Pourcentage en poids	
	Alliage 65/15	Alliage 70/30
Ni	64 à 66	(solde)
Cr	17 à 18	27 à 30
Si	2,2 à 2,6	1,5 à 2,5
Mo	1,8 à 2,2	—
Mn	1,2 à 1,5	1,2 à 1,5
C	0,6 à 0,7	< 0,50
S	< 0,05	< 0,05
P	< 0,05	0,05
Fe	(solde)	—

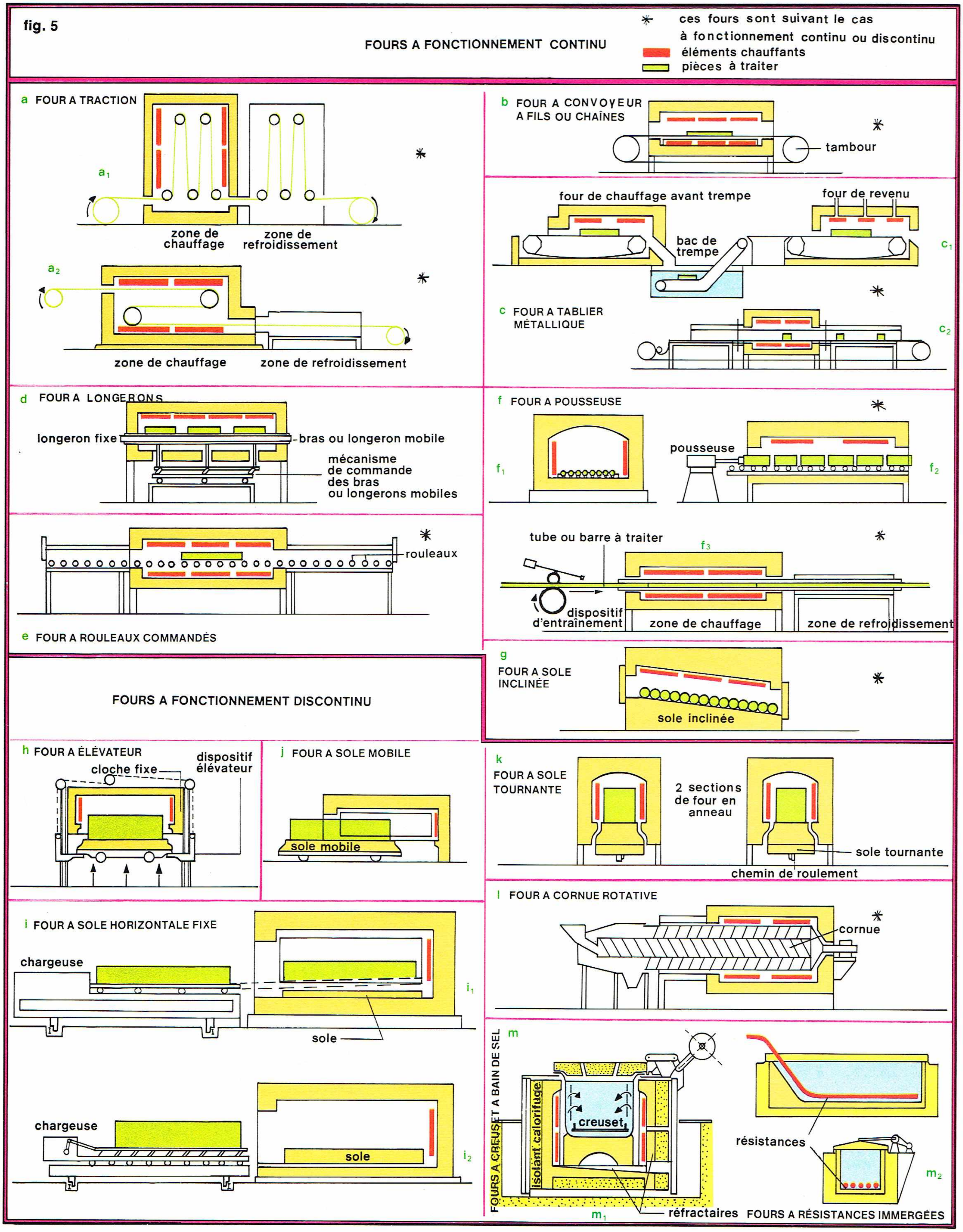

fig. 5
FOURS A FONCTIONNEMENT CONTINU
* ces fours sont suivant le cas à fonctionnement continu ou discontinu
éléments chauffants
pièces à traiter
a FOUR A TRACTION
a1
zone de chauffage
zone de refroidissement
a2
zone de chauffage
zone de refroidissement
b FOUR A CONVOYEUR A FILS OU CHAÎNES
tambour
four de chauffage avant trempe
four de revenu
bac de trempe
c1
c FOUR A TABLIER MÉTALLIQUE
c2
d FOUR A LONGERONS
longeron fixe
bras ou longeron mobile
mécanisme de commande des bras ou longerons mobiles
rouleaux
e FOUR A ROULEAUX COMMANDÉS
f FOUR A POUSSEUSE
f1
pousseuse
f2
tube ou barre à traiter
f3
dispositif d'entraînement
zone de chauffage
zone de refroidissement
g FOUR A SOLE INCLINÉE
sole inclinée
FOURS A FONCTIONNEMENT DISCONTINU
h FOUR A ÉLÉVATEUR
cloche fixe
dispositif élévateur
j FOUR A SOLE MOBILE
sole mobile
k FOUR A SOLE TOURNANTE
2 sections de four en anneau
sole tournante
chemin de roulement
i FOUR A SOLE HORIZONTALE FIXE
chargeuse
i1
sole
chargeuse
sole
i2
l FOUR A CORNUE ROTATIVE
cornue
m
FOURS A CREUSET A BAIN DE SEL
isolant calorifuge
creuset
m1
réfractaires
résistances
m2
FOURS A RÉSISTANCES IMMERGÉES
Richard Colin

partie inférieure de la sole du four), soit par des palonniers (chaînes placées à la voûte du four). Les roues dentées d'entraînement peuvent être placées dans le four ou à l'extérieur. Il est plus simple de mettre les roues à l'extérieur, car ainsi, tout l'ensemble mécanique d'entraînement travaille à froid, et sa surveillance et son entretien sont plus aisés; toutefois, les chaînes se refroidissent à leur sortie du four, et la consommation d'énergie est augmentée.

Les applications des fours à chaînes porteuses sont pratiquement les mêmes que celles des fours à pousseuse.

Fours à tabliers métalliques

Les pièces sont véhiculées dans ces fours par un tapis transporteur.

Les tambours d'entraînement et de renvoi peuvent être extérieurs ou intérieurs au four.

— Les tabliers en tôles chaudronnées, étant formés d'éléments articulés, résistent beaucoup mieux. Ils sont utilisés jusqu'à 600 °C environ s'ils sont fabriqués en acier ordinaire, jusqu'à 1 000 °C environ s'ils sont en acier réfractaire.

La *figure* 5 c_1 représente une installation continue de trempe et de revenu de pièces d'acier.

D'une façon générale, chaque fois que le mode d'alimentation du four le permet, on place les tambours de commande d'un tablier moulé dans le four pour éviter son refroidissement par sa sortie à l'air, car un tablier moulé a une assez forte capacité calorifique (poids 55 kg/m^2 environ).

Ces types de fours se prêtent bien à la mécanisation des installations. Ils peuvent travailler sous atmosphère contrôlée (opérations de recuit et trempe) [*fig.* 5 c_2].

— Par leur grande souplesse et le faible poids mort qu'ils constituent, les tabliers tissés sont une bonne solution pour les traitements sous atmosphère contrôlée tels que le recuit de pièces en acier, cuivre et alliages cuivreux, nickel et ses alliages, argent, etc.

Tous ces fours à tablier sont très répandus dans l'industrie; ils se construisent en toutes dimensions et toutes puissances, de quelques kW à plusieurs centaines de kW. Dans le cas de productions très importantes, pour diminuer l'effort de traction sur le tablier, on munit la sole du four de rouleaux commandés ou non qui tournent à la vitesse d'avancement du tablier.

Fours à longerons (pas de pèlerin)

L'avancement des pièces est assuré par des bras parallèles au grand axe du four, bras placés à la sole et commandés par un mécanisme extérieur au four, qui soulèvent les pièces, leur assurent une translation en avant, les déposent sur la sole, reviennent en arrière en position basse, éclipsés dans la sole, puis se lèvent en reprenant les pièces, et ainsi de suite (*fig.* 5 d). Ces fours sont, par exemple, utilisés pour les réchauffages de plaques et de billettes d'alliages légers ou cuivreux, et pour les chauffages de barres dans les fours à enfournement ou défournement latéral.

Fours à rouleaux commandés

L'avancement des produits est assuré par des rouleaux, plus ou moins espacés suivant la nature des pièces à traiter. Ils sont disposés sur un même plan, perpendiculairement à l'axe longitudinal du four. Leurs extrémités traversent les parois latérales dans des passages spécialement aménagés et sont supportées par des paliers situés à l'extérieur du four. A l'une des extrémités est claveté un pignon qui permet l'entraînement du rouleau, soit par couple conique, soit par pignon et chaîne. Il suffit d'entraîner tous les rouleaux à la même vitesse pour provoquer l'avancement des produits dans le four (*fig.* 5 e).

Cette solution permet dans de nombreux cas de supprimer le poids mort à chauffer que constituent les supports de charge, les transporteurs à tablier ou à chaînes. Lorsque la forme des produits nécessite néanmoins des supports, le poids de ces derniers est réduit au minimum.

Les applications de ce type de fours sont très nombreuses, car il se prête à tous les traitements thermiques. Avec ces appareils, il est facile de faire varier la vitesse d'entraînement des rouleaux en fonction de la dimension des produits traités. En outre, comme il est aisé de faire suivre la zone de chauffage de zones de refroidissement (lent ou rapide), on peut, dans un même four à rouleaux, réaliser les cycles de traitement les plus divers pour les produits les plus variés, tant en dimension qu'en tonnage : réchauffage de plaques avant laminage à chaud (alliages légers et alliages cuivreux, par exemple); recuit de feuillards, de tôles, de tubes, de barres, d'emboutis, etc.; trempe et revenu de feuillards d'acier; brasage sous atmosphère contrôlée.

Dans le cas des traitements thermiques des bandes en continu, l'installation comporte : un poste de déroulement des bandes, un poste de soudage ou d'agrafage pour assurer la continuité, le four proprement dit, une cisaille, une enrouleuse.

Les traitements peuvent y être effectués avec ou sans atmosphère protectrice.

Fours à pousseuse

La translation des pièces peut être assurée par une pousseuse extérieure exerçant son action soit directement sur les pièces, soit sur des montages supportant les pièces.

Les pièces ou montages peuvent alors glisser directement sur la sole : c'est le cas des fours de traitement de lopins, par exemple qui se poussent les uns les autres dans les V que comporte la sole (*fig.* 5 f_1) ; ils peuvent aussi avancer sur des rails, sur des chemins de roulement : boulets, galets (*fig.* 5 f_2), ou dans des tubes-moufles (*fig.* 5 f_3).

Ces quelques principes montrent l'universalité de l'emploi des fours à pousseuse. Énumérer les fours réalisés dépasserait le cadre de ce chapitre, car toutes les combinaisons sont possibles entre les modes de construction, les modes de chauffage, les modes de glissement, les modes de sortie des pièces, et éventuellement la façon dont sont refroidies les pièces, tout cela encore complété par le fait que tous ces fours peuvent être à atmosphère contrôlée.

Parmi les applications les plus usuelles de ces fours, citons le chauffage de lopins ou billettes (tous alliages) sur sole rainurée, le chauffage avant trempe sur sole rainurée, le recuit de demi-produits ou pièces diverses (tous alliages) sur plateaux (sole à galets) ; en particulier, le recuit des tôles magnétiques découpées, le recuit isotherme des aciers, ces deux traitements s'effectuant sous atmosphère contrôlée; le recuit en tubes-moufles en atmosphère contrôlée (cas des tubes d'acier roulé et soudé, par exemple) ; la cémentation gazeuse, la carbonitruration gazeuse, le recuit de tôles ou couronnes d'aciers spéciaux et d'aciers courants, sous cloche et en atmosphère contrôlée.

Fours à sole inclinée

Le principe de l'avancement des produits dans ces fours est fondé sur l'utilisation de la gravité (*fig.* 5 g).

Ces fours sont surtout utilisés pour le chauffage des pièces qui peuvent rouler sur elles-mêmes, telles que billettes, tubes, produits cylindriques, etc.

Les fours électriques à résistances rattachés à ce type sont en grande majorité des fours de chauffage, avant filage, de billettes d'alliages légers ou creux.

Fours à secousses

Nous ne ferons que citer ces fours.

Fours à fonctionnement discontinu (fig. 5)

Fours à élévateur

Dans ce type de four, la chambre de chauffe (*fig.* 5 h) a la forme d'une cloche fixe, le chargement se faisant par une ou plusieurs soles mobiles, chauffantes ou non, ou encore par une plate-forme montée sur un élévateur hydraulique.

Ces fours s'emploient pour toutes les températures jusqu'à 1 000/1 100 °C. Ils sont ventilés ou non. Ils permettent de réaliser tous les traitements énumérés pour les fours à cloche. Ils ont l'avantage de ne pas nécessiter de pont roulant, le four ayant lui-même ses engins de levage de la sole.

Les principales applications de ces fours sont, dans le cas des métaux ferreux : le recuit des fontes malléables, le recuit des tôles, l'hypertrempe et le recuit des aciers inoxydables, le recuit de cuves en acier inoxydable.

Ces fours sont aussi très utilisés, en raison des grandes facilités de manutention qu'ils permettent, pour le traitement des alliages légers : recuit des fils d'almélec, trempe de tôles et de pièces diverses, trempe et revenu d'adoucissement d'alliages légers.

Fours à sole horizontale fixe

Le chargement de ces fours s'effectue à l'aide d'une chargeuse à bras. La sole est aménagée pour surélever

◀ ***Page ci-contre, figure 5 : quelques exemples de fours continus et discontinus.***

la charge de façon que les bras de la chargeuse puissent s'introduire entre la sole proprement dite et la charge. Les bras de la chargeuse entrent dans le four en position basse ; arrivés en fin de course, ils se lèvent, soulèvent la charge, puis, toujours en position haute, sortent du four en entraînant la charge. La chargeuse se déplace ensuite latéralement et dépose la charge sur un support approprié au profil identique à celui de la sole du four. Les bras de la chargeuse peuvent rester en porte à faux (*fig.* 5 i_1) si les charges sont relativement faibles (quelques centaines de kg), ou bien rouler sur la sole du four dans des saignées munies de chemins de roulement en fonte ou en acier réfractaire (*fig.* 5 i_2).

Les fours à chargeuse sont utilisés pour les traitements les plus divers : cémentation, recuit par charges de plusieurs tonnes de planches, barres, bobines d'alliages cuivreux ou légers, recuit d'aluminium, etc.

Fours à sole mobile

Ce sont des fours fixes dont la sole, chauffée ou non, est mobile et peut sortir du four (*fig.* 5 i). Les opérations de chargement et de déchargement sont donc très faciles, car elles se font à l'extérieur du four avec des moyens de manutention ordinaires (palan, pont roulant).

Ce type de four est très utilisé pour les traitements de charges massives : recuit d'acier, d'acier moulé, d'aciers spéciaux, recuit de fonte, recuit de barres d'acier ou de tubes par charges de plusieurs tonnes à plusieurs dizaines de tonnes.

Fours à sole tournante

Ces fours ont la forme d'un tunnel circulaire. Leur sole, en forme d'anneau mobile, tourne sur un chemin de roulement placé à l'extérieur de la chambre des fours. Elle est entraînée par un dispositif pignon-crémaillère.

A cause de leur forme, ces fours ont un bon rendement calorifique, la sole mobile restant toujours dans la chambre de traitement. Ils présentent également les avantages suivants : possibilité de chauffe des pièces différentes successivement et sans mélange, simplicité d'entretien, économie de main-d'œuvre (un seul ouvrier pour le chargement et le déchargement des pièces), chaque pièce reste un temps bien précis dans le four (le temps d'une rotation complète, par exemple).

Ces fours sont appréciés dans les ateliers de traitements thermiques, chauffage avant trempe, cémentation en caisse, recuits, revenus ; ils peuvent être aussi utilisés pour des traitements en atmosphère contrôlée, moyennant certaines précautions (carcasse étanche, portes avec rideaux de gaz à marche automatique, joint de sable doublé, par exemple, par un joint d'huile refroidi par circulation d'eau).

Ils peuvent être employés avec une ventilation intérieure pour le chauffage avant matriçage des lopins d'alliages légers, et à des températures plus élevées, pour le chauffage avant trempe de petites pièces d'acier (disques d'embrayage, etc.), par exemple.

Fours puits

Ces fours, généralement enterrés, permettent soit le traitement de pièces placées dans des paniers, soit le traitement de pièces allongées de révolution nécessitant un chauffage en position verticale (arbres, tubes, rotors, coquilles de centrifugation, etc.). Une pièce est chauffée et trempée verticalement lorsqu'il faut éviter les déformations, soit lors du traitement lui-même, soit lors de l'usinage ultérieur.

La pièce subit alors un chauffage symétrique, mais il faut s'assurer que son amarrage sur le four ne crée ni tension, ni déformation ; il est recommandé de réaliser chaque fois que cela est possible une suspension à cardans pour que la pièce trouve d'elle-même son équilibre sous l'action de son propre poids. Lors du chauffage aux températures élevées, la pièce peut fluer sous son poids et libérer ainsi des tensions ; le refroidissement à la trempe ou au revenu étant lui-même fait de façon symétrique, on limite au minimum les risques de déformations. Le chauffage et la trempe en position verticale entraînent plusieurs sujétions : nécessité de laisser une collerette d'amarrage pour maintenir la pièce dans l'étrier de suspension sans qu'elle glisse, nécessité de bien dégager l'extrémité de la pièce pour que son traitement ne soit pas perturbé par la présence de l'étrier.

L'étrier de suspension est en alliage réfractaire et est trempé avec la pièce ; dans certains cas, on peut chauffer et tremper plusieurs pièces simultanément au moyen d'étriers à logements multiples.

Les fours du type « puits » permettent de couvrir une très large gamme de fabrications.

Fours à cornue rotative

Ces fours sont de 2 types :

— à récupération ; la cornue peut comporter deux spirales coaxiales à pas inverse ; dans ce cas, les pièces qui entrent dans le four commencent à se réchauffer par récupération de la chaleur des pièces qui en sortent (*fig.* 5 l) ;

— sans récupération ; les pièces à traiter sont véhiculées à l'intérieur de la cornue par une hélice.

Nombre de fours à cornue rotative sont des fours continus.

Ces fours sont utilisés pour le traitement de petites pièces : vis, billes de roulement, rondelles, cémentation gazeuse, etc.

Les fours à bain de sel (*fig.* 5 m)

Ces fours peuvent aussi bien être chauffés à l'électricité, au gaz ou au fuel. Dans le cas des fours à résistances électriques, celles-ci peuvent être placées autour de la cuve, voire à l'intérieur du briquetage, ou au contraire introduites par des électrodes protectrices plongées dans le bain de sel. C'est dans ce cas que l'on obtient les allures de chauffe les plus rapides. Les fours à bain de sel peuvent aussi être chauffés par passage direct de courant dans le bain. Les électrodes d'alimentation pénètrent ou non dans la cuve.

En ce qui concerne le bain de sel, on utilise suivant le cas : des sel neutres, en général à base de chlorure de baryum, de potassium, de sodium ; des sels de cémentation ou de cyanuration à base de cyanure de sodium ou de potassium, ou des sels de trempe ou de revenu des aciers ou de traitements thermiques des alliages légers ou ultra-légers, en général à base de nitrate de sodium ou de potassium. Des recherches récentes permettent d'espérer l'utilisation prochaine de sels non toxiques et probablement la suppression des sels à base de cyanure.

Les fours à bain de sel couvrent de très larges applications, parmi lesquelles on peut citer :

— trempe étagée, martensitique, bainitique ; trempe isothermique ou double trempe des aciers ;

— trempe des aciers rapides, en particulier des aciers légers en carbone dont il faut éviter la décarburation superficielle ;

— revenu ou recuit de détente, recuit isothermique ;

— nitruration des aciers rapides ;

— carbo-nitruration ou cyanuration des aciers de construction alliés ou non ;

— cyanuration ou cémentation sur une profondeur de 0,3 à 0,4 mm des aciers à carbone ;

— cémentation profonde ;

— sulfunisation ;

— traitement des métaux légers ou ultra-légers, particulièrement pour les alliages à haute teneur en magnésium.

De mise en œuvre relativement simple, les fours à bain de sel présentent des avantages notables. Le temps de chauffage à cœur des pièces est 4 ou 5 fois plus court que dans un four à atmosphère gazeuse. En outre, le chauffage des pièces est particulièrement uniforme en raison de la grande capacité calorifique du bain. On supprime par immersion les actions oxydantes ou décarbonantes des gaz de combustion des fours à flamme. Les pièces sortent donc exemptes de calamine, et la cote demeure pratiquement inchangée après trempe, ce qui permet d'effectuer le traitement de pièces parfaitement stables, toujours en raison de l'inertie du bain.

Les fours à induction pour le traitement des métaux et alliages

Si l'on soumet une pièce métallique magnétique à un champ électrique, elle est traversée par des courants induits et s'échauffe sous l'effet combiné de pertes par hystérésis et par courants de Foucault. Les pertes par hystérésis cessent dès que le matériau n'est plus magnétique, c'est-à-dire dès que l'on a dépassé le point de Curie, mais l'échauffement continue à se produire sous l'effet des courants de Foucault. Le champ électrique est généralement produit par une bobine inductrice, le corps chauffé constituant l'induit. On peut aussi utiliser des inducteurs à champ linéaire ou à champ glissant (analogues à ceux utilisés dans le moteur linéaire).

Le chauffage produit par le courant induit dépend de nombreux paramètres, et notamment de la répartition de la densité du courant.

Pour chaque épaisseur ou diamètre de pièce, il existe une fréquence optimale du courant. Ainsi, pour les métaux ferreux (magnétiques), les valeurs pratiques adoptées sont les suivantes :

Diamètre en mm	Au-dessous de 650 °C	Au-dessus de 650 °C
6 à 12	3 000 Hz	150 000 Hz
12 à 25	1 000 Hz	10 000 Hz
25 à 40	1 000 Hz	3 000 à 10 000 Hz
40 à 50	50 Hz	3 000 Hz
50 à 150	50 Hz	1 000 Hz
> 150	50 Hz	50 Hz

Il est à noter tout d'abord que, dans de nombreuses applications, en raison de son principe même (localisation de l'apport de chaleur à l'intérieur de la pièce), le chauffage par induction peut être effectué en l'absence de four proprement dit. C'est ainsi que l'on réalise dans les industries de très nombreux traitements sur tout ou partie de pièces considérées, par exemple : trempe de dents d'engrenage ou de partie de vilebrequin, etc.

Un certain nombre d'applications nécessitent néanmoins des fours dont la conception, si elle est adaptée à ce genre de chauffage, fait appel aux matériaux et techniques qui ont été évoqués dans les paragraphes précédents. Nous examinerons donc seulement les parties extérieures aux fours proprement dits.

Générateurs de fréquence. Suivant le cas, on fait appel à des groupes convertisseurs tournants ou à des générateurs statiques à thyristors, ou tubes électroniques. Les groupes convertisseurs sont utilisés pour les faibles fréquences jusqu'à 10 kilohertz ; leur rendement est relativement élevé, de l'ordre de 75 à 90 %. Ils sont néanmoins concurrencés dès maintenant par les générateurs à thyristors dont le rendement est supérieur et dont le coût est de plus en plus compétitif.

Éléments de compensation. L'inconvénient des dispositifs de chauffage par induction est lié à leur principe même. Ils consomment de l'énergie sous un faible cosinus. Il est donc nécessaire de prévoir dans la plupart des cas des batteries de condensateurs qui permettent de redresser le facteur de puissance.

Inducteur. L'inducteur est la pièce noble dans le four de chauffage par induction. Dans la plupart des cas où l'on veut chauffer des pièces à des températures élevées, il y a lieu de procéder au refroidissement de l'inducteur, et pour cela de prévoir des centrales de refroidissement dans lesquelles est intégré un déminéralisateur d'eau. Le refroidissement se fait généralement par passage direct de l'eau à l'intérieur des conducteurs creux constituant l'induit.

L'inconvénient essentiel du chauffage par induction tient au montant élevé des frais d'investissement et d'amortissement du matériel et, dans une certaine mesure, à sa complexité.

En revanche, eu égard à cet inconvénient, on peut citer de nombreux avantages : traitement séquentiel et automatique des pièces à cadences élevées conduisant à une haute productivité ; mise en route et arrêt immédiat s'adaptant parfaitement à des horaires intermittents ; le temps de traitement est en général très réduit (voir *tableau* V) et peut être rigoureusement ponctuel (propriété exclusive au chauffage par induction) ; constance de la qualité des traitements effectués ; diminution des pertes par oxydation ou décarburation. Enfin, cette méthode de chauffage ne donne lieu à aucune pollution, bruit, poussière, dégagement gazeux, etc.

● *Fours de réchauffage des brames de l'installation Mac Louth*

Cette installation en service depuis 10 ans permet de réchauffer avant laminage des brames produites par l'aciérie Mac Louth, de Trenton (Michigan).

La puissance délivrée par chaque inducteur est de 20 MW, la tension d'alimentation 2 700 V. On peut aussi alimenter les inducteurs sous une tension réduite, par exemple 2 400 V pour obtenir une puissance de chauffe de 10 MW, et 1 685 V pour une puissance de chauffe de

◀ ***Tableau V : temps de chauffage par induction pour les métaux ferreux et non ferreux ; pour obtenir un rendement maximal, on a intérêt à apporter les calories nécessaires dans le temps minimal, donc à admettre des puissances élevées, ce qui renchérit le coût du matériel électrique.***

Tableau V

Temps de chauffage par induction pour les métaux ferreux et non ferreux

	Métaux	Diamètre (en mm)	Temps de chauffage (en s)
Métaux ferreux (1)	Acier ordinaire Fréquence 10 000 Hz	12,5 25 40 50 75	11 31 79 127 324
	Acier ordinaire Fréquence 3 000 Hz	25 50 75 100	23 95 214 384
Métaux non ferreux (2)	Aluminium à 500 °C	100 200 300	30 120 300
	Laiton (70/30) à 750 °C	100 200 300	90 300 720
	Cuivre à 800 °C	100 200 300	25 100 210

(1) Pour une température finale de 1 150 °C avec une différence de température entre cœur et peau de 80 °C environ.
(2) Fréquence 50 Hz.

5 MW. Le réglage de la tension est assuré par un autotransformateur. L'aciérie comporte 18 fours, ce qui nécessite une puissance d'alimentation de 210 MW de mégavar. Le facteur de puissance naturel de l'installation est de 0,23. Il est ramené à 0,8 par une importante batterie de condensateurs (825 000 kvars).

Cette installation ayant donné totale satisfaction, d'autres réalisations de ce genre ont été entreprises aux États-Unis, notamment pour réchauffer des billettes, et une est en construction chez Usinor à Denain (France).

Fours à cloche

Le four à cloche permet d'exécuter d'une façon parfaite les traitements en atmosphère contrôlée de produits qui exigent ou peuvent supporter des montées et des descentes de température lentes. On peut les utiliser pour des traitements jusqu'à 1 000 à 1 200 °C avec ou sans présence d'air. Ils peuvent indifféremment être alimentés avec des combustibles gazeux ou liquides, ou à l'électricité. Les capacités de traitement peuvent atteindre 12 t, et les volumes de cloche dépasser 20 m^3.

Suivant le cas, les cloches peuvent être cylindriques ou rectangulaires avec ou sans moufles. Elles comportent une série d'embases à la périphérie, l'étanchéité entre celles-ci et la cloche proprement dite étant réalisée par des joints qui peuvent être en sable, huile, eau, caoutchouc. Les cloches sont généralement réalisées en acier réfractaire.

Ces fours permettent d'effectuer le recuit en atmosphère contrôlée de demi-produits ou de produits finis (feuillards, tôles, fils d'acier doux et dur, d'aciers cuivreux, de cuivre et d'alliages).

Dans les grandes aciéries, on utilise des batteries de fours cloche. Par exemple, pour une ligne continue de production de fer-blanc, capable de fabriquer 30 t/h, ce qui correspond au recuit d'environ 22 t/h de métal, on a prévu 10 fours dont la cloche a un poids de 20 t, et 20 bases. Le cycle complet de traitement est de 26 h, soit 4 j. Une telle série de fours peut remplacer très avantageusement un four continu de traitement.

Fours à bombardement ionique

Exploitant une technique très récente applicable à tous les aciers et permettant dans une mesure jusqu'ici non atteinte une adaptation optimale des caractéristiques de surfaces à la sollicitation de la pièce, ces fours sont tout

particulièrement utilisés dans le cas de la nitruration. On peut toutefois prévoir toutes sortes d'atmosphères pour des traitements existant dans les meilleures conditions de contrôles, et pour exécuter des traitements non encore réalisés par les techniques conventionnelles.

Parmi les avantages de ce procédé, on citera le temps de traitement beaucoup plus court dans le cas de la nitruration qu'avec le procédé en phase gazeuse, ainsi qu'un rendement énergétique exceptionnel. Ce procédé exclut aussi tout risque de pollution. Il permet le traitement de pièces entièrement finies ne tolérant aucune déformation, jusqu'à des températures de 480 à 500 °C.

- *Fours de traitement de nitruration*

Le four est constitué comme un four à vide, sous faible pression d'azote (10^{-1} à 10 torrs). L'ionisation est produite à l'intérieur du récipient sous l'influence d'une haute tension de 500 à 1 000 volts. La pièce à traiter est reliée au négatif de l'alimentation électrique, constituant ainsi la cathode, tandis que le pôle positif est relié à une électrode. Le champ électrique appliqué entre la pièce et l'électrode permet la création d'un plasma d'azote sous décharge luminescente. L'azote à l'état ionique est projeté contre la surface de la pièce et, en raison de la grande vitesse acquise par les ions, s'insère sous cette surface.

L'énergie des ions est transformée en chaleur qui sert à porter la pièce à la température de nitruration choisie. En raison de l'énergie des particules, il est possible de procéder à la nitruration à une température inférieure à celle requise par les procédés classiques. Suivant les traitements, l'opération peut durer de quelques minutes à quelques heures.

La diminution du temps de traitement et la suppression de toute pollution constituent deux des avantages de l'ionitruration. Ce procédé est en outre le seul qui permette de traiter des pièces de grande longueur ne tolérant aucune déformation.

Fours à bain fluidisé

Ce sont des fours adaptés au traitement thermique des pièces petites ou moyennes; ils se situent, du point de vue technique, entre les fours à atmosphère contrôlée et ceux à bain de sel, sans présenter toutefois les inconvénients de ces derniers. Ils sont l'objet d'études et de perfectionnements constants, en particulier pour les traitements de cémentation, trempe et revenu.

Le bain fluide est obtenu à partir de particules calibrées en suspension dans un courant gazeux (air + gaz, ou propane), qui assure la fluidisation en se déplaçant de bas en haut contre les parois intérieures de la cuve constituée de viroles en acier réfractaire. Le courant gazeux qui est soufflé à travers une paroi poreuse constitue l'atmosphère du four. Sa composition peut être adaptée au traitement à réaliser.

Cette technique, qui conduit à une économie sensible d'énergie et qui diminue notablement les durées de traitement, est appelée à un grand avenir. Entre autres avantages, on lui attribue une bonne homogénéité de température, une absence de pollution et un coût relativement intéressant. Quoique récents, les fours à bain fluidisé font déjà l'objet de nombreuses applications, aussi bien dans les traitements thermiques que dans des domaines divers, notamment en tant qu'incinérateurs de boues déshydratées.

Fours haute et ultra-haute fréquence (micro-ondes)

Ces fours mettent en œuvre les phénomènes d'hystérésis diélectrique. Si on appelle E la valeur efficace du champ électrique, F la fréquence, ε' la perméabilité relative et δ l'angle de déphasage du courant par rapport à la tension appliquée aux bornes d'un condensateur dont le diélectrique n'est autre que la matière à chauffer, la puissance mise en jeu dans ce condensateur est la suivante : $P = 5{,}56\ E^2F\varepsilon'\text{tg}\ \delta\ 10^{-6}\ \text{W/m}^3$. Le produit ε' tg δ est appelé facteur de pertes; il varie en particulier avec la fréquence, la température, la teneur en eau, la tension appliquée. En ce qui concerne le séchage, il est intéressant de noter la variation de ε' tg δ avec la température. Ainsi, pour l'eau, à 1 MHz, ε' tg δ est égal à : 2,7 à 0 °C, 3 à 20 °C, 3,7 à 40 °C, 4,6 à 60 °C, 5,5 à 80 °C et 5,7 à 100 °C. Les variations avec la tension et la fréquence, faibles, se compensent dans le cas de l'eau. Pour les autres corps, les valeurs du facteur de pertes sont en général inférieures à celles de l'eau.

En ce qui concerne les fréquences, elles doivent être choisies parmi celles autorisées :

Dénomination	Valeurs numériques	
HF ou *haute fréquence :*	27,12 MHz ± 0,6 %	13,56 MHz ± 0,05 %
Longueur d'onde :	110 cm	220 cm
UHF ou *hyperfréquence* ou *micro-ondes :*	915 MHz ± 50	2 450 MHz ± 50
Longueur d'onde :	33 cm	12 cm

Il y a lieu pour chaque corps de calculer l'épaisseur de pénétration *d* dans laquelle est dissipée, suivant les auteurs, la moitié, ou 1/*e* fois la puissance d'entrée, par exemple :

Corps	Température	Fréquence	*d* (50 %) en cm
Eau	25 °C	3 GHz	1,4
Glace	⩽ 0 °C	3 GHz	120

On voit qu'il est ainsi possible de chauffer les produits à cœur, la surface pouvant même rester froide.

Le facteur de perte et le produit F tg δ jouent un grand rôle pour définir les domaines respectifs des hautes fréquences et des micro-ondes.

Le facteur de perte de l'eau varie considérablement avec la fréquence. Les pertes diélectriques sont négligeables dans la gamme des hautes fréquences; elles sont très importantes pour les moyennes fréquences et les micro-ondes. Or, la plupart des matériaux contiennent de l'eau. On voit donc l'intérêt d'utiliser les micro-ondes dans les problèmes de séchage (les fréquences inférieures à 1 MHz étant inutilisables en raison des perturbations qu'elles apporteraient aux ondes de radiodiffusion). Il est toutefois possible de faire du séchage avec des hautes fréquences en jouant sur les pertes dans le matériau lui-même sans utiliser les propriétés particulières de l'eau.

Dans le cas des plastiques et du caoutchouc, le choix de la longueur d'onde se fait en fonction de l'optimum du produit F tg δ qui croît linéairement avec la fréquence, alors que $\rightarrow \varepsilon'$ reste sensiblement constant. Pour le caoutchouc et le polyéthylène, les énergies dissipées sont considérablement plus élevées avec les micro-ondes. On conçoit alors que celles-ci soient utilisées pour assurer des opérations de soudures de feuilles plastiques, polymérisation de tissus, etc.

Parmi les applications des fours HF ou UHF, citons : la déshydratation sous vide de substances labiles; la vulcanisation en continu par micro-ondes de profils en caoutchouc extrudés; le séchage des encres à l'eau (HF); le frittage céramique (UHF); le séchage du caoutchouc (UHF); la décongélation des produits alimentaires (UHF); le séchage du bois (UF) et celui de la sciure (HF); la cuisson de pâte de pain (UHF); le séchage de produits pharmaceutiques (HF), etc.

Les avantages du procédé sont les suivants : rapidité, faible dépense d'énergie, homogénéité du traitement dans la masse, propreté, qualité des produits obtenus.

Avantages et inconvénients des différentes sortes de fours. Consommations énergétiques

Il est possible dans la plupart des cas, pour l'exécution d'un traitement thermique donné, d'utiliser différents types de fours employant des combustibles divers. Le choix du four est alors fonction de la qualité et de la précision du traitement thermique à réaliser, de la rapidité d'exécution recherchée, de la quantité de pièces à traiter, de la place disponible, du coût d'investissement et du prix de fonctionnement.

Nous nous attarderons plus particulièrement sur le prix de fonctionnement des fours, et notamment sur la dépense énergétique, en raison de l'importance que revêt cet aspect dans la conjoncture actuelle.

Le rendement global de l'opération de chauffage est très variable suivant le type de four considéré. Dans les fours à flamme, il est généralement inférieur à 50 %, alors qu'il est de l'ordre de 50 % dans les fours électriques

pour les métaux à faible résistivité comme le cuivre et l'aluminium, et qu'il peut atteindre 70 % dans le cas de l'acier. Notons qu'il faut 240 kWh par tonne (soit 207 thermies) pour chauffer une pièce d'acier à 1 200 °C, 145 kWh par tonne (125 thermies) pour chauffer une pièce d'aluminium à 500 °C, et seulement 95 kWh par tonne (82 thermies) pour chauffer une pièce de cuivre à 800 °C.

Comparaison des coûts

Cas des moyens produits (lopins)

L'Association pour le développement technique des industries de l'estampage et de la forge (ADETIEF) a procédé, courant 1976, à une comparaison du prix de chauffage de pièces utilisées dans ce type d'industrie dans des fours à flamme, au gaz et au fuel, et dans des fours électriques. Le four pris en compte était un four de capacité moyenne susceptible de traiter 1 000 kg de pièces par heure, avec un taux d'utilisation (charge moyenne horaire/charge maximale horaire) de 50 %. Les mesures effectuées ont montré que, pour chauffer à 1 200 °C 1 kg de métal, il fallait disposer de 0,42 thermie en chauffage par induction et de 2,30 thermies en chauffage à la flamme. L'étude a pris en compte les prix de l'énergie tels qu'ils étaient en 1976, de même que le coût de la main-d'œuvre, celui résultant de la présence de calamine, ceux de l'eau de refroidissement, des amortissements et de l'entretien. Il est apparu en définitive que les dépenses totales étaient relativement comparables avec les trois énergies considérées (voir *tableau* VI). [On n'a pas pris en compte les frais généraux et le coût de l'usine dans laquelle le four doit être implanté.]

On retiendra que si le coût de la calorie électrique est généralement plus élevé que celui de la calorie gaz ou fuel, la dépense finale de combustible est en fait inférieure dans le four électrique en raison du rendement beaucoup plus élevé du chauffage électrique par induction. Enfin, on n'a pas tenu compte dans les fours à induction de leur automatisation fréquente qui peut conduire à des frais de main-d'œuvre inférieurs à ceux qui ont été retenus.

Dans ses conclusions, l'ADETIEF fait remarquer que « l'avantage du four à induction s'affirme donc, davantage si l'on considère les autres paramètres ». En effet, la production d'oxyde est divisée par deux dans les fours à induction par rapport à la chauffe à la flamme, ce qui représente une économie non négligeable. De la faible quantité de calamine produite à la surface du lopin découle de plus une augmentation de la durée de vie des matrices... Enfin, c'est sans doute le chauffage par induction qui apporte la solution la plus satisfaisante au problème de l'amélioration de productivité. Pour toutes ces raisons économiques, techniques et sociales, les entreprises d'estampage s'orientent vers l'utilisation de l'énergie électrique pour le chauffage des lopins avant estampage. Toutefois, la mise en place d'un groupe de chauffage par induction, y compris ses périphériques : pompes, tour de refroidissement, dispositifs automatiques de chargement... représente encore un investissement important, parfois difficile à envisager par les petites et moyennes entreprises, même si son amortissement est rapide.

Cas de gros produits

Il s'agit là de réchauffer des produits, telles des brames ou des billettes, dont le poids est considérable (jusqu'à 40 t par pièce) dans de très gros fours, qui sont alimentés en énergie relativement moins coûteuse (gaz naturel, gaz de haut fourneau, éventuellement électricité haute ou moyenne tension). Le *tableau* VII donne les coûts comparés du réchauffage d'une tonne de produit suivant la nature des fours. On remarque, comme dans le cas précédent, que les prix par unité de poids sont relativement comparables. Ce n'était pas le cas, par exemple, en 1970 lorsque la thermie flamme coûtait un centime. Dès maintenant, il est avantageux de remplacer les fours à flamme — qui consomment plus de 300 th/t avec 4 % de pertes par oxydation ou 800 th/t avec 2 % de pertes par oxydation — par des fours à chauffage électrique.

Conclusion

On remarque l'effet de taille qui conduit à un prix moyen très différent selon la taille des produits (*tableau* VIII).

Actuellement, les gros fours de réchauffage, qui représentent une part importante de l'activité industrielle, utilisent 5 à 6 % de l'énergie consommée en France. 35 % de ces fours utilisent le mazout lourd, 26 % le gaz de haut fourneau, 24 % le gaz naturel et 15 % le gaz de cokerie.

Il est probable que les impératifs énergétiques actuels conduiront à l'apparition plus ou moins rapide de fours électriques ou mixtes de réchauffage des gros produits. Ce renouvellement sera vraisemblablement accompagné d'une plus grande automatisation et conduira à une amélioration marquée des conditions de travail et à une diminution des nuisances et de la pollution.

Tableau VI — Poste d'affectation	Four tournant au gaz	Four tournant au fuel	Four à induction
Prix de la thermie ou du kWh (en centimes)	4,7	5,2	20
Énergie	0,108	0,119	0,084
Coût d'exploitation :			
— M.O. directe	0,050	0,050	0,050
— M.O. indirecte à allumage	0,004	0,004	0,002
— Entretien	0,052	0,052	0,040
— Perte au feu	0,020	0,020	0,010
— Eau de refroidissement	0,010	0,010	0,003
Amortissements	0,050	0,050	0,106
Total	0,294	0,305	0,295

Tableau VII	Flamme 4 centimes la thermie		Induction 50 Hz à 12 centimes le kWh		Mixte Flamme 720 °C Induction t > 720 °C
Production nominale	300 t/h (brames)	100 t/h (billettes)	300 t/h (brames)	100 t/h (billettes)	100 t/h
Puissance installée (en MW)	—	—	100	35	13,5
Part de l'énergie (en F/t)					
marche à 3 postes	20	14	42	37,2	22
marche à 1 poste	30	40	42	42,0	32
Perte en feu 3 postes	15 à 30	20 à 40	5 à 10	5 à 10	5 à 10
Perte en feu 1 poste	25 à 50	40 à 80	5 à 10	5 à 10	5 à 10
Conduite, amortissement, entretien	4,4 à 14,7	8,4 à 17,3	7,9 à 19,4	9,4 à 22,4	11 à 23,3
Prix total (en F/t) à 3 postes	42,1 à 57,1	42,4 à 62,4	54,9 à 59,9	51,6 à 56,6	38 à 43
Prix total (en F/t) à 1 poste	69,7 à 94,7	97,3 à 137,2	66,4 à 71,4	70,4 à 75,4	60,3 à 65,3

▲ ***Tableau VI :** coût comparé du réchauffage de petits produits (lopins) pour estampage dans un four capable de 1 000 kg/h au taux d'engagement 50 %, en francs 1976 par kilogramme.*
***Tableau VII :** coût comparé du réchauffage à 1 200 °C de gros produits (billettes et brames d'acier) dans de gros fours capables de 100 à 300 t/h (taux d'engagement 100 %) en francs 1976-1977 par tonne.*

Tableau VIII — Type de four	Taux d'engagement (en %)	Coût moyen : énergie, pertes, conduite, entretien et amortissements (en centimes/kg)
Four 1 t/h pour lopins à 1 poste	50	30
Four 100 t/h pour billettes à 1 poste	100	8
Four 300 t/h pour brames à 3 postes	100	4

◀ ***Tableau VIII :** taux d'engagement et coût moyen pour différents types de fours.*

fig. 6

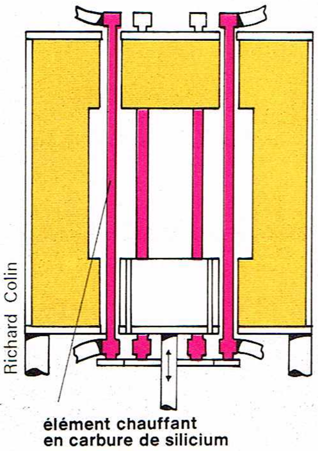

▲ *Figure 6 : four au carbure de silicium (carborandum). Les éléments en carborandum sont parfois découpés en spirales ; leur montage est effectué en évitant toute contrainte mécanique, et ils sont de préférence montés en vertical.*

fig. 7

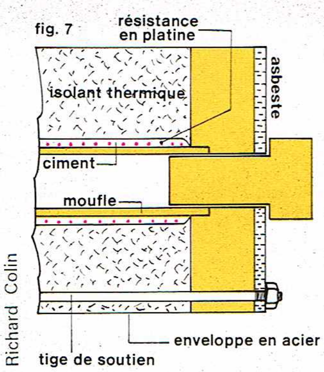

▲ *Figure 7 : four à enroulement de platine.*

▼ *Figure 8 : fours en disiliciure de molybdène (superkanthal). Les éléments sont disposés de préférence verticalement afin d'éviter tout contact du superkanthal avec les matériaux constitutifs des briques isolantes.*

fig. 8

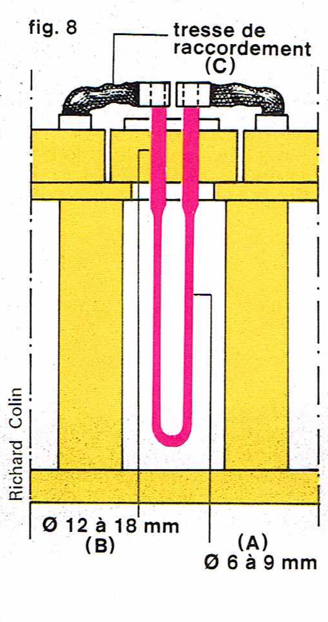

Les fours en milieu oxydant

Les fours électriques permettant des études en milieu oxydant sont assez différents de ceux travaillant sous vide, en atmosphère inerte ou réductrice. Les éléments chauffants ne sont plus métalliques ; le dernier métal résistant à l'oxydation est le platine, très onéreux. La *figure* 14 p. 186 de ce volume donne la température limite et l'atmosphère de travail des différents éléments chauffants. Ce sont les métaux qui se façonnent le plus facilement, et c'est faute d'en avoir qui résistent à l'oxydation à haute température que l'emploi de certains semi-conducteurs ou de composés intermétalliques s'est révélé très utile ; c'est le cas des fours à résistance de graphite qui peuvent atteindre 3 000 °C en atmosphère neutre, réductrice ou sous vide, c'est le cas des fours à baguette de carborandum, moins onéreux que le platine, de superkanthal et de chromite de lanthane, qui permettent d'une part d'accéder au domaine 1 500 °C-1 800 °C en atmosphère oxydante, et d'autre part de concevoir des fours de grand volume considérablement moins chers que les fours à résistance de platine rhodié. Enfin, les fours à résistance d'oxydes réfractaires permettent d'agrandir le domaine de températures accessible en atmosphère oxydante et d'atteindre 2 500 °C. Le *tableau* IX résume les éléments chauffants qui ont reçu des applications importantes pour des fours en atmosphère oxydante.

Fours (1 550 °C) en carbure de silicium : carborandum CSi

Le carbure de silicium est un semi-conducteur qui peut être utilisé sous forme de baguette ou de tube, pour constituer des éléments chauffants spécialement utiles en atmosphère oxydante et jusqu'à 1 500 °C. Mais leur durée de vie est faible à cette température limite ; par contre, à 1 400 °C, elle est de l'ordre de plusieurs milliers d'heures. Les éléments supportent aussi le vide, l'atmosphère inerte ou réductrice sans pouvoir dépasser 1 400 °C. Il faut éviter la présence de vapeur d'eau. Les éléments en carborandum sont formés de grains de carbure de silicium agglomérés sous pression au moyen d'un liant, et cuits à haute température. Il s'agit d'une céramique où la dimension des grains, la proportion et la nature du liant, la température de cuisson influent sur la résistivité des baguettes. Celle-ci est un point faible de ces éléments, car, outre qu'elle n'est pas constante d'une préparation à une autre, elle ne varie pas d'une façon constante en fonction de la température et du temps. La résistance d'un élément diminue environ de 10 % jusqu'à 700 °C, puis augmente de 10 % de 700 °C à 1 400 °C. Au cours du temps, on enregistre une évolution de 20 à 25 % pendant les cinquante premières heures, puis une variation plus lente. Pour maintenir la puissance constante d'un four équipé d'éléments de carborandum, il faut donc augmenter progressivement la tension disponible pour compenser cette évolution. Une réserve de tension de 40 à 50 % à 1 400 °C est suffisante pour une utilisation en atmosphère oxydante.

Les éléments en carborandum sont parfois découpés en spirales comme les tubes de carbone. Leur montage est effectué en évitant toute contrainte mécanique, et ils sont de préférence montés en vertical (*fig.* 6). Pour les contacts, on peut, pour les tubes dont le diamètre est inférieur à 30 mm, utiliser un contact par pince et tresse d'aluminium, sinon on utilise un contact par bride.

Dans le cas des baguettes, on utilise la métallisation des extrémités avec enroulement de fils de connexion ou bien un simple contact des extrémités avec des pièces refroidies. Le montage électrique des baguettes se fait de préférence en parallèle, ce qui permet le remplacement d'une baguette usée sans être obligé d'interrompre le fonctionnement du four. A titre d'exemple, une baguette de 14 mm de diamètre et de 250 mm de longueur a une résistance de 2,2 Ω et consomme 16 A sous 35 V à 1 400 °C.

Fours (1 600 °C) en platine rhodié (20 %)

Les métaux nobles et leurs alliages ont une résistivité suffisamment élevée pour les employer sans refroidissement. L'élément chauffant sous forme de fil est enroulé sur un tube réfractaire, et l'emploi d'un ciment maintient les spires non jointives. Il faut éviter d'utiliser des ciments qui contiennent de la silice ou du fer ; il est préférable d'employer des mélanges de poudre d'alumine fine, d'argile et de liant organique. Les craquelures dans le ciment sont à l'origine de la surchauffe de l'élément et doivent être évitées. Les fils peuvent être employés à partir d'un diamètre de 0,4 mm, mais, pour assurer une plus grande durée de vie, il est préférable d'utiliser des tailles plus grandes. La construction la plus simple est de bobiner un fil sur un tube en réfractaire exempt de silice et de le noyer dans du ciment. Le tout est placé dans un isolant thermique. En général, on souhaite avoir un gradient de température le long du tube le plus faible possible. Cela peut être obtenu en faisant varier l'espace entre les spires par un plus grand resserrement vers les extrémités, où les pertes thermiques sont maximales. On peut également constituer le four de trois bobinages : un à chaque extrémité et un dans la zone centrale.

La *figure* 7 illustre un cas classique d'un four à enroulement de platine. Des fours de grande taille ont été construits pour la fabrication de verres spéciaux de lunetterie.

Fours (1 750 °C) en disiliciure de molybdène : superkanthal $MoSi_2$

Le composant de base du superkanthal est le disiliciure de molybdène $MoSi_2$ qui, jusqu'à 1 750 °C, présente une grande résistance à l'oxydation grâce à une couche protectrice de silice SiO_2 qui se forme par oxydation du silicium. Sa grande fragilité mécanique a été réduite grâce à l'adjonction de certains additifs métalliques et céramiques. Les propriétés physiques du matériau commercialisé sont : coefficient de dilatation linéaire à 1 000 °C, 7-8 10^{-6}/°C ; poids spécifique, 5,6 ; résistance à la traction à 1 500 °C, 10 kg · cm^{-2} ± 25 % ; allongement à la rupture à 1 500 °C, 5 à 6 % ; résistance à la flexion à 30 °C, 45 kg · mm^{-2} ± 20 % ; dureté, 1 200 vickers. La résistivité électrique est faible ; son augmentation avec la température confère au superkanthal un caractère métallique.

Le matériau est une céramique élaborée sous forme de barres de diamètres variés, obtenues par compression, extrusion et frittage. Les éléments sont ployés à chaud sous forme d'épingle (A) [*fig.* 8] et ont un diamètre de 6 à 9 mm pour la zone à haute température. Les deux extrémités (B) ont un diamètre de 12 à 18 mm et sont soudées à l'épingle ; la tresse de raccordement (C) est serrée sur une partie métallisée de l'extrémité. Les éléments sont disposés, de préférence, verticalement : cet arrangement évite tout contact du superkanthal avec les matériaux constitutifs des briques isolantes. Dans le cas des éléments horizontaux, les fours ne doivent pas dépasser 1 550 °C, de crainte que la silice ne colle aux briques réfractaires. Comme la résistivité du superkanthal augmente avec la température, la puissance développée, à tension constante, est élevée à basse température et assure une montée rapide de la température du four sans aucun risque de surchauffe. Les éléments ne manifestent aucun vieillissement dans leurs caractéristiques électriques. Dans le cas d'un nouveau four, il faut prendre quelques précautions : la montée en température doit être rapide en présence d'une circulation d'air. Lorsqu'un four a fonctionné pendant plusieurs jours à une température peu élevée, il convient de temps en temps de le porter de nouveau à sa température maximale afin de permettre la réoxydation des éléments. On obtient la plus grande durée de vie en fonctionnement continu.

Le superkanthal supporte correctement de travailler dans diverses atmosphères, mais c'est en atmosphère oxydante qu'on obtient les caractéristiques maximales. Les températures limites de fonctionnement en fonction du milieu gazeux sont les suivantes : air, 1 700 °C ; azote, 1 600 °C ; argon, hélium, 1 500 °C ; hydrogène, 1 300 °C ; gaz carbonique, 1 600 °C ; oxyde de carbone, 1 500 °C. Le superkanthal ne supporte pas le chauffage sous vide.

Fours (1 750 °C) en chromite de lanthane : Pyrox 2000

Le matériau $LaCrO_3$ a été pour la première fois préparé, en France, au Laboratoire des ultraréfractaires, en 1968.

Les chromites de lanthanides sont des composés très réfractaires, dont les températures de fusion sont comprises entre 2 300 et 2 500 °C. Le chromite de lanthane est le plus réfractaire d'entre eux. Il présente une conductivité électrique déjà notable à température ambiante ($\sigma = 10^{-3}\ \Omega^{-1}\ cm^{-1}$) qui augmente rapidement avec la température ($\sigma = 1\ \Omega^{-1}\ cm^{-1}$ à 1 400 °C). Le

produit est toujours plus conducteur sous air que sous argon, et l'écart décroît pour les échantillons fortement dopés. Ce matériau dopé au calcium est tout à fait utilisable jusqu'à 1 800 °C.

Les éléments chauffants sont préparés par des techniques céramiques (compression et frittage). Les éléments peuvent être utilisés en position verticale ou horizontale. Toutefois, à haute température, seul le fonctionnement vertical est possible, la position horizontale entraîne l'apparition d'une déformation en arc due au fluage. La limite pratique d'emploi horizontal est fonction du diamètre et de la portée (de l'ordre de 1 200 °C à 1 500 °C).

La puissance peut atteindre dans certains cas 8 W/cm^2, mais il est préférable de travailler au-dessous de cette valeur, surtout à haute température. Il convient de respecter absolument les tensions efficaces maximales indiquées. On veillera à ce qu'aucune partie de l'élément ne soit en contact avec les réfractaires, ou aucun autre matériau, à une température supérieure à 1 000 °C. Les connexions électriques ne doivent jamais être refroidies par circulation d'eau, mais uniquement par convection naturelle.

Fours (2 500 °C) en oxydes réfractaires : zircone

Au-dessus de 1 800 °C, les matériaux constituant les éléments chauffants des fours en atmosphère oxydante se décomposent, se volatilisent ou s'oxydent. Pour travailler à de telles températures, on fait alors appel à d'autres techniques telles que celles du four à gaz de combustion avec isolement de la chambre de travail, du four à image ou du four solaire.

Dès 1900, Nernst eut l'idée d'utiliser les oxydes réfractaires comme résistance électrique pour source lumineuse (les filaments Nernst). Mais il faut attendre 1941 pour noter la construction d'un four de plusieurs kilowatts à éléments en oxydes réfractaires. Il est constitué de huit baguettes de thorine (ThO_2) de 90 mm de long et de 6 mm de diamètre, montées en parallèle. Les premiers essais qui ont eu lieu n'ont toutefois pas abouti à des durées de vie satisfaisantes, faute d'avoir résolu les principaux problèmes liés à la dissipation de l'énergie électrique dans un oxyde réfractaire ; ce sont essentiellement l'instabilité et l'inhomogénéité de ce type de chauffage, et la fragilité des éléments céramiques soumis à des contraintes mécaniques et thermiques.

● *Propriétés des oxydes réfractaires*

Pour un four haute température, le meilleur oxyde doit avoir essentiellement une température de fusion aussi élevée que possible et une bonne conductivité électrique à haute température.

Les oxydes dont le point de fusion est supérieur à 2 500 °C sont les suivants : BeO et CaO (2 600 °C), ZrO_2 et CeO_2 (2 700 °C), UO_2 (2 750 °C), HfO_2 et MgO (2 800 °C), ThO_2 (3 300 °C). A l'état pur, ils ont tous des inconvénients majeurs qui limitent leur emploi : BeO et CaO réagissent avec la vapeur d'eau, ZrO_2 et HfO_2 présentent une transformation cristallographique avec une grande variation de paramètres, CeO_2 est instable, MgO est très volatil, ThO_2 et UO_2 sont légèrement radio-actifs. Pour utiliser ces deux derniers oxydes, il convient de prendre des précautions qui sont onéreuses à mettre en œuvre.

La zircone stabilisée dans sa forme haute température par quelques % d'ajouts tels que la chaux ou l'oxyde d'yttrium apparaît comme un matériau tout à fait convenable avec une grande inertie chimique et un prix de revient raisonnable. De plus, elle est un des oxydes réfractaires les plus conducteurs à haute température.

On peut constater qu'à basse température tous les oxydes réfractaires sont des isolants, et leur résistivité décroît très vite avec la température. Elle est de la forme :

(1) $$\rho = \rho_0 \exp Q/RT$$

Q : chaleur d'activation apparente (en calories) = 30 000 cal · mol^{-1} ; R : constante des gaz parfaits ; ρ_0 : constante = 6,6 10^{-4} Ω · cm ; T : température en degrés Kelvin.

La dissipation directe de l'énergie électrique impose le préchauffage de l'oxyde par une résistance auxiliaire et la définition des conditions d'un chauffage stable.

● *Conditions pour le chauffage stable de l'élément chauffant*

La valeur de ρ à basse température (10^{10}-10^{15} ohms · cm) ne permet pas, sauf sous très haute tension, de dissiper une énergie importante dans le matériau. Par contre, en préchauffant l'oxyde jusqu'à 1 200 °C environ, ρ diminue, la température de l'oxyde croît très rapidement, et, si on ne prend alors aucune précaution, on atteint la fusion de l'élément. A la température d'équilibre T_e, la puissance fournie P_F égale la puissance perdue P_R ; aux températures élevées, on considérera seulement la puissance perdue par rayonnement P_R prépondérante devant les pertes par convection et par conduction. On a :

(2) $$P_F = \frac{V^2 s}{\rho_0 l} \exp - \frac{Q}{RT}$$

avec : V : tension appliquée aux bornes du circuit ; ρ_0 : constante (10^{-4} Ω · cm pour la zircone) ; s : section de l'élément chauffant ; l : longueur de l'élément chauffant ; Q : constante (30 000 cal pour la zircone) ; ε : facteur d'émission total (~ 0,5 pour la zircone) ; σ : constante de Stefan-Boltzmann ; S : surface latérale de l'élément chauffant ; T : température absolue.

Les courbes P_R et P_F en fonction de T peuvent se couper de deux façons différentes (*fig.* 9). Chaque point d'intersection donne une température d'équilibre. Si à partir de la température d'équilibre T_e apparaît une faible variation de la température, la *figure* 9 a montre, pour $\Delta T < 0$, que la puissance dissipée est inférieure à la puissance rayonnée, et le système tend à se refroidir. De même, pour $\Delta T > 0$, on dissipe dans l'oxyde plus qu'il ne rayonne, et il tend à s'échauffer. Le point C conduit à un chauffage instable. Par contre, un raisonnement analogue pour la *figure* 9 b montre que, pour tout signe de ΔT, le système tend à revenir à sa température d'équilibre T_e. La condition d'un chauffage stable s'exprime :

(3) $$\begin{cases} P_F = P_R \\ \left(\frac{\partial P_F}{\partial T}\right)_{Te} < \left(\frac{\partial P_R}{\partial T}\right)_{Te} \end{cases}$$

La résolution de **(3)** donne une condition sur le domaine de températures où sont réalisées les conditions d'un chauffage stable : $T_e > Q/4$ R. Pour la zircone stabilisée, cela donne : $T_e > 3$ 200 °C.

Cette valeur est très supérieure à la température de fusion de l'oxyde ; donc, dans le domaine de températures 1 200 °C-2 500 °C, la dissipation de l'énergie électrique dans la zircone conduit à un système instable, et il est normal d'atteindre la fusion ou le refroidissement rapide du matériau. Toutefois, il est possible de passer du cas de la *figure* 9 a (instable) au cas de la *figure* 9 b (stable), d'une part en mettant une résistance en série avec l'oxyde, et d'autre part en calorifugeant celui-ci. Par l'addition d'une résistance R_0 dans le circuit de l'oxyde, l'expression **(2)** devient :

(4) $$P_f = \frac{R_T V^2}{(R_T + R_0)^2}$$

R_T : résistance de l'oxyde à la température T. Dans ce cas, la courbe $P_f = f$ (T) présente un maximum (*fig.* 9 a pointillé) pour une température T telle que $R_0 = R_T$. Pour des valeurs convenables de V et de R_0, elle coupe la courbe P_R en deux points C et D dont un seul, D, satisfait aux conditions **(3)** et définit une température T_e pour un chauffage stable de l'oxyde.

On a déterminé les courbes P_F, P_f, P_R pour un élément chauffant en zircone stabilisée à la chaux ayant la forme d'un tube de 30 mm de long, de 24 mm de diamètre et de 2 mm d'épaisseur. Sous 50 V et avec 1 Ω de résistance en série, on n'a aucune intersection entre P_f et P_R ; par contre, sous 100 V et 1 Ω, on a deux intersections. L'une d'elles correspond à un fonctionnement stable à 2 000 °C. On peut également obtenir un chauffage stable en réduisant les pertes par rayonnement (courbe P'_R de la *fig.* 9 a). La puissance P_R devient P'_R :

(5) $$P'_R = \varepsilon\sigma S\,(T^4 - T_0^4)$$

T_0, température à l'extérieur de l'élément chauffant. Dans ce cas-là, P_R coupe la courbe P_F en deux points E et F (*fig.* 6 a). Seul le point E satisfait aux expressions **(3)**. En introduisant l'équation **(5)** dans **(3)**, on obtient une condition sur T_0 :

(6) $$T_0^4 > T_e^4 \left(1 - \frac{4\,RT'_e}{Q}\right)$$

fig. 9

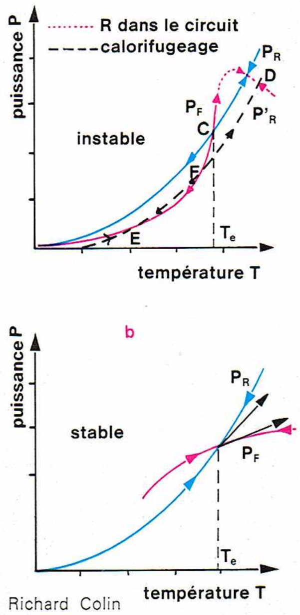

Richard Colin

▲ ***Figure 9 :** courbes de la puissance fournie (P_F) et de la puissance perdue (P_R) en fonction de la température ; chaque point d'intersection donne une température d'équilibre, stable en* **b**, *instable en* **a**.

▼ ***Éléments chauffants cylindriques utilisés dans les fours de laboratoire ; chaque élément est taillé dans la masse d'un barreau cylindrique de zircone à 4 % de chaux ou 8 % d'oxyde d'yttrium.***

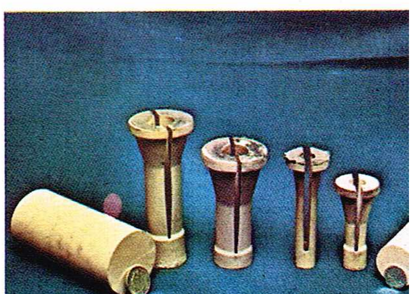

Lab. de recherche sur la physique des hautes températures - Centre national de la recherche scientifique

Tableau IX Composition	Forme	Résistivité (en ohm · cm) 20 °C	800 °C	1 200 °C	1 700 °C	T° max (en °C)
Carborandum CSi	Baguettes tubes	3	1	1,4		1 550
Platine-rhodié (20 %)		$21 \cdot 10^{-6}$	$40 \cdot 10^{-6}$	$50 \cdot 10^{-6}$		1 600
Superkanthal $MoSi_2$	Baguettes	$29 \cdot 10^{-6}$	$200 \cdot 10^{-6}$	$300 \cdot 10^{-6}$		1 750
Chromite de lanthane $LaCrO_3$	Baguettes tubes	10^3		10	10^{-1}	1 800
Zircone stabilisée ZrO_2 - 4 % CaO ZrO_2 - 6 % Y_2O_3	Baguettes tubes	$\simeq 10^{13}$	10^3	10	1	2 300

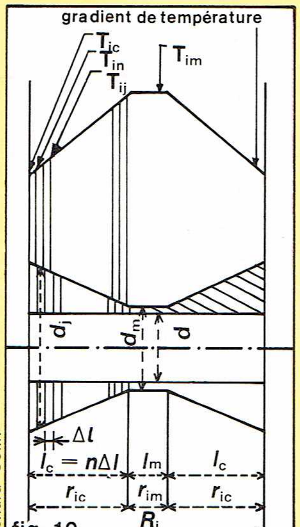

fig. 10

Richard Colin

▲ ***Tableau IX :** éléments chauffants utilisés dans les fours en atmosphère oxydante.*
***Figure 10 :** calcul de la résistance d'un matériau par découpage de l'élément en secteurs élémentaires (voir développement dans le texte).*

▼ ***Tableau X :** caractéristiques des fours électriques en atmosphère oxydante mis au point au Centre de recherches sur la physique des hautes températures d'Orléans (en astérisque, la performance primordiale de ces fours).*
***Tableau XI :** matériaux réfractaires utilisés pour l'isolation des fours en atmosphère oxydante.*

Seul un bon calorifugeage permet de satisfaire à l'équation **(6)**. Le calorifugeage de l'oxyde présente plusieurs avantages : assurer la stabilité du chauffage, réduire le gradient de température dans l'épaisseur de la céramique, assurer un bon fonctionnement sous des tensions plus faibles (moins de risque d'arcs). Dans le cas cité, on peut montrer qu'on obtient, avec un calorifugeage, un point de fonctionnement stable avec seulement 50 V et 1 Ω dans le circuit. Par contre, la nécessité de calorifuger interdit de préchauffer l'élément au moyen d'un chalumeau.

A partir de la valeur minimale de T_e, on définit la puissance maximale P_r que doit rayonner l'élément chauffant.

(7) $$P_r = P_R X \, 4 \, RT_e/Q$$

● *Description des éléments chauffants et des fours*

En tenant compte des résultats ci-dessus, et d'autre part en résolvant certains problèmes techniques tels que les contraintes mécaniques ou les eutectiques au niveau des contacts avec l'élément en céramique, plusieurs types d'éléments chauffants ont pu être réalisés.

Pour une longue vie des éléments chauffants, leur conception doit obéir à deux conditions : dilatation libre entre la température ambiante et la température de travail, et contacts électriques n'excédant pas 1 600 °C quand l'élément est à 2 500 °C. La première condition est réalisée grâce à une absence de contrainte mécanique par une suspension des éléments. La seconde condition impose une forme à l'élément telle que la résistance électrique du matériau soit évolutive et diminue au niveau des amenées de courant.

La photo de la p. 307 montre une série d'éléments chauffants cylindriques pour fours de laboratoire. L'élément est taillé dans la masse d'un barreau cylindrique de zircone à 4 % de chaux ou 6 % d'oxyde d'yttrium. Il est percé de part en part d'un trou au diamètre de la chambre de travail. Celui-ci varie de 16 à 45 mm. A sa partie supérieure, l'élément a une section double de celle qui est située près de la cavité à haute température. Cela permet aux amenées de courant de ne jamais dépasser 1 600 °C.

Pour réaliser le four, un écran en zircone est interposé entre l'élément et le tube d'alumine afin d'éviter que la température de celui-ci n'excède 1 900 °C. Le calorifugeage est assuré par des briques taillées ou des feutres isolants, séparés du four de préchauffage par un tube d'alumine. Pour atteindre 2 500 °C, il est préférable de placer l'élément sur une plaque de zircone, située à la partie supérieure du four.

Les fours mis au point au Centre de recherches sur la physique des hautes températures à Orléans étaient en 1977 les seuls fours électriques capables de dépasser 1 800 °C en atmosphère oxydante. Leurs applications sont multiples : au laboratoire (frittage et traitement thermique — points de fusion pour des étalons secondaires de l'échelle internationale de température) ; dans l'industrie (frittage, sans pollution, de pièces céramiques, tirage de la fibre optique, remplacement des fours à flamme par des fours électriques). Ils sont actuellement à l'étude pour équiper le laboratoire spatial européen Spacelab. Leurs caractéristiques dépendent de la performance essentielle dont l'usager a besoin (*tableau* X).

Calorifugeage et calcul d'un four

La puissance nécessaire pour maintenir un four à température fixe est déterminée par les pertes de chaleur à travers les parois du four. Il existe un calcul simple pour la distribution de température à travers un mur comprenant deux matériaux différents, l'un d'épaisseur l_1 et de conductivité thermique k_1, et l'autre d'épaisseur l_2 et de conductivité thermique k_2. Le flux de chaleur Q à travers la surface A est :

$$\frac{Q}{A} = \frac{k_1 \, (t_i - t_b)}{l_1} = \frac{k_2 \, (t_b - t_w)}{l_2} = h \, (t_w - t_a)$$

avec h coefficient de transfert de chaleur, t_i température à l'intérieur du four, t_b température à l'interface des deux matériaux, t_w température à la surface extérieure du four, t_a température ambiante, soit :

$$\frac{Q}{A} = \frac{t_i - t_w}{\dfrac{l_1}{k_1} + \dfrac{l_2}{k_2}} = h \, (t_w - t_a)$$

Les inconnues sont Q et t_w qui peuvent être déterminées par approximations successives si l'on connaît les conductivités thermiques des céramiques isolantes ; le *tableau* XI donne un aperçu des matériaux utilisables à haute température. Actuellement, des matériaux superisolants ont été étudiés : les multifeuilles sont formés d'un grand nombre de feuilles métalliques très minces, et leur conductivité thermique est aussi faible que 10^{-5} watt/cm · °C.

Deux points sont importants à évaluer : la puissance perdue et la puissance nécessaire pour atteindre une température donnée. La puissance perdue dépend essentiellement de la forme géométrique du four. Les pertes latérales à travers le calorifugeage sont faibles comparées aux pertes par les extrémités du four ; ces dernières peuvent être réduites en obturant avec soin les faces extrêmes : la puissance rayonnée par cm^2 de l'ouverture d'un four est évaluée à 13, 80, 170, 750 watts pour respectivement 1 000, 1 500, 2 000 et 2 900 °C. Dans le cas de fours bobinés sur un tube réfractaire dont la longueur est au moins 7 à 8 fois le diamètre, on peut admettre que la puissance à fournir par cm^2 est 0,2-0,6-1,4-3 watts pour atteindre respectivement 600, 1 000, 1 500, 2 000 °C.

Prenons l'exemple d'un four à enroulement de platine rhodié de diamètre intérieur D = 7 cm, de longueur L = 50 cm, c'est-à-dire de surface intérieure 1 100 cm^2. Pour atteindre 1 500 °C, il faudra une puissance de 2 000 watts. En général, l'espace entre les spires est égal au diamètre du fil, donc le nombre de spires n est : $n = L/2\,d$, et comme la longueur l du fil est égale à πDn, la relation entre la résistance R et le diamètre du fil est : $R \times 2 \, \rho \, DL/d^3$, où ρ est la résistivité du fil, soit $53 \, 10^{-6} \, \Omega \cdot cm$ à 1 500 °C. On doit donc prendre un fil de 0,5 mm de diamètre.

Dans le cas d'un élément chauffant fait d'une céramique dont la résistivité varie beaucoup avec la température, le calcul de la résistivité du matériau se fait par découpage de l'élément en secteur élémentaire de longueur Δl auquel on assigne une température uniforme T_{ij}. La résistance de ce secteur est r_{ij} (voir *fig.* 10) :

$$R_i = r_{im} + 2 \, r_{ic}, \; r_{ic} = \sum_{j=1}^{n} r_{ij}, \; r_{ij} = \frac{\Delta l}{\dfrac{\pi}{4} \, (d_j^2 - d^2)} \times \rho_{ij}$$

$$\rho_{ij} = \rho_0 \exp \frac{A}{T_{if}} \left\{ \begin{array}{l} 10^{10} \, \Omega \cdot cm \text{ à } \; 25 \text{ °C} \\ 1 \, \Omega \cdot cm \text{ à } 1\,500 \text{ °C} \end{array} \right.$$

Nous avons pris 14 secteurs de $\Delta l = 0,23$ cm avec une partie cylindrique (l_m) de 1,3 cm de hauteur. Le diamètre de l'élément est de 2,8 cm. La résistance mesurée est 1,33 Ω à 2 000 °C, et la résistance calculée est 1,29 Ω.

Tableau X — Performances / Paramètres	Laboratoire Température *	Industriel Durée de vie *	Spatial Consommation d'énergie *
Température limite	2 450 °C *	1 900 °C	2 000 °C
Énergie : 50 cm^3 à 2 000 °C	1 200 W	1 200 W	350 W *
Durée de vie de l'élément	1 000 h	5 000 h *	La mission (plusieurs jours)
Isolants	Feutre	Briques	Feutre et multifeuilles
Élément	Cavité cylindrique	Module	Cavité cylindrique
Type	Isotherme ou gradient (10-200 °C/cm)	Isotherme	Isotherme ou gradient (10-200 °C/cm)

Tableau XI Matériaux	Composition (en %)	Point de fusion (en °C)	Conductivité thermique (en W/cm · °C)	Température maximale d'emploi (en °C)
Alumine fondue	Al_2O_3 87-93 SiO_2 7-11	2 050	0,02	1 800
Glucine fondue	BeO	2 600	0,3	2 500
Magnésie	MgO 97 SiO_2 1,2 CaO 1,5	2 700	0,03	1 600
Mullite	Al_2O_3 72 SiO_2 28	1 800		1 600
Silice fondue	SiO_2 95-97	1 700	0,01	1 000
Thorine fondue	ThO_2	3 300		2 200
Zircon	ZrO_2 67 SiO_2 33	2 500		1 600
Zircone stabilisée	ZrO_2 94,5 CaO 5 SiO_2 0,5	2 700	0,02	> 2 000

ENCYCLOPÉDIE DES SCIENCES

TECHNOLOGIE IV

GRANGE BATELIÈRE

LEXIQUE DE TECHNOLOGIE (SYSTÈMES)

SUPPLÉMENT AU VOLUME XIX DE LA GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

ABRÉVIATIONS

adj.	adjectif	*n.*	nom	*par ext.*	par extension
ex.	exemple	*p. ex.*	*par exemple*	*syn.*	synonyme

A

affermage. *n.* Statut définissant les relations contractuelles entre une collectivité locale et l'organisme privé auquel elle confie l'exploitation et l'entretien des infrastructures et des équipements pour l'eau potable et les eaux usées.

affrètement. *n.* Mise d'un navire, par un armateur propriétaire (le fréteur), à la disposition d'un utilisateur (l'affréteur) qui l'utilisera à son profit. L'affrètement peut être consenti au voyage ou pour un temps défini. La charte-partie énonce les engagements des deux parties dans un contrat d'affrètement.

algorithme. *n.* Méthode mathématique d'analyse traitant, par exemple, le débit et le taux d'occupation des routes.

allocations familiales. Prestations en argent destinées à aider les chargés de famille. Elles sont calculées en fonction du nombre et de l'âge des enfants. Parfois entrent aussi en compte d'autres facteurs, comme le revenu familial ou la dimension du logement.

âme. *n.* Partie centrale d'un câble, composée de fibres naturelles ou artificielles (âme textile), de fils métalliques (âme métallique), ou des deux (âme mixte).

analyse de système. Méthodologie d'analyse rassemblant et coordonnant l'ensemble des études d'un projet complexe, depuis la définition jusqu'aux essais.

analyseur automatique. Machine de laboratoire capable de réaliser automatiquement toutes les opérations pour mesurer un ou plusieurs constituants à partir d'échantillons prélevés sur l'homme (sang, urine, etc.). Ces automates jouent aujourd'hui un grand rôle dans le diagnostic et les soins à l'hôpital.

approche systémique. Technique d'étude d'un système, différente de l'analytique, englobant les éléments et leurs interactions.

armateur. *n.* Personne ou société qui fait construire et équipe des navires pour les exploiter commercialement.

assiette-emprise. Surface du terrain réellement occupée par la route.

automoteur. *n.* Bateau de navigation intérieure muni d'un moyen de propulsion mécanique autonome. Il existe en France des automoteurs pouvant charger 300 tonnes, 1 350 tonnes et 2 000 tonnes de marchandises.

auxiliaires médicaux ou **professions de l'équipe médicale.** Professions qui s'exercent normalement sous le contrôle et la responsabilité du médecin. Les plus connues sont celles d'infirmière et de kinésithérapeute.

B

barge. *n.* La barge est un chaland ou une péniche à fond plat, sans moyen de propulsion mécanique propre. Ce bateau est spécialement conçu pour être poussé.

bief. *n.* Partie d'une voie navigable (canal ou rivière canalisée) comprise entre deux chutes (dénivellation des plans d'eau) en général délimitées par des écluses. Parmi les biefs d'un canal de jonction de deux bassins versants, le bief de partage est celui qui est le plus élevé.

bogie ou **boggie.** *n.* Ensemble mécanique comportant les essieux, les suspensions et le cas échéant des moteurs, sur lequel est posée, par l'intermédiaire d'un pivot, la caisse du véhicule.

boîte noire. Type de modèle d'un système où on ne se préoccupe que des entrées et sorties, sans détailler les transformations.

brain drain. (de l'anglais *brain*, cerveau, et *drain*, drainage). Mouvement amorcé avec la guerre en 1939, systématisé lors de la libération de l'Allemagne par l'armée américaine et généralisé jusque vers 1965; les meilleurs chercheurs scientifiques européens, confirmés ou juniors, étaient attirés dans les laboratoires américains où ils pouvaient mener leurs travaux dans de bien meilleures conditions matérielles.

bretelle d'accès. Voie permettant d'accéder du réseau routier ordinaire à une autoroute.

C

cahier des charges. Document administratif fixant l'ensemble des conditions imposées à un contractant lorsqu'un organisme administratif lui attribue un marché de travaux, de fournitures, ou une concession de service public.

calcul de rentabilité. Calcul par lequel une entreprise détermine s'il est rentable d'effectuer un investissement tel que la construction d'une usine, le lancement d'un nouveau produit, etc. Un type simple d'un tel calcul consiste à évaluer le nombre d'années au bout desquelles l'excédent des recettes sur les dépenses d'exploitation aura remboursé la valeur de l'investissement (éventuellement augmentée de l'intérêt de l'argent).

carrefour à niveau. Carrefour de routes sans passage dénivelé.

carte sanitaire. Ensemble de plans d'implantation des lits d'hospitalisation et d'équipements médicaux coûteux. Les autorisations d'implanter de tels équipements sont nécessaires et tiennent compte de la densité du tissu hospitalier local par rapport à la population de la circonscription.

caténaire. *n.* Conducteur aérien à partir duquel les engins à traction électrique sont alimentés. En technique ferroviaire, le retour du courant électrique se fait par les rails.

cavitation. *n.* Phénomène physique conduisant à la formation de bulles de vapeur dans un liquide en mouvement. Ce phénomène apparaît lorsque, localement, la pression est inférieure à la tension de vapeur du liquide.

check-up. Technique de dépistage systématique de certaines maladies, qui consiste à passer chaque sujet au crible d'un certain nombre d'examens stéréotypés permettant de les déceler. Ce terme vient de l'anglais « to check up » : pointer, contrôler sur une liste.

C.H.U. (centre hospitalier et universitaire). Ensemble d'hôpitaux ayant signé une convention avec une université en vue de contribuer à la formation de médecins. Son corps médical comprend un grand nombre de praticiens qui sont en même temps des enseignants de médecine.

cisaillement. *n.* Intersection en un point de deux ou plusieurs courants de circulation sous un angle sensible.

clothoïde. *n.* Courbe à progression de courbure constante.

compost. *n.* Déchets, essentiellement d'origine urbaine, ayant subi certaines opérations mécaniques (tri, broyage, dilacération, etc.) et une fermentation dirigée de quelques jours à quelques semaines, obtenue en faisant varier un ou plusieurs facteurs du milieu.

compostage. *n.* Mode de traitement consistant à activer et à diriger la fermentation biologique naturelle des ordures ménagères afin de produire du compost.

conférence maritime. Une conférence maritime rassemble plusieurs armateurs qui assurent des lignes régulières entre des ports identiques. Elle définit les niveaux des frets sur ces destinations.

conglomérat. *n.* Société essentiellement financière et de contrôle de gestion, dont l'activité consiste à

prendre le contrôle du capital de sociétés industrielles, à le valoriser par une gestion dynamique et à encaisser les bénéfices, ou à revendre avec profit ces sociétés.

conteneur. *n.* Grande boîte étanche, préfabriquée suivant un type normalisé, que l'on remplit de marchandises et dont la manutention est facile. Les conteneurs sont transportés à bord de navires spécialisés appelés porte-conteneurs. Un conteneur standard mesure 12 m de long, 2,4 m de large et 2,4 m de haut.

contrepoids. *n.* Masse accrochée à l'extrémité d'un câble de manière à lui assurer une tension déterminée.

corridor autoroutier. Ensemble formé par une autoroute et les routes qui peuvent constituer un itinéraire alternatif, ainsi que les transversales assurant les communications entre les deux systèmes.

culée. *n.* Appuis extrêmes d'un ouvrage d'art.

culot. *n.* Extrémité de câble formée en disposant les fils en forme de tronc de cône ou de pyramide et en coulant un alliage fusible à faible température.

cybernétique. *n.* Discipline étudiant les régulations et les communications dans les systèmes vivants et les machines élaborées par l'homme.

D

décibel (dB). *n.* Dixième partie du bel; le bel est l'unité servant à évaluer l'intensité d'un son.

déjaugeage. *n.* Se dit d'un bateau qui navigue au-dessus de sa ligne de flottaison. Dans cette configuration, le principe d'Archimède ne s'applique plus.

déverminage. *n.* Phase de mise au point d'un système complexe au cours de laquelle sont éliminés les composants d'une fiabilité douteuse ou dont les caractéristiques sont moins bonnes que celles attendues.

dévers. *n.* Inclinaison transversale donnée au profil en travers d'une chaussée dans les courbes, pour diminuer l'effet de la force centrifuge sur un véhicule en mouvement.

diplôme national. Diplôme professionnel reconnu par l'État. Cette garantie pour l'utilisateur impose que la formation correspondante soit complète et adaptée, donc que les programmes nécessaires soient communs à tous les établissements de formation.

division (d'une grande entreprise américaine) (mot anglais). Pour faciliter leur gestion en allégeant les services bureaucratiques du siège et en décentralisant les processus de décision, les grandes entreprises de tous les pays s'organisent en « sous-entreprises » dont les activités industrielles et commerciales sont assez déliées les unes des autres. En américain, le mot « division » désigne de grandes « sous-entreprises » très autonomes. Le mot français « division » n'a pas la même signification dans toutes les entreprises.

DME. Initiales de Distance Measurement Equipment, partie « mesure de distance » du système TACAN, normalisé par l'O.T.A.N., pour la radionavigation des avions militaires.

docker. *n.* Ouvrier spécialisé qui assure la manutention dans les ports.

duc d'albe. Ouvrage servant à l'accostage ou à l'amarrage d'un navire. Il est souvent réalisé à l'aide de pieux enfoncés dans le sol.

E

échangeur. *n.* Ensemble des voies permettant l'intersection d'autoroutes ou de routes express dont les liaisons ne comportent aucun cisaillement de courant de circulation.

effluent (liquide ou gazeux). *n.* Terme, utilisé dans le contexte de la pollution et de la gestion de l'environnement, désignant un fluide produit au cours d'une activité (production, consommation...) et rejeté dans le milieu naturel.

élasticité. *n.* Qualité d'un corps relative à sa capacité de déformation.

engineering ou **ingénierie.** *n.* Le néologisme français n'a pas encore supplanté le mot américain. L'activité d'ingénierie consiste, à partir d'un « cahier des charges » général indiquant les procédés techniques principaux, la taille et le coût d'investissement, à calculer et choisir tous les éléments d'une usine ou de toute autre grande installation (immeuble, hôpital, voie ferrée,...), à les dessiner, commander les matériels, planifier et suivre les travaux jusqu'à la réception de l'installation.

entreprise. *n.* Ensemble intégré de personnes, de capitaux, de moyens de production et de commercialisation, soumis à un système de décision cohérent et raisonnablement autonome, pour produire biens et services destinés à des utilisateurs. Le concept d'entreprise peut donc être distinct de celui de société juridique. Et bien souvent le domaine d'extension d'un « Comité d'entreprise » ne correspond pas à une entreprise telle qu'elle est définie ci-dessus.

épi. *n.* Ouvrage que l'on implante dans les rivières ou le long des côtes pour régulariser un cours d'eau ou assurer la stabilité d'une plage. L'épi est constitué en général d'enrochements déversés sur un tapis de fascines qui les isole du sol.

épissure. *n.* Jonction de deux câbles, ou des deux extrémités d'un même câble, réalisée par entrelacement des torons (*voir* ce mot), avec un minimum de surépaisseur.

EPNdB. Effective Perceived Noise Decibel. Unité acoustique tenant compte de la durée du bruit.

essai Proctor. Essai permettant d'apprécier l'influence sur le compactage de l'énergie dépensée et de la teneur en eau du sol.

établissement. (industriel, commercial, administratif, sanitaire, etc.). *n.* Ensemble de personnes et de moyens matériels, immeubles ou meubles, installés ou basés en un seul lieu, à une seule adresse et sous le contrôle d'une seule autorité locale. Une entreprise sera souvent constituée de plusieurs établissements : des usines, des dépôts et agences commerciales, un siège.

état. *n.* Ensemble de variables dont la connaissance à l'instant t_0, adjointe à celle des entrées, permet de calculer les sorties d'un système pour t supérieur à t_0.

étiage. *n.* État d'une rivière en période de faibles débits. Pour une rivière non aménagée, l'étiage se caractérise par une faible hauteur d'eau. L'étiage s'oppose à la crue.

étude de marché. Étude par laquelle une entreprise cherche à mieux connaître la destination de ses produits actuels ou nouveaux, leurs utilisateurs intermédiaires ou finals, le degré de satisfaction de ces utilisateurs face à la qualité, au prix des produits et, évidemment, aux produits concurrents. L'étude de marché s'appuie surtout sur l'analyse des ventes et sur des enquêtes. Le premier résultat d'une étude de marché est la prévision des ventes.

externe - interne. Étudiants de médecine (ou de pharmacie) exerçant une fonction à l'hôpital. L'interne est tenu de résider à l'hôpital au moins une partie de son temps.

extrados. *n.* Partie supérieure d'un corps portant (aile) qui est le siège d'une dépression. La partie inférieure qui est en surpression est appelée *intrados*.

F - G

feuilletage. *n.* Remplacement d'une pièce ferromagnétique massive par une pièce composée d'un grand nombre de tôles minces isolées électriquement les unes des autres. Cette opération a pour objet d'empêcher la circulation de courants induits dans la pièce ferromagnétique (*ex. :* carcasse de transformateurs).

forces de sustentation (ou de lévitation). Forces qui agissent sur un corps et équilibrent les forces de pesanteur, c'est-à-dire son poids. Le terme sustentation est de nature plus technique que le terme lévitation.

franc-bord. *n.* Marques peintes sur les flancs des navires, constituées par deux lignes horizontales qui selon les saisons et les mers, indiquent l'enfoncement dans l'eau que le navire en charge ne peut pas dépasser.

fret. *n.* Prix de transport d'une marchandise payé à un transporteur maritime (l'armateur) par le propriétaire de la marchandise transportée. Ce prix rémunère les services fournis par l'armateur ou effectués sous sa responsabilité.

gabarit. *n.* Courbe enveloppe des différentes positions susceptibles d'être prises par un véhicule guidé.

gadoue. *n.* Terme parfois utilisé pour désigner certains déchets urbains (ordures ménagères, détritus de marchés) ou des produits du nettoiement des voies publiques.

galet. *n.* En mécanique, petite roue en acier. Dans les appareils à câble, petite poulie à gorge où l'on considère que le contact câble-galet est ponctuel.

glissières de sécurité. Ensemble permettant d'empêcher un véhicule de quitter une chaussée.

granulométrie. *n.* Résultat de l'analyse de la dimension des grains qui composent un sol.

I - J - L

ILS. Instrument Landing System. Système d'aide non visuelle à l'approche et à l'atterrissage.

investissement. *n.* Dépense d'achat de biens de production (machines, bâtiments, brevets, etc.) qui seront exploités pendant plusieurs années. Ces dépenses seront amorties sur de grandes quantités de produits.

jauge. *n.* Donne le volume d'un navire exprimé en tonneaux de jauge. Le tonneau de jauge correspond à 100 pieds cubes anglais, soit 2,83 m³. La jauge brute (tjb) est le volume intérieur (cales, cabines, machines) du navire. La jauge nette correspond au volume utilisable pour le transport.

liants hydrocarbonés. Liquides visqueux ayant en général une forte adhésivité pour les pierres (au moins du même ordre de grandeur que celle de l'eau). Ce peut être un bitume, un brai mou ou un goudron de houille, ou encore un mélange.

M

management. *n.* Mot d'origine anglo-saxonne et maintenant admis en français pour désigner la responsabilité et l'ensemble des méthodes modernes de direction et gestion d'une entreprise. Le concept de management se distingue de celui de commandement : il implique une part importante de persuasion et de motivation, tant des clients que du personnel de l'entreprise.

marché test. L'un des moyens de prévoir quel sera l'accueil par la clientèle d'un nouveau produit ou d'un nouvel emballage est d'en lancer une petite série dans un secteur du marché, par exemple dans un grand magasin, et d'étudier attentivement la réaction des clients. Après avoir éventuellement modifié le produit ou l'emballage, on lancera une grande série sur l'ensemble du marché. S'il s'agit d'un produit entièrement nouveau, la quantité nécessaire au marché test aura pu être fabriquée par

une unité pilote, c'est-à-dire par la petite usine expérimentale qui a servi à mettre au point le procédé de fabrication.

marketing. *n.* Ensemble des flux d'informations établis entre une entreprise et ses clients actuels ou potentiels. Les informations remontant vers l'entreprise résulteront en grande partie des études de marché. Le flux inverse comprendra essentiellement la promotion des ventes.

mécanique des sols. Science dont le but est d'analyser la déformation du sol suivant les actions auxquelles il est soumis.

mille marin. Le mille marin est une mesure internationale de longueur qui vaut 1 852 m. Il correspond à la longueur d'une minute de méridien. L'unité de vitesse correspondante est le *nœud :* 1 mille marin par heure.

MLS. Microwave Landing System. Système de guidage devant succéder à l'ILS (*voir* ce sigle) dans les années 1980.

modélisation. *n.* Construction d'un modèle de comportement d'un système à partir des données.

mordache. *n.* Dans un téléphérique, sorte d'étau à vis permettant à celui-ci de se fixer sur un câble. Désigne particulièrement la partie en contact avec le câble.

O

OACI. Organisation de l'aviation civile internationale.

observabilité. *n.* Caractère d'un phénomène physique, technique ou économique que l'on peut observer directement avec des appareils de mesure. Un phénomène non observable directement peut être apprécié par ses effets indirects, ou au travers d'évaluations statistiques. *Ex. :* le nombre de voitures circulant dans une rue est observable. L'état de corrosion de la conduite d'eau sous la rue n'est pas observable, mais peut conduire à une fuite bien observable.

officine. *n.* Point de vente de médicaments au public. Le nombre d'officines est réglementé; chacune doit être dirigée par un pharmacien qui veille à respecter les conditions normales et non dangereuses de prescription des médicaments aux malades.

oligopole. *n.* État d'un secteur économique dominé par un petit nombre d'entreprises. *Ex. :* la fabrication des ordinateurs.

onduleur. *n.* Appareil électronique de puissance, composé principalement de thyristors qui transforment une tension électrique continue, fournie par une batterie par exemple, en une tension alternative à fréquence programmée.

ouverture. *n.* Distance entre appuis extrêmes.

ouvrages d'art. Pont, viaduc ou tunnel.

P

palette. *n.* La palette est un plancher constitué de deux plateaux de bois séparés par des chevrons pour permettre le passage des fourches d'un chariot élévateur. On dispose des marchandises diverses sur ce plancher. Les dimensions standardisées sont de 1,2 m sur 1,8 m.

pantographe. *n.* Appareil monté sur le toit des engins à traction électrique, qui capte le courant à la caténaire et le transmet à la chaîne de traction.

pas polaire. Distance généralement exprimée en millimètres, séparant deux pôles magnétiques consécutifs et de signes opposés sur l'inducteur d'une machine électrique (alternateur ou moteur).

PCEM - DCEM. Premier et deuxième cycles des études médicales. Les études médicales comprennent 2 ans de formation générale et scientifique (PCEM) et quatre ans de formation à l'exercice professionnel (DCEM). L'étudiant termine ensuite ses études en subissant les examens de clinique, en effectuant au moins un an de service d'interne à l'hôpital et en soutenant sa thèse.

pente d'eau. Ouvrage de navigation intérieure permettant aux bateaux de franchir une chute d'eau importante. Il existe une pente d'eau en France, à Montech, sur le canal latéral à la Garonne.

pile. *n.* Appui intermédiaire d'un ouvrage d'art.

pilonnement. *n.* Mouvement vertical auquel est soumis un véhicule. Ce mouvement ne doit pas être confondu avec le tangage qui correspond à une rotation du véhicule autour d'un axe horizontal perpendiculaire au déplacement.

plan incliné. Ouvrage de navigation intérieure permettant aux bateaux de franchir une chute d'eau importante. Le plan d'eau d'Arzviller est latéral, et celui de Ronquierre longitudinal.

poinçonnement. *n.* Déformation d'un revêtement sous l'effet d'une charge transmise par une surface d'appui relativement peu importante, se traduisant par l'enfoncement de cette surface d'appui dans le revêtement.

point de pupinisation. Désigne la localisation — extrêmement précise — d'une réactance de self (enfermée dans un pot protégé par du brai) afin d'injecter dans le réseau téléphonique (câbles à longue distance) la puissance nécessaire au renforcement de la modulation.

pont à hauban. Pont suspendu grâce à un seul câble.

port en lourd. C'est le poids maximal qu'un navire peut transporter, y compris les soutes, les vivres, les approvisionnements nécessaires à son fonctionnement et l'équipage. Il est exprimé en tonnes. Le poids total d'un navire s'appelle le déplacement du navire. Il peut s'estimer par la formule D = 1,2 P, où D est le déplacement et P le port en lourd (en tonnes).

portance. *n.* Composante verticale des forces de sustentation qui s'exercent sur un véhicule. L'idée de portance est généralement liée à l'idée de mouvement (*ex. :* portance aérodynamique).

portée. *n.* Distance qui sépare deux appuis successifs.

prévention médicale. Méthodes permettant d'éviter la survenue de maladies (prévention primaire) ou leur extension et leur aggravation par un dépistage précoce (prévention secondaire), ou encore des complications dans leur évolution. La prévention peut agir sur l'individu lui-même (vaccination) ou sur le milieu environnant (protection sur les machines, réglementation des produits alimentaires, etc.).

productivité. *n.* Rapport de la valeur de biens produits à la valeur des ressources utilisées à cet effet : matières premières, main-d'œuvre, usure des machines, etc. Cette notion est utilisée plutôt en comparatif qu'en absolu : on dira qu'une organisation est plus productive qu'une autre, on parlera de « gain de productivité ».

professions paramédicales. Professions qui s'apparentent à celle du médecin, soit complémentaires (pharmaciens), soit limitées à un domaine spécialisé de soins (dentistes, sages-femmes). On les distingue des auxiliaires médicaux (*voir* ce terme).

promotion des ventes. Ensemble d'actions, dépassant l'activité normale du réseau commercial, pour développer les ventes des produits de l'entreprise sur le marché. Les moyens utilisés seront : la publicité, une politique de prix, l'amélioration des emballages, des garanties, du service après vente, etc.

propulsion. *n.* Ensemble des organes qui permettent la création d'une force assurant le déplacement d'un véhicule (*ex. :* hélice d'un bateau, propulsion électrique d'un train, etc.).

pulsadis. *n.* Système émetteur situé à l'origine d'une installation E.D.F., superposant une fréquence de 170 à 180 Hz à la fréquence industrielle de 50 Hz afin de fermer le contacteur (récepteur) agissant sur le compteur de l'abonné.

pulsé. *adj.* Qualifie un mouvement unidirectionnel dont la vitesse varie à intervalles réguliers.

R

raideur en assiette. Caractéristique dynamique des organes de sustentation qui permettent le contrôle des mouvements de tangage, de roulis et de pilonnement.

rayon de courbure. Rayon du cercle tangent, au point considéré, à la courbe décrite par la route.

recueil automatique de données. Système permettant d'obtenir des informations sans intervention manuelle.

réhabilitation. *n.* Techniques favorisant la récupération de fonctions physiques ou mentales perturbées par la maladie. Méthodes contribuant au retour à une vie normale des malades et handicapés, et à leur réinsertion sociale.

réseau Freycinet. Le réseau Freycinet est constitué des canaux réalisés en France à la fin du siècle dernier dans le cadre d'un programme d'équipement lancé par le ministre Freycinet. Ces voies navigables représentent encore la majeure partie des voies françaises. Ses caractéristiques limitent ce réseau au passage d'automoteurs d'environ 300 tonnes.

résistance des matériaux. Étude des propriétés physiques des corps.

rétroaction. *n.* Action porteuse d'information, des sorties vers les entrées d'un système.

S

sabot. *n.* Pièce en forme de secteur de tore et pourvue d'une gorge sur laquelle repose un câble légèrement mobile. *Ex. :* appui sur un pylône d'un câble porteur de téléphérique.

Sécurité sociale. Organisation destinée à venir en aide aux personnes ou aux familles d'un pays lorsqu'elles peuvent difficilement subvenir à leurs besoins du fait de la maladie, d'un accident, d'un handicap. Les paiements se font grâce au *transfert* de l'argent collecté auprès de tous les membres de la collectivité par des cotisations obligatoires ou par l'impôt.

seuil. *n.* Dans le cadre des transports par eau, un seuil est un obstacle naturel à la navigation ; *ex. :* la ligne de partage des eaux entre deux bassins versants.

simulation. *n.* Étude du comportement d'un système dans le temps, à partir d'un modèle mathématique.

stable. *adj.* Caractéristique d'un point d'équilibre vers lequel tend l'état d'un système quand le temps augmente. On dit aussi *nœud.*

stationnaire. *adj.* Caractéristique d'un état n'évoluant pas avec le temps.

synoptique. *n.* En matière d'exploitation routière, le synoptique est une carte murale où sont visualisés, à l'aide de voyants lumineux de différentes couleurs, les niveaux de trafic de chaque tronçon de l'autoroute.

système. *n.* Ensemble d'éléments en interaction, élaboré pour satisfaire un objectif déterminé.

système isolé. Système n'échangeant ni matière, ni énergie, ni information avec l'extérieur.

système ouvert. Système échangeant matière, énergie ou information avec l'extérieur.

systémique. *n.* Méthode d'étude ou d'action qui utilise les acquis de la théorie des systèmes. Ce néologisme veut se distinguer de « systématique », qui ne vise que des cas plus simples ou triviaux : enchaînement de causes à effets, répétitions, etc.

T

terminal. *n.* Installation portuaire spécialement aménagée pour la réception de navires tels que pétroliers (terminal pétrolier), porte-conteneur (terminal à conteneurs), minéralier (terminal minéralier), etc.

terre-plein central. Partie non bitumée située entre deux chaussées d'autoroute.

théorie de l'information. Quantification de la notion d'information. L'ensemble du formalisme mathématique est dû à Shannon.

théorie des systèmes. Formalisation mathématique susceptible de décrire des comportements de systèmes, indépendamment de leurs finalités spécifiques.

ticket modérateur. Part de la dépense en soins médicaux qui n'est pas remboursée par la Sécurité sociale. En obligeant l'assuré à prendre en charge personnellement une partie des frais créés par les soins, il est destiné à modérer la tendance à l'accroissement des dépenses facilitée par la prise en charge collective. Son effet est en partie neutralisé par les remboursements complémentaires des mutuelles et les nombreuses exceptions à son application.

tiers payant. Mécanisme par lequel le malade n'a pas à avancer le paiement des soins. Ceux-ci sont alors directement payés par un tiers, Sécurité sociale ou mutuelle. Il est la règle pour les accidents du travail.

toboggan. *n.* Viaduc provisoire permettant le croisement de deux voies à des niveaux séparés.

toron. *n.* Élément d'un câble composé de plusieurs fils enroulés sur eux-mêmes. Les torons sont ensuite enroulés autour d'une âme pour constituer certains câbles.

tour de rôle. Le tour de rôle est la règle appliquée pour les transports par voies navigables, selon laquelle les demandes de transport émanant des chargeurs sont réparties entre les artisans bateliers suivant le rang dans lequel les bateaux, après déchargement, deviennent disponibles.

traînée aérodynamique. Appelée aussi résistance de l'air; force due au mouvement d'un mobile dans l'air qui s'oppose à son déplacement.

trajectoire de fuite. Trajectoire parcourue par un objet sous l'influence d'une poussée.

tramping. *n.* Type de transport maritime dans lequel le navire charge la marchandise disponible en fonction d'accords appelés chartes-parties de courte durée. En anglais, tramping signifie vagabondage.

travée. *n.* Espace libre entre deux appuis.

treuil. *n.* Cylindre mobile autour de son axe sur lequel s'enroule un câble. Ensemble constitué avec le moteur qui actionne le cylindre. *P. ext.*, ensemble de la machinerie d'un téléphérique.

U - V

unidirectionnel. *adj.* Se dit d'un mouvement qui s'effectue toujours dans le même sens.

usine. *n.* Établissement industriel qui concentre en un lieu des machines qui produisent ou utilisent des quantités notables d'énergie; *ex. :* l'usine électrique d'un complexe hydro-électrique. Une usine peut également employer une main-d'œuvre abondante. *Ex. :* une usine textile. Dérivé : « usiner »; *ex. :* usiner une pièce mécanique sur une machine-outil.

utilisabilité. *n.* Caractère d'un produit ou procédé technique qui peut être effectivement utilisé pour satisfaire les besoins de clients ou d'usagers. L'utilisabilité peut se heurter à des obstacles techniques ou économiques, mais aussi à des impératifs de sécurité ou de protection de l'environnement, à des critères éthiques ou, tout simplement, à la défaveur prévisible des usagers.

viaduc. *n.* Ouvrage de grande longueur comportant de nombreux appuis intermédiaires.

voie d'accélération. Surface, en bordure de chaussée d'une autoroute, réservée aux véhicules accédant à cette voie.

voie de décélération. Surface, en bordure de chaussée d'une autoroute, réservée aux véhicules quittant cette voie.

VOR. Very High Frequency (VHF) Omnidirectional Range. Radiophare omnidirectionnel à très haute fréquence.

V.R.D. Voirie et réseaux divers.

INDEX DES NOMS CITÉS

Les références sont données par l'indication du numéro de la page où se trouve le terme, suivi, le cas échéant, des lettres *a* et *b* se rapportant respectivement à la colonne de gauche et à la colonne de droite de chaque page.

Les références sont données, pour les illustrations, par le numéro de la page en caractères gras et, pour le texte, par le numéro de la page en caractères maigres pour une simple citation, et en italique pour un développement plus complet.

Pour les différentes variantes se rattachant à un même terme, un astérisque indiquera le renvoi à ce dernier. *Ex.* :
fardier
* véhicule à vapeur de Cugnot
véhicule à vapeur de Cugnot (fardier) **95**

U - V

ERRATA

Page 126, dans la légende concernant les illustrations figurant en bas de page, lire : *Aérotrain* interurbain I.80 H.V. équipé d'un réacteur insonorisé (et non : Hélice carénée de l'*Aérotrain* interurbain I.80).

Page 130, remplacer la légende concernant la *figure* 25 par :
A droite, *figure* 25 : système électromagnétique en similitude. Correspondance des grandeurs principales.

Page 135, dans la *figure* 25, la partie du haut représente le *modèle réel*, la partie du bas, la *maquette*.
La force f est égale à $F \cdot e^2$ et ni est égal à $N/ \cdot e$.

Page 175, dans le paragraphe ***Caractéristiques et contrats techniques***, à la 13^e^ et à la 20^e^ lignes, lire : point de pupinisation (et non point de purpinisation).

GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

TECHNOLOGIE IV

GRANGE BATELIÈRE, ÉDITIONS ATLAS, PARIS - ÉDITIONS KISTER, GENÈVE
ÉDITIONS ÉRASME, BRUXELLES-ANVERS

UNITED
N1004U
UNITED
UNITED
N7031U
UNITED
UNITED
N7403U
UNITED

Réalisation	IDÉES ET ÉDITIONS 16, avenue de Friedland, 75008 Paris.
Comité de direction	Simone DEVAUX, Uberto TOSCO.
Rédaction	Françoise MENU, Monique LIONS-GENTIL, Vanina DORÉ, Marie-Noëlle PAILLETTE.
Recherche de l'illustration	Mathilde RIEUSSEC.
Mise en pages	Tito TOPIN et Serge BROCHE.
Illustrations techniques	Richard COLIN.
Coordinateur des dessins	Mario LOGLI.
Fabrication	Sylvia COLIN, Jocelyne TÉPÉNIER.
Directeur de la publication	Bernard BOSC.

Les schémas portant la référence Richard Colin
ont été réalisés d'après des croquis fournis par les auteurs.

Dans ce volume :

LA TECHNOLOGIE (IV)
LES SYSTÈMES

Théorie des systèmes
L'entreprise et l'usine
Le système de santé en France
Les systèmes de transport
L'astronautique

Ont collaboré à ce volume :

pour la théorie des systèmes :

B. DUBUISSON.

pour l'entreprise et l'usine :

R. COLCOMBET.

pour le système de santé en France :

G. BROUN.

pour les systèmes de transport :

L. LEWDEN, pour le système de transport par air.

M. LEYRIT, D. DUNOYÉ, C. H. BROUSSAUD, pour les modes nouveaux de transport.

M. PERNIER, pour le système de transport par eau.

P. PERROD, pour le système de transport par route.

X. SIX, pour le système urbain.

A. SOURY-LAVERGNE, pour le téléphérique.

Dépôt légal : 1er trimestre 1978.
Imprimé en Italie par I.G.D.A. Officine Grafiche, Novara.

N. Cirani

LES SYSTÈMES - THÉORIE

Un des mots à la mode actuellement est celui de « système »; on effectue l'étude des systèmes dans de nombreux domaines. A quoi répond ce besoin? Et qu'est-ce que la théorie des systèmes?

Nous allons tenter de montrer qu'il s'agit à la fois d'une évolution des sciences vers la compréhension et la maîtrise d'ensembles de plus en plus complexes, et d'une tentative de modélisation du vivant.

Notre époque voit des transformations si rapides : évolution de l'énergie, développement de l'informatique, complexité croissante des machines, des armements nés des derniers conflits, que, pour atteindre un objectif donné, il faut réunir une équipe pluridisciplinaire de spécialistes; ceux-ci vont recenser toutes les solutions possibles afin de choisir la meilleure, les problèmes n'étant plus assez « simples » pour qu'un seul spécialiste (mathématicien, physicien, biologiste) puisse les résoudre à lui seul. Ce mode d'approche ne s'applique pas seulement à la science ou à la technologie : dans le domaine politique, pour ne parler que d'un des plus importants, il a permis d'esquisser l'analyse de certains problèmes; nous ne citerons pour exemple que l'excellente étude réalisée aux États-Unis sur le crime et la délinquance juvénile.

Historiquement c'est pour expliquer et modéliser les phénomènes biologiques qu'a débuté ce type de raisonnement. Reprenant un concept déjà ancien, en l'explicitant, Ludwig von Bertalanffy a lancé en 1932 l'idée d'une théorie générale des systèmes. Dans son livre qui porte ce titre, il précise qu'il était intrigué par les lacunes qu'il rencontrait au début des années 1920 en biologie théorique, et qu'il les attribuait au mode d'approche mécaniste des recherches, ne tenant aucun compte du phénomène essentiel de la biologie, la vie. Il mit donc en avant une conception organique de la biologie en lui fixant comme objectif prioritaire la découverte des principes d'organisation. Mais ces idées, malgré leur caractère précurseur, n'ont pas eu au départ un grand retentissement, ni en biologie, ni dans d'autres domaines. Pour certains, elles avaient un aspect évident, voire trivial, pour d'autres ce n'était qu'une « mathématisation » de plus, une abstraction qui n'aurait pas de conséquence.

Maintenant, on parle beaucoup d'analyse des systèmes (sans toujours bien savoir de quoi il s'agit), on a recours à des modélisations pour étudier des phénomènes complexes, dans lesquelles on fait apparaître le jeu des interactions.

Il faut dire qu'entre 1947 et 1949 est apparu de manière indépendante un courant de pensée parallèle à celui de Bertalanffy, représenté par des travaux qui, eux, ont eu un grand renom dès le début : ceux de Wiener sur la cybernétique, ceux de Shannon sur la théorie de l'information, ceux de von Neumann sur la théorie des jeux.

▲▶ L'étude des systèmes relève souvent de celle des interactions entre les différents éléments constitutifs plutôt que de celle des relations quantitatives. La théorie des graphes prend ainsi un grand intérêt; des problèmes de trafic urbain (ci-dessus, un échangeur à Los Angeles) ont ainsi été posés et parfois résolus, notamment au Japon (page 6, figure 1) par l'emploi de simulateurs de trafic; les circuits L.S.I. du simulateur sont ordonnés selon les mêmes dispositions que le réseau urbain; chaque composant a la propriété de retarder plus ou moins le passage d'un courant électrique selon les données transmises en permanence par les détecteurs de véhicules. L'itinéraire le plus rapide correspond donc au circuit parcouru le plus brièvement par une pulsion électrique, ici le composant (a) est réglé pour un temps de passage de 50 s de a à b; (c) pour un temps de 60 secondes de c à d, le courant passe plus vite en empruntant (c) et (d) donc le meilleur itinéraire est AcdB [paru dans le Monde du 16-11-1977].

FIG. I

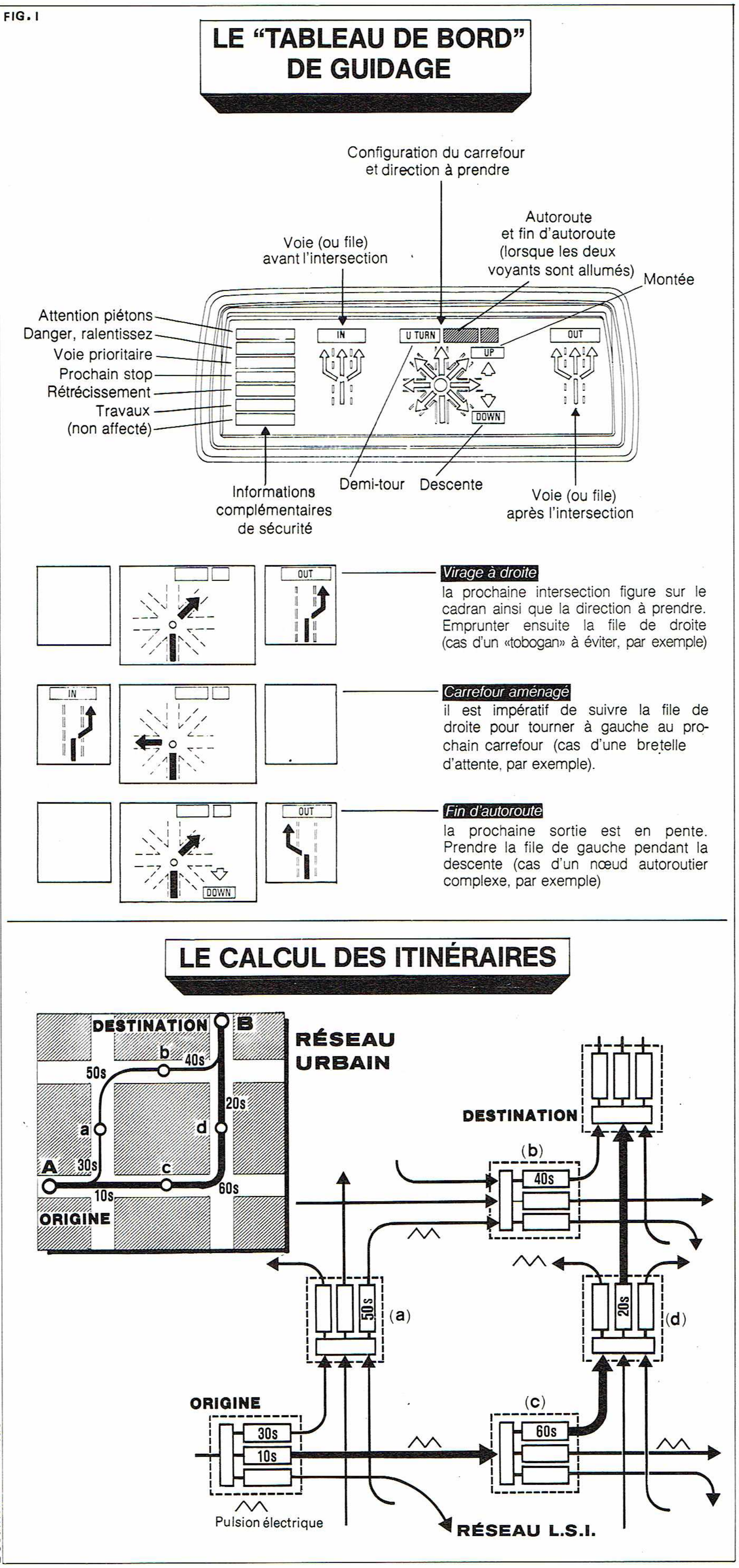

Document Le Monde

Avant d'exposer ce qui fait la spécificité de la théorie des systèmes, voyons ce qu'elle a de commun avec différentes disciplines, comment elle fait appel à leurs méthodes en se les appropriant, en suivant toujours von Bertalanffy, ou Drischel. Une première approche est donnée par la théorie des ensembles ; celle-ci permet en effet une axiomatisation des concepts : citons en particulier les travaux de Mesarovic. Beaucoup plus classique est l'approche par l'analyse mathématique : techniques d'étude des systèmes à partir de grandes classes de problèmes comme les équations de diffusion (en chimie, par exemple), les principes de cinétique (écologie), la mécanique statistique, etc. L'étude de systèmes relève souvent de celle des interactions entre éléments, c'est-à-dire de propriétés structurelles ou topologiques, plutôt que de relations quantitatives ; la théorie des graphes prend ainsi un grand intérêt : des problèmes de flux de matière, de trafic urbain ont été posés de cette manière et résolus (fig. 1).

La cybernétique, elle, étudie les systèmes en se fondant sur l'échange entre ceux-ci et l'extérieur (l'environnement), et sur le phénomène de rétroaction ; cette méthode du type « boîte noire », qui permet de représenter le système comme un tout, sans distinguer son intérieur, mais en étudiant les entrées, les sorties et les perturbations, a été et est toujours utilisée pour les mécanismes vivants. On ne peut parler de cybernétique sans parler de théorie de l'information. Normalisée par Shannon, elle a d'abord servi surtout à résoudre des problèmes de communication ; elle s'applique aujourd'hui à des systèmes très différents : organisations, reconnaissance de caractères.

Le point de vue « automates » permet de représenter des processus si ceux-ci se révèlent décomposables en un nombre fini d'opérations logiques. Il s'agit d'une méthode du type algorithmique, car elle consiste en une étude logique des différentes phases du processus. Il faut citer l'approche « théorie des jeux » qui permet d'étudier des ensembles antagonistes, l'approche « théorie de la décision » qui permet d'axiomatiser les choix entre diverses possibilités. L'informatique, enfin, par le biais de la simulation, donne le moyen de tester les modèles choisis, d'évaluer leur sensibilité ainsi que les solutions proposées, donc de savoir si la voie choisie est intéressante ou non.

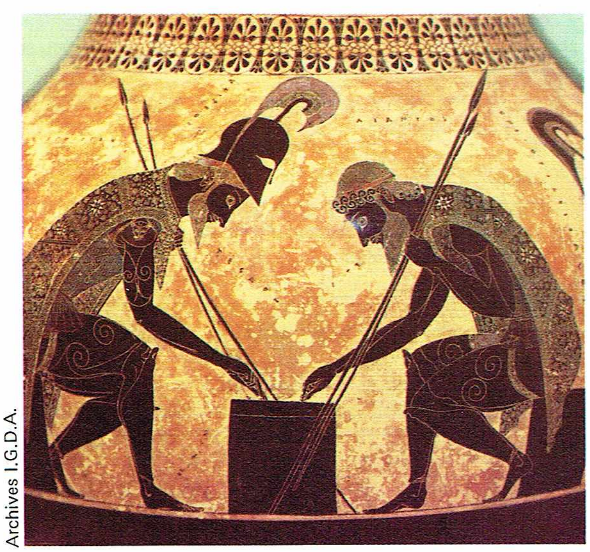

Archives I.G.D.A.

Une théorie générale des systèmes

Jusqu'ici, la Science a tenté d'expliquer les observations par un ensemble d'actions élémentaires qu'on pouvait étudier indépendamment les unes des autres. Puis, la complexité augmentant, on s'est aperçu qu'il fallait une approche globale, tenant compte aussi bien des éléments que de leurs interactions, donc aussi bien de la structure que des propriétés de chaque élément pris séparément : c'est ce qu'on peut appeler l' « approche système ». Une image très grossière peut en être donnée par l'exemple suivant : soit à étudier l'évolution d'une forêt « importante »; comme elle est composée d'arbres — c'est évident — on peut étudier les différentes essences, leurs évolutions, leurs adaptations, leurs maladies : c'est le mode d'approche classique, par l'élément. Une approche « système » considère la forêt comme un tout, globalement, la replace dans le contexte extérieur (eau pluviale, pollution de certaines zones, zones climatiques, densité des arbres, etc.) et étudie l'évolution de l'ensemble, non la juxtaposition de l'évolution de chaque arbre, mais un modèle total. Cette étude a effectivement été faite pour la forêt canadienne (*fig.* 2).

On voit ainsi que la théorie des systèmes est nécessairement une science pluridisciplinaire. On peut rapprocher cet esprit multidisciplinaire de la théorie des probabilités, qui formalise l'aléatoire, et dont les applications sont multiples : domaines biologique, biomédical, phénomènes de mortalité, contrôle de qualité de fabrication, etc.

Prenons un autre exemple : les progrès réalisés en technique de détection radar ont permis d'améliorer les diagnostics effectués avec l'aide d'ordinateur; ainsi, les résultats obtenus dans un premier système, technique, sont utilisables dans un second système, ici un système vivant. Il semble donc exister des lois générales des systèmes qui s'appliquent chacune à une classe de systèmes, indépendamment des propriétés particulières, des éléments et des interactions de ces systèmes. La théorie des systèmes va développer ces lois générales, ce qui permettra de formuler des lois exactes dans les domaines scientifiques autres que physiques.

La théorie des systèmes semble actuellement une science en pleine expansion, en prenant comme ses sous-ensembles la théorie de l'information, la cybernétique, la modélisation... C'est ainsi qu'a été créé à Vienne (Autriche) un organisme international comprenant des pays de l'Ouest comme de l'Est pour développer des études de ce type, l'*International Institute for Applied System Analysis*.

Dans l'approche physique classique, on ne considère que des systèmes isolés, coupés de l'extérieur (par exemple, les lois de la thermodynamique pour les systèmes fermés). Mais la nature ne crée que des systèmes interagissant avec l'environnement, des *systèmes ouverts*. Les systèmes vivants, ouverts par essence, sont pourtant stables, ce qui résulte de la lutte continuelle de l'intérieur et de l'extérieur. La physique s'est peu à peu intéressée à ces systèmes ouverts, ce qui a permis de dégager notamment le principe de l'*équifinalité*. Si l'on considère un système n'échangeant pas d'informations avec l'extérieur, son état final est entièrement déterminé par les conditions initiales. Ainsi, la position des planètes au temps t dans le système planétaire est-elle obtenue en résolvant les équations du mouvement à partir de $t = t_0$ où l'on connaît leurs positions respectives. La solution est unique en général, et l'on peut tracer les positions au temps t en fonction des positions au temps initial t_0. Cette fonction va caractériser le système fermé. Par contre, pour un système ouvert, le même état final peut être atteint pour des états initiaux différents, puisque rentrent en jeu les interactions avec l'extérieur. Les corrélations mêmes entre l'état initial et l'état final peuvent être différentes pour des mêmes états initiaux et finals; cela constitue l'équifinalité.

Le retentissement de ce principe a été grand, en particulier pour les systèmes biologiques. Pour les systèmes technologiques, c'est toute la différence entre systèmes sans entrées (fermés) et avec entrées (ouverts). Un système technique partant avec les mêmes conditions initiales peut arriver à des états finals différents. Un exemple de système ouvert, qui n'est tiré ni de la biologie ni de la technologie, est celui de la forêt canadienne, que nous avons cité plus haut.

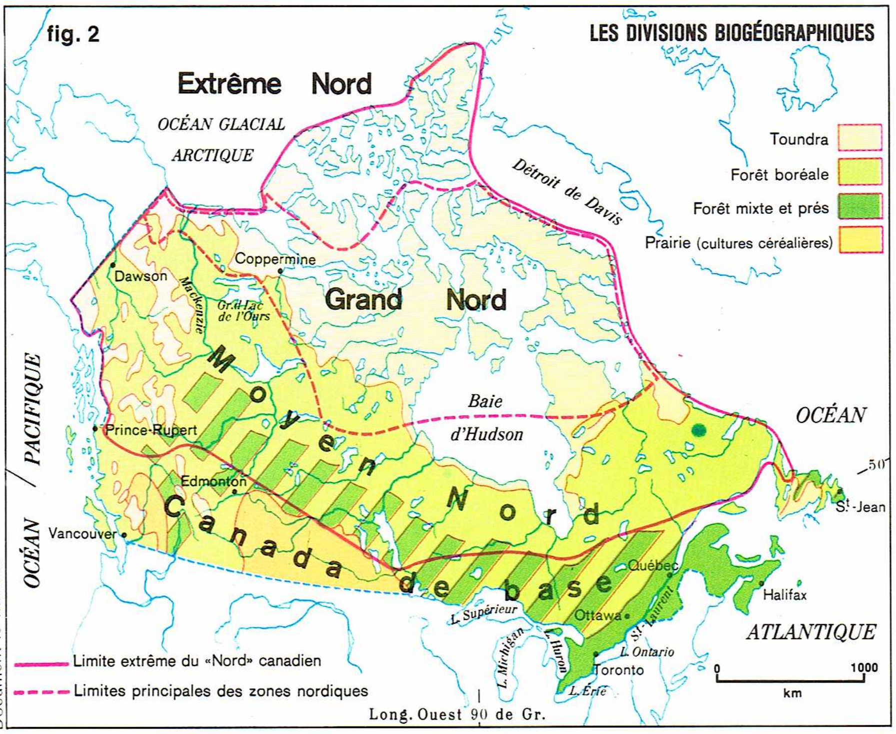

Document le Million

▲ *Figure 2 : une approche « système » d'une forêt étudiera celle-ci comme un tout replacé dans son contexte extérieur et s'intéressera à l'évolution de l'ensemble plutôt qu'à celle de chaque arbre ou espèce d'arbre. Cette sorte d'étude a été faite pour la forêt canadienne dont la répartition sur le territoire est indiquée ci-dessus.*

Proche de la théorie des systèmes, la théorie de la communication, par la quantification de l'information, proposée à l'origine par Shannon, permet, en effet, de saisir, c'est-à-dire de comptabiliser les échanges d'informations entre les différents éléments du système comme entre le système et l'extérieur. Parallèlement au concept d'information intervient le concept de rétroaction cher à la cybernétique : le système a, au niveau de ses entrées, des informations sur le comportement de ses sorties (*fig.* 3), ce qui peut le rendre autorégulé en garantissant stabilité et direction de l'action. La technologie actuelle a largement utilisé ce concept de rétroaction, base de l'automatique (commande régulée dans les usines, missiles à tête chercheuse, asservissement de température, etc.) ; on sait réaliser aujourd'hui des systèmes optimisés (c'est-à-dire calculer la ou les commandes de façon à satisfaire un critère, par exemple la minimisation de la consommation d'énergie), adaptatifs (c'est-à-dire dont le modèle présumé utilisé pour leur commande évolue en paramètres avec le système étudié), optimisés en milieu stochastique (c'est-à-dire commandables, alors que soumis à des perturbations aléatoires). La richesse des travaux faits actuellement prouve, à elle seule, la richesse du sujet. Il faut dire en conclusion que

◀ *L'approche « théorie des jeux » permet d'étudier des ensembles antagonistes. Page ci-contre, une amphore d'Ézéchias représentant Achille et Ajax jouant aux dés (Musée Gregoriano Etrusco, Rome, Italie).*

R. Schurch - Parimage - Camera Press

◀ *Si l'on considère un système n'échangeant pas d'informations avec l'extérieur, son état final est entièrement déterminé par les conditions initiales. Il en est ainsi pour les planètes dont on connaîtra la position au temps t, grâce à la donnée de leur position au temps t_0 et de l'équation de leur mouvement. On parlera de système fermé.*

▶ *Figure 3 : si l'homme a introduit la rétroaction dans les systèmes technologiques, c'est en partie parce que c'est un élément caractéristique des systèmes vivants, par exemple au niveau des régulations neuro-hypophyso-endocriniennes (d'après J. Decourt, les Glandes endocrines, coll. « Que sais-je? », n° 523, P.U.F.).*

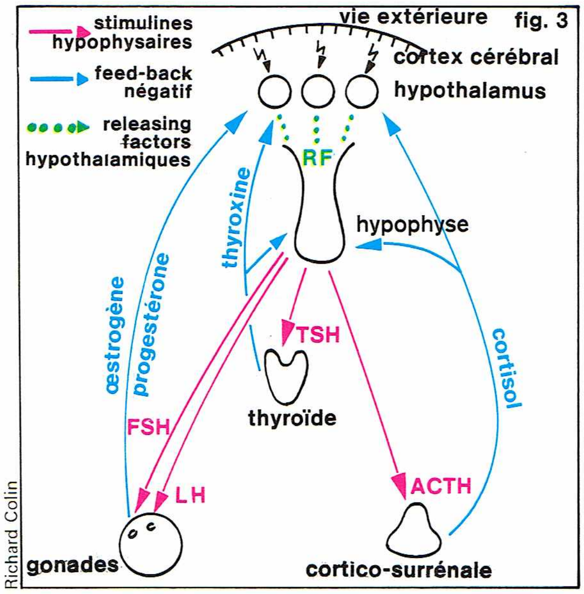

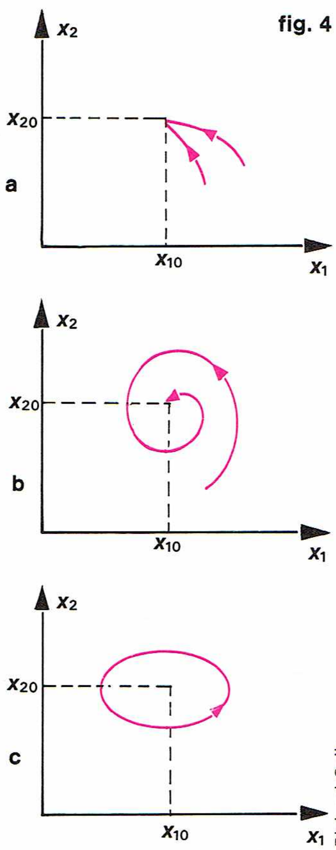

▲ *Figure 4 : représentation de l'évolution d'un système (voir développement dans le texte).*

si l'homme a introduit la rétroaction dans les systèmes technologiques, elle existe naturellement dans les systèmes vivants (*l'homéostase* par exemple, qui est le maintien à une température constante d'un être vivant).

Quelques concepts

La connaissance de l'ensemble des parties contenues dans un système et celle des relations qui les lient permettent de déduire le comportement du système; en effet, celui-ci ne dépend pas seulement de l'addition des comportements des parties, il faut tenir compte des interactions. On peut d'ailleurs prendre comme première définition d'un système celle d'ensemble d'éléments en interactions; il faudrait, pour être plus exact, ajouter que cet ensemble est élaboré afin de satisfaire un objectif.

Un système peut être défini mathématiquement de plusieurs façons : équation différentielle, système d'équations différentielles, système d'équations aux dérivées partielles. Une notion très importante est celle d'état du système. Nous allons maintenant la définir en concrétisant les notions précédentes. L'environnement agit sur le système par les entrées de ce dernier, le système agit sur l'environnement par les sorties. La connaissance à un instant t des entrées ne suffit pas à définir le comportement du système, c'est-à-dire l'évolution de ses sorties. Il faut y ajouter la connaissance d'un ensemble de variables que nous désignerons par $x_1(t), x_2(t), ..., x_n(t)$, qui sont les variables d'état. L'état d'un système à l'instant t est constitué de l'ensemble des valeurs prises par les variables d'état. La connaissance de celles-ci ainsi que des entrées permet de résoudre les équations du modèle du système, donc de calculer les sorties. Pour prendre un exemple, les équations du modèle pourront être données par le système d'équations différentielles suivant :

$$\frac{dx_1}{dt} = f_1\ (x_1, x_2, ..., x_n, u_1, ..., u_m)$$

où $u_1, ..., u_m$ constituent les entrées du système

$$\frac{dx_2}{dt} = f_2\ (x_1, x_2, ..., x_n, u_1, ..., u_m)$$

$$...$$

$$\frac{dx_n}{dt} = f_n\ (x_1, x_2, ..., x_n, u_1, ..., u_m)$$

$$y_1 = g_1\ (x_1, ..., x_2, u_1, ..., u_m)$$

où $y_1, ..., y_k$ constituent les sorties du système

$$y_k = g_k\ (x_1, ..., x_2, u_1, ..., u_m)$$

Des équations de ce type (dites équations d'état) s'obtiennent pour la modélisation de systèmes appartenant à de nombreux domaines : systèmes technologiques courants (processus de fabrication, par exemple), systèmes démographiques (étude des problèmes d'immigration ou d'émigration dans une ville), etc.

Cependant, une telle définition n'est pas générale. En particulier, elle ne fait pas apparaître des conditions spatiales et temporelles dont ne rendraient compte que des systèmes d'équations aux dérivées partielles, par exemple les processus de diffusion de la chaleur. Ces équations ne tiennent pas non plus compte du fait qu'un système peut dépendre, pour la réaction à une entrée, de son passé : les phénomènes d'hystérésis n'apparaissent donc pas dans une telle modélisation. Cependant, les équations présentées sont suffisamment générales pour permettre de définir quelques notions importantes.

Supposons le système sans entrée, c'est-à-dire

$$u_1 = u_2 = ... = u_m = 0$$

Le système est dit dans un *état stationnaire* si les différentes dérivées $dx_1/dt, ..., dx_n/dt$ sont nulles : il n'y a en effet alors aucune évolution dans le temps de l'état du système. En annulant les n équations $f_1 = 0, ..., f_n = 0$ et en résolvant le système à n inconnues ainsi formé, on obtient la solution $x_1 = x_{10}, x_2 = x_{20}, ..., x_n = x_{n0}$ (nous nous plaçons dans le cas particulier d'une solution unique, mais on peut très bien envisager l'existence de plusieurs solutions) qui constitue un état stationnaire. Parmi tous les états stationnaires possibles, certains peuvent être stables, d'autres instables.

Précisons maintenant l'analyse en écrivant pour toutes les valeurs de i de 1 à n, $x_i = x_{i0} - x'_i$. On obtient un nouveau système d'équations de terme général

$$\frac{dx'_i}{dt} = f'\ (x'_1, x'_2, ..., x'_n)$$

Supposons que chaque équation du système admette un développement en série de Taylor :

$$\frac{dx'_i}{dt} = a_{i1}x'_1 + a_{i2}x'_2 + ... + a_{ii}x'_i + ... + a_{in}x'_n + a_{i11}x'_1x'_2 + a_{i12}x'_1x'_2 + ...$$

Cet ensemble admet comme solution générale un système de terme général :

$$x'_i = k_{i1}e^{-\lambda_1 t} + k_{i2}e^{-\lambda_2 t} + ... + k_{in}e^{-\lambda_n t} + k_{i11}e^{-2\lambda_1 t} + ...$$

$k_{i1}, ..., k_{in}$ sont des constantes, $\lambda_1, ..., \lambda_n$ sont solutions de l'équation caractéristique :

$$\begin{vmatrix} a_{11} - \lambda, ..., a_{12} & ... & a_{1n} \\ a_{22} & a_{22} - \lambda, ..., & a_{2n} \\ '' & '' & '' \\ a_{n1} & ... \quad ... & a_{nn} - \lambda \end{vmatrix} = 0$$

Si toutes les valeurs λ solutions de cette équation sont réelles, négatives, alors x'_i tend vers zéro quand t tend vers l'infini, et x_i prend la valeur stationnaire x_{i0}. Le raisonnement tient encore si les λ sont des nombres complexes à partie réelle négative. Par contre, si une des valeurs λ est réelle positive ou imaginaire à partie positive, x_i tend vers l'infini avec t. Dans le premier cas, on dira que le point $(x_{i0}, ..., x_{n0})$ est un point d'équilibre stable; dans le second cas, que l'équilibre est instable. Si certaines valeurs λ sont complexes à parties réelles négatives, la variable x_i correspondante présentera des fluctuations périodiques amorties. A titre d'exemple, considérons un système à deux variables d'état dit du deuxième ordre, d'équation (on considère les entrées nulles) :

$$\frac{dx_1}{dt} = f_1\ (x_1, x_2)\quad \frac{dx_2}{dt} = f_2\ (x_1, x_2)$$

Soit $(x_{10}x_{20})$ l'état stationnaire; effectuons le développement proposé en série de Taylor; deux valeurs interviennent, λ_1 et λ_2, solutions de :

$$\begin{vmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} - \lambda \end{vmatrix} = 0 \qquad \frac{dx'_1}{dt} = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + ... \qquad \frac{dx'_2}{dt} = a_{21}x_2 + a_{22}x_2 + ...$$

Soit : $\lambda_2 - \lambda\ (a_{11} + a_{22}) + a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} = 0$.

Si $(a_{11} + a_{22})$ est négatif, $(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})$ positif et le discriminant de l'équation du second degré positif, on a deux solutions λ réelles négatives. Le système présente donc un point stationnaire stable (x_{10}, x_{20}), on l'appelle un nœud. On a coutume de représenter l'évolution du système pour les systèmes d'ordre deux dans le plan

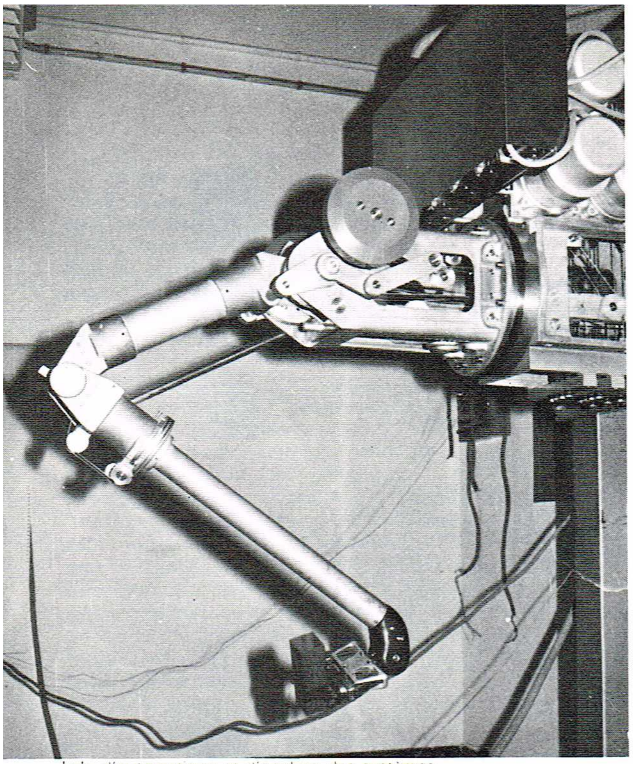

Lab. d'automatique et d'analyse des systèmes
de Toulouse - Centre national de la recherche scientifique

◀ ***Un exemple de finalité peut être fourni par la commande d'un bras mécanique; le but final étant de saisir une pièce, il y a évolution périodique des positions respectives du bras et de la pièce pour guider l'action.***

(x_1x_2) dit plan de phase. La *figure* 4a représente une évolution vers un nœud. Si $(a_{11} + a_{22})$ est négatif,

$$(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})$$

positif mais le discriminant négatif, on a deux solutions complexes conjuguées avec partie réelle négative. On a ce qu'on appelle une boucle (*fig.* 4b) : on atteint au bout d'un temps théoriquement infini le point $(x_{10}x_{20})$. Dans le cas où $(a_{11}+a_{22})$ est nul, $(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})$ positif, on a deux solutions imaginaires conjuguées, donc un comportement oscillatoire. Dans le plan (x_1x_2), on aura un cycle autour de $(x_{10}x_{20})$ [*fig.* 4c]. Dans le cas d'un discriminant positif, de $(a_{11} + a_{22})$ positif et $(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})$ positif, il y a deux solutions positives, et le système n'est pas stationnaire.

Supposons maintenant que le système tende vers un état stationnaire $x_{10}, ..., x_{n0}$. Les variations peuvent s'exprimer, non seulement en fonction des conditions actuelles, mais aussi en fonction de la distance à l'état stationnaire. Prenons comme nouvelle variable

$$x_1 = x_{10} - x'_1,\ x_2 = x_{20} - x'_2,\ ...,\ x_i = x_{i0} - x'_i$$

L'équation générale du système de définition s'écrit :

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i\ (x_{10} - x'_1, x_{20} - x'_2, ..., x_{n0} - x'_n)$$

Ainsi, les variations semblent dirigées pour satisfaire un état final qui ne sera atteint que dans l'avenir. Cette formulation (la détermination des évolutions, non par des conditions actuelles, mais par l'état final à atteindre) ne s'applique pas seulement à la mécanique, comme il paraît très aisé de le faire au premier abord (principe du minimum de la mécanique), mais à toute sorte d'autres systèmes. Cependant, ce schéma de formulation est très courant dans les modélisations de systèmes physiques, mais beaucoup moins pour des systèmes biologiques. Limitons toutefois les exégèses possibles d'une telle écriture : elle ne provient que d'un changement de variables dans les équations différentielles, c'est-à-dire d'un artifice pour faire apparaître l'état final. Il ne s'agit pas de dire que le système a la notion du but à atteindre, c'est-à-dire d'attribuer à un système physique une « prémonition », il ne s'agit que de la formulation pratique d'un fait qui peut s'exprimer en termes de causalité.

Un exemple de finalité peut être fourni pour les systèmes vivants par l'*homéostase*, le but poursuivi étant la survivance du système. L'homéostase est fondée en grande partie sur le concept de rétroaction : prise d'information sur l'extérieur pour définir l'action. Mais, en technologie, on utilise aussi ce principe pour que le système satisfasse une finalité. Ainsi de la commande d'un bras mécanique, le but final étant de saisir une pièce; il y a évaluation périodique des positions respectives du bras et de la pièce pour guider l'action. On pourrait conclure que ce type de finalité correspond entièrement au formalisme cybernétique des systèmes.

Analyse des systèmes technologiques

Nous allons maintenant particulariser aux problèmes des systèmes technologiques les méthodes d'analyse et de conception de systèmes. Nous définirons les systèmes comme des ensembles composés d'éléments et d'hommes capables de transformer certaines informations (les entrées) en d'autres informations (les sorties), souvent de façon à satisfaire un ou plusieurs critères. Les systèmes dont on lance des procédures d'analyse sont le plus souvent complexes et de coût élevé. On réunit donc pour les étudier ou les concevoir une équipe pluridisciplinaire qui aura pour but de tout mettre en œuvre pour satisfaire le critère. La plupart du temps, d'ailleurs, la solution prise sera le résultat d'un compromis, les contraintes étant fréquemment opposées.

Pour définir un système, on se donnera un **critère de mesure de son efficacité,** qui ne caractérise pas le système, mais sa mission. Ce critère doit tenir compte de plusieurs facteurs, parmi lesquels on peut citer la performance relative à la mission allouée (précision, rapidité), l'indicateur, qui, commun à plusieurs systèmes de même classe, permet de les comparer entre eux, la rapidité et la facilité de mise en œuvre, les coûts, les délais d'élaboration, la fiabilité et la maintenabilité. Une fois les critères d'évaluation correctement et complètement précisés, l'analyse d'un système repose sur l'étude des spécifications auxquelles le système doit répondre, de sa faisabilité sur différents points (technologique et économique), etc. La conception et la réalisation d'un système peuvent se décomposer en plusieurs phases : définition des objectifs, définition des spécifications, définition du système, analyse des performances, spécification technique du système, essais, analyse de maintenabilité. En fait, ce schéma linéaire est renforcé par beaucoup de rétroactions. Ainsi, on a souvent le chemin suivant : définition des objectifs, analyse des spécifications, étude de réalisabilité qui aboutit à une impossibilité, donc retour sur les objectifs donnés. L'organigramme correspondant à l'analyse et à la conception est complexe, et souvent le chemin ayant conduit à la réalisation du système est embarrassé de boucles... sinon d'embûches ! (*fig. 5*).

Précisons maintenant un peu ces différentes phases.

- *Objectifs*. Ils doivent être complètement précisés avec l'utilisateur, et leur définition entraîne généralement la formation de l'équipe système chargée d'élaborer l'ensemble. Cette équipe doit être pluridisciplinaire, et les différents membres devront adopter un langage commun compréhensible par les techniciens utilisateurs. A ce stade, on doit pouvoir donner un ordre de grandeur de la durée de l'étude, et du coût et de la durée de la réalisation.
- *Spécifications*. Durant la phase de définition des spécifications, on doit définir les entrées et les sorties, et leurs transformations. Cette phase nécessite un échange d'informations fréquent et approfondi entre utilisateurs. Il peut déjà exister un modèle mathématique du système et une indication sur une ou plusieurs solutions possibles.
- *Système*. A ce niveau, des choix décisifs et presque irréversibles seront effectués : choix de la structure, choix du mode de commande.
- *Spécification du système*. Il s'agit de l'analyse structurelle complète : définition des parties et des objectifs de chaque partie, définition des entrées et sorties de chaque partie, des interactions, des contraintes. A la fin de cette phase doivent apparaître des cahiers des charges pour les constructeurs des différentes parties, on devra donc avoir pris soin d'étudier la faisabilité possible. Cette étude nécessitera donc d'aller jusqu'au bout des études techniques, ce qui explique la durée importante de cette phase.
- *Réalisation*. Au début de cette phase sera étudié et défini un planning permettant la mise en évidence d'un chemin critique (dates « au plus tard » et dates « au plus tôt). Puis seront lancées les différentes réalisations, soit auprès des contractants, soit directement par le concepteur (il faut alors ajouter une gestion des commandes).
- *Essais*. Presque autant que les essais eux-mêmes compte une bonne planification, donc une bonne organisation des essais. On effectue des essais de chaque partie isolée, puis on connecte pour faire des essais de

▶ *Figure 5 ; organigramme classique établi pour une entreprise : évolution des coûts dans un centre de coûts.*

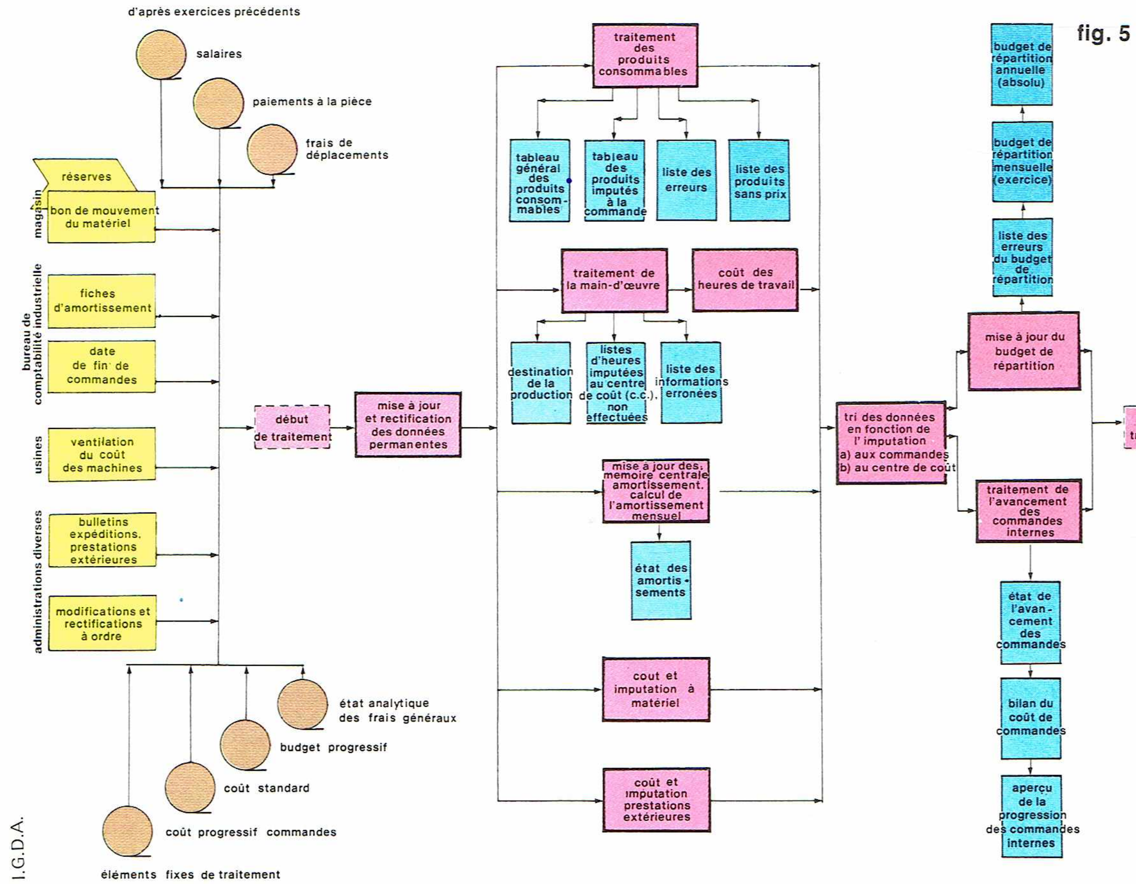

I.G.D.A.

l'ensemble. Certains systèmes demandent aussi des entraînements spécifiques du personnel (par exemple, le système *Apollo* nécessitait évidemment un entraînement des cosmonautes). Aussi, parallèlement au système lui-même, faut-il parfois créer des simulateurs, qui peuvent d'ailleurs être compris comme des sous-ensembles du système global, et, dans ce cas, leurs différentes phases intégrées à celles précédemment définies. Cet ensemble doit se révéler cohérent, et un des meilleurs moyens de faire échouer un système est de décider de « brûler » une étape pour aller plus vite. Il faut avoir soin de passer par tous les points, ne pas hésiter à étayer les différentes décisions de rapports clairs et précis qui constitueront un bon document pour retracer certains choix.

Méthodes mathématiques d'analyse de systèmes

Les équipes chargées de la création d'un système, généralement pluridisciplinaires, comme nous l'avons souligné, disposent d'un certain nombre d'outils mathématiques afin d'aider à la conception. On peut citer :

— le calcul des probabilités et l'exploitation statistique ;

— la théorie des processus de Markov ou la théorie des processus stochastiques de manière générale ;

— la recherche opérationnelle et les méthodes d'optimisation ;

— la théorie des jeux ou théorie des antagonismes.

Il leur faudra aussi avoir une bonne connaissance des notions physiques des phénomènes (équations de la physique, de la chimie, transmission de la chaleur, hydraulique). Enfin, pour tester les modèles ou pour identifier les paramètres, on doit avoir recours à des méthodes informatiques (mise en place de modèles du système sur ordinateur ou calculateur hybride).

Certains problèmes peuvent être traités complètement de manière analytique. Ainsi, partant des équations de base de la physique (loi des écoulements de fluide, de propagation de la chaleur, etc.), on arrive à avoir un modèle mathématique du comportement du système, qui est fonction de paramètres qu'on ne peut pas toujours atteindre directement par des mesures. Il convient alors de réaliser un logiciel reproduisant ces équations et de déterminer les paramètres en recherchant ceux qui satisfont le mieux un certain critère. Le critère souvent utilisé est celui des moindres carrés : on recherche les valeurs des paramètres minimisant l'écart quadratique entre les sorties du système réel et celles, théoriques, du système modélisé. Cette méthode est strictement analogue à une méthode d'optimisation.

Pour certains autres problèmes, on n'exploite pas directement les lois de la physique, soit à cause du caractère trop complexe des phénomènes étudiés, soit à cause de la difficulté d'identification de tous les paramètres. On procède alors avec ce qu'on appelle des **modèles « boîte noire »**. Le sous-ensemble modélisable est représenté par une « boîte » à laquelle on applique les entrées du système réel, « boîte » qui correspond à un modèle mathématique généralement simple à nombre faible de paramètres ; par comparaison des sorties avec un critère identique à précédemment, on identifie les valeurs des paramètres. En général, les modèles ainsi obtenus sont plus simples mais n'ont évidemment pas le support physique des précédents.

Une troisième approche, qu'on peut qualifier de mixte et qui, peut-être, est la plus réaliste, est d'écrire le modèle déduit des lois physiques et de le simplifier pour n'avoir plus qu'un petit nombre de paramètres à identifier.

▼ *Les essais demandent une bonne planification dans une bonne organisation. Certains systèmes demandent aussi des entraînements spécifiques du personnel.*

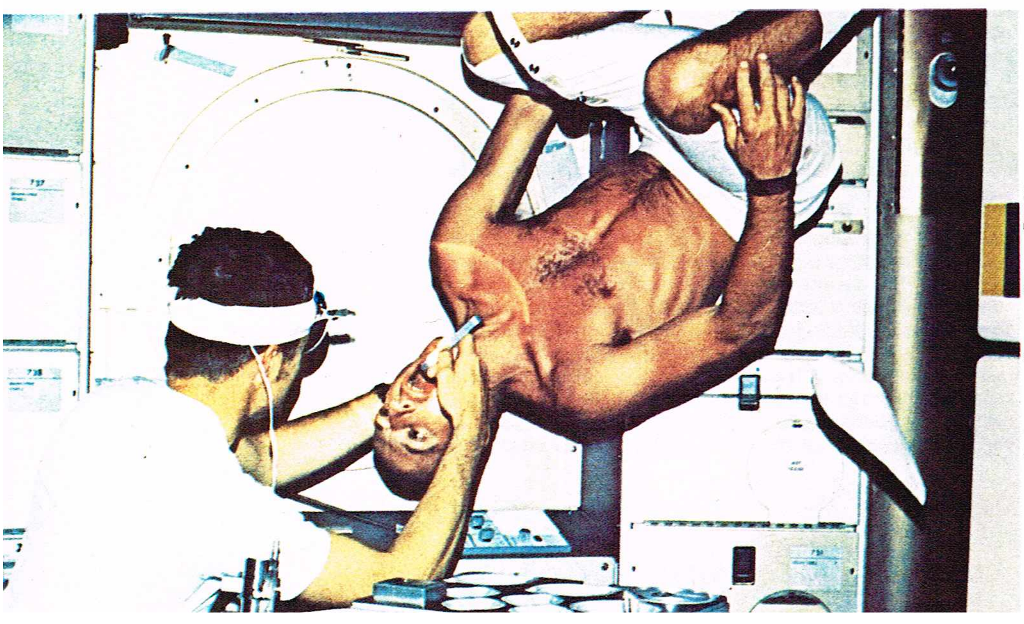

Parimage - Camera Press - Pasan

Précisons maintenant quels sont les divers types de **modèles mathématiques.** Ces modèles, souvent critiqués, sont pourtant indispensables pour la compréhension et la maîtrise des phénomènes étudiés. On peut distinguer trois classes de modèles :

— *Les modèles déterministes.* Ce sont surtout eux que nous avons discutés auparavant. Ils proviennent soit directement de l'étude des lois physiques du phénomène, soit indirectement de la simplification des équations.

— *Les modèles probabilistes.* Dans certains systèmes, les lois étudiées ne peuvent se représenter sous forme déterministe, on doit avoir recours à des constructions déduites du calcul des probabilités. Ainsi, lorsqu'on doit tenir compte d'entrées du type perturbations par exemple, on ne peut utiliser des modèles de moyennes, il faut aller vers l'individu lui-même, donc probabiliser l'axiomatique. Prenons le cas d'un système constitué d'un hypermarché : pour déterminer le nombre de caisses à ouvrir suivant l'heure et le jour de la semaine, on ne peut raisonner sur une moyenne globale; il faut tenir compte de données essentiellement aléatoires qui sont, par exemple, l'instant d'arrivée du client d'une caisse, le temps d'attente avant sa sortie (ici on exploiterait la théorie des files d'attente).

— *Les modèles de Monte-Carlo.* Ils utilisent des simulations par des tirages aléatoires à partir de lois de distributions données. On utilise ces modèles dans le cas de phénomènes complexes.

Il y a un point dont nous n'avons pas encore parlé et qui est important, c'est le **facteur échelle.** En effet, lors de la phase d'identification de paramètres, on compare sorties réelles et sorties calculées à l'aide de modèles théoriques. On doit donc procéder à des expérimentations sur le système; si celui-ci est en exploitation ou non encore créé, il est difficile sinon impossible de procéder à ces expériences. Aussi réalise-t-on un système à échelle réduite, qu'on appelle le *pilote*, sur lequel on effectue toutes les mesures nécessaires. Dans la réalisation du pilote, le facteur échelle est particulièrement important, et il n'y a pas simple homothétie de grandeur entre système réel et pilote.

Pour analyser un système, on a aussi recours à un outil mathématique puissant, la **simulation.** Avant de réaliser toute expérience de simulation, il convient de définir parfaitement le procédé à simuler, de se fixer les paramètres d'entrée sur lesquels on va agir, c'est-à-dire qu'on va faire varier pour étudier le comportement du modèle, de choisir avec soin la forme des sorties désirées et de faire un planning de simulation qui, toutes proportions gardées, a le même rôle que le planning de conception du système.

Les avantages de la simulation sont importants, ils permettent fréquemment de gagner du temps d'étude et d'expérimentation. Ainsi, pour un avion, la recherche d'un meilleur trajet de vol entre deux aéroports pourra être réalisée par simulation sur un gros calculateur et demander un temps ridiculement court comparé aux différents essais qui auraient été nécessaires. Les simulateurs de vol de la N. A. S. A. sont suffisamment célèbres pour donner une idée de l'importance de cette technique. La méthode de simulation généralement utilisée est une méthode numérique, c'est-à-dire fondée sur l'emploi d'un ordinateur digital, à cause de sa souplesse d'emploi et de ses grandes possibilités; il y a tout de même un certain nombre de paramètres auxquels il convient de prendre garde : précision du calculateur, vitesse de calcul, exploitation rapide des sorties.

Pour conclure, nous dirons quelques mots du **coût du système.** Il est en effet irréaliste d'optimiser techniquement un système sans faire intervenir son coût, qui est le principal frein aux créations technologiques sophistiquées. Les estimations de coût sont généralement difficiles; en effet, un système complexe nécessitant une analyse du type de celle que nous avons définie est en général un produit unique ou réalisé en faibles quantités, auquel on ne peut donc appliquer les méthodes de la fabrication en série. D'autre part, malgré toute la rigueur apportée aux études préliminaires, il se produit des retards qui grèvent le coût d'une manière difficilement prévisible *a priori*. Cependant, une analyse de coût est primordiale, et de son évaluation doit dépendre la réalisation du système. En fait, il faut procéder par estimations successives du coût : on doit donc actualiser celui-ci en fonction de nouvelles données inconnues au départ (hausse du prix des matières premières). S'il conduit à un dépassement trop important, il arrive qu'on renonce à la construction du système. Ainsi, aux États-Unis, il est courant de voir arrêter un projet, avec toutes les conséquences que cela comporte, parce que son coût estimé dépasse une barre fixée *a priori*. En effet, on peut douter de la rentabilité (coût de l'investissement et amortissement d'une part, gain de productivité d'autre part) si le coût du système augmente plus vite que le gain à réaliser. Le coût est donc tout au long de l'étude une rambarde et un guide pour orienter les différents choix; ainsi l'utilisation d'un matériel en série pour plusieurs postes sera-t-elle préférée à celle d'un matériel différent, mais optimal, pour chaque poste, car il y a diminution du coût d'achat, de maintenabilité.

Parimage - L. Herschtritt

▲ ***Dans certains systèmes, les lois étudiées ne peuvent se représenter sous formes déterministes. Par exemple, pour étudier la circulation automobile, il faut tenir compte de données essentiellement aléatoires.***

BIBLIOGRAPHIE

BERTALANFFY L. von, *Théorie générale des systèmes*, Paris, Dunod, 1973. - CLELAND D. L. et KING W. R., *l'Analyse des systèmes : Technique avancée de management*, Paris, Entreprise moderne d'édition, 1971. - DRISCHEL H., *Formale Theorien der Organisation*, 1968.

▼ ***Le contrôle du système usine (par exemple celui d'une centrale thermique) nécessite de nombreuses mesures en continu, souvent effectuées automatiquement; les résultats sont ici visualisés en permanence dans une salle de contrôle.***

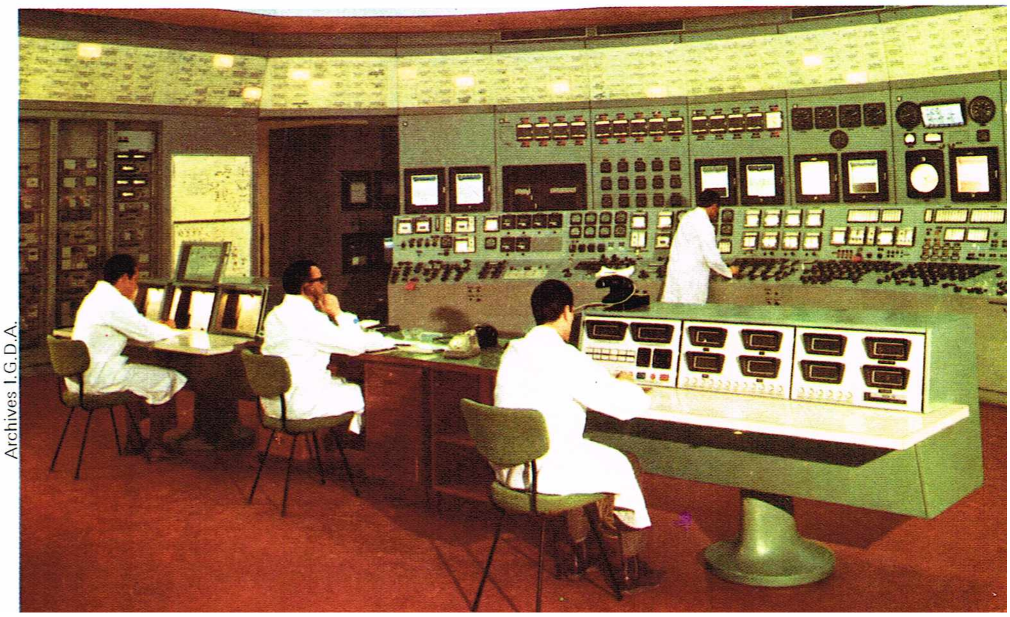

Archives I.G.D.A.

L'ENTREPRISE ET L'USINE

L'humanité industrielle progresse par grandes étapes, au cours desquelles elle maîtrise successivement tel ou tel aspect de son activité. En schématisant à l'extrême, l'on peut dire que les Anglais avaient maîtrisé le *commerce international et ses méthodes financières ;* puis les Américains, entre 1930 et 1945, ont été les premiers maîtres de l'*organisation industrielle*, art qu'ils ont transmis à certains pays d'Europe et au Japon, dans l'après-guerre, le concept fondamental étant celui de *productivité*. Les Américains encore ont été les pionniers du *marketing*, c'est-à-dire de la détection, de la suscitation et du suivi de la satisfaction des *besoins des consommateurs*.

Naturellement, dans ces trois grands domaines de la vie des entreprises, les méthodes continuent à évoluer, et le développement de l'informatique, en particulier, a permis des progrès considérables. De même, le développement actuel de la micro-informatique et de l'automatisme industriel aura une grande influence sur l'allure des usines, mais sans que l'on se ressente confronté à une grande inconnue de l'avenir. En revanche, les entreprises industrielles vivent depuis quelques décennies des situations mal maîtrisées dans trois domaines :

— l'entreprise et le progrès scientifique et technique ;
— la concentration industrielle ou la dispersion ;
— l'emploi de l'homme dans l'entreprise.

Dire que ces domaines ne sont pas maîtrisés ne veut pas dire que les dirigeants des entreprises ne trouvent pas de solutions efficaces aux problèmes auxquels ils sont confrontés. Mais on a le sentiment que ces solutions sont des « trucs » qui marchent au coup par coup, et que l'on doit remettre en cause tous les cinq à dix ans. Il n'y a pas encore dans ces domaines de corps de méthodes, de concepts définitivement stables. La question se pose même de savoir s'il en sera formulé, enseigné, appliqué dans un avenir proche.

C'est donc à ces domaines de réflexion que sera consacré l'essentiel de cet article; les aspects mieux maîtrisés de la vie des entreprises étant traités plus rapidement.

Le progrès scientifique et technique est-il le moteur de l'industrialisation ?

Le **progrès scientifique** permet à l'homme de connaître, et souvent de reproduire et d'observer à volonté, une gamme de plus en plus étendue et variée de phénomènes physiques, disons d'*effets physiques*.

Par le **progrès technique**, l'homme est capable de maîtriser, c'est-à-dire de faire fonctionner, les *machines* et *procédés* toujours plus nombreux et plus modernes que son industrie mettra en œuvre pour satisfaire les besoins des individus et de la société en agençant et en exploitant ce que nous appellerons des *systèmes fonctionnels :* habitat, transport, santé, alimentation, défense, etc.

▼ Figure 1 : entre le progrès scientifique, le progrès technique et la mise en œuvre de systèmes fonctionnels s'établit une hiérarchie des concepts. Figure 2 : un effet physique observable par l'homme est indépendant de tout usage pratique que l'on peut en faire ultérieurement.

fig. 1

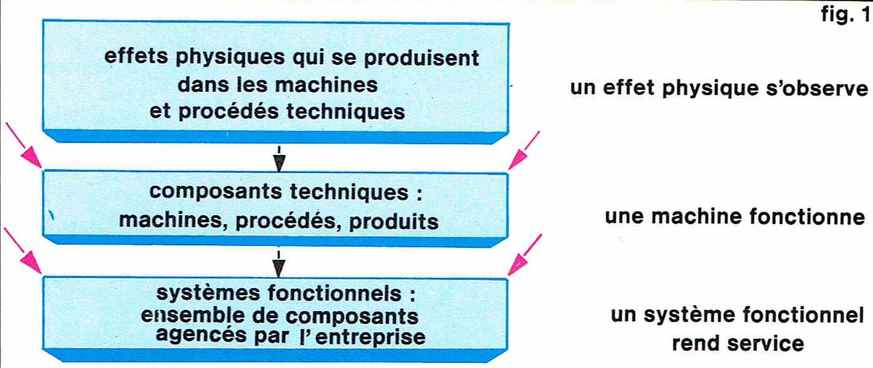

fig. 2

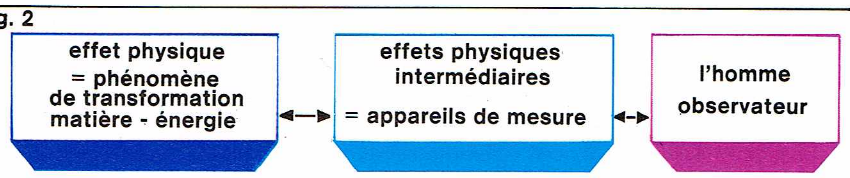

Nous avons donc une hiérarchie des concepts (*fig.* 1). Lorsque l'on parle couramment du progrès, pour se féliciter de son développement, de sa rapidité, ou au contraire pour en redouter certains effets, l'on englobe confusément des aspects du progrès qui se situent à l'un ou l'autre des trois niveaux de la *figure* 1. Il convient donc de procéder à quelques analyses, à quelques réflexions pour comprendre les relations entre le *progrès scientifique*, le *progrès technique* et le développement des entreprises industrielles et commerciales qui est une composante essentielle du *progrès économique*.

Par *effets physiques*, il faut entendre toutes les transformations de matière et d'énergie susceptibles de se réaliser selon des lois précises, selon des processus ou des expériences reproductibles et observables, et considérées indépendamment de tout usage efficace que l'homme peut en faire (*fig.* 2).

L'homme n'intervient que comme observateur en intercalant le plus souvent entre le phénomène étudié et lui-même un phénomène intermédiaire auquel il est directement sensible. Naturellement, ce schéma est très simplifié; le phénomène intermédiaire ne se limite pas à un appareil, ou à un ensemble d'appareils de mesure, mais bien souvent recouvre, par exemple, une puissante installation telle qu'un grand accélérateur de particules, un observatoire astronomique ou un laboratoire, ou encore toute une génération d'observations qui peuvent s'étaler sur de nombreuses années. Ce sera en particulier le cas de la découverte progressive des lois qui régissent les grands phénomènes naturels tels que la géologie ou la météorologie. Ce que nous appelons des effets physiques peuvent, bien sûr, être physico-chimiques, biologiques, corpusculaires, géologiques, selon la discipline scientifique dont ils relèvent au gré du hasard du développement de la science. Donnons-en quelques exemples :

— l'oxydation exothermique, c'est-à-dire la combustion, des matières organiques composant le bois (lignine, cellulose, etc.) ;
— l'évolution, sous l'effet de traitements thermiques, de l'arrangement cristallin d'un échantillon métallique ;
— la supraconductivité de matériaux composites à la température de l'air liquide ;
— la teneur en bore de sédiments géologiques en fonction de la salinité du milieu de leur dépôt (milieu lacustre, lagunaire, littoral, abyssal) ;
— la décomposition spontanée en un temps infiniment bref d'une particule nucléaire nouvellement identifiée en plusieurs particules avec émissions de rayonnements ;
— l'effet de la température sur l'activité d'une souche bactérienne ;
— la cinétique d'une réaction chimique catalysée par telle ou telle enzyme ;
— les lois thermodynamiques de détente de la vapeur pour produire du travail mécanique.

D'un point de vue strictement scientifique, ces différents phénomènes sont très comparables dans leur diversité ; ils peuvent donner lieu à des descriptions, à des articles de revues savantes, faisant appel au même vocabulaire, aux mêmes concepts fondamentaux, voire aux mêmes mathématiques. Ils peuvent idéalement être situés dans un même grand tableau synoptique englobant tous les phénomènes. Et néanmoins leurs relations à l'homme et à son industrie sont très différentes.

Pour analyser ces relations, considérons d'abord le cas qui peut sembler le plus banal, celui de la combustion du bois. Les conditions physico-chimiques à la surface du globe terrestre font que l'effet combustion existait bien avant l'homme, puisque la maîtrise du feu est précisément l'une des traces les plus significatives de l'apparition de l'espèce humaine, de l'*Homo sapiens*. Mais que de cavernes enfumées, que de dispositifs médiocres, tel l'atrium des Romains, avant que l'homme soit capable de construire une cheminée qui chauffe convenablement, sans l'enfumer, et, sans risques d'incendie, un local raisonnablement clos et confortable. Benjamin Franklin a été le premier à décrire une telle cheminée. Et bien que

Tableau I
Une typologie des effets physiques

		Feu de bois	Échantillon de métal	Supraconductivité	Bore dans sédiments	Particules nucléaires	Température bactéries	Réaction enzymatique	Machine à vapeur à piston	Machine à vapeur à turbine
Observabilité de l'effet	*Effet naturel,* constaté de tout temps par l'homme avant même de en avoir un début d'application	■					■			
	Effet naturel qui n'a été constaté et scientifiquement observé que récemment				■			■		
	Effet artificiel, provoqué pragmatiquement par l'*Homo faber* dans des conditions que l'on ne rencontre pas ou plus dans la nature		■						■	
	Effet artificiel, provoqué par l'homme à la suite d'une démarche de recherche scientifique			■		■				■
Utilisation de l'effet	Utilisé « sans le savoir »	■	■				■			
	Identifié ou provoqué artificiellement concurremment à son utilisation technique				■			■	■	
	Identifié et expliqué avant d'être incorporable dans un composant technique			■						■
	Sous perspective d'incorporation dans un composant technique					■				

l'industrie, depuis Franklin jusqu'à nos jours, ait développé de nombreux procédés d'oxydation ménagée ou de combustion du bois (charbon de bois, gazogènes, chaudières domestiques à feu continu, et, dernier gadget venu d'outre-Atlantique, bûches artificielles très ressemblantes recomposées à partir de sciure et de goudrons qui brûlent lentement en rayonnant régulièrement et longtemps pour le barbecue), bien des déboires, allant de l'enfumade à l'absorption de l'eau de combustion par les briques poreuses du haut de gaine d'une cheminée, empoisonnent encore la vie de maint maître de maison de la fin du XX^e siècle. Cependant que l'incendie de broussailles ou de forêt, provoqué à plus ou moins bon escient dans les pays tropicaux ou dans nos alpages pour nettoyer pâturages ou aires de culture, reste ailleurs un fléau redoutable.

Ces considérations sur la combustion du bois nous conduisent à imaginer un tableau synoptique des caractéristiques des phénomènes physiques, si l'on s'attache non plus à leurs caractéristiques scientifiques, physicochimiques, mais à leur connaissance, à leur maîtrise et à leur utilisation potentielle par l'industrie des hommes (*tabl.* I). Il sortirait du cadre de cette étude de pousser très loin ce type d'analyse, et le lecteur pourra émettre des doutes sur la position de telle croix dans telle case. C'est ainsi que, selon la réaction enzymatique considérée, l'on pourra mettre la croix « utilisation de l'effet » dans l'une ou l'autre ligne du tableau.

De même, Watt et ses successeurs avaient calculé dès 1800 que la turbine à vapeur avait un meilleur rendement que la machine à piston ; mais la turbine n'a été réalisable que plus d'un siècle plus tard. Naturellement, un tel tableau, en faisant ressortir deux concepts, deux idées maîtresses, qui sont l'*observabilité* et l'*utilisabilité* de l'effet physique dans l'histoire de l'homme, n'est qu'un procédé *descriptif*. Il ne saurait être considéré comme *explicatif*, ni, *a fortiori*, comme *directif ;* l'on ne saurait en déduire simplement des recettes permettant de découvrir de nouveaux effets physiques dont la maîtrise permette de créer de nouveaux appareils ou procédés qui, eux-mêmes, rendraient possibles de nouvelles industries. Néanmoins, analyser selon cette grille tout effet physique que l'on rencontre à tel moment de sa vie professionnelle ou civique, ou tout composant technique incorporant des effets physiques qui ne font pas encore partie de notre champ d'évidence, contribue à ne pas se laisser mystifier par le « progrès ».

Progrès technique et progrès économique

Si nous nous référons à nouveau à la *figure* 1, nous avons réfléchi aux relations entre effets physiques et composants techniques. Nous pourrions procéder à une analyse du même type des *relations entre composants techniques (matériels et procédés) et mise en œuvre de ces composants par l'industrie.* Mentionnons seulement deux types de situation ou de style d'évolution du progrès. De nombreux composants techniques (matériels ou procédés) sont raisonnablement maîtrisés par l'homme, mais des appareillages, industries ou services qui pourraient les utiliser ne se développent pas, soit qu'ils ne correspondent pas à des besoins ressentis par l'homme et la société, soit qu'ils coûtent trop cher.

Un premier exemple est celui du télévidéophone, ou téléphone comportant en outre la transmission d'images. Les usagers qui se téléphonent peuvent se voir, se montrer des images d'objets, scènes ou documents qui sont auprès d'eux. Des réseaux de télévidéophones existent et sont techniquement bien au point. Le *Pentagone*, par exemple, en a installé un pour en tester les conditions d'emploi. Ce type de matériel incorpore évidemment les progrès de l'électronique miniaturisée, et serait sans doute commercialisé à un prix très abordable s'il était fabriqué en très grande série. Mais le besoin réel n'en est pas ressenti par l'usager grand public. Que

***▲ Tableau I :** une typologie des effets physiques.*

***▼ Par effets physiques,** il faut entendre toutes les transformations de matière et d'énergie susceptibles de se réaliser selon des lois précises des processus ou des expériences reproductibles et considérées indépendamment de tout usage efficace que l'homme peut en faire. Un exemple peut être donné par l'évolution, sous l'effet de traitement thermique, de l'arrangement cristallin d'un échantillon métallique, dans le cas présent un échantillon d'alliage As_2Cd brut après une première fusion en atmosphère contrôlée.*

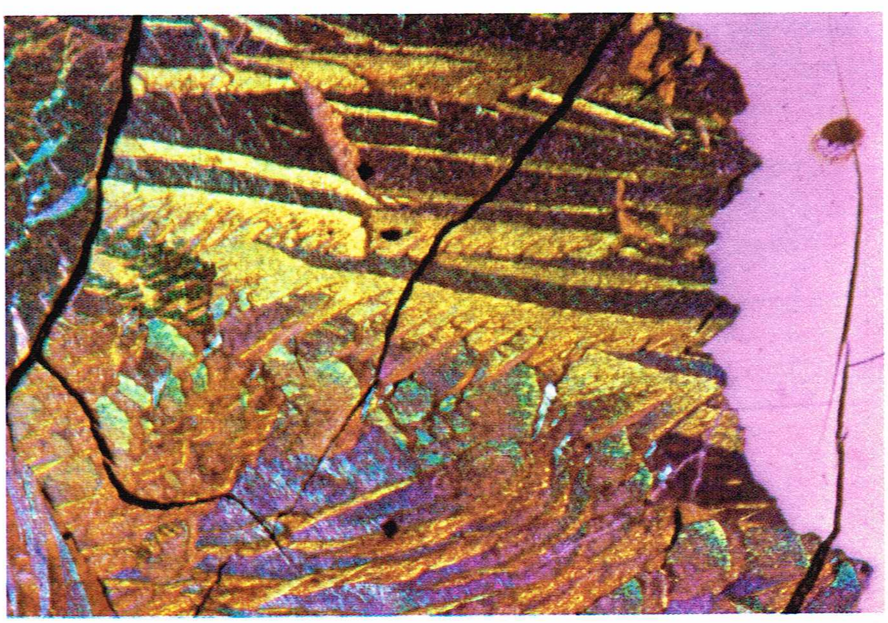

C.E.A. - Cliché R. Hasson

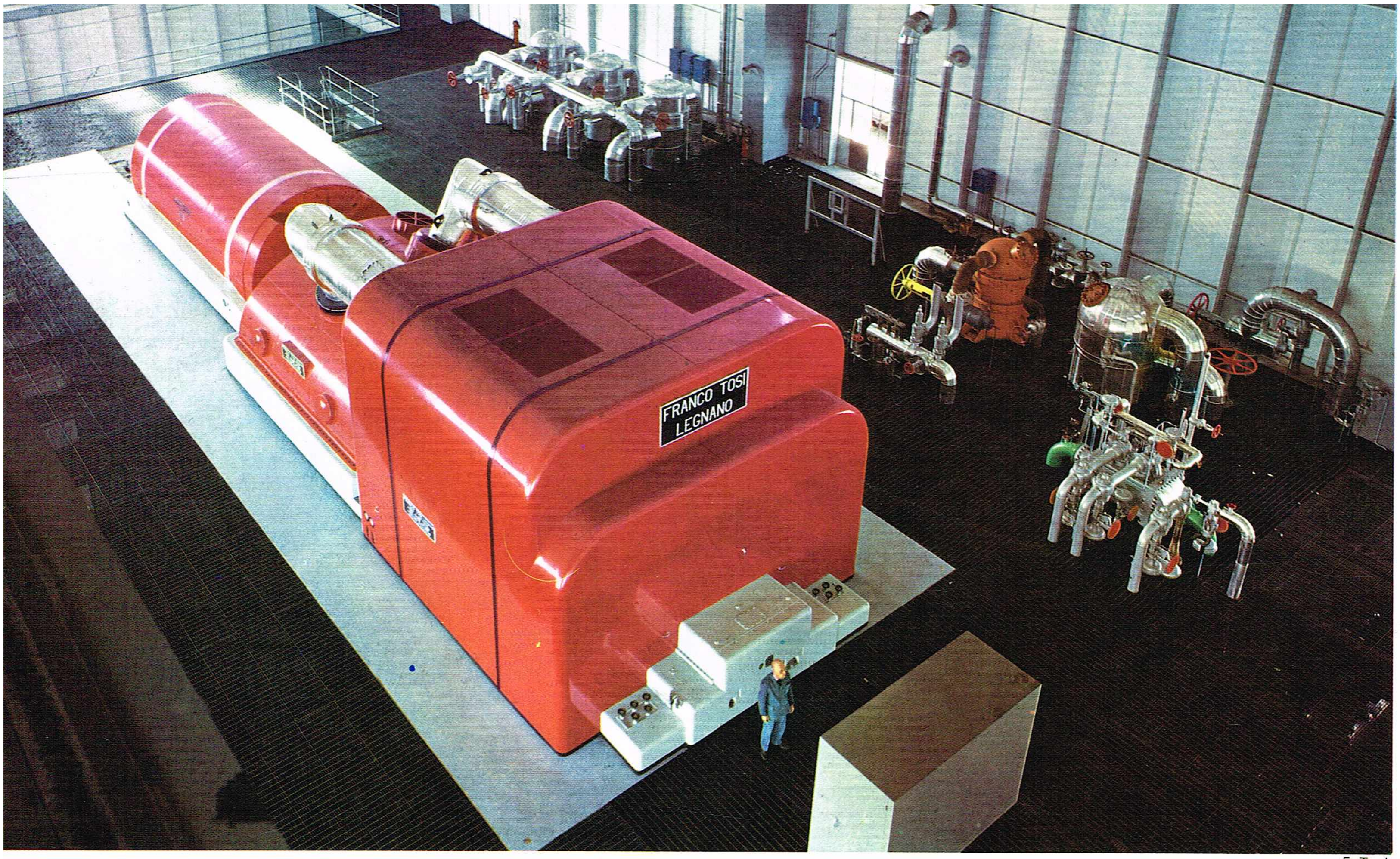

F. Tosi

▲ *Dans l'étude de l'utilisation des effets physiques, on note que la turbine à vapeur n'a été réalisable qu'un siècle après la machine à piston. Dès 1800 pourtant, Watt avait calculé que la première avait un meilleur rendement que la deuxième. Ici, une turbine à vapeur d'une centrale thermo-électrique.*

▼ *Le télévidéophone, pourtant très au point techniquement, ne s'est guère développé, car il ne correspond pas à un besoin ressenti. Il n'est utilisé que dans des cas particuliers ; par exemple, ici, pour une consultation à grande distance par un psychiatre de Boston.*

l'on réfléchisse en effet au type d'image que l'on désire transmettre. Si l'on ne transmet que le visage de l'interlocuteur, l'apport d'information supplémentaire par rapport à la phonie pure n'est pas très important pour la majorité des utilisateurs. L'on se rappelle certainement cette chanson fantaisiste où, en « vidéotéléphonant » à son meilleur ami, un mari malchanceux découvre progressivement l'étendue de son malheur ! Et pourtant, dans les années 1965-1968, emportés dans leur enthousiasme prospectif par le développement fulgurant des applications de l'électronique, les experts en développement et industrialisation prédisaient que le télévidéophone serait l'un des produits porteurs de la croissance industrielle pendant la période 1970-1975 !

Cet exemple ne contredit pas le fait qu'il existe une certaine demande pour des télétransmissions d'images, par exemple pour l'organisation de réunions de travail dont les participants sont en deux lieux distants l'un de l'autre, une usine et le siège d'une société par exemple ; sans parler de la télétransmission de documents tels que les journaux quotidiens.

Un bon contre-exemple de l'enlisement du télévidéophone est celui des réfrigérateurs, dont un composant technique essentiel est évidemment le groupe réfrigérant. Vers 1960, un industriel a mis au point et fabriqué en grande série des groupes suffisamment performants et fiables pour être garantis cinq ans. La disponibilité de ce composant technique a permis de faire baisser de moitié en moins de deux années les prix de vente des réfrigérateurs de toutes les marques commerciales, et de généraliser la présence de cet appareil ménager qui correspondait à un besoin objectif, surtout dans les appartements des immeubles modernes qui ne disposent pas de caves fraîches comme les maisons anciennes.

Une autre classe d'exemples d'appareils et de procédés techniques qui fonctionnent bien, mais que l'on hésite à industrialiser, se trouve dans le domaine de la santé. Ces appareils, ou certains produits pharmaceutiques, coûtent si cher que la société hésite à en proposer l'usage à tous les malades qui en tireraient bénéfice, et se refuse à en restreindre l'accès aux seuls malades suffisamment fortunés pour s'offrir les soins les plus coûteux. Nous touchons là à un problème de civilisation. Mais nous reviendrons, à propos des études de marchés et de l'expression des besoins des utilisateurs, sur cet aspect de l'industrialisation d'un composant technique liée au développement de l'usage d'un système qui incorpore ce composant.

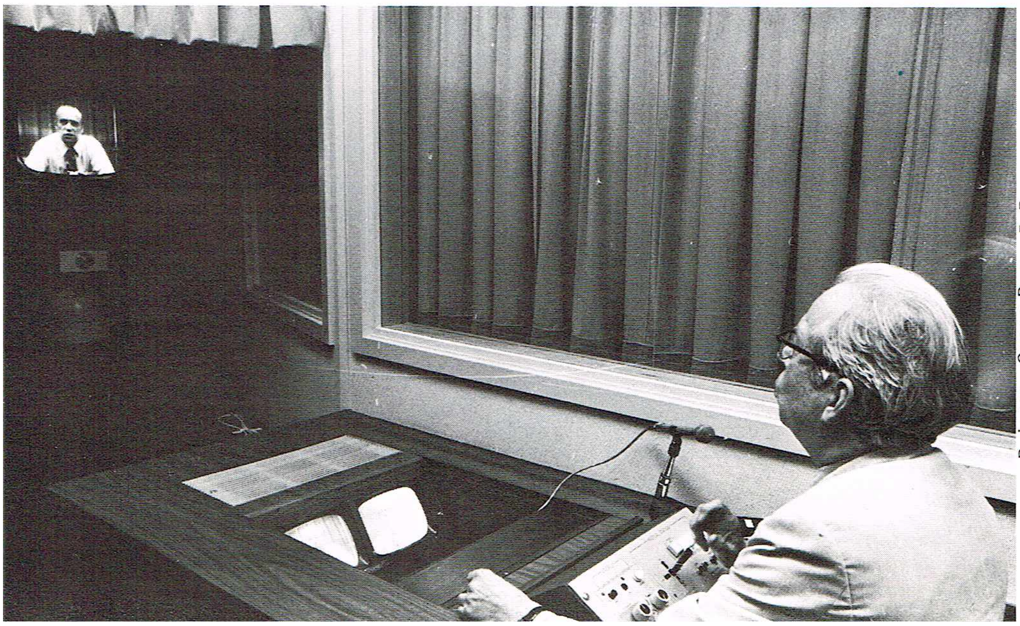

Parimage - Camera Press - B. Ross

La vie des systèmes fonctionnels

Un autre type de considération nous montrera par quelles voies le progrès technique passe le plus régulièrement au niveau des systèmes fonctionnels utilisés par la société. Sans doute apparaissent de temps à autre des systèmes fonctionnels réellement nouveaux, révolutionnaires, rendus soudain possibles grâce à la disponibilité de composants techniques, dus parfois eux-mêmes à une découverte scientifique : le transport terrestre motorisé, l'avion, la fusée permettant le satellite, la radiophonie, la télévision, l'ordinateur, l'antibiotique, la contraception, la production et la distribution de l'énergie électrique. Mais ensuite un tel système évolue, se perfectionne en incorporant des nouveautés techniques dans ses composants, et l'histoire des cent dernières années nous inspire une constatation, nous dirions presque une *loi de la technologie*. Lorsqu'il franchit son premier seuil de viabilité, un système fonctionnel a atteint un niveau structurel, une architecture, une organisation générale, qu'il conservera pour ainsi dire perpétuellement. S'incorporent ensuite progressivement dans ses sous-ensembles ou ses composants des progrès techniques,

Magnum - S.L.

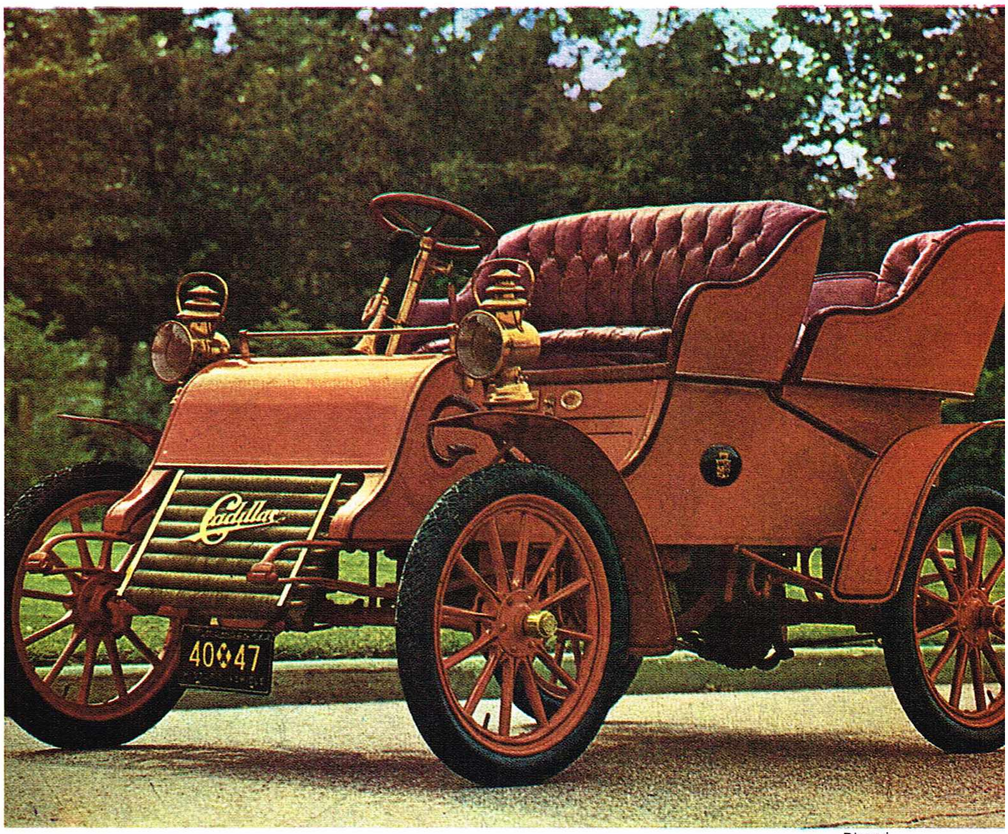

Photri

souvent très importants, qui font croître régulièrement les performances du système.

Prenons pour illustrer cette loi l'avion, l'automobile, la maison ou l'ordinateur. L'automobile avait atteint son architecture actuelle dès 1900 environ ; il avait fallu cinquante années pour passer d'un prototype de moteur à combustion interne à une automobile qui ne ressemble plus trop à une calèche ou à un phaéton. Et, dans cette permanence de la structure générale : moteur à explosion, débrayage-changement de vitesse-différentiel, roues à bandages, conducteur-passager, ont été incorporés un nombre illimité de composants révolutionnaires concernant soit le véhicule lui-même (citons la diode-transistor comme l'un de ces plus récents composants, qui a permis la généralisation des alternateurs), soit son mode de fabrication à la chaîne. De même, depuis 1915 ou 1920, l'avion a conservé la même organisation générale malgré les progrès extraordinaires réalisés dans la taille, les moteurs et l'instrumentation.

Parmi les progrès sur les composants, si certains sont décisifs, comme le réacteur d'avion, d'autres introduisent des variantes qui restent en compétition, en concurrence ; par exemple, le moteur à piston et le moteur rotatif pour l'automobile. Parfois interviennent des modifications structurelles importantes, mais partielles, qui ne modifient pas l'organisation générale du système. C'est le cas, par exemple, de la coque autoporteuse de l'automobile qui a été autorisée par les progrès dans l'emboutissage et la soudure des tôles, et qui a supplanté la structure châssis plus carrosserie, ou des roues indépendantes. C'est le cas également de l'intégration des structures mécaniques, ailes et fuselage, sur un avion tel que le *Concorde*, alors que, jusque-là, l'avion était constitué de deux poutres croisées, le fuselage et les ailes. Mais dans ces deux exemples, ces modifications partielles de structures, si elles ont permis un progrès des qualités du système qui est un peu plus rapide, un peu plus fiable, un peu plus confortable, un peu moins cher, etc., n'ont pas modifié l'usage général que l'homme fait du système.

Les mêmes considérations s'appliquent au logement, cette caverne artificielle de l'homme sédentaire ! Les derniers progrès décisifs dans la conception de la maison individuelle sont sans doute la disponibilité de la vitre et la maîtrise de la cheminée.

Pour ce qui est de l'ordinateur, la période de recherche de composants et d'une structure viable a duré assez exactement vingt ans, du début des années 1940 au début des années 1960. Or, depuis l'apparition de la troisième génération en 1964, d'innombrables progrès ont accru la rapidité, la fiabilité, la capacité, la souplesse des systèmes informatiques. Mais ce que l'on peut encore appeler un ordinateur en 1977 a la même architecture générale qu'un ordinateur de 1964, même si des modifications structurales partielles telles que l'UNIBUS (voie banalisée de transit des informations entre tous les éléments de l'ordinateur) sont intervenues.

Cependant, les progrès galopants de l'informatique, avec l'apparition des mini- et micro-ordinateurs et la maîtrise des télétransmissions de données, nous posent une question : sommes-nous toujours face aux mêmes systèmes fonctionnels ? Il se peut que la réponse soit négative, et l'évolution de cette branche industrielle et de ses produits peut être comparée à bien des points de vue aux développements décalés, puis concomitants, du chemin de fer et de l'automobile. D'abord est apparu le « moteur à vapeur », disons en 1800 pour arrondir les dates. Comme il permettait au véhicule d'aller vite, il fallait un chemin lisse et régulier, le chemin de fer. Le moteur à vapeur, vite supplanté, dès lors, par le moteur à explosion, n'a pu être installé sur un petit véhicule autonome que lorsque suffisamment d'améliorations ont pu être apportées au petit véhicule autonome en usage à l'époque, le véhicule hippomobile : bandages souples, suspension et direction adaptée. Et depuis, les deux systèmes, train sur chemin de fer et automobile sur pneus, se sont développés parallèlement en se spécialisant vers des utilisations distinctes correspondant à leurs caractéristiques spécifiques. Sommes-nous en 1978 à un tel point de branchement à partir duquel se distingueront deux classes assez distinctes de systèmes informatiques ?

Nous avons parlé de l'avion et de l'ordinateur, ce qui pourrait laisser croire que le progrès scientifique et technique apparaît au niveau de l'utilisateur au travers de systèmes très spectaculaires, de ces systèmes qui faisaient écrire et rêver Jules Verne. Nous aurions peut-être dû parler plutôt de l'agriculture, des industries alimentaires, de la santé et de l'éducation, car il se peut que ce soit dans ces systèmes fonctionnels là que se passent sous nos yeux les progrès les plus décisifs sans que nous ne nous en rendions compte. Nous tirerons des exemples de ces systèmes pour illustrer les pages suivantes de cet exposé.

▲ L'utilisation des réfrigérateurs s'est généralisée vers 1960, époque à laquelle la mise au point de groupes réfrigérants performants et fiables fabriqués en grande série et la forte demande ont permis de faire baisser de moitié les prix de vente (à gauche).

Si des améliorations évidentes ont été apportées aux automobiles depuis le temps où elles ressemblaient à des calèches ou à des phaétons, l'organisation générale, et la structure globale du produit n'ont pas changé (à droite).

Fotogram - Tourenne

Photri

Les fonctions de recherche et de développement dans l'entreprise

Nous n'avons toujours pas répondu franchement à la question initiale : le progrès scientifique et technique est-il le moteur de l'industrialisation ? Que la réponse soit oui ou non, ce que nous verrons plus tard, il y a sûrement là un problème du type de la poule et de l'œuf : lequel, de la poule ou de l'œuf, est apparu le premier sur la planète ? Il est évident que les entreprises doivent être très informées des progrès en cours ou probables dans un proche avenir, et la meilleure façon de se tenir informé est de participer activement soi-même à la recherche scientifique ou technique.

L'activité de *recherche et développement* d'une entreprise peut donc être schématisée par la *figure* 3. La flèche « innovations maison » de la *figure* 3 représente un flux d'innovations susceptibles d'être exploitées industriellement par l'entreprise elle-même. C'est ainsi que les grandes entreprises de l'industrie chimique ou pharmaceutique affirment que 50 % des produits qu'elles fabriqueront dans dix ans sont encore inconnus à ce jour, et donc que leurs laboratoires de recherche et d'essais sont essentiels à leur développement et même à leur simple survie. C'est ainsi également que tel constructeur français d'automobiles fondait il y a quelques années sa publicité sur le nombre et la variété des innovations techniques incorporées dans ses fabrications. Mais il suffit de suivre l'actualité technico-économique ou de parcourir les périodiques spécialisés dans les problèmes de gestion pour se persuader que la relation entre l'activité et l'efficacité des centres de recherche d'une entreprise et la croissance de cette entreprise est extrêmement aléatoire.

Des exemples frappants peuvent être cités ; la plupart des grands produits chimiques constituant les matières plastiques, ou les modèles récents d'appareils photographiques, par exemple, résultent de l'activité de recherche et d'innovation des firmes qui les fabriquent et en tirent d'importants bénéfices. Inversement, la firme automobile dont les modèles comportaient la plus forte dose d'ingéniérie de pointe n'a pas survécu en tant qu'entreprise indépendante sur le plan commercial et financier.

Il n'existe aucune théorie explicative, ni même réellement descriptive, des processus par lesquels le progrès technique s'incorpore dans l'industrialisation. Il convient donc de dresser plutôt un inventaire ordonné d'un certain nombre de concepts et de méthodes qu'utilisent les entreprises pour gérer leur recherche et leur développement, à savoir : la propriété industrielle ; le commerce des innovations et des innovateurs ; le *technological gap ;* les structures des entreprises et la créativité ; la politique des États et les organismes professionnels ; le contrôle de gestion.

La propriété industrielle — Les brevets

Lorsqu'une entreprise a mis au point un nouveau procédé de fabrication ou un nouveau dispositif dans ses laboratoires, elle dépose un brevet auprès de l'Administration. Le brevet est une description explicite du nouveau procédé ou matériel ; cette description doit donner toutes les indications qui permettraient à un autre industriel de fabriquer lui-même cette nouveauté, qui doit avoir été fabriquée effectivement. Naturellement, tel n'est pas le but premier de l'institution des brevets, mais ce principe fondamental indique clairement que l'on ne peut pas breveter une simple idée, par exemple l'idée de coder des lettres et chiffres par une combinaison de huit bits magnétiques, ni la formulation d'une loi physique telle que : le courant électrique échauffe un filament qui émet de la lumière. En revanche, le brevet pourra porter sur le procédé de fabrication qui produit un filament de meilleure qualité tant mécanique qu'irradiante. L'objectif du brevet est d'interdire, en général pendant vingt-cinq ans, à d'autres entreprises d'utiliser le même procédé ou de fabriquer le même objet, de façon que l'inventeur jouisse d'un marché protégé et puisse rentabiliser par la fabrication et la vente en grande quantité ses efforts d'innovation.

La législation et les usages de la propriété industrielle varient beaucoup selon les pays, même à l'intérieur du monde occidental, et même de la seule Europe des Neuf. Il existe depuis peu un brevet européen protégeant l'inventeur dans l'ensemble de l'Europe, mais ce nouveau type de brevet n'a pas pour autant éliminé les brevets de chacun des neuf États. L'inventeur n'est en effet protégé que dans les pays où il a déposé son brevet. Et encore est-ce à lui de faire sa propre police, et de prendre l'initiative de poursuivre en justice les auteurs de contrefaçons. L'inventeur fera le plus souvent appel, même s'il est une puissante firme disposant d'un service spécialisé, à un cabinet conseil en propriété industrielle.

Il existe de nombreux exemples de brevets qui ont été exploités par leur auteur. Citons parmi les plus spectaculaires le disque microsillon ou l'appareil de photographie à développement instantané. Mais la plupart des brevets ne sont pas exploités. En effet, la rapidité du progrès technique est telle qu'une firme met au point elle-même des procédés révolutionnaires avant même que soient amorties ses propres usines utilisant le procédé précédemment mis au point. Cette entreprise déposera les nouveaux brevets pour retarder quelque peu la diffusion industrielle et commerciale du progrès.

Un exemple type est celui des composants électroniques de l'informatique. Des usines avaient été implantées au début des années 1960 pour fabriquer en grande série des micromodules, petits boîtiers d'un volume de l'ordre du cm^3 contenant de cinq à dix composants élémentaires (transistors, résistance, capacités, etc.). A la date où les ordinateurs fondés sur ces micromodules ont été commercialisés à une grande échelle, fonctionnaient déjà en laboratoire ou dans des systèmes militaires des ordinateurs utilisant les premiers circuits intégrés. Mais il fallait attendre au moins cinq années pour amortir usines de fabrication de composants, chaînes de montage des ordinateurs, formation technique et organisation des services de maintenance.

Dans une situation d'oligopole (c'est-à-dire lorsqu'un petit nombre de firmes contrôlent la plus grande part du marché), ces firmes, dans l'ensemble, ont le même intérêt, et se surveillent étroitement, de façon que, dès que l'une d'entre elles décide de lancer son nouveau produit, les autres se précipitent pour en faire autant, de manière à conserver leur part du marché avec le nouveau produit. La plupart du temps, ce processus joue raisonnablement dans l'intérêt des utilisateurs et de la société globale qui s'essouffleraient à s'adapter sans cesse à un progrès galopant.

Lorsqu'un inventeur ne désire ni exploiter lui-même, ni geler son brevet, il vend ou loue moyennant redevance la licence d'exploitation du brevet à un autre industriel. Certaines sociétés se sont même donné comme objet essentiel de créer des innovations et de vivre de leurs cessions de licences. L'on doit constater que ce type d'entreprise n'est en général pas viable sans aide publique sous une forme ou une autre, quelle que soit la longue liste des coups exceptionnels.

Pour en finir avec les brevets, rappelons que le savoir-faire, le *know how* en anglais, n'est pas brevetable, et que c'est l'une des raisons pour lesquelles un industriel inno-

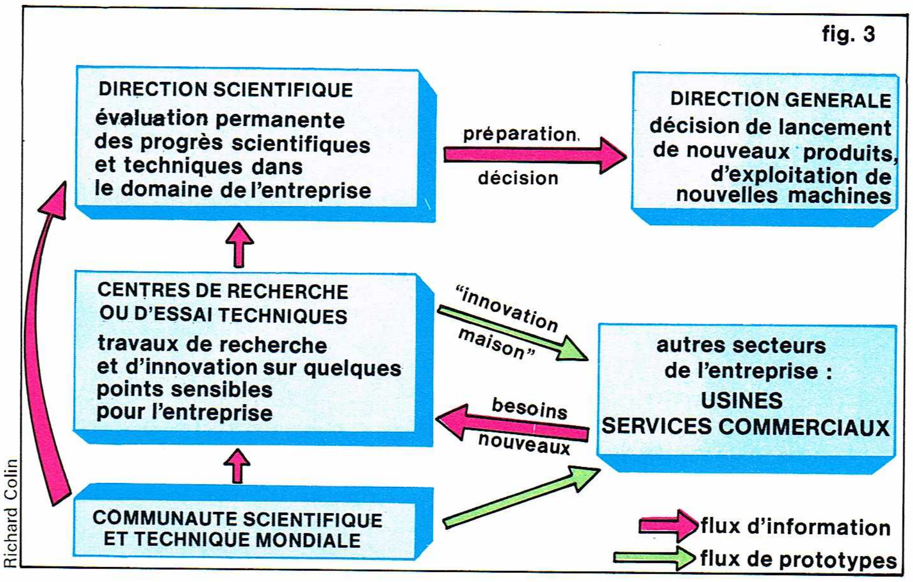

▲ ***Figure 3 :*** ***schématisation des activités de recherche d'une entreprise.***

◀ ***Page ci-contre : alors que, jusque-là, la structure mécanique (ailes et fuselage) d'un avion était constituée de deux poutres croisées (Boeing 747, en bas), celle du Concorde (en haut) est intégrée. Ce genre de modification contribue au progrès des qualités du système, mais ne modifie pas l'usage général que l'homme en fait.***

vateur se protège rigoureusement de l'espionnage industriel, que nombre d'entreprises qui exploitent elles-mêmes leurs innovations sur un marché actif aiment mieux se protéger par le secret dans leur phase de préparation du lancement du nouveau produit que par des brevets. Et enfin qu'une caractéristique essentielle d'un brevet est sa plus ou moins grande « contournabilité ».

Une activité essentielle des centres de recherche industriels est d'inventer des procédés originaux qui permettent de fabriquer par d'autres voies un matériel ou produit qui est déjà largement diffusé par une autre entreprise. Un cas célèbre est celui du polyéthylène, l'une des principales matières plastiques, qui était fabriqué par un procédé chimique catalytique, jusqu'à ce qu'un nouveau procédé permette de le synthétiser à très haute pression sans catalyseur.

Le commerce des innovations et les innovateurs

Lorsqu'un savant ou un inventeur a mis au point le prototype d'un appareil, ou un procédé chimique sur sa paillasse, par exemple, s'il n'a pas les moyens de l'industrialiser lui-même, il cherche à le faire adopter sous une forme ou sous une autre par une grande entreprise. Et inversement, les grandes entreprises ont couramment leurs chasseurs de têtes, qui ont pour fonction de repérer dans les laboratoires universitaires ou dans les petites entreprises des inventeurs qui détiennent de fait et de droit la propriété de leur découverte.

Citons quelques exemples : tel professeur de mathématiques d'un lycée d'une ville moyenne du Far West avait conçu et publié dans un livre un formalisme des symboles mathématiques, de l'écriture des fonctions, d'une pureté logique et d'une simplicité telles que même un ordinateur pouvait le comprendre sans passer par l'intermédiaire de langages ou de compilateurs complexes. Ce professeur a été repéré et, peut-on dire, acheté par une puissante firme informatique (qui, assez curieusement, n'a pas poussé sur une grande échelle le développement d'ordinateurs utilisant ce nouveau langage génial).

Tel chercheur chimiste doté d'une personnalité type de savant Cosinus, inventif, génial, mais assez individualiste, avait mis au point la synthèse d'un polyamide à partir d'huile de ricin. Son procédé a été développé par une société créée à cet effet par l'un des principaux groupes industriels français, société qui a ensuite grossi, a diversifié ses produits, a été revendue (toujours avec notre savant dans le lot « tout compris ») à un autre groupe industriel, puis a servi de base au développement d'une autre puissante firme.

Mais l'on rencontre aussi bien le processus inverse. Une grande entreprise se désintéresse d'une machine-outil ou d'un produit, car sa stratégie générale ou une crise passagère lui impose d'élaguer certaines de ses activités. Un ingénieur qui était le « propriétaire technique ou intellectuel » de cette machine ou de ce procédé décide de créer une nouvelle entreprise, généralement en payant ce qu'il emporte avec lui sous forme d'actions ou d'obligations, ou grâce à un prêt à moyen terme obtenu auprès d'un organisme financier tel qu'une société de développement régional.

Le plus intéressant pour une grande entreprise qui acquiert un homme et son savoir est de recruter ainsi non pas un savant, mais plutôt un développeur ; et bien souvent, le même *Homo sapiens* ne réunit pas les deux talents assez contradictoires d'inventeur et de développeur. Ainsi telle société française engagée dans l'exploration pétrolière et minière a-t-elle créé très rapidement un laboratoire de géochimie grâce au recrutement d'un docteur ès sciences qui s'était formé auprès de savants américains. En un tournemain, ce docteur ès sciences a organisé une véritable « usine géochimique », c'est-à-dire un laboratoire d'analyses et d'essais doté d'un ordonnancement, d'une comptabilité analytique, d'un système rationnel de management; en quelques années, il a fait pénétrer ces nouvelles techniques dans tous les chantiers de l'entreprise. Mais force est de constater qu'il n'a réussi aucune réelle découverte scientifique nouvelle.

Ce commerce des chercheurs et des innovations a pu prendre la forme du *brain drain* de l'Europe vers les États-Unis pendant la période 1940-1965 ; voire la forme d'un butin de guerre, puisqu'il semble que la base de départ de l'industrie photographique japonaise soit l'ensemble des procédés allemands récupérés par l'armée américaine et transférés au Japon pour aider à la renaissance industrielle de ce pays dans l'orbite stratégique des États-Unis.

Le technological gap

Cette expression américaine, que l'on peut traduire par retard technologique de l'Europe par rapport aux États-Unis, est apparue dans la littérature et les discours managériaux ou politiques vers l'année 1965. L'un des résultats du *brain drain*, de la fuite des cerveaux de l'Europe vers les États-Unis et de la puissance économique américaine était que les États-Unis prenaient une avance technologique foudroyante, reléguant la vieille Europe au rang de pays stagnant, au développement plafonné, limité. La technologie américaine était en avance en électronique, en informatique, en océanographie, en techniques spatiales, en systèmes d'armes, etc., cependant que ses savants raflaient la plupart des prix Nobel.

Ne cherchons pas à approfondir ce problème dans ses aspects économiques globaux, ce qui nous conduirait à constater que ce sont bien souvent les Anglais qui étaient les pionniers du progrès technologique (logiciels les plus récents, aéronautique, etc.), et que les autres pays d'Europe, dont la France, produisent également nombre d'innovations, ce qui nous conduirait en outre à nous demander si l'avance américaine ne résulte pas davantage d'un art du management et d'un certain protectionnisme (*American selling price* freinant l'importation des produits chimiques, affaire *Concorde*, etc.).

Mais décrivons plutôt un cas concret de rattrapage de ce retard technologique ; il s'agit de l'industrie du pétrole et du gaz naturel. Voilà un secteur technique où la suprématie américaine est incontestée, dont la capitale mondiale est Houston (Texas), qui rassemble la plus forte concentration de sièges de sociétés, de centres de recherches, de consultants, de sous-traitants, de centres de calculs dévoués à la cause pétrolière. Lorsque, entre les deux guerres, la France a ressenti le besoin à la fois économique et stratégique de développer stockage et raffinage de pétrole, l'État a invité les firmes anglo-américaines à installer leurs raffineries sur les rives de l'étang de Berre ou de la basse Seine. Mais l'on ne peut dire qu'il en soit résulté grand-chose pour la technique pétrolière française toujours à peu près inexistante. Même les efforts de l'État à la Libération, avec la création de l'Institut français du pétrole et des Sociétés REP (Recherche et Exploitation pétrolière), n'ont pas inoculé la fièvre du pétrole aux Français, mais ont abouti entre 1950 et 1955 aux découvertes du gaz naturel sulfureux de Lacq et des gisements pétroliers sahariens, découvertes qui ont, elles, provoqué l'engouement financier et technique, voire touristique, des Français pour le pétrole.

Pour forer très rapidement les trente-trois puits nécessaires à l'exploitation de Lacq, les équiper en tubes de production d'une nuance d'acier résistant à la corrosion à haute pression et à la température du gaz acide, construire les unités de l'usine de traitement de gaz : désulfuration, dégazolinage, production du soufre à partir de l'anhydride sulfhydrique, il a été très largement, presque exclusivement, fait appel à des procédés et équipements nord-américains ; même des équipements purement mécaniques tels que les gros compresseurs à gaz étaient fabriqués sous licence américaine. Et pour tous les problèmes liés à l'acidité du gaz et à la production du soufre, l'expertise des Canadiens de l'Alberta et de leur capitale pétrolière de Calgary (un petit Houston) était requise en permanence, des ingénieurs canadiens ayant l'expérience de gisements comparables à celui de Lacq étant même venus s'installer à Lacq pour plusieurs années.

Puis, le temps passant, les problèmes techniques qui se sont posés à Lacq ont évolué ; il s'agissait de tirer profit des nouvelles techniques de l'automatisme industriel pour améliorer le fonctionnement des unités de production, puis de s'attaquer au grave problème de la pollution en éliminant au maximum les composés sulfureux contenus dans les gaz (gaz carbonique et vapeur d'eau) renvoyés dans l'atmosphère. En un laps de dix années, les ingénieurs français ont ainsi été à même de développer des procédés originaux et efficaces qui sont maintenant commercialisés dans le monde entier.

Cette présence des Français dans la technologie de pointe s'est produite également en géophysique, en forage, en développement des gisements en mer, et

l'on peut même dire que les Français sont les leaders, par exemple dans les techniques de plongée sous-marine, ou de transport du méthane liquide (*fig.* 4).

Bien qu'il soit très difficile de donner des informations quantitatives, car les statistiques financières sur les achats et ventes de brevets ou licences ne donnent qu'une vue partielle des faits, l'on peut raisonnablement affirmer que la part des entreprises françaises dans le progrès technique du secteur pétrolier est passée en vingt-cinq ans de zéro à une part certainement comparable au poids de l'industrie pétrolière française par rapport à l'industrie mondiale.

Cet exemple illustre et confirme la thèse selon laquelle l'essentiel des innovations techniques ne consiste que rarement à créer un système fonctionnel (voir *fig.* 1) entièrement nouveau, mais porte bien plus sur des améliorations et des innovations de composants ou sous-systèmes. La meilleure façon pour une entreprise de se lancer dans un domaine technique nouveau pour elle, avec des chances de parvenir dans le peloton des quelques entreprises qui maîtrisent ce domaine et le font progresser, est donc d'acquérir et d'utiliser matériels et procédés, sous licence le plus souvent, puis de les perfectionner. Cette pratique conduit naturellement les ingénieurs et techniciens de l'entreprise à développer de nombreux contacts avec les constructeurs du matériel, avec les fabricants de matériels concurrents, etc.

Une excellente pratique pour une entreprise est de créer des établissements (filiales, agences) dans le pays ou la ville réputée pour son avance technologique. L'information technique et le progrès transitent en effet essentiellement au travers des contacts entre hommes, entre spécialistes ; la documentation technique, les brevets, les prospectus complètent ces contacts directs, mais ne les remplacent pas.

La structure des entreprises. La créativité

Dans cet environnement de progrès scientifique et technique intense, les entreprises ont été conduites à s'organiser pour choisir et développer des produits industrialisables et commercialisables. Dans son organigramme et sur le terrain, l'entreprise constitue une direction scientifique et des centres de recherche et d'essais de produits nouveaux (voir *fig.* 3).

Le problème fondamental d'organisation est le suivant : pour faire travailler des hommes efficacement, il faut les constituer en équipes relativement homogènes par leur technicité, leur rythme et style de travail, les locaux et équipements qu'ils utilisent, et, pour obtenir une bonne rentabilité, ces équipes doivent être de taille suffisante. Le département d'un centre de recherche comprendra souvent 20 à 60 ingénieurs et chercheurs, soit un effectif total de 50 à 200 personnes.

Les grands centres de recherche des grandes entreprises et des organismes professionnels ou étatiques atteignent souvent 200 ingénieurs et chercheurs, et parfois bien davantage. Quels sont les facteurs qui poussent à donner une dimension suffisante aux centres de recherche ?

— Le meilleur emploi des moyens logistiques : documentation et bibliothèque, centre de calcul, bureau de dessin, édition et reproduction de documents, etc.

— L'interdisciplinarité, c'est-à-dire la possibilité de constituer, selon les projets, des équipes comprenant des spécialistes de différentes disciplines, par exemple des mathématiciens d'analyse numérique, des électrotechniciens, des magnétohydrodynamiciens, et des physicochimistes pour un four canal en électrométallurgie.

— La possibilité de gérer les carrières du personnel technique et des jeunes chercheurs et ingénieurs en jouant sur un nombre suffisant de postes et de projets.

En outre, le style général de travail d'un centre de recherches nécessite de le séparer nettement des autres établissements de l'entreprise. Il cohabite difficilement avec le siège administratif et financier ; les problèmes de sécurité et de réglementation du travail conduisent à le séparer des usines ; les comportements de groupes, tout autant que la protection des secrets, sont encore des arguments qui poussent à distinguer et à séparer les établissements de recherche et développement.

Mais cette individualisation de la *recherche* et du *développement* dans des établissements spécifiques comporte intrinsèquement ses limitations. En effet, puisque le progrès technique et le développement industriel se

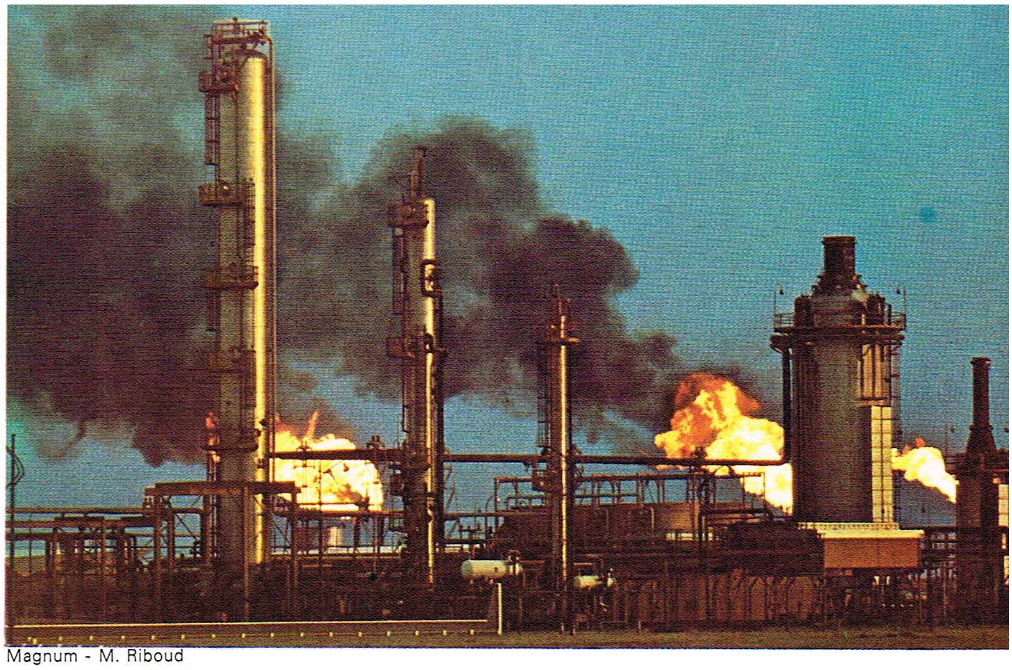

Magnum - M. Riboud

Photothèque TOTAL

▲ *La découverte entre 1950 et 1955 des gisements pétroliers sahariens (en haut, les installations de Hassi-Messaoud) a provoqué en France un engouement financier et technique pour le pétrole.*
Après la découverte du gaz de Lacq, les ingénieurs français, en une dizaine d'années, ont été à même de développer des procédés originaux et efficaces, maintenant commercialisés dans le monde entier. Ci-dessus, une explosion sismique à Abu Dhabi aux fins d'exploration du terrain et de ses gisements.
▼ *Figure 4 : rattrapage du retard technologique des entreprises françaises dans le domaine pétrolier.*

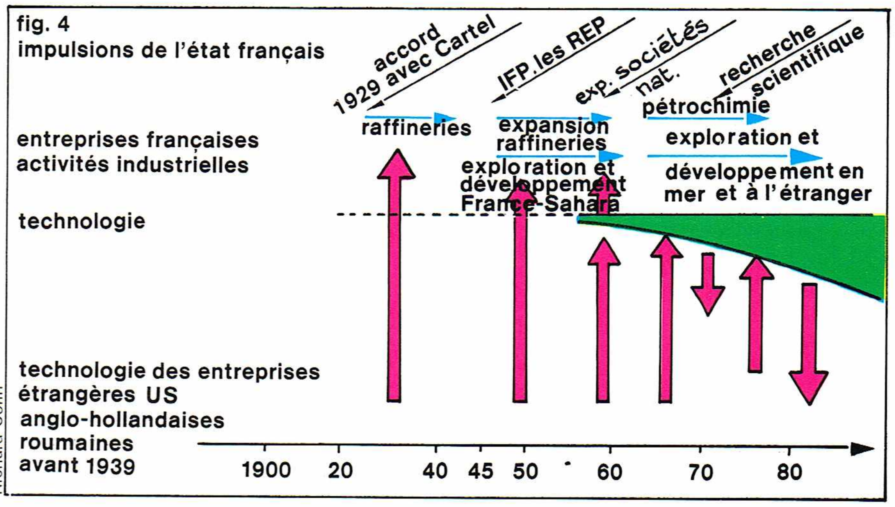

Richard Colin

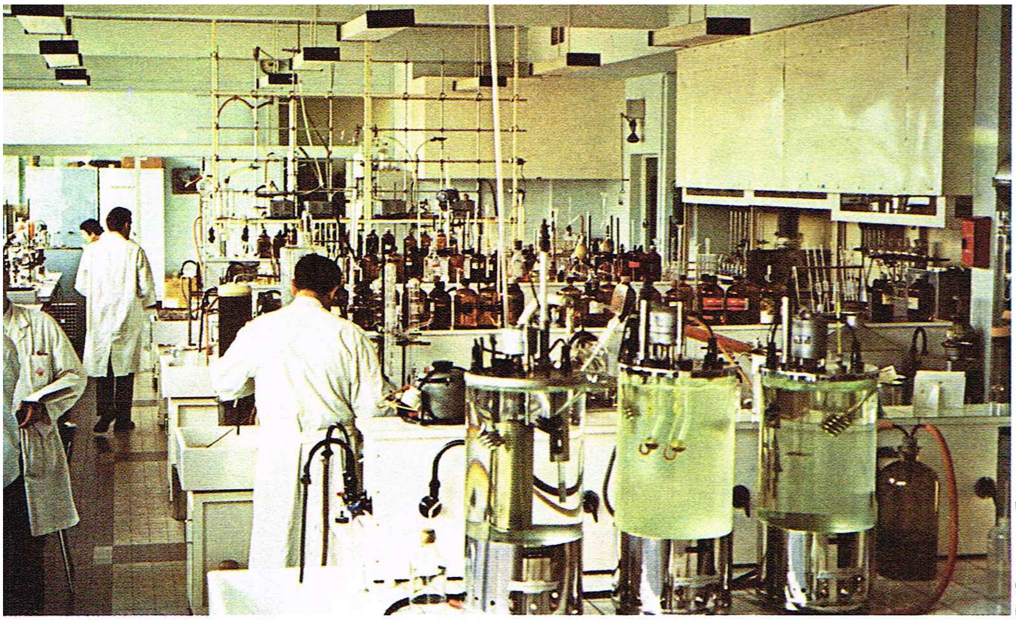

D. Gaugez - Fotogram

Fotogram - T. Boulley

▲ ***Le style général de travail d'un centre de recherche nécessite de le séparer nettement des autres établissements de l'entreprise. Ici, le centre de contrôle et de recherches des raffineries Shell. Une manifestation de l'importance des contacts entre les entreprises de pays différents est le remplissage des trains d'affaires et des avions (ici le* Concorde*), parfois véritables ponts aériens internationaux.***
▼ ***Figure 5 : vie d'un produit au travers des différentes directions techniques de l'entreprise.***

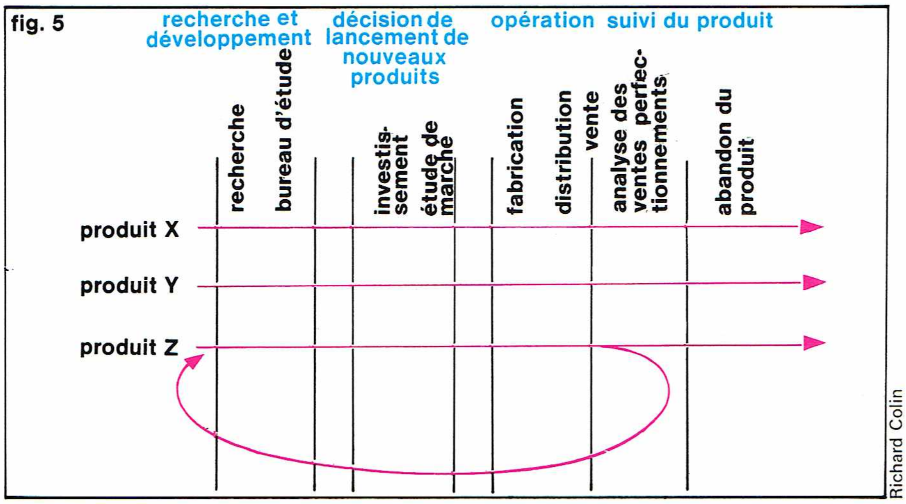

Richard Colin

produisent essentiellement en perfectionnant des produits ou installations industrielles existant déjà, et cela au service des besoins explicitement recensés des consommateurs, les hommes de recherche et développement doivent travailler en contact étroit avec les usines et le réseau commercial, et, bien sûr, avec les bureaux d'étude et les services d'études économiques du siège qui seront chargés de l'étape de mise en fabrication ou du lancement des nouveaux produits. Ces contacts sont également développés vers l'extérieur de l'entreprise, avec les fournisseurs spécialistes de tels composants, avec des chercheurs d'autres institutions.

Les manifestations de l'importance de ces contacts entre hommes et équipes sont le remplissage des trains d'affaires et des avions, avec l'organisation parfois de véritables ponts aériens internationaux (entre la France et la Grande-Bretagne pour le *Concorde*, entre Paris et Houston pour tels projets pétroliers), avec des rassemblements pulsatoires lors des salons technico-scientifiques (des composants électroniques, de l'innovation, de l'informatique, etc.), de congrès, de « semaines techniques » organisés par les grandes firmes multinationales pour leurs spécialistes dispersés dans nombre de filiales et de pays. Deux outils rationnels cherchent à réduire le coût impressionnant de ces contacts, dont la rentabilité est impossible à évaluer coup par coup, c'est-à-dire lors de la décision de créer telle commission ou d'organiser tel meeting ; ces deux outils sont la gestion de projet et la structure de l'entreprise.

Si l'on compare la **gestion d'un projet de recherche et développement** à celle des projets directement industriels (un chantier de travaux publics, la construction d'une usine), la première reste très qualitative ; en effet, beaucoup d'incertitudes entachent les informations nécessaires au manager de projet, et, en particulier, il doit souvent se contenter des informations subjectives de chaque chercheur sur l'avancement de son travail et la chance qu'il a d'aboutir dans les délais requis.

Quant à la structure de l'entreprise, tout au moins dès que l'entreprise dépasse la taille d'une PME, elle s'articule autour du regroupement des gens, des services ou des établissements selon trois critères : les techniques, les produits et les régions géographiques.

Une **direction technique** s'occupera par exemple de tout ce qui est fabrication mécanique, ou de tout ce qui est unité de production chimique, ou matériels de chantier ou de transports, c'est-à-dire de tous les équipements d'une même famille mis en œuvre par l'entreprise, et par là même des ingénieurs et techniciens liés à cette spécialité. La direction de l'ensemble des centres de recherche du groupe est de ce point de vue une direction technique.

Une **direction de produit** s'attache à toute la vie d'une classe de produits au travers des différents moyens techniques mis en œuvre par l'entreprise. Cette vie des produits est représentée de façon simpliste par une ligne droite sur la *figure* 5 ; elle serait mieux représentée par un cercle (voire une spirale), le marketing pouvant aussi bien être placé avant la recherche qu'en aval de la distribution.

Un directeur de produit est une sorte de businessman qui sous-traiterait toutes les opérations à des directions techniques. Une classe de produits sera souvent composée de produits ayant le même marché : matériaux pour le bâtiment ; matières plastiques pour les façonniers ; textiles ; chimie fine, etc.

Une **direction géographique** recouvre l'ensemble des *établissements* et *personnels* de l'entreprise implantés dans une même région ou un même pays. Ses préoccupations concerneront évidemment la gestion du personnel, les relations avec l'Administration, l'environnement et, lorsque cette direction travaille au niveau d'un État, le droit et la fiscalité.

Ce clivage selon trois dimensions subit naturellement tous les arrangements pragmatiques correspondant à l'infinie variété des entreprises et des hommes. Mais une tendance nette tend à confier les projets d'innovation, de décision, de définition et d'essai de produits nouveaux aux directions par produits. En effet, c'est le besoin du consommateur, du marché (et cela quel que soit le statut de l'entreprise ou le système économique) qui est le critère de la validité d'un produit nouveau tant en qualité qu'en prix.

Naturellement, le chef de projet incorporera dans son groupe de supervision du projet des spécialistes des

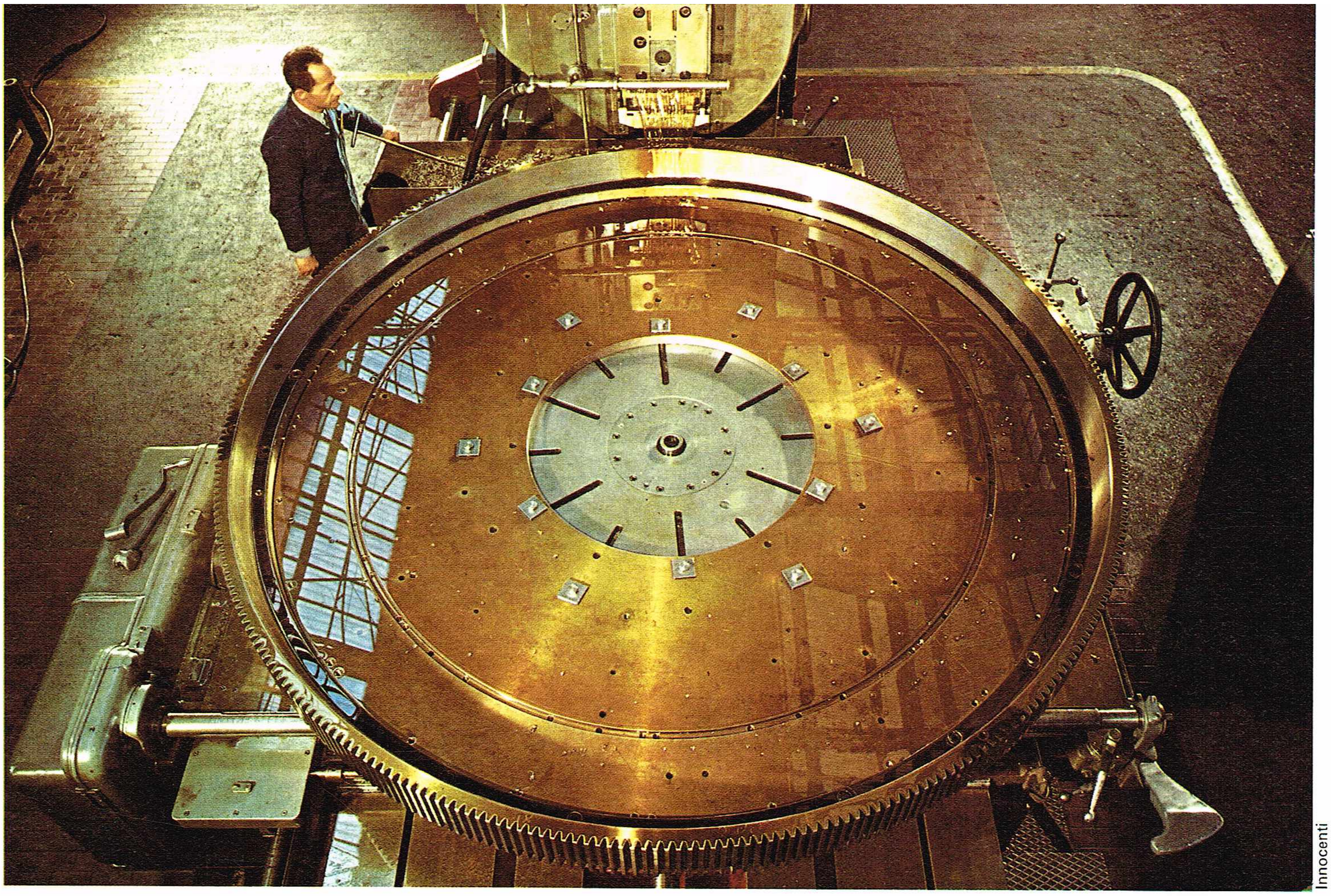

Innocenti

▲ ***La machine-outil est à l'évidence la cheville ouvrière de toute activité industrielle. En France, ce secteur industriel est assez petit et très dispersé en petites et moyennes entreprises.***

techniques à mettre en œuvre, et confiera aux centres de recherche, aux bureaux des méthodes, aux bureaux d'études le plus grand nombre des tâches nécessaires à la mise au point du prototype. Mais la direction de produits responsable du projet doit obtenir le budget nécessaire aux études, coordonner le projet, et sera jugée à ses résultats efficaces. Le responsable de projet sera personnellement vivement récompensé s'il réussit.

Citons quelques exemples connus du grand public. Le « train autos-couchettes » est un « produit » des compagnies de chemin de fer européennes, et de la S. N. C. F. en premier lieu. Un « chef de produit », dont le nom avait été largement cité par la presse lors des premiers succès de ce produit, a su définir celui-ci en fonction des besoins potentiels de la clientèle, et a obtenu appui et budget de la Direction générale pour :

— faire faire une étude de marché, de tarifs et d'horaires par la Direction commerciale;

— faire concevoir et fabriquer des wagons par la Direction des matériels roulants;

— susciter de la Direction de l'exploitation une organisation de ce nouveau service.

Un autre exemple, qui étonnera peut-être dans un exposé concernant l'entreprise, est le ravalement des façades des immeubles urbains. L'on sent bien qu'un animateur a eu la conviction initiale que l' « entreprise France » pouvait s'offrir ce soin de propreté, et a dû mettre en mouvement mille administrations, circuits, budgets, entreprises de travaux publics... pour lancer le mouvement.

Des exemples industriels célèbres sont, par exemple, la première marque de café instantané lyophilisé, qui a nécessité plusieurs années d'essais techniques et de marchés-tests.

Confier le lancement de produits nouveaux à des hommes qui connaissent les besoins du marché (et les trois exemples ci-dessus montrent que le mot « marché » doit être pris en un sens très élargi) influe sur le style de diversification de l'entreprise vers de nouveaux produits. Telle entreprise au renom mondial dans la fabrication des lames de rasoir ouvrira une nouvelle activité dans les produits de toilette pour hommes, plutôt que dans des produits en acier fin. (En revanche, elle vendra sans doute des brevets concernant l'acier très fin des lames de rasoir à des entreprises d'autres professions.) Le même réflexe d'entreprise a conduit toutes les entreprises pétrolières du monde occidental à s'intéresser à des concessions minières d'uranium dès les années 1960, puis plus récemment aux houillères, pour servir le marché de l'énergie.

Ce leadership donné à la direction de produits dans la définition des nouveaux produits se retrouve à une plus grande échelle. Lorsqu'une entreprise, englobant des sociétés très nombreuses répandues dans plusieurs pays, devient si gigantesque qu'elle est difficilement manageable à partir d'une seule direction générale, les responsables de cette entreprise la découpent en grandes *divisions*.

En France, dans les organigrammes d'entreprises, le mot *division* est utilisé dans de nombreux sens; la division peut représenter un niveau hiérarchique plus grand ou plus petit que direction du département. Au sens américain du terme, une *division* est une grande entreprise qui dispose de tous les moyens nécessaires à son objet : recherche, usines, commercial, état-major de siège, etc., et n'a des relations que juridiques et financières avec la direction générale du Groupe. La division englobe elle-même nombre de sociétés et filiales dans de nombreux pays. Là encore, le critère de découpage dans le grand ensemble à trois dimensions : géographique, produits, techniques, tend à privilégier le critère « produits », par exemple : la division poids lourds, la division véhicules automobiles, la division outillage, la division exportation d'usines clefs en main.

Évidemment, la situation idéale pour la créativité de nouveaux produits est celle d'une *PME à forte technicité*. On trouve là une petite équipe d'hommes connaissant bien la technique et le marché, et détenant sans trop d'intermédiaires le pouvoir de décision. Cette situation est en particulier celle du secteur de la machine-outil. Cette dernière est à l'évidence la cheville ouvrière de toute l'activité industrielle, puisque l'on passe par elle pour fabriquer tous les objets ! Et c'est pour cela que les responsables économiques sont très soucieux de la bonne santé dans le pays du secteur industriel « conception et fabrication de machines-outils ». Mais, en fait, que l'on compte en tonnes, en francs ou en heures de travail, ce secteur industriel est assez petit, et est très dispersé en PME où, typiquement, le patron est lui-même un fin monteur mécanicien, électronicien ou autre, et passe très vite du besoin client à l'invention et à la fabrication.

Tableau II

Principaux centres de recherche d'État en France

BRGM	: Bureau de recherche géologique et minière, 6, rue Chasseloup-Laubat, 75015 Paris.
CEA	: Commissariat à l'énergie atomique, 29, rue de la Fédération, 75015 Paris.
CERN	: Conseil européen pour la recherche nucléaire, B.P. 1211 Genève 23, Suisse.
CNEEMA	: Centre national d'étude et expérimentation du machinisme agricole, Parc de Tourvoie, 92160 Antony.
CNES	: Centre national d'études spatiales, 129, rue de l'Université, 75009 Paris.
CNET	: Centre national d'étude des télécommunications, 22300 Lannion.
CNEXO	: Centre national d'exploitation des océans (Monaco), 39, avenue d'Iéna, 75016 Paris.
CNRS	: Centre national de la recherche scientifique, 15, quai Anatole-France, 75007 Paris.
CSTB	: Centre scientifique et technique du bâtiment, 4, avenue du Recteur-Poincaré, 75016 Paris.
GERDAT	: Groupement d'études et de recherche pour le développement de l'agronomie tropicale, 42, rue Scheffer, 75016 Paris.
INAG	: Institut national d'astronomie et de géophysique, 77, avenue Denfert-Rochereau, 75014 Paris.
INRA	: Institut national de recherche agronomique, 11, rue J.-Nicot, 75007 Paris.
INSEE	: Institut national de la statistique et des études économiques, 12, rue Boulitte, 75014 Paris.
INSERM	: Institut national de la santé et de la recherche médicale, 101, rue Tolbiac, 75013 Paris.
IRCHA	: Institut de recherche chimique appliquée, 12, quai Henri IV, 91710 Vert-le-Petit.
IRIA	: Institut de recherche d'informatique et d'automatique, Domaine de Voluceau Rocquencourt, 78150 Le Chesnay.
LCPC	: Laboratoire central des ponts et chaussées, 58, boulevard Lefebvre, 75015 Paris.
ONERA	: Office national d'études et de recherche aéronautiques, 29, avenue de la Division-Leclerc, 92320 Châtillon-sous-Bagneux.
ORSTOM	: Office de la recherche scientifique et technique d'outre-mer, 24, rue Bayard, 75008 Paris.

Tableau III

Principaux centres d'essais techniques en France

CEMP	: Centre d'étude des matières plastiques, 21, rue Pinel, 75013 Paris.
CERCHAR	: Centre d'études et de recherches des charbonnages de France.
CERIB	: Centre d'études et de recherches de l'industrie du béton manufacturé, B.P. 42, 28230 Épernon.
CERILH	: Centre d'études et de recherches de l'industrie des liants hydrauliques, 23, rue deCronstadt, 75015 Paris.
CERMO	: Centre d'études et de recherches de la machine-outil, 21, rue Pinel, 75013 Paris.
CETEHOR	: Centre technique de l'industrie horlogère, 39, avenue de l'Observatoire, B.P. 1145, 25003 Besançon.
CETIAT	: Centre technique des industries aérauliques et thermiques, B.P. 19, 91402 Orsay.
CETIM	: Centre technique des industries mécaniques, 52, avenue Félix-Louat, B.P. 67, 60304 Senlis.
CNEC	: Centre technique de l'emballage et du conditionnement, avenue G.-Politzer, 78190 Trappes.
CTB	: Centre technique du bois, 10, avenue de Saint-Mandé, 75012 Paris.
CTC	: Centre technique du cuir, 181, avenue Jean-Jaurès, 69007 Lyon.
CTCA	: Centre technique de la conserverie agricole, 71, avenue du Général-Leclerc, 75014 Paris.
CTDEC	: Centre technique de l'industrie du décolletage, zone industrielle des Grands-Prés, B.P. 65, 74301 Cluses.
CTICM	: Centre technique industriel de la construction métallique, 20, rue Jean-Jaurès, 92807 Puteaux.
CTIF	: Centre technique des industries de la fonderie, 11, avenue Raphaël, 75016 Paris.
CTIH	: Centre technique des industries de l'habillement, 14, rue des Reculettes, 75013 Paris.
CTP	: Centre technique de l'industrie des papiers, cartons et celluloses, Domaine universitaire de Grenoble, Saint-Martin-d'Hères, B.P. 175, 38042 Grenoble.
CTTB	: Centre technique des tuiles et briques, 2, avenue Hoche, 75008 Paris.
CTTN	: Centre technique de la teinture et du nettoyage, avenue Gambetta, 69250Neuville-sur-Saône.
IFP	: Institut français du pétrole, 1-4, avenue de Bois-Préau, 92503 Rueil-Malmaison.
IRSID	: Institut de recherche de la sidérurgie, 185, rue du Président-Roosevelt, 78104 Saint-Germain-en-Laye.
IS	: Institut de soudure, 32, boulevard de la Chapelle, 75880 Paris.
ITERG	: Institut des corps gras, 5, boulevard de Latour-Maubourg, 75007 Paris.
ITF	: Institut textile de France, 35, rue des Abondances, 92100 Boulogne-sur-Seine.
IPREIG	: Institut professionnel de recherches et d'études des industries graphiques, 17, rue des Reculettes, 75013 Paris.
LCIE	: Laboratoire central des industries électriques, 33, avenue du Général-Leclerc, B.P. 8, 92260 Fontenay-aux-Roses.
LRCC	: Laboratoire de recherches et de contrôle du caoutchouc, 12, rue Carves, 92120 Montrouge.
SFC	: Société française de céramique, 23, rue de Cronstadt, 75015 Paris.

▲ *Tableau II : principaux centres de recherche d'État en France. Tableau III : principaux centres d'essais techniques en France.*

La politique de recherche des États. Les organismes professionnels

Seules les entreprises, fussent-elles nationalisées ou services publics tels qu'un hôpital ou les services techniques d'une grande ville, sont organisées et motivables pour faire passer dans les faits concrets, dans des systèmes fonctionnels, les progrès scientifiques et techniques. Mais le hasard de la vie des entreprises d'un pays, leur histoire, les ressources naturelles disponibles font que certains secteurs économiques risquent de rester absents d'un pays, voire d'en disparaître, si les entreprises ne sont pas encouragées à investir et à risquer dans des innovations. Il est donc naturel que les Administrations de l'État, et cela est de plus en plus vrai même aux États-Unis, pays où les entreprises sont le plus jalouses de leur indépendance, se soucient de créer les conditions qui permettent aux entreprises de réaliser ces investissements et prendre ces risques. L'État a pour cela des moyens divers :

— gérer dynamiquement les entreprises nationalisées et donner aux collectivités locales les structures qui leur permettent d'en faire autant pour leurs services publics ;

— créer de toutes pièces de nouvelles entreprises telles que le Commissariat à l'énergie atomique ;

— susciter, et financer par des taxes parafiscales ou par le budget, des centres de recherches et centres d'essais techniques dans les diverses spécialités, des centres universitaires, etc. ;

— encourager la recherche par des avantages fiscaux : ainsi, au début des années 1960, les entreprises pouvaient amortir, c'est-à-dire déduire de leur bénéfice imposable, dès la première année, 50 % du coût d'investissement, bâtiment et équipements compris, de leurs nouveaux centres de recherche ;

— inciter les équipes de recherche existantes, qu'elles soient du secteur public ou du secteur privé, à travailler sur tel ou tel thème en attribuant des crédits budgétaires complémentaires sur présentation de dossiers de projets de recherche.

L'expérience montre que tous ces procédés ont un rendement limité par rapport au travail bureaucratique nécessaire à leur gestion et aux sommes investies, sauf là où se trouve tel ou tel « chef de projet » sérieusement motivé, quelle que soit l'origine de sa motivation : conviction scientifique, recherche des honneurs après la réussite, intéressement financier au produit mis au point, sens du service public, etc. Pourquoi, par exemple, tel directeur des services techniques d'une grande ville de l'Ouest se passionne-t-il pour développer, progressivement, le recyclage des eaux usées vers le réseau d'alimentation en eau fraîche ? C'est une aventure à long terme, dont une première étape déjà réalisée consiste à utiliser l'eau d'égout après épuration pour alimenter centrale électrique, service de nettoyage urbain, etc.

C'est l'un des objectifs du système éducatif d'un pays, de ses écoles, facultés, écoles d'ingénieurs, de créer les conditions de l'apparition de tels hommes alliant tempérament et compétence technique. Et c'est bien là un aspect qui est loin d'être maîtrisé. Les entreprises coopèrent également à cet effort par leurs centres de formation, dont certains sont de véritables petites universités.

Contrôle de gestion de la recherche et du développement

Coût de la formation atteignant parfois 2 % des frais de personnel de l'entreprise, frais de voyages, missions et téléphone qui sont un gouffre du compte d'exploitation, temps passé en réunions de projet, frais de fonctionnements des laboratoires et de la direction scientifique, même si tout cela est globalement nécessaire, est-ce rentable pour telle entreprise dont les dirigeants doivent établir le budget et affecter aux efforts de recherche et développement des sommes considérables qui seraient plus immédiatement rentables, par exemple, dans des investissements de production ?

L'on constate que le montant de ce budget recherche et développement résulte d'un équilibre entre d'une part une pression pour le développer, pression due à la conviction générale, culturelle, des dirigeants des entreprises et de leur entourage (Administrations de l'État, opinion publique, etc.), et due également au dynamisme des inventeurs et chercheurs, qui ont toujours de bonnes raisons de demander de l'argent, et d'autre part deux limitations :

— chaque entreprise a le sentiment que, si elle fait beaucoup plus de recherche et développement que ses concurrents, elle travaille pour les autres ;

— à chaque alerte économique ou financière, l'entreprise comprime ses dépenses, à tort ou à raison, dans les domaines dont la rentabilité n'est pas immédiate, ou plutôt dont le dynamisme n'est pas indispensable à sa survie à très court terme.

L'on constatera donc que, dans chaque profession, toutes les entreprises consacrent à peu près le même pourcentage de leur chiffre d'affaires à la recherche et au développement, par exemple de l'ordre de 5 % dans l'industrie chimique. Cette remarque s'applique aussi aux

ressources affectées par chaque pays du monde occidental à la recherche et au développement financés par le budget de l'État.

Diversité des entreprises. Typologie

Tissus d'entreprises, d'établissements, de sociétés et d'organisations

En parcourant l'ensemble des problèmes que pose à l'entreprise sa confrontation au progrès scientifique et technique, nous avons mentionné au passage nombre de problèmes et de fonctions de l'entreprise autres que la direction scientifique et les centres de recherche et développement (laboratoires, bureaux d'études, centres d'essais, etc.) ; ces autres fonctions sont : l'organisation générale des structures, la gestion du personnel, le contrôle de gestion, le marketing, le management de projet, la fabrication. Pour compléter cet inventaire de fonctions de l'entreprise et y mettre un peu d'ordre, il convient de considérer la diversité des entreprises, puis, par quelques considérations, de cerner une entreprise type dont nous décrirons les fonctions et modes de gestion rationnelle, « systémique » comme l'on dit maintenant. Posons quelques définitions :

- une *entreprise* est l'ensemble des activités opérationnelles contrôlées par un même centre de décision ;
- un *établissement* est l'implantation de certaines activités en un lieu précis, constituant par là même une communauté de travail : un établissement pourra être une usine, un siège social, une agence commerciale, un dépôt, etc. ;
- une *société juridique* correspond à un concept patrimonial ; elle recouvre l'ensemble des biens dont elle est propriétaire, et des personnels qu'elle rémunère ;
- une *organisation*, dans le vocabulaire actuel des spécialistes, est un ensemble de personnels et de moyens soumis à une même autorité, mais s'applique, outre les entreprises et sociétés industrielles et commerciales, aux services publics, aux Administrations, voire à des établissements que les économistes classent dans les ménages, tels qu'une communauté religieuse. Pour ce qui nous concerne, le service des eaux d'une ville, un hôpital, ou un atelier d'entretien d'armements sont des *organisations.*

Établissements, entreprises, sociétés et organisations constituent des populations variées et aux relations multiples. Illustrons cette affirmation par quelques exemples.

Un *conglomérat* est un ensemble de sociétés filiales d'un même pouvoir essentiellement financier. La direction générale du conglomérat se soucie fort peu de la nature technique des produits, des usines et des filiales, encore moins des hommes, si ce n'est au travers d'un filtre unique, l'aspect financier : bénéfices et valeur des actions. Il se peut que le conglomérat joue un rôle utile dans l'organisation économique, mais nous ne pouvons le considérer comme une entreprise.

Pour mille raisons juridiques, financières et fiscales, une entreprise est souvent constituée en nombreuses filiales différentes qui sont contrôlées par la société mère, non seulement du point de vue financier, mais dans la définition de leurs grands objectifs, l'image de marque du *Groupe*, un raisonnable équilibre de leurs développements respectifs. Les filiales « contrôlées », c'est-à-dire dont le centre de décision principal est en fait la société mère, font partie de la même entreprise.

De nombreuses sociétés indépendantes du point de vue juridique et financier sont en fait très *dépendantes les unes des autres* et, par bien des aspects, doivent aussi être considérées comme une entreprise unique :

— ainsi, une société de services faisant plus de 50 % de son chiffre d'affaires avec un seul gros client, ce qui est souvent le cas de la multitude de sous-traitants qui gravitent autour d'une grosse plate-forme industrielle ;

— ou une société ne vivant que de commandes d'une seule Administration pour un seul type de fournitures ;

— un autre exemple est celui d'établissements industriels appartenant à des sociétés différentes, et physiquement liés entre eux de façon si intime que leurs investissements, leurs programmes de fabrication, voire les arrêts de travail de leurs personnels, doivent être étroitement coordonnés ; c'est souvent le cas des nombreuses unités de fabrication d'un complexe pétrochimique reliées entre elles par de nombreuses conduites de produits chimiques, voire d'utilités telles que de la vapeur ou de l'électricité ;

— ou encore, l'ensemble des entreprises d'une profession se trouvant dans certains termes de conjoncture obligées de se coordonner, que ce soit sous la pression du pouvoir de l'État ou une pression extérieure quelconque.

Nombre d'entreprises ou organisations enfin ont une activité purement immatérielle, proposent et vendent des services purs, tels que du « conseil » (juridique, fiscal, organisation, calculs d'engineering, vérification d'appareils, normalisation), ou purement spéculative, administrative ou financière, ou relationnelle et informative : une société de main-d'œuvre temporaire, une société de banque, un promoteur immobilier, un courtier, un centre de documentation ou un institut de sondages, une bourse commerciale, une société d'assurances, une chambre syndicale, un centre de formation professionnelle, un service de météorologie, un institut géographique, etc.

Les sociétés, entreprises ou organisations qui assurent toutes ces fonctions occupent un personnel nombreux et qualifié, sont gérées suivant des méthodes aussi rigoureuses que les entreprises industrielles et commerciales et ont souvent un poids déterminant sur les centres de décision de ces entreprises *industrielles et commerciales ;* elles sont une partie essentielle d'un système économique moderne, quel que soit le régime politique du pays considéré.

Nombre de services publics gèrent des établissements qui peuvent être souvent comparés par leur organisation et leur technicité à des établissements industriels ou à des sociétés de service : les services techniques d'une ville, par exemple le service des eaux avec ses installations d'épuration, ses laboratoires, etc. ; un hôpital, un établissement d'entreprise, les services de santé d'une ville ou d'une région, etc. Il existe un continuum entre les établissements industriels du secteur commercial, c'est-à-dire qui achètent et vendent, et les services publics dont certains n'ont à l'évidence plus aucun caractère d'entreprise, tel le service de l'état civil.

Et c'est ainsi que certaines activités voient leur organisation et leur statut changer parfois, car il apparaît à un certain moment opportun de les considérer plutôt d'un type ou d'un autre. Ainsi, l'exploitation des forêts domaniales, qui était un service de l'Administration de l'État, a été organisée il y a une quinzaine d'années en une entreprise, l'Office des forêts. Inversement, les Chemins de fer, qui étaient à l'origine des entreprises privées, sont devenus des entreprises nationalisées, et certains organismes de transports en commun urbains sont même franchement sortis du secteur commercial, puisqu'ils sont entièrement gratuits, au même titre que l'usage du trottoir par le piéton.

L'entreprise type

Cette promenade quelque peu sauvage parmi cette immense diversité technique et juridique de types de sociétés, organisations, établissements et entreprises fait douter de la possibilité de dessiner le schéma d'une entreprise type (*fig.* 6). L' « approche systèmes », ou systémique, permet cependant de poser une définition : *Une entreprise est un ensemble de moyens opérationnellement interconnectés, gérés par un centre de décision disposant d'une marge de manœuvre suffisante, et qui, à partir de ressources amont en matières, services, informations et environnement, produit en aval des biens matériels ou des services correspondant aux besoins exprimés d'utilisateurs.* On pourra dire d'une telle entreprise qu'elle a un *objet.*

Les implications d'une telle définition sont :

- Le centre de décision doit avoir une autonomie suffisante, sinon il ne serait pas un centre de décision, et un processus d'évaluation de ses performances, ce processus pouvant être la loi des entreprises commerciales du monde occidental, c'est-à-dire le succès financier de l'entreprise, mais tout aussi bien la notation d'un fonctionnaire, ou la pression de l'opinion exprimée par l'intermédiaire du système politique ; par exemple, les citoyens d'une ville exprimeront par leur vote leur appréciation de l'efficacité des services techniques de la ville comparée au montant des impôts locaux.
- L'entreprise dispose à ses frontières, c'est-à-dire à ses interfaces avec ses fournisseurs, ses clients, ou dans

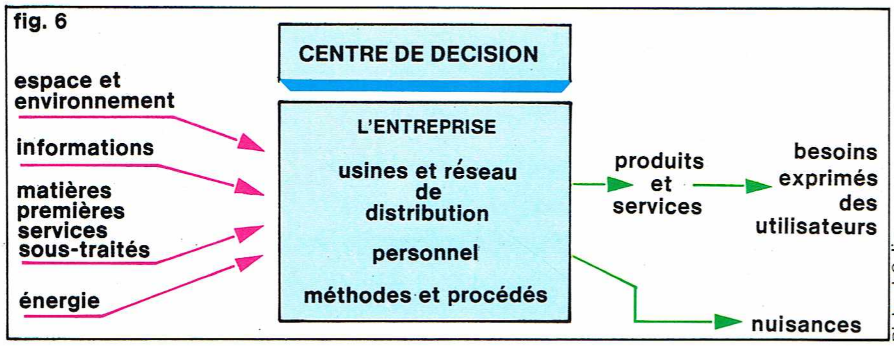

Richard Colin

▲ *Figure 6 : système de l'entreprise. Celle-ci est considérée comme un « transformateur ».*

les ressources technologiques ambiantes ou la population où elle recrutera ses personnels, de souplesse, de *degrés de liberté,* constitués par des marchés, des processus d'échanges ouverts et flexibles, des stocks, des ressources disponibles de matières premières, des besoins potentiels d'utilisateurs, etc. S'il n'y a pas des degrés de liberté aux frontières du système, il n'y a pas de centre de décision. Il n'est cependant pas indispensable que tous les paramètres aux frontières jouissent de tels degrés de liberté.

● Le découpage de l'activité industrielle et commerciale en entreprises ne respecte pas forcément les contours juridiques des sociétés ou organismes publics, et le critère d'appropriation, ou d'unicité financière, n'est pas toujours le critère fondamental de délimitation des contours d'une entreprise.

● Les activités de spéculation pure, c'est-à-dire qui ne rendraient aucun service à aucun utilisateur et consisteraient seulement à faire modifier la valeur financière actuelle ou potentielle d'un bien ou d'une situation, ne rentrent pas dans notre définition. C'est ainsi qu'un conglomérat, dans sa définition théorique, ne constitue pas une entreprise, mais un centre de spéculation jouant sur des entreprises.

● Une entreprise, comme tout système complexe, peut être décomposée en sous-systèmes, en sous-entreprises, c'est-à-dire en « divisions », assez peu connectées.

Une telle définition de l'entreprise a cela d'étonnant qu'elle ne considère pas la propriété ou la finance comme le critère fondamental. Cela permet d'une part de l'appliquer à tous les cas de figure et dans tous les régimes politiques et économiques. D'autre part, sous des formes variées ou sous la pression de circonstances, la société globale fait assez rapidement évoluer, en quelques décennies parfois, les modalités du droit patrimonial et financier. Que l'on pense, par exemple, au fait que l'impôt sur les revenus industriels et commerciaux ne date en France que de 1917 ; que l'on pense aux limitations du droit de propriété des sols urbains, aux processus de nationalisation et de dénationalisation, aux évolutions dans le temps et dans l'espace du droit des successions, au blocage des patrimoines physiques ou financiers dans de nombreux pays, etc.

Si l'on considère donc la vie d'une entreprise dans une société évolutive et sur une période suffisamment longue, l'on a intérêt à se fonder d'abord sur les éléments concrets du système entreprise et de son environnement « les hommes, les machines, les procédés », et à considérer les phénomènes de propriété des immeubles, meubles, brevets et finances comme des modalités de l'organisation des entreprises dans leur environnement.

Cette définition de l'entreprise est la plus réaliste qui soit, et n'exclut évidemment pas que les mouvements financiers jouent un rôle capital dans la vie des entreprises, ni que le franc ou toute autre unité monétaire serve d'unité de mesure dans la plupart des calculs économiques. Il conviendra donc de consacrer un développement au phénomène finances-monnaie pour en analyser les différents rôles dans la systémique des entreprises.

Les besoins des utilisateurs. Le marketing

Les biens matériels et les services produits par une entreprise doivent satisfaire des besoins *exprimés* par les utilisateurs. Il est clair que si la marchandise est vendue à un client, ce client aura exprimé son besoin en passant commande de la marchandise, ou en la prenant sur le rayon du magasin et en payant à la caisse. Lorsqu'il ne s'agit pas d'un client, mais de l'*usager* d'un service, par exemple, l'on comptera les usagers ou bien l'on fera des enquêtes : combien de voitures empruntent telle route, combien de touristes repartent d'un lieu de vacances plus tôt qu'ils ne l'avaient envisagé, ou au contraire s'y attardent plus longuement. Quel emploi effectif font les ménages de tel bien de consommation durable (automobile, appareils ménagers, etc.) qu'ils ont acquis.

Le premier outil de travail de l'entreprise est donc l'*analyse de ses ventes* ou plus généralement de l'usage qui est effectivement fait de ce qu'elle a livré en aval. Cette analyse se fera par le calcul statistique à partir des données commerciales des ventes, des résultats des comptages et des enquêtes ; qui n'a répondu à des enquêtes au cours d'un voyage en train ou en avion ?

Le plus souvent, l'entreprise cherche à découvrir au travers du calcul statistique :

— L'évolution dans le temps de la quantité livrée de tel ou tel produit, de façon à réagir sur les quantités à fabriquer et distribuer. La statisticien procédera naturellement à une analyse des variations saisonnières, détectera quelle est la loi de l'expansion du marché d'un produit nouveau, etc.

— Les conséquences sur le volume des ventes (ou plus généralement de l'utilisation) d'événements décidés par l'entreprise : changement de prix, nouvel emballage, politique de garantie, etc. ; ou d'événements extérieurs : conjoncture économique, lancement d'un produit par un concurrent, réglementation nouvelle, etc.

Par l'analyse statistique, l'entreprise cherchera aussi à connaître ses utilisateurs, à savoir qui ils sont. Ce sera relativement aisé lorsque ces utilisateurs consomment, détruisent pour ainsi dire, le produit. Mais ce sera parfois fort difficile lorsque l'entreprise livre des « demi-produits », tels que du plastique en granulé ou des fers, à des façonniers qui les transforment et les livrent à l'utilisateur final.

L'expression des besoins des utilisateurs ne se manifeste pas seulement à l'instant de l'achat ou de l'usage du produit ou du service, mais après et avant. *Après,* il s'agit de suivre la satisfaction des utilisateurs ; l'information proviendra des services « après vente », en particulier du service qui gère les garanties, et du service commercial, et, à nouveau, d'enquêtes. Les informations ainsi recueillies, donnant également lieu à traitement statistique, permettent d'améliorer le produit ou le service ; nous retrouvons là l'opportunité d'inviter un représentant du marketing dans les équipes de projets qui cherchent des composants et procédés nouveaux pour améliorer les produits, et, bien sûr, de supputer quels seront les besoins futurs des utilisateurs à la satisfaction desquels l'entreprise s'engagera. Car le rêve de toute entreprise est de connaître les besoins *avant,* pour adapter à temps ses programmes de fabrication, et surtout lancer de nouveaux produits en ayant eu le temps de les concevoir et de les mettre en fabrication, et en minimisant le risque toujours réel de ne pas voir le marché se développer au rythme prévu.

Pour connaître les besoins des utilisateurs avant que le produit ou service leur soit livré, voire même avant qu'il soit conçu, le service marketing dispose de différents

▼ *Les biens matériels et les services produits par une entreprise doivent satisfaire des besoins exprimés par les utilisateurs. Réciproquement, les commerçants, par la présentation des denrées (et d'autres procédés), essaient de créer de nouveaux besoins.*

Magnum - E. Hartmann

procédés, les uns passifs, qui consistent à prévoir « ce qui se passera probablement », les autres actifs, c'est-à-dire par lesquels l'entreprise agit elle-même sur l'explicitation des besoins des utilisateurs.

Parmi les *procédés passifs,* citons :

— l'extrapolation vers le futur de l'évolution constatée des ventes ;

— la connaissance de lois générales de pénétration des produits auprès des utilisateurs, par exemple : si un produit de grande consommation vendu sous une marque occupe plus de *x* % du marché, il y a un effet de saturation, et le client a le désir d'acheter une autre marque ;

— l'observation de ce qui se passe dans des pays plus développés, l'Amérique du Nord en particulier ;

— l'étude de marché.

Parmi les *procédés actifs :*

— Le marché test, qui consiste à tester les réactions des utilisateurs à un nouveau produit ou service ou à une nouvelle présentation ou tarification en proposant une quantité limitée de produit à un échantillon de clientèle. Le marché test ne peut être utilisé commodément que s'il ne nécessite pas de lourds investissements, par exemple si le produit est fabriqué par une unité pilote, c'est-à-dire une usine en miniature qui sert à la mise au point du procédé ; ou s'il s'agit d'une série test, telle la première série d'une voiture assez novatrice d'une grande marque française en 1966.

— Le système de la *mode,* par lequel, sans modifier la quantité de produits qui seront livrés, l'on prépare plus d'un an à l'avance le goût des consommateurs vers tel ou tel style d'habillement, de façon que tisseurs et confectionneurs puissent lancer leur fabrication avec une assurance raisonnable de la réponse des consommateurs.

— La *publicité,* dont le responsable du marketing aura grand soin d'analyser les résultats, travail difficile d'investigation et de calcul statistique, de façon à évaluer la rentabilité de la dépense publicitaire qui peut être très lourde, et l'efficacité de tel ou tel support publicitaire (TV, radio, journaux ou revues techniques, mailing, etc.).

— Et plus généralement la *promotion des ventes* qui englobe, outre la publicité, le soin de l'emballage, le style des contacts avec les clients ou usagers, l'image de marque, les foires et expositions, les tournées d'agents technico-commerciaux, le montage de systèmes de crédits, etc.

L'investigation de ce que seront les besoins, et donc aussi les goûts, des utilisateurs, fait de plus en plus appel à la science et à la démarche des *psychologues,* qu'il s'agisse de produits de grande consommation tout aussi bien que de produits techniques, que l'on vend à des acheteurs ou techniciens spécialisés d'entreprises. En effet, faire adopter à une autre personne tel produit ou service, que ce soit acheter une botte de persil à l'étal, de l'huile pour automobiles, prendre l'autobus plutôt que sa voiture, acheter un ordinateur pour remplacer sa bonne vieille machine mécano-comptable, faire nettoyer ses bureaux par une entreprise de nettoyage, est un acte économique fondamental, concret, ce que l'on appelle un fait micro-économique, qui bien souvent fait jouer des ressorts très profonds de la personnalité du client ou de l'usager. Toutes les écoles d'affaires, à l'image des *business schools,* consacrent une partie importante de leur enseignement au marketing, qui, comme nous l'avons vu, ne se limite pas à la publicité ou au calcul statistique, mais recouvre toute l'activité de l'entreprise qui pressent, aide à se formaliser, canalise et satisfait les besoins de ses clients ou usagers.

L'on pourra penser que toutes ces activités sont l'apanage de la vente forcenée, du « hard pressure selling » des entreprises américaines. Sans doute, cette ambiance de vente forcenée peut pousser à des abus, à de la surconsommation, du gaspillage de gadgets, etc., et il revient à la société d'un pays d'adopter des règles économiques qui évitent trop d'abus dans ce sens.

Mais trois aspects positifs peuvent être cités de l'intérêt du marketing :

— Une meilleure information mutuelle de l'entreprise et de ses clients, et donc une meilleure satisfaction des utilisateurs. Un exemple qui est sujet de controverse : celui des ceintures de sécurité pour automobile qui ont un objectif public à but non lucratif, sauver des vies et économiser des frais médicaux, tout autant qu'un objectif lucratif pour les fabricants.

Parimage - Camera Press - Annabelle

◀ ***Dans le système de la mode (ici une présentation de la collection Cacharel), on prépare plus d'un an à l'avance le goût des consommateurs de façon que tisseurs et confectionneurs puissent lancer leurs usines avec une assurance raisonnable de la réponse de la clientèle.***

▼ ***Les investissements pour la construction de méthaniers sont massifs et leur coût par m³ de gaz produit et transporté diminue considérablement avec la quantité produite et donc vendue. Ici, le méthanier*** Descartes.

Magnum - E. Hartmann

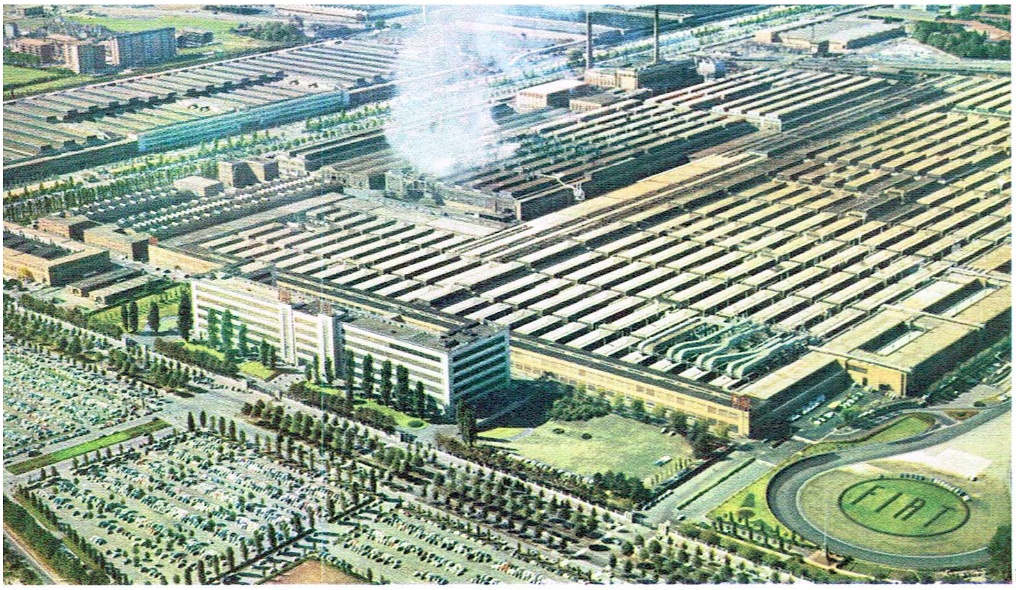

Fiat

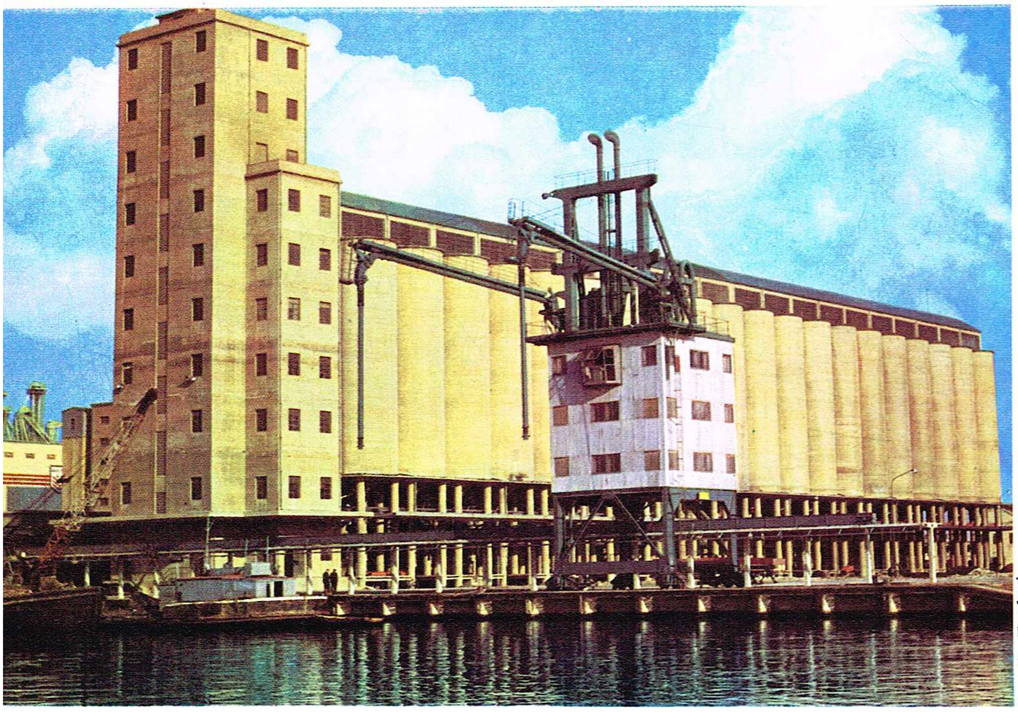

Coretti - Tanfani

▲ *Par usine, on entend généralement un ensemble produisant des objets à partir des matières premières et comprenant tous les stades de fabrication, telle cette usine automobile Fiat-Mirafiori (en haut); d'autres établissements industriels sont plus habituellement désignés par rapport au produit qu'ils traitent, tel ce silo à grains (ci-dessus) desservi par voies maritimes et ferroviaires.*
▼ *Si l'usine est généralement un lieu fixe, il en existe de mobiles comme les bateaux-usines appartenant aux flottes de pêche.*

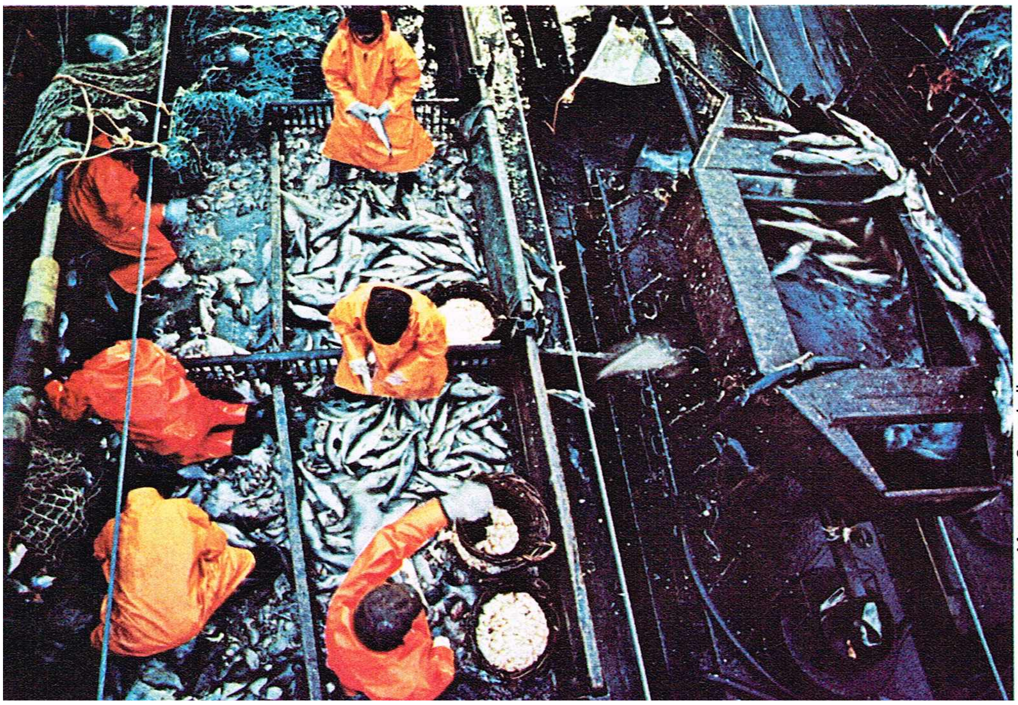

Magnum - Campbell

— Les services publics et l'Administration réalisent de plus en plus qu'ils doivent adopter des méthodes de marketing, même s'ils ne recherchent pas un but lucratif comme les entreprises privées.

— Et enfin, l'économie moderne est fondée sur des investissements assez lourds qui ne peuvent être rentabilisés que si une proportion importante des utilisateurs adopte assez vite les nouveaux produits.

Un exemple saisissant a été celui de la généralisation extrêmement rapide de l'emploi du gaz naturel en Europe. Sans doute, les gisements de gaz naturel de Lacq et de Hollande, du Sahara, puis de la mer du Nord ont-ils été découverts alors que les gisements de charbon s'épuisaient. Les investissements de forage et de construction de gazoducs à grande distance, *a fortiori* de méthaniers, sont considérables et massifs, et leur coût par m^3 de gaz produit et transporté diminue considérablement avec la quantité produite, et donc vendue. Des efforts importants d'information et de promotion ont permis de développer l'emploi de ce combustible bien plus vite qu'on n'avait osé l'espérer en 1955-1960. Cet effort de promotion s'est certainement exercé également sur des hauts fonctionnaires et des hommes politiques, puisqu'ils faisaient partie, *de facto*, du centre de décision de l' « entreprise gaz naturel ».

Une autre grande affaire publique qui a abouti à un succès indéniable a été la création et le démarrage du marché de Rungis. Ou encore la carte orange des Transports parisiens. Ces réussites n'auraient pas été possibles sans une bonne maîtrise, par les entreprises ou fonctionnaires responsables, du marketing.

L'on ne saurait en finir avec le marketing sans parler des besoins potentiels des utilisateurs. Nous avons dit dans la définition générale de l'entreprise qu'elle devait servir des besoins exprimés. Deux grandes classes de besoins restent potentiels et ne peuvent donc être servis immédiatement par les entreprises; il s'agit des *besoins non solvables*, soit besoins de produits consommables par des classes sociales peu fortunées, soit besoins d'équipement de secteurs professionnels en difficulté, soit, bien sûr, besoins de ceux des pays en voie de développement qui ne disposent pas de grandes ressources naturelles. La transformation de ces besoins potentiels en besoins explicites passe le plus souvent par des actions politico-économiques qui dépassent la possibilité d'action des entreprises elles-mêmes.

Il s'agit d'autre part de l'*emploi de nouvelles techniques modernes* dont les concepts et l'utilité n'apparaissent que progressivement aux usagers. Considérons par exemple les minisystèmes informatiques capables d'aider considérablement le dessinateur industriel. Si l'on compte le nombre de dessinateurs de tous types dans les entreprises, projeteur en mécanique ou en engineering, en travaux publics et bâtiments, dans la confection, dans l'électricité et l'électronique, etc., et si l'on constate qu'ils travaillent avec des outils comparables à la plume et au papier carbone que le comptable ou l'employé administratif ont abandonnés il y a plus de vingt ans, l'on ne peut que conclure : il y a un marché très important pour de petits systèmes interactifs de dessin industriel assistés par miniordinateurs. Mais, à l'évidence, ce marché n'est que potentiel, et une entreprise qui construit ces systèmes, dont les prototypes et un millier d'exemplaires opérationnels seulement existent dans le monde aujourd'hui, ne saurait se lancer sans risque dans leur fabrication en série.

Le nouvel instrument doit pénétrer les mentalités des utilisateurs potentiels, qui, en retour, à la suite d'expériences, préciseront leurs exigences détaillées, adapteront leurs méthodes et l'organisation de leur entreprise... éventuellement.

Bien des mésaventures ont frappé les entreprises qui ont voulu industrialiser trop tôt des techniques de pointe. Que l'on pense au grand boom de l'audio-visuel qui nous était promis en 65-70, en perspective duquel nombre d'entreprises aussi bien de fabrication d'équipements que d'édition et de diffusion se sont équipées, et qui finalement se traduit par une progression raisonnable de ces nouveaux produits en fonction d'une explicitation progressive des besoins réels des utilisateurs.

Cette description positive du marketing s'est voulue neutre vis-à-vis des systèmes politiques et économiques; même si c'est dans le système capitaliste que ses méthodes ont été d'abord développées et raffinées à un point extrême,

ce sont habituellement plutôt les courants de pensée socialistes qui prônent, par opposition à une économie de profit, une économie des besoins. Dans tout système, l'entreprise doit connaître les besoins qu'elle sert et dialoguer avec ses clients ou usagers.

L'usine. Le phénomène de concentration

La définition qui a été donnée plus haut de l'entreprise n'implique nullement que l'activité de production se passe dans une *usine,* et il convient donc de cerner également la définition de l'*usine*. Voici celle que propose le *Petit Robert :* « Établissement de la grande industrie destiné à la fabrication d'objets ou de produits, à la transformation ou conservation de matières premières, ou à la production d'énergie et employant des machines qui utilisent une source importante d'énergie. » L'on parlera effectivement d'usine sidérurgique, d'usine à gaz, d'usine électrique, d'usine de traitement des déchets nucléaires, d'usine de construction automobile, d'usine des eaux, etc.

D'autres mots généraux de la langue courante désignent d'autres établissements dont nous sentons qu'ils ne se distinguent pas nettement de la grande usine, mais forment plutôt toute une population d'établissements industriels dont les caractéristiques varient de façon continue d'un établissement à un autre ; il s'agira d'ateliers, manufactures, fabriques, dont la taille, le degré de mécanisation des tâches, la part de tradition ou de technicité de pointe, varient dans de larges proportions.

Et nombre d'autres établissements industriels sont plus habituellement désignés par rapport à leur objet, au produit qu'ils traitent (laboratoire pharmaceutique ; silo à grains ; laiterie, brasserie, sucrerie ; tuilerie, glacerie ; raffinerie ; installations portuaires, etc.), et même souvent par le nom de la société, surtout si ce nom sert de marque commerciale au produit : on ne parle pas par exemple de détergenterie ou d'usine à lessive, mais de l'Usine X ; ni de pneumatiquerie, mais de l'Usine Y.

Cette diversité de vocabulaire n'est pas sans signification profonde. Tous les établissements que nous avons cités ont une caractéristique commune, c'est la **concentration** en un lieu, généralement fixe, de moyens industriels importants et de postes de travail nombreux. Nous disons en un lieu généralement fixe, car il existe des usines mobiles : un bateau-usine dans les flottes de pêche, des usines flottantes (petites unités chimiques par exemple), voire de gigantesques engins, telle cette véritable usine sur chenilles, qui est alimentée en bobines de tôles de loin en loin, qui fabrique des tubes, les soude et les enterre sur des centaines de kilomètres dans les grands pays neufs.

L'étude du vocabulaire va nous permettre d'analyser quelque peu les motifs de cette concentration, et ainsi d'en considérer ensuite les avantages et inconvénients. Le mot *usine* semble assez lié au développement du phénomène de concentration industrielle du XIXe siècle ; l'énergie était alors peu facilement transportable, et le *machinisme* imposait la concentration auprès des sources d'énergie : mines de charbon ou chutes d'eau. Comme la mécanisation n'était que partielle, et ne concernait que les tâches nécessitant de grandes forces physiques ou mécaniques, ces usines rassemblaient une main-d'œuvre importante, soit pour « servir les machines », soit pour exécuter des tâches non mécanisables qu'il fallait effectuer au voisinage immédiat des machines.

Servir les machines : que l'on pense aux ouvriers du laminage qui saisissaient avec leurs grandes pinces les tiges chauffées au rouge pour les renfiler entre les rouleaux du laminoir ; que l'on pense aux ouvrières qui, il y a encore trente ans, piquaient les pierres mélangées au charbon sur le carreau de la mine, aux ouvriers qui guidaient, avec de grandes perches, la coulée de fonte dans les rigoles de sable pour obtenir les gueuses, aux chauffeurs qui enfournaient le charbon à la pelle, etc. Les tâches non mécanisables étaient celles qui requéraient le coup d'œil et l'habileté gestuelle, en particulier les tâches de montage, d'emballage, de manutention, etc.

Bref, le machinisme du XIXe siècle a entraîné non seulement la concentration de machines auprès des sources d'énergie, mais également la concentration de la main-d'œuvre, d'une main-d'œuvre le plus souvent peu qualifiée, travaillant dans des fabriques. D'ailleurs, dans le langage populaire, et surtout dans les campagnes que quittait cette main-d'œuvre, l'expression « Aller travailler à l'usine » a conservé une connotation un peu péjorative de « Aller se mêler à un troupeau de main-d'œuvre », et donc « Perdre son indépendance ».

La concentration de l'époque du machinisme n'a été possible, naturellement, que grâce au chemin de fer. On ne peut avoir, dans un système couvrant géographiquement l'ensemble du territoire, concentration de certaines fonctions que s'il existe un système de transport pour concentrer les éléments nécessaires à cette fonction et pour diffuser les produits de cette fonction. Une image nous en est donnée par le cœur qui ne peut jouer son rôle de pompe à sang que grâce au système vasculaire, aux veines qui drainent le sang vers le cœur et aux artères qui le diffusent dans tout le corps. Le schéma idéal de la concentration serait celui de la *figure* 7.

L'un des aboutissements du processus de concentration « énergie-machines-main-d'œuvre » du XIXe siècle a été les grandes usines de fabrication à la chaîne, par exemple de l'industrie automobile. Et assez naturellement, avec la possibilité technique de transporter l'énergie, et en particulier de l'énergie électrique, ces chaînes de montage ont ensuite été implantées en des lieux qui n'étaient pas pourvus de ressources énergétiques propres, et en particulier la banlieue parisienne, avec en premier lieu les Usines Citroën de Javel pour la fabrication en série des obus à partir de 1915. Il s'agissait de pouvoir recruter de la main-d'œuvre rapidement.

Assez curieusement, l'on implante maintenant de telles usines dans des régions où précisément il n'y a plus d'énergie, c'est-à-dire sur les bassins houillers ou

▼ A gauche, figure 7 : schéma idéal de la concentration énergie-machine-ressources-utilisateurs. A droite, au début de l'industrialisation, les tâches non mécaniques étaient celles qui requéraient coup d'œil et habileté gestuelle. Sur ce document, les ouvrières employées au tri du charbon dans une mine anglaise au XIXe siècle.

fig. 7

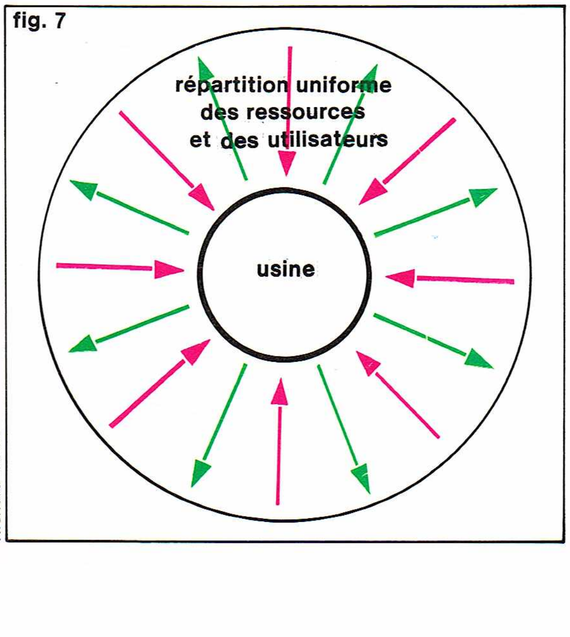

Richard Colin

Parimage - Camera Press

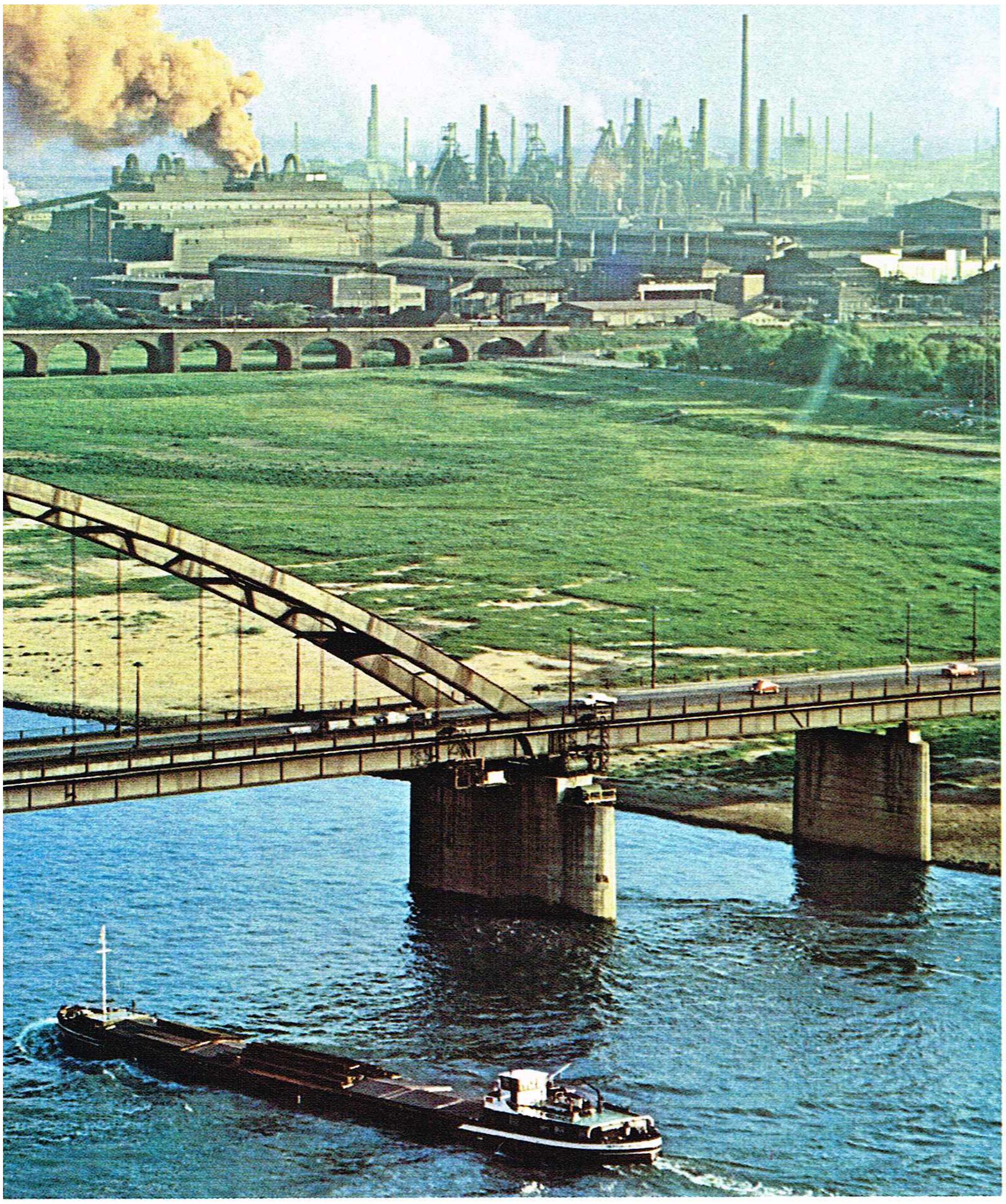

Magnum - R. Burri

▲ ***Une entreprise ne peut concentrer tous ses composants matériels et humains en un seul lieu que si celui-ci se trouve dans un tissu industriel dense et diversifié, comme celui de la Ruhr.***

miniers épuisés du Nord et de la Lorraine, pour procurer des emplois aux populations qui s'étaient agglomérées là au XIX[e] siècle. Quelles sont donc les différentes causes de cette concentration de l'activité industrielle en établissements de taille importante ?

Causes intrinsèques, internes à la structure de l'établissement

L'effet de taille

Le coût de construction et d'exploitation d'une installation n'augmente pas proportionnellement à sa capacité de production. On a l'habitude d'utiliser des formules du type :

$$I = I_0 \left(\frac{C}{C_0}\right)^x$$

où I_0 et C_0 sont le coût de construction et la capacité de production d'une installation connue, I et C se rapportant à une installation dont on envisage la construction. L'exposant varie selon le type d'installation ; il est certainement plus faible que 0,7 pour des installations lourdes très automatisées (haut fourneau, usine d'aluminium, raffinage ou pétrochimie, pétrolier ou minéralier, cimenterie), surtout si l'on s'intéresse à l'ensemble de l'investissement et des frais de fonctionnement ; cet exposant pourra être plus élevé que 0,7, tout en restant inférieur à 1, pour des installations moins lourdes et requérant davantage de main-d'œuvre : habillement, centre de transit de containers, électronique, fabrication mécanique, etc. (*fig.* 8).

Cette formule, dont l'exposant x varie selon le type d'industrie, ne s'applique que dans un éventail raisonnable de tailles, par exemple de 0,5 à 4 C_0. Naturellement, il ne s'agit que d'une formule estimative très globale et synthétique. Une décision d'investissement nécessite une estimation technique détaillée du coût de l'installation et de son fonctionnement.

▼ ***Figure 8 : effet de taille : le coût de construction et d'exploitation d'une installation n'augmente pas proportionnellement à sa capacité de production.***

Fig. 8

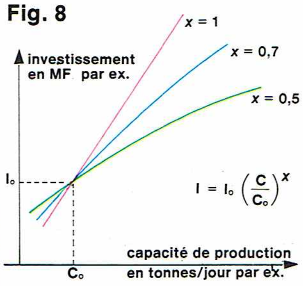

Richard Colin

Et si l'on pousse le raisonnement à la limite, dans des établissements purement de main-d'œuvre, ou de matière grise (un siège social, un centre de recherche, un bureau d'engineering, etc.), il arrive que le coût soit plus que proportionnel à l'effectif de l'établissement, en raison de ce que le bon sens populaire appelle « les frais généraux ». Remarquons enfin que l'effet de taille n'est possible que si l'on sait techniquement construire de grandes unités de production et transporter matières premières et produits finis.

Il y a en effet une autre raison intrinsèque à la concentration des établissements industriels ; il s'agit des commodités : *de communication et d'organisation, ou de stockage et distribution de marchandises.* Donnons quelques exemples de chacun de ces deux types de causes.

Commodités de communication et d'organisation

Soit une petite entreprise spécialisée dans un domaine technique assez avancé, par exemple la conception et le dessin de composants électroniques intégrés. Le poste de travail unitaire sera un technicien supérieur ou ingénieur projeteur ; mais il sera indispensable qu'il soit assisté d'un électronicien spécialiste de haut niveau qui entretienne des relations suivies avec aussi bien la recherche en électronique qu'avec les quelques entreprises au monde qui maîtrisent la fabrication de ces composants.

Si notre petite entreprise, fondée au départ à Genève, double son activité pour le compte de clients situés à Bruxelles, elle pourrait fort bien implanter un bureau d'études et de services à Bruxelles de façon à assurer un meilleur contact technique avec sa clientèle. Mais alors ses ingénieurs et techniciens ne bénéficieraient plus aussi quotidiennement de l'encadrement de l'électronicien expert. D'autre part, l'égalisation des charges d'activité entre les différents postes de travail, la garantie de maintenir un standard de qualité, le remplacement de personnels quittant l'entreprise seraient rendus plus difficiles. L'entreprise pourra donc opter plutôt pour une concentration de ses équipes de production en un point unique, quitte à exposer des frais de déplacement commerciaux pour aller au contact de ses clients.

De même que la phylogenèse et l'ontogenèse nous apportent des connaissances précieuses sur l'individu adulte, de même l'observation de l'histoire des entreprises au cours des âges ou de la naissance et de la croissance d'une petite entreprise de nos jours aide puissamment à comprendre l'organisation et le fonctionnement des plus grandes entreprises et de leurs établissements industriels.

Passons donc de notre petite entreprise à une moyenne ou plus grande entreprise. L'entreprise *concentre* en certains lieux ses composants matériels et humains de façon à créer des nœuds de communication indispensables aux courants d'informations *internes :*

— savoir-faire technique,
— méthodes,
— planning de production,
— ordonnancement des mises en fabrication, des expéditions, etc.,
— équipes pluridisciplinaires recherche et développement, marketing, production,
— contrôle de gestion,
— gestion du personnel, etc. ;

ou *externes :*

— contacts commerciaux,
— contacts avec les Administrations publiques, avec le monde financier,
— contacts professionnels avec les autres entreprises.

Naturellement, l'utopie est de tout concentrer en un seul point, ce qui n'est possible que pour des PME implantées dans des tissus industriels denses et diversifiés, tels que la banlieue parisienne ou le nord de la France, l'axe Tokyo-Osaka, la Ruhr, les grandes zones industrielles U. S., etc.

Mais, en fait, la plupart des entreprises doivent obligatoirement disperser sur le terrain certains de leurs éléments : extractions minières ou autres origines de matières premières, agences de ventes, donc dépôts, etc. Et dès lors elles doivent choisir une stratégie d'organisation pour déterminer quelles fonctions elles concentrent, soit au siège, soit en usines, et quelles activités elles dispersent sur le territoire.

Commodités de stockage et distribution

Une entreprise enfin concentre ses installations pour faciliter les mouvements de ses matières premières, demi-produits et produits, pour faciliter l'ordonnancement général des mises en fabrication, stockage et expéditions en fonction des commandes reçues des clients. Un réseau de transport étoilé (*fig.* 9) permet d'assurer le meilleur emploi du parc de machines-outils en fonction de la variété des commandes, et le meilleur groupage des expéditions.

Une grande entreprise de fabrique de détergents, par exemple, avec une usine dans la banlieue parisienne pour les savons, et une autre en province pour les lessives et dentifrices, transporte depuis des décennies la totalité de la production parisienne à l'immense dépôt de l'usine de province, d'où les trois classes de produits sont groupées en lots par clients, puis en camions ou wagons par groupes de clients des différentes régions de France. Cette entreprise envisagerait d'ailleurs maintenant de compléter sa concentration en une seule usine...

Telle autre grande entreprise de fabrication d'ordinateurs, avec des usines de montage réparties dans l'Europe entière et spécialisées par modèles d'ordinateurs et de périphériques, regroupe près de Paris le stockage, l'assemblage des configurations ordinateurs-périphériques, le service livraison et pièces de rechange, pour la totalité du marché français.

Telle grande marque d'automobiles a installé un seul grand dépôt de pièces de rechange desservant toute la France et certains pays voisins, ne laissant chez ses concessionnaires que des stocks minimaux d'urgence. Grâce à un système télex et aux transports express, tous les garages du vaste territoire ainsi desservi obtiennent leurs livraisons dans des délais satisfaisants. Cette organisation réduit la valeur du stock total, permet une gestion rationnelle d'un inventaire comportant plusieurs milliers de références et facilite la livraison vers ce dépôt unique des lots de pièces fabriquées par les usines de l'entreprise elle-même ou de ses sous-traitants.

Les trois grands facteurs internes de concentration des établissements industriels que nous avons vus : effet de taille réduisant l'investissement unitaire, création de nœuds de communications, simplification des mouvements de marchandises, comportent toutefois leurs propres antidotes.

fig. 9

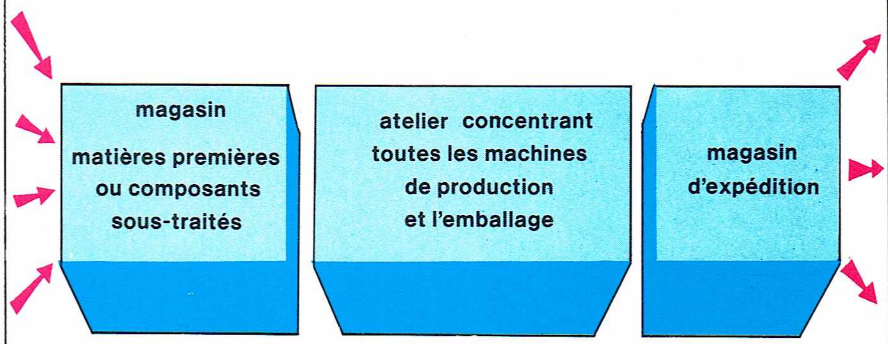

Richard Colin

▲ *Figure 9 : une entreprise doit concentrer ses installations pour faciliter les mouvements des matières premières et des produits intermédiaires, et doit ordonnancer les mises en fabrication, stockage et expédition en fonction des commandes reçues.*

Dispersion et concentration

Facilités extrêmes des transports et des communications permettent en effet d'organiser aussi bien la *dispersion* que la *concentration,* et nous pouvons en donner quelques exemples.

Un exemple très traditionnel : dans l'industrie des articles textiles de qualité, et fabriqués en petites séries selon des procédés semi-artisanaux, les sociétés commerciales assurent, « en ville », les fonctions d'approvisionnement, stockage, ventes, et de création des articles en fonction de la mode, cependant que la fabrication est largement dispersée dans de petits ateliers répartis dans de petites villes et bourgades.

Au-delà d'une certaine taille, les grandes usines comportant des ateliers différenciés par fabrications entraînent des problèmes de management interne et de nuisances

Alfa Roméo

◀ *Installation spéciale destinée au chargement, déchargement et stockage des pièces détachées dans une grande usine de construction automobile (Alfa Roméo). Les techniques modernes de gestion des magasins ont recours à un centre comptable électronique.*

J. Guilloreau - Fotogram

Ph. Héritier - Parimage

▲ *L'industrie des articles textiles de qualité est un exemple d'organisation « dispersée » : petites séries, procédés semi-artisanaux, fabrication répartie dans de petits ateliers créés dans de petites villes ou bourgades. En haut, tissages catalans (Arles-sur-Tech, Pyrénées-Orientales, 1974) ; en bas, magasins de prêt-à-porter, boulevard Poissonnière, Paris.*

qui coûtent plus cher et provoquent plus d'ennuis que d'aspects positifs. Certaines firmes préfèrent alors disperser leurs usines dans des villes différentes.

En outre, dans la conjoncture économique actuelle, la qualité des fabrications, une certaine indépendance recherchée vis-à-vis de l'environnement politique et social de tel pays ou telle région incitent également les entreprises à implanter leurs usines en des lieux variés, et souvent à avoir deux usines distantes l'une de l'autre capables de fabriquer toute pièce ou sous-ensemble. L'on sent même naître aujourd'hui une tendance à bien maîtriser des unités de fabrication de taille plus réduite que les unités gigantesques telles que nous les connaissons, par exemple en raffinage du pétrole ou pétrochimie, en électrolyse d'aluminium, en flottage du verre plat, en usines électriques. En effet, les spécifications détaillées des processus industriels et les tours de main varient selon la taille d'une installation. Maîtriser parfaitement des unités moyennes plutôt que gigantesques permet :

— d'en implanter dans des pays dont le marché est limité ;

— de ne pas provoquer des cassages de prix lorsque plusieurs entreprises mettent chacune en service leur nouvelle usine (et elles ont de bonnes raisons de les mettre en service en même temps, tout au moins en économie libérale et multinationale) ;

— voire de mettre temporairement une usine en sommeil pour passer une période de conjoncture basse, ce que les Américains appellent « mettre l'usine dans la naphtaline » *(to mothball a plant)*, comme on le fait des vêtements d'hiver pendant l'été.

Sous-traitance

Une autre méthode antidote aux causes internes de concentration est la *sous-traitance* et la *souplesse* nécessaire d'adaptation de l'entreprise aux évolutions, sur de longues périodes (5 à 10 ans), des possibilités techniques, des marchés, des conditions politiques et sociales. Dans une économie développée, moderne, la sous-traitance est extrêmement importante, et ce fait est illustré par la tenue annuelle d'un salon de la sous-traitance où preneurs et donneurs d'ordre se rencontrent. Certaines entreprises, par exemple dans la construction automobile, sous-traitent plus de 50 % de leurs fabrications, voire aussi la recherche technique attachée aux composants ainsi sous-traités. De même, l'industrie pétrolière a hérité de ses origines américaines une tradition de très large sous-traitance.

Avant le développement actuel des transports et communications et des méthodes d'ordonnancement, un tel taux de sous-traitance nécessitait que le tissu des entreprises principales et sous-traitantes fût fortement concentré, de façon à démarcher les ordres par relations personnelles permanentes, et à déclencher des livraisons rapides de pièces dont on n'avait pas planifié un programme de fabrication à moyen terme. La ceinture parisienne avec ses célèbres « métallos » illustrait un tel tissu dense d'entreprises. Cet impératif est moins vif aujourd'hui. L'on a pourtant construit de toutes pièces un tel tissu d'entreprises, surtout dans le domaine de l'électronique et de l'informatique, dans la banlieue Sud de Paris proche d'Orly. L'on peut distinguer :

● *Une sous-traitance continue, structurelle*, reliant fortement plusieurs entreprises pendant plusieurs années, englobant nombre de fabrications ou services peu spécialisés allant jusqu'au nettoyage des locaux. Nous avons dit précédemment qu'il y avait là en fait constitution de véritables entreprises intégrées, même si le Droit des sociétés considère les entreprises séparément. Les sous-traitants peuvent être fort loin, à Formose par exemple lorsqu'il s'agit de « tisser » les mémoires à ferrites des ordinateurs.

● *Une sous-traitance de quantité, conjoncturelle*, par laquelle, lorsque les entreprises principales d'une profession ont une surcharge d'activité, elles encouragent des sous-traitants à émerger et à investir en machines-outils pour se décharger sur eux de leurs pointes de travail. Cela est très fréquent en mécanique : décolletage, fraisage, etc., et c'est naturellement très dangereux pour les sous-traitants, car, lorsque la conjoncture se retourne, les ordres se tarissent rapidement.

● *La sous-traitance de spécialité*, la plus noble, et celle qui est effectivement un facteur de « concentration-dispersion » des établissements industriels.

Illustrons ce phénomène par l'exemple du microfilmage, qui s'est énormément développé depuis une vingtaine d'années au service de la documentation scientifique et technique, des notices et schémas d'entretien utilisés par les services après vente, des archives administratives et commerciales. Pendant une dizaine d'années, la meilleure méthode pour assurer la qualité de ses microfilms ou microfiches et le coût le plus réduit consistait à expédier les documents à microfilmer pour les confier à un unique atelier mondial, au nord-est des États-Unis, qui avait développé un équipement très performant. Actuellement, la croissance du marché, d'une part, et la disponibilité de bons équipements d'un coût plus abordable, d'autre part, permettent de voir prospérer deux ou trois entreprises de sous-traitance en France. Et dans quelques années encore, l'équipement disponible devrait permettre à chaque utilisateur important d'avoir son propre atelier de microfilmage. Naturellement, à côté de ces usines à microfilmer n'ont cessé d'exister de petits ateliers artisanaux chez nombre d'utilisateurs, mais sans prétendre concurrencer les performances qualité-coût des sous-traitants de spécialité.

La sous-traitance de spécialité se trouve également en mécanique. Il existe sur chaque continent ou sous-continent « la presse capable de former les plus grandes tôles ou structures métalliques », par exemple, et les entreprises donneuses d'ordres y expédient leurs pièces, en particulier les avionneurs.

Et citons pour finir des sous-traitances de spécialité très anciennes, telles que la mégisserie de la laine de Mazamet.

Souplesse d'adaptation

La *souplesse d'adaptation*, l'*évolutivité*, des entreprises est également un facteur qui tempère la concentration industrielle, que cette évolutivité soit décidée explicitement, et elle s'appellera diversification, restructuration, etc., ou qu'elle soit imposée par les circonstances, et elle s'appellera adaptation, voire *survie*, ce qui est en fait le critère fondamental de la vie d'une entreprise, ou des équipes et groupes humains qui la composent. Considérons celles de ces évolutions qui peuvent être classées parmi les causes internes des phénomènes de concentration-dispersion. Telle entreprise de construction de cycles et cyclomoteurs, pour faire face à son succès technique et commercial, avait pris le contrôle des usines de deux concurrents, spécialisant alors chacune des trois usines, implantées en trois villes fort distantes ; à l'une les moteurs, à l'autre les cadres et éléments carrossés, à une troisième le montage incorporant les composants sous-traités (roulements, équipement électrique) : dispersion des fabrications, concentration de l'ordonnancement de la fabrication et des ventes du marketing et de la gestion.

Nous avons déjà cité le cas de très grandes entreprises qui se décortiquent volontairement en quasi-entreprises, des divisions libres d'implanter leurs usines où elles le désirent. Un cas frappant est celui où une entreprise, pour créer en son sein ou dans ses relations avec l'extérieur de nouveaux canaux de communication, se divise en plusieurs établissements. C'est ainsi que des entreprises qui ont une implantation historique qui a vu se développer en symbiose usines, administration et services de direction générale, ne trouvent pas d'autre solution, pour gérer leur croissance et leur diversification, que d'extraire de cette base historique le nœud essentiel de communications que constituent les services de direction générale. Tel grand groupe chimique allemand de la vallée du Rhin a ainsi déménagé sa direction générale à Bruxelles, car les hommes de la direction générale continuaient à consacrer 95 % de leurs préoccupations, réunions ou rêves aux activités traditionnelles. En prenant du recul, ils devaient être mieux à même de disperser leurs pensées, et donc leurs investissements, sur l'ensemble du territoire... planétaire.

Cet exemple est aussi celui des nombreuses sociétés pétrolières qui étaient, il y a une dizaine d'années encore, dites *« Indépendants Américains »* (sous-entendu : du cartel des cinq majors historiques et multinationaux depuis 1920). Ces « Indépendants » avaient leur siège, leur base, dans la ville-champignon née de la découverte d'un gisement par leur fondateur pionnier vers la fin du XIXe ou le début du XXe siècle. La recherche de nouveaux terrains d'exploration les a conduits à s'extraire de cette base provinciale, tout en y laissant des services administratifs ou techniques importants. L'on trouve ainsi dans l'Oklahoma des villes de 50 000 à 200 000 habitants, vivant entièrement autour de ces « anciens établissements » d'une ou de quelques sociétés pétrolières dont les directions générales sont à Houston ou à Los Angeles, et les établissements industriels dispersés sur l'ensemble des États-Unis et du reste du monde.

D'autres entreprises au contraire ont choisi de conserver leur base historique dans une ville moyenne de province, « où il fait bon vivre », en installant une antenne commerciale à Paris, et une antenne financière à Zurich ou à Londres.

Les progrès de l'informatique ont permis, pour le meilleur ou le pire mélangés, de concentrer dans de véritables usines l'essentiel des activités techniques d'entreprises telles que les banques ou les assurances. Le progrès des télécommunications a permis de déconcentrer en province ces usines à traiter l'information.

Les deux exemples des entreprises pétrolières et des sociétés de banques et d'assurances montrent que la distribution naturelle des matières premières et des marchés et le progrès technique sont deux éléments *externes* concrets, deux situations objectives, en fonction desquelles l'entreprise choisit sa stratégie de concentration ou dispersion de ses usines et de ses autres fonctions. Nous y ajouterons un facteur externe qui n'est pas objectif, mais artificiel si on le considère de Sirius ; il est cependant aussi concret que les deux précédents si l'on se place au niveau de l'entreprise : il s'agit des *législations sociales et fiscales* des différents États.

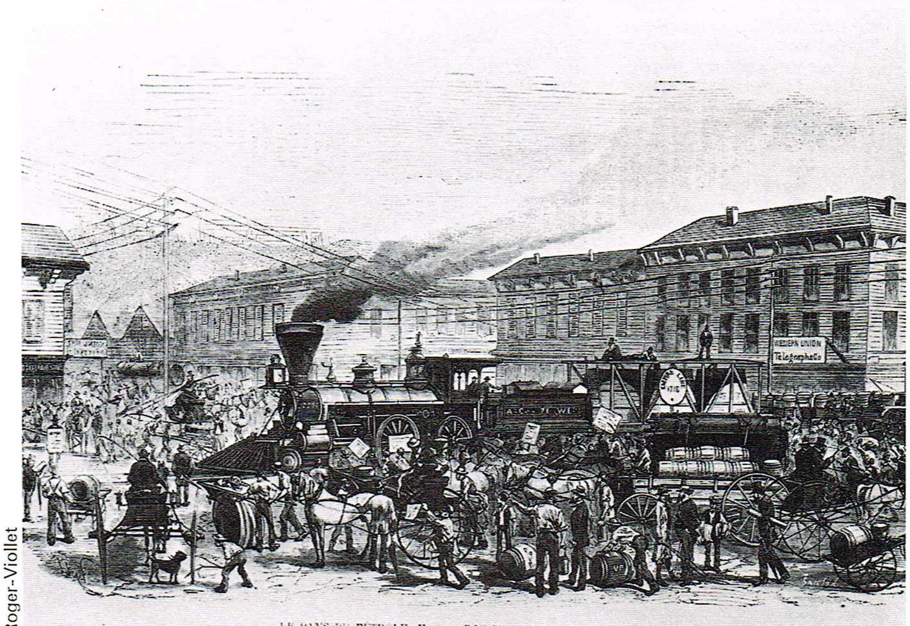

LE PAYS DU PETROLE : Une rue d'Oil City, la ville de l'huile, en Pensylvanie (États-Unis).

Roger-Viollet

▲ ***Une vue d'Oil City, capitale du pétrole en 1872, Pennsylvanie, États-Unis.***

Effets du progrès technique et scientifique

Les processus biochimiques applicables à l'industrie agro-alimentaire ne sont suffisamment maîtrisés pour construire des usines que depuis quelques décennies ou années. Pensons aux laiteries, dont la construction à une taille d'usine requiert la maîtrise du contrôle microbien, voire de la stérilisation, tant à la laiterie elle-même qu'en amont depuis la traite et la collecte jusqu'en aval chez le consommateur en passant par le stockage conjoncturel du beurre, du lait en poudre, etc. C'est donc l'un des effets du progrès scientifique et technique que de voir se construire nombre d'usines agro-alimentaires depuis une dizaine d'années en France, en particulier celles qui mettent en œuvre des fermentations.

Le progrès technique (régulation des procédés, laboratoire de contrôle) a également permis la concentration en grandes usines de fabrications traditionnelles comme les brasseries, la choucroute, etc., alors que les usines agro-alimentaires qui ne font appel qu'à des procédés « abiotiques », que ce soit mécaniques comme la meunerie, ou de mélanges et conditionnement comme la chocolaterie, avaient pu croître en taille depuis longtemps.

▼ ***Le contrôle microbien doit se faire autant à la laiterie elle-même (ici une installation de pasteurisation dans une centrale laitière de Milan) qu'en amont (traite, collecte) et en aval (stockage, vente, consommation).***

Centrale laitière de Milan

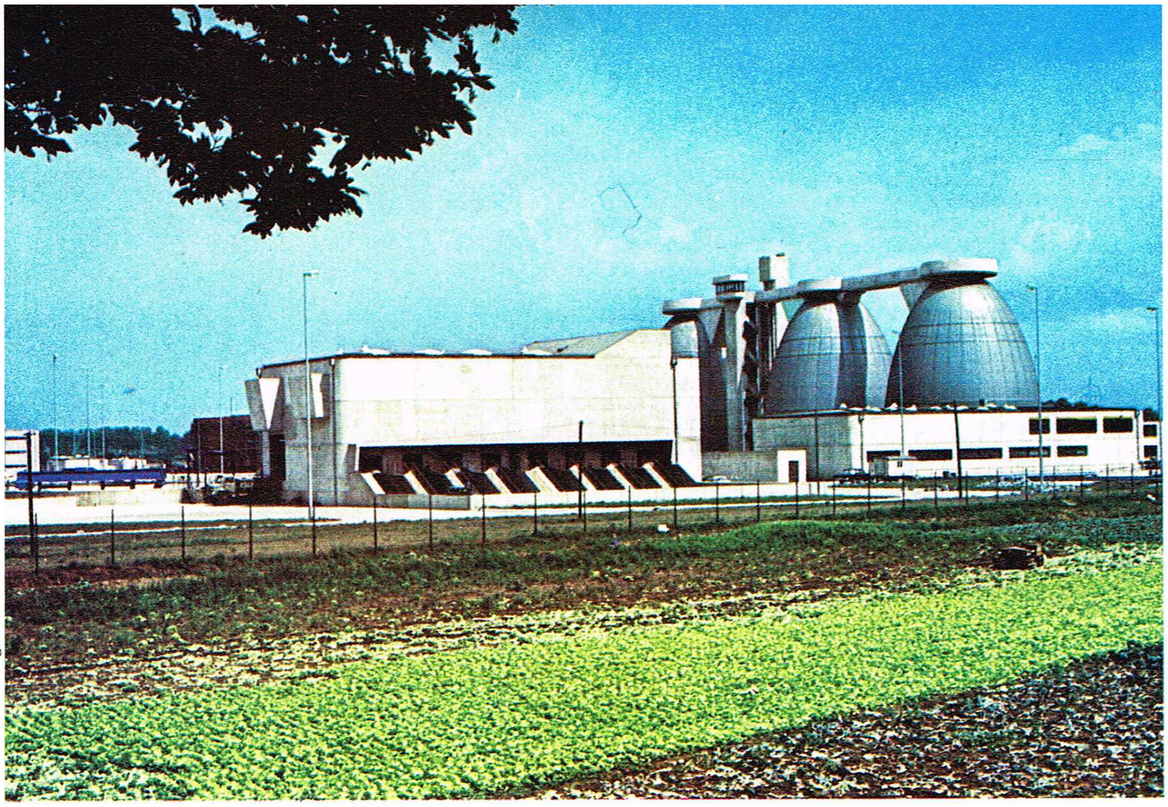

M. Cabaud - Fotogram

▶ *Une bonne maîtrise de l'épuration biologique des eaux usées permet de revenir à l'emploi d'épurateurs septiques, chacun adapté au type d'effluent qu'il reçoit, plutôt que de construire d'énormes stations d'épuration urbaines. Ci-contre, station d'épuration de Dusseldorf.*

Une autre révolution possible entraînée par le progrès scientifique et technique concerne le développement de l'emploi de phénomènes physiques qui se passeraient non plus de façon concentrée en quelques enceintes telles qu'un four ou un réacteur chimique, mais de façon largement étendue dans l'espace. Nous pensons à l'énergie solaire d'une part, et à nombre de processus biochimiques d'autre part. La combinaison de ces deux phénomènes est à l'origine de la synthèse de la chlorophylle, et donc de toute la matière organique sur la terre.

L'application de ces deux types de phénomènes à d'autres transformations physico-chimiques peut permettre de remplacer des installations industrielles très concentrées par une poussière de petites installations, et surtout par des procédés n'utilisant plus d'installations industrielles du tout. Par exemple, une bonne maîtrise de l'épuration biologique des eaux usées peut permettre de revenir à l'emploi d'épurateurs septiques, chacun adapté au type d'effluent qu'il reçoit, plutôt que de construire d'énormes stations d'épuration urbaines. Ou encore, à la fabrication dans de grandes usines chimiques des engrais azotés pourrait se substituer la fixation plus active d'azote *in situ* par des processus bactériens, etc. De façon plus visible, l'extension du chauffage domestique à l'énergie solaire remplacera partiellement le fuel venant des raffineries ou l'électricité venant des centrales.

Les physiciens et thermodynamiciens savent que l'on obtient de meilleurs rendements en mettant en œuvre des processus « moins violents », c'est-à-dire moins concentrés dans l'espace et dans le temps. Alors que tout l'art de l'ingénieur constructeur d'usines depuis deux siècles a consisté à enserrer dans des enceintes à hautes pression et températures, à cinétique accélérée, des procédés industriels qui traitent des matières premières qu'il faut concentrer en un point de paroxysme, tel le brûleur de la chaudière, puis entourer de mille accessoires annexes, l'art de l'ingénieur de l'an 2000, face à la crise des énergies traditionnelles, sera d'utiliser davantage, grâce à des procédés très dispersés, et en particulier biochimiques, les énergies « inépuisables » du Soleil, du centre de la Terre, de la marée, du vent. L'on sait par exemple faire extraire par des bactéries des métaux purs à partir de minerais. En travaux publics, des actions bactériennes peuvent permettre d'étanchéifier ou au contraire d'ameublir des sols en modifiant la structure chimique des argiles, etc. Naturellement cette tendance, qui ne supprimera pas nos usines et machines actuelles, ne pourra se développer que lentement avec l'invention de nouveaux appareillages et procédés adaptés.

La concentration ou la dispersion, voire le déménagement, des établissements industriels en fonction de la **répartition** sur le territoire **des ressources naturelles et des marchés** sont des phénomènes assez visibles. La sidérurgie s'est transportée des gisements houillers vers les ports, les usines d'assemblage ou de manufacture s'installent près de lieux de grande consommation qui se trouvent être aussi des réservoirs de main-d'œuvre, etc. Nous verrons le problème des sources de main-d'œuvre au paragraphe sur le personnel.

Un phénomène intéressant est de voir les établissements industriels se concentrer sur des axes de communications, sans autre facteur local bien net que la présence des voies de communication. C'est le cas de la région de Hanovre en Allemagne, ou de la vallée de l'Oise entre Creil et Saint-Quentin, où passent autoroute, voie ferrée et canal en cours de mise au gabarit européen, cet axe de communication allant de la région parisienne vers l'Europe du Nord industrielle.

Les usines de matériaux de construction (cimenterie, briqueterie, etc.) ont, en revanche, tendance à se distribuer régulièrement sur le territoire en un maillage régulier, de façon à desservir les marchés sans transporter ces matériaux lourds sur de grandes distances, et à faire néanmoins tourner des usines de taille assez importante.

Un phénomène de concentration industrielle qui s'est passé sous nos yeux ces toutes dernières années est celui de la production du plâtre. Traditionnellement, le plâtre ne pouvait être gâché et appliqué qu'artisanalement; c'était un produit sale et délicat d'emploi. Les plâtriers avaient le plus souvent de petites exploitations quasi familiales, et les entreprises du bâtiment s'approvisionnaient au plus près, pour économiser les frais de transport. De nos jours, se sont développées, sur les plus importantes formations de gypse, de grandes usines fabriquant des panneaux et éléments normalisés de plâtre qui sont ensuite expédiés sur de plus grandes distances.

Donnons comme dernier exemple celui de l'implantation des abattoirs en France, où, après des hésitations coûteuses, c'est la formule d'abattoirs de taille moyenne répartis dans les régions qui a été adoptée.

Dernier facteur externe influençant la stratégie d'implantation des installations industrielles, les **législations sociales et fiscales et le niveau des salaires.** Il ne s'agit ici ni de commenter la politique des divers États de la planète, ni de porter des jugements éthiques, mais seulement de comprendre que les entreprises s'adaptent à l'ensemble de « règles du jeu » que constitue la mosaïque des situations sociales et fiscales.

La plupart des États au monde ont, par exemple, une politique qui peut aller du très incitatif au très restrictif pour motiver des entreprises d'exploration pétrolière ou minière à explorer leur sous-sol. Politique *incitative* de l'Australie des années 1960 qui remboursait aux entreprises 25 % de leurs frais de recherche; politique *restrictive* du Canada qui a préféré geler pendant quelques années l'exploitation de ses gisements d'uranium en attendant de mieux maîtriser les centrales nucléaires, parce qu'il pouvait se développer grâce à ses autres immenses res-

sources énergétiques, fossiles ou hydro-électriques. Viennent à l'esprit toutes les implantations d'ateliers dans des pays où les salaires sont peu élevés, avec comme cas caricatural cette boutade selon laquelle les U. S. A. auraient installé toutes leurs manufactures et leurs établissements de jeu et de plaisir sur la rive droite du Rio Grande... Également le cas aberrant des inscriptions maritimes au Panama ou au Liberia, voire des refuges fiscaux, mais ces deux derniers exemples ne sont plus des problèmes d'implantations industrielles.

Nous voulons plutôt attirer l'attention sur des aspects parfois très techniques de la fiscalité. Dans les années 1955-1960, la TVA ne s'appliquait pas en France aux produits pétroliers, et, par une voie de conséquence qu'il serait trop ésotérique d'exposer ici, le coût de construction d'une raffinerie était de 10 à 15 % plus élevé sur la rive française du Rhin que sur la rive allemande. L'État français, face à des projets présentés par des entreprises tant françaises que multinationales, s'est donc empressé d'étendre à cette profession le régime de la TVA, et deux raffineries ont ainsi été construites en Alsace, créant emplois et activité.

Le calcul économique

En passant en revue les diverses facettes des phénomènes de concentration ou de dispersion, de gigantisme ou de limitation de taille, d'agrégation en tissus des établissements industriels et commerciaux, nous avons en fait cité au passage tous les éléments, autres que le financement et les ressources de main-d'œuvre, que l'entreprise prend en considération pour *décider un investissement*. Des méthodes de *calcul économique* sont maintenant bien au point pour fournir à la Direction les données chiffrables de sa décision, qui se ramènent pour l'essentiel au *calcul de rentabilité* de différentes alternatives ou combinaisons d'alternatives de projets d'usines et/ou de lancement de produits, et à un *choix*. Le plus souvent la solution choisie ne sera pas la plus rentable, mais *une* solution rentable qui fasse encourir le moins de risque, qui permette de conserver la meilleure souplesse d'adaptation aux *incertitudes* de l'évolution future de la technique, de la réponse du marché et des projets des entreprises concurrentes.

C'est ainsi qu'à rentabilité égale, le projet nécessitant moins d'investissements initiaux et plus de frais de fonctionnement proportionnels à la production sera généralement préféré au projet impliquant le risque d'un plus fort investissement. Si le calcul de rentabilité est assez simple dans son principe pour une entreprise autonome, qu'elle soit privée ou nationalisée, les calculs économiques nécessaires à la préparation de décision d'un investissement de service public sont plus délicats, car les avantages et les coûts, pour la collectivité, ne sont pas tous chiffrables en francs.

Sans doute faut-il faire confiance aux théoriciens et praticiens pour faire progresser les méthodes de préparation des décisions d'investissements ; mais on ne peut qu'être frappé par le thème d'une conférence présentée devant un grand aréopage d'auditeurs compétents et sérieux : « Le calcul économique est-il encore utile en 1977 ? » Le bon sens nous incite à répondre « Oui, mais il n'est pas suffisant ».

En effet, pour calculer, il faut d'abord mesurer des choses conceptualisées et quantifiables. Le topographe égyptien de l'Antiquité, qui devait réaffecter des lots de terrain à chaque paysan après la décrue du Nil, a créé le concept de surface et trouvé sa relation avec le concept de longueur ; le calcul a ensuite été assez facile. Or, dans l'activité économique, seules les transactions commerciales sont mesurables de façon simple et rapide, par leur contrepartie « conventionnelle » en argent. En revanche, on ne sait pas calculer la rentabilité d'une opération d'entretien préventif dans l'industrie lourde, car la contrepartie du fait que le haut fourneau, le laminoir ou le tanker soit mieux entretenu de *x* francs se conceptualise difficilement : cela améliore-t-il sa longévité ? sa fiabilité ? la sécurité ? *A fortiori*, les concepts qui permettraient de « calculer » les circonstances du progrès ou les modalités du réaménagement industriel mondial sont difficilement cernables.

▼ ***Cimenterie de Heming. Les usines de matériaux de construction ont tendance à se distribuer régulièrement sur le territoire de façon à desservir les marchés sans transporter ces matériaux lourds sur de grandes distances.***

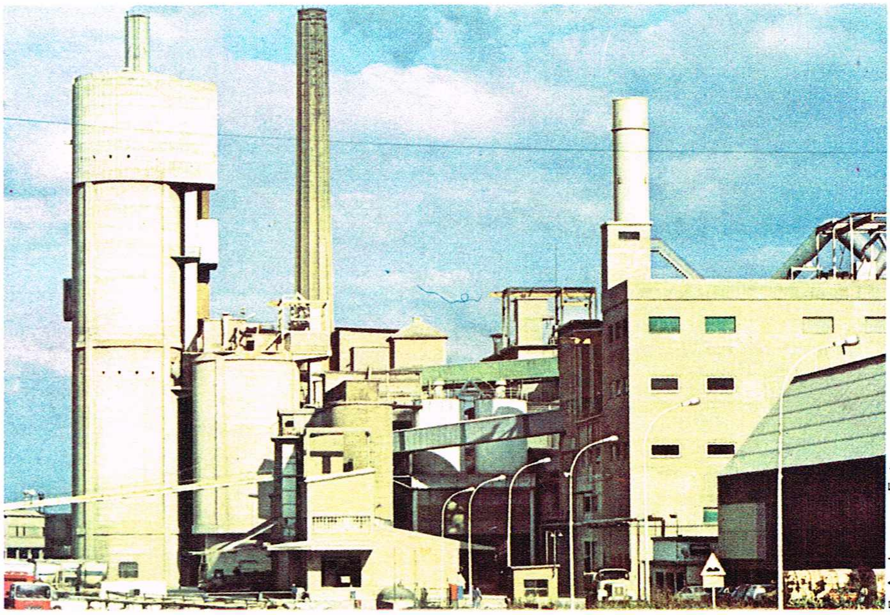

E. Anderson - Fotogram

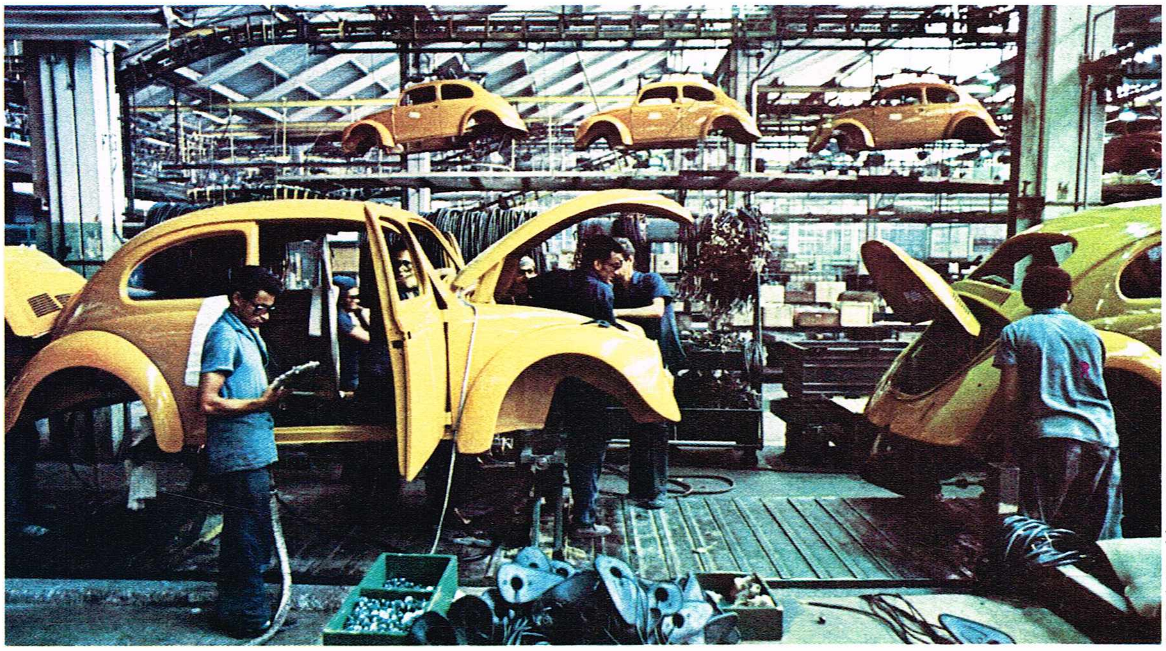

B. Barbey - Magnum

◀ ***Usine VW à São Paulo. De plus en plus, on tend à implanter les usines dans les pays en voie de développement.***

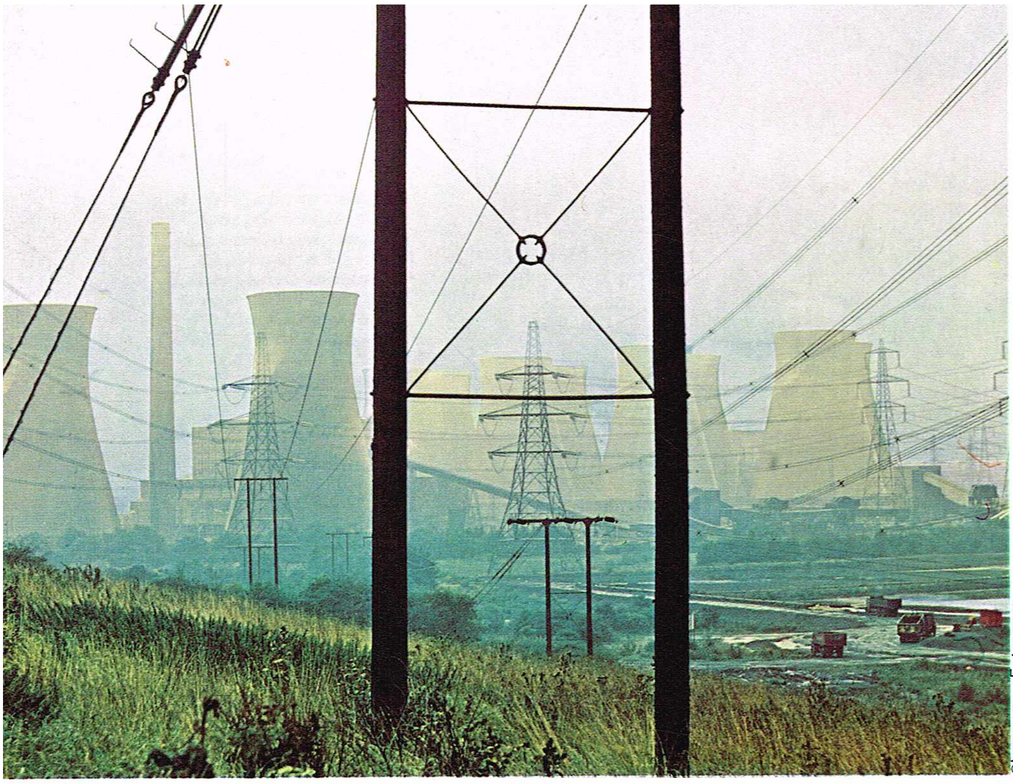

Chapman - Fotogram

▲ Usine à électricité Brotherton (Yorkshire). Une centrale électrique est, à l'évidence, du type « fabrication continue ».

▼ Une usine de construction automobile maintient pendant des mois les mêmes fabrications découpées en tâches successives, mais on ne peut parler vraiment de « fabrication continue », certaines tâches pouvant être exécutées à l'extérieur. Ci-dessous, à gauche, atelier d'assemblage chez Alfa Roméo ; ci-dessous, à droite, système piloté par ordinateur pour le test des circuits logiques intégrés.

L'organisation des usines. Le management intermédiaire

En laissant encore de côté, pour quelques instants, les problèmes d'emploi et de postes de travail, énumérons rapidement les divers aspects du fonctionnement concret de l'usine, de l'atelier, du chantier.

L'on peut dire que ce sont là des domaines parfaitement maîtrisés dans tous les pays industrialisés, et cette constatation est certainement sous-jacente à l'idée parfois exprimée que nous entrons dans une ère « postindustrielle ». Sans doute cette expression a-t-elle été inventée pour dire que l'industrie savait couvrir les besoins essentiels de l'humanité (pas partout malheureusement), et que l'on pouvait se soucier maintenant de l'art de vivre plutôt que de travailler de façon productive ; mais l'expression « postindustrielle » recouvre sans doute aussi l'idée que l'organisation des usines ne fascine plus l'esprit humain.

D'ailleurs, le commandement des usines et des chantiers n'est plus confié à des ingénieurs brillants et inventifs, mais à des « superintendants » dont on attend surtout qu'ils assurent l'ordre et la sécurité, de façon que l'usine réalise le planning de production décidé par la direction générale.

Qu'en est-il ? En fait, les méthodes d'organisation et de management des usines sont parfaitement maîtrisées et donnent tout à la fois lieu à des évolutions fondamentales sous nos yeux. En dehors de la gestion du personnel, le management de l'usine (le *mid-management* des Américains) comprend :

— la définition des méthodes techniques de fabrication par le bureau d'études et/ou le bureau des méthodes ;

— le calcul du programme de production ou de l'ordonnancement des tâches, et la gestion des stocks ;

— l'entretien des installations ;

— tout en assurant le contrôle qualité et la sécurité ;

— et en suivant le tout par une comptabilité industrielle.

Ces diverses responsabilités s'exercent de façons différentes selon le « degré de continuité » de la fabrication assurée par l'usine, ce degré de continuité étant une combinaison, d'une part, de l'intégration de toutes les opérations en un ensemble solidaire ou, au contraire, de leur morcellement en tâches successives sur des machines ou postes de travail, d'autre part, de la durée plus ou moins grande du réglage de la fabrication pour satisfaire les commandes des utilisateurs.

Un haut fourneau, une raffinerie, une centrale électrique sont à l'évidence du type continu (intégré et durée). Une usine de construction automobile d'une grande marque maintient pendant des mois les mêmes fabrications, mais les opérations sont découpées en tâches successives réalisées souvent dans des usines indépendantes, entraînant des stocks de produits « en cours de fabrication ». Une chaîne de fabrication de composants électroniques pourra être très intégrée et automatisée, et devoir néanmoins satisfaire des commandes de lots de produits assez différenciés. Un atelier de mécanique ordonnancera les charges de ses machines-outils au rythme de l'acceptation des commandes reçues. Les programmes de production donnent de plus en plus lieu à des calculs informatiques, de même que les plannings de chantiers ou de tous travaux dits « projets » tels qu'une grosse opération d'entretien.

Alfa Roméo

Yan-Lab, d'automatique et d'analyse des systèmes du centre national de la recherche scientifique

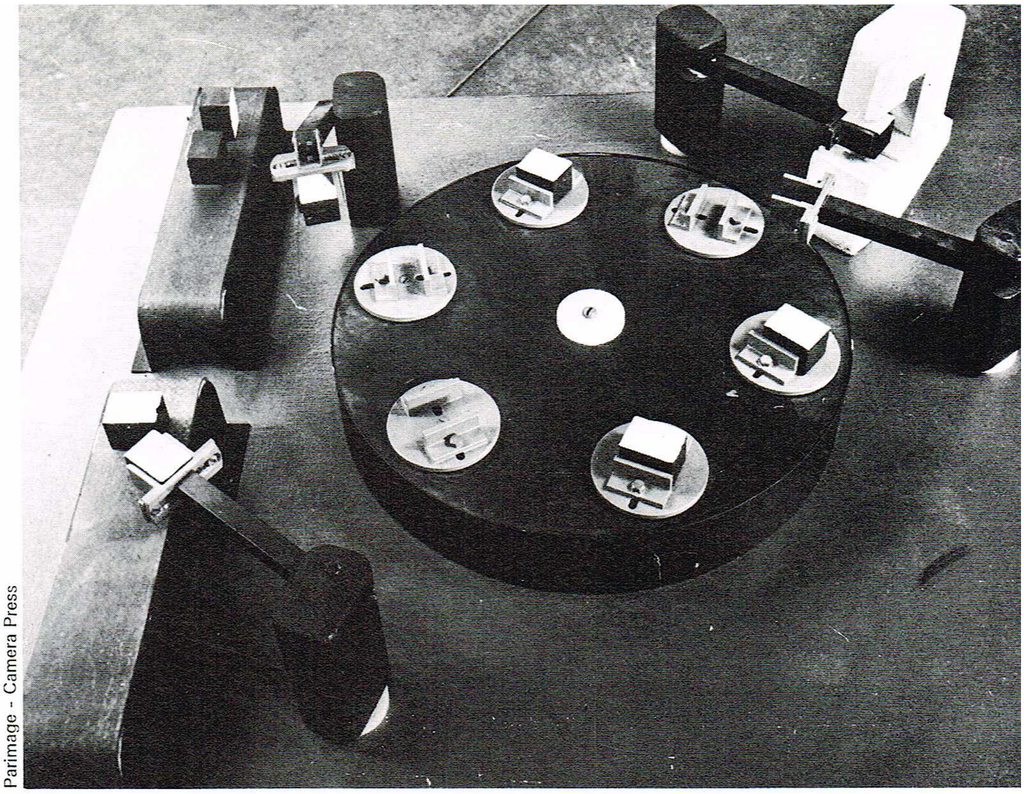

Parimage - Camera Press

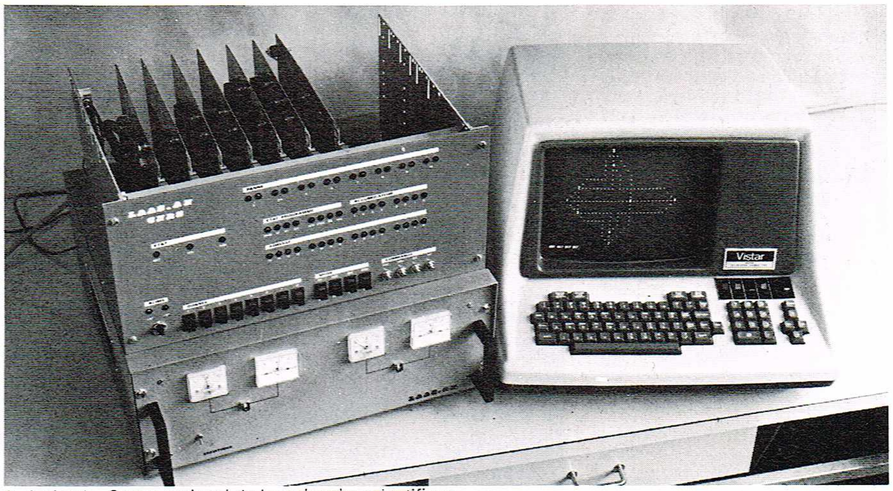

A. Amiand - Centre national de la recherche scientifique

▲ ***On pense qu'en l'an 2000, on saura construire des usines « tout-automatique » capables non seulement de fonctionner seules mais de diagnostiquer les causes de leurs pannes et de les réparer. En haut, robot au travail capable de trier des pièces et de les faire passer sur une courroie convoyeuse; au-dessous, microcalculateur à autodétection et autolocalisation de pannes.***

Les deux phénomènes techniques qui sont porteurs d'évolutions fondamentales du management des usines sont le *diagnostic* et l'*automatisme*. Ces deux techniques doivent leur développement aux progrès des mathématiques appliquées et des appareillages électroniques de mesure et de contrôle. Ce développement appelle de plus en plus la compétence d'ingénieurs spécialistes du *contrôle des systèmes industriels*.

● Le **diagnostic** recouvre :

— les méthodes de contrôle non destructif des produits mécaniques;

— l' « auscultation » du fonctionnement des machines sans les arrêter ni les démonter, grâce à l'analyse des nombreux « signaux » ou « signes cliniques » qu'elles émettent;

— la découverte, comme le ferait un détective, des causes de variations fines des caractéristiques des produits en cours ou finis, même si ces produits restent dans la limite des tolérances requises.

Exemples d'auscultation d'une machine : enregistrement et analyse sur ordinateur des vibrations, analyse des oligoéléments dans l'huile de vidange, analyse sur ordinateurs des mesures continues de températures en différents points de l'appareillage, etc. Des exemples de « démarche de détective » viennent à l'esprit de tout conducteur d'automobile, qui découvre souvent bien plus tard, et à ses frais, la cause originale de tel bruit, de tel refus de démarrer le matin.

Plus les procédés industriels sont complexes, plus il y a de risques qu'une petite variation de caractéristiques du produit à un premier stade de fabrication ne provoque un effet apparent qu'à un stade bien postérieur du procédé. Par exemple, en épuration d'eaux usées, l'épuration biologique de la pollution sera bien assurée dans des marges assez larges de qualité par des micro-organismes actifs, mais l'on constatera, bien en aval, que les boues résiduelles seront rendues autocombustibles ou non par des variations assez fines de la régulation de l'activité microbienne.

Le problème est encore bien plus complexe pour la fabrication des circuits intégrés, où le bloc de métal semiconducteur peut subir une vingtaine d'opérations successives très délicates, et la classe du produit final résultera parfois de très fines variations dans les toutes premières opérations.

Le développement et la maîtrise de bonnes méthodes de *diagnostic* sont les garants de la *fiabilité* des installations et du *contrôle qualité* des produits.

● Quant aux progrès galopants de l'**automatisme,** s'ils sont largement connus par les performances des engins spatiaux notamment, le grand public connaît moins l'immense variété de robots ou de minuscules ordinateurs de contrôle en cours de développement (ou déjà commercialisés, tels que des programmateurs de machines à laver). Ces robots et microcontrôleurs permettent de supprimer l'intervention de l'ouvrier pour les tâches qui font essentiellement appel à *ses aptitudes sensorielles animales*.

L'expression peut sembler surprenante! Illustrons-la par quelques exemples. Un vieux mécanicien chevronné n'analyse pas les vibrations ou l'huile de vidange du gros diesel; il sent que quelque chose ne va pas. Le mineur retraité ressentait, par tradition orale, que les risques de grisou sont plus grands les lendemains de coup de vent du Midi. Les animaux annoncent par leur comportement les tremblements de terre. Un animal un peu agile pourrait très bien être dressé à positionner dans le bon sens des rivets, boulons, etc., sur les tapis roulants d'une chaîne de montage automatisée.

Dans tous ces exemples, il y a acquisition de sensations assez subtiles et mise en forme par les organes sensoriels et l'instinct, plutôt que travail cérébral réel. Grâce à des composants très sophistiqués et à des trésors d'innovations, les microcontrôleurs et robots arrivent aujourd'hui à faire presque aussi bien dans beaucoup de cas. Ils seront utilisés dans une première période pour supprimer des postes de travail fastidieux ou pénibles, ou pour superviser des manutentions ou travaux en « environnement hostile »; c'est-à-dire, par exemple, au fond de la mer ou de la mine, dans des enceintes nucléaires, dans l'espace, etc.

Bien que l'on puisse affirmer que l'on saura construire vers l'an 2000 des usines « tout-automatique », c'est-à-dire qui seront capables non seulement de « fonctionner toutes seules », mais également de diagnostiquer les causes de leurs pannes et de se réparer elles-mêmes, il est difficile de prévoir comment seront utilisées de telles possibilités pour modeler l'organisation industrielle.

● En attendant ce « tout-automatique », nous devons humblement constater qu'aujourd'hui les opérations industrielles et commerciales sont régies par des **procédures administratives,** des circuits de papier :

— les commandes, bons de réception ou d'expédition,

— les factures,

— les ordres de fabrication,

— les bons d'entretien, bons de feu, bons de sortie, bons à tirer,

— la feuille de pointage,

— le rapport quotidien, le bilan de fabrication,

— l'état des stocks,

— les fiches suiveuses,

— les gammes opératoires,

— les plans de charge,

— le planning, les budgets, etc.

Ces procédures administratives ou technico-administratives se sont abondamment développées au service d'une meilleure « gestion intégrée » des activités de l'entreprise, d'une réglementation de plus en plus complexe des normes de qualité, des conditions de travail, de la protection de l'environnement, etc. Depuis dix ans, ces procédures sont largement automatisées sur ordinateur, sans pour autant changer de nature. Leur maîtrise relève de ce que l'on commence à appeler le *génie administratif*, et que l'on peut définir comme l'art de la mise en œuvre de tous les équipements présentés annuellement au SICOB. Deux questions sont cependant posées :

▶ *Depuis quelques années on assiste à une recherche dans l'art de vivre et de travailler. Les bureaux par exemple se veulent vastes, clairs et confortables.*

Berne - Fotogram

★ Toutes ces procédures constituent une espèce de système nerveux (plus ou moins sympathique!) de l'entreprise. Ce système nerveux ne risque-t-il pas de s'hypertrophier par rapport aux fonctions directement productives de l'entreprise? Sans parler du risque de bureaucratisation, c'est-à-dire du processus par lequel certaines personnes placées à certains points des circuits de papier éloignés des opérations, à certains plexus, prennent des décisions uniquement au vu des informations apparentes sur les papiers.

En effet, les informations figurant sur des documents de procédures n'ont pas comme but premier de donner une image complète de la réalité, mais de déclencher certaines actions au bout de la chaîne procédurale. Ainsi, le but d'une facture est d'inciter le client à payer; tandis que l'analyse des ventes au seul vu des factures est une opération très incomplète et hasardeuse.

★ La deuxième question est de savoir si et comment le « tout-automatique » provoquera des mutations en profondeur des circuits de papier.

Le personnel. Les personnes

L'entreprise requiert des ressources en amont, met en œuvre des moyens et livre des produits et services à des *utilisateurs*. Parmi ses ressources, la *population* où elle recrute *son personnel* qui s'intègre dans ses moyens. L'élévation générale du niveau culturel technique, disons du niveau technologique, ainsi que l'abondance et la qualité de l'information sur ce qui se passe font que les mêmes personnes constituent les trois groupes : population, personnel, utilisateurs.

Les opérations portes ouvertes, le consumérisme, l'interaction entre l'action politique et l'action industrielle, et bien d'autres canaux d'information, de formation de l'opinion, ainsi que le brassage social, l'augmentation de la proportion de personnels techniques font que l'on pourrait donner une autre définition de l'entreprise : *Une entreprise est un groupe ou un ensemble d'équipes d'hommes et de femmes qui satisfont leurs envies technologiques et affirment leur existence et puissance de groupe en répondant à des besoins économiques de la population à laquelle ils appartiennent.* Cette définition n'est ni plus ni moins exacte que la définition d'une société dans le Code de commerce; c'est-à-dire qu'elle est partielle, qu'elle privilégie un point de vue, mais que ce qu'elle exprime est vrai.

L'on a connu ces entreprises créées au XIXe siècle dans des villes de province grandies avec elles, où l'on naît à la maternité Smith, on va à l'école Smith, on s'embauche chez Smith, on est logé par Smith, on se soigne à l'hôpital Smith, on bénéficie d'un cercueil Smith, etc. L'on connaît des entreprises où la clôture est terrible, on change sa personnalité en entrant le matin, on la retrouve le soir, l'on ne prononce pas un mot à la maison de ce qui se passe à l'usine, le secret industriel y est conservé jalousement.

L'on a constaté plus généralement que, depuis trente ans, l'esprit d'équipe, l'esprit corporatif des grandes entreprises a largement débordé la clôture de l'usine sous l'égide du Comité d'établissement qui organise services sociaux, sports, formation, etc., à tel point que, dans des villes moyennes où il y a une grande entreprise, et le reste, c'est-à-dire les PME (petites et moyennes entreprises), les commerçants, les services, la population se répartissait en deux classes : ceux qui avaient les avantages de « la Smith » et les autres.

Les entreprises ont également développé les premières la Sécurité sociale, la médecine préventive, la formation continue, etc. Mais depuis quelques années est intervenue une égalisation générale, une extension à tous, c'est-à-dire aux PME et au secteur non industriel et commercial, du même art de vivre et de travailler : les notaires et les médecins ont leur système de formation continue, les agriculteurs la Sécurité sociale, etc.

En outre, les idées actuelles s'accommodent de moins en moins des clivages de population tels que « ceux de la Smith » et « les autres ». Bref l'entreprise a maintenant un *bilan social*. L'une des causes et des conséquences tout à la fois de ce courant d'attitudes et d'organisation est certainement l'action des syndicats.

Jetons enfin le concept d'autogestion en dernière touche provisoire de ce tableau (sans citer les travaux de tel ingénieur-conseil qui parle d'entreprises anthropogènes et d'entreprises anthropophages).

Il sort du cadre du présent ouvrage de procéder à une étude rationnelle ou à une prospective des problèmes de

« l'entreprise et les personnes », d'autant plus que l'esquisse que nous venons d'en donner serait à reprendre si l'on considère non plus seulement une entreprise dans sa ville, mais également les migrations de main-d'œuvre, la situation dans les autres pays tant industrialisés qu'en voie de développement.

Essayons néanmoins de synthétiser en un concept tout un ensemble de faits que nous devons bien constater :

— les horaires souples,
— les congés formation, maternité, etc.,
— les indemnités de chômage,
— le travail temporaire,
— les retraites anticipées,
— le travail au noir,
— les régimes de récupération des heures supplémentaires, des dimanches travaillés,
— la généralisation de cinq équipes en travail posté 3 × 8,
— les fermetures annuelles, etc.

Tout cela bat en brèche le système du travail « organisé ». Des experts pensent que : « Nous évoluons vers un système de travail « épisodique », selon une organisation très diversifiée. » Organisation très diversifiée est quasi synonyme de désorganisation ! Le chef d'entreprise trouve peu à peu des solutions à toutes les sujétions qu'entraîne cette désorganisation, pour sauvegarder sa productivité.

De même que, dans un régime de rémunération, lorsqu'il y a trop de primes diverses qui ont été créées au cours des années pour répondre à des problèmes circonstanciels, l'on procède à une refonte générale qui simplifie, en se fondant sur quelques concepts rafraîchis de ce que sont la qualification et le service rendu, de même l'on sent que viendra un jour une simplification radicale du travail désorganisé, sans que l'on puisse en préciser le sens, ni la cause, ni l'aboutissement.

En attendant, les services de personnel et les directions du personnel essayent de « tenir », en organisant leurs activités en quelques grandes fonctions qui correspondent aux concepts qui étaient assez clairs il y a seulement dix ans : gestion administrative, gestion des carrières et formation, « affaires sociales ».

L'on répond au « malaise des OS », puis à la pénurie de certaines classes de main-d'œuvre, en modifiant progressivement l'organisation des ateliers : limitation du morcellement par l' « enrichissement des tâches », introduction de robots pour les tâches fastidieuses, déconcentration en établissements « à échelle humaine », etc. Quant au « tout-automatique », il permettra d'implanter une plus grande variété d'usines loin des villes, loin des réservoirs de main-d'œuvre.

Fonctions patrimoniales et financières

Nous nous sommes efforcé jusqu'ici d'ignorer les problèmes juridiques et financiers de l'entreprise. En effet, dans le droit occidental, le droit de propriété est le fait non pas de l'entreprise telle que nous l'avons définie de diverses façons, mais de la société commerciale, le plus souvent société anonyme, et les pourtours des sociétés et des entreprises ou établissements se recouvrent comme deux dessins différents, comme deux cartes d'un pays, la carte de France par départements et la carte par zones de densité de population pour donner une image.

Nous devons néanmoins définir les différentes fonctions de l'entreprise ou de la société qui s'occupe de finances. Il est bon au préalable de bien comprendre les différents concepts cachés sous le mot *franc*. La *monnaie* est d'abord un bien d'emploi et de manipulation très souple, d'autant plus que les espèces sont le plus souvent remplacées par la monnaie scripturale (les comptes en banque par exemple). La monnaie est donc la contre-valeur des échanges commerciaux de biens et services. Mais attention... telle marchandise vaut telle somme précise, au centime près, parce que deux parties « indépendantes » se sont mises d'accord sur cette valeur pour cette transaction ?

▶ Page 38, en bas, vue du bureau de dessin assisté par miniordinateur de la société Graphaël à Compiègne. Certaines technologies, telles que le dessin industriel assisté par miniordinateur, correspondent à des besoins très importants des utilisateurs potentiels. Mais ce n'est que progressivement que se dégage un marché effectif pour de tels outils de travail, même s'ils sont parfaitement au point techniquement.

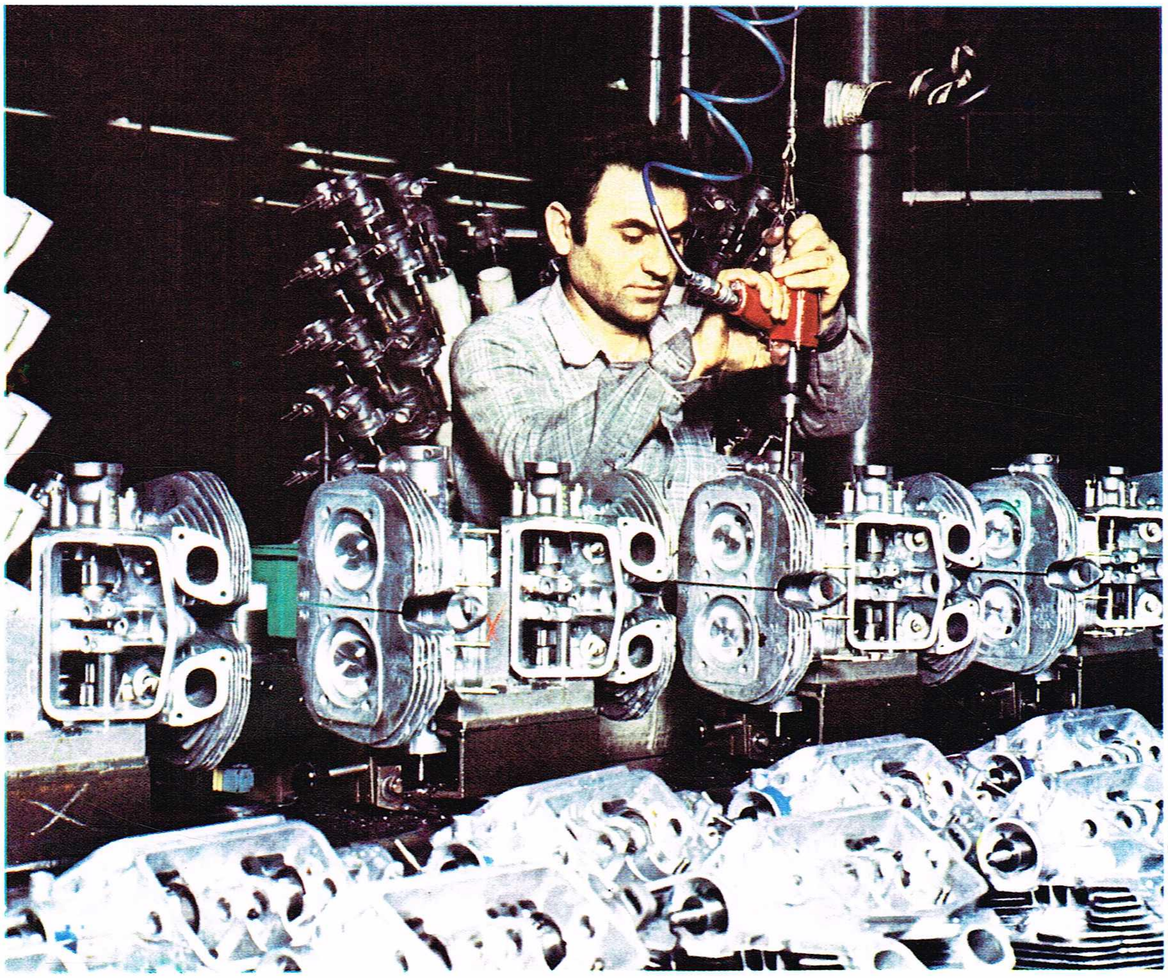

P. Tourenne - Fotogram

◀ Monteurs sur chaîne. Actuellement, on essaie de limiter le morcellement des tâches en revenant à des établissements à échelle humaine.

Fiat

▲ *Pour la gestion comptable d'un magasin de pièces détachées, Fiat utilise ce centre mécanographique.*

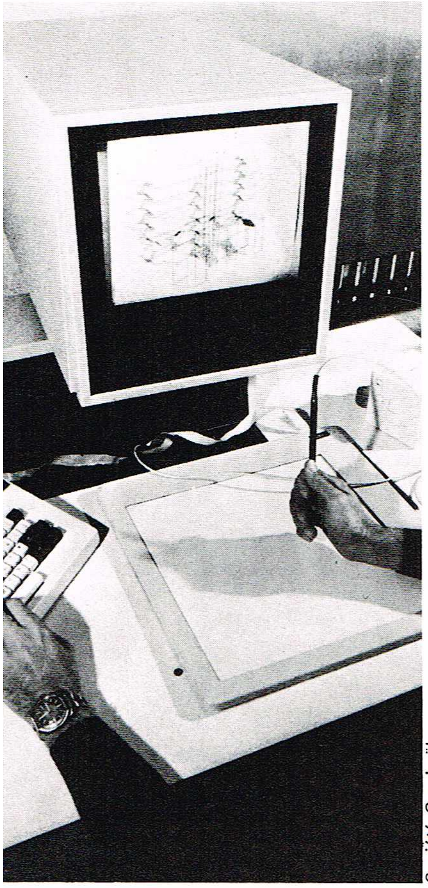

Société Graphaël

(C'est ainsi que les valeurs des transactions entre sociétés d'un même groupe n'ont pas grande signification absolue, ni les valeurs des « facturations internes » entre services d'une entreprise.)

D'autre part, le franc sert à évaluer les différents éléments de l'actif et du passif d'une société, qui présente ainsi chaque année son bilan. Le *bilan* devrait permettre à un acquéreur de savoir à quel prix il peut acheter une société, c'est-à-dire acheter tout ou partie de son capital. En fait, le bilan comptable a un objectif assez « procédural » vis-à-vis du fisc et des partenaires financiers, et l'on demandera à un évaluateur expert de dire combien vaut une société, y compris son potentiel humain et son potentiel de recherche et de développement.

Enfin, le franc est l'unité de *calcul économique* qui sert à quantifier tout, toutes les réalités de ce monde, dès lors qu'elles ont été regardées à travers le verre filtrant de l'économiste. L'économiste dira par exemple que 100 F considérés dans dix ans « valent » 50 F aujourd'hui, si on les « actualise ».

Ainsi l'**économiste** contribue-t-il à préparer toutes les décisions de l'entreprise, où ses vues se synthétisent avec celles du financier, du juriste, du directeur du personnel, etc., mais les études économiques ne sont pas une fonction à proprement parler financière.

Le **comptable** enregistre toutes les pièces, tous les documents, traduisant les achats et les ventes et toutes les dépenses de la société ; il procède en outre aux « évaluations conventionnelles » de la société (amortissements, provisions, etc.), pour aboutir au bilan et aux déclarations fiscales.

Le **trésorier** gère les fonds de la société, en s'assurant tout d'abord que ces fonds ne s'envolent pas. Il paie, encaisse, procède aux changes, fait les placements à court terme.

Le **financier** trouve à l'extérieur les sources de financement nécessaires au développement des entreprises de la société : emprunts, émissions d'actions, etc.

Avec le **juriste** et le **fiscal,** il étudiera les perpétuels aménagements par lesquels la carte des sociétés glisse en se déformant sur la carte des entreprises : création de filiales, rachat d'autres sociétés, modification des répartitions de capitaux..., toutes opérations qui favorisent le développement industriel et commercial.

Le **contrôleur de gestion** met sous forme de budgets et de plans à moyen terme les programmes d'activité qui ont été assignés aux différents secteurs de l'entreprise, et il compare les réalisations aux prévisions en publiant des documents chiffrés appelés tableaux de bord. Il est la cheville ouvrière de la *décentralisation des responsabilités* indispensables au bon fonctionnement de l'entreprise.

L'**auditor** ou **contrôleur interne** inspecte en permanence tous les aspects de la vie de l'entreprise : bonne tenue de tous les documents comptables, application des notes de service de la direction, bonne conservation des équipements et des stocks. De plus en plus, l'auditor procède également à des inspections techniques dans tous les domaines.

Le **commissaire aux comptes,** ou **auditor externe,** réalise une inspection périodique, annuelle, voire trimestrielle, pour le compte des actionnaires et des créanciers de la société. Il certifie la validité du bilan.

Naturellement, toutes ces fonctions, sauf la dernière, seront réunies en un seul bureau dans une petite entreprise. Alors que, dans une grande multinationale, elles occuperont plusieurs buildings plantés sur les cinq continents.

L'entreprise vivante

Les entreprises naissent, vivent et souvent meurent. Les sociétés aussi, en entraînant ou non leurs entreprises et leurs établissements dans la mort.

Si l'on sent vivre une entreprise, l'on peut ressentir un jour une période de vieillissement : ralentissement des circuits d'information, encroûtement dans des habitudes, sérénité face à l'épuisement proche de rentes de situations, bref, manque de réactivité. L'entreprise est un être vivant qui ne doit pas mourir, ce qui est une gageure. Comment, en effet, se renouveler réellement sans aliéner profondément sa personnalité ? on est absorbé par une autre société qui insuffle nouveaux capitaux et nouveaux hommes, ou au contraire on abandonne un secteur d'activité devenu pesant, et se modifient ainsi les équipes d'hommes à l'intérieur de l'entreprise. Et ce n'est plus la même entreprise !

LE SYSTÈME DE SANTÉ (EN FRANCE)

Pour l'Organisation mondiale de la Santé (O. M. S.), la santé serait « un état complet de bien-être physique, moral ou social »... Plus qu'une définition du réel, cette formule est plutôt l'expression d'un idéal, toujours recherché et rarement atteint.

Si l'on donne une importance si grande à la maladie et au système de santé, c'est peut-être que la population d'aujourd'hui attache plus de prix à lutter contre le risque de la maladie et ses conséquences, et souhaite davantage allonger sa durée de vie. Conscients que nous sommes des possibilités de la médecine et du réseau de santé dans notre société, nous en attendons beaucoup et avons perdu la résignation de nos pères en face de la maladie et de la mort. Le besoin de sécurité qui en résulte est à son tour un puissant facteur de progrès dans la société développée d'aujourd'hui. Un réseau de plus en plus ramifié de techniques spécialisées se développe, dont chacune vise à l'excellence dans la maîtrise d'un moyen de diagnostic ou de soins.

Tout en étant rendue nécessaire par le progrès de la médecine, la multiplication des professions et des spécialités complique chaque jour un peu plus le fonctionnement du système de santé. La complexité vient à la fois de la définition des compétences, de la multiplication des moyens, de l'organisation du temps et de la superposition des contraintes.

C'est pourquoi une description simple et logique du système de santé devient à la fois de plus en plus nécessaire et de plus en plus difficile.

On peut assimiler le réseau de santé à un *système* dont les parties interagissent sur le plan technique, économique et psychosociologique. La plupart de ses acteurs (en particulier les membres des professions libérales) préfèrent mettre l'accent sur la *relation bilatérale* entre le *praticien* et le *malade*, et certains préfèrent ne voir dans la solidarité sociale en face des problèmes de la santé qu'une péripétie liée à une structure administrative ou à un préjugé social temporaire.

La *solidarité sociale* est fondée sur la mise à la disposition de tous d'un ensemble de moyens soutenus par une organisation, une réglementation et une tradition de service. Elle s'oppose à la *solidarité bilatérale*, qui se traduit par la contribution d'un homme de l'art qui accepte de venir en aide à un malade qui en a besoin; fruit d'une tradition millénaire, ce service individuel peut être oblatif et gratuit. Il est maintenant presque toujours professionnel et rémunéré. Pourtant, une préoccupation morale en gouverne toujours les modalités. Elle appartient à cette grande tradition. Conscience sociale et vocation charitable ont dominé de tout temps la pensée des grands médecins, et suscité la vocation des personnels soignants.

Avec le développement de la médecine technique, le sort d'un malade grave est de moins en moins lié à l'action d'un seul praticien. Il dépend de plus en plus d'un réseau de personnels de santé, tels que médecins de diverses spécialités, techniciens de radiologie, biologistes, rééducateurs, travailleurs sociaux, etc. Dans ce contexte, le lien charitable entre médecins et malades s'est dilué. En même temps, le type de relations recherché par le malade et le moteur psychologique de ceux qui le soignent se sont modifiés.

Le malade a maintenant conscience de dépendre d'un système dont il a entendu vanter les possibilités techniques, mais dont il redoute la complexité et le coût. Mais il ignore généralement la part considérable d'organisation et d'effort collectif qui lui permet de profiter de la *politique de la santé*. Parmi les multiples actions de santé, la plupart ne sont pas médicales. Elles concernent la lutte contre les moustiques ou la protection des puits dans les pays en voie de développement; la surveillance des installations de traitement d'eau potable et l'aménagement des carrefours routiers dans les pays les plus développés.

Les actions pour favoriser la santé des populations n'ont pas toujours la *même efficacité par rapport à leur coût*. Elles peuvent parfois donner lieu à des résultats spectaculaires à peu de frais; c'est le cas de la vaccination contre la variole dans certains pays, ou de la mise en place de ceintures de sécurité dans les voitures chez nous. Elles peuvent aussi se révéler très coûteuses et peu efficaces; par exemple, la psychanalyse dans la pathologie psychiatrique aux États-Unis. Comme cela se passe souvent, les premiers progrès sont très peu coûteux, car ils résultent de l'application de moyens connus et bien rodés à une grande masse de population homogène; à un stade plus avancé, au contraire, les succès deviennent bien plus dispendieux, car les actions se diversifient, et s'appliquent à des populations de plus en plus réduites.

Malgré la richesse relative de notre pays, le problème se pose aujourd'hui de savoir jusqu'où peut aller l'effort de lutte contre une pathologie donnée, surtout lorsqu'elle concerne une population très réduite. Il est déplaisant d'aborder aussi objectivement un problème qui touche à la souffrance et aux chances de survie de chacun de nous. Heureusement, chaque médecin ne se pose pas ce problème, et s'efforce d'obtenir pour chacun de ses malades les meilleures conditions possibles d'explorations et de soins. Par contre, ceux qui décident au niveau national ne peuvent s'empêcher d'étudier quel nombre de postes de dialyse (rein artificiel), de monitoring (réanimation) ou de lits de traumatologie lourde le pays peut se permettre d'installer dans la limite de ses ressources.

Lauros - Giraudon

▲ *De tout temps, la santé des hommes fut la préoccupation des princes et des savants. Mais les résultats étaient bien décevants, et l'ignorance des causes des maladies était profonde.*

Musée royal Mauritshuis

▼ *La naissance de la médecine scientifique est passée par la connaissance de l'anatomie. Au XVIe siècle, les plus grands médecins s'y consacraient, et de grands peintres ont tenu à pérenniser les démonstrations de maîtres à l'occasion des rares dissections permises. Ici,* la Leçon d'anatomie du docteur Tulp, *de Rembrandt (La Haye, musée royal Mauritshuis).*

▶ *Tableau I : quelques données sur le système de santé français (1974).*

Tableau I Quelques données sur le système de santé français (1974)		
Personnel hospitalier (de l'ordre de)	600 000	
Médecins	73 500	
Lits d'hospitalisation	555 000	
Prestations de Sécurité Sociale (en milliards de francs)	200	
dont maladie, maternité (en milliards de francs)	70	
Dépenses de santé (en milliards de francs)	78	
Dépense de santé par tête (en francs)	1 500	
Part dans la consommation des ménages (en %)	10,2	
Part dans le produit intérieur brut (en %)	6,5	
Espérance de vie à la naissance	1954	1974
hommes	65 ans	69 ans
femmes	71 ans	77 ans
Mortalité périnatale (pour 1 000 naissances)	40	19

Le développement du système de santé

Malgré le nombre des réflexions et des études passées, nous ne sommes pas encore vraiment habitués à bien administrer un système aussi complexe (*tabl.* I). De plus, les acteurs du système (familles, médecins, administrateurs locaux) ont du mal à admettre que leur action individuelle, souvent motivée par le désir généreux d'aider ceux qui les entourent, soit bridée et contrôlée au nom de contraintes collectives.

Aujourd'hui, dans presque tous les pays du monde, les possibilités du système sont encore limitées, pour une large part, par les moyens dont il dispose. Nous ne pouvons pas appliquer les meilleurs méthodes de diagnostic et de soins à tous les malades dont l'état le demande. Il y faudrait un nombre suffisant de *bâtiments* et d'*équipements* répartis sur le territoire, mais surtout un nombre suffisant de *personnels* bien formés et spécialisés (infirmiers, kinésithérapeutes, laborantines, aides-radiologistes, etc.). Cela exigerait aussi la production d'une grande quantité d'*objets* (de biens) dont certains sont consommés au fur et à mesure (les médicaments), et d'autres utilisés pendant une longue période (lunettes, prothèses diverses, instruments de chirurgie, etc.).

Parmi les multiples actions destinées à favoriser la santé de la population, il faut signaler l'incidence d'actions d'éducation et de formation du public (éducation sanitaire), ainsi que de la législation sociale destinée à en protéger la partie la plus vulnérable. La protection sociale (aide au logement, aide sociale, aide à différentes catégories défavorisées) a un important effet préventif de la maladie, aussi bien physique que mentale. Il faut ajouter qu'elle favorise la réhabilitation et la réinsertion sociale des malades et des invalides, ce qui parachève l'effet bénéfique des soins. Enfin, elle aide à résoudre les difficultés pratiques des malades qui ne peuvent se réinsérer dans la vie active : personnes âgées, invalides ou infirmes.

▼ *Figure 1 : les organes du système de santé.*

fig. 1

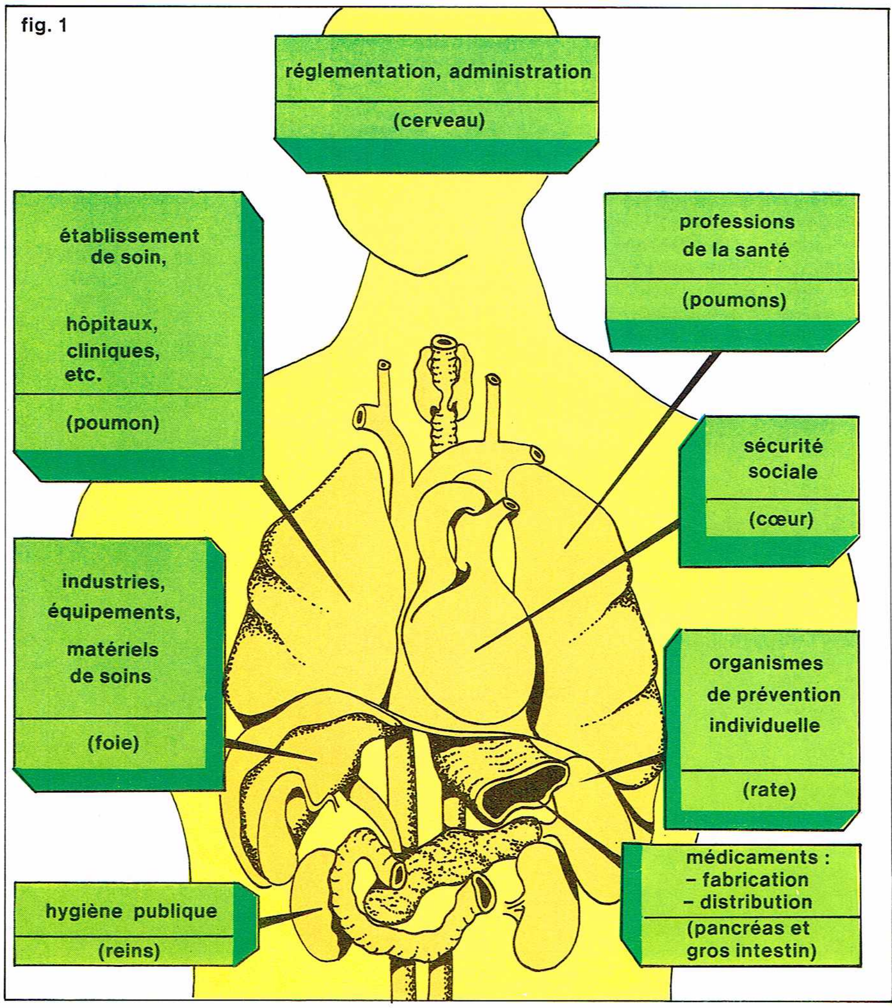

Richard Colin

L'anatomie du système de santé

Le système de santé peut être assimilé à un organisme vivant (*fig.* 1). Pour remplir ses fonctions essentielles, il comprend des organes constitutifs, obéit à des règles fondamentales, et fonctionne selon ses mécanismes propres. Une connaissance des organes qui le composent et des lois qui le régissent est nécessaire pour en comprendre les mécanismes.

Il dépend d'abord de la compétence et du dévouement de ses diverses *professions*. Quelques-uns de ces acteurs du système de santé sont souvent cités, et l'on croit bien les connaître. D'autres, au contraire, sont peu connus et ne sont rencontrés que par quelques-uns de ceux qui ont affaire avec le réseau de santé. Il est ensuite tributaire d'*établissements techniques* où les soins les plus compliqués peuvent être dispensés. Parmi eux, l'hôpital tient une place de choix. De même, son fonctionnement demande le soutien de l'*industrie* pour fabriquer les biens médicaux, en particulier les médicaments.

Enfin ce système obéit à une *organisation administrative et financière* que les administrations appliquent. La Sécurité sociale et l'Administration de la santé y jouent un rôle essentiel.

Les professions

On peut distinguer (*fig.* 2) ceux qui rencontrent des malades en toutes circonstances. Ce sont des généralistes. Au contraire, d'autres répondent à des besoins plus spécifiques. Parmi les premiers, les catégories les plus connues sont les médecins généralistes (ou omnipraticiens) et les infirmières de ville. On peut aussi y ranger les masseurs kinésithérapeutes et les pharmaciens d'officine.

Le médecin généraliste

Il y en a près de 50 000 en France, soit 96 pour 100 000 habitants. On a pu dire que c'est le médecin de premier recours, auquel on fait appel dans des circonstances très diverses, chaque fois qu'un secours médical est attendu. Très souvent, il est amené à aider le malade et sa famille dans la solution de problèmes qui dépassent la technique médicale. Aux yeux de tous, il est le praticien proche du malade, le médecin de famille.

Il a été formé en faculté de médecine, en sept ans au moins après le baccalauréat. Il a obtenu un diplôme de docteur en médecine au décours d'une thèse sur un sujet médical.

On peut distinguer plusieurs phases dans le service rendu par le généraliste : un *contact* et un échange d'informations, qui est le temps le plus long et parfois le seul recherché par le malade, un *examen*, une *décision*.

La forme que prend la médecine est fortement influencée par la manière dont sont rémunérés les services du médecin. Payé « à l'acte », c'est-à-dire forfaitairement pour chaque rencontre entre le médecin et le malade, le médecin est poussé à fragmenter son travail entre un grand nombre de rencontres brèves répondant « au coup par coup » aux appels du malade. Ce dernier est alors encouragé à rappeler souvent le médecin, donc à s'appuyer sur lui de plus en plus pour des décisions ou des interventions mineures qui, souvent, ne devraient pas nécessiter le recours à une personne aussi qualifiée. La réglementation sociale protectrice a le même effet, puisqu'elle exige la griffe du médecin pour la prise en charge sociale des frais et la délivrance des médicaments.

Le médecin prescripteur devient de proche en proche le dispensateur d'avantages payés par la collectivité et le garant de la sécurité du malade en cours de traitement. Sa responsabilité juridique et économique s'en trouve accrue, parfois sans qu'il en prenne suffisamment conscience.

L'infirmière

Le nombre d'infirmiers et infirmières diplômés est de 125 000 en France (1974), ce qui est insuffisant dans l'absolu (*fig.* 3). La pénurie est beaucoup plus marquée qu'il ne paraît, car une trop grande proportion des infirmiers diplômés n'exerce pas ou n'a pas d'activité de soins. Ce qui caractérise ce métier, c'est en effet sa féminisation très marquée, et l'évolution rapide qui a fait substituer en quelques décennies des infirmières civiles aux infirmières religieuses des hôpitaux, dont le nombre a décru rapidement.

L'infirmière est la cheville ouvrière des soins à l'hôpital; elle rend des services essentiels aux malades graves et à tous ceux qui doivent subir des examens et des soins complexes ou sanglants. Ses services ne sont pas toujours rémunérés aussi bien que le justifient la formation reçue, les aspects rébarbatifs de son travail et les astreintes de cette profession noble et difficile. Ce fait s'explique par l'héritage des soignantes religieuses, dont le style de vie particulier et la vocation permettaient une très faible rémunération, et par les exigences plus limitées d'une population féminine contrastant avec la prédominance masculine parmi les médecins et les gestionnaires. Il est probable que la poussée des besoins et l'évolution des esprits réduiront cette anomalie dans un avenir proche.

L'infirmière est formée en 28 mois après le baccalauréat, ou après un examen probatoire pour les candidates qui n'ont pas ce diplôme. Sa formation est partagée entre les enseignements d'école et une pratique quotidienne à l'hôpital. Les hôpitaux tirent avantage de cet apprentissage en faisant contribuer les élèves infirmières aux soins; ces dernières profitent d'une formation adaptée « sur le terrain », puisque le métier qu'elles pratiquent est celui dont elles doivent avoir la maîtrise pour exercer en hôpital ou en clinique.

Une fois diplômées, les infirmières peuvent poursuivre leur activité à l'hôpital, et y monter les degrés de la hiérarchie hospitalière (surveillante, monitrice, surveillante-chef, surveillante générale) ou encore se spécialiser. Elles peuvent s'installer en pratique libérale, seules ou en association avec d'autres infirmières, ou avec un ou plusieurs médecins. Elles peuvent aussi exercer leur métier dans les très nombreux secteurs où leur besoin se fait sentir : écoles, usines, entreprises, dispensaires, administrations, etc.

Les masseurs kinésithérapeutes et les ergothérapeutes

Ce sont des professions qui ont pris depuis peu d'années une rapide expansion. Elles visent les affections qui bénéficient de massages, mobilisation et réhabilitation par une activité physique. En dehors des applications classiques du massage (relaxation musculaire, cures thermales), les indications du kinésithérapeute se sont

fig. 2

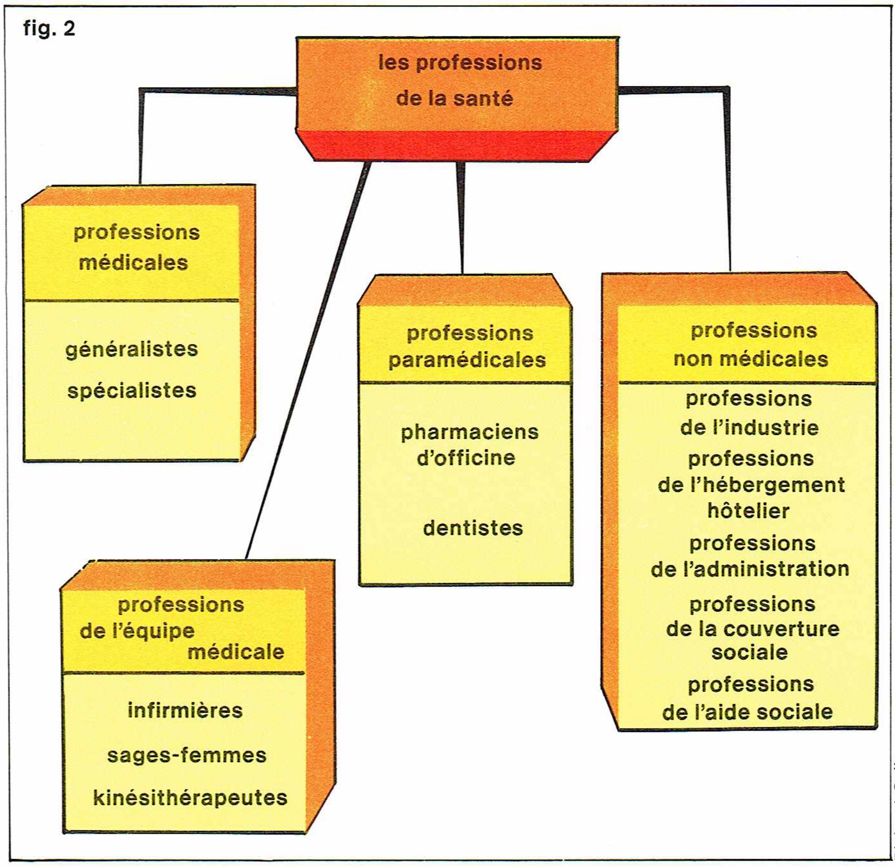

fig. 3

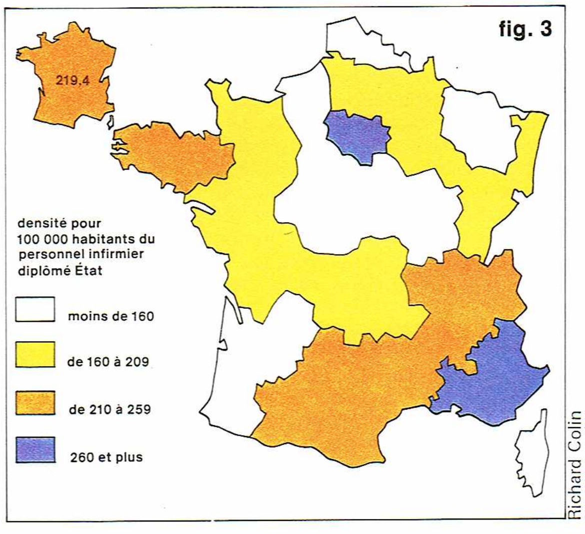

▲ *Figure 2 ; anatomie du système de santé : les professions.*

◄ *Figure 3 : densité du personnel infirmier diplômé d'État, par régions, au 1er janvier 1973 (d'après* la Documentation française, *Paris 1975).*

▼ *L'exploration par les isotopes radio-actifs permet de déceler des anomalies à un stade très précoce où la clinique médicale est muette et sert en particulier dans le diagnostic précoce des tumeurs. Elle demande des locaux spéciaux, des mesures complexes et un personnel compétent (hôpital Saint-Antoine, Assistance publique de Paris).*

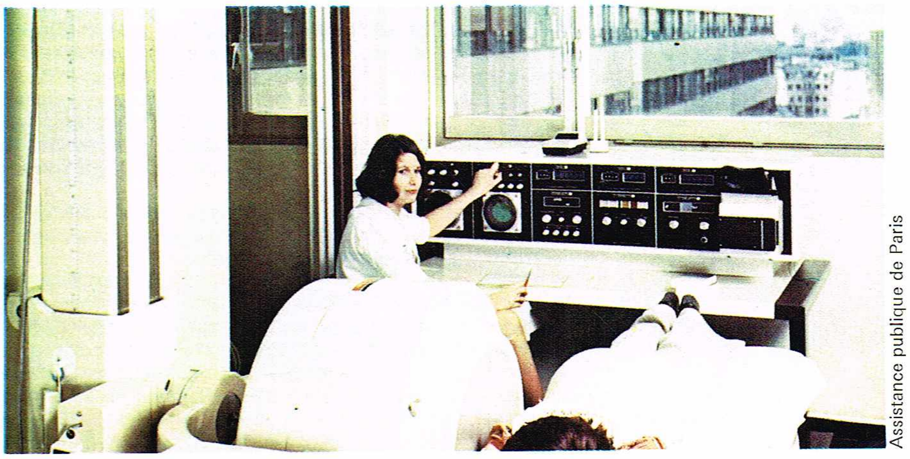

multipliées pour réparer les suites de traumatismes et réduire les séquelles de paralysies. Le sport, et plus spécialement le ski, et les accidents de voiture sont les grands pourvoyeurs de fractures diverses dont la rééducation demande une mobilisation passive et active dans des conditions rigoureuses.

En raison des récupérations parfois spectaculaires obtenues par la mobilisation, dont l'effet n'est pas seulement physique mais aussi psychique, les indications de l'ergothérapie et de la mobilisation ont été étendues à des invalides, aux personnes âgées, à des malades psychiatriques. Ces derniers tirent un grand profit d'une activité dirigée (ergothérapie). En ce qui concerne les paralysies, la grande indication du passé était la récupération des séquelles de poliomyélite. Depuis la vaccination, cette indication a heureusement perdu de son importance, mais la multiplication des paralysies traumatiques a largement compensé la baisse d'activité qui en aurait résulté.

Ce métier demande une formation de trois ans après le baccalauréat. Le succès de la kinésithérapie a attiré un grand nombre de jeunes dans cette profession pour laquelle des écoles ont été ouvertes en grand nombre, elle est maintenant assez pléthorique. Pour répondre aux multiples formes de mobilisation, un équipement assez élaboré et coûteux est nécessaire (piscine, accessoires divers, etc.).

Le pharmacien d'officine

Aujourd'hui, les pharmaciens forment trois populations différentes à partir d'une formation initiale identique : les *pharmaciens de l'industrie, du laboratoire et de l'officine*. Seuls ces derniers délivrent au public des médicaments. Pour rendre ce service, ils doivent avoir fait cinq années d'études après le baccalauréat et acquis de multiples connaissances sur le médicament, la maladie et le malade. Le nombre actuel des pharmaciens d'officine est de près de 20 000, soit 38 pour 100 000 habitants.

Leur rôle est de garantir le malade contre les risques que lui font courir les médicaments très actifs lorsqu'ils ne sont pas pris à bon escient. Ils doivent veiller à ce que les doses (les posologies) et les fréquences prescrites soient compatibles avec la sécurité du malade et que les prescriptions soient assez bien comprises par ce dernier pour éviter tout accident. Ils doivent être particulièrement vigilants lorsqu'il s'agit de médicaments toxiques ou de stupéfiants (drogues) susceptibles d'entraîner une accoutumance.

En dehors de cette responsabilité particulière de santé publique, ils ont une activité commerciale de détaillants en médicaments; ils vendent les médicaments au comptoir, gèrent leur stock et le renouvellent auprès des grossistes, de manière à délivrer n'importe quel médicament commercialisé en France dans les 24 heures.

Traditionnellement, ils fabriquaient eux-mêmes des médicaments par mélange de principes actifs en appliquant les « prescriptions magistrales » des praticiens. Cette part de leur activité a pratiquement disparu du fait de la multiplication des « spécialités », mélanges préparés industriellement et vendus tout prêts au pharmacien. Quelques rares préparations magistrales restent prescrites et réalisées par le préparateur en pharmacie.

Le pharmacien est aidé dans son travail par des auxiliaires, et souvent par un étudiant en pharmacie en stage. Un auxiliaire spécialement formé est le *préparateur en pharmacie*, dont le rôle principal est de préparer les médicaments dans l'officine. L'évolution industrielle de la pharmacie réduit fortement son utilité. Une officine dépassant un chiffre d'affaires déterminé doit disposer d'un pharmacien assistant. Le nombre des assistants obligatoires s'élève par tranches avec l'augmentation du chiffre d'affaires.

L'une des caractéristiques du monde de la santé est la multiplication des métiers *spécialisés*. Essayons d'en décrire les principaux.

Les médecins spécialistes

La médecine a pris un tel essor qu'il est impossible à un seul médecin d'en avoir une connaissance approfondie dans toute son étendue. D'où la multiplication des spécialités. L'agrément d'un exercice médical fondé sur une bonne connaissance d'un domaine restreint, mais aussi des conditions de pratique souvent moins astreignantes poussent une proportion toujours plus grande de médecins à se spécialiser. Aujourd'hui, dans la population médicale française, près de 40 % sont des spécialistes.

Ces praticiens ont poursuivi des études spécialisées plusieurs années au-delà de leur diplôme de docteur en médecine, et passé de difficiles examens. Ils ont donc au départ une compétence affirmée dans leur domaine; de plus, en ne voyant qu'un certain type de malades, ils la renforcent par une expérience focalisée. Les spécialistes se différencient par appareils et par procédés de diagnostic ou de soins. On peut mettre à part les pédiatres et les gériatres qui sont en fait des généralistes des enfants et des vieillards. Une liste en est représentée au *tableau* II. C'est la liste des spécialités reconnues par l'ordre des médecins. Dans les grands centres hospitaliers, on observe un raffinement plus grand encore dans la spécialisation; limitée à un ou quelques rares établissements, c'est l'affaire d'une personne ou d'un petit groupe particulier, qui a gagné une compétence très étroite, souvent à l'occasion de travaux de recherche.

Lorsqu'un malade pose un problème délicat, plusieurs spécialistes différents doivent être consultés. Cela n'est réellement accessible qu'à l'hôpital ou dans de rares polycliniques dont le but est justement de réunir en une seule consultation tout un aréopage de spécialistes. En fait, le médecin traitant qui a pris en charge le malade joue alors le rôle de chef d'orchestre et fait la synthèse des explorations et des avis spécialisés.

Parmi les spécialistes, une catégorie tient une place à part dans l'imagination du public : c'est le *chirurgien*. Le fait qu'il taille dans l'organisme lui donne un prestige inégalé. De moins en moins, la chirurgie est une approche primitive de destruction (l'ablation de ce qui est détérioré); elle est de plus en plus souvent une chirurgie de suppléance (prothèses) et de réparation. Elle n'est plus isolée de la médecine. Elle s'appuie sur des techniques médicales élaborées (anesthésie, réanimation, médication) et vient souvent à l'appui d'une autre technique médicale (irradiation par exemple). Longtemps encore, le chirurgien devra réparer minutieusement ce qu'aucune technique médicamenteuse ne pourra atteindre.

▶ *Tableau II : les spécialités médicales exclusives.*

Tableau II
Les spécialités médicales exclusives

Les médecins qui ont accepté de limiter leur exercice en clientèle à une des spécialités reconnues suivantes sont considérés comme spécialistes exclusifs :

Anatomie pathologique (discipline de laboratoire)

Anesthésie-réanimation

Biologie médicale (laboratoire)

Cardiologie (cœur et vaisseaux)

Chirurgie générale

Dermatologie (peau)

Gynécologie-obstétrique
(maladie des femmes et accouchements)

Maladies de l'appareil digestif

Médecine interne (consultant de médecine)

Neuro-chirurgie

Ophtalmologie (œil)

Otorhinolaryngologie (nez, gorge, oreilles)

Pédiatrie (enfants)

Pneumologie (poumons et voies respiratoires)

Psychiatrie (maladies mentales)

Les auxiliaires de l'équipe médicale

Un nombre notable de métiers regroupe autour du médecin des compétences complémentaires. Ils diffèrent selon les spécialités.

A l'hôpital, les infirmières sont secondées par des *aides-soignantes*, formées en quelques mois dans les services médicaux, dont le rôle est d'effectuer les soins les plus simples et sans risques. Des auxiliaires contribuent aux multiples besognes nécessaires autour du malade, sans intervenir dans les soins. Les *secrétaires médicales* remplissent le rôle de secrétaire en y ajoutant une connaissance des termes médicaux et du comportement vis-à-vis des malades (accueil, prise de renseignements, relations téléphoniques, etc.). En chirurgie, les soins en salle d'opération sont faits par des personnels spécialisés, les *infirmières de salle d'opération*. Les médecins anesthésistes sont secondés par des *aides-anesthésistes*. En pédiatrie, des infirmières spécialisées interviennent en tant que *puéricultrices*. Dans les services de nutrition et de maladies digestives, des *diététiciennes* s'occupent du régime et de l'équilibre alimentaire des malades. En radiologie, les *aides-radiologistes* placent les malades en bonne position, préparent et prennent les clichés, seuls ou le plus souvent avec le radiologiste dont le rôle est de les interpréter ou de pratiquer les explorations peu courantes, dangereuses ou complexes. En ophtalmologie, des *aides-orthoptistes* rééduquent les yeux des enfants atteints de strabisme. En O. R. L., des *orthophonistes* rééduquent la parole. En exploration fonctionnelle et dans divers services très spécialisés, des *biotechniciens* surveillent et utilisent des appareils complexes d'exploration et de soins. En obstétrique, un rôle essentiel est rempli par les *sages-femmes* ; ce sont des praticiens d'un bon niveau de compétence acquis en trois ans après le baccalauréat. Leur rôle est de surveiller et d'amener à terme les accouchements normaux, de surveiller la mère dans les suites de couches et donner les premiers soins aux nouveau-nés. Autrefois, les sages-femmes avaient la responsabilité de la plupart des accouchements dans les campagnes et les quartiers modestes des villes. De plus en plus, les accouchements sont faits sous surveillance médicale. Aujourd'hui, la responsabilité des sages-femmes est plus modeste, car la sécurité accrue des accouchements implique une surveillance par l'accoucheur et la proximité du réanimateur et du chirurgien.

Dans les laboratoires, dirigés par des médecins ou des pharmaciens, interviennent des personnels techniques formés en deux ans après le baccalauréat, les *techniciens supérieurs*, ou après le B. E. P. C., les *laborantins*. Ils sont secondés par les *aides de laboratoires* qui effectuent d'importantes besognes de préparation et d'entretien, et appliquent des techniques routinières.

De très nombreuses activités spécifiques se rencontrent dans certains services, et peuvent être citées : *cardio-pompistes* dans les salles de cathétérisme cardiaque, *électrocardiographistes* en cardiologie, *optométriste* en ophtalmologie, *psychologues* de santé, etc. Dans les services de psychiatrie, des infirmières spécialisées s'occupent des malades et secondent les praticiens : ce sont les *infirmières de secteur psychiatrique*.

Les professions paramédicales et assimilées

De multiples professions paramédicales occupent une place particulière dans le système de santé.

● *Le dentiste :* il exerce le plus généralement en pratique libérale. Ils sont de l'ordre de 25 000, soit 48 pour 100 000 habitants. Ils sont formés en cinq ans après le baccalauréat à soigner les dents et les gencives, à l'exclusion des importantes interventions maxillo-faciales qui sont du ressort d'un médecin spécialisé : le *stomatologiste*. Ils s'occupent des soins et de la prévention de maladies de la denture, et posent des prothèses dentaires lorsqu'une partie de la denture a été perdue ou a dû être sacrifiée.

● *Le prothésiste de laboratoire dentaire :* il fabrique les prothèses qui seront appliquées par le dentiste à partir de l'empreinte prise par ce dernier. Il a une formation technique couronnée par un C. A. P.

● *La sage-femme :* elle peut aussi exercer en pratique libérale, isolément ou sous la responsabilité d'un médecin.

● *Le prothésiste orthopédiste bandagiste :* il a pour fonction de préparer des prothèses externes, de les essayer et de les adapter. Il s'agit d'une profession très contrôlée, et insuffisamment pourvue.

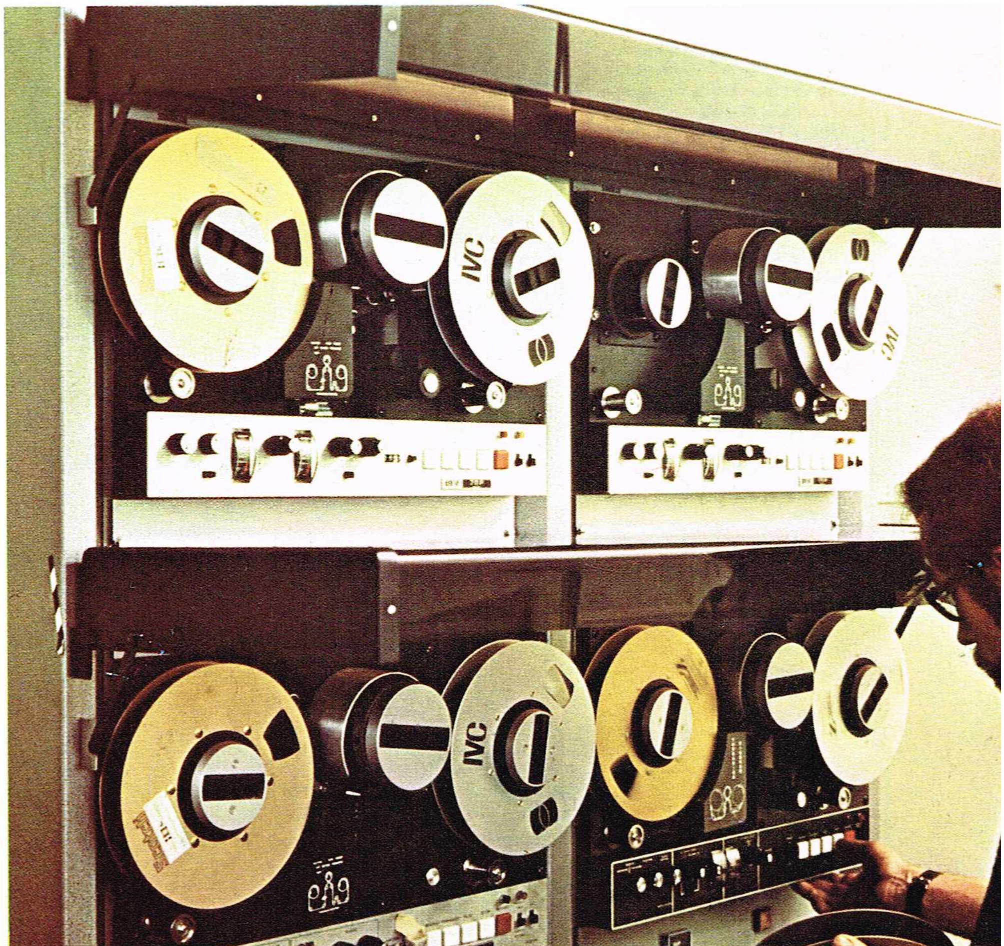

Assistance publique de Paris

▲ ***Si l'on veut reproduire le déroulement d'une exploration radiologique qui donne lieu à des visages qui se modifient rapidement, il suffit de l'enregistrer au magnétoscope; plus tard, ces bandes magnétiques permettent de reproduire les images enregistrées sur un écran de télévision (hôpital Saint-Antoine, Assistance publique de Paris).***

● *L'opticien :* il est un spécialiste qui adapte les lunettes à la vue des malades sur les prescriptions de l'ophtalmologiste.

● *L'audioprothésiste :* il adapte les prothèses auditives selon les indications de l'O. R. L. après étude de l'audiogramme.

● *La pédicure :* elle s'occupe des soins des pieds.

Les métiers de l'industrie de la santé

De multiples professions sont liées à l'industrie du médicament et des équipements médicaux. Citons :

● *Le pharmacien industriel* dont le rôle est de veiller à la qualité et à la non-toxicité de médicaments fabriqués dans l'industrie pharmaceutique. Dans chaque société, un pharmacien est personnellement responsable des médicaments vendus. Quelques pharmaciens grossistes stockent les médicaments et les délivrent pour distribution aux pharmaciens d'officine.

● *Le conseiller médical* est un médecin qui assure la liaison entre l'industrie pharmaceutique et le corps médical.

● *Le visiteur médical*, après une brève formation, vient présenter aux praticiens les médicaments fabriqués par les firmes et apporter des informations souhaitées à leur sujet.

● *Les experts* contrôlent les médicaments nouveaux au cours des essais successifs, analytiques, pharmacologiques et cliniques.

Les métiers non soignants de l'hôpital

En plus de l'équipe de soins, l'hôpital utilise le travail de très nombreux métiers. Nous ne citerons que les plus caractéristiques.

● *Le corps de direction :* il est formé du ou des directeurs, de l'économe, et des quelques autres responsables administratifs. Les directeurs sont des gestionnaires formés soit directement, soit après plusieurs années de participation à la gestion d'hôpitaux; de plus en plus, ils sont formés à l'École nationale de la santé publique (Rennes), en trois ans, après une licence de droit ou de

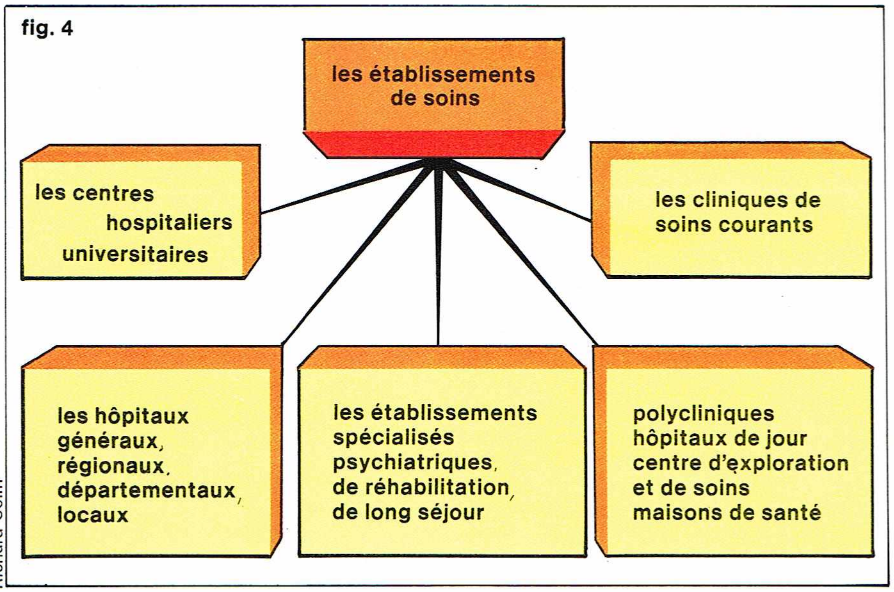

Richard Colin

▲ *Figure 4; anatomie du système de santé : les établissements de soins.*

sciences économiques. La hiérarchie des directeurs dépend de la taille de l'établissement qu'ils dirigent. Dans les plus grands d'entre eux, les centres hospitaliers régionaux, un directeur général a sous son autorité plusieurs directeurs d'établissements.

- *Le corps technique :* le nombre des bâtiments et la variété des équipements d'un hôpital exigent une équipe étoffée d'entretien, de surveillance et de dépannage. Le plus souvent, des travaux ininterrompus de construction, de remise à neuf et d'entretien nécessitent la présence à l'hôpital d'une équipe permanente de tous les corps d'État. Selon son importance, cette équipe est dirigée par un ingénieur hospitalier ou un adjoint technique. Dans les grands établissements, plusieurs ingénieurs interviennent en permanence; les uns tournés vers les travaux (génie civil), les autres vers les installations et les appareils médicaux (génie biomédical).
- *Le pharmacien* de l'hôpital a la responsabilité des médicaments distribués et administrés aux malades hospitalisés.

Des services aussi divers que la blanchisserie, le garage, les cuisines, l'informatique prennent dans certains hôpitaux une telle importance que des spécialistes de ces fonctions méritent d'être formés spécialement pour servir l'hôpital.

▼ *La salle d'opération et de réanimation impressionne par la solennité du cadre, mais aussi par le nombre et la complexité des appareils qui assurent l'efficacité et la sécurité de l'acte opératoire (hôpital Henri-Mondor, Créteil, Assistance publique de Paris).*

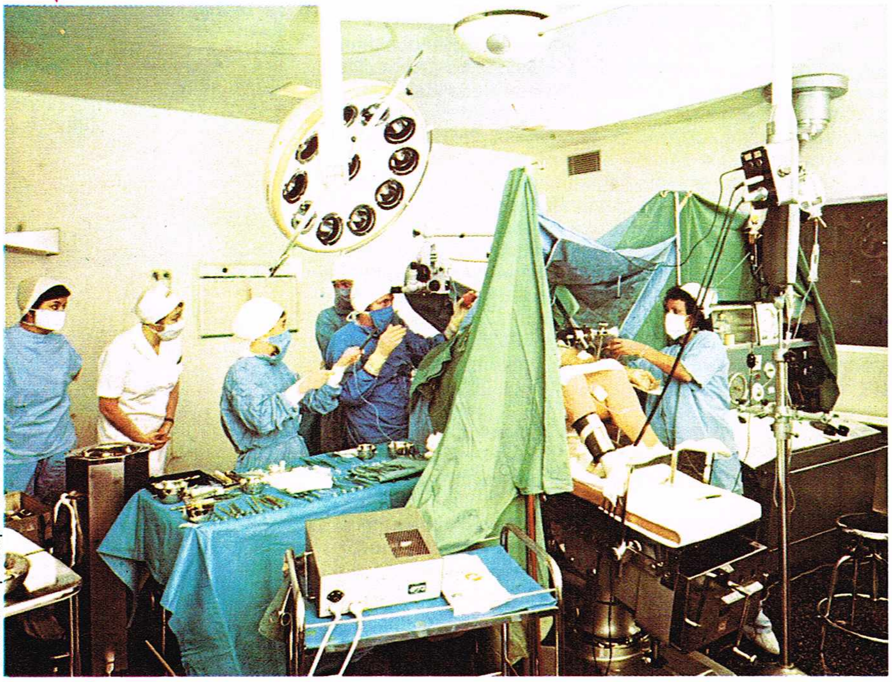

Assistance publique de Paris

Les établissements de soins - L'hôpital (*fig.* 4)

C'est un autre pivot du système de santé. Son importance grandit au fur et à mesure que la médecine devient plus complexe et plus technique. La diversité des établissements hospitaliers est telle qu'un grand centre hospitalier et universitaire (C. H. U.) ne ressemble guère à un hôpital rural, qui est fort différent d'un hôpital général de circonscription et d'une clinique spécialisée.

Ce qui caractérise l'hôpital (ou la clinique), c'est l'existence d'un secteur de soins médicaux avec hébergement. Le malade est logé dans l'établissement où il est soigné. Cette particularité le distingue de la polyclinique ou de la maison de santé. Cette coexistence donne une importance marquée à l'hôtellerie. En même temps qu'un organisme de soins, l'hôpital est un ensemble qui nourrit, héberge et entretient un nombre parfois très grand de pensionnaires. D'où l'importance de la blanchisserie, de la cuisine et de l'entretien des locaux d'hébergement.

Le système français d'hospitalisation comprend : un *secteur public* formé d'hôpitaux doués d'une certaine autonomie et rattachés généralement à une commune, parfois à plusieurs communes ou à un département; un *secteur privé* formé, pour une part, d'établissements à but non lucratif (centres anticancéreux; hôpitaux de communautés religieuses ou de mutuelles); pour une autre part, d'établissements à but lucratif (cliniques privées).

Parmi les hôpitaux et au sein des mêmes établissements, on trouve des hôpitaux ou services dits « actifs » où se pratiquent des soins médicaux ramassés en une brève durée (court séjour) et des services moins actifs destinés à des malades ayant une durée de séjour plus longue : convalescents en cours de rééducation (moyen séjour), malades chroniques et invalides (long séjour). Il faut mettre à part les hôpitaux et quartiers psychiatriques, qui demandent un développement particulier. En règle générale, les cliniques privées à but lucratif se spécialisent dans les soins « actifs » de courte durée.

Le **secteur public** est hiérarchisé. Il comprend un C. H. U. par région; c'est un centre d'enseignement et de soins qui regroupe un assortiment complet de services spécialisés et des unités d'enseignement et de recherche (U. E. R.) universitaires de médecine, de pharmacie, etc. Les plus importants d'entre eux sont des unités d'une très grande taille comme les Hospices civils de Lyon, l'Assistance publique de Paris (40 000 lits) ou l'Assistance publique de Marseille. Les centres hospitaliers sont des hôpitaux de grandes villes ou de villes moyennes. Établissements moins complets, ils comportent les spécialités les plus courantes. Les hôpitaux et hôpitaux-hospices de petites villes réunissent une panoplie plus modeste et répondent aux besoins courants d'hospitalisation. L'hôpital rural ne comporte qu'un service de médecine générale, et parfois une maternité.

Tous ces établissements emploient des praticiens qui exercent aussi en clientèle de ville ou en clinique. Les plus importants d'entre eux (C. H. U. et centres hospitaliers) emploient de plus en plus de praticiens à plein temps qui consacrent toute leur activité au service de l'hôpital.

En plus des services de soins, les établissements publics comprennent souvent des maisons de retraite ou des hospices de vieillards, vestige du passé.

Les *hôpitaux publics communaux* sont gérés par un conseil d'administration présidé par le maire. Ils sont placés sous la tutelle du préfet du département qui surveille la qualité du service rendu par l'hôpital, et plus encore les prix facturés par lui en fonction de la durée de séjour du malade (prix de journée).

Les *hôpitaux psychiatriques* sont issus d'une conception et d'une réglementation datant du XIX^e siècle (loi de 1838). Ils traduisaient le souci d'ordre et de sécurité publique plus que celui des soins aux malades mentaux, pour lesquels on ne pouvait pas grand-chose à cette époque. Depuis quelques années, la thérapeutique psychiatrique a brusquement évolué; elle est devenue active, parfois même curative. Du coup, l'hôpital centralisé rattaché au département a perdu de son intérêt; il est peu à peu remplacé par le *quartier psychiatrique*, service spécialisé implanté dans l'hôpital général. A ce service de soins aigus s'ajoutent des structures pour

malades ambulatoires (hôpital de jour où des malades sont soignés mais non hébergés ; ateliers protégés visant les soins par le travail et la réinsertion sociale).

Les hôpitaux psychiatriques gardent un intérêt pour héberger les malades difficiles à récupérer et pour les invalides profonds. Les psychiatres de ces établissements sont tenus de prendre en charge les malades mentaux d'un secteur géographique : c'est la *sectorisation*.

La hiérarchie hospitalière est une image du réseau hospitalier qui couvre le territoire, depuis les C. H. U., en passant par les centres hospitaliers, jusqu'aux hôpitaux plus modestes.

Entre les mailles de ce réseau qui a l'obligation de rendre un *service public*, c'est-à-dire de répondre 24 heures sur 24 aux besoins de soins de toute la population, se trouve le **secteur privé ;** il répond le plus souvent à des besoins spécialisés : cliniques de chirurgie, d'accouchement, maisons de santé psychiatrique ou de personnes âgées, centres de rééducation et de convalescence. Il existe aussi quelques hôpitaux privés généraux, qui appartiennent le plus souvent à une mutuelle (M. G. E. N.) ou à une grande entreprise (S. N. C. F.).

La dimension et l'architecture des hôpitaux et cliniques montrent aussi une large diversité de situations. Les hôpitaux ont parfois des tailles très importantes (plusieurs milliers de lits) et de nombreuses installations techniques. A l'opposé, des hôpitaux ruraux peuvent ne comprendre que quelques dizaines de lits et des moyens de soins modestes, répondant aux besoins les plus courants. L'expérience a montré les inconvénients de ces cas extrêmes. La doctrine actuelle conseille de bâtir des unités de 400 à 600 lits, 200 et 800 étant les extrêmes. Au-dessous, la rentabilité des installations techniques nécessaires est trop faible ; au-dessus, la gestion devient trop lourde, et les relations humaines perdent de leur qualité. Néanmoins, la grande majorité des cliniques à but lucratif a encore entre vingt et cent lits, et se trouve de ce fait sous-équipée. En même temps, trop de projets actuels ou récents aboutissent encore à la mise en place ou à l'agrandissement de monstres hospitaliers.

Le grand hôpital est un ensemble très organisé que l'on ne peut décrire en détail ici. Un organigramme d'hôpital est donné en exemple dans la *figure* 5.

La Sécurité sociale

Le passage de la pauvre médecine empirique d'autrefois à la puissante médecine scientifique d'aujourd'hui est une conséquence du développement des sciences et des techniques. Mais sa large diffusion, sa mise à la disposition de tous, est un effet de la *Sécurité sociale* (*fig.* 6). A quoi sert cet organisme ?

C'est un mécanisme financier pour la prise en charge des besoins de l'assuré, à certains moments de sa vie où il est mal préparé à assumer ses frais tout seul. La Sécurité sociale couvre l'*assurance maladie*, les *allocations familiales* et l'*aide aux personnes âgées*, ainsi que des risques divers, parmi lesquels il faut citer l'invalidité et les accidents du travail.

Les versements que la Sécurité sociale est amenée à faire (prestations) sont compensés par des rentrées (cotisations) qui proviennent des particuliers, et de leur employeur lorsqu'il s'agit de salariés. La part des dépenses qu'elle consacre à chacun de ces objectifs est la suivante :

Assurance maladie	34 %
Allocations familiales	15 %
Aides aux personnes âgées	39,5 %
Divers (dont accidents du travail)	11,5 %

Les sommes engagées à l'échelle nationale sont très importantes, puisqu'elles sont de l'ordre de grandeur du budget de l'État. Les cotisations versées par le salarié et son employeur représentent généralement plus du tiers du montant du salaire. Les sommes ainsi transférées des cotisants aux prestataires sont une manifestation de la solidarité entre Français bien portants et malades, actifs et inactifs (vieux et enfants), etc. Il est naturel que la Sécurité sociale veille à ce que cet argent, dont elle a la garde mais qui lui vient des cotisants, soit dépensé à bon escient. A son tour, elle est supervisée par les Pouvoirs publics qui veillent à ce qu'un équilibre soit maintenu entre recettes et dépenses, et à ce que la mission qui lui a été imposée soit efficacement remplie.

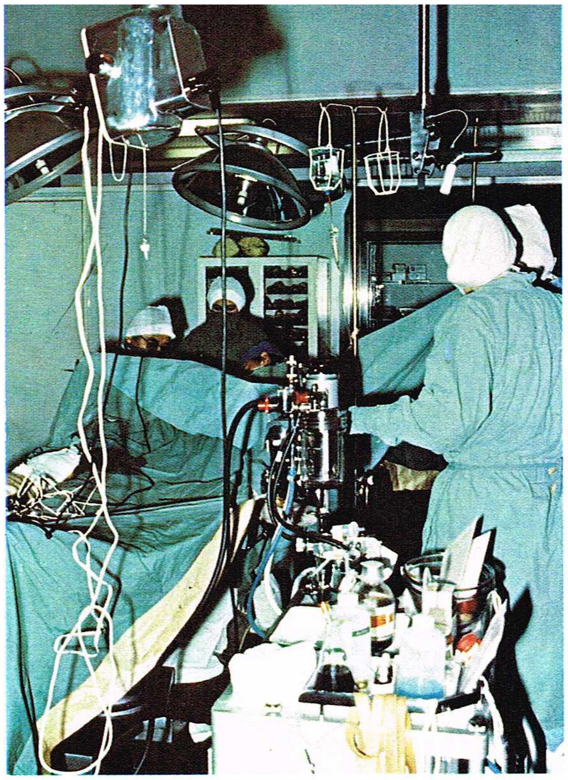

Assistance publique de Paris

◀ *Chaque intervention demande une multitude de mesures préopératoires (pression artérielle, gaz du sang, rythme cardiaque et respiratoire, etc.), et la perfusion à l'opéré de drogues multiples. C'est à ce prix que des interventions impossibles hier (opération à cœur ouvert, par exemple) se font tous les jours avec succès (hôpital Rothschild, Assistance publique de Paris).*

▼ *Hôpital Saint-Antoine : la maternité. Jusqu'à tout récemment, le séjour à l'hôpital signifiait inconfort et promiscuité. Aujourd'hui, un effort important est fait pour « humaniser » l'hôpital. Figure 5 : organigramme administratif d'un centre hospitalier régional.*

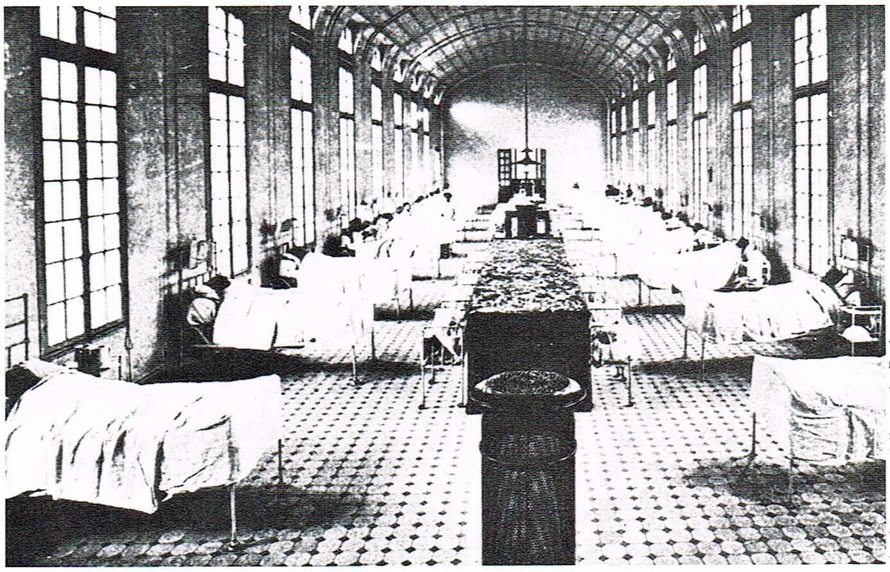

Assistance publique de Paris

fig. 5

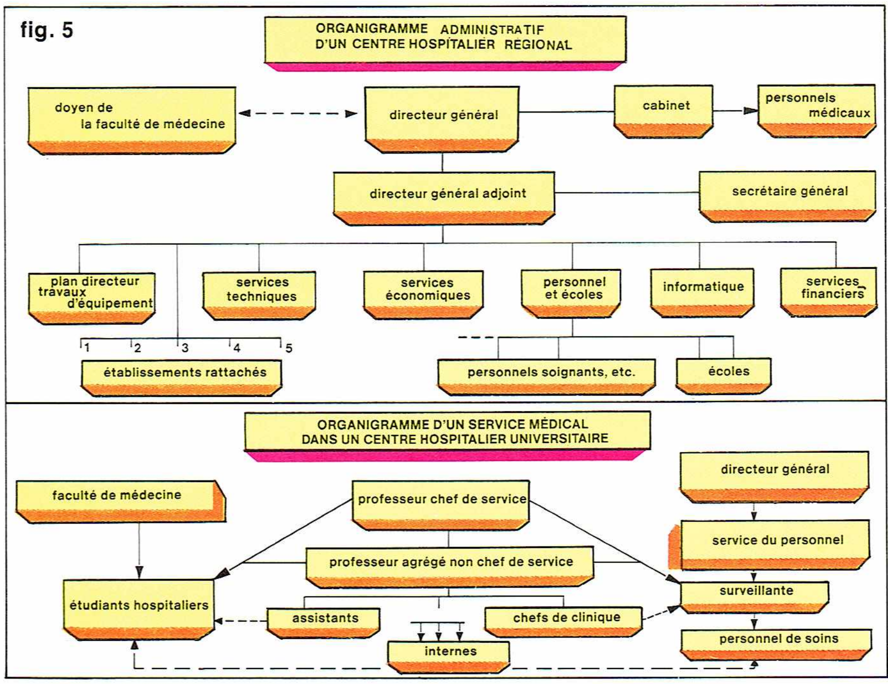

Richard Colin

fig. 6

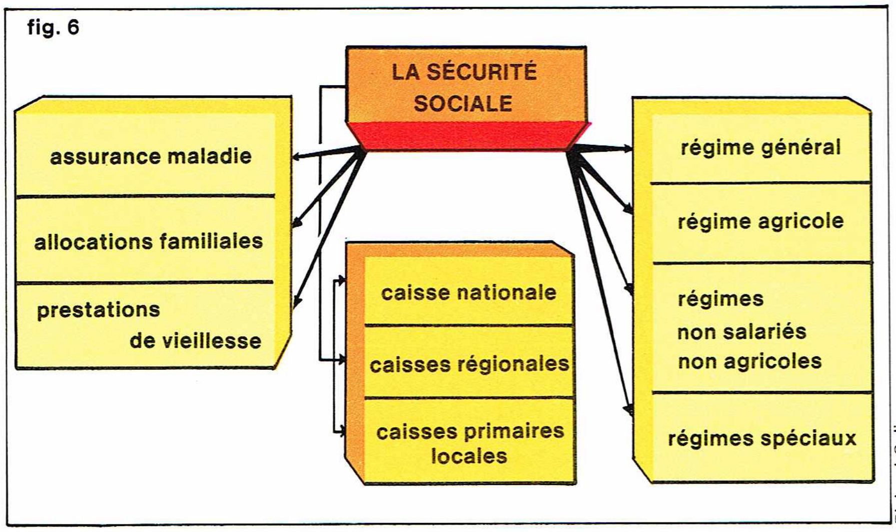

Richard Colin

fig. 7

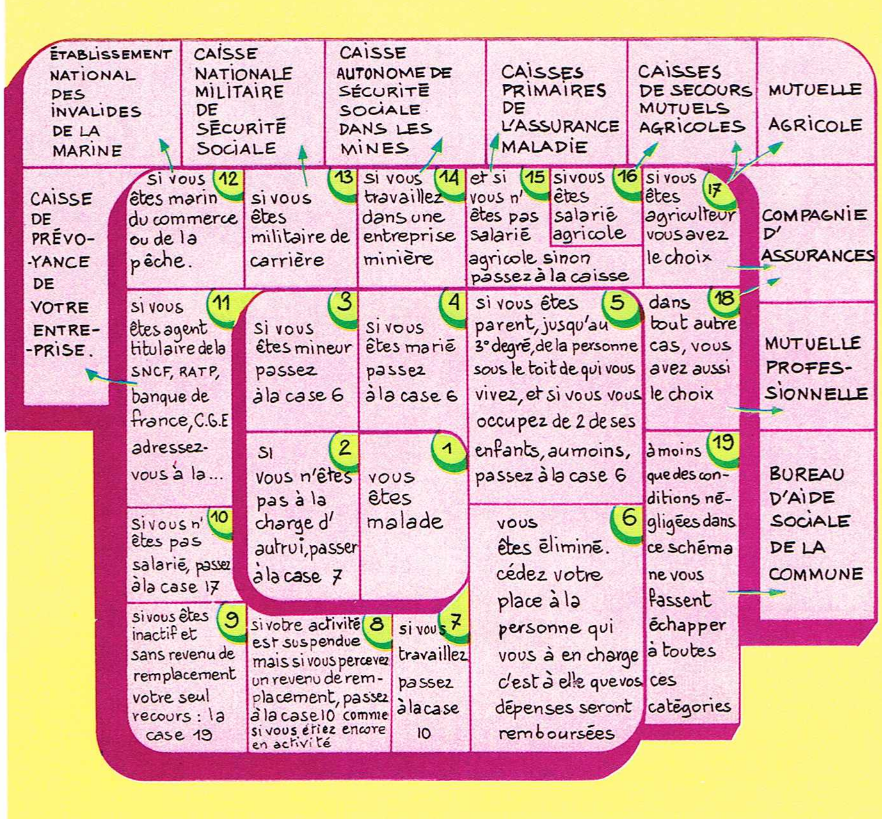

Richard Colin

▲ ***Figure 6 ; anatomie du système de santé : la Sécurité sociale. Figure 7 : le jeu de l'oie du remboursement de la Sécurité sociale (extrait de l'*****Avenir de la Sécurité sociale** ***de Paul Hermand, « collection Société », Éditions du Seuil).***

La Sécurité sociale est en fait une mosaïque de *régimes* plus ou moins importants autour d'une pièce maîtresse : le *régime général* des travailleurs salariés de l'industrie et du commerce. Ce régime compte 17 millions d'assurés et protège plus de 35 millions de personnes. Il s'y ajoute des régimes plus récents ; exploitants et salariés agricoles, assurés non salariés et non agricoles, et un éparpillement de régimes spécialisés qui regroupent les assurés par entreprises (S. N. C. F., R. A. T. P.), par statuts (fonctionnaires) ou par professions (mariniers, mineurs, clercs de notaires) [*fig.* 7].

Chaque régime a ses caisses, ses règles, ses problèmes financiers. Pour l'assurance maladie, le régime général a une caisse nationale, plusieurs caisses régionales et un grand nombre de caisses primaires locales. Heureusement, une harmonisation progressive se fait entre les règles des différents régimes, mais des variations importantes persistent aussi bien pour le niveau des cotisations que pour l'étendue de la prise en charge. Une péréquation entre les régimes bénéficiaires et les régimes déficitaires est opérée par l'État. Depuis peu, la situation précaire de la plupart des régimes les conduit à demander de plus en plus instamment une *prise en charge* par l'État d'une partie de leurs dépenses.

Chaque régime a ses règles pour l'administration des caisses, dont les cotisants assurent la gestion. Dans le « régime général », les caisses sont administrées à part égale par les représentants désignés des salariés (syndicats) et des employeurs. Cet organisme est chargé de collecter régulièrement des fonds et de les transférer pour répondre à des besoins « sociaux ».

La généralisation à toute la population de la prise en charge des frais de maladie crée entre les malades et les bien portants du pays une solidarité dont les facettes sont multiples. Les moyens dont dispose le système est tributaire des contributions de *toute* la collectivité, puisque les cotisations sont fondées sur les salaires ou l'activité professionnelle des assurés et payées par les travailleurs et les entreprises. La masse ainsi constituée profite à *tous* les assurés, c'est-à-dire pratiquement à *tous* les Français. Elle n'est pas illimitée, et son volume est assez bien connu. Ainsi, il apparaît que les efforts financiers que l'on peut faire pour développer certains moyens ou aider certains malades ne sont plus disponibles pour d'autres moyens ou d'autres malades. Ce mécanisme de pompe aspirante et foulante fait aujourd'hui de la Sécurité sociale le cœur du système de santé, qui irrigue toutes les ramifications de ses canaux financiers.

Le paiement des dépenses et des services rendus à l'occasion de la maladie et des soins par le canal de l'assurance maladie de la Sécurité sociale soutient l'activité des hôpitaux et des professions de la santé. La possibilité offerte par la Sécurité sociale aux personnes modestes ou démunies de se faire soigner contribue largement à la santé générale de la population, mais favorise aussi un développement marqué des professions de santé et des moyens de soins. Elle contribue donc *directement* et *indirectement* à l'augmentation de la durée de vie, à la baisse de la mortalité infantile, et à la réduction des handicaps physiques dont souffre la population.

L'industrie des biens médicaux

Parmi les moyens de soins, les *médicaments* d'origine chimique et biologique ont pris une part dominante. La production industrielle a transformé ce secteur. Onze mille spécialités pharmaceutiques sont fabriquées par environ quatre cents producteurs. En fait, ce secteur comprend un nombre limité de grandes sociétés, dont plusieurs appartiennent à des groupes multinationaux, et une poussière de firmes petites et moyennes.

Dans les grandes sociétés, la *production* est fortement contrôlée et automatisée. Elle est soutenue par une recherche active et un réseau publicitaire et commercial très dense, tourné vers les professions de la santé, et d'abord vers les médecins.

Pour la réussite commerciale de leurs produits, les fabricants dépendent de l'acceptation par la Sécurité sociale de leur remboursement aux malades. Aujourd'hui, chaque nouveau produit n'est accepté sur la liste que si le dossier apporte la preuve de sa nouveauté, ou encore de son prix de vente plus bas que ceux des concurrents. Il faut noter qu'un grand nombre de produits non remboursables, dits de « grand public », ne subissent pas cette contrainte. Ils sont seuls l'objet d'une publicité directe auprès du public (métro, revues, radio, etc.).

L'industrie pharmaceutique développe à la fois des produits obtenus par synthèse chimique et des produits extraits de substances naturelles : plantes, organes d'animaux et micro-organismes de fermentation. Cette dernière source, née avec les antibiotiques, prend actuellement une très grande extension.

Une fois préparés, contrôlés, conditionnés et stockés, les produits sont distribués par des *grossistes*, dont la mission est de livrer à n'importe quel *détaillant* (officine) dans les 24 heures n'importe quel produit pharmaceutique reconnu et autorisé en France. Le volume des médicaments vendus par ces grossistes est très important, et leur marge bénéficiaire très faible. Ils fonctionnent efficacement grâce à une automatisation poussée de la manutention, un réseau de transport et d'information constamment per-

fectionné. De plus en plus, les pharmacies françaises étendent leur compétence à la vente de produits diététiques et d'hygiène. Elles ne sont pas autorisées à ouvrir leur officine à des produits divers comme c'est le cas des « drugstores » américains. A l'inverse, il est obligatoire d'avoir le diplôme de pharmacien et de gérer une officine pour vendre des médicaments.

Une autre branche de l'industrie fabrique la vaste catégorie des *matériels médicaux*, qui regroupe d'innombrables objets, depuis les équipements lourds et très coûteux tels que les accélérateurs linéaires ou les scanographes (scanners) jusqu'aux prothèses auditives ou montures de lunettes, en passant par les instruments d'analyse, les accessoires de cabinet de consultation, le matériel de dentisterie ou des appareils de dialyse rénale. Certains de ces biens ne peuvent être efficacement mis au point que par des firmes très importantes, comme c'est le cas de la radiologie et du nucléaire à usage médical. D'autres, au contraire, se prêtent à la multiplication de petites entreprises : c'est le cas des accessoires et de tout le matériel d'hygiène du cabinet médical. De plus en plus, les firmes qui emportent les marchés sont celles qui regroupent, fusionnent et standardisent leur fabrication avant de l'automatiser selon des procédés sévèrement contrôlés. La sécurité du malade est à ce prix.

La réglementation de la santé

L'activité de soins a toujours dérivé de règles morales et obéi à un mouvement généreux vers autrui. La charité a longtemps poussé médecins, religieuses et bourgeois à donner bénévolement leur temps pour soigner et héberger les pauvres. Si la science de guérir a pris une valeur marchande grâce à l'efficacité de la médecine et à la solvabilité du malade soutenu par la Sécurité sociale, cette règle naturelle s'impose encore à tous ceux qui font profession de soigner. Le serment d'Hippocrate, prêté par le médecin lors de la soutenance de sa thèse, rappelle quelques principes auxquels le jeune médecin promet symboliquement de se soumettre. Des règles déontologiques édictées par l'ordre des médecins s'imposent en outre au praticien pour son comportement vis-à-vis du malade, de ses confrères et du monde extérieur. Le devoir d'assistance à son semblable en danger, le devoir de tact et de mesure dans la prescription et les honoraires, celui d'agir avec prudence et compétence, et celui du secret professionnel s'imposent à tous les praticiens.

Il n'est pas question d'exercer aujourd'hui une profession de la santé sans des *études* systématiques couronnées par un *diplôme*. Cette compétence de base est nécessaire à la sécurité des personnes soignées. Bien souvent, elle doit être complétée au fil des ans par une *expérience* rendue d'autant plus importante qu'à la diversité des situations naturelles s'ajoutent celles créées secondairement par l'effet de la thérapeutique.

D'autres règles s'imposent au médecin ou au personnel de soins du fait qu'il accepte de soigner des malades qui cotisent au système d'assurance maladie de la Sécurité sociale. En particulier, les médecins ont signé une *convention* avec la Caisse nationale d'assurance maladie qui les engage à suivre certaines règles administratives qu'impose le remboursement des malades par les caisses. D'autres obligations sont liées aux nécessités judiciaires et d'état civil : effectuer certaines expertises, délivrer des certificats de naissance et de décès. D'autres découlent des réglementations de la santé publique et sont sous le contrôle du ministère de la Santé. C'est le cas des examens de médecine préventive ou des vaccinations, par exemple. Pour une part, ces dernières sont pratiquées dans des dispensaires, des centres spécialisés, ou dans des centres de protection maternelle et infantile (P. M. I.).

De plus en plus, les membres des professions de santé consacrent tout ou partie de leur activité à une institution ou un organisme dont ils doivent suivre les règles internes : hôpitaux, dispensaires, entreprises, etc. Parfois les règles déontologiques sont en conflit avec d'autres règles, comme celles de l'entreprise qui les emploie. Les médecins connaissent ces conflits, par exemple en matière de secret professionnel, dans la médecine du travail ou lors des expertises judiciaires. Enfin, le réseau de santé, dans sa complexité, a de multiples contraintes internes de fonctionnement et d'organisation ; il est réglementé par un très grand nombre de textes, et il met à contribution un nombre très important de personnels divers.

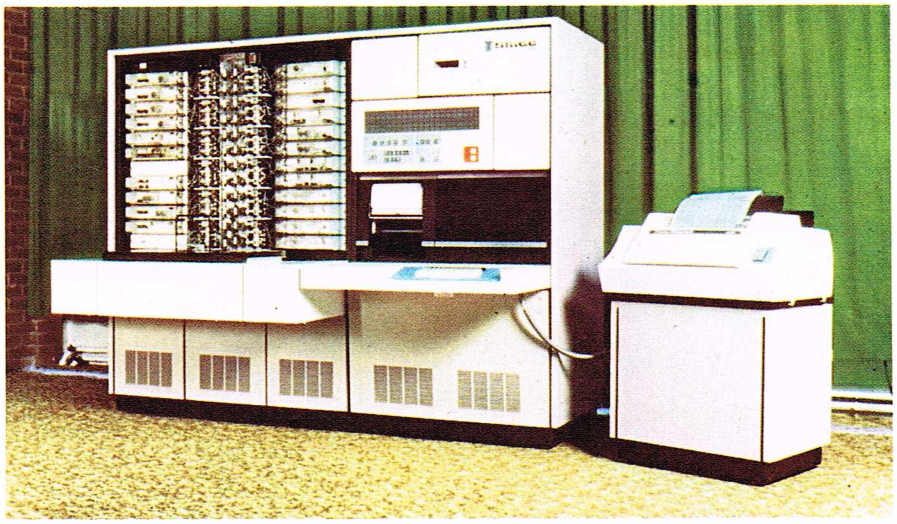

Technicon France

▲ ***Un appareil de dosage automatique permettant de mesurer à la fois 12 ou 24 paramètres du sang (sur plusieurs dizaines d'échantillons par heure) est un robot d'un coût élevé, entièrement compact, que l'on trouve dans les grands hôpitaux modernes. Couplé avec un ordinateur, il peut éclairer au fur et à mesure les médecins pour les soins les plus élaborés (Technicon France).***

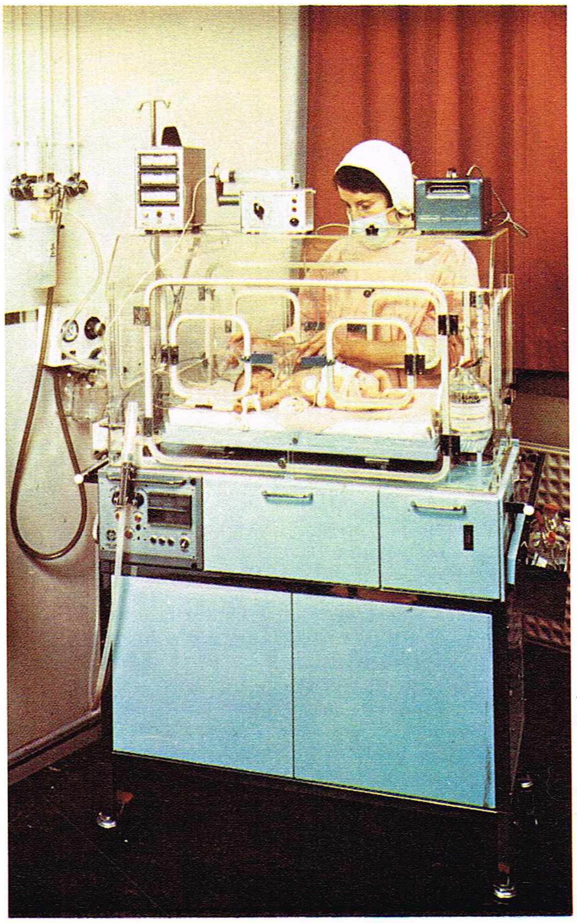

Assistance publique de Paris

◀ ***Les soins aux prématurés demandent d'infinies précautions. Ils se font en couveuse dont la température est contrôlée et qui met cet organisme fragile à l'abri des contaminations (hôpital Antoine-Béclère, Assistance publique de Paris).***

Plusieurs organismes veillent au respect de ces règles, au fonctionnement harmonieux du système, à la défense des différentes catégories de personnel. Il faut d'abord citer le *ministère de la Santé*. Il définit et fait appliquer la politique de santé, rédige les textes d'application des lois votées par le Parlement sur la santé. Il assure la tutelle de la Sécurité sociale (depuis le 22 avril 1977 : 2e gouvernement Barre). Parfois cette tutelle est au contraire confiée au ministère du Travail. Les grandes directions du ministère de la Santé sont actuellement une Direction générale de la santé, une Direction des hôpitaux, une Direction de l'aide sociale, une Direction de la Sécurité sociale.

En dehors de ses services parisiens, le ministère dispose de services extérieurs : les directions départementales et régionales de l'action sanitaire et sociale. Elles sont placées sous le pouvoir de coordination du préfet. Elles veillent à l'application locale des directives du ministère,

Ministère de la Santé

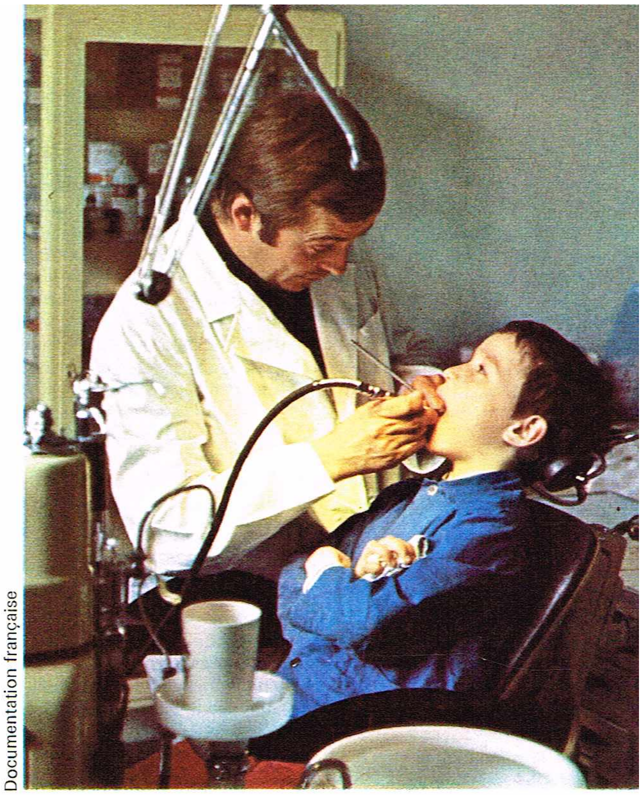
Documentation française

▲▶ La surveillance systématique des populations permet de soigner des maladies avant que leur évolution les ait aggravées. Elle demande l'examen général des enfants et des adultes (ci-dessus, P.M.I. de Clamart, Caisse régionale d'assurance maladie) ; des examens spécialisés tels que celui de la bouche et des dents (à droite, aérium de Mélèzes) ; des explorations biologiques faites en série (ci-contre, Caisse primaire d'assurance maladie de Saint-Brieuc).

Documentation française

et traitent de tous les problèmes administratifs de santé qui se posent à leur niveau.

Les *caisses d'assurance maladie* ont leur propre organisation à l'échelle nationale, régionale et locale; elles sont aussi en relation avec un service spécialisé de la préfecture.

Plusieurs professions de la santé élisent des représentants à une instance ordinale qui a la charge de défendre les règles et les intérêts moraux de la profession : l'*ordre des médecins,* celui des *pharmaciens,* celui des *dentistes.* Ils siègent sur le plan national, régional ou départemental. Des *syndicats* sont créés pour défendre les intérêts matériels des professions. Les procédures arbitrales de fixation des revenus et des honoraires leur ont donné une importance accrue. Il en est de même de la définition des statuts des personnels salariés par convention collective. Les *syndicats* professionnels se sont unis en *fédérations,* puis en *intersyndicats* pour mieux faire valoir les droits de leurs adhérents. L'un des aspects importants de l'action des syndicats est d'obtenir des caisses d'assurance maladie un niveau suffisant de remboursement des prestations payées par le malade, car cela conditionne le niveau d'honoraires que ces derniers peuvent eux-mêmes payer aux membres des professions de la santé exerçant en pratique libérale.

A l'échelle internationale, une instance favorise une meilleure défense de la santé des populations : c'est l'*Organisation Mondiale de la Santé* (O. M. S.), émanation de l'Organisation des Nations unies. Son effort porte surtout sur les pays pauvres où la santé de la population est souvent déficiente. Elle veille aussi à l'harmonisation des systèmes de santé des différents pays, et favorise les actions qui permettent de les rendre plus efficaces. La *Communauté européenne* (Europe des Neuf) compare les actions et les niveaux de santé des pays membres, et agit en faveur de la libre circulation des membres des professions de la santé. En principe, depuis le 1er janvier 1977 tout médecin d'un pays de la Communauté est libre de s'installer et d'exercer son métier dans tous ses autres pays.

La physiologie du système de santé

Les missions

Cet ensemble de structures, de moyens et de personnes a mission d'aider la population dans trois circonstances principales :

— en *prévenant* la survenue de maladie chez des personnes en bonne santé, ou l'aggravation de maladies tôt dépistées ;

— en *diagnostiquant* et *soignant* des maladies déclarées ;

— en favorisant la *réhabilitation* (et la réinsertion sociale) de malades et d'invalides.

La prévention

La santé est un état fragile, et de plus imparfaitement défini. Elle se traduit au présent par l'absence de souffrance ou autres signes contraignants, inquiétants ou source d'handicaps ; au futur, par une persistance de l'état actuel ou un épanouissement attendu.

Un certain nombre de détériorations de la santé peuvent être prévenues par des précautions appropriées ou une prévention active. Par exemple, la prévention des infections par vaccination, celle de la perte des dents par les soins apportés aux dents de lait, celle de certaines obésités de la mère de famille par un régime durant la grossesse. Les spécialistes distinguent cette *prévention primaire,* appliquée avant la survenue de l'affection redoutée, de la *prévention secondaire* qui consiste à dépister très tôt les maladies pour en arrêter précocement le développement. Par exemple, le dépistage de la tuberculose avant son extension, du diabète avant ses complications. Des procédés de *prévention de masse* ont été développés. Ils sont souvent d'une grande efficacité et peu coûteux pour la prévention primaire, mais s'appliquent seulement à un nombre limité de maladies. Au contraire, la prévention secondaire est plus coûteuse, car elle demande un examen approfondi cas par cas, et de nombreuses explorations « armées » (radiodiagnostic, dosages de laboratoire, etc.). Elle est justifiée si la fréquence de la maladie est assez grande ou les conséquences assez fâcheuses pour mériter un tel effort coûteux. Les multiples examens de dépistage faits en une fois chez un même sujet peuvent être moins coûteux, mais surtout moins contraignants pour l'intéressé. C'est le « check-up », qui a un succès croissant en raison de son intérêt, surtout après 50 ans.

La *prévention primaire* est faite en partie par le médecin de famille, en partie par des organismes de prévention qui interviennent aux différents âges de la vie : P.M.I. pour

les femmes enceintes, les nourrissons et les enfants avant l'âge de la scolarité, puis médecine scolaire, universitaire, militaire, médecine du travail, dispensaires de médecine sociale. Elle résulte d'obligations réglementaires, et se trouve prise en charge par la collectivité ou l'entreprise.

Le *dépistage* est fait par le médecin ou le spécialiste, à l'occasion d'examens systématiques tels que l'examen d'embauche, l'examen prénuptial, l'examen des conducteurs âgés, etc. Il est aussi pratiqué dans des centres spécialisés de dépistage.

Il est naturel de souhaiter éviter les maladies ou les accidents plutôt que de les guérir après coup. Il faut savoir toutefois que le domaine de la prévention est relativement limité, qu'il ne dépend qu'en faible part du réseau de santé, et qu'il se heurte à une résistance psychologique de la population, qui n'aime généralement pas subir des examens ou des manipulations inquiétantes ou douloureuses avant d'avoir ressenti un signe alarmant. Il existe même des ligues contre des vaccinations dont l'utilité et l'innocuité sont prouvées de longue date. Seule une réglementation contraignante jointe à une propagande continue permet de maintenir une pression de prévention efficace. C'est pourquoi, dans certains pays, cet effort va plus loin et s'efforce, pour le bien de la population, d'introduire la nécessité de la prévention parmi les règles de l'éthique sociale.

Le succès majeur de la *prévention individuelle* est la réduction massive des maladies infectieuses, source de grandes épidémies telles que la variole, la fièvre jaune, le typhus; ou de maladies souvent mortelles ou invalidantes pour le sujet atteint telles que le tétanos ou la poliomyélite. Une partie des effets de la prévention tient à l'*hygiène de la population*, à son *éducation sanitaire*, qui doit être toujours reprise, car elle n'est pas facilement acceptée (propreté corporelle, dents brossées, régime équilibré, exercice physique régulier et mesuré, abstention de toxiques tels que l'alcool et le tabac). Mais il faut insister sur les *mesures collectives :* distribution d'eau potable, évacuation des résidus, réglementation de la circulation, surveillance des aliments et des produits vendus au consommateur; règlements de sécurité dans le travail ou des lieux publics. Un très important réseau de règlements, de contrôles, de sanctions aux entreprises ou aux collectivités défaillantes protège la santé et la sécurité de la population à son insu.

Le diagnostic et les soins

C'est la fonction la mieux connue du réseau de santé : caractériser une maladie déclarée, lui apporter les soins nécessaires soit pour la guérir, soit pour l'atténuer ou limiter ses effets, et réduire ses conséquences sur le malade; voilà l'activité quotidienne des professions qui participent à ce système.

Les progrès de la science et de la technique accroissent le nombre et la qualité de leurs succès. Des maladies autrefois hors d'atteinte sont aujourd'hui guéries (méningite tuberculeuse, maladie de Hodgkin); d'autres sont beaucoup moins fâcheuses pour le malade qu'autrefois (certains cancers, la maladie de Parkinson, certaines psychoses, par exemple). La médecine s'efforce de reculer les limites de la survie, et l'on a pu parfois mettre en cause le zèle jugé excessif à maintenir en vie des moribonds ou des nouveau-nés malformés incapables d'une existence normale.

Ces actions héroïques, à la limite des possibilités de la médecine, posent des problèmes de morale qui mettent en évidence la part d'inconnues et d'incertitudes qui persiste malgré les conquêtes thérapeutiques.

La réhabilitation

Elle est un volet important du système de santé, et met à contribution un nombre croissant de spécialistes et de techniques. L'allongement de la durée moyenne de vie de la population accroît le risque pour chacun de se trouver victime à un moment de son existence d'un accident ou d'une maladie invalidante dont les séquelles doivent être atténuées, suppléées ou supprimées. Les accidents du sport et de la circulation sont une source de telles invalidités passagères ou permanentes, comme le sont certains accidents du travail. A la passivité et à la résignation de jadis s'est substitué un état d'esprit combatif qui s'efforce de récupérer les fonctions perdues dans toute la mesure du possible.

Gendarmerie nationale

▲ ***La prévention des accidents de la route fait aussi partie de la protection de la santé. Elle passe par l'aménagement des routes pour éviter les collisions et réduire la gravité de leurs conséquences.***

Depuis le massage et la mobilisation jusqu'à la fixation de prothèses de membres, toute une gamme de moyens a été adaptée aux fonctions motrices. De même, des efforts de réhabilitation s'appliquent aux déficients des sens, aux malades mentaux, aux personnes âgées, aux enfants handicapés. Souvent l'effet recherché est en même temps psychologique et vise à réinsérer le malade dans son milieu familial ou social. Enfin, l'aménagement des objets qui entourent l'handicapé et celui des conditions et des postes de travail contribuent à faciliter sa réhabilitation.

Les mécanismes

Il est difficile de comprendre le fonctionnement du système de santé sans faire le tour des mécanismes par lesquels les hommes sont formés, les méthodes et les outils de travail sont mis à la disposition des professions concernées, puis utilisés par elles. Ils ont une influence majeure sur les équilibres économiques et financiers de ses institutions (*fig.* 8).

▼ ***Figure 8; physiologie de la santé : les mécanismes.***

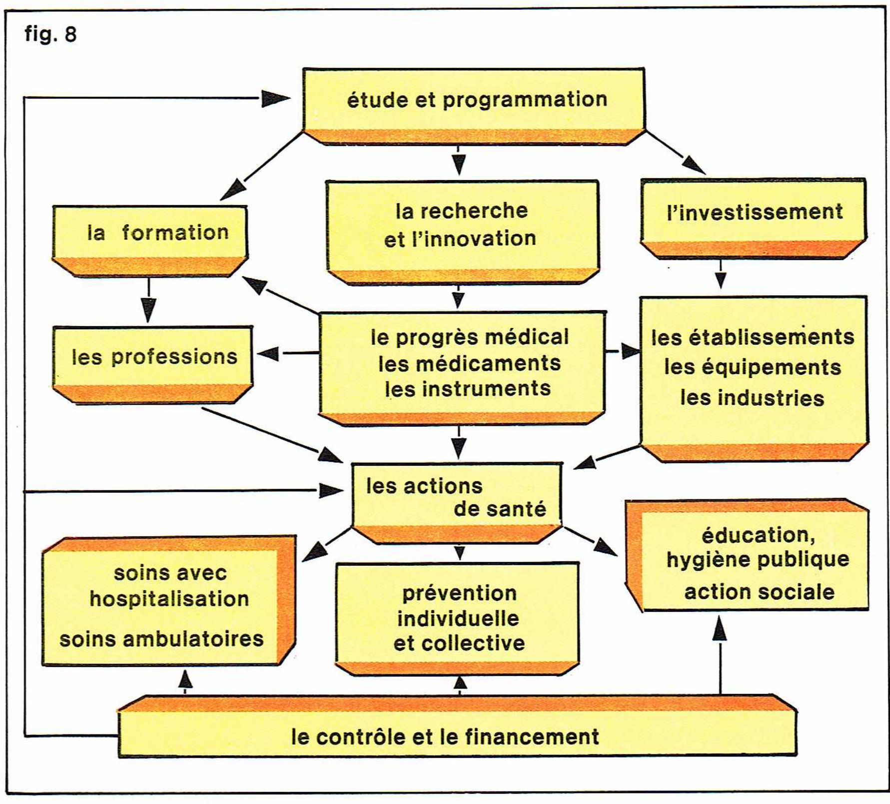

Richard Colin

La formation

C'est la compétence des hommes et la bonne qualité des équipements qui assurent d'abord la validité du système. La formation en est un aspect stratégique. On sait aujourd'hui que la *formation continue* est une nécessité pour les professions d'un secteur aussi évolutif. Pourtant, bien peu est encore fait dans ce sens, et seule la *formation initiale* a occupé depuis des décennies les textes et les esprits. Dans des métiers essentiellement pratiques, la part de formation « sur le terrain » doit être importante. Pourtant, au fur et à mesure que la technique médicale et les sciences qui la fondent se sont développées, il s'est installé un système de formation qui a d'abord séparé les étudiants des praticiens en exercice de ville, puis les a éparpillés dans des services spécialisés coupés de la pratique médicale la plus courante. Chose plus grave, la multiplication du nombre des étudiants a conduit à abréger la durée de leur présence auprès des malades. On s'efforce aujourd'hui de renverser par diverses mesures cette évolution défavorable. La situation est différente pour les infirmières et les sages-femmes qui consacrent la moitié de toute la durée de leurs études à l'hôpital. Les pharmaciens acquièrent une expérience pratique au cours d'une année de stage à temps plein. En ce qui concerne les kinésithérapeutes et les dentistes, ils sont tenus à une bonne activité pratique avant l'obtention du diplôme.

L'équilibre et le contenu des enseignements théoriques posent aussi de difficiles problèmes. Au lieu de partir de l'observation directe des besoins telle qu'elle peut être effectuée chez le praticien de ville ou d'hôpital, l'enseignement est bâti sur la juxtaposition des préoccupations, des traditions et des jugements de valeur des spécialistes des hôpitaux universitaires. Cette pratique est une source d'inadéquation des études à la réalité pratique vécue par la profession. Les généralistes ne reçoivent pas la formation de praticien adaptée à leurs besoins; des professions de l'équipe médicale n'ont pas toujours la formation concrète et simplifiée adaptée aux leurs. La formation n'épouse pas l'évolution des modes d'exercice; elle maintient des enseignements dépassés au détriment d'autres qui manquent cruellement, faute d'enseignants pour les promouvoir. Trop élitiste, elle introduit dans les esprits un système de valeurs hiérarchisées dont l'hôpital et le médecin sont le sommet. Cette vision non fonctionnelle est source de frustrations, et contraire à la nécessaire coopération entre tous les acteurs du système de santé.

Si l'on excepte ces graves défauts, la formation aux professions de santé est sérieuse, en ce sens que les enseignements sont faits en conscience, régulièrement, à un haut niveau de technicité. Les diplômes sont délivrés après des contrôles sévères, qui donnent généralement une bonne idée des exigences que chaque praticien s'impose à lui-même. Enfin, elle est fortement imprégnée de culture scientifique, ce qui favorise une certaine rigueur de l'observation et du raisonnement. Toutes ces qualités et une longue tradition universitaire font rechercher les enseignements français par un bon nombre d'étudiants francophones issus de nombreux pays. On peut cependant s'inquiéter de voir ces formations trop coupées des autres domaines de connaissance. Formés dans des écoles ou facultés spécialisées dès le début des études, les étudiants de ces professions reçoivent des enseignements purement techniques ou scientifiques qui les séparent des autres étudiants et du monde très divers qui les entoure. Le manque d'initiation sociale ou économique les empêche de se faire une opinion éclairée sur les structures et les problèmes de la société dans laquelle ils vont vivre et travailler. Cet isolement favorise l'individualisme excessif des professions de la santé. On peut espérer que les conséquences de la prise en charge collective des dépenses de santé amènera à terme une modification de cet état des choses.

L'engouement actuel pour les professions de la santé a entraîné un rapide accroissement de l'effectif des étudiants, ce qui va entraîner à terme un accroissement rapide du nombre des praticiens de ce secteur.

Les investissements

La pratique des métiers de la santé nécessite l'installation d'équipements adaptés. Pour certains, ils demeurent très modestes. Pour d'autres, ils demandent d'importants investissements. Avant de parler de la construction d'hôpitaux ou des équipements les plus lourds, il faut rappeler que l'installation d'un radiologiste est de l'ordre de 1 million de francs, celle d'une officine pharmaceutique ou d'un laboratoire entre 0,5 et 1 million de francs. La construction d'une clinique coûte près de 100 000 F par lit. Pour couvrir de tels frais sans prise de participation directe de capitalistes, laquelle est d'ailleurs interdite, les praticiens doivent souvent se mettre en commun, emprunter des sommes importantes et veiller à ce que les rentrées permettent de couvrir tous les frais d'exploitation, y compris les annuités de remboursement et d'intérêts. Cela explique en partie le souci, qui n'a rien de médical ou de sanitaire, de voir le capital investi fonctionner aussi activement que possible.

En ce qui concerne les équipements lourds et les investissements très importants, ceux-ci sont généralement assumés par des collectivités publiques (secteur public). Une procédure longue et élaborée est alors prévue pour qu'à toutes les étapes d'une telle décision, les avis soient bien pesés, et les abus évités. A chaque stade se trouvent comparées des solutions concurrentes, et se pratiquent les choix entre secteurs concurrents. Avant toute construction, la taille, la structure et l'implantation d'un hôpital doivent être soigneusement étudiées à l'avance. Il faut savoir aussi que son fonctionnement entraîne des coûts très élevés, surtout en charges de personnel. On compte que le coût de la construction d'un hôpital neuf égale deux à trois ans de fonctionnement normal; c'est dire qu'une prévision sérieuse et détaillée est demandée à ceux qui en prennent l'initiative. Celle-ci est d'abord fondée sur l'*évaluation des besoins* décrite dans le *programme d'établissement*. Comme on n'a aucune manière directe de les mesurer, et qu'ils sont influencés par les moyens mis à la disposition de la population, leur évaluation est fondée sur la comparaison entre les moyens disponibles localement et ceux qui existent dans d'autres secteurs géographiques pris comme référence. Cela est traduit en nombre de lits et d'équipements coûteux pour 100 000 habitants. Le pays est divisé en secteurs sanitaires, et l'équipement est rapporté à la population de ce secteur.

Les autorisations de construire et d'équiper se réfèrent à la *carte sanitaire* des besoins. Mais les habitudes de la population varient avec les régions. Par exemple, les Alsaciens vont plus volontiers à l'hôpital se faire soigner que les Auvergnats. Aussi tient-on compte pour nuancer les rapports précédents de la *zone d'attraction* qui indique l'étendue des communes environnantes d'où viennent les malades qui utilisent l'hôpital, et du *taux d'occupation* des lits, c'est-à-dire du nombre moyen de jours où chaque lit est occupé pour cent. Il va de soi qu'un service dont le taux d'occupation est de 25 % n'a pas lieu d'être agrandi, puisque la demande spontanée du public ne crée pas le besoin d'une capacité supplémentaire.

L'évaluation des besoins de la population s'impose à tous ceux qui veulent construire un hôpital, une clinique ou acquérir un équipement coûteux de diagnostic ou de soins. En effet, comme il apparaîtra mieux plus bas, la construction et les frais de fonctionnement qui vont lui succéder sont payés essentiellement grâce aux remboursements de la Sécurité sociale, c'est-à-dire aux cotisations payées par tous. Il est donc naturel que la collectivité veille à éviter le gaspillage et la mauvaise répartition des moyens. Un *programme coordonné* par étapes définit les grandes lignes du projet de construction et/ou de rénovation. Pour être applicable, il doit recueillir l'autorisation des services de la préfecture et, s'il s'agit d'une opération importante, du ministère de la Santé : c'est le *plan directeur*. Pour bénéficier d'une subvention de l'État, il doit être inscrit dans le Plan de développement national. Une longue succession de projets de plus en plus détaillés permet de passer du plan directeur à la réalisation. Cette étape administrative dure généralement plusieurs années. Son achèvement est nécessaire pour que le *maître de l'ouvrage* puisse disposer des fonds nécessaires pour passer les marchés et payer les entrepreneurs.

D'où proviennent ces fonds? Contrairement à ce que l'on croit généralement, l'État n'intervient que pour une

partie (25 à 40 % selon les périodes), et seulement pour les opérations inscrites dans le Plan. Le reste est autofinancé, c'est-à-dire payé avec les sommes dégagées à partir des recettes de l'hôpital. Comme l'hôpital ne dispose pas généralement au départ des fonds nécessaires, il emprunte cet argent sans intérêt à la Sécurité sociale, avec un faible taux d'intérêt à la Caisse des dépôts et consignations ou au taux du marché à des établissements bancaires. Quelques hôpitaux possèdent de longue date des biens immobiliers qu'ils vendent pour pouvoir construire. Une fois l'hôpital édifié et mis en service, une part des recettes sert à rembourser les prêteurs et à dégager des *amortissements* pour les aménagements à venir. La durée de vie prévue d'un hôpital est de cinquante à cent ans. En fait, les hôpitaux très anciens servent parfois après plusieurs siècles (par exemple, les hospices de Beaune ou l'Hôtel-Dieu de Paris). Dans ces conditions, il ne faut pas s'étonner de la vétusté d'une partie de notre patrimoine hospitalier.

Lorsque le processus aboutit, la pose de la première pierre, ou plus exactement le premier coup de pioche, est l'aboutissement d'un long cheminement administratif. C'est alors qu'interviennent les multiples difficultés liées au parti architectural, aux contraintes techniques, au respect des échéances, aux défaillances des entreprises, aux incertitudes inhérentes à tout programme de construction. Autres difficultés lors de la mise en service, par pénurie de personnel, par malfaçon ou par défaut d'hygiène ou de sécurité.

● *Les besoins en équipements de santé*

En raison de son prix, il faut éviter de construire ou d'agrandir un hôpital là où le besoin n'est pas très pressant, car on prive du même coup une autre ville ou une autre région qui en a un besoin plus impérieux. La comparaison entre besoins est difficile, et plus encore lorsqu'elle porte sur des hôpitaux ou des services spécialisés. C'est pour les faciliter que le ministère de la Santé a établi une *carte sanitaire* assortie de normes de besoins pour une population donnée. Le même problème se pose pour les installations et appareils très coûteux. Par exemple, tant qu'une zone ne dispose pas d'une unité de dialyse ou d'un scannographe (scanner) pour un million d'habitants, toute proposition techniquement valable est accueillie avec intérêt. Au-delà, toute proposition est repoussée pour éviter le suréquipement et la concurrence, sources de gaspillage. Inutile d'insister sur le caractère évolutif de telles normes, qui doivent être revues périodiquement, et comparées aux réalités de pays de même niveau sanitaire que le nôtre.

Si les normes font courir le risque d'un freinage du progrès technique, elles ont l'avantage de limiter la surenchère entre spécialistes dont chacun a l'œil tourné vers le pays le plus avancé dans son domaine. La somme de ces perfectionnements n'est pas supportable pour les finances d'un pays de notre niveau économique. Cette accumulation se réaliserait au détriment de nécessités banales de notre système de santé, qui doit répondre en même temps à l'augmentation globale de la population, à son urbanisation, et aux exigences de confort et de meilleures conditions de travail qui sont la demande de tous, qu'ils soient à l'hôpital, chez eux, à l'usine ou dans un magasin. On devrait considérer la *formation des personnels très qualifiés* comme un investissement collectif, en raison de son coût et de la durée de ses effets. Le nombre de spécialistes à former pourrait alors aussi bénéficier d'une vue d'ensemble dans le cadre de la carte sanitaire. Ce n'est pas le cas aujourd'hui.

Le coût des instruments de diagnostic et de soins a longtemps représenté un poids négligeable dans le prix d'un hôpital nouveau ou aménagé. Aujourd'hui, il faut ajouter 20 à 40 % au prix de la construction en équipements médicaux. Cette multiplication rapide de moyens coûteux, qui demandent souvent un personnel spécialisé pour leur usage, crée des problèmes inédits. Pour les coordonner et prévoir des ensembles techniques cohérents, on a créé la notion de « plateau technique » dont le coût et la complexité ne peuvent que croître. Au contraire, les bâtiments et l'infrastructure d'hébergement, analogues à ceux d'un hôtel, devraient tirer un meilleur parti de la construction industrialisée rapide, efficace et de faible prix de revient.

D'une ville à l'autre, la situation varie largement en ce qui concerne les moyens de soins avec hospitalisation. Dans l'une, les édiles ont réalisé au cours du temps de vastes opérations, fait des acquisitions immobilières heureuses, reçu de larges donations de terrains. Les administrateurs d'aujourd'hui n'ont pas trop de peine à tirer parti de cette richesse pour créer les moyens de

Assistance publique de Paris

▲ *L'hôpital moderne permet de belles réalisations architecturales qui doivent rester compatibles avec l'organisation correcte de l'hébergement et des soins (hôpital Antoine-Béclère à Clamart, Assistance publique de Paris).*

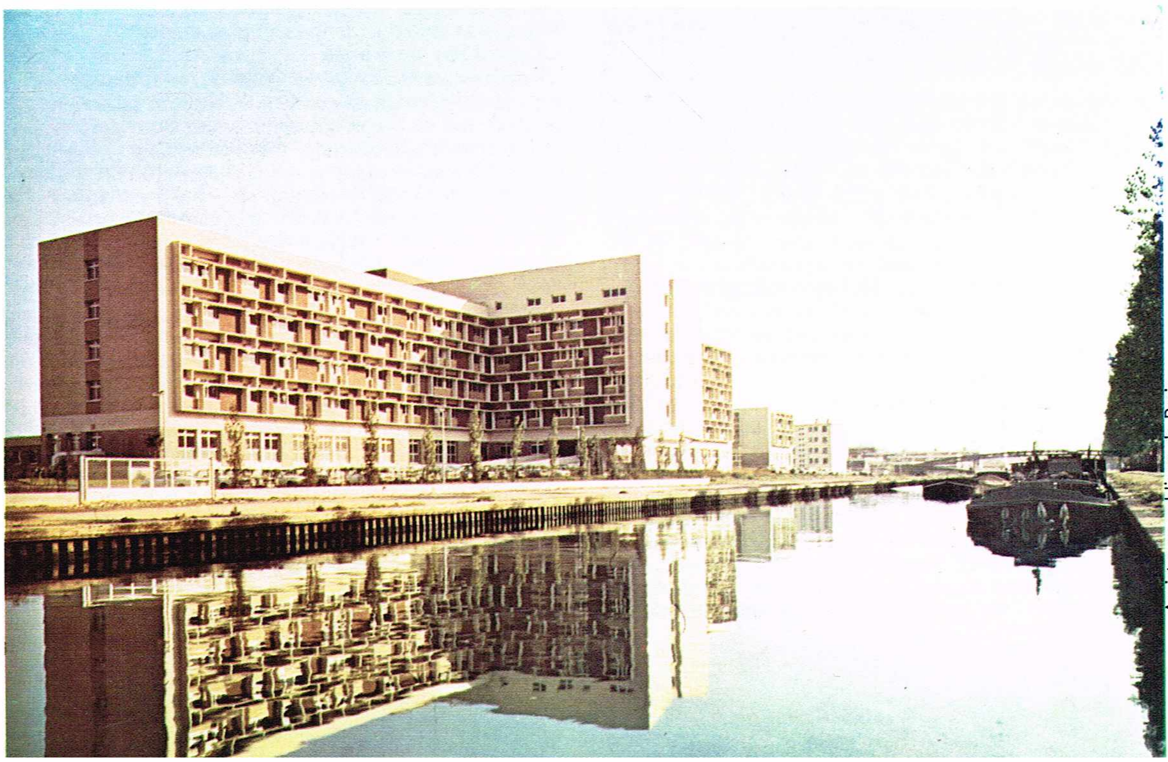

Assistance publique de Paris

◀ *Une architecture traditionnelle d'hôpital peut être rehaussée par un cadre agréable. Elle rend plus faciles la desserte et la distribution des services (hôpital Jean-Verdier à Colombes, Assistance publique de Paris).*

Tableau III
Quelques coûts et remboursements d'actes de soins (Mai 1977)

Dénomination	Lettre-clef	Nombre	Prix (en francs)	Taux de remboursement (en %)
Visite de nuit du généraliste	VN	1	104	70
(à 10 km du praticien)	+ IK	20	20	100
Consultation d'un spécialiste	CS	1	48	70
Injection intra-veineuse	K	2	14,40	80
Electro-encéphalogramme	K	30	216	80
Cathétérisme cardiaque	K	100	720	100
Traitement chirurgical de l'infarctus du myocarde	K	250	1 800	100
Dosage de l'alcool dans le sang	B	50	57,50	80
Radio de l'estomac	Z	50	295	80
Rééducation d'un membre (par séance)	AMM	7	40,25	80

▲ *Tableau III : quelques coûts et remboursements d'actes de soins.*

soins que demandent les citoyens de cette cité. Dans l'autre, les établissements hospitaliers sont insuffisants et vétustes, le patrimoine inexistant. Seul un effort financier important permet à leurs responsables de réaliser peu à peu des opérations modestes de modernisation et d'humanisation. Bien souvent, c'est l'initiative privée qui vient suppléer dans ces villes l'insuffisance des initiatives collectives. Des cliniques sont alors réalisées, parfois bien équipées et de bonne valeur technique, parfois très insuffisantes pour répondre aux besoins de la médecine moderne. Certains besoins ne sont pas bien satisfaits, à commencer par ceux qui impliquent des services astreignants ou mal payés. Ces faiblesses sont comblées par certains hôpitaux réservés aux militaires, aux enseignants, aux agents de la S. N. C. F.

Ainsi, malgré la solidarité nationale dans le cadre du système de santé, les possibilités offertes à chacun dépendent encore pour une part de la ville qu'il habite, de la profession qu'il exerce ou encore de l'entreprise pour laquelle il travaille.

La recherche et l'innovation

Le progrès de la médecine est aujourd'hui presque intégralement issu de la recherche et de l'innovation. Cela ne doit pas exclure les inventions techniques limitées, qui peuvent être d'une grande utilité, parfois dues à un praticien ingénieux soucieux de répondre à un problème particulier. La recherche physique et chimique fournit des molécules, des appareils et des instruments, ainsi que des procédés nouveaux d'exploration. L'industrie transforme le résultat de ces recherches en des produits ou des appareils utilisables commodément par les praticiens et les malades, dans des conditions de sécurité acceptables.

L'important potentiel de recherche actuel met à la disposition de la médecine de nombreux moyens nouveaux d'exploration et de soins. Les bouleversements les plus marqués sont apparus dans les techniques nucléaires, dans l'exploration médicale, aidée par l'informatique. L'introduction de l'ordinateur a favorisé les techniques non sanglantes pour l'exploration radiologique et ultrasonore (scanner) ; en immunologie, dont le développement rapide favorise de nouvelles méthodes de diagnostic ; en analyse, et surtout pour la synthèse chimique aidée par ordinateur, qui a permis de mettre au point une multitude de molécules actives nouvelles. La connaissance des mécanismes pathogènes progresse en ordre dispersé grâce à la recherche biomédicale. D'où une conduite thérapeutique mieux établie. Beaucoup de découvertes médicales n'auraient pu rendre service aux malades sans *développement industriel*. Il permet de mettre un nouveau produit à la disposition d'un très grand nombre de malades. Son intervention favorise l'automatisation et la standardisation. Comme il s'agit de produits spécialisés, fabriqués par un petit nombre de producteurs, le contrôle de leur qualité peut être pratiqué plus efficacement et protéger ainsi, mieux que dans le cas d'une production artisanale, la sécurité du malade qui utilisera le nouveau médicament ou le nouvel appareil.

Sans l'intervention de l'industriel, le prix d'un grand nombre de produits, appareils ou instruments médicaux les aurait rendus inaccessibles aux malades. C'est le cas, par exemple, du pacemaker (petit appareil implantable qui relance le cœur par stimulation électrique) ou du rein artificiel. A l'inverse, certaines innovations médicales n'ont pas encore atteint une sécurité d'emploi et un prix de revient satisfaisants, faute d'avoir été industrialisées dans de bonnes conditions. C'est le cas, par exemple, de certains matériaux de prothèse.

En dehors des grandes inventions, des perfectionnements sont apportés en permanence aux techniques et aux produits. Ils favorisent l'adaptation nécessaire des produits au besoin ou au confort de l'utilisateur, mais aussi aux contraintes du marché commercial. Ce perfectionnement continu des produits vendus est la preuve du dynamisme de ceux qui les fabriquent. En dehors des grandes inventions plutôt rares, des innovations heureuses permettent d'adapter des matériaux ou des dispositifs nouveaux pour obtenir des produits plus simples, plus légers, plus faciles d'emploi, etc. C'est souvent grâce à elles que le prix de revient du produit peut baisser ou sa diffusion augmenter considérablement. Parmi les innovations industrielles récentes, citons, à titre d'exemple : l'imagerie à ultrasons, qui risque de se substituer à terme aux rayons X ; la mise au point de poches portables pour la collecte des excréta ; la mise au point d'un dialyseur (rein artificiel) miniaturisé ; la transmission à distance de l'électrocardiogramme ; les nouvelles présentations de médicaments ; l'observation directe des viscères par les sondes à fibres optiques. Chacune de ces innovations doit d'abord faire la preuve de son efficacité et de son innocuité ; elle ne se substitue que lentement aux procédés plus anciens. En raison de l'évolution rapide des techniques, les produits nouveaux risquent d'être bientôt chassés à leur tour par des produits concurrents. D'où une course à la nouveauté qui peut aussi être source d'accidents, et qui provoque immanquablement une hausse du coût des soins. Mais ces inconvénients sont compensés par un perfectionnement permanent, source d'espoir et de renouveau.

La pratique courante

Les métiers de la santé sont d'abord des *pratiques*. Malgré les perfectionnements, ils reposent pour une large part sur une base empirique qui laisse un champ notable à l'observation personnelle, à l'expérience et à l'intuition. C'est dire que le praticien adapte son attitude à chaque cas qu'il rencontre. D'où une diversité dans son travail, qui est renforcée par la variété des contacts humains avec les malades et leur famille. D'où aussi une tendance à la dispersion qui ne laisse guère le loisir de la vision synthétique ni de l'activité organisée.

Les praticiens ont souvent de la peine à bien *s'organiser*. Cela s'explique par les contraintes propres à ce secteur, mais aussi par l'absence d'une tradition. Les procédés raffinés d'organisation et de répartition des tâches n'ont encore qu'un faible impact sur les unités de soins et les hôpitaux. C'est une gêne au fonctionnement quotidien des grandes unités techniques, telles que les centres hospitaliers des grandes villes. Le praticien isolé peut se contenter d'une organisation beaucoup plus rudimentaire, mais une rationalisation de son poste de travail et une programmation aussi stricte que possible de ses rendez-vous peuvent faciliter sa tâche, tout en rendant service à ses clients et en préparant un terrain favorable à une association avec d'autres praticiens.

Le financement et les prix

Le fonctionnement du réseau de santé est fortement tributaire de son *système de financement*. En dehors d'une faible marge de liberté, les prix qui s'y pratiquent sont réglementés et contrôlés. Bien qu'ils soient le résultat d'une transaction permanente entre les syndicats, la Sécurité sociale et l'État, c'est en définitive la pression exercée par les pouvoirs publics sur les prix de journée hospitalière et les niveaux de remboursement de la Sécurité sociale qui déterminent en grande partie l'activité de ce secteur. Comment fonctionne ce financement? En principe, le malade paie au fur et à mesure les services des praticiens ou de l'établissement qui le soigne. Il est ensuite remboursé, totalement ou partiellement, suivant un barème établi par la Sécurité sociale. Il reçoit éventuellement un complément de remboursement de la mutuelle à laquelle il adhère. En fait, pour toutes les prestations qui coûtent cher, un paiement direct, partiel ou total, est possible soit par la Sécurité sociale, soit par la mutuelle. Il suppose une demande, et la garantie que l'intéressé a bien droit au remboursement correspondant. Celui-ci est fondé sur deux facteurs. L'un concerne la facturation de la prescription fournie. Il s'agit d'une *lettre clef* indiquant la catégorie d'acte effectué (C pour une consultation médicale, AM pour le soin d'un auxiliaire, Z pour une radio, K pour un acte chirurgical, etc.), qui a une valeur unitaire en francs, et un chiffre par lequel cette valeur est multipliée. Ce dernier dépend de l'importance et de la complexité de l'acte pratiqué (voir *tableau* III). L'hospitalisation est facturée à la journée, et les produits pharmaceutiques à leur prix de détail. Un autre facteur multiplicatif applique la réglementation en vigueur pour chaque catégorie de prestations ou de produits et pour chaque catégorie d'assurés. C'est un coefficient de remboursement fixé d'avance.

Dans le cas du régime général, les journées d'hospitalisation sont remboursées par la Sécurité sociale à 80 % de leur prix jusqu'au 20e jour, à 100 % (intégralement) au-delà; les actes des médecins et des auxiliaires médicaux sont remboursés à 75 %; les médicaments de 90 % à 70 % ou 40 % selon les cas. D'autres prestations sont remboursées selon un tarif forfaitaire (cure thermale, par exemple). Dans d'autres régimes, les coefficients de remboursement (C*f*) diffèrent, en plus ou en moins. Dans la règle générale, la valeur de la lettre clef (L) et le facteur de multiplication (F*m*) sont les mêmes pour tous les régimes :

$$\text{montant du remboursement} = L \times Fm \times Cf$$

Le remboursement de la mutuelle s'ajoute et parfois se substitue à celui de la Sécurité sociale, selon des barèmes propres à chacune d'entre elles. Dans quelques cas particuliers, le remboursement est sans relation directe avec le paiement effectué : par exemple, si la clinique n'est pas conventionnée avec la Sécurité sociale; si le praticien a facturé un dépassement (D), soit à cause d'exigences particulières du malade (DE), soit du fait de sa propre notoriété (DP) ; si le médecin traitant est hors convention avec la Sécurité sociale.

On voit que le *poids financier* qui repose sur la Sécurité sociale et les mutuelles dépend de la *valeur* attribuée aux tarifs unitaires des lettres clefs (tarification), aux *facteurs multiplicatifs* attribués à chaque acte (nomenclature) et aux *coefficients de remboursement*. Il dépend aussi des *prix des produits*. Enfin, il est fortement tributaire du *volume* des prestations servies par les acteurs du réseau de santé : nombre de journées d'hospitalisation, nombre d'actes médicaux et paramédicaux effectués, volume des médicaments prescrits :

$$\text{poids financier} = \text{montant du remboursement} \times \text{volume}$$

Il ne faut pas croire pour autant que la Sécurité sociale ou les pouvoirs publics soient libres de modifier ces facteurs selon leurs vues personnelles. L'hôpital et la clinique ont des frais fixes de personnel, de chauffage et d'entretien; les revenus des membres des professions de santé dépendent étroitement de leur activité professionnelle; les prix des médicaments couvrent le prix de leurs matières premières, les frais des industries qui les fabriquent et de ceux qui les mettent à la portée du malade. De plus, le revenu et l'emploi d'un grand nombre de salariés du secteur dépendent du tarif des remboursements de la Sécurité sociale. Chaque fois que l'on fait pression sur les prix, on met en difficulté un acteur du système. Chaque fois qu'on laisse monter un prix, on modifie un rapport considéré comme normal entre les rémunérations des différents acteurs, et les autres demandent une augmentation en proportion. Comme les remboursements de la Sécurité sociale se font avec les sommes collectées grâce aux cotisations, l'équilibre de son budget implique une évolution parallèle des cotisations et des prestations. Les cotisations s'ajoutent en tant que charges aux salaires payés par les entreprises; leur augmentation pèse donc sur les prix des produits vendus, ce qui est source d'inflation. Réciproquement, lorsque l'activité économique se ralentit, les recettes de la Sécurité sociale diminuent; c'est pourquoi le financement et les prix du système de santé, loin d'être indépendants du système économique, s'y trouvent étroitement associés.

Conclusion

Périodiquement, débats politiques et articles de presse attirent l'attention du public sur l'accroissement rapide des dépenses de santé. Pour les responsables de la Sécurité sociale, il pose le problème de l'équilibre budgétaire de cet organisme, puisque les recettes augmentent au même rythme que l'activité économique, tandis que les dépenses ont un rythme de croissance beaucoup plus rapide. Cette préoccupation budgétaire tient le devant du décor, ce qui fait omettre d'autres caractéristiques dans l'évolution actuelle du système de santé.

Dans la réalité quotidienne, c'est la compétence et le dévouement des acteurs du monde de la santé qui conditionnent sa réputation et la qualité des résultats obtenus. Partout, le besoin s'accroît des services de ceux qui jouent modestement le premier rôle dans les soins aux grands malades. La demande d'infirmières, aides-soignantes ou brancardiers, est difficilement satisfaite. La complexité croissante du système médical rencontre des difficultés croissantes d'organisation et d'administration. L'explosion technique qui entraîne l'application de moyens de soins de plus en plus élaborés et coûteux oblige à faire de plus en plus appel à des compétences extérieures au monde de la santé.

Paradoxalement, plus le système de santé devient efficace dans sa lutte contre la souffrance et l'imprévu de la maladie et contre le poids de ses séquelles, plus il est décrié. Ses acteurs n'ont pas pris encore conscience d'appartenir à un grand système au service du public. Ses bénéficiaires souffrent de ses imperfections sans apprécier positivement ce que ses effets salutaires impliquent d'intelligence et de dévouement. Le système de santé n'a pas encore trouvé son Copernic ou son Newton.

Dans le vertige de sa révolution technique, la médecine a fait quelque peu oublier l'acquis plus ancien de la révolution pastorienne. De même, l'importance de la relation individuelle entre médecine et malade tend à minimiser celle de la nécessaire infrastructure collective qui la sous-tend. La prévention de masse et l'hygiène publique ont peu de chances dans l'avenir prévisible d'aboutir à de prestigieuses conquêtes sur la maladie susceptibles d'impressionner le public. Mais les résultats acquis dans le passé doivent en permanence être défendus. A son tour, la percée désordonnée des techniques appliquées aux soins individuels devra s'appuyer sur une prise de conscience de la dimension collective de la médecine actuelle et sur une utilisation méticuleuse des moyens mis à la disposition du malade grâce à la mise en commun d'importantes ressources.

BIBLIOGRAPHIE

BROUN G., *Le financement des Coûts de la Maladie; Essai d'analyse économique*. Rev. Aff. Sociales 23,1, 1969 - BROUN G., BONAMOUR P. et DARTIGUES R., *Réflexion sur l'avenir du Système de Santé (Rapport du groupe de travail de prospective de la Santé)*, Documentation Française, Paris, 1969. - BROUN G., *Aspects économiques des problèmes de Santé dans les pays développés : analyse de l'exemple français*, Ouest Médical, 18, 1493, 1971. - BROUN G., *Planification par objectifs : définition, étapes et problèmes*. Méd. Afri. Noire, 21, 893, 1974. - BROUN G., DAGRAS G. et MOREAU C., *L'ingénieur biomédical et le corps hospitalier*, Gestions hospitalières, 63, 109, 1977.

LES SYSTÈMES DE TRANSPORT

LE SYSTÈME DE TRANSPORT PAR EAU

Ce système de transport est constitué par les trois groupes d'éléments suivants :

- Une *infrastructure*, qui consiste en l'aménagement des voies navigables et des ports. Elle est étroitement liée aux conditions naturelles imposées par la mer, les rivières et les conditions météorologiques. Elle met en œuvre des techniques particulières appelées travaux maritimes et fluviaux, et des équipements propres, tels que les aides à la navigation.
- Les *bateaux*, qui sont les véhicules associés à l'eau.
- Les *techniques d'exploitation*, qui reposent sur des hommes : les marins, les bateliers, les armateurs, les pilotes, les dockers et les auxiliaires de transport.

Le transport par eau est souvent relié aux autres modes de transport : transport routier, transport ferroviaire, transport par tube.

Il est classique de faire une distinction dans le système de transport par eau entre le transport maritime et le transport fluvial. On considère en effet que le transport fluvial est un mode de transport intérieur à un pays, que l'on qualifie souvent de terrestre comme le transport routier ou le transport ferroviaire. En fait, il prolonge de façon naturelle, par l'eau, le transport maritime; les techniques les plus modernes de porte-barges permettent même d'éviter les ruptures de charges dans les ports maritimes. C'est le point de vue qui sera développé ici.

Historique sommaire et situation actuelle

Le transport par eau remonte à l'origine des temps. L'homme a observé très tôt que les arbres arrachés par les crues flottent sur l'eau et sont charriés par les rivières; il en a tiré l'idée de rassembler plusieurs arbres afin de constituer les premiers radeaux, utiles pour transporter les denrées et matières premières nécessaires à son activité. Plus tard, il a réalisé des bateaux capables de résister aux intempéries et de naviguer en mer.

Durant des millénaires, les fleuves, les rivières et la mer ont été pour l'homme le moyen privilégié de transporter les marchandises et les hommes et de permettre le commerce entre les peuples.

Transport fluvial

Le passé

L'homme a d'abord emprunté les rivières dans leur état naturel. On sait que les Égyptiens naviguaient sur le Nil trois millénaires avant Jésus-Christ. Ils utilisaient des barques de près de 50 m de long. Les Assyriens créèrent les canaux artificiels pour suppléer au manque de rivières naturelles. Au début de notre ère, les Chinois inventèrent les barrages amovibles pour augmenter la profondeur d'eau des rivières et accroître ainsi les possibilités de navigation.

A l'époque romaine, les rivières étaient parcourues par des barques à fond plat. En Gaule, la navigation était active sur la Seine, la Sambre, la Loire, la Saône et le Rhône. Les bateliers formaient des corporations. Selon Strabon, un système de portage de marchandises était installé pour passer du bassin du Rhin à celui du Rhône.

Pendant le Moyen Age, dans toute l'Europe, les rivières ont été le lieu privilégié pour la création d'agglomérations. Les corporations de bateliers se placèrent sous la protection des rois. De nombreux conflits d'intérêt apparurent avec les propriétaires de moulins à eau installés sur les rivières.

De cette époque remonte la technique des barrages utilisés pour créer des lâchures d'eau, ou *écluses*, qui permettaient d'offrir aux bateaux descendant la rivière un tirant d'eau accru par rapport aux possibilités naturelles. Au XII[e] siècle, en Flandre, sur le canal d'Ypres à Nieuport fut installé un système de plans inclinés appelés Overdrach. On faisait glisser des barques sur ces plans à l'aide de treuils, permettant ainsi le franchissement de la dénivellation entre deux plans d'eau. De 1200 à 1700, la plaine du Pô en Italie fut le siège de la plus importante voie fluviale du monde. Venise et Ferrare doivent une part de leur prospérité à ce fleuve. Au XIV[e] siècle, des ingénieurs hollandais inventèrent l'écluse à sas qui fut perfectionnée par Léonard de Vinci par la mise au point du système de portes busquées, très simple, qui est encore utilisé de nos jours.

En France, le canal de Briare et du Loing entre la Seine et la Loire, construit entre 1604 et 1646, fut le premier canal permettant de passer d'un bassin à un autre. Le canal du Midi fut achevé en 1681. Il permet de joindre la mer Méditerranée à l'océan Atlantique. Mais il faut attendre 1879 pour que soit défini un programme cohérent de développement des voies navigables, comportant la réalisation de 1 400 km de nouveaux canaux. Ce programme constitue encore la base du réseau actuel, dit réseau Freycinet, pour le nord et l'est de la France. Il correspond à l'essor de l'industrie lourde en Europe. Parallèlement, des réalisations importantes s'effectuèrent en Allemagne et aux Pays-Bas. Cette période d'activité intense pour les transports fluviaux a pris fin avec la Première Guerre mondiale en raison du développement du chemin de fer. Elle a laissé de nombreux bassins isolés les uns des autres. Aux États-Unis, le réseau des voies navigables atteignait 40 000 km.

Entre les deux guerres, une nouvelle période d'activité permit d'améliorer les voies navigables et d'en créer de nouvelles : le canal Albert en Belgique, le canal Juliana aux Pays-Bas, le canal d'Alsace en France, les canaux Mittelland et Wesel-Datteln en Allemagne, les canaux Moscova-Volga et Baltique-mer Blanche en U. R. S. S.

Ce mouvement intéressa également les États-Unis. Une technique nouvelle s'est développée sur les grands fleuves : le *poussage*. Un convoi poussé est composé d'un certain nombre de barges où l'on met la marchandise à transporter et d'un pousseur où demeure l'équipage. Les barges et le pousseur sont réunis par des câbles et forment un ensemble monolithique.

Après la Seconde Guerre mondiale, des travaux de grande envergure furent menés; le Rhin en aval de Strasbourg, le Danube, la Moselle, le Rhône, le canal Amsterdam-Rhin, la Volga, la Kama, le Svir, le Don, le Dniepr, l'Irtytch, les canaux Volga-Don, Volga-mer Noire. D'autres travaux ont été entrepris en Belgique, en Tchécoslovaquie, en Pologne, en Yougoslavie et en Allemagne fédérale (canal Rhin-Main-Danube).

La situation actuelle

Le réseau

En France, le réseau des voies navigables comportait, en 1975, 7 000 km :

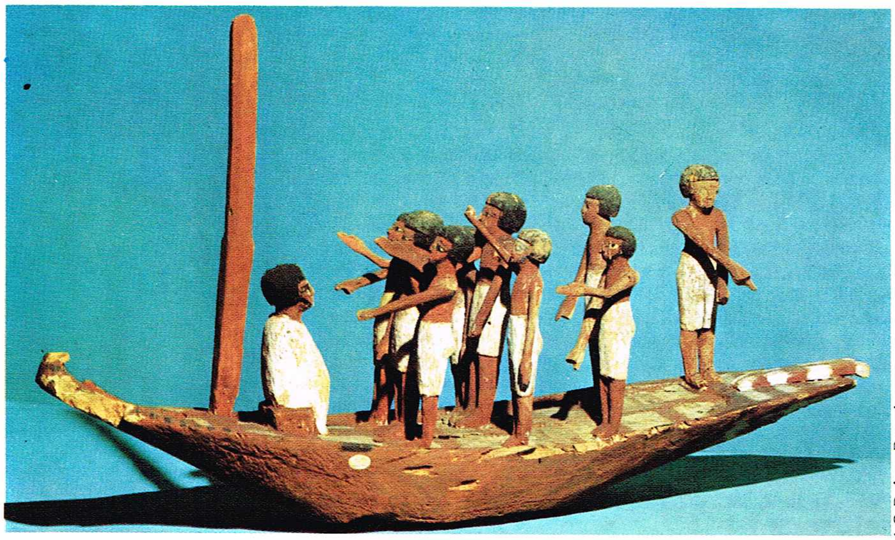

I.G.D.A. - Poggio

▼ *Modèle de bateau à voile égyptien en bois (Musée égyptien, Turin) remontant environ à l'an 2000 av. J.-C. On peut penser que les Égyptiens ont été les premiers à utiliser le transport par eau (le Nil) et à construire des bateaux.*

— 800 km de voies anciennes inférieures au gabarit Freycinet ;

— 4 000 km de voies du réseau Freycinet permettant la navigation de 1,80 à 2 m d'enfoncement d'automoteurs de 38,50 m de long pour 5 m de large et une cargaison de l'ordre de 250 t de port en lourd ;

— 350 km permettant la navigation à 2 m ou 2,50 m d'enfoncement de convois poussés de 800 t de port en lourd ;

— 1 850 km permettant la navigation à grand gabarit de convois poussés de plus de 2 000 t de port en lourd.

En Belgique, le réseau comporte 1 500 km (1972), dont 900 km à moyen gabarit (< 800 t) et 600 km à grand gabarit (> 1 350 t).

En R. F. A., le réseau comporte 4 400 km, dont 3 000 km à grand gabarit (> 1 350 t).

En Hollande, 5 500 km, dont 2 200 à grand gabarit et 1 400 à moyen gabarit.

En U. R. S. S., 146 000 km de voies navigables.

La flotte

Voici sa composition en France, en 1975 : 5 125 automoteurs de capacité 1 960 000 t, 1 133 barges de capacité 865 000 t, 192 pousseurs, 30 remorqueurs.

Les trafics

En France, le trafic a atteint en 1975, année défavorable, 95 millions de tonnes et 11,9 milliards de tonnes kilométriques. 20 % de ce trafic en tonnage est fait à l'exportation. En 1973, il était de 50 milliards de tonnes kilométriques en R. F. A., 32 milliards de tonnes kilométriques aux Pays-Bas, 200 milliards de tonnes kilométriques en U. R. S. S. et 540 milliards de tonnes kilométriques aux États-Unis.

La nature des marchandises transportées est la suivante (1975) :

51 % de matériaux de construction,
19 % de produits pétroliers,
13 % de produits agricoles et denrées alimentaires,
7 % de combustibles minéraux (charbon),
5 % de produits métallurgiques,
3 % de minerai.

La part du trafic fluvial par rapport aux autres modes de transports intérieurs était, en 1970, de 9,5 % en France, en tonnes kilométriques, de 27,9 % en R. F. A. et en Belgique, et de 61,7 % aux Pays-Bas. En tonnes, 5 % pour la France, 10 % pour la R. F. A., 20 % en Belgique et 40 % aux Pays-Bas.

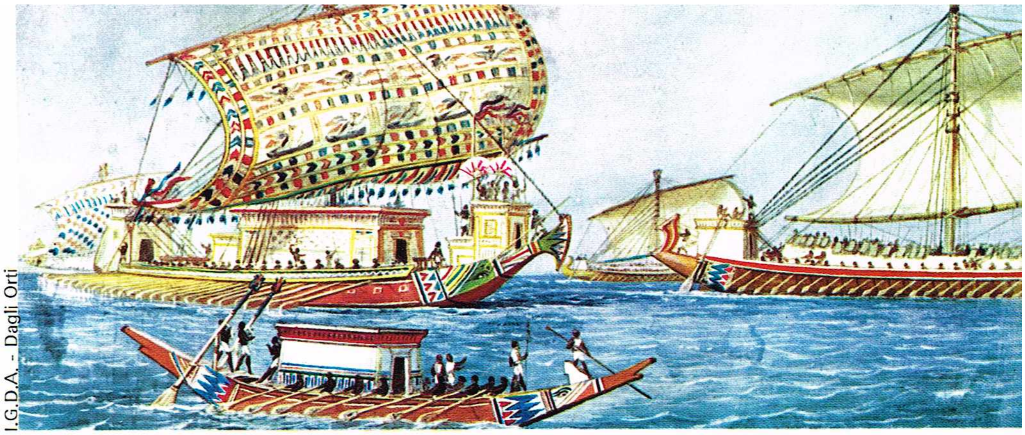

I.G.D.A. - Dagli Orti

▲ ***Embarcation égyptienne de l'époque de Ramsès III (Musée naval, Madrid). Les Égyptiens ont construit les premiers véritables navires de guerre.***

Transports maritimes

Le passé

L'origine des transports par mer n'est pas connue avec précision. Il est très probable qu'après avoir découvert les bateaux capables de naviguer sur les rivières, l'homme a dû vouloir les utiliser sur la mer. Il a pratiqué d'abord la navigation à vue des côtes, et a sûrement hésité longtemps avant d'affronter la haute mer et l'inconnue des océans. 2 600 ans avant Jésus-Christ, les Égyptiens possédaient des navires de haute mer mus par des rames. On sait que les Phéniciens étaient de brillants navigateurs : 1 000 ans avant J.-C., ils avaient déjà colonisé l'Espagne.

Lorsque l'homme a su construire des bateaux, il les a utilisés pour le transport des passagers et des marchandises. Les moyens de propulsion ont été longtemps la rame et la voile, et le matériau de construction, le bois.

Au Moyen Age, dans les mers septentrionales, des navires à voile, rectangle de toile recueillant les vents portants, effectuaient leurs voyages sous l'égide de la ligue hanséatique, association à des fins commerciales des ports de mer de l'Allemagne du Nord. Pendant ce temps, des navires utilisant le gréement aurique de voiles latines, introduit par les Arabes au VIIIe siècle, sillonnaient la Méditerranée.

Au XVe siècle, la découverte de la boussole (grâce aux Arabes qui l'avaient rapportée de Chine où l'on connaissait cet instrument trois siècles avant notre ère) fut un événement fondamental dans l'époque des grandes découvertes. On commença à dessiner des cartes, et l'on utilisait l'astrolabe pour le calcul astronomique de la latitude : c'est un disque métallique lourd, suspendu verticalement, gradué en degrés, et muni d'une alidade pivotante en son centre, par laquelle on mesurait la hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon. La longitude pouvait être obtenue à partir d'horloges qui furent longtemps des sabliers.

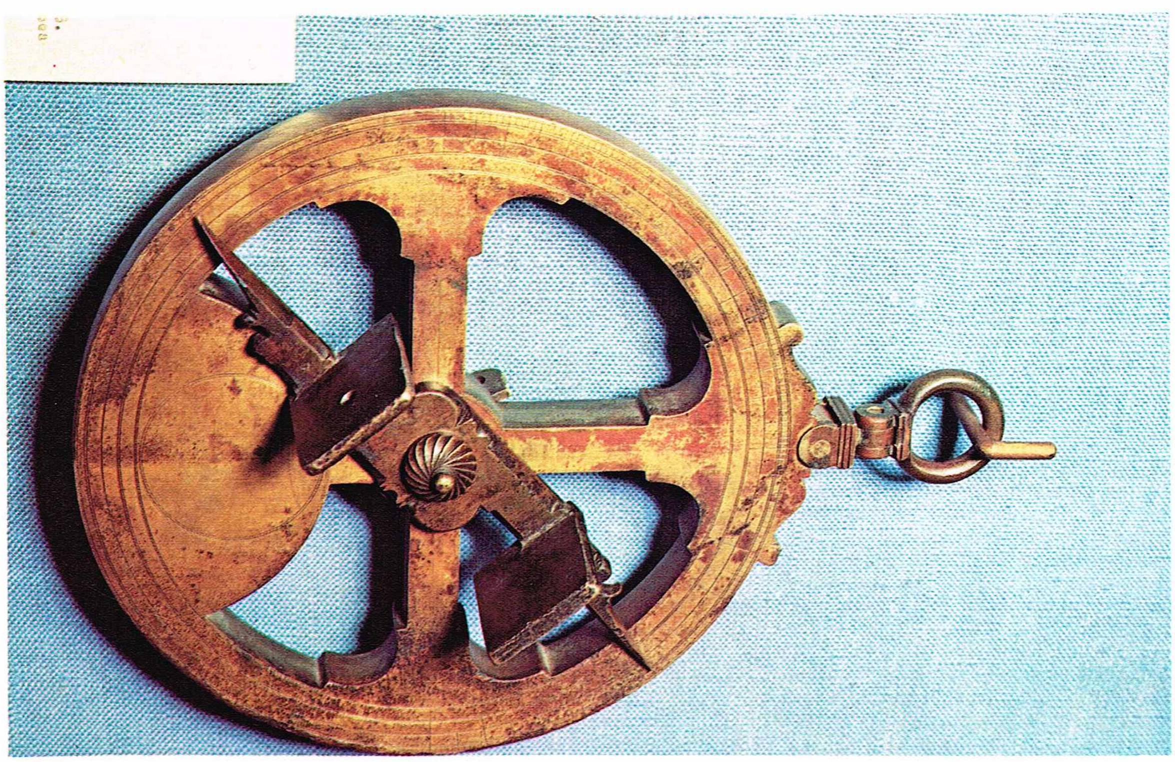

Bevilacqua - Cedri

◀ ***Astrolabe marin (1588) provenant d'un des navires de l'Invincible Armada. Il est du type utilisé entre 1540, environ, et 1670 (Greenwich, Musée naval).***

Archives I.G.D.A.

▲ *Départ de Palos de la caravelle de Christophe Colomb (château d'Albertis, Genève).*

▶ *Tableau I : composition de la flotte mondiale par types de navires. Tableau II : évolution globale du trafic maritime international entre 1965 et 1975. Tableau III : composition de la flotte marchande française au 1er janvier 1977.*

A cette époque, les Portugais, les Espagnols, puis les Hollandais et les Anglais régnaient en maîtres sur les mers. Le stimulant essentiel qui aboutit au développement du voilier long-courrier fut l'essor de l'Empire ottoman qui entraîna l'arrêt des approvisionnements terrestres en épices.

En France, contrairement à l'Angleterre, l'Espagne, le Portugal et la Hollande, le pouvoir royal ne s'est guère intéressé au développement d'une flotte. Il faut signaler l'exception importante de la création par François Ier, en 1517, du port du Havre de Grâce. A la fin du XVe et au début du XVIe siècle, alors que les puissances étrangères tournaient leur énergie du côté de la mer, la France luttait contre l'Italie et les Habsbourg. Il faut attendre le XVIIe siècle pour que, grâce à Richelieu, puis surtout à Colbert, une flotte importante soit développée. Ces activités maritimes de la France et de l'Angleterre furent en grande partie consacrées à la création d'empires coloniaux. Au XIXe siècle, l'invention de la machine à vapeur a permis un nouvel essor mondial des activités maritimes par l'accroissement de la capacité de port et de la vitesse des navires. Ce fut la fin de l'époque des clippers, navires de commerce rapides à voiles, capables de louvoyer près du vent. C'est au cours de ce siècle que furent construits les premiers bateaux en acier.

La situation actuelle

La flotte mondiale, exprimée en tonneaux de jauge brute (le tjb vaut 2,83 m³ et permet d'exprimer la capacité intérieure totale d'un navire), est en croissance régulière. En 1960, elle s'élevait à 130 millions de tjb, pour atteindre 160 millions de tjb en 1965, 227 millions de tjb en 1970, 326 millions de tjb en 1975 et 372 millions de tjb en 1976.

Les douze principales flottes nationales sont en 1976 :

1. Libéria	73,5	millions de tjb
2. Japon	41,7	—
3. Royaume-Uni	32,9	—
4. Norvège	28	—
5. Grèce	25	—
6. U. R. S. S.	20,7	—
7. Panama	15,6	—
8. U. S. A.	15	—
9. France	11,3	—
10. Italie	11	—
11. R. F. A.	9,3	—
12. Suède	8	—

La composition de la flotte mondiale par types de navires permet de montrer que les pétroliers et les transporteurs de vrac représentent environ 70 % du tonnage total, les transporteurs de marchandises diverses (y compris les porte-conteneurs) 22 % (voir le *tableau* I). Le nombre de navires s'élève à 66 000. Une centaine d'entre eux dépassent 140 000 tjb (environ 275 000 tonnes de port en lourd). Près de 65 % de la flotte mondiale ont moins de 10 ans d'âge.

L'évolution globale du trafic maritime international exprimé en millions de tonnes transportées et en milliards de tonnes-milles (produit du tonnage par la distance) est donnée par le *tableau* II. Le *tableau* III donne la composition de la flotte française au 1er janvier 1977.

**Tableau I
Composition de la flotte mondiale par types de navires**

Types de navires	Tonnages (en millions de tjb)
Pétroliers	168
Transporteurs de gaz liquéfié	3,4
Transporteurs de produits chimiques	1,2
Vracquiers mixtes (OBO)	25
Transporteurs de vrac	60,7
Transporteurs de marchandises diverses	73,6
Porte-conteneurs	6,7
Divers	2,1
Navires sans activités commerciales (remorqueurs, dragueurs, câbliers, etc.	25

**Tableau II
Evolution globale du trafic maritime international entre 1965 et 1975**

Année	Trafic en millions de tonnes	Trafic en milliards de tonnes-milles
1965	1 638	5 849
1970	2 481	10 654
1975	2 987	15 225

**Tableau III
Composition de la flotte marchande française au 1er janvier 1977**

Types de navires	Nombre	Capacité (en tjb)
Navires à passagers		
Paquebots	4	97 171
Cars et trains ferrés	20	126 764
Aéroglisseurs	3	357
	27	224 292
Cargos		
Cargos de ligne	133	959 772
Porte-conteneurs	24	398 224
Bananiers et navires polythermes	36	203 731
Transporteurs de vrac sec	58	900 307
Transporteurs de vrac mixte	6	524 782
Citernes à vin et huile	12	22 336
Transporteurs de produits chimiques	13	63 802
Caboteurs (500 tjb)	47	21 303
Navire sec stationnaire	26	37 779
Pousseurs	1	1 200
Barges	1	12 555
	357	3 146 791
Pétroliers		
Pétroliers longs-courriers	79	7 434 369
Caboteurs pétroliers	30	125 150
GPL - GNL *	7	209 223
Pétroliers et GPL stationnaires	2	242
Barges pétrolières	2	2 760
	120	7 771 744
Total général	504	11 142 827

* GPL : gaz de pétrole liquéfié - GNL : gaz naturel liquéfié.

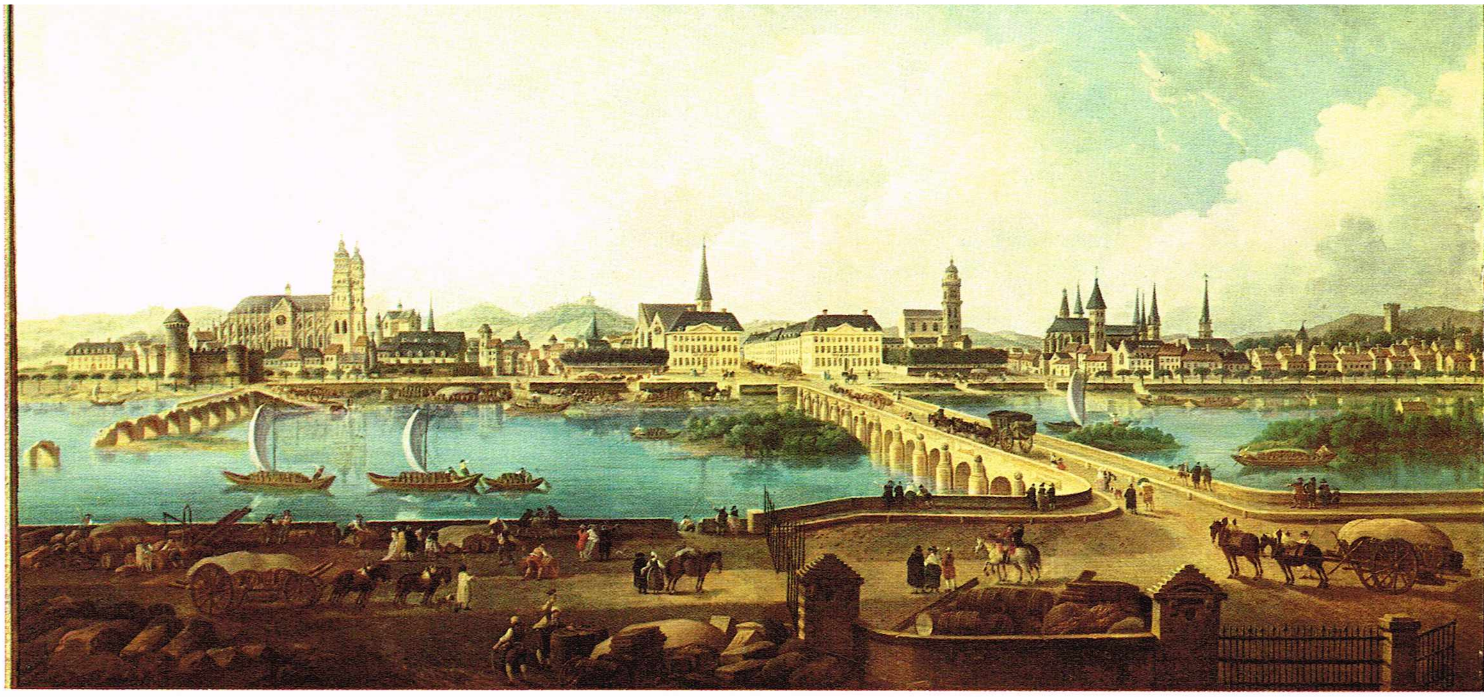

Les éléments naturels

Les éléments naturels conditionnent fortement la réalisation des infrastructures et l'exploitation du système de transport par eau. Nous examinerons donc leurs actions en étudiant le milieu aquatique.

Les rivières

Les régimes hydrauliques sont extrêmement variables d'une rivière à une autre et, pour une même rivière, varient dans le temps : une rivière peut passer d'un régime d'étiage, correspondant à des périodes de sécheresse, à un régime de crue lors de fortes précipitations. La notion fondamentale est celle de débit.

Débit d'une rivière

On appelle débit d'une rivière en un lieu donné le volume d'eau exprimé en m^3 s'écoulant en ce lieu pendant l'unité de temps (la seconde). On le désigne par la lettre Q, et on l'exprime en m^3/s. Les crues correspondent aux forts débits, et les étiages aux faibles débits.

On trace l'*hydrogramme* de la rivière en un point donné en portant le débit transitant en ce point en fonction du temps (*fig.* 1). En portant en ordonnée les débits observés, et en abscisse le nombre de jours pendant lesquels le débit est dépassé, on obtient la *courbe des débits classés*, représentée *figure* 2.

La *courbe de fréquence* des débits en un point donné (*fig.* 3) est tracée à partir des débits journaliers observés en ce point pendant un très grand nombre d'années (par exemple, 100 ans) en portant en ordonnée le rapport du nombre de jours où le débit compris entre Q et $Q + \Delta Q$ a été observé au nombre de jours total d'observation. Cette courbe, si elle a été réalisée à partir de très nombreuses observations, permet d'obtenir la probabilité pour que le débit de la rivière soit compris entre Q et $Q + \Delta Q$.

Ce sont les phénomènes extrêmes de crue et d'étiage qui ont le plus d'importance pour la navigation. En période d'étiage (faible débit), la hauteur naturelle de l'eau n'est pas suffisante pour que les bateaux puissent naviguer ; on doit alors avoir recours à des techniques artificielles comme la construction des barrages de navigation. En période de crue, les courants sont trop grands pour que la navigation s'effectue dans des conditions de sécurité admissibles. On ne peut guère s'y opposer, sauf en réduisant les crues par la construction de réservoirs-tampons.

On dit qu'une crue est décennale, centennale, millénale s'il existe une chance sur 10, sur 100, sur 1 000 de la voir apparaître dans l'année. On utilise les mêmes expressions pour les étiages. La prévision des étiages et des crues des rivières constitue un élément fondamental pour la réalisation et l'exploitation des infrastructures de navigation intérieure. Elle s'effectue par des méthodes probabilistes qui permettent d'apprécier quelles sont les lois de distribution de ces phénomènes extrêmes les mieux adaptées au cas d'une rivière donnée, en fonction des observations réalisées dans le temps. Il est fondamental de posséder des statistiques valables sur au moins vingt-cinq ans.

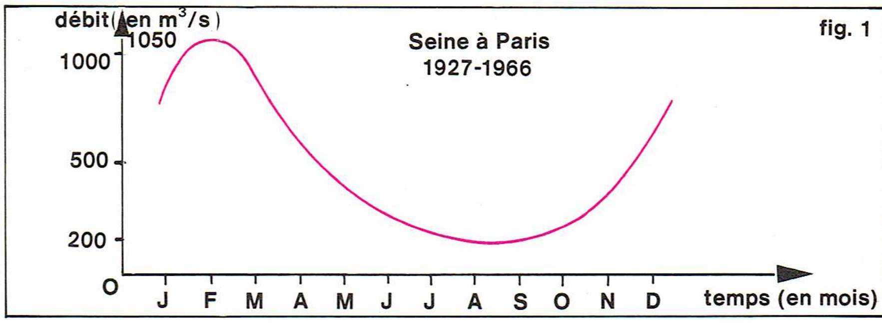

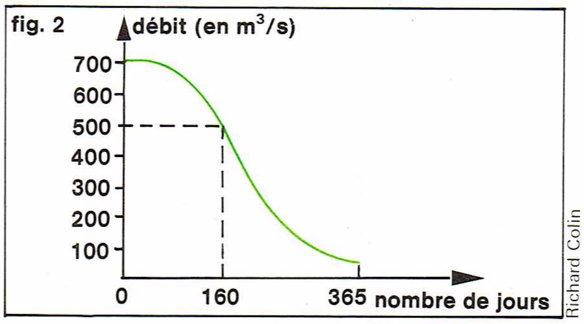

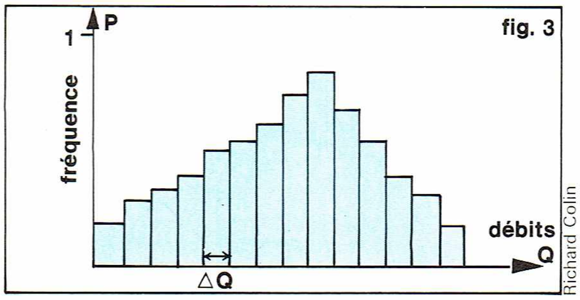

▲ *Vue panoramique de Tours en 1727, par P. A. Demachy (Beaux-Arts de Tours).* Lauros - Giraudon

Figure 1 : hydrogramme de la Seine à Paris ; on l'a construit en portant, chaque mois, la moyenne des débits enregistrés au cours des années 1927 à 1966.

◀ *Figure 2 : courbe des débits classés pour une année. Un point de cette courbe a pour ordonnée un débit* **Q** *et pour abscisse le nombre de jours pendant lesquels ce débit est dépassé. Ainsi, sur la figure, pendant 160 jours par an, le débit est supérieur à 500 m^3/s.*

◀ *Figure 3 : histogramme de fréquence des débits en un point donné.*

La mer

Les principaux phénomènes naturels régissant les mouvements de la mer sont la marée, les courants et la houle. Les plus importantes propriétés physico-chimiques de l'eau de mer sont la température, la densité et la salinité.

La marée

La marée est une oscillation des océans entretenue par l'attraction du Soleil et de la Lune sur les molécules d'eau. Cette attraction se traduit par un renflement de l'océan. Lors des équinoxes, lorsque le Soleil, la Lune et la Terre sont alignés, le renflement est maximal, et l'on observe des marées importantes de vive-eau. Si le Soleil, la Terre et la Lune font un angle droit, le renflement est minimal et l'amplitude des marées est faible, ce sont les marées de morte-eau.

▶ *Figure 4 : courbe du niveau du plan d'eau en fonction du temps. Le marnage est la différence des niveaux de pleine mer* (PM) *et de basse mer* (BM).

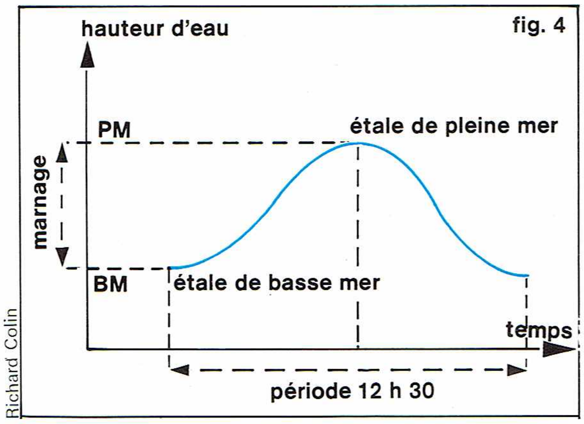

En un lieu donné, on peut tracer la courbe du niveau du plan d'eau en fonction du temps. Lorsque le niveau d'eau est maximal, on dit que l'on est en pleine mer; lorsqu'il est minimal, on est en basse mer. Le marnage est la différence des niveaux de pleine mer et de basse mer. Sur les côtes de l'Atlantique en France, cette courbe est en général une sinusoïde, pouvant subir de fortes modifications dans les eaux peu profondes (*fig.* 4).

Les périodes de la marée sont celles du mouvement relatif de la Lune (rotation en 24 h 50 mn) et du Soleil (rotation en 24 h) autour de la Terre. Sur les côtes européennes de l'Atlantique, de la Manche et de la mer du Nord, la marée est semi-diurne : elle comporte deux pleines mers et deux basses mers en 25 heures. Sur les côtes de la Thaïlande et du Vietnam, la marée est diurne : elle ne comporte qu'une pleine mer et une basse mer en 25 heures.

▼ *Tableau IV : termes descriptifs concernant la houle.*
Figure 5 : a, *diffraction de la houle autour d'une jetée;* b, *réfraction de la houle dans une baie.*

Tableau IV
Termes descriptifs concernant la houle

Longueur (en m)		Hauteur (en m)	
Courte	< 100	Faible	< 2
Moyenne	100 à 200	Modérée	2 à 4
Longue	> 200	Forte	> 4

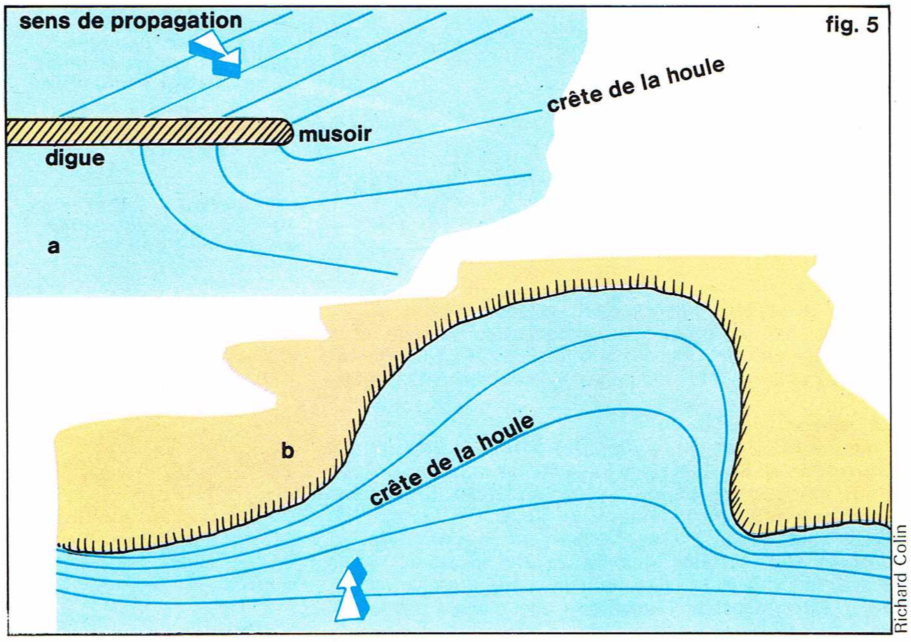

Il est possible de prédire les marées à partir des calculs astronomiques (théorie de Laplace) ou d'analyses harmoniques (théorie de Kelvin).

Sur les cartes marines, le zéro des côtes indiquées est la côte de la plus basse mer observée. Les côtes sont comptées positives au-dessus du zéro hydrophysique, négatives en dessous.

En France, pour les côtes de l'Atlantique, la Manche et la mer du Nord, on définit deux fois par jour le coefficient C de la marée; ce coefficient varie entre 120 pour les plus fortes marées de vive-eau et 20 pour les plus faibles marées de morte-eau. L'amplitude de la marée A en un lieu donné est obtenue par la formule : 2 A = C/100 U; U s'appelle l'unité de hauteur du lieu donné; il ne dépend pas du temps.

Les courants de marée

Les courants engendrés par la marée intéressent toute la masse liquide, mais leur intensité diminue au voisinage du fond. Ces courants de marée sont alternatifs si leur direction varie peu au cours du cycle de marée, giratoires dans le cas contraire.

Au large des côtes, les courants de marée sont proportionnels à l'amplitude de la marée. Près des côtes, les variations sont plus complexes, parfois proportionnelles à la racine carrée de l'amplitude de la marée.

On repère les courants sur les cartes par leur direction (sens vers lequel ils portent) et leur intensité en nœuds (1 mille marin [c'est-à-dire 1 852 m] par heure, soit environ 0,5 m/s ou 2 km/h). En France, les courants de marée maximaux sont atteints à certaines périodes de l'année : au raz Blanchard (12 nœuds); dans le golfe du Morbihan (12 nœuds).

Les courants généraux

Il existe des courants océaniques à caractère pratiquement permanent et uniforme, tels le courant froid du Labrador, le Gulf Stream dirigé de l'ouest vers l'est, et le courant équatorial dirigé de l'est vers l'ouest. Ces courants sont formés par des forces extérieures au milieu marin (vent) ou par des forces internes au milieu marin (différences de salinité ou de température).

La houle

La houle est produite par l'action du vent à la surface de l'eau. Lors d'une tempête ou d'un coup de vent, la surface de la mer se couvre de rides, puis de vagues qui progressent dans la direction où souffle le vent. On observe ensuite que la crête des vagues se brise en formant des rouleaux d'écume donnant à la mer un aspect moutonné. Il se forme ainsi un ébranlement de la surface de l'eau qui produit des ondes libres se propageant depuis le lieu de formation de la tempête : c'est le phénomène de houle. On constate que la houle fait décrire aux molécules d'eau des cercles ou des ellipses. Il n'y a pas de transport de masse.

Lorsque la houle atteint une côte inclinée, elle déferle : les vagues s'effondrent en formant de l'écume. La houle transporte de l'énergie, et exerce des efforts importants sur les obstacles qu'elle rencontre (navire, digue, etc.).

La houle est un phénomène oscillatoire que l'on caractérise par son amplitude H, sa période T, sa longueur d'onde L et sa célérité C : C = L/T. Il existe de nombreuses théories de la houle, dont la plus simple permet d'obtenir une relation entre T et L (théorie de Gerstner) : $T^2 = \frac{2\pi L}{g}$. (voir *tableau* IV).

Les houles longues atteignent 200 m à 500 m et plus de longueur d'onde pour des périodes de 12 à 18 secondes.

Comme tout phénomène oscillatoire, la houle est susceptible (*fig.* 5) :

— de se réfléchir sur un obstacle en formant les clapotis, ce qu'elle fait en conservant sa période;

— de se réfracter lorsqu'elle rencontre une modification des fonds; elle le fait aussi en conservant sa période; la houle se concentre au voisinage des caps et s'épanouit dans les lacs;

— de se diffracter dans une passe ou à proximité d'une digue.

Propriétés physico-chimiques de l'eau de mer

En dehors de la *température*, les propriétés les plus importantes de l'eau de mer sont la salinité et la densité.

La *salinité* a une valeur moyenne de 35 g de sels minéraux dissous pour 1 000 g d'eau de mer. Cette valeur atteint 10 g en mer Baltique, 32 g en Atlantique Nord, 38 g en Méditerranée et 43 g en mer Rouge. Le chlorure de sodium constitue près de 80 % des sels minéraux contenus dans l'eau de mer.

La *densité* de l'eau de mer intervient pour le tirant d'eau des navires : elle est reliée à la salinité. Pour une salinité de 35 g par litre, la masse volumique est de 1,026 g/l à la température de 15 °C.

Les facteurs météorologiques

Parmi les éléments naturels jouant un rôle important dans le transport par eau, les facteurs météorologiques se situent au premier plan.

La **température** peut entraîner sur les canaux artificiels des interruptions de navigation dues à l'apparition de glaces. Il est rare cependant que celles-ci fassent prise sur une rivière ou en mer. En diminuant la visibilité, le **brouillard** est évidemment un élément de gêne dans la navigation des bateaux. Quant au **vent,** il a surtout prise sur les bateaux légers (sans chargement), qu'il rend moins manœuvrants — sans parler, bien sûr, des tempêtes et des cyclones (*tableaux* V et VI) !

Ces différents éléments naturels, crues, étiages, houle et courants, constituent des obstacles qui se traduisent par des pertes de temps, voire des avaries ou l'impossibilité d'assurer le transport par eau. Mais il faut également en tenir compte dans la conception des infrastructures, tels les ports et les aménagements de rivières.

Aménagement des rivières

L'aménagement des rivières et des canaux, que l'on regroupe sous le terme d'ensemble de voies navigables, consiste essentiellement à établir un chenal profond et stable dans le temps pour permettre la navigation de bateaux dont on a choisi le tirant d'eau. La *figure* 6 donne la carte des rivières navigables et des canaux français.

Aménagement à courant libre d'une rivière sans marée

On est conduit à aménager une rivière lorsque la profondeur d'eau au mouillage disponible pendant la période des basses eaux (étiage) est suffisante. Il existe des lois qui donnent des relations entre la configuration du lit d'une rivière, son débit et la profondeur d'eau.

Les **lois de Lacey** indiquent que la largeur du lit et la longueur des méandres d'une rivière sont proportionnelles à la racine carrée du débit moyen, que la profondeur moyenne est proportionnelle à la racine cubique du débit et la vitesse d'écoulement à la racine sixième du débit.

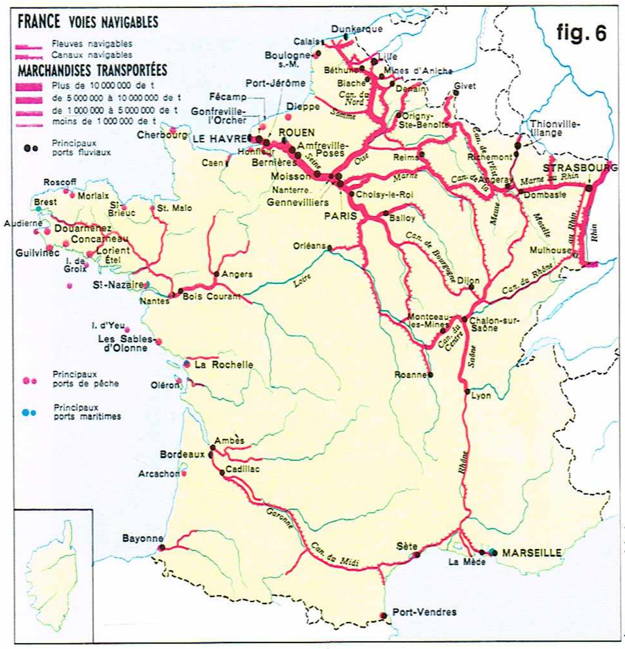

document Alpha

Tableau V Force du vent (échelle de Beaufort)			
Vitesse moyenne (en nœuds)	**Code ("vent force...")**	**Terme descriptif**	**Effets au large**
< 1	0	Calme	Mer comme un miroir
1 à 3	1	Très légère brise	Quelques rides
4 à 6	2	Légère brise	Vaguelettes courtes, ne déferlant pas
7 à 10	3	Petite brise	Très petites vagues, quelques moutons
11 à 16	4	Jolie brise	Petites vagues, nombreux moutons
17 à 21	5	Bonne brise	Vagues modérées, moutons, quelques embruns
22 à 27	6	Vent frais	Formation de lames, crêtes d'écume blanche, embruns
28 à 33	7	Grand frais	Lames déferlantes
34 à 40	8	Coup de vent	Lames allongées, traînées d'écume, tourbillons d'embruns
41 à 47	9	Fort coup de vent	Grosses lames, rouleaux, visibilité réduite par les embruns
48 à 55	10	Tempête	Très grosses lames, épaisses traînées blanches, visibilité réduite par les embruns
56 à 63	11	Violente tempête	Lames exceptionnellement hautes, bancs d'écume, visibilité réduite par les embruns
⩾ 64	12	Ouragan	Lames énormes, mer entièrement blanche, visibilité très réduite par l'écume et les embruns

▲ *Tableau V : force du vent (échelle de Beaufort).*

◄ *Figure 6 : carte des voies navigables en France.*

▼ *Tableau VI : état de la mer d'après la hauteur moyenne des vagues bien formées du système observé.*

Tableau VI Etat de la mer d'après la hauteur moyenne des vagues bien formées		
Hauteur (en m)	**Code ("mer force...")**	**Terme descriptif**
0	0	Calme, sans rides
0 à 0,1	1	Calme, ridée
0,1 à 0,5	2	Belle
0,5 à 1,25	3	Peu agitée
1,25 à 2,5	4	Agitée
2,5 à 4	5	Forte
4 à 6	6	Très forte
6 à 9	7	Grosse
9 à 14	8	Très grosse
> 14	9	Enorme

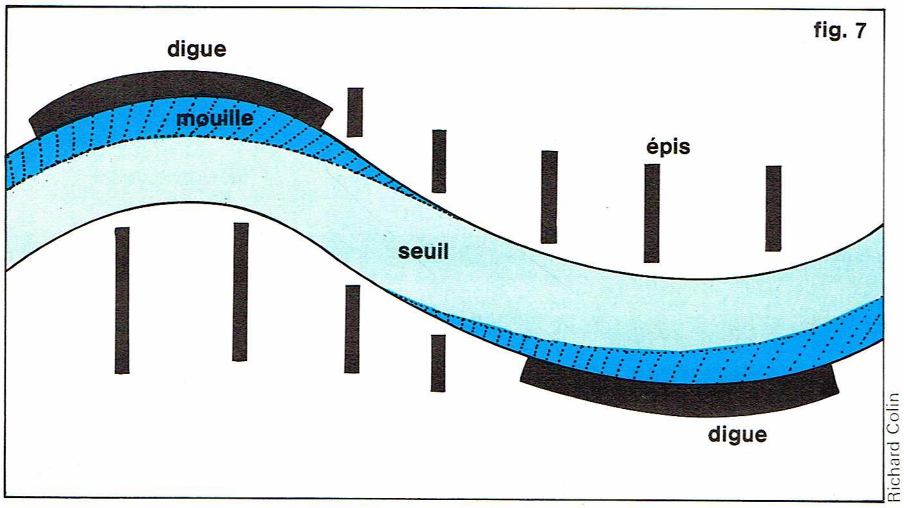

▲ *Figure 7 : aménagement d'une rivière par digues et épis. Des mouilles (zones profondes) se creusent dans les rives concaves, que l'on protège de l'érosion par des digues. Les rives convexes, qui restent dégagées, sont seulement dessinées par quelques épis perpendiculaires à la berge.*

Les **lois de Fargue,** trouvées sur la Garonne, confirmées par Girardon sur le Rhône et par de nombreux autres ingénieurs sur des rivières à fonds sableux dans le monde, indiquent que des mouilles (zones profondes) se creusent, dans les courbes des rivières sur les rives concaves. Elles sont séparées les unes des autres par des seuils situés aux inflexions.

L'aménagement consiste d'abord à choisir un bras de rivière dont les profondeurs sont aussi bonnes que possible et à essayer de les améliorer en appliquant les lois précédemment citées. On recherche les bras ayant le moindre débit solide (sable, etc.) pour y concentrer le débit de liquide, et l'on rejette le débit solide dans les autres bras.

On peut approfondir le lit d'une rivière dans des sections localisées par dérochage et dragage. On préfère fixer les formes du lit d'une rivière au moyen d'ouvrages appelés digues et épis (*fig.* 7). Les rives concaves de la rivière sont fixées par des digues constituées par un revêtement de la berge naturelle s'opposant à l'érosion du courant. Les rives convexes restent au contraire dégagées, l'ossature en étant seulement dessinée par quelques épis perpendiculaires à la berge.

On est amené, par faible débit, à concentrer l'écoulement dans un chenal le moins large possible. Pour les forts débits, il faut augmenter le lit de la rivière. Le profil en travers type est donc celui représenté par la *figure* 8.

En France, on peut citer les aménagements à courant libre suivant : le Rhin à l'aval de Strasbourg; le Rhône à l'aval de Lyon (travaux de Girardon) ; la Loire en aval de la Maine (travaux de Kauffmann).

▶ *Figure 8 : lit majeur et lit mineur. On est amené, pour les faibles débits, à creuser un chenal où l'eau se concentrera en période d'étiage.*
▼ *A gauche, figure 9 ; principe de la canalisation d'une rivière : avant canalisation, le niveau de la rivière fluctue entre le niveau d'étiage et le niveau de crue exceptionnelle. La canalisation consiste à réaliser des barrages qui délimitent des plans d'eau horizontaux. En période de crue, les barrages sont ouverts pour ne pas gêner l'écoulement des eaux. A droite, figure 10 : on construit les digues en utilisant des fascines et des enrochements que l'on peut solidariser par du mastic de bitume.*

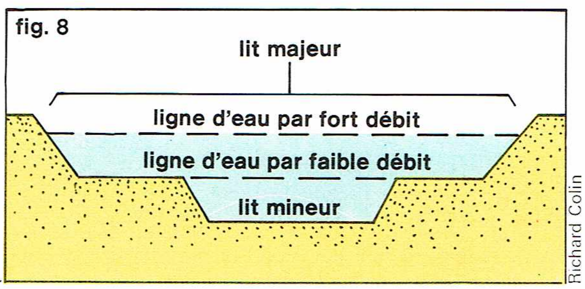

Aménagement à courant libre d'une rivière soumise à la marée

Aux phénomènes dus à la rivière s'ajoutent ici ceux dus à la marée : celle-ci induit dans la rivière une onde qui se propage vers l'amont en engendrant des phénomènes de transports solides et de modification du lit. Les matériaux transportés par les courants de la rivière et de la marée se déposent à chaque renverse, en formant des barres et des seuils qui limitent le tirant d'eau. De nombreux facteurs interviennent, tels que la turbulence de l'écoulement, les variations de salinité, la nature des sédiments transportés.

On aménage la rivière en utilisant les caractéristiques du flot et du jusant, et on évite les discontinuités des sections de la rivière et de son embouchure. On utilise les mêmes techniques que pour les rivières non soumises à marée : épis, digues et dragages.

Canalisation d'une rivière non soumise à la marée

Ce type d'aménagement est très différent des précédents. On crée sur la rivière une succession de plans d'eau sensiblement horizontaux (ce sont les *biefs*) au moyen de barrages. En régime de basses eaux, la rivière devient un escalier géant. Les bateaux franchissent les marches par des écluses accolées en général aux barrages. En régime de crues, les barrages sont retirés pour éviter les inondations. La rivière reprend donc son allure avant canalisation.

L'espacement et la cote de retenue des barrages sont déterminés pour que le mouillage désiré soit obtenu à l'étiage tout du long de la rivière (*fig.* 9).

En France, la Seine, la Saône, le Rhône, le Rhin et la Moselle sont canalisés.

Canal latéral à une rivière

Lorsqu'une rivière est trop étroite ou trop sinueuse pour pouvoir être canalisée, on réalise un canal latéral entièrement artificiel dans la vallée et constitué par une succession de biefs horizontaux. Les dénivellations sont franchies par les bateaux grâce à des écluses. Il n'y a pas de barrage.

Le canal de jonction entre deux vallées

C'est un aménagement purement artificiel qui consiste à faire rejoindre deux voies navigables situées en général dans des bassins différents : on crée des plans d'eau horizontaux séparés par des écluses ou des élévateurs à bateaux. Le bief le plus élevé s'appelle le bief de partage, parce que les eaux se partagent entre les deux versants.

L'alimentation en eau d'un tel canal est délicate à assurer. On utilise souvent les eaux des rivières qui sont reliées par le canal, en les faisant remonter jusqu'au bief de partage par pompage. On peut également créer des réservoirs au niveau du bief de partage.

Les ouvrages principaux

L'aménagement d'une voie navigable comporte la réalisation de multiples ouvrages, parmi lesquels nous examinerons : les épis, les digues, les défenses de berges, les barrages de navigation, les écluses, les pentes d'eau.

Les épis et les digues

L'aménagement à courant libre s'effectue, comme nous l'avons dit, par la mise en place de digues dans les concavités et d'épis dans les convexités. On les construit en utilisant des fascines et des enrochements que l'on peut solidariser par du mastic de bitume (*fig.* 10). Les épis et les digues peuvent être submersibles ou insubmersibles.

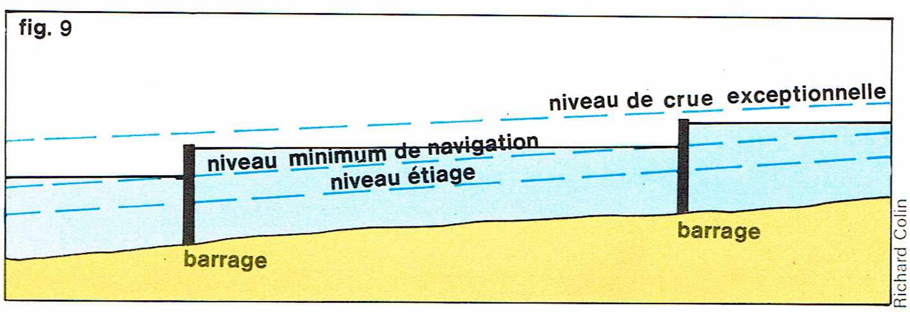

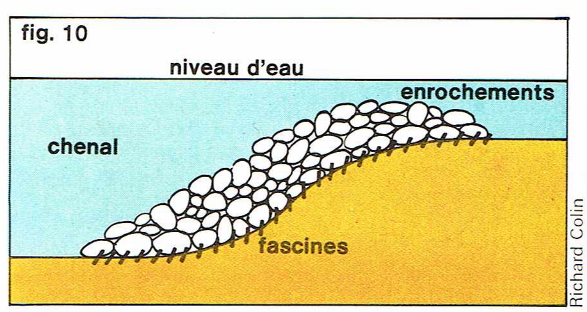

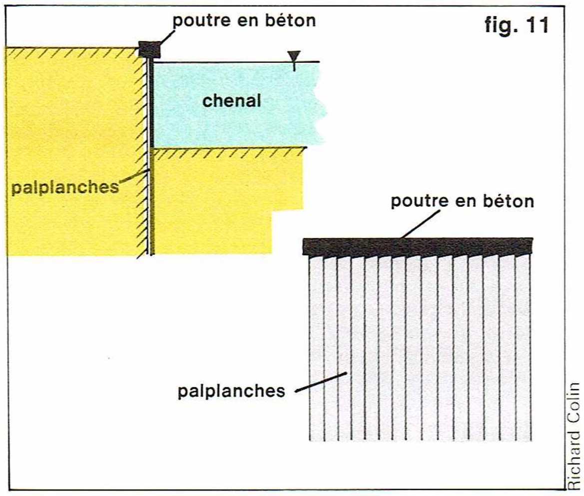

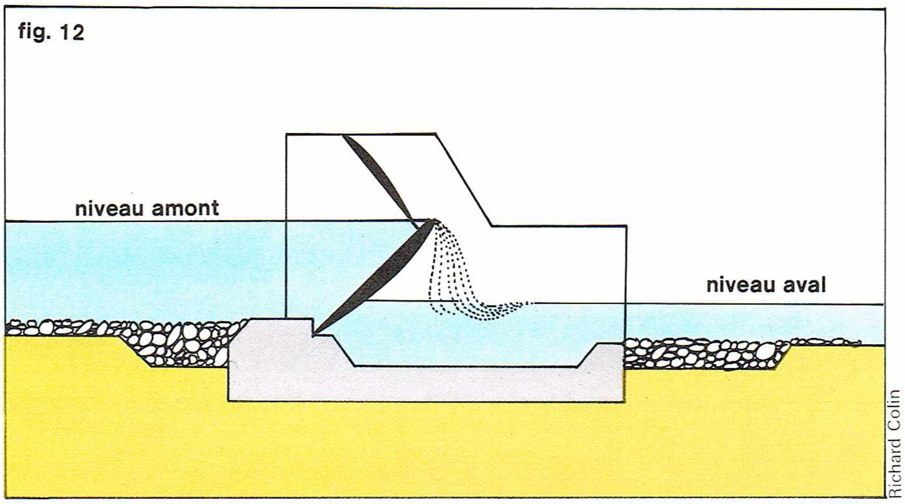

Les défenses de berge

Pour éviter l'érosion des berges due aux crues des rivières ou au passage des bateaux, on réalise des défenses de berge. Ces ouvrages linéaires peuvent être des murs de béton, des digues en enrochements ou des planches en acier. Elles peuvent également contribuer à l'étanchéité de la voie navigable (*fig.* 11).

Les barrages de navigation

Les barrages permettent de maintenir en amont une cote d'eau suffisante pour la navigation. En période de crues, ils sont relevés de façon à ne pas gêner l'écoulement des eaux. A l'heure actuelle, on réalise surtout, en France, des barrages-clapets (*fig.* 12) et des barrages-segments (*fig.* 13).

Les écluses

Les écluses constituent, avec les barrages et les défenses de berge, les ouvrages les plus importants sur les voies navigables. Elles permettent aux bateaux de franchir les dénivellations des plans d'eau (*fig.* 14).

Les dimensions des écluses sont variables selon les voies navigables. Sur les voies à grand gabarit, les normes européennes conduisent à une longueur de 185 m utiles, une largeur de 12 m utiles. On entend par là qu'un bateau faisant 185 m de long et 12 m de large pourrait juste passer dans l'écluse.

L'écluse est constituée d'un sas et de deux têtes, la tête amont et la tête aval. Ces têtes renferment chacune une porte ; l'écluse comporte deux *bajoyers* et un *radier*.

Il existe un système d'alimentation en eau, qui est prélevée à l'amont et rejetée à l'aval. Le fonctionnement de

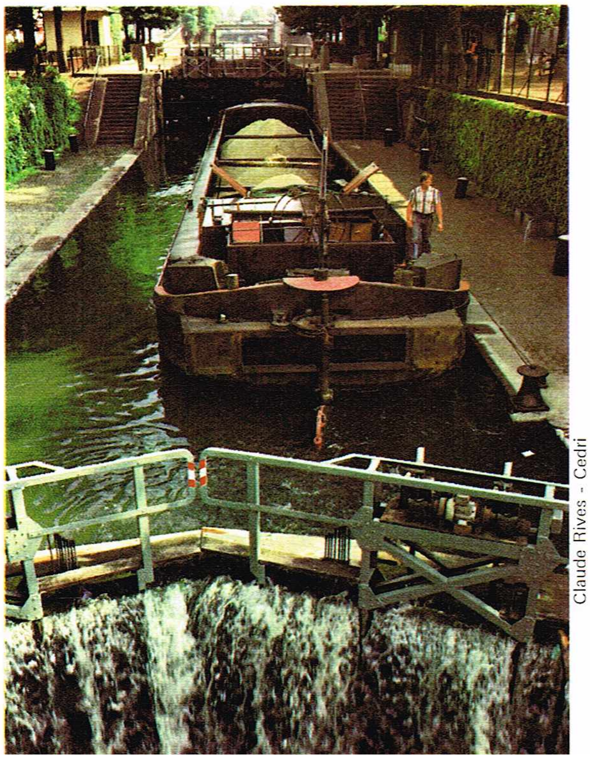

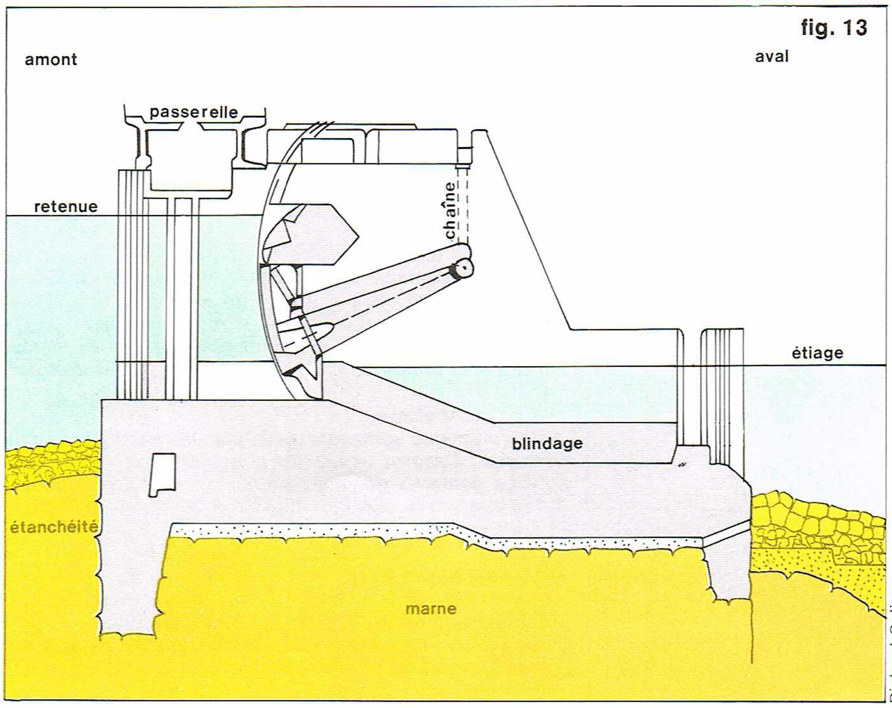

◀▲ En haut, à gauche, figure 11 : défense de berge en palplanches métalliques. En haut, à droite, figure 12 : barrage-clapet ; ce barrage est constitué par plusieurs piles entre lesquelles on dispose des vannes-clapets qui tournent autour d'un axe horizontal situé dans la partie inférieure. Des vérins implantés sur les piles permettent de manœuvrer les clapets.
Ci-dessus, figure 13 : barrage-segment ; ce barrage est constitué par plusieurs piles entre lesquelles on dispose des vannes-segments qui tournent autour d'un axe horizontal situé à l'arrière, en dehors des eaux. On peut remonter complètement les vannes.

◀ Automoteur dans une écluse du canal Saint-Martin, à Paris.

▼ Figure 14 : coupe transversale du sas.
a, de l'écluse d'Écuelles ; b, de l'écluse de Seurre. Les mouvements d'eaux se font dans l'écluse type a (Écuelles) par les têtes ou les portes des écluses. Ils se font latéralement par les aqueducs figurant dans le type b (Seurre).

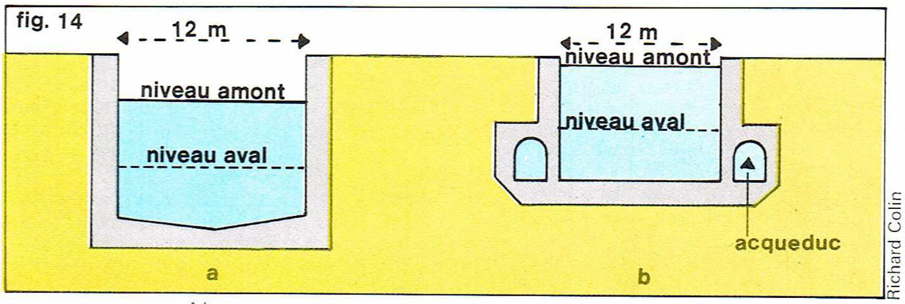

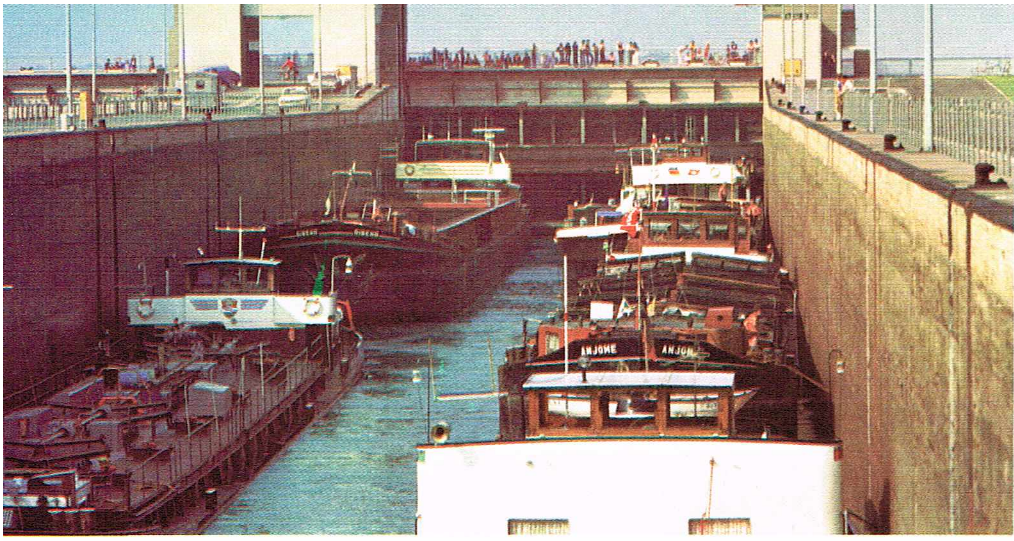

C. Sappa - Cedri

▲ *Écluse de Gambsheim sur le Rhin (Alsace).*

l'écluse est très simple : lorsque le niveau d'eau dans le sas est le même que celui à l'amont, par exemple, on ouvre la porte amont. Un bateau peut pénétrer dans le sas de l'écluse. On ferme alors la porte amont, on arrête l'alimentation en eau de l'écluse, et on rejette l'eau contenue dans le sas vers l'aval. Le niveau du plan d'eau dans le sas s'abaisse, ainsi que le bateau, jusqu'au niveau aval. On ouvre alors la porte aval, et le bateau peut quitter le sas. La chute de l'écluse est la dénivellation entre le niveau amont et le niveau aval. En France, le record de chute appartient à l'écluse de Donzère-Mondragon sur le Rhône avec 26 mètres. Le record mondial est russe avec 42 mètres.

La construction d'une écluse se fait souvent à l'abri d'un *batardeau* qui isole la fouille dans laquelle sera construite l'écluse de l'eau due à la présence de la rivière ou du canal.

La pente d'eau

C'est un ouvrage qui permet le passage des bateaux d'un bief aval à un bief amont à l'aide d'un coin d'eau constitué dans une rigole et poussé par un bulldozer. Ce nouveau type d'élévateur à bateaux est réalisé en France sur le canal latéral à la Garonne près de Montauban.

Les plans inclinés

Ces ouvrages sont constitués par des parallélépipèdes contenant l'eau et le bateau que l'on élève ou abaisse sur une pente en général raide. Citons les plans inclinés d'Arzviller sur le canal de la Marne au Rhin, en France, et de Ronquières, en Belgique.

Les ascenseurs bateaux

Le bateau pénètre dans une « boîte » contenant de l'eau que l'on élève ou que l'on abaisse verticalement au moyen d'un dispositif à câbles. Ce type d'ouvrage est réalisé, en particulier, en Allemagne.

Les ponts canaux

Ces ouvrages sont érigés pour le cheminement des rivières par les canaux. Le plus célèbre, en France, est celui du canal de Briare.

Aménagement des ports

Un port maritime ou fluvial est le lieu dans lequel les navires vont stationner dans l'attente d'un voyage et vont effectuer les opérations de chargement ou de déchargement de passagers ou de marchandises, ou de soutage (fuel par exemple) et d'avitaillement. Le port permet également l'entretien, la réparation, voire la construction des navires. Il est un des maillons de la chaîne des transports par eau.

Le port maritime doit être aussi un abri pour les navires vis-à-vis des tempêtes et de la houle. Il peut être implanté dans une rade abritée, sur le littoral ou sur un fleuve. Le port peut être gagné sur les eaux ou bien creusé dans les terres. Les éléments naturels qui ont été décrits plus haut sont toujours pris en considération lors du choix de l'implantation d'un nouveau port : les courants, le vent, la houle.

Nous distinguerons les ports extérieurs, débouchant directement en mer, et les ports intérieurs établis sur des rivières ou des canaux. Le Havre, Antifer, Dunkerque, Cherbourg sont des ports extérieurs; Rouen, Paris, Londres, Rotterdam sont des ports intérieurs.

▼▶ *A droite, figure 15 : digue à talus. Ci-dessous, figure 16 : tétrapode; bloc de béton pouvant peser jusqu'à 100 tonnes, utilisé pour résister à des houles de forte amplitude.*

fig. 16

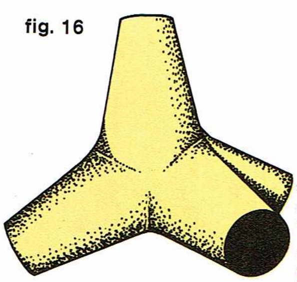

Richard Colin

Les ports extérieurs

Un port extérieur compte en général un avant-port défini par des digues, dont le but est de constituer un plan d'eau relativement calme où les navires puissent ralentir (on dit : casser leur erre) et être pris en charge éventuellement par des remorqueurs. Un chenal d'accès mène à l'avant-port. Ce port lui-même est abrité à nouveau par des ouvrages de protection. Il comporte des bassins délimités par des quais. L'agitation due à la houle doit être réduite — de l'ordre de 0,50 m — au droit des quais et des bassins.

Le port et l'avant-port sont conçus en fonction des bateaux qui doivent y évoluer. Les dimensions des navires, longueur, largeur, tirant d'eau, sont les éléments fondamentaux qui permettent de dessiner le plan masse d'un port et de définir les profondeurs d'eau.

Un navire peut casser son erre sans l'aide d'un remorqueur sur une distance de l'ordre de 2 à 4 fois sa longueur. Il peut manœuvrer seul dans un cercle d'évitage ayant pour diamètre trois fois sa longueur. La largeur du chenal d'accès au port est de l'ordre de grandeur de la largeur des plus grands navires pouvant accéder au port.

La spécialisation des navires intervient également dans la conception des ports : les minéraliers nécessitent des engins de déchargement spéciaux avec des aires de stockage, les pétroliers sont également reçus sur des quais spécialisés; les porte-conteneurs impliquent des portiques de déchargement et de chargement très importants et des terre-pleins de manutention de grande superficie situés à proximité du quai.

Les ports intérieurs

Les ports intérieurs peuvent être maritimes, fluviaux ou mixtes, selon qu'ils sont accessibles aux navires de mer ou aux bateaux de navigation intérieure. Ils nécessitent la création, puis l'entretien, de chenaux de navigation. Ils peuvent être en communication directe avec la mer (port de Rouen), ou bien isolés par une écluse (port de Caen). Leurs quais sont directement situés le long du chenal ou bien dans des *darses,* elles-mêmes isolées éventuellement par des écluses.

Les ouvrages portuaires

Les digues

Les digues sont soumises aux efforts exercés par la houle, qui, en période de tempête, sont extrêmement violents. Pour assurer leur stabilité, on les fait les plus massives possible. On les protège du côté extérieur directement soumis à la houle, mais aussi du côté intérieur, parce qu'une houle exceptionnelle peut submerger l'ouvrage. L'extrémité de la digue appelée *musoir* est une zone particulièrement sensible. On distingue deux types de digues : la digue à talus d'enrochements et la digue verticale.

● Une *digue à talus* est constituée par une infrastructure en enrochements naturels comportant une carapace formée de blocs naturels ou artificiels (en béton) très lourds et par une superstructure, le couronnement, formée d'éléments en béton établis au-dessus du niveau moyen de la mer (*fig.* 15).

fig. 15

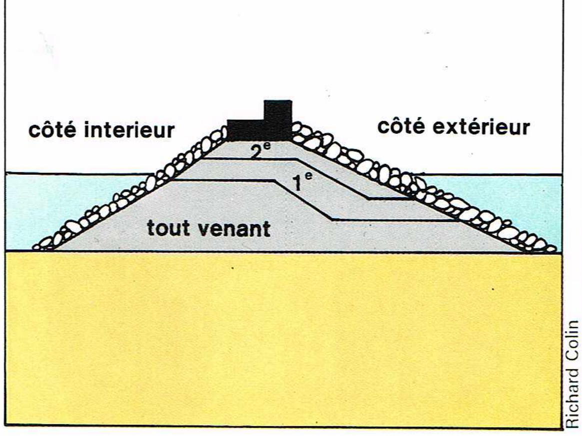

Richard Colin

Au port d'Antifer, pour résister à des houles de forte amplitude, les enrochements artificiels placés du côté large font 48 tonnes. Ce sont des blocs cubiques en béton. Au port de Dunkerque, les blocs les plus lourds font 100 tonnes. Il faut des engins spéciaux pour les mettre en place. On utilise des blocs de formes diverses. Citons en particulier le tétrapode construit selon les diagonales d'un tétraèdre (*fig.* 16).

● Une *digue verticale* est constituée par une muraille en blocs de béton empilés et fondée sur une infrastructure en enrochements naturels. C'est un ouvrage fragile dont la destruction par la houle est presque toujours totale. On adopte pour son calcul une houle centennale (probabilité d'occurrence de 1/100) [fig. 17].

Les quais

Les quais dans les ports assument plusieurs fonctions :

— l'amarrage des navires,

— l'accostage des navires,

— le soutènement des terres,

— la reprise des charges circulant sur les quais (grue, portique, etc.).

Il existe de nombreux types de quais, dont la *figure* 18 donne quelques illustrations.

Les ducs d'albe

On désigne ainsi des ouvrages constitués de tubes métalliques enfoncés dans le sol qui permettent l'accostage et l'amarrage des navires (*fig.* 19). Les ducs d'albe peuvent être souples ou rigides.

Les équipements portuaires

Les équipements portuaires comportent les terre-pleins, les hangars, les réseaux divers (électricité, téléphone, fuel, eau, etc.) et l'outillage. L'évolution technologique est rapide dans ce domaine.

L'**outillage** d'un port varie en fonction de la marchandise à manipuler (conteneurs, marchandises en vrac, palettes, colis séparés, etc.) et des conditions de manutention (verticale, horizontale). Nous citerons, pour la manutention verticale, les grues de quai fixes ou mobiles pour des charges allant jusqu'à une quinzaine de tonnes, les portiques à conteneurs d'une force de levage de 40 tonnes, les pontons bigues pour les colis lourds exceptionnels (jusqu'à 400 tonnes). Pour la manutention horizontale, on dispose de chariots élévateurs utilisés pour des transports sur 200 mètres de palettes allant jusqu'à 25 tonnes, de remorques tirées par un tracteur pour les transports sur de plus grandes distances.

Pour la manutention de pondéreux en vrac (charbon, minerais, engrais, ciments, etc.), on utilise les roues-pelles ou les bennes desservies par des bandes transporteuses à grand débit permettant de porter la marchandise sur des parcs de stockage. Pour la manutention de céréales et de grains en vrac, on utilise des aspirateurs pneumatiques pour le déchargement et des goulottes pour le chargement des navires.

Les liquides en vrac (hydrocarbures, gaz liquéfié, vin, huile, etc.) sont manutentionnés par pompage dans des

N. Cirani

▲ *Implantation moderne d'un port : ici, le port de San Francisco.*

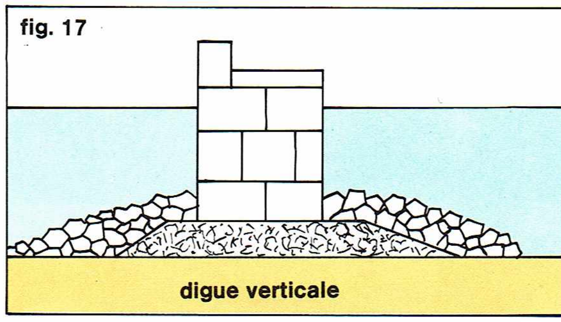

Richard Colin

◀ *Figure 17 ; digue verticale : elle est constituée par une muraille en blocs de béton empilés et fondée sur une infrastructure d'enrochements naturels.*

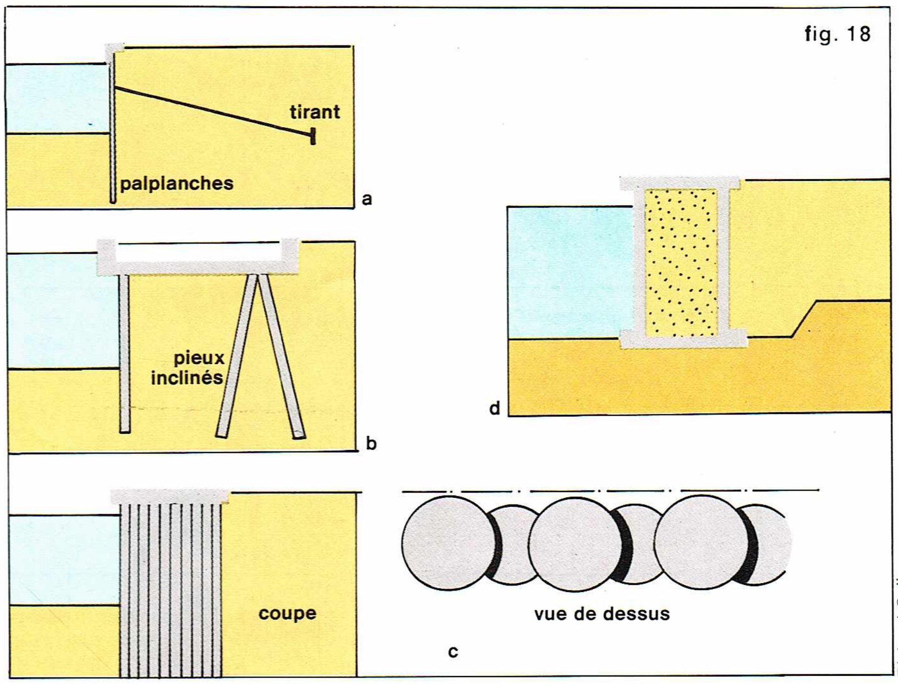

Richard Colin

▲ *Figure 18 :*
a, quai plein en palplanches métalliques ;
b, quai danois : plate-forme soutenue par des pieux droits et inclinés ;
c, quai en gabions : le soutènement des terres est obtenu par des gabions circulaires constitués de palplanches métalliques ;
d, quai en caissons : le soutènement des terres est obtenu par des caissons en béton armé, en général préfabriqués.

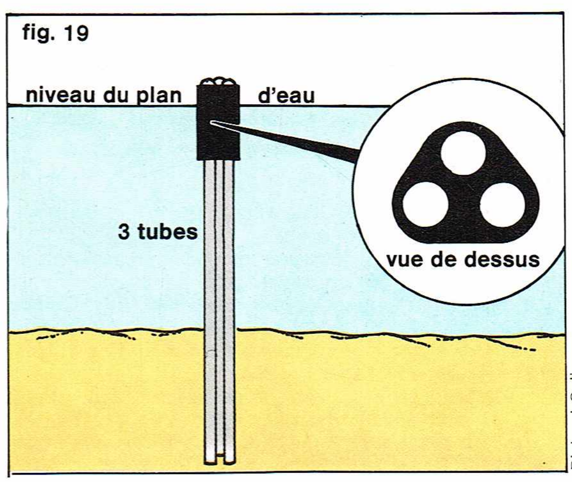

Richard Colin

◀ *A droite, figure 19 : ducs d'albe.*
A gauche, port de Gennevilliers : chargement de céréales (colza).

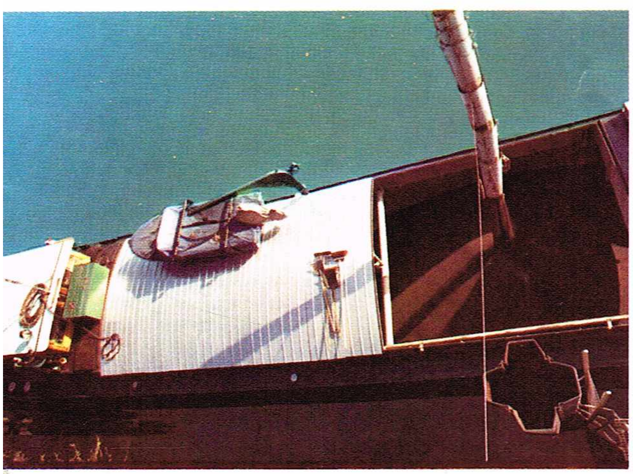

Gérard Sioen - Cedri

▶ *Radiophare et sémaphore à Porte-Saint-Matthieu (Finistère); on voit aussi les ruines d'une abbaye.*

Claude Rives - Marina Cedri

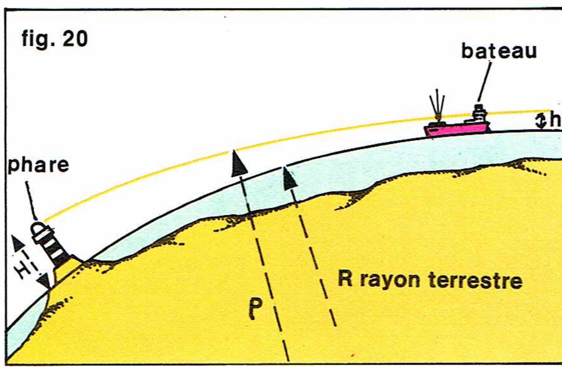

▶ *Figure 20 : schéma permettant de calculer la courbure d'un rayon lumineux issu d'un phare.*

Richard Colin

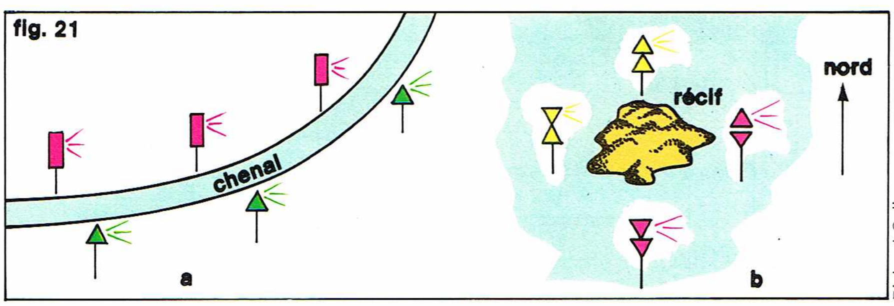

Richard Colin

▲ *Figure 21 : balisage; a, système latéral; b, système cardinal.*

tubes. La liaison avec le bateau se fait par des flexibles, en caoutchouc souple, de plusieurs mètres de longueur.

Les **hangars.** On réalise de plus en plus des hangars sans étage, et sans appuis intérieurs, de façon à faciliter la circulation des engins de manutention. La largeur des hangars atteint 50 m.

Les **terre-pleins** permettent le stockage des marchandises peu sensibles aux intempéries, et des conteneurs. Ils sont situés à une vingtaine de mètres des quais.

Les aides à la navigation

Les aides à la navigation sont des équipements du système de transport par eau, ayant pour but de prévenir les navigateurs des dangers dus à des obstacles (bancs, récifs, épaves), de les aider à suivre les chenaux d'entrée de port ou tracés dans les estuaires ou les rivières et, plus généralement, à naviguer en sécurité.

La transmission des informations se fait par des ondes lumineuses dans le cas des phares et des bouées, sonores et électromagnétiques dans le cas du radar, des radiophares.

Les phares

L'origine des phares remonte au feu allumé sur la tour érigée dans l'île de Pharos près d'Alexandrie. C'était une des sept merveilles du monde. Un feu est caractérisé par :

— sa *couleur :* il peut être blanc, rouge, vert, violet;

— son *rythme :* il peut être à éclats lorsque la durée totale de lumière est nettement plus courte que la durée d'obscurité, à occultation dans le cas inverse, isophase (la durée de la lumière est égale à la durée de l'obscurité) ou scintillant (alternances très rapides de lumière et d'obscurité d'égale durée).

La portée du feu fait intervenir à la fois la hauteur du support du feu, l'intensité lumineuse du feu exprimée en candelas, les conditions météorologiques (en particulier la présence de brume).

Désignons par R le rayon terrestre, H la hauteur du feu au-dessus de la surface de la mer, h celle de l'observation (*fig.* 20); le rayon de courbure ρ du rayon lumineux est :

$$\rho = \sqrt{HR\,\frac{2m}{m-1}} + \sqrt{hR\,\frac{2m}{m-1}}$$

avec $m = \rho/R$; m varie de 2 à 20 selon l'indice de réfraction de l'atmosphère.

Le balisage

Le balisage est réalisé au moyen de balises, de bouées et de feux. On distingue le système cardinal utilisé en haute mer et dans les rades, et le système latéral utilisé dans les chenaux et sur les rivières (*fig.* 21).

Dans le système latéral, le navire venant de la mer et remontant le chenal trouve à babord des balises rouges ou rouges et blanches de forme cylindrique (la nuit, le feu est rouge); à tribord, des balises noires ou vertes de forme conique (la nuit, le feu est vert).

Dans le système cardinal, un obstacle est marqué par des balises dont le voyant est constitué de deux cônes disposés verticalement de diverses façons.

Les aides radio-électriques

On distingue :

● le radiophare omnidirectionnel, émettant des ondes circulaires sur une fréquence déterminée avec un signal caractéristique;

● le radio-alignement, qui émet dans une direction privilégiée;

● le radiophare consol, qui permet de réaliser plusieurs radio-alignements différents selon la direction;

● les systèmes Decca, Omega, Loran, fondés sur la mesure d'une différence de phases entre les émissions de deux stations foyers; il s'agit d'un procédé de navigation hyperbolique;

● le système Loran, fondé sur la mesure des temps de propagation de deux ondes de même fréquence émises simultanément par deux émetteurs;

● le récepteur météorologique; le récepteur situé à bord du navire permet d'établir des cartes météo comportant les isobares et les isothermes ainsi que des cartes de hauteur de vagues;

● les liaisons radiotéléphoniques se font entre les navires équipés d'émetteurs récepteurs fonctionnant dans la bande métrique (VHF) et les capitaineries des ports;

● la navigation par satellites, qui permet, grâce à un ordinateur situé à bord des navires, de connaître la position à chaque instant en longitude et en latitude;

● le radar. Il utilise une onde de très haute fréquence, donc très courte, émise par un émetteur. Cette onde se réfléchit sur un obstacle et revient sur un récepteur qui la détecte et l'amplifie. Le radar est muni d'une antenne à réflecteur parabolique ou à fentes fonctionnant alternativement en émetteur, puis en récepteur, qui balaie l'horizon.

On mesure le temps entre l'émission et la réception d'une onde. Le résultat est porté sur un écran qui est gradué en distance.

Le radar est systématiquement installé sur les navires de mer et sur les convois poussés de navigation intérieure. Il permet la navigation par temps de brume ou de brouillard. C'est un outil particulièrement efficace qui nécessite toutefois un entraînement intensif des opérateurs (voir *Technologie II*, p. 96 à 106).

Titus

▲ *Pétrolier brise-glace près de la côte de l'île d'Ellesmere (Canada).*

Les bateaux

Les bateaux constituent les véhicules du système de transport par eau. On les caractérise par les dimensions géométriques suivantes (*fig.* 22) :

- la *longueur hors tout* sépare les points extrêmes de la proue et de la poupe ;
- la *longueur entre deux perpendiculaires* se mesure au droit de la ligne de flottaison ;
- la *largeur hors tout ;*
- le *tirant d'eau* est la profondeur du bateau sous la ligne de flottaison ;
- le *franc bord* est la hauteur du pont supérieur du bateau au-dessus de la ligne de flottaison ;
- le *creux* est la hauteur du bateau sous le pont continu supérieur.

La capacité d'un navire est une notion complexe qui donne lieu aux définitions suivantes :

- le *déplacement* est le poids de l'eau déplacée par la carène (volume immergé) ; il varie avec le déchargement du navire. On définit un déplacement à pleine charge et un déplacement lège ;
- le *port en lourd* est le poids total de charge que l'on peut transporter sur un navire (y compris les passagers, les vivres, le lest) ;
- la *jauge brute* est la capacité intérieure du navire exprimée en tonneaux de jauge. Le tonneau vaut 100 pieds cubes, soit 2,83 m^3 ;
- la *jauge nette* représente le volume utilisable pour le transport commercial ; elle s'exprime en tonneaux.

Théorie du navire

Le phénomène fondamental qui permet le transport par eau est la **flottabilité des navires.** Le poids du navire chargé est équilibré par la force d'Archimède. Si la partie immergée du navire, ou carène, a un volume V, et si $\overline{\omega}$ est le poids spécifique de l'eau, qui varie avec la salinité et la température (valeur moyenne $\overline{\omega} = 1{,}026$), la force

▼ *Figure 22 : dimensions caractéristiques d'un bateau.*

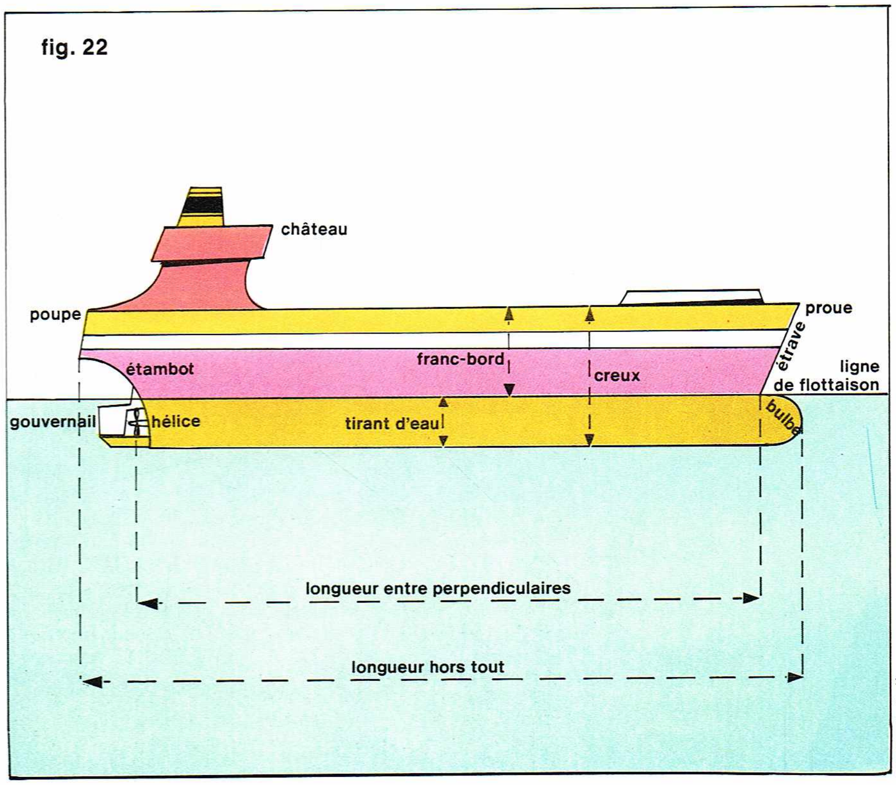

Richard Colin

fig. 23

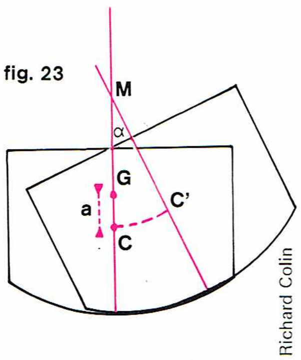

▲ ***Figure 23 : centre de poussée C et métacentre M d'un bateau.***

d'Archimède, qui est aussi le déplacement du navire, vaut :

$$D = \overline{\omega}V$$

elle s'applique au centre de poussée.

Lorsque le navire s'incline d'un angle α autour de son axe longitudinal, le centre de poussée C change et devient C'. Il décrit une courbe appelée *courbe de poussée.* Le rayon de courbure ρ est le rayon métacentrique; on appelle métacentre, M, le centre de courbure de la courbe de poussée en C (*fig.* 23). Un navire sera stable s'il revient spontanément à sa position d'équilibre. Le couple de rappel est :

$$C = P\ (\rho - a)\ \sin \alpha,$$

P étant le poids du navire et a = GC la distance du centre de gravité au centre de poussée.

Si $\rho - a$ est positif, le navire est stable. Si $\rho - a$ est négatif, le navire chavire.

La période d'oscillation du navire est :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{IG}{P\ (\rho - a)}}$$

où IG est le moment d'inertie par rapport à l'axe.

Lorsque le navire est en marche, il est soumis à l'*action de l'eau,* qui exerce en effet une force qui s'oppose à l'avancement du navire. Cette force est donnée par :

$$R = kSV^2 + \lambda\Sigma V^{1,825}$$

R s'exprime en kgf ; S est le maître couple du navire en m^2 ; Σ est la surface mouillée latérale du navire en m^2 ; k et λ sont deux coefficients ; V est la vitesse en m/s. Le premier terme s'appelle la résistance hydrodynamique ; le second terme est la résistance de frottement.

Les bateaux de navigation intérieure ont des formes rectangulaires moins bien dessinées que les navires de mer, ce qui augmente la résistance à l'avancement. La formule de Gerbers-Engels s'applique alors :

$$R = (kS + \lambda\Sigma)\ V^{2,25}$$

En mer, la houle produit une action sur le navire qui se traduit par le roulis, le tangage et le lacet. Le roulis est le mouvement du navire correspondant à une rotation autour de son axe longitudinal. Le tangage correspond à une rotation autour de son axe transversal, le lacet à une rotation autour d'un axe vertical.

La **propulsion du navire** est réalisée par une ou deux hélices. Inventée en 1839, l'hélice comporte 3 ou 4 pales implantées régulièrement autour d'un moyeu de révolution. Le rendement propulsif de l'hélice est le rapport entre la puissance reçue sur l'arbre à la puissance fournie sous forme de poussée du navire. Il est de l'ordre de 0,6 à 0,7. La puissance effective fournie P est donnée par :

$$P = \frac{KS^2V^3}{n}$$

où S est le maître couple immergé, K un coefficient dépendant du navire, n le rendement propulsif et V la vitesse du navire.

Les navires de commerce utilisent actuellement des moteurs Diesel (dans 65 % des cas) ou des turbines à vapeur (dans 33 % des cas) pour entraîner l'arbre portant l'hélice. La propulsion nucléaire n'en est qu'au stade expérimental et devrait connaître un important développement.

La solution la plus économique est d'avoir une seule ligne d'arbres. La propulsion Diesel est très généralement utilisée pour les gammes de faibles puissances ; la propulsion vapeur pour les gammes de fortes puissances. La puissance de l'appareil propulsif atteint 1 500 ch pour un car-ferry, 17 000 ch pour un navire polytherme, de 25 000 à 50 000 ch pour un superpétrolier, 50 000 ch pour un porte-conteneurs de la troisième génération. La consommation de combustible par cheval et par heure est de 180 à 210 g pour la propulsion vapeur classique, et environ 150 g pour la propulsion Diesel. Le rendement global d'un moteur Diesel est de l'ordre de 0,35 à 0,40.

Les **qualités évolutives** du navire concernent sa tenue de route et les caractéristiques qu'il développe lors d'une giration. Le navire dispose d'un ou de plusieurs gouvernails symétriquement par rapport au plan longitudinal du navire. Ils lui permettent de modifier son cap et d'évoluer plus ou moins rapidement. C'est l'action du gouvernail qui compense les actions perturbatrices du vent et de la mer.

Pour tenir la route, c'est-à-dire un cap, on agit sur la barre, c'est-à-dire sur le gouvernail. Un navire aura une bonne tenue de route s'il faut donner de faibles angles de barre pour maintenir un cap donné. Un navire évolue aisément s'il peut modifier son cap, voire l'inverser, en un temps et dans un espace aussi réduits que possible.

Le navire est dit en giration lorsqu'il décrit un cercle. Il prend alors de la gîte vers l'extérieur de la courbe décrite. On caractérise la qualité d'évolution d'un navire par le rapport du diamètre D de giration à la longueur L du navire. Pour un cargo à un seul gouvernail, D/L est de l'ordre de 3. Pour un navire à deux gouvernails, on obtient D/L de l'ordre de 1,5.

La construction navale

La construction navale est une industrie dont la production a connu entre 1965 et 1975 un taux moyen annuel de croissance de l'ordre de 8 %, lié à l'accroissement de la flotte mondiale. En 1975, la production mondiale s'élevait à 35 millions de tonneaux de jauge brute, dont la moitié revenait au Japon, principal producteur mondial, et 22 % à la C. E. E. La production française était alors de 1,2 million de tjb, soit, avec 3,5 % de la production mondiale, la cinquième place.

Au cours des dernières années, la part relative des pétroliers n'a cessé de croître, pour atteindre les 2/3 de la production de la construction navale mondiale. Par contre, la part des transporteurs de vrac n'a cessé de diminuer, pour atteindre 18 % en 1975.

Les plus grands chantiers français sont :

— les chantiers de La Ciotat, qui ont livré, en 1975, 480 000 tjb ;

— les chantiers de l'Atlantique, de Nantes-Saint-Nazaire, qui ont livré, en 1975, 415 000 tjb ;

— les CNIM de La Seyne, qui ont livré, en 1975, 180 000 tjb ;

— France-Dunkerque, qui ont livré, en 1975, 80 000 tjb ;

— les chantiers du Havre, de La Rochelle-Palice, qui ont livré, en 1975, 9 000 tjb.

Pour les pétroliers, les coûts de construction étaient, en 1975, de l'ordre de $ 200 la tonne de port en lourd ; pour les transporteurs de gaz liquéfié, de l'ordre de 3 000 F le m^3 ; pour les porte-conteneurs de la troisième génération, 7 000 F la tonne de port en lourd.

Les types de navires maritimes

Au cours des dernières années, on a assisté au développement de nouveaux types de navires selon deux tendances : la spécialisation et le gigantisme. Parallèlement, on peut remarquer la diminution du nombre des navires classiques comme les paquebots de lignes et les cargos à plusieurs ponts non spécialisés.

Les cargos

Ils permettent le transport de marchandises diverses. La spécialisation se traduit par l'accroissement du nombre des navires polythermes permettant le transport de denrées périssables (par exemple, bananes à + 12 °C, viande à 0 °C), des transporteurs de produits chimiques (par exemple, acide phosphorique), des transporteurs de voitures.

Les vracquiers

Ils sont utilisés pour le transport en masse de minerais, de phosphates, de céréales (maïs, blé), de sucre, etc.

Les pétroliers

Les pétroliers sont particulièrement marqués par le gigantisme. Aussi peut-on constater l'évolution suivante : en 1954, le plus gros pétrolier faisait 50 000 tjb ; en 1966 : 200 000 tjb ; en 1971 : 370 000 tjb ; en 1976 : 560 000 tjb.

Les vracquiers mixtes

Ils peuvent transporter du pétrole ou des marchandises sèches, par exemple du minerai de fer.

Claude Rives - Marina Cedri

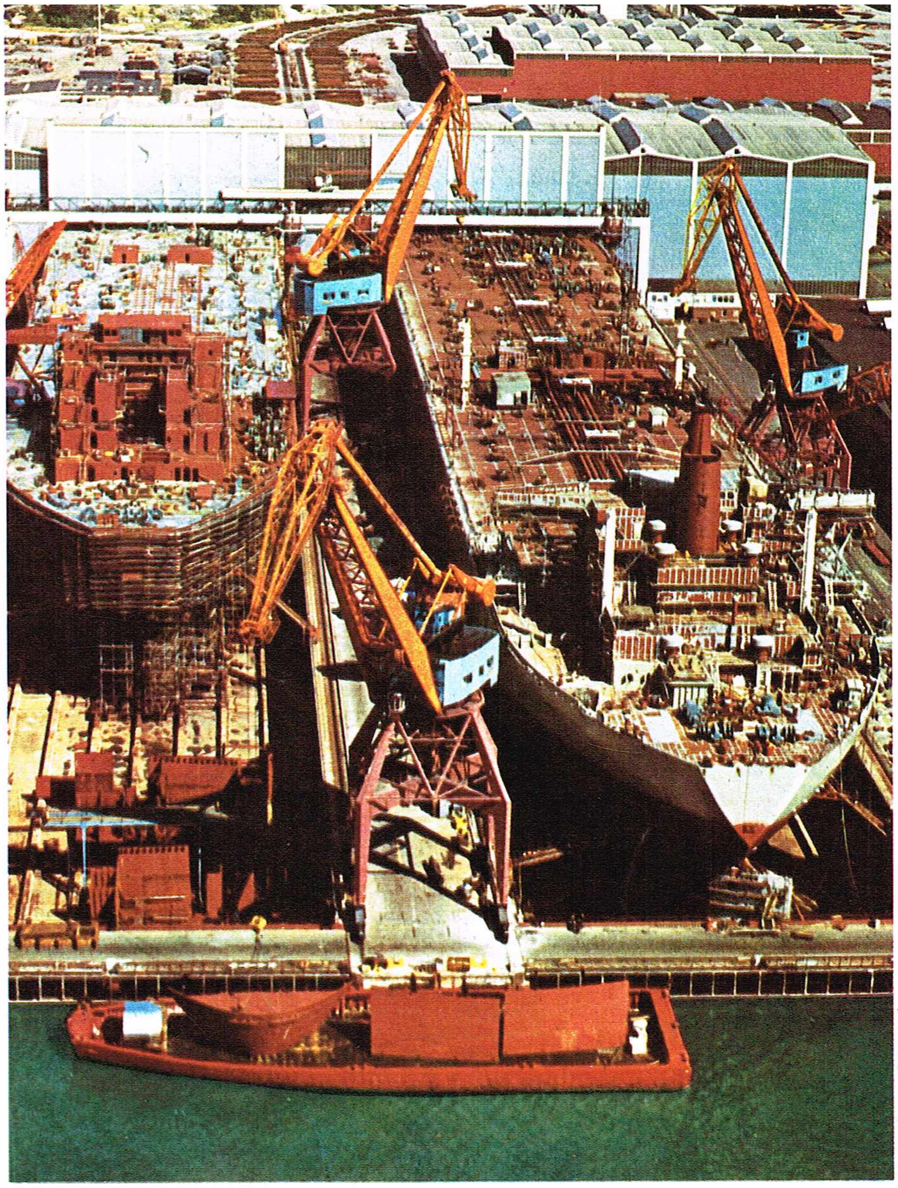

Aktiebolaget Getaverken

Les porte-conteneurs

Ces navires reçoivent des conteneurs de 20, 35 ou 40 pieds de long (soit 6 à 12 m), d'un volume intérieur compris entre 30 et 67 m³. Citons les deux principaux types de conteneurs normalisés : *type IC :* longueur 20′, largeur 8′, hauteur 8′; *type IA :* longueur 40′, largeur 8′, hauteur 8′.

Les porte-conteneurs sont classés en trois générations selon la capacité en conteneurs et la vitesse :

1re génération : capacité de 200 à 800 conteneurs de 20 pieds, vitesse de 20 nœuds;

2e génération : capacité de 800 à 1 500 conteneurs de 20 pieds, vitesse de 20 à 28 nœuds;

3e génération : capacité de 1 500 à 2 500 conteneurs, vitesse de 28 à 32 nœuds.

Les transporteurs de gaz

Il s'agit de navires spéciaux extrêmement sophistiqués pour le transport de gaz de pétrole liquéfiés (GPL) ou de gaz naturels liquéfiés (GNL) [méthanier, par exemple]. Il existe deux procédés français (cuves membranes en acier inoxydable gaufré ou en Invar) et un procédé norvégien (cuves sphériques autoporteuses en aluminium) pour les navires GNL.

Les navires rouliers et les car-ferries

Le chargement et le déchargement de ces navires se font par roulement de véhicules ou remorques possédant des roues. Ils sont munis de portes, en général à l'arrière, et parfois aussi à l'avant. Les car-ferries permettent le transport des passagers.

Les porte-barges

Les premiers porte-barges sont apparus en 1969 aux États-Unis. On distingue actuellement trois types de porte-barges entre lesquels se répartissent les trente navires existants.

● *Système LASH :* les barges standards font 18,70 m de longueur, 9,50 m de largeur, 2,60 m de tirant d'eau et ont un port en lourd de 350 tonnes. Ces barges sont embarquées et rangées dans les cales à l'aide d'un portique situé à l'arrière du navire. Les porte-barges LASH peuvent transporter 60 à 75 barges.

▲ A gauche, cargo avec son remorqueur dans l'écluse du bassin Belcot au Havre. A droite, pétroliers en construction dans le chantier naval d'Arendal en Norvège. ▼ Le bateau porte-conteneur « Président Harrison » dans le port de Newport News (U.S.A.).

Photri

Christian Sappa - Cedri

▲ *Navigation sur le Rhin en Alsace. Au premier plan, une péniche; derrière, un pousseur.*

● *Système SEABEE :* les barges ont 32 m de longueur, 12 m de largeur, 2,80 m de tirant d'eau et 850 tonnes de port en lourd. L'embarquement est réalisé par un élévateur de 2 000 tonnes de capacité situé à l'arrière du navire. La barge est ensuite roulée par transporteur hydraulique. Un navire SEABEE fait 260 m de long, 31,60 m de large, 11,70 m de tirant d'eau. Sa puissance est de 36 000 ch, son déplacement de 37 000 tonnes et sa vitesse de 21,8 nœuds.

● *Système BACAT :* ces porte-barges peuvent transporter des marchandises en vrac, des charges lourdes, des palettes et des conteneurs. La barge fait 16,80 m de longueur, 4,65 m de largeur, 2,45 m de tirant d'eau, et 140 tonnes de port en lourd.

Les navires rapides

Pour augmenter sensiblement la vitesse des navires, deux dispositifs principaux sont utilisés.

— Les *hydrofoils* possèdent des ailes judicieusement inclinées et partiellement immergées. Sous la poussée d'une hélice marine ou aérienne, l'action de l'eau sur les ailes soulève le navire jusqu'à le faire surgir totalement hors d'eau. Ces navires sont utilisés sur des mers peu agitées.

— Les *naviplanes* sont soulevés au-dessus de la surface de l'eau par un coussin d'air produit par des ventilateurs. Ils peuvent se déplacer aussi bien sur l'eau que sur le sol. On obtient des vitesses de 100 à 200 km/h. Ils sont sensibles à la houle.

Les types de bateaux de navigation intérieure

Les bateaux de navigation intérieure sont en général moins bien dessinés que les navires de mer. Leurs formes sont plus carrées, et ils ne possèdent pas de bulbes d'étrave qui permettent une bonne pénétration dans l'eau. On recherche en effet, par des formes parallélépipédiques, les meilleures capacités possible plutôt que l'obtention de grandes vitesses.

Les dimensions varient beaucoup d'un pays à l'autre, même en Europe. On distingue deux grands types de bateaux, les automoteurs et les convois poussés.

Les automoteurs

Ils comportent une cale où l'on charge la marchandise, une ou deux cabines pour le logement de l'équipage et le groupe moteur. Ils se propulsent au moyen d'un moteur Diesel et d'une ligne d'arbre. Le *safran* est très important.

L'automoteur type Freycinet fait 38,50 m de longueur, 5,05 m de largeur, 1,80 à 2,50 m de tirant d'eau. Le port en lourd varie entre 250 et 350 tonnes. La puissance installée est de l'ordre de 100 à 200 ch.

En Hollande et en Belgique, on trouve des automoteurs dits campinois, dont le port en lourd avoisine 600 tonnes. Ils mesurent 50 m de long, 6,60 m de large et 2,50 m de de tirant d'eau.

L'automoteur RHK (Rhein, Herne, Kanal) mesure 80 m de long, 9,50 m de large, 2,50 d'enfoncement. Il charge 1 350 tonnes. La puissance du moteur est de l'ordre de 700 ch.

Les convois poussés

Un convoi poussé est constitué d'un pousseur comportant l'équipage et les moteurs d'une ou plusieurs barges. Les barges européennes standardisées font 11,10 m de large, 76,50 m de longueur et 4 m d'enfoncement. Elles peuvent charger 2 200 tonnes. Les barges et le pousseur sont rendus solidaires par des câbles qui en font un ensemble monolithique. En France, les convois poussés de 10 000 tonnes constitués par 4 barges peuvent circuler sur le Rhin, et sur la Seine entre Rouen et la mer. Des convois poussés de 4 400 tonnes constitués de deux barges en flancs et d'un pousseur peuvent circuler sur la Seine, l'Oise, le Rhône et la Moselle.

Signalons le convoi poussé type canal du Nord, d'une capacité de 800 tonnes de port en lourd, composé d'un automoteur Freycinet poussant une barge de même gabarit.

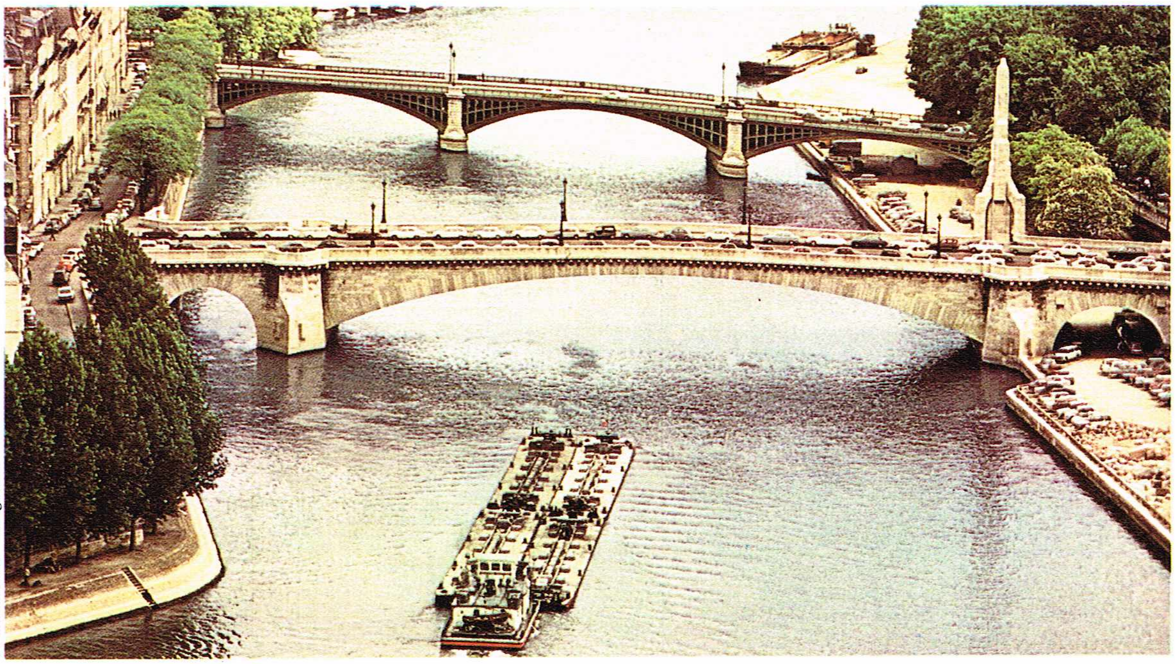

E. Hartmann - Magnum

▶ *Pousseur à deux barges sur la Seine, au pied de Notre-Dame.*

Les hommes

Dans le système des transports par eau, de nombreuses professions sont amenées à intervenir. Nous distinguerons les professions directement impliquées dans l'opération du transport maritime ou fluvial : essentiellement les armateurs, les marins, les mariniers et artisans bateliers, les professions liées aux ports ou à la manutention portuaire (dockers, pilotes), et les professions d'intermédiaires entre les chargeurs, terme par lequel on désigne les demandeurs de transport et les transporteurs. Ces professions sont regroupées sous l'appellation d' « auxiliaires de transport maritime ou fluvial ».

Les transporteurs

Les **armateurs** maritimes (ou fluviaux) sont les entrepreneurs qui possèdent ou louent les navires de mer (ou les bateaux de navigation intérieure) pour effectuer le transport par eau.

En France, l'armement maritime comporte 200 compagnies de navigation effectuant un chiffre d'affaires de 9 milliards de francs (1975). Le *tableau* VII donne la liste des plus importants armements maritimes français.

Les plus grands armements mondiaux sont constitués par les compagnies pétrolières telles que Royal Dutch Shell, EXXON, BP, TEXACO. Pour les marchandises sèches, ce sont les Japonais.

En France, l'armement fluvial comporte 3 000 patrons bateliers qui sont des travailleurs indépendants exploitant un automoteur, 7 compagnies exploitant 600 bateaux et environ 600 petites flottes exploitant 1 900 bateaux. Le chiffre d'affaires était en 1975 d'environ 700 millions de francs.

Les **marins** embarqués à bord de navires de mer sont environ 17 000 en France.

Les **mariniers** embarqués à bord de bateaux de navigation intérieure sont environ 12 000 en France.

Les professions portuaires

Lorsque le navire arrive au port, plusieurs opérations sont nécessaires avant que l'on puisse décharger la marchandise transportée : il s'agit du pilotage du navire, du remorquage et des opérations de lamanage (manipulations des aussières qui permettent d'amarrer le navire).

La capitainerie du port intervient pour désigner le quai où le navire accostera et régler les mouvements des navires dans le port.

La manutention portuaire est effectuée par les dockers, souvent pour le compte des entreprises d'acconage. Parmi les 18 000 dockers en France, nombreux sont ceux spécialisés pour l'utilisation d'engins tels que les grues, les chariots élévateurs, les portiques, les portiques à conteneurs, etc. En France, en 1973, environ 120 entreprises de manutention portuaire ont effectué 900 millions de recettes nettes.

Les auxiliaires de transport

Le terme « auxiliaire de transport » regroupe des professions très diverses :

Le **commissionnaire de transport** maritime ou fluvial agit pour le compte d'un commettant, la société cliente, qui veut faire effectuer un transport. Il est son intermédiaire auprès du transporteur. Il a la responsabilité globale du transport.

Le **commissionnaire en douane** est un mandataire agissant pour le compte d'une société cliente qui désire effectuer une importation ou une exportation. Il règle les droits et taxes perçus par l'Administration des douanes ; il est agréé par les douanes.

Le **consignataire de navires** représente une compagnie maritime dans un port. Il remplit certaines fonctions administratives lors de l'arrivée d'un navire, et supplée le capitaine.

Le **transitaire** est un mandataire commercial agissant à l'embarquement pour le compte du chargeur et au débarquement pour le compte du réceptionnaire. Le transitaire s'engage à exécuter les instructions de son mandat en mettant en œuvre tous les moyens dont il dispose. Le commissionnaire de transport s'engage personnellement à faire parvenir la marchandise dans l'état où elle est remise. Sa responsabilité est plus lourde que celle du transitaire.

Gérard Sioen - Cedri

▲ *Bureau d'affrètement de la batellerie à Conflans-Sainte-Honorine (Yvelines).*

L'**agent maritime** représente une compagnie maritime dans une zone géographique dont il a l'exclusivité.

Le **courtier d'affrètement** exerce principalement à Paris, et fait les affrètements ainsi que les ventes et les achats de navires. Les courtiers de fret interviennent beaucoup en navigation intérieure.

Le **courtier maritime** exerce dans un port où il a le monopole des affrètements de navires.

En France, en 1973, dans le domaine maritime, environ 200 commissionnaires en douane et transitaires ont effectué 500 millions de francs de recettes nettes, 180 agents maritimes et consignataires ont effectué 200 millions de francs de recettes nettes, les courtiers d'affrètement et maritimes ont effectué 100 millions de francs de recettes nettes.

L'organisation des transports par eau

Après avoir passé en revue les composants du système de transport par eau, l'infrastructure et le matériel, après avoir indiqué les acteurs, il reste à voir comment fonctionne le système. L'objectif est d'assurer le transport par eau

▼ *Tableau VII : les plus importants armements maritimes français.*

Tableau VII
Les plus importants armements maritimes français

Sociétés	Nombre de navires	Capacité		Sec (en %)	Pétroliers (en %)
		en milliers de tjb	en milliers de tpl		
1 : Société française de transports maritimes	51	1 350	2 388	25	75
2 : Cie navale des pétroles	13	1 187	2 346		100
3 : Société maritime Shell	13	1 150	2 260		100
4 : Cie générale maritime	75	978	1 495	80	20
5 : Esso	7	767	1 533		100

Gérard Sioen - Cedri

▲ *Bateaux à quai sur la Seine à Conflans-Sainte-Honorine, grand centre de la batellerie.*

d'un bien appartenant à un chargeur entre une origine et une destination, qui sont des ports fluviaux ou maritimes. Les modes de transport routier ou ferroviaire peuvent être amenés à intervenir quand ce n'est pas le cas. Ils sont mis en jeu bien souvent par l'intermédiaire des auxiliaires de transports.

Nous examinerons successivement les transports fluviaux et les transports maritimes où les modes d'exploitation, bien que voisins, ne sont pas les mêmes.

L'exploitation des transports fluviaux

Au début du XX^{e} siècle, le transport fluvial était régi par la loi de l'offre et de la demande. Les contrats de transport étaient conclus librement et donnaient lieu à une rémunération du transporteur, le fret, dont le niveau pouvait fluctuer de façon importante. Peu à peu fut institué un régime d'exploitation réglementée, dont la base est le contingentement du matériel, le tour de rôle et un certain contrôle des frets.

Le chargeur conclut avec le transporteur fluvial, éventuellement par l'intermédiaire d'un courtier de fret, un contrat de transport. Ce contrat, qui est accompagné d'une lettre de voiture ou d'un connaissement fluvial, est contrôlé par l'Office national de la navigation. Il existe trois types de contrats pour les transporteurs par eau :

— le **contrat au voyage,** par lequel le transporteur s'engage à amener une cargaison complète d'un point de chargement à une destination déterminée en échange d'un fret calculé à la tonne ;

— le **contrat à temps,** par lequel le transporteur met un bateau dont il est le propriétaire à la disposition d'un chargeur pendant une période déterminée contre un prix à la journée, au mois ou à l'année ;

— le **contrat au tonnage,** par lequel le transporteur s'engage à transporter dans un délai fixé un tonnage déterminé contre le paiement d'un fret à la tonne.

Le contrat au voyage, qui est le plus fréquemment utilisé, doit être obligatoirement conclu dans un bureau d'affrètement selon des taux de fret contrôlés et la règle du tour de rôle. Le *tour de rôle* consiste à répartir les demandes de transport émanant des chargeurs par l'intermédiaire des comités de fret selon le rang dans lequel les bateaux, après déchargement, deviennent disponibles. Les mariniers sont invités à choisir, dans l'ordre de leur inscription au tour de rôle, un transport parmi ceux qui sont offerts. Ceux qui passent conservent le bénéfice de leur inscription.

Les frets des contrats au voyage sont fixés par *barèmes* établis par l'Office national de la navigation en accord avec le ministère de l'Économie et des Finances. Ces barèmes ne s'appliquent ni aux contrats au tonnage, ni aux contrats à temps, ni aux transports à l'exploitation. La tarification est fondée sur le prix de revient de l'automoteur Freycinet ; la distance tarifaire est calculée en kilomètres virtuels, en tenant compte des caractéristiques des voies navigables empruntées. Le barème tient compte du coût de l'immobilisation du bateau pendant le chargement ou le déchargement : ce délai, appelé *délai de planche,* vaut deux fois deux jours.

La réglementation ne s'applique en fait qu'à environ 30 % du trafic total assuré par la voie d'eau. Le reste constitue un secteur plus libéral où joue en principe la loi de l'offre et de la demande. Le nombre de bateaux de navigation intérieure est *contingenté*. Pour exploiter un bateau, il faut un permis d'exploitation qui est délivré après un agrément préalable de mise en service.

Les *courtiers de fret* sont assermentés : ils participent aux séances des bourses d'affrètement où ils représentent les chargeurs. Ils sont rémunérés au moyen d'une commission payée par le transporteur et égale à 5 % du montant du fret. Ils recherchent les trafics, rédigent les pièces administratives et font aux mariniers des avances sur fret. Il y a environ 80 courtiers de fret en France, dont 10 assurent plus de 60 % des transports.

Les transports maritimes

Le chargeur, c'est-à-dire l'usager des transports par eau, peut se trouver dans deux situations.

● Il peut avoir à expédier des cargaisons importantes et homogènes susceptibles de mobiliser un ou plusieurs navires. C'est le cas d'une compagnie pétrolière, d'une usine sidérurgique, d'un exportateur en gros de céréales. Il est alors tentant d'affréter un ou plusieurs navires soit pour un voyage (il s'agit d'un affrètement au voyage), soit pour une certaine période (il s'agit d'un affrètement à temps). Le chargeur conclut alors une *charte-partie* avec un armateur.

● Il peut avoir à expédier des chargements réduits, occupant un espace restreint à bord d'un navire, mais susceptibles de destinations diverses, et de délais à respecter. Il conclut alors avec un armateur un contrat de transport appelé *connaissement*. Il utilisera le transport par lignes régulières exploitées par l'armateur. Les lignes régulières de navigation se sont constituées progressivement et forment un réseau intégrant la plupart des ports maritimes. L'installation d'une ligne régulière nécessite de l'armateur un investissement énorme par le nombre de bateaux, l'organisation administrative et commerciale dans les escales. Il perçoit des chargeurs, ses clients, un fret payable en général lors de l'embarquement selon un tarif établi d'après le poids, le volume, la valeur, la nature de la marchandise transportée.

Les compagnies de navigation sont bien souvent amenées à se regrouper au sein de conférences maritimes

pour l'exploitation en commun des lignes régulières d'une zone géographique donnée. Les moyens des divers membres, en particulier les navires, sont mis en commun. Il est possible alors d'assurer un itinéraire et un horaire fixes le long de la ligne régulière desservie. Un tarif est publié par la conférence et donne lieu à des ristournes de fidélité. A côté des armements de ligne régulière membre d'une conférence, il peut exister des armements hors conférences, appelés outsiders, qui pratiquent des tarifs inférieurs de 10 à 15 % en général à ceux des conférences.

Le chargeur voulant utiliser une ligne régulière s'adresse à un transitaire ou directement à l'armateur, pour connaître les tarifs de fret, le bateau qui sera utilisé et les dates du transport. Il est établi alors un connaissement qui est le titre de transport remis au chargeur, sur lequel figurent la désignation de la marchandise embarquée à bord d'un navire, le prix et les conditions du transport. Le connaissement est établi soit à une personne dénommée à qui la marchandise sera délivrée, soit au porteur, soit à ordre, ce qui permet de le transmettre par endossement.

Le contrat d'affrètement d'un navire se conclut entre un fréteur, celui qui possède le navire, et un chargeur, celui qui veut l'utiliser.

On distingue l'affrètement coque nue, par lequel le propriétaire loue un navire à un tiers qui l'armera pour le faire naviguer, c'est-à-dire fournira l'équipage et le capitaine; l'affrètement à temps, par lequel le propriétaire loue un navire à un tiers, avec l'équipage et le capitaine pour un temps délimité ; l'affrètement au voyage, par lequel l'affréteur loue la capacité de transport du navire en vue d'y embarquer une cargaison déterminée, pour une destination déterminée.

Le marché de l'affrètement est soumis à la loi de l'offre et de la demande. Ce sont les courtiers d'affrètement qui l'animent. Les cours sont fluctuants. A un instant donné, un navire affrété au voyage donne lieu à un fret inférieur à un navire affrété à temps. Le type d'exploitation d'un navire se livrant à la recherche d'affrètement au voyage ou à temps s'appelle le *tramping*. Il s'oppose à l'exploitation d'un navire sur ligne régulière. Les taux de fret au tramping sont définis par les bourses de fret. C'est à Londres que se trouve la plus grande bourse de fret du monde, la *Baltic Exchange*.

Les nouvelles techniques des transports par eau

Afin de faciliter la manutention des marchandises, et plus généralement d'accroître la productivité des transports par eau, de nouvelles techniques sont apparues dans les années 1955-1970 en Europe. Elles concernent d'une part les unités de charge, et d'autre part l'automatisation des divers procédés utilisés.

Les unités de charge permettent le regroupement des divers petits éléments d'une cargaison en un nombre de « colis » à manutentionner. Elles mettent en œuvre les techniques de palettisation, de conteneurisation et de paquettisation.

- La **palettisation** consiste à disposer des marchandises diverses sur un plancher constitué de deux plateaux de bois séparés par des chevrons pour permettre le passage des fourches des chariots élévateurs. Les dimensions standardisées sont de 120 × 180 cm. Le poids varie entre 800 et 2 000 kg. La hauteur ne dépasse pas 1,70 m. Une tarification particulière a été adoptée pour encourager le recours à la palettisation.
- La **conteneurisation** consiste à disposer des marchandises diverses dans des conteneurs de formes normalisées. Le conteneur permet le transport des marchandises sans rupture de charge par les divers modes de transport. Il est muni de dispositifs facilitant sa manipulation. Il est constitué par un solide plancher muni de quatre montants, le reste étant un abri contre les intempéries. On peut gerber les conteneurs, c'est-à-dire les empiler les uns sur les autres.
- La **paquettisation** consiste à mettre en fardeaux préconstitués certains frets non palettisables ou non conteneurisables, comme des tuyaux, des bois, des fers à béton, etc. Les fardeaux sont préchargés, ce qui permet un chargement rapide des navires.
- L'**automatisation** a pénétré beaucoup de secteurs, y compris le transport par eau. Elle se développe sur les navires de mer, sur les pousseurs de navigation intérieure et sur les engins de manutention importants.

Le transport par eau dans la chaîne des transports

Le transport par eau, nous l'avons vu, n'est souvent qu'un maillon de la chaîne des transports qui permet d'acheminer une marchandise d'un point de départ à un point d'arrivée. Le transport commence et se termine par une manutention et un stockage ; ces deux opérations peuvent intervenir à plusieurs reprises dans la chaîne, lorsque plusieurs modes de transport différents sont mis en œuvre.

C'est l'ensemble de la chaîne qu'il faut organiser, et le problème des interfaces est très important. Le fait pour un chargeur d'être à proximité d'une voie navigable est un élément fondamental dans le choix du transport par eau. Pour diminuer les frais de transport, les industriels sont souvent conduits à implanter leurs usines au bord de l'eau, dans des zones industrielles et portuaires. Pour la sidérurgie, par exemple, citons la *Solmer* à Fos et *Usinor* à Dunkerque.

▼ ***Embarquement d'un conteneur au moyen d'un portique***

I.G.D.A. - Costa

De Andrade - Magnum

◀ ***Chargement d'une voiture à bord d'un bateau.***

U.S.I.S.

▲ ***La partie inférieure, gigantesque, d'une plate-forme off-shore est transportée par voie d'eau vers le golfe du Mexique.***

L'usage de conteneurs a amené un progrès important dans la chaîne des transports. Le conteneur est en effet international et permet le « porte à porte ». Ils peuvent être remplis par les chargeurs eux-mêmes dans les usines. Ils sont pris en charge par les transitaires qui les amèneront au port. Ils seront ensuite manutentionnés et chargés à bord de porte-conteneurs ou de cargos. Les conteneurs peuvent aussi être constitués dans des centres d'empotage par réunion de marchandises de provenances diverses; après le transport maritime, ils seront dépotés, et les marchandises seront alors éparpillées vers leurs destinataires.

La technique des porte-barges permet d'éviter la rupture de charge que l'on trouve d'habitude entre le transport maritime et le transport fluvial : la barge est mise à l'eau par le navire et est alors poussée jusqu'au port fluvial qui est sa destination.

Comme nous l'avons vu, ce sont les auxiliaires dans les ports maritimes ou fluviaux qui réalisent les connexions avec les modes de transport terrestres.

Pour conclure, nous pouvons dire que le système de transport par eau possède de nombreux atouts : il est le plus économique en énergie des modes de transport; il est peu polluant; il permet d'éviter la saturation des infrastructures routières : un convoi poussé de 4 000 t est l'équivalent de 200 camions de 20 t; il est particulièrement économique pour les transports en quantités importantes, et enfin il permet l'implantation d'industries en bordure du littoral ou sur les voies d'eau.

Nous avons montré qu'il est légitime de rassembler les transports fluviaux et les transports maritimes sous le terme unique de système de transport par eau, parce que les infrastructures, les équipements, le matériel utilisé, les techniques d'exploitation sont semblables. De plus, le transport maritime constitue le prolongement du transport fluvial. De même, la voie navigable est un moyen de pénétration privilégié d'un port maritime dans son hinterland. Le système de transport par eau permet d'apporter aux chargeurs non seulement un type de transport économique, mais une qualité de service de plus en plus marquée.

BIBLIOGRAPHIE

BAUDELAIRE, *Administration et Exploitation portuaire*, Eyrolles. - BOYER, *les Transports maritimes*, collection « Que sais-je? ». - CHAPON, *les Travaux maritimes*, Eyrolles. - LARRAS, *la Prévision et la prédétermination des étiages et des crues*, Eyrolles; *Fleuves et rivières non aménagés*, Eyrolles. - LAVERGNE, *les Transports par mer*, Moreux. - MACINTYRE D., *l'Aventure de la voile*, Albin-Michel. - MORICE, *les Transports fluviaux*, collection « Que sais-je? » - ROBERT, *Éléments d'une politique des transports maritimes*, Eyrolles. - SERVIÈRES, *le Navire*, Cours de l'École nationale supérieure des techniques avancées. - TENAUD, *la Navigation intérieure*, Cours de l'École nationale des ponts et chaussées. - Institut d'économie des transports maritimes, tome I, *le Navire*; tome II, *Construction du navire*; tome III, *Exploitation*; tome IV, *les Auxiliaires*. - *Les Voies navigables de France*, octobre 1973, Regards sur la France.

LA ROUTE ET LE SYSTÈME ROUTIER

La civilisation actuelle a été qualifiée de civilisation de l'automobile comme symbole de la société de consommation. Il est un fait que la voiture, honnie et adorée, occupe une place essentielle dans de très nombreux aspects de la vie de bon nombre d'hommes et de femmes des pays développés : on travaille pour la fabriquer et l'acheter, on l'utilise pour aller travailler, mais aussi pour occuper ses loisirs, on l'a presque constamment sous les yeux, on y vit, on y meurt, on y rêve...

La route, son support, modifie profondément la géographie des pays, la structure des villes. Au début de notre ère, l'Empire romain a développé les routes pour asseoir sa domination administrative et militaire sur les pays conquis, et la structure ainsi donnée au réseau a marqué l'Europe de l'Ouest pour des millénaires : il est en effet frappant de constater que certaines routes suivent encore aujourd'hui les tracés romains. Depuis lors, le réseau français s'est modifié, se développant à partir de la capitale au fur et à mesure que se renforçait l'État centralisé ; enfin, ce réseau s'est maillé, pour en arriver à la toile d'araignée que nous connaissons bien aujourd'hui.

Les raisons qui ont conduit à cette formidable expansion sont bien connues (63, 6 voitures pour 100 habitants aux États-Unis, 35 en France) : la route est polyvalente, elle permet l'usage de l'automobile, de l'autocar, du camion, des deux-roues, et la marche à pied. L'automobile elle-même est aussi polyvalente. Sa possession permanente ou temporaire permet de nombreux usages : transport urbain, transport rural, transport interurbain ; ses fonctions sont diverses, trajets domicile-travail (appelés dans le jargon technique les migrations alternantes), déplacements professionnels (par exemple, les voyageurs représentants-placiers, les réparateurs de matériel, les médecins), déplacements personnels pour raison familiale ou pour les loisirs. Le véhicule permet d'aller de l'origine à l'extrémité du déplacement directement sans rupture de charge, ou indirectement en effectuant des achats ou en rendant une visite en cours de route, et cela à n'importe quel moment (pas d'horaires à respecter). Très souvent le temps de parcours est plus faible qu'avec tout autre mode de transport, notamment lorsque la distance n'est pas trop longue. Enfin l'automobile permet de se déplacer à plusieurs avec un transport commode des bagages : ainsi elle est souvent moins coûteuse que les transports collectifs (surtout lorsque le véhicule est de toute façon en possession de l'usager). Cela tient en grande partie au fait que, la plupart du temps, le conducteur est le transporté lui-même.

Le véhicule utilitaire (camions de divers tonnages, camionnette) présente de nombreux avantages de la même nature : polyvalence de l'usage, disponibilité, parcours porte à porte, temps global de transport ; c'est ainsi que le transport routier a connu depuis la Dernière Guerre mondiale une expansion considérable qui l'a conduit à assurer une grande partie des transports intérieurs dans de nombreux pays.

L'autocar ou l'autobus permet un transport collectif peu coûteux et bien adapté à la desserte fine d'une agglomération ou d'une zone géographique. Il autorise aussi de nombreux transports spéciaux, notamment touristiques.

Les deux-roues présentent une gamme variée de possibilités qui ouvre l'usage de la route aux jeunes pour des coûts plus ou moins faibles selon qu'il s'agit d'une simple bicyclette ou d'une puissante motocyclette. Ils présentent aussi pour le loisir un attrait renouvelé.

Toutefois, le développement de l'usage de la route ne présente pas que des aspects positifs. Des inconvénients sont progressivement apparus et prennent une importance croissante :

- La route ne peut satisfaire tous les besoins de déplacement, principalement en milieu urbain : la congestion généralisée de nos villes à certaines heures peut être considérée comme un gaspillage effréné de temps, de matière et de santé. Et rien n'y fait : une route urbaine n'est pas sitôt construite qu'elle est déjà saturée. On verra que c'est un problème vital pour les cités que d'organiser ce qu'on a pu appeler l' « anarchie automobile ».

M. Durazzo - Magnum

▲ *On rencontre encore en Provence des routes bordées de platanes, ombreuses l'été.*

- L'agression qu'entraîne la présence d'infrastructures routières dans une zone, habitée ou non, est de plus en plus mal admise par les riverains : le bruit, la pollution, la consommation d'espace et même la nuisance visuelle sont au cœur des débats actuels.
- La route est meurtrière, puisque, « chaque année, une ville comme Mazamet est rayée de la carte », et que le nombre de blessés se chiffre par centaines de milliers. Le coût collectif correspondant est énorme : selon certaines estimations, il représenterait 20 à 30 % du budget de l'État de la France.
- Enfin, la route est coûteuse pour la nation en matières premières, et notamment en énergie : les automobiles, les camions et les chaussées elles-mêmes consomment en effet près de 15 % du pétrole importé par la France, et on sait les problèmes actuels que cela crée. Des remarques analogues peuvent être faites pour d'autres produits (acier, caoutchouc, verre).

C'est l'ensemble de ces points qui est abordé dans cette étude afin de donner les éléments d'appréciation sur ce phénomène social que sont la route et l'automobile.

L'infrastructure routière

On appelle route une plate-forme longitudinale permettant le passage de véhicules automobiles, c'est-à-dire autonomes quant à la propulsion et à la direction suivie ; le terme « infrastructure routière » est d'ailleurs plus adapté à cette définition, car la « route » est souvent comprise sous le sens général de système routier (infrastructures, superstructures, véhicules).

▶ *Périphérique de Paris.*

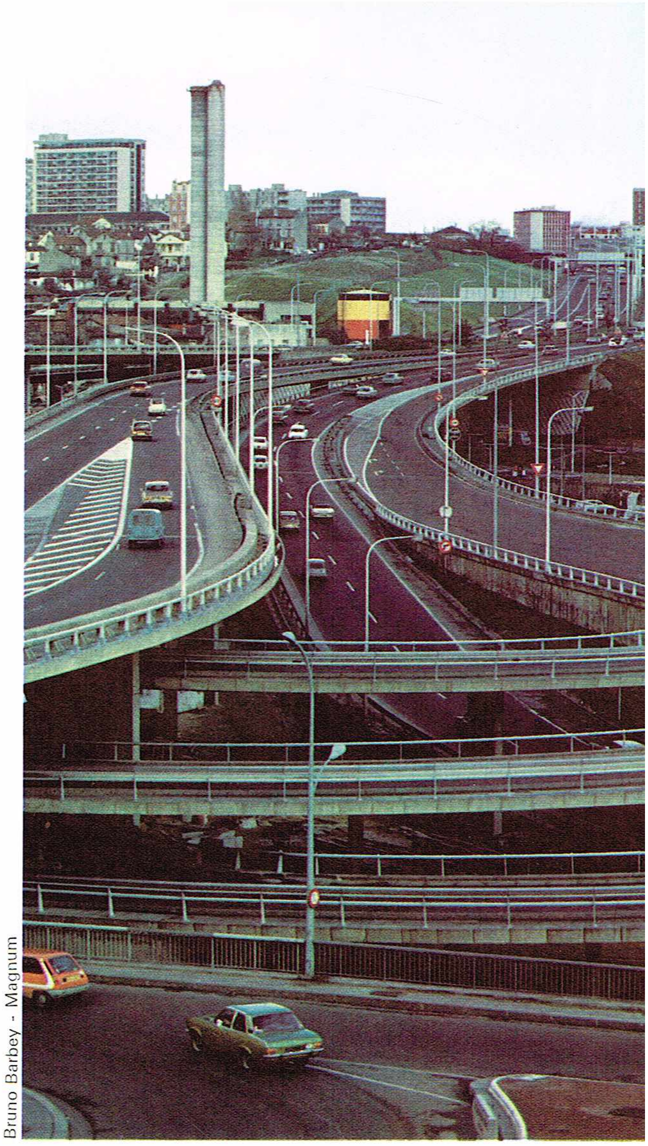

Quelques caractéristiques

Il y a de nombreux types de routes, et on peut les classer principalement suivant des critères administratifs, techniques et fonctionnels.

● La **classification administrative** dépend des pays et de leur organisation politique; généralement quatre niveaux sont distingués : le national, le régional, le local et le spécifique. C'est en fait la collectivité propriétaire qui détermine la voie. En France, on distingue essentiellement deux types de réseaux :

★ Le *réseau routier national* dépend du domaine public national. Il comporte en France aussi bien des autoroutes que des routes, et se situe en milieu urbain et en rase campagne. Ses dimensions sont données par le *tableau* I. La nature de ce réseau a évolué avec le temps.

▶ *Tableau I : dimensions du réseau routier français.*

Tableau I
Dimensions du réseau routier français

Nombre de kilomètres	Milieu urbain (> 5 000 hab.)	Rase campagne
Autoroutes	700	3 000
Routes	3 500	28 000

▼ *Tableau II : structure détaillée du réseau autoroutier français à la fin de 1974.*
Tableau III : structure détaillée du réseau routier français à la fin de 1974.

Tableau II
Structure détaillée du réseau autoroutier français à la fin de 1974

Autoroutes	2 × 2 voies	2 × 3 voies	2 × 4 voies	Autres profils	Total
Longueur totale	2 186	283	11	149	2 629

Tableau III
Structure détaillée du réseau routier français à la fin de 1974

	Routes	Rase campagne	En agglomérations de plus de 5 000 habitants	En agglomérations de moins de 5 000 habitants	Total
Chaussée unique	2 voies	20 178	2 417	2 841	25 436
	3 voies	2 753	540	239	3 532
	4 voies	490	306	64	860
	5 voies +	2	31		33
	Total	23 423	3 294	3 144	29 861
Ch. séparée	2 × 2 voies	1 052	171	49	1 272
	2 × 3 voies	22	34	3	59
	2 × 4 voies		7		7
Ensemble		24 497	3 506	3 196	31 199

La modification la plus récente date de quelques années, lorsque le réseau national a été « dégraissé » des voies les moins importantes qui sont devenues départementales. Les départements qui ont accepté la gestion de ces routes ont été dédommagés financièrement. La structure plus détaillée du réseau national se présentait, à la fin de 1974, comme l'indiquent les *tableaux* II et III.

★ Les *réseaux locaux*. Les collectivités locales sont gestionnaires d'un réseau très important : il y a d'une part les chemins départementaux (328 429 km) et les voies communales (424 953 km). Le réseau routier comprend ainsi environ 800 000 km auxquels il faut ajouter pour être exhaustif les routes forestières et les routes militaires ainsi que, à la limite, les chemins agricoles. Leurs caractéristiques sont en général moins bonnes, bien que certaines voiries communales et départementales puissent dans certains cas particuliers être des voies très larges (Champs-Élysées) ou quasi autoroutières (certaines rocades urbaines).

● Les **caractéristiques techniques** sont nombreuses. On distingue les autoroutes (qui feront l'objet d'une analyse particulière) du reste du réseau par la réunion de quelques conditions impératives :

— l'interdiction de l'accès des riverains;

— l'interdiction de circulation à certains véhicules lents (principalement les deux-roues légers et les tracteurs agricoles) ;

— l'absence de carrefour à niveau : tous les croisements doivent être effectués par des « échangeurs » qui comprennent des « bretelles d'accès ».

C'est ainsi que, contrairement à ce que l'on pense en général, l'existence de deux chaussées (pratiquement généralisées sur les autoroutes) n'est une condition ni nécessaire ni suffisante pour qu'une voie soit considérée comme autoroutière.

Actuellement, une autre différence importante entre divers types de voies est la vitesse autorisée :

— sur les autoroutes de rase campagne, on peut pratiquer des vitesses allant jusqu'à 130 km/h ;

— sur les autoroutes urbaines, 110 km/h ou 80 km/h (périphériques de Paris, de Lyon) ;

— sur les routes ordinaires de rase campagne, 90 km/h ;

— sur la voirie urbaine, 60 km/h.

Nous allons examiner trois aspects techniques qui interviennent dans la construction d'une route : le tracé, la chaussée et les ouvrages d'art. Pour être exhaustif, de nombreuses autres questions devraient être abordées, comme l'entretien, le renouvellement, les terrassements, mais de nombreux manuels traitent de l'ensemble de la question, et on pourra s'y reporter avec profit.

● L'analyse des **caractéristiques géométriques** d'une route procède d'un certain nombre de volets : largeur, bombement, accotements, fossés, saignées, courbes, profils, déclivités, virages, carrefours, gabarit des ouvrages.

★ La *largeur* d'une voie est fixée en fonction de l'importance du trafic prévu à un horizon de l'ordre d'une dizaine d'années. Si une forte progression est possible à long terme, il est souhaitable de réserver la possibilité d'un élargissement. On admet en rase campagne qu'une chaussée à deux voies peut supporter en pointe 800 véhicules, une chaussée à trois voies 1 200 véhicules par heure. Sur une chaussée unidirectionnelle sans carrefour, le débit horaire théorique est de 1 200 véhicules par voie.

On parle souvent de débit journalier, plus facile à apprécier : dans ce cas, on estime en général le trafic journalier à six fois le trafic de l'heure de pointe (par exemple, une route à 3 voies peut admettre un trafic journalier de 7 000 véhicules/jour environ).

En zone urbaine, la vitesse est plus faible, on peut donc augmenter sensiblement ces chiffres : la capacité d'une autoroute urbaine est ainsi de 1 800 véhicules par heure et par voie, et d'une rue de 1 000 à 1 200. Les chiffres les plus élevés atteints en France sont les suivants :

— pour une autoroute : A3 (antenne de Bagnolet, Seine-Saint-Denis), 160 000 véhicules/jour ;

— pour une rue : avenue du Général-de-Gaulle (Neuilly, Hauts-de-Seine), 110 000 véhicules/jour.

La largeur des chaussées est de 3 m par voie pour une route à faible circulation et de 3,5 m pour une route à grand trafic ; il faut prévoir une plate-forme plus large qui varie de 5 m supplémentaires pour une voie modeste à 15 m pour une autoroute : ainsi l'emprise totale peut varier de 8 m à 35 m, voire même 70 m.

★ Le *profil en travers* doit prévoir :

— un bombement pour l'écoulement des eaux ; il était de l'ordre de 0,01 : ce chiffre donne la flèche au centre de voie par rapport à sa largeur ; on lui préfère maintenant deux versants plans en pente de 2 à 3 % ; pour une voie à chaussées séparées, la pente est unique (2 % environ) et dirigée vers la limite de plate-forme ;

— des accotements qui permettent le stationnement de véhicules en détresse : leur largeur est de l'ordre de 3 m, et ils sont inclinés vers l'extérieur à 5 % ; sur les autoroutes, ce sont les bandes d'arrêt d'urgence (4 m) ; ils peuvent également porter des pistes cyclables, indispensables lorsque le trafic dépasse 300 cycles à l'heure ;

— des fossés et des saignées qui permettent un drainage correct, indispensable pour l'assainissement et la bonne tenue des chaussées : les fossés ont de 1 m à 1,5 m de large et 50 cm de profondeur ; ils peuvent être remplacés, sur autoroute ou en agglomération, par un égout auquel les eaux sont amenées par des caniveaux au travers de grilles.

★ Les *courbes* et *virages* ne sont pas souhaitables uniquement pour que la route épouse la géographie physique et économique de la contrée traversée, mais également pour rompre la monotonie et éviter l'éblouissement prolongé la nuit. Toutefois, les courbes doivent être aussi larges que possible, être progressives et avoir un certain dévers qui permet au véhicule de virer moins dangereusement et plus confortablement ; une certaine surlargeur est également très souhaitable : en effet, l'insertion d'un véhicule dans un virage fait qu'il y a une relation à assurer entre la vitesse, le rayon de courbure, le dévers et la surlargeur. Cette dernière est en général égale à 50/R (R étant le rayon de courbure). Le *tableau* IV donne, pour la vitesse de référence V, le rayon minimal et le dévers.

Tableau IV
Rayon minimal de courbure et dévers d'une courbe pour une vitesse donnée

Vitesse (en km/h)	Rayon (en m)	Dévers (en %)
120	1 000	4
80	400	5
40	120	5

◄ *Tableau IV : rayon minimal de courbure et dévers d'une courbe pour une vitesse donnée.*

Un point important est la nécessité d'un raccordement progressif entre la ligne droite et le virage ; il a fait l'objet de nombreux travaux, et on utilise fréquemment la parabole cubique ($y = x^3$), la lemniscate, ou mieux la clothoïde (courbe dont la progression de courbure est constante).

Par ailleurs, il faut veiller dans les courbes à assurer une visibilité suffisante pour que le conducteur puisse voir à temps, compte tenu de sa vitesse et de sa distance de freinage, un obstacle quelconque : on est ainsi amené à couper des arbres, à faire un terrassement ou à interdire la construction sur une certaine surface.

★ Les *pentes* appellent deux remarques :

— la *pente maximale* suivant la région peut varier de l'ordre de 4 % en plaine à 8 % en montagne : il est essentiel d'ailleurs qu'un tel maximum ne soit pas atteint sur une distance de plus d'un kilomètre ; la pente trop forte est un facteur d'insécurité (accidents en chaîne de la célèbre côte de Laffrey dans l'Isère) et de diminution considérable du débit (files derrière les poids lourds) ;

▼ *En bas, col d'Izoard et le refuge Napoléon (Hautes-Alpes, 2 361 m) et la route d'accès. Ci-dessous : dos d'âne sur une route à deux voies.*

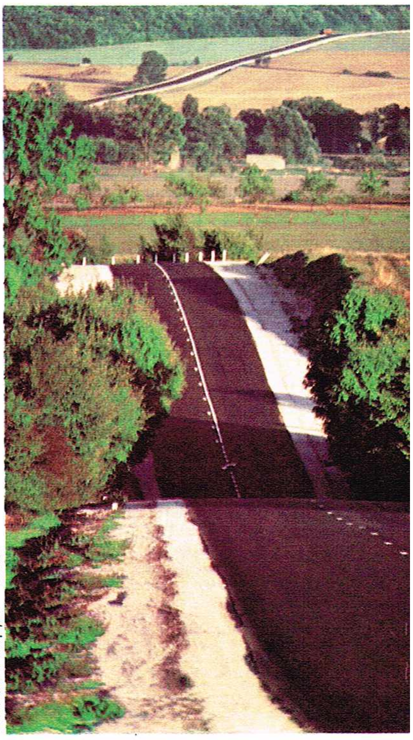

Christian Sappa - Cedri

Gérard Sioen - Cedri

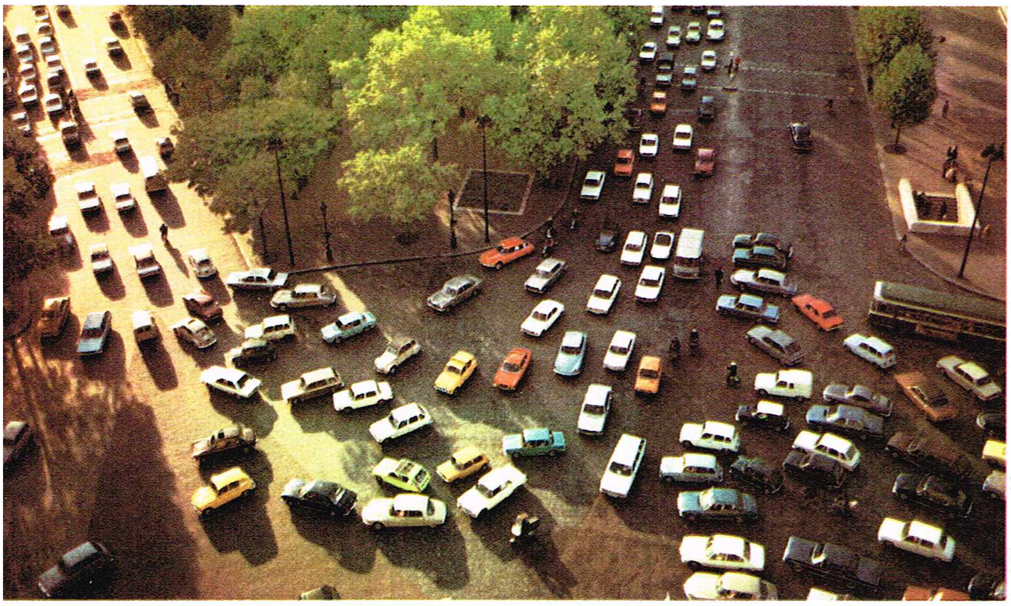

Fred Mayer - Magnum

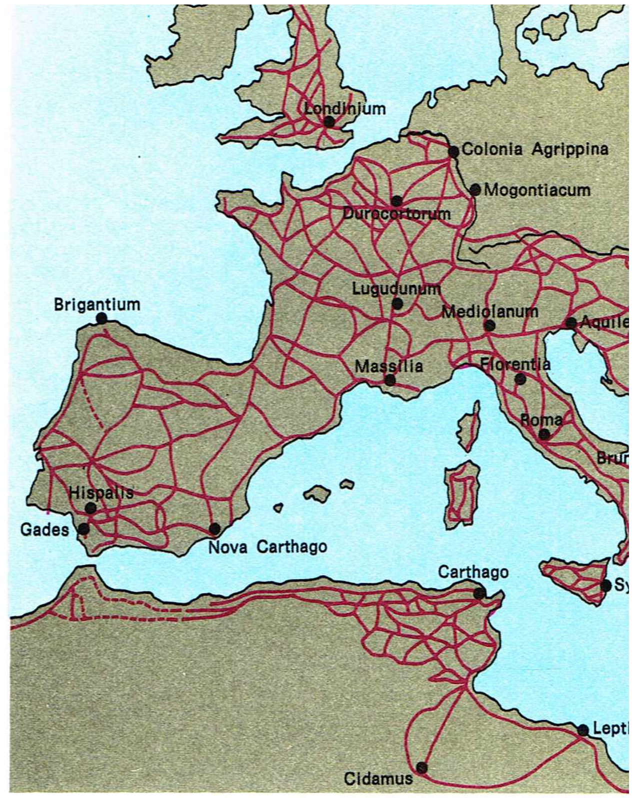

▲ *La place de l'Étoile à Paris, nœud important de la circulation de la capitale.*

— un *raccordement progressif* est nécessaire également entre le palier et la pente soit au bas, soit au sommet de la côte : au bas, il s'agit du confort (un rayon de courbure de 1 500 m est un minimum) ; en haut, il s'agit également de sécurité : la visibilité est en effet engagée (un rayon de courbure de 6 000 m est alors nécessaire).

★ Les *carrefours* sont en général à niveau. Il en résulte un problème de visibilité analogue à celui qui a été mentionné pour les virages ; il s'agit surtout de réduire la vitesse sur les voies secondaires (courbes ou, très souvent, « stop ») ; de ménager des zones de stockage pour les véhicules qui manœuvrent ; d'éviter les cisaillements à angle très aigu ; de séparer les sens de circulation.

Lorsque le trafic devient important, il faut installer des feux tricolores, des sens giratoires, des passages dénivelés. Sur les autoroutes, on doit prévoir des voies d'accélération et de décélération pour permettre l'intégration d'un véhicule dans un flux à vitesse donnée.

Chaussées

Une route est essentiellement composée d'une chaussée : on appelle ainsi toute surface destinée au stationnement ou à la circulation des personnes ou des véhicules (voitures particulières, camions, bicyclettes). La chaussée est l'élément de base qui se situe dans un ensemble plus ou moins complexe suivant qu'il s'agit d'un chemin, d'une route, d'une autoroute, ou que le relief ou l'environnement est plus ou moins difficile : on aura alors des ouvrages variés pour permettre la construction de la chaussée.

La chaussée est nécessaire pour assurer un usage permanent. La plupart des sols existants ne peuvent en effet satisfaire cette exigence : ils sont plastiques et ne peuvent supporter sans dommage une circulation même limitée de véhicules ; même s'ils sont correctement nivelés, très rapidement des ornières se forment, la pluie ou la sécheresse rend les déplacements impossibles. Il faut donc traiter le sol.

Les Romains furent les précurseurs en la matière, et leur technique resta en usage jusqu'au XIX^{e} siècle : ils mirent au point un réseau très vaste sur lequel la circulation était toujours possible. La coupe type de leur chaussée était la suivante (sur une profondeur pouvant atteindre 1 mètre) : en couches inférieures, une fondation en pierres plates *(statumen)* et des déchets pierreux *(nudus)* ; en couches de base, du béton de pierres cassées avec de la chaux grasse *(nucleus)* ; en couches supérieures, un dallage scellé au mortier de chaux *(summum dorsum)* [*fig.* 1]. On verra plus loin que cette structure reste semblable, à l'époque moderne, même si les matériaux ont varié.

Qualités demandées à une chaussée

L'objet de la chaussée est de permettre aux véhicules de rouler dans les meilleures conditions possible de confort et de sécurité : c'est le point de vue des usagers, et ces objectifs sont en partie contradictoires. Elle doit également être aussi peu coûteuse que possible et durable : c'est le point de vue de l'exploitant, qui est, la plupart du temps, une collectivité publique.

Le confort sera bon si le profil de la chaussée est uniformément plat afin de ne pas engendrer des oscillations

▼ *A gauche, restes de la Voie Sacrée, une des plus belles voies romaines et la plus avancée au point de vue technique.*
A droite, figure 1 : section d'une chaussée romaine.

I.G.D.A. - C. Bevilacqua

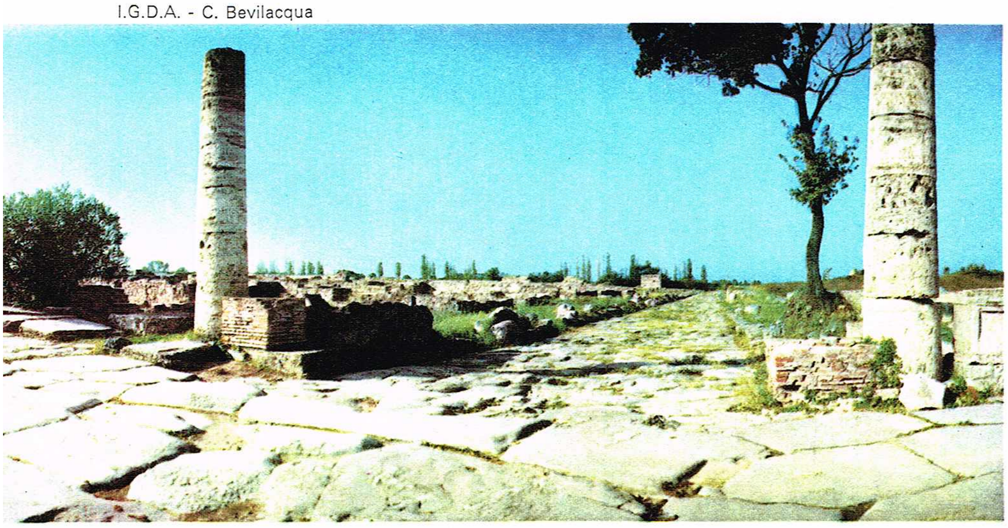

fig. 1

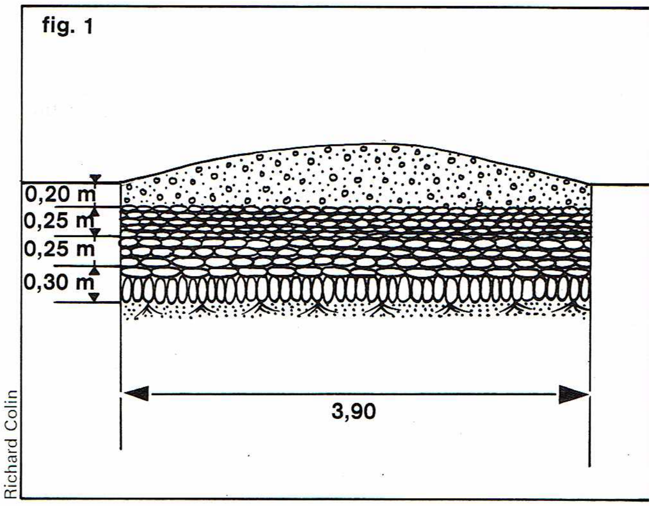

Richard Colin

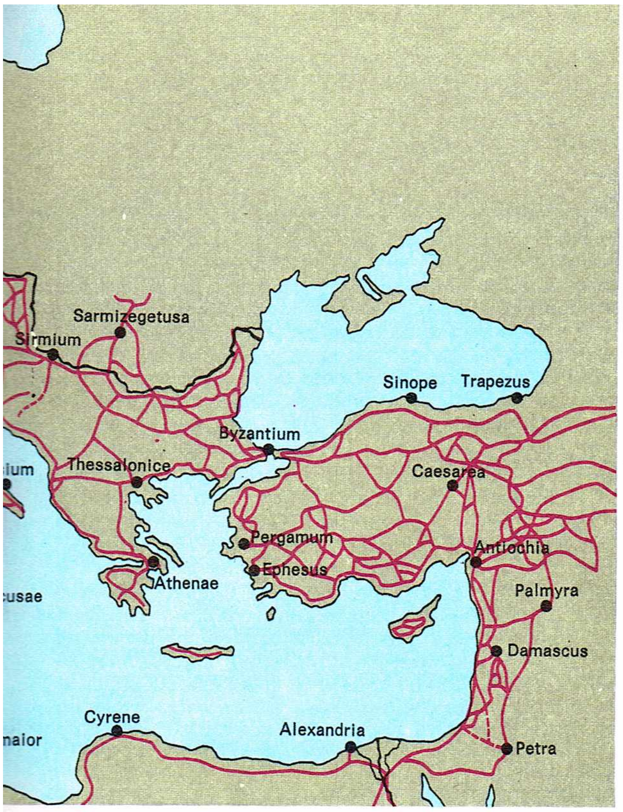

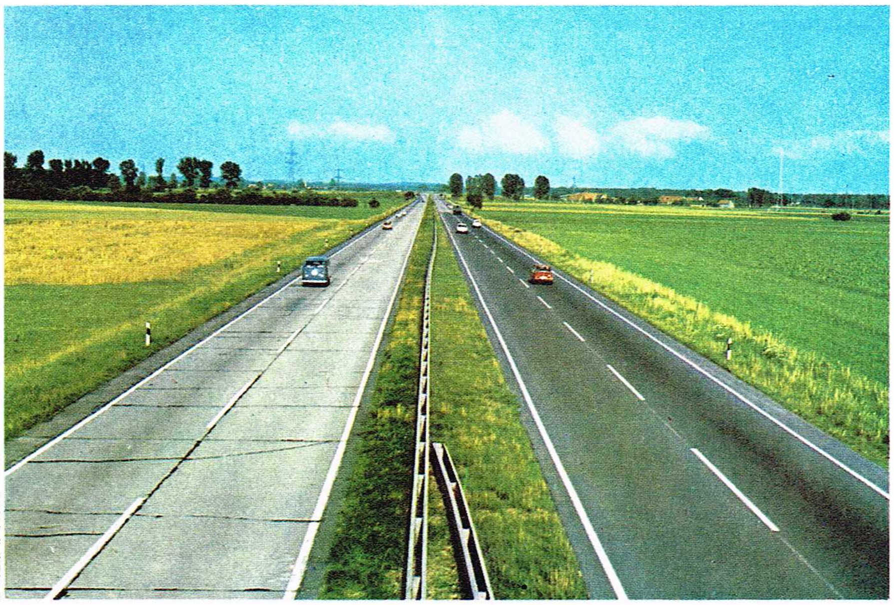
I.G.D.A. Titus

▲ *A gauche, réseau routier de l'Empire romain. Les Romains avaient compris l'importance des communications routières avec les provinces les plus lointaines de l'Empire.*

A droite, autoroute aux environs d'Ulm. Chaussée « rigide » en dalles de béton (a gauche). Chaussée « souple » composée de matériaux purs résistant à la traction (à droite).

verticales inconfortables pour le voyageur et les marchandises, et agressives vis-à-vis des pneumatiques, des roues et des carrosseries. La sécurité sera assurée dans la mesure où le véhicule pourra freiner efficacement en toutes circonstances et respecter les trajectoires que le conducteur veut lui faire suivre : l'adhérence des contacts des pneumatiques avec la chaussée doit donc être aussi élevée que possible, même par temps de pluie, aussi bien dans le sens du déplacement (freinage) que dans le sens transversal (courbe).

La durabilité sera acquise dans la mesure où, compte tenu du trafic, ces conditions (freinage, virage, régularité de la surface) se maintiendront.

La chaussée sera économique non seulement si son coût de construction est faible, mais si l'entretien et la réfection ne sont pas trop onéreux : il y a là un bilan à faire sur une longue période pour choisir le meilleur compromis selon l'utilisation de la route.

La technique de construction, fondée au départ sur l'expérience, s'est progressivement théorisée par l'étude des contraintes et des déformations sous les divers efforts auxquels sont soumises les chaussées au passage des véhicules, qui sont, dans leur grande majorité, munis de roues gainées de pneumatiques. Le pneumatique est l'organe qui relie le véhicule à la chaussée : son rôle est de transmettre et de répartir les charges verticales et les efforts longitudinaux et transversaux. Le pneumatique présente trois caractéristiques : son affaissement, qui est proportionnel à la charge, sa pression moyenne, qui est constante et sensiblement égale à la pression de gonflage de la chambre à air, sa raideur, qui est la pente de la courbe d'affaissement. La charge verticale du véhicule impose à la chaussée un effort de poinçonnement lié directement à la pression de gonflage et aux structures surtout sensibles dans les hautes pressions (supérieures à 7 kg/cm^2) et une pression globale qui se diffuse dans la chaussée jusqu'au niveau du sol de fondation : la chaussée joue ainsi un rôle de limitation de la pression sur le sol naturel; la pression du pneumatique joue un rôle moins important que le poids total; le corps même de la chaussée doit être apte à répartir ce poids total.

La chaussée doit résister au poinçonnement et permettre une *bonne répartition de la charge sur le sol naturel :* c'est ainsi que le poids par essieu joue un grand rôle dans l'usure des routes et que celui-ci est limité par le Code de la route à 13 tonnes en France (10 tonnes dans la plupart des autres pays européens).

Le pneumatique impose également, de toute évidence, des efforts horizontaux à la chaussée : lors du freinage ou de l'accélération, il se développe, bien sûr, des efforts retardateurs et accélérateurs, mais il existe, même en l'absence de toute variation, des efforts de cisaillement qui proviennent de l'inégalité du contact; leur valeur, même faible, est cependant suffisante pour entraîner une usure du revêtement et du bandage. Un effet second qui marque bien le phénomène est le bruit entraîné par le roulement qui, dans certains cas, peut être insupportable pour les riverains : ainsi le revêtement du boulevard périphérique de Paris, mal conçu, a dû être remplacé en 1976 au sud de la capitale.

Il faut, à ce stade, souligner l'importance de ces considérations pour le choix de la chaussée au regard de l'infrastructure routière : la grande surface sur laquelle la construction doit être faite nécessite la sélection de la solution la plus économique, compte tenu des divers paramètres que sont le sol naturel, le climat, la structure et la quantité de trafic. C'est pourquoi les ingénieurs routiers cherchent constamment à améliorer leurs techniques et à les adapter à chaque cas particulier.

On distingue diverses natures de sols d'après leur granulométrie :

— Les sols à gros grains (cailloux > 20 mm. gravier < 2 mm, gros sable > 0,2 mm). Sans cohésion, leurs propriétés mécaniques varient peu avec l'humidité.

— Les sols à éléments fins sont de loin les plus nombreux (sable fin > 0,02 mm, limon > 2 μm, argile < 2 μm). La résistance mécanique de ces sols est d'autant plus conditionnée par leur teneur en eau que le grain est plus petit : la présence d'argile a une importance très grande, car elle favorise la cohésion, mais elle est très sensible à l'eau. L'obtention d'une bonne compacité nécessite une teneur en eau convenable : il faut la réaliser lors de la mise en œuvre et protéger le sol au mieux pour empêcher de trop forts écarts durant la vie de la chaussée. Ce sont les variations excessives de ces paramètres qui entraînent la plupart du temps la ruine des chaussées. Toute l'importance du drainage, de l'imperméabilisation des surfaces, de sous-couches anticapillaires ressort de ces phénomènes.

Deux types de chaussées sont ainsi distingués :

— Les *chaussées rigides* sont constituées de dalles de béton en produits « blancs » : elles fléchissent sous les charges et transmettent les efforts à distance en les répartissant sur une très grande surface; c'est la mauvaise tenue des couches inférieures ou du sol qui entraîne des déformations de la dalle qui se fissure et conduit à la ruine de la chaussée. L'avantage de ces chaussées est leur grande solidité lorsque le sol est bon et les sous-couches bien traitées. Leur coût est toutefois élevé.

— Les *chaussées souples* sont composées de couches de matériaux peu résistants à la traction; la mécanique des sols s'y applique. Les couches supérieures sont plus résistantes et moins déformables que les couches inférieures, mais les contraintes dans le terrain seront plus élevées que dans le cas précédent.

La ruine de la chaussée provient souvent du niveau trop élevé atteint par celle-ci. Ainsi, suivant que le terrain sera plus résistant et moins défavorable, la chaussée souple sera plus adaptée; dans le cas inverse, c'est la chaussée rigide qui l'emportera.

▲ *Construction d'une route : au-dessous, le ballast est chargé de supporter et de transmettre les charges ; au-dessus, le pavement.*

La chaussée souple

Elle se compose de plusieurs couches : une *couche de base* de 10 à 20 cm d'épaisseur en constitue l'élément essentiel. C'est à l'intérieur de celle-ci que les pressions élevées dues aux efforts des essieux se diffusent suffisamment pour être supportées soit directement par le terrain, soit par les couches de fondations : l'ensemble constitue le *corps de la chaussée*. Bien entendu, avant la mise en place du corps de la chaussée, le terrain doit être aplani ; on dit qu'on a réalisé la *forme*.

Sur les routes où la circulation dépasse un seuil minimal, la couche de base est protégée par une couche de surface destinée à résister aux efforts horizontaux : c'est le *goudron* traditionnel de nos routes. Le plus souvent, toutefois, si ce goudron est toujours constitué de liants hydrocarburés, plusieurs couches le composent, l'une de roulement, directement en contact avec les roues, l'autre de liaison, qui assure la transition avec la couche de base.

La *couche de fondation* est constituée souvent par un mélange du terrain et d'apport convenable (graves maigres, mâchefers, schistes miniers) ; elle doit pouvoir être compactée par un cylindre et avoir ainsi une certaine granulométrie, être peu sensible à l'eau (peu d'argile) et adaptée au sol correspondant.

La *couche de base* doit être particulièrement soignée : elle présentera les mêmes caractéristiques, mais avec plus de précision. Il doit y avoir suffisamment d'argile pour assurer une cohérence minimale, mais pas trop, pour éviter que la sensibilité à l'eau ne soit trop forte. Les matériaux doivent ainsi avoir une grosseur inférieure à 30 mm, mais ne pas comporter trop de fines (moins de 50 %). Le principe de construction est d'étaler le matériau choisi sur le cadre de fondation, puis de le compacter avec des cylindres en arrosant pour réaliser la teneur en eau optimale (l'eau s'immisçant entre les éléments permet un meilleur remplissage du volume par glissement, trop d'eau empêche la résorption des vides). Cette teneur se détermine pour un sol donné par l'essai Proctor (ou Proctor modifié) : il s'agit de simuler en laboratoire le compactage à différents dosages d'eau et de définir ainsi la teneur en eau pour laquelle la densité est maximale ; on s'efforce ensuite de la maintenir lors du chantier.

Les *couches de surface* sont principalement constituées de matériaux fins enrobés de liants hydrocarburés, goudron ou bitume : ces produits noirs sont très visqueux aux températures ordinaires, mais, soit par chauffage, soit par une préparation spéciale (fluxage, émulsion), ils deviennent fluides, puis redeviennent rapidement visqueux avec deux qualités essentielles, la cohésivité (ils se déforment sans arrachement et fissuration) et l'adhésivité (ils collent aux agrégats minéraux). Le goudron vient de la distillation de la houille (usines à gaz, cokeries), le bitume des raffineries de pétrole (il existe à l'état naturel à Trinidad) ; l'un est plus adhésif (le goudron), l'autre plus visqueux (le bitume) ; toutefois, le premier vieillit plus vite. Tous deux sont utilisés, bien que le second ait prédominé ces dernières années.

La chaussée rigide

La couche de base d'une chaussée rigide est constituée d'une dalle en béton qui fléchit élastiquement sous les charges et transmet ainsi les efforts à distance en les répartissant sur une grande surface.

Les contraintes dans le sol dépendent ainsi des dimensions et surtout de l'épaisseur de la dalle, de l'élasticité relative de la dalle et du sol et de la position de la charge sur la dalle. Elles sont faibles, à condition que le sol ne soit pas trop déformable, car alors la dalle ne peut suivre et subit des flexions très fortes qui entraînent des fissures. La déformabilité du sol est donc essentielle pour la stabilité. Il est ainsi indispensable de porter une grande attention au terrain et de procéder à un compactage soigné améliorant la portance, il ne doit d'ailleurs pas être trop fort pour éviter des décompressions.

Les *couches de fondation* ont une épaisseur de 20 à 40 cm ; les matériaux utilisés pour cela sont des tout-venants provenant des ballastières ou du concassage de roches mi-dures. Bien entendu, ces couches sont compactées, par vibration la plupart du temps, et parfois imprégnées de ciment ou de bitume.

Le béton utilisé pour la *couche de base* doit être de très bonne qualité, car elle est soumise à un dur traitement (charges, chocs, pluie). La composition du béton doit être étudiée tant pour la granulométrie des agrégats que pour le dosage en eau et en ciment : c'est évidemment toute une technique complexe qui est à analyser dans un ouvrage spécialisé ; l'épaisseur de la couche fait l'objet de théories assez compliquées qu'il n'est pas possible d'exposer brièvement : en fait, des abaques (courbes tracées expérimentalement) permettent, à partir des paramètres (poids des charges, portance), de déterminer les dimensions optimales des dalles.

La construction s'effectue suivant les techniques de la construction des ouvrages en béton, par coffrages fixes ou glissants : les procédés modernes utilisent des machines à coffrages glissants se déplaçant sur chenilles : le béton est déposé devant elles, et elles font toutes les opérations, jusqu'au lissage inclus ; la composition du béton est étudiée pour qu'il puisse être décoffré après quelques minutes du fait de la translation des coffrages attachés à la machine. Le rendement est très élevé, puisqu'il est possible de traiter un kilomètre de chaussée par jour.

Les ouvrages d'art

Les cités importantes se sont souvent développées au bord des fleuves et des rivières. Même si un gué permettait de les franchir, l'édification de ponts prenait une importance vitale pour l'avenir de ces villes. Mais c'était une tâche périlleuse, car les cours d'eau sauvages les emportaient parfois avant même qu'ils soient achevés. Ainsi, pendant des siècles, inlassablement, les hommes ont reconstruit des ponts dont il ne reste presque pas de traces, contrairement aux cathédrales dont on peut suivre l'évolution. Avec les matériaux utilisés, le bois et la pierre, les ponts ont dû connaître une évolution semblable.

En décrivant la lente progression dans l'art de construire les ponts au cours des siècles, nous montrerons la relation entre le matériau et la forme architecturale, puis nous présenterons l'éventail actuel des solutions techniques, enfin nous expliquerons simplement comment se font aujourd'hui le choix du parti et la construction d'un pont.

La construction

Il faut d'abord préciser quelques termes appartenant au vocabulaire des ouvrages d'art. L'**ouverture** est la distance entre **appuis** extrêmes. La **portée** est la distance qui sépare deux appuis successifs. Les **culées** sont les appuis extrêmes; elles assurent la transition avec le terrain naturel ou un remblai. Les **piles** sont les appuis intermédiaires. Les espaces libres entre appuis sont appelés **travées.** Le **tablier** peut porter une voie routière, une voie ferrée, un canal ou un aqueduc. L'**intrados** du tablier (ligne inférieure sur l'élévation) doit respecter en général divers gabarits (routier, ferré ou de navigation). Le tablier peut être **simplement posé** sur ses appuis (on dit alors qu'il est sur **appuis simples**), **articulé** ou **encastré.** Un **viaduc** est un ouvrage de grande longueur comportant de nombreux appuis intermédiaires.

Jusqu'au début du XIX^e siècle, les seuls matériaux utilisés ont été le bois et la pierre. Le bois permet de faire des ponts à poutres, la pierre des ponts à voûtes, dont les formes ont évolué depuis la voûte en plein cintre jusqu'à la voûte surbaissée et en anse de panier. La voûte, réalisée sur un cintre, a été inventée probablement par les Étrusques. Elle a été utilisée et répandue par les Romains (pont-aqueduc du Gard). On en trouve aussi des vestiges anciens en Extrême-Orient. Les voûtes arabes étaient en arc brisé. Il suffit de longer les quais de la Seine à Paris pour admirer les nombreux ponts à voûtes, dont le plus ancien est le Pont-Neuf (XVII^e). Ils sont également nombreux sur la Loire (pont de Saumur dû à Cessart, pont de Blois).

Au début du XIX^e siècle sont apparus les premiers ponts métalliques, d'abord en fonte, puis en fer et en acier rivé. On en voit à Paris (pont Alexandre-III, pont d'Arcole). Ces nouveaux matériaux ont permis de diversifier les ouvrages et de franchir de grandes portées en arc (viaduc de Garabit, Eiffel 1882), ou en pont suspendu.

Au début du XX^e siècle, la maçonnerie fut progressivement remplacée par le béton armé. Le béton, mélange de graviers, de sable, de ciment et d'eau, qui acquiert sa résistance par la prise hydraulique du ciment, permet de réaliser des formes moulées très variées. Aux voûtes se sont ajoutés les poutres (dalle, poutre en té, poutre à talon), les arcs coulés sur cintre en bois, les structures en « bow-string » (arc dont les poussées sont reprises par le tablier formant tirant, l'ensemble fonctionnant comme travée indépendante). Un très bel exemple d'ouvrage en arc est le pont de Plougastel conçu et réalisé vers 1930 par Eugène Freyssinet : trois arcs de 186 m de portée, dont le cintre, entièrement cloué, a été amené et déplacé par flottaison en utilisant les marées.

Après la Seconde Guerre mondiale, le béton précontraint, inventé et développé par Freyssinet, produisit une sorte de révolution dans l'utilisation du béton. Le béton est un matériau qui résiste bien aux efforts de compression mais très peu aux efforts de traction. L'idée de la précontrainte est d'introduire des contraintes de compression préalables au moyen de câbles en acier dur à haute résistance, constituant une réserve de compression que viennent seulement diminuer les efforts extérieurs appliqués. La mise en pratique de cette idée exigeait la fabrication d'acier dur à haute résistance, de façon que les contraintes résiduelles après les diverses pertes de tension (frottement, ancrage, déformation différée du béton appelée fluage, relaxation de l'acier) ne soient pas négligeables. La ténacité de l'inventeur permit de surmonter ces difficultés. Le béton précontraint, matériau moulable, résistant à la traction et se prêtant à l'assemblage, donc à la préfabrication, ouvrait encore le champ des formes et des modes d'exécution possibles : poutres, arcs, portiques réalisés sans cintre au sol, par éléments coulés en place ou préfabriqués à proximité.

Aujourd'hui, les qualités d'acier utilisées pour les plats, les tôles et les câbles, d'une part, les progrès accomplis dans les assemblages par soudure et boulons à haute

C. Sappa - Cedri

◀ *Le pont Alexandre-III, à Paris.*

Paul Maurer - Cedri

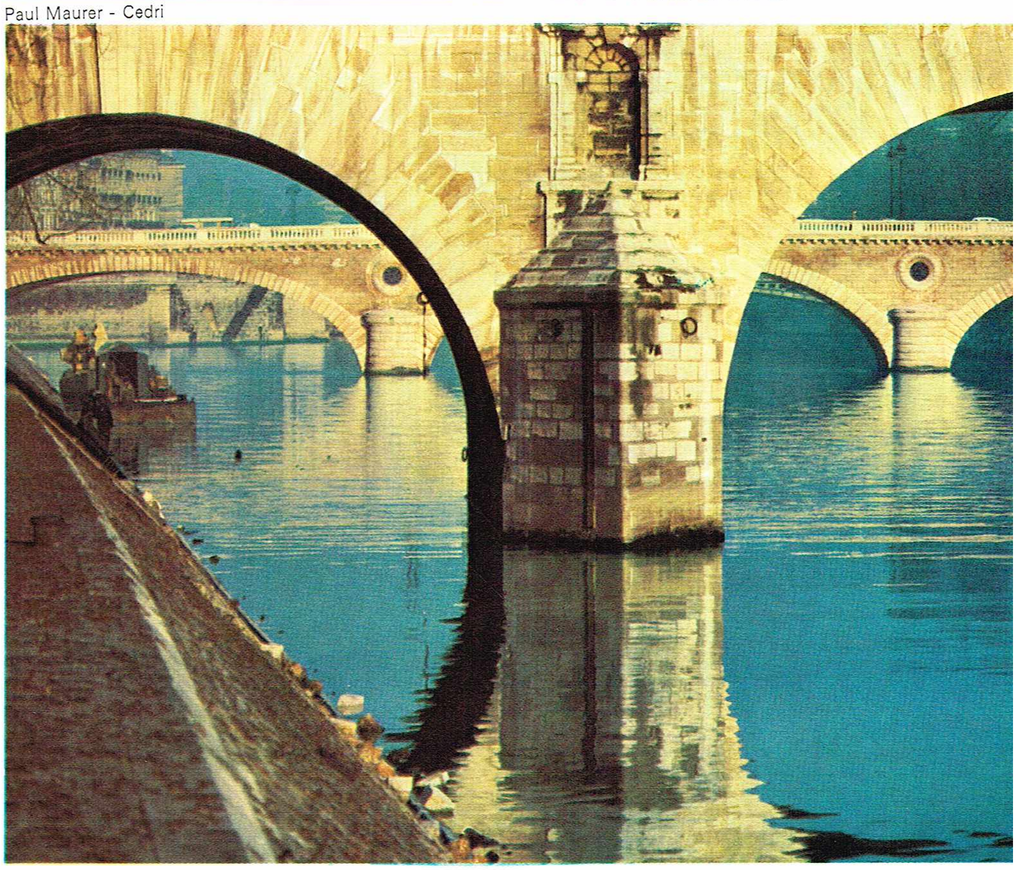

▼ *Ponts de Paris.*

Marka

▲ *Pont suspendu Verrazano à New York; construit en 1964, ce pont a la portée la plus longue du monde : 1 298 m. Le câble de soutènement a un diamètre de 900 mm.*

C. Sappa - Cedri

▶ *Viaduc de l'île d'Oléron près de Chaput (Charente-Maritime), construit en 1967; il a 3 km de long.*

résistance, d'autre part, permettent de faire des prouesses techniques dans le domaine des grandes portées où l'acier reste le seul matériau utilisable : ponts à haubans à tablier métallique, ponts suspendus (pont Verrazano à New York, 1964, record mondial de portée 1 298 m).

Pour réaliser des fondations profondes, les moyens d'exécution sont restés longtemps rustiques (pieux en bois, caissons en bois échoués par lestage). Les faibles portées des ponts à voûtes et l'encombrement du lit des cours d'eau par les piles massives qui en résultaient, des fondations peu profondes, d'autre part, ont entraîné fréquemment la ruine des ouvrages par affouillement. Aujourd'hui, une meilleure connaissance de la mécanique des sols, et les nombreux modes d'exécution disponibles conduisent à fonder les ouvrages aussi profondément qu'il est nécessaire pour les protéger des affouillements. Ainsi, dans le Rhône, aux crues autrefois redoutables, la cote de fondation dans les alluvions est fixée à 10 m environ sous le fond du lit. Les bâtardeaux de palplanches, la technique des caissons havés, soit à l'air libre, soit à l'air comprimé, celle des pieux battus en béton armé ou en acier, des puits forés et moulés dans le sol ou des barrettes offrent de nos jours toute une gamme de solutions possibles.

Aujourd'hui, pour réaliser un franchissement, l'éventail des solutions techniques est donc très ouvert. Les matériaux utilisés sont maintenant le béton armé, le béton précontraint et l'acier soudable, à haute limite élastique, dans l'ordre des portées croissantes.

Le *béton armé* est utilisé pour les faibles portées, inférieures à 30 m, pour faire des dalles ou des poutres en té. Les arcs en béton armé ne sont plus compétitifs, à cause du prix du cintre, pour lequel on pourrait avoir des difficultés à trouver des charpentiers compétents, et ont été remplacés par des ouvrages en béton précontraint construits par encorbellement.

Le *béton précontraint* a envahi le domaine des portées de 20 à 150 m. Les petits ouvrages, dalles, dalles nervurées, sont coulés sur cintre au sol. Les poutres en double té, préfabriquées, puis lancées au moyen de poutres métalliques, couvrent les portées de 25 à 55 m (viaduc d'accès à Tancarville 50 m, pont d'Abidjan 56 m). Un autre mode d'exécution permettant de réaliser des tabliers de grande longueur sans appuis au sol, pour des portées de 40 à 60 m, est le cintre autoporteur autolanceur. Le bétonnage se fait par longueurs égales (4/5 de la travée i, 1/5 de la travée $i+1$), au rythme d'un élément par semaine; le cintre s'appuie sur les piles et se lance d'une travée exécutée à la suivante à l'aide d'un avant-bec. Dans le même domaine de portée, la technique du poussage consiste à bétonner le tablier derrière la culée par tronçons et à le mettre en place par glissement téflon-acier inoxydable (coefficient de frottement 2 à 3 %) en prenant appui sur la culée. Tous ces ouvrages sont de hauteur constante.

Au-delà de 60 à 70 m, le mode de construction est l'*encorbellement* et les tabliers sont de hauteur variable. Le tablier est réalisé par éléments de 3 m de longueur environ, en général en progressant symétriquement à partir des piles. Les éléments (voussoirs), à section en caisson, peuvent être soit coulés en place dans des équipages mobiles prenant appui sur le tablier déjà construit (avec un voussoir spécial sur pile), soit préfabriqués, posés (à l'aide d'une poutre métallique par exemple) et assemblés par précontrainte. La seconde méthode a l'avantage de diminuer les délais d'exécution (exécution des appuis et préfabrication du tablier concomitante). Parmi les ouvrages exécutés depuis 1958 suivant ces méthodes, citons le viaduc d'Oléron (3 km de longueur, 1967) et récemment le viaduc de Calix à Caen (portée centrale 156 m), et le viaduc de Gennevilliers (portée centrale 172 m). La plus grande portée a été longtemps celle du pont de Bendorf sur le Rhin (210 m). Il existe maintenant au Japon un ouvrage d'une portée centrale voisine de 235 m.

Les *ponts en acier* à poutres sous chaussée permettent des élancements plus grands que les ponts en béton précontraint (l'élancement est le rapport de la portée à la hauteur de poutre). Ainsi le pont de l'Alma avec ses deux travées dissymétriques de 110 m et 40 m n'aurait pas pu être réalisé en béton précontraint dans les mêmes conditions de profil en long et de gabarit de navigation.

C. Sappa - Cedri

▲ ***Pont de Saint-Brévin à Saint-Nazaire, sur l'embouchure de la Loire; pont à haubans et tablier en acier, de portée centrale de 403 m.***

Mais en France, les ponts en acier restent plus coûteux que ceux en béton précontraint.

Le pont du Bonhomme sur le Blavet près de Lorient (186 m entre articulations des béquilles inclinées) et le viaduc de Carente à Martigues (210 m entre articulations des béquilles inclinées, 300 m entre appuis extrêmes) constituent deux exemples de *portiques à béquilles inclinées*, articulées en pied (l'une en béton précontraint, l'autre en métal), qui s'adaptaient particulièrement bien au site et à la géologie.

Pour les portées supérieures, on peut envisager un *pont à haubans à tablier* en béton précontraint (pont de Brotonne sur la Seine, 320 m de portée centrale) ou en acier (pont de Saint-Nazaire, 403 m de portée centrale). Les haubans peuvent être disposés en nappe axiale ou en nappes latérales; ils peuvent être peu nombreux et de forte puissance (pont Masséna sur le boulevard périphérique de Paris) ou multiples et servir au montage du tablier par éléments (pont de Brotonne). A noter l'intérêt, pour un tablier en béton précontraint, de la composante horizontale des efforts de traction dans les haubans qui comprime le tablier (c'est en fait une précontrainte extérieure au béton).

Pour les très grandes portées, le *pont suspendu* reste le seul type d'ouvrage possible (pont de Tancarville, 1959, 608 m de portée centrale). Les tabliers à poutre de rigidité en treillis, de conception classique (*Golden Gate* à San Francisco, première moitié du XXe siècle, 1 280 m), sont maintenant remplacés par des tabliers en caisson soudé, au profil aérodynamique, plus élégants (pont sur la Severn en Angleterre; pont sur le Bosphore à Istanbul, portée centrale de l'ordre de 1 100 m). Les problèmes de stabilité aérodynamique demandent d'ailleurs des études approfondies accompagnées d'essais en soufflerie sur modèle réduit (fréquences propres en flexion et en flexion-torsion).

▶ *Page ci-contre, sortie du tunnel du Mont-Blanc.*

Le choix du parti

Le choix du parti d'un pont s'opère en prenant en compte toutes les données du franchissement : la forme de la brèche, les emplacements souhaitables pour les appuis, les gabarits à réserver, les sols, les modes d'exécution adaptés au site. La comparaison entre diverses solutions possibles fait intervenir l'esthétique générale et le coût.

En France, les ponts sont en général étudiés par l'administration de l'Équipement au niveau de l'avant-projet. Un appel d'offres permet de sélectionner l'entreprise (ou le groupement d'entreprises) qui fait les études d'exécution et les travaux sous la direction d'un ingénieur de l'Administration, maître d'œuvre, agissant pour le maître d'ouvrage (État, département).

Les disciplines scientifiques et techniques qui interviennent dans le domaine des ouvrages d'art sont la résistance des matériaux (théorie de l'élasticité), la mécanique des sols, les méthodes de calcul et les lois de comportement propres aux différents matériaux (béton armé, béton précontraint, acier), ainsi que les règlements de calcul correspondants.

Les matériaux utilisés aujourd'hui pour construire les ponts, les connaissances théoriques acquises, les outils de calcul disponibles donnent une grande liberté de conception à l'ingénieur. Certaines formes architecturales sont tombées en désuétude, mais d'autres sont apparues. Le béton de granulats légers, d'argile ou de schiste expansé, est un matériau récent qui doit étendre le domaine des ponts en béton précontraint. Dans la réalisation des ponts, tout n'est donc pas fait, et l'on ne vient pas trop tard pour tenter de faire d'un grand pont un chef-d'œuvre.

Les méthodes de choix des investissements routiers

Les routes étant, par excellence, des équipements publics, toute décision les concernant est soumise en principe au critère d'efficacité collective maximale.

En matière d'investissements routiers, plusieurs niveaux de choix se posent à l'État, qui gère le réseau national :

— comparer entre eux les divers aménagements envisageables sur chaque liaison ;

— fixer les ordres d'urgence relatifs entre des opérations routières indépendantes dans l'espace ;

— fournir des éléments de comparaison entre les opérations routières et les investissements publics d'autre nature afin de fixer les enveloppes financières à apporter à chaque secteur. Nous ne traiterons pas ici de la voirie départementale ou communale, qui ne fait pas l'objet de méthodes aussi élaborées.

L'économie classique propose une réponse à ces trois questions grâce aux calculs de rentabilité économique. Le principe en est simple : tous les projets, quels qu'ils soient, seront comparés au vu des coûts et avantages qu'ils sont susceptibles de procurer à la collectivité.

Les coûts et les avantages d'un projet

L'évaluation monétaire des coûts d'un projet routier ne présente pas de difficulté théorique. On distinguera le coût d'investissement (acquisitions foncières, études, construction), coût non répétitif, limité dans le temps (la durée des investissements routiers atteint souvent plusieurs dizaines d'années), des coûts de fonctionnement et d'entretien, annuels ou au moins périodiques.

Les avantages pris en compte dans les calculs économiques concernent essentiellement les usagers : économies de prix de fonctionnement des véhicules, gains de temps, amélioration du confort et de la sécurité. Ces gains sont mesurables en unités physiques, puis traduits en francs par l'intermédiaire des valeurs unitaires correspondantes (valeur du litre du carburant, de l'heure, des accidents, etc.). Ainsi, les effets plus ou moins favorables que peuvent avoir un projet sur l'aménagement du territoire, la politique des transports, l'équilibre de la balance commerciale, etc., ne sont pas pris en considération dans les calculs, faute de pouvoir être évalués en termes monétaires. Ils sont pris en compte parallèlement quand des informations suffisamment précises et fiables sont disponibles.

Les valeurs utilisées dans les calculs économiques sont des « valeurs collectives ». Elles peuvent différer des valeurs ressenties par l'usager (valeurs individuelles) : par exemple, ces dernières comprennent les taxes sur les carburants dans le coût de fonctionnement des véhicules, alors que ces taxes ne correspondent pas à un coût réel pour la collectivité. Les valeurs individuelles et collectives préconisées par la circulaire du 14 novembre 1974 du ministère de l'Équipement sont données en francs 1974 dans le *tableau* V. Les valeurs individuelles du temps et du bonus ont pu être mesurées d'après le comportement des usagers sur les routes.

▼ *Tableau V : valeurs individuelles et collectives préconisées par la circulaire du 14 novembre 1974 du ministère de l'Équipement, pour le calcul des coûts et avantages d'un projet d'investissement routier.*

Tableau V
Valeurs individuelles et collectives préconisées par la circulaire du 14 novembre 1974 du ministère de l'Equipement pour le calcul des coûts et avantages d'un projet d'investissement routier

	Unité de référence	Valeur individuelle	Valeur collective
Voirie, entretien du véhicule :			
véhicules légers	Véhicules x km	0,11	0,11
poids lourds	Véhicules x km	0,40	0,40
Carburant :			
essence	Litre	1,72	0,93
gas-oil	Litre	1,04	0,59
Temps :			
véhicules légers	Heure de véhicule	18	18
poids lourds		33	33
Accidents corporels :			
1 tué		0	380 000
1 blessé		0	17 000
dégats matériels	Accident		3 200
Bonus* véhicules légers sur autoroute	Véhicules x km	0,08	0,08
Bonus véhicules légers sur route ordinaire :			
à chaussées séparées	Véhicules x km	0,02	0,02
interdite aux riverains	Véhicules x km	0,02	0,02
à carrefours dénivelés	Véhicules x km	0,02	0,02
Péage éventuel :			
véhicules légers	Véhicules x km	0,12	0
poids lourds	Véhicules x km	0,18	0

*Le bonus valorise l'amélioration du confort par rapport à une route ordinaire.

Les critères du calcul économique

Le taux de rentabilité immédiate

Le taux de rentabilité immédiate d'un projet, pour une année donnée (en général la première année de mise en service), est le rapport des avantages entraînés pour la collectivité, pour cette année de référence, par la réalisation du projet, au coût de l'investissement initial :

$$t = \frac{A}{I}$$

avec t : taux de rentabilité immédiate ; A : somme des avantages nets ; I : montant de l'investissement. Les avantages pour une année sont calculés déduction faite des coûts directs correspondants (coûts d'entretien de la route, par exemple).

Taux d'actualisation et bénéfice actualisé d'une opération

Le taux d'actualisation sert à comparer des dépenses et des avantages intervenant à des époques différentes : une dépense D de l'année 0 équivaut à une dépense $D_n = D \times (1 + a)^n$ de l'année n (a = taux d'actualisation, notion voisine mais différente du classique taux d'intérêt).

Le bénéfice actualisé d'une opération, B, est la différence entre la somme des avantages annuels, A, procurés par l'opération, actualisés une même année de référence, et le coût d'investissement de l'opération, actualisé la même année I_0 :

$$B = -I_0 + \frac{A_1}{1 + a} + \frac{A_2}{(1 + a)^2} + \dots + \frac{A_n}{(1 + a)^n}$$

si n est la durée de vie du projet.

G. Schachmes - Parimage

Le projet est jugé rentable pour la collectivité si son bénéfice actualisé est positif. Entre deux projets concurrents, on optera pour le projet qui procure le plus grand bénéfice. En principe, le taux d'actualisation est fixé, à chaque plan, de façon que l'enveloppe financière des investissements rentables dans tous les secteurs ne dépasse pas le montant des ressources financières que la nation peut y consacrer.

Taux de rentabilité interne

Le taux de rentabilité interne r d'un projet est le taux d'actualisation qui annulerait le bénéficie actualisé :

$$0 = -I_0 + \frac{A_1}{1+r} + \frac{A_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{A_r}{(1+r)^n}$$

On démontre que si le taux de rentabilité interne d'un projet est supérieur au taux d'actualisation, son bénéfice actualisé au taux d'actualisation est positif et réciproquement.

Lorsque l'avantage annuel croît dans le temps, ce qui est généralement le cas des projets routiers, le taux de rentabilité interne est supérieur au taux de rentabilité immédiate.

Date optimale de mise en service

C'est la date de mise en service qui rend maximal le bénéfice actualisé; lorsque les avantages croissent dans le temps, on démontre que la date optimale de mise en service doit être telle que le taux de rentabilité immédiate devienne supérieur au taux d'actualisation.

Coefficient de restriction des crédits

Le secteur routier ne dispose pas en pratique de crédits suffisants pour réaliser tous les projets rentables au taux fixé par le Commissariat général au Plan (9 % pour le VII[e] Plan).

Pour ajuster l'enveloppe des opérations rentables à l'enveloppe financière dont elle dispose, on est ainsi conduit à majorer fictivement les coûts d'investissements de ses projets d'un coefficient multiplicateur k appelé coefficient de restriction des crédits. Au VII[e] Plan, on adopte une valeur de k de 1,5.

Exemple de calcul littéral de l'avantage annuel

Considérons un projet d'aménagement sur place d'une route d'après la circulaire du 14 novembre 1974 du ministère de l'Équipement. Soit :

— sans aménagement :

n_0 le trafic;
C_0 le coût ressenti par les usagers (coût généralisé incluant le temps passé, le confort, etc.);
C'_0 le coût correspondant pour la collectivité;

— avec aménagement :

n_1 le trafic, somme du trafic reporté n et du trafic induit $n_1 - n_0$ (correspondant à des usagers supplémentaires attirés par la meilleure qualité de la liaison);
C_1 le nouveau coût individuel;
C'_1 le nouveau coût collectif.

On a pratiquement : $C' = C - t + s - p$ avec t : montant des taxes sur les carburants; s : coût des accidents (collectif); p : montant d'un péage éventuel.

L'avantage des usagers peut être visualisé sur une courbe représentant le trafic en fonction du coût (*fig.* 2). Il se décompose en avantage des usagers reportés :

$$A_r = n_0\,(C_0 - C_1)$$

et en avantage des usagers induits :

$$A_r \simeq (n_1 - n_0)\,\frac{C_0 - C_1}{2}.$$

Quant au coût supporté par l'État (qui peut être négatif), il passe de la valeur $n_0\,(C'_0 - C_0)$ à la valeur $n_1\,(C'_1 - C_1)$.

L'avantage total s'écrit donc :

$$A = \frac{n_0 + n_1}{2}\,(C_0 - C_1) + n_1\,(C_1 - C'_1) - n_0\,(C_0 - C'_0)$$

le premier terme correspondant aux avantages individuels, le second aux recettes de l'État, qui sont égales à :

$$\Delta t - Ds + \Delta p$$

ou encore

$$A = n_0 C'_0 - n_1 C'_1 + (n_1 - n_0)\,\frac{C_0 + C_1}{2}$$

Exemple numérique : comparaison de trois partis d'aménagement

Cet exemple numérique est inspiré d'un cas réel : la recherche du meilleur parti d'aménagement d'une liaison du sud-est de la France (autoroute sans péage, avec péage ou aménagement sur place à deux fois deux voies de la route existante).

Le *tableau* VI montre comment se décompose l'avantage total pour l'année 1980 dans chacune des trois solutions (en francs 1974).

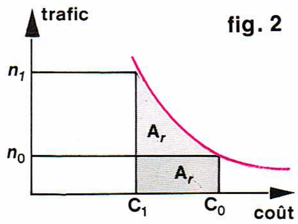

Richard Colin

▲ ***Figure 2 :** courbe représentant le trafic en fonction du coût.*

Tableau VI
Pour l'année 1980 avantage total, avantages individuels et recettes de l'État dans la recherche du meilleur parti d'aménagement d'une liaison du sud-est de la France (valeurs calculées en millions de francs 1974)

Parti d'aménagement	Avantage total	Avantages individuels				Recettes de l'État		
		Trafic reporté			Trafic induit	Taxes	Sécurité	Péage
		Fonctionnement	Temps	Bonus				
Autoroute sans péage	94 MF 100 %	9 MF 10 %	34 MF 36 %	14 MF 15 %	19 MF 20 %	14 MF 15 %	4 MF 4 %	
Autoroute* avec péage	75 MF 100 %	8 MF 11 %	32 MF 42 %	13 MF 18 %	4 MF 5 %	4 MF 5 %	5 MF 7 %	31 MF 41 %
Aménagement sur place 2 x 2 voies	42 MF 100 %	1 MF 2 %	23 MF 54 %	9 MF 21 %	4 MF 10 %	5 MF 12 %	0 MF	

* Le total est inférieur à la somme des montants partiels du fait du péage non déduit des avantages individuels liés au trafic reporté.

◀ ***Tableau VI :** pour l'année 1980, avantage total, avantages individuels et recettes de l'État dans la recherche du meilleur parti d'aménagement d'une liaison du sud-est de la France (valeurs calculées en millions de francs 1974).*

Tableau VII
Taux de rentabilité des projets d'aménagement d'une liaison du sud-est de la France, compte tenu des coûts d'investissement (en millions de francs 1974) et du coefficient de restriction de 1,5

Parti d'aménagement	Coût total	Coût budgétaire	Coût majoré (k = 1,5)	Avantage total en 1980	Rentabilité immédiate
Autoroute sans péage	377 MF	377 MF	565 MF	94 MF	16,6 %
Autoroute avec péage	409 MF	185 MF	501 MF	75 MF	14,9 %
Aménagement sur place	311 MF	311 MF	466 MF	42 MF	9,0 %

▲ *Tableau VII : taux de rentabilité des projets d'aménagement d'une liaison du sud-est de la France, compte tenu des coûts d'investissement (en millions de francs 1974) et du coefficient de restriction de 1,5.*

Compte tenu des coûts d'investissements et d'un coefficient de restriction des crédits budgétaires de 1,5, on calcule les taux de rentabilité, donnés au *tableau* VII, en millions de francs 1974.

On constate, sur cet exemple, que l'instauration du péage diminue la rentabilité (car une partie du trafic se détourne alors de l'autoroute), même compte tenu de l'avantage d'un financement non budgétaire ; mais l'autoroute à péage demeure nettement meilleure que l'aménagement sur place de la route existante.

Si l'on suppose que les avantages annuels des trois solutions étudiées croissent dans le temps de manière identique (par exemple, comme la croissance générale du trafic routier), leur classement serait identique selon le critère de rentabilité interne. Enfin, la solution la plus « chère » étant aussi la plus rentable, c'est également elle qui procure le plus grand bénéfice actualisé.

Les autoroutes

Le réseau autoroutier est devenu depuis une dizaine d'années la structure de base du système dans les pays développés ; il a pris la relève du réseau principal de routes nationales avec l'augmentation considérable du trafic : il s'est en effet révélé impossible d'écouler les flots de véhicules entre les grandes agglomérations sans les concentrer sur des infrastructures spécialisées à haute productivité. Rien n'est plus difficile et dangereux, en effet, que de mélanger sur la même chaussée des mobiles circulant à des vitesses différentes (piétons, animaux, cycles, automobiles). On a même pensé à séparer les automobiles des poids lourds : ainsi, il existe aux États-Unis des parkings interdits aux poids lourds, et on a pensé à la construction d'autoroutes à grande vitesse. C'est pourquoi on traitera ici de façon spécifique de l'autoroute, un des mythes de l'époque actuelle.

Les caractéristiques physiques des autoroutes

Aux termes de la loi (loi du 18 juillet 1955 modifiée successivement par les décrets du 29 mars 1958 et du 4 juillet 1960), les autoroutes sont des routes réservées à la circulation automobile rapide (à l'exclusion des vélomoteurs, cyclomoteurs et véhicules lents) ; elles ne doivent pas comporter de cisaillement des courants de circulation (en particulier, aucun croisement à niveau) ; enfin, leurs accès sont limités en certains points spécialement aménagés à cet effet. Ainsi, la séparation des chaussées n'est pas obligatoire, en théorie, et réciproquement, les routes express à deux fois deux voies séparées mais à carrefours non dénivelés ne sont pas des autoroutes.

En pratique, l'autoroute présente des caractéristiques physiques excellentes : larges rayons de courbure, rampes faibles, accotements et terre-plein central aménagés qui permettent la pratique de vitesses élevées (la vitesse maximale autorisée sur autoroute est en 1978 de 130 km/h) et l'écoulement des débits importants, tout en assurant aux usagers une meilleure sécurité que sur route ordinaire ; en effet, à parcours égal, l'autoroute est trois fois plus sûre qu'une route ordinaire.

Les caractéristiques géométriques d'une autoroute sont déterminées en fonction de la vitesse de référence requise. Celle-ci est généralement de 120 ou 140 km/h et, exceptionnellement, en zone urbaine ou en montagne, de 80 ou 100 km/h. Pour les vitesses de référence élevées, la rampe ne doit pas excéder 4 %. En outre, les courbes sont toujours raccordées aux lignes droites par des arcs à courbure progressive (en général, en forme de clothoïdes) [*tabl.* VIII].

Le raccordement d'une autoroute à une route ou à une autre autoroute implique l'étude d'échangeurs parfois sophistiqués.

Grâce à ces qualités physiques, l'autoroute peut admettre des trafics très élevés : environ 1 200 véhicules par heure et par voie, ce qui correspond à un trafic journalier moyen de 30 000 véhicules pour une autoroute à deux fois deux voies (contre 15 000 pour une route ordinaire à quatre voies) [le débit de saturation est estimé à 1 800 véhicules par heure et par voie].

En milieu urbain, comme on l'a vu plus haut, les autoroutes, pourtant très congestionnées, parviennent à écouler des trafics encore plus élevés ≃ 160 000 véhicules par jour pour une autoroute à deux fois quatre voies).

La construction d'une autoroute

L'ampleur des travaux qu'implique la construction d'une autoroute amène le maître d'ouvrage à faire appel à de grandes entreprises organisées comme pour une production industrielle et spécialisées dans le terrassement, les ouvrages d'art, les chaussées, le traitement des abords, etc. Grâce à cette organisation, des productivités élevées sont atteintes, surtout depuis la réforme de 1970 qui a permis de concéder en une seule fois de très longues sections.

Les terrassements sont menés par des engins puissants : scrapers, bouteurs, niveleurs, compacteurs. En ce qui concerne les ouvrages d'art, les tabliers en béton précontraint sont généralement coulés sur place. Parfois, certains éléments sont fabriqués en usine et assemblés sur le chantier grâce à de puissantes grues.

La chaussée représente l'ouvrage principal de l'autoroute : elle coûte à elle seule près de 50 % de la dépense des travaux. Au-dessus de la couche de forme, constituée de matériaux d'apport tout venant, la chaussée proprement dite comporte en général plusieurs couches de matériaux enrobés en bitume. La fabrication des enrobés est assurée par des centrales mobiles, capables de produire environ 300 tonnes par heure. L'étalement des couches successives est ensuite effectué par des machines qui répandent les matériaux en toute longueur à une vitesse de l'ordre d'un kilomètre par jour.

Tableau VIII
Rayons de courbure des autoroutes en fonction des vitesses de référence et des pourcentages de pente

Vitesses de référence \ Pourcentages de pente	7 % (minimum absolu)	5 %	2 %	0 %
80 km/h	240 m	424 m	1 300 m	2 000 m
100 km/h	425 m	665 m	2 000 m	3 000 m
120 km/h	665 m	1 000 m	3 000 m	4 000 m
140 km/h	1 000 m	1 400 m	4 000 m	5 000 m

▶ *Tableau VIII : rayon de courbure des autoroutes en fonction des vitesses de référence et des pourcentages de pente.*

Avantages économiques et coûts sociaux des autoroutes

Avantages directs

Les avantages directs des autoroutes — ceux qui concernent les usagers — ont déjà été évoqués : gains de temps, confort, sécurité. Les usagers de l'autoroute perçoivent essentiellement les deux premiers, mais sont peu sensibles à l'amélioration de sécurité qui est pourtant importante et prise en compte en tant qu'avantage collectif.

Les coûts de fonctionnement (consommation de carburant, usure, entretien) varient peu entre la route et l'autoroute. Les véhicules consomment à peine plus de carburant sur autoroute si l'on considère la suppression des à-coups, l'atténuation des rampes, etc. Au total, le gain individuel, péage non compris, de l'usager transféré de la route à l'autoroute constitue en moyenne 25 à 30 % du coût ressenti sur la route (ce coût individuel inclut le temps passé, évalué en tonnes monétaires au moyen d'une valeur du temps [18 F par véhicule en 1974], et le plus ou moins grand confort de la route), ce qui est à peine supérieur au péage demandé par les concessionnaires.

En ce qui concerne les poids lourds, ce gain varie dans de plus grandes proportions (de 0 à 40 %) selon la qualité de l'itinéraire routier parallèle (en particulier selon les rampes).

Le gain économique de la collectivité par usager transféré sur l'autoroute est supérieur au gain individuel grâce à l'amélioration de la sécurité : de 30 à 40 % du coût collectif sur la route pour les voitures particulières.

Avantages indirects

En plus des avantages directs, les autoroutes présentent d'autres avantages tels que le détournement du trafic de transit des agglomérations et les modifications économiques qui peuvent résulter de l'amélioration de la desserte d'une région. Ce dernier avantage est souvent évoqué pour justifier la construction d'autoroutes dans des régions où le trafic ne le ferait pas à lui seul. De fait, la réalisation d'une autoroute a certainement une influence sur la productivité des entreprises, l'implantation d'unités nouvelles et la structuration de l'espace en général, mais les liens de cause à effet sont difficiles à mettre en évidence.

Coûts sociaux

Depuis quelques années, l'opinion publique est de plus en plus sensible aux nuisances causées par l'autoroute en milieu urbain : bruit, nuisances visuelles, nécessité d'exproprier ou de supprimer des espaces verts, coupure créée dans le tissu urbain, etc.

Si les nuisances apportées par l'autoroute sont moindres en rase campagne, elles ne sont pas négligeables pour autant : soustraction de terres agricoles (environ 8 ha par km) et démembrement des exploitations (le remembrement a été rendu obligatoire, avec participation financière du concessionnaire, depuis quelques années), coupure des communications, modifications éventuelles de la nappe phréatique, etc.

Enfin, il faut noter l'importance du coût de construction de l'autoroute à mettre en regard des avantages directs procurés : environ 7 millions de francs 1975 par kilomètre (soit en général 30 % de plus qu'une route neuve à deux fois deux voies).

La constitution du réseau autoroutier français

Depuis plusieurs dizaines d'années, on évoque couramment le retard de la France sur ses voisins en matière d'équipement autoroutier. De fait, plusieurs pays européens ont commencé à construire leur réseau avant la Dernière Guerre; les préoccupations militaires n'étaient pas étrangères à cet effort d'équipement (Italie, Allemagne). En France, après la guerre, quelques sections d'autoroutes furent construites pour améliorer le dégagement des grands centres urbains, mais on ne comptait encore qu'une centaine de kilomètres équipés à la fin des années 1950.

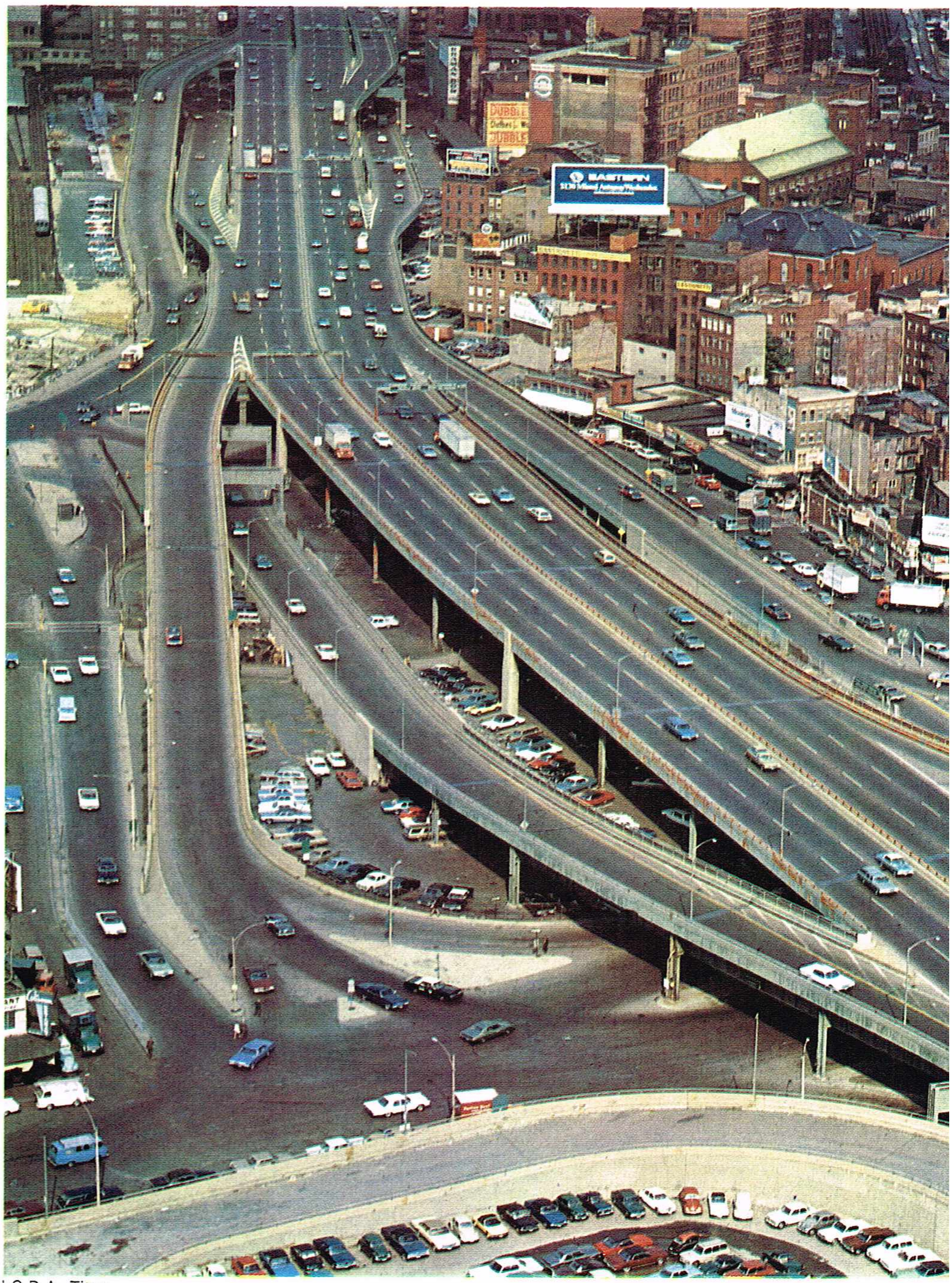

I.G.D.A. Titus

▲ *Une « freeway » dans le centre de Boston; ces voies permettent une circulation fluide et rapide à l'intérieur des villes; elles sont la solution américaine au problème de la concentration automobile urbaine.*

L'année 1955 fut décisive pour les autoroutes dans le monde : aux États-Unis fut lancé un programme fédéral de 50 000 km; l'Allemagne et l'Italie arrêtèrent les modalités de financement de leur réseau; en France, le Parlement vota une loi prévoyant la concession d'autoroutes à des sociétés d'économie mixte, autorisées à percevoir des péages. Les cinq sociétés d'économie mixte (SEM) créées de 1957 à 1963 entreprirent l'équipement des plus grands axes du territoire : Paris-Lille (SANEF), Paris-Rouen (SAPN), Paris-Lyon (SAPL, devenue SAPRR), Lyon-Marseille (SAVR, devenue SASF) et Marseille-Nice (ESCOTA).

Grâce au système ainsi mis en place, 100 à 150 kilomètres d'autoroutes furent mis en service chaque année de 1960 à 1970, mais ce rythme paraissait encore insuffisant face aux besoins. C'est pourquoi les pouvoirs publics décidèrent en 1969 de diversifier les sources de financement des autoroutes : quatre sociétés privées furent créées de 1970 à 1973, COFIROUTE, AREA, ACOBA, APEL; en outre, la Société du tunnel routier sous le Mont-Blanc s'est vu concéder l'autoroute

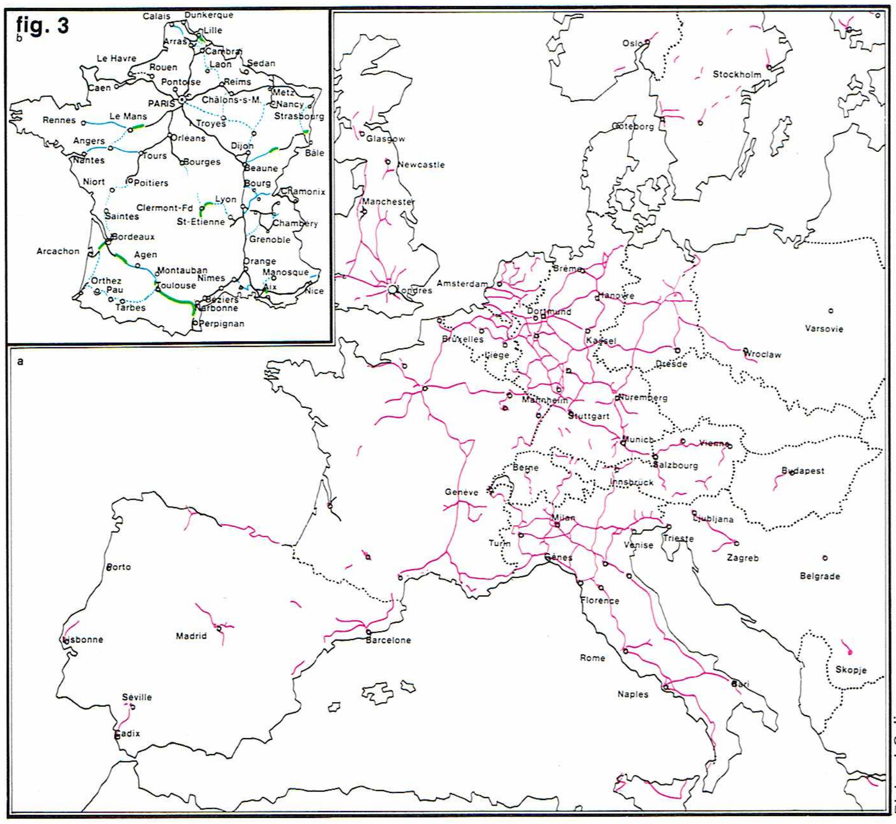

Richard Colin

▲ *Figure 3. a, autoroutes européennes en service au 1.1.1977 (en rouge). b, programmes prioritaires des autoroutes françaises. En noir : autoroutes en service au 31.12.1977 (4 305 km). En vert : autoroutes en service au 31.12.1978 (4 872 km). En bleu : autoroutes en service au 31.12.1980 (5 871 km). En pointillé bleu : autoroutes envisagées à l'horizon 1983 (8 000 km). Chiffres englobant les autoroutes de liaison, routes express intégrables et voies rapides urbaines.*

Blanche (Genin-Le Fayet), et une plus grande autonomie fut accordée aux SEM.

Ces nouvelles dispositions ont facilité l'accélération du rythme de développement du réseau : à la fin de 1976, 2 700 kilomètres d'autoroutes concédées étaient en service (voir *fig.* 3).

Parallèlement, l'État a poursuivi son effort en matière d'autoroutes urbaines. En incluant ces dernières, ainsi que les quelques sections d'autoroutes gratuites en rase campagne et de routes express, le réseau autoroutier français comptait fin 1976 4 000 km, contre 6 800 km au réseau allemand et 5 500 km au réseau italien. En revanche, il n'y a que 2 200 kilomètres en Grande-Bretagne et 1 100 km en Espagne (voir *fig.* 3a). On remarque ainsi le maillage très fin de l'Europe centrale (entre Copenhague et Brindisi) et le retard de l'ouest et de l'est de l'Europe. Pour ce qui concerne la France, cela s'explique en partie par la bonne qualité (au regard des trafics) du réseau routier classique en 1950, et la densité plus faible de population.

Le financement des autoroutes

Étant donné les coûts de construction élevés des autoroutes et les besoins importants qui apparaissaient, les pouvoirs publics décidèrent d'en concéder la réalisation à des sociétés d'économie mixte (SEM) à la fin des années 1950. Celles-ci, administrées par des collectivités locales, des chambres de commerce et l'État, par l'intermédiaire de la Caisse des dépôts et consignations, ont des capitaux propres très faibles, et le financement des infrastructures est alors assuré par deux sources principales :

— les participations de l'État, versées par le budget par l'intermédiaire du Fonds spécial d'investissement routier (FSIR) ou sous forme d'apports en nature (la part ainsi supportée par l'État était en moyenne de 30 % pour les premières autoroutes ; elle n'est plus que de 10 à 15 % au VI^e Plan) ;

— les emprunts garantis par l'État, et collectés par la Caisse nationale des autoroutes.

Afin d'accélérer la construction du réseau, l'État décide en 1969 d'attirer d'autres capitaux par la création de sociétés concessionnaires privées et la libération du régime des SEM. Outre les sources de financement déjà utilisées, et qui restent majoritaires, les concessionnaires sont invités à recourir à des emprunts obligatoires non garantis. Par ailleurs, les actionnaires des sociétés privées (sociétés de travaux publics et banques) doivent financer 10 % des investissements de concession par leurs capitaux propres. Enfin, la fixation des péages est libéralisée durant les dix premières années de concession.

Ce système, mis en place depuis 1970, est encore en vigueur aujourd'hui. Le montant des péages perçus a atteint 1 450 millions de francs en 1975. Ceux-ci servent en grande partie à payer les charges financières des emprunts (40 % des recettes), l'entretien et l'exploitation des autoroutes (20 à 25 %), tandis qu'une marge de 30 à 35 % des recettes est provisionnée en vue du remboursement des emprunts (en cours pour les SEM).

Certes, l'instauration du péage sur les autoroutes de rase campagne a permis d'en accélérer la construction et d'en faire supporter la charge par ceux qui les utilisent. Cependant, il ne faut pas méconnaître les inconvénients du péage : mauvaise utilisation de l'autoroute, car une partie des usagers est inutilement dissuadée par le péage, substitution partielle de critères financiers au souci du service public (d'où disparités de tarification, grand espacement entre des échangeurs, qualités physiques parfois réduites). Enfin, le système en vigueur depuis 1970 ne comporte pas que des avantages. En particulier, le grand nombre de sociétés (10 au total), s'il est susceptible d'apporter parfois une certaine émulation, peut aussi être la cause de mauvais fonctionnements regrettables (prospérité de certaines sociétés alors que d'autres ont des difficultés à mener à bien leur réseau, disparités tarifaires importantes, intervention accrue de l'État, etc.).

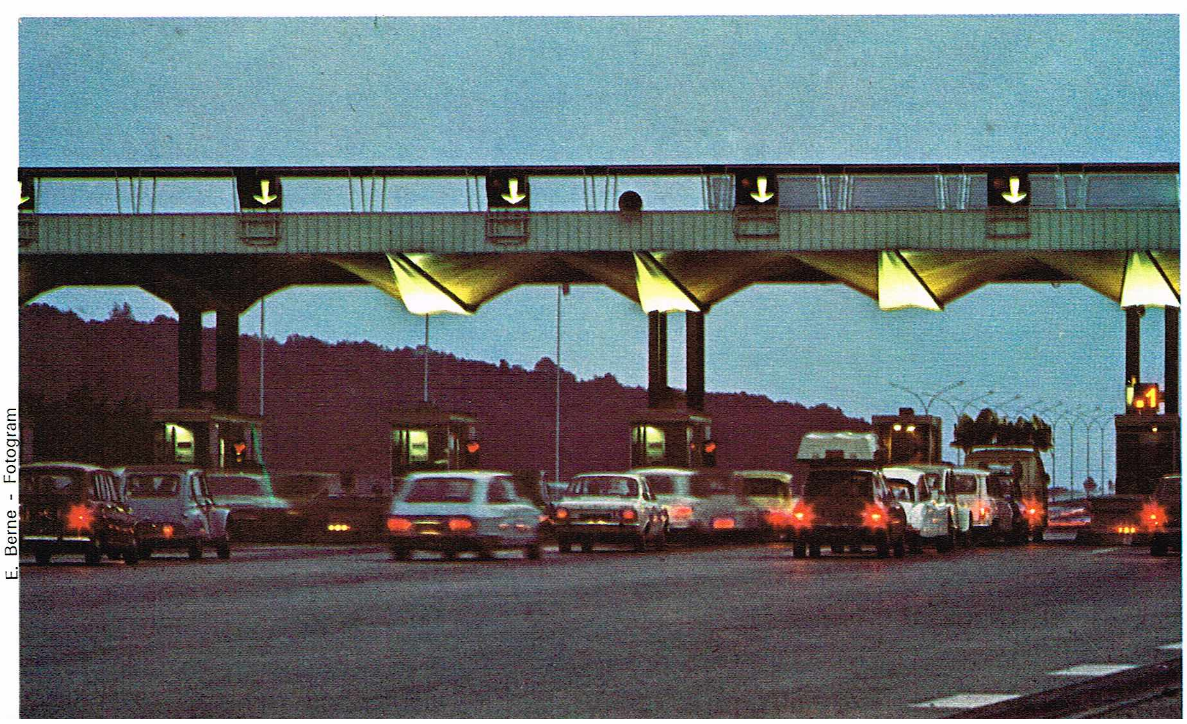

E. Berne - Fotogram

▶ *Postes de péage d'une autoroute.*

La programmation des autoroutes

Les autoroutes, qui assurent en général des liaisons d'intérêt national, sont programmées à un niveau central. Les axes les plus chargés, ou ceux qui ont été jugés les plus intéressants pour le désenclavement d'une région, sont étudiés par les services techniques du ministère de l'Équipement afin de comparer les coûts et avantages économiques des différentes solutions d'aménagement envisageables, en particulier, si le trafic le justifie, la création d'une autoroute. Ainsi, c'est en principe le critère de rentabilité collective qui préside au choix des autoroutes.

Cependant, depuis quelques années, des programmes d'une rentabilité médiocre ont été décidés dans certaines régions pour des raisons d'aménagement du territoire, l'autoroute étant considérée comme un atout pour le développement de ces régions, ainsi que nous l'avons dit plus haut. Au reste, les établissements publics régionaux acceptent parfois, depuis ces toutes dernières années, de participer financièrement à la construction.

Des réalisations importantes sont prévues dans les années à venir : 500 kilomètres d'autoroutes (autoroutes urbaines et voies express comprises) devraient être construits chaque année pour atteindre un total d'environ 7 500 kilomètres en service en 1983 (le conseil des ministres du 16 juin 1977 a prévu la réalisation de 3 000 km d'*autoroutes de liaison* nouvelles d'ici à 1983).

Les autoroutes Beaune-Mulhouse, Bordeaux-Toulouse-Narbonne, Annecy-Grenoble, Narbonne-Perpignan, Tours-Poitiers, Calais-Arras, Clermont-Ferrand-Saint-Étienne sont d'ores et déjà en construction ou partiellement réalisées. Les mises en service suivantes sont programmées d'ici à 1983 : Lyon-Genève, Mâcon-Bourg, Le Mans-Rennes, Tours-Angers-Nantes, Poitiers-Bordeaux, Bayonne-Tarbes, Orléans-Bourges-Clermont-Ferrand, Nancy-Dijon.

Les problèmes actuels de la route

Depuis quelques années, de nouvelles tendances se font jour en matière d'infrastructure. Il s'agit d'une part de l'insertion de la route dans le milieu urbain et rural : la recherche d'une meilleure qualité de la vie demande qu'on se préoccupe des effets négatifs au regard de ce critère.

Par ailleurs, comme il est de plus en plus difficile et de plus en plus cher de construire de nouvelles routes, notamment en milieu urbain, il convient de mieux utiliser ce qui existe, et c'est l'objet de l'exploitation de la voirie. Enfin, le problème de la répartition géographique, très contrastée actuellement, se pose : convient-il de continuer la concentration du réseau dans les zones les plus denses, ou bien la route ne doit-elle pas favoriser une meilleure harmonie sur le plan du développement ? C'est le problème du rôle du système routier dans l'aménagement du territoire.

Les nuisances de la route

On assiste actuellement à une mise en cause assez systématique de la route, et plus spécialement des véhicules automobiles. Les points d'attaque sont variés : ils tiennent aussi bien au mode de vie qu'aux dommages très précis engendrés par son utilisation. Certains reprochent en effet, au nom d'une certaine éthique, le caractère trop individualiste et en même temps moutonnier de l'automobiliste, d'autres l'immense gaspillage économique et social entraîné par la circulation. Les thèses d'Alain, puis plus récemment d'Ivan Illitch sont bien connues : le Français moyen consacrerait 3 heures par jour à sa voiture ; cette affirmation repose sur le fait que non seulement il passe une heure par jour en moyenne à rouler, mais deux heures à travailler pour payer le véhicule, son usage, les impôts pour la construction des routes, et

▼ *D'aucuns affirment qu'au temps « perdu » dans les embouteillages, les automobilistes ajoutent le temps passé à raconter par quels exploits ils ont pu en sortir.*

S. Larrain - Magnum

Tableau IX
Répartition et évolution (entre 1965 et 1975) du nombre de victimes des accidents de la route

	1965	1972	1975
Véhicules impliqués			
Deux-roues	108 000	114 500	119 000
Automobiles	253 000	340 000	319 000
dont voitures de tourisme	212 000	300 000	280 000
Autres véhicules	1 000	1 100	1 200
Ensemble	362 000	455 600	439 200
Victimes décédées dans les six jours			
Usagers de deux-roues	3 400	4 075	3 400
Automobilistes	5 800	9 300	7 050
Piétons	2 900	3 200	2 500
Divers	20	20	30
Ensemble	12 120	16 595	12 980
Victimes blessées			
Usagers de deux-roues	97 000	106 000	111 500
Automobilistes	153 000	220 000	190 000
Piétons	40 000	45 000	43 000
Divers	400	300	300
Ensemble	290 400	371 300	344 800
(dont grièvement blessées)	90 000	107 000	92 700

J.-P. Paireault - Magnum

▲ Jusqu'en 1969, les accidents de la route ont été considérés comme de véritables fléaux; ce n'est que lors de la préparation du VIe Plan qu'un effort considérable a été amorcé pour en stopper la croissance et en diminuer la gravité (à droite). A gauche, tableau IX : répartition et évolution (entre 1965 et 1975) du nombre de victimes des accidents de la route.

certains ajoutent même un quart d'heure pour parler de ses exploits ou des embouteillages qu'il a vécus. Ces chiffres sont, bien sûr, approximatifs, et la critique postule que le temps ainsi utilisé est gaspillé, ce qui est contestable : il y a ainsi un jugement de valeur sur le fait qu'il serait préférable d'écouter un concert plutôt que de rouler. Mais cela signifie néanmoins que l'automobile occupe une place très importante dans la vie de chacun et que cette importance est maintenant l'objet de critiques, ce qui ne date que de quelques années.

Cependant, c'est surtout sur des conséquences très concrètes que la généralisation de l'automobile a entraînées que la contestation se développe à l'heure actuelle. Quatre aspects d'importance variable sont présentés ici : les accidents de la route, le bruit au voisinage des voies, la pollution entraînée par les véhicules et la destruction des sites engendrée par la construction de nouvelles voies.

La route et les accidents

L'importance des accidents de la route est bien connue : parmi l'ensemble des modes de transport, le mode routier est de loin le plus dangereux. En France, en effet, il y a environ 15 000 tués sur la route et près de 400 000 blessés pour 250 000 accidents environ. Jusqu'en 1969, ce problème n'a pas été apprécié comme un véritable fléau, et ce n'est que lors de la préparation du VIe Plan qu'un effort considérable a été amorcé pour tenter de stopper la croissance régulière des accidents, parallèle à l'accroissement de la circulation. Une étude approfondie des causes, toujours diverses, a été menée; un résumé en est donné dans la liste suivante :

État d'ivresse	7 %
Circulation à gauche	7 %
Changement de direction irrégulier	9 %
Vitesse excessive	18,5 %
Dépassement irrégulier	5,5 %
Inobservation de la priorité	22,5 %
Mauvais état du véhicule	1 %
Infraction des piétons	11 %
Divers	18,5 %

Par ailleurs, le *tableau* IX donne une répartition des victimes par catégories d'usage et son évolution entre 1965 et 1975.

Ces tableaux très résumés montrent que la politique suivie depuis 1970 a eu des effets spectaculaires, puisque le maximum de dommages a été atteint en 1972 et que, depuis lors, une diminution des accidents est intervenue. Ils mettent aussi en évidence l'importance du nombre de victimes non automobilistes : bien qu'une automobile soit impliquée dans 70 % des cas, 48 % des victimes seulement sont des automobilistes. C'est tout le problème actuel des deux-roues, motorisés ou non : un des obstacles importants à leur développement est leur insécurité, en milieu urbain notamment.

La politique mise en œuvre s'est orientée principalement dans six directions :

● La **ceinture de sécurité** a été rendue obligatoire malgré les controverses dont elle est l'objet : cette mesure a entraîné une diminution de la gravité de la conséquence des accidents, comme le montrent les chiffres : entre 1972 et 1975, le nombre d'accidents a diminué de 6 %, le nombre des blessés de 13 %, le nombre de morts de 24 %. Le port du casque par les

motocyclistes a eu un effet identique. Notons toutefois que ces mesures n'ont été appliquées qu'en rase campagne et qu'effectivement la gravité des accidents s'est plutôt amplifiée en ville.

- La **limitation de vitesse** s'est également généralisée, puisque désormais les vitesses maximales autorisées en France sont de 130 km/h sur les autoroutes, de 110 km/h sur les voies express et les autoroutes urbaines, de 90 km/h sur la voirie ordinaire et de 60 km/h en agglomération. La « crise de l'énergie » a d'ailleurs rendu cette mesure plus facilement acceptable par le public. Elle a été accompagnée d'un contrôle plus rigoureux, par tout un dispositif technique (radars, notamment) et judiciaire (commission de retrait du permis de conduire, procédure d'urgence). On peut dire que la limitation de vitesse est entrée dans les mœurs même si de nombreuses infractions peuvent être encore observées.
- La **lutte contre l'alcoolisme au volant** a été développée : systématiquement, lors d'un accident grave, un alcootest est effectué, et les punitions les plus sévères sont encourues lorsque le taux d'alcoolémie dépasse 0,8 g. Cette mesure s'est révélée très efficace : une diminution de l'alcoolisme au volant a été observée depuis trois ans.
- Un **certain nombre de normes** ont été imposées aux constructeurs, sous l'impulsion notamment des États-Unis qui ont fixé des objectifs très ambitieux et pratiquement incompatibles avec les véhicules européens beaucoup plus légers. On note toutefois que les modèles les plus récents sont effectivement conçus pour une part avec un souci de la sécurité.
- L'**information et la formation des conducteurs** ou du public en général ont également fait de gros progrès : les flashes télévisés en sont l'expression la plus sensible, mais l'attention portée à la formation des futurs conducteurs et des cyclistes aura certainement une grande efficacité dans l'avenir.
- Enfin, la **recherche de la suppression des points noirs du réseau routier** s'est organisée, et les dispositifs destinés à limiter les risques se sont multipliés ; les feux tricolores, la signalisation horizontale ou verticale (stop, séparation de circulations), la surveillance des sorties d'école sont des moyens peu coûteux mais très efficaces. La suppression de carrefours à niveau, grâce à des souterrains à gabarit réduit et non à des toboggans, la séparation des circulations par un terre-plein central muni de glissières de sécurité, les pistes cyclables bien conçues, les passerelles ou passages souterrains pour piétons sont des investissements plus lourds, mais tout aussi rentables. Il est apparu en revanche que l'amélioration même des voies pouvait parfois augmenter l'insécurité : ainsi la route à trois voies, sans signalisation horizontale très élaborée, est réputée dangereuse ; une route élargie sans que les carrefours soient traités correctement accroît la vitesse des véhicules et par là même la gravité des collisions.

Ce problème de la sécurité routière est donc important : non seulement les dommages physiques et psychologiques entraînés par les accidents ne sont pas admissibles, mais il s'agit aussi d'un problème économique : on a évalué que le coût économique d'un tué était en 1970 de 230 000 F, d'un blessé de 10 000 F, et d'un accident corporel de 4 000 F. Ainsi, en 1976, on peut apprécier le coût économique des accidents de la route à près de 14 milliards de francs. Cet ordre de grandeur est confirmé par le montant des primes versées aux compagnies d'assurances : 16 milliards de francs/an. En résumé, on peut estimer à 1 200 F par an et par véhicule le coût des accidents de la route tant matériels que corporels.

Pour terminer sur ce point, nous citerons (*tableau* X) quelques chiffres relatifs à l'année 1971, qui permettent de comparer les accidents de la route en France et dans quelques pays. Ce tableau montre bien qu'il était grand temps qu'un effort fût effectué en France, d'autant plus que sont considérées comme tuées les personnes décédées dans les 6 jours en France, dans les 7 jours en Italie, et dans les 30 jours ou plus dans les autres pays. Ces indicateurs se sont, pour 1976, sensiblement améliorés, puisque le nombre de tués par millier de véhicules/kilomètre n'est plus en France que de 0,056 au lieu de 0,08.

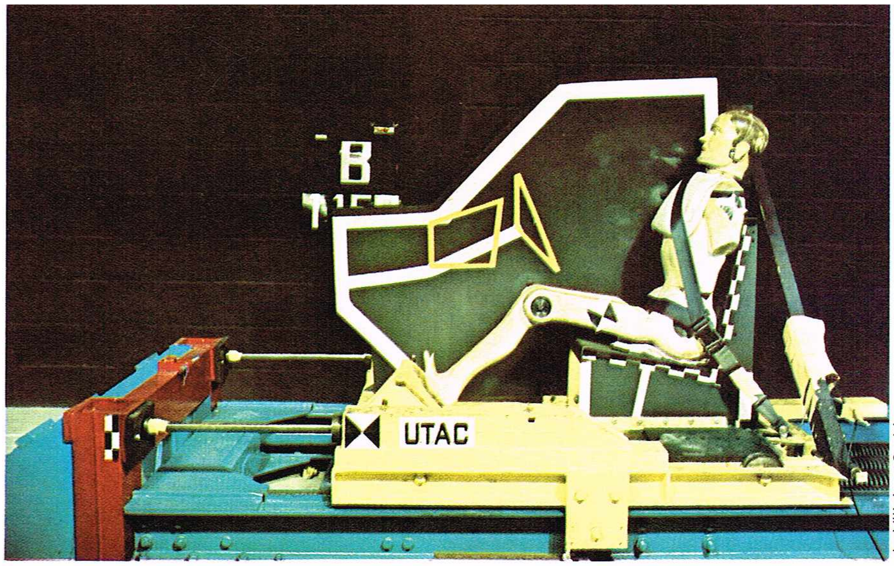

J. Villain - Cedri

▲ *La ceinture de sécurité a été rendue obligatoire malgré les controverses dont elle a été l'objet : ici, banc d'essai d'une ceinture de sécurité, épreuve de choc frontal.*

Tableau X
Quelques chiffres relatifs aux accidents de la route

Pays	Parcours en 10^9 véhicules/km	Accidents corporels		Tués		Blessés	
		en milliers	pour 10^6 véhicules/km	en unités	pour 10^6 véhicules/km	en milliers	pour 10^6 véhicules/km
R.F.A.	280	370	1,3	18 700	0,07	520	1,85
France	193	240	1,26	16 000	0,08	345	1,85
Grande-Bretagne	220	260	1,2	7 700	0,035	345	1,60
Italie	200	180	0,9	10 100	0,05	245	1,25
États-Unis	1 900	1 350	0,7	54 700	0,03	2 000	1,05
Suède	–	16,4	–	1 200	–	2,3	–

◀ *Tableau X : quelques chiffres relatifs aux accidents de la route.*

▶ *Tableau XI : seuils sonores de gêne.*

Situation	Seuil de gêne [en dB(A)]
Silence nocturne	30
Silence diurne	40
Pièce de séjour	45
Bureau ou salle d'étude	50
Local commercial	55 à 65

Tableau XI — Seuils sonores de gêne

▼ *Bien que des études aient été faites et les seuils de bruit définis par le ministère de l'Équipement, on est souvent assez loin de ces seuils, d'où les réactions de la population.*

Chauveaud de Rochefort - Fotogram

Le bruit et la route

Les études et enquêtes effectuées dans les villes en France et à l'étranger montrent que le bruit le plus important est causé par la circulation. La gêne due au bruit est, bien sûr, un phénomène subjectif qui ne peut être mesuré chez celui qui le subit : suivant son intensité, sa durée, sa variation, il est plus ou moins bien supporté à trois niveaux : superficiel (agacement), psychologique (concurrence avec une autre activité comme sommeil, télévision), physiologique (oreille).

Depuis quelques années, des études systématiques ont été faites, et des seuils de gêne ont été définis dans le *Guide du bruit* (1972) du ministère de l'Équipement : il s'agit du niveau sonore à partir duquel 20 % des personnes interrogées se déclarent gênées. Le *tableau* XI résume les résultats. Le bruit y est évalué en décibels A [dB (A)], unité qui intègre la puissance du bruit et le caractère plus ou moins gênant de la fréquence du son émis.

Malheureusement, on est assez loin de ces seuils à proximité des voiries urbaines : le bruit croît avec la vitesse, le régime de rotation du moteur, la charge de ce dernier et, évidemment, avec le débit de la voie. C'est ainsi que le niveau moyen du bruit est déjà de 70 dB (A) pour une circulation de 100 véhicules/heure roulant à 70 km/h. Le niveau de bruit peut ainsi atteindre 80 dB (A) au bord d'une autoroute urbaine, mais l'infrastructure joue un rôle important, ainsi que la signalisation, les feux, le pourcentage de poids lourds et le revêtement. Des dispositifs et des mesures variés peuvent être mis en place, et leur efficacité se détermine en appréciant la variation de trois pourcentages :

— le pourcentage P_1 de riverains peu gênés par le bruit : < 70 dB (A) ;

— le pourcentage P_2 de riverains assez gênés par le bruit : entre 70 et 75 dB (A) ;

— le pourcentage P_3 de riverains très gênés par le bruit : > 75 dB (A).

La lutte antibruit se mène sur plusieurs fronts :

● Les **mesures d'exploitation** visent à rationaliser l'utilisation des voies avec pour objectif de diminuer le niveau sonore :

— vitesse limitée des véhicules sur autoroute (80 km/h) ; cela se fait expérimentalement sur le tronçon B3 à Aulnay-sous-Bois en Seine-Saint-Denis (région parisienne) ;

— diminution du trafic par divers moyens : interdiction de circulation des poids lourds la nuit, de tous véhicules particuliers dans certaines autres villes, etc. ;

— horaires fixes pour l'enlèvement des ordures ménagères ;

— horaires stricts pour les livraisons.

● Les **moyens d'action sur la voirie elle-même** sont souvent efficaces, mais coûteux.

★ Le *tunnel* foré à la construction est la meilleure solution, mais fort coûteuse (jusqu'à 400 millions de francs le kilomètre).

★ La *couverture lourde* (il s'agit de permettre de recréer l'urbanisation au-dessus ; coût environ 50 millions de francs le kilomètre) ou *légère* (couverture végétale ; coût 25 millions de francs le kilomètre, ou ossature métallique : 15 millions de francs le kilomètre) nécessite souvent, pour une longueur supérieure à 300 m, une ventilation qui devient importante et demande une véritable petite usine lorsque la couverture se développe sur plus de 800 m.

★ L'*écran antibruit* est constitué soit par un ouvrage en béton ou en verre, soit par des talus ou des merlons en terre qui peuvent être plantés. L'exemple le plus connu est celui de la protection d'un grand ensemble de L'Hay-les-Roses (Val-de-Marne) : le coût de 15 millions de francs, pour 300 mètres, est élevé ; le gain est de 9 dB (A) pour les étages inférieurs des immeubles, ce qui est appréciable.

● Les **moyens sur les bâtiments** concernent la conception des immeubles, notamment celle des appartements : il y a longtemps que l'on dispose les chambres sur la cour. On peut ainsi insonoriser un appartement grâce à un double vitrage (coût de 1 200 à 3 000 F par fenêtre à double battant) ; le gain est important : 30 dB (A).

● Enfin, la législation a fixé des **niveaux sonores maximaux** pour les véhicules :

M. Rocha - Fotogram

◀ *La circulation routière est responsable d'une partie de la pollution urbaine. Ici, une manifestation antipollution.*

voitures particulières : 82 dB (A) ;
véhicules de PTC < 3,5 t : 84 dB (A) ;
véhicules de PTC > 3,5 t : 89 dB (A) ;
véhicules utilitaires de puissance > 220 ch : 91 dB (A).
Ces normes seront d'ailleurs sans doute révisées en baisse, car elles semblent trop fortes.

Mais bien entendu, pour l'avenir, c'est une politique plus globale de la structuration de l'espace urbain et de l'organisation des transports qui peut permettre de redonner une qualité de vie dans laquelle le silence relatif joue un rôle certain, et ce silence, il faut le reconnaître, est troublé profondément par les automobiles, même si l'usage du klaxon s'est presque éteint !

B. Uzzle - Magnum

◀ *Mesure de la pollution atmosphérique dans une grande ville. Les normes ont été fixées concernant la qualité de l'air ambiant.*

La pollution et l'automobile

La circulation routière est également parmi les premiers responsables de la pollution urbaine. Les gaz d'échappement constituent la base des émissions polluantes qui sont composées d'oxyde de carbone et d'azote, d'hydrogène et de produits dérivés des additifs tels que le plomb (ce dernier point est par exemple à la base d'une contestation du passage d'une autoroute en viaduc au-dessus d'entrepôts au marché de Rungis, en raison de la fixation éventuelle de ce produit sur la viande). 90 % des émissions d'oxyde de carbone et 70 % de celles des hydrocarbures (dont 35 % viennent de l'évaporation des réservoirs d'essence, du carburateur et des émanations du carter) ont pour origine la route. Elles ont ainsi entraîné l'apparition de smog photochimique résultant de combinaison d'hydrocarbures et d'oxyde d'azote.

En France, on estime que les normes suivantes peuvent fixer la qualité de l'air ambiant :

— pour l'oxyde de carbone (CO) : le seuil de 46 mg/m^3 ne pourrait être dépassé que pendant 1 % du temps, le seuil de 18 mg/m^3 pendant 15 % du temps ;
— pour les oxydes d'azote, le seuil de 670 mg/m^3 ne doit pas être dépassé pendant plus de 1 % du temps.

Des mesures systématiques effectuées au centre des agglomérations montrent que ces seuils sont souvent dépassés. Un exemple de mort d'homme a déjà été enregistré (parking de la place Grangier à Dijon) ; à Tokyo, il faut mettre des masques légers, à Paris régénérer l'air par des machineries (à Saint-Lazare, par exemple).

Une politique de lutte antipollution diminuera un certain nombre de coûts sociaux tenant aux effets de la pollution sur la santé, l'habitat, les matériaux, les végétaux (coût évalué à 30 milliards de francs aux États-Unis en 1969), mais son coût n'est pas négligeable, puisque le rapport au Premier ministre français, « Automobiles et nuisances, pour un programme d'action » (août 1971), estimait que les augmentations devraient varier entre 1 % du prix de l'automobile dans le cas d'un abaissement de 30 % du niveau des émissions d'oxyde d'azote, et 10 % dans le cas d'un abaissement de 40 % des limites spécifiées par le Marché commun en ce qui concerne l'oxyde de carbone et les carbures d'hydrogène, et d'un abaissement de 70 à 80 % des émissions d'oxyde d'azote.

Tableau XII - Études d'impact : thèmes sur lesquels portent les analyses d'une infrastructure routière

Caractéristiques du site et de l'environnement	Domaines d'incidence des impacts	Causes attachées aux effets ou impacts — Caractéristiques géométriques du projet : Tracé en plan-présence d'échangeurs	Profil en long et profil en travers { remblai, déblai, ouvrage d'art	Utilisation et exploitation de l'autoroute
Caractéristiques physiques et chimiques	**Géologie**			
	— structure du sous-sol		— rupture de continuité des couches par création d'une tranchée	
	— phénomènes évolutifs : * tassements		— surcharge des couches sous-jacentes aux remblais	
	* stabilité d'un versant, de talus		— agravation d'une instabilité	
	Pédologie			
	— qualité, consistance des sols		— érosion, — lessivage } du sol	— pollution du sol
	— taux d'humidité des sols		— assèchement ou hydratation	
	Géomorphologie	bouleversement des microreliefs		
	Hydrogéologie			
	— eaux superficielles fleuves, rivières, ruisseaux, fossés	— effet de coupure		— pollution : résidus de combustion, huiles
	— eaux de ruissellement		— perturbation des chemins d'écoulement (du bassin versant)	— pollution
	— eaux souterraines : nappes (en particulier nappes phréatiques)		— perturbation des nappes ; effets de drainage ou de rétention	— pollution
	— sources, puits	assèchement ou tarissement partiel		
	Hydrobiologie			
	— microfaune aquatique — microflore aquatique			— perturbations, modification des caractéristiques hydrobiologiques
	Climatologie			
	— atmosphère			— pollution atmosphérique
	— exposition au vent	destruction ou création d'obstacles au vent		
	— éclairement		— création de zones d'ombre	
	— microclimats			— réchauffement de l'air
Biologie	**Faune**			
	— oiseaux	{ destruction des refuges perturbation des territoires		
	— petits animaux sauvages (lapins de garenne, belettes, hérissons, rongeurs, etc.)	— effet de coupure : perturbation des cheminements, réduction de l'espace vital	— destruction des gîtes	— danger dû au passage des voitures en période nocturne surtout
	Flore			
	— végétation ligneuse * arbres : bois, parcs, bosquets, taillis, alignements, sujets isolés	destruction par abattage sur emprise mauvais traitement pendant les travaux création de nouvelles lisières : ● descente de cimes ● modification de l'ensoleillement ● risque de développement d'une végétation arbustive ● risque de développement de parasites sur les arbres		— réchauffement de l'air — dépôts huileux ou poussiéreux sur les troncs ou sur les feuilles
	* arbustes : haies de clôture, terres en friche	suppression sur emprise		
	* vergers	suppression sur emprise difficultés d'accès ou d'exploitation		— agressions diverses : modification de la température — résidus de combustion en suspension dans l'air
	— végétation herbacée : gazons, friches	suppression sur emprise, altération		
Écologie	**Cycles écologiques** — cycles de l'eau, de l'hydrogène, du carbone, de l'azote, etc. — cycles géomorphologiques : érosion, transport, sédimentation — cycle du sol : alternance érosion pédogenèse — cycle biologique : alternance production-destruction de matière vivante — cycle énergétique : absorption et irradiation d'énergie par la terre **Équilibres complexes** — eau, sol, microrelief, végétation	perturbations et désordres divers (voir caractéristiques physiques, chimiques, biologiques, nuisances)		
Occupation des sols	**Caractéristiques d'ensemble** — structure du tissu — organisation du parcellaire — dépendances entre quartiers ou communes	— perturbation, coupure — modification ou bouleversement — non-respect des dépendances		
	Utilisation productive des terres — cultures maraîchères, potagers — vergers	{ effet de substitution et de destruction sur l'emprise risque de changement d'affectation difficultés d'accès ou d'exploitation		— pollutions
	Habitat — collectif : grands ensembles — individuel : pavillons	{ problèmes d'expropriation et de transfert de population effets de coupure par rapport aux divers pôles d'attraction enclavement, difficultés d'accès		
	Activités industrielles et commerciales — usines, ateliers, entrepôts, commerces	{ expropriations coupure, morcellement, enclavement difficultés d'accès difficultés d'extension perte de clientèle		
	Zones de loisirs — sports, promenade, jeu	{ suppression (même temporaire) d'équipements tels que terrain de sport disparition d'aires de jeu spontanée suppression de possibilités de promenade, coupures de cheminements piétonniers		
	Friches	disparition sur emprise		
	Réseaux de communication existants — voies ferrées	réduction d'emprise		
	— routes nationales et départementales — voies secondaires et rues			— risque de surcharge
	— cheminements piétonniers, sentiers	coupure disparition et coupure		
Facteurs sociaux, culturels et esthétiques	**Qualité de la vie** — tranquillité — santé	gêne psychologique		{ — bruit — nuisance olfactive — gêne due à l'éclairement nocturne
	— cadre de vie	{ dégradation pollution visuelle (talus) perte d'éclairement		
	Facteurs culturels — monuments historiques — sites protégés — zones d'intérêt écologique ou scientifique	{ destruction empiètement sur sites protégés ou intéressants voisinage indésirable		
	Paysage — lignes de force	— contradiction de ces lignes de forces — défaut d'intégration		
	— éléments structurants : parc de Retz, alignements d'arbres, bosquets	— { destruction totale ou partielle — { dissimulation		
	— qualité, caractéristique du paysage	— banalisation — inharmonie entre ouvrage et site préexistant — impression d'encombrement		

Nature des effets ou impacts

L'exploitation routière

Le coût très élevé des infrastructures rend indispensable leur fonctionnement optimal afin de rendre à l'usager tout le service qu'il peut en attendre. Initialement limitée à la signalisation routière, l'exploitation routière a connu au cours de la dernière décennie une évolution technique qui a conduit à introduire des méthodes modernes de gestion faisant appel à l'électronique et à l'informatique, pour résoudre les problèmes de fluidité et de sécurité.

Deux catégories d'équipements sont mises en place : les équipements statiques destinés à fournir à l'usager une aide permanente à la conduite, et les équipements dynamiques visant à réguler le trafic.

L'exploitation des routes en rase campagne

Les équipements statiques

Ils se caractérisent par une grande diversité : marquage au sol, signalisation de direction, signalisation de prescription, signalisation de danger, éclairage, borne d'appel d'urgence, glissière de sécurité, aire de repos, aire d'information et de service, amélioration de l'adhérence des chaussées, etc. Ces équipements ont pour objectifs la sécurité et le confort des usagers.

Les équipements dynamiques

Ils sont un domaine d'applications privilégié de l'électronique et de l'informatique; leur caractéristique principale est de s'adapter, en temps réel, aux conditions de circulation sur le réseau. Ils permettent, lorsque le réseau principal est saturé, durant les grandes migrations saisonnières, de délester les automobilistes vers des itinéraires secondaires plus fluides. L'utilisation de ces équipements nécessite une connaissance permanente de l'état du trafic sur l'ensemble du réseau à gérer. Des capteurs de trafic, implantés sur les différents axes routiers concernés, transmettent à un miniordinateur, localisé dans un poste de commande (P. C.), les informations permettant de prendre les décisions de délestage sur des itinéraires parallèles non saturés.

L'exploitation des autoroutes urbaines

L'exploitation des autoroutes urbaines constitue un domaine d'intervention particulier par suite de l'existence de pointes horaires de trafic très importantes chaque jour et d'un très grand flux de circulation. En Région parisienne, les radiales autoroutières écoulent chacune quotidiennement 150 000 à 200 000 véhicules.

Le centre d'exploitation

Des systèmes automatisés de régulation sont utilisés. Un centre d'exploitation central regroupe les fonctions de recueil automatique des données de circulation, de surveillance du réseau, de gestion et de commande des équipements implantés sur le site au moyen d'un ordinateur et d'un réseau de télétransmission.

Des capteurs, implantés sur l'autoroute tous les mille mètres, transmettent à l'ordinateur du centre d'exploitation des données de débit et de taux d'occupation de la chaussée (pourcentage de temps pendant lequel un point donné de la chaussée est occupé par des véhicules). Ces données, après traitement, sont utilisées pour mettre à jour un synoptique, carte murale où sont visualisés, essentiellement à l'aide de voyants lumineux de différentes couleurs, les niveaux de trafic de chaque tronçon de l'autoroute.

D'autre part, des caméras de télévision télécommandables implantées sur le site permettent de surveiller depuis les récepteurs du centre d'exploitation les conditions de circulation. Cette surveillance permanente du réseau permet de détecter les incidents. Lorsque l'ordinateur, au moyen d'un algorithme de calcul traitant le débit et le taux d'occupation, détecte une irrégularité dans l'écoulement du trafic, il déclenche un signal d'alarme qui alerte l'opérateur. Celui-ci vérifie, à l'aide du circuit de circulation, la présence réelle d'un incident et déclenche, s'il y a lieu, une intervention des services appropriés : police, pompiers, ambulance, dépanneur.

Les équipements commandés depuis le centre d'exploitation

- *Panneaux à indications variables.* Pour renseigner l'usager, l'opérateur peut afficher, à distance, sur des panneaux disposés régulièrement sur l'autoroute, des messages variables indiquant les conditions de circulation ou l'état de la chaussée.
- *Contrôle des accès.* Pour décongestionner une autoroute, on peut contrôler ses accès. Cette technique a été utilisée pour la première fois en 1963 aux États-Unis. Des feux tricolores installés sur les bretelles d'accès permettent de ne laisser pénétrer sur l'autoroute que les véhicules pouvant être écoulés. Les cycles de feu sont calculés pour que le débit admissible sur l'autoroute, ajouté au débit mesuré en amont de l'accès, donne, dans le tronçon situé à l'aval de l'accès, un débit ne dépassant jamais la capacité de ce tronçon. Celle-ci est le nombre maximal de véhicules que le tronçon peut écouler sans saturation, elle dépend de la largeur des voies, de la distance des obstacles latéraux, du profil de la section : plat ou vallonné, et du pourcentage de poids lourds. Le choix du cycle de feu peut être fait automatiquement par l'ordinateur central, à partir du recueil automatique des données.

La nécessité d'offrir un itinéraire de remplacement aux usagers ne pouvant pénétrer sur l'autoroute conduit à introduire la notion de corridor autoroutier, qui est l'ensemble formé par une autoroute, les routes qui peuvent constituer un autre itinéraire et les transversales assurant les communications entre les deux systèmes. L'objectif étant alors d'optimiser l'utilisation globale du corridor, plusieurs critères peuvent être retenus pour évaluer l'efficacité de la régulation :

— diminution du temps de parcours moyen à l'intérieur du corridor,
— amélioration de la fluidité,
— augmentation des débits de sortie à la frontière du corridor,
— amélioration du niveau de sécurité,
— amélioration du confort de conduite,
— réduction de la consommation d'énergie et de la pollution.

Nous retrouvons ici les objectifs principaux de toute exploitation des infrastructures routières.

Les infrastructures routières, le cadre de vie et le milieu naturel

Après avoir longtemps négligé ces aspects, on se livre maintenant à un examen systématique de toutes les conséquences envisageables de la construction d'une nouvelle infrastructure. C'est l'objet de ce qu'on appelle les *études d'impact*. Le *tableau* XII donne les thèmes sur lesquels portent ces analyses. Il n'est, bien sûr, pas possible de donner des indications chiffrées sur le sujet, mais disons qu'actuellement on estime que, pour 1 hectare de forêt détruit par des travaux, il faut en zone très habitée récupérer ou planter quelque 10 hectares, et que l'on envisage sérieusement de faire passer le coût d'une section de 1 à 1,5 pour ne pas détruire temporairement un couloir naturel de cinquante mètres de large. C'est dire l'importance ressentie du problème.

◄ ***Page ci-contre, tableau XII : études d'impact. Thèmes sur lesquels portent les analyses d'une infrastructure routière.***

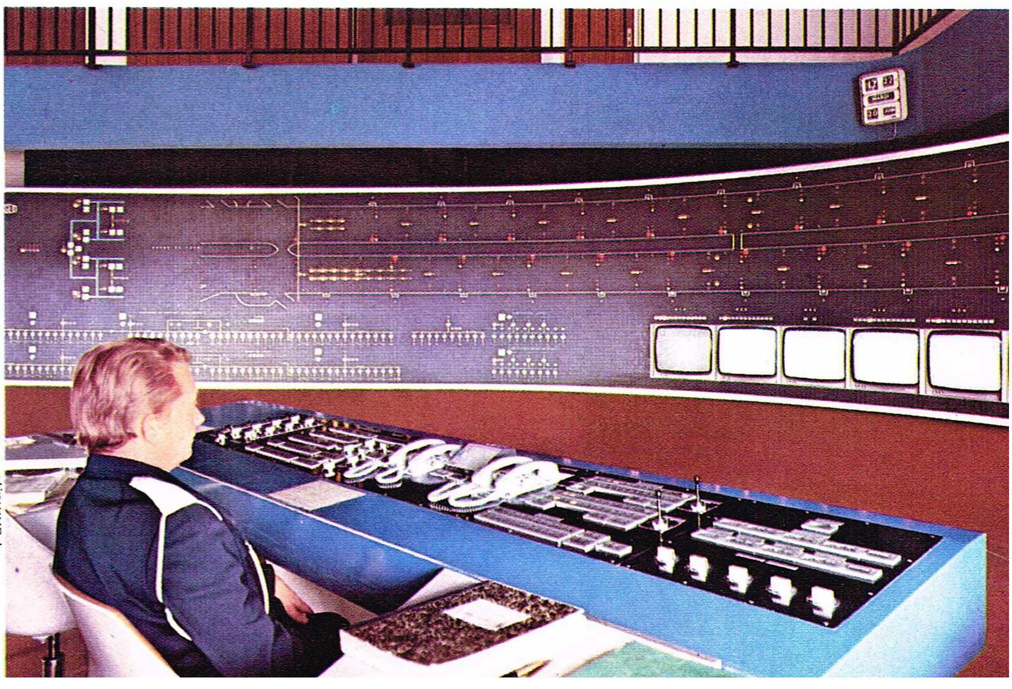

▼ ***Salle de contrôle de la circulation à l'intérieur du tunnel de Fourvière à Lyon.***

Parimage

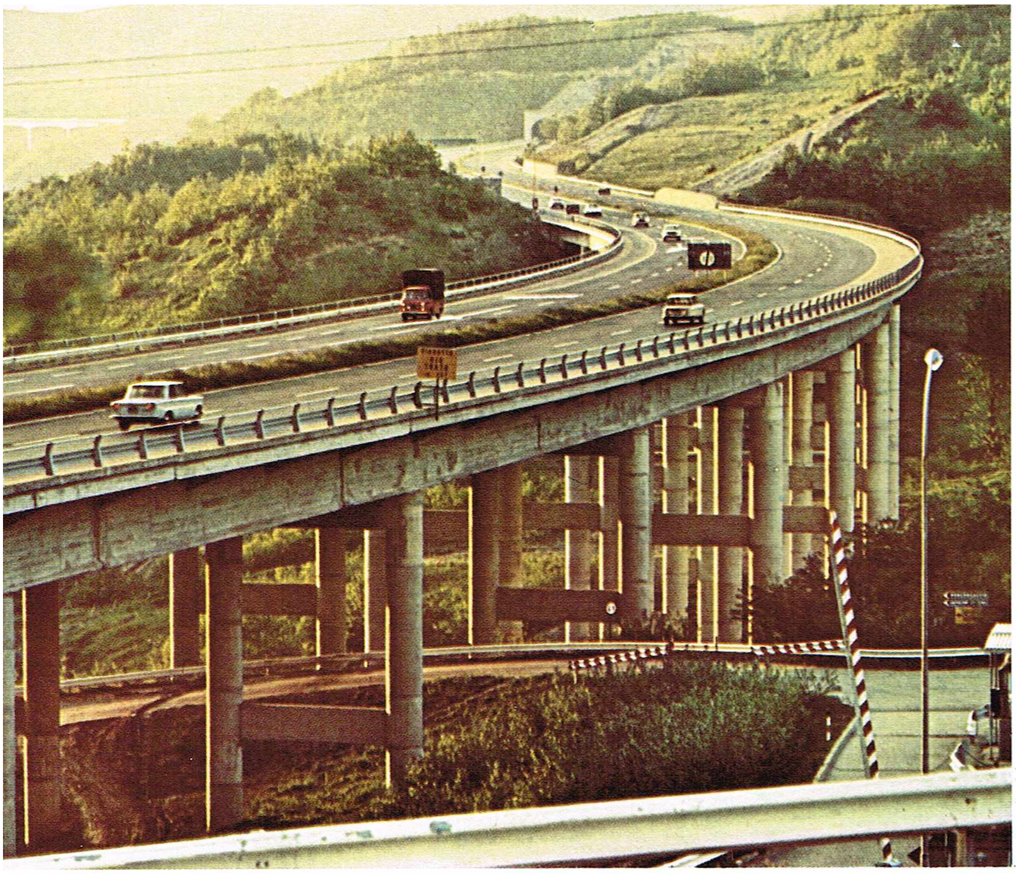
R. Burri - Magnum

▲ *L'autoroute du Soleil en Italie : cet axe routier nord-sud avait été conçu, entre autres, dans l'espoir d'attirer des emplois nouveaux dans le Sud. Il semble qu'en fait, il ait plutôt accéléré un exode vers le Nord.*

Les routes et l'aménagement du territoire

La politique d'aménagement du territoire et ses incidences dans le domaine des transports

En France, la nécessité de mener une politique de développement harmonieux du territoire s'est essentiellement affirmée depuis une vingtaine d'années, en prenant conscience des profondes inégalités régionales et de la congestion de la Région parisienne résumées par la formule lapidaire : « Paris et le désert français. »

On se fixa donc pour objectif de freiner la croissance de la Région parisienne en s'appuyant pour cela sur un nombre limité de métropoles d'équilibre, puis, plus récemment, sur les villes de province petites et moyennes. Parallèlement, l'attention était spécialement portée sur les régions à l'écart du développement, telles la Bretagne ou certaines zones de montagne.

En fait, en régime économique libéral, les pouvoirs publics n'ont pas de moyen d'action direct sur la répartition spéciale des emplois et de la population. L'État ne peut agir que par des incitations (primes, régime fiscal), ou par la programmation des équipements publics. On comprendra dans ces conditions que la politique des transports soit considérée comme un instrument privilégié de la politique d'aménagement du territoire. On conçoit mal en effet qu'une région puisse prendre sa place dans l'économie moderne, caractérisée notamment par la complexité des échanges d'informations et de biens, sans disposer des infrastructures de transport qui assurent tant la desserte interne aux besoins d'emplois que les relations de personnes et de marchandises avec les autres régions.

Au reste, interrogées lors de la préparation du VIIe Plan, les régions ont eu l'occasion de marquer leur préférence, parmi l'ensemble des différents équipements collectifs, pour les infrastructures de transport, en particulier routières et autoroutières. Il paraît donc souhaitable pour l'aménagement du territoire d'équiper et de désenclaver les régions qui ont été laissées à l'écart des réalisations qui se révélaient prioritaires dans les zones économiquement dynamiques.

Tenant compte de ces préoccupations, le Conseil central de planification du 25 novembre 1975 a décidé que le développement des infrastructures de transport serait poursuivi en tenant compte désormais de deux priorités : désenclaver l'Ouest, le Sud-Ouest et le Massif central, par la création d'un réseau de grandes liaisons à caractéristiques autoroutières ; insérer économiquement la France dans l'Europe en raccordant son système de transport aux réseaux européens.

L'influence des infrastructures routières sur la localisation des activités

Les actions entreprises dans le domaine des transports au nom de l'aménagement du territoire postulent que toute amélioration d'une liaison est nécessairement favorable aux régions desservies et, en particulier, attire des emplois nouveaux dans ces régions. De telles relations de cause à effet peuvent paraître évidentes, elles n'ont néanmoins jamais été clairement démontrées. On a même pu observer parfois des effets contraires à ceux escomptés ; par exemple, la réalisation de l'axe autoroutier nord-sud en Italie semble avoir, dans un premier temps, accéléré l'exode, dans le Mezzogiorno.

De nombreuses enquêtes, réalisées auprès des industriels ou de responsables économiques régionaux, ont tenté de mettre en évidence les facteurs de localisation des activités ; les résultats ne sont pas toujours cohérents entre eux, et, selon les cas, le facteur transport apparaît comme primordial ou subalterne.

Des études économiques et statistiques ont tenté d'aborder ce problème de façon plus scientifique, en se spécialisant soit sur la décentralisation d'établissements parisiens, soit sur l'impact d'une infrastructure de transport nouvelle... Il semble là encore que les relations entre transports et « structuration de l'espace » ne soient ni directes ni univoques et que certains facteurs tels que la disponibilité de main-d'œuvre peu qualifiée — donc bon marché — ont joué dans les vingt dernières années un rôle attractif plus important auprès des industriels que la qualité des transports.

Ainsi, une politique d'aménagement qui ne s'appuierait que sur les transports a peu de chances de réussir. Il n'en reste pas moins vrai que l'enclavement de certaines régions constitue un frein à leur développement. En outre, l'amélioration de la desserte d'une zone, menée parallèlement à un faisceau d'actions cohérentes (autres équipements, aides aux implantations), peut avoir un rôle très positif lorsque les conditions locales sont favorables.

On peut sans doute affirmer en conclusion qu'une bonne desserte routière est une condition nécessaire du démarrage économique, mais qu'elle est loin d'être suffisante.

La politique routière en liaison avec l'aménagement du territoire

Le schéma directeur des routes

L'élaboration, en 1971, d'un schéma directeur du réseau routier national de rase campagne a marqué une étape importante dans la définition d'une politique routière et sa réorientation en fonction des objectifs de l'aménagement du territoire. Ce schéma ne constitue pas un programme d'aménagements routiers à réaliser à des échéances précises mais plutôt un cadre de réformes pour l'action à entreprendre : l'État concentrera désormais ses efforts sur les 27 500 km du schéma directeur, les anciennes routes nationales étant peu à peu remises aux départements.

Les liaisons à inscrire au schéma directeur ont été déterminées de façon concentrée entre le ministère de l'Équipement, la DATAR (Délégation à l'aménagement du territoire et à l'action régionale) et les instances régionales, et selon deux critères principaux : un critère fonctionnel (relations des principales métropoles entre elles et avec les grandes villes proches) et un critère opérationnel (densité du trafic actuel).

Le schéma adopté par le gouvernement fait apparaître en définitive de nombreuses liaisons appelées à jouer un rôle important pour l'aménagement du territoire, en particulier : trois grandes liaisons inter-régionales nord-sud et six grandes liaisons est-ouest ne traversant pas la Région parisienne.

Les actions programmées à moyen terme

La préparation du VIIe Plan a donné l'occasion au ministère de l'Équipement de préciser sa politique routière, en particulier les actions menées en faveur de l'aménagement du territoire.

En premier lieu, les actions entreprises au cours des plans précédents seront poursuivies. Il s'agit notamment du renforcement coordonné des itinéraires du schéma directeur (9 300 km renforcés fin 1975, achèvement

prévu vers 1985), qui permet l'acheminement du trafic lourd dans toutes les régions. Par ailleurs, la réalisation du « Plan routier breton » est menée vigoureusement un milliard de francs y a été consacré dans le cadre du VIe Plan et un effort analogue doit être poursuivi dans celui du VIIe Plan.

En second lieu, des actions nouvelles sont amorcées pour mieux répondre aux priorités définies par le gouvernement fin 1975 :

— un programme autoroutier, destiné à relier l'Ouest, le Sud-Ouest et le Massif central au reste de la France (voir le chapitre *Autoroutes*) ;

— un plan routier du Massif central, pour lequel sont prévus des efforts comparables à ceux consentis pour le plan routier breton ;

— l'aménagement d'axes nord-sud et d'axes transversaux pour la desserte de la façade atlantique ;

— une série de réalisations routières et autoroutières tendant à raccorder les grands centres français aux réseaux européens.

Les véhicules

La route a pour objet de permettre à des véhicules de circuler : nous rappellerons rapidement à ce sujet quelques données très résumées, sans être exhaustif, ce qui serait impossible ; le champ est évidemment trop vaste pour cela. La question des coûts sera un peu plus approfondie, car elle est souvent moins bien connue.

Classification

Les véhicules automobiles sont des véhicules qui se déplacent sur la route par leurs propres moyens, en utilisant généralement l'énergie d'un combustible. On distingue :

● *Les automobiles de tourisme* ou *véhicules particuliers*. Elles sont destinées au transport d'un nombre réduit de passagers et se différencient selon le type de la carrosserie.

● *Les véhicules utilitaires*. La distinction entre ces véhicules se fait surtout selon le tonnage. Pour le petit tonnage, allant jusqu'à 1 500 kg de charge utile, il s'agit des camionnettes, fourgonnettes ou voitures commerciales ; pour les moyens et gros tonnages, de 2 à 18 tonnes, il s'agit de camions à plateau, fourgons, cars et autobus.

● *Les véhicules spéciaux*. Ils comportent des équipements appropriés : citerne, benne, balayeuse, arroseuse, ambulance, etc.

● *Les véhicules légers*. Ce sont les motocyclettes, les vélomoteurs, les bicyclettes à moteur auxiliaire, les triporteurs.

Bien qu'utilisés à des fins très diverses, on retrouve les mêmes éléments dans la constitution des véhicules :

— la carrosserie, qui renferme les personnes ou les marchandises ;

— le moteur, qui engendre le mouvement en fournissant l'énergie ;

— les organes de transmission, qui transmettent le mouvement aux roues motrices ; il s'agit de l'embrayage qui isole à volonté le moteur de la transmission sans l'arrêter, pour effectuer un départ ou un changement de vitesse ; de la boîte de vitesses, qui réalise l'équilibre entre le couple moteur (force motrice) et le couple résistant (charge totale) par variation de la vitesse de rotation des organes intermédiaires et récepteurs (arbre de transmission, différentiel, roues motrices) ;

— les roues, prenant appui sur le sol, qui permettent le mouvement du véhicule ;

— la suspension, qui absorbe les chocs dus aux inégalités de la route et transmis par les roues ; elle est composée de ressorts hélicoïdaux, de ressorts à lames et d'amortisseurs reliant les essieux au châssis ; ces derniers atténuent les oscillations des ressorts ;

— l'ensemble de la direction, qui permet d'agir sur l'orientation des roues ;

— le système de freinage, qui permet de ralentir et d'arrêter le véhicule (frein au pied) ou de l'immobiliser (frein à main) ;

— un équipement électrique, indispensable pour le fonctionnement du moteur, l'éclairage et la commande de divers accessoires ;

— un châssis, qui constitue l'ossature du véhicule et supporte les organes et la carrosserie.

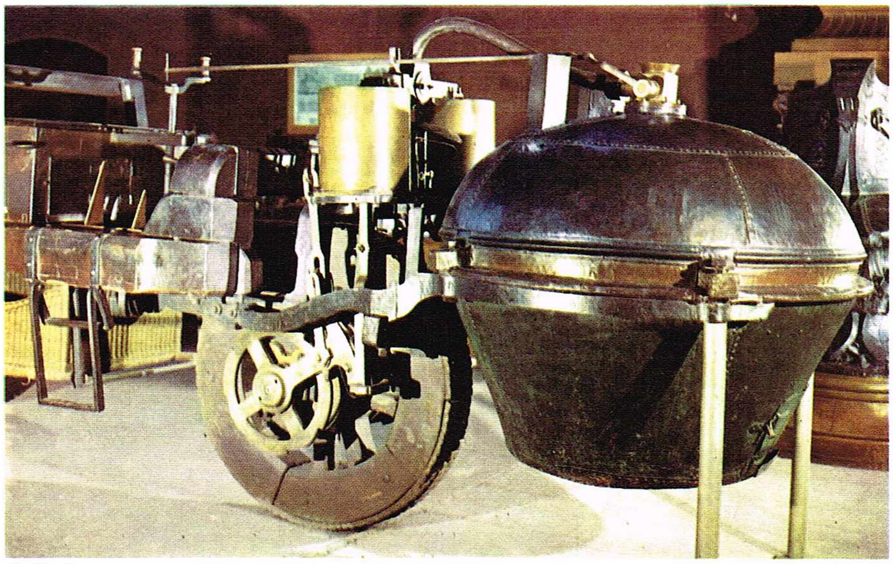

C. Bevilacqua

▲ ***Véhicule à vapeur de Cugnot destiné à traîner une pièce d'artillerie. Seule la roue antérieure est motrice et directrice (Paris, Conservatoire national des Arts et Métiers).***

Historique

En 1769, Cugnot construit le premier véhicule automobile : le « fardier ». Il s'agit d'un véhicule à trois roues, dont l'une est directrice, utilisant la vapeur d'eau comme force motrice. C'est le premier véhicule propulsé par un moyen autre que la traction animale. En 1821 apparaissent, en Angleterre, les premières diligences à vapeur.

Puis, successivement, en 1851, est découverte la bobine de Ruhmkorff utilisée pour produire une étincelle électrique ; en 1859, le premier accumulateur est construit par Plante ; en 1860 sont déposés les brevets du Belge Lenoir pour l'emploi du gaz d'éclairage ou des vapeurs d'hydrocarbure en combinaison avec l'air ; en 1862, Beau de Rochas imagine le cycle du moteur à explosion qui est réalisé pratiquement en 1870, par l'Allemand Otto.

▼ ***Moteur à explosion de Lenoir (1860) : moteur à deux temps, il marchait au gaz d'éclairage et l'étincelle était produite à l'aide d'une pile.***

Nat's photo

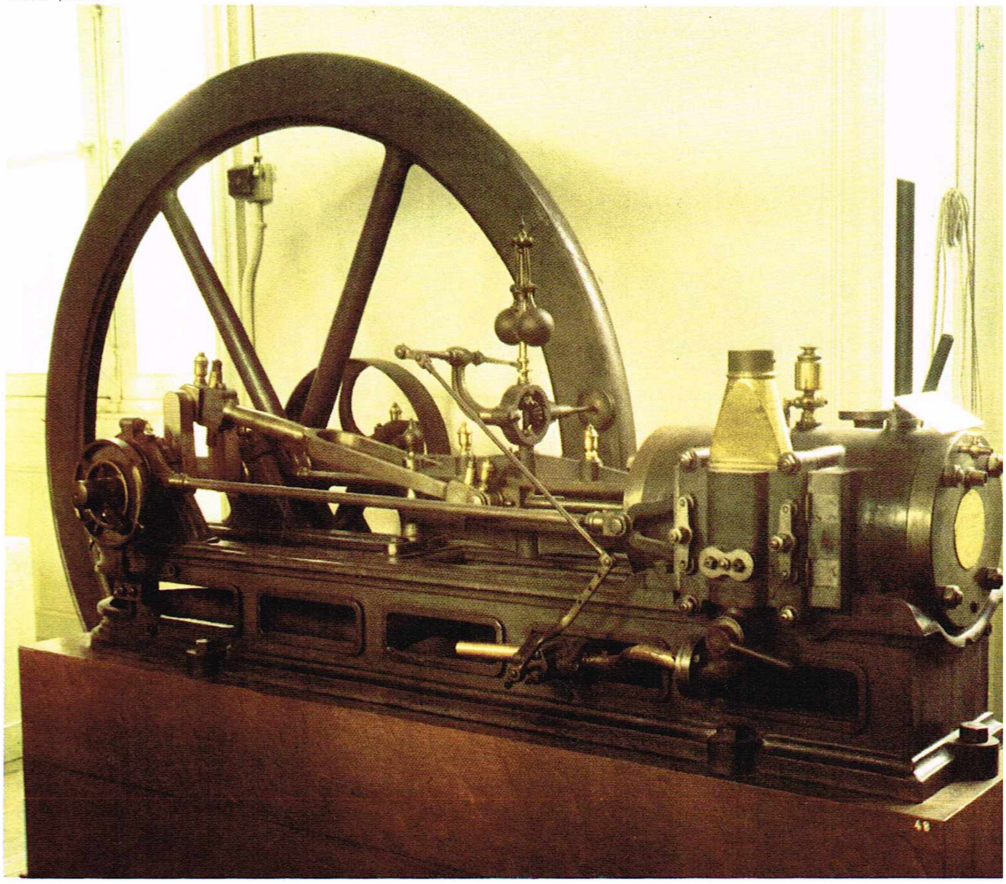

C'est à Amédée Bollée que l'on doit les premières réalisations pratiques (véhicules particuliers et non pas destinés à des services publics) ainsi qu'un début de commercialisation. Les principales créations de Bollée furent l'*Obéissante* en 1873, la *Nancelle* en 1878, la *Mary-Ann* et la *Nouvelle* en 1880, et la *Rapide* en 1881, qui fut construite en plusieurs exemplaires. Ces véhicules étaient toutefois très lourds (la *Nouvelle* pesait trois tonnes et développait une puissance de près de 30 ch; à l'opposé, la *Mary-Ann* pesait vingt-huit tonnes et, grâce à ses 100 ch, pouvait tirer, en palier, une charge de près de cent tonnes).

Certains chercheurs, toutefois, afin de réaliser des engins plus légers et moins encombrants s'orientèrent vers d'autres sources d'énergie, notamment le gaz et le pétrole. Mais la voiture automobile est véritablement née lorsque apparut ce que la vapeur ne pouvait procurer : un moteur léger, à grande puissance massique, capable de vitesses de régime relativement élevées, qualités propres au moteur à explosion réalisé, en 1887, par l'Allemand Gottlieb Daimler.

Avec le peu de recul dont nous disposons — trois quarts de siècle — il est difficile de dire qui a réalisé la première voiture. L'examen des documents d'époque montre que quatre constructeurs ont, vers 1890, produit des véhicules, tous équipés du moteur Daimler, dont on peut dire qu'ils ont ouvert l'ère de l'automobile : en 1888, Benz construit une petite voiture de 300 kg roulant à la vitesse maximale de 20 km/h, propulsée par un moteur Daimler; en 1891, Panhard et Levassor adaptent un moteur Daimler de 2 ch sur un châssis automobile; un an après apparaît la Peugeot équipée, elle aussi, d'un moteur Daimler. En 1892, Diesel dépose son premier brevet.

Les premiers constructeurs s'attaquent au problème, perfectionnent le moteur à explosion, tant et si bien que l'automobile commence à connaître la consécration de l'épreuve publique sur route.

Les étapes sont rapides :

— 1894 : course Paris-Rouen (126 km, 15 concurrents, 3 véhicules à vapeur, 12 à pétrole) gagnée par de Dion à la vitesse moyenne de 22 km/h ;

— 1901 : Paris-Berlin, 74 km/h ;

— 1903 : Paris-Madrid, 105 km/h.

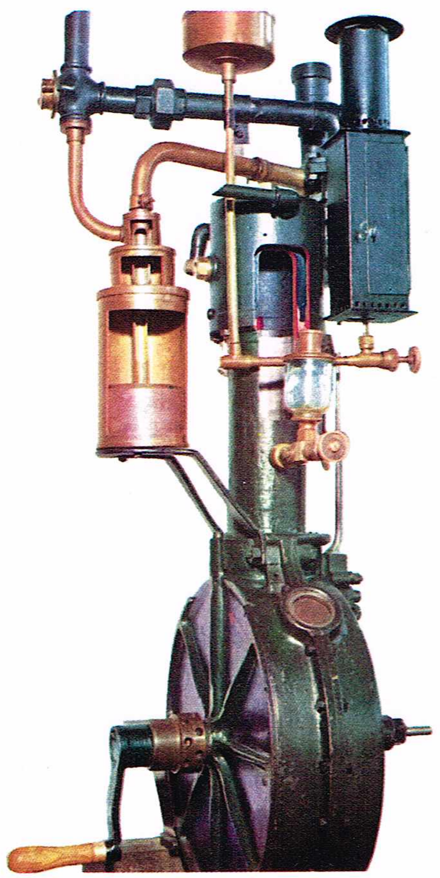

▶ *Moteur à un seul cylindre réalisé par Daimler en 1885 (Monaco, Deutsches Museum).*

Archives I.G.D.A.

L'ère des grandes compétitions sur route s'ouvrait, la France devait prendre la tête du mouvement, ne serait-ce qu'en raison du grand nombre de constructeurs qui allaient en faire, des années durant, le plus important producteur mondial. Dans les premières années du XX[e] siècle, quelques noms allaient connaître la gloire : Panhard, Peugeot, Renault, de Dion, mais aussi les Darracq, Brasier, Clément, Mors, Delahaye, Delage, Delaunay-Belleville. En Allemagne, Daimler (devenu Mercedes) et Benz rivalisaient avant de s'unir. La Grande-Bretagne avait ses Wolseley, Austin, Maudsley, Vauxhall, Lanchester et déjà Rolls-Royce. Les autres pays, longtemps en retard, n'ont pris une place véritable que lorsque l'automobile est passée au stade de la production industrielle. Dans ce domaine, Henry Ford fut un des plus efficaces.

Comment naît une automobile

La construction automobile a considérablement évolué ces dernières années en Europe, notamment en France, à l'exemple des méthodes américaines. La naissance d'une automobile, depuis sa conception jusqu'à sa livraison, s'effectue avec les principales étapes suivantes : études, préparation, réalisation et contrôle, vente.

Au premier stade a lieu la préétude. Il s'agit, à partir d'enquêtes, de sondages, de statistiques, de chercher et préciser ce que seront les désirs et les besoins d'une clientèle future. Ce service de préétude apporte des informations essentielles et détermine les facteurs nouveaux devant intervenir pour modifier les types de voitures, les lignes, les carrosseries, les couleurs, etc.

Le bureau d'études a un double rôle : l'étude du prototype et l'étude des modifications. Le service chargé de l'étude du prototype est particulièrement secret. Il comprend des ingénieurs élaborant les premiers projets, des esthéticiens industriels chargés de mettre en forme les demandes du service préétude, des dessinateurs et des maquettistes. Cette équipe travaille environ cinq ans sur un modèle avant qu'il sorte en série.

Le service des nomenclatures établit la liste des pièces de l'automobile et enregistre tous ces éléments. Il suit le cheminement des pièces dans tous les services.

La direction choisit parmi les projets du bureau d'études celui qui sera retenu pour la fabrication en série.

Le service de fabrication du prototype et celui des essais travaillent en secret sur la mise au point du prototype qui est essayé sur les diverses pistes d'essais.

Le stade outillage comprend le bureau des méthodes, l'ordonnancement et le lancement. L'automobile est d'abord fabriquée selon des méthodes de moyennes séries (préséries) avec du matériel spécifique. A partir des résultats sont étudiés les temps nécessaires à la répartition des tâches.

Le bureau du planning établit les dates de début et de fin des tâches en fonction de leur répartition et des impératifs de changement des postes. A partir de ce calendrier, le bureau de lancement prévoit la distribution du matériel et surveille le respect des délais de fabrication.

Le bureau de fabrication des outillages met en place les machines et les outils spécifiques à la création du produit déterminé.

Les bureaux des matières premières et accessoires veillent à l'approvisionnement et sont responsables du bon renouvellement des stocks et de l'immobilisation minimale de ces stocks.

Le service des installations se charge de la mise en place des chaînes; le service fabrication produit les pièces du moteur, de la transmission et de la carrosserie.

Puis a lieu le montage. Une immense chaîne se déroule (où se pratique le montage de la carrosserie), sur laquelle se greffent des chaînes de fabrication secondaires (aménagements intérieurs par exemple). En fin de chaîne est née véritablement l'automobile, qui est distribuée par le service livraison après avoir subi les différents contrôles du service contrôle des produits finis.

La construction d'une automobile demande ainsi l'intervention de nombreux secteurs. La *figure* 3 en donne une représentation très schématique avec, d'une part, les flux économiques en milliards de francs (sur les traits du schéma), et, d'autre part, le nombre de travailleurs de la branche concernée.

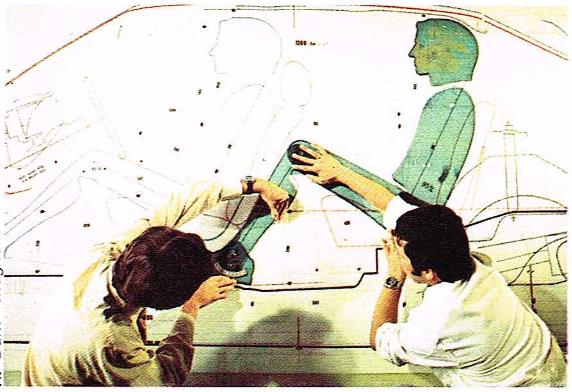

R. Burri - Magnum

Le coût des véhicules routiers

Les chiffres les plus divers circulent sur ce sujet : il est donc utile de faire le point afin de donner des bases d'appréciation, d'une part, pour les automobiles, d'autre part, pour les camions et les autocars.

Coût de la voiture particulière

On distingue traditionnellement plusieurs types de coûts suivant qu'on apprécie le point de vue de l'usager ou celui de la collectivité, et selon le caractère plus ou moins marginal de la dépense. Il est ainsi opportun de faire la décomposition suivante.

Coût de possession du véhicule

Il comprend le prix d'achat du véhicule qu'on peut traduire par un amortissement annuel, celui de la carte grise ainsi que la prime d'assurance : la somme de ces trois termes constitue la base des coûts fixes. On peut lui ajouter dans certains cas les dépenses de garage au lieu de résidence du véhicule. On a donc la formule :

$$C_p = A + C_g + P_a + G$$

C_p est un coût annuel. L'amortissement A, auquel on peut ajouter C_g (carte grise), est variable suivant le véhicule, suivant son utilisation et le mode de financement

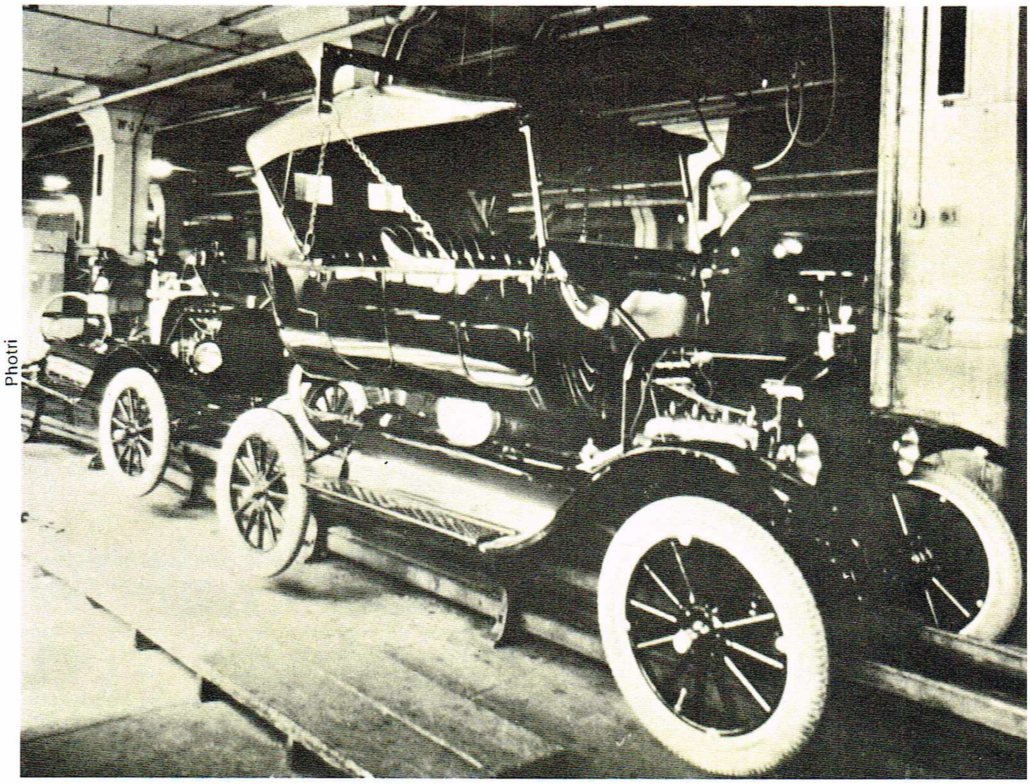

Photri

▲ *A gauche, les bureaux d'études étudient et expérimentent le confort et la sécurité des sièges de voitures.*

A droite, premiers montages à la chaîne chez Ford. Cette méthode était tout à fait révolutionnaire. Jusque-là, une voiture était entièrement montée en un endroit fixe.

▼ *Figure 4 : représentation schématique des principaux flux économiques liés à la fabrication des véhicules particuliers (document BIPE).*

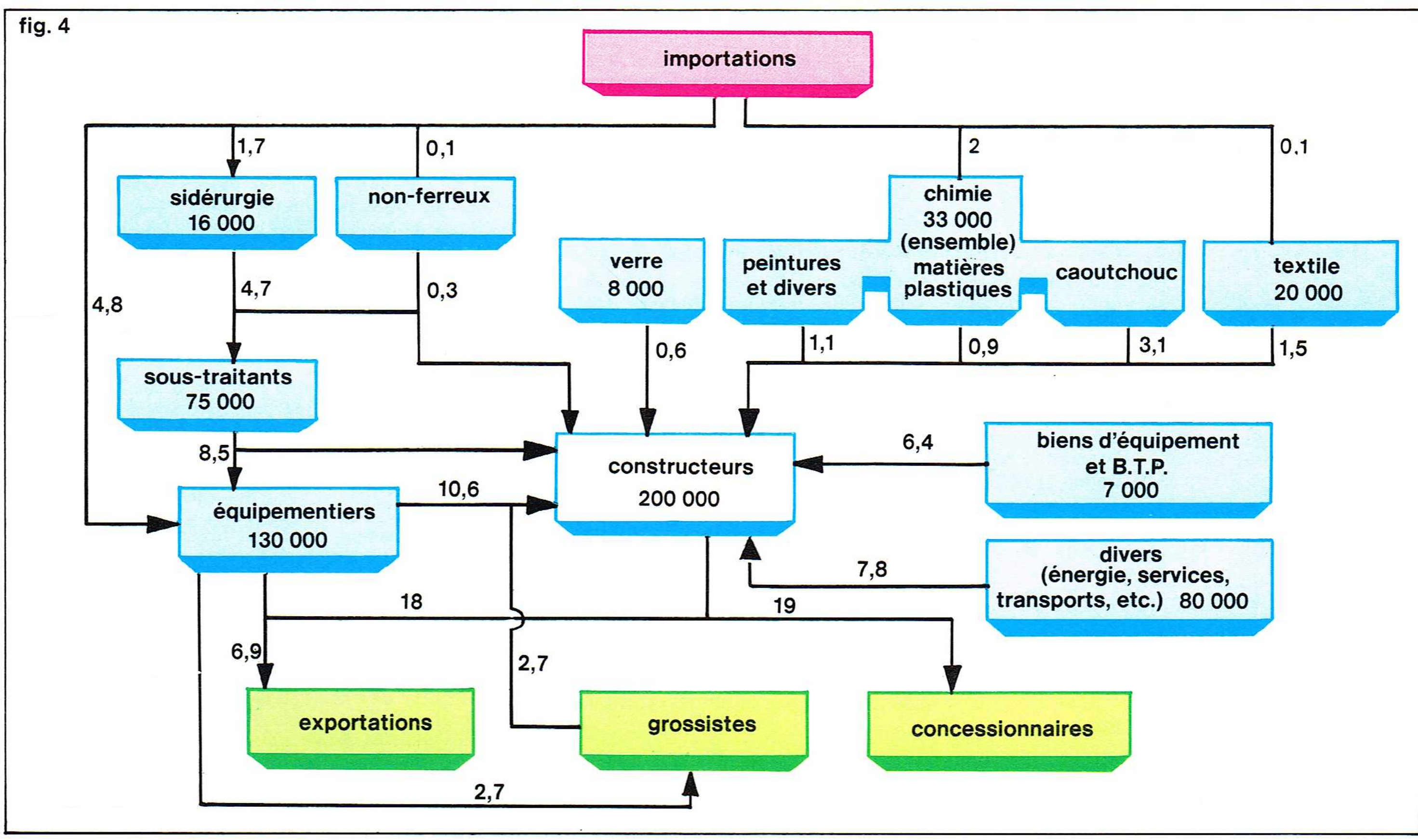

Richard Colin

(taux de l'emprunt) ; le prix des véhicules est situé entre 12 000 F et 50 000 F, la durée de vie de l'ordre de 5 ans. La prime d'assurance P_a varie entre 500 et 3 000 F. Le coût du garage G peut s'élever jusqu'à 4 000 F par an. L'ordre de grandeur moyen de C_p est de 4 000 à 10 000 F.

Coût d'utilisation du véhicule

Il comprend les dépenses courantes :

— *Carburant* (S) : la consommation varie de 6 à 15 litres aux 100 kilomètres pour les véhicules courants ; le prix du carburant a fortement augmenté depuis 1974, puisqu'il est passé de 1,2 F à 2,4 F environ : il n'a néanmoins fait que rattraper son coût en francs constants des années 1955. Le coût kilométrique varie ainsi de 14 à 35 centimes.

— *Frais d'entretien du véhicule* (E) : ils comprennent le lubrifiant, les pneumatiques, les réparations nécessaires, et sont très variables. On estime que le coût moyen est de l'ordre de 15 centimes au kilomètre.

— *Frais divers :* pour mémoire (il peut s'agir par exemple des contraventions).

Coût social

C'est le coût pour la collectivité ; on peut distinguer :

— Le *coût des accidents :* ce poste est décrit dans les pages concernant la sécurité routière.

— Le *coût de congestion :* on pourrait d'ailleurs parler du temps passé dans le véhicule ; en effet, la différence fondamentale existant entre l'automobile et les autres modes de transport tient au fait que le conducteur est le transporté lui-même (en dehors du cas des taxis). Ce temps est pris en compte, comme on le voit par ailleurs dans les études de rentabilité. Le coût de congestion a un impact plus limité : il s'agit d'estimer la gêne procurée aux autres usagers par chacun d'entre eux ; en effet, à partir d'un certain niveau de circulation, chaque voiture supplémentaire entraîne une diminution de la vitesse du flot (comme le montre la courbe vitesse-débit [*fig.* 5]) et entraîne ainsi une perte de temps pour les autres usagers. Le coût global en zone saturée est très élevé : on estime en effet à un milliard le nombre d'heures perdues par la congestion, c'est-à-dire le temps supplémentaire passé sur la route par rapport à celui que permettrait une circulation fluide : si on valorise le temps à 12 F environ, on arrive à une « perte » de l'ordre de 12 milliards de francs.

— De même, le *coût collectif global* dû aux accidents est très élevé, il a été évalué à quelque 7 milliards de francs en 1970 sur la base d'une valorisation de la vie humaine de 230 000 F et d'un coût par blessé de 10 000 F. En 1976, ce coût devait donc atteindre l'ordre de grandeur cité par le coût de congestion (12 milliards), compte tenu de l'érosion monétaire et de l'augmentation des accidents entre 1970 et 1973.

Coût des transports routiers de marchandises

Il est évidemment difficile de donner un aperçu du coût du transport d'une tonne sur un kilomètre (tk) sans se livrer à une analyse détaillée de divers cas ; en effet, les paramètres qui interviennent sont nombreux : la taille de l'envoi et du camion, le mode de gestion de l'entreprise, le parcours assuré sont les trois facteurs déterminants. Ils se traduisent par les paramètres suivants : amortissement, salaire du chauffeur et durée du travail, kilomètres parcourus en charge et à vide, coût de l'entretien et des réparations, taxes et frais généraux.

Un certain nombre de ces postes sont des charges fixes (restant constantes que le véhicule roule ou non) ; ce sont : les charges financières et l'amortissement calculé au temps ; les impôts ; une part des salaires.

D'autres sont sensiblement proportionnels aux parcours : la partie de l'amortissement calculée au kilomètre parcouru ; les dépenses d'entretien, de pneumatiques, de carburant, de lubrifiant ; le reste des salaires (heures supplémentaires et frais de déplacement des chauffeurs).

Pour les transports de zone longue, la formule suivante est souvent utilisée :

$$C_{t\,km} = \frac{F_g}{KC_u}\left[C_{hm}\,(1 + r) + (C_h + S_v + F_d)\left(\frac{1 + r}{V_m} + \frac{S}{d}\right)\right]$$

$C_{t\,km}$: coût à la tonne-kilomètre ;
F_g : coefficient multiplicateur correspondant aux frais généraux ;
C_u : charge utile du véhicule ;
K : coefficient de chargement ;
C_{hm} : coût hectométrique (du véhicule) ;
r : pourcentage de retour à vide ;
C_h : coût horaire (du véhicule) ;
S_v : salaires variables ;
F_d : frais de déplacements ;
V_m : vitesse moyenne ;
S : diverses données complémentaires.

On évalue également le coût au véhicule-kilomètre, qui est donc :

$$C_{v\,km} = C_{t\,km} \times C_u \times K$$

On obtient, pour les véhicules les plus gros, les chiffres moyens donnés dans le *tableau* XIII.

▶ ***Tableau XIII : coût des transports routiers de marchandises en fonction du tonnage pour les plus gros véhicules.***

Tableau XIII
Coût des transports routiers de marchandises en fonction du tonnage pour les plus gros véhicules

Tonnage (en tonnes)	$C_{v/km}$ (en francs)	$C_{t/km}$ (en francs)
38	4,55	0,22
35	4,45	0,24
19	3,62	0,375

Ce tableau montre que le coût de transport d'une tonne diminue sensiblement avec l'augmentation du tonnage total du camion. On peut se demander pourquoi alors ne pas utiliser de plus gros poids lourds : le code de la route interdit les tonnages supérieurs à 38 tonnes et le poids par essieu de plus de 13 tonnes ; le motif tient pour une part à la sécurité, mais surtout à la dégradation infligée par les essieux lourds aux chaussées ; cette dégradation va s'accélérant, puisqu'on estime qu'elle varie comme la puissance quatrième du poids de l'essieu (cette thèse est discutée suivant le type de la chaussée [simple ou rigide], mais l'ordre de grandeur n'est pas contesté).

Les tarifs pratiqués sont différents, car de nombreux facteurs interviennent pour moduler les coûts : divers paramètres tels que la taille de l'entreprise, le respect de la durée du travail, les surcharges font que le coût ressenti par l'entreprise peut varier du simple au double. Le tarif, lui, dépend de l'état du marché, et notamment du tarif ferroviaire parallèle.

Par ailleurs, le passage d'un poids lourd sur une route entraîne un certain nombre d'effets externes qui se nomment globalement, comme pour l'automobile, « coût social » :

— il encombre la voie beaucoup plus qu'un autre véhicule parce qu'il occupe plus de place et qu'il va plus lentement : c'est le coût de congestion ;

— il entraîne des accidents plus nombreux, plus importants que les autres véhicules ; dans de nombreux cas graves, les camions sont impliqués ;

— il détériore la chaussée, comme nous l'avons vu plus haut ;

— il fait plus de bruit, dégage plus de gaz nuisants (moteur Diesel).

Ce n'est pas une raison pour nier l'intérêt du transport routier qui est dans tous les pays, à l'heure actuelle, un moyen de transport nécessaire au fonctionnement de l'économie ; mais, dans le cadre d'une politique libérale des transports de marchandises, il a paru souhaitable, afin de permettre une certaine égalisation des conditions de concurrence entre les divers modes de transport, de faire payer aux camions une partie de ces nuisances sociales : c'est ce que l'on appelle la taxe à l'essieu, dont le principe de calcul est fondé sur le coût marginal social. On a indiqué par ailleurs la recette correspondante

E. Berne - Fotogram

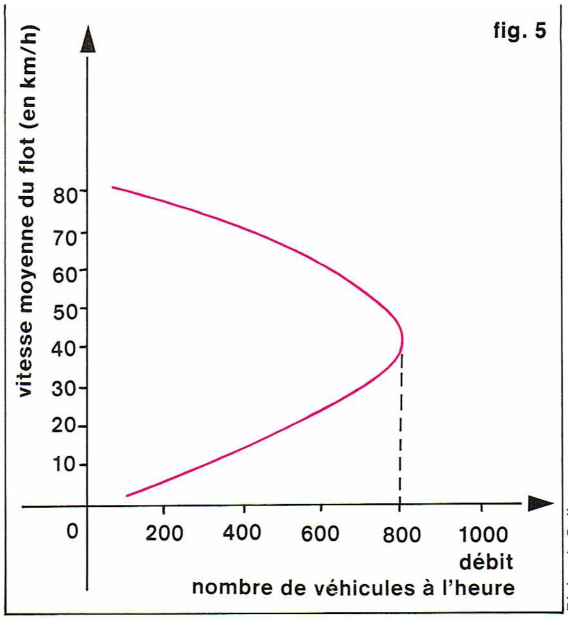

Richard Colin

◀ *Voitures destinées à l'exportation en instance de chargement dans le port du Havre.*

◀ *Figure 5 : courbe vitesse-débit. A partir d'un certain niveau de circulation, chaque voiture supplémentaire entraîne une diminution de la vitesse du flot et cause ainsi une perte de temps pour les autres usagers. Il y a une courbe par type de voie.*

▼ *Tableau XIV : les quinze premiers constructeurs d'automobiles en 1974.*

pour l'État, mais le mode de calcul exact est complexe et ne peut être décrit en quelques mots : disons simplement qu'on apprécie le coût social marginal en étudiant les dépenses supplémentaires (non ressenties directement par les transporteurs) entraînées par le passage d'un camion (de tel type : taille, poids, etc.) sur la voirie nationale.

Le coût des autobus

Des considérations du même ordre peuvent être développées : la même formule est valable en gros, le coût au car-kilomètre varie suivant les cas de 3 à 15 F ; c'est un transport qui est adapté à une desserte fine des zones urbaines (système type R. A. T. P.) et à la desserte de zones rurales où le trafic est relativement faible mais où la nécessité d'un service public se fait néanmoins ressentir. Il convient bien également lorsqu'une cinquantaine de personnes sont à transporter d'un point à un autre, et cela recouvre aussi bien le ramassage scolaire, les transports ouvriers, que les excursions ou les pèlerinages.

L'organisation du secteur

La route occupe une place importante dans l'économie globale du pays : en premier lieu, bien sûr, son existence même est une base de l'organisation de la vie économique et sociale, mais elle représente aussi une part sensible des activités des Français. Il est possible de décomposer ce domaine en quatre parties : les activités dont l'objet est la production et l'entretien des véhicules et des infrastructures, le secteur du transport routier proprement dit (dont la fonction est de transporter sur la route), les activités annexes (assurances, tourisme) et l'appareil politico-administratif qui prend les décisions de gestion et de transformation du système. Ce sont probablement plus de 2 millions de personnes qui travaillent ainsi dans cet ensemble d'activités.

Le domaine amont

La construction des véhicules

Fondée sur les grandes entreprises automobiles, elle est en général très concentrée au niveau de la production finale des engins : en France, trois groupes de constructeurs occupent la quasi-totalité du marché : Renault-Saviem ; Peugeot-Citroën ; Berliet-Simca-Chrysler pour les automobiles, les camions et les autobus. D'autres industriels s'y intéressent, comme les tentatives de Matra et d'autres constructeurs le montrent, mais cela est marginal. Il en est de même, bien que cela soit moins net, pour les deux-roues (Motobécane, Peugeot). Le *tableau* XIV donne pour 1974 les quinze premiers constructeurs mondiaux. La production automobile française s'élevait à la même date à 3 050 000 automobiles, 400 000 camions, 4 000 autocars et autobus, 12 000 tracteurs routiers. Cette industrie est très exportatrice, puisqu'elle a exporté en 1975 près de 60 % de sa production ; elle est actuellement sur le plan mondial en état de surcapacité importante, puisque la production en 1973 était supérieure à 30 millions de véhicules, alors qu'elle plafonne maintenant vers 25 millions de véhicules.

Tableau XIV

Les quinze premiers constructeurs d'automobiles en 1974

Constructeurs	Pays	Nombre de véhicules produits en 1974
General Motors	Etats-Unis	4 673 000
Ford	Etats-Unis	3 098 000
Toyota	Japon	2 434 000
Volkswagen	R.F.A.	2 083 000
Nissan	Japon	2 002 000
Chrysler	Etats-Unis	1 539 000
Renault	France	1 527 000
Fiat	Italie	1 498 000
Ford Europe	R.F.A. / Grande-Bretagne / Belgique	988 000
British Leyland	Grande-Bretagne	863 000
Chrysler Europe	France / Grande-Bretagne / Espagne	781 000
Toyo-Koguyo	Japon	740 000
Peugeot*	France	730 000
Citroën*	France	688 000
Lada (Fiat)	U.R.S.S.	650 000

*Le regroupement récent de ces deux firmes amène le nouveau groupe au niveau de Fiat et de Renault.

▶ *Tableau XV : exportation d'automobiles de quelques pays européens.*

Tableau XV
Exportation d'automobiles de quelques pays européens en 1976

Pays	Automobiles (x 10^3)	Véhicules utilitaires (x 10^3)
R.F.A.	3 546	321
France	3 387	454
Italie	1 471	113
Grande-Bretagne	1 333	372
Benelux	1 120	119

▶ *Tableau XVI : importance des différents secteurs d'équipement automobile.*

Tableau XVI
Importance des différents secteurs d'équipement automobile

Secteurs	Chiffre d'affaires (en milliards de francs)
Equipements automobiles	10
Première transformation des métaux	7,5
Pneumatiques	5,5
Produits chimiques	3,4
Sidérurgie	3,1
Construction mécanique	2,4
Verre	0,5

▼ *Tableau XVII : le secteur des équipements est complexe et lié à d'autres activités, comme le montrent les exemples figurant dans ce tableau.*

Tableau XVII
Quelques exemples de production et de débouchés du secteur des équipements

Sociétés	Production	Débouchés
Férodor	Embrayage Climatiseur Garniture de friction Equipement électrique Carrosserie	Automobiles 80 % (50 % première montée) Industrie et bâtiment 20 %
S.E.V. Marchal	Allumeurs Projecteurs Essuie-glaces Avertisseurs Pompes à essence Lave-glaces Moteurs ventilation Bobines Alternateurs Bougies	Automobiles 100 % (dont 1re montée 50 %)
D.B.A.	Freins Commandes hydrauliques Démarreurs Embrayages Equipements électriques Injecteurs	Automobiles 90 % Aéronautique 10 %
Jaeger	Tableaux de bord Horlogerie	Automobiles 70 % Aéronautique 15 % Bijouterie 5 % Industrie 10 %

Les chiffres de 1976 pour les divers pays européens sont, en milliers de véhicules, réunis au *tableau* XV. On voit ainsi que l'industrie automobile française a continué, malgré la crise, la progression de sa production, alors que celle-ci a stagné en R. F. A. et a régressé en Italie et en Grande-Bretagne. Ce phénomène s'est accompagné d'une progression des immatriculations de véhicules neufs; après une baisse en 1974 et en 1975, le niveau de 1976 a dépassé celui de 1973.

Les constructeurs automobiles assurent généralement la conception du véhicule, la fabrication des organes essentiels et l'assemblage. Pour les pièces, ils ont très souvent recours à des fournisseurs sous-traitants dont l'organisation varie suivant le domaine : certaines sont très concentrées comme pour les pneumatiques (Michelin, Dunlop) ; dans d'autres domaines, il s'agit de petites et moyennes entreprises (PME), notamment dans les équipements. Le *tableau* XVI donne l'importance des secteurs concernés. Le secteur des équipements est très complexe et très lié à d'autres activités comme le montrent les quelques exemples du *tableau* XVII.

Le secteur des travaux publics

Il fait partie de la branche « Bâtiments, Travaux publics »; c'est lui qui regroupe les entreprises qui construisent et entretiennent les routes. Les BTP, rappelons-le, sont un des secteurs les plus importants, puisque 2 millions de travailleurs y ont leur activité. La part des travaux publics est un peu inférieure au tiers, et la route proprement dite doit être concernée par un peu moins de 20 %. Ce domaine comprend un certain nombre de grandes entreprises qui consacrent leur activité à la construction des grandes infrastructures nouvelles ou des chantiers d'entretien importants (renouvellements coordonnés) et, sur le plan local, de nombreuses petites entreprises. Un certain nombre de travaux sont d'ailleurs faits en régie par des services des Ponts et Chaussées.

Les activités « aval » de l'automobile

Elles permettent l'utilisation du véhicule : il s'agit principalement des services de réparations et d'entretien assurés par les garages, de la production et de la distribution des carburants et de l'assurance automobile.

● Les **garages** : le nombre d'entreprises s'élevait à 61 500 en 1973 et se décomposait ainsi : 4 500 concessionnaires, 15 000 agents, 18 000 garages, 7 000 carrossiers; 17 000 stations-service (dont 8 000 appartiennent aux compagnies pétrolières).

Le chiffre d'affaires de ces entreprises atteint le montant énorme de 100 milliards de francs environ, dont près de 50 % correspondent à la vente des véhicules neufs ou d'occasion et 30 % à la vente de carburants et lubrifiants. La réparation proprement dite représente ainsi moins du cinquième de leur activité.

● L'**assurance automobile** représente une part importante du secteur des assurances : avec un chiffre d'affaires de 17 milliards, elle occupe 33 % de l'activité de ce secteur. La plus grande société, l'UAP, a un chiffre d'affaires de l'ordre de 7 milliards de francs, c'est-à-dire supérieur à la valeur ajoutée de la branche automobile de Renault (6 milliards environ) : c'est une des toutes premières sociétés françaises.

Les entreprises de transports

Les transports de voyageurs

Il y avait en France, à la date du 31 décembre 1972, 2 853 entreprises ayant comme activité principale le transport routier public de voyageurs, dont :

— 97 entreprises ayant comme activité principale le transport urbain;

— 2 417 entreprises ayant comme activité principale le transport autre qu'urbain;

— 339 entreprises effectuant des transports publics de voyageurs et de marchandises;

— de plus, 481 entreprises effectuaient à titre accessoire des transports publics de voyageurs par autocar.

La répartition des véhicules entre les entreprises effectuant à titre principal des transports routiers publics de voyageurs était la suivante :

Fred Mayer - Magnum

— 922 entreprises possédaient 1 ou 2 véhicules ;
— 518 entreprises possédaient 3 ou 4 véhicules ;
— 597 entreprises possédaient de 5 à 9 véhicules ;
— 442 entreprises possédaient de 10 à 19 véhicules ;
— 251 entreprises possédaient de 20 à 49 véhicules ;
— 63 entreprises possédaient de 50 à 99 véhicules ;
— 30 entreprises possédaient de 100 à 199 véhicules ;
— 19 entreprises possédaient de 200 à 499 véhicules ;
— 11 entreprises possédaient 500 véhicules ou davantage.

L'entreprise la plus importante est la R. A. T. P. qui assure le transport par autobus dans la zone la plus dense de la région Ile-de-France et qui utilise près de 4 000 autobus pour transporter 700 millions de voyageurs par an.

En dehors des transports par taxis, qui nécessiteraient à eux seuls une analyse approfondie, les transports publics de voyageurs comprennent des services réguliers (journaliers ou périodiques) et des services occasionnels ou touristiques.

Les services d'autocars sont soumis à des règles de sécurité (pour chaque véhicule, autorisation de circuler, visites techniques) et à un cahier des charges (horaires, itinéraires, tarifs). Le tarif kilométrique se tient en général un peu en dessous de celui de la 2e classe de la S. N. C. F. En revanche, les tarifs réduits sont beaucoup moins fréquents. Les prix sont plus élevés sur les parcours difficiles et sur certaines lignes très peu fréquentées, ainsi que sur les lignes qui ne sont pas en concurrence avec le chemin de fer.

Les services réguliers concernent le plus souvent des relations à courte ou à moyenne distance. Cependant, aux États-Unis, le transport public régulier à grande distance par autocars est très répandu ; il est moins rapide, mais moins cher que le transport par chemin de fer, dont la classe coach, plutôt luxueuse, est d'un coût en rapport avec sa qualité. En France, on trouve seulement quelques lignes régulières à grande distance, comme Genève-Nice, qui fait partie des services Europabus et qui fonctionne toute l'année.

Les services réguliers de voyageurs se prêtent mal à la concurrence. Quand deux lignes rivales s'établissent sur une même relation, on assiste à une lutte de tarifs (par exemple sur la Côte d'Azur, quelques années après la guerre), puis à une entente. De nombreuses lignes régulières ont actuellement de la peine à vivre du fait de la concurrence des voitures particulières et des deux-roues. Certaines d'entre elles cherchent à se faire une clientèle nouvelle avec les ramassages d'écoliers, pour lesquels ont été créés également des circuits spécialisés ; d'ailleurs, certaines entreprises sont spécialisées dans le transport des écoliers ou des ouvriers.

Contrairement à ce que l'on pourrait croire, la concurrence faite à la S. N. C. F. par les services occasionnels ou touristiques est importante, même pour des transports massifs. Par exemple, à Lourdes, ont été relevés à l'arrivée les nombres de voyageurs suivants : 1 395 340 par fer et 294 480 par cars (du 1er avril au 15 octobre).

Dans le même ordre d'idée, on peut encore noter les exemples suivants : en 1970, la France a reçu plus de 50 000 visiteurs, dont 34 000 ont été amenés au Havre par 700 autocars ; le 3 octobre 1971, plus de 80 autocars ont amené à Honfleur 4 200 personnes de la Région parisienne, réunies pour un Congrès d'anciens prisonniers de guerre ; le 22 septembre 1975, le Syndicat des transports routiers de Seine-Maritime a organisé une excursion collective vers le Mont-Saint-Michel : cette excursion a groupé 2 850 personnes qui ont été transportées dans 63 autocars.

◀ *Ancien autobus parisien à plate-forme arrière. Il est à remarquer que la R.A.T.P. remet ce genre de plate-forme à l'honneur.*

▼ *Une station-service Elf.*

Leonard Freed - Magnum

Les transports de marchandises

Les transports pour compte propre

Un certain nombre d'entreprises de production transportent elles-mêmes leurs marchandises : c'est ce qu'on appelle le « compte propre ». Le parc pour ce type de transport (appelé souvent transport privé) va de la simple camionnette qui sert à faire les courses jusqu'au grand parc privé dont disposent certaines firmes pour assurer la distribution de leurs marchandises dans un secteur plus ou moins étendu. C'est le cas, par exemple, de certaines sociétés d'épicerie à succursales multiples.

Le transport routier privé présente des avantages certains de commodité et de souplesse. L'entreprise qui possède des véhicules ou qui les prend en location (il sera question de la location de véhicules de transport de marchandises un peu plus loin dans ce chapitre) les a constamment à sa disposition et peut s'en servir à sa guise, en attribuant à ses transports la priorité qu'elle désire. En outre, elle peut se servir de ces véhicules pour sa publicité en mettant en évidence sa raison sociale, ou bien des textes ou des images.

D'ailleurs, une maison de commerce peut estimer préférable d'être indépendante des professionnels pour assurer ses transports, même s'il en résulte pour elle des dépenses un peu plus élevées.

Les transports pour compte d'autrui

Ce sont les transports assurés par des entreprises spécialisées dans cette activité appelée « pour compte d'autrui » ou « public ».

Il y avait en France, à la date du 31 décembre 1972, 30 771 entreprises ayant comme activité principale le transport routier public de marchandises. De plus, 5 183 entreprises industrielles ou commerciales effectuaient des transports de cette espèce, qui ne constituaient pour elles qu'une activité accessoire, parfois très secondaire. La répartition des véhicules entre les entreprises effectuant à titre principal des transports routiers publics de marchandises était la suivante :

▼ *Port de Gennevilliers : chargement de camions de la société Béton de Paris.*

G. Sioen - Cedri

— 17 601 entreprises possédaient 1 ou 2 véhicules ;
— 4 936 entreprises possédaient 3 ou 4 véhicules ;
— 4 171 entreprises possédaient de 5 à 9 véhicules ;
— 2 357 entreprises possédaient de 10 à 19 véhicules ;
— 1 230 entreprises possédaient de 20 à 49 véhicules ;
— 284 entreprises possédaient de 50 à 99 véhicules ;
— 129 entreprises possédaient de 100 à 199 véhicules ;
— 42 entreprises possédaient de 200 à 499 véhicules ;
— 21 entreprises possédaient 500 véhicules ou davantage.

De nombreuses entreprises pratiquent ce qu'on appelle le *groupage*, qui consiste à faire pour les colis ce que fait la poste pour le courrier. Les colis sont concentrés ou déchargés dans des entrepôts. Pour respecter les principes de bonne utilisation et de rotation intense des véhicules, les groupeurs sont amenés à utiliser deux types de camions : des véhicules lourds à grande capacité pour le parcours de ville à ville, et des véhicules plus petits pour le ramassage et la distribution, d'où la nécessité de certains transbordements. Ceux-ci s'effectuent parfois dans des gares routières publiques de marchandises ou des centres routiers, établissements dont il a été question plus haut.

Dans certains cas, les deux services sont distincts, en ce sens que le groupeur proprement dit, qui collecte et distribue les colis, fait assurer la traction de quai à quai par un transporteur qu'il rémunère au camion-kilomètre ; souvent, il utilise la S. N. C. F. pour cela (groupage ferroviaire). La S. N. C. F. a elle-même plusieurs filiales « groupage », dont la plus importante est la SCETA. Dans d'autres cas, au contraire, l'enlèvement et la livraison sont assurés par les véhicules affectés à une gare routière publique de marchandises et transportés au départ ou à destination de celle-ci par des groupeurs.

La base des transports routiers publics est le transport à la demande. Les artisans travaillent généralement sous ce régime. Lorsqu'ils assurent un transport, ils sont amenés à rechercher un fret complémentaire pour éviter de partir ou de revenir à vide. Comme leurs relations commerciales sont parfois assez limitées, ils font éventuellement appel à des affréteurs qui centralisent les offres et les demandes de transport.

Les entrepreneurs qui disposent d'un parc important établissent généralement des plans de transport, hebdomadaires par exemple, qui leur permettent de lancer leurs camions sur des circuits polygonaux, le long desquels ils circulent avec des frets successifs. C'est le moyen le plus efficace pour obtenir un chargement moyen élevé. Ce procédé présente toutefois l'inconvénient que les transports doivent être prévus assez longtemps à l'avance, de sorte que le caractère de souplesse du transport automobile s'en trouve quelque peu altéré.

Bien entendu, pour diminuer leurs coûts, les transporteurs routiers s'orientent le plus possible vers le transport de lots importants.

Le rôle des Bureaux régionaux de fret est de servir d'intermédiaire entre le transporteur (ou son représentant, le commissionnaire) et le chargeur (qui veut transporter une marchandise). Ces Bureaux enregistrent le fret remis par les transporteurs eux-mêmes et par les commissionnaires de transport (ceux-ci doivent offrir aux Bureaux, en principe, au moins 60 % du fret total dont ils disposent) et la répartition entre les transporteurs qui n'appartiennent pas à la circonscription du Bureau : par priorité, à ceux qui ont annoncé leur passage, puis à ceux qui se présentent au Bureau. Enfin, le reste du fret, s'il y a lieu, est attribué aux transporteurs qui appartiennent à la circonscription du Bureau.

La location de véhicules

De nombreuses entreprises donnent des camions en location, soit avec chauffeur, soit sans chauffeur.

Le preneur peut être une personne physique ou morale quelconque, pour assurer des transports pour son compte propre, ou une entreprise de transport public, pour assurer des transports publics.

Le loueur aide ses clients à faire face à leurs besoins saisonniers de transport, ou aux pointes de leur trafic.

Dans le cas des locations de camions, le loueur est amené fréquemment à jouer le rôle de « conseil en organisation de transports ». Bien entendu, le loueur s'efforce d'assurer la meilleure utilisation de son parc, en tenant compte des besoins de ses divers clients.

Il y avait en France, en mai 1975, environ 7 000 entreprises de location gérant un parc de 110 000 véhicules et employant environ 40 000 personnes; le chiffre d'affaires de l'ensemble de ces entreprises atteignait environ 5,5 MM de F, et les investissements annuels environ 1,5 MM de F.

Des secteurs d'activité très variés ont recours à la location, par exemple les transports publics et les auxiliaires de transport, l'industrie pétrolière, l'industrie chimique, les industries agricoles et alimentaires, les industries du bâtiment et des matériaux de construction.

La part de la location de camions dans le secteur des transports a augmenté très rapidement depuis une dizaine d'années :

— le parc global en location est passé de 31 680 véhicules en 1967 à 107 000 véhicules en 1975;

— de 1963 à 1973, la part de la location dans la branche « transports terrestres de marchandises » (oléoducs non compris), qui comprend la S. N. C. F., la navigation intérieure, le transport routier public, les déménagements, la location, est passée de 5 à 10 %;

— le chiffre d'affaires réalisé en 1974 a atteint 5,5 MM de F contre 22 MM de F pour le transport routier public, et 20 MM de F pour la S. N. C. F.

L'organisation politico-administrative

La route est multiple, c'est ainsi que de nombreuses instances en traitent. Au niveau gouvernemental par exemple, de nombreux ministères interviennent :

— le ministère de l'Industrie pour la construction automobile et les carburants;

— le ministère de l'Équipement pour la construction et l'exploitation des routes nationales;

— le secrétariat d'État chargé des Transports auprès du ministère de l'Équipement pour la gestion du secteur des transports routiers;

— le ministère de l'Intérieur pour la voirie communale et départementale;

— le ministère de l'Économie et des Finances, notamment pour le budget.

Mais aussi, plus accessoirement, les ministères chargés de l'Environnement (insertion dans les sites), de l'Agriculture (voirie rurale et forestière), de la Justice (répression des contrevenants), de la Défense (gendarmerie), du Commerce et de l'Artisanat.

Cela montre la complexité des décisions, qui sont par ailleurs démultipliées plus que décentralisées aux échelons locaux : la construction des routes, ou du moins son encadrement, est assurée par les Directions départementales de l'Équipement (Services dits des « ponts et chaussées ») et parfois pour certaines grandes villes par les services techniques urbains (notamment à Paris) : leur rôle est central, car c'est un point de passage obligé pour le choix des projets et leur mise en œuvre. Elles travaillent aussi bien pour le compte de l'État que pour celui des collectivités locales communes et départements.

L'Administration des ponts et chaussées a la réputation d'être très structurée et de bien s'adapter au terrain. Il y a actuellement près de 120 000 agents au ministère de l'Équipement : leurs tâches s'étendent à l'urbanisme et à la construction de logements, mais une partie importante du personnel travaille néanmoins pour la route.

Bien entendu, chaque collectivité publique est également concernée :

— la commune pour la voirie communale (parfois subventionnée par l'État), mais aussi pour l'organisation de la circulation (le pouvoir de police des maires est bien connu);

— le département pour la voirie départementale, également subventionnée par l'État ou par la Région, mais également par l'organisation des transports routiers de voyageurs par l'intervention des Comités techniques des transports départementaux;

— la Région, qui répartit les crédits de catégorie II (dits d'intérêts régionaux) et finance dans certains cas (région d'Ile-de-France, Nord);

— le Parlement national, qui intervient notamment au niveau des plans et des budgets.

D'autres intervenants jouent un rôle important :

● Des *organismes officiels :*

— les syndicats patronaux du secteur routier, dont les principaux sont la FNTR (Fédération nationale des transporteurs routiers), très largement majoritaire, et l'UNOSTRA (qui regroupe plutôt le secteur coopératif et artisanal);

— les syndicats ouvriers; on doit signaler à ce sujet qu'en France, en dehors de la R. A. T. P., l'organisation du secteur (type d'activité, taille des entreprises) n'est pas favorable à l'existence de syndicats puissants (c'est le contraire qui se passe aux États-Unis); c'est sans doute une des raisons pour lesquelles les conditions de travail y sont encore assez dures (durée hebdomadaire souvent supérieure à 50 heures);

— l'Union routière, qui défend les intérêts des usagers de la route et des constructeurs de véhicules;

— la Prévention routière, le Touring Club de France, l'Automobile Club...

● Des *associations d'usagers* ou *de défense* se sont constituées ces dernières années en grand nombre et agissent actuellement très vigoureusement la plupart du temps, pour critiquer et contester les projets, mais parfois pour défendre une opération. Elles ont pour la plupart une base très locale, mais certaines se sont fédérées au niveau régional ou national.

Le financement du secteur

Il est intéressant, pour conclure, de donner un tableau publié annuellement par la Commission des comptes des transports de la nation et qui donne une partie des flux financiers intéressant le secteur en 1974 (*tableau* XVIII).

On voit donc que l'ensemble des dépenses directement faites par ou pour le fonctionnement du système routier s'élevait à environ 180 milliards de francs en 1974. Ce chiffre n'est pas directement comparable à la production

▼ *Tableau XVIII : dépenses occasionnées par la route, en France (en millions de francs).*

Tableau XVIII

Dépenses occasionnées par la route en France (en millions de francs)

Mise de la voirie à la disposition des usagers.	
Etat	
Fonctionnement	3 900
Investissement	4 700
Sociétés d'autoroutes	
Fonctionnement	300
Investissement	1 900
Collectivités locales	
Fonctionnement	3 100
Investissement	5 100
Total	
Fonctionnement	7 300
Investissement	11 700
Total général	19 000
Dépenses des utilisateurs de la voirie	
Automobiles	
Acquisition	28 000
Utilisation	53 000
Total	81 000
Entreprises de transports	
Transports de marchandises pour compte d'autrui	15 000
Transports de marchandises pour compte propre	38 000
Transports de voyageurs	3 600
Total	56 600

intérieure brute (1 200 milliards), mais il permet néanmoins de situer son importance.

Signalons également pour terminer l'importance des ressources fiscales de l'État perçues sur les usagers de la route : 24 milliards en 1974, dont une part importante vient des taxes sur les carburants (19 milliards) et des taxes différentielles sur les véhicules (1,6 milliard). Ce chiffre doit être comparé au budget global de l'État (300 milliards) et à ses dépenses sur la route (8,6 milliards).

Cette étude a brossé un panorama de ce qu'on peut appeler le système routier, c'est-à-dire l'ensemble des éléments qui concernent la circulation des véhicules automobiles; on a d'ailleurs vu que le système avait une telle dimension, une telle complexité que son rôle économique, politique, social dépasse largement le seul aspect du transport routier : sa place dans l'industrie, dans l'aménagement du territoire, dans les conditions de vie fait que toute modification qui le concerne a des conséquences multiples.

La route a eu pour effet la création d'activités diverses : par exemple, plusieurs sports lui sont directement liés; les plus connus sont le sport automobile avec ses formes variées (formule 1, rallyes) et le cyclisme (tour de France) : la notoriété des champions et des marques fait une publicité incontestable aux activités routières.

D'une façon plus générale, le système routier n'est qu'une partie d'un autre système plus global qui est celui des transports. Au lieu de pratiquer des politiques sectorielles, on détermine actuellement une politique globale des transports, qui prend en compte le devenir de chacun des secteurs. C'est le développement de ce que l'on peut appeler la complémentarité des divers modes, laquelle se situe d'abord sur le plan technique : nous n'en citerons ici que quelques exemples.

- Il est très souhaitable de concentrer les transports sur la technique la plus efficace : lorsqu'un trafic important existe sur une liaison, il est meilleur marché de concentrer le transport sur le chemin de fer mais d'assurer les transports terminaux par route; c'est le principe des transports mixtes qui prennent différentes formes : le conteneur en est la solution la plus élaborée qui vient d'ailleurs du transport maritime; la forme très rationnelle des « freigh liner trains » en Grande-Bretagne consiste à attribuer au rail les transports de conteneurs à longue distance alors que la répartition avant et après se fait par route. En France, le développement de cette technique se fait lentement mais sûrement : elle se heurte à de nombreuses difficultés, notamment commerciales, car le problème se pose de savoir qui est responsable du transport. Les formes moins complètes sont celles des remorques « Kangourous », dans lesquelles c'est la semi-remorque qui « monte » sur un wagon de chemin de fer, ou l'UFR, ou le « piggy bach » où c'est le camion entier qui est transporté par fer.

- Les trains-autos (couchettes ou non) transportent des voitures à 400, 500 ou 1 000 kilomètres et évitent ainsi au conducteur des trajets longs et monotones. Cette technique utilise d'ailleurs une formule tarifaire très novatrice : c'est la tarification bleu-blanc-rouge importée du Québec. Trois tarifs existent suivant qu'on se trouve en période creuse, moyenne ou de pointe. Une autre formule du même genre, et plus rationnelle du point de vue collectif, est celle de la location de véhicules routiers (auto ou bicyclette) aux gares terminales. Cette formule se heurte à des difficultés aussi bien organisationnelles que financières et sociologiques (la propriété de l'automobile est un aspect essentiel de la société dite de consommation). Des expériences « pionniers » en la matière ont échoué pour diverses raisons, comme à Montpellier ou à Amsterdam (Pays-Bas) où des voitures en self-service ont été mises à la disposition du public. Ces échecs ne sont sans doute pas définitifs. On verra probablement de telles tentatives se reproduire.

- En milieu urbain, la politique suivie en Région parisienne en matière de parcs de stationnement rentre dans ce cadre : des parcs bon marché sont installés à proximité immédiate des gares afin que les usagers dispersés dans la banlieue puissent néanmoins utiliser les infrastructures lourdes de transport en commun. De même, tout un réseau de parcs « deux-roues » est en cours de mise en place.

Une organisation globale rail-route-fer-eau plus rationnelle est un aspect plus politique de la question : par des mesures tarifaires, réglementaires, fiscales, les divers gouvernements tentent de rationaliser le système des transports en incitant ou en obligeant les usagers à utiliser les modes de transport les plus efficaces. Sans doute verra-t-on, dans un avenir plus ou moins lointain, une personnalisation des transports collectifs et une collectivisation des transports individuels permettant l'utilisation optimale de chacun d'eux : transports individuels pour la répartition et la diffusion des trafics, transports collectifs pour les parcours entre pôles de concentration des trafics.

▼ ***Grand prix de Monaco : le sport automobile, la notoriété de ses champions, les performances de ses voitures font une publicité incontestable aux activités routières.***

Fred Mayer - Magnum

BIBLIOGRAPHIE

DUCLOS D., *l'Automobile impensable,* Centre de sociologie urbaine, Paris, 1976 (marché 75 000 23 Ministère Équipement). - CHOPPY J., *Dictionnaire de l'industrie routière,* Eyrolles éd., Paris, 1975. - GUILLEMIN C., *le Prix de la route. Essai sur la tarification publique,* Economica éd., Paris, 1976. - HONDERMARCQ H., *Dimensionnement et construction des routes,* Presses universitaires de Bruxelles, Bruxelles, 2 vol., 1977. - JEUFFROY G., *Conception et construction des chaussées,* 2 tomes, coll. Cours de l'École nationale des ponts et chaussées, Eyrolles, Paris, 1976. - MAGNAN R., *l'Autoroute dans la ville,* C.R.U. éd., Paris, 1971. - MILLET M. et VEUVE A., *les Autoroutes,* coll. E.C.S., Eyrolles éd., Paris, 1975. - *Code de la Route,* 5 tomes, J.O., Paris. - D.R.C.R., *la Route en* 1975, Paris, 1976. - Fédération des usagers des transports et Paris-écologie, *Assez roulé comme ça : on réfléchit* (Éléments pour un contre-projet au plan de circulation de Paris), suivi du *Manifeste révolutionnaire,* par les Amis de la Terre, coll. Amis de la Terre, J.-J. Pauvert, Paris, 1977. - *L'Avenir de l'automobile,* Doc. Franç. éd., coll. Études de politique industrielle, Min. Industrie Recherche, Paris, 1976. - SETRA, div. routes autoroutes rase campagne, Études d'environnement des autoroutes de liaison et des aménagements routiers de même nature : éléments d'information et première approche méthodologique pour l'étude des effets des aménagements autoroutiers sur leur environnement immédiat, docum. prov., 2 fasc., coll. Guide Environnement Paysage, SETRA éd., Bagneux, 1975.

SYSTÈME DE TRANSPORT PAR AIR

L'avion est un moyen de transport récent, fruit d'une technologie particulièrement avancée, qui garde aux yeux des hommes un aspect fascinant et prestigieux. Cette fascination et ce prestige sont liés aux qualités objectives du transport par air, à savoir sa rapidité, les distances énormes qu'il permet de parcourir, la possibilité de franchir tous les obstacles naturels... Mais ils tiennent aussi à des caractéristiques plus subjectives : échapper à la pesanteur terrestre et se déplacer librement dans l'air comme l'oiseau sont des rêves que l'imagination de l'homme a toujours exprimés à travers les âges.

Le prestige du transport aérien tient aussi, et c'est regrettable, à l'inaccessibilité de ce moyen de transport, coûteux pour la majorité des individus. L'avion reste en effet le privilège des classes sociales les plus aisées, et la démocratisation du transport aérien, en dépit des gros progrès réalisés ces dernières années, reste un objectif inaccessible dans les conditions économiques actuelles : on estime ainsi que seuls 5 % des Français effectuent un voyage aérien au cours d'une année. Cet aspect élitiste du transport aérien permet aussi de comprendre la virulence des réactions que l'on peut enregistrer face aux inconvénients de ce moyen de transport. Pourquoi accepter des gênes, importantes certes, pour un gadget réservé à 5 % de la population ? Les autres moyens de transport entraînent des gênes aussi importantes, sinon aussi pénibles, mais elles sont mieux acceptées, car chacun a l'occasion d'utiliser ces moyens de transport et en ressent donc la nécessité.

Le transport aérien par rapport aux autres modes de transport

Le transport aérien n'échappe à la concurrence des autres modes de transport que sur des trajets intercontinentaux de longue distance. Le transport maritime a en effet pratiquement disparu sur les lignes (pour le transport de passagers) et ne subsiste principalement que sous la forme de voyages touristiques de luxe. Mais pour les distances moyennes (1 000 à 3 000 km) et surtout les courtes distances (moins de 1 000 km), l'avion est en concurrence avec la voiture et le train, moins rapides mais aussi moins coûteux. Pour certaines courtes liaisons de ville à ville, l'avion peut même n'offrir aucun gain de temps : le train à grande vitesse prévu entre Paris et Lyon permettra à ses utilisateurs de relier les deux villes en un temps sensiblement identique à celui que permet l'avion. Mais ce type de moyen de communication terrestre ne peut être mis en service que sur des liaisons à gros trafic, seules capables d'assurer la rentabilité d'un équipement lourd.

L'avion, par contre, n'a besoin que d'infrastructures minimales (des aéroports) de faible coût, et il est irremplaçable pour assurer des liaisons, même de quelques centaines de kilomètres, qui ne sont pas de gros axes de transport. L'avion est un moyen de désenclavement pour les régions d'accès difficile par les transports terrestres, et dont l'accès par les airs ne pose aucun problème.

L'avion reste, en dépit de la concurrence des transports terrestres, le moyen de transport indispensable des gens pressés sur toute étape de plus de 500 km.

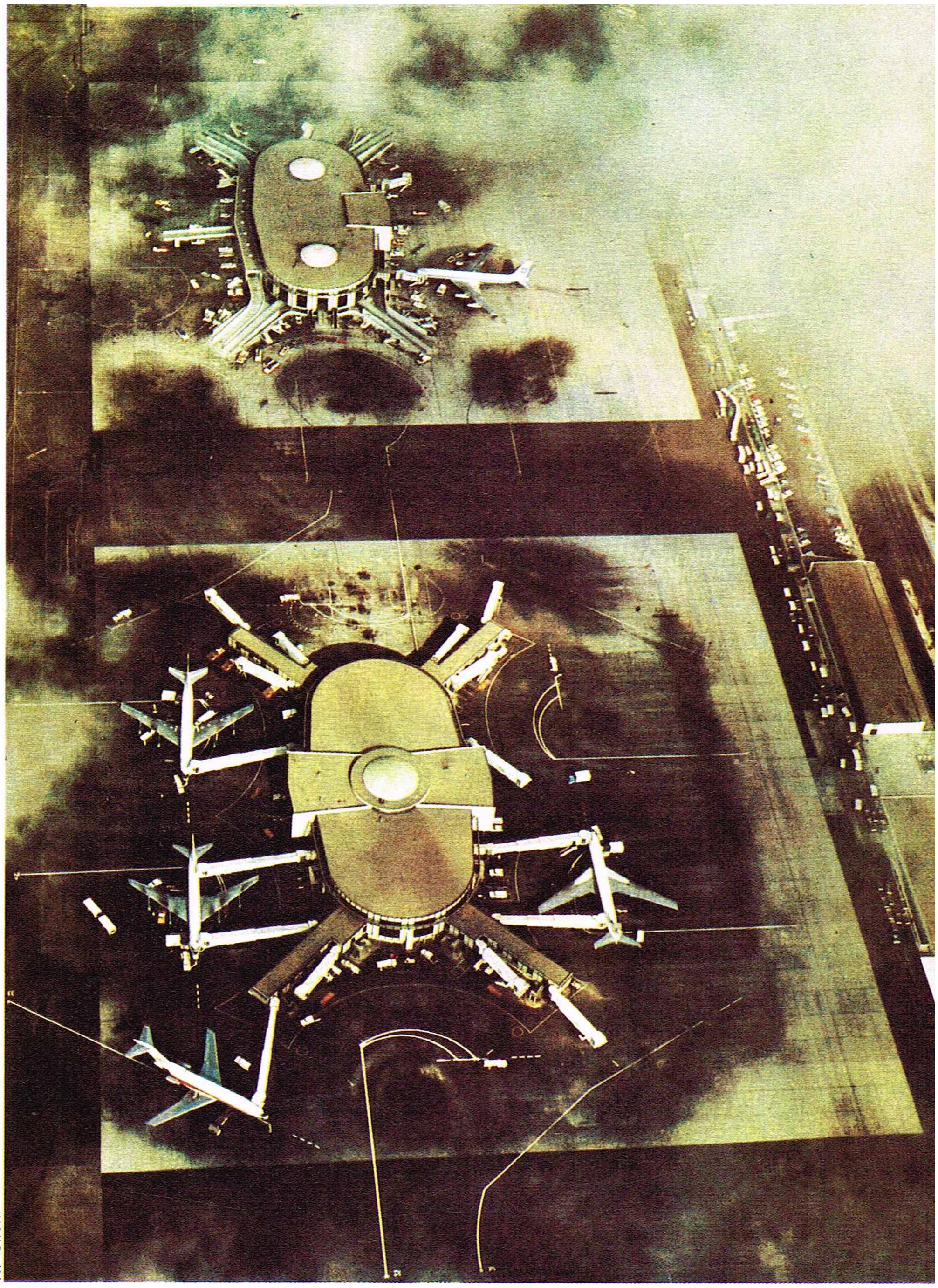

N. Cirani

▲ *Aires de stationnement des avions de l'aéroport de Los Angeles.*

Le fret aérien

Le développement du transport du fret par avion est important : la distribution de denrées périssables ou précieuses dans des régions très éloignées du lieu de production peut nécessiter le recours à un moyen de transport très rapide. Des avions cargos sont spécialement aménagés pour ne transporter que du fret. Et beaucoup d'avions gros porteurs sont mixtes, c'est-à-dire qu'ils peuvent emporter simultanément des passagers et des marchandises. Le marché du fret aérien reste cependant limité, et c'est le transport des personnes qui constitue la principale activité du transport aérien.

▼ *Avion DC9 pour le transport des marchandises. Le développement des transports aériens est une composante importante du problème des transports à l'échelle mondiale.*

I.G.D.A. - Tosi

L'aviation générale et le transport aérien commercial

Dans ce qui suit, il sera principalement question du transport aérien commercial. Mais l'aviation englobe aussi de nombreuses autres activités que l'on désigne par le terme d'aviation générale, par opposition à aviation commerciale.

L'aviation générale est mal connue en dépit de son importante activité. On distingue :

— l'aviation « légère » : vol à voile, parachutisme, vol à moteur, au sein des aéro-clubs et des écoles de pilotage ;

— l'aviation de voyage, sur avions privés ;

— le travail aérien, c'est-à-dire l'utilisation des aéronefs à des fins de travaux agricoles, de travaux publics, etc.

L'aviation générale regroupe donc d'autres activités que des activités sportives ou de formation de pilotes. L'aviation de voyage privé, et notamment l'aviation d'affaires, prend de plus en plus d'ampleur. Les avions utilisés n'ont généralement que quelques sièges, et il est évident que les contraintes qu'ils entraînent sont d'une tout autre nature que celles de l'aviation de transport commercial.

Les divers aspects du système de transport aérien

La description technique du système du transport aérien se limitera, dans notre exposé, à l'étude de deux sous-systèmes : le système aéroportuaire et le système de navigation aérienne, qui permettent d'assurer le fonctionnement de l'ensemble du transport aérien.

Nous ne parlerons pas des aspects techniques de la construction aéronautique, à savoir le fonctionnement des moteurs, l'aérodynamique, la mécanique du vol, la construction des cellules, qui sont déjà connus du lecteur. En ce qui concerne l'industrie aéronautique, nous nous contenterons de donner, au *tableau* I, la production des principaux types d'avions, et, au *tableau* II, la liste des réacteurs en service au début de 1977. Nous ne développerons pas non plus le fonctionnement des compagnies aériennes qui assurent l'exploitation et la commercialisation de leur flotte d'avions ; il sera résumé au *tableau* III.

Dans une première partie, nous décrirons les infrastructures au sol nécessaires au transport aérien, c'est-à-dire les aéroports. Tout le système de navigation aérienne sera décrit dans une deuxième partie.

Le transport par air se caractérise par l'absence d'infrastructure linéaire, et les aéronefs en vol sont libres de se déplacer dans les trois dimensions de l'espace. Mais pour se diriger, les aéronefs ont besoin d'aides à la navigation. En outre, dès que la circulation aérienne devient dense, il est nécessaire de contrôler le trafic à partir du sol de façon à assurer la sécurité des aéronefs et la fluidité du trafic. Il faut même, dans certaines zones où se posent des problèmes d'encombrement de l'espace, passer à un véritable guidage des aéronefs.

Cette description technique du système de transport aérien laisse volontairement de côté un aspect très important et original du transport aérien : son organisation internationale. Il est cependant utile de mentionner l'existence de l'Organisation de l'aviation civile internationale, dont le siège est à Montréal, et qui est une agence de l'O. N. U. En effet, la principale action de l'OACI se situe au niveau technique : la normalisation des systèmes d'aviation civile à tous les niveaux (télécommunications, aides à la navigation aérienne, exploitation des avions, banalisation des équipements) est indispensable à la bonne marche du transport aérien.

Aéroports

Délimitation du système aéroportuaire

Définition d'un aéroport

Tout mode de transport a besoin d'une infrastructure, c'est-à-dire d'équipements permettant le déplacement des véhicules. Pour le transport aérien, l'espace aérien constitue l'essentiel de cette « infrastructure », comme les océans constituent celle du transport maritime. Mais, aux extrémités du parcours, le transport aérien nécessite des infrastructures terminales : les aérodromes ou aéroports.

L'aérodrome est une plate-forme qui permet le mouvement des aéronefs et qui est équipée des installations de sécurité, d'avitaillement et d'entretien qui sont nécessaires à cette fonction.

▼ *Tableau I : principaux types d'avions en service à travers le monde (début 1977). Figure 1 : le système aéroportuaire.*

**Tableau I
Principaux types d'avions
en service à travers le monde (début 1977)**

Capacité (nombre de passagers)	Types d'avions	Constructeurs	Production
Long-courriers			
350-500	B 747	Boeing	290
270-320	DC 10-30 et 40	Douglas	120
300	L 1011	Lockheed	140
140-180	B 707	Boeing	910
190-210	DC 8	Douglas	550
180	IL 62	Ilyouchine	ND*
150	VC 10	BAC	50
	IL 18	Ilyouchine	ND
Court et moyen-courriers			
270-330	DC 10-10	Douglas	100
350	IL 86	Ilyouchine	ND
250-300	A 300 B 2/4 (Airbus)	Coopération européenne	23
150	B 727	Boeing	1 240
	Tu 154	Tupolev	ND
110-160	Trident	Hawker Siddeley	100
150	Mercure	Dassault	10
115-130	B 737	Boeing	480
90-120	Convair	Convair	100
115	DC 9	Douglas	850
120	Yak 42	Yakolev	ND
70-120	Caravelle III, XII	Sud Aviation	280
90-120	BAC 111	BAC	220
80	F 28	Fokker	100
60-75	Tu 104, 124, 134	Tupolev	ND

*ND : non disponibles

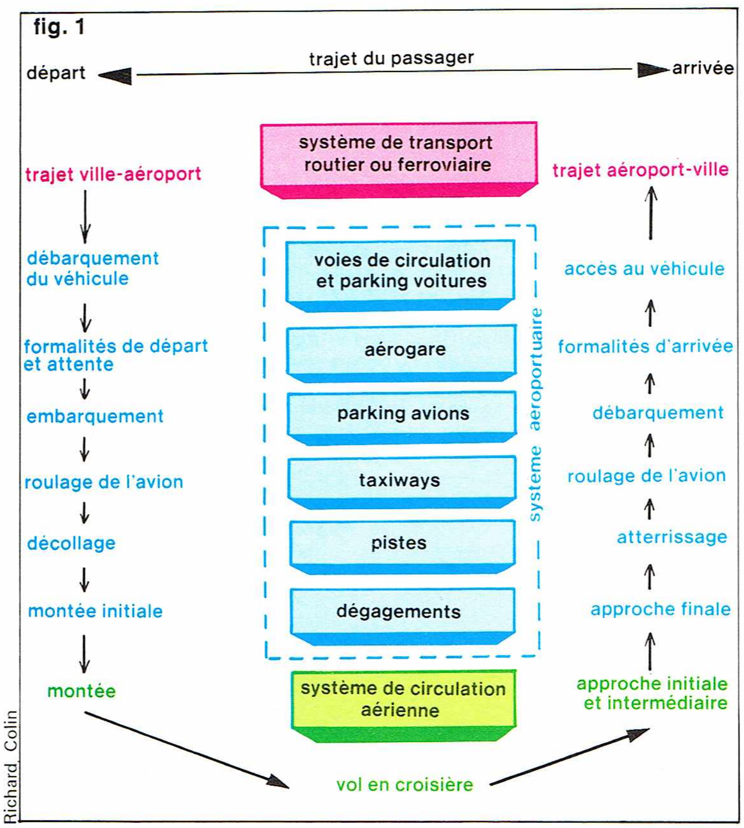

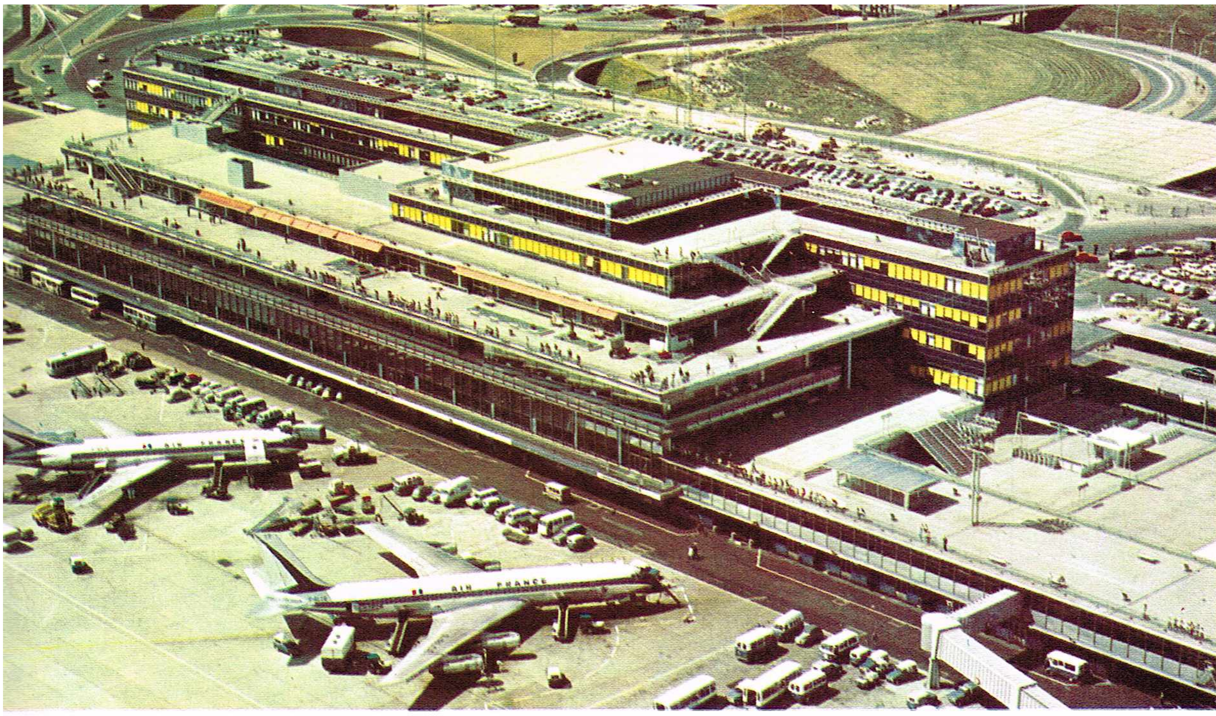

Beaugard - Cetri - Titus

◀ *Zone de stationnement de l'aérogare d'Orly sud.*

▼ *Tableau II : principaux types de réacteurs en service pour le transport aérien mondial (début 1977). Tableau III : trafic des principales compagnies aériennes mondiales en 1975.*

L'aérodrome est appelé aéroport s'il est spécialement équipé pour le transport aérien commercial.

Le système aéroportuaire

La *figure* 1 retrace le trajet effectué par un usager du transport aérien et permet de définir les principaux éléments du système aéroportuaire.

L'aéroport a donc pour mission de transformer un flux de passagers (ou de fret) entrant en un flux d'avions sortant, dans le cas d'un décollage, et de faire la transformation inverse dans le cas d'un atterrissage.

Description d'un aéroport

Les principaux éléments constitutifs d'un aéroport sont les suivants :

- les **installations terminales** qui sont groupées autour de l'aérogare de passagers ou de la gare de fret et qui comprennent les voies de circulation et les parkings de voitures, les gares et les aires de stationnement des avions ;
- l'**aire de manœuvre** composée de voies de circulation pour les avions et de pistes d'envol ;
- les **autres installations techniques** destinées à assurer l'entretien et la révision des avions et leur sécurité (sécurité-incendie, balisage, radionavigation, station météorologique) ;
- les **dégagements** réglementaires des abords de l'aéroport qui imposent la suppression et le balisage des obstacles susceptibles de gêner la circulation des aéronefs en vol.

Caractéristiques de l'aire de manœuvre

L'élément le plus important d'un aéroport est, bien entendu, la piste d'envol des avions, en fonction de laquelle sont implantés tous les autres éléments de l'aéroport et, en particulier, les voies de circulation, les aires de stationnement et les gares.

La direction de la piste

La première caractéristique d'une piste est sa direction, qui est un facteur essentiel pour la bonne insertion de l'aéroport dans son environnement.

La direction de la piste est choisie en fonction de plusieurs critères :

La **configuration du terrain :** l'avion, pendant les phases d'atterrissage et de décollage, doit s'approcher ou s'éloigner de la piste dans l'axe de celle-ci pour éviter toute manœuvre délicate de virage à proximité du sol. Il est donc nécessaire que cet axe de piste soit absolument dégagé de tout obstacle gênant, colline ou bâtiment.

Les **conditions météorologiques,** et plus particulièrement le vent : les avions ne peuvent pas atterrir ou décoller avec un vent traversier trop fort. Le vent traversier est la composante du vent perpendiculaire à la direction d'envol. Les quadriréacteurs lourds actuels tolèrent des composantes transversales de vent de l'ordre de 55 km/h. Mais les avions plus légers y sont

Tableau II
Principaux types de réacteurs en service pour le transport aérien mondial (début 1977)

Poussée au décollage	Types	Constructeurs	Exemplaires en service dans les compagnies	Principales utilisations
20 à 24 t	JT 9	Pratt et Whitney	1 200	B 747/DC 10
18 à 25 t	RB 211	Rolls Royce	410	B 747/L 1011
	CF 6	General Electric	650	B 747/DC 10/A 300
9 à 13 t	CFM 56	SNECMA/General E.	en développement	–
	JT 10 D	Pratt et Whitney	–	–
	D 30 KP	Soloviev	ND	IL/62/IL 76/Tu 154 A
	NK 8	Kuznotsov	ND	IL/62/Tu 154
8 à 10 t	JT 4	Pratt et Whitney	700	B 707/DC 8
	JT 3	Pratt et Whitney	4 500	B 707/DC 8
	CONWAY	Rolls Royce	360	VC 10/B 707/DC 8
	DC 20	Soloviev	ND	Tu 124
3 à 7 t	JT 8	Pratt et Whitney	8 000	B 727/B 737/DC 9/ Caravelle/Mercure
	SPEY	Rolls Royce	720	BAC 111/F 28/HS 121
	AVON	Rolls Royce	540	Caravelle/Comet
	M 45 H	Rolls Royce/SNECMA	20	VFW 614
	D 36	Lotarev	ND	Yak 42

B : Boeing ; L : Lockheed ; Il : Ilyouchine ; Tu : Tupolev ; F : Fokker ; HS : Hawker Siddeley.

Tableau III
Trafic(1) des principales compagnies aériennes mondiales en 1975

Compagnies	Nationalité	Passagers (en millions)	Passagers-kilomètres transportés (en milliards)	Tonnes-kilomètres transportées (en millions)	Total TKT (2)
1: United Airlines	Etats-Unis	29,0	45,4	1 048	5 134
2: Pan American Airways	Etats-Unis	7,3	29,3	1 642	4 283
3: Transworld Airlines	Etats-Unis	15,8	36,2	904	4 161
4: American Airlines	Etats-Unis	20,7	35,5	894	4 089
5: British Airways	Grande-Bretagne	12,7	27,1	796	3 235
6: Eastern Airlines	Etats-Unis	27,7	29,4	422	3 071
8: Delta Airlines	Etats-Unis	26,5	26,5	366	2 751
8: Japan Airlines	Japon	8,9	19,3	861	2 599
9: Air France	France	8,0	17,9	829	2 434
10: Lufthansa	R.F.A.	9,4	13,9	1 055	2 302
11: Northwest Airlines	Etats-Unis	8,9	16,1	733	2 182
12: Air Canada	Canada	10,4	17,5	463	2 038
13: K.L.M.	Pays-Bas	3,1	11,2	705	1 717
14: Flying Tiger	Etats-Unis	0,1	0,9	1 304	1 385
15: Alitalia	Italie	5,8	9,9	416	1 307
32: U.T.A.	France	0,6	3,4	254	577
64: Air Inter	France	4,5	2,3	7	198

(1) U.R.S.S. non comprise - Passagers transportés sur vols réguliers seulement.
(2) 10 passagers équivalent à 1 tonne.

beaucoup plus sensibles, et un vent traversier de 30 km/h est très dangereux pour la plupart d'entre eux et leur interdit donc toute manœuvre. On choisit donc une direction de piste minimisant l'occurrence des vents défavorables, de façon que l'utilisation de la piste soit maximale et que le trafic aérien soit le moins souvent perturbé. Si l'on désire que l'aéroport soit utilisable quelles que soient la direction et la force du vent, il faudra aménager plusieurs pistes de directions différentes de façon qu'il y ait presque toujours une direction d'envol pour laquelle la composante transversale du vent ne dépasse pas les limites acceptables.

L'**urbanisation** : le survol de zones habitées situées à proximité de l'axe de la piste peut entraîner des nuisances excessives pour les riverains de l'aéroport, notamment en ce qui concerne le bruit.

La piste

La piste est une aire rectangulaire aménagée afin de servir au roulage des avions au décollage et à l'atterrissage, son axe longitudinal étant confondu avec une direction d'envol.

Sur les aérodromes d'une certaine importance, la piste est dotée d'une chaussée lui permettant de supporter les charges des appareils les plus contraignants fréquentant l'aéroport.

Les dimensions de la piste sont choisies en fonction du type d'appareil qui doit desservir l'aéroport.

Longueur de piste

La longueur de piste nécessaire à chaque appareil est définie par les procédures opérationnelles de décollage et d'atterrissage qui sont appliquées.

● *Procédures opérationnelles au décollage*. La longueur de piste nécessaire au décollage des avions doit évidemment tenir compte, non d'un décollage normal, mais des procédures appliquées en cas d'incident au cours de l'accélération de l'appareil. Malgré l'excellente fiabilité des moteurs, l'incident le plus pénalisant pris en considération est la panne d'un moteur. La longueur de piste disponible doit permettre au pilote d'éviter tout accident.

La procédure de décollage est la suivante : l'avion étant situé à une extrémité de la piste, le pilote entreprend le décollage. Si un moteur tombe en panne au début de l'accélération, le pilote doit aussitôt « couper les gaz » et freiner l'avion pour qu'il puisse s'immobiliser sur la longueur de piste restante. Cette procédure est appelée accélération-arrêt. Mais si la panne est décelée par le pilote lorsque la vitesse de l'avion est déjà grande, la longueur de piste encore nécessaire pour décoller avec un moteur en panne sera inférieure à celle nécessaire à l'accélération-arrêt. L'exploitant de l'avion doit donc définir une vitesse critique V_1, appelée vitesse de décision, telle que, si la panne est décelée avant que la vitesse V_1 soit atteinte, le pilote procède à une accélération-arrêt, et si la panne est décelée quand la vitesse acquise est supérieure à V_1, il poursuive le décollage avec un moteur en panne (*fig.* 2).

On choisit généralement V_1 de sorte que si la panne survient quand l'avion a cette vitesse, la distance d'accélération-arrêt et la distance de décollage soient égales. La distance de décollage correspond à la distance nécessaire à l'avion pour être en vol à 10,70 m du sol (35 pieds). Elle est donc différente de la distance de roulage au sol. La procédure de décollage, une fois la vitesse de décision V_1 dépassée, fait intervenir la vitesse de cabrage (V_r) où le pilote cabre l'avion pour soulager le train avant, puis la vitesse de décollage (V_{lof}) où l'avion quitte le sol, et la vitesse de montée initiale (V_2) que l'avion doit au moins avoir atteinte à 10,70 m du sol pour poursuivre une montée normale. La détermination de ces différentes vitesses est propre à chaque type d'avion et peut varier d'une compagnie à l'autre pour le même avion.

Cette procédure opérationnelle étant définie, la longueur minimale de piste nécessaire au décollage d'un avion est alors égale à la distance de décollage avec un moteur en panne (ou à la distance accélération-arrêt). Cette longueur de piste doit de plus être supérieure à 1,15 fois la distance de décollage normal sans panne, par mesure de sécurité.

La longueur de piste dépend naturellement du poids de l'avion : une piste trop courte pour être utilisée par un avion à son poids maximal peut très bien servir au décollage de cet avion allégé, soit qu'il n'emporte pas une charge marchande maximale, soit que les soutes de carburant n'aient pas été entièrement remplies.

On voit que la partie extrême de la piste ne sera utilisée que très rarement pour des manœuvres d'accélération-arrêt ou des décollages avec un moteur en panne, et qu'elle ne sera que survolée en temps normal. Par souci d'économie, il est possible de la construire avec une moindre résistance, et elle constituera alors un prolongement occasionnellement roulable (POR). On peut même disposer, en bout de piste normale, d'un prolongement simplement dégagé, et qui n'est destiné qu'à être survolé. L'existence de tels prolongements (aux deux extrémités de la piste) permet de définir différemment la vitesse de décision et d'augmenter les possibilités opérationnelles de la piste.

● *Procédure opérationnelle à l'atterrissage*. La distance nécessaire à l'atterrissage est égale à la distance nécessaire à l'avion pour s'arrêter depuis le point survolé à une hauteur de 15 m, divisée par 0,6 pour tenir compte de l'imprécision de l'atterrissage. Actuellement, cette distance est en général inférieure à la distance nécessaire au décollage, et c'est donc cette dernière qui définit la longueur de piste nécessaire à un type d'avion (*fig.* 3).

● *Corrections de longueur de piste*. Lorsque l'on désire construire une piste, on choisit une longueur correspondant aux besoins de l'avion le plus pénalisant destiné à utiliser l'aérodrome, avec sa charge marchande maximale. Des corrections doivent alors intervenir pour tenir compte des caractéristiques du site, à savoir :

▼ *En haut, figure 2 : la distance de décollage d'un avion correspond à la distance nécessaire à l'avion pour être en vol à 10,70 m du sol (35 pieds). Au milieu, figure 3 : la distance d'atterrissage est égale à la distance nécessaire à l'avion pour s'arrêter depuis le point survolé à une hauteur de 15 m; elle est en général inférieure à la distance de décollage. En bas, avion au décollage.*

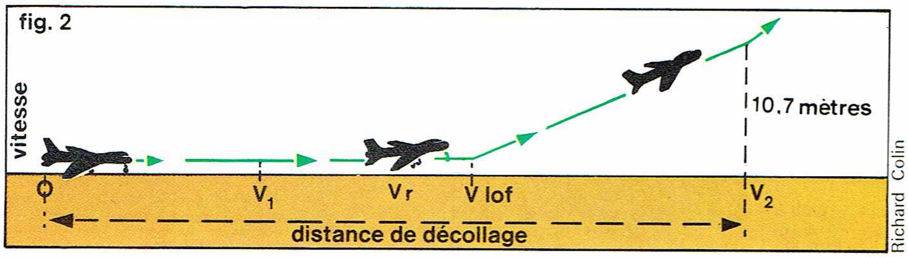

Richard Colin

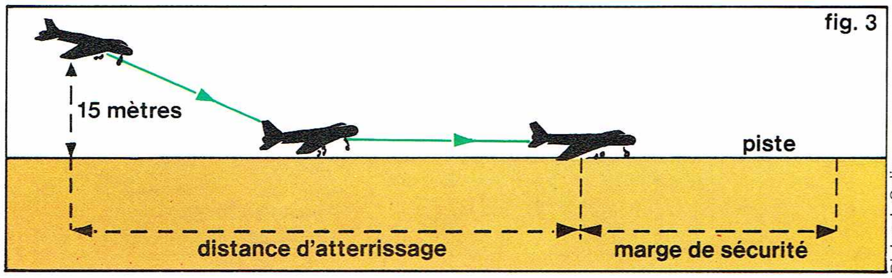

Richard Colin

De Andrade - Magnum

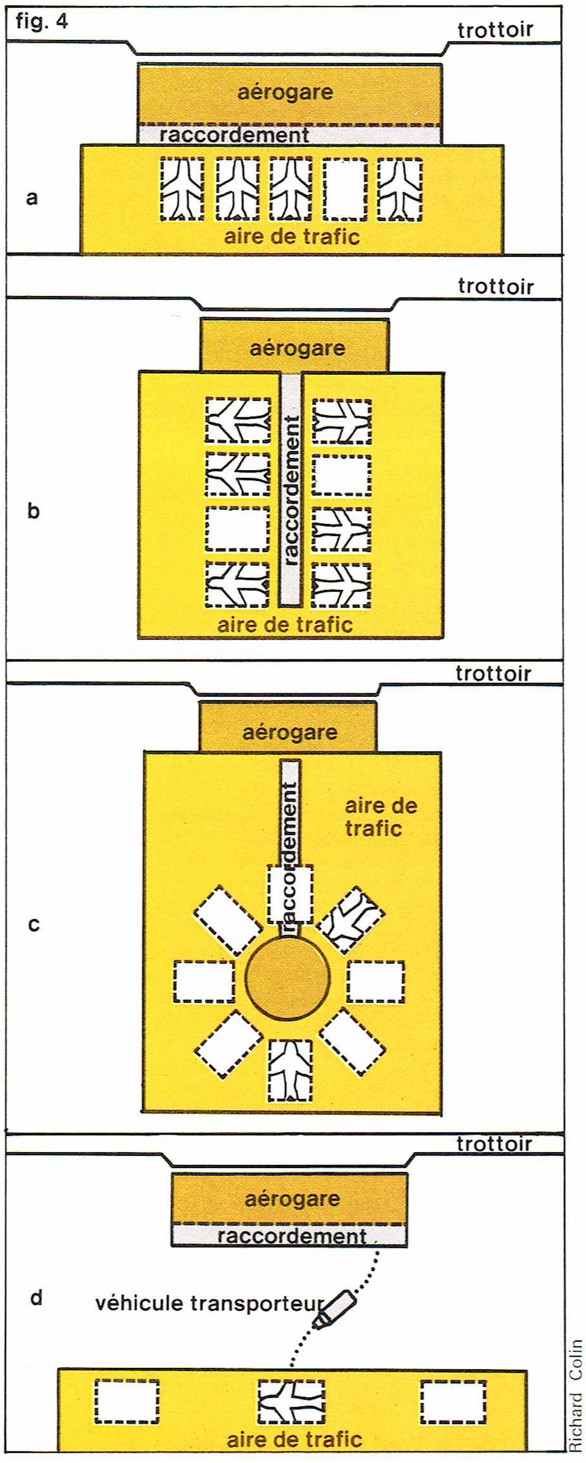

◀A gauche, figure 4 diverses dispositions des aires de stationnement : a, linéaire; b, avec « jetée »; c, avec « satellites »; d, avec véhicules pour transporter les passagers de l'aérogare à l'avion. A droite, aéroport de Roissy-en-France : vue générale.

— l'altitude de l'aérodrome qui diminue la puissance des moteurs au décollage et augmente les distances de décollage;

— la température moyenne sur le site, car la chaleur modifie les performances des moteurs;

— la pente moyenne de la piste : si la piste est en légère montée, la distance de décollage sera allongée.

Largeur des pistes

Elle dépend de la nature des trafics. Elle est de l'ordre de 40 à 60 m pour un aéroport important.

Les bandes d'envol

La bande d'envol est une aire rectangulaire dégagée encadrant la piste et destinée à réduire les risques de dommages auxquels est exposé un avion sortant accidentellement de la piste et à améliorer la protection des avions qui la survolent à l'atterrissage et au décollage.

Les installations terminales

Leur capacité dépend de la conception géométrique retenue pour les aires de stationnement des avions et pour l'aménagement de l'aérogare.

L'aire de stationnement avion

Elle doit être adaptée au trafic, tant par sa nature (un avion gros porteur du type Boeing 747 nécessite des installations différentes de celles nécessaires à des avions moins encombrants) que par sa densité : nombre d'avions présents simultanément sur le parking.

De nombreuses dispositions géométriques différentes ont été choisies sur les grands aéroports à travers le monde, sans qu'aucune puisse être retenue comme la plus efficace. On peut décrire quatre principaux types de dispositions de l'aire de stationnement avion qui sont représentées sur les schémas de la *figure* 4 :

★ La disposition linéaire n'est adaptée que pour les aéroports peu importants. Le nombre d'avions pouvant accéder directement à l'aérogare est en effet très limité par la taille de celle-ci.

★ La disposition avec jetées permet de pallier cet inconvénient mais augmente la distance à parcourir par le passager dans l'aérogare. (Par exemple, l'aéroport de Chicago-O'Hare, le premier aéroport mondial; l'aérogare d'Orly-Ouest.)

★ La disposition avec satellites (par exemple, l'aérogare n° 1 de Roissy-Charles-de-Gaulle) a l'avantage de permettre une bonne densité de l'aire de stationnement tout en laissant aux avions la possibilité de manœuvrer par eux-mêmes.

★ La dernière disposition a recours à l'utilisation de véhicules pour transporter les passagers de l'aérogare à l'avion. L'aire de stationnement peut alors être très étendue, et le nombre de postes de stationnement n'est pas limité par la nécessité d'être au contact des bâtiments de l'aérogare. Mais l'inconvénient est la rupture de charge supplémentaire entraînée par l'utilisation d'un véhicule de transbordement. Celui-ci est souvent un simple autobus, mais des véhicules élévateurs spéciaux ont été réalisés pour permettre aux passagers de passer de l'aérogare à l'avion sans avoir à changer de niveau (aéroports de Washington-Dulles et Montréal-Mirabel).

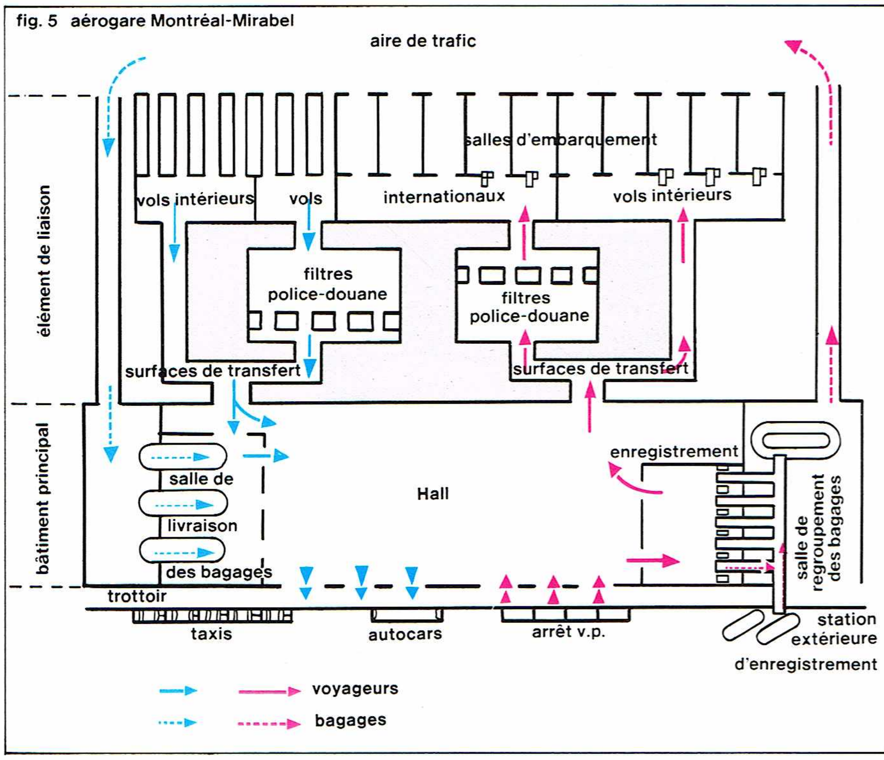

Richard Colin

▲ *Figure 5 : plan type d'aérogare schématisant la circulation des passagers.*

▼ *Figure 6 : circulation des avions au sol. Le nombre et la disposition des voies dépendent du trafic de l'aéroport.* a, *faible trafic ;* b, *trafic moyen ;* c, *fort trafic.*

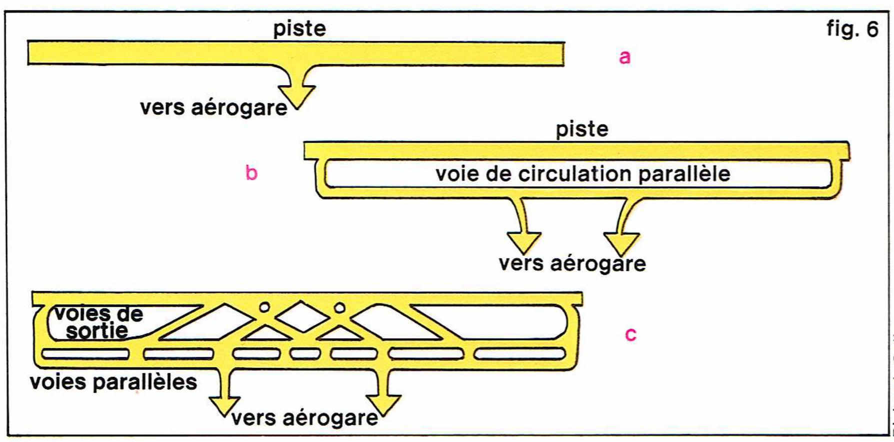

Richard Colin

L'aérogare

La fonction principale de l'aérogare est le traitement des passagers aériens. Mais elle a aussi d'autres fonctions annexes comme l'accueil des visiteurs et la fonction commerciale (implantation de commerces, en particulier sur le trajet du passager, pour l'inciter à consommer).

Du strict point de vue aéronautique, l'aérogare doit être aménagée pour que les flux de passagers s'écoulent de la façon la plus régulière. Il est donc nécessaire pour les aéroports à gros trafics d'éviter le croisement du flux des passagers au départ et de celui des passagers à l'arrivée. Cette séparation peut se faire verticalement en affectant spécialement un niveau de l'aérogare au circuit départ, et un autre niveau au circuit arrivée (Roissy). La séparation peut aussi se faire latéralement comme sur la *figure* 5 (Montréal-Mirabel).

Le plan des aérogares dépend essentiellement de l'emplacement des postes de stationnement des avions. Les dispositions avec « jetées » ou « satellites » entraînent la construction de bâtiments spéciaux joignant le corps principal de l'aérogare aux salles d'embarquement.

Quand le poste de stationnement de l'avion est contigu aux bâtiments, le transbordement des passagers s'effectue de plus en plus par des passerelles télescopiques, dont une extrémité est solidaire de la salle d'embarquement, et dont l'autre extrémité est mobile et peut se positionner juste en face des portes de l'avion. Les passagers n'ont alors aucun trajet à effectuer à l'extérieur.

Circulation des avions

Circulation au sol

La circulation des avions au sol s'effectue sur les voies de circulation (« taxiways ») spécialement aménagées qui permettent aux avions de gagner l'aire de stationnement aux abords de l'aérogare.

Disposition des voies de circulation

Le nombre et la disposition des voies de circulation dépendent de l'importance du trafic de l'aéroport (*fig.* 6). Pour un aéroport à faible trafic, une seule voie entre la piste et l'aire de stationnement est suffisante. Les avions doivent alors remonter la moitié de la piste pour se positionner à l'extrémité et décoller. Si le trafic est plus dense, une voie de circulation parallèle à la piste d'envol permet aux avions de venir se positionner en bout de piste pour décoller, sans empêcher d'autres atterrissages ou décollages.

Sur un aéroport à très fort trafic, pour limiter au maximum le temps d'occupation de la piste par un avion qui décolle ou atterrit, les avions peuvent utiliser des sorties de piste rapides. Celles-ci présentent de grands rayons de courbure qui permettent aux avions de les emprunter à bonne vitesse (100 km/h) et donc de libérer la piste plus rapidement que s'ils devaient freiner pour en sortir à très faible vitesse par un virage serré à angle droit. Le réseau des voies de circulation devient en fait fort compliqué sur les gros aéroports qui sont dotés de plusieurs pistes d'envol et de plusieurs aérogares.

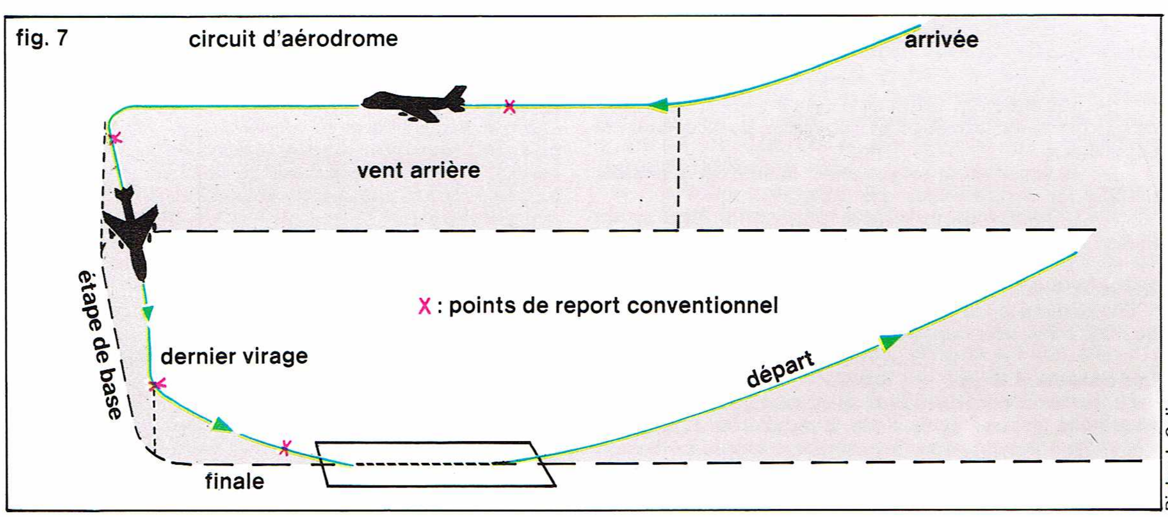

Richard Colin

▶ *Figure 7 ; circuit d'aérodrome : tous les avions en vol à vue doivent respecter un circuit défini sur le plan international.*

Contrôle de la circulation au sol

Dès que le trafic a une certaine importance, la circulation au sol des avions est assurée par la tour de contrôle. Tout mouvement d'avion est alors subordonné aux consignes données par les contrôleurs qui ont la charge d'assurer la régularité du trafic d'avions et d'empêcher toute collision.

Le sens d'utilisation de la piste est déterminé en fonction du vent, les atterrissages et décollages devant avoir lieu dans la direction opposée à celle du vent. Par vent presque nul, on choisit la direction présentant le plus grand avantage pour le réseau de circulation aérienne.

Sur les aéroports disposant de plusieurs pistes, deux d'entre elles sont souvent utilisées simultanément, l'une étant réservée aux décollages et l'autre aux atterrissages. Le débit de l'aéroport est ainsi amélioré, surtout si les deux pistes sont indépendantes, c'est-à-dire parallèles et assez éloignées l'une de l'autre.

Le circuit d'aérodrome

Le cheminement des avions en vol à vue aux abords de l'aérodrome doit respecter le circuit d'aérodrome défini sur le plan international de façon que tous les avions évoluent de la même manière. Le circuit type est une trajectoire décrite à une distance moyenne de 1 500 m des limites de piste, sur laquelle des points de report conventionnels ont été fixés et où les autorisations du contrôle d'aérodrome sont délivrées (*fig.* 7).

Vol aux instruments

La plupart des vols commerciaux n'utilisent cependant pas cette procédure de vol à vue, mais suivent des procédures d'approche et d'atterrissage aux instruments en se servant d'aides radio-électriques à la navigation.

Les aides radio-électriques à l'approche et à l'atterrissage

- L'*ILS* (Instrument Landing System) est le système le plus répandu d'aide non visuelle à l'approche et à l'atterrissage. Il est constitué d'émetteurs au sol qui définissent dans l'espace deux plans sécants par rapport auxquels l'avion peut se positionner :

— un plan vertical contenant l'axe de piste est défini par un radiophare d'alignement de piste VHF *(Localizer)* et sert au guidage en direction ;

— un plan de descente incliné à 3° (réglable entre 2° et 4°) par rapport à l'horizontale est défini par un radiophare d'alignement de descente UHF (Glide) et sert au guidage en site.

L'intersection du plan de descente et du plan vertical définit la trajectoire de descente. Des repères de distance du seuil de piste sont constitués de trois radiobornes VHF (Markers).

Le radiophare d'alignement de piste est un émetteur VHF transmettant une fréquence porteuse modulée simultanément en amplitude par les deux signaux 90 et 150 Hz de façon que les taux de modulation pour ces deux fréquences soient fonction de l'azimut et que la différence de taux de modulation (DDM) soit proportionnelle à l'écart angulaire à l'intérieur du secteur d'alignement de piste. Le radiophare d'alignement de pente est un émetteur UHF transmettant une fréquence porteuse modulée en amplitude à 90 et 150 Hz dont les taux de modulation sont fonction de l'angle de site. La DDM est proportionnelle à l'écart en site à son voisinage.

A bord, les récepteurs mesurent les différences des taux de modulation proportionnelles à l'écart en azimut et à l'écart en site. Un indicateur de déviation, du type indicateur à aiguilles croisées, fournit l'écart en azimut en déviant l'aiguille verticale, et l'écart en site par l'aiguille horizontale.

Les radiobornes sont des émetteurs VHF à diagramme de rayonnement en éventail très directif à la verticale, destinés à marquer le passage de l'avion à la distance du seuil de piste d'environ 7 300 m (OM ou Outer Marker), 1 050 m (MM ou Middle Marker) et 75 m (IM ou Inner Marker). A bord, ces passages sont matérialisés par l'allumage de voyants caractéristiques : bleu pour OM, orange pour MM et blanc pour IM.

- Le *MLS* (Microwave Landing System) est le système de guidage à l'atterrissage qui doit succéder à l'ILS au début des années 80. Il devrait permettre d'augmenter la cadence des atterrissages grâce à une meilleure fiabilité et à l'utilisation de trajectoires multiples courbes ou à facettes.

L'atterrissage tous temps

Les possibilités offertes par les aides radio-électriques à l'approche et à l'atterrissage sont particulièrement intéressantes lorsque les conditions météorologiques rendent le vol à vue impossible. On doit alors procéder à des atterrissages tous temps. Si l'ILS dont est doté le terrain et les équipements de bord (récepteur ILS, pilote automatique) ont une fiabilité suffisante, il est possible, bien que cela ne soit pas encore autorisé pour des vols commerciaux, de faire des atterrissages par visibilité absolument nulle.

Actuellement, une visibilité minimale est requise pour ce type d'atterrissage : on estime en effet qu'aux tout derniers instants précédant l'atterrissage, le pilote doit voir la piste d'atterrissage pour être capable de reprendre le contrôle de l'avion en cas de défaillance technique quelconque et avant que l'avion touche le sol.

Les atterrissages tous temps permettent d'améliorer la régularité du transport aérien sur les aéroports où apparaissent souvent de mauvaises conditions météorologiques (brouillard).

La dénébulation

En cas de brouillard très dense, il est possible d'améliorer artificiellement la visibilité à l'atterrissage de façon que la sécurité des avions soit assurée ; il s'agit d'atteindre la visibilité minimale dont il a été question ci-dessus. L'aéroport de Paris a ainsi mis en place à Roissy et à Orly le système de dénébulation Turboclair, qui fonctionne à la demande des compagnies aériennes. Le principe de dénébulation est le suivant : des turboréacteurs sont ancrés sur les bords de la piste à proximité du point d'impact à l'atterrissage ; leur mise en service provoque un réchauffement de l'air environnant qui suffit à dissiper localement le brouillard et permet d'améliorer la visibilité pour l'atterrissage.

B. Langevin - Parimage

▲ *La fonction principale de l'aérogare est le traitement des passagers aériens. Elle a aussi d'autres fonctions annexes comme l'accueil des visiteurs et la fonction commerciale. Ici, à l'aéroport de Roissy-en-France, tapis roulant donnant accès aux salles d'embarquement.*

Balisages lumineux

De nuit ou par mauvaise visibilité, le pilote a besoin d'aides visuelles lumineuses pour mieux distinguer les limites de la piste et des voies de circulation. Ces aides lumineuses sont particulièrement développées pour aider l'atterrissage : outre le balisage de la piste elle-même, des lignes d'approche permettent au pilote de visualiser nettement dans l'obscurité le seuil de la piste et le point d'atterrissage qu'il doit viser.

Indicateur visuel d'angle d'approche

Les pistes non dotées d'ILS peuvent être équipées d'un indicateur visuel d'angle d'approche, le VASIS (Visual Approach Slope Indicator System), qui fournit au pilote la matérialisation visuelle d'un plan de descente. Ce système est constitué de feux, disposés de part et d'autre de la piste. Le faisceau lumineux émis par chaque feu comporte une partie supérieure blanche et une partie inférieure rouge, séparées par un étroit faisceau de couleur rose qui matérialise le plan de descente que le pilote doit suivre. La disparition du rose vers le blanc ou vers le rouge prévient le pilote de tout écart vers le haut ou vers le bas par rapport à son plan de descente (*fig.* 8).

fig. 8

Richard Colin

▲ *Figure 8 : indicateur visuel d'angle d'approche. Si l'avion est trop haut, il voit le feu blanc ; s'il est trop bas, il voit le rouge. Il doit rester dans la zone étroite où on voit le feu rose.*

L'aéroport et son environnement

Le bruit

Le bruit des avions sur les aéroports importants est l'un des problèmes majeurs auxquels le transport aérien doit faire face, aussi bien pour la localisation des futurs aéroports que pour la construction des nouveaux avions.

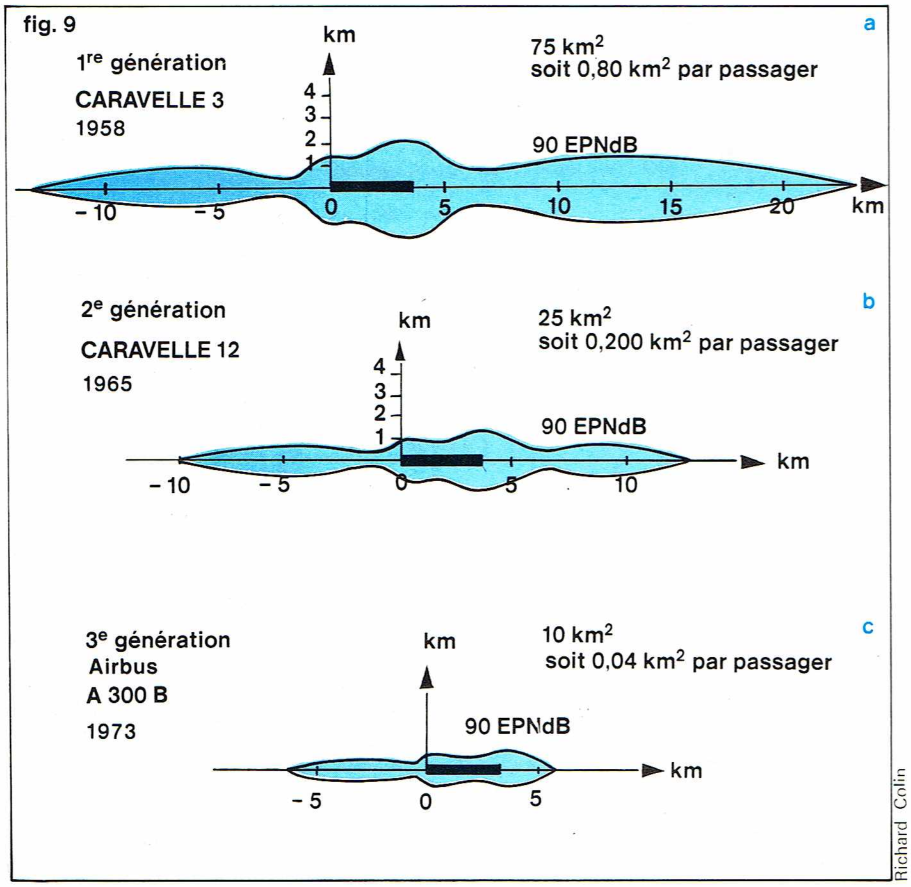

▲ *Figure 9 : comparaison des surfaces exposées à plus de 90 EPNdB (Effective Perceived Noise Decibels) lors d'une approche et d'un décollage.*

Nature du bruit

Le bruit est émis par le moteur des avions. Dans le cas d'un turboréacteur, on peut distinguer deux types de bruits qui sont perçus simultanément :

— le « bruit de jet » engendré par les gaz chauds éjectés à grande vitesse à la sortie de la tuyère ; ce sont les turbulences dues au mélange des gaz chauds et de l'air ambiant qui provoquent un bruit semblable au bruit d'un chalumeau ;

— le bruit engendré par les parties mécaniques du moteur tournant à grande vitesse qui ressemble à un bruit de sirène.

Au décollage, l'avion doit utiliser la pleine puissance de ses moteurs et provoque donc un bruit intense. Mais l'avion prend de l'altitude rapidement, ce qui limite l'étendue des zones fortement gênées par le bruit. En revanche, à l'atterrissage, les avions suivent une trajectoire à pente faible (2 à 3°) et, bien que les moteurs ne soient pas à pleine puissance, l'étendue des zones gênées par le bruit est assez grande.

Mesure du bruit

Le bruit des avions est généralement mesuré en PNdB (Perceived Noise Decibels), unité acoustique qui tient compte de la composition spectrale du bruit, et qui a été établie à partir d'une statistique sur la gêne. On utilise aussi une autre unité, l'EPNdB (Effective Perceived Noise Decibel), qui tient compte de la durée du bruit.

En mesurant les bruits en PNdB, il est possible de comparer le niveau de bruit des avions à celui d'autres bruits courants : ainsi, le bruit d'un Airbus au décollage à 300 m est aussi fort que celui d'une sonnerie de téléphone à 3 m (90 PNdB) ; le bruit d'un Airbus en approche à 120 m est comparable à celui perçu dans une rue passante (100 PNdB) ; le bruit d'un Boeing 707 au décollage à 300 m a le même niveau que celui d'un marteau piqueur à 2 m.

Réduction du bruit

● *Réduction du bruit à la source.* Les réacteurs des nouvelles générations sont nettement plus silencieux que ceux du début des années 1960. Ces réductions de bruit sont principalement dues à l'utilisation de moteurs à double flux qui mélangent l'air ayant traversé la chambre de combustion du moteur à un jet froid et lent et diminuent donc le bruit de jet (*fig.* 9). Les nouveaux avions sont tenus de respecter des normes de bruit très contraignantes pour obtenir leur certification acoustique. Mais les avions conçus avant que ces certifications acoustiques aient été rendues obligatoires sont toujours en exploitation et le seront encore pour un bon nombre d'années.

● *Procédures antibruit.* Ces procédures spéciales ont été mises en application sur un grand nombre d'aéroports. Elles obligent les avions à suivre des cheminements qui évitent au maximum le survol des agglomérations. Des procédures de décollage à poussée réduite permettent de limiter l'émission de bruit. De nombreux aéroports ont même institué un couvre-feu la nuit, de façon à éliminer toute gêne nocturne pour les riverains.

L'écologie

La présence de l'aéroport peut avoir des conséquences néfastes pour son environnement écologique.

— La présence des oiseaux constitue un risque non négligeable pour les avions en raison de la vulnérabilité de certaines parties et en particulier des moteurs. Or l'aéroport est souvent un site favorable à l'implantation d'oiseaux divers. Pour éliminer ces risques aviaires, des mesures variées sont prises qui visent à éloigner le plus possible la population d'oiseaux attirée sur l'aéroport.

— L'hydrologie du site est affectée par la présence de l'aéroport : l'érosion du sol lors de sa construction et la pollution due à son exploitation risquent en effet de modifier la qualité de l'eau.

— Le comportement des populations animales est affecté par la présence de l'aéroport.

— La pollution de l'air par l'émission des poussières et fumées des réacteurs ne peut être négligée.

L'occupation des sols

Le gigantisme des nouveaux aéroports internationaux peut laisser rêveur. La construction du nouvel aéroport de Montréal s'est accompagnée de l'achat de 35 000 ha de terrain, soit trois fois la superficie de la ville de Paris (mais seulement 20 % de cette superficie constitue réellement la zone aéroportuaire). L'emprise de l'aéroport de Roissy est de 3 000 ha. Les aéroports sont donc de gros dévoreurs d'espace, ce qui est compensé par l'absence d'infrastructure linéaire pour le transport aérien, à la différence des routes ou des voies ferrées.

La surface nécessaire aux aéroports n'est pas sans poser des problèmes d'occupation des sols aux environs des grandes agglomérations. Les aéroports sont en effet confrontés à deux nécessités contradictoires :

— D'une part, ils doivent s'éloigner des agglomérations urbaines. Les populations sont en effet de plus en plus sensibles au bruit et à la pollution et refusent l'implantation de nouveaux aéroports près de leurs zones d'habitation. Et la superficie nécessaire à ces infrastructures ne peut être libérée qu'à des distances de plus en plus grandes des centres des villes.

— Mais, d'autre part, les aéroports ne peuvent pas trop s'éloigner des villes sans remettre en cause l'existence du transport aérien. L'intérêt essentiel de l'avion est en effet sa rapidité, et il est impossible d'éliminer le gain de temps qu'il procure par l'allongement des temps de transports terminaux entre les villes et les aéroports.

La solution tient dans l'existence d'un moyen de transport rapide entre l'aéroport et le centre ville. Les autoroutes ont l'inconvénient de ne pas échapper aux encombrements de la voirie urbaine. Pour les villes où la circulation est souvent difficile, il est indispensable d'aménager un moyen de transport en site propre comme les liaisons ferroviaires reliant directement les gares centrales de chemin de fer aux aérogares. La desserte ferroviaire des aéroports parisiens présente à cet égard l'inconvénient de nécessiter une rupture de charge au cours du déplacement : le train ne va, ni à Roissy ni à Orly, jusqu'aux aérogares elles-mêmes, et les parcours terminaux doivent être effectués en autocars.

Le développement du transport aérien à courte distance sera largement tributaire de la rapidité des parcours terminaux, dont la durée est déjà au moins égale au temps de vol lui-même sur de nombreuses liaisons inférieures à 1 000 km.

La circulation aérienne

Aller d'un aéroport à un autre pose deux types de problèmes. Un problème de navigation d'abord : le pilote doit disposer de moyens pour maintenir son avion sur la route qu'il a choisie : il doit donc à chaque instant connaître sa position, par rapport à cette route, avec une précision suffisante. Ensuite, et avec d'autant plus d'acuité que le ciel est plus encombré d'avions, se pose le problème de régler la circulation aérienne, pour éviter les collisions, bien sûr, mais aussi les embouteillages.

La navigation

Les moyens dont disposent les avions civils pour connaître leur position dans l'espace sont nombreux et variés dans leur principe. Ils doivent répondre à trois objectifs essentiels :

- Une **précision adaptée** à chaque phase de vol : si une précision de quelques mètres par rapport à l'axe de la piste est indispensable pour l'atterrissage sans visibilité tel qu'il est pratiqué de plus en plus fréquemment, une précision de quelques kilomètres, ou même moins bonne, peut être satisfaisante pour un avion en croisière dans une zone peu encombrée.
- Un **fonctionnement sans défaillance,** qu'il s'agisse de pannes du matériel ou de conditions de fonctionnement liées, par exemple, aux conditions de propagation des ondes radio-électriques. C'est ainsi que certaines gammes d'ondes sont peu à peu abandonnées parce qu'elles subissent des brouillages dus aux orages.
- Une **commodité d'utilisation** aussi grande que possible. Les conditions économiques d'exploitation des avions, aussi bien que les caractéristiques des avions modernes (essentiellement la vitesse, mais dans certains cas le bruit et les contraintes techniques), exigent que l'exploitation des renseignements fournis par les instruments de navigation soit très rapide et n'accapare pas l'équipage. Il est important aussi d'éviter tout risque d'erreur, toute ambiguïté dans la lecture des instruments.

Les moyens propres à l'avion

Des instruments à bord des avions permettent au pilote de connaître la vitesse et la direction du déplacement par rapport à l'air : on pourrait penser qu'il peut facilement en déduire la route suivie. Mais le vent, la variation des caractéristiques physiques de l'air (pression, température) et l'imprécision des mesures introduisent des erreurs importantes. Pour y remédier, divers moyens indépendants de toute infrastructure au sol peuvent être employés.

Le **radar Doppler** permet la mesure de la vitesse par rapport au sol par utilisation de l'effet Doppler : une onde électromagnétique émise par le radar Doppler, à bord de l'avion, attaque le sol en incidence oblique ; la surface du sol illuminée renvoie de l'énergie dont une partie est reçue à bord de l'avion. La différence de fréquence entre l'onde émise et l'onde reçue à bord de l'avion permet de connaître la vitesse de rapprochement entre l'avion et la partie du sol illuminée, donc, après calcul, la vitesse de l'avion par rapport au sol. Mais le radar Doppler est un appareil coûteux.

Ces dernières années, la technologie des systèmes à inertie, développée pour les applications militaires des missiles balistiques, a pu être appliquée à la navigation des avions. Pratiquement tous les long-courriers modernes sont équipés de **centrales à inertie.** Dans ce système, trois accéléromètres mesurent les variations de vitesses selon trois axes stabilisés par gyroscopes. De ces variations de vitesses, un système de calcul déduit la vitesse, puis le déplacement de l'avion. A chaque instant, le pilote connaît ainsi sa position exacte.

Mais ces méthodes, mêmes lorsqu'elles mettent en œuvre des moyens sophistiqués, sont insuffisantes pour le transport aérien moderne. Les avions doivent voler par tous les temps, dans des zones encombrées où la précision doit être bien meilleure que celle des meilleures centrales à inertie après un vol de plusieurs heures, et dans lesquelles les cheminements imposés aux avions sont complexes, ce qui nécessite des repères nombreux utilisables quel que soit le temps.

Il faut aussi que tous les avions, même petits, puissent respecter les mêmes règles et les mêmes procédures. S'il

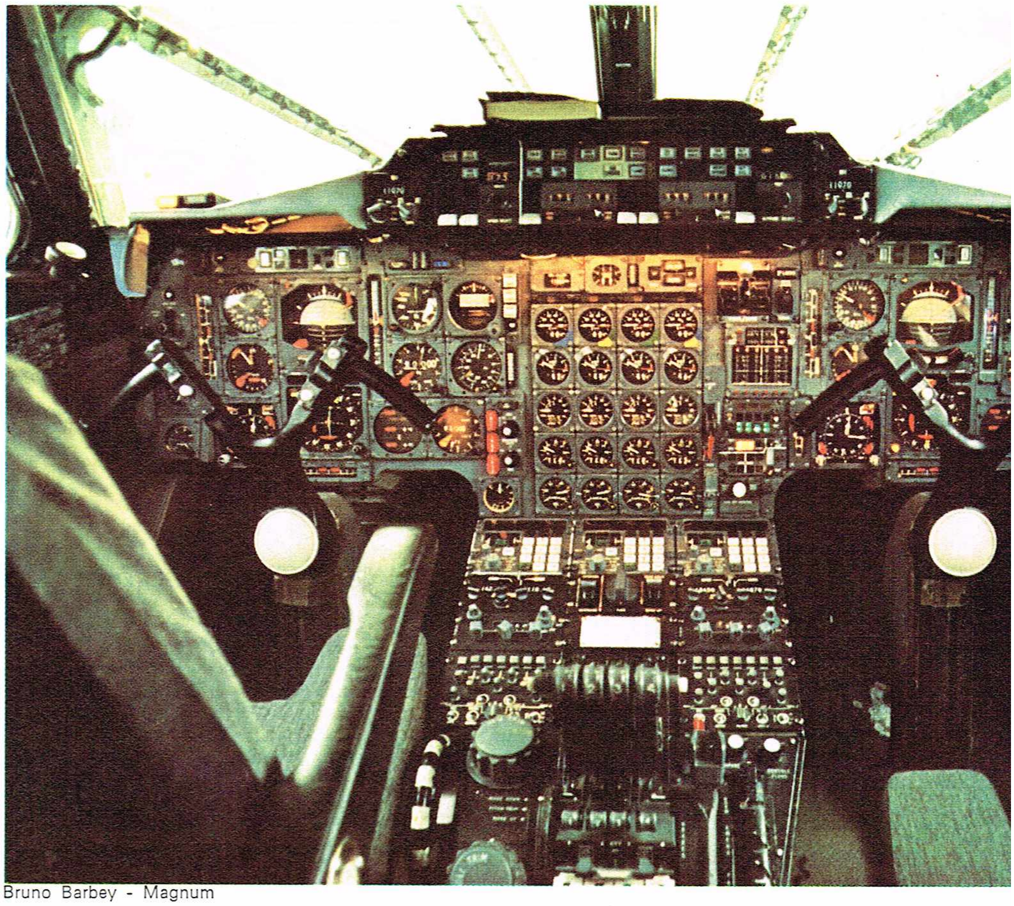

Bruno Barbey - Magnum

▲ *Poste de pilotage de* **Concorde.**

est concevable que les long-courriers modernes s'équipent de moyens autonomes, utiles pour la navigation à grande distance, il n'est pas possible d'exiger des équipements aussi coûteux que les centrales à inertie (il en faudrait deux pour des raisons de sécurité) pour des bimoteurs d'affaires, par exemple.

Les moyens dépendant d'installations radio-électriques au sol

Pour satisfaire ce besoin de naviguer partout et quel que soit le temps, de nombreux systèmes utilisant les ondes radio-électriques ont été ou sont employés. Nous nous limiterons à en évoquer les grandes lignes et à mentionner les systèmes les plus importants.

Navigation à longue distance

A grande distance, les ondes utilisables sont les ondes moyenne fréquence et au-dessous, c'est-à-dire au-dessous de 3 MHz. Les systèmes les plus performants sont du type « hyperbolique », puisqu'on désire couvrir une grande surface : c'est-à-dire qu'on définit des lignes de position comme étant le lieu des points dont la différence de distance à deux stations radio-électriques données est constante. On mesure cette différence de distance à bord de l'avion (on détermine donc la ligne de position sur laquelle se trouve l'avion) soit en mesurant le temps qui sépare la réception de deux signaux émis par chacune des deux stations, soit en mesurant la différence de phase entre ces deux signaux. La position de l'avion s'obtient comme étant l'intersection de deux de ces lignes de position : il faut donc au moins trois stations émettrices pour permettre à un avion de se situer.

L'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) avait normalisé deux systèmes : le Consol et le Loran A ; mais, peu précis dans certaines conditions de propagation, d'emploi délicat et n'assurant pas une couverture complète, ils sont de moins en moins utilisés.

Le système de navigation à grande distance qui semble avoir les perspectives d'avenir les plus sérieuses est le système OMEGA. La couverture mondiale par ce système sera assurée par 8 stations, dont 7 sont déjà en service. Chaque station émet des trains d'ondes sur 10,2, 11,33 et 13,6 kHz suivant une séquence fixe et connue. Ce cycle

d'émission est synchronisé sur le temps universel, avec une très grande précision, puisque les stations ont dû être équipées d'horloges atomiques. La détermination des lignes de position sur lesquelles se trouve l'avion se fait par mesures de phase.

La précision du système OMEGA peut être assez bonne, nettement inférieure au kilomètre, bien que certains problèmes de principe subsistent qui ne peuvent être exposés ici. Si son développement est poursuivi au-delà des utilisations militaires qui ont décidé sa mise en place, le système OMEGA pourra résoudre beaucoup de problèmes pour la navigation aérienne civile, même à moyenne distance : il est aussi susceptible de bien d'autres applications, pour la navigation maritime en particulier. La météorologie étudie même la possibilité d'équiper des ballons sondes de récepteur OMEGA pour observer le régime des vents sans faire appel à de coûteux radars de poursuite.

I.G.D.A. - O.P.I.

▶ *Une partie d'un tableau de bord : de gauche à droite et de haut en bas, radio-boussole, compte-tours, VOR ILS, manomètre, VOR de localisation, température du carburateur. Le VOR est un système de mesure angulaire. Ce sont les initiales de Very High Frequency Omnidirectional Range ; en français, on dirait : radiophare omnidirectionnel à très haute fréquence.*

Navigation à moyenne et à courte distance

La méthode fondamentale pour la navigation à courte et à moyenne distance a été, et est encore pour une grande part, de suivre des routes aériennes, chaque tronçon étant balisé à ses extrémités d'un radiophare permettant une mesure d'angle. Le pilote dispose d'un cadran sur lequel une aiguille lui indique la route à suivre pour rallier le repère suivant, et, connaissant la distance entre deux repères ainsi que la vitesse de son avion, il lui est facile d'estimer le temps nécessaire pour atteindre ce nouveau repère radio-électrique. La distance entre deux radiophares jalonnant une route aérienne peut varier dans de grandes proportions, de quelques dizaines à quelques centaines de kilomètres en fonction du tracé de la route et de la densité de la circulation aérienne.

● Jusque vers les années 1950, le système composé d'un *radiophare moyenne fréquence,* MF (200 à 1 700 kHz), au sol et d'un radiocompas automatique à bord des avions a ainsi été le moyen de navigation essentiel, sur lequel était fondée la circulation aérienne. Le radiophare moyenne fréquence est un simple émetteur complété par une antenne omnidirectionnelle très simple.

Le *radiocompas,* ou goniomètre automatique, était un équipement relativement coûteux que sa grande diffusion et les progrès technologiques ont maintenant rendu abordable même pour l'aviation légère. A bord de l'avion, une aiguille indique automatiquement, lorsque le pilote a sélectionné la fréquence désirée, la direction dans laquelle se trouve le radiophare émetteur par rapport à l'axe de l'avion.

Mais les moyennes fréquences ont des possibilités limitées par leur sensibilité aux perturbations atmosphériques et par le nombre trop réduit de stations pouvant émettre simultanément sans se brouiller. D'autre part, pour une mesure angulaire, la précision dans cette gamme d'ondes ne peut qu'être faible.

L'OACI a ainsi été conduite à définir un nouveau système de mesure angulaire, le *VOR :* ce sont les initiales de V H F Omnidirectional Range, V H F signifiant Very High Frequency. En français, on dirait : radiophare omnidirectionnel à très haute fréquence. Les fréquences utilisées se situent dans la bande 108-118 MHz. L'espace minimal entre deux canaux, c'est-à-dire la différence de fréquence minimale entre deux VOR assez proches pour éviter qu'ils ne se brouillent, est de 50 kHz ; le nombre de VOR de fréquence différente que l'on peut implanter est donc élevé, et la même fréquence peut être réutilisée à condition de respecter entre les stations une distance suffisante. Malgré cela, les responsables de l'infrastructure de radionavigation commencent à rencontrer des difficultés pour l'extension du nombre de stations VOR.

Une station VOR rayonne une onde porteuse VHF modulée de telle façon que soient transmis deux signaux à 30 Hz ; leur différence de phase dépend de l'azimut dans lequel on se trouve : ils sont en phase dans la direction du nord magnétique. En détectant ces signaux à bord de l'avion et en mesurant leur déphasage, il est donc possible de détecter sur quel axe se trouve l'avion par rapport à la station VOR. Cette indication est très commode d'utilisation, car elle est stable et elle est donnée par rapport à un repère au sol sans référence à l'axe de l'avion.

Bien que de caractéristiques très différentes, le VOR est utilisé selon des méthodes très semblables aux radiophares MF, qu'il a remplacés peu à peu pour jalonner les routes aériennes. Cette possibilité de remplacement progressif est un point très important pour un système mettant en œuvre de très nombreux avions et de caractère très international. Maintenant que l'infrastructure VOR est suffisante et que tous les avions sont équipés de récepteur VOR, les radiophares MF ont pratiquement disparu pour la navigation à moyenne distance. Mais ils subsistent très nombreux, et pour longtemps encore, dans les zones autour des aérodromes, pour permettre aux avions d'effectuer les procédures d'approche des pistes. On se contente alors d'émetteur de faible puissance (ce qui réduit un des inconvénients du système).

Cet exemple de la longévité du radiocompas, alors qu'il y a vingt ans tout le monde croyait à sa disparition proche, est significative à la fois de la résistance au changement lorsqu'un système a fait ses preuves, et de la faculté des techniciens à améliorer un matériel : car, si le radiocompas est encore tant utilisé, c'est, bien sûr, que l'infrastructure au sol est simple et peu coûteuse, mais aussi que les performances du matériel de bord sont incomparablement supérieures à ce qu'elles étaient il y a vingt ou trente ans, pour un prix devenu très abordable.

● Mais le VOR atteint maintenant ses limites : le nombre de stations ne peut croître indéfiniment, et sa précision n'est pas suffisante pour l'utiliser en dehors de trajets balisés tronçon par tronçon. Lorsque le système VOR avait été retenu, l'OACI était bien consciente de ses limitations, puisqu'un système complémentaire de mesure de distance avait aussi été normalisé : le *DME* (Distance Measurement Equipment), qui est en fait la partie « mesure de distance » du système TACAN normalisé par l'O. T. A. N. pour la radionavigation des avions militaires.

Le principe du DME est le suivant : à bord de l'avion, un émetteur envoie des impulsions qui sont reçues par la station au sol. Après avoir vérifié que ces impulsions correspondent bien à une interrogation d'un avion, la station au sol (le répondeur) répond sur une fréquence différente. Cette réponse est captée à bord de l'avion qui a interrogé (l'équipement à bord s'appelle un interrogateur). La distance avion-station au sol est calculée à partir du temps qui sépare l'interrogation de la réponse. En effet, si l'on déduit de ce temps le délai mis par le répondeur à décoder et émettre la réponse (ce temps est fixé par une norme internationale à 50 µs), on a la relation :

$$D = \frac{1}{2} \times V \times (T - 50\ \mu s)$$

V étant la vitesse de propagation des ondes radio-électriques dans l'air, soit 300 m/s, et le facteur 1/2 tient compte de ce que le signal parcourt la distance aller-

retour. Cette distance est donc de 150 m/μs au-delà du retard de 50 μs apporté par le répondeur au sol.

L'implantation des DME a démarré lentement, les administrations donnant la priorité au VOR dont les caractéristiques étaient très bien adaptées au remplacement des radiophares moyenne fréquence. D'autant plus que la technologie du DME est plus délicate que celle du VOR, car il travaille dans une gamme de fréquences très supérieures, entre 962 et 1 213 MHz. Mais maintenant que cette technologie est parfaitement maîtrisée, les stations VOR sont de plus en plus complétées par un DME. Il semble aussi convenir beaucoup mieux à l'évolution prévisible de la navigation sur des routes aériennes balisées, vers une navigation dite « de surface » où le nombre de cheminements serait beaucoup plus grand sans qu'il soit nécessaire, pour les définir avec précision, d'augmenter la densité de l'infrastructure au sol.

Les calculateurs de navigation

Cette navigation de surface implique à bord de l'avion un **calculateur de navigation** pour que la tâche de l'équipage ne soit pas trop compliquée. Les calculateurs de navigation modernes, qui équipent de plus en plus les avions, bénéficient des plus récents développements techniques, qu'il s'agisse des moyens de navigation propres à l'avion (radar Doppler, centrales à inertie), des moyens de radionavigation (le DME est parfaitement adapté à une exploitation automatique), et surtout du progrès des techniques numériques. Ils intègrent les données fournies par les différents moyens, les testent, les comparent entre elles, pour donner aux pilotes une information continue, très sûre et très facile d'utilisation sur le suivi de la route choisie. Certains d'entre eux peuvent élaborer aussi des informations sur la conduite technique du vol, telles que les quantités de carburant consommé, les réserves qui seront disponibles à l'arrivée dans certaines hypothèses, etc.

Avec l'évolution des techniques, on peut dire que le problème de la navigation est bien résolu. Le *Concorde* en est un bon exemple : pour diminuer les effets du bruit, il doit suivre avec une grande précision des trajectoires déterminées en fonction des zones d'habitation; ses moyens le lui permettent : calculateur de navigation intégrant les données de centrales à inertie et des divers moyens radio-électriques. Il peut ainsi adopter très tôt le régime supersonique, le plus favorable, sans causer de gêne exagérée aux habitants.

L'atterrissage constitue cependant un problème de navigation à part : l'avion doit se situer à quelques mètres près par rapport à l'axe de la piste. Ce problème a été examiné dans le chapitre consacré aux aéroports.

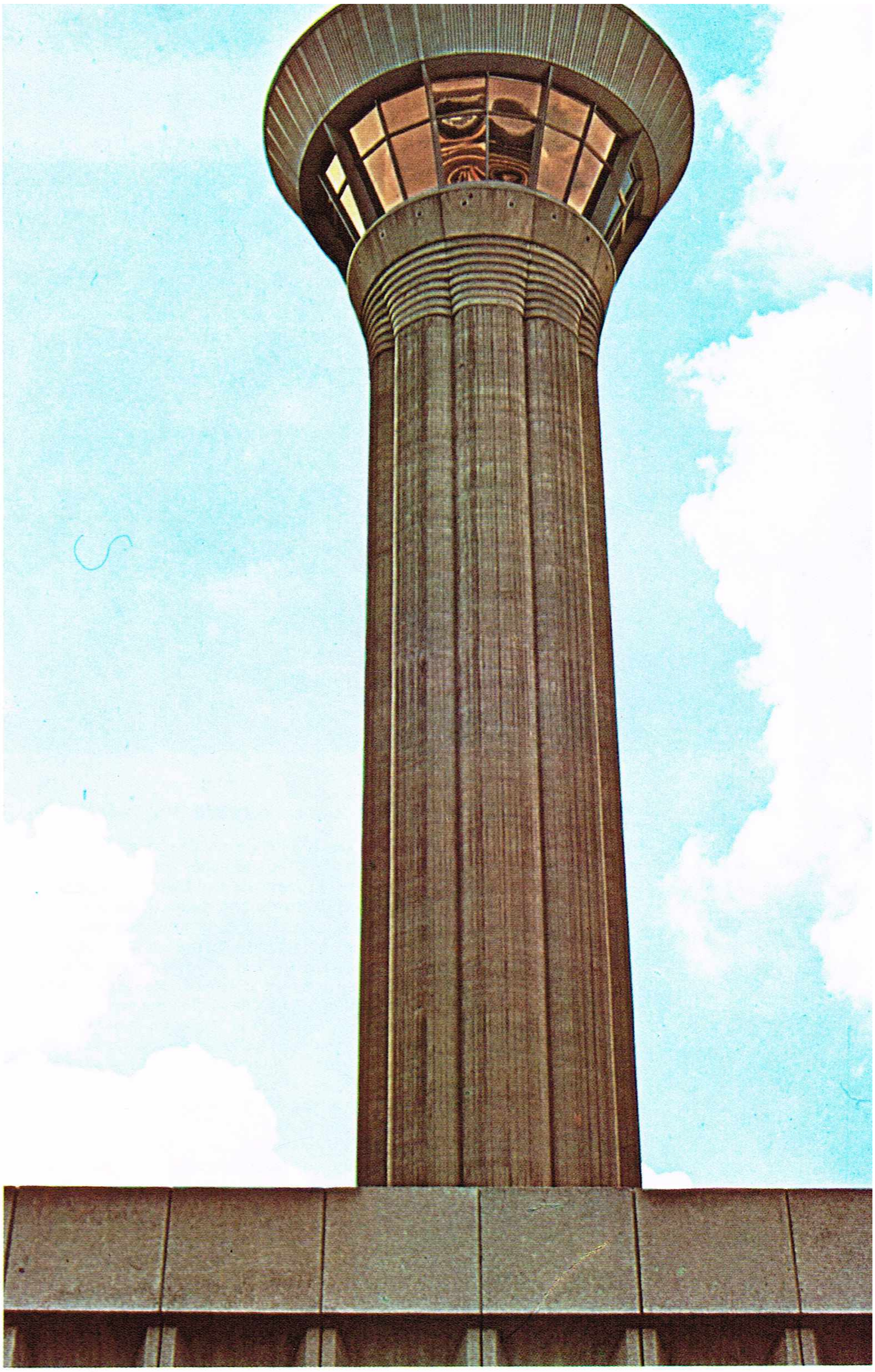

Erich Lessing - Magnum

▲ *Tour de contrôle de l'aéroport Charles-de-Gaulle à Roissy-en-France.*

Les services rendus aux avions par les organismes au sol

Les services au sol, qui ont la responsabilité de permettre aux avions de voler dans de bonnes conditions de sécurité et de régularité, ont des tâches que l'on peut classer comme suit :

● **Assurer le suivi des avions en l'air** pour éventuellement déclencher les recherches si un avion n'arrive pas à destination. Cela a conduit, à mesure que le transport aérien se développait, à mettre en place un réseau mondial de transmission d'informations. Au départ, chaque avion dépose un « plan de vol » : les informations recueillies sont alors transmises sur ce réseau mondial à tous les centres intéressés par ce vol. On verra plus loin que ce plan de vol est utilisé aussi comme information de base pour le contrôle de la circulation aérienne. En radiotéléphonie, à intervalles réguliers, l'avion informe les services au sol du bon déroulement du vol, ou de toute modification éventuelle.

● **Assurer l'information de vol :** les avions en l'air, pour naviguer dans les meilleures conditions, ont besoin d'informations diverses, sur les conditions météorologiques, sur l'état des infrastructures, sur le trafic aérien, etc. Ce service d'informations de vol est rendu principalement sur les grandes étendues maritimes ou sur terre lorsque la densité du trafic n'impose pas un véritable contrôle. Ce besoin d'échanges d'informations a demandé la mise en place de moyens de transmission radiotéléphonique air-sol. Lorsqu'on ne bénéficie pas de ce réseau, les transmissions sont assurées sur la gamme des ondes courtes (haute fréquence) entre 3 et 30 MHz. Avec les matériels modernes, l'utilisation des ondes courtes est devenue plus facile mais reste cependant délicate : choix de la fréquence en fonction de la distance et de l'état de l'ionosphère, sensibilité aux parasites atmosphériques, par exemple.

● **Assurer le contrôle de la circulation aérienne :** au-delà d'un certain niveau de trafic, il n'est pas possible de laisser évoluer les avions librement. Lorsque la visibilité est bonne, on pourrait penser qu'ils pourront éviter d'eux-mêmes les collisions, et cela a été vrai pendant longtemps. Mais les avions volent même lorsque la visibilité est faible ou nulle, et, de toute façon, les avions modernes sont trop rapides pour que les pilotes puissent assurer eux-mêmes l'anticollision. Enfin, dans un système de transport, les contraintes économiques jouent; il faut assurer un écoulement régulier du trafic. Ce besoin d'un service de contrôle est apparu d'abord autour des aérodromes, puis s'est étendu pour couvrir maintenant la quasi-totalité des vols commerciaux au-dessus des continents.

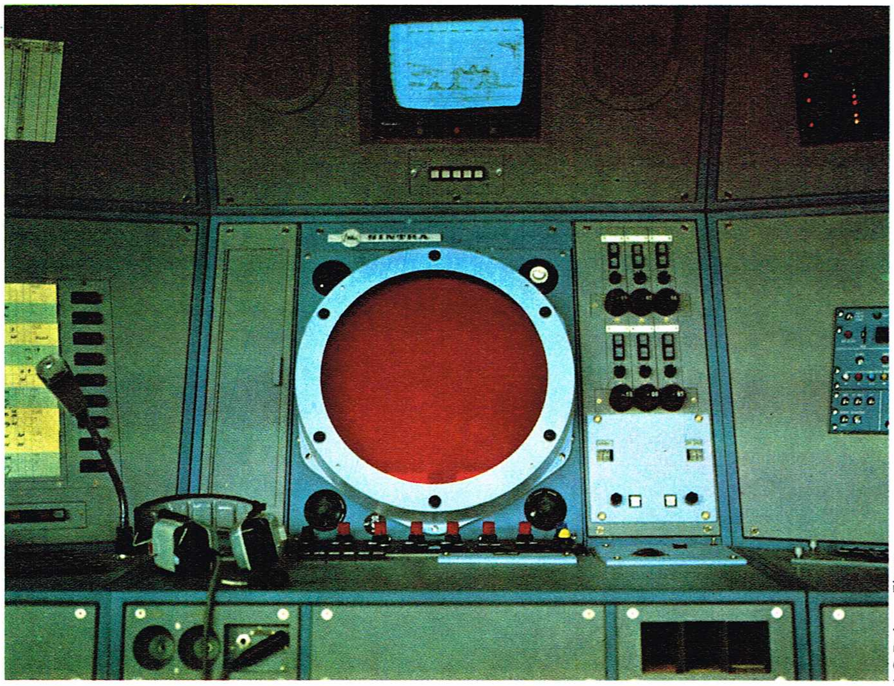

I.G.D.A. - Fiore

▲ *Écran radar pour le contrôle au sol du trafic aérien.*

Le contrôle de la circulation aérienne

Avant d'aborder la suite de ce chapitre consacré à la circulation aérienne, il faut préciser que, dans un avion civil, le pilote commandant de bord est entièrement responsable de la conduite de son avion. Il peut demander aux services de contrôle ou d'informations de vol des renseignements sur sa position, même sur la route à suivre, mais c'est lui qui est responsable de sa navigation.

Lorsqu'il existe un service de contrôle, les contrôleurs ont la responsabilité d'éviter les collisions entre les avions qu'ils ont sous leur contrôle et d'assurer la régulation du trafic. A ces titres, ils doivent, bien sûr, connaître la position des avions à chaque instant et sont amenés à donner des ordres aux pilotes.

On aperçoit ainsi que la limite des responsabilités du pilote commandant de bord et des services de contrôle est malaisée à définir avec précision. Mais ces indications générales sont suffisantes pour éclairer un peu la suite : le pilote est responsable de la conduite de son avion, il désire donc disposer d'informations sur sa position sans intermédiaires, aussi directement que possible. Les services de contrôle, pour assurer leur mission de sécurité et d'écoulement régulier du trafic, ont aussi besoin de connaître la position des avions. Il ne faudra donc pas trop s'étonner d'une certaine dualité dans les moyens mis en œuvre, car le dispositif actuel s'est mis en place très progressivement.

Pour exécuter leurs tâches, les contrôleurs ont besoin de connaître la position des avions et les intentions des pilotes.

Acquisitions d'informations sur le trafic

● Les **informations de base** sur le trafic sont acquises en deux temps.

★ Avant le départ, la réglementation impose aux pilotes un « plan de vol » qui contient les informations dont auront besoin les services au sol. On a vu une première utilisation de ce plan de vol, pour permettre un suivi du vol de façon à déclencher les recherches ou toute mesure d'assistance jugée utile, lorsqu'un incident se produit. Mais ces plans de vol contiennent les intentions des pilotes et sont donc très utiles pour les services de contrôle qui, successivement, contrôleront le vol.

Ce plan de vol est acheminé sur un réseau international, dont la définition et l'évolution sont supervisées par l'OACI, vers tous les centres intéressés par le vol. Dans les centres de contrôle importants, et c'est le cas des quatre centres français, ces informations sont traitées sur de puissants calculateurs qui les trient et les mettent en forme au bénéfice de chaque cellule de contrôle. En fait, c'est un réseau d'ordinateurs qui peu à peu se constitue pour l'acheminement et le traitement des données contenues dans les plans de vol.

▶ *Page ci-contre : intérieur d'une tour de contrôle du trafic aérien.*

★ Lorsqu'un avion est contrôlé par un centre, il informe ce centre des éléments précis de sa navigation : tronçon de route sur lequel il se trouve, heure estimée à laquelle il atteindra le prochain repère radio-électrique, vitesse, niveau de vol. Éventuellement, il informe le contrôleur des modifications à apporter à son plan de vol. Le contrôleur remet ainsi à jour les informations sur les vols soit directement sur une fiche qui retrace les caractéristiques de chaque vol, soit, de plus en plus, en informant le calculateur de traitement des plans de vol. Les autres cellules de contrôle du centre, et éventuellement les autres centres peuvent alors disposer, lorsque l'avion atteindra l'espace dont ils ont la responsabilité, d'informations parfaitement à jour pour ce vol.

Ces informations de base permettent d'organiser et de suivre l'écoulement du trafic sur le réseau d'itinéraires. Mais les contrôleurs n'ont qu'une information approximative et discontinue sur la position réelle des avions. Ils sont donc tenus de prévoir et de faire respecter entre les avions des séparations très importantes : la norme généralement admise est un espace correspondant à 10 minutes de vol. Aux vitesses des avions modernes, cette contrainte, liée aux possibilités d'erreurs importantes sur la connaissance de la position des avions à chaque instant, limite exagérément le débit des routes aériennes.

● **Les systèmes radar.** Les zones dans lesquelles le trafic aérien est dense sont donc couvertes par des radars qui donnent aux contrôleurs une information très précise et pratiquement continue sur les évolutions des avions.

Les stations radar utilisées pour contrôler le trafic aérien associent très généralement un radar primaire (l'avion réfléchit vers le radar une partie de l'énergie reçue de ce radar) à un radar secondaire (un interrogateur radar secondaire dont l'antenne est solidaire de l'antenne du radar primaire émet une paire d'impulsions qui déclenche un répondeur placé à bord de l'avion; ce répondeur réémet vers la station, sur une fréquence différente, une série d'impulsions). Le radar secondaire permet, comme le radar primaire, de localiser un avion avec une bonne précision, mais il a en outre deux avantages très importants :

— le signal reçu n'est pas mélangé à d'autres signaux parasites, alors qu'en radar primaire, il faut séparer le signal réfléchi par l'avion des signaux réfléchis par les nuages ou le sol qui sont souvent d'un niveau très supérieur;

— le signal émis par la station et le signal renvoyé par l'avion peuvent être codés; ces possibilités de codage sont utilisées pour identifier l'avion et pour connaître son altitude.

Le radar secondaire est un système très comparable dans son principe au DME, mais l'interrogateur est au sol et le répondeur à bord des avions. Les signaux radar secondaires peuvent de façon aisée être traités par ordinateur : on verra plus loin que ce point est important.

Les moyens de communications

On a vu qu'il existe des centres de contrôle divisés en cellules de contrôle. Ces cellules sont composées généralement de deux ou trois contrôleurs et sont responsables d'un espace délimité. Le nombre d'avions dont une cellule de contrôle peut accepter la charge varie en fonction de l'organisation et de la complexité du trafic; mais il est limité, de l'ordre d'une dizaine, souvent moins.

Pour travailler, chaque cellule doit échanger de nombreuses informations avec les pilotes, et avec les cellules de contrôle mitoyennes, qu'elles soient ou non dans le même centre de contrôle. Cela nécessite des moyens de communications efficaces, dont l'importance croît avec le nombre de cellules, et donc avec le trafic. Ces moyens peuvent être regroupés en trois réseaux principaux.

● On a déjà vu qu'il existait un réseau international de transmission de données pour l'acheminement et la mise à jour des plans de vol.

● Pour que chaque cellule de contrôle puisse rester en contact permanent avec les avions dont elle a la charge, un réseau de radiotéléphonie air-sol a été peu à peu développé. Il existe en France une vingtaine de

stations d'émission-réception reliées aux centres de contrôle par des lignes téléphoniques louées aux Postes et Télécommunications de façon à permettre des liaisons de très bonnes qualités au bénéfice des avions volant dans les voies aériennes. A ces stations s'ajoutent les installations implantées sur les aérodromes pour le contrôle de leur périphérie.

Ces stations exploitent une bande de fréquences dans la gamme VHF, car seules des fréquences élevées permettent une qualité suffisante. A la fin de la guerre, les normes imposaient une séparation de 100 kHz entre deux fréquences pour éviter les brouillages réciproques. Le nombre de liaisons nécessaires augmentant avec le trafic, il a fallu réduire cette séparation à 50 kHz et bientôt à 25 ; mais il ne sera guère possible de descendre plus bas : il faudra donc faire évoluer les méthodes de contrôle.

● Les liaisons entre cellules de contrôle responsables d'espaces mitoyens sont assurées par un réseau téléphonique dont les caractéristiques sont définies en tenant compte des exigences du contrôle : qualité et fiabilité de la liaison, bien sûr, mais aussi temps d'établissement de la communication très courts (dans certains cas, on exige un temps d'établissement de l'ordre de quelques secondes), grande souplesse d'emploi, etc.

En effet, lorsqu'un avion contrôlé par une cellule va franchir la limite de la cellule suivante, il est indispensable que la continuité du contrôle soit assurée, et, pour cela, que les contrôleurs puissent entrer en contact sans difficulté. Comme l'organisation interne de chaque centre et la répartition des responsabilités varient en fonction du trafic, c'est-à-dire peuvent changer plusieurs fois au cours de la journée, les installations deviennent très complexes.

L'automatisation du contrôle de la circulation aérienne

Lorsque la densité du trafic est faible, les tâches de contrôle sont relativement simples, puisque le risque que deux avions se rapprochent dangereusement est faible. Mais, lorsque le trafic augmente, le risque de conflit augmente beaucoup plus rapidement. Il faut alors organiser les vols, donner aux pilotes des instructions précises et s'assurer qu'elles sont bien suivies.

L'exploitation d'informations radar devient ensuite nécessaire, mais au prix d'une surcharge de travail importante pour les contrôleurs.

On a vu que l'espace était découpé en volumes, de façon que le nombre d'avions à l'intérieur de ce volume ne dépasse pas la capacité de contrôle d'une cellule élémentaire. Plus la densité de trafic augmente, plus il faut découper l'espace, et les avions restent de moins en moins de temps à l'intérieur d'une même cellule. Les tâches de coordination entre cellules voisines accaparent de plus en plus les personnels de contrôle. L'accroissement de la vitesse des avions ne fait qu'accentuer ce phénomène, qui explique que la complexité du contrôle augmente beaucoup plus vite que le nombre d'avions à contrôler.

Pour sortir de cet engrenage, il est de plus en plus fait appel aux techniques de traitement de l'information. Traiter des informations radar en provenance de plusieurs stations pour fournir aux contrôleurs une image composite, correler les informations radar aux plans de vol de façon qu'à côté de chaque écho radar figure l'indicatif de l'avion et, pour remettre à jour les éléments du vol, aider au dialogue nécessaire entre cellules de contrôle, tout cela exige des ordinateurs puissants, capables de gérer un grand nombre de terminaux de toute sorte. Le problème est d'autant plus délicat que toute défaillance, si elle n'est pas maîtrisée, peut avoir des conséquences importantes sur la sécurité des vols.

Un centre moderne de contrôle de la circulation aérienne est maintenant une entité très complexe, faisant appel aux techniques les plus sophistiquées. Mais les contrôleurs restent encore, et pour longtemps, les maîtres du jeu : ce sont eux qui prennent les décisions, même s'ils sont puissamment aidés, à plusieurs niveaux, grâce aux moyens de traitement de l'information mis en place :

— dans l'exécution de nombreuses tâches matérielles,
— dans le tri, le rapprochement et la présentation des informations disponibles,

et aussi de plus en plus :

— dans la planification des vols,
— dans la préparation des décisions,
— dans la détection des possibilités de conflits.

Magnum

▶ *Photographie prise à l'aérodrome de Chicago-O'Hare avec un temps de pose de quelques minutes. Les traînées lumineuses donnent une idée du trafic.*

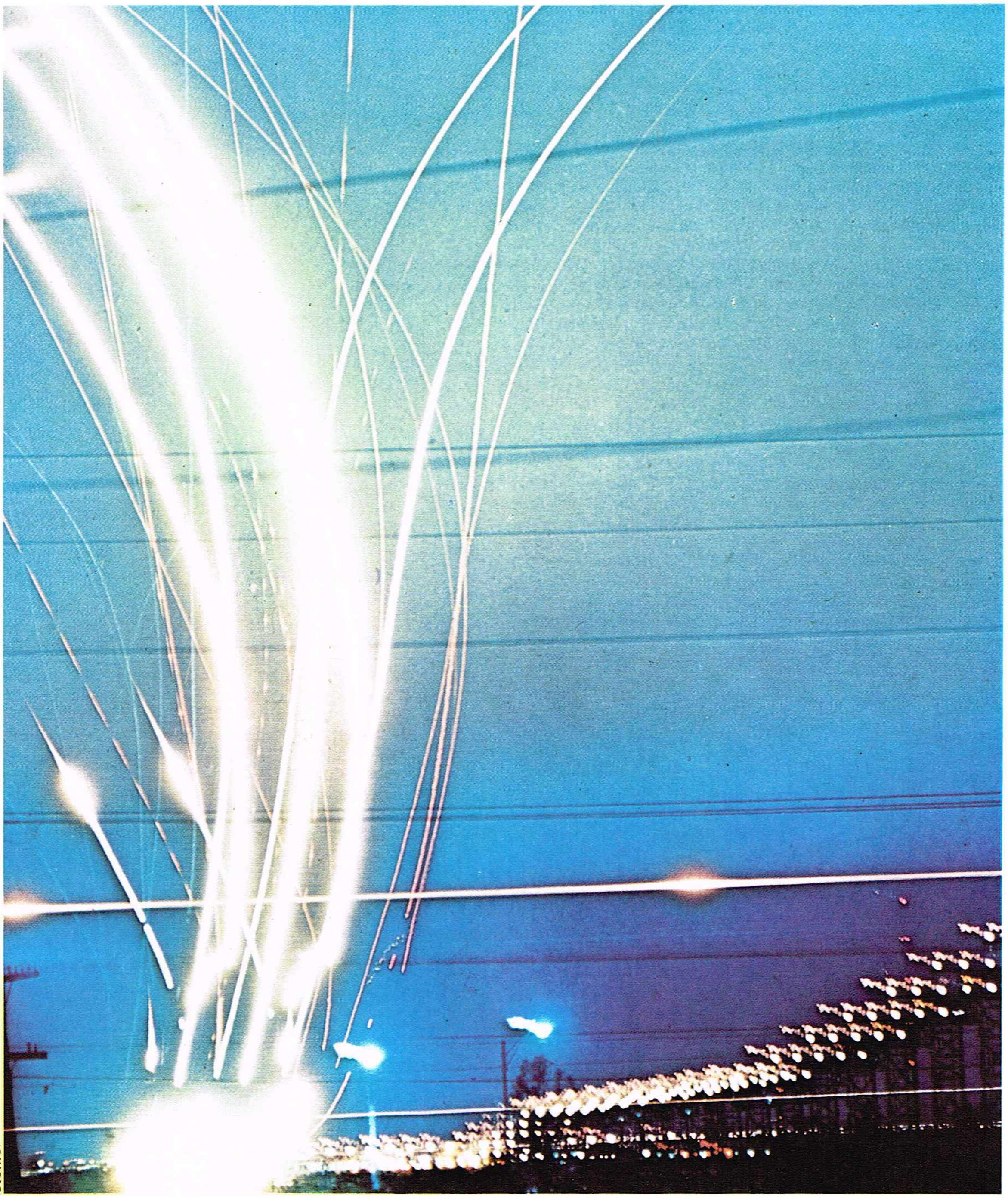
U.S.I.S.

Évolution

Cette rapide description n'aborde que très partiellement les problèmes que pose l'organisation sur le plan mondial de la circulation aérienne, mais devrait permettre au lecteur de s'en faire une image fidèle.

Malgré une évolution technologique considérable, malgré l'énorme croissance du transport aérien, ce système a peu bougé du point de vue fonctionnel. La mise en œuvre de nouvelles techniques est gênée par des considérations de normalisation internationale, de méthodes d'exploitation. Ainsi, il serait techniquement facile d'assurer une transmission automatique de données entre centres de contrôle et avions : cela se fait depuis plusieurs années pour les essais en vol. Mais il faudrait que les États, au sein de l'OACI, se mettent d'accord sur des normes techniques, qu'une proportion suffisante de compagnies aériennes acceptent d'équiper leurs avions d'un nouveau matériel qui ne sera peut-être pas immédiatement rentable, que des méthodes d'exploitation nouvelles soient définies, expérimentées et mises en œuvre progressivement sans perturber le fonctionnement actuel du système. Plutôt que d'aborder de front ce problème, les responsables s'efforcent de rechercher une solution dans l'augmentation des possibilités de codage du radar secondaire. Les performances seront bien moindres.

Pourtant, on ressent le besoin, dans les années à venir, pour ne pas entraver la croissance du transport aérien, qui se poursuit malgré la crise de l'économie mondiale, d'améliorer l'efficacité du système de circulation aérienne. Pour cela, une intégration plus grande des différentes fonctions entre elles semble indispensable, et l'informatique le permet.

Si l'on veut un contrôle de la circulation aérienne plus souple et moins pénalisant, il faut plus de souplesse dans la navigation elle-même des avions, mais il faut aussi que les contrôleurs puissent transmettre aux pilotes des ordres plus variés et mieux en contrôler l'exécution. Cela implique d'aborder globalement les problèmes de navigation, de liaison air-sol et les méthodes de contrôle, comme un *système,* et non plus fonction par fonction. L'évolution que cela entraînera est alors difficile à prévoir.

SYSTÈMES NOUVEAUX DE TRANSPORT

Les nouveaux modes de transport interurbain ou la recherche des grandes vitesses

La réduction des durées des déplacements est un élément essentiel de l'amélioration de la qualité de service des transports ; l'accroissement de la vitesse des véhicules est évidemment le premier moyen qui vient à l'esprit pour parvenir à une diminution du temps de transport. Aussi les pays industriels ont-ils financé plus ou moins généreusement des programmes dont le but était la mise au point de moyens de transport guidés capables de vitesses très grandes.

Toutefois, la course aux performances conduit presque infailliblement à augmenter les coûts d'investissement et d'exploitation dans des proportions parfois considérables. Par exemple, la puissance des moteurs nécessaires croît sensiblement comme le cube de la vitesse. Dans un autre ordre d'idée, le respect des conditions de confort minimales impose au tracé de la ligne des caractéristiques géométriques bien définies. A la limite, pour des vitesses très grandes, le tracé de la ligne doit se rapprocher de la trajectoire balistique, l'infrastructure atteignant dans ces conditions un coût prohibitif dans une région vallonnée.

Selon les études actuellement disponibles sur le sujet, la vitesse optimale (au sens de la rentabilité pour l'exploitant) d'un système de transport interurbain de voyageurs se situe dans la plage des 350-400 km/h pour les systèmes guidés sans contact avec la voie. Pour les systèmes « roues-rails », la vitesse optimale se situe dans la plage des 250-300 km/h. La délimitation plus précise de ces vitesses dépend de chaque ligne, en fonction notamment des coûts d'infrastructure et d'exploitation ainsi que du trafic.

Les possibilités de développement de ces modes de transport à grande vitesse sont limitées par la concurrence des autres modes : pour une distance inférieure à 100 km, la voiture particulière s'impose souvent, et, au-delà de 600 km, la concurrence de l'avion devient très vive. C'est donc pour les liaisons dont la longueur est comprise entre 100 et 600 km environ que de tels systèmes sont envisageables. Il se trouve que de nombreuses villes européennes importantes sont situées à des distances comprises à l'intérieur de ces limites ; un grand nombre d'études ont ainsi été entreprises, en Europe, sur l'opportunité de réaliser certaines liaisons par un moyen de transport à grande vitesse. Ces études, centrées sur l'insertion d'une ligne nouvelle dans un réseau déjà existant, doivent être très poussées, du fait notamment de l'importance des investissements qu'elles peuvent conduire à effectuer.

A ces limitations, d'ordre économique, viennent s'ajouter des contraintes d'ordre purement technique, notamment celles qui concernent la sécurité des voyageurs et celles qui visent à la réduction des nuisances vis-à-vis des usagers et des riverains.

D'une manière générale, l'accroissement de la vitesse de circulation des véhicules implique le développement technologique des organes de propulsion, de freinage et de sustentation, ainsi que des systèmes de signalisation. Le succès des nouveaux systèmes de transport ne peut être assuré que dans la mesure où ces différents sous-ensembles verront leurs performances et leur fiabilité progresser conjointement.

Pour aller vite, il faut réduire au minimum la traînée aérodynamique

Un rapide calcul montre qu'à vitesse stabilisée la consommation énergétique ramenée au voyageur · km est directement proportionnelle à la valeur de la résistance à l'avancement du véhicule, dans laquelle la traînée aérodynamique représente la part la plus importante dans le domaine de vitesse considéré. On voit tout de suite l'importance de l'étude aérodynamique.

Soit η_p le rendement des moteurs du véhicule.

L'énergie E consommée pour parcourir 1 km s'écrit :

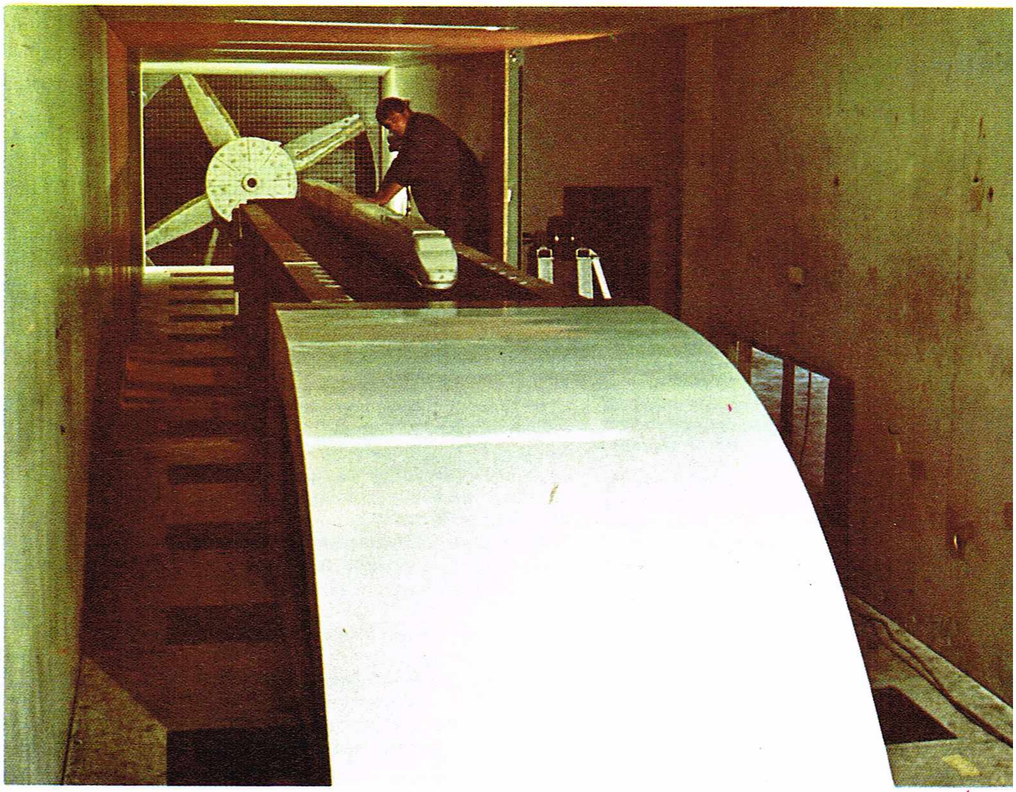

I.A.T. - Saint-Cyr

▲ ***L'expérimentation en soufflerie est le seul moyen dont nous disposions pour déterminer la traînée des véhicules. Pour les véhicules à coussin d'air, un tapis mobile, synchrone du vent de la soufflerie, reproduit de façon satisfaisante les conditions réelles de fonctionnement.***

$$E = \frac{T}{\eta_p} 1\,000$$

T étant la résistance à l'avancement (newtons).

Soit, ramené au siège kilomètre offert :

$$e_{sk_o} = \frac{1}{N_s} \frac{T}{\eta_p} 1\,000$$

en désignant par N_s le nombre de sièges.

De plus, la connaissance précise de cette caractéristique est indispensable pour déterminer la motorisation du véhicule.

Si l'on considère des vitesses couramment atteintes, la loi : $T = 1/2\ \rho\ SCV^2$ (où ρ est la densité de l'air et S la surface portante) se vérifie bien, mais, à grande vitesse, l'extension, sans précaution, de cette formule conduit à des erreurs.

Le seul moyen dont nous disposions pour déterminer la traînée des véhicules reste, tout comme en aéronautique, l'expérimentation en soufflerie. Toutefois, la circulation à une faible distance du sol introduit une perturbation de l'écoulement : le véhicule, contrairement à un avion, n'évolue que dans un demi-espace. Plusieurs procédés ont été expérimentés afin de simuler cette configuration ; seule l'utilisation d'un tapis mobile, synchrone du vent de la soufflerie, satisfait entièrement les conditions de fonctionnement.

La vitesse ne doit pas compromettre le confort des voyageurs

A vive allure, l'enchaînement répété de virages serrés incommode rapidement la majorité des passagers d'une automobile, et le seul remède consiste à réduire la vitesse de la voiture. Pour le système de transport à grande vitesse, le problème se pose en termes inverses : la vitesse du véhicule étant imposée, c'est le tracé de la ligne qui devra être défini en fonction de la valeur de celle-ci.

Quelle que soit la technologie des véhicules, les normes usuelles de confort imposent au tracé des lignes des conditions géométriques impératives. Les accélérations ressenties par les voyageurs lors du franchissement des courbes ne doivent pas excéder les valeurs limites suivantes :

accélération transversale : $\gamma_T \leqslant 0{,}5\ \text{m/s}^2$;
accélération verticale : $\gamma_v \leqslant 0{,}45\ \text{m/s}^2$.

Ces limitations se traduisent pour le projeteur par le respect de rayons de courbure minimale R liés à la vitesse de circulation V.

Tableau I Rayon minimal admissible en fonction de la vitesse pour les systèmes de transport à grande vitesse			
Caracté-ristiques de la voie \ Vitesse	250 km/h	350 km/h	500 km/h
Tracé en long	2 850 m	5 450 m	11 200 m
Profil en long	10 900 m	20 800 m	43 000 m

▲ Tableau I : rayon minimal admissible en fonction de la vitesse.

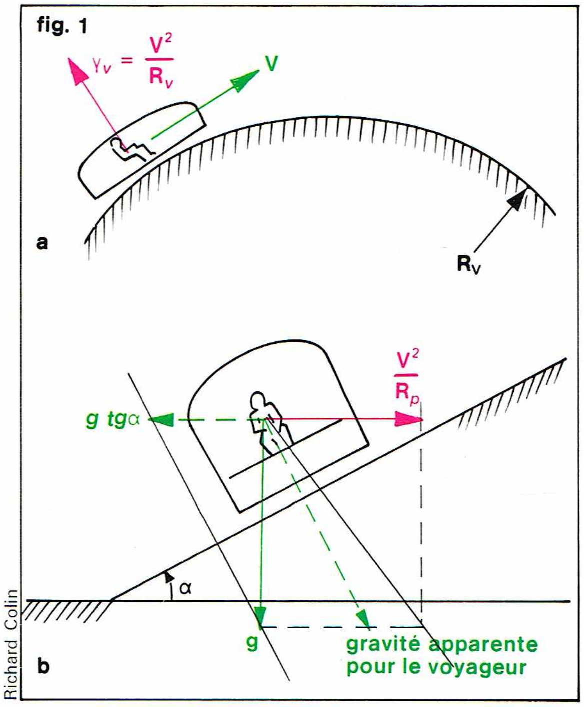

► Figure 1 : les accélérations ressenties par le voyageur ne doivent pas excéder certaines valeurs ; a, l'accélération verticale γ_v doit rester inférieure à 0,45 m/s², b, l'accélération transversale ne doit pas dépasser 0,5 m/s².

● Pour le franchissement des vallons, profil en long (*fig.* 1 a) :

$$\gamma_v = \frac{V^2}{R_v} \Rightarrow R_v \geqslant 2{,}22\ V^2$$

(V en m/s, R_v en m).

● Dans le tracé en plan, le dévers de la voie permet une réduction notable du rayon de courbure en plan R_p (*fig.* 1 b) :

$$\gamma_T = \frac{V^2}{R_p} - g\ \mathrm{tg}\ \alpha$$

soit, pour des dévers de l'ordre de 12,5 % : $R_p \geqslant 0{,}581 \cdot V^2$ (V en m/s et R_p en m).

On conçoit facilement que l'insertion d'une ligne à 250 km/h se fait beaucoup plus aisément que celle définie pour 500 km/h (voir le *tableau* I et la *figure* 2).

L'accroissement de la vitesse ne doit pas se faire aux dépens de la sécurité des voyageurs

L'impossibilité d'éviter un obstacle pour un transport terrestre guidé ainsi que la grande vitesse de circulation impliquent pour les voyageurs des risques qui peuvent être classés sous deux grandes rubriques :

— les accidents consécutifs à une défaillance technologique : rupture de pièces, incendie, etc. (ce point relève de la notion de fiabilité des organes en général) ;

— les collisions, soit avec un autre véhicule, soit avec un obstacle étranger au système de transport.

▼ Figure 2 : exemple de tracé des profils en long des lignes ; a, vitesse 250 km/h, b, vitesse 500 km/h.

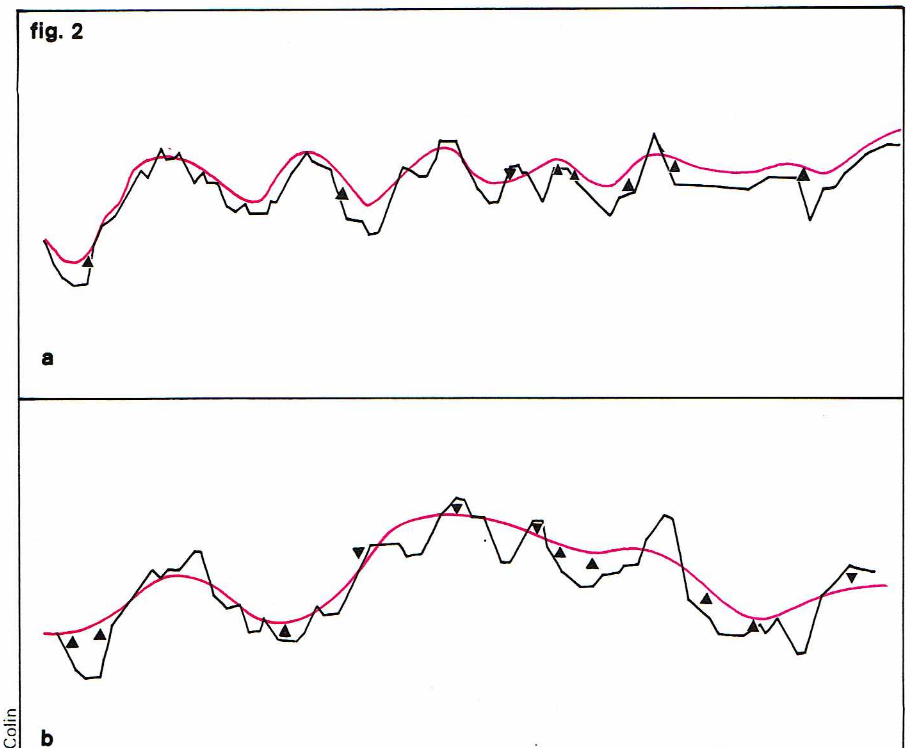

échelles : horizontalement 1/100 000
verticalement 1/2 500

Alors que l'analyse des risques consécutifs à une défaillance technologique reste spécifique à chaque mode de transport, l'analyse des risques de collision peut se faire indépendamment de la technologie, à charge pour celle-ci d'être capable d'assurer la fonction freinage. On peut distinguer deux scénarios possibles : collision avec un obstacle étranger au système — évaluation du risque d'accident ; collision entre deux véhicules successifs — limite du cadencement des véhicules.

● *Le risque de collision avec un obstacle étranger au système* ne peut être éliminé que par une protection pratiquement irréalisable de la ligne vis-à-vis de l'environnement. Aussi, dans l'hypothèse où un obstacle se trouve accidentellement sur la trajectoire des véhicules ou encore à la suite d'une malveillance criminelle, le seul espoir qui subsiste d'éviter une catastrophe se résume-t-il au processus suivant :

— détection de l'obstacle,

— transmission de l'ordre d'arrêt aux véhicules concernés,

— déclenchement à bord des véhicules d'une procédure de freinage de catastrophe.

Le mode de freinage alors utilisé peut provoquer des dégradations matérielles qui sont acceptables au regard des vies humaines sauvées.

On peut, grâce à un calcul simple de probabilités, évaluer le risque d'une collision avec un obstacle fixe en fonction de la fréquence des véhicules, de leur vitesse et de la distance de freinage. Soit θ la période des véhicules, D_f la distance d'arrêt et V_0 la vitesse ; lorsque, à l'instant $t = 0$, un obstacle apparaît sur la voie, le premier véhicule qui se dirige vers ce danger se trouve à une distance X comprise entre 0 et $V_0 \cdot \theta$. Si l'on suppose pour simplifier que l'ordre de freinage parvient instantanément au véhicule, le risque de collision se traduit par l'inéquation :

collision si $X \leqslant D_f$ avec $0 < X < V_0 \cdot \theta$

Soit, sous forme de probabilité :

$$\text{probabilité de collision} = \frac{D_f}{V_0 \theta}$$

Il est évident que, pour une vitesse V_0 et un trafic θ donnés, le seul moyen de réduire la probabilité de collision est de réduire la distance d'arrêt des véhicules, c'est-à-dire d'accroître l'efficacité des systèmes de freinage.

● *Risque de collision entre deux véhicules successifs*

★ *Sécurité anticollision.* Le critère de sécurité anticollision peut se résumer par cette phrase : chaque véhicule doit avoir devant lui une distance libre supérieure à sa distance d'arrêt. Posons :

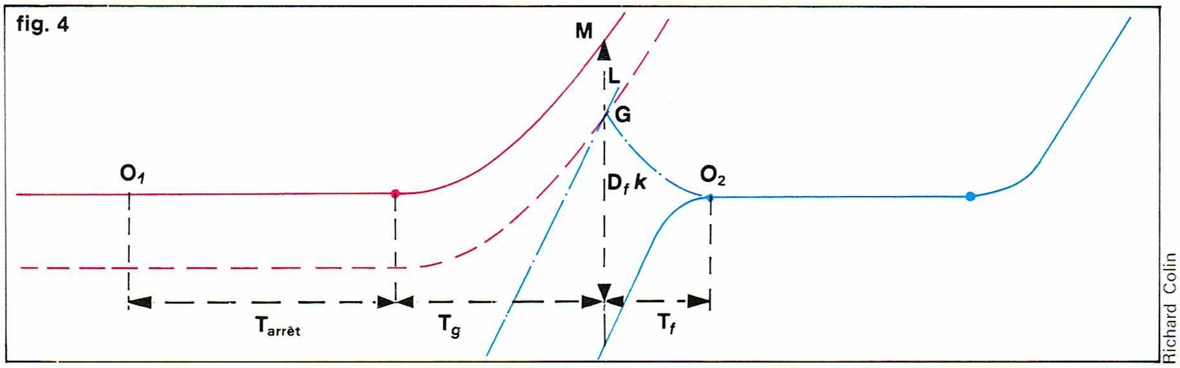

◀ ***Figure 4 : positions relatives des courbes de la figure 3 dans le cas limite (risque de collision).***

x_1 (t) : abscisse de l'avant du premier véhicule au temps t;
L : longueur du premier véhicule;
x_2 (t) : abscisse de l'avant du second véhicule au temps t;
D_{f2} (t) : distance d'arrêt du véhicule n° 2;
k : coefficient de sécurité ($k > 1$);
le critère de sécurité anticollision se traduit par l'inéquation :

$$x_1(t) - L \geqslant x_2(t) + k\,D_{f2}(t)$$

★ *Calcul de la période nominale des véhicules.* Si l'on suppose que tous les véhicules ont le même diagramme de marche, c'est-à-dire que la caractéristique x_2 (t) se déduit de x_1 (t) par translation selon l'axe des t de période θ, c'est-à-dire :

$$x_1(t) = x_2(t + \theta),$$

la *figure* 3 permet de visualiser la marche des véhicules; on remarquera qu'à chaque instant, la pente des courbes x (t) correspond à la vitesse des véhicules.
On constate immédiatement que le risque maximal de collision se situe au moment où le véhicule n° 1 dégage la station et où le véhicule n° 2 décélère pour y entrer (point G). A la limite, on a l'égalité :

$$x_1(t) - L = x_2(t) + kD_f(t)$$

La *figure* 4 schématise les positions relatives des courbes dans ces conditions. On constate donc que la période des véhicules est liée au temps d'arrêt, à T_g et à T_f :

$$\theta = T_{\text{arrêt}} + T_g + T_f$$

— le temps d'arrêt est un paramètre d'exploitation;
— le temps de freinage T_f est, bien sûr, lié au problème des freins;
— le temps T_g, pour sa part, fait intervenir la longueur des véhicules, le coefficient de sécurité k et la distance de freinage, ainsi que la caractéristique d'accélération.

L'accroissement de la vitesse ne doit pas impliquer un accroissement des nuisances : l'électricité, source d'énergie privilégiée

Les systèmes nouveaux de transport à grande vitesse nécessitent l'installation de machines de forte puissance pour assurer la propulsion des véhicules. Si l'on excepte les sytèmes à voie active dont la réalisation n'est pas encore envisagée, les véhicules sont tous automoteurs.
Sur le plan économique, le groupe propulsif doit être aussi léger que possible afin de conserver au véhicule une capacité « payante » maximale. Les puissances requises (plusieurs milliers de kW) ne peuvent être fournies dans ces conditions que par des moteurs thermiques de forte puissance spécifique (turbomachines exclusivement) ou par des moteurs électriques.
● *Moteur thermique :* la propulsion par un turbomoteur très léger implique l'obligation d'embarquer une masse importante de carburant atteignant plusieurs tonnes. De plus, les nuisances de tels engins (pollution et bruit) ont condamné leur utilisation dans les régions à forte densité de population (zones suburbaines).
● *Moteur électrique :* la propulsion par moteur électrique peut n'entraîner aucune nuisance, excepté celle qui est provoquée par les centrales électriques, mais il se pose le délicat problème de l'approvisionnement en énergie électrique du véhicule, c'est-à-dire le problème du captage. Il n'est pas simple de transposer directement les technologies utilisées par le matériel ferroviaire aux modes de transport dans lesquels le système de sustentation élimine le contact matériel. Le véhicule doit être équipé d'au moins deux « pantographes » captant sur deux caténaires, le retour du courant par les rails étant naturellement exclu.
De plus, l'utilisation d'un moteur électrique linéaire n'améliore pas la situation, car le facteur de puissance ($\eta \cos \varphi$) de ces machines reste très modeste (0,5-0,6 dans les meilleurs cas).
Aussi plusieurs systèmes, pour la phase de mise au point, comportent-ils à bord un groupe générateur léger qui élimine le problème du captage. Le véhicule Garrett à moteur linéaire et le TGV-001 de la S. N. C. F. en sont deux exemples typiques.

▼ ***Figure 3 : visualisation de la marche de deux véhicules ayant le même diagramme de marche, mais décalés dans le temps.***

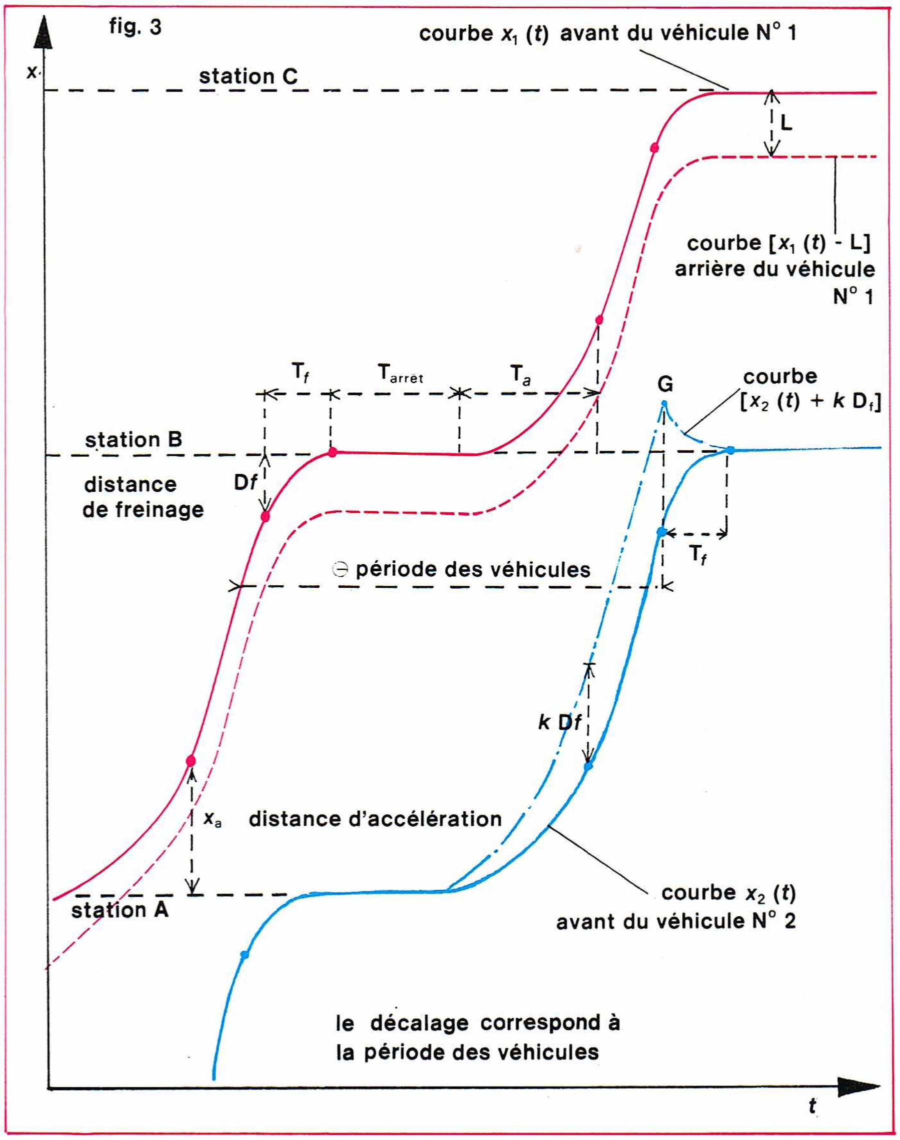

Modes de remplacement de la « roue »

Pendant longtemps, on avait pu croire que la roue ne permettrait pas de dépasser une vitesse critique maximale, liée surtout au problème de l'adhérence. Or, les recherches dans le domaine ferroviaire tendent actuellement à démontrer que cette vitesse maximale était une vue subjective et qu'elle ne correspond pas à une limite physique clairement établie.

On peut alors se demander quel est l'intérêt de développer des techniques de sustentation sans contact matériel. En fait, trois arguments peuvent être avancés pour justifier ces innovations :

— les sustentations sans contact matériel sont moins sensibles aux défauts de la voie, ce qui se traduit par la possibilité de faire circuler des véhicules à grande vitesse sur une voie de qualité relativement médiocre, sans pour autant compromettre leur stabilité dynamique :

— la répartition des charges sur une plus grande surface pourrait conduire à une infrastructure légère, donc moins onéreuse à la construction ;

— l'absence de liaison mécanique entre le sol et le véhicule permet d'espérer une réduction importante des vibrations et du bruit dus au roulement.

Un dernier point concerne l'aspect économique du problème : actuellement, s'il n'existe pas d'impossibilité technique pour faire circuler des véhicules ferroviaires jusqu'à 300 km/h, il se pose le problème de la maintenance des organes de roulement et des voies. En effet, l'accroissement des vitesses impose une maintenance de plus en plus importante au niveau des roues. L'immobilisation pour entretien des véhicules se traduit par la nécessité d'augmenter le parc pour satisfaire la demande. Si l'on ajoute aux frais de maintenance proprement dits ces frais d'amortissement, il se peut que ce soit la conjoncture économique et non la technologie qui fixe les limites de vitesse du système roues-rails.

Actuellement, trois technologies sont susceptibles d'être utilisées en remplacement de la roue. Il s'agit du coussin d'air et des coussins magnétiques, soit électromagnétiques par attraction, soit électrodynamiques à répulsion.

Le coussin d'air

Le principe de cette sustentation est simple : de l'air sous pression est envoyé dans des coussins situés sous le véhicule et s'échappe sur la périphérie de ceux-ci, entre le sol et des lèvres d'étanchéité souples. Dans ces conditions, la force de sustentation est égale au produit de la surface des coussins par la surpression de l'air qu'ils contiennent.

Sur les véhicules à coussin d'air, on trouve en fait non seulement des coussins de sustentation qui équilibrent le poids des véhicules, mais aussi des coussins de guidage verticaux qui reprennent les efforts latéraux. La mise en pression des coussins est assurée par un compresseur embarqué à bord du véhicule ; celui-ci est entraîné soit par une turbine, soit par un moteur électrique.

Étude théorique simplifiée

En partant des équations de la mécanique des fluides, on obtient les équations suivantes.

Équation de la surpression

$$\Delta p = F/S_c = Mg/S_c$$

avec M masse du véhicule,
g accélération de la pesanteur,
S_c surface des coussins.

Équation du débit volumique

$$Q = \alpha h \cdot l_c \cdot V_f$$

avec h hauteur de fuite,
α coefficient de contraction,
l_c périmètre du coussin,
V_f vitesse de fuite.

Relation entre la surpression et la vitesse de fuite

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho V_f^2$$

On constate qu'à toute augmentation de la hauteur de fuite (par exemple, si le véhicule se soulève sous l'action d'un effort aérodynamique) correspond une diminution de la pression dans le coussin. Le poids du véhicule jouera alors le rôle d'une force de rappel ; réciproquement, si le véhicule s'abaisse sur la piste (diminution de la hauteur de fuite), cela se traduira par une augmentation de la pression et de la force de sustentation (*fig.* 5). Le système à coussin d'air est donc naturellement stable.

Puissance de sustentation

Si η_s représente le rendement des ventilateurs de sustentation, la puissance de ceux-ci s'exprime par :

$$\mathcal{P}_s = 1/\eta_s \cdot Q \cdot \Delta p$$

Soit, en faisant apparaître le diamètre hydraulique $D = 4 \frac{S_c}{l_c}$:

$$\mathcal{P}_s = \frac{1}{\eta_s} \frac{4\,\alpha h}{D} V_f \cdot Mg.$$

On distingue deux grandes familles de coussins d'air : les coussins basse pression, particulièrement adaptés aux grandes vitesses, et les coussins haute pression, réservés à la manutention et aux véhicules de transport spécifiquement urbains. Ils diffèrent sensiblement quant à leur technologie, mais le principe reste le même (*fig.* 6).

Les premiers correspondent à une hauteur de fuite relativement importante qui permet la circulation des véhicules sur une voie de béton sans usure excessive des lèvres des coussins. Le second type correspond à une hauteur de fuite beaucoup plus faible, qui, en contre-

▼ Le TRIDIM (Société Bertin - E.D.F.) : véhicule de transport urbain à coussins d'air haute pression propulsé par moteur électrique. La transmission de l'effort est assurée par un pignon attaquant une crémaillère fixée à la voie (à gauche). Figure 5 : schéma de principe d'un coussin d'air.

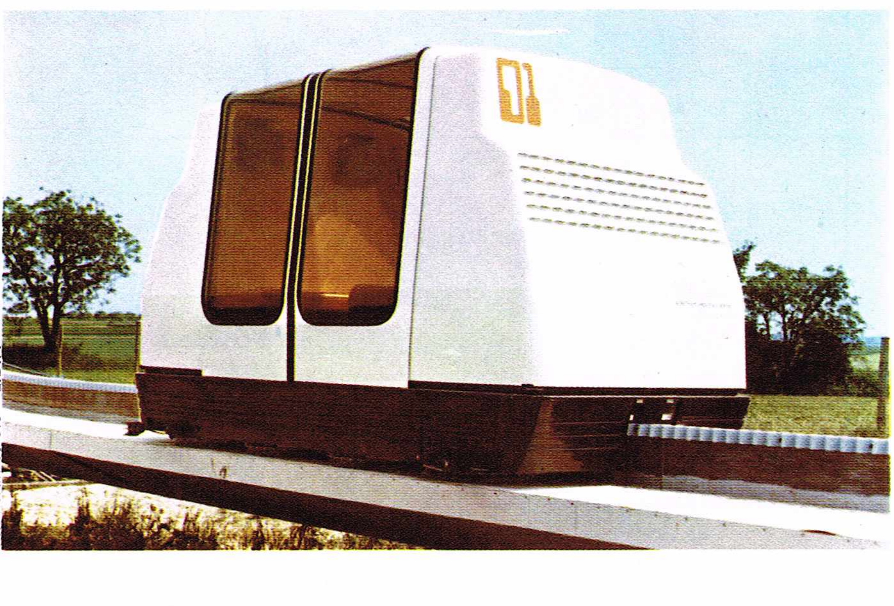

Sté Bertin et Cie - E.D.F.

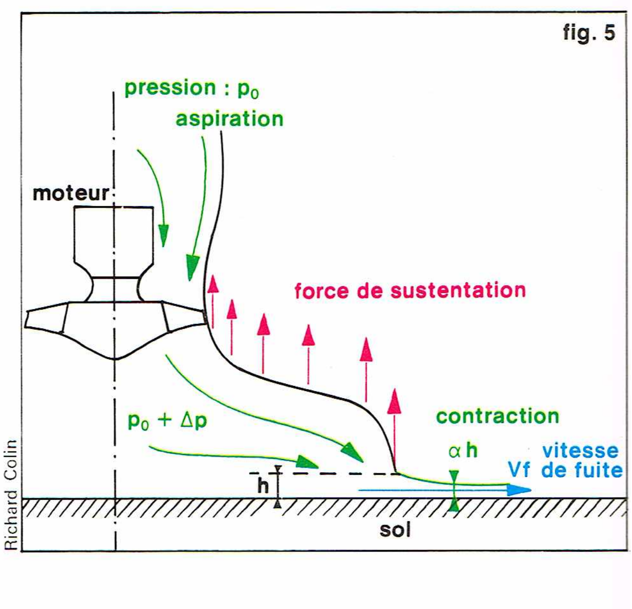

Richard Colin

partie, nécessite une voie beaucoup plus lisse. Les voies sur lesquelles circulent les véhicules équipés de ces coussins sont recouvertes, en général, d'un revêtement époxy. Ces surfaces très lisses permettent, à l'aide des coussins haute pression, de descendre la puissance de sustentation aux environs de 3 kW/t. Le coût d'une telle voie est nettement plus élevé que celui d'une voie classique.

Pour les véhicules équipés de coussins d'air basse pression, la puissance absorbée par la sustentation est actuellement de l'ordre de 15 kW par tonne, ce qui peut paraître important; toutefois, il faut remarquer qu'un véhicule de 80 places propulsé par réacteur a une masse de 25 t, ce qui correspond à une puissance de sustentation par place offerte de 4,7 kW.

D'autre part, à grande vitesse, l'on bénéficie d'une récupération dynamique. En effet, l'avant du véhicule est le siège d'une surpression qui varie comme le carré de la vitesse; dans ces conditions, il est possible de réduire de manière très sensible la puissance des moteurs de sustentation. A 400 km/h, on peut espérer un gain de 50 %. La puissance de sustentation passe alors à une valeur de l'ordre de 2,5 kW par place offerte.

Le chiffre de 15 kW/t correspond d'ailleurs à une hauteur de fuite relativement importante, déterminée par la rugosité de la voie, afin de minimiser l'usure des lèvres d'étanchéité. Si l'on accepte de réduire la hauteur de fuite, il est possible de diminuer la puissance en contrepartie, mais cela implique que la voie soit d'une construction plus soignée et, par conséquent, plus onéreuse. Un compromis doit donc être trouvé entre le coût de la voie et celui de l'énergie de sustentation. Remarquons enfin que des études sur la technologie des coussins sont actuellement poursuivies en vue de diminuer la puissance de sustentation.

Puissance de propulsion. Traînée de captation

Les moteurs doivent vaincre trois types de résistances à l'avancement.

- La traînée aérodynamique, soit

$$T_a = 1/2 \cdot \rho\ S C_x V^2$$

avec S = maître couple, C_x = coefficient de traînée et V = vitesse du véhicule.

- La traînée de frottement, T_f, liée aux contacts matériels subsistants : lèvres des coussins, captage électrique, etc. La valeur de T_f est à peu près indépendante de la vitesse V.
- La traînée de captation, T_c. Celle-ci est proportionnelle au débit du compresseur et à la vitesse du véhicule, la puissance utilisée à vaincre cette traînée étant fournie par le moteur de propulsion. Elle correspond à l'énergie qu'il faut transmettre à la masse d'air captée chaque seconde pour l'accélérer de la vitesse nulle à la vitesse du véhicule :

$$T_c = \rho QV$$

Dans ces conditions, la puissance de propulsion $\mathcal{P}_p$ s'exprime au rendement près par la formule :

$$\mathcal{P}_p = [T_f + \rho QV + \frac{1}{2}\rho S C_x V^2] \cdot V$$

Guidage des véhicules

Outre les coussins de sustentation, le véhicule doit posséder des coussins de guidage qui agissent sur une paroi verticale. Cette nécessité de guidage entraîne une complication des aiguillages (*fig.* 7).

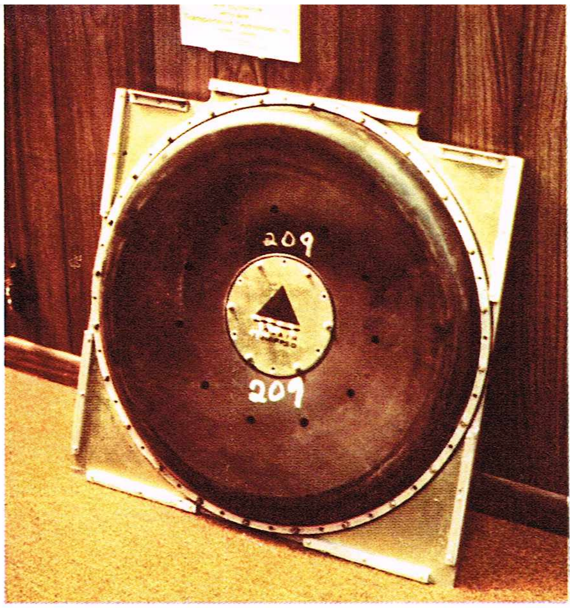

Photo D. Dunoyé

◀ *Coussin d'air haute pression. Détail.*

▼ *Figure 6 : il existe deux familles de coussins d'air ;* a, *coussin à haute pression (150 mb). La hauteur de fuite est de l'ordre de quelques dixièmes de mm ;* b, *coussin à basse pression (40 mb). La hauteur de fuite est de l'ordre de 3 mm.*

Photo en bas, l'Aérotrain interurbain développé par le ministère des Transports détient le record de vitesse des véhicules de transport terrestre (429 km/h).

Figure 7 : guidage des véhicules à coussins d'air ; deux solutions : a, *véhicule Aérotrain (aiguillage par lame flexible) ;* b, *véhicule Grumman (aiguillage par transfert de voie).*

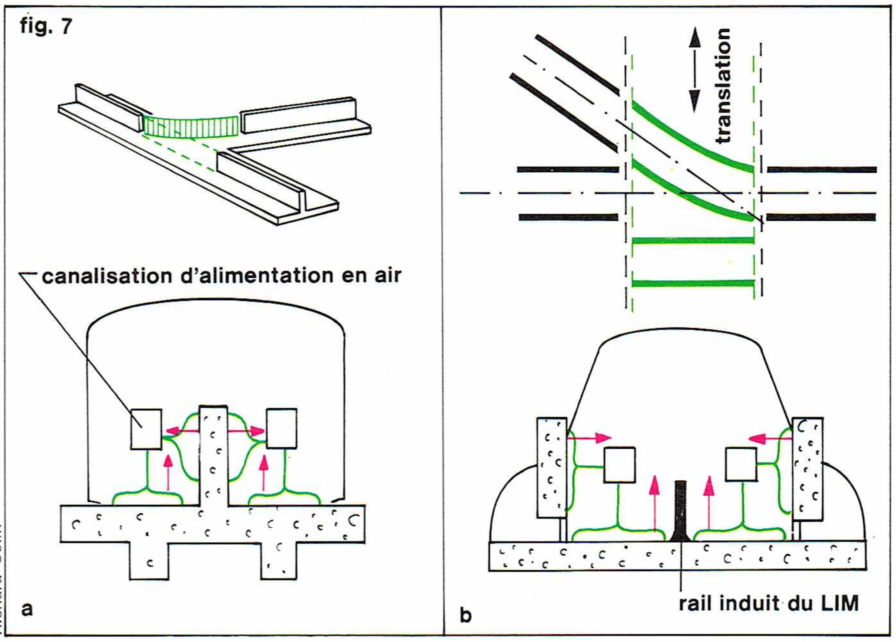

Richard Colin

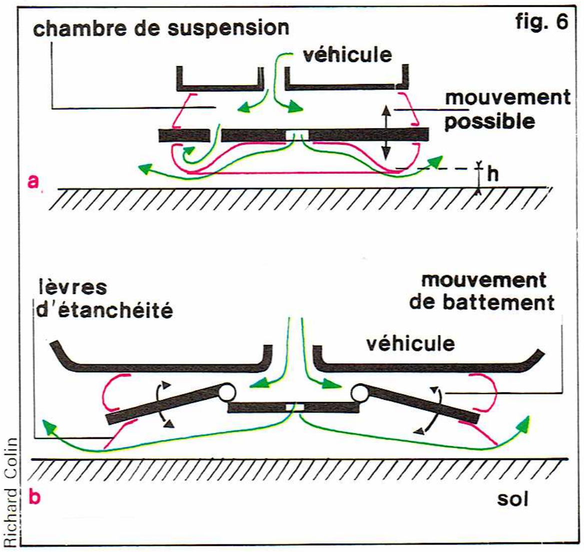

Richard Colin

I.R.I.

▶ *Figure 10 : forces électrodynamiques mises en jeu lors d'une sustentation électrodynamique à répulsion.*

Les coussins magnétiques

Trois types de sustentations sont envisageables pour sustenter et guider un véhicule à grande vitesse :
— sustentation magnétique par aimants permanents;
— sustentation électrodynamique par répulsion;
— sustentation électromagnétique par attraction.

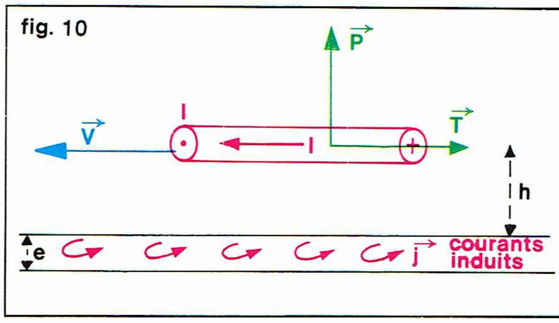

Sustentation magnétique par aimants permanents

Sur la voie et sous le véhicule sont disposés des aimants permanents se repoussant l'un l'autre : les pôles identiques sont face à face (*fig.* 8).

▶ *Figure 8 : sustentation magnétique par aimants permanents. Sur la voie et sous le véhicule sont disposés des aimants permanents se repoussant l'un l'autre, les pôles identiques se faisant face.*
Figure 11 : variation des composantes portance (P) et traînée (T) d'un système électrodynamique en fonction de la vitesse.

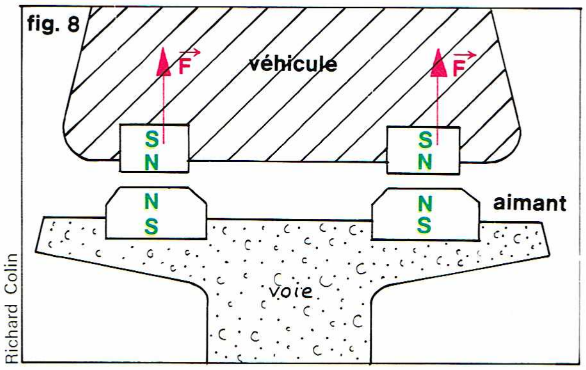

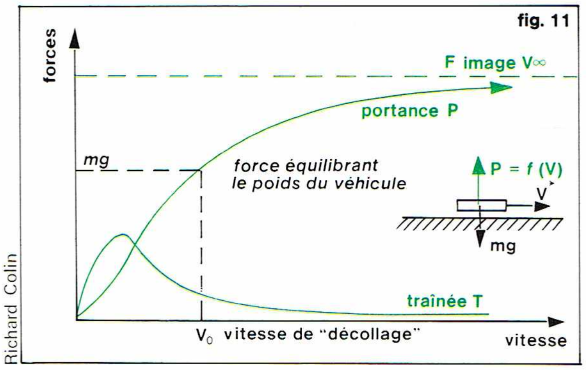

Sur la voie, il est envisagé d'utiliser des ferrites de baryum, les aimants à base de lanthanides (cobalt-samarium) étant réservés au véhicule. Les forces magnétiques spécifiques engendrées par les aimants permanents sont relativement faibles, et l'intérêt de ce système consiste surtout dans le fait qu'il n'engendre pas de traînée induite. Cependant, un système de guidage, indépendant du système de sustentation, doit être ajouté; de plus, en fonction de la charge, la hauteur de vol fluctue. Sur le plan dynamique, les forces de répulsion des aimants ne comportent pas de terme d'amortissement, compromettant ainsi la stabilité à grande vitesse. En outre, le coût et la rareté des matériaux s'opposent au développement de cette technologie.

Sustentation électrodynamique à répulsion

Principe

Le déplacement, au-dessus d'une plaque conductrice en alliage d'aluminium ou de cuivre, d'une bobine parcourue par un courant constant provoque, dans cette plaque, des courants induits dont le sens est tel qu'ils tendent à s'opposer à la variation du flux, c'est-à-dire qu'ils s'opposent à la pénétration du champ dans le conducteur (*fig.* 9). A vitesse infinie, la variation de flux induit des courants qui s'opposent à toute pénétration du champ magnétique. Tout se passe comme si, sous la bobine, se déplaçait une bobine « image » synchrone dont le champ serait opposé au champ inducteur. Dans ces conditions, les deux bobines (la réelle et la fictive) se repoussent, tout comme deux aimants identiques dont les pôles de même nature se font face.

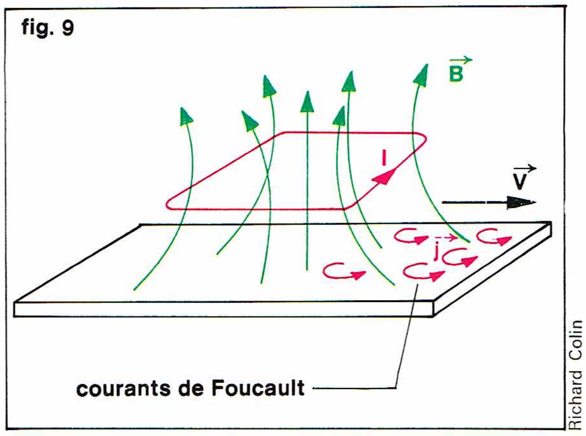

▶ *Figure 9 : principe de la sustentation électrodynamique à répulsion.*

Caractéristiques des forces électrodynamiques

Suivant la loi de Laplace, il apparaît entre les courants induits liés à la plaque et les courants inducteurs une force résultante qu'il est commode de décomposer en un terme de portance P, perpendiculaire à la vitesse, et un terme de traînée T, colinéaire à la vitesse (*fig.* 10). Les forces P et T sont liées :
— à la hauteur de vol,
— aux caractéristiques géométriques de la bobine (longueur, largeur) et de la plaque (largeur, épaisseur),
— au courant dans la bobine I,
— à la conductibilité du matériau de la plaque.

La *figure* 11 indique l'allure générale des forces P et T en fonction de la vitesse, tous les autres paramètres étant fixés par ailleurs. La caractéristique de portance permet de déterminer la vitesse limite nécessaire à la lévitation du véhicule de masse *m*.

Pour une vitesse donnée, les forces sont proportionnelles au carré du courant I et varient selon une loi approximativement exponentielle en fonction de la hauteur de vol. Ce système est stable, car une réduction de la hauteur de vol entraîne une augmentation de la portance qui tend à éloigner la bobine de la plaque.

L'utilisation de ce système pour la sustentation d'un véhicule pose de nombreux problèmes

Par principe, à vitesse nulle, la portance est nulle; les véhicules doivent donc atteindre, grâce à un autre moyen de sustentation, une vitesse suffisante. Les véhicules sont en conséquence dotés d'un « train d'atterrissage » qui représente une masse conséquente.

Le deuxième problème concerne la réalisation des bobines. Les forces de lévitation doivent équilibrer le poids des véhicules, c'est-à-dire plusieurs dizaines de tonnes; or le seul moyen connu pour engendrer des champs magnétiques suffisants est l'utilisation de bobines supraconductrices dans lesquelles circulent des centaines de milliers d'ampères-tours. Les conducteurs en alliage de titane-niobium, par exemple, sont disposés à l'intérieur d'une enceinte cryogénique refroidie par de l'hélium liquide à 4,2 °K. Le courant électrique circule alors, théoriquement, sans source extérieure dans ces conducteurs; en réalité, il est indispensable de réactiver périodiquement les bobines et de compenser, pratiquement en permanence, les pertes cryogéniques en recyclant l'hélium liquide. La réalisation des enceintes cryogéniques est très délicate, car elles doivent maintenir la bobine à l'état supraconducteur et, de plus, être capables de transmettre les efforts qui apparaissent au niveau des conducteurs aux châssis du véhicule.

En dernier lieu, il est à noter que les bobines supraconductrices produisent un champ magnétique très intense qui peut être dangereux pour les voyageurs installés dans la cabine, et il convient donc d'installer des blindages magnétiques.

A l'heure actuelle, cette technologie est en sommeil, et son succès dépend beaucoup des progrès faits en cryogénie.

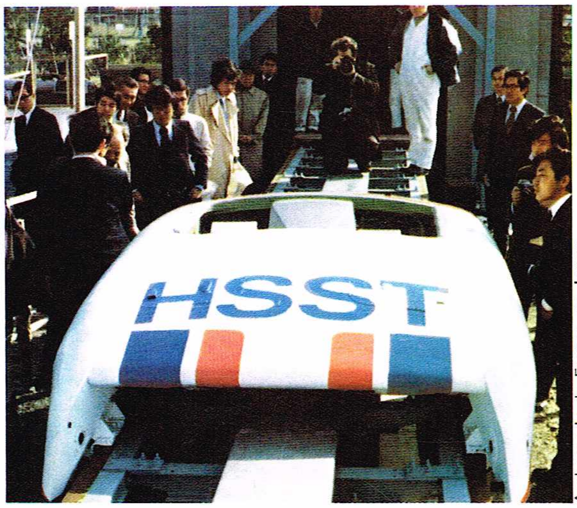

Ambassade de France au Japon

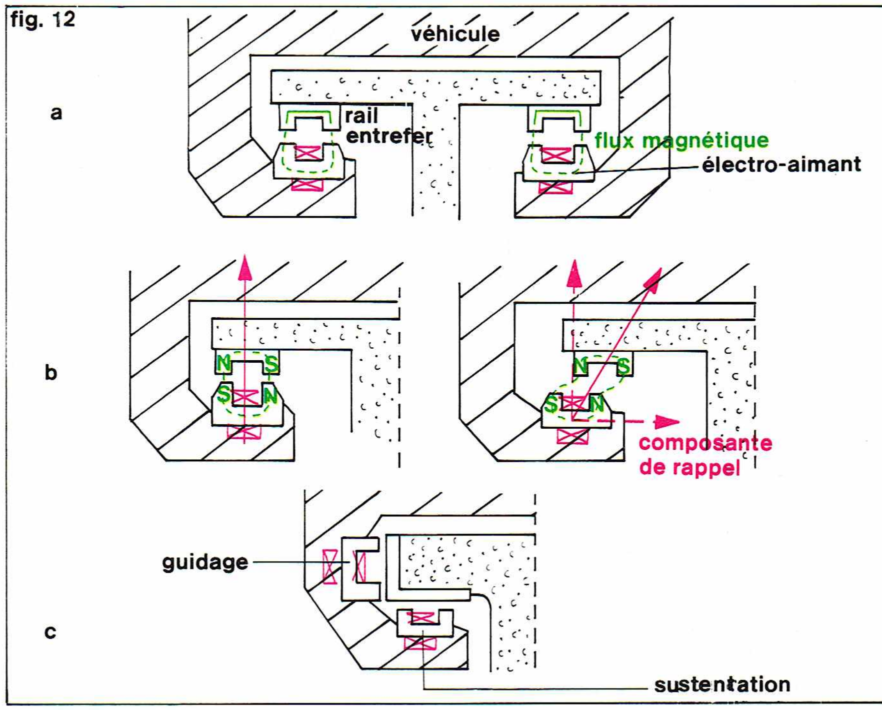

Richard Colin

▲ *A droite, figure 12 : sustentation électromagnétique par attraction. Voir développement dans le texte.*

A gauche, banc d'essai du véhicule de la JAL à Kawasaki.

▼ *Ci-dessous, véhicule expérimental à sustentation électrodynamique développé par les JNR.*
En bas, véhicule Krauss-Maffei. Sustentation à attraction (R.F.A.).

Sustentation électromagnétique par attraction

Principe

Le véhicule est sustenté par des électro-aimants classiques agissant sur un rail solidaire de la voie (*fig.* 12a).

Les problèmes spécifiques

La principale difficulté rencontrée lors de la mise au point de ce mode de sustentation réside dans le fait que les forces d'attraction entre l'électro-aimant et le rail sont d'autant plus intenses que l'entrefer est plus faible. Si le courant d'excitation des bobines est constant, il existe une seule valeur de l'entrefer pour laquelle la force magnétique équilibre exactement le poids du véhicule. Si, pour une raison quelconque, la valeur de l'entrefer diminue, la force de sustentation augmente, et le véhicule sera soulevé, allant jusqu'à entrer en contact avec le rail. De même, si l'entrefer augmente, la force de sustentation diminue, et le véhicule est alors entraîné par son poids et tombe. Le système est donc naturellement instable ; dans ces conditions, il devient indispensable de contrôler en permanence le courant dans les électro-aimants pour conserver un entrefer à peu près constant.

Du point de vue de la sécurité se pose le problème d'une coupure d'alimentation électrique qui se traduirait immédiatement par une chute brutale de l'engin.

Pour que l'attraction ait une valeur suffisante, tout en conservant dans les électro-aimants des courants dont l'intensité rend possible une régulation fine, il est nécessaire de prévoir un entrefer réduit (10 à 20 mm). Dans ces conditions, la puissance électrique dissipée dans les électro-aimants de sustentation provient essentiellement des pertes par effet Joule dans les bobinages, soit 2 à 3 kW par tonne sustentée. Il est toutefois indispensable, pour assurer la stabilité dans toutes les configurations de fonctionnement, d'installer une puissance très supérieure.

Il faut d'ailleurs noter que les véhicules à sustentation magnétique par attraction sont lourds. Un engin de 144 places, capable d'atteindre une vitesse de 300 km/h, pèserait 135 tonnes, soit une puissance de sustentation de 2,8 kW par place offerte.

Guidage

Par sa géométrie, le système permet de s'affranchir des problèmes de guidage, car un déplacement latéral du véhicule induit des forces de rappel dans le plan horizontal (*fig.* 12b). Toutefois, pour mieux résister aux rafales de vent latéral, on préfère disposer deux séries d'aimants (*fig.* 12c).

Ambassade de France au Japon

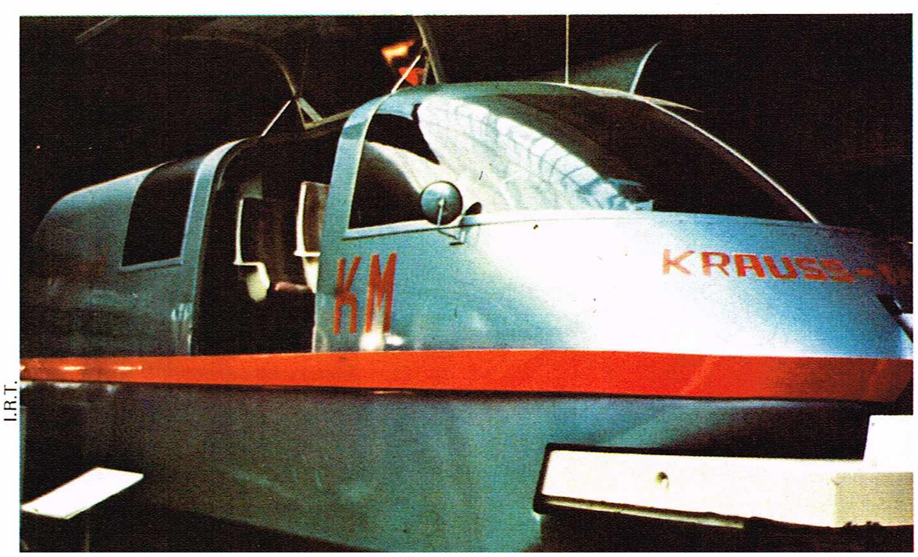

I.R.T.

I.R.T.

▲ *Le premier véhicule* Aérotrain *interurbain* I-80 *équipé d'une hélice carénée (280 km/h sur la voie expérimentale au nord d'Orléans).*
▼ *Hélice carénée de l'*Aérotrain *interurbain* I-80. *On voit sur cette photographie la tuyère d'éjection des gaz dilués ainsi que la prise d'air sur le toit de l'*Aérotrain.
*Figure 13 : traitement acoustique du groupe motopropulseur de l'*Aérotrain *expérimental haute vitesse (*I-80 HV*).*

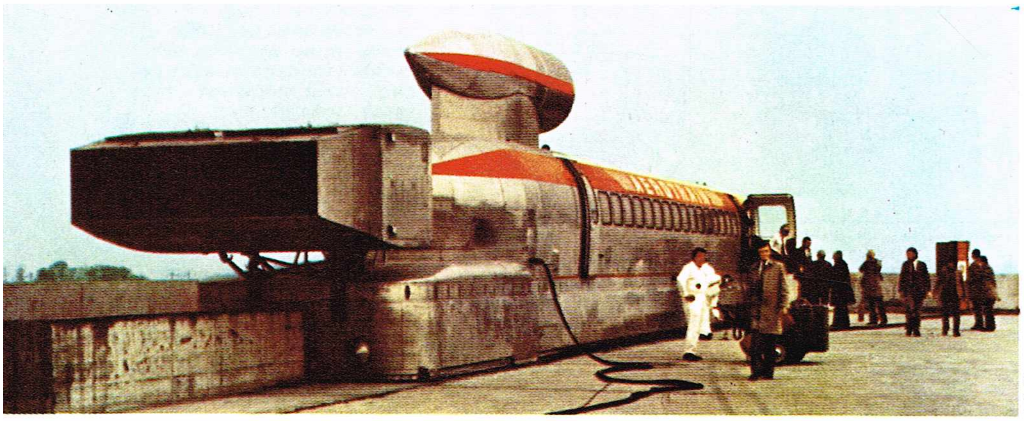

I.R.T.

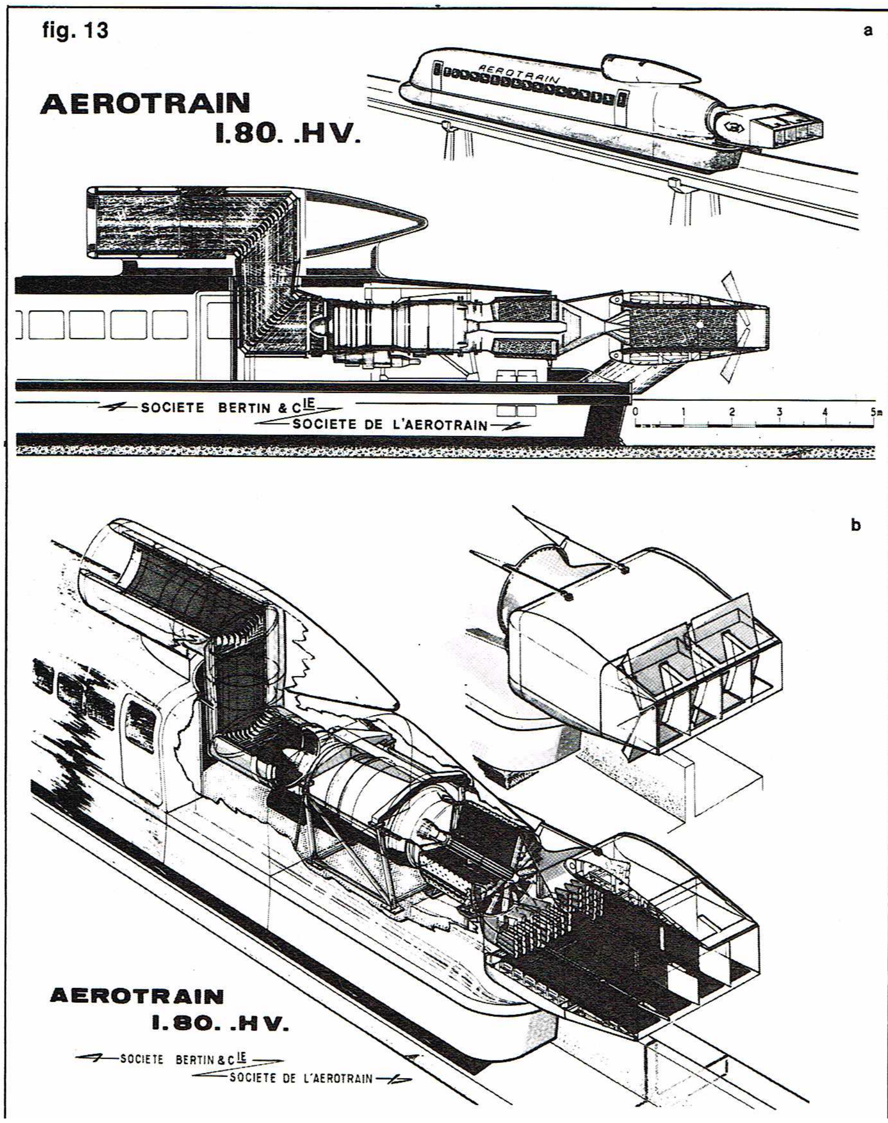

Sté Bertin et Cie

Traînée induite

Tout comme dans le cas du système électrodynamique, les rails de sustentation sont le siège de courants de Foucault qui font apparaître des forces parasites : dans le sens vertical, les courants induits tendent à réduire la portance; dans le sens du déplacement, les courants induits créent une traînée électromagnétique que doit vaincre le moteur de traction. Le *feuilletage* des rails permet une réduction de ces forces parasites, mais relève sensiblement le coût de la voie.

La propulsion des véhicules à grande vitesse

Les technologies nouvelles de sustentation ayant comme principe fondamental l'élimination d'un contact matériel, il était logique de propulser les véhicules avec des moteurs ne faisant pas appel aux forces de frottement. De plus, ces moteurs doivent fonctionner aussi bien en freinage qu'en traction, et, pour des raisons de sécurité, leurs performances en freinage doivent être supérieures à celles de traction. Il est beaucoup moins grave de perdre du temps à l'accélération que de ne pas pouvoir s'arrêter.

Dans l'état actuel de la technique, il existe deux familles de propulseurs qui respectent ce cahier des charges. Ce sont les propulseurs utilisés en aéronautique (réacteur ou hélice carénée) et les moteurs électriques linéaires à induction.

Les propulseurs aéronautiques adaptés au transport terrestre

Le premier véhicule *Aérotrain* interurbain I-80 était équipé d'une hélice carénée entraînée par deux turbines à gaz Turboméca développant au total 1 900 kW. Cette motorisation a permis d'atteindre avec le véhicule de 20 tonnes la vitesse de 280 km/h sur la voie expérimentale construite au nord d'Orléans. Le freinage était obtenu par inversion du pas de l'hélice. Mais l'hélice ne permettait pas, malgré l'amélioration due au carénage, d'obtenir des poussées suffisantes pour atteindre de très grandes vitesses.

Pour des vitesses supérieures à 300 km/h, le réacteur était la solution logique. Toutefois, il était difficile d'installer un réacteur sur un véhicule circulant près du sol à cause des nuisances sonores. Aussi la société Bertin a-t-elle développé un système d'insonorisation fondé principalement sur le principe de la dilution du jet de gaz chaud dans une trompe. Comme en aéronautique, le freinage est obtenu grâce à un inverseur de poussée; un frein à mâchoires serrant le muret de guidage permet l'immobilisation complète du véhicule (*fig.* 13).

En cas d'arrêt d'extrême urgence, un dispositif de mise à l'air libre de la canalisation d'alimentation des coussins de sustentation permet l'annulation de celle-ci. Dans cette situation, le véhicule se pose sur des patins spéciaux assurant un freinage efficace.

Le véhicule *Aérotrain* ainsi motorisé détient le record du monde de vitesse des engins de transport terrestre avec voyageurs : 429 km/h.

Les moteurs électriques linéaires à induction
* *Les moteurs asynchrones*

Dans un dessein de simplicité, le moteur linéaire est le plus souvent assimilé à un moteur rotatif asynchrone triphasé. Dans cette configuration, le couple fourni par le moteur se transforme en une poussée. L'inducteur est installé dans le véhicule, l'induit fixé sur la voie (*fig.* 14).

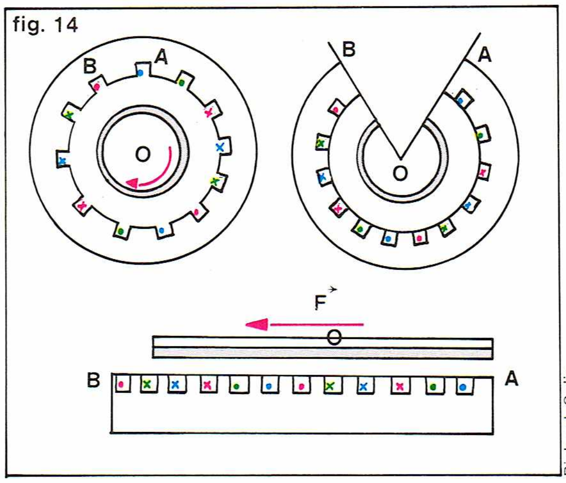

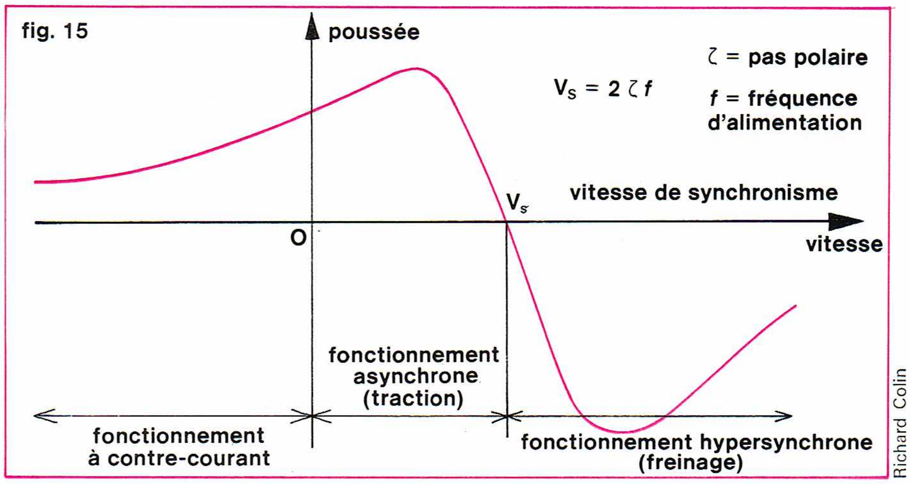

Particularités électromagnétiques des moteurs linéaires. Effet d'extrémité

Contrairement aux moteurs rotatifs où l'induit « baigne » dans le flux magnétique, l'inducteur du moteur linéaire « absorbe » continuellement un induit magnétiquement neutre. Dans ces conditions, lorsque l'inducteur est animé d'une grande vitesse par rapport à l'induit, il existe à l'avant du moteur une zone qui ne travaille pratiquement pas. Tout se passe comme si le moteur était moins long qu'il n'est en réalité. En arrière du moteur apparaît en outre une zone où l'induction n'est pas nulle. L'énergie stockée dans cette portion d'induit est perdue pour la propulsion.

Au total, la longueur active du moteur est d'autant plus réduite que la vitesse est plus grande. Aussi, pour obtenir des poussées importantes à grande vitesse, les ingénieurs sont-ils conduits à construire les moteurs les plus longs possible.

Commande des moteurs linéaires

Les courbes poussée-vitesse des moteurs linéaires sont semblables à celles des moteurs électriques asynchrones classiques (*fig.* 15). Dans ces conditions, le réglage de l'effort moteur peut se faire de deux manières différentes en fonction de la vitesse.

- *Tension variable.* On applique aux bornes du moteur une tension *u* triphasée réglable ($0 < u <$ U nominale). Mais le moteur fonctionne pendant la phase d'accélération à de forts glissements, c'est-à-dire avec des rendements faibles (*fig.* 16a), et chauffe l'induit.
- *Fréquence et tension variables.* On conserve tout au long de l'accélération un glissement faible afin de bénéficier d'un rendement et d'un facteur de puissance maximaux. Pour cela, le moteur est alimenté par un convertisseur statique qui génère un courant alternatif triphasé à partir d'un courant continu, c'est-à-dire un onduleur à fréquence variable (*fig.* 16b).

Freinage du véhicule au moyen du moteur linéaire

Si l'on se réfère à la caractéristique de poussée d'un moteur linéaire, deux types de freinages sont envisageables.

— On se place au-delà du synchronisme, le moteur se comportant comme une génératrice asynchrone; ce type de freinage impose évidemment d'utiliser pour l'alimentation du moteur un onduleur réversible, ce qui pose des problèmes à bord d'un véhicule.

— On se place en configuration de contre-courant, c'est-à-dire que, par la commutation de deux phases, le champ glissant est inversé par rapport à la vitesse du véhicule. Toutefois les efforts de freinage obtenus à grande vitesse sont médiocres, et cette solution ne présente pas un grand intérêt.

La solution la plus réaliste est, dans ces conditions, l'injection de courant continu dans deux des phases du moteur : l'inducteur se comporte comme une succession de pôles Nord et Sud alternés défilant à grande vitesse. Le passage des pôles N. et S. devant le rail induit crée des courants de Foucault qui provoquent un effort de freinage important (*fig.* 17).

Les moteurs électriques linéaires de première génération

Dans le cas d'un moteur linéaire élémentaire, il existe une force d'attraction non négligeable entre l'inducteur et le rail induit : le système de guidage du véhicule doit donc équilibrer cet effort parasite. Aussi les moteurs de première génération avaient-ils été conçus de façon à éliminer cette composante transversale. Pour cela, le rail était entièrement amagnétique, le flux magnétique circulant entre deux moteurs élémentaires. De plus, il était relativement facile de construire de tels moteurs.

Outre les problèmes de rendement et de faible cos φ liés à la configuration même du moteur (grand entrefer, induit peu résistif, fuites magnétiques dans les têtes de bobines, etc.), le problème de la tenue mécanique du rail induit devient alors le problème n° 1. En effet, afin de conserver des performances acceptables, il faut que

▲ ***Figure 14 :** transformation géométrique d'une machine électrique rotative en machine linéaire.*
***Figure 15 :** courbe poussée-vitesse d'un moteur linéaire. Elle est semblable à celle d'un moteur électrique asynchrone classique.*

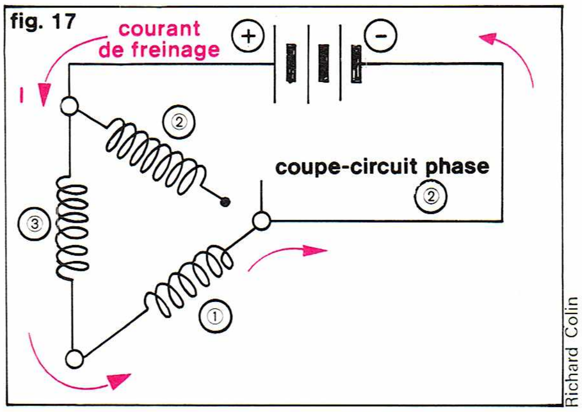

◀ ***Figure 17 :** schéma électrique du freinage par injection de courant continu dans un moteur linéaire asynchrone.*

▼ ***Figure 16;** le réglage de l'effort de traction d'un moteur linéaire peut se faire de deux manières différentes :* a, ***tension variable;*** b, ***fréquence et tension variables.***

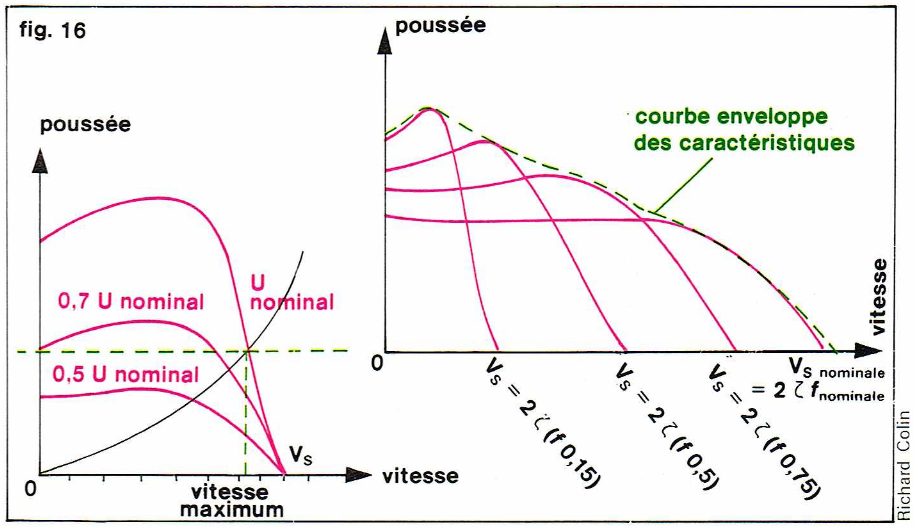

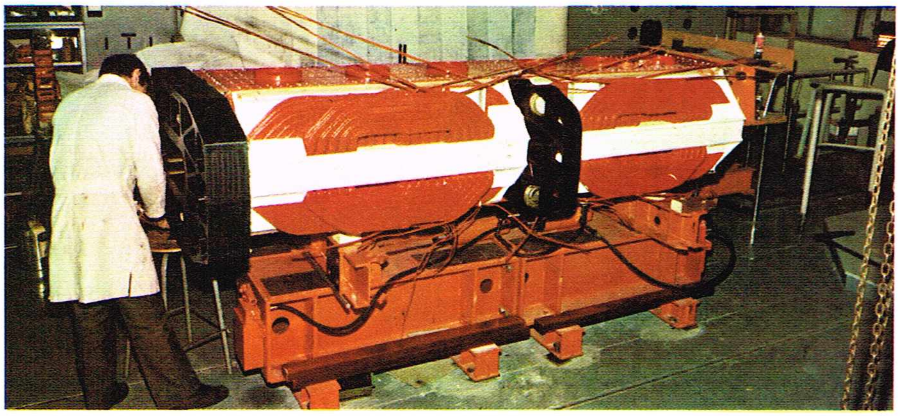

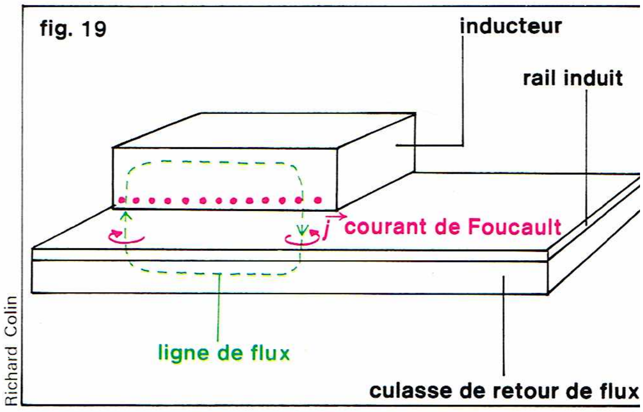

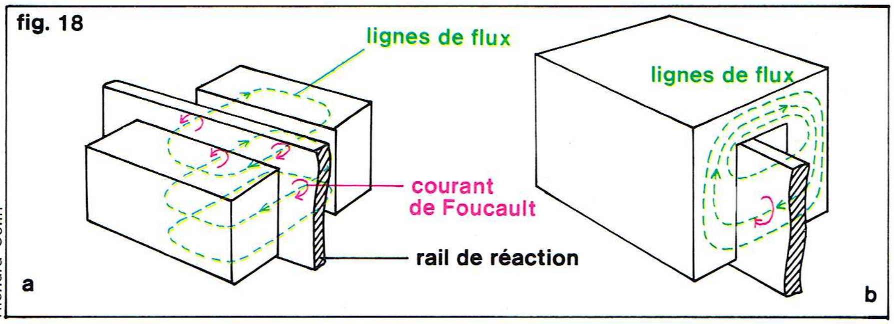

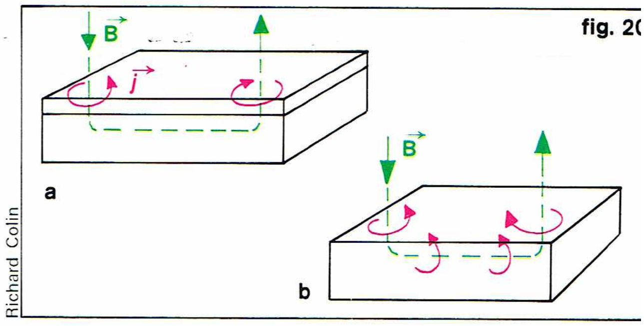

▲ *En haut, à gauche : moteur linéaire à double inducteur. En bas, à gauche, figure 18 : moteur asynchrone de 1re génération ; a, moteur symétrique ; b, moteur à flux transverse. En haut, à droite, figure 19 : schéma d'un moteur simple avec un seul inducteur. En bas, à droite, figure 20 : courants de Foucault dans un rail de réaction ; a, alliages légers ; b, fer massif.*

▼ Aérotrain *à moteur linéaire de la Société Bertin.*

l'entrefer du moteur soit faible vis-à-vis des autres dimensions. Comme tout contact entre le moteur et le rail est exclu, il est nécessaire de guider le moteur par rapport au rail de façon aussi parfaite que possible, la raideur du rail devant être suffisante pour éviter toute déformation (*fig.* 18).

Deux solutions subsistent alors quant à la technologie du rail : rail en profilé alvéolé, et rail continu de grande longueur soudé, posé tendu.

A ces problèmes purement mécaniques se superpose un problème thermique. Les courants induits circulant dans le rail élèvent sa température par effet Joule, introduisant des phénomènes de dilatation différentielle entre la voie et le rail. Il est alors nécessaire soit de prévoir des joints de dilatation, soit, dans le cas des rails soudés, de précontraindre suffisamment le rail pour que l'échauffement n'annule pas l'effort de traction.

Dans le premier cas, les joints de dilatation créent une discontinuité électrique néfaste ; dans le second cas, les contraintes dans le rail peuvent dépasser la limite élastique du matériau par temps froid et entraîner ainsi une rupture.

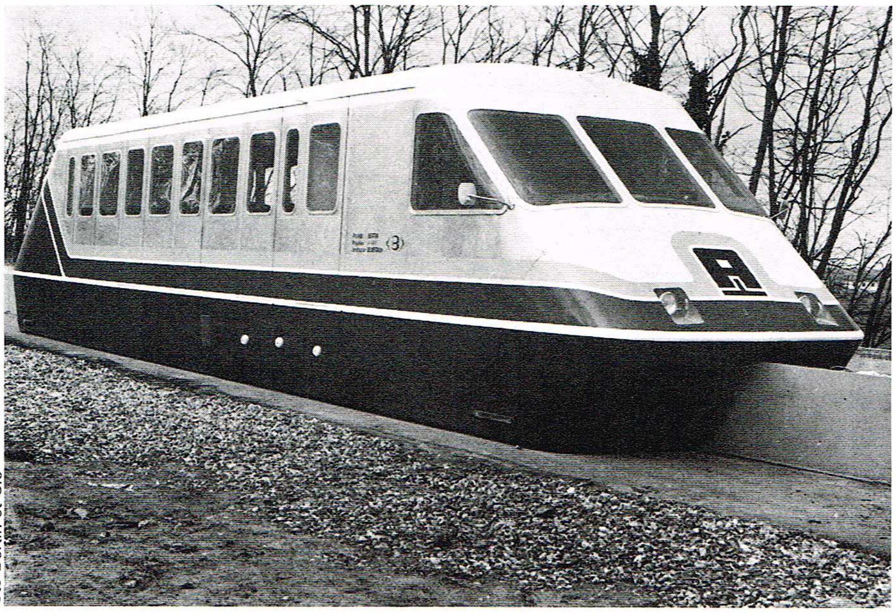

Sté Bertin et Cie

Les moteurs électriques linéaires de deuxième génération

Paradoxalement, le moteur le plus simple avec un seul inducteur n'a pas été utilisé pour la propulsion des véhicules à grande vitesse dans le passé. Mais face aux problèmes rencontrés, c'est sans doute une solution réaliste (*fig.* 19). Le rail de réaction remplit dans ce cas une double fonction :

— il est le siège des courants de Foucault ;
— il assure le retour du flux magnétique.

Les problèmes mécaniques sont alors beaucoup plus simples à traiter, la culasse ferromagnétique de retour du flux présentant une résistance mécanique très importante.

Certains constructeurs envisagent de conserver une plaque conductrice de faible résistivité (alliage léger) dans laquelle circuleront les courants de Foucault (induit composite) [*fig.* 20a]. Mais il est possible aussi d'utiliser un induit en fer massif qui assure les deux fonctions (*fig.* 20b).

Le moteur à double transformation géométrique

Ce moteur linéaire est caractérisé par le fait que l'inducteur est encastré dans l'induit, le flux magnétique se refermant par l'intermédiaire d'une culasse ferromagnétique. Cette disposition particulière de l'inducteur présente l'avantage de réduire les fuites magnétiques, ce qui est un facteur favorable pour l'amélioration du facteur de puissance (*fig.* 21 a, b et c).

Actuellement, ce moteur est capable de développer une puissance spécifique considérable ; le rendement et le facteur de puissance sont supérieurs à ceux de tous les autres types de moteurs linéaires déjà construits. Toutefois, sa compacité, très favorable du point de vue électromagnétique, pose de gros problèmes de refroidissement.

Les caractéristiques reproduites dans les courbes des *figures* 22 et 23 ont été obtenues par les ingénieurs de l'Institut de recherche des transports sur un moteur de ce type. Ce moteur prototype destiné à propulser des véhicules jusqu'à 200 km/h a démontré la validité de cette solution.

D'autre part, le facteur de puissance de ce moteur très élevé pour ce type de machine ainsi que la dissymétrie électrique entre les trois phases permettent un bon fonctionnement sous alimentation monophasé 50 Hz, le bobinage du moteur restant, bien entendu, triphasé, et le déphasage nécessaire est obtenu par un condensateur. En jouant sur la valeur de la capacité, on peut ajuster la poussée du moteur en fonction du glissement.

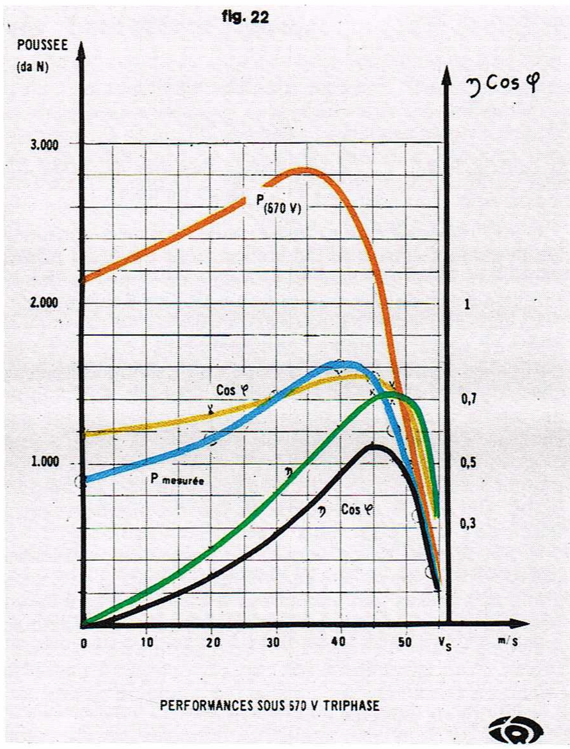

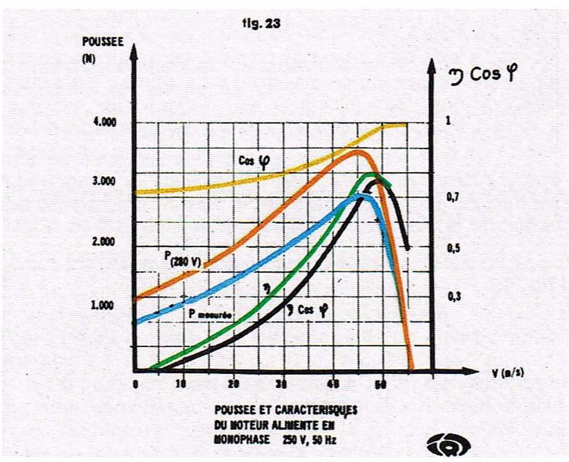

I.R.T.

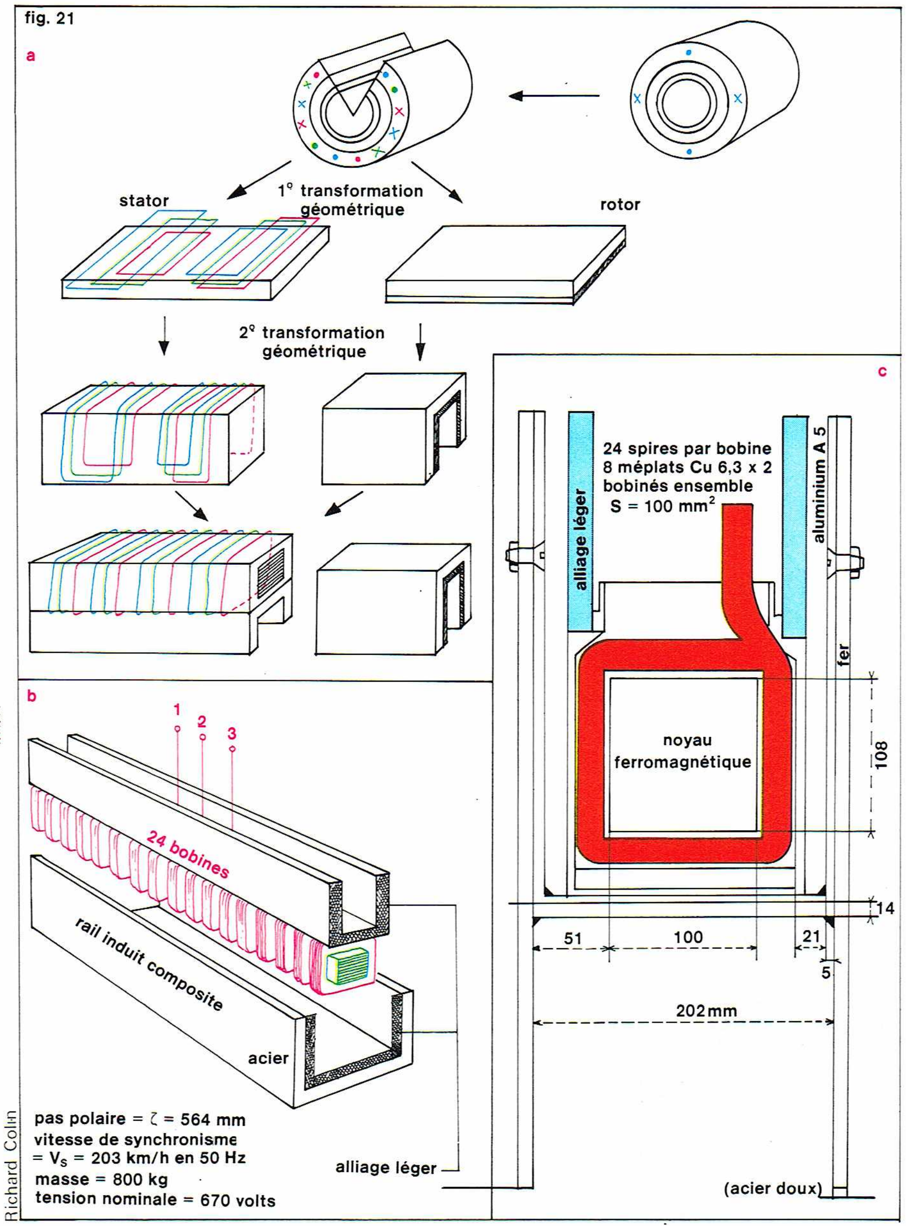

Richard Colin

***** ***Le moteur linéaire synchrone***

Principe

D'une part, à bord du véhicule, est installée une bobine cryogénique engendrant un fort champ magnétique constant, d'autre part la voie est équipée d'un réseau de trois conducteurs alimentés chacun par une phase d'un réseau triphasé. On génère ainsi au-dessus de la piste une onde électromagnétique qui se propage à la vitesse $V_c = 2\tau f$, τ étant le pas polaire et *f* la fréquence d'alimentation. Cette onde se comporte comme une succession d'aimants de pôles opposés solidaires entre eux, qui défileraient à la vitesse V_c par rapport à la voie. La bobine, dont la polarité magnétique est fixée, se trouve alors attirée par un pôle et repoussée par les deux pôles mitoyens, l'influence des autres pôles magnétiques étant beaucoup moins forte (*fig.* 24). On réalise ainsi un engrènement magnétique : le véhicule est entraîné par l'onde d'induction.

Avantages et inconvénients

Le véhicule est passif si l'on suppose les problèmes de cryogénie résolus; en revanche, sa vitesse est imposée par la fréquence du courant inducteur, ce qui implique la possibilité de faire varier cette fréquence pour les phases du mouvement à vitesse variable conducteur.

Les courants circulant dans la voie sont énormes, et la mise sous tension doit se faire tronçon par tronçon au

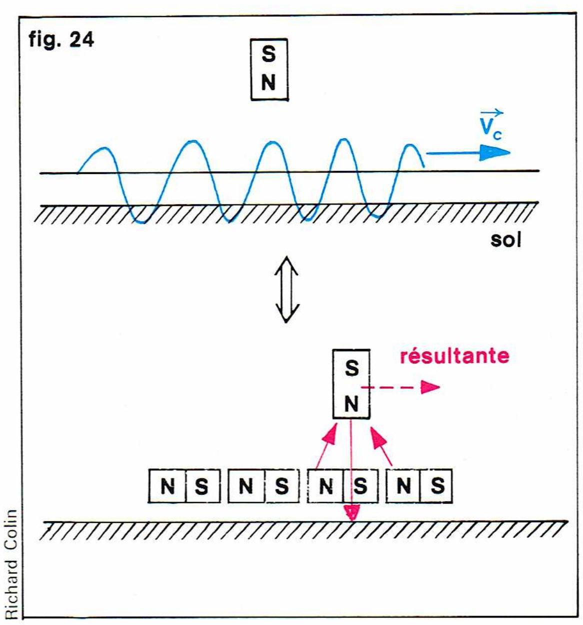

Richard Colin

▲ Figure 22 : performances sous 670 V triphasé ; en vert, poussée du moteur. Figure 23 : caractéristiques en monophasé ; tension normalisée 250 volts. Figure 21 : moteur axial ou moteur en U ; a, transformation géométrique ; b, schéma du moteur axial ; c, schéma du moteur axial de Firminy (d'après document I.R.T.).

◄ Figure 24 : l'onde électromagnétique se propage à la vitesse $V_c = 2\tau f$, τ étant le pas polaire et f la fréquence d'alimentation.

fur et à mesure que le véhicule progresse. Par ailleurs subsiste le risque de voir le véhicule décroché de sa position d'équilibre dans la vague électromagnétique à la suite d'une perturbation extérieure. Dans le domaine des moteurs électriques linéaires à grande vitesse, c'est sans nul doute la solution la plus futuriste.

Les expérimentations sur modèles réduits, une solution économique et fructueuse

La mise au point d'un système de transport guidé à grande vitesse nécessite des moyens considérables. Il est indispensable de posséder des pistes d'essais de plusieurs kilomètres de long pour tester les différents organes à grande vitesse; de plus, on conçoit aisément que toute modification, aussi minime soit-elle, implique des délais et des dépenses importantes lorsqu'elles intéressent la voie sur plusieurs kilomètres.

D'autre part, les composants des systèmes de transports nouveaux vers lesquels se portent les efforts des techniciens concernent principalement des dispositifs électromagnétiques : systèmes de sustentation magnétique, moteurs électriques linéaires et dispositifs de freinage à courants de Foucault. Dans l'état actuel des connaissances et des moyens informatiques, il n'est pas possible de déterminer entièrement ces systèmes par le calcul, et seule l'expérimentation est capable de révéler toutes les possibilités de ces machines.

Face à cette difficulté, l'Institut de recherche des transports a élaboré une méthodologie fondée sur des essais de modèles réduits; les essais d'une machine électrique, à l'échelle 1/3, par exemple, mettent en jeu des dispositifs beaucoup plus légers; les masses variant comme le cube de l'échelle, un moteur linéaire de trois tonnes est représenté par une maquette d'une centaine de kilos sur laquelle il est facile d'apporter des modifications.

Cette méthode de recherche, déjà appliquée dans bien des domaines (l'aéronautique en particulier), n'est valable que lorsque l'on est capable d'extrapoler les résultats obtenus sur les maquettes aux machines réelles. Il était donc indispensable de disposer d'une corrélation entre ces résultats, c'est-à-dire d'établir les lois de similitude.

L'élaboration des lois de similitude électromagnétique

Le principe de cette similitude consiste à conserver des phénomènes similaires dans le modèle à l'échelle grandeur et dans la maquette. Cela implique de conserver les mêmes matériaux ainsi que la même induction magnétique en tout point des deux machines, afin d'éliminer toute distorsion liée à d'éventuels phénomènes électromagnétiques non linéaires (saturation). Les phénomènes rencontrés dans les machines électriques précédemment évoquées sont de nature essentiellement inductive, et les effets capacitifs (courant de déplacement) sont négligeables; de ce fait, les lois générales de l'électromagnétisme se résument dans les quatre équations suivantes :

$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \Sigma ni$ (théorème d'Ampère)

$e = -\frac{d\Phi}{dt}$ (loi de Faraday)

$U = ri$ (loi d'Ohm)

$\vec{B} = f(\mu, \vec{H}, t, ...)$ (caractéristiques magnétiques de la matière).

Il faut remarquer que l'option qui consiste à conserver les matériaux ainsi que l'induction pour un point donné dans le modèle grandeur et la maquette implique que la fonction *f* est identique pour le modèle et la maquette.

Le *tableau* II fournit les corrélations entre les paramètres liés aux deux machines homothétiques (*fig.* 25). En particulier, l'unité de temps dans cette similitude suit le carré de l'échelle; par exemple, à l'échelle 1/3, l'unité de temps est le 1/9 de seconde. L'augmentation des vitesses avec la réduction de l'échelle conduit à des dispositifs d'essais particuliers : ainsi, pour étudier un moteur à 200 km/h en vraie grandeur à l'aide d'un modèle réduit au 1/3, il est nécessaire d'expérimenter jusqu'à 600 km/h. Cela pose deux types de contraintes :

- *Sur le plan mécanique,* il est nécessaire de réaliser des roues d'essais de faibles dimensions, mais capables de grandes vitesses périphériques. Malgré les problèmes posés par la force centrifuge, ces roues sont toujours préférées à des dispositifs linéaires pratiquement irréalisables. Pour la même raison, on est conduit à limiter la réduction du modèle à l'échelle 1/5, l'échelle 1/3 paraissant la mieux adaptée.
- *Sur le plan thermique,* les températures ne sont conservées par la similitude qu'en régime adiabatique. Cela conduit à des essais brefs, de l'ordre de la seconde, pour deux raisons :

— il faut rester suffisamment isotherme, pendant la durée de l'essai, pour pouvoir découpler les influences thermiques des performances électromagnétiques (variations des résistances électriques par échauffement);

— il faut rester dans le domaine adiabatique afin que les mesures locales des dérivées de la température par rapport au temps fournissent une mesure exacte des pertes de la machine et de leur localisation.

▼ En bas, à gauche, le nouveau frein électromagnétique (système SENF) monté, ici, sur un bogie du TGV 001, est un des premiers composants développés à l'aide de la similitude électromagnétique. Ci-dessous : premiers essais du frein SENF sur une maquette au 1/25^e. A droite, figure 25 : engrènement magnétique.

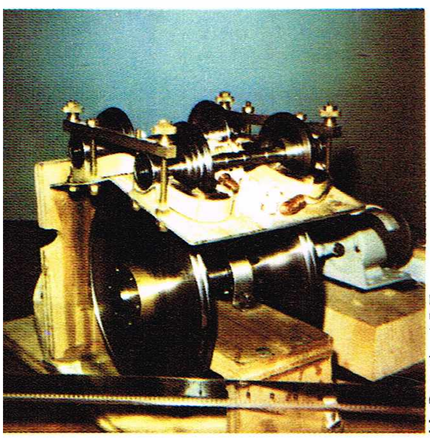

M. Pascal - I.R.T.

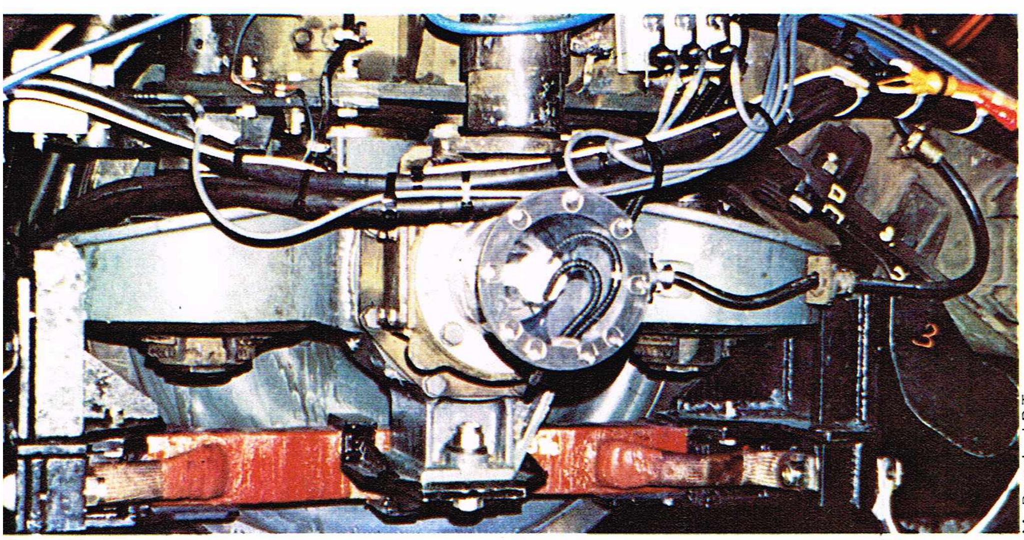

M. Pascal - I.R.T.

fig. 25

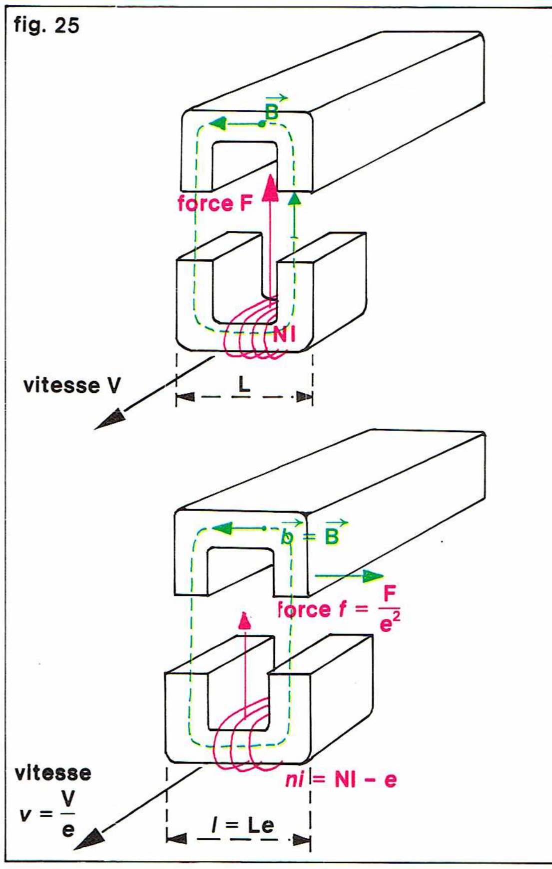

Richard Colin

Les nouveaux modes de transport urbain

Ces dix dernières années ont vu naître nombre de nouveaux modes de transport terrestre. Cette explosion d'idées a touché, sans exception, tous les domaines du transport, à savoir l'interurbain (distances franchies supérieures à 100 km), le suburbain (de 20 à 100 km) et le transport à courte distance (inférieure à 20 km). Nous parlerons de cette dernière catégorie, qui, sans aucun doute, a trouvé la plus large audience parmi les novateurs.

Cet engouement, né aux États-Unis, a été suscité par plusieurs facteurs :

— démocratisation de l'automobile, soulignant l'inadaptation des réseaux routiers, les problèmes de pollution, etc. ;

— manque d'attrait des modes de transport classiques souvent dans un état proche de la vétusté ;

— introduction de conceptions futuristes par les industries aéronautiques et aérospatiales cherchant à diversifier leur activité (c'est surtout vrai aux États-Unis).

Cet enthousiasme s'est cependant peu à peu éteint ; l'importance des efforts à fournir tant du point de vue technique que du point de vue financier est la cause essentielle de ce désistement progressif. A l'heure actuelle, sur plus de 150 projets, seuls quelques-uns sont arrivés à maturité. Fort heureusement, durant ce laps de temps, le secteur classique a proposé d'intéressantes innovations : commande de feux centralisée, plans de circulation, couloirs d'autobus, feux commandés par autobus, etc. Celles-ci ont permis d'améliorer très sensiblement une situation qui devenait critique et de reporter l'échéance à plus tard.

Le coût de l'énergie, l'importance grandissante accordée aux problèmes de pollution sont des éléments qui, à terme, risquent de relancer la grande bataille : transport individuel contre transports collectifs. Cette fois-ci, ces derniers seront armés de solutions qui, sans être aussi spectaculaires que les projets initiaux, auront gagné en réalisme.

Classification des systèmes en fonction des missions de transport

Les différents types de missions

Celles-ci se répartissent en trois catégories.

- **Transport spécifiquement urbain** (T. S. U.), qui remplit une mission de base dans un environnement urbain.
- **Transport hectométrique** (T. H.), qui remplit une mission complémentaire dans un environnement urbain.
- **Transport spécialisé** (T. S.), qui remplit une mission quelconque dans un environnement urbain.

Ces missions peuvent être réalisées de différentes manières selon l'importance des trafics à écouler, des distances à franchir, des fréquences souhaitées, etc.

La *figure* 26 présente les grandes familles susceptibles de remplir les diverses missions de transports spécifiquement urbains, ainsi que celles des deux autres catégories, qui ne sont que des cas particuliers de la première. Notons également, outre les systèmes à cabine, les systèmes à bande transporteuse dont les missions sont essentiellement celles de transport hectométrique et de transport spécialisé.

fig. 26

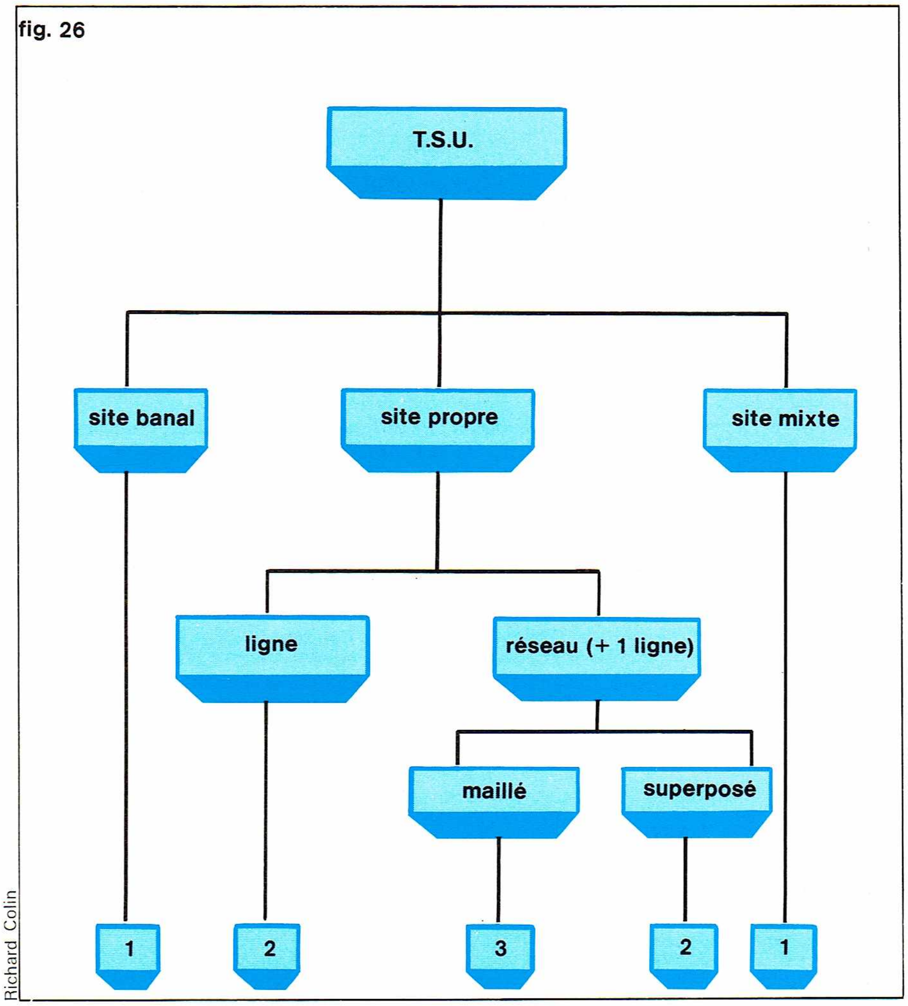

▲ *Figure 26 : familles de systèmes rencontrées dans les modes nouveaux de transport (métro exclu).*
Site : *lieu de circulation ; il est* banal *lorsqu'il utilise la voirie normale, qu'il soit guidé ou non ; il est dit* propre *lorsqu'il utilise une voie imposant le guidage et protégée de toute interférence avec toute autre forme de trafic ; il est dit* mixte *pour toutes combinaisons des deux types précédents.*
Réseau maillé : *réseau dans lequel n'importe quel véhicule peut aller à n'importe quel endroit.*
Réseau superposé : *les véhicules sont affectés à une seule ligne. Les déplacements se font avec des correspondances (rupture de charge) en des lieux bien précis.*
1, 2, 3 *sont les différentes familles de systèmes.*

Les familles de systèmes

Nous nous proposons d'examiner l'essentiel des caractéristiques de ces familles et les implications technologiques qui en découlent.

Les systèmes à grosses cabines

Ceux-ci utilisent des véhicules dont la capacité unitaire est supérieure à 100 passagers. Circulant sur un site banal et/ou mixte, ces systèmes ne sont pas automatisables, ce qui implique la nécessité d'un chauffeur. De plus, leurs performances dépendent très fortement de la congestion du réseau routier (à l'heure actuelle, la vitesse moyenne de l'autobus parisien est de 11 km/h *intra-muros* et de 17 km/h en banlieue).

Les systèmes à moyennes cabines

Dans ce cas, la capacité des véhicules varie entre 10 et 50 passagers. Circulant en site propre, ces systèmes apportent un certain nombre d'améliorations par rapport à ceux de la première famille. Les principales sont : l'automatisation qui permet d'utiliser la ligne à sa capacité maximale, la régularité de marche, la vitesse moyenne plus élevée, le confort de marche, etc. Ce type de système est particulièrement bien adapté aux axes lourds (trafic supérieur à 5 000 p/h) et aux réseaux superposés. Dans ce dernier cas, la plupart des trajets nécessitent un changement au moins. Les accroissements de capacité sont obtenus par formation de trains de deux ou plusieurs véhicules de base. Ce sont les systèmes les plus en vue, car ils répondent le mieux aux besoins qui vont s'exprimer d'ici à quelques années.

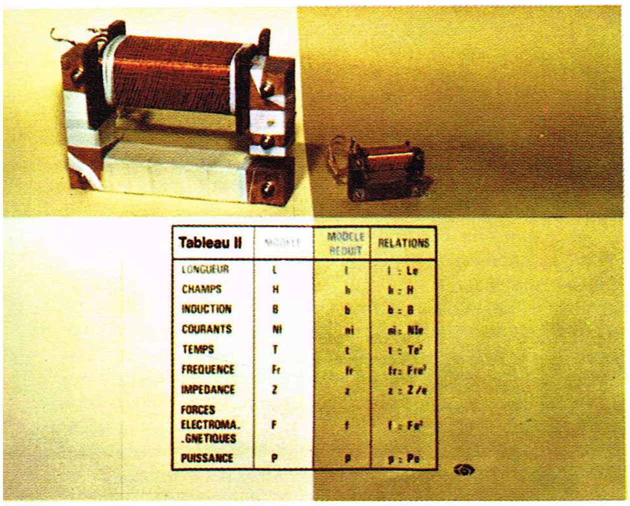

Tableau II	MODELE	MODELE REDUIT	RELATIONS
LONGUEUR	L	l	l : Le
CHAMPS	H	h	h : H
INDUCTION	B	b	b : B
COURANTS	NI	ni	ni : NIe
TEMPS	T	t	t : Te²
FREQUENCE	Fr	fr	fr : Fre²
IMPEDANCE	Z	z	z : Z/e
FORCES ELECTROMA.GNETIQUES	F	f	f : Fe²
PUISSANCE	P	p	p : Pe

◀ *Tableau II : similitude électromagnétique.*

Les systèmes à petites cabines

La capacité des véhicules de ces systèmes est inférieure à 6 passagers. Ce sont en fait les « remplaçants » de l'automobile. Outre les améliorations similaires à celles des systèmes de la famille précédente, ils apportent l'avantage d'une liaison directe point à point sans rupture de charge. Afin d'assurer un débit suffisamment important, les cadences de succession des véhicules seront élevées (inférieures à 10 secondes). Bien que fort séduisant, ce type de projet est peu réaliste. Il est probable que des arrêts intermédiaires seront nécessaires afin d'alléger les infrastructures et de limiter des problèmes similaires à ceux que l'on rencontre sur le réseau routier (encombrement des voies, gestion des véhicules vides, etc.).

La réalisation des fonctions

Par fonction, nous entendons tous les sous-ensembles qui permettent de propulser, freiner, guider, contrôler, etc., les véhicules sur leur site.

Propulsion

D'une manière générale, la propulsion des véhicules peut se faire de deux manières : ou bien les moteurs sont à bord des véhicules, on dit alors que les *véhicules* sont *actifs* ou *autonomes;* ou bien les moteurs sont placés dans la voie, on dit alors que la *voie* est *active* ou que les *véhicules* sont *passifs*.

Le choix d'une technique dépend d'un ensemble de paramètres dont l'importance varie selon les applications. Notons seulement que les systèmes à véhicules actifs, plus chers (au point de vue de la motorisation), ont une souplesse d'utilisation plus grande que celle des systèmes à voie active, celle-ci offrant des avantages quant à la régulation et au contrôle.

Les ensembles de propulsion peuvent se regrouper en trois grandes catégories :

— les machines électriques tournantes adaptées aux véhicules actifs;

— les câbles et bandes transporteuses et autres systèmes adaptés aux véhicules passifs;

— les machines électriques linéaires s'adaptant aux deux cas.

Les machines électriques tournantes

Les machines les plus utilisées dans le domaine de la traction sont les moteurs à courant continu, qui offrent une grande souplesse d'utilisation. Cependant, des machines plus sophistiquées ont vu le jour.

▼ *Figure 27 : fonctionnement d'un moteur à réluctance variable; bobine rouge : hors tension; bobine verte : sous tension; en bleu : « dents » du rotor. Ce type de moteur est soit rotatif (moteur Garret) soit linéaire (Traklec).*

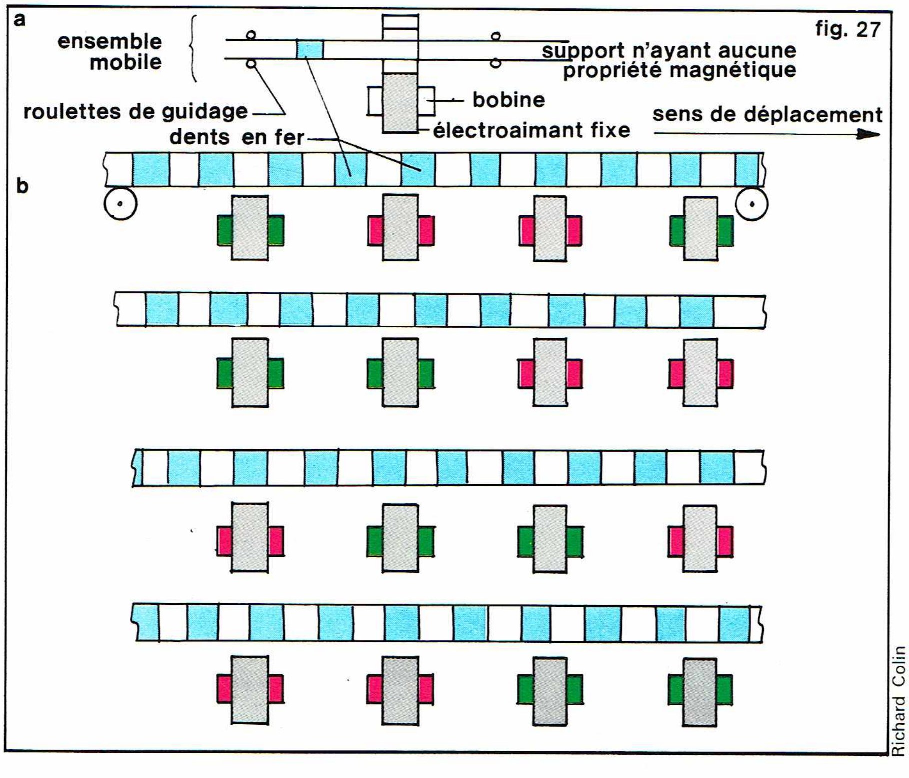

Le moteur à réluctance variable

Son principe de fonctionnement, relativement simple, utilise les propriétés magnétiques du fer. Considérons la *figure* 27a : si l'on met la bobine sous tension, la dent en fer va être attirée par l'électro-aimant; les roulettes de guidage vont imposer un déplacement longitudinal de l'ensemble mobile. Le mouvement s'arrêtera après un certain nombre d'oscillations, lorsque la dent sera au droit de l'électro-aimant, ce qui correspond à la résistance minimale du circuit magnétique (réluctance).

A partir de ce principe, on peut aisément concevoir un moteur. Pour cela, il suffit de mettre plusieurs dents sur l'ensemble, de disposer plusieurs bobines à la suite des autres, et de les alimenter tour à tour de façon à créer une course-poursuite entre l'alimentation des bobines et les dents. La *figure* 27b explicite ce principe.

Ces moteurs sont des machines synchrones à induit massif (pas de cuivre) alimentées en courant continu. La variation de vitesse du moteur peut être obtenue en faisant varier plus ou moins le cycle de mise sous tension des bobines. Ce type de commande est cependant très complexe à réaliser et nécessite une électronique de puissance très performante. La vitesse des moteurs est en général limitée par la fréquence de commutation des circuits électroniques.

Ces moteurs ont une bonne puissance volumique, et les moteurs rotatifs se présentent sous forme de « galettes » qui peuvent plus ou moins facilement s'insérer dans une roue de véhicule. Le couple développé par ce type de moteur dépend essentiellement du nombre de bobines simultanément sous tension. Il est facile de comprendre que, plus le nombre de bobines du moteur sera élevé, plus grands seront son couple et son encombrement, et plus faible sera sa vitesse maximale. Un compromis doit donc être recherché entre la taille (donc le couple) et la vitesse du moteur. Ce compromis est d'autant plus aisé que le nombre de roues motrices est élevé.

Les moteurs à courant continu

Connus et utilisés depuis longtemps, les moteurs à courant continu à branchement série ont des caractéristiques couple-vitesse très intéressantes dans le domaine de la traction. Les hacheurs de tension permettent de balayer la plage couple-vitesse avec une plus grande souplesse, en réduisant notamment les pertes.

Parmi ces deux types de machines, la dernière catégorie est celle qui, sans aucun doute, est la plus utilisée dans les applications à véhicules actifs.

Nous allons maintenant examiner les ensembles de propulsion des systèmes à voie active.

Câbles et bandes transporteuses

Utilisés pour propulser des véhicules passifs, ces systèmes sont implantés tout le long de la voie. Cela permet théoriquement d'imprimer la même loi de déplacement à tous les véhicules en un point donné de celle-là.

● *Le câble.* Utilisé depuis longtemps sur les systèmes de montagne, le câble n'est cependant pas un inconnu des transports de surface. Rappelons qu'à la fin du XIXe siècle des réseaux entiers de systèmes à câbles existaient dans le monde, et principalement aux États-Unis. Les street-cars de San Francisco sont d'ailleurs toujours en service. Dans ces systèmes, la variation de vitesse est obtenue en serrant, à l'aide d'une pince, solidaire du véhicule, un câble se déplaçant à vitesse constante.

L'utilisation du site propre permet, outre l'utilisation de pinces à commande automatique, de ne plus assurer la variation de vitesse par réglage de l'effort de pincement, dont la conséquence était l'usure rapide du câble et des mors de pince.

Les variations continues de vitesse sont obtenues de plusieurs manières :

— *par câbles :* la pince lâche un câble pour en reprendre un autre, chaque câble ayant une fonction unique (vitesse constante, accélération, décélération) ;

— *par tourets :* un ensemble de roues, à axe vertical, transmet, par l'intermédiaire d'une barre d'appui solidaire du véhicule, les efforts d'accélération ou de ralentissement;

— *par galet orientable :* les variations sont obtenues en faisant varier l'inclinaison d'un galet (solidaire du véhicule) s'appuyant sur un cylindre tournant à vitesse

fig. 28

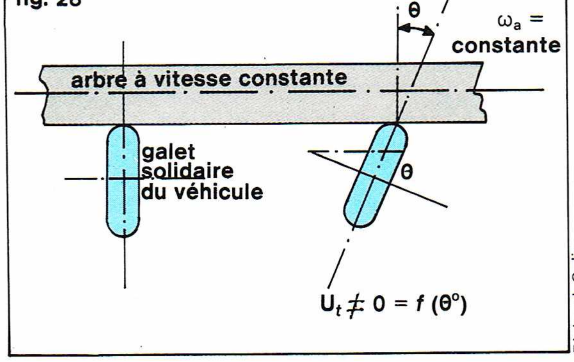

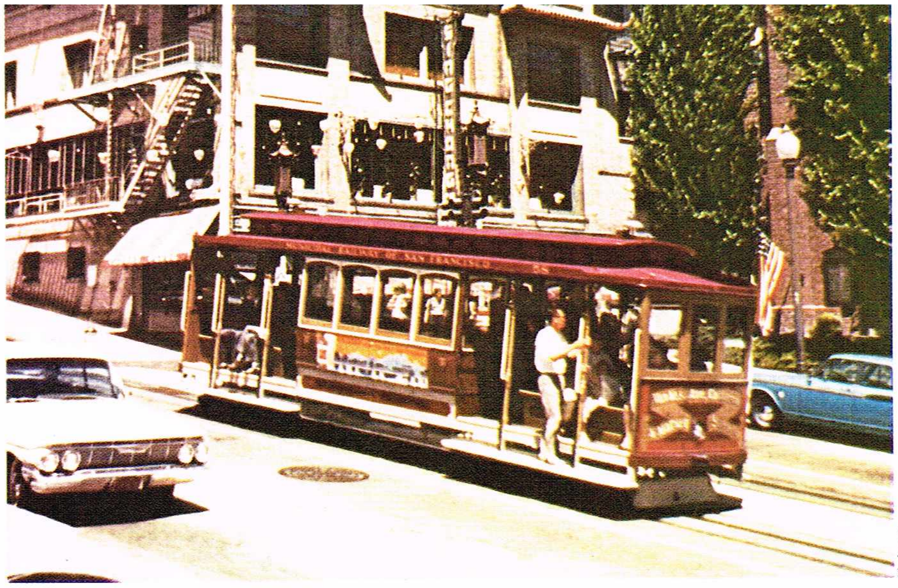

constante (*fig.* 28). Dans ces zones, le véhicule est désolidarisé du câble.

● *Les systèmes à bandes transporteuses.* Dans les systèmes précédents, les véhicules étaient plus ou moins rigidement fixés à l'ensemble de propulsion. Dans le cas de bandes transporteuses, les cabines sont « posées » sur celles-ci et s'y maintiennent par adhérence. Cela permet de réaliser de manière simple les accélérations et décélérations du véhicule en juxtaposant une série de bandes ayant toutes des vitesses constantes mais différentes, l'inertie du véhicule lissant plus ou moins cette progression discrète de vitesse. D'une manière générale, ces systèmes dépendent beaucoup de l'adhérence, et leur confort est en général assez rustique.

● Outre ces deux dispositifs, il existe un troisième système très prometteur, car il réutilise une partie de l'énergie cinétique des différents mobiles. Ce système s'apparente à une *chaîne à maillons de longueur variable.* Si l'on se reporte à la *figure* 29, on voit que lorsque l'ensemble circule à vitesse constante, l'écartement entre deux bogies est constant. La variation de vitesse est obtenue en rapprochant ou en écartant les bobines les unes par rapport aux autres. Ce mouvement est obtenu en faisant enrouler ou dérouler le lien souple sur les bobines dont la rotation est commandée par des cames placées le long de la voie. Ces ensembles de propulsion sont particulièrement adaptés aux systèmes à voies actives.

● *Autres systèmes.* Il existe également des systèmes de propulsion pouvant s'adapter soit sur des véhicules actifs, soit sur des voies actives. Nous allons les examiner dans la suite du paragraphe.

Les machines électriques linéaires

Les machines linéaires à induction ont un fonctionnement semblable à celui des moteurs asynchrones triphasés à induction.

L'intérêt porté à ces machines est une conséquence de l'introduction de technologies de sustentation dites sans adhérence (coussins d'air et magnétique). La roue étant supprimée, il fallait évidemment trouver un autre moyen de propulsion. Si, dans le domaine des transports interurbains, l'hélice ou le réacteur sont encore utilisables — bien que bruyants — il n'est pas concevable de les utiliser pour des véhicules urbains.

Il existe trois grandes configurations de machines linéaires asynchrones (voir chapitre précédent) : simple inducteur, double inducteur et induit en U. Dans la première configuration, l'inducteur se trouve d'un seul côté de l'induit; il est également connu sous le nom de moteur à plat; dans la deuxième, l'inducteur se trouve de part et d'autre de l'induit, et, dans la troisième, l'inducteur est dans l'induit en forme de U.

Guidage et sustentation

Traditionnellement réalisée par le couple roue-rail dans les systèmes guidés classiques, cette fonction s'est divisée en un sous-ensemble sustentation et un sous-ensemble guidage, que nous allons examiner rapidement.

Sustentation

Le rôle de ce sous-ensemble est de répartir la masse du véhicule sur la voie. Cette répartition peut être soit discrète (roues), soit continue (coussins d'air ou magnétique).

Les sous-ensembles de sustentation peuvent se regrouper en deux grandes catégories :
— porteur : le véhicule est au-dessus de la voie;
— suspendu : le véhicule est au-dessous de la voie.

Pratiquement, les deux groupes utilisent les mêmes technologies (à l'exclusion du couple roue-rail) qui sont : le pneumatique, le coussin d'air, le coussin magnétique et le câble (pour les véhicules suspendus uniquement).

● *Le coussin d'air.* Identique dans son principe, le coussin d'air adapté aux véhicules urbains diffère toutefois quelque peu dans sa technologie des coussins d'air équipant les véhicules à grande vitesse.

● *Le coussin magnétique.* Il peut être réalisé de deux manières (voir chapitre précédent) : par attraction magnétique ou par répulsion électrodynamique. Seule la première technologie est applicable en transport urbain, car elle est indépendante de la vitesse.

L'introduction de ces nouveaux modes de sustentation a eu pour effet de supprimer l'effet de guidage obtenu à l'aide du couple roue-rail. Nous allons donc examiner comment celui-ci est réalisé.

Guidage

L'ensemble de guidage astreint le véhicule à suivre une trajectoire donnée. Cette trajectoire est soit immuable, soit variable grâce à l'introduction des aiguilles.

D'une manière générale, l'ensemble des techniques de sustentation peut être utilisé en guidage, les plans de référence devenant verticaux. On trouve également — mais c'est rare — un guidage unilatéral avec un pal-

▲ *Figure 28 : variation de vitesse par galet orientable.*
La vitesse de translation du galet est fonction de l'inclinaison des deux axes.
A droite, le célèbre tramway (street car) de San Francisco.

▼ *Ci-dessous, variation de vitesse par tourets; le pas est tel qu'il y a toujours au moins un pneumatique qui s'appuie sur la barre d'entraînement solidaire du véhicule.*
En bas, figure 29 : chaîne à maillons de longueur variable du Delta V (d'après un document HEF).

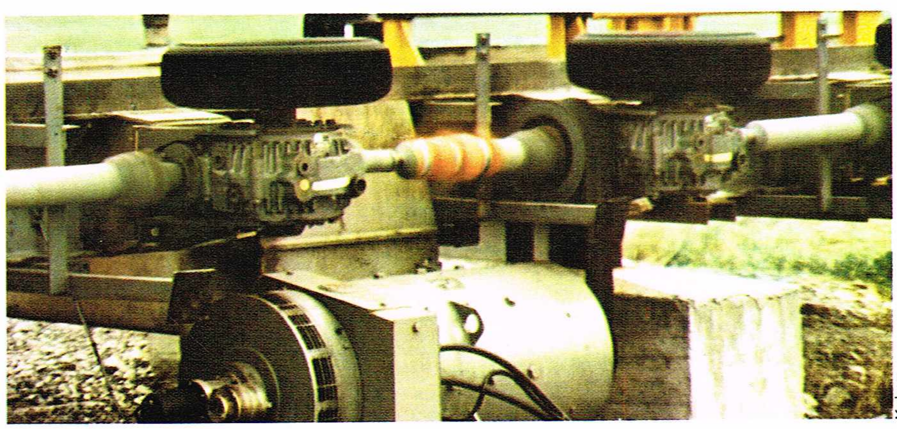

fig. 29

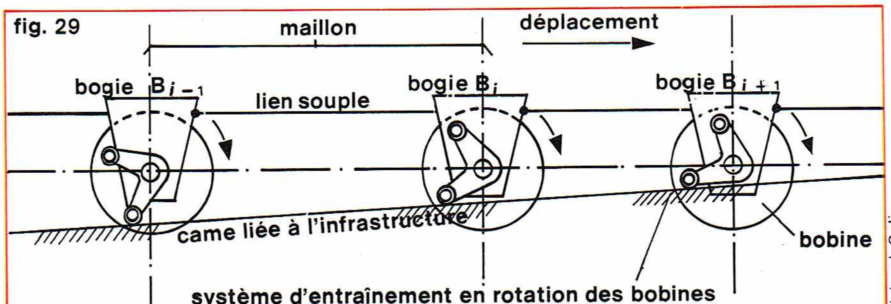

fig. 30

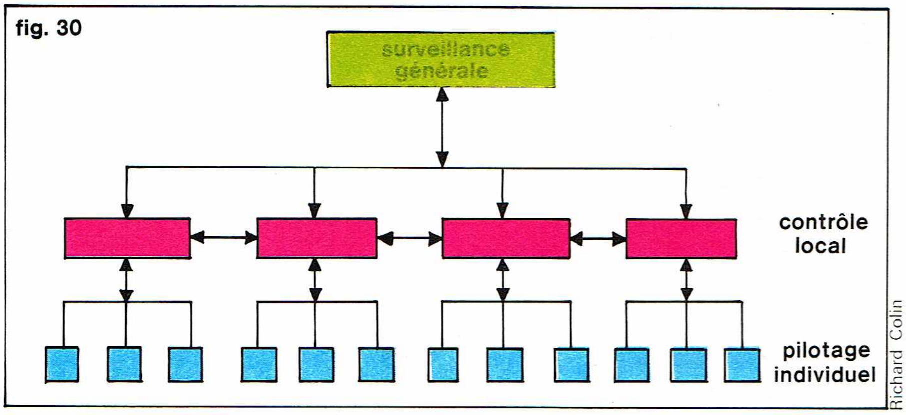

▲ ***Figure 30 : réalisation de la fonction contrôle.***

peur qui suit le mouvement de la voie et contrôle l'orientation des roues du véhicule.

En ce qui concerne le problème de l'aiguille, on distingue deux catégories, selon que la pièce mobile est à bord du véhicule ou dans la voie. En pratique, la première solution est adaptée aux petites cabines se succédant à grande cadence, car le temps de manœuvre d'une pièce de voie risquerait de limiter le débit d'un tronçon. Lorsque les fréquences sont faibles (inférieures à 2 véhicules/mn), la deuxième solution est souvent adoptée. D'une manière générale, le problème de l'aiguillage est beaucoup plus complexe à résoudre que dans le cas du couple roue-rail, et cela à cause de la masse des parties mobiles réalisant le guidage des véhicules.

La circulation

Par circulation, nous entendons la manière dont le déplacement des véhicules est réalisé. On distingue trois sortes de circulation :

- *Synchrone*. Tout les véhicules sont assujettis à suivre le déplacement d'un point fictif et ne peuvent jamais s'en écarter. Ce type de circulation est identique au fonctionnement d'un engrenage ; très rigide, il s'accommode mal des perturbations locales.
- *Quasi synchrone*. Ce système offre la possibilité de changer la référence suivie par un véhicule lorsque cela est nécessaire. Beaucoup plus souple que le type précédent, il est également plus performant sur les réseaux complexes.
- *Asynchrone*. Le déplacement des cabines n'est asservi à aucun point fictif. Très simple, ce type de circulation n'est adaptable qu'à de très faibles trafics, car il ne permet pas de connaître la situation globale avec précision.

Rôle de protection

Outre le déplacement des véhicules, la circulation doit assurer leur protection. Celle-ci peut être réalisée selon deux méthodes de cantonnement, fixe ou mobile.

- Dans le premier cas, la ligne est découpée en zones (appelées cantons) dont la longueur dépend de la vitesse maximale autorisée et de la décélération d'urgence garantie selon la formule :

$$D_C = k \frac{V^2}{2\gamma_{du}}$$

où D représente la longueur du canton,
k un coefficient > 1,
V la vitesse maximale autorisée en m/s,
γ_{du} la décélération d'urgence garantie en m/s².

La protection est réalisée en interdisant l'entrée du canton qui suit celui occupé par un véhicule.

Intéressant lorsque l'on fonctionne à régime nominal, ce mode de protection est mal adapté lorsque des perturbations apparaissent, car il impose des distances trop grandes entre véhicules et conduit à un rapide blocage du réseau. De plus, la position des véhicules à l'intérieur des cantons n'est pas connue avec précision. Pour pallier cet inconvénient, beaucoup de systèmes ont rajouté un intégrateur de vitesse sur les véhicules qui transmettent ainsi la distance parcourue, à partir d'un point origine, au calculateur chargé de surveiller le trafic. Cela est nécessaire lors des phases transitoires, et notamment des redémarrages, si l'on veut éviter les collisions.

- Le deuxième type de protection est en fait une amélioration du premier. La vitesse et la position des véhicules étant connues, le calculateur chargé de surveiller le trafic calcule en permanence la distance de sécurité affectée à un véhicule donné et vérifie qu'il n'y a pas de conflit.

Le contrôle

Nous venons de décrire l'une des principales fonctions que doit remplir tout système de transport. Parallèlement à celle-là, bien d'autres doivent être remplies : surveillance des stations, des équipements de voie, des systèmes d'alimentation, sécurité, etc. La masse de données échangées entre les véhicules et les différents ensembles de contrôle est énorme. Afin de faciliter leur tâche, les concepteurs ont adopté des systèmes de contrôle hiérarchisés remplissant des rôles bien spécifiques. Nous allons examiner rapidement la manière dont est généralement remplie cette fonction.

Dans les systèmes les plus sophistiqués, on rencontre trois niveaux.

— Le premier et le plus élevé est le niveau central. En général chargé de la surveillance de l'ensemble du réseau, ce système gère la répartition du trafic selon les différents arcs du réseau. Il gère également le mouvement des véhicules vides en fonction des prévisions de trafic. Lorsqu'une situation dangereuse apparaît, il déclenche les systèmes de sécurité.

— Le niveau intermédiaire est un niveau local. Chargé de la surveillance d'une zone, ce système donne les instructions de marche aux véhicules en fonction du trafic, des destinations, du profil de réseau, etc.

— Le dernier niveau se trouve à bord du véhicule ; chargé de suivre le bon déroulement des instructions données par le niveau intermédiaire, ce système est en fait le pilote automatique.

L'ensemble du système de contrôle se répartit schématiquement comme le montre la *figure* 30. Seuls les systèmes les plus importants possèdent les trois niveaux.

Ce type de contrôle est possible grâce à un échange constant d'informations entre le véhicule et les différents équipements. Les systèmes de transmissions de données jouent un rôle important dans cet échange. Ils sont en général réalisés par le couplage inductif entre une antenne de voie et une antenne placée à bord du véhicule. Pour des raisons de sécurité, la période d'interrogation est très faible (1/10^e^ de seconde environ). Le système à frotteur est également utilisé. Ses performances dépendent cependant des conditions atmosphériques, notamment du gel, et certaines précautions sont à prendre lors de la conception.

L'ordinateur joue un rôle capital dans le traitement de la multitude d'informations qu'il reçoit et transmet aux différents ensembles du système. D'une manière générale, dans les systèmes les plus sophistiqués, plusieurs ordinateurs se répartissent les différentes tâches permettant de faire fonctionner le réseau.

Cet ensemble de techniques évoluées permettra à longue échéance de réaliser des déplacements origine-destination — par des réseaux maillés importants. Notons que cela ne sera possible que si la conception traditionnelle des stations est changée.

Les stations

Le mode d'exploitation choisi détermine le type de stations que l'on retiendra. Ainsi il est facile de comprendre que si l'on veut réaliser des déplacements origine-destination sans arrêt, les stations intermédiaires devront être « by-passées ». En revanche, si une exploitation omnibus est retenue, toutes les stations pourront être en ligne.

Les stations peuvent être classées selon d'autres critères, et notamment :

— l'embarquement qui peut se faire soit à l'arrêt, soit en marche à faible vitesse (système continu et semi-continu) ;

— la libération ou non de la voie après arrêt du véhicule (voir *fig.* 31).

Dans le premier cas (a), en fin de translation longitudinale (flèche verte), le véhicule est arrêté en gare du quai pour le chargement ; dans le second cas (b), à la fin de la translation longitudinale (flèche rouge), le véhicule effectue une translation transversale avant d'effectuer l'embarquement-débarquement, ce qui libère la

fig. 31

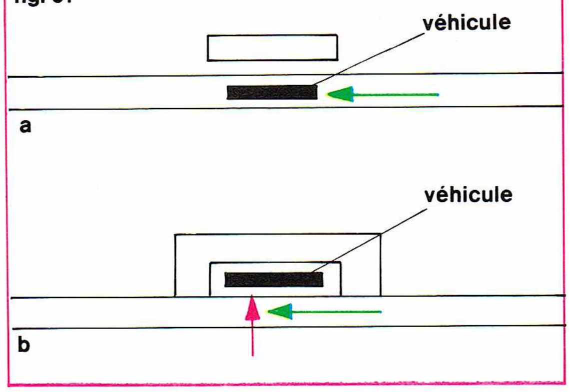

Richard Colin

voie principale et permet le passage de véhicules. A remarquer que cela n'est intéressant que lorsque les systèmes de sustentation et de guidage s'y prêtent bien (coussin d'air et coussin magnétique).

Les systèmes semi-continus permettent de réaliser des fréquences élevées à l'aide de stations dont la longueur ne dépend que du trafic qu'elles ont à écouler. Théoriquement, ce type de système est tel qu'il y a toujours un véhicule en station, ce qui permet de supprimer le temps d'attente. Une étude expérimentale de l'embarquement-débarquement latéral en marche a montré que, pour des vitesses inférieures ou égales à 30 cm/s, il n'y avait aucun problème.

Présentation de quelques réalisations

Le *tableau* III résume les caractéristiques techniques de quelques-uns des nombreux systèmes ayant vu le jour.

Les systèmes à cabines

Comme nous l'avons déjà expliqué, nous ne nous intéresserons qu'aux systèmes à petites et à moyennes cabines, les systèmes à grosses cabines n'étant que des améliorations de techniques déjà anciennes.

Les systèmes à petites cabines

Conçus à l'origine pour réaliser des trajets directs, on les connaît davantage sous le sigle PRT, Personal Rapid Transit (tous les systèmes à petites cabines ne sont pas forcément des PRT).

● *Le système Aramis*. Développé par la Société *Matra,* ce système PRT est toujours à l'état de prototype. On trouvera les principales caractéristiques de son mode de fonctionnement à la *figure* 32. Bien qu'utilisant la marche en rame, ce système peut facilement réaliser des liaisons origine-destination directes grâce à un attelage électronique qui maintient les véhicules à 30 cm l'un de l'autre. Le véhicule de tête reçoit les instructions de la voie, et chacun des autres s'asservit en distance sur celui qui le précède. Les moteurs à réluctance variable seront utilisés sur les véhicules futurs.

A l'heure actuelle, après des essais sur prototype, les études se poursuivent dans le dessein de développer un matériel moins cher.

● *Le système TTD*. Développé par Otis (filiale de United Aircraft), ce système PRT utilise le moteur linéaire

◄ *Figure 31 .*

▼ ***Tableau III : caractéristiques techniques de quelques-uns des nouveaux systèmes de transports urbains ayant vu le jour.***

Tableau III
Caractéristiques techniques de quelques-uns des nouveaux systèmes de transports urbains ayant vu le jour

Types	Nom	Caractéristiques techniques: Propulsion: Moteur électrique: Rotatif	Propulsion: Moteur électrique: Linéaire	Propulsion: Divers	Sustentation: Divers	Sustentation: Pneumatique	Sustentation: Coussin d'air	Guidage longitudinal: au dessous du véhicule: Latéral	Guidage longitudinal: au dessus du véhicule: Central	Guidage latéral: Latéral	Guidage latéral: Central	Guidage latéral: Divers	Aiguillage: Déformation de voie	Aiguillage: A bord du véhicule	Aiguillage: Divers ou absence	Capacité	Performances: Vitesse max. (en km/h)	Performances: Débit en ligne par sens (en p/h)	État d'avancement: Opérationnel	État d'avancement: Prototype	État d'avancement: Modèle	État d'avancement: divers	Constructeurs	Remarques
Petites cabines	Aramis	×				×		×		×				×		6	50	15 000		×			Matra	Attelage électronique
	Cabinen-taxi		×			×			×	×				×		2	36	4 000		×			Demag MBB	Véhicules circulant au-dessus et au-dessous de la poutre porteuse
	CVS	×				×		×			×			×		2	80	inconnue		×	×		Consortium japonais	Le réseau est composé de voies express et locales
	Jetrail	×				×			×	×			×			6	30	4 000	×				Stanray Corp.	Système arrêté depuis 1974 par cause de fermeture de l'aéroport Love Field (Dallas, États-Unis)
	Monocab	×				×			×	×				×		6	36	6 000		×			Rohr Corp.	
	Morgantown	×				×		×				×		×		10	48	7 500	×				Boeing Bendix	Le réseau va s'agrandir prochainement
	TTD		×				×	×		×				×		10	50	4 000		×			OTIS, filiale de United Aircrafts	Accostage latéral dégageant la voie de circulation principale
	VEC		×	×	×			×				×			×	2	13	1 200	×				SAVEC	Guidage par roue diabolo
Moyennes cabines	Airtrans	×				×		×		×			×			40	25	9 600	×				Vought Corp.	
	Ford Act	×				×		×		×			×			24	50	4 000	×				Ford	
	Poma 2000			câble		×		×		×			×			40	32	9 000		×			Poma 2000	Version semi-continue abandonnée
	Satellite Transit System	×				×		×		×					×	100	27	5 000	×				Westinghouse	Opérationnel dans plusieurs aéroports
	VAL	×				×		×		×					×	53	80	6 000		×		×	Matra	En cours de construction; ouverture prévue en 1982
Accélérateurs de piétons	Speedaway														×		15	15 000		×			Dunlop Institut Batelle	Tapis accéléré
	TRAX														×		15	15 000		×		×	P. Patin R.A.T.P. HEF	Trottoir accéléré, en essai; l'expérimentation commerciale doit commencer en 1978

fig 32

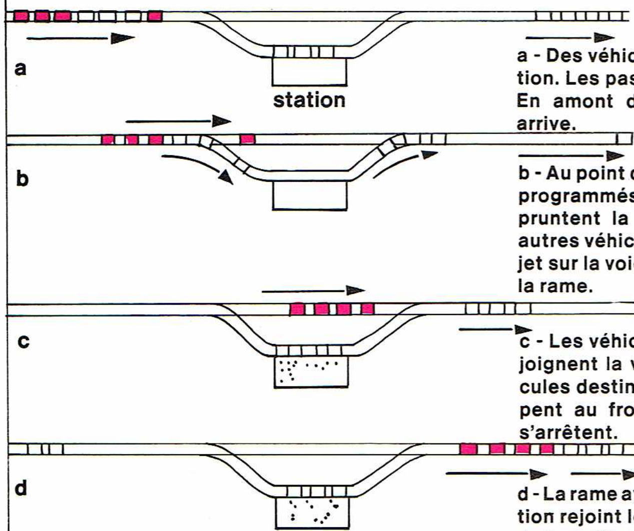

a - Des véhicules sont arrêtés en station. Les passagers sont embarqués. En amont de la station, une rame arrive.

b - Au point d'aiguillage, les véhicules programmés pour cette station empruntent la voie de dérivation. Les autres véhicules poursuivent leur trajet sur la voie principale en reformant la rame.

c - Les véhicules sortis de station rejoignent la voie principale. Les véhicules destinés à la station se regroupent au front de cette dernière et s'arrêtent.

d - La rame ayant court-circuité la station rejoint les véhicules qui viennent de la quitter et reforme avec eux une nouvelle rame. Les voyageurs destinés à la station descendent, puis d'autres embarquent.

Richard Colin

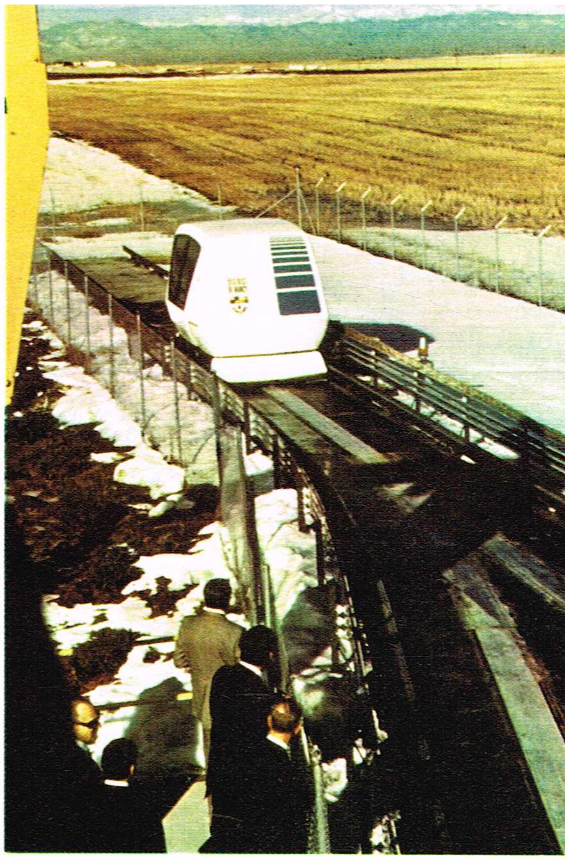

D. Dunoyé

▶ *En haut, à droite, système TTD : le coussin d'air permettant le déplacement dans un plan, ce système utilise le principe de l'accostage en station (voir fig. 31).*

Ci-contre : vue d'une station du système Aramis dont le schéma figure ci-dessus.

D. Dunoyé

D. Dunoyé

▲ *Le* cabinentaxi *sur piste d'essai à Hagen (R. F. A.).*

▶ *Système* Morgantown *: les stations tiennent un plan important au sol ; les véhicules peuvent y faire demi-tour.*

D. Dunoyé

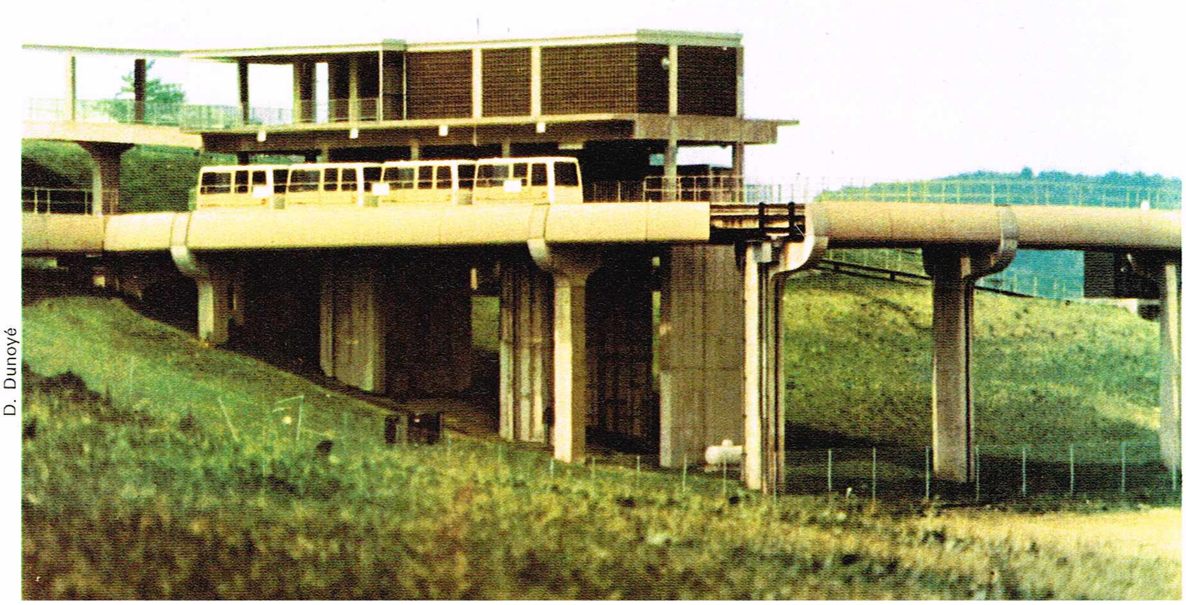

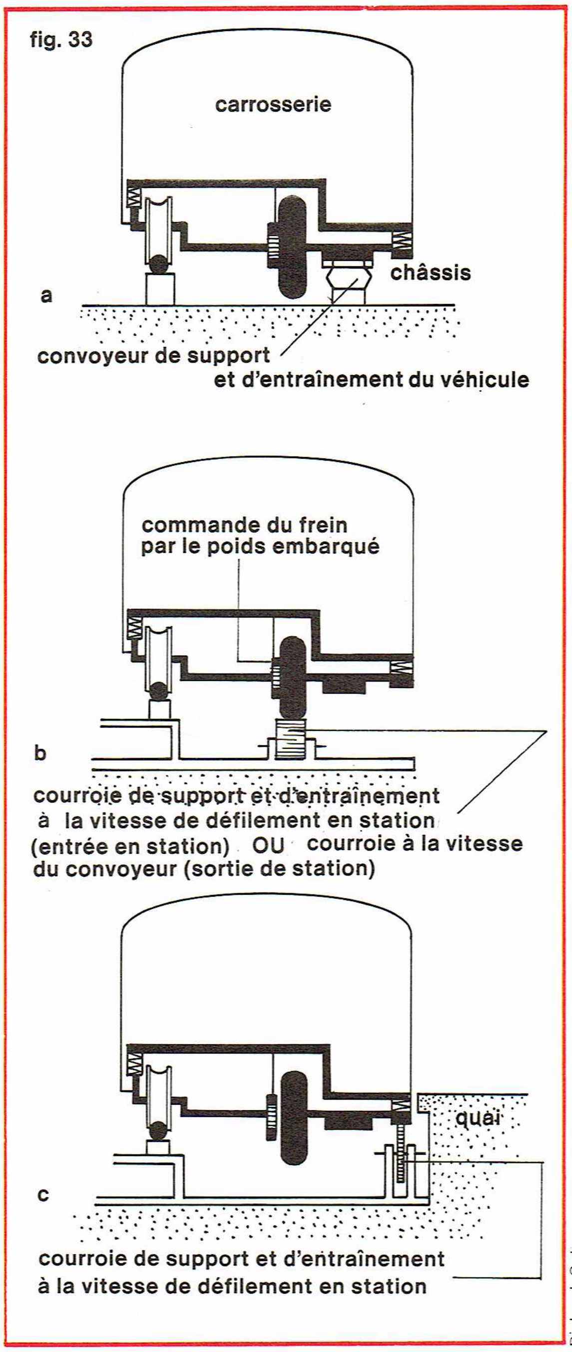

Richard Colin

(primaire embarqué) et le coussin d'air haute pression. Véhicules et composants sont testés depuis plusieurs années à Denver, dans le Colorado. Le coussin d'air permettant le déplacement dans un plan, ce système utilise le principe de l'accostage en station. Conçue pour réaliser du transport spécifiquement urbain (TSU), une version simplifiée de ce système est en cours de montage dans l'hôpital de Duke University à Durham (États-Unis).

● *Le Cabinentaxi.* Développé par MBB et Demag, ce système PRT à petites cabines est original par la conception de sa voie. Les véhicules propulsés par moteurs linéaires circulent au-dessus et au-dessous d'une poutre caisson. Actuellement, des essais du prototype complet ont lieu à Hagen (Allemagne de l'Ouest). Le site comporte 3 km de voie, 24 véhicules, 3 stations, les systèmes de perception et de péage, etc. Une version simplifiée et agrandie, appelée le *Cabinenlift,* est en service à l'hôpital de Ziegenheim, en Allemagne, depuis 1976.

● *Morgantown.* Les stations sont le point faible des PRT ; elles occupent souvent un espace trop important. Un cas extrême est peut-être celui de Morgantown, où les véhicules peuvent, en effet, faire demi-tour à chaque station.

S.A.V.E.C.

▲ *Le* VEC *(système à petites cabines à voie active) est le seul mode de transport nouveau opérationnel en France.*

C'est sans aucun doute le système à petites cabines le plus connu. C'est également, à l'heure actuelle, le seul qui soit en fonctionnement. Conçu pour réaliser des déplacements origine-destination directs, ce système n'utilise aucune technologie très innovatrice en matière de propulsion et de sustentation. Pour le moment, le réseau comporte environ 5 km de voie simple, 45 véhicules et 3 stations ; il doit être porté prochainement à environ 10 km, 80 véhicules et 5 stations.

Les quatre systèmes que nous venons de présenter brièvement ne sont que quelques-uns des plus connus. Il en existe d'autres, et notamment le CVS, au Japon, dont l'état de développement est aussi avancé que celui du Cabinentaxi.

Pratiquement, tous les systèmes à petites cabines sont à l'origine des PRT. Cependant, devant l'ampleur des problèmes à résoudre, beaucoup de systèmes ont disparu ou se sont rabattus vers la réalisation des missions moins complexes, et notamment celle de TH.

● *Le VEC.* Système à petites cabines à voie active, le VEC est le seul mode de transport nouveau opérationnel en France. En ligne, le véhicule est propulsé par des moteurs linéaires. Les variations de vitesse sont assurées par des séries de courroies à vitesse constante et un frein dont l'effort est proportionnel à la masse du véhicule et de sa charge. Par sa conception, le VEC est bien adapté aux circuits extrêmement tourmentés (*fig.* 33).

◀ *Figure 33 : principe de fonctionnement* VEC *;*
a, en ligne, vitesse 4 à 10 m/s ;
b, entrée ou sortie de station décélération-accélération (de 0,6 à 1,5 m/s²) ;
c, en station défilement devant le quai à 0,35 m/s ; embarquement-débarquement.

Les systèmes à cabines moyennes

De conception moins sophistiquée que la précédente, c'est la famille qui a le plus grand nombre de systèmes en exploitation. Cependant, aucun d'entre eux n'effectue encore une mission TSU ; tous remplissent des missions plus ou moins spécialisées, et notamment le transport des passagers dans les zones aéroportuaires. En revanche, un certain nombre de projets en cours de réalisation, notamment en France, au Japon et aux États-Unis, devraient conduire à l'ouverture des premiers systèmes à cabines moyennes remplissant des missions TSU dans un proche avenir.

● *L'Airtrans.* Conçu par LTV, ce système est l'un des plus importants en service dans le monde. Installé dans le nouvel aéroport de Dallas-Fort Worth, il assure, depuis 1974, la fonction de transport de passagers, employés, ravitaillement, messageries, bagages de ce complexe immense (aussi grand que l'île de Manhattan). Actuellement, plus de 50 véhicules circulent 24 h sur 24, sur 20 km de voie. Les 53 stations et 75 aiguillages donnent l'ampleur du système, qui, après un départ difficile (dû à l'absence d'essais de déverminage), fonctionne de manière très satisfaisante.

Entièrement automatique, la marche du système est surveillée par deux opérateurs. Lors de pannes (cela arrive), une procédure extrêmement sophistiquée permet de déterminer le sous-système incriminé et souvent la cause. Dans la plupart des cas, quand cela ne met pas la sécurité en défaut, les pannes sont effacées à partir du poste de surveillance. Lorsque cela n'est pas possible, un réparateur volant est envoyé sur les lieux dans un temps minimal. Pendant le trajet, il est mis au courant du type de panne et est donc capable de réagir très rapidement une

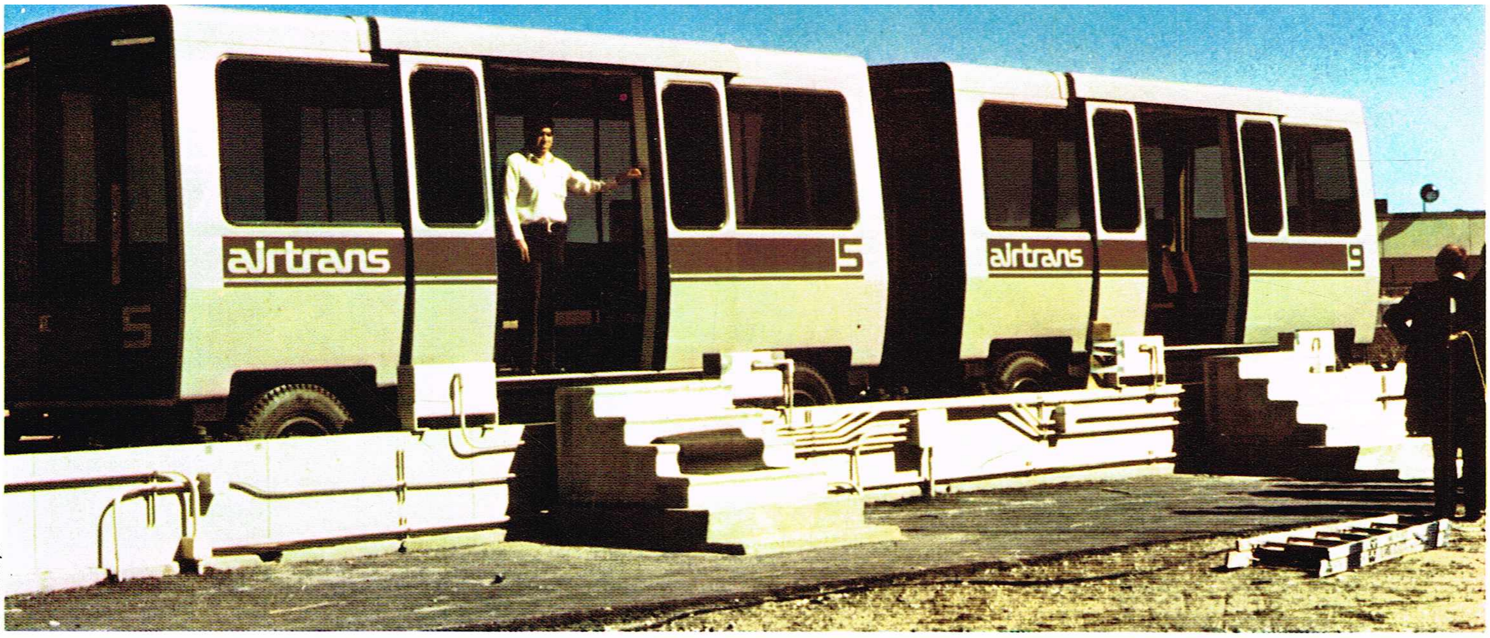

D. Dunoyé

▲ *L'*Airtrans, *installé dans le nouvel aéroport de Dallas-Fort Worth, assure le transport des passagers, messageries et bagages (50 véhicules, 20 km de voies, 53 stations, 75 aiguillages).*

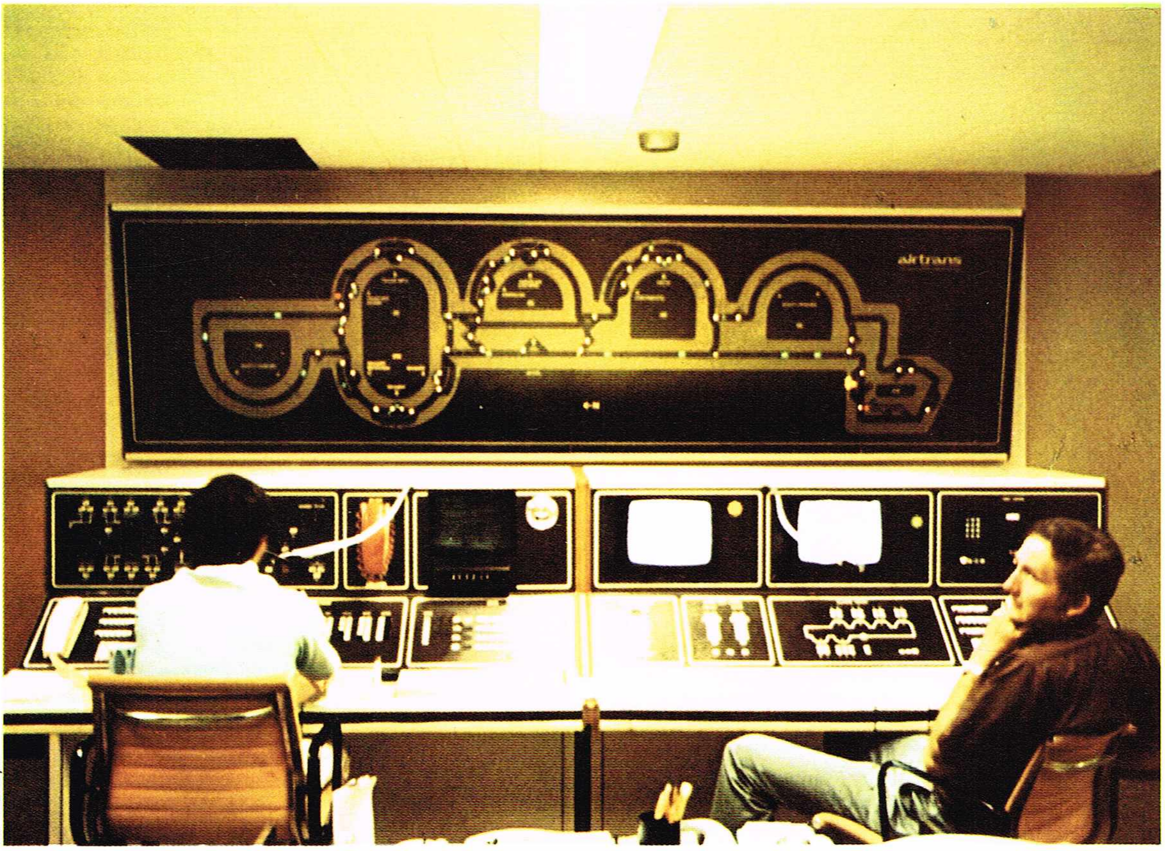

D. Dunoyé

▶ *Pupitre de commande centralisé de l'*Airtrans.

▲ *Le* Poma 2000, *système original français à cabines moyennes et à voie active, utilise les techniques employées sur les remonte-pentes.*

Kaiser

fois sur les lieux. Là, suivant la gravité de la panne, il peut soit l'effacer et relancer le véhicule en mode automatique, soit l'effacer et relancer le véhicule en mode manuel, soit encore l'effacer et remorquer le véhicule jusqu'à la station la plus proche où il fera descendre tous les voyageurs. En cas de panne risquant de durer plus de 15 mn, un système de bus entre en service pour assurer le trafic voyageurs.

De nombreux autres systèmes à cabines moyennes sont en service dans les aéroports américains. Pour mémoire, rappelons Seatle, Tampa, équipés de systèmes Westinghouse ; certaines zones d'activité, tel le Centre commercial de Fairlane, dans le Michigan, sont également équipées de systèmes similaires (Ford ATC).

Parmi tout cet ensemble de systèmes, il est intéressant de remarquer qu'aucun n'est encore opérationnel dans une mission de TSU. Cependant, de gros efforts sont entrepris dans les pays industrialisés pour combler cette lacune. A l'heure actuelle, les premiers systèmes qui entreront en service seront probablement japonais, avec notamment le KRT à Kobé. Le VAL français, dont les travaux ont démarré au début de 1977, devrait être ouvert au public d'ici à 1980. Le Minitram anglais, bien qu'entièrement développé, rencontre des difficultés au niveau

du financement de la réalisation. Il en est de même du H-Bahn allemand. Les systèmes américains suivis depuis plusieurs années par le Department of Transportation vont pouvoir enfin être l'objet d'une grande expérimentation commerciale, appelée DPM, qui sera réalisée dans quatre villes américaines : Saint Paul, Houston, Los Angeles, Cleveland.

● *Le Poma* 2000, système français à cabines moyennes et à voie active, a été conçu par Pomagalski ; ce système original emploie les techniques utilisées sur les remonte-pentes. En ligne, les véhicules sont accrochés sur un câble principal défilant à 9 m/s. A l'entrée en station, le véhicule lâche le câble et est pris en charge par une rampe de tourets ou par des câbles auxiliaires. Dans le premier cas, le véhicule ne s'arrête pas en station, et la fréquence de passage peut être supérieure à 4 véhicules par minute. Dans le deuxième cas, les véhicules s'arrêtent, mais la fréquence de passage ne peut dépasser 2 véhicules par minute.

La *figure* 34 présente le fonctionnement de la pince de débrayage.

Ce rapide tour d'horizon nous a montré que les systèmes à cabines sont les plus utilisés, quel que soit le type de mission envisagé. Il existe cependant une autre catégorie de système appelée *accélérateur de piétons,* particulièrement adaptée à remplir certaines missions TH (transports humains).

Les accélérateurs de piétons

Dans ces systèmes, le passager reste debout. Utilisant des planchers mobiles, ces modes de transport sont plus économiques à exploiter que les systèmes à cabines, car véhicules, automatismes de régulation et de surveillance, etc., sont supprimés. A largeur et vitesse égales, ils ont un débit supérieur aux systèmes à cabines. Cependant, la station debout en limite la longueur, ce qui les rend plus aptes à assurer des liaisons courtes à fort trafic. Actuellement, deux systèmes sont au stade de prototype : le TRAX en France, inventé par M. Patin et développé par la R.A.T.P. et le Speedaway en Angleterre, inventé par MM. Bouladon et Zuppiger de l'institut Batelle à Genève et développé par Dunlop.

Le premier est celui qui a atteint la plus grande maturité. Les essais d'endurance du système complet (plancher et main courante) doivent commencer au début de l'année 1978 sur le prototype de 70 mètres installé dans les locaux de H. E. F. (Centre stéphanois de recherches mécaniques Hydromécanique et frottement) à Saint-Étienne.

Le second, dont le plancher fonctionne depuis plusieurs années, n'a cependant pas résolu de manière satisfaisante le problème de la main courante.

Le système TRAX

Le TRAX se présente comme un trottoir roulant classique, mais son plancher mobile est constitué de plaques rainurées coulissantes, dont le mouvement relatif permet de réaliser les accélérations et les décélérations. Dans les zones d'entrée, les plaques sont accélérées de 3 km/h à 12 km/h ; dans les zones de sortie, elles sont décélérées de 12 km/h à 3 km/h. L'embarquement et le débarquement se font de face. Le système de retournement du tapis permet de réaliser un trottoir aller et un trottoir retour dans le même plan horizontal. La main courante a la même loi de mouvement que les plaques. Elle est constituée de poignées individuelles reliées deux à deux, l'intervalle entre deux poignées permettant un appui occasionnel sans danger.

— *Fonctionnement du plancher mobile*

Les plaques sont montées sur des tubes-supports à l'intérieur de chacun desquels coulissent deux tubes télescopiques. La variation de vitesse est obtenue par la déformation de mailles quadrangulaires formées par des chaînes fermées (*fig.* 35) de même périmètre, reliant les extrémités des tubes télescopiques de deux tubes-supports successifs.

Deux rampes latérales, sur chacune desquelles roule un galet en acier monté à l'extrémité de chaque tube télescopique, commandent soit l'allongement de ces dernières, ce qui entraîne le rapprochement des tubes-supports, donc une contraction du plancher et un ralentissement, soit leur raccourcissement, d'où l'éloignement des tubes-supports, donc une extension du plancher et une accélération. Le profil des rampes latérales est déterminé par la loi de variation de vitesse choisie.

Les efforts longitudinaux qui assurent le déplacement des tubes-supports sont fournis par les tensions des chaînes de liaisons. Dans les zones de décélération, l'énergie cinétique est récupérée et transmise aux zones en amont par la tension des chaînes de liaison. Le système est ainsi extrêmement économe en énergie.

— *Fonctionnement des mains courantes*

Les mains courantes sont formées de poignées individuelles rigoureusement synchrones du plancher mobile. La variation de vitesse est obtenue par des mailles déformables qui assurent, en outre, la continuité de l'appui.

▼ ***Figure 34 : fonctionnement de la pince de débrayage (coupe transversale).***

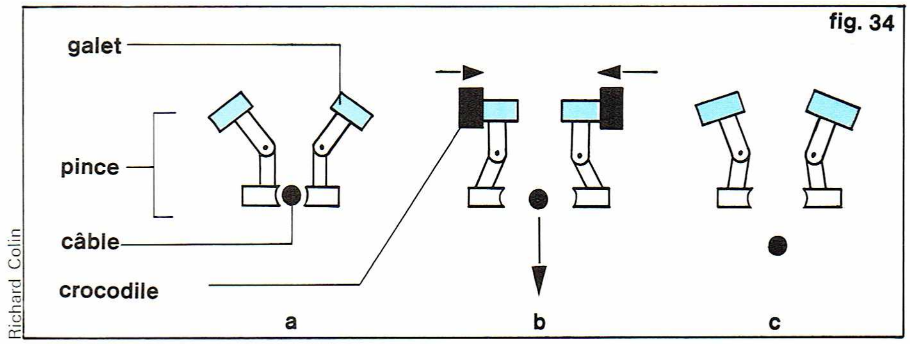

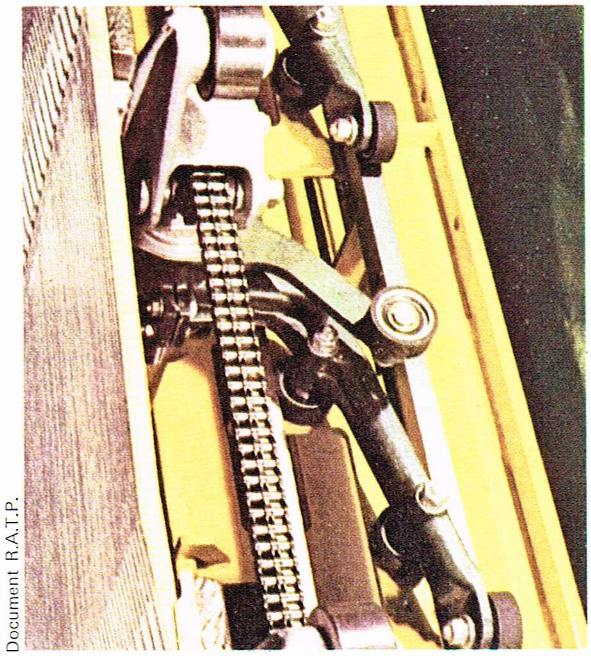

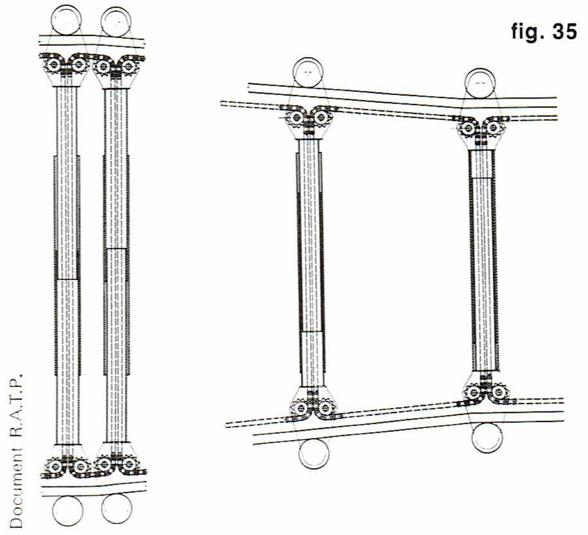

◀ ***Les trottoirs roulants (ou accélérateurs de piétons) sont de plus en plus utilisés, et on cherche à en élever la vitesse. Se pose alors la question de l'accélération (ou décélération) brusque à laquelle est soumis le piéton à l'entrée (ou à la sortie). Une solution élégante est proposée par le système TRAX, où le plancher mobile est constitué de plaques rainurées coulissantes dont le mouvement relatif longitudinal permet de réaliser progressivement les accélérations et décélérations. Dans la zone d'entrée, les plaques sont accélérées de 3 à 12 km/h et décélérées de 12 à 3 km/h à la sortie. En bas, figure 35 : schéma de principe de la variation de vitesse dans le système TRAX (document R. A. T. P.). Au-dessus : peignage des plaques entre elles (document R. A. T. P.).***

▶ *Figure 36 : exemple de ligne bimode.*

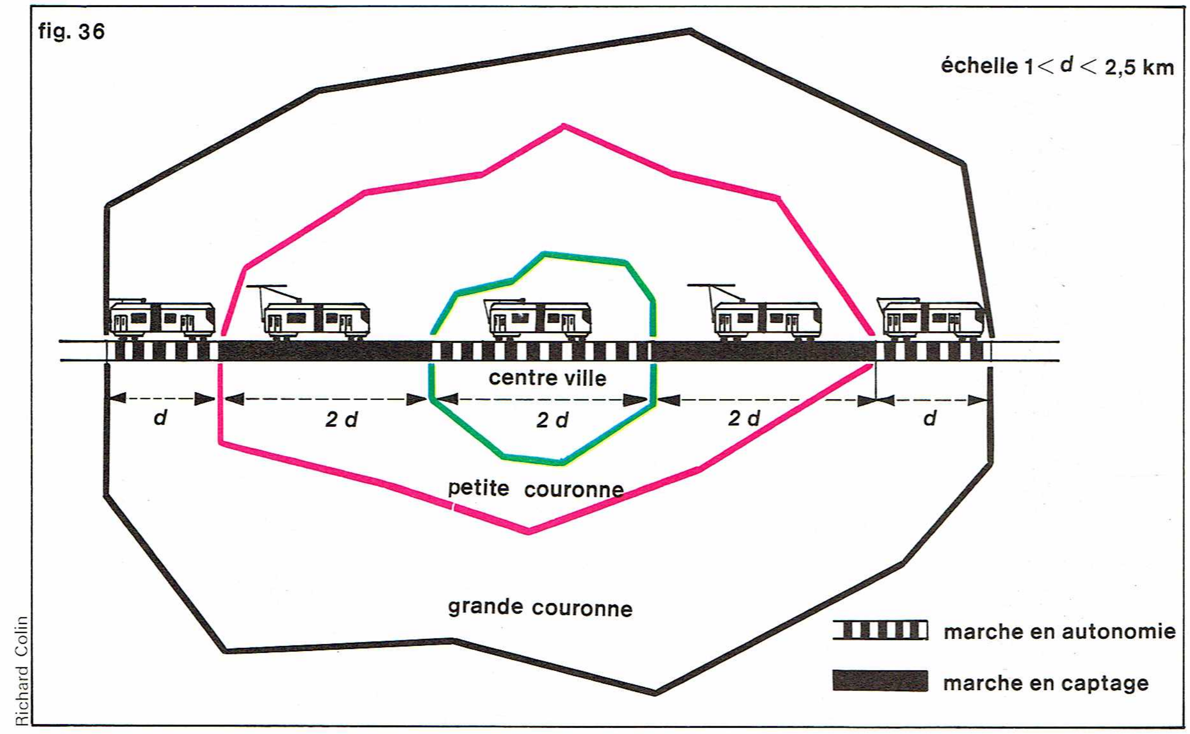

Le trolleybus bimode

Bien que le trolleybus ne soit pas à proprement parler, un mode de transport nouveau, il a suscité un regain d'intérêt, tant en France qu'à l'étranger, et cela a incité les pouvoirs publics à promouvoir le développement d'un nouveau type de trolleybus : le « trolleybus bimode articulé ».

En effet, les principaux avantages du trolleybus par rapport à l'autobus thermique sont les suivants : réduction sensible du bruit, absence de pollution, amélioration du confort (pas de changement de vitesse), utilisation d'une énergie secondaire (électrique). Hormis un coût d'investissement plus élevé, l'inconvénient majeur du trolleybus classique réside dans son entière dépendance par rapport aux fils aériens d'alimentation électrique.

Afin de pallier cet inconvénient, le trolleybus bimode, actuellement à l'étude, disposera, grâce à des batteries embarquées, d'une double alimentation :

— en « captage », le courant capté sert à alimenter le moteur de traction ; quand la consommation du moteur diminue (vitesse constante ou arrêt), le courant disponible sert alors à recharger les batteries ;

— en « autonomie », le véhicule tire son énergie des batteries.

En exploitation, cette innovation se révélera particulièrement intéressante dans certains cas précis :

— En centre ville ou à la traversée de sites classés, l'intrusion visuelle créée par les caténaires (« toile d'araignée » aux carrefours) pourra être supprimée.

— En extrémité de lignes : celles-ci voient fréquemment leur parcours modifié en fonction des fluctuations de la demande ; en parcourant les tronçons en autonomie, on pourra limiter les infrastructures aux tronçons les plus chargés, qui de plus sont souvent communs à plusieurs lignes.

— En cas de travaux sur la ligne, sa déviation n'occasionnera plus le déplacement provisoire très coûteux des fils aériens.

Le matériel

La propulsion

Elle est assurée par un moteur à courant continu à excitation séparée. Un dispositif unique, entièrement électrique (hacheur à thyristors), assure à la fois la commande du moteur et la recharge des batteries. Le dispositif permet également le « freinage par récupération » : lors du freinage, le moteur fonctionne en génératrice et l'énergie ainsi « récupérée » est renvoyée sur les batteries.

Le confort au démarrage est nettement amélioré par rapport à une commande classique à rhéostats, du fait de la parfaite régularité de l'accélération. En raison du type d'exploitation retenu (autonomie entre deux tronçons en captage limitée à 5 km environ), il est nécessaire de disposer de plus de puissance que d'énergie. C'est pour cette raison que les batteries alcalines au cadmium-nickel ont été retenues. Dans les conditions d'exploitation prévues, la durée de vie des batteries pourrait atteindre cinq à six ans, leur masse s'élèverait à environ deux tonnes.

Afin d'augmenter les chances de réussite commerciale de ce projet, une caisse à grande capacité a été choisie. Composé d'un véhicule tracteur et d'une remorque, dérivés d'un autobus classique, le trolleybus bimode articulé aura une capacité de 150 passagers environ (au lieu de 90 pour le véhicule standard). Par ailleurs, un dispositif d'emperchage-déperchage automatique permettra au machiniste d'effectuer le transfert entre tronçons en captage et tronçons en autonomie, en 15 secondes environ et sans quitter son poste de conduite.

Ligne type exploitée en matériel bimode (*fig.* 36)

Le dimensionnement des batteries, comme nous l'avons vu, est prévu pour assurer au véhicule une autonomie maximale de 5 km environ en fonctionnement normal. En fonctionnement exceptionnel, l'autonomie totale serait de 15 km. Le matériel en est encore au stade des études ; le montage du véhicule probatoire devrait être terminé dès la fin de l'année 1978.

Les programmes étrangers

En Allemagne et au Japon sont également développés des systèmes bimodes. Ces systèmes sont différents du système français dans la mesure où ils sont munis d'un dispositif de guidage escamotable : là où la circulation est dense, sur les « axes lourds », l'autobus électrique circule en site propre, où il est guidé ; cela permet une réduction d'emprise, une simplification du système de captage de courant et l'automatisation du système sur le site propre ; en périphérie, sur site banal, l'agent de conduite reprend toute l'initiative.

En Allemagne, les études portant sur l'électrification du véhicule sont dissociées de celles portant sur le guidage. L'intégration des deux n'a pas encore été réalisée. Les grosses difficultés rencontrées au niveau des batteries amèneront peut-être à envisager un véhicule pour lequel l'autonomie en site banal serait assurée par un moteur Diesel. Au Japon, le système complet est à l'essai depuis plus d'un an.

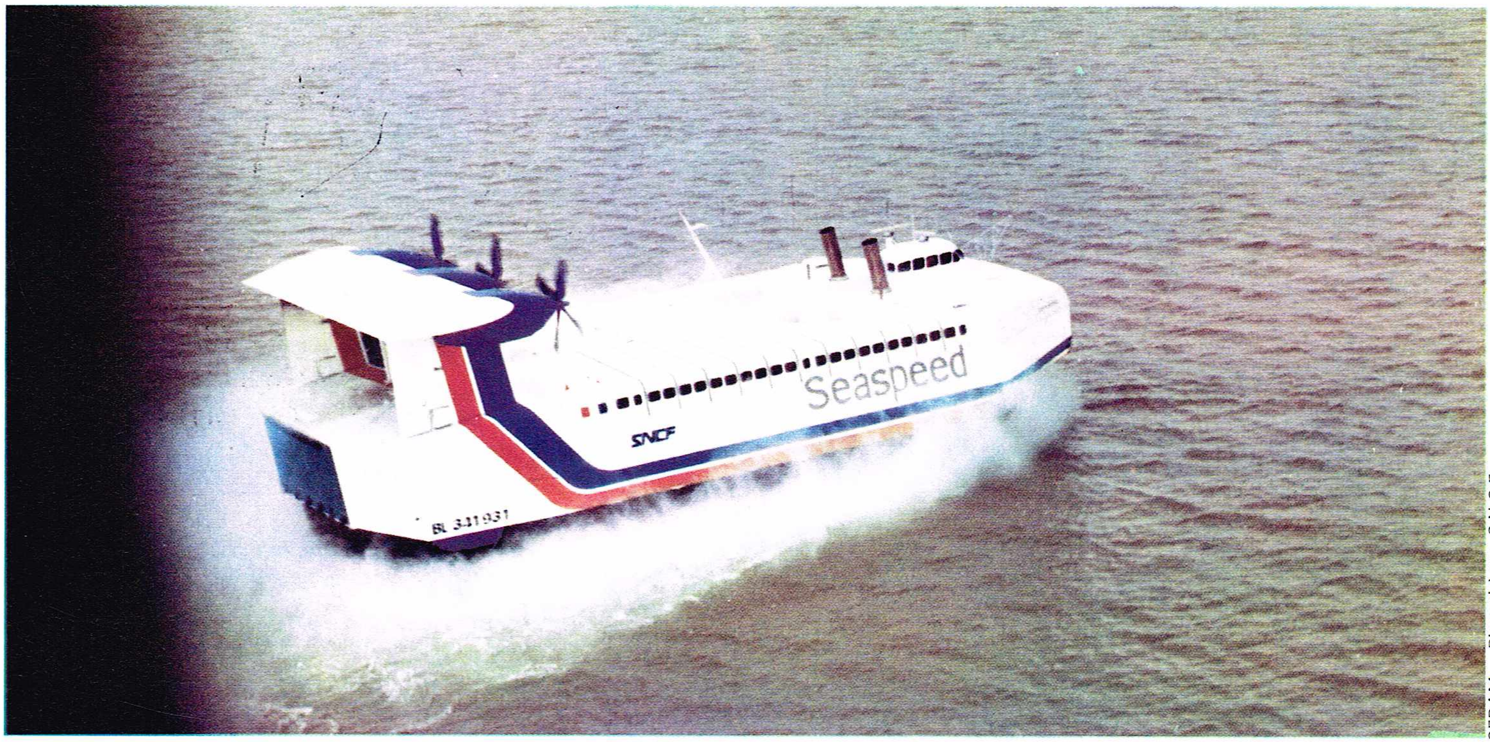

SEDAM - Photothèque S.N.C.F.

▲ *Le naviplane N 500 de la SEDAM. Le pont inférieur est destiné à recevoir les véhicules automobiles et le fret ; le pont supérieur est destiné aux passagers (400 environ). A l'arrière, 3 moteurs de propulsion de 3 200 ch.*

Les nouveaux modes de transport maritime

De tout temps, le transport maritime a été la composante principale des échanges commerciaux internationaux. Toutes les améliorations techniques qui ont été étudiées ont touché surtout l'augmentation de la puissance propulsive installée à bord, ainsi que l'accroissement des tonnages. Mais, alors que, sur terre et dans les airs, l'homme se déplace de plus en plus vite, on constate sur mer une certaine stagnation dans cette course à la vitesse, due principalement à la résistance hydrodynamique à l'avancement (pour un navire classique, la puissance nécessaire à la propulsion varie à peu près comme le cube de la vitesse) [*fig.* 37], à tel point que tout gain notable de vitesse doit provenir de solutions techniques nouvelles qui cherchent à diminuer cette résistance à l'avancement plutôt qu'à accroître la puissance installée à bord. Ces navires, qui profitent des technologies de pointe permettant d'atteindre — il est vrai, pour de faibles tonnages — des performances élevées, sont appelés de manière générale « navires non conventionnels ».

Actuellement, on peut donc définir deux grands axes de recherche dans le domaine des modes nouveaux des transports maritimes :

— développement de concepts nouveaux pour accroître surtout la vitesse de déplacement : c'est le cas des navires non conventionnels ;

— recherche d'améliorations à apporter à des navires de type classique au niveau des conditions d'exploitation et de la rentabilité commerciale, ce qui conduit, par exemple, aux navires à propulsion nucléaire pour les gros tonnages.

Nous allons d'abord établir une classification des différents types de navires non conventionnels, et en étudier plus particulièrement quelques-uns, puis nous décrirons les autres modes de développement des navires classiques.

Classification des navires non conventionnels

Deux approches principales ont été explorées pour obtenir des navires à hautes performances et ont donné les hydroptères et les navires à coussin d'air, dont la différence réside dans le mode de sustentation. Le *tableau* IV permet de donner une classification générale suivant les principaux modes de fonctionnement en croisière de ces engins.

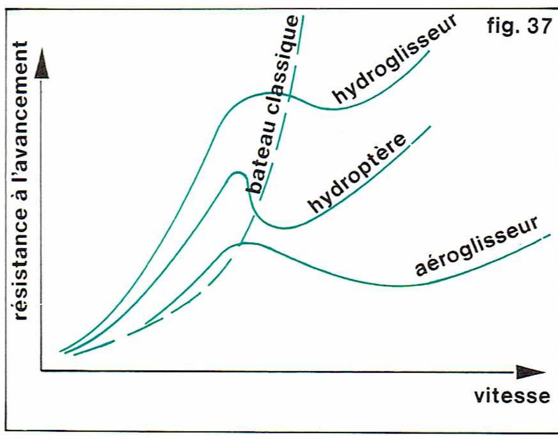

Richard Colin

◀▼ *A gauche, figure 37 : résistance à l'avancement en fonction de la vitesse pour différents modes de transport maritime. Ci-dessous, tableau IV : classification générale des navires non conventionnels.*

Tableau IV
Classification générale des navires non conventionnels

Milieu	Terme générique	Origine de la sustentation en croisière	Dénomination	Appellation
Surface de séparation air-eau	Aéroglisseurs	Aérostatique	A.S.A.S. (1) ou aéroglisseurs à coussin d'air	Aéroglisseurs à coussin d'air à jupes souples Aéroglisseurs à coussin d'air à quilles latérales
		Aérodynamique	A.S.A.D. (2)	Aéroglisseurs Aéroglisseurs à effet tunnel Aéroglisseurs-Hydravions
	Navires	Hydrostatique	*Navires à déplacement classique**	*Navires lents* *Vedettes rapides*
		Hydrodynamique	Hydroptères	Hydroglisseurs Hydroptères à plans émergents Hydroptères à ailes totalement immergées

(1) A.S.A.S. = Aéroglisseurs à sustentation aérostatique.
(2) A.S.A.S. = Aéroglisseurs à sustentation aérodynamique.
* Navires conventionnels mentionnés afin de garder la continuité dans l'évolution technologique de la construction navale.

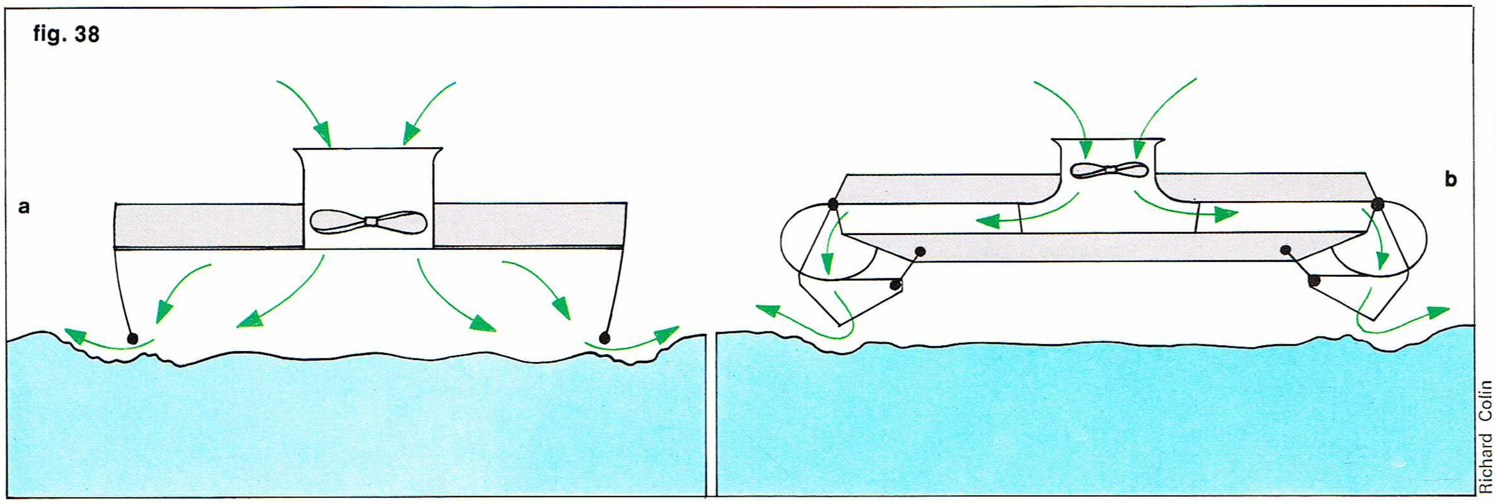

▲ *Figure 38 : les deux modes principaux de confinement du coussin d'air.*

▶ *Figure 39 : forces aérodynamiques et hydrodynamiques agissant sur aéroglisseur amphibie.*

Aéroglisseurs marins amphibies

Ce sont des appareils à sustentation aérostatique dont le principe est de faire évoluer un véhicule sur un matelas d'air — ou coussin — créé par des ventilateurs qui prélèvent de l'air au-dessus de l'appareil pour le refouler en dessous. L'application directe de ce principe n'aurait pas donné beaucoup de possibilités à ce genre de véhicule; en effet, il doit suivre les irrégularités du terrain ou de la houle, alors que la hauteur de fuite de l'air sous le coussin ne doit pas excéder quelques dizaines de centimètres si l'on veut éviter d'avoir des puissances installées prohibitives pour les ventilateurs de sustentation. La création de « jupes souples » pour confiner le coussin permet d'avoir une « coque déformable » qui peut absorber les obstacles sans modifier l'équilibre de l'ensemble.

Les deux modes principaux de confinement du coussin sont décrits dans les *figures* 38 a et 38 b. La filière à jupes souples et à alimentation périphérique du coussin est à la base de toutes les réalisations opérationnelles actuelles dans le monde.

Les premières études ont commencé en Angleterre il y a une vingtaine d'années, sous l'impulsion de M. Cockerell. La première traversée de la Manche eut lieu en août 1959 avec le *SR. N1*, premier d'une série de six hovercrafts. Ces aéroglisseurs, actuellement en service commercial, ont atteint un stade de développement satisfaisant jusqu'à environ 200 tonnes. Leur vitesse est de l'ordre de 70 nœuds par mer calme, mais elle est sensiblement affectée par l'état de la mer. Ce type d'appareil est actuellement utilisé dans le domaine civil, pour le transport rapide de passagers et d'automobiles ou de fret sur de courtes distances (de 30 à 100 nautiques), et présente l'avantage de s'affranchir des contraintes des ports conventionnels et des routes maritimes actuelles. Nous décrirons plus loin quelques types d'appareils.

Nous allons faire le bilan des forces agissant sur un aéroglisseur amphibie pour bien montrer les différences existant avec les navires classiques. Elles sont de deux sortes.

Forces aérodynamiques

Il y a d'abord la *traînée aérodynamique,* qui varie comme le carré de la vitesse; sans oublier que ces appareils pouvant avoir des angles de dérapage élevés, la surface du maître couple varie (l'allongement moyen de ces appareils est de l'ordre de 2) [*fig.* 39].

Il faut ensuite tenir compte de la *traînée de captation,* due au fait que les ventilateurs de sustentation qui aspirent de l'air au repos doivent lui communiquer la vitesse de déplacement de l'appareil par rapport au milieu ambiant. Cette traînée est proportionnelle à la vitesse.

Ces deux forces sont les principales d'origine aérodynamique.

Forces hydrodynamiques

Le champ de pression, dû à la sustentation, déforme la surface libre en engendrant un champ de vagues qui produit deux actions principales :

● Une *résistance due aux interactions* jupes-mer, qui se décompose en plusieurs termes :

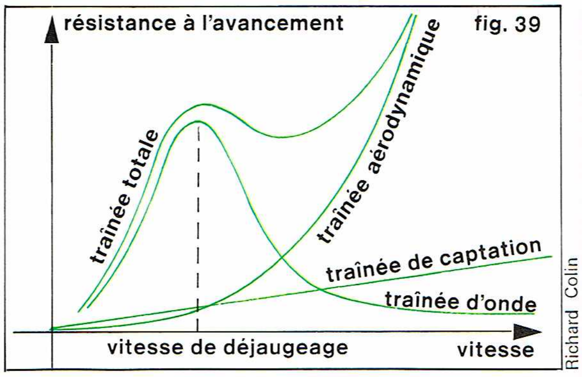

— une *résistance de frottement* due aux vagues mouillant les jupes; elle dépend du nombre de Reynolds et de la surface mouillée, donc en fait des conditions de vol de l'aéroglisseur;

— une *résistance* dite *d'écopage* due aux chocs des vagues à l'intérieur du coussin sur les jupes;

— une *traînée « d'embruns »* due aux embruns soulevés par l'afflux d'air du coussin et arrêtés par les jupes ou la structure.

Ces différentes forces ne sont pas calculables théoriquement.

● Une *résistance de vague* ou *traînée d'onde* due à la formation d'une houle de vitesse supérieure à la vitesse de transfert d'énergie (célérité de la houle supérieure à la vitesse de groupe). Cette traînée dépend des nombres de Froude et de Reynolds, de la vitesse, de la géométrie du champ de pression, sans oublier les dimensions de la masse d'eau environnante (profondeur, en particulier). Il est possible de calculer par la théorie ce dernier terme, mais uniquement pour une mer calme. Cette traînée d'onde présente un pic appelé « déjaugeage » qui se produit au moment où la longueur d'onde du champ de vagues créé par l'aéroglisseur est approximativement égale à deux fois la longueur de l'appareil. Retenons pour fixer les idées que, pour un aéroglisseur d'allongement 2, la vitesse de déjaugeage correspond à un nombre de Froude d'environ 0,6. La traînée totale au déjaugeage est un paramètre très important car il donne des indications sur le minimum de puissance à installer pour la propulsion.

Il est évident, par ailleurs, qu'il faut déterminer la marge de puissance au-dessus du déjaugeage pour se fixer la vitesse maximale par mer calme, et savoir jusqu'à quel état de mer l'appareil pourra fonctionner.

La manœuvrabilité est un problème particulier aux aéroglisseurs marins amphibies, qui ont tendance à glisser latéralement lors de la giration, à cause du manque de contact avec l'eau. Plusieurs types de solutions sont envisagés sur les aéroglisseurs actuels. D'autre part, ces appareils ont une structure légère qui doit supporter les efforts en vol — qui les rapprochent plus de l'avion — et les efforts en posé sur l'eau (cas à envisager s'il y a une panne de sustentation) qui les rapprochent du navire classique.

Solutions envisagées

Voyons maintenant les solutions envisagées pour deux aéroglisseurs de tonnage élevé.

● Tout d'abord le SR. N4 britannique qui assure depuis 1969 le transport de passagers et de voitures à travers la Manche.

Dimensions : longueur hors tout ≃ 40 m ;
largeur hors tout ≃ 24 m ;
hauteur hors tout à l'arrêt : 11,50 m ;
hauteur des jupes : 2,44 m.

Masse : 180 tonnes.

Vitesse maximale par mer calme : 70 nœuds ;
le SR.N4 en version standard peut transporter 254 passagers et 30 véhicules.

Propulsion : 4 hélices à pas variables montées sur pods tournants.

Sustentation: 4 ventilateurs de type centrifuge.

Puissance : elle est fournie par 4 turbines Rolls-Royce Proteus de 3 400 ch en continu ; chaque turbine actionne une hélice de propulsion et un ventilateur de sustentation.

La manière dont les hélices aériennes sont placées assure une très bonne manœuvrabilité. Le seul inconvénient est que les turbines Proteus sont placées à l'arrière de l'appareil, ce qui conduit à utiliser des transmissions mécaniques de grande longueur. Une version allongée du SR. N4 est prévue pour transporter 416 passagers et 60 véhicules. Sa mise en service aurait lieu en 1978.

● En France, la Société d'étude et de développement des aéroglisseurs marins (SEDAM) a produit plusieurs appareils. Les deux premiers sont les N 300 et les N 102 (voir *photos*). Ces appareils devaient montrer la viabilité des techniques françaises de Jean Bertin. En avril 1973, un protocole d'accord était signé entre l'État et la SEDAM pour le développement d'un appareil de plus gros tonnage, le N 500. Simultanément, le département de la Gironde et la S. N. C. F. passaient chacun commande ferme d'un appareil.

G. Loucel - Fotogram

▲ ***L'hovercraft (véhicule à coussin d'air) britannique SR. N4.***

▼ ***En bas, le naviplane N 300 (SEDAM) est un aéroglisseur marin polyvalent de 30 tonnes destiné à des utilisations civiles et militaires. Sa production industrielle a commencé en 1971.***
Ci-dessous, aéroglisseur géant N 500-02 (SEDAM) destiné aux lignes Boulogne-Douvres et Calais-Douvres. Il peut transporter 400 passagers, 65 voitures, atteindre une vitesse de 130 km/h et franchir des creux de 2,5 m.

SEDAM - Photothèque S.N.C.F.

SEDAM - Photothèque S.N.C.F.

SEDAM - Photothèque S.N.C.F.

Voici les caractéristiques principales du N 500 :
Poids total : 260 tonnes.
Charge marchande : 85 tonnes — 20 tonnes de carburant.
Vitesse maximale sur eau calme : 70 nœuds.
Vitesse maximale sur houle : 2,50 m — 48 nœuds.
Autonomie : 5 heures.

Dimensions : longueur hors tout ≃ 50 m ;
largeur hors tout ≃ 23 m ;
hauteur totale au repos ≃ 15 m ;
hauteur des jupes : 3,60 m à l'avant ;
2,50 m latéralement ;
surface portante ≃ 840 m^2 ;
débit total d'air ≃ 860 m^3/s.

Propulsion : 3 turbines à gaz Avco Lycoming TF 40 entraînant chacune une hélice Hawker-Siddley de 21 pieds (quadripale, pas variable, tournant à 620 tr/mn).

Sustentation : 2 turbines TF 40 entraînant chacune un ventilateur axial de 4 m de diamètre (13 pales, 900 tr/mn, pas fixe) ; le débit nominal est de 860 m^3/s.

La turbine TF 40 développe 3 200 ch en puissance maximale continue et consomme environ 250 g/ch/h.

Le N 500 peut emporter 65 automobiles et 385 passagers. Les divers cas de chargement (ne devant pas excéder 85 tonnes) laissent la possibilité d'embarquer dans le couloir central de l'appareil 5 autocars. Le premier N 500 devait entrer en service sur la Manche en 1977, mais il a malheureusement été détruit par un incendie sur le chantier de construction. Le deuxième appareil a commencé ses essais sur eau en août 1977 et a poursuivi ses essais d'évaluation sur la Manche à la fin de l'année 1977 ; il est actuellement à Boulogne et rentrera en service en mars-avril 1978 sur le trajet Boulogne-Douvres (compagnie exploitante S.N.C.F. Seaspeed).

◀ ***Naviplane N 102 de la SEDAM : cet aéroglisseur marin léger, monomoteur, destiné à des fonctions de transport et à des utilisations militaires, n'est actuellement plus en service.***

Navires à effet de surface à quilles latérales

Comme l'aéroglisseur amphibie, ce type de navire est à sustentation aérostatique, mais le confinement du coussin est différent. Sur les côtés, deux quilles immergées annulent les fuites d'air, mais augmentent beaucoup la résistance à l'avancement. A l'avant et à l'arrière, le confinement est assuré par des éléments souples (*fig.* 40).

Ces appareils ne sont plus amphibies, mais ils présentent, par rapport aux aéroglisseurs marins classiques, l'avantage d'une bien meilleure stabilité en lacet, c'est-à-dire une très bonne tenue de route, et demandent une puissance de sustentation plus faible. Le mode de propulsion peut être soit des hélices aériennes ou marines, soit des jets d'eau.

Les navires à effet de surface à quilles latérales semblent dans l'avenir devoir être capables de vitesses de 80 à 100 nœuds pour des tonnages excédant 2 000 tonnes. Mais il reste beaucoup de problèmes technologiques à résoudre. Les réalisations actuelles sont peu nombreuses; les plus importantes sont les deux engins expérimentaux construits par les États-Unis pour étudier leurs performances et leur comportement en mer, et pour comparer les diverses solutions techniques envisagées. Leurs caractéristiques principales sont réunies au *tableau* V.

Ces engins, construits à la demande de l'US Navy, doivent lui permettre de définir des programmes futurs; le développement actuel de ces engins est surtout axé sur les applications militaires.

fig. 40

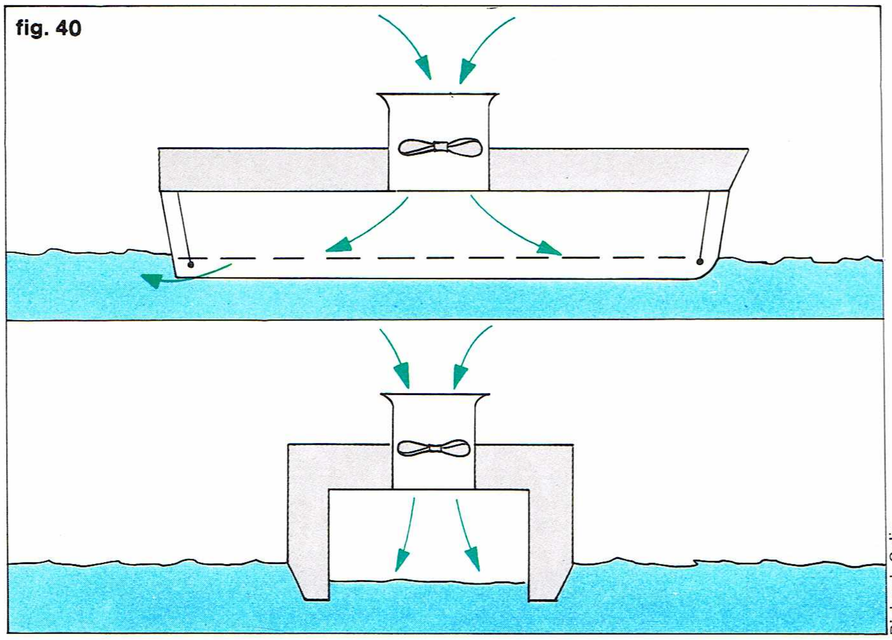

Richard Colin

▲ ***Figure 40 : schéma d'un navire à effet de surface à quilles latérales. Sur les côtés, deux quilles immergées annulent les fuites d'air mais augmentent la résistance à l'avancement.***

Hydroptères

Les hydroptères sont des navires à sustentation hydrodynamique assurée par des plans porteurs (ou ailes) immergés. Alors que, sur les navires classiques, l'équation de portance est une relation poids-volume, sur l'hydroptère, la relation à satisfaire fait intervenir un poids, une surface et une vitesse. C'est de cette différence que proviennent les problèmes techniques propres aux hydroptères.

— La surface des ailes doit être assez faible, et en tout cas plus faible que la surface mouillée du navire, pour pouvoir profiter d'une réduction de la traînée de frottement; cela conduit à des charges alaires importantes (plusieurs tonnes par m²). A ces charges élevées correspondent des dépressions élevées et des risques de cavitation sur l'extrados de l'aile.

— Les profils qui permettent de réduire ces risques de cavitation sont des profils minces. Il faut donc éviter des couplages entre les efforts hydrodynamiques et les déformations élastiques de l'aile dues à sa minceur.

— La coque est supportée en vol par des « jambes », contrairement à un navire classique où la pression est répartie. L'hydroptère doit satisfaire à ces deux impératifs.

Tous ces problèmes conduisent à adopter des constructions aussi légères que possible, et ainsi on préférera souvent les turbines à gaz aux diesels pour la propulsion.

Dans l'ensemble des réalisations actuelles, on peut définir deux sortes d'hydroptères :

Hydroptères de la première génération (*fig.* 41)

Leur sustentation est assurée par des ailes hydrodynamiques partiellement immergées, qui percent la surface grâce à leur géométrie en V. Cette disposition des plans porteurs confère à l'hydroptère de première génération une stabilité naturelle en roulis et tangage. En revanche, la stabilité de la plate-forme, indispensable pour le confort des passagers ou pour l'implantation de systèmes d'armes modernes (missiles), se détériore dès que la mer est forte, car la portance des ailes est liée à leur surface immergée qui varie avec l'état de la mer. Ces navires sont donc utilisables pour des trajets où la mer n'est pas trop forte (eaux calmes ou courtes distances si la couverture météo est moyenne). Un avantage propre aux hydroptères est qu'ils peuvent redevenir, en cas de grosse mer, des bateaux à coque classique en diminuant leur vitesse.

● Parmi les hydroptères de première génération, il faut citer les *Supramar* et les engins soviétiques, tous civils, puis l'hydroptère militaire canadien *Bras d'or* destiné à la lutte anti-sous-marine (*tableaux* VI et VII).

● Le PT 150 présente des améliorations sensibles au concept de base. L'aile AR, qui porte environ 40 % du poids du véhicule, est entièrement immergée. L'angle d'attaque peut être réglé à volonté par des vérins hydrauliques, et la portance de l'aile est contrôlée automatiquement par des jets d'air judicieusement disposés sur l'extrados.

Tableau V

Caractéristiques principales des navires à effet de surface à quilles latérales

Caractéristiques	SES 100 A (Aerojet General Corporation)	SES 100 B (Bell Aerospace)
Déplacement (en t)	100	100
Longueur hors-tout (en m)	25	23,5
Largeur hors-tout (en m)	12,8	10,7
Vitesse par mer calme (en nœuds)	≃ 80	≃ 80
Pression de sustentation (en cm d'eau)	45,5	47,9
Propulsion	Jets d'eau 4 Ayco Lycoming TF 35 (3 500 ch)	Hélices semi-immergées 3 turbines marinisées Pratt et Whitney FT 12A6
Sustentation	Intégration de la propulsion et de la sustentation Soufflantes axiales	Indépendante de la propulsion Soufflantes centrifuges
Quilles latérales	Minces	Épaisses

▶ ***Tableau V : caractéristiques principales des navires à effet de surface à quilles latérales américains.***

Tableau VII **Caractéristiques de quelques hydroptères soviétiques**			
Caractéristiques	**Raketa**	**Kometa**	**Sputnik**
Longueur hors-tout (en m)	26,96	35,20	47,90
Largeur hors-tout (en m)	5,00	9,60	9,00
Masse totale pleine charge (en t)	25	56	117
Vitesse de croisière (en nœuds)	32	32	41
Puissance maximale (en ch)	850	1 800	3 400
Capacité (nombre de passagers)	64	100	300

fig. 41

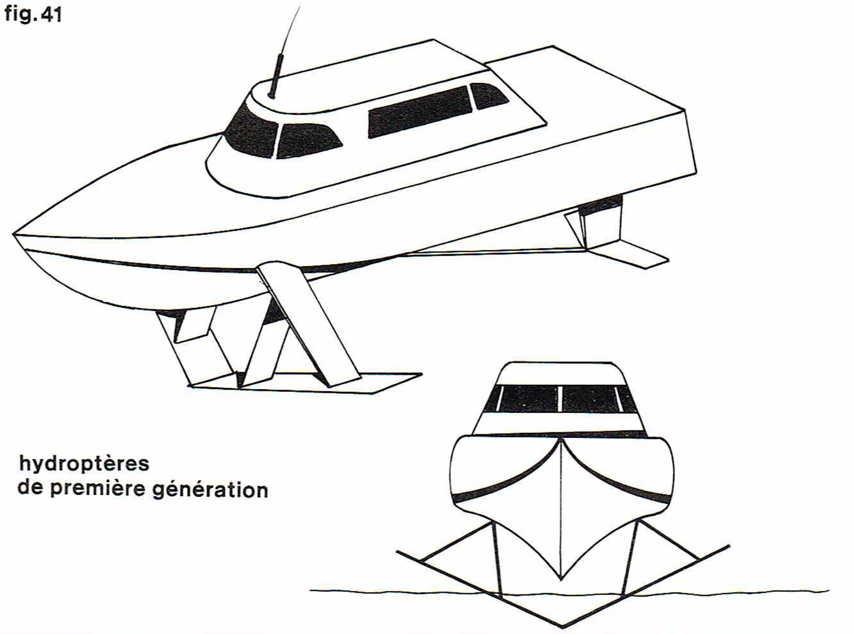

Richard Colin

L'aile AV reste du type « à plans émergents », mais comporte des volets de bord de fuite permettant une plus grande latitude de centrage de la charge utile, une hypersustentation au décollage, un réglage de la hauteur de vol et, par là même, compte tenu de la géométrie de l'aile, un réglage de la raideur en assiette et en pilonnement.

La partie centrale de l'aile AV est munie du même dispositif de réglage de la portance que l'aile AR.

Le PT 150 transporte 250 passagers. Le premier exemplaire est sorti d'usine en 1968.

Hydroptères de seconde génération (*fig.* 42)

Pour s'affranchir de cette limitation d'emploi par mer forte, la portance est assurée par des plans totalement immergés, ce qui nécessite, pour avoir une bonne stabilité en roulis et en tangage, un pilotage automatique de l'incidence des ailes.

Actuellement, les buts visés pour les hydroptères de seconde génération sont les suivants :

— Accroître le confort : quand l'état de la mer est compatible avec les dimensions de l'appareil, on peut, par le pilotage automatique, annuler théoriquement tous les mouvements de plate-forme. En pratique, des accélérations de 0,05 *g* sont obtenues dans ce mode de pilotage dit « de tenue ».

— Accroître les capacités tous temps des hydroptères : dès que l'état de la mer ne permet plus le pilotage

fig. 42

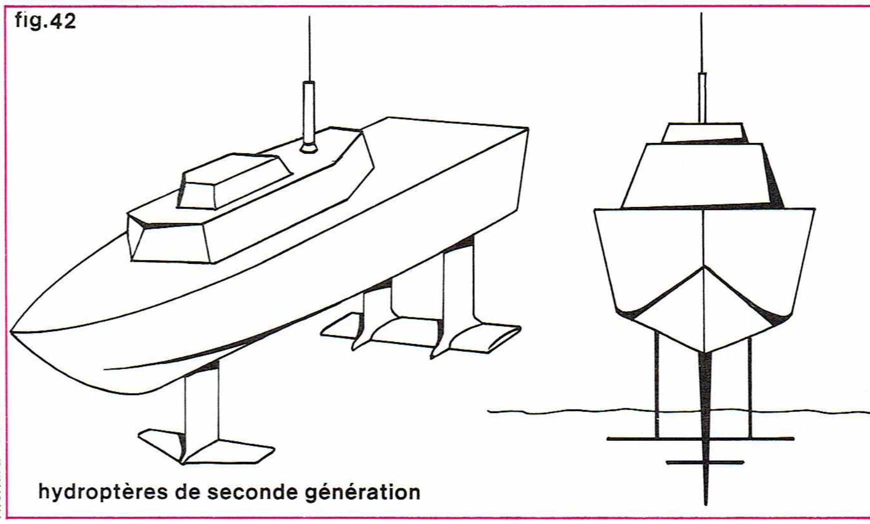

Richard Colin

▲ *En haut à gauche, tableau VII : caractéristiques de quelques hydroptères soviétiques. A droite, figure 41 : hydroptère de la première génération. La portance est assurée par des ailes partiellement immergées qui percent la surface grâce à leur géométrie en V. En bas, figure 42 : hydroptère de seconde génération : la portance est assurée par des plans totalement immergés.*

▼ *Tableau VI : caractéristiques de quelques hydroptères.*

Tableau VI
Caractéristiques de quelques hydroptères

Caractéristiques	Supramar PT 20	Supramar PT 150	Bras d'or (militaire) FHE 400	Plainview AG (EH)	Dolphin	Flagstaff PG H1	Tucum Cari PG H2	H 890
Vitesse (en nœuds)	34	36	60 (mer calme) 50 (mer agitée)	50	50	50	50	50
Longueur hors-tout (en m)	20,75	37,50	45,90	64,6	22,6	22,2	21,6	10,66
Largeur hors-tout (en m)	4,99	7,50	6,5	12,2	5,7	6,5	5,9	4,15
Masse totale pleine charge (en t)	32,00	165,00	215,00	320	60	65	58	4,5
Puissance maximale (en ch)	1 350	2 × 3 400	25 000	2 × 14 000	3 200	3 200	3 400	
Distance franchissable (en milles nautiques)	216	300			200			
Capacité (nombre de passagers)	70-78	250						
Tirant d'eau sur coque (en m)	3,08	5,50	7,16					
Propulsion	1 diesel Maybach Mercedes Benz MB 820 db	2 diesel Maybach Mercedes Benz MD 1081	1 turbine Pratt et Whitney FT 4 A 2	2 turbines General Electric LM 1500	1 turbine Rolls Royce Tyne 621	1 turbine Rolls Royce Tyne 621	1 turbine Rolls Royce Proteus	Réacteur Marmorée 4 de Turboméca (480 décanewton)
Type	Plans porteurs émergents	Plans porteurs mixtes	Plans porteurs mixtes	Plans porteurs immergés	Plans porteurs immergés	Plans porteurs immergés	Plans porteurs immergés	Plans porteurs immergés

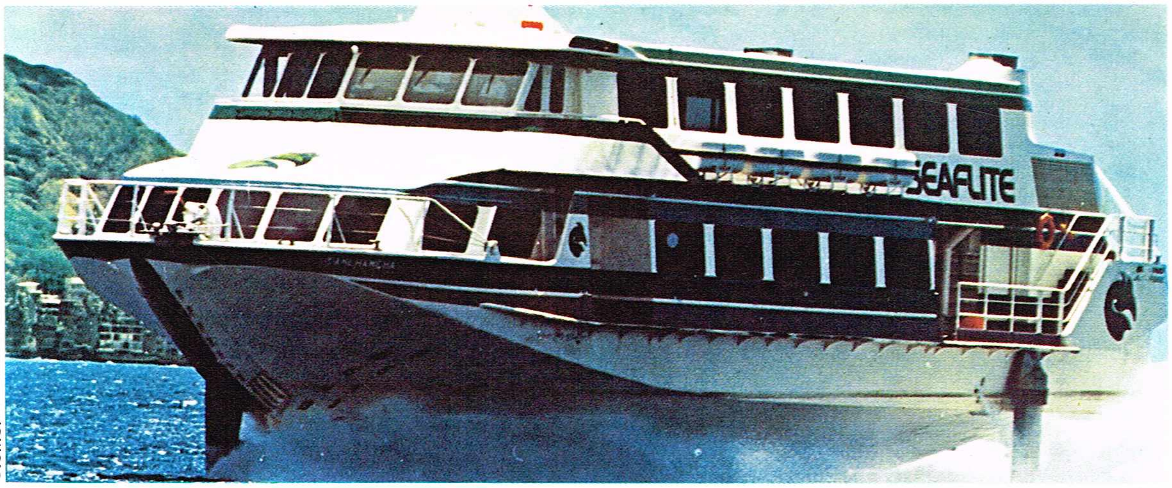

U.S.I.S.

▶ *L'hydroptère Kamehameha dans le port d'Honolulu. Il assure un service régulier entre les îles de l'archipel des Hawaii.*

U.S.I.S.

▲ *Hydroptère de recherche USS Plainview pendant un parcours d'essai dans le Puget Sound (fjord) dans l'État de Washington.*

▼ *Figure 43 : navires non conventionnels à sustentation aérodynamique. On peut définir trois types de sustentations : a, récupération de la pression d'arrêt sous l'appareil (ram-wing) ; b, portance assurée par l'effet « tunnel » ; c, principe de l'aéroglisseur hydravion.*

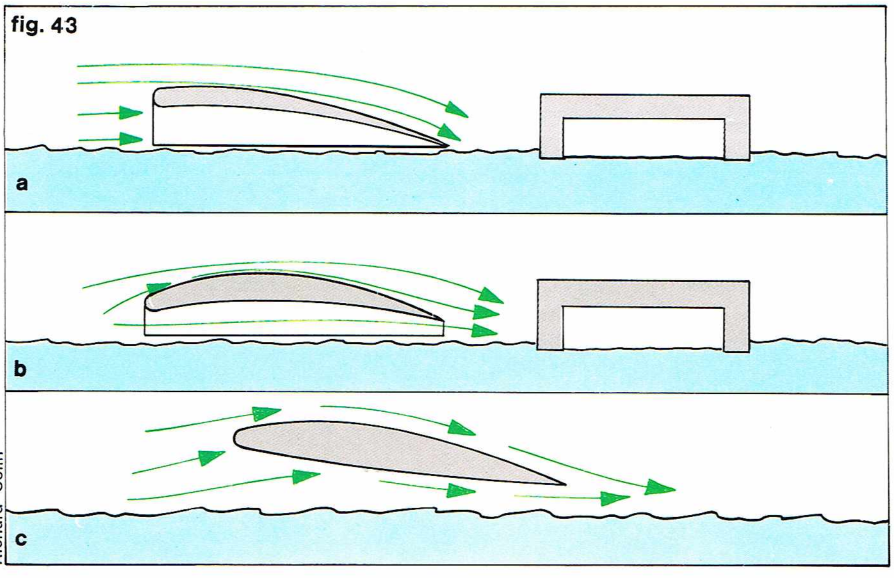

Richard Colin

« de tenue », on peut, en modifiant le mode de pilotage automatique, continuer à voler en contournant partiellement la houle.

— Accroître la vitesse et le tonnage. Actuellement, avec des profils d'ailes subcavitants, on peut atteindre 50 à 60 nœuds. La mise au point de profils supercavitants permettrait d'envisager des vitesses d'environ 80 nœuds.

Le *tableau* VI donne les caractéristiques principales des hydroptères expérimentaux de première et de seconde génération sans oublier l'hydroptère expérimental français H 890 construit par la SNIAS. Cet engin de 4,5 t (longueur hors tout, 10,66 m ; largeur, 3,90 m) a atteint 50 nœuds, et peut franchir sans contournement des vagues de 80 centimètres.

Il y a actuellement trois exemples de réalisations opérationnelles d'hydroptères de seconde génération, en dehors de l'U. R. S. S. Toutes trois sont de conception Boeing :

● La canonnière lance-missiles *Swordfish* de la marine italienne, qui dérive directement du *Tucumcari ;*

Déplacement : 64 tonnes.
Vitesse maximale : 50 nœuds.
Vitesse par mer force 4 : 40 nœuds.
Vitesse sur coque : 7 nœuds.
Autonomie : 440/1 150 nautiques.
Propulsion : 1 turbine à gaz Rolls-Royce entraînant 2 jets d'eau.

● Le patrouilleur lance-missiles *PHM* du type *Pegasus :*

Déplacement : 235 tonnes.
Longueur : 40 mètres.
Vitesse maximale : > 50 nœuds.
Vitesse par mer force 5 : > 40 nœuds (vagues de 4 m).
Vitesse sur coque : 12 nœuds.
Autonomie par mer force 5 : > 500 nautiques.
Autonomie sur coque : 1 800 nautiques.
Propulsion : 1 turbine à gaz LM 2500 (16 000 ch) entraînant une pompe axiale à 2 étages.

● Le transporteur de passagers *Jet-Foil :*

Déplacement : 115 tonnes.
Longueur : 27,5 mètres.
Largeur : 9,5 mètres.
Vitesse maximale : 50 nœuds.
Vitesse par mer force 5 : 45 nœuds.
Propulsion : 2 turbines à gaz Allison de 3 300 ch entraînant 2 jets d'eau.
Charge marchande : 190/250 passagers.
Hauteur de vagues maximales franchissables : 3,50 mètres.

Navires non conventionnels à sustentation aérodynamique

Ces navires utilisent, comme les avions, la vitesse relative de l'air pour leur sustentation.

En partant du cas étudié plus haut, celui des navires à quilles latérales, on peut définir par évolution progressive trois types d'appareils à sustentation aérodynamique :

— Si on supprime la jupe avant, on peut, à vitesse élevée, assurer la portance grâce à la pression aérodyna-

mique d'arrêt sous la plate-forme de l'engin (*fig.* 43). Ces appareils sont baptisés *Ram-Wing* aux États-Unis.

— Si on supprime également la jupe arrière, la sustentation aérodynamique est assurée par « effet tunnel ».

— Si, en outre, on supprime les deux quilles latérales, on obtient un aéroglisseur-hydravion, semblable à un avion volant en effet de sol, c'est-à-dire un véhicule aérien profitant de l'accroissement de portance dû au fait qu'il se déplace à une altitude inférieure à son envergure.

Ces appareils, à l'exception de l'*Ekranoplan* soviétique, sur lequel on a peu de renseignements, sont au stade de l'étude.

Les avantages de ce type d'appareil sont les suivants :

— Pas de problème de coussin.

— Accroissement de la finesse aérodynamique, et donc possibilité d'atteindre des vitesses élevées de l'ordre de 500 nœuds, tout en ayant une bonne autonomie.

— Pas de problèmes technologiques majeurs, car on utilise directement les techniques aéronautiques, en particulier pour la propulsion. Mais, en revanche, les problèmes de déjaugeage et d'amerrissage sont particuliers, ainsi que la stabilité par mer formée, et la manœuvrabilité à faible altitude pour des appareils de grande envergure.

Propulsion navale nucléaire

Le développement de l'application à la propulsion navale de l'énergie nucléaire a d'abord suivi des motivations politiques et militaires. En effet, les critères de rentabilité commerciale sont plus limitatifs que les analyses « coût-efficacité » que l'on effectue pour des programmes militaires, ce qui explique pourquoi l'on compte actuellement plusieurs centaines de navires nucléaires militaires, et seulement trois navires marchands nucléaires, pour les pays de l'Ouest, et des brise-glace soviétiques.

Nous commencerons donc par étudier les flottes militaires en insistant sur les sous-marins qui sont à la base du développement de cette technique, ensuite nous passerons aux navires de commerce, et enfin nous ferons le point des problèmes à résoudre pour assurer le développement de la propulsion nucléaire au niveau des flottes de commerce.

Flotte militaire

Dès les années 1950, le sous-marin nucléaire lanceur d'engins est apparu comme le navire de guerre d'avenir en raison d'une autonomie quasi illimitée, par rapport aux sous-marins classiques, et d'une grande « discrétion ». Le premier programme de propulsion nucléaire américain démarrait en 1949 sous l'impulsion de l'amiral Rickover. Ce programme, dénommé STR (Submarine Thermal Reactor), devait conduire au prototype S1W qui peut être considéré comme le premier réacteur au monde de

U.S.I.S.

▲ ***Sous-marins à propulsion nucléaire USS Skate et USS Seadragon faisant surface au pôle Nord.***

la filière à eau pressurisée (PWR). Le principe en est le suivant. C'est un réacteur qui utilise l'eau ordinaire à la fois comme fluide caloporteur et comme modérateur. Mais, comme les neutrons de la réaction de fission sont assez facilement absorbés par l'hydrogène, il faut, pour entretenir cette réaction nucléaire, avoir un cœur contenant de l'uranium faiblement enrichi (environ 5 %). L'eau est maintenue sous pression pour éviter toute ébullition.

Le premier sous-marin nucléaire, le *Nautilus,* équipé d'un réacteur S2W directement dérivé du S1W, fut mis en service en 1955. Un deuxième programme américain, le SIR (Submarine Intermedia Reactor), étudia un réacteur utilisant du béryllium comme modérateur et du sodium liquide comme fluide caloporteur. Le sous-marin *Seawolf,* équipé d'un réacteur de ce type, fut mis en service en 1957, mais diverses difficultés de maintenance à bord firent abandonner cette filière pour les réacteurs embarqués. Actuellement, à peu près tous les réacteurs nucléaires de propulsion navale sont du type à eau pressurisée.

Les sous-marins nucléaires en service dans le monde sont essentiellement de deux types :

● Les **sous-marins nucléaires lanceurs d'engins (SNLE).** Ceux des pays occidentaux (États-Unis, Grande-Bretagne, France) équipés de 16 missiles balistiques ont un déplacement allant jusqu'à 8 000 t et une vitesse en plongée d'environ 30 nœuds. Les SNLE soviétiques ont un déplacement variant entre 4 000 t et 9 000 t suivant le nombre de missiles embarqués. Le premier SNLE français, le *Redoutable,* est entré en service en 1969, son réacteur étant dérivé d'un prototype à terre (PAT) construit à Cadarache. Trois autres SNLE du même type sont actuellement opérationnels.

▼ ***Tableau VIII : caractéristiques des principaux sous-marins américains à propulsion nucléaire.***

Tableau VIII
Caractéristiques des sous-marins américains à propulsion nucléaire

Caractéristiques	Nautilus SSN 571	Seawolf SSN 575	Skate SSN 578	Skipjack SSN 585	Triton SSRN 586	Halibut SSGN 587	Tullibee SSN 597	Thresher SSN 593	G. Washington SSBN 598	Ethan Allen SSBN 608	La Fayette SSBN 616	Sturgeon SSN 637
Mise sur cale	Juin 1952	Sept. 1953	Juillet 1955	Mai 1956	Mai 1956	Avril 1957	Mai 1958	Mai 1958	Nov. 1957	Sept. 1959	Janv. 1961	Août 1963
Mise en service	Sept. 1954	Sept. 1960	Déc. 1957	Avril 1959	Janv. 1959	Janv. 1960	Nov. 1960	Août 1961	Déc. 1959	Août 1961	Avril 1963	Juillet 1966
Longueur (en m)	99	103	81	77	136	107	79	84	116	125	130	90
Largeur (en m)	8,5	8,5	7,6	9,5	11,3	8,8	8,8	9,6	9,7	10	10	9,5
Vitesse de surface (en nœuds)	20	19	15	20	27	18	15	20	20	18	18	20
Vitesse de plongée (en nœuds)	25	24	19	35	25	25	20	32	25	25	23	30
Réacteurs	S 2 W	S 2 G S 2 WA	S 3 W ou S 4 W	S 5 W	2 S 4 G	S 3 W	S 2 C	S 5 W	S 5 W	S 5 W	S 5 W	S 5 W

Tableau IX
Caractéristiques des premiers navires militaires de surface à propulsion nucléaire

Caractéristiques	Long Beach	Enterprise	Bainbridge	Nimitz
Pays	États-Unis	États-Unis	États-Unis	États-Unis
Mise sur cale	Déc. 1957	Fév. 1958	Mai 1959	Juin 1968
Mise en service	Sept. 1961	Déc. 1961	Nov. 1962	Sept. 1973
Type	Croiseur	Porte-avions	Frégate	Porte-avions
Longueur (en m)	220	340	170	330
Largeur (en m)	22	40	18	40
Vitesse (en nœuds)	35	35	35	35
Puissance (en ch)	80 000	280 000	60 000	260 000
Réacteurs (PWR) :				
nombre	2	8	2	2
type	4 boucles	4 boucles	3 boucles	4 boucles

▲ *Tableau IX : caractéristiques des premiers navires militaires de surface à propulsion nucléaire.*

▼ *Tableau X : caractéristiques des principaux navires de commerce de surface à propulsion nucléaire.*

Tableau X
Caractéristiques des principaux navires de commerce de surface à propulsion nucléaire

Caractéristiques	Lénine	Savannah	Otto Hahn	Mutsu
Pays	U.R.S.S.	États-Unis	R.F.A.	Japon
Mise sur cale	Août 1956	Mai 1958	Sept. 1963	Nov. 1968
Mise en service	Sept. 1959	Mai 1962	Déc. 1968	1973
Type	Brise-glace	Cargo mixte	Minéralier	Cargo
Longueur (en m)	130	180	170	120
Largeur (en m)	28	24	23	20
Vitesse (en nœuds)	18	21	16	17
Puissance (en ch)	44 000	22 000	10 000	10 000
Réacteurs (PWR) :				
nombre	3	1	1	1
type	2 boucles	2 boucles	Intégré/FDR	2 boucles

● Les **sous-marins nucléaires d'attaque** (SNA). Ces sous-marins de tonnage plus faible sont beaucoup plus rapides en plongée que les SNLE, et n'ont pas le même armement. La Chine serait en train de construire également des sous-marins.

● Les **bâtiments de surface.** Les États-Unis lancèrent également dans les années 1960 des bâtiments de surface à propulsion nucléaire, tout d'abord le *Long Beach,* le porte-avions *Enterprise,* puis la frégate *Bainbridge* dont les caractéristiques sont résumées dans le *tableau* IX. D'autres bâtiments du même type ont été mis en chantier depuis lors.

Flottes de commerce

Le premier navire marchand à propulsion nucléaire est le brise-glace soviétique *Lénine* mis en service en 1959. Les États-Unis ne tardèrent pas à construire également un navire marchand nucléaire, le *Savannah,* cargo mixte mis en service en 1962. Il a amplement démontré la faisabilité et la fiabilité d'un navire de commerce nucléaire après avoir parcouru plus de 500 000 nautiques avant d'être retiré du service pour raisons économiques.

Par ailleurs, l'Allemagne et le Japon, qui s'étaient vu interdire toute application militaire de l'énergie nucléaire à la suite de la Seconde Guerre mondiale, voulurent acquérir une expérience qui leur permettrait de ne pas se laisser distancer par les autres pays (U. R. S. S., États-Unis, Grande-Bretagne, France). Ces deux nations lancèrent chacune un navire de commerce expérimental de faible puissance (10 000 chevaux, c'est-à-dire la moitié de la puissance du *Savannah*). L'*Otto-Hahn* allemand a été mis en service en 1968 et a parcouru, avec son premier cœur, 250 000 nautiques en quatre ans. Il a repris la mer en 1973 avec un deuxième cœur. Le *Mutsu* japonais a été mis en service en 1973. Leurs caractéristiques sont décrites dans le *tableau* X.

Perspectives de la propulsion navale nucléaire

On peut dire que la technique des réacteurs nucléaires embarqués sur navires classiques est désormais maîtrisée, grâce au nombre important de navires nucléaires militaires. Mais il faut ajouter qu'il y a peu de navires de forte puissance actuellement opérationnels. Or, depuis la crise de l'énergie qui a conduit à une augmentation importante du prix du pétrole, on cherche à mieux déterminer le seuil de rentabilité de la propulsion nucléaire navale pour les bâtiments de commerce.

La substitution de l'énergie nucléaire à l'énergie fossile, rentable pour la production d'électricité dans les grandes centrales terrestres, atteint aujourd'hui le seuil de compétitivité pour la propulsion navale civile, à partir d'une puissance de l'ordre de 60 000 ch, pour laquelle le surinvestissement spécifique, ne croissant que faiblement avec la puissance entre 50 000 ch et 150 000 ch, est amorti par l'économie réalisée sur les combustibles classiques dont la consommation est fonction directe de la puissance.

Une puissance installée de 60 000 ch à 120 000 ch correspond à des navires du type suivant :

— des pétroliers de 0,5 MTPL environ naviguant à 16/20 nœuds;

— des transporteurs de gaz liquéfiés de 200 000 m^3 naviguant à 25/27 nœuds;

— des porte-conteneurs rapides de 40 000 t environ naviguant à 25/27 nœuds;

— tout navire spécialisé exigeant soit un long rayon d'action (brise-glace), soit de fortes puissances installées (navires non conventionnels).

L'économie *annuelle* de fuel lourd est de l'ordre de la *tonne* par cheval de puissance installée pour un taux d'utilisation de 50 %. Le taux d'utilisation moyen pour les types de navires cités ci-dessus tourne autour de 75 à 80 %. Cela correspond à 100 000 t/an pour un pétrolier de 0,5 MTPL, et 110 000 t/an pour un porte-conteneurs de 80 000 ch. Ce seuil de puissance dépend en fait de facteurs susceptibles d'évoluer rapidement, comme le coût du cycle du combustible nucléaire par rapport au prix des soutes, et n'est donc qu'un ordre de grandeur.

Plusieurs pays ont dans leurs cartons des projets de réacteurs nucléaires capables de délivrer des puissances

U.S.I.S.

▲ *Le Long-Beach (CGN-9), premier croiseur à propulsion nucléaire, pendant des opérations en Atlantique (U. S. Navy).*

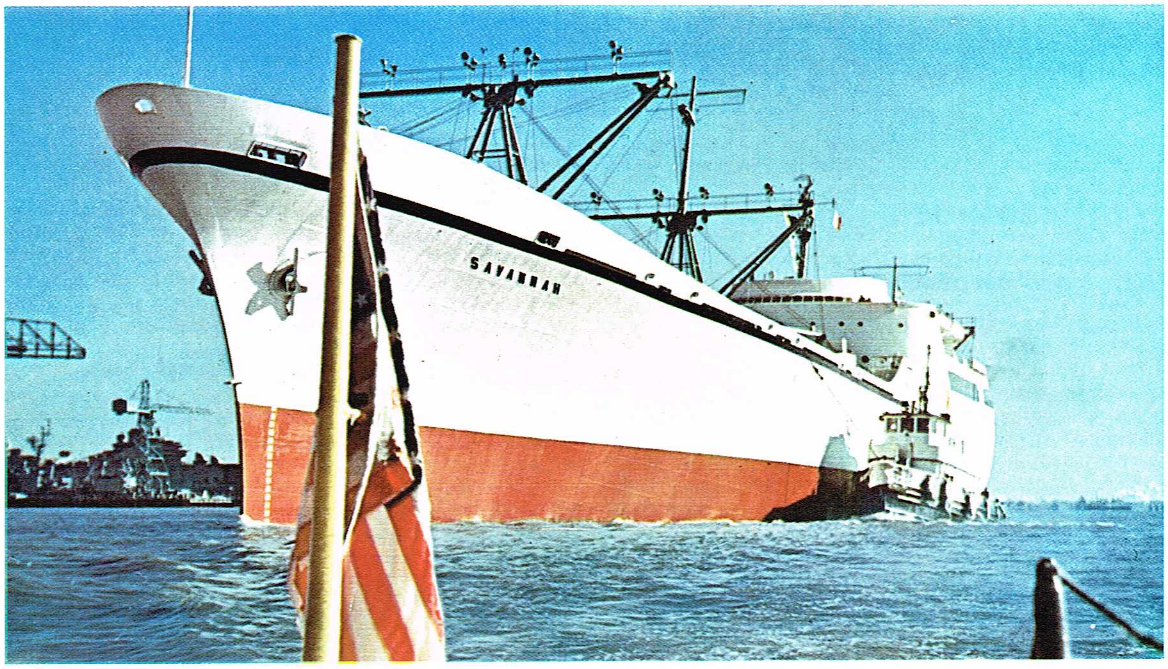

U.S.I.S.

◀ *Le Savannah devant le chantier naval de Philadelphie sur la rivière Delaware. Au premier plan le drapeau d'un garde-côte américain.*

de 80 000 à 120 000 ch. En France, en particulier, des études et essais sont poursuivis pour définir des chaudières nucléaires embarquées de 280 MWth baptisées CAS 2 G (chaudières avancées de série à deux générateurs de vapeur). En République fédérale d'Allemagne, un projet de porte-conteneurs de 80 000 ch est prêt, de même aux États-Unis.

Il reste cependant à édicter un recueil de règles internationales, concernant la navigation de ces bâtiments, leur accueil dans différents ports, les principes de base à appliquer pour leur construction, etc. Ce travail est en cours au sein de l'organisation intergouvernementale consultative de la navigation maritime dépendant de l'O. N. U. Les premiers navires commerciaux à propulsion nucléaire devraient donc voir le jour dans les années 1980.

BIBLIOGRAPHIE

GARREAU, M., *la Traction électrique,* éditions scientifiques Riber. - GOY, G., *Connaissance de la traction électrique,* Semis. - JANES, *Year Books,* Paul Goldsack, Paulton House, 8 Shepherdess Walk, London N1 7 LW England. - *Assessment of Operational Automated Guideway Systems,* U.S. D.O.T/T.S.C., Kendall Square-Cambridge, MA 02142, USA. - *Information documentation,* Bulletin de la R. A. T. P. - Rapports de l'Institut de Recherche des Transports, 2, avenue du Général-Malleret-Joinville, 94114 Arcueil. - The Lea Transit Compendium, 123 Green Street, Huntsville AL, 35081, U.S.A. Volume II, 1975, nos 1 à 9.

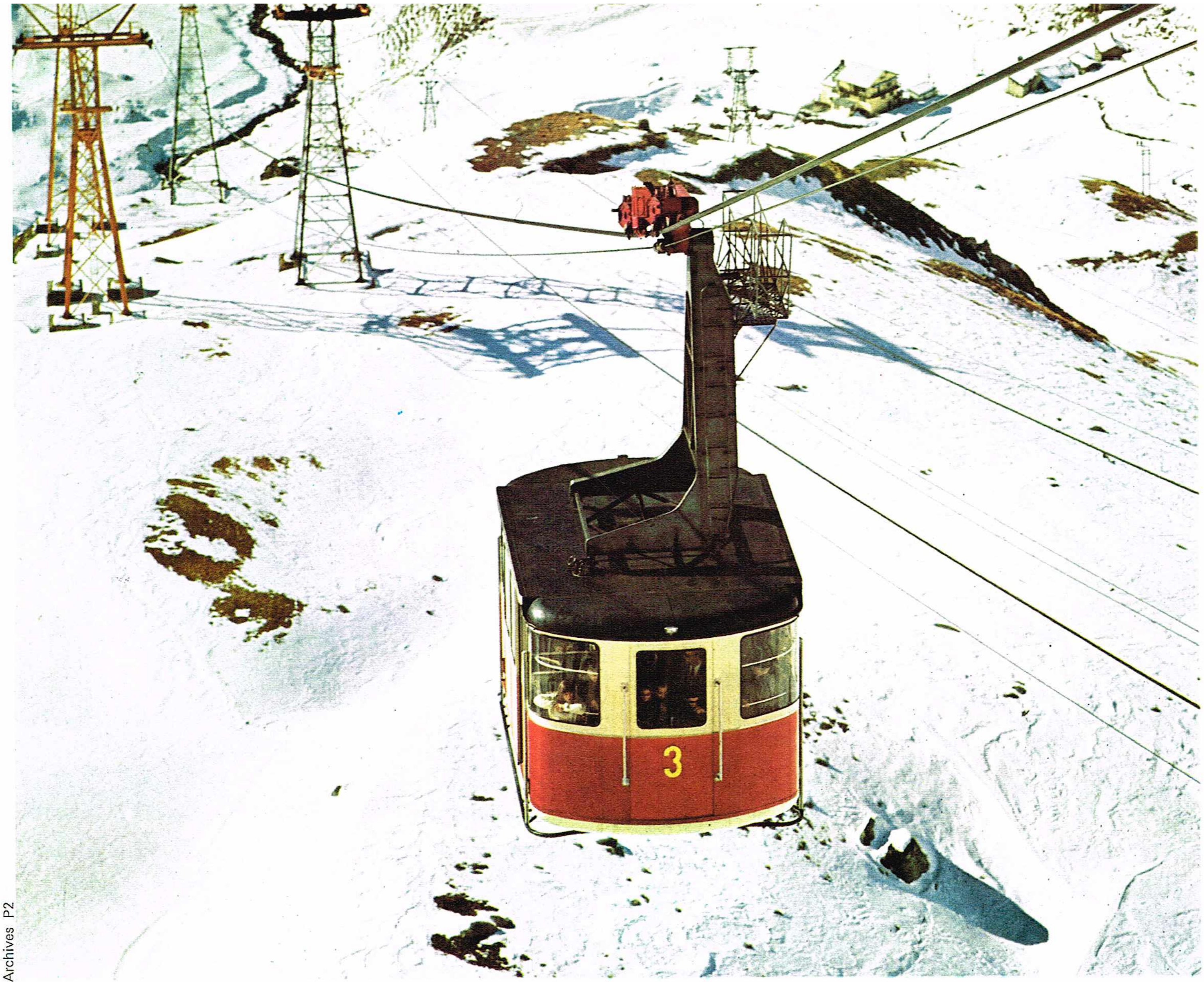

Archives P2

▲ *Téléphérique Cervinia-Plan Maison.*

TÉLÉPHÉRIQUES

Historique et généralités

Les premiers téléphériques

L'emploi de cordes suspendues horizontalement comme moyen de transport aérien est apparu à des époques très reculées et chez de nombreuses civilisations.

Les installations les plus anciennes, qui constituent une solution intermédiaire entre les ponts et les téléphériques, furent construites au Japon. L'ouvrage intitulé *Taiheiki,* par exemple, raconte que, il y a six cents ans, un empereur, fuyant devant l'ennemi, traversa une vallée au moyen d'un transporteur aérien appelé *Yeu,* c'est-à-dire « singe sauvage », d'où provient peut-être le terme actuel de « pont de singe » qui désigne un pont rudimentaire constitué de deux cordes. Des installations semblables étaient également connues au Brésil, en Nouvelle-Zélande et en Inde, où, avec diverses modifications, elles sont en service encore aujourd'hui. Parmi celles-ci, la « tyrolienne » consiste essentiellement en une corde porteuse fixe, le long de laquelle un homme, qui peut s'attacher par un nœud coulant, glisse en se servant de ses bras comme moyen de propulsion ou, plus rarement, est tiré par une deuxième corde que manœuvre une personne placée sur le versant opposé.

En Europe, le transport le long de cordes aériennes fut mis en œuvre comme moyen de défense civile dès le XVe siècle, comme l'attestent des manuscrits et des croquis qui sont parvenus jusqu'à nous, mais le premier dessin montrant un téléphérique conçu selon une technique rationnelle fait son apparition dans le livre *Machinae novae* du savant Fausto Veranzio, imprimé à Venise en 1595 ; le téléphérique décrit servait au transport de personnes au-dessus d'installations de défense.

En 1536, les Espagnols construisirent un téléphérique en Amérique du Sud, entre Santanda et Mérida, et le Français Samson d'Abbeville, de son côté, en construisit un en Afrique du Nord, à Guregra, près de Fez. Ce dernier, d'après une description qui nous est parvenue, reliait deux rochers situés sur les rives d'un fleuve à une hauteur de 243 m ; dix personnes pouvaient prendre place dans un wagonnet tiré par un treuil à main.

En 1644, le Hollandais Adam Wybe Van Harlingen utilisa un téléphérique à une seule corde pour le transport de terre lors des travaux de fortification de Dantzig ; la corde, en chanvre, glissait sur des poulies fixées à une série de poteaux en bois et transportait des paniers d'osier remplis de terre. Un téléphérique semblable fut installé au XVIIe siècle lors des travaux de fortification de Moscou.

Le câble d'acier

Tous les transporteurs aériens que nous venons de citer, destinés aussi bien au transport de personnes que d'objets, comportaient des cordes en fibres végétales, mais leur emploi était limité précisément par la robustesse très relative de celles-ci. L'avènement du câble d'acier donna sa véritable impulsion au développement du téléphérique.

En 1834, W. A. J. Albert, conseiller supérieur des mines à Klausthal, commença à employer, après de longues années de recherches, des câbles métalliques longs de 20 à 40 m, formés de torons hélicoïdaux. Ces câbles, qui remplaçaient les chaînes, étaient confectionnés à la main. Ils étaient constitués de trois torons (plus tard six) de quatre fils chacun, en acier sans soufre, ayant une charge de rupture de 40 hectobars.

En 1836, treize puits de mines, dans les montagnes du Harz, en Allemagne, étaient déjà équipés de câbles d'acier. En 1839, à Falun, en Suède, fut installée la pre-

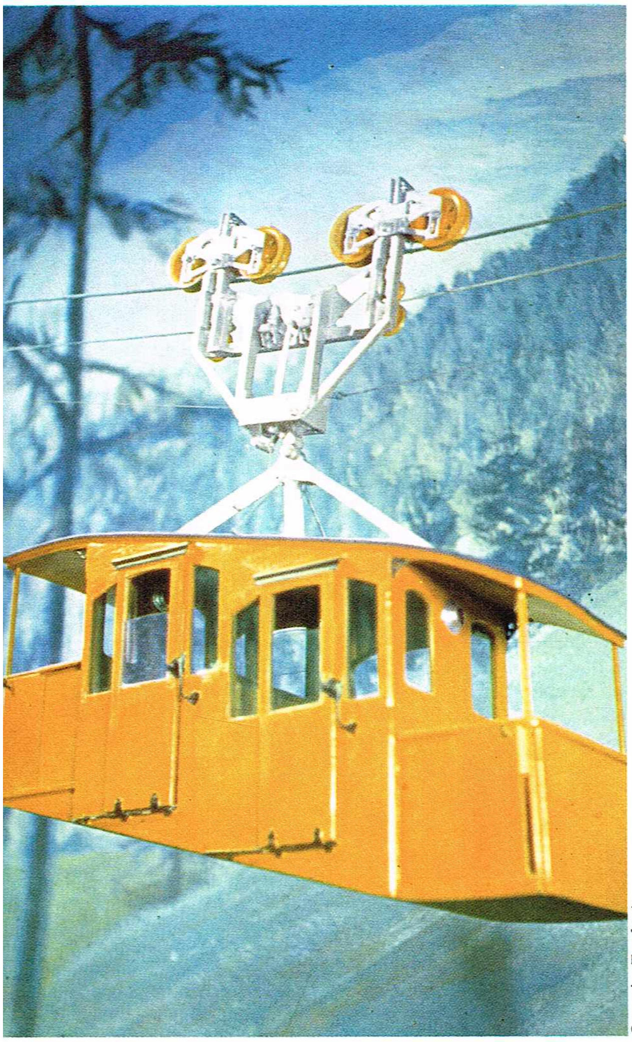

Ceretti - Tanfani

◀ ***Modèle de la voiture du téléphérique Lana-San Vigilio près de Merano (Italie), inauguré en 1912 (Milan, musée de la Science et de la Technique).***

mière usine pour la production de câbles, et, en 1840, fut fondée la fabrique Felten & Guillaume à Cologne.

Après la découverte du câble d'acier, l'Anglais Robinson déposa en 1856 un brevet de téléphérique monocâble, et Hodgson, en 1867, en exploitant ce brevet, installa plusieurs appareils de ce type. Pearce Roe, en 1890, améliora le système en introduisant des *dispositifs d'approche,* chariots à deux roues tournant à 2,5 m/s et à wagonnets d'un poids de 500 kg.

Les premiers *blondins* à câble avaient fait leur apparition un peu avant 1859 : il s'agissait de simples fils d'acier d'un diamètre d'environ 8 mm, ancrés aux deux extrémités et employés pour le transport du bois. En 1861, l'Allemand von Dïcker conçut un téléphérique à deux câbles, qui fut construit la même année à Oeynhousen; en 1868, l'ingénieur Cypher entreprit, dans une mine du Colorado, la construction du premier téléphérique bicâble à 2 voies sur pylônes en bois.

En 1879, von Dïcker construisit un téléphérique bicâble à mouvement unidirectionnel pour les travaux de fortification de Metz; sa longueur était de 1 923 m et la dénivellation de 41 m. Il était doté de pylônes en bois, avec des pièces d'appui pour le câble porteur et des poulies pour le câble tracteur. Les bennes étaient dotées d'un dispositif de basculement breveté par l'ingénieur autrichien Theobald Obach, qui avait déjà construit un téléphérique à mouvement unidirectionnel pourvu de ces mêmes dispositifs en Slovénie. La même année, Koenig construisit en Suisse un téléphérique de 2 100 m, avec une pente de 1 : 3, pour le transport du bois, et fonctionnant par gravité.

Téléphériques pour le transport des personnes

Tous les téléphériques à câbles d'acier que nous venons de décrire étaient destinés uniquement au transport de matériaux, mais servaient aussi pour le transport des ouvriers, dans des bennes spéciales disposées entre les wagonnets.

Le premier téléphérique destiné à transporter des personnes fut construit en 1866 à Schaffouse par Ritter en vue de permettre le contrôle des turbines sur le Rhin. Il avait 101 m de longueur et était doté de quatre câbles porteurs; chaque benne, tirée par un câble tracteur actionné par un treuil à main, pouvait transporter deux personnes.

Le premier téléphérique assurant un service public de transport de personnes semble avoir été celui de Knoxville (États-Unis), construit en 1893 pour la traversée du Tennessee; il était doté de bennes supportées par un câble porteur et tirées par un câble tracteur. Par la suite, en 1894, des téléphériques pour passagers furent construits à Blackpool, en Nouvelle-Zélande, et à Lvov, ville autrichienne à l'époque.

La première installation vraiment en pente, contrairement aux précédentes, fut construite par Torrez y Queveda en 1901, à San Sebastian, en Espagne. Elle possédait une benne se déplaçant sur une ligne formée de six câbles porteurs (280 m de longueur et 10 % de pente), le déplacement de la benne étant assuré par deux câbles tracteurs. En tête de ligne se trouvaient la station motrice et les dispositifs destinés à maintenir la tension des câbles. Un téléphérique identique, avec une seule cabine pour 46 passagers, fut construit en 1915, avec la collaboration de Torrez, sur un bras du Niagara, près de Whirpool.

En 1909 fut réalisé à Colorado un téléphérique à *mouvement unidirectionnel,* long de 2 100 m et avec une dénivellation de 1 810 m (il montait de 1 990 à 3 800 m d'altitude) ; il était doté de 26 bennes découvertes à 4 places, munies de dispositifs d'accouplement.

A l'occasion de l'exposition de Turin de 1911, on installa sur le Pô deux téléphériques horizontaux. Le premier, à mouvement à va-et-vient d'une rive à l'autre, possédait deux cabines de 12 places; il était long de 114 m et avait un câble porteur de 50 mm de diamètre. Le second, long de 280 m, était à mouvement unidirectionnel; il comportait 15 cabines à quatre places se déplaçant à la vitesse de 1 m/s.

Téléphériques de montagne

Le premier téléphérique de montagne fut conçu par l'Espagnol Torrez y Queveda pour une installation qui ne fut jamais réalisée. En 1905, un ingénieur de Cologne, Feldmann, entreprit avec le constructeur Emilio Strub l'étude du téléphérique de Chamonix à l'Aiguille du Midi. En 1909, Strub reprit ses études en collaboration avec la firme Ceretti et Tanfani. Les travaux furent entrepris en 1911. Ce téléphérique comportait quatre tronçons successifs d'une longueur globale de presque 6 km, avec une dénivellation de plus de 2 500 m.

Mais le premier téléphérique de montagne pour le transport de personnes fut celui du Wetterhorn (1 670 m d'altitude), en Suisse, dans l'Oberland bernois; construit en 1908 d'après un projet de Feldmann, la longueur horizontale était de 365 m, pour une dénivellation de 420 m. Deux câbles porteurs reliaient les deux stations terminales sans pylône intermédiaire, avec une pente maximale de 200 %; l'installation comportait une seule cabine transportant 16 personnes.

A partir de cette époque commence à se développer la construction de téléphériques plus lourds. En 1912 entre en service le téléphérique Lana-San Vigilio, près de Merano; on y trouve pour la première fois deux pylônes en acier, construits d'après un brevet de Strub, et des freins de sécurité sur le câble porteur. En 1913 entre en service le téléphérique brésilien de Cabeza de Azucar, à Rio de Janeiro, construit sous licence de ce même Strub.

Simultanément, les téléphériques pour le transport de marchandises se multiplient. Du point de vue technique, on adopte deux types de solutions : téléphériques monocâbles à mouvement unidirectionnel et téléphériques bicâbles à va-et-vient.

Funiculaires

Entre la fin du siècle dernier et le début de ce siècle, les *funiculaires* ont connu leur plus grande période de développement : il s'agit d'installations comportant une voie

Ceretti - Tanfani

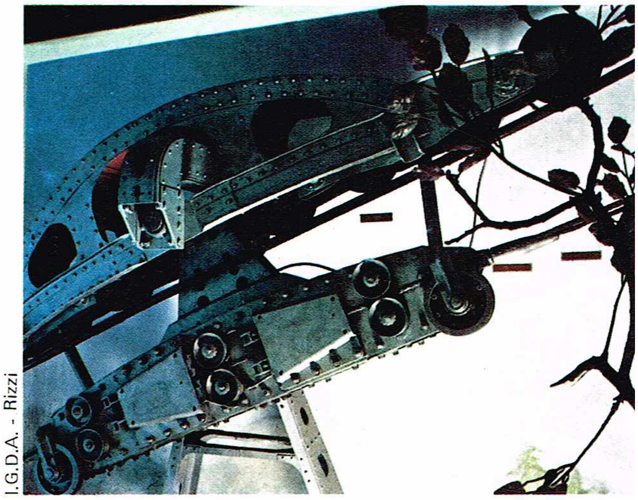

I.G.D.A. - Rizzi

▲ *A gauche, chariot du téléphérique Cortina-Pocol inauguré en 1926 (Milan, musée de la Science et de la Technique). A droite, téléphérique de Pocol : l'appareil a été rénové en 1955-1956; le câble frein a été supprimé au profit d'un frein de chariot agissant sur le câble porteur.*

rigide sur laquelle circulent des wagons tirés par un câble. L'industrie connaissait déjà depuis quelque temps ce type de transporteur à plan incliné. En effet, dès 1825, Stephenson avait utilisé une installation semblable, dans laquelle le câble était actionné par une machine à vapeur. Le premier funiculaire pour passagers fut probablement celui de Dusino, en Italie, installé en 1861 ; il fut suivi par celui de Lyon, construit en 1862. Ce fut ensuite une période de déclin pour les funiculaires, qui ont été le plus souvent supplantés par les téléphériques, moins coûteux; toutefois, un grand nombre sont encore actuellement en service.

Téléskis ou remonte-pentes

En 1934, le Suisse Constam déposa, en collaboration avec la firme Bleichert, un brevet de téléski, solution intermédiaire entre le funiculaire et le téléphérique : le skieur n'est pas suspendu, mais est traîné sur ses skis par un câble supporté par des pylônes. Le skieur est relié au câble par une cordelette fixée sur un enrouleur. Le premier téléski construit selon ce principe fut installé, en 1934, sur la piste de Bolgen à Davos (Suisse) ; d'autres entrèrent en service la même année, à Saint-Moritz et à Megève; puis ce système se répandit très rapidement; il caractérise l'équipement des stations des Alpes centrales et orientales.

A la même époque et après quelques essais d'installations de remorquage des skieurs par des amateurs, à partir d'éléments de récupération (au mont Pilat près de Saint-Étienne, au col de Porte près de Grenoble), J. Pomagalski, industriel à Grenoble, installe le premier *téléski « à perches »* sur la piste de l'Éclose à l'Alpe d'Huez (Isère). Ce type d'appareil est très répandu dans les Alpes occidentales.

Télésièges

Les télésièges, issus du téléski, sont de véritables téléphériques, dans lesquels les bennes sont remplacées par des sièges, initialement à une ou deux places.

Le premier télésiège à un seul câble fut réalisé aux États-Unis en 1937 sur la « Dollar Mountain » à Sun Valley (Idaho) ; le premier télésiège européen fut installé en Tchécoslovaquie en 1939. En 1943, Constam déposa un brevet relatif à la transformation d'un téléski en télésiège, afin de permettre l'utilisation de l'installation aussi bien en été qu'en hiver. La première réalisation de ce genre eut lieu en 1944 sur le Jochpass par la firme Sameli Huber. C'est sur ce principe qu'a été construit le premier télésiège implanté en France en 1946 au col de Voze (Haute-Savoie).

Le principal défaut des télésièges résidait dans la difficulté qu'éprouvaient les passagers à s'asseoir et à se lever alors que les sièges étaient en marche. En 1944, les ingénieurs du consortium suisse « de Roll » améliorèrent le brevet de Constam en adoptant un système d'accrochage et de décrochage automatiques des sièges dans les stations; il fut alors possible d'augmenter la vitesse, d'introduire des sièges à deux places et d'accélérer le trafic. Ces télésièges, dits débrayables, peuvent comprendre plusieurs tronçons, comme celui de Grindelwald, en Suisse, qui comporte quatre tronçons, sur une longueur totale de 4 355 m avec une dénivellation de 1 105 m.

Réalisations modernes

Notre époque a vu la construction de nouveaux téléphériques, plus perfectionnés, mais aussi l'amélioration des installations existantes, dans lesquelles on a introduit l'emploi de matériaux légers et on a adopté des systèmes automatiques de contrôle et de commande. Les performances (vitesses, capacité, débit) ont été notablement accrues.

● Voici tout d'abord quelques données intéressantes relatives aux installations pour les transports de matériaux.

Le téléphérique le plus haut a été installé en 1936 à la frontière du Chili et de la Bolivie. Il sert au transport du minerai extrait du cratère du mont Aucanqhuilcha (6 150 m d'altitude) ; d'une longueur de 14 km, il descend le minerai à 4 000 m.

Le téléphérique le plus long se trouve en Suisse et sert au transport de minerai entre Kristineberg et Boliden, sur une distance de 96 km. La ligne passe au-dessus de terrains marécageux infranchissables par d'autres moyens de transport; elle possède 503 pylônes en béton armé, reposant pour la plupart sur des blocs de béton coulés dans le terrain marécageux. Il est divisé en trois tronçons, chacun d'eux est commandé par un moteur de 135 ch. Il possède 915 bennes de 1,25 t, le débit horaire étant de 57 t.

Le téléphérique monocâble de Dorado (Colombie), construit en 1929 par la British Ropeway Engineering Co. Ltd., est très long (74 km) et est situé à une grande altitude. La station inférieure est à 2 500 m, la supérieure à 5 800 m.

● En ce qui concerne les téléphériques pour voyageurs, le problème qui se pose n'est pas de parcourir de grandes distances, mais de franchir de grandes dénivellations. Les téléphériques actuels atteignent des altitudes de plus de 5 000 m et traversent des ravins et des glaciers infranchissables par d'autres moyens. Par exemple, le téléphérique de Pico Espejo, au Venezuela, composé de 4 tronçons, est situé à 4 800 m d'altitude et a une longueur totale de 12 km (construction française Applevage).

Parmi les réalisations italiennes, rappelons le téléphérique Oropa-Lago del Mucrone (Piémont), construit par la firme Zuegg et entré en service en 1926, réalisation tout à fait remarquable si l'on tient compte de sa date de construction : il présente, en effet, une longueur de 2 360 m avec une portée de 1 188 m, une capacité de 23 personnes par cabine et une vitesse de 4,30 m/s. Cette même année 1926 vit l'inauguration du téléphérique Cortina d'Ampezzo-Pocol, construit par la firme Ceretti et Tanfani, et modernisé par cette même firme en 1955-1956.

Dans le domaine des réalisations les plus audacieuses, mentionnons le téléphérique qui relie Plan Maison (2 557 m), au Piémont, à la crête du Furggen (3 488 m) ; il comporte deux câbles porteurs, sans pylône intermédiaire, avec une portée d'une longueur de 2 887 m, ce qui constitue toujours un record. Construit par la Société Agudio et Zignoli en 1952, il est doté de deux cabines pour 25 personnes et possède une vitesse de 9,40 m/s.

Rappelons enfin l'ensemble unique d'appareils reliant Chamonix à Courmayeur, au-dessus de la chaîne du Mont-Blanc. Il comprend un téléphérique à va-et-vient en 2 tronçons (Chamonix-Plan de l'Aiguille-Aiguille du Midi), un téléphérique bicâble à mouvement unidirectionnel appelé télécabine de la vallée Blanche (Aiguille du Midi-pointe Helbronner), un petit téléphérique à va-et-vient entre la pointe Helbronner et le refuge Torino, et un téléphérique à va-et-vient en 2 tronçons, refuge Torino-Le Pavillon et Le Pavillon-La Palud (Courmayeur). Chacun de ces appareils présente des caractéristiques exceptionnelles et mériterait une description complète. Les esprits curieux de techniques y trouveront autant de sujets de contentement que les touristes qui découvrent un panorama et une ambiance uniques au monde.

I.G.D.A. - Poggio

▲ *Liaison Chamonix-Courmayeur : téléphérique de la pointe Helbronner au refuge Torino.*

Classification et description des installations

Les téléphériques peuvent en premier lieu être divisés en deux groupes : *téléphériques monocâbles* et *téléphériques bicâbles,* suivant que les fonctions de sustentation et de translation sont assurées par un même câble ou par des câbles distincts. Dans le premier cas, le câble unique est dit porteur-tracteur ; dans le second cas, il y a un ou plusieurs câbles porteurs et un ou plusieurs câbles tracteurs.

Le deuxième critère de classement est le mouvement des véhicules ; celui-ci se fait ou bien alternativement dans un sens puis dans l'autre sur la même voie : téléphériques *à va-et-vient,* ou bien toujours dans le même sens de parcours, le mouvement est dit *unidirectionnel*. S'il y a arrêt ou ralentissement du système lors du passage en gare des véhicules, le mouvement est *intermittent* ou *pulsé,* dans le cas contraire le mouvement est *continu*.

Enfin les appellations courantes font le plus souvent référence à ce qui est le plus frappant pour le public, c'est-à-dire l'aspect du véhicule utilisé, d'où les termes télésièges, télébennes, télécabines qui peuvent désigner des appareils appartenant à différentes catégories. L'appellation de téléphérique s'étant historiquement concentrée principalement sur les appareils bicâbles à va-et-vient, on a tendance actuellement à employer le mot de *téléportés* pour désigner l'ensemble des téléphériques où les véhicules et leur chargement sont portés par un câble, ce qui laisse seulement de côté les remonte-pentes et les funiculaires, mais inclut les appareils *automoteurs* qui se déplacent sur un câble porteur sans l'aide de câbles tracteurs.

Téléphériques monocâbles

C'est le type le plus simple et le plus répandu (*fig.* 1) ; il est constitué par un câble porteur-tracteur métallique, auquel sont fixés, de manière stable ou par un système d'accrochage et de décrochage automatiques, des sièges, des bennes ou des cabines. Le câble passe dans la gorge de deux poulies installées dans les stations terminales et forme un circuit fermé. Les deux brins se déplacent en sens opposé.

▼ *Figure 1 : schéma d'un téléphérique monocâble à pinces fixes.*

fig. 1

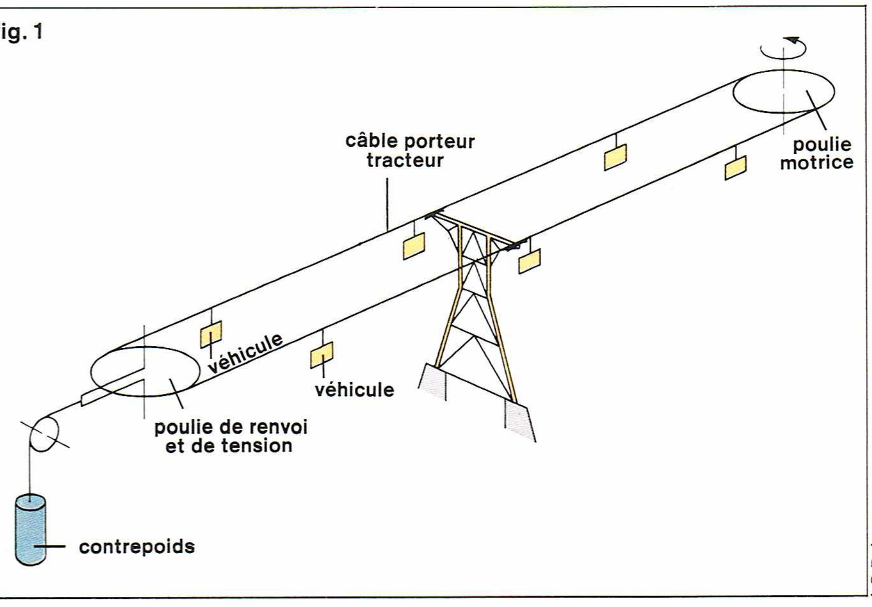

I.G.D.A.

▶ *Télécabine monocâble pulsée appelée « petit train du Lavacher » à Tignes (Savoie).*

C. Dournon

Une des poulies (dite de renvoi) est libre de tourner sur un pivot. L'autre, dite motrice, est reliée aux moteurs par l'intermédiaire d'un réducteur. L'une de ces deux poulies (motrice ou de renvoi) assure également une fonction de tension du câble en étant montée sur un équipage mobile et reliée à un système de tension à base de contrepoids, et plus récemment de vérins hydrauliques. Si la distance entre les stations est importante, on installe le long de la ligne des pylônes munis de potences aux extrémités desquelles sont fixées de petites poulies ou galets montés sur balanciers de manière à équilibrer la charge.

Le mouvement des appareils monocâbles est, sauf exceptions pour quelques appareils de chantier, unidirectionnel. Il peut être pulsé, comme pour le « petit train du Lavacher » à Tignes (Savoie), construit par Pomagalski en 1975, ou le plus souvent continu. Dans ce dernier cas, il y a lieu de considérer si la vitesse de translation et la forme des véhicules (ouverts comme les sièges ou les bennes, fermés comme les cabines) permettent ou non l'embarquement ou le débarquement en marche. Si oui, les véhicules sont accrochés au câble porteur-tracteur au moyen d'une pince fixe. Il s'agit des télésièges et télébennes construits à de très nombreux exemplaires. La vitesse maximale est généralement limitée à 1,5 m/s pour les piétons et 2,5 m/s pour les skieurs skis aux pieds. Les sièges sont à une, deux, ou trois places. Des sièges à 4 places ont été réalisés aux États-Unis. Si l'on veut augmenter la vitesse, et donc abréger la durée du parcours, ou utiliser des câbines fermées, il est nécessaire de désolidariser les véhicules du câble dans les gares. A cet effet, chaque véhicule est accroché au câble au moyen d'une (véhicules jusqu'à 3 places) ou deux (véhicules jusqu'à 6 places) pinces débrayables. A l'entrée en gare, la pince est ouverte, et le véhicule, pris en charge par des rails, quitte le câble et est ralenti. Les voies en station permettent le contournement de la poulie et les différentes manœuvres de chargement et de déchargement. Des voies annexes permettent le stockage des véhicules hors exploitation. En sortie de gare, le véhicule est accéléré pour reprendre une vitesse égale à celle du câble ; la pince est alors refermée sur celui-ci. Pendant ces opérations, l'installation continue de fonctionner, le câble gardant une vitesse constante, qui a été portée, il y a quelques années, à 4 m/s.

▼ *Figure 2 : archet biplace de téléski avec son enrouleur.*

fig. 2

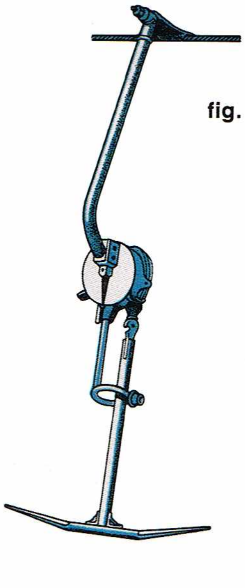

I.G.D.A.

Le débit des appareils, qui ne dépend pas de la vitesse en ligne mais de l'espacement en temps des véhicules, peut atteindre 1 300 personnes/heure pour un télésiège triplace et 2 000 personnes/heure pour une télécabine 6 places.

Chaque constructeur possède pour les pinces, qui constituent un organe essentiel de ces appareils, son propre système. L'effort de serrage, qui doit être strictement contrôlé, est fourni par des ressorts hélicoïdaux, des rondelles-ressort, ou par le poids même du véhicule. Des contacts électriques contrôlent en permanence le bon déroulement des opérations. De même, sur les pylônes, une ligne électrique « de sécurité » détecte, aussi bien sur les appareils à pince fixe que sur les appareils à pince débrayable, les anomalies qui pourraient se présenter. Des appareils de ce genre ont été construits en grand nombre, particulièrement en France.

Pour les très grandes longueurs, il est nécessaire de réaliser plusieurs tronçons. Des gares de transfert automatiques permettent de faire passer les véhicules d'un tronçon sur le suivant, sans que les voyageurs soient obligés de débarquer. On peut citer en exemple la télécabine de la Roche de Mio à La Plagne construite par Pomagalski. (Le premier tronçon, seul achevé actuellement, a une longueur de 3 760 m, un câble de 40 mm de diamètre, 141 cabines de 6 places et un moteur principal de 720 ch.)

Un type particulier d'installation monocâble est constitué par le **téléski**, qui, dans sa forme la plus simple, comporte un câble continu sur lequel sont fixées, à intervalle régulier, des pinces. Chaque pince est munie d'un enrouleur à ressort sur lequel s'enroule une corde d'environ 8 m, à l'extrémité de laquelle est fixé un dispositif qui permet au skieur de s'accrocher (*fig.* 2). Celui-ci prend le téléski à la station inférieure et, sur ses skis, est tiré jusqu'au sommet de la pente. Là, il se dégage de ses attaches, et la cordelette, rappelée par le ressort, s'enroule rapidement sur le tambour de l'enrouleur et ne glisse plus sur la neige. A côté de ce système, il en existe un autre, très répandu en France où il a été conçu, dans lequel le dispositif d'accrochage du skieur est placé à l'extrémité d'un tube télescopique muni d'un ressort hélicoïdal de rappel. Sous le poids du skieur, le tube se déploie, pour revenir ensuite à la position initiale lorsque l'utilisateur quitte son point d'appui. Les caractéristiques techniques

I.G.D.A. - Poggio

Photothèque Pomagalski S.A.

des téléskis sont identiques à celles des téléphériques monocâbles, mais avec un certain nombre de simplifications, puisque le câble ne doit pas supporter des charges très élevées. La vitesse peut atteindre 4,5 m/s. Le bon fonctionnement de ces appareils est lié non seulement à un fonctionnement mécanique correct, mais encore à l'entretien de la piste de montée et à l'agencement des aires de départ et d'arrivée. La participation active du skieur est nécessaire pendant toute la durée du parcours.

◀▲ A gauche, télénacelle ou télébenne monocâble à pince fixe ; l'embarquement se fait en marche ; les voyageurs sont debout. Ci-dessus, télécabine monocâble à pinces débrayables, véhicule de 6 places : l'Alpe d'Huez (Isère).

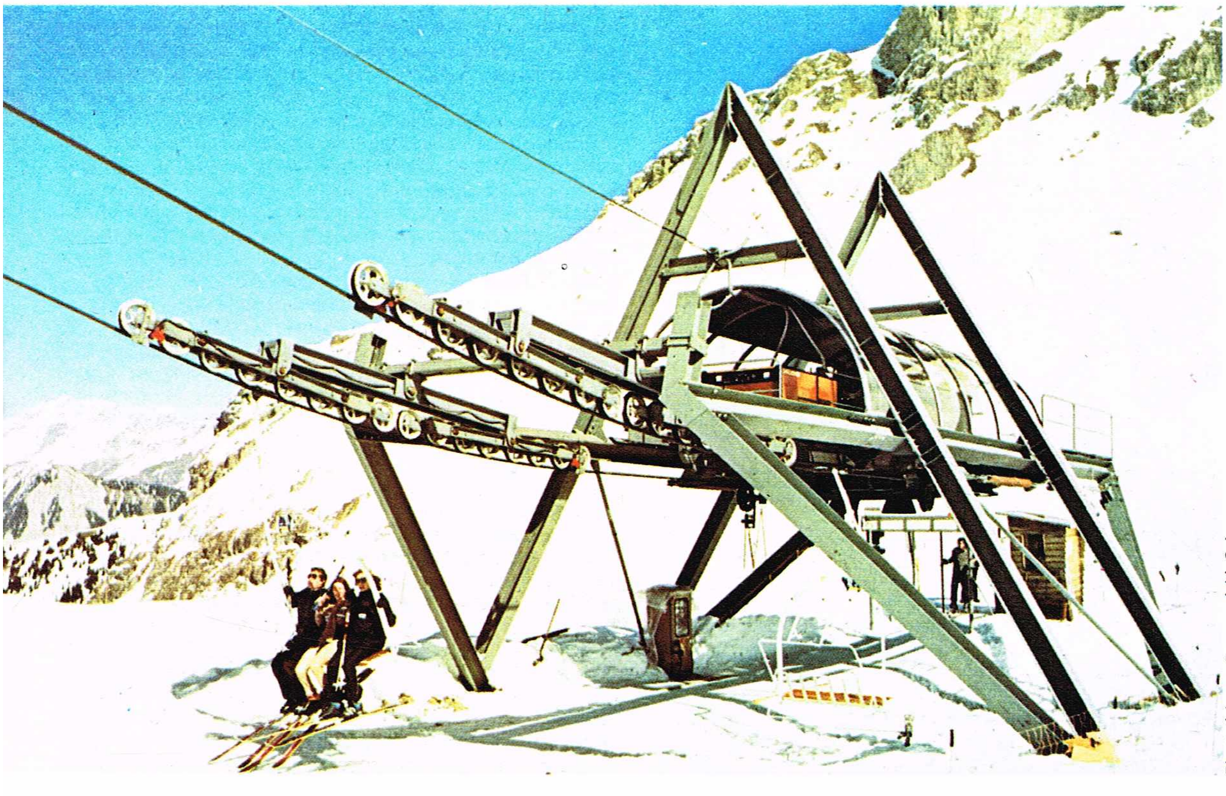

Photothèque Pomagalski S.A.

◀ Gare inférieure (matrice avec tension hydraulique) de télésiège triplace à pinces fixes. La gare suspendue permet l'embarquement sous la poulie.

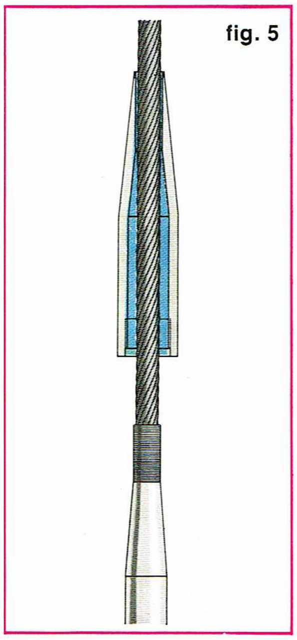
fig. 5

I.G.D.A.

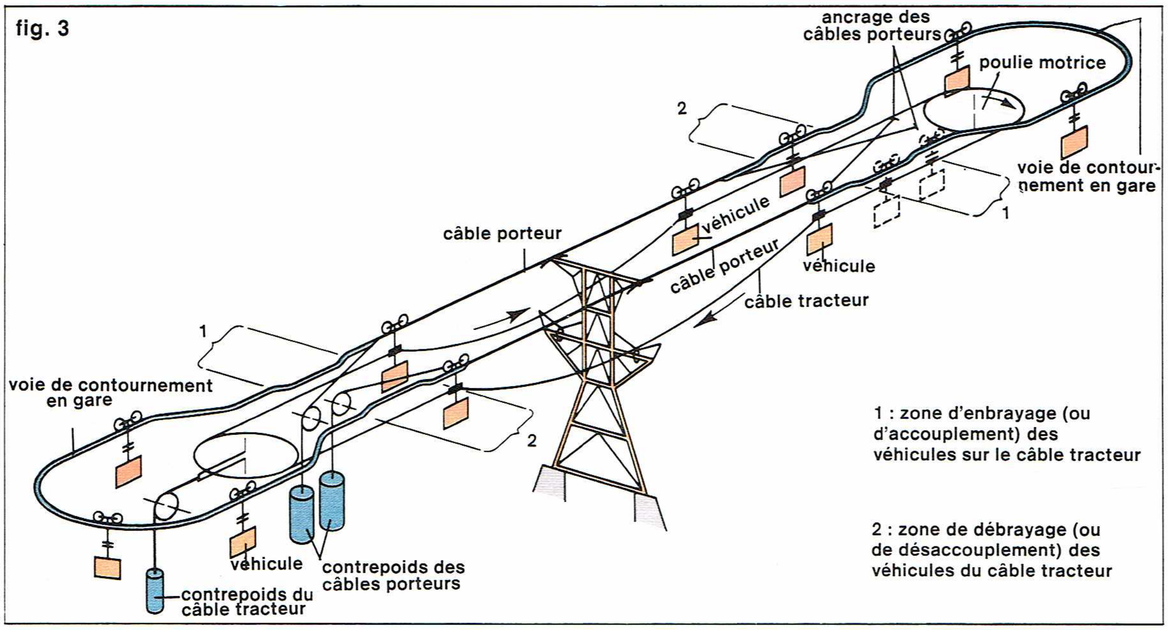
fig. 3

I.G.D.A.

▲ *A droite, figure 3 : schéma de téléphérique bicâble à mouvement unidirectionnel continu et pinces débrayables. A gauche, figure 5 : culot conique et manchon.*

Téléphériques bicâbles

Pour certains transports importants, et lorsque, pour les téléphériques à voyageurs, il est nécessaire de franchir des dépressions de plus de 40 m de profondeur, on a recours aux **téléphériques bicâbles** qui servent aussi bien au transport des marchandises que des personnes. Ce système est dit « bicâble » parce que les bennes ou les wagonnets sont supportés, au moyen de chariots à galets, par un ou plusieurs câbles parallèles, dits porteurs, et sont tirés par un ou plusieurs câbles formant boucle et assez semblables à ceux utilisés dans les installations monocâbles, mais qui ont ici uniquement un rôle de tracteur.

Les *câbles porteurs* sont ancrés, dans l'une des stations terminales, à des supports fixés au sol; dans l'autre station, ils sont reliés à un système destiné à les maintenir en tension, système fondé soit sur la déviation du câble porteur lui-même sur des sabots à long rayon et l'accrochage directement sur les contrepoids, soit sur un *câble auxiliaire* dit *de tension* qui passe sur des poulies et est fixé d'un côté sur le câble porteur et de l'autre sur les contrepoids.

▼ *Figure 4, schéma d'un téléphérique bicâble à va-et-vient.*

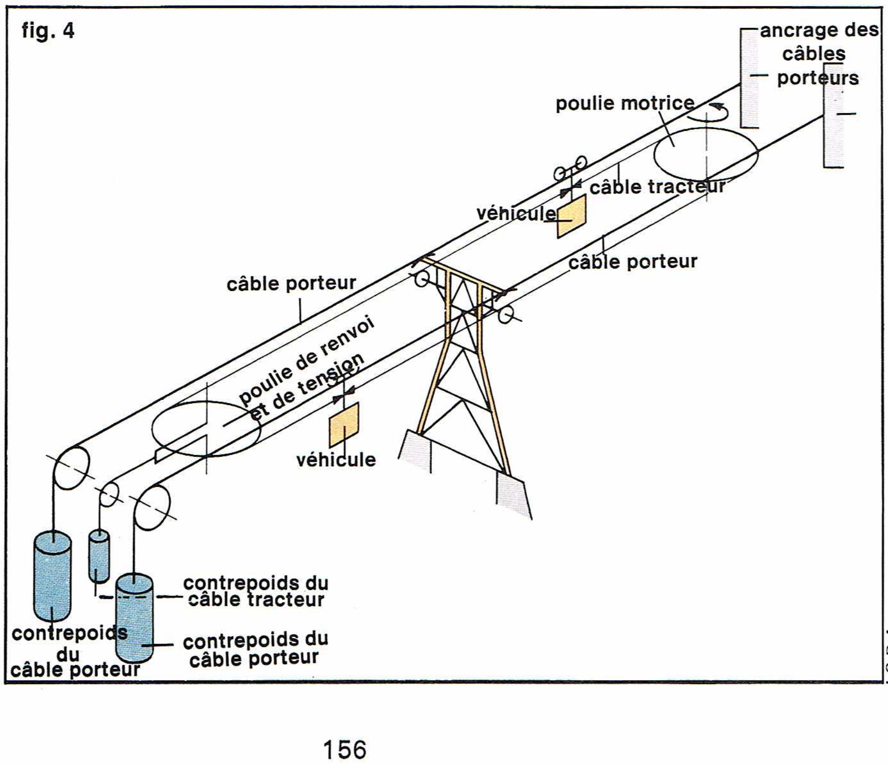
fig. 4

I.G.D.A.

Les câbles porteurs, toujours sans raccords sur les parties en ligne, ne peuvent en effet s'accommoder de rayons de courbure importants. L'emploi de câbles de tension, plus souples mais aussi résistants, permet de s'affranchir de cette contrainte et rend possible un changement du câble, particulièrement sollicité à cet endroit.

Le mouvement est soit alternatif (ou à va-et-vient), soit unidirectionnel continu ou pulsé.

Les appareils bicâbles à *mouvement unidirectionnel continu,* appelés plus couramment télécabines bicâbles débrayables (*fig.* 3), fonctionnent sensiblement de la même manière que leurs homologues monocâbles. Les véhicules sont tout à fait comparables, mais leur suspension, au lieu d'être reliée directement par des pinces débrayables au câble porteur-tracteur, est reliée à un chariot qui porte, outre les pinces débrayables, les galets lui permettant de rouler sur les câbles porteurs. Un exemple en est fourni par la télécabine de la Grande-Rochette à La Plagne (Savoie).

Lorsque la question du débit n'est pas l'impératif n° 1, on peut envisager de regrouper les cabines en trains et de les rendre solidaires du câble tracteur par des pinces fixes. Les manœuvres en gare se font à une vitesse très lente (environ 0,30 m/s) et nécessitent un ralentissement correspondant du câble tracteur. Le mouvement est dit *pulsé.* Les trains de cabines sont régulièrement espacés le long du câble tracteur de façon que les entrées en gares inférieure et supérieure se produisent simultanément. La télécabine de la vallée Blanche, dont on a déjà parlé, reste le plus bel exemple de ce type d'appareil, particulièrement apprécié sur les sites touristiques. Les appareils modernes comportent 2, 4 ou 6 trains de cabines de 6 places, et la vitesse en ligne peut atteindre 6 m/s.

Si l'on veut en revanche concentrer la charge dans un ou deux véhicules de grande capacité, on utilise un mouvement à va-et-vient. Chaque cabine monte et descend sur le même câble porteur, tirée par le câble tracteur dont on inverse le mouvement (*fig.* 4). On peut, dans ces conditions, les arrêter dans la station pendant le temps nécessaire pour les opérations de chargement et déchargement.

Si la distance entre stations est très importante et si la configuration du sol le permet, on dispose le long de la ligne un certain nombre de pylônes métalliques ou en béton armé, dotés de supports (appelés *sabots*) pour le câble porteur et de galets sur lesquels circule le câble tracteur. Les sabots peuvent être fixes ou oscillants; ils sont en acier de forge et ont une gorge garnie de bronze ou de céleron, par exemple, afin d'éviter l'usure des câbles, tout en assurant leur glissement. Les bennes sont accrochées au moyen de suspensions articulées à des chariots dont le nombre de roues varie selon la charge à transporter; les roues sont montées sur un système de balanciers, et, dans les téléphériques pour le transport de

personnes, elles sont revêtues de garniture souple. Le chariot comporte les appareils d'accrochage au câble tracteur, qui peuvent être constitués par des mordaches qui serrent le câble. D'autres systèmes de fixation du câble tracteur seront décrits plus loin.

Les installations bicâbles permettent de franchir de très grandes distances. Dans tous les cas, au-delà de 3 km, on préfère couper la ligne en deux ou plusieurs tronçons.

Le débit des appareils à va-et-vient, dont la vitesse peut atteindre 12 m/s, est inversement proportionnel à la longueur du parcours, ce qui est un handicap certain à l'heure actuelle. La formule est la suivante :

débit horaire D = capacité d'une benne C × nombre de bennes à l'heure, ou encore :

$$D = C \times \frac{3\,600}{\frac{L}{v} + t}$$

avec L longueur développée en m, v vitesse moyenne en m/s, t temps d'arrêt en station en s.

Les bennes sont de plusieurs types selon l'utilisation. Pour le transport de personnes, on emploie des cabines pouvant recevoir plus de 100 personnes (125 pour le téléphérique de la Grande Motte à Tignes, Savoie).

On pourrait décrire d'autres types d'installations, par exemple celle du téléphérique Chamonix-Aiguille du Midi, comprenant un câble porteur et trois câbles tracteurs fonctionnant en parallèle, mais il s'agit en réalité de variantes des systèmes fondamentaux dont nous venons d'exposer les principes.

Éléments d'un téléphérique

Les principaux éléments d'un téléphérique sont : les câbles, les pylônes, les stations (avec les groupes moteurs, les appareils de commande, les dispositifs de signalisation et de sécurité), le matériel roulant, les ouvrages de protection.

Câbles

Les câbles sont toujours en acier, de section circulaire ; on distingue : les câbles hélicoïdaux, les câbles à torons et les grelins.

Les **câbles hélicoïdaux**, constitués par une ou plusieurs couches de fils d'acier enroulés en hélice autour d'un autre fil d'acier ou d'une âme textile, sont dit *ouverts* lorsqu'ils sont formés uniquement de fils à section ronde, *clos* lorsqu'ils sont formés de fils à section ronde et de fils à section profilée. Les câbles clos présentent au moins un enroulement, situé à l'extérieur, constitué de fils à profil en Z ; de ce fait, ils offrent une surface plus lisse et plus compacte.

Les **câbles à torons** sont constitués par une âme textile sur laquelle sont enroulés des câbles hélicoïdaux (dits torons) ; pour rendre le câble plus compact, on peut utiliser des fils de diamètres différents pour les différentes couches de chaque toron. Selon le nombre de torons et leur constitution, on a divers types de câbles : *Seale, Warrington, Warrington-Seale*.

Les **grelins** sont obtenus par câblage entre eux de six câbles autour d'une âme textile ou constituée par un septième câble. Ils forment des câbles de gros diamètre mais très souples.

Dans les installations bicâbles, les câbles d'acier sont utilisés comme câbles porteurs, câbles tracteurs, câbles lest et câbles freins. On les emploie aussi comme câbles de tension pour la fixation des contrepoids et comme câbles porteurs-tracteurs dans les téléphériques monocâbles ; ils servent aussi de câbles de signalisation pour les circuits de contrôle. Les câbles porteurs sont généralement du type clos.

- La *charge de rupture* des fils des câbles varie, selon le type de câble, de 150 hbars à 220 hbars. Il s'agit donc d'un acier extrêmement dur, obtenu par tréfilage.
- Le *degré de sécurité* est le rapport entre la charge de rupture admise et la tension maximale (T_{max}) qui s'exerce sur le câble en service. La charge de rupture admise est la plus petite des deux valeurs suivantes : charge de rupture expérimentale et charge de rupture calculée.

Tous les câbles sont soumis à des essais de réception en cours et en fin de fabrication. Ils sont ensuite périodiquement contrôlés, en particulier au moyen d'appareils magnétiques qui permettent de déceler des ruptures de fil à l'intérieur du câble. Des critères de dépose très stricts permettent de déterminer les remplacements nécessaires.

Les câbles à torons peuvent être épissurés de manière à former une boucle fermée. C'est le cas de tous les câbles porteurs-tracteurs d'appareils monocâbles, des câbles tracteurs des appareils bicâbles à mouvement unidirectionnel et de certains câbles tracteurs pour appareils à va-et-vient. Dans cette dernière hypothèse, les chariots sont fixés sur le câble tracteur par des mordaches.

Une autre solution consiste à avoir un câble tracteur interrompu au droit des deux véhicules. Le brin amont est le câble tracteur proprement dit. Le brin aval est alors appelé câble lest. Il est parfois constitué d'un câble de diamètre plus faible, car il subit des efforts moins importants.

Les **câbles freins** et les câbles d'agrippement, dont la fonction est d'arrêter les wagonnets en cas de rupture des câbles tracteurs, sont actuellement remplacés par un système de freinage sur le câble porteur. Lorsqu'il existe, le câble frein est en tout point semblable à un câble tracteur et doit donc comporter, comme ce dernier, des contrepoids pour le maintien en tension, ce qui complique l'installation.

Les **câbles de tension** ont pour fonction de relier les câbles porteurs ou les systèmes de tension des câbles tracteurs aux contrepoids. La jonction du câble tracteur

Soury - Lavergne

▼ ***Téléphérique bicâble Melchsee-Frutt-Bonistock (Suisse). On notera la présence de deux câbles porteurs, le tambour d'ancrage des câbles tracteurs, la suspension et l'amortisseur d'oscillations.***

Ceretti - Tanfani

au chariot, du câble porteur à son câble de tension, etc., peut être réalisée au moyen de *culots* (*fig.* 5). Un culot est obtenu en évasant en forme de cône ou de pyramide les fils de l'extrémité d'un câble, puis en coulant dans un manchon en acier de forme correspondante du métal fusible à basse température (étain, antimoine, zinc, par exemple). Le manchon peut être relié au système de tension ou au chariot du téléphérique.

Les **câbles de secours** sont utilisés lorsque l'évacuation des voyageurs d'un appareil immobilisé doit obligatoirement se faire le long des câbles, au moyen de nacelles de sauvetage. Il peut s'agir soit d'un simple treuil, la nacelle descendant par gravité, soit d'un véritable téléphérique de secours de caractéristiques réduites. Dans ce dernier cas, le câble de secours est disposé en permanence le long de la ligne mais plus haut que les autres câbles. Pour son utilisation, il est ramené au niveau des autres par délestage partiel de son contrepoids. Tout cela complique évidemment l'installation.

Les calculs relatifs au câble de secours sont identiques à ceux du câble tracteur. Les charges qui pèsent sur lui sont : la partie du contrepoids fixe, son poids propre, les résistances de frottement et la composante du poids traîné.

Les **câbles de signalisation** sont destinés à permettre les communications téléphoniques entre les voitures et la station. Actuellement, pour ne pas ajouter un autre câble, on utilise souvent pour cette fonction un câble tracteur isolé électriquement, ou bien on a recours à des appareils radio.

Les **câbles porteurs-tracteurs** des téléphériques monocâbles, enfin, sont de type assez souple, à nombre de fils réduit.

Le degré de sécurité des câbles est toujours largement calculé. Voici quelques valeurs minimales imposées par le règlement français :

— câbles porteurs, câbles freins, câbles d'agrippement et câbles de secours : 3,15;

— câbles de tension, câbles porteurs-tracteurs, câbles tracteurs (cas général) : 4,5;

— câbles lest des téléphériques à va-et-vient : 3,6;

— câbles de signalisation : 3.

Pylônes

Pour que la charge circulante voyage à une hauteur minimale du sol, hauteur qui doit être toujours respectée, on installe le long de la ligne des pylônes; ceux-ci portent des appuis *(sabots)* pour les câbles porteurs des téléphériques bicâbles, et des *galets* pour les câbles porteurs-tracteurs des téléphériques monocâbles et les câbles tracteurs des téléphériques bicâbles.

Il existe des pylônes en bois, en béton armé ou en métal. Dans tous les cas, le pylône est construit sur une fondation en béton armé, calculée de manière à assurer la stabilité de l'ensemble.

Les **pylônes en bois** sont actuellement employés uniquement pour des installations de transport de marchandises de faible importance. Ils sont constitués d'une ossature se présentant comme un treillis et peuvent être ancrés au sol au moyen de câbles d'acier.

Les **pylônes métalliques** sont de divers types. Ils peuvent être en forme de mât ou de portique et réalisés sous forme de caisson de tôle soudée ou en treillis (assemblage généralement boulonné de profilés de type cornière).

Les **pylônes en béton armé** sont parfois utilisés dans les installations de grande importance lorsque les conditions locales l'exigent. Les pylônes sont bâtis le plus souvent en position verticale, mais, dans des téléphériques de montagne, on trouve souvent des pylônes inclinés selon la résultante des tensions des câbles porteurs et de leurs poids, cela afin d'éviter des contraintes de flexion sur les structures. Une étude portant sur la résistance au renversement sous l'action du vent s'impose dans chaque cas.

On a vu apparaître récemment les **supports suspendus.** En 1959, par exemple, on a construit sur le lac de Zurich un téléphérique monocâble long de 1 350 m sur deux pylônes espacés de 1 000 m, auxquels sont fixés quatre câbles d'acier de 40 mm de diamètre supportant cinq paires de suspentes dotées de galets pour le câble porteur-tracteur.

◀ *Pylône-gare intermédiaire du téléphérique (type bicâble pulsé) des Ruillans à La Grave (Hautes-Alpes).*

C. Dournon

Une réalisation très audacieuse est celle de la télécabine de la vallée Blanche à la hauteur du Petit et du Grand Flambeau. La suspension est réalisée avec trois câbles de type Hercule de 50 mm de diamètre, ancrés au sommet des Flambeaux, auxquels sont fixés les sabots des câbles porteurs et les galets des câbles tracteurs et des câbles de sécurité. Bien que la charge du téléphérique ne soit que de trente tonnes, les câbles doivent présenter une résistance très importante à cause des vents violents, de la glace et des écarts de température.

Les **sabots** sont en acier haute résistance et offrent un profil creux qui épouse la courbure du câble sur le pylône. La partie supérieure de profil comporte un creux longitudinal bordé d'un filet sur les côtés. Les bords ont une épaisseur qui varie de 10 à 15 mm et peuvent se situer au-dessus ou au-dessous du niveau supérieur du câble (à mi-diamètre, par exemple). Les bords hauts maintiennent mieux le câble en cas de tempête, mais la marche des wagons est irrégulière (en effet, les galets reposent sur les bords et non sur le câble) ; les bords bas permettent une marche plus souple. Le rayon interne du sabot est supérieur à celui du câble ; sa valeur se situe aux environs de 0,7-0,8 fois le diamètre du câble. Ce sabot a la forme d'un arc de cercle dont le rayon est 250 fois le diamètre du câble, d'après les normes en vigueur en France, tandis qu'en Italie la norme impose pour les téléphériques affectés au transport de personnes que le rayon soit 350 fois le diamètre du câble.

Les sabots sont fixés sur le pylône de manière rigide ou selon un système oscillant. On adopte les *sabots rigides* lorsque l'angle qui se forme entre le câble chargé et le câble déchargé au voisinage du pylône est de faible ouverture, précisément lorsque la tangente de l'angle atteint une valeur maximale de 0,25. Si l'angle est très ouvert, on adopte des *sabots oscillants*, c'est-à-dire fixés au pylône par un pivot qui permet au sabot de légères rotations. On emploie, enfin, des sabots à secteurs de courbures différentes lorsque la tangente de l'angle précité est supérieure à 0,35 ; plus précisément, dans ce cas, les rayons de courbure des sabots sont plus faibles dans les portions initiale et finale.

Dans les téléphériques affectés au transport de personnes, les sabots sont à bords ras, de manière à permettre le passage des galets à grande vitesse et le passage des mâchoires du frein de sécurité. Les gorges des sabots sont souvent revêtues de bronze ou d'autres alliages spéciaux. Le graissage du câble sur son appui est prévu.

Les pylônes portent en outre le groupe des galets à gorge pour le guidage du câble tracteur (ou, dans le cas des téléphériques monocâbles, du câble porteur-tracteur) et du câble frein.

Sur les appareils monocâbles, on recourt parfois aux pylônes pour limiter la hauteur du câble. Dans ce cas, le câble passe sous les galets et le pylône n'assure plus une fonction de support mais de compression.

Il peut arriver que, suivant les cas de charge, un pylône doive assumer successivement un rôle de support ou de compression. Il est alors équipé d'un système de galets mixte support-compression.

Stations

Il existe différents types de stations selon qu'il s'agit d'installations monocâbles ou bicâbles, destinées au transport de marchandises ou de passagers. En outre, on distingue les stations motrices, les stations de renvoi, les stations de tension, les stations intermédiaires, et en montagne les stations amont et aval, suivant leur emplacement et les fonctions remplies.

◀ *Page ci-contre, pylône en béton armé sur le téléphérique Campiglio-Spinale (Italie).*

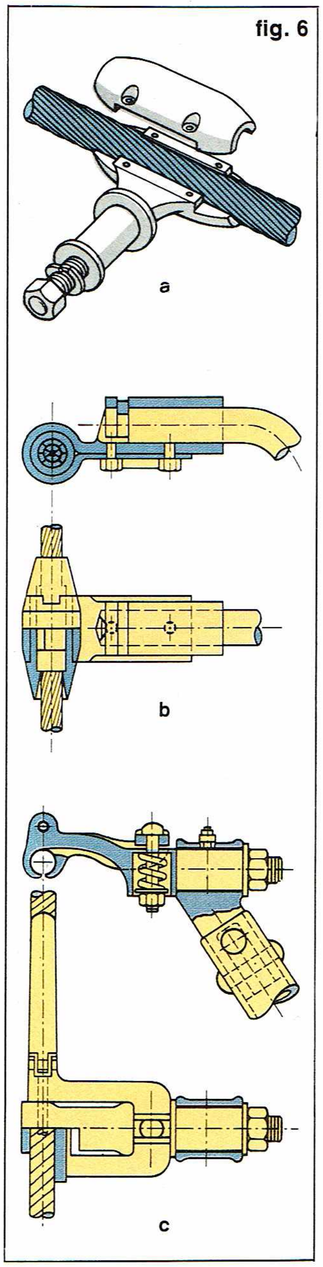

Photothèque Montaz Mautino

Stations de téléphériques monocâbles

Dans les installations destinées au transport de passagers, celles-ci sont en général très simples.

● La *station-motrice,* en maçonnerie ou à structure métallique, est dotée d'un groupe moteur, constitué par un treuil avec une poulie de grand diamètre, sur laquelle s'enroule le câble porteur-tracteur, commandé par l'intermédiaire d'un réducteur par un moteur généralement électrique ; on y trouve aussi le moteur de secours, l'ensemble des commandes, les freins, les dispositifs de liaison et de sécurité. Pour les appareils débrayables, il faut ajouter les dispositifs d'embrayage et de débrayage, la voie de contournement et éventuellement des voies de garage.

● La *station de renvoi* comporte une poulie de grand diamètre, et pour les appareils débrayables des équipements identiques à ceux de la station motrice. Si la station de renvoi est également station de tension, la poulie est soit suspendue, soit montée sur un chariot appelé lorry et tirée par le câble de tension fixé à l'autre extrémité au contrepoids. Si la station motrice est également station de tension, c'est l'ensemble du groupe moteur qui est mobile.

Dans les stations de téléphériques monocâbles pour le transport de marchandises, on trouve en outre des dispositifs de chargement et de déchargement, ces équipements variant selon la nature des matériaux transportés.

Stations des téléphériques bicâbles

Les plus complexes du point de vue technique sont celles qui équipent les téléphériques bicâbles destinés au transport des passagers.

● La *station motrice* est généralement en maçonnerie sur une ossature en béton armé, et abrite soit les dispositifs d'ancrage, soit les systèmes de tension des câbles porteurs. Le groupe moteur est constitué par un treuil de grande dimension pour le câble tracteur et un treuil auxiliaire pour le câble de secours. Le moteur, généralement électrique, est doublé par un moteur de réserve (de puissance moindre), qui sert pour les voyages à vitesse réduite ou en marche manuelle. Il est en outre exigé que la station comporte un moteur alimenté par une source d'énergie indépendante, afin que, en cas de panne de l'installation principale, on puisse ramener les voitures à la station ; ce moteur, souvent à essence ou à gas-oil, peut commander directement le treuil par un dispositif de couplage mécanique, ou encore en actionnant un générateur de courant.

La station motrice doit être dotée des appareils suivants : un indicateur de vitesse du câble tracteur, un dispositif d'arrêt en cas de vitesse excessive, un indicateur de position des voitures, un dispositif d'arrêt automatique des voitures en fin de course, un frein ordinaire commandé par l'opérateur, un frein de sécurité sur la poulie se déclenchant automatiquement sous l'effet de

▲▶ Ci-dessus, figure 6 : détail de quelques pinces fixes pour appareils monocâbles (télésièges) : a, type à mordaches ; b, type Pohlig, c, type à tenailles. A droite, gare amont motrice fixe pour télésiège triplace à pinces fixes. Télésiège de Roche-Mantel aux Deux-Alpes (Isère).

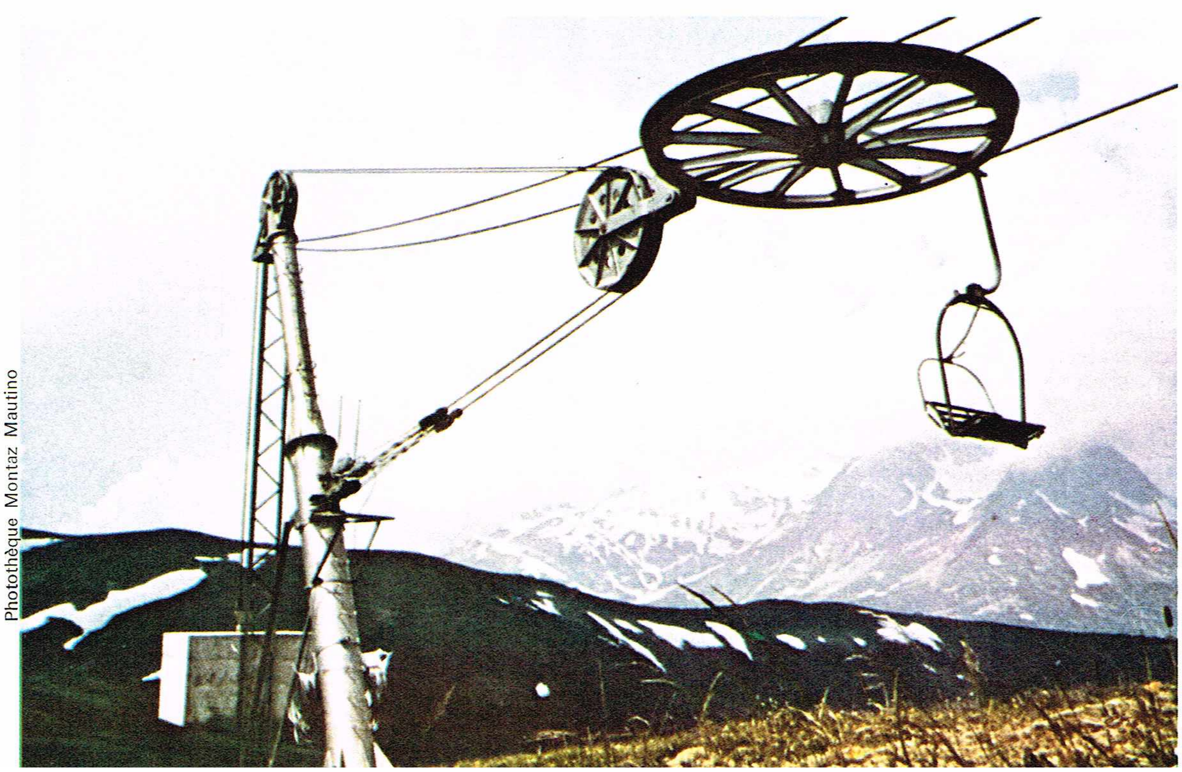

Photothèque Montaz Mautino

▶ Télésiège de Baudin à Val-Morel (Savoie). Poulie de renvoi et de tension suspendue.

certaines sécurités et sur ordre « arrêt d'urgence », et un frein automatique électromagnétique, dit de service. Le tableau de bord comporte en outre les appareils de contrôle pour la manœuvre des moteurs, les commutateurs pour passer sur le moteur choisi et les instruments électriques de mesure.

S'il existe plusieurs véhicules (télécabines bicâbles débrayables), ces stations sont dotées, elles aussi, d'une voie suspendue, ou d'un système analogue, avec un dispositif de décrochage automatique des cabines, qui sont ramenées ensuite vers le câble porteur qui leur fera effectuer la course de retour. Ce système est souvent adopté dans les téléphériques pour le transport de marchandises, les cabines étant remplacées par des wagonnets.

● La *station de renvoi,* construite aussi de préférence en béton armé, contient les poulies de renvoi pour les câbles mobiles, dotées d'un système tendeur semblable à celui qui est utilisé pour les câbles porteurs-tracteurs dans les télésièges, et des dispositifs d'ancrage ou de tension pour les câbles porteurs tels que nous les avons décrits ci-dessus.

La course des contrepoids est surveillée par des contacts électriques. Les contrepoids permettent de corriger les variations de tension dues aux variations de charge, aux écarts de température, aux allongements élastiques ou permanents. Si les contrepoids coulissent dans des puits maçonnés, ces derniers doivent être secs et accessibles au contrôle.

Matériel roulant

Dans les téléphériques bicâbles, les **véhicules** sont habituellement fermés; ils comportent à leur partie supérieure un chariot doté de plusieurs galets roulant sur le ou les câbles porteurs. La cabine est reliée au chariot par une suspension articulée, complétée parfois par un amortisseur d'oscillations de grande dimension. La capacité des appareils modernes dépasse la centaine de personnes.

Grâce à l'amélioration des méthodes de calcul des structures et à l'emploi de matériaux légers, le poids mort des véhicules par personne transportée est ainsi passé de 60-70 kg, il y a quarante ans, à 40-45 kg actuellement.

Les dimensions de la cabine sont déterminées en fonction du nombre de passagers. Les règlements français et italiens déterminent la superficie minimale du plancher par application de la formule :

$$S = 0{,}15\,n + 0{,}5$$

dans laquelle S est en m² et n est le nombre de passagers.

La hauteur intérieure minimale des cabines est de 2,20 m pour le transport de personnes sans skis et de 2,35 m pour le transport de personnes avec skis. Les cabines étaient autrefois de forme hexagonale ou octogonale allongée, en vue de réduire les poussées du vent. Actuellement, on préfère des cabines rectangulaires à angles plus ou moins arrondis, plus faciles à construire, car on a noté que la charge provoquée par la pression du vent augmente de manière à peu près négligeable.

La suspension est toujours articulée de façon à permettre au véhicule de rester horizontal. Pour les petites cabines modernes, une articulation supplémentaire et des amortisseurs améliorent le confort des passagers et limitent les sollicitations du matériel.

Dans les installations bicâbles à mouvement continu pour le transport de personnes, les cabines comportent de 2 à 7 places, généralement 6. De formes variées, elles sont constituées d'un châssis habillé de tôle ou de panneaux plastiques. Les skis sont accrochés à des supports spéciaux à l'extérieur. Ces cabines sont suspendues au câble porteur au moyen d'un chariot à 2 ou 4 galets.

Dans les installations monocâbles, les véhicules sont des sièges à 1, 2 ou 3 places, des sièges-cabines ou des cabines à 2, 4 ou 6 places. Le serrage est réalisé à l'aide de pinces fixes (*fig.* 6).

Dans les téléphériques pour le transport des matériaux, la forme des bennes dépend de ce que l'on doit transporter. On utilise généralement des bennes-wagonnets avec un caisson en tôle, suspendues au moyen d'un système qui permet le basculement de la benne pour le déchargement.

Dans les téléphériques bicâbles à va-et-vient, pour marchandises ou pour passagers, les bennes ou cabines sont suspendues au câble porteur par l'intermédiaire d'un **chariot.** Le chariot reçoit aussi les câbles tracteur et de secours et le frein de chariot lorsque celui-ci est imposé. Le chariot repose sur le câble porteur par l'intermédiaire de galets à gorge, dont le nombre varie de 4 à 12 en fonction de la charge; ce nombre est doublé lorsqu'il y a 2 câbles porteurs sur chaque voie. Chaque paire de galets est fixée à un **balancier,** et chaque balancier est relié au suivant par un balancier intermédiaire, et ainsi de suite. Ce système permet aux galets de s'adapter aux courbures du câble porteur et à la charge de se répartir de manière uniforme sur chacun d'eux. En fin de chaîne se trouve un balancier principal auquel est suspendu le pivot de fixation de la suspente.

Les galets sont dotés d'une gorge de section circulaire. Les bords de la gorge ne doivent pas être trop hauts, car le galet doit passer sans danger sur les sabots des pylônes et éventuellement sur les rails suspendus dans les installations à circuit fermé. Dans presque tous les téléphériques pour passagers, les gorges sont revêtues de caoutchouc, afin de réduire l'usure aussi bien des galets que du câble.

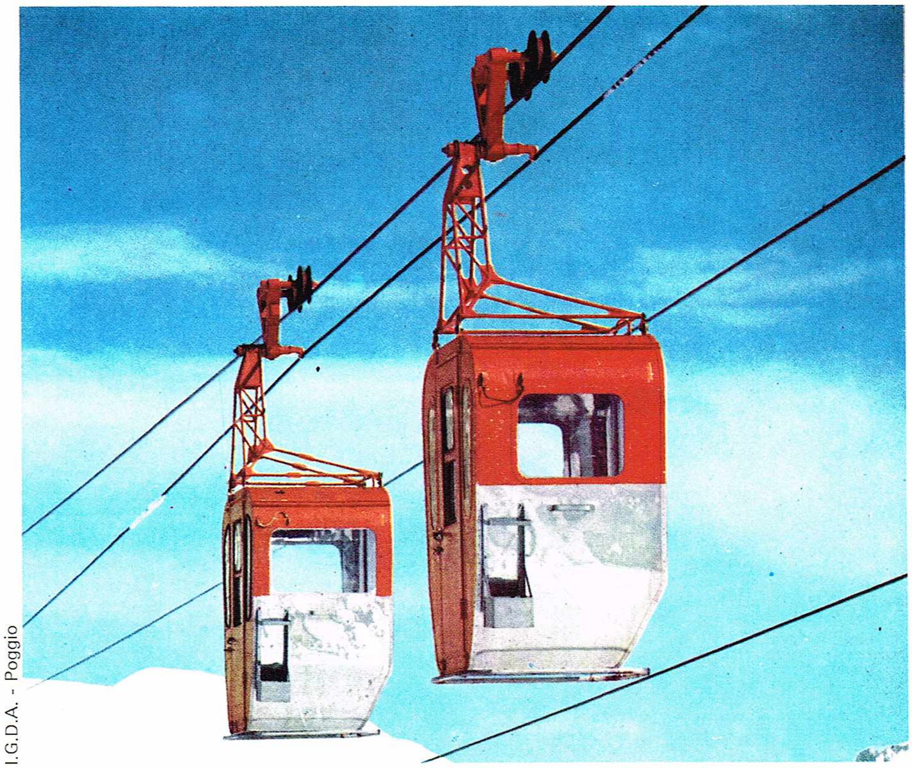

I.G.D.A. - Poggio

▲ ***Cabines de la vallée Blanche : noter le chariot et ses galets, l'attache fixe au câble tracteur, la suspension de la cabine 4 places avec porte-skis extérieurs.***

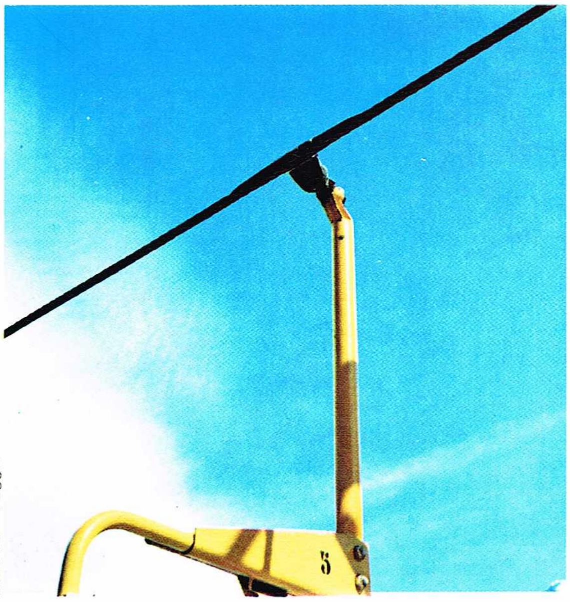

I.G.D.A. - Poggio

◀ ***Attache fixe de télésiège.***

Dans les téléphériques à mouvement continu, puisque les wagonnets parcourent dans les stations une voie suspendue nécessairement courbe, entre le câble d'arrivée et le câble de départ, on peut prévoir que les balanciers reliant les paires de galets puissent tourner dans le plan horizontal pour suivre la courbure de la voie. Il faut donc les relier au balancier intermédiaire par un système à deux pivots ayant respectivement leurs axes de rotation, le premier dans le plan horizontal, le second dans le plan vertical. Ce problème ne se pose pas pour les wagonnets dotés uniquement d'un mouvement de va-et-vient, dans lesquels les balanciers sont reliés simplement par des pivots à axe horizontal.

Le câble tracteur est relié au chariot de manière fixe s'il s'agit d'un téléphérique de type va-et-vient ou pulsé, ou par un système de décrochage automatique s'il s'agit d'une installation à cabines débrayables.

Les téléphériques bicâbles à va-et-vient sont généralement dotés d'un **système de freinage** sur le câble porteur entrant automatiquement en action si le câble tracteur se casse ou perd sa tension pour une raison quelconque. Le frein peut être actionné aussi par le cabinier. Un tel frein alourdit notablement le chariot et, en cas d'action, soumet l'ensemble du système à des efforts importants. Il n'est plus nécessaire lorsque l'on peut garantir la non-rupture du câble tracteur. On admet en France que ceci est réalisé en particulier lorsqu'il y a 3 câbles tracteurs fonctionnant en parallèle (exemple : les 2 tronçons du téléphérique de l'Aiguille du Midi).

Le serrage sur le câble porteur est toujours assuré par des mâchoires. La force de serrage doit tenir compte du fait que cette opération doit pouvoir être effectuée même dans les conditions les plus défavorables : pente maximale, charge maximale et frottement minimal sur le câble à cause de la présence de glace ou de graisse. Le système de freinage est situé à la partie centrale du chariot ou, dans certains appareils modernes, sur un chariot annexe fixé comme une remorque au chariot principal.

Pour conclure le chapitre consacré au matériel roulant, mentionnons certains téléphériques dotés d'un **chariot automoteur.** Le moteur est donc installé sur le chariot et fait avancer le wagonnet par des systèmes de différents types, permettant d'avoir une adhérence suffisante sur le câble porteur. On supprime ainsi les câbles tracteurs. Cette technique, développée en particulier par la Société Neyrpic, a fait l'objet de réalisations importantes à Grevelingen (Pays-Bas) pour un téléphérique-blondin destiné à des transports d'enrochements et à Sidi Ifni (Maroc) pour relier un embarcadère à la terre ferme. L'adaptation de cette technique aux téléphériques de montagne est restée limitée à de petits engins, de sauvetage en particulier.

Un autre système comporte, à côté du câble porteur, un câble fixe, dit **câble de touage.** Le chariot du wagonnet est doté de deux grosses poulies sur lesquelles s'enroule le câble de touage. Un moteur, installé sur le chariot, fait tourner les deux poulies, qui avancent ainsi le long du câble de touage en entraînant le wagonnet.

▼ ***Figure 7 :* *systèmes d'enroulement du câble sur la poulie motrice : A, poulie motrice ; B, poulie auxiliaire.***

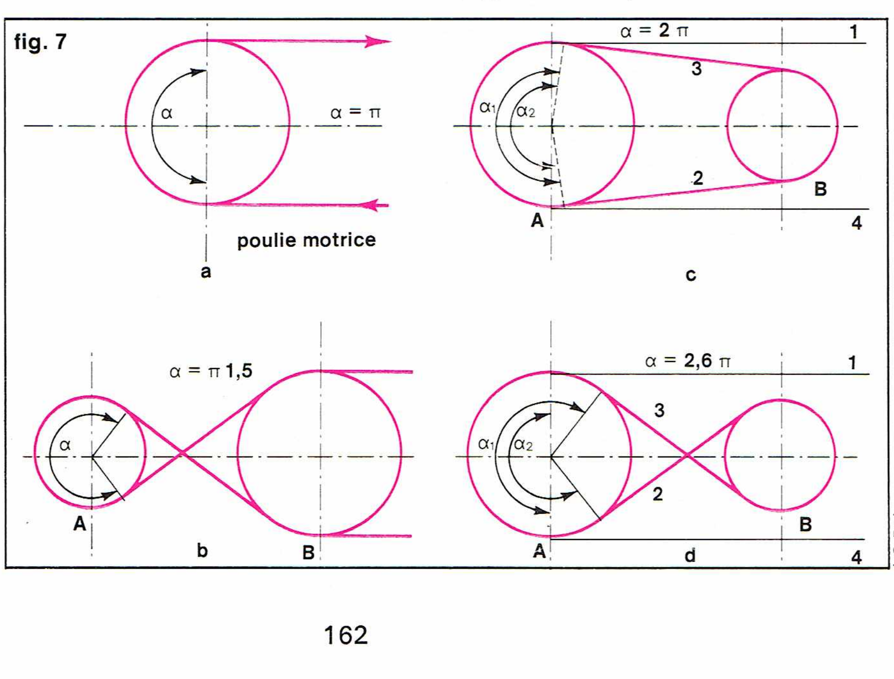

I.G.D.A.

Ouvrages de protection

Les câbles d'un téléphérique peuvent passer au-dessus d'une route, d'une voie de chemin de fer, d'une voie d'eau navigable, d'une ligne électrique, d'un groupe d'habitations, etc., ce qui impose d'assurer une protection contre la chute possible des wagonnets ou du chargement ; ceci est vrai en particulier pour les téléphériques à matériaux et pour les téléphériques à voyageurs à véhicules ouverts.

Groupe moteur

Par groupe moteur, on entend l'ensemble moteur, réducteur et poulie d'entraînement du câble tracteur ou tracteur-porteur, selon les cas.

La **poulie d'entraînement** est unique. On a parfois recours à deux poulies, mais il faut dans ce cas adjoindre un dispositif de répartition du mouvement. La poulie motrice peut être horizontale ou verticale ; lorsqu'elle est verticale, on recourt à un système de poulies de renvoi. La *figure* 7 montre une série de schémas adoptés pour transmettre le mouvement au câble. Un enroulement de 180° du câble (*fig.* 7 a) ne permet pas toujours d'avoir une adhérence suffisante ; lorsque l'effort atteint des proportions considérables, on a recours à des schémas faisant intervenir plusieurs poulies pour que des enroulements d'un angle supérieur à 180° soient possibles (*fig.* 7 b, c, d).

On a aussi construit et utilisé des **poulies** dites **autobloquantes.** Il s'agit de poulies dans lesquelles la gorge qui reçoit le câble est constituée par une série de paires de mâchoires articulées sur les bords de la poulie elle-même. Le câble repose sur les mâchoires, qui se bloquent lorsqu'il est tendu. En ce qui concerne la force motrice transmise, on peut dire que, pour un diamètre égal, une poulie autoblocante avec un câble enroulé à 180° transmet une force correspondante à celle que transmettrait un système de deux poulies de construction normale ou une poulie à trois gorges. Ces poulies provoquent une usure plus importante du câble, mais il faut noter que, même dans un système à poulies multiples, le câble est soumis à d'importantes contraintes, car il subit deux flexions de plus à chaque passage.

La transmission du mouvement entre moteurs et poulie est réalisée actuellement par des réducteurs à engrenage contenus dans un carter à bain d'huile. Les appareils anciens utilisaient des engrenages de grand diamètre à l'air libre. Les salles de machines étaient alors très spectaculaires. Le réducteur peut avoir plusieurs entrées pour différents moteurs ou une entrée unique. L'entraînement peut se faire en ligne directe avec cardans ou par le biais de courroies trapézoïdales multiples.

La nécessité de régler la vitesse pour les téléphériques à va-et-vient a conduit à adopter des groupes Ward-Leonard, composés d'un moteur à courant continu et d'un moteur excitateur-générateur ; en faisant varier le courant du générateur qui alimente le moteur à courant continu, on fait varier la vitesse du moteur. Avec ces groupes, on obtient un système permettant de régler de manière continue la vitesse et d'obtenir un freinage très doux.

L'inconvénient de ce système, très robuste et utilisé depuis longtemps, réside dans le prix et l'encombrement occasionnés par trois machines tournantes. On utilise actuellement des moteurs à courant continu avec variateurs à thyristors. On n'a plus qu'un moteur très compact, mais en revanche des armoires électriques importantes. La maintenance, bien qu'étudiée à l'avance, concerne des technologies modernes fondées sur l'électronique et nécessite une formation adéquate du personnel. La puissance dépasse 1 200 ch au téléphérique de la Grande-Motte à Tignes.

Cette solution est également utilisée pour les appareils monocâbles à mouvement continu et à pinces fixes ; le transport des skieurs et des piétons nécessitant déjà deux vitesses, une variation de vitesse en continu présente la possibilité d'une adaptation plus souple aux possibilités de la clientèle qui, rappelons-le, embarque et débarque en marche. Cependant la solution la plus économique et la plus simple reste l'utilisation de 2 moteurs alternatifs : un moteur grande vitesse (skieurs) synchrone à rotor bobiné et un moteur petite vitesse (piétons) à rotor en court-circuit. D'autres solutions donnent également un résultat satisfaisant. Il s'agit d'une part du moteur alter-

C. Dournon

▲ *Télécabine bicâble débrayable de la Grande-Rochette à La Plagne (Savoie).*

natif triphasé à collecteur (système Schrague) qui permet d'avoir quelques vitesses, prédéterminées, couvrant largement les besoins. Ce principe, qui permet une réalisation robuste et simple, est une bonne solution pour les puissances faibles ou moyennes (guère supérieures à 250 ch). D'autre part, il existe un système permettant de contrôler les moteurs asynchrones à bagues normaux qui est fondé sur l'alimentation par thyristors du stator. Le résultat pratique est comparable à celui qui est obtenu avec un moteur à courant continu.

La question de la vitesse variable se pose avec beaucoup moins d'acuité pour les appareils monocâbles ou bicâbles pourvus de véhicules débrayables, et la motorisation généralement adoptée comprend un moteur asynchrone.

Les appareils bicâbles à va-et-vient ou pulsés sont actuellement dotés de programmes de marche entièrement automatiques. Pour permettre l'exploitation en cas d'arrêt de l'automatisme, il est régulièrement prévu un moteur asynchrone permettant une conduite manuelle à une vitesse légèrement réduite (7 m/s par exemple).

En outre, et sur tous les appareils téléportés, le règlement exige la présence d'un moteur de secours alimenté par une source d'énergie indépendante du moteur principal. Il s'agit généralement d'un moteur thermique (essence ou Diesel) dont le rôle est uniquement de permettre de ramener à vitesse réduite, mais au moins égale à 1 m/s, les voyageurs en gare, à l'exclusion d'une exploitation continue.

Il est enfin prévu, en cas d'immobilisation complète de l'appareil, un plan de sauvetage permettant d'évacuer les passagers. Les moyens nécessaires tiennent compte des caractéristiques propres de l'appareil, de son environnement et du personnel disponible. Le sauvetage consiste soit à redescendre les passagers au sol au droit des véhicules, soit à les ramener en gare au moyen de nacelles. Les procédés sont originaux en ce qui concerne l'accès des sauveteurs aux véhicules lorsque ceux-ci sont répartis le long de la ligne (accès direct ou accès par le câble) et le plus souvent dérivés de ceux qui sont utilisés pour le sauvetage en montagne en ce qui concerne la descente au sol des passagers. Pour les cabines importantes (plus de six personnes), qui sont généralement accompagnées par un cabinier, c'est celui-ci qui met en œuvre les moyens d'évacuation stockés en permanence à bord du véhicule.

Photothèque Montaz Mautino

◀ *Téléski à perches à Chamrousse (Isère). Noter la présence d'un rattrapage de câble sur la poulie.*

C. Dournon

▲ *Téléphérique de sauvetage automoteur au pic Blanc à l'Alpe d'Huez (Isère).*

Mesure des balancements des cabines dans les téléphériques pour passagers

Les mouvements pendulaires des cabines constituent un problème pour la sécurité de fonctionnement des installations. Provoqués surtout par le vent, généralement fréquent dans les zones de montagne, ces mouvements sont susceptibles d'entraver sérieusement le trafic.

Actuellement, les règlements qui s'appliquent aux installations publiques prévoient la suppression du service lorsque la vitesse du vent atteint une certaine valeur. Mais, en pratique, on rencontre des situations où, bien que la vitesse du vent enregistrée par les appareils demeure dans la limite admise, les oscillations et les balancements qui se produisent ponctuellement peuvent présenter quelques dangers. A l'inverse, en présence de vents signalés comme dangereux par les appareils, on pourrait maintenir le service en réduisant l'importance des oscillations grâce à des stabilisateurs ou en ralentissant la cabine et même en l'arrêtant en certains points de la ligne où les oscillations peuvent s'amortir sans risque.

Le vent peut agir par rafales isolées, qui entraînent un déportement brusque de la cabine par rapport à sa position verticale, suivi d'un mouvement oscillatoire qui s'amortit lentement; en revanche, si les coups de vents ont une certaine fréquence, les oscillations imprimées à la cabine peuvent atteindre des amplitudes dangereuses, notamment lorsque la fréquence des oscillations devient proche de la fréquence des rafales, et cela même si la force du vent est relativement faible. Par vent constant, on assiste à un déplacement de la cabine par rapport à la position verticale, qui se maintient pendant toute la durée de l'action perturbatrice, sans qu'il y ait d'oscillations. Ces phénomènes peuvent se superposer, et donner lieu par conséquent simultanément à un déportement fixe et à un déportement dynamique de la cabine.

En pratique, il revient au conducteur, qui doit bien connaître son appareil et apprécier la situation locale, de ralentir ou arrêter son appareil dans les quelques cas où il serait déraisonnable de continuer l'exploitation, bien que le vent ne dépasse pas la vitesse limite réglementaire. Il faut noter en outre que le règlement français impose la liberté du gabarit pour des oscillations transversales d'au moins 0,3 radian en l'absence de guidage, ce qui est déjà considérable.

Montage des téléphériques

La première phase du travail consiste à préparer le tracé sur lequel sera implanté l'appareil. Il faut abattre les arbres sur une certaine largeur et protéger les zones d'installation des pylônes contre les avalanches et les éboulements. En montagne, et plus généralement dans les zones d'accès difficile, on installe habituellement un téléphérique léger de chantier qui court parallèlement à la ligne, pour le transport des matériaux, mais on emploie de plus en plus souvent l'hélicoptère. On procède ensuite à l'exécution des fondations des pylônes et des stations.

On installe ensuite dans les stations les mécanismes de transmission et les différentes poulies. Dans le même temps, on procède à l'installation des pylônes. Les différentes pièces des pylônes métalliques sont assemblées avec des boulons. La pose du câble porteur sur les pylônes et l'ancrage de ses extrémités sont des opérations complexes exigeant un outillage particulier et l'intervention d'un personnel spécialisé.

Le câble porteur, dans les téléphériques pour le transport de marchandises, est livré en tronçons de longueur variant de 200 à 500 m, chacun d'un poids de 2 à 4 t. Il est enroulé sur de gros tambours en bois, que l'on place sur un axe d'acier reposant sur des supports pour le déroulement du câble. La rotation du tambour est freinée pour éviter la formation de nœuds.

Les câbles porteurs des téléphériques affectés au transport de passagers posent des problèmes plus complexes, car, comme on le sait, ils ne doivent pas présenter de raccordements. De ce fait, ils sont enroulés sur des tambours de très grandes dimensions, la masse totale pouvant dépasser 50 t.

Dans les téléphériques pour le transport de marchandises, les tronçons de câble sont posés par terre sur des traverses en bois le long de la ligne; c'est là qu'on exécute les jonctions. Le contrepoids est placé le plus haut possible au-dessus du puits et est raccordé au câble porteur au moyen d'un câble de tension; l'autre extrémité du câble est fixée au moyen de crochets à un câble auxiliaire. Le câble est ensuite soulevé au moyen de treuils disposés sur les pylônes et mis en place sur les sabots et les gorges des galets. Au cours de cette opération, il faut veiller à ce que les crochets qui soulèvent le câble ne soient pas espacés les uns des autres d'une distance supérieure à la longueur des sabots, afin d'éviter les courbures de flexion. La pose débute sur les pylônes qui se trouvent du côté des contrepoids. Il faut éviter que les jonctions ne tombent sur les sabots des pylônes.

Une fois le câble installé sur tous les pylônes, on le tend au moyen d'un treuil jusqu'à ce que le contrepoids se soulève de son appui provisoire, qui est alors ôté. La tension du câble peut être obtenue par étapes lorsque le câble de traction est court ou le tambour du treuil trop petit; on recourt alors à un deuxième câble auxiliaire. Le contrepoids utilisé au cours de cette étape du travail a un poids qui correspond à environ la moitié du poids définitif, mais qui est néanmoins suffisant pour obtenir que le câble porteur, déchargé, prenne une courbure identique à celle qui sera la sienne lors du fonctionnement à pleine charge. Cette condition réalisée, on procède à l'ancrage définitif du câble, et on complète le contrepoids.

L'installation d'un câble porteur dans un téléphérique pour passagers a lieu de la manière suivante : on place le tambour sur lequel le câble est enroulé dans la station inférieure, et on accroche son extrémité à celle d'un câble d'entraînement, qui, commandé par un treuil, assurera le déroulement. Le tambour du treuil a en général une capacité d'enroulement ne dépassant pas 300 m, donc la pose sera réalisée en plusieurs étapes. A la fin de chaque étape, le câble porteur est fixé à un autre câble auxiliaire, on déplace le treuil et on recommence le travail. Les opérations d'ancrage et de fixation du contrepoids sont identiques à celles que nous venons de décrire pour les téléphériques affectés au transport de marchandises. Rappelons, enfin, qu'un câble sous tension est soumis durant sa première année de fonctionnement à un allongement d'environ 0,70 % de sa longueur. A la fin de cette période, le contrepoids est soulevé par réduction de la longueur du câble de tension ou par d'autres procédés.

Le montage du câble tracteur ne présente pas de difficultés particulières. Après sa mise en place sur les poulies et les galets, on réalise l'épissure ou les culots d'attache sur les chariots; pour finir, on le met sous tension avec les contrepoids. Les câbles auxiliaires (câbles freins, etc.) sont installés de la même manière.

La première mise en service de l'installation est effectuée à charge réduite. On teste alors tous les mécanismes de commande et de secours à pleine charge, après quoi on fait fonctionner l'installation pendant au moins une centaine d'heures. A la fin de cette période, on procède à une vérification d'ensemble, en présence du service de contrôle pour les téléphériques à voyageurs. Il est alors procédé à la mise en service ou à l'ouverture au public.

Calculs et vérifications

Un câble métallique ancré à ses extrémités prend, sous l'effet de son propre poids, la forme d'une chaînette. Naturellement, il faut supposer que le câble est parfaitement flexible, inextensible et homogène. En adoptant les symboles de la *figure* 8, l'équation de la courbe qu'on appelle chaînette est la suivante :

$$y = \frac{h}{2}\left(e^{\frac{x}{h}} + e^{-\frac{x}{h}}\right) = h \text{ ch } \frac{x}{h}$$

dans laquelle x et y sont les coordonnées du point considéré par rapport à un plan cartésien, l'axe y étant vertical, c'est-à-dire ayant la direction de l'axe de symétrie de la courbe, et l'axe x horizontal étant situé à une distance h du sommet de la courbe, c'est-à-dire de son point le plus bas. Le paramètre h, caractéristique de la courbe, est exprimé par la relation :

$$h = \frac{H}{p} = y \cos \alpha$$

dans laquelle H est la composante horizontale de la tension, p le poids du câble par unité de longueur, et α l'angle formé par la tangente à la courbe au point considéré avec l'horizontale. Pour chaque valeur de h, on a une courbe différente. L'utilisation pratique de cette formule est très laborieuse et, de ce fait, ne se prête pas à la solution des problèmes concernant les câbles aériens. On a donc proposé des systèmes pratiques pour l'étude des chaînettes, mais, dans le domaine qui nous intéresse, on préfère recourir à des simplifications qui conduisent à des résultats approximatifs, ce qui se justifie par le fait que les données de départ elles-mêmes ne sont pas exactes. En effet, il n'est pas vrai qu'un câble métallique soit parfaitement flexible et inextensible; en outre, le poids du câble est fourni par les firmes avec une approximation de 2 %. Avec ces données de départ, il serait vain de prétendre à une précision des calculs.

Donc, si nous considérons le poids du câble réparti non tout au long de la chaînette mais de la droite qui joint les extrémités de la travée, l'équation de la chaînette est ramenée à celle d'une parabole, dont la solution peut être obtenue directement. L'approximation est d'autant meilleure que le câble est plus tendu. L'équation de la parabole est :

$$x^2 = 2\,h'\,y,$$

dans laquelle h' est égal à $\frac{H}{p} \cos \gamma$, où γ est l'angle formé par la corde de la travée (droite joignant les deux extrémités) ; H et p ont des significations connues.

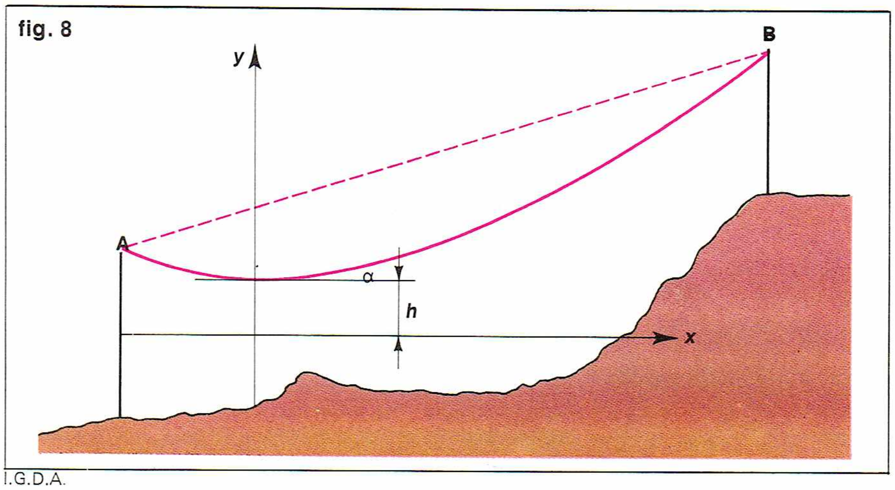

I.G.D.A.

▲ ***Figure 8 : courbe prise par un câble fixé à ses extrémités.***

L'origine des axes cartésiens x et y est située au sommet de la parabole, et l'axe de symétrie est vertical.

La flèche verticale, c'est-à-dire la distance entre la droite reliant les deux extrémités de la travée et le câble, mesurée verticalement en un point quelconque distant horizontalement de x par rapport à une extrémité, est :

$$f = \frac{px}{2\,H \cos \gamma}\,(l - x),$$

où l est la longueur à l'horizontale de la travée. Dans la portion centrale $\left(\text{pour } x_2 = \frac{l}{2}\right)$, on a :

$$f_m = \frac{pl}{8\,H \cos \gamma}$$

En général, pour des travées de dénivellation d (différence d'altitude entre l'extrémité supérieure et l'extrémité inférieure) de faible importance et avec un câble peu tendu, le sommet peut tomber à l'intérieur de la travée. En ce point, la tangente est horizontale et la tension minimale (= H).

Pour des câbles déchargés, si on néglige l'action du vent, H est constante; lorsque les câbles sont chargés, par exemple les câbles porteurs supportant à la fois le poids du matériel roulant et une des composantes de l'effort du câble tracteur, H varie avec le passage d'amont en aval de la charge, tandis que la tension du câble demeure constante. A la rigueur, on peut considérer que H ne change pas, uniquement dans les installations dans lesquelles la charge descend librement le long du câble.

Étudions maintenant le cas d'un câble à travée unique, muni d'un contrepoids et sans charge sur la ligne. On place si possible le contrepoids en aval, où la tension est moindre. Ici, la tension est déterminée par la valeur du contrepoids C. La tension maximale se situe à l'extrémité amont et vaut :

$$T_{max} = C + p\,L \sin \gamma = C + pd$$

où L est la distance entre les extrémités de la travée.

Les paramètres p et d ont une signification connue. A ces valeurs il faut ajouter les frottements sur la poulie de renvoi au contrepoids. En indiquant par T_A et T_B les tensions aux extrémités de la travée (*fig.* 9a), on a $T_A = C$ et $T_B = T_{max}$. La poussée sur la poulie de renvoi au contrepoids sera :

$$S = 2\,T_A \sin \frac{\delta}{2}$$

dans laquelle δ est l'angle d'enroulement du câble sur la poulie. En utilisant les symboles de la *figure* 9a, la poussée prend sa valeur :

$$S = 2\,C \sin \frac{90 - \alpha}{2}$$

Si α n'est pas connu, on peut exprimer S en fonction de γ avec une bonne approximation :

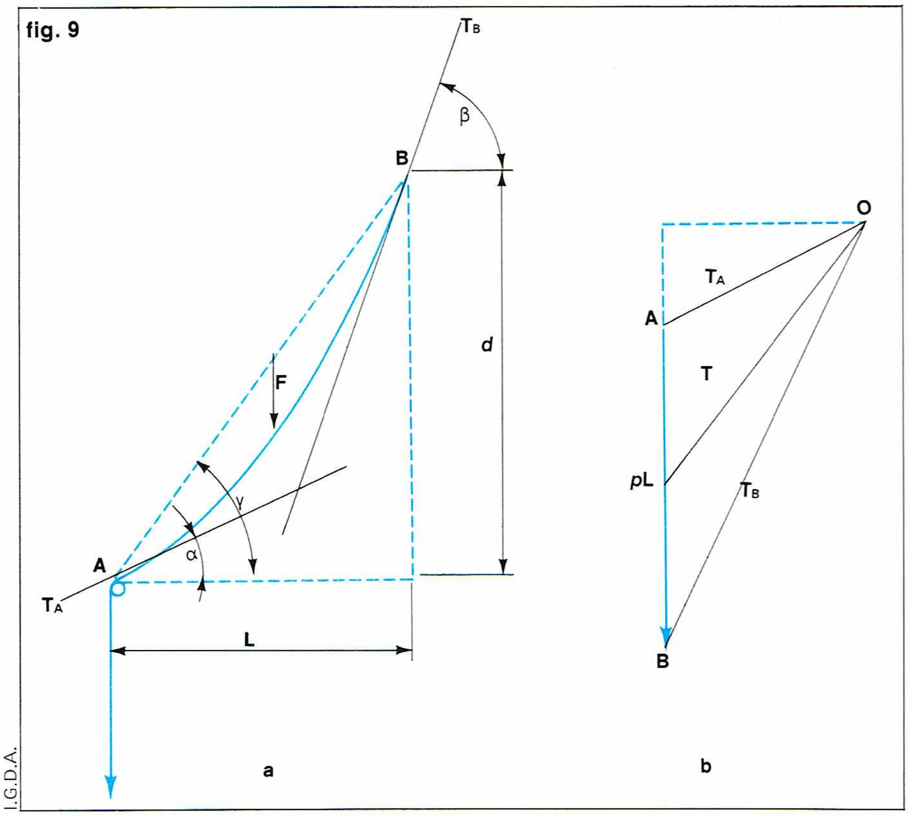

▲ *Figure 9 :*
a, force d'appui sur la poulie de déviation au contrepoids;
b, triangle d'équilibre du câble.

$$S = 2\,C \sin \frac{90 - \gamma}{2} \left[\operatorname{tg} \gamma = \frac{d}{l}\right]$$

Avec le triangle d'équilibre, on sait que :

$$H = T_A \cos \alpha = T_B \sin (90 - \beta) = T_B \cos \beta$$

d'où

$$T_B = T_A \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} = C \frac{\cos \alpha}{\cos \beta}$$

formule qui permet de contrôler la tension en amont en connaissant la valeur du contrepoids C et en mesurant les angles α et β avec des instruments.

En outre, en se fondant sur les formules habituelles et sur certaines propriétés géométriques de la parabole, on parvient aux relations :

$$\operatorname{tg} \beta = \operatorname{tg} \gamma + \frac{pL}{2\,H} \qquad \text{et} \qquad \operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \gamma - \frac{pL}{2\,H}$$

qui permettent de connaître les angles d'entrée aux extrémités de la travée, si γ, p, L et H sont connus, ou bien, cas plus fréquent, de calculer β par la seule mesure de α en aval, sachant que :

$$H = T_A \cos \alpha = C \cos \alpha$$

Enfin, considérant le triangle d'équilibre du câble déchargé (*fig.* 9b), on obtient (théorème des sinus) :

$$\frac{pL}{\sin (\beta - \alpha)} = \frac{T_A}{\sin (90 - \beta)}$$

d'où

$$T_A = \frac{pL \cos \beta}{\sin (\beta - \alpha)}$$

et, par un procédé analogue :

$$T_B = \frac{pL \cos \alpha}{\sin (\beta - \alpha)}$$

Ces relations nous permettent de vérifier les tensions d'une travée grâce à la seule mesure des angles α et β aux extrémités.

Le cas d'un câble porteur à travée unique avec une charge unique se déplaçant sur lui doit être étudié en tenant compte que, si l'on néglige les frottements, la tension est indépendante de la charge utile et de la poussée du vent. En effet, la charge provoque uniquement une augmentation de la flèche et un soulèvement du contrepoids. En outre, en supposant vertical l'effet de la charge, la composante H horizontale de la tension demeure constante. Par un procédé analogue aux précédents et avec les mêmes symboles, on obtient :

$$T_A = \frac{\cos \beta}{\sin (\beta - \alpha)} (P + pL) = C$$

et

$$T_B = \frac{\cos \alpha}{\sin (\beta - \alpha)} (P + pL) = C + pd$$

et enfin

$$H = T_A \cos \alpha = T_B \cos \beta = \frac{\cos \beta \cos \alpha}{\sin (\beta - \alpha)} (P + pL)$$

Sans reprendre les formules intermédiaires, rappelons que, lorsque la charge est dans la portion centrale, on applique les relations suivantes :

$$T_A = \frac{\cos \gamma}{2 \sin (\gamma - \alpha)} (pL + P)$$

et

$$T_B = \frac{\cos \gamma}{2 \sin (\beta - \gamma)} (pL + P)$$

qui permettent d'obtenir les valeurs des tensions aux extrémités du câble, en connaissant la charge qui se déplace (P), le poids du câble, et en mesurant les angles α, β et γ.

Avec un raisonnement analogue, en supposant la charge proche de l'extrémité aval (A), on obtient :

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \gamma - \frac{p \frac{L}{2} + P}{H}$$

tandis que tg β sera approximativement égale à celle que l'on obtient lorsque le câble est chargé. Ces formules sont utiles pour l'étude des sabots aux extrémités de la travée, car elles permettent de déterminer la courbure nécessaire pour que le câble repose dessus régulièrement.

Enfin, il peut être intéressant de calculer les angles α_c et β_c par rapport à l'horizontale de la trajectoire du chariot à l'approche des points d'appui. Lorsque le chariot arrive à l'extrémité amont de la travée, on a :

$$\operatorname{tg} \beta_c = \operatorname{tg} \gamma + \frac{pL + P}{2\,H}$$

et à l'extrémité aval :

$$\operatorname{tg} \alpha_c = \operatorname{tg} \gamma - \frac{pL + P}{2\,H}$$

Comme on le voit, la trajectoire du chariot au voisinage des appuis correspond à la courbe de l'axe du câble porteur lorsque le chariot est au milieu de la travée.

Dans le cas le plus fréquent (câble porteur à plusieurs travées, avec contrepoids en aval), il faut noter avant que, en négligeant les frottements, une charge sur une travée n'influe pas sur la tension ou sur la configuration des autres, mais uniquement sur les angles d'entrée α et β de la travée où elle se trouve et donc sur la charge supportée par les points d'appui adjacents. La poussée sur les points d'appui est donnée par la formule :

$$S = 2T \sin \frac{\delta}{2}$$

dans laquelle T est la demi-somme des tensions du câble en amont et en aval de l'appui, et δ l'angle du câble sur l'appui, égal à la différence entre l'angle β de la travée qui précède et l'angle α de la travée qui suit.

La tension maximale du câble est calculée avec la formule déjà connue, en prenant comme dénivellation la dénivellation totale et en tenant compte du frottement sur les appuis.

On peut appliquer à chaque travée les formules relatives aux installations à travée unique, comme nous venons de le voir. Dans un téléphérique de montagne pour passagers, on peut également tenir compte de l'influence due aux variations de température. Mais tout cela ne conduit qu'à une simple modification de la position du contrepoids.

En ce qui concerne les câbles tracteurs, on peut observer que, dans le cas le plus fréquent, c'est-à-dire celui d'une installation comportant une boucle tendue

par un contrepoids avec deux charges en ligne (une par câble tracteur), la tension maximale T_{max} peut être calculée comme dans le cas du câble tracteur immédiatement en aval de la charge mobile P, cette dernière étant, elle aussi, calculée selon la méthode habituelle. La tension en aval, déterminée par le contrepoids C, sera égale à C/2, car elle se partage entre les deux branches du câble tracteur. Nous avons fait remarquer que, dans certains téléphériques pour le transport de passagers, la boucle du câble tracteur est constituée par deux câbles de section différente (câble tracteur supérieur et câble lest) reliés par des raccordements au niveau des chariots : dans ce cas, il faudra déterminer la position de la charge mobile P pour laquelle on a la valeur T_{max} de la tension, position qui dépend des angles d'entrée au niveau des appuis, des travées et de leur longueur. C'est pourquoi chaque cas doit être étudié séparément en tenant compte des caractéristiques du parcours. Les calculs et vérifications relatifs au câble porteur-tracteur dans un téléphérique monocâble sont effectués selon les critères que nous venons d'exposer pour les câbles porteurs à plusieurs travées. Lorsqu'il existe plusieurs charges mobiles, à faible distance les unes des autres et de poids voisins, on peut considérer la charge comme uniformément répartie le long du câble, ce qui conduit à prendre en considération un poids de câble fictif par unité de longueur, donné par la formule :

$$P_c = \frac{P_v}{s} + p$$

dans laquelle P_v indique le poids d'un véhicule chargé, s la distance entre véhicules, p le poids par mètre de câble vide.

On prend la valeur P_c et on effectue les calculs comme pour un câble porteur chargé.

Pour les vérifications, il faut contrôler que la charge en kilogrammes pour chaque galet dans les conditions les plus sévères ne dépasse pas une valeur déterminée à l'avance et qui tient compte de la garniture du galet, des caractéristiques des roulements employés et du calcul des éléments de balancier.

Il faut également s'assurer que l'appui du câble sur le train de galets est toujours maintenu même en cas de surtension du câble. Le règlement français prescrit les valeurs à prendre en compte pour effectuer ces justifications. Les ouvrages mixtes support-compression permettent de résoudre le problème en cas de difficultés.

La *figure* 10 représente un diagramme relatif à une installation bicâble : S est la résultante des tensions T_m (tension en amont) et T_v (tension en aval) que les deux tronçons de câble tracteur exercent sur le chariot. Cette résultante n'est pas toujours parallèle tout le long de la ligne à la trajectoire du chariot : en indiquant par θ l'angle formé par S avec cette trajectoire, les composantes de S parallèle et normale à la trajectoire seront : S cos θ et S sin θ.

La composante normale S sin θ modifiera la configuration du câble porteur en s'ajoutant à la composante du poids dans la même direction : P cos γ.

fig. 10

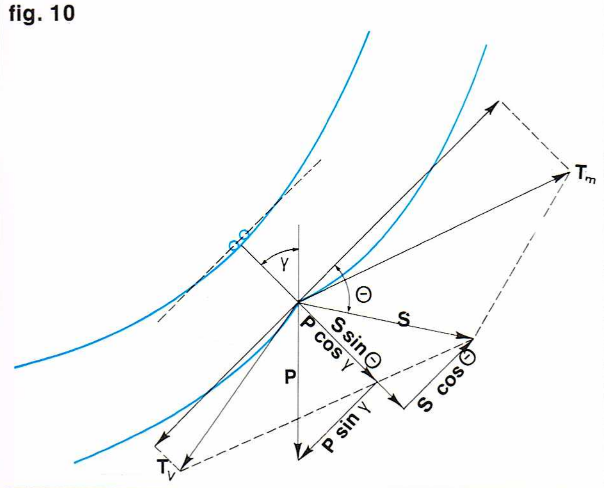

◀ *Figure 10 : tension exercée par le câble tracteur sur un chariot de téléphérique bicâble.*

En outre, en négligeant les frottements, nous aurons dans la partie centrale approximativement S cos θ = P sin γ, d'où :

$$\cos\theta = \frac{P}{S}\sin\gamma$$

Si $\theta = 0°$, l'effort exercé par le câble tracteur ne modifie pas la configuration du câble porteur. Mais il est parfois possible que θ devienne négatif, et dans ce cas le câble tracteur aura tendance à soulever le chariot du câble porteur.

Normalement, dans les téléphériques pour voyageurs, le câble tracteur repose sur des galets d'appui au niveau des pylônes, disposés beaucoup plus bas que les sabots supportant les câbles porteurs ; il s'ensuit une aggravation de la charge sur ces derniers, avec une augmentation de la flèche. En outre, le chariot doit supporter, outre son propre poids et celui du wagonnet, une bonne portion de câble tracteur, et cela doit être pris en compte pour le calcul des structures.

La force motrice disponible à la poulie reliée au moteur ne devra pas être inférieure à la différence maximale des tensions T et t dans les deux branches du câble tracteur ou du câble tracteur-porteur au niveau de la poulie :

$$F = T - t$$

La puissance en chevaux du moteur sera au minimum :

$$N = (T - t)\,\frac{V}{75 \cdot \eta}$$

où V est la vitesse de l'installation en m/s, et η le rendement de la transmission entre moteur et poulie, qui peut varier entre 0,9 et 0,6 selon le nombre de réduction.

En outre, il faudra vérifier que le câble ne glisse pas sur la poulie motrice ; pour réaliser cette condition, il faut que la relation suivante se trouve vérifiée en toutes circonstances :

$$\frac{T}{t} \leqslant e^{0,9 f\alpha}$$

où e est la base des logarithmes népériens, α l'angle d'enroulement du câble sur la poulie, f le coefficient minimal de frottement entre câble et poulie, et 0,9 un coefficient de sécurité.

Avec des gorges revêtues de caoutchouc, $f \simeq 0,25$; avec des gorges en acier ou en fonte, $f \simeq 0,12$. Si le câble est graissé, ces valeurs doivent être diminuées de 30 à 40 %. Il convient en particulier de justifier le maintien de l'adhérence lors du freinage.

Pour les téléphériques destinés au transport public de passagers, les accélérations et décélérations du câble sont limitées pour assurer tant la sécurité de l'installation qu'un confort minimal pour les passagers. Ainsi l'accélération moyenne du câble au démarrage ne doit pas dépasser 0,50 m/s², et l'accélération instantanée 1,50 m/s². La décélération doit être comprise entre 0,50 m/s² et 1,25 m/s² pour les appareils dont la vitesse de marche est supérieure à 4 m/s, et entre $\frac{v+1}{10}$ m/s² et $\frac{v+1}{4}$ m/s² lorsque la vitesse de marche v est inférieure ou égale à 4 m/s.

Blondins

Les blondins sont des installations qui peuvent être considérées comme des *grues* ou des *ponts roulants* à câbles et des téléphériques à la fois. En effet, à la place de la poutre centrale, on place un ou plusieurs câbles porteurs en acier, sur lesquels court un chariot.

Dans le système le plus simple, on a deux pylônes en ossature métallique (en bois pour les petites installations) sur lesquels reposent un ou plusieurs câbles métalliques parallèles dont les extrémités sont ancrées au sol. Un chariot doté de galets court sur le câble (ou sur les câbles), tiré par un câble tracteur en circuit fermé (comme dans les téléphériques) qui passe sur les poulies de renvoi placées sur les pylônes et est mû par un treuil moteur. Il existe enfin un troisième câble, dit de levage, qui aboutit à un palan comportant une ou plusieurs poulies et supporté par le chariot. Lorsque le chariot est arrêté, si le treuil déroule le câble de relevage, le palan (avec son crochet) descend. Si le treuil enroule le câble, le palan monte.

Ceretti - Tanfani

▲ ***Blondins radiaux implantés pour la construction de la digue d'Almendra (Espagne).***

Pour couvrir une zone plus étendue, on peut rendre mobiles les pylônes de support. En pratique, les installations comportent un pylône tournant sur lui-même et un autre mobile sur des rails décrivant un arc de cercle dont le centre est situé sur l'axe de rotation de l'autre pylône ; on peut aussi opter pour un autre système, dans lequel les deux pylônes sont mobiles sur des voies parallèles. Ces systèmes permettent de couvrir des surfaces respectivement en forme de secteur ou rectangulaires. Les treuils moteurs doivent être placés sur les pylônes. Les câbles porteurs sont de préférence de type clos. Les différents calculs sont identiques à ceux qui s'appliquent aux téléphériques.

Le champ d'applications des blondins est très étendu. On les emploie normalement lorsqu'il est nécessaire de franchir des vallées très profondes, par exemple dans les constructions de barrages de montagnes et de ponts.

Situation des transports de voyageurs par appareils à câbles en France

La France possédait, à la fin de l'année 1975, 2 748 appareils à câbles pour le transport de voyageurs, se répartissant de la manière suivante :

- 13 funiculaires,
- 50 téléphériques bicâbles à va-et-vient,
- 3 autres téléphériques bicâbles,
- 78 monocâbles débrayables,
- 266 monocâbles à pinces fixes,
- 1 894 remonte-pentes fixes,
- 444 remonte-pentes démontables,

ce qui place la France, en nombre total d'appareils, immédiatement derrière l'Autriche.

Il s'agit essentiellement, sauf pour les funiculaires, d'appareils installés en montagne et destinés à une clientèle de skieurs. La Savoie, suivie par la Haute-Savoie et l'Isère, vient largement en tête avec, à la même date, 610 appareils, et le massif alpin comprend plus des deux tiers du parc français.

La croissance du parc a été très forte à la fin des années 1960 et jusqu'en 1973 (plus de 10 % par an), depuis elle s'est ralentie et représente environ 5 % par an.

Le secrétariat d'État aux Transports a une mission générale de contrôle technique et commercial de ces appareils. Il a auprès de lui une commission consultative permanente, appelée *Commission des Téléphériques,* dont la création remonte à 1936 et qui regroupe les représentants de l'Administration, des constructeurs, des exploitants et des ingénieurs-conseils. Le contrôle local et toutes les décisions relatives à chaque appareil sont confiés aux préfets qui s'appuient sur les Directions départementales de l'Équipement. Ces dernières possèdent généralement, dans les départements de montagne, un petit service spécialisé. En outre, deux bureaux interdépartementaux, localisés à Annecy et à Grenoble, servent de bureaux d'études et d'assistance technique tant auprès des services départementaux qu'au profit du secrétariat d'État. Ils sont chargés en particulier d'étudier les propositions nouvelles des constructeurs.

La législation de base est celle des voies ferrées d'intérêt local (V. F. I. L.) complétée par des arrêtés techniques particuliers. Outre les études et les essais effectués avant la construction et l'ouverture au public de chaque appareil, tous les engins téléportés sont soumis à une visite annuelle détaillée.

La sécurité obtenue s'améliore en permanence si l'on tient compte de l'augmentation du parc et du trafic. Bien que l'on ne dispose pas encore de chiffres très précis, on peut estimer qu'elle est de l'ordre de celle obtenue sur les chemins de fer.

BIBLIOGRAPHIE

En italien.

MAROCCHI D., *Funicolari aeree,* Libreria Editrice Universitaria Levrotto e Bella, Torino, 1965. - NICOLARDI A., *Teleferiche,* Hoepli, Milano, 1950. - VAUDAGNA, *Teleferiche,* Hoepli, Milano, 1930. - ZIGNOLI V., *Funivie,* Viretto, Torino, 1938 ; *Trasporti meccanici,* Hoepli, Milano, 1953.

En français.

ANDRÉ P., *Entraînement des télésièges par moteurs asynchrones et variateurs à thyristors,* in *Revue générale d'électricité,* tome 85, n° 11, novembre 1976. - CRETIN F., nombreux articles dans *Génie civil,* LXXVIII à XC. - DAVIN M., *Sur la flexibilité d'un câble clos au passage d'un train de galets,* in *Mécanique - Électricité,* n° 144, mai 1961. - DE FRANCISCO L., *Le plus haut téléphérique du monde,* in *Génie civil,* 1er avril 1957. - GOIRAND P., *Transporteurs aériens sur câbles,* in *Techniques de l'ingénieur,* Paris, 1971. - LEHANNEUR L., *Conférences sur les téléphériques à voyageurs,* École nationale des ponts et chaussées, Paris, 1962 ; *le Calcul des suspensions de télésièges,* in *Construction,* tome XX, n° 9, septembre 1965. - N., *les Téléphériques de l'aiguille du Midi et de la Vallée Blanche,* in *Ski,* n° 149, Paris, juin 1964. - PAPAULT R., *l'Exécution de la digue de Grevelingen,* in *le Génie civil,* 1er septembre 1965 ; *Nouveau Système de téléphérique automoteur à l'embarcadère de Sidi Ifni,* in *le Génie civil,* mai 1968. - REBUFFEL A. et MONZIES P., *Transporteurs aériens sur câbles,* in *Techniques de l'ingénieur,* Paris, 1957. - SCHNEIGERT Z., *Téléphériques et Transporteurs aériens,* Eyrolles, Paris, 1964. - THURWANGER J.-J., *le Téléphérique du Mont-Dore,* in *Revue d'électricité et de mécanique,* n° 56, novembre-décembre 1937. - Nombreux articles de MM. LEHANNEUR, NICOLAS, REBUFFEL et CZITARY dans *Annales des Ponts et Chaussées,* de 1947 à 1959.

Revues.

International Berg-und Seilbahnrundschau, Vienne. - V. S. T. *Revue,* Berne. - *Aménagement et Montagne,* Grenoble. - *Économie et prospective de la montagne,* Voiron. - *Bulletin officiel du ministère de l'Équipement,* imprimerie des Journaux officiels, en particulier fascicule spécial n° 69-24 *bis.*

◀ *La ville étant par définition un lieu de concentration, les flux de matière qu'on y observe sont à la fois très denses et très intenses. Lorsque l'on passe à l'échelon de la métropole régionale (ici, Sao Paulo au Brésil), le degré d'artificialisation est total.*

LE SYSTÈME URBAIN

L'écosystème urbain

La ville est un organisme qui a besoin d'être alimenté en éléments naturels, en matières premières et en produits élaborés. Son fonctionnement donne lieu à des rejets gazeux, liquides et solides. Enfin, la ville étant par définition un lieu de concentration, les flux qu'on y observe sont à la fois très denses et très intenses.

L'écosystème urbain résulte donc des interactions en un point donné de l'espace entre l'écosystème naturel et le système des activités humaines. Comment se caractérisent ces deux écosystèmes ?

Un écosystème naturel est un système ouvert qui utilise l'énergie solaire pour fabriquer sa matière première à partir de la photosynthèse. Cette énergie transformée est à la base de tous les échanges de matière qui entretiennent la vie du système par une circulation continue. Même dans les dégradations diverses qu'on y observe, le flux d'énergie n'est pas atteint ; ce sont les échanges de matière qui sont perturbés.

L'écosystème urbain est, comme tout autre, traversé par un flux d'énergie dont les sources sont plus complexes que celles des systèmes naturels. Ses échanges de matière sont également destinés à faire face à des dépenses de maintenance et de croissance, mais il recycle mal ses produits ; il a donc tendance à fonctionner à perte. Une évolution historique considérable le caractérise. L'homme, tout d'abord, participait à la vie d'écosystèmes naturels ; puis il se regroupa en unités de peuplement : villages, bourgs, villes moyennes, toujours incluses dans un environnement naturel et rural. L'écosystème urbain s'est ainsi artificialisé progressivement au cours des siècles, puis très brutalement au XX^e siècle. Ses facteurs physiques et biologiques sont maintenant très différents de ceux des écosystèmes environnants. Quant aux facteurs humains, ils ont rompu leurs relations de continuité avec ceux-ci. La ville est donc devenue étrangère à sa région. Et, lorsque l'on passe à l'échelon de la métropole régionale, le degré d'artificialisation est total. Un exemple de cette évolution est très significatif : celui de la consommation d'énergie par habitant.

Ramade (1974) estime que l'homme du Néolithique utilisait 10 000 kcal/jour, celui de la fin du Moyen Age 22 000, alors qu'actuellement sa consommation d'énergie atteindrait entre 200 et 300 000 kcal/jour selon le mode de calcul. En parallèle à cette énorme quantité, les postes de consommation se sont très diversifiés. La consommation de l'homme rural se concentrait sur trois secteurs principaux de 4 000 kcal chacun : chimique (métabolisme des aliments), thermique (combustion du bois de chauffage), mécanique (traction animale). Celle de l'homme technologique et urbanisé affecte la production et la distribution des biens de consommation, l'habitat, les loisirs, la circulation...

En définitive, c'est au niveau de leur balance import-export que l'on observe les différences les plus significatives entre l'écosystème naturel et l'écosystème urbain. Ce dernier se caractérise en effet par une consommation considérable d'énergie, sous toutes les formes possibles, et par une exploitation désordonnée, car opportuniste, des matières premières qu'il gaspille et qu'il ne recycle pas.

Les recherches sur l'écosystème urbain — en tant que tel — sont encore très rares. Deux études de cas ont cependant été réalisées par les professeurs Ricou, d'une part, et Denaeyer et Duvigneaud d'autre part, respectivement sur les villes de Grand-Quevilly et de Bruxelles. Pour illustrer les résultats de ses travaux, ce dernier a réalisé une coupe schématique d'ouest en est de l'agglomération bruxelloise et établi à partir de là :

▶ *Page 170, figure 2 : l'écosystème Bruxelles ; valeurs approximatives :*
— du bilan annuel d'énergie (énergie naturelle et énergie importée), en trillions de kilocalories (10^{12} kcal) ;
— du cycle du carbone : matières organiques importées ou exportées chaque année, en milliers de tonnes (10^3 t) ; on a ajouté le verre et le fer exportés sous forme de déchets ;
— des principales pollutions, en milliers de tonnes par an ;
— du bilan d'eau, naturelle et importée annuellement, en millions de tonnes (10^6 t) ;
— de la photosynthèse : 60 · 10^{12} kcal de lumière ; 0,4 · 10^{12} kcal de matière organique élaborée ; 104 000 tonnes de productivité nette primaire (PN_1), et 109 tonnes d'oxygène dégagé, pouvant constituer 1/3 de la quantité nécessaire aux hommes (d'après P. Duvigneaud).

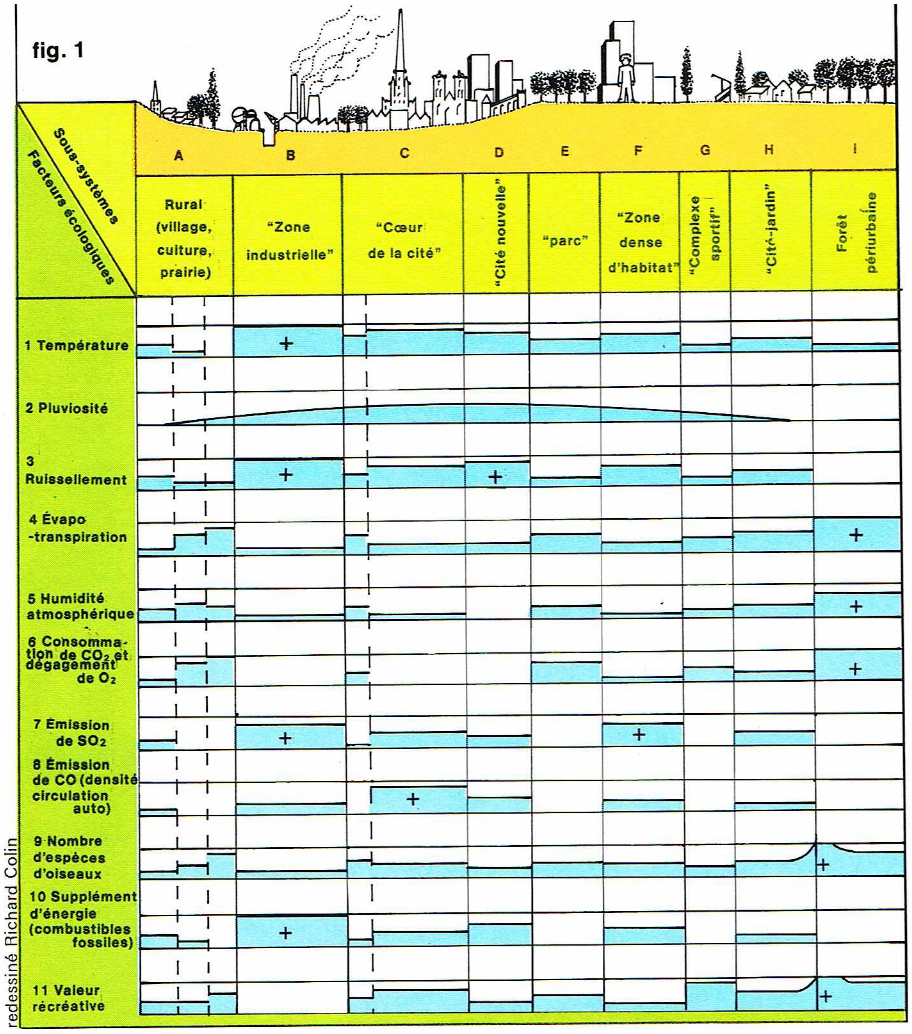

▲ *Figure 1 : l'écosystème urbain (coupe très schématique ouest-est de Bruxelles) ; les différences avec l'écosystème forêt sont nombreuses : structure en sous-systèmes, importation d'énergie fabriquée à partir de combustibles fossiles, importation d'aliments, importation d'eau, pollution, etc. Le degré de remplissage des rectangles correspond à l'intensité des facteurs écologiques considérés. Les croix correspondent à des sous-systèmes où les facteurs favorables ou nuisibles ont une intensité maximale (adapté d'après P. Duvigneaud,* la synthèse écologique, *Doin, 1974).*

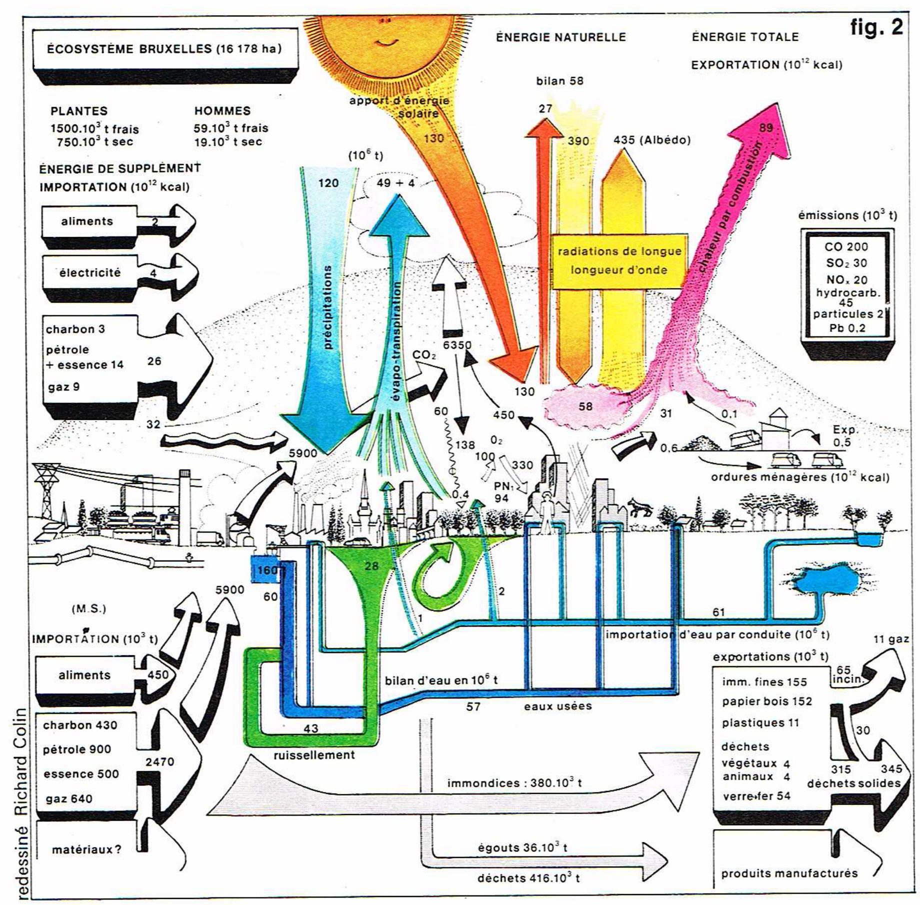

— une matrice de relations entre l'espace structuré en sous-systèmes et les facteurs écologiques les plus significatifs (*fig.* 1) ;

— un schéma des importations et des exportations de l'écosystème (*fig.* 2).

Certes, l'approche écosystémique ne constitue pas une méthode « miracle » apte à résoudre tous les problèmes urbains actuels, mais, selon Hervé Mathieu, son caractère logique à la fois global et diversifié peut se révéler d'une grande utilité pour la compréhension des villes et de leur complexité profonde et pour suggérer des actions plus cohérentes et plus efficaces de création et de gestion urbanistiques.

L'analyse de cet auteur suggère que le besoin de connaissance des systèmes urbains se fait nettement sentir au niveau des flux de matière, d'énergie et d'information qui traversent les villes, soutiennent leurs activités et participent à toutes leurs transformations.

Plutôt que d'écosystème, il propose alors, à l'instar de H. T. Odum, de parler de « métabolisme urbain », entendant par là l'ensemble des activités urbaines d'absorption (anabolisme), de transformation et de rejet (catabolisme) de matière, d'énergie et d'information. La description du métabolisme urbain est donc celle des très nombreux flux qui relient les multiples sous-systèmes, unités hiérarchisées d'ordres et de niveaux différents constituant la ville, ainsi que des mécanismes de transformation interne à ces unités (*fig.* 3).

On se rend compte immédiatement qu'il est pratiquement impossible de réaliser une telle description exhaustive, tant la complexité structurelle et fonctionnelle du système global — la ville — est grande.

Les urbanistes se sont cependant toujours vivement attachés à essayer de comprendre cette complexité par une analyse de plus en plus approfondie. Mais, paradoxalement, cela a souvent eu pour résultat des solutions exagérément simplistes, amenant à un appauvrissement de la structure urbaine, par exemple par certains types de rouages. De même, un fonctionnalisme trop étroit s'est souvent traduit par un surdimensionnement ou une multiplication inutile des réseaux ou des équipements, entraînant un important gaspillage de l'espace et des ressources. Ainsi la réalisation de galeries techniques, le rapprochement et l'association d'une piscine et d'une patinoire ou d'une usine d'incinération des déchets et d'une centrale de chauffage urbain sont encore exceptionnels.

Hervé Mathieu fait remarquer également que cette complexité est accrue par le fait que les flux évoqués (matières, énergie, information, personnes...) ne sont pas indépendants les uns des autres : les flux matériels ont souvent une dimension énergétique et informationnelle, l'énergie requiert un support matériel, l'information un support énergétique et/ou matériel, etc.

Il faut tenir compte également du fait qu'il n'est pas possible d'enfermer l'écosystème urbain dans des limites définies :

— les flux énergétiques et matériels doivent être considérés depuis leur lieu de production qui peut être extrêmement éloigné de la ville, jusqu'au lieu de rejet dans le milieu périurbain sous une forme dégradée ;

— de nombreux éléments du système urbain ne sont pas localisés à l'intérieur de l'entité spatiale « ville » elle-même.

Tout cela conduit à adopter, comme le fait J. de Rosnay, une vision très globale, macroscopique, de l'écosystème urbain qui doit être davantage considéré comme un niveau d'organisation sociale — associé à son support spatial multidimensionnel — que comme une aire géographique étroitement délimitée.

De l'observation de la situation des villes et des récentes voies de recherche, il se dégage clairement que les principaux problèmes métaboliques que doivent affronter les agglomérations — et en particulier les grandes métropoles — sont à l'heure actuelle : les consommations d'eau, d'espace et d'énergie d'une part, la production des déchets (solides, liquides, gazeux et thermiques) d'autre part.

A côté des moyens d'action sectoriels — qui sont loin d'être négligeables —, c'est par une approche globale de ces problèmes que les autorités locales et les planificateurs urbains peuvent accéder à une meilleure gestion

des flux. Par une plus grande association des préoccupations écologiques aux préoccupations techniques, sociales et économiques, il s'agit de promouvoir des techniques de récupération et de recyclage, une utilisation « en cascade » des diverses ressources et produits (par les chaînes énergétiques, notamment, et une conception intégrée des infrastructures et des équipements urbains).

D'une façon générale, tout le capillaire des réseaux qui supportent les flux à l'intérieur de la ville doit être, le plus possible, regroupé et organisé de façon intégrée : galeries techniques, couloirs énergétiques, meilleure utilisation commune des infrastructures de transport des personnes et des marchandises, etc.

En définitive, Hervé Mathieu conclut que les grands équipements métaboliques doivent être adaptés aux conditions et aux contraintes écologiques et socio-économiques locales. Leurs qualités principales seraient, pourrait-on dire, d'être « discrets et efficaces ». Si, comme c'est malheureusement le cas, on ne peut observer dans de nombreuses villes ni l'une ni l'autre de ces qualités, c'est sans doute en partie parce que l'on n'a pas adopté assez tôt une vision globale et à long terme — « écosystémique » — de ces problèmes fondamentaux.

Les consommations de la ville

Le schéma de la *figure* 4 montre la complexité des flux entrées-sorties des matières et — dans une moindre mesure — d'énergie auxquels le fonctionnement d'une ville donne lieu. En fait, les consommations de la ville ne sont encore connues que d'une manière très approximative. Elles ont une double origine :

— La consommation finale des agents économiques de la ville : ménages, entreprises et administrations ; y compris donc l'utilisation des produits nécessaires à l'entretien et au développement de la ville, par exemple pour la construction et l'aménagement des équipements collectifs et des infrastructures.

— La consommation intermédiaire des établissements industriels liée à leur cycle de production.

Les produits consommés seront regroupés en grandes catégories, car il est parfois difficile de répartir les consommations entre les divers utilisateurs.

L'eau

L'eau est la marchandise qui représente — de très loin — le plus fort tonnage distribué dans une ville. Elle est utilisée par les individus (emplois domestiques de cuisine, nettoyage ou hygiène), par les collectivités (notamment pour le nettoiement des rues) et par les industriels.

Pour survivre, il suffit à l'homme d'absorber trois litres d'eau par jour, et avec 40 litres il peut vivre dans des conditions de confort très acceptables. Or, ce sont 300 à 400 litres qu'il faut distribuer par habitant et par jour dans les grandes villes européennes, 25 à 30 % de cette quantité étant destinés à la consommation industrielle. A Marseille, ce chiffre est de 1 000 l/hab/j, et, dans certaines villes des États-Unis, il peut atteindre 2 000 l/hab/j.

Dans une agglomération de type métropole régionale française, ce volume moyen de 400 l/hab/j, nécessaire pour satisfaire la demande, se répartit approximativement comme suit :

- utilisation domestique (particuliers) : 100 l/hab/j
- utilisation publique (services municipaux) : 70 l/hab/j
- utilisation collective et industrielle (grands établissements) : 140 l/hab/j
- pertes diverses sur les réseaux : 90 l/hab/j

L'unité choisie ici (l/hab/j) pour exprimer ces besoins est assez parlante, mais elle est très imparfaite, car les consommations sont sujettes à de grandes variations en fonction des régions (dans le Midi de la France, on observe souvent des consommations doubles de celles de la Région parisienne), de la saison et du type d'urbanisation : les consommations sont plus importantes dans les zones d'habitat individuel, surtout en raison de l'existence de nombreux jardins particuliers.

En pratique, lorsque l'on établit un projet d'alimentation en eau d'une ville, l'évaluation des besoins se fait de façon détaillée en se fondant sur un certain nombre de

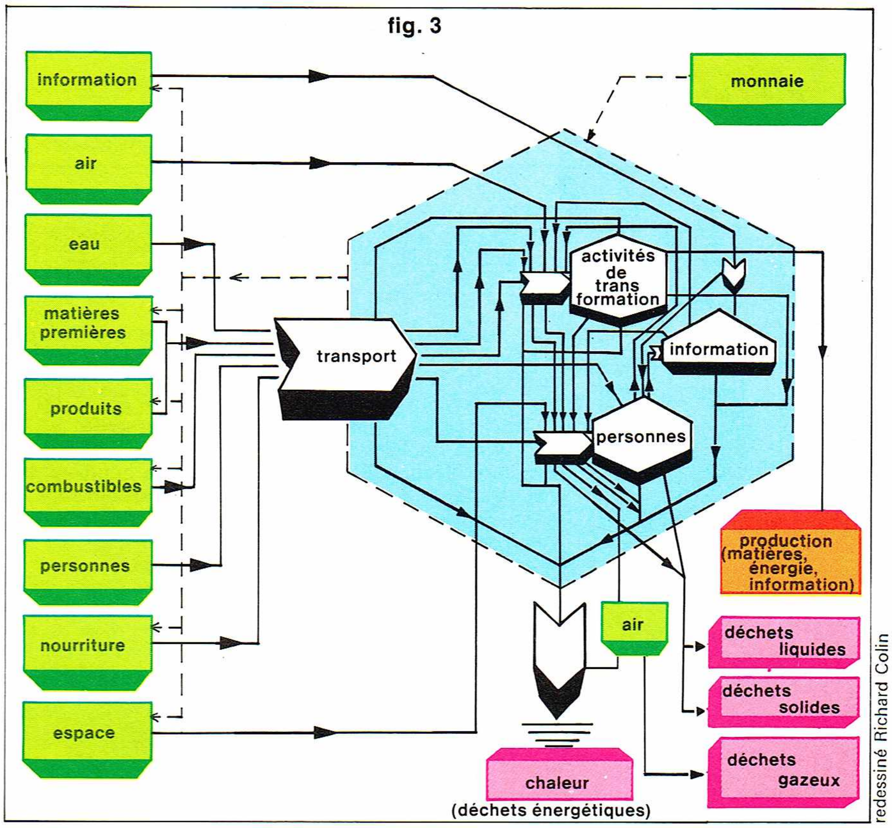

▲ *Figure 3 : modèle fonctionnel du métabolisme urbain (d'après H. Mathieu, Annales 1975 du Centre de recherche d'urbanisme, repris de H. T. Odum, Relations of Energy and Complexity in Planning, Architectural Design, nº 10, 1972).*

▼ *Figure 4 : entrées et sorties de matières d'une ville.*

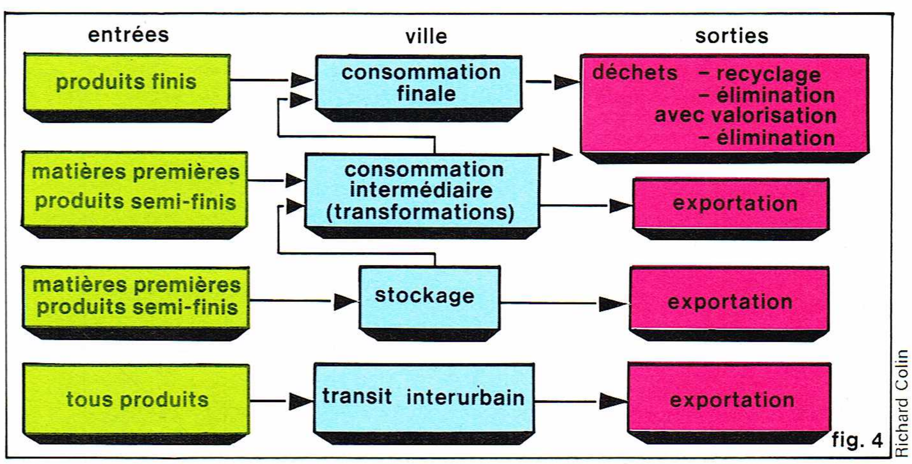

normes, éventuellement corrigées après observation des habitudes régionales :

- consommations domestiques : 100 à 120 l/hab/j
- consommations publiques :
  - — lavage caniveaux : 25 l/m/j
  - — lavage marchés : 5 l/m²
  - — urinoirs publics : 500 l/poste/j
  - — arrosage jardins : 3 à 10 l/m²/j
- consommations collectives et individuelles :
  - — écoles : 100 l/élève/j
  - — hôpitaux : 500 l/lit/j
  - — abattoirs : 500 l/tête/j
  - — usines : à fixer après enquête

On tient compte des pertes et gaspillages (majoration forfaitaire de 30 %), des réserves d'incendie et des réserves d'amortissement des pointes quotidiennes d'utilisation.

▶ *Figure 5 : consommation d'eau en fonction de la taille des villes (d'après H. Mathieu,* l'Eau et les Déchets urbains, *Écologie urbaine, Centre de recherche d'urbanisme).*

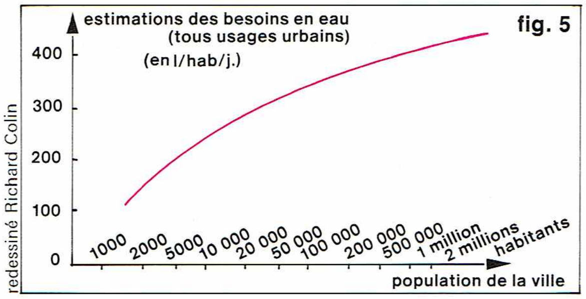

redessiné Richard Colin

La consommation moyenne journalière par habitant croît avec la taille des villes, comme le montre le graphique de la *figure* 5 établi, d'après des observations empiriques, par Hervé Mathieu.

Cette courbe représente la situation présente (1970) en Europe occidentale, mais elle aura vite perdu son caractère d'actualité, car on constate une augmentation très rapide de la consommation globale d'eau dans les villes (environ 3 % par an), augmentation qui peut s'expliquer par :

— l'augmentation de la taille des villes,

— l'accroissement du niveau de vie (installations sanitaires modernes, machines à laver le linge et la vaisselle...),

— le développement industriel.

Mais il faut noter aussi que trois facteurs peuvent limiter cette croissance :

— les améliorations techniques apportées sur les réseaux pour réduire les fuites et les pertes à tous les niveaux ;

— le développement du recyclage, particulièrement dans l'industrie ;

— l'action sur la tarification entraînant une diminution des gaspillages. Dans les villes qui ne sont pas équipées en compteurs individuels, la consommation est deux à trois fois plus élevée que dans celles qui en sont pourvues.

Les matériaux de construction

Le développement et l'entretien des villes nécessitent le transport et la mise en place de quantités importantes de matériaux de construction, c'est-à-dire essentiellement les sables, graviers, produits bitumeux et bétons utilisés pour la voirie et les bâtiments.

La consommation de ces matériaux varie fortement selon les villes : de 2 à 5 tonnes par an et par habitant. Dans la région de New York par exemple, cette consommation est d'environ 4 t/hab/an.

Les marchandises de production industrielle

Les entreprises industrielles engendrent des flux de marchandises considérables. Ces marchandises peuvent être destinées à la consommation finale. Elles sont alors distribuées sous forme de produits finis aux centres de stockage et de consommation de l'agglomération considérée ou de toute autre agglomération. Elles peuvent aussi servir à la consommation intermédiaire et sont alors distribuées sous forme de produits semi-finis ou de matières premières.

. Alors que les flux engendrés par la consommation des ménages sont assez voisins d'une ville à l'autre, il n'en est pas de même pour ceux provenant des activités de production. Une enquête menée par la SODETEG a montré que l'agglomération de Metz-Thionville (B) consomme environ 100 t/hab/an de marchandises pour la production industrielle, alors que cette même consommation est seulement de 10 t/hab/an pour Aix-en-Provence (A). Plus précisément, le poids des marchandises reçues et expédiées par an par les établissements industriels de ces 2 agglomérations, ramené à une population de 100 000 habitants, s'établit selon le tableau suivant :

Produits	A	B
Pétrole - mines - métallurgie	13 000	3 763 000
Constructions mécaniques	10 000	57 000
Transformation des métaux	10 000	58 000
Bâtiments - Travaux publics	740 000	5 586 000
Chimie - aliments - textiles	145 000	199 000
Habillement	500	400
Manufactures diverses	5 300	9 500
TOTAL ARRONDI	924 000	9 673 000

(valeurs en tonnes/an pour 1974)

On voit que l'immense majorité du tonnage est liée aux industries extractives et au secteur bâtiment-travaux publics : 78 % du tonnage à Aix-en-Provence et 97 % à Metz-Thionville.

La partie la plus importante de ces flux a pour destinataires de grands établissements industriels raccordés au réseau ferroviaire ou aux voies d'eau. Cela est particulièrement vrai pour les produits pondéraux transportés en vrac, qui, par exemple pour l'agglomération de Metz-Thionville, représentent 50 % du tonnage reçu et expédié.

Les produits de consommation courante

Les produits consommés par les ménages pour un usage domestique sont essentiellement : les produits alimentaires, les livres et la papeterie, les meubles et les appareils ménagers. A titre d'indication, la consommation annuelle des produits alimentaires est, en France, de 820 kg par habitant répartis de la manière suivante :

— boissons : 230 kg
— légumes et crémerie : 350 kg
— épicerie sèche : 70 kg
— viandes et poissons : 70 kg
— pain et pâtisserie : 100 kg

Les meubles, appareils ménagers et produits d'entretien représentent, eux, une consommation moyenne de 100 kg/hab/an. Enfin, pour les livres, journaux, fleurs et jouets, la consommation annuelle est comprise actuellement entre 150 et 200 kg/hab/an mais devrait connaître une augmentation sensible dans les années à venir en raison de l'augmentation du niveau de vie de la population.

Les combustibles et les carburants

On peut répartir les besoins des villes en deux catégories. D'une part, les combustibles nécessaires au chauffage des locaux d'habitation et à l'eau chaude sanitaire, c'est-à-dire le charbon et le fuel domestique ; d'autre part, les carburants nécessaires à la propulsion des voitures et des camions.

▼ *A gauche : le développement et l'entretien des villes nécessitent le transport et le stockage (ici, des silos à sable) de grandes quantités de matériaux de construction ; il faut compter, selon les villes, de 2 à 5 tonnes par an et par habitant. A droite : en France, la consommation annuelle de produits alimentaires est d'environ 820 kg par habitant (ici, le marché de la rue Mouffetard à Paris).*

D. Bouquignaud - TOP

Fred Mayer - Magnum

Là encore, l'enquête de la SODETEG a révélé des variations considérables de consommation d'une ville à l'autre, hors usages industriels, en fonction notamment de l'activité économique et des conditions climatiques des villes. C'est ainsi qu'à Aix-en-Provence, le tonnage de fuel et de charbon vendu par les détaillants est de 240 kg/hab, alors qu'il s'élève à 420 kg/hab à Metz-Thionville, et à 900 kg/hab à Paris.

A cela, il faut ajouter les besoins des utilisateurs industriels qui sont souvent très importants. C'est ainsi que, dans la région de New York, la consommation de combustibles et de carburants — toutes catégories d'utilisateurs confondues — atteint une valeur totale de 7 t/hab/an.

Dans la Région parisienne, la consommation des produits pétroliers seuls atteint 1,5 t/hab/an, dont au moins 70 % sont utilisés par l'industrie.

Enfin, en ce qui concerne l'essence et le gas-oil, la consommation moyenne française est de 300 kg/hab/an, et de 400 kg/hab/an en Région parisienne.

La consommation d'énergie dans les villes

Après avoir évoqué les consommations de combustibles et de carburants solides ou liquides, nous allons maintenant aborder, d'une manière plus globale, la consommation de l'énergie sous toutes ses formes. Les éléments de cette évaluation, établie par Philippe Rochefort, sont donnés en TEC (tonnes équivalent charbon). On sait qu'une tonne d'hydrocarbure vaut environ 1,6 TEC et que 1 000 kWh valent 0,4 TEC.

Les comparaisons internationales font apparaître qu'il n'y a pas de relation simple entre la consommation d'énergie et le PNB (produit national brut). Certes, il existe une liaison, mais les disparités sont grandes d'un pays à l'autre (et d'une région à l'autre, en France). Cela tient davantage aux étapes du développement économique et aux structures de consommation correspondantes.

A titre indicatif, on peut mentionner que la consommation par habitant aux États-Unis est pratiquement dans un rapport de 1 à 4 avec la France pour l'électricité et pour la consommation totale d'énergie.

La relation entre la consommation d'électricité et le taux d'urbanisation est plus nette qu'avec le revenu : la concentration urbaine, en elle-même, entraîne une forte consommation d'électricité (ce qui n'est pas le cas pour le fuel domestique, peut-être mieux adapté à un habitat dispersé).

Le *tableau* I est une estimation des consommations par type d'énergie et par secteur d'utilisation, ramenées à un total de 100 %, qui correspond, pour la France, à 223 millions de TEC en 1970. Compte tenu des différences entre les diverses sources consultées par Ph. Rochefort et des variations possibles sur les normes de correction en TEC, il s'agit seulement d'ordres de grandeur. A titre indicatif, on trouvera également ci-après une estimation du budget-énergie d'un ménage motorisé exprimée en TEC/an :

Transports urbains voiture	0,17
Transports en commun	0,04
Éclairage	0,18
Appareils ménagers - T.V.	0,35
Cuisine + divers	0,08
Eau chaude	0,35
Chauffage électrique	2,20
	3,37
Éclairage public	0,18
Autres services publics	0,60
Commerces et bureaux	1,20
	1,98
Transports (non urbains)	2,70
Imputations des dépenses industrielles	6,50
TOTAL	14,55

Tableau I
Répartition (en %) de la consommation d'énergie en France en 1970

Consommateurs \ Énergies	Charbon	Produits pétroliers	Gaz	Électricité	Total
Valeurs globales					
Ménages	4	10-13	2-3	3,5-4,5	19,5-24,5
Tertiaire	0,5	5-7	0,5-1	2,5-3	8,5-11,5
Transport	0,5	18		1,5	20
Industrie	9-11	18	4	13-16	44-49
Total	14-16	51-56	6,5-8	20,5-25	100
Décomposition approchée					
Ménages :					
Chauffage	3	8-11	1-2	0,5	12,5-16,5
Chauffe-eau	0,5	1,5	0,5	0,5-1	3,5
Éclairage				0,5-1	1
Cuisine	0,5	0,5	0,5		1,5
Divers				2	2
Tertiaire :					
Commerces et bureaux	0,5	5-7	0,5-1	2-2,5	8-11
Éclairage + divers				0,5	0,5
Transport :					
S.N.C.F.	} 0,5	0,5		1	2
Autres		17,5		0,5	18
Industrie :					
Sidérurgie	7-8	3	1	2	13-14
Autres	2-3	13	3	11-14	29-33
Agriculture		2			2

▲ ***Tableau I : répartition (en %) de la consommation d'énergie en France en 1970 (d'après Ph. Rochefort,* la Ville et l'Énergie, *les cahiers de la SCET, nº 1, 1975).***

E. Hartmann - Magnum

◀ ***La concentration urbaine entraîne une forte consommation d'électricité, et le rapport de la consommation est de 1 à 4 entre la France et les États-Unis (ici, une vue de New York, la nuit).***

Les réseaux urbains

De même que le corps humain est irrigué par les vaisseaux de son système sanguin (artères, veines et veinules, par ordre d'importance décroissante), la ville est desservie par un ensemble de réseaux très dense, très complexe et, lui aussi, bien hiérarchisé.

Ces réseaux sont très souvent liés à la voirie, si bien que la conception et la réalisation des projets d'infrastructures font appel aux spécialistes en « voirie et réseaux divers » (V. R. D.).

Le premier maillon de cette chaîne est constitué par les réseaux primaires qui ont comme fonction d'alimenter la ville et ses quartiers les plus importants, notamment les zones d'activités. Les réseaux secondaires correspondent à la distribution interne d'un quartier ou d'une zone. Enfin les réseaux tertiaires sont constitués des ramifications extrêmes permettant de desservir les utilisateurs individuels ou collectifs.

Une étude très approfondie sur les réseaux visitables a été menée en 1976 pour le compte du secrétariat du Groupe central des villes nouvelles et du Plan Construction essentiellement par MM. Arsac, architecte, et Navarro, ingénieur au BETURE. C'est à partir de cette étude que nous avons réalisé la synthèse qui suit sur les réseaux urbains. En raison de la grande diversité des

▶ *Figure 6 : organisation des réseaux d'eau sous pression (d'après* Réseaux visitables, *août 1976, étude établie pour le Plan Construction par des filiales de la Caisse des dépôts et A. Arsac, architecte, et J. J. Navarro, ingénieur).*

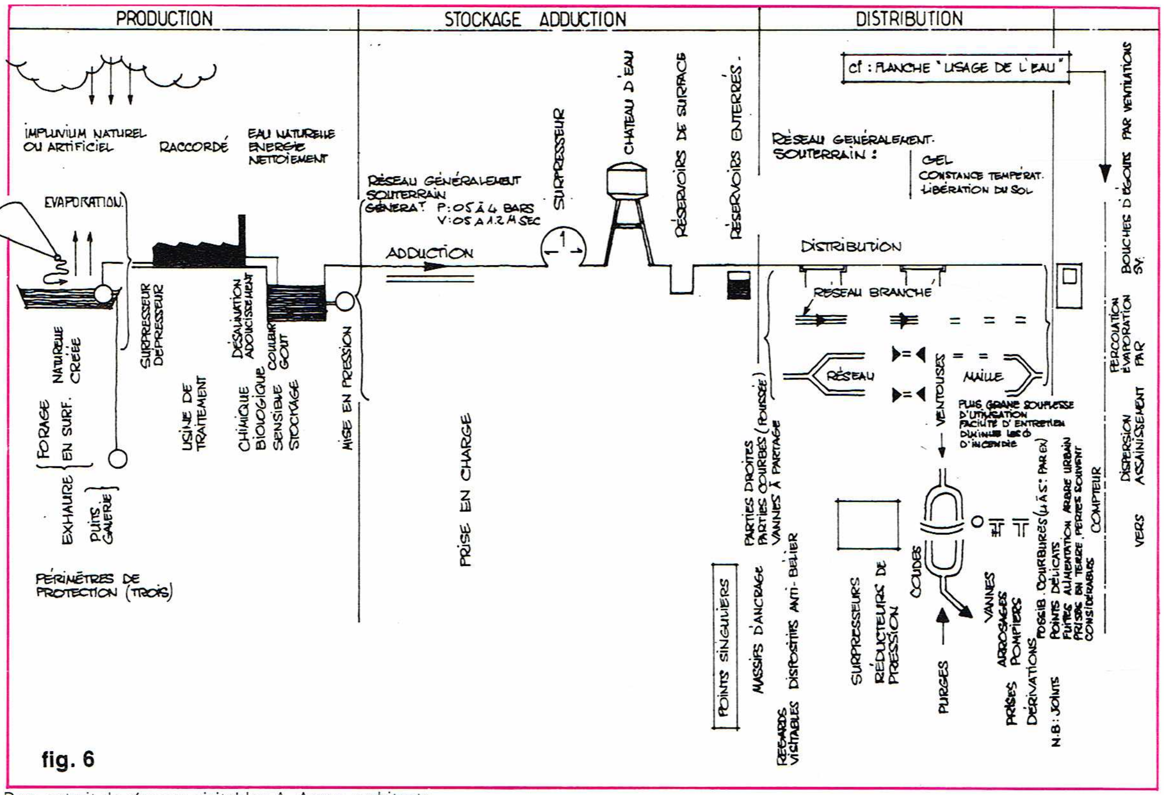

fig. 6

Doc. extrait de réseaux visitables, A. Arsac, architecte

réseaux urbains, nous limiterons notre analyse aux réseaux les plus importants (en dehors des réseaux de transport).

Réseaux de distribution d'eau

Définition

Ce sont les installations situées en aval des dispositifs d'exhaure, de stockage ou de traitement. Les différents types de réseaux d'eaux correspondent aux utilisations suivantes :

— L'eau potable à usage domestique, représentant environ 10 % de la consommation totale.

— L'eau non potable ou brute pour les usages industriels, l'arrosage et le lavage, la défense contre l'incendie, les bassins et fontaines.

— L'eau d'évacuation vers les ruisseaux, rivières et fleuves.

— L'eau « irrigation ».

— L'eau « navigation » (cf. différents usages de l'eau pour les loisirs).

Caractéristiques et contraintes techniques

Les réseaux (*fig.* 6) craignent le gel et nécessitent, éventuellement, la protection d'une couverture minimale ou même d'un calorifugeage. Ils sont généralement sous pression et étanches, ce qui les expose aux coups de bélier et à la poussée aux coudes, et présentent un certain nombre de point singuliers : ventouses, purges aux points hauts et bas, sectionnements (vannes), réducteurs de pression. Ces appareillages doivent être accessibles et se trouvent généralement dans des chambres en maçonnerie. Il faut noter que les pressions minimales et maximales à respecter — en principe 0,5 et 5 bars — sont déterminées plus pour le fonctionnement et la non-détérioration du matériel des usagers que pour le réseau lui-même. Les vitesses d'écoulement minimal (pour éviter la formation de dépôts, l'entartrage, etc.) et maximal (pour éviter une dégradation du réseau essentiellement aux joints et autres points singuliers) sont généralement comprises entre 0,5 et 1,2 m/s.

Ces réseaux peuvent être maillés — par opposition aux réseaux en branches — pour assurer une plus grande souplesse d'utilisation (secours et facilité d'entretien) et permettre, éventuellement, une diminution des diamètres des canalisations, essentiellement par rapport aux normes d'incendie. Enfin ces réseaux sont constitués de différents types de matériaux : ciment, plastique, fonte, acier... Cependant les tuyaux métalliques posent des problèmes de corrosion interne et externe.

▼ *Installation d'un réseau de distribution d'eau.*

Pont-à-Mousson

Réseaux d'assainissement : eaux pluviales et eaux usées

Définition

Ces réseaux sont constitués par l'ensemble des systèmes et équipements permettant la collecte, le transfert, le traitement et le rejet des eaux de ruissellement et des eaux usées domestiques et industrielles.

Caractéristiques et contraintes techniques

Ces réseaux fonctionnent quasi exclusivement par gravitation. Dans ce cas, il faut respecter pour les canalisations une pente minimale pour assurer la vitesse nécessaire à l'autocurage ($V \geqslant 1$ m/s), et une pente maximale pour limiter a vitesse d'écoulement ($V \leqslant 4$ m/s). Enfin, il est nécessaire d'aménager des possibilités de visite pour l'entretien.

Les matériaux utilisés sont encore plus variés que précédemment. Les canalisations peuvent être en maçonnerie, amiante-ciment, béton, béton armé, grès, fonte salubre, plastiques... On y rencontre également de nombreux points singuliers : regards de visite, station de refoulement ou de relèvement, réservoir de chasse, bassin tampon, déversoir d'orage...

Réseaux du gaz

Définition

On distingue généralement entre :

— les réseaux de transport exploités en haute pression sous des pressions comprises entre 16 (éventuellement 25) et 67 bars ;

— les réseaux de distribution exploités en moyenne pression et classés en trois catégories :

MPA	1 bar
MPB	de 1 à 4 bars
MPC	de 4 à 16 (éventuellement 25) bars

Le gaz est transporté par canalisations acier de divers diamètres. Sur ces canalisations sont piqués les branchements individuels ou collectifs, qui desservent les usagers par l'intermédiaire de détendeur HP/BP. La distribution du gaz dans les immeubles est faite en basse pression.

Caractéristiques et contraintes techniques

Les réseaux — qui doivent être étanches — sont généralement soudés ; toutes les soudures doivent d'ailleurs être contrôlées par radiographie. Ils craignent la chaleur extérieure et doivent, par conséquent, être placés dans un milieu permettant de bons échanges thermiques. Les canalisations doivent être protégées intérieurement et extérieurement contre les corrosions chimiques. Enfin, ces canalisations sont divisées en tronçons qui doivent pouvoir être isolés par des robinets de sectionnement facilement accessibles.

Réseaux d'électricité

Définition

Il ne sera question ici que de l'électricité en courant alternatif. On distingue trois catégories de réseaux électriques :

— Le réseau de transport d'énergie haute tension aux tensions de 63 kV à 750 kV. Le maximum pour les réseaux souterrains est à l'heure actuelle de 380 kV.

— Le réseau de distribution d'énergie en moyenne tension. Les tensions couramment utilisées sont 15 et 20 kV (exceptionnellement 5,5 et 10 kV). Ce réseau permet de desservir les postes de transformation HT/BT de distribution publique ou d'abonnés moyenne tension, par exemple industriels.

— Le réseau de distribution d'énergie en basse tension, directement utilisable par les abonnés domestiques. La tension utilisée presque uniformément en France est celle de 220/380 volts (classe B 2), et l'on trouve de plus en plus rarement des installations en 127/200 volts (classe B 1).

Caractéristiques et contraintes techniques

L'énergie électrique est une énergie qui ne se stocke pas en grande quantité. Certaines installations, très peu nombreuses, utilisent cependant l'énergie produite pendant les heures creuses pour pomper de l'eau d'un niveau à un niveau plus élevé avec restitution d'électricité pendant les heures de pointe. Dans tous les cas, l'énergie électrique se transporte par câbles, aériens ou souterrains. Les câbles s'échauffent par effet Joule et supportent mal la chaleur. Il est donc nécessaire de les installer dans un milieu permettant de bons échanges thermiques.

Réseaux de télédistribution

Définition

Un réseau de télédistribution est, fondamentalement, un réseau de transmission de signaux de télévision à structure ramifiée dont les principaux éléments constitutifs sont :

— un complexe aérien (antennes) et une station centrale générale où sont traités les signaux;

— le réseau proprement dit constitué par du câble de type coaxial, des organes d'amplification et des organes de dérivation et de branchement.

Le point terminal de ce réseau doit être considéré comme étant la prise de télévision située dans chaque logement.

Il faut noter cependant que la terminologie n'est pas suffisamment précise et que le terme de télédistribution est actuellement utilisé à propos de systèmes de technicité et de possibilités très différentes, à savoir :

1 - La simple antenne communautaire à l'échelon de quelques centaines de logements dont la motivation essentielle réside dans la suppression des antennes sur les toits.

2 - Le réseau d'une capacité d'une quinzaine de programmes susceptibles de desservir une zone dans un rayon de l'ordre de 10 à 15 km.

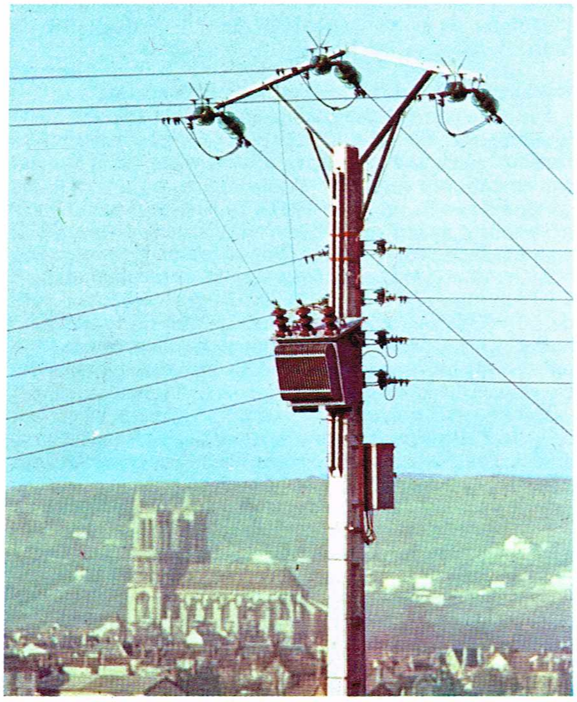

E.D.F. - Sodel - P. Vals

◀ *Dans tous les cas, l'énergie électrique se transporte par câbles souterrains ou aériens, comme dans ce réseau de distribution d'énergie en moyenne tension - basse tension.*

3 - Les systèmes beaucoup plus évolués, en cours de gestation, permettant un échange bilatéral entre les usagers et la station centrale.

Ces réseaux de la prochaine décennie ouvrent des perspectives considérables pour :

— le choix et la sélection des programmes par l'abonné avec facturation correspondante;

— l'accès à des programmes particuliers, à l'aide de code, et à des fichiers;

— le télé-enseignement;

— la télétransmission;

— les télémesures : relevé des compteurs à distance, etc.

Le terme de télédistribution ne devrait donc en fait s'appliquer qu'aux réseaux définis en 2 et en 3. Il est en effet possible de faire évoluer des réseaux de 2 en 3 progressivement et moyennant certaines précautions techniques, alors qu'il n'est pas envisageable de passer de 1 en 2, les techniques des réseaux s'apparentant plus exactement à celles du matériel grand public utilisé dans l'antenne collective.

Caractéristiques et contraintes techniques

La télédistribution nécessite d'avoir une continuité technique de l'ensemble du réseau, depuis l'antenne et la station centrale jusqu'à la prise chez l'usager. Cela implique de confier la réalisation à une même main-d'œuvre et une même entreprise. Les contraintes de voisinage des réseaux de télédistribution sont identiques à celles des réseaux téléphoniques. D'ailleurs, l'établissement de ces réseaux s'effectue dans l'infrastructure « génie civil » téléphonique, mais le téléphone et la télédistribution doivent être compartimentés : fourreaux spéciaux, adaptation des chambres téléphoniques, etc.

Enfin les matériels — organes passifs et actifs — doivent être facilement accessibles pour les réglages et les dépannages, la maintenance et l'entretien. Il est d'autant plus facile de réaliser ces opérations d'exploitation que les réseaux sont établis en ouvrage visitable, par exemple en galerie technique.

Réseaux du téléphone

Définition

Il s'agit des liaisons téléphoniques entre abonnés assurées par l'intermédiaire de centraux téléphoniques.

Le réseau du téléphone peut être réalisé :

— pour les liaisons entre centraux, par faisceau hertzien ou par le câble des lignes à grande distance;

— pour la desserte, par câble autoporté sur poteau (ou façade) ou par câble posé sur chemin de câble en galerie;

— pour les liaisons entre centraux pour la desserte ou le transport, par câble en pleine terre, câble sous fourreau P. V. C. ou ciment, câble posé en conduites multiples en ciment ou en P. V. C., enfin par câble posé en bordures techniques.

Dans les câbles urbains, on peut distinguer les câbles de transport de forte capacité et les câbles de distribution qui comportent généralement moins de 112 paires. La transition se fait à l'aide de sous-répartitions.

Caractéristiques et contraintes techniques

Le réseau téléphonique est constitué de paires téléphoniques, car il faut deux fils pour un rattachement au centre téléphonique. De plus, le nombre de paires varie de façon bien définie : 14, 28, 112, 224... Ce réseau craint les perturbations électromagnétiques, en particulier celles qui sont engendrées par le réseau électrique M. T. ou H. T., lorsque les réseaux téléphoniques et électriques cheminent en parallèle sur un long parcours. Dans le cas de lignes aériennes M. T. ou H. T., des mesures doivent être prises pour minimiser les effets de l'induction. Les câbles des lignes à grande distance comportent, en des emplacements précis, des points d'amplification, des répéteurs et des points de purpinisation. En cas de déplacement d'un de ces câbles, il faudra maintenir la distance entre deux points singuliers consécutifs.

Ces points singuliers sont très nombreux : central, autocommutateurs, sous-répartiteurs, concentrateur (foisonnement des prises), boîte de répartition, chambre de tirage, points de purpinisation et d'amplification, répéteur, translateur...

E. Berne - Fotogram

▲ *Éclairage public.*

Réseaux d'éclairage public

Définition

Ces réseaux remplissent de nombreuses fonctions :

— éclairage des piétons et de la circulation automobile ;

— éclairage des monuments et des édifices publics ;

— éclairage d'infrastructures et d'équipements divers : aéroports, gares routières, bâtiments industriels ;

— éclairage et balisage de lieux d'agrément : fontaines, jardins publics ;

— signalisation.

Les réseaux d'éclairage public sont de différents types :

— aérien (par caténaire) ou alimenté par câble mixte électricité distribution publique/éclairage ;

— en façade par câbles torsadés ;

— souterrain, en tranchée à 0,80 m du sol ou en galerie ;

— en caniveau technique, en particulier dans les bordures techniques de trottoir.

Ils sont commandés par des systèmes :

— manuel ;

— à horloge avec cadran à correction automatique ;

— à cellule photo-électrique temporisée ;

— groupant les deux matériels précédents ;

— pulsadis : code utilisant une fréquence spéciale se superposant à la fréquence du courant électrique. Ce système nécessite des filtres de blocage antiharmonique.

Caractéristiques techniques et contraintes

L'*alimentation* d'un réseau d'éclairage public peut être de deux types.

— Basse tension 380/220 V (exceptionnellement 220/127 V). Ce type de desserte limite le rayon d'action du réseau du fait de la chute de tension en ligne. Il multiplie donc les départs aux postes de transformation et nécessite de disposer des postes de transformation-distribution publique.

— Tension intermédiaire de 5 500 ou 3 200 V. Cette solution exige la construction d'un poste particulier d'éclairage public avec transformateurs principaux. Elle exige aussi la mise en place de transformateurs secondaires pour abaisser la tension de 15 ou 20 kV à 5 500 ou 3 200 V, tout au long du parcours, chaque transformateur alimentant en 220 V de 4 à 6 candélabres. Le rayon d'action de ce type de réseau est plus important que le précédent, mais il nécessite des mesures de sécurité renforcées.

Les *sources d'éclairage* diffèrent par la couleur, la valeur du flux lumineux comparé à la puissance (rapport lumens/watts), les coûts d'investissement, d'exploitation et d'entretien.

— Les lampes sont de nature très diverse : à filament ou à incandescence, à décharge dans un gaz (fonctionnement avec un appareillage auxiliaire, ballast, condensateur), à cycle d'iode, à iodure métallique, aux halogènes, à vapeur de mercure, à vapeur de sodium (haute et basse pression)...

— Les luminaires sont de trois types :

● fonctionnel, équipé d'un miroir aluminium ou verre, à répartition symétrique ou asymétrique (le choix entre les différentes sortes existantes se fait en fonction de la catégorie de la voie à éclairer) ;

● d'ambiance, pour l'éclairage des cheminements (en général 125 W sur un support de 3 ou 4 m) ou de frondaisons (par borne ou projecteur) ;

● par projecteurs, pour l'éclairage des stades, centres commerciaux, monuments publics.

Dans le choix des supports, trois facteurs peuvent être pris en compte :

— le matériau : bois, acier, aluminium, polyester, béton ;

— la forme : droit ou à crosse ;

— la hauteur : de 3 à 4 mètres, jusqu'à 40 mètres.

Réseaux de chauffage

Définition

Les réseaux de chauffage assurent le transport de la chaleur généralement par circulation d'eau chaude en circuit fermé entre un bâtiment producteur de cette chaleur (chaufferie) et les différentes sous-stations alimentant les bâtiments utilisateurs. La température maximale de l'eau peut être soit comprise entre 240 et 111 °C (chauffage haute pression), soit inférieure ou égale à 110 °C (chauffage basse pression).

Alimentation des chaufferies

Les trois systèmes les plus répandus pour l'alimentation des centrales sont les suivants :

— chaufferies au fuel avec stockage adjacent (la viabilité doit alors être prévue pour permettre la livraison du fuel par camions-citernes) ;

— chaufferies au fuel avec stockage séparé (il faut alors prévoir un réseau d'alimentation entre le stockage et la chaufferie) ;

— chaufferies au gaz séparées d'un autre bâtiment utilisateur de gaz (les installations comportent alors une tuyauterie de raccordement au réseau général Gaz de France).

Caractéristiques et contraintes techniques

Les réseaux de distribution sont constitués de deux tuyaux — un aller et un retour — en acier et calorifugés. Ils sont généralement placés en caniveau mais peuvent également être enterrés selon certains procédés, en général brevetés, qui consistent, le plus souvent, dans la mise en tranchée d'ensembles préfabriqués de tuyauteries calorifugées placées dans une enveloppe protectrice étanche. Ces réseaux présentent un encombrement en volume important : les dimensions des caniveaux vont de 50 × 30 cm à 200 × 100 cm. Ils doivent recevoir un calorifugeage épais, soigneux et possédant une bonne tenue dans le temps de manière à éviter des déperditions excessives de chaleur.

Il faut aussi prévoir :

— Une pente pour les tuyaux, pour permettre la vidange aux points bas qu'il faut raccorder à l'égout ou en eau perdue.

— Une purge d'air aux points hauts.

— L'installation d'une robinetterie pour le sectionnement aux points hauts et aux points bas, avec des ouvrages en maçonnerie permettant son fonctionnement.

— La libre dilatation des tuyauteries sous l'effet de la variation de température. Cette obligation implique, en particulier, de prendre les dispositions suivantes :

● respect d'une distance minimale entre la tuyauterie et les parois du caniveau,

● installation de lyres ou de compensateurs, ceux-ci devant être placés dans des chambres visitables.
● libre glissement des tuyauteries sur leur support,
● présence de points fixes avec un ancrage solide.

Réseaux d'ordures ménagères

Définition

On entend par réseaux d'ordures ménagères l'ensemble des installations permettant la réception des ordures et leur évacuation de la zone d'utilisation considérée soit en surface par volumes discontinus, soit par canalisation avec l'intermédiaire d'une veine fluide (air ou eau), soit enfin par wagonnets.

Les ordures ménagères sont définies administrativement par l'article II du cahier des charges type pour la collecte dans les villes de plus de 10 000 habitants. Cependant l'autorité municipale peut apporter des compléments à l'énumération du cahier des charges.

La *collecte publique* consiste en la reprise et au transport des ordures entre leur point de dépôt par les usagers et le centre de traitement par les services publics.

Par contre, les producteurs d'ordures ménagères doivent prendre en charge le stockage des ordures et son entretien sur leur lieu de production et leur transport jusqu'au point de reprise par les services publics : c'est la partie *privée* de la *collecte*.

Les deux *types de stockages* pour le transport en surface sont :

— le stockage permanent au moyen de poubelles classiques étanches ou de containers ;

— le stockage par emballage perdu : sacs en papier, en films plastiques, etc.

Caractéristiques et contraintes techniques

Les réseaux d'ordures ménagères doivent permettre d'éviter aux habitants toute gêne qui pourrait être due à une fermentation, à l'odeur, à la vue, et au bruit.

Le dimensionnement des locaux de stockage — situés au niveau le plus bas des immeubles — est conçu en fonction du type de stockage et de la fréquence de la reprise par les services publics.

Il faut enfin prévoir :

— l'entretien des locaux de stockage (eau de nettoiement, égout et ventilation) ;

— le cheminement entre les locaux de stockage et le point de reprise ;

— le cheminement pour la reprise par les bennes de collecte du service public.

Liaison entre les réseaux

Il est très facile de constater que ces réseaux ont ou peuvent avoir différentes liaisons entre eux — continues ou ponctuelles — en fonction de :

— leur emplacement : au sol ou en sous-sol, par exemple ;

— leur géométrie : réseaux linéaire ou maillé ;

— leur étendue : réseaux ponctuel ou spatial.

Le *tableau* II, réalisé dans le cadre de l'étude mentionnée précédemment sur les réseaux visitables, montre, par exemple, qu'en sous-sol, 6 réseaux présentent des liaisons continues : l'eau sous pression, les eaux usées, la climatisation, le gaz, l'électricité (réseaux courants forts et courants faibles), et d'autres des liaisons éventuelles, notamment le transport en site propre.

Réseaux visitables et galeries techniques

Le premier choix qui intervient dans la conception d'un réseau est le suivant : le réseau va-t-il être enterré, après réalisation d'une tranchée généralement séparée, ou réalisé au moyen de lignes aériennes, ou, au contraire, va-t-il être incorporé dans un ouvrage spécifique non seulement pour faciliter son exploitation mais aussi pour améliorer son intégration dans l'environnement. Ce choix devrait au moins ne pas se faire en fonction des seules considérations technico-économiques.

Il apparaît en effet clairement que le fonctionnement actuel du système V. R. D., véritable système d'équations, est l'un des facteurs importants de l'aggravation des problèmes d'environnement et de qualité de la vie. Ses excès et son autoritarisme entraînent des phénomènes de réactions — justifiées — de plus en plus forts et nombreux : comités et associations de sauvegarde contre

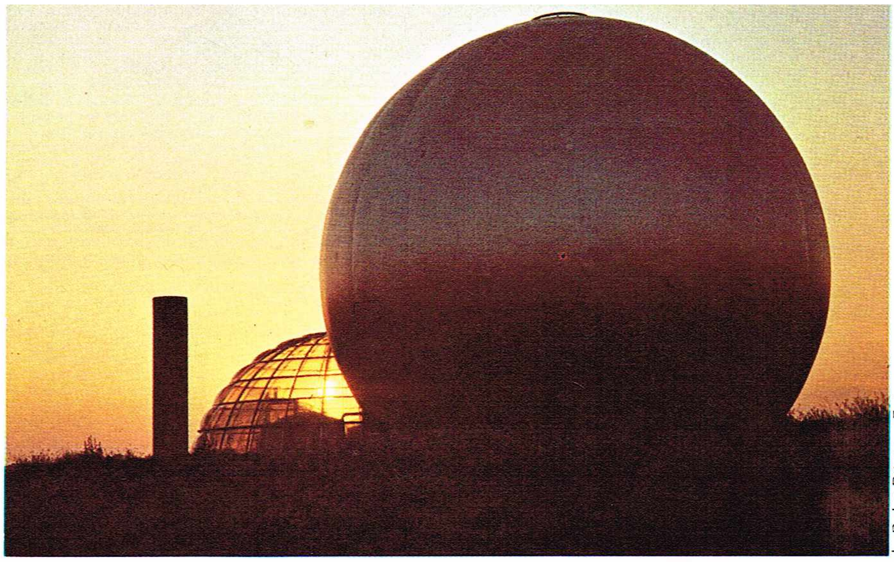

J.-P. Le Bihan - Fotogram

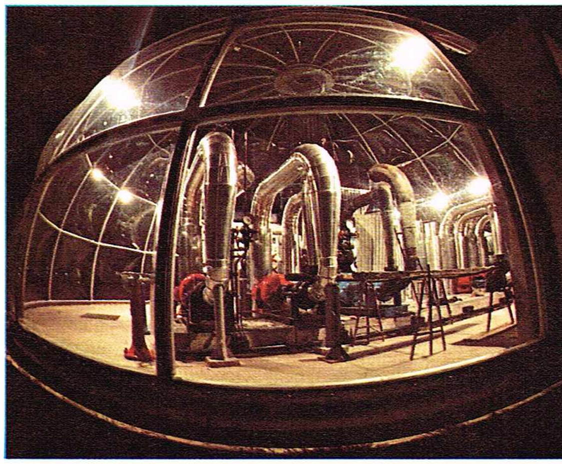

J.-P. Le Bihan - Fotogram

◄▲ *Aux villes nouvelles ou quartiers neufs sont souvent associés des réseaux de chauffage, comprenant, par exemple, une chaufferie au fuel avec un stockage séparé ; en haut, une vue extérieure de la chaufferie et du ballon de fuel de la ZUP de Meaux ; à gauche, la chaufferie.*
▼ *Tableau II : liaisons entre les réseaux urbains (d'après* Réseaux visitables, *août 1976, étude établie pour le Plan Construction par les filiales de la Caisse des dépôts et A. Arsac, architecte, et J. J. Navarro, ingénieur - Modèle de caniveau Soproci).*

Tableau II
Liaisons entre les réseaux urbains
(extrait de réseaux visitables, A. Arsac architecte, J.-J. Navarro ingénieur)

Liaisons continues ↔ / Liaisons ponctuelles ○	Source d'énergie	Atmosphère	Sol	Sous-sol	Transport - Site propre	Voirie	Parking	Cheminements	Plantations	Éclairage	Mobilier urbain	Eaux ordinaires	Eaux sous-pression	Eaux polluantes	Nettoiement - Ordures	Climatisation	Produits industriels	Combustibles liquides	Gaz domestique	Électricité courants forts	Électricité courants faibles	Ondes hertziennes	Odorat - Ouie - Vue	Réseau culturel
Source d'énergie	\	\○		\○	○	○						\○	\○	○	○		○	○	\○	○	○	\○		
Atmosphère	\↔	\			\○									\○										\○
Sol	\↔	\↔	\		\○																			
Sous-sol	\↔		↔	\	\○	\○	\○	\○		\○		\○												\○
Transport - Site propre		\↔	\↔	\↔	■	○	○	○		○	○		\○	\○	○			\○		\○	\○	\○		\○
Voirie			↔			■		\○					\○	○	○			○		○				
Parking			↔	\↔		↔	\	○			○		\○	○	○	\○		○		\○				
Cheminements			↔					\		\○		○			○					\○				○
Plantations		↔	↔			\↔	\↔	↔	\	\○	\○	○	○											
Éclairage			↔			\↔	\↔	\↔		\	○		\○							○	\○			
Mobilier urbain			↔			\↔	\↔	↔			\	\○	○	○	○					○	○			
Eaux ordinaires		↔	↔	\↔	\↔							\	○	\○		\○							○	
Eaux sous-pression				↔					\↔				■	\○		\○				\○	\○			
Eaux polluantes				↔										\	\○		\○		\○				\○	
Nettoiement - Ordures		↔	↔			↔			\↔						■								○	
Climatisation				↔												■		\○	\○	○	\○		○	
Produits industriels				\↔													\			○			○	
Combustibles liquides				\↔														\		\○	\○			
Gaz domestique				↔															■	\○	\○		\○	
Électricité courants forts				↔																■	○	○	\○	○
Électricité courants faibles				↔																	■	○	\○	○
Ondes hertziennes		↔																				\		○
Odorat - Ouie - Vue	↔	↔	↔			↔		↔	↔	↔	↔												\	
Réseau culturel			↔	\↔		\↔	↔	\↔		↔	↔									↔	↔	↔	↔	\

■ Maillage éventuel \ Liaison éventuelle ↔ Liaison continue ○ Liaison ponctuelle

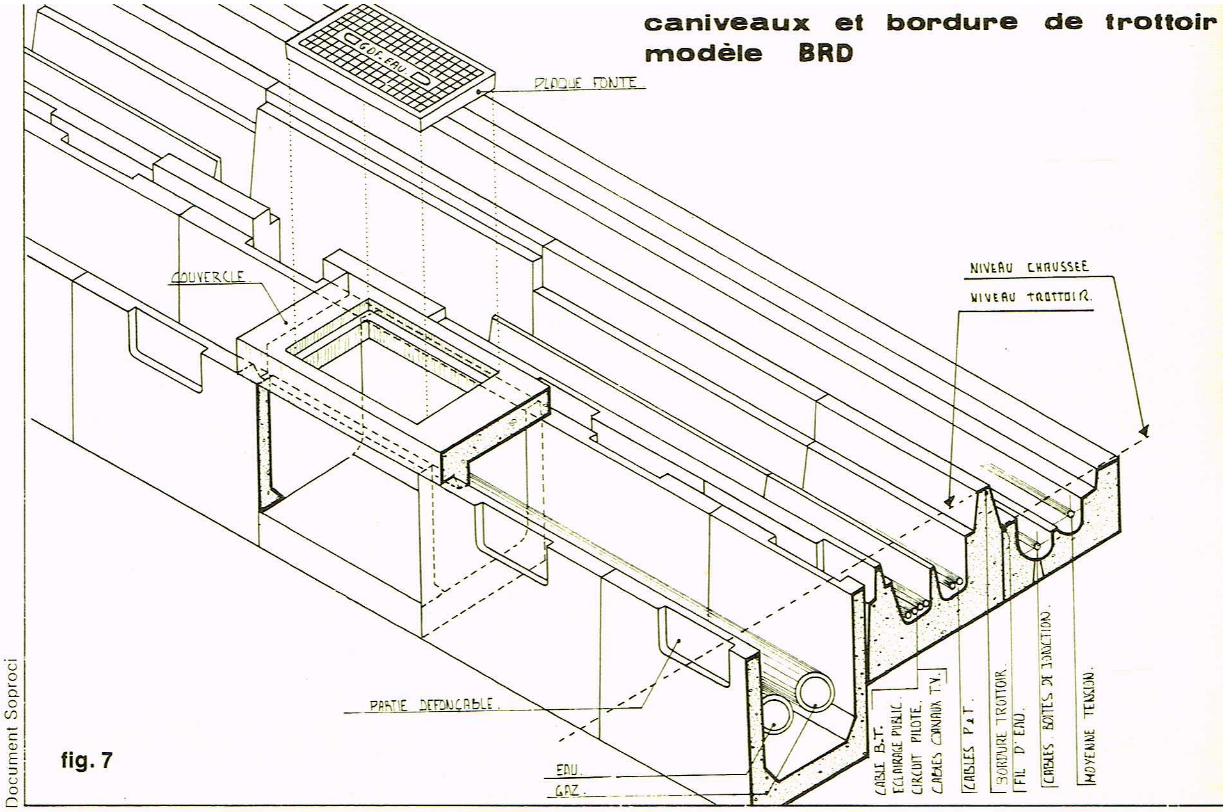

fig. 7

▶ *Figure 7 : un exemple de réseau visitable, les caniveaux et bordures de trottoir du modèle BRD Soproci marque déposée, brevetée français et étranger (d'après* Réseaux visitables, *août 1976, étude établie pour le Plan Construction par les filiales de la Caisse des dépôts et A. Arsac, architecte, et J. J. Navarro, ingénieur).*

Document Soproci

▼ *Figure 9 : coupe transversale du pont de l'Alma (Paris) ; cet ouvrage d'art est conçu pour assurer la continuité des réseaux urbains (d'après* Réseaux visitables, *août 1976, étude établie pour le Plan Construction par les filiales de la Caisse des dépôts et A. Arsac, architecte, et J. J. Navarro, ingénieur).*

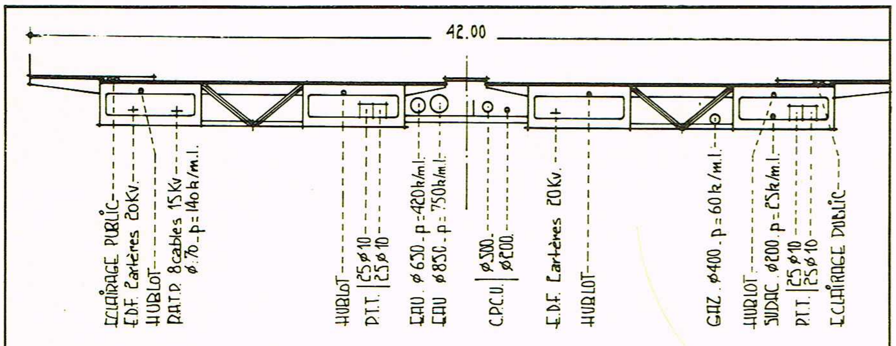

fig. 9

fig. 8

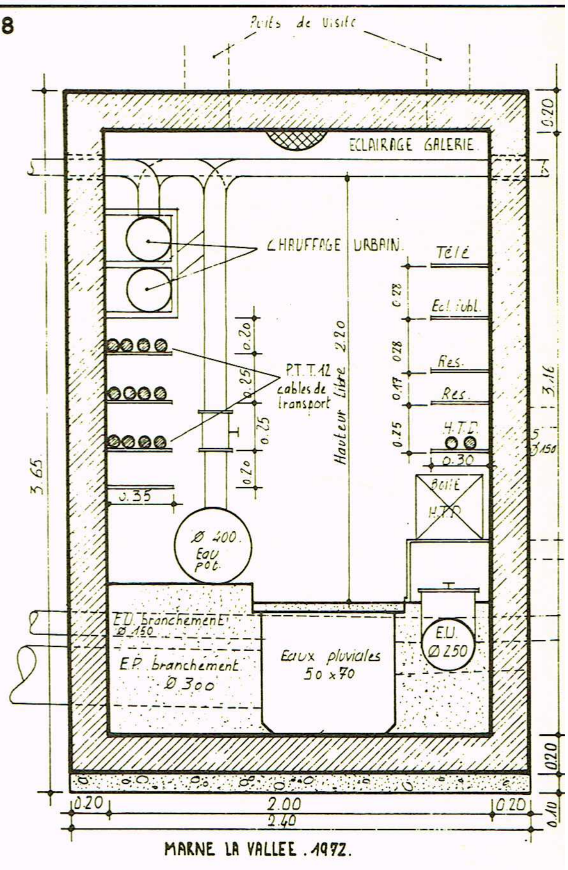

Doc. extrait de réseaux visitables

▶ *Figure 8 : un autre exemple de réseau visitable, la galerie technique de distribution (ici, à Marne-la-Vallée, en 1972) permet le passage d'un homme debout (d'après* Réseaux visitables, *août 1976, étude établie pour le Plan Construction par les filiales de la Caisse des dépôts et A. Arsac, architecte et J. J. Navarro, ingénieur).*

des tracés ou implantations de réseaux, volonté de protection de sites classés ou non, etc. Par « réseaux visitables », nous entendons les différents systèmes facilitant l'exploitation, l'entretien, la réparation et le renforcement de l'un des réseaux avec le minimum de dégradation ou de gêne apporté aux autres réseaux, à l'environnement (voirie, trottoirs, plantations, espaces libres...), aux gestionnaires dans leurs interventions, ainsi qu'au public dans l'exercice de ses différentes activités.

Dans les *figures* 7, 8 et 9, on trouvera quelques exemples de « réseaux visitables ». Elles montrent que :

— La « galerie technique » permettant le passage d'un homme debout est loin d'être la seule possibilité.

— Les ouvrages d'art urbains peuvent être conçus pour assurer la continuité du système.

— On peut saisir un certain nombre d'opportunités pour réaliser dès maintenant certaines opérations d'aménagement dans lesquelles les réseaux peuvent être rendus visitables pratiquement sans autre investissement que celui qui peut et devrait être fait au niveau des études : ouvrages d'art, voirie rapide urbaine ou sous-sols et vides sanitaires des immeubles.

Galeries techniques

Il est inutile de s'étendre sur les améliorations apportées par les réseaux visitables pour réduire les dommages causés à la voirie et les nuisances occasionnées par les chantiers ouverts sur la voie publique. Il convient cependant de remarquer que les galeries techniques — encore appelées galeries communes — ou multifluides — non seulement réduisent mais annulent pratiquement tous les inconvénients des réseaux traditionnels.

Aspects techniques de la pose de réseaux en galerie technique

Selon Jacques Angibaud (Communauté urbaine de Lyon), à condition de respecter certaines précautions concernant l'isolation, le calorifugeage, la ventilation..., il est techniquement possible de placer à l'intérieur d'un même ouvrage souterrain des canalisations et câbles conduisant des fluides divers. Sans doute, les risques propres à chaque fluide spécifique ne diffèrent pas sensiblement suivant que les réseaux sont enterrés ou en galerie, si ce n'est, dans ce dernier cas, qu'une plus grande facilité d'accès aux hommes ou aux animaux — en particulier les rongeurs — peut obliger à prendre des précautions supplémentaires.

En ce qui concerne le gaz, le risque d'explosion a pratiquement disparu aujourd'hui avec l'emploi des tuyauteries en acier soudé parfaitement étanches. Le voisinage du gaz est donc admis par les autres utilisateurs, à la condition que les vannes soient placées dans des chambres isolées. Le principal inconvénient est d'ordre commercial, et provient d'une température élevée (supérieure à 25

ou 30 °C), car à volume égal, le gaz chaud, donc dilaté, contient moins de thermies que le gaz froid. Il faut alors calorifuger le tuyau, ce qui accroît l'encombrement du réseau et les frais d'installation. C'est d'ailleurs le fait des échanges thermiques qui pose un problème pour divers réseaux, crée des sujétions et provoque des réticences.

Pour le réseau chauffage urbain, une température ambiante élevée est au contraire favorable, puisqu'elle diminue les pertes : la meilleure position sera donc en haut.

Dans les câbles électriques, les pertes en chaleur sont variables avec la tension, de l'ordre de 25 kW/km pour un câble MT ou BT, tandis qu'elles atteignent 100 kW/km dans un câble de transport à 225 kV. Comme l'exploitation à température élevée est à éviter, il faut donc soit réduire la température ambiante ou l'intensité du courant transporté, soit augmenter la section des conducteurs.

En ce qui concerne la distribution de l'eau potable, le seul inconvénient de la chaleur est ressenti par les usagers qui peuvent se plaindre de la tiédeur de l'eau.

Enfin, pour les P. T. T., le mode de pose le plus économique est le tirage des câbles dans des tubes de PVC réunis en faisceau. Or les galeries techniques se prêtent assez mal à cette technique, car :

— la température peut parfois y dépasser 40 °C alors que le PVC perd ses propriétés mécaniques au-delà de cette température ;

— le volume restreint des galeries s'accommode mal de la recherche d'espace provenant des P. T. T. pour le renforcement de ses lignes.

D'une manière générale, les problèmes de croissance des divers réseaux ainsi que les possibilités d'exploitation de nouveaux services font toucher une des limites de la galerie technique.

Aspects économiques

Dans le cadre des travaux sur les réseaux visitables menés pour le compte du Plan Construction, une étude comparative a été effectuée sur la rentabilité économique de la galerie technique par rapport à la pose traditionnelle. Sur la base des seuls éléments directement chiffrables que les auteurs ont pu exploiter, deux points ont été mis en évidence :

— le coût d'exploitation d'une galerie technique semble moins élevé que celui de réseaux posés en tranchée, malgré le coût de maintenance et d'exploitation de la galerie elle-même ;

— dans le bilan — investissement plus exploitation —, en longue période, la solution visitable est compétitive, sans même tenir compte des nombreux avantages — quantifiables ou non — relatifs à la réduction des nuisances et des dommages causés à la voirie.

Archivage des réseaux souterrains

De nombreuses études ont été menées récemment sur l'archivage des réseaux souterrains. Leur objet était de définir la nature et le contenu des systèmes à mettre en place, ainsi que les modalités de collecte de l'information concernant les réseaux souterrains.

Nécessité d'une information adéquate

En effet, les besoins d'information apparaissent clairement au niveau :

— des études d'implantation de réseaux nouveaux ;

— des travaux de mise en place des réseaux nouveaux ou d'intervention sur des réseaux déjà posés ;

— de la gestion des ouvrages.

Claude Teslutchenko (Communauté urbaine de Strasbourg) a analysé l'origine de ces besoins. Les collectivités locales, en tant que gestionnaires du domaine public et de la voirie communale, aménageurs, exploitants de réseaux et, enfin, coordinateurs des activités des autres exploitants, ont besoin de connaître avec précision l'encombrement du sol et du sous-sol. Elles estiment donc devoir archiver des informations précises, à jour et homogènes.

Les exploitants de réseaux ont en ce domaine de multiples besoins qui naissent de leur souci permanent d'améliorer la qualité du service rendu, tout en abaissant les coûts de celui-ci. Cela ne peut s'obtenir que par une rigoureuse gestion commerciale et technique des ouvrages. Ils sont donc particulièrement intéressés par tout système susceptible d'assurer la liaison la plus étroite possible entre les besoins exprimés par les consommateurs et les conséquences qui en découlent pour eux-mêmes : extension des réseaux, renforcements, remplacements.

On pourrait croire que, face à des besoins aussi clairement exprimés, des dispositions aptes à les satisfaire ont été prises depuis longtemps. Or il faut bien reconnaître que très peu de choses ont été faites dans ce domaine en France, sauf par quelques grandes villes comme Lille, Marseille, Grenoble et Strasbourg ; sans doute, moins en raison de la complexité des problèmes à résoudre que des contraintes techniques propres à chacun des exploitants de réseaux.

Contenu des plans collectifs des réseaux

Malgré ces exigences spécifiques, le contenu des plans collectifs des réseaux semble assez simple à définir. Ils devront comporter :

— la planimétrie de surface, constituée par les ouvrages apparents au sol (bordures de trottoirs, regards, bouches à clefs, armoires...),

— les limites administratives des rues, des propriétés...,

— les constructions, c'est-à-dire l'ensemble de l'environnement visible des réseaux,

— l'ensemble des points de référence topométriques,

— le tracé des réseaux souterrains avec les indications essentielles concernant leur appartenance, leur nature et leurs fonctions,

— les altitudes des points caractéristiques,

— un certain nombre d'indications littérales : noms de rues, lieux-dits.

Enfin, il est certain qu'il est pratiquement impossible de représenter tous les réseaux ensemble sur un même plan avec, de plus, tous les renseignements techniques souhaitables. Chaque concessionnaire devra donc, pour ses besoins propres, compléter une copie du plan collectif pour tous les détails techniques qui le concernent spécialement. Le dossier final sera donc constitué d'un plan collectif — de base — et d'un ensemble de plans techniques de chacun des réseaux.

Coût et avantages de l'archivage des réseaux

L'évaluation des coûts de création et de maintenance du plan collectif des réseaux dépend d'une part du volume et de la valeur technique des informations concernant les réseaux existants, d'autre part du volume des informations à archiver pour les nouveaux réseaux.

Toujours selon C. Teslutchenko, l'ordre de grandeur du mètre linéaire de réseau à archiver est de 4 à 6 F (1974). Le coût total de l'archivage est donc une dépense relativement importante. Sa rentabilité se mesurera à long terme moins par des économies procurées aux services utilisateurs que par une amélioration des services rendus. On peut cependant parler d'économies ou d'avantages même si ceux-ci apparaissent plus comme des éléments subjectifs que comme des faits tangibles et mesurables :

— économies sur les prestations, que les bureaux de dessin de chaque exploitant sont tenus de fournir ;

— limitation, voire suppression de dommages causés aux réseaux ;

— enfin, disponibilité d'informations précises, fiables et actualisées, dont une ville a réellement besoin de nos jours.

Statuts et gestion des réseaux

A l'issue de ce chapitre sur les réseaux urbains, il paraît utile de faire le point sur le statut et la gestion des différents services publics.

Très schématiquement, on peut distinguer 4 types de statuts :

— La régie : la mise en œuvre relève directement des services techniques de l'autorité locale, assistés et contrôlés par des fonctionnaires de ministères techniques.

— L'affermage : seule l'exploitation (et l'entretien) est confiée à une organisation privée.

— La concession : en liaison avec les autorités locales, l'ensemble du ou des services est confié à un industriel privé qui prend les investissements à son compte.

— La gérance : il s'agit d'un contrat sous forme juridique bien définie qui lie les autorités locales à un particulier pour tout ou partie des services.

Tableau III Le statut des différents réseaux urbains		
Réseaux	**Principes**	**Statuts du service**
Distribution d'eau	L'eau n'est pas nationalisée et relève des autorités locales (commune, syndicat de commune, communauté urbaine)	Régie, affermage, concession ou gérance
Assainissement EP ou EU	*Idem*	*Idem*
Gaz	Pas de monopole de distribution de gaz	Organismes concessionnaires : Gaz de France, Cie française de méthane, Sté nationale du gaz du Sud-Ouest (ces 3 organismes jouent des rôles complémentaires)
Électricité	Pas de monopole de distribution de l'électricité	Régie et organismes concessionnaires : Régies des collectivités locales E.D.F., établissement public à caractère industriel et commercial Sociétés anonymes (p. ex. Strasbourg) SICAE (Sté d'intérêt collectif agricole d'électricité)
Télédistribution	Aucun texte réglementaire ne régit actuellement, sur les plans administratifs et publics, les réseaux de télédistribution	
Téléphone		Secrétariat d'État aux Postes et Télécommunications
Éclairage public	Dépendance directe des collectivités locales (cf. Code d'administration communale)	Régie et concession
Chauffage urbain	Le réseau primaire (jusqu'aux sous-stations) et la chaufferie centrale appartiennent à la collectivité locale. Les réseaux de distribution sont en général de droit privé.	Régie ou concession
Ordures ménagères	La collecte publique est du ressort des services publics	Régie ou concession

On trouvera ci-après deux tableaux : le *tableau* III donne le statut des différents réseaux; le *tableau* IV indique le contenu détaillé des différents statuts des services publics.

Les déchets solides

L'urbanisation et le puissant essor économique des pays industrialisés, conséquences des progrès technologiques réalisés depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale, contribuent certes à l'amélioration des conditions de vie de l'individu, mais s'accompagnent aussi d'une augmentation de la pollution sous différentes formes. La recherche légitime de la qualité de la vie, liée à la sensibilisation de l'opinion publique à l'égard des pollutions, apporte une dimension nouvelle à ces problèmes.

La ville, par la concentration de sa population et l'intensité de ses activités, est, de ce fait, la plus exposée aux processus de dégradation. Différentes nuisances ou incommodités prennent alors naissance : la pollution des cours d'eau et de l'atmosphère, le bruit et la production de déchets de natures diverses, notamment des « ordures ménagères » de la vie quotidienne. Parmi les efforts faits pour réduire ces atteintes, il apparaît que l'élimination des déchets doit requérir une attention particulière.

Si l'on veut se situer correctement par rapport à l'étude de ce problème, il convient d'emblée de souligner deux observations faites par l'Association générale des hygiénistes et techniciens municipaux (AGHTM) dans son ouvrage intitulé *les Résidus urbains :*

— une certaine évolution caractéristique de la civilisation contemporaine tend à se manifester : alors que la loi de 1884 sur la police municipale imposait l'enlèvement des ordures ménagères pour des raisons de sécurité et de salubrité publiques fort compréhensibles à cette époque, l'objectif actuel des opérations d'élimination des résidus urbains vise, en plus, l'amélioration de la qualité de la vie et la recherche du bien-être de l'homme ;

— cette recherche de l'amélioration du cadre de vie, certes très souhaitable, ne doit cependant pas faire oublier que le but premier de ces actions est de lutter contre la nocivité des déchets.

Analyse du système des déchets solides

Avant de les décrire, il faut préciser ce que l'on entend par « déchets ». Ce terme peut en effet faire l'objet de

Tableau IV

Services publics : recours à un tiers (tableau établi par le B.E.T.U.R.E.)

		Rémunération	Régime investissements	Personnel	Propriété des investissements	Tarification	Affectation du résultat d'exploitation (bénéfice ou déficit)	Fonction économique d'entrepreneur	Redevance à la collectivité
Modes de gestion nouveaux	Gérance	Versée par la collectivité (remboursement débours plus 1 % pour rémunération) — Il est payé par la collectivité —	La collectivité supporte le financement	Géré par le gérant (en pratique la gérance suppose peu de personnel)	Collectivité	Décidée par la collectivité	Collectivité	Collectivité	Non
	Régie intéressée	Versée par la collectivité (forfait plus intéressement)	La collectivité supporte le financement	Géré par le régisseur (mais statut du personnel doit être aligné s./statut coll. si on envisage retour personnel à la collectivité en cas de dénonciation du contrat)	Collectivitée	Concertée	Collectivité	Concessionnaire et partiellement régisseur	Non
Modes de gestion classiques	Affermage	Prise sur l'exploitation — Il se paye —	La collectivité supporte le financement	Géré par le fermier — Mais on peut avoir du personnel détaché de la collectivité —	Collectivité	Fixée par le fermier dans la limite d'un tarif agréé	Fermier	Fermier	(Oui)
	Concession	Prise sur l'exploitation	Le concessionnaire supporte le financement	Géré par le concessionnaire	Collectivité pour les biens du service. Concessionnaire pour les biens du siège	Fixée par le concessionnaire (dans la limite d'un tarif agréé par le concédant)	Concessionnaire	Concessionnaire	(Oui)

nombreuses définitions, et il est souvent utilisé avec des significations différentes.

Dans son rapport de 1974, le Groupe d'études sur l'élimination des résidus solides (GEERS) a admis que sous le vocable de « déchets » on désignait généralement « l'ensemble des biens, matériaux et éléments qui ne possèdent — dans les conditions de lieu et de temps de leur production — ni valeur marchande, ni état suffisant pour une valorisation éventuelle, compte tenu, soit des connaissances technologiques, soit des données économiques du moment ».

D'autre part, le contenu de l'expression « déchets solides » doit être précisé. Il s'agit certes des déchets qui se trouvent physiquement à l'état solide, mais il prend en compte également d'autres déchets à l'état liquide ou pâteux, dès lors que, produits sous une forme concentrée et susceptibles d'être rejetés de façon discontinue, ils n'ont pas le caractère d' « effluents ». C'est le cas, par exemple, des boues des stations d'épuration, des bains concentrés, des déchets des stations d'épuration, des déchets de peinture ou de vernis, etc.

Mais il convient aussi de mieux cerner les différentes étapes de la « vie » des déchets, depuis leur génération jusqu'à leur élimination. Le Groupe d'études sur les résidus solides a proposé de représenter ces étapes sous la forme du schéma reproduit à la *figure* 10, et de distinguer trois parties au sein de ce « système déchets solides » :

— Les sources et mécanismes de production des déchets résultant des différentes formes de l'activité humaine. Il faut noter que c'est sur cette « partie amont » du système que l'on peut agir si l'on veut modifier la quantité et la nature des déchets produits.

— Les moyens d'élimination des déchets solides, ce terme désignant l'ensemble des opérations de stockage, tri, collecte, transport et traitement des déchets aboutissant à la production d'éléments ou de matériaux pouvant être réintroduits dans le circuit économique en tant que matières premières, produits intermédiaires ou même produits de consommation. Si l'on veut supprimer ou réduire les conséquences néfastes des rejets, c'est sur cette « partie aval » du système qu'il faut agir.

— Enfin, divers moyens — législatifs, réglementables, économiques... — permettent d'agir sur les parties amont et aval du système et représentent les moyens de la gestion des déchets. La place allouée à ce chapitre ne nous permettra pas d'aborder l'ensemble de ces problèmes.

Nous emprunterons aux travaux du GEERS — sauf indication contraire — les éléments essentiels (définitions, estimations, ...) des pages suivantes concernant les résidus solides.

Origine, nature et quantité des déchets solides

Nous analyserons les différents déchets, principalement en fonction de leur source de production, et nous terminerons par l'examen de quelques catégories particulières de déchets.

Déchets provenant de l'activité des ménages

* *Ordures ménagères*

Ce sont, par essence même, les résidus de l'activité des ménages. Du point de vue administratif, les ordures ménagères sont constituées de déchets de faibles dimensions présentés au service du ramassage dans des récipients prévus à cet effet :

— les déchets provenant des habitations ou de collectivités : résidus de cuisine, déchets des denrées consommables, objets brisés, emballages, cendres et mâchefers, etc. ;

— les produits provenant du nettoiement des voies publiques, des places et des marchés ;

— éventuellement, dans des limites fixées par l'autorité municipale, certains déchets provenant des établissements industriels et commerciaux, assimilables, par leur nature, aux déchets ménagers.

En dépit des lacunes que présentent encore les données statistiques sur les ordures ménagères en France, il est cependant possible d'en tirer des renseignements concernant leur composition, leurs quantités et leurs caractéristiques.

● *Composition*

La composition des ordures ménagères est non seulement très hétérogène, comme pouvait le laisser prévoir

fig. 10

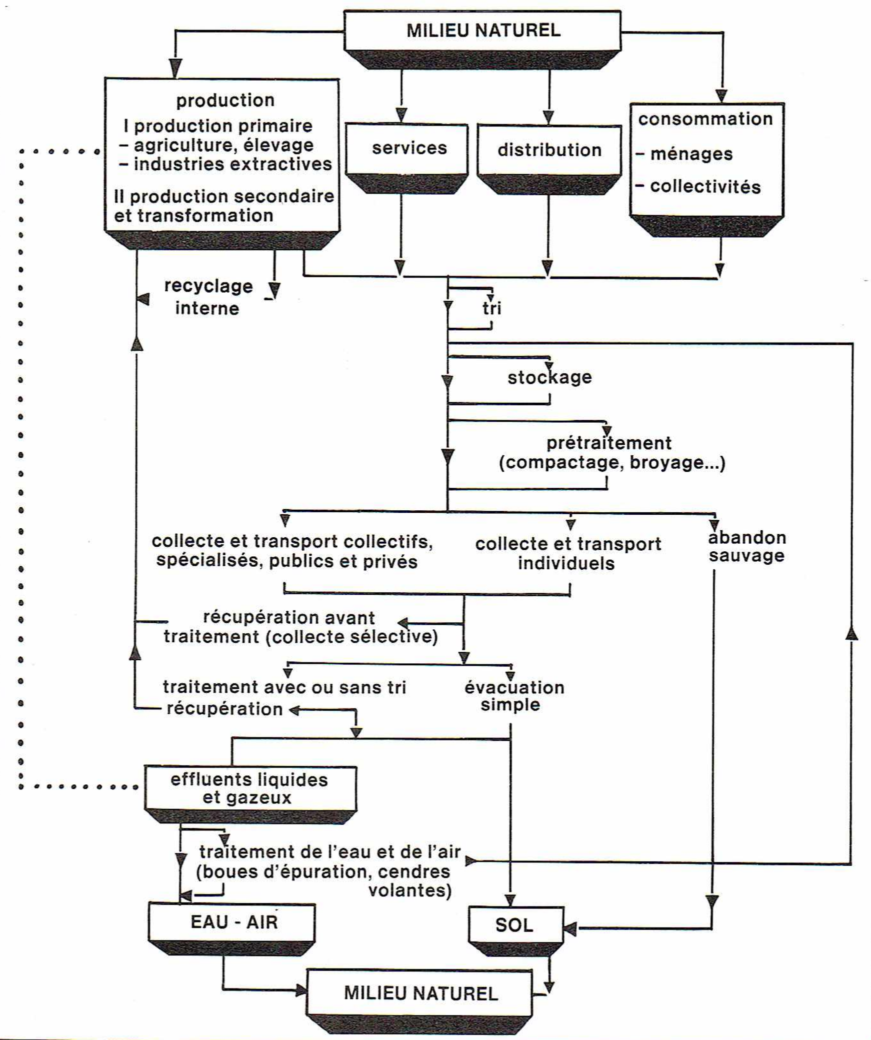

redessiné Richard Colin

▲ *Figure 10 : schéma d'analyse du système des déchets solides (d'après* les Déchets solides, Proposition pour une politique, *rapport du Groupe d'études sur l'élimination des résidus solides, Environnement, la Documentation française, 1974).*

◀ *Page ci-contre en haut, tableau III : le statut des différents réseaux urbains ; tableau IV : services publics : recours à un tiers (d'après* Réseaux visitables, *août 1976, étude établie pour le Plan Construction par les filiales de la Caisse des dépôts et A. Arsac, architecte, et J. J. Navarro, ingénieur).*

▼ *Évaluées, en France, en moyenne à 250 kg par habitant et par an, les ordures ménagères sont le plus souvent déversées dans des poubelles ordinaires et collectées par des bennes ; par ce mode de collecte, on ne peut éviter l'épandage accidentel de détritus sur la voie publique.*

G. Peress - Magnum

la définition donnée plus haut, mais aussi très variable. Elle résulte en effet de nombreux facteurs : mode de vie des habitants, situation géographique, saison, type d'habitat.

Actuellement, on peut situer la composition des ordures ménagères dans les fourchettes suivantes :

	en poids
— éléments fins (< 20 mm)	10 à 20 %
— matières végétales et putrescibles	15 à 30 %
— papiers et cartons	20 à 40 %
— chiffons	1 à 6 %
— matières plastiques	2 à 6 %
— verres	2 à 8 %
— métaux	2 à 6 %

Il est évidemment important d'essayer de prévoir quelle pourrait être la composition des ordures ménagères dans la décennie à venir. A cet égard, les tendances observées au cours des dernières années donnent des indications intéressantes. En effet, la composition a évolué de façon sensible et on peut constater :

— une diminution importante des cendres, due au recul du chauffage individuel par combustible solide au profit du chauffage au fuel, au gaz ou à l'électricité ;

— une certaine stabilité dans la proportion des matières végétales ou animales (la diminution résultant de l'emploi de conserves et légumes préépluchés étant compensée par l'accroissement constant de la consommation de fruits et légumes frais en toute saison) ;

— une augmentation importante des papiers et cartons due principalement à la diffusion de la presse et à l'utilisation croissante d'emballages et de produits à jeter après usage unique.

Ces tendances permettent raisonnablement de conduire aux hypothèses de composition suivantes pour 1990 :

	en poids
— éléments fins (< 20 mm)	2 à 5 %
— matières végétales et putrescibles	10 à 15 %
— papiers et cartons	40 à 60 %
— chiffons	5 à 7 %
— matières plastiques	8 à 10 %
— verres	5 à 8 %
— métaux	4 à 6 %

A titre indicatif, on trouvera au *tableau* V la composition des ordures ménagères dans différents pays européens.

● *Quantités*

En ce qui concerne les quantités produites, on a pu estimer la production totale d'ordures ménagères pour l'année 1972, en France, à onze millions de tonnes — soit un volume d'environ 55 000 000 m^3 — dont plus d'un million de tonnes pour la seule ville de Paris.

La moyenne annuelle de la production par habitant et par jour calendaire serait donc d'environ 0,850 kg en zone urbaine et de 0,600 kg en zone rurale ; ce qui représente une production annuelle par habitant de 250 kg en moyenne. A Paris, la production journalière par habitant est supérieure à 1 kg.

L'augmentation moyenne de la production d'ordures ménagères par habitant est de l'ordre de 2,3 % dans les zones rurales et les banlieues. L'accroissement en volume est sensiblement plus rapide, en raison de l'importance croissante des emballages.

Si ces taux d'accroissement se maintiennent, la production des ordures ménagères, en 1990, pourrait atteindre environ 1,300 kg/hab/j dans les zones urbaines et 1,050 kg/hab/j dans les zones rurales et les banlieues.

On trouvera des éléments de comparaison avec l'étranger dans le *tableau* VI.

● *Variations*

Il faut noter que la production des ordures ménagères connaît des variations :

— au cours de la semaine, le mardi étant généralement le jour le plus chargé ;

— d'un mois à l'autre, avec un rapport K = tonnage maxi (janvier)/tonnage mini (août) ayant une valeur de 1,6 (étude sur 40 villes françaises en 1966).

● *Caractéristiques*

Outre leur composition, les ordures ménagères sont caractérisées par :

— Leur **degré d'humidité,** qui varie entre 20 et 60 %, avec une moyenne de 40 % l'été et de 30 % l'hiver. D'une façon générale, l'humidité moyenne tendrait à décroître lentement, 0,25 % par an environ.

— Leur **pouvoir calorifique.** Il mesure le nombre de kilocalories ou millithermies dégagées par la combustion complète de un kilo d'ordures ménagères. Comme la vapeur d'eau formée s'échappe avec les autres gaz de combustion, c'est le pouvoir calorifique inférieur (P. C. I.) qui caractérise l'aptitude des ordures ménagères à être incinérées. Actuellement, le P. C. I. varie suivant le lieu et la saison de 1 200 à 2 000 kcal/kg, et la tendance est à l'accroissement (environ 2 % par an) avec une atténuation des variations saisonnières.

— Leur **rapport carbone/azote** (C/N). Les ordures ménagères renferment plusieurs milliards de germes de micro-organismes thermophiles par gramme. Abandonnées à elles-mêmes, elles entrent rapidement en fermentation. La température s'élève et se maintient entre 60 et 70 °C, ce qui a pour effet de détruire les germes pathogènes. Cette évolution des ordures en fermentation peut être suivie notamment par la détermination du rapport des teneurs en carbone/azote (C/N), qui reflète le mieux la richesse et le stade d'évolution des ordures. Cette donnée a d'ailleurs été choisie comme un critère de la qualité du traitement des ordures par compostage.

— Leur **densité** (ou leur masse volumique) : cette caractéristique a une grande influence sur les capacités des moyens de collecte et de stockage des ordures. Elle n'a de sens que si on définit les conditions dans lesquelles on la détermine : en poubelle, en fosse, en décharge avec ou sans traitement. En effet, les ordures sont compressibles et leur densité varie au cours des différentes manipulations qu'elles subissent du lieu de production au lieu d'élimination. La densité des ordures ménagères en poubelles sans tassement est en général de l'ordre de 0,20 en été et de 0,30 en hiver. Par suite du développement des emballages perdus, elle est en nette diminution depuis une vingtaine d'années.

* *Déchets encombrants*

Par déchets encombrants d'origine domestique, on entend généralement les meubles, objets et appareils

▼ *Tableau V : composition des ordures ménagères (en % en poids) dans différents pays européens (d'après* les Déchets solides, Proposition pour une politique, *rapport du Groupe d'études sur l'élimination des résidus solides, Environnement, la Documentation française, 1974). Tableau VI : quantités d'ordures ménagères dans différents pays (en kg par habitant et par an) [d'après* les Déchets solides, Proposition pour une politique, *rapport du Groupe d'études sur l'élimination des résidus solides, Environnement, la Documentation française, 1974].*

Tableau V
Composition des ordures ménagères dans différents pays européens (en % en poids)

Pays	Cendre	Verre	Métaux	Matières organiques	Papier	Autres
Belgique	48	3	2,5	23	20,5	3
Danemark	—	—	—	—	40	60
Finlande	—	5	5	10	65	15
France	24,3	3,9	4,2	24	29,6	14
Allemagne	30	9,8	5,1	21,2	18,7	15,2
Pays-Bas	9,1	4,9	4,8	14	45,2	22
Norvège	12,37	5,14	2,58	55,72	24,19	—
Espagne	22	4	3	45	21	5
Suède	—	15	6	12	55	12
Suisse	20	5	5	15-25	40-50	—
Royaume-Uni	30-40	5-8	5-8	10-15	25-30	5-10

Tableau VI
Quantités d'ordures ménagères dans différents pays (en kg par habitant et par an)

Pays	Valeur basse	Valeur haute	Valeur moyenne
Danemark	—	—	230
France	225	325	290
Allemagne	200	375	200
Italie	140	350	200
Luxembourg	350	400	400
Pays-Bas	195	490	270
Suisse	140	215	150
Royaume-Uni	210	325	272

M. Riboud - Magnum

Appareils électroménagers	Nombre d'appareils	Masse (en tonnes)	Volume (en m³)	Hypothèses		
				Durée de vie moyenne (en années)	Poids moyen (en kg)	Volume moyen (en m³)
Machines à laver	450 000	36 000	112 500	15	80	0,25
Réfrigérateurs	600 000	36 000	210 000	15	60	0,35
Machines à coudre	100 000	1 000	5 000	15	10	0,05
Aspirateurs	600 000	2 400	12 000	10	4	0,02
Radiateurs électriques	400 000	6 000	40 000	14	15	0,10
Téléviseurs	700 000	28 000	105 000	10	40	0,15
Radios	1 250 000	4 000	12 500	15	15	0,10
Total (non compris mobilier)	///	114 400	497 000	///	///	///

Tableau VII
Estimation des déchets encombrants (appareils électroménagers) en France en 1972

ménagers usagés dont la récupération n'est pratiquement plus assurée par les circuits commerciaux, et qui ne peuvent pas, en raison de leurs dimensions, être présentés à la collecte des ordures ménagères dans les récipients agréés à cet effet. Dans ces conditions, leur enlèvement n'est pas toujours assuré par la collectivité. Ces déchets sont alors souvent abandonnés clandestinement n'importe où, de manière « sauvage ».

Selon les estimations du Groupe d'études sur les résidus solides, les quantités, collectées dans les localités ayant organisé un service spécial, se situent entre 13 et 55 litres par habitant et par an avec une densité variant entre 0,15 et 0,20, ce qui représente 1,5 à 6 % du poids total des déchets collectés. Les chiffres disponibles pour les États-Unis se situent à des niveaux supérieurs : 100 l/hab/an et même 380 l/hab/an.

En rapprochant ces chiffres de ceux des appareils électroménagers, meubles et autres objets encombrants produits annuellement, et en formulant des hypothèses sur la durée de vie de ces objets, on peut estimer que la production réelle totale des déchets encombrants serait en fait de l'ordre de 20 à 30 l/hab/an (voir *tableau* VII).

En 1985, le pourcentage de ce type de déchets par rapport aux ordures ménagères pourrait atteindre 10 % en poids, soit environ 40 kg/hab/an.

Déchets provenant de la distribution et des activités de services

* *Déchets commerciaux*

Les déchets commerciaux sont constitués par les résidus de l'activité des différents circuits de distribution : emballages, palettes, invendus, déchets organiques, etc. Ces déchets sont souvent assimilés aux ordures ménagères en raison de leur composition assez analogue. Cependant, deux facteurs donnent une nouvelle dimension aux problèmes des déchets commerciaux :

— les nouvelles formes de distribution et les nouvelles techniques de conditionnement ;

— on y trouve de plus en plus souvent des produits toxiques ou dangereux provenant de produits invendus ou interdits à la commercialisation.

Il existe encore peu de données sur ce type de déchets en France. Les grandes surfaces de vente — qui représentent environ 25 % des ventes totales — auraient évacué 350 000 tonnes d'emballages en carton et 80 000 tonnes d'emballages en bois pour la seule année 1975. Il semble que ces estimations doivent être considérées comme des minimums. Les déchets commerciaux pourraient donc représenter au total un tonnage compris entre 1 500 000 t et 2 000 000 t.

* *Déchets des hôpitaux*

Les déchets de l'activité hospitalière comprennent environ 30 % de déchets divers, analogues aux ordures ménagères, engendrés par les services généraux (administration, magasins, cuisines), et 70 % de déchets spécifiques provenant des salles de soins, des laboratoires, des chambres.

Le volume de ces déchets, non compris les déchets alimentaires, peut être estimé à l'heure actuelle à 2,5 litres/lit/jour. Compte tenu du développement des objets à usage unique, ce nombre pourrait rapidement passer à 5 litres.

▲ A gauche, déchets commerciaux (emballages, cagettes en bois, etc.) amoncelés lors des grèves de mai 1968 près des Halles de Paris.

A droite, tableau VII : estimation des déchets encombrants (appareils électroménagers) en France, en 1972 (d'après* les Déchets solides, Proposition pour une politique, *rapport du Groupe d'études sur l'élimination des résidus solides, Environnement, la* Documentation française, *1974).

TOP

◄ L'enlèvement des objets encombrants d'origine domestique, tels que meubles et appareils électroménagers, n'est pas toujours assuré par la collectivité, et il n'est pas rare que ces objets soient abandonnés clandestinement.

Déchets provenant des activités de production et de transformation

Ces déchets présentent moins d'intérêt dans le cadre de ce chapitre; leur analyse est présentée à titre indicatif sous forme de tableau synthétique (*tableau* VIII).

Déchets provenant du traitement des effluents liquides et gazeux

* *Boues d'épuration*

On désigne en général sous l'appellation de « boues d'épuration » urbaines et industrielles les matières extraites des eaux usées par les divers procédés — physiques, chimiques et biologiques — d'épuration. La nature des boues est liée aux matières polluantes présentes dans le milieu à épurer et aux procédés ou réactifs éventuels mis en œuvre dans cette épuration. On distingue, en particulier, dans les stations urbaines, les boues fraîches (extraites du décanteur) des boues digérées (de façon aérobie ou anaérobie).

Le Groupe d'études pour l'élimination des résidus solides a procédé à une estimation des quantités de boues d'épuration pour l'année 1972. Dans le tableau ci-dessous :

QUANTITÉS ESTIMABLES

Production estimée	Effluents traités	Effluents potentiels
Boues industrielles		
– boues liquides	16 millions de t	34 millions de t
– résidus pelletables	1,25 million de m^3	2,7 millions de m^3
dont matière sèche	312 000 t	680 000 t
Boues urbaines		
– boues liquides	13 millions de t	42 millions de t
– résidus pelletables	1 million de m^3	3,4 millions de m^3
dont matière sèche	260 000 t	850 000 t

— les boues liquides contiennent 98 % d'eau ; une fois rendues « pelletables », ces boues ne contiennent plus que 75 % d'eau ;

— par effluents liquides potentiels, on veut signifier la totalité des effluents liquides susceptibles d'être traités.

* *Matières de vidange*

Une part importante de la population française — un quart environ — n'est pas raccordée à un réseau d'assainissement et doit procéder au traitement des eaux usées dans des installations individuelles. Ces installations comprennent notamment des fosses septiques et des fosses fixes qui doivent être périodiquement vidangées. Le produit de ces opérations, les matières de vidange, représente un volume annuel d'environ 4,3 millions de m^3 à 98 % d'eau.

* *Poussières et cendres volantes provenant du traitement de l'air*

Par « poussières », on désigne les particules solides finement divisées, de provenances très diverses, en suspension dans des milieux gazeux. Les cendres volantes sont constituées par des particules de cendres et d'impuretés entraînées par les gaz de combustion. La taille de ces particules va de 1 à 80 micromètres.

La production de cendres volantes a été estimée à 9 millions de t pour l'année 1965. Une part importante de ces cendres provient des centrales thermiques de l'E. D. F. : 1 445 000 t étaient ainsi produites en 1971, la moitié environ étant commercialisée et réutilisée.

Quelques catégories particulières de déchets

* *Déchets de matières plastiques*

Les plastiques sont des matériaux de plus en plus employés : leur production doublait environ tous les cinq ans jusqu'à présent. Leur utilisation est source de déchets qui apparaissent à deux niveaux :

— au stade de la fabrication : on prévoit qu'ils pourraient passer de 70 000 t en 1971 à 185 000 t en 1980 ;

— après utilisation chez les distributeurs et les consommateurs essentiellement. Là encore on prévoit une progression sensible de ces déchets : de 460 000 t en 1970 à 1 725 000 t environ en 1980.

Les déchets de matières plastiques sont principalement constitués par des emballages.

Tableau VIII
Les déchets des activités de production et de transformation

Catégories de déchets	Composition	Production	Quantités estimées
Déchets provenant du secteur secondaire et des activités de transformation - Industries	— Composition variée : tous déchets solides, liquides ou pâteux concentrés produits par l'industrie	Évaluation (1972) de déchets par emploi et par an	1 tonne
		Évaluation de la quantité de déchets produite par l'industrie	de 7 à 11 millions de tonnes
- Bâtiment et Travaux Publics	— Déblais et gravats	Remblais en région parisienne (par an)	13 millions de tonnes
Déchets du secteur primaire	— Déchets d'origine animale — fumier (élevages industriels) — cadavres d'animaux — résidus d'abattoirs collectés à l'abattoir même et dans les boucheries	Estimation des déchets animaux, tonnage potentiel récupérable (1968)	1,01 million de tonnes
	— Déchets d'origine végétale — déchets laissés sur les champs ou dans les vergers — écarts de triages — surplus — retraits (FORMA en particulier)	Estimation 1968 — déchets de légumes — déchets de fruits aux champs — écarts de triage (légumes) — écarts de triage (fruits)	1 539 000 tonnes 203 000 tonnes 131 100 tonnes 123 000 tonnes
	— Déchets professionnels — provenant des produits industriels utilisés par l'agriculture (sacs d'engrais, plastiques, surplus d'insecticides, matériels hors d'usage)	Aucune donnée	
Déchets des industries extractives	— Stériles, terres mortes... (qui sont la plupart du temps entassés et forment ainsi les « terrils », « crassiers », « pierriers »)	— Mines — Carrières	42 millions de tonnes 75 millions de tonnes

▶ ***Tableau VIII :** les déchets des activités de production et de transformation.*

* *Déchets de caoutchouc*
Les déchets de caoutchouc sont essentiellement liés à la fabrication et à l'utilisation des pneumatiques.
— Au stade de la fabrication, ces déchets ont été estimés à 56 000 t en 1973; ils devraient atteindre 85 000 t environ en 1980. 75 % de ces déchets proviennent de l'industrie du pneu.
— Les déchets de caoutchouc, après utilisation, sont en quasi-totalité constitués par les pneus usagés qui se retrouvent chez les distributeurs.

* *Emballages*
Les emballages constituent une part croissante des déchets solides industriels, commerciaux, et domestiques. Une fraction non négligeable des dépenses de la nation leur est consacrée. Selon la profession, en effet, en 1967, l'industrie de l'emballage représentait 1,36 % du produit national brut avec une production de 4 700 000 tonnes. Cette même année, 60 % de l'activité des industries du bois, du papier-carton et du verre, et 13,5 % de l'activité des industries plastiques — 20 % en 1970 — étaient consacrés à la production des emballages.

En France, actuellement, la consommation d'emballages est d'environ 150 kg — alors qu'elle est de 250 kg aux États-Unis. Leur composition dans les ordures ménagères en 1970 était la suivante :

		en %
— verre	800 000 t	19
— plastique	320 000 t	8
— métal	475 000 t	11
— bois	500 000 t	12
— papier et carton	2 200 000 t	50
	4 295 000 t	100

Les emballages, une fois utilisés, peuvent suivre trois circuits différents :
— le circuit habituel de collecte des ordures ménagères : 80 % des emballages;
— la récupération : 10 % environ des emballages sont récupérés, surtout ceux en bois;
— les circuits incontrôlés : 10 % des emballages deviennent des déchets sauvages.

* *Véhicules hors d'usage*
En 1971, on estimait que 5,5 % du parc automobile se trouvait mis hors de circulation chaque année, soit plus de 750 000 véhicules à cette époque. Il apparaît ainsi que le nombre de véhicules particuliers et commerciaux à éliminer annuellement est actuellement de 1 000 000 environ. On estime à 1,5 % environ le nombre de véhicules abandonnés de manière sauvage, soit 15 000 unités par an.

* *Pneumatiques usagés*
En 1973, 343 000 tonnes de pneumatiques usagés ont dû être éliminées, dont 25 millions de pneus pour voitures de tourisme et 3,42 millions de pneus pour véhicules utilitaires.

A cela, il faut ajouter les pneus mis au rebut chez le fabricant : 35 300 t en 1973.

En 1971, 66 600 t de pneus usagés (22 %) étaient récupérés :
— 45 000 t pour le rechapage, surtout de pneus poids lourds,
— 11 000 t pour la fabrication de caoutchouc régénéré,
— 10 000 t pour la fabrication de poudrette.

On prévoit pour 1980 un tonnage d'environ 450 000 t de pneus usagés à éliminer.

Résumé
Il n'est pas possible d'estimer avec précision les quantités de déchets produits en France. On se bornera donc à rappeler quelques évaluations de la production de certains déchets en 1972 :

— ordures ménagères	11 000 000 t
— déchets commerciaux	1 à 2 000 000 t
— déchets industriels	11 000 000 t
— déchets des industries extractives	117 000 000 t
— boues d'épuration (75 % eau)	
● urbaines	1 000 000 t
● industrielles	1 250 000 t
— pneumatiques usagés	347 000 t
— véhicules hors d'usage	800 000 unités

D. Bouquignaud - TOP

▲ *L'entrepôt d'un ferrailleur de La Courneuve près de Paris; on estime à environ 1 million le nombre de véhicules mis hors circulation chaque année en France.*

Modes d'élimination des déchets
La plupart des déchets ne peuvent être éliminés au lieu même de leur apparition. Il faut donc les acheminer vers un lieu de traitement. Dans le cas des résidus urbains, mais aussi pour bien d'autres déchets, cet acheminement est réalisé au moyen d'une collecte, par l'organisation d'un « service d'enlèvement » qui vient débarrasser les détenteurs de ces déchets à domicile. La collecte constitue donc un élément important du système d'élimination des déchets. Il s'agit en effet, en déchargeant le producteur du déchet d'une tâche pour laquelle il est en général peu qualifié, de réaliser une élimination des déchets dans des conditions satisfaisantes sur les plans techniques et économiques.

Quant au traitement, son objet est de transformer des déchets en des produits susceptibles de retourner sans inconvénients dans le milieu naturel, ou de trouver une utilisation.

Donner une destination « utile » aux déchets constitue une voie désormais essentielle pour leur élimination. En effet, à un moment où l'on est contraint d'économiser à la fois l'énergie et les matières premières, il convient de considérer les déchets comme une matière première d'un type particulier qui peut donner lieu à des opérations de valorisation, notamment par la récupération : nous aborderons rapidement ce problème. Comme dans la partie précédente consacrée à la production des déchets, nous traiterons essentiellement des ordures ménagères.

La collecte des ordures ménagères et des déchets encombrants

* *Procédés courants de collecte des ordures ménagères*
Différents modes de collecte peuvent être envisagés, selon les principes suivants définis par l'Association générale des hygiénistes et techniciens municipaux.

● *Collecte ordinaire ou collecte ouverte*
Le déversement des récipients — les poubelles ordinaires — se fait directement dans les bennes. C'est le mode le plus simple, le plus usité en France. Mais on ne peut éviter des poussières et un épandage accidentel de détritus sur la voie publique. Les modes ci-après éliminent cet inconvénient, mais sont en général d'un coût plus élevé.

● *Collecte hermétique*
La collecte est dite hermétique lorsque sont utilisées des poubelles normalisées, fermées par un couvercle à charnière, le contenu se déversant dans des véhicules complètement clos. Ce vidage est opéré par un orifice, généralement placé à l'arrière du véhicule, fermé par un opercule dont les mouvements d'ouverture et de fermeture correspondent exactement, par une coordination convenable, à ceux de renversement et de vidage des poubelles.

● *Collecte par échange de récipients*
Les récipients pleins sont chargés sur des camions appropriés et remplacés par des récipients vides venus du lieu de vidage et remis en bon état après lavage.

● *Collecte par sacs perdus*
Elle s'inspire du système précédent, mais au lieu de récupérer les récipients, les sacs sont « perdus », c'est-à-dire éliminés avec les ordures qu'ils contiennent.

B. Uzzle - Magnum

▲ *La collecte des déchets par sacs perdus permet de diminuer de 30 % le temps de manipulation des éboueurs qui n'ont pas à rapporter les récipients vides.*

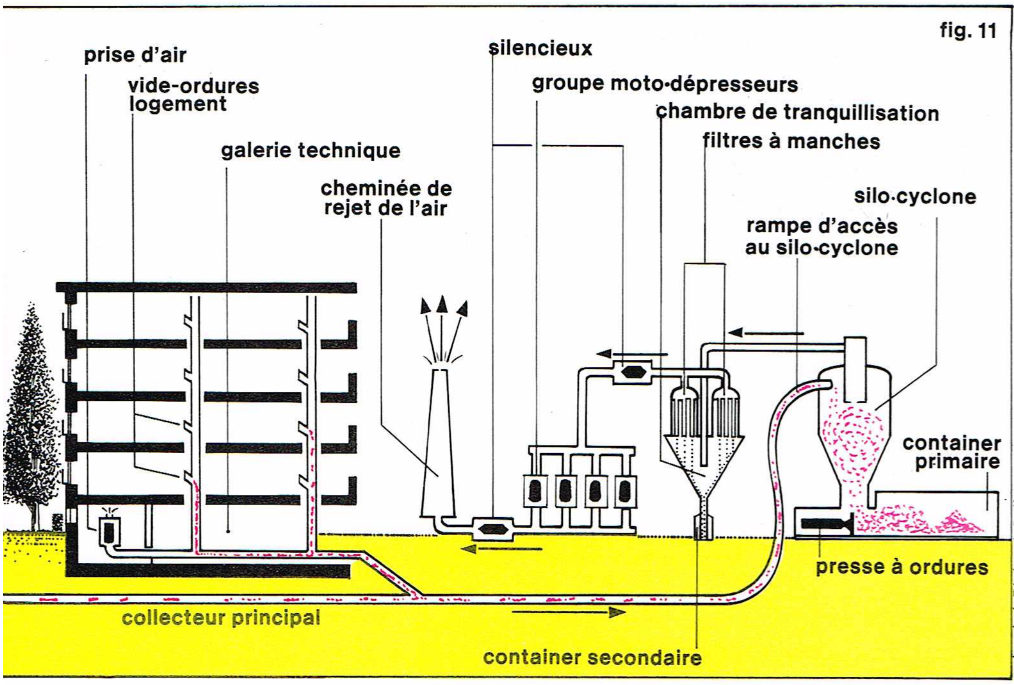

▲ *Figure 11 : schéma de principe de la collecte pneumatique (d'après* Choix d'un système de précollecte des ordures ménagères, *document n° 3, juillet 1975, Société centrale pour l'équipement du territoire).*

▼ ***La collecte des déchets encombrants par containers fixes installés temporairement n'est pas toujours satisfaisante, des ordures ménagères et des déchets commerciaux s'y trouvant souvent mêlés.***

TOP

Les sacs perdus — en papier ou en polyéthylène — permettent également de pratiquer une collecte hermétique. Mais, en plus, ils contribuent à abaisser dans des proportions appréciables — de l'ordre de 30 % — les temps de manipulation, puisque les éboueurs n'ont pas à rapporter de récipients vides. Ce système présente plusieurs avantages :

— économie en personnel et en matériel,
— possibilité d'utilisation de simples camions à plateau en cas de nécessité, tout en maintenant une collecte propre,
— fatigue réduite lors des manipulations (absence de poids mort),
— niveau sonore des opérations de ramassage très réduit.

Son utilisation tend ainsi à se développer de plus en plus.

● *Collecte par conteneurs*

Ce mode consiste à utiliser des bacs de grande capacité et répond aux besoins particuliers de grands ensembles : habitations, centres commerciaux, etc.

Ces bacs roulants de grande capacité (300 à 1 100 litres), en plastique ou en métal, sont conçus pour être vidés mécaniquement dans des bennes équipées d'un dispositif de lavage approprié. Ce système, comme les sacs, permet une diminution appréciable du temps de collecte. Les bacs roulants peuvent être utilisés en zone pavillonnaire ou, pour éviter un ramassage de porte à porte, on peut les mettre à la disposition des habitants, de place en place dans un abri ou sur une aire spécialement aménagée.

* *Procédés spéciaux de collecte des ordures ménagères*

● La *collecte pneumatique* a fait son apparition en Suède il y a une dizaine d'années et a donné lieu à une réalisation récente en France dans la ville neuve de Grenoble-Échirolles. Elle consiste à transporter les ordures par aspiration dans un réseau de conduites de grand diamètre (50 cm) depuis le pied de chute des vide-ordures jusqu'à un silo central de stockage (*fig.* 11).

Le réseau est mis en dépression à l'aide de pompes puissantes. Les ordures chassées par l'air, circulant rapidement dans les conduites (100 km/h), peuvent être transportées ainsi sur une distance qui peut atteindre 2,5 km et sont ensuite reprises dans des conteneurs de grande capacité, pour être acheminées au lieu de traitement. Chaque vide-ordures est ainsi « soutiré » une ou deux fois par jour, grâce à un système de vannes télécommandées, dont le fonctionnement peut être programmé.

Le principal intérêt de ce procédé est de supprimer pratiquement toute main-d'œuvre de manutention entre les « producteurs » (vide-ordures des logements) et le silo de stockage, et d'allier de très bonnes conditions d'hygiène, de confort et d'esthétique. Il laisse cependant subsister la nécessité de collecter spécialement les « refus de vide-ordures ». D'autre part un handicap important est son coût d'investissement initial élevé, qui pose des problèmes à la collectivité, à l'aménageur ou au promoteur.

● L'*évacuation par voie humide* fait appel à l'eau comme vecteur et s'effectue à partir d'un évier-vidoir, éventuellement muni d'un petit broyeur, raccordé soit directement au réseau d'égouts, soit à un réseau spécial fonctionnant sous vide.

Il présente sensiblement les mêmes avantages et les mêmes inconvénients que la collecte pneumatique, notamment celui de nécessiter une collecte spéciale pour les objets qui ne peuvent passer par l'évier-vidoir. Après un nombre appréciable de réalisations dans les années 1930 en région parisienne, il n'a donc plus connu d'autres développements.

Il faut noter d'ailleurs que l'évacuation directe par les égouts des ordures ménagères préalablement broyées est actuellement interdite en France — sauf dérogation préfectorale — alors que ce procédé est largement utilisé dans certains pays, les États-Unis notamment.

* *Le coût de la collecte*

Il s'évalue généralement à la tonne ramassée. Dans certaines études, il l'est par logement, sur la base de 3,5 hab./log., ce qui équivaut sensiblement à 1 tonne par an.

Les dépenses d'enlèvement des ordures ménagères ont une double origine :

● La *précollecte* — ou *collecte privée* — qui correspond à l'acheminement des déchets depuis leur point de production (habitation) jusqu'au point de prise en charge par le service municipal de collecte. Ces dépenses sont assez faibles dans le cas d'immeubles collectifs, en particulier de ceux équipés de vide-ordures.

Elles sont très variables en fonction de divers paramètres : fréquence de la collecte, nombre de logements par étage, type de récipient. Une étude effectuée par le BETURE en 1974 pour le compte du secrétariat d'État à l'Environnement montre que le prix moyen de revient de la précollecte dans un immeuble collectif avec vide-ordures se situe entre 200 et 300 F/log./an (prix au 1er janvier 1973). Bien entendu, ces dépenses sont intégrées dans les dépenses générales de gestion des immeubles et ne sont pas comptabilisées au titre de la collecte des ordures ménagères.

● La *collecte publique,* qui correspond à l'ensemble des coûts nécessaires au bon fonctionnement du service municipal de ramassage. A ces dépenses s'ajoutent les dépenses d'évacuation et de traitement ; le total représentant les charges du service municipal qui seront réparties entre les habitants au moyen de la taxe d'enlèvement des ordures ménagères.

Le prix de revient de la collecte publique dépend de deux types de facteurs :

— des données impératives : le type d'habitat, la topographie, les difficultés dues à la circulation urbaine...,
— des paramètres qui résultent du choix de l'auteur du projet d'organisation de la collecte et qui déterminent le niveau de qualité du service recherché.

L'étude du BETURE fait apparaître un prix moyen en France de 75 à 80 F/log./an (valeur au 1er janvier 1973), pour une tonne environ. Une enquête menée en 1972 par les ingénieurs des Villes de France (IVF) dans 32 villes françaises montrait des écarts très importants : de 43 à 126 F la tonne (prix de 1971). Les prix diminuent fortement lorsque le degré d'urbanisation augmente ; au contraire, ils augmentent très nettement en zone pavillonnaire.

* *Enlèvement des déchets encombrants*

La collecte de ces déchets est organisée de façon différente par les municipalités.

● La *collecte par camion en porte à porte* périodique est la plus répandue. Ce système ne donne pas toujours les résultats attendus, par manque d'information du public.

● La *collecte en containers fixes :* par cette méthode on recueille souvent aussi des déchets déposés par des commerçants et des ordures ménagères qui pourraient être remises à la collecte normale.

Traitements des ordures ménagères

Il n'existe pas de procédé de traitement universel et idéal, utilisable dans n'importe quelles circonstances. Néanmoins on dispose actuellement d'un éventail de moyens qui, utilisés judicieusement, permettent d'apporter des solutions satisfaisantes aussi bien au plan de la protection de l'environnement que du point de vue économique.

* *Importance relative des différents modes de traitement*

Selon une estimation effectuée par la Direction des collectivités locales, les modes de traitement des ordures ménagères se répartissaient de la façon suivante, en 1970 :

Mode de traitement	Quantités (millions de tonnes)	Population desservie (en %)
— décharge contrôlée	7,0	70,9
— incinération	2,0	21,3
— compostage	0,7	7,3
— broyage	0,5	0,5
	10,2	100,0

De nouveaux types de traitements font par ailleurs l'objet de recherches et de réalisations expérimentales, notamment l'incinération à haute température et la pyrolyse.

* *Mise en décharge « contrôlée »*

Les décharges « brutes », réalisées sans aucune précaution, sont interdites en France depuis la circulaire du 1er février 1973. La mise en décharge des ordures ménagères doit donc désormais être « contrôlée », c'est-à-dire « dirigée ».

Ce mode de traitement consiste pour l'essentiel à épandre les ordures brutes en couches successives de 2 à 2,50 m d'épaisseur et à les recouvrir chaque jour d'un matériau inerte, par exemple de la terre végétale. Depuis la mise en œuvre du procédé suivant la méthode d'origine, une évolution s'est manifestée dans les techniques employées, en raison notamment de la possibilité d'utiliser des engins de terrassement plus lourds et d'une plus grande maniabilité (*fig.* 12).

Une première technique — en décharge compactée — permet, grâce à l'utilisation d'engins spéciaux munis de roues à bandage « pieds de moutons », un gain de volume appréciable, et même la mise en place de la couche de couverture peut être différée de plusieurs jours.

Une autre technique, apparue il y a quelques années, se répand rapidement. Elle consiste à broyer les ordures préalablement à leur mise en dépôt par couche d'épaisseur modérée (0,50 à 1 m). Ce broyage permet également de réduire le volume des ordures et assure une transformation plus rapide et plus complète des produits.

La mise en décharge contrôlée satisfait à des règles précises d'implantation (une enquête géologique est effectuée avant de retenir un site) et d'aménagement des abords (elle donne lieu de plus en plus à des aménagements paysagers).

* *Compostage*

Le compostage ou traitement par fermentation biologique a pour objet d'activer et de diriger la transformation des ordures qu'on produit naturellement dans les décharges afin d'obtenir un produit, le compost, utilisable en agriculture comme amendement organique. Le principe du traitement est le suivant :

— les ordures subissent en premier lieu un traitement physique qui permet d'éliminer certains déchets impropres au compostage (ferrailles, verres...) et de réduire la dimension des autres déchets afin de faciliter leur fermentation ;

— la fermentation aérobie des produits compostables est ensuite dirigée par apport d'air et, éventuellement, d'eau.

Cette fermentation peut avoir lieu :

— soit en tas avec retournement périodique : c'est le procédé dit « de fermentation lente », d'une durée de 2 à 3 mois (*fig.* 13a) ;

— soit dans des cellules de fermentation dont la forme varie selon les constructeurs et dans lesquelles les produits sont brassés pendant une durée de 5 à 20 jours : c'est le procédé dit « de fermentation accélérée » (*fig.* 13b).

Le compost ainsi obtenu est principalement utilisable en agriculture, bien qu'il ait d'autres débouchés potentiels, la culture des champignons notamment.

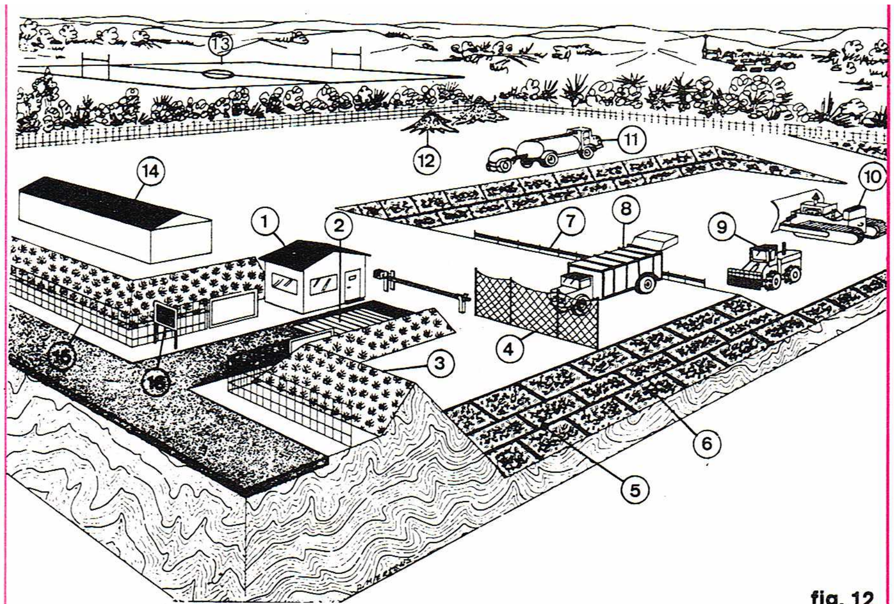

fig. 12

1 poste de contrôle
2 pont bascule
3 digue engazonnée de protection esthétique le long d'une route fréquentée
4 écran mobile de protection contre les envols (mailles < 50 mm - hauteur > 3 m)
5 couverture journalière
6 couches d'ordures
7 butée amovible devant le front de décharge
8 benne de collecte en cours de déchargement
9 compacteur
10 routeur d'épandage des ordures et de la couverture
11 tonne à eau (sécurité incendie)
12 réserve de matériau pour couverture et sécurité incendie
13 terrain de sport aménagé sur la partie terminée de la décharge
14 locaux d'exploitation (garages, ateliers, etc.)
15 clôture générale du terrain (hauteur > 2 m)
16 panneau de signalisation précisant le numéro et la date de l'arrêté d'autorisation et les heures d'ouverture

La Documentation française

▲ ***Figure 12 :** schéma type d'une décharge contrôlée des résidus urbains (d'après* **les Déchets solides, Proposition pour une politique,** *rapport du Groupe d'études sur l'élimination des résidus solides, Environnement, la Documentation française, 1974).*

▼ ***Figure 13 :*** **a,** ***schéma type d'une usine de compostage par fermentation lente ;*** **b,** ***schéma type d'une usine de compostage par fermentation accélérée (d'après*** **les Déchets solides, Proposition pour une politique,** ***rapport du Groupe d'études sur l'élimination des résidus solides, Environnement, la Documentation française, 1974).***

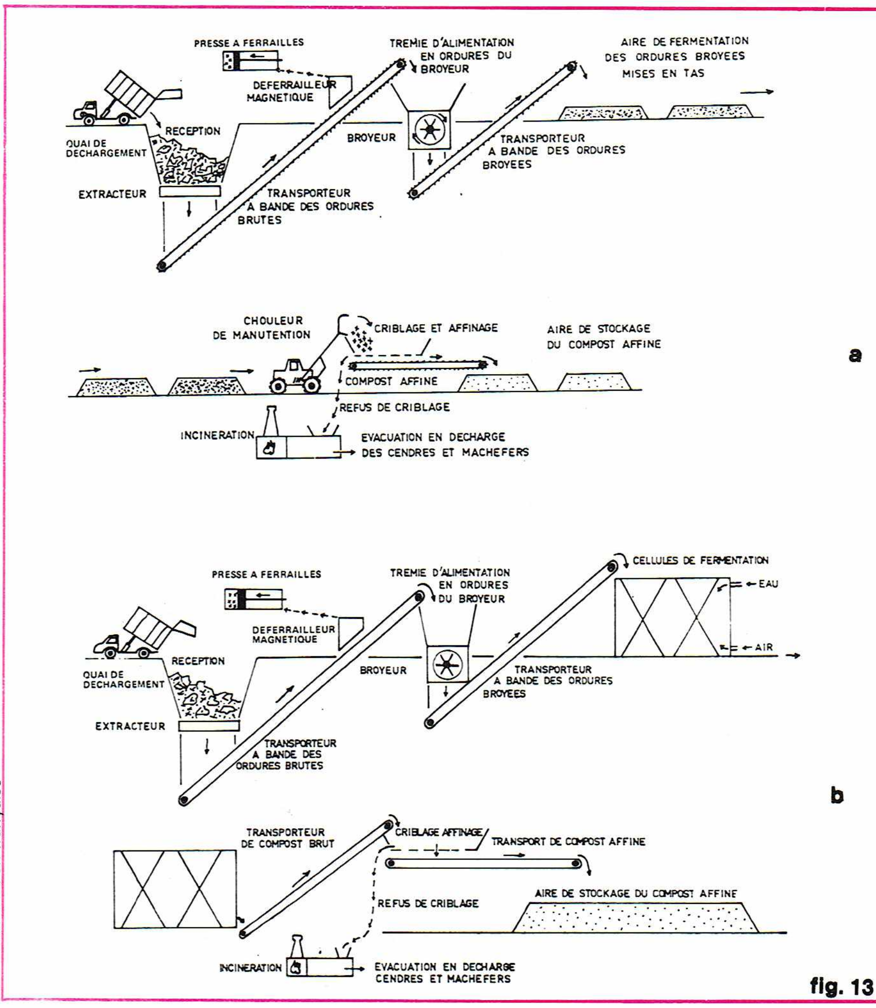

fig. 13

La Documentation française

▼ Figure 14 : *a, schéma type d'une usine d'incinération sans récupération de chaleur (four à grille mécanique) ; b, schéma type d'une usine d'incinération avec récupération de chaleur (four à grille mécanique)* [*d'après* **les Déchets solides, Proposition pour une politique,** *rapport du Groupe d'études sur l'élimination des résidus solides, Environnement, la Documentation française, 1974*].
Tableau IX : coût du traitement des ordures ménagères en 1973 par type de procédé.

* *Incinération*

C'est une technique bien connue et largement utilisée : les ordures introduites dans un four subissent d'abord une déshydratation (pour réduire leur degré d'humidité qui est encore de 35 % en moyenne) par effet de rayonnement et passage des gaz chauds ; puis elles entrent en combustion sous l'action de la température et l'apport d'air comburant (*fig.* 14).

Différents types de fours et de grilles assurent automatiquement l'avancement des ordures et le retournement de la masse en combustion de manière à permettre une combustion très complète. Moyennant certaines précautions — lavage et dépoussiérage des gaz —, l'incinération des ordures ménagères n'est pas — contrairement à ce qui a été parfois affirmé — un procédé dangereux pour la santé publique qu'il y aurait lieu désormais d'écarter.

La chaleur dégagée par la combustion des ordures peut — dans les grandes usines d'incinération — être récupérée sous forme de vapeur d'eau, qui est alors :

— soit envoyée dans un réseau de chauffage urbain ;
— soit distribuée à des établissements gros consommateurs de vapeur : usine de séchage du bois, piscine, hôpital, école ;
— soit, enfin, détendue dans un turbo-alternateur pour produire de l'électricité. C'est dans ce dessein que l'E. D. F. a créé une filiale, la TIRU ; celle-ci exploite, par exemple, à Ivry-sur-Seine la plus grande centrale d'incinération de France qui traite 600 000 tonnes d'ordures par an.

* *Coût du traitement*

Il est plus facile de cerner le coût du traitement des ordures que celui de leur collecte. Dans le *tableau* IX, on trouvera des fourchettes de prix de revient par tonne traitée. Le grand écart des prix indiqués pour un même procédé s'explique à la fois par la différence de taille des installations et l'utilisation qui est faite de leur capacité théorique. Ces chiffres sont à rapprocher du coût moyen de la collecte publique : 25 à 80 F/t en moyenne.

La récupération

Si la récupération de matières telles que papiers, cartons, ferrailles, métaux non ferreux, verres, textiles, etc., est relativement développée en ce qui concerne les déchets de l'industrie et du commerce, elle n'a eu jusqu'à présent qu'un caractère marginal dans le domaine des ordures ménagères.

* *Importance de la récupération*

Les circonstances actuelles ont mis l'accent sur l'intérêt d'une telle récupération pour trois raisons principales :

— la nécessité, sur le plan national, de limiter les importations des matières premières « naturelles » ;
— la prise de conscience de plus en plus répandue dans l'opinion publique que les ressources naturelles ne sont pas inépuisables et que, par conséquent, il fallait favoriser la récupération des matériaux recyclables ;
— l'élimination des ordures ménagères est une charge importante pour les collectivités locales ; dans la mesure où il est possible de l'organiser, la récupération valorise les déchets et est susceptible d'entraîner un allégement du coût de cette élimination.

La récupération permet donc d'atteindre des objectifs intéressants pour l'économie générale et la protection de l'environnement. Cependant elle doit être soigneusement pensée et organisée. En effet, assurer des débouchés pour les produits récupérés, dans des conditions de rentabilité acceptables, ne se fait pas sans difficulté.

fig. 14

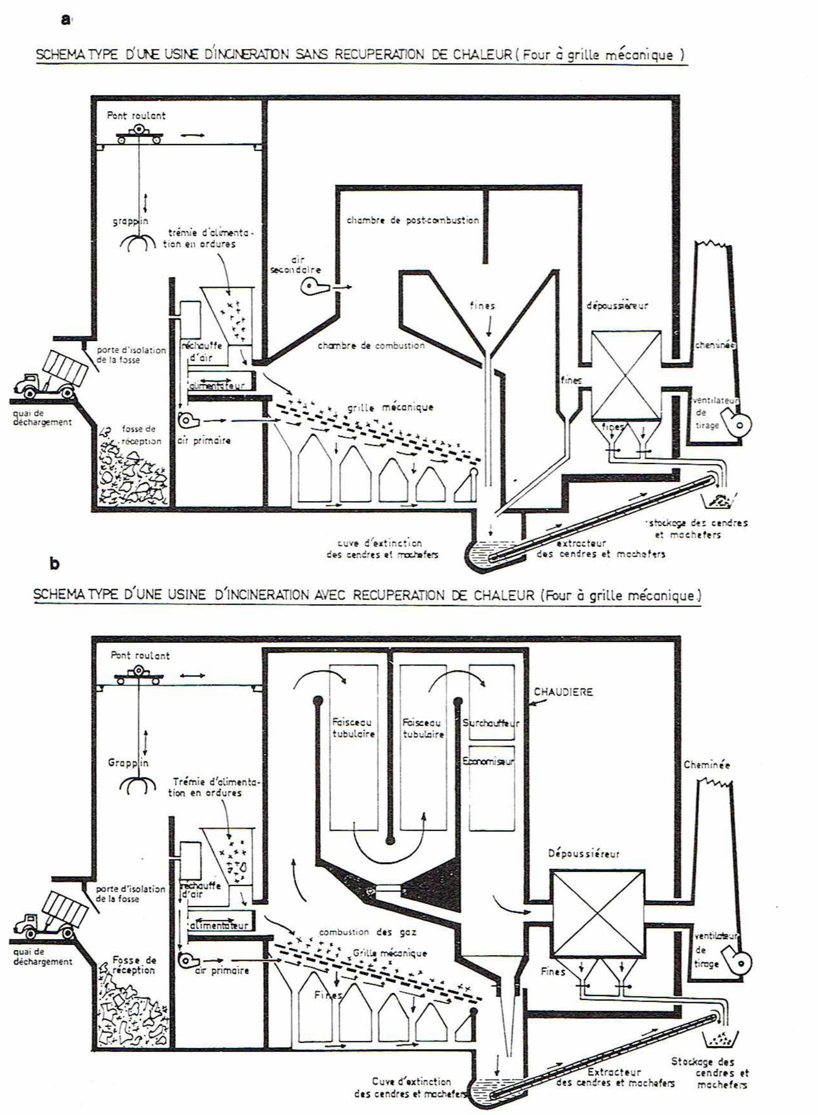

La Documentation française

Tableau IX
Coût du traitement des ordures ménagères en 1973 par type de procédé

Type de procédé	Prix de revient (en francs par tonne d'ordures effectivement traitées)
Décharge contrôlée traditionnelle	10 – 25
Décharge d'ordures broyées	20 – 45
Compostage	25 – 60 (recettes provenant de la vente du compost non comprises)
Incinération	35 – 100 (recettes éventuelles de la récupération de chaleur non comprises)

◀ *Tableau X : évolution et importance de la récupération de matières en France.*

Tableau X

Évolution et importance de la récupération de matières en France

Matériaux	Estimation pour 1971 (1) Matériaux récupérés		Estimation pour 1974 (2) Matériaux récupérés	Récupération potentielle dans les matériaux urbains
Papier-carton	1 406 000 t	5 000 000 t (consommation totale)	2 000 000 t	4 000 000 t
Ferraille	5 600 000 t (+ 5 500 000 t recyclage interne)	22 400 000 t (production totale d'acier)	6 500 000 t	
Cuivre	144 000 t	254 000 t (consommation de matière première vierge)	750 000 t	500 000 t
Aluminium	126 300 t	375 000 t (consommation de matière première vierge)		800 000 t
Verre	270 000 t	1 500 000 t (production totale)		

(1) Rapport du Groupe d'Étude sur l'Élimination des résidus solides (1974).

(2) Fédération nationale des Syndicats des Industries et Commerces de la récupération.

* *État de la récupération en France*

L'industrie de la récupération est loin d'être négligeable. En 1974, elle occupait déjà 35 000 personnes avec un chiffre d'affaires de 6 milliards de francs (1974). Le *tableau* X donne des indications concernant :

— l'évolution de la récupération entre 1971 et 1974 ;

— l'importance de la récupération par rapport à la production ou à la consommation totale ou à la consommation de matières premières « vierges » ;

— l'importance de la récupération par rapport aux quantités susceptibles d'être offertes à la récupération, c'est-à-dire aux quantités de matériaux éliminés chaque année dans les résidus urbains.

* *Méthodes de récupération*

Différentes méthodes et différents procédés existent, mais la recherche dans ce domaine reste largement ouverte.

● *Récupération avant la collecte*

On peut réaliser « à la source » la récupération de certains déchets qui, ainsi, ne seront pas présentés à la collecte des ordures ménagères.

— *Récupération chez l'habitant*

Elle est actuellement très limitée et presque entièrement fondée sur la bonne volonté des habitants. Cependant il n'est pas exclu que le ramassage préalable puisse être organisé par les municipalités.

— *Le centre de recyclage*

La récupération fondée sur le civisme et la bonne volonté de la population peut prendre une nouvelle forme : le « centre de recyclage », né aux États-Unis en 1969. Il s'agit d'une aire située en pleine zone urbaine où sont déposés plusieurs grands containers, chacun recevant une catégorie de déchets triés et apportés par les habitants eux-mêmes. On peut ainsi récupérer : les papiers journaux, les cartons d'emballage, les boîtes de conserve, les verres, les vieux vêtements et chiffons, les matières plastiques. De tels centres sont très répandus aux États-Unis : on en compte plus de 1 000.

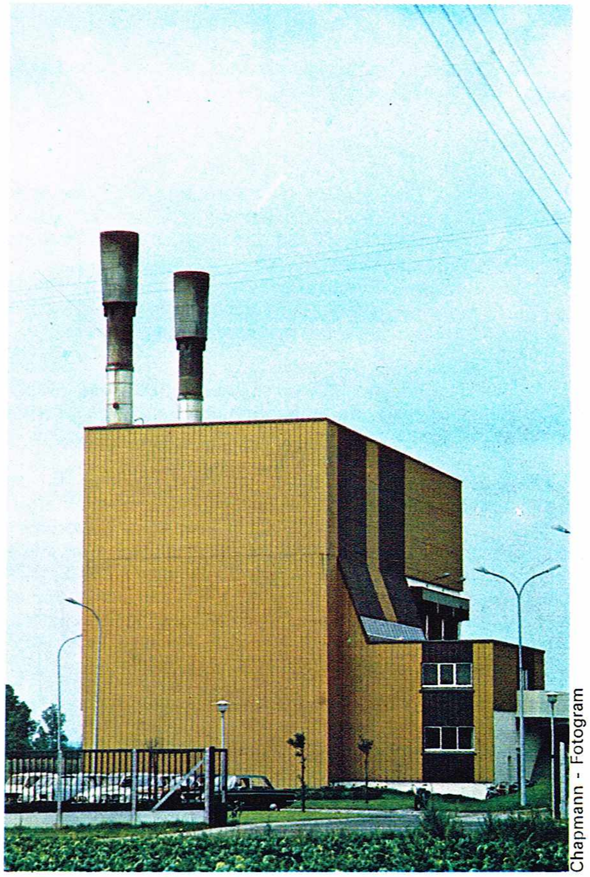

Chapmann - Fotogram

◀ ***L'incinération des ordures ménagères après déshydratation est une technique largement utilisée et non dangereuse pour la santé publique (usine d'incinération de Hazebrouck, Pas-de-Calais).***

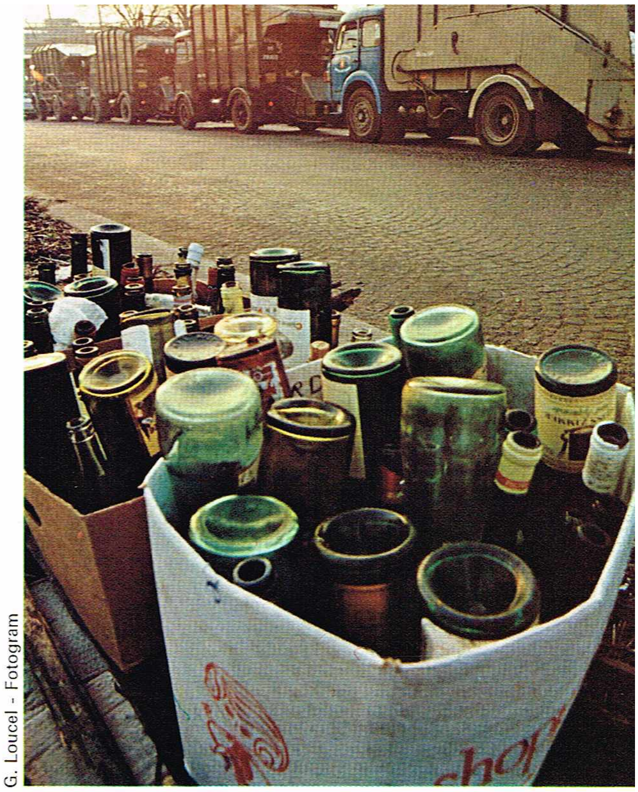

G. Loucel - Fotogram

▶ *La collecte sélective consiste à ramasser de façon séparée divers constituants des ordures ménagères (comme, ici, le verre) mais cela suppose un tri chez l'habitant ou au niveau de l'immeuble.*

● *Récupération au niveau de la collecte*

Il s'agit en fait de la collecte sélective. Celle-ci consiste à collecter de façon séparée divers constituants des ordures ménagères. Elle suppose un tri chez l'habitant, au niveau de l'immeuble, du ou des matériaux que l'on veut trier.

C'est ce système d'organisation qui a été adopté dans certaines villes de Suède comme Orebro-Vivella où trois poubelles sont nécessaires (pour le verre, les papiers et cartons, le reste des ordures).

Pour la collecte des papiers et cartons, le rapport du Groupe d'études sur les résidus solides suggère trois modes d'organisation.

— La collecte, le tri, la mise en balles et le stockage des vieux papiers sont pris en charge directement par la municipalité qui négocie avec les papetiers.

— La collecte seule est prise en charge par la collectivité locale; les autres opérations étant réalisées par une entreprise de récupération ou une papeterie.

— La collectivité locale donne son accord à une entreprise de récupération ou à une papeterie qui se charge de l'ensemble du travail.

Des expériences de récupération des vieux papiers ont lieu actuellement en France (Le Havre, La Rochelle).

● *Récupération à partir des procédés de traitement actuels*

Il s'agit essentiellement des systèmes suivants :

— Les usines de compostage, qui permettent une réutilisation dans l'agriculture.

— Les usines d'incinération, qui, pour certaines, permettent une récupération de chaleur, bien que cela ne représente pas une forme très satisfaisante de valorisation des résidus urbains.

— Plus récemment, la récupération des résidus d'incinération; le Bureau des recherches géologiques et minières effectue des études sur la revalorisation des matériaux contenus dans les mâchefers.

● *Récupération à travers les nouvelles techniques de traitement*

Les nombreuses recherches expérimentales menées actuellement, notamment aux États-Unis, en France et en Italie, portent sur les techniques suivantes :

— tri automatique des ordures ménagères (procédés du *Bureau of Mines* du Stanford Research Institute et de la Sortex Company) ;

— combinaison du tri et de l'incinération (procédé Cicchini) ;

— la pyrolyse (carbonisation des ordures sous l'effet de la chaleur en absence d'oxygène).

L'eau et la ville

Nous avons déjà abordé les relations entre l'eau et la ville sous l'angle de la consommation de l'eau, tout d'abord, et, ensuite, sous celui des réseaux de distribution d'eau et d'assainissement.

Compte tenu de l'importance capitale de l'eau pour la vie de la ville, il convient maintenant de situer ces deux aspects sectoriels dans une problématique plus large.

La ville et le cycle de l'eau

L'urbanisation (par l'imperméabilisation des sols), comme certains grands aménagements (construction de lacs artificiels, par exemple), modifie sensiblement le cycle naturel de l'eau.

De plus, les volumes d'eau qui sont prélevés sur ce cycle (pour les usages domestiques, mais surtout agricoles et industriels) sont chaque jour plus importants, et arrivent à représenter une part non négligeable de la circulation totale, comme le montre la *figure* 15, extraite de l'excellent ouvrage d'Hervé Mathieu, *l'Eau et les Déchets urbains* (Centre de recherche d'urbanisme), auquel nous emprunterons l'essentiel des chiffres et illustrations des pages suivantes.

L'eau et les déchets urbains - La ville et le milieu extérieur

Après avoir situé les « perturbations urbaines » dans le cycle naturel de l'eau, il faut s'interroger sur les prélèvements urbains opérés sur ce cycle et, d'une manière générale, sur la circulation dans la ville.

La *fig.* 16 montre des liens logiques existant entre l'eau et les déchets urbains, la ville et le milieu extérieur.

L'eau et la vie urbaine

Grâce à ses multiples propriétés et à son abondance à la surface de la Terre, l'eau joue, en plus de son rôle primordial de « source de vie », des rôles extrêmement divers dans la collectivité humaine, et dans les villes en particulier :

— rôle « purificateur » comme agent de nettoyage ;

— rôle de « convoyeur » : transport dans ou sur l'eau ;

— rôle d'échangeur calorifique comme liquide caloporteur (chauffage des immeubles) ou réfrigérant (applications domestiques et industrielles) ;

— rôle énergétique : utilisation de l'énergie potentielle de l'eau par hydro-électricité ;

— rôle ludique pour la pêche, la promenade, la natation ;

— rôle thérapeutique : utilisation de certaines propriétés des eaux dans les villes thermales ;

— rôle esthétique et psychologique : on a parlé, à ce point de vue, d'« espaces bleus » (rivières, canaux, plans d'eau) jouant un rôle un peu similaire (quoique moins nécessaire) à celui des « espaces verts ».

L'eau et la localisation des villes

Sans eau, pas de ville. Et, en effet, la présence d'eau a toujours été le principal facteur de localisation des groupements humains. De tout temps, on a pu observer que la densité de population est plus élevée dans les vallées, près des estuaires, des fleuves, des lacs, etc.

Enfin l'eau reste un facteur de localisation de première importance pour les entreprises industrielles qui doivent être alimentées en matériaux pondéreux ou qui sont grandes consommatrices d'eau en raison de leurs procédés de fabrication.

Besoins et ressources en eau

Nous ne reviendrons pas sur l'étude des besoins en eau de la ville que nous avons faite dans le chapitre *Les consommations de la ville*. Cependant, on pourra s'y reporter, le cas échéant, pour bien comprendre l'analyse comparative à laquelle nous allons procéder entre les besoins et les ressources en eau.

A première vue, ces dernières apparaissent comme étant beaucoup plus importantes que les besoins. Si bien que l'on a du mal à croire les écologistes lorsqu'ils affirment que, à moins de changer les pratiques actuelles, l'humanité s'achemine rapidement vers une situation de pénurie d'eau.

Or, Hervé Mathieu, dans son ouvrage déjà cité, a procédé à des estimations très intéressantes à cet égard.

Les besoins annuels en l'an 2000 seront d'environ 18 000 km^3, alors que le volume total présent dans la biosphère est estimé à 1,35 · 10^9 km^3, soit un rapport de 1 à 75 000 ! Mais, à plus de 97 %, cette quantité est constituée par les océans, et, si l'on excepte également l'eau des glaciers, l'eau atmosphérique et l'eau assurant l'humidité du sous-sol, il ne reste que 9 millions de km^3 poten-

tiellement disponibles. Dans cette réserve globale d'eau douce utilisable, il est possible de prélever chaque année jusqu'à 50 000 km³ (ruissellement de surface et écoulement souterrain). Le rapport besoins/disponibilités n'est déjà plus que de 1 à 3.

En France, les 440 km³ de précipitations annuelles se répartissent approximativement en :

— 260 km³ : évaporation,
— 80 km³ : ruissellement de surface
— 100 km³ : écoulement souterrain
} soit 180 km³ théoriquement disponibles.

Les prélèvements annuels (urbains, industriels et agricoles) étant estimés à 60 km³ pour l'an 2000, on voit que, sur le plan national, on aboutit au même rapport : besoins/disponibilités = 1/3.

Si l'on ajoute à cela que les ressources sont loin d'être accessibles uniformément dans le temps et dans l'espace, et qu'une part toujours plus grande de celles-ci est souillée par la pollution, donc rendue impropre à la consommation directe, on se rend compte alors à quel point l'eau est en train de devenir un bien rare — l'épuration des eaux usées et le recyclage sont désormais strictement nécessaires.

L'eau et la planification urbaine

Comme un être vivant, une ville privée d'eau se verrait condamnée à mourir très rapidement. La réalisation d'installations efficaces d'alimentation, d'évacuation et d'épuration est donc à la base du bon fonctionnement d'une ville.

Ces facteurs doivent, bien entendu, être pris en compte lors de la conception d'une ville nouvelle ou d'un grand ensemble industriel. Mais il ne faut pas oublier qu'il reste énormément à faire pour améliorer les installations des villes actuelles.

En effet, selon H. Mathieu, 85 % seulement de la population française est desservie par un réseau de distribution d'eau, 50 % par un réseau d'égouts, et 15 % par une station d'épuration (en 1972).

L'alimentation en eau

L'alimentation en eau d'une agglomération se fait par une succession d'opérations qui transforment l'eau brute en un produit de consommation « livré » directement à son lieu d'utilisation avec une qualité, un débit et une pression donnés. Elle est d'abord prélevée dans le milieu naturel, puis, après un traitement éventuel, est amenée — par sa propre énergie gravitaire ou grâce à un apport d'énergie extérieur — à un réservoir où elle est stockée dans l'attente d'être distribuée aux usagers domestiques et industriels. Ce sont ces opérations successives que nous allons examiner maintenant.

Le captage

Le captage est l'opération qui consiste à prélever l'eau au cycle naturel de l'eau. Ce prélèvement peut se faire :

* Soit dans les *eaux superficielles*

Malgré la qualité incertaine — voire médiocre — des eaux de surface, on les utilise néanmoins, car on peut régulièrement et facilement prélever des volumes importants. La plupart du temps, il faut cependant leur faire subir un traitement pour améliorer leur qualité.

* Soit dans les *eaux souterraines*

Les eaux souterraines étant, d'une manière générale, moins polluées que les eaux de surface, on préfère cette solution chaque fois que cela est possible.

En dehors des sources, l'eau est captée dans le sous-sol. On y trouve deux types de nappes souterraines :

— la nappe phréatique : c'est la première que l'on rencontre dans le sous-sol, en général très près du sol;

— les nappes captives : ce sont de véritables poches d'eau, enfermées entre deux couches de terrain imperméable. Le niveau piézométrique de la nappe indique quelle est la pression à laquelle ses eaux sont soumises.

Dans tous les cas, les débits de prélèvement ne doivent pas dépasser un niveau maximal :

— le débit naturel pour les sources,

— un seuil limite déterminé par essais de pompage pour les nappes; au-delà de ce seuil, on risquerait un

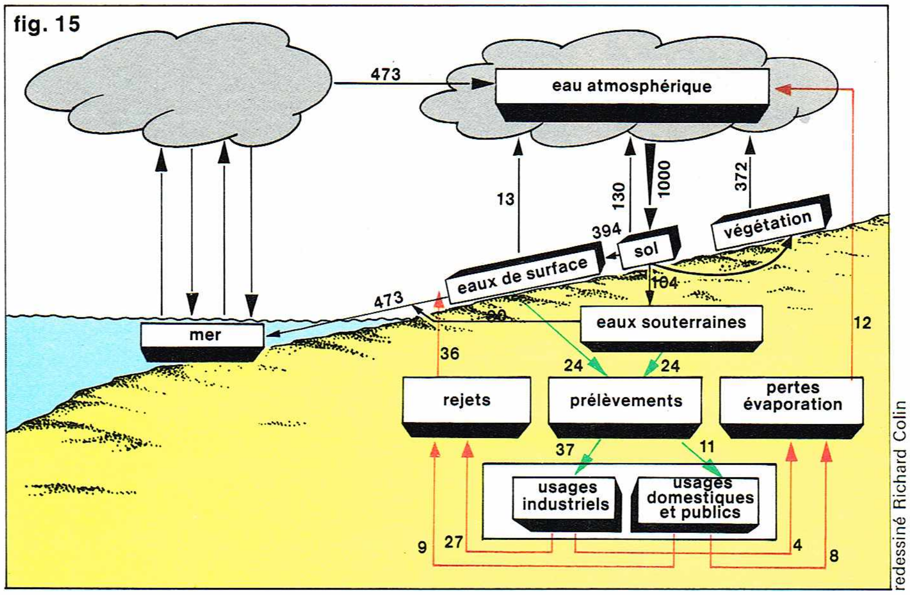

▲ *Figure 15 : la ville et le cycle de l'eau; seuls les prélèvements destinés aux usages industriels, publics et domestiques ont été pris en compte; l'intervention de l'homme dans le cycle hydrologique est plus marquée encore (action sur le sol, la végétation et les prélèvements agricoles) [d'après H. Mathieu,* l'Eau et les Déchets urbains, *Écologie urbaine, Centre de recherche d'urbanisme). Les valeurs indiquées sont en litres d'eau.*

▼ *Figure 16 : représentation des liens logiques existant entre l'eau et les déchets urbains, la ville et le milieu extérieur (d'après H. Mathieu,* l'Eau et les Déchets urbains, *Écologie urbaine, Centre de recherche d'urbanisme).*

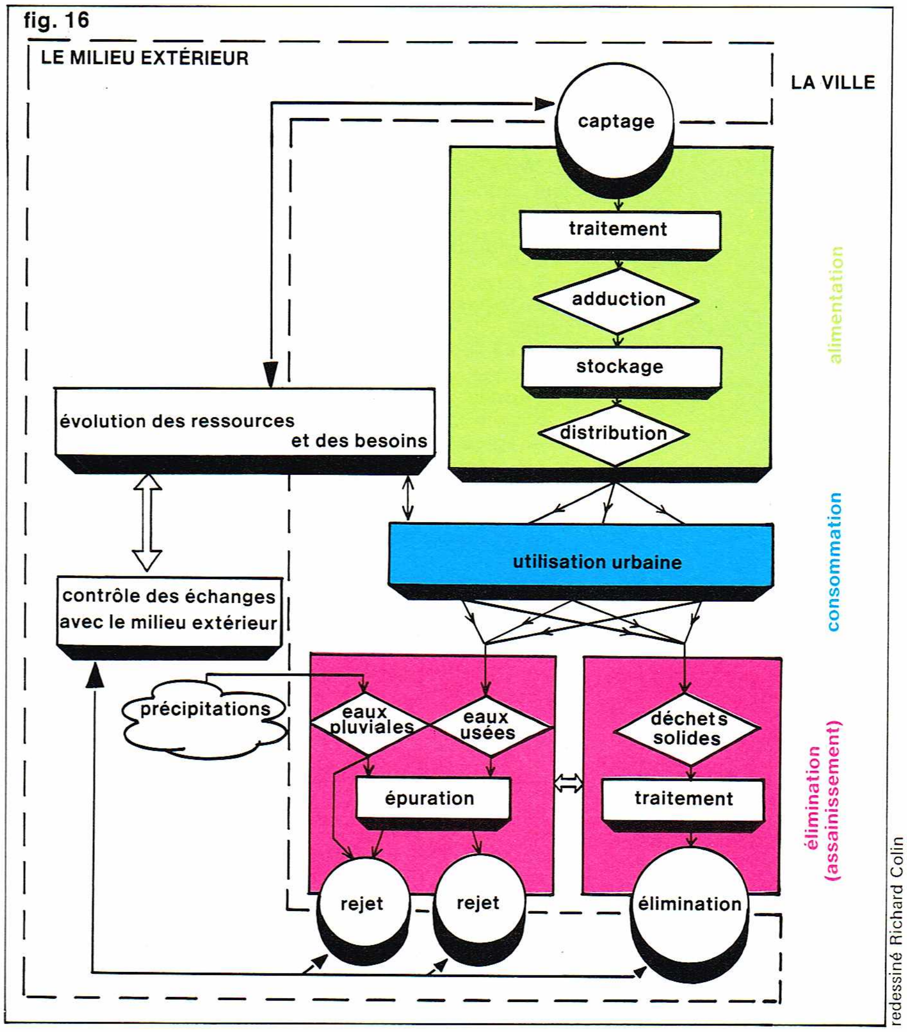

▶ *Détail des canalisations en acier et des vannes à papillon du réservoir de stockage d'eau de L'Hay-les-Rose, qui alimente la ville de Paris.*

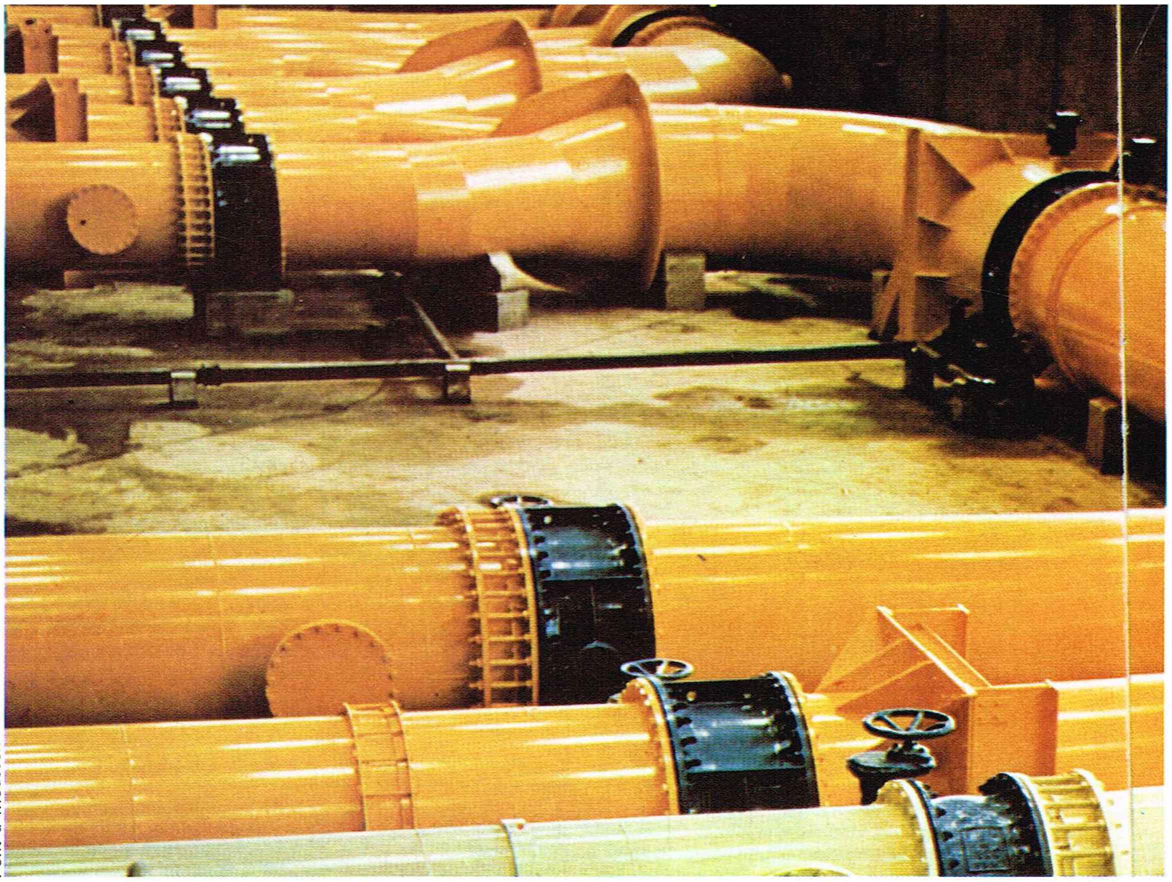

Pont-à-Mousson

colmatage des puits de forage, ou un épuisement de la nappe.

Le choix de l'eau d'alimentation d'une ville est un problème complexe nécessitant des études préalables (techniques, économiques et géologiques) poussées. Ce choix peut prendre une forme simple : faut-il, par exemple, aller chercher, parfois très loin, une eau de qualité satisfaisante et la transporter jusqu'au lieu d'utilisation ou, au contraire, prélever sur place une eau de qualité inférieure et nécessitant par conséquent un traitement d'amélioration artificielle ?

Le traitement de l'eau

Pour déterminer quel(s) traitement(s) appliquer à l'eau prélevée en vue de lui donner les qualités requises, il faut procéder à une analyse complète de ses caractéristiques « naturelles ».

* *Caractéristiques naturelles*

L'eau se définit par des caractéristiques :

● physiques :

— température (environ 10 °C pour l'eau d'alimentation) ;

— couleur et turbidité (un seuil admissible est fixé pour chacune d'elles) ;

— odeur et saveur ;

● chimiques :

— agressivité : caractère acide ou basique mesuré par le pH (l'eau pure est neutre ; pH égal à 7) ;

— dureté : liée à la teneur en sels de calcium et de magnésium et mesurée par le titre hydrotimétrique TH (une eau est considérée comme douce si son TH est < 15) ;

— composition chimique : l'analyse complète est rarement pratiquée ;

● bactériologiques :

— numération totale des germes (pour être potable, une eau doit contenir moins de 5 000 micro-organismes/cm^3) ;

— recherche de germes-tests et de germes pathogènes (une eau potable ne doit en contenir aucun).

* *Traitement de l'eau d'alimentation*

Les traitements dont il va être question concernent essentiellement les eaux superficielles. Selon les cas, on peut faire appel :

● à la floculation : précipitation des matières colloïdales par adjonction de réactifs chimiques ;

● à la décantation et au tamisage : élimination des matières en suspension et du floculat ;

● à la filtration : interception par filtrage mécanique ou absorption des matières en suspension ou dissoutes par passage de l'eau au travers de filtres poreux, de sables ou de graviers très fins ;

● à la stérilisation : élimination des bactéries et surtout des germes pathogènes par le chlore, l'ozone ou les rayons ultraviolets.

* *Procédés d'affinage de la qualité de l'eau*

Après ces traitements, l'eau est, en principe, propre à la consommation. Cependant on peut encore améliorer sa qualité par :

— neutralisation (contre la corrosion) ;

— adoucissement (contre l'entartrage) ;

— déferrisation, démanganisation, désodorisation, fluoration...

En définitive, on peut dire que l'eau qui arrive au robinet de l'usager est, de nos jours, un produit réellement « fabriqué ».

L'adduction

Une fois captée et traitée, l'eau doit être acheminée vers les lieux de son utilisation. Le débit de captage étant relativement constant, à l'inverse de la consommation des usagers, il faut prévoir une installation intermédiaire de stockage qui puisse jouer le rôle de régulateur. On en arrive ainsi au schéma de fonctionnement de la *figure* 17.

Les différentes méthodes d'adduction sont les suivantes :

* *L'adduction gravitaire*

On utilise, dans tous les cas où cela est possible, l'énergie potentielle gratuite de l'eau pour l'amener par gravité au bassin de stockage.

* *L'amenée par refoulement*

Si le réservoir se trouve à une altitude plus élevée que le captage, il faut relever mécaniquement la pression de l'eau à l'aide d'une station élévatoire qui met celle-ci en charge dans une conduite de refoulement (le plus souvent au moyen de pompes centrifuges).

* *L'adduction mixte*

C'est une combinaison des deux types précédents qui est utilisée lorsque :

— le profil du terrain présente des changements de pente très marqués ;

— la distance entre le captage et le réservoir principal est trop élevée.

Les *figures* 18a et 18b présentent deux cas de figures utilisant l'adduction mixte.

* *Service en route*

Lorsque les points de captage et de stockage sont situés de part et d'autre de l'agglomération à desservir, on peut être amené à utiliser la conduite d'adduction comme conduite de distribution. Pour que cela soit possible, il faut, en particulier, que le débit prélevé pour la distribution soit nettement inférieur au débit de la conduite d'adduction. On appelle « service en route » ce système combiné d'adduction-distribution (*fig.* 19).

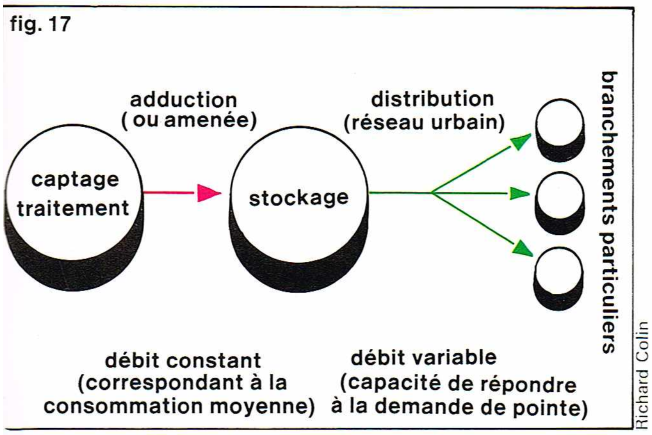

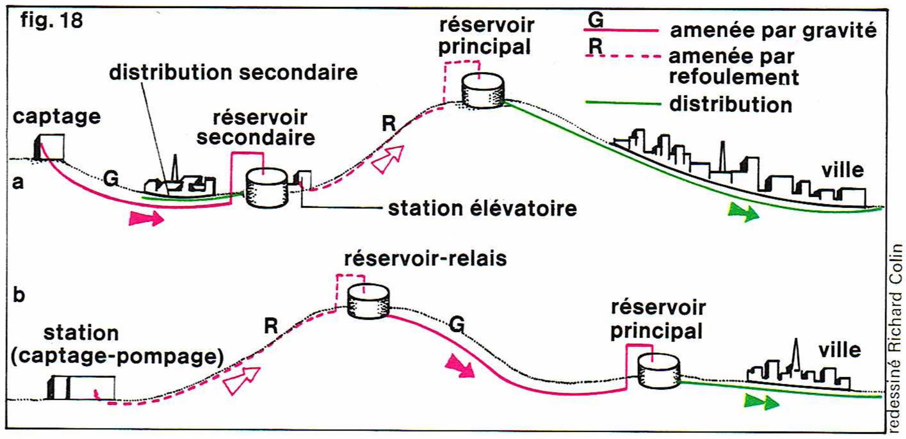

Le stockage

* *Rôle des réservoirs*

On a vu que les réservoirs ont essentiellement comme rôle de constituer un tampon régulateur entre le débit constant de captage et celui, variable, de la distribution aux usagers : aux heures de pointe, la consommation peut atteindre trois à quatre fois la consommation horaire moyenne. Les réservoirs permettent aussi :

— d'assurer la continuité du service lorsque l'adduction est momentanément interrompue ;

— de répondre à une augmentation brutale et exceptionnelle de la demande, en cas d'incendie par exemple.

En plus des réservoirs principaux, on trouve d'autres types de réservoirs :

— Les réservoirs d'étagement permettent d'éviter de trop grandes différences de pression entre les parties hautes et basses d'une ville construite sur un terrain accidenté (*fig.* 20a).

— Les réservoirs d'équilibre permettent d'assurer une pression d'alimentation suffisante dans les quartiers éloignés du réservoir principal (*fig.* 20b).

Les réservoirs sont prévus pour assurer dans le réseau de distribution une pression comprise, en général, entre 20 et 40 mètres de hauteur d'eau. On peut satisfaire à cette exigence de trois façons différentes :

— par un réservoir au niveau du sol placé sur un site suffisamment élevé ;

— par un réservoir-tour (château d'eau) : cette solution présente souvent de graves inconvénients sur le plan de l'esthétique ;

— faute de pouvoir implanter un réservoir-tour, par un réservoir au niveau du sol mais dont l'eau est montée artificiellement en pression par une réserve d'air comprimé.

* *Capacité des réservoirs*

On a vu précédemment que la consommation quotidienne dans une grande agglomération était de l'ordre de 300 à 400 l/hab. Compte tenu des pertes, des risques d'interruption de l'adduction, des extensions futures du réseau, des réserves d'incendie (au minimum 120 m^3), on stocke, en général, une quantité au moins égale à la consommation journalière (et même deux ou trois fois supérieure en cas d'adduction par refoulement).

En pratique, la capacité de stockage d'une ville de 100 000 habitants doit donc être de l'ordre de 30 000 m^3.

La distribution

L'eau stockée doit maintenant être distribuée aux différents usagers.

* *Les réseaux de distribution*

Le problème ayant déjà été traité précédemment, nous nous limiterons à illustrer les deux principaux types de réseaux.

● *Le réseau maillé (structure en arbre)*, constitué d'une suite de conduites hiérarchisées : conduites maîtresse, secondaires, tertiaires, etc., dans lesquelles l'eau circule toujours dans le même sens, et où chacune d'elles transite la totalité des débits qui doivent être fournis à l'aval (*fig.* 21a).

● *Le réseau maillé (structure en treillis)*. Dans ce type de réseau, la conduite maîtresse est souvent reliée à un réservoir secondaire d'équilibre. Le sens de circulation de l'eau dans les conduites s'établit alors en fonction de la répartition des pressions aux différents points du

▲ Figure 17 : schéma de l'alimentation en eau d'une ville.
Figure 18 ; deux cas d'adduction mixte de l'eau :
a, par gravité, puis refoulement ;
b, par refoulement, puis gravité
(d'après H. Mathieu, l'Eau et les Déchets urbains, ***Écologie urbaine, Centre de recherche d'urbanisme).***

▼ Figure 19 : système combiné d'adduction-distribution d'eau, appelé « service en route » (d'après H. Mathieu, l'Eau et les Déchets urbains, ***Écologie urbaine, Centre de recherche d'urbanisme).***

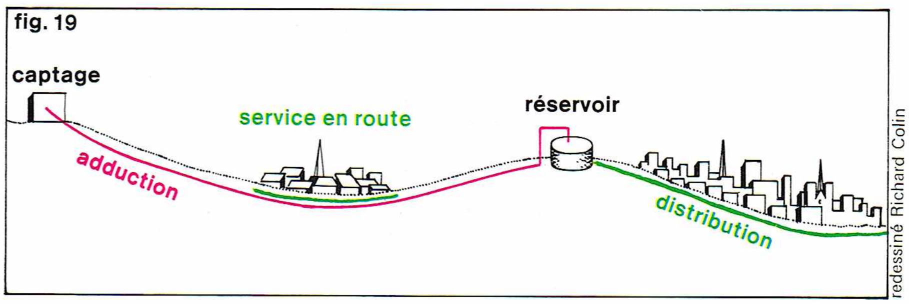

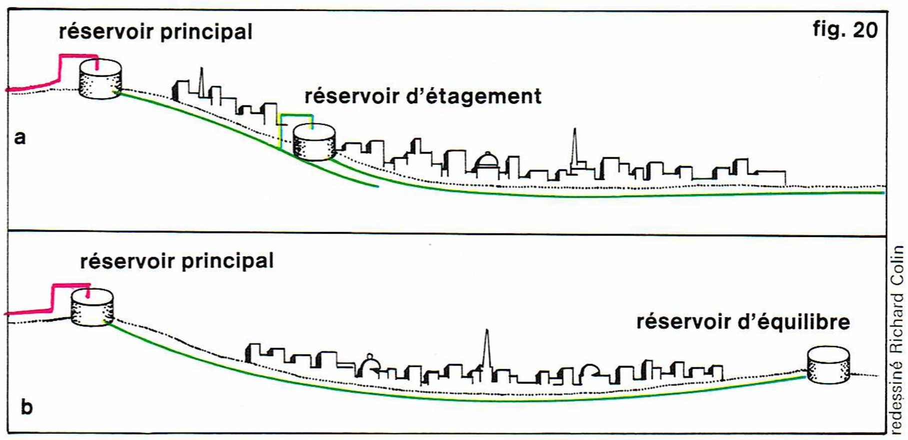

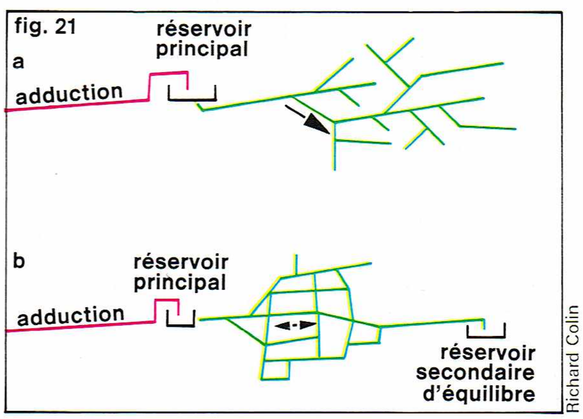

◄▲ Figure 20 ;
les réservoirs d'eau :
a, réservoir principal associé à un réservoir d'étalement ;
b, réservoir principal associé à un réservoir d'équilibre.
Figure 21 ; les deux principaux types de réseaux maillés de distribution d'eau :
a, structure en arbre ;
b, structure en treillis
(d'après H. Mathieu, l'Eau et les Déchets urbains, ***Écologie urbaine, Centre de recherche d'urbanisme).***

▶ *Lorsque la configuration topographique ne permet pas l'implantation d'un réservoir d'eau au niveau du sol, on a recours au réservoir-tour ou château d'eau (ici, celui de Marne-la-Vallée). Actuellement, on peut noter une recherche esthétique dans ce domaine.*

E. Berne - Fotogram

réseau : la très grande souplesse de fonctionnement que ce type de réseau permet fait que l'on préfère en général cette disposition à celle des réseaux ramifiés. Cependant le calcul des réseaux maillés est beaucoup plus complexe : il se fait par des méthodes d'approximations successives (du type *Hardy-Cross*) ou par analogie électrique (*fig.* 21 b).

* *La double distribution*

Dans les grandes villes, lorsque les besoins en eau des industries sont très importants, on peut avoir intérêt à doubler le réseau de distribution d'eau potable d'un réseau d'eau non potable. Cette solution a un avantage évident : économiser l'eau potable ; mais elle présente un double inconvénient : un coût en général plus élevé et des risques de contamination non négligeables du réseau d'eau potable (par erreur de branchement, par exemple).

* *Distribution d'eau par surpression*

Lorsque le réservoir principal est sous pression (cf. *Rôle des réservoirs*), l'alimentation en eau de la ville se fait par refoulement à partir d'une station de surpression. Compte tenu des récents progrès techniques, il est maintenant possible d'appliquer cette solution à grande échelle, comme cela a été fait pour la ville nouvelle de Toulouse-Le Mirail.

L'élimination des déchets liquides

Les déchets liquides des agglomérations sont constitués des eaux usées, domestiques et industrielles, mais aussi des eaux de ruissellement. En effet, les eaux « lavent » les villes et entraînent avec elles des déchets très divers : poussières, feuilles mortes, excréments des animaux, détergents, etc. L'assainissement urbain ne peut se contenter d'évacuer ces déchets, il faut se préoccuper du milieu « naturel » en aval.

On a le choix entre trois solutions :

— rejeter les eaux usées telles quelles dans un milieu naturel liquide en s'en remettant au pouvoir auto-épurateur de ce dernier ; c'est en fait ce qui se passe encore dans bien des cas ; mais au-delà d'un certain seuil de développement urbain, la nature n'a plus une capacité de régénération suffisante pour pouvoir accepter les déchets de la ville sans se dégrader rapidement ;

— épurer les eaux usées partiellement, à l'aide d'un certain nombre de traitements artificiels, avant de les restituer au milieu naturel qui achèvera leur régénération : c'est le minimum de ce que chaque ville devrait faire ;

— les régénérer complètement avec possibilité de réutilisation sur place ou dans une agglomération située en aval. Il est certain que, dans les zones fortement urbanisées, le recyclage des eaux s'imposera de plus en plus à l'avenir.

Les eaux usées urbaines : caractéristiques et quantités

* *Les eaux de ruissellement*

Il est inutile de revenir sur leur composition de manière plus complète et détaillée. En revanche, il est important de retenir une caractéristique importante des eaux pluviales. Leur degré de pollution est très variable : relativement fort au début d'une précipitation, surtout après une période de sécheresse, il devient de plus en plus faible en fin de pluie, car la dilution est alors importante. Cette diminution de la charge polluante au cours d'une précipitation permet souvent de ne pas surdimensionner les installations de traitement, en admettant un rejet sans épuration par les déversoirs d'orages en cas de surcharge.

En ce qui concerne les débits (moyen et de pointe), ils dépendent : du régime pluviométrique local (plus forte pluie décennale) ; de la surface arrosée et de la perméabilité des sols.

La méthode de calcul des débits la plus couramment utilisée est la « méthode rationnelle » où le débit est calculé en litres/seconde par la formule :

$$Q = C \cdot I \cdot A.$$

avec :

C, coefficient de ruissellement ($0 \leqslant C \leqslant 1$) : terrains non bâtis (jardins, stades) : C = 0,10 ; habitat clairsemé et zones industrielles : C = 0,25 ; densité moyenne : C = 0,60 ; très fortes densités : C = 0,90 ;

A, aire d'apport exprimée en hectares ;

I, intensité moyenne de la précipitation exprimée en l/s/ha. Le débit maximal est obtenu pour une durée de précipitation égale au temps de concentration du bassin (durée d'écoulement de la pluie la plus éloignée de la surface d'apport jusqu'au point de regroupement considéré).

* *Les eaux usées domestiques*

Il n'est pas nécessaire de s'étendre sur leur composition. Il faut savoir cependant que l'on distingue les eaux ménagères (eaux de cuisine...) et les eaux-vannes qui contiennent les matières excrémentielles.

Les quantités rejetées sont approximativement égales aux quantités distribuées, soit environ 150 à 200 l/hab./j. Le calcul des canalisations se fait à partir des débits de pointe (débit moyen multiplié par un coefficient de l'ordre de 2,5).

* *Les eaux usées industrielles*

Elles sont évidemment très variables en quantité comme en qualité. Il faut donc étudier chaque cas séparément, d'autant plus soigneusement que la charge polluante des eaux résiduaires d'une usine peut être importante. On l'évalue fréquemment en rapportant l' « équivalent-habitant » de l'unité de production à la D.B.O. (« unité de mesure » de la pollution dont il sera question plus loin).

Si l'on veut être complet, il ne faut pas oublier d'ajouter aux débits précédents 100 à 150 l/hab./j pour tenir compte des usages publics.

Les réseaux d'égouts

Les réseaux d'assainissement ont déjà été traités en même temps que les autres réseaux urbains. Il semble cependant intéressant d'apporter ici des compléments d'information sur les différents systèmes d'évacuation et types de réseaux.

* *Typologie des systèmes*

Le procédé d'assainissement par « tout-à-l'égout » est maintenant d'un emploi généralisé dans les villes. Deux conceptions majeures prévalent lors de la conception de réseaux d'égouts, l'une préconisant d'évacuer séparément eaux usées domestiques et eaux pluviales, l'autre au contraire de collecter toutes les eaux usées dans une même canalisation.

▶ *Page ci-contre, en bas, figure 23 : principe du traitement et de l'épuration des eaux usées urbaines (d'après H. Mathieu, l'Eau et les Déchets urbains, Écologie urbaine, Centre de recherche d'urbanisme).*

● *Système unitaire*
Toutes les eaux pluviales domestiques (ménagères et vannes) et industrielles (éventuellement après un prétraitement) sont collectées dans un réseau unique qui les concentre vers un système d'épuration. Les ouvrages doivent être largement dimensionnés de manière à pouvoir absorber les débits pluviaux importants. L'inconvénient de ce système est que certains débits d'orages devront, lors des pointes exceptionnelles, être déversés à l'exutoire sans épuration, bien qu'ayant été souillés par les autres eaux usées (domestiques et industrielles).

● *Système séparatif*
L'évacuation des effluents urbains se fait par deux réseaux différents : un réseau d'eaux usées qui aboutit à une station d'épuration, et un réseau pluvial évacuant les eaux de ruissellement directement vers le cours d'eau le plus proche sans aucun traitement ou, dans certains cas, après une décantation sommaire.

Ce système semble être plus satisfaisant sur le plan de la protection du milieu. Cependant, l'implantation de deux réseaux distincts peut nécessiter un investissement initial sensiblement plus important. D'autant que les deux réseaux ne suivent pas nécessairement le même trajet : l'un concentre les eaux usées vers la station d'épuration, l'autre suit les lignes de grande pente pour atteindre l'exutoire le plus proche.

● *Système pseudo-séparatif*
C'est une solution intermédiaire qui consiste à recevoir les eaux usées et les eaux pluviales en provenance des immeubles et établissements divers dans une seule canalisation (un seul branchement par immeuble) alors que les eaux de ruissellement recueillies dans les caniveaux sont maintenues le plus longtemps possible en surface. On voit immédiatement que ce système ne peut être préconisé que pour les petites agglomérations et les communes rurales.

* *Tracé des réseaux*
Le tracé des réseaux dépend de trois éléments :
— localisation des points de collecte (zones d'habitation, zones industrielles) ;
— localisation des points de concentration des effluents ;
— et surtout, conditions topographiques, l'écoulement des eaux usées se faisant essentiellement par gravité.

En fonction de ces éléments, le tracé d'un réseau d'assainissement prendra l'une où l'autre des formes suivantes (*fig.* 22) :
— Schéma perpendiculaire : rejet direct sans épuration en plusieurs points de la rivière (ou du rivage, ou du lac...). Ce schéma ne peut donc être retenu que pour un réseau pluvial en système séparatif (*fig.* 22a).
— Schémas à collecteurs d'interception : les effluents, regroupés dans un ou plusieurs collecteurs, sont évacués vers la station d'épuration, laquelle est située en aval de l'agglomération (*fig.* 22b).
— Schémas à centres collecteurs : les effluents, concentrés en une ou plusieurs stations de relèvement situées aux points bas, sont évacués par un émissaire vers la station de traitement (*fig.* 22c).

L'épuration des eaux usées

* *Mesure du degré de pollution*
Les eaux usées contiennent des matières minérales et organiques dont l'action sur la flore et la faune aquatiques peut être directe (par leur caractère nocif ou toxique) ou indirecte, provoquant un manque d'oxygène soit par modification physique du milieu (détergents synthétiques, pollution thermique), soit par des réactions chimiques ultérieures (comme facteur réactif ou comme catalyseur). Il importe donc de connaître pour ces différents éléments : leur quantité, leur concentration, leur composition chimique et leur oxydabilité.

A cet égard, bien que non parfaite, c'est la mesure de la D. B. O. (demande biochimique d'oxygène) qui est la méthode la plus utilisée. Elle représente la quantité totale d'oxygène nécessaire à la destruction ou à la dégradation biochimique des matières organiques non azotées dans une eau usée. L'oxydation des composés du carbone est pratiquement terminée en 20 jours, mais, par convention, on se contente de mesurer la D. B. O. qui représente la demande d'oxygène pendant les cinq premiers jours de l'oxydation, soit, approximativement, les 2/3 de la D. B. O. totale.

Toutefois, en particulier pour les effluents industriels, on peut être amené à mesurer également la D. C. O. (demande chimique d'oxygène), qui représente la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder chimiquement les différents corps réducteurs ou oxydables présents dans l'effluent. Ces deux mesures, bien que traduisant des réactions très différentes, sont complémentaires lorsqu'il s'agit de choisir le type de traitement.

On admet en général que si le rapport $\frac{\text{D. B. O.}}{\text{D. C. O.}}$ est :
— > 0,6, l'effluent relève d'un traitement biologique normal (cas de la pollution domestique) ;
— compris entre 0,2 et 0,6, il sera nécessaire, pour traiter l'effluent, d'avoir recours à des souches bactériennes particulières (cas des effluents de la fabrication de pâte à papier) ;
— < 0,2, un traitement biologique n'est pas possible.

* *Différents processus d'épuration*
Hervé Mathieu distingue entre les processus d'épuration suivants :
— les processus mécaniques intervenant dans les procédés gravitaires (décantation, flottation) et les procédés à barrière (tamisage, filtration) ;
— les processus chimiques intervenant dans les procédés annexes de prétraitement (neutralisation, floculation, précipitation, par exemple des sels de métaux lourds...) ou de traitements complémentaires (absorption sur charbon actif, élimination des phosphates par précipitation, etc.) ;
— les processus de dégradation biologique qui se traduisent par une oxydation (combustion humide des matières organiques par le truchement de bactéries aérobies ou anaérobies) ou par une réduction (digestion des boues).
— La *figure* 23, établie par Hervé Mathieu, montre clairement les nombreuses imbrications entre les deux chaînes « traitement des eaux de consommation » et « épuration des eaux usées ».

En ce qui concerne les différents procédés d'épuration, nous les mentionnerons — sans pouvoir entrer dans les détails — en respectant la classification et la terminologie de ce schéma.

fig. 22

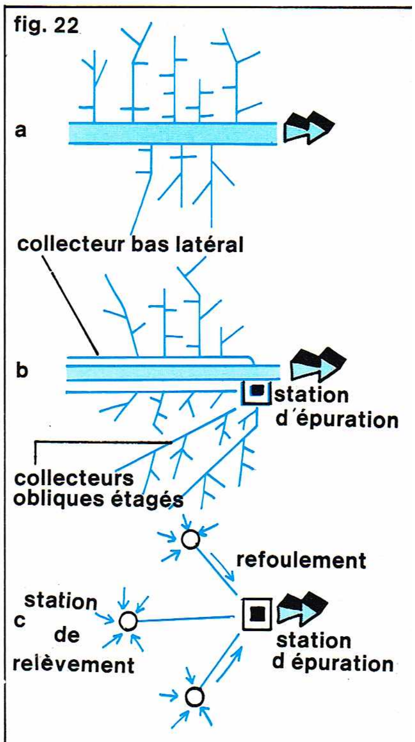

redessiné Richard Colin

▲ ***Figure 22 :*** ***les différents tracés de réseaux d'assainissement (d'après*** **H. Mathieu, l'Eau et les Déchets urbains,** ***Écologie urbaine, Centre de recherche d'urbanisme).***

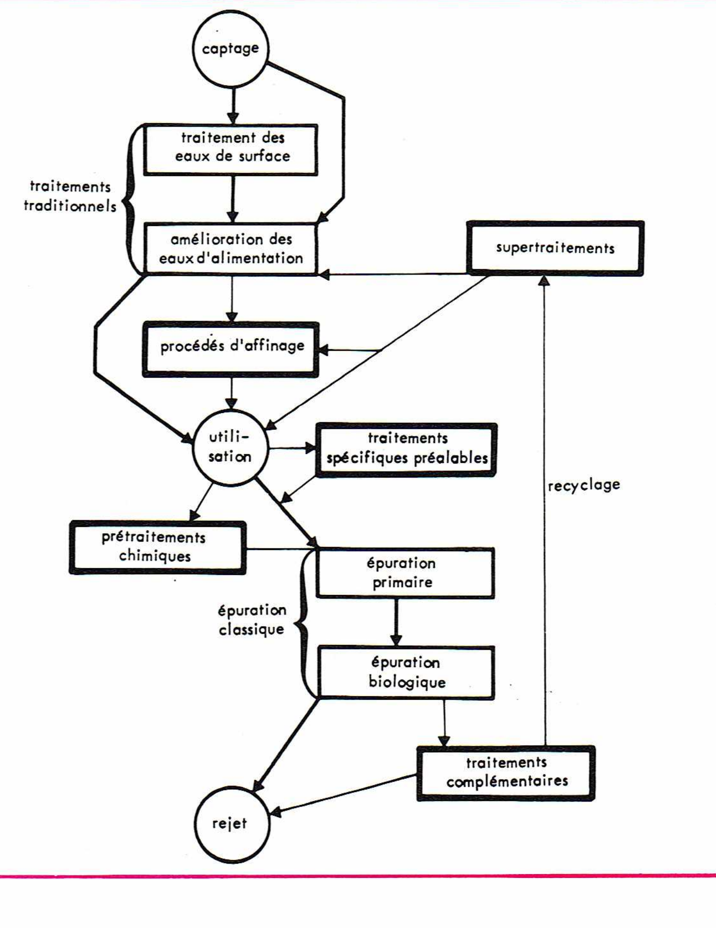

Document CRU

fig. 23

▶ *Une station d'épuration des eaux usées.*

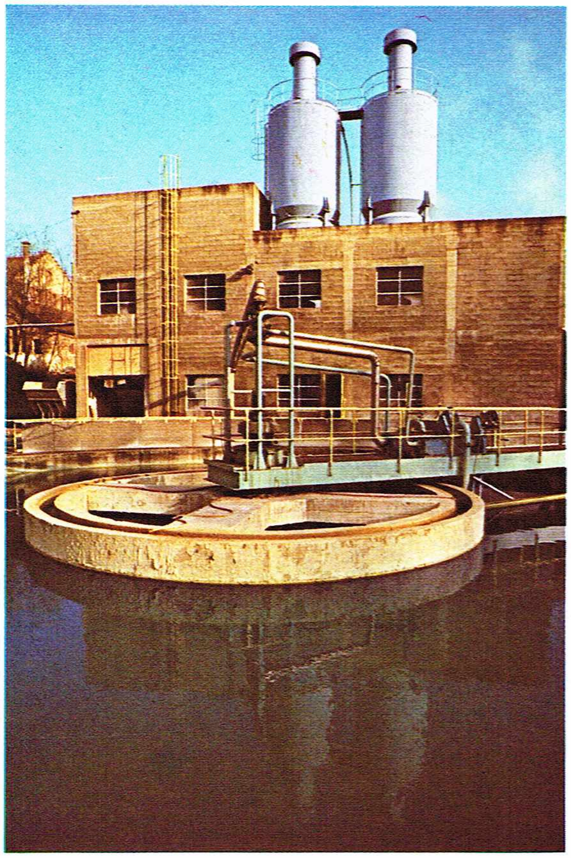

E. Marlot - Fotogram

▼ ***Figure 24 : exemple d'organisation d'une station d'épuration par boues actives, associée à une usine d'incinération des ordures ménagères (d'après H. Mathieu,* l'Eau et les Déchets urbains, *Écologie urbaine, Centre de recherche et d'urbanisme).***

fig. 24

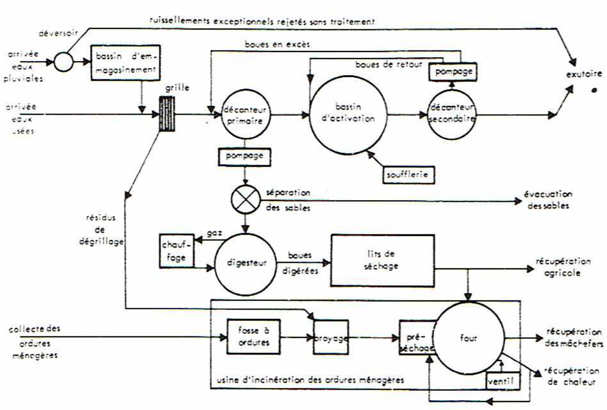

Document CRU

L'épuration naturelle. Par rapport aux procédés artificiels, les procédés de traitement naturel présentent les inconvénients suivants : processus d'épuration beaucoup plus long, emprise au sol des installations très supérieure, dégagements d'odeur assez fréquents. L'épuration naturelle s'effectue selon les procédés suivants : irrigation agricole extensive (épandage par irrigation, infiltration ou aspersion) ; épandage à forte charge dans les champs ; filtration par le sol ; auto-épuration dans les bassins d'oxydation-stabilisation (lagunage).

L'épuration primaire est réalisée par : dégrillage (succession de grilles horizontales ou légèrement inclinées) ; filtration mécanique sur sable (ne pas confondre avec la filtration par le sol) ; écumage (séparation naturelle ou artificielle des matières flottantes à la surface de l'eau) ; décantation (clarification par sédimentation).

L'épuration secondaire. Pour éliminer les matières organiques, il faut compléter l'épuration primaire par une dégradation biochimique. Le travail des micro-organismes actifs peut se faire en aérobiose (oxydation à partir de l'oxygène de l'air ou de l'oxygène dissous dans l'eau) ou en anaérobiose (oxydation non par l'oxygène moléculaire mais par emprunt aux sels dissous).

Les principaux procédés sont les suivants : passage continu sur lits bactériens à faible charge (lits à fixation des boues) ou à haute charge (lits autocurables) ; épuration par disques biologiques tournants (micro-organismes en contact alternativement avec l'air et l'eau à traiter) ; activation des boues (contact avec la flore bactérienne au sein du liquide lui-même par l'intermédiaire de boues floculées en suspension).

Les paratraitements. Sous ce vocable, on peut regrouper tous les traitements autres que ceux pratiqués dans l'épuration « classique » (primaire + secondaire). Ce sont :
— les traitements dits « tertiaires » ou complémentaires (la stérilisation par exemple) ;
— les prétraitements chimiques : précipitations, coagulation, floculation, moussage, flottation ;
— les traitements d'affinage de l'eau d'alimentation ;
— les « supertraitements » de régénération totale de l'eau usée, la plupart dérivés des méthodes de dessalement des eaux usées et des eaux saumâtres.

* *Les stations d'épuration*

A chaque problème d'assainissement doit correspondre une solution appropriée, c'est-à-dire spécifique. Il n'existe donc pas de solution type ni de « modèle » en matière de stations d'épuration. La *figure* 24 représente un exemple d'organisation possible d'une station d'épuration par boues activées, associée à une usine d'incinération des ordures ménagères.

L'énergie et la ville

Une longue période d'énergie à bon marché a conduit à un équilibre consommation/services rendus sans aucun doute très éloigné de l'optimum. Et, de fait, de nombreuses actions aboutissant à des économies d'énergies sont possibles sans modification importante ni des procédés technologiques, ni des modes de vie des consommateurs. Deux importants colloques sur l'énergie et la ville — organisés par le Centre de recherche d'urbanisme (CRU) en décembre 1975, d'abord, l'Association générale des hygiénistes et techniciens municipaux (AGHTM) et la Société centrale pour l'équipement du territoire (S.C.E.T.) en janvier 1977, ensuite, — ont permis de faire le point sur les nombreuses recherches en cours dans ce domaine. Nous n'avons pas la place ici de rapporter le contenu de ces travaux.

En tout état de cause, il ressort que les réflexions présentées par Philippe Rochefort en 1974 semblent toujours valables. Dès cette époque, l'auteur formulait, à dessein sans nuances, les hypothèses suivantes.

— Dans la pratique actuelle, il y a dissociation entre bilan économique (au sens classique) et bilan énergétique. Cette dissociation est de même nature que celle qui consiste à considérer les coûts d'investissements sans les coûts d'exploitation.

— Il y a interdépendance entre les problèmes de matières premières (autres que les matières premières d'approvisionnement en énergie primaire) et les problèmes d'énergie.

— Les mécanismes de concentration et plus particulièrement d'urbanisation accroissent la consommation d'énergie par un effet propre, indépendant du revenu. En ce sens, on peut dire qu'il n'y a pas d'économie d'échelle sur le plan énergétique.

— A mode de vie identique et formes de production inchangées, on peut réaliser des économies d'énergie considérables (jusqu'à 40 %) aussi bien pour les consommations domestiques qu'industrielles.

— L'orientation des sources d'énergie primaire vers les énergies gratuites (soleil, vent, géothermie) ira croissant. L'usage systématique de la pompe à chaleur, dont le « rendement » est supérieur à 1, va visiblement dans ce sens.

BIBLIOGRAPHIE

DUVIGNEAUD P., La synthèse écologique, Doin, Paris, 1974. - DUVIGNEAUD P., Écosystème urbain, applications à l'agglomération bruxelloise, colloque international organisé par l'agglomération bruxelloise, 14-15 septembre 1974. - MATHIEU H., L'eau et les déchets urbains, C.R.U., Paris. - de ROSNAY J., Le Macroscope, Seuil, Paris, 1975.

Jacques Tiziou - Sygma

▲ *Départ de la fusée* **Saturne** *en juillet 1975.*

ASTRONAUTIQUE

LA SATELLISATION

Mouvements des objets dans l'espace

Tout objet dans l'espace subit l'attraction de tous les autres objets et exerce son attraction sur eux; on englobe sous la dénomination d'objets aussi bien les étoiles et les planètes, objets célestes, que le moindre objet lancé par l'homme.

L'Univers étant peuplé, d'une façon très clairsemée, d'amas très éloignés les uns des autres, on peut considérer que les forces d'attraction s'exercent dans chaque amas indépendamment du reste de l'Univers, bien qu'en toute rigueur, toutes les forces d'attraction s'exercent jusqu'à l'infini.

La force d'attraction entre deux objets de masse M et m placés à la distance d est $F = G \frac{Mm}{d^2}$ où G est une constante dite d'attraction universelle. Il s'ensuit que tout objet dans l'espace est sous l'influence du corps céleste qui, dans son voisinage, exerce sur lui une action prépondérante, fonction de sa masse et de sa proximité. On dit que l'objet est satellite du corps céleste. La Lune est satellite de la Terre, la Terre du Soleil; les satellites artificiels, lancés dans l'espace par l'homme, sont satellites soit de la Terre, soit de la Lune ou d'une autre planète, soit du Soleil. Lancés avec une vitesse encore plus grande, ils échappent au système solaire, mais deviendront tôt ou tard satellites de quelque corps cosmique placé dans le voisinage de leur trajectoire.

Nous allons nous référer au modèle de Clémence pour expliquer ces trajectoires, qui sont des coniques. Rappelons que les coniques sont des courbes du second degré obtenues par des sections planes du cône : on a une ellipse (un cercle à la limite) si le plan sécant coupe toutes les génératrices du cône, une parabole si le plan sécant est parallèle à une génératrice du cône, et une hyperbole si le plan sécant est parallèle à deux génératrices du cône.

Modèle de Clémence

Il ne s'agit que d'une très rudimentaire approche des problèmes de l'astronautique.

Il donne une idée assez concrète, intuitivement, de la façon dont agissent les forces de gravitation dans l'espace. C'est une grossière initiation à l'espace courbe d'Einstein.

Le Soleil S et une de ses planètes P sont supposés être des boules pesantes posées sur une toile tendue sur un cerceau. S, de beaucoup le plus lourd, est immobile. P orbite autour de lui, creusant sur son passage la toile qui se retend aussitôt après. Les creux de la toile, sous le poids de S et de P, sont marqués par des circonférences concentriques, lignes de niveau de la pente, d'autant plus rapprochées que la pente est plus grande.

Prenons (*fig.* 1) une bille O. Placée sans vitesse en O_1, elle tombe suivant la ligne de plus grande pente et s'écrase sur S. De même, placée en O_2, elle s'écrase sur P. Placée en O_3 où les pentes vers S et vers P sont égales, elle reste en équilibre précaire.

▼ ***Figure 1 : modèle de Clémence.***

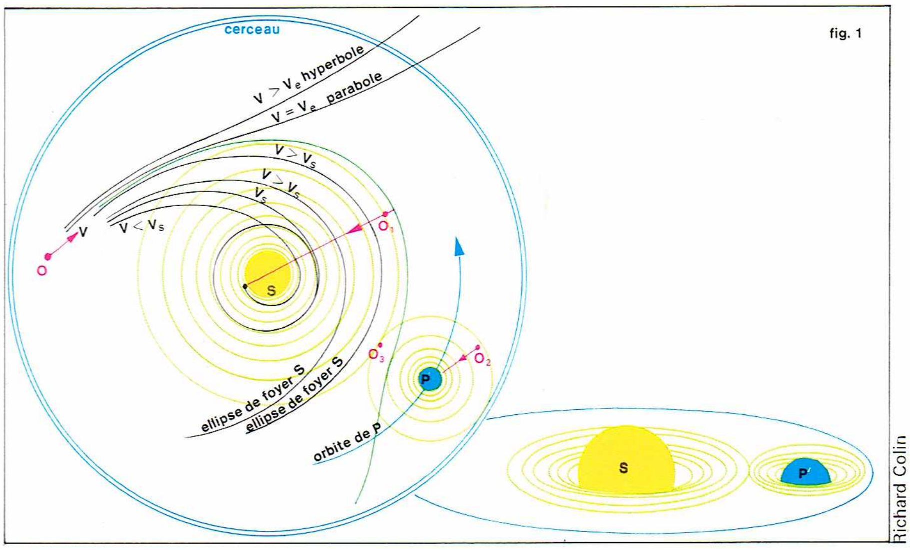

Richard Colin

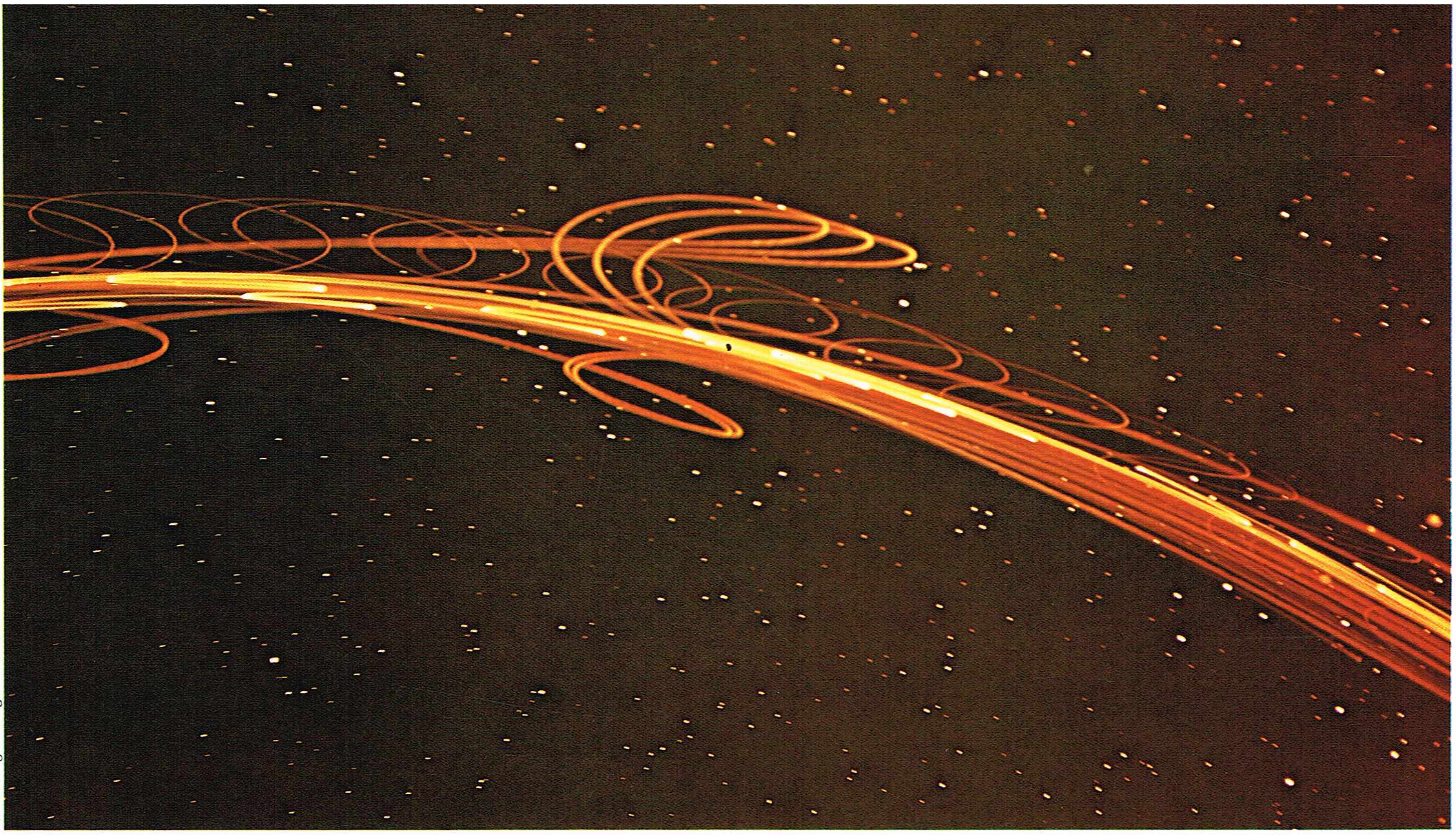

E. Lessing - Magnum

▲ *Planétarium de Munich. Le mouvement des planètes est reconstitué sur une période de 17 ans. Cette photographie représente le mouvement apparent de Mars, Vénus, Mercure, Jupiter et Saturne. Les rétrogradations de certaines de ces planètes donnent lieu à une boucle apparente.*

▼ *Figure 2 : voir commentaires dans le texte.*

Donnons maintenant à la bille 0 une vitesse V (les frottements sont supposés nuls, donc la vitesse reste constante). Son comportement va dépendre de la valeur et de la direction de la vitesse reçue ainsi que de la distance à laquelle elle passe de S. Si elle en est assez près pour subir l'influence du creux créé par S, son trajet sera évidemment infléchi vers S. Plusieurs cas se présentent :

— V est inférieure à une certaine *vitesse de satellisation* V_s caractéristique de S, la bille descend le creux de S et finit par s'écraser sur S ;

— si V égale V_s, arrivée à un certain point, la bille ne descend plus mais tourne suivant une orbite circulaire autour de S, au flanc de l'entonnoir creusé par le poids de S ;

— si V est supérieure à V_s, la bille, après avoir atteint son point le plus bas, remonte le creux et décrit une ellipse autour de S comme foyer ;

— si V atteint une certaine valeur V_l, *vitesse de libération* caractéristique de S, la bille remonte entièrement le creux de S et décrit une branche de parabole dont S est le foyer, si V est égale à V_l. Si V est supérieure à V_l, la trajectoire devient une branche d'hyperbole ; dans les deux cas, la bille échappe définitivement au creux de S.

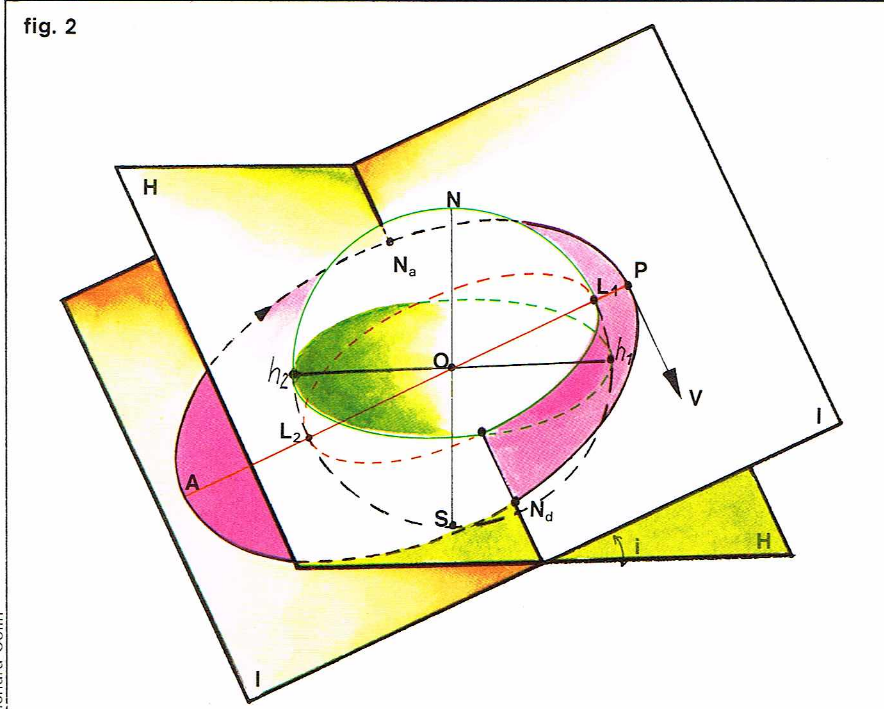

Richard Colin

La trajectoire de la bille peut la conduire sous l'influence du creux causé par P. Les mêmes phénomènes que précédemment peuvent se produire, les valeurs critiques de la vitesse étant alors la vitesse de satellisation et la vitesse de libération caractéristiques de P. Dans ce cas, l'étude du trajet se complique à cause du déplacement de P qui parcourt son orbite autour de S. La trajectoire bleue correspond à une orbite elliptique autour de S qui est déformée par son passage à proximité de P. Passant plus près encore de P et à vitesse moindre, l'objet pourrait être capturé par P et devenir son satellite.

Nous venons d'étudier ces mouvements en considérant le Soleil et une planète ; mais le problème est universel et toujours régi par les mêmes lois, qu'il s'agisse du Soleil et d'une planète, ou de la Terre et de la Lune, ou de toute autre association d'objets célestes. On comprend aisément que ce problème devient inextricablement compliqué dès qu'il y a plus de trois corps en présence.

Chaque astre a une vitesse de *satellisation* et une vitesse de *libération* bien déterminées pour une distance donnée au centre d'attraction.

La force qui impose les mouvements est l'attraction universelle ; sa valeur est définie par la loi de Newton. Les lois qui donnent les caractéristiques des orbites sont les trois lois de Kepler, qui découlent de celle de Newton ; mais, en fait, Kepler les avait énoncées avant que Newton fît connaître la sienne : il les avait découvertes de façon empirique en étudiant les observations célestes très précises de son maître Tycho Brahé.

Mouvements des satellites. Lois de Kepler

Les satellites artificiels de la Terre obéissent aux mêmes lois que les planètes gravitant autour du Soleil, les lois de Kepler, qui s'énoncent ainsi :

— les orbites des planètes sont des coniques dont le Soleil occupe un foyer ;

— les aires balayées pendant des temps égaux par le vecteur planète-Soleil sont égales ;

— les cubes des demi-grands axes des orbites elliptiques sont proportionnels aux carrés des périodes de révolution.

Dans l'énoncé de ces lois, il n'y a qu'à remplacer le mot Soleil par le mot Terre, et le mot planète par le mot satellite pour obtenir les lois qui régissent les mouvements de ces derniers.

fig. 3

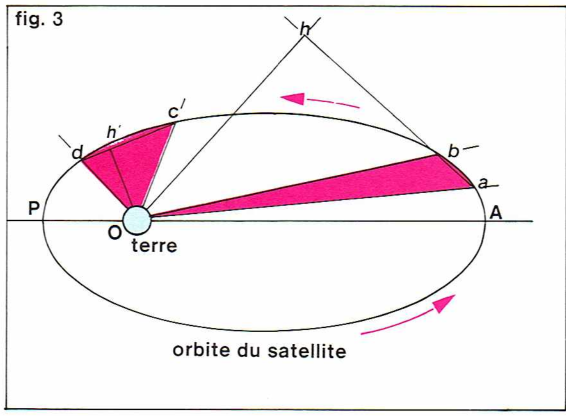

fig. 5

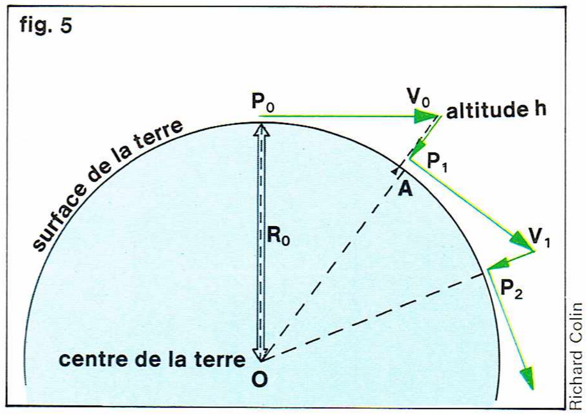

◀ *Figure 3 : le rayon vecteur d'un satellite balaie en un temps donné des surfaces égales.*
Figure 5 : schéma du lancement d'un satellite. Ici, la vitesse de lancement est $\overrightarrow{P_0V_0}$, horizontale.

1re loi. **La trajectoire d'un satellite placé sur une orbite terrestre est une conique dont le centre de la Terre est un des foyers.**

La Terre (*fig.* 2) est représentée par le cercle de diamètre NS. L'équateur terrestre est dans le plan H, il contient les points h_1 et h_2. Le satellite est supposé avoir été lancé du point P (périgée) suivant la vitesse $\overrightarrow{PV}$ perpendiculaire à PO. Cette vitesse égale à V est juste supérieure à la vitesse de satellisation, dont nous parlerons en détail plus loin : c'est la vitesse minimale qui doit être donnée dans ces conditions au satellite pour qu'il ne retombe pas sur la Terre. La courbe suivie par le satellite est l'ellipse de grand axe POA passant par O (A est l'apogée) ; elle traverse le plan horizontal aux points N_d, nœud descendant, et N_a, nœud ascendant. Le plan de l'orbite du satellite est le plan I qui contient PO et PV ; il fait un angle $\hat{\imath}$ avec le plan H équatorial.

Les latitudes du satellite seront maximales et égales en valeur absolue en P et en A. Leur valeur sera alors celle de l'angle d'inclinaison de l'orbite sur le plan de l'équateur.

2e loi. **Le rayon vecteur d'un satellite (droite fictive qui le relie au centre de la Terre) balaie, en un temps donné, des surfaces égales.**

Soit O*ab* et O*cd* (*fig.* 3) deux aires parcourues par le vecteur du satellite dans des temps égaux. La 2e loi de Kepler énonce qu'elles sont égales. Ces aires sont très voisines des triangles O*ab* et O*cd*. Donc, si l'on abaisse O*h*, perpendiculaire sur *ab*, et O*h'* perpendiculaire sur *cd*, on doit avoir $Oh \times ab = Oh' \times cd$ (doubles des aires considérées). Comme *ab* est éloigné et *cd* plus proche de O, O*h* est plus grand que O*h'*, et donc *ab* est plus petit que *cd*. Les deux arcs *ab* et *cd* étant parcourus dans des temps égaux, il s'ensuit que la vitesse du satellite est d'autant plus grande sur son orbite qu'il est plus rapproché de la Terre ; elle est donc maximale au périgée P et minimale à l'apogée A. Il s'ensuit encore que la vitesse augmente en allant de l'apogée A vers le périgée P et qu'elle diminue quand le satellite va du périgée P vers l'apogée A.

3e loi. **Les cubes des demi-grands axes des orbites elliptiques sont proportionnels aux carrés des périodes de révolution.**

Sur un grand axe de valeur donnée, on peut construire une infinité d'ellipses d'excentricités différentes. A la limite, la circonférence est l'ellipse d'excentricité nulle.

Il découle de la troisième loi que, si des ellipses (et la circonférence limite), orbites de satellites autour de la Terre, ont leurs grands axes égaux, elles seront parcourues dans des temps égaux.

Prenons trois orbites (dont la circonférence limite) de même grand axe $P_1A_1 = P_2A_2 = P_3A_3$ (*fig.* 4). Plaçons-les par rapport à la Terre. L'orbite circulaire n'a qu'une position possible, celle pour laquelle le centre de la Terre est le centre de l'orbite. Les orbites elliptiques auront des périgées d'autant plus rapprochés de la Terre que leurs excentricités seront plus grandes.

On verra dans le paragraphe suivant que la vitesse de satellisation diminue quand l'altitude du périgée augmente. Si donc V_1, V_2 et V_3 sont les trois vitesses de satellisation correspondant aux périgées P_1, P_2 et P_3, on aura : $V_1 < V_2 < V_3$.

Vitesse de satellisation

Pourquoi un objet lancé dans l'espace ne retombe-t-il plus à partir d'une certaine vitesse de lancement ?

Nous examinerons d'abord le cas où la vitesse de lancement est horizontale. Supposons que la Terre n'ait pas d'atmosphère (ce qui est le cas pour la Lune). Lançons un objet dans une direction horizontale au point P_0 à la vitesse $\overrightarrow{P_0V_0} = V_0$ (*fig.* 5). Il est soumis à la force de lancement et à la pesanteur.

Au bout d'une seconde, il aurait parcouru une distance horizontale égale à la vitesse V_0 de lancement s'il n'était pas soumis à la gravitation terrestre. Mais cette dernière lui fait parcourir une distance verticale de $1/2\ g_0t^2$ (dans laquelle g_0 est 9,81 m et $t = 1$ s), soit 4,905 m.

L'objet se trouve donc au bout d'une seconde à l'extrémité du vecteur résultant de la vitesse $\overrightarrow{P_0V_0}$ et du vecteur $\overrightarrow{V_0P_1} = 4{,}905$ m. Le point P_1 est au-dessus du sol si V_0P_1, qui est égal à 4,905 m, est inférieur à l'altitude *h* du point V_0. On dit alors que V_0 a une valeur V_s dite de satellisation.

Comme nous sommes supposés être dans le vide, l'objet repart de P_1 avec une vitesse $\overrightarrow{P_1V_1}$, égale à $\overrightarrow{P_0V_0}$, pour être au bout de la deuxième seconde en P_2, etc. On peut écrire :

$$(R_0 + h)^2 = R_0^2 + V_s^2$$

où *h* doit être à peine supérieur à 4,905 m.

Le rayon R_0 de la Terre est pris à sa valeur moyenne de 6 370 km. On en tire la valeur de V_s qui doit être au moins égale à 7,780 km/s, qu'on arrondit à 7,8 km/s. C'est la vitesse de *satellisation* ou **première vitesse cosmique.**

Tout objet lancé horizontalement avec une vitesse à peine supérieure à 7,9 km/s ne retombera pas sur la Terre : il sera satellisé. Mais notre raisonnement n'est valable que parce que nous avons supposé que nous étions dans le vide, ce qui est indispensable pour que la vitesse ne diminue pas :

$$P_0V_0 = P_1V_1 = P_2V_2, \text{ etc.}$$

Remarque : la figure est grossièrement déformée dans ses proportions pour pouvoir être lue plus clairement. En effet, P_0P_1 est inférieur à 8 km, $OP_0 = 6\,370$ km et $V_0P_1 = 0{,}005$ km. En réalité, l'angle $V_0P_0P_1$ est égal à moins d'un quatre-centième d'arc, ce qui permet, à un infiniment petit près, de supposer que P_1V_1 est dans le prolongement de P_0P_1.

La vitesse de satellisation diminue avec l'altitude

Nous venons de voir que la satellisation est assurée si V_0P_1 est inférieure à V_0A. Or $V_0P_1 = \dfrac{1}{2}\,g_0$.

Soit P'_0 à une altitude différente de zéro (*fig.* 6) ; la vitesse à donner à l'objet est perpendiculaire en P'_0 à P'_0O, donc tangente au cercle de rayon OP'_0 et de centre O. Soit $P'_0V'_0$ cette vitesse. L'attraction terrestre donne $V'_0P'_1$ dirigé vers O.

En P'_0 la valeur de l'accélération de la pesanteur est *g*. Nous avons vu que $g = g_0 \dfrac{R_0^2}{d^2}$ *d* étant la distance de P'_0 au centre ; donc $g < g_0$ et $V'_0P'_1 < V_0P_1$. Il s'ensuit que

fig. 4

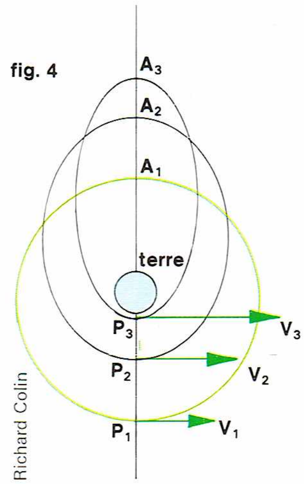

▲ *Figure 4 : si des ellipses, orbites de satellites autour de la Terre, ont leurs grands axes égaux, elles seront parcourues dans des temps égaux.*

▼ *Figure 6 : la vitesse de satellisation diminue avec l'altitude.*

fig. 6

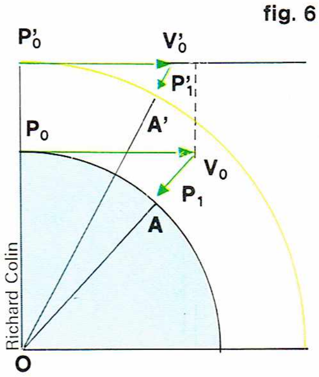

▶ *Figure 8 : influence de la direction de la vitesse de lancement.*

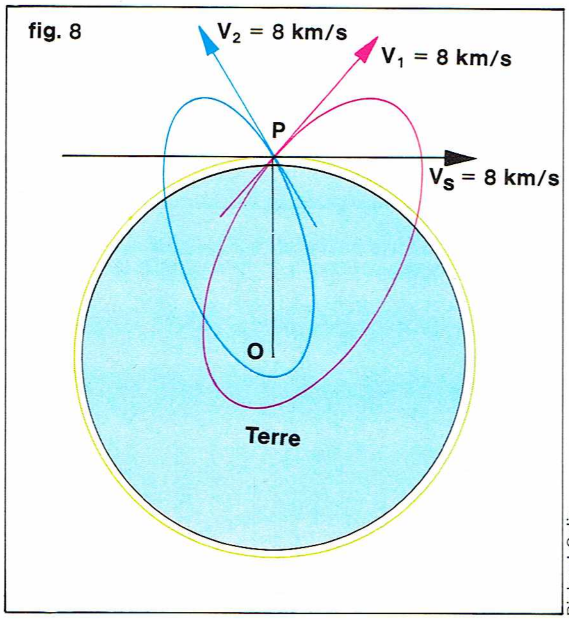

▼ *Figure 7 : si un corps est satellisé sur une orbite, c'est qu'à l'altitude h où il tourne, la force centrifuge C contrebalance la force F d'attraction de la Terre.*

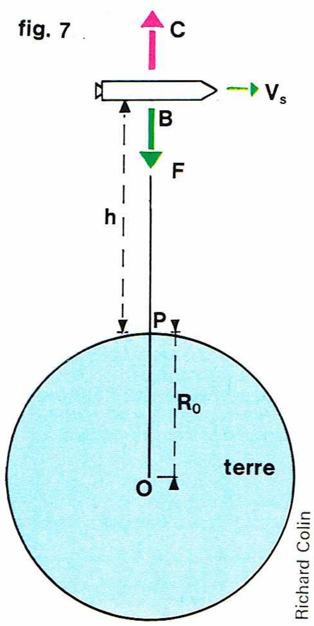

P'_1 pourra être au-dessus du cercle passant par P'_0 pour des valeurs de $P'_0V'_0$ inférieures à P_0V_0.

Nous venons de calculer la vitesse de satellisation V_s de façon élémentaire et de montrer qu'elle diminue avec l'altitude. Les lois de la mécanique permettent d'arriver rigoureusement aux mêmes résultats. Si un corps ne retombe plus sur la Terre après avoir été lancé dans l'espace et satellisé sur une orbite, c'est qu'à l'altitude où il tourne, la force centrifuge créée par son mouvement contrebalance la force d'attraction de la Terre.

Soit h ($h = AB$) son altitude, V_s sa vitesse horizontale, m sa masse, R_0 le rayon OA de la Terre, M la masse de la Terre (*fig.* 7). La force d'attraction s'écrit :

$$F = G\,\frac{mM}{(R_0 + h)^2}$$

La force centrifuge du corps est : $C = \dfrac{mV_s^2}{R_0 + h}$.

Écrivons que les deux forces s'équilibrent ; on a alors

$$\frac{mV_s^2}{R_0 + h} = G\,\frac{mM}{(R_0 + h)^2}$$

On en tire $\quad V_s = \sqrt{\dfrac{GM}{R_0 + h}}$ vitesse de satellisation circulaire à l'altitude h. On voit que :

— V_s ne dépend pas de la masse du corps mais seulement de h ;

— V_s est inversement proportionnel à $\sqrt{R_0 + h}$, donc diminue quand h augmente ;

— la vitesse de satellisation circulaire à l'altitude zéro est :

▼ *Figure 9 : influence de la valeur de la vitesse de lancement, sa direction restant horizontale.*

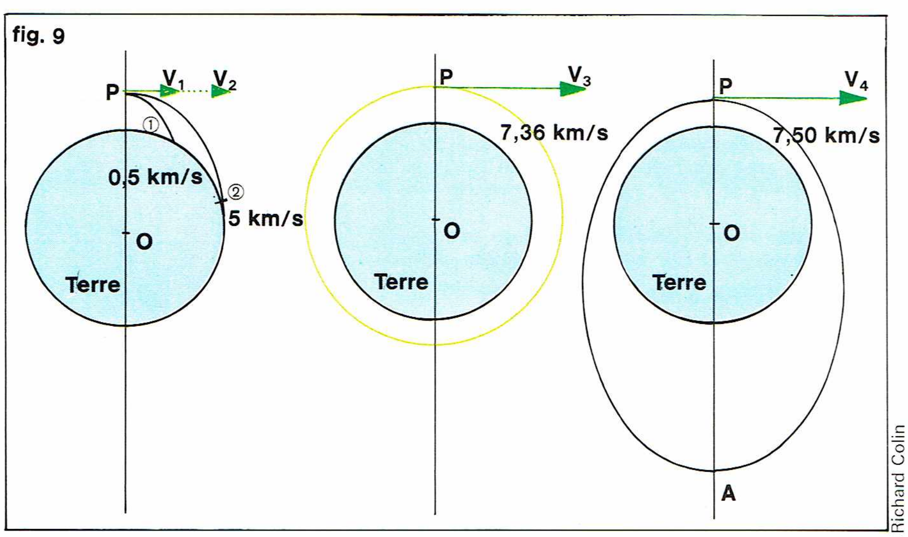

$$V_s = \sqrt{\frac{GM}{R_0}}$$

$$= \sqrt{\frac{6{,}67 \cdot 10^{-11} \times 5{,}97 \cdot 10^{-24}}{6\,370 \cdot 10^3}} = 7\,780 \text{ m/s}$$

Cette valeur n'est que théorique, puisque la Terre n'est pas dans le vide. Mais elle sert de base de calcul quand l'on tient compte de la pesanteur et de la traînée. On verra plus loin que cette valeur est alors portée à 7 914 m/s ou 8 000 m/s suivant les auteurs (les différences proviennent de différences d'appréciation sur la valeur de la traînée).

Influence de la direction de la vitesse de lancement

En pratique, on adopte 8 km/s comme vitesse de satellisation à l'altitude 0. Toutefois, ces 8 km/s ne donnent une orbite circulaire que si la direction de la vitesse est rigoureusement perpendiculaire à la droite qui joint le point de lancement au centre de la Terre. Le moindre écart donnera une orbite elliptique dont le centre de la Terre est l'un des foyers.

C'est le cas de la *figure* 8 pour des lancements à vitesse 8 km/s, mais dans des directions PV_1 et PV_2. Seule la direction PV_s perpendiculaire à OP donne une orbite circulaire. Dans tous les cas où la direction de la vitesse de 8 km/s n'est pas perpendiculaire à OP, l'objet lancé retombe sur la Terre.

Influence de la valeur de la vitesse de lancement, sa direction restant horizontale

Supposons que du point P et juste au-dessus de l'atmosphère, on lance un objet dans une direction toujours perpendiculaire à la droite PO qui joint le point de lancement au centre de la Terre, mais en faisant varier la valeur de la vitesse (*fig.* 9).

Supposons que P soit à 1 000 km d'altitude. Le calcul donne à cette altitude une vitesse de satellisation de 7,36 km/s.

Si $V_1 = 0{,}5$ km/s, l'objet retombe sur la Terre en 1.
Si $V_2 = 5$ km/s, l'objet retombe sur la Terre en 2.
Si $V_3 = 7{,}36$ km/s, il y a satellisation circulaire.
Si $V_4 = 7{,}50$ km/s, l'objet décrit une ellipse autour de la Terre. O, centre de la Terre, est à l'un des foyers de cette ellipse. La droite PO prolongée porte le grand axe PA de cette ellipse. Le point P le plus rapproché de la Terre porte le nom de *périgée*. Le point A le plus éloigné de la Terre porte le nom d'*apogée*.

Dans tous les autres cas où la vitesse est supérieure à 7,36 km/s, l'orbite sera une ellipse.

Mais si la vitesse atteint 10,41 km/s, l'orbite, pour cette altitude, devient une parabole, et si la vitesse est supérieure à 10,41 km/s, l'orbite devient une hyperbole. La valeur 10,41 km/s de la vitesse est dite, pour l'altitude de 1 000 km, la vitesse de *libération*. On exprime ainsi que l'objet échappe à l'attraction terrestre et s'éloigne de la Terre sans retour. La vitesse de *libération* décroît comme celle de *satellisation* avec l'altitude. Elle est, théoriquement, de 11,19 km/s à l'altitude 0.

Trajectoires d'objets lancés du point P d'altitude 1 000 km avec différentes vitesses horizontales

Le centre de la Terre est toujours un des deux foyers des ellipses (*fig.* 10). Les vitesses de 7,36 à 10,41 km/s donnent des satellites artificiels. On verra au paragraphe suivant que la vitesse de libération V_l est liée à la vitesse de satellisation V_s, à une distance quelconque de la Terre (ou d'un autre astre) par la formule : $V_l = V_s\sqrt{2}$.

Ici on a bien : $10{,}41 = 7{,}36 \times 1{,}414$.

Vitesse de libération V_l

C'est la vitesse horizontale qu'il faut donner au satellite pour qu'il échappe à l'attraction terrestre. On l'appelle aussi **deuxième vitesse cosmique.** Libéré de la pesanteur terrestre, le satellite est capturé par le Soleil. Au-delà, il existe une **troisième vitesse cosmique** qui fait échapper le satellite au Soleil ; il part dans le cosmos.

On a vu que, pour un éloignement d, l'accélération de la pesanteur est $g = \dfrac{GM}{d^2}$. Pour porter une masse m de

la distance d à la distance $d + \Delta d$, il faut dépenser une énergie :

$$\Delta E = m \cdot g \cdot \Delta d$$

où
$$\Delta E = m \frac{GM}{d^2} \Delta d = mg_0 \frac{R_0^2}{d^2} \Delta d$$

(car $GM = g_0 R_0^2$).

Si Δd tend vers 0, E est fonction de d. Pour un astre donné, $mg_0 R_0^2$ est une valeur constante. A cette constante près, $-\frac{1}{d^2}$ est la dérivée de $\frac{1}{d}$

Donc $E = -mg_0 R_0^2 \frac{1}{d}$ énergie nécessaire pour porter m à la distance d.

Pour aller de la distance d à la distance d' qui lui est supérieure, il faut dépenser une énergie :

$$E_{d'} - E_d = mg_0 R_0^2 \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{d'}\right)$$

Si $d' = \infty$, la dépense d'énergie devient :

$$E_{d'} - E_d = \frac{mg_0 R_0^2}{d}$$

Mais c'est aussi l'énergie cinétique : $1/2\, mV_l^2$ qu'il a fallu donner à m pour atteindre la vitesse de libération V_l, donc :

$$\frac{1}{2} mV_l^2 = \frac{mg_0 R_0^2}{d} \quad \text{d'où} \quad V_l^2 = \frac{2\,GM}{d} \quad \text{et} \quad V_l = \sqrt{\frac{2\,GM}{d}}$$

Comme on a trouvé précédemment que la vitesse de satellisation est : $V_s = \sqrt{\frac{GM}{d}}$, on voit que : $V_l = V_s \sqrt{2}$.

En particulier, pour $d = R_0$, c'est-à-dire à la surface de la Terre, $V_l = \sqrt{\frac{2\,GM}{R_0}}$, ce qui n'a qu'une valeur théorique, puisque la Terre est entourée d'une atmosphère. On trouve dans ces conditions $V_l = 11{,}192$ km/s.

Le fait que $V_l = V_s \sqrt{2}$ indique qu'un satellite sur *orbite circulaire* possède la moitié de l'énergie nécessaire à sa libération.

Détermination des orbites

On utilisera les unités MKSA dans lesquelles l'unité de force est le newton.

Appliquons deux lois de la mécanique : *conservation* de l'*énergie* et du *moment cinétique*, au corps satellisé de masse m dont la distance au centre de la Terre est d, M étant la masse de la Terre.

Énergie

L'énergie potentielle du corps, celle qu'il possède en fonction de sa hauteur au-dessus du sol de la Terre dont il subit l'attraction, est : $E_p = -G\frac{Mm}{d}$ (comptée négativement, car, par définition, sont comptées positivement les énergies qui tendent à éloigner le corps de la Terre).

Si le corps tombe, son énergie cinétique, nulle quand il était immobile, devient :

$$E_c = \frac{1}{2} mV^2$$

V étant la vitesse à l'instant considéré.

Écrivons que l'énergie totale est constante :

$$\text{(1)} \qquad E_p + E_c = E = \frac{1}{2} mV^2 - G\frac{Mm}{d}$$

Moment cinétique

Considérons maintenant la conservation du moment cinétique. L'objet satellisé est en S avec SO = d (*fig.* 11). O : centre de la Terre. Si α est l'angle que fait le vecteur vitesse SV avec SO, le moment cinétique est :

$$V \times \overline{OH} = V \times d \sin \alpha$$

Or cette expression n'est rien d'autre que le double de la surface du triangle OVS. Cette surface est constante par application de la deuxième loi de Kepler. Donc :

$$\text{(2)} \qquad Vd \sin \alpha = \text{constante}$$

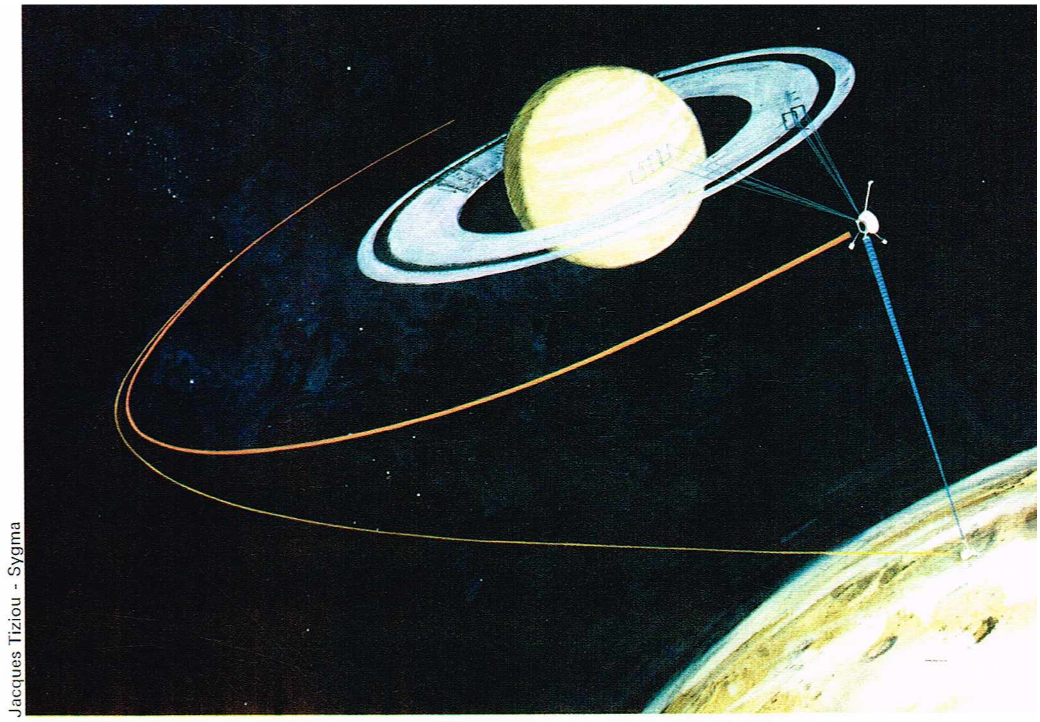

▲ ***Dessin d'anticipation. Les scientifiques de la N. A. S. A. proposent d'envoyer un satellite autour de Saturne dans les années 1980 et de tenter un débarquement sur Titan. Titan (au premier plan) est un satellite de Saturne, deux fois plus gros que la Lune. Cette mission (sans présence humaine) demanderait 3 à 4 ans.***

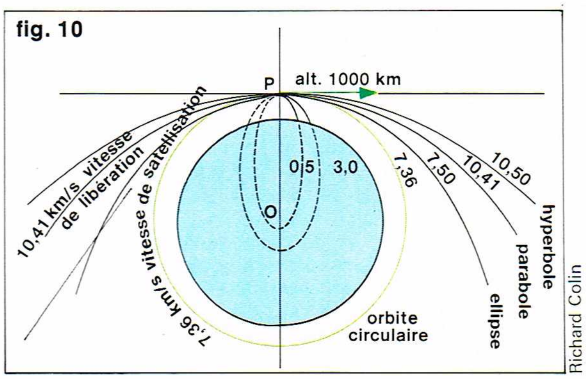

◀ ***Figure 10 : trajectoires d'objets lancés du point P d'altitude 1 000 km avec différentes vitesses horizontales.***

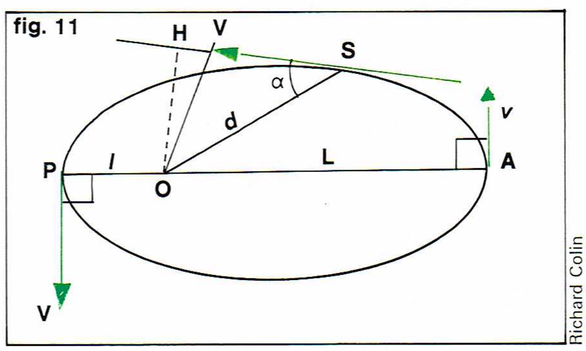

◀ ***Figure 11 : voir développement dans le texte.***

Deux points de l'orbite présentent un intérêt majeur, le périgée P et l'apogée A. En ces points, $\sin \alpha = 1$. Soit l et L les distances du périgée et de l'apogée, V et v les vitesses en ces points, l'équation **(2)** s'écrit :

$$\text{(3)} \qquad V \cdot l = v \cdot L$$

Écrivons que l'énergie dépensée pour éloigner la masse m du périgée à l'apogée est égale à la perte d'énergie cinétique du satellite :

$$mGM\left[\frac{1}{l} - \frac{1}{L}\right] = \frac{1}{2} m\,[V^2 - v^2]$$

Des deux équations précédentes, on tire :

$$V^2 = \frac{2\,GM}{L + l} \cdot \frac{L}{l} \quad \text{et} \quad v^2 = \frac{2\,GM}{L + l} \cdot \frac{l}{L}$$

Or, on a vu que V_s est, à la distance l

$$V_s = \sqrt{\frac{GM}{l}} \quad \text{ou} \quad V_s^2 = \frac{GM}{l}$$

$$\text{donc : } V^2 = \frac{GM}{l} \cdot \frac{2L}{L + l} = V_s^2 \frac{2L}{L + l}$$

D'où :

$$\text{(4)} \qquad \frac{V^2}{V_s^2} = \frac{2\,L}{L + l}$$

Altitude (en km)	V_s Vitesse de satellisation (en km/s)	V_l Vitesse de libération (en km/s)
0	7,914	11,192
50	7,883	11,148
100	7,853	11,105
150	7,823	11,063
200	7,793	11,021
250	7,763	10,979
300	7,734	10,938
350	7,705	10,897
400	7,677	10,857
450	7,649	10,817
500	7,621	10,778
550	7,593	10,739
600	7,566	10,700
650	7,539	10,662
700	7,512	10,624
750	7,486	10,857
800	7,460	10,550
850	7,434	10,514
900	7,408	10,478
950	7,383	10,442
1 000	7,358	10,406

Tableau I
Vitesses de satellisation et de libération en fonction de l'altitude (de 0 à 1 000 km d'altitude)

Variation de la vitesse de lancement	Vitesse de lancement (en km/s)	Distance de l'apogée (en rayon terrestre)	Vitesse orbitale (en km/s)	Période de révolution J	h	mn
V varie par paliers de 0,2 km/s	8,0	1,05	7,66		1	27,2
	8,2	1,16	7,08		1	34,6
	8,4	1,29	6,51		1	43,4
	8,6	1,44	6,51		1	53,4
	10,0	3,95	2,53		5	28,6
	10,2	4,50	2,08		7	07
	10,4	6,39	1,63		9	59,4
V varie par paliers de 0,1 km/s	10,5	7,34	1,43		11	59
	10,6	8,71	1,22		15	2
	10,7	10,63	1,01		19	43
	10,8	13,53	0,80	1	3	32
	10,9	18,41	0,59	1	18	32
	11,0	28,36	0,39	3	7	12
V varie par paliers de 0,01 km/s	11,02	31,77	0,35	3	21	36
	11,03	33,78	0,33	4	06	00
	11,04	36,05	0,31	4	16	06
	11,09	54,07	0,21	8	11	02
	11,10	60,02	0,19	9	21	00
		Lune				
	11,11	67,43	0,17	11	17	30
	11,12	76,88	0,15	14	05	48

Tableau II - Caractéristiques principales des orbites en fonction de la vitesse de lancement

▲ ***Tableau I** : vitesses de satellisation circulaire et de libération en fonction de l'altitude (de 0 à 1 000 km).*
***Tableau II** : caractéristiques principales des orbites en fonction de la vitesse de lancement.*

Les équations **(3)** et **(4)** permettent, connaissant deux des valeurs l, L, v, V, de calculer les deux autres. Un procédé de calcul commode consiste à poser :

$$\frac{L}{l} = \lambda \text{ et } \rho = \frac{V}{V_s}$$

(4) devient : $\rho^2 = \frac{2\lambda}{1+\lambda}$ ou, sous une autre forme :

$$\lambda = \frac{\rho^2}{2 - \rho^2}$$

On verra dans les exemples suivants que l'utilisation des équations précédentes conduit à une grande simplification des calculs.

Il faut cependant connaître la valeur de la vitesse de satellisation circulaire en fonction de l'altitude. On peut la calculer. Le *tableau* I donne cette valeur de 0 à 1 000 km d'altitude. La valeur $\rho = \frac{V}{V_s}$ est appelée *régime de lancement*. Il caractérise en effet l'orbite (pour $\rho = 1$ en particulier, l'orbite est circulaire).

1er exemple de calcul

Un satellite est lancé à 185 km d'altitude avec une vitesse horizontale de 9,4 km/s. Quelles seront l'altitude de l'apogée et la vitesse à l'apogée ?

Reportons-nous aux formules trouvées plus haut :

$$\rho = \frac{V}{V_s} \text{ et } \lambda = \frac{\rho^2}{2-\rho^2} = \frac{L}{l}$$

Le *tableau* I donne 7,8 km/s comme vitesse de satellisation à 185 km d'altitude. Donc, on a :

$$\rho = \frac{9{,}4}{7{,}8} = 1{,}2$$

$$\lambda = \frac{(1{,}2)^2}{2 - (1{,}2)^2} = 2{,}57$$

$$l = 6\,370 + 185 = 6\,555 \text{ km}$$

donc $L = \lambda \cdot l = 2{,}57 \times 6\,555 = 16\,816$ km.

L'altitude de l'apogée est :

$$16\,816 - 6\,370 = 10\,446 \text{ km}$$

L'équation $V \cdot l = v \cdot L$ donne :

$$9{,}4 \times 6\,555 = v \times 16\,816$$

d'où : $v = \frac{9{,}4 \times 6\,555}{16\,816} = 3{,}7$ km/s (par excès)

2e exemple de calcul

On veut lancer un satellite à un périgée de 1 000 km d'altitude pour qu'il passe à 39 500 km au-delà de la Lune. Quelle vitesse faut-il lui donner ?

La distance de centre à centre entre la Terre et la Lune est en moyenne de 384 400 km, le rayon de la Lune de 3 500 km, donc :

$$L = 384\,400 + 3\,500 + 39\,500 = 427\,400 \text{ km}$$

D'autre part :

$$l = 1\,000 + 6\,370 = 7\,370 \text{ km}$$

donc : $\lambda = \frac{L}{l} = \frac{427\,400}{7\,370} = 58$

et $\rho^2 = \frac{2\lambda}{1+\lambda} = \frac{2 \times 58}{59} = 1{,}96$

donc : $\rho = \sqrt{1{,}96} = 1{,}40$

Le *tableau* I donne à 1 000 km d'altitude la vitesse de satellisation de 7,358 km/s. La vitesse à donner au satellite sera donc : 7,358 × 1,4 = 10,30 km/s.

Le satellite décrit bien encore une ellipse, puisque, à 1 000 km de périgée, la vitesse de libération est :

$$10{,}41 > 10{,}30$$

Caractéristiques principales des orbites en fonction de la vitesse de lancement

Pour dresser le *tableau* II qui donne, en fonction de la vitesse de lancement à l'altitude 0, la distance de l'apogée, la vitesse orbitale et la période de révolution, nous avons tenu compte, avec autant de précision que possible, du fait que l'objet satellisé part verticalement, qu'il traverse l'atmosphère et subit des inclinaisons de trajectoire. C'est pour cela que la vitesse de satellisation est donnée pour 8,0 au lieu de 7,78 km/s et la vitesse de libération pour 11,12 au lieu de 11,00 km/s. De plus, notre calcul a été fait avec des chiffres théoriques calculés comme si la Terre était dans le vide, ce qui est, bien sûr, irréel; ils ont donc été majorés dans le tableau.

Nous partons, pour étudier les variations des caractéristiques des orbites, de l'altitude 0 pour laquelle on sait que la vitesse de satellisation est 7,78 km/s. Pour chaque valeur de V, on écrira : $\rho = \frac{V}{7{,}78}$ et on obtiendra la valeur de λ en portant cette valeur dans :

$$\lambda = \frac{\rho^2}{2 - \rho^2}$$

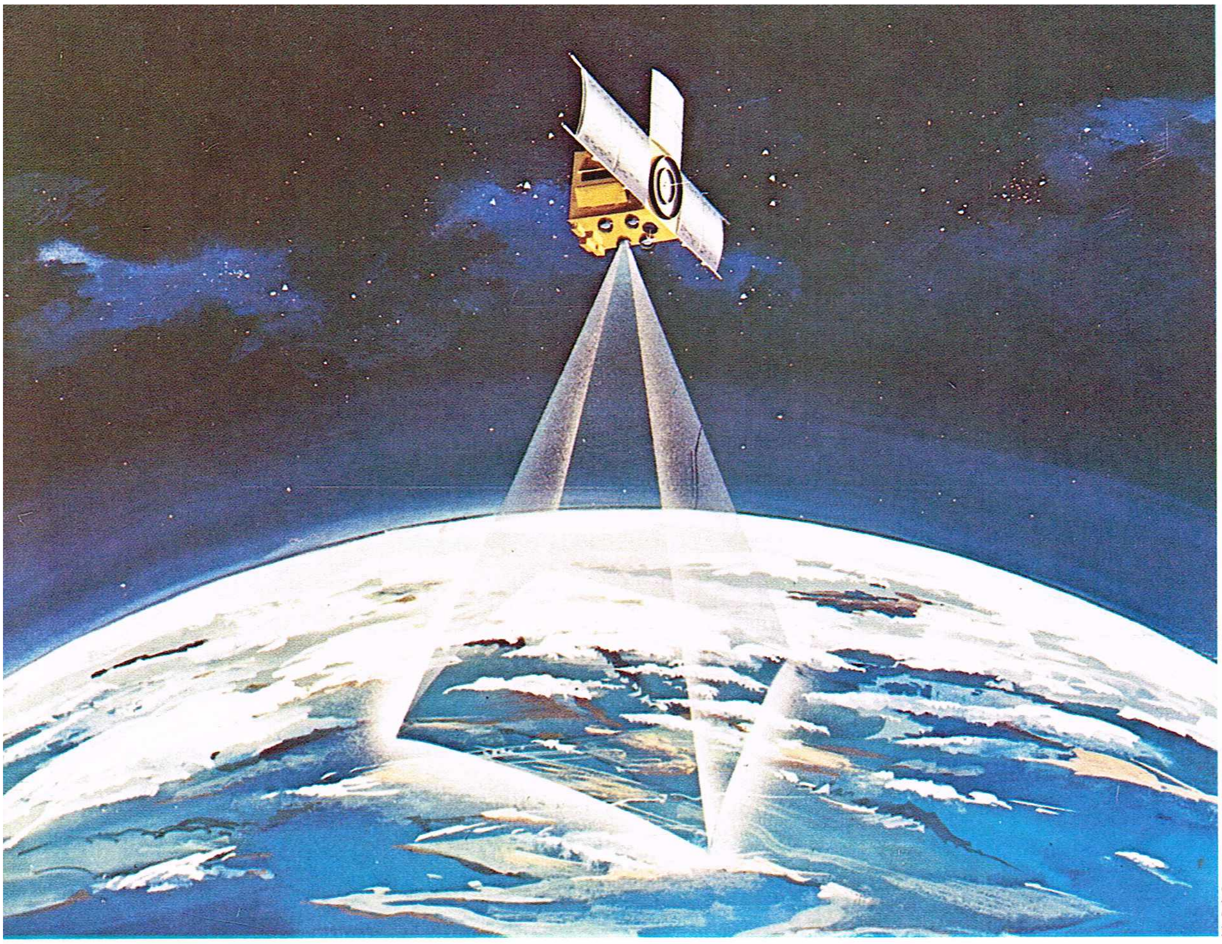

U.S.I.S.

◀ *Représentation artistique du satellite météorologique américain* Tiros M *en train de prendre, aux infrarouges, une photographie des nuages. Le satellite est alors à 1 448 km au-dessus de la Terre.*

Comme le périgée est à 6 370 km du centre, on aura L par la formule : $L = 6\,370 \times \lambda$.

On trouvera la période de révolution en écrivant, conformément à la troisième loi de Kepler, que les cubes des demi-grands axes sont proportionnels aux carrés des périodes de révolution. Sachant que la période de révolution est de : $\frac{2\,\pi R_0}{7{,}9} = T_0$ sur l'orbite circulaire d'altitude 0, c'est-à-dire dont le demi-grand axe est le rayon terrestre, il ne restera plus, pour évaluer la période T d'une autre orbite dont on vient de calculer le demi-grand axe, qu'à écrire :

$$\frac{\left(\frac{L + l}{2}\right)^3}{(6\,370)^3} = \frac{T}{T_0^2}$$

Examinons le *tableau* II ainsi calculé. Avec une même augmentation de vitesse de 0,2 km/s par exemple, le grand axe de l'ellipse a augmenté :

— entre 8,2 et 8,4 de 0,13 rayon terrestre ;
— entre 10,8 et 11,0 de 14,83 rayons terrestres ;
— entre 10,9 et 11,1 de 41,61 rayons terrestres.

Autrement dit, un même accroissement de vitesse en début de tableau, dans le voisinage de la vitesse de satellisation, augmente beaucoup moins la distance de l'apogée qu'il ne le fait en fin de tableau, près de la vitesse de libération.

La Lune étant à 60,3 rayons terrestres de la Terre, on lit dans le tableau que la vitesse de lancement pour l'atteindre est donc comprise entre 11,10 km/s et 11,11 km/s. Or cette valeur est toute proche de la vitesse de libération. On peut en tirer la conclusion suivante : du point de vue de la vitesse de lancement, il est presque indifférent que la destination de l'astronef soit la Lune ou un corps céleste beaucoup plus éloigné. Pratiquement, la vitesse de libération doit être déjà atteinte au départ d'un astronef pour la Lune.

Durée du trajet

La période de révolution d'une ellipse dont le grand axe est égal à la distance de la Lune est de dix jours environ, il en faut donc cinq pour parvenir à la Lune. La vitesse moyenne du voyage s'élève à très peu près à 1 km/s.

On remarque qu'en fin du tableau, la durée de voyage augmente beaucoup pour de faibles accroissements de vitesse. On ne se résignera pas au vol inerte qui allonge si considérablement la durée du voyage. La solution consiste à faire passer l'astronef sur une orbite hyperbolique en lui donnant sur sa trajectoire une poussée motrice. Cela suppose que soient conservés à son bord un appareil moteur et une réserve de combustible.

Influence des variations de vitesse du satellite sur orbite. Transferts d'orbite

Si l'on diminue la vitesse du satellite sur son orbite, la force centrifuge diminue. L'attraction terrestre devient alors supérieure à la force centrifuge. Le satellite perd de l'altitude. C'est évidemment le mouvement inverse qui se produit quand l'on augmente la vitesse du satellite. Les transferts d'orbite sont donc obtenus par variation de la poussée.

Il faut remarquer que, lors d'un rendez-vous orbital (*fig.* 12), l'astronef A qui doit rejoindre l'astronef B ne peut pas se contenter de se placer d'abord à la même altitude, puis de réduire l'écart en augmentant sa vitesse, car, ce faisant, il monterait automatiquement sur une orbite d'altitude supérieure. Le rendez-vous demande une manœuvre plus nuancée et se fait par approximations successives quand il est exécuté manuellement.

Impulsions pour divers transferts d'orbite à partir de l'orbite circulaire d'altitude 200 km

Beaucoup d'astronefs en partance limitent leur orbite terrestre d'attente à l'altitude de 200 km (dans l'expérience *Apollo :* 185 km) ; il nous a paru intéressant de donner la valeur des impulsions qu'il est nécessaire de

fig. 12

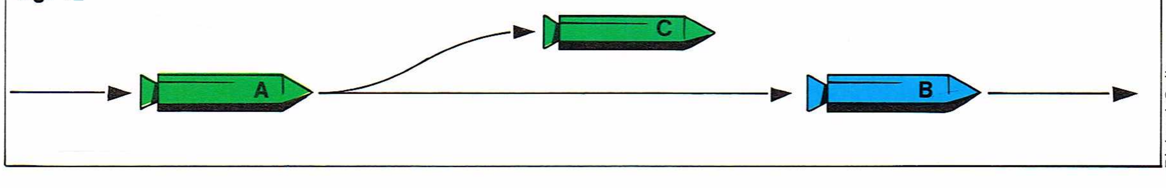

Richard Colin

◀ *Figure 12 : un rendez-vous orbital demande une manœuvre nuancée et se fait par approximations successives quand il est exécuté manuellement.*

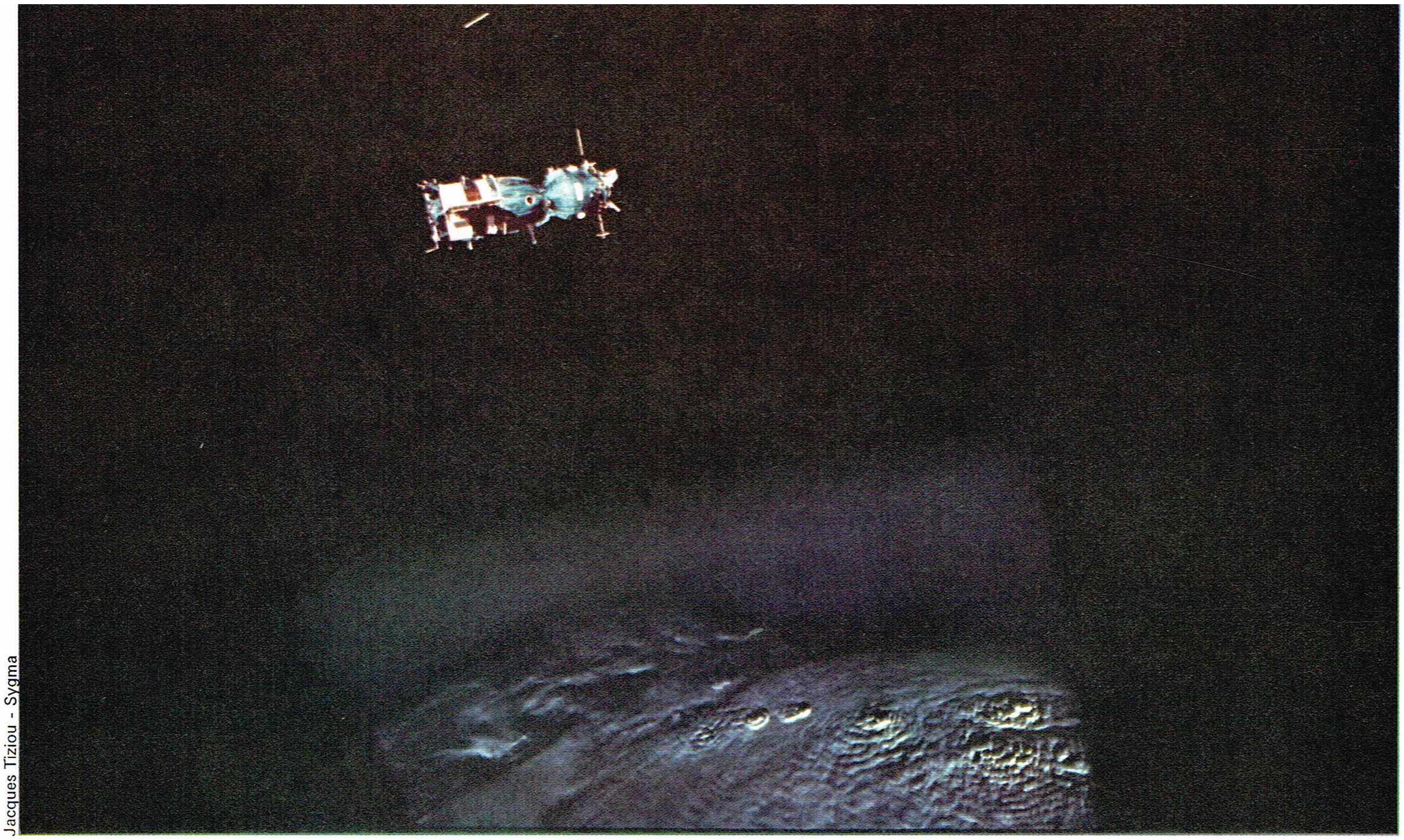

Jacques Tiziou - Sygma

▲ **Soyouz** ***en vol photographié par*** **Apollo.**

donner à un astronef placé dans ces conditions pour atteindre divers objectifs :

La vitesse sur orbite à 200 km étant en moyenne de 7,8 km/s, il faut une impulsion de :

— 0,22 km/s pour s'éloigner à 1 000 km ;
— 1,52 km/s pour s'éloigner à 10 000 km ;
— 2,75 km/s pour s'éloigner à 100 000 km ;
— 3,19 km/s pour atteindre le point neutre Terre-Lune ;
— 3,23 km/s pour s'arracher à l'attraction de la Terre ;
— 3,59 km/s pour atteindre Vénus ;
— 3,70 km/s pour atteindre Mars ;
— 6,31 km/s pour atteindre Jupiter ;
— 8,90 km/s pour s'arracher à l'attraction du Soleil.

Vol dans l'air et dans l'espace

L'avion a besoin de l'oxygène de l'air pour faire fonctionner son moteur, que celui-ci soit à hélice ou à réaction. Si l'avion est à hélice, c'est l'hélice qui, en prenant appui sur l'air, crée la poussée. Dans les deux cas, l'avion décolle et vole, grâce à la portance qu'il trouve de la part de l'air, sur ses ailes et sur son fuselage. Un dirigeable s'envole parce qu'il est gonflé de gaz plus légers que l'air. L'air est indispensable à l'envol de l'avion et du dirigeable.

L'astronef, en revanche (c'est le terme que l'on devrait toujours employer pour désigner un véhicule spatial), n'a aucunement besoin d'air pour prendre son essor grâce à son moteur-fusée. L'air n'est pour lui qu'une gêne par la résistance qu'il lui oppose, par la traînée et l'échauffement qu'il provoque.

Parvenu dans le vide, il pourrait poursuivre, moteur arrêté, son chemin sans ralentir, sans recevoir de poussée nouvelle, et sa trajectoire ne serait fonction que de l'attraction de tous les objets célestes de l'Univers. Toute nouvelle poussée destinée à modifier sa vitesse ou sa direction lui est donnée par des moteurs-fusées qui n'ont aucunement besoin d'air pour fonctionner et qui, d'ailleurs, fonctionnent d'autant mieux que le vide est plus parfait.

Comment ces fusées fonctionnent-elles ? C'est ce que nous examinerons dans un prochain chapitre.

▼ ***Figure 13 : les excentricités de la Terre et de Vénus sont presque nulles (0,02 et 0,07), et leurs orbites presque circulaires. Celle de Mars (0,09) donne une ellipse plus marquée.***

fig. 13

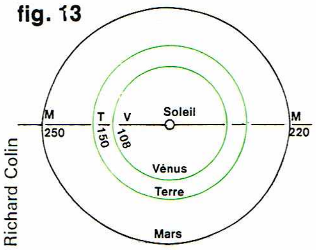

Richard Colin

Les orbites des sondes interplanétaires

Dans le chapitre précédent, pour étudier les trajectoires des satellites artificiels de la Terre, nous avons utilisé les lois de Newton et de Kepler, énoncées à l'origine pour rendre compte des mouvements des planètes dans le système solaire. Comme nous l'avons dit, ces lois sont universelles, elles s'appliquent à n'importe quel satellite de n'importe quel corps céleste. Leur application à un satellite de la Terre était justifiée.

En abordant une brève étude des trajectoires des sondes planétaires, nous replaçons ces lois dans leur domaine originel. Les sondes planétaires, après avoir acquis une vitesse au moins égale à la vitesse de libération, deviennent des satellites du Soleil.

Trajectoires d'un satellite pour atteindre les planètes du système solaire

Nous n'examinerons que l'envol vers Mars ou vers Vénus. Comme l'orbite de la Terre est placée entre celles de ces deux planètes, nous aurons ainsi deux types de lancements différents.

Remarquons d'abord que la masse du système solaire est répartie très irrégulièrement. Avec sa masse égale à 330 000 fois celle de la Terre, le Soleil représente 99,2 % de l'ensemble. Parmi les planètes, dont le total des masses est de 448 fois celle de la Terre, Jupiter prend une part prépondérante avec une masse de 318.

Si nous placions toutes les planètes dans le modèle de Clémence exposé plus haut, il y aurait autant de trous de gravitation *mobiles*, avec un creux beaucoup plus prononcé pour Jupiter. L'ensemble orbiterait autour d'un véritable puits de gravitation *immobile*, celui du Soleil.

Pour aller de la Terre à une planète, un objet spatial (astronef ou sonde) doit d'abord quitter le trou de gravitation de la Terre, donc avoir une vitesse minimale au moins égale à la vitesse de libération terrestre. Il doit en fin de voyage tomber dans le trou de gravitation de la planète visée. Après avoir échappé à l'attraction terrestre et avant d'être happé par l'attraction de la planète, l'objet a une trajectoire déterminée par sa vitesse, par sa direction au moment de son injection dans le système solaire, et enfin par l'attraction du Soleil.

Ces mouvements se passent à l'intérieur du système solaire considéré comme un tout. Ils sont indépendants du fait que le Soleil se meut à la vitesse de 19,4 km/s par rapport aux étoiles voisines et que le groupe d'étoiles dont il fait partie se déplace à la vitesse de 220 km/s dans la Voie lactée. Le calcul d'une trajectoire ne serait rigoureux que si l'on tenait compte de l'influence du Soleil et de toutes les planètes. Il est extrêmement compliqué. Pour l'effectuer, on considère que chaque planète est entourée d'une zone dans laquelle son champ de gravitation est prépondérant. Une application

de la loi de Laplace réduit alors le problème à celui du problème de deux corps.

On a ainsi le long de la trajectoire, en partant d'une orbite terrestre :

- Une **phase de départ,** avec libération de l'attraction terrestre ; l'objet doit avoir une vitesse *résiduelle* appelée *vitesse à l'infini* après cette libération. La trajectoire est une branche d'hyperbole.
- Une **phase de transfert.** L'orbite est alors une branche d'ellipse dont le Soleil occupe un des foyers. Elle est déterminée, comme nous l'avons déjà souligné, par l'attraction du Soleil, la valeur et la direction de la vitesse à l'infini.
- La **phase d'arrivée.** La trajectoire est, comme au départ, une branche d'hyperbole. L'objet doit être freiné pour être satellisé.

Dans la plupart des cas, l'étude de la trajectoire se réduit à la phase de transfert : vol d'un satellite artificiel autour du Soleil.

Nous avons introduit ci-dessus la notion de *vitesse à l'infini*. Elle est très importante, car elle donne la vitesse minimale de *croisière* du satellite, sur des distances très importantes. Les distances concernant les missions interplanétaires sont, en effet, de l'ordre de dizaines de millions de kilomètres.

Sur la *figure* 13, les orbites de la Terre et de Vénus sont circulaires. Les excentricités de ces deux planètes : 0,02 et 0,007, sont presque nulles. L'orbite de Mars, d'excentricité 0,09, donne une ellipse plus marquée. Les chiffres placés sous les lettres V (Vénus), T (la Terre), M (Mars) donnent les distances de ces planètes au Soleil en millions de kilomètres.

Vitesse à donner au satellite

On a vu que, pour qu'un objet soit injecté dans le système solaire, il fallait qu'il passât pratiquement de la vitesse de satellisation de 8 km/s à la vitesse de libération de 11 km/s. La vitesse d'injection dans le système solaire doit donc être au moins de l'ordre de 3 km/s.

Si l'on se fixe un objectif planétaire, il faut qu'en plus de la vitesse de libération *minimale* qui affranchit l'objet de l'attraction terrestre mais le laisse sans vitesse, l'objet reçoive au départ un appoint de vitesse. A cet appoint de vitesse donné au départ, correspond, au moment où l'objet commence son voyage dans le vide, une vitesse *résiduelle* qu'il va conserver indéfiniment (à condition, bien sûr, de ne recevoir aucune perturbation : attractions d'objets célestes voisins de sa trajectoire, chocs de météorites, etc.). Cette vitesse résiduelle est appelée aussi *vitesse à l'infini* V_∞. Le calcul montre qu'elle est relativement très vite atteinte, pratiquement dans les dix premiers millions de kilomètres parcourus, alors que le parcours d'un satellite dont la destination est une planète se chiffre par centaines de millions de kilomètres.

La vitesse à l'infini peut être considérée comme la *vitesse moyenne de croisière* du satellite. Celle-ci devra être calculée en fonction du voyage à effectuer dans le système solaire. Sa valeur permettra de connaître l'appoint que l'on doit donner au départ à la vitesse de libération pour obtenir la vitesse résiduelle souhaitée. Il s'agit d'un problème simple, puisque les énergies sont proportionnelles aux carrés des vitesses. Il suffit d'additionner le carré de 11 (pour l'énergie d'évasion de la région terrestre) au carré de la vitesse de croisière souhaitée, pour obtenir le carré de la vitesse à donner au départ.

Exemple : on veut obtenir une vitesse de croisière de 2,8 km/s : $V^2 = \overline{11}^2 + \overline{2,8}^2 = 128,84$ d'où

$$V = 11,38 \text{ km/s}$$

par défaut.

On voit donc que, si, à partir d'une orbite terrestre obtenue avec une vitesse de 8 km/s, on veut lancer un objet spatial dans le système solaire avec une vitesse de croisière de 2,8 km/s, au lieu des 3,0 km/s pour lesquels l'objet aurait une vitesse nulle dans le système solaire, il faut créer une vitesse de 3,8 km/s. Avec un appoint de 0,38 km/s à l'injection, on obtient donc 2,8 km/s comme vitesse de croisière à l'infini.

Sens de la vitesse d'injection

La Terre orbite autour du Soleil à la vitesse d'environ 30 km/s. Nous sommes devant un problème de transfert d'orbite (*fig.* 14 et 15).

fig. 15

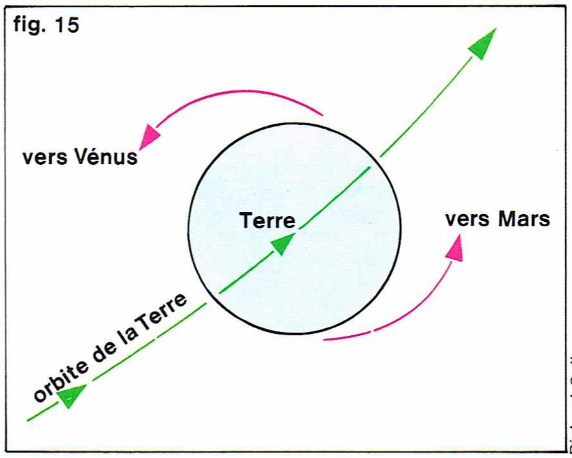

Richard Colin

◄▼ *Figures 14 et 15 : transfert d'orbites (voir développement dans le texte).*

fig. 14

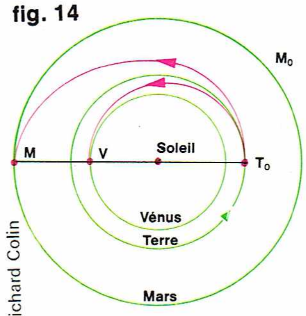

Richard Colin

Puisque Mars est sur une orbite extérieure à l'orbite terrestre, il faudra pour l'atteindre lancer le satellite dans le sens du déplacement de la Terre sur son orbite afin d'obtenir une vitesse supérieure à celle de la Terre.

En revanche, Vénus étant à l'intérieur de l'orbite de la Terre, il faudra obtenir une vitesse inférieure à celle de la Terre sur son orbite pour l'atteindre. Il suffit pour cela de se libérer de l'attraction terrestre avec une vitesse opposée à la vitesse terrestre. Toutefois, le satellite destiné à Vénus se déplace dans le même sens que la Terre, car la composante due à la vitesse propre de la Terre reste prépondérante. Le satellite, tout en se déplaçant dans le même sens, prendra du retard sur la Terre.

A part cette différence de direction pour la vitesse d'injection, suivant que l'on veut atteindre une planète supérieure ou une planète inférieure, les autres caractéristiques sont étudiées de la même façon.

On se borne ci-après à l'étude des vols vers Mars.

Les vols vers Mars

La distance séparant la Terre de Mars varie entre 55 et 400 millions de kilomètres. Les deux planètes sont le plus rapprochées lors des grandes oppositions qui se produisent tous les 15 ou 17 ans (la différence est causée par l'excentricité 0,09 de l'orbite de Mars). Ces positions pourraient *a priori* paraître les plus favorables. Il n'en est rien, car la Terre se déplace autour du Soleil à la vitesse de 30 km/s environ. De plus, dans ces conditions, le satellite, en partant de la Terre, s'éloignerait en ligne directe du Soleil, donc devrait vaincre une attraction maximale.

Le prix du trajet en combustible serait doublement exorbitant, puisqu'on peut calculer qu'il faudrait atteindre 39 km/s, chose impossible actuellement.

▼ **Viking I.**

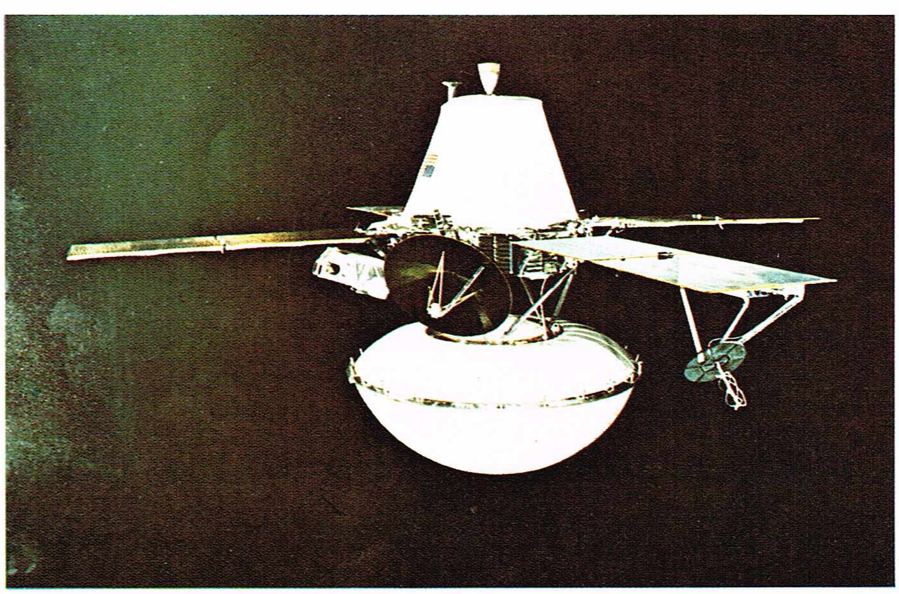

T. Korody - Sygma

fig. 16

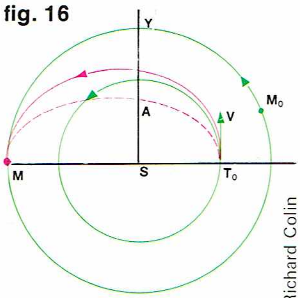

▲ *Figure 16 : vol vers Mars ; trajectoires à énergie minimale.*

Trajectoires à énergie minimale

Deux conditions les définissent :

● Elles doivent être choisies de façon que le satellite s'éloigne le *moins possible* du Soleil, car l'attraction de ce dernier est considérable, et tout éloignement est très coûteux en énergie.

● Par ailleurs, le satellite partant de la Terre peut bénéficier au maximum de la vitesse de notre globe autour du Soleil, environ 30 km/s, si le lancement se fait tangentiellement à l'orbite terrestre, et, bien entendu, dans le sens de la rotation autour du Soleil.

La première condition implique que l'orbite du satellite ne coupe pas l'orbite de Mars, donc qu'elle arrive tangentiellement à cette orbite ; la deuxième condition définit une vitesse de lancement perpendiculaire en T_0 à ST_0 (*fig.* 16). Le périhélie de l'orbite sera donc en T_0 et l'aphélie en M, intersection de l'orbite de Mars et de la droite T_0S prolongée. Quand le satellite est lancé en T_0, Mars se trouve en M_0. Le satellite parcourt l'arc T_0M pendant que Mars parcourt l'arc M_0M.

L'orbite de Mars faisant un angle de 1,85° avec le plan de l'écliptique, la vitesse de lancement devra avoir une composante perpendiculaire à ce plan. La rotation de 180° du satellite autour de S caractérise la trajectoire à énergie minimale. Le même raisonnement vaudrait pour un lancement vers Vénus.

Il faut remarquer que rien n'empêcherait de suivre une trajectoire plus tendue se rapprochant au départ du Soleil. Mais, à partir du moment où il traverse en A la droite SY perpendiculaire à T_0S, le satellite s'éloigne du Soleil tout en diminuant de vitesse, puisqu'il va vers l'aphélie. Comme l'arc AM est plus grand que l'arc T_0A, la dépense d'énergie pour atteindre M est considérable. On démontre qu'en définitive, la dépense d'énergie est supérieure sur la trajectoire tendue à ce qu'elle est sur la trajectoire qui entoure l'orbite terrestre.

Période synodique

Le grand axe de l'orbite est parfaitement fixé par son périhélie en T_0, son aphélie en M et sa longueur égale à la somme des distances Terre-Soleil et Soleil-Mars (entre 370 et 400 millions de kilomètres). La vitesse à l'injection est également fixée. La trajectoire est donc unique.

On sait calculer la durée du trajet grâce à la troisième loi de Kepler, elle est de 8 mois 10 jours. Comme l'on connaît la vitesse de Mars sur son orbite, on sait où cette planète doit se trouver au moment du lancement, en M_0. La configuration T_0SM_0 est définie avec précision, et elle ne se retrouvera identique que 780 jours plus tard ; cet intervalle de temps est appelé *période synodique*.

Donc, si, pour une raison quelconque (mauvais temps, incident pendant le compte à rebours, avarie d'un appareil facile à réparer mais pas avant le temps zéro du lancement), le tir ne peut être fait à l'instant exact prévu, la prochaine expérience ne peut avoir lieu que 780 jours plus tard. C'est une chose difficile à accepter, et l'on a cherché à y remédier. C'est-à-dire qu'au lieu d'avoir à lancer à un instant très précis, on cherche à se donner la possibilité de disposer d'un intervalle de temps assez important, qu'on appelle *fenêtre* de lancement.

Fenêtres de tir

On obtient ce résultat en cherchant un rendez-vous entre le satellite et Mars qui ne soit pas un point unique M, mais un point quelconque d'un arc M_1MM_2 axé sur M. Voyons comment cela peut s'obtenir pour les points extrêmes M_1 et M_2 (*fig* 17).

Dans les deux cas, on procède de la même façon :

— On augmente légèrement la vitesse d'injection. L'apogée s'éloigne, et l'ellipse coupe l'orbite de M en deux points.

— On injecte le satellite avec une direction de la vitesse légèrement sécante.

Pour une *même vitesse d'injection* légèrement supérieure à la vitesse de libération, on a :

pour M_1 deux ellipses d'axes a_1p_1 et $a'_1p'_1$

pour M_2 deux ellipses d'axes a_2p_2 et $a'_2p'_2$

qui satisfont aux conditions de rendez-vous.

Les *figures* 17 montrent que le trajet le plus court est celui suivant l'arc T_0BM_1. C'est celui qui convient le mieux pour un astronef habité.

Les chances de pouvoir atteindre Mars en dépit de certains incidents qui pourraient empêcher le rendez-vous ponctuel en M sont évidentes. Pour une très faible dépense d'énergie supplémentaire, on peut fixer ce rendez-vous tout le long de l'arc M_1MM_2.

Admettons par exemple que $M_1M = 3°$; on a donc $M_1M_2 = 6°$, soit le soixantième de la circonférence décrite par Mars en 687 jours (en réalité, une ellipse d'excentricité 0,09). $\overset{\frown}{M_1M_2}$ est donc décrite en environ 13 jours, car c'est à l'aphélie que la vitesse est moindre.

Il ne faut pas oublier que la Terre, à cause de sa rotation sur elle-même, impose d'autres conditions. Il s'ensuit que, pendant ces 13 jours, on disposera à des moments différents de la journée de fenêtres beaucoup plus réduites. Les chances de pouvoir tirer n'en ont pas moins été augmentées dans des proportions considérables.

LE FONCTIONNEMENT DE LA FUSÉE

Il nous paraît indispensable, dès le début, de fixer les idées sur la façon dont fonctionne une fusée. En effet, beaucoup de gens croient que les fusées prennent leur essor grâce à l'appui, sur l'atmosphère, des gaz qu'elles éjectent par l'arrière. Bien plus, il n'est pas rare de voir cette opinion partagée par des personnes ayant une bonne culture autre que scientifique.

Or rien n'est plus faux. Le fonctionnement de la fusée est fondé sur la troisième loi de Newton, qui énonce qu'à toute force correspond une force d'importance égale et de direction opposée : c'est le principe de l'action égale à la réaction. La fusée crée sa propulsion grâce à ce qu'elle emporte avec elle (les propergols), elle n'a aucunement besoin d'air ni, d'ailleurs, de quoi que ce soit provenant du milieu qu'elle traverse pour fonctionner. Son rendement est en fait meilleur dans le vide que dans une atmosphère.

La fusée est un type particulier de moteur à réaction. Ce sont les moteurs à réaction qui, les premiers, ont permis de faire d'énormes bonds dans la gamme des vitesses atteintes : avant la Seconde Guerre mondiale, les avions les plus rapides volaient à 300 km/h ; pendant la guerre, le *Messerschmitt* 163 à réaction atteignit 950 km/h ; en 1953, un *Skyrocket* parvenait à 2 600 km/h. L'hélice n'était pas capable d'atteindre ces vitesses. Or, pour les fusées, il n'y a pas *théoriquement* d'autre limite à leur vitesse que celle de la lumière.

▼ *Figure 17 : fenêtres de tir ; au lieu d'avoir à lancer le satellite à un instant précis, on cherche à se donner la possibilité de disposer d'un intervalle de temps assez important qu'on appelle « fenêtre de tir » ou « de lancement ». Figure 18 ; principe de fonctionnement d'une fusée : premier exemple.*

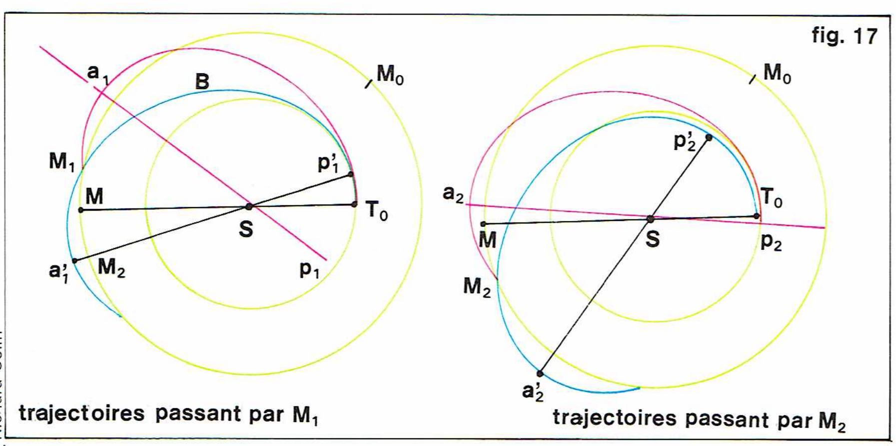

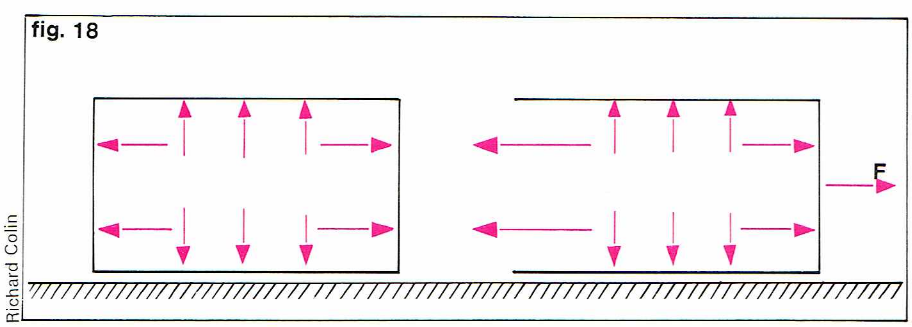

Le principe de l'action égale à la réaction

La vulgarisation scientifique, pour l'expliquer, utilise des exemples faciles à comprendre.

Premier exemple

Prenons un récipient cylindrique (*fig.* 18) empli d'un gaz sous pression et posé sur une surface horizontale glissante. On sait que la pression du gaz s'exerce sur toutes les parois avec une force égale. Si nous enlevons l'un des fonds du cylindre, le gaz s'écoulera par cette ouverture ; sa pression sur le fond opposé ne sera plus équilibrée, et le cylindre se mettra en mouvement dans la direction indiquée par la flèche F. On comprend que, plus la pression sera grande, plus la vitesse sera élevée. Le mouvement provient entièrement du déséquilibre des forces internes. Les fusées sont propulsées par application de ce même principe.

Si le cylindre se trouve dans le vide, la paroi qui avance n'éprouve aucune résistance de la part du milieu. La vitesse est donc plus grande dans ce cas. Les fusées, destinées à traverser le vide interplanétaire, en bénéficient également.

Pour obtenir un meilleur rendement, on donne à l'orifice un profil élaboré appelé tuyère, dont nous reparlerons plus loin.

Second exemple

Un homme se tient sur un wagonnet placé sur deux rails horizontaux (*fig.* 19a). Il saute à terre dans l'axe des rails. On comprend que le wagonnet se met à rouler en sens inverse, poussé par le pied de l'homme au moment où il prend son élan.

Complétons cet exemple (*fig.* 19b) : au lieu de sauter lui-même à terre, supposons que l'homme lance à terre une à une les briques d'un tas posé sur la plate-forme du wagonnet. Le principe reste le même. L'envoi de chaque brique dans un sens donnera une impulsion en sens contraire au wagonnet, donc une accélération. Chaque brique ajoutera sa propre accélération, et la vitesse s'accroîtra.

Rapport de masses

Le calcul montre que, si V_e est la vitesse (dite vitesse d'éjection) avec laquelle chaque brique est lancée, le wagonnet roulera à la vitesse V_e quand l'homme aura lancé un poids de briques égal à 1,7 fois *les poids additionnés de l'homme et du wagonnet*, cette somme constituant la *charge utile*, puisque le but de l'opération est de transporter en un autre lieu le wagonnet et son passager. On désignera dans les formules la charge utile par M_F, car c'est la *masse finale* de l'ensemble quand l'opération est terminée. Si M_0 est la masse totale initiale, on appelle rapport de masses la valeur $R = \frac{M_0}{M_F}$.

Il faut noter que, dans l'opération qui vient d'être décrite, la masse de briques embarquée au début est égale à 1,7 M_F (donc $M_0 = 2,7\ M_F$). S'il y avait davantage de briques embarquées, il ne suffirait pas de jeter le nombre de briques dont le poids totalise 1,7 M_F pour obtenir le résultat cherché, en effet, à chaque impulsion, la masse à accélérer serait plus grande.

Les briques dépensées pour accélérer le véhicule peuvent être considérées comme un combustible, car c'est bien une substance dont la consommation crée une poussée.

Notons encore, pour éviter toute ambiguïté, que notre raisonnement suppose que les rails sont rigoureusement horizontaux, les frottements et la résistance de l'air nuls. Ainsi, le wagonnet et sa charge sont supposés dans un état théoriquement identique à celui de la fusée qui se déplace dans le vide. La vitesse du wagonnet est donc supposée constante tant qu'il ne subit pas de nouvelle impulsion, tandis que chaque force impulsive crée une accélération.

Nous venons de dire qu'il faut lancer un poids de briques de 1,7 M_F pour que le wagonnet acquière une vitesse égale à celle V_e, uniforme, avec laquelle est lancée chaque brique. Mais cette vitesse étant acquise, rien ne s'opposerait à ce que la vitesse s'accroisse encore si le passager pouvait continuer à jeter des briques ; chacune continuerait à provoquer une accélération, et le wagonnet prendrait une vitesse supérieure à celle avec laquelle les briques sont lancées. Le calcul montre alors qu'il faut un stock de briques tel que le rapport de masses soit $\overline{2,7}^2$ pour que, lorsqu'il sera épuisé, la vitesse soit 2 V_e.

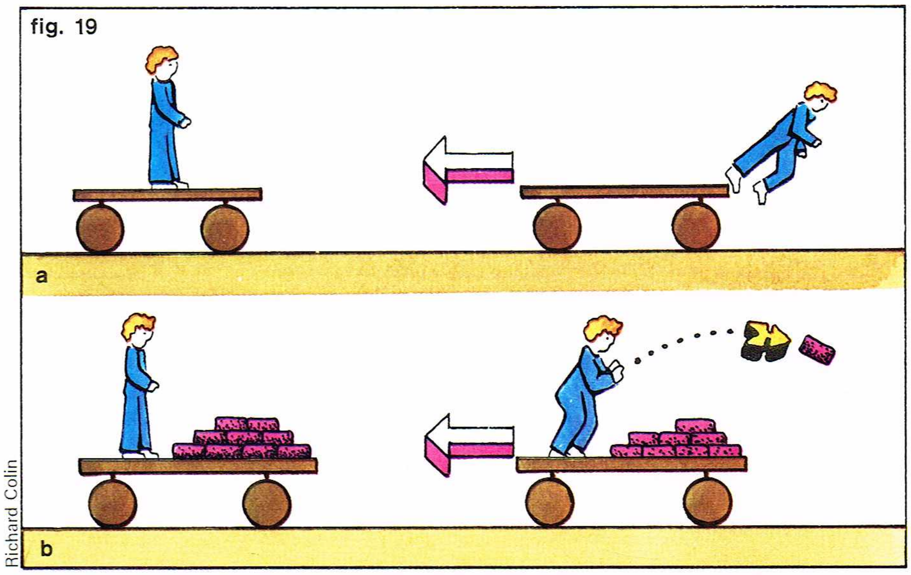

Richard Colin

▲ ***Figure 19 : principe de fonctionnement d'une fusée : deuxième exemple.***

D'une façon générale, pour obtenir une vitesse nV_e, le rapport de masse doit être $\overline{2,7}^n$ (2,7 est la valeur approchée du nombre de Neper dont le symbole est *e* ; une valeur plus précise est 2,718 28...). Autrement dit, si le passager lance chaque brique à la vitesse V_e, il faut, pour obtenir une vitesse $n \cdot V_e$, que le wagonnet soit chargé au départ d'un stock de briques : $(\overline{2,7}^n - 1)\ M_F$. (La charge totale est bien $M_0 = \overline{2,7}^n\ M_F$ et le rapport de masses $\overline{2,7}^n$.)

Remarquons encore que la cadence avec laquelle sont lancées les briques n'est pas intervenue dans notre raisonnement. Si elle est régulière, autrement dit si le débit du combustible que constituent les briques est constant, le mouvement sera uniformément accéléré.

Il est facile de comprendre que la force qui agit sur le wagonnet dépend de la vitesse V_e avec laquelle est éjectée chaque brique, et du nombre D de briques lancées chaque seconde. Si F est la force de propulsion et D le débit qui s'exprime en kg/s, on a :

$$F = D \cdot V_e$$

L'exemple que nous venons de prendre souligne que l'on se trouve devant un **problème nouveau en mécanique : l'étude du mouvement d'un corps dont la masse est en continuelle diminution.**

Le mouvement de la fusée est analogue. Sa masse totale s'allège continuellement de la masse du combustible brûlé jusqu'à épuisement de ce dernier.

Pour le wagonnet, nous avons trouvé que la force de propulsion est : $F = D \cdot V_e$. Il en est de même pour la fusée. D est alors la masse de gaz éjectée chaque seconde à la vitesse V_e. Et l'on a pour la fusée : $F = D \cdot V_e$.

Exemple : une fusée brûlant 30 kg de propergols par seconde et éjectant les gaz produits à la vitesse de 2 000 m/s a une poussée : $F = \frac{30}{9,81} \times 2\ 000$, d'environ 6 000 kgf. Remarquons que, le poids étant le produit de la masse par l'accélération de la pesanteur, il faut, pour trouver la masse de propergols, diviser le poids par 9,81. Or, le newton est égal à : $\frac{1\ \text{kgp}}{9,81}$, donc, si l'on écrit $F = 30 \times 2\ 000 = 60\ 000$, F est exprimée en newtons.

Le principe de l'**égalité de l'action et de la réaction** n'est rien d'autre que l'application d'un autre principe, celui de la **conservation de la quantité de mouvement.**

Prenons le wagonnet au repos, chargé de son passager et d'un stock de briques que celui-ci est prêt à jeter une par une. La quantité de mouvement de l'ensemble (Σmv) est nulle, puisque *v* est nulle. La masse initiale est M_0 (wagonnet + homme + briques). La masse d'une brique est *m*.

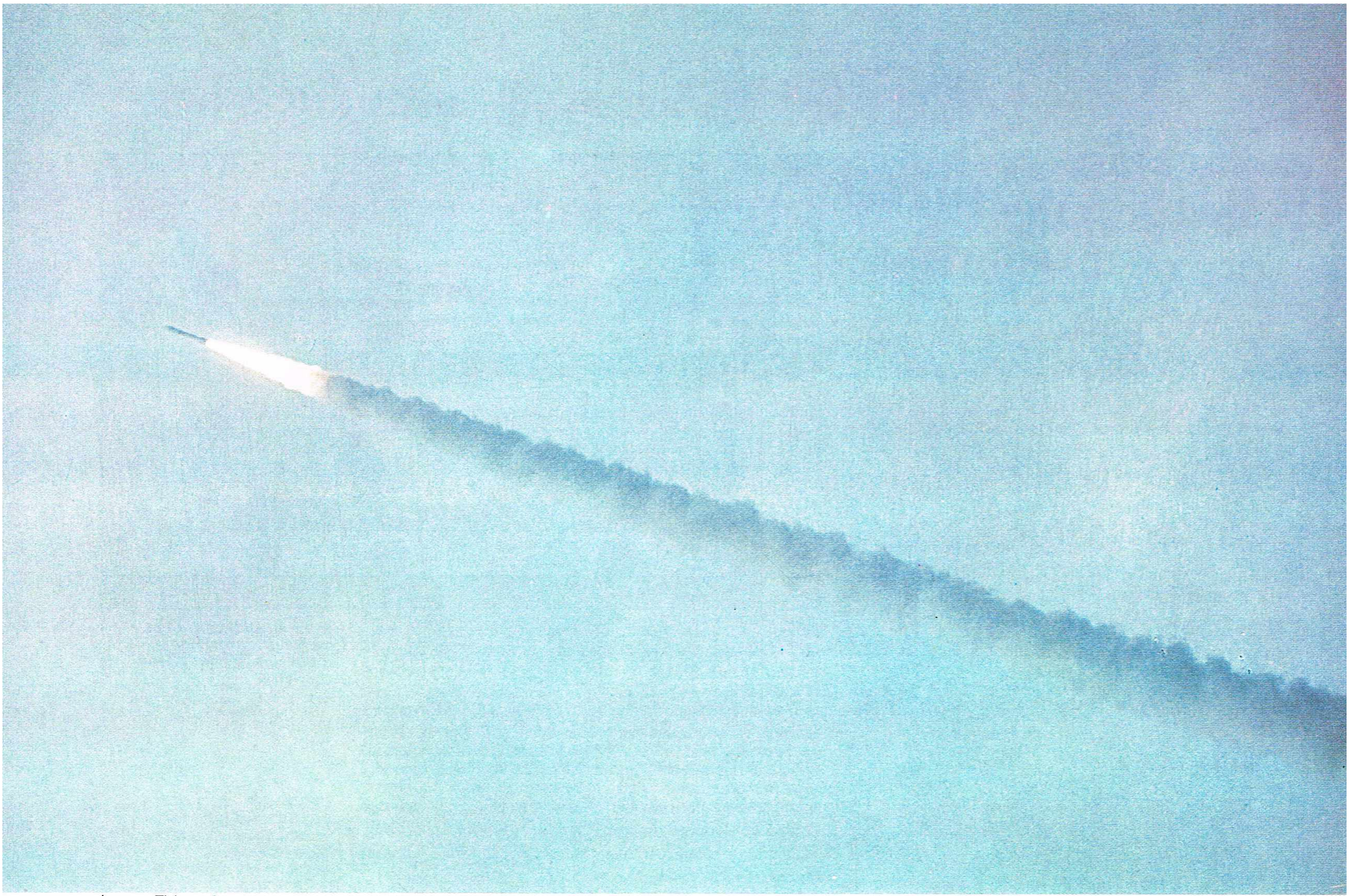

Jacques Tiziou - Sygma

Jacques Tiziou - Sygma

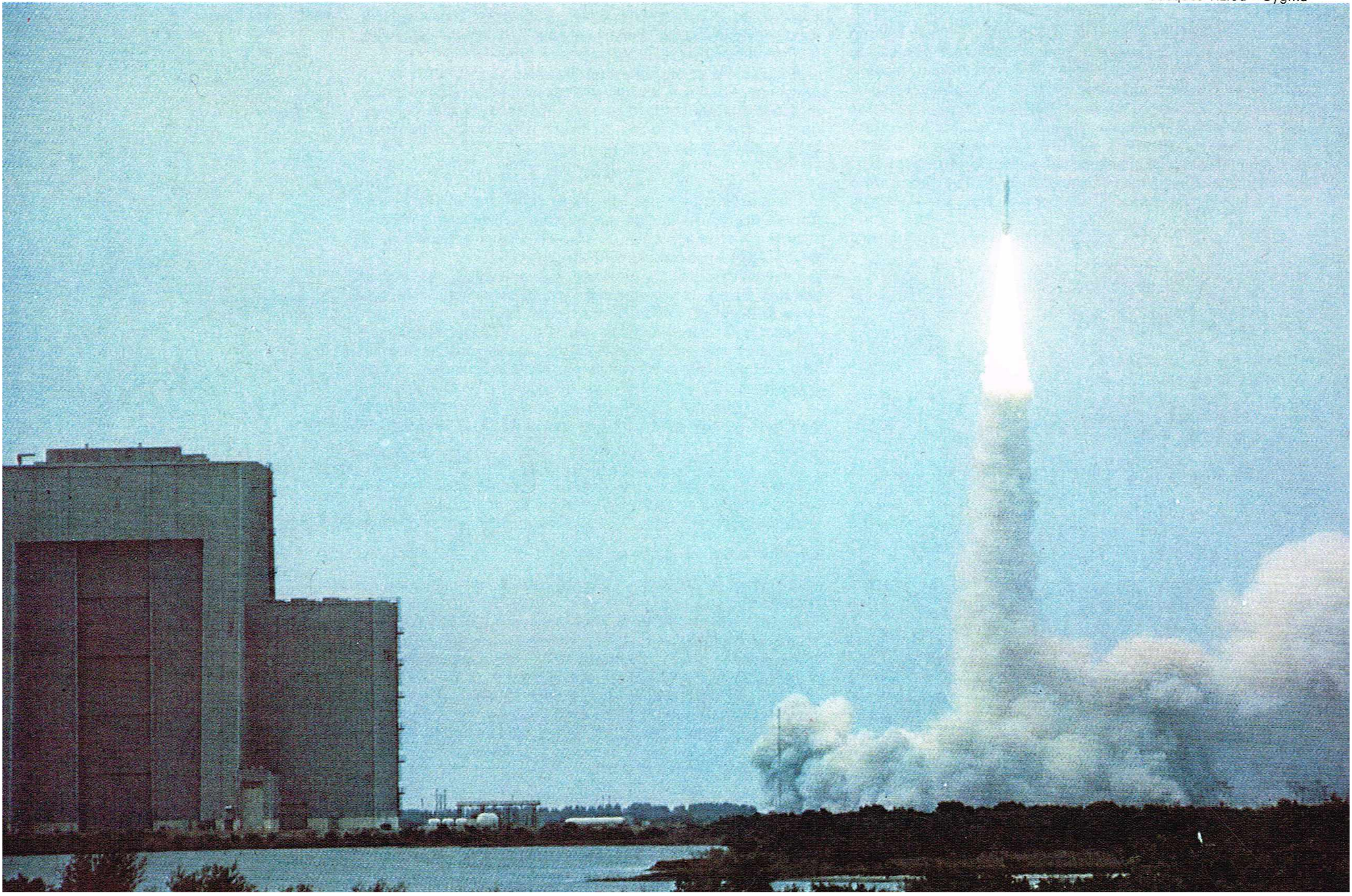

Jetons une brique chaque seconde à la vitesse V_e. A la première brique, la masse est devenue $(M_0 - m)$, et le wagonnet roule en sens inverse de celui dans lequel a été jetée la brique; à une certaine vitesse v, v et V_e sont évidemment de signes contraires.

Écrivons que la quantité de mouvement est restée constante, c'est-à-dire nulle :

$$(M_0 - m)\, v - mV_e = 0, \text{ d'où } v = \frac{mV_e}{M_0 - m}$$

Exemple : le wagonnet pèse 300 kg, l'homme 70 kg, et il y a 126 briques de 5 kg, jetées à la vitesse de 2 m/s. Nous choisissons ce chiffre parce que

$$126 \times 5 = 1{,}7\ (300 + 70).$$

Nous nous trouvons dans le cas où, après le jet de la dernière brique, la vitesse du wagonnet sera $v = V_e$. La vitesse acquise par le wagonnet au premier jet est :

$$v = \frac{\frac{5}{9{,}81} \times 2}{\frac{1\,000}{9{,}81} - \frac{5}{9{,}81}} \neq \frac{10}{1\,000} = 0{,}01 \text{ m/s}$$

Si chaque brique provoquait la même accélération, la vitesse finale serait $0{,}01 \times 126 = 1{,}26$ m/s. Or, nous savons que cette vitesse doit être 2 m/s. La différence vient du fait qu'à chaque brique lancée, la masse totale diminue, et donc que la brique suivante provoquera une accélération supérieure à la précédente. La dernière accélération sera par exemple : $\frac{5 \times 2}{370} = 0{,}027$ m/s.

La vitesse de la fusée

Nous venons de trouver que $F = D \cdot V_e$. Mais une autre évaluation de F est donnée par le produit de la masse de la fusée par l'accélération. Si V est la vitesse de la fusée, son accélération est :

$$\frac{dV}{dt}, \text{ donc } F = M\frac{dV}{dt} = DV_e$$

Or, D est la masse de gaz éjectée pendant 1 seconde, il représente la variation de la masse M, soit $\frac{dM}{dt}$. L'équation précédente devient donc :

$$M\frac{dV}{dt} = V_e\frac{dM}{dt}$$

et par intégration :

$$V = V_e \operatorname{Log}_e \frac{M \text{ initiale}}{M \text{ actuelle}}$$

ce qui donne en logarithmes décimaux, en remarquant que 2,3 est la valeur approchée par défaut du logarithme népérien de 10 :

$$V = 2{,}3\, V_e \log_{10} \frac{M \text{ initiale}}{M \text{ actuelle}}$$

Cette formule, énoncée pour la première fois par Tsiolkovski, porte son nom. Elle permet d'écrire que la vitesse maximale, c'est-à-dire celle qu'a la fusée quand tous les combustibles sont brûlés et qu'il ne reste plus que la charge utile comme masse, est :

$$V_{max} = 2{,}3\, V_e \log_{10} \frac{M_0}{M_F} = 2{,}3\, V_e \log_{10} R$$

(R étant le rapport de masses déjà défini plus haut).

Accroissement de vitesse dû à la combustion d'un seul étage

Un seul étage de fusée peut être considéré comme une fusée dont la charge utile comprend la masse des étages supérieurs et la masse de la charge utile finale. Si l'on désigne par M_i la masse initiale de l'ensemble quand cet étage est mis à feu, et par M_f la masse de l'ensemble quand sa combustion est terminée, la formule précédente permet d'écrire que l'accroissement de vitesse créé par cet étage est : $2{,}3\, V_e \log_{10} \frac{M_i}{M_f}$.

La formule de Tsiolkovski correspond au diagramme de la *figure* 20. En ordonnées sont portées les vitesses de la fusée, en abscisses les rapports de masses. Les courbes sont tracées pour différentes valeurs de la vitesse d'éjection.

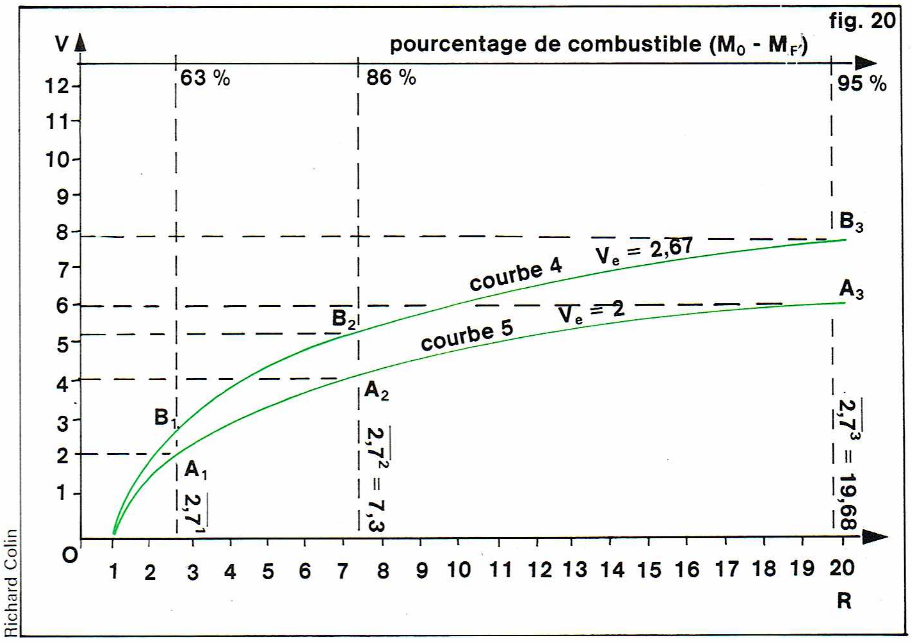

Richard Colin

▲ *Figure 20 : diagramme correspondant à la formule de Tsiolkovski. En ordonnées : vitesse de la fusée ; en abscisses : rapport de masses. Paramètre : vitesse d'éjection.*

On utilise le diagramme de la façon suivante : nous avons dit plus haut que, pour que V atteigne 2 V_e, il faut que le rapport de masse soit $\overline{2{,}7}^2$. Considérons la première courbe **(5)** qui correspond à une vitesse d'éjection de 2,0.

Pour un rapport de masses de 2,7, V doit être égal à $V_e = 2$. C'est bien ce que l'on trouve en mesurant l'ordonnée de A_1, intersection de la droite d'abscisse 2,7 avec la courbe **(5)** qui correspond à la vitesse d'éjection de 2,0.

Pour un rapport de masses $\overline{2{,}7}^2 = 7{,}3$, nous trouvons bien $V = 2\, V_e = 4$.

Et pour un rapport de masses $\overline{2{,}7}^3 = 19{,}68$, nous trouvons $V = 3\, V_e = 6$.

V est donnée par un nombre qui est exprimé dans les mêmes unités que celles utilisées pour tracer la courbe, c'est pour cela que nous ne les avons pas précisées. Si V_e, par exemple, est 2 m/s (vitesse que l'on a choisie comme vitesse d'éjection des briques dans l'exemple concernant le wagonnet), V sera exprimée en m/s. Mais si l'on prend la courbe **(4)** qui correspond à :

$$V_e = 2{,}67 \text{ km/s}$$

vitesse d'éjection des gaz provenant de la combinaison très employée kérosène-oxygène liquide, V sera exprimée en km/s.

On voit sur la courbe **(4)** que, pour un rapport de masses $\overline{2{,}7}^2 = 7{,}3$, l'ordonnée de B_2 est bien

$$2\, V_e = 2 \times 2{,}67 = 5{,}34 \text{ km/s}$$

et, pour un rapport de masses $\overline{2{,}7}^3 = 19{,}68$, l'ordonnée de B_3 est $3\, V_e = 3 \times 2{,}67 = 8$ km/s.

Il faut remarquer qu'aux valeurs de R correspondent des pourcentages de combustibles bien déterminés. Par exemple, si $R = \frac{\text{masse totale}}{\text{masse finale}} = 7{,}3$, cela veut dire qu'il y a en pourcentage : $\frac{100}{7{,}3} \neq 14$ % de charge utile et 86 % de combustible.

On a porté les pourcentages en abscisses en haut de la *figure* 20. On voit qu'il faut un pourcentage de combustible de :

— 63 % pour obtenir $V = V_e$;
— 86 % pour obtenir $V = 2\, V_e$;
— 95 % pour obtenir $V = 3\, V_e$.

Éjection des gaz

La vitesse de la fusée dépend de la *vitesse d'éjection* des gaz et du *rapport de masse*. Dans un moteur bien conçu, la vitesse d'éjection des gaz est donnée approximativement par la formule :

$$V_e = 7{,}5 \sqrt{\frac{T}{M_m}}$$

◀ *Page ci-contre, en haut, fusée* Viking *(juillet 1975). En bas, sonde* Viking *à destination de Mars.*

Jacques Tiziou - Sygma

où V_e est exprimée en mètres/seconde, T, température des gaz dans le moteur, en degrés Kelvin, M_m, masse moléculaire des gaz éjectés, en kilogrammes.

V_e est d'autant plus grande, par conséquent, que les gaz sont plus légers. S'il n'y avait que cette condition à remplir, les charges utiles pourraient être bien plus importantes.

Mais d'autres facteurs interviennent : si la densité des propergols est faible, il faut augmenter les dimensions des réservoirs, donc les poids morts de la fusée. D'autre part, les propergols les plus puissants sont les plus toxiques, les plus dangereux à manipuler, et aussi les plus coûteux. De toute façon, on est limité par l'énergie chimique des propergols susceptibles d'être utilisés et par la température que peuvent supporter les parois de la chambre de combustion et de la tuyère.

Avec les propergols dont on dispose, il serait parfaitement possible d'atteindre une vitesse V_e d'éjection de l'ordre de 4 km/s, mais il faudrait dépasser les 3 000 degrés à l'intérieur des chambres de combustion. La métallurgie des hautes températures n'est pas encore parvenue à ce stade. Les vitesses de sortie restent comprises entre 2,5 et 3 km/s, tandis que la température à l'intérieur des chambres atteint ou dépasse de peu 2 500 degrés.

LE PROBLÈME DE LA PROPULSION

Puissance du moteur-fusée

Le moteur d'une fusée ne produit un *travail mécanique* que si cette dernière est en mouvement, puisque tout travail mécanique est le produit de la force par la distance parcourue sous son action. La *puissance* du moteur-fusée est donc le produit de la poussée par la distance parcourue en une seconde.

Exemple : une fusée de 5 t de poussée volant à la vitesse de 1,5 km/s aura à ce moment une puissance de 100 000 ch ; cette puissance sera de 200 000 ch quand elle aura atteint la vitesse de 3 km/s.

La puissance atteint des valeurs énormes, 10 à 30 millions de ch dans les fusées géantes.

Exemple : le troisième étage de *Saturne* de 92 t de poussée développe une puissance de 13 738 666 ch quand est atteinte la vitesse de libération de 11,2 km/s.

Le moteur-fusée est caractérisé par un poids *spécifique* très faible, à peine quelques grammes par cheval développé, alors que, pour les meilleurs moteurs d'aviation, ce poids est d'environ 500 grammes.

Consommation spécifique

C'est le poids de combustible qu'il faut consommer pour obtenir l'unité de puissance pendant l'unité de temps, c'est-à-dire, dans notre cas, le poids de propergols qu'il faut brûler pour obtenir un kilogramme de poussée par seconde.

Impulsion spécifique

La caractéristique fondamentale du moteur-fusée est la vitesse d'éjection des gaz, c'est pourquoi on a volontiers recours, pour définir une fusée, à la valeur de son *impulsion spécifique* I_{sp} : c'est la force fournie à la fusée par la consommation en une seconde d'un kgp de propergol. La masse de propergol brûlée en une seconde est le débit D, son poids est Dg. La force est la poussée : DV_e. Donc $I_{sp} = \frac{DV_e}{Dg} = \frac{V_e}{g}$.

Or V_e s'exprime en m/s, g en m/s². La dimension de l'impulsion spécifique est donc celle d'un temps. Finalement, la définition précédente revient à dire que I_{sp} *est le temps, exprimé en secondes, pendant lequel la combustion d'un kilogramme de propergols produit une poussée d'un kilogramme.*

Plus l'impulsion spécifique est grande, plus la puissance du moteur-fusée est importante. Les propergols solides donnent des impulsions spécifiques de 230 à 260 s, les propergols liquides de 270 à 300 s ; l'hydrogène liquide allié au fluor ou à l'oxygène liquide permet d'atteindre 400 s.

Augmenter la vitesse d'expulsion

Lorsque nous avons analysé l'équation fondamentale du mouvement de la fusée, nous avons vu qu'il est de la plus grande importance d'obtenir des vitesses élevées

Archives Radaelli

◀ *Le professeur Robert Godard près de sa fusée à propergol liquide, qui fut lancée en 1926 à Auburn, Massachusetts.*

d'expulsion des gaz. Cela se fait par le choix des propergols capables de produire des gaz de faible poids moléculaire et par l'augmentation de la température à l'intérieur des chambres de combustion.

Propulsion chimique ou non chimique

Il faut aussi tenir compte d'autres facteurs. Pour porter à de hautes températures les produits de la combustion, il est évident qu'on a avantage à choisir des propergols capables de développer une quantité d'énergie élevée par gramme consommé.

Dans les fusées ou vaisseaux cosmiques à propulsion non chimique (hypothèse envisageable uniquement dans un avenir assez éloigné), l'énergie proviendra soit d'un réacteur nucléaire, soit d'un générateur capable de capter l'énergie solaire et de la transformer, soit encore d'autres sources qui ne sont pour l'instant capables que d'infimes puissances. Cette énergie servira à accélérer un matériau passif, sur le plan énergétique, dont l'éjection créera la poussée.

Dans le cas de la propulsion chimique, au contraire, les propergols fournissent à la fois l'énergie nécessaire pour accélérer le jet et le matériau dont ce même jet est constitué.

Défauts et risques des propergols

Une autre catégorie de problèmes surgit du fait que beaucoup de propergols sont toxiques, corrosifs et d'un maniement difficile. Il faut tenir compte de ces caractéristiques lors de l'étude des projets relatifs à l'appareil propulseur, aux réservoirs et aux tuyères de sortie.

La quantité d'énergie produite par gramme de propergol peut varier beaucoup : de 500 à 2 000 calories environ.

Certains propergols, qui ont des caractéristiques idéales en ce qui concerne la chaleur produite par unité de matière consommée et le faible poids moléculaire des produits de combustion, sont parmi les plus toxiques et les plus difficiles à manier. Le fluor, par exemple, en raison de sa très haute réactivité, n'a jamais reçu jusqu'à présent d'application pratique. Le couple oxygène-hydrogène est idéal à bien des égards (oxygène et hydrogène produisent en brûlant 2 900 calories par gramme, valeur très élevée ; ils fournissent comme produit de combustion H_2O dont le poids moléculaire 18 est très faible). La réalisation pratique d'une fusée à oxygène-hydrogène a exigé de longues années de recherches. On a utilisé un moteur de ce type dans le programme *Apollo*.

L'utilisation de l'hydrogène liquide, son acheminement depuis les réservoirs fixes jusqu'aux réservoirs de la fusée, et de ceux-ci jusqu'à l'appareil propulseur, sont très dangereux. L'oxygène à l'état liquide bout à environ — 180 °C, l'hydrogène à — 253 °C. Aux températures très basses auxquelles il faut maintenir l'oxygène avant de le faire arriver dans les chambres de combustion, il reste encore très actif vis-à-vis de toute une série de matériaux, et il a aussi tendance à changer de volume dans des proportions importantes pour de faibles variations de température. Le risque d'une fuite d'hydrogène liquide pendant le chargement et le risque d'explosion d'un réservoir apparaissent comme des éventualités extrêmement redoutables.

Critères guidant le choix du type de propergol

La charge de propergol que la fusée emporte peut se trouver à l'état liquide ou à l'état solide. L'un et l'autre de ces deux procédés présentent des avantages et des inconvénients.

● *Propergols liquides*

La fusée *à propergol liquide* doit être chargée, sauf cas particulier, peu avant le lancement. Combustible et comburant (c'est-à-dire oxydant) — ou au moins l'un des deux — sont très réactifs chimiquement, et l'un des deux est presque toujours un *cryogène*, c'est-à-dire un liquide à très basse température. L'oxygène, l'hydrogène et le méthane sont des substances typiquement cryogéniques. Mais aussi, peuvent être corrosives des substances non cryogéniques telles que l'acide nitrique, le peroxyde d'hydrogène (eau oxygénée), le tétroxyde d'azote, l'ammoniaque, l'hydrazine, tous employés dans les fusées.

Les difficultés liées aux caractéristiques des combustibles liquides et la nécessité de ne ravitailler la fusée que peu de temps avant son lancement trouvent en contrepartie de nombreux avantages. Il est facile d'allumer et d'éteindre, même à plusieurs reprises, l'appareil propulseur, et d'en doser la poussée en faisant varier l'admission dans les chambres de combustion. La réaction chimique est toujours correcte et contrôlée, car combustible et comburant sont dosés avec précision. La température des chambres et des tuyères est également fixée avec précision, ce qui permet d'éviter tout risque d'explosion.

En outre, on obtient avec les propergols liquides des valeurs plus intéressantes en ce qui concerne les poids moléculaires des gaz expulsés, des températures plus élevées à l'intérieur des chambres et des quantités d'énergie plus grandes par gramme de propergol consommé. Enfin, il est aisé de contrôler la trajectoire d'un missile à propergol liquide, car il est possible d'agir non seulement sur sa direction, mais aussi sur l'intensité de la poussée.

● *Propergols solides*

Le missile à *propergol solide* présente au contraire la caractéristique particulière de pouvoir être préparé plusieurs semaines et même plusieurs mois avant son utilisation et, partant, d'être toujours prêt au lancement. Il n'exige pas d'équipements complexes pour le remplissage des réservoirs. En général, il coûte moins cher en raison de sa construction plus simple et du fait que sa matière même est d'un coût peu élevé. En revanche, dans une fusée à propergol solide, il n'est pas possible d'arrêter la combustion une fois qu'elle a commencé. Si elle se déroule anormalement, toute intervention ou modification est impossible, de même qu'il est impossible de doser la poussée pendant le fonctionnement du propulseur. La correction de la trajectoire est donc moins précise que dans le cas d'un missile à propergol liquide.

On a tenté de concilier les propergols solides et les propergols liquides : on a construit des fusées hybrides dans lesquelles le combustible solide forme un cylindre

◀ *Page ci-contre : lancement de* **Skylab II**, *au centre spatial Kennedy, en mai 1973.*

▶ ***Le missile à propergol solide* Scout *(États-Unis) ; de coût relativement bas, il est utilisé pour la mise en orbite de satellites artificiels de dimensions modestes.***

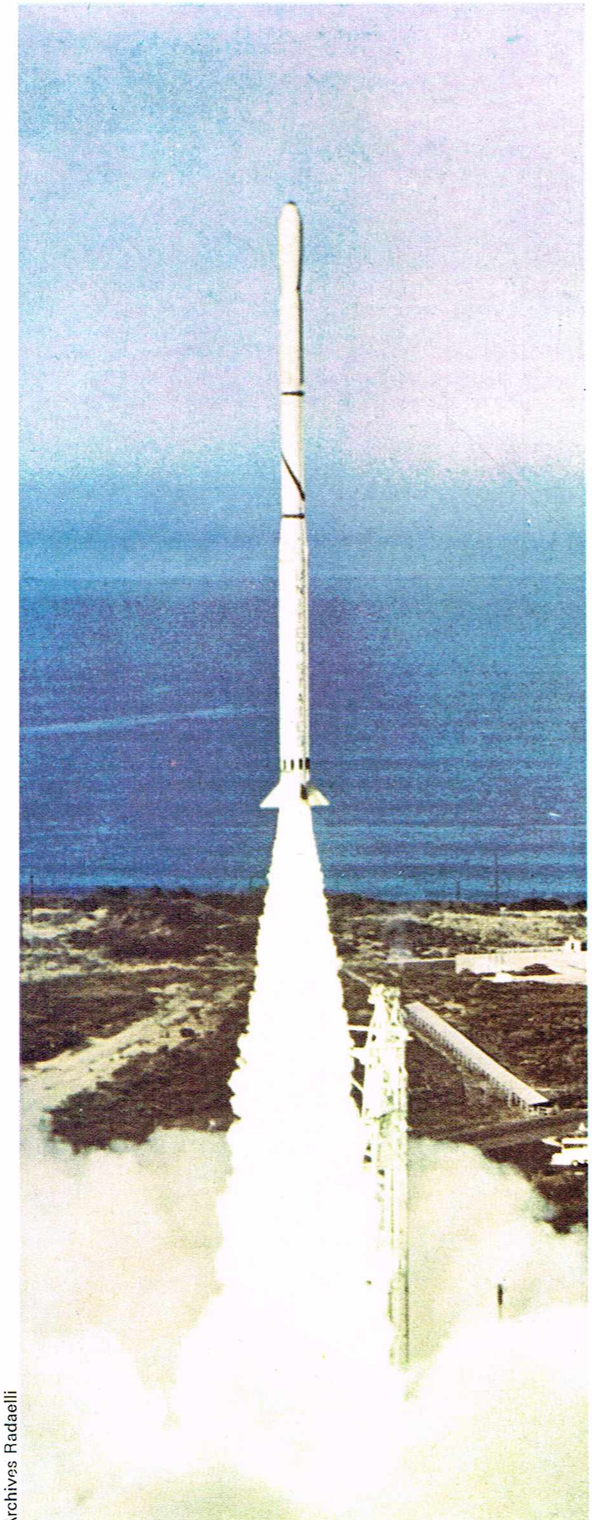

Archives Radaelli

creux (en polyéthylène, polysulfures, ou divers mélanges) tandis que le comburant est liquide (acide nitrique, peroxyde d'hydrogène ou autres). La formule est intéressante, et fait l'objet de recherches actives.

Actuellement, tous les vecteurs utilisés pour les entreprises spatiales de grande envergure sont à propergols liquides. Le plus souvent, l'un des deux composants est de nature cryogénique, sinon les deux. Presque tous les missiles de petite ou moyenne dimension à usage militaire sont à propergol solide. Les raisons de ce choix résident dans le caractère « toujours prêt » de ces engins, leur facilité de transport et la simplicité des rampes de lancement.

On utilise aussi des missiles à propergol solide pour la mise en orbite des satellites artificiels de dimensions peu importantes (par exemple, *Scout* a mis en orbite, notamment, le satellite italien *San Marco*), ou comme deuxième ou troisième étage de fusées à plusieurs étages de grandes dimensions. Les grands missiles balistiques intercontinentaux, capables de transporter des têtes nucléaires simples ou multiples, sont habituellement à propergols liquides. En revanche, les missiles stratégiques de moyenne portée, tels que ceux qui constituent l'armement des sous-marins à propulsion nucléaire, sont à propergols solides.

Il convient de souligner le fait que, bien qu'ils dépendent d'une seule discipline sur le plan du calcul et de la technologie, les missiles destinés à des fins militaires sont désormais nettement différenciés des missiles destinés aux entreprises spatiales. Les énormes vecteurs spatiaux ne présentent aucun intérêt militaire. Les missiles balistiques intercontinentaux et les missiles globaux sont désormais beaucoup plus petits que les vecteurs spatiaux, et leurs dimensions ne sont pas destinées à augmenter. Les têtes nucléaires les plus meurtrières et les charges d'explosifs conventionnels les plus redoutables peuvent être facilement transportées par des missiles ayant les mêmes dimensions que ceux qui mettaient en orbite les premiers satellites artificiels. C'est dire que les progrès des fusées spatiales ne présentent plus d'intérêt militaire notable, sinon en ce qui concerne le perfectionnement des techniques de guidage.

Propulsion à propergols liquides

Un système propulseur à propergols liquides est formé essentiellement de deux groupes de réservoirs, d'un système d'arrivée dosée de combustible et de comburant, d'une chambre de combustion et d'une tuyère d'éjection des gaz produits par la combustion (*fig.* 21).

Le moteur-fusée à propergols liquides

Quels que soient les propergols utilisés, les différentes phases sont identiques. L'injection des propergols dans la chambre de combustion se fait grâce à des systèmes d'alimentation de plusieurs types. On utilise en général deux systèmes d'alimentation.

Un gaz de pressurisation contenu dans le réservoir Z met en pression les réservoirs de combustible H et de comburant O (*fig.* 22). Le combustible, avant de pénétrer dans la chambre de combustion, passe dans les parois de la tuyère afin de la refroidir. Le gaz du réservoir Z peut être un gaz neutre comme l'hélium ou l'azote. Il peut aussi provenir de l'évaporation des propergols eux-mêmes, il y a alors *autopressurisation*.

Si l'on veut obtenir une poussée et une durée de combustion très élevées, on utilise en général des turbo-

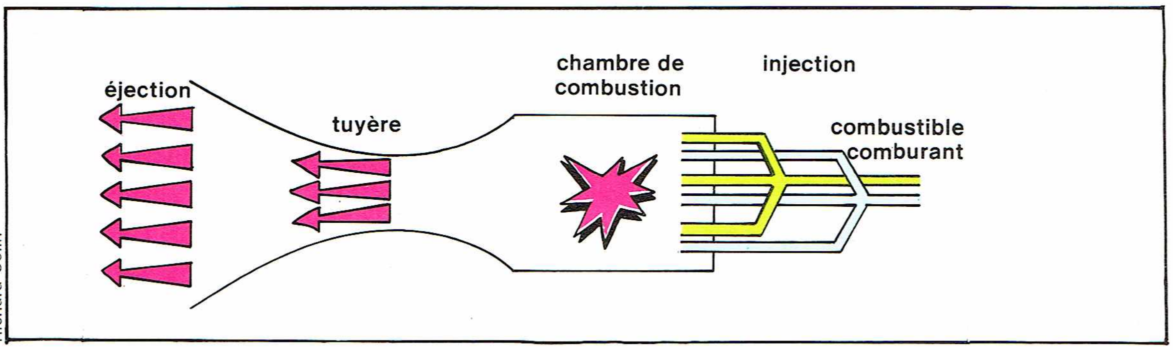

Richard Colin

▶ ***Figure 21 : schéma de principe d'un système propulseur à propergols liquides.***

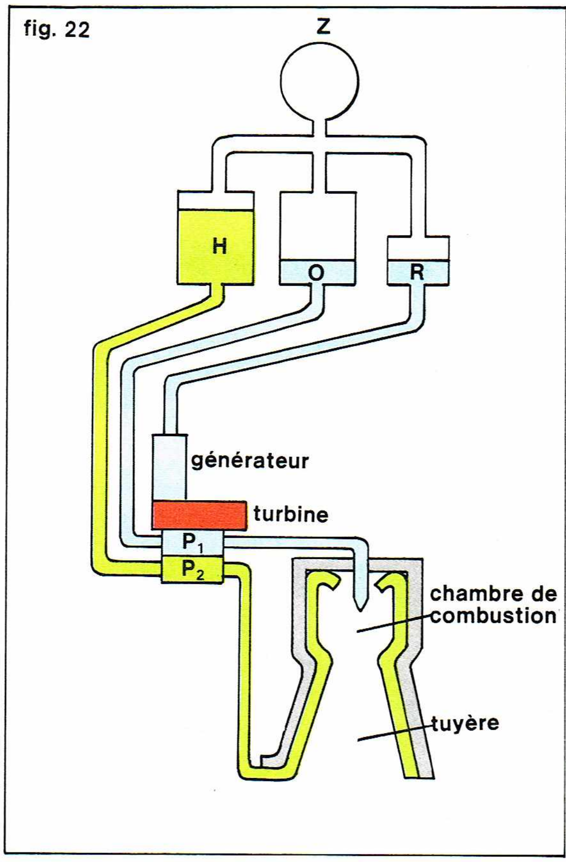

Richard Colin

◀ *Figure 22 : schéma de principe d'un moteur-fusée à propergols liquides.*

pompes P_1 et P_2 qui sont entraînées par une turbine actionnée par un gaz fourni dans le générateur. Celui-ci reçoit un propergol provenant du réservoir R par pressurisation des gaz de Z.

L'injection

Il faut que le mélange des propergols soit rapide et complet, et effectué selon un rapport déterminé. Pour y parvenir, on place les injecteurs dans l'ogive d'injection, de façon qu'un injecteur de combustible se trouve toujours entre deux injecteurs de comburant, et réciproquement. Les jets de liquides se pulvérisent en des brouillards très fins qui se mélangent intimement et affluent vers le centre de la chambre de combustion.

Une injection est parfaite quand on obtient une bonne homogénéité du mélange. La combustion est alors complète. S'il n'y a pas homogénéité, il se forme des poches de gaz qui créent des dangers d'explosion. Même sans qu'il y ait explosion, l'efficacité de la réaction chimique est alors diminuée.

L'allumage

Lorsque les propergols ne sont pas hypergoliques, c'est-à-dire lorsqu'ils ne s'enflamment pas par simple contact, on doit utiliser un système d'allumage : résistance électrique, système pyrotechnique, ou encore des pré-chambres de combustion dans lesquelles des liquides hypergoliques provoquent la flamme pilote.

La chambre de combustion

Elle peut avoir des formes très variées ; les chambres cylindriques sont les plus usitées. Température et pression fixent ses caractéristiques mécaniques. La température varie entre 2 500 et 4 000 °C ; il faut donc protéger les parois de la chambre ; elles peuvent être recouvertes d'un matériau qui évacue la chaleur en se volatilisant progressivement (ablation), mais la méthode la plus employée

▼ *Second étage de* Saturne V *à cap Kennedy. On voit les cinq moteurs à propergol cryogénique (Lox-LH2).*

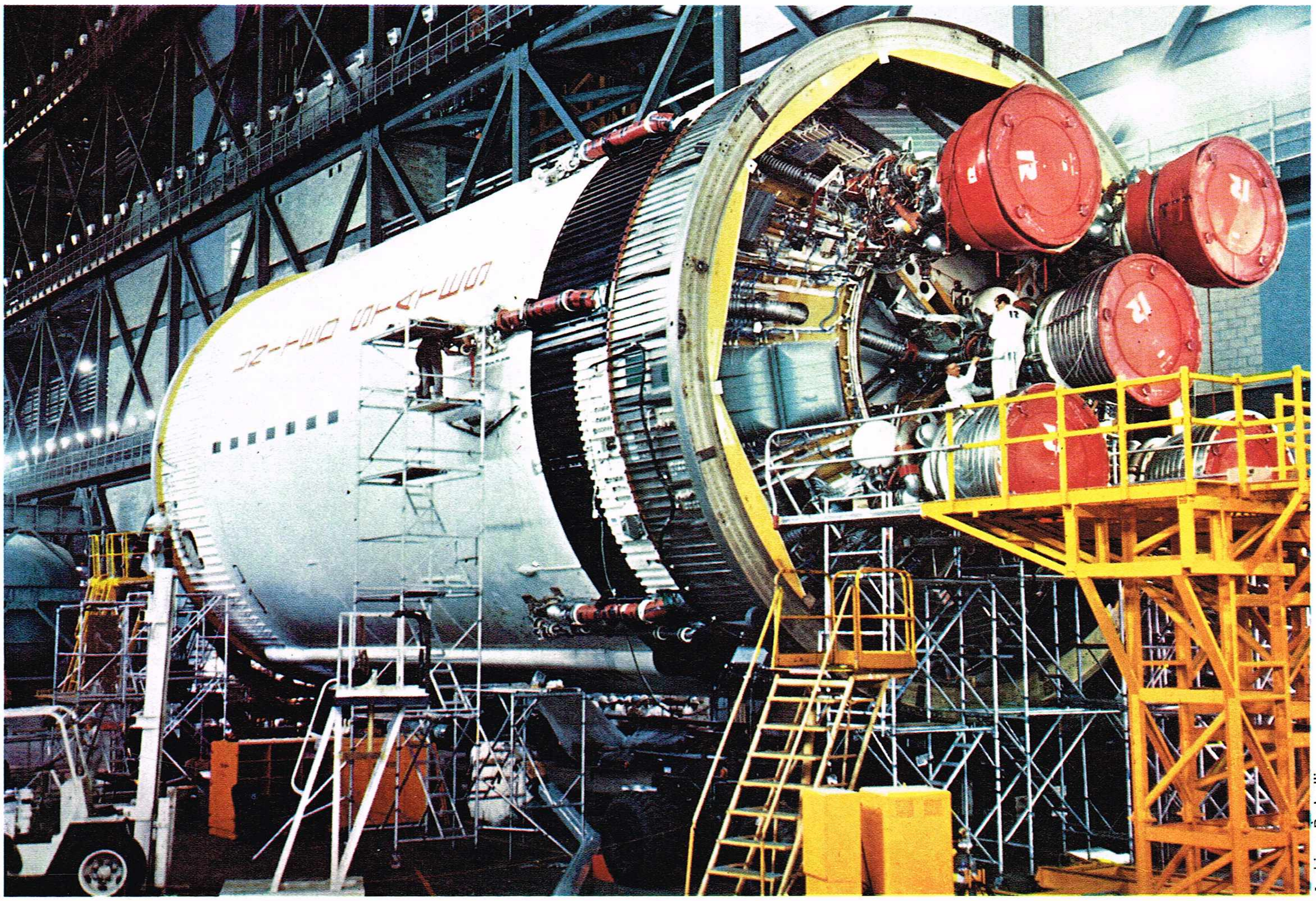

Archives Radaelli

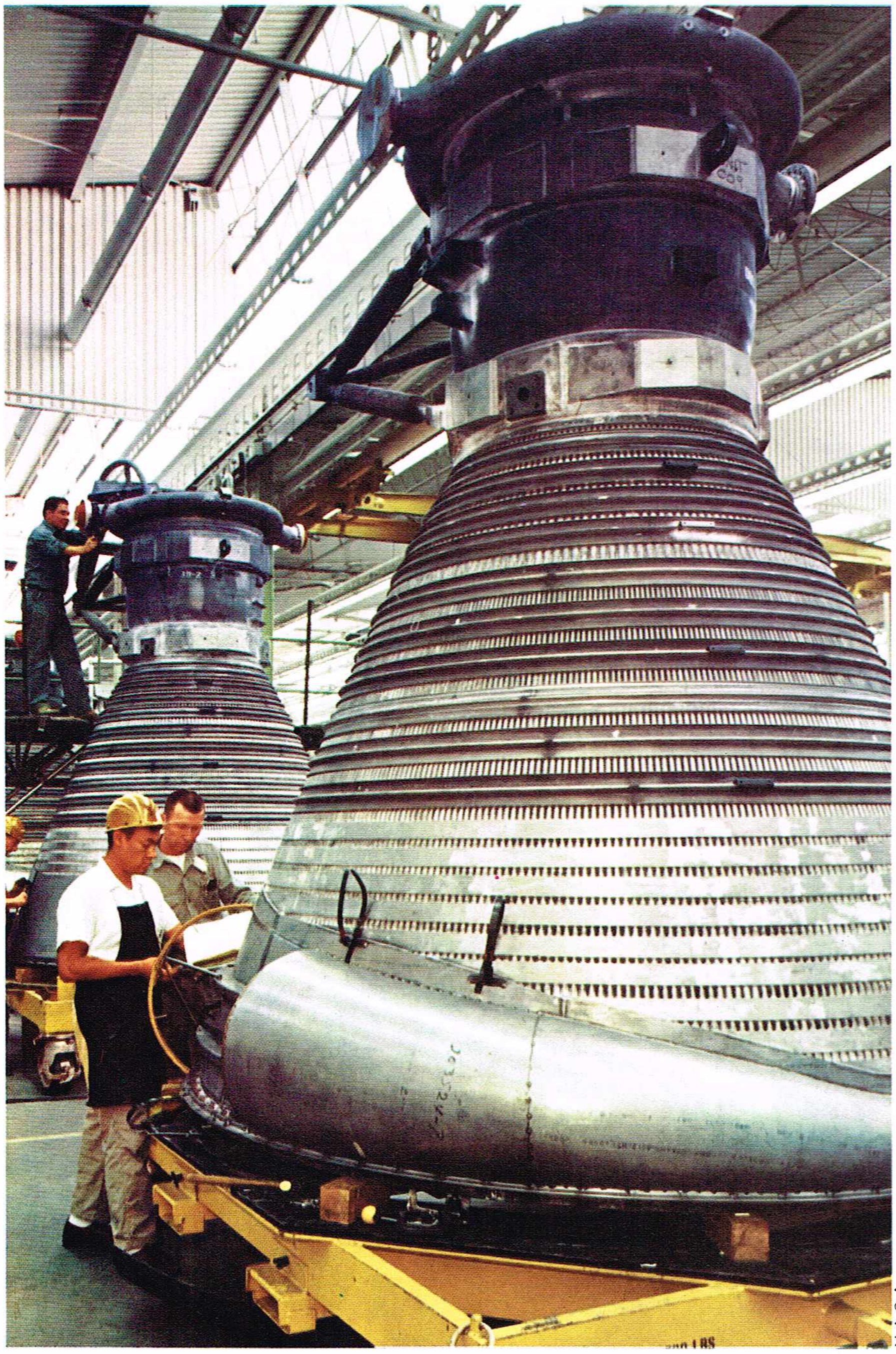

N.A.S.A.

▲ *Chaîne de montage de la chambre de combustion du FI, moteur à propergol liquide qui sera monté en cinq exemplaires sur* Saturne V.

▼ *Figure 23 : schéma de principe d'une tuyère dite de Laval.*

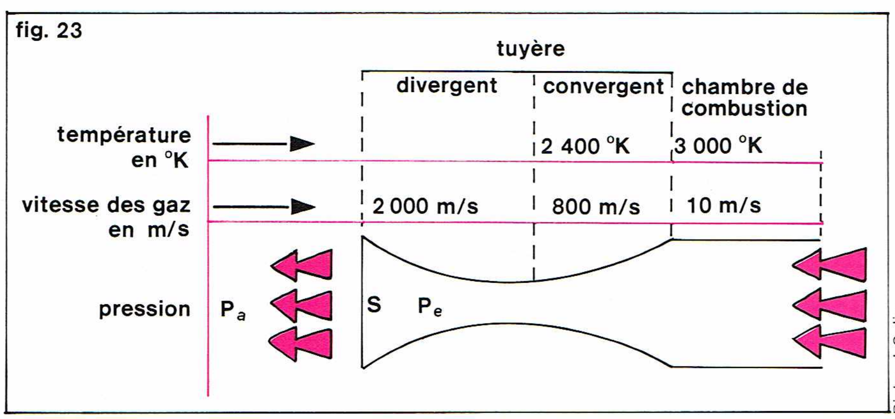

Richard Colin

consiste à faire circuler dans les parois de la tuyère, avant qu'il soit injecté, l'un des liquides cryogéniques à très basse température.

On arrive ainsi à ne pas dépasser 1 000 °C sur les parois. La pression des gaz suit des variations considérables. En arrivant aux injecteurs, les propergols se transforment en gaz. La pression diminue considérablement dans cette détente, la vitesse des gaz n'est plus alors que de quelques mètres par seconde. Après l'allumage du mélange, la pression monte environ à 40 kg/cm².

Il arrive que, sur les bords d'entrée de la tuyère, une faible partie des gaz en expansion soit réfléchie vers les injecteurs. Lorsque la vitesse de cette masse de gaz prend certaines valeurs, il peut naître des phénomènes d'interférence qui produisent de fortes vibrations et peuvent même provoquer la destruction du moteur. Rien ne peut mieux souligner la nécessité d'étudier parfaitement l'écoulement des gaz, donc la forme de la tuyère, le but final étant d'obtenir la vitesse d'éjection la plus grande possible.

La tuyère

Lorsqu'on fait circuler un gaz dans un tuyau, on peut obtenir un accroissement de la vitesse du gaz en rétrécissant le tuyau : au point de rétrécissement, la masse, ayant à passer par une section moindre, augmente de vitesse.

On s'est aperçu qu'à partir du moment où cette vitesse atteint celle du son à la température du gaz, il est inutile de rétrécir davantage le passage, la vitesse ne fera que diminuer. Au contraire, si on l'élargit de nouveau, après le goulet, la vitesse continue de croître.

Une tuyère construite sur ce principe est dite tuyère de Laval. Elle est composée d'un convergent et d'un divergent. La pression des gaz diminue évidemment entre le goulet et la surface de sortie de section S (*fig.* 23).

Si l'on désigne par P_e la pression des gaz à l'expulsion et par P_a la pression ambiante à l'altitude où se trouve la fusée, on montre que la poussée, dont on avait exprimé jusqu'ici la valeur par $F = DV_e$, doit être affectée d'une correction :

$$F = DV_e - (P_e - P_a)\,S$$

Il est logique d'ajouter ce terme correctif, puisque la vitesse d'expulsion des gaz est d'autant plus grande qu'elle ne reçoit pas d'opposition. Cette valeur de F devient maximale si $P_e = P_a$. La tuyère est alors dite *adaptée*, et V_e n'est plus fonction que de la température de la chambre de combustion suivant la formule déjà rencontrée :

$$V_e = 7{,}5\sqrt{\frac{T}{M_m}}$$

On voit que l'adaptation de la tuyère consiste à en déterminer le contour pour qu'à la sortie la pression intérieure soit devenue égale à la pression ambiante. On y parvient très rarement, mais on tente de s'en rapprocher le plus possible.

Nous venons de voir que, dans tous les propulseurs à liquides, la paroi des chambres de combustion est double : le flux de propergol passe dans l'espace qui sépare les deux parois avant de pénétrer dans la chambre pour y être brûlé. La paroi de la chambre qui se trouve en contact avec les gaz chauds est ainsi refroidie, cependant que la chaleur enlevée à la paroi est récupérée pour la combustion, puisque le propergol pénètre dans la chambre réchauffée. De la sorte, la part de chaleur qui constituerait une menace pour l'intégrité de la paroi interne de la chambre est éliminée sans être dissipée, elle est réintroduite dans la chambre, véhiculée par le propergol qui y pénètre.

Les matériaux

Une grande partie des efforts déployés pour faire progresser les fusées sont tournés vers l'étude de chambres de combustion capables de supporter des températures de plus en plus élevées, ainsi que l'agressivité chimique des gaz produits. Ces mêmes remarques s'appliquent aux tuyères de sortie. C'est un problème de métallurgie, et les solutions adoptées par les constructeurs sont nombreuses. On utilise fréquemment des superalliages à teneur en cobalt élevée, souvent recouverts de matériau céramique ou métallocéramique. Cette couche superficielle a pour fonction de résister à la fusion, tandis que

la couche protégée doit supporter les fortes pressions. Dans de nombreux cas, la couche superficielle se consume progressivement.

On utilise des matériaux différents suivant les types de propergols, les températures de régime et les caractéristiques chimiques des gaz. Étant donné que la chambre de combustion et la tuyère sont les éléments clefs de l'appareil propulseur, les constructeurs observent la plus grande discrétion aussi bien sur les matériaux utilisés que sur les techniques de construction.

Quoi qu'il en soit, la solution adoptée varie aussi en fonction des caractéristiques de fonctionnement : dans un missile, l'appareil propulseur n'est appelé à fonctionner que pendant quelques minutes. Il suffit que les chambres et les tuyères résistent au régime pendant cette courte période. Dans certains cas, l'intervalle entre une période de fonctionnement et la suivante peut se prolonger.

A l'épreuve provoquée par la chaleur et par l'attaque chimique des gaz, s'ajoute alors ce qu'on appelle le *choc thermique*. Les parois des chambres et des tuyères sont d'abord portées à des températures très élevées et, lorsqu'elles cessent de fonctionner, se refroidissent rapidement. A nouveau activées, elles subissent un brusque réchauffement. La répétition de ces cycles éprouve durement les matériaux.

Aussi, pour la réalisation de chambres de combustion aux caractéristiques élevées, compte-t-on beaucoup sur la grande famille des *métaux réfractaires* ou *durs*, aujourd'hui en plein développement. Ils peuvent être utilisés de manière complexe et très diverse pour constituer des *cermets*, combinaisons métallocéramiques dont les caractéristiques résultent de l'addition de la résistance des métaux à celle des composés céramiques aux températures élevées (de l'ordre de 3 000 °C). Produits très difficiles à obtenir, ils sont tellement durs qu'il est impossible de les travailler par enlèvement de copeaux ou emboutissage. De plus, ils ne sont pas soudables. Ils sont déjà utilisés largement dans certaines pièces des propulseurs (colliers de tuyères, déflecteurs). On obtient par frittage des pièces de dimensions limitées.

La propulsion chimique

Dans les *fusées chimiques*, l'énergie résulte de la combustion produite par deux éléments chimiques qu'on appelle **propergols.**

Les *propergols* comprennent les **comburants** (ou *oxydants*) et les **combustibles.** Ils peuvent être *liquides* ou *solides*.

On appelle **monergol** un produit chimique ou un mélange stable de produits qui contient à la fois le comburant et le combustible. L'eau oxygénée est un monergol. Les propergols solides peuvent être considérés comme des monergols.

Si comburant et combustible s'enflamment en arrivant au contact l'un de l'autre, on a affaire à des **hypergols** ou *propergols hypergoliques*. En revanche, les propergols non hypergoliques ont besoin d'un système d'allumage.

Les **lithergols** consistent en un mélange d'un liquide et d'un solide en poudre (par exemple, du magnésium pulvérulent dans l'hydrogène liquide).

Les propergols

La gamme des corps utilisés en pratique ou étudiés expérimentalement comme propergols est très large, et on peut en établir une classification systématique en se fondant sur plusieurs critères. Une première subdivision permet de distinguer les monopropergols et les dipropergols.

Les monopropergols

Font partie des monopropergols des substances qui se caractérisent par le fait que toute réaction chimique exothermique qui s'y amorce ne s'arrête que par épuisement de la substance et donne naissance à des produits gazeux à haute température et de poids moléculaire en général relativement faible. Il s'agit de véritables explosifs, comme le nitrométhane CH_3NO_2, le nitrate de méthyle CH_3NO_3 et même la nitroglycérine $C_3H_5(ONO_2)_3$, ou bien de composés instables, comme l'hydrazine N_2H_4 ou l'acétylène C_2H_4. L'utilisation des explosifs comme propergols chimiques présente de sérieuses difficultés. Certains d'entre eux, diversement combinés, peuvent entrer dans la composition des propergols solides. Quant aux monopropergols instables, dont l'hydrazine est un exemple typique, il est plus pratique de les utiliser avec un autre composé pour former un dipropergol.

Les dipropergols

Plus intéressants sont les *mélanges de monopropergols*, constitués de deux composés. Ils restent chimiquement inertes tant qu'ils ne sont pas enflammés par un arc électrique ou par un point chaud situé à l'intérieur des chambres de combustion. Parmi ces mélanges, les plus connus sont la *solution Diver* constituée par du nitrate d'ammonium NH_4NO_3 dans l'ammoniac NH_3, et la *solution Myral* constituée par du nitrate de méthyle CH_3NO_3 et du méthanol avec une solution de méthanol CH_3OH et d'eau oxygénée H_2O_2.

Les dipropergols sont des couples de composés à l'état liquide, que la fusée emporte dans deux groupes distincts de réservoirs et qui entrent en contact à l'intérieur des chambres de combustion. Un des deux liquides remplit ce que l'on peut considérer comme le rôle de *combustible*, l'autre le rôle de *comburant*, termes imprécis mais qui facilitent la compréhension du processus et permettent la classification de nombreuses substances.

- *Les combustibles*

Parmi les combustibles, il convient de mettre à la première place l'hydrogène, important en raison de son faible poids atomique et de sa valeur énergétique élevée par rapport à sa masse. Suivent, par ordre de complexité chimique : le méthane, l'ammoniaque, l'hydrazine, l'alcool éthylique, le kérosène, et toute une série d'hydrocarbures et de mélanges d'hydrocarbures. Les boranes sont particulièrement intéressants, mais ils restent toutefois d'un emploi très difficile, en raison de leur toxicité et de leur agressivité chimique.

- *Les comburants*

Pour les comburants ou oxydants, la gamme est beaucoup plus restreinte : oxygène moléculaire (O_2), ozone (O_3), eau oxygénée (H_2O_2), acide nitrique (HNO_3). On peut y ajouter deux oxydes d'azote, NO et N_2O_4. Ces derniers ne contenant pas d'oxygène, ils ne sont pas à proprement parler des *oxydants*, mais ils entrent dans la catégorie des *comburants*. Le fluor et le chlore présentent des caractéristiques chimiques très intéressantes (V_e de l'ordre de 6 km/s). Mais, comme nous l'avons déjà dit, leur réactivité chimique est si élevée que leur emploi est exclu pour le moment.

— Parmi les *dipropergols classiques*, on trouve les mélanges suivants : acide nitrique-kérosène, acide nitrique-aniline, acide nitrique-hydrazine, acide nitrique-divers mélanges d'hydrocarbures, eau oxygénée-divers mélanges d'hydrocarbures, oxygène-hydrocarbures ou divers mélanges d'hydrocarbures, oxygène-ammoniaque, oxygène-hydrazine, oxygène-hydrogène-oxygène-diborane.

Dans les dipropergols, l'un des composants au moins est de type cryogénique (en général l'oxygène, mais aussi le méthane et l'hydrogène). Cette règle est observée dans tous les grands missiles spatiaux d'aujourd'hui. On peut facilement le constater en suivant la transmission d'un lancement à la télévision : la mince colonne de vapeurs blanchâtres qui descend latéralement le long du missile prêt sur la rampe de lancement indique en effet avec certitude la présence à bord d'au moins un propergol cryogénique.

— *Propergols solides*. La propulsion à propergol solide exige un appareillage plus simple. Il est constitué d'une chambre de combustion, de la tuyère de sortie correspondante et d'un système élémentaire pour faire démarrer la combustion, qui ne s'arrêtera qu'après épuisement complet du propergol. Les formules qui donnent la vitesse de sortie et l'équation générale du mouvement sont les mêmes.

Un problème essentiel pour la fusée à propergol solide est la nécessité de maintenir la régularité de la combustion et de ne pas dépasser certaines valeurs de température et de pression au-delà desquelles il y aurait risque d'éclatement des parois.

La combustion doit se produire à une certaine vitesse, afin de développer la poussée prévue, qu'elle soit cons-

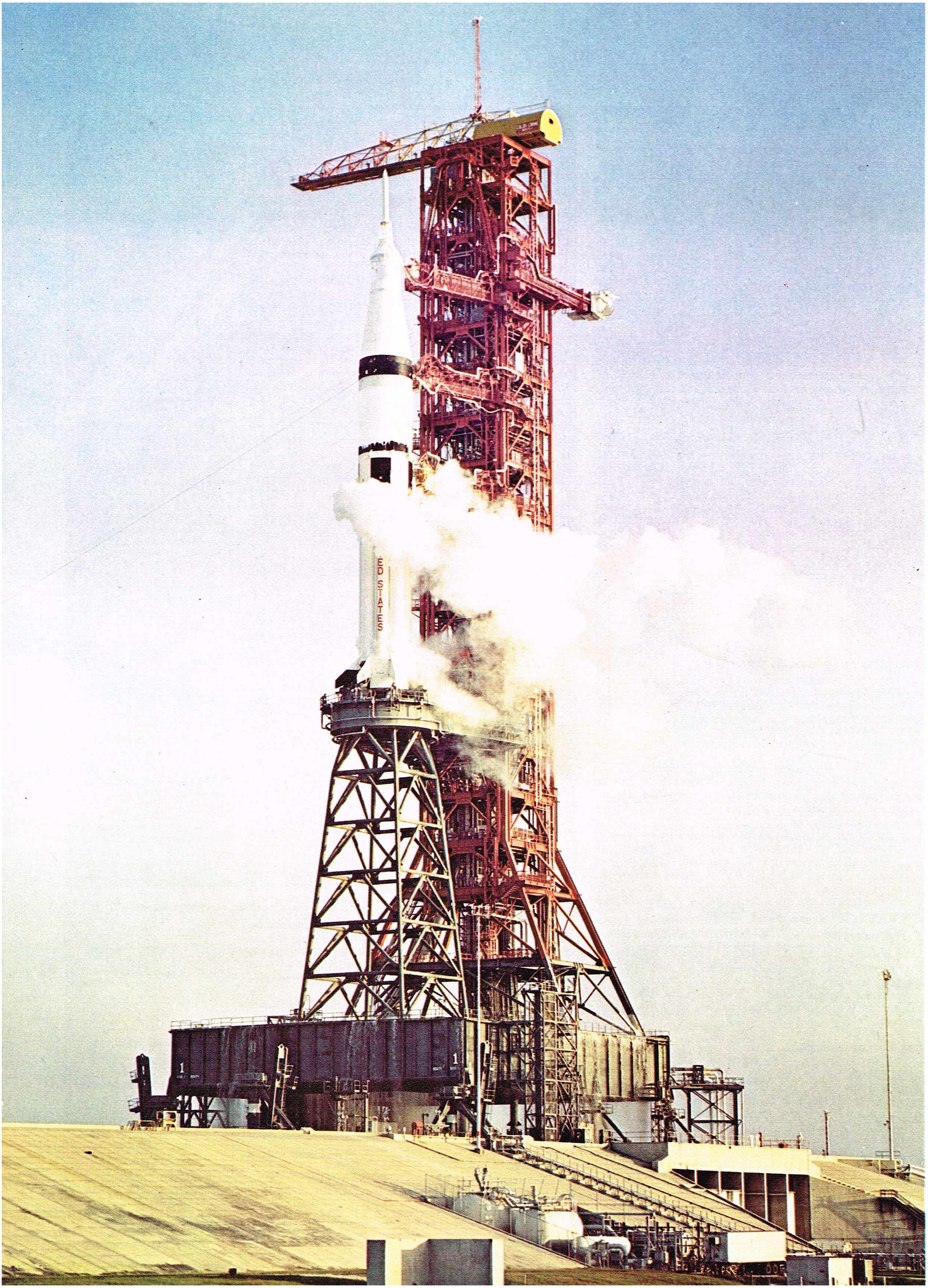

Sygma

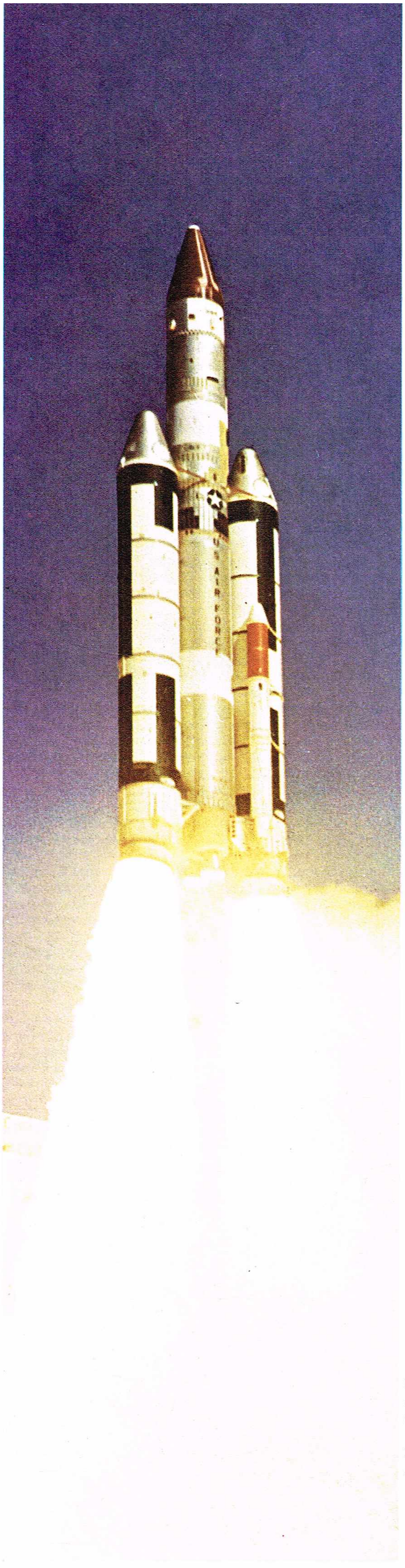

◀ *Fusée américaine* **Titan IIIC**, *dotée de deux boosters qui lui assurent une poussée de 1 100 t. Les boosters, fusées à propergol solide, fournissent au départ une poussée complémentaire pendant quelques minutes, puis se détachent.*

Archives Radaelli

tante ou variable. Pour cela, on façonne la *charge*, c'est-à-dire la masse solide dans laquelle combustible et comburant sont intimement mélangés. On a ainsi des sections diverses : tubulaire, tubulaire à profil intérieur étoilé, tubulaire à rayons, à croisillons ou autres. La combustion est fonction de la *surface libre de la charge*. (Celle-ci doit, par exemple, rester constante si l'on veut obtenir une poussée égale.) A la suite d'essais laborieux, on parvient à la définition de la forme de la charge la mieux adaptée.

La charge doit être homogène, bien qu'elle soit constituée presque toujours de plusieurs composés chimiques. Elle doit être coulée à l'état liquide dans des moules ou directement à l'intérieur du corps du missile afin de prendre la forme voulue.

Les fusées destinées à des emplois militaires ont des éléments de charge énormes (diamètre de cinq à six mètres, poids dépassant une tonne) qui sont empilés par deux, trois ou plus, à l'intérieur de la fusée.

Pour la mise en orbite de petits satellites artificiels (télécommunications, relevés météorologiques, études des radiations et du champ magnétique terrestre, etc.), on réalise aussi des missiles vecteurs à propergol solide de faible coût ; le missile *Scout* en est un exemple typique.

En règle générale, dans la composition d'un propergol solide, on introduit un léger excédent de comburant. S'il s'ensuit une légère perte de rendement, elle est compensée par un déroulement plus stable de la combustion.

Les vitesses d'éjection des gaz avec les propergols solides sont inférieures à celles que l'on obtient avec les propergols liquides. Dans les meilleures conditions et avec les mélanges solides les plus élaborés, on obtient des valeurs d'environ 2,45 km/s, tandis que le couple classique oxygène liquide-kérosène utilisé depuis plusieurs années atteint 2,67 km/s (l'oxygène et l'hydrogène liquides : 3,69 km/s).

L'une des caractéristiques des missiles à propergol solide est que l'on ne peut pas faire varier la poussée à volonté une fois que la combustion est amorcée. Dans les modèles de grandes dimensions, comme dans la fusée *Scout*, il est toujours possible d'ajouter au propulseur principal un certain nombre de propulseurs auxiliaires, que l'on fait intervenir ou non, dans une séquence définie au cours même du lancement, en fonction de l'analyse de la trajectoire réelle de la fusée.

— On utilise généralement des fusées à propergol solide comme *boosters*, c'est-à-dire comme propulseurs additionnels dans les grands missiles à propergols liquides. Disposés au nombre de deux, trois ou plus, sur les côtés du premier étage, à sa partie la plus basse, ils fournissent au départ une poussée complémentaire pendant quelques minutes, puis se détachent.

L'avenir des propergols solides reste assuré en raison des avantages qu'ils présentent pour l'augmentation des performances des fusées existantes, et surtout pour leur réaction instantanée.

◀ *Page ci-contre : centre spatial Kennedy ; la fusée* **Saturne IB** *doit lancer les astronautes de* **Skylab III** *en orbite terrestre. La mince colonne de vapeur qui descend latéralement indique la présence à bord d'un propergol cryogénique.*

▼ *Les neuf boosters à propergol solide d'une fusée* **Delta** *créent cet effet d'étoile assez spectaculaire, peu de temps après le lancement.*

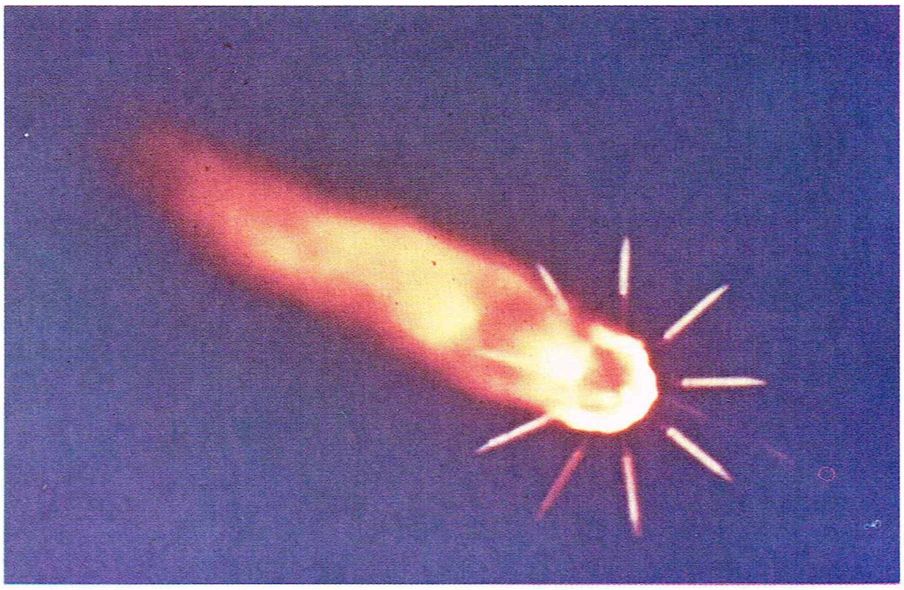

U.S.I.S.

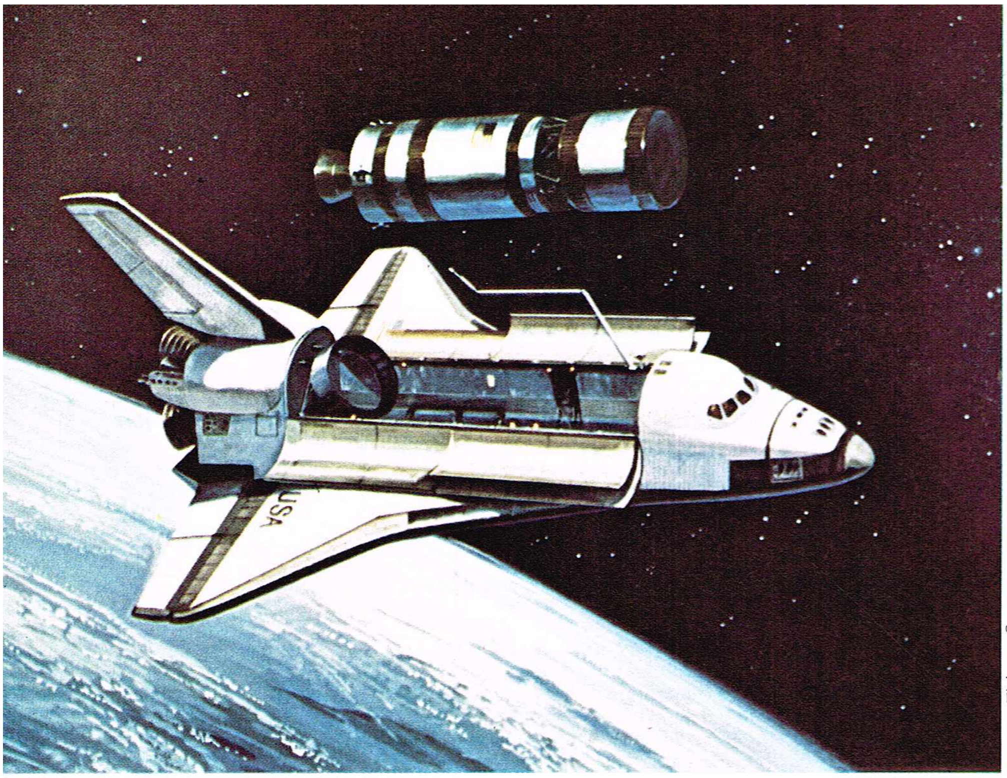

Jacques Tiziou - Sygma

▲ *Navette spatiale.*

La navette spatiale, dont les premiers essais sont effectués depuis mars 1977, reçoit l'impulsion de deux énormes boosters, dont chacun donne une poussée de 12 millions de newtons (soit 1 200 t environ). Après leur extinction, ils sont largués, freinés par parachute et récupérés.

Propulsion non chimique de la fusée

Dans l'état actuel de la recherche, et pour longtemps encore, il n'est pas concevable que l'on puisse *remplacer* la propulsion chimique par d'autres types de propulsions. Toutefois, on pratique déjà une utilisation conjointe des deux systèmes. La propulsion non chimique offre des possibilités intéressantes pour assurer le mouvement des corps cosmiques déjà placés sur orbite par un vecteur chimique et pour assurer une poussée auxiliaire. La puissance, pour l'instant, reste très faible.

Les motifs de la recherche actuelle sur les systèmes de propulsion non chimique apparaissent clairement à l'analyse des aspects mécaniques et énergétiques de la propulsion chimique. Nous en avons parlé à propos de l'équation du mouvement de la fusée, et notamment à propos de la vitesse d'expulsion du jet des chambres.

Rappelons deux formules données précédemment :

(1) $$V = 2{,}3\ V_e \log_{10} R$$

(2) $$V_e = 7{,}5\sqrt{\frac{T}{M_m}}$$

Dans **(1)**, V augmente pour une vitesse d'éjection V_e donnée si l'on augmente R. Nous avons montré qu'on obtient une vitesse finale $V = nV_e$ pour un rapport de masses $\overline{2{,}7^n}$. Cela se traduit par la courbe de la *figure* 24, qui montre la réduction rapide de la charge utile, si l'on veut obtenir une grande vitesse pour une vitesse d'injection donnée.

On ne peut donc pas aller très loin dans cette voie. L'augmentation de V doit être attendue de celle de V_e.

La formule **(2)** montre que V_e dépend de T et de M_m. Comme M_m doit être le plus faible possible, nous ne pouvons guère obtenir d'amélioration sur ce point à partir du moment où nous utilisons le gaz le plus léger : l'hydrogène. Pour augmenter les vitesses d'éjection actuelles, il faudrait faire monter à plus de 4 000 °C la température à l'intérieur des chambres de combustion, avec des pressions de quelques dizaines d'atmosphères.

On a beau utiliser la technique des *matériaux sacrifiés* qui sont détruits progressivement par les gaz chauds, mais assurent une protection suffisante pendant les quelques minutes de fonctionnement de l'appareil propulseur, il existe toujours une limite, assez proche, des vitesses réalisables. Des calculs complexes montrent que la vitesse de sortie maximale théorique d'un propergol chimique, dans lequel le comburant est l'oxygène, est égale à environ 4,0 km/s. En utilisant comme comburant le fluor, cette vitesse pourrait être supérieure. Cependant, en explorant toutes les combinaisons chimiques possibles, on ne pourra jamais dépasser beaucoup la valeur théorique de 6,0 km/s, même avec un fort taux de détente.

Cette limite théorique est inhérente aux caractéristiques de la matière, à la capacité des composants à produire l'énergie. La chaleur à l'intérieur des chambres de combustion provient de la réaction chimique du combustible avec le comburant. Elle ne peut fournir qu'une quantité bien définie d'énergie, donc le jet ne peut être accéléré au-delà d'une certaine vitesse. La métallurgie et la technique de construction des chambres de combustion pourront sans doute permettre d'atteindre des températures et des pressions nettement supérieures à celles d'aujourd'hui. On parviendra alors à la limite des vitesses théoriques. Le *tableau* III donne quelques valeurs des vitesses d'éjection, qui varient un peu suivant les auteurs. Celles qui sont données ici sont les plus faibles qu'on ait trouvées.

Les chiffres du *tableau* III expriment en m/s la vitesse d'éjection obtenue pour un choix combustible-comburant. Ces valeurs sont données pour un *taux de détente* (rapport des pressions à l'intérieur de la chambre de combustion et à la sortie de la tuyère) de 50. Elles doivent être multipliées par 1,06 pour un taux de détente de 100. (Le taux de détente 150 utilisé par les Soviétiques pour créer la surprise du premier *Spoutnik* avec leur fusée *Vostok* reste exceptionnel.)

La combinaison ozone-hydrogène à taux de détente 100 donnerait 4 213 m/s, et la combinaison fluor-hydrogène environ 4 000 m/s. Mais l'ozone et le fluor sont des corps dangereux. L'ozone explose sous l'influence des causes les plus anodines, le fluor est extrêmement corrosif. Bref, si l'on veut obtenir la sécurité du fonctionnement, il faut

▼ *Figure 24 : la courbe donne, en pourcentage de la masse totale au départ, la part qu'il faut donner aux propergols pour atteindre des vitesses de la fusée exprimées en fonction de la vitesse d'éjection des gaz. Elle souligne la réduction très rapide de la charge utile. Tableau III : quelques valeurs des vitesses d'éjection pour divers combustibles-comburants.*

Tableau III

Quelques valeurs des vitesses d'éjection (en m/s) obtenues par un choix combustible-comburant

Combustible \ Comburant	Ozone	Fluor	Oxygène	Acide nitrique
Alcool éthylique			2 610	
Kérosène	2 865	2 860	2 670	2 420
Hydrazine		3 200	2 855	2 600
Hydrogène	3 975	3 780	3 690	

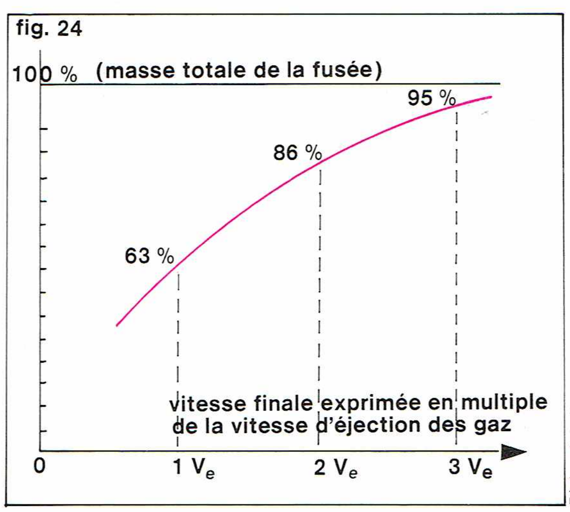

Richard Colin

adopter des produits plus classiques, le kérosène étant le grand combustible de base pour le premier étage, et l'oxygène liquide le comburant fondamental.

A la recherche d'une solution nouvelle

Si l'on veut effectuer un voyage planétaire, envoyer par exemple un homme sur Mars, ces vitesses d'éjection sont faibles. Compte tenu de l'important équipement que demanderait un voyage martien pour assurer la survie des passagers, on aboutirait à des rapports de masses prohibitifs. Ils deviennent inimaginables pour des voyages plus lointains.

Si l'on ne veut pas renoncer à ces projets grandioses, il faut trouver des modes de propulsion créant des vitesses de l'ordre de 100 km/s, au moins pour avoir de faibles rapports de masses.

Comment obtenir de telles vitesses d'éjection, impossibles à approcher, même de très loin, par les seules réactions chimiques ?

Il faut, à ce point, faire une remarque importante. La matière que nous consommons dans une fusée chimique remplit en réalité deux fonctions différentes :

— dans une première phase, elle est le combustible générateur d'une énergie calorifique convertie en mouvement ;

— à un second stade, elle devient le fluide récepteur de cette quantité de mouvement.

Comme, dans la fusée chimique, la vitesse d'éjection est limitée, on est condamné à emporter une énorme quantité de propergol qui sera utilisé simultanément comme source d'énergie de propulsion et comme matériau à éjecter pour provoquer la réaction. Cette confusion est évidemment avantageuse, puisqu'une part très importante de l'engin est constituée par la matière énergétique, mais elle est la cause de la limitation des possibilités de créer de grandes vitesses, puisque l'on doit se contenter de celles que peuvent créer les énergies chimiques.

Si l'on sépare les fonctions, en recourant d'une part à une source d'énergie, d'autre part à un fluide qui recevra de cette source d'énergie une quantité de mouvement, il n'y a plus de limite théorique aux vitesses d'éjection, qui ne dépendent plus que de l'énergie employée.

C'est ainsi que les spécialistes se sont tournés vers une tout autre voie que celle de la fusée chimique, en s'orientant notamment vers la *fusée électrique* dans laquelle il est possible, dès maintenant, d'atteindre des vitesses d'éjection cinquante fois supérieures à celles réalisables avec les fusées chimiques et avec des gaz portés à 10 000 °C et plus. Ces vitesses peuvent être atteintes grâce au fait qu'à ces températures, les gaz sont fortement ionisés et sensibles aux champs magnétique et électrique. Il devient possible de diriger le jet et même de le comprimer de telle sorte qu'il ne puisse atteindre aucune partie du propulseur.

Dans ces nouveaux types de propulseurs, la matière éjectée est passive du point de vue énergétique. L'énergie nécessaire à la création et à l'éjection est fournie par un générateur indépendant de l'appareil propulseur.

Avec les moteurs non chimiques, il est possible de réduire fortement la quantité de substance à éjecter. On a déjà obtenu des quantités *cinquante* fois moindres. Mais cela n'a été possible que pour réaliser des moteurs de très faible puissance destinés aux corrections d'assiette, car il faut emporter un générateur d'énergie distinct et une réserve de matériau pour le faire fonctionner. A grande échelle, le devis de poids reste prohibitif.

On ne sait pas très bien encore quels résultats on peut attendre en s'engageant dans cette voie ; tout ce que l'on peut dire, c'est qu'une fusée à propulsion totalement non chimique semble encore inconcevable aujourd'hui. Le générateur électrique et le matériel nécessaire à son fonctionnement sont trop lourds. En outre, les systèmes de propulsion non chimiques sont, pour le moment, très petits, pour des motifs de techniques de construction. Ils ne peuvent développer que des poussées d'un kilogramme, tandis qu'un vecteur capable de mettre sur orbite un grand corps cosmique artificiel doit développer une poussée de plusieurs milliers de tonnes. On est loin du compte.

Mais la technique de la propulsion non chimique n'en est qu'à ses débuts. Ses développements sont pour le moment imprévisibles. Quoi qu'il en soit, tandis que les limites de la propulsion chimique sont connues et bien définies, les possibilités de la propulsion non chimique restent ouvertes à toutes les hypothèses. L'avenir seul permettra de juger. On a cependant l'impression de voguer en pleine science-fiction ; c'est le moindre défaut de certains savants authentiques ! Les étonnantes réalisations qui ont vu le jour pendant ces dernières décennies doivent cependant nous garder d'un scepticisme exagéré.

fig. 25

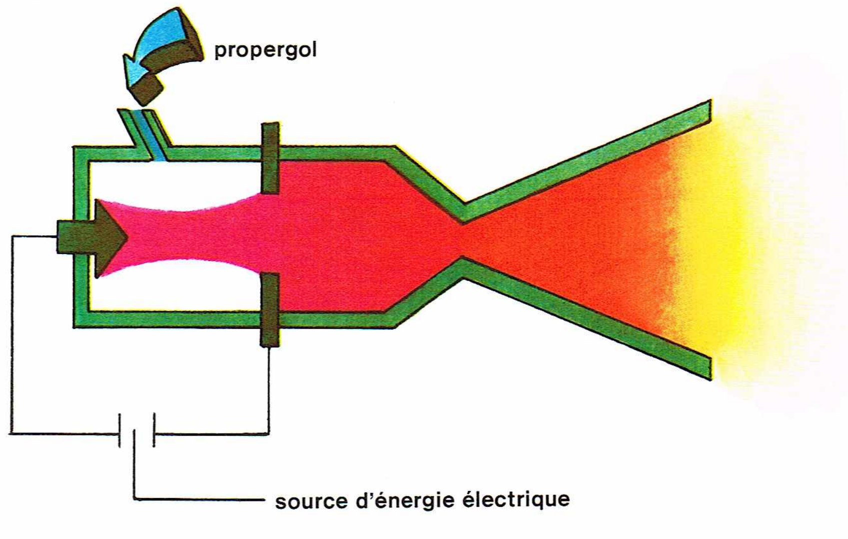

▲ ***Figure 25 : schéma de principe d'un moteur électrothermique.***

Propulseurs non chimiques

Propulsion électrothermique

En chauffant un jet de gaz, par exemple de l'hydrogène, à très haute température (jusqu'à 10 000 °C) par un arc voltaïque, on obtient la propulsion électrothermique, donnant des vitesses d'éjection de 20 km/s. C'est déjà cinq fois plus que la meilleure performance des propulseurs chimiques.

Les modèles réalisés jusqu'à présent (*fig.* 25) sont capables de développer une poussée d'environ 300 g, ils absorbent une puissance électrique d'environ 30 kW. La masse du propulseur seul est de quelques kg, mais, pour faire une comparaison valable avec les propulseurs chimiques, il faut ajouter celle du groupe électrogène qui est de très loin supérieure.

Il est très improbable que l'on puisse jamais réaliser des propulseurs de ce type capables de donner une grande puissance. Ils exigeraient d'énormes générateurs et devraient être constitués de très nombreux jets élémentaires, étant donné qu'il n'est pas possible d'obtenir des arcs électriques isolés dépassant certaines dimensions.

Il faut noter qu'il s'agit de porter le propergol à une température élevée, mais qu'il n'y a pas de combustion de ce propergol. Ce type de fusée peut donner des vitesses d'éjection quadruples de celles des fusées à propergols chimiques.

L'érosion causée par les arcs et les ruptures qui peuvent se produire dans les matériaux utilisés à haute température imposent une limite supérieure à la vitesse d'éjection, c'est pourquoi ce type de moteur ne sera sans doute pas retenu pour les grands vols interplanétaires, mais il pourrait être utilisé pour de faibles parcours comme le voyage de la Terre à la Lune, et aussi pour contrôler l'assiette des grands véhicules spatiaux.

Propulsion électromagnétique ou moteur à plasma

Rappelons d'abord l'effet d'un champ magnétique sur un courant électrique qui est la base du principe de fonctionnement de ce moteur. Sur la *figure* 26, AB est un conducteur relié à la borne positive d'une source électrique, CD un conducteur relié à la source négative, EF une tige conductrice, N et S les deux pôles d'un aimant. Si l'on pose EF sur les tiges AB et CD, le courant se forme entre les points de contact et s'établit suivant la direc-

fig. 26

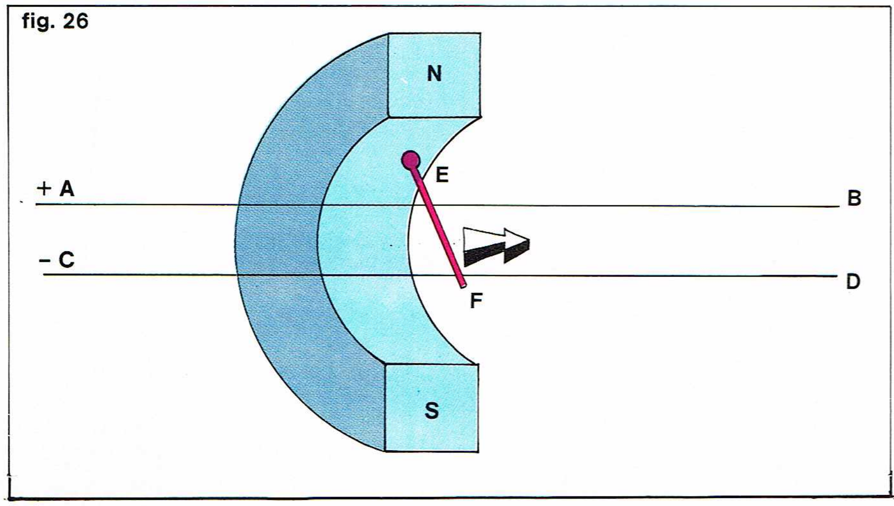

▲ *Figure 26 : rappel de l'effet d'un champ magnétique sur un courant électrique.*

tion EF. A ce moment, EF glisse sur les fils AB et CD suivant la règle des « trois doigts ».

Supposons maintenant que ces appareils soient dans un récipient dans lequel on a fait le vide, puis introduit un gaz. Si entre E et F la différence de potentiel est suffisante pour créer une décharge, les électrons sont arrachés des atomes de gaz : les électrons, négatifs, sont attirés vers E, tandis que les ions, positifs, se dirigent vers F. Les flots de ces deux sortes de particules cheminent donc en sens inverse, mais, comme ils sont de signe contraire, sous l'effet du champ magnétique NS ils se déplacent tous deux dans le même sens. La matière ainsi plasmifiée est environ mille fois plus conductrice que le cuivre, on peut travailler avec des intensités considérables, et l'éjection du plasma se produit à des vitesses atteignant *plusieurs dizaines de km/s*.

Des prototypes expérimentaux ont été réalisés en utilisant pour gaz l'azote et en créant une différence de potentiel de 3 000 volts. Le plasma était alors catapulté à une vitesse de 40 km/s. Certes, les poussées ainsi réalisées sont encore infimes (quelques grammes à peine). Elles sont cependant suffisantes dès maintenant pour actionner les petits moteurs de correction d'un satellite.

Moteur ionique

Dans les propulseurs électromagnétiques que nous venons de voir, la création des ions s'est faite entre les bornes de l'aimant grâce à la décharge électrique. Dans les moteurs ioniques, les ions sont créés au préalable (*fig.* 27).

Plusieurs méthodes sont possibles. La plus courante consiste à porter à une forte température certains métaux alcalins, comme le césium. La vapeur de césium produite est alors envoyée sous pression à travers une cathode poreuse en tungstène qui accroche les électrons. Il ne ressort que les ions positifs que l'on envoie dans une électrode cylindrique portée à un potentiel négatif. On annule le potentiel au passage, et on lui donne tout de suite après une valeur positive qui continue d'accélérer l'essaim d'ions positifs en agissant cette fois par répulsion. En opérant ainsi plusieurs fois, à travers des électrodes successives, on peut obtenir une accélération considérable tout comme dans les *accélérateurs linéaires* dont on retrouve le principe.

Cependant, il se pose un problème très particulier : l'appareil se charge de plus en plus d'électricité négative. Son attraction sur les ions positifs atteint des valeurs qui peuvent annuler le mouvement. On tourne cette difficulté en soufflant sur une anode poreuse en tungstène des vapeurs d'un métalloïde monovalent comme l'iode. Cette fois, les ions négatifs sortants sont dirigés vers un cylindre chargé positivement dont on fait varier le signe de charge comme pour l'autre électrode. Les accélérations imprimées aux ions positifs et aux ions négatifs s'ajoutent, et la charge électrique totale s'équilibre grâce à un appareil qui en égalise les débits.

Un autre procédé consiste à annihiler la charge électrique en faisant suivre en A le cylindre accélérateur par des grilles en platine émettant un flux d'électrons. Dans ce cas, l'essaim d'ions positifs accélérés a sa charge électrique neutralisée et n'est plus freiné par la charge statique négative croissante de l'appareil. L'injecteur d'iode est, bien entendu, devenu inutile.

Indépendamment du césium, on peut employer du mercure ou toute substance se prêtant à une facile ionisation comme certaines molécules lourdes hydrocarbonées.

Les vitesses d'éjection dépassent facilement 100 km/s dans un propulseur ionique, mais tous les types construits présentent un poids élevé pour une poussée très faible.

▼ *Figure 27, moteur ionique : création d'ions à partir de la vapeur de césium.*

fig. 27

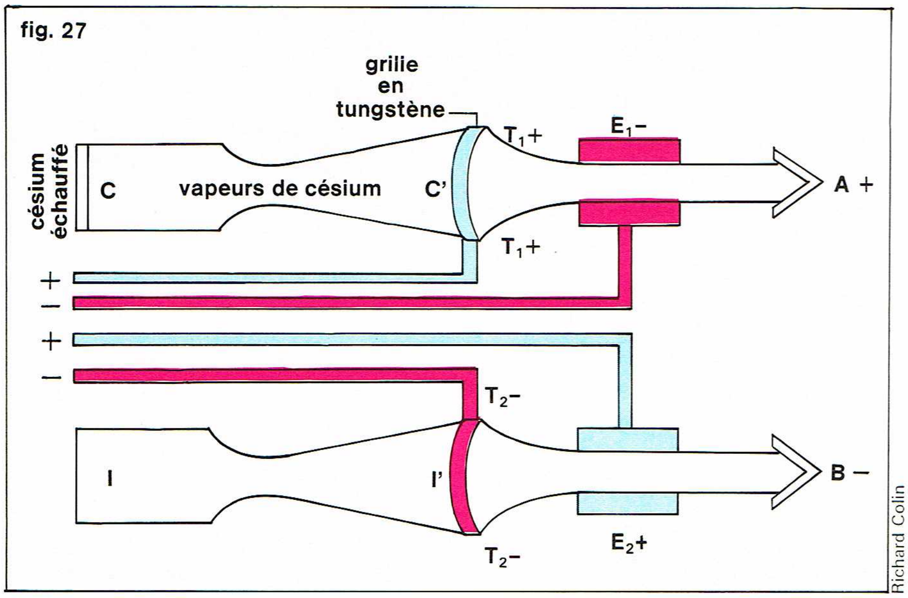

Les trois types de propulseurs cités plus haut sont appelés électriques, car la production du jet est provoquée par l'énergie électrique. Leur emploi est dès maintenant possible pour obtenir des jets directionnels en vue d'effectuer des corrections sur les satellites artificiels destinés à rester longtemps en orbite (plus d'un an). Des expériences pratiques ont été effectuées par les Soviétiques à bord de *Zond III* et de certains satellites *Yantar*. Le propulseur électrique se révèle très intéressant pour les manœuvres d'orientation et de correction qui demandent des poussées très modestes et de courte durée.

Si le satellite est destiné à avoir une longue durée de vie, se pose alors le problème de la réserve de matériau qu'il doit emporter pour l'expulser sous forme d'un grand nombre de jets, émis de façon espacée. Étant donné que le fonctionnement des propulseurs électriques se produit de façon intermittente et par brèves impulsions, l'énergie nécessaire pourra être fournie par des batteries rechargées à l'aide des cellules solaires ou par un générateur thermoélectrique à radio-isotopes.

Propulsion photonique

L'astronautique n'en est encore qu'à ses premiers pas. Mais l'imagination des savants se donne libre cours en prévoyant qu'une fusée pourrait être propulsée par des quanta de lumière, les photons, dont l'avantage serait d'être éjectés à la plus grande vitesse possible, celle des rayons lumineux. On n'ignore pas que les radiations lumineuses peuvent exercer une pression, donc créer une réaction ; on en a des exemples avec les radiomètres des laboratoires de physique et la déviation bien connue de la queue des comètes par la lumière du Soleil.

Dans la formule d'Einstein : $E = Mc^2$, où E est l'énergie, M la masse, et *c* la vitesse de la lumière, la masse est infiniment petite. C'est celle du photon, non mesurable. En voulant s'approcher de la vitesse de la lumière, il faudrait utiliser des rapports de masses vertigineux.

Les savants, emportés par ces conceptions futuristes, n'en parlent pas moins de combustibles constitués de matière et d'antimatière dont la rencontre est évidemment séduisante, puisque la réaction d'annihilation crée une énorme énergie avec émission de photons. Ils n'ont pas expliqué comment serait stockée l'antimatière. Elle ne

P.R.I.

◀ *La fusée* Nerva.

pourrait l'être que par des champs électromagnétiques.

L'examen du problème révèle en tout cas que la fusée photonique ne peut s'envisager que sous la forme d'un énorme engin pesant plusieurs milliers de tonnes. Le moteur à photons qui le propulserait devrait lui faire atteindre, par accélérations régulières, une vitesse proche de celle de la lumière. L'énergie produite serait redoutable, et un moteur de cette puissance ne pourrait être mis en action qu'à une certaine distance de la Terre. (Un calcul fait au sujet d'un projet *Boeing* de fusée photonique de 200 t seulement montre que l'énergie dépensée par cette fusée serait l'équivalent de 1 200 fois toute l'énergie électrique produite dans le monde !) La *figure* 28 représente d'ailleurs un croquis de ce projet *Boeing*.

La construction de la fusée photonique ne présente pour l'instant qu'un intérêt purement théorique. Elle fait appel à de nombreuses hypothèses, et les matériaux nécessaires à sa construction n'existent même pas. Ainsi, la possibilité de sa création peut paraître pour le moment une pure vue de l'esprit, mais les principes auxquels elle fait appel sont scientifiquement sains. Les surprises que la science nous a réservées ces dernières années doivent nous inciter à ne juger qu'avec prudence ses possibilités théoriques et techniques.

Un projet tel que celui de *Boeing* ouvre un vaste champ à la recherche. On se rend bien compte que la construction de la fusée ne pourrait être que l'aboutissement d'un gigantesque effort, aussi bien pour les dépenses à envisager que pour les inventions qu'on doit attendre du génie humain. La propulsion photonique ne se présente donc à l'heure actuelle que comme une spéculation encourageante nécessitant encore de nombreuses découvertes de base.

Propulsion nucléaire : l'énergie nucléaire au service de la propulsion

L'énergie nucléaire, à masse égale, est des milliers de fois supérieure à celle des combustibles chimiques. Tous les types de propulseurs non chimiques que nous venons de décrire demandent une grande énergie électrique.

Il a donc paru logique d'essayer de l'obtenir à partir de l'énergie nucléaire, qui, dans ce cas, est utilisée de façon indirecte, en chauffant par exemple un fluide dont la vapeur entraîne une turbine actionnant un générateur d'électricité.

Mais l'énergie nucléaire peut être aussi utilisée de façon directe, en chauffant les gaz propulsant la fusée.

Nous savons que l'hydrogène est le gaz choisi de préférence, car la vitesse d'éjection est d'autant plus grande que la masse moléculaire du gaz éjecté est plus faible.

Le principe de la propulsion nucléothermique est simple : l'énergie libérée dans le réacteur, sous forme de chaleur, vaporise un fluide qui ne saurait être que l'*hydrogène liquide*. L'impulsion spécifique est essentiellement fonction de la *température* de l'hydrogène. On est ainsi conduit à envisager trois types de propulseurs nucléaires suivant que l'échangeur est solide, liquide ou gazeux.

▼ ***Figure 28, propulsion photonique ; croquis du projet Boeing.***

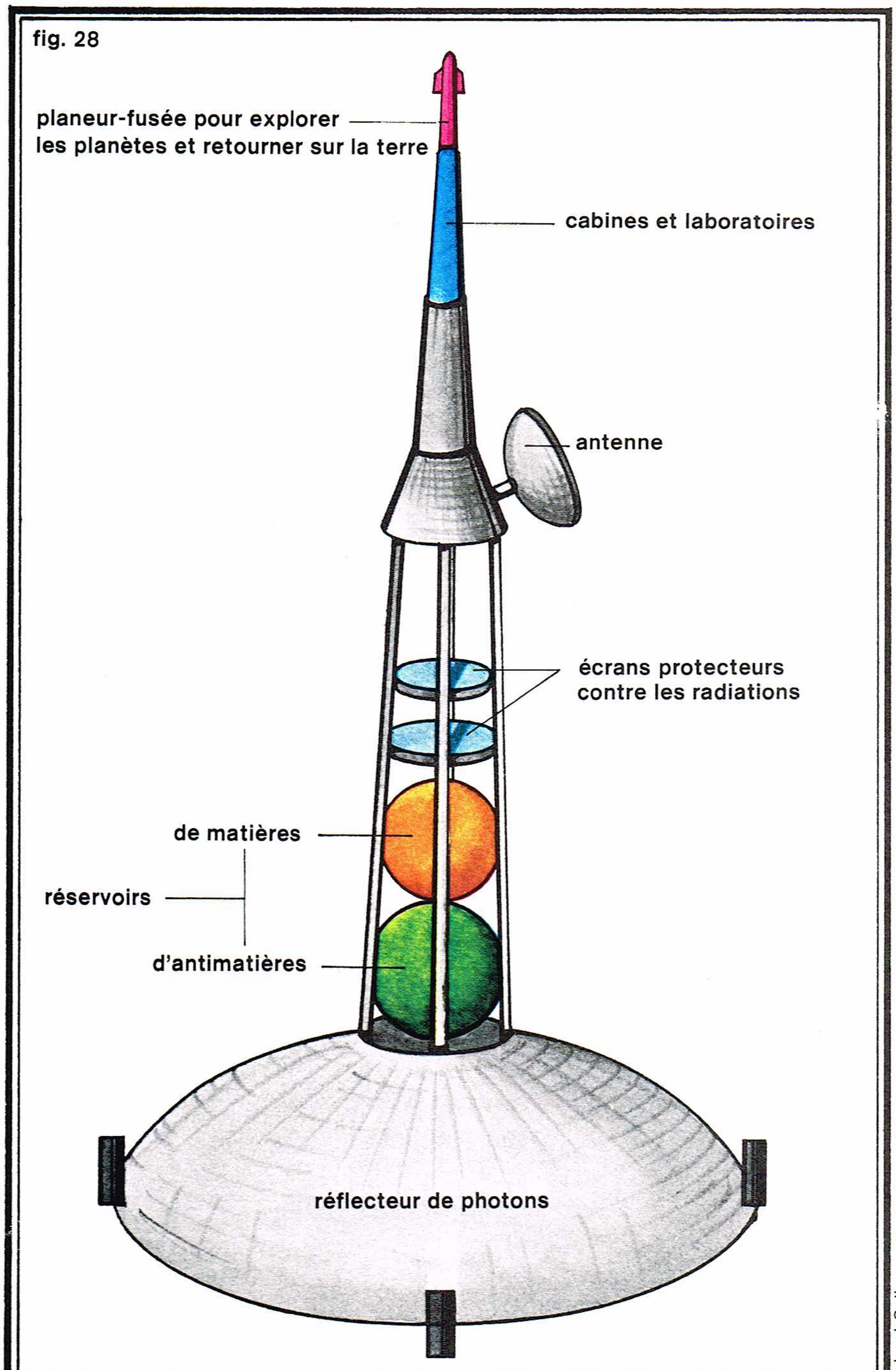

Richard Colin

▶ *Figure 29 : fusée nucléaire ; schéma de principe de la fusée américaine* Nerva.

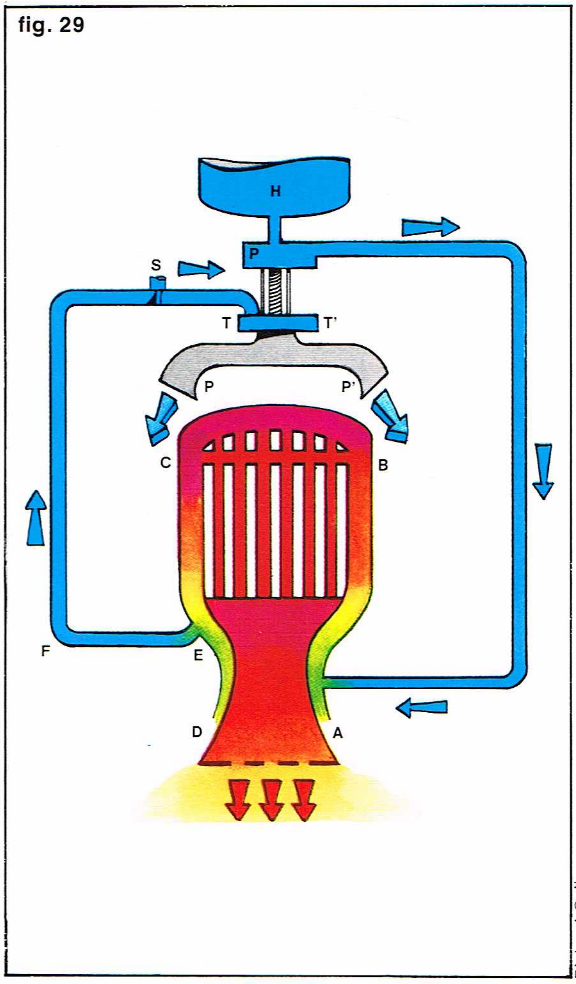

Réacteurs à noyau solide

Dans ces réacteurs, l'hydrogène est vaporisé et chauffé sous pression dans un cœur nucléaire percé de nombreux canaux afin de permettre une bonne circulation. L'hydrogène chaud s'échappe par une tuyère classique. A partir de 800 °C, la vitesse d'éjection devient supérieure à celle qu'on peut obtenir avec les meilleurs propergols chimiques. Or le cœur solide permet de pousser la température jusqu'à 3 300 °C. Les modérateurs sont soit le graphite, soit le béryllium, et, comme la chaleur prend naissance dans le modérateur, ce type de réacteur est dit à « modérateur chaud ».

Il existe des réacteurs qui n'utilisent pas de modérateur. Ils sont composés schématiquement d'un certain nombre de plaques portant le combustible dont les surfaces lui transfèrent la chaleur. L'inconvénient de ces réacteurs dits « rapides » est que la consommation de matériau fissile est beaucoup plus élevée ; il en faut donc une grande quantité, et il doit être réparti au sein d'un matériau réfractaire. L'expérience a prouvé qu'on pourrait obtenir une température de 2 500 °C pendant de longues périodes avec du dioxyde d'uranium en concentration élevée dans des métaux réfractaires tels que le tungstène, le molybdène, à moins qu'on n'utilise des carbures de zircone, d'hafnium ou de tantale.

Il existe enfin des réacteurs thermiques hétérogènes dans lesquels le matériau fissile est séparé du modérateur et inclus au sein de matériaux réfractaires qui assurent le transfert de chaleur. Dans ce cas, le modérateur peut être refroidi et maintenu à une température de fonctionnement faible, ce qui permet l'emploi de l'eau, de l'eau lourde, du béryllium ou des hydrures métalliques.

▼ *Moteur nucléaire pour fusée expérimentale NRX-A3 (États-Unis).*

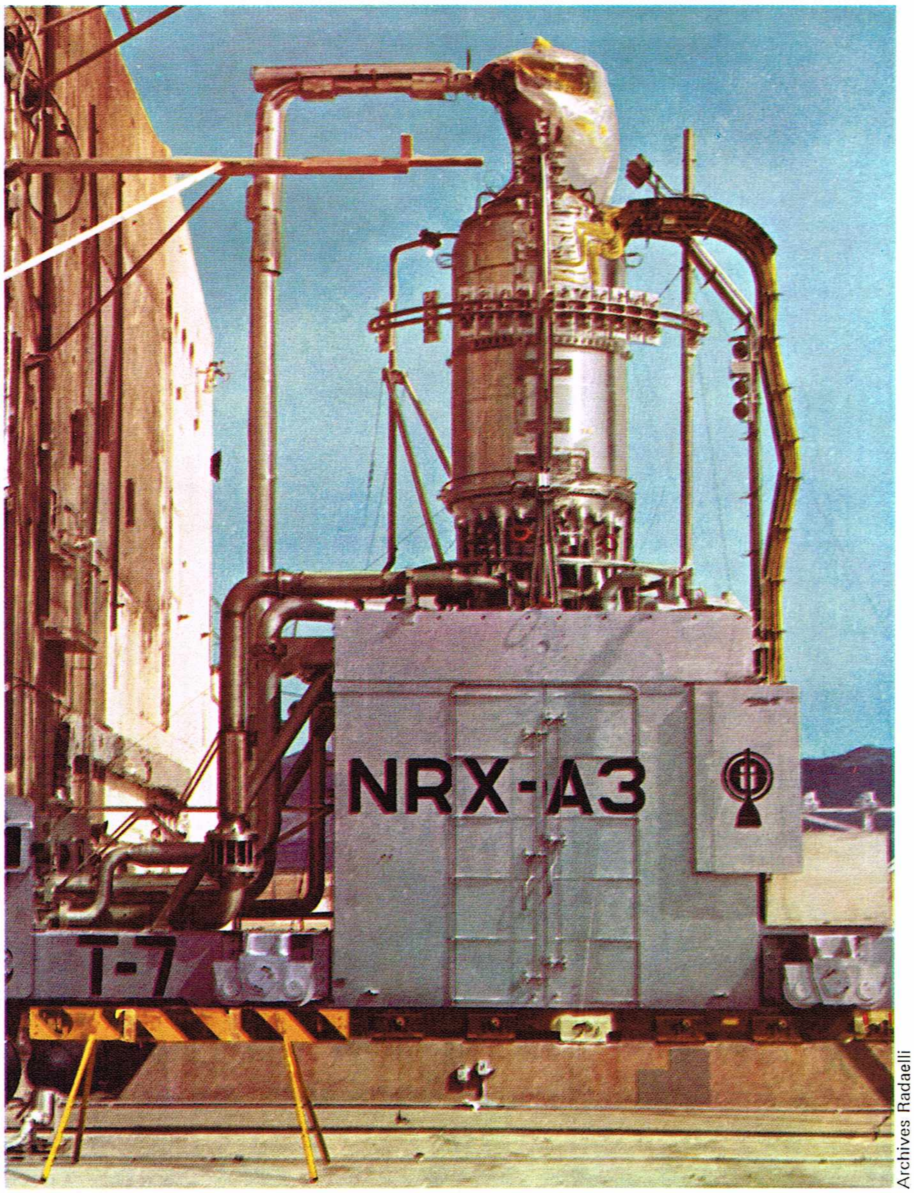

Ce type de réacteurs est le plus difficile à réaliser, car le refroidissement du modérateur introduit une complication supplémentaire, mais ce sont ceux qui semblent promettre les impulsions spécifiques les plus élevées, de l'ordre de 1 200 s, très supérieures aux 400 s maximales qu'on obtient par voie chimique.

Réacteur à échangeur liquide

Puisqu'on veut augmenter la température et que dans les réacteurs à noyau solide la résistance des matériaux la limite à 3 300 °C, on a été conduit à construire des réacteurs nucléothermiques à échangeur liquide. L'hydrogène y barbote dans du carbure d'uranium liquide qu'on empêche de s'échapper grâce à une rotation qui opère une séparation centrifuge. La température peut monter jusqu'au point d'ébullition du carbure d'uranium, soit 4 400 °C, ce qui permet d'obtenir une impulsion spécifique de 1 600 s environ.

Réacteur à échangeur gazeux

Là encore, le problème consiste à empêcher l'uranium gazeux de s'échapper ; on y parvient avec une très énergique centrifugation provoquée par l'arrivée tangentielle de l'hydrogène. On calcule qu'on peut obtenir des impulsions spécifiques de 3 000 s pour une température de 25 000 °C. On a ainsi un réacteur « critique », c'est-à-dire dans lequel la réaction nucléaire s'entretient elle-même en ajustant la pression du gaz fissile. La pression dans la cavité serait de l'ordre de 7 000 kg/cm^2, ce qui pose des problèmes non encore résolus.

La pression serait réduite si l'on pouvait faire en sorte que, l'uranium circulant plusieurs fois, sa durée de séjour par rapport à l'hydrogène soit augmentée. On essaie d'y parvenir soit en créant un mouvement tourbillonnaire qui maintient plus longtemps le gaz le plus lourd par centrifugation, soit en envoyant le jet d'uranium gazeux avec une vitesse beaucoup plus faible que le jet d'hydrogène,

soit enfin en utilisant des forces électromagnétiques retenant l'uranium.

Les performances théoriques des fusées nucléaires à noyau gazeux sont de loin les plus intéressantes. Mais aussi séduisante que soit la théorie, on ne peut pas dire à l'heure actuelle quand la technique en permettra la construction.

La fusée nucléaire aux États-Unis - La fusée *Nerva*

En 1955, la Commission à l'énergie atomique et l'US Air Force s'unissaient pour étudier la réalisation d'une fusée nucléothermique. Le principe consistait à profiter de l'énergie d'une pile à uranium compacte, incomparablement supérieure à celle fournie par une masse égale de propergols chimiques, pour communiquer à un fluide une vitesse de quelque 8 km/s.

En 1957, le moteur *Kiwi*, alimenté à l'hydrogène liquide, fonctionne sur un rail. En 1961, les résultats sont prometteurs, et les grandes lignes d'un programme sont arrêtées. A cette époque, le but poursuivi dans la mise au point du *Nerva* était qu'il pût remplacer le S IV-B (étage supérieur de la fusée *Saturne V*), créant une même poussée de 90 t avec un rapport de masses tellement plus avantageux que la charge utile aurait pu passer à 250 t au lieu de 47,7 t. Mais le programme *Nerva* a été victime de la politique de l'espace suivie par les Américains. En effet, on ne sait pas si une fusée nucléaire aurait été prête aussi vite que *Saturne V* si tous les crédits avaient été consacrés à son profit; ce qu'on sait, c'est que la politique choisie a porté ses fruits dans la mesure où l'exploit visé était l'arrivée de l'homme sur la Lune. Cependant, le programme nucléothermique avait le vent en poupe en 1968 à la suite des résultats obtenus, et le président Johnson décidait de donner priorité absolue à la fusée thermonucléaire. On était assuré, à ce moment-là, du succès du programme *Apollo* à réacteur chimique. Le but visé allait donc très au-delà : envoyer un équipage sur Mars vers 1985.

Une poussée de 31 t était obtenue en 1970, et il paraissait alors plausible qu'un engin de 45 t fût disponible en 1976. Or le programme *Nerva* allait connaître une nouvelle mésaventure quand le docteur Low prit en 1971 la direction de la N. A. S. A. Il trouva le programme *Nerva* trop coûteux, car, si les premiers objectifs étaient atteints, les crédits étaient fortement diminués. Mais la fusée *Nerva* continuait de présenter un intérêt certain pour la navette spatiale.

Pour des raisons mal expliquées, et qui peuvent être soit économiques, soit techniques, soit les deux à la fois, on apprenait au début de 1972 que la N. A. S. A. abandonnait la mise au point du propulseur nucléaire *Nerva* de 31 t. Toutefois, si les grands projets *Nerva* sont mis en sommeil, le principe en est retenu pour des engins plus modestes de 7 à 9 t de poussée.

La technique *Nerva*, très élaborée, mérite donc d'être décrite (*fig.* 29). L'hydrogène liquide stocké dans le réservoir H est envoyé par une pompe P à l'intérieur d'une paroi ABCD qui entoure le cœur du réacteur et la tuyère. Arrivant au point A, l'hydrogène est vaporisé au contact de la paroi chaude de la tuyère qu'il contribue ainsi à

▼ ***Moteur de la fusée nucléaire* Nerva.**

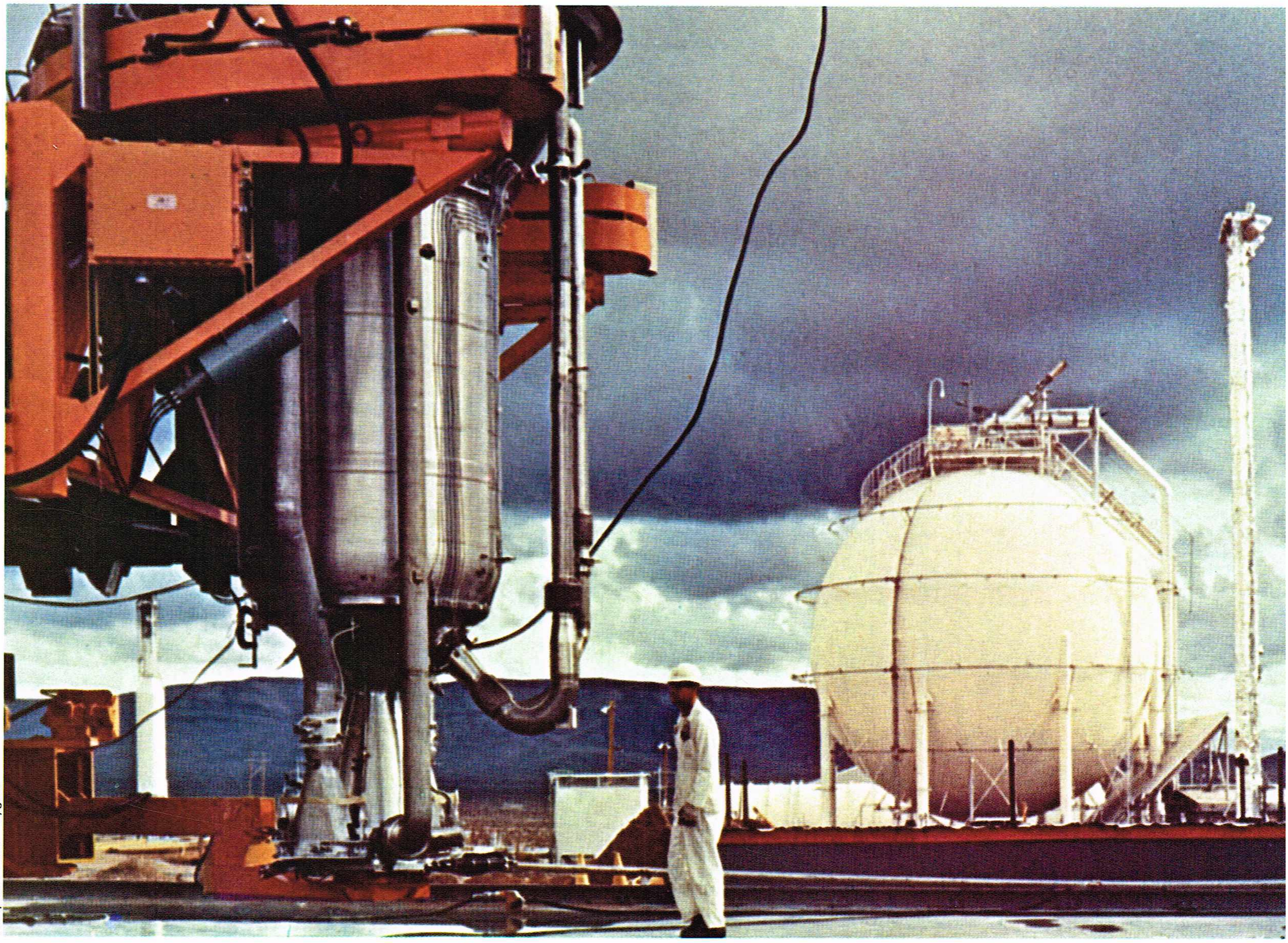

Jacques Tiziou - Sygma

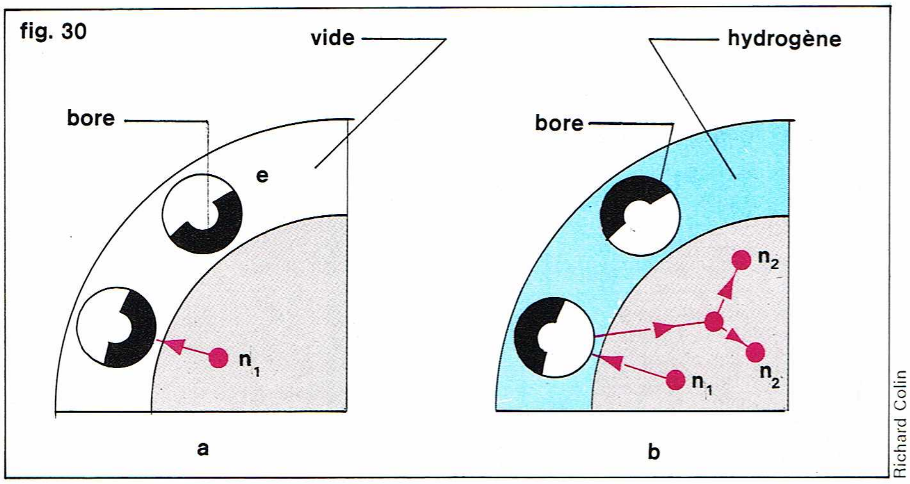

▲ *Figure 30 : voir développement dans le texte.*

refroidir sans qu'il y ait perte de rendement, puisque la chaleur prise par l'hydrogène liquide pour se vaporiser sera acquise à l'arrivée dans le cœur du réacteur où la température atteint 2 500 °C.

L'énergie nécessaire au fonctionnement de la pompe est fournie par une dérivation d'hydrogène vaporisé EFST dont le débit est contrôlé par une valve S et actionne une turbine TT′ qui entraîne la pompe. Le gaz qui a servi à actionner la turbine est éjecté par les pipes P et P′.

● *L'autorégulation instantanée*

Le réacteur doit être *autorégulateur*, c'est-à-dire que les réactions qui produisent des fissions doivent s'accélérer s'il passe une grande masse d'hydrogène, et s'arrêter instantanément si le débit en est arrêté. Sans cela, la pile se transforme en bombe nucléaire.

La vie d'un neutron libre actif dans l'uranium 235 pur est de l'ordre du *milliardième de seconde*. C'est-à-dire que la commande ne peut souffrir aucun retard; elle n'est pas réalisable par des moyens asservisseurs, même en utilisant des machines électroniques.

On sait que la fission par un neutron d'un noyau d'uranium 235 libère en moyenne 2,46 neutrons secondaires dont une partie est absorbée par l'uranium 238 auquel le 235 est mélangé, une autre partie par les impuretés, et dont enfin une fraction s'échappe par la surface extérieure de la pile.

On appelle facteur de multiplication K de la pile le rapport entre le nombre de neutrons secondaires actifs créés et le nombre de fissions dont ils sont issus. Si K est plus petit que l'unité, la pile est dite *convergente ;* les réactions s'éteignent. Si K est plus grand que l'unité, la *réaction en chaîne s'amorce.* Il s'agit de la modérer, et dans notre cas, la chaleur emportée par le flux d'hydrogène qui la traverse est un facteur de modération. (Dans le projet *Nerva* initial, la quantité d'hydrogène liquide envoyée par la pompe était de 8 t/mn, 133 l/s d'un liquide dont la température est à — 253 °C.)

Si l'on prend une quantité d'uranium 238 suffisante pour que K soit inférieur à 1, et si de plus on entoure la pile de barres dopées au bore dont la propriété est d'absorber les neutrons, rien ne se produira (*fig.* 30). En fait, pour obtenir un contrôle très fin, les barres, au lieu de glisser longitudinalement, pivotent sur elles-mêmes toutes ensemble du même angle. Une fraction de leur circonférence porte le bore absorbant les neutrons, l'autre partie les réfléchit.

Si les barres sont dans la position du croquis a, le neutron *n* qui s'évade du cœur de la pile est absorbé par le bore. Si les barres sont dans la position b, le neutron n_1 est renvoyé par le matériau réfléchissant et, percutant un noyau, donne naissance à deux noyaux n_2 (en moyenne : 2,46). K est augmenté.

— Au départ, il y a le vide dans l'espace *e* (croquis 30 a) et les segments de bore sont tournés vers l'intérieur. La quantité d'uranium 238 est prévue pour donner K = 0,98 à 0,99.

— A la mise en marche de la pompe, les molécules d'hydrogène agissent comme matériau réfléchissant. Un plus grand nombre de neutrons ayant quitté le cœur sont réfléchis vers le centre. K augmente et peut dépasser 1. K est alors ramené à l'unité en faisant un peu tourner les barres de contrôle pour qu'une fraction du bore agisse. Ce réglage est très fin.

— A partir de ce moment, toute augmentation du débit d'hydrogène entraîne une augmentation de K avec production de chaleur d'autant plus grande que K a davantage augmenté. Toute diminution du débit entraîne instantanément l'effet inverse.

L'importance des réactions nucléaires est bien asservie au débit d'hydrogène.

● *Gain en charge utile donné par un étage à propulsion nucléaire*

La *figure* 31 montre le gain considérable que procurerait un troisième étage nucléaire au lieu d'un troisième étage chimique, dans l'appoint de charge utile d'une fusée à trois étages destinée aux explorations interplanétaires. On voit que, dans tous les cas, la charge utile est pratiquement doublée.

▼ *Figure 31 : cette figure montre le gain considérable que procurerait un troisième étage nucléaire au lieu d'un troisième étage chimique. En rouge : troisième étage nucléaire; en bleu : troisième étage chimique.*

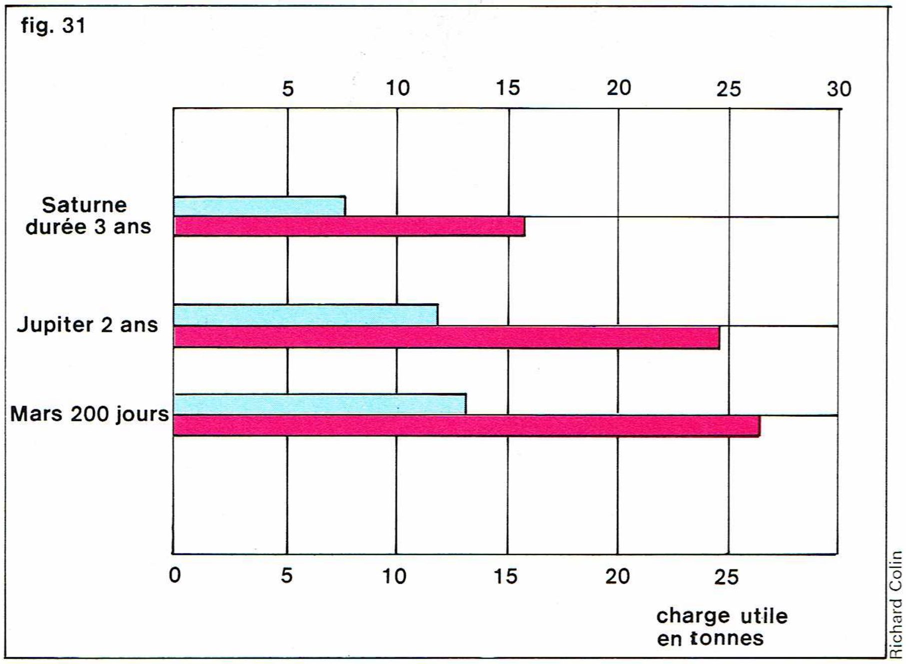

Réacteurs radio-isotopiques

Ils utilisent l'énergie rayonnée par un radio-élément pour chauffer un fluide. Ils ne délivrent que des poussées très faibles.

Aux États-Unis, deux applications très différentes ont été faites de la propulsion isotopique.

Dans le projet *Poodle*, un étage (1,7 tonne d'hydrogène) propulsé par quatre moteurs à polonium 210 produisant une poussée d'environ un newton peut fonctionner un mois. Cet engin a été conçu pour être utilisé en dernier étage sur un certain nombre de lanceurs existants, en vue d'élargir la gamme de leurs missions.

Un deuxième type est celui du projet DART qui utilise comme fluide l'ammoniac et comme radio-élément le plutonium 238. Ce propulseur est destiné à maintenir à poste et à contrôler l'attitude de stations spatiales importantes pendant des durées de un à cinq ans.

Les réalisations soviétiques

Les Soviétiques restent très discrets sur la plupart de leurs recherches spatiales et des résultats qu'ils ont obtenus. Toutefois, à la Quatrième Conférence des Nations unies qui s'est tenue à Genève en septembre 1971, ils ont laissé entendre qu'ils travaillaient à la mise au point de réacteurs nucléaires destinés à assurer l'alimentation électrique de leurs stations orbitales.

Ces réacteurs *Topaz* utilisent la conversion thermoionique. Dans le système *Topaz*, le modérateur est de l'hydride de zirconium, le réflecteur est en béryllium. Le refroidissement est obtenu par un alliage de métaux liquides sodium-potassium. Le poids du réacteur est de 250 kg sans blindage et 2 500 kg avec blindage. *Topaz* contient 18 kg d'uranium 235.

LA LUNE

L'étude de l'astronautique, même sans être exhaustive, demanderait plusieurs gros volumes ; aussi nous sommes-nous limité, pour l'essentiel, après les généralités nécessaires à la compréhension du sujet, à l'examen du programme *Apollo*. Si d'aucuns en contestent la nécessité, il restera néanmoins dans l'histoire de l'homme comme un prodigieux exploit technique lié à une aventure sportive.

Il faut, avant d'aborder le problème tel qu'il s'est posé aux savants, aux ingénieurs et aux techniciens, présenter avec plus de précision l'astre qui, étant le plus proche de la Terre, devenait le but tout désigné des premières tentatives de l'homme.

Origine de la Lune

On admettait jusqu'à très récemment que la Lune avait été expulsée de la Terre. Mais si les savants partageaient pour la plupart cette opinion, ils restaient divisés sur la manière dont les choses s'étaient passées. S'agissait-il d'un événement volcanique, d'un effet de marée, ou d'une conséquence de la force centrifuge ? Une hypothèse séduisante présentée par George Darwin, le propre fils du grand physiologiste anglais, fut en partie confirmée par les travaux sur la dynamique des fluides effectués par le grand mathématicien français Henri Poincaré. En voici les grandes lignes.

Il y a plusieurs milliards d'années, la durée du jour terrestre n'était que de quatre heures (les mesures actuelles, que Darwin ne pouvait connaître, indiquent que le jour terrestre augmente de deux millièmes de seconde par siècle). A cette époque, le globe terrestre, encore très malléable, avait, sous l'influence de l'attraction du Soleil, un renflement équatorial très important qui subissait un phénomène de marée. Comme le magma dont était formée la Terre n'était pas homogène, les conditions différentes d'écoulement des masses produisirent, par la suite, une zone de renflement plus accentuée. A partir de ce moment, l'attraction du Soleil y devint plus intense que dans les zones voisines, et le phénomène ne put que s'amplifier. Une hernie se forma, se dilata et fut finalement expulsée. Ainsi serait survenue, d'après cette hypothèse, la création de la Lune.

Nous l'avons brièvement exposée parce que, jusqu'à hier encore, elle emportait l'assentiment de la plupart des savants. Or, c'est depuis 1977 que parviennent des informations qui l'infirmeraient. En effet, on commence à disposer des résultats d'un assez grand nombre d'analyses du sol lunaire qui ont été faites un peu partout grâce aux échantillons prélevés sur la Lune, notamment par la mission *Apollo* (les Soviétiques en ont eu en quantités bien moindres par leur sonde-robot).

Plus de 382 kilogrammes de pierres et de poussières ont été rapportés sur Terre ; 20 ont été distribués à quelque deux cents laboratoires. Depuis 1970, sept conférences se sont tenues à Houston ; leurs participants y ont exposé des résultats concrets qui semblent infirmer que la Lune ait pu appartenir jadis à la Terre et qu'elle en ait été expulsée.

Voici l'essentiel de ces résultats. La formation du Soleil et des planètes remonterait à 4,6 milliards d'années. La Lune est un astre mort, sans vie possible, frappé d'une immobilité presque absolue. Ses infimes tremblements sont réguliers et concordent avec l'effet de marée que la Terre, deux fois par lunaison, provoque sur la masse encore visqueuse située à 800 km de profondeur sous le sol lunaire et qui entoure un noyau solide, probablement de fer. Le champ magnétique est presque nul. La Lune vibre longuement (pendant des heures) comme une cloche quand elle est heurtée par une météorite. Elle doit cette élasticité au manque d'eau structurelle dans ses molécules ; ses roches sont d'une nature proche de celle des roches terrestres, mais elles en diffèrent par l'absence totale d'eau, même à l'état lié.

On peut en conclure que l'hypothèse de Darwin, même épaulée par les travaux sur la dynamique des fluides de Henri Poincaré, est à rejeter. Il reste donc à formuler d'autres hypothèses. La première est que la Lune se serait formée en même temps que la Terre, mais indépendamment. La différence entre la densité de la Lune, qui est de 3,36, et celle de notre globe, 5,5, rend toutefois cette supposition peu probable.

J. Tiziou - Sygma

▲ *Vue de la Lune prise par* **Apollo XIII.**

Il reste donc la dernière hypothèse classique : la Lune serait une planète capturée par la Terre, et elle proviendrait d'une zone plus proche du Soleil que Mercure. Mercure et Lune agissant l'un sur l'autre, l'orbite de la Lune se serait allongée, et celle-ci, tombant dans les parages de la Terre, aurait été capturée. L'hypothèse reçoit un faible appui du fait que l'excentricité de Mercure est anormale, ce qui peut provenir d'une ancienne action réciproque.

La seule chose sûre est que la théorie de Darwin a reçu de sérieuses contradictions et qu'elle est peut-être à éliminer ; peut-être, car l'expérience des cinquante dernières années, qui a amené tant de bouleversements dans tous les domaines, en particulier en astronomie, doit nous rendre prudents. Il reste quelque 350 kg de roches à examiner. Apporteront-elles quelques analyses décisives ?

Il faut remarquer que le plan de l'orbite lunaire est beaucoup plus proche de l'écliptique que de l'équateur terrestre. Cette considération était mise en avant, contre l'opinion généralement admise, par ceux qui en tiraient une preuve, à leur avis évidente, que la Lune ne s'était pas échappée de la Terre à une époque où les rotations de notre globe étaient rapides. Les récentes découvertes semblent leur donner raison.

▼ *Roches lunaires : photo prise par* **Apollo XI.**

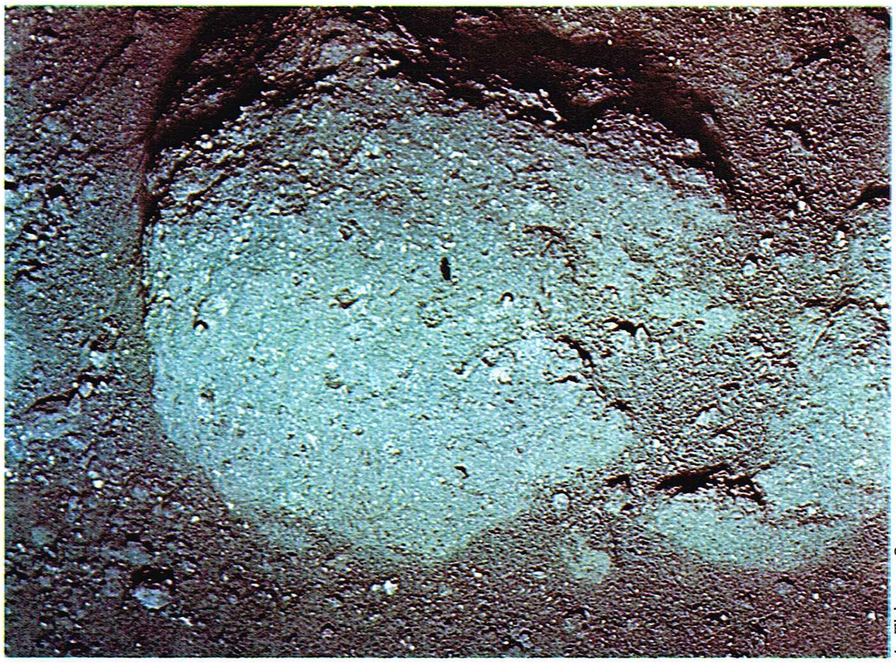

J. Tiziou - Sygma

▶ *Figure 32 : mouvement de la Lune par rapport à la Terre et au Soleil.*

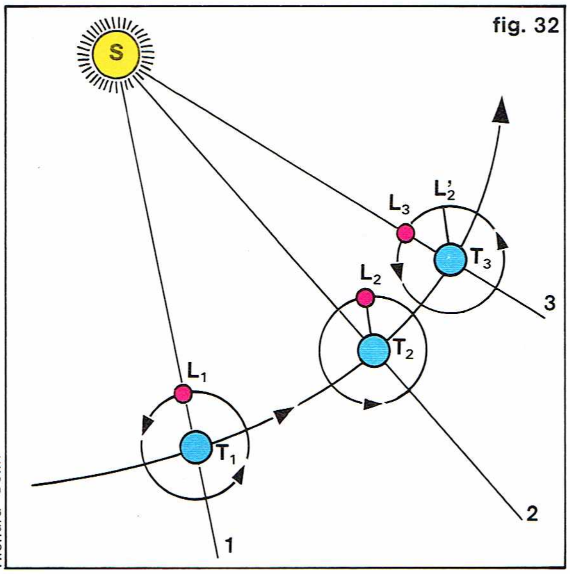

Caractéristiques du mouvement de la Lune

La Lune décrit autour de la Terre une orbite presque circulaire. La distance entre leurs deux centres est en moyenne de 384 000 km, soit environ 60 rayons terrestres. Grâce aux mesures effectuées par radar, on a pu déterminer avec beaucoup de précision que la distance de l'apogée est de 421 690 km, et celle du périgée de 353 880 km.

La Lune tourne dans un plan qui fait 5° 8′ avec le plan contenant la trajectoire de la Terre autour du Soleil, l'écliptique.

La Lune effectue le tour de la Terre en 27 jours, 7 heures et 43 minutes *(révolution sidérale)*. Mais comme, pendant ce temps, la Terre tourne autour du Soleil, les positions relatives de la Lune et du Soleil, vues de la Terre, ne se retrouvent que tous les 29 jours, 12 heures et 44 minutes (*révolution synodique*, ou lunaison). La *figure* 32 le montre. Dans la position **1**, le Soleil, la Lune et la Terre sont alignés. Quand la Lune aura fait un tour complet de la Terre (révolution sidérale), elle se trouvera en L_2 tel que T_2L_2 est parallèle à T_1L_1. Pour que Soleil, Lune et Terre soient de nouveau alignés, il faudra que la Lune vienne de L_2' (tel que T_3L_2' soit parallèle à T_2L_2 et T_1L_1) en L_3. Pendant ce temps, la Terre parcourra T_2T_3 sur son orbite. Pour rendre la figure claire, nous avons dessiné T_2T_3 beaucoup plus grand qu'il ne l'est en réalité, puisque T_1T_2 est parcouru en 27,5 jours, tandis que T_2T_3 correspond à 2,5 jours environ. Par contre, l'angle T_1ST_2 est à peu près à l'échelle, il vaut environ 30°.

Comme la Lune nous présente toujours la même face, sa période de rotation est égale à celle de sa révolution synodique : 29 jours 12 heures 44 minutes. En fait, nous voyons un peu plus d'une demi-sphère de la Lune. N'oublions pas, en effet, qu'elle parcourt une ellipse, que sa vitesse sur sa trajectoire est maximale au périgée, et minimale à l'apogée, ce qui entraîne une oscillation en latitude par rapport à la Terre. De plus, l'axe de rotation de la Lune sur elle-même n'est pas rigoureusement perpendiculaire au plan de son orbite. Cela provoque une oscillation de longitude qui nous dévoile les deux calottes polaires à 14 jours d'intervalle. Ces deux phénomènes, dénommés librations, font que nous pouvons en fait observer 59 % de la surface lunaire.

Rappelons qu'aujourd'hui nous connaissons la face cachée de la Lune grâce aux explorations spatiales.

Le voyage

Le *tableau* II des caractéristiques des orbites, donné précédemment, nous permet de faire des remarques importantes sur la durée d'un voyage vers la Lune.

En considérant la vitesse orbitale à l'apogée, nous constatons qu'à la distance de la Lune, la vitesse orbitale est tombée à 0,180 km/s, alors que la vitesse de lancement était supérieure à 11,10 km/s. Nous constatons également que la période de révolution est presque de 10 jours. Aussi faudra-t-il, dans ces conditions, 5 jours pour atteindre la Lune, la vitesse moyenne du voyage étant d'à peu près 1 km/s. (Nous verrons que l'on écourtera ce voyage en empruntant des branches de trajectoires hyperboliques grâce à des corrections effectuées en vol en mettant à feu les moteurs-fusées. Le voyage total Terre-Lune d'*Apollo* durera un peu moins de trois jours.)

Les points neutres

Nous avons raisonné jusqu'à maintenant comme si la Terre était la seule masse déterminant l'orbite de l'aéronef. Mais l'itinéraire Terre-Lune est infiment plus compliqué.

Prenons d'abord la Lune. Elle a une masse égale à 1/81 de celle de la Terre. (A sa surface, l'accélération de la pesanteur n'est que le sixième de *g*.) Dès le départ du satellite, la force d'attraction qu'exerce sur lui la Terre commence à diminuer, tandis que celle de la Lune augmente lentement. A un certain point du parcours, les

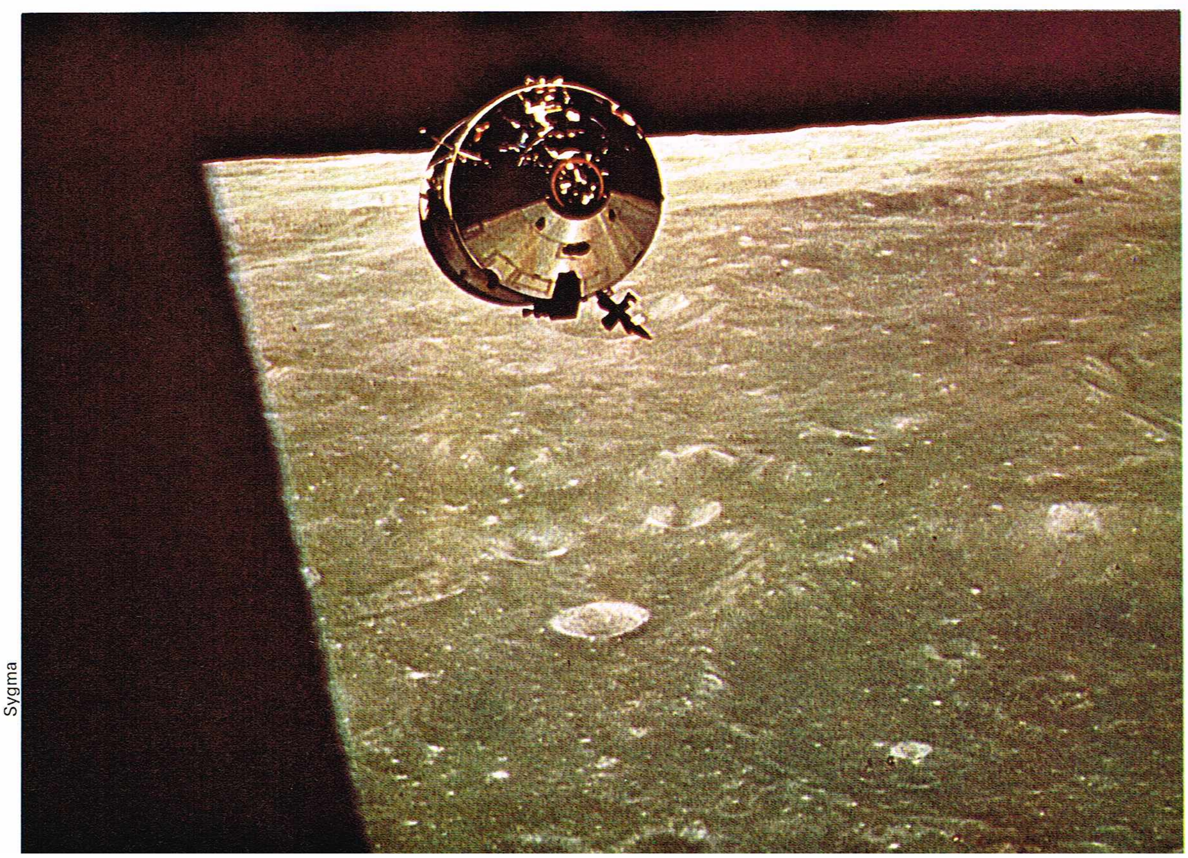

▶ **Apollo X**, *après s'être approché à 15 km, ne se posera pas sur la Lune. Ce sera le dernier vol d'essai avant l'alunissage* **d'Apollo XI.**

Sygma

deux forces s'exerçant dans des sens opposés sont égales. Un calcul simple montre que ce point, appelé *point neutre*, se trouve à environ 54 rayons terrestres de la Terre.

Il suffirait que l'astronef l'atteigne avec une vitesse presque nulle pour que l'attraction de la Lune lui fasse accomplir la dernière partie du trajet. Cependant une pareille manœuvre ne présente pratiquement aucun intérêt. Si nous consultons le tableau des apogées (*tabl.* II), nous voyons en effet que le point neutre est atteint avec une vitesse de lancement de 11,09 km/s, alors qu'il suffit d'une vitesse de lancement juste supérieure à 11,10 km/s pour atteindre la Lune (sans tenir compte de son attraction).

Au point neutre, l'accélération de la pesanteur terrestre et celle de la Lune ont la même valeur : 3,32 m/s^2, mais elles sont de sens opposé. Il existe un autre point au-delà de la Lune où les deux accélérations sont aussi égales, mais elles sont alors dirigées dans le même sens. Ce point est à 7,5 rayons terrestres au-delà de la Lune.

Point neutre Terre-Soleil

Il existe également un point neutre sur la droite Terre-Soleil, où les attractions exercées par ces deux astres sont égales et de sens contraire. Calculons sa position : si d est sa distance à la Terre, D sa distance au Soleil, m la masse de la Terre, M celle du Soleil, G le coefficient d'attraction universelle, nous avons, en écrivant que les accélérations des pesanteurs solaire et terrestre sont égales au point neutre :

$$\frac{GM}{D^2} = \frac{Gm}{d^2} \text{ ou } \frac{M}{m} = \left(\frac{D}{d}\right)^2$$

Or : $M = 1\ 990\ 577 \times 10^{24}$ kg

$m = 5{,}97 \times 10^{24}$ kg

$$\text{Donc } \left(\frac{D}{d}\right)^2 = \frac{1\ 990\ 577}{5{,}97} = 333\ 400 \text{ environ}$$

$$\text{et } \quad \frac{D}{d} = \sqrt{333\ 400} = 577$$

ce qui donne

$$D + d = 578\ d = 150 \cdot 10^6 \text{ km}$$

$$\text{Donc } d = \frac{150\ 000\ 000}{578} = 259\ 515{,}0 \text{ km}$$

Le point neutre entre la Terre et le Soleil est donc à une distance de la Terre qui est égale à :

$$\frac{259\ 515}{384\ 400} = 0{,}68 \text{ fois}$$

par excès la distance de la Terre à la Lune.

Si nous traçons, avec T comme centre et comme rayon

$$TA = TB = 0{,}68\ TL,$$

une circonférence C_1, elle est le lieu des points neutres entre la Terre et le Soleil (*fig.* 33). Dans certaines configurations, l'influence du Soleil peut jouer un rôle important, notamment au voisinage du point neutre Terre-Lune.

Prenons un exemple qui montre combien la diversité des masses et des mouvements des objets célestes qui influent sur la trajectoire de l'astronef aboutit à une force résultante extrêmement variable en valeur absolue et en direction, ces variations étant continuelles (car les objets célestes sont en perpétuel mouvement) et pouvant être considérables dans des laps de temps très courts.

Considérons la trajectoire d'un astronef injecté au périgée P, dans le voisinage de la Terre T, pour atteindre la Lune après être passé au point neutre N entre la Terre et la Lune (*fig.* 33). Le point de rendez-vous est en L, qui se trouve sur la droite prolongée qui passe par P et le centre T de la Terre, à son intersection avec l'orbite de la Lune.

Quand l'astronef est, par exemple, au point E_1, la Lune se trouve en L_1. Pendant que l'astronef parcourra le trajet E_1NL, la Lune parcourra le trajet L_1L. Sur le trajet Terre-Soleil, le point neutre où les attractions des deux astres sont égales et de sens opposé se trouve en B tel que $TB = 0{,}68\ TL_0$.

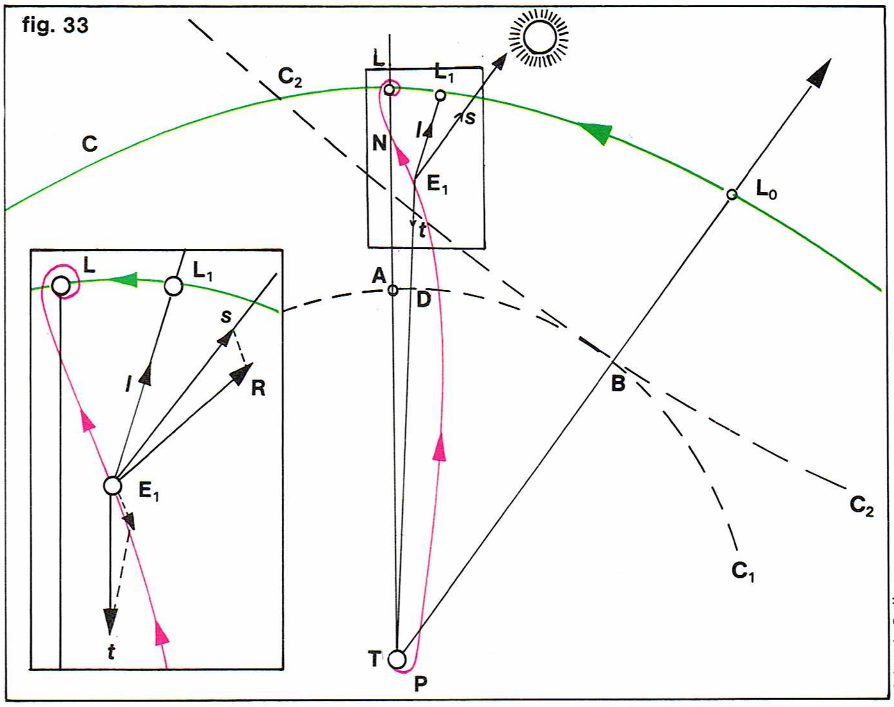

Richard Colin

▲ *Figure 33 : lieu des points neutres entre la Terre et le Soleil.*

Traçons la circonférence C_1 de centre T et de rayon 0,68 TL_0 et la circonférence C_2 ayant pour centre le Soleil, tangente en B à C_1. L'astronef en E_1 n'a pas encore atteint le point neutre Terre-Lune, donc l'attraction E_1l qu'exerce sur lui la Lune est inférieure à celle E_1t qu'exerce la Terre. De plus, E_1 étant à l'intérieur de la circonférence C_2, l'attraction qu'exerce le Soleil, E_1s, est supérieure à celle qu'exerce la Terre, E_1t. Finalement, la résultante E_1R des vecteurs E_1l, E_1s et E_1t est prépondérante vers le Soleil.

Cependant, le Soleil peut occuper toutes les positions possibles par rapport à la ligne Terre-Lune au cours d'une lunaison. Son action sera donc très diverse. Quand le Soleil et la Lune s'approcheront de leur conjonction, leurs attractions s'additionneront. Au contraire, quand ils seront en opposition, ce seront les attractions du Soleil et de la Terre qui s'ajouteront. On comprend que les variations du vecteur E_1R sont très rapides en direction comme en valeur. Leur influence sur une trajectoire inerte, c'est-à-dire sans poussée nouvelle pour effectuer des corrections, est extrêmement compliquée et difficile à évaluer. Aussi garde-t-on toujours une réserve de combustible pour d'éventuelles corrections.

Considérations sur les points neutres

Nous avons jusqu'ici situé le point neutre sur la ligne qui va de la Terre au point de rendez-vous de l'astronef avec la Lune. (Rappelons qu'il y a un autre point neutre au-delà de la Lune.) La trajectoire de l'astronef est voisine de cette ligne, l'astronef y passe avec une vitesse radiale, il n'y séjourne pas.

Pour un corps satellisé, le calcul du point neutre est différent. On doit tenir compte qu'en ce point, il y a équilibre entre l'attraction terrestre et l'attraction lunaire augmentée de la force centrifuge du satellite par rapport à la Terre. Ce point neutre est alors à 320 000 km de la Terre, soit 50,3 rayons terrestres (au lieu des 54 calculés plus haut).

La neutralité de ce point et celle du point extérieur sont toutes théoriques. L'équilibre y est foncièrement instable, car le déplacement de la Lune est perpendiculaire à la ligne suivant laquelle s'exercent les forces d'attraction.

Points de Lagrange

Une singularité théorique, prévue dès 1772 par Lagrange, a reçu des confirmations éclatantes avec la découverte des planètes troyennes. Lagrange démontra que, dans tout système de deux corps A et B, dont l'un, B, gravite autour de l'autre, A, il existe sur l'orbite du satellite deux points (depuis cette époque, appelés points de Lagrange) où, si l'on place un objet spatial, il reste en

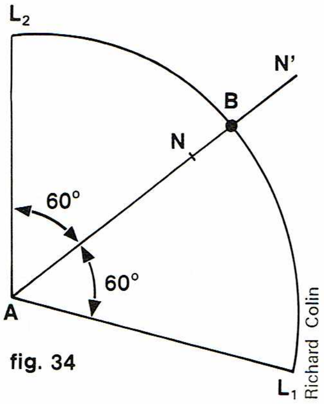

fig. 34

▲ *Figure 34 : points de Lagrange (L_1 et L_2). Si l'on place en l'un de ces points un objet spatial, il reste en équilibre stable.*

équilibre stable (*fig.* 34). Ces deux points sont sur l'orbite respectivement 60° en avant et en arrière de la ligne qui joint le corps principal A au satellite B.

Le raisonnement vaut pour tout couple d'astres : Soleil-Terre, Soleil-planète, Terre-Lune, etc. Aussi, dans un système de deux astres, existe-t-il deux points neutres où l'équilibre d'un corps est instable, N et N′, et deux points neutres où l'équilibre d'un corps est stable, les points de Lagrange L_1 et L_2.

Le point N′ correspondant au système Terre-Lune s'appelle *point de Moulton*. Il émet une pâle lumière à cause des matériaux qui viennent y séjourner plus ou moins longtemps, après avoir été soufflés par le vent solaire le long de la queue magnétique de la Terre. Le point de Moulton est en quelque sorte réapprovisionné en permanence par l'arrivée de ces matériaux qui repartent ensuite vers les régions lointaines.

Dans le système Soleil-Terre, les points de Lagrange se trouvent à quelque 150 millions de km du Soleil et de la Terre. Étant des *puits de gravitation*, ils présentent un intérêt considérable du point de vue astronautique. Des sondes ou des stations qui y seraient placées seraient en effet stables et constitueraient d'importantes sources d'information.

Les planètes troyennes

Ce sont de petites planètes qui occupent les points de Lagrange du système Soleil-Jupiter. Il y en a une quinzaine, réparties entre les deux points de Lagrange. Achille est la première qui fut découverte en 1906. Elles portent des noms de héros de *l'Iliade*, d'où leur dénomination globale de planètes troyennes.

Les économies d'énergie pour le tir vers la Lune

Nous avons examiné jusqu'ici brièvement quelles trajectoires pouvaient conduire l'astronef jusqu'à la Lune. Elles appartiennent à une famille de coniques dont le centre de la Terre constitue l'un des foyers dans le cas des ellipses, et le seul foyer quand l'on passe à la parabole limite et aux hyperboles.

▼ **Soyouz IX** *au départ sur le cosmodrome de Baïkonour, situé dans un lieu désertique d'une étendue grande comme cinq fois celle de la France.*

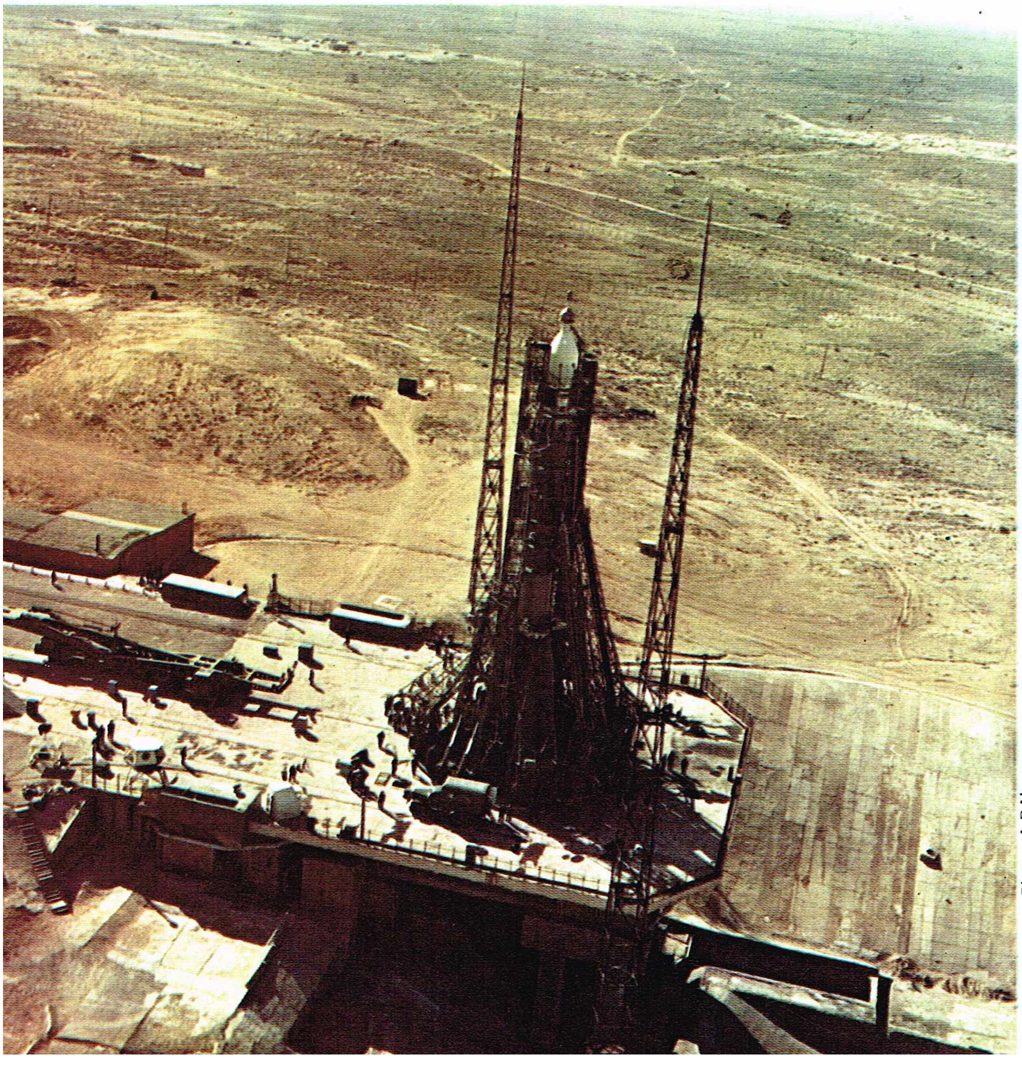

Photo A.P.N.

Nous avons montré que la famille des ellipses créées par des vitesses de lancement comprises entre la vitesse de satellisation et la vitesse de libération atteint des apogées assez lointains pour dépasser la Lune.

En raisonnant en termes d'économie d'énergie maximale, on peut imaginer que l'astronef est lancé à l'équateur, dans l'azimut 90° pour profiter au maximum de la vitesse de rotation de la Terre. Sa vitesse de lancement devrait lui permettre de juste dépasser le point neutre afin de tomber naturellement dans la zone d'attraction de la Lune. (Ce point neutre pourrait être à une distance minimale de la Terre, si, le Soleil et la Lune étant près de leur conjonction, leurs attractions sur l'astronef s'additionnaient.) La durée du voyage serait alors de neuf jours.

La durée du voyage

En fait, on l'a déjà remarqué, il suffit d'ajouter à peine 0,01 km/s à la vitesse de lancement pour atteindre l'orbite de la Lune, sans tenir compte d'autre chose que de l'attraction terrestre. Et comme, de toute façon, la vitesse de libération est extrêmement voisine de la vitesse de lancement donnant un apogée sur orbite lunaire, il suffit de franchir le plus tôt possible la vitesse de libération pour injecter l'astronef sur une trajectoire hyperbolique (cela se fait pour *Apollo*, 4 heures et 44 minutes après le départ). Il faudra certes faire une manœuvre inverse, arrivé à proximité de la Lune, pour placer l'astronef sur une orbite lunaire (pour *Apollo*, 51 heures et 41 minutes après le départ).

On y aura gagné, pour une faible dépense de combustible, de réduire considérablement la durée du voyage (un peu moins de 3 jours au lieu de 9).

La poursuite pendant la phase d'envol

Dans l'étude sommaire qui vient d'être faite, il est entendu implicitement que la trajectoire part du périgée. La droite qui joint le périgée au centre de la Terre, prolongée, désigne sur l'orbite lunaire le point de rendez-vous. En outre, il est supposé que le périgée est hors des couches denses de l'atmosphère terrestre et que la vitesse d'injection sur la trajectoire est perpendiculaire à la ligne joignant le périgée au centre de la Terre, sauf écarts accidentels.

Il appartient aux différents postes d'observation échelonnés sur les pistes de lancement (pour les États-Unis, des Bahamas à l'Australie ; pour l'U. R. S. S., du Kazakhstan au Kamtchatka) de suivre la phase d'envol, de mesurer les différences entre la trajectoire réelle de l'astronef et celle qu'on avait souhaité lui voir prendre (des perturbations sont dues, par exemple, à des vents violents imprévus dans l'atmosphère moyenne), de signaler ces différences au centre de lancement afin que les corrections voulues soient rapidement apportées et que l'engin soit lancé dans les conditions prévues (exactitude du périgée, perpendicularité de la vitesse d'injection). Toute erreur à ce niveau pourrait certes être corrigée sur le trajet translunaire, mais au prix d'une dépense de combustible.

Un calcul encore plus précis de la trajectoire doit tenir compte de l'influence des objets célestes du système solaire qui, à certaines époques, peuvent être assez rapprochés pour que cette influence ne soit pas absolument négligeable.

Les économies gratuites d'énergie

On voit que le choix de la route à prendre pour se rendre sur la Lune n'est pas simple. La performance à réaliser est bien définie : il s'agit d'amener une certaine masse de la Terre sur la Lune en consommant le moins d'énergie possible. Il semble que, l'énergie potentielle de la masse à déposer sur la Lune étant unique et bien définie, il faille toujours dépenser la même énergie quel que soit le chemin emprunté.

Cela est rigoureusement vrai du point de vue théorique. Mais, si l'on tient compte du fait que Terre et Lune sont en rotation sur elles-mêmes et que la Lune tourne autour de la Terre, une certaine partie de l'énergie totale constante à fournir pourra être prélevée sur les énergies naturelles.

● Une première économie sera acquise en lançant l'astronef dans le sens de la rotation de la Terre. Elle sera d'autant plus grande que le lieu de lancement sera plus près de l'équateur et la direction du lancement plus voisine de la direction ouest-est.

Mais le choix du lieu de lancement doit obéir à d'autres considérations. Certaines sont imposées par la géographie. Le territoire soviétique, par exemple, ne s'étend pas plus bas que le 40e degré de latitude. Le choix de la station principale, Baïkonour, au Kazakhstan, a été guidé par le fait qu'autour de la base le lieu est désertique sur une étendue grande comme cinq fois celle de la France. C'est un gage de sécurité et de secret. De là, les fusées tirées dans des plans inclinés à 65° survolent l'U. R. S. S. jusqu'au Kamtchatka, ce qui permet, grâce à des postes d'observation au sol, d'effectuer les corrections de trajectoire nécessaires au bon départ. Mais on est loin des conditions idéales en ce qui concerne la rotation de la Terre (équateur et direction ouest-est). Pour améliorer cette situation, les Soviétiques ont créé un centre de lancement à Tyuratam, toujours au Kazakhstan, mais plus au sud, à 45° 6′ de latitude nord. De là, les fusées s'envolent sur des orbites dont l'inclinaison est voisine de 52°. C'est un progrès, mais c'est tout ce que la géographie permet à l'Union soviétique.

Les Américains sont bien mieux placés avec le cap Kennedy (anciennement cap Canaveral, d'où, par une étrange coïncidence, Jules Verne, dans son célèbre roman, avait fait partir ses voyageurs pour la Lune). Du cap Kennedy, la trajectoire de la piste principale passe sur une succession d'îles rapprochées, depuis la Grande Bahama jusqu'à Porto Rico, puis au milieu de l'océan Atlantique sur l'île de l'Ascension, enfin sur l'Afrique du Sud et l'Australie où la N. A. S. A. a installé des stations de repérage. De cap Kennedy situé à la latitude de 28° 5′ nord, les deux pistes encore en usage (une troisième passant au-dessus de Cuba a été supprimée) survolent la mer sur de très longs parcours.

La France est très avantagée grâce au centre spatial guyanais de Kourou, qui n'est guère qu'à 5° 3′ de latitude nord. Ce serait une base idéale pour le départ des sondes spatiales à destination des planètes dont le plan de révolution est presque confondu avec celui de l'écliptique proche de celui de l'équateur. Malheureusement, la France n'a que bien rarement quelque chose à lancer et rien, en tout cas pour l'instant, vers les espaces interplanétaires.

U.S.I.S.

▲ *Le véhicule spatial d'*Apollo XI *sort du bâtiment où il a été assemblé. Il va parcourir, sur son train de roues, les 5,6 km qui le séparent de son aire de lancement à une vitesse de 1,6 km/h.*

▼ *Vue panoramique des diverses aires de lancement à cap Kennedy (appelé cap Canaveral jusqu'en 1963). Cette portion de la côte atlantique de la Floride a été le terrain des plus célèbres lancements des États-Unis.*

U.S.I.S.

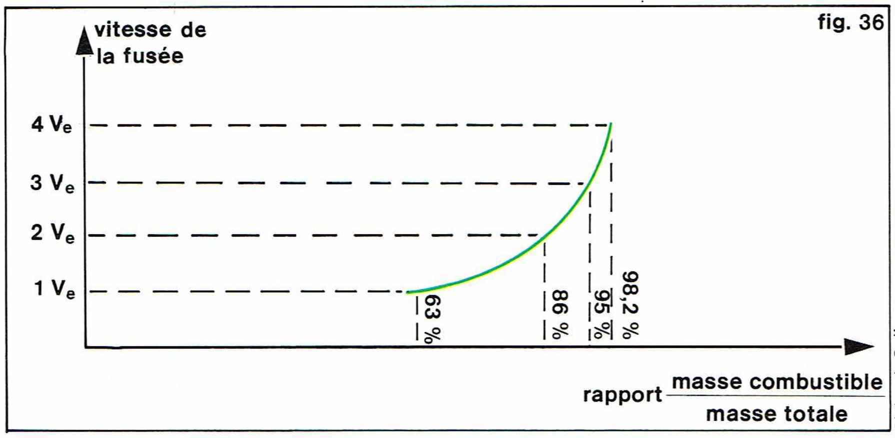

▲ *Figure 36 : diagramme représentant la vitesse de la fusée, exprimée en multiples de la vitesse d'éjection, en fonction de la proportion des propergols.*
▼ *Figure 35 : si l'astronef arrive sur la Lune en A après avoir parcouru la courbe indiquée, il aura moins à freiner par rétrofusée, puisque le sol avance sous lui à la vitesse de 1 km/s.*

● Une deuxième économie d'énergie peut être réalisée à l'arrivée sur la Lune. Celle-ci se déplace en effet, sur sa trajectoire quasi circulaire autour de la Terre, à la vitesse d'environ 1 km/s dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Si l'astronef arrive sur la Lune en A après avoir parcouru la courbe indiquée sur la *figure* 35, il aura moins à freiner par rétrofusée, puisque le sol avance sous lui à la vitesse d'1 km/s (à très peu près).

Ces deux économies d'énergie, au départ grâce à une impulsion dans l'espace provenant de la vitesse de rotation de la Terre, et à l'arrivée grâce au déplacement de la Lune à raison de 1 km/s, se cumulent très heureusement.

RAPPORTS DE MASSES - VITESSE D'ÉJECTION - POURCENTAGES DE PROPERGOLS

Nous avons acquis maintenant quelques notions sur ce que doivent être les trajectoires, d'abord dans l'atmosphère, puis au-delà, pour atteindre un objet spatial comme la Lune. Mais il ne faut pas oublier ce qui est l'essentiel du problème à résoudre : faire parvenir à destination la plus grande charge utile possible. Cette condition ne paraîtrait pas prioritaire si les lois qui régissent le lancement d'une fusée permettaient, par des modifications mineures, d'augmenter facilement la charge utile.

Nous avons vu que parfois les lois de la mécanique offrent des facilités presque inattendues : par exemple, on s'est rendu compte que, dans la famille d'ellipses des corps satellisés autour de la Terre, il suffit, dans la zone de celles qui atteignent la Lune, d'infimes augmentations de poussée initiale pour obtenir d'énormes accroissements de la distance de l'apogée. Il n'en est malheureusement rien en ce qui concerne la charge utile.

Reportons-nous à la formule de Tsiolkovski :

$$V = 2{,}3\ V_e \log_{10} \frac{M_0}{M}$$

où, rappelons-le, V_e est la vitesse d'éjection des gaz, M_0 la masse de la fusée au moment du départ, et M la masse de la fusée à l'instant considéré. Autrement dit, $(M_0 - M)$ représente la masse de propergols brûlés depuis le décollage.

La vitesse maximale est obtenue quand tout le combustible est épuisé. Si M_0 est la masse initiale et M_f la masse finale quand le combustible est épuisé, la vitesse maximale est :

$$V_{max} = 2{,}3\ V_e \log_{10} \frac{M_0}{M_f}$$

et la masse de combustible épuisé :

$$M_0 - M_f$$

Dans un vol habité, par exemple, M_f représente le poids des cosmonautes, des appareils qui leur sont indispensables et de la structure qui permet leur protection.

Comme la vitesse finale est obtenue quand l'éjection des gaz s'arrête faute de combustible, elle est fonction de la masse initiale de combustible à bord, de la charge utile et de la vitesse d'éjection des gaz; celle-ci peut être évaluée en fonction du pourcentage de la masse occupée par les propergols. En appliquant la formule ci-dessus, on trace le diagramme de la *figure* 36 qui représente la vitesse d'éjection en fonction de la proportion de propergols.

Les vitesses d'éjection des propergols les plus employés sont :

$V_e = 2{,}670$ km/s pour la combinaison kérosène-oxygène (liquides).

fig. 35

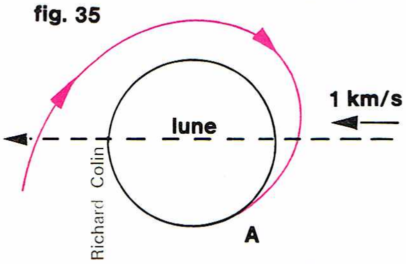

▶ *Page ci-contre, fusée de lancement Vanguard à 3 étages en préparation à cap Canaveral (décembre 1957) sous la direction de l'Office de recherches navales. Elle doit lancer dans l'espace un satellite d'observation.*

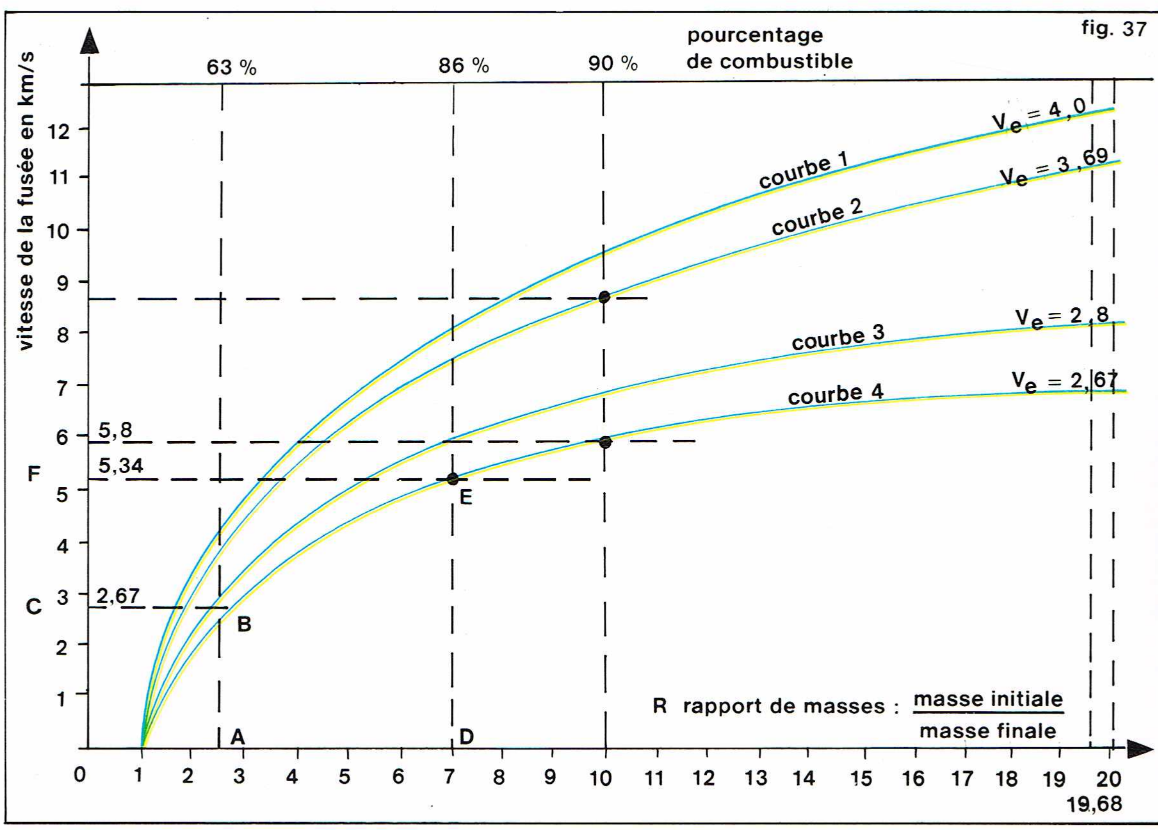

▶ *Figure 37 : relation entre rapport de masses, pourcentage de combustible et vitesse de la fusée pour différentes vitesses d'éjection.*

$V_e = 3{,}690$ km/s pour la combinaison hydrogène-oxygène (liquides).

L'emploi de l'ozone et du fluor, avec l'hydrogène comme combustible, donnerait, à taux d'expansion 100, des vitesses de 4,213 km/s et 4,0 km/s. C'est le maximum de ce que l'on peut espérer actuellement de l'emploi de corps chimiques ; mais l'ozone est un explosif dangereux, et le fluor est très corrosif. Ainsi, les vitesses d'éjection actuellement usitées sont les deux premières citées.

Reprenons maintenant (*fig.* 37) le diagramme étudié précédemment (*fig.* 20) et qui représente la formule fondamentale $V = 2{,}3\ V_e \log_{10} R$. Les combinaisons actuellement les plus employées sont **2** et **4**. Le diagramme de l'équation fondamentale correspond à celui des pourcentages de combustibles. Ce dernier indique que, pour obtenir $V = 3\ V_e$, le pourcentage des combustibles doit être de 95 %. Cela donne un rapport de masses de 20 et ne laisse que 5 % pour les structures et le satellite.

Or, malgré tous les efforts entrepris, on n'a jamais obtenu de pourcentage inférieur à 10 % de la masse totale pour les structures. Cela représente un rapport de masses de $\frac{90 + 10}{10} = 10$. En nous rapportant au diagramme de l'équation fondamentale, on voit que ce rapport de masses permet d'atteindre : la vitesse 5,8 km/s en utilisant la combinaison kérosène-oxygène (courbe **4**), et la vitesse 8,6 km/s en utilisant la combinaison hydrogène-oxygène (courbe **2**). On voit donc qu'avec ce rapport de masses déjà extrême, la fusée ne peut atteindre que la vitesse de satellisation. Avec le même rapport de masses, la combinaison la plus avantageuse fluor-hydrogène (non employée) ne permettrait d'atteindre que 9,3 km/s, vitesse encore insuffisante pour obtenir la libération.

Considérons une fusée à un seul étage. La structure, malgré toutes les améliorations faites pour l'alléger, représente au moins 10 % de la masse totale. Cela donne sur la courbe **1** des propergols les plus efficaces (mais non employés à cause des risques que crée le fluor) une vitesse de 8,6 km/s. Nous rapportant au *tableau* des apogées, nous voyons que cela ne permet de s'élever qu'à une altitude de 2 810 km environ. Encore faut-il ajouter qu'il n'y parviendrait que la structure vide, sans charge utile ! Ce serait une opération absurde car, en définitive, l'énergie créée est dépensée en pure perte. Elle n'accélérerait que la masse inerte. Le problème paraîtrait soluble si la masse des réservoirs disparaissait au fur et à mesure qu'elle devient inutile.

On pourrait comparer cette opération à ce qui se passe dans une cigarette. Le papier contenant le tabac se consume au même niveau que le tabac, il disparaît dès qu'il n'a plus aucun rôle à jouer.

Il n'est pas inutile de rappeler que le but poursuivi est de placer à destination la plus grande charge utile possible. Lorsqu'on augmente la charge utile M_f, dans

$$\left[V_{\max} = 2{,}3\ V_e \log_{10} \frac{M_0}{M_f}\right]$$

le rapport $\frac{M_0}{M_f}$ diminue, donc (dans des proportions moindres) $\log_{10} \frac{M_0}{M_f}$ diminue également : M_f augmente bien, mais aux dépens de la vitesse.

Si nous supposons maintenant que la charge utile est constituée par une autre fusée qui porte ses propres moteurs et les propergols nécessaires à leur fonctionnement, et que cette fusée est détachée de la première à la fin de la combustion de celle-ci, la seconde fusée commence à accélérer sa course en partant de la vitesse acquise par l'action de la première fusée. Son appareil propulseur aura évidemment à accélérer une masse beaucoup plus petite que la masse initiale constituée par les deux fusées. Quand tout son combustible sera épuisé, la vitesse obtenue sera égale à la somme de la vitesse créée par sa propre action et de la vitesse qu'avait acquise la première fusée. On dit que l'on a une *fusée à deux étages*. Rien n'empêche de renouveler avec le deuxième étage ce que l'on a fait avec le premier, c'est-à-dire que, lorsqu'il aura brûlé tout son combustible, on pourra le séparer d'une *troisième fusée* qu'on peut considérer comme la charge utile du deuxième étage. Cette nouvelle troisième fusée pourra à son tour en porter une quatrième, et ainsi de suite.

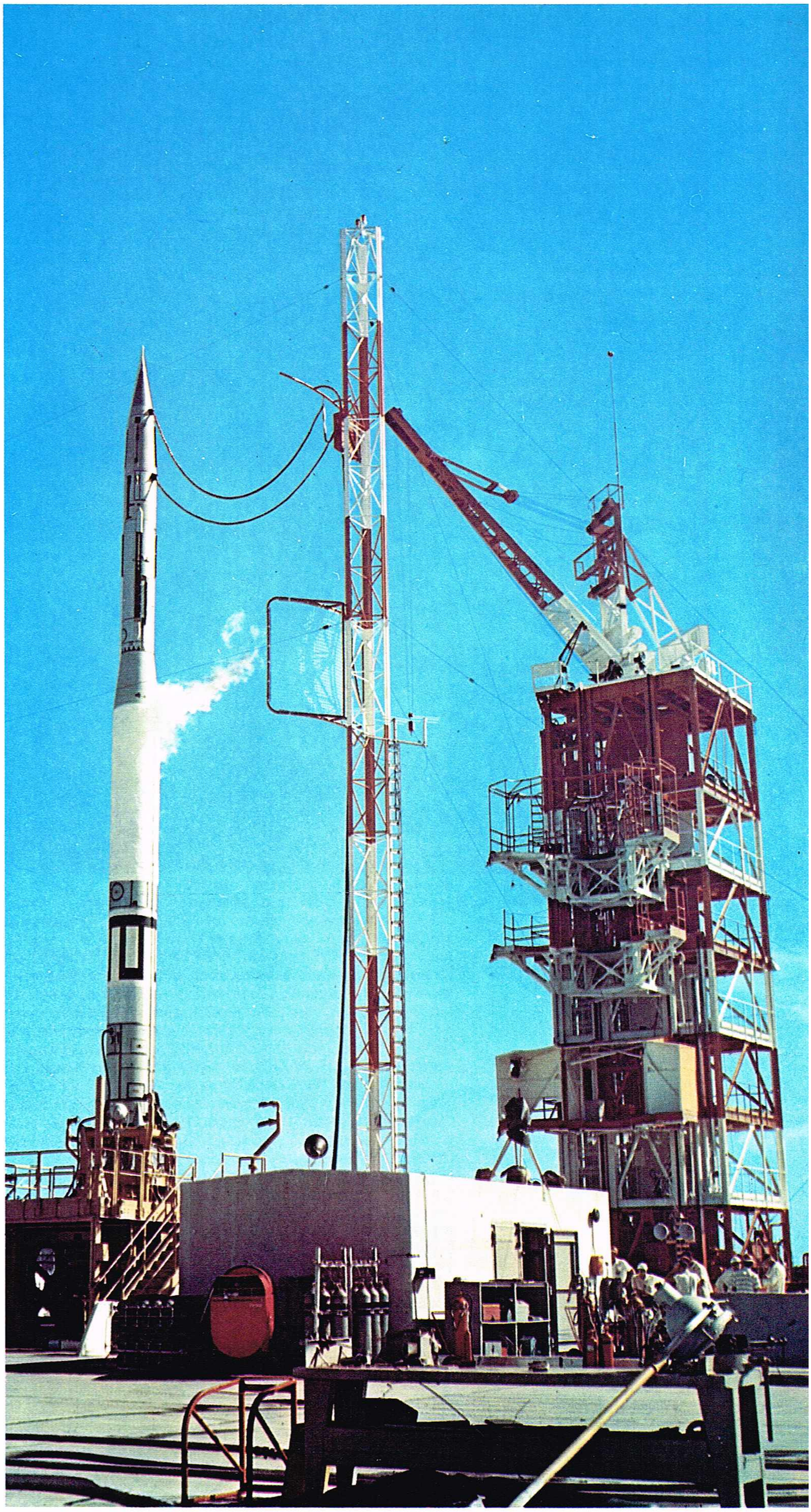
U.S.I.S.

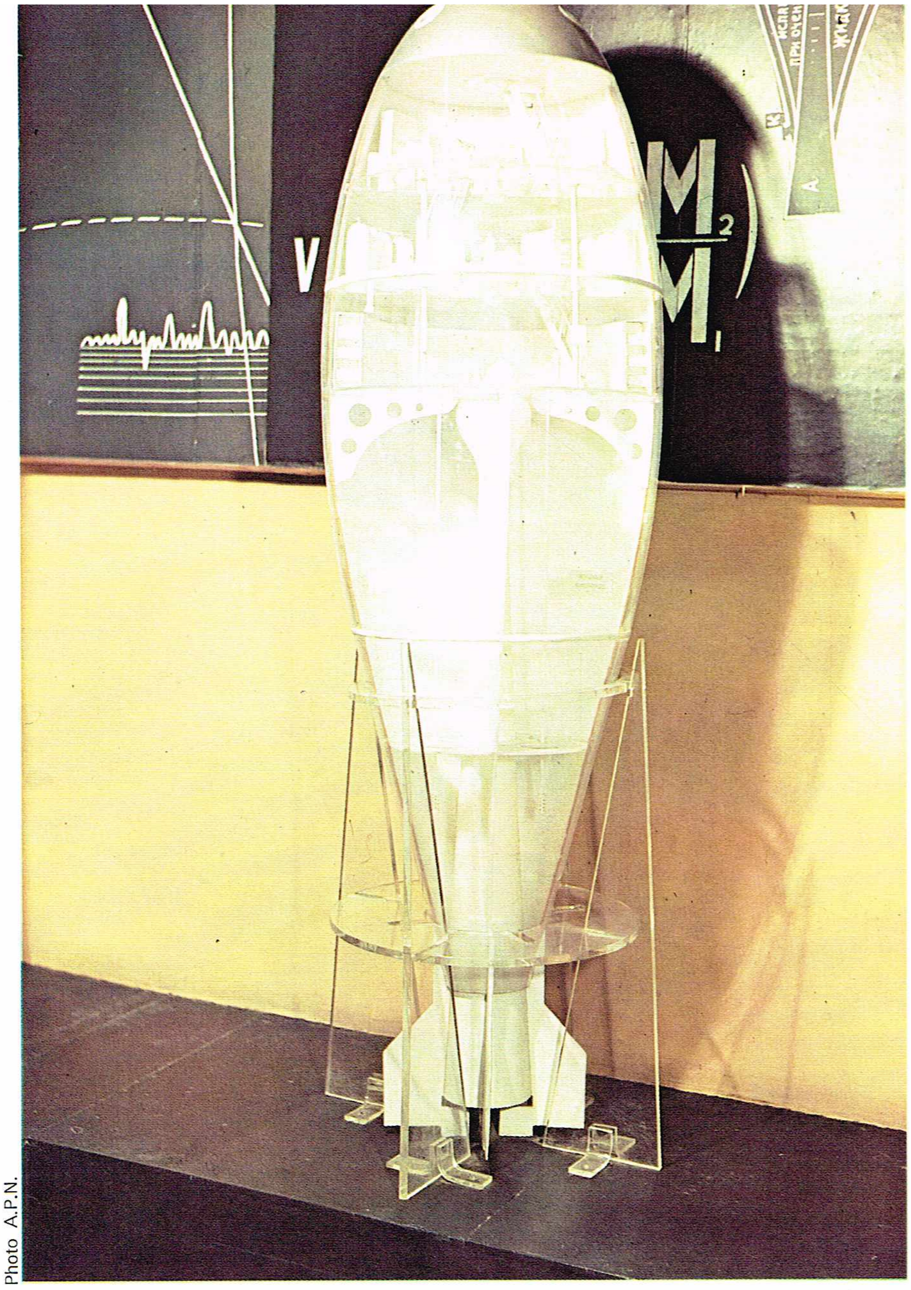

▲ *Maquette de la fusée de Tsiolkovski.*

Gravité - Densité de l'air

Leurs lois de variation avec l'altitude

La **gravité** décroît avec l'altitude suivant la loi qui donne la force d'attraction terrestre :

$$F = G\frac{mM}{d^2}$$

Puisque F est égale aussi à mg, g étant l'accélération de la pesanteur au point considéré (donc 9,81 m/s² à l'altitude 0), on voit que g varie en sens inverse de d^2. Si AB représente la valeur de la gravité au sol (prise égale à l'unité), soit à un rayon TA du centre de la Terre, elle sera 1/4 à 2 R, 1/9 à 3 R, 1/16 à 4 R et 1/25 à 5 R (*fig.* 38). La diminution de la gravité, très rapide au début, devient ensuite de plus en plus lente. *Mais il faut bien souligner qu'elle ne cesse jamais.*

La **densité de l'air** diminue aussi avec l'altitude, mais en suivant une loi différente. On voit (*fig.* 39) qu'elle est déjà le dixième de ce qu'elle est au sol à environ 15 km d'altitude, le centième à 30 km, le millionième à 110 km, alors qu'à 110 km d'altitude la gravité est encore les 98/100 de ce qu'elle est au sol.

Influence de la pesanteur et de la densité de l'air au départ de la fusée

La formule $V = 2{,}3\ V_e \log_{10} R$ est l'équation fondamentale du mouvement de la fusée sous sa forme la plus simple : cas d'une fusée qui commence à se déplacer dans un espace vide où la pesanteur est peu sensible. Mais il y a lieu de la compléter ainsi :

$$V = 2{,}3\ V_e \log_{10} R - gt - V_d$$

Dans cette équation complète apparaissent deux nouveaux termes. Le *premier* est représenté par le produit de g, constante gravitationnelle d'une planète et de t, temps pendant lequel l'appareil propulseur du missile reste actif. Sur la Terre, g est égal à 9,81 m/s². Sur les autres planètes, les valeurs approximatives de g sont : 8,8 sur Vénus, 2,56 sur Mercure, 1,56 sur la Lune, 3,54 sur Mars, 26 sur Jupiter. Le *deuxième* terme, V_d, désigne la perte de vitesse due à la présence d'une atmosphère et varie sensiblement suivant la trajectoire parcourue par le missile et les caractéristiques de l'atmosphère. Cette formule est simple et peut s'appliquer, malgré les approximations qu'elle comporte, quelles que soient les conditions d'opération d'un missile :

L'expérience a prouvé que les *fusées à trois étages* sont suffisantes pour les vaisseaux cosmiques. Il n'y a d'ailleurs pas intérêt à trop multiplier le nombre d'étages, car chaque séparation pose de très délicats problèmes au moment où l'étage suivant doit entrer en fonction. On n'obtient une très grande sûreté qu'en utilisant des appareils dont le poids grève le devis général et diminue le bénéfice réalisé par l'augmentation du nombre d'étages, puisque tout poids ajouté vient à l'encontre du but recherché : accroître la charge utile.

Certes, dans l'utilisation des fusées à plusieurs étages, l'augmentation de la charge utile de chaque étage et, par conséquent, la diminution du rapport de masses ont entraîné une diminution de la vitesse propre de l'étage. Mais, comme les vitesses créées par chaque étage s'additionnent, on obtient des vitesses élevées en multipliant le nombre d'étages.

Il faut noter que la masse du satellite augmente en pourcentage de la masse totale avec chaque largage d'un étage suivi de la mise à feu de l'étage supérieur. Il est fréquent que la masse finale, celle du satellite, soit égale à celle de la structure du troisième étage, alors qu'au départ, elle n'était que de quelques pour cent de la masse totale des structures inertes.

C'est avec les *fusées à trois étages* à propulsion chimique qu'ont été mis en orbite les *Soyouz* soviétiques et qu'a été réalisé le programme *Apollo*. La fusée à propulsion chimique à plusieurs étages, préconisée par Tsiolkovski il y a plus d'un demi-siècle, est aujourd'hui fondamentale pour l'exploration de l'espace et le restera longtemps, en attendant que des fusées dotées de propulseurs d'une autre nature viennent s'y ajouter ou peut-être les remplacer.

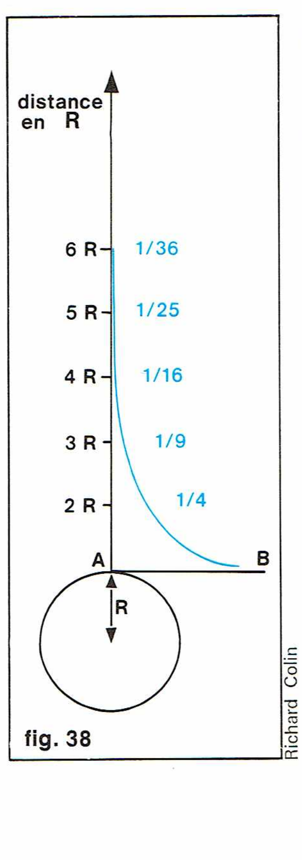

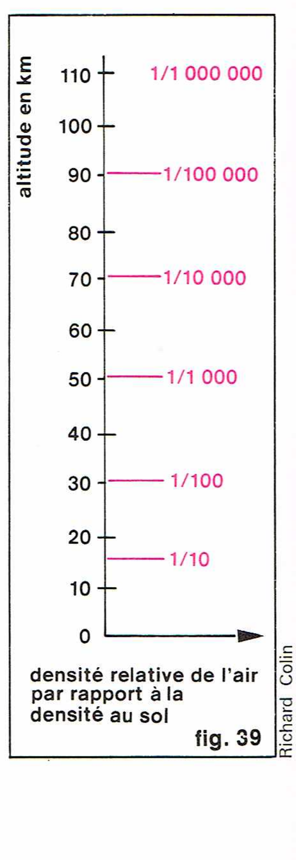

▶ *Figure 38 : variation relative de la gravité en fonction de l'altitude. Figure 39 : variation relative de la densité de l'air en fonction de l'altitude.*

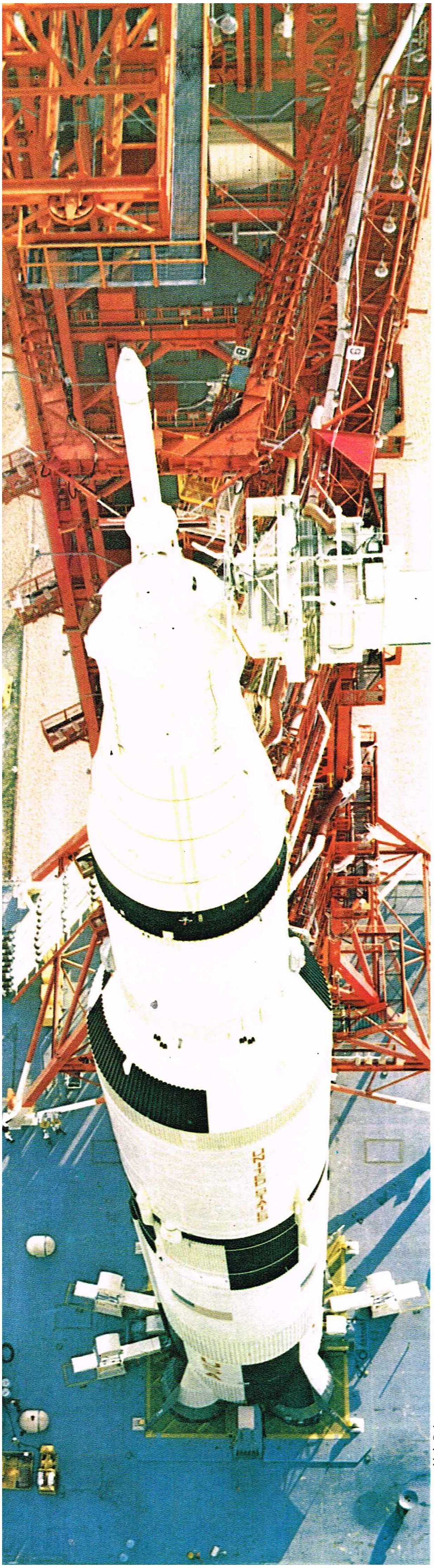

N.A.S.A.

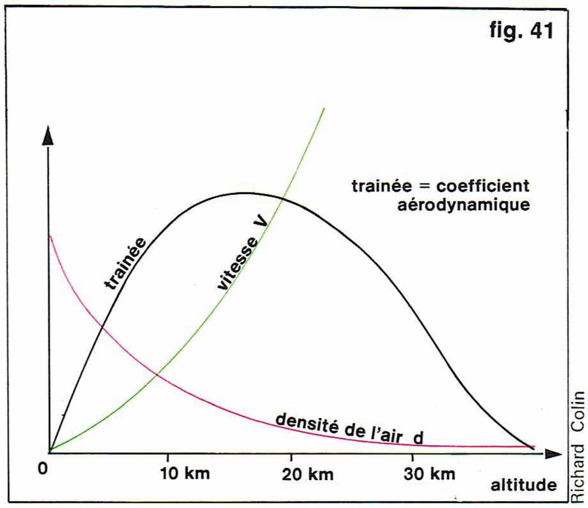

◄ Figure 41 : tir vertical d'une fusée.

— si celui-ci commence à se déplacer dans le vide, même à une vitesse initiale différente de zéro, les termes *gt* et V_d sont nuls, et il faudra additionner à la vitesse finale V la vitesse initiale que possédait le missile avant l'entrée en fonctionnement des appareils propulseurs ;

— si le missile part de la Terre, on appliquera la formule complète après avoir calculé la valeur de V_d en fonction des caractéristiques de la trajectoire prévue ;

— si, enfin, le missile part de la Lune, V_d sera égal à zéro à cause de l'absence d'atmosphère, et *g* prendra la valeur caractéristique qu'il a sur la Lune.

Il convient donc de noter que les conditions locales telles que la proximité d'une planète et la présence d'une atmosphère ont toujours pour effet de diminuer le rendement d'un missile ; elles introduisent des facteurs qui en réduisent la vitesse finale. Les autres conditions restent inchangées : rapport de masses, vitesse d'expulsion des gaz, température de combustion à l'intérieur des chambres.

Dans la quasi-totalité des cas, les conditions locales exercent une influence notable, car le missile porteur de corps cosmiques artificiels part de la Terre ou de la Lune (comme dans le cas d'*Apollo* ou de *Luna* 16). Il en sera de même, dans l'avenir, quand seront mises au point les explorations de Mars ou de Vénus, avec retour sur la Terre. Il sera alors nécessaire d'améliorer les performances du missile.

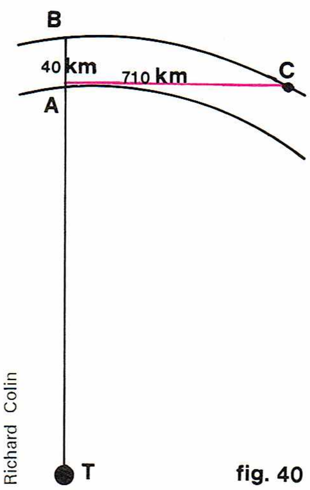

▲ *Figure 40 : tir horizontal d'une fusée.*

Tir horizontal, tir vertical

Pourrait-on imaginer de tirer la fusée horizontalement ? On sait que la densité de l'atmosphère est pratiquement nulle à 40 km d'altitude. Avant d'être hors de l'atmosphère, la fusée tirée horizontalement (*fig.* 40) aurait à parcourir AC, au lieu de AB = 40 km, dans le cas d'un tir vertical. Le diamètre terrestre étant de 12 735 km, on voit que $AC^2 = 12\,735 \times 40$, donc AC = 710 km : la fusée aurait ainsi à faire un parcours dix-huit fois plus long que si elle était tirée verticalement. La vitesse augmentant très vite avec la combustion des propergols (dans la *Saturne V*, 2 007 tonnes sont brûlées en 150 secondes), on peut en conclure sans calcul que la traînée et l'échauffement deviendraient vite excessifs. La fusée retomberait sur Terre.

Le tir vertical a donc été retenu ; il permet de traverser le plus vite possible l'atmosphère et d'échapper ainsi aux effets de la traînée, dont la valeur est proportionnelle à la densité de l'air et au carré de la vitesse, avec un coefficient de proportionnalité qui dépend de l'aérodynamisme de la fusée (*fig.* 41).

Comme la densité de l'air est maximale au sol, on limite l'accélération au départ afin d'éviter une traînée trop vite excessive puisqu'elle croît comme le carré de la vitesse. C'est pour cette raison que l'on voit les fusées s'élever d'abord très lentement. Il suffit de donner une poussée supérieure au poids (elle est de 3 471 t soulevant un poids de 2 902 t au décollage, soit 1,2 son poids pour la fusée *Saturne V*).

Cependant, la quantité de propergols brûlés chaque seconde est énorme au départ (13 t/s pour *Saturne V*).

◄ *Gigantesque et puissant vecteur spatial* Saturne V *a permis la mission* Apollo *et la conquête de la Lune ; ici, il vient d'être transporté sur sa rampe de lancement. Complété par la capsule* Apollo, *il a une hauteur totale de 110 m, et le seul premier étage peut fournir une poussée de 3 884 434 kg.*

La masse totale s'allège d'autant, et, comme la poussée reste constante, la vitesse s'accroît suffisamment vite pour que, malgré la diminution de la densité de l'air, la traînée augmente rapidement. La poussée est calculée pour que la traînée atteigne sa valeur maximale à une altitude d'environ 15 km. Ensuite, la densité tend à s'annuler vers 40 km d'altitude. La traînée suit évidemment la même évolution.

Désormais, la fusée, en position verticale, n'est plus soumise qu'à deux forces verticales de sens opposé, la poussée et son propre poids. Or on a vu ci-dessus que, si la gravité diminue quand on s'éloigne de la Terre, elle ne le fait que très lentement dans la zone qui correspond à l'atmosphère. Il faut atteindre la distance de six rayons terrestres, soit une altitude de : 6 370 × 5 = 31 850 km, pour que la pesanteur soit réduite à 1/36 *g*. A l'altitude de 40 km, elle a presque la même valeur qu'au sol. Elle freine donc considérablement l'essor de la fusée.

L'espace

Du point de vue astronautique, l'espace commence là où la densité de l'air est devenue suffisamment faible pour que la traînée puisse être considérée comme négligeable. En fait, il ne s'agit pas d'atteindre le vide absolu qui n'existe pas dans le système solaire. Il reste toujours, même dans les zones les plus éloignées de tout astre, au moins quelques atomes au centimètre cube, mais ce n'est pas gênant pour un astronef.

A quel moment la traînée devient-elle négligeable? Pour l'estimer, il faut considérer sa valeur qui est donnée par la formule $T = KdV^2$, où K est un coefficient de proportionnalité qui est fonction de l'aptitude aérodynamique de l'objet qu'on lance, *d* la densité de l'air, et V la vitesse. Cette formule montre qu'une traînée négligeable à petite vitesse peut devenir importante à vitesse élevée. On ne saurait donc définir de limite à l'espace qu'en tenant compte de la vitesse. Ainsi, on dira que la traînée devient négligeable à 180 km d'altitude pour les vitesses habituelles de satellisation de 8 km/s, mais qu'un corps animé d'une vitesse de 600 km/s est déjà très sérieusement freiné à cette altitude. On estime qu'à 1 000 km d'altitude un corps animé d'une vitesse de 12 000 km/s subirait une résistance égale à celle que l'atmosphère oppose à 5 000 m d'altitude à un corps animé d'une vitesse de 10 km/s.

Pour obtenir la loi fondamentale, nous n'avons fait aucune hypothèse sur le débit des gaz. Dans la partie verticale de l'ascension, on s'arrange pour que ce débit soit à peu près constant : la poussée reste donc constante.

On rend les effets de la densité de l'air minimaux en diminuant le plus possible la poussée au décollage. Dès 40 km d'altitude, le terme V_d de la formule corrigée peut être considéré comme négligeable. A partir de ce moment, l'étude de la propulsion verticale se réduit à celle des deux forces antagonistes : la poussée constante (égale, dans *Saturne V* par exemple, à 1,2 fois le poids initial) et la force de pesanteur, qui diminue au rythme — considérable — de la diminution des propergols brûlés.

La résultante de ces deux forces croît donc rapidement avec l'ascension. Elle est égale à la force d'inertie, produit de la masse par l'accélération. La diminution rapide de la masse entraîne une augmentation très rapide de l'accélération, qui peut aller de 0,5 *g* au départ à 50 *g* pour le dernier étage. Mais il est évident qu'il ne s'agit là que de fusées non habitées : les astronefs transportant des passagers ne doivent pas dépasser 6 *g*.

Pendant la phase de propulsion verticale, en ne tenant plus compte de V_d qu'on a minimisé le plus possible et qui tend naturellement vers zéro lorsque l'altitude augmente, l'accroissement de vitesse reste diminué du facteur *gt*, dans lequel *t* est, en secondes, le temps de combustion. Au temps de 120 s, par exemple, correspondra une diminution importante de la vitesse fournie par l'étage : 1,200 km/s environ.

En supposant le débit constant, ce qui est très proche de la réalité, on peut déterminer l'altitude maximale qu'atteindrait la fusée, et à partir de laquelle elle commencerait à descendre si l'on n'allumait pas un deuxième étage. Cette altitude, dite *de culmination*, est fonction des rapports de masses et de leur différence. A rapport constant, on a intérêt à augmenter le plus possible la masse de l'étage si l'on veut satelliser de grosses masses. Cela explique la course aux fusées de plus en plus lourdes.

LA FUSÉE - LA TRAJECTOIRE AU DÉPART - LA LOI D'ASSIETTE

La fusée, on l'a vu précédemment, a des positions bien définies en deux points de son trajet :

— elle est verticale au départ afin de traverser le plus rapidement possible les couches denses de l'atmosphère ;

— elle doit être perpendiculaire à la ligne qui la joint au centre de la Terre au moment où elle est mise sur orbite terrestre.

Parmi les raisons exposées plus haut, qui imposent de mettre la fusée sur orbite terrestre avant de la lancer dans l'espace, il y en a au moins deux qui sont primordiales. Quand on veut lancer dans l'espace des astronefs habités ou des sondes spatiales, il s'agit d'engins d'un prix exorbitant; bien plus, pour les premiers, où est en jeu la vie des cosmonautes, on ne peut pas se permettre la moindre erreur ni sur l'instant du départ, ni sur le point d'injection qui sera le périgée, car sa position conditionne celle du grand axe de la courbe conique que va suivre l'engin, ni enfin sur la vitesse initiale qui doit être rigoureusement perpendiculaire à la ligne qui joint l'engin au centre de la Terre.

La fusée, en partant de la Terre, est soumise à de nombreuses influences, et l'on ne peut pas assurer que les conditions énumérées ci-dessus soient toutes remplies pour une fusée directement envoyée dans l'espace. L'instant du départ peut, par exemple, être retardé par un violent orage, car l'atmosphère est traversée de vents variables (et même si l'on a mesuré ces vents avant le lancement, rien ne peut assurer qu'ils seront les mêmes, en force et en direction, quelques instants après) ; ou bien, dès le départ, a pu se révéler une défectuosité interne, que l'on peut corriger à distance ou dont l'effet peut être annulé. En plaçant la fusée sur orbite, en lui laissant parcourir autant d'orbites qu'il est nécessaire, on se donne le temps de mesurer avec précision ses caractéristiques, de corriger d'éventuelles défectuosités soit à distance, soit par l'intervention sur place des cosmonautes; on peut enfin déclencher à la seconde précise, au point et dans la direction voulus, l'injection sur la trajectoire libre. Notons enfin que ces précautions n'ont pas la même rigueur pour les fusées d'expérience destinées à opérer à distance moyenne; la fiabilité de techniques largement éprouvées permet de les lancer directement dans l'espace.

Voyons comment la fusée peut passer de sa position verticale au départ à sa position horizontale sur orbite. Cette question doit être examinée en gardant en tête ce qui est le leitmotiv de tout lancement : pour une quantité d'énergie bien définie, obtenir à l'emplacement voulu la charge utile maximale.

Quand la fusée s'élève du sol jusqu'à l'altitude de l'orbite choisie, nous avons admis que la décroissance de l'accélération de la pesanteur reste négligeable. Quelle que soit la trajectoire suivie ou la position de la fusée dans l'espace, elle reste attirée vers le centre de la Terre par la force *mg* appliquée à son centre de gravité. *g* est donc considérée comme constante sur ce parcours, tandis que *m* diminue très rapidement.

Considérons une fusée dont la trajectoire reste verticale (*fig.* 42) :

1. Au sol, la poussée F et le poids *mg* sont verticaux, de sens contraire et appliqués au centre de gravité. La vitesse est nulle. La valeur de F est comprise entre 1,2 et 1,5 *m*.

2. La fusée commence à prendre de la vitesse. Elle crée une traînée T qui s'ajoute au poids, mais F croît très vite.

3. La fusée atteint entre 30 et 40 km d'altitude. La densité de l'air tend vers zéro. La traînée disparaît.

4. Le combustible est épuisé. La poussée s'annule. La fusée continue sur sa lancée, mais elle est freinée par son poids. Sa vitesse décroît.

5. La vitesse s'annule. La fusée atteint son altitude maximale z_0.

6. La fusée sans vitesse verticale ni horizontale est en équilibre quelconque. Entraînée par son poids, elle bascule et reprend de la vitesse en descendant. Si *g* est considérée comme constante, *m* décroît sans cesse avec la consommation du combustible, le poids *mg* décroît donc de **1** à **4**; il est ensuite constant.

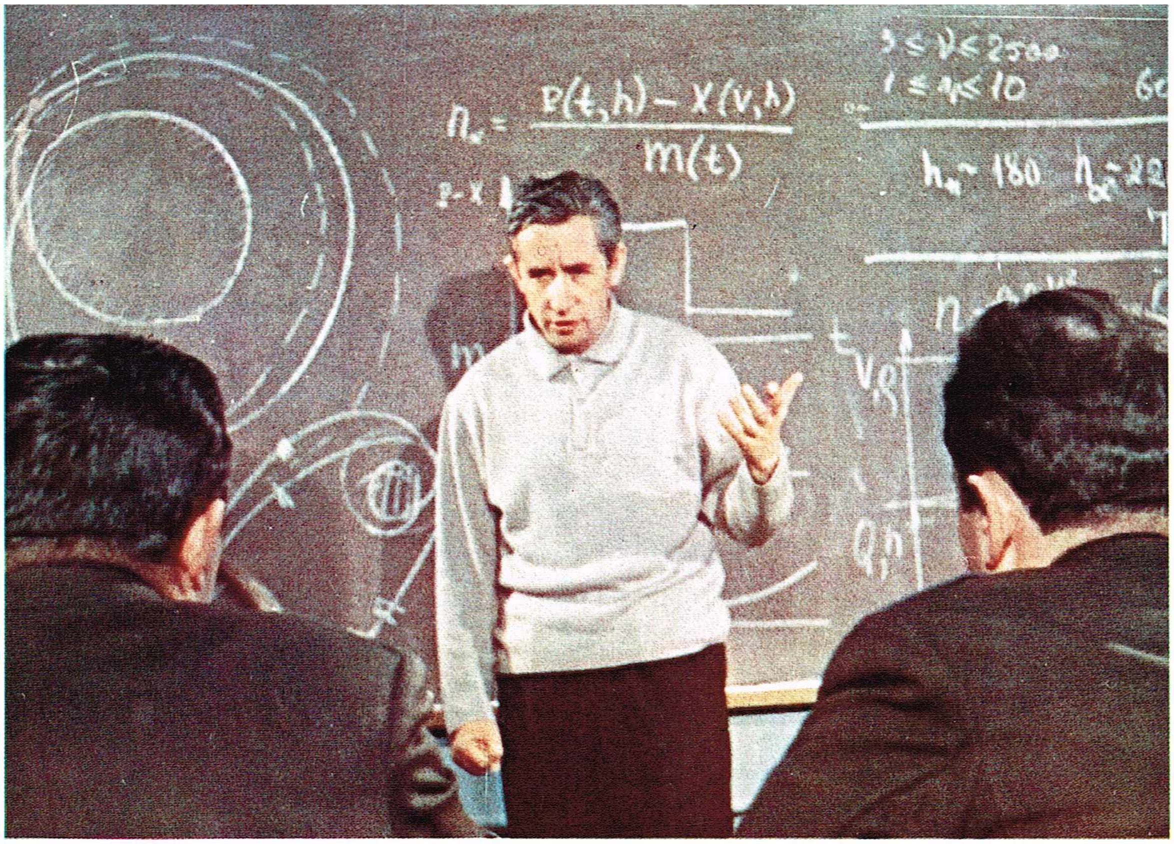

◄ *Konstantin Féoklistov fait aux futurs cosmonautes un cours sur les aspects théoriques du vol dans le cosmos (1965).*

Photo A.P.N.

▼◄ *Figure 42 : stades successifs du lancement vertical d'une fusée (voir développement dans le texte). Figure 43 : trajectoire incurvée permettant à la fusée d'être en position horizontale quand elle arrive sur sa trajectoire.*

Voyons ce qui se passe si, par des procédés que nous allons définir plus loin, on arrive à incurver la trajectoire de façon qu'elle soit horizontale au moment où la fusée parvient à l'altitude de l'orbite choisie ; c'est, par exemple, 185 km pour la fusée *Saturne V*. A cette altitude, la vitesse de satellisation est de 7,8 km/s environ (*fig.* 43).

La densité de l'air étant devenue presque nulle à l'altitude de 30 km, la raison qui avait fait préférer l'essor vertical pour traverser rapidement les couches denses de l'atmosphère a disparu. On commence à incliner la fusée à partir de cette altitude, et l'on désigne par *angle d'assiette* α l'angle que fait l'axe de la fusée avec l'horizontale. Le poids mg est vertical, mais la force qui donne l'ascension verticale est devenue $F \sin \alpha - mg$. Après disparition de la traînée, cette force était $F - mg$ dans le cas précédent de l'ascension restée verticale. Comme $(F \sin \alpha - mg) < (F - mg)$, pour un même temps de combustion, le point de culmination, qui avait atteint l'altitude z_0 avec l'ascension verticale, se trouvera forcément à une altitude moindre avec une trajectoire incurvée.

Il reste à estimer si l'on a beaucoup perdu dans ce dernier cas, en raisonnant en termes d'énergie totale et non d'altitude, puisque aussi bien notre problème est d'arriver à placer une charge utile maximale.

Dans le premier cas, au point de culmination l'énergie cinétique de la fusée est nulle ; son énergie totale est égale à son énergie potentielle :

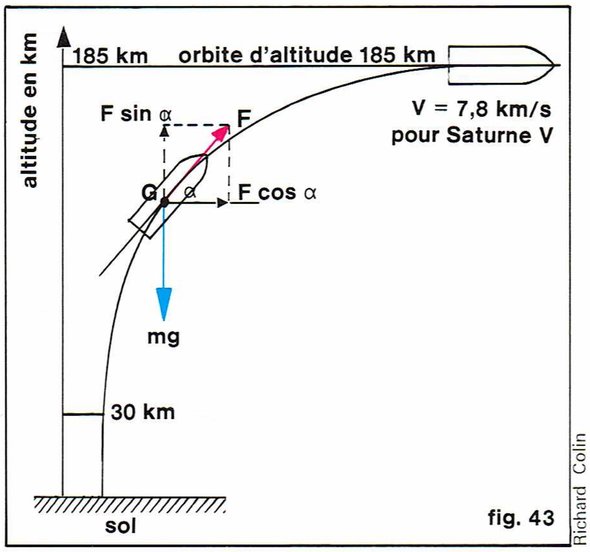

fig. 43

Richard Colin

$$E_p = -G \frac{mM}{R_0 + z_0}$$

avec G constante d'attraction universelle, m masse de la fusée, M celle de la Terre, R_0 rayon terrestre, z_0 altitude de culmination.

Dans le deuxième cas, l'énergie cinétique n'est pas nulle, car la fusée est poussée horizontalement par la force $F \cos \alpha$. L'énergie totale de la fusée est alors :

$$E = -G \frac{mM}{R_0 + z_1} + \frac{1}{2} mV_2$$

où z_1 est l'altitude du point de culmination, $z_1 < z_0$.

La loi d'assiette

On démontre par le calcul que l'on peut définir une loi de variation de α, appelée **loi d'assiette**, pour laquelle la projection de la vitesse sur l'horizontale est maximale, avec une poussée constante. La valeur de α est fonction du temps. Quand on a déterminé cette loi, on cherche à l'optimiser par approximations successives afin d'augmenter l'altitude de culmination. L'aide des machines électroniques se révèle pour cela plus que précieuse.

Le calcul et l'expérience montrent alors que l'on a toujours avantage à incliner la fusée. La somme de son énergie potentielle et de son énergie cinétique, avec une loi d'assiette optimisée, est toujours supérieure à la seule énergie potentielle de la fusée qui culmine en s'élevant à la verticale.

On arrive ainsi à améliorer les performances de 35 % pour des pertes d'altitude de culmination qui ne sont jamais supérieures à 6 %.

Le choix de l'envol vertical ne se justifierait que si la fusée, parvenue à son point de culmination, à vitesses horizontale et verticale nulles, pouvait être convenablement orientée pour regagner, dans la différence d'altitude (6 %) qui sépare les deux points de culmination $(z_0 - z_1)$, une vitesse horizontale égale à celle qu'a fait naître la composante $F \cos \alpha$ dans le cas du vol incurvé. Le calcul montre qu'on en est loin.

On comprend d'ailleurs intuitivement que la méthode ne serait pas bonne, qui consisterait à reprendre le guidage de la fusée alors que, parvenue sans vitesse à son point de culmination, elle serait en équilibre instable, pour la réorienter afin de l'injecter sur orbite.

Stabilité de la fusée

Lorsqu'on incline la fusée, elle suit un moment la direction de la vitesse qu'elle avait avant d'être inclinée, puis, comme la direction de la poussée a changé, cette direction va se modifier progressivement. Voyons ce qu'il

fig. 42

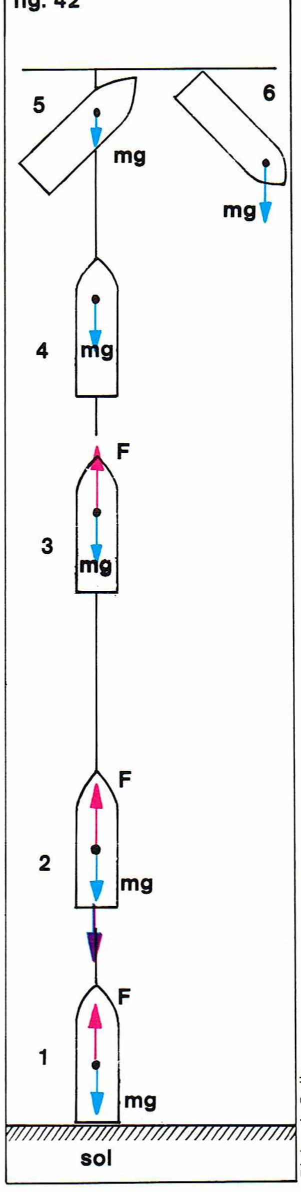

Richard Colin

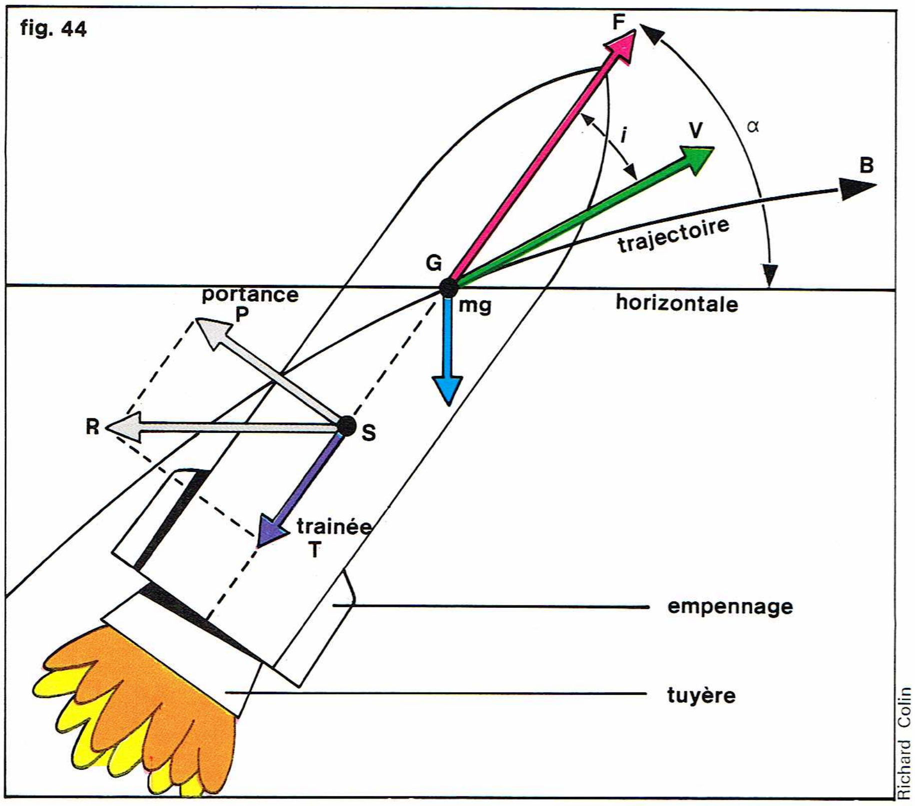

▲ *Figure 44 : forces agissant sur une fusée dans une position quelconque.*

▼ *Séparation en vol : le premier étage de l'énorme* **Saturne V** *est éjecté trois minutes après le départ de cap Kennedy. L'altitude est d'environ 85 km et la vitesse de 9 000 km/h. Plus tard, la caméra sera éjectée à son tour et récupérée dans l'Atlantique.*

advient pendant la traversée de l'atmosphère si des causes imprévues viennent modifier la trajectoire désirée.

L'étude de cette trajectoire conduit à examiner d'abord quelles forces agissent sur la fusée dans une position quelconque. Ce sont (*fig.* 44) :

— au centre de gravité G, la poussée F, le poids *mg* ;

— en un point S appelé foyer, la portance P, la traînée T.

L'angle que fait l'axe de la fusée avec la direction de la vitesse GV est l'angle *i* d'incidence.

L'angle que fait l'axe de la fusée avec l'horizontale est l'**angle d'assiette** α.

G se déplace pendant le vol vers la pointe de la fusée, au fur et à mesure que les premiers étages brûlent leurs combustibles et sont d'ailleurs largués.

S se déplace vers la pointe quand la vitesse augmente.

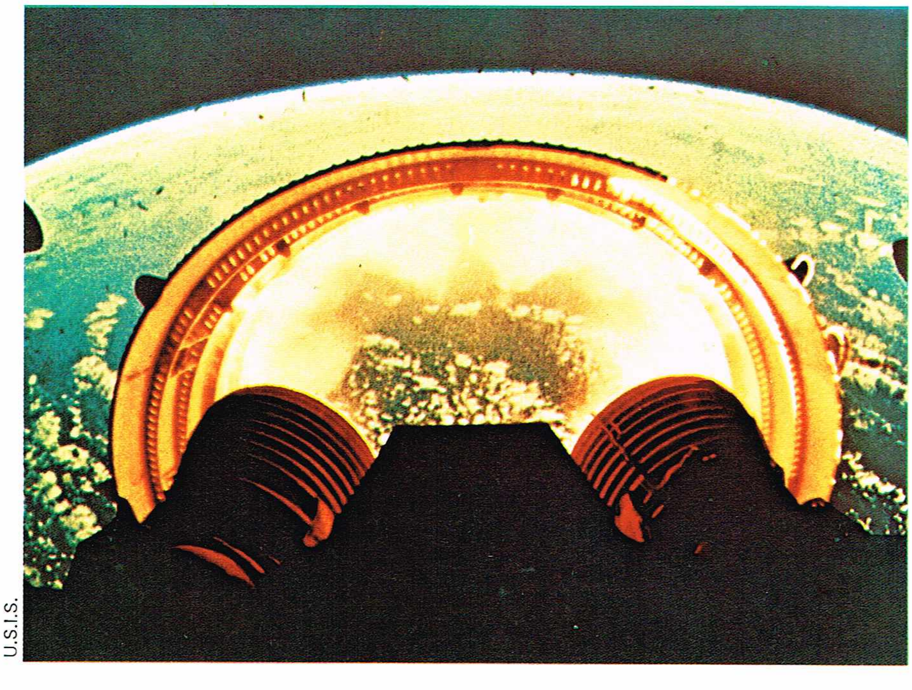

La position de S dépend de l'écoulement des filets d'air, qui arrivent sur la fusée en sens inverse de V et à cette vitesse. Elle est déterminée par la forme de la fusée, sa vitesse et la valeur de l'angle d'assiette α.

La traînée et la portance ont une résultante R qui est appliquée en S.

Si S est au-dessous de G, le couple C = P × GS tend à ramener l'axe de la fusée dans la direction de la vitesse, donc à annuler l'angle *i*. A ce moment, la portance est nulle, et l'effet de l'air se réduit à la traînée qui freine la poussée. On dit que *la fusée est stable*. Dans le cas contraire, S au-dessus de G, la fusée chavire sur sa trajectoire.

Comme l'on veut imposer à la fusée de suivre la loi d'assiette, on ne peut pas lui laisser une trop grande stabilité naturelle qui viendrait à l'encontre des modifications qu'on doit apporter à la trajectoire. Pour arriver à ce résultat, on essaie de rendre GS le plus faible possible pendant l'ascension. Ce n'est pas facile, car G et S changent sans cesse de position.

Quand la vitesse croît jusqu'à 330 m/s (à la température ambiante), S se déplace vers la tuyère, il revient ensuite vers la pointe de la fusée. A vitesse constante, S recule si l'incidence augmente.

G se déplace toujours dans le même sens, vers la pointe de la fusée, puisque la vidange des propergols se fait par l'arrière. Une période stable est plus facile à obtenir dès que l'on atteint les vitesses supersoniques, puisque, à ce moment, S et G se déplacent simultanément vers l'avant. Au départ, l'instabilité qui pourrait résulter du fait que S est plus près de la pointe est en général compensée par des empennages ajoutés près de la tuyère.

La poursuite de la loi d'assiette impose que l'angle *i* ne soit jamais nul. Comme il est très difficile de garder le couple C le plus faible possible, on utilise des jets de gaz latéraux ou des déviations de tuyère. On soumet ainsi les grandes structures des fusées géantes à des efforts considérables. Pour éviter qu'elles ne se déforment, il faut alors les renforcer, donc les alourdir.

On a préféré choisir une solution qui ne correspond pas parfaitement à la loi d'assiette. On garde l'incidence nulle, en donnant une très grande stabilité à l'engin. La courbure de la trajectoire est alors obtenue par gravité, en laissant la fusée obéir à la force centripète *mg* cos α créée par l'attraction terrestre. On aboutit ainsi à une solution imparfaite mais très simplifiée. C'est celle qui est utilisée pour la fusée *Saturne V*.

Optimisation de la poussée

Nous avons vu plus haut que les grands axes des ellipses parcourues par un satellite augmentent extrêmement vite pour de faibles variations de la poussée. La précision avec laquelle est obtenue la vitesse horizontale au point de culmination est donc d'une importance capitale. Elle doit être de l'ordre de *un dix-millième*. Or la vitesse dépend non seulement de l'assiette de la fusée, mais aussi, évidemment, des poussées successives qu'elle reçoit de ses différents étages.

Avec le **premier étage**, on garde une accélération faible pour éviter une traînée excessive. Il en résulte au moins un inconvénient certain : le freinage dû au poids s'exerce plus longtemps. L'idéal serait d'augmenter progressivement la poussée à mesure que diminue la densité de l'air. En fait, la poussée initiale est énorme. Les matériaux et la chambre de combustion ont été calculés pour y résister. On ne peut guère augmenter la poussée. On a donc renoncé à agir sur le débit qui reste constant pendant toute la durée de combustion du premier étage.

Le **deuxième étage** s'allume au moment où la densité de l'air est presque nulle. On accélère alors fortement la fusée, réduisant le temps pendant lequel s'exerce encore un freinage dû au poids.

Le **troisième étage** agit quand la fusée va devenir horizontale. Le poids, équilibré par la force centrifuge, n'agit plus.

Pour obtenir avec finesse la vitesse au point d'injection sur l'orbite, on a intérêt à adopter une faible poussée de longue durée. L'erreur commise sur l'instant où la poussée doit être annulée sera d'autant plus petite.

Le *tableau* IV donne les caractéristiques des principales fusées américaines et soviétiques.

Tableau IV

Caractéristiques des fusées américaines et soviétiques entre 1949 et 1969

	Génotype	Dérivés	Nombre d'étages	Poussée (en tonnes)	Charge utile (en tonnes) sur orbite terrestre	sur orbite lunaire	sur orbite planétaire	Premiers lancements
Fusées américaines		Wac-Corporal + V-2	2					1949 Atteint l'altitude de 402 km
		Viking						1re fusée sonde spécifique américaine
		Fusées sondes allant de l'Aircas à la Javelin	1 à 3					Types divers allant pour la masse de 5,5 kg à 136 kg et pour les altitudes atteintes de 61 à 925 km
	V-2	Redstone	1					1957
	V-2	Jupiter C	1 + 2					1958 1er satellite américain sur orbite
	Viking	Vanguard	3	12,3 + 3,4 + 1,1	de 0,001	à 0,045		1958 1 échec - 3 succès
		Scout	4	0,070				1960 Place satellite de faible masse
		Thor	1	48,5				Missile moyenne portée
	Thor	Thor-Agena						
	Thor	Thor-Able-Star						
	Thor	Thor-Delta	2	48,5 + 3,4	0,270	+ 0,045		
		Atlas						1958 1er missile intercontinental (10 000 km)
	Atlas	Atlas-Mercury	2	163				
	Atlas	Atlas-Agena	2	172				
	Atlas	Atlas-Centaur	2	180,5				1959 Programme Mercury
		Titan I						1960 Missile intercontinental
	Titan	Titan II						Retenue pour programme Gemini
	Titan	Titan IIIC	3	642 + 240 + 45,4	{ 11,8 11,8	+ 2,6	+ 7,3	Avec étage supplémentaire Avec un autre étage supplémentaire
	Saturne	Saturne IB	2	725 + 90	15,5			1966
	Saturne	Saturne V	3	3 400 + 453,5 + 90	109	41		1967
Fusées soviétiques	Missile intercontinental	Missile balistique intercontinental	2	512	1,4			1957 août
		Spoutnik	2	512	1,4			1957 octobre
		Luna et Vostok type I	2 + 1	512 + 90				1959 janvier
		Vostok habité	2 + 1	512 + 90	6,2	1,6	0,73	1961 avril
		Voskod - Soyouz	2 + 2	512 + 90 + 4	8,2	2,6	1,14	1964 octobre
	Missile de portée moyenne	Sandal	2		0,54			1962 Satellite scientifique et militaire
		Skean	2 + 1		3,40			1964 Satellite de navigation
	De types très différents	Proton	2	1 360 + 450	12,30			1967
		Proton	2 + 2		27,2			1968
		Lanceur lunaire	?	4 500	147,0	56,0	{ Mars 22,5 Vénus 27,0	1969 ? Sans doute condamné N'a pas été mis en service

Nota : pour les fusées américaines il arrive que les chiffres varient quelque peu suivant les sources d'information ; seules ont été notées les informations qui ont pu être recoupées.

▶ *Missile antimissile terre-air* Nike Zeus *(États-Unis) à grand rayon d'action.*

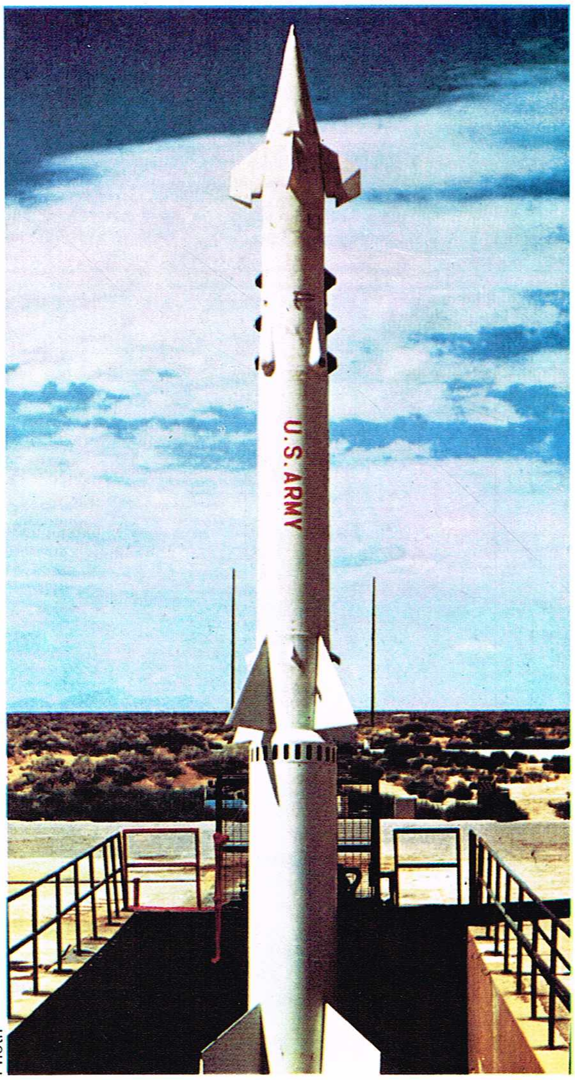

Photri

CONTROLE DE LA TRAJECTOIRE DE LA FUSÉE

Les fusées et les missiles ont, suivant leur type, à parcourir des trajectoires de nature différente : balistiques, orbitales ou de fuite. Dans certains cas, ils sont intégralement guidés à partir du sol. Dans d'autres, ils assurent leur autoguidage sur une trajectoire préétablie et peuvent, sur des ordres envoyés du sol, la corriger. Enfin, il existe des fusées totalement autoguidées (missiles anti-aériens sol-air par exemple, qui peuvent poursuivre une cible en mouvement).

Donc, une fusée doit disposer en premier lieu d'un système capable de lui imprimer des changements de trajectoire en direction et en orientation, et parfois aussi des changements de vitesse. On doit ensuite disposer d'un système de contrôle apte à donner les ordres nécessaires à l'annulation des écarts, si la fusée ne suit pas la route prévue.

Les moyens qui permettent de contrôler la trajectoire d'un missile, et éventuellement de la modifier, sont assez simples en ce qui concerne leur principe de fonctionnement. La méthode classique consiste à disposer en couronne autour de la base de la fusée un système de propulseurs beaucoup plus petits que les propulseurs principaux. Ces propulseurs, appelés aussi *verniers* parce qu'ils sont destinés à la régulation fine de la marche de la fusée, sont orientables. Ils peuvent être allumés et éteints à plusieurs reprises, et développer ainsi une poussée plus ou moins intense. A cet effet, leur propergol doit être de type liquide. S'ils sont actionnés avec un jet parallèle à celui des propulseurs principaux, ils ajoutent une poussée supplémentaire permettant de doser de manière précise la poussée globale de la fusée. S'ils sont appelés à développer une poussée non parallèle à celle des propulseurs principaux, ils provoquent la rotation de tout le corps du missile autour de l'un de ses axes barycentriques, de sorte qu'après la manœuvre, la poussée principale se trouve appliquée dans une direction différente.

Les moteurs verniers (*fig.* 45) sont indispensables pour assurer la finesse d'une correction, finesse qu'on ne pourrait pas obtenir par les seuls moteurs de propulsion de trop grande puissance : dans ce cas, en effet, un réglage très précis de la poussée est impossible.

Ils permettent également d'effectuer des opérations secondaires indispensables : ils freinent, par exemple, un étage de la fusée au moment où, ses propergols étant épuisés, il doit se séparer de l'ensemble. Le freinage assure une franche séparation. Ils peuvent aussi servir à créer une pesanteur artificielle pour éviter que les propergols liquides en état d'apesanteur ne se rassemblent hors de portée des canalisations de pompage. Pendant les périodes de vol non propulsé, les moteurs verniers jouent enfin un rôle essentiel en contrôlant l'assiette en tangage, en lacet et en roulis de la fusée.

Nous avons vu que des manœuvres de ce genre sont indispensables au cours des lancements spatiaux. L'attitude de la fusée, pour les gros vecteurs, est le plus souvent corrigée pendant l'ascension, par l'orientation de la tuyère principale ; cette manœuvre est réalisée en plusieurs étapes, par action de jets directionnels, soit pendant la phase active des propulseurs principaux, soit pendant la phase de non-activité de ces propulseurs.

Dans le cas de vecteurs de grandes dimensions, à propergol solide, il est possible de les équiper en jets directionnels périphériques à propergol liquide, ou disposés de manière à atteindre le jet principal en le déformant et en lui faisant ainsi développer pendant le temps voulu une poussée oblique par rapport à l'axe de la fusée.

Les instruments du guidage

Avant d'examiner comment est guidée la fusée, voyons suivant quels principes sont construits les instruments qui permettent son guidage. Il s'agit des gyromètres pour l'évaluation des angles, et des accéléromètres pour celle des accélérations.

Gyromètre

Le gyromètre est un gyroscope ou, si l'on préfère, une toupie tournant très vite. Rappelons sa propriété essentielle (*fig.* 46) : si l'on incline le bâti horizontal ABCD sur lequel tourne la toupie au point 0 (d'un angle qui ne soit pas excessif), la toupie continue de tourner, en 0, sur le bâti incliné A'B'C'D', mais son axe décrit un cône

fig. 45

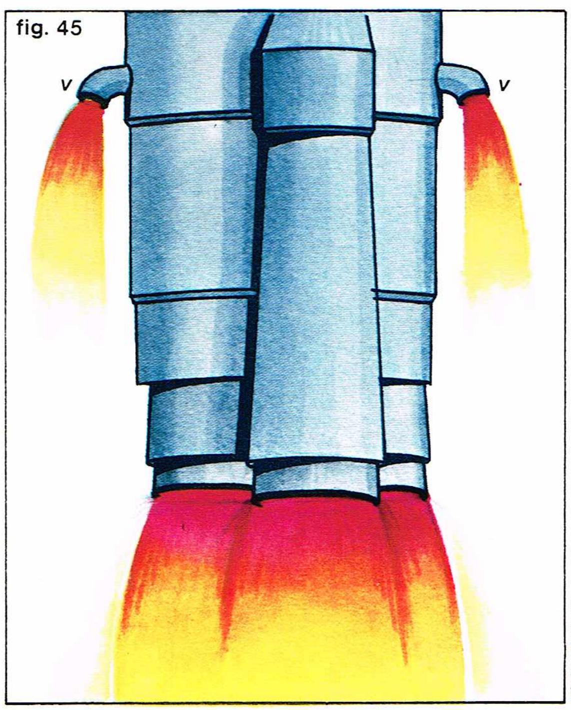

Richard Colin

▶ *Figure 45 : les moteurs verniers (v) sont indispensables pour assurer la finesse d'une correction qu'on ne pourrait pas obtenir par les seuls moteurs de propulsion de trop grande puissance.*

fig. 46

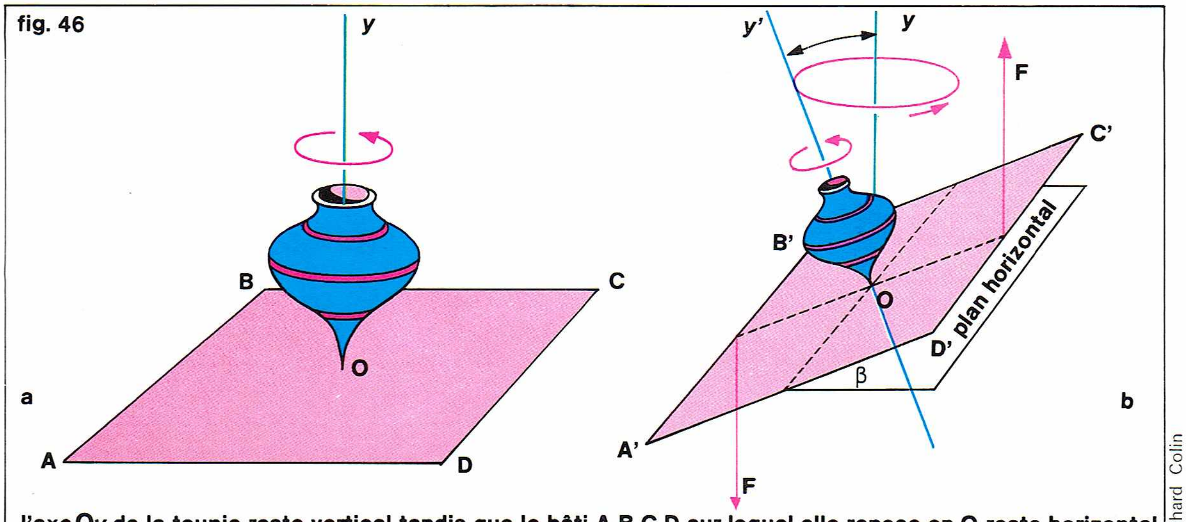

l'axe Oy de la toupie reste vertical tandis que le bâti A B C D sur lequel elle repose en O reste horizontal

◀ ***Figure 46 :*** ***gyromètre*** (a) ; ***si l'on incline le bâti horizontal*** ABCD ***d'un petit angle, l'axe du gyromètre décrit un cône autour de sa direction initiale*** (b).

autour de sa direction initiale dans le même sens que la giration de la toupie.

L'angle de OY' avec OY est différent de l'angle β dont on a tourné le bâti (*fig.* 46b). Il est fonction de la vitesse de rotation de la toupie et du couple (FF) qu'on a appliqué au bâti.

Accéléromètre

Le principe en est très simple (*fig.* 47). Supposons une masse reliée à un bâti solidaire de la fusée par un ressort. Au repos, l'index porté par la masse est placé devant la graduation zéro. Si la fusée subit une accélération, la masse se déplace en sens inverse de cette accélération et en donne la mesure. La précision demandée est très grande, aussi les accéléromètres sont-ils des instruments très perfectionnés. En général, le déplacement de la masse modifie la capacité d'un condensateur, ce qui donne naissance à un courant utilisé pour ramener la masse à sa position initiale. Ce courant est rendu, par des bobines, directement proportionnel aux accélérations. Il peut donc en introduire la mesure dans un ordinateur.

fig. 47

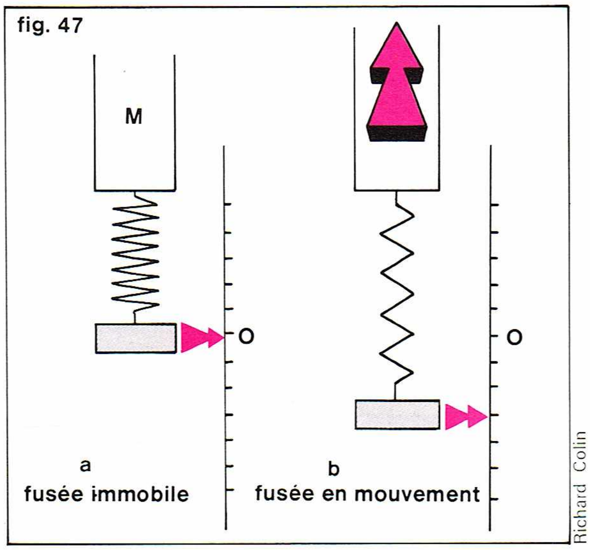

◀ ***Figure 47 : principe de l'accéléromètre ; si la fusée subit une accélération, la masse*** M ***se déplace en sens inverse de cette accélération et en donne la mesure.*** a, ***fusée immobile ;*** b, ***fusée en mouvement.***

Pilotage et guidage de la fusée

Le *pilotage* consiste à contrôler à chaque instant l'*attitude* de la fusée afin qu'elle suive la loi d'assiette théorique calculée d'avance par les ingénieurs et introduite en mémoire, avant le départ, dans le programmateur d'inclinaison.

Le bâti d'un gyromètre est lié rigidement à la fusée, dont il mesure donc les inclinaisons réelles. La mesure est introduite dans le programmateur qui détermine alors l'écart entre l'inclinaison réelle et l'inclinaison idéale, et qui donne des ordres, en fonction de ces écarts, à la tuyère principale, de la façon suivante.

La tuyère montée sur cardan est orientée par des vérins hydrauliques dont la longueur varie sur ordre du programmateur d'*inclinaison*, grâce à l'action de moteurs électriques. Cette action produit un mouvement de vissage ou de dévissage qui modifie les longueurs des tiges de transmission et provoque ainsi la rotation de la tuyère sur son cardan (*fig.* 48).

Inclinée, elle produit un couple de rotation autour du centre de gravité de la fusée. Quand la bonne inclinaison est obtenue en fonction de la loi d'assiette, la tuyère revient dans l'axe. Cette opération constitue le **pilotage.**

Mais, en restituant à tout instant à la fusée l'inclinaison idéale qu'elle doit avoir, on ne résout qu'une partie du problème. Les effets de perturbation qu'elle a subis l'ont placée en définitive sur une autre trajectoire que la trajectoire prévue. Si elle continue de suivre fidèlement la loi d'assiette théorique après avoir rectifié son inclinaison, la correction d'angle aura certes été effectuée, mais pas la correction de trajectoire qui demande à la fois une poussée et une nouvelle loi d'assiette, qui est donc à

fig. 48

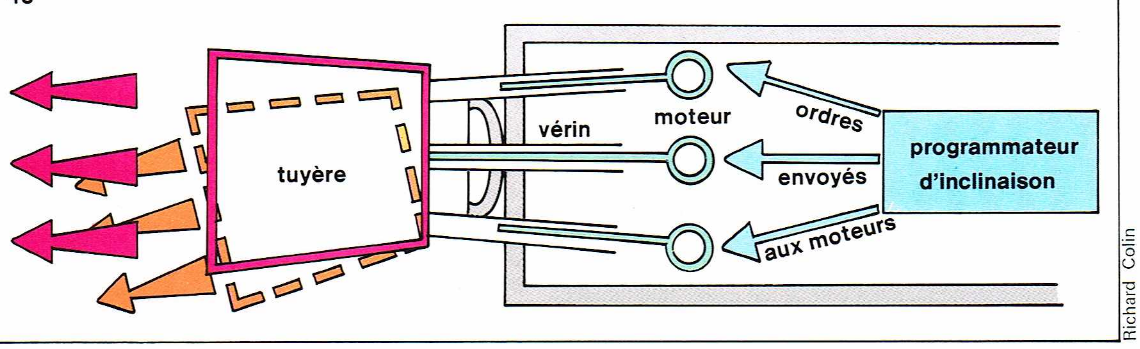

◀ ***Figure 48 : principe du pilotage et du guidage d'une fusée par inclinaison de la tuyère à l'aide de vérins hydrauliques.***

Photri

▲ *Centre souterrain de contrôle lors d'un lancement à cap Kennedy. Au périscope, von Braun.*
▼ *Accéléromètre installé dans l'unité de guidage de la capsule* Apollo. *Cet appareil relève tout écart de la valeur de l'accélération par rapport aux valeurs fixées par le programme et la communique au système de contrôle de la navigation.*

créer à tout instant. Ce rôle est confié à un ordinateur, qui optimise en permanence la loi d'assiette et ordonne les durées de combustion. Cette opération est le **guidage** de la fusée.

Pour y parvenir, il faut :

— connaître la position et la vitesse, en grandeur et en direction ;

— évaluer les écarts entre ces valeurs *mesurées* et les valeurs *prévues* théoriquement, et en déduire les corrections à effectuer ;

— faire les corrections nécessaires en agissant sur la tuyère.

On y parvient de différentes façons.

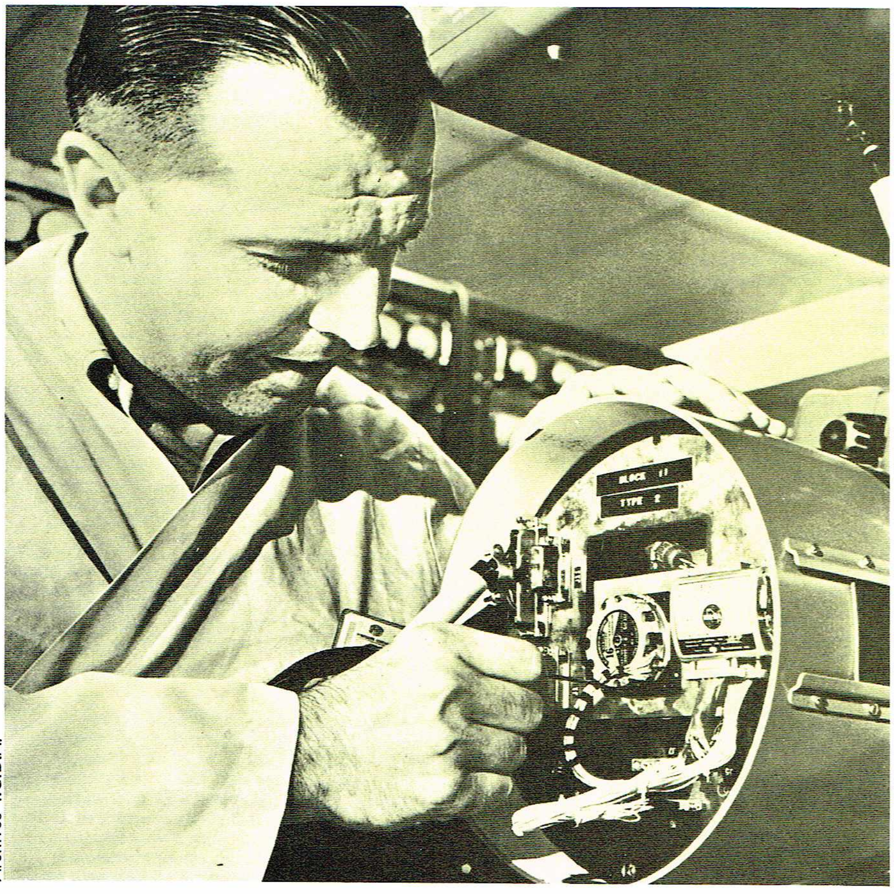

Archives I.G.D.A.

Guidage radio

Des impulsions modulées sur une fréquence radio sont émises vers la fusée, à l'instar d'une émission radar, par une antenne directionnelle de station terrestre, et la fusée les renvoie au sol. La mesure du temps de propagation de l'onde donne la position de la fusée, l'écart de fréquence à l'émission et à la réception, dû à l'effet Fizeau-Doppler, donne sa vitesse. D'autre part, les gyromètres embarqués à bord de la fusée envoient par radio la mesure des angles, donc l'assiette réelle.

A terre, un puissant calculateur possède ainsi tous les éléments lui permettant d'obtenir la trajectoire réelle, qu'il compare à la trajectoire théorique calculée. Il en déduit les corrections à effectuer, les code et les envoie à l'émetteur terrestre. Le récepteur de la fusée les reçoit, les amplifie, les décode et les transmet aux moteurs des vérins de la tuyère.

Le guidage radio est permanent pendant la phase propulsée. Il impose la création de plusieurs stations terrestres dans la direction du lancement, et même d'un très grand nombre s'il existe plusieurs directions de lancement et plusieurs bases. C'est un système trop vulnérable du point de vue militaire, car les ondes de guidage peuvent être brouillées par l'ennemi.

Guidage par inertie

Pour ces raisons, on a cherché à rendre le guidage autonome. C'est ainsi que l'on a réalisé le guidage inertiel, qui est tout entier contenu dans la fusée et absolument indépendant des stations terrestres.

Nous avons vu que, pour contrôler l'attitude, on utilisait un gyromètre dont la plate-forme est liée rigidement à la structure de la fusée. Mais, si l'on rend le bâti du gyromètre indépendant des mouvements de la fusée en le montant sur pivot, on peut lui conserver sa direction initiale malgré un basculement de la fusée : il reçoit un couple opposé au moyen d'un moteur d'asservissement.

Prenons maintenant trois gyromètres définissant trois directions invariables dans l'espace. Montons trois accéléromètres sur leurs bâtis. Ils vont détecter les accélérations suivant les trois directions invariables dans l'espace, donc permettre à un calculateur d'évaluer à chaque instant la valeur de l'*accélération réelle* de la fusée. La vitesse au départ étant nulle, l'addition des accélérations réelles mesurées donne à tout instant la vitesse réelle de l'engin. En opérant de même avec les vitesses, on obtient la position de la fusée.

Le calculateur connaît donc la position, les angles fournis par les gyromètres, et il a en mémoire les paramètres de la trajectoire théorique ; il peut donc comparer trajectoire réelle et trajectoire théorique, évaluer les écarts et ordonner les corrections nécessaires. Tout se passe à l'intérieur de la fusée. Le guidage inertiel, bien que fort délicat et complexe, est très efficace (les senseurs appliqués à la plate-forme d'inertie sont sensibles à des rotations d'un dixième de degré), mais il ne peut tenir compte d'éventuelles perturbations extérieures, notamment du vent latéral, des variations imprévues de la pression atmosphérique et des poches de dépressions, facteurs qui peuvent provoquer des déviations de la trajectoire sans que le système de guidage par inertie les enregistre.

Le système de guidage automatique par inertie est utilisé sur les grandes fusées destinées aux entreprises spatiales et sur les missiles balistiques intercontinentaux. Il peut toutefois être corrigé, pour tenir compte de ce que nous venons d'exposer et d'éventuelles imperfections de fonctionnement, à l'aide d'ordres communiqués par les stations terrestres.

Guidage par système de navigation

Il est possible, grâce à des appareils complexes dérivés des appareils de navigation maritime et aérienne, de doter l'engin de systèmes capables d'élaborer et de fournir des données très précises sur la position, la vitesse et l'orientation de l'engin par rapport au Soleil, à la Lune, et à un groupe d'étoiles fixes. A bord est placée une plate-forme d'inertie qui permet de maintenir toujours « encadré » le système de référence et qui, grâce à des senseurs, donne la position à tout moment du missile en mouvement. En général, ce calcul est effectué immédiatement à bord par un calculateur électronique.

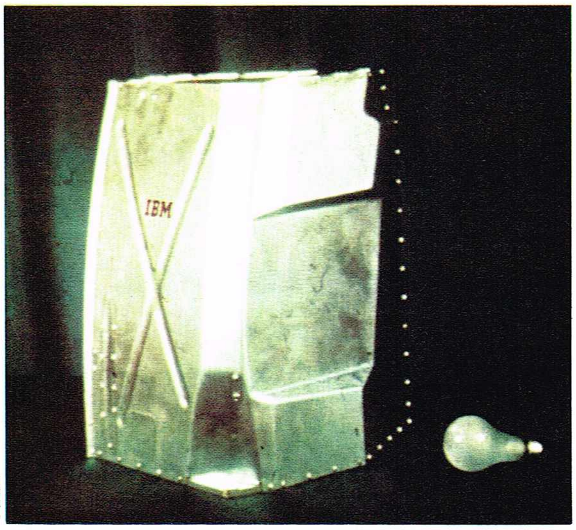

P.R.I.

Ce système de navigation est utilisé dans les fusées destinées aux lancements spatiaux et prend une importance primordiale lorsqu'il s'agit d'accomplir des parcours cosmiques proprement dits, tels que les vols vers la Lune ou vers les planètes. Au-delà d'une certaine distance de la Terre, en effet, l'évaluation de la position, de la vitesse et de la direction du mouvement d'une sonde spatiale ou d'un vaisseau cosmique devient peu sûre ; il est même pratiquement impossible d'évaluer à partir du sol l'orientation du corps cosmique artificiel.

Au cours de nombreux lancements, on a confié à un système de guidage de navigation le rôle d'assurer l'orientation du corps cosmique dans l'espace pour lui permettre d'accomplir certaines manœuvres (alunissage, descente sur Vénus, navigation autour de la Lune, etc.), ou, plus simplement, pour assurer l'orientation correcte des antennes afin de rendre possibles les liaisons radio. Les antennes émettrices et réceptrices situées à bord des corps cosmiques artificiels sont, bien entendu, des antennes directionnelles, car les antennes non directionnelles exigeraient sur de telles distances une trop grande puissance. L'orientation correcte des antennes est donc une condition essentielle pour la réalisation des liaisons radio sur les distances cosmiques.

Les systèmes de navigation travaillent automatiquement : le calculateur envoie au système d'orientation, sous forme d'impulsions électriques, des ordres élaborés à partir des signaux reçus. Ce dernier assure, par la mise en action de jets périphériques, l'orientation correcte en vol du corps cosmique.

Système d'autoguidage

Ces systèmes ont un intérêt purement militaire. Ce sont surtout les missiles sol-air antiaériens qui en sont pourvus. Le missile est muni d'un *dispositif de recherche* ou *chercheur* mobile, qui capte un signal émis par la cible, signal qui peut être représenté par la chaleur (rayons infrarouges) ou par un faisceau de signaux radar. Dans le premier cas, il s'agit d'*autoguidage passif*, car c'est la cible qui émet le signal ; dans le deuxième cas, le signal émis par la cible est un signal réfléchi qui peut être provoqué par une station à terre qui dirige un faisceau radar sur la cible aérienne *(autoguidage semi-actif)*, ou par le missile lui-même qui possède à son bord un radar entièrement autonome *(autoguidage actif)*. Une fois que le dispositif chercheur a capté un signal, un système extrêmement complexe entre en jeu, système qui a pour but d'orienter le missile vers la cible (avion ou missile), même si elle opère des changements de route.

Système de téléguidage

On désigne ainsi les systèmes de guidage à partir du sol grâce auxquels la trajectoire du missile peut être suivie soit à vue, soit par des systèmes radar. On calcule à terre les erreurs par rapport à la trajectoire désirée, on élabore et on codifie les ordres pour la correction de la trajectoire. Il existe plusieurs méthodes, fondées sur différents principes.

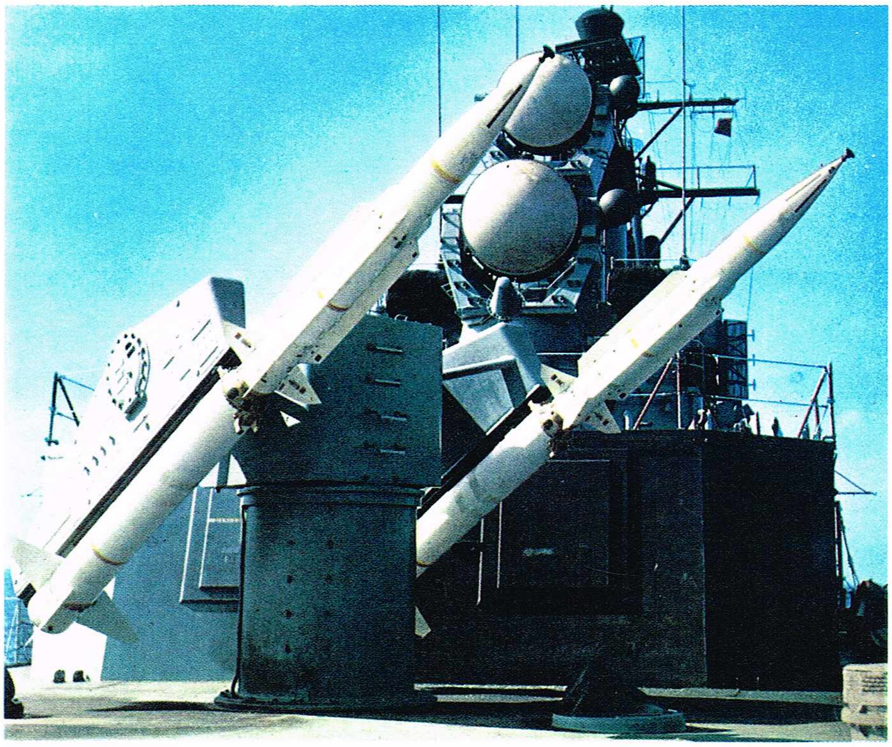

Archives Radaelli

Dans les systèmes de téléguidage proprement dits, on peut télémétrer le missile, c'est-à-dire en définir la position par une séquence rapide, à partir des signaux reçus à terre et provenant de lui. A l'aide de relevés successifs de ce type, opérés à des intervalles très rapprochés, il est possible de reconstruire la trajectoire réelle, de la comparer avec la trajectoire théorique, de calculer les corrections appropriées, de les codifier et de les transmettre au missile. Cette série complexe d'opérations est effectuée automatiquement par des calculateurs électroniques qui analysent toutes les données en quelques fractions de seconde. On emploie des systèmes de ce type dans les bases de lancement des vecteurs spatiaux,

▲ *A gauche, calculateur de la capsule* **Gemini** *(comparé aux dimensions d'une ampoule électrique). A droite, couple de missiles* **Advanced Terrier** *(États-Unis) en position de lancement. On aperçoit au 2e plan deux radars, l'un pour la détection de la cible, l'autre pour le guidage du missile.*
▼ *Antenne de téléguidage au sol, en relation avec la salle de contrôle.*

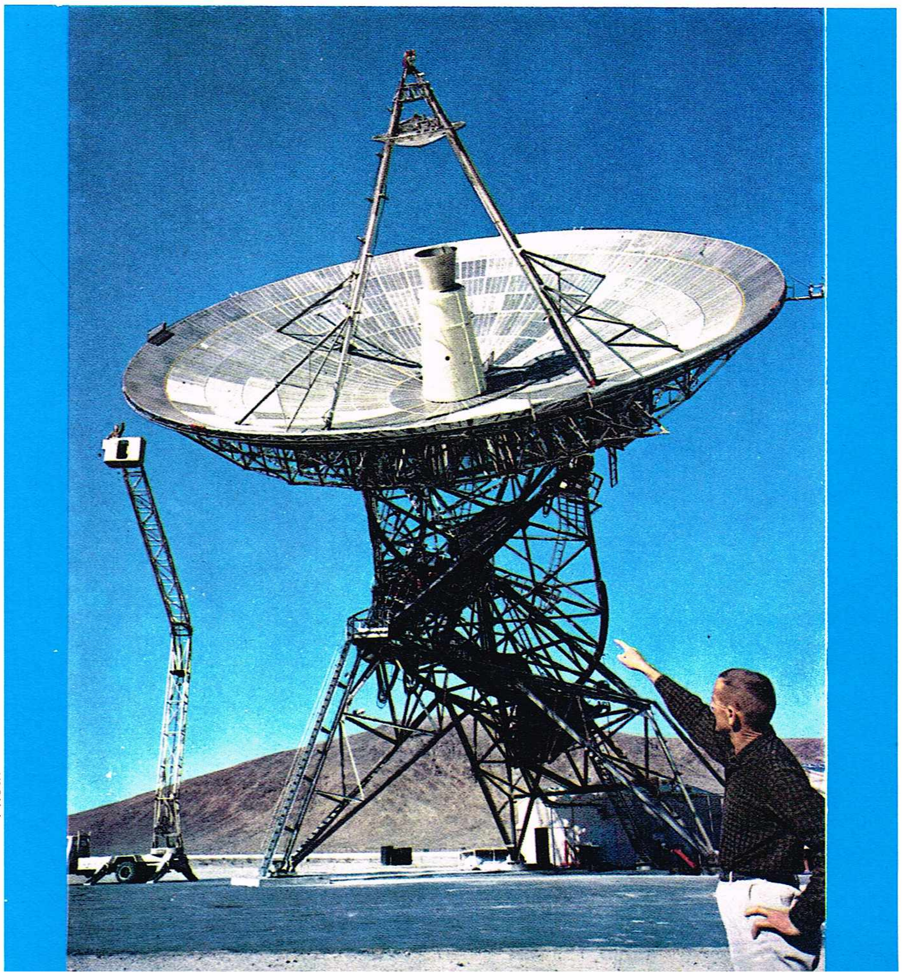

Photri

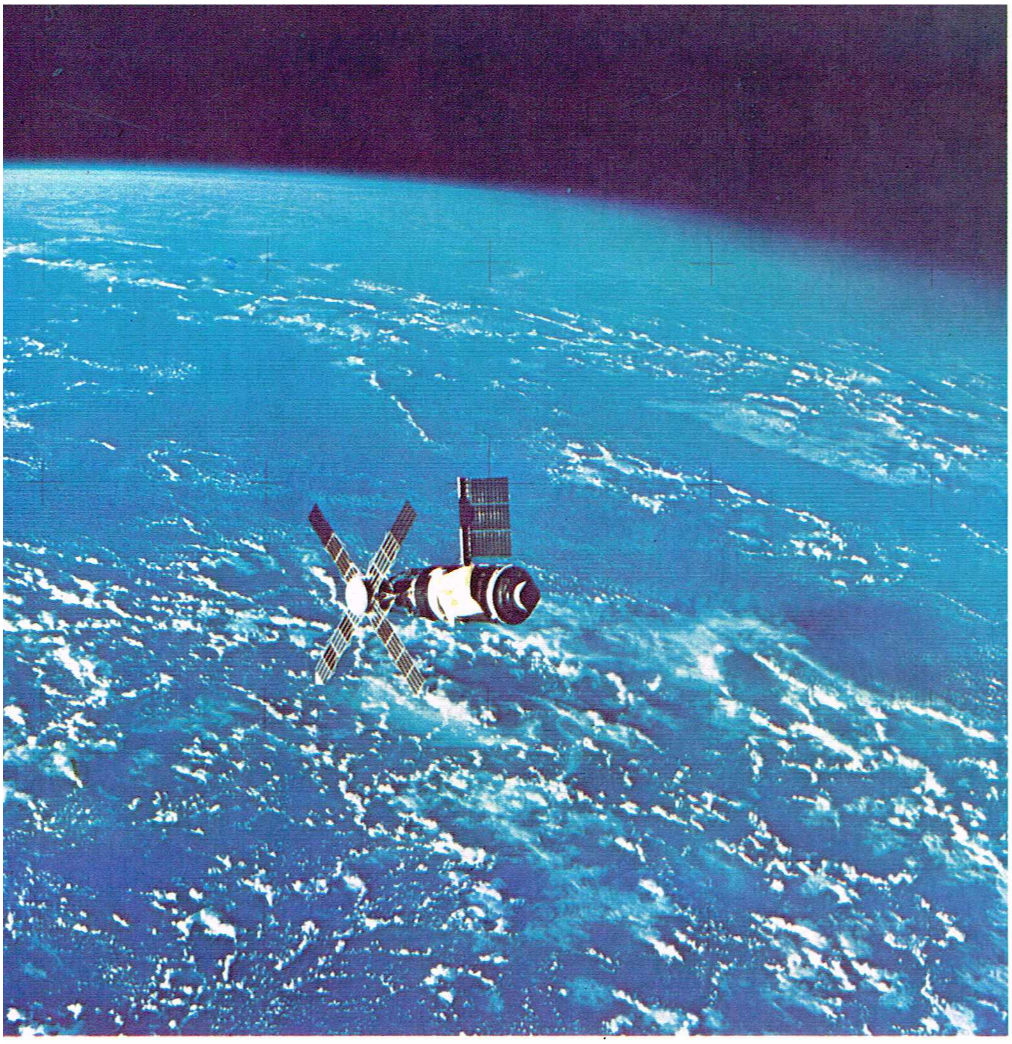

U.S.I.S.

▲ *Très belle vue de la station spatiale* Skylab *sur fond de nuages et d'étoiles, prise par le module de commande d'*Apollo *pendant un vol d'essai de ce dernier.*

▼ *Poste de commande de la station* Saliut. *Au centre, le tableau de commandes et les fauteuils de l'équipage ; derrière le tableau, un hublot dans le sas de passage qui relie* Saliut *à* Soyouz XI.

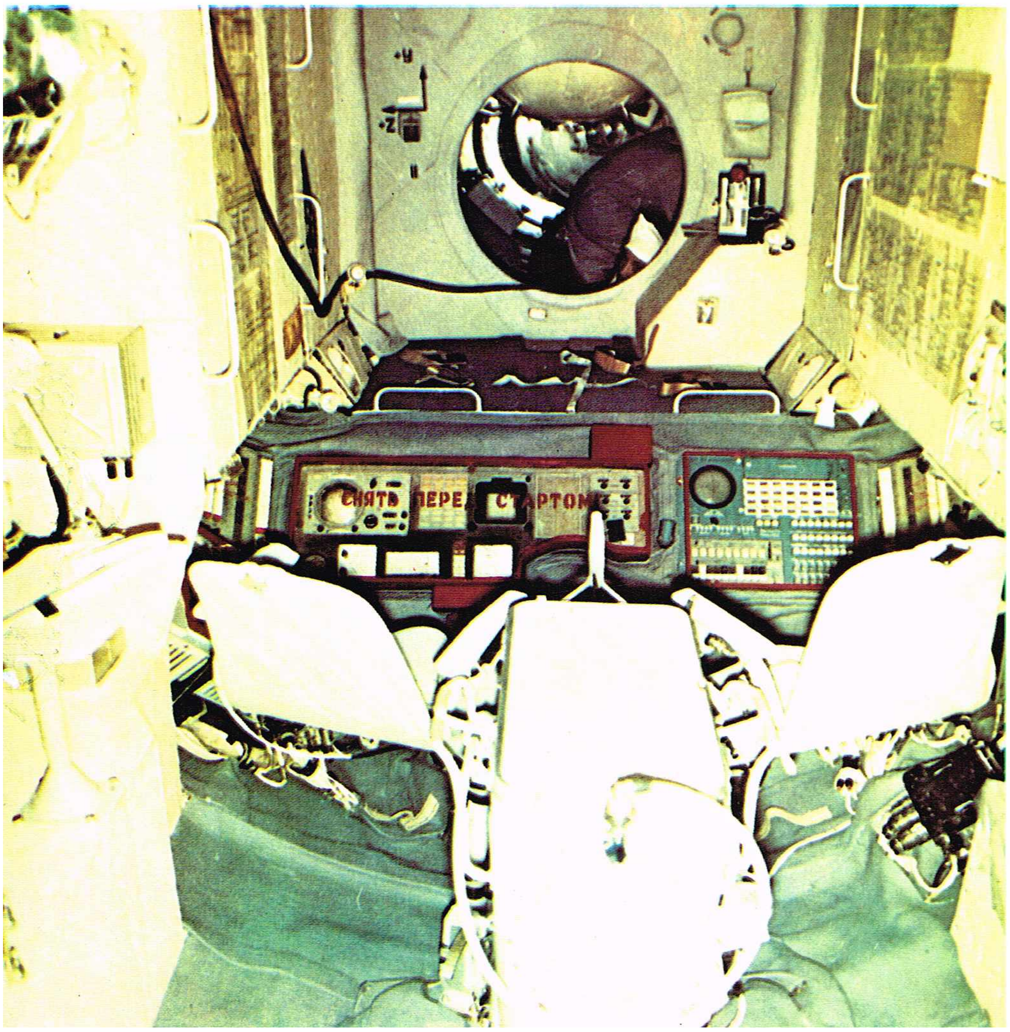

Photo A.P.N.

ainsi que pour remettre sur orbite des corps cosmiques et suivre leur trajectoire de retour.

Normalement, lors d'un lancement spatial, on suit le vecteur depuis son lancement, et l'on effectue une ou plusieurs corrections de la trajectoire, même après le détachement du ou des premiers étages, alors que le corps cosmique artificiel se trouve déjà à une distance importante de la surface terrestre.

Le **système à faisceau de guidage** constitue une variante présentant une certaine analogie avec le radiophare utilisé en aéronautique. Le faisceau de guidage atteint le missile, dont les appareils automatiques de bord agissent de manière à maintenir constant le signal reçu du sol (équisignal). Si le missile sort de la zone centrale du faisceau de guidage, le signal reçu par les antennes de bord varie de manière différente suivant la direction de sortie que le missile a tendance à emprunter. Cette variation du signal reçu, dûment décodée, amplifiée, recodée et envoyée aux organes de direction qui se trouvent à bord du missile, le ramène au centre du faisceau. Ainsi, il est possible de téléguider une fusée sol-air contre une cible aérienne. De manière analogue, bien qu'avec des techniques différentes, il est possible de téléguider un missile depuis le sol, au moyen de rayons infrarouges, c'est-à-dire de rayons thermiques, modulés en amplitude ou émis par impulsions.

Tous les systèmes cités relèvent de disciplines indépendantes (électronique, système radar, étude des micro-ondes, etc.). Le problème du téléguidage (surtout par radar) d'un missile anti-aérien ou antimissile suscite aujourd'hui un très grand intérêt et est à l'origine de l'étude et de la mise au point d'une dizaine de systèmes différents utilisant des radars.

PROBLÈMES D'ASTRONAUTIQUE

Le développement des fusées a rendu possible le démarrage des programmes spatiaux en mettant à leur disposition des vecteurs suffisamment maniables et puissants : ainsi, *Saturne V* est en mesure de mettre sur orbite une charge utile d'environ 100 t. Leur précision de fonctionnement, leur maniabilité, leur aptitude à être dirigés sont satisfaisantes, de même que sont suffisamment perfectionnés les systèmes de téléguidage et d'autoguidage des missiles, par inertie ou par d'autres procédés. Mais la navigation spatiale ou astronautique pose de nombreux autres problèmes, tout à fait différents des problèmes typiques de la fusée astronautique que nous allons aborder.

Navigation dans l'espace

Une sonde à grand rayon, un astronef en orbite, un corps cosmique en route vers la Lune doivent naviguer dans l'espace au sens propre du mot. Au-delà d'une centaine de milliers de kilomètres de la Terre, ou guère plus, il n'est plus possible de guider, à proprement parler, un corps cosmique artificiel, même avec les systèmes de télémétrie spatiale et de correction de trajectoire les plus délicats. Il est certes possible de maintenir des liaisons radio, de recevoir des données ou des relevés, de les analyser et d'envoyer les ordres consécutifs que les appareils automatiques de bord pourront exécuter, mais le corps cosmique artificiel doit se servir, au cours de son voyage dans l'espace, d'instruments typiques de navigation, qui restent mal connus, malgré les fréquentes informations qui nous parviennent sur leur existence et leur fonctionnement.

A bord d'un corps cosmique artificiel, qu'il s'agisse d'un satellite artificiel de modestes dimensions, d'une sonde à large rayon d'action ou d'un vaisseau cosmique proprement dit, existe un système équivalent à celui qui permet au marin en mer de faire le point, c'est-à-dire de déterminer sa position à partir de mesures faisant intervenir les astres et l'horizon. Pour un satellite artificiel ou un astronef en orbite, l'horizon, même vu à partir d'une altitude de 300 km ou plus, est un des éléments sûrs du calcul. En revanche, dans l'espace, seuls les astres, les étoiles fixes, peuvent constituer un système de référence valable.

Sur les astronefs prévus pour transporter des hommes à bord, le spécialiste de la navigation spatiale, en se

référant à trois étoiles fixes, définit sa propre position avec une bonne approximation. Cette opération, répétée à des intervalles successifs rigoureusement chronométrés, permet de déterminer la vitesse et la trajectoire, grâce à un calculateur de dimensions relativement modestes. Il est au contraire très difficile, sinon tout à fait impossible, qu'un système automatique non guidé par l'homme choisisse correctement un groupe de trois étoiles fixes pour faire le point, surtout si ce système se trouve à bord d'une sonde spatiale destinée à des vols sur longue distance, poursuivis durant des jours ou des mois, car celle-ci a fatalement tendance à tourner lentement sur elle-même.

Toutefois, un facteur simplifie le problème : les corps célestes qui intéressent l'exploration spatiale d'aujourd'hui et du proche avenir parcourent des orbites situées toutes dans le plan de l'écliptique. Faire le point devient ainsi un problème à deux dimensions et non un problème dans l'espace. En outre, les sondes se déplacent à l'intérieur d'une zone de l'espace où le Soleil constitue toujours une source lumineuse si intense qu'elle ne peut être confondue avec aucune autre. Pour les systèmes optiques de référence de la sonde, la Terre, Mars, Vénus, la Lune constituent aussi des sources lumineuses intenses et facilement identifiables.

Les systèmes de navigation des sondes spatiales sont donc structurés et programmés de manière à chercher automatiquement un point de référence donné (le Soleil ou une planète proche) et à s'orienter par rapport à ce point. Une plate-forme gyroscopique placée à l'intérieur de la sonde permet de définir pendant toute la durée du voyage le plan dans lequel se trouvent les orbites des planètes et la trajectoire de la sonde.

Les systèmes de navigation d'une sonde pour longues distances ne sont pas toujours actifs : en effet, il faudrait user trop d'énergie pour les maintenir en activité permanente et transporter une quantité trop grande de gaz à expulser pour former les jets d'orientation. Les systèmes sont donc périodiquement activés du sol. Ayant suivi la trajectoire dans sa partie initiale, on peut, grâce à des calculateurs électroniques, déterminer à tout instant l'endroit où se trouve la sonde et diriger sur elle un faisceau d'ondes radio-électriques au moyen d'une antenne émettrice directionnelle.

Cependant, le système de bord de la sonde n'est jamais tout à fait inactif. Entre une séance de liaison et la suivante, et au cours de la période de vol par inertie pendant laquelle aucune manœuvre n'est nécessaire, le système de bord reste dans un état dit de « petite alerte », dans lequel certains circuits reliés aux antennes réceptrices restent actifs et sont prêts à recevoir de la Terre tout signal d'alerte. Ils activent alors tout le système et le mettent en état de « grande alerte », dans lequel les appareils de bord reçoivent les ordres de la Terre et les exécutent. Le premier de ces ordres a précisément pour but d'imposer une orientation correcte par référence au Soleil ou à une planète, suivant le programme préétabli.

Les *Zond*, par exemple, prenaient comme points de référence la Lune pendant la première partie du voyage vers la Lune, ensuite le Soleil et la Terre. Sur la trajectoire de retour, leur point de référence a été la Terre, jusqu'à leur arrivée dans une zone suffisamment proche pour que le système de téléguidage des stations terrestres les prenne en charge.

Les modalités d'orientation ne sont pas, en principe, complexes, étant donné que l'on dispose à bord d'une plate-forme gyroscopique et d'un système programmé pour viser un corps céleste comme point de référence : en comparant le programme enregistré et les relevés des appareils de bord, le système évalue les écarts et commande différents servomécanismes. Ceux-ci actionnent des jets directionnels d'orientation et des propulseurs jusqu'à ce que les signaux d'erreur soient ramenés à zéro. C'est alors que sont obtenues l'orientation correcte de la sonde et sa stabilisation dans cette position. Cette situation est signalée en code au sol ; la sonde se trouve ainsi prête à recevoir et à exécuter les ordres.

Au cours de la mission de *Luna XVI*, on a effectué par exemple soixante-huit séances de liaison, dont plus de la moitié alors que la sonde se trouvait à plus de 200 000 km de la Terre, chacune précédée d'une série de manœuvres préparatoires suivant le schéma que nous avons décrit.

U.S.I.S.

▲ *L'astronaute Alan B. Shepard, commandant de la mission* **Apollo XIV**, *se protège les yeux du Soleil trop brillant. Cette photographie a été prise de la porte du module lunaire par Edgar D. Mitchell, pilote de ce module.*

L'aptitude d'une sonde spatiale à s'orienter correctement est essentielle : de son orientation, en effet, dépendent la réussite des différentes manœuvres et la possibilité d'établir des liaisons radio avec la Terre. Les systèmes dont nous venons de parler présentent un fonctionnement régulier et très précis. Mais les données relatives à leur constitution sont extrêmement rares, plus rares encore que celles que nous possédons sur le téléguidage des missiles de guerre.

Conditions extra-terrestres et technologies spécialisées

Les conditions que l'on rencontre, même sur des orbites relativement proches de la Terre (300 km), sont fondamentalement différentes de celles qui existent sur Terre. En l'absence de l'écran constitué par l'atmosphère, les radiations cosmiques et solaires arrivent non fitrées, avec toute leur énergie. Hors de l'atmosphère, toute matière liquide ou même visqueuse tend à s'évaporer rapidement en laissant ou non un résidu solide. La pesanteur, sur des orbites circumterrestres, circumlunaires ou dans l'espace, n'est pas sensible : en orbite, elle est compensée par la force centrifuge, tandis que, dans l'espace, règne un état d'apesanteur.

Les matériaux de revêtement du corps cosmique artificiel doivent être tels qu'ils ne puissent être endommagés par les radiations cosmiques et solaires. Il faut que le corps cosmique tourne lentement autour de lui-même ; sinon, la moitié exposée au Soleil se trouverait portée à trop haute température. Lorsque la rotation n'est pas possible, on crée une circulation de fluides capable d'équilibrer la température.

Il faut maintenir à l'intérieur d'un corps cosmique artificiel, même non habité, une atmosphère d'air, d'azote, d'hélium ou d'un autre gaz, pour permettre le fonctionnement régulier d'appareils de type terrestre. Car, dans le vide, les lubrifiants normaux s'évaporent, deux métaux mis en contact peuvent se souder spontanément à froid, les composants de tout circuit électrique ou électronique peuvent s'altérer profondément sous l'influence des radiations, avec des variations brusques de température et de pression.

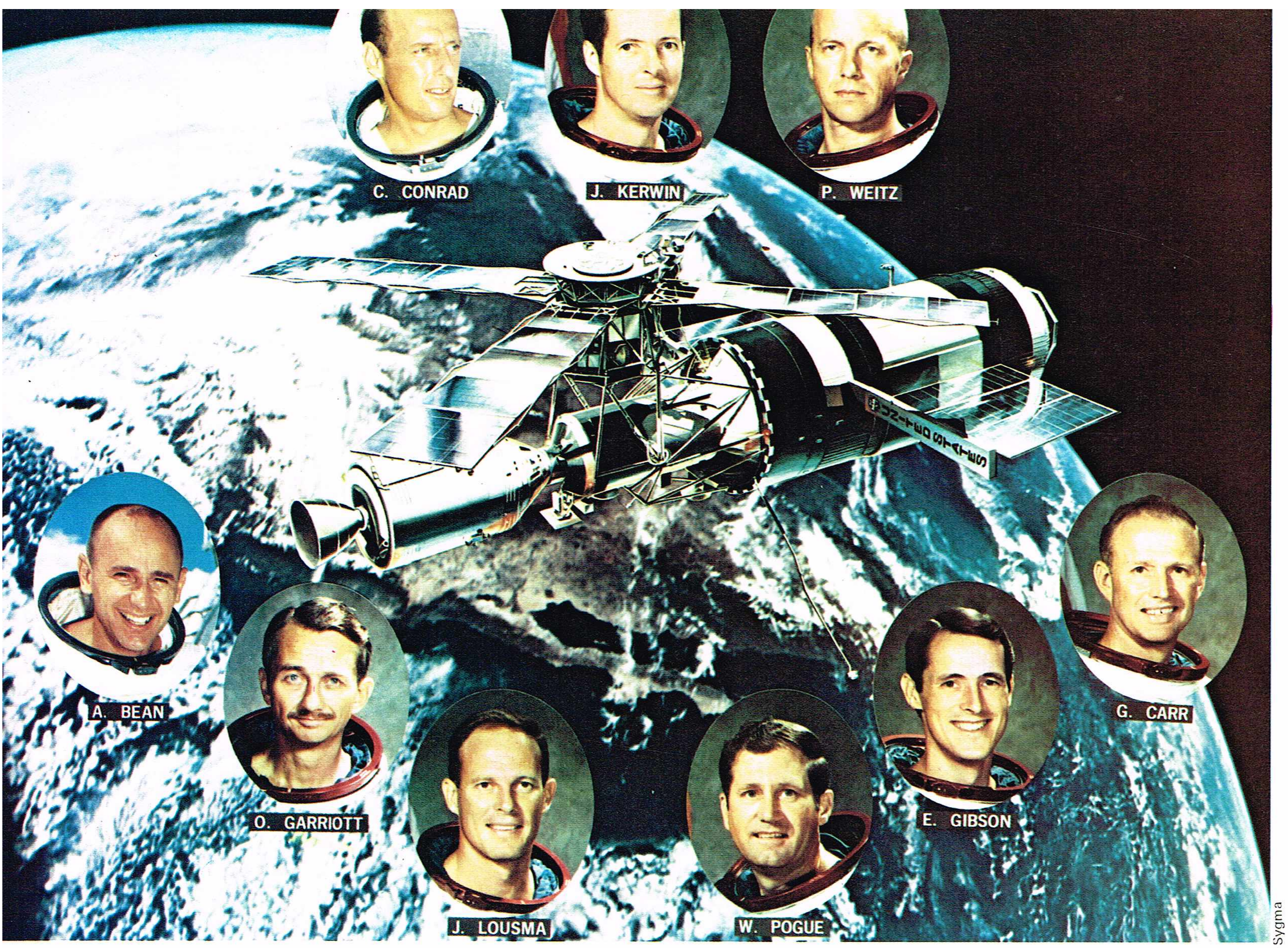

Sygma

▲ *Équipage de* **Skylab**, *importante station de recherche scientifique de 100 tonnes. Son programme en 1973 était d'étendre nos connaissances sur les possibilités de la présence humaine dans les satellites terrestres. Il devait ainsi se livrer à des investigations scientifiques, technologiques et médicales.*

Si le corps cosmique artificiel doit rester pendant un certain temps à la surface d'une planète ou d'un satellite, ou bien pénétrer dans son atmosphère, il faut concevoir sa structure suivant une technologie qui tienne compte à la fois des conditions qui règnent dans l'espace et de celles qu'on rencontre sur le corps céleste.

Par exemple, sur la Lune, on devra affronter des problèmes typiquement lunaires. La pesanteur y est en effet plus faible que sur notre globe, mais non négligeable. Le jour lunaire dure environ 15 jours terrestres. Pendant le jour, le sol lunaire reste exposé aux radiations solaires sans être protégé par l'écran que constituerait une atmosphère ; le fort échauffement engendre des températures de l'ordre de 120 °C. Inversement, pendant la longue nuit lunaire, la température descend à environ 150 °C au-dessous de zéro. Une station lunaire permanente, ou destinée à séjourner longtemps sur la Lune, doit donc avoir une structure qui permette le fonctionnement régulier de tous ses organes intérieurs et extérieurs, dans cette large gamme de températures.

Sur la surface de Vénus, l'attraction gravitationnelle est semblable à celle de la Terre, mais il y règne des températures de l'ordre de 480 °C au-dessus de zéro et des pressions de l'ordre de 90 atmosphères, dans un milieu fait à 95 % d'anhydride carbonique. Une sonde destinée à opérer dans une telle ambiance doit être construite suivant une technologie vénusienne, aussi spécialisée et aussi différente de la technologie terrestre que de la technologie lunaire. Elle doit être non seulement exceptionnellement solide du point de vue mécanique, mais de plus être en mesure d'opérer à des températures capables de faire fondre l'étain et le plomb, de ramollir l'aluminium et de recuire plus ou moins profondément le cuivre et l'acier.

On peut faire des considérations analogues à propos des sondes destinées à explorer Mercure, Mars, Jupiter et les planètes extérieures du système solaire sur chacune desquelles règnent des conditions différentes.

L'ÉQUILIBRE DU SATELLITE DANS L'ESPACE

Contrôle d'attitude du satellite

Une fois le guidage et le pilotage de la fusée assurés et le satellite lancé dans l'espace, on ne peut cependant pas admettre qu'il y ait des mouvements désordonnés.

S'agit-il d'un véhicule habité, la présence d'un équipage demande que les mouvements soient limités. Les manœuvres, et notamment le retour sur la Terre, imposent que la direction de l'axe du satellite soit maintenue avec une grande précision.

Qu'il s'agisse d'un satellite scientifique ou d'un satellite météorologique, il faut que les axes de référence aient des directions bien définies.

Il est donc indispensable de *contrôler l'attitude* du satellite. Les *causes perturbatrices* sont nombreuses, et il n'est pas nécessaire qu'elles soient fortes : le satellite obéit dans le vide à la moindre impulsion. On citera parmi ces causes : les mouvements internes non compensés du satellite, l'impact des molécules gazeuses de l'atmosphère, les météorites, les effets magnétiques, électrostatiques et gravitationnels, la pression de radiation.

Piloter le satellite, c'est déterminer les déviations qu'il subit et ensuite les corriger.

Corriger l'attitude du satellite est également indispensable quand on veut *corriger l'orbite*. Les corrections d'attitude peuvent être obtenues soit par des techniques passives, soit par des techniques actives.

Techniques passives

Par gradient de gravité

Le satellite, parvenu sur orbite, développe deux mâts télescopiques au bout desquels se trouvent deux petites masses d'environ 1 kg (*fig.* 49). L'attraction sur les deux masses est différente. En S_1, la masse A, plus près de la

Terre, est attirée avec plus de force que la masse B. Attirée, elle se rapproche donc encore et, se rapprochant, subit une attraction accrue. Le système est stable et se maintient indéfiniment.

A l'origine, en S_1, $F_A > F_B$. En S_2, la stabilisation est théoriquement acquise. La ligne des mâts reste dirigée vers le centre de la Terre. Mais l'*équilibre exact* est précaire. La distance du satellite à la Terre est très grande par rapport à la distance AB. L'attraction en A est très peu différente de l'attraction en B. Cela peut donner lieu à de gênantes oscillations.

Par effet gyroscopique

Le satellite est mis en rotation, et il se stabilise autour de son axe dès que la vitesse de rotation atteint 100 tours/minute. C'est la méthode employée sur les satellites de télécommunications.

L'axe de rotation est dirigé perpendiculairement au plan d'orbite. Les cellules solaires sont placées sur le cylindre. Une antenne « disque » permet d'éviter les inconvénients de la rotation.

Si l'on veut obtenir des faisceaux coniques plus directifs, on fait tourner le faisceau à la même vitesse que le satellite mais en sens opposé, grâce à des antennes à balayage électronique. Leur gain d'antenne est plus élevé que celui des antennes disques (*fig.*50).

Par l'effet du magnétisme terrestre

Des aimants sont placés de façon à donner un moment magnétique dirigé suivant l'axe du satellite, qui se place alors tangentiellement aux lignes de force du champ magnétique terrestre. L'intensité de celui-ci décroît comme le cube de sa distance au centre de la Terre. Aussi le contrôle d'attitude par cette méthode ne peut-il guère s'exercer au-delà de 5 000 km. Par contre, en dessous de cette altitude, le contrôle par champ magnétique terrestre est particulièrement aisé.

Sur la *figure* 51, les lignes vertes sont les lignes de force du champ magnétique. Le satellite suit l'orbite tracée en rouge. En chaque point de son orbite, le barreau aimanté qui constitue son axe se dirige tangentiellement aux lignes de force.

Techniques actives

Des jets de gaz commandés par des vannes sont expulsés par de petits propulseurs agissant à la façon de réacteurs et distribués de façon à pouvoir assurer la correction des déviations suivant trois axes perpendiculaires. Les moteurs verniers se trouvent disposés par paires sur les axes OX, OY, OZ. Leur action est perpendiculaire à ces axes et de directions opposées suivant que l'on actionne l'un ou l'autre des jets.

Prenons un exemple (*fig.* 52) :

— Le jet 1 mis à feu exerce une force F_1 dans le plan YOZ, qui fait tourner l'ensemble autour de OX.

— Le jet 2 mis à feu exerce une force F_2 dans le plan XOY, qui fait tourner l'ensemble autour de OZ.

— Le jet 3 mis à feu exerce une force F_3 dans le plan XOZ, qui fait tourner l'ensemble autour de OY.

Dans le vide, chacune de ces impulsions ne s'arrêtera que si l'on met en marche par à-coups le vernier voisin de sens opposé, jusqu'à obtenir l'attitude désirée.

Il est presque inutile de préciser qu'il s'agit de manœuvres très délicates qui doivent être menées avec beaucoup de finesse si l'on ne veut pas faire une consommation excessive de gaz. L'équilibre n'est obtenu qu'après une série d'impulsions décroissantes. Le système use beaucoup de gaz (en général de l'azote) et ne convient qu'aux satellites dont la durée de mission est limitée.

Volants à inertie

Les volants à inertie sont destinés, par un effet gyroscopique, à stabiliser par un couple de rappel l'effet foncièrement instable du contrôle d'attitude par jets de gaz.

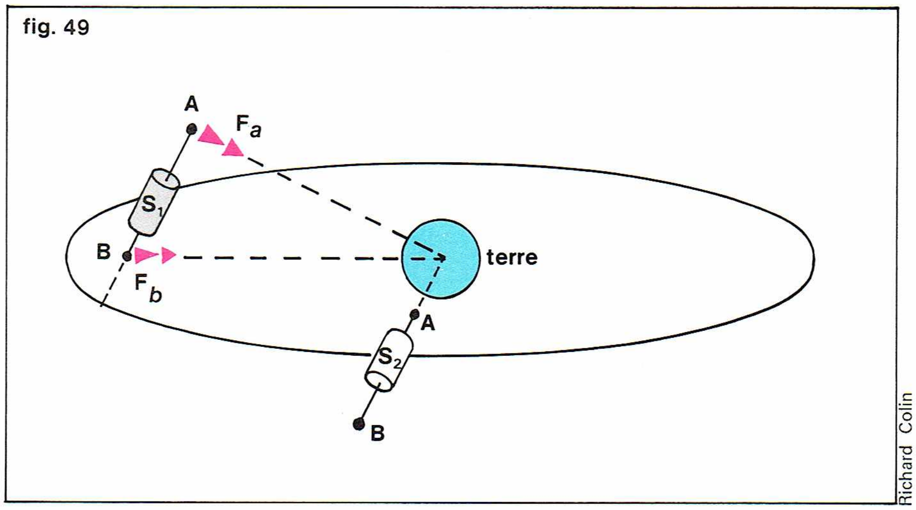

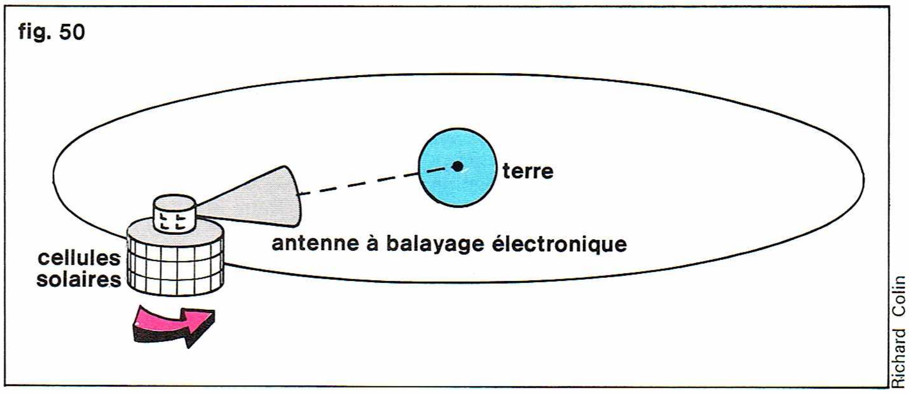

▲ ***Figure 49 : contrôle d'attitude par gradient de gravité.***
Figure 50 : contrôle d'attitude par effet gyroscopique.

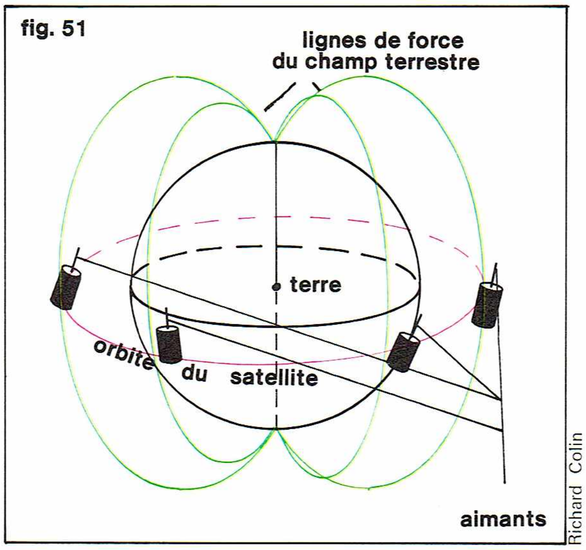

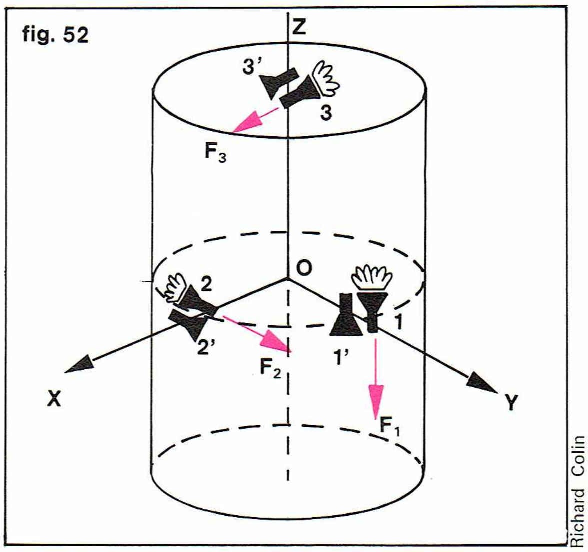

◀ ***Figure 51 : contrôle d'attitude par effet du magnétisme terrestre.***
Figure 52 : contrôle d'attitude à l'aide de moteurs verniers (technique active).

▶ *Figure 53 : contrôle d'attitude à l'aide de volants d'inertie.*
Figure 55 : pour repérer un satellite sur sa trajectoire, on utilise des coordonnées qui servent à repérer les astres en astronomie.

fig. 53

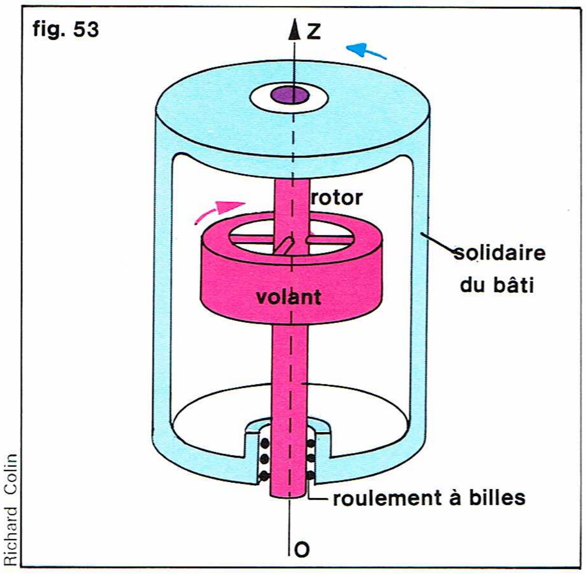

fig. 55

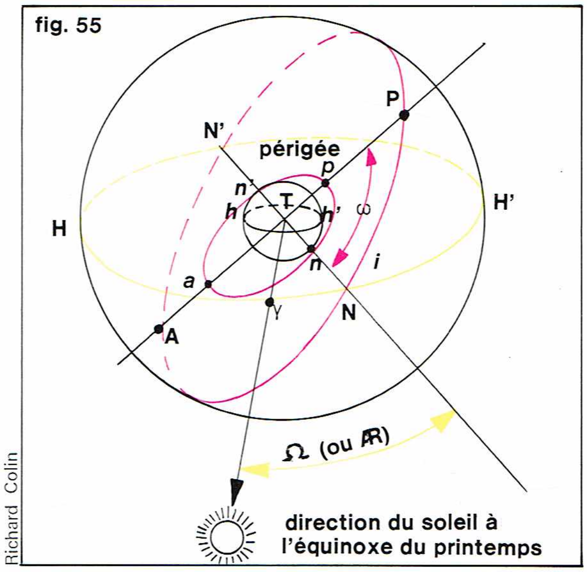

Dans ce système (*fig.* 53), le volant est fixé par des rayons à un axe qui n'est autre que le rotor d'un moteur électrique monté par l'intermédiaire de deux roulements à billes dans le bâti même du satellite.

Le principe de l'action et de la réaction vaut également pour les corps en rotation. Dans le schéma de principe, on voit que le volant solidaire du rotor peut tourner par rapport au bâti. Mais il le fait par l'intermédiaire des roulements à billes, et toute rotation dans un sens du volant entraîne par réaction une rotation en sens inverse du bâti sur lequel doivent s'appuyer les billes du roulement.

La vitesse du volant est de l'ordre de 1 000 tours/minute. Il constitue un système gyroscopique d'axe OZ. Toute altération de l'équilibre du bâti par rapport à cet axe engendre un couple de rappel du gyroscope.

En plaçant trois volants sur trois axes quadrangulaires, on obtient la stabilisation de l'ensemble.

Recalage sur les astres

Nous venons de voir comment on peut corriger l'attitude du satellite par des techniques actives. Encore faut-il avoir des points de repère pour le remettre dans une position bien définie en un point de sa trajectoire. Son attitude est calculée ou a été calculée d'avance pour ce point ; cela ne peut se faire que si l'on a dans l'espace des directions de référence à partir de ce point.

L'astronomie permet de calculer l'angle que font, par exemple, la direction du Soleil et celle d'une étoile brillante comme Canopus, à l'instant où le corps cosmique se trouve au point choisi de sa trajectoire. Mettons, par exemple, que cet angle calculé soit de 62°.

L'engin porte des appareils appelés *senseurs* qui captent l'énergie rayonnée par un astre ou par n'importe quelle émission radio-électrique provenant d'un poste terrestre. L'axe d'un senseur est perpendiculaire à son plan ; il est dirigé vers la source lumineuse ou radio-électrique quand il en reçoit l'énergie maximale.

Pour placer maintenant le corps cosmique dans l'attitude correcte calculée, il faut que nous arrivions, en le faisant tourner par une technique active (définie précédemment), à le placer de telle façon que les droites qui le joignent au Soleil et à Canopus fassent alors un angle de 62°.

L'engin porte sur ses faces des cellules solaires. On l'oriente de telle façon que la face ABCD reçoive l'énergie solaire maximale (*fig.* 54). A ce moment, l'axe OZ qui lui est perpendiculaire est dirigé vers le Soleil. (Les axes OX, OY, OZ dont nous nous sommes servi plus haut pour étudier le contrôle par techniques actives sont perpendiculaires à 3 faces.)

On oriente d'abord la lunette astrale, senseur d'étoiles, qui est mobile autour du point R situé sur OZ, de façon que la lunette RL fasse un angle de 62° avec RZ. En utilisant les jets de gaz, on fait alors tourner l'ensemble autour de RZ. Comme l'angle des directions de Canopus et du Soleil, angle calculé, est à ce moment de 62°, l'axe de la lunette passe sur Canopus.

L'attitude est parfaite quand la lunette astrale, arrivée en RL', reçoit l'énergie maximale de Canopus.

fig. 54

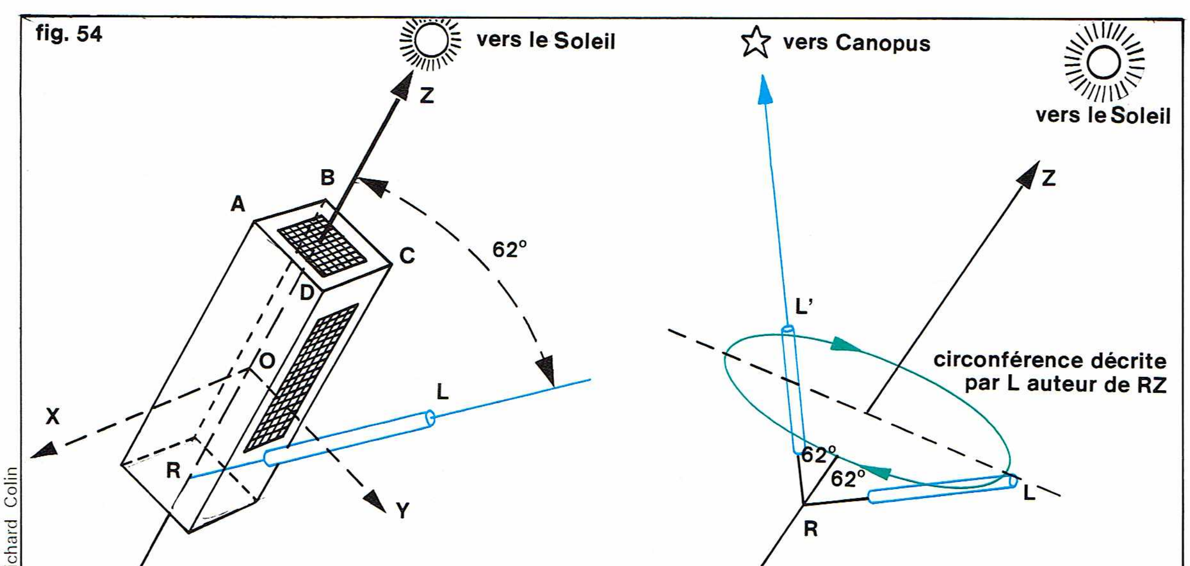

▶ *Figure 54 : directions de référence dans l'espace. Quand la cellule solaire portée par la face ABCD reçoit le maximum d'énergie, l'axe OZ est dirigé vers le Soleil. L'axe de la lunette RL, à 62° de OZ, passe sur Canopus. L'angle de 62° calculé à terre est l'angle que font les directions engin spatial-Soleil — engin spatial-Canopus à l'instant de l'expérience.*

COORDONNÉES DES SATELLITES

Pour repérer un satellite sur sa trajectoire, on utilise des coordonnées qui servent à repérer les astres en astronomie (*fig.* 55). Soit l'ellipse *(npn'a)* décrite par le satellite ; *n* est le nœud ascendant. En ce point, l'orbite traverse le plan équatorial. Chacun de ces points est projeté sur la sphère céleste, sphère qui a pour centre T, le centre de la Terre. L'équateur céleste est le grand cercle HNH'N', intersection de la sphère céleste et du plan de l'équateur terrestre *hnh'n'*.

Ainsi, le périgée *p* est projeté en P sur la sphère céleste, et les points nodaux (points où la trajectoire passe d'un côté à l'autre du plan équatorial) se projettent en N et N'.

La trajectoire est d'abord définie par son plan :

— il fait un angle *i* (*i* est exprimé en degrés) avec le plan équatorial ;

— NN' fait un angle Ω avec la direction Tγ du Soleil au moment de l'équinoxe de printemps (l'angle Ω, ou *ascension droite* mesurée dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, s'exprime en heures, minutes, secondes ; les marins le désignent par le symbole AR, au lieu de Ω). Cet angle est dans le plan équatorial.

Les coordonnées du périgée sont :

— l'angle NTP, compté de N vers P, que fait dans le plan de l'orbite la direction du nœud ascendant N avec la droite TP ;

— son altitude (TP moins le rayon de la Terre).

Tout point de la trajectoire est ensuite repéré par rapport au périgée.

fig. 56

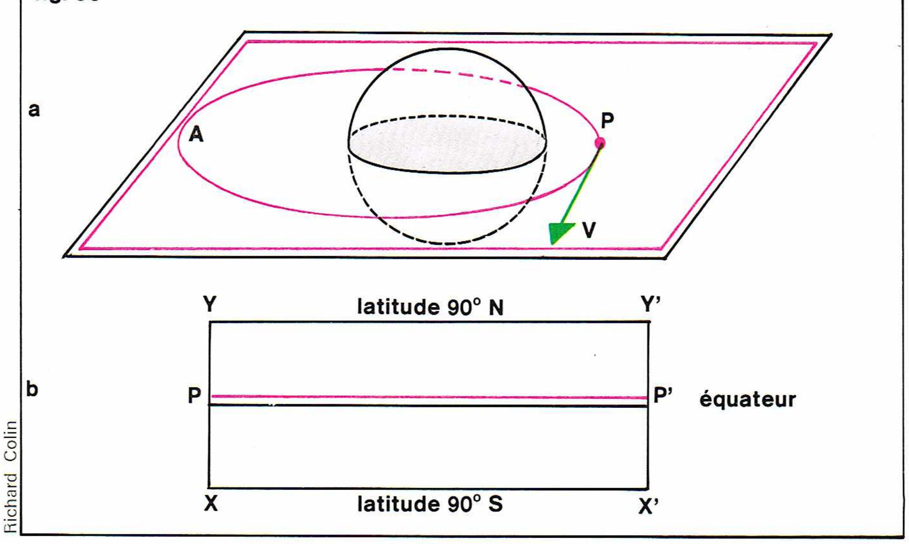

fig. 57

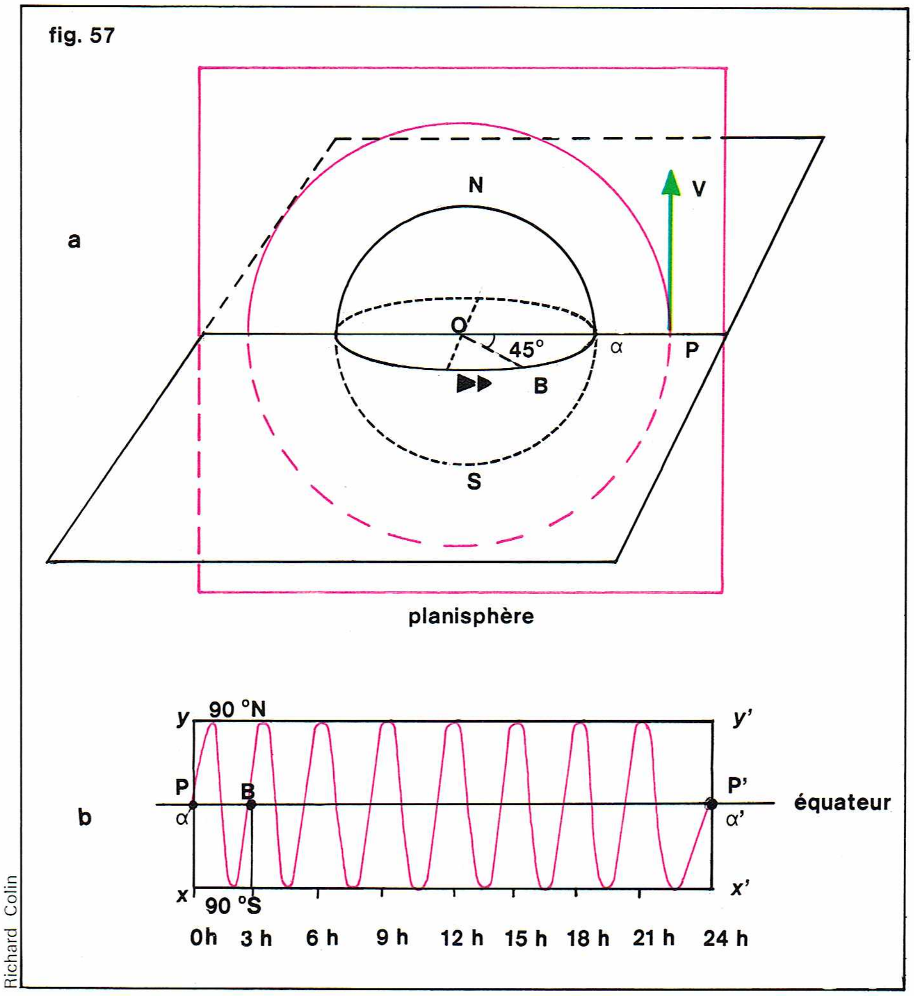

▲ *En noir : la Terre, son équateur et le plan qui le contient. En rouge : l'orbite et son plan ; P est le périgée. Figure 56 : orbite équatoriale. Figure 57 : orbite polaire.*

Orbites des satellites

Différentes sortes d'orbites

Leurs projections sur un planisphère

Sur les 3 *figures* suivantes, la Terre, son équateur et le plan qui le contient sont tracés en traits noirs. L'orbite et son plan sont tracés en traits rouges. P est le périgée, A l'apogée, $\overrightarrow{PV}$ la vitesse d'injection, et, le planisphère étant une surface développée, les points *x* et *y* sont confondus avec *x'* et *y'*.

Orbite équatoriale (*fig.* 56)

Les plans de l'équateur terrestre et de l'orbite sont confondus. La projection de l'orbite sur le planisphère se confond avec l'équateur. P est confondu avec P'.

Orbite polaire (*fig.* 57)

Dans une orbite polaire, le satellite est injecté à la vitesse $\overrightarrow{PV}$ perpendiculaire à OP. Le vecteur $\overrightarrow{PV}$ est dans un plan passant par les pôles.

Pendant que le satellite décrit son orbite dans le plan PNS fixe dans l'espace, la Terre tourne en sens inverse des aiguilles d'une montre, autour de l'axe NS, à raison de 360° en 24 h, soit 15° par heure. Choisissons un satellite qui parcourt exactement 8 orbites par jour. Sa trace coupera l'équateur un nombre de fois égal au double du nombre de fois que sa période est comprise dans 24 h [ici 16 fois]. Si ce quotient ne comporte pas de décimales, ce qui est le cas dans notre exemple, l'orbite repassera toujours sur les mêmes points. Sinon, elle se trouvera décalée à chaque passage, et le satellite pourra passer au-dessus de tous les points de la Terre.

Comme le satellite met 3 h pour accomplir sa révolution, la première fois qu'il repasse au point P, le point de l'équateur terrestre qui se trouve sur la droite OP est le point qui, au moment de l'injection, se trouvait en B sur l'équateur, 45° (15° × 3) en arrière de α (*fig.* 57a).

La trace de la trajectoire du satellite sur le planisphère est une sinusoïde qui, à chaque révolution, est tangente alternativement à la ligne *yy'* de latitude 90° nord et à la ligne *xx'* de latitude 90° sud (*fig.* 57b).

Orbites d'inclinaison quelconque

Considérons d'abord les orbites circulaires. Quand le plan de l'orbite est incliné sur le plan de l'équateur, la projection de la trajectoire du satellite sur un planisphère est une courbe sinusoïdale tangente en ses points haut et bas aux parallèles dont les latitudes nord et sud ont pour valeur le nombre de degrés de l'inclinaison de l'orbite. La courbe recoupera l'équateur autant de fois que la demi-période du satellite est contenue dans les 24 h, temps de révolution de la Terre (*fig.* 58).

Si le quotient de 24 h par la période de révolution du satellite est un nombre entier, la projection de sa trajectoire sur le planisphère repassera toujours par les mêmes points. Ainsi, sur le planisphère de la *figure* 58 l'orbite du satellite de 6 h de période est invariable ; elle coupe bien 8 fois l'équateur : $8 = \frac{24}{3}$.

Si la période du satellite n'est pas contenue un nombre de fois entier dans 24 h, la courbe se décalera toutes

fig. 58

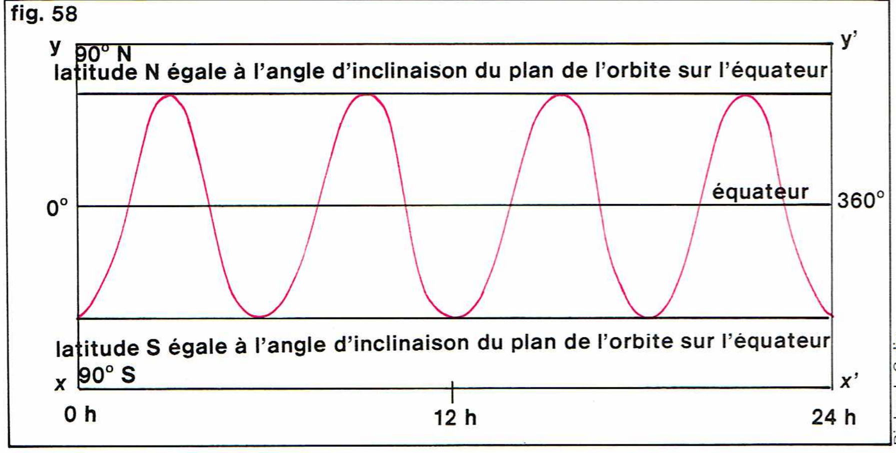

Richard Colin

fig. 59

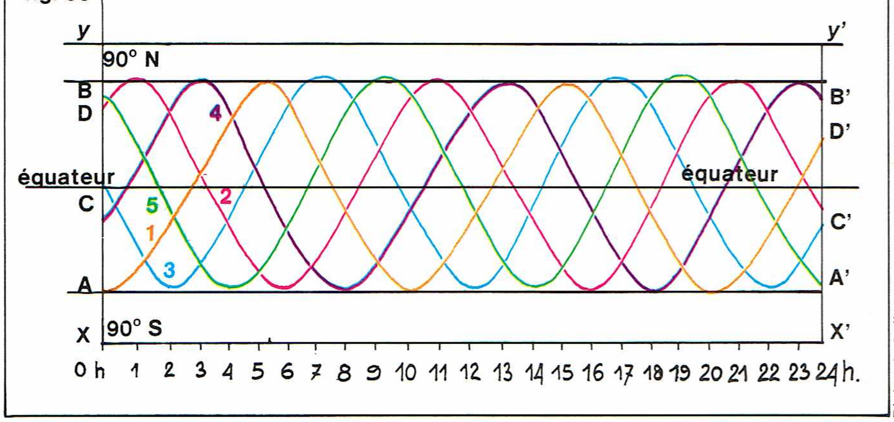

Richard Colin

▲ *Figure 58 : projection de la trajectoire du satellite sur un planisphère dans le cas d'une orbite circulaire d'inclinaison quelconque. Figure 59 : cas où la période de révolution du satellite est de 10 h (orbite circulaire).*

les 24 h de la même quantité par rapport à la courbe précédente.

La *figure* 59 est l'orbite d'un satellite dont la période de révolution est de 10 h. Le satellite parti du point A sur la courbe **1** de couleur orangée arrive au bout de 24 h en B′ confondu avec B. Il continue sur la courbe **2** rouge jusqu'en C′ confondu avec C, et ainsi de suite jusqu'à ce qu'à la fin de la cinquième journée il se retrouve avec la courbe verte en A′ dans la même position qu'au départ. En effet, dans ce cas, le plus petit commun multiple de 10 h et de 24 h est 120 h ou 5 jours entiers.

Si la période du satellite s'exprime par un nombre quelconque avec décimales, il peut être nécessaire d'attendre un très grand nombre de révolutions avant que le satellite repasse exactement au-dessus de son point de départ. Prenons par exemple le célèbre *Spoutnik I*, dont la période était de 96,2 mn. Chaque jour, il accomplissait un peu plus de 15 révolutions, puisque

$$96{,}2 \times 15 = 1\,443 \text{ mn}$$

et que 24 h correspondent à 1 440 mn : il gagnait donc 3 mn chaque jour. Pour repasser au-dessus de son point de lancement, il lui fallait donc attendre :

$$\frac{1\,440}{3} = 480 \text{ jours}$$

Cependant on peut remarquer que, au bout de 32 jours, son avance est de : $3 \times 32 = 96$ mn. Il est donc à 0,2 s près au-dessus de son point de lancement. Ce qui n'empêche qu'il lui faudra attendre encore très longtemps avant d'y repasser exactement (environ 478 jours).

Projection des orbites non circulaires

Prenons par exemple le *Cosmos 282*, dont l'orbite 240/1 840 km est parcourue en 106 mn (*fig.* 60).

La deuxième loi de Kepler montre que ce satellite met 39 mn pour parcourir la partie de son orbite qui est au-dessous du plan équatorial, donc l'arc : nœud descendant-périgée-nœud ascendant (en bleu), tandis qu'il met 67 mn pour parcourir la partie de son orbite qui est au-dessus et passe par l'apogée où sa vitesse est minimale (en rouge).

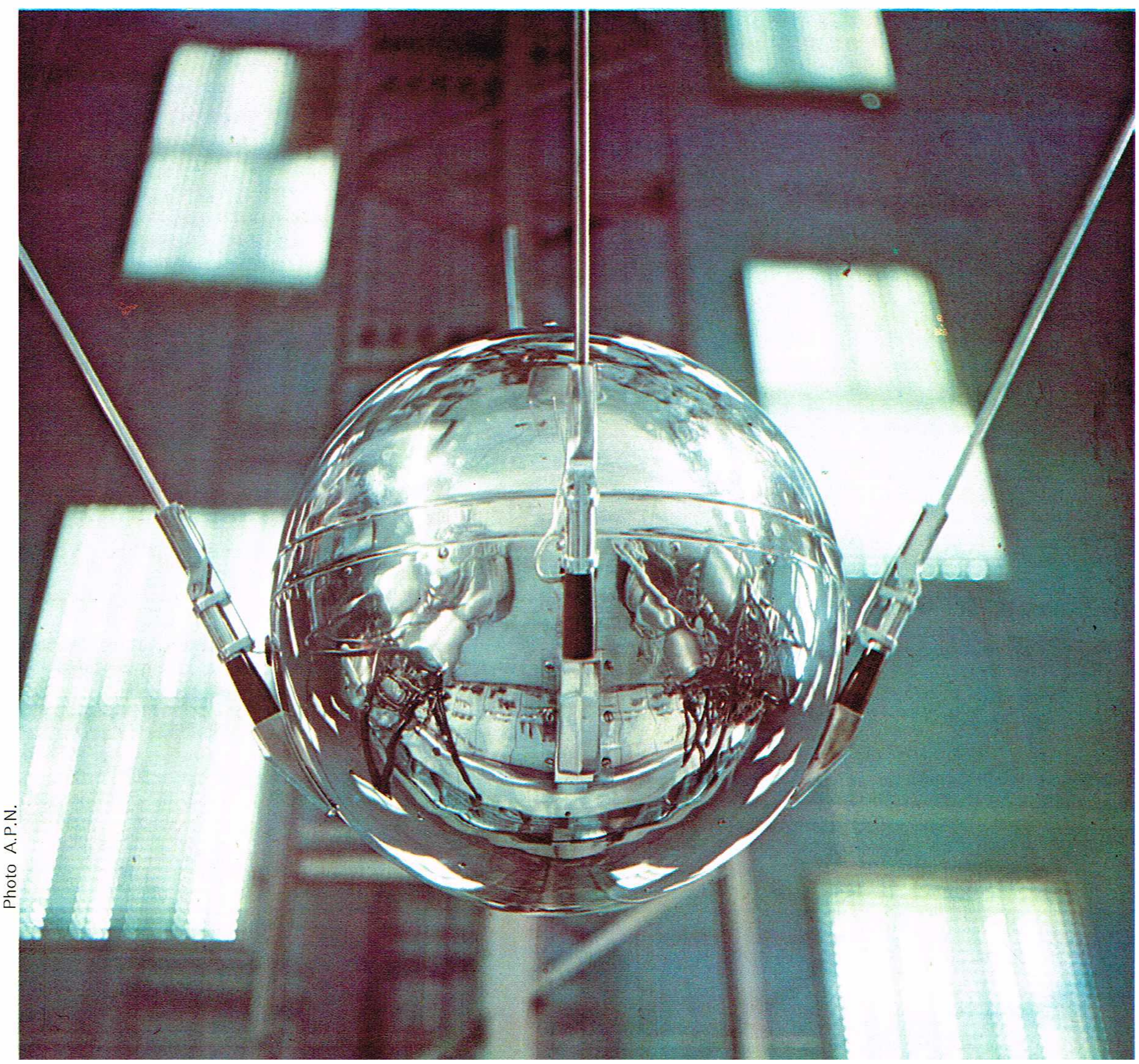

Photo A.P.N.

▶ **Spoutnik I :** *premier satellite de l'espace ; sa période était de 96,2 mn. Chaque jour, il accomplissait un peu plus de 15 révolutions autour de la Terre.*

La portion de la trajectoire n_1Pn_2 est parcourue en 39 mn, et la portion n_2An_1 en 67 mn. La sinusoïde n'est plus régulière.

Les perturbations d'orbite et leurs corrections

Les orbites des satellites peuvent être perturbées par de nombreuses causes.

Rappelons pour mémoire qu'une orbite relativement basse s'use peu à peu dans un air même très raréfié. Le satellite finit par se consumer en pénétrant dans les couches denses de l'atmosphère. Un satellite polaire à moyenne altitude subit à hauteur de l'équateur le frottement de la couche gazeuse que notre globe entraîne dans son mouvement de rotation à une vitesse voisine de 0,5 km/s. Il est déporté sans que sa longévité toutefois soit altérée.

La Terre, parce que sa rotondité n'est pas parfaite, modifie la trajectoire du satellite qui est perturbée par le bourrelet équatorial. En effet, l'action de ce bourrelet fait tourner dans le plan équatorial la *ligne des nœuds NN'* (nœuds ascendant et descendant) autour du centre de la Terre, en sens inverse de la rotation terrestre. Cette *précession* des nœuds peut être très rapide pour un satellite orbitant à basse altitude. La ligne nodale ne mettrait qu'une quarantaine de jours pour reprendre sa position initiale après un tour complet, pour un satellite orbitant à 1 200 km de la Terre. Pendant ce temps, A décrit le cercle $AA_1A_2A_3A$ (*fig.* 61). Pour le satellite Terre tournant autour du Soleil, le phénomène est identique : les nœuds sont les équinoxes, la précession nodale est la précession des équinoxes. L'éloignement fait que la révolution autour de l'axe des pôles dure 24 000 ans.

D'autre part, la Lune et le Soleil, par leurs attractions, modifient l'inclinaison du plan de l'orbite, d'autant plus que l'altitude est plus grande, car alors l'attraction terrestre devient plus faible, tandis que celle des deux autres astres augmente. La variation de l'inclinaison est faible (de l'ordre du degré par an).

Enfin, la ligne PA qui joint le périgée à l'apogée tourne dans le plan de l'orbite. Il s'ensuit que A vient en A' à l'opposé, et donc P en P', au bout d'un certain temps. Cette variation est d'autant plus rapide que l'inclinaison de l'orbite est plus éloignée de 63°. Le calcul montre en effet que la perturbation est nulle pour cette dernière valeur. Pour une orbite équatoriale, elle atteint plusieurs degrés par jour.

Autre source de perturbation : la pression exercée par le rayonnement solaire. Elle augmente évidemment avec la taille du satellite. Un satellite comme *Echo II*, par exemple, qui avait 40 m de diamètre, y était particulièrement sensible.

Les perturbations sont corrigées par les moteurs verniers.

Quels sont les effets des perturbations sur un satellite (stationnaire) orbitant à 35 780 km d'altitude?

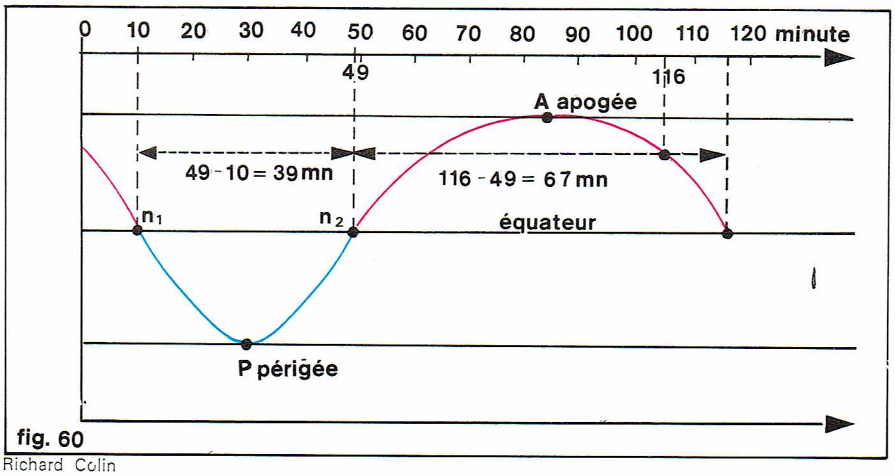

Richard Colin

▲ *Figure 60 : projection d'une orbite non circulaire. Ici, celle de* **Cosmos 282** *dont l'orbite 240/1 840 km est parcourue en 106 mn.*

Le renflement équatorial cause une dérive qui, non corrigée, serait de 10° par an environ. Bien que cette dérive ne soit pas énorme, on peut l'annuler par un léger transfert d'orbite qui donne un effet opposé.

Les forces d'attraction dues à la Lune et au Soleil provoquent un déplacement de 0,1° de longitude et 0,8° en latitude au cours d'une année. Le satellite, pendant cette durée, se trouvera donc dans un rectangle ayant ces dimensions; mais le rectangle sera décalé l'année suivante. L'orbite se dégrade régulièrement.

Ces perturbations ne sont pas graves, car les pinceaux envoyés par les antennes terrestres sont larges, ils sont de plus mobiles et conçus pour des poursuites.

Les satellites stationnaires

On peut juger de l'importance des satellites stationnaires au grand nombre de ceux qui ont été mis sur orbite depuis le lancement du premier, *Syncom II*, le 26 juillet 1963. En effet, en 1977, 112 satellites stationnaires se sont alignés sur l'unique fil que constitue l'orbite équatoriale de 35 780 km d'altitude. Ils comprenaient 84 satellites de télécommunication (13 expérimentaux, 31 civils, 40 militaires), 3 satellites météo, 25 satellites militaires pour la reconnaissance et la navigation. Tous sont placés à des longitudes connues. Ne figurent pas sur cette liste une cinquantaine de satellites secrets dont la position est inconnue.

Si l'on consulte le tableau donnant la distance des apogées et la durée des périodes de révolution d'un satellite autour de la Terre, on trouve qu'à l'altitude de 35 780 km, le satellite effectue une révolution autour de la Terre en 23 h 56 mn 4 s, c'est-à-dire dans le temps exact que met la Terre pour effectuer une révolution.

▼ *Figure 61 : perturbation d'orbite. Le satellite* **Echo II** *de 40 m de diamètre. L'étendue de sa surface le rend sensible à la pression du rayonnement solaire.*

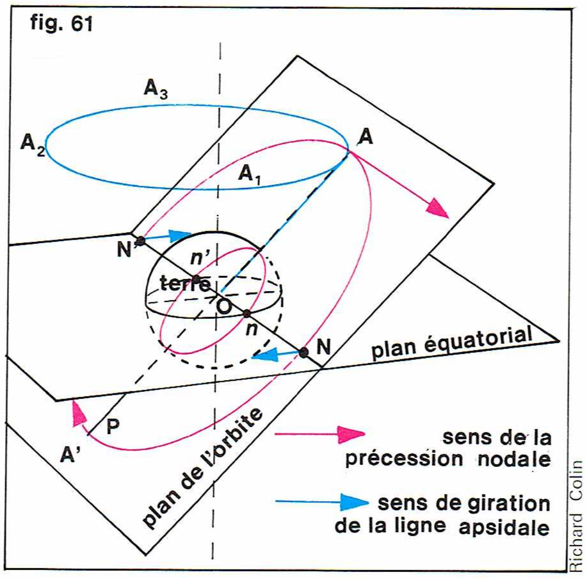

Richard Colin

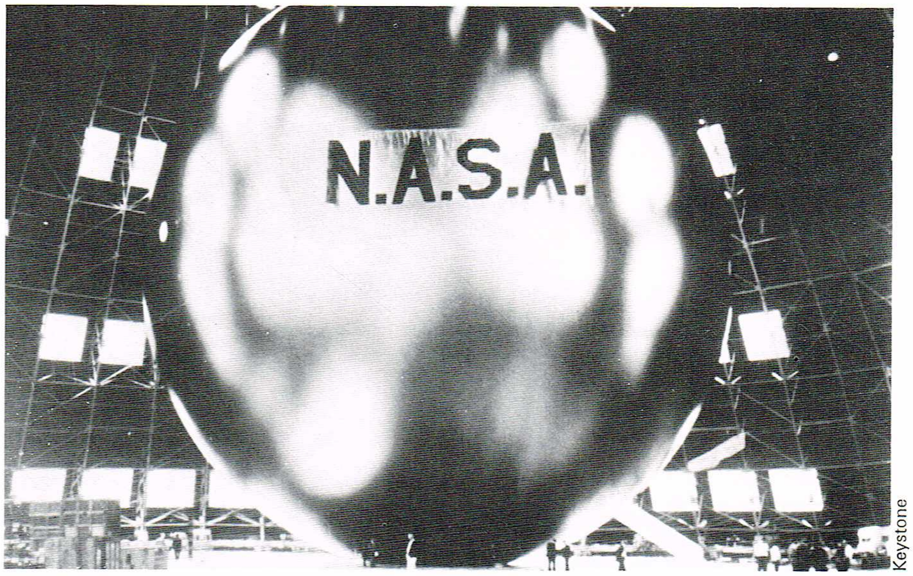

Keystone

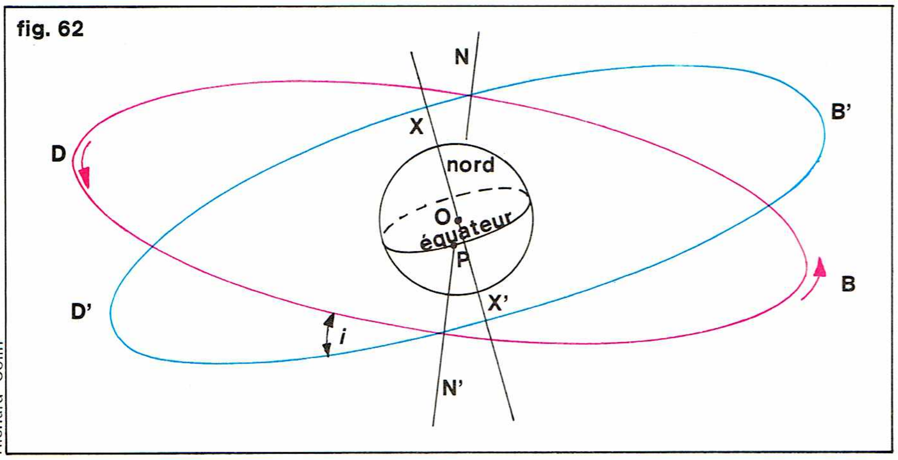

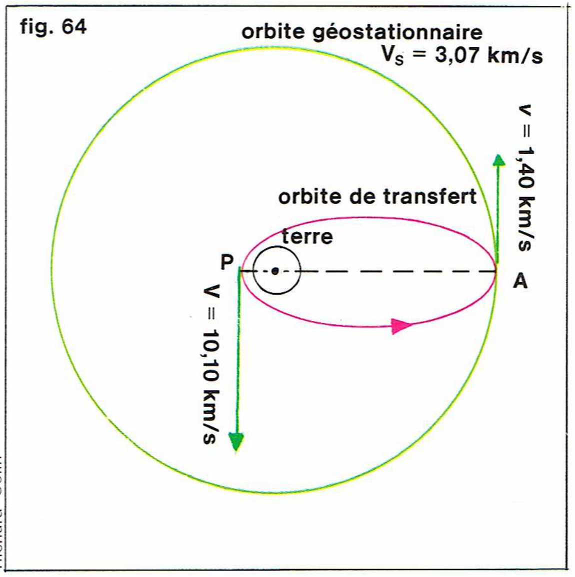

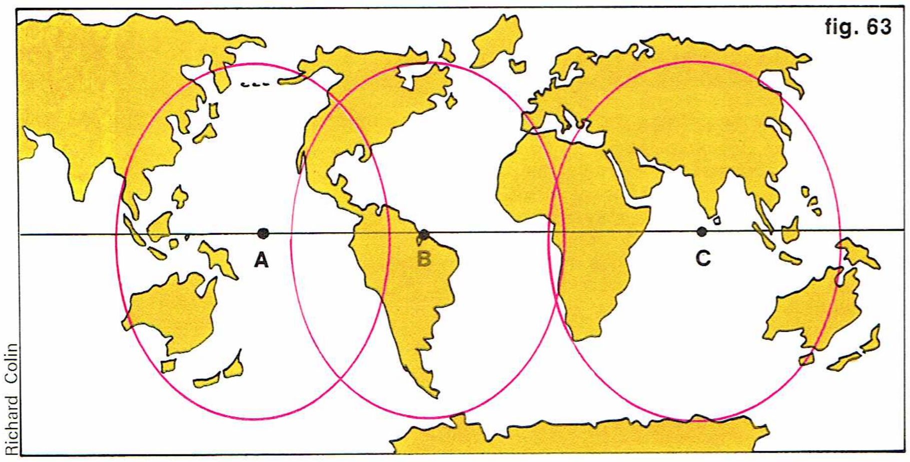

▲▶ *Figure 62 : orbite d'un satellite géostationnaire. Figure 63 : avec trois satellites géostationnaires, mis en orbite en A, B ou C, on peut couvrir l'ensemble du monde. Figure 64 : mise en orbite d'un satellite géostationnaire.*

Considérons (*fig.* 62) un tel satellite qui parcourt son orbite N'BND dans le sens indiqué par la flèche, inverse de celui des aiguilles d'une montre. N et N' sont les points nodaux où l'orbite traverse le plan équatorial. Considérons le point P sur l'équateur terrestre qui se trouve sur la ligne nodale. Puisque le satellite tourne dans le même sens que la Terre et qu'il a le même temps de révolution, un observateur placé en P verra le satellite toujours dans le même plan méridien, mais plus ou moins haut sur l'horizon. Si l'orbite est inclinée de *i* degrés, il oscillera dans une journée du *i*-ième parallèle nord au *i*-ième parallèle sud. Au même moment de la journée, il sera visible exactement au même point. Ce satellite est dit *synchrone*.

Si l'inclinaison du plan d'orbite est nulle, le satellite parcourt une orbite équatoriale, et il se trouve entièrement immobile par rapport à l'observateur. Il est dit *géostationnaire*.

Toutefois, nous avons vu au chapitre traitant des perturbations d'orbite que nulle orbite n'est réellement fixe, ce qu'il ne faut pas oublier.

On peut dire que le satellite a représenté aux yeux des hommes politiques le premier impact de l'astronautique. Du fait que ses émissions peuvent être reçues directement par les particuliers sans passer par les réseaux d'État, il devient un moyen de propagande idéal pour le pays

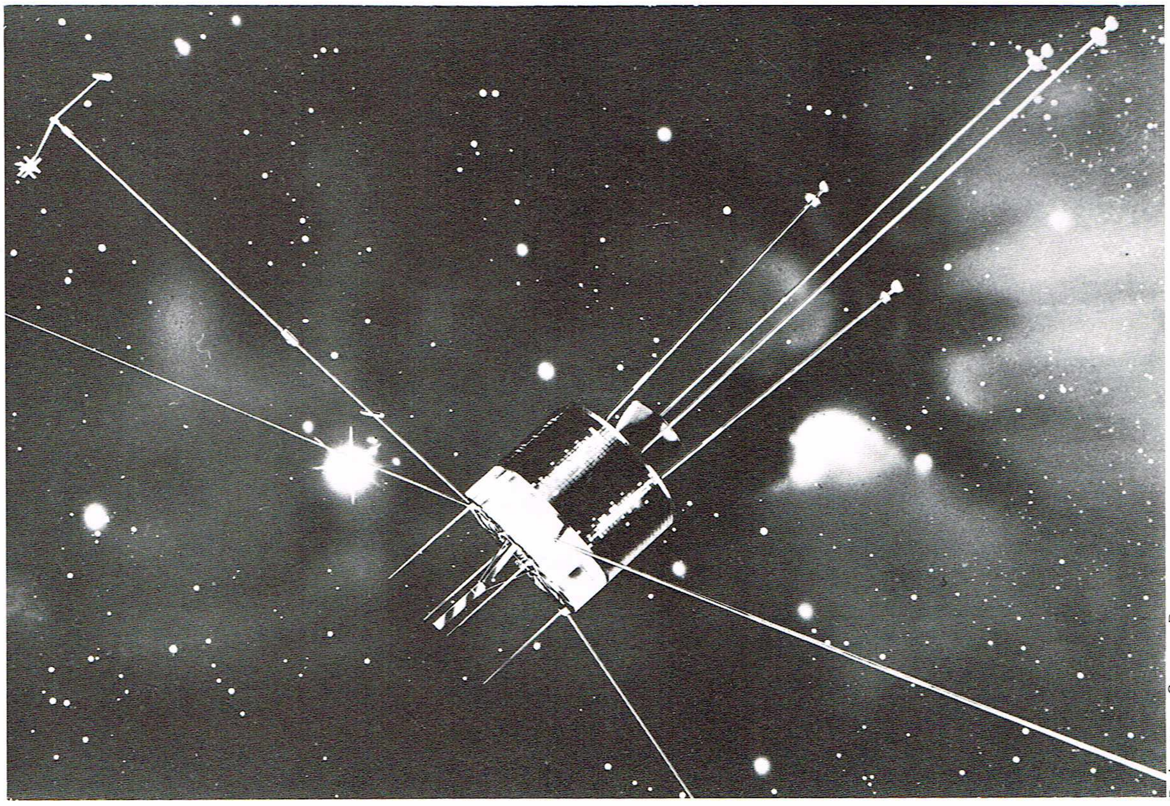

▶ *Montage représentant le premier satellite géostationnaire européen GEOS, à vocation expérimentale scientifique.*

Parimage - Camera Press

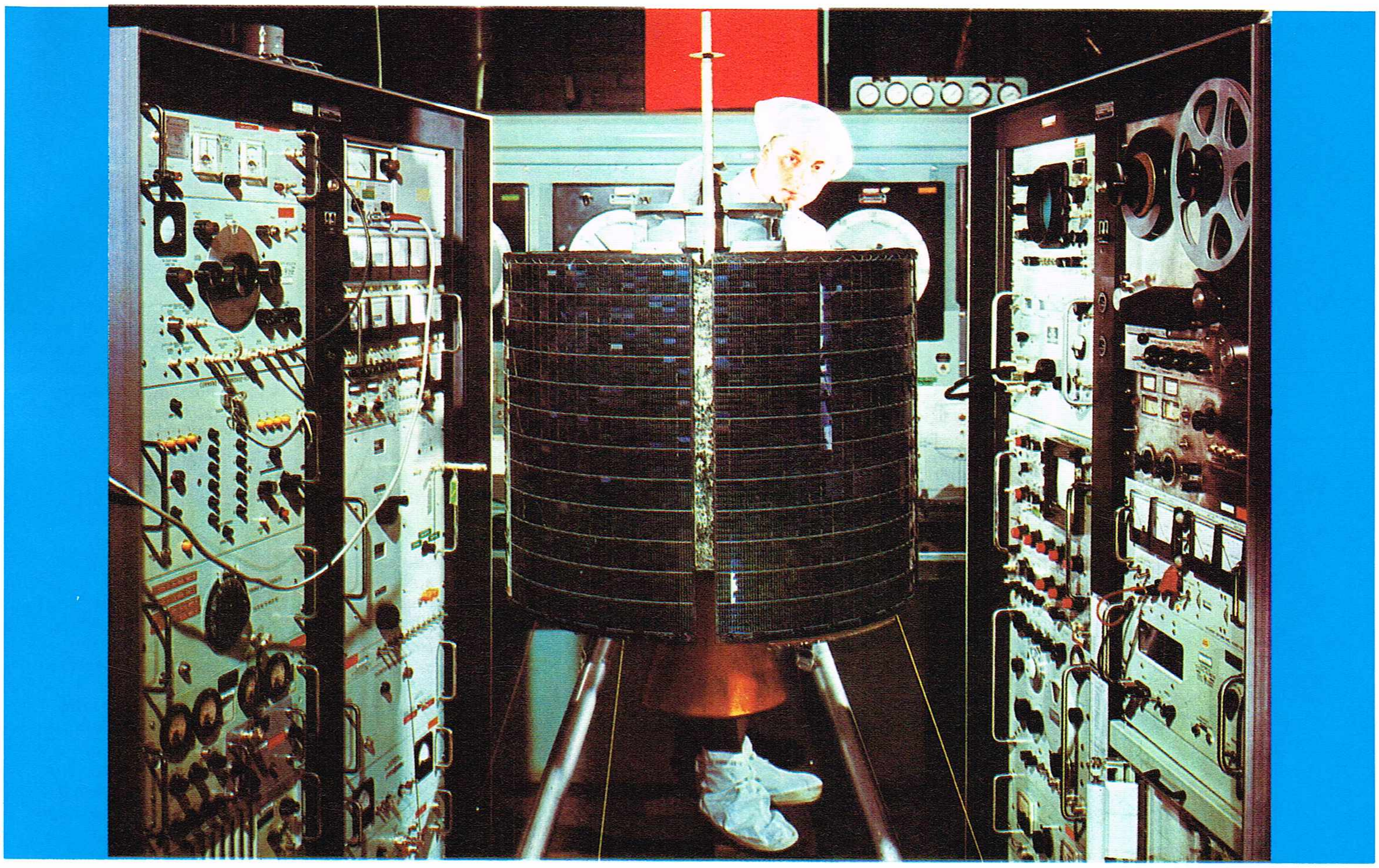

Archives Radaelli

▲ *Le satellite* **Early Bird** *est le premier satellite de communication, mis en orbite en avril 1965, à usage commercial. Il dispose de 240 canaux pour les communications téléphoniques et peut ainsi (en alternance) transmettre un programme de télévision. Sa première transmission de télévision fut une première mondiale.*

qui en contrôle l'exploitation, ainsi qu'une énorme source de revenus pour les compagnies qui le mettent au service des transmissions commerciales. Il suffit de se reporter au planisphère (*fig.* 63) pour voir qu'avec trois satellites géostationnaires, mis en orbite en A, B et C, on peut couvrir l'ensemble du monde.

La mise en place s'effectue de la façon suivante : d'un périgée P à l'altitude de 300 km, on injecte le satellite sur une orbite elliptique dite de transfert (*fig.* 64). La vitesse donnée au périgée est d'environ 10,10 km/s. Elle assure un apogée de 35 780 km. La vitesse à l'apogée est $v = 1{,}40$ km/s environ.

Après que le satellite a parcouru une ou plusieurs fois l'orbite de transfert, on met à feu son moteur au moment où il passe à l'apogée, pour lui donner un complément de vitesse de 1,67 km/s, ce qui lui assure la vitesse de satellisation de 3,07 km/s nécessaire pour rester sur l'orbite géostationnaire. On laisse ensuite dériver le satellite sur cette orbite jusqu'à ce qu'il atteigne la longitude choisie. La dérive est alors stoppée par les moteurs. L'engin est à poste.

Toutes les fois que des écarts causés par diverses perturbations deviennent excessifs, on les corrige par les moteurs de bord. Après épuisement du combustible, le satellite devient vite inutilisable.

On prévoit que 59 satellites géostationnaires ou synchrones seront mis sur orbite avant 1980. Une étude de la N. A. S. A. estime que 274 nouveaux satellites seront lancés entre 1980 et 1990.

Des règlements internationaux fixent l'espacement minimal en longitude de deux satellites géostationnaires afin d'éviter des interférences de leurs émissions. Cet espacement est de 0,4° pour des satellites travaillant sur des fréquences différentes, et de 2,8° pour ceux qui ont la même fréquence.

Il est essentiel pour ces satellites d'être parfaitement stabilisés afin que leurs antennes soient orientées en permanence vers la Terre et leurs panneaux solaires vers le Soleil.

Après avoir utilisé les systèmes par rotation qui nécessitaient des appareils très compliqués pour garder la bonne orientation des antennes, on préfère maintenant la stabilisation suivant 3 axes grâce aux roues d'inertie tournant à grande vitesse à l'intérieur du corps du satellite. Le fonctionnement en a été expliqué dans un chapitre précédent.

Influence de la latitude du lieu de lancement

Un problème cependant est fondamental, dont on n'a pas encore parlé. On ne peut jamais placer directement un satellite sur une orbite si cette orbite doit avoir une inclinaison inférieure à la latitude locale, autrement dit on ne peut placer un satellite *directement* sur une orbite équatoriale qu'en le lançant depuis un point situé sur l'équateur.

Ce problème a été résolu différemment par les Américains et par les Soviétiques.

Les Américains avaient le choix entre l'implantation d'un cosmodrome sur l'équateur, et une méthode difficile et coûteuse en combustible qui consiste à effectuer les lancements à partir de leur territoire, le plus près possible certes de l'équateur, en provoquant ensuite des torsions de la trajectoire grâce à des impulsions perpendiculaires au plan de l'orbite.

La première solution a été abandonnée ; le site équatorial possible était en effet une île du Pacifique, et les installations et l'entretien d'un cosmodrome en ce lieu éloigné étaient beaucoup trop coûteux.

Le lancement à partir de la Floride a été préféré. C'est là que prit son essor, le 6 avril 1965, le satellite *Early Bird*, qui devait connaître une certaine célébrité, car sa mise en service intervint solennellement avec la transmission d'un programme d'Eurovision transatlantique, une première mondiale. Lancé à l'inclinaison minimale possible, celle de la latitude du lieu de lancement, soit 28,7°, on s'est arrangé pour que le troisième étage achève sa combustion quand la trajectoire traversait le plan équatorial en P (*fig.* 65). Sur cette première branche, d'ailleurs, des impulsions perpendiculaires, commandées par la chaîne des postes des Bahamas, ont permis de

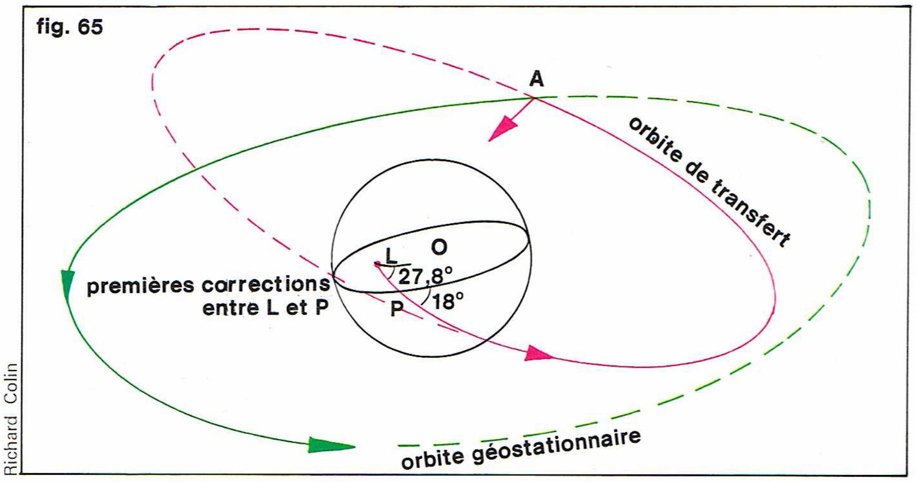

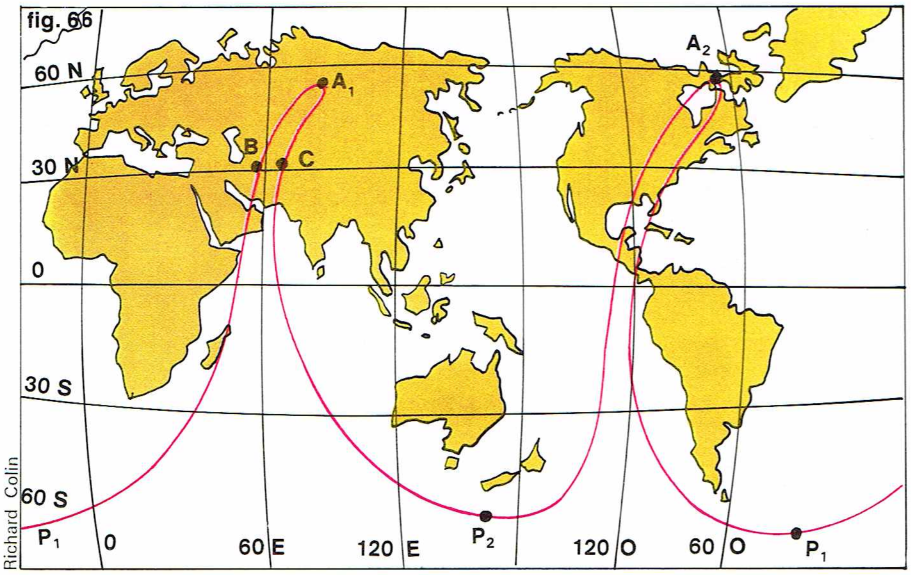

▲ *Figure 65 : trajectoire de lancement de* Early Bird.
Figure 66 : trace sur le planisphère de la trajectoire de Molniya I, *premier satellite soviétique de communication.*

▼ *Figure 67 : trace de la trajectoire de* Lunik II, *lancé le 12 septembre 1959. Ce vol fut justement célèbre, puisque, pour la première fois, un objet spatial lancé par l'homme atteignait la Lune.*

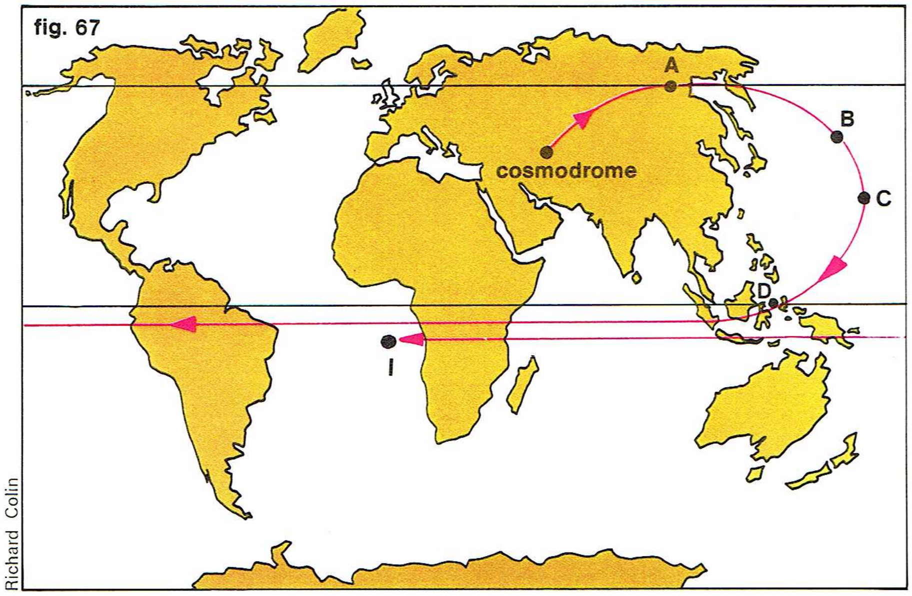

réduire l'inclinaison à 18°. En P, la vitesse est maximale, P est bien le périgée de l'orbite de transfert. Donc, l'apogée A sera dans le plan équatorial et dans le prolongement de la ligne PO. En A est donnée la dernière grande poussée transversale pour atteindre non seulement la vitesse de satellisation géostationnaire, mais aussi le rabattement de la trajectoire dans le plan équatorial. Le satellite suit le trajet fléché.

Toutes ces manœuvres sont très fines et très difficiles à réaliser. Elles exigent des techniques très élaborées, que ce soit dans le domaine de la propulsion ou pour déplacer les trajectoires hors de leur plan d'origine. Elles nécessitent souvent plusieurs ajustements avant que soit obtenue la trajectoire désirée.

Les Russes, comme aucune partie de leur territoire ne se trouve guère plus bas que le 40e degré de latitude nord, auraient dû procéder à une opération autrement difficile et coûteuse pour réduire à zéro l'inclinaison de l'orbite d'un satellite lancé de leur pays. D'autre part, pour les mêmes raisons géographiques, un satellite géostationnaire immobilisé au-dessus de l'océan Indien n'aurait pas été visible au-delà d'une ligne allant de Vladivostok à la Nouvelle-Zemble, laissant dépourvues de larges zones de la Sibérie où son utilité est la plus grande. De toute façon, pour l'U. R. S. S., un satellite très bas sur l'horizon est peu intéressant.

Aussi, quand les Soviétiques ont voulu lancer leur premier satellite de communication *Molniya I*, ils ont choisi une orbite de 12 h inclinée d'environ 65° (mettant ainsi à profit ce qu'on a vu plus haut ; pour cette valeur, la précession de la ligne des apsides est presque nulle).

La trajectoire de *Molniya I* sur le planisphère est intéressante (*fig.* 66). Parti du périgée P_1 à la vitesse 10,15 km/s à 500 km d'altitude, au 30e parallèle nord, en B, sa vitesse n'est plus que de 5,5 km/s et son altitude de 10 000 km. A l'apogée A_1, l'altitude est proche de 40 000 km ; la vitesse est 1,5 km/s. Il peut donc établir longuement des liaisons sur tout le territoire soviétique, puisque l'arc très réduit BA_1C qui comprend l'apogée est parcouru lentement, pendant plus de 10 h.

Trajectoire d'une fusée sur le planisphère

Nous avons choisi de parler de *Lunik II*, lancée le 12 septembre 1959 en vol direct pour atteindre la Lune, vol justement célèbre parce que, pour la première fois, un objet spatial lancé par les soins de l'homme atteignait sa cible, la Lune, à 380 000 km de distance. L'impact se produisit à la vitesse de 3,30 km/s.

Pour marquer cet événement, la fusée portait un écusson fortement protégé par une cuirasse métallique, sur lequel on avait gravé, en russe, ces mots : « U. R. S. S. Septembre 1959. » Peut-être, un jour, un cosmonaute se promenant sur la Lune découvrira-t-il cet objet arrivé dans la mer de la Tranquillité. Le succès du lancement provoqua un délire d'enthousiasme en Union soviétique.

L'instant d'arrivée fut marqué par l'arrêt des émissions radio que la fusée n'avait cessé d'envoyer depuis son envol. C'est le professeur anglais Lowell qui, à l'écoute au radiotélescope de Jodrell Bank, annonça la nouvelle au monde.

Examinons la trace de la trajectoire sur le planisphère (*fig.* 67). Lancée de Baïkonour dans un plan faisant un angle de 65° avec les parallèles, la fusée passa en A sur le 65e parallèle nord à l'altitude de 1 800 km, à la vitesse de 10 km/s. En B, l'altitude était de 6 500 km et la vitesse était tombée à 8,12 km/s.

A ce moment, l'arc d'hyperbole que suivait la fusée commença à s'éloigner rapidement de la Terre, et se dirigea vers la Lune presque selon une ligne droite. Comme la Terre tourne d'ouest en est et que la composante vers l'est du mouvement de *Lunik II*, très importante au début de la trajectoire, était devenue de plus en plus petite, c'est le mouvement de la Terre qui devint dominant. La fusée fut tangente à la longitude 180° en C à 31 000 km d'altitude, la vitesse étant tombée à 4,90 km/s. En D, elle rejoignit l'équateur, son altitude étant alors 78 500 km, et sa vitesse égale à 3,6 km/s. La trace est restée, en gros, parallèle à l'équateur et en est revenue de l'est, allant vers l'ouest, pour s'arrêter au point I au moment de l'impact.

L'ÉNERGIE A BORD DU SATELLITE

Sources d'énergie dans l'espace

Le problème des sources d'énergie à bord, destinées à alimenter les systèmes de télécommunications, les servomécanismes, les instruments et dispositifs divers, est très complexe, surtout lorsqu'il s'agit d'une entreprise spatiale de longue durée nécessitant des engins de grandes dimensions. Certaines sources, typiquement terrestres, peuvent être placées dans les engins spatiaux. Les piles, à condition qu'elles soient hermétiquement fermées et protégées contre les sautes de température, fonctionnent régulièrement dans l'espace, même si elles s'épuisent relativement vite par rapport à leur masse. Les batteries d'accumulateurs, hermétiques et bien protégées, peuvent fonctionner pendant des mois et même des années, à condition d'être rechargées régulièrement grâce aux cellules solaires disposées à l'extérieur et capables de transformer directement en énergie électrique l'énergie reçue du Soleil.

● La technique des **cellules solaires,** négligée pendant de longues années à cause de son coût, a été, par la suite, rapidement perfectionnée, à tel point qu'aujourd'hui tous les corps cosmiques artificiels destinés à un séjour extra-terrestre actif de longue durée sont pourvus de batteries de cellules solaires, disposées souvent sur de larges « ailes » ou « voiles » qui donnent à l'engin un aspect particulier. L'ensemble « cellules solaires-batteries chimiques-dispositif de contrôle de charge » est d'un fonctionnement sûr, même s'il se révèle encombrant et lourd.

● On a expérimenté avec succès des **générateurs nucléaires à radio-isotopes** qui produisent de la chaleur, transformée partiellement en énergie électrique par effet thermo-électrique. Ces appareils peuvent fonctionner régulièrement pendant des années sans usure et sans incidents, mais ils sont eux aussi encombrants et lourds, eu égard à la puissance développée.

● On a également utilisé dans le domaine spatial les **piles à combustible,** notamment sur les véhicules *Gemini* et *Apollo*. A cet effet, on obtient directement du courant électrique à partir d'une réaction chimique se déroulant dans des conditions particulières.

On dispose aujourd'hui de piles à combustibles à oxygène-hydrogène capables de fournir une quantité importante d'énergie, tout en présentant un poids et un encombrement limités. Toutefois leur fonctionnement n'est encore ni stable ni sûr, ce qui a causé des ennuis sérieux au cours de certains vols *Gemini* et a failli transformer en véritable désastre le vol d'*Apollo XIII*. Pour des entreprises cosmiques de durée limitée, les piles à combustibles permettent une économie de poids de quelques quintaux et une réduction de l'encombrement d'environ 1 m^3, avantages tellement importants qu'ils ont amené les techniciens américains à prendre des risques. Au contraire, les techniciens soviétiques, qui ne les considèrent pas comme très sûres, ne les ont jamais utilisées.

● L'emploi à bord des satellites de **réacteurs nucléaires à fission** proprement dits relève d'un avenir assez éloigné et plutôt incertain. En effet, un réacteur nucléaire est tellement lourd que son emploi est exclu à bord d'un corps cosmique qui devrait, outre le réacteur, transporter la chaudière correspondante, une turbine et un générateur électrique couplé à la turbine. Les réacteurs deviendront certainement plus légers dans l'avenir, et les corps cosmiques plus grands. Mais il faudra attendre plusieurs dizaines d'années pour que l'emploi des réacteurs nucléaires embarqués devienne habituel, à moins qu'une révolution technique imprévue n'en change radicalement les données.

Cependant, des réacteurs nucléaires du type SNAP impair sont employés dans les stations ALSEP déposées sur la Lune.

● Les sources d'**énergie électrique** employées sur les satellites et sur le sol lunaire sont brièvement décrites ci-après.

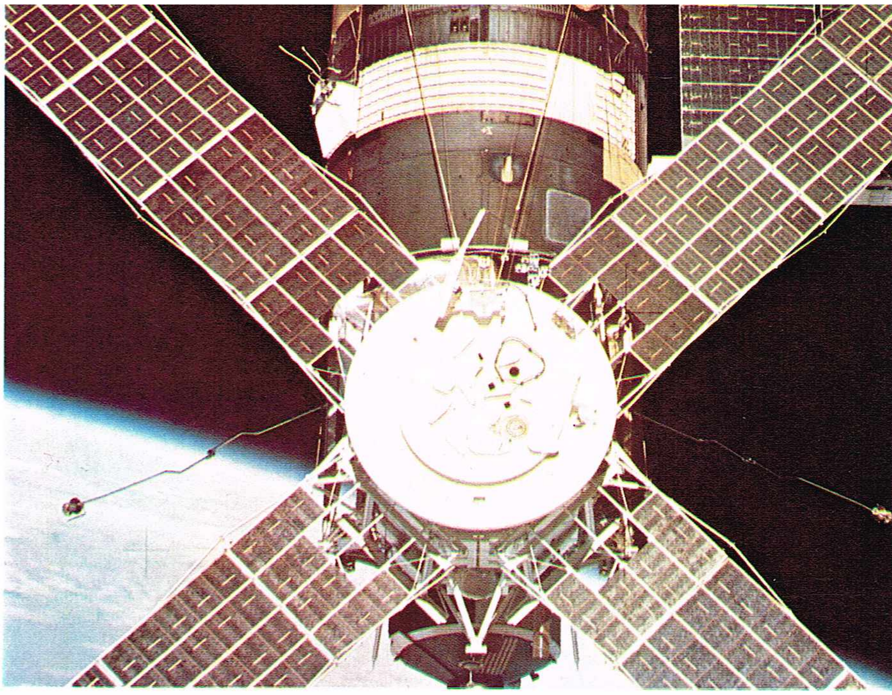
J. Tiziou - Sygma

▲ **Skylab IV.**
On peut observer les panneaux solaires.

Source solaire

L'énergie solaire est évidemment gratuite et pratiquement inépuisable. Son utilisation toutefois est très complexe. Deux méthodes sont possibles, l'une par conversion directe, l'autre par le truchement d'une machine thermique. Actuellement, seule la conversion directe est utilisée dans les *cellules solaires*.

Ce sont des plaquettes formées de la juxtaposition de couches de silicium différemment dopées d'impuretés. Elles transforment directement l'énergie solaire en énergie

fig. 68

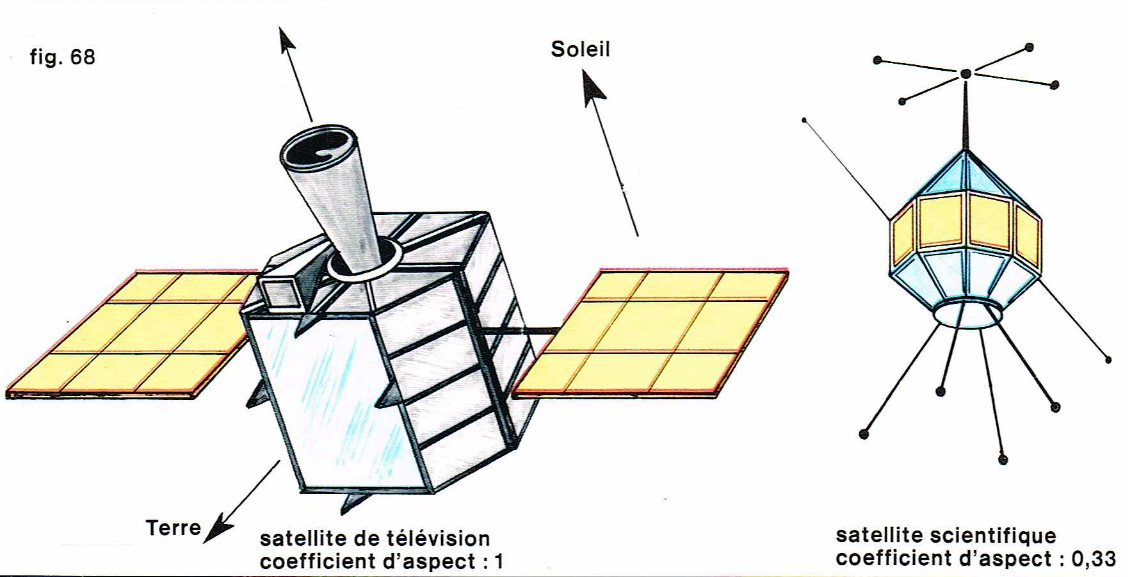

Richard Colin

◄ ***Figure 68 : alimentation d'un satellite en énergie solaire.***

fig. 69

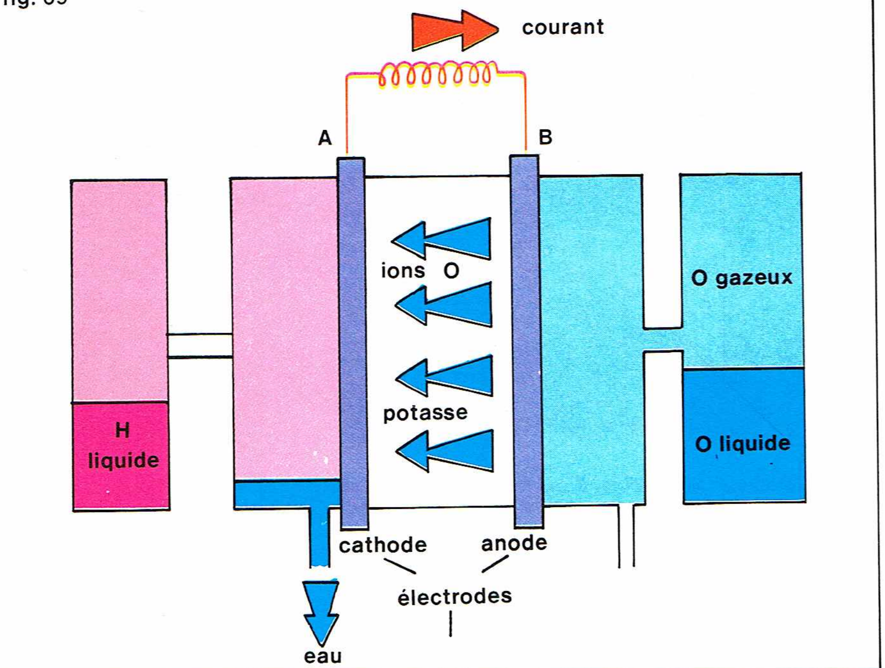

Richard Colin

▲ *Figure 69 : schéma d'une pile à combustible.*

électrique avec un rendement de 10 %. (Sur la Terre, l'énergie solaire reçue par une surface perpendiculaire aux rayons est de 2 calories par minute et par centimètre carré, soit 0,13 watt/cm^2.)

Leur emploi demande diverses précautions :

— un filtre violet doit arrêter le rayonnement ultraviolet qui rendrait opaque la colle servant à fixer les différents matériaux sur les cellules ;

— un filtre à infrarouge doit empêcher un échauffement excessif.

Les cellules solaires se présentent sous la forme de petits rectangles de 1 cm sur 2 cm. Les antennes solaires en contiennent des dizaines de milliers. Il est évident que l'énergie captée est maximale quand le plan des cellules est perpendiculaire aux rayons du Soleil.

Pour s'assurer que le satellite sera toujours alimenté en énergie solaire, on emploie deux méthodes (*fig.* 68) :

— On place les cellules de telle façon que la surface exposée au Soleil soit constante, quelle que soit la position du satellite. Ce résultat est obtenu en disposant les cellules sur des surfaces différemment orientées. Dans ce cas, la surface exposée n'est évidemment qu'une fraction de la surface totale des cellules. Le rapport de la première à la deuxième s'appelle *coefficient d'aspect*.

— L'attitude du satellite est contrôlée de façon que la surface des cellules reste perpendiculaire aux rayons du Soleil. Le coefficient d'aspect est alors égal à 1.

Accumulateurs

On peut constituer une source d'énergie tampon en faisant charger en permanence des accumulateurs pendant la phase d'éclairement. Ceux-ci sont du type nickel-cadmium, argent-cadmium et argent-zinc ; l'électrolyte est généralement une solution de potasse.

La durée de vie de ces accumulateurs peut atteindre plusieurs années. Utilisés en secours, ils fournissent la puissance de pointe nécessitée par des opérations coûteuses en électricité, comme les télémesures à grande distance.

▼ *Figure 70 : principe d'un générateur statique.*

fig. 70

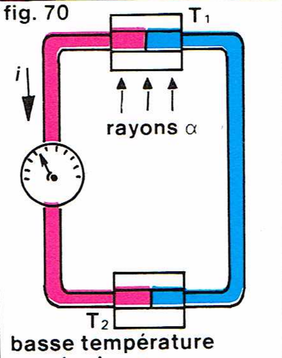

Richard Colin

Les piles à combustible

Vers les années 1960, les piles solaires semblaient la formule de l'avenir. Mais leur fragilité sous l'effet des radiations de l'espace a conduit à reconsidérer cette question. La puissance requise pour les premiers vols habités ne pouvait pas être fournie, d'ailleurs, par des piles solaires.

Les piles à combustible apparurent avec les vols *Gemini*. Leur principe est le suivant : lorsque deux corps de nature différente sont en contact, il y a toujours entre eux une différence de potentiel désignée sous le nom d'effet Volta avec passage d'un certain nombre d'électrons d'un corps à l'autre. Puis un équilibre s'établit avec des potentiels différents pour chacun des corps. Si l'on entretient ce transport d'électrons, on peut produire un courant électrique.

L'exploitation de ce phénomène se heurte en pratique à des difficultés considérables.

Pour les accumulateurs classiques, on sait que, lorsqu'ils sont mis en charge, leur effet principal est de décomposer l'eau contenue dans le bac. L'oxygène et l'hydrogène sont chimiquement fixés par le revêtement des électrodes. Le courant électrique de décharge provient de la recombinaison des deux gaz.

La pile à combustible (*fig.* 69) travaille de la même manière, à la différence toutefois qu'il n'est pas besoin de la charger, car l'hydrogène et l'oxygène sont envoyés sur les électrodes (argent, nickel), l'électrolyte étant la potasse. Entre les électrodes servant de parois aux deux réservoirs à oxygène et hydrogène gazeux, il y a des différences de concentration d'électrons, les deux gaz étant de nature différente. Les ions oxygène (atomes ayant perdu deux électrons), soumis au champ électrique de la cuve, parviennent à la cathode, ou électrode hydrogène ; là, ils se recombinent avec l'hydrogène et produisent de l'eau. Entre la cathode et l'anode, entre A et B, on a un courant électrique. La pile à hydrogène peut théoriquement donner 600 W/h/kg. Elle fournit de plus une substance particulièrement précieuse dans un satellite habité : l'eau.

La pile à combustible est préférable aux autres pour des missions d'une douzaine de jours (en ce qui concerne la chose essentielle : le devis de poids).

L'énergie nucléaire

Elle offre des possibilités exceptionnelles, puisque, à masse égale, l'énergie produite peut représenter plusieurs millions de fois celle des combustibles chimiques.

Diverses méthodes permettent de convertir l'énergie nucléaire en électricité.

Générateurs statiques

Ils utilisent l'effet Seebeck ainsi défini : lorsqu'on soude, en deux points, deux fils métalliques de nature différente et que l'on porte une des soudures à une température élevée, l'autre à une température basse, un courant prend naissance dans le circuit (*fig.* 70).

Les générateurs statiques utilisent des radio-isotopes comme sources de chaleur. Le principe consiste à enfermer le radio-élément dans un blindage auquel il délivre son énergie sous forme calorifique (par rayons α). Cette source chaude alimente des thermocouples qui utilisent en général le tellurure de plomb.

Les générateurs isotopiques présentent un triple intérêt par rapport aux piles solaires :

— ils fonctionnent dans l'obscurité ;

— ils affranchissent le satellite de la nécessité de maintenir les panneaux perpendiculaires aux rayons du Soleil ;

— ils ignorent les pannes sèches (trop fréquentes avec l'alimentation solaire quand elle est défaillante et que les accumulateurs sont déchargés).

Les générateurs isotopiques américains constituent la famille des SNAP impairs (System for Nuclear Assistance Power). C'est le SNAP 27 qui alimente les instruments de mesure et les émetteurs laissés sur la Lune.

Les SNAP utilisent de préférence du plutonium 238 comme source chaude (après avoir essayé le strontium 90 et le césium 144). Pourquoi le plutonium 238 ? Parce que c'est un sous-produit des besoins militaires, sans intérêt de ce point de vue. Il est donc à ce titre un déchet, alors qu'il devient un matériau idéal pour les techniciens de l'espace.

Les rendements des thermocouples sont très faibles. Aussi le SNAP requiert-il de grandes quantités de plutonium 238, ce qui représente des radio-activités considérables (le plutonium 238 est 18 fois plus actif que le radium). L'emploi du plutonium 238 est redoutable en cas d'accident et de pertes (Palomarès). C'est un poison extrêmement violent.

fig. 71

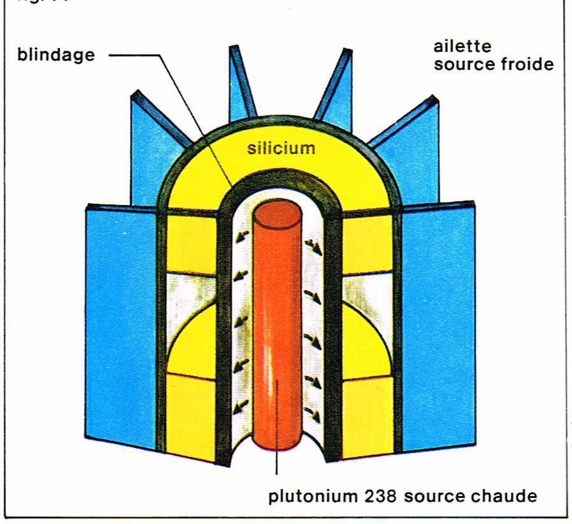

Richard Colin

Schéma de principe d'un générateur isotopique (pour station ALSEP sur la Lune). Le rayonnement du plutonium 238, placé au centre, chauffe le blindage (*fig.* 71). Les ailettes extérieures sont dans l'espace à une très basse température. Le courant peut être recueilli entre le silicium et le germanium, semi-conducteurs de types différents, dont le rendement chaleur-électricité est d'environ 5 %. Certains isotopes ont des durées de vie de plusieurs années.

Le phénomène mis en jeu est analogue à celui utilisé dans les thermocouples pour mesurer la température.

Il a pris une grande importance depuis la découverte de corps tels que le silicium et le germanium dont le rendement atteint 5 %.

Générateurs dynamiques

Ils sont très puissants. Ils constituent aux États-Unis la famille des SNAP pairs. Leur longévité est particulièrement intéressante pour les voyages lointains, et leur intérêt est considérable pour alimenter en électricité les moteurs ioniques.

Ce sont des machines à vapeur dont la chaleur provient de la radio-activité, ou plus exactement de réacteurs comme ceux des usines nucléaires (*fig.* 72).

Ces générateurs posent beaucoup de problèmes difficiles à résoudre :

— régulation des tensions disponibles et de la conversion de l'énergie électrique,

— diversification des tensions à partir d'une seule tension déterminée,

— blindage protecteur contre les radiations dans les vaisseaux habités,

— lubrification des machines tournantes dans le vide intersidéral,

— poids du générateur.

Pour une puissance de 50 kW (à comparer avec les autres sources d'énergie de 0,1 kW environ), la masse totale serait de 600 kg pour une durée de vie de plusieurs années.

TÉLÉCOMMUNICATIONS SPATIALES

Il ne servirait de rien d'envoyer des satellites dans l'espace si l'on ne pouvait rester en communication avec eux. On pourrait certes imaginer qu'un satellite habité n'est pas forcé de garder un lien avec la Terre et qu'on peut en confier la manœuvre à son seul équipage. Mais on voit mal comment on pourrait en user de même avec des satellites inhabités, notamment avec les sondes spatiales lointaines.

En fait, les astronefs emportant des passagers sont toujours restés, et sans doute resteront toujours en liaison avec la Terre, car c'est seulement au sol que de nombreuses équipes spécialisées, munies des instruments et des ordinateurs nécessaires, peuvent résoudre au mieux les problèmes qui se présentent aux astronautes pour leur en transmettre les solutions.

Archives Radaelli

fig. 72

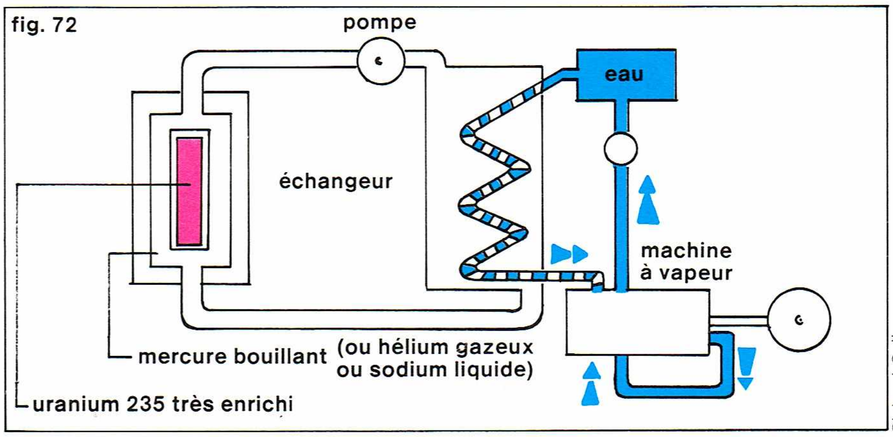

Richard Colin

L'expérience l'a d'ailleurs déjà prouvé; les équipes à terre sont parfois intervenues, apportant rapidement des remèdes efficaces à des situations précaires.

Le rôle du satellite est multiple, mais il doit en priorité, d'une part, recueillir des informations et les transmettre à la Terre par télémesure, d'autre part, recevoir de la Terre des ordres par télécommande et les exécuter.

Dans un autre ordre d'idée, le satellite s'est révélé précieux, comme relais des communications lointaines, en assurant une large couverture terrestre permanente.

Les fenêtres de l'atmosphère

Il existe dans l'atmosphère, à une altitude de 100 km environ, une couche dite de Heaviside qui réfléchit les ondes hertziennes habituelles.

Il serait impossible de communiquer avec un satellite orbitant au-dessus de cette altitude s'il n'existait pas de « fenêtres » par où deux groupes d'ondes traversent l'atmosphère sans entrave : le premier est constitué par les rayons lumineux visibles, le second par des rayons de haute fréquence.

Sur la *figure* 73, à gauche, se trouvent les longueurs d'onde les plus courtes, rayons γ, rayons X, rayons ultraviolets qui sont tous interceptés. Puis la fenêtre des rayons lumineux visibles, suivis des infrarouges dont les radiations calorifiques traversent en partie l'atmosphère, enfin, à partir de 1 cm environ, la grande fenêtre des ondes électriques de haute fréquence pour laquelle, à partir de 10 cm environ, l'atmosphère n'est plus un obstacle.

▲ En haut à droite, l'utilisation de l'énergie nucléaire à bord des véhicules spatiaux n'a pas été généralisée, mais des essais ont été faits. Les générateurs américains constituent la famille des SNAP (System for Nuclear Assistance Power). Ici, un SNAP 10 A; premier générateur nucléaire mis en orbite, il pouvait fournir 500 watts mais était très pesant et encombrant. Figure 71 : schéma de principe d'un générateur isotopique. Figure 72 : schéma d'un générateur dynamique.

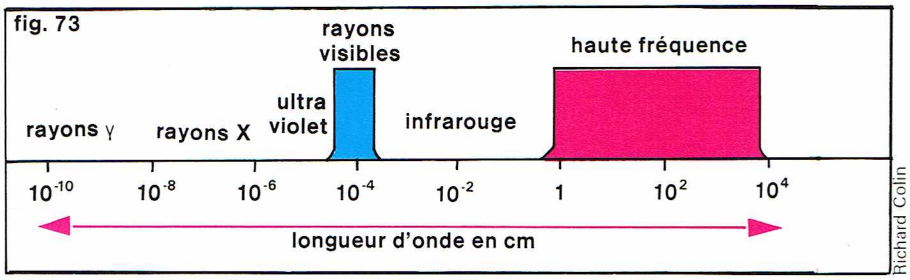

Richard Colin

▲ *Figure 73 : échelle des longueurs d'onde des ondes hertziennes. A droite, la « grande fenêtre » correspondant aux longueurs d'onde pour lesquelles l'atmosphère n'est pas un obstacle et qui permettent de communiquer avec un satellite.*

Choix de la longueur d'onde

Nous sommes donc devant un problème de technique des hautes fréquences, la fenêtre des rayons lumineux restant intéressante pour la poursuite optique et l'emploi des lasers.

L'expérience a montré que les transmissions radio-électriques sont meilleures sur les ondes dont la longueur va de 3 cm (fréquence 10 000 MHz) à 3 m (fréquence 100 MHz). Rappelons que le mégahertz (MHz) correspond à une onde de 1 million de cycles par seconde. Sa longueur d'onde est de 300 m.

Affaiblissement de propagation

Quand une énergie électromagnétique est émise en un point, elle conserve la même valeur sur la surface de chacune des sphères ayant ce point pour centre ; l'énergie reçue en un point de cette surface est donc d'autant plus faible que la surface est plus grande, c'est-à-dire que le rayon R de la sphère est plus grand. Cet affaiblissement dit de propagation s'exprime en décibels (dB), et il est égal à :

$$a = 10 \log \frac{\text{puissance émise}}{\text{puissance reçue}} = \frac{\lambda^2}{4\,\pi R^2}$$

(où λ est la longueur d'onde).

Par exemple, un rapport de puissance de 100 représente un affaiblissement de 20 dB, un rapport de puissance de 10 000 un affaiblissement de 40 dB, etc.

On comprend bien que cet affaiblissement est considérable, puisque toute la puissance est rayonnée sur une sphère. Il est facile d'y remédier en n'envoyant l'énergie que dans un étroit faisceau. C'est le rôle des antennes, qui est parfaitement comparable à celui que joue une lentille optique. On réalise donc un gain, donné par la formule :

$$G = \frac{6\,d^2}{\lambda^2}$$

où d est le diamètre de l'antenne.

▼ *L'astronaute A. Werden, pilote du module d'Apollo XV, flotte dans l'espace, hors de la cabine. Cette image en couleurs a été transmise par une caméra de télévision montée sur le module de commande.*

Sygma

Si la fréquence est doublée, donc la longueur d'onde divisée par 2, le gain est 4 fois plus élevé pour le même diamètre. Dans ce cas, on voit dans la formule de l'affaiblissement que ce dernier est 4 fois plus grand. Le gain donné par l'antenne compense donc l'augmentation de l'affaiblissement.

Cependant, il ne faut pas oublier que le satellite porte des antennes directionnelles, on a donc un deuxième gain d'antenne. Il y a donc tout intérêt à utiliser de hautes fréquences.

Bande passante

Quand on transmet une information, la succession des informations qui arrivent au récepteur se fait à un certain rythme. On dit que la *bande passante* est d'autant plus grande qu'elle peut transmettre plus de renseignements dans un temps donné.

Ce rythme doit être rapide quand l'image à transmettre comporte de nombreux points, comme c'est le cas pour la télévision. Leur arrivée doit paraître instantanée, pour éviter que l'œil n'en saisisse la construction.

On y parvient évidemment mieux si la fréquence qui porte les éléments d'information est élevée. C'est une raison d'adopter les hautes fréquences, qui s'ajoute à celle que nous avons soulignée ci-dessus.

La fréquence dépend cependant du type de réception à réaliser. Pour des satellites proches, dont le défilement est rapide, il est trop compliqué de les doter d'une antenne directive suffisamment mobile. La fréquence porteuse est choisie dans une basse échelle (100 MHz environ). Au contraire, pour les satellites lointains, dont la direction est presque fixe, on passe à des fréquences beaucoup plus hautes. Par exemple, les satellites *Tiros* de météorologie, qui travaillent à faible distance, utilisent une onde porteuse de 108 MHz de fréquence, tandis qu'un *Molniya* est sur 6 000 MHz environ, et la cabine *Apollo* sur des fréquences de l'ordre de 10 000 MHz.

Modulation

Pour transporter une information, il faut la superposer à l'onde porteuse : ce sont en effet les déformations de l'onde porteuse qui constituent l'information. On peut modifier une onde soit en modulant son *amplitude*, soit en modifiant sa *fréquence*.

Il y a donc un choix à faire entre la *modulation d'amplitude* et la *modulation de fréquence ;* on est guidé dans ce choix par leur aptitude à reproduire le signal avec une fidélité déterminée. A qualité égale de reproduction, la modulation de fréquence est beaucoup plus avantageuse, elle permet d'utiliser des puissances beaucoup plus faibles à l'émission. Elle est donc tout indiquée pour des émetteurs travaillant sur des satellites lointains, où l'on ne dispose évidemment pas de grandes puissances. A terre, au contraire, les puissances disponibles étant élevées, on utilise parfois la modulation d'amplitude.

Codage

Sur les très longues distances qui séparent de la Terre les sondes spatiales, le bruit qui entoure tout signal radio-électrique est considérable. Il devient nécessaire, pour distinguer l'information que l'on cherche à recevoir, de la différencier le plus possible du bruit de fond que constituent les parasites.

On obtient ce résultat, en général, en utilisant la télémesure *digitale* que permet un *codage binaire* dont le grand avantage est de n'avoir à différencier à la réception que les deux états zéro et un (ce qui ne demande pas un fort rapport signal/bruit).

Liaisons par laser

Le gain d'une antenne croissant avec la fréquence, la directivité d'un laser (dont la fréquence est dans la bande des 100 000 GHz) est telle que l'on pourrait transporter de l'énergie par son utilisation.

Signalons que nous avons déjà donné, dans le chapitre consacré à l'étude des orbites, une idée des étendues couvertes par un satellite du type *Molniya* ou par les géostationnaires américains.

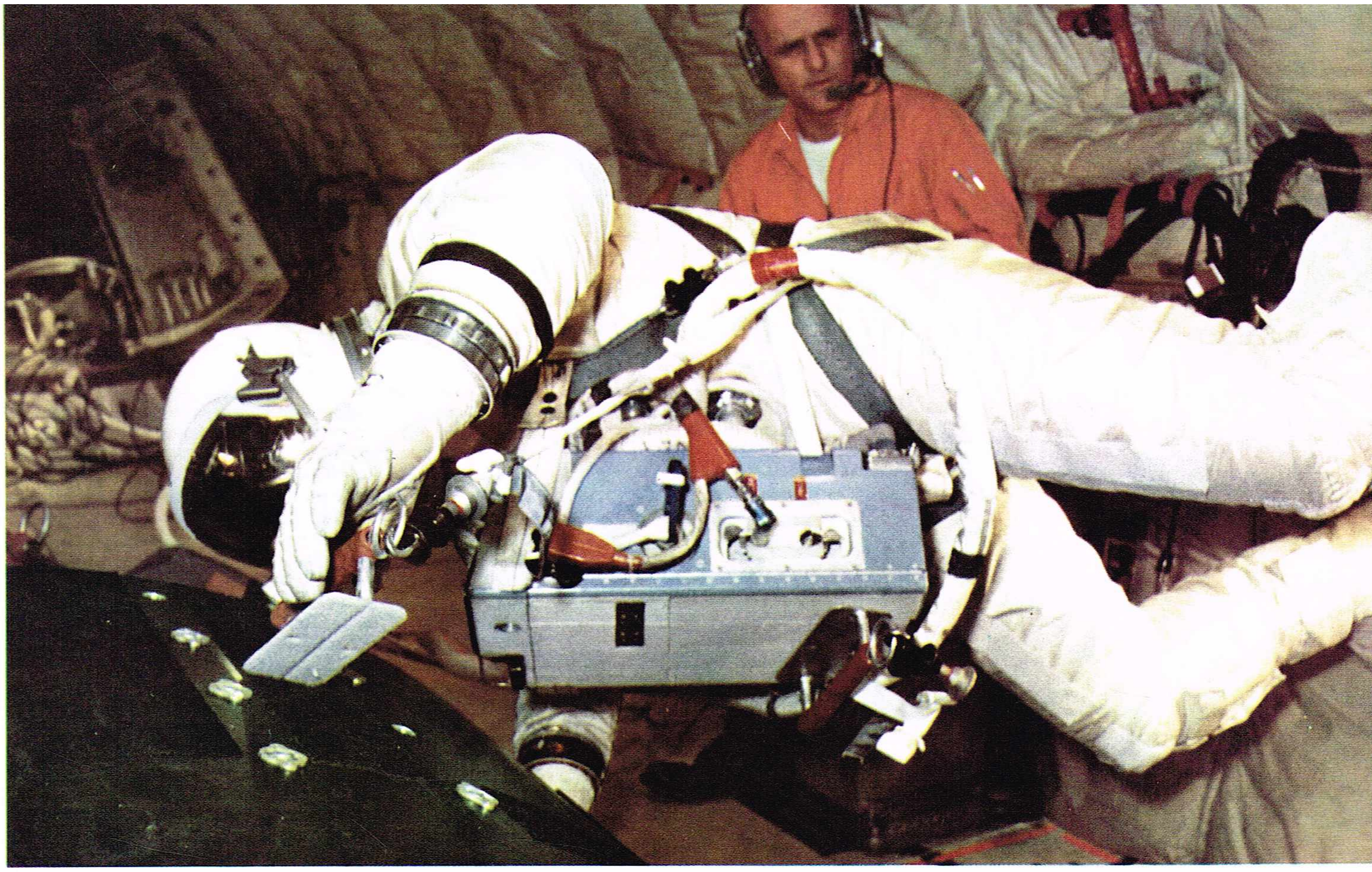

J. Tiziou - Sygma

▲ *État d'apesanteur. L'astronaute Aldrin Jr, pilote de* **Gemini XII**, *effectue des essais dans un simulateur. L'état d'apesanteur était mal connu avant l'essor de l'astronautique.*

SURVIE DE L'HOMME DANS L'ESPACE

L'organisme humain est absolument inadapté à des séjours dans l'espace sur une planète solaire autre que la Terre. Aussi a-t-on été obligé, avant de le soumettre à cette épreuve, d'étudier longuement les moyens qui lui permettraient de survivre et d'accomplir des fonctions délicates dans l'ambiance très particulière qui est celle d'une cabine spatiale, ou dans les conditions que créent, par exemple, sur la Lune, l'absence d'atmosphère et une gravité six fois moindre que sur la Terre.

Les expériences spatiales avec véhicules habités, véritables exploits — ne serait-ce que du point de vue physiologique — doivent leur succès à une longue série de recherches dont nul ne pouvait savoir à l'avance si elles donneraient à l'homme la possibilité de survivre et de travailler dans l'espace.

Pour arriver à ce résultat, les itinéraires prévus pour les véhicules habités ont été explorés au préalable par des engins spatiaux contenant des animaux. Les longs examens médicaux auxquels ils furent ensuite soumis permirent de penser que l'homme pouvait affronter les mêmes vols dans des conditions de sécurité suffisantes.

Parallèlement, un vaste programme fut organisé pour entraîner les cosmonautes à se familiariser avec les conditions spéciales qu'ils auraient à connaître durant leur mission. De plus, les véhicules cosmiques furent équipés d'un dispositif capable de déceler immédiatement toute intensification dangereuse des radiations afin de mettre en œuvre des moyens de protection efficaces.

L'état d'apesanteur

L'une des questions primordiales que se posaient les savants était de savoir comment les hommes se comporteraient en état d'apesanteur.

Cet état est d'autant plus mal ressenti qu'il succède à une période de forte augmentation de la gravité. L'accélération, en effet, s'accentue rapidement avec la chute de la densité de l'air et l'énorme diminution de la masse totale pendant les premières minutes de vol. On arrive à des accélérations de 20 g pour les fusées non habitées. Dans le cas des astronefs contenant des cosmonautes, on la limite volontairement à 6 g.

L'état d'apesanteur commence soit avec le vol balistique spatial sans poussée (la vitesse, qui est alors constante, entraîne une accélération nulle), soit avec la mise sur orbite pendant laquelle le poids de toute masse à bord de l'astronef ainsi que celui de l'astronef sont compensés par la force centrifuge qu'ils subissent. L'état d'apesanteur durera ensuite pendant tout le voyage sauf dans les périodes d'accélération ou de freinage qui sont relativement très brèves.

L'état d'apesanteur était assez mal connu avant l'essor de l'astronautique. Mais on sait bien aujourd'hui par quels effets il se manifeste : tous les objets flottent dans l'astronef si on les déplace ; au moindre mouvement, un homme peut venir se cogner brutalement sur la paroi opposée ; seule l'aspiration peut faire sortir un liquide de son récipient, à moins que l'on n'obtienne ce résultat en pressant un flacon en plastique.

Le sang dans les vaisseaux perd son poids, donc les veines des membres inférieurs qui, sur Terre, sont accoutumées à travailler pour renvoyer le sang au cœur, cessent cet effort. Aussi, après de longs séjours dans l'espace, certains cosmonautes se sont-ils évanouis parce que le sang revenait mal dans leur cerveau. Ce problème a été longuement étudié, et l'évanouissement très bref ne semble pas présenter un réel danger. Mais on pense qu'il faudra créer une gravitation artificielle pour des trajets de très longue durée si l'on ne veut pas s'exposer à des accidents plus graves.

Un autre trouble est comparable à celui qui survient lorsqu'un homme reste alité pendant une longue période. Le manque d'exercice aboutit à une décalcification : le calcium des os passe dans le sang et s'élimine ensuite dans l'urine. Afin d'y remédier, des séances d'exercice sont prévues.

Le tout premier essai en vue d'évaluer l'effet de l'état d'apesanteur sur un organisme supérieur fut effectué sur des singes vivants enfermés dans une fusée et ensuite parachutés. Ils avaient très bien résisté à cette épreuve, comme le montrèrent les cardiogrammes enregistrés pendant l'expérience. Cependant, la fin fut tragique pour ces pauvres animaux : largués au-dessus du désert de White Sands, ils ne purent être retrouvés à temps pour survivre. En U.R.S.S., ce fut sur des chiens que l'on étudia l'effet de l'apesanteur.

Voici comment furent réalisés les premiers essais sur les hommes : des aviateurs de l'US Air Force furent embarqués dans un avion, avec pour mission de décrire ce qu'ils ressentiraient dans différentes configurations de vol (piqués avec forte accélération, suivis de looping créant un état d'apesanteur de quelque 20 secondes). Les résultats obtenus furent assez différents parmi les 46 volontaires : 22 n'avaient ressenti aucun effet pathologique, seulement un léger trouble ; 14 avaient le mal de l'air avec vomissements. On en conclut qu'il fallait avant tout soumettre les futurs cosmonautes à des tests physiques très rigoureux.

Sygma

▲ *A. Scott, commandant de la mission* Apollo XV, *se soumet à des essais de pression. Un cosmonaute doit être habillé d'un vêtement d'altitude avec une pression maintenue constante à 155 mm Hg d'oxygène pur, la pression initiale de la cabine étant de 300 mm Hg.*

L'expérience a prouvé depuis ces premiers essais que des êtres humains, convenablement sélectionnés, résistent parfaitement à l'état d'apesanteur en ce qui concerne leur comportement ; mais cela n'exclut pas les troubles de décalcification et de perte de connaissance après des vols de longue durée si l'on n'y porte pas remède.

A bord des véhicules spatiaux

Certaines circonstances de la vie familière peuvent avoir des effets inattendus. L'évacuation des déchets, par exemple, provoque un mouvement de réaction de l'astronef qu'il faut compenser par un jet de gaz.

L'absence de courants de convection fait que l'air chaud demeure au contact du corps, que l'air expiré riche en gaz carbonique reste à proximité du visage, ce qui crée un danger d'asphyxie pendant le sommeil. On y remédie évidemment par un brassage mécanique de l'atmosphère de la cabine.

L'exiguïté de l'habitacle fait que toute variation dans la teneur en oxygène, due par exemple à un travail imprévu, trouble excessivement l'équilibre chimique du mélange artificiel de gaz emplissant la cabine.

La pression intérieure

On aurait voulu, pour des raisons techniques évidentes, adopter une pression intérieure dans l'habitacle très inférieure à celle de 760 mm Hg que l'homme subit sur Terre. On a été limité dans cette voie, car l'expérience a prouvé que, si une large portion de la cabine, par exemple, était détruite, la survie des cosmonautes dépendait de la différence entre les *pressions initiale et finale*.

En pratique, on a défini une protection certaine et totale : l'homme doit être habillé d'un vêtement d'altitude avec une pression maintenue constante à 155 mm Hg d'oxygène pur, la pression initiale de la cabine étant de 300 mm Hg (donc le double environ de la pression interne de l'habit).

Effets d'une forte décompression

Si la pression autour du corps tombe au-dessous de 47 mm Hg, les liquides de l'organisme se vaporisent et provoquent un refroidissement violent. En 30 secondes, il se produit un collapsus pulmonaire, un effondrement de la tension artérielle, des convulsions et la perte de connaissance. Cependant, l'homme peut être ranimé s'il est recompressé en moins de 80 secondes.

Lorsque le sujet protégé par un vêtement d'altitude sous pression est soumis à une décompression dans le vide, sans que la pression initiale dans la cabine *ait été préalablement abaissée* à un niveau convenable, il est victime de *dysbarisme par décompression*. Selon les sujets, cela se manifeste très diversement. Le trouble peut aller de la douleur légère à des troubles nerveux ou circulatoires graves, parfois mortels. Il faut donc prendre la précaution d'éliminer les sujets trop sensibles après les avoir examinés dans un caisson de décompression.

Quant au dysbarisme primaire, qui provient du dégagement de l'azote dissous dans les liquides de l'organisme et dans les graisses, on peut l'atténuer grandement en substituant à l'azote de l'atmosphère artificielle l'hélium qui, sept fois moins dense que l'azote, a un taux de diffusion plus grand. Les effets de la décompression sont environ quatre fois moindres.

Le taux d'oxygène

En ce qui concerne le taux d'oxygène, il faut trouver un équilibre entre la sous-oxygénation qui peut entraîner des troubles moteurs, avec impossibilité pour les sujets de se rendre compte des erreurs commises et de les corriger, et la suroxygénation qui entraîne d'abord des troubles psychiques légers, puis, plus tardivement, des nausées et des vomissements avec bronchite et fièvre. La conclusion des experts est que la pression d'oxygène doit être comprise entre 145 et 380 mm Hg.

La climatisation

La climatisation de la cabine a pour but de créer une ambiance confortable qui permette un rendement physique et un rendement intellectuel sans défaillance notable.

De longues expériences ont abouti aux conclusions suivantes : la température doit être maintenue entre 18 °C et 24 °C, l'humidité relative comprise entre 40 et 60 %, les vitesses de déplacement de l'air ne doivent pas provoquer des sensations de courant d'air.

L'atmosphère de la cabine doit enfin être asséchée par des méthodes physiques ou des procédés chimiques. L'humidité provient du corps même des cosmonautes (au niveau de la mer, à 20 °C, un homme au repos libère 50 g d'eau par heure).

L'épuration de la cabine spatiale

Elle est nécessaire à cause des différentes odeurs qui se concentrent, et des poussières qui restent en suspension dans l'air.

La ventilation étant trop coûteuse en énergie, l'épuration est obtenue par des systèmes complexes de filtres à laine de verre, à charbon activé et à huile.

Les accélérations

On les compte en astronautique en prenant comme unité l'accélération g que nous fait subir la gravitation terrestre à l'altitude 0 (c'est-à-dire 9,81 m/s^2).

Les cosmonautes subissent au départ des accélérations de l'ordre de 4 g. Au retour, les décélérations, bien plus violentes, peuvent atteindre 8 g.

Pour faire face aux dangers de l'accélération, la posture la plus favorable est la position couchée, les jambes placées légèrement plus haut que la tête, le corps bien serré dans un vêtement étroit afin de freiner les mouvements des organes en compressant le ventre. Des expériences réalisées sur des volontaires placés dans des centrifugeuses ont montré que certains d'entre eux ont résisté avec succès à des accélérations de 20 g (en station couchée).

Le temps d'application de l'accélération a une énorme importance. Un homme assis ne peut pas supporter pendant plus d'une seconde une accélération de 3 g sans

donner des signes de troubles qui vont jusqu'à provoquer sa mort si rien n'est modifié pendant un quart d'heure.

Les trop grandes accélérations, très brèves, peuvent fracturer les os, disjoindre les articulations, déchirer les muscles. (Phénomène assez peu connu, ces graves lésions peuvent se produire lors d'une brusque décélération, dans un accident d'auto, par exemple, sans que le corps porte sur les objets environnants.)

Le freinage à l'arrivée

L'un des moments les plus critiques, les plus dangereux et les plus éprouvants pour les cosmonautes est celui où l'astronef, à son retour de l'espace, possède par rapport à la Terre sur laquelle il va se poser une vitesse de plusieurs milliers de km à l'heure (40 000 km/h au retour de la Lune).

Si la Terre n'était pas entourée par une importante atmosphère, seul un freinage par rétrofusées pourrait annuler la vitesse d'impact. Il consommerait ainsi à peu près autant de combustible qu'il en a fallu au départ pour le porter au-dessus de l'atmosphère. Ce combustible, emporté dès le départ, diminuerait dans d'énormes proportions les performances de la fusée.

Heureusement, l'atmosphère terrestre permet de freiner l'astronef, et finalement de l'amener presque à vitesse nulle au sol, ce qui est toujours une opération très délicate.

Le corps cosmique doit être guidé vers un couloir idéal déterminé de manière précise, donc pénétrer dans l'atmosphère sous un angle bien déterminé. S'il arrive suivant une direction trop proche de la verticale, l'échauffement est trop rapide, et le corps est surchauffé au point d'en être sérieusement endommagé, sinon détruit. Si, au contraire, il est dans une position trop oblique, il glisse sur une couche superficielle de l'atmosphère et a tendance à rebondir pour tomber à nouveau, en faisant des ricochets très difficiles à contrôler.

Avant l'arrivée, l'astronef doit orienter son appareil propulseur, s'il en est pourvu, de manière à ralentir sa course, à se diriger correctement et à emprunter avec précision le couloir de rentrée. Commence ensuite la phase de la traversée des couches supérieures de l'atmosphère qui s'accompagne de toute façon d'un fort échauffement.

Un véhicule *Apollo,* de retour de la Lune, assure son freinage par une succession d'incursions en ricochets bien calculés dans les hautes couches de l'atmosphère (*fig.* 74). Cette manœuvre difficile permet, quand elle est bien exécutée, de se rapprocher le plus possible du point d'amerrissage prévu (où attend un porte-avions).

Le véhicule est muni d'un bouclier thermique (que nous décrirons plus loin) dont le but est d'évacuer par évaporation dans l'espace une grande partie de la chaleur provoquée par le frottement.

En outre, il présente en général une forme aérodynamique génératrice de portance. La trajectoire de rentrée est ainsi beaucoup plus longue et l'échauffement par friction moins intense. A la limite, si les caractéristiques dynamiques étaient suffisamment développées, on pourrait aboutir à une rentrée pilotée ou téléguidée qui exigerait peut-être plus de temps, mais qui éviterait la phase dangereuse du *black-out* et permettrait de réduire de manière importante les contraintes thermiques et mécaniques sur les structures portantes du véhicule.

Le black-out est en effet la phase la plus dangereuse de la rentrée : elle dure habituellement quelques minutes, pendant lesquelles le contact radio entre le véhicule et les bases terrestres est interrompu. L'atmosphère est en effet ionisée par le bouclier thermique qui se volatilise sous l'effet de la chaleur. Dès que la vitesse du véhicule est réduite, celui-ci sort une ou plusieurs antennes, et le contact radio est ainsi rétabli. Enfin s'ouvrent les parachutes : d'abord deux petits parachutes-freins à une altitude d'une dizaine de kilomètres, puis, à 5 000 m, trois grands parachutes.

La descente peut être ralentie à l'aide de fusées d'atterrissage à poussée verticale (utilisées pour l'arrivée sur le sol, en U. R. S. S.).

Les Soviétiques ont développé à fond la méthode de l'*atterrissage souple*. Leurs véhicules spatiaux arrivent, sauf cas particulier, sur la terre ferme et touchent le sol à une vitesse inférieure à 15 km/h. Les Américains, au contraire, ont toujours fait rentrer leurs véhicules sur la mer, à une vitesse de 35 km/h ou même un peu plus, exploitant l'effet amortisseur du *plongeon*. Mais celui-ci présente certains dangers parce qu'il porte le véhicule à plusieurs mètres de profondeur et aussi parce que, par mer agitée, la récupération se révèle parfois laborieuse. Une rentrée en catastrophe qui obligerait leur véhicule à descendre sur la terre ferme et non sur la mer, avec un impact sur le sol à la vitesse de 35 km/h, pourrait causer des blessures aux cosmonautes et endommager le matériel. Comme nous l'avons expliqué précédemment, ce sont vraisemblablement les conditions géographiques qui ont déterminé le choix de l'arrivée au-dessus de la terre, fait par les Russes, ou au-dessus de la mer, fait par les Américains.

Il faut noter que la résistance de l'air ne dépend pas uniquement de sa densité, mais aussi de la vitesse du projectile. Quand celle-ci est suffisamment réduite, la résistance diminue en dépit de l'augmentation de la densité de l'air.

La décélération atteint 8 *g* à 75 km d'altitude, alors que la vitesse est encore de 25 000 km/h (la première chute de vitesse provient de l'entrée progressive, très tangentielle, dans les plus hautes couches de l'atmosphère, ensuite la décélération diminue rapidement).

A 20 km d'altitude, la vitesse est d'environ 5 000 km/h, avec une décélération d'environ 1,5 *g*. L'astronef atteint alors une vitesse de chute aérodynamique, dite vitesse limite, qui est encore de 500 à 800 km/h. Elle sera presque annulée par les extractions successives de parachutes de plus en plus importants, qui réduisent la vitesse au moment de l'impact à environ 35 km/h.

Le bouclier thermique

Il revêt la partie basse de la cabine qui subit l'échauffement maximal pendant la phase de grande décélération. Il est fait d'un matériau ayant des propriétés ablatives, c'est-à-dire qu'il fond partiellement et perd de sa masse. Les matériaux fondus qui se volatilisent dans l'espace emportent avec eux une partie importante de la chaleur. Le bouclier se carbonise superficiellement, il dégage aussi des gaz qui constituent une protection pour les parois en s'écoulant. Les matériaux les plus utilisés sont faits de mélanges de verres ou de fibres de quartz.

Les parties de la cabine autres que le bouclier s'échauffent elles aussi, mais beaucoup moins. Elles sont protégées par une circulation d'eau entre deux parois et sont recouvertes de béryllium, métal qui a été choisi en raison de sa chaleur spécifique élevée et parce qu'il garde ses propriétés mécaniques jusqu'à près de 800 °C.

Séjours prolongés

On tente de créer, en vue de séjours prolongés en orbite de stations habitées (ou pour plus tard, lorsqu'il s'agira de voyages cosmiques de longue durée à l'intérieur du système solaire), un véritable milieu clos à équilibre naturel contrôlé, corrigé par les seuls instru-

fig. 74

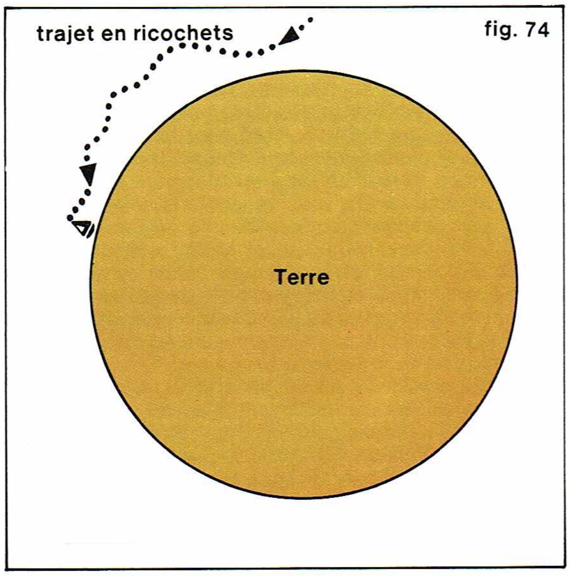

Richard Colin

◀ ***Figure 74 : un véhicule* Apollo *de retour de la Lune assure son freinage par une succession d'incursions en ricochets bien calculés sur les hautes couches de l'atmosphère.***

Keystone

▲ *Le président Pompidou devant la capsule américaine de la « mission Apollo XIV ». On remarque l'état du bouclier thermique, carbonisé superficiellement lors du retour dans l'atmosphère (XXIXᵉ Salon international de l'aéronautique et de l'espace du Bourget).*

ments de bord. Pour le réaliser, on peut raisonnablement penser à des cultures d'algues, capables d'absorber l'anhydride carbonique et de restituer au milieu l'oxygène, en utilisant l'énergie solaire que l'on peut faire facilement pénétrer dans les locaux à travers les hublots étanches transparents dont ils sont munis. On envisage aussi d'utiliser des bactéries, capables de transformer les déchets de l'organisme humain en composés organiques simples, utilisés comme engrais par les algues, ce qui pourrait réduire les provisions nécessaires d'oxygène et de substances destinées à l'absorption de l'anhydride carbonique. On s'intéresse, par exemple, à une algue comestible, *Chlorella*, qui se développe avec une grande rapidité, même dans des conditions éloignées des conditions terrestres.

Pendant plusieurs mois, les Soviétiques ont tenté de créer, à terre, un milieu de dimensions limitées, complètement séparé de l'extérieur, sauf en ce qui concerne l'apport d'énergie solaire. Au cours de l'expérience, il a été possible de maintenir à l'intérieur du local une atmosphère dans des conditions parfaitement équilibrées. De plus, mais en quantités insuffisantes, des cultures artificielles ont fourni des légumes et des végétaux divers à pouvoir calorifique élevé et forte teneur en protéines et vitamines. Dans cet ordre d'idée, il n'est pas improbable que, dans un avenir relativement proche, les stations orbitales permanentes soient dotées d'un système biologique capable de fournir au moins une partie de l'oxygène et des aliments nécessaires, tout en éliminant une grande partie de l'anhydride carbonique et des déchets biologiques humains.

▼ *Comment boire une orangeade dans l'espace.*

J. Tiziou - Sygma

Le repos et le travail dans l'espace - Les chantiers circumterrestres

Les programmes à court terme destinés à mettre en orbite une station orbitale permanente ont rendu le problème du travail dans l'espace urgent et concret. En effet, à l'intérieur du corps de la station existeront les conditions d'apesanteur déjà décrites : l'homme ne peut y effectuer aucun mouvement sans se cramponner à l'une des structures internes ou s'appuyer contre elle, ce qui demande un certain entraînement pour coordonner ses mouvements et éviter de casser des instruments.

Au repos, lorsqu'il est possible de se servir d'une couchette (comme cela a déjà été réalisé), l'astronaute s'y attache avec des sangles, car même un léger mouvement pendant le sommeil pourrait provoquer des déplacements imprévisibles de son corps. Tous les objets d'usage courant doivent être enfermés dans des tiroirs ou fixés aux parois par des systèmes de blocage à pinces, des aimants ou des crampons à ressort, faute de quoi ils flottent dangereusement dans le local. En outre, en l'absence de gravité, on ne peut pas, nous l'avons déjà dit, boire dans un verre ou verser un liquide ; on absorbe donc les liquides à partir d'ampoules spéciales en matière plastique déformable. Ainsi, en dehors des limitations imposées par le manque de place, les conditions de vie et de travail à l'intérieur d'une station orbitale ne sont tout de même pas inhumaines.

Plus complexe et délicat est d'effectuer à l'extérieur d'un vaisseau cosmique le travail nécessaire pour réaliser, par exemple, l'assemblage d'une grande station orbitale, pour faire des réparations et différentes inspections. Il n'est pas exclu qu'on puisse, dans un avenir proche, transporter pièce par pièce, sur une station orbitale, un vaisseau cosmique de très grandes dimensions destiné à des explorations lointaines interplanétaires. Il serait alors assemblé en orbite comme dans un véritable chantier spatial.

Nous parlerons plus loin des scaphandres ; un autre problème essentiel est celui des moyens de locomotion à court rayon dont doivent se servir les travailleurs de l'espace. Deux modèles ont été expérimentés avec succès, mais pendant des temps très courts. Les Américains ont utilisé un petit engin à réaction, indépendant, muni de poignées et doté de systèmes de régulation. L'astronaute, protégé par son scaphandre et ses gants, est entraîné par l'appareil et règle en même temps la poussée et la direction du petit moteur. Les Soviétiques, de leur côté, ont adopté la solution qui consiste à fixer sur le dos du scaphandre un moteur à jet orientable. On utilisera encore pendant longtemps, pour exécuter des travaux extérieurs dans l'espace, un câble de sécurité, indispensable pour le cas où l'homme perdrait le contrôle du petit appareil propulseur et de ses propres mouvements, car celui qui accomplit un effort pour bouger ou manier une pièce se met en mouvement et se déplace de façon désordonnée. Il faut un long entraînement et beaucoup d'adresse pour arrêter ces contorsions imprévues. S'il n'était pas attaché par un câble de sécurité, l'homme pourrait vite devenir un « objet spatial », très difficile à repérer, à surveiller et à rejoindre, même s'il était muni d'un appareil radio. Des éventualités de ce genre, remarquablement décrites dans la littérature de science-fiction et au cinéma, sont à envisager aujourd'hui en termes concrets.

La technologie du travail dans le vide, en l'absence de pesanteur, est graduellement mise au point : on ne peut pas utiliser de liquide (vernis, fluides réfrigérants, lubrifiants, matériaux dégraissants), car ils se volatilisent très rapidement. En revanche, les opérations de soudure sont facilitées par l'absence d'oxygène. Pour limer ou raboter, des précautions particulières sont à prendre pour éviter que l'opérateur ne se trouve entouré d'un nuage gênant de substances finement pulvérisées.

Sygma

fig. 75

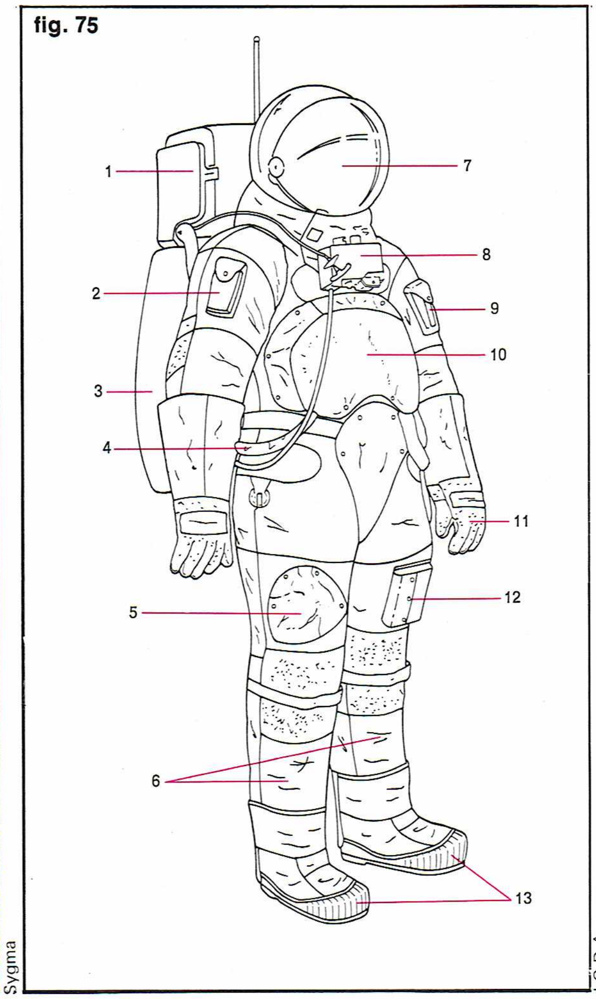

I.G.D.A.

◄ *A gauche, astronaute d'*Apollo *entièrement équipé. A droite, figure 75, schéma du scaphandre d'un astronaute : 1, appareil d'épuration de l'oxygène ; 2, petite poche pour les lunettes de soleil ; 3, récipient dorsal ; 4, tube d'arrivée de l'oxygène épuré ; 5, collecteur d'urine ; 6, protection thermique et antimétéorite intégrale ; 7, visière pour les activités hors cabine ; 8, boîte de contrôle des divers appareillages ; 9, poche pour un stylo lumineux ; 10, protection des appareils de télécommunication, ventilation, oxygénation et réfrigération ; 11, gant pour les activités hors véhicule ; 12, boîte pour petits outils ; 13, surbottes lunaires.*

Le scaphandre

Il a subi des modifications importantes depuis les premiers modèles utilisés pour les programmes *Mercury* et *Gemini*, au cours desquels les astronautes avaient été complètement aveuglés par leur transpiration.

On a d'abord utilisé un sous-vêtement à larges mailles parcouru par un réseau de fins tubes de plastique dans lesquels circule de l'eau. Ce système avait déjà prouvé son efficacité lors de courses automobiles sous des climats torrides : il est 70 % plus efficace que lorsqu'on n'emploie que de l'air. Ce sous-vêtement n'est utilisé que lors de l'excursion lunaire. Il est doublé par un deuxième système à circulation d'air qui est le seul à fonctionner pendant le vol.

Les joints des articulations doivent permettre leur mobilité, c'est pourquoi ils sont construits suivant une forme en accordéon. La pression interne maintient le torse du scaphandre. Le casque ne repose pas directement sur les épaules des cosmonautes, et il est amplement pourvu de plastique transparent pour assurer un grand champ de visibilité.

Les micros et écouteurs sont fixés sur un serre-tête, comme pour les pilotes d'avion. Des blocs de mousse amovibles protègent la nuque au moment du lancement.

Les bottes sont intégrées au scaphandre, mais les gants sont montés sur roulements à billes pour laisser une grande liberté de mouvement au poignet.

Le scaphandre porte un équipement dorsal qui est une véritable usine assurant la circulation et la déshumidification de l'oxygène, la circulation par pompe de l'eau de réfrigération, le fonctionnement de la ventilation et de la pressurisation. Il renferme les sources d'énergie nécessaires aux communications radio. Au sommet, un dispositif de secours permet d'utiliser une bouteille d'oxygène indépendante en cas de panne du système principal. Le grand récipient dorsal qui contient tous ces appareils est en fibres de verre et il est profilé de manière à s'adapter exactement au dos de l'astronaute (*fig.* 75).

EXPLORATION DE L'ESPACE ENTRE LA TERRE ET LA LUNE

Les missions de reconnaissance vers la Lune

L'envol du premier *Spoutnik*, suivi de quelques autres satellites, qu'ils fussent déjà très lourds en U. R. S. S., ou encore bien légers chez les Américains, fit naître dès 1957, dans l'un et l'autre camp, l'espoir de réaliser un vieux rêve, celui de lancer des vols interplanétaires.

On a vu que l'énergie nécessaire pour parvenir sur l'orbite lunaire est très proche de celle qu'il faut pour parcourir le système solaire. Cependant, les voyages interplanétaires sont infiniment plus longs que le trajet Terre-Lune ; il était donc naturel que celle-ci devînt le premier but que se fixèrent les deux Grands.

Il faut souligner que la progression incessante, depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale, de la puissance et de la masse des fusées *a toujours été guidée* par le désir de réaliser un missile militaire capable de porter des charges de plus en plus lourdes.

La première raison de l'avance soviétique en ce qui concerne le tonnage lancé dans l'espace est d'ordre strictement militaire. L'U. R. S. S., n'ayant pas de base proche des États-Unis, chercha à construire d'emblée un ICBM au lieu des IRBM de moyenne portée dont pouvaient se contenter les Américains dotés de nombreuses bases de lancement à proximité de l'U. R. S. S. *Thor*, missile militaire à portée moyenne, *Atlas*, premier missile stratégique de 10 200 km de portée, *Titan*, construit sur ordre de la Défense pour pallier un possible échec de l'*Atlas* encore en construction, sont avant tout des armes de guerre, tout comme l'est le *Vostok* soviétique.

Quoi qu'il en soit, il ne pouvait longtemps échapper aux spécialistes que les missiles militaires, de plus en plus puissants, étaient également capables de satelliser

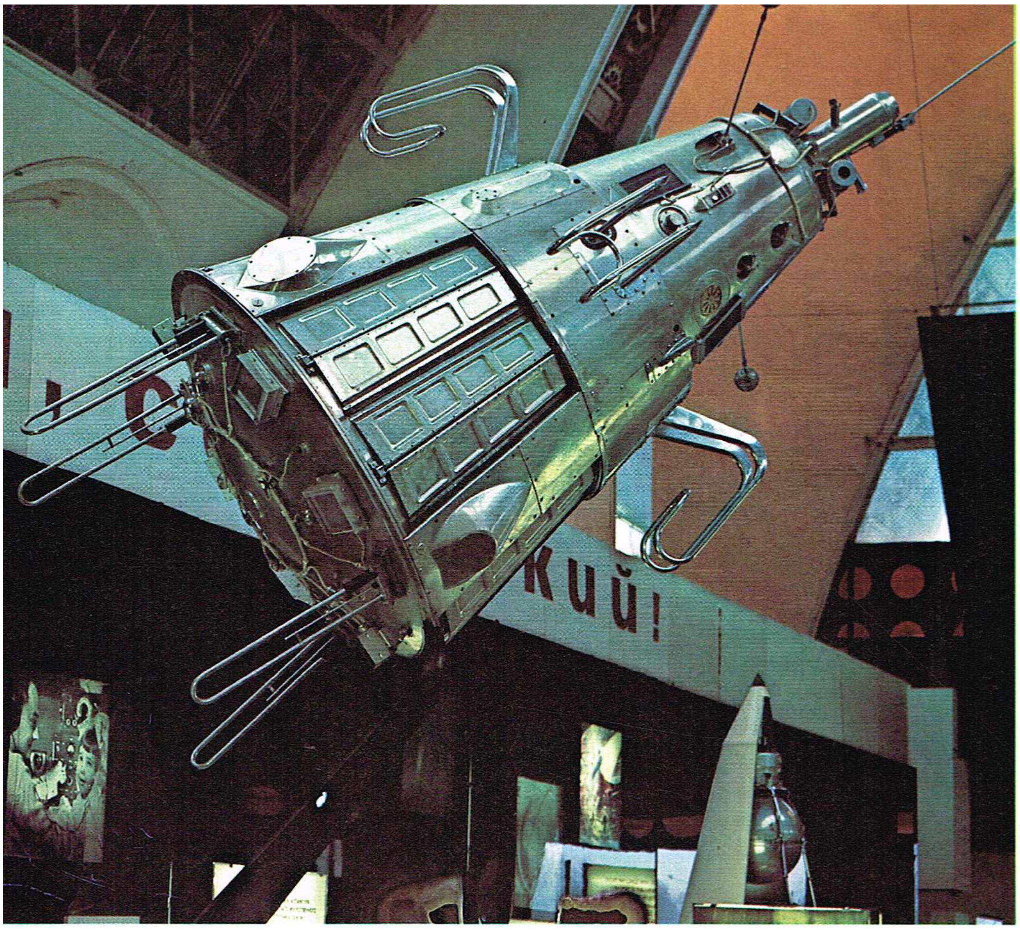

Photo A.P.N.

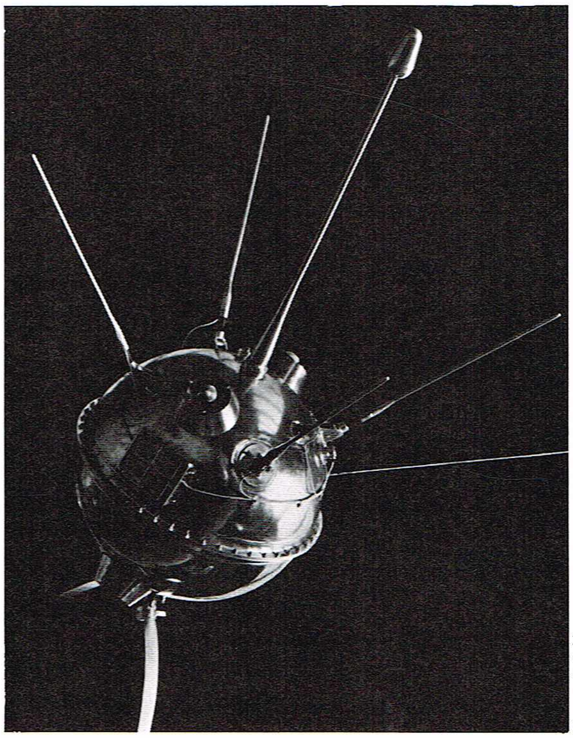

Photo A.P.N.

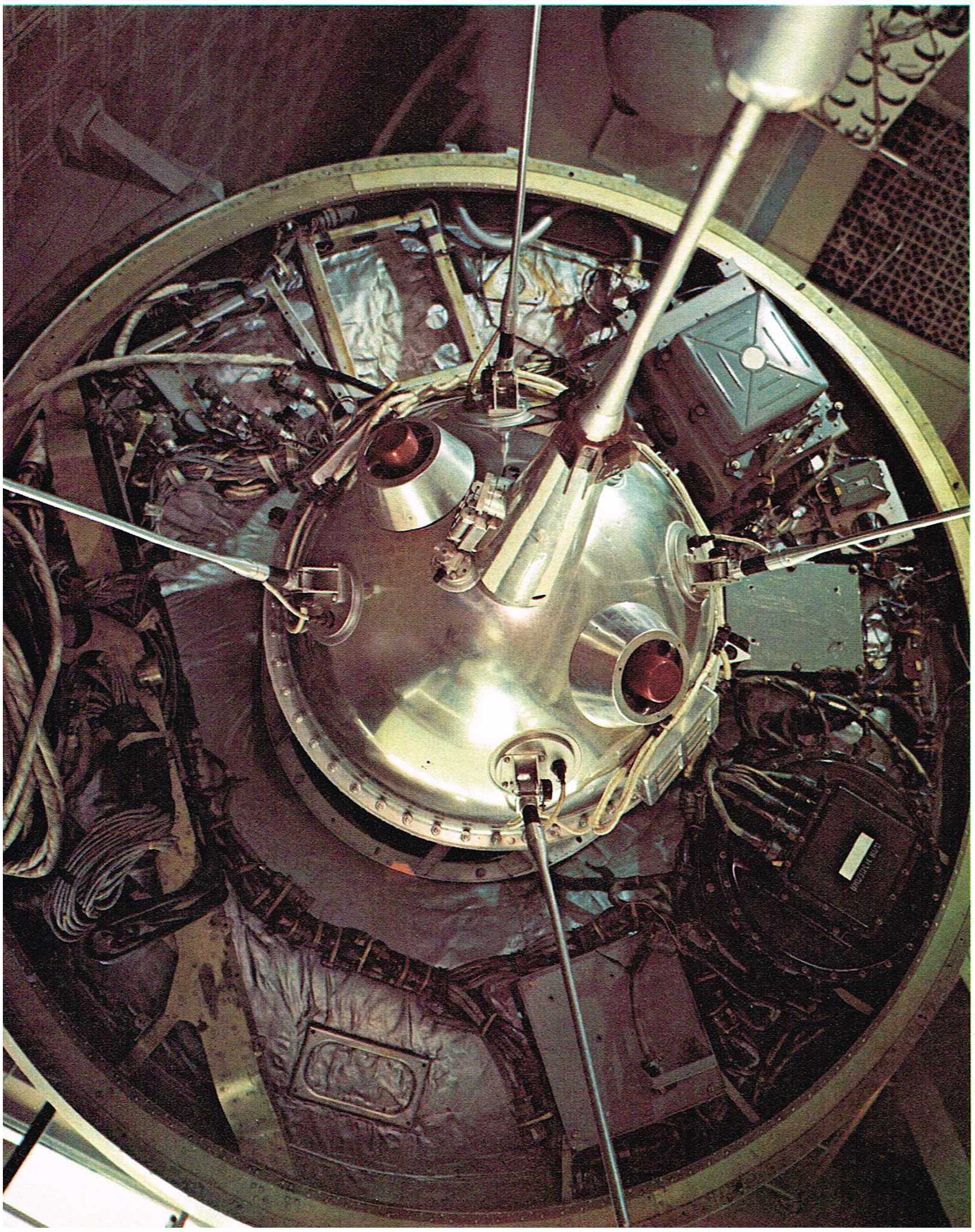

Photo A.P.N.

et même de libérer des charges utiles de plus en plus grandes dans l'espace. Lancés dans une compétition avant tout militaire, il eût été bien étonnant qu'au moment où ils commençaient de penser « satellites » au lieu de « missiles », ils n'eussent pas entrevu aussitôt que les objets satellisés pouvaient rentrer également dans l'arsenal de guerre, qu'ils soient moyens d'espionnage ou de guet, ou menace orbitale.

En 1957, en tout cas, avec le triomphe des *Spoutnik*, l'imagination des savants s'évada dans l'espace. Le premier but à atteindre fut aussitôt désigné, les Américains le proclamant tout haut par la voix de leur président, les Russes le laissant presque inaperçu dans le programme de leurs expériences : il s'agissait de débarquer un homme sur la Lune.

Et comme il n'était pas question de se lancer sans précautions dans une aventure d'un prix exorbitant et pleine de risques inconnus, on décida aussitôt de pousser des missions de reconnaissance vers la Lune. Elles dépendaient étroitement des performances des fusées, et le champ de leurs investigations s'étendit au fur et à mesure que la puissance croissante du vecteur permit d'aller plus loin en portant plus de poids.

Les premiers tirs lunaires

L'exploration spatiale cependant fut influencée par l'esprit de compétition. L'humiliation ressentie après la satellisation de *Spoutnik* ne fut pas toujours bonne conseillère : c'est à la hâte que furent montés les premiers lancements américains. Les États-Unis voulaient à leur tour réaliser une grande première. C'est alors qu'ils lancèrent le programme *Pioneer*.

Pioneer

Une fusée *Thor*, surmontée d'un étage *Able* et d'une sonde *Pioneer* fut lancée le 18 août 1958 ; sa vitesse finale se révéla insuffisante, et il fallut la faire exploser à 15 km d'altitude. Il en fut de même avec *Pioneer II* le 12 octobre suivant et avec *Pioneer III* le 8 novembre.

L'insuccès était complet. Les Américains, qui comptaient sur ce programme pour rehausser leur prestige national, étaient atterrés. (« Pourtant, remarqua von Braun, ce n'est que des échecs que l'on tire des enseignements. ») Ces engins eurent malgré tout un intérêt scientifique appréciable en faisant mieux connaître les ceintures de radiations qui entourent notre globe, mais ce n'était qu'une mince consolation au regard des objectifs visés, et l'écart restait considérable entre les deux Grands.

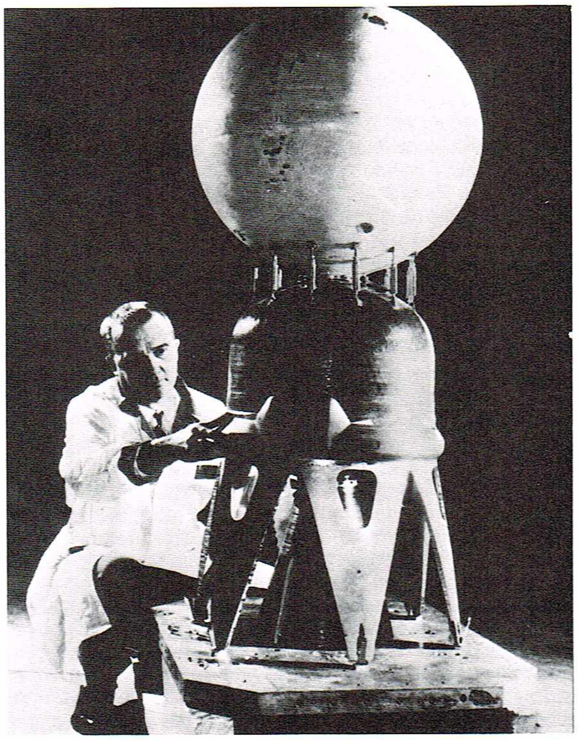

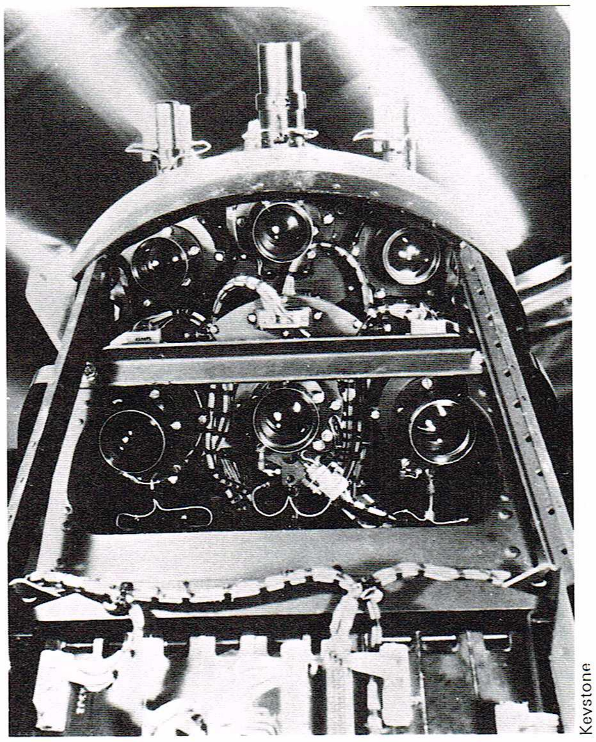

◀ *Capsule lunaire* **Ranger III.** *Cette capsule était chargée de recueillir des renseignements quant à la structure de l'écorce et des cratères lunaires. La boule de balsa, montée sur la rétrofusée, devait contribuer au ralentissement de l'engin.*

Les six caméras de télévision de **Ranger VII.** *Elles furent déclenchées au moment où l'engin se trouvait à 3 200 km. Pendant 18 secondes, avant de s'écraser comme prévu sur la Lune,* **Ranger VII** *envoya un grand nombre de messages qui permirent de reconstituer 4 308 images d'excellente qualité, dont la dernière prise seulement à 300 mètres d'altitude.*

A cette époque, la fusée soviétique reçoit un troisième étage qui permet de lancer dans l'espace des poids de près de 400 kg, alors que les engins qui seront lancés par des fusées *Juno II*, aux États-Unis, n'atteignent pas 10 kg de charge utile.

Luna

Au début de l'année 1959, les Russes, à nouveau, créent la surprise : pour la première fois dans l'histoire de l'humanité, un engin lancé par l'homme se libérait de l'attraction terrestre. C'est le 2 janvier 1959 que la *Luna I* ne manqua la Lune que de 6 500 km.

Un événement spectaculaire marqua cette grande première. La sonde largua dans l'espace du sodium qui, sublimé par le rayonnement solaire, se révéla comme une belle comète jaune visible de certains points de la Terre pendant quelques minutes. On a montré précédemment combien est difficile le tir balistique sur la Lune : le moindre écart en direction, ou le moindre décalage de l'instant de lancement, suffit à faire manquer le lointain rendez-vous. Ne manquer la Lune que de 6 500 km représentait déjà un exploit sensationnel.

Les Américains réalisaient certes un lancement avec *Pioneer IV*, deux mois plus tard, mais la sonde passa à 60 000 km de la Lune, dix fois plus loin que n'avait fait *Luna I*.

Ce demi-succès n'en engendra pas moins un certain optimisme. Optimisme de courte durée, car le 12 septembre 1959 *Luna II* faisait mouche sur sa cible, la Lune, sur laquelle elle s'écrasait à la vitesse de 3,33 km/s, ce qui laissa quelques doutes sur les chances de retrouver la boule armoriée introduite à l'intérieur de la sonde pour laisser sur notre satellite la première empreinte humaine.

Quelques jours plus tard, *Luna III*, d'une masse de 435 kg, prenait le départ. Mission : contourner la Lune pour en photographier la face cachée. La sonde parcourut une ellipse autour de la Terre et, passant à son périgée, transmit les photographies prises pendant 40 minutes, qui représentaient 70 % de la face cachée de la Lune. Pour la première fois, on put dresser un atlas de cette face jusqu'alors inconnue. Ce fut encore un indéniable et immense succès pour les Soviétiques.

Les Ranger

S'estimaient-ils comblés ou, plus simplement, n'ont-ils pas préparé la suite? Toujours est-il que de *Luna III* lancée en octobre 1959 jusqu'à *Luna IV* s'écouleront près de quatre ans. Cependant, les Américains se décident enfin à entrer avec tous leurs moyens dans la compétition, et un important programme scientifique est mis sur pied, celui des *sondes lunaires Ranger*.

Le but poursuivi, cette fois, va bien au-delà de se satisfaire de l'écrasement de la sonde sur la Lune, puisque les Américains cherchent à la faire arriver sur cette planète avec une vitesse suffisamment faible pour que des instruments bien protégés puissent entrer en action après l'alunissage. Ces instruments comprenaient un sismographe (destiné à déceler les tremblements de Lune et les chocs des météorites), un appareil de mesure des variations de température, et, bien entendu, l'émetteur radio. Ils étaient tous contenus dans une sphère de 30 cm de diamètre protégée par une enveloppe de balsa épaisse de 15 cm.

Sur commande d'un altimètre, la sonde devait se libérer à 21 km de la Lune. La rétrofusée avait ensuite à réduire la vitesse à 240 km/h. On espérait que la coque en balsa suffirait à protéger les instruments à cette grande vitesse d'impact. N'était-ce pas un peu chimérique? Quoi qu'il en soit, il n'est pas déraisonnable de penser que c'est à la violence de ce choc que les sondes, parvenues à destination, durent de rester muettes.

La fusée choisie fut une *Atlas Agena B*. Le 23 août 1961, elle plaça correctement sur orbite terrestre le premier *Ranger*, mais l'étage *Agena* refusa de fonctionner. L'ensemble se consuma une semaine plus tard en pénétrant dans l'atmosphère. Un *Ranger II* n'eut pas davantage de chance. Pour *Ranger III*, *Agena* fonctionna parfaitement, et même beaucoup trop, car aucune correction ne put diminuer la vitesse excessive du lancement. La sonde, très en avance sur la Lune, la manqua et devint satellite du Soleil le 26 janvier 1962.

Ranger IV s'écrasa le 26 avril 1962 sur la Lune, renouvelant près de trois ans après l'exploit de *Luna II*. La sonde aurait dû envoyer des messages radio. Mais elle resta muette, comme le restera six mois plus tard *Ranger V* qui passa à 724 km de la Lune. Avec lui finissait la première phase des lancements *Ranger*, marquée par beaucoup d'insuccès. C'est de leur étude que naquirent de nombreuses modifications. Un effort important fut donné à l'amélioration des prises de vues. Désormais les sondes porteront 6 caméras dont on peut voir la disposition sur la photographie ci-dessus. La nouvelle phase *Ranger* commença le 30 janvier 1964 avec l'envoi de *Ranger VI*.

Ranger VI fut d'abord mis sur orbite 180 km avec *Agena*. Celle-ci, mise à feu, injecta la sonde sur ellipse de grand axe 400 000 km, dont l'apogée était par conséquent derrière la Lune, qu'une correction en cours de

◀ *Page ci-contre : en haut à gauche,* **Spoutnik III.** *En bas, la station automatique* **Luna I** *avec le dernier étage de la fusée porteuse. En haut, à droite, station automatique* **Luna II.** *Le 12 septembre 1959,* **Luna II** *atteignit bien la Lune, mais à une vitesse telle (3,33 km/s) qu'il y a peu de chances de retrouver les renseignements qu'elle contenait.*

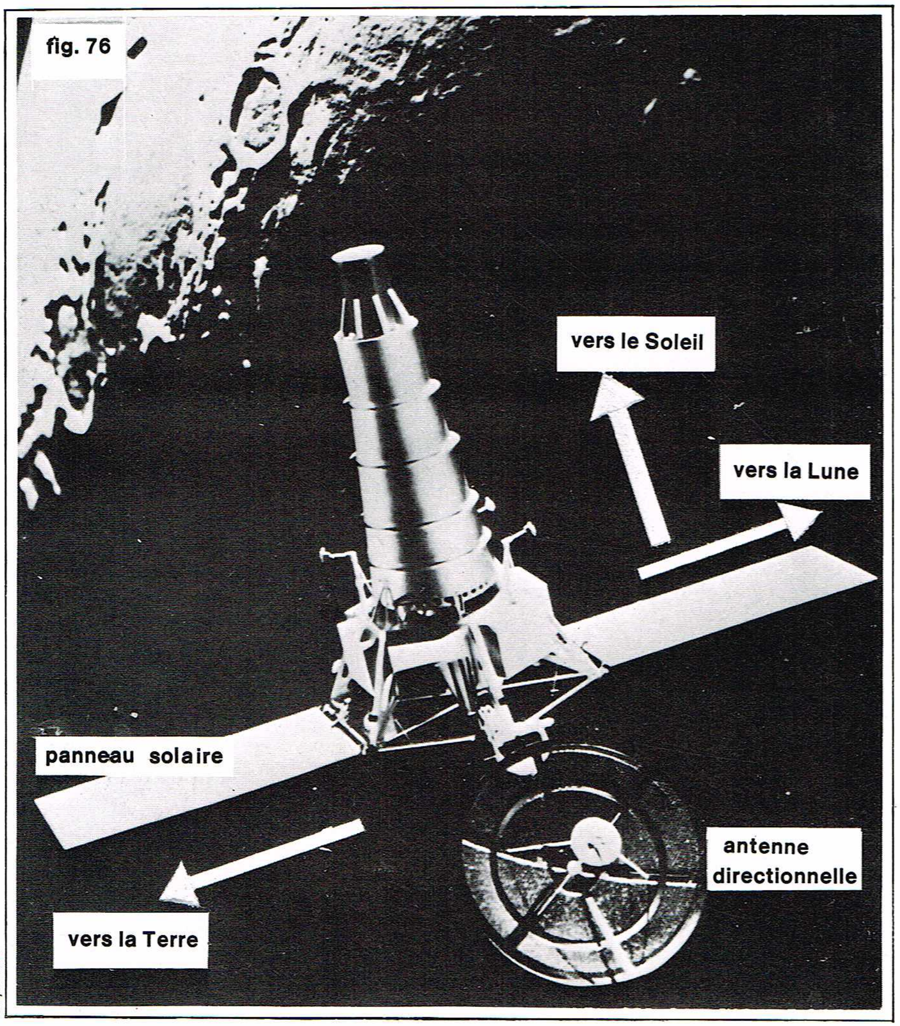

Keystone

▲ *Figure 76 : structure des derniers* Ranger.

▶ *Page ci-contre, en haut, figure 77 : capsule d'alunissage de* Luna IX. *Les quatre « pétales » permettent à la sonde de rester en bonne position après l'impact. En bas, figure 78 :* Luna XII, *lancée le 22 octobre 1966, donna de bonnes photos ainsi que des informations sur la gravitation lunaire, le rayonnement gamma de la Lune, et la densité du flux de météorites dans son voisinage.*

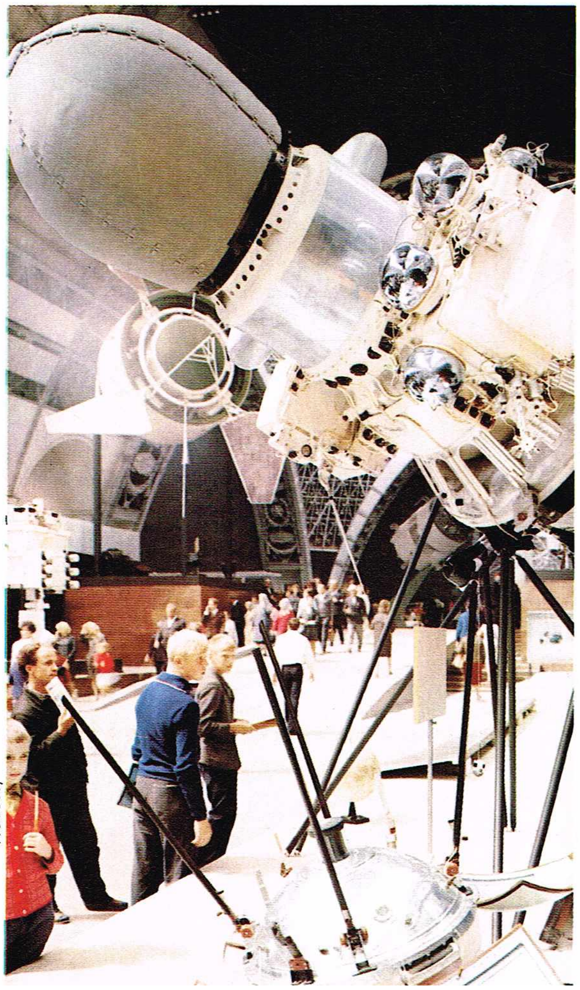

Novosty

▶ Luna IX, *première sonde ayant effectué un alunissage en douceur, exposée à Moscou.*

trajet permit de bien viser. Mais aucune réponse ne parvint à l'ordre de mise en marche des caméras. Aucune photo ne fut envoyée. C'était un nouvel échec.

Ranger VII fut lancé le 28 juillet 1964. Tout marcha bien. Pour alimenter en énergie électrique les caméras et la télévision, la sonde déploya ses panneaux solaires. Les caméras furent déclenchées au moment où l'engin se trouvait à 3 200 km de la Lune. Pendant 18 secondes, avant que *Ranger VII* s'écrasât sur la Lune comme prévu, il envoya un grand nombre de messages permettant de reconstituer 4 308 images d'excellente qualité, dont la dernière a été prise seulement à 300 m d'altitude. (La définition des détails lunaires était 2 000 fois plus grande que sur les photos lointaines prises auparavant.) La *figure* 76 montre la structure des derniers *Ranger VI, VII, VIII* et *IX.*

Ranger VIII prit son envol le 17 février 1965. La fusée s'écrasa sur la Lune à 24 km du point prévu. Les caméras envoyèrent 7 137 excellentes images.

Ranger IX, dernier de la série, fut lancé le 21 mars 1965 et transmit 5 814 photos. La précision du tir fut extraordinaire, puisque l'impact se produisit à 4 km du point prévu. Pendant les 18 minutes de transmission, tous les appareils de télévision américains purent recevoir en direct le film de l'approche du sol lunaire jusqu'à l'instant de l'écrasement.

Le programme Ranger, qui avait mal débuté, finit ainsi en apothéose. Mais sa première phase, destinée à déposer sur la Lune des instruments qui devaient effectuer quelques mesures simples et les renvoyer à la Terre par radio, avait entièrement échoué pour des raisons diverses. Pour les deux premiers, ce fut l'étage *Agena* qui refusa de se rallumer. Le troisième *Ranger* manqua la Lune, le quatrième s'y écrasa, mais resta ensuite muet. Il en fut de même pour le cinquième.

Ce n'est qu'à partir du moment où l'on ne demanda aux *Ranger* que de prendre des photographies dans les minutes précédant leur écrasement que le succès fut assuré. Il était décisif, car les vues prises à bout portant révélaient les moindres détails du sol lunaire. Des cratères de 4 m de rayon y étaient facilement repérables. Cependant il ne s'agissait que de photographies et l'on ne pouvait faire que des hypothèses sur la nature physique du sol et sur l'ambiance lunaire. C'est donc au *programme Surveyor* suivant que l'on confiera la mission de les analyser.

Les Luna

Toutefois, entre le dernier lancement *Ranger* (*IX* le 21 mars 1965) et le premier lancement *Surveyor* (30 mai 1966), les Soviétiques vont entamer une nouvelle étape de leur exploration. Ils n'ont lancé, depuis 1959, qu'une seule *Luna*, la *Luna IV*, dont l'objet était sans doute d'étudier la technique des voyages lents, préparant l'alunissage en douceur. La sonde était en effet placée sur une ellipse terrestre de 90 000 km de périgée et 400 000 km d'apogée. (Plus le trajet est long, plus faible est la vitesse au voisinage de la Lune, c'est bien ce que l'on recherche, car elle sera plus facile à annuler pour réaliser un alunissage en douceur.)

Il faut observer que *Luna III* date d'octobre 1959. *Luna IV* attendra presque quatre ans, puisqu'elle est lancée en avril 1963. Et *Luna V* ne prendra son vol qu'à la fin de mai 1965. Ces longs délais suggèrent des recherches approfondies et des mises au point laborieuses. Pourtant, il faudra attendre le lancement de *Luna IX* pour enregistrer un succès.

La façon dont sont constituées les sondes *Luna* vaut qu'on s'y arrête. Au contraire des sondes américaines, conçues chacune en vue d'une mission précise, les *Luna* sont toujours faites de deux parties bien distinctes : le bloc moteur et la charge utile. Ces deux parts sont indépendantes ; quand la charge utile est à pied d'œuvre, elles se séparent. Toutes les *Luna* ont les mêmes organes de propulsion et de stabilisation. Les réservoirs sont plus ou moins remplis selon la poussée requise, la charge utile servant de complément variable pour que l'ensemble ait un poids voisin de 1 600 kg. La charge utile peut donc être très différente d'une *Luna* à l'autre, suivant la mission qui lui est impartie.

Une sphère solide contient les réserves de comburant. Son hémisphère inférieur est entouré d'un réservoir en

forme de tore contenant le combustible. Un cylindre contient les batteries, les systèmes inertiels et de stabilisation, les commandes du propulseur. L'attitude est contrôlée par quatre petits moteurs fixés au tore. L'arrière est caréné à partir du tore jusqu'à la grosse tuyère. De petites sphères réparties dans les volumes vacants contiennent le gaz du système de stabilisation.

Le système d'orientation prend comme références le Soleil et la Lune, quand la sonde en est encore éloignée. La distance est mesurée grâce à un signal émis par la sonde sur télécommande de la Terre, et la vitesse par le glissement de fréquence de ce signal (effet Doppler) ; la direction de la sonde est évaluée à partir de la Terre. Ces trois paramètres permettent de définir la trajectoire.

Malgré les améliorations apportées, il faudra attendre *Luna IX* pour obtenir un succès. *Luna V*, destinée à alunir, ne fonctionna pas correctement. Certaines photos d'observatoires montrent un nuage de poussière qui serait la conséquence de son impact (9 mai 1965).

Luna VI, lancée le 8 juin 1965, mais mal dirigée, manqua la Lune de 160 000 km.

Luna VII, lancée le 4 octobre 1965, s'écrasa comme *Luna V*.

Luna VIII, lancée le 3 décembre 1965, se posa probablement en douceur, mais n'émit que pendant 2 s.

Luna IX, partie le 31 janvier 1966, atterrit en douceur le 3 février, dans l'océan des Tempêtes. *Luna IX* emportait un compteur de radiations, un thermomètre, un système de télévision, des calculatrices électroniques, un système de thermorégulation, des émetteurs. La sonde prit trois panoramas qu'elle transmit à la Terre, et elle cessa d'émettre le 6 février.

On voit sur la photo de *Luna IX* (*fig.* 77) les 4 pétales qui permettent à la sonde de rester en bonne position après l'impact. Leur face interne sert d'antenne. Ils portent aussi, sur des plaquettes, une gamme de couleurs pour évaluer, par comparaison, la couleur du sol lunaire.

Luna X, lancée le 31 mars 1966, mit sur orbite lunaire une station automatique de 245 kg. Munie d'instruments scientifiques divers, elle enregistra un champ magnétique dû non pas à la Lune, mais à la « queue magnétique » de la Terre ; elle détecta une forte densité de météorites et une radio-activité lunaire comparable à celle des basaltes terrestres.

Luna XI, lancée le 24 août 1966 (1 640 kg ; orbite lunaire 160/1 200 km), étudia la composition du sol suivant un nouveau procédé : la *méga-analyse*. (Les rayons X et les rayons gamma que la planète émet sont caractéristiques des éléments constituant son sol, sous l'effet du rayonnement cosmique qu'il reçoit. Chaque type de noyau se comporte de façon différente. Or l'on a déterminé la liste des matières avec, en face de chacune d'elles, le rayon qu'elle émet lorsqu'elle reçoit un certain type de rayonnement. Ces types de rayonnements avaient été étudiés auparavant par *Luna X*.)

Luna XII, lancée le 22 octobre 1966, donna de bonnes photos ainsi que des informations sur la gravitation lunaire, le rayonnement gamma de la Lune, et la densité du flux de météorites dans son voisinage (*fig.* 78).

Luna XIII, lancée le 21 décembre 1966, était une sonde destinée à se poser en douceur sur la Lune. *Luna XIII* arriva parfaitement bien, le 24 décembre, avec un freinage sur moins d'une minute. Une caméra à 60 cm du sol donna de très bonnes photos. Un doigt poussé par une petite fusée à poudre fut enfoncé dans le sol lunaire dont la densité fut évaluée par absorption des rayons gamma d'une radiosource portée par la sonde (densité trouvée : celle de l'eau).

Le programme Surveyor

Cependant, depuis plus d'un an, les Américains ont mis au point le programme *Surveyor*. Le premier *Surveyor* partira le 30 mai 1966 (entre *Luna X* et *Luna XI*). Le but cherché est de prendre des photographies de la Lune pendant la phase d'approche comme l'ont fait les derniers *Ranger*, puis de poser en douceur l'engin qui continuera à donner des vues du sol environnant après l'alunissage. D'autres instruments étudieront la consistance des sols, la nature chimique de ses composants, et d'éventuels tremblements de Lune ainsi que les chocs des météorites. Le tout sera évidemment envoyé à la Terre par radio.

Les premiers *Surveyor* pesaient environ 1 t (dont

fig.77

Photo A.P.N.

fig. 78

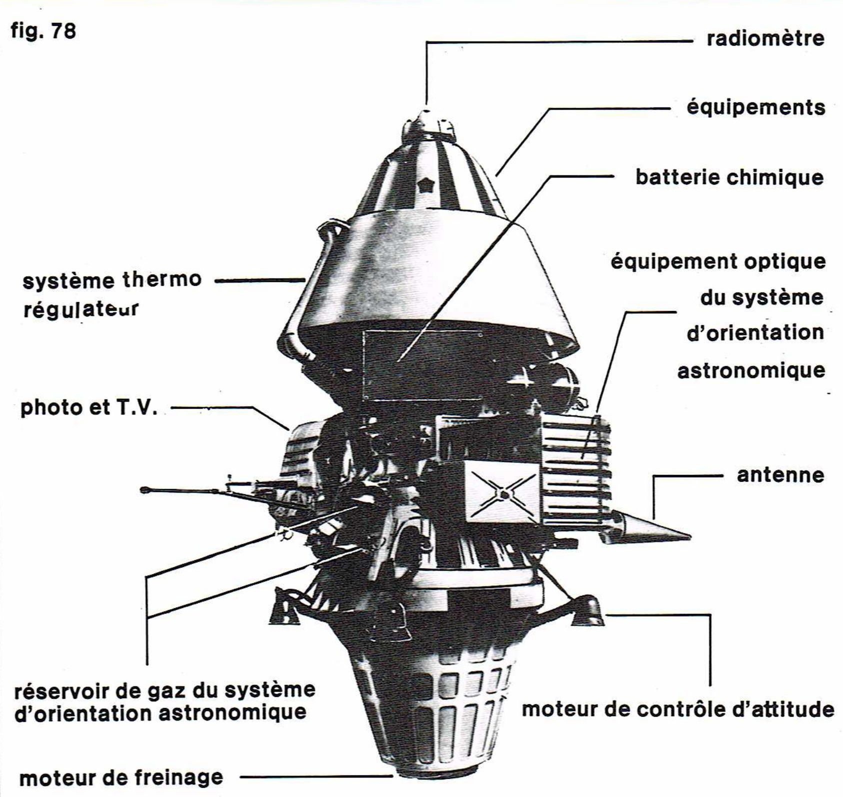

Keystone

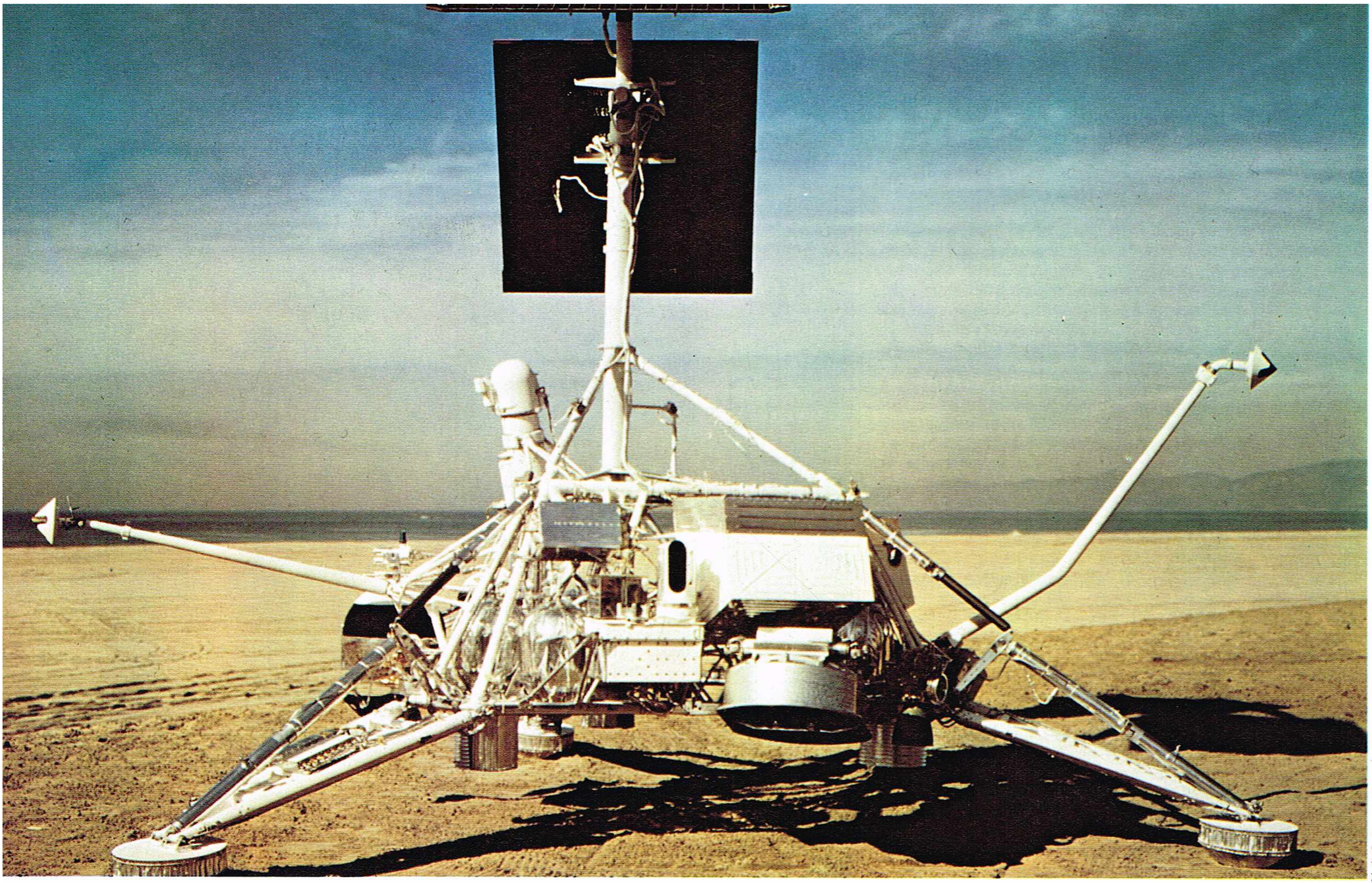

N.A.S.A.

▲ **Surveyor** *au sol. Trois jambes d'alunissage portent des sabots, dont la partie inférieure est un matériau qui s'écrase à l'impact et absorbe une partie de l'énergie. De puissants amortisseurs font le reste.*

30 kg d'équipements). Hauts de 3 m, leur base triangulaire s'inscrivait dans un cercle de 4,3 m de diamètre.

Des essais très sévères furent effectués sur Terre pour vérifier la fiabilité de l'engin qui utilisait plusieurs nouveaux matériaux. *Surveyor* était largué d'un ballon, à une altitude telle que sa vitesse d'arrivée au sol fut la même que sur la Lune. La structure du vaisseau est triangulaire. Trois jambes d'alunissage portent des sabots dont la partie inférieure est un matériau qui s'écrase à l'impact et absorbe ainsi une partie de l'énergie restante. De puissants amortisseurs font le reste. Lors des tirs, le contrôle du *Surveyor* est assuré depuis la Terre, tant au cours du trajet qu'après l'alunissage.

Lancée par une fusée *Atlas-Centaur*, la sonde est protégée par un carénage qui est éjecté dès que l'engin quitte l'atmosphère terrestre. Aussitôt, les trois jambes et les deux antennes omnidirectionnelles sont déployées. Les signaux sont émis tout de suite afin d'assurer la poursuite depuis la Terre. L'attitude est maintenue par acquisition du Soleil, puis de Canopus, car cette dernière fournit une direction pratiquement perpendiculaire à l'écliptique (c'est la première fois que cette étoile est utilisée). Les poussées de correction d'attitude sont fournies par de petits jets d'azote placés à l'extrémité de chacune des trois jambes. Elles sont automatiques après la première acquisition. Au cours du vol, les manœuvres sont effectuées par la mise à feu de trois petits moteurs verniers à propergols liquides. Leur rôle est triple :

— ils permettent des manœuvres pendant le voyage vers la Lune (à la place du moteur de correction de trajectoire) et conservent l'attitude correcte ;

— durant le fonctionnement de la rétrofusée, ils assurent la stabilisation de l'engin ;

— en finale, commandés par une calculatrice qui reçoit ses données d'un radar (attitude et vitesse), ils assurent une vitesse d'impact inférieure à 4 m/s (15 km/h).

A 1 600 km environ de la Lune, la Terre télécommande un pivotement de 180° afin que l'axe de poussée de la rétrofusée coïncide avec la direction du déplacement. La première caméra de télévision se trouve alors dirigée vers la Lune et commence à prendre des photographies.

A 100 km, un radio-altimètre déclenche la mise à feu de la rétrofusée principale ; les trois petits moteurs verniers ne cessent pas de contrôler l'attitude grâce aux indications données à ce moment par un système inertiel. La vitesse diminue progressivement. Puis le moteur principal est éjecté. Les moteurs verniers continuent de ralentir le vaisseau. Les ordres sont donnés par le radio-altimètre et un radar Doppler. A 4 mètres du sol, la vitesse de chute doit être de 5,6 km/h. Les verniers sont stoppés afin de ne pas creuser le sol lunaire. L'impact se fait finalement à 10 km/h, c'est-à-dire à la vitesse d'un parachutiste.

Posé sur le sol, *Surveyor* pointe son antenne plane vers la Terre et déplie ses panneaux solaires jusque-là repliés. Deux jeux d'émetteurs-récepteurs assurent les liaisons avec la Terre.

Étudiés pour fonctionner un jour lunaire (soit environ 15 jours terrestres), certains *Surveyor*, notamment le premier, ont parfaitement résisté aux rigueurs de la nuit lunaire et se sont réactivés ensuite pour transmettre photographies et informations.

Le 2 juin 1966, *Surveyor I* ouvrit la série par un succès retentissant. Pour la première fois dans l'histoire, des photographies prises à quelques mètres du sol lunaire étaient transmises intégralement avec tous leurs détails. L'une d'elles, prise le 13 juin, montre l'ombre de *Surveyor I* sur le sol lunaire. *Surveyor I* survécut à plusieurs nuits lunaires, envoyant des centaines de photographies. Arrivé en juin, il ne se tut que le 9 octobre 1966. *Surveyor I* fut photographié par un *Lunar Orbiter*, ce qui permit de déterminer parfaitement sa position.

Surveyor II fut lancé le 20 septembre 1966 sur une ellipse d'apogée 442 000 km (donc 60 000 km au-delà de la Lune). L'engin pesait 1 002 kg et emportait une station de 281 kg.

Après correction de la trajectoire pour la faire passer près de la Lune et provoquer ainsi sa chute sur notre planète, on estime que l'impact se fit à 86 km du point prévu, ce qui est très remarquable pour l'époque. Malheureusement, la dernière correction de trajectoire échoua, un moteur vernier n'ayant pas fonctionné. La sonde culbuta et se disloqua.

Surveyor III eut une arrivée mouvementée. Sous la poussée, qui était mal réglée cybernétiquement, il fit trois ricochets de hauteurs décroissantes qui l'amenèrent à 9 m de son premier impact.

Les premières photos étaient mauvaises. La distribution électrique se faisait mal, les moteurs restaient sous

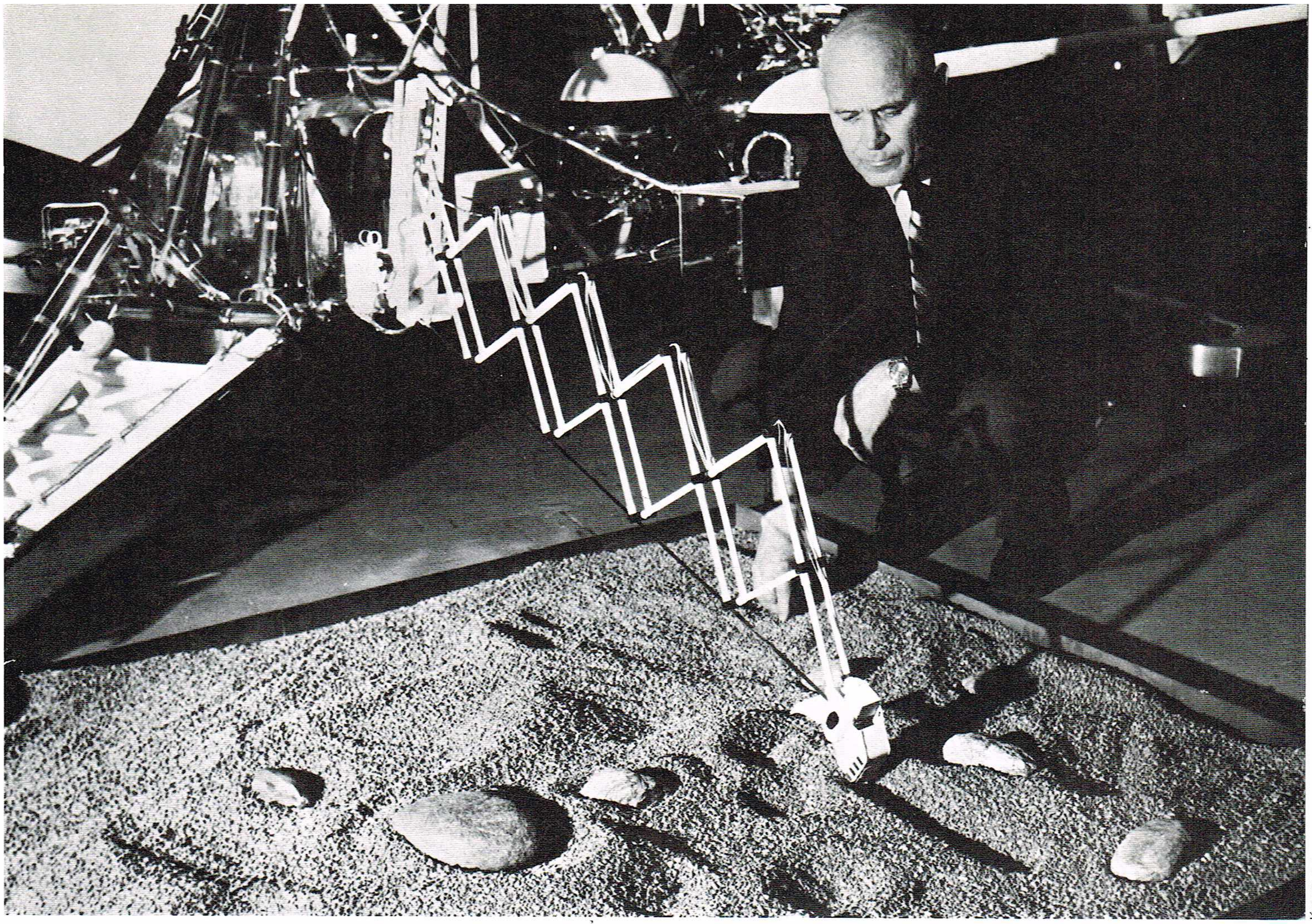

Keystone

tension. On télécommanda alors l'arrêt de tous les appareils et on les remit en marche les uns après les autres. La manœuvre fut couronnée de succès. Les moteurs n'étant plus alimentés, les appareils reçurent l'intensité nécessaire et envoyèrent d'excellentes photographies.

La grande innovation consistait en un bras mécanique long de 1,30 m au bout duquel se trouvait une petite pelle destinée à creuser le sol pour en déterminer les caractéristiques physiques. Le creusement fut suivi en direct par la station terrestre de Pasadena.

Surveyor III avait été lancé pour se trouver sur la Lune à un moment où devait se produire une éclipse totale de Soleil, la Terre masquant largement ce dernier (elle a, vue de la Lune, un diamètre 3 fois plus grand que celui du Soleil). L'éclipse dura au total 1 h 18 mn sur la totalité de la Lune. Le jour de l'éclipse, tout fonctionna d'une façon parfaite. En une heure, la température tomba de + 93 °C à — 104 °C.

Surveyor III ne put pas être photographié comme *Surveyor I* par un *Lunar Orbiter*. Mais les photos qu'il prit du ciel étoilé pendant l'éclipse permirent de calculer avec précision ses coordonnées sur la Lune.

La pelle permit de creuser trois sillons, de recueillir des pierres (le tout étant télévisé en direct). C'est la première fois qu'on acquit la certitude que la Lune n'est pas recouverte d'une épaisse poussière. (*Surveyor III* fit parvenir près de 6 000 photographies à Pasadena.)

On avait prévu de rallumer les moteurs afin de faire accomplir de petits bonds à *Surveyor III*. L'expérience ne put avoir lieu, car tout le combustible était épuisé. Aucun contact ne put être rétabli avec l'engin au retour du jour lunaire (à l'inverse de ce qui s'était produit pour *Surveyor I*).

Surveyor IV fut lancé le 14 juillet 1967. Le 17 juillet, la Terre eut connaissance que l'engin à 11 km du sol lunaire avait sa vitesse réduite à 134 m/s, vitesse un peu forte mais acceptable. Puis ce fut le silence. Les fusées commandées cybernétiquement avaient dû ne pas fonctionner : c'était l'écrasement ou le chavirement. En tout cas, *Surveyor IV* resta muet.

Surveyor V fut utilisé en septembre 1967 pour effectuer de petits bonds lunaires grâce au combustible restant. L'engin se comporta bien, progressa par sauts et resta sur ses trois pieds, bien que sa dernière position se trouvât sur la pente inclinée de 20° d'un cratère. Un barreau aimanté filmé par la caméra permit de constater la présence de matériaux magnétiques sur la Lune.

Surveyor VI prit 60 000 clichés après avoir été lancé le 9 novembre 1967.

Surveyor VII fut le dernier de la série. Lancé le 7 janvier 1968, il se posa le 10 janvier sur une montagne à 4 572 m d'altitude dans un paysage très accidenté. Il était doté d'une petite pelle excavatrice pour creuser le sol jusqu'à 40 cm de profondeur, et il avait un analyseur chimique qui permit d'étudier les roches superficielles et les fragments extraits du sol. Le 20 janvier, la caméra de télévision de *Surveyor VII* réussit à capter et à prendre des clichés de rayons laser émis à partir de deux sites terrestres, l'un dans l'Arizona (Tucson), l'autre en Californie (Britchwood). L'analyseur étudia un rocher voisin grâce à l'alpha-activation.

L'alpha-activation

Ce n'est pas un problème facile à résoudre que de faire analyser sur place, par un appareil de dimensions réduites et de façon entièrement automatique, la composition du sol lunaire avoisinant et d'envoyer ensuite par

▲ **Surveyor III :** ***à l'extrémité d'un bras mécanique de 1,30 m de long se trouve une petite pelle destinée à creuser le sol pour en déterminer les caractéristiques physiques. Actionnée par un moteur électrique commandé du sol, la pelleteuse peut creuser jusqu'à 45 cm sur un rayon d'une douzaine de mètres. Les mouvements sont suivis grâce à une caméra.***

▼ ***Figure 79 : pour analyser le sol lunaire, du curium 242 est placé à bord de* Surveyor *(voir développement dans le texte).***

fig. 79

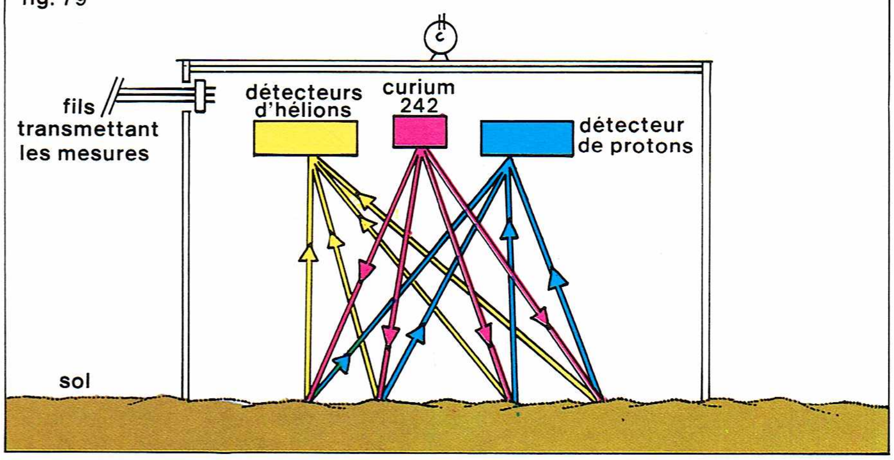

Tableau V
Moyennes des résultats obtenus par les deux derniers Surveyor

Carbone	< 2,5%	Aluminium	6,5 ± 2%
Oxygène	57 ± 5%	Silice	20 ± 3%
Sodium	< 2,0%	Calcium-Fer	9 ± 2%
Magnésium	3 ± 2%		

fig. 80

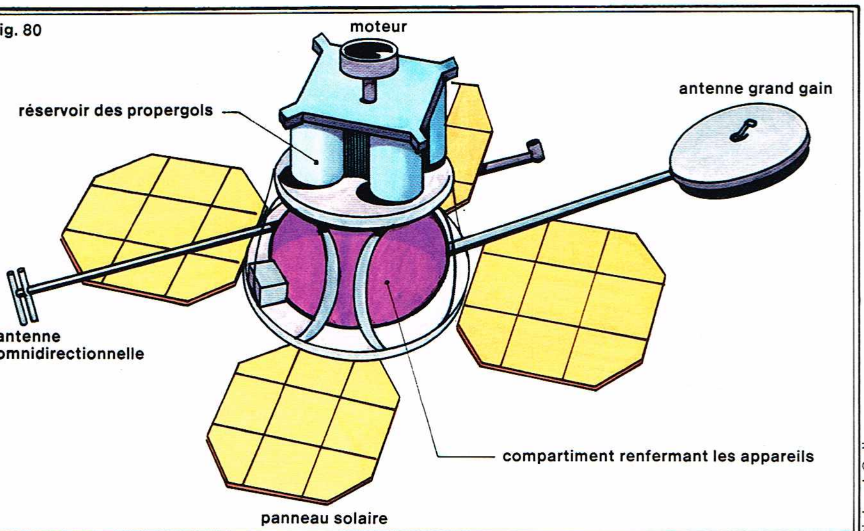

Richard Colin

▲ *Tableau V : moyennes des résultats obtenus par les derniers* Surveyor.

Figure 80 : **Lunar Orbiter.** ***Des batteries cadmium-nickel emmagasinent, pendant que les quatre panneaux solaires sont éclairés, la charge électrique nécessaire au fonctionnement de la sonde lorsqu'elle est dans l'ombre.***

▼ *Photographie des panneaux solaires de* Lunar Orbiter.

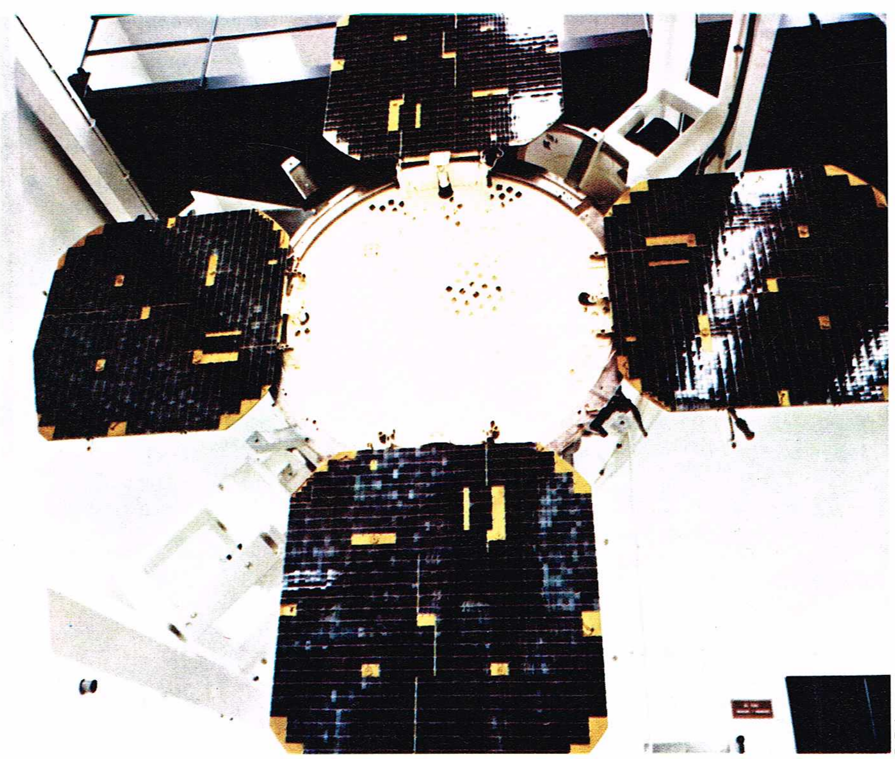

P.R.I.

radio le résultat de l'analyse. Pour accomplir ce tour de force, du curium 242 est placé à bord de *Surveyor*. C'est un radio-élément de vie assez brève (période 162 jours) dont le rayonnement sera intense pendant la durée de l'opération.

Le curium est un émetteur « alpha » qui éjecte des hélions ; ceux-ci sont réfléchis par les gros noyaux, car leur forte charge engendre une répulsion électrostatique importante. Si le noyau rencontré est petit, l'hélion engendre une réaction nucléaire qui provoque l'émission d'un proton dont l'énergie de jaillissement est caractéristique de l'élément. Il faut toutefois que cet élément ait des noyaux dont le nombre de protons soit compris entre 4 et 20, ce qui limite les possibilités d'analyse des éléments légers à une catégorie bien déterminée, qui exclut notamment les éléments 1, 2, 3 et 4.

L'alpha-activation consiste à décompter les hélions et à mesurer l'énergie des protons grâce à des détecteurs. La méthode, très ingénieuse, ne permet pas, malheureusement, de déceler l'élément 1, c'est-à-dire l'hydrogène. De plus, les rayons alpha n'ont aucune force de pénétration, et ils ne peuvent analyser que la mince couche superficielle, sur une épaisseur de quelques centièmes de millimètre seulement (*fig.* 79). Les moyennes des deux derniers *Surveyor* sont données au *tableau V*.

Lunar Orbiter

Les *Ranger*, destinés à s'écraser sur la Lune, malgré plusieurs insuccès au début, avaient fourni une ample moisson de photographies prises dans les vingt dernières minutes qui précédaient l'impact.

Aux *Surveyor*, très perfectionnés et conçus pour se poser en douceur, avaient été confiées des missions précises : envoyer les vues prises à bout portant de leur proche environnement, analyser la nature chimique de la couche superficielle du sol sélène et, grâce à un bras mobile se dépliant, utiliser une pelle mécanique destinée à déterminer la structure physique du sol. *Ranger* et *Surveyor*, aussi brillants qu'aient été les résultats qu'ils permirent d'acquérir, ne donnaient que des vues et des analyses très locales, celles qui concernaient leur voisinage immédiat.

Avant de lancer des hommes dans l'extraordinaire aventure que devait être leur débarquement sur la Lune, le besoin se faisait sentir de posséder de larges vues d'ensemble du sol lunaire afin de choisir les sites les plus favorables à un alunissage de capsule habitée. C'est à *Lunar Orbiter* que fut confiée cette mission.

Les missions *Lunar Orbiter* et *Surveyor* étaient en fait complémentaires, et les deux programmes s'exécutèrent pratiquement en même temps.

Pour les *Lunar Orbiter*, qui, comme leur nom l'indique, restaient sur orbite autour de la Lune, tout a été mis en œuvre pour obtenir des négatifs de très grande qualité, dont l'image convertie en signaux électriques est émise vers les stations terrestres, où ces signaux électriques sont retransformés en images.

L'orientation de la sonde s'obtient comme pour les *Surveyor* en utilisant le Soleil et l'étoile Canopus. Il existe également un système inertiel qui permet de conserver l'attitude correcte quand l'engin passe dans l'ombre de la Lune.

La fiabilité du système très élaboré d'orientation est mise en lumière par un incident qui se produisit lors du premier lancement. L'engin ne parvint pas à se fixer sur le Soleil. Les ingénieurs de la station terrestre calculèrent immédiatement les valeurs de référence par rapport à la Lune et à Canopus. L'orientation réussit alors parfaitement et fut confiée aussitôt après au système inertiel.

Sur les *Lunar Orbiter*, en plus de ses caméras, la sonde (*fig.* 80) dispose de : quatre panneaux solaires, une antenne parabolique à grand gain, une antenne omnidirectionnelle. Des batteries cadmium-nickel emmagasinent, pendant que les panneaux solaires sont éclairés, la charge électrique nécessaire au fonctionnement de la sonde dans l'ombre.

La manœuvre est standardisée : les *Lunar Orbiter* sont d'abord stabilisées sur une orbite lunaire à environ 900 km d'altitude. Les stations terrestres procèdent alors à toutes les vérifications, des photos de contrôle sont effectuées. Si tout va bien, la sonde est injectée sur une orbite elliptique dont le point le plus rapproché de la Lune

en sera à 45 km. Les caméras à haute résolution activées en ce point peuvent couvrir une aire de 7 700 km², tout en permettant de distinguer un objet de 1 m² de section, tandis que le dispositif à grand angle prend des clichés couvrant 40 000 km² sur lesquels on peut distinguer un objet de 16 m².

Au début de la série *Lunar Orbiter*, les Américains pensaient la limiter à trois vols. Ces engins avaient pour mission de photographier près de l'équateur lunaire une série de 34 sites, parmi lesquels devait être choisi le point d'alunissage des premiers cosmonautes.

Le premier *Lunar Orbiter* fut lancé le 10 août 1966. Il était muni d'un moteur-fusée pour corriger sa trajectoire et pesait 363 kg. En outre, des instruments étudiaient les radiations et les forces de gravitation lunaire.

Le troisième engin de la série prévue fut lancé en février 1967. Les quatrième et cinquième, lancés en mai et août 1967, furent placés sur des orbites fortement inclinées (à 85°) de 2 700/6 000 km d'altitude environ. De là, les images couvrent 230 000 km² sur lesquels on peut distinguer des détails de 60 m de longueur. La mission fut prévue pour durer 16 jours, au cours desquels 98 % de la surface lunaire furent relevés, face arrière comprise bien entendu.

Les *Lunar Orbiter* remplirent un autre rôle. Ils furent les premiers instruments de la géodésie lunaire ou sélénodésie. Satellites très rapprochés de la planète, ils accusent en effet avec beaucoup de précision les variations de la gravité lunaire. Ils permirent de déceler que la Lune renferme de grosses masses plus denses, qu'on dénomma mascons. Leur localisation permit de tenir compte de leur influence sur les futures expériences dans l'environnement lunaire.

Avec le lancement du cinquième *Lunar Orbiter*, en août 1967, les Américains estiment avoir pris suffisamment de clichés pour faire le choix des zones d'alunissage. Ils ont à effectuer un long travail pour dépouiller leurs documents.

Le programme Soyouz

Les Russes sont prêts maintenant à expérimenter, avec de nouveaux engins, un programme composé à la fois de recherches lunaires et de mises sur orbite terrestre de vaisseaux ayant une masse importante. Ce programme *Soyouz* (le mot signifie « partie d'un ensemble ») comprend deux sortes d'expériences utilisant des vaisseaux de tonnage important.

Dans une série portant encore le nom de *Luna*, les Russes se livrent à des études approfondies de l'espace, grâce à des engins inhabités mais munis d'un grand nombre d'appareils permettant de faire presque tout ce que ferait l'homme.

Simultanément, se poursuivent des recherches expérimentales en vue de mettre sur orbite terrestre des stations habitées.

Luna XIV, lancée le 15 septembre 1968, est un *Soyouz* inhabité destiné à voir comment se comportera la cabine télécommandée depuis la Terre. En fait, c'est l'étude d'un problème de guidage. Décrivant une trajectoire hyperbolique, la sonde passera à 1 950 km de la Lune et, 15 h plus tard, se dirigera vers la Terre où elle amerrira le 21 septembre, dans le sud-est de Madagascar. Expérience très réussie.

Luna XV est lancée le 13 juillet 1969. C'est probablement un *Soyouz* d'un poids de 5 t. Il semble, par les allusions faites, qu'il s'agisse d'un engin automatique destiné à se poser sur la Lune, à y recueillir des échantillons et à redécoller pour rejoindre la Terre. Les Russes, en utilisant cette station inhabitée au moment même où *Apollo XI* se déroule, espèrent montrer qu'ils font avec un robot la même chose que les astronautes américains. En fait, une sorte de suspense durera plusieurs jours. *Luna XV* est sur orbite lunaire le 17 juillet, elle opérera deux transferts d'orbite, dont le dernier, le 19 juillet, doit la faire passer à 16 km de la surface de la Lune. Le 21 juillet, l'alunissage est tenté, mais l'arrêt des émissions indique que la sonde s'est probablement écrasée sur la Lune (voir les remarques sur *Luna XV* faites plus loin à la fin de la mission *Apollo*).

Luna XVI est lancée le 12 septembre 1970, au moyen de la fusée-lance *Proton* qui peut mettre 5 t sur orbite lunaire. *Luna XVI* est sans doute identique à son prédécesseur, cependant elle inaugure un nouveau type d'exploration spatiale, avec des sondes non habitées, mais munies de systèmes moteurs élaborés, afin d'assurer des manœuvres compliquées à proximité de la Lune. C'est, ne l'oublions pas, la première sonde qu'envoient les Soviétiques après que les Américains ont mis le pied sur la Lune (*fig.* 81).

Avec *Luna XVI*, il est nécessaire de choisir un point d'alunissage bien déterminé, ce qui ne peut se faire qu'en passant par une orbite lunaire. La satellisation lunaire est acquise dans la nuit du 16 au 17 septembre sur une orbite quasi circulaire à 110 km de la Lune, puis l'engin est transféré sur une orbite 106-15 km. Enfin, après une deuxième correction, le périsélénée est abaissé à 0,6 km.

Le freinage sera brutal, court, donc économique (l'engin automatique peut encaisser facilement des décélérations de 5 *g*). La rétrofusée cesse de fonctionner à 20 m du sol. Les moteurs secondaires cesseront à 2 m du sol, après avoir assumé le contrôle d'attitude.

L'alunissage a lieu le 20 septembre, dans une zone d'ombre. On suppose que cette circonstance a été choisie afin d'assurer un guidage astral précis, impossible de jour, car le Soleil ne permet que difficilement la visée des étoiles. Une foreuse télécommandée depuis la Terre est enfoncée à 35 cm dans le sol. Une main mécanique saisit les roches et les place dans un contenant qui fait partie de la fusée de retour.

Le 21 septembre, la fusée se détache de l'ensemble, sa mise à feu étant télécommandée depuis la Terre, et s'élance sur le chemin du retour, chargée des roches prises sur la Lune.

Le problème de la récupération ne se pose pas de la même manière que pour les capsules habitées *Apollo*, obligées de rentrer sous un angle de 5 à 7°. Les capsules *Luna* peuvent avoir le même type de protection que les capsules destinées à Vénus, elles peuvent supporter de très fortes températures et de fortes décélérations (10 000 °C et 300 *g*).

La surprise est totale quand on apprend que le retour, entièrement balistique, s'est effectué à 80 km de Djezkazgan. La trajectoire a fait l'objet d'un calcul subtil, mais la visée, au demeurant, est plus facile que lors du trajet de la Terre vers la Lune, puisque le disque gravitationnel de la Terre est infiniment plus grand que celui de la Lune.

Luna XVI a ramené 100 g de sol lunaire, ressemblant à du sable, provenant du carottage à 35,5 cm de profondeur. Les analyses chimiques ont révélé 70 corps, dont certains isotopes. D'autres résultats sont intéressants à noter :

▼ *Figure 81 : les différentes parties de* Luna XVI.

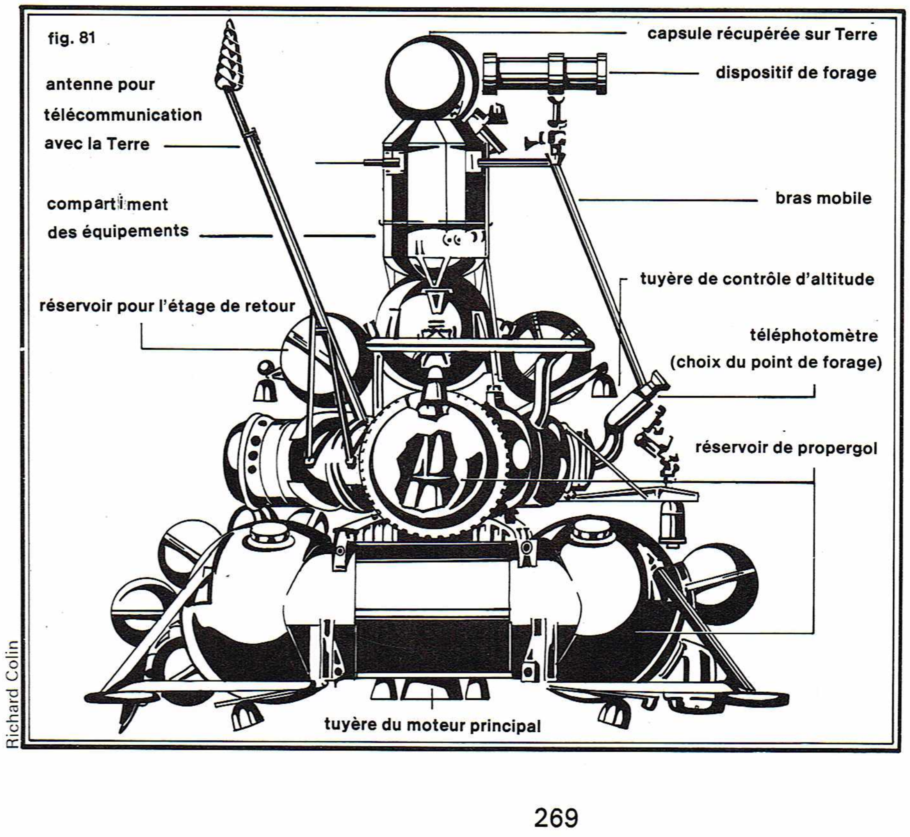

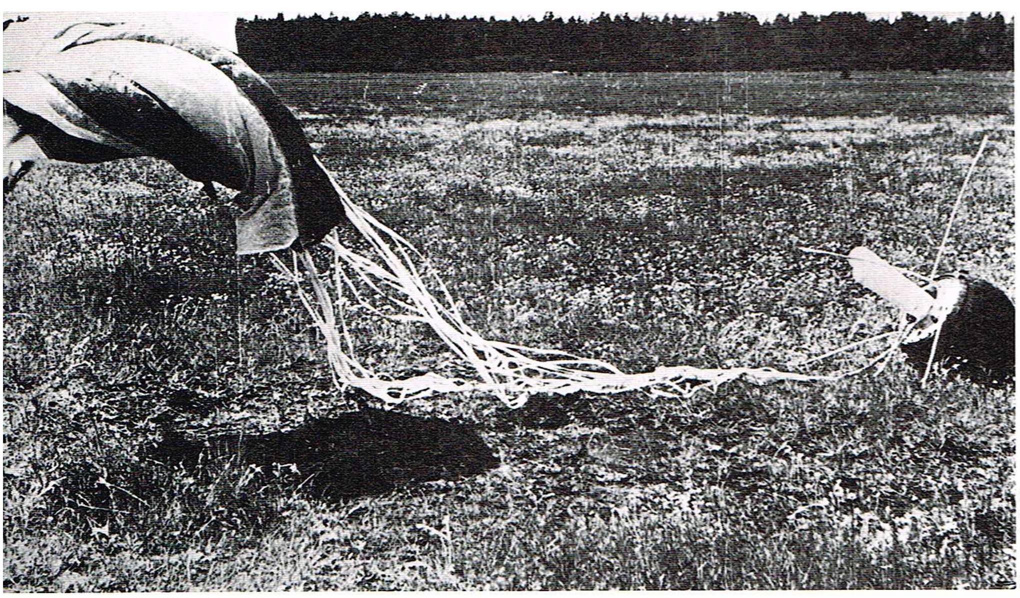

▲ ***La capsule de* Luna XVI *vient d'atterrir avec son parachute à 80 km de Djezkazgan.***

— les photos révèlent des plaines inondées de lave volcanique et érodées par le vent solaire et les météorites ;
— la conductibilité thermique est inférieure à celle des meilleurs isolants terrestres.

Luna XVII et le Lunakhod. Luna XVI avait rapporté une carotte du sol lunaire prise à proximité du point où la sonde s'est posée et immobilisée.

Avec *Luna XVII*, l'exploration de la Lune franchit une nouvelle étape. Comme son prédécesseur, elle doit revenir sur la Terre avec les échantillons prélevés sur la Lune. Mais *Luna XVII* porte une sorte de Jeep lunaire. Sa conception technique est le fruit d'années de recherches expérimentales qui montrent bien que, dès le début, les Soviétiques ont orienté leurs études vers la réalisation d'engins robots. Cela peut faire penser qu'ils n'ont songé à débarquer un homme sur la Lune qu'à partir du moment où le président Kennedy a désigné cette mission comme but prioritaire à la N. A. S. A. Nous avons déjà montré que, contrairement à ce qu'ils ont déclaré après le succès d'*Apollo XIV*, les Soviétiques avaient inclus le débarquement d'un homme sur la Lune dans leur programme.

En fait, le lanceur lunaire est catalogué dès 1967 dans leurs projets ; sa puissance prévue est supérieure à celle de *Saturne V* (4 500 t de poussée contre 3 400), et la charge utile que les Soviétiques pensent mettre sur orbite terrestre est de 46,5 t, contre 41 pour *Saturne V*.

Il est probable que, soit faute de crédits, soit retard à s'orienter vers cette voie nouvelle, les Russes, polarisés par leurs recherches intensives pour la mise en œuvre de robots, ne sont pas arrivés à mettre au point assez tôt leur lanceur lunaire pour précéder les Américains. N'en ayant plus besoin pour les expériences qui ont suivi, ils ont, au moins pour l'instant, renoncé à poursuivre la fabrication de leur fusée géante.

La fabrication de *Lunakhod* prouve cependant à quel haut degré de technicité sont parvenus les Soviétiques à l'époque du programme *Apollo. Lunakhod I* pèse 756 kg et a les dimensions d'une Jeep. Il a de chaque côté 4 roues motrices qui se déplacent facilement dans un plan vertical afin de toujours rester en contact avec le sol. Chaque roue est entraînée, quand elle est embrayée, par un moteur à courant continu situé dans le moyeu. Le changement de sens du courant entraîne l'inversion de la marche. Un frein à disque peut bloquer la roue. Les changements de direction sont obtenus en différenciant les régimes de rotation des roues droite et gauche.

Le châssis monté sur les 8 roues porte un corps en alliage de magnésium en forme de marmite fermée par un couvercle mobile. De jour, le couvercle est ouvert. Sa partie intérieure est couverte de photopiles qui rechargent les accumulateurs ; la puissance est voisine de 300 W. A vitesse maximale, un moteur de roue consomme 35 W.

Le corps de *Lunakhod* est physiquement un vase Dewar ; il est donc très isolé, et les pertes par rayonnement sont très faibles. Malgré cela, le refroidissement nocturne serait excessif. On y a remédié en utilisant une chaudière à radio-isotope située à l'extérieur et assurant le réchauffement par des circuits de gaz caloporteur. (On ne pouvait pas mettre la chaudière à l'intérieur, car son dégagement permanent de chaleur aurait été excessif pendant le jour.)

L'équipement de *Lunakhod I* est composé de :

— deux caméras situées à l'avant comme sont situés les phares d'une auto ; elles donnent la vue du terrain devant l'engin et permettent donc de le guider (à partir de la Terre) ;

— quatre caméras panoramiques donnant ensemble une vue complète de l'environnement ; les images sont exceptionnellement bonnes, elles permettent de discerner des détails millimétriques ;

— un réflecteur laser visé depuis la Crimée et du pic du Midi, en vue de mesurer la distance Terre-Lune avec précision ;
— un radiomètre pour l'analyse chimique du sol ;
— un télescope X ;

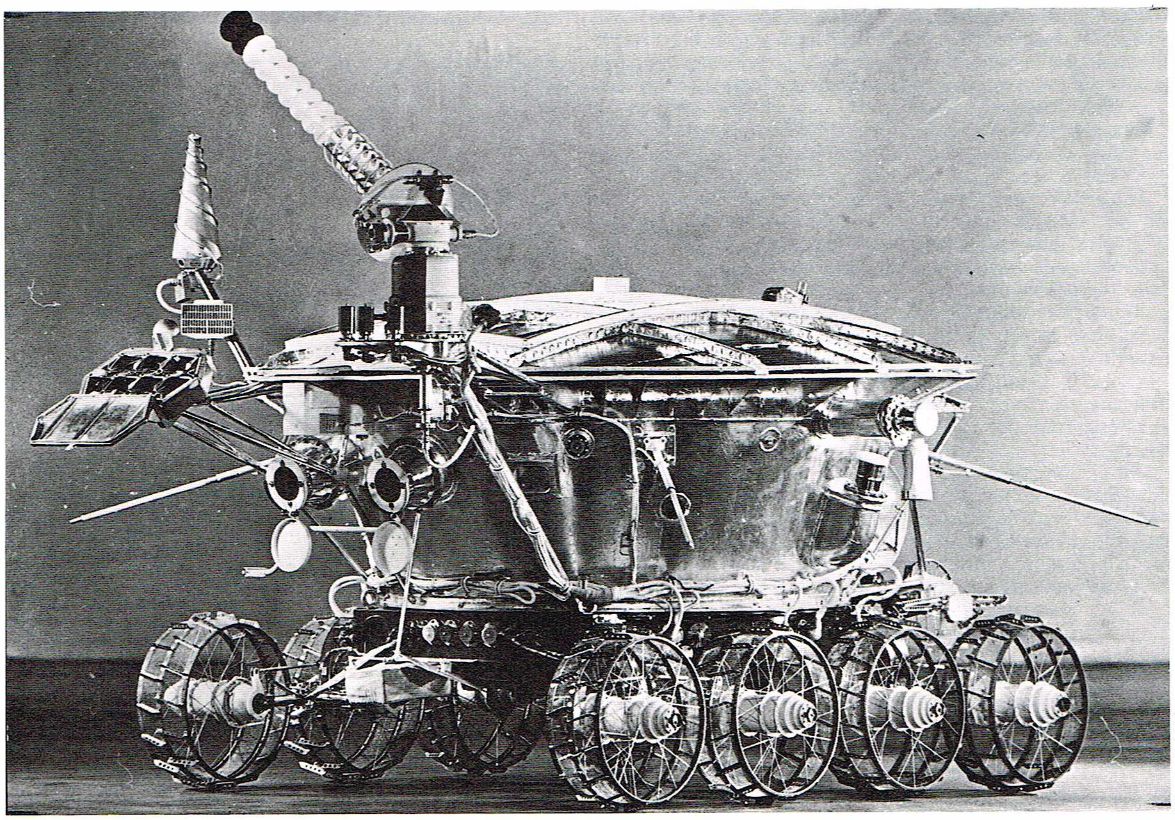

▶ ***L'appareil lunaire autotracté* Lunakhod I *: il pèse 756 kg et a les dimensions d'une Jeep. Le châssis monté sur 8 roues indépendantes a un couvercle mobile qui s'ouvre le jour pour recharger les accumulateurs par l'intermédiaire de photopiles.***

— un instrument en forme de cône métallique qui, enfoncé dans le sol et mis en rotation sur lui-même, permet d'étudier les propriétés physiques du sol lunaire.

Les images reçues à terre en provenance des téléviseurs permettaient de télécommander les mouvements de l'engin sur la Lune grâce à une équipe de quatre hommes : un commandant de bord, un ingénieur, un opérateur radio, un navigateur.

La voiture a cependant des circuits cybernétiques de sécurité (car le temps mort Terre-Lune des ordres radio est de 2,5 s) pour freiner notamment devant un danger sans attendre l'ordre de la Terre.

L'énergie est fournie par des photopiles plus ou moins exposées au Soleil, suivant l'intensité de l'éclairement, grâce à une ouverture variable du couvercle. Des capteurs de température règlent ce mouvement. Voici les expériences réalisées : observation du ciel grâce à un télescope à rayons X, analyse chimique du sol, appréciation de sa dureté, renvoi d'échos laser grâce à un réflecteur français (deux échos obtenus les 5 et 6 décembre).

Lunakhod est rentré dans la nuit lunaire le 23 novembre 1970. La température tomba à — 125 °C. Le jour ne revint que le 8 décembre. Dès le 9, *Lunakhod* fut complètement réactivé. Aucune avarie ne fut notée. Le couvercle ouvert permit de recharger les accumulateurs.

Le 22 décembre, après avoir effectué de nombreuses excursions dont l'une a atteint 337 m, *Lunakhod* est mise en hibernation jusqu'au 7 janvier 1971, à 1 370 m de *Luna XVII*. La voiture fut remise en marche le 9, parcourut 140, 517, puis 550 m, et le 18 retrouva *Luna XVII*. La troisième journée lunaire se termina le 21 janvier après un parcours total de 3 593 m. Réveillée le 6 février, la voiture entama sa quatrième journée lunaire et continua son exploration jusqu'au 20 février.

Luna XVIII fut lancée par fusée *Proton* le 2 septembre 1971. La satellisation lunaire intervint le 7 septembre, à 100 km du sol lunaire. Le 11 septembre, alunissage après 54 révolutions. La descente se passa mal, sans doute en raison du terrain, et causa la mort électronique de l'engin. Après cet échec, les Russes revinrent avec les deux *Luna* suivantes à des expériences plus simples, ne comportant pas de *Lunakhod*.

Luna XIX fut lancée le 28 septembre par fusée *Proton*. La satellisation lunaire s'effectua le 3 octobre sur orbite 140 km. But de l'expérience : étude en orbite du champ de gravitation lunaire (mascons) ; mesure du flux de météorites ; établissement d'une carte de la Lune.

Luna XX fut lancée le 14 février 1972, par fusée *Proton*. Suivie par moyens radio-électriques et optiques (depuis l'observatoire de Simferopol), elle se satellisa le 18 février sur orbite à 100 km de la planète, avec transfert le 19 sur 100/21. Puis *Luna XX* largua ses composants devenus inutiles : réservoirs, radioprogrammateur, système d'astronavigation. Le moteur principal, opérant en rétrofusée, fut mis à feu à 17 km du sol et réduisit à zéro la composante horizontale de la vitesse. En fin de combustion, *Luna XX*, parvenue à 2 500 m d'altitude, tomba en chute verticale. Le moteur principal fut rallumé de 700 m jusqu'à 20 m. A ce moment, entrèrent en jeu deux propulseurs secondaires jusqu'à 2 m du sol et *Luna XX* se posa à 2 km du point où *Luna XVIII* avait fait un alunissage malheureux.

Luna XX était munie de deux caméras panoramiques inclinées permettant aux techniciens de voir le sol sous l'engin, et de les guider en conséquence. Le Soleil était à 53° au-dessus de l'horizon et permettait le guidage depuis la Terre.

Le bras de l'engin fut libéré, la foreuse mise à poste en 15 mn environ, et l'enfoncement dura 30 mn. L'extraction dura 7 mn. Puis le bras déposa la carotte dans la capsule sphérique, tête de la fusée cosmique, dont la fermeture est automatique. L'outil avait été guidé depuis le sol, mais il y avait aussi un ordinateur cybernétique pour certains mouvements. Au moment du départ, la fusée était inclinée à 8°. Un système compensateur en tenait compte. Le vol balistique conduisit la fusée près de la Terre. Le 25 février, la capsule fut détachée. La traversée de l'atmosphère porta le bouclier à 10 000 °C. Un avion put alors la repérer (il faisait nuit), malgré une tempête de neige. La récupération fut guidée par hélicoptère avec goniomètre. L'atterrissage, parfait, s'effectua à 40 km du point visé, Djezkazgan.

PRÉPARATION DES VOLS HUMAINS AUTOUR DE LA TERRE

Le programme Mercury

Depuis 1957, les États-Unis s'étaient fixé comme premier objectif de rendre possible un vol humain dans l'espace. Il leur faudra plusieurs années pour y parvenir et, malgré des efforts soutenus et d'immenses crédits engagés, la déception sera rude quand ils se verront coiffés sur le poteau. Le premier homme de l'espace, en effet, sera le Russe Youri Gagarine. Son envol a lieu le 12 avril 1961. Celui de l'Américain Shepard ne survviendra que 20 jours plus tard. Les États-Unis n'auront pas eu la revanche qu'ils cherchaient depuis que les Russes avaient placé le 4 octobre 1957 le *Spoutnik* sur orbite, depuis que leur *Lunik I* avait atteint la vitesse de libération et que leur *Lunik II* s'était écrasé le 12 septembre 1959 sur la Lune après l'avoir parfaitement visée.

Humiliés, les Américains n'ont cependant pas voulu brûler les étapes, et sans doute ont-ils eu raison à long terme.

La cabine *Mercury* (*fig.* 82) est le premier vaisseau qu'ils cherchent à mettre sur orbite. C'est un engin pesant 1,4 t, qui ne peut emmener qu'un seul passager. Son siège est moulé à la forme du corps, le buste est horizontal au moment du lancement et sera donc vertical sur orbite. Le cosmonaute a sous la main une commande qui assure l'éjection de la tour de sauvetage en cas d'accident au départ. Un grand parachute ramènerait alors le cosmonaute à terre (il y a en réalité 2 parachutes ; le premier, plus petit, extrait le grand parachute et le stabilise). Dans la cabine *Mercury*, un moteur de contrôle d'attitude permet de corriger les mouvements de tangage et les lacets grâce à l'éjection de gaz comprimé. Un autre moteur contrôle le roulis. Un système périscopique

fig. 82

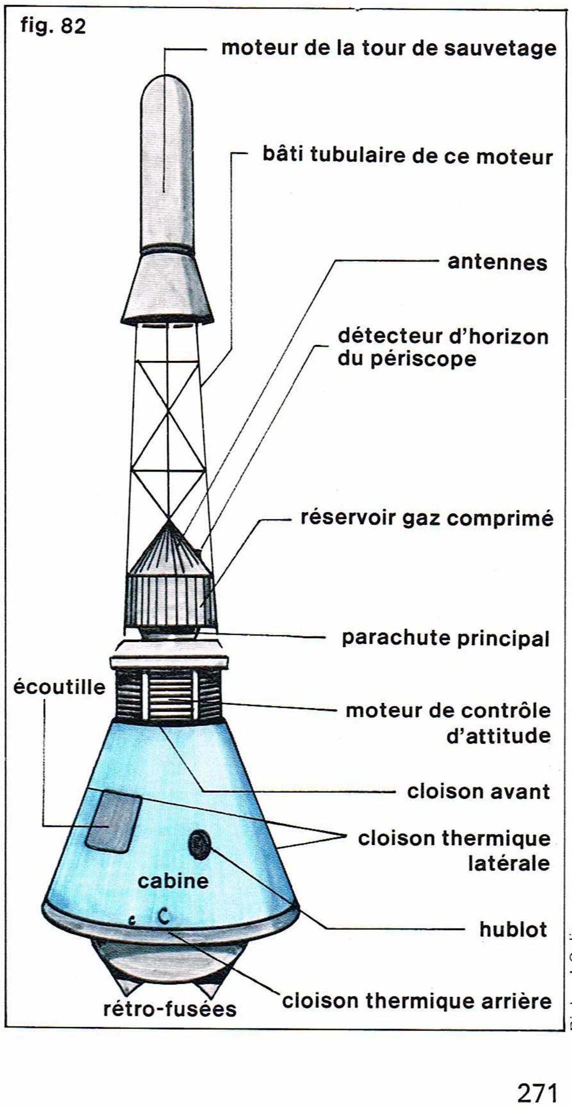

Richard Colin

◀ *Figure 82 : cabine* Mercury *; cet engin pesant 1,4 t ne pouvait emmener qu'un seul voyageur.*

▶ *Cabine* Charik *: elle permit le triomphe de Gagarine. Elle est en forme de boule de 2,3 m de diamètre et pèse 2 400 kg. La partie inférieure est le dernier étage de la fusée porteuse* Vostok. *Il va se détacher après mise en orbite.*

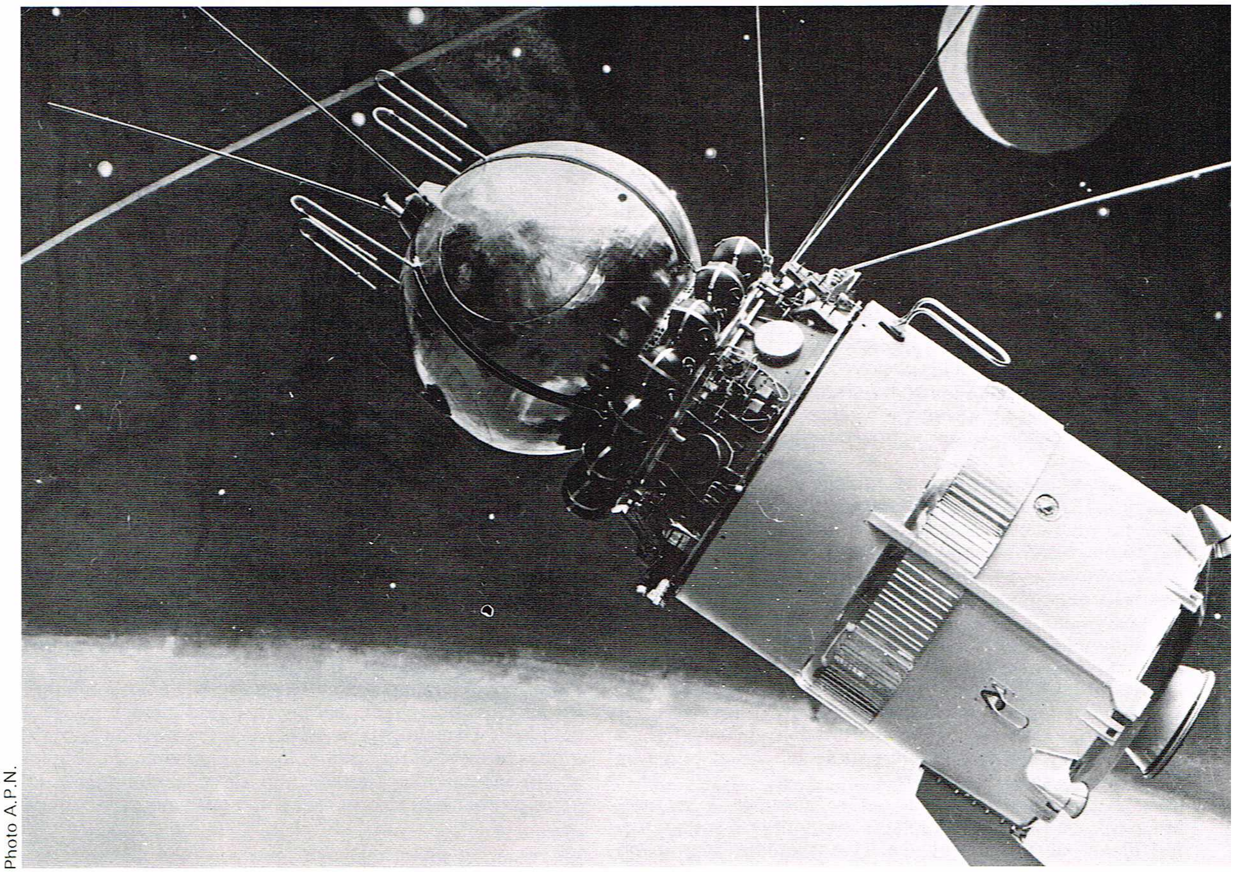

Photo A.P.N.

Archives I.G.D.A.

▲ *Youri Gagarine, premier pilote de l'espace. Le 12 avril 1961, à bord de* Vostok I, *il accomplit un tour complet autour de la Terre en 108 minutes et atterrit à 10 km du point d'atterrissage prévu.*

permet au cosmonaute de chercher l'horizon. Il pilote l'engin un peu comme on pilote un avion avec un manche à balai. Émetteur-récepteur radio et antennes complètent l'équipement.

La cabine *Mercury* a été mise en construction dès 1958. Ses futurs pilotes ont été soigneusement sélectionnés en 1959. Ils étaient sept à suivre un dur entraînement depuis deux ans; John Glenn a donné les meilleurs résultats au cours des tests, suivi de Shepard, puis de Grissom. Simultanément étaient préparées les fusées qui doivent être utilisées pour le programme *Mercury*. Elles sont toutes de la série des *Atlas* avec plusieurs modifications.

Le tout premier essai de la cabine est effectué le 9 septembre 1959; elle est lancée par une *Atlas D* surnommée *Big Joe*. En décembre 1960, une cabine est récupérée à l'issue d'un vol balistique de 360 km, après avoir atteint 216 km d'altitude. L'expérience est renouvelée un mois plus tard; cette fois, la cabine emmène un petit chimpanzé qui revient indemne. Comme le chimpanzé est notre plus proche cousin dans l'échelle animale, il est alors décidé qu'un homme peut être lancé dans l'espace, et les trois premiers sélectionnés sont soumis à un intense entraînement. La capsule *Mercury* est prête, la fusée est rendue à cap Canaveral en mars 1961.

Cependant, des rumeurs en provenance de l'Union soviétique parlent de l'envoi prochain d'un homme dans l'espace. Les préparatifs sont accélérés aux États-Unis, pas assez cependant, car, le 12 avril 1961, le monde apprend que Youri Gagarine a été lancé en U. R. S. S. et a atterri sain et sauf après une révolution.

Sa cabine sphérique *Charik* (la « petite boule ») a trois panneaux amovibles. L'un d'eux permet au pilote d'entrer et de sortir, même avec son siège éjectable. Un deuxième panneau ferme le compartiment parachute et sert au besoin de sortie de secours, le troisième ne sert qu'à l'installation des appareils.

L'arrivée au sol peut s'effectuer de deux façons :

— le pilote reste dans *Charik*, déclenche un parachute frein à 4 000 m d'altitude, puis le parachute principal à 2 600 m; l'impact au sol est très dur;

— le pilote s'éjecte avec son siège à 7 000 m, ouvre son parachute individuel à 2 500 m et largue son siège.

Les cosmonautes russes ont toujours choisi la deuxième solution.

Le 12 avril 1961 voit le triomphe de Gagarine. Aux États-Unis, c'est la consternation. Le seul résultat obtenu jusqu'ici n'est qu'un saut de 364 km avec une cabine habitée par un chimpanzé, alors que les Russes viennent de mettre un cosmonaute sur orbite!

Avant d'affronter la mise sur orbite, réservée à Glenn, la capsule *Freedom* est enfin lancée le 5 mai 1961 avec Shepard à son bord. Le cosmonaute est récupéré dans l'Atlantique, en parfaite santé, après avoir franchi 485 km et atteint 184 km en altitude. Le 21 juillet, c'est au tour de Grissom d'effectuer un saut identique.

Bien que le Soviétique Gagarine ait déjà été mis sur orbite, on ne peut être assuré que la cabine *Mercury* présente les mêmes garanties que *Vostok*. Aussi, prenant

I.G.D.A. - Tosi

▶ Charik, *la « petite boule », pèse 2 400 kg et a un diamètre de 2,3 m. Elle a trois panneaux amovibles; l'un permet d'entrer et de sortir, l'autre ferme le compartiment parachute, le troisième sert à l'installation des appareils.*

une ultime précaution, les Américains lancent le 23 novembre 1961 le chimpanzé Enos qui sera récupéré indemne après avoir bouclé une orbite.

On considère alors que tout est prêt pour la mise sur orbite d'un cosmonaute.

Le 20 février 1962 est le grand jour. John Glenn effectue trois tours de la Terre. Cela marque la fin du complexe spatial que nourrissaient les Américains. Les envois dans l'espace vont se succéder à un rythme accéléré :

— le 24 mai 1962, Scott Carpenter boucle 3 tours ;
— le 3 octobre 1962, Schirra effectue 6 révolutions ;
— les 15 et 16 mai 1963, Gordon Cooper atteint 22 révolutions.

Le programme *Mercury* est terminé. Il a donné satisfaction : non seulement les vols se sont déroulés comme prévu, mais les astronautes se sont parfaitement accommodés des vols spatiaux, accumulant les observations, résistant sans fatigue excessive à des vols de plus en plus longs.

La N. A. S. A. décide alors de passer au *programme Gemini*.

Le programme Gemini

C'est la seconde étape du programme général *Apollo* engagé depuis 1960 ; mais cette nouvelle étape n'a été décidée qu'en 1961, quand il est devenu évident qu'il serait très utile de créer des vaisseaux biplaces avant d'entamer la construction de la cabine *Apollo*, qui doit emmener trois astronautes (leur nombre a été fixé impérativement par la nature des missions qui leur seront imparties).

C'est la fusée *Titan II* qui assurera le succès du programme *Gemini*. Elle a d'abord été conçue pour doubler l'*Atlas* comme missile intercontinental. Ses premiers plans datent de 1955. A cette époque, *Atlas* n'avait pas encore volé (le premier vol est en effet du 17 décembre 1957). Les responsables de la Défense, craignant que ce dernier ne donne pas satisfaction, préférèrent doubler la mise en s'adressant à la Société Martin, l'*Atlas* étant fabriqué par Convair.

Photri

▲ ***Récupération d'Alan Shepard.***

En juin 1960, *Titan I* réussit ses premiers essais. L'armée de l'air demande alors à la Société Martin une *Titan II* plus perfectionnée. Elle est prête moins de deux ans plus tard, et constitue alors l'engin militaire le plus puissant de l'arsenal américain. C'est une fusée à deux étages, que l'on a voulu adapter à son rôle militaire. Les moteurs développent une poussée totale de 240 t. Leurs propergols sont connus de longue date, mais c'est la première fois qu'ils sont utilisés : le combustible est de la diméthylhydrazine et le comburant du peroxyde d'azote. Ils ont l'énorme avantage, à l'inverse des combustibles cryogéniques, de pouvoir être conservés pendant plusieurs mois à la température normale. Ce sont d'autre part des hypergols, c'est-à-dire qu'ils s'enflamment spontanément au contact l'un de l'autre, ce qui permet de supprimer le système d'allumage.

La fusée *Titan* a donné si complète satisfaction qu'elle est retenue pour le programme *Gemini* dès 1962. Pour ajouter à sa fiabilité, puisque désormais elle va propulser des cabines habitées, *Titan II* est dotée d'un système destiné à déceler les défauts de fonctionnement, et à avertir les astronautes en cas d'incident ; il se révélera plusieurs fois très efficace. Son guidage est du type radio-inertiel, ce qui permet au contrôle terrestre de suivre avec précision le vol de l'engin jusqu'à sa mise sur orbite.

La cabine Gemini

C'est un véhicule biplace pesant 3 300 kg (contre 1 400 kg pour *Mercury*). *Gemini* possède un système propulseur comportant 24 moteurs de 11,5 kg, 2 moteurs de 38 kg, 2 moteurs de 43 kg. Cette multiplicité des moteurs est le signe de la recherche d'une grande manœuvrabilité.

Dans le nez de *Gemini* se trouve un radar d'approche pour les rendez-vous. La cabine a trois parachutes : un extracteur, un stabilisateur et le parachute principal. Il y a quatre moteurs de contrôle d'attitude, un pour le tangage, deux pour le roulis, un pour les lacets. Il faut y ajouter

Keystone

▲ ***Un départ historique : le premier vol habité aux États-Unis. Le 5 mai 1961, la fusée* Redstone *qui emporte Shepard dans une cabine* Mercury*, s'élance du cap Canaveral. Shepard sera récupéré indemne dans l'Atlantique.***

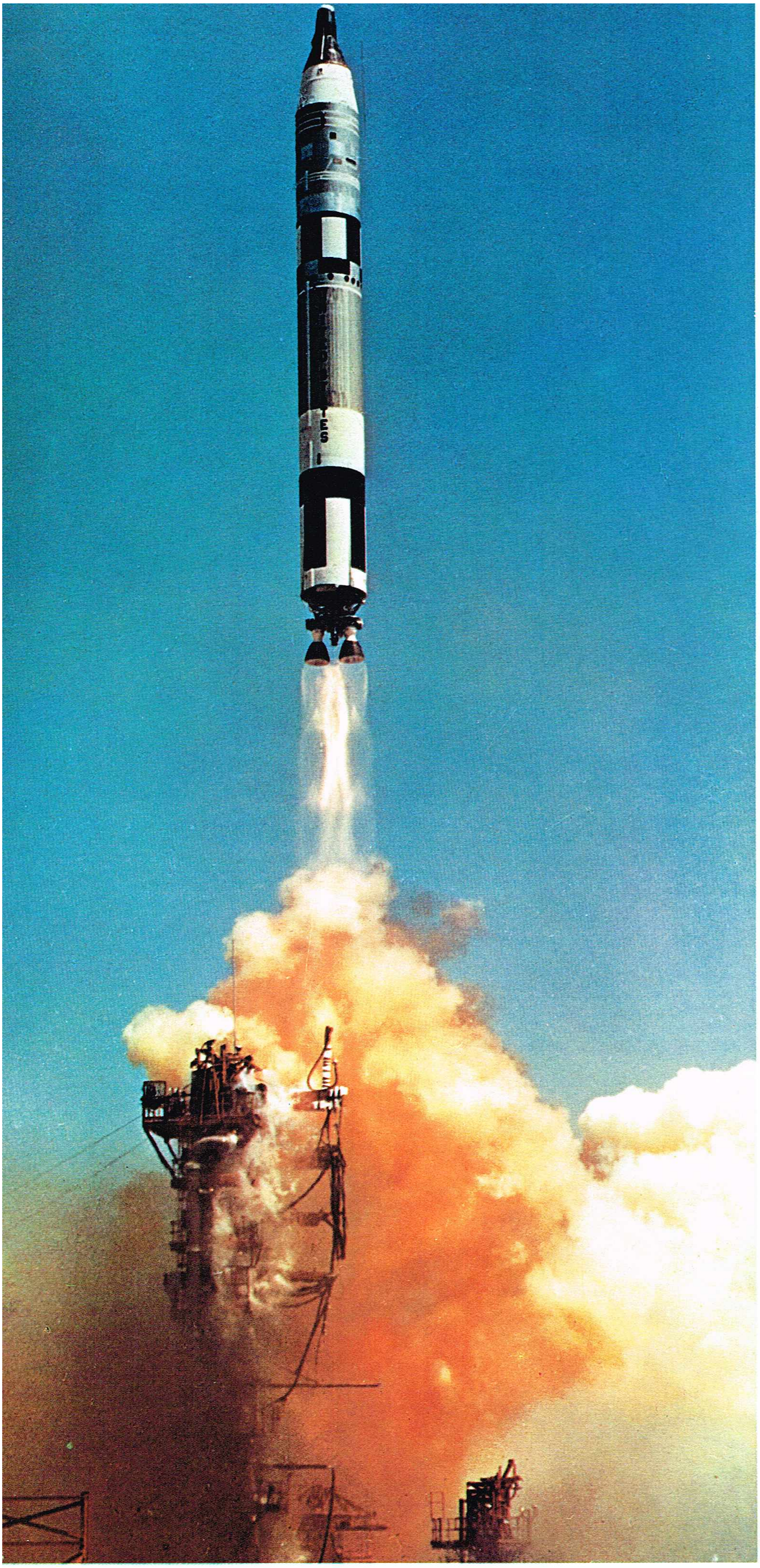
U.S.I.S.

un moteur de contrôle d'attitude pour la rentrée dans l'atmosphère, un moteur de manœuvre et des rétrofusées.

Les astronautes ont sous la main les organes nécessaires à la commande de tous les moteurs.

Les réservoirs des propergols nécessaires à la mise en route des moteurs de contrôle d'attitude sont sous le plancher, à côté du système réfrigérant et du réservoir d'oxygène liquide.

La cabine possède, comme *Mercury*, son périscope et ses détecteurs d'horizon. Plusieurs antennes assurent les liaisons HF. Une antenne est destinée à la manœuvre de récupération, une autre au déclenchement de la descente en parachute.

La cabine *Gemini*, on le voit, est parfaitement équipée pour assurer un rendez-vous spatial, pour rentrer dans l'atmosphère et pour être récupérée dans les conditions optimales. C'est grâce aux expériences *Mercury* et aux observations formulées par les différents pilotes de la cabine monoplace que la cabine *Gemini* est devenue un chef-d'œuvre de technologie. Elle connaîtra des incidents plus ou moins graves, qui seront minimisés par l'intervention des astronautes à qui l'on a donné de nombreux moyens pour y remédier. *Gemini* accomplira brillamment le programme qu'on lui a fixé.

Premières expériences

La première *Gemini*, vide de passagers, mais remplie d'instruments de contrôle, fut placée sur orbite le 8 avril 1964. Après quatre jours de fonctionnement au cours desquels furent recueillis tous les renseignements désirés, la cabine se consuma en rentrant dans l'atmosphère comme prévu. Le succès de l'expérience fut total.

Le 19 janvier 1965, la *Gemini II* se posait en excellent état dans l'Atlantique après un bond de 3 460 km à la vitesse moyenne de 7,4 km/s.

Le 23 mars 1965, Grissom (du deuxième essai *Mercury*) et Young sont placés sur orbite. Ils exécutent des transferts d'orbite grâce à leurs moteurs-fusées, et exécutent des loopings sur leur trajectoire. Ils se posent à 93 km du point prévu après avoir effectué trois révolutions autour de la Terre.

Le 3 juin 1965, Mc Divitt et White procèdent à une nouvelle expérience. Ils dépressurisent leur cabine, et White sort dans le vide. Il réédite l'exploit accompli le 18 mars précédent par Alexis Leonov qui a passé 10 mn hors de son vaisseau *Voskhod II*. L'expérience *Gemini* est beaucoup plus dangereuse, car, à l'inverse du vaisseau soviétique, la cabine ne possède pas de sas de sortie. White évolue autour de *Gemini IV* à l'aide d'un pistolet qui, actionné, rejette du gaz et crée donc des impulsions. L'astronaute est relié à la cabine par un long cordon qui l'alimente en oxygène et en électricité. La sortie durera 21 minutes.

Gemini IV sera récupérée après sa 62^{e} révolution. Les risques courus par les astronautes sortis de la cabine sont considérables. En effet, les hommes, hors de la cabine, baignent dans les rayons cosmiques, ils risquent le choc de micrométéorites, et ils reçoivent une grande quantité de chaleur du Soleil. (On sait que l'extérieur de la combinaison de White a été porté à la température de 121 °C. Cette combinaison ne comportait pas moins de 22 couches de protection.)

Le 21 août 1965, Cooper et Conrad effectuent 33 révolutions et, malgré divers incidents, sont récupérés sains et saufs.

Premier rendez-vous spatial

Le programme *Apollo* en projet comprend plusieurs rendez-vous entre des cabines pilotées. Il convient donc de s'assurer que ces rendez-vous dans l'espace ne présentent pas de difficultés insurmontables.

Le **15 décembre 1965**, Schirra et Stafford placés dans *Gemini VI* rejoignent Borman et Lowell qui voguent dans *Gemini VII*. Les deux vaisseaux naviguent de conserve pendant près de 5 heures et demie. Ils se rapprochent jusqu'à 30 cm l'un de l'autre, mais évitent de se toucher. Rien n'est encore prévu pour un amarrage entre les deux.

Le **16 mars 1966**, *Gemini VIII*, pilotée par Armstrong aidé de Scott, réalise le premier rendez-vous spatial. La cible poursuivie est le deuxième étage *Agena* mis sur orbite par une fusée *Atlas-Agena*. Cette *Agena* est munie

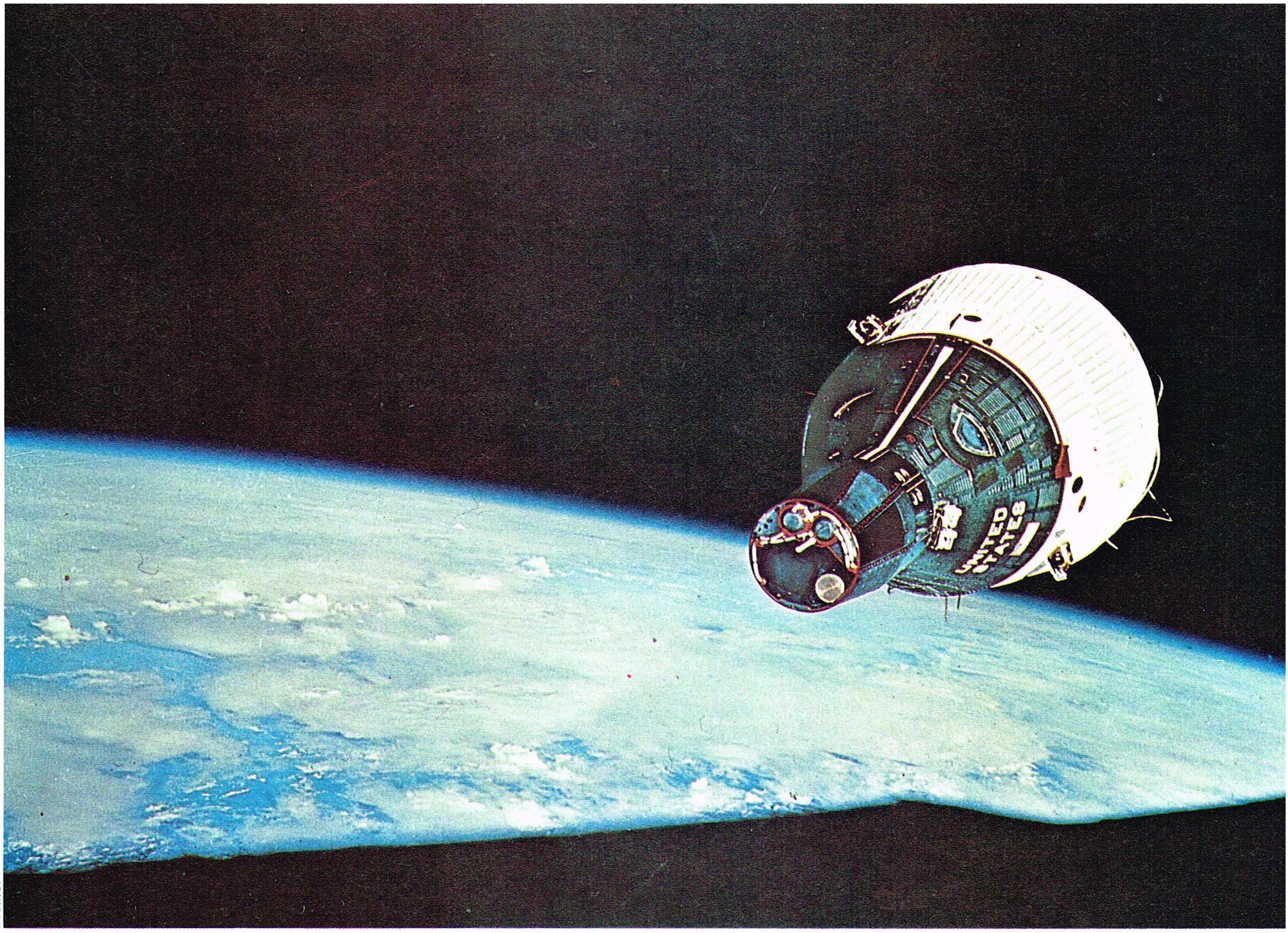

U.S.I.S.

d'une sorte de mâchoire double. Pilotée par Armstrong, *Gemini VIII* engage son nez dans la mâchoire d'*Agena* qui se referme : les deux engins sont ainsi solidaires. Un incident grave se produit alors, un moteur de stabilisation se bloque alors qu'il est ouvert; l'ensemble se met à tourner de plus en plus vite sur lui-même. Les pilotes, grâce à leur sang-froid et à la compétence acquise par un long entraînement, réussissent à freiner la rotation et peuvent enfin se dégager. Mais ils reçoivent l'ordre de rentrer, car ils sont exténués. Ils ne s'en posent pas moins à 5 km du point prévu.

Le **1er juin 1966,** une nouvelle cible est utilisée. C'est une simple mâchoire surmontant un cylindre. Les deux parts de la mâchoire sont maintenues accolées par une coiffe; quand celle-ci est éjectée, la mâchoire s'ouvre. *Gemini IX* est rapidement au rendez-vous, mais c'est pour constater que la coiffe s'est mal dégagée, la mâchoire de ce que les astronautes appelleront le « crocodile spatial » n'est qu'entrouverte, et l'arrimage n'est pas possible. Les deux pilotes, Stafford et Cernan, doivent se contenter de prendre la photo du crocodile spatial.

Cependant, ils poursuivent leurs expériences. Cernan sort de la cabine et va prendre, à l'arrière de *Gemini*, une sorte de fauteuil muni d'un système de propulsion dans lequel il doit s'installer. Mais la manœuvre se révèle trop difficile, et il doit y renoncer après être resté hors de la cabine plus de deux heures. Le retour après 46 révolutions est le plus précis de ceux qu'on a réalisés : l'amerrissage se fait à 1,5 mille marin du porte-avions *Wasp*.

Le **18 juillet 1966,** *Gemini X* a rendez-vous avec une *Agena* mise sur orbite. L'arrimage est réussi. Le moteur de l'*Agena* est mis à feu. L'ensemble est propulsé en 14 secondes à 764 km d'altitude avec une poussée de 7 250 kg.

Young et Collins se séparent alors de l'*Agena* et cherchent l'étage *Agena* laissé sur orbite depuis le rendez-vous avec *Gemini VIII* (interrompu par la mise en rotation accidentelle de l'ensemble). Collins sort de la cabine et va travailler sur l'*Agena*. Le retour se fait sans histoire.

N.A.S.A.

▲ *Tom Stafford, à bord de* Gemini VI, *a pris cette image de* Gemini VII *lors de leur rendez-vous dans l'espace le 15 décembre 1965.*

◀ *Page ci-contre, la fusée* Titan II *du programme* Gemini, *2 étages, 240 tonnes de poussée.*

◀ *E. White évolue autour de* Gemini IV *à l'aide d'un pistolet qui rejette du gaz, créant ainsi des impulsions.*

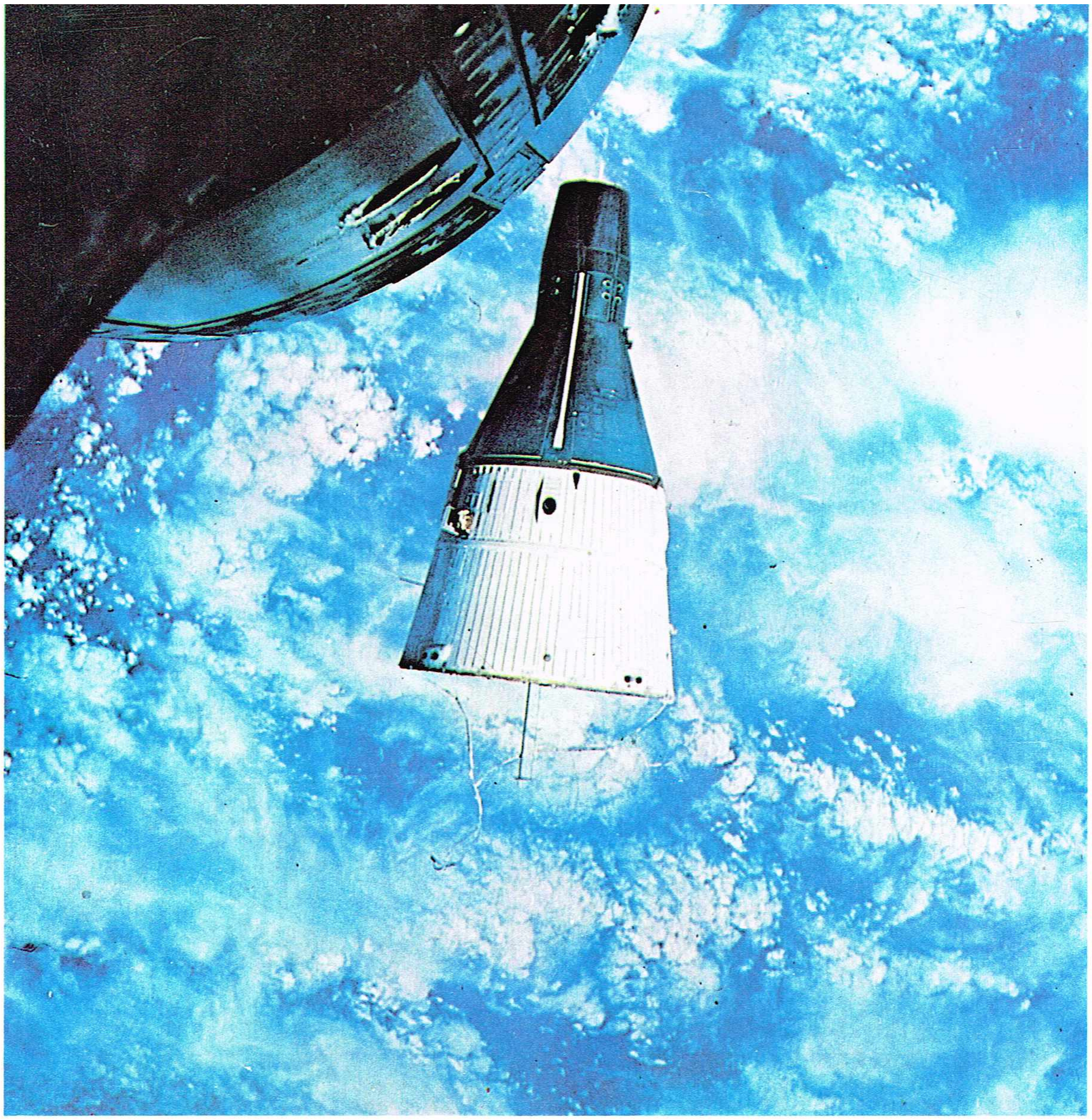

▶ *Vue de* Gemini VI *prise à partir de* Gemini VII. *Les deux vaisseaux naviguèrent de conserve pendant près de 5 heures et demie et se rapprochèrent à 30 cm mais sans se toucher. L'amarrage n'était pas encore prévu.*

Le **12 septembre 1966,** *Gemini XI* réussit le rendez-vous à une demi-seconde près de l'instant prévu. Cette perfection dans le temps a été recherchée, car il faut que, lors du programme *Apollo*, la cabine décollant de la Lune rejoigne celle qui a été laissée en orbite (comme on le verra plus loin) dès la première rencontre, sans coup férir. Des séries d'arrimages sont effectuées avec succès.

Le **14 septembre 1966** et le **11 novembre** de la même année, la série *Gemini* s'achève par un complet succès. Elle aura été fertile en incidents, mais tous ont apporté des enseignements nouveaux, et aucun n'a mis en danger la vie des astronautes. La N. A. S. A. est maintenant prête à entamer le *programme Apollo*.

▼ *Ce « crocodile affamé » est la cible ATDA de* Gemini IX *qui n'avait pu se débarrasser de sa coiffe aérodynamique. Les astronautes devront se contenter d'un rendez-vous sans arrimage.*

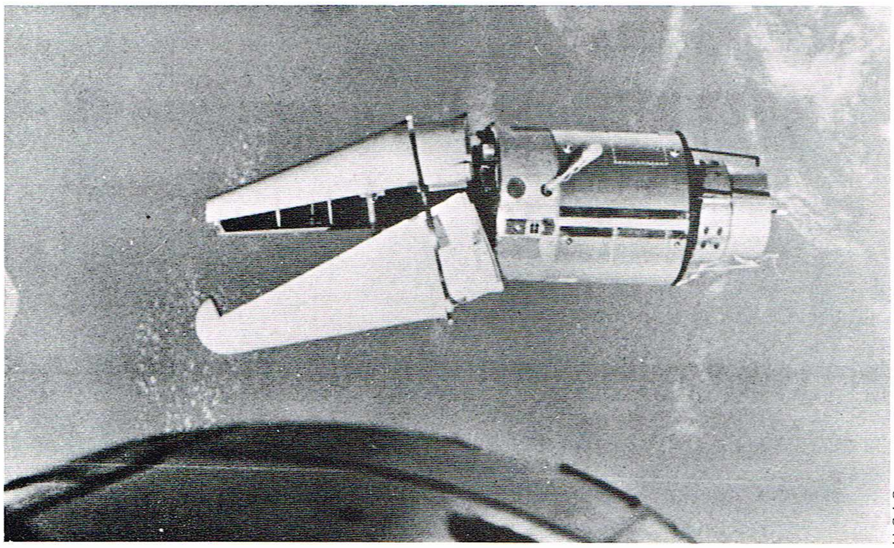

U.S.I.S.

LE PROGRAMME APOLLO

Le programme *Apollo*, qui a permis pour la première fois de débarquer des hommes sur la Lune, puis de les ramener sur Terre, présente une complexité extrême. De tous les programmes spatiaux réalisés, c'est celui à propos duquel ont été transmises les plus nombreuses informations de toutes sortes. Mieux qu'aucune autre expérience, il permet d'étudier et d'apprécier une entreprise spatiale ; c'est pourquoi nous avons donné une importance particulière à sa description.

Il ne s'agissait pas seulement d'envoyer un homme sur la Lune, il fallait le faire arriver au point choisi d'avance, au kilomètre près. Toutes les manœuvres, satellisation, libération, alunissage, retour sur la Terre, demandaient une très grande précision.

Ce sont les *Surveyor* et les *Lunar Orbiter* qui ont permis de défricher cette voie toute nouvelle, comportant d'immenses risques. On retiendra que, pour y parvenir, plus de cent mille ordres leur ont été envoyés depuis la Terre. Grâce à ces expériences, on est parvenu à connaître parfaitement les trajectoires lunaires ainsi qu'à déceler et à mesurer les irrégularités du champ de gravitation lunaire. C'est alors que la N. A. S. A. jugea qu'elle était prête à tenter l'aventure humaine.

On se donna pourtant encore un délai. Ne fallait-il pas s'assurer que la cabine supporterait sans dommage la période d'échauffement au moment où elle rentrerait dans l'atmosphère ? Comment se comporteraient les combustibles en apesanteur, comment s'effectueraient les réallumages, comment, surtout, se réaliseraient la jonction des cabines, la mise en coïncidence des sas ? Tout cela fit l'objet des vols d'*Apollo I* à *Apollo VII* inclus. Quand *Apollo VIII*, pour la première fois habité par trois cosmonautes, s'élance, poussé par la fusée *Saturne V*, il n'y aura pas de mauvaise surprise : sa trajectoire, sa mise en orbite lunaire, son retour seront suivis à une dizaine de mètres près.

Apollo IX montra le bon fonctionnement du module lunaire. La satisfaction éprouvée ne pouvait pas faire oublier cependant d'autres risques majeurs : le moteur de freinage pendant la descente sur la Lune obéirait-il avec toute la souplesse désirable ? Stopperait-il à la bonne hauteur ? Trop tôt, il entraverait la descente, trop tard, il provoquerait l'écrasement. Le moteur principal du module de service partirait-il à coup sûr pour assurer la désatellisation de l'orbite lunaire ? Ce moteur, plus que toute autre partie du module, avait fait l'objet de soins extraordinaires ; il pouvait se réallumer cinquante fois de suite sans défaillance ; tout avait été fait pour lui donner une fiabilité presque absolue.

Mais il restait toujours la possibilité d'une panne, à un endroit imprévu. Même à la veille de l'exploit d'*Apollo XI*, la cabine lunaire avait suscité les pires difficultés : en orbite à 15 km du sol lunaire, elle refusait de se séparer de son socle.

Toutefois, le moment était arrivé de se lancer coûte que coûte : *Apollo XI* réalisa l'exploit.

Le véhicule lunaire Apollo

On désigne sous ce nom l'ensemble des étages qui surmontent la fusée proprement dite, dont ils ne sont séparés que par le cerveau IBM, cylindre de 0,91 m de haut (*fig.* 83).

Au départ, le véhicule lunaire est surmonté par la tour de sauvetage T qui sera larguée juste après l'allumage du second étage. Il comprend :

— le module de commandement, que l'on appelle aussi *cabine Apollo* C ;

— le module de service M ;

— le module lunaire L, qui comprend deux parties : la partie supérieure L″ et la partie inférieure L′.

Les quatre volets V qui entourent le module lunaire sont éjectés après la mise sur trajectoire translunaire. Ils ne jouaient au départ qu'un rôle aérodynamique et n'appartiennent pas à proprement parler au véhicule lunaire.

La cabine *Gemini* était une *Mercury* perfectionnée, mais, dans l'une comme dans l'autre, les cosmonautes vivaient dans un inconfort presque insupportable ; avec la cabine *Apollo*, on passe à une tout autre classe ; la *figure* 84 représente les trois engins spatiaux tracés à la même échelle. *Mercury* pesait 1,4 t, *Gemini* plus du double : 3,3 t. L'ensemble *Apollo* qui vogue vers la Lune pèse au départ 46,9 t.

La tour de sauvetage T

Pour le cas où la fusée exploserait au départ, on a prévu un système qui pourrait sauver la vie des cosmonautes : la tour de sauvetage. Elle a environ 7,8 m de haut, et pèse 3,5 t.

Les différents éléments de cette tour sont indiqués sur la *figure* 85.

1, détecteurs (4) d'attitude ;
2, moteur de contrôle de tangage ;
3, moteur d'éjection : hauteur 1,17 m, diamètre 0,65 m ; poussée 15 t ; durée de combustion : 1 s ;
4, moteur de sauvetage : hauteur 4,6 m ; diamètre 0,9 m ; poussée 70,3 t pendant 6 s ; carburant solide : poids 1,5 t ;
5, structure attachée à la cabine par 4 boulons explosifs ;
6, capuchon en verre, qui protège la cabine des jets de combustion du moteur **4** ;
7, 4 tuyères du moteur principal chargé de projeter la cabine ;
8, cône en liège et verre (ablatif) ; il est largué 0,4 s après l'éjection du système de sauvetage ;
9, empennage canard de basculement (déployé) ;
10, boulons explosifs (4).

Si la fusée explose au départ, le déroulement des manœuvres se fait automatiquement. Le moteur de sauvetage **4** tire la cabine dégagée du module de service avec une poussée de 70 t pendant 6 s, créant une vitesse de Mach 2. Quand l'ensemble ainsi lancé et guidé par le moteur de contrôle de tangage, grâce aux 4 détecteurs d'attitude, atteint sa culmination, les boulons explosifs **10** sautent. La cabine redescend en chute libre et largue ses parachutes.

S'il n'y a pas d'incident au départ, c'est le moteur d'éjection **3** qui dégage la tour de sauvetage après allumage du second étage de la fusée. Simultanément, les verrous explosifs (qui ont chacun un double système de mise à feu) sautent. Le bec de canard **9**, déployé, fait basculer l'ensemble pour dégager la trajectoire ; 0,4 s plus tard, le revêtement **8** de liège et de verre est expulsé.

La cabine Apollo (C) ou module de commandement

Les cosmonautes entrent dans la cabine par une ouverture rectangulaire dont le système de verrouillage est très complexe (*fig.* 86). Face à la porte d'accès se trouvent un télescope d'observation et un sextant spatial. Latéralement, des armoires contiennent les réserves d'eau, de nourriture et de médicaments.

On verra plus loin que, le 28 janvier 1967, l'équipage qui se trouvait dans la cabine au cours d'un exercice d'entraînement fut carbonisé parce que l'oxygène de la cabine prit feu. A cette époque, l'ouverture de la porte demandait 90 s. Après cet accident, on a réalisé une nouvelle fermeture qui peut se débloquer en 2 s seulement.

A l'inverse de ce que font les Soviétiques, les Américains ont décidé que leurs cosmonautes respireraient de l'oxygène pur (chez les Russes, la cabine a une atmosphère normale de 21 % d'oxygène pour 79 % d'azote,

J. Tiziou - Sygma

◀ ***Lancement d'*****Apollo XVII** ***à cap Kennedy, le 7 décembre 1972.***

▶▼ Figure 83 : différentes parties du véhicule lunaire Apollo. *Figure 84 : cabines* Apollo *(46,9 t),* Gemini *(3,3 t) et* Mercury *(1,4 t) tracées à la même échelle. Figure 85 : tour de sauvetage d'*Apollo *au cas où la fusée exploserait au départ (voir développement dans le texte).*

fig. 85

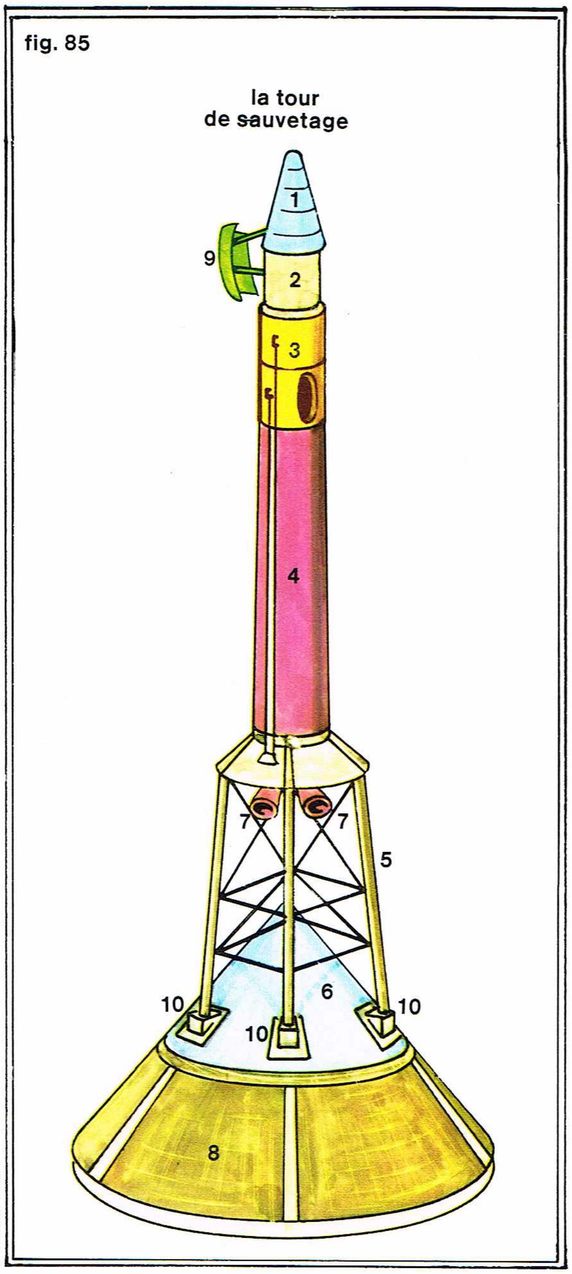

fig. 83

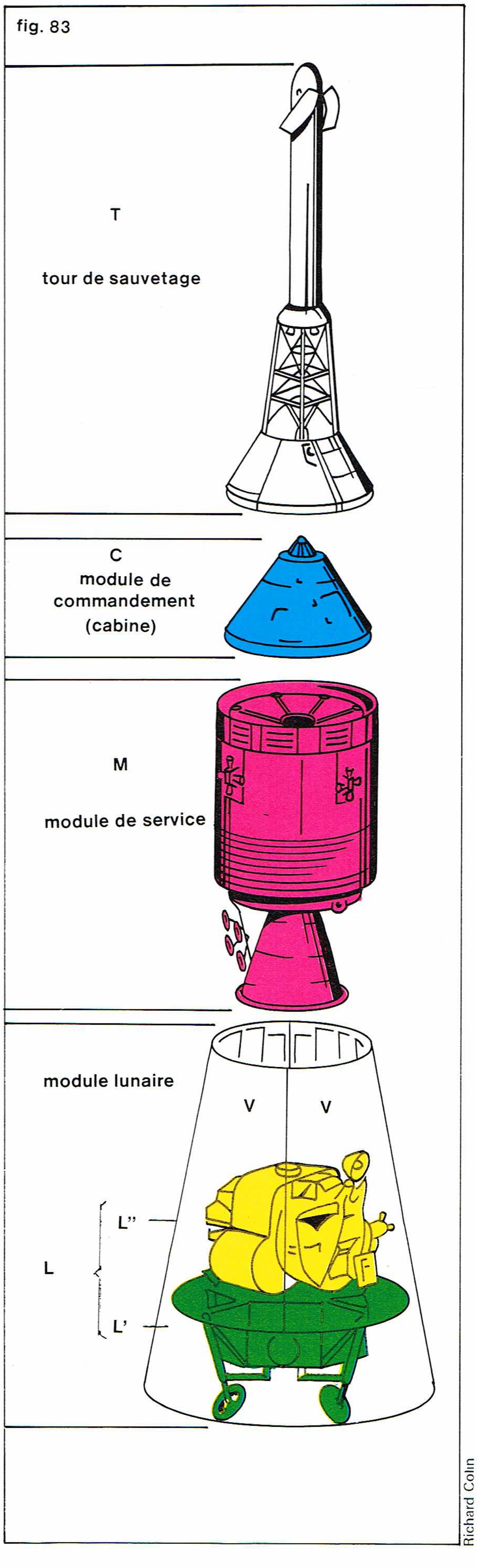

fig. 84

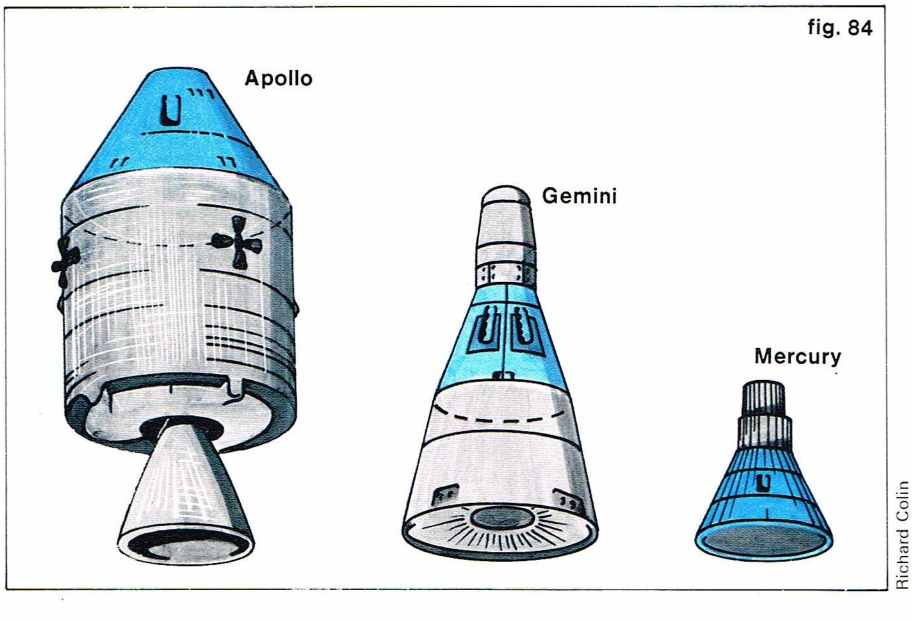

à la pression atmosphérique normale 760). Le procédé américain présente deux avantages appréciables :

— la pression intérieure peut être le tiers de la pression normale, ce qui diminue de beaucoup l'importance des fuites ;

— le système de contrôle pour un seul gaz est plus simple et donc moins pesant que pour deux (l'économie de poids reste un souci dominant).

Après l'accident qui coûta la vie à trois cosmonautes, certaines personnes ont vivement reproché à la N. A. S. A. de s'en tenir à l'oxygène pur. En fait, elle avait une bonne raison pour cela : l'oxygène est à une pression de 276 mm de mercure (au lieu de 760), aussi bien à l'intérieur de la cabine que dans le scaphandre. En cas de décompression brusque de la cabine (par exemple, par un trou causé par une météorite), le scaphandre résiste mieux ainsi à la tension subite qui le tend. L'absence d'azote a aussi des effets bénéfiques, en supprimant les risques de décompression.

Notons cependant qu'à l'oxygène on ajoute toujours une part d'hélium, car, même à faible dose, ce gaz supprime les inconvénients inhérents à l'oxygène pur.

Le croquis de la *figure* 87 montre très schématiquement le conditionnement de la cabine. Cet équipement régularise la pression de l'atmosphère dans la cabine (oxygène + un peu d'hélium). Il absorbe le gaz vicié, le purifie, puis le restitue à la cabine. Le scaphandre est alimenté par un circuit séparé ; on voit qu'en cas de dépressurisation de la cabine, le circuit scaphandre continue d'être alimenté. Les circuits bleus représentent les gaz viciés, les rouges les gaz purifiés. L'oxygène se trouve dans la boule O. Le conditionnement se fait en C. L'eau en excès est évacuée en E.

Il faut également absorber le gaz carbonique dégagé par la respiration des pilotes. Les Américains ont choisi d'absorber le CO_2 par de l'hydroxyde de lithium, tandis que les Soviétiques ont adopté un système différent, qui a l'avantage de régénérer l'oxygène. Les raisons de la préférence de la N. A. S. A. pour une méthode qui paraît moins séduisante n'ont pas été révélées.

Le système de climatisation a été long à mettre au point. Souvent, le principal problème, aussi paradoxal que cela paraisse, est d'éliminer la chaleur créée dans l'espace restreint de la cabine par les hommes et les appareils électriques. On le résout en faisant circuler l'atmosphère dans un échangeur où elle cède ses calories à un mélange eau-glycol ; ce liquide est refroidi grâce à un radiateur extérieur à la cabine.

fig. 86

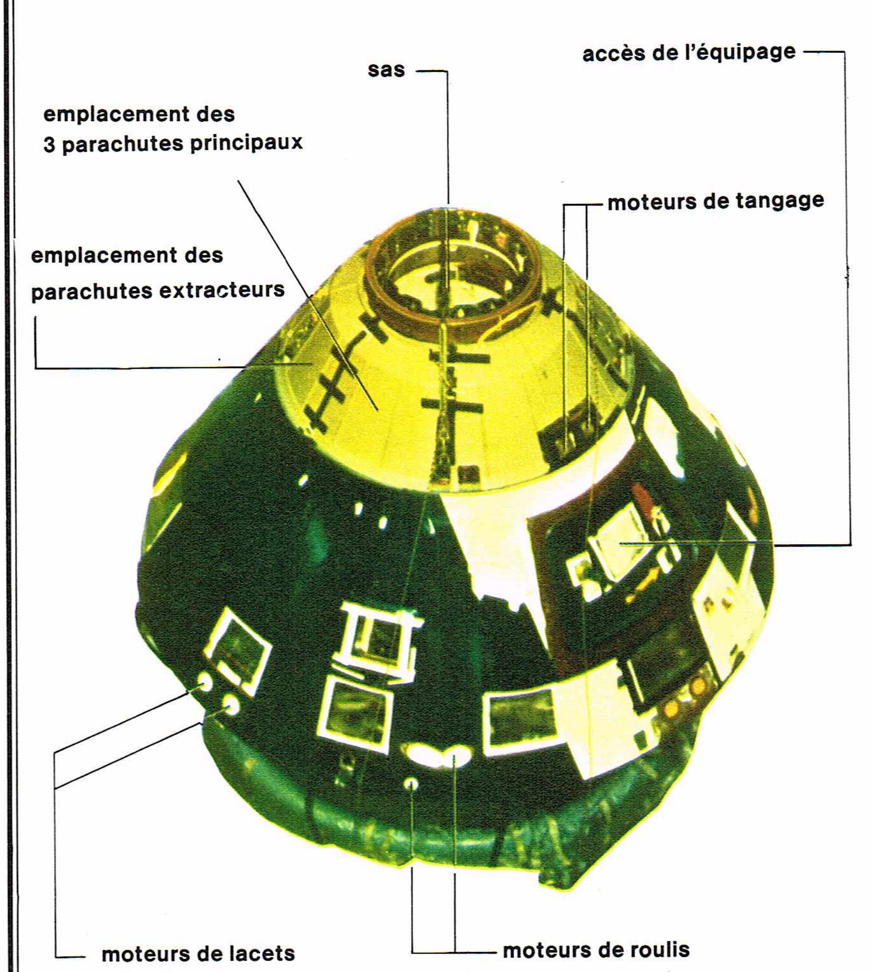

J. Tiziou - Sygma

▲ *Figure 86 : capsule d'Apollo IX ou module de commandement. Cette photographie a été prise à l'usine au moment où la capsule est emballée pour être envoyée à cap Canaveral (d'où les bandes de protection fixée par adhésifs).*

fig. 87

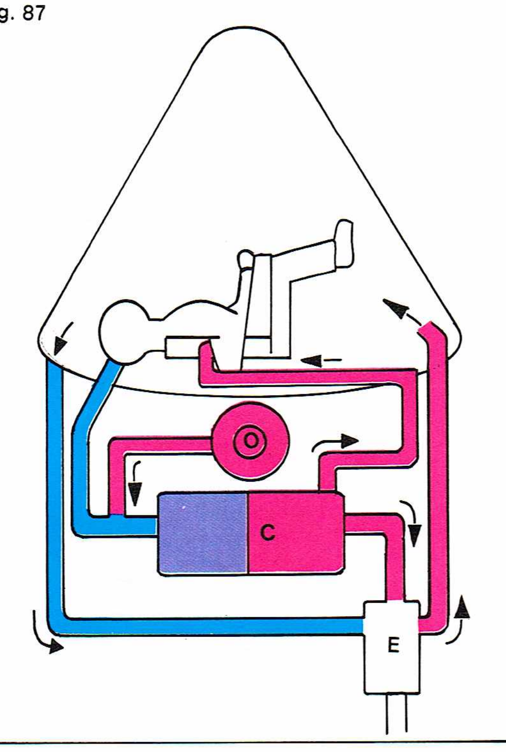

Richard Colin

◀ *Figure 87 : schéma montrant le conditionnement de l'atmosphère de la cabine et des scaphandres (voir développement dans le texte).*

La commande de la cabine

Le commandant de bord se place à gauche, il surveille les cadrans qui permettent de suivre le vol. Le pilote, placé au centre, peut suivre l'ensemble des données du tableau de bord, il contrôle personnellement les liaisons avec la Terre. A droite, le technicien s'occupe des systèmes électriques et du fonctionnement de la climatisation.

fig. 88

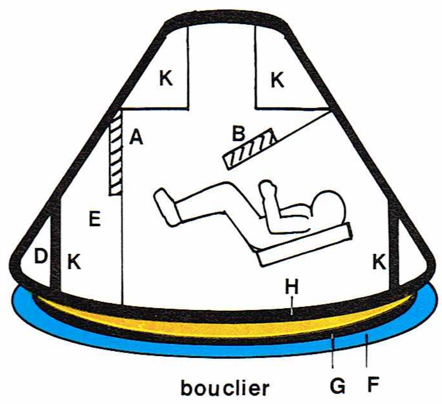

Richard Colin

Figure 88 : disposition intérieure et protections de la cabine (voir développement dans le texte).

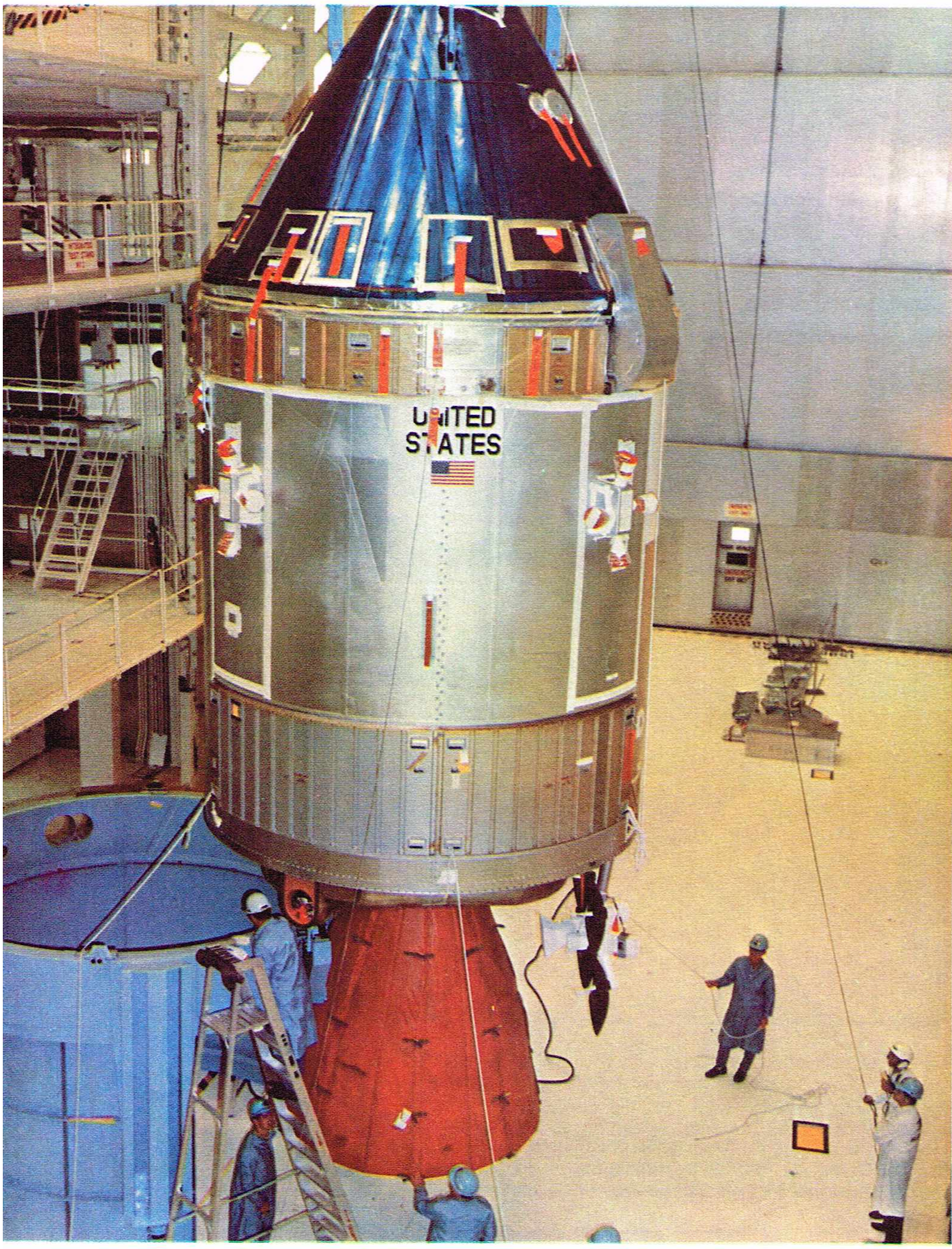

Sygma

fig. 89

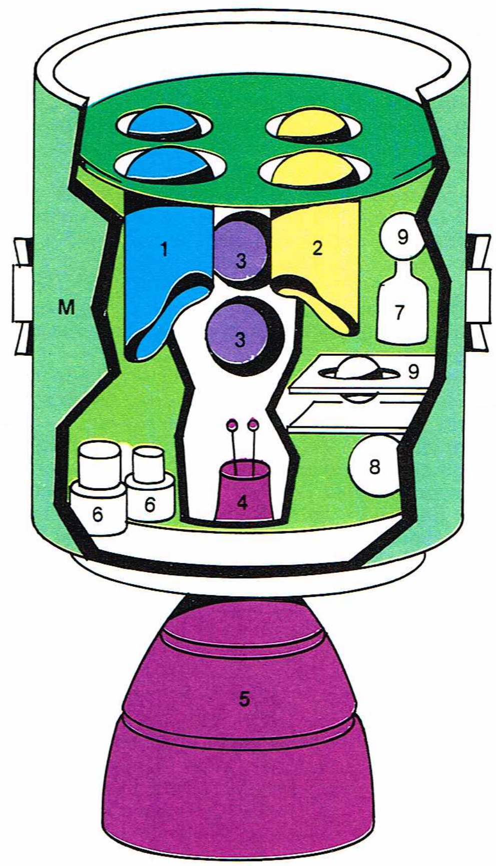

Richard Colin

▲ Apollo XI en préparation : vue, prise à l'intérieur du centre spatial Kennedy, du véhicule de commande et du module de service. Figure 89 : coupe du module de service.

La *figure* 88 montre la disposition intérieure de la cabine et ses protections. On a figuré un cosmonaute demi-allongé, il peut aussi s'allonger complètement, s'asseoir ou se mettre debout. Au-dessus de lui, le pupitre de commande B. En A, le tableau de contrôle. En haut, le sas S; E est le matériel d'équipement, D l'espace annulaire, K la coquille intérieure en aluminium. La coque extérieure est en acier.

En bas, F et G constituent le *bouclier* qui brûle en s'arrachant par lambeaux quand la cabine rentre à grande vitesse dans l'atmosphère terrestre. F est une couche d'époxy (résine ablative), G et H des cloisons en acier qui ont entre elles de la fibre de quartz, puissant isolant contre la chaleur.

Le module de service

La *figure* 89 représente une coupe du module de service M. Il a 6,88 m de hauteur et pèse, vide, 5,2 t. Plein, il a au départ une masse de 24 t dont 7 t de carburant et 12,2 t de comburant (le carburant est un mélange à 50/50 d'UDMH et d'hydrazine; le comburant est du peroxyde d'azote). Le réservoir **1** contient le comburant, le réservoir **2** le carburant, le réservoir **3** l'hélium liquide servant à la pressurisation des réservoirs. Le moteur principal, de poussée 9,3 t, est en **4,** sa tuyère en **5.** Le nombre de remises en marche possibles du moteur est de 50.

Le contrôle d'attitude est composé de 16 tuyères groupées en 4 blocs de 4 tuyères chacun (*fig.* 90). Le nombre de remises en marche possibles de ces tuyères d'attitude est de 10 000. Les propergols utilisés sont l'hydrazine et le peroxyde d'azote. Chaque bloc de 4 tuyères a ses réservoirs de combustibles à l'intérieur de la paroi. Chaque tuyère peut fonctionner indépendamment.

En **6** (*fig.* 89) se trouvent les piles à combustible qui alimentent en permanence les batteries situées dans la cabine *Apollo*; en **7** et **8** les réservoirs d'hydrogène; en **9,** le réservoir d'oxygène.

fig. 90

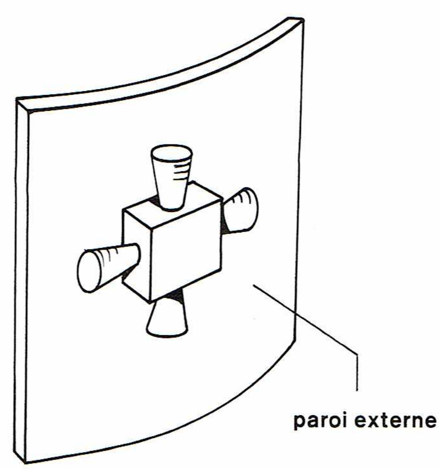

Richard Colin

▶ Figure 90 : un bloc de quatre tuyères-verniers. Il y a quatre de ces blocs sur le pourtour extérieur du module.

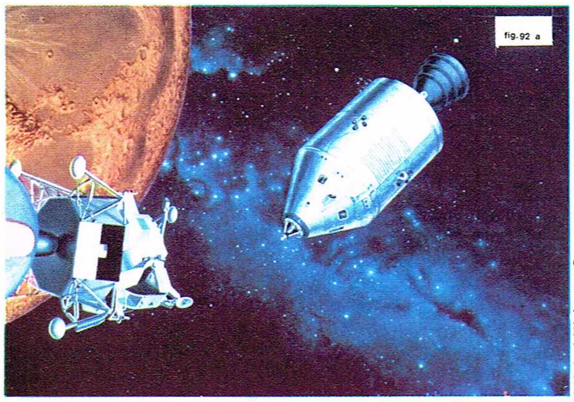

Michel Tiziou - Sygma

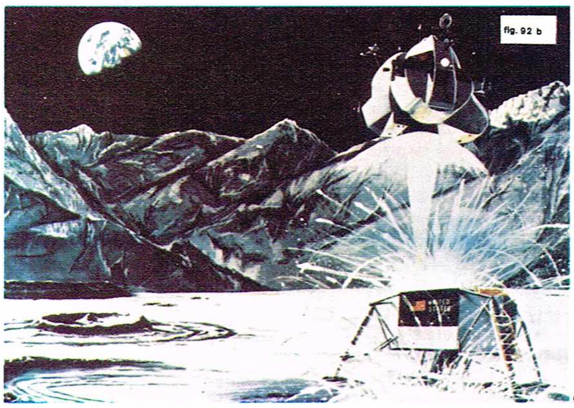

Sygma

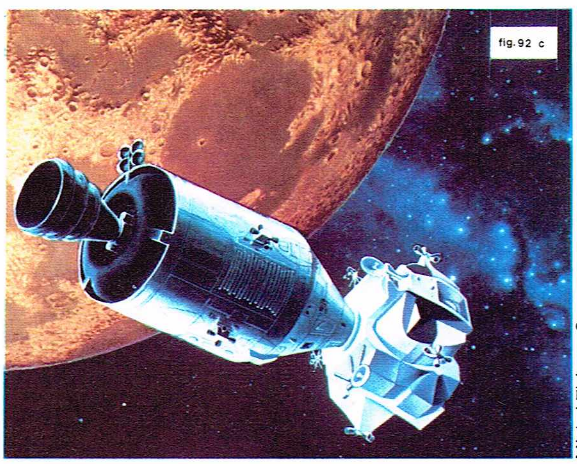

Michel Tiziou - Sygma

Michel Tiziou - Sygma

▲ ***Figure 91 : module lunaire.* 1 : *antenne orientable (bande* S*) ;* 2 : *sas ;* 3 : *radar d'approche ;* 4 : *porte de descente sur la Lune ;* 5-5′ : *deux des commandes d'attitude.***

Figure 92 :* a, *séparé du vaisseau mère, le module lunaire descend vers la Lune, freiné par son moteur à poussée variable très souple, de 0,475 t à 4,75 t ;* b, *l'exploration lunaire est terminée ; la partie supérieure est séparée de la partie inférieure (qui restera sur la Lune) par le moteur de remontée de 1,6 t de poussée ;* c, *la partie supérieure a rejoint l'ensemble du module de service resté sur orbite.

Le module lunaire L

Son poids au départ est de 14,74 t, sa hauteur est de 6,99 m, train d'alunissage déployé, et son diamètre est de 9,45 m. Il se compose de deux parties (*fig.* 91) :

● La partie supérieure L″ est la cabine habitable dans laquelle les deux cosmonautes se placeront lors de la descente vers la Lune et au départ de la Lune pour rejoindre l'ensemble de M et de la cabine C resté sur orbite avec le troisième pilote. L″ a son propre moteur de remontée. Le volume pressurisé disponible est de 6,66 m^3.

● La partie inférieure L′ sert à porter L″ et possède le moteur de descente qui sert à freiner l'ensemble ; ses quatre pieds avec amortisseurs assument l'alunissage après arrêt du moteur de freinage à 50 m du sol. L′ sert de plate-forme de départ à L″ et reste sur la Lune.

Les différentes étapes de la descente sur la Lune et de la remontée sont indiquées *figure* 92abc.

Le *tableau* VI donne quelques caractéristiques des 2 étages L′ et L″ du module L.

Manœuvres de retournement et de restructuration d'Apollo

Le vol *Apollo* va nécessiter des manœuvres de retournement de la cabine que les Américains ont mises au

Tableau VI
Quelques caractéristiques des deux étages (L′ et L″) du module lunaire L

Étage	Masse à vide (en t)	Masse des propergols (en t)	Nombre de moteurs	Poussée (en t)	Hauteur (en m)	Diamètre (en m)
Étage de descente L′	1,95	8,11	1	Variable de 0,475 à 4,75	3,23 sans pied	4,29
Étage de remontée L″	2,20	2,35	1	1,6	3,76	4,29

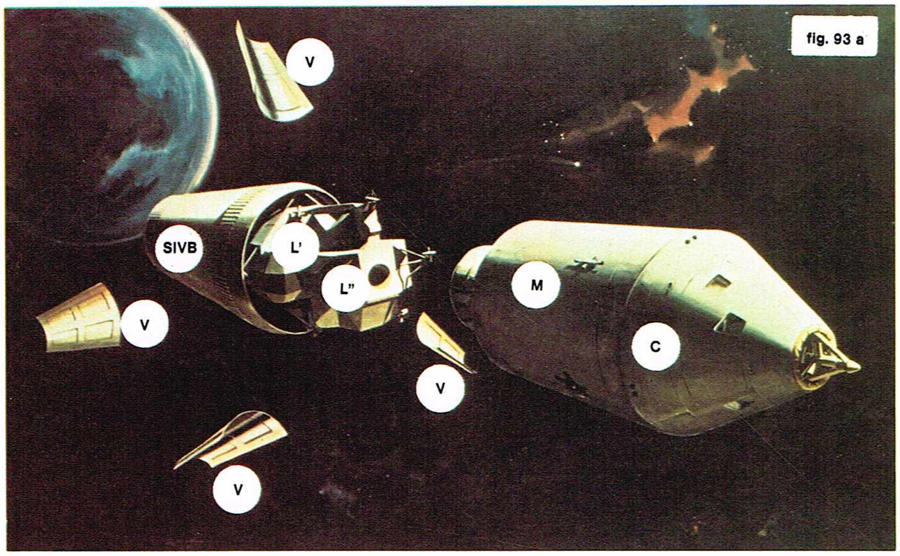

U.S.I.S.

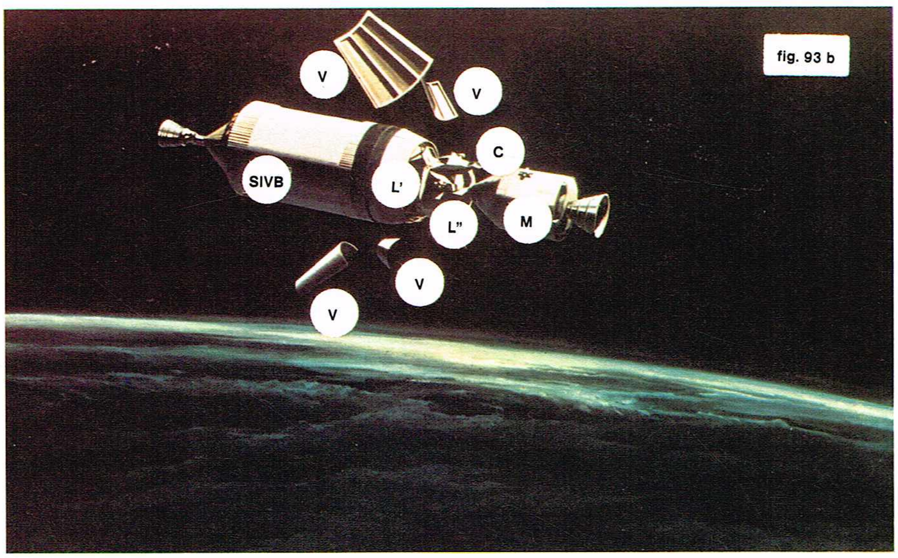

U.S.I.S.

▼▲ ***Figure 93 : ces trois photos montrent l'ensemble des manœuvres exécutées avant l'arrivée sur la Lune (voir développement dans le texte).***

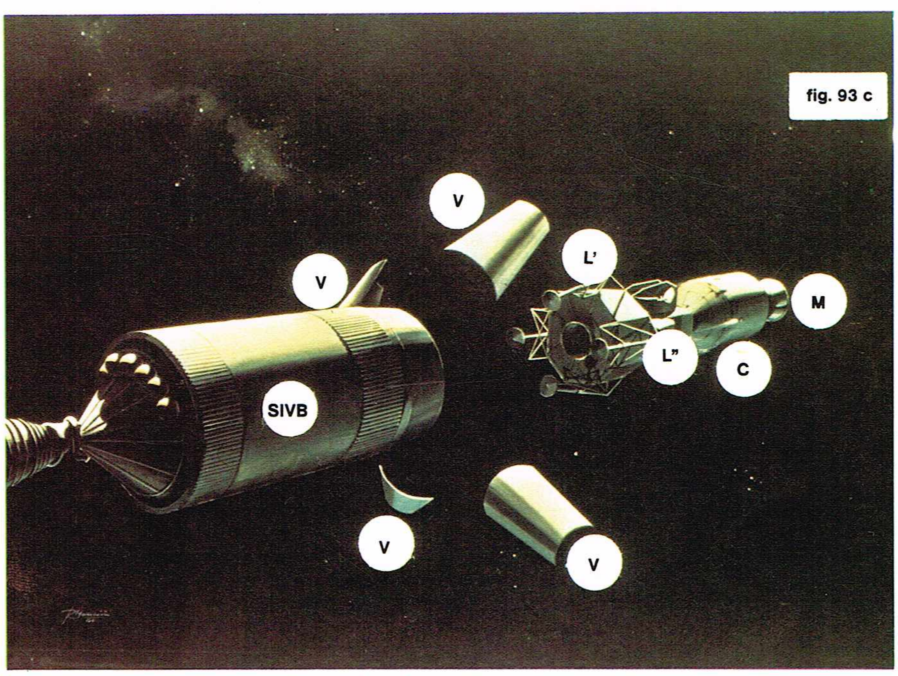

U.S.I.S.

point au cours du programme *Gemini*. On a vu que la cabine est dotée de 12 moteurs verniers de 0,42 t de poussée chacun.

Pour comprendre leur mode d'action, considérons un cas plus simple, celui de deux moteurs disposés de chaque côté d'un véhicule spatial.

— S'ils sont allumés en même temps dans la même direction, ils donnent une poussée qui passe par le centre de gravité. La vitesse est modifiée (augmentée ou diminuée, puisque les moteurs peuvent agir dans un sens ou en sens opposé).

— Si un seul moteur est allumé, il y a à la fois changement de vitesse et pivotement.

— Si deux moteurs sont allumés, opérant en sens inverse, ils créent un couple entraînant une rotation sans changement de vitesse (à poussée égale).

La diversité des manœuvres effectuées avec deux moteurs situés de part et d'autre du véhicule spatial, symétriquement par rapport au centre de gravité, met en lumière la souplesse d'utilisation que permettent d'obtenir 12 moteurs de contrôle d'attitude. Chacun a une masse de 3,76 kg et une poussée de 42,2 kg fournie par deux propergols : hydrazine et N_2O_4. Ces moteurs disposent de 3 000 remises à feu possibles.

La précision des manœuvres a été atteinte lors de l'entraînement du programme *Gemini*, avec ses rendez-vous spatiaux et ses jonctions. Les premiers vols *Apollo* ont servi à parfaire cet entraînement comme il se devait, puisqu'on employait une nouvelle cabine. Avant la grande première que sera le débarquement sur la Lune, *Apollo IX* permettra d'effectuer une jonction dans le voisinage de la Lune.

De nombreuses critiques se sont élevées pour déplorer la complexité des manœuvres de restructuration que l'on fait subir au véhicule *Apollo* dès le départ sur la trajectoire vers la Lune. Donnons une idée de cette restructuration (*fig.* 93).

La *figure* 93a montre l'ensemble du véhicule lunaire se détachant de l'étage *S. IVB* peu après que, placé sur la trajectoire lunaire, les volets de carénage du module lunaire se soient ouverts pour le dégager, tandis que les verniers du module de service M écartent l'ensemble (C-M). La *figure* 93b montre les quatre volets V déverrouillés qui s'éparpillent dans l'espace après que l'ensemble, en position (C_1-M_1), ait tourné sur lui-même grâce à deux verniers éjectant le gaz en sens opposé et se soit aligné sur l'axe de *S. IVB ;* les verniers sont stoppés. Puis ils sont remis en marche dans le même sens pour que le sas de C vienne s'accoler au sas de L″. Quand cette opération est faite, les verniers sont stoppés, puis remis en marche, comme le montre la *figure* 93c, pour entraîner le module lunaire (L′-L″). L'étage *S. IVB* abandonné ira se consumer dans l'atmosphère tandis que le véhicule lunaire complet (C-M-L) continue vers la Lune.

Schéma du déroulement des opérations

La *figure* 94 schématise l'ensemble des opérations. Au point O le premier étage E_1 de la fusée est mis à feu. Au point 1, cet étage consumé s'éteint. Il est largué tandis que, simultanément, le deuxième étage est mis à feu. Aussitôt après, en T, la tour est expulsée. Au point 2, le deuxième étage E_2 consumé s'éteint. Il est largué tandis que l'étage E_3 est mis à feu.

Au point A la vitesse est suffisante pour assurer la satellisation terrestre. L'étage E_3 est alors éteint (bien que tout son combustible ne soit pas encore consommé).

Sur sa lancée, l'ensemble (E_3 plus véhicule *Apollo*) se satellise. Il fera autant de fois le tour de la Terre qu'il est nécessaire pour procéder au contrôle de son bon fonctionnement et effectuer éventuellement d'ultimes corrections. Quand tout est bien prêt, l'étage E_3 est rallumé pour donner à l'ensemble la poussée nécessaire à la transformation de l'orbite circulaire en une ellipse dont le grand axe a une valeur voisine de la distance de la Lune.

Le point P où cette poussée est donnée sera le périgée de l'ellipse. Sa position est déterminée par le fait qu'il doit se trouver en alignement avec le centre de la Terre et avec la position l_2, calculée, où se trouvera la Lune quand le véhicule arrivera dans son voisinage.

L'étage E_3 est largué dès que la trajectoire lunaire est acquise, au point 3. Le voyage se poursuit avec la cabine C, le module de service M et le module lunaire L. Cet ensemble va se satelliser en l_2 autour de la Lune.

Quand celle-ci est parvenue en l_3, le véhicule se scinde au point D. Le module lunaire L, freiné, alunit en F, tandis que (C-M) reste sur orbite. L'exploration terminée, L se scinde à son tour. La Lune est parvenue à ce moment en l_4. La partie supérieure de L, L″, emmène deux astronautes et rejoint (C-M) en G sur l'orbite lunaire. L″ s'accolle à C. Les deux astronautes regagnent C. L″ est alors larguée et va s'écraser sur la Lune. La Lune est en l_5 quand M est alors mis à feu et place l'ensemble (C-M) sur la trajectoire de retour vers la Terre.

Le voyage

A la mise à feu du premier étage, ses 2 007 t de kérosène et d'oxygène liquides portent *Saturne V* à l'altitude de 40 km, en brûlant en 120 s. A ce moment, la vitesse acquise est d'environ 7 km/s. La trajectoire est d'abord verticale. La fusée monte avec une accélération modérée dans les couches denses de l'atmosphère afin d'éviter un échauffement excessif. Puis sa course s'infléchit progressivement.

Le premier étage est largué dès que son combustible est épuisé, et le deuxième étage est mis à feu en E_1 (*fig.* 95). C'est le moment où la tour de sauvetage, désormais inutile, est expulsée en une seconde par son moteur donnant 70 t de poussée pendant 6 s.

Le deuxième étage accélère la fusée jusqu'à une vitesse proche de la vitesse de satellisation (7,6 km/s). Épuisé, il est largué en E_2.

Le troisième étage est alors mis à feu et donne la dernière impulsion pour assurer la mise sur orbite terrestre, puis il est éteint.

La fusée géante a perdu en très peu de temps 2 592 t, plus le poids de la tour de sauvetage. Tout cela pour n'atteindre que le voisinage de l'orbite terrestre.

L'ensemble qui gravite sur orbite terrestre est donc composé du troisième étage (le *S. IVB*) et du véhicule *Apollo*. Cet ensemble va faire le nombre de révolutions nécessaires autour du globe terrestre jusqu'à l'instant où le *Central Operations* terrestre l'injecte sur un ellipsoïde lunaire.

A cet instant, le troisième étage est rallumé. Il augmente alors la vitesse d'un peu plus de 3,0 km/s, ce qui transfère l'astronef sur une orbite elliptique ayant pour périgée le point où a été donnée l'impulsion. L'apogée de cette ellipse sera sur la ligne qui joint le périgée au centre de la Terre.

Le troisième étage, épuisé, est largué. A ce moment, le véhicule partant vers la Lune est composé : du module de commandement ou cabine C, du module de service M, du module lunaire L enfermé dans un carénage de quatre volets qui seront bientôt éjectés dans l'espace (*fig.* 96).

Il faut souligner l'énorme précision que demande la manœuvre. Qu'il y ait la plus faible erreur en direction ou une vitesse légèrement différente au départ, nous avons déjà vu que le rendez-vous sera manqué. Afin de l'éviter, le voyage est suivi point par point, et la trajectoire rectifiée soit par télécommande à partir de la Terre, soit par les astronautes eux-mêmes, sur indications données par le *Central Operations*.

Les vols Apollo I à X

Apollo I est lancé le 26 février 1966, avec une fusée *Saturne I.B*. Le deuxième étage, après avoir porté la vitesse de l'ensemble à 8 km/s, se sépare du véhicule *Apollo* qui fait une rentrée dans l'atmosphère à la vitesse qu'aurait un engin venant d'une orbite basse. Premier succès : bien protégée par son bouclier, la cabine amerrit dans l'Atlantique après 39 mn de vol.

fig. 94

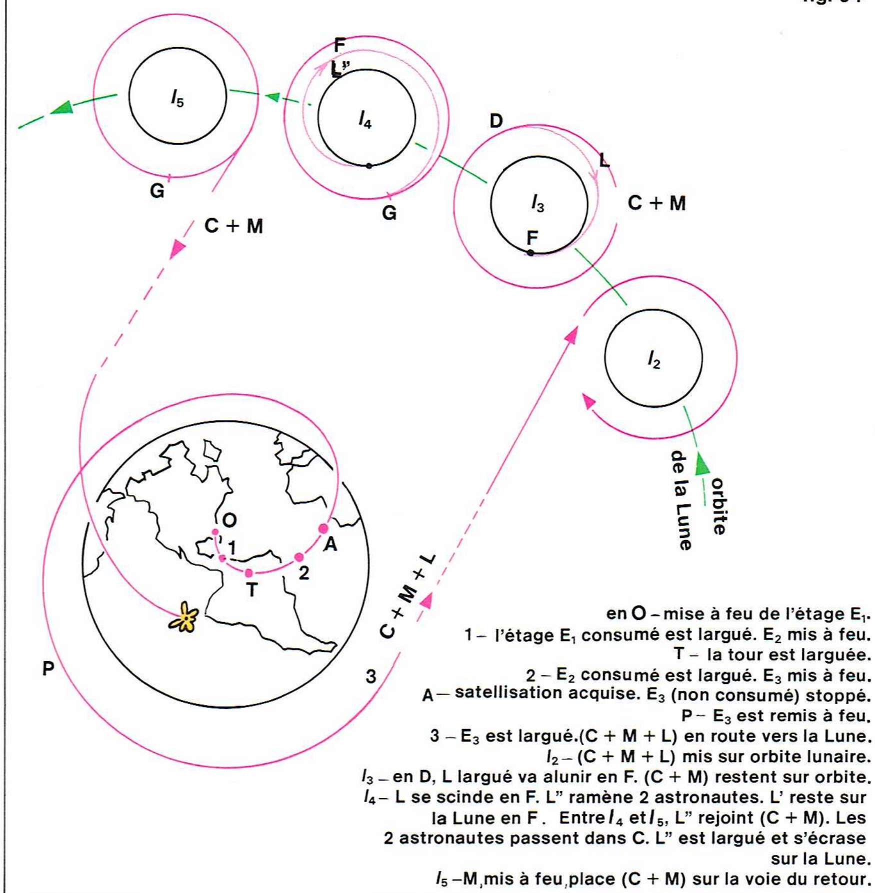

Richard Colin

▲ *Figure 94 : schéma général du déroulement des opérations du voyage aller et retour sur la lune.*

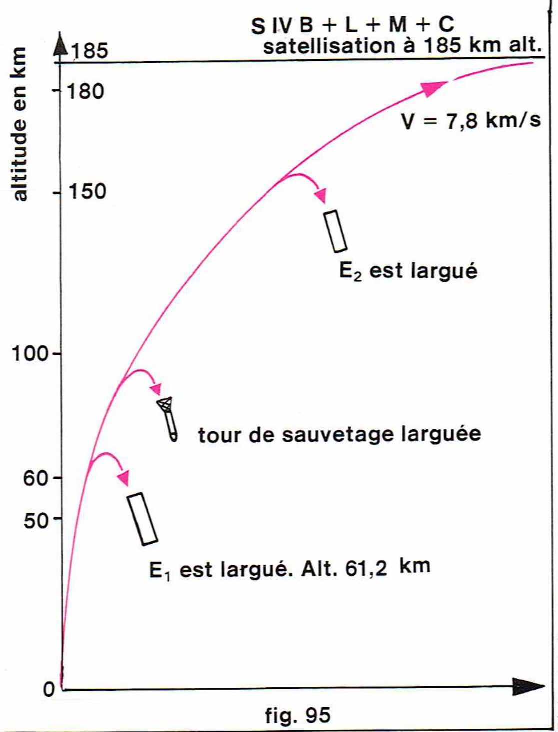

fig. 95

Richard Colin

◀▼ *Figure 95 : sont successivement largués le premier étage (en E_1), puis la tour de sauvetage, puis le deuxième étage (en E_2).*
Figure 96 : le troisième étage largué, le véhicule partant vers la Lune est composé du module de commande ou cabine C, du module de service M, du module lunaire L enfermé dans un carénage de quatre volets qui seront bientôt éjectés dans l'espace.

fig. 96

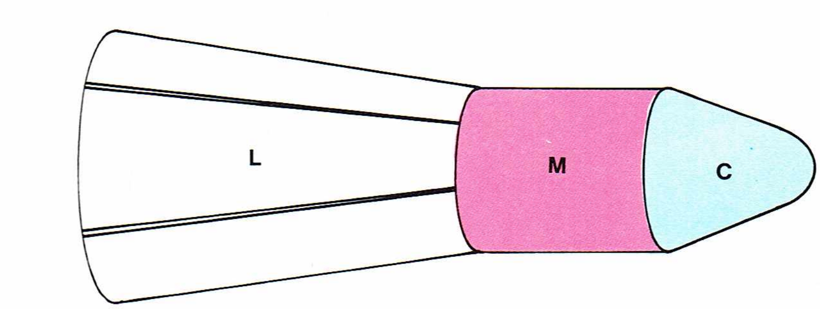

les 2 volets de carénage vont être éjectés

Richard Colin

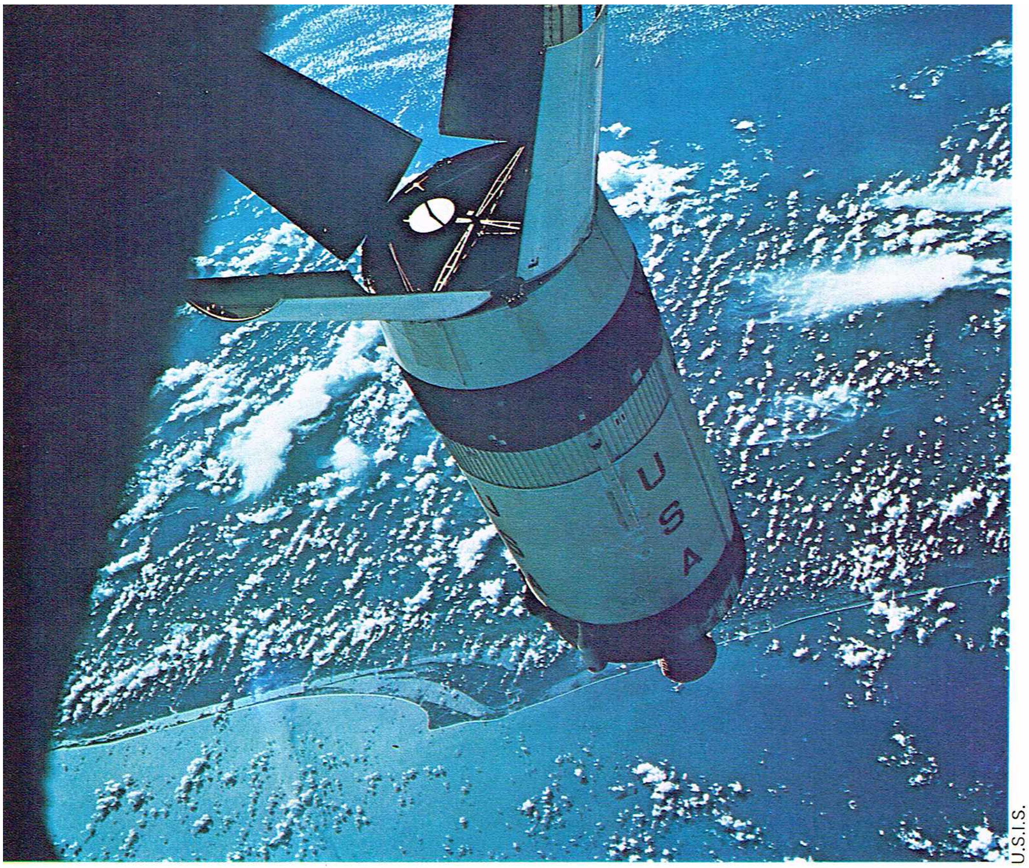

U.S.I.S.

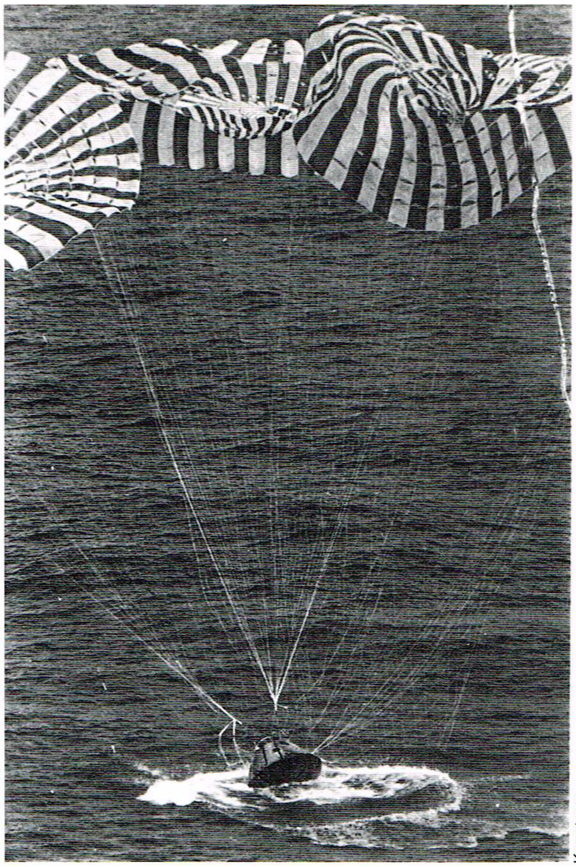

Keystone

▲ *A gauche, le second étage de* **Saturne I.B,** *photographié de la capsule* **Apollo VII,** *trois heures environ après son largage. L'altitude est de 230 km, et la distance entre les deux engins de quelque 30 m. On distingue la côte du cap Kennedy. A droite, amerrissage des cosmonautes d'*Apollo IX*, filmé par le porte-avions* **Guadalcanal,** *situé alors à 4 km.*

Apollo II est lancé avec une *Saturne I.B* le 5 juillet 1966. But : étude du comportement des combustibles en apesanteur et du réallumage en orbite.

Apollo III est lancé avec une *Saturne I.B* le 29 août 1966. Trois mises à feu du module de service réalisent l'équivalent d'un retour de la Lune. Succès.

Apollo IV est la première expérience qui, le 9 novembre 1967, utilise la *Saturne V* complète. Après deux révolutions, le moteur du troisième étage, rallumé, le place sur une orbite de 18 200 km d'apogée. La cabine amerrit dans le Pacifique à moins de 10 km du point prévu.

Le tir d'*Apollo IV* a été retardé par un accident survenu le 27 janvier 1967 à cap Kennedy. Au cours d'un exercice, Virgil Grissom, Edward White et Roger Chaffee sont carbonisés dans le brusque incendie qui éclate dans la cabine pleine d'oxygène pur.

Apollo V est lancé par une fusée *Saturne I.B* le 21 janvier 1968. Essai à vide du module lunaire placé sur orbite. Avarie du programmateur de bord, qui montre que l'on n'est pas prêt pour un vol habité.

Apollo VI est lancé par une *Saturne I.B* le 4 avril 1968. Mise sur orbite de 22 000 km d'apogée. De multiples défaillances de moteurs posent un cas de conscience aux responsables de la N. A. S. A.

On voudrait passer à un vol habité, mais ce n'est guère possible après ces incidents. Toutefois, un examen attentif de la question révèle que les vibrations de la fusée faisaient ballotter les propergols dans les réservoirs et provoquaient ainsi une alimentation irrégulière des moteurs. Le remède était facile à trouver; il suffisait de changer le régime des moteurs afin d'éviter la période vibratoire. Les ingénieurs furent assez sûrs de leurs conclusions pour déclarer qu'il était inutile de faire un nouvel essai à vide. Le prochain vol *Apollo VII* serait habité.

Le vol d'*Apollo VII* mérite d'être décrit un peu plus longuement, car se trouvent à bord Schirra, Eisele et Cunningham. C'est le vrai démarrage du programme *Apollo*. Mais comme les manœuvres prévues sont voisines de la Terre, le lancement est fait par une *Saturne I.B*.

Le deuxième étage *S.IVB* lié au véhicule *Apollo* est placé sur une orbite 227/284,3 km, d'inclinaison 32° environ. Après deux révolutions, *S.IVB* est séparé du véhicule qui s'éloigne, puis fait demi-tour pour simuler la restructuration prévue dans le déroulement général du programme *Apollo*.

Cela permet d'observer qu'un panneau s'est mal ouvert. L'adaptateur devra être modifié. Les deux parties s'éloignent de nouveau, et le rendez-vous est pris pour le lendemain 12 octobre. Il s'effectuera bien. Après plusieurs essais des moteurs et plusieurs transferts d'orbite, entrecoupés de séances de télévision, la désatellisation est effectuée le 22 octobre. La cabine *Apollo* se renverse à l'amerrissage qui a lieu à 600 m seulement du point prévu. Le chavirement est laborieux, mais il réussit.

Apollo VIII est lancé par une *Saturne V*. C'est la première fois que cette fusée propulse un véhicule habité. Le 21 décembre 1968, Borman, Lovell et Anders effectuèrent une expérience nouvelle : après s'être placés sur une orbite circumterrestre 182/189 km, ils accélérèrent jusqu'à dépasser la vitesse de libération et parvinrent à proximité de la Lune. Puis, réduisant la vitesse de l'engin jusqu'à la vitesse orbitale lunaire, ils accomplirent onze révolutions autour de la Lune à très basse altitude (112 km). Ils accélérèrent à nouveau pour le retour vers la Terre et amerrirent le 28 décembre 1968. Les seuls inconvénients, du reste discrets, subis par les astronautes furent une irritation des voies respiratoires, imputable peut-être à une légère grippe ou à l'atmosphère intérieure de l'engin, constituée pour 65 % d'oxygène et pour le reste d'hélium, à une pression inférieure à la pression terrestre.

Remarquons que les Soviétiques n'utilisèrent jamais et n'ont pas l'intention d'utiliser à bord des engins spatiaux transportant des équipages humains une atmosphère différente de l'atmosphère terrestre. Ils considèrent qu'une différence risque de surcharger l'organisme et, à la longue, d'entraîner des troubles.

La solution américaine oxygène-hélium est dictée par le problème de la puissance du missile vecteur : pour un voyage aussi long que celui d'*Apollo*, avec trois personnes à bord, maintenir à l'intérieur de l'habitacle une atmosphère raréfiée d'oxygène-hélium plutôt que d'azote-oxygène permet une économie de poids non négligeable. Pour cette même raison, les Américains adoptèrent, aussi bien pour le programme *Gemini* que pour le programme *Apollo*, des piles à combustible oxygène-hydrogène plutôt que des piles conventionnelles ou batteries d'accumulateurs. Les piles à combustible, à énergie et puissance égales, sont beaucoup plus légères. Toutefois, elles sont beaucoup moins sûres, comme le montrèrent des difficultés rencontrées au cours du projet *Gemini* et, plus tard, lors des redoutables péripéties du vol *Apollo XIII*, dont on parlera plus loin.

Sur les quelque 2 millions de composants que comporte le véhicule *Apollo*, cinq seulement n'ont pas donné entière satisfaction. Sondé par des milliers de capteurs, l'équipement a été ausculté en permanence par les ordinateurs de Houston. Enfin, le réseau mondial américain a localisé l'engin à une dizaine de mètres près, en tout point de sa trajectoire (sauf, bien sûr, pendant les occultations). Ce vol constitue la réalisation sans doute la plus extraordinaire de la technologie mise au service des hommes : contrôle permanent d'organes situés à des dizaines de milliers de kilomètres, fiabilité d'un ensemble de deux millions de constituants.

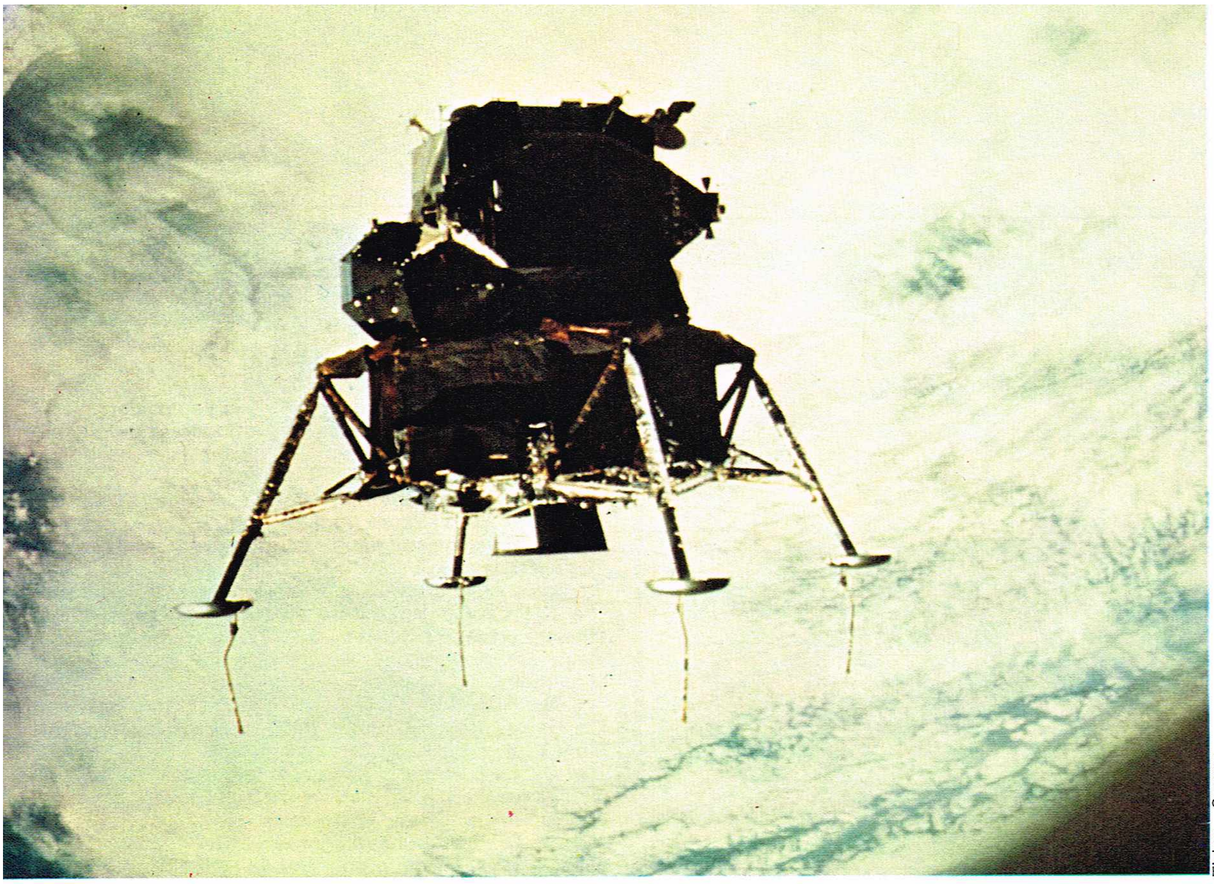

Tiziou - Sygma

◀ ***Le module lunaire vient de quitter* Apollo IX *pour descendre sur la Lune.***

▼ ***Quatrième jour de vol de la mission* Apollo IX *commencée le 3 mars 1969 : le module lunaire, le module de commande et le module de service d'*Apollo IX *sont encore réunis. Scott a ouvert la porte de la capsule et prend une photographie.***

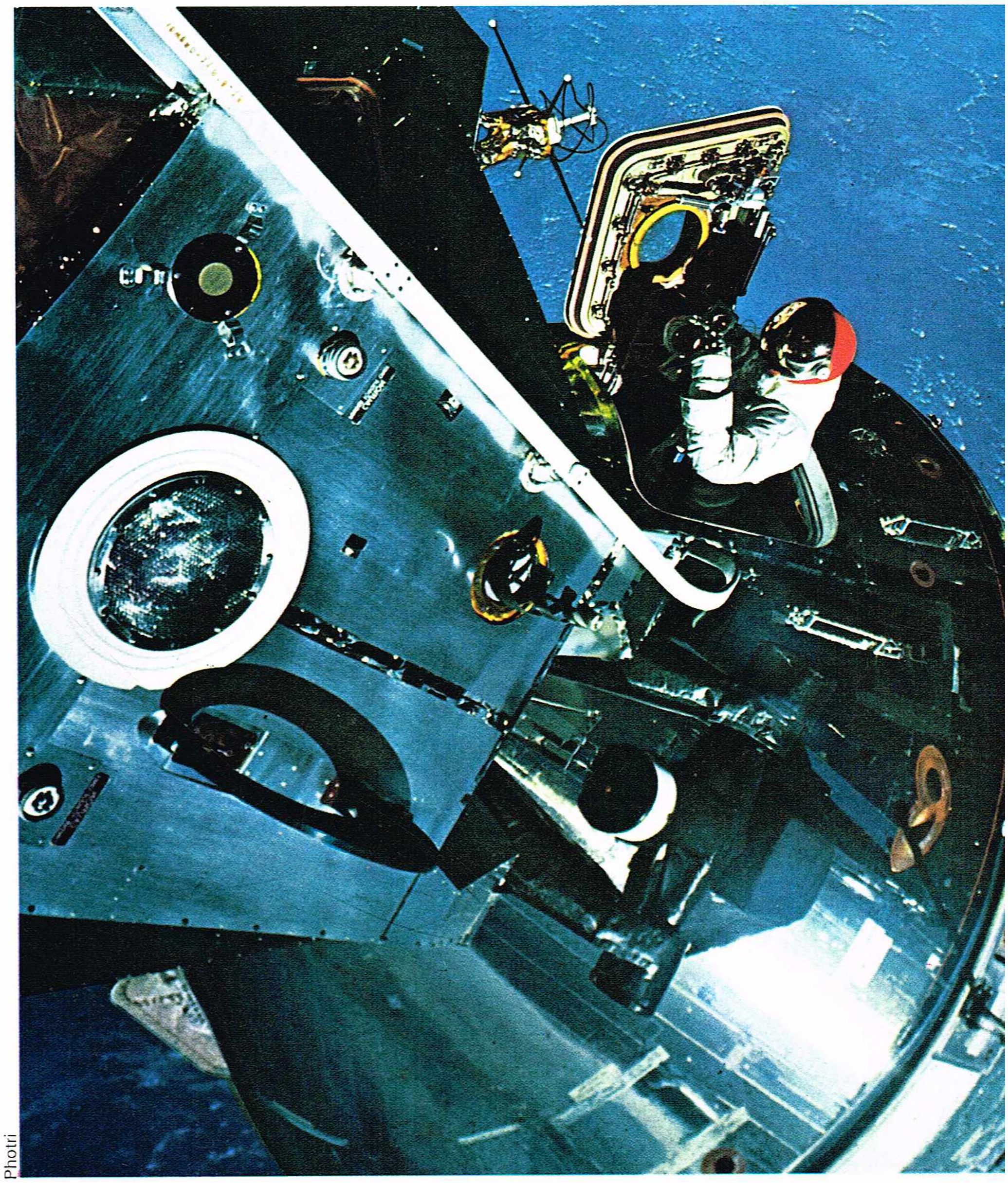

Photri

Avec *Apollo VIII*, pour la première fois dans l'histoire des hommes, une cabine habitée par des astronautes a effectué un vol circumlunaire.

Il reste maintenant, avant de tenter le débarquement sur la Lune, à tester le module lunaire.

Apollo IX, qui emmène à son bord J. Mc Divitt, R. Schweickart et D. Scott, est lancé le 3 mars 1969 par une *Saturne V* améliorée du fait de la réduction de poids des étages secs (en fait, des réservoirs), de l'augmentation de la quantité de combustible et de l'amélioration des performances des moteurs.

Le véhicule lunaire L, on s'en souvient, est constitué de deux parties : L′ qui porte la cabine L″. L′ est muni de 4 pieds pour l'alunissage et d'un moteur-fusée qui freine la descente. Au départ de la Lune, L′ reste au sol, tandis que la cabine lunaire L″ qui contient les deux astronautes et possède sa propre rétrofusée rejoint par ses propres moyens le module de commandement C resté sur orbite avec le troisième homme à son bord.

Pendant la mission *Apollo IX*, deux cosmonautes passèrent dans la cabine L″ du module lunaire L qui fut détaché de l'ensemble module de commandement-module de service (C-M). Les cosmonautes manœuvrèrent longuement sur l'orbite lunaire, puis larguèrent la partie inférieure L′ et rejoignirent avec L″ l'ensemble (C-M). Les cabines furent alors accolées. Les trois cosmonautes se regroupèrent dans le module de commandement C, l'écoutille fut fermée et L″ larguée.

L'amerrissage fut particulièrement sensationnel, car il fut télévisé à 4 km de distance par le porte-avions *Guadalcanal*.

Apollo X réédita la même mission, entre le 18 et le 26 mai 1969. Son module lunaire, piloté par Stafford et Cernan, s'approcha à moins de 15 000 m de la surface lunaire. Il se produisit alors un incident qui aurait pu être très grave : au moment où les deux parties du module lunaire auraient dû se séparer, pour permettre à l'étage cabine de remonter, de se mettre en orbite et de s'accrocher à nouveau à la capsule principale en attente sur orbite circumlunaire, de graves difficultés apparurent. Les deux étages refusèrent de se séparer. Pendant de longues minutes, l'équipage fut engagé dans une série de manœuvres d'urgence, tandis que l'ensemble virait, oscillait et que la pression diminuait. Finalement, la manœuvre réussit, et la mission put se conclure heureusement. On parla d'abord d'un défaut de montage qui aurait échappé au contrôle lors du compte à rebours. Puis on trouva que deux parties métalliques, appartenant respectivement au premier et au deuxième étage, étroitement en contact pendant l'accrochage, s'étaient soudées spontanément. Ce phénomène sera parfaitement mis en évidence et étudié par les Soviétiques quelques mois plus tard, à bord de *Soyouz VI*.

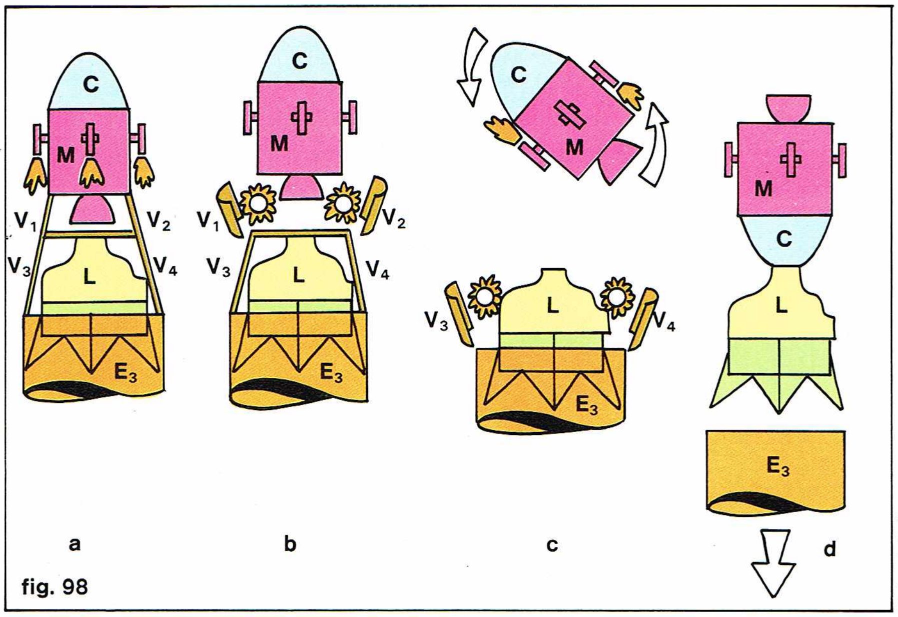

▲ *Figure 98 : manœuvre qui a pour but de mettre l'écoutille de la cabine* C *en face de celle de la cabine du module lunaire afin que les deux astronautes qui descendront sur la Lune puissent prendre place dans* L *le moment venu ; le troisième astronaute reste dans C.*

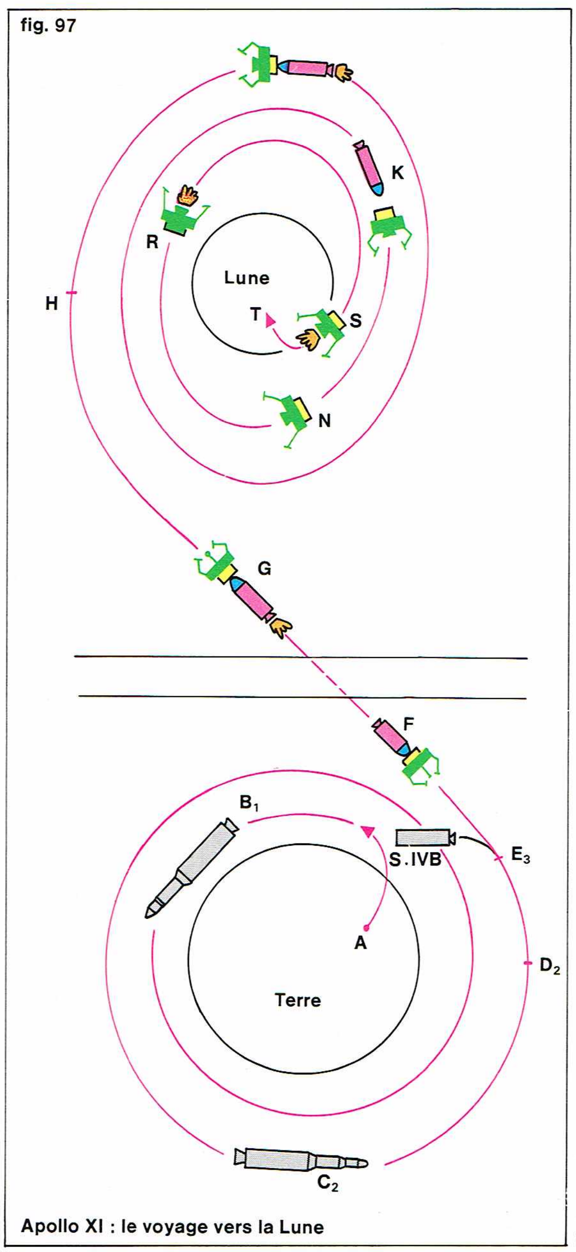

▶ *Figure 97;* **Apollo XI** *: le voyage vers la Lune (voir développement dans le texte).*

Richard Colin

Apollo XI. Le voyage triomphal

Apollo XI s'élance le 16 juillet 1969 à l'heure prévue à la seconde près : 17 h 32. Ses caractéristiques sont les suivantes :

— poids à la mise à feu : 2 941,22 t;

— poids au décollage : 2 902,32 t;

— poussée : 3 471 t. A noter que la poussée augmentera en altitude à cause de la diminution de la densité de l'air (elle sera de 4 121 t quand l'engin ne pèsera plus que 1 000 t).

● **Entre A et B_1** (*fig.* 97). Le premier étage est largué à 40 km d'altitude. A ce moment, V = 7,0 km/s. La tour de sauvetage est larguée aussitôt après. Le deuxième étage est largué à 200 km d'altitude, la vitesse étant 7,6 km/s. A ce moment, le troisième étage est mis à feu.

● **B_1**. L'engin est injecté sur une excellente orbite terrestre presque circulaire : 183/189,4 km. Le troisième étage est alors éteint. *Apollo* effectue presque deux révolutions.

● **C_2**. Au moment où il passe en C_2 (au-dessus des îles Hawaï), le troisième étage est remis à feu pendant 5 mn 17 s.

● **D_2**. La poussée de E_3 injecte le véhicule sur sa trajectoire lunaire qui est acquise en D_2. L'altitude est alors 900 km, et la vitesse 10,67 km/s.

Après D_2, les astronautes entreprennent une manœuvre délicate (*fig.* 98) qui a pour but de mettre l'écoutille de la cabine C en face de l'écoutille de la cabine L du module lunaire, afin que les deux astronautes désignés pour descendre sur la Lune puissent venir prendre place dans L le moment venu, le troisième astronaute restant dans C. On sait que le compartiment de service M porte des fusées verniers latérales et qu'il est lié à l'étage E_3 par un tronc de cône fait de quatre volets qui peuvent être projetés dans l'espace grâce à des explosifs.

La manœuvre est la suivante (*fig.* 98) : en *a*), les verniers sont mis en route un bref instant vers le bas. L'ensemble (C-M) se détache vers le haut. En *b*), les explosifs de V_1 et V_2 sont mis à feu. Les deux volets supérieurs volent dans l'espace. En *c*), les verniers de M sont maintenant différenciés, l'un vers le bas, l'autre vers le haut, afin d'assurer la rotation de l'ensemble (C-M). Simultanément, les explosifs de V_3 et V_4 sont mis à feu. V_3 et V_4 volent dans l'espace. En *d*), après que (C-M) a tourné de 180°, l'écoutille de C est raccordée à celle de L. Quand la parfaite étanchéité est assurée, les écoutilles sont ouvertes. On peut passer maintenant de C dans L, et inversement.

● **E_3**. A ce moment, E_3 éteint et vide est largué.

● **F.** Le véhicule lunaire est en route vers la Lune. Les deux cabines sont accrochées. Le module de service est en avant, sa tuyère tournée vers le sens de déplacement. Pour pouvoir effectuer des corrections positives, il faut faire tourner l'ensemble de 180° (grâce aux verniers) [*fig.* 99].

● **G.** L'ensemble ayant tourné de 180°, une correction est effectuée en G.

Le point neutre (rappelons que c'est le point où pesanteur terrestre et pesanteur lunaire, de valeur égale et de sens contraire, s'équilibrent) est passé le 19 juillet à la vitesse de 3 278 km/s.

● **H.** La satellisation lunaire est obtenue sur une orbite 312/113,3 km transformée 4 heures plus tard en 121,5/99,4 km et tendant vers une orbite circulaire 106 km.

● **K.** Le module lunaire L est séparé du module machine M qui continue sur orbite circulaire avec la cabine C.

● **N.** Les pieds d'alunissage sont déployés.

● **R.** La rétrofusée de L est mise à feu. L se transfère sur une orbite 106/16 km.

● **S. Séquence d'alunissage.** Elle est schématisée par la *figure* 100. La manœuvre est automatique jusqu'à 150 m d'altitude, ce qui veut dire que la fusée rétroactive de L se met en marche automatiquement pour régulariser la descente. Mais, à 150 m, les astronautes prennent les commandes de guidage et de fonctionnement de la rétrofusée. Voyant se présenter au dernier moment un cratère devant eux, ils prolongeront le vol de 6 km pour trouver un lieu propice à l'alunissage. Alors, la composante verticale de la vitesse est annulée à 50 m d'altitude. La Lune est touchée à 21 h 17 mn 42 s, le 20 juillet. Les

Richard Colin

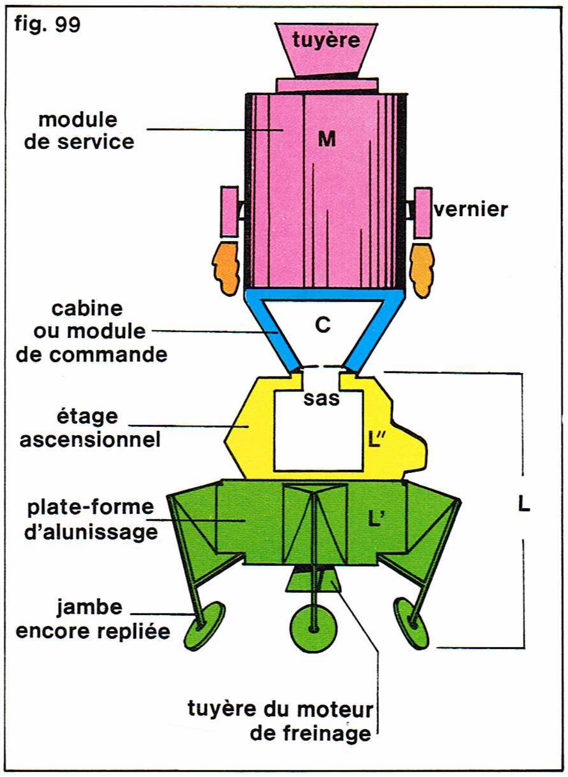

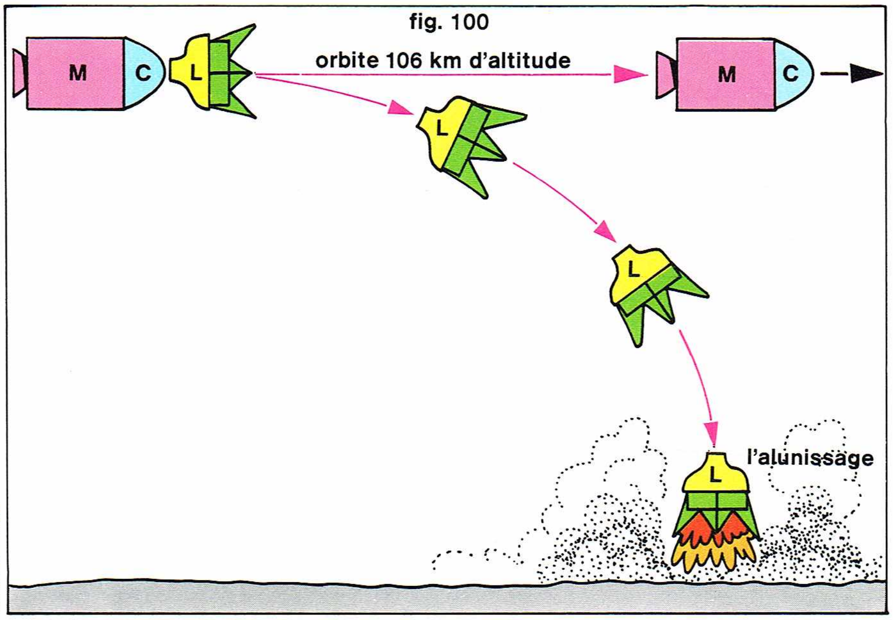

◀▲ *Figure 99 : coupe schématisée de l'ensemble cabine-module lunaire. Figure 100 : schéma de la séquence d'alunissage.*

▼ *Le premier pas d'Armstrong sur la Lune. Armstrong et Aldrin, pour marquer l'arrivée de l'homme sur la Lune, plantent la hampe du drapeau des États-Unis dans le sol lunaire. Ces images de faible qualité, mais désormais historiques, proviennent de la caméra de télévision qui était à bord.*

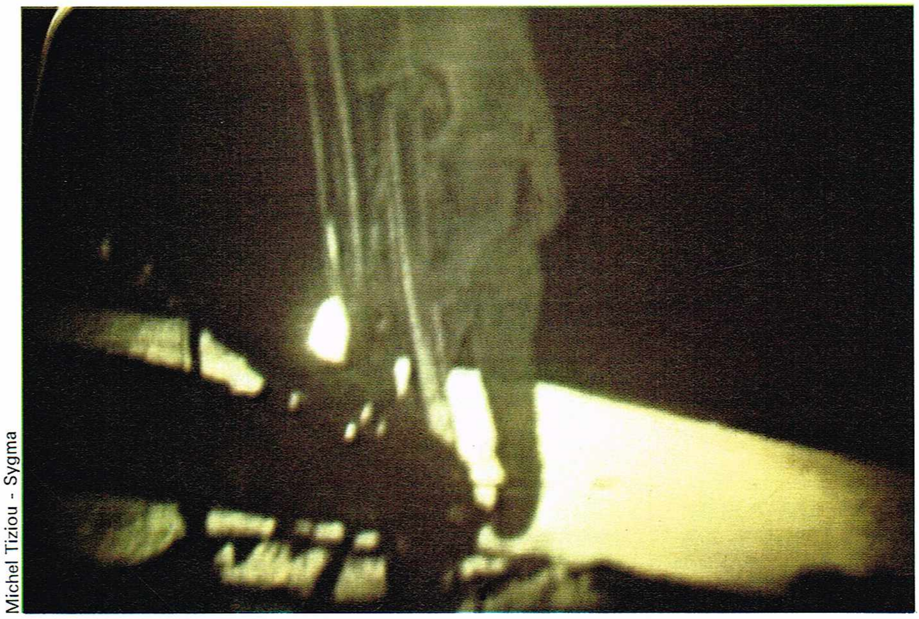
Michel Tiziou - Sygma

Tiziou - Sygma

ultimes vérifications durent jusqu'à 3 h 38 mn, le 21 juillet. A ce moment, le hublot est ouvert.

Armstrong descend, il sera le premier homme à poser le pied sur la Lune, suivi par Aldrin, comme on le voit sur les photos.

L'équipage rentre à 6 h 11 mn. Le hublot est refermé. Les deux hommes vont prendre huit heures de repos.

Le séjour sur la Lune

Armstrong et Aldrin resteront en tout 21 h sur la Lune, pendant lesquelles ils ramassent des échantillons de roches, prennent des instantanés, utilisent une feuille d'aluminium déployée pour capturer les particules provenant du bombardement solaire. Ils placent enfin deux appareils sur la Lune : un sismographe et un réflecteur laser.

Le **sismographe** (*fig.* 101) est destiné à détecter les tremblements de Lune. Il est schématiquement composé d'un poids (rouge sur la figure) fixé à un ressort. Une plaque (verte) est placée dans une encoche du poids. La plaque est solidaire de tous les mouvements du sol par le support de l'appareil. Le poids, par son inertie, tend à conserver sa position initiale. La plaque et le poids forment les deux bornes d'une capacité qui se charge électriquement au moindre mouvement relatif de la plaque et du poids. Le signal électrique créé par un tremblement de Lune est amplifié, codé sous forme numérique et transmis à la Terre par un émetteur grâce à une antenne.

Le **réflecteur laser** (*fig.* 102) déposé sur la Lune est destiné à mesurer avec une précision jamais atteinte jusque-là la distance de la Lune à la Terre. Les faisceaux d'émission des pulsations des rayons laser sont dirigés, grâce à un télescope, vers le réflecteur déposé sur la Lune. Ils s'y réfléchissent exactement à 180° grâce à des cristaux de quartz possédant cette propriété quelle que soit la direction incidente. La mesure de la durée du trajet aller-retour, les rayons réfléchis revenant exactement au point de départ, permet d'évaluer la distance entre la Terre et la Lune.

Le départ de la Lune

Nous avons jusqu'à maintenant considéré le module lunaire L comme un tout. C'est à cette étape que vont se séparer ses deux parties :

— L', qui sert de train d'alunissage et d'amortisseur de chocs à l'arrivée, puis de plate-forme de départ;

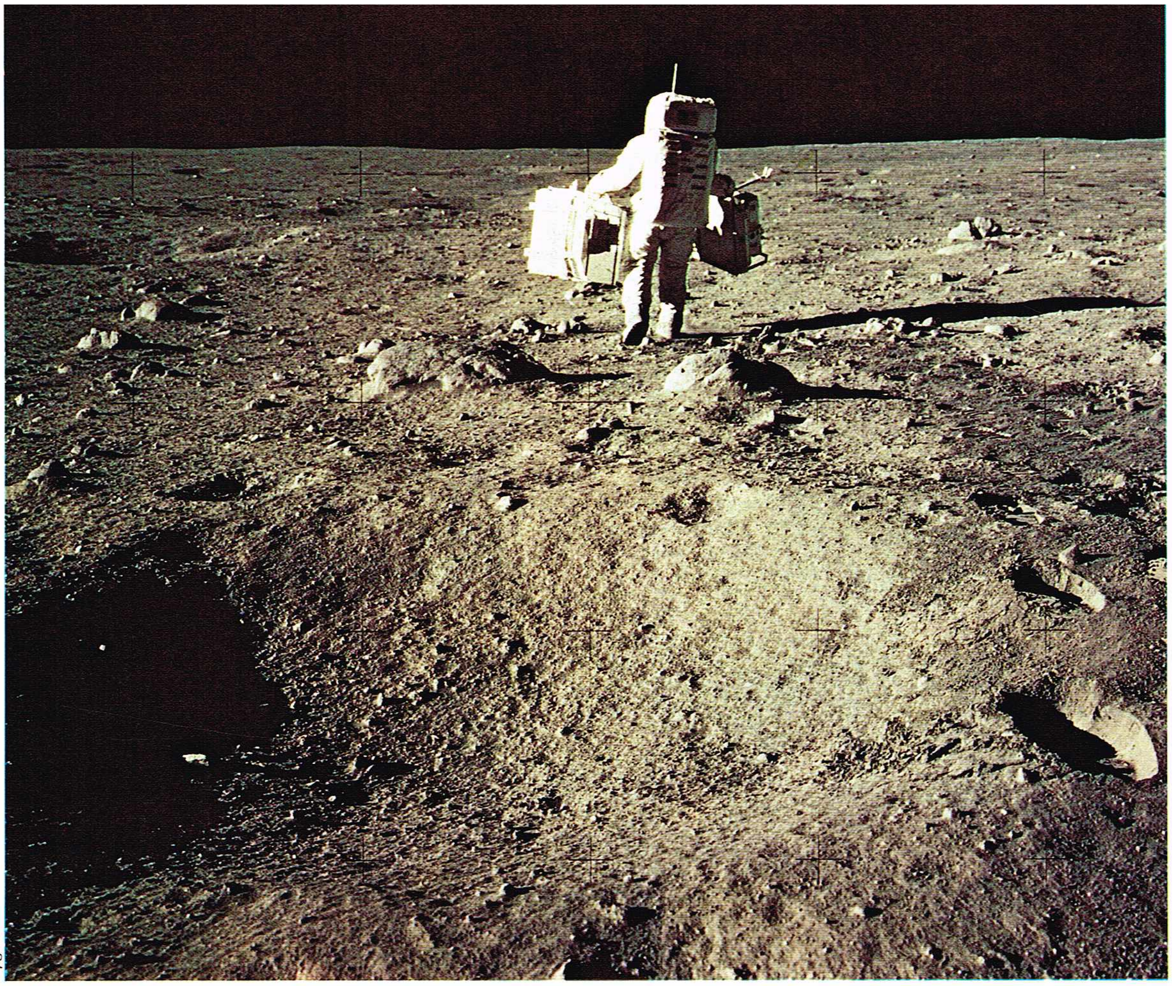

▶ Aldrin va déposer un sismographe et un réflecteur laser à une trentaine de mètres du module lunaire. Cette photo a été prise par son compagnon.

Sygma

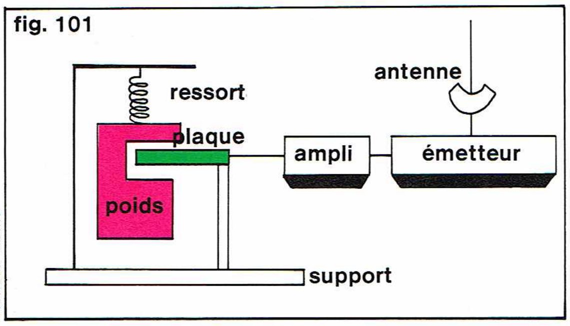

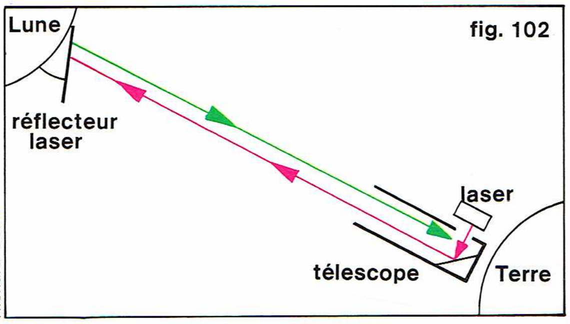

Richard Colin

▶ Figure 101 : schéma du sismographe posé sur la Lune ; il est destiné à détecter les tremblements de la Lune. Figure 102 : réflecteur laser ; il permettra de mesurer avec une précision jamais atteinte la distance de la Terre à la Lune.

— L″, qui comprend la cabine où se trouvent les deux astronautes descendus sur la Lune et le moteur-fusée qui a freiné l'arrivée au sol et va permettre de renvoyer L″ dans l'espace, sur orbite lunaire, pour effectuer son rendez-vous avec l'ensemble (C-M) resté sur orbite 106 km avec Collins, le troisième astronaute à bord.

Après 21 h de séjour sur la Lune, Armstrong et Aldrin mettent à feu le moteur-fusée de L″ après avoir dégagé les pièces qui le verrouillent à L′ (*fig.* 103). La remontée s'effectue normalement. L″, avec une vitesse de 6 643 km/s, se place sur une orbite 16,7/83,4 km qui va être rapidement transformée en orbite circulaire 84 km, puis 104/110 km. (Il faut se rappeler que l'ensemble (C-M) gravite sur orbite circulaire 106 km.) La jonction a lieu après que chacun des modules a manœuvré avec ses fusées verniers d'approche pour que le hublot de la cabine de l'ensemble (C-M) soit placé en regard de celui de L″. Le sas est ouvert. Armstrong et Aldrin viennent rejoindre Collins dans la cabine C. Les écoutilles sont fermées. L″ est déverrouillé et se sépare de l'ensemble (C-M).

Le retour vers la Terre

La *figure* 104 en schématise les étapes :

- **A.** Décollage de l'étage supérieur L″ du module lunaire.
- **B.** Avant que s'achève le deuxième tour, L″ a rejoint l'ensemble (C-M).
- **C.** Les astronautes, entre **B** et **C**, sont passés dans la cabine C où ils se retrouvent donc tous les trois. Les hublots sont fermés. L″ est largué sur orbite lunaire.

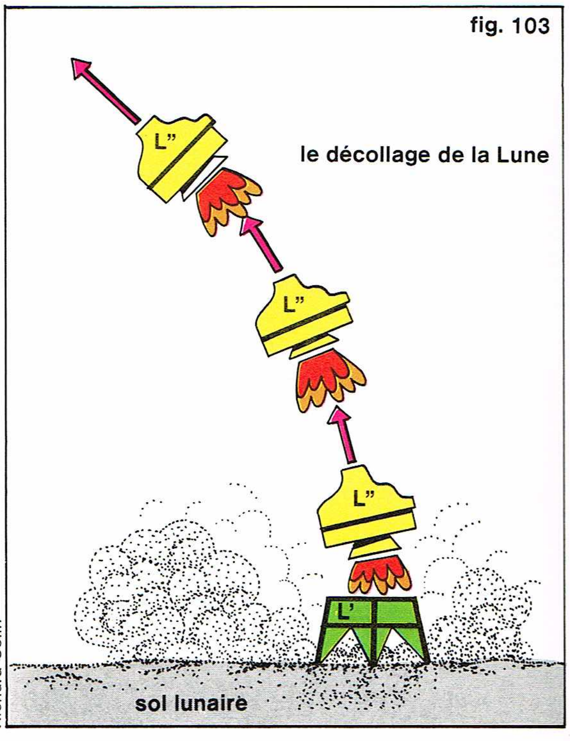

Richard Colin

▶ Figure 103 : le décollage de la Lune.

fig. 104

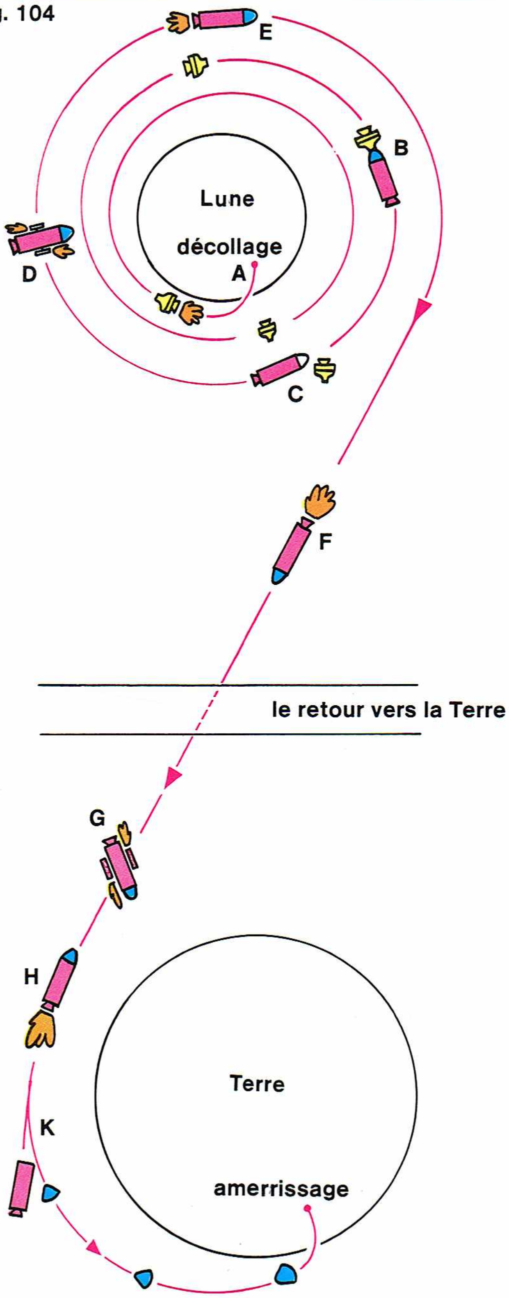

Richard Colin

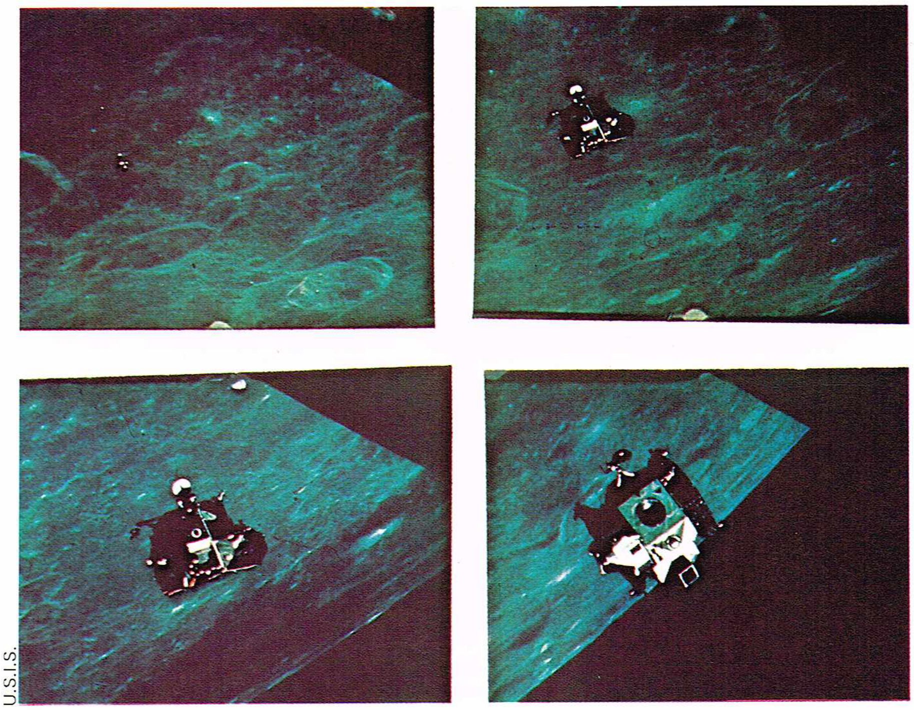

U.S.I.S.

▲ ***Le module lunaire d'Apollo XI, avec Armstrong et Aldrin à bord (ici, au-dessus de la face cachée de la Lune), en route pour rejoindre le module de commande resté en orbite lunaire. Les pionniers de la Lune vont rejoindre Michaël Collins le 12 juillet 1969, pour le retour vers la Terre.***

● **D.** L'ensemble (C-M) se retourne pour que le moteur-fusée soit placé à l'arrière.

● **E.** Le moteur est mis à feu pour injecter l'ensemble (C-M) sur orbite terrestre.

● **F.** Il est opéré une correction à mi-course.

● **G.** L'ensemble (C-M) est à nouveau tourné pour que le moteur puisse servir à diminuer la vitesse qui n'a pas cessé de croître depuis qu'a été passé le point neutre. Elle atteint 11,2 km/s.

● **H.** (C-M) sont en position de freinage, moteur allumé.

● **K.** La cabine est séparée du compartiment machines. Ce dernier tombe vers la Terre et se consume au cours du violent freinage atmosphérique. La cabine, bien présentée, bouclier en avant, fonce vers la Terre et pénètre dans les premières couches de l'atmosphère. La décélération est violente, 8 *g* environ (à 75 km d'altitude). Autour de la cabine, c'est un feu d'artifice de parcelles incandescentes arrachées au revêtement du bouclier. La décélération diminue : 5 *g* à 50 km d'altitude, 3 *g* à 25 km, *g* à 15 km, décélération nulle à 10 km d'altitude.

La fin du voyage

Les points **G, H, K** de la *figure* 105 correspondent aux mêmes points que ceux de la *figure* 104. On voit que l'ensemble (C-M) pivote en **G** de façon à pouvoir freiner en **H** en mettant à feu le moteur de freinage. En **K**, la cabine est séparée de M. Freinée par son bouclier présenté vers l'avant, elle tombe vers la Terre tandis que M poursuit sa route.

◀ ***Figure 104 : le trajet du retour vers la Terre.***

fig. 105

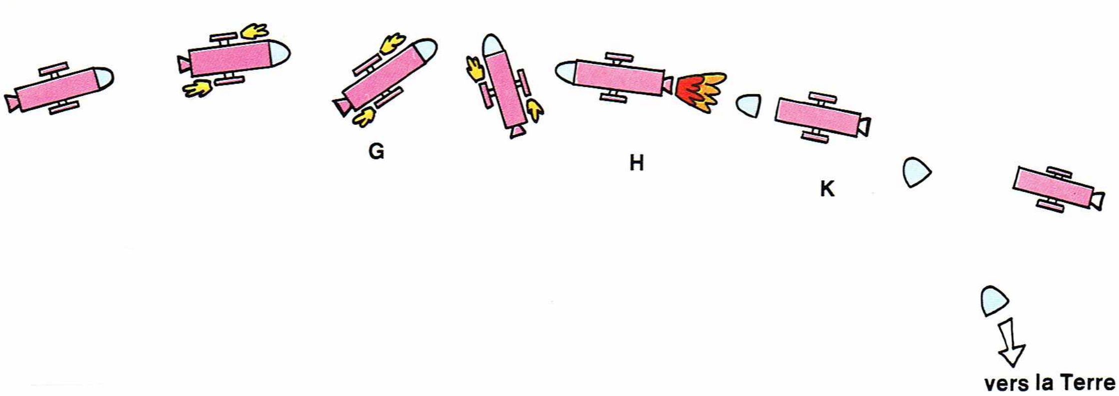

Richard Colin

◀ ***Figure 105 : la fin du voyage.***

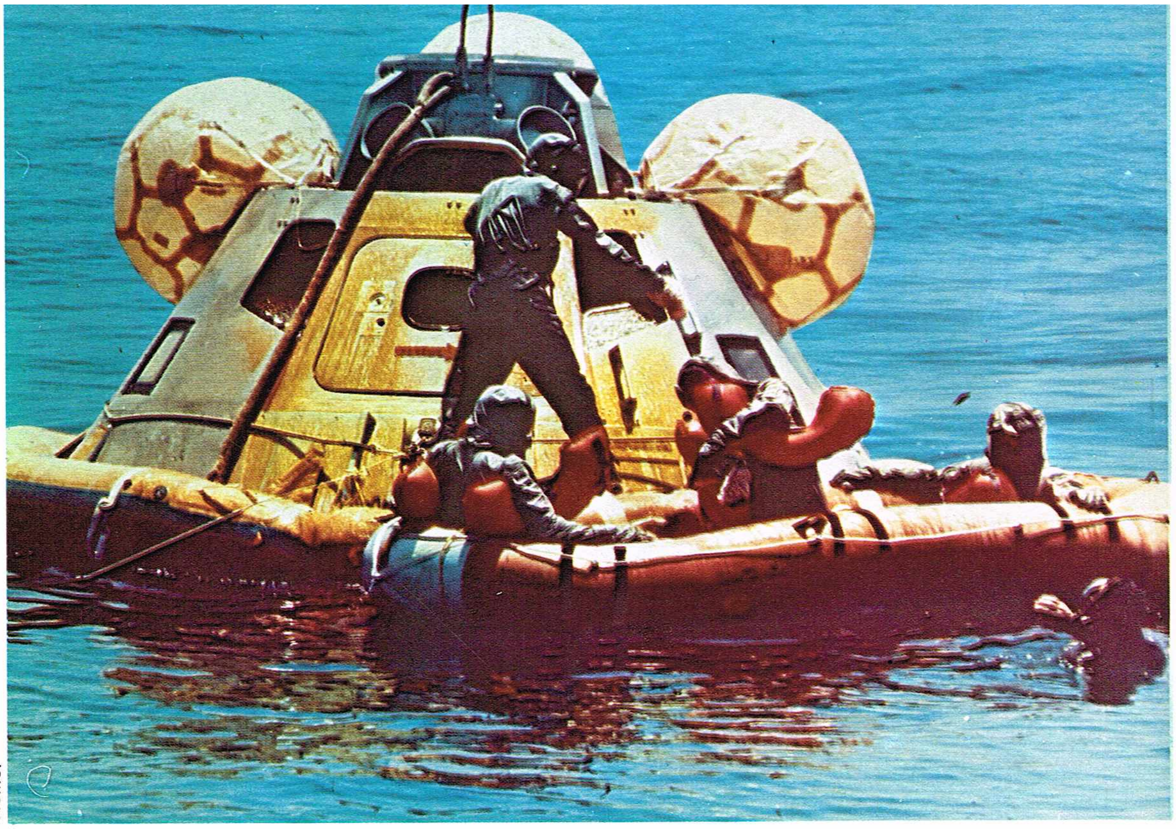

U.S.I.S.

▶ *Amerrissage de la cabine d'*Apollo XI.

L'amerrissage

La *figure* 106 en représente les étapes :

- **N** - la cabine entre dans les couches supérieures de l'atmosphère terrestre ; le capot du compartiment des parachutes est largué ;
- **P** - deux petits parachutes d'extraction sont éjectés et se gonflent, tirant
- **Q** - trois parachutes d'extraction plus grands qui tirent à leur tour
- **R** - les trois parachutes principaux ;
- **T** - la cabine amerrit.

L'amerrissage s'est effectué dans le voisinage d'un porte-avions. Des nageurs de combat sont largués par hélicoptères à proximité de la cabine. Leur premier soin est de lui assurer une flottabilité fortement positive en la ceinturant d'un flotteur pneumatique.

L'écoutille est alors ouverte, et les cosmonautes s'embarquent dans un dinghy largué en même temps que les nageurs.

Les cosmonautes gagnent le porte-avions. La cabine est, de son côté, remorquée sous la grue du porte-avions qui la hisse à bord.

▼ *Figure 106 : les différentes étapes de l'amerrissage.*

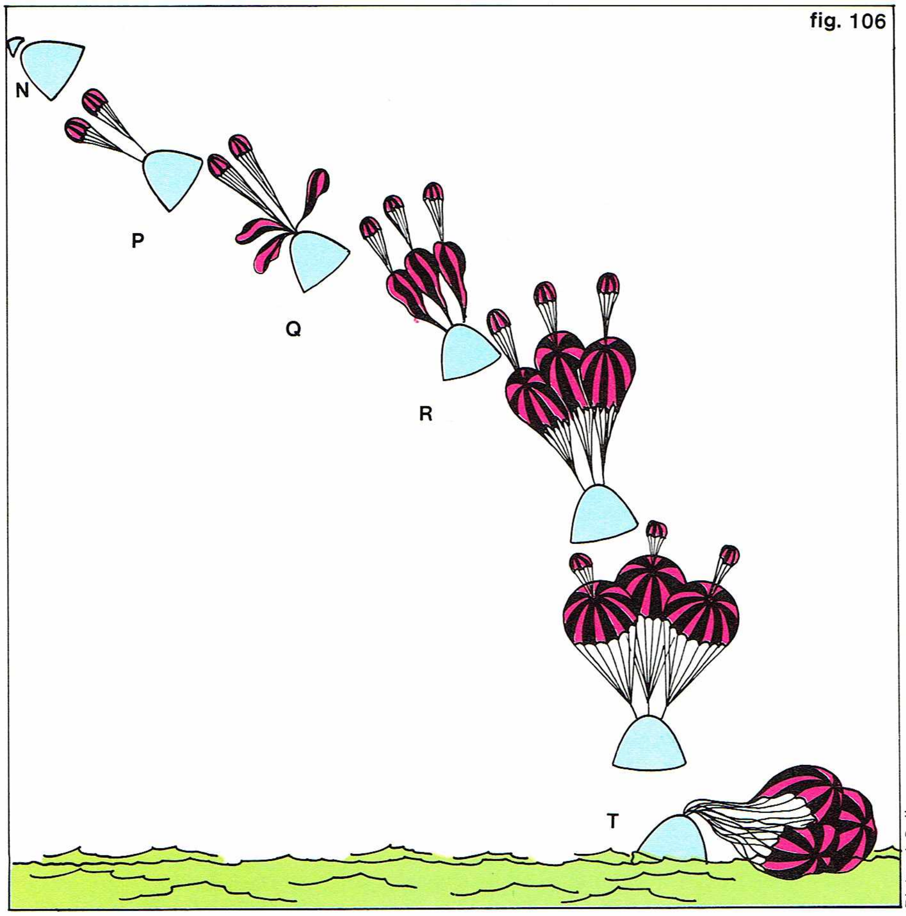

Luna XV et Apollo XI

L'expérience réalisée par les Soviétiques, envoyant, le 13 juillet, leur *Luna XV* qui va se placer sur une orbite lunaire 100/16 km à peu près identique à celle du module lunaire, éclaire d'un jour étrange la compétition des deux Grands. Quelle était la mission de leur engin ? Il est douteux qu'on le sache jamais.

L'astronaute américain Borman était en visite à Moscou, et il a été tenu au courant des changements d'orbite de la sonde russe par les propres soins du président de l'Académie des sciences d'U. R. S. S., cela au nom de la sécurité de l'équipage d'*Apollo,* approche qui nous paraît singulière.

Le lancement de *Luna XV* a suscité vingt interprétations plus ou moins fantaisistes. Des indices sûrs permettent d'attribuer à *Luna XV* les vastes dimensions d'un *Soyouz.* Les Russes seraient-ils parvenus enfin à mettre en piste un gros lanceur ? Après avoir pulvérisé tous les records de charge utile à l'aube de l'ère spatiale, les Soviétiques semblaient handicapés par l'absence de gros lanceurs du type *Saturne V*. Des rumeurs ont bien fait état, de temps à autre, de départs de grosses fusées, en Sibérie ou dans les steppes du Turkestan, mais rien n'est encore venu les confirmer. Il est raisonnable de penser que l'effort colossal de recherches, de technique et d'industrie que suppose la construction d'une fusée du type *Saturne V* n'a pas pu être mené de concert avec le programme déjà très chargé que se sont imposé les Russes dans leur tentative pour obtenir un automatisme intégral.

D'ailleurs, il est fort peu probable que *Luna XV* ait été un *Soyouz* habité, si l'on en juge par la nature des signaux échangés. Il est plus vraisemblable que *Luna XV* a été une sonde inhabitée destinée à faire automatiquement tout le travail dévolu à *Apollo XI*.

Si l'on considère tout ce que les Russes avaient déjà réalisé, il ne leur manquait qu'un chaînon pour que la manœuvre soit complète. Ils savaient en effet mettre des satellites sur orbite lunaire, réaliser des rendez-vous automatiques dans l'espace, enfin envoyer des sondes sur les sols planétaires. Et la Lune est relativement si près qu'ils peuvent être sûrs de leurs télécommunications. Le chaînon manquant, c'est le retour de la sonde exploratrice vers la capsule laissée en orbite lunaire, manœuvre à la portée de la science astronautique actuelle.

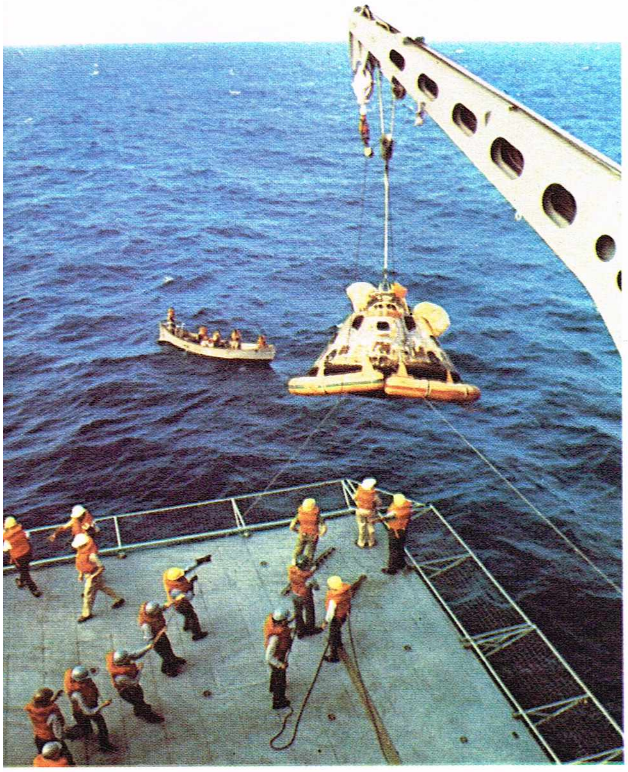

Photri

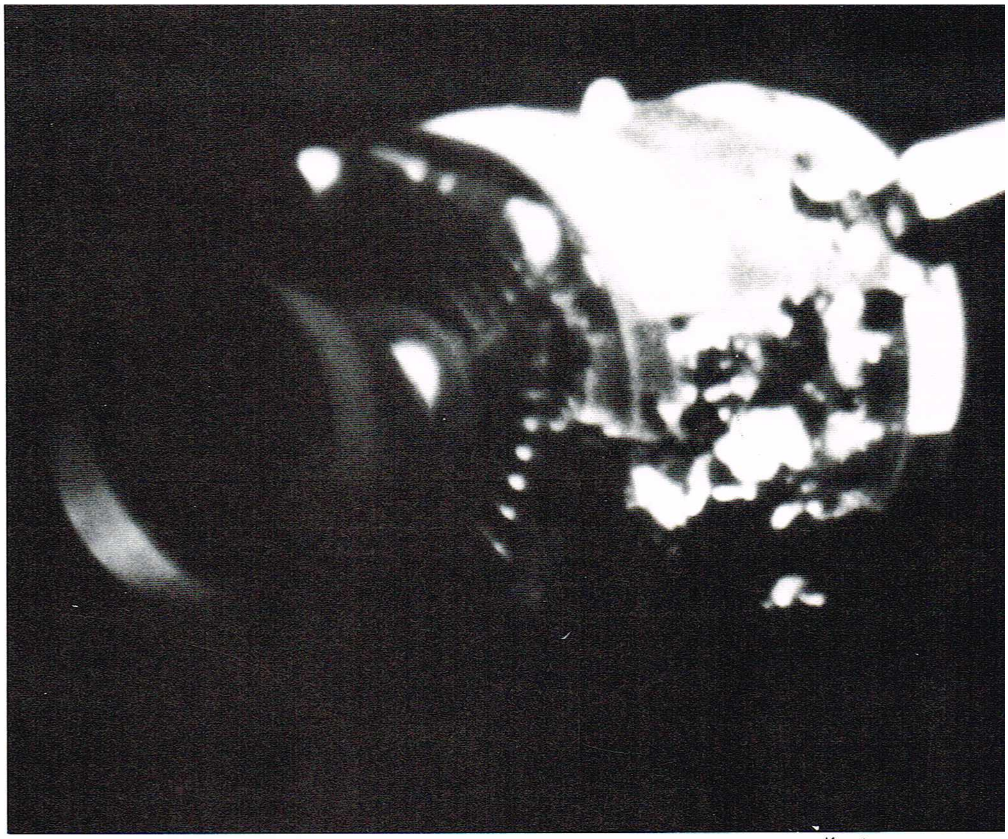

Keystone

▲ *A gauche, après l'amerrissage dans le Pacifique, à seulement 14 km du navire* Hornet *chargé de sa récupération, la cabine d'*Apollo XI *est hissée à son bord. A droite, photographie de la cabine d'*Apollo XIII *prise au moment où elle vient de se séparer du module de service. Elle montre bien l'étendue des dégâts causés par l'explosion. Un panneau de 4 mètres de long est éventré.*

A la fin de l'expérience *Luna XV*, manifestement ratée, les Soviétiques ont bien essayé de donner le change en déclarant que, mission accomplie, ils donnaient l'ordre à leur engin de se poser sur la Lune dans un endroit prévu d'avance. Mais l'équipe de Jodrell Bank a capté pendant les quatre dernières minutes de vol de *Luna XV* un flot précipité de signaux, comme si l'on voulait à tout prix éviter une catastrophe. En vain, car la vitesse d'impact mesurée était de 480 km/h ! Dans cette hypothèse, pourquoi les Soviétiques s'obstineraient-ils à nier un échec fort honorable, si l'on songe à la merveille d'automatisme qu'il a fallu réaliser ?

C'est pourquoi se présente une autre hypothèse plausible. Au moment où les Soviétiques se voyaient battus sur le poteau, il n'est pas impossible que leurs dirigeants, pour des questions de prestige, aient choisi de faire n'importe quoi dans le seul dessein de faire parler d'eux, au moment où ils craignaient qu'on parlât trop de leurs adversaires. Le mystère dont ils ont entouré la mission *Luna XV* n'avait peut-être pas d'autre but que de faire croire à une grande expérience.

Apollo XII à XVI

Apollo XII est lancé le 14 novembre 1969. Douze secondes après le décollage, les observateurs terrestres voient un éclair. La foudre a frappé par deux fois la fusée sans autre dommage qu'une panne électrique de douze secondes. Mais, désormais, les lancements ne se feront plus par temps orageux.

Le module lunaire se pose sur la Lune à 180 m de *Surveyor III*, qui est inactif depuis le 17 mai 1967 et dont quelques pièces seront prélevées. Une caméra spéciale de TV en couleurs miniaturisée, d'un coût de vingt millions de francs, refuse de fonctionner.

Après le rendez-vous sur orbite lunaire, l'étage de remontée est mis à feu sur une trajectoire de collision avec la Lune. L'impact a lieu à 75 km de la station *Alsep*. Pour la première fois, on constate une chose extraordinaire : le train d'ondes provoqué par le choc sera perçu par le sismographe pendant 55 mn. Tout se passe comme si l'intérieur de la Lune était constitué de masses diverses qui donnent de nombreuses réverbérations acoustiques.

Les autres constatations faites sur la Lune sont les suivantes : les pierres sont recouvertes d'une poussière de verre ; la couche pulvérulente a de 2 à 8 cm d'épaisseur, et les cosmonautes sont couverts de la poussière qu'ils soulèvent en marchant ; la couleur de *Surveyor* abandonné depuis deux ans a changé : de blanche elle est devenue grise ; le miroir a bruni.

Apollo XIII fut lancé le 11 avril 1970, avec à son bord Lovell, Haix et Swigert. Après un départ normal, alors qu'il était en route le 14 avril vers la Lune, se produisit une violente explosion à l'intérieur du module de service qui détruisit la plupart des installations et des dispositifs de bord et provoqua une large déchirure dans son enveloppe. Le propulseur principal du module de service et ses systèmes d'orientation ne fonctionnaient plus. Le véhicule commença à tourner sur lui-même, tandis que la pression baissait à l'intérieur de l'habitacle principal, la température devenant de plus en plus basse.

Le sang-froid et l'extraordinaire adresse des trois hommes permirent d'éviter le désastre. Deux d'entre eux passèrent dans l'habitacle du module lunaire et, utilisant le propulseur et les moyens d'orientation de ce dernier, réussirent à stabiliser le véhicule. Grâce aux instructions reçues du sol, ils le mirent ensuite sur une trajectoire assurant le contournement de la Lune et le retour vers la Terre. Un changement de direction eût été impossible, car l'appareil du module lunaire ne disposait pas d'une réserve de propergols suffisante. La nouvelle route fut suivie régulièrement, tandis que les pilotes se trouvaient dans une position très inconfortable : ils ne pouvaient pas tous demeurer dans la capsule principale dont l'atmosphère était glaciale ; à tour de rôle, l'un d'eux venait dans la cabine, tandis que les deux autres se tenaient dans l'étroit habitacle du module lunaire.

La rentrée fut un chef-d'œuvre d'habileté et d'audace : le module de service, hors d'usage, fut abandonné. Pour ralentir la cabine, on utilisa l'appareil propulseur du module lunaire qui fut décroché au dernier moment. La cabine, avant de pénétrer dans les couches denses de l'atmosphère, avait à opérer un mouvement de conversion de 180°, et elle s'y engagea à une vitesse nettement supérieure à la normale. Mais le bouclier thermique et les premiers parachutes résistèrent, en sorte que la dernière phase fut très régulière. Depuis le moment de l'accident et jusqu'à la fin, les trois astronautes avaient utilisé les seules ressources du module lunaire (oxygène, énergie électrique, appareils radio, système propulseur, système d'orientation).

Bien qu'on ne puisse pas l'affirmer avec une certitude absolue, ce grave accident semble imputable à une fuite d'oxygène et d'hydrogène des piles à combustible ou de leurs réservoirs, qui auraient rempli le module de service d'un mélange détonant. Une étincelle ou la présence d'un point chaud aurait provoqué l'explosion.

Il faut noter que le programme *Apollo* a surtout réussi grâce à la préparation et à l'adresse des pilotes appelés à opérer dans des conditions pénibles. Dans les moments les plus difficiles, ce sont eux qui ont toujours trouvé les solutions appropriées malgré la présence à bord d'appareils automatiques et d'un calculateur électronique. Le voyage d'*Apollo XIII* restera un chef-d'œuvre de courage et d'habileté.

Apollo XIV prend son départ le 28 janvier 1971. Les trois astronautes sont Alan Shepard, Stuart Roosa et

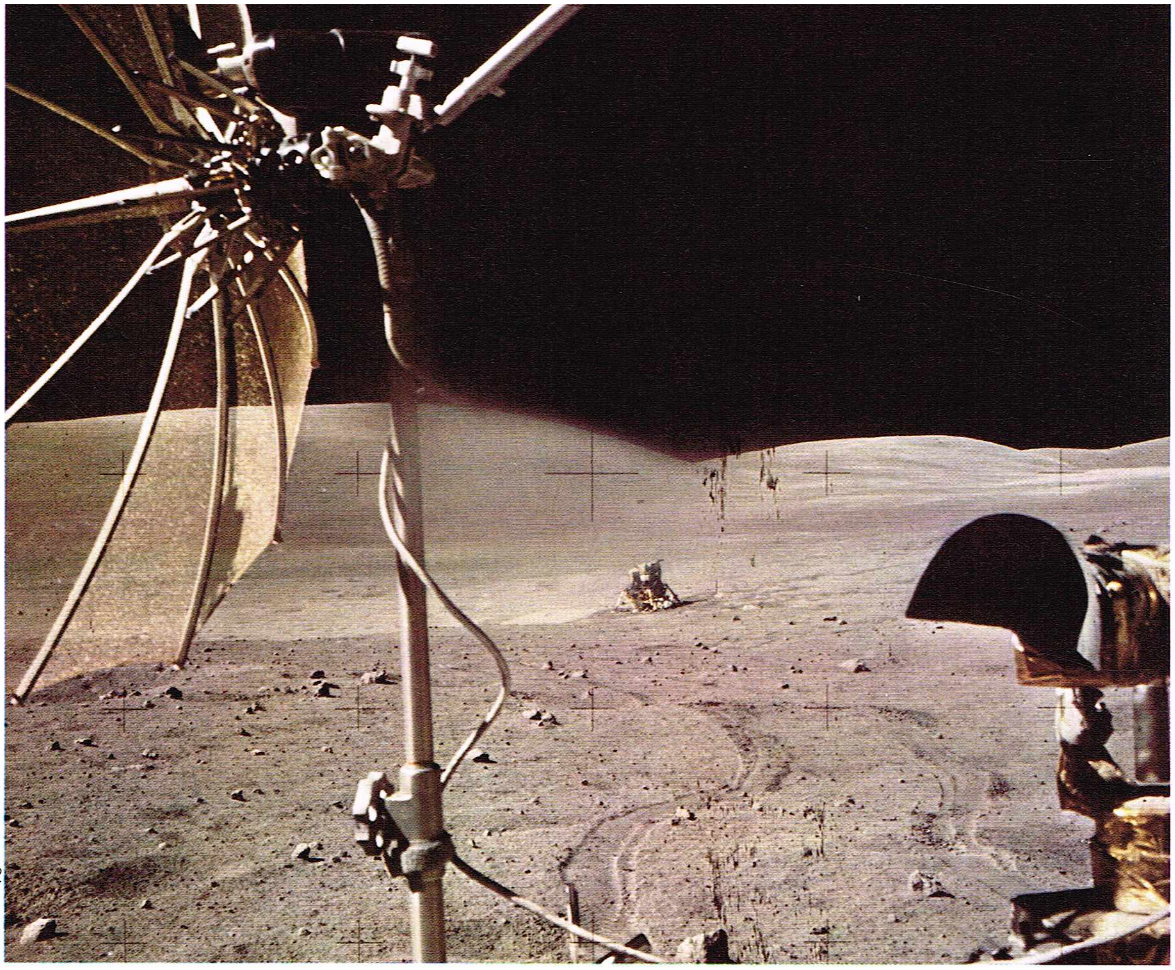

Tiziou - Sygma

▶ *Vue prise de la voiture lunaire d'Apollo XVI. Au fond, le LEM, posé sur un des rares endroits plats et sans rochers ; au premier plan, la grande antenne et la caméra de télévision de la voiture lunaire.*

Edgar Mitchell. Le 29, l'équipage signale des difficultés de restructuration. Le système de blocage entre la cabine et le module lunaire refuse de fonctionner. Après diverses tentatives téléguidées du sol, l'amarrage est enfin acquis après une heure et demie d'efforts. Le 5 février, l'alunissage est précis à 26 m du point visé ! Le retour s'effectuera le 9 février.

La mission *Apollo XIV* aura un bilan scientifique intéressant :

* Plusieurs pierres ramassées sont exceptionnellement radio-actives.

* L'intensité du champ magnétique décelé par les astronautes est beaucoup plus grande que prévu. On doit admettre qu'il y a des corps ferromagnétiques dans le sous-sol lunaire (mascons).

* Les indications des sismomètres conduisent par une autre voie à une interprétation analogue.

* La durée des échos provoqués par la projection de l'étage *S. IVB* sur la Lune confirme que la Lune résonne comme une cloche. Sa masse n'est pas homogène, mais semble contenir de gros blocs différenciés. L'expérience a été répétée : après le transfert, au retour, des astronautes, le module lunaire a été précipité à son tour sur la Lune, y réveillant d'interminables échos. Ces constatations sur les réverbérations sonores à l'intérieur de la Lune viennent corroborer ce qu'on avait déjà constaté lors du vol *Apollo XII*.

Le vol *Apollo XV* est effectué par David Scott, Alfred Worden et James Irwin. La fusée décolle de cap Kennedy le 26 juillet 1971. Elle va battre plusieurs records ; celui de la précision : le décollage a eu lieu avec 0,18 s de retard ; celui de la charge utile : le module lunaire pèse 16,4 t, contre 15,2 pour *Apollo XIV*. La *Saturne* 510 qui la propulse est légèrement plus puissante que ses devancières. La poussée au décollage atteint 3 522 t. Le tir a lieu franchement vers l'est pour profiter au maximum de la vitesse de la Terre.

Nous citerons, pour une fois, le nombre d'incidents, tous mineurs, auxquels ce vol a obligé les astronautes et les équipes à terre de faire face ; car cette énumération illustre la délicatesse des instruments et l'extraordinaire fiabilité qu'engendrent la redondance des circuits et la compétence, aussi bien des astronautes que de ceux qui, au sol, analysent les causes des avaries et guident l'équipage parfois à des centaines de milliers de kilomètres.

— Lors de la restructuration (réunion du module lunaire à la cabine après qu'il a tourné de 180°), un voyant s'est allumé inopinément. Il est placé sur un des deux systèmes qui alimentent le moteur. Indique-t-il une défaillance du système ou un allumage intempestif de la lampe ? Pour en avoir le cœur net, on va mettre à feu le moteur au moyen du système douteux. L'opération est commandée manuellement. Il y a un retard, mais la procédure suivie a permis de déceler le point faible : un contact accidentel de deux fils sur un commutateur. A partir du sol, les ingénieurs inventent une nouvelle procédure qui permet d'ignorer le circuit défaillant.

— Trois jours après le départ, toutes les liaisons sont coupées avec la Terre. On découvre que c'est au sol qu'un amplificateur a été défaillant.

— Un disjoncteur saute sur le circuit convertissant le courant continu des batteries en alternatif. Des lampes des panneaux resteront éteintes.

— La vitre extérieure de l'altimètre du pilote est brisée. L'instrument est, en fait, protégé par deux vitres entre lesquelles se trouve de l'hélium sous pression, et la vitre intérieure restera intacte.

— Une fuite d'eau est enregistrée. Depuis Houston, un technicien décèle l'endroit douteux et indique aux astronautes l'écrou qu'ils doivent resserrer.

Chacune de ces avaries semble mineure, mais c'est surtout parce qu'on s'est donné les moyens d'y faire face. En fait, la moindre d'entre elles, si elle n'avait pas été corrigée, aurait pu compromettre la mission.

C'est le 30 juillet que le module se pose sur la Lune, après un vol qui est resté, du point de vue des temps et de la trajectoire, un modèle de perfection, et cela malgré les incidents relatés. Le séjour de Scott et d'Irwin sur la Lune sera de 67 h.

Cette fois, la charge utile, qui était de 150 kg au cours des précédents vols, a été portée à 600 kg, ce qui a permis d'emporter les 225 kg de la voiture lunaire. Son débarquement et sa mise en œuvre se passent bien. Une caméra, embarquée sur la voiture, est télécommandée depuis Houston. Aussitôt, l'on découvre depuis la Terre des images d'une rare perfection.

Au cours de trois sorties, les astronautes accumuleront une importante quantité d'échantillons lunaires, mettront en place une nouvelle station *Alsep* et planteront, grâce à une foreuse, des thermocouples à 1,5 m de profondeur. Le dernier jour, Irwin montre aux téléspectateurs que Galilée n'avait pas tort quand il avait affirmé quatre siècles plus tôt qu'au-dessus d'un astre dépourvu d'atmosphère, tous les objets tombent avec la même vitesse : le commandant de la mission lâche devant la caméra

un marteau et une plume de faucon. On leur voit prendre le même mouvement.

Une des surprises de ce vol est constituée par l'aspect des Apennins lunaires. Tous les savants avaient prédit qu'ils devaient avoir des pentes arides et des reliefs très accentués. Les astronautes n'ont découvert que des sommets très arrondis, comme si ces montagnes avaient été l'objet d'une intense érosion. Comme celle-ci ne pouvait provenir ni du vent, ni du ruissellement, on n'en peut trouver que trois raisons : les météorites, le vent solaire, les rayons cosmiques. En tout cas, cette érosion marque un phénomène de transport de matériaux en contradiction avec tout ce que prévoyait l'astronomie traditionnelle. Au pied des Apennins se trouve un bassin de réception dans lequel se sont accumulés les matériaux de plusieurs régions de la Lune.

Le décollage du LEM d'*Apollo XV* fut un événement sensationnel. La voiture lunaire avait été immobilisée à une centaine de mètres du module lunaire, en direction duquel était braquée la caméra. Des millions de téléspectateurs ont pu voir l'ascension du véhicule qui emportait les deux astronautes vers la cabine restée sur orbite.

A 2 h 38, le 3 août, le moteur du module lunaire fut mis à feu pour projeter l'engin contre la Lune. Son impact déclencha des échos pendant près d'une heure.

Sur le chemin du retour, Worden sortit dans l'espace pour récupérer à l'extérieur deux cassettes. La manœuvre fut rapidement exécutée, sans incident.

Le 6 août eut lieu une éclipse de Lune, assez difficile à observer de Paris à cause du mauvais temps et de la faible hauteur de la Lune au moment où elle se produisait. Les astronautes, eux, virent parfaitement la Lune dans le cône d'ombre de la Terre dans lequel ils se trouvaient eux-mêmes.

L'ultime phase de la descente réserva encore une émotion. L'un des trois parachutes de la cabine se mit en torche. C'est à 45 km/h que l'engin plongea dans l'océan, le 7 août à 21 h 46 mn. Il y avait eu plus de peur que de mal, le voyage s'était bien terminé !

Apollo XVI est lancé le 16 avril 1972 avec John Young, Charles Duck et Thomas Mottingly.

Pour la première fois, le but visé est une région montagneuse. La trajectoire a été calculée pour survoler la face arrière de la Lune, à 110 km d'altitude dans la soirée du 19.

Le module lunaire est détaché le 20. Un incident dramatique se produit à ce moment. La cabine devrait remonter sur une orbite lunaire à 96 km d'altitude. Mais Mottingly retarde cette manœuvre à cause d'un voyant rouge allumé au tableau de bord qui témoigne d'une avarie concernant le pivotement du moteur principal. Il faudra 5 h d'attente, pendant lesquelles tous les cerveaux de Houston sont mis à contribution pour donner le feu vert. L'alunissage a lieu le 21.

Young et Duke doivent rester 71 h sur la Lune. Le lieu de l'alunissage est couvert en abondance de pierres de toutes tailles. La caméra va donner au monde entier des images d'une qualité encore inégalée.

La station *Alsep* est installée, et des trous de 3 m de profondeur sont forés pour y introduire des sondes thermiques.

Le 22, première excursion en Jeep lunaire. Parcourant 4 km, les astronautes atteignent un relief de 230 m de haut, d'où, pour la première fois, des hommes découvrent un horizon lunaire à 30 km. Le magnétomètre, qui donne 236 gammas là où l'on en attendait 10, prouve la présence de fortes masses magnétiques dans le sous-sol.

Le 23, excursion de 5 km en Jeep au cratère Palmetto à 5 km du module. Le paysage ressemble au Hoggar. Total du poids des roches collectées : 96 kg. Le 24, remontée du module, télévisée pour la Terre par la caméra de la Jeep.

Le même soir, un petit satellite actif de 36 kg est placé sur orbite où il mesurera en permanence le champ magnétique et le plasma dans l'environnement lunaire.

Le 25 avril, *Apollo XVI* est arraché à l'orbite lunaire. Sur le trajet du retour, Mottingly sortira de la cabine à laquelle il reste relié par un filin de 8 m de long pour récupérer des films pris en orbite sélène par des caméras placées dans le module de service. Puis il expose une boîte biologique au rayonnement ultraviolet du Soleil.

Le 27 avril, l'amerrissage se déroule parfaitement avec 17 s d'écart sur le temps calculé !

LES VOLS INTERPLANÉTAIRES

Les vols interplanétaires ont visé d'abord les deux planètes les moins éloignées de la Terre (*fig.* 107), à l'exception de la Lune : Mars et Vénus. Les sondes envoyées par les Américains vers ces deux planètes portent le nom général de **Mariner.** Les sondes envoyées par les Soviétiques sont baptisées **Mars** ou **Vénus** suivant la planète de destination (*tableau* VII).

Le vol vers Mars

La distance qui sépare la Terre de Mars varie entre 55 et 400 millions de kilomètres. Le rapprochement maximal a lieu tous les 15 ou 17 ans (*fig.* 108). La Terre et Mars sont en opposition tous les 780 jours. Le lancement doit avoir lieu 96 jours avant cette opposition. La Terre est alors en retard de 44°4' sur Mars dans leur course autour du Soleil. Ces données correspondent à ce qui se passe quand le lancement a lieu avec la vitesse minimale requise, 11,6 km/s. Avec une augmentation de la vitesse initiale de 3 %, la durée du vol diminue de 40 % environ. Le vol ne dure plus qu'environ 160 jours au lieu de 260. (C'est le cas de *Mariner IX* qui n'a mis que 166 jours.)

Le vol vers Vénus

Vénus, étant placée par son orbite entre la Terre et le Soleil, ne peut donc jamais se trouver en opposition (une planète est en opposition quand sa longitude diffère de 180° de celle du Soleil). Les périodes favorables aux lancers d'engins vers Vénus reviennent tous les 584 jours. Le voyage dure trois mois et demi (*Mariner II* a mis 109 jours).

Sous l'effet de l'attraction solaire, la vitesse de la sonde augmente de 10 km/s environ. L'arrivée sur Vénus, après l'accélération due à l'attraction de la planète, se fait à environ 40 km/s.

fig. 107

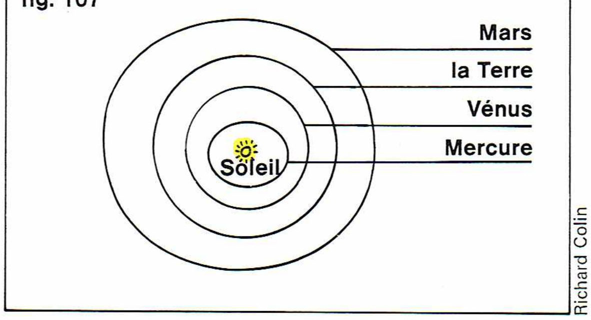

◀ ***Figure 107 :** en dehors de la Lune, Mars et Vénus sont les planètes les plus rapprochées de la Terre.*

fig. 108

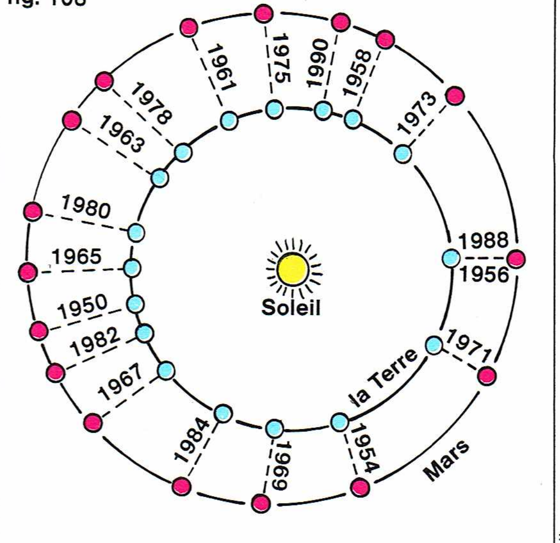

◀ ***Figure 108 :** la distance qui sépare la Terre de Mars varie entre 55 et 400 millions de kilomètres. Les oppositions, qui se produisent tous les 780 jours, lorsque la Terre passe entre Mars et le Soleil, offrent les périodes les plus favorables à l'étude de la planète.*

Tableau VII
Les vols interplanétaires vers Vénus et Mars
(en bleu États-Unis - en rouge U.R.S.S.)

Vers Vénus			Vers Mars		
	Vénus I	12- 2-61			
Mariner I		22- 7-62			
Mariner II		27- 8-62			
				Mars I	1-11-62
	Zond I	4-64			
			Mariner III		5-11-64
				Zond II	30-11-64
			Mariner IV		28-11-64
	Vénus II	12-11-65			
	Vénus III	16-11-65			
	Vénus IV	12- 6-67			
Mariner V		14- 6-67			
	Vénus V	5- 1-69			
	Vénus VI	6- 1-69			
			Mariner VI		7-69
			Mariner VII		7-69
	Vénus VII	17- 8-70			
				Mars II	19- 5-71
				Mars III	28- 5-71
			Mariner VIII		5-71
			Mariner IX		30- 5-71
	Vénus VIII	27- 3-72			
				Mars IV	7-73
				Mars V	7-73
				Mars VI	8-73
				Mars VII	8-73
			Mariner X (vers Mercure)		3-11-73
			Viking I		20- 8-75
			Viking II		4-10-75

▲ *Tableau VII : les vols interplanétaires.*

Les sondes Mariner

Le même nom de baptême *Mariner* désigne les sondes lancées vers Mars ou vers Vénus. Cependant, Vénus ne sera observée que de loin par les *Mariner II* et *V*, le lancement *Mariner I* ayant échoué à cause du mauvais fonctionnement de la fusée *Atlas-Agena*. *Mariner X*, destiné à l'étude de Mercure, est passé à proximité de Vénus et a transmis quelques renseignements sur cette planète.

Le nombre d'expériences vers Vénus étant très limité en ce qui concerne les États-Unis, nous les avons incluses chronologiquement dans la liste des sondes *Mariner*.

Les sondes

La structure centrale est hexagonale ; elle est en magnésium, pèse environ 18 kg et comprend huit compartiments, dont sept sont occupés par l'électronique. Six compartiments sont contrôlés thermiquement au moyen de persiennes qui s'autocommandent grâce à des tiges dilatables (entre 14 °C et 32 °C). Des surfaces peintes diversement, des recouvrements en téflon aident à assurer le contrôle thermique.

Les panneaux solaires, de 2,13 m de longueur sur 0,9 m de largeur, sont recouverts de 17472 cellules solaires qui fournissent une énergie de 800 watts près de la Terre et de 450 watts près de Mars (plus éloigné du Soleil). Une batterie tampon a une capacité d'environ 1 000 watts.

La sonde est stabilisée sur 3 axes grâce à 12 tuyères à jet d'azote réparties en deux systèmes indépendants et redondants. Les capteurs fonctionnent sur le Soleil et sur Canopus (*fig.* 109). Les corrections de trajectoire sont assurées par 4 propulseurs capables de fonctionner au centième de seconde près. L'équipement scientifique comprend deux caméras TV, deux spectromètres (un infrarouge et un ultraviolet), un radiomètre, deux capteurs.

Les sondes *Mariner* sont télécommandées à partir du sol pour les corrections de trajectoire. Pour le reste, elles sont conçues de manière à fonctionner indépendamment grâce à un calculateur. Les télécommunications sont digitales et assurées par deux ensembles émetteurs-récepteurs redondants. Les antennes sont l'une à grand gain, prévue pour rester cinq mois pointée vers la Terre, l'autre à faible gain, servant de guide d'ondes.

Il faut rappeler que les Américains avaient visé Vénus une première fois le 11 mars 1960 avec un *Pioneer V* qui manqua sa cible et ne servit qu'à une étude de l'espace interplanétaire. C'est au cours de l'année 1961 que les Américains adoptèrent leur programme d'exploration planétaire, avec deux projets immédiats, l'un visant Vénus, l'autre Mars. Deux sondes furent construites en un temps record en utilisant des sous-ensembles déjà existants.

Mariner I (Vénus)

Mariner I, destiné à Vénus, est lancé le 22 juillet 1962 par une *Atlas-Agena*. La fusée fonctionne mal. L'officier de sécurité prend la décision de la faire exploser 293 s après le départ. On remarqua que la sonde avait émis pendant 64 s après l'explosion, ce qui signifiait que non seulement son fonctionnement était correct, mais qu'elle avait résisté aussi au choc de l'explosion.

Mariner II (Vénus)

Il est lancé le 27 août 1962 vers Vénus. Après avoir accéléré la sonde jusqu'à une vitesse de 11,35 km/s, le dernier étage, *Agena*, se sépara de la sonde qui, désormais

fig. 110

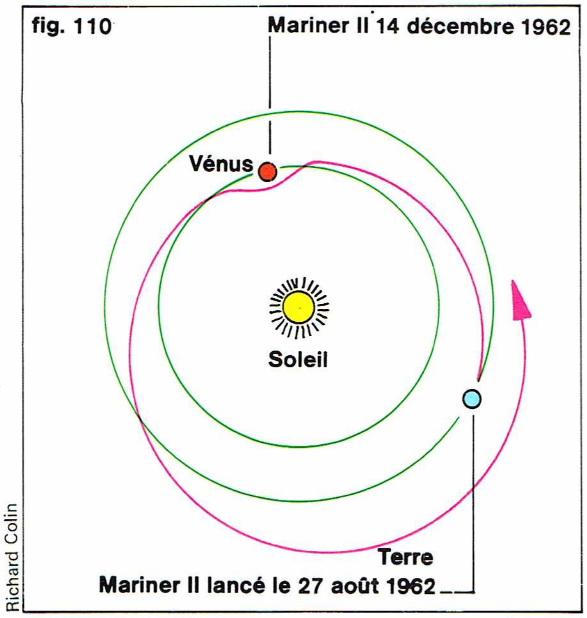

▶ *Figure 110 : sonde* **Mariner II**. *Pendant 109 jours, la sonde resta en contact avec la Terre et obéit à tous les ordres reçus. Elle passa si près de Vénus que sa courbe fut déviée par la planète.*

livrée à ses propres moyens, allait voyager 109 jours et parcourir 290 millions de kilomètres, guidée à partir de la Terre (*fig.* 110).

Une première manœuvre d'attitude fut effectuée pour réduire la distance à laquelle la trajectoire suivie allait faire passer la sonde : 370 000 km de Vénus. Après correction, elle passera exactement à 35 000 km.

Le 109e jour du voyage, les inquiétudes sont grandes : sept thermomètres ont atteint leur graduation supérieure, et le capteur terrestre est insensible. Douze heures avant le passage au-dessus de Vénus, la sonde ne répond plus. C'est un désastre ! Les techniciens multiplient les manœuvres télécommandées depuis Pasadena. Le miracle a lieu : tous les instruments se mettent en marche sur une impulsion heureuse, et les résultats sont positifs. Pour la première fois, on apprend que l'atmosphère de Vénus est brûlante et que la pression au sol est très considérable. Aucun champ magnétique n'a été décelé.

Mariner III (Mars)

Mariner III est lancé le 5 novembre 1964 vers Mars. Un étage de la fusée fonctionne 92 s au lieu des 96 prévues. La mise en orbite est donc mauvaise. De plus, les panneaux solaires ne se déploient pas. La sonde se tait au bout d'un jour. La cause de cet échec est trouvée : le carénage aérodynamique en fibre de verre n'a pu être largué.

Mariner IV (Mars)

Il reste, à ce moment, encore quatre semaines avant que se ferme la fenêtre martienne. On en profite pour donner au futur *Mariner IV* un carénage plus classique en magnésium. *Mariner IV*, laboratoire de 260 kg, est lancé le 28 novembre 1964. Les panneaux se déploient correctement, l'acquisition du Soleil (c'est-à-dire son repérage par le senseur solaire qui servira à stabiliser la sonde) se fait ; l'autre senseur vise Canopus.

La première trajectoire, qui devait faire passer la sonde à 322 000 km de Mars, est corrigée pour passer à 8 700 km seulement. Ce vol vers Mars ne cesse d'être un continuel succès.

Le 15 juillet 1965, le *Jet Propulsion Laboratory* reçoit les premiers signaux captés par l'observatoire de Johannesburg (en « vue » de la sonde). Les signaux ne composent d'abord aucune photo, puis tout s'améliore rapidement. La première photo est reconstituée le 16. Elle est assez médiocre pour le profane, mais pleine d'enseignements pour les experts : ils y décéleront quelque 10 000 cratères de diamètre égal ou supérieur à 5 km. Après avoir pris ses 22 clichés, *Mariner IV* poursuivit son voyage autour du Soleil.

Destinée à fonctionner 6 000 h, la sonde était en parfait état au bout d'un temps triple. Le 1er octobre 1965, elle recevait son 85e ordre de la Terre, celui de ne plus parler. Elle avait alors transmis 50 millions de mesures scientifiques ou techniques.

Le contact était repris le 4 janvier 1966, mais il ne s'agissait que de signaux n'acheminant pas d'information. A ce moment, la sonde se trouvait à 347 millions de kilomètres de la Terre.

Les enseignements de *Mariner IV* furent multiples. Fixés à son châssis, fait d'un alliage de magnésium et d'aluminium, se trouvaient 31 696 instruments électroniques qui servirent à détecter les protons solaires, à enregistrer la présence de poussières, à transmettre à la Terre la densité de l'atmosphère martienne, ainsi que la valeur du faible champ magnétique de la planète.

L'équipement photographique transporté par *Mariner IV* était très perfectionné : 22 photographies prises à environ 15 000 km couvraient une bande de 10 000 km au sol.

Les colonnes de chiffres ci-dessous sont un exemple de ce que la Terre reçoit de la sonde en ce qui concerne les prises de vues TV :

LNO	171	172	173	174	175	176
100	35	36	36	36	36	37
101	33	34	34	33	34	34
102	33	34	34	33	34	33
103	33	33	33	33	33	33

Chaque nombre représente l'intensité d'un point lumineux du téléviseur. En traduisant ce code chiffré en lumière, on reconstitue l'image sur Terre.

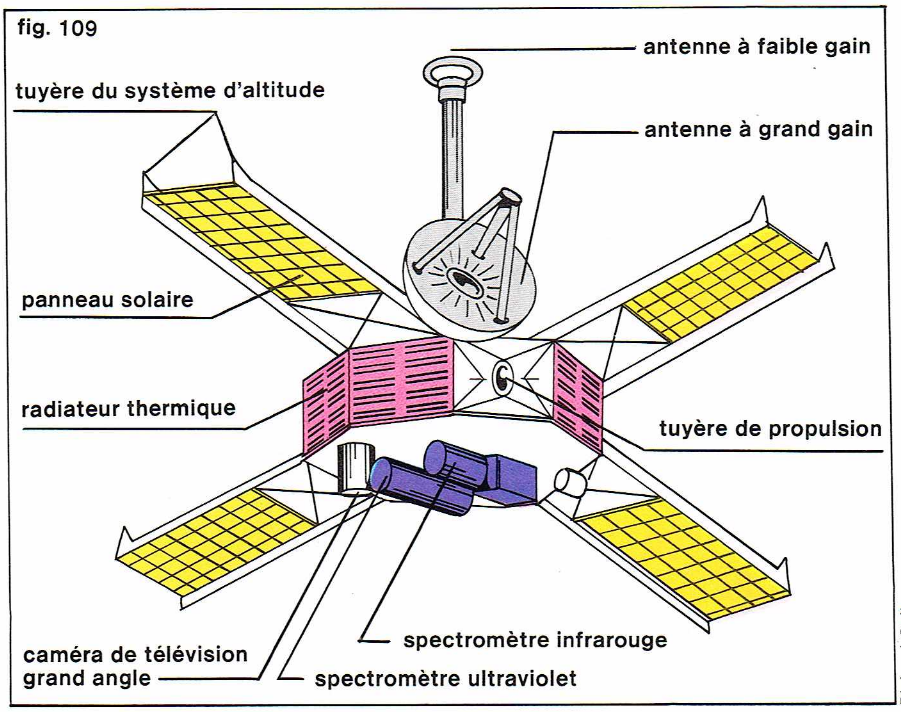

Richard Colin

▲ *Figure 109 : schéma de la sonde* Mariner.

▼ *Techniciens travaillant sur* Mariner IV, *pratiquement achevé. En vol, les quatre panneaux solaires fourniront l'énergie nécessaire aux instruments de mesure.*

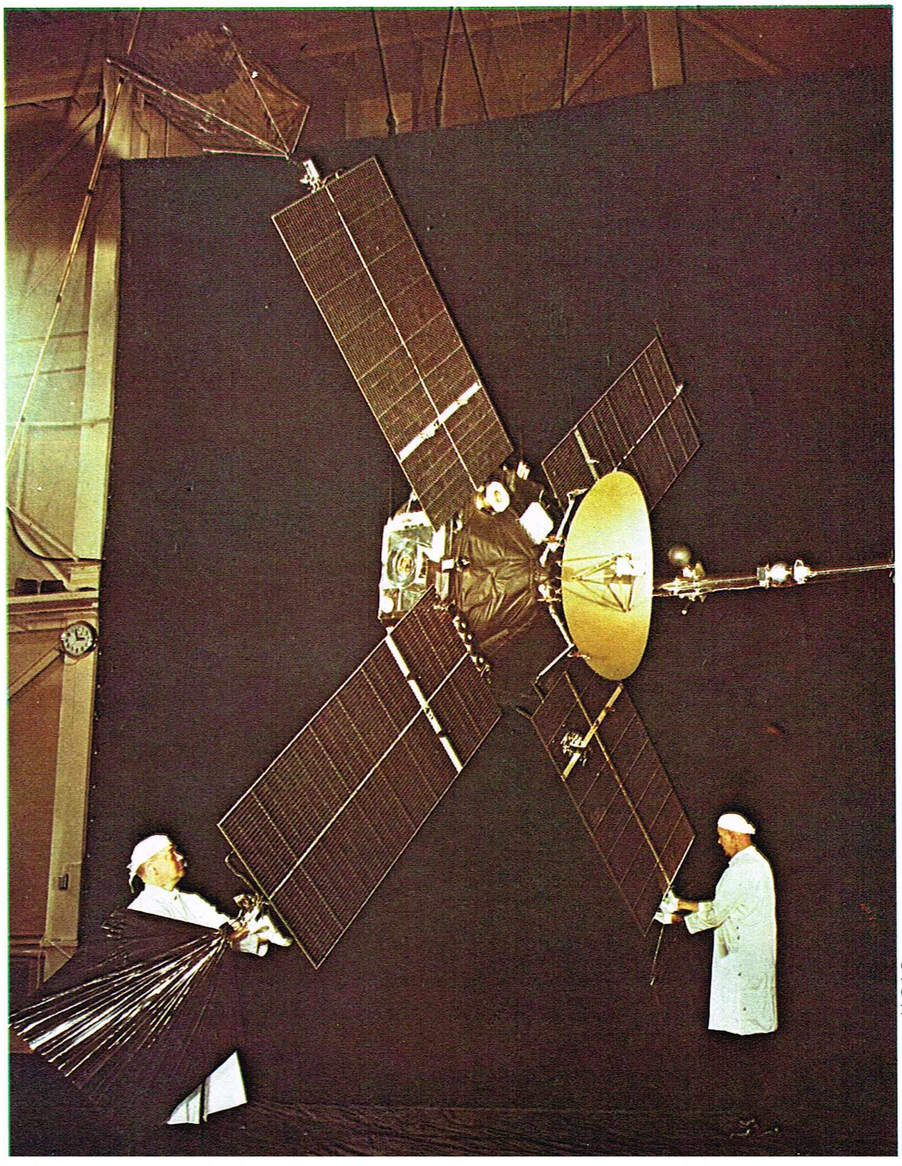

U.S.I.S.

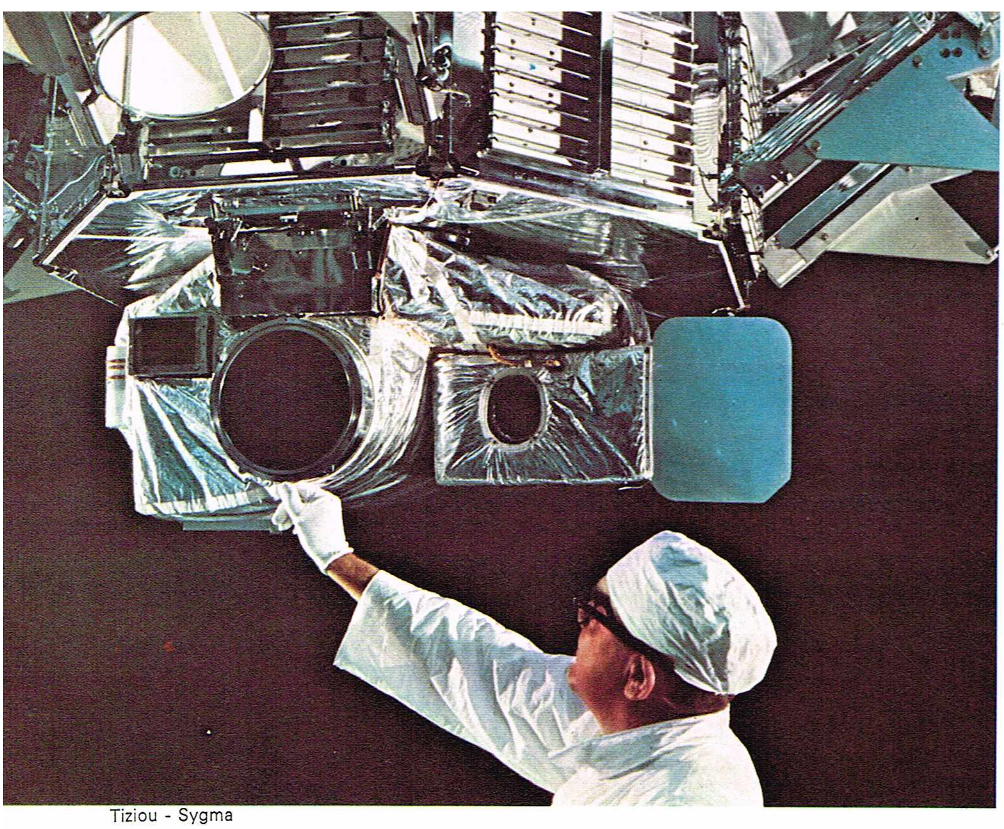

Tiziou - Sygma

Keystone

▲ *A gauche, caméra de télévision montée sur* Mariner IX. *A droite, photo de Mars prise par* Mariner *à environ 240 000 km. La tache blanche, en bas, est le pôle Sud.*

Mariner V (Vénus)

Mariner V est destiné à étudier l'atmosphère vénusienne. Lancée le 14 juin 1967, la sonde pèse 256 kg. Le 19 octobre, une correction de trajectoire est effectuée pour qu'elle passe à 4 000 km de la surface vénusienne, donc dans la haute atmosphère de la planète (qui s'étend jusqu'à 10 000 km de son sol).

Deux photomètres ultraviolets doivent rechercher la proportion d'oxygène et d'hydrogène dans cette atmosphère. Les données recueillies permettent de préciser que le sommet de la couche nuageuse est à 67 km du sol vénusien. Le rayon de Vénus est estimé à 6 052 km en recoupant les observations de *Mariner V* et celles de la sonde *Vénus IV* soviétique arrivée la veille.

Mariner VI et Mariner VII (Mars)

Mariner VI et *Mariner VII* ont été lancés dans la même fenêtre martienne, et sont passés, après un voyage de 56 jours chacun, à quelque 3 500 km de Mars.

Pour *Mariner VI*, lancé vers Mars, l'ordre de prendre les premières images est donné à 1 232 000 km de la planète, le 29 juillet 1969. Les transmissions à la Terre commencent le lendemain. La première image arrive sur la télévision américaine. Elle a franchi 96 millions de km en 5 mn 20 s pour atteindre la Terre.

Le 31 juillet, *Mariner VI* passe à 3 427 km de Mars. On peut évaluer la grande précision du vol de *Mariner VI*, si l'on tient compte que sur un parcours balistique elliptique de 385 millions de km, le passage à proximité de la planète a eu lieu avec 99 s de retard.

Les gros plans de Mars montrent qu'il ressemble beaucoup à la Lune (une photo montre un cratère de 500 km de diamètre).

Les appareils emportés par la sonde donnent les résultats suivants :

— le spectromètre infrarouge destiné à mesurer le pouvoir émissif des différents terrains est tombé en panne ;

— deux radiomètres infrarouges mesurent la température à la surface de Mars et dans son atmosphère : à l'équateur, + 24 °C le jour, — 73 °C la nuit ;

— le spectromètre ultraviolet analyse l'atmosphère martienne : entre 40 et 90 % de gaz carbonique, un peu d'oxyde de carbone, pas d'azote, un peu d'oxygène et d'hydrogène. L'atmosphère est sèche. On voit des nuages de poussière.

Six jours avant le survol de Mars, *Mariner VII* semble mal en point. On suppose qu'il a été bousculé par une météorite : prévue pour passer à 3 347 km de Mars, sa trajectoire actuelle semble passer maintenant à 100 km seulement de Mars.

La Terre réalise une nouvelle prouesse, en sauvant une situation qui semblait désespérée. Le programme est modifié : la caméra est mise en marche le 2 août 1969

▼ *A droite, Phobos, un des deux satellites de la planète rouge (Mars), a été photographié par* Mariner IX *à une distance d'environ 5 540 km. On distingue très nettement les cratères. A gauche, l'autre satellite de Mars : Deimos.*

U.S.I S.

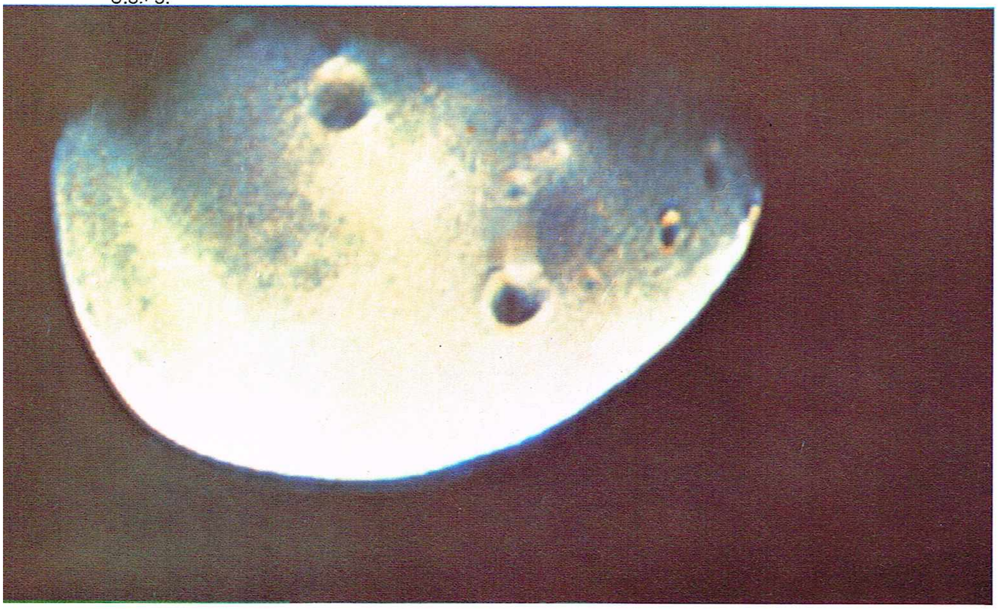

U.S.I.S.

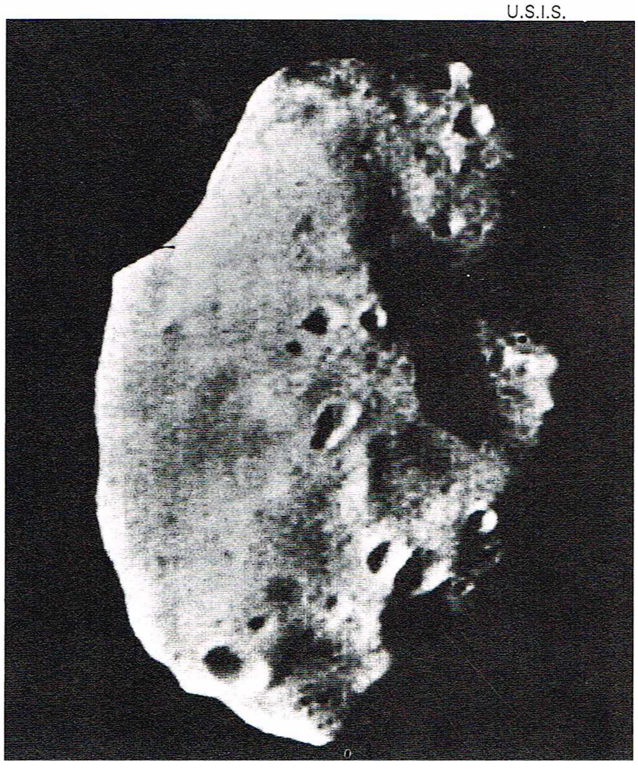

◀ ***Le satellite américain* Mariner IX *qui s'est placé en orbite autour de la planète rouge a pris cette photo de la surface de Mars. Ce document révèle la présence de nombreux cratères sur un terrain relativement jeune couvert de dépôts volcaniques.***

alors que la sonde se trouve à 1 830 000 km de Mars, et 34 images prises le 2, transmises le 3, sont bonnes. Une seconde série débute à 643 700 km ; elle va donner des photos extraordinaires, qui révèlent une profusion de cratères.

Le 5 août, la sonde passe au-dessus du pôle Sud de Mars. Les images sont diffusées en télévision. La première surprise provient de l'aspect de la calotte glaciaire. Vue de Terre, elle semblait circulaire. Or elle est irrégulière, les bords sont tourmentés, la teinte générale grisâtre avec une tache sombre au centre. Des lignes incurvées ressemblent à des glaces à la dérive : glace ou neige carbonique ? Le spectromètre révèle des traces de méthane et d'ammoniac dans l'atmosphère martienne.

Mariner VIII (Mars)

Mariner VIII s'est abîmé dans l'Atlantique, quelques minutes après son lancement, par défaillance de la fusée *Atlas-Centaur*, qui n'avait jusqu'alors donné aucun mécompte au cours de sept placements de *Surveyor*, deux de *Mariner* et un placement d'un satellite de télécommunications.

Mariner IX (Mars)

Mariner IX, prêt à être lancé aussitôt après pour profiter de la même fenêtre martienne, avait des missions quelque peu différentes de celles de *Mariner VIII*. L'échec de celui-ci est en partie rattrapé en modifiant la programmation de *Mariner IX*. Il y aura au total moins de missions, mais les missions essentielles seront effectuées. La sonde sera lancée le 30 mai 1971.

Mariner IX doit effectuer un voyage de 462 millions de kilomètres et arriver à destination le 13 novembre 1971. Il est prévu pour orbiter 17 ans sur orbite martienne. Il permettra d'étudier la planète pendant ce long laps de temps, au cours duquel les Américains comptent déposer des sondes *Viking* sur le sol même de la planète en vue de rechercher toute trace de vie.

Mariner IX est muni de 2 caméras de télévision, de radiomètres et de spectromètres infrarouge et ultraviolet. On estime qu'il va photographier 70 % de la planète avec une résolution d'un kilomètre. De plus, un téléobjectif, permettant une observation dix fois plus fine, doit procurer des renseignements inédits. *Mariner IX* a rempli en fait plus que la mission qui lui était assignée : jusqu'au 31 mars 1972, il a transmis 7 000 clichés couvrant 85 % de la surface de la planète.

Du 31 mars au 4 juin 1972, *Mariner IX* passe à chaque révolution dans l'ombre de Mars. L'énergie fournie par les piles solaires diminue donc. En fait, *Mariner IX* a éprouvé dès le début des déboires indépendants de son propre fonctionnement, dus à de fortes tempêtes de sable qui voilaient le sol martien. Pour pallier cet inconvénient, la sonde a été placée le 30 décembre 1971 sur une orbite différente lui permettant d'effectuer en 60 jours ce qui devait l'être en 90.

Une extraordinaire photo de Phobos a été prise à la distance de 5 540 km le 30 novembre 1971 par *Mariner IX* dont la caméra était télécommandée depuis le *Jet Propulsion Laboratory* de Pasadena.

Phobos est une lune de Mars, l'autre est Deimos (du nom des deux héros de *l'Iliade* qui attelaient le char du dieu de la guerre). Découverts en 1877, par l'astronome américain Asaph Hall, ils ont une étrange histoire. En effet, plus d'un siècle plus tôt, Voltaire en parle dans son *Micromégas* et Jonathan Swift dans ses *Voyages de Gulliver ;* ce dernier prévoit l'existence des deux lunes et leur attribue même des révolutions d'une durée voisine de la durée réelle, et cela plus d'un siècle avant que la découverte scientifique en soit réalisée.

Sous la caméra de *Mariner IX*, Phobos s'est révélée être un patatoïde d'environ 25 km de longueur sur 21 km de largeur, criblé de cratères de toutes tailles. La pesanteur est de 1/1 000 de celle de la Terre. La vitesse de libération n'y est que de 7,5 m/s, ce qui fait qu'un bon sauteur ou un bon coureur de 100 m pourrait s'en détacher, s'envoler littéralement et, happé par la gravitation de Mars, venir s'y écraser après une chute de 5 000 km.

Le bilan des renseignements apportés par *Mariner IX* en quelques mois a été extraordinaire. On peut le résumer ainsi :

* Les photographies ont multiplié les témoignages en faveur d'un volcanisme dont on pense déceler les coulées de lave. Hypothèse corroborée par le fait que l'atmosphère de Mars s'enrichit de composés hydrogénés d'origine volcanique.

* Des creux, des cassures, des crêtes semblent indiquer une activité tectonique.

* Les vents jouent certainement un rôle important. On a bien vu leur effet, lors du premier mois suivant l'arrivée de *Mariner IX*, période pendant laquelle la surface martienne était quasi voilée par les tempêtes de sable. Leur vitesse peut atteindre plusieurs centaines de km/h.

* La pression à la surface de Mars est faible, la pesanteur trois fois moindre que sur la Terre.

* Les dénivellations sont énormes. Certains canyons ont des profondeurs dépassant 2 500 m. Pour effectuer ces mesures, on utilise le spectromètre infrarouge : en étudiant la raie d'absorption du dioxyde de carbone, on peut évaluer la masse de ce gaz sous la sonde et, par déduction, la hauteur du sol.

* Il semble y avoir peu de vapeur d'eau autour de Mars, peu d'eau à sa surface, mais, grâce à la température, elle peut être conservée sous forme de glace en quantités très importantes qui, parfois, se subliment en perturbant violemment l'atmosphère.

En conclusion, au milieu de 1972 (après en avoir fortement douté, au vu des observations des premiers *Mariner*), l'extraordinaire moisson récoltée par *Mariner IX* semblait apporter des présomptions suffisantes de l'existence de certaines formes de vie sur Mars.

Mariner X (Mercure)

Mariner X (528 kg) est lancé le 3 novembre 1973 en vue d'explorer Mercure. Avant l'envoi de cette sonde, on savait fort peu de chose sur Mercure, qui ne s'approche jamais à moins de 77 millions de kilomètres de la Terre, dont la taille est seulement de 1,4 fois celle de la Lune, et que l'on ne peut jamais voir à plus de 28° du Soleil. Avec les plus puissants instruments, Mercure n'est jamais apparu que comme la Lune nous apparaît à l'œil nu.

Mercure met 88 jours environ pour boucler sa rotation autour du Soleil, et les radars ont montré qu'il tourne sur lui-même en 59 jours. Nous avons étudié à propos de la Lune le freinage dû aux marées, dont la conséquence est que cette planète tourne toujours la même face vers la Terre. Les astronomes avaient pensé qu'il en était de même pour Mercure, au regard du Soleil. La radarastronomie, en permettant de fixer la durée de la rotation à 59 jours, a montré qu'il existe d'autres équilibres dynamiques que la synchronisation. L'un d'eux correspond à une rotation dont la durée est les deux tiers de la période de révolution. C'est le cas de Mercure.

C'est le 29 mars 1974 que *Mariner X* passe à 705 km de Mercure. Mais, sur la route de Mercure, la sonde est passée à 5 808 km de Vénus, trajectoire prévue pour que la sonde reçoive de Vénus une décélération l'aidant à se mettre en orbite autour de Mercure. Un réseau de poursuite terrestre très précis permet de reconstituer la

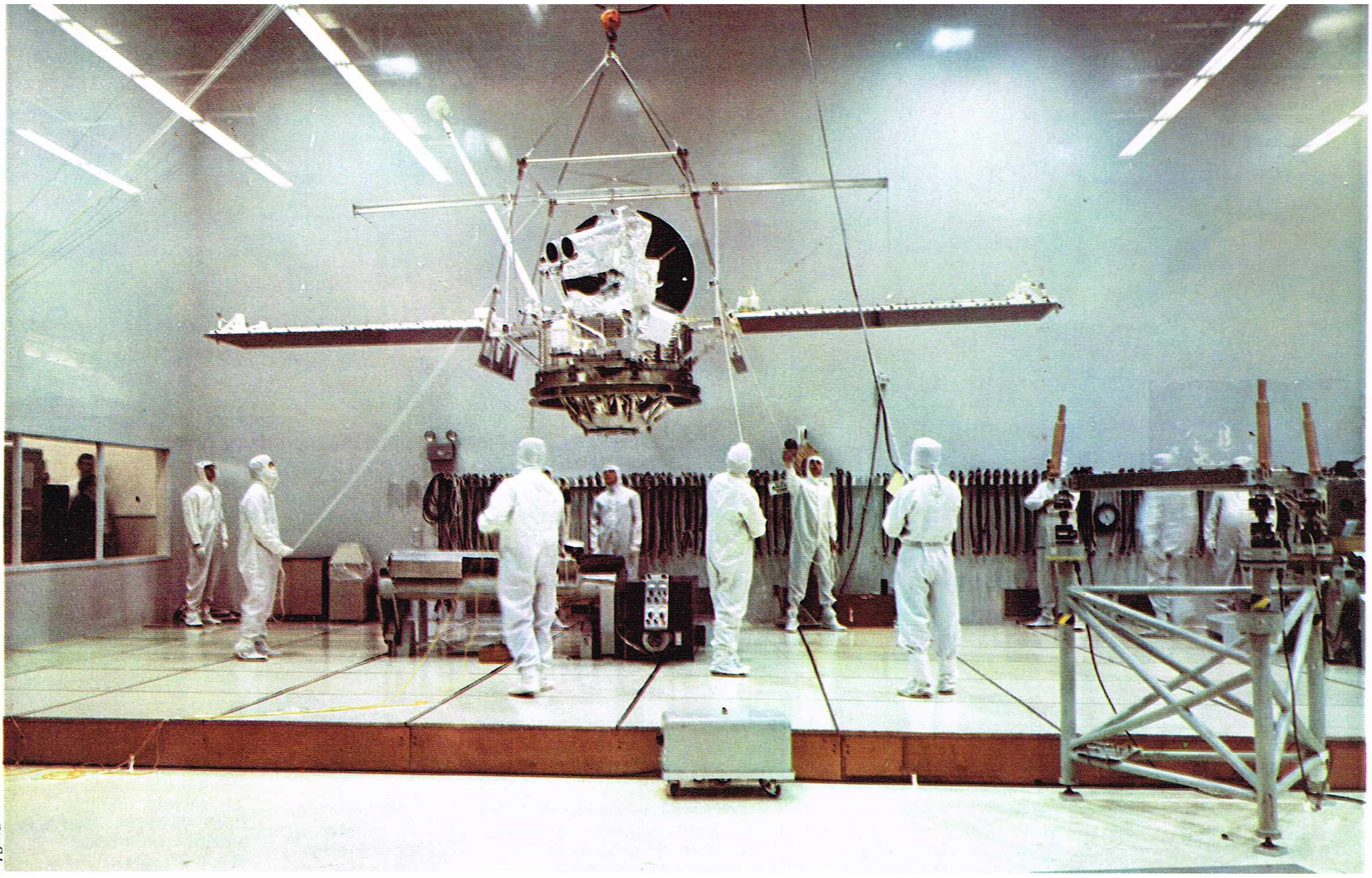

Sygma

▲ *L'achèvement de* **Mariner X.**

trajectoire exacte de *Mariner X* et ainsi, par sa déformation, d'évaluer pour la première fois la masse de la planète. Elle vaut 0,055 35 (en prenant la masse de la Terre égale à 1), et sa densité est de 5,44.

Mariner X porte les instruments nécessaires à l'exécution de six expériences dont voici les résultats :

* Deux spectromètres ultraviolets décèlent dans l'enveloppe gazeuse de Mercure les gaz suivants : hydrogène, oxygène, composés carbonés, argon, hélium, néon et xénon.

* Un radiomètre infrarouge permet d'évaluer que la température varie de près de 500 °C entre le jour et la nuit (au crépuscule du soir, la température passe de + 200 °C à — 120 °C en très peu de temps). Cela provient du manque d'atmosphère et du fait que le sol superficiel est très granuleux.

* Deux magnétomètres révèlent l'existence d'un champ magnétique considérable pour cette petite planète ; on suppose qu'il est produit par l'influence du champ magnétique solaire qui, en tournant, engendre un champ électrique important dans Mercure.

* Des émetteurs radio montrent, par le brutal arrêt des signaux quand la sonde passe derrière Mercure, qu'il n'y a pas d'atmosphère.

* Deux caméras avec téléobjectifs et filtres permettent de recueillir plus de 2 000 photos en rapprochement à partir d'une distance de 4,5 millions de kilomètres. 716 gros plans, avec pouvoir de résolution de 150 m, pris à moins de 100 000 km, montrent que Mercure ressemble étrangement à la Lune, avec de grands et de petits cratères, jeunes ou vieux, des escarpements abrupts et des réseaux de fractures.

* Après s'être éloigné de Mercure, *Mariner X,* calé sur une orbite solaire propice, repasse à proximité de la planète pour effectuer une seconde série d'observations, qui permettent de supposer que la moitié du volume de Mercure serait un noyau de fer de 2 000 km de rayon environ sur lequel les silicates se sont déposés par accrétion.

La mission Viking

Depuis août 1973, après leur quadruple expérience des *Mars IV, V, VI* et *VII* (nous en parlerons plus loin), qui fut très loin de répondre aux espérances qu'on avait fondées sur elle, les Soviétiques n'ont pas envoyé de nouvelle sonde vers Mars. Les Américains, de leur côté, ont cessé leurs vols vers Mars avec *Mariner IX* qui, en 1971, a rapporté une riche moisson de renseignements. Ils préparent depuis cette date des engins destinés à se poser sur Mars. Ce sont 2 sondes *Viking* parties en août et en septembre 1975. Elles ont pour mission de chercher si une sorte de vie existe sur Mars.

Aux temps héroïques de l'exploration, les *Mariner IV* puis *VI* et *VII* n'avaient pu que survoler la planète. De ces observations lointaines, rien ne pouvait être conclu qui infirmât ou confirmât l'existence d'une sorte de vie, même simplement végétale.

L'exploration plus minutieuse de *Mariner IX,* en 1971, redonnait un vif intérêt à la planète. Désormais, l'on pouvait affirmer que Mars a été, est peut-être encore, le théâtre d'une activité volcanique. On y voit de grands cratères, des failles, de larges canyons comme celui qui court sur plus de 3 000 km près de son équateur, et surtout de ces lacis plus clairs et sinueux qui, sur les photographies que l'on prend sur Terre de très haute altitude, correspondent toujours à des lits de rivières asséchés.

Depuis 1971, les Soviétiques ont tenté sans succès, en 1973, de poser sur Mars des engins d'exploration qui sont restés muets, après avoir été probablement détruits au moment de l'impact.

L'intérêt de l'exploration *Viking* reste donc entier, d'autant plus vif que la N. A. S. A. n'avait pas lésiné sur les moyens. Les deux sondes *Viking* envoyées vers Mars sont des laboratoires automatiques très coûteux (on a parlé d'un prix unitaire d'environ 100 milliards d'anciens francs), fruits de plusieurs années de recherches effectuées par des milliers de savants et de techniciens déjà longuement formés par de nombreuses expériences spatiales.

Les *Viking* ont-ils quelques chances de découvrir une sorte de vie extra-terrestre ? D'une façon générale, dans l'état actuel de nos connaissances, y a-t-il une probabilité pour qu'une sorte de vie soit née ailleurs que sur le globe terrestre ?

Ce problème de biologie devient fondamental pour l'astronautique. Bien que l'on connaisse sur la Terre des cellules vivant dans des conditions de températures ou de pressions extrêmes, on admet *a priori* que la vie ne peut apparaître et se perpétuer que dans un environnement de type planétaire. La première question est donc : existe-t-il d'autres planètes que celles du système solaire dans l'univers ? Une chose est certaine : on n'en a jamais encore apporté de preuve expérimentale formelle. Mais

il est non moins certain qu'il existe des milliards de galaxies, qu'elles comportent des milliards d'étoiles, et, parmi elles, des milliards d'astres comparables à « notre » Soleil.

Supposer que nombre d'entre eux aient des cortèges de planètes n'est pas outrepasser la part de certitude que donne le calcul des probabilités. Rendues invisibles par l'éclat proche de leur soleil, certaines planètes seront peut-être décelées par le télescope spatial de la future navette. Une meilleure définition des recherches en infrarouge pourrait également amener à cette découverte. D'ores et déjà, les savants tiennent pour acquis qu'il existe des milliards de planètes et que, parmi elles, certaines doivent graviter autour de leur soleil dans des conditions voisines de celles des planètes du système solaire.

Cependant, quels que soient les espoirs suscités par l'exploration *Viking*, il est impossible de s'attendre à trouver sur Mars une forme de vie *terrestre*. Ce que l'on sait avec précision de la planète n'est pas à cet égard engageant. La pression de son atmosphère, presque exclusivement faite de gaz carbonique, n'y est que de quelques millibars. On n'y trouve ni oxygène, ni azote.

Une grande question à laquelle la science n'a pas encore répondu est celle de savoir si Mars a eu de l'eau et si elle en recèle encore. C'est en effet la présence de l'eau, essentielle à l'éclosion des types de vie que l'on peut imaginer, qui pourrait lancer sur la voie des découvertes. L'actuelle ignorance a permis aux savants d'avancer diverses hypothèses. La plus courante consiste à penser que l'immense calotte polaire, dont l'étendue varie, est tout entière faite d'eau gelée sous la couche de glace carbonique provenant de l'atmosphère. Elle séduit beaucoup ceux qui veulent à toute force que la vie ait existé sur Mars, car l'on sait que, tous les 3 millions d'années, l'axe de rotation de la planète se redresse sur l'écliptique. Alors la calotte glaciaire peut fondre (elle est plus près du Soleil). L'eau se répand, une partie se vaporise d'abord. La pression atmosphérique croît jusqu'au point où l'eau peut rester liquide en surface et former des rivières, des lacs et des mers.

L'activité des volcans libère des gaz et de la vapeur d'eau. Toutes les conditions sont créées pour que la vie apparaisse comme elle est apparue sur Terre, si tant est que les cellules organiques ne soient pas venues tout simplement de l'espace par des météorites qui, ne brûlant pas dans une atmosphère raréfiée, ont encore plus de chances que sur Terre d'apporter leurs richesses organiques.

Il va sans dire que l'on est dans un domaine de pures hypothèses. Elles n'ont rien d'absurde et sont adoptées par ceux des savants qui sont le plus anxieux de vouloir prouver l'existence de vies extra-terrestres.

Ce processus s'est-il déroulé dans le passé, au rythme de 3 millions d'années qui est celui du balancement de l'axe de la planète ? Alors, rien n'empêcherait que la vie, plusieurs fois, soit éclose, puis ait disparu, et que cela, dans l'avenir, se reproduise.

L'engin Viking

C'est un véhicule de 3 500 kg environ, composé d'un *Orbiter* qui restera sur orbite et d'un module largable qui doit se poser sur la planète, le *Lander*. Le lanceur est la fusée *Titan III E/Centaur* (la plus puissante après *Saturne V*).

Deux boosters et deux étages élèvent d'abord l'ensemble, puis sont largués après que la *Centaur* a pris le relais. Celle-ci se place avec le *Viking* sur une orbite 185 km, puis s'éteint. Elle se rallume au moment voulu et projette *Viking* sur sa trajectoire solaire. *Centaur* est ensuite larguée et écartée de la trajectoire.

Le *Viking* s'oriente avec le Soleil et Canopus comme références. Quatre panneaux solaires et deux batteries fournissent l'énergie électrique. Les corrections de trajectoire sont faites par un ordinateur de bord. Les sites d'arrivée sur Mars ont été choisis à partir des informations données par *Mariner IX* et des renseignements recueillis par les sondes soviétiques *Mars*, et communiqués en vertu d'un accord de coopération.

Le *Lander* est soumis à des conditions d'atterrissage précises : il ne peut pas se poser si le vent excède 250 km/h (ce qui est assez fréquent sur Mars), le sol ne doit pas avoir une inclinaison supérieure à 20°, et la garde de l'engin au sol n'est que de 22 cm.

Le *Viking* se place sur une orbite martienne. Il se scinde en *Orbiter* et *Lander*. Ce dernier, après s'être largement écarté, amorce sa descente pour rentrer à 240 km/h dans les couches basses de l'atmosphère martienne, très ténue. A 6 400 m d'altitude, un parachute est déployé ; la coquille protectrice de la sonde est éjectée. A 1 500 m du sol, le parachute est largué. Trois rétrofusées s'allument, et leur poussée est réglée par un radar d'approche fonctionnant entre 45 km et le sol, puis par un radar d'atterrissage mesurant l'altitude et la vitesse avec une grande précision.

Le lancement des Viking

Il donna lieu à de nombreuses péripéties. Les Américains auraient voulu que la première sonde arrivât symboliquement le 4 juillet 1976 (200e anniversaire de l'Independance Day) sur Mars. Malheureusement, les vérifications du dernier moment montrèrent des défectuosités. Une véritable course contre la montre s'engagea, que gagnèrent en partie les ingénieurs.

La fenêtre martienne durait heureusement six semaines. Le premier *Viking* fut mis à feu le 20 août 1975. Une correction de trajectoire fut effectuée le 27 août pour le faire passer à 2 160 km de Mars. Le deuxième *Viking* suivra avec quelque retard et n'arrivera sur Mars que le 3 septembre 1976.

Les expériences projetées

Elles étaient de différentes natures, mais les principales étaient destinées à déceler l'existence d'une sorte de vie quelconque sur la planète. Les *Lander* sont à cet égard de vrais laboratoires, qui utilisent trois méthodes :

▼ ***Le* Viking *vient de se scinder. En haut, l'*Orbiter *restera sur orbite. Au-dessous, le* Lander *avec sa coquille de protection descend vers Mars. Plus bas, on voit le cône qui obturait le dessous du* Lander.**

Keystone

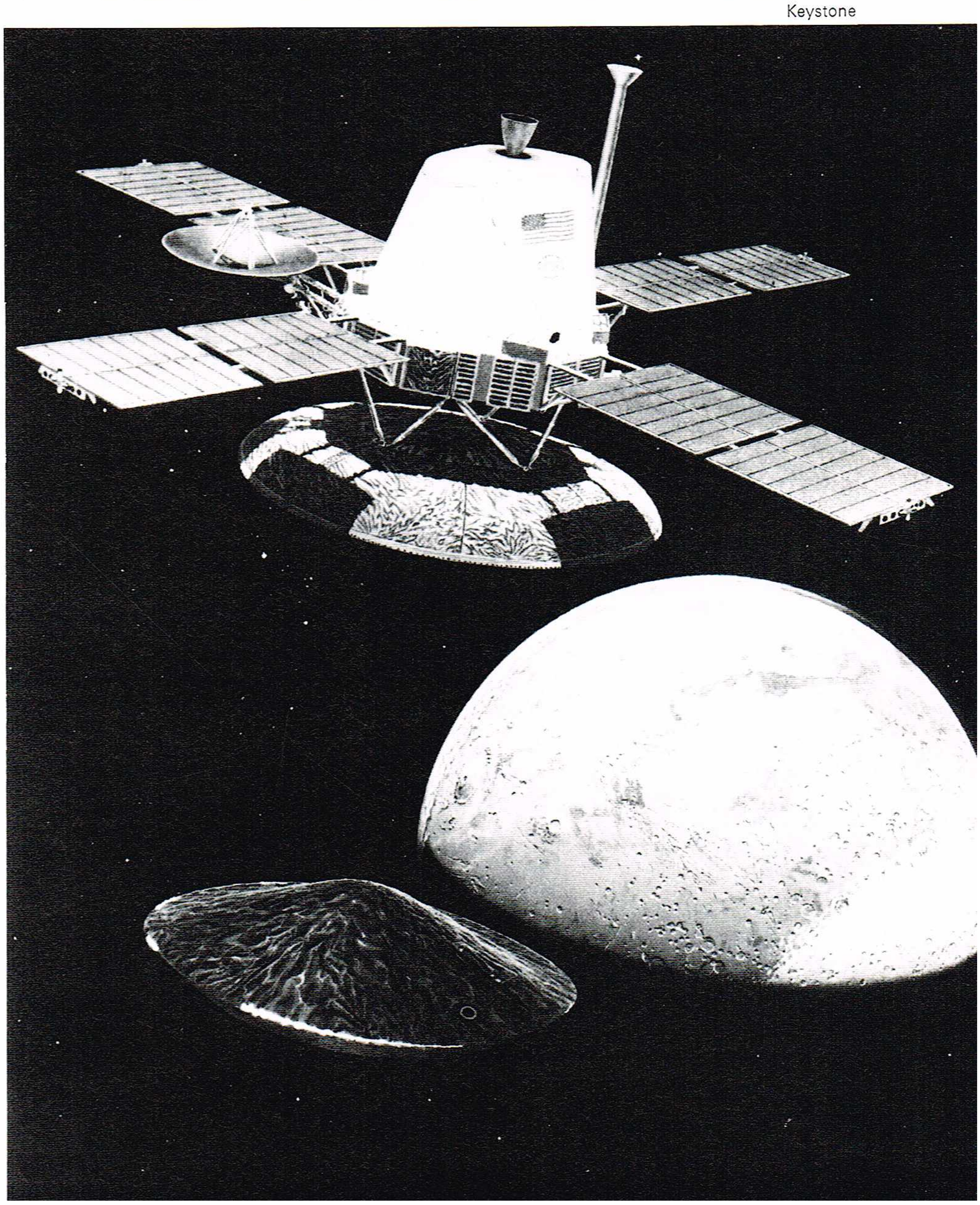

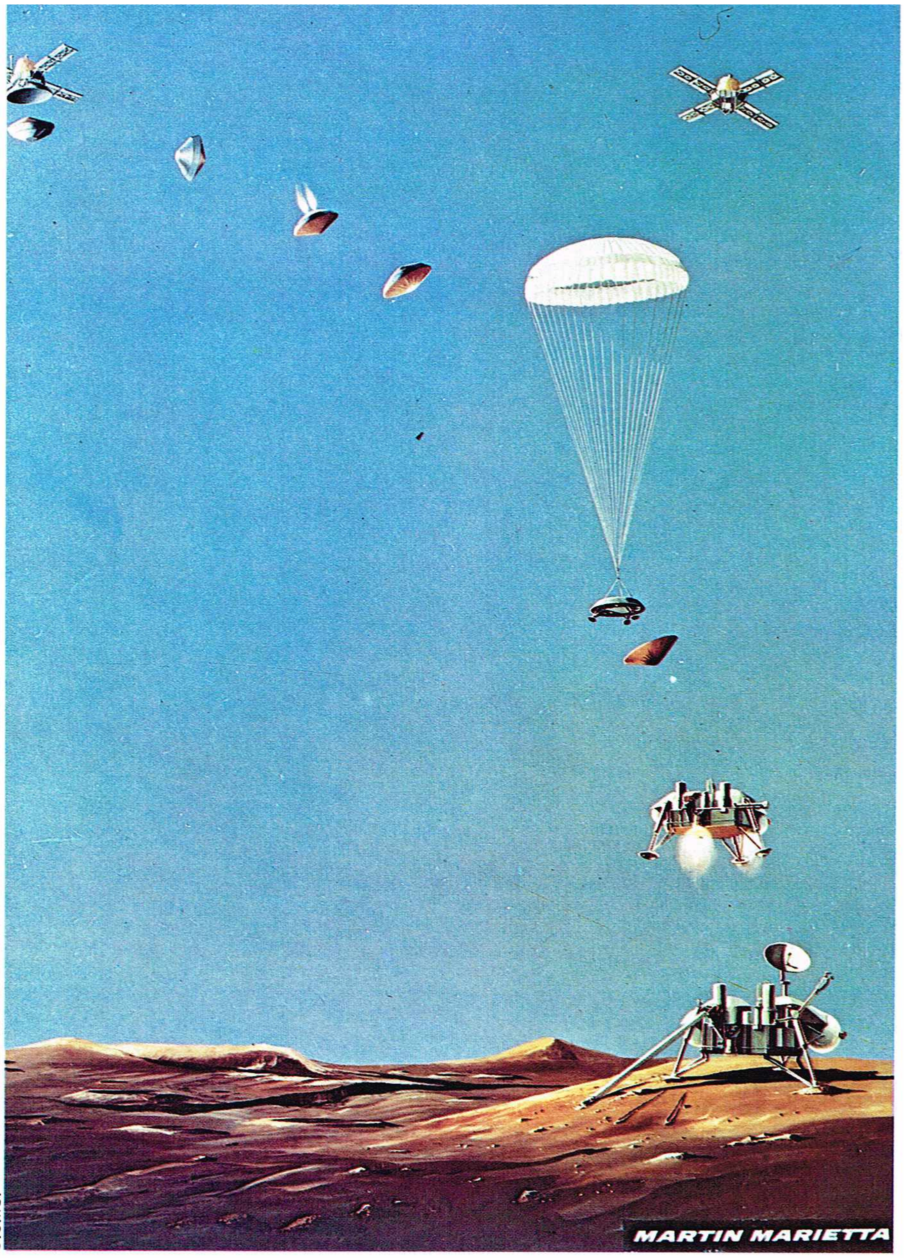

U.S.I.S.

▲ *Dessin des phases successives de la descente sur Mars d'un laboratoire chargé de détecter des traces possibles de vie.*

▼ *Dessin du* Viking *par un artiste américain.*

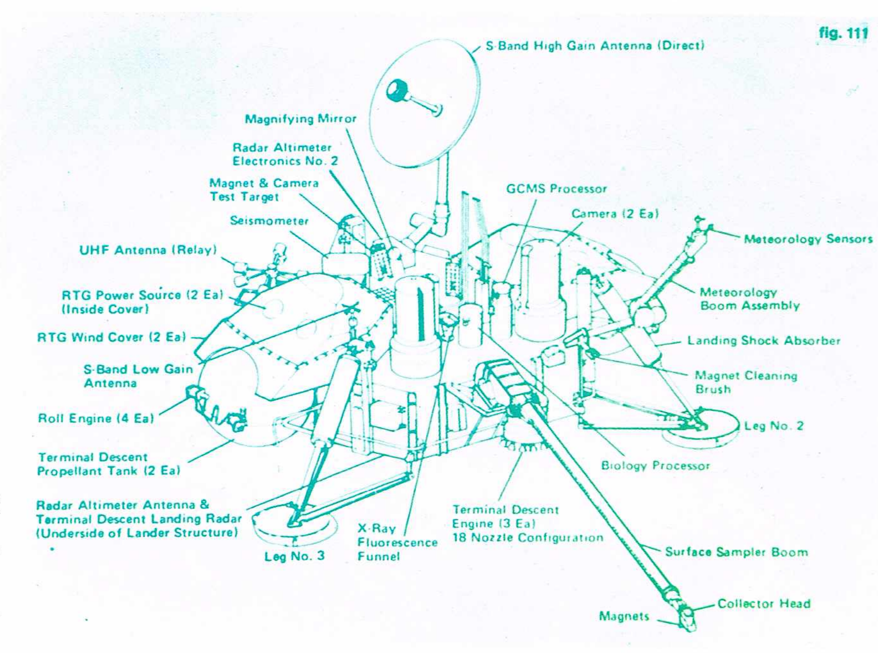

Tony Korody - Sygma

★ La vie végétale pourrait être décelée grâce au phénomène qui lui est propre de la photosynthèse. Le bras de la sonde creuse le sol et dépose un échantillon dans une chambre où est exactement reproduite l'atmosphère martienne environnante, lumière comprise. Mais le gaz carbonique de la chambre est marqué au carbone 14. Après incubation et réchauffement à haute température, les gaz résultants seront analysés pour voir s'ils contiennent des molécules organiques.

★ Une autre chambre contenant des matières nutritives et de l'eau recevra un autre échantillon du sol martien. Si du méthane et du gaz carbonique apparaissent, c'est que l'échantillon contient des particules vivantes.

★ Une expérience plus fine que la précédente permet, en marquant les matières nutritives au carbone 14, de s'assurer que si du gaz carbonique également marqué au carbone 14 se dégage, il provient certainement d'une transformation de type organique.

Chaque sonde pèse plus d'une tonne, et son laboratoire se compose de 40 000 pièces dont plusieurs milliers sont en mouvement. Stérilisé avant son départ afin d'y supprimer toute trace de vie accidentelle qui fausserait l'analyse, il voyagera plus d'un an à travers l'espace, cet espace dont on sait aujourd'hui qu'il contient en suspens des micro-organismes capables de rendre vaine la stérilisation des sondes. C'est dire combien est aléatoire le résultat d'une expérience mettant en jeu une machinerie compliquée, ne fonctionnant qu'après un long voyage de plus de 300 jours à travers l'espace.

Que peut-on attendre de ces analyses ? Plusieurs résultats :

— Aucune présence de vie ou d'eau n'est révélée. Y en a-t-il ailleurs ?

— L'eau existe, ou a existé sur Mars, sans qu'on y trouve trace de vie.

Alors, il faudrait conclure que, malgré la présence des acides, témoins de vie détectés dans les nuages interstellaires, les ensemencements restent très aléatoires sur les objets célestes propres à les faire fructifier. Mais ce n'est qu'une hypothèse fragmentaire. Rien n'empêche qu'il en soit différemment ailleurs. Il faudrait y aller voir. Quand, où et comment ?

— Eau et vie sont décelées. Tout espoir est permis. Les grandes envolées englobant les milliards d'étoiles ne connaissent plus de limite. On peut rêver tout à son aise, avec un sentiment de vertige.

— Une constatation ambiguë serait celle qui révélerait la présence de la vie sans qu'on trouve présence d'eau. Elle déchaînerait, sans nul doute, une vague d'hypothèses contradictoires dans le monde savant.

Dès l'arrivée des sondes sur Mars, l'ordinateur de bord se mit en marche pour calculer les coordonnées exactes du point d'atterrissage, afin de diriger correctement l'antenne vers la Terre.

Deux caméras à défilement photographièrent les alentours ; hautes de 1,5 m, elles peuvent se déplacer horizontalement et explorer des tranches verticales au moyen d'un miroir. Elles purent donner les détails du sol, des vues panoramiques et même des vues stéréoscopiques, car elles sont éloignées d'un mètre. Grâce à leurs bras mécaniques, les échantillons prélevés sur le sol furent distribués aux appareils chargés de les analyser (*fig.* 111).

Les premières analyses ayant été négatives, les savants pensèrent que toute trace de vie avait pu disparaître sous l'influence directe des rayons ultraviolets du Soleil. On parvint alors à déplacer une grosse pierre afin de prélever des échantillons du sol à un endroit où ils étaient restés à l'abri des rayons solaires. Le résultat ne fut pas plus probant.

Les résultats

En septembre 1976, un congrès de l'Union astronomique internationale a réuni deux mille savants à Grenoble. Le principal inventeur de l'expérience *Viking*, Carl Sagan, a fait le point, devant une salle passionnée et comble, sur l'exploration de Mars. Le jeune savant américain a montré les magnifiques vues en couleurs du désert rougeâtre parsemé de cailloux qui entoure le module au sol de *Viking I*.

Mais il a dû, à regret, avouer que les résultats jusqu'ici obtenus restaient énigmatiques. Sans être négatifs, ils n'apportent aucune certitude et sont entachés de contradictions.

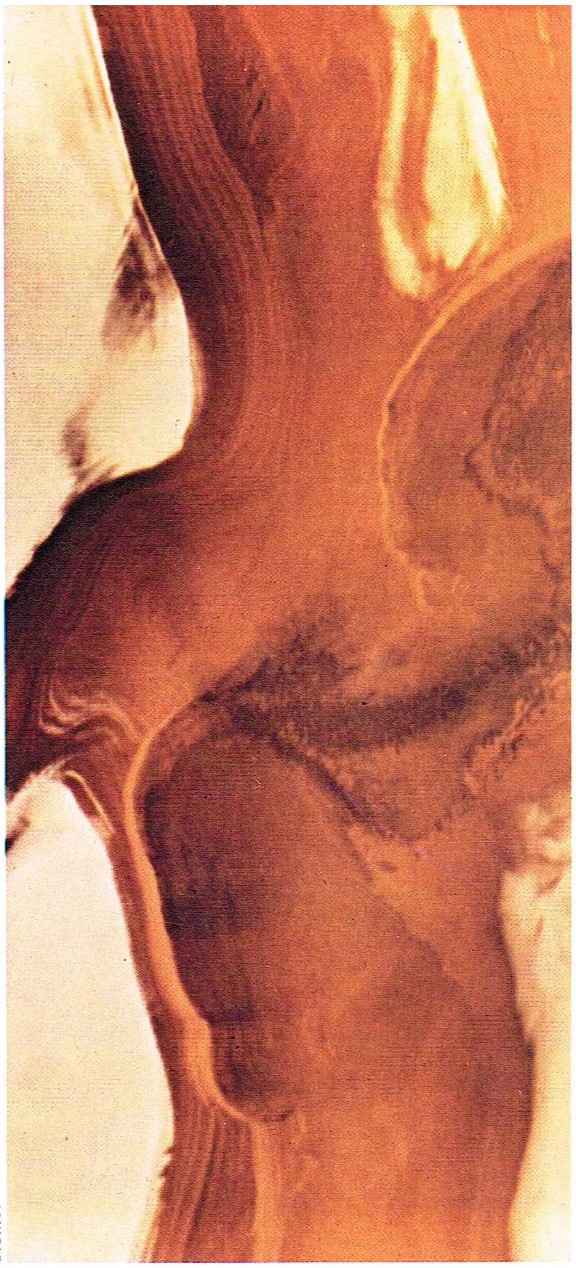

U.S.I.S.

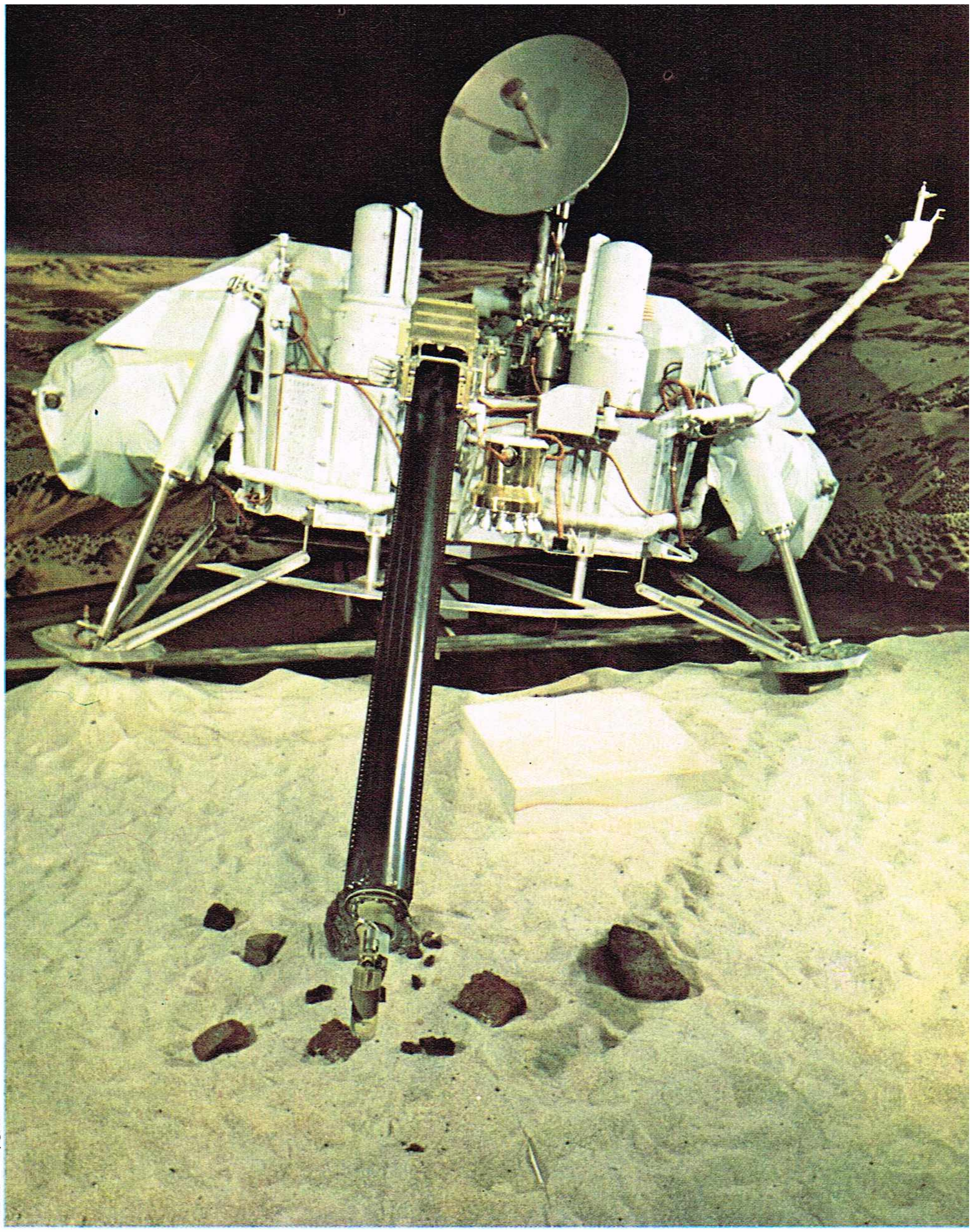

Tiziou - Sygma

▲ *A gauche, une éclaircie dans la couche d'oxyde de carbone qui recouvre le pôle Nord de Mars, laisse apercevoir un paysage givré qui révèle la présence d'eau sur cette planète. Cette photographie, prise par* **Viking Orbiter II**, *recouvre environ 30 km sur 60 km. A droite,* **Viking** *sur Mars, 1976.*

Les expériences biologiques ont décelé un dégagement de gaz carbonique; or les micro-organismes vivants libèrent un isotope radio-actif du gaz carbonique à partir d'un milieu de culture marqué isotopiquement au préalable; ce pourrait donc être la preuve de l'existence d'êtres vivants microscopiques. Malheureusement, l'expérience de chromatographie n'a rien décelé, bien que, théoriquement, elle soit assez fine pour découvrir une molécule organique parmi des milliards d'autres.

(La chromatographie est une méthode d'analyse chimique fondée sur l'adsorption des fluides par les solides. Les échantillons finement divisés, afin que la surface de contact soit maximale, sont envoyés à travers une matière poreuse par un courant liquide ou gazeux. La traversée de cette barrière se fait à des vitesses inégales, ce qui permet de noter au passage les différents constituants. Les enregistrements sont alors transmis à la Terre où ils sont identifiés grâce à l'étalonnage préalable de l'instrument.)

Rappelons que *Mariner VI* et *VII*, en juillet et août 1969, ont formellement reconnu que l'atmosphère de Mars était surtout composée de gaz carbonique, avec des traces d'oxyde de carbone et d'eau. Des expériences dont les témoignages sont fondés sur l'apparition de gaz carbonique, même sous la forme d'isotope radio-actif, seraient plus convaincantes dans un milieu dépourvu de gaz carbonique.

Cependant, des résultats négatifs ne prouvent pas forcément l'inexistence de la vie sur Mars. Il faut garder présent à l'esprit que les méthodes employées supposent, *a priori*, que toute forme de vie qu'on recherche doit se comporter à peu près comme elle le ferait sur Terre. Il est bien naturel, certes, de vouloir suivre des voies déjà défrichées, puisque aussi bien l'on ignore quels sont les milieux de culture qu'il faudrait mettre au point, pour des créatures dont les besoins alimentaires sont inconnus !

Carl Sagan avance que, peut-être, l'action des rayons ultraviolets sur Mars n'y a permis que des formes de vie dont l'aspect est imprévisible. On sait que la faible vitesse de libération de Mars qui est de 5 km/s (contre 11,2 pour la Terre) a permis à la plupart des molécules légères de s'évader dans l'espace. L'oxygène et l'hydrogène se trouvent en faibles quantités dans la partie supérieure de l'atmosphère de Mars, dont l'ensemble est surtout constitué par du gaz carbonique. Or, sur Terre, l'oxygène a été produit par les végétaux chlorophylliens ; c'est de ce gaz qu'est née la couche d'ozone qui arrête les rayonnements ultraviolets. On voit donc que nos méthodes de recherche de toute trace de vie sont fondées sur des phénomènes concernant des êtres vivant dans une atmosphère composée de 4/5 d'azote pour 1/5 d'oxygène, avec de faibles quantités de gaz carbonique, de vapeur d'eau et d'argon, le tout sous la protection d'une haute couche d'ozone. Comment transposer ces méthodes à d'éventuelles créatures vivantes qui seraient dans une atmosphère infiniment plus ténue de gaz carbonique, avec traces d'oxyde de carbone et d'eau, l'ensemble étant cette fois sous l'action directe de l'ultraviolet ?

Depuis longtemps, quelques chercheurs ont simulé en laboratoire les conditions physiques régnant à la surface de Mars. Des organismes vivants ont été introduits dans des récipients stérilisés contenant de la terre, du sable et de la limonite, récipients dans lesquels on a créé une atmosphère analogue à celle qui existe sur Mars, et simulé artificiellement les variations de température de la planète. Les plantes et les animaux ont péri, mais plusieurs variétés de bactéries ont survécu et se sont multipliées.

Il est donc raisonnable de diriger vers Mars les premières recherches de vie extra-terrestre, en remarquant d'ailleurs

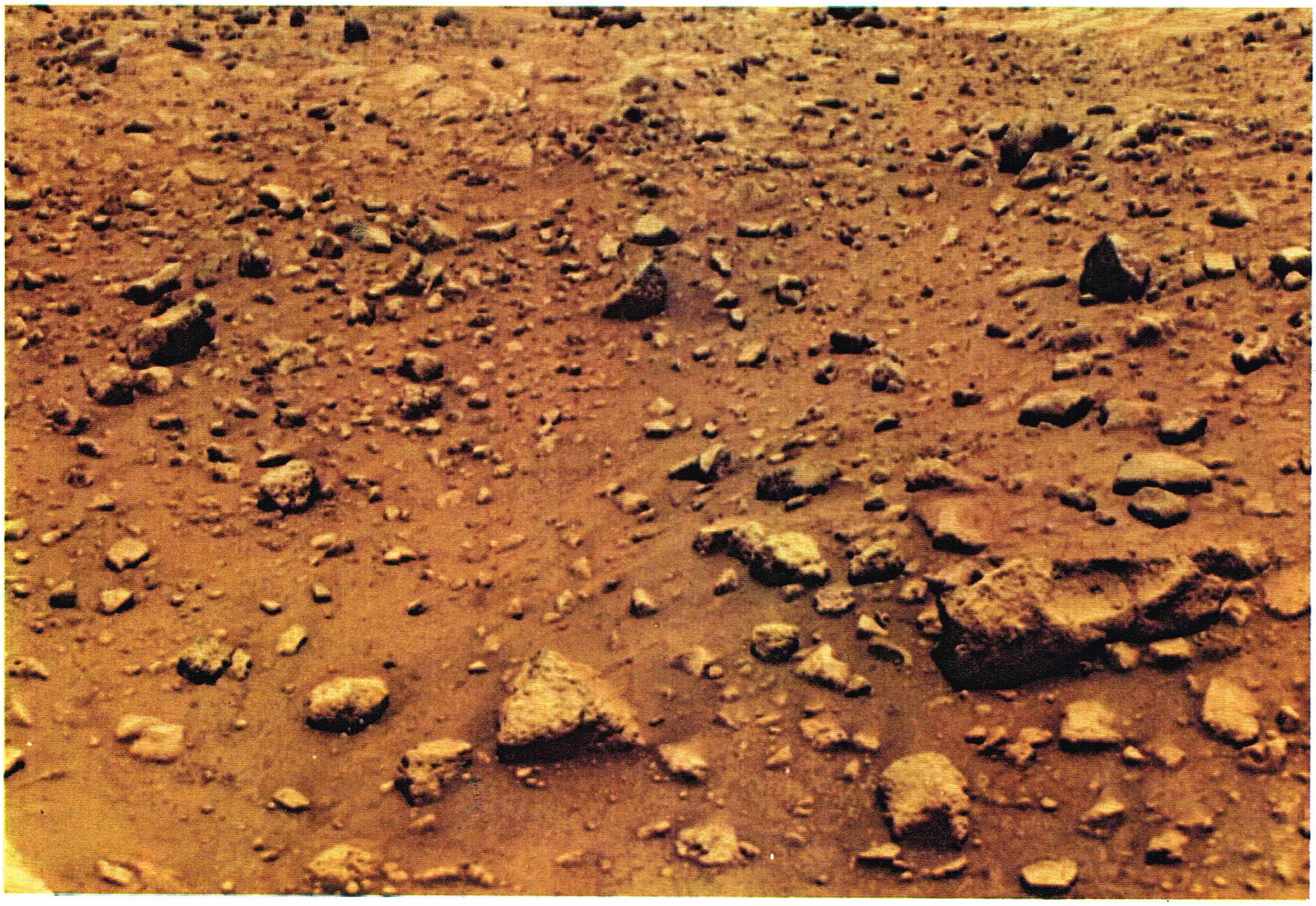

J. Novak - TOP

▲ *Le sol martien : il est rougeâtre, avec de nombreux cailloux dont l'apparence permet de penser qu'ils sont d'origine volcanique.*

que, bien qu'ils s'y trouvent dans d'énormes disproportions, certains éléments sont communs à l'une et l'autre atmosphère : l'eau, le gaz carbonique, la pression. Quant à l'action de l'ultraviolet, elle n'est pas rédhibitoire, des formes de vie terrestres lui ont échappé.

Il faut remarquer enfin que, sur l'échelle des températures moyennes : Vénus (+ 400 °C), Terre (+ 14 °C), Mars (+ 10 °C à — 70 °C), Jupiter (— 130 °C), Saturne (— 160 °C), Uranus (— 190 °C), Neptune — 210 °C), et Pluton (— 220 °C) ; Mars est la seule planète qui, variant de + 10 °C à — 70 °C (*Mariner VI* a mesuré à l'équateur + 24 °C à midi et — 73 °C la nuit), ait une zone commune avec la Terre.

On voit donc que, si la marge d'espoir est faible, elle n'en existe pas moins sur Mars, et sur Mars en priorité. (Depuis les expériences *Apollo*, la Lune est considérée comme un monde presque certainement sans vie. Son atmosphère est proche du vide absolu.) D'ailleurs, les changements de teintes périodiques de Mars continuent d'intriguer les savants. Ils n'en ont encore donné aucune explication plausible. *Viking I*, en nous révélant son extraordinaire voisinage de plaine rouge semée de cailloux, n'a malheureusement pas dévoilé la présence de mousses ou de lichens. Sont-ils ailleurs ?

Si l'exploration demeure dans une impasse, ce sera peut-être pour n'avoir pas cherché au bon endroit. Des mesures polarimétriques ont en effet donné des spectres assez voisins de celui de la limonite pour penser que la présence de cet oxyde de fer hydraté prouverait qu'à un moment de son existence, Mars a connu une atmosphère humide et oxydante. Mais on est loin de pouvoir estimer comme certaines des mesures polarimétriques si lointaines.

Il n'est arrivé que trop souvent, en astronomie, de voir s'écrouler, avec l'amélioration des observations dues au perfectionnement des instruments, des hypothèses nées du désir de l'observateur de voir à tout prix, et sans doute de bonne foi, ce qu'il espère avoir découvert. Il n'est que de se rappeler à ce sujet la fameuse histoire des « canali » de Schiaparelli, si passionnément reconnus et, si l'on peut dire, embellis par Percival Lowell !

Le meilleur moyen, certes, est d'y aller voir. C'est ce qu'ont fait les *Viking*, sans grand succès jusqu'à maintenant. Les Américains, à la conférence de Grenoble, n'ont pas caché qu'ils comptent, d'ici à deux ans, envoyer sur Mars un *Viking* monté sur roulettes. Capable de se promener sur de grandes distances, il multiplierait par un énorme facteur les chances de déceler la vie sur la planète rouge, si elle y existe. Pasadena envisage de lancer plus tard un engin capable de revenir sur Terre en rapportant des échantillons du sol martien. On ne caresse le projet d'y envoyer des astronautes que de façon très évasive. L'astronautique n'est pas encore mûre pour les voyages habités de longue durée. Y arrivera-t-elle un jour ? Faudra-t-il payer à ce prix, car il sera très lourd, la découverte de la vie extra-terrestre ? Et qu'est-ce, au fait, que la vie telle que nous la comprenons ?

Cette vie, que l'on recherche ailleurs, comment se caractérise-t-elle ? L'être vivant se distingue de l'objet inerte par son aptitude à se nourrir, à croître, à se reproduire, sans compter qu'il doit réagir en fonction de son environnement. Sa nourriture assure son énergie et remplace ses atomes usés par des atomes neufs. Si les créatures évoluées sont dotées d'organes des sens, ceux-ci ne constituent pas une condition *sine qua non* de la vie, mais semblent indispensables au développement de l'intelligence. Les créatures vivantes donnent naissance à des copies d'elles-mêmes, les modifications de structure tendent à se perpétuer.

L'environnement opère la sélection des formes les mieux adaptées au milieu ambiant. Les êtres vivants sont capables de réactions afin de résister aux perturbations. S'ils ne peuvent le faire, ils meurent et se désintègrent. La faculté d'adaptation, l'équilibre du métabolisme sont

des caractéristiques fondamentales de l'être vivant. L'étude biochimique des organismes montre une extrême complication qui conduit à une immense diversité des espèces.

Comment la vie a-t-elle pris naissance sur Terre? La théorie de la panspermie postule que la vie est arrivée sur la Terre sous forme de germes venus d'autres régions de l'univers, grâce à la pression de radiation de la lumière. S'il en était ainsi, on ne ferait que repousser le problème de l'origine de la vie, il demeurerait entier. On préfère considérer que la vie est apparue de façon spontanée. Sa naissance provient-elle de réactions chimiques ordinaires, est-elle inéluctable? Tout le monde n'est pas d'accord sur ce point. Certains savants pensent que l'apparition de la vie n'est que fort improbable, qu'elle demande pour naître que soient réunies des conditions précises, et cela pendant suffisamment longtemps.

Il n'est pas possible d'exclure que l'apparition de la vie soit un phénomène surnaturel. On dépasse alors largement le cadre scientifique. De très grands esprits refusent cette intrusion de la métaphysique. Mais ils omettent d'expliquer que si la vie est le produit de réactions chimiques ordinaires, elles-mêmes proviennent de la mise en présence d'un certain nombre de substances, certes dénuées de vie, mais provenant d'une création. Laquelle? Comment les composés organiques initiaux se sont-ils formés? Comment ont-ils accru leur complexité jusqu'à donner la vie?

Après la célèbre expérience de Stanley Miller, d'autres savants ont montré que de nombreux corps, dans les éclairs et la lumière ultraviolette qui environnaient la Terre aux premiers jours, ont pu produire, grâce à cet apport d'énergie, la synthèse de composés organiques compliqués.

Les premières créatures vivantes qui apparurent il y a environ trois milliards et demi d'années, les éobiotes (« organismes de l'aurore ») anaérobies, se sont procuré l'énergie nécessaire à leur métabolisme en décomposant les molécules organiques. Une hypothèse séduisante est qu'ils ont dû naître dans des mares peu profondes plutôt que dans les océans, car l'évaporation y favorisait la concentration des composés organiques, donc les réactions chimiques entre eux.

Comment l'évolution a-t-elle commencé? On en est réduit, bien sûr, aux spéculations.

C'est sûrement d'une chaîne nucléique, avec un code proche du code actuel, qu'est née la faculté de reproduction.

Les éobiotes se nourrissaient initialement des acides aminés et des nucléotides déjà formés. Puis, avec l'appauvrissement du milieu, ils ont trouvé les mécanismes nécessaires pour en fabriquer, à partir des molécules organiques. Ainsi est née la sélection naturelle, les plus habiles se sont mieux nourris, ils ont pris la tête du peloton : début de l'évolution. Puis les éléments nutritifs originels se sont raréfiés.

Alors, avec l'apparition des cyanophycées, petites algues vertes, le mécanisme de la photosynthèse qu'elles ont mis au point leur a donné les moyens de se nourrir de l'énergie du Soleil. La photosynthèse produit de l'oxygène : il envahira peu à peu l'atmosphère terrestre. Désormais, les aliments préexistants sont presque épuisés, la lumière solaire devient la source de toute énergie.

A mesure que le méthane et l'ammoniac laissaient place à l'oxygène, apparaissaient les différents animaux qui se nourrissent des plantes. Les premiers animaux remontent à près d'un milliard d'années. Les plantes et animaux vraiment terrestres sont apparus il y a environ 300 millions d'années. Quant à l'humanité, son histoire tient en quelques millions d'années!

La vie est-elle un phénomène répandu dans tout l'univers? La découvrir sur Mars eût été un immense pas franchi dans notre connaissance de l'univers. La Lune s'est révélée comme un monde mort, sans trace de vie aucune. On ne peut pas encore dire qu'il en est de même sur Mars, où l'exploration n'a pu atteindre que quelques mètres carrés du sol martien. Des *Viking* mobiles permettront-ils de découvrir la vie en inspectant de plus larges étendues? Si cet espoir est déçu, on ne voit guère où l'on pourrait découvrir des types de vie extra-terrestres dans le système solaire, le seul qui soit vraisemblablement à portée de regard de l'homme.

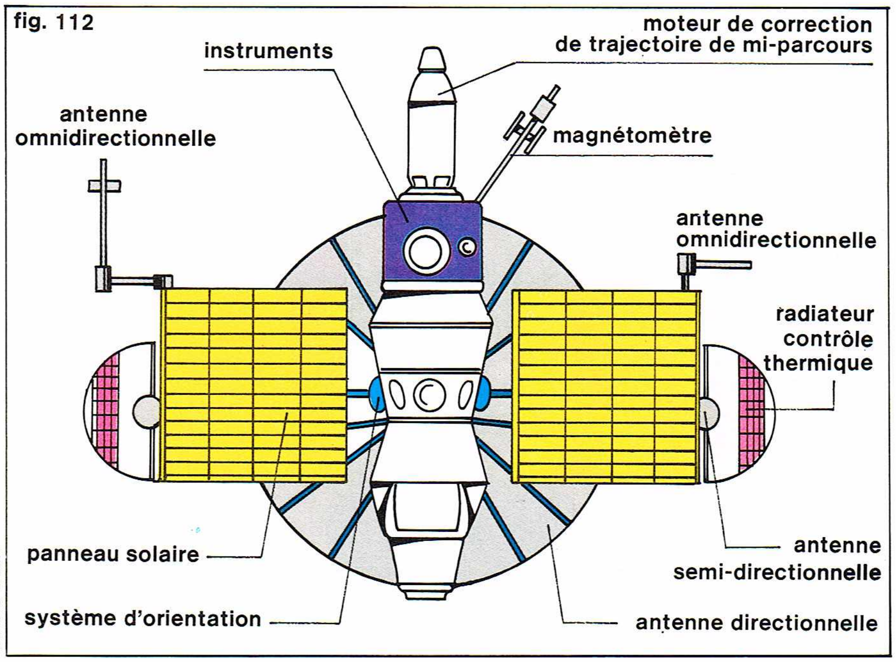

▲ *Figure 112 : schéma général des sondes* Mars.

Les sondes soviétiques Vénus et Mars

Les Soviétiques ont, plus logiquement que les Américains, baptisé leurs sondes d'après leurs planètes de destination. Comme elles sont à peu près aussi nombreuses dans les deux cas, nous examinerons d'abord les sondes vers Mars, ensuite celles destinées à Vénus. On se reportera au *tableau* VII, donné p. 294 pour retrouver la chronologie des lancements.

Les sondes soviétiques vers Mars

Mars I

La sonde *Mars I* fut lancée le 1[er] novembre 1962. La trajectoire initiale devait faire passer *Mars I* à 192 000 km de la planète qui, à ce moment, le 19 juin 1963, serait à 247 millions de kilomètres de la Terre. *Mars I* pesait 893,5 kg, mesurait 3,3 m de hauteur pour 1,10 m de diamètre. La sonde se composait de deux compartiments étanches où étaient maintenues une température entre 20 et 30 °C et une pression de 850 mm de mercure (*fig.* 112). L'équipement comprenait : caméra, spectrographe, magnétomètre, radiotélescope et compteurs pour l'enregistrement des météorites. *Mars I*, pendant cinq mois et au cours de soixante séances de liaison, collecta et transmit de très nombreux renseignements sur les conditions physiques régnant dans l'espace.

Le 2 mars 1963, la sonde était réorientée de façon à abaisser la distance de passage à 5 000 km environ. Après la correction, l'antenne directionnelle refusa de se pointer à nouveau vers la Terre. L'expérience prenait ainsi fin à cause d'un incident mécanique qui semblait mineur.

Zond II

Avant de lancer à nouveau des sondes *Mars*, les Soviétiques utilisèrent une sonde *Zond*, dont le but était d'étudier les équipements de navigation et de pallier les défaillances constatées sur *Mars I*.

Zond II, lancée le 30 novembre 1964 (2 jours après *Mariner IV*), devait causer également de graves mécomptes. Dès le départ, l'énergie électrique était moitié de celle prévue. La sonde passera bien, grâce à trois corrections, à 1 500 km de Mars, mais, muette, ne servira à rien.

Mars II et Mars III

Après l'échec de *Mars I* en 1964, les Russes portèrent leurs efforts sur des lancements vers Vénus (relatés plus loin).

Ce n'est qu'en 1971, profitant de conditions très favorables, qu'ils lancèrent coup sur coup *Mars II* et *Mars III*,

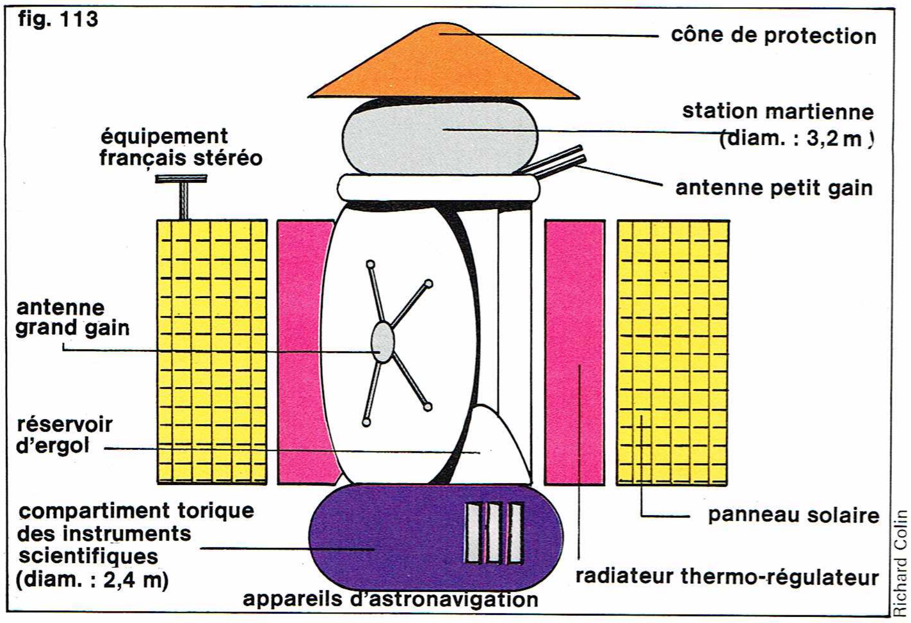

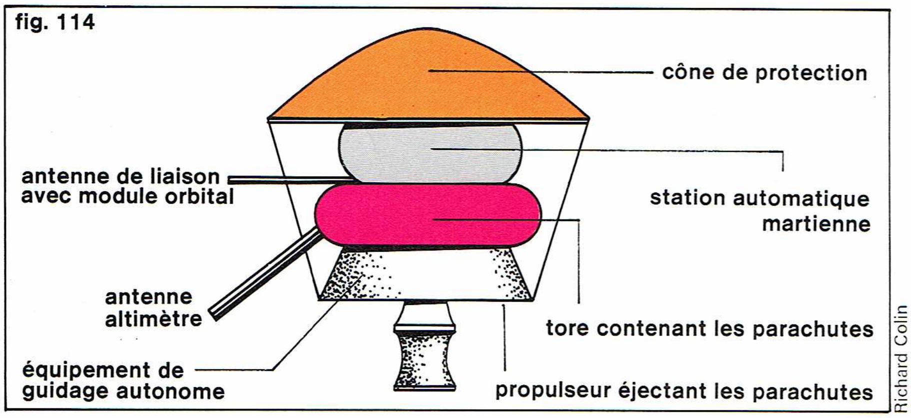

▲ *Figure 113 : schéma du module largable et du module orbital des sondes* Mars. *Figure 114 : module largable de* Mars II *et* III.

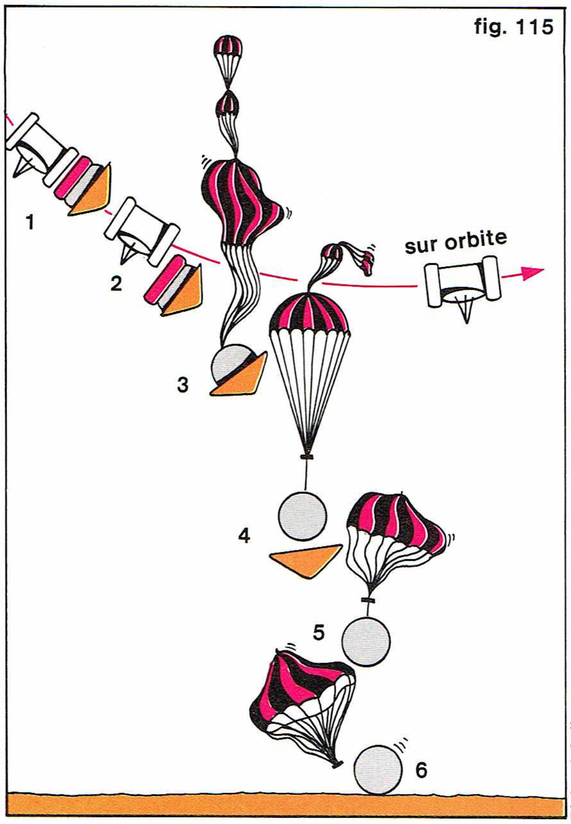

▶ *Figure 115 : manœuvre d'atterrissage de* Mars III.

les 19 et 28 mai. Les deux sondes étaient semblables, à la seule différence que *Mars III* emportait en outre un équipement français dit « Stéréo ».

Chaque sonde comprenait un module devant rester sur orbite et un module largable destiné à se poser sur le sol martien. Chacune des deux sondes pesait 4 650 kg.

Module orbital

Il comprend (*fig.* 113) :

— un compartiment contenant les appareillages optiques et électroniques, les systèmes de navigation solaire et astrale, les appareils scientifiques ;

— un compartiment moteur surmonté du module largable ;

— les appareils habituels : panneaux solaires au silicium, panneaux régulateurs, micropropulseurs d'attitude, antennes (dont celles destinées aux liaisons entre le module sur orbite et le module posé sur le sol).

Module largable

Il comprend (*fig.* 114) :

— la capsule contenant les instruments scientifiques destinés à mesurer la température et la pression au sol, et à déterminer les compositions chimique de l'atmosphère et physico-chimique du sol, ainsi que des appareils de prise de vues panoramiques ; un radiateur isotopique joue le rôle de réchauffeur ; l'alimentation électrique provient d'une batterie, chargée avant largage par les piles solaires du module orbital, ce qui laisse supposer que le module largable n'est pas destiné à fonctionner longtemps ;

— un chapeau conique destiné à assurer le freinage aérodynamique ;

— un tore contenant les parachutes ;

— trois moteurs.

Système de guidage

Les corrections de trajectoire sont effectuées par un moteur du module orbital (à turbopompe avec réallumage). Elles sont télécommandées de la Terre ou ordonnées par un calculateur de bord.

L'atterrissage de Mars III

Il a commencé le 2 décembre 1971 et a suivi les séquences suivantes (noter qu'il ne peut être télécommandé à partir de la Terre, car les manœuvres doivent être effectuées à des fractions de seconde près, et l'éloignement de la Terre demande plusieurs minutes pour la transmission des signaux) [*fig.* 115] :

1. Le module largable se sépare, 15 mn plus tard son moteur est allumé pour le placer sur une trajectoire de collision avec la planète.

2. Il est orienté pour que le cône de protection pénètre le premier dans l'atmosphère martienne (à ce moment, la vitesse est de 6 km/s).

3. Alors commence le freinage aérodynamique. Un accéléromètre déclenche l'allumage d'un petit propulseur à poudre chargé de tirer les parachutes de leur logement.

4. A la vitesse de 300 m/s, le cône de protection est éjecté. Le parachute principal s'ouvre.

5. L'antenne télémétrique commande à 30 m d'altitude l'allumage du moteur de freinage (moteur principal en position inverse).

6. Le parachute principal est éjecté pour éviter qu'il ne recouvre le module au sol. Des amortisseurs atténuent le choc à l'impact.

Les manœuvres

Mars II n'a pas pu éjecter son module largable, le tout est donc resté en orbite. *Mars III* a bien fonctionné, en ce qui concerne la séquence énumérée ci-dessus, mais la station ne fonctionnera que 20 s. Le poids considérable (5 t) des sondes laissait entrevoir un programme ambitieux. Le module orbital était prévu comme satellite de télécommunications chargé de retransmettre d'abord les renseignements du module largable (nous avons vu que c'était pour peu de temps), et ensuite de renseigner longtemps la Terre sur les caractéristiques ambiantes.

Mars II et *III*, comme *Mariner IX*, sont arrivés au-dessus de la planète rouge pendant qu'un vent de sable très violent, imprévisible, en voilait presque entièrement la surface. La poussière jaunâtre était soulevée jusqu'à 8 km d'altitude. Cependant, certaines hautes montagnes

émergeaient du nuage de sable. Elles donneront de très bons clichés.

Le module orbital de *Mars II* qui n'a pas pu se séparer du module largable et le module orbital de *Mars III* resté seul sur orbite compenseront les défaillances de l'observation au sol par une très riche moisson de renseignements pris sur orbite jusqu'en août 1972.

Mars III (*fig.* 116), qui passera 7 fois à son périgée de 4 000 km d'altitude, enverra pendant ces passages des informations à la cadence de un million de mesures par heure (pour des consommations de l'ordre du watt, ce qui donne une idée de l'extraordinaire réussite des Soviétiques, à cette époque, dans une discipline qui n'était pas leur fort auparavant). Les enseignements scientifiques seront considérables.

Au début, les poussières de l'ordre du µm soulevées par des vents allant de 200 à 500 km/h, qui sont causés par les considérables variations de température, couvraient la plus grande partie de la planète. Plus tard, les mesures de température ont fait apparaître en moyenne une différence allant de + 13 °C à 14 heures à — 93 °C à 19 h pour deux points séparés par 30 degrés de latitude. La température tombe très vite après le coucher du Soleil, ce qui signifie que la conductivité du sol est très faible (c'est celle de la poussière sèche).

La basse atmosphère de Mars est surtout faite de gaz carbonique. Vers 100 km, ce gaz décomposé par l'ultraviolet solaire donne de l'oxyde de carbone et de l'oxygène. Au-dessus de 400 km, il reste de l'oxygène et de l'hydrogène atomiques.

En absorbant le rayonnement ultraviolet, l'atmosphère supérieure se réchauffe. La température à 200 km d'altitude est de 300 °C environ.

La force d'attraction de Mars, bien que 3 fois inférieure à celle de la Terre, permet la formation d'une couronne d'hydrogène autour de la planète.

Mars IV à VII

En 1973, les Soviétiques lancent quatre sondes *Mars*. Les circonstances sont moins favorables qu'en 1971, la distance de la planète ne sera pas inférieure à 66 millions de kilomètres. Il s'ensuit que les sondes doivent emporter davantage de carburant, donc moins de charge utile.

Les sondes sont lancées en deux périodes :

- *Mars IV* et *Mars V*, à 4 jours d'intervalle, en juillet 1973;
- *Mars VI* et *Mars VII*, à 4 jours d'intervalle, en août 1973.

Les deux premières sondes sont seulement destinées à se mettre en orbite et à transmettre à la Terre, de cette orbite, les signaux que transmettront à partir du sol martien les deux modules largables provenant des deux dernières sondes. *Mars IV* et *Mars V*, en conséquence, ont reçu des équipements supplémentaires d'étude à la place des modules largables dont on les a allégés.

Mars IV passe à 2 200 km de la planète, manque sa mise sur orbite et continue son chemin dans le système solaire. En revanche, *Mars V* se place sur orbite 1 760/32 500, et va envoyer une ample moisson de renseignements.

Des vues prises à travers des filtres diversement colorés permettront de reconstituer des images en couleurs.

Les mesures d'humidité créent une certaine émotion dans le monde scientifique, car, à certains endroits, elles donnent 60 µm d'eau précipitable.

Des instruments divers étudient l'atmosphère martienne, décèlent des traces d'ozone, mesurent la température du sous-sol à 50 cm de profondeur, donnent des idées de la composition chimique du sol par étude du rayonnement gamma, étudient les particules de faible énergie du vent solaire. Un magnétomètre mesure un champ 10 fois plus fort que le champ interplanétaire.

Mars VI fonctionne impeccablement, mais, comme les signaux de son module largable bien arrivé au sol étaient prévus pour passer par *Mars IV*, désormais perdu, rien ne sera transmis vers la Terre.

Mars V, qui pourrait servir de relais, vient de tomber en panne. Quant à la partie orbitale de *Mars VI*, elle est en route vers le système solaire.

Mars VII largue bien son module destiné au sol, mais le moteur de freinage de ce dernier ne s'allume pas, le module se perd donc au large par excès de vitesse. Le

fig. 116

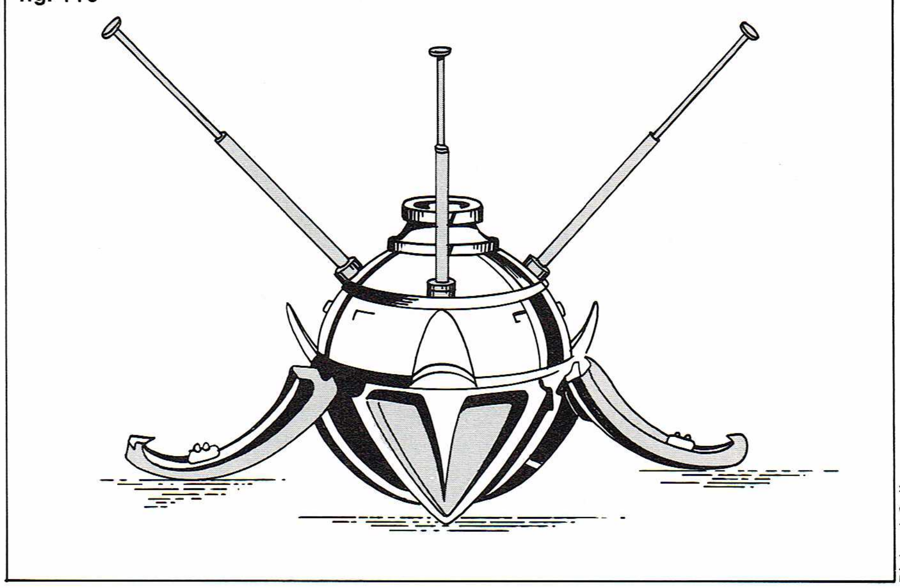

Richard Colin

▲ *Figure 116 : schéma du module largable de* **Mars III** *tel qu'il se présente en action sur le sol de la planète.*

▼ **Mars III.**

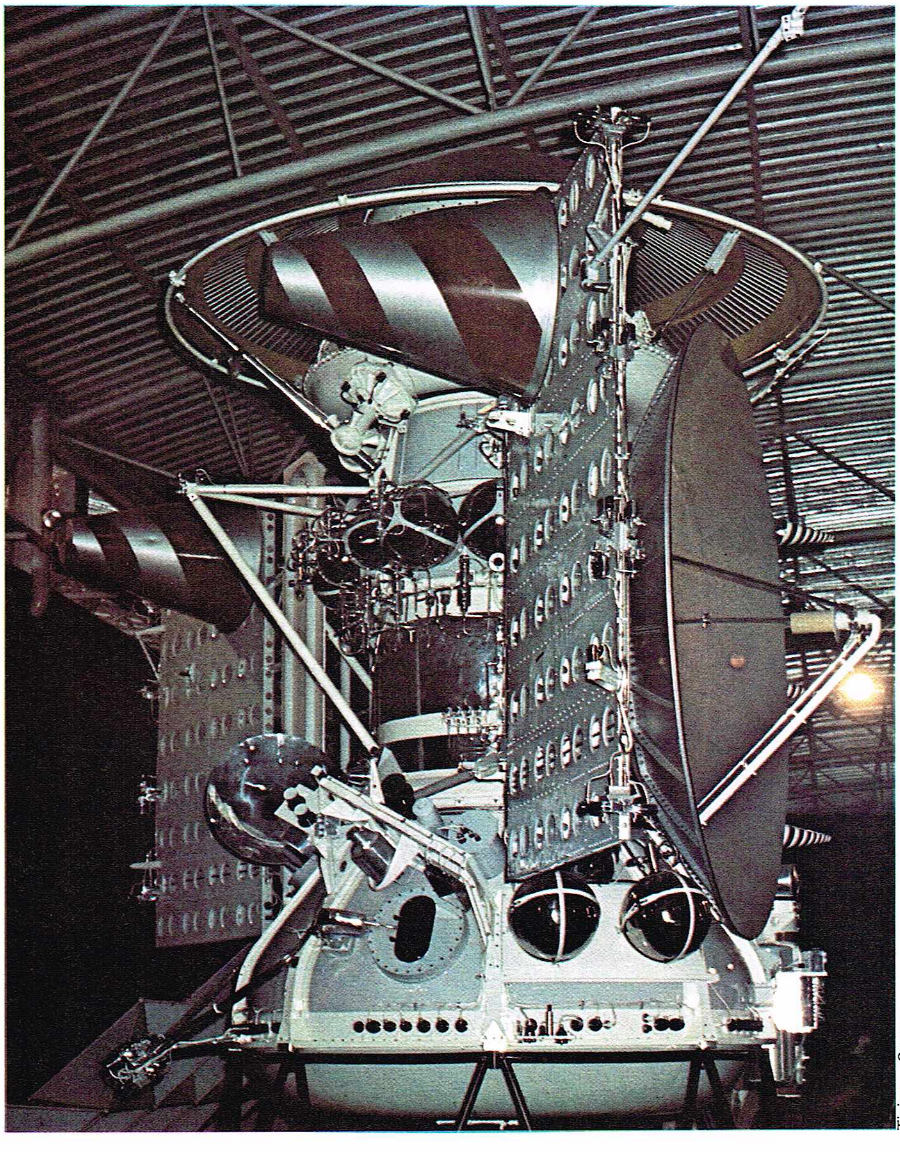

Tiziou - Sygma

fig. 117

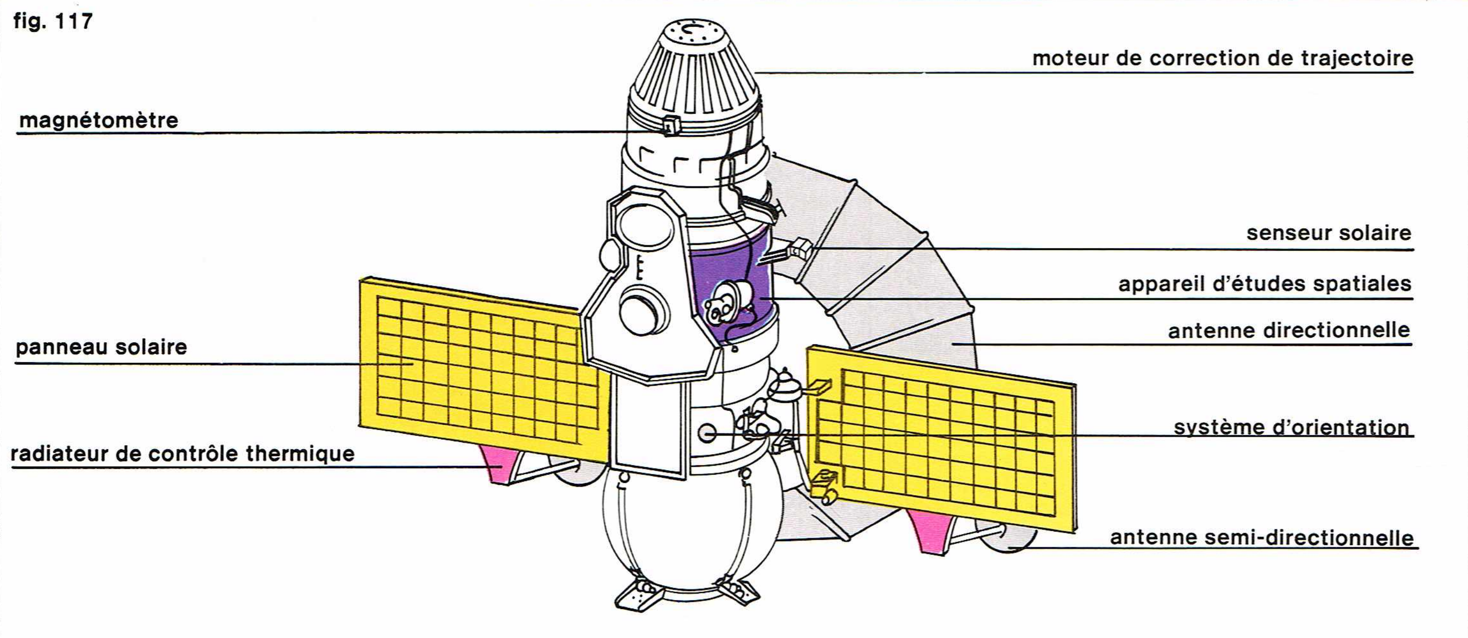

▲ *Figure 117 : sonde Vénus.*

compartiment orbital se place sur orbite solaire, d'où il transmettra pendant un certain temps des renseignements sur l'espace cosmique.

On peut dire que cette grande expérience, pourvue de quatre sondes, est un échec presque total.

Les sondes Vénus soviétiques

Le 4 février 1961, les 6 483 kg de *Spoutnik VII* battaient tous les records de masse sur orbite terrestre. Cependant, les Soviétiques restèrent discrets sur ce lancement, et l'on pense que ce satellite était porteur d'une sonde vénusienne qui n'aurait pas pu s'élancer ensuite dans l'espace.

Huit jours plus tard, *Spoutnik VIII*, de poids identique, est mis sur une orbite terrestre, et de ce satellite s'élancera *Vénus I*, sonde vénusienne qui inaugure, pour *la première fois dans l'histoire*, un lancement spatial en deux temps. La manœuvre étant réalisée avec une extrême précision, il suffira d'une correction à mi-parcours pour faire passer la sonde à 100 000 km de Vénus.

Vénus I

Cet engin était constitué d'un cylindre ayant environ 2 m de long pour 1 m de diamètre, un poids de 643,5 kg. Il était divisé en deux compartiments hermétiquement clos, dont l'un contenait tous les équipements nécessaires au fonctionnement de la sonde et l'autre les instruments destinés à fournir des renseignements sur la planète Vénus.

Deux panneaux solaires rechargeaient des batteries chimiques, et trois antennes assuraient les communications.

De faibles signaux purent être captés par Jodrell Bank le 12 juin 1961, mais rien ne permit d'affirmer qu'ils étaient en provenance de *Vénus I*.

Zond I

Les Soviétiques attendirent trois ans pour renouveler leur tentative avec *Zond I*, au début d'avril 1964. Cette sonde était bien dirigée vers Vénus, et elle put établir plusieurs liaisons radio. Une correction de trajectoire était effectuée le 14 mai, puis ce fut le silence.

Vénus II et III

C'est à la faveur de la fenêtre vénusienne de 1965 que deux stations identiques furent lancées les 12 et 16 novembre : *Vénus II* et *III*. Leurs missions étaient différentes. La première devait passer au large de Vénus, procéder à des mesures et envoyer des photographies. *Vénus III*, au contraire, était destinée à se poser sur Vénus.

Vénus II suivit une trajectoire correcte mais, arrivée sur les lieux, resta muette.

Vénus III largua comme prévu une petite sphère de 0,9 m de diamètre dans l'atmosphère vénusienne. Cette dernière atteignit la surface de Vénus le 1er mars 1966, mais n'émit aucun signal.

Vénus IV

Le 12 juin 1967, la sonde *Vénus IV*, pesant 1 100 kg, prit la route de l'espace.

Elle se composait d'un compartiment orbital et d'une capsule destinée à se poser à la surface de la planète. Le compartiment orbital contenait le moteur de correction de trajectoire, les senseurs pour instruments et contrôle d'attitude, des antennes, des piles solaires et des moteurs verniers.

L'orientation de la sonde par rapport à la Terre, au Soleil et à l'étoile Canopus était effectuée par contrôle d'attitude.

La capsule se sépara de la sonde le 18 octobre 1967. Sphère d'1 m environ de diamètre, pesant 382,5 kg, elle contenait les instruments de mesure et le parachute de descente.

Après une décélération de 300 *g*, permise par un revêtement ablatif, la capsule éjecta son parachute quand la vitesse fut tombée à environ 1 000 km/h. Les informations sur la température et la pression commencèrent alors à être relevées à 25 km du sol vénusien. Les signaux donnèrent des indications allant de 50 à 280 °C, pour la température, de 1 à 15 atmosphères pour la pression. L'analyse révéla que l'atmosphère était composée surtout de gaz carbonique. Puis la sonde devint muette, sans qu'on pût affirmer qu'elle était parvenue à la surface de Vénus quand passa son dernier message.

Vénus V et VI

Vénus V et *VI*, lancées respectivement les 5 et 6 janvier 1969, atteignirent leur but les 16 et 17 mai. Pour tenir compte des enseignements de *Vénus IV*, ces deux sondes portaient plusieurs améliorations : possibilité de supporter une décélération de 450 *g*, isolation poussée, diminution de la surface des parachutes qui, placés dans une atmosphère très dense, ralentissaient trop les sondes.

Mais, cette fois encore, on ne put avoir de certitude sur l'altitude à laquelle les sondes avaient émis leur dernier message. Cependant, les observations ont été poussées plus loin. Les savants s'accordent pour estimer que la pression au sol est de 100 atmosphères, et la température voisine de 500 °C.

Vénus VII

Lancée le 17 août 1970, *Vénus VII* s'est posée sur Vénus le 15 décembre. Les signaux ont été captés pendant 23 mn après l'arrivée sur la planète ; ils confirmaient les données précédentes concernant la température

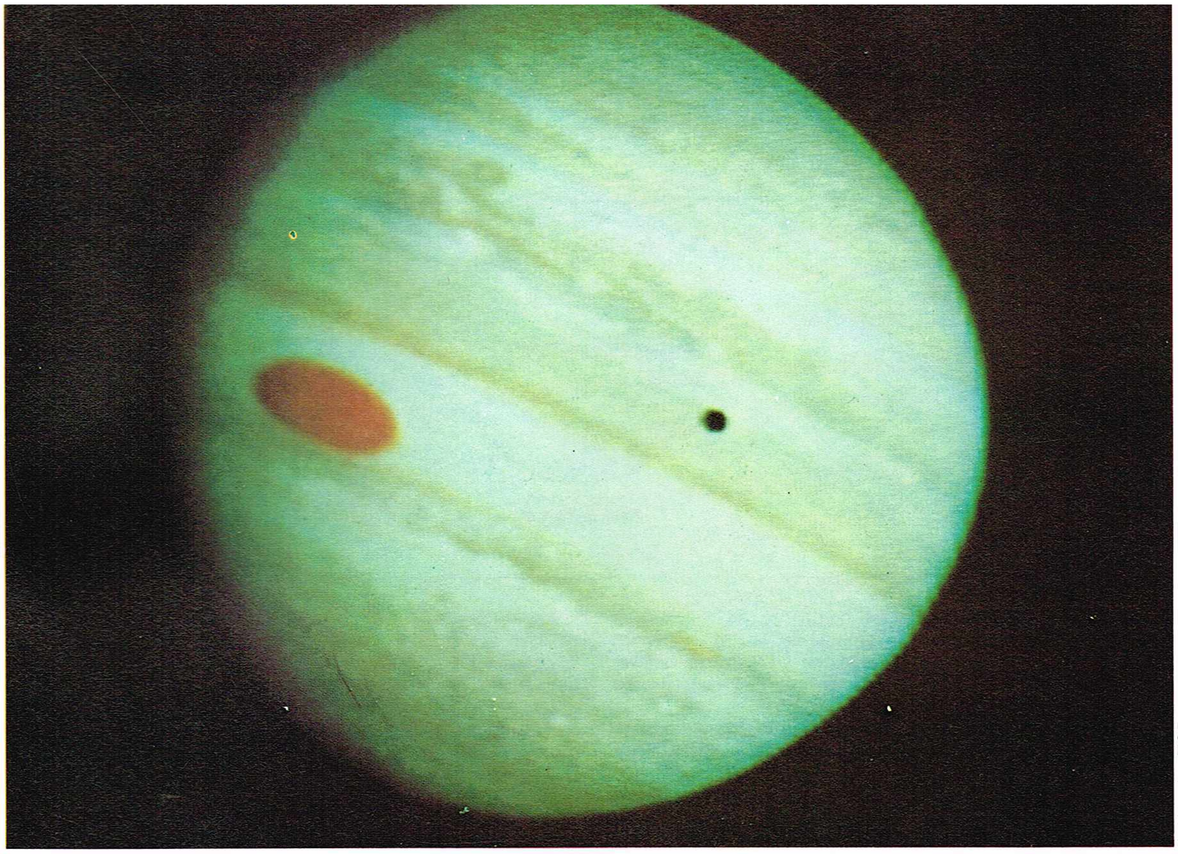

◀ ***Photographie de Jupiter prise par* Pioneer X, *qui était alors à 2 500 000 km de la planète géante. On distingue la tache rouge de Jupiter, l'ombre du satellite Io et les trous caractéristiques des nuages.***

J. Novak - TOP

(475 °C), mais ce furent les seules informations transmises.

Vénus VIII

Lancée le 27 mars 1972, elle est arrivée en juillet sur la planète. Elle a donc vu un grand succès venir couronner les efforts incessants que les Soviétiques font depuis 1961 pour mieux connaître Vénus. Depuis cette date, ils ont en effet envoyé au moins dix sondes vers cette planète (*fig.* 117).

Vénus VIII a transmis des signaux pendant 50 mn après son arrivée sur le sol vénusien. Tous les instruments fonctionnaient et, dans ce laps de temps, envoyèrent de multiples renseignements.

Quatre manomètres opérant dans des gammes différentes étaient utilisables. La pression au sol fut trouvée à 93 ± 1,5 atmosphères.

La composition chimique de l'atmosphère était analysée par des systèmes spéciaux : des capsules où l'on a poussé le vide s'ouvrent à des altitudes déterminées, absorbent les gaz ambiants et se referment automatiquement. Des réactifs permettent de reconnaître les gaz captés et de mesurer la quantité de chacun d'eux. Ceci pour l'oxygène, le gaz carbonique, l'azote et la vapeur d'eau. Les quantités moyennes des résultats obtenus par *Vénus IV*, *Vénus VIII* et *Mariner V* sont : gaz carbonique : plus de 93 %; azote et gaz rares : moins de 2 %; oxygène : moins de 0,1 %.

La quantité de vapeur d'eau varie avec l'altitude, elle est de 6 mg/l à 46 km et 11 mg/l au niveau de condensation qui se trouve à 55 km environ.

En outre, un analyseur spécial cherchait les traces d'ammoniac. Les mesures ont donné, entre 30 et 45 km d'altitude, de 0,1 à 0,01 % de gaz ammoniac.

Grâce à des mesures du flux de lumière, *Vénus VIII* a montré que l'éclairement au sol provenant du Soleil serait 15 fois moins intense qu'il ne l'est sur la Terre.

Le vent a été mesuré par interprétation des glissements de fréquence anormaux des mesures d'effet Doppler. Le jour de la descente de *Vénus VIII*, la vitesse du vent était de 360 km/h en haute atmosphère, 250 km/h à 50 km d'altitude, 140 km/h à 40 km d'altitude; la vitesse tendait vers 0 à partir de 10 km d'altitude. En surface, l'atmosphère, lourde, est stagnante.

L'étude du rayonnement gamma dû aux éléments radio-actifs du sol a été faite par un bloc de détection associé à un analyseur calibré sur Terre. Comme il fallait une dizaine de minutes pour avoir un spectre d'émission, on a pu recevoir deux analyses qui montrent la présence de potassium, d'uranium et de thorium dans des proportions voisines de celles qu'on rencontre dans les granites terrestres. Toutefois, la densité des roches superficielles est sur Vénus presque moitié moindre que sur la Terre.

Les sondes Pioneer vers Jupiter

Jupiter est à une distance de la Terre variant entre 590 et 965 millions de kilomètres. Deux sondes, *Pioneer X* et *XI* (259 kg), envoyées par les Américains, ont recueilli beaucoup de renseignements sur cette planète jusqu'alors presque entièrement inconnue. Elles ont été lancées en décembre 1973 et décembre 1974.

Résultats de la double exploration

Jupiter a un diamètre égal à 11,2 diamètres de la Terre, 138 000 km en moyenne. Sa masse égale 318 fois celle de la Terre (2,5 fois la somme des masses de toutes les autres planètes solaires). Sa densité est faible : 1,31.

Ce que l'on voit de Jupiter, ce sont des couches nuageuses qui tournent très vite et à des vitesses différentes suivant la latitude. La période va de 9 h 50,5 mn à 9 h 55,5 mn, ce qui donne au niveau de l'équateur une vitesse de 12,66 km/s (supérieure par conséquent à la vitesse de libération terrestre).

Il semble que Jupiter soit sans sol. A cet égard, *Pioneer*, qui n'a pas détecté de noyau, confirme les indications déjà fournies par les radars. Jupiter est une étoile manquée, sa masse étant trop faible (du point de vue stellaire) pour déclencher des réactions thermonucléaires.

La température mesurée par *Pioneer X* est de 2 000 °C à 1 000 km au-dessous du sommet des nuages, et de 11 000 °C à 25 000 km. A cette dernière profondeur, l'hydrogène doit passer à l'état métallique sous une pression de 3 millions d'atmosphères. La température au centre est de l'ordre de 30 000 °C.

Le photomètre ultraviolet a mesuré dans l'atmosphère jovienne 82 % d'hydrogène, 17 % d'hélium, 1 % d'autres éléments. Les astronomes y voient la composition de la nébuleuse dont est né le système solaire.

Les bandes de circulation nuageuse circulent en sens opposé dans les deux hémisphères et provoquent de fantastiques tourbillons dans la zone de contact.

La fameuse tache rouge qui s'étend sur 40 000 km en longitude et 13 000 km en latitude est essentiellement mobile. Elle se déplace lentement dans un sens, puis dans l'autre, de façon irrégulière, puisqu'elle met tantôt 10 ans, tantôt le double pour faire le tour de Jupiter. Sa couleur varie également, allant du brun au rouge, à l'orange, au rose. *Pioneer* a permis de calculer que la tache rouge a la même densité que les régions voisines et qu'elle s'élève de 8 km au-dessus de son environnement.

Jupiter est une radiosource intense, avec deux émissions, l'une décimétrique, l'autre décamétrique, ayant l'une et l'autre des explosions que l'on qualifie d'orages; les astronomes y trouvaient la preuve d'un champ magné-

fig. 118

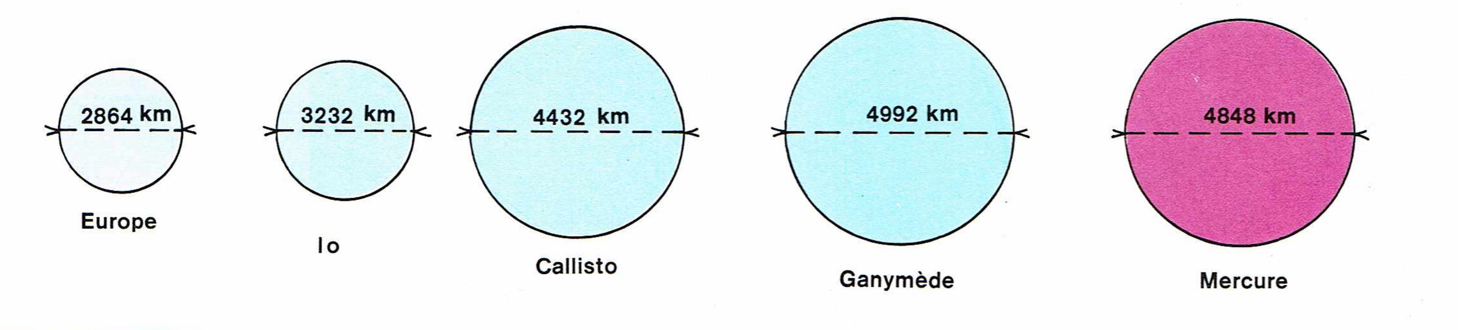

Richard Colin

▲ ***Figure 118 :* diamètres respectifs des plus gros satellites de Jupiter comparés à celui de Mercure.**

▼ ***Conception artistique de Jupiter et de ses quatre satellites, à partir de la gauche : Callisto, Europe, Io et Ganymède.***

tique intense et de puissantes ceintures de radiations. Ces hypothèses ont été confirmées de façon éclatante par *Pioneer X*. La sonde a mesuré, au niveau de l'astre, une intensité de 4 gauss (représentant 8 fois celle du champ terrestre).

Les ceintures de radiations ont presque saturé les instruments de la sonde, qui a reçu une dose équivalente à 100 fois la dose mortelle pour l'homme.

Des particules de hautes énergies ont été décelées à 290 millions de kilomètres de Jupiter. Il est probable qu'elles atteignent la Terre.

On sait que Jupiter a douze satellites. Les plus gros, Callisto, Ganymède, sont des lunes aussi grosses que les planètes. Ganymède a un diamètre supérieur, et Callisto presque égal à celui de Mercure. Io et Europe ont 3 232 et 2 864 km de diamètre. Tous quatre réfléchissent mieux la lumière que la Lune.

Callisto est à 1,6 million de kilomètres de Jupiter.

Les trois autres décrivent des orbites allant de 420 000 à 1 million de kilomètres. La *figure* 118 montre les grosseurs comparées des quatre plus grosses lunes de Jupiter avec Mercure.

Ganymède est constitué de gaz solidifiés, sans noyau central. Sa densité est 1,94. *Pioneer X* en a donné une photographie montrant des cratères météoritiques. Callisto a une densité encore moindre.

Io : la déviation de la trajectoire de *Pioneer X* a permis de calculer qu'elle a une densité de 3,50 indiquant peut-être des roches et un noyau métallique. Atmosphère très ténue. Pression au sol 0,05 millibar. Température moyenne de la surface : — 145 °C en hémisphère éclairé. Io tourne toujours la même face vers Jupiter. Quand elle passe dans son ombre, la température tombe à — 250 °C. *Io est le corps le plus réfléchissant du système solaire*. On l'explique par la chute d'une neige de méthane quand elle passe dans l'ombre. Io est dans un cocon d'hydrogène.

Europe. D'une densité moyenne de 3,1, elle fait penser à une structure rocheuse. Les analyses spectrales ont montré qu'Europe est recouverte de *neige et de givre*.

Les autres satellites se divisent en deux groupes gravitant à des distances très différentes, capturés sans doute l'un à l'aphélie de Jupiter, l'autre à son perihélie. Ce sont certainement des astéroïdes.

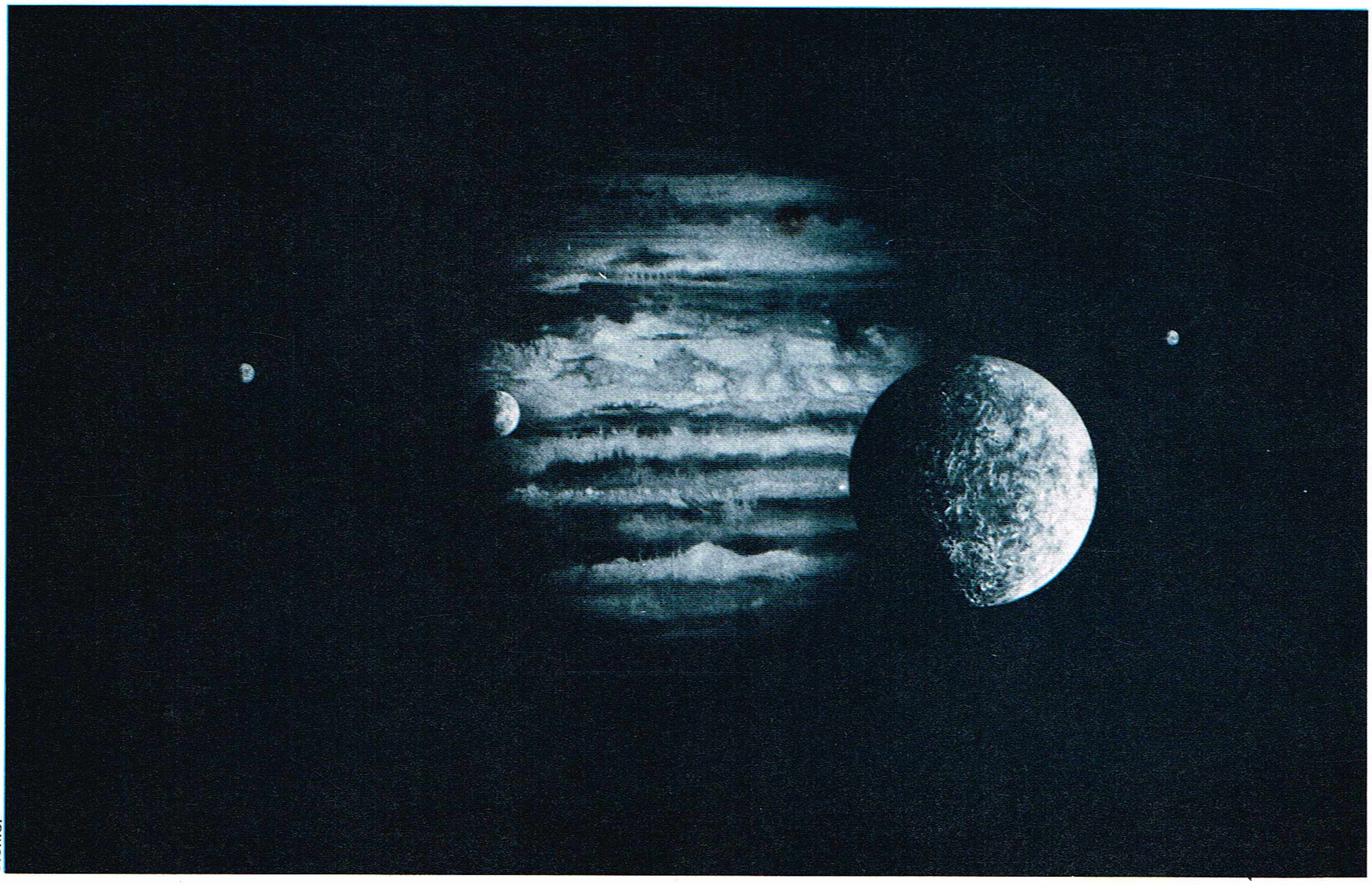

U.S.I.S.

ENCYCLOPÉDIE DES SCIENCES

TECHNOLOGIE

V

GRANGE BATELIÈRE

LEXIQUE DE TECHNOLOGIE (OBJETS ET PRODUITS)

SUPPLÉMENT AU VOLUME XX DE LA GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

ABRÉVIATIONS

adj.	adjectif	*n.*	nom	*par ext.*	par extension
ex.	exemple	*p. ex.*	par exemple	*syn.*	synonyme

A - B

absorption. *n.* Transformation d'énergie rayonnante en une autre forme d'énergie, par interaction avec la matière.

actiniques. *adj.* Habituellement employé pour désigner des radiations qui provoquent des actions chimiques. Les lampes actiniques sont des lampes à vapeur de mercure basse pression, revêtues intérieurement d'une couche fluorescente qui transforme l'énergie ultraviolette engendrée par la décharge en radiations actiniques dont l'émission est comprise entre 370 nm et 420 nm.

adjuvant. *n.* De *adjuvare* (latin) : aider. Un adjuvant est un excipient (voir ce mot) qui facilite la préparation des médicaments. Par exemple, la fabrication des comprimés impose souvent la présence d'adjuvants : *diluants* (amidon, lactose...), *agglutinants* (gommes, sucres...), *lubrifiants* (stéarate de magnésium, lauryl sulfate de sodium...), éventuellement de *délitants* (ou *désintégrants*).

adoucisseur (d'un lave-vaisselle). L'adoucissement consiste à substituer du sodium au calcium pour obtenir du carbonate de sodium qui, étant soluble, ne formera pas de dépôts. Cette transformation est effectuée par le passage de l'eau à travers un corps poreux, une résine.

aérosol. *n.* Ce terme désigne une dispersion stable de particules solides ou liquides dans un gaz. La brume, un nuage, la poussière sont des aérosols. Par extension, dans le secteur du conditionnement, c'est un emballage de transport dans lequel ce phénomène est réalisé. Ce récipient, parfaitement étanche, est équipé d'une valve, d'un gicleur, et contient un mélange dosé de produit actif et de gaz propulseur liquide ou sous pression.

aiguille. *n.* Organe de la mécanique Jacquard, dans le chas de laquelle est passé le crochet.

allantoïque. *adj.* Se dit du liquide contenu dans la cavité la plus externe de l'œuf de poule incubé qui renferme l'embryon et toutes ses annexes.

allumage piézo-électrique. Le choc sur un cristal, élément de forme cylindrique en quartz dont le diamètre est d'environ 15 mm, engendre un courant électrique qui provoque une étincelle.

amniotique. *adj.* Se dit du liquide contenu dans la cavité la plus interne de l'œuf, celle qui est au contact immédiat de l'embryon. La quantité de liquide amniotique est très faible, la cavité amniotique étant une cavité presque virtuelle par suite de l'accolement des feuillets de l'amnios.

amorçage. *n.* L'amorçage d'une lampe munie d'un starter est obtenu à l'aide de la tension transitoire provoquée par l'ouverture du starter. Pour les lampes sans starter, une aide à l'amorçage peut être obtenue au moyen d'un trait extérieur conducteur ou par application d'une tension élevée fournie par un ballast entre les extrémités de la lampe.

amorceur. *n.* Dispositif électrique qui fournit les conditions nécessaires à l'amorçage d'une décharge.

anatoxine. *n.* L'anatoxine est une toxine modifiée sous l'influence du formol par un séjour prolongé à l'étuve. L'anatoxine est une substance antigénique, dépourvue de toxicité, stable et permettant d'immuniser les sujets auxquels on l'injecte.

anticorps. *n.* Substance spécifique et défensive de nature protéique, engendrée dans l'organisme par l'introduction d'un antigène avec lequel elle se combine pour en neutraliser l'effet toxique. Les anticorps sont contenus dans la fraction dite gamma du sérum, que l'on peut isoler par électrophorèse ou par précipitation.

antigène. *n.* Toute substance étrangère qui, introduite dans l'organisme, engendre la formation d'anticorps. Les antigènes sont le plus généralement de nature protidique. Les protéines de l'alimentation qui, par définition, seraient antigéniques sont, dans les processus de la digestion, décomposées en acides aminés, briques primitives de l'édifice protéique et reconstituées de l'autre côté de la barrière intestinale en protéines spécifiques de l'individu, le mettant ainsi à l'abri des agressions qu'auraient engendré des protéines étrangères.

anti-histaminique. *n.* L'histamine est une substance existant dans certains tissus animaux ou résultant de leur décomposition. L'injection d'histamine à un organisme vivant entraîne des phénomènes de choc, des réactions musculaires ou circulatoires qui se retrouvent dans certains états infectieux. On appelle anti-histaminiques les substances qui combattent une action analogue à celle de l'histamine observée par exemple à l'occasion de réactions de type allergique ou à la suite de réactions vaccinales.

appareillage. *n.* Opération consistant à nouer les lisses aux arcades du métier Jacquard.

appertisation. *n.* Voir *stérilisation*.

arcade. *n.* Ficelle de lin reliant le collet de la mécanique Jacquard à la lisse.

bague. *n.* C'est la partie haute d'une bouteille ou d'un flacon sur laquelle s'accroche l'élément de fermeture : bouchon ou capsule. Ses tolérances de fabrication sont très étroites.

ballast. *n.* Dispositif utilisé pour contrôler ou stabiliser le courant qui traverse les lampes à décharge.

bâti ou **carcasse.** *n.* Ensemble de la charpente du métier à tisser.

brûlage. *n.* Action qui consiste à éliminer le liant mélangé aux poudres fluorescentes, qui s'est déposé à l'intérieur des tubes au cours de l'opération d'enduction. Pour ce faire, on passe les tubes dans un four à température élevée, qui brûle l'enduit et transforme le liant en poudre et gaz, lesquels s'éliminent facilement.

brûleur. *n.* Enceinte en quartz à l'intérieur de laquelle prend naissance le phénomène d'électroluminescence des lampes à décharge.

brunissage. *n.* Lissage d'une surface de métal à l'aide d'un outil en agathe ou en acier poli, ayant pour effet de la durcir et de la rendre brillante.

C

cabochon. *n.* (étymologie : en forme de caboche). Forme arrondie et bombée donnée à un élément décoratif, le plus souvent en pierre dure. Cabochon simple : dessus bombé, dessous plat. Cabochon double : convexité sur les deux faces.

catadioptre. *n.* Un catadioptre est une pièce de signalisation de véhicule automobile qui permet de le positionner par réfléchissement de la lumière émise quand il se trouve dans un rayon lumineux. Il se présente sous forme d'un assemblage de tétraèdres dont les faces dévient les rayons lumineux jusqu'à les renvoyer vers leur origine.

catalyse (nettoyage du four par). Les parois du four sont revêtues de plaques en émail mat et poreux contenant du carbonate de tungstène qui oxyde les éclats de graisse se produisant pendant la cuisson.

C.E.E. Commission internationale de réglementation en vue de l'approbation de l'équipement électrique. Elle comprend les comités électrotechniques de 22 pays européens, plus Australie, Canada, Islande, Japon, Afrique du Sud et U.S.A. comme membres observateurs.

C.E.I. Commission électrotechnique internationale. Partie de l'ISO relative à l'électrotechnique, comprend les comités électrotechniques de plus de 60 pays.

cellules diploïdes. Ce sont les cellules somatiques (du corps) d'un organisme vivant qui renferment un nombre 2N de chromosomes. Les cellules germinales (reproductrices : ovules ou spermatozoïdes) renferment les N chromosomes caractéristiques de l'espèce. En se combinant avec les chromosomes germinaux d'un individu de sexe opposé, ils reconstituent le nombre 2N des cellules somatiques.

C.E.N. Comité européen de normalisation. Comprend les organismes nationaux de normalisation de la C.E.E. et des pays de l'E.F.T.A., plus la Grèce et l'Espagne comme membres correspondants.

CENELEC. Comité européen de normalisation électrotechnique. C'est la partie du C.E.N. relative à l'électrotechnique. Il comprend les comités électrotechniques des mêmes 14 pays de l'Ouest européen que le C.E.N.

centrifugation zonale. Méthode de centrifugation séparative dans laquelle on introduit à l'intérieur d'un cylindre ou d'un cône tournant à très grande vitesse un soluté de concentration et de densité croissantes (saccharose, chlorure de césium). La substance centrifugée s'étage à l'intérieur du bol de centrifugation en fonction de la densité propre de ses constituants. On peut, en extrayant des zones successives du matériel en centrifugation, obtenir une séparation du matériel à centrifuger en recueillant à l'état de pureté toutes les particules ayant la même densité.

C.I.E. Commission internationale de l'éclairage. Comprend les comités nationaux d'éclairage de 30 pays.

ciselé. *n.* Décor effectué sur l'endroit d'une plaque de métal, en insculptant au marteau les dessins variés de poinçons et de ciselets.

code européen. Le code européen est un faisceau de croisement asymétrique utilisé pour l'éclairage des véhicules automobiles. Il répond aux conditions suivantes : par rapport à l'axe vertical du véhicule, la partie gauche comporte une coupure horizontale au-dessous de laquelle l'automobiliste doit voir la route sur une distance de 25 à 50 mètres ; au-dessus, rien. Dans la partie droite, la coupure est relevée de 15° de manière à éclairer le bas-côté de la route sur une distance de 50 à 75 m.

coefficient d'efficacité. Il mesure le rapport entre le volume (ou le poids) efficace d'un emballage et le volume (ou le poids) réel de cet emballage. Il doit être aussi voisin que possible de l'unité.

collet. *n.* Boucle en corde sans nœud passée dans le talon des crochets, servant à recevoir les cordes auxquelles sont suspendues les lisses (voir ce mot).

compartiment de conservation (conservateur). Destiné à maintenir à basse température (* — 6 °C ; ** — 12 °C ; *** — 18 °C), les produits surgelés ou congelés industriellement que l'on peut se procurer dans le commerce, mais ne permet pas d'effectuer la congélation.

complexe. *n.* En termes d'emballage, le complexe est un composite comportant plusieurs couches intimement liées, dont au moins un matériau plastique, qui apportent à l'ensemble les propriétés spécifiques de chacune d'entre elles : légèreté ; imperméabilité à l'eau, à certaines vapeurs, etc. A noter qu'un complexe est toujours un matériau souple.

composite. *n.* Un emballage composite est constitué de plusieurs matériaux. A noter que si l'utilisation de complexe conduit à un emballage composite, un matériau composite n'est pas toujours un matériau complexe.

conditionnement. *n.* Opération de conditionner (voir ce mot) ; par extension, résultat final de l'opération, c'est-à-dire l'emballage et ses annexes.

conditionner (un produit). C'est le parer des qualités que le consommateur lui attribue *a priori*, par le biais de son emballage et de son habillage.

conduction. *n.* Échanges thermiques entre deux milieux mis en contact et immobiles.

convection. *n.* Échanges thermiques entre un corps et un fluide en mouvement. *Convection naturelle :* échanges thermiques entre un corps et un fluide sans mouvement forcé. *Convection forcée :* échanges thermiques entre un corps et un fluide dans un mouvement forcé.

corps noir. Le corps noir, ou radiateur intégral, est un corps qui absorbe toutes les radiations incidentes quelles que soient les longueurs d'onde, direction et polarisation. Il n'y a ni transmission ni réflexion.

couleur (température de). La température de couleur est une expression utilisée pour décrire la couleur d'une source de lumière en comparant celle-ci à la couleur du corps noir ou radiateur intégral. La température du corps noir exprimée en Kelvins, pour laquelle l'équivalence de couleur est obtenue, est dite température de couleur de la source. L'unité est le kelvin (K).

couleurs (triangle de). Le triangle de couleurs permet la spécification mathématique exacte de toute couleur à l'aide de deux coordonnées chromatiques qui sont calculées à partir de la distribution spectrale énergétique de la lampe et de la réponse d'un observateur colorimétrique « standard » de la C.I.E. aux 3 couleurs primaires : rouge, bleu, vert.

D - E - F

décharge électrique. Passage d'un courant électrique à travers des gaz et des vapeurs par l'intermédiaire des porteurs de charge produits et entraînés par le gradient de potentiel appliqué au milieu.

dégivrage. *n.* L'humidité provenant des denrées est transformée dans le réfrigérateur ou le congélateur en givre. La suppression de ce givre, ou dégivrage, peut être manuel, semi-automatique ou automatique.

diffuseur. *n.* Dispositif modifiant la distribution spatiale d'un flux lumineux ou énergétique.

écran paralume. Écran formé d'éléments translucides ou opaques géométriquement disposés de façon à masquer les lampes à la vue directe sous un angle déterminé.

emballage. *n.* C'est l'ensemble Enveloppe + Fermeture qui protège le produit contenu, permet son transport et assure sa conservation.

embuvage. *n.* Différence de longueur entre les fils de chaîne avant le tissage et le tissu fabriqué.

enduction. *n.* Action d'enduire l'intérieur des tubes des lampes fluorescentes d'une mince couche de poudre fluorescente, activée par des ions de terre rare et mélangée à un liant pour faciliter la manipulation et la mise en place.

ensouple. *n.* Ensemble des fils ourdis, de même longueur et enroulés sur un rouleau dit d'*ensouple*.

épithélial. *adj.* Se dit des cellules provenant d'un épithélium, c'est-à-dire des fines membranes qui recouvrent une muqueuse ou limitent un organe. Ce sont des cellules planes juxtaposées qui recouvrent le corps ou tapissent l'intérieur des organes, cellules généralement de grande taille, à protoplasma clair et qui se prêtent particulièrement à la mise en culture pour la croissance des virus.

étirage. *n.* Opération qui consiste à allonger une barre de métal au détriment de sa section, en modifiant ou non la forme de cette section.

excipient. *n.* De *excipere* (latin) : recevoir. L'excipient reçoit le principe actif et permet la fabrication des médicaments. Il peut être un *solvant* (ou véhicule) qui transporte le principe actif jusqu'à son lieu d'utilisation, ou un *adjuvant* (voir ce mot).

fardeau. *n.* On désigne ainsi l'emballage regroupant généralement sous film rétractable ou étirable un certain nombre d'emballages unitaires. C'est un conditionnement destiné à la distribution.

fibule. *n.* Bijou servant à agrafer un vêtement, composé d'une épingle articulée sur un élément décoratif plus ou moins richement orné.

flash pasteurisation. C'est le traitement thermique en vrac et en continu d'un produit alimentaire en vue de le stabiliser microbiologiquement pour permettre sa distribution et sa consommation dans les meilleures conditions. Le traitement, qui dure quelques dizaines de secondes, s'effectue entre 65 et 90 °C dans un matériel appelé échangeur thermique.

flotté. *n.* Fil levé ou baissé pendant plusieurs coups consécutifs, lors du tissage.

fluorescence. *n.* Quand un photon frappe un atome, le photon disparaît et l'énergie est absorbée par l'atome. Si ce dernier retourne à son état d'énergie d'origine par étapes, on dit qu'il y a fluorescence du gaz. Les fréquences émises sont plus faibles que celles des ondes absorbées, c'est une véritable transformation de fréquence.

flux lumineux. C'est la grandeur caractéristique d'un flux de rayonnement exprimant son aptitude à produire une sensation lumineuse évaluée d'après les valeurs de l'efficacité lumineuse relative. Cela signifie que l'énergie de toutes les bandes de longueurs d'ondes du spectre émis par une source a été interprétée par l'œil ou un récepteur physique possédant la même sensibilité spectrale et que le flux de la source est la somme de ces interprétations.

four à convection forcée. La cuisson des denrées est effectuée par l'air chaud dans un mouvement renforcé par une turbine (appelé aussi four à chaleur tournante).

four à convection naturelle. Les mets sont cuits soit directement par les combustibles qui proviennent du brûleur, soit indirectement par l'air chauffé par les parois.

four à micro-ondes. Appareil équipé d'un magnétron qui engendre des ondes électromagnétiques de haute fréquence (2 450 mégahertz). Les molécules des denrées à cuire, sous l'action des micro-ondes, oscillent à très grande vitesse en changeant de place et provoquent un échauffement très rapide des matières organiques.

G - H - I

givre de guérison. Trace laissée dans un cristal par une cristallisation secondaire, venant combler les vides dus à des fêlures accidentelles survenues lors de la formation du cristal.

gradateur. *n.* Dispositif permettant de faire varier le flux lumineux des lampes d'une installation d'éclairage.

granulation. *n.* Décor obtenu sur un fond en or, en y faisant adhérer de minuscules boules d'or disposées en semis ou en filigrane.

grilloir. *n.* Élément de chauffe placé sous la voûte d'un four pour réaliser les cuissons par rayonnement.

habillage. *n.* C'est l'ensemble des techniques qui permettent de valoriser un produit aux yeux de l'acheteur potentiel : impression directe de l'emballage, étiquetage, staniolage, surbouchage, etc.

halogène. *n.* De l'iode, du fluor ou du brome (qu'on appelle halogènes) sont ajoutés au gaz normal de remplissage des ampoules pour éviter le noircissement par processus chimique interne qui empêche tout dépôt sur l'ampoule. Dans une lampe à incandescence courante, la température élevée du filament provoque l'évaporation de particules de tungstène qui se condensent sur la paroi de l'ampoule. L'halogène supprime cet effet néfaste.

horlogerie. *n.* Conception, réalisation et diffusion d'objets capables de mesurer le temps.

immuno-électrophorèse. *n.* Méthode consistant à faire diffuser dans un milieu gélifié un immunsérum au contact d'un antigène spécifique. La rencontre de l'immunsérum et de l'antigène détermine des zones de précipitation visibles et photographiables, permettant de mesurer la quantité d'antigènes ou d'anticorps en présence.

immuno-fluorescence. *n.* Méthode qui consiste à placer au contact d'une cellule supposée infectée des anticorps sériques obtenus chez l'animal, couplés avec un corps réagissant par une fluorescence à l'influence des rayons ultra-violets. Si la cellule infectée renferme l'antigène spécifique des anticorps expérimentaux, on voit sous le microscope à ultra-violets la cellule s'illuminer, traduisant ainsi la fixation de l'anticorps fluorescent par l'antigène présent dans la cellule.

incandescence. *n.* L'incandescence est une émission de lumière visible due à l'excitation thermique.

inclusion. *n.* Aspect que prennent, après coloration au microscope optique ou en examen au microscope électronique, les structures résultant de la croissance d'un virus et donnant lieu à des aspects morphologiques différents de ceux de la cellule normale. L'aspect particulier de certaines inclusions qualifiées de spécifiques permet de faire le diagnostic d'un virus causal (rage) ou d'une catégorie de virus qui donnent tous des inclusions du même type (inclusion herpétique).

infrarouge (rayonnement). Rayonnement de radiations dont la longueur d'onde est plus grande que celle du rayonnement visible.

inhibition. *n.* Action d'inhiber. Phénomène consistant à empêcher, à l'intérieur d'une cellule, une action physiologique ou l'apparition d'une lésion sans qu'il y ait nécessairement destruction de l'agent pathogène cause de la lésion ou de l'action constatée en absence d'inhibition.

intensité lumineuse (diagrammes). Ce sont des diagrammes, sous forme polaire, qui représentent les distributions de lumière non symétriques dans au moins deux plans : un plan vertical passant par l'axe du luminaire ; un plan perpendiculaire à l'axe.

IRC. Indice de rendu des couleurs.

I.S.O. Organisation internationale de normalisation. Comprend les organismes nationaux de normalisation de 57 pays plus 15 membres correspondants.

isolux (courbes). Ce sont des courbes qui réunissent les points d'égal éclairement.

L

labilité. *n.* Action imposant un changement ou une modification d'état ou de structure. C'est le contraire de la stabilité qui consiste dans la résistance aux actions tendant à imposer un changement.

laminage. *n.* Opération qui consiste à amincir une plaque de métal en l'allongeant par écrasement entre deux cylindres d'acier.

lapidaire. *adj.* ou *n.* Qui concerne les pierres ou la taille des pierres. Artisan qui taille les pierres précieuses autres que le diamant (diamantaire).

lave-linge à chargement frontal. Lave-linge comportant en façade un hublot qui donne accès à une ouverture du tambour destinée à y introduire le linge.

lave-linge à chargement par le haut. Lave-linge équipé d'un tambour muni d'une ouverture périphérique fermée par une porte à glissière.

lave-linge à pulsateur. Les agitateurs de formes variées, ou une turbine, sont fixés dans la cuve et animés d'un mouvement de rotation. Ce principe de fonctionnement est essentiellement utilisé pour les petits appareils portatifs.

lave-linge à tambour. Un tambour cylindrique, perforé et inclus dans la cuve, tourne autour d'un axe horizontal. Le linge est mis en mouvement par les palettes du tambour.

liant. *n.* Produit servant à faire adhérer une substance sur un support tel que le verre d'une lampe ou le fond d'un tube cathodique.

lingot. *n.* Tout parallélépipède de métal coulé dans une lingotière.

lisse. *n.* Organe du métier à tisser Jacquard, en textile ou en métal, et comprenant une ouverture : le maillon (voir ce mot).

lixiviation ou **percolation.** *n.* Opération consistant à extraire à l'aide d'un solvant (eau, alcool, éther) les principes actifs contenus dans une drogue d'origine végétale. Le solvant neuf est introduit sur une poudre et la traverse, ce qui assure un épuisement plus efficace que la macération. La préparation du café est un exemple de percolation.

luminescence. *n.* C'est un phénomène d'émission par la matière d'un rayonnement électromagnétique dont l'intensité, dans certains cas, est plus forte que celle du rayonnement thermique de cette matière à la même température.

luminosité. *n.* Sensation visuelle selon laquelle une surface paraît émettre plus ou moins de lumière.

lyophilisation. *n.* Méthode consistant à dessécher dans le vide un produit préalablement congelé. Encore appelée cryodessication.

M - N - O

magnétron. *n.* Oscillateur à haute fréquence émettant des faisceaux d'ondes électromagnétiques de haute fréquence.

maillon. *n.* Ouverture située au milieu de la lisse, afin de permettre le passage du fil de chaîne, de façon à le faire se mouvoir.

marchure ou **pas.** *n.* Espace compris entre les fils de chaîne, levés afin de laisser le passage à la navette.

microniseur. *n.* Dispositif utilisé pour réduire une substance en poudre fine. Les particules produites ont des dimensions de l'ordre du micromètre.

moule ébaucheur. Dans la fabrication de la bouteille de verre, c'est le moule qui recueille la paraison. Il donne une « ébauche » de bouteille sur laquelle la bague a déjà été formée définitivement.

moule finisseur. Dans la fabrication de la bouteille de verre, c'est dans ce moule que la bouteille prend sa forme définitive. Le démoulage s'effectue après refroidissement du moule.

néoplasie. *n.* Déviation de la croissance d'un tissu qui devient désordonnée, échappe au contrôle de l'organisme et aboutit à la formation de tumeurs.

néphélométrie. *n.* Méthode optique de mesure qui consiste à observer l'opacité progressive apparaissant dans un liquide sous l'influence d'une réaction chimique ou du conflit entre un antigène et un anticorps. L'opacité est d'autant plus grande qu'il y a plus de matière entrant en réaction. On peut ainsi opérer un dosage des éléments causant l'apparition de cette opacité.

nielle. *n.* Décoration en incrustation sur fond d'argent, résultant de l'application à chaud d'une matière noire, le « niel », composée de sels métalliques (argent, cuivre, plomb).

nouage. *n.* Voir *tordage*.

numération globulaire. Opération qui consiste à dénombrer les globules rouges ou blancs contenus dans un millimètre cube de liquide biologique, généralement de sang.

occulteur. *n.* C'est un écran paralume (voir ce terme) disposé entre les deux voies de circulation contraire des routes pour éviter l'éblouissement dû aux véhicules venant en sens inverse.

once. *n.* Plus précisément *once troy*, unité de masse encore utilisée dans la cotation internationale de l'or et valant 31,1 035 grammes.

oncologie. *n.* Étude des tumeurs qualifiées de cancéreuses. Action oncologique : influence des substances entraînant la transformation des cellules normales en cellules cancéreuses.

ourdissage. *n.* Action première de réalisation d'un tissu. Elle consiste en la mise en place des fils de chaîne ; ceux-ci sont disposés parallèlement et dans un ordre donné composant l'ensouple (voir ce mot).

P - R

palette. *n.* Support (en bois ou en plastique) destiné à la manutention de charges conçues pour le transport en quantités. Elles existent en versions normalisées 800 × 1 200 mm et 1 000 × 1 200 mm.

paraison. *n.* C'est la quantité de matériau (verre ou plastique) mise en œuvre (et prédécoupée) pour la fabrication d'un pot, d'un flacon ou d'une bouteille. Elle est recueillie dans le moule de fabrication.

pasteurisation. *n.* Traitement thermique que l'on fait subir à un produit alimentaire pour inactiver les micro-organismes qu'il contient pendant le temps nécessaire à sa distribution et à sa consommation. Le traitement dure plusieurs dizaines de minutes à une température voisine de 60-70 °C. La pasteurisation se fait généralement dans le récipient. En vrac, elle porte le nom de pasteurisation en vrac ou de flash pasteurisation (voir ce terme).

pectoral. *n.* Plaque ornementale parfois somptueusement décorée (par exemple, chez les Égyptiens), portée sur la poitrine et couvrant plus ou moins les épaules et le dos.

peigne. *n.* Appareil posé sur les métiers à tisser afin de maintenir les fils des ensouples dans leur ordre d'ourdissage et dans l'écartement souhaité.

pépite. *n.* Masse d'or natif, généralement petite (d'où son nom signifiant pépin), alluvionnaire ou véhiculée par les cours d'eau.

percolation. *n.* Voir *lixiviation*.

phiale. *n.* Pièce d'orfèvrerie antique, coupe plate sans pied ni anse, souvent décorée au repoussé et parfois ornée d'un élément central en relief ou « omphalos ».

phosphorescence. *n.* Luminescence qui persiste un temps appréciable après l'excitation.

photomètre. *n.* Appareil servant à mesurer des grandeurs relatives aux rayonnements.

pied. *n.* Le pied d'une lampe est la partie en verre qui obstrue l'ampoule et est traversée par les arrivées de courant.

plaque vitro-céramique. Le matériau vitro-cristallin recouvre et enferme les résistances posées sur un ciment réfractaire. Le vitro-cristallin, obtenu par le traitement thermique d'un verre spécial, est indilatable et peut subir, sans se modifier, un écart de température allant de 0 à 700 °C.

polyploïdes. *adj.* Se dit de cellules anormales ayant un nombre aberrant de chromosomes, nombre en général supérieur au nombre 2N qui caractérise l'espèce. Les cellules polyploïdes sont des cellules généralement dérivées des tumeurs cancéreuses. Elles ont de ce fait un caractère néoplasique qui empêche de les utiliser pour des préparations destinées à la thérapeutique.

porphyre. *n.* Pierre volcanique très dure. En pharmacie, on l'utilise pour réaliser des appareils destinés à broyer très finement des produits solides, notamment pour les pommades oculaires.

portée. *n.* La portée indique, sur le métier Jacquard, le nombre de crochets pouvant actionner les lisses indépendamment les unes des autres.

pouvoir de congélation. Quantité de denrées qu'il est possible de congeler dans un congélateur, par 100 l, en 24 heures. Le poids des denrées fraîches qui peuvent être congelées est compris entre 4,5 et 6,5 kg.

pré-emballage. *n.* C'est l'ensemble d'un produit et de l'emballage individuel dans lequel il est pré-emballé, c'est-à-dire introduit hors de la présence de l'acheteur et de telle sorte que la quantité de produit contenue dans l'emballage ait une valeur choisie à l'avance et ne puisse être modifiée sans altérer celui-ci.

propellant. *n.* On désigne ainsi le gaz propulseur d'un aérosol.

pyrolyse (nettoyage du four par). Le procédé à pyrolyse consiste à détruire les graisses et autres projections à une température de 500 °C environ pendant un cycle de nettoyage indépendant des périodes de cuisson. Dès que la température de l'enceinte s'élève à 300 °C, un dispositif de sécurité verrouille la porte.

rayonnement. *n.* Le rayonnement est une émission sous forme d'ondes électromagnétiques ou de particules.

récipient-mesure. *n.* C'est un emballage en verre ou en tout autre matériau présentant des qualités de rigidité et de stabilité donnant les mêmes garanties métrologiques que le verre quand ce récipient :
— bouché ou conçu pour être bouché, est destiné au stockage, au transport ou à la livraison des liquides,
— a une capacité nominale égale ou supérieure à 0,05 litre et inférieure ou égale à 5 litres,
— a des caractéristiques de fabrication et de construction telles qu'il peut être utilisé comme récipient-mesure c'est-à-dire permettre, lorsqu'il est rempli jusqu'à un niveau déterminé ou jusqu'à un pourcentage déterminé de sa capacité à ras-bords, la mesure de son contenu avec une précision suffisante.

réflexion. *n.* Renvoi du rayonnement par une surface sans changement des fréquences.

réflexion diffuse. La réflexion régulière ne se manifeste pas à l'échelle macroscopique.

réflexion mixte. Réflexion en partie spéculaire et en partie diffuse.

réflexion spéculaire. Réflexion sans diffusion. Un miroir a une diffusion spéculaire.

réfraction. *n.* Changement de direction de la propagation d'un rayonnement, dû aux variations de la vitesse dans un milieu optiquement non homogène ou au passage d'un milieu à un autre.

réfrigérateur à absorption. L'utilisation d'une source de chaleur permet d'effectuer le cycle de transformation du fluide frigorigène. Elle joue le rôle de moteur et envoie le fluide frigorigène du bouilleur au condenseur où il se liquéfie. Il s'évapore ensuite en absorbant la chaleur à l'intérieur.

réfrigérateur à compression. Le compresseur aspire le fluide frigorigène et passe ensuite dans l'évaporateur où il s'évapore en absorbant la chaleur à l'intérieur de l'armoire dont il abaisse ainsi la température.

régénération. *n.* Dans un lave-vaisselle, au cours de l'adoucissement d'eau, la résine se dégrade. La régénération de l'adoucisseur s'opère avec du sel chimiquement pur, qu'il faut renouveler périodiquement après un certain nombre de lavages de la vaisselle.

réglage de la chaleur moyenne d'une plaque de cuisson. La puissance de la plaque restant toujours au maximum, c'est la variation de la durée de passage du courant qui détermine la chaleur moyenne émise.

réglage de la puissance d'une plaque de cuisson. Le mode le plus fréquent consiste à utiliser plusieurs résistances qui permettent d'obtenir six valeurs différentes de chauffe : allure forte, quatre allures intermédiaires, allure douce.

réglage de la température d'une plaque de cuisson. Le réglage thermostatique a pour objet de maintenir à une température donnée le foyer de cuisson en fonction de la température du fond du récipient, mesurée à l'aide d'un palpeur avec lequel il est mis en contact.

repercé. *n.* Décor obtenu sur une plaque de métal par découpage à la scie.

repoussé. *n.* Décor en relief, effectué par martelage et de manière analogue au ciselé, mais en travaillant sur l'envers de la plaque.

ribosomes. *n.* Organites d'une cellule vivante formés de granules d'acide nucléique dont l'acide est un acide ribonucléique. Les ribosomes sont les récepteurs des messages transmis depuis le noyau par l'ARN messager et commandent la synthèse des protéines par la cellule.

S

spectre visible. On appelle visible la partie du spectre électromagnétique à laquelle l'œil est sensible et située entre l'ultraviolet et l'infrarouge.

stabilisation. *n.* Action de stabiliser l'intensité qui traverse les lampes à décharge après leur amorçage. A cette fin, on utilise un ballast.

staniolage. *n.* Technique qui consiste à draper, sur le col pré-encollé d'une bouteille, une bande de papier aluminium ou de complexe aluminium prédécoupée à la longueur voulue.

starter. *n.* Dispositif qui permet le préchauffage des électrodes pour l'allumage des lampes à décharge. Il peut fournir une pointe de tension en combinaison avec le ballast monté en série.

stérilisation. *n.* Traitement thermique que l'on fait subir à l'ensemble produit-emballage pour le stabiliser microbiologiquement. La température de traitement atteint 110 à 130 °C et le traitement dure plusieurs dizaines de minutes. Cette technique perturbe les caractéristiques organoleptiques du produit. Utilisée pour les conserves, elle porte le nom d'*appertisation*.

sublimer, sublimation. Action physique consistant dans le passage direct de l'état solide à l'état gazeux sans intermédiaire liquide. La sublimation de l'eau se produit à basse température et dans le vide. La glace se transforme en vapeur d'eau sans phase liquide.

surbouchage. *n.* Opération de pose sur le col d'une bouteille ou d'un flacon d'un accessoire essentiellement décoratif qui se superpose à la fermeture proprement dite (bouchon, capsule,...).

surfactif. *n.* Agent capable d'abaisser la tension superficielle de l'eau. On dit encore *tensio-actif*.

synergiques. *adj.* Actions de nature indépendante et s'exerçant dans le même sens ou produisant le même effet en se renforçant mutuellement.

T - U - V - W

table à induction. Un inducteur engendre, grâce à un générateur électronique, un champ magnétique pendant la cuisson. La cuisson s'effectue, lorsqu'un récipient en fonte ou en acier est posé sur la plaque, par échauffement direct du fond de récipient.

table top. Plan de travail, situé à une hauteur de 850 à 854 mm ou de 900 à 904 mm, équipant le réfrigérateur, le lave-vaisselle, le lave-linge, le congélateur.

teinture. *n.* En pharmacie, préparation à base d'alcool où l'on a incorporé une ou plusieurs substances médicamenteuses. *Ex. :* teinture d'iode. On réserve de plus en plus ce nom à des solutions extractives de drogues d'origine végétale ou animale (teinture d'arnica, d'aconit...).

tératogène. *adj.* Se dit d'une substance ou d'un virus qui entraîne, au cours de la vie fœtale, la formation d'un monstre par action sur le développement de l'embryon.

terre de diatomées. Les diatomées sont des algues microscopiques à carapace siliceuse brune, abondantes dans toutes les eaux ; elles se déposent en sédiments (terre), qui constituent une pâte de polissage fine et tendre.

terre d'infusoires ou **Kieselguhr.** Silice extrêmement divisée provenant d'infusoires microscopiques fossiles. La terre d'infusoires sert d'adjuvant de filtration en évitant le colmatage des filtres.

thermocouple. *n.* Dispositif de sécurité qui fonctionne à l'aide d'un électro-aimant, alimenté par un courant sous faible tension (produit par le thermocouple), et qui maintient le débit du gaz. Si l'électro-aimant n'est plus alimenté (le brûleur vient à s'éteindre, et le thermocouple n'est plus chauffé), il se sépare du clapet qui stoppe le débit du gaz.

tordage ou **nouage.** *n.* Opération consistant à réunir par torsion particulière chaque fil d'ensouple au fil passé dans la dent du peigne et dans la lisse.

torques. *n.* Collier réalisé par la torsion d'un ou de plusieurs fils de métal, très usité chez les Celtes.

toxine. *n.* Poison soluble sécrété par des bactéries. La toxine pénètre dans le sang et se fixe sur un tissu ou sur un organe, le plus souvent le système nerveux, où le poison se fixe « comme l'encre sur le buvard ». Les toxines sont de nature protidique. On sait aujourd'hui les préparer à l'état de grande pureté et d'extrême concentration permettant de les visualiser à l'état cristallisé.

transformation blastique. Sous l'influence de certaines substances, et notamment des antigènes auxquels ils sont sensibilisés, on peut voir les lymphocytes sanguins d'origine thymique (lymphocytes T) se transformer en cellules ayant l'apparence d'une rosette, analogues aux cellules en multiplication rapide que l'on observe dans les premiers stades du développement d'un œuf fécondé.

transmission. *n.* Passage de radiations dans un milieu sans modification de la fréquence.

tripoli. *n.* Roche siliceuse provenant autrefois de la Tripolitaine, et utilisée en poudre ou en pâte pour polir certains métaux et pierres.

trypsine. *n.* Suc digestif produit par le pancréas et qui, dans la digestion, agit sur les protéines en les décomposant en acides aminés lorsque la digestion est poussée à l'extrême. Dans l'opération qualifiée de trypsination, on fait subir à un tissu l'action ménagée de la trypsine, interrompue au bout de quelque temps de manière à séparer les cellules les unes des autres et à les obtenir soit à l'état isolé, soit en paquets cellulaires que l'on peut ensuite mettre en culture.

tularémie. *n.* Maladie bactérienne des léporidés (lièvres) transmissible à l'Homme. La maladie existe en France où elle a été importée par des lièvres provenant de Tchécoslovaquie, mais elle n'y est pas très répandue. Elle est au contraire commune dans les pays de l'Est et représente en Asie centrale un réel danger pour les travailleurs de la forêt.

typhus exanthématique. Maladie épidémique et grave transmise à l'Homme par le pou ; elle détermine après une incubation de quelques jours une fièvre élevée avec abattement profond (typhos) et accompagnée d'une éruption cutanée (exanthème) plane, rosée ou pétéchiale traduisant les hémorragies microscopiques qui se produisent dans l'épaisseur de la peau.

U.H.T. Ce terme désigne une technique qui consiste à porter, en continu, le lait à une température voisine de 150 °C pendant un temps de l'ordre de la seconde. Cette méthode présente l'avantage de n'avoir que très peu d'influence sur les qualités organoleptiques du produit.

ultraviolet (rayonnement). Rayonnement de radiations dont la longueur d'onde est plus petite que celle du rayonnement visible.

virus spumeux. (en anglais : *foamy virus*). Il s'agit d'un virus fréquent chez les singes et complètement latent chez eux, qui ne se manifeste qu'à l'occasion de la mise en culture des cellules de l'animal. On voit alors se développer des cellules bourrées de vacuoles qui prennent un aspect mousseux *(foam)* et sont impropres à la culture des virus.

volume nominal (d'un récipient). C'est la quantité de produit que contient effectivement le récipient lorsqu'il a été rempli dans des conditions opératoires définies à l'avance (température, pression, ...).

wrap-around. *n.* Technique qui consiste à envelopper un produit dans son emballage livré sous la forme d'une feuille de papier, carton ou complexe.

INDEX DES NOMS CITÉS

Les références sont données par l'indication du numéro de la page où se trouve le terme, suivi, le cas échéant, des lettres *a* et *b* se rapportant respectivement à la colonne de gauche et à la colonne de droite de chaque page.

Les références sont données, pour les illustrations, par le numéro de la page en caractères gras et, pour le texte, par le numéro de la page en caractères maigres pour une simple citation, et en italique pour un développement plus complet.

Pour les différentes variantes se rattachant à un même terme, un astérisque indiquera le renvoi à ce dernier. *Ex. :*
calcin
* verre récupéré
verre récupéré (ou calcin) 158 b

ERRATA ET COMPLÉMENTS

Page 45, colonne de gauche, avant-dernière ligne, lire : Langmuir et non : Langmuire.
Page 45, colonne de droite, 7e ligne sous la photo, lire : Pour réduire cet échauffement, on utilise le krypton et le xénon, compte tenu que la conductibilité calorifique d'un gaz est inversement proportionnelle à sa masse atomique. Pour maintenir le filament à une température élevée, Langmuir remplaça le filament rectiligne par un filament spiralé, lequel fut remplacé par la suite par un filament à double spiralage.
Page 45, colonne de droite, en complément à la 1re phrase, sous le titre *Nature de la lumière :* ces champs sont sinusoïdaux si le phénomène qui leur a donné naissance est lui-même sinusoïdal.

Page 46, 9e ligne sous le titre *Quelques unités fondamentales*,

$$dF = I d\Omega$$

où

$$I = \lim_{\Omega \to 0} \frac{dF}{d\Omega}$$

dans laquelle *dF* est le flux lumineux contenu dans l'angle solide $d\Omega$.
Page 46, colonne de droite, 56e ligne, la définition doit être complétée de la manière suivante : La luminance d'une source est le quotient de l'intensité lumineuse dans la direction considérée par la surface apparente de la source dans cette même direction.
Page 46, 10e et 11e lignes sous le titre *La couleur*, supprimer « et d'une mesure calorimétrique ».

Page 47, colonne de gauche, 7e ligne, ajouter : En dessous de 6 000 °K les lampes à incandescence étant très proches du corps noir auront un bon rendu de couleur. Par contre, à la température de 2 500-3 000 °K, les lampes à incandescence émettent beaucoup plus de rouge, il y aura donc déformation du rendu des couleurs par rapport à la réalité.
Page 47, 6e et 7e lignes sous le titre *Production de la lumière* lire : Le rayonnement émis dépend de la nature du corps émetteur et de la température à laquelle celui-ci est porté.

Page 48, colonne de droite, 15e ligne, lire : 2 886/5 200 = 0,55 µm.
Page 48, colonne de droite, 29e ligne sous le titre *Production de la lumière par luminescence*, lire : 400 et 700 nm et non 4 000 et 7 600 Å.

Page 49, colonne de droite, 8e ligne, remplacer « importantes » par « de 20 lm/W au maximum ».
Page 49, colonne de droite, 13e ligne, supprimer « et conduction ».
Page 49, colonne de droite, remplacer les trois lignes situées au-dessus du titre *Caractéristiques* par : Il existe 5 types principaux de culots : B15, B22, E14, E27 et E40, et un nombre très important d'autres types.

Page 50, colonne de gauche, 2e ligne, ajouter après « ... est réduite de 20 % » : Une surtension de 10 % seulement, 240 V au lieu de 220 V par exemple, entraîne un accroissement de flux lumineux de 40 % et une réduction de la durée de vie de 70 %. Il faut toujours placer des lampes dont la tension de fonctionnement correspond exactement à la tension du secteur de manière à obtenir les performances optimales des lampes à incandescence.
Page 50, colonne de gauche, 18e et 19e lignes, ajouter après « ... sens s'attirent : D'autre part, l'échauffement intense des points de plus faible diamètre entraîne la rupture à cause de l'émission importante de particules de tungstène.
Page 50, colonne de droite, 16e et 17e lignes, remplacer « une lentille qui donne la largeur du faisceau » par : une coupole en verre prismatique sur les lampes « flood » ou extensives, et en verre dépoli sur les lampes « spot » ou intensives. La largeur du faisceau est donnée par la position relative du filament et du réflecteur.
Page 50, colonne de droite, 23e ligne, supprimer « par rapport aux précédentes ».

Page 51, colonne de gauche, 2e ligne sous le titre *Lampes miniatures*, remplacer « krypton » par « xénon ».
Page 51, colonne de gauche, 7e ligne sous le titre *Lampes pour la photographie*, substituer à « recouvert en partie d'une » l'expression « remplacé par une »
Page 51, colonne de gauche, 16e ligne sous le titre *Lampes pour la photographie*, ajouter après « lumière naturelle » : « et empêche la lampe d'exploser ».

Page 53, colonne de droite, 4e et 5e lignes, remplacer 4 047 Å, 4 358 Å, 5 461 Å, 5 770 et 5 790 Å par : 404,7 nm, 435,8 nm, 546,1 nm, 577 et 579 nm.
Page 53, colonne de droite, 16e et 17e lignes, lire : Les lampes à allumage instantané n'ont un facteur de puissance voisin de l'unité que si leur appareillage de stabilisation est conçu à cet effet.
Page 53, colonne de droite, 25 et 26e lignes, lire : Les puissances varient entre 50 et 2 000 watts; certaines atteignent 3 500 à 5 000 W.

Page 54, colonne de gauche, à la dernière ligne du premier paragraphe, après « lieux publics » ajouter « rues et routes ».

Page 55, colonne de gauche, 58e ligne, remplacer 2 537 Å par 253,7 nm
Page 55, colonne de droite, dernière ligne du paragraphe *Lampes flammes*, supprimer : « à filament bispiralé ».
Page 55, sous le titre *Lampes à bas voltage* lire : Ce sont des lampes à incandescence qui fonctionnent sous des tensions inférieures à 50 volts.

Page 56, colonne de droite, 9e et 10e lignes, sous le titre *Lampes à lueur :* lire : « le gaz de remplissage est le néon ».

Page 58, colonne de gauche, 4e à 6e lignes sous le titre *Influence de la température*, lire : Cela provient du fait que la pression de la vapeur de mercure à l'intérieur du tube est fonction de la température. En basse pression (lampes fluorescentes, lampes à vapeur de sodium BP) la température modifie sensiblement le flux émis. En haute pression (lampes à ballon fluorescent, lampes à vapeur de sodium HP), la température n'affecte que très peu le flux émis.

Page 61, colonne de gauche, 5e ligne sous le titre *Décoration* ajouter après « tout le reste n'est qu'habillage » : Il faut préciser que, dans certains cas, cet habillage peut servir à protéger la lampe et, quelquefois, l'utilisateur.

Page 64, sous le titre *Luminaires étanches*, supprimer, à la 2e ligne : « ou qui présentent des risques d'explosion »; et aux 6e et 7e lignes : « fabriques de gaz, d'hydrogène, poste de charge d'accumulateurs... »

Page 66, dans le paragraphe *Pompage*, à la 4e ligne, remplacer « après avoir fait le vide, on introduit un 'getter' puis », par « on dépose un getter sur le filament au moment de sa fixation sur le pied, puis on introduit le gaz, argon... »

Note relative au générique du volume XX
Supprimer la mention : P. ROOS pour les machines à écrire et à calculer.

GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

TECHNOLOGIE V

GRANGE BATELIÈRE, ÉDITIONS ATLAS, PARIS - ÉDITIONS KISTER, GENÈVE
ÉDITIONS ÉRASME, BRUXELLES-ANVERS

Publiée sous le haut patronage de :
Messieurs les professeurs :
Jean DORST, membre de l'Institut,
Charles FEHRENBACH, membre de l'Institut,
Roger HEIM, membre de l'Institut,
Monsieur l'amiral André JUBELIN,
Messieurs les professeurs :
Pierre LÉPINE, membre de l'Institut,
Louis LEPRINCE-RINGUET, de l'Académie française,
Jean-François LEROY, professeur au Muséum national d'histoire naturelle,
Henri NORMANT, membre de l'Institut,
Monsieur Jacques PICCARD, docteur ès sciences h.c.

Réalisation	IDÉES ET ÉDITIONS 16, avenue de Friedland, 75008 Paris.
Comité de direction	Simone DEVAUX, Uberto TOSCO.
Rédaction	Françoise MENU, Monique LIONS-GENTIL, Vanina DORÉ, Marie-Noëlle PAILLETTE.
Recherche de l'illustration	Mathilde RIEUSSEC.
Mise en pages	Tito TOPIN et Serge BROCHE.
Illustrations techniques	Richard COLIN.
Coordinateur des dessins	Mario LOGLI.
Fabrication	Sylvia COLIN, Jocelyne TÉPÉNIER.
Directeur de la publication	Bernard BOSC.

Les schémas portant la référence Richard Colin
ont été réalisés d'après des croquis fournis par les auteurs.

Dans ce volume :

LA TECHNOLOGIE V — OBJETS ET PRODUITS

R. Martinot - TOP

Ont collaboré à ce volume :

Pour l'introduction :

D. QUARANTE, *pour* évolution formelle des objets et produits et interactions avec la technologie ; aspects sémantiques de l'objet.

L. MAGNON, *pour* objets, produits et économie — production et marketing ; qualités formelle des objets ; les supports méthodologiques du design industriel.

Pour l'horlogerie :

R. GUIDOT.

Pour la bijouterie et la joaillerie :

COSTANZA.

Pour l'éclairage :

J. GUÉNARD.

Pour l'électro-ménager :

S. BERTHIER DE LIONCOURT, A. HATALA, A. LEMBERGER.

Pour les produits textiles et le linge de maison :

M. FLANDIN.

Pour le mobilier :

D. QUARANTE et A. MASSEAU.

Pour l'emballage et le conditionnement :

M. LEMAIRE

Pour le médicament :

G. HAZEBROUCK.

Pour les vaccins :

P. LÉPINE.

Pour les industries alimentaires :

H. CHAVERON.

Pour les loisirs :

H. POPHILLAT.

Pour les machines à écrire et à calculer :

P. ROOS.

Pour technologie et société :

X. SIX et J.-C. ZIV.

Dépôt légal : 1er trimestre 1978.
Imprimé en Italie par I.G.D.A. Officine Grafiche, Novara.

P. Sugny et P. Sauvé

▲ *Si les catalogues et les rayons des grands magasins proposent une classification fonctionnelle des objets, il n'est pas de même des petits étalages qui présentent parfois un assemblage d'objets hétéroclites.*

OBJETS ET PRODUITS

Aucun mode de classification des objets ou produits existant actuellement sur le marché ne peut être totalement satisfaisant : entre l'objet et le produit, l'usager et le produit, la technologie et le produit, il existe trop de liens et d'interactions possibles. Aussi, dans ce chapitre, les objets ou produits présentés ne le seront pas avec l'intention de faire un tour d'horizon exhaustif, mais seront pris comme prétexte à une connaissance plus générale. L'objet, le produit, deviendra moyen didactique de mettre en lumière des connaissances technologiques tout en faisant découvrir son fonctionnement, son utilité, sa valeur d'usage. Au travers de différents exemples transparaîtront également les rôles actuels du design industriel et du marketing. Les objets et produits présentés ici, pris aujourd'hui à une date précise de leur évolution formelle, pourront nous permettre de mieux saisir le contexte technologique, social ou historique dans lequel ils s'inscrivent.

Dans ce chapitre, nous entendons par objets et produits tout ce qui est actuellement fabriqué ou produit et directement utilisable par le consommateur pour usage, depuis les meubles et textiles, jusqu'aux médicaments et vaccins, en passant par les jeux, les ustensiles ménagers, la joaillerie, les produits alimentaires, l'éclairage, l'horlogerie, etc. Ne seront pas traités les objets à usage

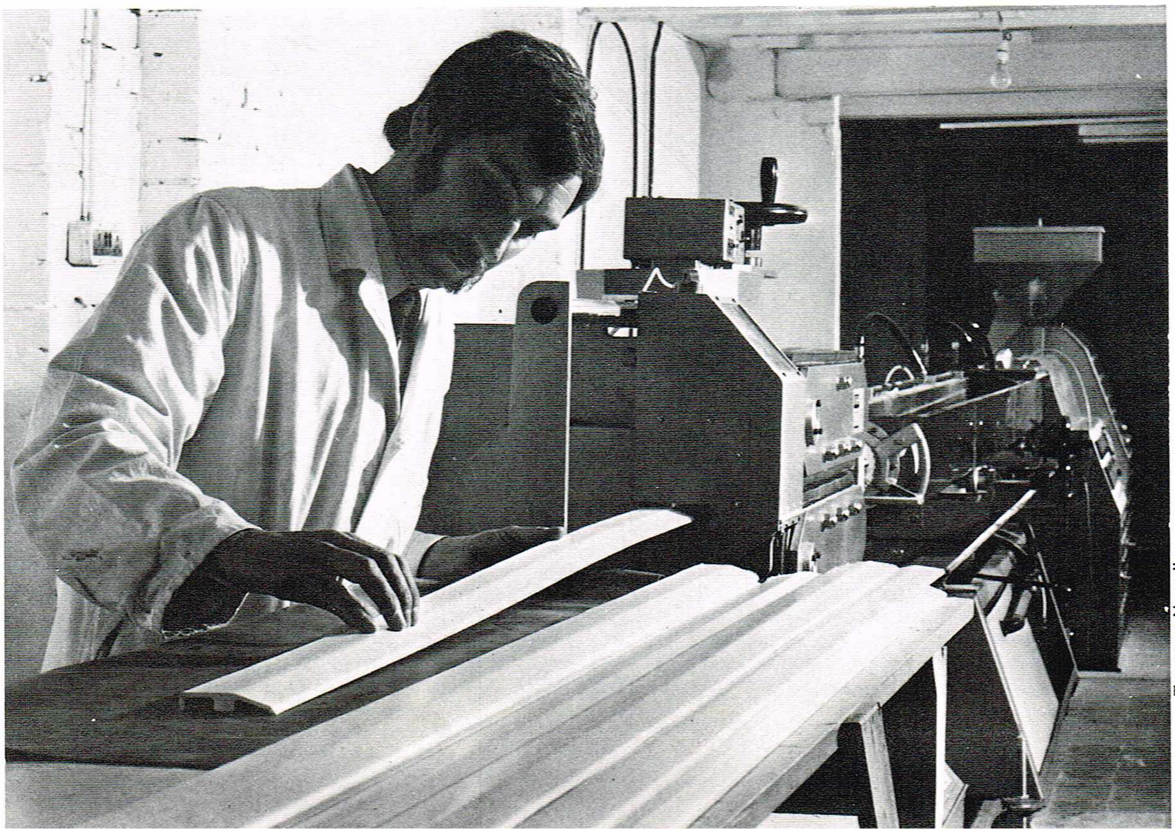

Turner et Newall

◄ *Fabrication industrielle d'un profilé de plinthe.*

collectif, les appareils scientifiques ou les équipements lourds; c'est-à-dire, pour reprendre les termes de Gillo Dorflès dans l'introduction à l'ouvrage l'Objet créé par l'homme, *les objets à usage « supra-individuel » : machines-outils, aménagements collectifs, mobilier urbain, transport collectif. De ce chapitre seront exclues les matières premières en tant que telles (acier brut, matières plastiques à l'état de granulés, etc.) ; de même seront exclus en tant que tels les produits semi-finis (profils, tôles d'acier, bois sous forme de planches, de tasseaux).*

Il n'en reste pas moins qu'après avoir procédé à ces éliminations, le monde des objets ou produits directement utilisables par l'actuel consommateur est extrêmement vaste. La prolifération des « salons » de toute nature (Salon du meuble, Salon du bricolage, Salon du cuir, Salon du jouet, etc.) ne peut nous fournir que des renseignements d'ordre social ou, plus exactement, sur les liens sociaux qui existent entre le consommateur et le produit. Les différents catalogues de produits, celui de la Redoute, *de* Manufrance *ou des* 3 Suisses, *proposent une classification fonctionnelle qui limite encore l'analyse. Le vocabulaire des lieux du négoce, ou des différents rayons des grands magasins ou supermarchés, ne fait que rejoindre cette classification fonctionnelle : droguerie, papeterie, boulangerie, mercerie* (fig. *1). De plus, on s'aperçoit rapidement que cela n'a rien de figé et que certains secteurs se développent au détriment de certains autres.*

On peut essayer de mieux saisir le problème des objets ou produits par une analyse du vocabulaire actuel. On relève certains noms composés : *abris modulaires, blocs-cuisines, qui nous font pressentir le concept de modularité. Les expressions :* chaîne stéréo intégrée *ou* éléments adaptables *nous amènent à la notion d'intégration du mobilier dans l'architecture. Les termes* électroplinthe *ou* peigne soufflant *nous renseignent sur la superposition récente, l'intégration en un seul objet de deux fonctions au départ distinctes et remplies par deux objets différents.*

Les choses se compliquent encore lorsque l'on compare l'évolution rapide de certains pays, leur luxe technologique, la prolifération de leurs produits et le dénuement de certains autres pays actuellement encore sous-développés.

Le dernier congrès de l'ICSID (International Council of Societies for Industrial Design) a formulé d'une manière très claire le problème de ce développement lié au concept de l'identité. Le but de l'ICSID est de créer des liens entre les différentes associations professionnelles de designers afin d'améliorer le bien-être matériel et psychologique de l'homme ; l'ICSID joue un rôle à la fois d'initiateur et d'informateur dans le domaine du design. Pour son Xe Congrès, les thèmes retenus ont été l'identité et le développement, thèmes liés au développement industriel : identité du design lui-même et identité des produits, associés au développement des pays et plus particulièrement à celui des pays actuellement défavorisés. Ce problème du développement est lié à celui de l'identité par l'adaptation aux conditions culturelles et climatiques. Réponse significative de Victor Papanek à ces questions : offrir par l'information la possibilité aux différents types d'usagers de construire eux-mêmes leur propre modèle : pencils in the hands of people *(« à chacun son crayon »).*

fig. 1

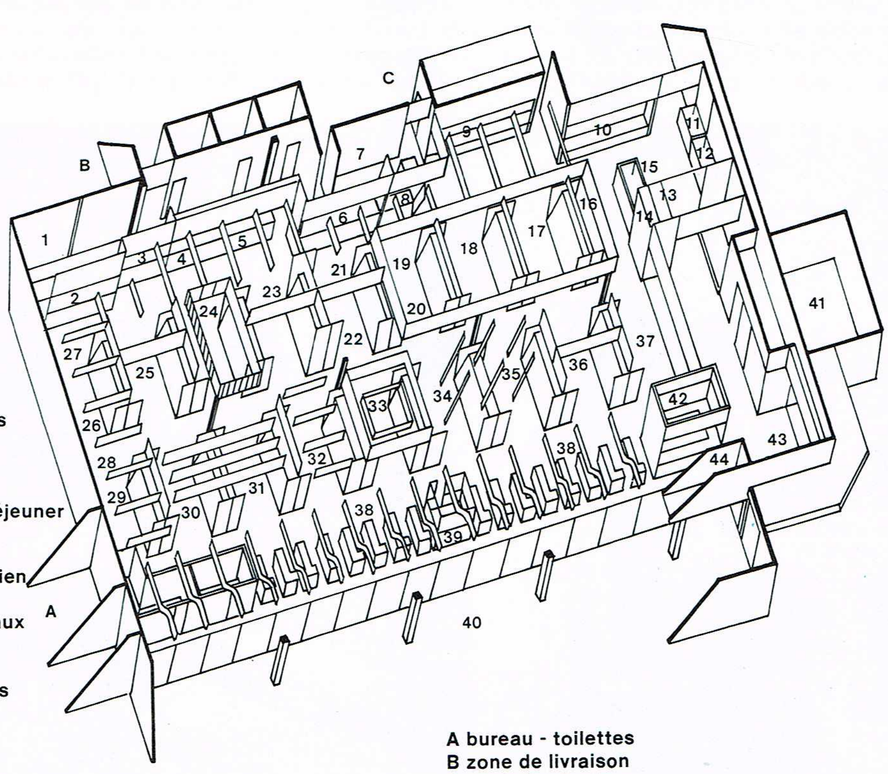

1 préparation des fruits
2 fruits et légumes
3 viande
4 viande préemballée
5 viande
6 viande cuite
7-8 plats cuisinés
9 laiterie
10 nourriture congelée
11-12-13 glaces
14 aliments pour bébés
15 volailles
16 soupe en boîte
17 légumes en conserve
18 viandes en conserve
19 fruits en conserve
20 lait et crèmes
21-22 sucre et farine
23 plats préparés
24 saumures
25 poissons
26 sucreries
27 fruits et légumes frais
28 boulangerie
29 bonbons
30 gâteaux
31 céréales pour petit déjeuner
32 confiture
33 thé - café
34-35 produits d'entretien
36 poissonnerie
37 nourriture pour animaux
38 sorties-caisses
39 bureau du directeur
40 bureau des réductions
41 pharmacie
42 journaux
43 entrée - sortie
44 zone vide

A bureau - toilettes
B zone de livraison
C zone de stockage

▶ ***Figure 1** : emplacement des rayons dans un grand magasin (d'après un document* **Architecture intérieure CREE n° 24**).

Richard Colin

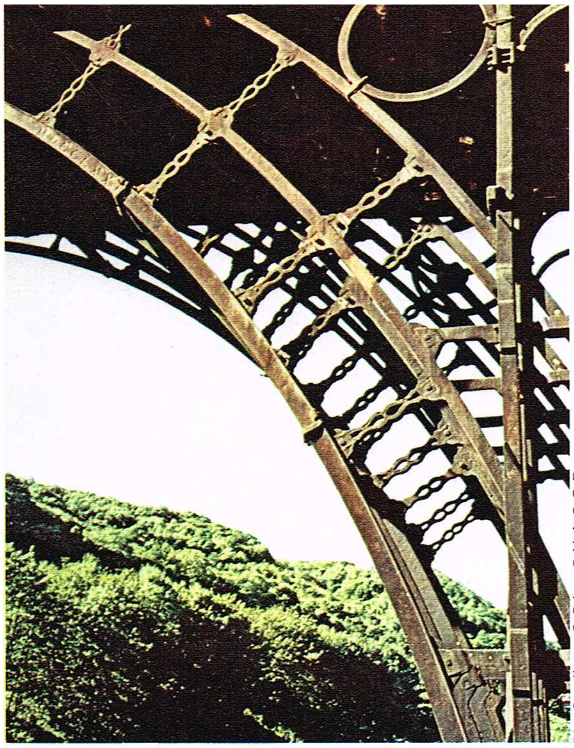

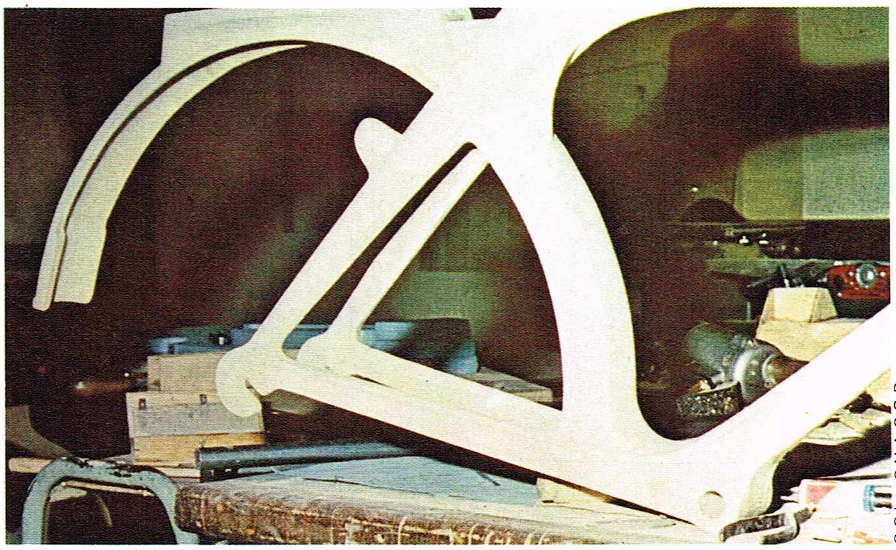

▲ *A gauche, détail du pont de Coalbrookdale (1777-1779) de l'ingénieur Darby. A droite, projet de M. Ramond : cadre de bicyclette en fibre de verre injectée (1975).*

Évolution formelle des objets et produits

Quelles sont les relations profondes qui sous-tendent l'existence des objets et produits ? Il y a peu de temps encore, jusqu'au début du XIX^e siècle, le nombre des objets et produits utilisés quotidiennement était relativement restreint. Entre 1850 et 1900, une quantité incroyable d'objets nouveaux apparut. On peut citer : la machine à coudre, la machine à écrire, le téléphone, le stylo-plume, la bicyclette, l'appareil photographique.

Actuellement, les objets qui nous entourent sont très nombreux, très variés, et, pour chaque type de produit, il existe une très grande diversité de modèles. L'industrialisation a rendu possible non seulement la création de produits nouveaux, mais également celle de formes nouvelles. Ce chapitre se propose donc d'analyser cette production d'objets et de produits qui nous entourent. Afin d'éclairer la lecture de ce qui suivra, il convient au départ de faire certaines distinctions :

● **Distinction entre l'objet et le produit :**

— l'*objet* (de *objectare*, « jeter devant »), chose placée devant, qui a une destination, une certaine utilité, depuis l'outil qui prolonge la main jusqu'à l'objet industriel appréhendé par l'utilisateur ; un produit industriel devient objet dans la maison (un poste de télévision, un luminaire) ;

— le *produit* directement lié à la production industrielle, que ce soient les produits alimentaires, les produits d'entretien ou les produits électroménagers.

● **Distinction entre la technologie de fonctionnement de l'objet produit,** c'est-à-dire sa raison d'être, sa réponse à l'usage, **et la technologie de fabrication,** c'est-à-dire les moyens utilisés, les machines, les outils nécessaires à la fabrication de cet objet.

● **Distinction entre l'artisanat et la production industrielle :**

— l'*artisanat,* qui utilise diverses techniques, ces techniques étant en général propres à un matériau particulier : travail de la terre, du cuir, du bois ;

— la *production industrielle,* qui n'est pas liée à une technique particulière, mais bien à la technologie, celle-ci étant la science permettant une utilisation judicieuse de la connaissance des diverses techniques. Il semble nécessaire de rappeler ici la définition de la technologie donnée par G. Denielou dans le numéro 166 d'introduction des volumes *Technologie :* « La technologie comme étant la science des procédés et produits de l'industrie humaine. »

● **Distinction entre l'outil, l'objet produit de l'artisanat ou l'objet produit de l'industrie.**

Depuis les objets les plus primitifs, depuis les premiers bifaces du Paléolithique inférieur ou les haches en pierre polie du Néolithique, les rapports de l'homme et de l'objet (l'homme était alors confronté directement et physiquement avec sa production) ont complètement changé. L'outil prolongeait la main de l'homme. L'objet, l'outil (armes, couteaux, instruments de chasse) augmentait l'action de l'homme, son efficacité. A. Leroi-Gourhan écrit : « La main à l'origine était une pince à tenir les cailloux, le triomphe de l'homme a été d'en faire la servante de plus en plus habile de ses pensées de fabricant. Du Paléolithique supérieur au XIX^e siècle elle a traversé un interminable apogée. Dans l'industrie, elle joue encore un rôle essentiel, par quelques artisans outilleurs qui fabriquent les pièces agissantes des machines devant lesquelles la foule ouvrière n'aura qu'une pince à cinq doigts pour distribuer la matière ou un index pour appuyer sur le bouton. »

De l'outil, en passant par l'instrument, jusqu'à la machine, l'évolution a été très lente, tandis que le passage de la machine à la machine-outil a été brutal et a complètement bouleversé la fabrication des objets et les rapports physiques et psychiques de l'homme avec ses produits. Considérons le vase de terre modelé par l'artisan et le vase en thermoplastique obtenu par injection ; leur fonction peut être la même, mais une grande différence sépare ces deux objets : l'un a des qualités formelles imprévisibles, il est unique ; l'autre a des qualités formelles prévisibles, il a été « projeté », il est le produit de série né d'un modèle défini à l'avance. Aujourd'hui coexistent dans notre environnement quotidien les deux types d'objets : l'*objet artisanal* et l'*objet industriel*, avec cependant une prédominance très nette de l'objet industriel. Comment s'est effectuée cette lente substitution ? Qu'est-ce qui distingue très précisément ces deux types d'objets ?

Plus qu'un essai de classification, peu probant, l'histoire peut nous donner quelques réponses. Certaines dates peuvent nous guider et nous servir de points de repère ; il faut cependant nous garder de croire qu'elles sont un point de départ précis. Il n'y a pas à proprement parler de ruptures ou de changements brutaux, il y a un lent glissement vers l'industrialisation, qui dépend à la fois des techniques passées et de la technologie actuelle. L'invention des premières horloges mécaniques, dont on peut situer l'apparition en Europe aux environs du XIV^e siècle, un peu plus tard, au XV^e siècle, celle d'horloges de table, plus petites, dues à l'invention du ressort moteur, plus tard encore la précision apportée par G. Graham, au début du XVIII^e siècle, par l'échappement dit « à repos » eurent autant d'importance pour l'industrialisation des produits que l'arrivée de la machine à vapeur.

La date de 1777 va cependant nous servir de point de départ ; elle correspond à la construction du premier pont en fer sur la Severn par l'ingénieur Darby. Les nouveaux apports technologiques, la machine, l'invention de l'électricité, l'utilisation de la fonte engendrent progressivement de nouvelles solutions. Le machinisme, le démarrage de la production en série réclament l'élaboration d'un schéma préalable avant toute fabrication, un projet, des plans. Les moules de fonderie, tout comme aujourd'hui les moules d'injection des matières plastiques, nécessitent une démarche qui oblige à prédéterminer les qualités formelles des produits et toutes les contraintes s'y rapportant. Sont apparus et apparaissent

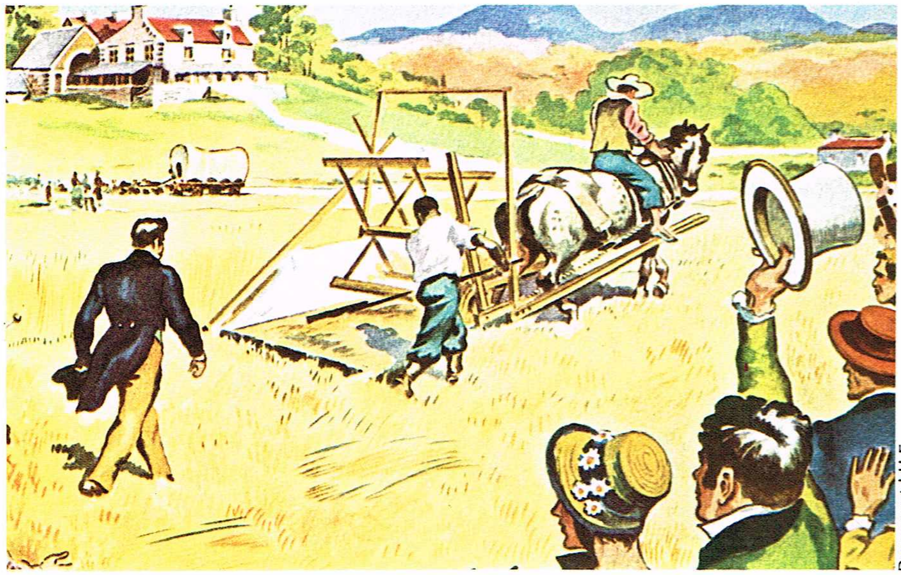

Document I.H.F.

▲ *Premier essai, premier triomphe de la moissonneuse en 1831. L'image portait en légende : « Le temps presse pour ceux qui vivent à la merci du ciel »* (Encyclopédie Mc Cormick de la motoculture).

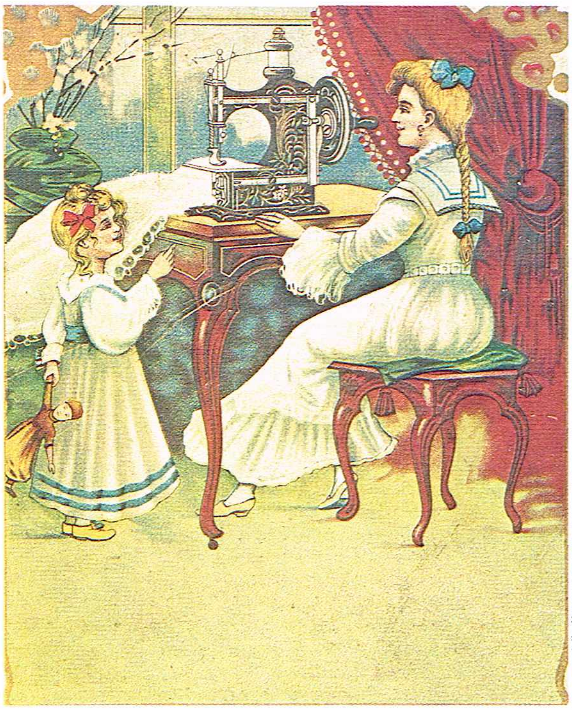

Roger-Viollet

► *Ancienne machine à coudre. L'aspect s'efforce de s'améliorer par l'adjonction d'ornementations et de décorations propres à faire oublier la partie mécanique.*

▼ *Le Crystal Palace de l'Exposition universelle de Londres en 1851. La technologie apparaît ici comme la source possible d'une nouvelle architecture.*

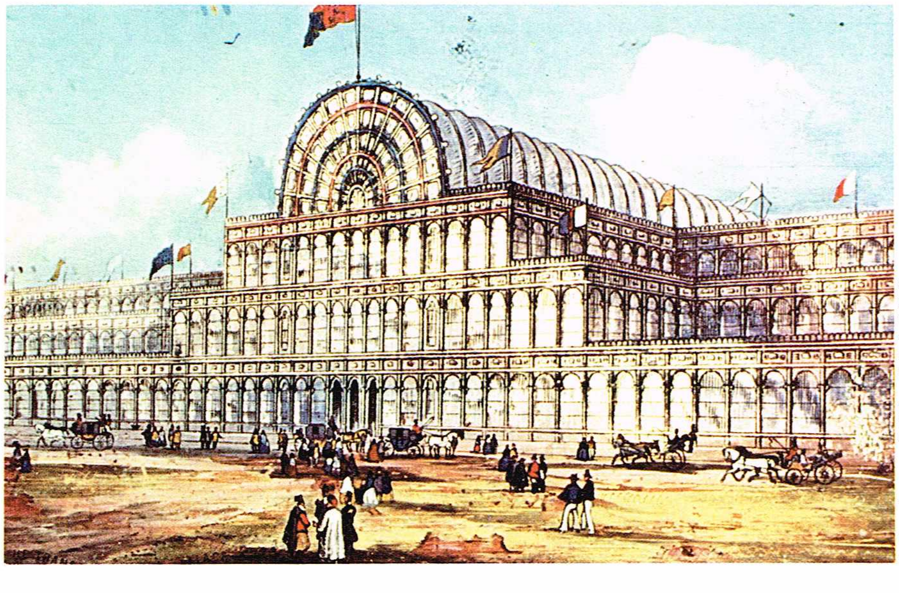

P. Kneebone - C.C.I. - C.N.A.C.G.P.

chaque jour des matériaux aux caractéristiques qualitatives prévisibles. Actuellement, on est capable de prendre en compte avec précision le pourcentage de retrait du méthacrylate au moment du thermoformage, on est capable de prémoduler au moment de la paraison l'épaisseur de la paroi d'une bouteille réalisée en extrusion-soufflage. La révolution industrielle a complètement transformé le mode de conception des produits.

En partant de ce XVIII^e siècle, où l'on prononce pour la première fois le mot « industriel », nous nous proposons de faire un très rapide tour d'horizon de l'histoire des objets et des produits. Voici quelques dates : 1790, invention du métier à tisser en France par J.-M. Jacquard ; 1796, début de l'architecture métallique ; 1817, la draisienne, du nom de son inventeur von Drais, diplomate allemand ; 1829, la locomotive à vapeur de Stephenson ; 1830, la première machine à coudre réalisée en France par Thimonnier.

On assiste en ce début du XIX^e siècle à une double histoire des objets quotidiens.

★ D'une part, l'éclosion de styles néo-baroque, néo-gothique, néo-mauresque, néo-turc, s'appuyant tous sur des références historiques. On prendra à ce propos l'exemple bien connu des machines à coudre dont l'aspect s'efforce de se féminiser par l'adjonction d'ornementations, de décorations, afin de faire oublier la présence mécanique de l'objet, ou l'aspect de certaines machines se parant d'ornements baroques ou de colonnes égyptiennes. « Généralement, écrit G. Simondon, tout travestissement d'objets techniques en objets esthétiques produit l'impression gênante d'un faux et paraît un mensonge matérialisé. » Il semble difficile de dissocier totalement les objets des réponses architecturales de la même époque ; les bâtiments néo-gothiques « the houses of Parliament » à Londres, de C. Barry, ou encore, à Paris, un peu plus tard, le néo-baroque de l'Opéra de Garnier.

★ D'autre part, à l'opposé, et ceci n'est pas une simplification historique mais correspond bien à toute une polémique de l'époque (Garnier sollicita une pétition au moment de la construction de la tour Eiffel), on trouve les solutions fournies en grande partie par les ingénieurs proposant des objets, des produits, des machines ou des architectures émanant d'un dessin fonctionnel. C'est le début de la grande architecture métallique : serre du jardin des Plantes de Rouhault, 1833 ; bibliothèque Sainte-Geneviève de Labrouste, 1845 ; les ouvrages d'Eiffel, la construction des gares.

Certains objets ou produits illustrent cette tendance, c'est-à-dire une maîtrise profonde de la production industrielle, un accord rationnel entre la forme et la fonction. On comparera la machine à coudre surornementée et l'aspect épuré de la première moissonneuse conçue par un pionnier, Mac Cormick. Avec l'essai triomphal de celle-ci, en 1831, contraste l'accueil critique qui fut fait à l'objet lors de sa présentation en Europe : la moissonneuse fut critiquée, et cela non pas pour sa performance technique, mais bien pour son aspect dénudé.

L'Exposition universelle qui eut lieu à Londres en 1851 met bien en évidence cette ambiguïté. La construction du Crystal Palace n'inaugure pas l'emploi du métal dans l'architecture, mais son architecte Joseph Paxton est un grand novateur, tant dans la conception même de l'ouvrage (il imagina la structure de la charpente du Crystal Palace en étudiant en botaniste l'organisation de la feuille du nénuphar géant *Victoria regia,* par une démarche que nous appellerions bionique) que dans la méthode rationnelle employée pour sa construction, par la gestion même du chantier. La technologie apparaît ici comme la source possible d'une nouvelle architecture : verre et métal. Autour du Crystal Palace se retrouvent d'un côté les partisans d'un fonctionnalisme rationnel, de l'autre les partisans d'un retour aux styles du passé. Non seulement les réactions à propos de la construction en elle-même illustrent ces deux tendances, mais, à l'intérieur même du Crystal Palace, ce fait se trouva doublement vérifié. La plupart des objets présentés en 1851 contrastaient d'une manière saisissante avec l'architecture, par leur maniérisme, leur surenchère d'ornementations, fioritures, formes tourmentées, surchargées de décorations faisant oublier les fonctions primaires de l'objet.

A ce moment, il n'y avait que la moissonneuse de Mac Cormick, ou encore les revolvers de Samuel Colt, pour préfigurer ce que sera le design industriel. C'est encore aux États-Unis vers 1850 que fut dessinée cette fameuse série de revolvers dont le grand intérêt de conception résidait dans l'interchangeabilité des pièces. Plusieurs modèles pouvaient être fabriqués en partant des mêmes pièces de base, véritable fabrication en série annonçant le concept de standardisation. (Déjà, en 1800, l'invention du tour automatique de Maudslay avait permis d'obtenir une uniformité dans le filetage des vis.) J. C. Migout et C. L. Bergery écrivaient en 1840 : « L'uniformité exigeait une extrême précision dans l'exécution de chaque pièce et une exactitude rigoureuse dans leur assemblage. On les prescrivit, on les obtint et par là les constructions furent portées à un tel point de perfection qu'une pièce soit en bois, soit en fer d'un certain modèle de voiture et confectionnée dans un arsenal quelconque put servir de rechange à toutes les voitures d'un même modèle confectionné dans d'autres arsenaux. »

En utilisant les nouveaux apports de la technologie, ainsi que les nouveaux matériaux, les ingénieurs proposèrent des solutions qui seront, par leur souci de fonctionnalité et d'économie de dessin dans le sens noble du terme, profondément esthétiques : en 1850, le Britannia Tubular Bridge de Stephenson; en 1854, la construction des Halles de Baltard.

On peut relever encore quelques dates importantes : 1840, l'arrivée des produits semi-finis qui seront bientôt à la base de la réalisation de nombreuses architectures et de nombreux produits (téléphone, gramophones, luminaires, ferronnerie) ; James Nasmyth invente le marteau-pilon à vapeur qui permettra de façonner des pièces métalliques qu'il eût été impossible d'obtenir à la main; 1850, le ciment est produit en masse; 1856, Bessemer met au point le procédé qui permettra la production de l'acier. Aux États-Unis, James Otis expérimente à New York le premier ascenseur. C'est aussi la création du premier Sulky avec son dessin précis, léger, purement calculé pour sa fonction.

En 1859, en Allemagne, Michael Thonet propose les premières chaises de série d'une ligne très sobre en bois cintré. A la fois industriel, créateur, ingénieur, Thonet concevait les machines nécessaires à la fabrication en série de ses modèles.

C'est à peu près à ce moment-là qu'il faut situer en Angleterre l'importance de la prise de position de W. Morris dont les idées dérivaient pour une grande part de celles de Ruskin. Les théories de W. Morris ainsi que son œuvre eurent une importance considérable pour la création des objets et des produits, en particulier ceux de l'habitat. W. Morris était un « socialiste » avant tout. Replaçons-nous dans cette Angleterre victorienne : l'apparition dans les campagnes d'usines bruyantes obscurcissant les paysages (on pense aux romans de Dickens), la prolifération d'objets hétéroclites plus ou moins hideux ou inutiles produits par les machines, les conditions de vie des ouvriers, souvent infernales, contrastant avec celles de la bourgeoisie. Contre cette société industrielle dotée de tous les attributs de l'enfer, W. Morris propose un retour en arrière, un retour au Moyen Age. Il refuse totalement l'ère des machines et prêche que la beauté des objets et des produits ne peut être créée que par la main de l'homme. Il souhaitait, par ce retour à l'artisanat, combler les hommes de toutes les classes avec des objets de qualité : « Les classes populaires doivent en même temps se libérer de l'esclavage d'usine et s'entourer d'un cadre de vie dont la franchise et la pureté lui apporteront le bonheur. » Le mouvement « Arts and Crafts » est fondé sur l'initiative de Morris en 1886. On y rencontre des noms comme Ashbee, Crane, Gimson; tous ces artistes, artisans et créateurs constatent que la machine est responsable d'une profonde modification des rapports de l'homme avec les objets. La production industrielle dépasse dans sa distribution le cadre étroit de la contrée, suscitant des intermédiaires commerciaux et supprimant le contact direct entre le producteur et le consommateur. D'autre part, l'automatisation engendre l'ouvrier spécialisé et le désintérêt de celui-ci vis-à-vis de ce qu'il produit. Les « Arts and Crafts » préconisent le retour à des méthodes anciennes quasi artisanales. Le travail se fait en groupe, et le travailleur reste en contact avec l'objet à tous les stades de la production. Dans ce dessein se constituent des ateliers artisanaux où sont fabriqués meubles, vaisselle, tapisseries, etc. Mais cette production artisanale se révèle plus coûteuse que la production industrielle; elle est donc destinée à une clientèle privilégiée. C'est l'échec; Ashbee propose alors d'utiliser des prototypes artisanaux comme modèle industriel, ce qui est encore un non-sens du point de vue de la production.

Cependant il est certain que W. Morris a eu le mérite de poser clairement le problème de l'esthétique des objets produits par les machines. Henri Van de Velde (Belgique), fortement influencé par la pensée de W. Morris, propose de poursuivre cette recherche en créant des formes fonctionnelles parfaitement en accord avec les matériaux, mais, à l'encontre de W. Morris, en utilisant les possibilités de la machine, en réunissant l'art et l'industrie.

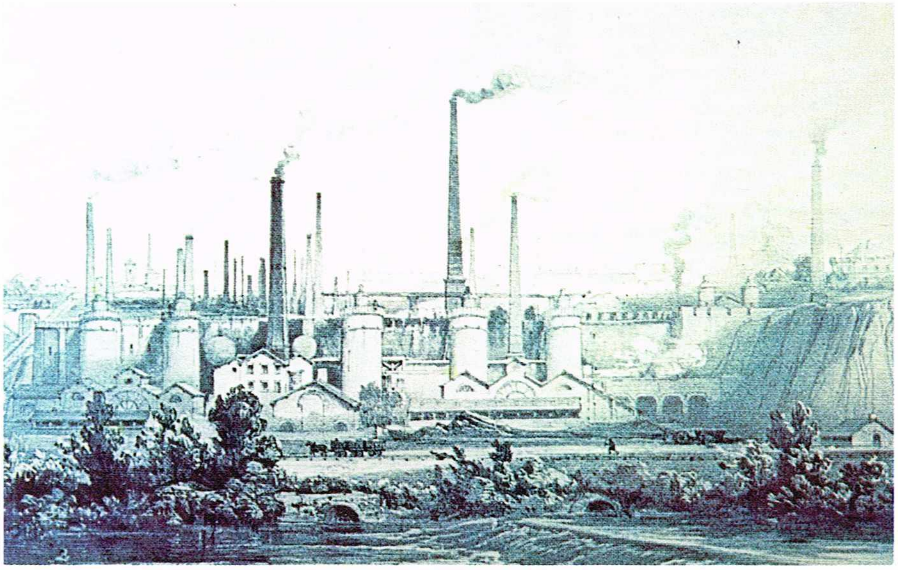

C.C.I. - C.N.A.C.G.P.

▲ Hauts fourneaux de Commentry. Contre cette société industrielle, W. Morris prêche la beauté des objets et des produits créés de main d'homme. Écologiste avant l'heure, il fonde, en 1886, un mouvement défendant ses idées.

L'art nouveau

Van de Velde reste à la tête du mouvement moderne de ce début du XX^e siècle.

1890-1910 : nous sommes à l'époque de ce qui fut nommé « art nouveau ». Pendant vingt ans, de nombreux créateurs s'attachèrent à dessiner des objets en prenant comme modèles ou références les formes de la nature (fleurs, animaux, feuillage, femme), aspects biomorphiques concrétisés dans les objets quotidiens, un art appliqué dont le rythme, les courbes, dérivaient des formes naturelles, du vivant. L'art nouveau, qualifié à tort de style nouille (en Allemagne c'est le Jugendstil, en France le style 1900, ou Liberty en Grande-Bretagne) marque ce début du XX^e siècle de réponses formelles particulièrement originales. Les motifs et modèles proposés sont parfaitement nouveaux, sans référence aucune aux styles antérieurs. Même si, en 1907, en Autriche, l'architecte André Loos publie un livre intitulé *Ornement et Crime*, nous devons nous garder de considérer, *a posteriori*, l'art nouveau uniquement comme un style. Les entrées de métro de Guimard, indépendamment de leur rythme décoratif, ont eu l'avantage de proposer pour la première fois un véritable système d'objets pour la ville; c'est déjà la conception actuelle du mobilier urbain.

Situons encore quelques dates : 1870, invention du Celluloïd; 1876, Bell met au point le téléphone; 1889, Kodak sort un appareil de série; 1895, le cinématographe des frères Lumière. Aux États-Unis, c'est la grande architecture de Sullivan, dont la célèbre formule, « la forme suit la fonction », se trouve vérifiée par l'architecture du Guaranty Building de Buffalo : « C'est la loi qui règne sur toutes les choses organiques et inorganiques, physiques et métaphysiques, humaines et surhumaines, et qui dicte toutes les vraies manifestations de l'esprit, du cœur et de l'âme : la vie se reconnaît à son expression, la forme suit toujours la fonction. C'est la loi. » Ce sera aussi l'école de Chicago avec F. Lloyd Wright. En 1896, le Prus-

▶ *A gauche, luminaire d'E. Gallé (1900) : début de l'« art nouveau ». A droite, station du métro Père-Lachaise par Guimard, à Paris. Les entrées de métro de Guimard, en plus de leur rythme décoratif, ont eu l'avantage de proposer pour la première fois un véritable système d'objets pour la ville.*

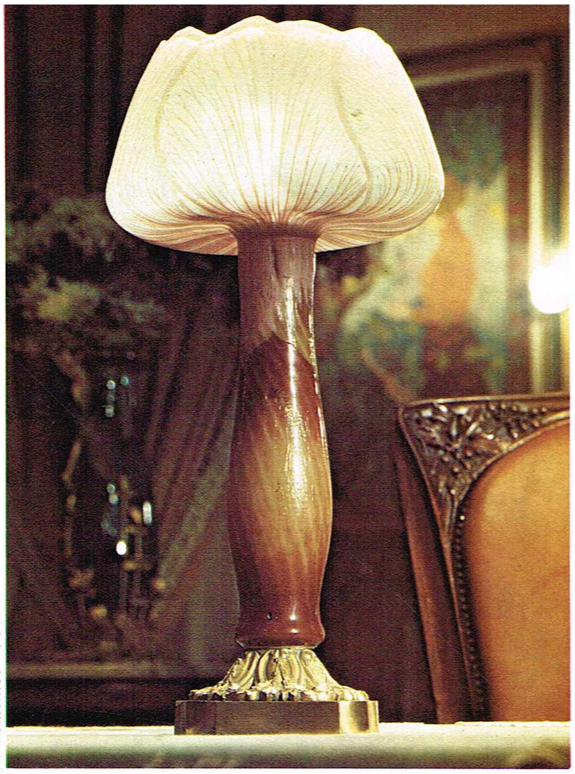

R. Guillemot - TOP

Bulloz

sien Muthesius séjourne en Angleterre. Il y rédigera un rapport dont le contenu sera très proche des principes de l'esthétique industrielle. 1900, c'est la construction à Paris du métro ; c'est aussi l'année de la Grande Exposition, la construction du Grand et du Petit Palais, du pont Alexandre-III. 1901, c'est la création à Paris de la Société des artistes décorateurs dont la vocation sera de promouvoir les arts appliqués. En 1904, Paul Souriau écrit *Beauté rationnelle* et s'efforce de définir une parfaite symbiose du Beau et de l'Utile.

Ces années-là, on assiste à la naissance du cubisme, à la découverte du lamellé collé par Otto Hetzer. Aux États-Unis, c'est la première machine à laver. 1909 voit l'invention de la bakélite. Il semble difficile de limiter ce bilan historique à la simple production des objets dans l'habitat quotidien.

Parallèlement à cette évolution, on peut suivre dans d'autres domaines l'amélioration progressive des conditions de travail ou d'existence (en 1896, découverte de la radio-activité, des rayons X, en 1901 des groupes sanguins).

Dans ce chapitre, le lecteur découvrira plus en détail l'évolution plus précise d'un objet ou d'un produit. Ce tour d'horizon historique s'efforce seulement de mettre en lumière les interactions ayant existé entre des domaines apparemment différents.

Nous sommes arrivés en 1912, Muthesius a déjà fondé le « Deutscher Verbund » qui peut se comparer à une société d'encouragement à l'art et à l'industrie. Cet architecte allemand eut l'intention de favoriser les relations entre artistes et industriels. C'est ainsi que Peter Behrens put réaliser pour la firme AEG le premier programme de design industriel englobant l'étude des appareils, la conception des emballages, l'aménagement des locaux de l'usine jusqu'à la présentation graphique du catalogue publicitaire de la firme. Cet exemple resta isolé sinon unique en ce début de siècle. Peter Behrens a été le premier consultant artistique, c'est-à-dire le premier designer en place dans une entreprise industrielle.

D'importants mouvements se dessinent, qui auront tous une répercussion à plus ou moins court terme sur les créations de produits ou sur les créations architecturales : le futurisme italien représenté par l'impétueux Marinetti, le constructivisme en Russie représenté par Tatlin, l'esprit nouveau et Le Corbusier, le mouvement hollandais « De Stijl » prônant la rigueur formelle, influencé fortement par l'art japonais et représenté par Rietveld, Van Doesburg et, dans la peinture, par Mondrian.

▼ *A gauche, vue générale de l'Exposition de 1900, à Paris. A droite, c'est en 1912 que Peter Behrens put réaliser pour la firme AEG le premier programme de design industriel, englobant l'étude des appareils, la conception des emballages, l'aménagement des locaux de l'usine, jusqu'à la présentation du catalogue publicitaire. Ici, une usine d'industrie lourde.*

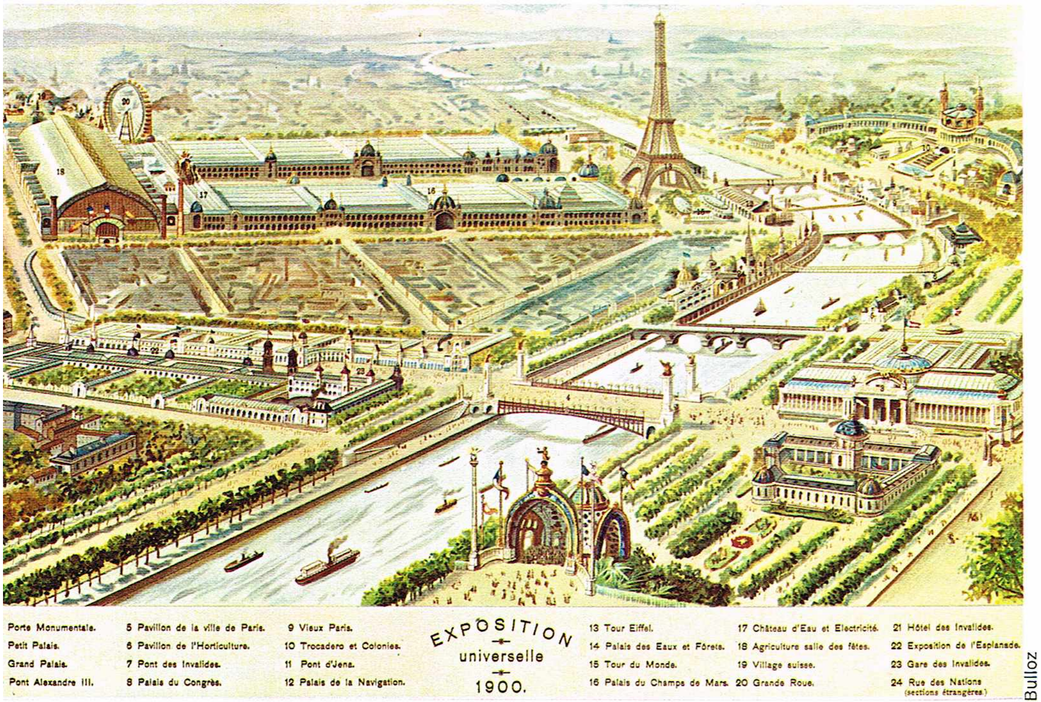

Bulloz

Lion et Tajan - C.C.I. - C.N.A.C.G.P

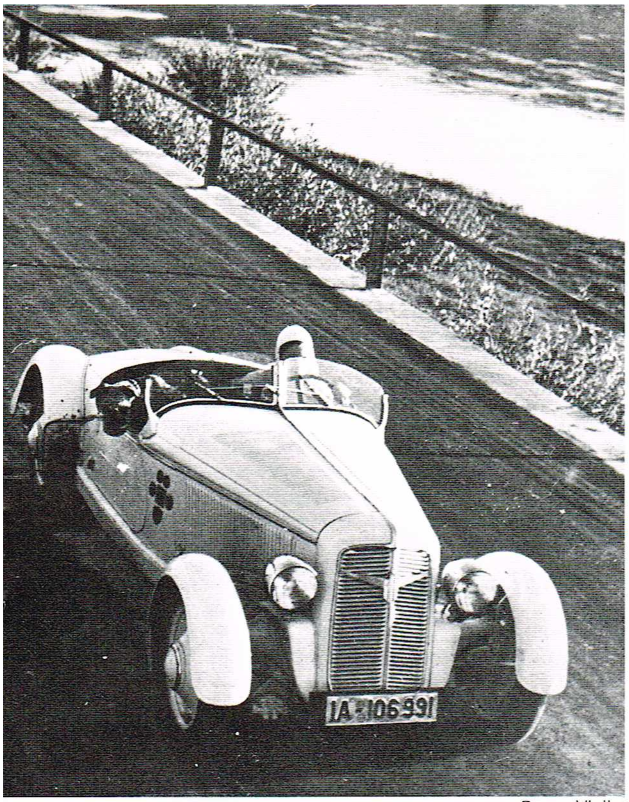

Roger-Viollet

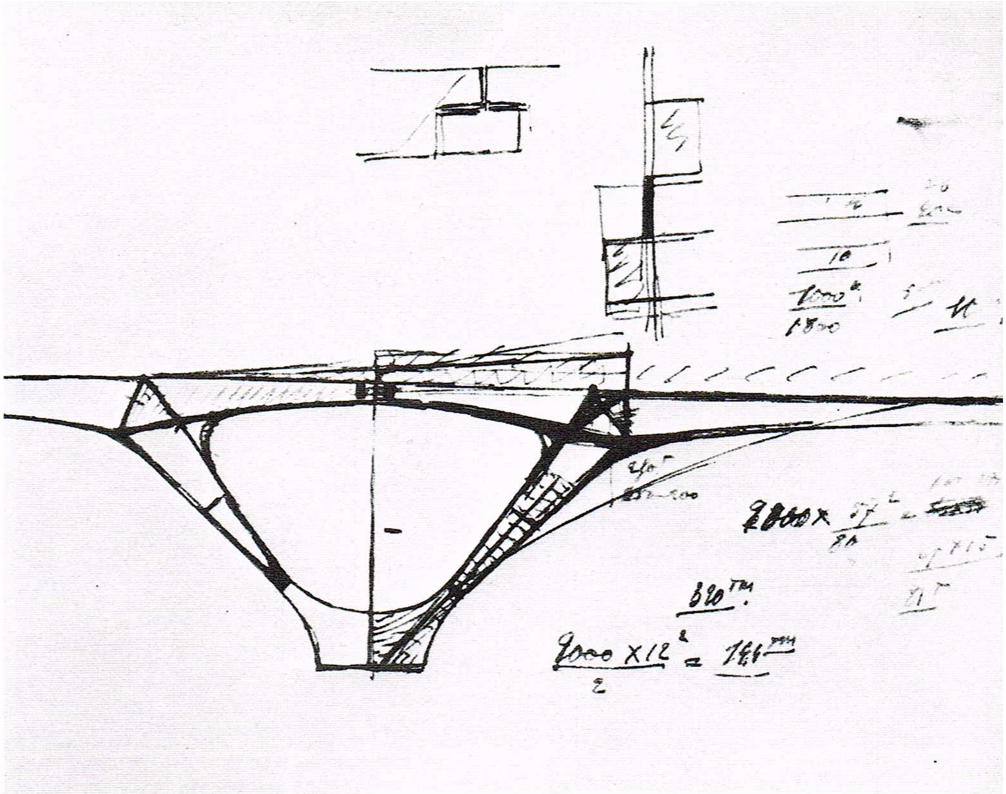

Document Freyssinet

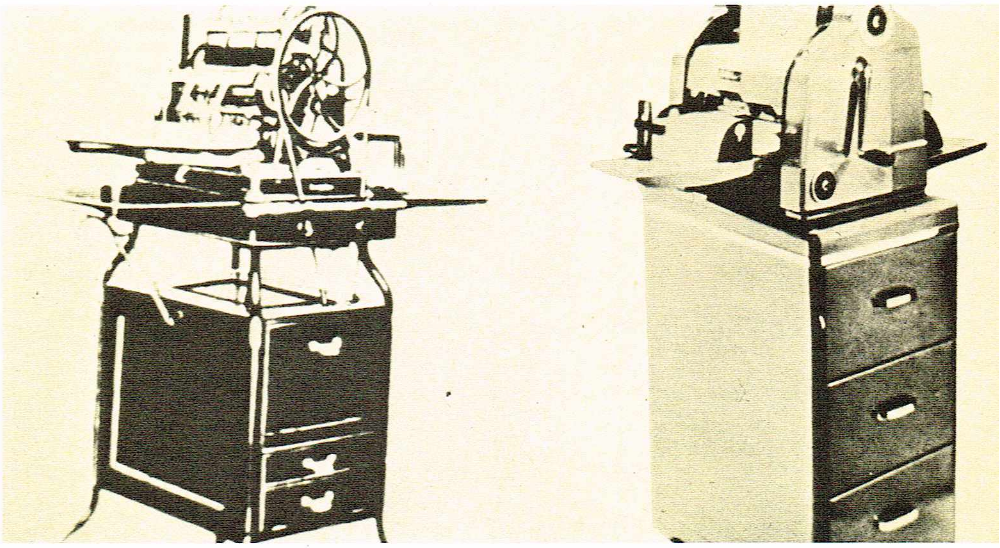

C.C.I. - C.N.A.C.G.P.

▲ *En haut à gauche, cabriolet Adler, 1930, dessiné par Gropius. En haut, à droite, esquisse originale d'Eugène Freyssinet. Étude et croquis préliminaires du pont Saint-Michel à Toulouse. Ci-dessus, le duplicateur Gestetner, étudié par R. Loewy en 1929, est resté le symbole de l'œuvre de celui qui sera considéré comme le créateur de l'esthétique industrielle.*

Le Bauhaus

C'est dans la république de Weimar que se produira un événement qui aura dans l'histoire des objets un retentissement considérable. En 1919, Van de Velde et Gropius font fusionner l'École des arts décoratifs et l'École des beaux-arts de Weimar pour créer le « Bauhaus ». Cette école est un creuset où se mêlent des représentants du mouvement « De Stijl », avec Van Doesburg, et des artistes constructivistes, tel Moholy Nagy. Beaucoup de constructivistes viennent des ateliers bolcheviques de Moscou ; ils pensent que « la science elle-même engendrera des formes nouvelles et que, pour conserver la cohérence de celles-ci, l'aspect extérieur d'un objet doit en respecter l'organisation interne ».

L'originalité du Bauhaus réside dans son enseignement où l'on apprend à concevoir les objets de la façon même dont ils sont perçus, c'est-à-dire globalement et non isolément. Cependant, l'attitude fonctionnaliste du Bauhaus est rigide et absolue, elle engendrera un formalisme constructiviste qui sera vite dépassé par la fonction symbolique de l'objet. Pourtant : « le Bauhaus n'avait pas pour but de propager un « style », un système ou un dogme quelconques, mais d'exercer une influence vivifiante sur la création. Un « style du Bauhaus » n'eût été qu'un retour à l'académisme stérile et stagnant et c'était justement pour le combattre que j'avais créé le Bauhaus. Nous tentions de découvrir une nouvelle attitude qui suscite une conscience créatrice chez les intéressés et qui conduirait finalement à définir une nouvelle conception de la vie ».

Le manifeste du Bauhaus, lancé en avril 1919, exprimait un désir d'œuvre totale : créer une unité fondamentale entre toutes les branches des arts appliqués, « telle la cathédrale du futur, à l'exemple des bâtisseurs, illuminer dans sa plénitude de lumière les moindres recoins de la vie quotidienne ».

Devant ce monde à construire, le Bauhaus proposait une nouvelle attitude, une nouvelle conscience créatrice. Il a certainement eu plus d'influence sur les générations suivantes par cet idéal profondement inspiré d'humanisme que par les œuvres en tant que telles qu'il a réalisées.

Parmi ces œuvres, certaines aujourd'hui nous paraissent encore très actuelles. Il suffit de citer les meubles de Breuer, les objets de Wagenfeld, les créations de Gropius ou de Mies Van der Rohe. Le Bauhaus vécut à Weimar, à Dessau ensuite. L'arrivée du nazisme entraîna sa fermeture en 1933 et l'exil de ses enseignants. Ainsi se créa aux États-Unis un New Bauhaus (1937).

Citons quelques découvertes de cette époque. De 1917 date l'invention de la Cellophane en France, de 1927 celle du Plexiglas (PMM), de 1930 celle du béton précontraint par E. Freyssinet et de 1931 celle du polyvinyle. Le premier rasoir électrique a été fabriqué en 1933.

L'esthétique industrielle

Aux États-Unis, lors du redressement qui a suivi la grande crise économique de 1929, les industriels américains seront les premiers à percevoir l'intérêt de l'amélioration esthétique des objets produits dans leurs usines, et le facteur esthétique sera utilisé comme argument de vente. Alors que le Bauhaus avait une attitude didactique, les esthéticiens industriels, tels R. Loewy ou H. Dreyfus, se contentent de répondre à l'attente des consommateurs. Raymond Loewy, dans son livre *La laideur se vend mal*, propose, en esthéticien, des études complètes visant à rajeunir, à embellir les produits industriels. Le duplicateur Gestetner qu'il étudia en 1929 est resté le symbole de l'œuvre de celui qui sera considéré comme créateur de l'esthétique industrielle.

Il faut souligner, à ce propos, qu'actuellement, l'expression « esthétique industrielle » est souvent critiquée par les designers industriels qui la trouvent trop limitative par rapport à leur démarche plus globale.

En fait, il s'agissait alors souvent de décoration apportant une valorisation sociale au produit. Certains sociologues y voient aujourd'hui l'expression d'une « culture industrielle et populaire », on pourrait dire aussi un folklore de la technologie mal comprise; car on se contente de transformer l'aspect du produit sans améliorer réellement la valeur d'usage de l'objet ni faciliter sa fabrication.

Les premiers pas du design

La production de guerre des années 1940 impose des conceptions plus pratiques se souciant peu de considé-

La charte de l'esthétique industrielle (définition de J. Vienot)

Définition : l'esthétique industrielle est la science du beau dans le domaine de la production industrielle. Son domaine est celui des lieu et ambiance de travail, des moyens de production et des produits.

1° loi d'économie : l'économie des moyens et des matières employés (prix de revient minimum), dès lors qu'elle ne nuit ni à la valeur fonctionnelle, ni à la qualité de l'ouvrage considéré, est condition déterminante de la beauté utile.

2° loi de l'aptitude à l'emploi et de la valeur fonctionnelle : il n'est de beauté industrielle que d'ouvrages parfaitement adaptés à leur fonction (et reconnus techniquement valables). L'esthétique industrielle implique une harmonie intime entre le caractère fonctionnel et l'apparence extérieure.

3° loi d'unité et de composition : pour former un tout harmonieux, les différents organes constituant un ouvrage utile doivent, sur leur plan respectif, être conçus les uns en fonction des autres et en fonction de l'ensemble.

Les ouvrages utiles doivent satisfaire aux lois d'équilibre statique ou dynamique dans les proportions, compte tenu des propriétés des matières employées.

4° loi d'harmonie entre l'apparence et l'emploi : dans l'ouvrage qui satisfait aux lois de l'esthétique industrielle, il n'y a jamais conflit, mais toujours harmonie entre la satisfaction esthétique qu'en ressent le spectateur désintéressé et la satisfaction pratique qu'il donne à celui qui l'emploie.

Toute production industrielle doit être génératrice de beauté.

5° loi du style : l'étude du caractère esthétique d'un ouvrage ou d'un produit industriel doit tenir compte de la durée normale à laquelle il doit être adapté.

Un ouvrage utile ne peut prétendre à un caractère de beauté durable que s'il a été conçu loin de l'influence artificielle de la mode.

Des caractéristiques esthétiques des ouvrages utiles d'une époque découle un style qui en est l'expression.

6° loi d'évolution et de relativité : l'esthétique industrielle ne présente pas de caractère définitif : elle est en perpétuel devenir.

La beauté de l'ouvrage utile est fonction de l'état d'avancement et de l'évolution des techniques qui l'engendrent.

Toute technique nouvelle nécessite le temps de la maturation pour parvenir au stade de l'épanouissement qui lui permettra de trouver une expression esthétique équilibrée et typique.

7° loi du goût : l'esthétique industrielle s'exprime dans la structure, la forme, l'équilibre des proportions, la ligne des ouvrages utiles. Le choix des matières, des détails de présentation, des couleurs relève davantage du goût qui doit en être l'heureux complément, compte tenu de la loi d'économie.

8° loi de satisfaction : l'expression des fonctions qui donnent sa beauté à l'ouvrage utile doit s'entendre de la façon dont elle frappe tous nos sens : non seulement la vue, mais l'ouïe, le toucher, l'odorat et le goût.

9° loi du mouvement : les engins destinés à se mouvoir eux-mêmes dans l'espace (air, mer, route, rail) trouvent dans le mouvement qu'ils engendrent la caractéristique essentielle de leur esthétique. Aux lois d'aptitude à l'emploi et d'harmonie entre l'apparence et l'emploi s'ajoute ici un facteur de comportement dans l'élément considéré (terre, eau, air) qui domine les autres bases du jugement.

10° loi de hiérarchie ou de finalité : l'esthétique industrielle ne peut faire abstraction de la finalité des ouvrages produits industriellement.

Une hiérarchie morale s'établit naturellement entre ceux-ci. Les productions industrielles qui possèdent, en raison de leur objet, un caractère de noblesse et qui sont de nature à aider l'homme à progresser, ou qui sont susceptibles d'avoir une influence salutaire dans le domaine social, jouiront d'un préjugé favorable. En revanche, les engins qui ont pour fin la destruction humaine ne sauraient prétendre à une admiration sans réserve.

11° loi commerciale : l'esthétique industrielle trouve l'une de ses applications les plus importantes sur les marchés commerciaux. La loi du plus grand nombre des acheteurs ne saurait infirmer la valeur des lois définissant l'esthétique industrielle.

La vente ne saurait être considérée comme un critère de la valeur esthétique. Lorsqu'elle en est la considération, elle témoigne de l'égalité de niveau entre le créateur du modèle et l'acheteur, toute considération de prix mise à part.

12° loi de probité : l'esthétique industrielle implique honnêteté et sincérité dans le choix des matières ou matériaux employés.

Une réalisation industrielle ne saurait être considérée comme belle, dès lors qu'elle contient un élément de mensonge, de dissimulation, de tromperie.

Toutefois, les revêtements et les caparaçonnages exigés fonctionnellement par une réalisation industrielle sont légitimes lorsqu'ils expriment correctement les fonctions essentielles de l'objet et qu'ils ne servent pas à dissimuler des matériaux ou des organismes susceptibles de compromettre le bon fonctionnement ou la valeur de l'objet.

13° loi des arts impliqués : l'esthétique industrielle implique une intégration de la pensée artistique dans la structure de l'ouvrage considéré.

Loin du décor plus ou moins arbitraire ou artificiel ou surajouté des arts appliqués, les arts qui concourent à l'esthétique industrielle peuvent singulièrement être dits impliqués dans le modèle à concevoir, faisant corps avec la technique et se confondant avec elle.

Jacques Vienot (1953)
Fondateur de l'Institut d'esthétique industrielle

rations esthétiques. C'est l'époque de la Jeep, des abris métalliques, de la mise au point des conditionnements d'aliments en rations et de la création d'objets élémentaires à puissante valeur d'usage tels que le jerrican ou la tenue de combat aux multiples poches. La forme d'un objet doit avant tout être une réponse matérielle pour améliorer l'usage. Les designers américains, tels que D. Teague, qui ont participé à la conception de ces objets, annoncent le design contemporain.

Il ne faut pas confondre les notions de *styling*, qui cherche à enjoliver, à améliorer l'apparence d'un produit sans se soucier réellement de sa bonne adaptation à sa fonction, de *redesign*, qui est la modification d'un produit déjà dessiné en vue de le réadapter aux besoins du marché et qui peut en certains cas apporter de bonnes solutions d'amélioration ; le terme même d'*esthétique industrielle* explicite ses objectifs, nous l'avons vu ; quant au concept actuel de *design industriel,* il correspond à une véritable profession dont la vocation, selon la définition actuelle donnée par l'Union française des designers industriels, est, « après analyse technologique, économique et esthétique, exhaustive, de créer les formes, matières, couleurs, structures permettant d'améliorer tous les aspects de l'environnement humain conditionnés par la production industrielle, qu'il s'agisse :

— de création (ou design) de produits ;
— de création (ou design) graphique ;
— de création d'environnement ou d'ambiance visuelle ».

Par ce rapide survol historique, nous nous sommes efforcés de dégager les événements qui ont amorcé les processus étiologiques du design industriel, qui ont contribué, par le jeu des réactions d'influence ou d'opposition, à définir cette activité. Il nous a permis de comprendre comment un objet ne peut être considéré que comme une réponse à un moment donné, et comment il reste indissociable de son contexte.

Interactions avec la technologie

L'évolution formelle des produits est liée à l'évolution des techniques ou à certains bouleversements sociaux. Les nouveaux matériaux autorisent de nouvelles expressions. Ainsi, les possibilités qu'offrent aujourd'hui les matières plastiques engendrent de nouvelles formes, elles ont permis la diversité des modèles actuels dans l'ameublement, la fabrication, dans le domaine hospitalier, d'instruments à jeter (seringue, linge, ustensiles chirurgicaux à usage unique) ; les presses capables de sortir des dimensions impressionnantes de profils en bois moulé ont permis dans l'ameublement la création de nouveaux modules.

Si l'on peut *a posteriori*, dégager d'une époque un style celui-ci est certainement en relation étroite avec les techniques du moment. La main, l'artisanat engendraient leurs propres formes, la machine donne de nouvelles possibilités. Si, à la fin du XVIIIe siècle, le dessin des caractères typographiques devient plus précis, c'est parce que les presses d'imprimerie ont été améliorées et au même moment également la qualité des papiers.

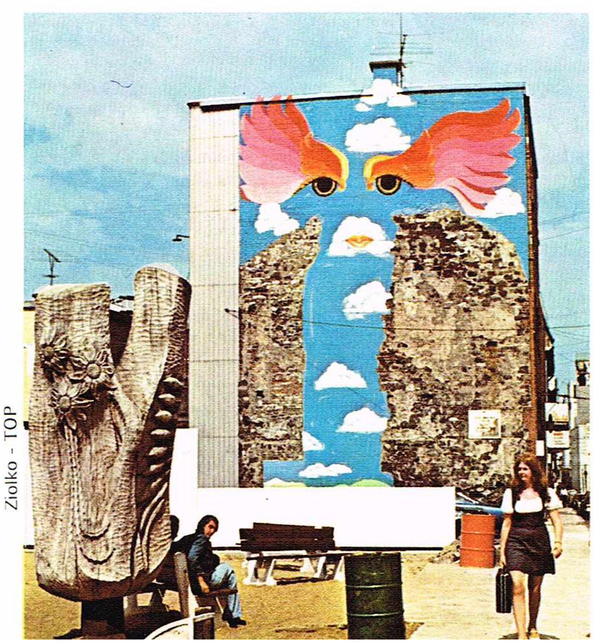

Ziolko - TOP

En 1879, l'apparition de la première lampe à incandescence suscite une explosion de formes nouvelles. Tout se tient. Si les premiers *sky scrapers* ont pu être construits vers 1890, c'est bien en rapport direct avec l'invention des produits semi-finis, avec le début de la production du ciment en masse et avec l'invention du premier ascenseur.

Entre l'objet, l'usager et la technologie, les interactions sont nombreuses et l'évolution d'un produit ne peut se comprendre qu'au travers de ces interactions. L'usager peut contraindre la recherche technologique à proposer des solutions nouvelles et à prendre certaines orientations. La réglementation devenue plus rigide sur les produits non-feu crée des obligations aux fabricants de fibres synthétiques. D'un autre côté, les contraintes techniques interfèrent sur la forme, la taille, l'aspect ou même le fonctionnement des produits; ainsi les progrès de la chimie, qui permettent une certaine stabilisation des pigments aux intempéries ou à la lumière, ont brutalement autorisé la couleur dans l'architecture — polychromie ou supergraphisme. De la même manière, la possibilité de teinter les granulés de matières plastiques modifie considérablement l'aspect de nos objets quotidiens. Les techniques récentes de transformation du bois ont conditionné de nouvelles formes (angles arrondis du bois moulé), tout comme les techniques de moulage des différentes matières plastiques ont complètement révolutionné l'aspect formel des objets actuels. Certains objets ont déjà été miniaturisés, en liaison directe avec l'électronique.

Un autre aspect de cette influence de la technologie est la disparition complète de certaines familles d'objets : la stérilisation industrielle a fait disparaître des ustensiles de cuisine, ne serait-ce que le bidon de lait familial ou l'anti-monte-lait, phénomène quelquefois réversible, puisqu'on a vu la réapparition récente des yaourtières qui s'équipent alors d'un dispositif électrique.

Les matériaux et les formes de nos objets évoluent, et cette transformation ne se fait pas sans regrets. En effet, nous remarquons souvent, dans l'utilisation d'un matériau nouveau, un instinct de référence à des schémas traditionnels. L'invention même d'un matériau — par exemple, celle du Celluloïd, destiné à remplacer l'ivoire des boules de billard — procède d'un désir d'imitation. Ainsi, les matériaux lamifiés (Formica, Polyrey ou autres) adoptent au départ l'aspect de matériaux déjà connus : ce sont alors les faux bois, les faux marbres, les faux lièges.

Ce n'est que progressivement que les formes réalisent leur propre autonomie. Les premiers moulins à café furent d'abord des moulins à épices. Les machines elles-mêmes ont des formes qui rappellent des modèles antérieurs : les premières automobiles eurent du mal à se dégager de la berline, la bicyclette porte encore en elle la marque du cheval dont elle est née (le hobbyhorse, la selle, les pédales dérivées des étriers, l'expression anglaise *to ride a bike*). L'existence formelle des objets semble les figer dans leur image concrète. Le vocabulaire traduit la lenteur de cette progression : la plume, le stylo-plume, le stylo, le stylo-bille.

Lorsque la machine ou l'objet répondent à une fonction entièrement nouvelle, on les voit quelquefois se parer, s'orner, se référer par le superflu au style de leur époque.

Aspects sémantiques de l'objet

Cette réflexion nous amène à prendre en considération l'aspect sémantique, l'*aspect symbolique des objets et produits*. Indépendamment du service qu'ils rendent, indépendamment de leur fonction, les objets quotidiens, les produits dont nous sommes entourés ont une autre charge. Il suffit de regarder la diversité des formes dans l'automobile, répondant pourtant souvent au même cahier des charges, pour comprendre que nous attribuons aux objets qui nous entourent une autre dimension. Si on accepte de faire un parallèle avec la linguistique, on parlera alors de *connotations*, ce que Roland Barthes dans son livre *Mythologies* appelle « métalangage ».

Cette dimension sémantique des objets et produits a été remarquablement analysée par Jean Baudrillard dans *le Système des objets* et dans son ouvrage *Pour une critique de l'économie politique du signe*. Les techniques de vente actuelles utilisent largement ce facteur. La pro-

M. Fraudreau - TOP

▲ Les matières plastiques engendrent des formes et des couleurs nouvelles dans la vie quotidienne.
◀ Page ci-contre, à gauche, la charte de l'esthétique industrielle (texte communiqué par l'Institut français d'esthétique industrielle). A droite, mur peint à Québec, considéré comme « création d'ambiance visuelle ».

Document Hansa

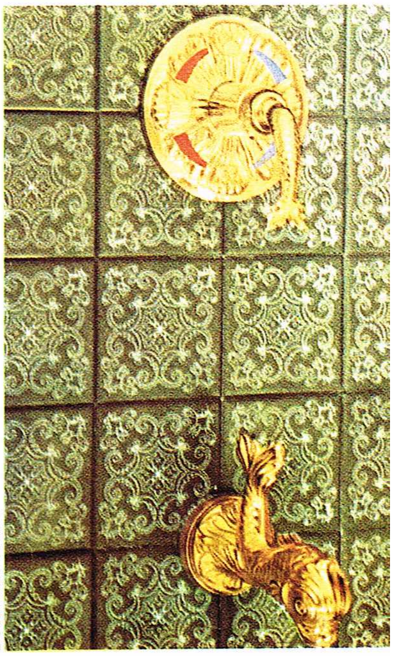

Document Hansa

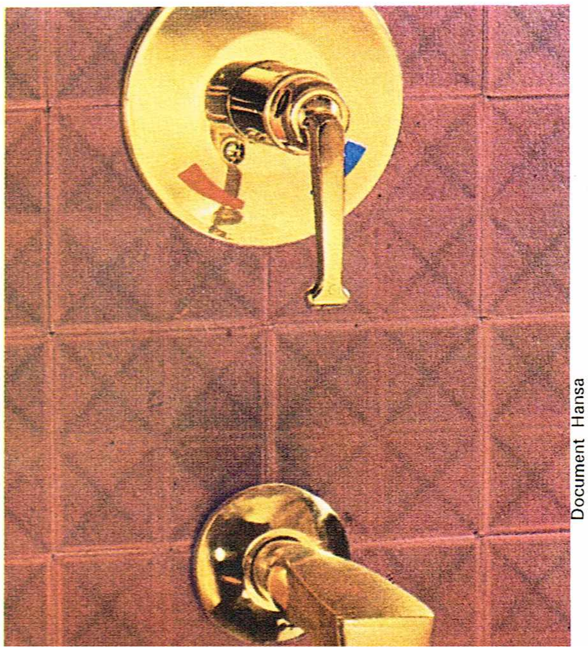

Document Hansa

◀▲ Mitigeur à levier, bec de baignoire. Débit et température de l'eau sont réglés simultanément par un seul mouvement de levier. Simplicité formelle en accord avec le maniement aisé. Même produit montrant deux exemples de stylisme. Le traitement de surface chromé-doré associe à l'objet l'idée de richesse. Ici, même mécanisme, mais surchargé et habillé. Symbole du dauphin, lui-même surmonté de motifs décoratifs mi-nageoires mi-feuillage.

▶ *Pendules, thermomètres et baromètres. Le kitsch.*

Document D. Quarante

duction actuelle, si on considère le monde de la consommation, prend comme référence, selon Baudrillard, plus la valeur de l'objet comme signe, c'est-à-dire comme valeur d'échange, que comme service, c'est-à-dire comme valeur d'usage. Notre dépendance sociale vis-à-vis des objets nous oblige souvent à un achat motivé par le paraître autant que par le service. « Indépendants de leur statut fonctionnel, les objets qui nous entourent ont une autre valeur, *celle de l'échange signe*, les objets ne s'épuisent jamais dans ce à quoi ils servent, et c'est dans cet excès de présence qu'ils prennent leur signification de prestige, *qu'ils désignent* non plus le monde mais l'être et le rang social de leur détenteur », écrit Baudrillard.

Les exemples ne manquent pas, depuis l'automobile, en passant par la montre de femme surchargée de diamants réduisant la dimension du cadran à un disque devenant lui-même fonction symbolique, jusqu'aux pavillons de banlieue du début du siècle. Le terme « pavillon » en est bien l'illustration verbale, ses cheminées d'apparat, ses barres d'appui en place seulement du côté rue en sont l'expression visible.

Exacerbant à l'extrême la valeur connotative des objets, on aboutit au concept du *kitsch* qui est, selon la définition d'A. Moles, « une fonction sociale surajoutée à la fonction significative d'usage qui ne sert plus de support mais de prétexte ». « Les objets kitsch ne se laissent pas déduire rationnellement mais en y incorporant un degré élevé de gratuité et de jeu qui leur donne une sorte d'universalité hétérogène. »

Ces connotations peuvent être volontairement utilisées dans la création des produits. C'est la définition même du *stylisme*. Elles peuvent se retrouver aussi bien dans la morphologie de l'objet (dessin d'un simple robinet surchargé de dorures, ou d'un aspirateur aérodynamique) que dans la présentation même de ces produits. Celle des produits alimentaires en est un exemple typique : l'emploi abusif qui a été fait de certains colorants alimentaires n'avait d'autre souci que de superposer au produit une charge symbolique, la couleur intervenant comme renforcement de l'image du produit, soit coloration du produit lui-même (glace au citron plus jaune qu'une glace au citron naturel), soit coloration de l'emballage du produit (photographie de petits pois plus verts que nature).

A ce propos, on notera qu'il est actuellement très difficile de dissocier l'objet de son emballage (packaging) ou du graphisme qui s'y rattache. L'objet est appréhendé par l'usager soit directement (vision, préhension), soit indirectement par l'intermédiaire du graphisme. Il y a plusieurs possibilités :

— ou bien le graphisme accompagne directement l'objet pour fournir une information sur le produit lui-même, sur son contenu, son fonctionnement, sa composition, sa provenance ;

— ou bien le graphisme accompagne l'objet au moyen d'une fiche d'utilisation, fiche technique, fiche d'entretien ; en ce cas, le graphisme intervient pendant ou après l'achat ;

— ou bien le graphisme précède l'objet, il intervient avant l'achat, par la publicité du produit, la présentation sur catalogue photo, l'affiche, l'emballage, le conditionnement.

Les objets actuels sont pour la plupart des produits de l'industrie. Il semble difficile de les isoler totalement de leur contexte de production. L'objet transporte un message, et ce message n'est pas complètement sans lien avec l'entreprise qui a fabriqué le produit. L'objet, le produit communique l'image de l'entreprise, de l'industriel. On aborde ainsi le concept d'*image de firme*. Il suffira de dire ici que les produits sont alors considérés comme vecteurs dans la mise en place d'une stratégie de communication.

Actuellement, l'objet ou le produit, que ce soit dans sa conception (analyses préliminaires indispensables, relations psychologiques, sociales, écologiques ou historiques, relation produit-usager, relation ergonomique homme-machine) ou dans les moyens nécessaires à sa fabrication, à sa mise en œuvre ou encore à sa diffusion, est lié directement ou non à certaines disciplines scientifiques, et toujours à la technologie. Il s'y réfère ou il y fait appel.

Objets, produits et économie

La technologie et le produit, objet de consommation

La technologie et les besoins du marché

L'objet utile est largement influencé par le progrès technologique. Ainsi, par exemple, dans notre milieu familier, la machine à laver le linge ou la vaisselle, l'ouvre-boîtes ou le réveille-matin électronique, tout semble être l'expression d'une robotisation universelle de nos objets. Entre le moulin à café qui ronronne lorsqu'on appuie sur le bouton orange et l'appareil de grand-mère qu'il fallait faire tourner avec beaucoup d'énergie, en le serrant fort entre les genoux, il y a incontestablement un écart important dans l'effort physique à fournir. Plus que cela, cet exemple suggère la modification qui s'est produite dans l'expression et l'usage des objets qui nous entourent. Ce type de transformation est le résultat de rencontres entre la technologie et tout ce qui est utilisable par le « grand public ». Le pouvoir vendeur de notre société mercantile a su nous persuader d'acheter des produits plus modernes et plus pratiques. Les producteurs ont su exploiter les techniques nouvelles pour innover sans cesse dans le domaine du

▶ *A gauche, machine à écrire Valentine, conditionnement de Noël Olivetti. Il est actuellement difficile de dissocier l'objet de son emballage ou du graphisme qui s'y rattache. A droite, l'emploi de certains colorants alimentaires n'avait d'autre souci que de superposer au produit une charge symbolique, la couleur intervenant comme renforcement de l'image du produit.*

Olivetti

B. Kuhn - TOP

quotidien ; le dynamisme économique a su apporter la sophistication technique au rang du domestique.

Il est courant de porter des jugements sévères sur cette trop rapide évolution de notre cadre de vie et d'incriminer l'ampleur des progrès technologiques. Cette réflexion ressemble à celle des anciens Grecs qui attribuaient le vent au souffle d'Éole, ou bien à celle des enfants qui s'imaginent que le vent est produit par le mouvement des ailes du moulin. La technologie est une science des procédés, une étude des phénomènes ayant pour fin de les exploiter avec une intention créatrice, elle n'est pas le machinisme, pas plus que la médecine n'est la maladie. Si l'évolution des objets utilisables par le grand public est rapide, c'est parce que les produits sont soumis à des champs modificateurs intenses. Cette intensité dans la vie des produits, dans la transformation de leur forme, cette anamorphose des objets semble irrésistible, voire programmée. Essayons de savoir quels sont les facteurs autres que la technologie qui influencent le devenir des objets. Essentiellement, des objets sont fabriqués parce qu'ils sont utilisés, donc appréciés pour leur valeur d'usage ; à moins qu'ils ne soient recherchés pour leur valeur d'échange ou pour la « charge symbolique » dont ils sont porteurs (exemple des bijoux). Dans tous les cas, la réalisation industrielle d'objets n'est possible que si l'offre du producteur correspond à la demande de l'utilisateur. Ce qui paraît très simple à l'échelle d'un groupe semble plus compliqué au niveau d'une production de masse. Dans le commerce qui s'établit entre le vendeur et l'acheteur, il faut trouver le moyen d'évaluer la demande et faire en sorte que l'offre ne soit ni sous-estimée, ni trop importante. Ce sont les études et recherches commerciales qui essaient de mesurer et d'ajuster l'offre et la demande. La production industrielle, qui cherche à rentabiliser ses investissements, a des cadences difficiles à moduler en fonction des appétits des acquéreurs ; de plus, il est de l'intérêt du producteur de sortir des quantités importantes (*fig.* 2).

Le jeu économique impose sa règle : produire beaucoup au meilleur prix, réaliser le maximum de bénéfices pour amortir ses équipements et réinvestir au plus vite dans de nouvelles structures pour une production encore plus compétitive. Dans une telle ambiance de stimulation, les producteurs industriels ont besoin, en plus de l'évaluation de l'offre, de stimuler la demande.

La production et le marketing

Comment exciter l'appétit du consommateur de produit ? D'abord, par la publicité, ensuite par la présentation de l'objet et par un bon service de vente, enfin par l'innovation. Le produit est donc cet objet qui se fabrique, se vend, s'achète, s'utilise, se consomme, puis se jette.

La détermination des attentes de l'utilisateur et l'évaluation du désir d'achat du consommateur sont le fait d'une activité bien spécifique, le « marketing », qui se veut la science du commerce et se donne pour but la satisfaction du consommateur devant les produits qu'il a acquis. (Ce terme de marketing, d'origine anglo-américaine, devrait être remplacé par celui de « marchéage » ou de « mercatique » si nous voulions lutter pour l'emploi correct de la langue française ; nous continuerons à l'employer ici car il est consacré par l'usage.)

Le marketing a donc pour objectif les collectivités humaines considérées du double point de vue de leur pouvoir d'achat et de leur manière d'en faire usage (*fig.* 3). De la connaissance du consommateur résultera la décision commerciale ; chaque décision commerciale sera en mesure d'influencer fortement la conception technique de tel produit et (ou bien encore) la technique de fabrication. Prenons un exemple : une fabrique habituée à produire une tondeuse à gazon très perfectionnée utilisant des techniques sophistiquées et de nombreuses possibilités d'utilisations annexes se verra contrainte d'abandonner ce modèle et de se contenter de produire de nouvelles tondeuses de jardin aux possibilités moindres mais dont les caractéristiques s'adaptent mieux à la demande du moment. Le coût à la production permettra un rapport qualité/prix concurrentiel, et le nouveau produit pourra faire l'objet d'une nouvelle campagne de lancement.

Les industriels sont demandeurs d'études de marché depuis que les gens du marketing leur ont montré que le comportement du client potentiel est bien souvent prévisible, rarement aléatoire. C'est une illustration du postulat sur lequel se fondent beaucoup de sciences sociales : « Chacun est différent, mais tout le monde est pareil. » Les études de marché cherchent à révéler le point de rencontre entre l'offre et la demande ; l'intention d'achat est théoriquement prévisible et devrait permettre d'ajuster le produit fabriqué au consommateur.

En explorant les besoins existants et les besoins latents du consommateur, en aidant à saisir plus rapidement et avec davantage de précision les transformations en cours, l'action du marketing permet une meilleure adéquation du produit. Par conséquent, un produit sera conçu en fonction de la clientèle à laquelle il s'adresse, il cherchera à toucher plus spécialement telle ou telle catégorie d'utilisateurs ; c'est la technique de segmentation. Il en résulte une grande diversité d'objets conçus pour des fonctions quasi identiques : par exemple, le *tableau* I nous propose quatre variantes d'aspirateurs-balais ; en dehors de leur apparence, voyons ce qui les différencie.

fig. 2

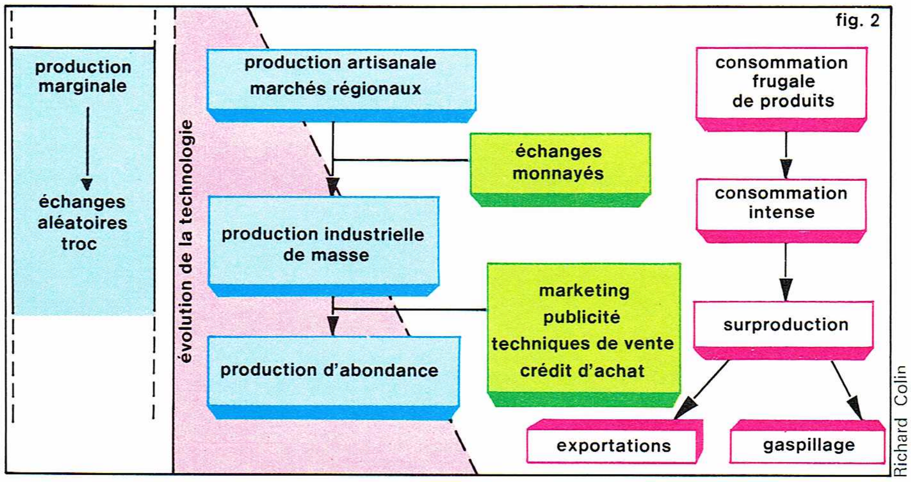

fig. 3

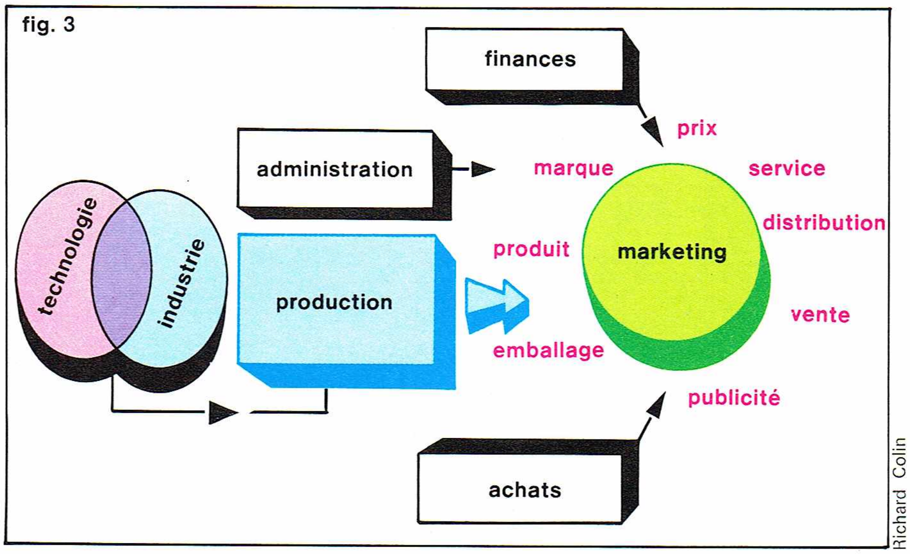

▲ ***Figure 2 : évolution de la production par rapport aux grandes étapes du développement économique.***
Figure 3 : la place du marketing dans l'entreprise.

▼ ***Tableau I : caractéristiques de quatre variantes d'aspirateurs.***

Tableau I
Caractéristiques de quatre variantes d'aspirateurs

Numéro	Puissance (en watts)	Dépression (en mm Hg)	Débit (en l/mn)	Capacité sac poussière (en l/mn)	Prix (en F en juillet 1977)
1	400	1 250	1 590	1	144
2	400	1 150	1 200	2,5	220
3	400	905	1 530	2,6	240
4	600	1 340	1 300	2	470

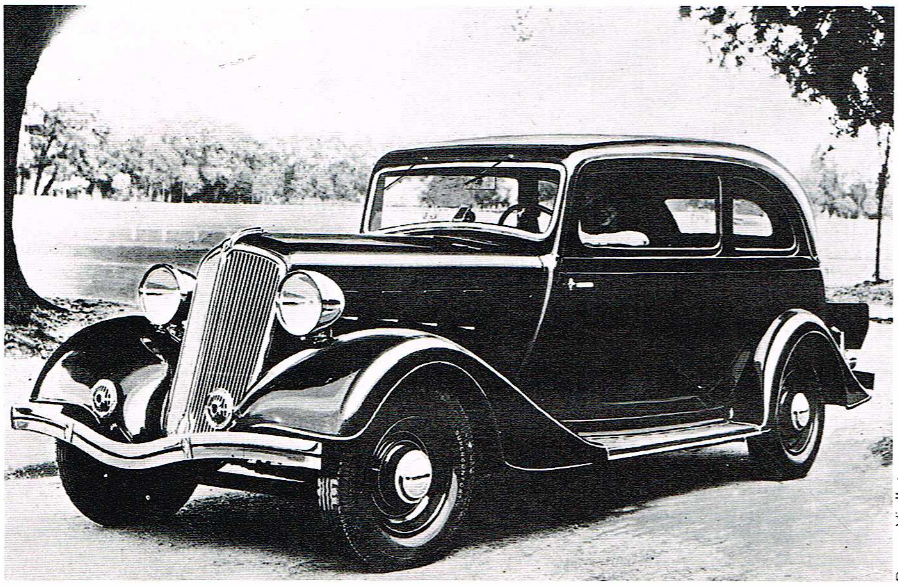

Roger-Viollet

A. Noguès - Sygna

▲ ***Les progrès techniques, l'amélioration des performances, de nouvelles contraintes, entraînent une évolution notoire des modèles automobiles. Ces changements sont aussi une nécessité commerciale. En haut, Renault 21 ch 1933. En bas, Renault 17.***

Par son prix et son apparence, l'aspirateur n° 1 semble être destiné à des acheteurs peu fortunés ; à l'inverse, le produit n° 4 semble réservé à des clients prêts à payer plus cher. Il faut remarquer que l'appareil optimal n'existe pas ici. Le débit du moins cher est supérieur à celui du modèle n° 4. D'autre part, le prix ne justifie pas toujours les performances : l'aspirateur n° 2 a des performances moins bonnes que celles du n° 1, qui est pourtant nettement moins cher ; seuls le volume du sac et le dessin de la carrosserie justifient cette variante.

Une technologie du commercial

L'action du marketing n'est plus envisageable sans une recherche de caractère scientifique. Les efforts étant centrés, en particulier, sur les relations du consommateur avec le produit, cela implique différents champs d'étude : mathématiques opérationnelles, analyse de l'usage, études ergonomiques, analyses de marché, symbolique de l'objet, désir d'achat, caractéristiques techniques, innovation, expression plastique du produit, conditionnement, etc. Cela explique l'intervention de chercheurs et de réalisateurs qui ont des « profils » très différents ; il n'est pas étonnant de trouver, au sein d'une équipe « hommes de marché », ingénieurs, psychologues, sociologues, sémiologues et autres spécialistes venant grossir le nombre d'intervenants autour de la définition d'un produit.

Mais il faut bien comprendre que les études de marketing ne fournissent aucune certitude sur la réalisation des prévisions de vente. Les prévisions commerciales ont toujours un certain pourcentage d'incertitude quant au but à atteindre ; les « instruments de mesure » se perfectionnent avec le temps mais ne suffisent pas à éviter des surprises, qui peuvent alimenter les sarcasmes des adversaires de cette « technologie du commercial ». La crédibilité du marketing n'est pas toujours acquise ; le contexte social, voire politique, d'une entreprise peut justifier une certaine méfiance face à des prévisions de marché qui pourraient être jugées peu compatibles avec la « conjoncture ».

Le marketing instigateur

Le client n'est pas seulement le point d'arrivée du processus qui englobe achat, production, planification financière et commercialisation, il en devient aujourd'hui le point de départ. En effet, le marketing ne se contente plus d'influencer le produit existant mais, plus encore, donne l'idée initiale d'un produit qui doit naître. Ce nouveau produit sera conçu en fonction du consommateur, de ses besoins, de ses moyens, de ses désirs. En d'autres termes, « le marketing définit les objectifs à la façon d'un aimant qui sur une feuille de papier oriente la limaille vers les pôles ». Il semble en tout cas que les impératifs commerciaux définissent la vie du produit.

L'obsolescence

Dans l'économie d'aujourd'hui, une dure loi régit la durée d'un objet commercial, c'est celle de l'obsolescence. C'est un phénomène économique qui dépasse le vieillissement technologique ou l'usure physique. Lorsqu'une organisation technique existante se révèle moins « rentable » qu'une nouvelle technique, lorsqu'un nouvel équipement permet une productivité plus élevée en abaissant les coûts de production, la structure technique ancienne devient obsolète. L'obsolescence est un phénomène de « destruction créatrice ». L'obsolescence « technique » est elle-même devenue obsolète par rapport à l'obsolescence « commerciale ». Ce phénomène, considéré comme une tendance il y a trente ans, est devenu règle générale dans l'économie d'aujourd'hui.

Bien qu'elle serve souvent d'alibi, on peut dire que la technologie est étrangère à ce processus. Il n'en reste pas moins que c'est le vieillissement artificiel et programmé des produits qui nous aura conduit au foisonnement d'objets dans notre environnement quotidien. Un changement fréquent des modèles est nécessaire pour que les fabricants puissent maintenir la production en augmentation continuelle.

Il n'est pas facile de vieillir artificiellement un produit, et pour cela de nouveaux acteurs doivent suppléer aux techniciens de production : en général, ce sont les stylistes industriels qui, par une manipulation habile des formes et une expression nouvelle des produits, excitent le désir d'achat.

Le styling

Jusqu'à ces dernières années, la nouveauté d'un produit entraînait rarement une augmentation de sa qualité ; au contraire, il portait en lui, déjà, les signes de son vieillissement programmé ; par exemple, un poste de radio ayant une forme aérodynamique est un non-sens formel, mais en revanche une garantie que cet appareil se démodera rapidement, lorsqu'apparaîtra le poste de radio en forme de récepteur fictionniste vu dans le dernier film à grand succès.

Par l'intermédiaire de leurs créateurs stylistes, les objets deviennent un mode nouveau de communication sociale en même temps qu'un magnifique régénérateur de production. C'est la tendance du « styling » que de préférer les symboles de mode et de prestige aux qualités intrinsèques de chaque produit. Ainsi une préférence pour des imitations de matériaux fait naître l'impression d'une richesse imaginaire : on a parlé de la « misère chromée » des années 1950 où l'étalage du chrome sur la plupart des objets courants masquait leur pauvreté technique et formelle derrière un écran étincelant (*the wizard of gloss* : « la sorcellerie de l'éclat »).

Marketing et innovation

La crise de l'énergie et des matières premières qui sévit depuis 1973 a entraîné une sorte de moralisation de la production face au gaspillage programmé de notre société dite d'abondance. Pour suppléer le luxe du « styling », le « marketing » a su promouvoir l'innovation, qui devient un objectif propre. Pour les fabricants

d'équipements, elle peut constituer le moyen de rendre obsolètes les équipements anciens chez leurs clients et donc d'élargir leur propre marché. Pour les consommateurs, le produit nouveau n'apparaît plus comme l'ancien produit remaquillé « new look », mais comme l'expression d'une innovation, d'une amélioration notoire.

L'adaptation à la demande du moment se conjugue avec une attitude active des gens de marché, qui cherchent à anticiper les développements futurs. Toute conception étroite ou trop mercantile (au premier degré) des attentes du consommateur est balayée ; il faut faire place à l'innovation. Face aux produits, le marketing évolue sans cesse entre deux pôles : la créativité et la rationalité. De nouveaux salons apparaissent : Salon de la créativité, Salon de l'innovation, que les gens de marché consomment à leur tour comme de délicieux produits.

Il faut reconnaître que certaines techniques ont fait merveille lorsqu'elles ont été prises en charge par les « hommes de marché » pour développer des produits nouveaux intéressant tout le monde. Par exemple, la biochimie et les enzymes des lessives, les techniques cryométriques et les aliments surgelés, la photochimie et les appareils de photo à développement instantané, et, encore plus récemment, le succès de l'électronique microscopique dans le domaine des calculatrices de poche et des montres électroniques à affichage digital.

De nombreux autres exemples peuvent être cités, du café lyophilisé aux textiles non froissables ; dans tous les cas, le dynamisme commercial a pu mettre des techniques de pointe au service de tous.

La publicité des produits

La publicité est destinée à lancer un produit nouveau ou bien à mieux faire connaître une gamme de produits déjà existants. Par exemple, voici un problème de publicité : au 1er mars, 20 % des ménagères connaissent un produit ; l'objectif est de porter ce taux à 40 % au 1er décembre de la même année. La publicité a pour mission de transmettre des informations et d'établir un contact étroit entre le produit et le « public-cible ». Le message publicitaire émis est en effet toujours destiné à une cible, c'est-à-dire aux consommateurs potentiels concernés par ce produit. En revanche, la « réclame » est propagée dans toutes les directions, sans objectifs, sans cible, elle ne fait pas partie d'une stratégie de communication prônée par les théoriciens de la publicité. La « pub » est aussi utilisée par les chefs d'entreprise comme moyen de lancer un produit coûte que coûte, même s'il est mal conçu.

Les moyens de communication entre l'entreprise et son « public-cible » englobent toutes les formes de publicité, depuis la publicité-media (affiches, spots de télévision, etc.) jusqu'à la publicité directe que représente l'emballage : *the silent salesman*, « le vendeur silencieux ». C'est l'emballage qui se laisse acheter dans les « self-services », et c'est lui qui participe au désir d'achat lorsque le produit est exposé dans une vitrine ou bien photographié dans un catalogue. L'emballage, superstructure de l'objet, est lui-même un produit de consommation.

Le design industriel

Le design industriel est une activité liée au développement de la technologie dans l'environnement et à l'évolution sociale. C'est aussi une profession récente perçue différemment selon l'observateur ; ses résultats, ses effets peuvent aussi être différents suivant le type d'approche du praticien designer. Depuis plusieurs années, le terme « design » a été employé abusivement. Il aura été successivement : un nouveau thème-slogan de publicité ; une rubrique vedette des journaux de mode ; un adjectif qualificatif synonyme de moderne, « in », dépouillé ; une nouvelle griffe garantissant ce bon goût dans l'audace ; un nouveau style contemporain, concurrent sérieux de l' « Empire » et du « Regency ».

En fait, le terme design a été usurpé par la mode au détriment de la crédibilité du design industriel, qui, lui, est concerné par une conception plus globale du produit industriel, même s'il échappe difficilement aux spéculations sur l'objet à des fins mercantiles (voir le styling).

Une des ambitions du design est de dépasser le stade de la conception de l'objet isolé pour aborder les systèmes d'objets d'un environnement donné. Cela apparaît dans la définition officielle donnée au congrès de l'ICSID à Bruges en 1964 : « Le design industriel est une activité créatrice dont le but est de déterminer les qualités formelles des objets produits industriellement. Les qualités formelles ne se limitent pas aux caractéristiques extérieures mais concernent aussi les rapports de structures et de fonctions qui convertissent un système en une unité cohérente tant du point de vue du producteur que du consommateur. Le design embrasse tous les aspects de l'environnement humain qui sont conditionnés par la production industrielle. »

Cette définition est instructive. Est-elle parfaite ? Il semble difficile d'englober en quelques lignes toutes les facettes d'une activité. On pourrait compléter cette définition en ajoutant que le design est aussi une activité qui invente de nouveaux rapports dans la technosphère grâce à la manipulation critique des techniques et l'utilisation motivée de la plus grande partie possible des connaissances humaines.

Le champ d'applications du design industriel concerne les utilisateurs d'équipements et de services, les consommateurs de produits et enfin toute collectivité évoluant dans un environnement construit. La démarche propre au design a pour but la clarification de structures complexes, la lisibilité des formes, la cohérence et la diversité au sein des systèmes d'objets. Le designer a un rôle à jouer, il doit se faire l'interprète du « citoyen-consommateur ». D'après le designer français Roger Tallon, « le design ne se veut ni un art, ni un mode d'expression, à plus forte raison un style : c'est une démarche créative métho-

Roger-Viollet

Document Seiko - U.T.I.

▲ *Ancienne et nouvelle calculatrices : résultat de la vulgarisation de l'électronique microscopique.*

Le Centre de création industrielle

Inséré dans un centre culturel multidisciplinaire voué à l'illustration de la création au XXe siècle, le CCI a pour rôle de rendre compte de tout un aspect de cette création dont la finalité n'est pas l'œuvre d'art, mais dont la dimension culturelle et sociale caractérise les sociétés industrielles contemporaines : l'architecture, l'urbanisme, le design, les communications visuelles.

Institution originale que sa conception globale de la « création industrielle » et son option culturelle distinguent des « Design Centers » anglo-saxons, simples vitrines de la production, le CCI a été créé en 1969 au sein de l'Union centrale des arts décoratifs et intégré au Centre national d'art et de culture Georges-Pompidou en 1972.

Il doit savoir s'adresser à la fois au grand public, à un public plus spécialisé de concepteurs ou de responsables de la production, et à ces médiateurs particuliers de la création industrielle que sont les collectivités publiques ou les administrations qui ont en charge l'organisation de l'environnement des Français.

◀ *Définition du C. C. I. (Centre de création industrielle), intégré au Centre national d'art et de culture Georges-Pompidou.*

Document Braun

▲ *Influence du design industriel sur les appareils ménagers, tels que le robot de cuisine.*

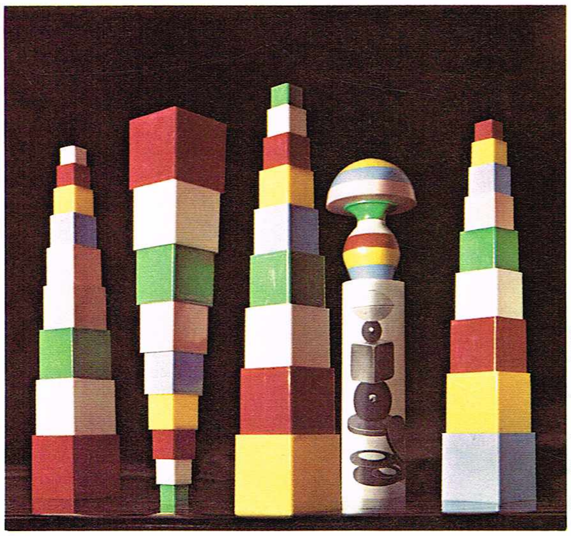

J. Ph. Charbonnier - TOP

▶ *Les jouets pour enfants ont un caractère didactique plus marqué.*

▼ *Brosse à dent électrique : adéquation entre les performances techniques, la forme et l'usage.*

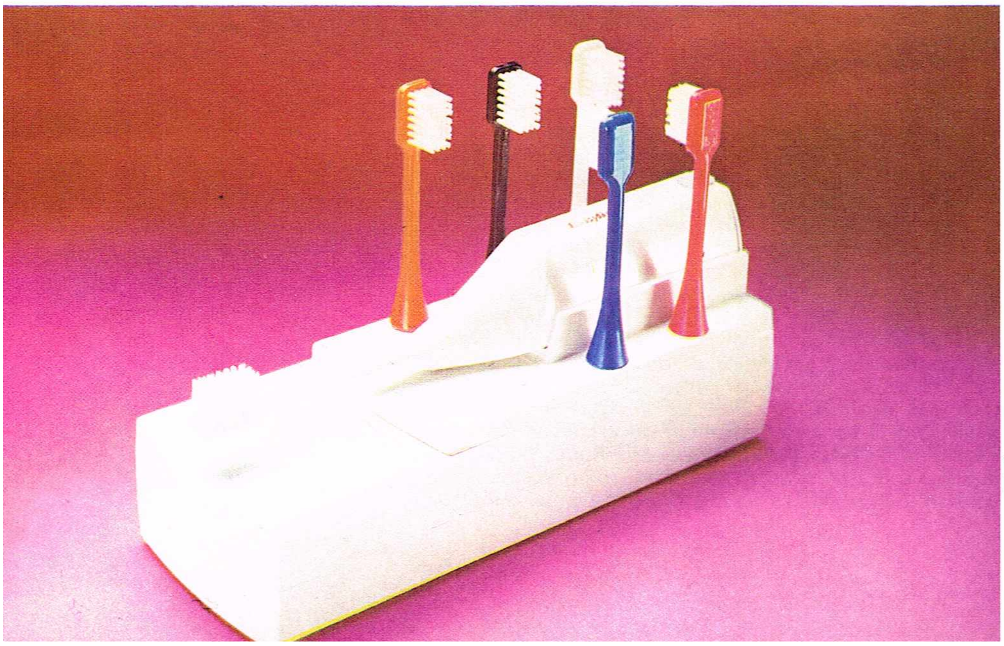

Babyliss

dique qui peut se généraliser à tous les problèmes de conception, une recherche de la cohérence, une tentative pour créer une grammaire simple de la forme. Aujourd'hui, le design se doit de participer à l'émancipation culturelle et sociale. A l'intérieur du système de production, il exerce des responsabilités plus ou moins larges suivant le degré de maturité de l'entreprise dans laquelle il se manifeste. »

L'histoire du design, nous l'avons vu, est liée à celle de la société industrielle. Le design est né de la volonté de combattre l'anarchie formelle engendrée par la production industrielle. Aujourd'hui, l'une de ses préoccupations majeures est de maîtriser toutes les implications d'un objet. La valeur d'usage « primaire » d'un objet est assortie d'une sorte de valeur d'usage « induite » qui fait de l'objet un support d'informations et un élément d'un système de communication sociale. Non seulement l'objet est rendu plus signifiant par sa forme, mais les « marques » qu'il porte sont l'expression de la fonctionnalité. L'objet possède une charge sémantique que le design moderne essaie de ne plus ignorer.

La forme

L'expression gratuite, sectaire ou fantaisiste de la forme n'a plus de raison d'être, puisque nos connaissances sur la perception de la forme sont mieux établies. La psychologie de la forme *(Gestalttheorie)* nous a appris que nous voyons toute forme de manière globale, qu'il existe des lois perceptives qui nous font distinguer la figure du fond.

« La forme est une fonction de plusieurs variables, et non pas la somme de plusieurs éléments. » « Une partie dans un tout est autre chose que cette partie isolée dans un autre tout. » Le tout, l'unité formelle, nous paraît plus que la somme de ses éléments : par analogie, une mélodie est plus que l'enchaînement de différents sons ; un mot est plus qu'une succession de lettres. La théorie de la Gestalt se trouve appliquée dès qu'il s'agit de créer des relations et une concordance entre différents éléments d'un objet.

Comment implanter l'un par rapport à l'autre manettes, vis, séparations, joints, voyants lumineux, chiffres de réglages, etc. ? Existe-t-il dans ce domaine des règles esthétiques ? Les propriétés géométriques de la symétrie et les proportions du nombre d'or sont difficiles et délicates à manipuler à l'échelle d'un objet utilitaire. Si elles deviennent les seuls critères de structuration et d'ordonnancement, elles se raidissent sous forme de recette et débouchent inévitablement sur un style *a priori* dans l'expression plastique des objets.

Les qualités formelles des objets

Il existe de nombreuses formes qui sont déterminées par des critères et paramètres rationnels ; on peut citer celle d'une hélice, celle d'un roulement à billes, celle d'un ballon. Mais il s'agit là plus d'une configuration géométrique, géospatiale, que d'une « forme » au sens où l'entendent les plasticiens. Il n'en reste pas moins que ces éléments techniques ont, de fait, une forme interprétée comme belle : « Quand une forme répond à un besoin, elle satisfait toute une part de notre esprit, la première, celle sans laquelle il n'y a pas d'autres satisfactions possibles », dit Le Corbusier.

Les produits sont généralement destinés à un usage ; une ou plusieurs fonctions déterminent une certaine configuration de l'objet et lui donnent en même temps son originalité formelle.

Aux fonctions d'usage sont confrontées les contraintes de fabrication qui prédisposeront la forme finale ; par exemple, en fonction des procédés de fabrication, des ballons pourront présenter des qualités formelles différentes, bien que leur géométrie soit essentiellement sphérique. Les matériaux diffèrent, la taille aussi, mais c'est surtout la structure de construction qui impose la différenciation morphologique que l'on peut faire d'une balle à l'autre. La séparation de la sphère en différents éléments montre que les qualités formelles sont quelquefois indépendantes du désir de « décoration ».

Les variations possibles dans la détermination d'une forme dépendent du champ des contraintes de fabrication et du rôle de sa structure dans la fonction à accomplir.

Dans la zone 1 de la *figure* 5, on peut raisonnablement penser que la technologie est nécessaire et suffisante pour déterminer la forme de l'objet.

Dans la zone 2, les propriétés formelles des objets produits industriellement rentrent dans le champ d'activité du designer.

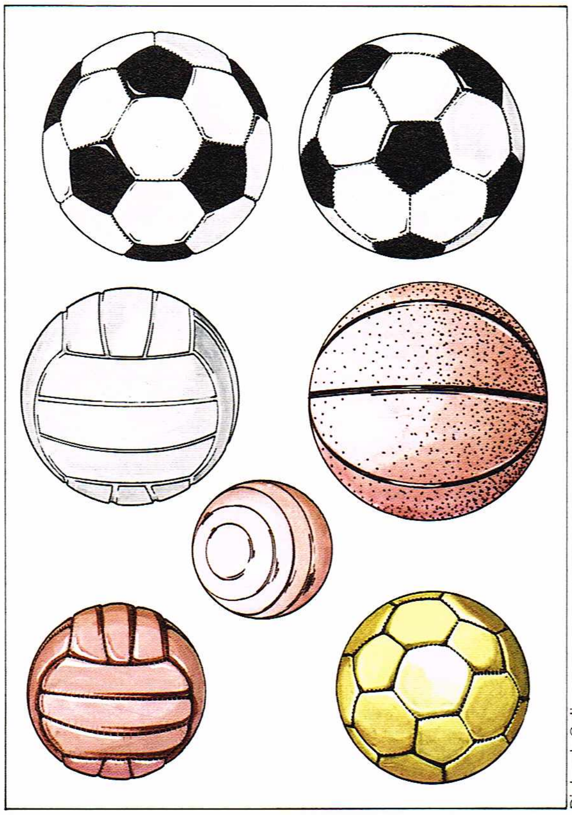

Richard Colin

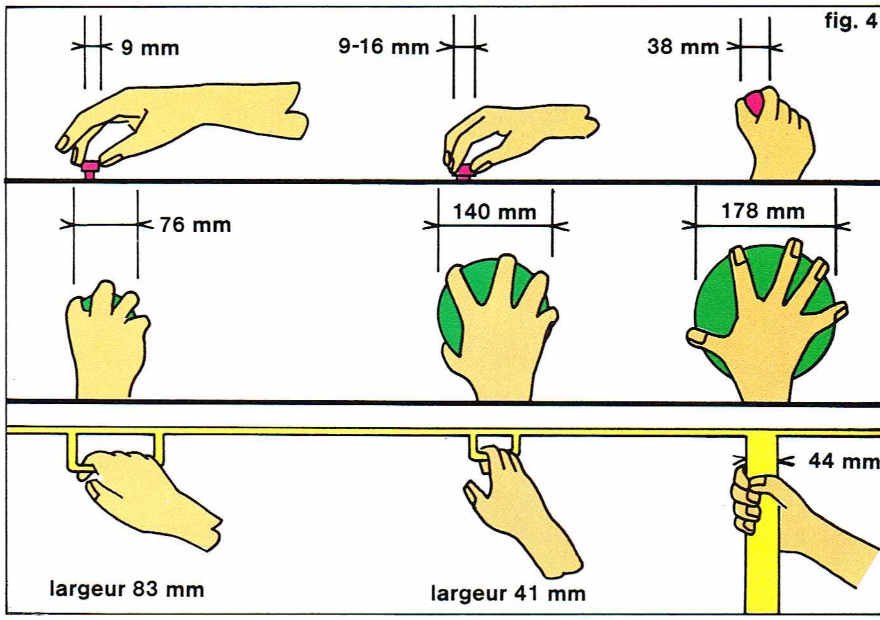

Richard Colin

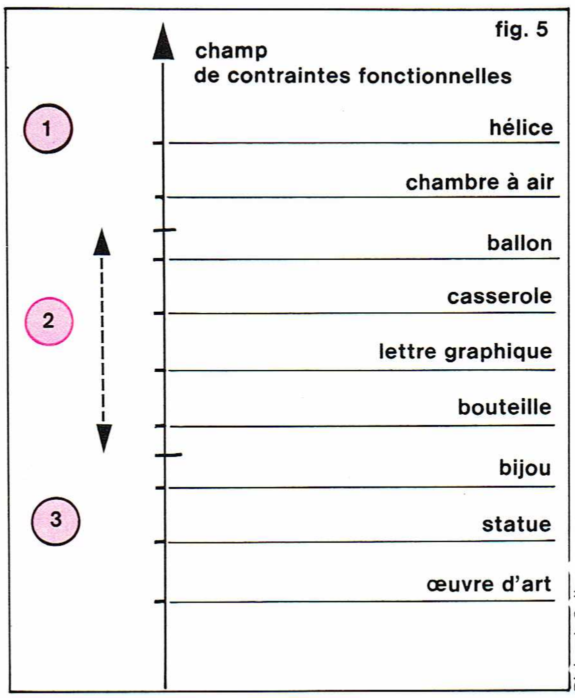

Richard Colin

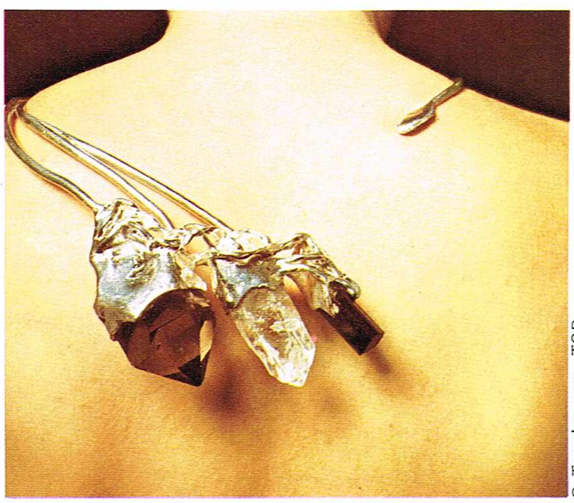

G. Tourdymann - TOP

◀▲ *A gauche, selon sa structure de construction et ses matériaux, une même forme géométrique peut avoir des expressions différentes. A droite, figure 4 : adaptation de la machine à l'homme. Les dimensions des commandes doivent tenir compte des limites normales de possibilité de prise en main (d'après E. Woodson, l'Adaptation de la machine à l'homme, Éditions d'organisation ; actuellement épuisé ; édition entièrement revue en été 1978).*

◀ *A gauche, bijoux : peu de contraintes fonctionnelles dans la définition de ces formes. Ce sont des « produits de luxe » à faible valeur d'usage et forte valeur symbolique. A droite, figure 5 : échelle des contraintes fonctionnelles et liberté d'expression des formes.*

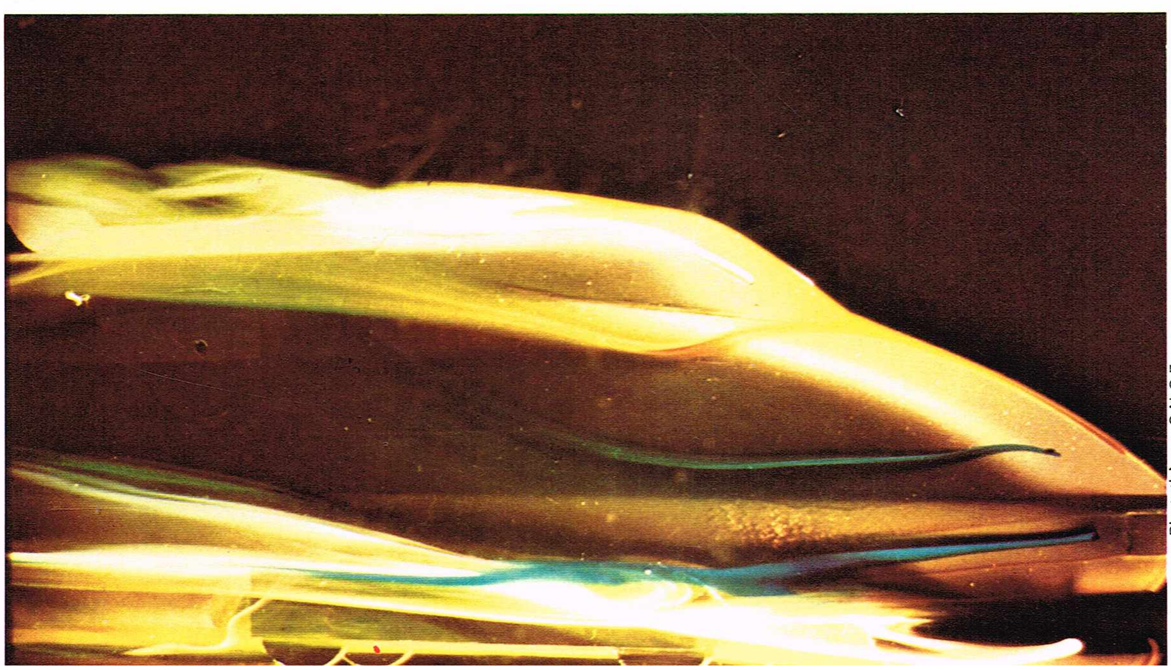

Photothèque S.N.C.F.

◀ *Le TGV (train à grande vitesse) en soufflerie : la liberté d'expression plastique pour une forme aérodynamique, est proportionnelle à l'incertitude sur la détermination scientifique de la géométrie optimale.*

Document Flambo

▲ *Exemple de mobilier de bureau fonctionnel.*

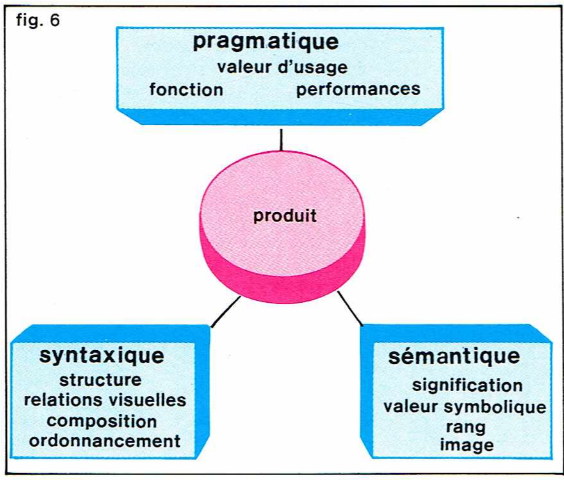

Richard Colin

▶ *Figure 6 : les trois dimensions analytiques de la théorie des signes appliquée à l'objet.*

Dans la zone 3, le processus créatif est indépendant de la maîtrise technologique. Le champ sémantique de l'objet et ses qualités plastiques l'emportent sur les contraintes de fabrication. La technologie n'est qu'un « matériau ».

Les supports méthodologiques

Le design se sert des méthodes et des connaissances d'autres disciplines scientifiques.

● La théorie des signes de Pierce permet de tirer des conclusions pratiques pour l'analyse dans le cadre de la méthodologie de design. Elles se rapportent d'une part aux qualités formelles, et d'autre part à des facteurs intéressant le marketing. On distingue ainsi trois dimensions analytiques : la dimension pragmatique, la dimension syntaxique, la dimension sémantique (*fig.* 6). Par exemple, un produit tel qu'une automobile sera analysé comme étant :

— sur le plan pragmatique : un moyen de transport;
— sur le plan syntaxique : une carrosserie sur 4 roues;
— sur le plan sémantique : un coursier racé, expression de la maîtrise technique ou une superbe voiture, objet de prestige, image d'un confort dominé et d'une sécurité sans problème, etc.

● La théorie de l'information trouve aussi de nombreuses applications et trouve quelquefois son prolongement dans le domaine syntaxique de la forme. Par exemple, Max Bense, professeur à l'université de Stuttgart, a défini la « mesure esthétique » comme étant le rapport suivant :

$$M = \frac{o}{c} = \frac{\text{ordonnancement}}{\text{complexité}}$$

L'ordonnancement, c'est la richesse de la composition (proportions, rythmes, matières, couleurs et autres relations décodables). La complexité est déterminée par le nombre d'éléments décomposables (segments, courbes, angles, rebroussements, inflexions, etc.).

Dans son livre *Théorie de l'information et Perception esthétique*, A. Moles développe de nombreuses notions utilisables par la méthodologie du design.

● Le design fait également appel à l'ergonomie (du grec : *ergon*, « travail », relation homme-machine, relation homme-travail). A la base de cette nouvelle discipline scientifique, il y a l'anthropométrie (étude des mensurations humaines). L'ergonomie étudie la physiologie, les performances motrices, les seuils de perception, en vue d'applications directes pour l'amélioration des conditions de travail ou pour la conception des produits.

▼ *A gauche, lit Lattoflex; la sobriété et l'efficacité conjuguées pour un meilleur confort physiologique. A droite, l'élément de base, expression d'une nouvelle technique de la structure souple.*

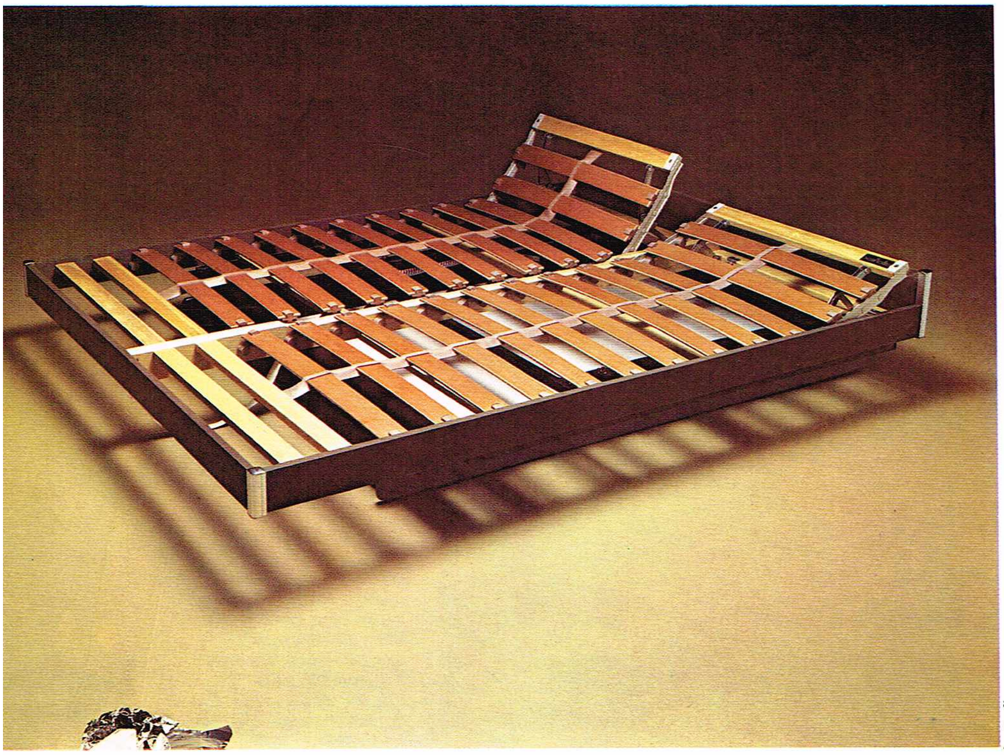

Lattoflex

Lattoflex

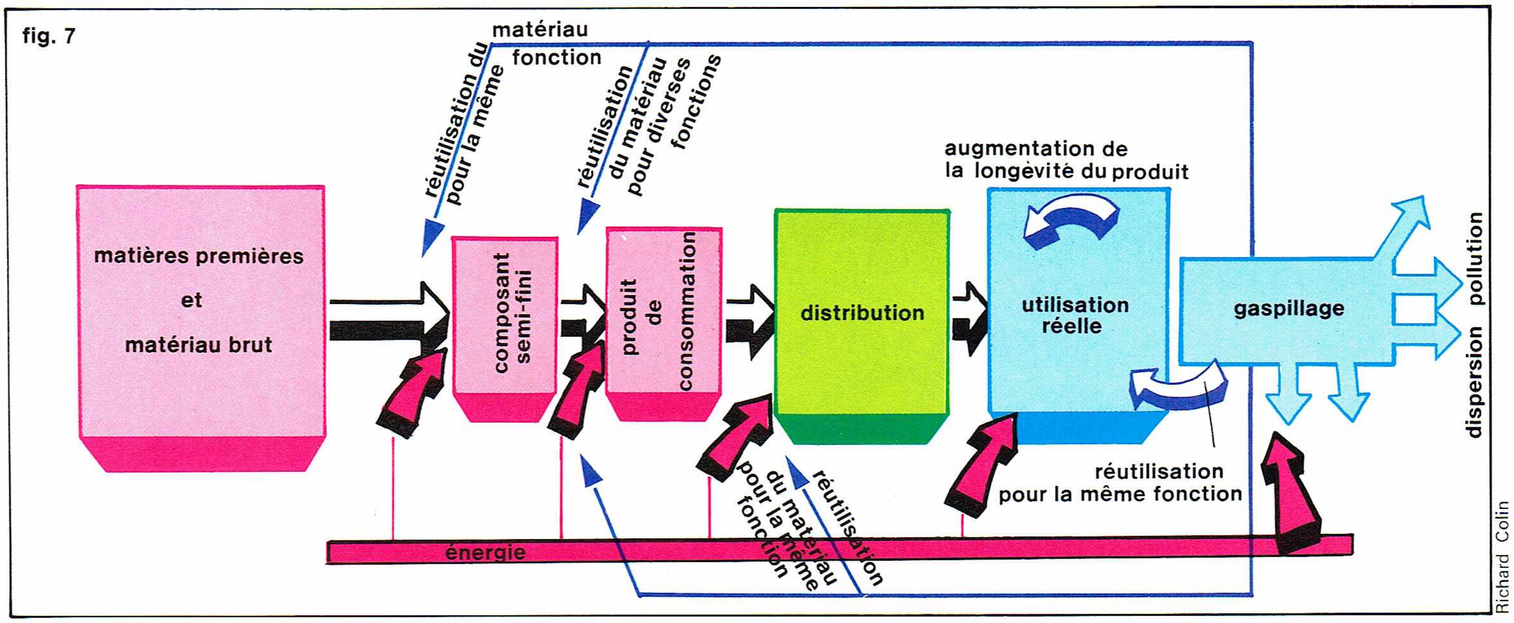

▲ *Figure 7 : cycle possible d'utilisation des matériaux et des produits dans l'économie de production.*

Le produit et la technologie dans l'environnement

Le produit peut être considéré sous trois aspects : l'aspect économique : la production et la vente ; l'aspect social et humain : la consommation, l'information ; l'aspect écologique : les déchets et les nuisances. L'aspect économique de la production et de la vente a été évoqué par le biais de l'action du marketing et de la publicité. Pour le second aspect, il faut préciser que, pour échapper à la subordination commerciale, on doit chercher et parvenir à équilibrer le rapport producteur-consommateur. L'objet, le produit devrait pouvoir répondre aux besoins sociaux. La qualité des produits dépend donc d'une meilleure information du public qui les consomme : ce peut être, par exemple, grâce à l'Agence pour l'étiquetage informatif sur les produits, qui joue un rôle pilote dans ce domaine, et par le jeu de la concurrence. Nombreuses sont les firmes qui s'engagent à donner maintenant des informations précises et fiables sur les produits qu'elles proposent. La qualité des produits dépend aussi d'une meilleure expression de la demande à travers les organisations de consommateurs. Allant dans le sens d'une évolution positive, le désir de culture et de loisir tend à se substituer à notre consommation excessive d'objets et de symboles. La chaîne « haute fidélité » est plus sobre dans son aspect, mais le son qui en sort est de meilleure qualité.

Utilité des produits

La production industrielle a bouleversé notre société par la puissance avec laquelle elle a modifié notre cadre de vie, notre comportement et notre niveau de communication sociale et culturelle. Le progrès technologique se répercute tôt ou tard sur le produit industrialisé, donc sur la société consommatrice ; par exemple, l'application du transistor au produit industriel a permis d' « inonder » le monde de postes récepteurs de faible coût. Dans les pays économiquement sous-développés, le transistor est ainsi devenu un réel instrument politique de communication avec la masse, on pourrait donc dire objectivement un instrument d'émancipation.

Nuisances des produits

Plutôt que pour sa valeur utilitaire, le produit peut encore être considéré d'un point de vue écologique : pour sa production, il nécessite matières premières et énergie ; après consommation, c'est un déchet et souvent une nuisance pour l'environnement. Potentiellement, tout produit est un futur déchet, et, dans un monde économique surproductif, cela mérite que l'on s'y intéresse de plus près (*fig.* 7).

Devant l'ampleur du phénomène des pollutions et nuisances, et compte tenu des restrictions énergétiques d'aujourd'hui, les responsables nationaux incitent les chercheurs et industriels à proposer des solutions valables. L'équilibre des milieux naturels et la qualité de notre environnement nécessitent autre chose qu'une économie de surproduction. Il est possible de fabriquer moins de produits à condition que les usagers acceptent eux-mêmes de consommer moins. Technologiquement parlant, la durée de vie moyenne d'un produit peut être très longue : une automobile peut durer vingt ans et un réfrigérateur encore plus longtemps ; jusqu'à maintenant, une voiture ferroviaire vivait en moyenne quarante ans.

Parallèlement, on peut très bien concevoir des produits jetables, conçus spécialement pour avoir une courte vie ; dès lors, il faut concevoir un « beau déchet » et non plus seulement un bel objet. Ce type de produit doit être réellement biodégradable ou recyclable, de même que le génie médical utilise couramment des fils de suture qui, au bout du temps nécessaire, s'éliminent d'eux-mêmes dans l'organisme. Arrivera-t-on au stade où la destruction d'un produit participera à la régénérescence de l'environnement et non à sa dégradation ?

Le produit, demain

Historiquement, le transport aéronautique n'a jamais été promu par une compagnie ferroviaire, pas plus que les montres électroniques ne sont le fait d'horlogers traditionnels. Les produits de demain seront-ils le résultat de procédés aujourd'hui révolutionnaires, qui seraient vulgarisés ? Les techniques de pointe seront de moins en moins chères, les structures considérablement réduites et allégées, les fonctionnements dix fois plus fiables, les consommations d'énergie dix fois plus faibles. On est donc en droit d'espérer que toutes ces gammes de procédés techniques seront positivement connectées ; il pourra en résulter des interférences créatrices remettant en cause les habitudes séculaires que nous avons vis-à-vis des produits.

La technologie peut œuvrer pour la qualité de notre environnement, elle est de toute façon au service de nos choix.

BIBLIOGRAPHIE

BARTHES R., *Mythologies*, Seuil, 1957. - BAUDRILLARD J., *Pour une critique de l'économie politique du signe*, Gallimard, 1972. - COLDER R., *l'Homme et ses techniques*, Payot. - DORFLÈS G., *Introduction à l'industrial design*, Casterman. - HUISMAN D., PATRIX G., *l'Esthétique industrielle*, Presses universitaires de France. - LEROI-GOURHAN A., *Milieu et Techniques*, Albin Michel. - MOLES A., *Théorie de l'information et Perception esthétique*, Casterman, 1972. - MOLES A., *Psychologie du kitsch*, Denoël-Gonthier. - NOBLER J., *Design*, Stock-Chêne. - PEVSNER N., *les Sources de l'architecture moderne et du design*, la Connaissance s.a. - WOODSON A., *l'Adaptation de la machine à l'homme*, les Éditions d'organisation, 1959. - *L'Objet créé par l'homme*, Bibliothèque de synthèses, 1968.

▶ *Montre du XVIII^e siècle.*

R. Guillemot - TOP

HORLOGERIE

Les cycles universels

Il est raisonnable de supposer que la notion d'une durée de temps constante séparant les « passages » successifs du Soleil s'est imposée au plus ancien des hommes de la préhistoire. On peut imaginer qu'il eut également la possibilité de lier cet instant particulier à la direction d'une ombre portée. Néanmoins, il est plus que probable que le découpage de ce temps quotidiennement écoulé en séquences repérables fut le fait de l'*Homo sapiens* plutôt que de l'*Homo habilis* qu'un mode de vie très instinctif devait, par ailleurs, rendre particulièrement réceptif aux effets des rythmes universels.

C'est probablement l'agriculture, nécessaire aux peuples sédentarisés, qui imposa le repérage précis des cycles qui déterminent le jour, le mois, l'année. Ces cycles, définis dans leur corrélation avec la situation ou l'allure particulière d'un astre dans le ciel, n'impliquaient pas, pour être définis, une connaissance très précise du mouvement des astres.

En Occident, c'est depuis le XVII^e siècle seulement que nous savons que la durée d'un jour correspond à la rotation complète de la Terre sur son axe, celle d'un mois à la révolution de la Lune autour de la Terre, et celle d'une année à une révolution complète de la Terre autour du Soleil.

Au cours des millénaires, différentes civilisations ont tenté de coordonner ces cycles pour aboutir à l'établissement d'un calendrier précis. La difficulté réside en effet en ce que la division de l'année en mois et du mois en jours n'aboutit pas à des nombres entiers : la durée de la révolution de la Terre autour du Soleil est de 365 jours, 5 heures, 48 minutes, 46 secondes. La révolution complète de la Lune autour de la Terre correspond à une durée légèrement supérieure à 29 jours 1/2. Il s'ensuit qu'une année comporte environ 12 mois lunaires et un tiers.

L'établissement du calendrier répondait à une nécessité vitale, celle de labourer, d'ensemencer la terre et de récolter à date fixe de manière que le rendement fût maximal. L'efficacité du calendrier tenait donc avant tout à sa constance dans le temps, et en particulier à la correspondance précise entre la durée de l'année et celle du cycle des quatre saisons.

Vers un calendrier idéal

L'observation du ciel ayant mis en évidence la concordance entre le mouvement des astres et la succession des saisons, il vint à l'esprit de l'homme que ces astres correspondaient à des manifestations divines et que ces divinités étaient garantes de l'ordre des saisons. L'évolution du calendrier va donc être soumise à des impératifs d'ordre à la fois scientifique et religieux, ces derniers n'étant pas forcément liés d'ailleurs à la présence d'êtres mythiques dans le ciel. C'est ainsi que les calendriers juifs et chrétiens, tenant compte du repos de Dieu le septième jour de la création, n'envisageront jamais la possibilité d'adopter des semaines comportant un nombre de jours différent de sept.

Sur ces bases agraires et religieuses, les Sumériens, 3 000 ans avant l'ère chrétienne, devaient réaliser le premier calendrier véritablement pratique. De ce calendrier, qui n'est pas parvenu jusqu'à nous, on peut avoir une idée à travers les documents que nous ont transmis leurs successeurs, les Babyloniens. Selon toute vraisemblance, le calendrier sumérien était fondé sur une année de 12 mois lunaires de 30 jours chacun. Une méthode de correction que nous ne connaissons pas devait rattraper régulièrement le décalage qui s'ensuivait.

Les Babyloniens, quant à eux, avaient résolu le problème en faisant alterner des mois de 30 et de 29 jours, ce qui permettait une meilleure correspondance du calendrier et des cycles lunaires, tandis qu'un treizième mois de 30 jours était introduit une année sur trois. Ce système de correction fut appliqué pendant quinze siècles environ. Aux environs du V^e siècle avant l'ère chrétienne, les prêtres babyloniens responsables de la tenue du calendrier allaient faire une découverte importante : ils s'aperçurent, en effet, que, tous les 19 ans, la Lune et le Soleil occupaient la même place relative dans le ciel. Cette correspondance entre les cycles solaire et lunaire permettait dès lors de préciser que 19 années solaires sont sensiblement équivalentes à 235 mois lunaires. La modification de calendrier qui s'ensuivit consista à accorder un mois supplémentaire à sept années choisies dans le cycle de 19 ans.

Autre civilisation agraire, la civilisation égyptienne avait besoin d'un calendrier pratique, situant en particulier de manière précise la date de la crue du Nil qui, chaque année, vient déposer sur les terres exploitées un limon fertilisant. Une observation minutieuse du ciel permit de constater que ce débordement du Nil intervient régulièrement quelques jours après l'apparition de Sirius, qui n'est pas visible jusque-là parce qu'il est situé du même côté que le Soleil par rapport à la ligne d'horizon. On fit donc de cet événement le point de départ de l'année égyptienne. Au demeurant, cette dernière était composée de 12 mois de 30 jours, et le rattrapage se faisait en introduisant chaque année 5 jours complémentaires consacrés à des fêtes religieuses et n'intervenant pas en conséquence au niveau de la vie agricole. Néanmoins, un décalage subsiste que, vers 240 avant

notre ère, Ptolémée Évergète propose de rattraper en introduisant tous les quatre ans un sixième jour. Cette modification ne reçoit pas l'assentiment des prêtres qui feignent tout simplement de l'ignorer.

Lors du voyage en Égypte qui devait le conduire auprès de Cléopâtre, César eut l'occasion de se familiariser avec le calendrier égyptien. Cela lui fut d'un précieux secours lorsque, accédant au pouvoir, il se trouva dans l'obligation de réformer le calendrier romain. Ce dernier, avec son année lunaire de 355 jours, présentait de réelles difficultés de correction ; de plus, il se prêtait aux interprétations des politiciens qui n'hésitaient pas à introduire des corrections hasardeuses pour prolonger leurs mandats.

Lorsque Jules César prit le pouvoir, le calendrier romain présentait ainsi un décalage de plus de 60 jours par rapport aux saisons. Il décréta donc que l'année 46 avant l'ère chrétienne aurait 445 jours, 23 jours venant s'insérer après le mois de février et 67 jours après le mois de novembre. Grâce à cet artifice, le calendrier romain put correspondre à nouveau au déroulement des saisons. De manière à éviter tout nouveau « glissement », César décréta que, tous les 4 ans, le mois de février aurait 29 jours, instaurant ainsi l'usage de l'année bissextile.

Ainsi défini, le calendrier julien, survivant à la chute de l'Empire romain, demeura en usage dans les pays d'Europe pendant seize siècles. Il lui faudra pendant ce temps-là s'accommoder des exigences de la religion chrétienne ; celle-ci, héritière de l'écriture sainte hébraïque, avait dû, en même temps, adopter certains éléments du calendrier israélite qui, sur la base du cycle luni-solaire de tradition babylonienne, avait, conformément au livre de la Genèse, adopté la semaine de sept jours, et les célébrations des fêtes à des dates variables, telle la fête de Pâques dont le concile de Nicée, en 325, a fixé la date au premier dimanche de la pleine lune qui vient après l'équinoxe du 21 mars. A côté de cela, l'année liturgique chrétienne prévoyait que certaines fêtes, tels Noël et la Toussaint, devaient se présenter à dates fixes.

Très pratique, le calendrier julien n'en acceptait pas moins un décalage de 1 jour tous les 128 ans. Ainsi les grandes fêtes religieuses se trouvaient-elles peu à peu rejetées hors de leurs saisons d'origine. Au XV^{e} siècle, le calendrier accusait un retard de dix jours par rapport à la course du Soleil. Le pape Grégoire XII décréta donc en 1582 que cette année-là serait réduite de dix jours. Par ailleurs, il fit supprimer trois années bissextiles tous les cent ans. Ainsi, l'erreur du calendrier grégorien se trouve-t-elle réduite à un jour tous les 3 323 ans.

L'adoption de cette réforme, qui fut immédiate dans les pays catholiques, ne devait prendre effet que beaucoup plus tard dans les pays protestants comme l'Angleterre qui ne devait l'employer qu'en 1752.

Pour ce qui concerne la religion orthodoxe, le calendrier utilisé est encore le calendrier julien. L'adoption en Russie devenue soviétique du calendrier grégorien en 1918,

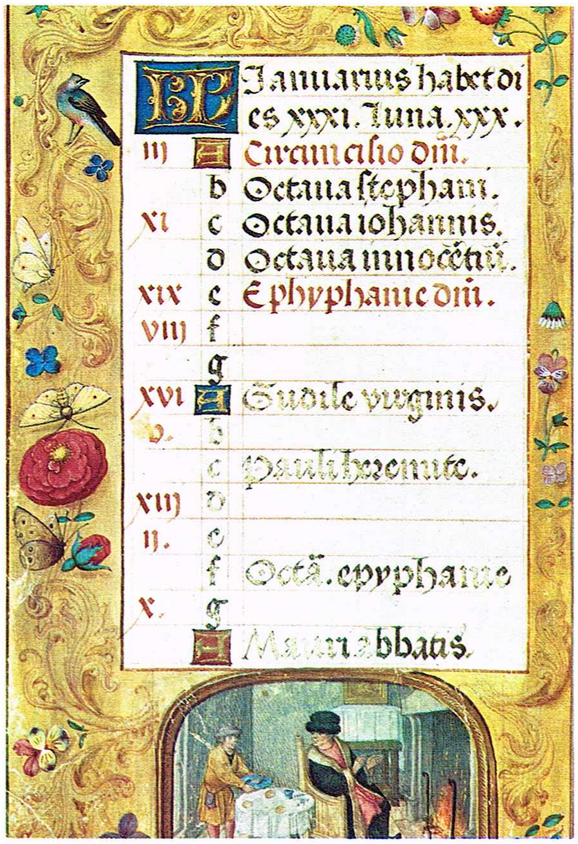

Giraudon

◀ *Calendrier julien ; survivant à la chute de l'Empire romain, il demeurera en usage dans les pays d'Europe pendant seize siècles.*

annee qui fut à cette occasion écourtée de 13 jours, eut pour effet immédiat de reporter la célébration de la « Révolution d'octobre » au 7 novembre.

Les musulmans, quant à eux, utilisent toujours le calendrier luni-solaire babylonien, mais le fait de lui avoir supprimé le principe des mois complémentaires le ramène à un calendrier purement lunaire avec 6 mois de 29 jours et 6 mois de 30 jours.

Une proposition pour un calendrier mondial a été déposée il y a quelques années au Conseil social et économique de l'O. N. U. ; il a été élaboré par Elizabeth Achelis. L'année comporte 4 trimestres de 91 jours chacun avec un mois de 31 jours et les deux autres de 30 jours. Chaque trimestre compte 13 semaines, et la somme des 4 trimestres donne au total 364 jours. Un jour supplémentaire est prévu au mois de décembre, qu'Elizabeth Achelis a appelé le « jour du monde ». Par ailleurs, chaque année bissextile, le mois de juin compte un jour supplémentaire. Ce calendrier « sans faille » a

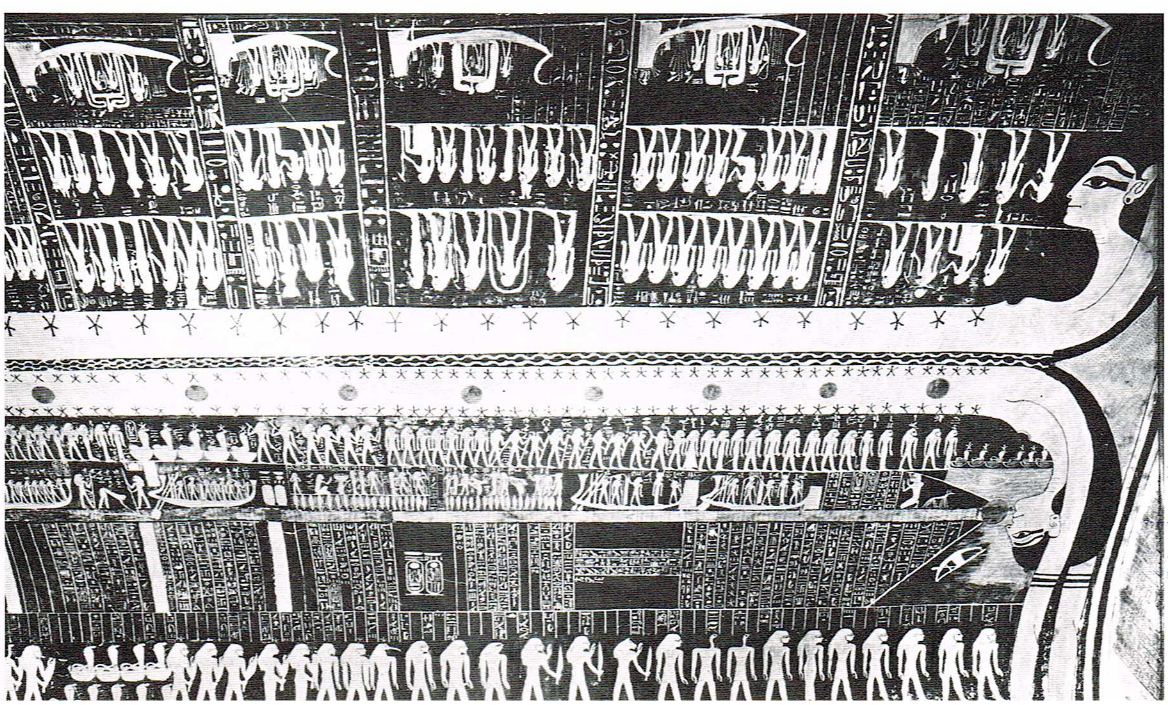

E. Lessing - Magnum

◀ *Sur cette table du temps égyptienne, Nout, déesse du ciel s'allonge entre les divinités du jour et de la nuit.*

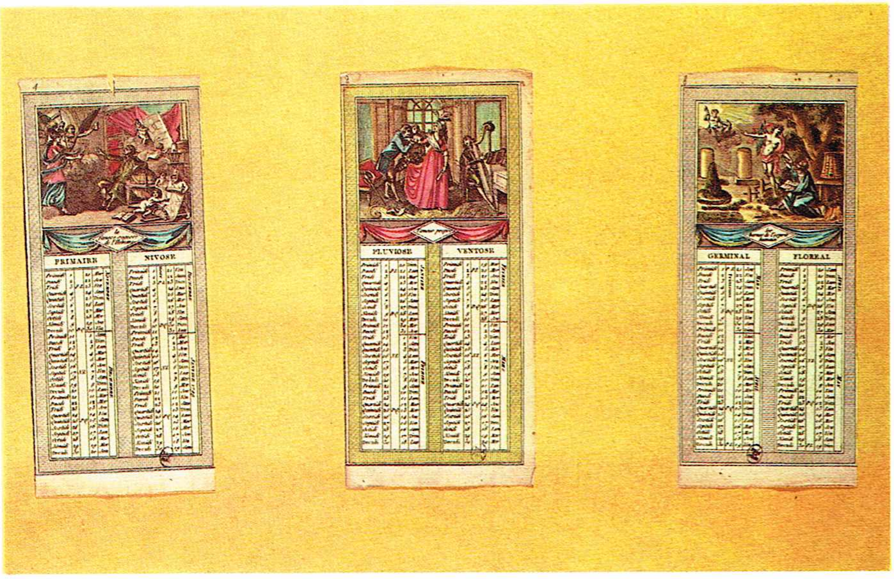

▲ *Calendrier révolutionnaire.*

cependant soulevé des objections d'ordre religieux dans la mesure où le « jour du monde » viendrait s'intercaler dans l'ordonnancement régulier des cycles de 7 jours imposés par le quatrième commandement.

Les rythmes de la vie

Le cycle de vingt-quatre heures joue un rôle primordial et, avec une plus ou moins grande facilité d'adaptation, l'ensemble des êtres vivants s'y conforme. Cependant, l'atténuation de l'instinct chez l'homme rend moins efficace son système d'horlogerie biologique, et, si l'on peut constater que les cycles de veille et de sommeil, en particulier, sont fondés sur le rythme de vingt-quatre heures, nous savons par expérience que cette régularité n'est que faiblement innée dans la mesure où l'enfant ne l'acquiert que progressivement à l'imitation de ses parents. Malgré tout, il est possible de vérifier qu'un dérèglement de l'horloge humaine, comme celui qu'occasionne l'usage sur une longue distance de moyens de transport à très grande vitesse, tel l'avion à réaction, entraîne des perturbations physiologiques et psychologiques sérieuses. De la même manière, il est possible de vérifier que, privé d'instruments susceptibles de lui indiquer si, sur terre, il fait jour ou bien nuit, le spéléologue continuera néanmoins à respecter un rythme voisin de vingt-quatre heures.

Nous savons désormais que, chez les animaux, certaines glandes à sécrétion hormonales jouent le rôle d'« horloge centrale ». Pour les mammifères, c'est en particulier la glande pinéale — dont le schéma de sécrétion, régularisé par la lumière, adopte un rythme de vingt-quatre heures — qui joue le rôle d'horloge et même de synchroniseur.

Si la lumière chez l'animal n'agit pas directement sur les cellules, il n'en est pas de même pour les plantes qui, au niveau de l'assimilation chlorophyllienne, par exemple, sont capables d'absorber certaines radiations des rayons lumineux et de transformer leur énergie. Celle des radiations rouges va permettre ainsi au protoplasma d'opérer les synthèses endothermiques qui élaborent pour la plante des molécules complexes d'aliments carbonés. Ainsi, dans le domaine végétal, le rythme de vingt-quatre heures joue sur le processus même de la nutrition, mais on peut également le voir se manifester d'une manière analogue à celle qui règle les alternances de veille et de sommeil dans le monde animal, au niveau de l'ouverture et de la fermeture des fleurs, avec cette particularité subtile que les phénomènes qui se produisent à des moments précis ne suivent pas forcément l'alternance des jours et des nuits, et que les horaires ne sont pas les mêmes pour chaque fleur.

Par exemple, la fleur du volubilis s'ouvre à trois heures du matin, celle du pissenlit de Californie à six heures, celle du nénuphar blanc à sept heures, celle du laiteron épineux à neuf heures, etc., tandis que se ferment à treize heures la fleur de l'œillet prolifère, à quatorze heures la fleur du mouron rouge, à seize heures la fleur du petit liseron, etc. Et ainsi tout au long de la journée, si bien qu'on a pu réaliser dans les jardins européens du XIX^e siècle des horloges florales où, pour lire l'heure, il suffisait de repérer quelle fleur venait d'éclore ou bien de se fermer. Quelques horloges florales existent encore dans le monde, et nous pouvons citer en France celles de Besançon et du jardin d'acclimatation de Paris.

Pourtant, le cycle des vingt-quatre heures chez les plantes est sujet au déréglage, et si l'on peut parler d'« horloge biologique » interne à la plante, il faut également admettre l'existence d'un « synchroniseur » susceptible de réajuster les décalages horaires lorsque ceux-ci deviennent trop importants. On a pu mettre en évidence le fait que le synchroniseur fonctionne sous l'influence d'éléments extérieurs tels que la lumière et la température.

Le rôle du cycle lunaire vis-à-vis des rythmes de la vie est lui aussi incontestable. On ne saurait discuter les effets de la Lune sur le régime des marées et, par voie de conséquence, sur la faune marine qui la subit. On peut même affirmer avec Alexis Carrel que, pour les habitants du littoral, « le temps lunaire est plus important que le temps solaire. Les modes de l'existence, les moments du sommeil et des repos sont déterminés par le rythme des marées. Le temps humain se place alors dans le cadre des variations quotidiennes du niveau de la mer. » Et là, il ne faut évidemment voir que le seul phénomène d'accoutumance. En dehors sans doute de toute influence directe des astres, se situent d'ailleurs certains rythmes vitaux, comme le rythme pulmonaire ou le rythme cardiaque, qui semblent bien fonctionner d'une manière autonome et posséder un régulateur indépendant du reste du corps. Certaines expériences ont en effet permis de constater que, parmi les cellules prélevées sur un cœur vivant et placées dans un milieu nutritif approprié, un certain nombre continuent à palpiter sans qu'aucune excitation extérieure intervienne et finissent même par imprimer leur rythme aux cellules qui, primitivement, étaient inertes.

Les premiers dispositifs à mesurer le temps

Ainsi, l'homme en tant qu'être vivant subit la loi des rythmes réguliers qui sont propres à la vie même. Il ne serait sans doute pas faux d'en déduire que ces cycles internes l'ont contraint à repérer d'une manière précise les moments privilégiés de la journée où, d'une manière sensiblement équivalente de jour en jour, certains actes obligatoires se répètent. Nécessité de suppléer un instinct déficient, mais également nécessité d'adopter les rythmes particuliers qui naissent des obligations sociales.

Pour passer du simple repérage à un découpage de plus en plus précis du temps, l'homme va faire preuve d'une ingéniosité telle que toute la science, toute la technologie propres à notre civilisation vont dépendre de cette recherche.

Les gnomons

Les premiers appareils à mesurer le temps qui s'écoule dans une journée ensoleillée sont les gnomons. Leur principe, qui consiste à repérer l'orientation et la longueur de l'ombre portée d'un objet sur un plan fixe, est si simple que l'on peut supposer qu'avant même de songer à planter dans le sol un objet particulièrement adapté à ce type de mesure, l'homme se contenta de repérer qu'à tel instant de la journée, l'ombre d'une pierre ou d'une branche d'arbre empruntait telle direction.

Le gnomon est constitué par une tige de longueur déterminée, plantée verticalement sur un sol horizontal qui porte des repères. Ceux-ci sont relatifs à la direction de l'ombre et à sa dimension au cours de la journée et à la variation de longueur de cette même ombre au cours de l'année, plus longue au solstice d'hiver, plus courte au solstice d'été.

On trouve les traces des gnomons les plus anciens en Égypte, en Chaldée, en Chine, en Grèce (où ils reçurent leur nom *gnômôn :* « celui qui indique »), et de ce fait, on ne sait pas où ils naquirent véritablement.

Ces appareils très simples et dont l'usage a survécu jusqu'à nos jours, puisqu'on les utilise encore dans certaines régions d'Égypte, possèdent un certain nombre

d'inconvénients, dus en particulier à l'imprécision de la lecture. Plus le gnomon est haut et plus cette lecture est aisée, mais plus l'ombre en extrémité est floue. D'où l'idée de substituer à un simple bâton un obélisque en pierre de grande dimension surmonté d'une boule sphérique donnant en extrémité d'ombre une indication plus ponctuelle. Vers la fin du Xe siècle, l'Arabe Ibn Younis remplaça cette sphère par un disque percé d'un trou dont la projection lumineuse sur le sol améliorait considérablement la précision de la lecture.

Un inconvénient du gnomon, qui devient essentiel lorsqu'il s'agit de coordonner la simultanéité des indications horaires dans un vaste territoire (Empire romain), tient en outre à ce qu'il indique l'heure locale.

Les cadrans solaires

Cet inconvénient subsiste dans le cadran solaire, qui constitue une formule améliorée du gnomon. Ce dernier avait pour inconvénient fondamental de projeter une ombre dont le déplacement était irrégulier. Pour que ce mouvement trouve une régularité et ne traduise plus en quelque sorte la complication apparente du mouvement de la Terre autour du Soleil, il suffit d'incliner le « style » par rapport au « cadran » d'un angle tel qu'il soit non plus vertical, c'est-à-dire dirigé vers le centre de la Terre, mais parallèle à l'axe de la Terre. Ce dernier, pointé vers l'étoile polaire, est facilement déterminable. Le cadran solaire ainsi défini est donc un instrument à usage local. A l'équateur le style doit être horizontal, au pôle Nord il doit être vertical, moyennant quoi la direction de l'ombre en un lieu donné et pour des heures semblables reste la même quel que soit le jour. La longueur de l'ombre, par contre, reste variable.

De tels appareils existaient en Égypte dès 1300 avant J.-C., et Vitruve, quelque trente ans avant J.-C., parle de treize types de cadrans solaires différents, parmi lesquels figurent en particulier ceux qui, semblables à celui que construisit vers 280 Aristarque de Samos, possèdent une table en forme de calotte hémisphérique et un style dont l'extrémité coïncide avec le centre de la sphère.

Comme les gnomons, les cadrans solaires ont le grand inconvénient de n'indiquer l'heure que dans la journée. Pour pallier cet inconvénient, on construisit des cadrans lunaires fondés sur la constatation suivante : la pleine lune passe avec la nouvelle lune au méridien du lieu considéré et le jour choisi en même temps que le Soleil. Les jours suivants, la Lune revient au méridien avec trois quarts d'heure de retard. On peut donc ainsi en déduire, en utilisant un cadran solaire éclairé par la Lune, l'heure à l'aide d'un système de correction. Quoi qu'il en soit, on ne peut jamais envisager l'utilisation d'appareils à ombre portée lorsque le ciel est nuageux. C'est pourquoi, dès que l'homme eut suffisamment développé son industrie, il envisagea de fabriquer des mécanismes susceptibles de mesurer le temps dans n'importe quelle circonstance, et en particulier à l'intérieur d'une habitation.

L'écoulement des fluides et la consumation des cierges pour marquer l'écoulement du temps

L'analogie entre l'écoulement du temps et celui d'un fluide était évidemment trop tentante pour qu'elle ne donnât pas naissance à d'ingénieux procédés de décompte des instants qui passent. On construisit donc des appareils utilisant l'écoulement du sable et de l'eau.

Le **sablier,** de fabrication très simple, consiste généralement en la juxtaposition verticale de deux vases coniques en verre, de forme et de contenance similaires, communiquant entre eux par un petit orifice qui permet l'écoulement d'une certaine quantité de sable fin du récipient supérieur dans le récipient inférieur. Le temps nécessaire à la descente du sable est bien déterminé et correspond à quelques minutes, un quart d'heure, une demi-heure, trois quarts d'heure, une heure, rarement plus, à la suite de quoi, si l'on veut apprécier à nouveau un laps de temps identique, il suffit de retourner le sablier pour que le sable entreprenne une nouvelle descente.

Parfois, on s'avisa de placer côte à côte quatre sabliers mesurant l'un le quart d'heure, l'autre la demi-heure, le troisième les trois quarts d'heure et le dernier l'heure, de manière à diviser l'heure et à obtenir une horloge très rudimentaire.

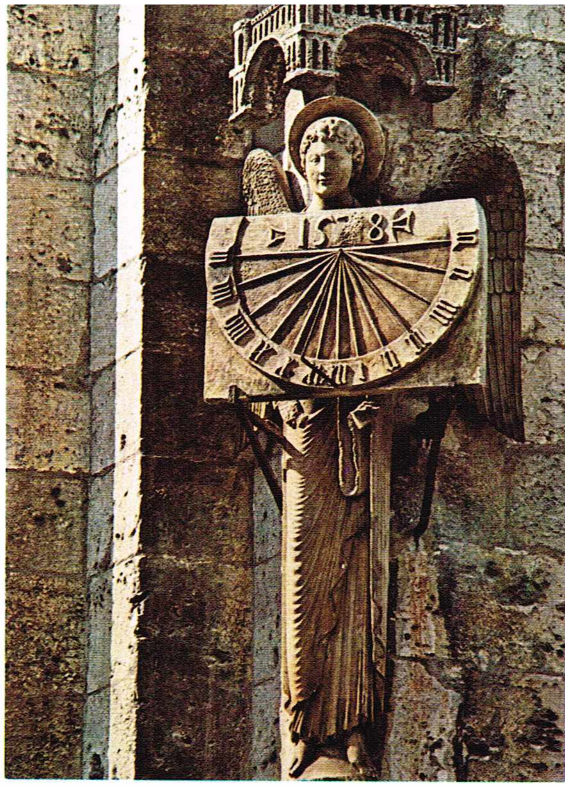

P. Hinous - TOP

◀ ***Cadran solaire. De tels appareils existaient en Égypte dès 1300 avant J.-C. Ils ont le grand inconvénient de n'indiquer l'heure que dans la journée.***

Malgré l'évidence de leur principe et de leur construction (ce n'est en particulier qu'au XIXe siècle que l'on envisagera de substituer à la réunion de deux récipients la réalisation d'une seule pièce soufflée à deux renflements), les sabliers ne sont pas très vieux ; leur naissance date du XIVe siècle seulement.

Plus anciennes sont les **horloges de cire calibrées** dont la consumation a lieu en un temps donné ; leur usage remonte au Xe siècle, avec parfois d'étranges et subtils perfectionnements ; ainsi, au début du XIIIe siècle, l'Arabe Al Jazari joignit à une chandelle un jeu de billes logées dans des alvéoles à différents niveaux, si bien qu'en diminuant de hauteur, la chandelle libérait les billes qui, elles-mêmes, actionnaient des figurines chargées de moucher la mèche et d'entretenir ainsi une combustion régulière. Pour aussi ingénieux que puisse être ce système, on ne saurait considérer les horloges de cire comme les ancêtres mécaniques des systèmes d'horlogerie.

La **clepsydre,** en revanche, quoique son principe soit tout aussi élémentaire, devait donner naissance à d'astucieuses machines à découper le temps.

Tout comme le sablier, la clepsydre trouve son principe dans l'écoulement d'un fluide, mais cette fois-ci, c'est d'eau qu'il s'agit. Il est vraisemblable que, sous la forme très rudimentaire d'un récipient percé d'un trou à la base, de manière à laisser échapper lentement et dans un temps donné le liquide qu'il contient, la clepsydre fut utilisée très tôt dans l'ensemble du Moyen-Orient (3 000 ans avant J.-C. sans doute). Le musée du Caire, en particulier, conserve celle qui fut construite vers 1400 avant J.-C. pour Aménophis III.

▼ ***Sabliers : analogie entre l'écoulement d'un fluide et celui du temps.***

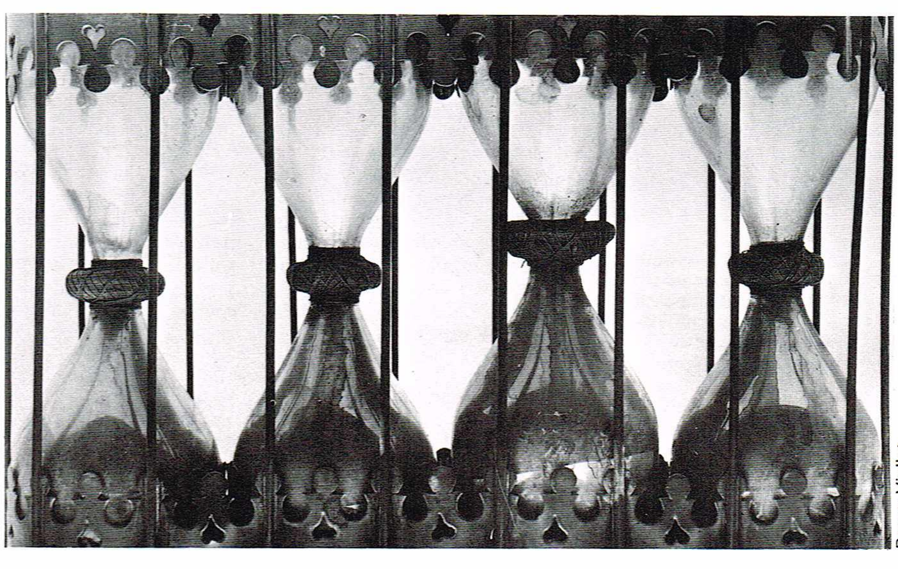

Roger-Viollet

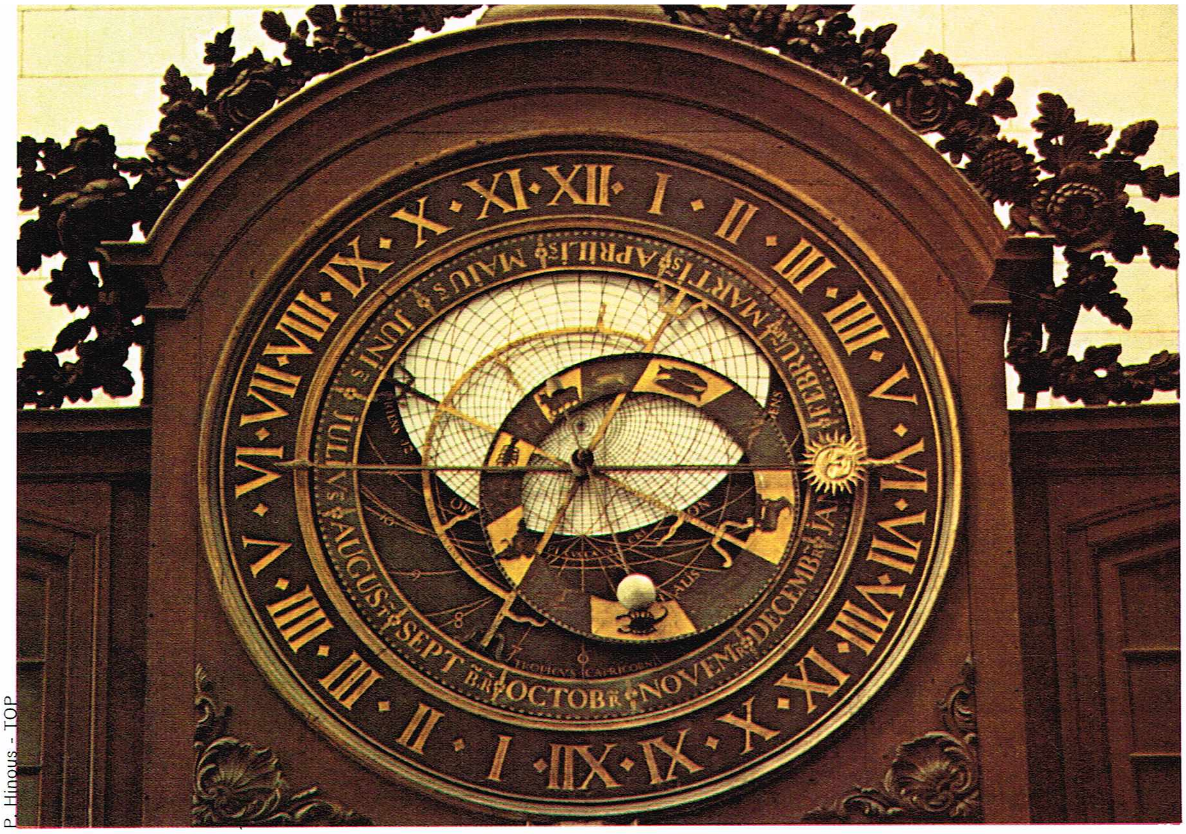

P. Hinous - TOP

▶ *Horloge astronomique de la basilique Notre-Dame à Saint-Omer.*

Ayant constaté que, d'un récipient à parois verticales, l'eau s'écoule d'une manière différente suivant qu'il est plein ou presque vide, les Égyptiens eurent l'idée de réaliser des vases de forme conique dont la pente de 70° entretient un écoulement à vitesse constante.

Un autre type de clepsydre particulièrement fruste dans sa conception faisait, en inversant le principe, intervenir des petits bols flottants dont le fond percé laissait pénétrer l'eau de manière qu'au bout d'un temps donné, lorsqu'une certaine quantité de liquide avait pénétré dans le récipient, celui-ci sombrait. Ce système fut employé par les Celtes de l'Antiquité, par les brahmanes de l'Inde, et également par les Indiens d'Amérique. On l'utilise encore parfois de nos jours en Algérie ou dans l'Égypte du haut Nil.

Le perfectionnement mécanique de la clepsydre fut, en 124 avant J.-C., l'œuvre de Ctésibios d'Alexandrie qui trouva le moyen de visualiser le temps passé à l'aide d'une aiguille et d'un cadran gradué. Lorsque le niveau de l'eau baissait, un flotteur tirait sur une corde enroulée autour d'un tambour relié à l'aiguille.

Des mécanismes qui mesurent le temps

Par la suite, le système corde-tambour devait faire place à des transmissions par crémaillères et roues dentées laissant véritablement présager les systèmes d'horlogerie mécanique.

Au Moyen Age, la clepsydre était d'un usage universel ; elle constituait assez volontiers le présent qu'un souverain destinait à un autre souverain : très célèbre fut celle que le calife de Bagdad, Haroun al-Raschid, offrit à Charlemagne. Elle sonnait les heures en laissant choir par douze fenêtres douze billes de métal sur douze cloches, et à midi faisait apparaître douze automates représentant des chevaliers armés.

L'ingéniosité des mécaniciens qui perfectionnèrent la clepsydre était grande, et les systèmes utilisés pour afficher l'heure préfiguraient suffisamment ceux qui seront adoptés dans les premières horloges mécaniques à poids pour que l'on puisse se demander pourquoi ces dernières n'apparaîtront pas avant le X^e siècle. Il faut aussi constater que leur usage ne fit pas disparaître pour autant clepsydres, sabliers et cadrans solaires dont l'usage survécut pendant de longs siècles.

En fait, alors qu'il était relativement aisé de régulariser l'écoulement des fluides, il était beaucoup plus difficile de maîtriser le problème de la chute en mouvement accéléré du poids ou, plus tard, celui de la détente irrégulière du ressort spiral. Pour y parvenir, il fallut découvrir le principe de l'échappement et substituer ainsi à la notion de continuité dans le développement du phénomène mécanique celle du discontinu et du périodique.

Ni clepsydre, ni appareil à poids (l'eau en s'écoulant emplissait les godets placés régulièrement à la périphérie d'une roue de 3,30 m de diamètre et la faisait tourner), l'horloge que Su Song construisit en Chine au XI^e siècle, et qui fut vraisemblablement la plus perfectionnée de l'époque, montre pour la première fois un système d'échappement parfaitement fonctionnel qui arrêtait le mouvement de la roue pendant le remplissage des godets. Il serait bien difficile de prétendre que l'Occident n'eut pas connaissance de cette prodigieuse réalisation qui subsista jusqu'à la fin du XIV^e siècle.

Si l'on en croit Lewis Mumford, ce serait saint Bernard qui, en Europe, aurait déclenché la recherche technologique qui devait aboutir au développement de la science horlogère. On peut lire en effet dans *Technique et Civilisation :* « Aux variations de la vie séculière, la règle opposait sa discipline de fer. Aux six dévotions quotidiennes, saint Bernard en ajouta une septième. Une bulle du pape Sabinien, au VII^e siècle, décréta que les cloches des monastères sonneraient sept fois par vingt-quatre heures. Ces ponctuations de la journée constituaient les heures canoniques. Il devint nécessaire d'avoir un moyen de les compter et d'assurer leur répétition régulière. » Il faudra pourtant attendre deux cents ans pour que les horloges mécaniques soient véritablement mises au point en Europe. Il ne s'agira d'ailleurs pas alors de machines dont le but serait simplement de compter les heures, mais d'appareils extrêmement complexes que l'on appellera les horloges astronomiques, capables de présenter les jours de l'année avec indication des fêtes fixes et des fêtes mobiles, la position des planètes, le lever et le coucher du Soleil, etc.

Roger-Viollet

▶ *On utilise encore parfois de nos jours en Algérie ou en Égypte des clepsydres, qui trouvent aussi leur principe dans l'écoulement d'un fluide.*

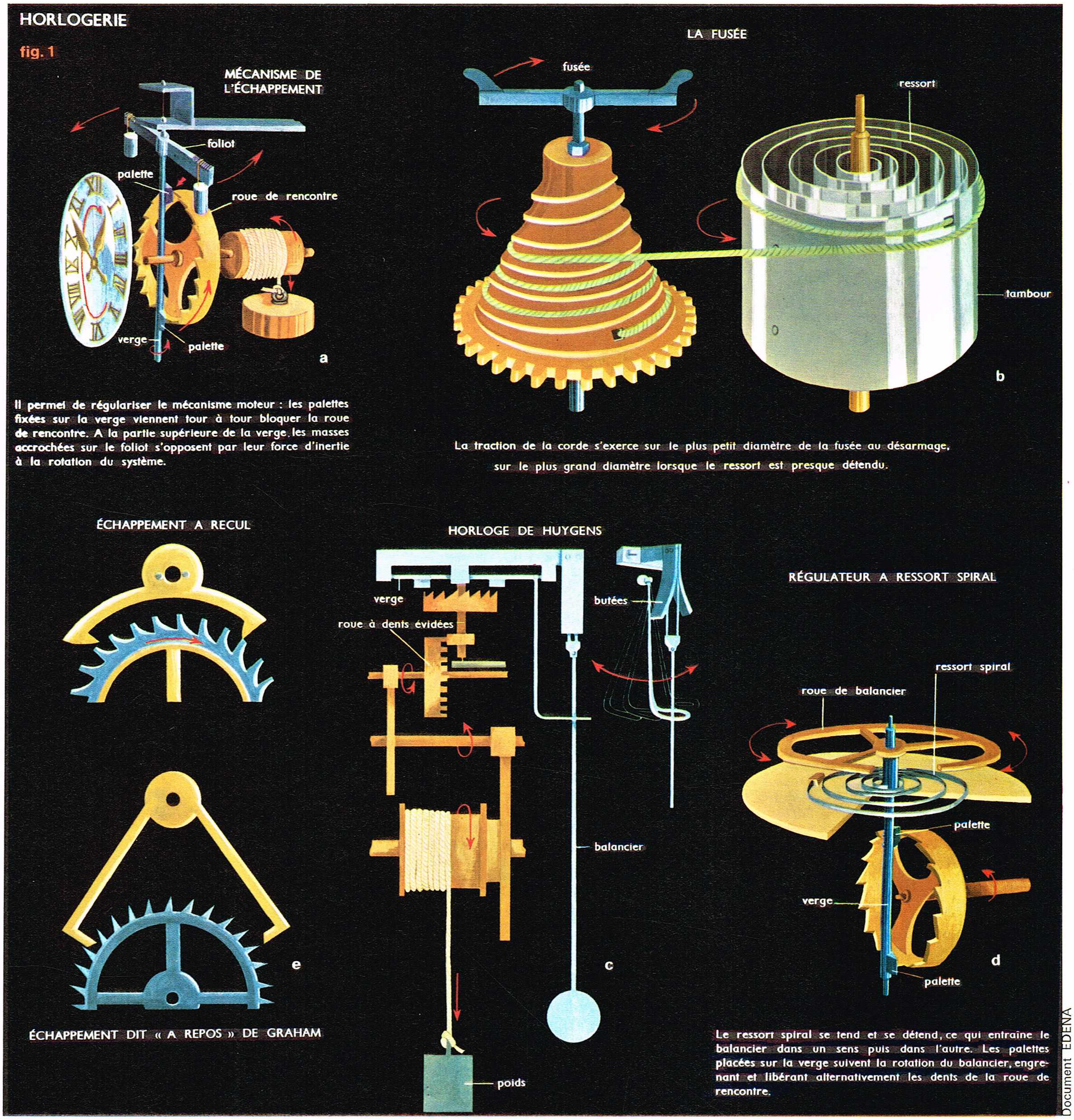

▲ *Figure 1 : les diverses solutions qui furent trouvées pour résoudre le délicat problème de l'échappement dans une horloge mécanique.*

L'évolution technologique de l'horloge mécanique

La plus parfaite de ces horloges fut celle que Giovanni de Dondi construisit vers 1360 et qui comportait un *échappement* mécanique à verge et palettes, foliot et roue de rencontre, le tout étant actionné par des poids. Il s'agit là du premier ensemble mécanique moteur-échappement, dont l'usage généralisé jusqu'au XVII[e] siècle a permis d'indiquer et de sonner les heures dans toutes les grandes villes et tous les monastères d'Occident.

Le mécanisme de l'échappement fonctionnait de la manière suivante (*fig.* 1a). L'ensemble moteur était constitué par un poids suspendu à l'extrémité d'une corde enroulée sur un tambour. Celui-ci était relié à une roue de rencontre dentée qui recevait alternativement, grâce aux oscillations du foliot lesté (lui-même mis en marche par l'énergie fournie par le poids moteur), des palettes fixées à l'axe du foliot (verge). Leur interposition entre les dents de la roue dentée alternativement à la partie supérieure et à la partie inférieure, suivant les oscillations du foliot, permettait la descente discontinue, mais régulière, du poids jusqu'au déroulement complet de la corde.

Vers 1500, un *ressort spiral* en acier allait faire concurrence aux poids. Cette ingénieuse substitution permit de rendre l'horloge sinon portative, du moins portable, et elle devint ainsi pendule d'appartement. Le mérite de cette invention revient vraisemblablement à Peter Henlein

R. Guillemot - TOP

▶ *La substitution d'un ressort spiral moteur à l'encombrant ensemble poids, corde, tambour a permis la miniaturisation et la mise au point de la montre-bracelet.*

de Nuremberg, encore qu'on en trouve également les traces dans les carnets de Léonard de Vinci. Les « œufs de Nuremberg », ainsi baptisés à cause de leur forme ovoïde, furent rapidement appréciés par les gens fortunés de France et d'Italie qui, en adaptant la forme générale de ces pendulettes aux caprices de leur fantaisie (croix, légumes, animaux, têtes de mort, etc.), n'hésitèrent pas également à utiliser, pour la confection des boîtiers, les métaux les plus précieux, finement ciselés et parfois sertis de pierres précieuses.

Ces horloges, qui utilisaient donc pour faire mouvoir l'aiguille la détente d'un ressort spiral, possédaient de ce fait un mouvement non pas constant mais variable, dans la mesure où le rythme moteur, étant lié à la tension du ressort, décroissait au fur et à mesure de la détente de celui-ci. Pour pallier cet inconvénient, l'horloger tchèque Zech eut l'ingénieuse idée de lier au ressort, par l'intermédiaire d'une corde, une *fusée* de forme conique compensant, par l'accroissement progressif du bras de levier du couple, la décroissance de la force motrice. D'autres chercheurs tenteront d'obtenir le même effet en faisant varier l'épaisseur du ressort sur toute sa longueur (*fig.* 1b).

Le pas décisif dans le domaine de la régularisation des mouvements d'horlogerie allait être fait grâce à l'observation en 1588 par un jeune étudiant de dix-huit ans, Galileo Galilei, de l'oscillation régulière d'une lampe suspendue par une chaîne à la voûte de la cathédrale de Pise. Il imagina immédiatement que ce pourrait être là un moyen de mesurer l'heure et essaya, sans qu'on puisse dire aujourd'hui s'il y parvint, de fabriquer une horloge à pendule. En tout cas, c'est à un âge déjà très avancé qu'il tenta véritablement l'expérience dont le témoignage est parvenu jusqu'à nous grâce à l'existence de quelques croquis.

En 1657, le savant hollandais Christian Huygens devait réaliser le rêve de Galilei en construisant la première *horloge à balancier* (*fig.* 1c). Elle était mue par un poids dont l'effort était exercé par l'intermédiaire d'une roue à champ, elle-même contrôlée par un axe (verge) muni de palettes. L'oscillation de cet axe était assurée par un pendule (balancier) qui, dans ses aller et retour, entraînait, grâce à un renvoi à 90° de celui-ci, l'ensemble verge-palettes.

Les horloges de Huygens furent les premières à marquer les secondes. Bien que considérablement accrue, la précision des horloges à balanciers restait liée à un certain nombre de facteurs, lesquels apparaissent parfaitement dans la formule même de la période d'oscillation du pendule :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{mgl}}\left[1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \sin^2\frac{\alpha}{2} + \left(\frac{1\cdot 3}{2\cdot 4}\right)^2 \sin^4\frac{\alpha}{2} + \dots\right]$$

dans laquelle T est la période, I le moment d'inertie du pendule par rapport à l'axe de rotation, *m* sa masse, *g* l'accélération de la pensanteur, *l* la distance du centre de gravité au centre d'oscillation, α l'amplitude.

On voit en particulier que la période augmente avec l'amplitude ; l'horloge retarde donc quand l'amplitude augmente, ce qui conduit à n'entretenir que des amplitudes faibles. Par ailleurs, on remarque l'influence de la latitude par l'intermédiaire de *g*.

Enfin, la dilatation intervenant sur la longueur du pendule, il fallut envisager de remédier à cet inconvénient en trouvant des systèmes de compensation (une augmentation de 5,5 % sur une longueur de balancier de 1 mètre entraînant un retard de 2,5 secondes par jour).

En 1715, G. Graham conçut un pendule dont la lentille creuse contenait du mercure, de manière que, la température s'élevant, la tige du pendule s'allonge et abaisse le centre d'oscillation, tandis que, le mercure se dilatant et remontant dans la lentille, remonte le centre d'oscillation.

En 1753, J. Harrison inventa le pendule à grille bimétallique fondé sur la différence de dilatation de deux métaux, par exemple acier et laiton. La tige du pendule était constituée par un assemblage de barres de ces deux métaux tel que, lorsque certaines s'allongeaient vers le haut et les autres vers le bas, le centre d'oscillation restait fixe. De nos jours, le métal Invar (alliage de fer et de nickel), découvert par Charles-Édouard Guillaume en 1897, permet de réaliser des tiges de pendules pratiquement indéformables par élévation de température.

En 1675, Huygens devait joindre son nom à l'importante découverte du *balancier spiral* (*fig.* 1d). Celle-ci allait entraîner l'horlogerie vers la miniaturisation, en même temps qu'elle proposait un système précis dans toutes les positions. A partir de là, les montres portatives allaient naître.

Le balancier est une roue possédant une inertie suffisamment grande pour faire office de volant. L'extrémité centrale d'un ressort spiral est fixée sur l'axe du balancier, tandis que l'extrémité périphérique est reliée au pont du balancier. Un système de palettes fixées sur l'axe du balancier et venant agir sur une roue de rencontre complète cet ensemble mécanique de régulation.

Il ne restait plus, à l'aube du XVIII[e] siècle, à l'horlogerie mécanique qu'à trouver des systèmes d'échappement parfaitement corrects pour parvenir au dernier degré de perfectionnement. Plusieurs centaines de types d'échappements ont été conçus depuis l'invention de l'échappement à verge et roue de rencontre, qui tentent tous de remédier à son manque d'isochronisme.

Parmi eux, les plus importants sont : l'échappement à repos de Georges Graham adapté aux horloges pendules, et l'échappement libre à ancre que l'on utilise principalement pour les montres (*fig.* 1e). Dans le premier cas, les impulsions se font au voisinage de la position d'équilibre du pendule et ont lieu en un temps très court.

Dans le second cas, la roue d'échappement agit sur le balancier par l'intermédiaire de l'*ancre*. Les deux palettes de celle-ci s'engagent alternativement dans les dents de la roue d'échappement, tandis qu'une fourchette de l'autre côté de l'axe d'oscillation actionne la cheville du balancier. Les impulsions sont de courte durée et ont lieu au voisinage de la position d'équilibre du balancier. Le balancier bat plus librement que dans le cas de l'échappement à verge et roue de rencontre.

Tous ces perfectionnements des systèmes d'horlogerie, qui suivent la substitution d'un ressort spiral moteur à l'encombrant ensemble poids, corde, tambour, ont permis d'envisager la miniaturisation et d'aboutir vers 1920 à la montre-bracelet.

Une montre mécanique se présente aujourd'hui avec les composants suivants : une roue dentée dont le mouvement est lié à la détente d'un ressort spiral (remontoir) à une possibilité de rotation dans un sens. Un système d'échappement dans lequel l'ancre est mue par les oscillations d'un balancier permet, à chaque allée et venue, le passage d'une seule dent de la roue. L'échappement à ancre entretient lui-même les oscillations. Chaque fois que la roue dentée tourne, elle fournit une impulsion à l'ancre qui la transmet au ressort spiral du balancier. Par ailleurs, un train d'engrenage entraîne le mouvement des aiguilles, des secondes, minutes et heures.

Parmi les perfectionnements liés à l'usage du bracelet-montre, on peut citer le remontage automatique dont le principe est fondé sur la mise en mouvement, grâce aux déplacements du bras, d'une masse oscillante qui remonte constamment le ressort.

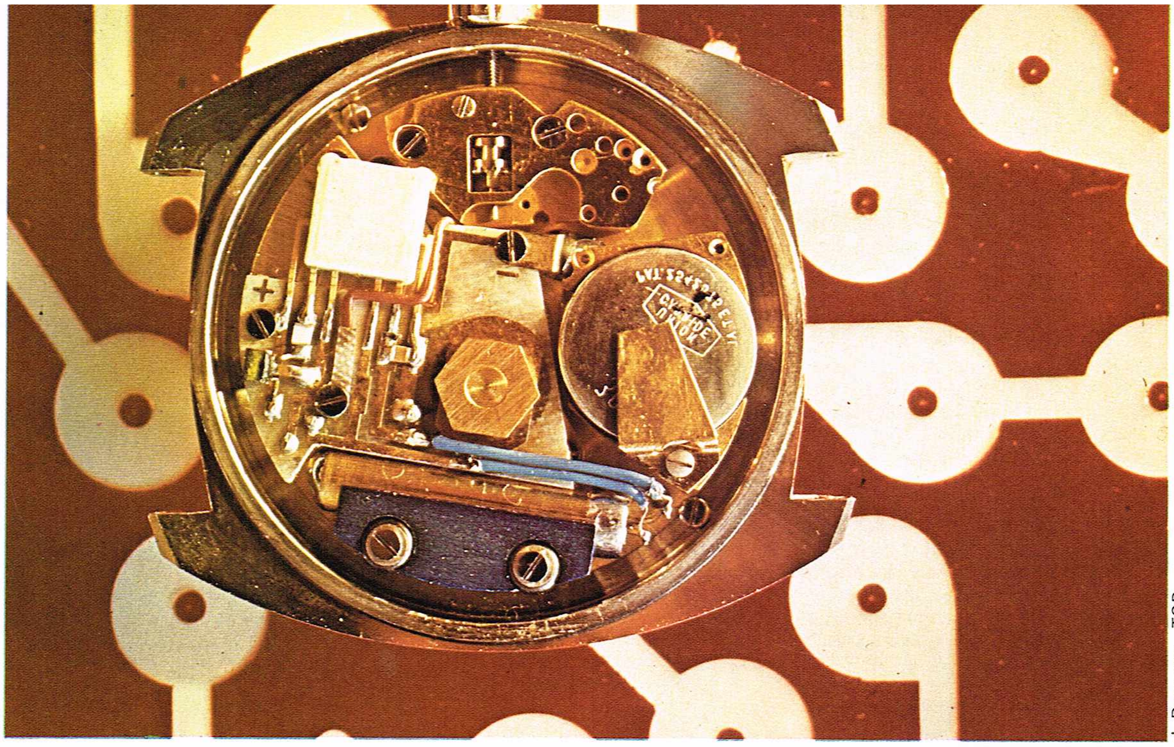

J. Ducange - TOP

◀ *Intérieur d'une montre à quartz sur plan de travail.*

Design Programme

▲ *Montre à quartz Lip, entièrement électronique à affichage digital (Design Roger Tallon, 1975).*

Horlogerie et électricité

L'apparition de l'électricité comme source d'énergie stockable dans les piles allait permettre de franchir une nouvelle étape dans le domaine de la précision, la constance de la source d'énergie permettant de garantir la régularité de fonctionnement du résonateur classique balancier-spiral. Conjointement, la recherche allait s'orienter vers l'utilisation de nouveaux résonateurs qui seront le diapason, le quartz et l'atome.

Le diapason

En 1866, L. Bréguet avait songé à l'utilisation du diapason pour une horloge. Mais c'est en 1954 seulement que le Suisse Hetzel put mettre au point la première montre-bracelet électrique à diapason.

Le résonateur est constitué par un diapason d'une fréquence de 360 Hz. Son mouvement est entretenu par l'action d'une bobine, elle-même reliée à un circuit électrique et agissant par l'intermédiaire de deux bobines sur des aimants permanents fixés aux extrémités des branches du diapason. La pile de 1,35 V assure un fonctionnement continu d'un an environ. La roue portant les aiguilles reçoit les vibrations du diapason par l'intermédiaire d'un système de cliquets. La précision de la montre à diapason est d'environ une seconde par jour.

Le quartz

Envisagée vers les années 1920, l'utilisation du quartz en tant que résonateur de système d'horlogerie ne devait prendre effet qu'en 1930. Les propriétés piézo-électriques du quartz ont été mises en évidence par les frères Curie en 1880 : lorsqu'un quartz est soumis à des efforts de traction ou de compression, une polarisation électrique apparaît sur l'une de ses faces, et réciproquement, si on soumet le quartz à une différence de potentiel, il devient le siège de contraintes mécaniques. C'est cette propriété que l'on exploite dans le résonateur. Si l'on utilise une tension alternative, les déformations le deviennent également. Lorsque la fréquence propre du quartz est égale à celle de l'excitation, le quartz entre en résonance; on parvient ainsi à le faire vibrer à la fréquence de 10 000 Hz. Cette fréquence, trop élevée pour permettre l'affichage direct, est démultipliée électroniquement de manière à agir sur un moteur à rotation uniforme ou à mouvement saccadé.

La précision des montres à quartz est de l'ordre de la minute par an. Conçue en 1970, la montre Hamilton ne possède plus aucune partie mobile, et dans la démultiplication des fréquences, qui permet de passer de 32 768 Hz à 2 Hz par l'intermédiaire de 14 étages binaires, cinq de ces fréquences intermédiaires sont utilisées pour l'ensemble des fonctions, par exemple l'affichage de l'heure en système digital avec diodes fluorescentes.

L'atome

Les horloges atomiques qui existent depuis vingt ans exploitent la stabilité des fréquences de transitions entre des niveaux d'énergie bien déterminés d'atomes particuliers.

En octobre 1976, l'exactitude de ces horloges a permis de donner lors de la XIIIe Conférence générale des poids et mesures une nouvelle définition de la seconde qui devient « la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 ».

Une horloge atomique utilise comme élément essentiel un étalon de fréquence, les organes de transmission mécanique des systèmes d'horlogerie classique étant, quant à eux, remplacés par des synthétiseurs, des multiplicateurs, des diviseurs de fréquence électronique. Pour que l'horloge atomique soit précise et stable au maximum, il convient d'utiliser une transition atomique de contrôle possédant une raie très fine, dont la fréquence de résonance facile à détecter soit indépendante des conditions extérieures. Les transitions magnétiques dipolaires hyperfines liées à l'état fondamental des atomes alcalins aux fréquences situées dans les hyperfréquences conviennent parfaitement. Parmi les horloges atomiques les plus précises, on peut citer :

L'horloge moléculaire à ammoniac utilisant l'effet MASER (Microwave Amplification by Simulated Emission of Radiation). Elle fut imaginée en 1954 par C. H. Townes et utilise une des fréquences d'inversion de position de l'atome d'azote dans une molécule d'am-

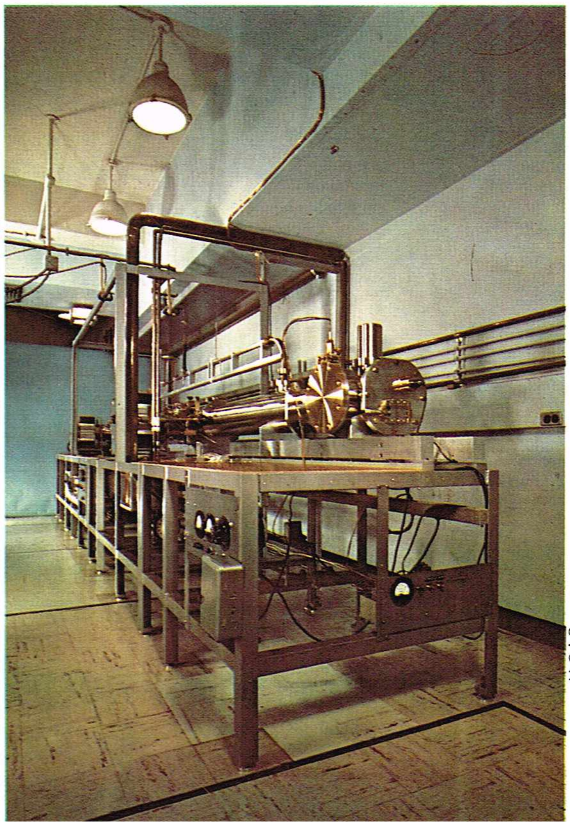

U.S.I.S.

◀ *Horloge atomique. Ces horloges exploitent la stabilité des fréquences de transitions entre des niveaux d'énergie bien déterminés d'atomes particuliers. National Bureau of standards' atomic clock, Denver, coll.*

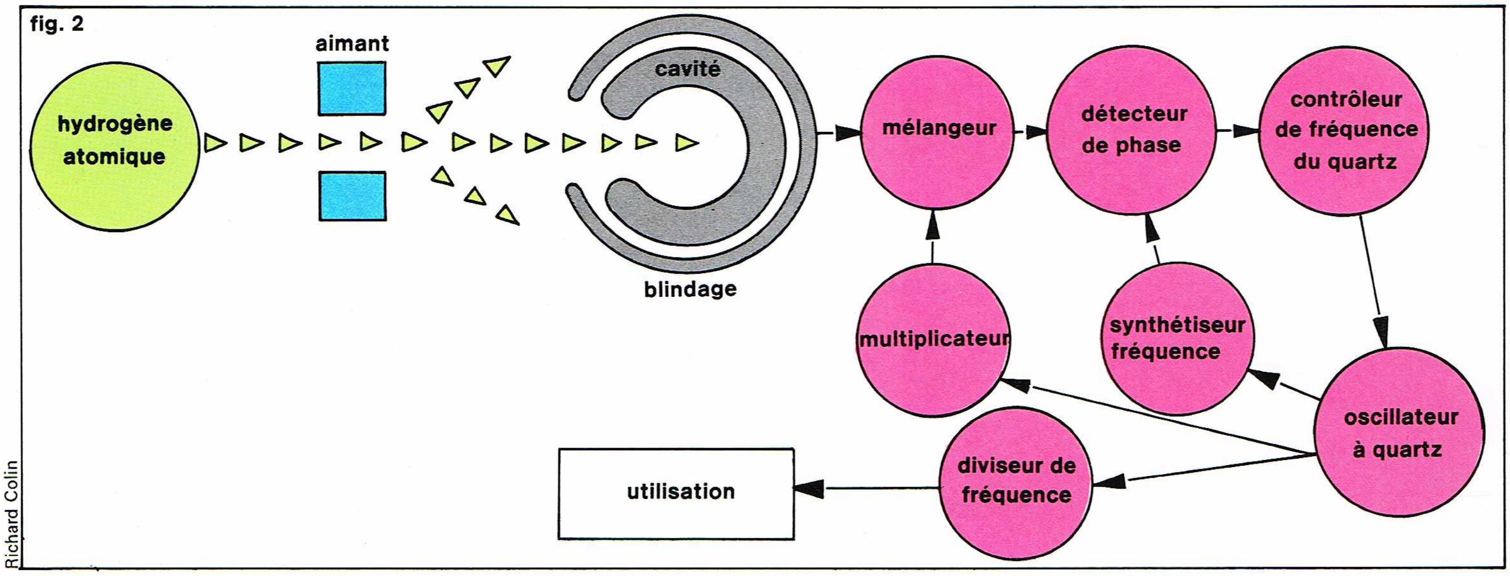

▲ *Figure 2 : principe d'une horloge atomique à hydrogène (MASER).*

▼ *Figure 3 : principe d'une horloge atomique à jet de césium.*

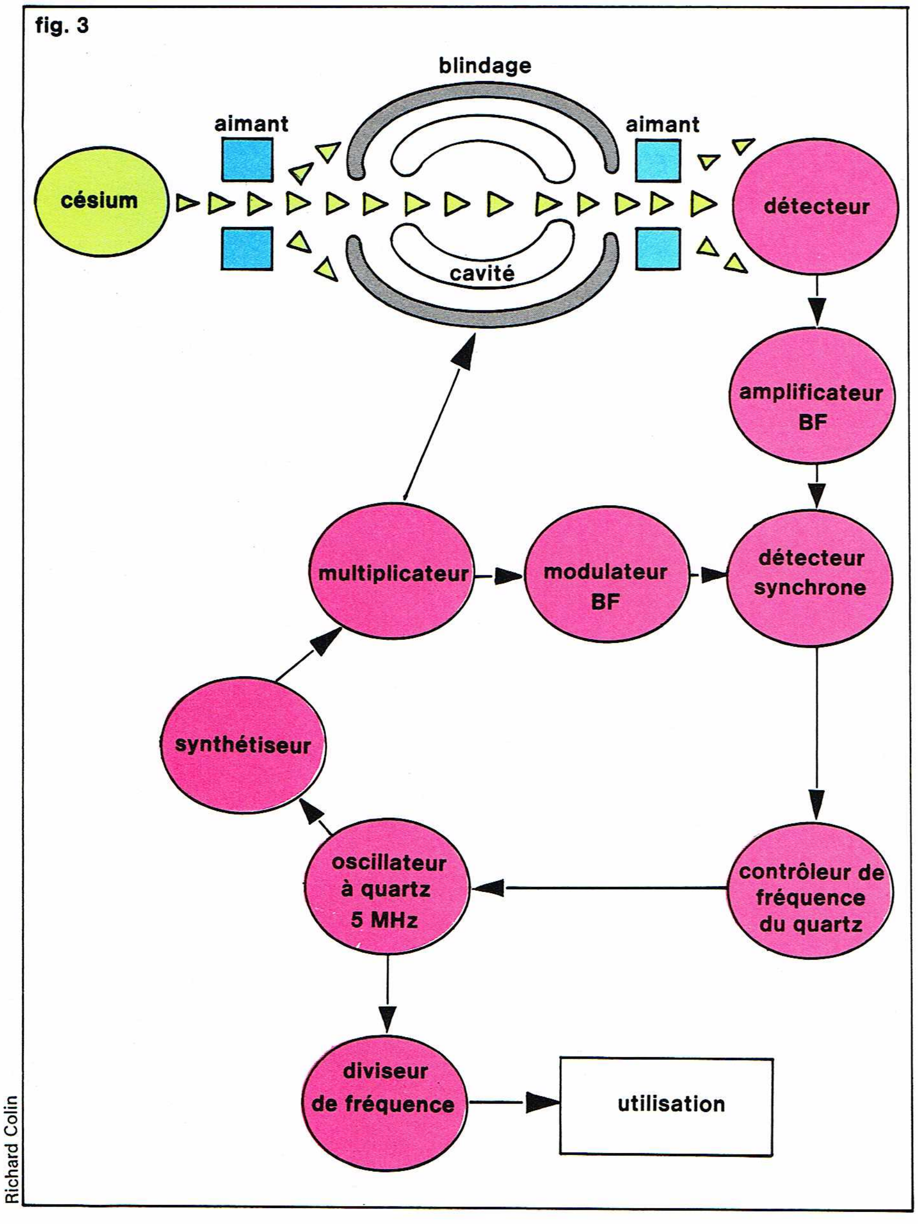

moniac. Cette horloge est remarquablement indépendante des conditions extérieures dans la mesure où la fréquence n'est soumise ni aux variations de pression, ni aux variations de température, et où elle n'a rien à voir avec le vieillissement de la matière. Néanmoins, on lui préfère aujourd'hui, lorsque l'on veut réaliser les étalons de fréquences atomiques, l'hydrogène atomique dont le spectre dans l'état fondamental est moins dépendant encore des facteurs extérieurs, tout en étant plus simple. La transition correspond à l'écart de niveau (*fig.* 2)

$$F = 1,\ m = 0 \text{ à } F = 0,\ m = 0.$$

Les atomes d'hydrogène, qui sont obtenus grâce à la dissociation de l'hydrogène moléculaire à partir d'une décharge haute fréquence, sont expulsés dans le vide. Les atomes à l'état F = 0 sont repoussés au moment de leur passage dans un séparateur magnétique, et les atomes à l'état F = 1 sont au contraire concentrés vers l'axe du jet avant de pénétrer dans une enceinte sphérique en quartz revêtue de teflon, placée elle-même dans un espace fermé soumis à l'hyperfréquence. Les atomes d'hydrogène rebondissent sur le teflon des parois de l'enceinte sans perdre leur orientation, et ceci pendant 0,3 seconde environ, à la suite de quoi ils sortent de l'enceinte. S'ils sont en quantité suffisante dans l'enceinte, ils peuvent retomber dans l'état F = 0 d'une façon cohérente par émission stimulée et entretenir ainsi dans l'enceinte des oscillations à la fréquence de transition, pourvu que l'énergie totale libérée par les atomes soit supérieure aux pertes dans l'enceinte.

L'énergie hyperfréquence produite par le maser contrôle ensuite la fréquence d'une horloge à quartz (fréquence 10^5 Hz, qui, par multiplication, fait apparaître la fréquence d'inversion 23 870 127 MHz). L'exactitude d'une telle pendule est actuellement de $\pm 2 \cdot 10^{-12}$.

L'horloge à jet de césium. Une autre horloge atomique, imaginée elle aussi vers les années 1950, comporte un jet d'atomes de césium. Elle utilise la transition entre le niveau hyperfin F = 4, $m = 0$, et le niveau hyperfin F = 3, $m = 0$ (*fig.* 3).

Le jet d'atomes de césium dans un vide poussé passe dans l'entrefer d'aimants à champ magnétique non uniforme qui produit une séparation des atomes telle que seuls les atomes dans l'état F = 4 convergent vers l'axe. La transition hyperfine ayant eu lieu dans une cavité hyperfréquence, le jet passe dans l'entrefer d'un deuxième système d'aimants identiques qui relocalise les atomes sur un détecteur qui fonctionne par ionisation de surface.

Comme dans le cas de l'horloge à effet maser, l'horloge à jet de césium contrôle la fréquence d'une horloge à quartz. Sa fréquence est 9 192 631 770 Hz, et la précision de l'horloge est de l'ordre de 10^{-12}, ce qui correspond sensiblement à 1 seconde en 300 000 ans.

L'horloge à cellule de rubidium pompée optiquement utilise une cellule contenant du rubidium 87 placée dans une cavité hyperfréquence. On obtient un pompage optique hyperfin par filtrage d'une source de

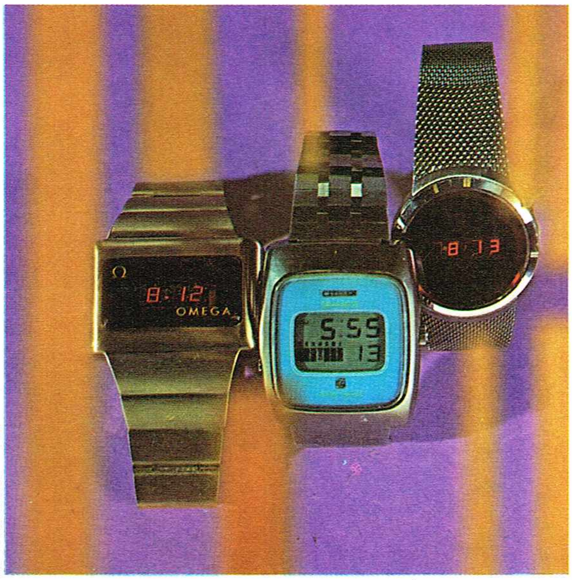

R. Guillemot - TOP

◀ *Montre à affichage digital par lampes diodes (à gauche et à droite), par cristaux liquides (au centre).*

lumière de résonance au rubidium 87 passant au travers d'un filtre de l'isotope rubidium 85. Le pompage produit l'enrichissement en atomes dans le niveau d'énergie F = 2 au détriment de ceux du niveau F = 1. Lorsque la fréquence de l'oscillateur qui excite la cavité correspond à la fréquence hyperfine du rubidium 87, il y a à nouveau égalité d'atomes dans les niveaux F = 2 et F = 1, ce qui produit une absorption de lumière à travers la cellule. Cette résonance est détectée photo-électriquement.

L'affichage digital pour remplacer le système cadran-aiguilles

Parallèlement à l'évolution technologique fondamentale, l'horlogerie a connu dans ces dernières années des mutations dans le domaine de la valeur d'usage. Parmi elles, il faut citer la substitution de l'affichage « numérique » ou « digital » à l'affichage « analogique » des montres et horloges à aiguilles.

Après les systèmes mécaniques à volets qui, dans les lieux publics en particulier, ont permis de visualiser l'heure en se référant à l'écriture, en passant par tous les systèmes d'affichage lumineux, par trames de lampes, lampes à filaments multiples, etc., on en est arrivé dans ce domaine également à un très haut niveau de miniaturisation, qui a permis d'adapter l'affichage numérique aux montres-bracelets à quartz. Cet affichage aujourd'hui peut prendre deux formes :

— il peut utiliser un écran digital/LED (Light Emitting Diodes) où les diodes reproduisent des chiffres qui apparaissent lorsqu'on presse un bouton;

— il peut utiliser un écran digital/LCD (Liquid Cristal Display), et, dans ce cas, les chiffres obtenus à partir des cristaux liquides restent constamment visibles sur un fond clair. La lecture n'est possible qu'avec une lumière ambiante correcte; certaines montres sont équipées d'une petite lampe d'éclairage annexe qui permet la lecture nocturne.

Des matériaux nouveaux pour une production de masse

On peut enfin constater que l'utilisation des matériaux de synthèse pour la confection des boîtiers, voire des mécanismes, tend à se généraliser dans la fabrication des pendulettes et des montres. Cela permet d'abaisser considérablement les coûts et de rendre ces objets désormais accessibles à tous.

« Changez de montre comme vous changez de vêtements » est devenu aujourd'hui un argument publicitaire qui, à travers sa désinvolture aguichante, en dit long sur les exigences de la civilisation que le monde industriel a fait naître. De la même manière qu'elle commande le programme de la machine, l'horloge permet à chacun de nous d'être comptable de chacune de ces heures qui passent et dont on nous demande désormais de rendre compte.

ORFÈVRERIE - JOAILLERIE

De la pierre au joyau

Aussi loin que l'on puisse remonter dans l'histoire de l'humanité, on retrouve la trace du besoin instinctif de se parer. Dès les âges paléolithiques, plumes, coquillages, pigments et cailloux semblent avoir été distingués et utilisés à des fins sans nul doute décoratives, mais pourvues d'un sens spirituel et social.

Mettre en valeur le caractère exceptionnel d'un individu, sa beauté physique, sa force, son rang, mais aussi lui concilier les faveurs des forces supérieures, la protection des divinités, tel semble avoir toujours été le rôle de cet objet étonnant que l'on appelle le bijou, et qui feint parfois d'être utile pour mieux dissimuler qu'il n'a jamais cessé d'être un talisman. Dans cette optique, tout matériau est convenable, pourvu qu'il soit reconnu comme ornemental ou signifiant. Mais comment marquer l'importance particulière de cet objet, si ce n'est en lui conférant les vertus des substances les plus rares, les plus précieuses, les plus inaltérables : brillance des métaux, dureté et pureté des gemmes, toutes ces qualités

▼ *Ce grand collier, entièrement constitué de variétés de quartz, a été trouvé à Suse (2 000 av. J.-C.); le lion est en cornaline, les yeux prophylactiques (magiques et bénéfiques pour s'opposer au « mauvais œil ») sont en agate à zonage plan (Louvre, Paris).*

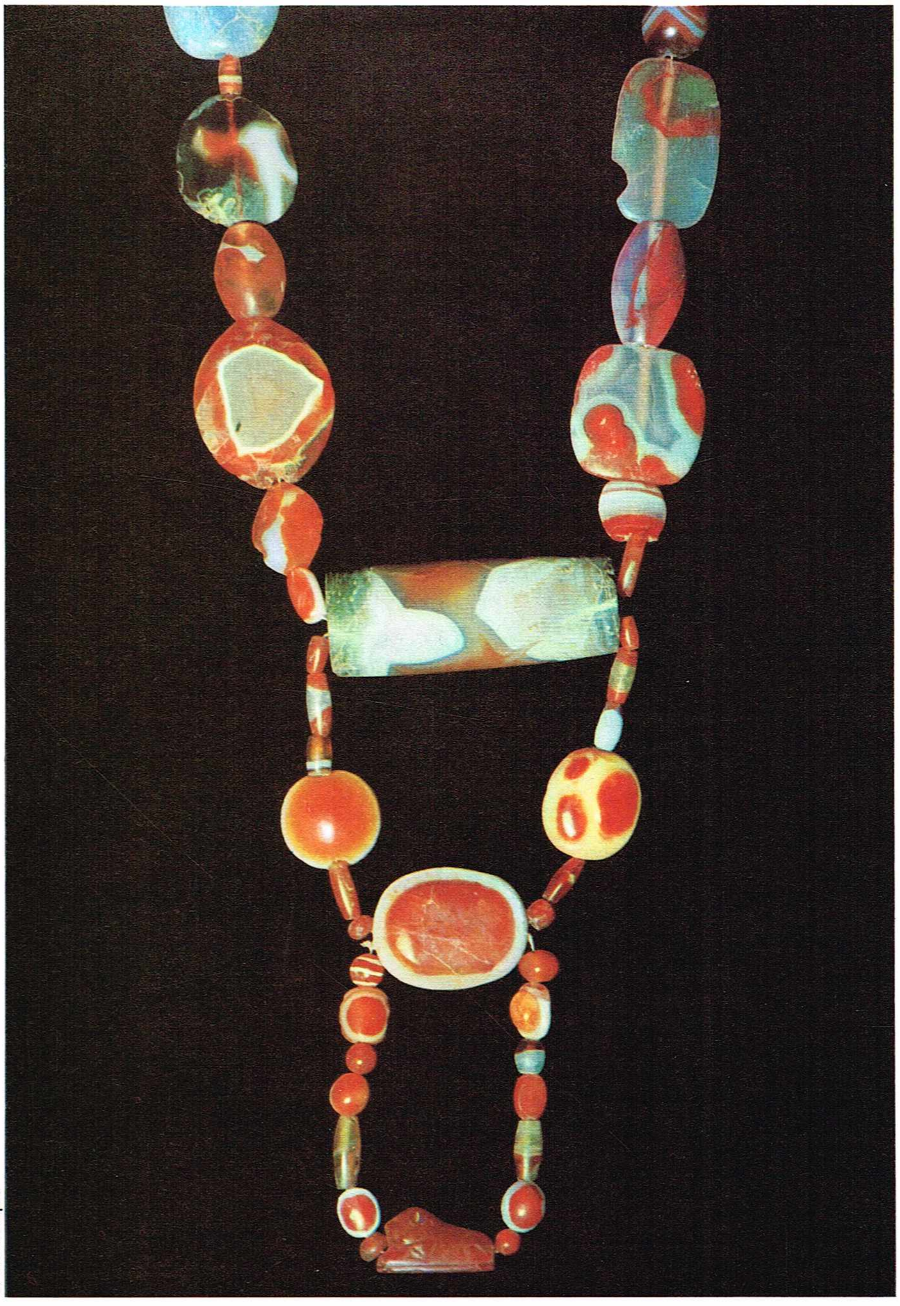

C. Bevilacqua

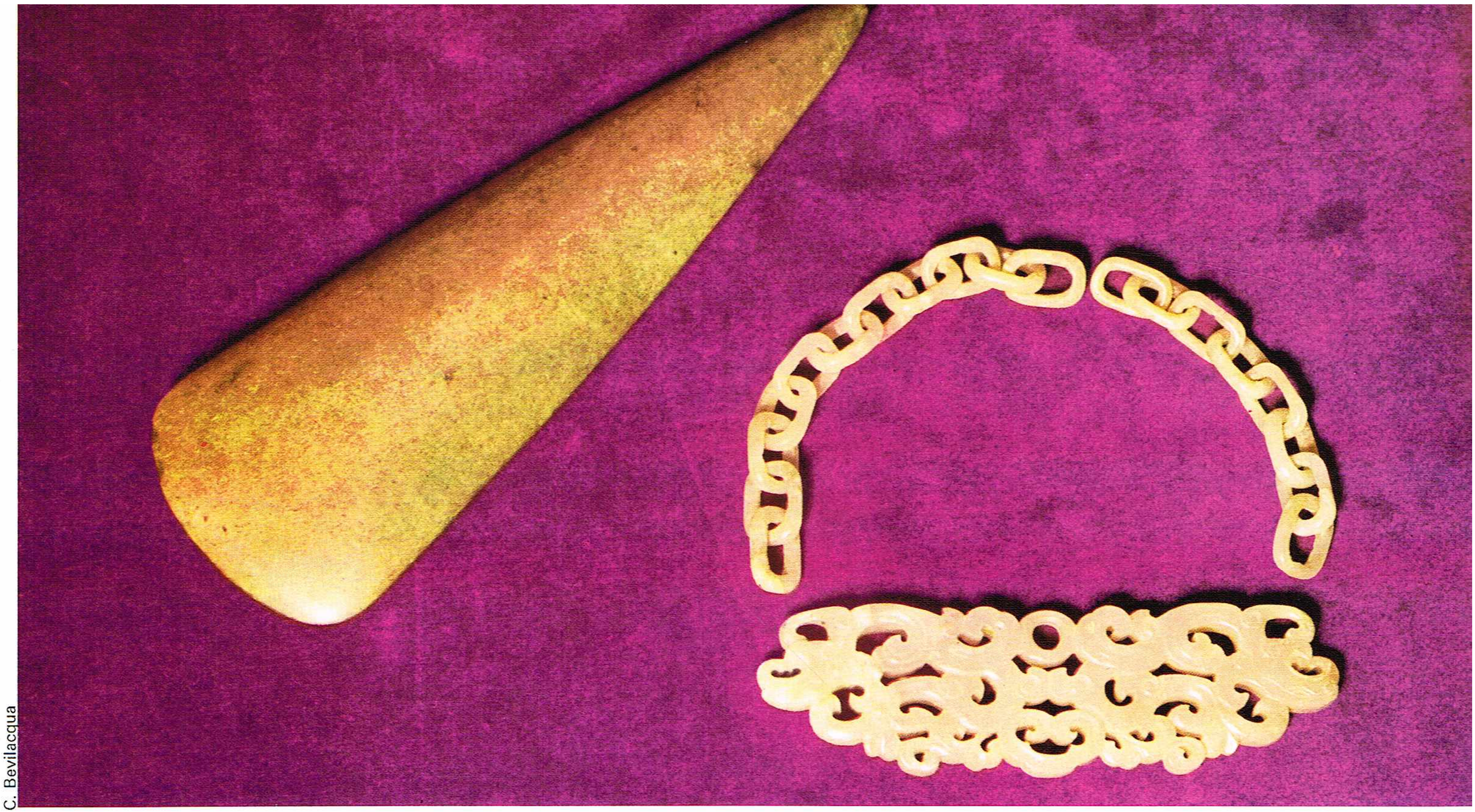

C. Bevilacqua

▲ *Dix mille ans de patientes acquisitions techniques séparent les fabrications de ces deux objets en jade : hache néolithique, à gauche, et collier chinois du XVIII^e siècle, à droite, (plaque et chaîne prises dans la masse) [E. N. S. M.].*

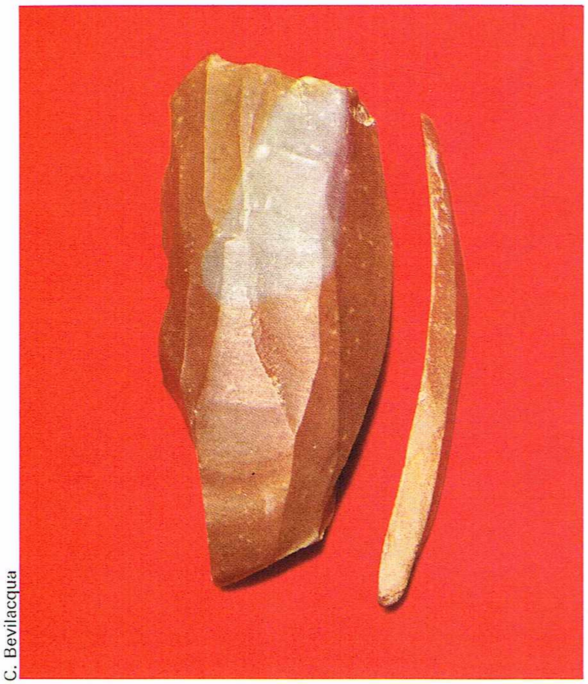

C. Bevilacqua

▶ *Les magdaléniens savaient aussi détacher par pression et par percussion sur des nucléus (blocs matrices) de fines lames destinées à servir d'outils.*

qui, au regard de la fragilité humaine, sont un défi à la puissance des éléments et à la force inexorable du temps.

Certes, les matières précieuses ne sont pas les seules à mériter de la considération, c'est l'émotion qui est le support de la beauté, et aucune barrière ne va à l'encontre de l'utilisation de quelque substance que ce soit pour la faire naître, mais, chaque matériau étant considéré dans sa catégorie propre (verre, cuir, bois, matières synthétiques, etc.), nous laisserons de côté la bijouterie dite de fantaisie et le travail des métaux communs pour n'évoquer ici que les matériaux riches, supports de la bijouterie, de la joaillerie et de l'orfèvrerie, produisant des objets précieux.

A quelques exceptions près, tous ces matériaux sont issus du règne minéral. Ce sont des cristaux. Ils se divisent en deux catégories différenciées et complémentaires déterminant les deux technologies fondamentales des arts précieux :

— le monde du *métal*, tout en plasticité et en aptitude à recevoir les formes, dominé par l'or, roi des métaux, métal divinité, privilège des dieux et des rois ;

— le monde des *minéraux* proprement dits, roches et gemmes, où dureté et fixité font référence, et au sommet duquel brille la pureté du diamant.

Certes, pour sortir de son animalité, il est manifeste que le premier geste de l'homme a été de ramasser un caillou, sa première réflexion (scientifique) de le choisir pointu et tranchant, et son premier artisanat de produire lui-même les arêtes ; c'est le *clivage :* un choc judicieusement appliqué annule la force de liaison des molécules, détachant ainsi des débris du bloc initial qui finira par ne présenter que des surfaces extérieures de plus grande force de cohésion, et dont les lignes de rencontre sont des arêtes vives où la dureté de la roche est à son maximum. Technologie naturelle, encore d'actualité (on ne saurait faire mieux en un minimum de temps et d'effort), elle est en vigueur dans bien des cas pour le travail des cristaux précieux, entre autres celui du diamant.

Le travail par usure des facettes intervient dans un deuxième stade — deuxième âge de l'humanité, âge de la pierre polie. L'interaction de minéraux de duretés différentes, encore une fois technologie douce, fait appel aux propriétés physiques des corps en présence pour faire valoir leurs qualités naturelles.

Quittons ici ce monde minéral, car les pierres de joaillerie, surtout le diamant, rarissime et, par ses qualités mêmes, intraitable, ne furent reconnues et leur technologie maîtrisée qu'à une époque fort récente. Par contre, le troisième stade de la progression de l'humanité l'a amenée à la connaissance des métaux (cuivre, argent, bronze, or), et celle-ci prit le pas sur les connaissances antérieures, conditionnant pour des siècles toute l'évolution de la civilisation. Pour ce qui touche à la production d'objets précieux, notamment des objets en or, elle s'est manifestée avec un éclat tel qu'il semble qu'elle ait atteint d'emblée au plus haut niveau de maîtrise, avec des procédés dont la pratique nous a échappé et dont la théorie tient encore du mystère. Si bien que pour appréhender la technologie des objets précieux, il est indispensable de commencer par celle des métaux qu'elle emploie.

Les métaux

Un métal pur est constitué par une multitude de grains juxtaposés dont chacun est un cristal. A l'intérieur de ce grain, des atomes tous semblables sont répartis régulièrement selon des rythmes géométriques rigoureux ; à chaque élément correspond une structure déterminée qui lui est propre. Il existe des cristaux où tous les atomes sont semblables mais qui ne sont pas des cristaux métalliques. C'est le cas du diamant : chaque électron périphérique d'un atome de carbone est mis en commun avec un électron périphérique de l'atome voisin, constituant ainsi une sorte de molécule géante, dans laquelle

tous les atomes semblables sont liés par covalence. D'autres édifices cristallins sont faits d'atomes différents liés par électrovalence, par exemple le sel gemme. C'est le cas de bien des gemmes, mais il ne s'agit pas non plus de cristaux métalliques.

Dans le cas d'un métal, la cohésion est bien due aux électrons de valence, mais ceux-ci sont mis en commun entre *tous les atomes*. L'ensemble du noyau atomique et des couches d'électrons inférieures complètes constitue une trame d'ions métalliques lourds à charges électriques positives, dans laquelle se déplace un nuage d'électrons à charges électriques négatives, lequel assure la cohésion de l'ensemble. Cette mobilité des électrons de valence explique les propriétés des métaux : la conductibilité électrique et thermique, le magnétisme, le nuage d'électrons pouvant être modifié par un champ électrique, l'éclat métallique et la couleur, et enfin leur qualité principale, à savoir la plasticité, les atomes métalliques pouvant rompre leur liaison avec les atomes voisins, pour procéder à des liaisons équivalentes avec de nouveaux voisins sans altérer l'homogénéité de l'ensemble.

La malléabilité est la propriété de transformer un métal en feuilles, la ductilité celle de l'étirer en fils. Ainsi, l'or peut être transformé en feuilles allant jusqu'à 1/10 000 de mm d'épaisseur. Une once d'or pesant environ 31 g et occupant un volume de 1,5 cm^3 environ donnera une feuille d'environ 12,2 m^2 et un fil de 90 000 m.

Mais, au cours de ces opérations, les cristaux du métal subissent un tassement qui durcit la masse et la rend cassante. On dit que le métal est *écroui*. On remédie à cet inconvénient en « recuisant ». Le *recuit* consiste à chauffer le métal à une température élevée proche de son point de fusion. La chaleur a pour effet de dilater l'ensemble, et un refroidissement lent de le restructurer de manière homogène. Le *point de fusion* d'un métal est le moment où l'élévation de la température libère totalement les atomes de leurs contraintes; ils glissent les uns sur les autres et se rassemblent en gouttes. De solide, le métal est devenu liquide. Il est alors apte à prendre n'importe quelle forme et à la conserver sous l'action d'un refroidissement brusque, propriété utilisée pour la *fonte*, ou à dissoudre d'autres éléments, principalement d'autres métaux, ce qui permet la réalisation des alliages.

Les métaux purs fondent et se solidifient à des températures constantes caractéristiques de chaque métal, tandis que les solutions solides ou alliages présentent un intervalle de fusion et de solidification variant avec leur composition chimique.

La *trempe*, refroidissement brusque, fige la structure métallique dans un état reflétant le désordre des hautes températures. Elle permet de conserver à froid et hors d'équilibre une structure stable à chaud. Ce procédé durcit certains métaux, mais il les rend par le même effet cassants. Par un réchauffement méthodique, le *revenu*, on réhomogénéise l'ensemble et on combine les propriétés du métal en vue de la meilleure utilisation fonctionnelle. La trempe n'est guère utilisée dans l'élaboration des objets précieux, en revanche des traitements thermiques dont le résultat est de conférer aux pièces traitées la dureté et d'autres qualités bien définies ont été mis au point grâce à la connaissance actuelle de la physique du métal.

Tableau I

Métaux utilisés pour la fabrication des objets précieux

Métaux	Symbole	Numéro atomique	Densité	Température de fusion (en °C)
Or	Au	79	19,7	1 064
Platine	Pt	78	19,5	1 770
Argent	Ag	47	10,7	962
Cuivre	Cu	29	6,3	1 084
Étain	Sn	50	11,8	228
Zinc	Zn	30	6,5	420
Palladium	Pd	46	10,6	1 554

▲ ***Tableau I : métaux utilisés pour la fabrication des objets précieux.***

Les métaux qui concernent la fabrication des objets précieux figurent au *tableau* I. Ces métaux ne sont pratiquement jamais utilisés à l'état pur. La combinaison de deux ou de plusieurs d'entre eux permet à la fois d'améliorer leurs qualités, de pallier les inconvénients qu'ils présentent à l'état pur (souvent une trop grande malléabilité), enfin de changer leur coloration dans un dessein esthétique. Les alliages possèdent des caractéristiques propres, notamment des températures de fusion plus basses que celles du métal principal, et peuvent de ce fait être employés pour le soudage.

En France, l'utilisation des métaux précieux est soumise à des règles très strictes : autorisation de l'État et obligation de se conformer aux titres prescrits par la loi.

Ces titres se définissent en carats (pour l'or), ou en millièmes. 1 carat est le 1/24 de la masse considérée; ainsi, 18 K = 750/1 000. Les titres autorisés sont, pour l'or : 24 K ou or fin ; 22 K ou 920/1 000 ; 20 K ou 840/1 000 ; enfin le 18 K ou 750/1 000, le plus fréquemment employé à cause de ses meilleures qualités de résistance, de son prix de revient et de ses possibilités de coloration.

* L'*or jaune*, Au 750, Cu 125, Ag 125, est d'usage courant.

Un alliage or fin et cuivre prend une belle coloration *rouge*. A 20 K, il se prête à la réalisation de pièces à beaux reflets cuivrés. A 18 K, il est beaucoup plus dur que l'or jaune et autorise la fabrication de ressorts, épingles, etc., et toutes pièces réclamant une bonne résistance et élasticité.

Un alliage or fin et argent donne un or aussi inoxydable que l'or fin et coloré d'un doux reflet *vert*. Trop mou pour les bijoux, on lui préfère un alliage intermédiaire, improprement dit 3/4 jaune, composé de Au 750 g, Cu 90 g, Ag 160 g environ, gardant un ton vert et possédant une meilleure dureté.

I.G.D.A. - De Gregorio

◀ ***Or et argent fins, et cuivre électrolytique en quantités nécessaires à l'obtention, par fusion, d'un kilogramme d'un alliage appelé*** **or jaune.**

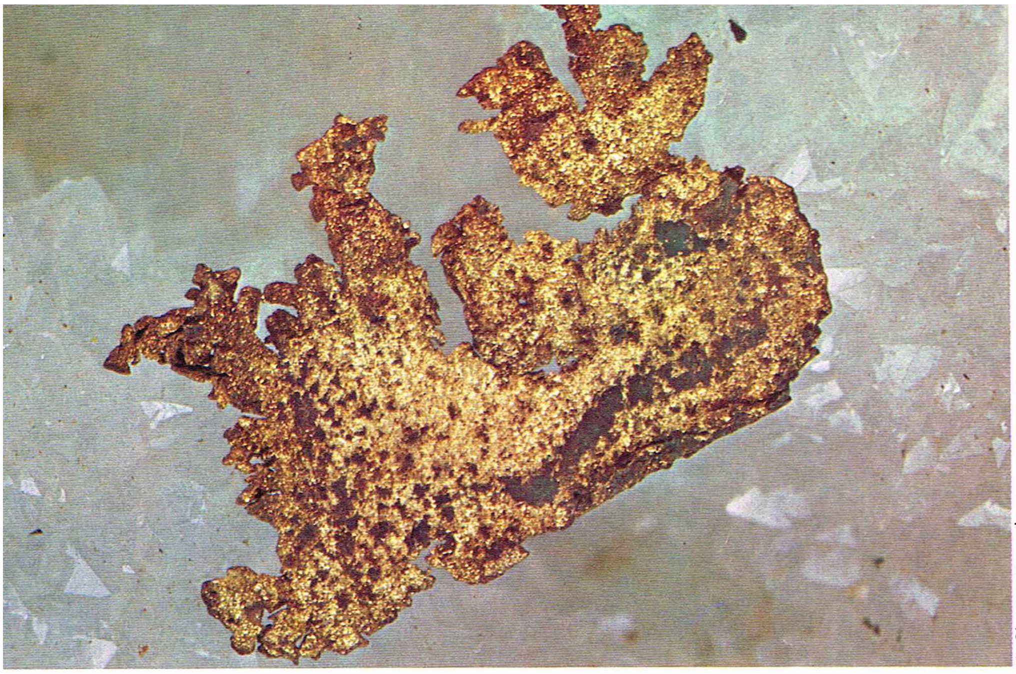

H. Chaumeton - Jacana

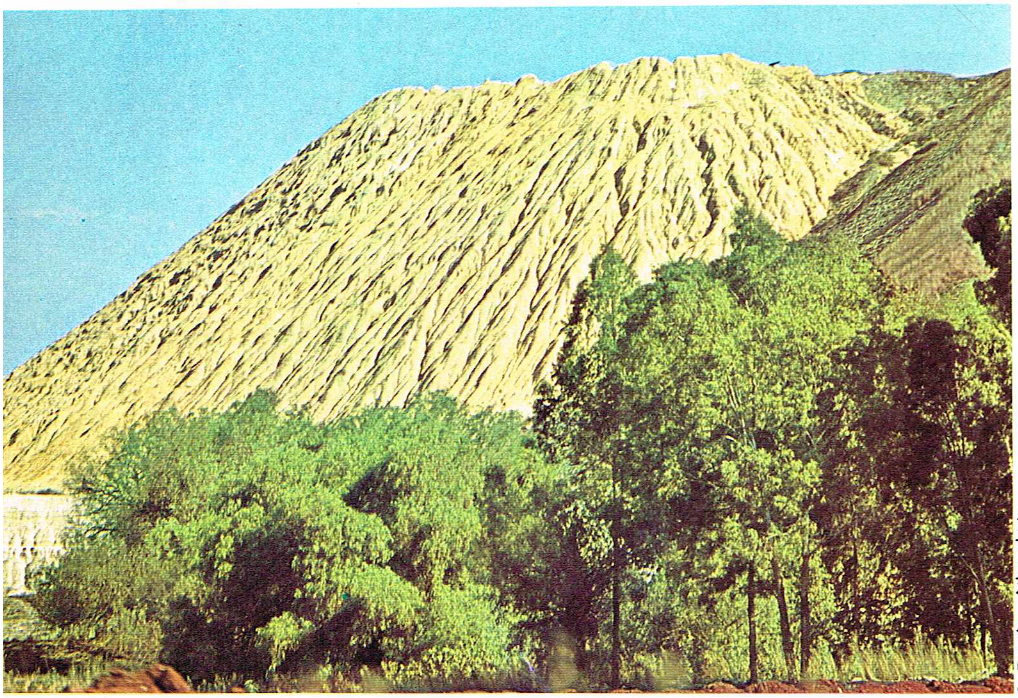

G. Boutin - Atlas photo

▲ *En haut, or natif. Ci-dessus, terril, entassement des stériles d'une mine d'or (Johannesburg).*

▼ *Travailleur dans une mine d'or.*

R. Burri - Magnum

L'*or rose,* très utilisé, est l'alliage intermédiaire entre le rouge et le jaune ; il comporte, en millièmes, Au 750, Cu 170, Ag 80.

L'*or gris* ordinaire comprend 750 à 800 millièmes d'or fin auquel viennent s'ajouter en proportions variables cuivre, zinc et nickel sans aucune adjonction d'argent ou de platine. L'or gris palladié à 750 comporte, en plus de l'or, du cuivre et du nickel, et 100 à 150 millièmes de palladium. Les ors gris ont un bel éclat et des qualités de résistance et d'élasticité propres à la réalisation de ressorts. L'inconvénient de ces alliages pour la bijouterie réside dans la nécessité d'affiner les chutes et les limailles en vue de les réutiliser, car, si on se contente de les refondre, leur texture non homogène leur ôte toute malléabilité.

* Le *platine* dense et mou titre généralement 950 millièmes ; on lui ajoute du cuivre et de l'iridium pour le durcir. La joaillerie, qui en fit grand cas il y a quelques années, tend maintenant à le laisser de côté au profit des alliages d'or gris.

* L'*argent* fin, d'un beau blanc mais très mou, peut être employé, mais ne présente que l'intérêt de l'inaltérabilité et de la couleur. Le premier titre, 950/1 000 Ag, 50/1 000 Cu, encore très mou, s'adapte cependant à la fabrication de pièces suffisamment massives ou de pièces auxquelles le travail impose un fort écrouissage. Le deuxième titre est plus apte à l'utilisation courante, il est fait de 800 g Ag et 200 g Cu. On remédie à l'oxydabilité de ces alliages par des revêtements électrolytiques d'argent fin pour la couleur, ou de rhodium, d'une couleur grise moins agréable à l'œil mais dur, qui protège pour un temps la surface des altérations mécaniques et chimiques.

* Le *palladium*, bien que d'un prix de revient relativement élevé, n'est pas un métal précieux au regard de la législation. Il peut être affecté à la fabrication de bijoux, mais, jouissant d'un succès médiocre, il n'intervient dans ce domaine que par ses qualités de complémentarité dans les alliages, à l'égal d'autres métaux courants tels que nickel, zinc, étain et cuivre, encore que ces derniers aient bien plus de raisons d'être pris en considération : en premier lieu, à cause de leur caractère irremplaçable pour la réalisation de pièces de dinanderie, ainsi que pour la fabrication des alliages destinés à la bijouterie dite « de fantaisie », qui les utilise tels quels ou enrobés d'un revêtement électrolytique, plus ou moins épais, plus ou moins précieux ; enfin pour leur importance dans la fabrication des bronzes, qui de tout temps ont donné lieu à la naissance de formes nobles.

L'or

Ce n'est pas un effet du hasard si, en tout temps et en tout lieu, l'on a reconnu à l'or la suprématie sur tous les autres métaux. Rare et magnifique, il exerce depuis des temps immémoriaux un irrésistible attrait, et la place qu'il a prise dans l'histoire répond à des mobiles passionnels sans commune mesure avec son apport réel tant dans l'évolution des techniques que dans les mécanismes socio-économiques. Son importance symbolique s'est adaptée à toutes les modes, à toutes les croyances, à toutes les formes de sociétés. Or, le symbole ne s'invente pas, il s'impose de lui-même. Étant universel, l'homme le reconnaît.

Substance inattaquable, se parant des qualités de la lumière, se prêtant aux formes les plus élaborées, l'or est devenu valeur référence, on dit franc comme l'or, pur ou beau comme l'or ; on dit du cœur, de la voix ou du caractère qu'ils sont d'or, etc. ; s'il a revêtu une signification magique et spirituelle, c'est bien parce qu'il est doué des propriétés naturelles idéales.

Déjà, on peut l'admirer à l'état natif. Antérieur à l'apparition de toute vie animale, il est présent partout dans la nature, ce qui explique en partie le caractère universel de son rayonnement, visible à fleur de terre ou à fleur d'eau, seul ou associé à d'autres éléments sans rien perdre de sa beauté. L'humanité primitive n'eut qu'à tendre la main pour s'en emparer ; elle n'eut qu'à cueillir cette matière à laquelle elle put aisément imposer quantité d'autres formes. Paillettes et sables charriés par les eaux, filons d'or des montagnes se détachant sur fond de quartz, la beauté intrinsèque se manifeste sans restriction.

La masse qui se présente est le plus souvent infime, elle n'atteint qu'exceptionnellement des dimensions pro-

digieuses, 92 kg, dit-on, pour la pépite de Molvague (Australie), 40 kg pour un bloc d'or des montagnes dans un filon californien.

Si dans les débuts les petites pépites semblent avoir été relativement faciles à rencontrer, on en vint très vite à la recherche méthodique, et avec les débuts de la civilisation commence l'exploitation systématique des gisements par des travaux de mine, excavations, consolidations, etc., travaux dont on retrouve les traces dans des fouilles en Égypte ainsi que dans des documents écrits.

De nos jours, l'exploitation des gîtes filoniens s'est muée en une véritable industrie. Elle bénéficie des immenses progrès du machinisme pour les forages, l'extraction, le broyage et le concassage, et du progrès des connaissances scientifiques pour les traitements métallurgiques ignés ou physico-chimiques qui font de l'extraction une opération minière complexe où l'or devient parfois secondaire. Les minerais d'accompagnement ont un intérêt pratique souvent plus considérable, tels la pyrite de fer ou de cuivre, la blende (minerai de zinc), la galène (minerai de plomb), les minerais de tellurure d'argent, de mercure et, selon des découvertes récentes, d'uranium, en Union sud-africaine.

Naturellement beau, l'or garde indéfiniment son éclat. Dans les conditions normales, il ne se combine avec aucun autre élément. Il est inaltérable. Les seuls solvants possibles sont un mélange dans des proportions bien précises d'acides chlorhydrique et nitrique, l'eau régale, n'existant pas à l'état naturel, et le mercure avec lequel il forme des alliages spontanés, ou « amalgames », faciles à distiller à la température d'ébullition du mercure (367 °C), procédé connu et utilisé depuis toujours pour extraire l'or des minerais complexes.

Les progrès de la chimie et des aménagements industriels rendent possible aujourd'hui la conversion de certains minerais en chlorure d'or (chloruration) et en aurocyanure de potassium (cyanuration) dont on extrait l'or par réduction, précipitation ou électrolyse. Il est bon de noter toutefois que l'extraction de 20 g d'or nécessite en moyenne le traitement d'une tonne de minerai. On est loin de la cueillette et des légendaires pépites.

Néanmoins, même à très petite échelle, l'exploitation reste rentable, compte tenu de la valeur marchande du métal. Aussi subsiste-t-elle un peu partout, mais les sources essentielles sont :

l'Union sud-africaine, environ 50 % de la production mondiale ;

le Canada, environ 15 % ;

l'U. R. S. S., 7 % selon des estimations, puis les États-Unis, l'Australie, le Ghana, la Rhodésie, le Congo-Kinshasa.

Viennent ensuite la Colombie, le Mexique, le Pérou, le Brésil, le Chili, l'Inde, les Philippines, le Japon, etc.

La France conserve encore une mine, celle de Salsigne, dans la Montagne Noire, qui emploie environ 450 personnes à l'extraction de minerai contenant, en plus de l'or, du cuivre, de l'argent et de l'arsenic. Sa production annuelle est de 6 t pour l'argent, et de 1 1/2 à 2 t pour l'or. La mine de Saint-Yriex en Haute-Vienne, dont l'exploitation avait été abandonnée après la Deuxième Guerre mondiale, risque de connaître un regain d'activité, car de nouveaux filons de surface y auraient été récemment mis à jour, d'une teneur de 25 g par tonne.

L'or mis dans le commerce est absorbé à 70 % par la bijouterie-orfèvrerie, 10 % sert à la prothèse dentaire, 8 % à la fabrication de métal plaqué, le reste est à usage industriel (décoration, dorure).

Remarquable par son aspect, universellement répandu, bien que de faible disponibilité, l'or a pu être utilisé dès le début de l'âge des métaux, car c'est le métal dont la métallurgie pose le moins de problèmes. La possibilité de le former, l'étirer, l'écraser par simple martelage apparaît d'emblée ; ainsi, furent façonnés les premiers objets en or révélés par les fouilles archéologiques (perle de Thire), mais sa légende est liée au feu. Et c'est avec la maîtrise de ce dernier que furent inventoriées toutes les possibilités de manipulation du métal. Si malléabilité et ductilité sont évidentes, leur application en est très vite limitée, lorsqu'elle n'alterne pas avec des opérations de recuit. Il en va de même de tous les formages, estampages, ciselures et autres interventions mécaniques. Tout le travail de l'or est lié à la pratique du feu.

Travail des métaux

● Pour disposer au départ d'une quantité de métal suffisante et lui donner les caractéristiques appropriées au travail que l'on s'est fixé, l'opération fondamentale est la fusion, et son corollaire, la fonte. Elle intervient pour rassembler les petites quantités de métal en une masse unique, sorte de goutte aplatie, ou *culot*. Celui-ci peut être travaillé par martelage : on le *forge*. Plusieurs culots peuvent être refondus ensemble ; les fontes successives ne nuisent en rien à la qualité du métal. Au contraire, il se purifie au contact des *fondants*, produits dont le rôle est d'absorber les oxydes métalliques et les impuretés qui pourraient s'y trouver.

On place les parcelles d'or et les fondants adéquats dans un creuset en terre réfractaire que l'on chauffe soit dans un four (à charbon, à gaz ou à l'électricité), soit au moyen d'un chalumeau comme c'est le cas dans les ateliers artisanaux. La masse métallique rougit, se liquéfie, devient incandescente sous le souffle du chalumeau, tournoie en volutes irisées pour se refroidir en un galet recouvert d'un dépôt fuligineux entouré de scories diversement colorées. A moins que, soutenant le feu pour lui garder sa fluidité, on ne coule le métal qui paraît prêt à bouillir dans un moule parallélépipédique en fonte où il se fige en un lingot, à la surface granuleuse et brillante.

Les fondants restent collés au fond du creuset. Les plus utilisés, tant pour l'or que pour les métaux précieux, sont le borax ou borate de soude et le carbonate de soude. Une pincée de salpêtre ou de soufre, ajoutée vivement juste avant la coulée, élimine les impuretés

I.G.D.A. - De Gregorio

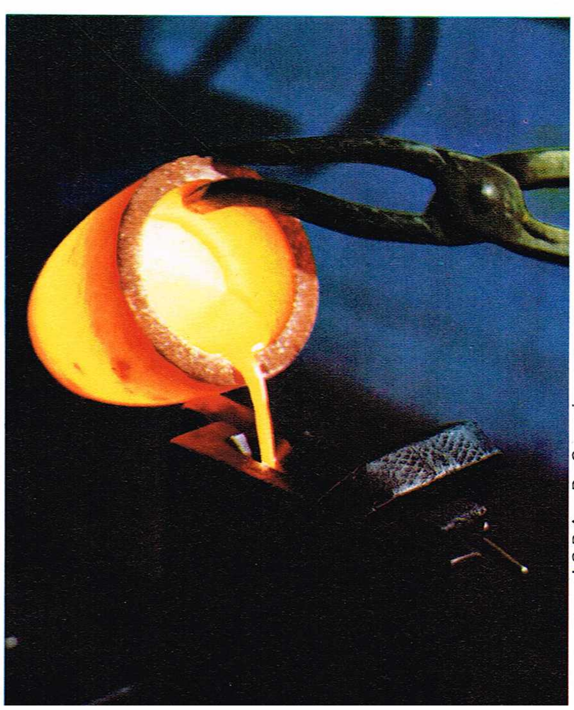

I.G.D.A. - De Gregorio

◀ ***A gauche, fusion des composants de l'or jaune. A droite, l'alliage, parfaitement liquéfié, est versé du creuset dans le moule (lingotière).***

I.G.D.A. - De Gregorio

I.G.D.A. - De Gregorio

▲ *En haut, lingot d'or jaune obtenu après les opérations de fusion et de coulage. En bas, phase de fusion dans une centrifugeuse.*
▼ *A gauche, laminage à froid d'une feuille d'or pur par écrasement du lingot. A droite,* fonte à cire perdue. *Ici, fabrication, à l'aide du prototype du bijou choisi, du moule vulcanisé qui permettra le tirage de cires pour fondre le modèle à la cire perdue.*

restantes dont la présence nuirait à la bonne plasticité du métal.

Lors de la préparation de la fonte, on peut introduire dans le creuset des métaux complémentaires, de qualités et en quantités déterminées, pour obtenir des alliages aptes à des usages variés, selon le titre, la couleur, la dureté et la fusibilité recherchés. Au sortir de la lingotière, brillant et dense, doux au toucher, sonnant bien sur le tas en acier, le lingot est prêt pour sa transformation.

Celle-ci se fait à froid. Elle a pour but d' « apprêter » le métal pour le présenter en fils ou en feuilles : étirage et laminage. Deux cylindres d'acier superposés et tournant simultanément en sens inverse écrasent le lingot engagé dans l'espace qui les sépare. Un mécanisme de réglage permet de modifier l'intervalle de séparation, de façon à exercer une pression croissante mais modérée. Le métal sera ainsi entraîné et aminci par des passes successives, sans subir d'écrasement brutal qui bouleverserait l'homogénéité de sa structure. Le laminage se fait au moyen de rouleaux parfaitement lisses et polis. Il faut veiller en cours de travail à ne pas inverser le sens du passage et à pratiquer plusieurs recuits, car, sous la pression des rouleaux, le métal s'écrouit; il perd son épaisseur, s'élargissant à peine au profit d'un allongement appréciable à chaque passage. Quand le lingot aura atteint au moins le double de sa longueur initiale, on pourra le passer en sens inverse, ou perpendiculairement au précédent passage, mais on ne le fait sans dommages qu'après l'avoir soigneusement recuit.

Des rouleaux creusés de cannelures de dimensions décroissantes équipent les laminoirs pour fils. On y introduit des barres de section carrée, obtenues directement au coulage, ou découpées dans de la plaque. Le passage dans des cannelures de plus en plus petites allonge le métal et l'étrécit. Pour finir, le passage dans des filières (plaques percées de trous où l'on force le métal à passer en le tirant avec une pince) régularise la section du fil, la modifie selon la forme des trous (ronds, carrés, ovales, cannelés, etc.) et la diminue jusqu'à la dimension désirée.

Fonte, alliage, laminage et étirage sont couramment pratiqués, même dans de petits ateliers, mais les conditions de production de l'industrie mettent à la portée des fabricants grands et petits des produits apprêtés qui bénéficient de tous les progrès de la connaissance physique et expérimentale du métal, tant pour les métaux traités que pour ceux qui servent à la construction des appareils et des machines utilisés à cet effet.

● Un autre procédé de transformation, connu depuis les débuts de la métallurgie, connaît actuellement d'importantes améliorations, c'est la *fonte à la cire perdue*. Au lieu de verser le métal en fusion dans une lingotière, on peut le solidifier dans un moule ayant la forme que l'on veut obtenir ou une forme qui s'en rapproche le

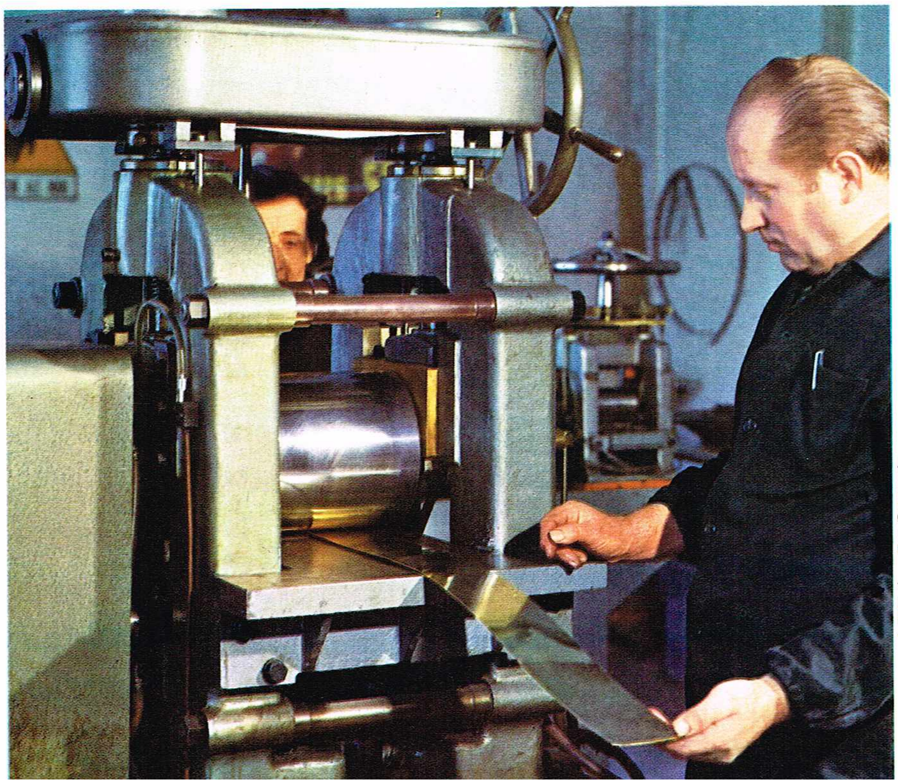

I.G.D.A. - De Gregorio

I.G.D.A. - De Gregorio

I.G.D.A. - De Gregorio

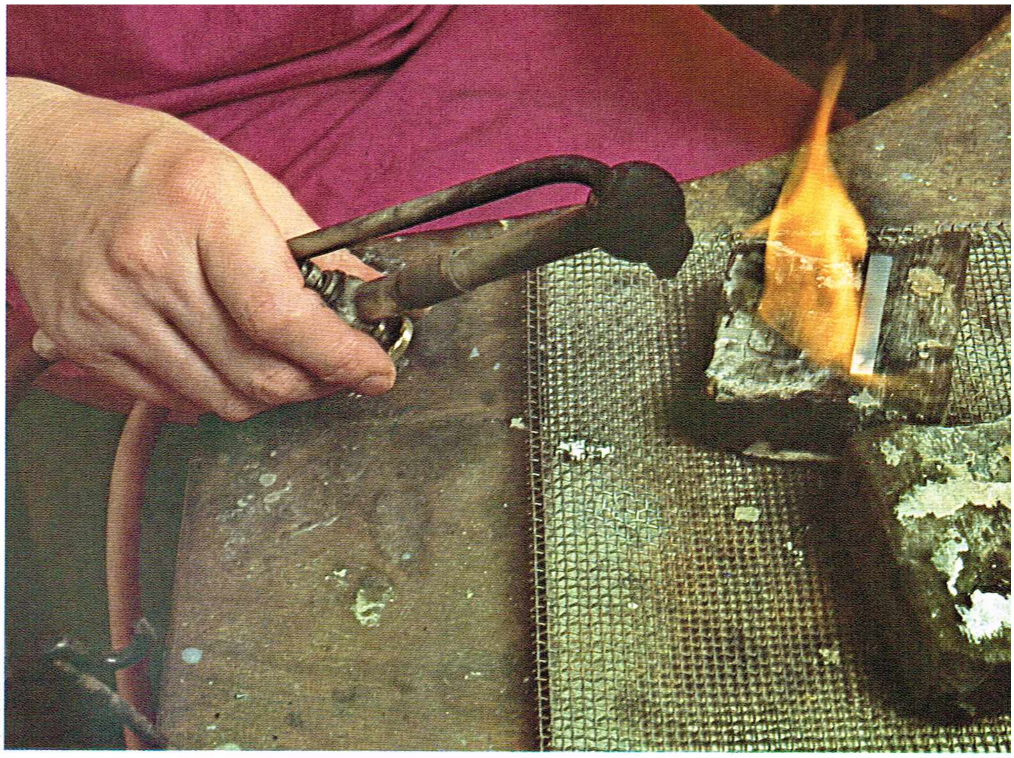

D. Boutet

▲ *A gauche, fonte à cire perdue, sortie du four d'un cylindre de plâtre préchauffé à 800 °C.*

A droite, phase de soudure des éléments d'un bijou.

plus possible. Ainsi peuvent être coulées statuettes, pendentifs, anneaux massifs pour bagues ou bracelets. On fait un modèle en cire, que l'on enrobe d'un matériau résistant à la chaleur, terre, plâtre, agglomérés, en réservant des jets de coulée et des évents. Le métal en fusion vient remplacer la cire, reproduisant exactement le volume qu'elle occupait. Un léger rétreint du métal au refroidissement facilite l'extraction du « tirage ».

Cette méthode permet d'envisager, à partir d'une matrice, la répétition du modèle initial. Largement utilisée dès les premières civilisations des métaux, elle semble avoir été appliquée de préférence à la fabrication d'objets en bronze, parmi lesquels figurent et des bijoux et des outils. L'or, moins disponible et magnifiant, était plutôt étalé en feuilles. Hautement respecté, il n'engendrait que des pièces réclamant plus que le soin de bien reproduire un modèle donné. Il n'en va plus ainsi aujourd'hui. Économie de consommation oblige. Si l'objet précieux garde parfois un sens social, il est totalement vidé de son contenu spirituel. De la bijouterie courante aux joyaux les plus coûteux, tout vient en « tirages ». La différence est dans le nombre ; nombre d'exemplaires tirés, nombre d'heures de travail exigées par la mise au point de la maquette. Les procédés modernes de fonte — sous pression, par centrifugation — ont contribué à la généralisation du procédé, en raison de la facilité d'obtention de grandes quantités de pièces venant d'une même coulée.

Les matrices sont réalisées dans des gommes vulcanisables et parfois — plus récemment — dans des matières polymérisables. Elles sont pourvues d'un jet de coulée et sectionnées en deux parties exactement superposables. Le vide formé par le volume de la maquette est garni par centrifugation de cire chauffée, qu'on laisse solidifier avant de l'extraire avec son jet de coulée. On obtient donc autant de pièces que l'on veut du même modèle. Les cires semblables ou de modèles différents sont rassemblées en une sorte d'arbre dont le tronc est un « cylindre ». On enrobe l'ensemble dans un revêtement de plâtre fin que l'on place dans un four pour le sécher et l'amener à une température convenant à la réception du métal en fusion. Le métal est coulé par centrifugation. On refroidit et on désagrège le revêtement de plâtre qui laisse à nu une grappe de pièces reliées au cylindre par leur tige de coulée. Il n'y a plus qu'à détacher chaque pièce en coupant la tige et à procéder à la finition.

Une forme très ouvragée peut très bien venir d'un seul jeu, mais elle aura besoin d'être « reprise » : il faut enlever à la scie le jet de fonte, limer les ébarbures, poncer les surfaces planes qui tendent à se creuser par l'effet de rétraction du métal au refroidissement. L'aspect de ces pièces, quant à leur forme et à leur enveloppe extérieure, est bien similaire au modèle original. Seule leur texture est différente, moins compacte, moins dense ; il arrive aussi qu'elle présente des vides. On dit que le métal est « piqué ». A moins d'un traitement spécial, la surface du métal ne sera pas susceptible d'une aussi belle finition, et la qualité intrinsèque de l'objet s'en trouvera modifiée.

● Si deux ou plusieurs pièces ainsi obtenues doivent être assemblées, on a recours au *soudage*, exactement comme on le ferait pour des éléments façonnés à l'établi. L'opération consiste à réunir deux parties de métal en utilisant la différence de fusibilité des alliages.

On prépare les parties à souder en les limant de manière qu'elles soient bien planes et bien propres. On les maintient rapprochées, au besoin en s'aidant d'une ligature en fil de fer, ou en les fixant dans du plâtre. Il faut que l'ajustement soit parfait, sans qu'il y ait d'interstice. On enduit le joint d'une solution de borax qui facilitera la diffusion de la soudure que l'on dépose sur le joint en minuscules paillons. On actionne alors le chalumeau, pour chauffer, non la soudure, mais toute la pièce, jusqu'à obtention de la température de fusion de la soudure. Celle-ci fondra alors, filant en un éclair le long du joint et rendant les deux morceaux de métal parfaitement solidaires, au point que, sur un objet fini, on a du mal à localiser une soudure bien faite. On décape alors la pièce dans un bain d'acide sulfurique dilué, le bain de « déroché ». Soigneusement rincée et séchée, elle est prête pour une deuxième intervention, s'il y a lieu, avec une soudure plus basse.

On soude généralement entre eux des métaux ou alliages de composition semblable, mais rien ne s'oppose à l'assemblage de métaux différents : or sur argent, argent ou or sur bronze ou cuivre, à condition de respecter les limites inférieures de fusibilité des métaux en présence. Cela permet de varier les effets décoratifs et de réaliser des placages. Un plaqué laminé fabriqué industriellement ne réclame même pas un apport de soudure. Un lingot d'alliage de cuivre sur lequel repose une feuille d'or est porté, dans un four à l'abri de toute oxydation, à la température limite de sa fusibilité. L'ensemble est pressé à chaud dans une presse hydraulique d'environ 200 t, puis laminé avec des recuits fréquents. La cohésion entre les atomes du métal support et ceux de la feuille plaquée est absolument parfaite, et l'on peut traiter les feuilles ainsi obtenues comme un seul alliage. La surface présente, en plus d'un très bel aspect, d'excellentes qualités de résistance, bien que l'épaisseur du placage ne dépasse généralement guère 20 à 30 micromètres.

Les avantages apportés au travail des métaux précieux par la connaissance et l'industrialisation contemporaines facilitent une partie du travail et assurent une diffusion très large des objets. Ils n'ont guère modifié les techniques de base, ni le travail manuel qu'ils requièrent. A quelques détails près, l'outillage reste le même, et il sert à effectuer les mêmes opérations : découpage, perçage, limage, emboutissage, estampage, gravure, ciselure, repoussé, guillochage, brunissage, polissage, etc. Cependant, grâce à l'utilisation de tourets électriques, complétée par des traitements électrolytiques et thermo-électriques qui camouflent les imperfections et durcissent les surfaces, la finition atteint un degré de perfection jamais égalé.

Mais on est en droit de se demander si tous ces développements représentent bien un progrès. Un regard

R. Wilson - TOP

▲ *Art thrace. Rhyton en or en forme de tête de cerf (découvert à Panarguritche).*

rapide sur ce qui émerge du passé, confronté à ce que nous produisons aujourd'hui, met cruellement en évidence l'appauvrissement de la qualité artistique. Quant à la technique même, oserions-nous affirmer quelque supériorité ? Quand on examine la moindre bague égyptienne, quelque phiale achéménide, le torque de Koul-Oba, ou un gobelet étrusque, on reste confondu. Tant de virtuosité ne semble pas compatible avec les embûches d'un travail par trop hypothétique et laborieux. Les procédés existaient, qui autorisaient à se jouer de milliers de granulations à peine palpables, à les aligner en prodigieuses arabesques, à les relier sans bavure, sans empâtement, sans déformation, à la feuille pourtant très mince qui les supporte.

Des analyses micrographiques, des expérimentations de laboratoire ainsi que le travail et l'imagination de savants qualifiés ont permis d'aboutir à des idées théoriques sur la méthode employée. Les explications logiques, compatibles avec les propriétés chimiques et physiques du métal, sont d'autant plus aptes à convaincre que des applications pratiques ont pu en être faites. Le procédé n'en demeure pas moins entouré d'un halo de mystère qui ne sera sans doute jamais totalement éclairci, même si sa reconstitution est très proche de la réalité. La plus précise des analyses ne peut livrer les conditions exactes de la réalisation, ni la nature exacte des produits employés, composants volatilisés en cours d'exécution, substances végétales ou animales ne résistant pas à la chaleur, catalyseur quelconque, ne se fixant pas sur l'objet. Tout ce que l'on peut dire, c'est qu'aujourd'hui nul ne se sent capable de refaire vraiment aucune de ces pièces, ni de produire un travail analogue en virtuosité.

▼ *Planche de l'Encyclopédie de D'Alembert : orfèvres-joailliers.*

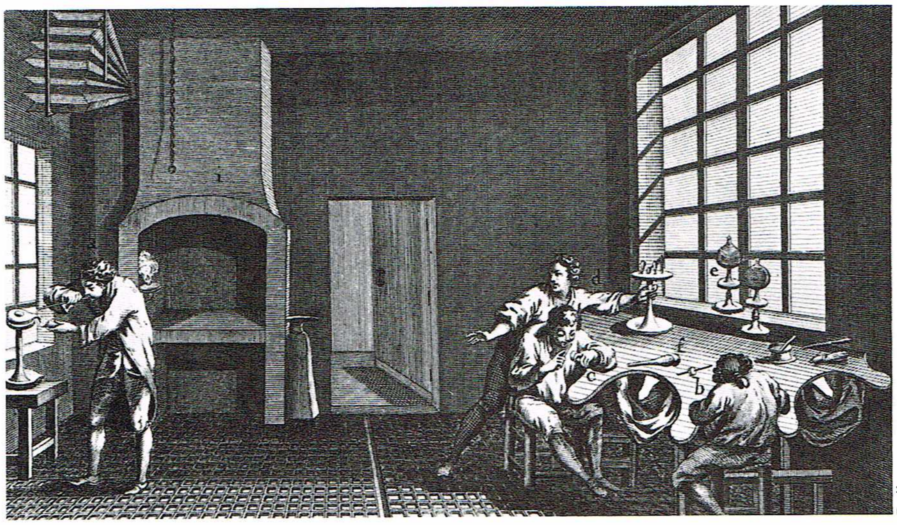

Bulloz

Doit-on s'étonner d'avoir perdu des recettes dont l'application était généralisée ? Les documents sont rares. En retrouverait-on de plus explicites que ceux dont nous disposons que nous ne saurions peut-être pas les interpréter. L'orfèvrerie n'était qu'un art ; elle n'a jamais été science. Outre que chaque atelier ou chaque individu aime bien garder secrets les « trucs » qui lui permettent de faire mieux qu'autrui, ce qui est parfois une nécessité vitale, les connaissances étaient transmises oralement. Et pour cause, bien peu étaient en mesure de lire et d'écrire, et ceux-là ne devaient guère s'adonner à l'orfèvrerie. Si bien que la transcription est dès le départ sujette à caution. S'y ajoute la mouvance du vocabulaire ; la désignation nominale d'un produit a pu s'attacher à tout autre chose, et à la limite perdre totalement son sens. De plus les jargons ne se sont jamais embarrassés de désignations scientifiques. Hermétisme voulu ou inconscient, on prend du « déroché », du « fondant », de l' « isolant », ou, pour citer un exemple précis et actuel, du « plator », appellation désignant un alliage d'or gris fort apprécié et ne contenant pas un seul gramme de platine, comme son nom inciterait à l'imaginer. Pour peu que le procédé se révèle efficace, qui ira se soucier de la nature exacte du produit, procédé et produit étant considérés comme d'autant meilleurs qu'ils paraissent plus nouveaux ? D'une génération à l'autre, le procédé change, la mode changeant aussi. Simultanément à l'oubli, insensiblement la transition s'effectue.

Les pierres

Étymologiquement, l'orfèvrerie est le travail de l'or. Si l'on ajoutait quelque pierre de-ci de-là, c'était surtout pour souligner la beauté du métal. Des incrustations de métaux de couleurs diverses furent pratiquées dès l'époque sumérienne. Le nielle, les émaux, oxydes naturels fusionnés avec du verre, vinrent heureusement enrichir les décors en filigrane et en cloisonné ; le goût de la couleur et des effets de transparence se répandit, contribuant, conjointement à une carence de l'or à certaines époques, à ce que les orfèvres s'attachent moins aux prouesses qu'autorisait la seule connaissance du métal.

Le désir d'accroître ces effets de transparence, de luminosité et de couleur aida à généraliser l'intérêt porté aux pierres. Plus ou moins précieuses, connues dès la plus haute antiquité, certaines étaient investies, à l'égal de l'or, d'une aura magique. On leur reconnaissait, en plus de leur attrait visuel, des vertus surnaturelles et des pouvoirs prophylactiques en étroite relation avec leur signification astrale.

L'évolution se fit dans le sens de la diversité croissante des variétés, et dans la recherche des moyens propres à mettre en valeur leur aspect naturel en exploitant toutes leurs possibilités ornementales. Polissage, taille de cabochons, avivage des facettes naturelles après un clivage sommaire furent toujours pratiqués. Le progrès eut pour objet de réussir à forer les pierres, à les creuser, à graver des dessins en creux (intailles de sceaux et de cylindres), ou en relief (camées), à les façonner en perles.

La vogue des pierres alla croissant, celle des gemmes proprement dites commença vers le Xe siècle, pour susciter de plus en plus d'intérêt avec la meilleure connaissance des cristaux et des procédés de taille à facettes. C'est à partir du XVe siècle qu'avec l'engouement pour les pierres précieuses, sous l'éternel orfèvre, commença d'apparaître le moderne joaillier.

Les matières les plus recherchées pour la parure et la création d'objets précieux sont des substances cristallines :

* D'abord les gemmes, à cristal unique, édifices d'atomes, ions ou molécules disposés régulièrement selon des schémas axiaux cohérents, propres à chaque variété. Elles sont homogènes, transparentes, et leur couleur résulte de la transformation que leur édifice cristallin impose à la lumière.

A cette catégorie appartiennent non seulement les gemmes les plus admirées et bien évidemment le diamant, mais tous les cristaux, depuis l'humble sel gemme et les fragiles fluorines, en passant par toutes les variétés qui intéressent la bijouterie. Il faut citer les spinelles, les quartz, les tourmalines, les zircons, les grenats, les béryls dont une variété est l'émeraude, les corindons qui comprennent notamment rubis et saphirs, et enfin

◀ *Quelques sceaux anciens. Le sceau rond en fluorite vert pâle et le sceau carré en calcaire rouge, tous deux gravés au foret, ont été trouvés à Suse et remontent à la fin du IVe millénaire et au début du IIIe av. J.-C. Les sceaux (cylindres en lapis-lazuli et en cornaline sombre) sont de l'époque d'Agadé (2300 av. J.-C.). Le sceau (cylindre en serpentine vert foncé, avec l'empreinte du déroulement) date de 2100 av. J.-C. Le dernier, non gravé, en améthyste, est intéressant, car il a été abandonné en cours de fabrication à cause de la mauvaise jonction des deux trous percés de chaque côté du cylindre (Louvre, Paris).*

C. Bevilacqua

les topazes, encore que cette liste ne soit pas exhaustive et que chaque espèce présente un grand nombre de variétés.

* Des agglomérats de cristaux laissant plus ou moins passer la lumière : pierres de lune, jades, calcédoines, etc., et des agglomérats opaques s'apparentant plus aux roches qu'aux cristaux, tels que turquoises, malachite, lapis-lazuli.

* Enfin à une troisième catégorie se rattachent les substances d'origine organique : ambre, jais, corail, ivoire, et surtout les perles naturelles ou cultivées.

Ces matériaux furent différemment appréciés selon les époques, les facteurs économiques, les enthousiasmes dus à la mode et aux liaisons que les voyageurs établirent avec des pays lointains. Leur beauté, leur couleur, leur rareté et leur poids, puisqu'il faut bien admettre que la grosseur d'une pierre est un facteur de rareté, firent toujours partie des critères de sélection. Mais les raisons principales de leur succès résident, comme pour les métaux précieux, dans leur nature même.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ *Malachite du Katanga (collection Schubnel).*

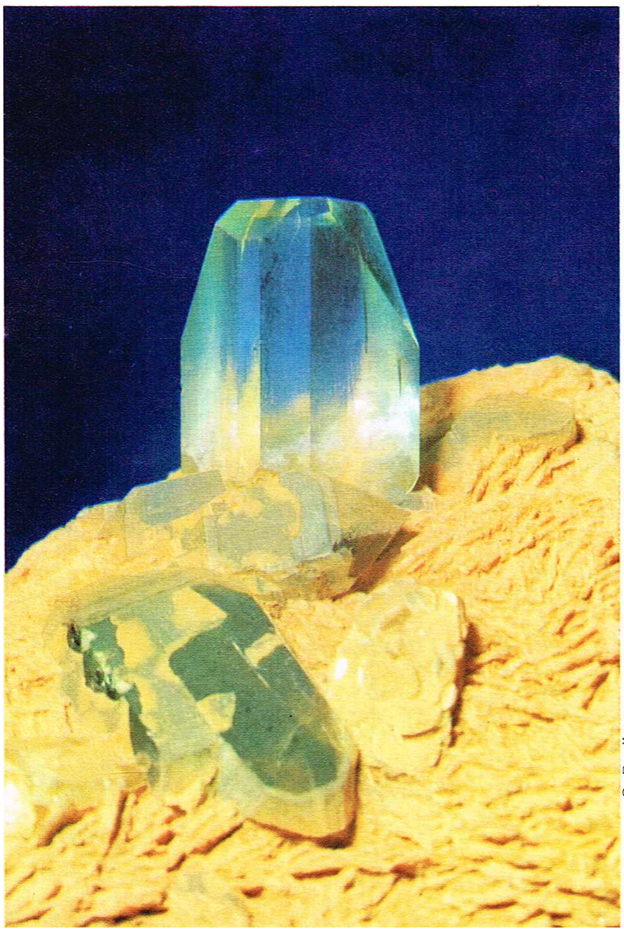

C. Bevilacqua

◀ *Cristal de topaze bleue sur gangue, Sibérie (E. N. S. M.).*

Les réseaux cristallins, parfaitement ordonnés, engendrent des faces et des arêtes dures peu sensibles à l'usure, réfractaires aux agents chimiques et aux oxydations. Ils limitent des volumes solides, transparents, translucides, où la lumière se trouve piégée, filtrée, sublimée en un jeu de couleurs et d'effets dont l'attrait s'exerce sans fin, pour peu que l'intervention de la technique arrive à vaincre leur force de cohésion pour faire valoir toutes leurs qualités.

Travail des pierres

Si le premier avantage que la pierre offrit à l'homme fut sa dureté, ce fut aussi le premier obstacle qu'elle lui opposa, cependant la nature elle-même, moins marâtre qu'on a bien voulu le dire, lui a fait entrevoir les moyens de contourner la rigueur de sa loi. Seuls les procédés scientifiques récents ont permis d'établir les particularités de chaque système cristallin, avec ses axes de symétrie et de croissance, les constantes angulaires et les plans de plus ou moins grande cohésion, qui permettent le clivage. Mais dans la nature, sous l'action de chocs fortuits ou de changements brusques de températures, le clivage se produit spontanément, livrant des traces visibles à un œil attentif. L'observation de ces marques sur le cristal indique comment agir pour contrôler l'effet provoqué par l'application délibérée de procédés analogues.

Si l'homme des pointes de flèches et des haches de silex fut en quelque sorte le précurseur du diamantaire contemporain, il s'est vite heurté, faute de moyens, à l'immuable fixité de la roche. La maîtrise des pierres ne

R. Guillemot - TOP

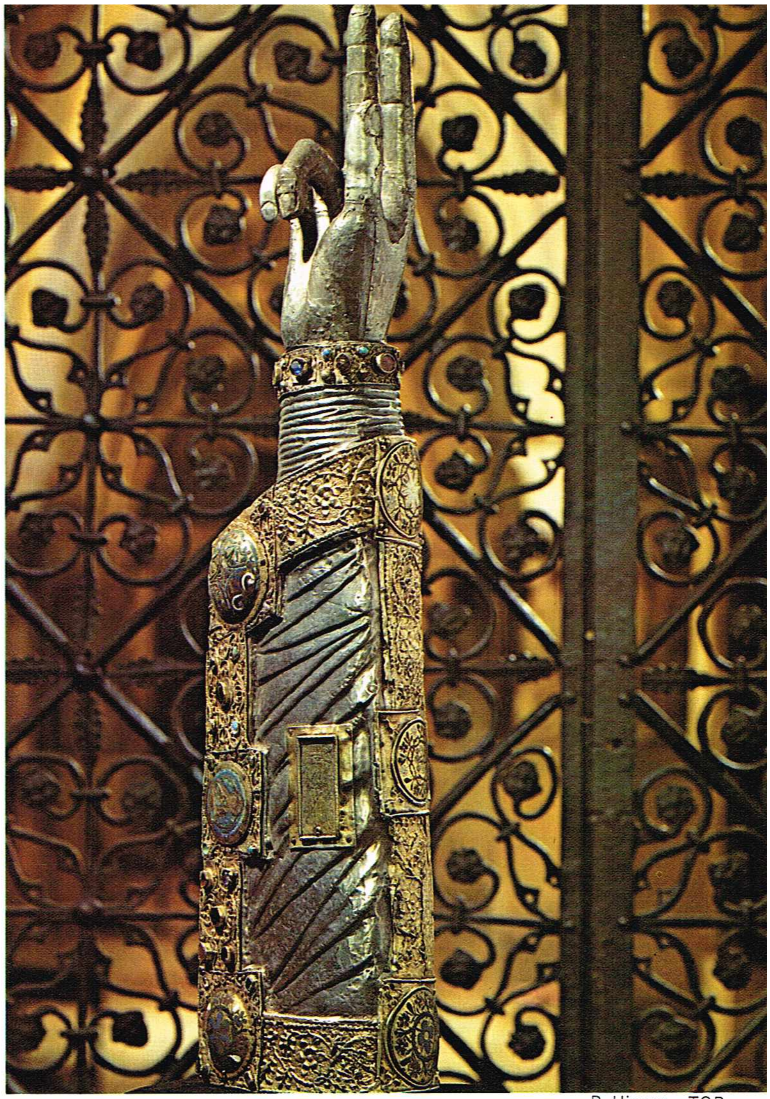

P. Hinous - TOP

▲ *A gauche, ivoires sculptés (château d'Ambras, Autriche). A droite, main surmontant un reliquaire ouvragé du XIIe siècle (St-Saens, Rouen).*

s'est exercée que petit à petit et en commençant par les plus tendres d'entre elles. Le corail apparaît en incrustations dans les armes des guerriers celtiques. De l'Orient, de l'Inde, où les gisements furent toujours abondants, de la Chine arrivaient les turquoises et les jades des attributs royaux et des intailles pour les sceaux. En Chine, les jades furent sculptés à une époque très ancienne et polis avec une grande perfection, mais il est bon de signaler que le jade fraîchement extrait est relativement tendre; c'est l'exposition à l'air qui lui confère une dureté croissant avec le temps.

En gemmologie, on mesure la dureté d'un minéral par comparaison avec des minéraux de référence selon l'*échelle de Mohs*, de 1 pour le talc qui se laisse rayer par tous les minéraux, à 10 pour le diamant qui ne peut être entamé que par lui-même. Ces échelons successifs de dureté ne tiennent pas compte des écarts existant entre eux. Ainsi, le diamant 10 est 140 fois plus dur que le corindon 9, alors que celui-ci n'est que 6 fois plus dur que la topaze 8. Bien qu'elle ne corresponde pas à des unités de mesure, comme le fait la méthode Rosival, cette échelle se révèle plus pratique, car elle donne des indications situant immédiatement une variété de pierre par rapport aux autres et par rapport aux produits et aux outils qu'elle aura à affronter au cours de la réalisation d'un objet.

● *Clivage et sciage*

Le *clivage* est un moyen d'éviter la mise en œuvre d'une force colossale pour façonner le volume, mais la dureté n'en reste pas moins l'adversaire majeur, car elle s'oppose à l'usure nécessaire à la modification des volumes résultant du clivage et à celle des surfaces pour un polissage indispensable à la vivacité de l'éclat, de la transparence et de la couleur.

Or, cette *usure* ne peut s'effectuer que par l'emploi de corps plus durs que celui que l'on entend traiter. Les meilleurs résultats sont obtenus avec des poudres de cristaux durs : corindon et silice sont les principaux abrasifs. Dès la plus haute antiquité, on utilisa l'émeri et le tripoli. Le sable, la pierre ponce, la craie, l'ocre, le blanc de Meudon et le blanc d'Espagne, les terres de diatomées, dites ardoises à polir, étaient connus et faisaient déjà l'objet du négoce. Pilés plus ou moins finement, à sec, ou additionnés d'eau, de graisse ou d'huile d'olive, amalgamés à de la cire, ils constituent des pâtes à polir d'une bonne efficacité. Le choix d'une gamme de grains de dureté et de grosseur décroissantes permet de nuancer le travail : dégrossissage et usure de la pierre au début, ensuite ponçage, et polissage toujours plus fin jusqu'à obtention d'un beau lustrage pour la finition.

Ces abrasifs étaient employés à l'aide d'instruments fort simples, outils façonnés dans de la pierre, bâtonnets en buis, peaux, fibres végétales, burins, forets et meulettes en métal enserrant peut-être des éclats de roches dures, et, comme outillage lourd, meules et roues en pierre. Cet ensemble suffisait à façonner des formes simples, plaques, cylindres, cabochons, à les percer et à les graver.

La glyptique, ou art de graver sur pierre fine, fut à l'honneur dans toutes les civilisations antiques, mais elle ne paraît pas avoir été en mesure de s'attaquer à des variétés plus dures que les roches siliceuses. Émeraudes à peine plus dures que le quartz et corindons avaient droit au « respect », et l'on considérait même comme sacrilège la moindre tentative à leur encontre.

Quant au diamant, l'on n'en constate point la présence dans les ouvrages précieux. Son existence est mentionnée par les savants grecs comme une curiosité. Ses propriétés étonnaient. Son nom, en grec *adamas*, signifie indomptable. Même sa rareté ne lui a pas valu la place d'honneur que détenait la perle, cette reine des mers, que la superbe Cléopâtre fit dissoudre dans du vinaigre pour mieux éblouir et souligner le prestige de sa propre majesté. Pourtant l'Inde recelait des diamants, et si l'on en croit Pline, Chypre, la Macédoine et l'Éthiopie également. Connu pour son extrême dureté, a-t-il seulement été utilisé pour sa capacité à entamer les autres minéraux? Cela est peu probable; les progrès de la technique à ce niveau furent lents et laborieux.

Venu de l'Orient avec les pierres, l'art de modifier leur forme et de les polir s'était étendu à travers l'Asie Mineure, l'Égypte, la Grèce et l'Étrurie, jusqu'à l'Occident, mais il resta longtemps dans cet état élémentaire. Le changement s'opéra au moment des croisades. Par piété, non par goût du luxe, des pierres jusque-là inconnues furent

rapportées en Occident. Destinées à l'orfèvrerie religieuse, il fallut, pour la gloire de Dieu et des saints, leur conférer par un travail perfectionné des qualités transcendantes. Guildes et corporations virent le jour un peu partout en Europe, reflétant l'existence de centres de transformation indépendants des gisements, et dont certains persistent encore. Châsses et reliquaires s'enrichirent, en plus des cristaux de roches, des agates et des améthystes antérieurement employés, de grenats, puis de béryls et de saphirs. Un saphir important orne déjà le talisman de Charlemagne; il est taillé en cabochon, et accompagné d'un entourage de pierres plus petites, grenats, perles fines et émeraudes. Quant à l'éblouissante et fameuse Pala d'Oro de San Marco à Venise, commandée au Xe siècle, puis enrichie et remaniée plusieurs fois, elle finit au XIVe siècle par être ornée de quelque deux mille pierres dont certaines présentent des tailles facettées.

L'apparition des premières facettes semble correspondre à l'importation des premiers diamants. Dès le Moyen Age, des comptoirs pour le commerce (dont l'un se situait à Anvers), des ateliers réputés étaient détenus par les Vénitiens, et c'est probablement l'un d'entre eux, Perruzzi, qui aurait réalisé les premières tailles de diamants. A son tour, Louis de Berchem, en 1475, aurait amélioré le procédé, et c'est à lui que l'on devrait l'utilisation de l'égrisé (diamant pulvérisé) et la mise au point d'une taille à 32 facettes. Une fois de plus, la connaissance empirique ouvrit la voie à la connaissance scientifique. La pratique suivie du clivage, de la taille, l'amélioration du polissage permirent de mieux observer les cristaux et d'établir avec certitude les règles dont le respect conditionne une taille rationnelle.

Le clivage se fait selon des angles constants et caractéristiques. L'existence de directions privilégiées dans un cristal montre que la cohésion n'est pas la même dans tous les plans; il est indispensable de situer les plans de moindre résistance, tant pour le clivage que pour l'attaque à la meule si l'on veut procéder à des sciages. Plus particulièrement quand il s'agit du diamant, cristallisant en octaèdre, il ne se laissera entamer que par lui-même, mais à condition que l'attaque s'opère de biais.

Le sciage à plat sur les faces de l'octaèdre est impossible. Il se fait le plus facilement soit par un plan passant par quatre sommets, c'est le *sciage quatre pointes*, soit par un plan perpendiculaire à une arête et passant par deux sommets, c'est le *sciage deux pointes*. Ce dernier exige deux fois plus de temps que le précédent (*fig.* 1).

La dureté joue non seulement un rôle important pour la conservation de la beauté conférée par la taille (grâce à elle, surfaces polies et arêtes restent intactes, ménageant le jeu de la lumière), mais elle est directement responsable de l'aspect de la pierre. Il y a un rapport de cause à effet entre la dureté et les propriétés optiques, qui font le charme et le pouvoir de fascination des gemmes. Dès 1639, le naturaliste danois Stensen avait noté la constance des valeurs angulaires pour certains cristaux. Vers la fin du XVIIIe siècle, l'abbé Haüy, minéralogiste français, conçut les bases de la cristallographie. En 1912, on put, par des radiogrammes, rendre manifeste la structure fine cristalline d'une sphalérite. Depuis lors, la connaissance gemmologique et les techniques lapidaires ont franchi de multiples étapes, et cela d'autant plus vite que le développement industriel a mis à leur disposition des moyens à peine imaginables il y a un siècle ou deux.

Point n'est besoin de prendre des risques inconsidérés, de détériorer un beau spécimen. Les laboratoires sont munis de filtres sélectifs de rayons ultraviolets et infrarouges, de spectroscopes, d'appareils à rayons X, de microscopes polarisants. Les pierres peuvent être soigneusement inspectées, et il est facile de déceler inclusions valorisantes ou indésirables, plans de macle, plans de clivage, tout ce dont le lapidaire ou le diamantaire devra tenir compte. Le plus souvent, l'œil exercé du technicien suffit à l'examen et permettra de déterminer comment tirer parti de la matière en limitant la perte de poids, sans négliger l'aspect esthétique de sa démarche, qui vise à l'exaltation des rayons lumineux et de la couleur, et qui est étroitement lié aux autres propriétés physiques du réseau cristallin.

Dureté, cohésion et densité des atomes sont proportionnelles. Inversement, plus la densité atomique est grande, plus la lumière aura de difficultés à franchir le barrage des plans d'atomes des faces du cristal. Celles-ci joueront comme des miroirs, donnant à la pierre ce que l'on appelle de l'éclat. Mieux la surface est polie, plus elle est réfléchissante et brillante. On définit l'éclat d'une pierre par comparaison : on dit qu'elle est adamantine, soyeuse, nacrée, résineuse, vitreuse, métallique, etc.

Une partie seulement de la lumière qui arrive à la surface d'une gemme est réfléchie et contribue à son éclat. Une autre partie est dans tous les cas plus ou moins absorbée, donnant toutes les variantes de translucidité, de l'opacité totale à la transparence de la plus belle « eau ». La partie complémentaire qui réussira à pénétrer à l'intérieur de la gemme va se trouver dans un milieu différent, et sa vitesse de propagation sera ralentie : c'est le phénomène de la *réfringence*. Le retard infligé aux photons de la lumière par les électrons de la masse cristalline dépend de la plus ou moins grande densité des atomes présents. Plus le nombre de photons retenus dans la gemme est important, plus l'œil perçoit une sensation de luminosité. Le diamant, présentant la plus grande densité d'atomes, cumule donc toutes les qualités; il est le plus dur, le plus lumineux et offre un maximum d'éclat.

Pour un faisceau lumineux qui pénètre dans la pierre, la modification de sa vitesse de propagation s'accompagne d'une déviation de la trajectoire qui dépend du rapport des vitesses de propagation dans la gemme et dans l'air. Selon le type de cristal considéré, le faisceau lumineux reste unique en milieu isotrope (spinelles, grenats, diamants), ou bien il se décompose en deux rayons ayant chacun une vitesse de propagation différente en milieu anisotrope (quartz, corindons, béryls, topaze).

La composition spectrale de la lumière du jour ajoute encore à la complexité du phénomène, car, pour chaque couleur du spectre, la vitesse de propagation est différente, et de ce fait les rayons correspondants sont réfractés différemment. D'où des effets optiques extrêmement nuancés; la lumière se disperse à l'intérieur de la gemme et, à sa sortie, s'étale en une infinité de reflets colorés.

L'art du lapidaire, bien qu'il relève aujourd'hui plus de la spéculation mathématique que de l'art à proprement

J. Guillot - TOP

▲ ***Talisman de Charlemagne, IXe siècle : un pendentif d'or enchasse un gros saphir clair entouré d'émeraudes, de perles et de grenats montés en bâtes entourés de filigranes d'or.***

▼ ***Figure 1 :*** **a, *plan de sciage quatre pointes.*** **b, *plan de sciage deux pointes.***

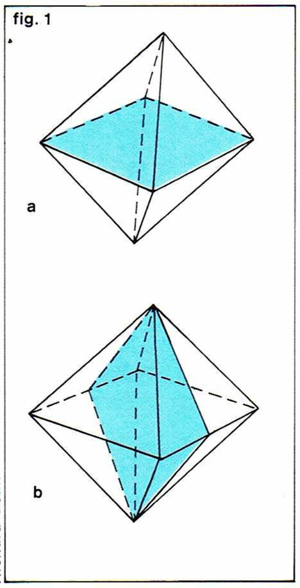

Richard Colin

▶ *Figure 2 : taille du diamant, dite en brillant. a et b, préparation de la table ; a, à partir de l'octaèdre par sciage quatre pointes ; b, par ébrutage au touret suivi d'une « mise en croix » de la toupie ainsi obtenue afin de la ramener à une forme analogue à celle de a. c, mise en huit-huit par usure des quatre arêtes longitudinales de la pyramide de a ou des côtés correspondants sur la toupie b. d, facettage par usure des arêtes ou de leur point de rencontre afin d'obtenir le brillantage à 56 facettes.*

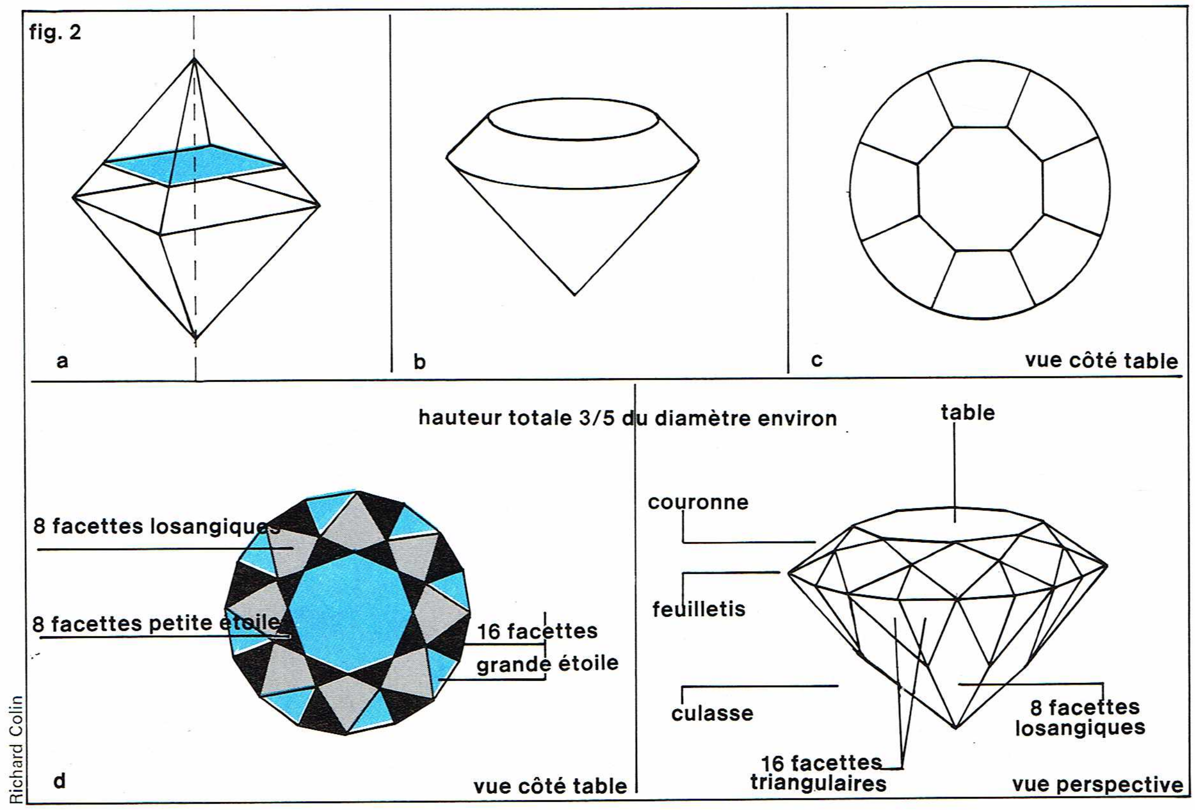

parler, consiste à porter les qualités optiques d'une pierre à leur degré le plus élevé. Le rôle de la taille est de conserver un maximum de lumière dans le cristal. Toute l'habileté consiste à piéger le faisceau de lumière entrant dans la pierre de telle sorte qu'il ne puisse ressortir aussitôt, mais qu'il se réfléchisse à l'intérieur de la gemme, augmentant sa dispersion, pour retomber sur une autre facette qui, à son tour, peut en réfléchir une partie, si bien qu'au flot de la lumière entrante s'ajoute la lumière en circulation faisant de la pierre taillée une sorte de cage où la lumière est forcée de se concentrer, de se décomposer, de multiplier tous ses effets et ses feux. Ceux-ci seront d'autant plus intenses que l'indice de réfraction est élevé.

● *Taille et couleur*

La *taille* du diamant, dite *en brillant*, illustre parfaitement ce phénomène ; l'observation scrupuleuse d'angles permettant la réflexion totale conduit à une forme idéale dont les proportions sont fixées par les lois de l'optique (*fig.* 2).

Cette taille en brillant est conçue pour que tout rayon ayant pénétré perpendiculairement par la « table » ressorte par la « couronne » et inversement, les facettes de la culasse formant une barrière pratiquement infran-

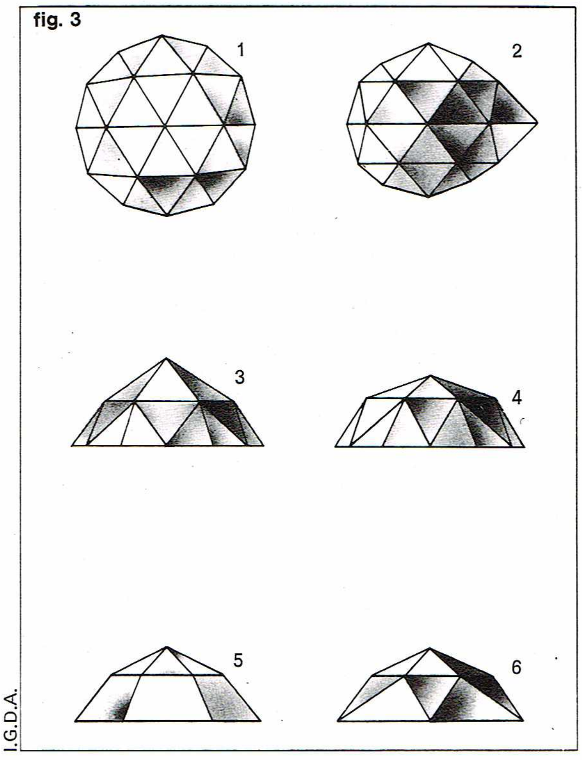

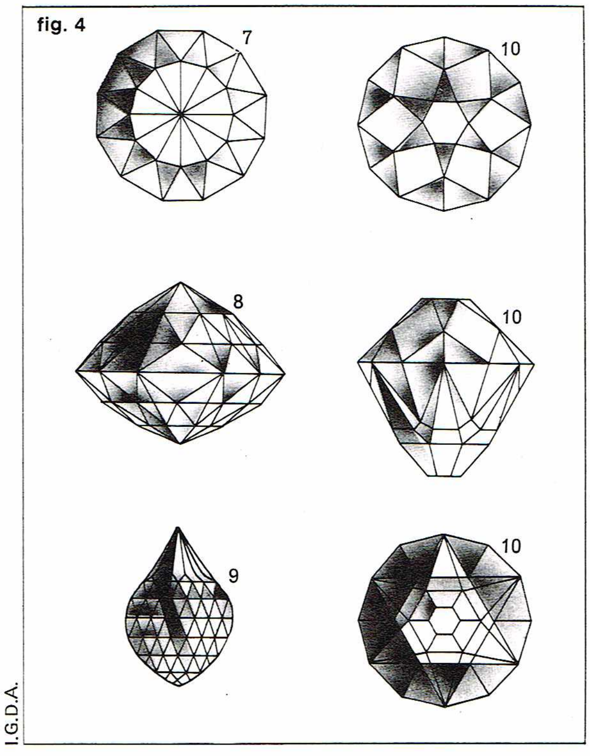

▶ *Figures 3 et 4 : autres tailles du diamant ; 1 à 9 : taille « en rose » ; 8 : taille en « double rose » ; 10 : taille « en étoile ».*

chissable. Quand on regarde un brillant de dessus, on a l'impression que les facettes de la culasse sont des miroirs. La taille en brillant est aussi celle qui assure la meilleure dispersion des rayons; plus importante, il y aurait irisation; plus faible, les feux ne seraient pas nets.

Le lapidaire ne se borne pas à retenir un maximum de lumière dans la gemme, il doit aussi en souligner les qualités particulières, et notamment l'intensité de la couleur. Blanche quand elle arrive sur la pierre, la lumière est un flux complexe de vibrations, que les plans d'ions de la structure cristalline soumettent à des modifications, tendant à éliminer ou à renforcer certaines d'entre elles. Au sortir de la gemme, la composition spectrale de la lumière peut être nettement différente. On dit que la pierre est rouge, verte ou bleue... La couleur n'est qu'exceptionnellement liée à la nature du cristal. Il existe des diamants ocre, verts et roses, comme il existe des topazes bleues, des saphirs incolores et des grenats verts. Mais la qualité de la nuance colorée de telle variété, de telle provenance, est parfois si spécifique qu'elle devient symbolique, éclipsant jusqu'à l'existence de ses semblables, même si ces dernières sont en fait plus répandues dans les gisements.

L'intensité de la couleur est généralement un facteur de prix. Une bonne taille peut renforcer la coloration ou la mieux répartir. Elle peut aussi attirer l'attention sur certaines particularités de cristallisation, sur des anomalies, sur la présence de cristaux étrangers imbriqués dans l'édifice cristallin et qui ajoutent leur charme insolite à la beauté de la pierre. Irisations, opalescences dues à des dispositions lamellaires de cristaux, chatoiement et astérisme, dus à des inclusions fibreuses, givres de guérison, plans d'accroissement ou de décollement du cristal, pléochroïsme inhérent à la nature de la pierre et se traduisant par la vision de couleurs différentes selon l'angle d'observation, tout cela fait vivre la pierre, la personnalise et ajoute encore à son attrait.

● *Techniques modernes*

La technologie actuelle est propre à assurer une grande liberté d'intervention sur les pierres précieuses, et une grande perfection des résultats. Les machines, indispensables dans ce domaine, sont bien conçues, réalisées dans des alliages spécialement étudiés, pourvues de moteurs tournant à des vitesses très élevées et réglables en fonction du matériau traité et de l'abrasif employé; enfin, elles bénéficient de toutes les possibilités d'automation.

On ne se contente plus de prélever les abrasifs dans la nature, on pourvoit à leur fabrication. Le rouge à polir utilisé pour les métaux est un oxyde chimique de fer. Le vert, de dureté 8 à 9, est un oxyde chimique de chrome. Le carborandum est un carbure de silicium. L'électrocorindon fabriqué par synthèse est plus dur que le corindon naturel. Oxydes de chrome et métaux durcissants, carbures de bore et de tungstène, alumines traitées viennent compléter la gamme naturelle, le plus efficace de tous restant le diamant pulvérisé, naturel ou de synthèse.

Les poudres ainsi fabriquées sont calibrées, présentées telles quelles, encollées sur des supports adaptés aux machines, incorporées, pour faire des meules, à des produits qui vont de la mousse plastique la plus douce aux caoutchoucs et jusqu'aux métaux durs pour les granules de diamants. Ici aussi, l'empirisme est dépassé; les produits obtenus sont testés à des vitesses différentes et les traces laissées sur les matériaux examinées avec des microscopes électroniques ou à interférences. L'on pousse la minutie jusqu'à mesurer la profondeur de ces traces afin de mieux déterminer les vitesses opératoires.

Pierres naturelles et pierres de synthèse

Le prestige dont ont toujours joui les pierres fines a fait que l'on a cherché par tous les moyens à se les approprier. De même que pour les métaux précieux, des moyens gigantesques sont mis en œuvre pour exploiter les gisements connus et pour en découvrir de nouveaux, et leur exploitation se fait aussi simultanément à celle d'autres gemmes ou d'autres minerais utiles à l'industrie.

Les diamants utilisables en bijouterie abondent dans les trouées cylindriques de l'écorce terrestre, dites *cheminées diamantifères*, résultat de phénoménales explosions volcaniques; ils sont accompagnés d'olivine, de quartz et de diamants de qualité moindre à usage industriel. Ces cheminées se situent principalement en Afrique du Sud. Ailleurs, l'érosion les a entraînés dans des gîtes alluvionnaires : Afrique centrale, Inde et Brésil.

Les corindons viennent de l'Inde, de Ceylan, de la Birmanie, du Siam, d'Australie; les béryls, du Brésil principalement. Les autres pierres d'un peu partout. A certaines régions s'attache la réputation de très belles variétés, mais aucune n'a l'exclusivité d'un type de gemme. L'émeraude n'existe pas seulement en Colombie, le rubis au Siam et le saphir en Birmanie. Chaque région du monde cache dans son sol des multitudes de cristaux précieux ou modestes. Ceylan, Madagascar et l'Inde sont réputés pour leur richesse en pierres de toutes sortes. Pourtant, seul le diamant a une réelle importance économique. Il représente 80 à 90 % de la production mondiale de pierres précieuses. En fait, il est moins rare que les rubis, saphirs et émeraudes pour lesquels un épuisement des gîtes connus serait à craindre dans un proche avenir.

La science, qui n'a cessé d'apporter de nouveaux procédés aux techniques d'extraction et de transformation, devait fatalement tenter de reproduire ces merveilles que la nature ne livre qu'avec parcimonie et au prix de tant d'efforts.

Pour l'or, nul n'ignore les tentatives des alchimistes. La légende veut qu'elles aient été parfois couronnées de succès. Mais si l'on a perdu la recette de la poudre de projection, les perspectives de la physique nucléaire ne semblent pas contredire l'éventuelle transmutation du plomb, ou d'un autre métal en or, bien que nulle recherche ne soit orientée en ce sens.

En revanche, pour ce qui est des gemmes, depuis la fin du siècle dernier où l'on réussit la reconstitution du corindon à partir de débris naturels que l'on fusionnait, et depuis l'invention de Verneuil, qui procéda à une véritable synthèse de l'alumine en présence d'oxydes pour en assurer la coloration, des améliorations successives n'ont cessé de parfaire la qualité des cristaux de synthèse et ont fait de leur production une véritable industrie.

Corindons, émeraudes et spinelles sont reproduits dans des fours. Quant aux diamants, ils réclament des températures et des conditions de pression si élevées que les résultats sont moins satisfaisants. On réussit surtout des pierres de très petites dimensions et de qualité médiocre, qui ont leur place dans l'industrie; tout laisse prévoir que, dans des délais peu éloignés, on pourra compter sur des cristaux plus purs et plus volumineux à usage ornemental.

Les pierres de synthèse présentent, à peu de chose près, toutes les caractéristiques physiques de leur modèle naturel, et leur façonnage s'effectue dans les mêmes conditions. On pourrait considérer que leur aspect est tout aussi satisfaisant, si ce n'est plus : l'on n'a pas lésiné sur la dimension des cristaux ni sur les oxydes assurant la coloration; de plus, sont évités ici les impuretés, les défauts de cristallisation et les obstacles rencontrés dans la nature. Les pierres sont pures : elles ne présentent pas ce que la joaillerie moderne considère comme des défauts. Même pour l'œil exercé du spécialiste, la différence à peine sensible est peu aisée à établir, il faut de plus en plus le secours des appareils de laboratoire, et encore doit-on se garder d'interpréter leurs données sans une grande circonspection. Pourtant, pour l'amateur de

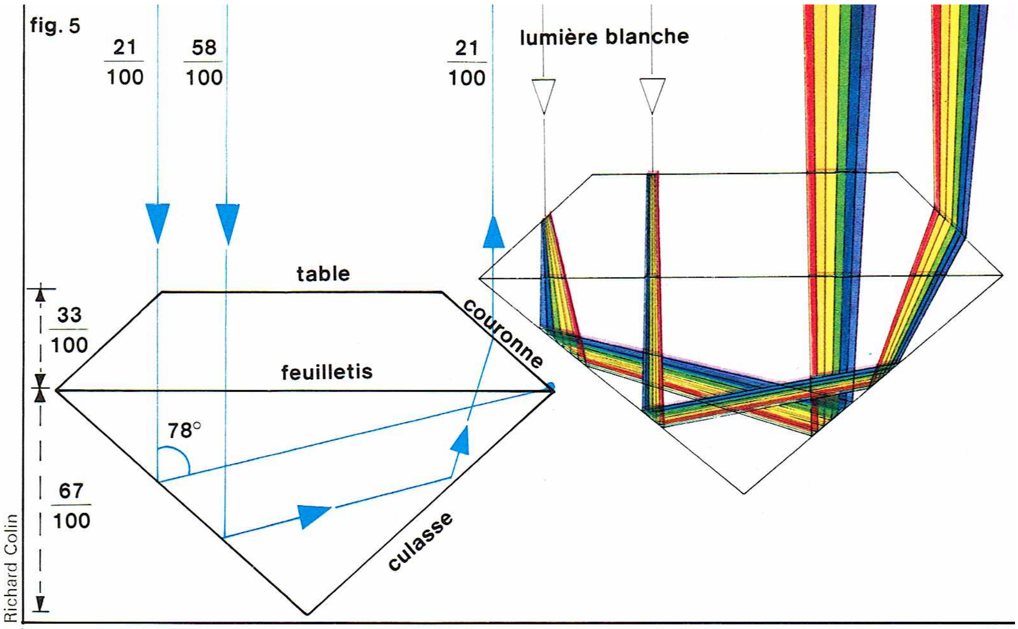

Richard Colin

▲ ***Figure 5 : tracé du parcours des rayons lumineux dans un brillant.***

D. Boutet

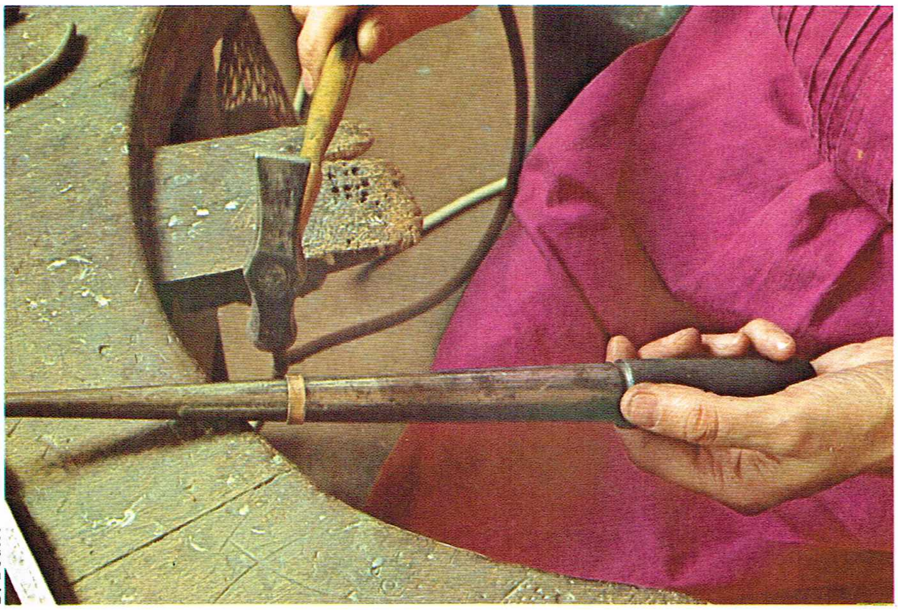

D. Boutet

▲ *En haut, panoplie des outils de l'orfèvre. Ci-dessus, forgeage à la main d'une bague.*

▼ *A gauche, l'orfèvre au travail. A droite, bague (création Costanza. Collection Sophie Boubat).*

minéraux nobles, il y a loin de la pierre synthétique à la pierre fine.

L'intervention de la technologie, avec son cortège impressionnant d'appareils et de machines, apporte un type de perfection qui se paye par la vacuité du produit. Prodigieuses sont la possession du secret des métamorphismes minéraux et la connaissance approfondie des lois de l'optique. Mais où situer le plus grand prodige ? dans le creuset de l'industrie, dans l'existence du cristal idéal ou dans celle du cristal qui a pu naître et croître au milieu d'innombrables difficultés au sein de la terre ? Le prodige n'est-il pas plutôt dans les mille reflets cuivrés des paillettes d'oligiste qui parsèment les grenats, dans les impalpables fils de byssolithe, dits cheveux de Vénus, qui se déploient dans la limpidité des quartz ? N'est-il pas dans les minuscules pyrites qui étoilent une plaque de lapis-lazuli, dans les aberrantes cristallisations qui viennent se greffer dans une texture étrangère : petit cube de grenat visible au cœur d'un diamant, ou minuscule cristal de diamant à l'intérieur même d'un diamant ? Autant d' « accidents » faisant de la pierre un individu pourvu d'un charme et d'une personnalité propres.

Le prodige est-il le savoir-faire qui ramène toutes les pierres de joaillerie à un modèle standardisé, ou tout simplement ce fait que trop de gens, profanes ou professionnels, ignorent : la beauté des gemmes à l'état brut — cristal natif sorti de sa gangue, diamants roulés aux formes voisines de l'octaèdre, bâtonnets hexagonaux de béryl, prismes de quartz surmontés d'une pointe pyramidale ?

La magie de la technologie a substitué à l'expression harmonieuse d'un certain état de la matière et à l'acte magique un type de perfection qui ôte au produit tout pouvoir d'envoûtement. La norme ramène la plus belle des choses à une effrayante banalité. La taille contraint les gemmes à une uniformité standardisée. Des moules sortent, quasi finis, des modèles munis de chatons dans lesquels on insérera au hasard des besoins commerciaux n'importe quelle pierre. En la confrontant à ce que l'on connaît du passé et de sociétés ayant une vie spirituelle intense, on serait tenté de penser que la joaillerie moderne vit sur une imposture. Cela ne nuit en rien à sa prospérité, bien au contraire, puisqu'elle n'est que le reflet de la société à laquelle elle s'adresse, où la loi est celle de la productivité, du profit et de la norme, société où le système de production étouffe toutes les possibilités de projets porteurs de différences, en faveur des nivellations d'identités.

L'esthétique arrive parfois à sauver ses droits, on « fait » du joli, on « maquettise » et on « design ». Mais cela peut-il suffire pour un type d'objets où l'important n'est pas seulement ce qui paraît ? De nos jours, bien rares sont les objets précieux, même ceux qui, comme le bijou, restent au contact du corps, qui s'adressent plus à la sensibilité profonde d'un être qu'à son entendement et à sa vanité. On les préfère comme signe extérieur d'un niveau social et, dans le meilleur des cas, culturel, mais ils sont le plus souvent démunis d'un sens spirituel et cosmique. Les résonances profondes entre les matériaux, le geste de l'artisan et le rythme intérieur de l'individu qui vivra au contact de l'ouvrage sont ignorés. Alors que l'esthétique procède du raisonnement, l'acte plastique est une grâce, et à l'heure où la recherche de pointe en physique a pu constater que tout n'est que rapport de vibrations dont une faible partie seulement semble identifiée, tout porte à croire qu'il entretient une relation avec ce qui reste dans l'ombre et n'en existe pas moins.

Valeur d'exceptionnalité, la beauté capte les forces occultes éparses dans l'univers, unissant les fluides que véhicule le cosmos aux composants choisis pour leur pouvoir de réception, et, par le truchement de la forme, elle relie forces physiques et mystiques en un flux de radiations influent et continu.

D. Boutet

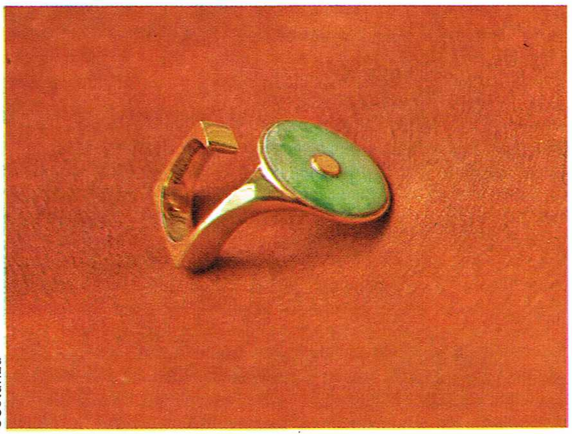

Costanza

L'ÉCLAIRAGE

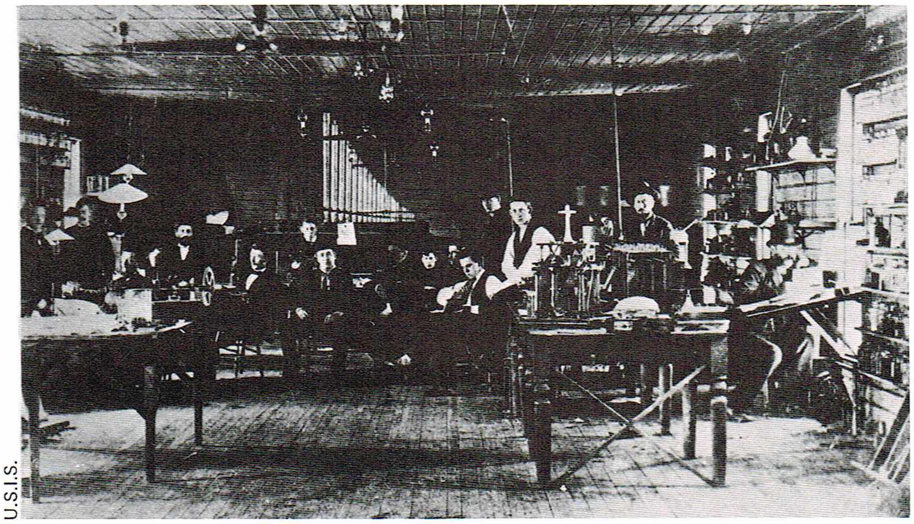
U.S.I.S.

▲ *Le laboratoire d'Edison, Menlo Park, New Jersey, tel qu'il était en 1880. Les premières lampes à incandescence pendent au plafond et sont encore montées sur les supports de l'ancien éclairage au gaz.*

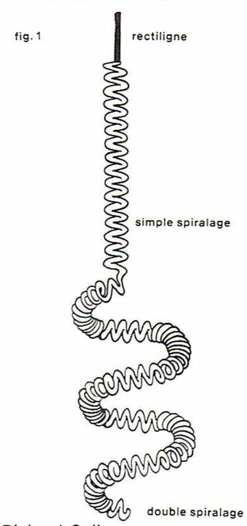

document Mazda

Richard Colin

▼ *Figure 1 : filament de lampe.*

Depuis la plus haute antiquité, les hommes ont assuré l'éclairage de leurs lieux d'habitation. Ce furent en premier les flammes des foyers et des brasiers qui étaient montés sur des trépieds de manière à assurer un meilleur éclairement en surélevant le niveau des sources lumineuses par rapport au sol. Cette disposition était d'ailleurs favorable à la sécurité, car des foyers à même le sol risquaient de mettre le feu aux vêtements.

On vit apparaître ensuite des torches, soit portées à la main au cours des déplacements, soit fixées aux murs, des lampes à huile (dont on a retrouvé certains spécimens datant des Phéniciens) et des chandelles faites de suif. Les premières chandelles semblent dater du IV^e siècle. Ces procédés avaient un rendement médiocre, et l'on imagine aisément le faible niveau d'éclairement que l'on obtenait dans des salles de châteaux ou de palais. Quant aux artisans, ils ne travaillaient qu'à la lumière solaire.

Dans les villes, les rues n'étaient pas éclairées; on ne trouvait des chandelles qu'aux lieux de débauche ou à l'emplacement des statues pieuses. En 1524, il était recommandé de placer une lanterne aux façades des maisons au niveau du premier étage. En 1667, La Reynie demande que des lanternes soient placées aux extrémités et au milieu des rues; on en comptait 5 772 à Paris en 1721.

En 1787, un ingénieur et chimiste français, Philippe Lebon, découvre le gaz d'éclairage. En 1797, il commence ses essais avec le gaz provenant de la distillation du bois et communique sa découverte à l'Institut. Un brevet d'invention est déposé le 28 septembre 1799, relatif aux « thermolampes ». Cette découverte est appliquée en 1805 pour éclairer les manufactures. En 1810, Davy invente la lampe à arc qui est constituée de deux électrodes de charbon de cornues placées bout à bout et fait une démonstration devant la Société royale de physique de Londres. Louis XVIII autorise, en 1817, l'éclairage au gaz du passage des Panoramas par Windsor. La substitution du gaz à l'huile est généralisée en 1832.

En 1859, Sauter installe au sommet de l'arc de triomphe à Paris une lentille au centre de laquelle il place une source lumineuse. On peut dire qu'à cette date le projecteur est inventé.

En 1877, un Anglais, Swan, suivi en 1878 par un Américain, Edison, fabrique les premières lampes à filament de carbone. Le filament était constitué de fibres de coton ou de rubans de bristol carbonisés à l'abri de l'air. La fibre de bambou fut adoptée par Edison. Ces lampes ne fournissaient qu'une lumière jaune, car la température du filament ne dépassait pas 1 600 °C et l'efficacité lumineuse était de l'ordre de 3 lumens par watt. Il aurait fallu augmenter la température pour avoir une meilleure efficacité lumineuse et une meilleure teinte de couleur, mais on se heurtait à une difficulté due à l'évaporation du filament dans un récipient vide d'air. On utilisa alors des métaux comme l'osmium, ce que fit en 1898 Auer von Welsbach, puis le tantale, et enfin le tungstène (*tabl.* I).

C'est le tungstène qui donnait les meilleurs résultats; la température atteignait 2 100 °C et l'efficacité lumineuse était multipliée par trois. En 1913, Langmuire introduisit dans les ampoules un gaz inerte (azote ou argon) qui ralentit la volatilisation du filament, et permit d'élever la température vers 2 500 °K. En cette même année, Coolidge met au point un procédé de tréfilage du tungstène. Ainsi constituées, les lampes chauffaient, car des courants de convection, dus à l'atmosphère gazeuse, entraînaient la chaleur du filament vers l'ampoule. Pour les réduire, Langmuir remplaça le filament rectiligne par un filament spiralé, lequel fut remplacé ensuite par un filament à double spiralage (*fig.* 1). D'autre part, la conductibilité calorifique d'un gaz étant inversement proportionnelle à sa masse atomique, on utilisa le krypton et le xénon. Cela a permis d'atteindre des températures de 2 800 °K et des efficacités lumineuses de 16 lumens par watt.

Nature de la lumière

Rappelons brièvement qu'un rayonnement lumineux provient de la propagation d'ondes électromagnétiques qui ont pour origine l'association d'un champ magnétique $\vec{B}$ et d'un champ électrique $\vec{E}$ sinusoïdaux, en phase et rectangulaires. L'onde ainsi produite se propage à la vitesse de 300 000 kilomètres par seconde. Planck, en 1900, a exprimé la théorie des quanta dans laquelle on admet que la lumière est constituée de grains qui possèdent tous une même quantité d'énergie proportionnelle à la fréquence; Einstein a appelé ces grains d'énergie des photons. Ces deux théories des quanta et des ondulations sont à l'origine de la mécanique ondulatoire développée par Louis de Broglie et Schrödinger en 1927.

Ces ondes se caractérisent notamment par leurs longueurs d'onde qui sont comprises entre quelques millionièmes de micromètre et quelques kilomètres. Le *tableau* II donne les types de rayonnement en fonction de la longueur d'onde.

La couleur du rayonnement et la sensibilité de l'œil (différente selon les observateurs) varient suivant la lon-

▼ *Tableau I : point de fusion de quelques métaux. Tableau II : types de rayonnement en fonction de la longueur d'onde.*

Tableau I

Point de fusion de quelques métaux

Métaux	Température (en °C)
Cuivre	1 084
Fer	1 400
Platine	1 770
Osmium	2 300
Tantale	2 900
Tungstène	3 350

Tableau II

Types de rayonnement en fonction de la longueur d'onde

Rayonnement	Longueur d'onde
Rayons X	$< 0{,}2$ nm
Rayons intermédiaires	$0{,}2$ nm $< \lambda <$ 100 nm
Ultraviolet	18 nm $< \lambda <$ 400 nm
Visible	380 nm $< \lambda <$ 760 nm
Infrarouge	$0{,}8\ \mu$m $< \lambda <$ 300 μm
Ondes hertziennes	$\lambda >$ 100 μm

Tableau III
Facteur de visibilité des différentes radiations

Longueur d'onde (en Å)	Sensibilité	Longueur d'onde (en Å)	Sensibilité
4 000	0,000 4	5 800	0,870
4 100	0,001 2	5 900	0,757
4 200	0,004 0	6 000	0,631
4 300	0,011 6	6 100	0,503
4 400	0,023	6 200	0,381
4 500	0,038	6 300	0,265
4 600	0,060	6 400	0,175
4 700	0,091	6 500	0,107
4 800	0,139	6 600	0,061
4 900	0,208	6 700	0,032
5 000	0,323	6 800	0,017
5 100	0,503	6 900	0,008 2
5 200	0,710	7 000	0,004 1
5 300	0,862	7 100	0,002 1
5 400	0,954	7 200	0,001 05
5 500	0,995	7 300	0,000 52
5 550	1,000	7 400	0,000 25
5 600	0,995	7 500	0,000 12
5 700	0,952	7 600	0,000 06

Ces valeurs sont les valeurs officielles, publiées par la Commission Internationale de l'Éclairage. Elles sont relatives à une moyenne de mesures effectuées sur un grand nombre d'observateurs.

fig. 2

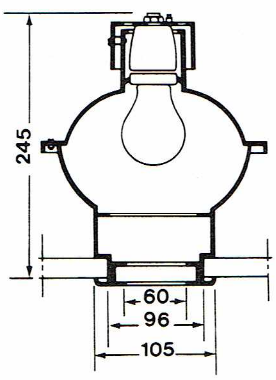

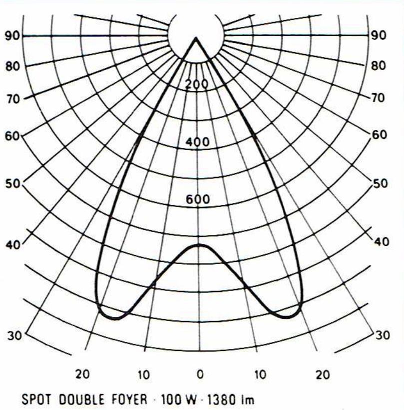

Document Claude

▲ *Tableau III : facteur de visibilité des différentes radiations. Figure 2 : exemple de courbe polaire à répartition symétrique pour un appareil de révolution.*

gueur d'onde (*tableau* III). Le violet s'échelonne entre 380 nm et 439 nm, le bleu entre 439 nm et 498 nm, le vert entre 498 nm et 568 nm, le jaune entre 568 nm et 592 nm, l'orange entre 592 nm et 631 nm, et le rouge entre 631 nm et 760 nm. Quant à la sensibilité de l'œil, elle varie suivant une courbe appelée « courbe d'efficacité lumineuse relative » en forme de chapeau de gendarme, dont le maximum se situe à 555 nm.

Quelques unités fondamentales

Les principales unités utilisées sont :

● **Pour le flux lumineux, le lumen,** dont la définition officielle est : « la grandeur caractéristique d'un flux de rayonnement exprimant son aptitude à produire une sensation lumineuse évaluée d'après les valeurs de l'efficacité lumineuse relative ». Ce qui intéresse l'éclairagiste, c'est l'effet lumineux du rayonnement et non l'énergie transportée. Il s'exprime en fonction de l'intensité lumineuse par la relation $dF = Id\Omega$. En d'autres termes, cela veut dire que le flux de la source est la somme de tout ce qu'interprète l'œil dans la bande visible.

On ne peut départager deux sources avec la seule notion de flux lumineux, car l'une d'elles peut émettre dans la bande de 555 nm un flux plus important, alors que l'autre offre, dans une bande plus large, une lumière mieux répartie, donc une meilleure qualité.

● **Pour l'éclairement, le lux,** qui est l'éclairement d'une surface d'un mètre carré recevant normalement un flux d'un lumen uniformément réparti. L'éclairage que l'on obtient avec un certain flux dépend de la surface sur laquelle il se répartit et est égal au quotient du flux lumineux F tombant sur une surface S :

$$E = \frac{F}{S}$$

Il faut se rappeler que l'éclairement varie en raison inverse du carré des distances, c'est-à-dire qu'une même source éclairera 4 fois moins une surface à 4 m qu'à 2 m de distance. D'autre part, l'éclairement varie avec l'angle formé par la surface avec la direction des rayons lumineux suivant la loi :

$$E' = E \cos \alpha$$

E' étant l'éclairement réel, E l'éclairement de la même surface perpendiculaire aux rayons lumineux, et α l'angle formé par le plan de la surface avec la perpendiculaire aux rayons.

● **Pour l'intensité lumineuse, la candela.** L'intensité lumineuse dépend de la répartition dans l'espace du flux lumineux. Conformément aux décrets du 28 février 1948 et du 3 mai 1961, on utilise des propriétés du radiateur intégral ou corps noir, et on définit la candela de la manière suivante : Une candela est l'intensité lumineuse, dans une direction déterminée, d'une ouverture perpendiculaire à cette direction ayant une aire de 1/60e de centimètre carré et rayonnant comme un radiateur intégral porté à la température de solidification du platine, soit 2 060 °K.

Avec la même lampe à incandescence, un projecteur et un globe répartissent différemment le flux dans l'espace en fonction de la direction. En effet, pour le premier, l'intensité lumineuse suivant l'axe est très importante et décroît très rapidement quand on s'éloigne ; pour le second, les intensités seront presque identiques dans toutes les directions.

Il est indispensable, pour un éclairagiste, de connaître ces répartitions. Les fabricants les fournissent avec des courbes appelées « courbes photométriques » ou « courbe de répartition angulaire de l'intensité ». Ce sont des courbes polaires à répartition symétrique si l'appareil est de révolution, et à répartition dissymétrique si l'appareil a plusieurs axes de symétrie comme les tubes fluorescents (*fig.* 2).

● **Pour l'efficacité lumineuse, le lumen par watt.** C'est une unité qui permet de rendre compte du bilan flux/consommation énergétique. Le *tableau* IV donne des grandeurs et les unités pour quelques exemples.

● **Pour la luminance, la candela par mètre carré.** La luminance d'une source lumineuse est le quotient de son intensité en candelas par sa surface en mètres carrés. Le *tableau* IV donne les unités fondamentales et quelques exemples.

La couleur

Nous avons vu que le spectre visible s'échelonnait entre 380 nm pour le violet et 7 60 nm pour le rouge. Dans cette bande, on trouve toutes les combinaisons de couleurs. L'éclairagiste a à sa disposition le diagramme des couleurs, appelé quelquefois triangle des couleurs, qui a été adopté par la CIE en 1931. C'est une représentation en coordonnées chromatiques rectangulaires (*fig.* 3). Pour chaque type de lampe, le constructeur indique les coordonnées qui sont obtenues à partir de la distribution spectrale énergétique de la lampe et d'une mesure calorimétrique. Dans ce triangle, l'espace chromatique n'est pas uniforme, c'est-à-dire que, autour d'un point donné, le lieu géométrique des points d'égal écart de couleur est une ellipse. Pour corriger cet inconvénient, il existe un diagramme CIE-UCS de chromaticité uniforme.

On spécifie les couleurs par le système Munsell qui considère que chacune d'elles a trois dimensions : la tonalité, la clarté, la saturation. La CIE a introduit la comparaison des caractéristiques de couleur des différentes sources sur l'apparence de certaines couleurs tests éclairées par la lampe en essai et par une source

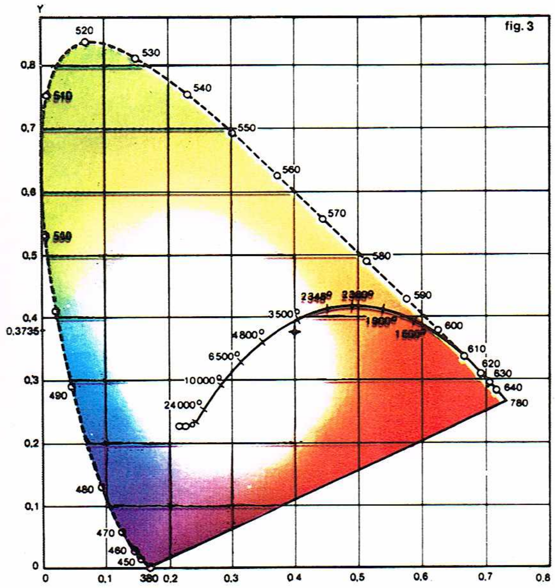

Document Claude

Grandeurs	Symboles	Unités	Symboles	Définitions	Exemples
Flux lumineux	F ou Φ	Lumen	lm	Flux énergétique interprété par l'œil	Lampe à incandescence : 60 W, 220 V, 600 lm Lampe fluorescente : 40 W, de 2 450 à 3 200 lm Lampe sodium H.P. : 400 W, 40 000 lm Lampes halogènes : 2 000 W, 200 000 lm
Éclairement	E	Lux	lx	Flux lumineux/surface	En plein soleil : jusqu'à 100 000 lux Près d'une fenêtre par temps couvert : 1 500 à 2 000 lux
Intensité lumineuse	I	Candela	cd	Flux lumineux/angle solide	Dans l'axe d'un réflecteur industriel duo : 2 fois 40 W, blanc 1 350 cd Dans l'axe d'un projecteur vitrine : 100 W, de 5 000 à 20 000 cd Dans l'axe d'un projecteur iode : 2 000 W, de 3 500 à 160 000 cd Dans l'axe d'un projecteur halogénures : 2 000 W, de 100 000 à 350 000 cd
Luminance	L	Candela par m²	cd/m²	Intensité/surface apparente de la source	Surface en pleine lune : 3 000 cd/m² Lampe fluorescente : 40 W, blanc 5 500 cd/m² Lampe à ballon fluorescent : 400 W, 110 000 cd/m² Filament lampe à incandescence : 100 W, 5 800 000 cd/m² Soleil : 2 400 000 000 cd/m²

Tableau IV
Les unités fondamentales et quelques exemples de lampes

▲ *A gauche, figure 3 : diagramme chromatique (triangle des couleurs). A droite, tableau IV : les unités fondamentales et quelques exemples.*

de référence. On établit la moyenne des différences de couleurs constatées qui mesure le rendu des couleurs de la lampe étudiée.

Les lampes à incandescence ont des distributions spectrales énergétiques comparables à celles des sources de référence, ce qui leur confère un excellent rendu des couleurs. Pour les lampes fluorescentes, certaines émettent trois longueurs d'onde de manière à obtenir un rendu des couleurs excellent (*fig.* 4 et 5).

La comparaison entre une source de lumière et la couleur du corps noir s'appelle *température de couleur*. Le kelvin est son unité de température.

Sources et modes de rayonnement

Au point de vue spectral, les sources peuvent émettre de deux façons différentes : leur spectre peut être continu, c'est-à-dire que le rayonnement contient toutes les longueurs d'onde dans une plage déterminée; leur spectre peut être discontinu, le rayonnement est alors formé de raies filiformes ou de bandes. Les gaz à haute pression, les liquides et les solides émettent généralement des rayonnements à spectre continu; par contre, les gaz dilués émettent des rayonnements à spectre discontinu.

Ces rayonnements sont d'origine thermique ou luminescente. Le premier provient de la chaleur émise par une source, le second provient d'un phénomène chimique ou électrique ou de radiation autre que thermique.

Production de la lumière

Production de la lumière par incandescence

Cette production est fondée sur la loi de Joule qui exprime qu'un conducteur traversé par un courant s'échauffe, et d'autant plus que l'intensité qui le traverse est élevée. Il prend successivement les couleurs rouge sombre, rouge vif, jaune et blanc brillant. Le rayonnement émis dépend de la nature du corps émetteur. Il est nécessaire d'avoir un radiateur idéal pour faire des mesures de comparaison quand on possède un radiateur quel-

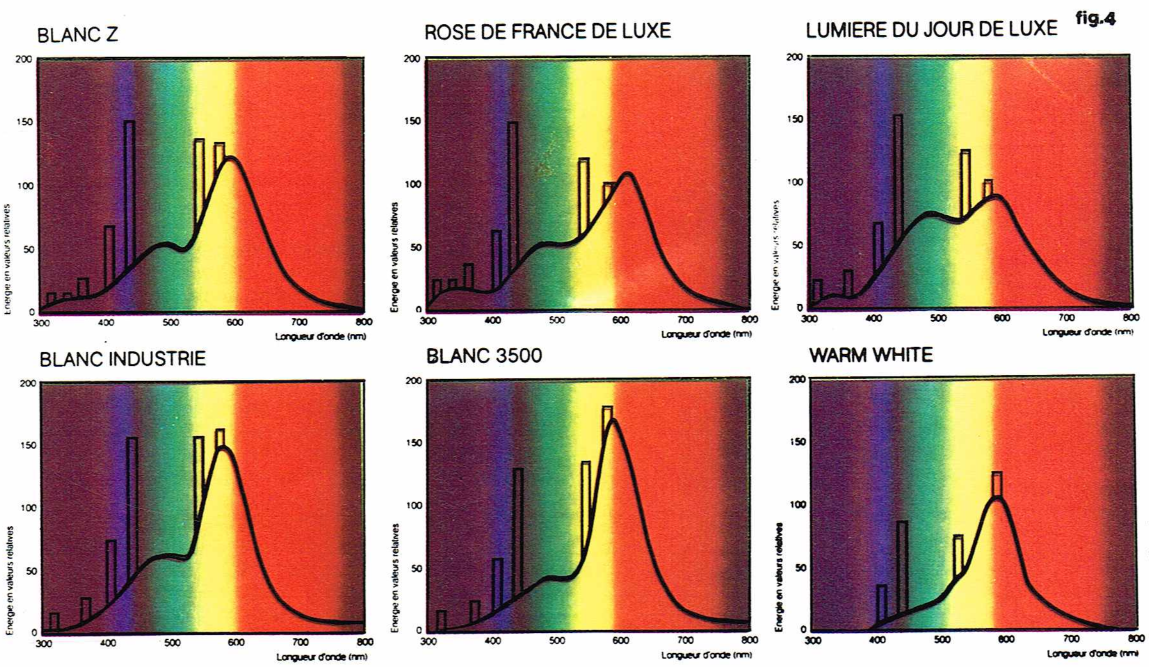

Document Claude

◀ *Figure 4 : courbe de répartition spectrale de différents types de lampes.*

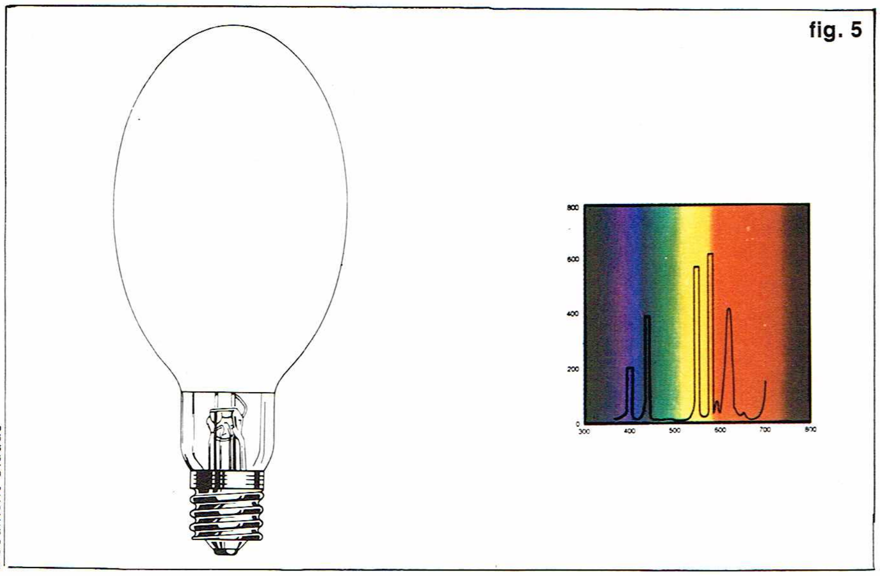

▲ *Figure 5 : exemple de courbe de répartition spectrale d'une lampe à ballon fluorescent.*

conque. Ce radiateur idéal, qui obéit à des lois simples, est appelé *corps noir.*

Ce corps noir est une substance qui absorbe tous les rayonnements qu'il reçoit, quelles que soient les longueurs d'onde. Il est constitué d'une boîte creuse présentant un orifice de petites dimensions : tout rayonnement qui entre par le trou ne sort pas, car il subit de multiples réflexions avec absorption. Prenons l'exemple d'un grand four tapissé de noir de fumée : si l'on place une source à la petite porte d'entrée, on ne verra rien ressortir.

Le rayonnement du corps noir est régi par des lois contenues dans la formule de Planck. Ce sont les lois de Stephan et de Wien. La première indique : que le rayonnement total en énergie d'un corps noir est proportionnel à la surface du corps et croît comme la quatrième puissance de la température absolue de ce corps. La seconde s'énonce : pour un corps noir, le produit de la longueur d'onde λ_{max} correspondant au maximum d'émittance à une température T et de cette température absolue T est constant : $\lambda_{max}T = C^{te}$.

Cette constante est égale à 2 886 avec λ_{max} en micromètres et T en kelvins.

Citons un exemple : à la température $t = 100$ °C, soit $T = 100 + 273 = 373$ °K, nous aurons

$$\lambda_{max} = 2\,886/373 = 7{,}74\ \mu m$$

c'est un rayonnement infrarouge. Effectivement, un corps porté à 100 °C émet un rayonnement dans l'infrarouge non visible. C'est entre 800 à 1 000 °K que la lumière visible apparaît. A 2 886 °K, $\lambda_{max} = 1\ \mu m$, le rayonnement est blanc. La courbe de sensibilité de l'œil montre que son maximum a lieu dans la partie vert-jaune qui nécessiterait une longueur d'onde égale à $2\,886/5\,500 = 0{,}52\ \mu m$.

Il y a deux catégories de corps qui ne sont pas noirs : les corps gris et les corps colorés. Les premiers ont une courbe de répartition spectrale identique à celle du corps noir, obtenue en translatant cette dernière vers le bas. Cette courbe est applicable aux charbons, donc à la combustion de tous les corps qui en dérivent : acétylène, gaz d'éclairage, lampes à filament de carbone... Les seconds ont des courbes de répartition quelconques, non comparables à celle du corps noir pour la même température. Eux-mêmes se classent en deux catégories : ceux dont le maximum de la courbe est dans les faibles longueurs d'onde, c'est le cas du tungstène et des métaux en général ; ceux dont la répartition comporte plusieurs sommets dans la plage visible et une émission très faible dans les plages invisibles, c'est le cas des oxydes de terre qui étaient très utilisés pour la fabrication des manchons d'éclairage au gaz.

Production de la lumière par luminescence

L'émission de lumière par luminescence est due à l'excitation des atomes de gaz traversé par un flux électronique. Ce sont les déplacements des électrons qui assurent le passage du courant comme dans un métal ; mais dans ce dernier, les électrons libres assurent cette fonction, alors que dans un gaz, il faut des conditions particulières pour que ces électrons soient libérés : le gaz doit être ionisé. Un atome de gaz est ionisé quand un électron s'échappe de l'attraction du noyau, sous l'effet d'une énergie extérieure, en laissant un ion positif. En effet, l'ensemble noyau + électron est neutre ; le fait de retirer un électron négatif rend cette nouvelle constitution positive, elle est appelée ion.

Pour que ce phénomène se produise, il faut exciter l'atome avec une énergie extérieure : le « choc ». Des corpuscules viennent frapper la molécule : atomes neutres dus à l'élévation de la température d'un corps qui augmente l'agitation moléculaire, électrons et photons. Quant un photon frappe un atome, son énergie est absorbée par l'atome et le photon disparaît. L'atome n'absorbe que les photons dont l'énergie est égale à celle nécessaire pour qu'il atteigne un niveau d'excitation ; il reste dans cet état pendant quelque 10^{-8} seconde, puis revient à son état premier : l'excitation correspond à un changement de niveau d'un électron et chaque changement est à l'origine d'un rayonnement de longueur d'onde bien déterminée : onde monochromatique. Celle-ci sera visible si la longueur d'onde est comprise entre 4 000 et 7 600 Å.

Considérons un tube contenant un gaz et deux électrodes. Si on applique une différence de potentiel de quelques centaines de volts entre ces électrodes, les quelques ions positifs que renferme le gaz viennent frapper la cathode (négative). Sous l'effet du choc, des électrons sont libérés qui ionisent les atomes gazeux qui les entourent. Le champ électrique accélère les électrons qui provoquent l'excitation des atomes. Le gaz devient lumineux. Au cours de ce phénomène, la cathode qui était froide le reste. Si on l'échauffe par une source extérieure, il se produit une décharge d'arc, car elle libère un nombre beaucoup plus grand d'électrons. La perte de puissance et la chute cathodique deviennent faibles, le courant est beaucoup plus intense. On dit que ces lampes sont *à cathodes chaudes.*

Les résultats sont les mêmes quand on alimente la lampe sous une tension alternative. Deux critères importants sont à retenir : une *tension d'amorçage* doit être suffisante pour provoquer l'ionisation du gaz. Après

▼ *Éclairage « rétro » (musée Horta).*

allumage, cette tension peut décroître, car la résistance de la lampe diminue, et une fois déclenché, le processus se poursuit de lui-même. Une *stabilisation* est nécessaire, car, après l'amorçage, l'intensité augmente considérablement jusqu'à la destruction de la lampe. Il est donc indispensable d'ajouter en série, dans le circuit, un limiteur de courant appelé communément *ballast*.

Il existe divers types de luminescences :

● la *chimiluminescence*, qui a pour origine une réaction chimique, comme par exemple la lueur verte de faible intensité qui résulte de l'oxydation lente du phosphore blanc au contact de l'air. Si cette réaction chimique prend naissance sur des organismes vivants, le phénomène est appelé « bioluminescence ».

● l'*électroluminescence*, qui fut découverte en 1936 par Destriau, se manifeste par une émission lumineuse quand on soumet à un champ électrique des produits comme les poudres monocristallines de sulfure de zinc mélangées à un matériau isolant. Les lampes de ce genre se présentent quelquefois sous forme de plaques constituées par une plaque support en verre, une couche conductrice transparente, une couche de matière fluorescente, une couche de matière réfléchissante, une couche conductrice métallique et une plaque support en verre. Ces lampes sont des condensateurs lumineux de faible luminance. La couleur peut être verte, bleue ou orangée. Elles sont alimentées directement sous la tension du réseau 220 V alternatif. La consommation est négligeable. Toute variation de différence de potentiel se traduit par une variation de l'intensité lumineuse. On s'en sert dans certaines applications comme amplificateurs de radiations.

● La *thermoluminescence*. Il y a thermoluminescence quand un matériau émet une radiation lumineuse par augmentation progressive de sa température.

● La *photoluminescence* est provoquée par une absorption de radiations électromagnétiques dans la plage infrarouge, visible et ultraviolet.

● La *sonoluminescence* est provoquée par l'action d'ondes ultrasonores intenses sur certains liquides qui donnent naissance à une cavitation.

● La *triboluminescence* apparaît sur certains solides soumis à des contraintes mécaniques, par exemple l'acide tartrique, le saccharose, le nitrate d'uranium, les phosphores synthétiques.

Production de la lumière par fluorescence

Quand un photon frappe un atome, le photon disparaît et l'énergie est absorbée par l'atome. Si ce dernier retourne à son état d'énergie d'origine par étapes, on dit qu'il y a *fluorescence* du gaz. Les fréquences émises sont plus faibles que celles des ondes absorbées, c'est un véritable transformateur de fréquences.

Si l'onde émettrice se situe dans la partie non visible du spectre (lumière ultraviolette), la lumière réémise par une substance appropriée sera visible.

Lampes actuelles

Les principaux types de lampes utilisées de nos jours sont :

— les lampes à incandescence ;
— les lampes à décharge ;
— les lampes fluorescentes.

Les lampes à incandescence

Les principaux éléments qui constituent une lampe sont : une ampoule à l'intérieur de laquelle se trouve le filament et le gaz, et le culot (*fig.* 6).

● **L'ampoule** est une enveloppe de verre scellé. Elle peut être claire, opalisée ou translucide. L'opalisation consiste à recouvrir la face interne de l'ampoule avec un revêtement siliceux sous forme de poudre blanche. Le verre translucide est obtenu par attaque à l'acide de la face interne. Ces deux solutions permettent de diffuser la lumière émise par le filament. La forme varie suivant l'utilisation et le fabricant, on en compte quelques dizaines : forme standard, sphérique, cylindrique, conique, flamme, etc. On peut y incorporer un réflecteur du côté du culot pour diriger le faisceau lumineux ou à l'opposé du culot pour avoir une calotte argentée. Le verre peut

fig. 6

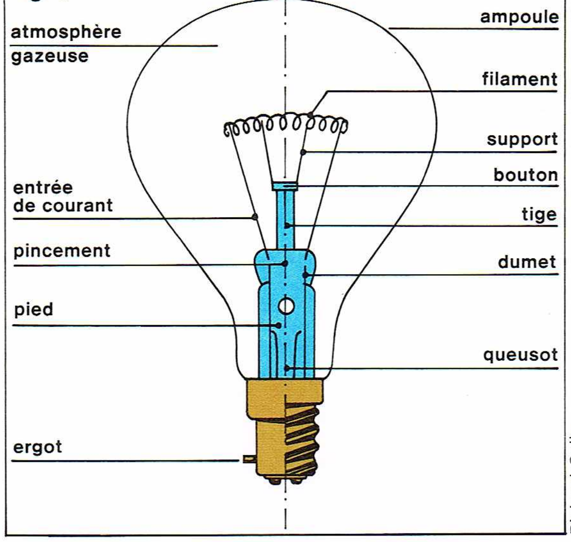

◀ ***Figure 6 : pièces constitutives d'une lampe à incandescence.***

être coloré, il est alors principalement destiné à la décoration.

● **Le filament.** Nous avons vu que divers métaux avaient été essayés par les précurseurs avant de retenir le tungstène. Avec ce métal, les températures atteintes sont très élevées et permettent d'avoir des énergies rayonnées dans le spectre visible et une efficacité lumineuse importantes. Les fils couramment utilisés ont un diamètre compris entre 0,015 et 0,045 mm. Suivant la puissance, dans certains cas, le diamètre peut atteindre 2,5 mm ; à titre de comparaison, le diamètre moyen d'un cheveu est 0,060 mm. Le fil est bispiralé pour réduire les pertes de chaleur par convection et conduction. La longueur du filament est de 40 mm pour une lampe de 1,5 V-0,2 W et 70 cm pour une lampe de 220 V-40 W. Le bispiralage réduit à 1/25 la longueur du filament déployé, ce qui diminue le nombre de supports de filament.

● **Le gaz de remplissage.** Dans le vide, le filament de tungstène porté à haute température s'évapore. En effet, l'agitation moléculaire augmentant avec la température, ces molécules de tungstène s'échappent du conducteur et vont se déposer sur l'ampoule. La présence de molécules de gaz autour du filament forme une barrière qui s'oppose à ce déplacement et les molécules reviennent sur leur support d'origine. Malgré tout, quelques-unes s'échappent et se déposent sur le verre qui noircit légèrement. Cet effet est d'autant plus néfaste que le gaz contient plus d'impuretés en provenance des crochets supports de filaments.

Pour améliorer le vide des ampoules, on dépose sur les filaments des substances appelées getters. La volatilisation est d'autant plus faible que le gaz a une masse atomique élevée, c'est pourquoi on emploie le krypton, l'argon et l'azote. Le krypton est le meilleur de tous, mais il est rare ; on le trouve dans l'air dans la proportion de 1 volume de krypton pour 10 millions de volumes d'air. Les lampes courantes contiennent de l'argon, l'azote est utilisé dans les lampes de projection pour éviter l'amorçage entre les entrées de courant souvent rapprochées.

● **Le culot.** Il sert à relier la lampe à la douille. Les culots sont normalisés, leurs symboles sont une lettre suivie de chiffres. La lettre E (Edison) a été retenue pour les culots à vis et la lettre B pour les culots à baïonnette. Il en existe 7 types : B 22 baïonnette, B 15 petite baïonnette, B 22 R Retreint, E 22 vis Edison, E 14 petite vis, E 40 vis Goliath, E 27 R Retreint.

Caractéristiques

La durée de vie moyenne est de 1 000 heures. Ce chiffre correspond à l'optimum économique d'exploitation entre le prix de revient des lampes et celui de l'énergie électrique. Il faut évidemment respecter la tension nominale d'alimentation. Si la tension est inférieure (sous-voltage), la durée de vie sera augmentée, mais le flux lumineux sera beaucoup plus faible. En moyenne, la durée de vie est multipliée par deux quand on diminue

de 5 à 10 % la tension nominale, par contre l'efficacité lumineuse est réduite de 20 %.

Il faut noter aussi que le flux lumineux augmente plus vite que la puissance, car un gros filament peut être porté à une température plus élevée qu'un petit pour une même durée de vie, car l'importance relative des perte est plus faible (*tableau* V).

Le *tableau* VI donne les caractéristiques des lampes à incandescence.

Influence de l'intensité sur la durée de vie

La résistance du filament, faible à froid, croît avec la température. A la mise sous tension, une surintensité traverse la lampe qui soumet les spires à des contraintes mécaniques élevées (rappelons que dans un solénoïde, un courant augmente son diamètre car les forces exercées par deux courants de sens contraire s'opposent, et diminue sa longueur par rapprochement des spires car les forces exercées par deux courants de même sens s'attirent). La durée de vie sera d'autant plus courte que le nombre d'allumages sera élevé. On a intérêt à mettre en série un rhéostat avec les lampes de forte puissance pour diminuer cette surintensité.

Gammes des lampes à incandescence

La lampe du type standard en forme de poire est la plus courante; le verre peut être clair, dépoli ou opalisé.

Lampes à réflecteur

Le réflecteur est constitué par un revêtement interne de l'ampoule par métallisation d'aluminium ou d'argent. Cette solution évite la corrosion du réflecteur et le rend insensible aux poussières. Le réflecteur peut être placé du côté du culot, ce qui permet un faisceau dirigé vers l'avant, ou à l'opposé du culot, ce qui permet un éclairement vers l'arrière; dans ce cas le réflecteur est appelé *à calotte argentée*. Les lampes à faisceau dirigé donnent un éclairement deux fois plus important sur le plan de travail qu'une lampe normale sans réflecteur. Les ampoules ont la forme courante à calotte aplatie verre soufflé ou de parabole verre pressé. Elles sont souvent associées aux lampes fluorescentes pour accentuer les ombres et reflets. Dans les lampes en verre pressé, la partie avant (non réflectrice) est une lentille qui donne la largeur du faisceau.

Certaines constructions sont très robustes et peuvent être utilisées sans précautions spéciales à l'extérieur. La partie avant peut être colorée pour les utilisations décoratives. Les lampes en verre soufflé ne possèdent pas de lentille, la largeur du faisceau est obtenue par la position du filament; par rapport aux précédentes, elles sont moins robustes et leur intensité lumineuse est plus faible à puissance égale. Elles servent surtout à l'éclairage intérieur. Le réflecteur peut aussi être placé sur la partie sphérique des ampoules.

Lampes de projection

Elles sont à classer dans la catégorie des lampes dont la fabrication est spéciale. En effet, elles doivent avoir un foyer lumineux de faibles dimensions, de flux élevé, dont la position par rapport au culot doit être très précise pour assurer l'interchangeabilité sans changer le réglage. Leur durée de vie est plus courte que celle d'une lampe ordinaire, du fait de la température plus élevée du filament; quelquefois elle peut être réduite à quelques heures. Le filament comprend plusieurs boudins disposés suivant les génératrices d'un cylindre ou dans un ou deux plans. Actuellement, la plupart des lampes sont alimentées en basse tension de 8, 12 ou 24 volts. La source lumineuse est très compacte, car le filament est formé d'un unique boudin. Les projecteurs cinématographiques pour petits formats sont équipés de lampes cylindriques de faible diamètre pour diminuer au maximum la distance entre le filament et le système optique, et améliorer le rendement lumineux. Leur puissance ne dépasse pas 500 watts.

▼ *Tableau V : flux lumineux des lampes à incandescence 127 et 225 volts.*

Tableau V
Flux lumineux des lampes à incandescence de 127 et 225 volts

Puissance (en W)	Flux lumineux (en lm) 127 V	Flux lumineux (en lm) 225 V
100	1 300	1 100
1 000	20 500	18 500
Rapport des puissances : 10	Rapport des flux : 15,7	Rapport des flux : 16,8

▶ *Tableau VI : caractéristiques des lampes à incandescence.*

Tableau VI
Caractéristiques des lampes à incandescence

Puissance (en W)	Flux (en lm) 125 V-130 V	Flux (en lm) 220 V-230 V	Efficacité lumineuse (en lm/W) 125 V-130 V	Efficacité lumineuse (en lm/W) 220 V-230 V	Dimensions (en mm) Diamètre	Dimensions (en mm) Hauteur	Dimensions (en mm) Centre lumineux	Filament	Culot
15	141	128	9,4	8,5	60	103	75	SS	B 22 (1)
25	256	233	10,25	9,3	60	103	75	SS	B 22 (1)
40	506	436	12,65	10,9	60	103	73	DB	B 22 (1)
60	849	744	14,15	12,4	60	103	73	DB	B 22 (1)
75	1 125	967	15	12,90	60	103	73	DB	B 22 (1)
100	1 595	1 395	15,95	13,95	60	103	73	DB	B 22 (1)
150	2 385	2 093	15,90	13,95	80	160	120	SS	B 22 (1)
200	3 430	2 990	17,15	14,95	80	160	120	SS	B 22 (1)
300	5 205	—	17,35	—	88	175	133	SS	E 27
300	—	5 025	—	16,75	88	175	133	DB	E 27
500	9 525	8 700	19,05	17,5	110	233	178	SS	E 40
750	15 000	13 425	20	17,9	130	267	202	SS	E 40
1 000	21 150	18 750	21,15	18,75	130	267	202	SS	E 40
1 500	32 025	29 325	21,35	19,55	170	335	250	SS	E 40
2 000	43 900	39 100	21,25	19,55	170	335	250	SS	E 40
3 000	67 650	59 850	22,55	19,15	240	400	280	SS	E 40

(1) Lorsque la lampe est munie d'un culot E 27, ajouter 1,5 mm pour la hauteur du centre lumineux.
SS = simple spirale DB = double spirale

Il existe aussi des lampes sphériques dont le filament est monté en cylindre, leur puissance varie entre 500 et 1 500 watts. Elles sont utilisées pour l'éclairage des terrains de sport, monuments, chantiers. Leur durée de vie est 500 heures. Les appareils épiscopes sont équipés de lampes sphériques à filament plan de puissance 250 à 1 000 watts, leur durée de vie est 100 heures. Les prises de vues cinématographiques nécessitent des lampes plus puissantes de l'ordre de 10 000 watts ; le culot est alors remplacé par deux broches.

Lampes miniatures

Ces lampes fonctionnent sous une très basse tension. L'ampoule est généralement remplie de krypton pour augmenter l'efficacité lumineuse. Elles sont utilisées dans les appareils de radio, tableaux de bord de voitures, piles de poche, bicyclettes. On les colore pour les utiliser en décoration : guirlandes lumineuses pour arbres de Noël, bouquets de lumière, par exemple.

Lampes à halogène

Ce sont des lampes à incandescence à filament de tungstène à haute performance. L'ampoule ne noircit pas, car le processus chimique interne empêche tout dépôt de molécules de tungstène issues de la vaporisation du filament à haute température. Pour ce faire, on introduit dans la lampe, en plus du gaz normal, une quantité d'halogène de l'ordre de 0,1 mg/cm^3 (iode ou fluor ou brome). La température de l'ampoule voisine 600 °C. A cette température, l'iode gazeux se combine aux gaz de tungstène pour former de l'iodure de tungstène qui ne se condense pas sur la partie interne de l'ampoule. L'iodure de tungstène, au contact du filament qui est à 2 600 °C, se décompose en libérant le tungstène qui se dépose.

Les ampoules sont en quartz de petites dimensions. Les ampoules en quartz ne doivent pas être manipulées à la main, car les traces de graisse laissées par les doigts provoquent une dévitrification à chaud. On utilise quelquefois la double enveloppe : le tube en quartz est placé à l'intérieur d'une ampoule en verre qui le protège. Cette ampoule est munie d'un culot à vis alors que les tubes sont équipés, à leurs extrémités, de pièces en céramique qui nécessitent l'usage de culots particuliers (*fig.* 7).

Elles conviennent parfaitement pour équiper les projecteurs légers et de faible volume pour la photographie, le cinéma. On les utilise aussi pour éclairer les stades, les monuments, vitrines, magasins. Le flux lumineux est important et pratiquement constant dans le temps. Leur durée de vie est deux fois supérieure à celle d'une lampe à incandescence normale pour une efficacité lumineuse égale. On peut les brancher directement sur le secteur sans appareillage auxiliaire. Leur puissance s'échelonne de 50 watts et 100 watts pour les lampes miniatures de diamètre 11 mm et longueur 44 mm à 2 000 watts pour des tubes de 10 mm de diamètre et 322 mm de longueur.

Lampes pour la photographie

* *Lampes éclair* ou *lampes pour flash*. Elles sont constituées d'un écheveau de fil combustible : filament long et fin en alliage d'aluminium et de magnésium ou de zirconium placé dans une ampoule remplie d'oxygène. Un petit filament de tungstène rougit à la mise sous tension et met en combustion le fil. Ce filament est recouvert en partie d'une pâte explosive contenant du phosphore. L'éclair atteint son maximum d'éclairement 20 millisecondes après le contact, la combustion est terminée 40 millisecondes après. Les flux lumineux sont très importants, de l'ordre de 500 000 à 1 million de lumens. Une seule lampe flash libère autant de lumière que 500 lampes de 75 watts. Ces lampes sont recouvertes d'un vernis bleu qui permet la photographie en couleurs, le spectre étant proche de celui de la lumière naturelle.

* *Lampes pour prises de vues cinématographiques*. La durée de vie, quelques dizaines d'heures, a été sacrifiée au profit de l'efficacité lumineuse. Elles sont de faibles dimensions, ce qui permet au cinéaste amateur de transporter aisément son projecteur. La puissance est généralement 1 000 watts.

* *Lampes pour agrandisseurs*. Ce sont des lampes standards en forme de poire, d'intensité lumineuse normale ; l'intérieur est dépoli pour avoir une lumière diffuse.

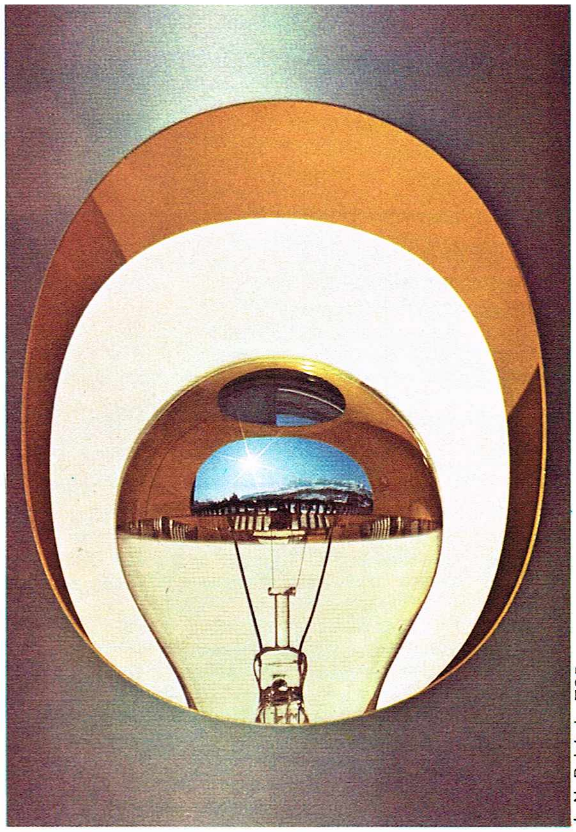

J.-N. Reichel - TOP

◄ ***Lampe à réflecteur :** la calotte argentée donne un éclairement deux fois plus important sur le plan de travail.*

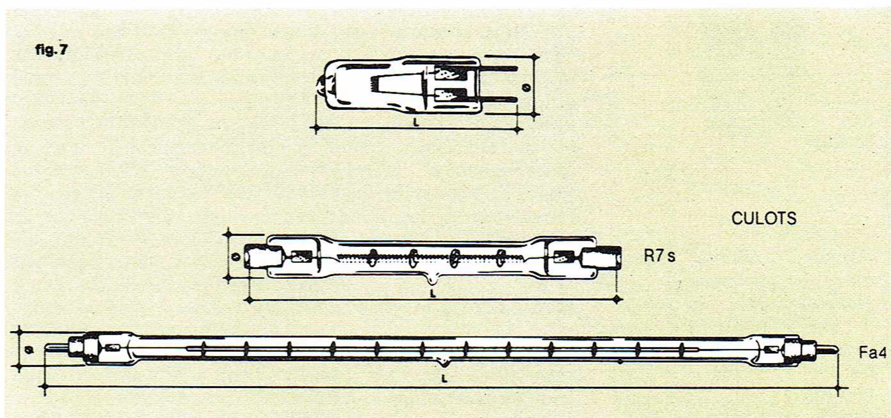

Document Claude

▲ ***Figure 7 :** trois types de lampes tungstène-halogène.*

* *Lampes pour laboratoires*. Le tirage des épreuves nécessite des lampes *inactiniques*, c'est-à-dire qui n'ont aucune action sur les émulsions. Il existe des lampes de couleur rouge pour le développement des émulsions orthochromatiques, verte pour le développement des émulsions panchromatiques, jaune-vert pour le développement des papiers au bromure d'argent, jaune pour le développement des papiers au chlorure d'argent.

Les lampes à arc

Dans l'historique, nous avons vu que la lampe à arc a été inventée en 1810 par Davy, bien avant la lampe à incandescence en 1877-1878 par Swan et Edison. Ces lampes ont été largement utilisées pendant les 68 ans qui séparent les deux inventions et même au-delà, surtout pour l'éclairage public. Elles n'ont pas été abandonnées et servent toujours dans certaines applications qui nécessitent une luminance élevée.

Le nom d'arc vient de la forme que prend naturellement la décharge électrique sous l'effet de l'air chaud ascendant quand les électrodes sont placées dans un même plan horizontal. Les électrodes sont en charbon. L'extrémité positive du charbon est portée à haute température et se creuse en cratère, qui est la principale source de lumière ; elle fournit environ 85 % de la lumière totale. La luminance de ce cratère atteint 300 millions de candelas par mètre carré. L'extrémité négative du charbon est portée au rouge et fournit 5 % de la lumière. L'arc est à l'origine des 10 autres pour cent. Il faut placer les électrodes de telle façon que l'extrémité positive soit du côté à éclairer. En fonctionnement, les électrodes s'usent, et l'écartement varie ; pour y remédier, on place un régulateur mécanique qui rapproche les électrodes pour compenser l'usure tout en maintenant la pointe

Tableau VII
Caractéristiques de quelques familles de lampes à décharge (documentation Claude)

Nature de la décharge	Aspect de la lumière	Puissance (en W)	Efficacité lumineuse (en lm/W)	Rendu des couleurs	Accessoires	Utilisation
Vapeur de mercure	Blanc pourpre	160 250 500	20 à 25	Bon	Directement sur le secteur	Industries Éclairage public Résidences Parkings Jardins
Vapeur de mercure	Blanc « Europe »	50-80 125-250 400-700 1 000 2 000	40 à 55	Convenable	Ballast + condensateur de compensation	Industries Éclairage public Routier Grands espaces Entrepôts
Vapeur de mercure	Blanc chaud	80 125 250 400	40 à 55	Bon	Ballast + condensateur de compensation	Industries Halls Grands bureaux Surfaces de vente Jardins Rues piétonnières
Vapeur de sodium	Blanc doré	250 400	100 à 110	Moyen	Ballast + allumeur + condensateur de compensation	Grands espaces Routiers Urbains Chantiers Voies ferrées Tunnels
Vapeur de sodium	Blanc doré	250 400	100 à 110	Moyen	Ballast + condensateur	
Vapeur de sodium, thallium, indium	Blanc pur	2 000	95	Bon	Ballast + allumeur + condensateur écrêtage + condensateur compensation	Stades Parkings Échangeurs Voies de triage Parcs Grands espaces

▲ *Tableau VII : caractéristiques de quelques familles de lampes à décharge.*

▼ *Tableau VIII : caractéristiques de deux types de lampes à vapeur de sodium haute pression.*

positive en un lieu fixe, bien déterminé comme le foyer d'un miroir parabolique par exemple. La luminance des lampes actuelles peut atteindre 800 millions de candelas par mètre carré. Les électrodes sont formées d'un aggloмérat de poudre de charbon, de goudron, de sels métalliques. Du fluorure ou du carbure de cérium peut être ajouté ainsi qu'une mèche. De ces éléments dépend le spectre du rayonnement émis.

Elles sont utilisées dans les projecteurs puissants comme les phares en bord de mer, les appareils de projection de cinéma professionnel.

Tableau VIII
Caractéristiques des deux types de lampes à vapeur de sodium haute pression

Lampes	Puissance (en W)	Culot	Flux lumineux (en lm)	Efficacité lumineuse (en lm/W)	Dimensions (en mm)	
					Longueur	Diamètre
Lampes tubulaires	250	E 40	26 500	106	257	52
	400	E 40	48 000	120	285	52
Lampes ovoïdes	250	E 40	25 000	100	257	90
	400	E 40	45 000	112	292	120

Les lampes à décharge

La lampe à décharge met en œuvre le phénomène d'électroluminescence décrit dans le chapitre précédent, dont la lumière n'est pas produite par le chauffage du filament, mais par l'excitation du gaz à haute température enfermé dans une enceinte isotherme dénommée *brûleur*. Ce brûleur porté à haute température est protégé par une ampoule en verre de forme tubulaire ou ovoïde, claire ou poudrée, munie d'un culot de raccordement.

Il existe plusieurs types de lampes à décharge qui sont toutes suffisamment importantes dans leur utilisation pour que nous en fassions une description et en annoncions les caractéristiques principales. Nous aborderons successivement les lampes à vapeur de sodium, à vapeur de mercure, mixtes, spéciales. Les lampes à décharge se différencient notamment par la température de la cathode ; dans celles qui ont la cathode froide, la décharge a lieu dans un volume important et le tube est très long, par contre celles qui ont la cathode chaude ont des tubes courts.

Leurs dimensions sont faibles par rapport au flux lumineux qu'elles produisent. Le *tableau* VII définit quelques familles de lampes.

Lampes à vapeur de sodium basse pression

L'intérieur du tube est rempli de sodium à basse pression qui se vaporise à la température de 98 °C et d'un mélange de néon ou d'argon. Les électrodes sont des filaments spiralés et activés. C'est une lampe à cathode chaude qui fonctionne en régime d'arc. Pour éviter une accumulation du sodium en certains points précis du tube, on fait de petites cavités qui constituent des points froids où le sodium se condense. Le néon est à l'origine de la première décharge qui émet une lumière rouge très caractéristique du gaz. La décharge amorcée, la température augmente jusqu'à 200 °C, valeur où les atomes de vapeur de sodium sont excités. L'allumage complet dure 10 minutes.

La pression, de quelques centaines de newtons par mètre carré, permet d'avoir un amorçage sous faible tension. Pour que le fonctionnement soit correct, il faut que le tube à décharge soit à la température de 270 °C. Pour maintenir cette température, on place le tube dans une ampoule dans laquelle on fait le vide et dont la paroi interne est revêtue d'oxyde d'indium. Les rayons infrarouges émis par le tube se reflètent sur l'oxyde et maintiennent le tube à bonne température. L'efficacité lumineuse est très élevée, de l'ordre de 200 lumens/watt, mais son spectre se réduit à deux raies pratiquement confondues dans la zone jaune-rouge. De ce fait, elle émet une lumière pratiquement monochromatique. Elle est utilisée dans les applications où le rendu des couleurs n'a pas d'importance. La variation du flux lumineux dans le temps est très faible : 10 % après 6 000 heures de fonctionnement. Ce flux provient à 90 % de l'émission du sodium, le reste du gaz d'amorçage. La lumière émise par ces lampes est très intéressante, car les raies du spectre se situent dans la zone où l'activité visuelle et la vitesse de la perception sont les meilleures. C'est actuellement la solution idéale pour l'éclairage des circuits routiers par temps de brouillard.

Lampes à vapeur de sodium haute pression

Elles sont constituées d'un tube à décharge en alumine frittée pour résister à la corrosion du sodium due à son activité chimique intense à la température de fonctionnement de 700 °C. Il est placé dans une ampoule en verre dur qui sert de protection et dans laquelle on fait le vide. Le tube à décharge est rempli avec une importante quantité de sodium, pour qu'en fonctionnement normal, à une pression de 20 kilonewtons par mètre carré environ, la vapeur du sodium soit saturée. Sont ajoutés aussi du mercure comme support de la décharge et un gaz rare, le xénon, pour favoriser l'amorçage (*fig.* 8 a).

Ces lampes ont une répartition spectrale assez large dans le domaine visible comparée au spectre des lampes basse pression (*fig.* 8 b). La couleur est agréable, l'aspect de la lumière est blanc doré. Les ampoules de protection peuvent être tubulaires, claires ; dans ce cas, la source lumineuse est très compacte, ce qui permet un contrôle optique sérieux du flux lumineux. Elles peuvent être aussi ovoïdes diffusantes et, si besoin est, remplacer des

Fig. 8

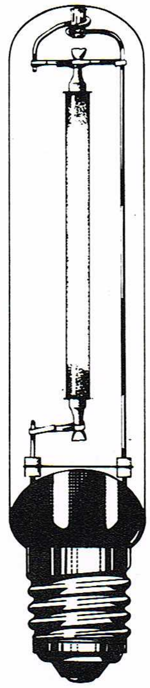

répartition spectrale.

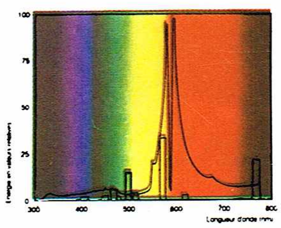

ballons fluorescents à vapeur de mercure dans des luminaires existants. L'efficacité lumineuse est élevée : 100 à 120 lumens par watt. Il leur faut 5 à 10 secondes pour s'amorcer. Aussi bien en forme tubulaire qu'ovoïde, les puissances les plus courantes sont 250 et 400 watts. Le *tableau* VIII donne les caractéristiques pour ces deux puissances.

Il leur faut un ballast de stabilisation, un allumeur et éventuellement des condensateurs pour améliorer le facteur de puissance. Leur durée de vie est de l'ordre de 4 à 6 000 heures avec une perte du flux lumineux de 15 %. On trouve maintenant des lampes dont l'auto-allumage se fait par l'intermédiaire d'une tige d'alumine supportant une résistance de tungstène placée à l'intérieur du tube. Elle est liée électriquement à une électrode et s'approche très près de l'autre électrode. Une tension de l'ordre de 150 volts permet l'amorçage entre cette tige et la deuxième électrode, qui entraîne l'allumage du tube (*fig.* 9).

Lampes à vapeur de mercure

Les lampes à vapeur de mercure très basse pression font l'objet du chapitre *Lampes fluorescentes.* Au cours d'une décharge électroluminescente, un accroissement de pression entraîne une augmentation de l'efficacité lumineuse et enrichit la composition spectrale de l'émission. Si l'on étudie la variation spectrale en fonction de la pression, on obtient le *tableau* IX.

Les lampes à vapeur de mercure haute pression sont constituées d'un tube à décharge en quartz pour résister aux fortes températures. Il contient en faible quantité du mercure, qui est liquide à la température normale de 20 °C. Il va se vaporiser progressivement, et la pression interne sera de l'ordre de $2 \cdot 10^5$ à 10^6 newtons par mètre carré. S'il n'y avait que du mercure, l'amorçage ne pourrait se faire à la température ordinaire, c'est pourquoi on ajoute une petite quantité d'argon. Pour faciliter l'amorçage, on monte une électrode auxiliaire, en plus des deux électrodes principales, qui est reliée à l'électrode opposée par l'intermédiaire d'une forte résistance. Dès la mise sous tension, une décharge prend naissance, ionise le gaz du tube et augmente sa température. Le mercure se vaporise progressivement et la décharge principale apparaît. L'ensemble est placé dans une ampoule protectrice remplie d'un gaz inerte qui maintient la température à peu près constante.

La vapeur de mercure émet les couleurs jaune, vert et bleu dans le spectre visible (violet à 4 047 Å, bleu à 4 358 Å, vert à 5 461 Å et jaune à 5 770 et 5 790 Å). Il y a absence totale de radiations rouges. Pour y remédier, on revêt la paroi interne de l'ampoule protectrice d'une substance fluorescente qui transforme l'énergie ultraviolette en couleur rouge. On donne à l'ampoule la forme ovoïde. S'il est inutile de créer une composante rouge, l'ampoule de protection est claire.

Par rapport à l'incandescence, cette lampe présente notamment deux avantages : sa durée de vie est six fois supérieure, ce qui réduit le nombre d'interventions, et son efficacité lumineuse est multipliée par un coefficient qui varie suivant le type de lampe entre 1,5 et 6. Les lampes à allumage instantané ont naturellement un facteur de puissance voisin de l'unité. Celles qui ne possèdent pas d'électrode auxiliaire s'amorcent avec un ballast équipé de condensateurs pour ramener le facteur de puissance à une valeur proche de 1. Dans certaines lampes, on ajoute au mercure et à l'argon des halogénures d'indium, de thallium et de sodium, ce qui leur confère une efficacité lumineuse importante : 100 lumens par watt et un spectre bien équilibré. Les puissances varient entre 50 et 200 watts. Le *tableau* X donne à titre d'exemple quelques caractéristiques, très variables suivant le type de lampe, à puissance égale.

Le thallium émet une lumière verte, l'indium une lumière bleue, le sodium une lumière jaune, le scandium une lumière rouge. La combinaison judicieuse du thallium, de l'indium et du sodium peut donner une lumière blanche avec une efficacité lumineuse toujours de l'ordre de 100 lumens par watt. Le phénomène interne au tube à iodures (ou halogénures) métalliques est le suivant : en fonctionnement normal, la température interne du tube est telle que l'iode et le thallium sont libres. Dans l'arc, leur concentration est importante et les atomes de thallium émettent une couleur verte. Au contact du tube, ils se recombinent. Le cycle est identique à celui d'une lampe à halogène.

Les lampes à vapeur de mercure haute pression sont utilisées pour l'éclairage :

— des grandes surfaces extérieures, comme les parkings, les routes, les carrefours, les parcs industriels ;

— des surfaces extérieures de prestige : rues piétonnières, promenades, places, parcs ;

— des volumes intérieurs relativement importants : grands bureaux, halls d'entrée, surfaces de vente.

Certaines servent à l'éclairage des serres et au forçage des plantes.

Les lampes à iodures métalliques, à cause de leur lumière agréable, sont principalement destinées à l'éclairage des grandes surfaces : stades, parkings, échangeurs, triage ferroviaire.

Lampes à lumière mixte

Nous avons vu que les lampes à vapeur de mercure haute pression n'émettent pas de lumière rouge, ce qui limite leur emploi. Par contre, les lampes à incandescence ont leur spectre situé dans la zone des rouges et infra-

fig. 9

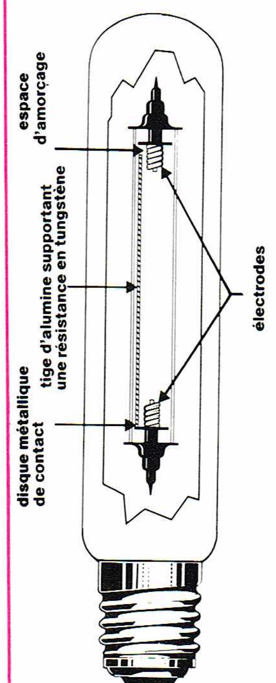

◄▲ *Figure 8 : lampe à vapeur de sodium haute pression, et courbe de répartition spectrale. Figure 9 : détail du dispositif d'auto-allumage d'une lampe à vapeur de sodium haute pression.*

▼ *Tableau IX : variation spectrale en fonction de la pression pour les lampes à vapeur de mercure.*

Tableau IX
Variation spectrale en fonction de la pression pour les lampes à vapeur de mercure

1 atm	Faibles pressions	Raies à 185 et 253,7 nm	Ultraviolet	Lampes germicides et productrices d'ozone
10 atm	Pressions moyennes	Raies à 365 nm, vertes à 546 nm et jaunes à 577 nm	Vert et jaune	
100 atm	Très fortes pressions	Raies plus nombreuses et plus larges, spectre continu	Spectre continu	

Tableau X Caractéristiques des lampes à vapeur de mercure					
Puissance (en W)	Culot	Flux lumineux (en lm)	Efficacité lumineuse (en lm/W)	Dimensions (en mm)	
				Longueur	Diamètre
160	E 27	3 000	18,75	180	75
250	E 40	5 500	22	227	91
500	E 40	13 500	27	275	131
50	E 27	2 000	40	129	55
80	E 27	3 800	47,5	159	70
125	E 27	6 400	51	173	75
250	E 40	12 500	54	223	90
400	E 40	23 000	57,5	286	120
700	E 40	40 000	57,1	330	140
1 000	E 40	55 000	55	395	165
2 000	E 40	120 000	60	430	185
2 000	E 40	190 000	95	430	100

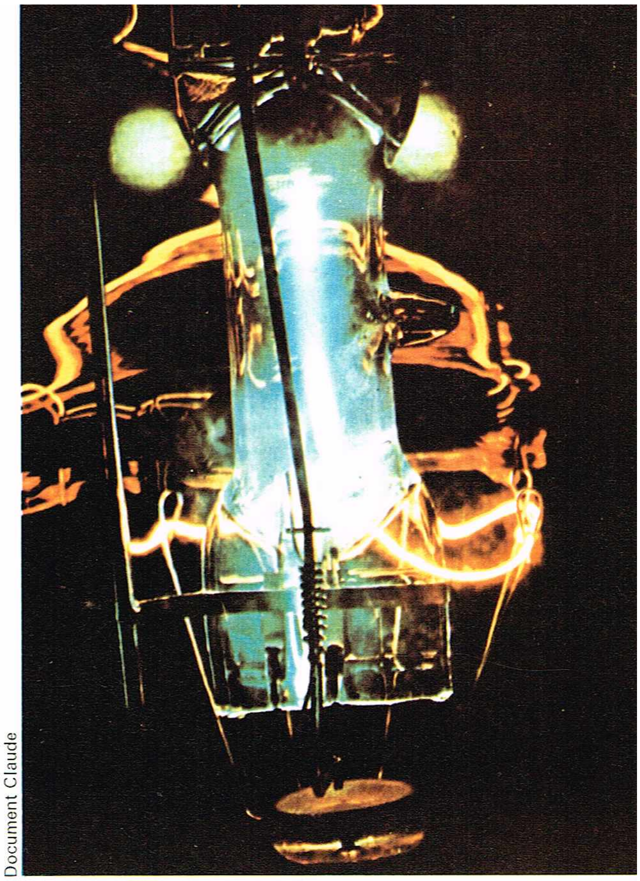

Document Claude

▲ Tableau X. A droite, lampe à éclairage mixte. On distingue le filament incandescent et le tube de décharge en quartz.

▼ Figure 10 : détail d'une lampe fluorescente; a, poudres fluorescentes qui confèrent à la lampe un flux optimal et une faible chute de flux dans le temps; b, anneau de protection qui évite le noircissement des tubes aux extrémités et assure un plus long maintien de l'efficacité lumineuse; c, électrode trispirale qui assure la qualité d'un bon amorçage dans le temps.

rouges, d'où l'idée de grouper dans une seule ampoule les deux types de lampes. Le tube à décharge est monté en série avec le filament de tungstène. Comme une lampe à incandescence, l'ampoule est remplie d'un gaz et sa face interne est revêtue d'une matière fluorescente. Les radiations ultraviolettes du tube sont transformées en radiations visibles grâce à cette couche fluorescente. Le résultat donne une lumière blanche, agréable et bien équilibrée. Le filament, en série avec le tube à décharge, stabilise le courant et fait office de ballast. Ces lampes peuvent remplacer les lampes à incandescence sans modifier le réseau d'alimentation. Leur durée de fonctionnement est six fois supérieure et leur efficacité lumineuse double. On les utilise pour éclairer les grands espaces et locaux industriels, les ateliers, hangars, entrepôts, garages, lieux publics.

Lampes fluorescentes

Ce sont des lampes à cathode chaude, qui fonctionnent en régime d'arc. Le tube, rempli de vapeur de mercure basse pression et de gaz rare, est revêtu intérieurement de matières fluorescentes (*fig.* 10), dont dépend la couleur de la lumière émise. Une décharge dans un tube rempli de vapeur de mercure basse pression émet une radiation ultraviolette de 2 537 Å (ou 253,7 nm) qui excite la fluorescence des matières tapissant le tube. Ces substances fluorescentes sont des poudres : sels minéraux auxquels on ajoute des métaux luminogènes comme le plomb ou le manganèse. Leur fabrication est contrôlée très sévèrement, car une infime quantité d'impureté peut empêcher la fluorescence. Le *tableau* XI donne les couleurs du rayonnement fluorescent de certains sels. Leur combinaison permet d'avoir des gammes de couleurs très étendues, et notamment celles exigées le plus souvent par les clients pour satisfaire leurs besoins.

Le nombre de ces couleurs est limité ; leurs désignations commerciales, qui varient suivant les fabricants, sont le plus souvent les suivantes : blanc industrie, blanc de luxe, blanc soleil de luxe, blanc brillant de luxe, lumière du jour. La qualité de la lumière est caractérisée par la couleur apparente de la lampe qui dépend de la température de couleur :

Couleur apparente	Température de couleur
Chaude (blanc rosé)	< 3 300 °K
Intermédiaire (blanc)	3 300 à 5 500 °K
Froide (blanc bleuté)	> 5 500 °K

et par son indice de rendu des couleurs (IRC) qui caractérise l'aptitude des tubes fluorescents à ne pas déformer l'aspect coloré des surfaces et des objets qu'ils éclairent. Cet indice est normalisé. Il permet, par comparaison entre le tube considéré et une source lumineuse de même température de couleur, dont le rendu des couleurs est bien accepté, d'apprécier la différence d'aspect coloré des objets. Il est exprimé par un chiffre compris entre 0 et 100 : 0 si la différence d'aspect est très importante, 100 si cette différence est nulle. Le Cahier des recommandations relatives à l'éclairage intérieur rédigé par l'Association Française d'Éclairage, donne les valeurs de IRC ou R_a suivantes :

Excellent	IRC ⩾ 90
Bon	80 < IRC < 90
Acceptable	70 < IRC < 80
Médiocre	60 < IRC < 70
Sans exigence	IRC < 60

— Le blanc industrie émet très peu de lumières rouges et bleues, sa teinte est froide, son efficacité lumi-

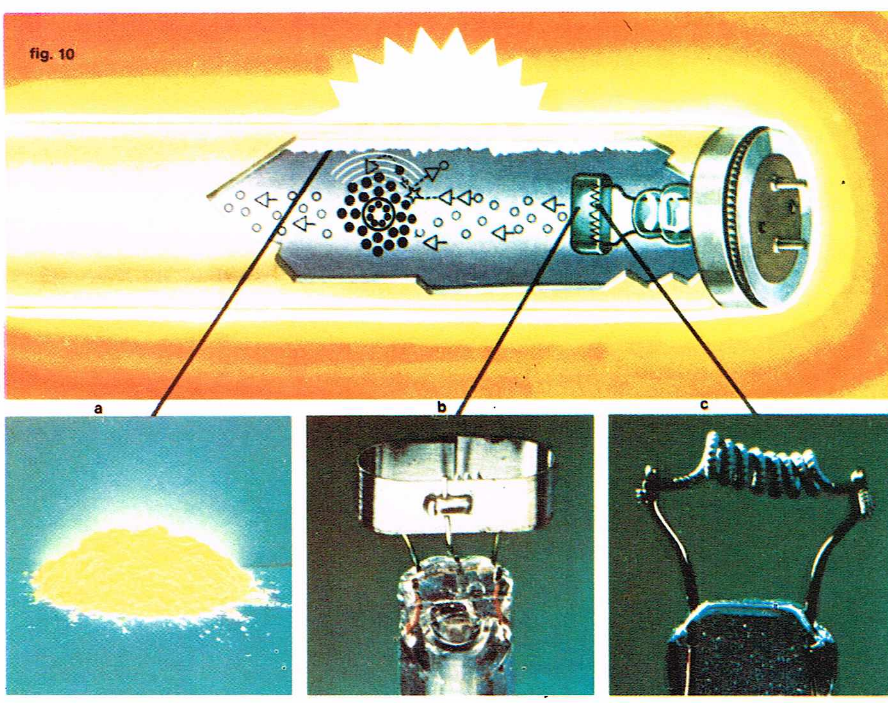

Document Philips

neuse élevée. Il est utilisé dans les installations où le rendu des couleurs a peu d'importance.

— Le blanc de luxe a deux émissions importantes dans les longueurs d'onde 435 et 546 nm et deux plus faibles à 404 et 578 nm. Il est surtout utilisé pour contrôler les blancs et les gris.

— Le blanc soleil de luxe est plus riche en radiations de grandes longueurs d'onde, ce qui lui confère un emploi facile dans les locaux où l'on recherche une ambiance intime et chaude comme les habitations, les hôtels, les salles de spectacle, etc. L'harmonie est excellente quand on associe ces tubes avec des lampes à incandescence.

— Le blanc Z est une teinte agréable à utilisation universelle. Il assure une bonne perception des couleurs et une ambiance agréable (bureaux, salles de classe, commerce).

— Le rose de France de luxe est une teinte rosée flattant les teints. Il crée une ambiance chaude et intime et peut s'associer à l'incandescence (séjour, bains, boucheries, charcuteries, salles de spectacles).

— Le blanc brillant de luxe permet un rendu fidèle des couleurs. Il est employé pour l'éclairage des restaurants, des locaux administratifs, des salles de cours.

— La lumière du jour crée une ambiance froide; elle est difficile à créer artificiellement, car elle varie suivant l'heure, la saison, l'état du ciel. Ces tubes ne doivent être utilisés que pour des éclairements au moins égaux à 500 lux. Ils apportent une excellente définition des couleurs. Recommandés pour l'éclairage des magasins de blanc, teintureries, cabinets dentaires, etc.

La quantité de vapeur de mercure à utiliser doit être dosée très précisément. Pour ce faire, on met le mercure soit directement, soit dans un petit tube en verre fixé par un fil conducteur à proximité de l'électrode. Le tube se rompt à la mise sous tension, le mercure passe en phase vapeur et, pour certains types, se combine à de l'indium qui a été déposé en des endroits précis : sur la coupelle, qui, sous l'effet de la forte température, libère des atomes de mercure de l'amalgame qui s'est formé à la rupture du petit tube; sur le pincement de la lampe; sur le rebord entre le pincement et le culot. En cet endroit, porté à faible température, l'amalgame joue le rôle de régulateur de pression.

Les deux extrémités du tube sont munies d'un culot scellé comprenant deux ergots qui s'insèrent dans une douille support. Il faut tourner la lampe d'un quart de tour pour que les contacts électriques se fassent et qu'elle soit verrouillée. Chaque culot supporte une électrode en tungstène bispiralé ou trispiralé, comme les lampes à incandescence, recouvert d'oxyde pour augmenter le nombre d'électrons émis. Une coupelle entoure les électrodes de manière à maintenir leur température pratiquement constante et à éviter le noircissement du tube aux extrémités par projection de particules arrachées aux électrodes au cours de la décharge.

Le fonctionnement normal a lieu à la température de 45 °C pour laquelle la tension de vapeur du mercure est la pression optimale pour l'émission de la radiation 2 537 Å. Ce critère fixe les dimensions suivant les puissances. Cette température, due à la décharge, est atteinte à condition que la température ambiante soit de 20 °C. Toute variation de température entraîne une baisse sensible du rendement. Généralement, les tubes ont un diamètre extérieur de 32 et 38 mm; ils sont droits ou circulaires. On trouve aussi dans le commerce des tubes de petit diamètre : 16 mm, qui sont très robustes et qui dégagent une très faible quantité de chaleur.

Lampes diverses

Lampes renforcées

Elles sont spécialement étudiées pour résister aux chocs et aux vibrations. Le filament est soutenu par un plus grand nombre de supports. Le culot et les matériaux de connexion permettent de les utiliser jusqu'à 280 °C. Pour certaines, le filament est au rhénium. Leur forme peut être standard; dans ce cas, les culots sont le plus généralement du type B 22, E 27 ou E 40. Les puissances s'échelonnent de 40 à 1 000 watts. Pour les formes sphériques, les culots sont B 22, E 14 et E 27. Les puissances s'échelonnent de 15 à 60 watts. Les fours sont éclairés avec des lampes de ce type.

Lampes veilleuses

Ce sont des lampes de faible puissance (4 watts), de dimensions réduites, surtout destinées aux éclairages de signalisation témoin, de faible ambiance lumineuse, éclairage d'appoint pour télévision. Les culots utilisés sont B 22, E 14 et E 27. Elles peuvent être claires ou opales.

Lampes brûle-parfum

Elles sont de faible puissance : 15 watts, de dimensions réduites, et destinées, comme les précédentes, aux éclairages de signalisation témoin.

Lampes flammes

Dans cette série, on trouve des lampes normales, dépolies intérieur ou dépolies extérieur, des lampes torsadées claires, dépolies intérieur ou dépolies extérieur. On utilise de nombreux types de culots : E 14, E 27, B 15, B 22. Les puissances varient de 25 à 60 watts, les diamètres de 35 à 60 mm et les longueurs de 90 à 145 mm. Ce sont des lampes à incandescence à filament bispiralé.

Lampes bas voltage

Ce sont des lampes à incandescence qui fonctionnent sous les tensions 12, 24, 27 ou 48 volts. Leur puissance s'échelonne de 15 à 500 watts. On les trouve avec des culots E 14, E 27, E 40, B 15, B 22. Elles sont de forme tube ou standard ou sphérique, claires ou dépolies. Elles sont utilisées pour les éclairages de sécurité, baladeuses, machines-outils et éclairages de secours.

Lampes à ozone

Ce sont des lampes à décharge dans la vapeur de mercure. Le verre transmet les radiations de 185 nm, qui sont génératrices d'ozone, et une radiation germicide de 253,7 nm.

Lampes germicides

Ce sont des lampes à décharge dans la vapeur de mercure très basse pression. Elles émettent un rayonnement ultraviolet de 260 nm de longueur d'onde. Elles fonctionnent suivant le même principe que le tube fluorescent, mais ici l'ampoule est transparente et transmet directement le rayonnement ultraviolet.

Lampes solaires

Ces lampes émettent un rayonnement dans la zone ultraviolette qui existe dans le rayonnement solaire, d'où leur nom. Elles émettent un rayonnement visible, un rayonnement ultraviolet et un rayonnement infrarouge.

Lampes à lumière noire

Elles émettent dans la plage de longueurs d'onde comprises entre 350 et 370 nm. Un verre de couleur bleu pourpre foncé élimine par absorption presque toutes les radiations visibles. Seul l'ultraviolet passe. Elles provoquent des phénomènes de fluorescence. Elles sont principalement utilisées dans les industries chimiques, textiles, alimentaires, en philatélie, en minéralogie, pour les expertises médicales et bancaires, dans les spectacles pour améliorer la décoration.

Lampes de signalisation

Elles sont caractérisées par leur très longue durée de vie : 8 000 heures. Elles ont une très bonne efficacité lumineuse. Généralement, leur filament est bispiralé et leur atmosphère est au krypton. Elles sont peu affectées par le grand nombre d'allumages et les vibrations. Les culots sont E 27 et B 22 et les puissances de 25 à 70 watts.

Tableau XI Sels fluorescents	Longueur d'onde correspondant au maximum d'absorption (en nm)	Longueur d'onde correspondant au maximum d'émission (en nm)	Couleur du rayonnement fluorescent
Borate de cadmium	250	615	Rose-rouge
Silicate de cadmium	240	595	Jaune-rose
Silicate double de béryllium et de zinc	253,7	392,5	Blanc-jaune
Silicate de zinc	253,7	525	Vert
Tungstate de magnésium	285	480	Blanc bleuté
Tungstate de calcium	272	440	Bleu

▲ *Tableau XI : couleurs du rayonnement fluorescent de certains sels.*
▼ *Spectre d'une lampe à décharge à iodures métalliques.*

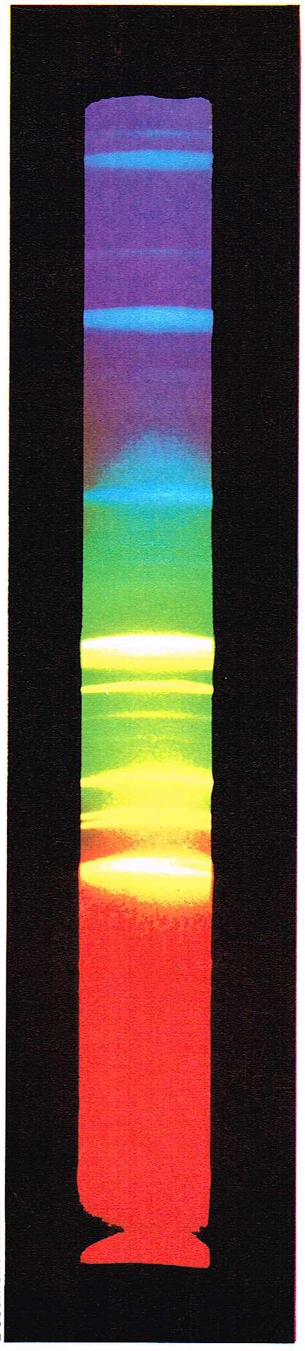

Document Mazda

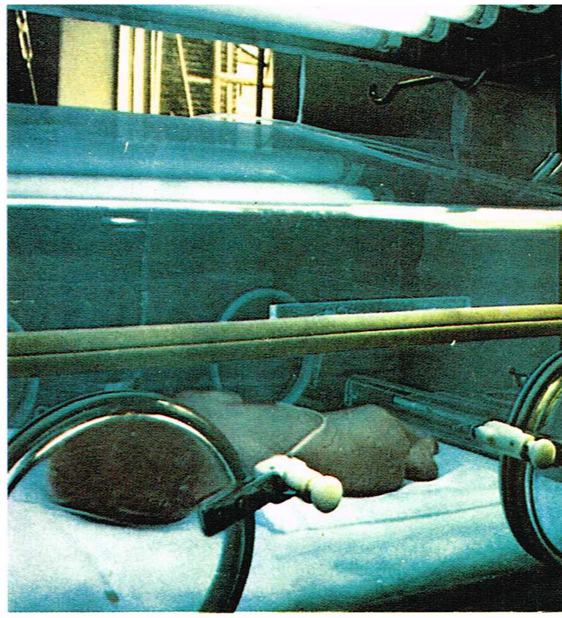

Document Philips

Tableau XII Caractéristiques des lampes à lueur				
Culot	**Tension de fonctionnement (en V)**	**Intensité admise (en mA)**	**Tension d'amorçage (en V)**	**Résistance de stabilisation**
Sans	100-130	0,4-0,6	65	150 k Ω
Sans	200-250			390 k Ω
Sans	220-230	1-1,5	150	68 k Ω
Sans	380			220 k Ω
E 14	220-230	2-3	150	dans
E 14	380			le
E 14	110-130	2-3		culot

fig. 11

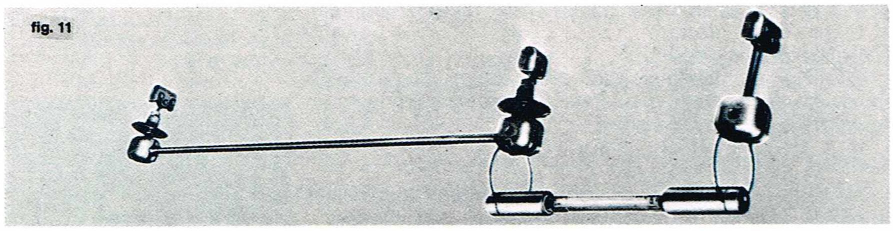

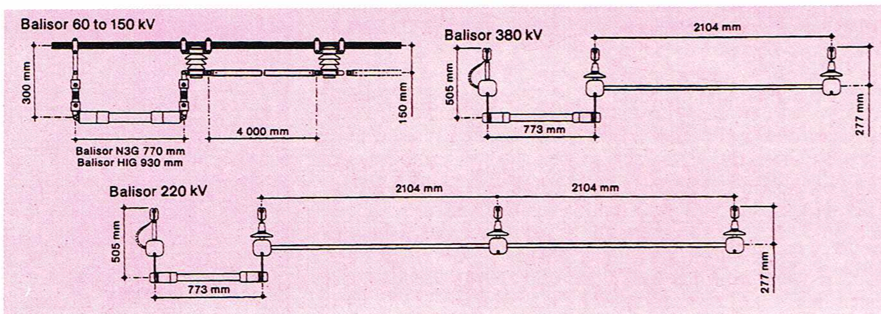

Document Claude

▲ Tableau XII : caractéristiques des lampes à lueur. Figure 11 : lampe pour le balisage des lignes aériennes haute tension. En haut, à droite, utilisation de la lumière bleue pour le traitement de l'ictère néo-natal chez les enfants prématurés.

Elles sont utilisées pour les feux de signalisation, répétiteurs autos et panneaux piétons.

Lampes décor

Ce sont des lampes de formes originales destinées à la décoration et aux éclairages d'ambiance. Elles sont souvent de gros volume. Elles enrichissent les luminaires ou les simplifient jusqu'à les remplacer. Elles sont utilisées dans l'éclairage domestique, les lieux publics, vitrines, commerces, restaurants, hôtels, etc. Les culots utilisés sont E 27 et B 22 et les puissances s'échelonnent de 40 à 100 watts.

fig. 12

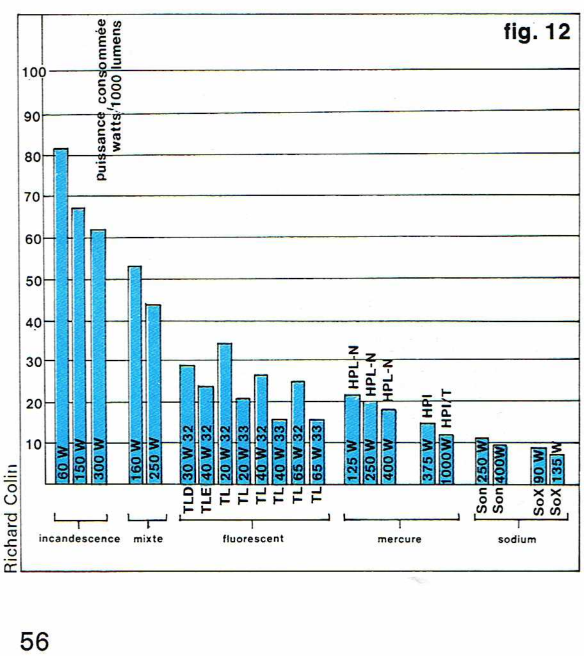

Richard Colin

► Figure 12 : puissance consommée par différents types de lampes pour 1 000 lumens émis.

Lampes infrarouges

Ces lampes sont utilisées pour l'élevage et certaines applications industrielles comme le séchage des peintures, la cuisson superficielle. Le rayonnement infrarouge présente de nombreux avantages relatifs à l'économie et à la simplicité de mise en œuvre. L'entretien est réduit au minimum. Elles possèdent les culots normalisés E 27 et B 22 et se font dans la gamme des puissances de 100 à 400 watts.

Lampes à lueur

Les lampes à lueur sont des lampes à décharge qui fonctionnent au régime de la luminescence. La tension d'amorçage se confond pratiquement avec la tension de fonctionnement normal. Leur consommation est très faible, de l'ordre du milliampère, et leur durée de vie est longue. Leur stabilisation est obtenue avec une faible résistance, généralement incorporée au culot. Pour les lampes sans culot, cette résistance est soudée sur un des fils d'amenée du courant. Le gaz de remplissage est l'argon, qui émet une lumière rouge-orangé. Leur flux lumineux diminue en fonction du vieillissement, ce qui permet de les changer avant qu'elles soient hors d'usage.

Elles sont utilisées pour signaler, dans l'obscurité, la position des interrupteurs. Elles servent de témoin sur les appareils électroménagers. On les monte à l'intérieur de tournevis à manches transparents comme indicateurs de tension ; une amenée de courant est reliée à la lame, l'autre à un œillet métallique sur le manche. La lampe s'allume quand la lame est en contact avec un conducteur sous tension, l'œillet étant relié à la masse par l'intermédiaire de la main de l'électricien. Une forte résistance est placée en série qui élimine tout danger. Le *tableau* XII donne un ordre de grandeur des caractéristiques.

Lampes à filament axial

Ce sont des lampes tubes ayant une arrivée de courant à chaque extrémité. Les culots peuvent être fixés suivant l'axe ou latéralement. Le verre est dépoli ou opale. Elles sont utilisées pour l'éclairage domestique et les vitrines des magasins. Leur puissance varie de 25 à 110 watts, leur diamètre de 21 à 38 mm et la longueur de 221 à 600 mm.

Autres lampes

Il existe d'autres lampes pour des applications bien particulières, comme par exemple les tubes pour la photothérapie en lumière bleue pour le traitement de l'ictère néo-natal chez les enfants prématurés. Ce sont des tubes fluorescents qui utilisent une poudre au pyrophosphate de strontium activée à l'europium, dont 30 % de la puissance totale fournie au tube est rayonnée dans l'infrarouge. La faible émission érythémale (240 nm $\leqslant \lambda \leqslant$ 300 nm) constitue un avantage évident. La longueur d'onde de 313 nm qui apparaît se trouve pratiquement absorbée par la poudre au strontium.

- *Lampes pour le balisage* des lignes aériennes haute tension 60 000 à 380 000 volts et des bâtiments au voisinage des aéroports (*fig.* 11).

Si l'on compare les différents types de lampes, on établit la *figure* 12, qui indique les puissances consommées par 1 000 lumens émis.

◀ *Bureaux de la tour Fiat à la Défense, près de Paris ; éclairage par diffuseurs encastrés.*

Conception - Marketing - Design

Les lampes et les appareils d'éclairage font l'objet de deux branches distinctes. La plupart des constructeurs ont d'ailleurs créé des départements séparés qui assurent leur étude, leur fabrication et la commercialisation de leurs produits. Cette distinction est logique, car les techniques ne sont pas les mêmes, les marchés, les quantités à fabriquer et à vendre non plus. Ces deux lignes de produits se rejoignent au niveau du service commercial pour apporter au client un service complet.

Les clients trouvent dans les catalogues les produits dont ils ont besoin ; cependant, les architectes, les bureaux d'études, les promoteurs, les installateurs ont quelquefois besoin d'appareils particuliers pour offrir des solutions originales à leurs propres clients. Ces demandes sont exécutées d'après un cahier des charges précis dans des délais qui doivent être très courts pour la plupart de ces réalisations. Les études spéciales s'accompagnent très souvent de commandes complémentaires sur catalogue. Ces produits spéciaux se retrouvent alors sur catalogue en raison de leur demande.

Cette évolution des formes et des besoins se transmet alors naturellement du client au fabricant. Les architectes s'intéressent essentiellement aux surfaces de plafond d'un certain module et à l'aspect du produit. En revanche, le souci des bureaux d'études et des installateurs est plus technique, comme l'association de l'éclairage et du conditionnement d'air ou la combinaison éclairage-faux plafond. Certains constructeurs possèdent des bureaux de design prestataires de service dont le rôle est le dessin précis d'appareils à partir d'idées assez vagues.

Le service marketing se préoccupe généralement des lampes et des appareils et agit dans un souci de prospective. Il saisit la tendance dans le domaine des appareils et en fait part au service commercial et au service des ventes. Le marché est partagé en deux : les appareils peu coûteux et robustes, destinés pour la plupart au grand public, et les appareils à haute technicité. Quant aux motivations des clients, elles peuvent être techniques, esthétiques, faire intervenir les questions de prix, de délais de livraison, de rapidité de montage.

On peut parler de design pour les appareils d'éclairage, alors que la forme des sources est surtout le fait de considérations techniques. L'innovation est limitée dans le domaine des appareils. L'apparition de nouvelles lampes exige l'étude, le dessin et la fabrication de nouveaux appareils liés au volume de la source, à son utilisation, à son intégration dans le milieu ambiant, à son prix.

Sources d'alimentation des lampes

Les lampes à incandescence fonctionnent indifféremment sous une tension alternative ou une tension continue. Leur principe est fondé sur l'échauffement d'un filament traversé par un courant ; la loi de Joule s'applique quelle que soit la source. Quant aux tensions, elles sont comprises entre quelques volts et 220 volts.

Les lampes fluorescentes peuvent très bien fonctionner en courant continu. On les alimente en courant alternatif, car : c'est la forme de courant distribuée par EDF ;

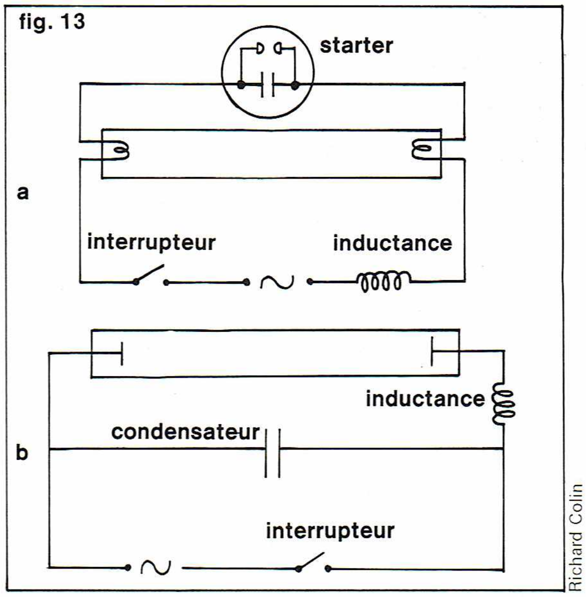

◀ *Figure 13 : circuits d'allumage ; a, par préchauffage des électrodes ; b, par résonance.*

chaque électrode fonctionnant alternativement en anode et en cathode, il y a moins d'usure des filaments ; il est plus facile de produire une surtension et de stabiliser un arc en alternatif.

Amorçage des lampes à décharge

Les procédés sont différents selon que les lampes sont à cathode froide ou à cathode chaude.

Pour les lampes à cathode froide, il faut créer une chute de tension après l'amorçage, soit en mettant en série dans le circuit une inductance, soit en alimentant le tube directement aux bornes du secondaire d'un transformateur à fuite. Pour les lampes à cathode chaude, les principaux types d'amorçages sont les suivants.

- **Allumage instantané.** Il peut être obtenu en plaçant, à la fabrication, une bande conductrice à l'intérieur ou à l'extérieur du tube suivant une génératrice de manière à diminuer la tension d'amorçage à froid.
- **Allumage par préchauffage.** Ce type d'allumage nécessite un préchauffage des électrodes suivi d'une surtension pour provoquer l'amorçage de la décharge. Le principe est le suivant : à la fermeture de l'interrupteur I, le courant traverse successivement une inductance L, les électrodes (qui s'échauffent) et un starter qui n'est autre qu'un interrupteur automatique qui s'ouvre après un temps très court. Cette ouverture provoque une surtension aux bornes du tube, à cause de la présence de L, qui amorce la décharge (*fig.* 13a).

Le starter à gaz est couramment utilisé, il se compose d'un tube à décharge au néon contenant un bilame. A la fermeture du circuit, un arc prend naissance dans le tube qui déforme le bilame par échauffement et ferme le circuit. La décharge ayant disparu, le tube se refroidit, le circuit s'ouvre et la tension est appliquée aux bornes du tube. En parallèle avec le starter, on place toujours un condensateur d'antiparasitage.

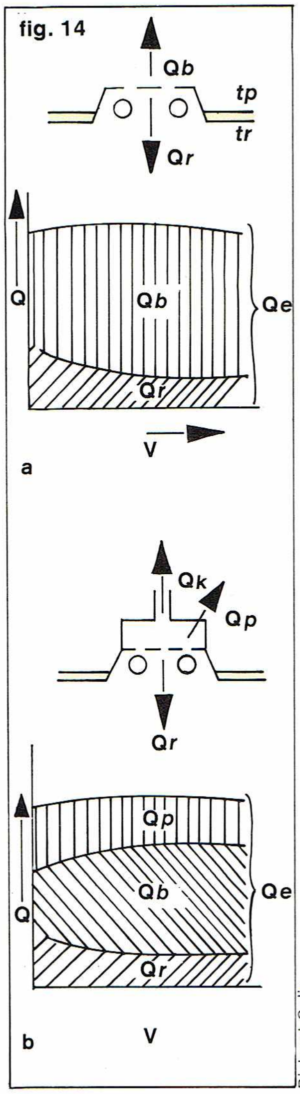

▲ *Figures 14 a et b : voir développement dans le texte (d'après document Philips).*

▼ *Figure 14 c : baisse du flux lumineux en fonction de la durée d'allumage.*

• **Allumage par résonance.** Il utilise un circuit résonnant inductance-condensateur qui génère une surtension aux bornes du tube à la mise sous tension et provoque l'allumage (*fig.* 13b).

Particularités de fonctionnement

Les lampes possèdent un certain nombre de particularités qu'il est intéressant de connaître quand on établit un projet. Ce sont principalement les influences de la température et de la tension, les effets stroboscopiques, le papillotement, les parasites des ondes hertziennes, la durée de vie, etc.

Influence de la température

• **Lampes à incandescence** : le flux lumineux varie très peu avec la température.

• **Lampes à décharge.** Contrairement aux précédentes, la variation du flux émis est très importante. Cela provient du fait que la pression de la vapeur de mercure à l'intérieur du tube est fonction de la température. Les tubes sont étudiés pour que le maximum de flux soit obtenu à 20 °C. Les appareils d'éclairage sont conçus en conséquence : aération et espacement des tubes.

La quantité de chaleur évacuée par le luminaire et l'accroissement du rendement lumineux dépendent du type de luminaire et du volume d'air repris. Il en est de même de la perte de charge dans le luminaire et du niveau de bruit créé par le flux d'air le traversant. Les diagrammes thermique et aéraulique précisent les relations entre ces diverses grandeurs. Sur le diagramme thermique sont indiquées les relations entre le débit d'air et l'accroissement du rendement lumineux, d'une part, et les puissances dissipées dans certaines conditions, d'autre part. Si V est le volume d'air exprimé en m^3/h, on pourra tracer sur ce diagramme, par exemple, les courbes *fig.* 14 a et b :

Qe : pourcentage de la puissance totale absorbée en fonction de l'air extrait;

Qb : pourcentage de la puissance totale extraite par l'air aspiré;

Qr : pourcentage de la puissance totale absorbée par le luminaire, directement rayonné dans le local;

on a alors $Qe = Qb + Qr$.

Pour une reprise sous gaine, on peut distinguer :

Qk : pourcentage de la puissance totale absorbée extraite dans la gaine de reprise;

Qp : pourcentage de la puissance totale absorbée diffusée dans le plénum.

Dans ce cas : $Qe = Qr + Qk + Qp$ (extrait d'une étude Philips).

A l'extérieur, il faut se prémunir du froid qui est encore plus néfaste que la chaleur.

Influence de la tension

Les variations de tension ont des influences considérables, pour les lampes à incandescence, sur l'efficacité lumineuse, la durée de vie, la puissance absorbée.

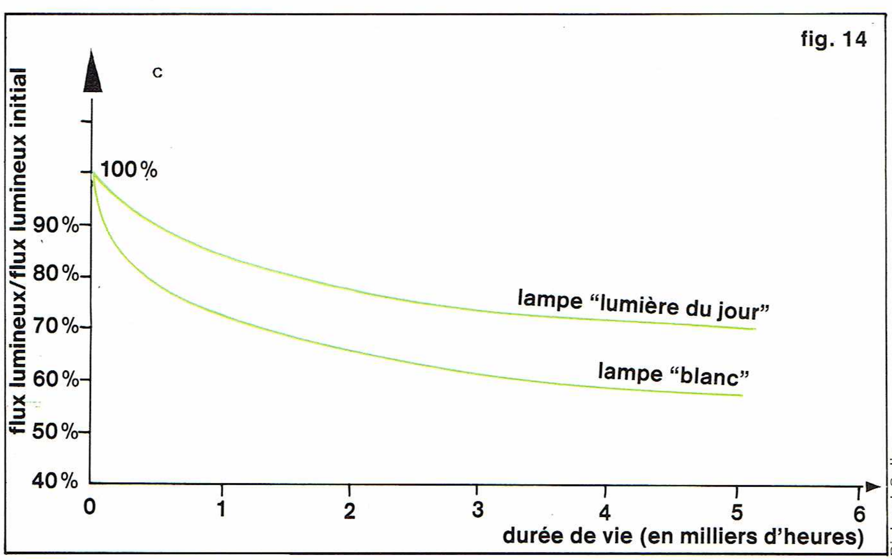

Ses influences sont également importantes pour les lampes à décharge. Les caractéristiques varient linéairement pour les faibles variations de part et d'autre de la valeur nominale. Si nous prenons une augmentation de tension de 10 %, l'intensité du courant croît de 25 à 30 % et la puissance consommée de 25 % environ; le flux lumineux croît de 15 à 20 % et l'efficacité lumineuse de 5 à 10 %. Quand la tension décroît, l'allumage peut devenir impossible par insuffisance du préchauffage des électrodes; des phénomènes de battement peuvent aussi apparaître.

Effets stroboscopiques et papillotement

Les lampes sont généralement alimentées en courant alternatif dont les passages à zéro entraînent une diminution de la température du filament, donc une diminution d'éclairement, et les passages aux maximums entraînent une augmentation de cet éclairement. Ces variations périodiques de flux lumineux ont une faible amplitude pour les lampes à incandescence qui possèdent des filaments à forte inertie calorifique. Par contre, pour les lampes fluorescentes, chaque passage à zéro de la tension annule le rayonnement ultraviolet; ce phénomène se produit 100 fois par seconde et génère un papillotement. Du fait des propriétés phosphorescentes des poudres, le flux lumineux ne cesse jamais complètement. Ce papillotement apparaît surtout aux extrémités des tubes et quand les lampes sont usées.

On supprime ce papillotement en alimentant deux tubes dont on déphase les tensions. On peut aussi alimenter trois tubes sur les trois phases d'un réseau triphasé dont les tensions sont naturellement déphasées de 120° les unes par rapport aux autres. On comprend aisément que le papillotement s'accentue quand la fréquence diminue. Si ces tubes éclairent des pièces en mouvement, des effets stroboscopiques gênants peuvent apparaître.

Les parasites des ondes hertziennes

Ces tubes à décharge produisent des rayonnements électromagnétiques qui se traduisent par des parasites dans les postes de réception radiophonique placés à proximité. Ces rayonnements ont pour origine le rayonnement direct des lampes ou le rayonnement, ou conduction, du circuit d'alimentation. La portée est faible, de l'ordre de quelques mètres. On supprime ce phénomène en éloignant l'antenne du récepteur ou en filtrant le courant d'alimentation.

La durée de vie

Pour les lampes à incandescence, la durée de vie moyenne est fixée à 1 000 heures par la norme C 72-100. Quand le flux lumineux a diminué de 20 %, on estime que la vie de la lampe a pris fin. Pour les lampes à décharge, la durée de vie est supérieure pour une même diminution du flux lumineux, à condition de respecter les clauses ci-après. Pendant les 100 premières heures, la diminution du flux lumineux peut atteindre 15 à 20 % du fait de la décroissance de l'efficacité des poudres fluorescentes par suite de la formation d'une pellicule métallique de mercure sur les parois du tube. Après ces cent heures, la décroissance est lente. Le flux lumineux atteint 70 à 80 % de la valeur, par rapport au flux initial, aux environs de 100 h et 60 à 70 % au bout de 5 000 h (*fig.* 14 c).

La durée de vie des tubes fluorescents dépend de la tension d'alimentation, de la température ambiante, des cycles d'allumage, de l'intensité du courant de décharge, du préchauffage insuffisant. Ce sont surtout les allumages qui provoquent l'usure des électrodes, c'est pourquoi des allumages répétés diminuent considérablement la vie de la lampe.

Principes d'un bon éclairage

Il est souhaitable de respecter six principes généraux pour obtenir un éclairage rationnel : avoir un éclairement convenable, éviter les ombres accentuées, éviter l'éblouissement, réaliser un éclairement uniforme, choisir la teinte de la source, entretenir soigneusement les appareils.

Éclairement convenable

La luminance est l'élément le plus important de ce principe, quoique l'éclairement soit la base utilisable

dans les calculs des projets. L'éclairement permet la visibilité détaillée des objets sans fatigue des yeux. Pour trouver les niveaux d'éclairement corrects, il faut se souvenir de deux notions : le confort visuel qui détermine le bien-être de l'individu, et la performance visuelle, que l'on peut mesurer, et qui détermine la rapidité et la précision du travail effectué. Il faut donc connaître au départ la teinte de la tâche, le détail, le contraste avec le fond sur lequel repose l'objet, la distance d'observation, les dimensions des détails, le mouvement des objets, les temps d'observation... En règle générale, il faut majorer l'éclairement des objets en mouvement et de ceux qui nécessitent une observation prolongée.

Éviter les ombres accentuées

C'est moins les ombres que le contraste de luminances qui fatigue la vue. Pour les éliminer, il faut multiplier le nombre de sources ou placer les foyers lumineux dans des appareils qui augmentent la surface éclairante. L'éclairage indirect est une bonne solution, mais il supprime le relief, ce qui peut être un inconvénient.

Éviter l'éblouissement

L'éblouissement est toujours néfaste, qu'il soit obtenu par effet direct ou effet indirect, par « réflexion ». On doit choisir des appareils dont la luminance soit suffisamment faible pour ne pas provoquer de gêne.

Éclairement uniforme

On a toujours intérêt à éclairer uniformément le plan de travail pour augmenter les facultés visuelles de l'œil.

Teinte de la source

Il faut, en règle générale, que les sources diffusent une lumière qui s'approche le plus possible de la lumière naturelle. Si ce n'est pas le cas, la lumière artificielle doit altérer au minimum les couleurs des objets, notamment dans certaines applications comme les galeries d'art, les magasins de tissus. Dans les salons, salles de réunions, il ne faut pas que les visages soient « décolorés ».

Entretien des appareils

Les appareils doivent être nettoyés régulièrement et soigneusement; ils doivent donc être accessibles. L'éclairement peut décroître de 30 à 40 % en quelques semaines suivant l'empoussièrement.

Modes d'éclairage

Considérons les principaux modes d'éclairage pour les lampes à incandescence et les tubes fluorescents (*tabl.* XIII).

Éclairage direct. Toute la lumière est dirigée vers le bas. Bien que déconseillé, ce mode d'éclairage constitue les 3/4 des modèles; il doit donc être bien choisi et bien installé.

Éclairage semi-direct. 60 à 90 % de la lumière sont dirigés vers le plan de travail, le reste est envoyé vers le plafond.

Éclairages direct-indirect et mixte. La répartition se fait également vers le haut et vers le bas.

Éclairage indirect. 90 à 100 % de la lumière sont dirigés vers le haut qui la diffuse si le plafond est une surface claire. C'est un éclairage « doux » qui atténue les ombres. Utilisé seul, il peut donner un aspect monotone à la salle. Il est à conseiller avec un plafond blanc et une source lumineuse de forte puissance.

Éclairage semi-indirect. 60 à 90 % du flux sont dirigés vers le plafond.

Le *tableau* XIV donne en valeurs relatives l'éclairement du plan de travail en fonction de la puissance utilisée.

Tableau XIII
Les principaux modes d'éclairage pour les lampes à incandescence et les tubes fluorescents

Modes d'éclairage	Pourcentage d'éclairement vers le haut	Pourcentage d'éclairement vers le bas
Lampes à incandescence		
Direct	0	75
Semi-direct	18	65
Direct-indirect	45	40
Mixte	40	43
Semi-indirect	60	22
Indirect	90	0
Lampes fluorescentes		
Lampes nues	50	50
Direct	0	75
Semi-direct	22	49
Direct-indirect	40	38 } suivant le type
Direct-indirect	51	40 } d'appareil

Tableau XIV
Éclairement (en valeurs relatives) d'un plan de travail en fonction de la puissance utilisée et du mode d'éclairement

Puissance \ Mode	Direct	Semi-direct	Mixte	Semi-indirect	Indirect
40 W	62	50	40	33	20
60 W	92	75	60	50	32
80 W	—	—	80	65	45
100 W	—	—	98	83	55

▲ ***Tableau XIII :** les principaux modes d'éclairage pour les lampes à incandescence et les tubes fluorescents.*
***Tableau XIV :** éclairement d'un plan de travail en fonction de la puissance utilisée et du mode d'éclairement.*

Propriétés optiques de la matière

Quand un faisceau lumineux atteint une surface de séparation de deux milieux, il apparaît des phénomènes de réflexion, d'absorption, de transmission et de diffusion.

Réflexion

Quand un rayon lumineux tombe sur une surface et est renvoyé avec ou sans modification des ondes qui le constituent, on dit qu'il y a réflexion. Le point où tombe le rayon lumineux est le point d'incidence. L'angle que fait la normale à la surface avec le rayon émis est l'angle d'incidence; l'angle entre cette normale et le rayon réfléchi est l'angle de réflexion. Si ces deux angles sont égaux, on dit qu'il y a réflexion spéculaire.

Une glace donne une réflexion spéculaire, car les rayons réfléchis donnent l'image exacte sans déformation de l'objet émetteur. Les métaux utilisés sont l'argent poli (qui réfléchit 90 % de la lumière), l'aluminium poli (qui ne réfléchit que 62 % de la lumière), le verre argenté. Si la surface est rugueuse et composée de nombreuses petites particules réfléchissantes, la réflexion est diffuse, il y a dispersion; on trouve dans cette catégorie le papier blanc mat, la neige, les plafonds en plâtre, le papier buvard, les peintures blanc mat. Une réflexion ni spéculaire ni diffuse est mixte (*tableau* XV).

Absorption

L'absorption a lieu quand un rayon lumineux traverse une atmosphère peu transparente comme de la fumée. Le rayon lumineux émis peut être partiellement ou totalement absorbé, c'est le cas de la rencontre d'un rayon avec un corps transparent coloré : une partie est complètement absorbée par l'écran, l'autre le traverse. L'absorption est neutre si toutes les longueurs d'onde sont absorbées dans le même rapport, sélective si le rapport n'est pas le même.

Réfraction

Quand un rayon lumineux passe d'un milieu à un autre, il est dévié; on dit qu'il y a réfraction. C'est le changement de la vitesse de la lumière qui provoque ce changement de direction. Si le nouveau milieu est plus dense, la vitesse est réduite, et réciproquement.

▶ *Tableau XV : réflexion de la lumière sur différents matériaux et peintures.*

Tableau XV Réflexion de la lumière sur différents matériaux et peintures	
Peintures et matériaux	**Facteur de réflexion**
Peintures blanches	0,70 à 0,80
Peintures grises	
100 g de blanc de zinc et :	
5 g de noir d'ivoire	0,66
25 g de noir d'ivoire	0,36
40 g de noir d'ivoire	0,23
50 g de noir d'ivoire	0,19
Peintures roses	
100 g de blanc de zinc et :	
5 g de terre de Sienne brûlée	0,65
25 g de terre de Sienne brûlée	0,44
40 g de terre de Sienne brûlée	0,37
50 g de terre de Sienne brûlée	0,30
Papiers peints unis	
Blanc	0,67 à 0,76
Crème	0,69
Paille	0,65
Chamois	0,65 à 0,66
Gris trianon	0,78
Pierre	0,37
Gris ardoise	0,19
Noir	0,04
Matériaux	
Marbre blanc	0,83
Carreau de faïence blanche	0,70
Tôle émaillée blanche et mate	0,60 à 0,83
Tôle émaillée polie	0,65 à 0,77
Argent poli	0,90 à 0,92
Aluminium oxydé ou dépoli	0,70 à 0,89
Chrome poli	0,63 à 0,66
Aluminium poli	0,62
Acier inoxydable au chrome-nickel	0,55
Brique amiante blanche	0,62
Brique jaune	0,45
Brique rouge	0,20
Ardoise	0,10

▼ *Tableau XVI : éclairements moyens recommandés en fonction de l'activité par la Fédération des associations d'éclairage de l'Europe occidentale.*

Tableau XVI Éclairements moyens recommandés en fonction de l'activité par la Fédération des associations d'éclairage de l'Europe occidentale		
Type d'éclairage	**Éclairement (en lux)**	**Type d'activité ou exemple**
Général, mais activité intermittente ou tâche grossière	20 30 50 100 150	Minimum pour la circulation à l'extérieur Cours et entrepôts Parkings, allées de communication Chargement et déchargement, quais et docks Voies de circulation intérieure, escaliers, magasins
Général, lieux de travail continu	200 300 500 750 1 000	Minimum pour la tâche visuelle Grosse mécanique, tâches industrielles diverses, lecture et écriture Mécanique moyenne, imprimeries, dactylographie, travaux de bureaux Bureaux de dessin, mécanographie Mécanique fine, gravure, comparaison des couleurs, dessins difficiles
Général ou localisé	1 500	Mécanique de précision, électronique fine contrôles divers
Localisé	2 000	Tâches très difficiles dans l'industrie ou le laboratoire

Transmission

La transmission est le passage de rayons lumineux dans un milieu donné sans que les fréquences qui le composent soient modifiées. En traversant ce milieu, une partie est absorbée. Le rapport entre le flux sortant (transmis) et le flux entrant (incident) est appelé facteur de transmission.

Valeurs de quelques éclairements et luminances

La sensation de confort n'est pas seulement liée à la possibilité d'exécuter correctement une tâche. Un éclairement faible, suffisant pour une gare de triage par exemple, ne le serait pas pour écrire et conduirait à une sensation très désagréable. 2 000 lux est la valeur que des observateurs ont accordée pour avoir un niveau d'éclairement suffisant dans tous les cas avec des sources non éblouissantes. La notion de confort est ressentie de façon différente suivant les époques et les pays, elle varie avec le niveau économique. Les recommandations des États-Unis ou de la Suède sont supérieures à celles de l'Europe occidentale; elles sont remises à jour périodiquement pour suivre les progrès techniques. Le *tableau* XVI donne les éclairements moyens recommandés en fonction de l'activité par la Fédération des associations d'éclairage de l'Europe occidentale. « Ces éclairements sont ceux à obtenir au milieu de la période s'étendant de la mise en service jusqu'au premier entretien. Ils dépendent donc de l'empoussièrement de l'installation, de la chute de flux des lampes... »

L'œil humain est sensible à des éclairements compris entre 1/3 000e de lux et 100 000 lux. Par jour clair, près d'une fenêtre à l'intérieur d'une habitation, l'éclairement est de quelques centaines de lux. A l'ombre, en plein air, quelques milliers de lux. En été, en plein soleil, à midi, l'éclairement est de 100 000 lux. D'autres recommandations donnent un ordre de grandeur des luminances en fonction des sources et des éclairements minimaux en fonction des travaux.

Les appareils d'éclairage ou luminaires

Un luminaire est un appareil servant à répartir, filtrer ou transformer la lumière des lampes; il comprend toutes les pièces nécessaires pour fixer et protéger les lampes, et pour les relier au circuit d'alimentation. Il fournit une autre répartition des intensités lumineuses en évitant des luminances gênantes dans le champ visuel et en rendant plus efficace l'éclairage du plan de travail.

Une première caractéristique importante est la répartition des intensités dans les zones supérieure et inférieure. La norme UTE 71-121 les répartit dans 5 zones de l'espace : l'hémisphère inférieur est découpé en 4 zones, la cinquième étant l'hémisphère supérieur.

Une seconde caractéristique est le rendement, qui est le rapport du flux lumineux sortant du luminaire dans les conditions normales d'emploi au flux qu'émettrait la lampe ou les lampes équipant ce luminaire et fonctionnant en dehors de lui. Le rendement total est égal à la somme du rendement hémisphérique inférieur et du rendement hémisphérique supérieur. La répartition hémisphérique supérieure ne possède qu'une classe désignée par la lettre T. La répartition inférieure, qui joue un rôle beaucoup plus important que la précédente, possède 10 classes désignées par les lettres A à J. La Commission internationale de l'éclairage (CIE) classe les luminaires d'éclairage intérieur en fonction de la distribution du flux lumineux.

Parmi les autres caractéristiques, on trouve l'esthétique qui a un caractère souvent déterminant dans le choix; les fabricants ont généralement toutes les possibilités pour allier l'esthétique à la technique. Viennent ensuite des qualités pratiques comme les facilités de pose et dépose, l'empoussièrement, la tenue dans le temps des matériaux, etc. Tous les luminaires doivent être conformes aux normes en vigueur relatives à la protection électrique, à la protection mécanique et au comportement thermique.

Protection électrique
Il s'agit d'éviter tout contact direct avec les pièces sous tension quand on retire toutes les pièces sans l'aide d'un outil, sauf les lampes et les chemises de douilles. Pour les parties métalliques qui pourraient être mises sous tension par contact indirect, les appareils sont classés en quatre catégories suivant les normes NF C 20-030 et NF C 71-110 (*fig.* 15).

Protection mécanique
La Commission internationale de l'éclairage a établi une classification relative au degré de protection des luminaires contre la pénétration de l'humidité, de la poussière et à la résistance aux chocs. Cette classification est donnée par la norme NF CF 71-110.

Comportement thermique
Les températures doivent être limitées pour ne pas causer ou alimenter des incendies. On utilise les symboles suivants :
M0 = incombustible
M1 = non inflammable
M2 = difficilement inflammable
M3 = moyennement inflammable
M4 = facilement inflammable
M5 = très facilement inflammable

Luminaires pour lampes à incandescence

Décoration

On trouve sur le marché plusieurs centaines de modèles de luminaires destinés à la décoration, aussi bien pour usage intérieur qu'extérieur. Le design joue un rôle prépondérant, car, mis à part la douille, le fil d'alimentation et éventuellement le réflecteur, tout le reste n'est qu'habillage. L'esthéticien peut jouer à l'infini avec les formes.
On trouve des **spots** très simples qui ne comportent qu'un tube : corps pour protéger la douille et une potence qui permet le réglage de l'orientation et la fixation du luminaire au mur, au plafond ou sur le sol, soit en positionnement fixe, soit sur rail conducteur. Le tube peut être remplacé par une sphère ou un profilé.
Si on lui adjoint un réflecteur, le spot devient **projecteur.** Si on supprime la potence, les luminaires précédents deviennent des plafonniers que l'on fixe au plafond par une extrémité du tube. L'ensemble peut être encastré ou non. La douille peut être fixée à un abat-jour ou à un globe et suspendue à un fil. Si l'on emploie les spots à l'extérieur, l'étanchéité corps-lampe est assurée par un joint le plus souvent en silicone, et les lampes utilisées sont à réflecteur en verre pressé résistant

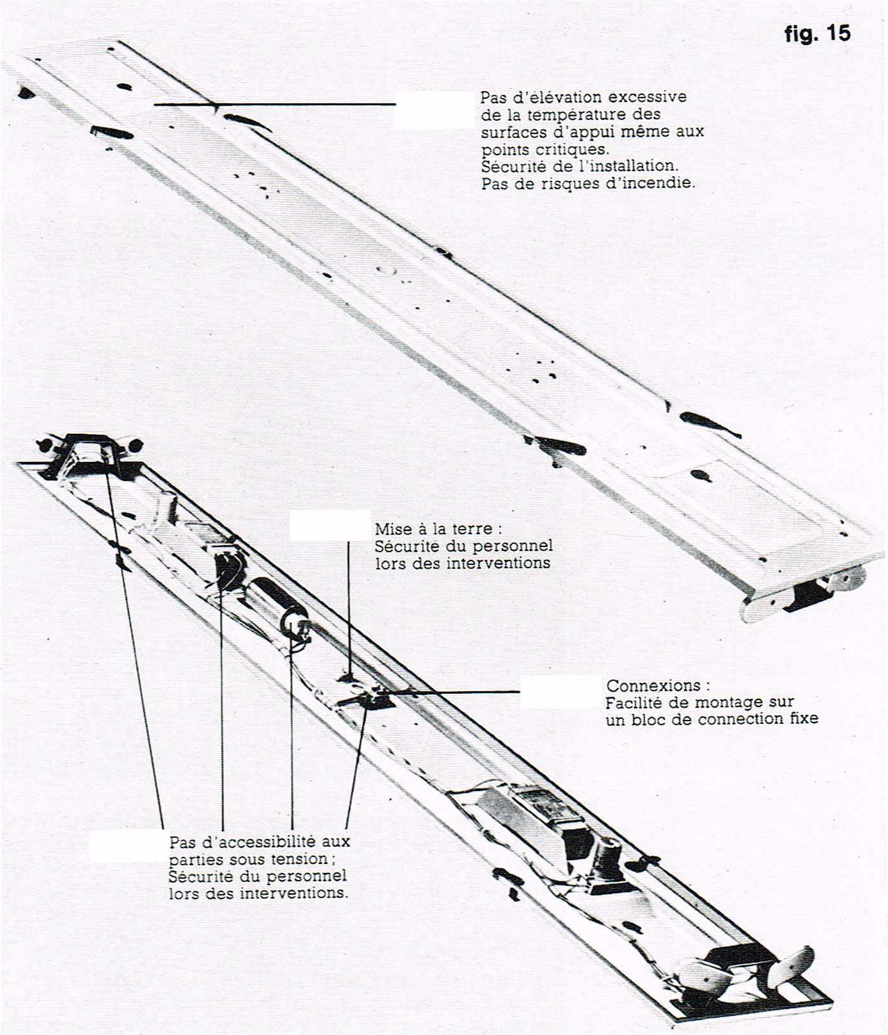

Document Philips

▲ *Figure 15 : dispositifs de sécurité (respect de la norme C 71-110).*

▼ *Spots lumineux sur patère (à gauche) et sur rail (à droite).*

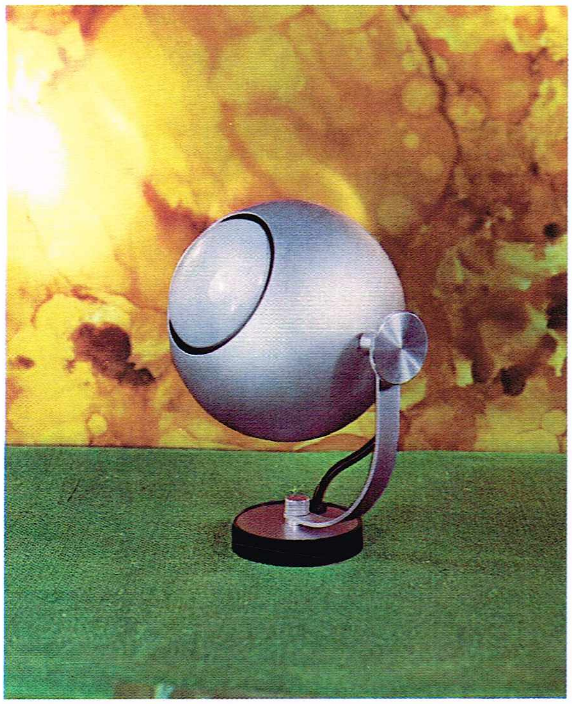

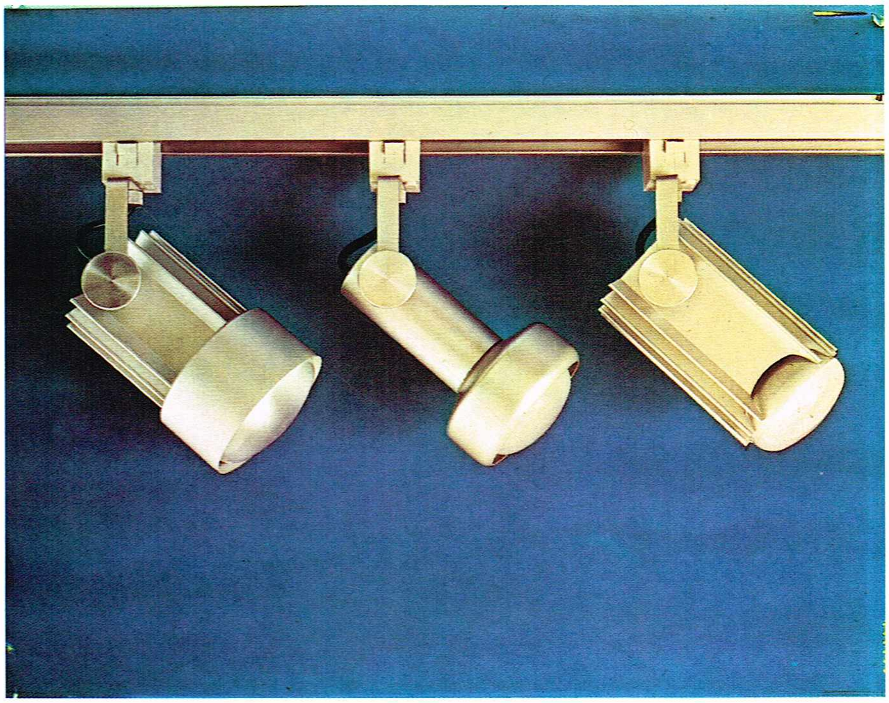

▶ *Appareils décoratifs pour l'éclairage des voies tertiaires.*

Document Philips

aux chocs thermiques sans protection particulière. Pour l'extérieur, on trouve une gamme d'appareils décoratifs, antivandalisme ou non, pour l'éclairage des voies tertiaires, le balisage des chemins piétonniers, l'éclairage des massifs.

Hublots étanches

Ils sont composés d'un socle en fonte et d'une verrine en verre maintenue par des vis imperdables. L'étanchéité est assurée par un joint souple en caoutchouc. Un presse-étoupe est placé aux entrées de courant. Le verre peut être circulaire ou allongé.

Hublots antidéflagrants

Ces luminaires sont utilisés dans les lieux où l'on peut trouver des vapeurs, gaz inflammables ou liquides volatils. Ils ne sont pas détériorés par une explosion interne, et surtout laminent la flamme produite, l'empêchant de se propager à l'extérieur. Leurs corps sont en acier ou en fonte et les vasques en verre dur.

Projecteurs pour lampes tungstène-halogène

Ils sont composés d'un corps, généralement en alliage léger et avec des ailettes de refroidissement, à l'intérieur duquel se place un réflecteur en aluminium brillanté martelé protégé de l'extérieur par une glace de sécurité en verre trempé. Le corps est fixé à son support par l'intermédiaire d'une fourche qui permet une orientation variable. Le marché offre aux clients des projecteurs étanches pour lampes de 250 à 1 500 watts. Ils sont principalement utilisés pour l'éclairage des stades, des terrains de sport, des salles omnisports, des patinoires, des piscines, des aérodromes, des chantiers, des parkings, illuminations, son et lumière, panneaux publicitaires, vitrines de magasins, éclairages de frondaisons, etc.

Projecteurs et lanternes de chantier

Ce sont des appareils hermétiques, étanches ou non, certains pouvant résister aux chocs, d'autres n'ayant qu'une grille pour protéger la lampe. Quand il existe, le verre trempé est souvent protégé par un grillage. Le corps est maintenu par une potence ou suspendu à un crochet. Certains modèles acceptent des lampes de 500 watts. Ils sont utilisés pour l'éclairage à petite, moyenne et grande distance de chantiers de travaux publics, l'éclairage d'accès et de circulation, de balisage.

Réflecteurs pour l'industrie

Ces luminaires, très simples, sont constitués d'un réflecteur en tôle émaillée ou laquée blanc ou en aluminium. Ils sont suspendus au plafond par un tube. On les emploie pour éclairer les ateliers.

▶ *Éclairage d'un hangar de réparation Air France de réacteurs à Roissy.*

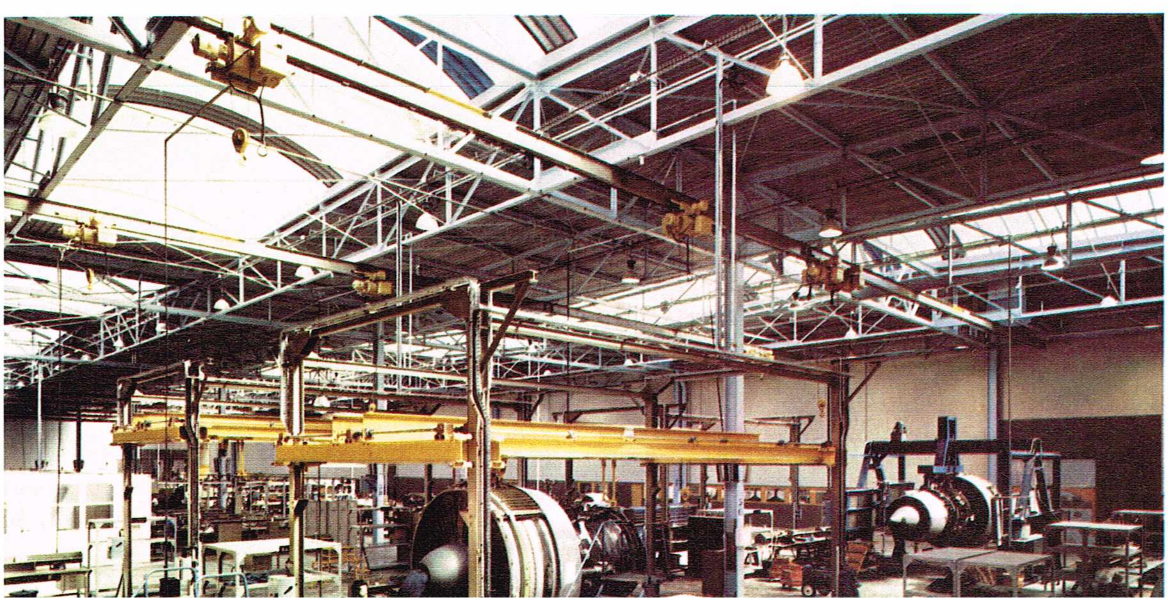

Luminaires pour lampes fluorescentes

Appliques

Comme pour les luminaires utilisés en décoration avec les lampes à incandescence, on trouve sur le marché quantité de modèles suivant la forme de l'habillage. Quel que soit son « design », une applique est toujours constituée d'une réglette en métal ou en matière plastique contenant le ballast d'alimentation et de deux embouts qui supportent la lampe. Cette dernière peut être nue ou protégée par une vasque diffusante ou lisse. Les applications sont multiples pour l'éclairage intérieur des entrées, cuisines, salles de bains, vitrines, etc.

Diffuseurs non encastrés

Ils sont constitués d'une platine métallique emboutie qui sert à la fixation de l'appareil et de support aux douilles, starter, dominos, fils, etc., et d'un diffuseur. Leurs lignes sont sobres, ce qui permet de les mettre en place sans problème particulier d'esthétique. Le panneau diffusant peut être une simple plaque ; dans ce cas, l'éclairage est direct ou peut posséder des panneaux latéraux qui augmentent l'angle d'ouverture du diagramme des intensités lumineuses. Les diffuseurs peuvent être des vasques en matière plastique, des grilles métalliques ou plastiques, des lames métalliques ou plastiques. Un réflecteur peut être placé derrière la lampe. Ils peuvent être équipés d'un nombre variable de lampes, le plus souvent une ou deux. On peut les fixer directement au plafond ou les suspendre. Leur forme est le plus souvent rectangulaire, quelquefois circulaire pour les tubes de même forme. Ces luminaires sont très utilisés dans les bureaux, magasins, salles d'attente, laboratoires, salles d'examen, salles de dessin industriel, bibliothèques, salles d'ordinateurs, cantines, restaurants, galeries d'art, etc.

Diffuseurs encastrés

.Ces appareils ont été créés de manière à s'intégrer dans les faux plafonds de plus en plus utilisés dans les bâtiments modernes. Il faut qu'ils s'adaptent parfaitement aux modules du plafond, que leur mise en place soit simple et rapide, que la maintenance puisse se faire sans difficulté. Leur esthétique doit être étudiée de manière à pouvoir résoudre les problèmes d'ambiance qui se posent aux architectes.

Ils sont constitués d'un caisson et d'un diffuseur. Le caisson a le même rôle que la platine des diffuseurs non encastrés. Les vasques peuvent être satinées, à pointe de diamant, ou des grilles entièrement métalliques ou en matière plastique. Ils sont utilisés pour l'éclairage des magasins, halls de réception, couloirs, etc., de la même façon que les systèmes non encastrés.

Diffuseurs encastrés à reprise d'air

Deux raisons principales sont à l'origine de la création de ce luminaire (*fig.* 16) :

— le conditionnement d'air qui équipe les locaux modernes nécessite une extraction de l'air vicié ; une solution économique sur le plan technique et esthétique consiste à reprendre l'air, soit par des ouïes, soit en sommet de caisson ;

— le confort visuel entraîne de hauts niveaux d'éclairement et la nécessité d'augmenter le nombre et la puissance des tubes fluorescents, d'où la chaleur dégagée.

La solution précédente est avantageuse et permet d'évacuer les calories dues aux luminaires. Cela permet d'éliminer les zones de chaleur qui se créent sous les appareils et en diminuent le confort, ainsi que les poussières qui se déposent sur les tubes et les diffuseurs, de faire fonctionner les lampes à la température où elles ont le meilleur rendement. On peut adjoindre à ces appareils un réseau de soufflage d'air. Ces appareils augmentent les surfaces non acoustiques du plafond et détériorent l'insonorisation. Applications : bureaux, salles de réunion, halls.

Réflecteurs industriels

Comparés aux précédents, ce sont des appareils simplifiés pour lesquels l'esthétique a moins d'importance ; par contre, ils sont très robustes et de haut rendement lumineux. Ils s'installent facilement dans toutes les charpentes industrielles. Ils se composent d'une platine, d'un réflecteur et éventuellement d'une grille de défilement. Des pièces de mise en ligne permettent de réaliser des lignes continues. Ils sont utilisés dans les ateliers de fabrication, de mécanique, de montage, halls de machines, halls de stockage, entrepôts. Ils peuvent être équipés de une, deux, trois ou quatre lampes.

Rampes d'éclairage continues

Ces luminaires sont composés d'une platine sur laquelle, à volonté, on peut adapter un réflecteur. On place ces platines bout à bout pour constituer une ligne. On les utilise le plus souvent dans les supermarchés et halls de vente de grande superficie.

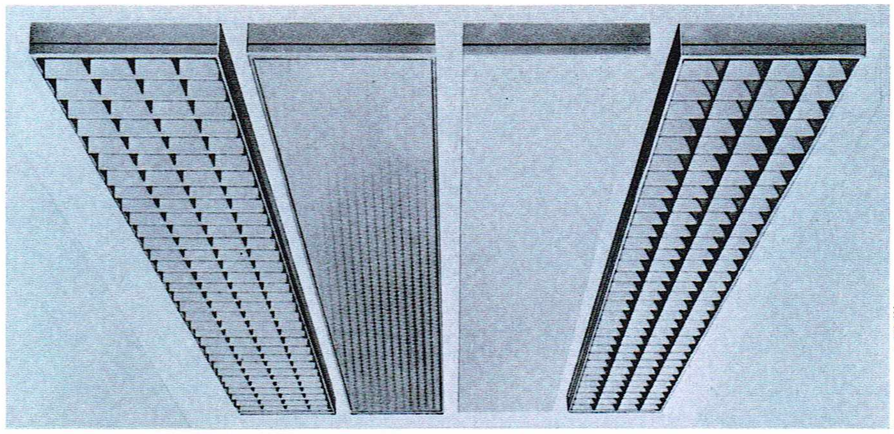

Document Philips

▲ Quelques types de diffuseurs : grille, pointe de diamant, satiné.

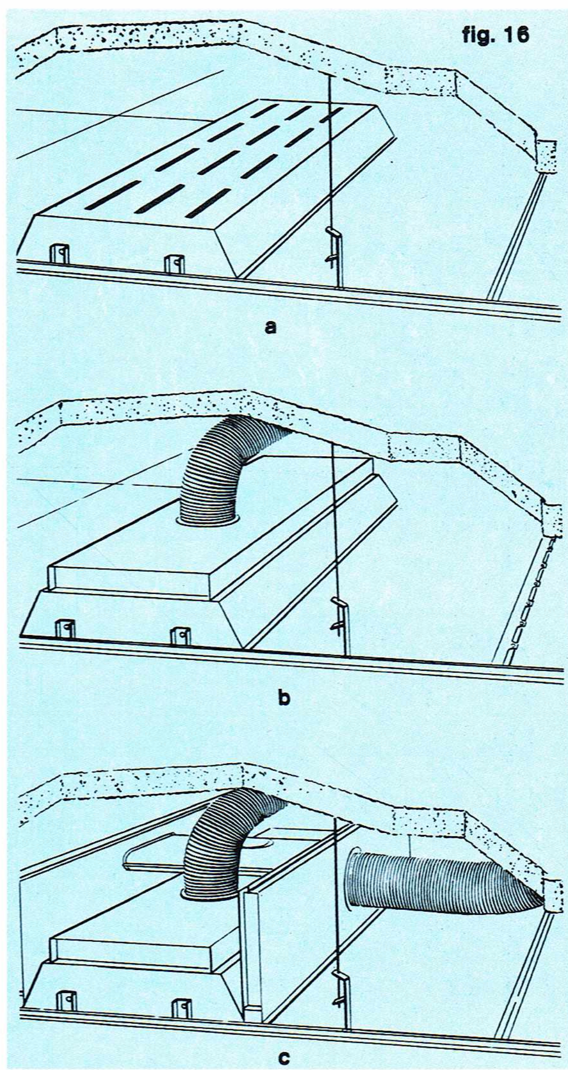

Document Philips

◄ Figure 16 : appareils d'éclairage à reprise d'air ; a, vers plénum en dépression ; b, branché sur canalisation d'évacuation ; c, appareil à reprise d'air et à soufflage d'air branché sur canalisation double.

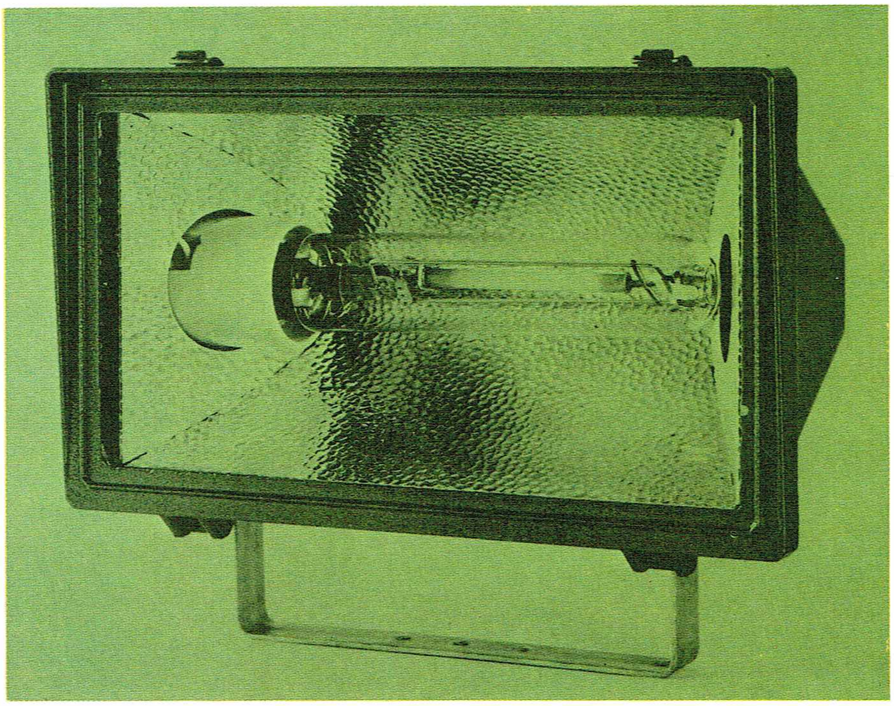

▲ *Projecteur à orientation variable. Le réflecteur est en aluminium brillanté et martelé.*

▼ *Lampes à décharge spéciale pour la croissance des plantes (décharge dans la vapeur de mercure haute pression).*

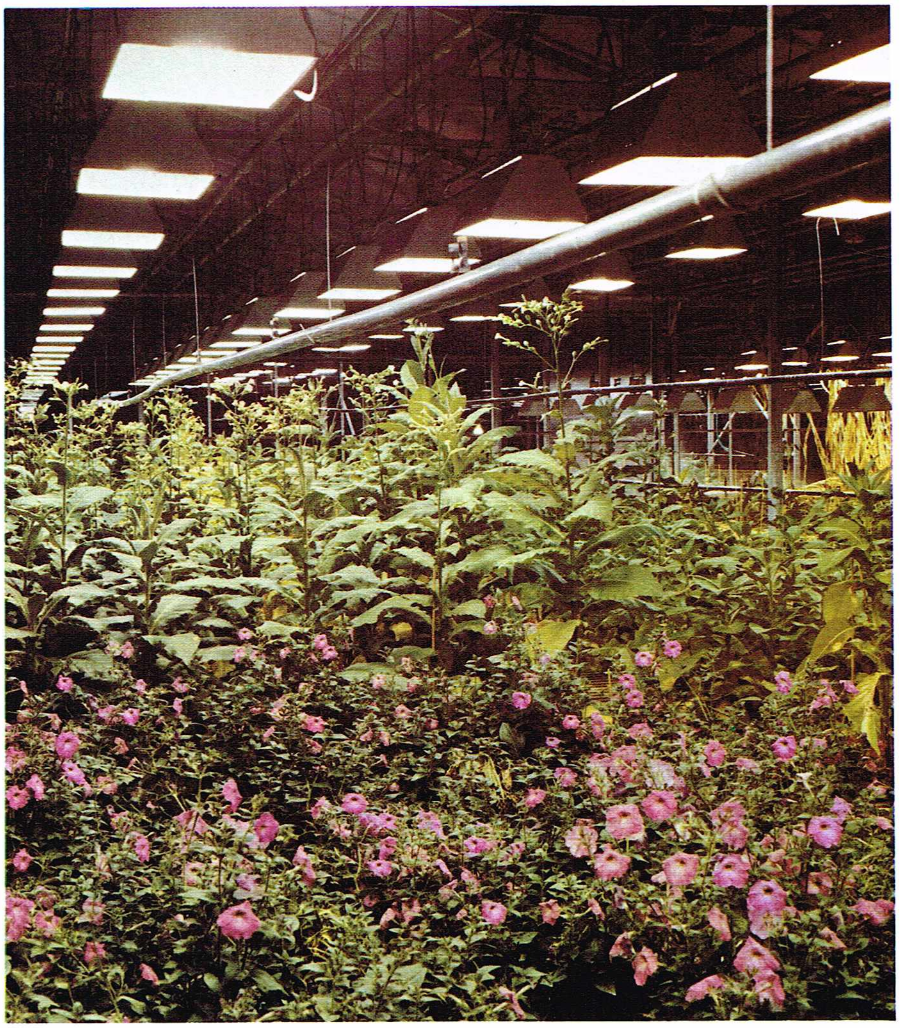

Luminaires étanches

On les utilise dans les locaux à atmosphère humide, corrosive, poussiéreuse ou qui présentent des risques d'explosion, caves, garages, laveries, couloirs souterrains, piscines, cuisines de cantine, blanchisseries, parkings, abattoirs, chaufferies, conserveries, ateliers de traitement de surface, raffinerie, industrie chimique, fabriques de gaz, d'hydrogène, poste de charge d'accumulateurs...

On trouve dans ces modèles des réglettes dans lesquelles les lampes sont placées chacune dans un tube protecteur et dont l'étanchéité est assurée aux deux extrémités des luminaires avec platine et vasque et presse-étoupe pour le passage des câbles. Ils peuvent être équipés de une ou deux lampes.

Rails

Un rail électrique est un profilé à l'intérieur duquel sont logés plusieurs conducteurs placés dans une gaine qui les isole sur les 4/5es de leur circonférence environ. Une surface longitudinale reste donc à nu et permet la liaison électrique avec des appareils accrochés au rail. Une autre solution consiste à placer un câble méplat multiconducteur à l'intérieur du rail ; les liaisons avec les luminaires sont faites à l'aide de boîtes de dérivation. Ces rails sont reliés entre eux par des jonctions en T, L ou X suivant les besoins.

Autres luminaires

Citons les réflecteurs pour tableaux d'école ; les appliques pour hôpitaux où l'éclairage joue un rôle important sur l'organisme du malade : la lumière doit être sécurisante pour atténuer les angoisses. Les appliques sont généralement plus complexes que celles utilisées dans les autres utilisations.

Pour les transports, les réglettes sont à ballast transistorisé et convertisseur qui transforme le courant continu en courant ondulé à la fréquence de quelques kHz. On les utilise dans les autobus, le métro, le train, les caravanes, etc.

Luminaires pour lampes à décharge

Projecteurs pour lampes sodium haute pression

Ils sont composés d'un corps, généralement en alliage léger, avec des ailettes de refroidissement, à l'intérieur duquel se place un réflecteur en aluminium brillanté, martelé ou non, protégé de l'extérieur par une glace de sécurité en verre trempé. Le corps est fixé à son support par l'intermédiaire d'une fourche qui permet une orientation variable. Ils peuvent être équipés de lampes dont la puissance est 200 watts. On les utilise à l'extérieur sur les stades, les terrains de sport, les aérodromes, les chantiers navals, les gares de triage, les parkings, les docks, les échangeurs, et à l'intérieur des patinoires, des salles omnisports.

Réflecteurs industriels pour ballons fluorescents ou lampes sodium haute pression

Ce sont des réflecteurs hémisphériques en tôle émaillée ou aluminium oxydé brillanté. L'appareillage d'alimentation est placé au niveau de la douille et protégé par un cylindre métallique. Ils sont de grandes dimensions, le diamètre varie entre 400 et 800 mm et la hauteur de 400 à 650 mm environ. Leur masse est importante : 2 à 14 kg. Ils sont suspendus à la charpente des locaux. On peut y monter des lampes allant jusqu'à 2 000 W. On les utilise principalement dans les halls de montage ou d'essais de grands volumes.

Dans le cas d'éclairage extérieur routier, le réflecteur est plus esthétique et doit s'harmoniser avec l'environnement. Le luminaire comprend une platine fixée au candélabre, une vasque et un miroir. La platine renferme l'appareillage. La lampe à vapeur de sodium haute pression est très utilisée pour l'éclairage des monuments, cathédrales, églises, châteaux.

Réflecteurs pour le forçage des plantes

Certaines lampes à vapeur de mercure haute pression et à ballon fluorescent ont un spectre lumineux qui favorise la croissance et le développement des végétaux grâce à la photosynthèse. Ces réflecteurs sont principalement utilisés dans les serres pour le forçage des plantes. Ils

sont constitués d'un réflecteur et d'une platine qui contient l'appareillage. Les lampes qui les équipent ont des puissances de 250 à 400 watts.

Hublots étanches pour ballons fluorescents

Ils sont composés des mêmes éléments que les hublots pour lampes à incandescence, mais sont plus volumineux. On y place des lampes dont la puissance peut aller jusqu'à 400 watts, suivant le modèle.

Luminaires pour lampes à vapeur de sodium basse pression

Ces lampes, utilisées très souvent pour l'éclairage des circuits routiers, sont montées dans un réflecteur semblable à celui utilisé précédemment. Mis à part l'appareillage et la forme, les composants sont toujours une platine, une vasque et un réflecteur (*fig.* 17).

Éclairage de sécurité

Les pouvoirs publics attachent une grande importance aux problèmes de sécurité et notamment au règlement relatif aux risques de paniques. Il existe des éclairages de sécurité, de panique et de remplacement. Le premier doit permettre, lorsque l'éclairage normal est défaillant, l'évacuation sûre et facile du public vers l'extérieur ainsi que les manœuvres intéressant la sécurité et l'intervention des secours. Le second est une variante réservée aux locaux dont l'exploitation exige l'obscurité. Le troisième permet de poursuivre l'exploitation de l'établissement en cas de défaillance de l'éclairage normal.

Pour assurer ces fonctions, on trouve sur le marché des ensembles compacts constitués d'une batterie de grande fiabilité comme celle au nickel-cadmium, d'un chargeur, d'une commande de commutation et télécommande, d'une commande de mise au repos locale ou à distance, d'ampoules à longue durée de vie. Des inscriptions peuvent être portées sur la vasque : sortie, sortie de secours, flèche; l'enveloppe extérieure doit être peu inflammable. Leur forme est généralement parallélépipédique pour s'adapter au mieux à l'environnement et aux exigences des architectes. Les lampes peuvent être à incandescence ou fluorescentes.

Les gradateurs de lumière

Ils utilisent un appareillage électronique ou non, complexe, des ballasts spéciaux (dans le cas de la fluorescence), un câblage plus important (toujours en fluorescence). Ils trouvent leurs applications dans les salles de réunion et de conférences, les amphithéâtres, les salles d'exposition, les salles de contrôle, dispatching, théâtres, cinémas, galeries d'art, studios de photographie. Cette solution permet d'utiliser un local aussi efficacement que possible avec un éclairage dépendant ou non de l'éclairage naturel. C'est une solution pratique.

Fabrication

Que les lampes soient à incandescence, à décharge ou fluorescentes, leurs cycles de fabrication sont comparables. Comme nous l'avons vu précédemment, un très grand nombre d'entre elles sont équipées de filaments. Le tungstène qui les compose est obtenu par frittage. On agglomère sous pression de la poudre de tungstène obtenue par des procédés chimiques. Les lingots qui résultent de cette opération sont chauffés par passage d'un courant intense qui soude les particules entre elles. Ils sont ensuite martelés à chaud jusqu'à l'obtention d'un fil de faible diamètre qui est passé dans une filière en diamant. Le diamètre final varie entre 0,015 et 0,5 mm. Si nous faisons un simple calcul pour mettre en évidence la petitesse du fil, nous nous apercevons qu'avec un fil en tungstène de 4 m de longueur et 1 mm de diamètre, on fabrique 17,7 km de fil de 15 microns de diamètre.

Les fils sont successivement spiralés pour former les filaments autour d'un fil de molybdène ou d'acier. L'ensemble est à nouveau spiralé de manière à obtenir un double spiralage (bispiralé), qui est parfois encore spiralé (trispiralé).

Avant fabrication, les ampoules (ou ébauches) présentent un « col » relativement long et étroit qui permettra le scellement sur le pied. Les dimensions des lampes tubes doivent être rigoureuses par l'utilisation qui en est faite (voyants de signalisation par exemple).

Lampes à incandescence

Fabrication des pieds

Le pied est la partie en verre qui ferme l'ampoule et qui est traversée par les arrivées de courant. En son centre, et dirigée vers l'intérieur de l'ampoule, se trouve la tige support. Le matériau de base est une canne en cristal montée verticalement, dont on chauffe fortement une extrémité en lui imprimant un mouvement de rotation. Simultanément, une pièce métallique est introduite en son centre, de bas en haut, et soumise elle aussi à un mouvement de rotation inverse de celui de la canne, de façon à évaser l'extrémité pour que le verre prenne la forme d'un cône très ouvert. L'ensemble est coupé, la canne avance et le cycle recommence. La machine automatique qui effectue ces opérations est appelée « évaseuse ».

Le pied se compose : d'un évasement; d'un « queusot », pièce très importante puisque c'est un petit tube en verre débouchant à l'intérieur de l'ampoule qui permet d'y faire le vide et de la remplir de gaz inerte; de deux entrées de courant; d'une tige dans laquelle seront piqués les supports du filament. Le pied terminé, on peut monter le filament.

Scellement des pieds. Vient ensuite l'opération de scellement du pied sur l'ampoule. Le pied est tenu verticalement, le filament dirigé vers le haut. L'ampoule est présentée au-dessus du pied et descendue jusqu'à ce que le filament soit en son centre. Des rampes chauffent

▼ Figure 17 : détail d'un luminaire d'éclairage public pour lampe à vapeur de sodium basse pression.

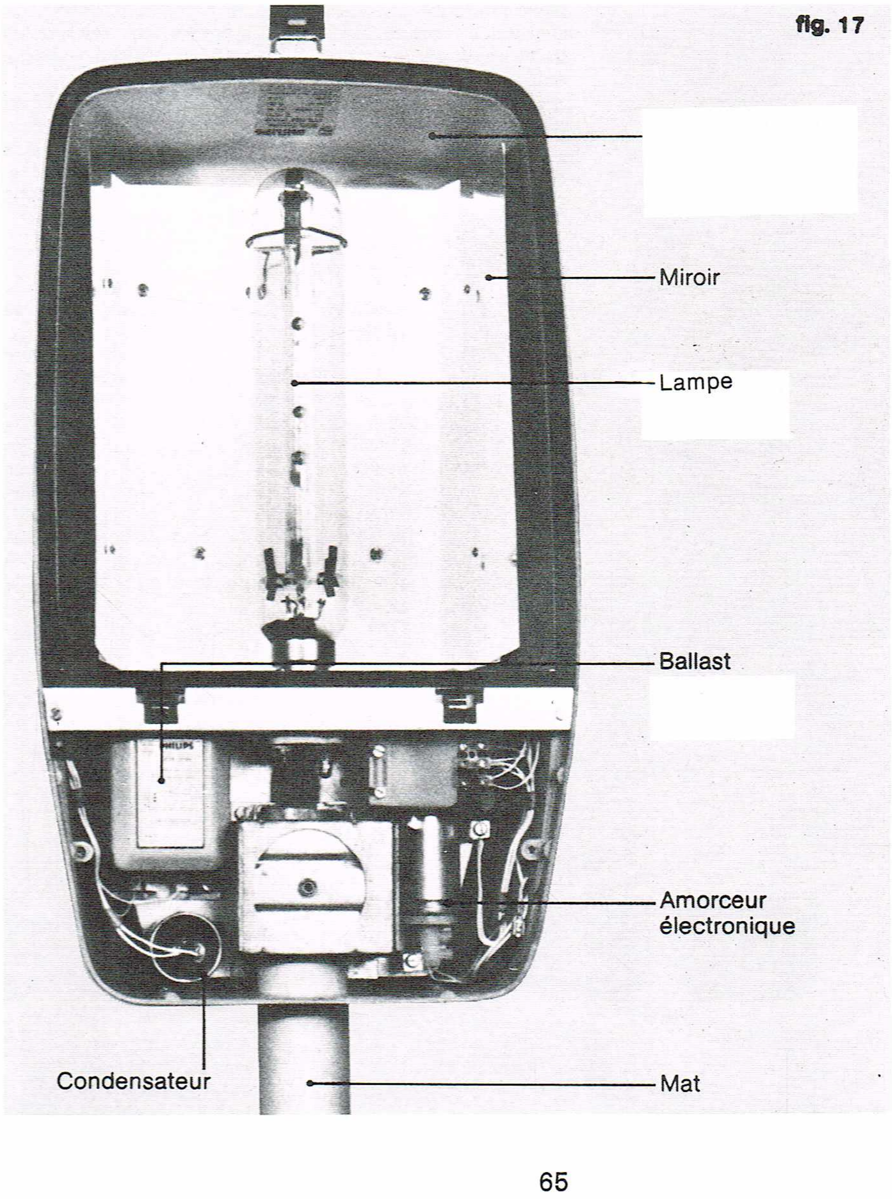

Document Philips

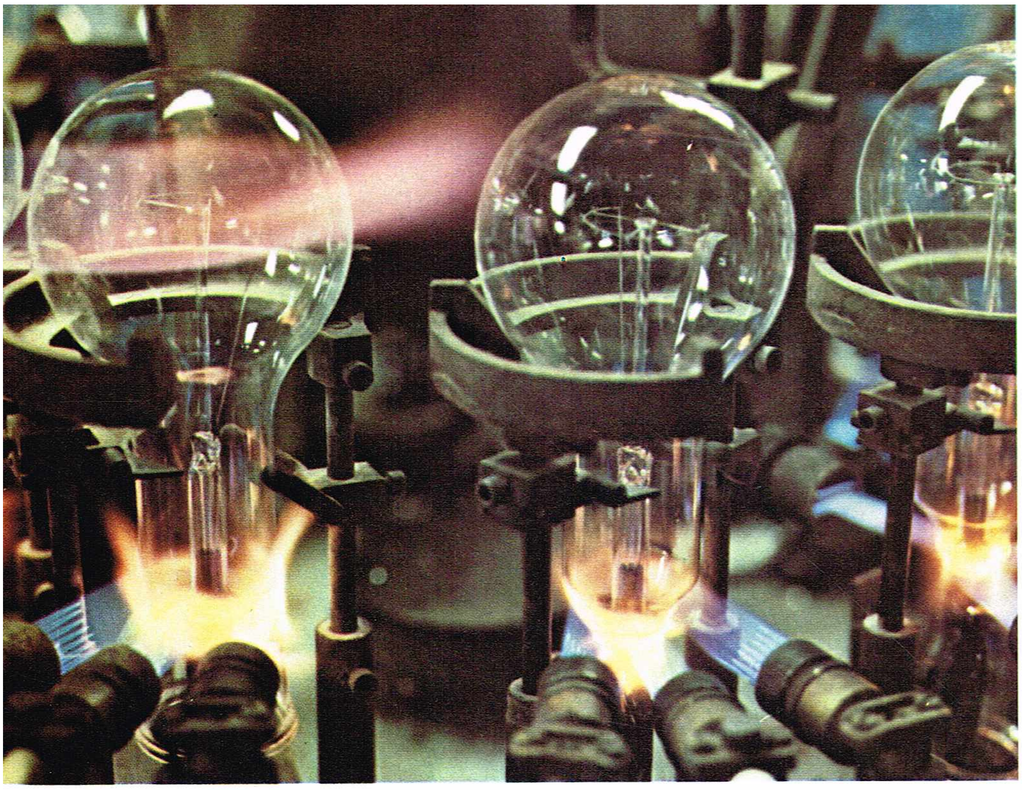

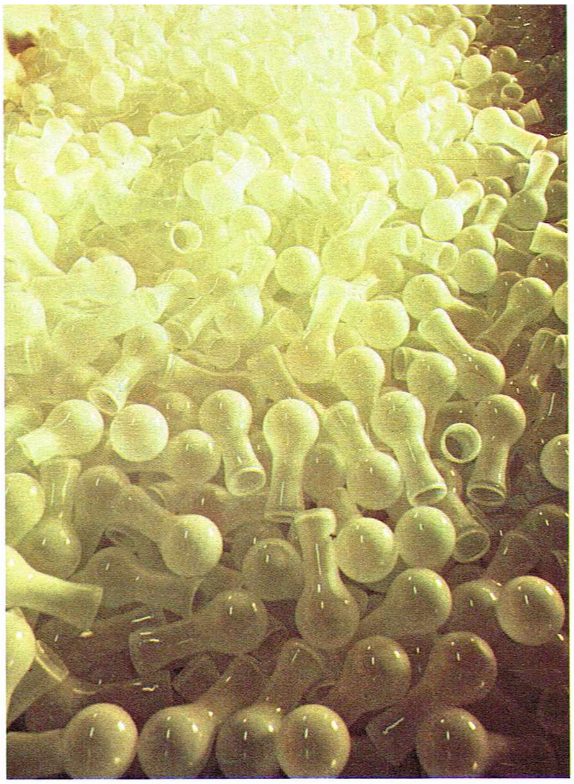

▲ *A gauche, scellement de l'ampoule sur le pied des lampes à incandescence. A droite, ampoules pour lampes à incandescence.*

fortement le goulot de l'ampoule au niveau du pied. Le verre se ramollit et, par un phénomène de striction, vient au contact du pied ; l'ensemble se soude et l'excédent de verre de l'ampoule se détache automatiquement.

Pompage. Le pompage consiste à faire le vide dans l'ampoule par l'intermédiaire du tube qui traverse le pied. Il ne doit rester aucune impureté ni trace d'humidité, c'est pourquoi, après avoir fait le vide, on introduit un « getter », puis le gaz, argon, krypton, etc., après quoi on coupe le queusot, qui est la partie en verre qui dépasse extérieurement du pied.

Culottage. Le culot est mis en place. Il est collé au tube à l'aide d'une pâte qui se polymérise.

Contrôle. Toutes les lampes sont contrôlées, non seulement en fin de fabrication, mais en cours de chaîne.

Emballage. Les lampes sont placées séparément dans des boîtes, puis dans des cartons pour être expédiées.

Lampes fluorescentes

Le schéma synoptique de la *figure* 18 illustre bien les phases de fabrication des tubes fluorescents.

Enduction. L'opération d'enduction consiste à enduire l'intérieur du tube d'une mince couche de poudre fluorescente, activée par des ions de terre rare, qui a pour objet, nous l'avons vu précédemment, d'agir comme un transformateur de fréquence de rayonnement. Pour permettre une manipulation et une mise en œuvre aisées, ces poudres sont mélangées à un liant. Deux méthodes permettent l'enduction des tubes :

— La première méthode consiste à placer les tubes verticalement et à injecter le liquide (poudre fluorescente et liant) par le bas jusqu'à ce que le niveau atteigne le sommet des tubes.

On supprime alors l'arrivée du liquide, le niveau descend, une couche résiduelle se dépose sur les tubes qui sont séchés avant l'opération suivante.

— La deuxième méthode consiste à placer les tubes verticalement et à injecter le liquide par la partie supérieure des tubes, contrairement à la méthode précédente. Un parapluie d'enduit s'écoule le long des parois internes. Les tubes sont égouttés, puis séchés.

Le nombre de tubes sur la machine à enduire peut être extrêmement variable. La méthode Philips, par exemple, n'enduit que 2 tubes à la fois. Une autre méthode permet d'en enduire 7 simultanément. L'épaisseur du dépôt est très régulière.

Brûlage. Le liquide introduit dans les tubes au cours de l'enduction est un mélange de poudre et de liant. Ce liant doit être totalement éliminé. Pour le faire disparaître, on passe les tubes dans un four à température élevée qui brûle l'enduit. Sous l'effet de la chaleur, le liant se transforme en poudre et gaz qui s'éliminent aisément.

Fabrication des pieds. Les opérations sont similaires à celles déjà décrites pour les lampes à incandescence. Ici, il n'y a pas de tige de supportage de filament, car ce dernier est très court et n'est fixé par pincement qu'à ses deux extrémités par les entrées de courant. Les filaments sont bispiralés ou trispiralés et rectilignes. Après fixation sur les pieds, ils sont recouverts, par trempage, d'un amalgame de triple carbonate qui augmente considérablement l'émission des électrons au cours de la décharge.

Scellement des pieds. Vient ensuite l'opération de scellement des pieds à chaque extrémité des tubes. Le tube et le pied sont mis en contact. Des brûleurs chauffent fortement l'extrémité du tube qui se ramollit et se soude à la partie conique du pied.

Pompage. On fait un vide très poussé à l'intérieur de la lampe par l'intermédiaire des pieds. On ne met pas de getter dans les lampes fluorescentes. A la rigueur, un peu de phosphore sur les électrodes. On chauffe les filaments en les reliant à une source électrique pour transformer les triples carbonates en oxyde métallique. Le remplissage est précédé de plusieurs vides successifs entre lesquels on fait passer un courant de gaz inerte (azote) pour « laver » le tube. On y joint une faible

▼ *Figure 18 : synoptique de la fabrication des tubes fluorescents.*

fig. 18

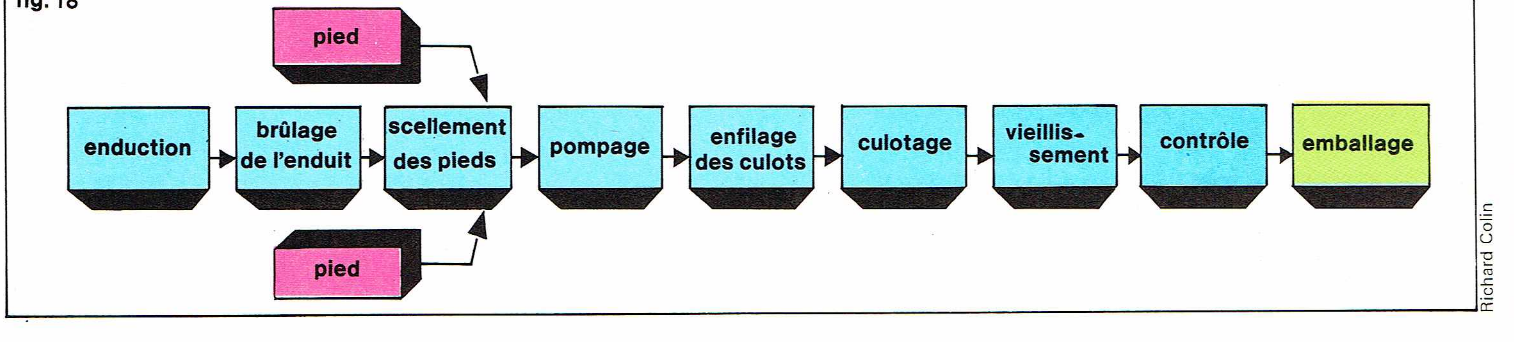

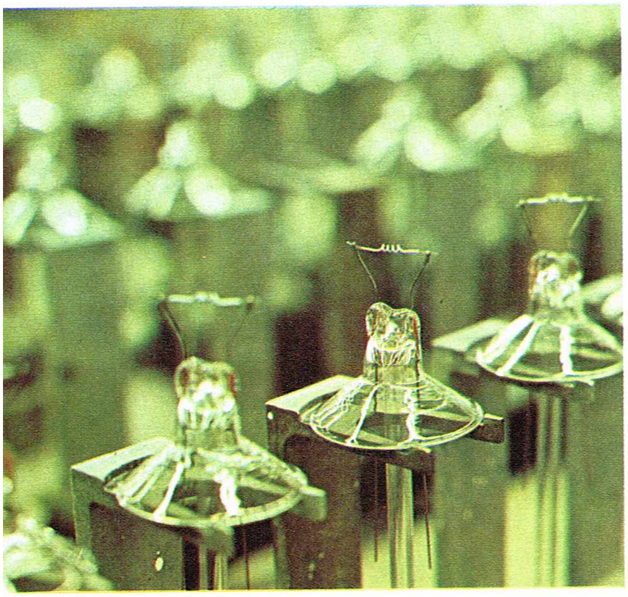

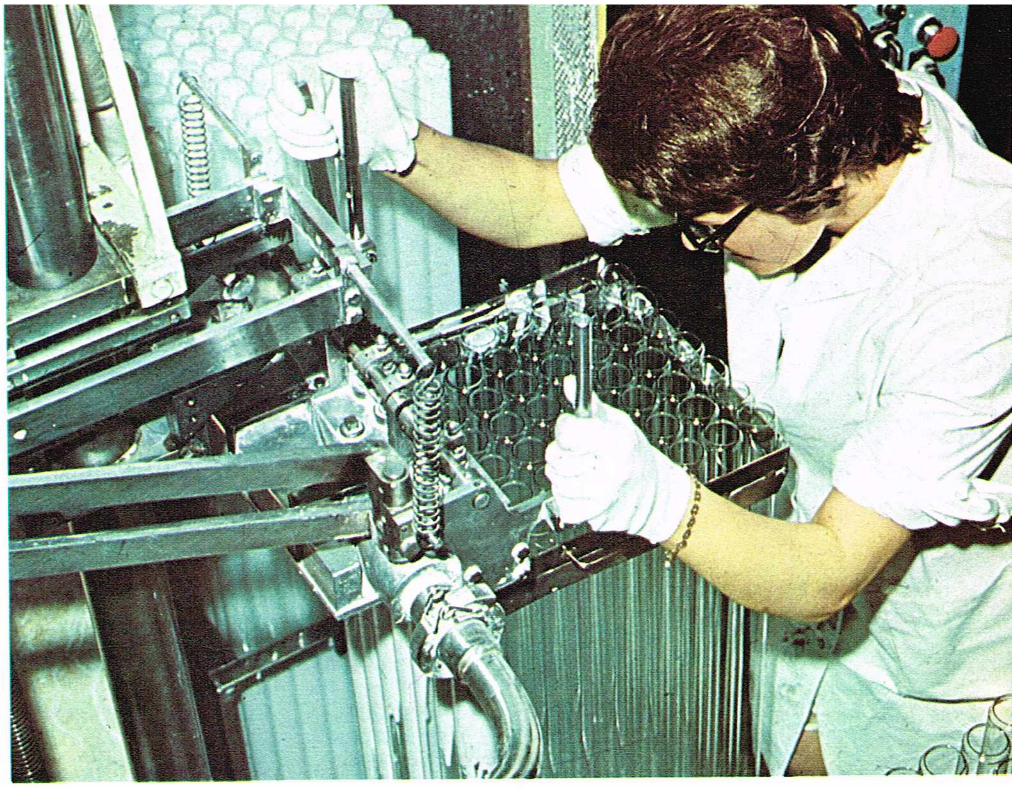

▲ *A gauche, fabrication des pieds de lampes fluorescentes.*
A droite, enduction des tubes à l'aide d'une machine à injecter verticale.

◀ *Chauffage d'une extrémité de tube avant scellement du pied.*

▼ *Banc pour vieillissement des tubes.*

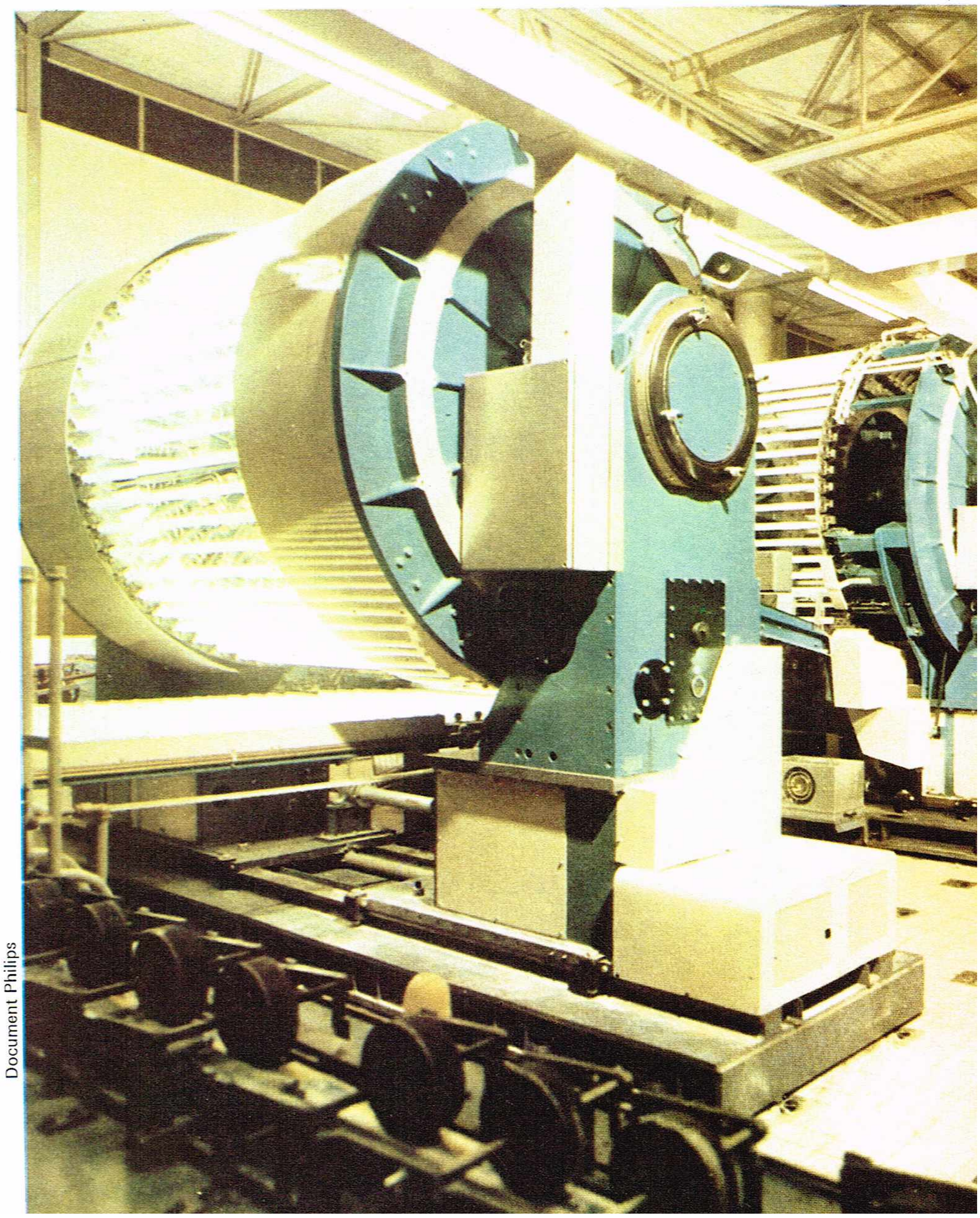

Document Philips

quantité d'argon à la pression de 3 mm de mercure pour favoriser l'amorçage. Le ou les queusots sont alors coupés.

Enfilage des culots - Culottage. Les culots sont présentés simultanément des deux côtés des tubes placés horizontalement. Les entrées de courant doivent être parfaitement rectilignes. Les culots sont enduits intérieurement d'une pâte qui les scellera au tube après polymérisation. Ils sont présentés dans l'axe du tube et translatés horizontalement. Les fils pénètrent dans les broches creuses. La portion de fil qui dépasse est coupée. Le fil est alors soudé en extrémité de broche par l'établissement d'un arc électrique entre une électrode et cette broche. La lampe fluorescente est alors terminée.

Vieillissement. Les tubes sont montés et branchés automatiquement sur un banc pour vérifier le bon fonctionnement. Ils restent ainsi allumés 30 à 60 secondes.

Contrôle et emballage. Ils subissent une série de derniers contrôles avant d'être emballés. Pour ce faire, une machine automatique les prend et les enfile 5 par 5 dans des étuis avant d'être placés dans les cartons d'expédition.

Lampes à décharge

Les procédés de fabrication sont fort comparables à ceux que nous venons de décrire. Il faut quand même noter la mise en œuvre de tubes en alumine frittée appelés « brûleurs » dans les lampes à vapeur de sodium haute pression et celle de brûleurs en quartz dans les lampes à vapeur de mercure haute pression. Le pincement du brûleur se fait à une telle température que, pour le regarder confortablement, il est préférable d'utiliser un verre fumé.

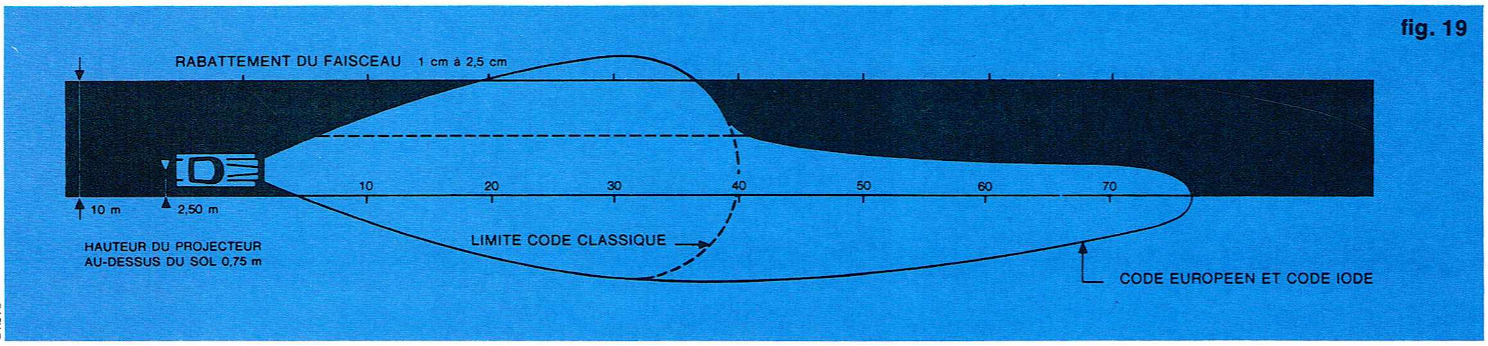

Cibié

▲ *Figure 19 : faisceau de croisement correspondant au Code européen.*

L'éclairage des automobiles

Les appareils d'éclairage automobile ont pour fonction de leur assurer un éclairage indépendant, lié au véhicule et qui lui permet de se déplacer aux mêmes vitesses de nuit et de jour.

Historique

Le premier projecteur de lumière électrique date vraisemblablement de 1859 : M. Sauter installe au sommet de l'Arc de triomphe une lentille au foyer de laquelle était placée une source lumineuse. La première lampe à incandescence vit le jour en 1878 à la suite de l'invention de Thomas Edison. Sept ans plus tard, en 1885, un réflecteur en verre, de forme parabolique, était construit : le projecteur utilisé universellement venait d'être créé.

Sur les premières automobiles, les fonctions d'éclairage et de signalisation n'étaient pas dissociées. Le nombre de véhicules était très réduit, et la seule lanterne permettait de signaler la présence et d'éclairer faiblement, mais suffisamment, la route pour les vitesses réduites du moment. Cette lanterne était alimentée par du gaz acétylène. Dans les années qui suivirent, les autorités durent séparer les fonctions, à cause de l'augmentation du nombre de voitures, de la circulation nocturne et des vitesses. En 1899 paraît la première réglementation : un feu blanc et un feu vert à l'avant, et le remplacement des lampes à acétylène et à pétrole par des lampes électriques. Les projecteurs étaient fabriqués à l'unité, et ce n'est que vingt ans plus tard, vers 1919, qu'apparaissait leur fabrication en série.

En 1923, on commença à se préoccuper de l'éblouissement, car la fréquence des croisements augmentait, et, les vitesses étant faibles, le temps de croisement était long. Le Code de la route définit le premier faisceau de croisement en 1929. A cette même date, un arrêté oblige

Cibié

▶ *Vieille lanterne d'automobile fonctionnant à l'acétylène. L'évolution de la circulation nocturne a amené à diversifier les deux fonctions de la lanterne initiale et à définir deux sortes d'appareils : appareils d'éclairage et appareils de signalisation.*

la pose de deux dispositifs d'éclairage : code et phare. Le faisceau lumineux était limité par un plan horizontal : l'intensité était faible dans la zone supérieure, suffisante pour voir la route sur une certaine distance dans la zone inférieure. Cette disposition, la seule utilisée en France jusqu'en 1957, est toujours valable, mais elle n'est appliquée qu'à certains véhicules comme les tracteurs, les machines agricoles. La lumière jaune est adoptée par un décret le 10 janvier 1939.

Code européen

Dès 1950, les experts désiraient augmenter la distance de visibilité sans augmenter l'éblouissement, et après de longues recherches apparaît, en 1957, le faisceau de croisement asymétrique ou Code européen. Ce code répond aux conditions suivantes : par rapport à l'axe vertical du véhicule, la partie gauche comporte une coupure horizontale au-dessous de laquelle l'automobiliste doit voir la route sur une distance de 25 à 50 mètres, au-dessus rien. Dans la partie droite, la coupure est relevée de 15° de manière à éclairer le bas-côté de la route sur une distance de 50 à 75 mètres (*fig.* 19).

Les lampes utilisées ont une puissance de 40/45 watts. Le culot comporte un plan de référence qui donne aux filaments une position très précise dans l'appareil optique. Il y a deux filaments en tungstène : un de croisement et un de route. Les ampoules sont remplies de gaz, argon ou azote. Elles sont positionnées à l'aide de trois bossages et d'un ergot. Trois connexions alimentent les filaments : masse, faisceau croisement, faisceau route. Les lampes sont mises en place par l'arrière, ce qui permet d'avoir une étanchéité, assurée à la fabrication, entre glace et réflecteur.

Utilisation de la lampe halogène

En 1962, aux 24 heures du Mans, 18 voitures étaient équipées de projecteurs à lampes aux halogènes. Les résultats furent concluants, car aucune lampe ne claqua. Avec les lampes, les dimensions et les formes des projecteurs évoluèrent. Les fabricants ont modifié les caractéristiques géométriques en fonction de l'amélioration des techniques d'emboutissage qui permettait d'obtenir des réflecteurs plus profonds, de forme rectangulaire et trapézoïdale. On trouve actuellement sur le marché quatre types de lampes halogènes.

La lampe H1

Elle n'assure qu'une fonction. Il faut placer un cache si l'on veut obtenir un faisceau de croisement. Sa puissance est 55 watts. Elle est utilisée sur les véhicules rapides, dans les projecteurs principaux et dans les projecteurs antibrouillard. L'ampoule est en verre de silice, le gaz neutre est du krypton, l'halogène est de l'iode, du brome, du fluor. Le filament de tungstène est porté à 3 150 °K. Le plan de référence est obtenu par une collerette fixée au culot. Il n'y a qu'une connexion.

La lampe H2

Comme la précédente, elle n'assure qu'une fonction. Elle est utilisée dans les projecteurs extra-plats de complément : antibrouillard et route de pointe. On la trouve aussi dans quelques projecteurs principaux ; un constructeur l'utilise pour le faisceau de route de la *CX* Citroën.

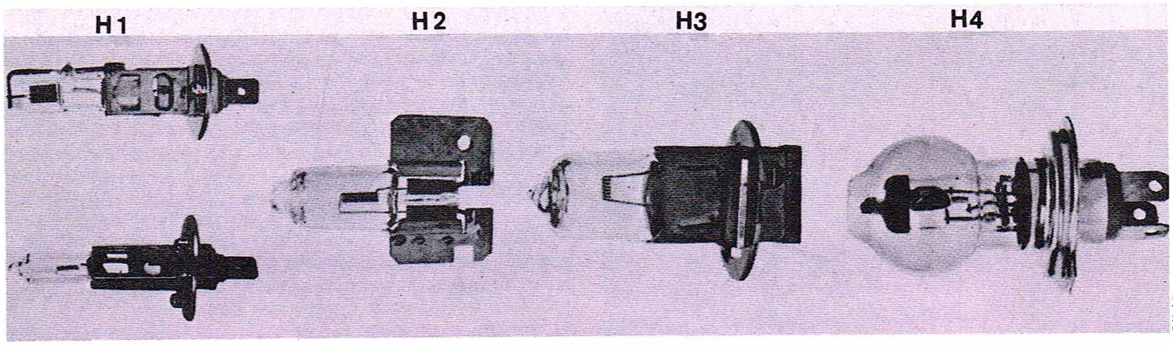

Cibié

◀ *Lampes halogènes (H1 à H4).*

La lampe H3

Elle assure aussi une seule fonction et n'est utilisée que dans les projecteurs de complément. Sa puissance est 55 watts.

La lampe H4

C'est la dernière née. Elle assure les deux fonctions code et route. Sa puissance est 55/60 watts. Elle présente l'avantage, par rapport au Code européen, de doubler l'intensité lumineuse par un accroissement de 10 % de la puissance. Elle est à double enveloppe ; la première est une ampoule en verre jaune au cadmium ; la seconde, en verre de silice, est remplie de krypton et d'halogène. Les filaments sont en tungstène. Le plan de référence est obtenu par une collerette. Le positionnement est assuré par trois languettes, dont une de largeur différente qui permet l'orientation convenable. Une nouvelle répartition fut envisagée à partir de la lampe H4. Le relèvement de 15° est remplacé par un relèvement de 45° pour reprendre un aspect horizontal décalé en hauteur de 1° par rapport à cette ligne horizontale. Cette disposition « à coupure décalée » limite l'éblouissement direct dans les croisements en virage à grand rayon et l'éblouissement par le rétroviseur.

Le Code européen n'est pas pour autant abandonné ; en effet, les études optiques montrent que l'iode est intéressant pour les projecteurs de diamètre inférieur à 200 mm et dans tous les cas pour le faisceau route (*fig.* 20).

Projecteurs

Le premier projecteur rectangulaire est celui de l'*Ami 6* (1960). Dans ce type de projecteur le faisceau de croisement est européen, le faisceau route utilise une lampe à halogène. Mais ces deux structures ne sont pas forcément liées, la lampe halogène n'étant apparue qu'en 1968. La matière plastique est largement utilisée. On la trouve dans les plots de fixation, les cuvelages d'adaptation dans les carrosseries, les recouvrements des projecteurs de complément, les pièces intermédiaires entre les réflecteurs et les glaces de forme. D'autres constructeurs automobiles choisissent deux phares distincts qui peuvent tous deux utiliser des lampes à iode. On trouve enfin le projecteur unique équipé d'une lampe H4 qui assure les deux fonctions code-route.

Toutes les glaces sont équipées de stries en forme de prisme qui ont pour rôle de diffuser la lumière selon des données déterminées par des essais de laboratoire et pratiques. Les schémas de la *figure* 21 montrent les formes des faisceaux lumineux que l'on obtient avec le même réflecteur équipé de trois glaces différentes.

▼ *En bas, figure 20 : comparaison entre les lampes Code européen et H4. Ci-dessous, projecteur S. E. V. - Marchal H4 pour Citroën* CX.

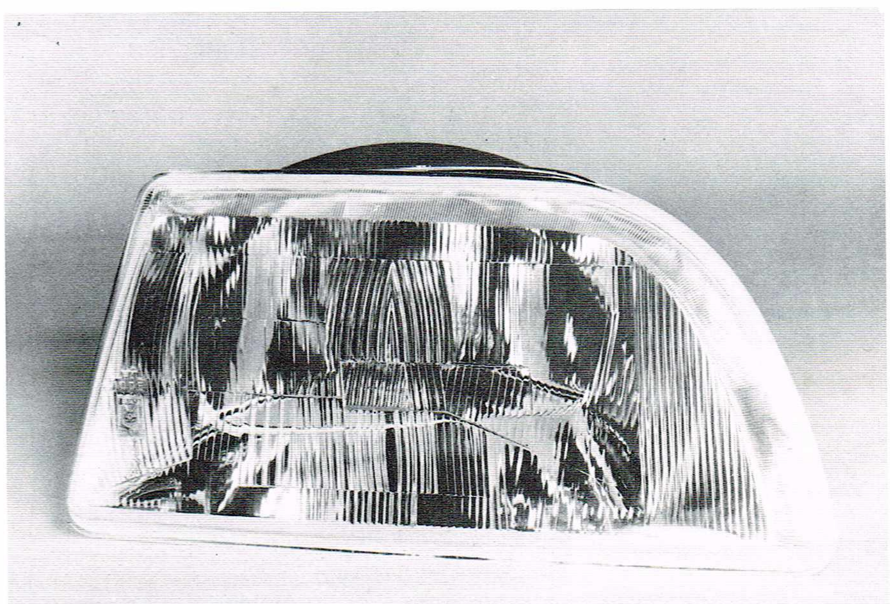

S.E.V. - Marchal

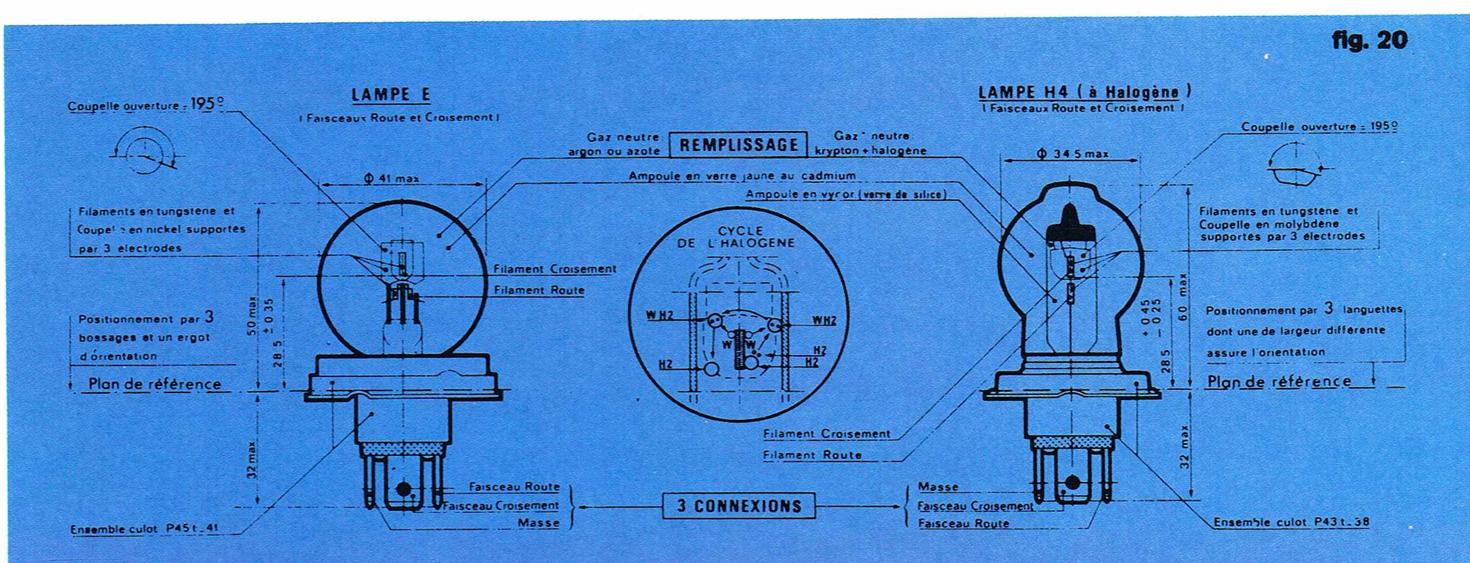

Cibié

Applicon

La forme de la voiture étant imposée, le fabricant doit assurer l'adaptation entre son réflecteur et la carrosserie. Des systèmes graphiques interactifs restitués par des miniordinateurs sont quelquefois utilisés : il suffit de mettre en mémoire les deux formes pour que la machine donne sur table traçante dans les trois dimensions la pièce d'adaptation.

Projecteurs antibrouillard

Le projecteur antibrouillard est conçu pour que le faisceau pénètre profondément dans la nappe; il doit être efficace. Il doit éclairer le bas-côté de la route surtout au carrefour, la largeur du faisceau doit être bien étudiée. L'éclairement doit être uniforme pour éviter la fatigue et la tension nerveuse. Il doit avoir un faible volume, car son installation est généralement faite après la mise en service du véhicule.

C'est à partir de ces considérations que les fabricants ont étudié les projecteurs offerts actuellement aux automobilistes. Le gradient de coupure vertical est franc, la coupure horizontale est nette. Tous les antibrouillards sont maintenant équipés de lampes à iode. Leur forme est circulaire ou rectangulaire.

Équipements complémentaires

Correcteurs d'orientation

Ils permettent de contrôler la position du faisceau par rapport à la route en fonction de la charge ou du comportement dynamique du véhicule. Il existe des correcteurs manuels qui se composent d'un levier pourvu d'une came permettant la rotation verticale du bloc optique. Le correcteur peut avoir un renvoi de commande au tableau de bord qui agit sur un piston; la variation de pression se transmet à un récepteur fixé au bloc optique. Le correcteur dynamique mécanique automatique modifie l'inclinaison des projecteurs en fonction de la charge du véhicule et des accélérations et décélérations.

Le correcteur d'assiette, équipant les véhicules Citroën *GS, CX* et *DS,* maintient constante la hauteur de la caisse du véhicule quelle que soit la charge, mais ne corrige pas les variations d'inclinaison momentanées de cette caisse lors des accélérations et des freinages. Par contre, le correcteur automatique hydraulique d'orientation des projecteurs joue instantanément sur l'inclinaison des projecteurs par rapport à la route.

fig. 21

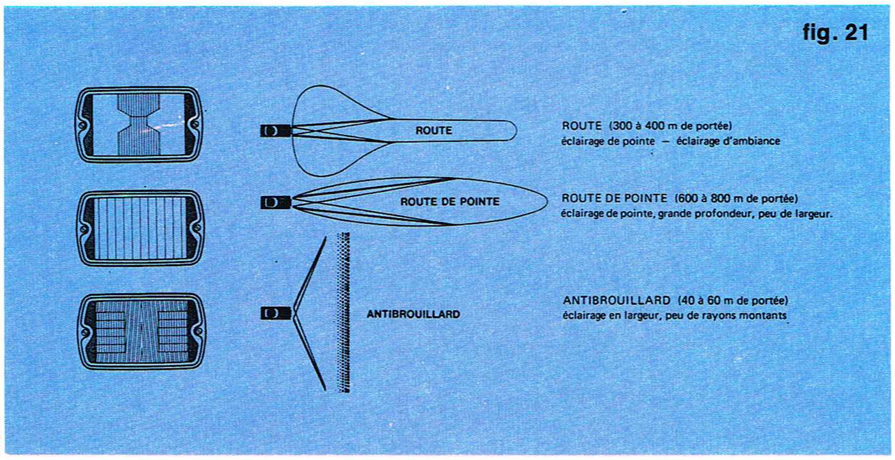

Cibié

▲ ***Système graphique interactif assisté par ordinateur utilisé pour le dessin en 3 dimensions des pièces de liaison entre réflecteur et carrosserie. Figure 21 : forme des faisceaux lumineux que l'on obtient avec le même réflecteur équipé de trois glaces différentes.***

▼ ***Virole de raccordement : l'ordinateur est de plus en plus utilisé pour ces applications. Il restitue les pièces en perspective sur un écran cathodique ou une table traçante. La figure ci-contre montre une restitution sur papier d'une pièce de liaison entre réflecteur et carrosserie.***

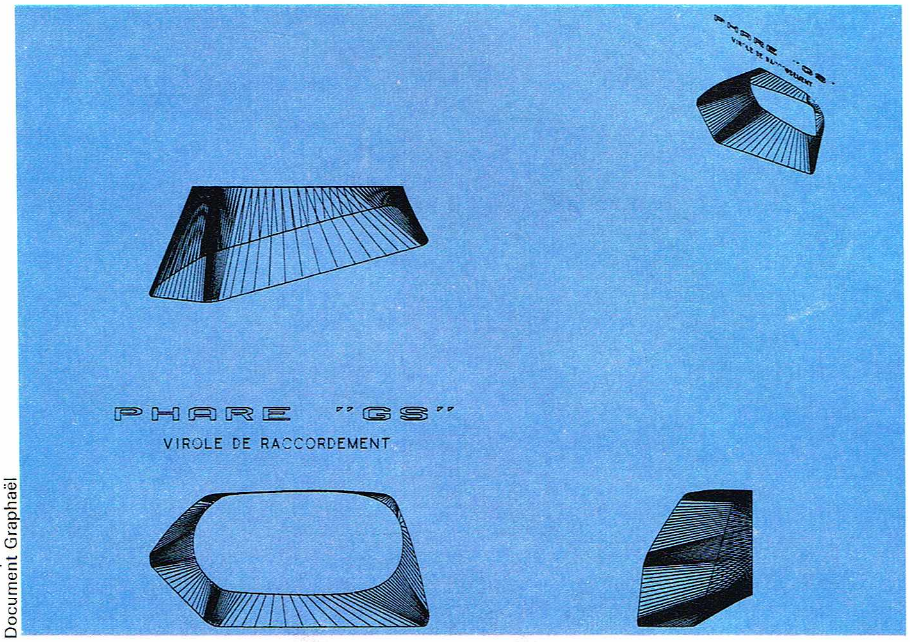

Document Graphaël

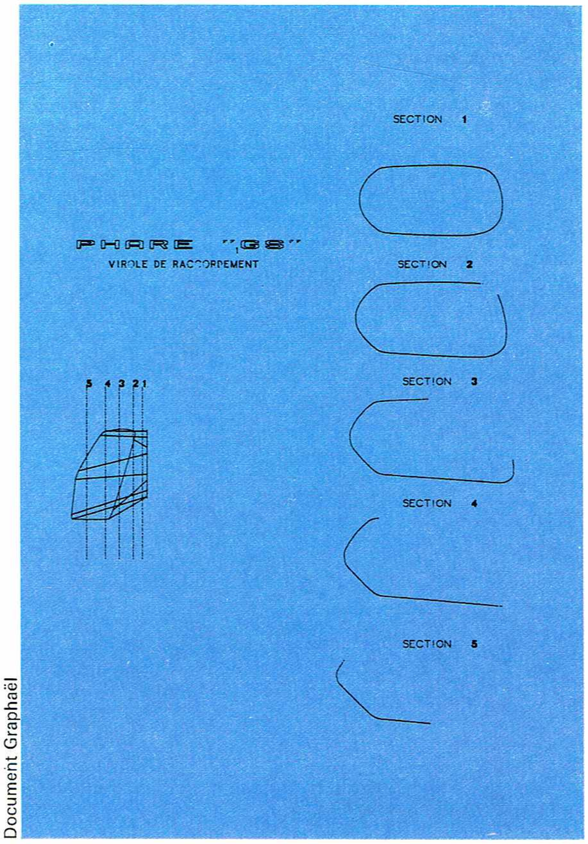

Document Graphaël

Essuie-phares

Ce sont des organes de sécurité qui permettent de garder les glaces de projecteurs très propres. Des expériences ont montré qu'en quelques minutes une glace peut absorber 80 % de la lumière par projections dues aux autres véhicules. Chaque projecteur a son mécanisme indépendant qui comprend un moteur électrique, une réduction de vitesse, une tringlerie, un balai essuie-glace, un système d'amenée d'eau de lavage avec pompe, conduits et gicleurs. Le balai peut être une brosse ou une lame de caoutchouc.

Fabrication

La fabrication des lampes est similaire à celle que nous avons décrite précédemment.

Fabrication des miroirs

Les miroirs, pièces de haute précision, nécessitent de très grandes précautions, tant dans le choix des tôles et dans le réglage des machines que dans leur manipulation. En effet, l'écart maximal admissible entre la pièce et sa forme théorique ne doit pas dépasser quelques centièmes de millimètre. Quant aux défauts locaux, ils doivent être inférieurs à quelques microns. Cela explique que chaque opération sur les miroirs soit suivie d'un contrôle unitaire rigoureux. Toute pièce douteuse est irrémédiablement refoulée, puis détruite, aucune opération de reprise ou de réparation n'étant possible avec une telle précision.

Sur les ébauches des miroirs sortant des presses, il reste à effectuer les différentes opérations d'usinage dont dépend la position de la lampe dans la parabole. Ce sont le rognage de la collerette qui fixe la position des filaments de la lampe par rapport au foyer de la parabole, et le crantage qui donne à la coupelle « code » son orientation par rapport à la glace. Ces différents travaux sont effectués sur des manèges automatiques de grande précision. Une erreur de quelques centièmes de millimètre sur la position des filaments peut, en effet, se traduire par une diminution importante des valeurs d'éclairement.

Dernier stade d'usinage : le polissage. Il lui est demandé d'éliminer le « grain » de la tôle et de faire disparaître les traces éventuellement laissées par l'emboutissage.

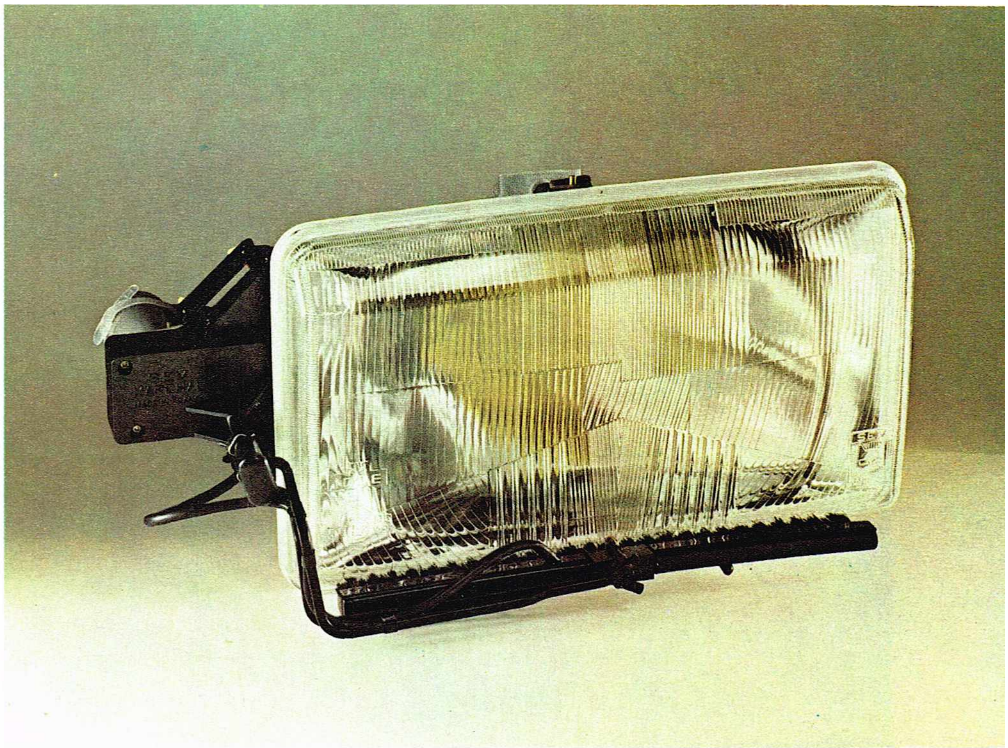

S.E.V. - Marchal

▲ *Projecteur H4 pour Simca Chrysler équipé d'un essuie-phare.*

Cibié

◀ *Batteries de machines semi-automatiques à polir les miroirs rectangulaires.*

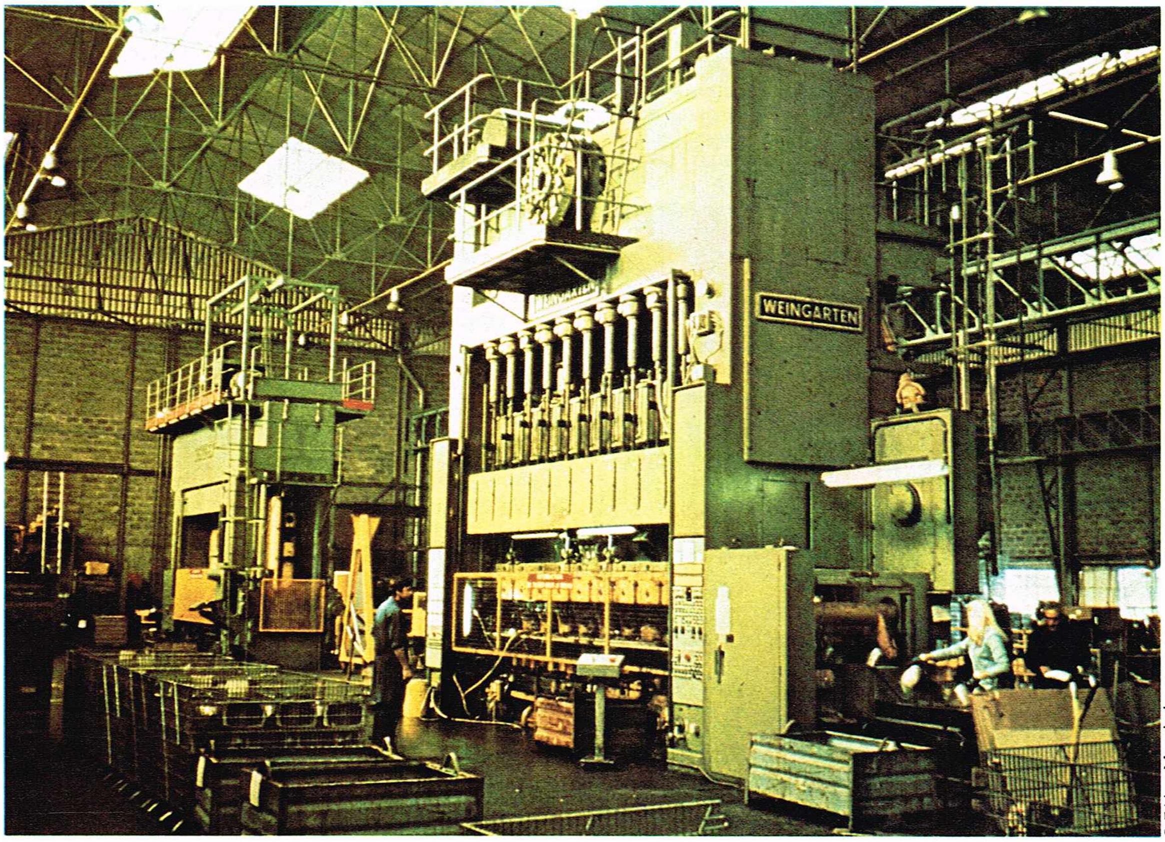

S.E.V. - Marchal

◀ *Vue partielle d'une presse-transfert de 400 t pouvant exécuter 11 opérations simultanées en moins d'une minute.*

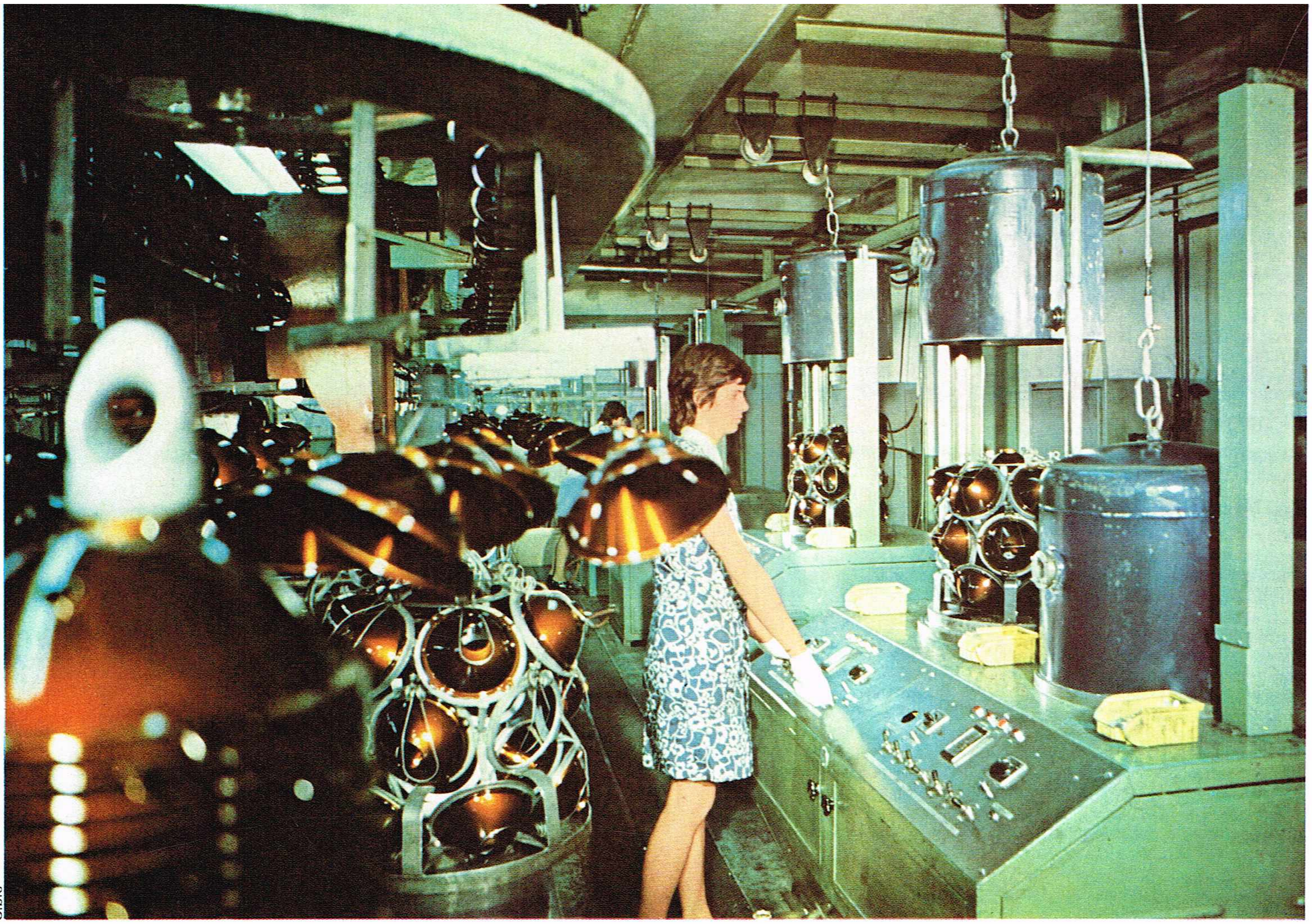

Cibié

▲ *Atelier de vaporisation sous vide.*

Cette opération commence à faire de la pièce en tôle un miroir. Aujourd'hui, le polissage est entièrement effectué sur des machines semi-automatiques. L'ensemble du polissage totalise plus de 100 postes, répartis sur diverses machines de 4 à 7 têtes, à mouvement alternatif ou continu suivant qu'il s'agit de polir des miroirs rectangulaires ou des miroirs ronds.

Après un dégraissage aux solvants chlorés, les pièces de fixation, les supports d'écrous, les pattes d'accrochage, etc., sont fixés aux miroirs. Ces assemblages sont faits sur des soudeuses par points qui effectuent, parfois, la fixation simultanée de quatre éléments.

Le miroir qui a maintenant son aspect définitif est dirigé vers le tunnel de phosphatation. Cette protection, outre son influence propre sur la résistance à la corrosion, apporte au vernis une meilleure surface d'accrochage. Dans ce tunnel est effectué, tout d'abord, un dégraissage très poussé grâce à des jets de lessive sodique à haute pression. Ces jets ont pour but de décoller les graisses et de débarrasser la surface interne de la parabole de toute trace suspecte : grains d'abrasifs, copeaux, etc.

▼ *Une cloche à vide pour l'aluminage des réflecteurs de projecteurs.*

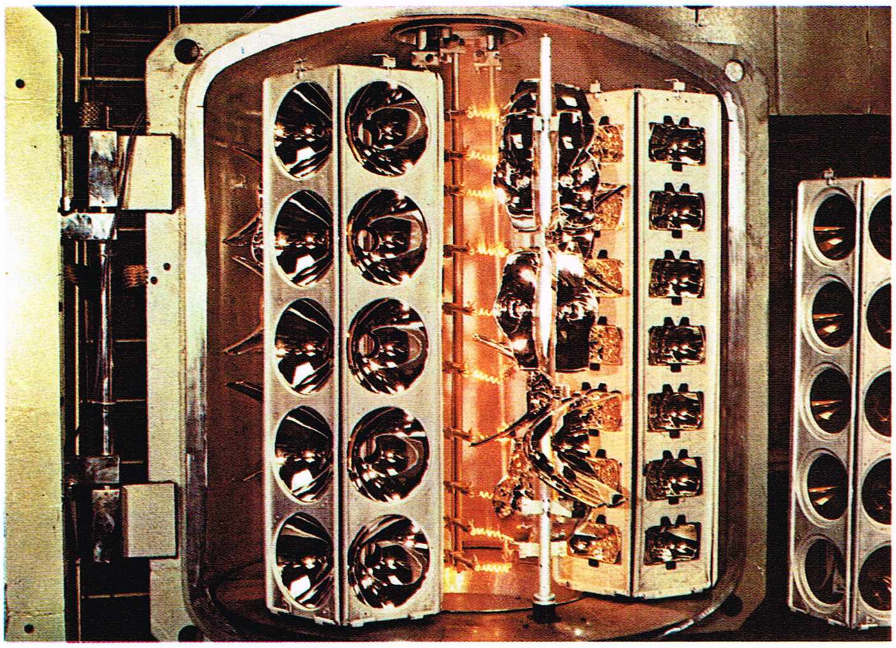

S.E.V. - Marchal

Ensuite, après de nombreux rinçages, une attaque chimique transforme en phosphate amorphe la surface de la tôle. Cette attaque est stoppée à l'étape suivante par l'action d'une solution passivante. Bref, après d'ultimes rinçages, les pièces sont séchées à l'air chaud. Le miroir, qui a été décroché du convoyeur de phosphatation, est alors envoyé à l'atelier de peinture où deux couches différentes de vernis, dont l'épaisseur totale est de 25 microns, lui sont appliquées. Les installations de vernis sont entièrement automatiques. Les régulations de viscosité, de température et l'alimentation des cuves de trempe se font sans intervention manuelle. Cet automatisme donne la plus grande constance possible à la qualité. Le vernis, indépendamment de son rôle de protection contre la corrosion, donne à la surface interne des paraboles son aspect spéculaire.

Après son passage dans les fours de polymérisation, le miroir, encore chaud, reçoit dans l'atelier d'aluminage la couche réfléchissante. Celle-ci est constituée d'une pellicule d'aluminium absolument pur dont l'épaisseur est de quelques centaines d'angströms. Cette couche est obtenue par l'évaporation sous vide de petits barreaux d'aluminium placés dans des spirales de tungstène portées à haute température par passage de courant électrique.

Les machines d'évaporation créent un vide de 1×10^{-4} torr (1 torr = 1 mm Hg) en trois minutes. Elles permettent l'aluminage simultané de 6 à 30 miroirs. Depuis quelques années, on utilise un procédé industriel de vaporisation du SiO (monoxyde de silicium) qui, après l'aluminage, assure une très bonne protection à la surface réfléchissante sans pour cela en altérer les qualités optiques.

Fabrication des enjoliveurs

Les enjoliveurs issus soit de larges bandes embouties sur presse transfert, soit de bandes étroites soudées en bout par étincelage et formées ensuite sur machines

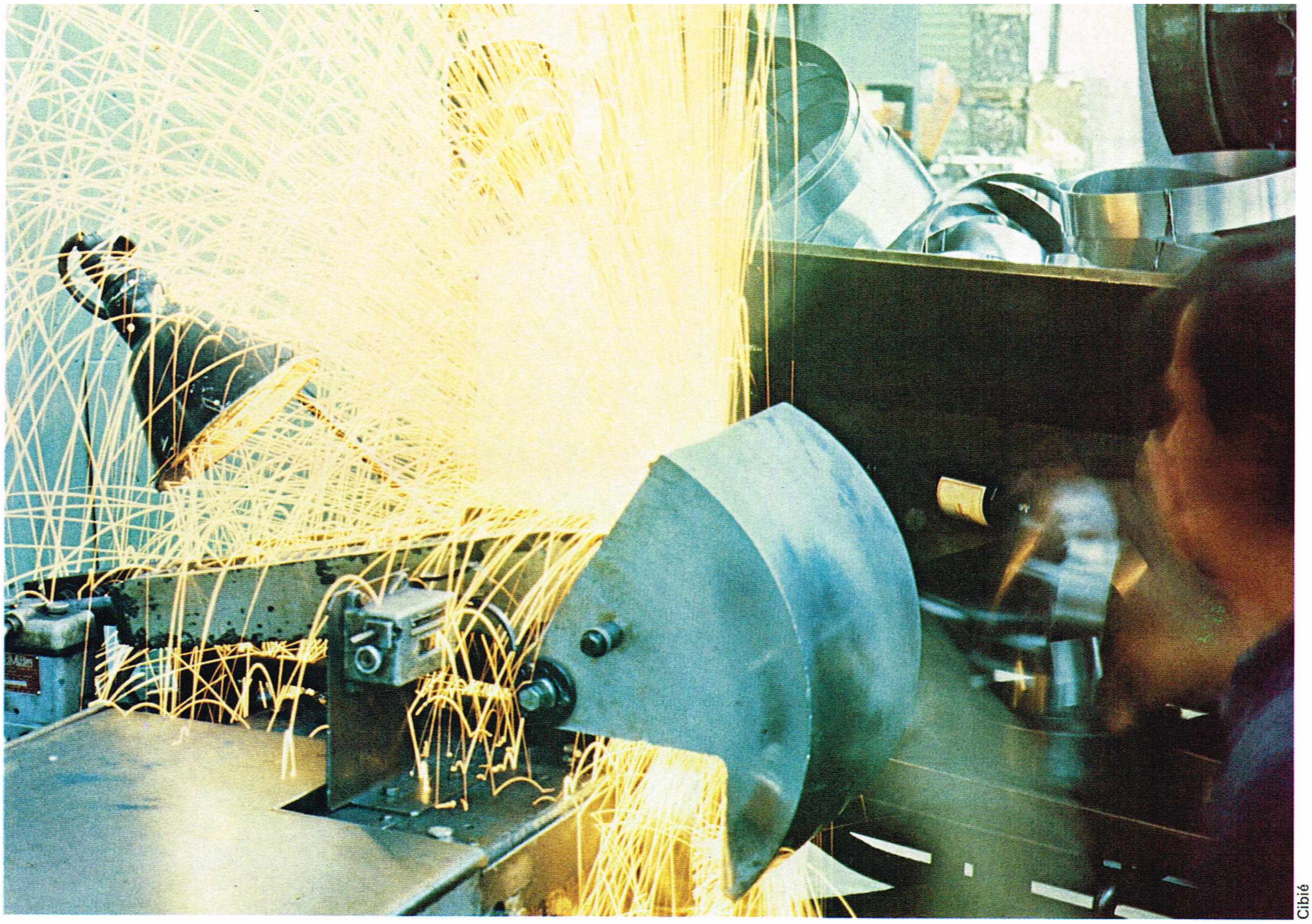

Cibié

▲ ***Soudure en bout par étincelage des cercles pour enjoliveurs.***

automatiques, reçoivent, parallèlement aux opérations d'usinage effectuées sur les miroirs, les différents ajouts, pattes et pièces de fixation à la carrosserie. Ils suivent alors deux voies distinctes suivant qu'ils sont chromés ou peints.

Dans les procédés de protection ou de décor par dépôt électrolytique, le dégraissage tient une place de la plus haute importance. C'est la raison pour laquelle le chromage commence par trois dégraissages différents : dégraissage chimique, dégraissage électrolytique en phase cathodique, enfin dégraissage électrolytique en phase anodique. Quatre rinçages successifs achèvent le nettoyage des pièces.

Alors commence le chromage. Il débute par un dépôt de cuivre alcalin mat (5 microns) servant d'accrochage au suivant, de cuivre acide (20 microns) très brillant. Vient ensuite une couche de nickel (20 microns) également brillant. Pour finir, on dépose une pellicule de chrome (1 micron) qui donne à l'enjoliveur cet aspect bleu bien connu. Fait à la fois remarquable et curieux, la qualité d'une couche de chrome n'est pas liée uniquement à son épaisseur, mais aussi à sa propre structure.

Il est à souligner que toutes ces opérations sont entièrement automatisées. L'atelier de chromage est conçu comme une seule et immense machine-transfert. Toutes les opérations sont liées à un cycle unique de 40 secondes. Les vitesses de dépôt n'étant pas les mêmes pour les différentes couches et l'épaisseur variant d'un bain à l'autre, la longueur des cuves est fonction de ces deux paramètres. Le passage d'une cuve à la suivante s'effectue par montée, transfert longitudinal et descente des supports de pièces accrochées sous des poutres mues par vérins pneumatiques. De fréquentes analyses des bains, des contrôles de pièces, visuels et destructifs, permettent de garantir les chromes.

Fabrication des cuvelages

Les cuvelages, souvent achevés sur les presses-transfert, sont accrochés à des convoyeurs — plusieurs kilomètres par usine — qui les amènent au montage après différents traitements de protection, tels que phosphatation, dont nous avons déjà parlé à propos des miroirs, et peintures anticorrosion ou décoratives.

Les progrès réalisés font que l'on peut envisager dans certains cas, pour ces pièces, l'abandon de la tôle au profit de matières premières telles que le plastique armé ou la fibre de verre dont l'emploi supprime les problèmes de protection contre la corrosion.

Fabrication des petites pièces

Parallèlement à ces trois chaînes principales, démarre de l'atelier des presses une quatrième ligne de fabrication concernant les pièces de faibles dimensions : attaches, contacts, fiches et pièces de support de lampes. Certaines d'entre elles sont *protégées* à l'atelier de zingage et de bichromatage, identique quant à sa conception à l'atelier de chromage. Ces traitements donnent aux petites pièces la couleur jaune irisé qui les caractérise.

L'emploi des lampes à halogène et les températures atteintes par ces dernières en fonctionnement imposent à certaines fabrications un soin tout particulier, spécialement pour le nettoyage et la manipulation. En effet, les moindres traces de graisse s'évaporent lors de l'allumage, se condensent sur la parabole et la ternissent; il est donc nécessaire que toutes les pièces en soient complètement dépourvues. Les ultrasons apportent à ce problème une solution satisfaisante, et l'emploi en a été généralisé.

Fabrication des glaces

Étudiées par les ingénieurs à l'aide de puissants moyens scientifiques tels que l'ordinateur, le laser, les tables traçantes, les bancs optiques, etc., les glaces sont de véritables instruments d'optique. A leur réception, elles subissent toutes un contrôle visuel pour s'assurer de leur parfaite transparence et de l'absence de bulles ou autres défauts. D'autre part, des échantillons prélevés au hasard sont découpés, et chaque strie ou prisme est contrôlé géométriquement. Elles rejoignent ensuite, au montage, les autres éléments du projecteur.

Le montage

Les différentes pièces, maintenant terminées, protégées, dégraissées, aluminées, contrôlées, sont acheminées par convoyeurs dans les halls de montage où elles retrouvent les glaces. Celles-ci seront fixées sur les paraboles à l'aide d'un cordon de colle qui assure également l'étanchéité du bloc optique. Les colles sont de deux types

Cibié

▶ *Vue générale d'un atelier de montage.*

différents : dures, c'est le cas des « époxys », elles sont utilisées pour les petits ensembles; souples, « élastomères », elles servent aux optiques de grandes dimensions et ont pour fonction, outre d'assurer l'étanchéité, de compenser la dilatation différentielle entre les glaces et les parties métalliques.

Le long de nombreux tapis roulants, des dizaines de postes de travail permettent l'assemblage des divers sous-ensembles, cuvelage, bloc optique, enjoliveur, et le regroupement de ceux-ci.

Les dernières vérifications, en particulier le contrôle optique unitaire et le contrôle d'aspect, permettent d'éliminer, au cours de cette ultime phase, les pièces présentant les moindres défauts.

▼ *Vérification et mesure d'intensité du faisceau d'un projecteur.*

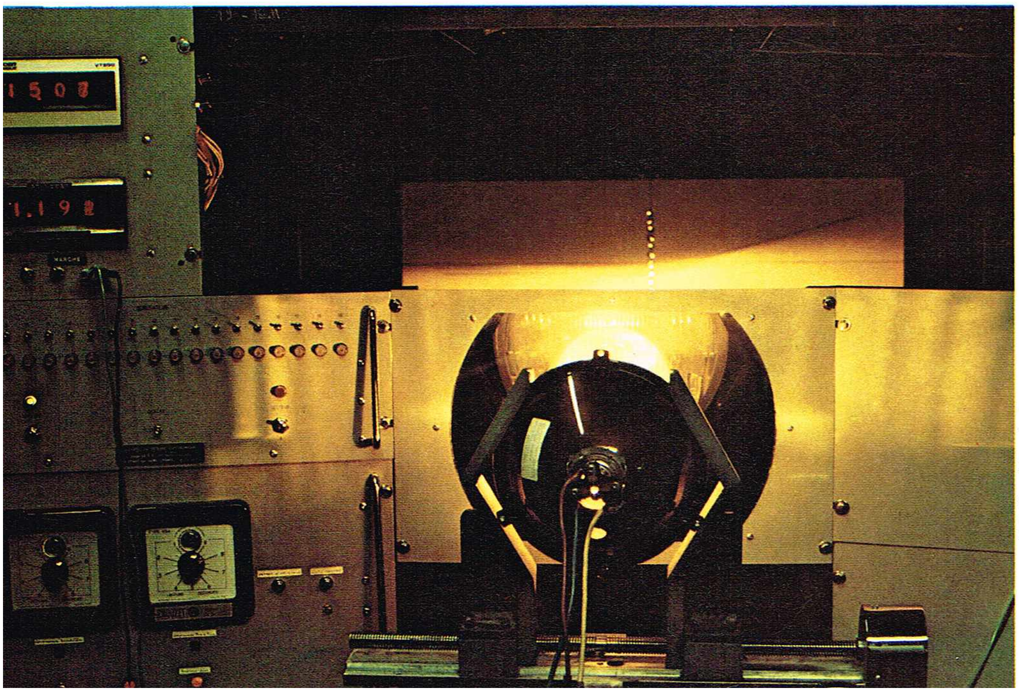

S.E.V. - Marchal

Évolution

Il est difficile de prévoir l'évolution de l'éclairage automobile, d'autant plus que, comme dans toute discipline, les fabricants gardent secrètes leurs recherches. On peut malgré tout citer l'utilisation éventuelle de la lumière polarisée. Sous l'aspect technique, il n'y a pas de difficultés majeures, car on utilise couramment les lampes à iode, les alternateurs à débit important et les filtres polarisants qui sont disponibles industriellement. Les véritables difficultés sont dues à la coexistence des deux types d'éclairages. Le passage de l'un à l'autre demanderait environ cinq ans, pendant lesquels des éblouissements excessifs auraient lieu ainsi qu'une mauvaise reconnaissance des feux de signalisation à travers un analyseur. Une telle décision aurait des conséquences économiques importantes, car les équipements, plus coûteux, entraîneraient une augmentation du prix des voitures neuves; il faudrait équiper les véhicules anciens de nouveaux feux de signalisation, de nouveaux projecteurs, d'analyseurs, etc. Pour assurer la maintenance, les constructeurs devraient constituer des stocks de ces équipements d'adaptation. Sur le plan humain, les usagers de la route devraient s'adapter. Évidemment, cette décision entraînerait un accroissement de la sécurité qu'il faudrait évaluer avant de dresser un bilan qui permettrait à l'Administration de prendre cette résolution.

En attendant, sur les routes secondaires où la vitesse est limitée à 90 km/h, les faisceaux actuels pourraient être conservés. Sur les autoroutes, l'éblouissement direct pourrait être éliminé par la mise en place d'occulteurs entre les deux voies, ce qui permettrait l'emploi des faisceaux de route. L'éblouissement qui en résulterait par les rétroviseurs serait éliminé en équipant les lunettes arrière et les rétroviseurs extérieurs d'analyseurs.

On pourrait penser à l'utilisation de lampes à éclat dans les feux de signalisation, qui produisent un effet physiologique donnant un éveil de l'attention. C'est une solution séduisante, mais fort coûteuse actuellement.

PILES ET ACCUMULATEURS

Historique

C'est à Volta que nous devons la première pile hydro-électrique, constituée par une chaîne de conducteurs renfermant un voltamètre dissymétrique.

Le comte Alessandro Volta était un physicien italien, régent de l'École Royale de Côme, professeur de physique. Il commença ses recherches en 1792 à partir d'une observation assez particulière faite par Galvani : quand on interposait un arc métallique entre deux parties différentes du tronc d'une grenouille dépouillée, les membres excités se mettaient en mouvement. Il établit sa « série des tensions » en 1793 pour les métaux. Ces différentes recherches aboutirent à la découverte de la pile électrique en 1800.

Cette première pile était composée de disques de cuivre et de zinc isolés les uns des autres par des rondelles de drap ou de carton trempées dans de l'eau acidulée. Les derniers disques de cuivre et de zinc étaient reliés à deux bornes extérieures par l'intermédiaire de conducteurs. Le ruissellement de l'eau acidulée établissait des courts-circuits internes qui rendaient la pile peu fiable et diminuaient la tension à ses bornes.

Cruikshank trouva une solution en couchant la pile à colonne dans une auge d'eau acidulée : ce fut la « pile à auge ».

On s'aperçut très vite que la force électromotrice de la pile diminuait très rapidement quand elle débitait sur une charge extérieure. Cela provenait du changement de nature des contacts, et notamment d'un dépôt de bulles d'hydrogène sur l'électrode positive résultant de l'électrolyse. On appela ce phénomène la *polarisation*. Pour l'annuler, il fallut placer des dépolarisants capables d'éliminer ces bulles. Poggendorff, en 1842, introduisit un dépolarisant liquide : le bichromate de potassium. Cette nouvelle pile fut améliorée par la suite par des chercheurs comme Ducretet, Trouvé et Grenet. Les éléments suivants la constituaient : le pôle positif était composé de deux plaques de charbon de cornue, et le pôle négatif d'une plaque de zinc coulissante disposée entre les deux précédentes. L'ensemble baignait dans une solution d'acide de bichromate de potassium. La réaction suivante donnait naissance à un courant : formation de sulfate double de potassium et de chrome, dégagement d'oxygène qui empêche la polarisation en se combinant avec l'hydrogène. La force électromotrice est 2 volts. D'autres dépolarisants ont été utilisés, comme l'acide nitrique dans la pile de Bunsen en 1842.

Le plus utilisé et le plus pratique pour les piles est le dépolarisant solide. C'est Leclanché qui, le premier, s'en est servi en 1868. Cet élément est composé d'une tige de zinc comme pôle négatif, plongeant dans une solution de chlorure d'ammonium; d'une plaque de charbon de cornue comme pôle positif, placée dans un sac de toile ou un vase poreux. Cette plaque est recouverte d'un aggloméré de bioxyde de manganèse. La force électromotrice est 1,5 volt. C'est le type de pile le plus couramment utilisé de nos jours.

Ferry l'a perfectionnée de la façon suivante. Au fond du vase est disposée horizontalement une plaque de zinc constituant l'électrode négative. L'électrode positive est du charbon poreux jouant le rôle de catalyseur. Une solution de chlorure d'ammonium sert d'électrolyte. Quand l'électrolyte est immobilisé par une substance gélatineuse, on appelle les piles : « piles sèches ».

Daniell réalisa le premier, en 1836, une pile impolarisable à deux liquides en plongeant deux lames métalliques différentes chacune dans une solution d'un de ses sels. Une tige de zinc (pôle négatif) plonge dans du sulfate de zinc. Un cylindre de cuivre (pôle positif) plonge dans une solution saturée de sulfate de cuivre; cet ensemble est placé dans un vase poreux. La force électromotrice est 1,08 volt.

D'autres éléments impolarisables, comme les piles de concentration, sont constitués par deux électrodes de même métal qui plongent dans deux solutions de concentrations différentes d'un sel de ce métal.

Le premier élément rechargeable fut réalisé par Gaston Planté en 1859. La construction était difficile, c'est pourquoi cette découverte ne franchit pas le seuil du laboratoire pendant une vingtaine d'années. Le développement de l'industrie de l'accumulateur au plomb commença véritablement vers 1881 par la découverte d'un procédé de tartinage des plaques avec un composé de plomb due à Faure. Jusqu'en 1900, les batteries étaient principalement destinées à des installations fixes, soit pour compléter l'installation de centrales électriques, soit pour assurer la continuité des services en cas d'arrêt des machines. Furent construites ensuite des batteries pour véhicules terrestres, bateaux, etc. Ce n'est qu'en 1919 qu'apparut le démarrage électrique des moteurs à combustion.

En 1894 est équipé le premier fiacre automobile Krieger; en 1895, le double phaéton Jeantaud de la course Paris-Bordeaux. En 1898, la première locomotive électrique destinée au PLM, et en 1899 le premier véhicule au monde à franchir la vitesse de 100 km/h : la *Jamais contente* de Jenatzi. A cette époque, les marines française et étrangères achetaient des batteries françaises pour l'alimentation des moteurs de sous-marins.

Origine de l'électricité

Dans un conducteur, le courant électrique a pour origine le déplacement d'électrons qui ne sont liés à aucun atome et qu'on appelle électrons libres. Une pile ou un accumulateur sont générateurs de ce mouvement d'électrons. Au cours du fonctionnement, l'anode se comporte comme un donneur d'électrons, la cathode les reçoit par l'intermédiaire du circuit extérieur. Anode et cathode sont reliées intérieurement par un électrolyte qui est un conducteur purement ionique au sein duquel se déplacent les ions sous l'influence du champ électrique.

Les piles Leclanché ou piles sèches

Constitution d'une pile sèche

Les piles du type « Leclanché » sont dues à Georges Leclanché (1838-1882).

La pile sèche est généralement constituée (*fig.* 1) :

- D'un **godet de zinc** servant à la fois de container et d'électrode négative. Pour des raisons technologiques et électriques, on a donné une forme cylindrique au godet; en effet, tous les constituants sont placés à égale distance les uns des autres, ce qui permet un débit régulier du courant grâce à la transformation régulière des produits chimiques.
- D'une **électrode positive** qui est un aggloméré dont le mélange joue le rôle de dépolarisant, constitué d'une pâte comprenant principalement du bioxyde de manganèse, un conducteur en graphite ou en noir d'acétylène, et d'un électrolyte qui est une solution de chlorure d'ammonium et de chlorure de zinc.

* Il existe trois types principaux de bioxydes de manganèse : les bioxydes naturels, les bioxydes chimiques et les bioxydes électrolytiques :

— Les *bioxydes naturels* ont pour origine l'enrichissement d'un minerai. Le titre obtenu varie entre 70 et 85 % de MnO_2.

— Les *bioxydes chimiques* sont préparés par oxydation de sels de manganèse en solution. Le titre obtenu varie entre 80 et 90 % de MnO_2.

— Les *bioxydes électrolytiques* sont obtenus à partir de l'électrolyse d'une solution de sulfate de manganèse. Ils sont très purs et titrent plus de 90 % de MnO_2.

En plus de leur titre, leurs formes cristallines diffèrent sensiblement; les bioxydes électrolytiques et chimiques sont constitués par une phase γ très active et une phase β réductible sous de faibles densités de courant. On conçoit donc que, suivant les proportions respectives des différents bioxydes, on prépare des mélanges dépolarisants qui fonctionnent avec un rendement électrochimique satisfaisant sous tous les régimes de décharge. Pour ce faire, on utilise une forte proportion de bioxyde électrolytique et des mélanges qui ont de bons rendements en décharge lente, mais plus faibles en décharge rapide. Ces compositions sont donc déterminées par des considérations d'usage, mais il faut savoir que le choix

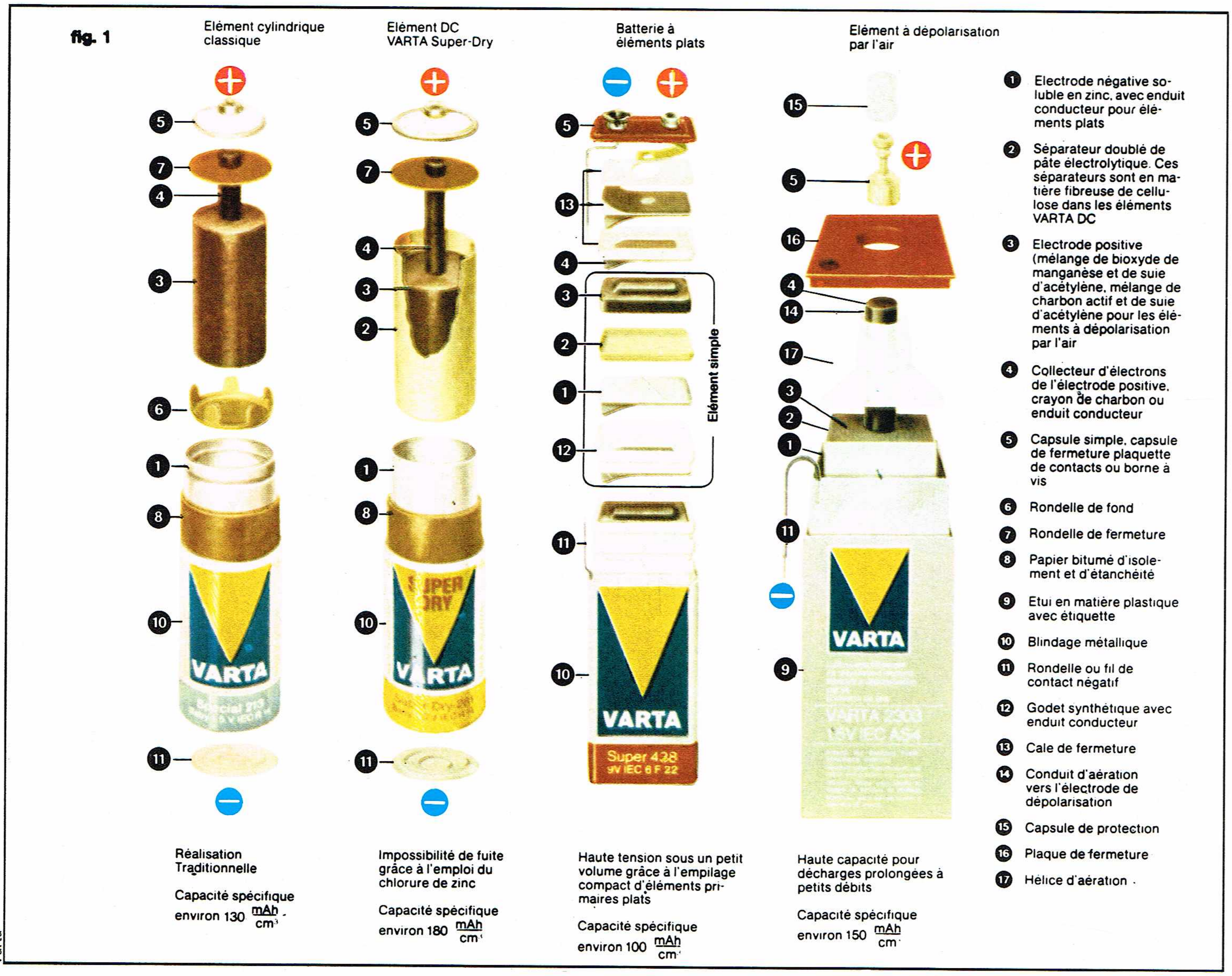

▲ ***Figure 1 : structure de divers types de piles sèches au manganèse (Varta).***

détermine le coût, le bioxyde électrolytique étant beaucoup plus cher que le naturel (*fig.* 2).

★ Dans l'électrode positive, le conducteur a pour rôle d'assurer la conduction entre les grains de bioxyde qui sont mauvais conducteurs et d'assurer la rétention de l'électrolyte ; c'est pourquoi on utilise le noir de carbone qui remplit parfaitement ces deux fonctions.

★ La réaction chimique de la pile est la suivante :

$$2\ MnO_2 + Zn + 2\ NH_4Cl \rightarrow 2\ MnO_2H + Zn\ (NH_3)_2\ Cl_2$$

L'électrolyte permet la propagation des ions dans le mélange dépolarisant décrit ci-dessus. L'électrode négative qui est en zinc passe à l'état de chlorure de zinc diamine, le bioxyde de manganèse se réduit à l'état de MnO_2H. Les protons de réduction du manganèse sont fournis par NH_4Cl qui est un produit actif. Il y a consommation d'eau pour la fourniture de protons, les ions HO^- précipitent les ions Zn^{++} en hydroxydes de zinc.

● D'un **compartiment médian** situé entre l'électrode positive et le godet. C'est un électrolyte sous forme de gel qui assure la conduction entre les deux électrodes. Ce peut être aussi un séparateur.

★ Le *gel* est un mélange dépolarisant analogue au précédent. Il est immobilisé par une suspension de produits, comme les farines ou l'amidon, puis gélifié par la chaleur ou l'addition de sels. L'épaisseur est 1,5 à 2 mm.

★ Le *séparateur* est une feuille de papier sur laquelle on a disposé une mince couche de dépolarisant de 3/10 à 5/10 de mm d'épaisseur. Le gain de place obtenu permet d'augmenter le volume de la partie centrale, d'où une augmentation des performances.

Fabrication des éléments de pile sèche

Les principales phases de la fabrication sont les suivantes :

● **Préparation des composants :** tube en zinc, crayon de charbon, mélange dépolarisant, électrolyte.

★ Le *tube en zinc*, qui constitue l'électrode négative et sert de container, est obtenu à partir d'une pastille en zinc pur qu'on place sous le poinçon d'une presse. Le procédé employé, bien connu, est le filage à chaud. Le tube est ensuite ébarbé, et un jonc est formé à sa partie supérieure (il servira au maintien de la rondelle d'obturation) ; on le plonge alors dans un bain de dégraissage pour retirer toute trace néfaste au bon fonctionnement ultérieur.

★ Le *crayon*, qui constitue l'électrode positive, est du charbon de cornue, poreux et perméable aux ions. Il est le plus souvent fabriqué par des spécialistes, sous-traitants des fabricants de piles.

★ Le *mélange dépolarisant* ou *masse*. Les matières premières sont stockées dans des silos avant d'être pesées automatiquement pour être mélangées et malaxées. Ce sont le bioxyde de manganèse, des sels d'ammoniac ou de chlorure de zinc et du noir d'acétylène qui doit être très conducteur d'électricité et qui doit pouvoir absorber une forte quantité d'humidité maintenue rigoureusement constante (à 1 % près). Le noir d'acétylène est fait dans des canons à acétylène qui sont des tubes robustes dans lesquels on introduit de l'acétylène que l'on fait exploser. Le résidu de la combustion est le noir utilisé dans les piles.

Après malaxage, le mélange dépolarisant est inutilisable ; il faut, pour qu'il acquière ses caractéristiques, le laisser reposer pendant 24 heures.

* L'*électrolyte* est un mélange de chlorure de zinc ou de sel d'ammoniac, d'un produit gélifiant à base de farine de blé de bonne qualité ou d'amidon de maïs, quelquefois les deux réunis. L'ensemble est malaxé et reste en suspension.

● Les composants étant prêts, la **fabrication de l'élément** peut commencer :

— Le crayon et la masse sont présentés sous une presse horizontale qui agglomère, sous forme cylindrique, le mélange dépolarisant autour du crayon.

— L'aggloméré obtenu est enveloppé automatiquement dans du papier préalablement enduit d'électrolyte sur la face qui sera en contact avec le zinc.

— Sur la chaîne de montage, on introduit l'ensemble précédent dans le tube en zinc, puis on presse le tout.

— La cale ou rondelle d'obturation est mise en place. Elle s'appuie sur le jonc du tube. On laisse un petit volume d'air entre la masse et la rondelle pour permettre aux gaz de s'échapper de l'aggloméré.

— On coule sur la rondelle une cire d'obturation qui est flambée pour assurer une bonne adhésion au tube et autour du charbon.

— Un joint plastique est placé entre le zinc et un capot métallique supérieur pour rendre étanche l'élément et assure l'isolement électrique.

— L'ensemble est introduit dans une gaine de carton bitumé. Son rôle est d'absorber le maximum de liquide en cas de percement du tube en zinc.

— L'élément est enveloppé d'un manteau métallique, d'une rondelle de fond et d'une rondelle supérieure. Ces constituants sont sertis.

— *L'élément de pile est terminé.* La pastille inférieure est estampée d'un code : les premier et second chiffres indiquent les numéros du mois de fabrication, le troisième chiffre l'année. Par exemple, 047 correspond à avril 1977.

● On **stocke** les éléments une à deux semaines dans une pièce climatisée pour laisser l'osmose se faire.

● Au cours de la chaîne on fait des **contrôles** d'humidité de tous les composants et des contrôles très précis du poids du bioxyde de manganèse. En fin de chaîne, deux contrôles automatiques sont effectués : la mesure de la force électromotrice à vide et un essai en court-circuit franc sur un ampèremètre. Les éléments éjectés sont à nouveau contrôlés manuellement, car il arrive souvent que les résultats négatifs ne soient dus qu'à des mauvais contacts. On pose la bande de garantie, on colle l'étiquette.

Les machines automatiques peuvent fabriquer, sans intervention manuelle, jusqu'à 300 éléments à la minute. Suivant leurs dimensions, ces éléments sont vendus sous l'appellation : grosse torche, dont le diamètre est 34 mm et la hauteur 61,5 mm ; moyenne torche, de 26 mm de diamètre et 50 mm de hauteur ; petite torche, de 21,5 mm de diamètre et 74 mm de hauteur ; et très petite torche ou « stylo », de 14,5 mm de diamètre et 50,5 mm de hauteur, dont l'appellation varie souvent, suivant les fabricants.

Fabrication des piles plates

Les piles plates sont composées de trois éléments en série. Contrairement aux précédentes, leur partie supérieure comprend une rondelle en carton qui s'appuie sur

▼ ***Figure 2 : fonctionnement des éléments primaires et des piles sèches.***

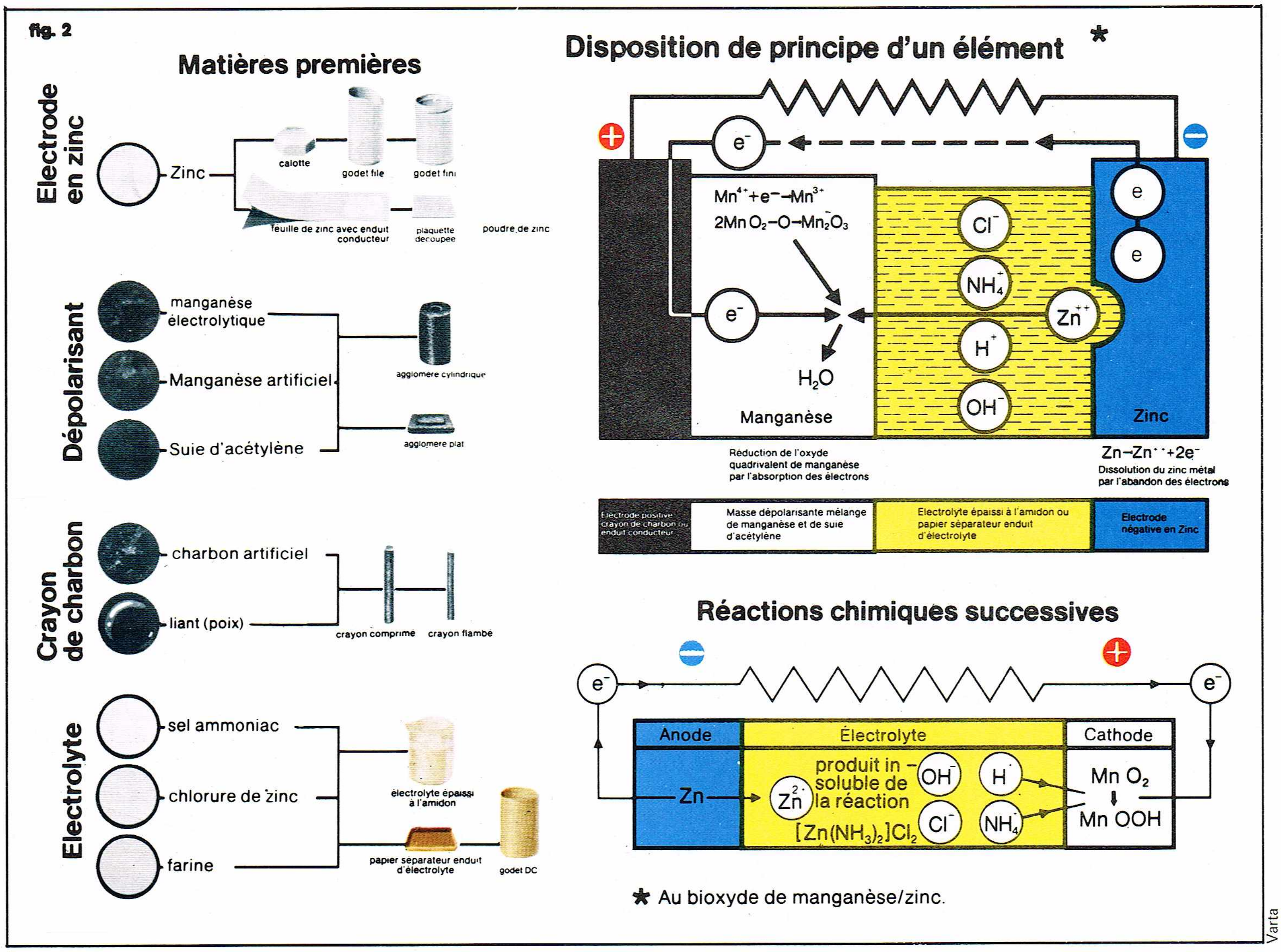

Fabrication des piles :
1 - La sélection sévère des matières premières (bioxyde de manganèse, noir d'acétylène, électrolyte, zinc) est un des facteurs de qualité d'une pile.
2 - A partir des matériaux bruts, les bobines de dépolarisant sont réalisées par frittage. Elles subissent un premier contrôle rigoureux.
3 - Après injection de l'électrolyte et de la plaquette d'isolant, sont introduits dans le godet en zinc la bobine de dépolarisant et le bâton de carbone. Cette cellule...
4 - ... passe ensuite dans un bain de cuisson. Après refroidissement, l'électrolyte est gélifié. Au cours de cette opération, une contrôleuse vérifie que la bobine est bien centrée dans le godet de zinc.
5 - Pour éviter le dessèchement des composants, la bobine est recouverte de cire. Après refroidissement, le dépôt d'un joint en polyéthylène blanc permet de libérer les gaz formés pendant la décharge et d'empêcher l'écoulement de l'électrolyte. Puis le contact positif est monté sur le bâton de carbone. Un anneau rouge isole ce contact.
6 - Puis, avant de commencer l'habillage de la pile, on vérifie le voltage et l'ampérage. Ce contrôle permet de déceler le moindre défaut qui aurait pu apparaître au cours de la production. Ensuite, le manchon de vinyl est mis en place...
7 - ... comme le contact négatif et la rondelle isolante. L'ensemble est chauffé ; en refroidissant, le manchon vinyl assure un ajustement très serré autour de la pile. Cela est la 2e protection contre le coulage de l'électrolyte. C'est une caractéristique des piles Philips.
8 - Introduction dans la chaîne des jupes métalliques.
9 - Les piles nues sont convoyées vers le poste d'habillage...
10 - ... où elles sont introduites dans les jupes métalliques.
11 - Les piles reçoivent la jupe métallique de couleur ou habillage final.
12 - Avant d'être emballées, les piles terminées sont soumises à un dernier contrôle électrique.
13 - Un exemple d'emballage des piles : emballage par plateau ou « tray pack » qui est une création Philips.

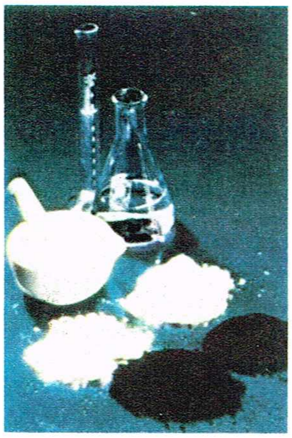
1

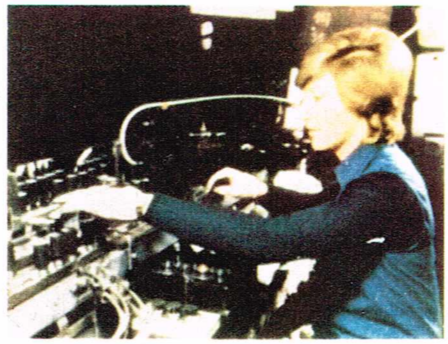
2

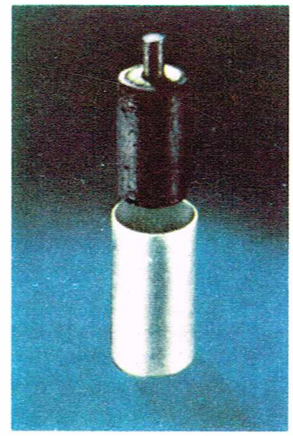
3

4

5

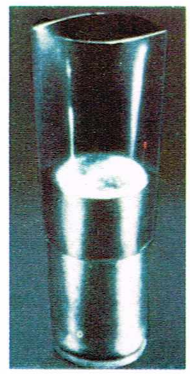
6

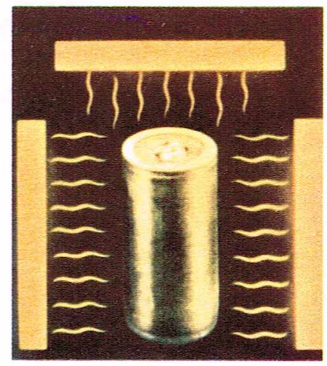
7

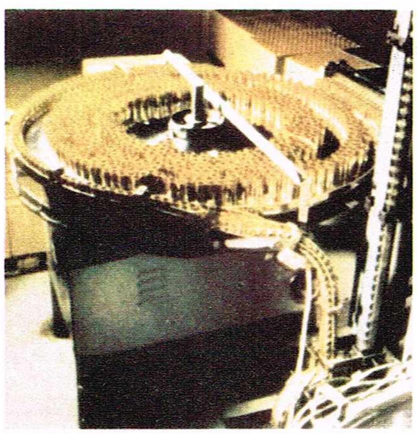
8

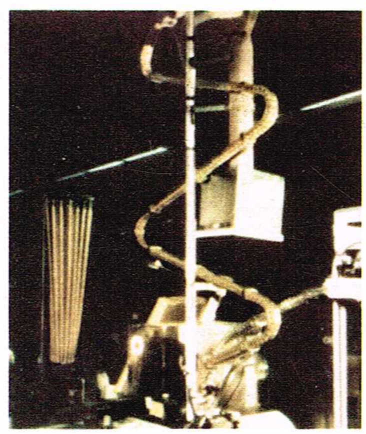
9

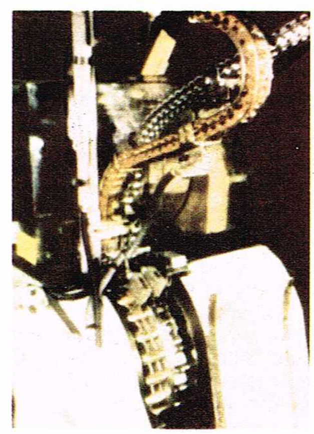
10

11

12

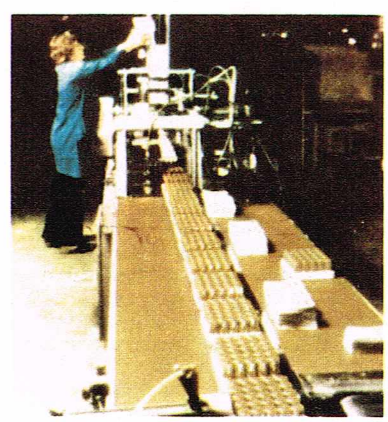
13

Document Philips

le jonc du tube de zinc. On place par-dessus de la cire qui assure l'étanchéité. Une capsule en laiton est enfoncée à force sur le crayon (*fig.* 3).

— Sur la capsule du premier élément, on soude à l'étain une lame en laiton : c'est la liaison positive. A la partie supérieure du tube, on soude sur le zinc un fil étamé.

— On soude sur le zinc du deuxième élément un fil étamé.

— On soude sur le zinc du troisième élément une lame en laiton : c'est la liaison négative.

— Ces trois éléments nus sont placés dans un étui en matière plastique et isolés les uns des autres par un séparateur en forme de U qui entoure l'élément central.

— Le fil étamé du premier élément est soudé à la capsule du deuxième élément ; le fil du deuxième élément est soudé à la capsule du troisième élément.

— On introduit le couvercle en matière plastique qui est collé à l'étui.

— On rabat les lames.

— On pose la bande de garantie.

— On colle l'étiquette.

— On contrôle la force électromotrice à vide et on fait un essai en court-circuit.

Caractéristiques des piles sèches

Le marché offre généralement aux consommateurs, et pour chaque fabricant, plusieurs prix par type de pile cylindrique. Cette différence a pour origine le bioxyde de manganèse employé :

— le moins cher, qui donne la qualité courante, est le bioxyde naturel ;

— le plus cher, qui donne les meilleures caractéristiques, est le bioxyde électrolytique ;

— la qualité intermédiaire est composée de bioxyde chimique ou d'un mélange des deux bioxydes précités.

Les piles plates ne sont généralement fabriquées qu'avec un seul type de bioxyde de manganèse.

Les accumulateurs au plomb

Constitution d'un accumulateur au plomb

Un accumulateur au plomb est constitué de plaques, de séparateurs et d'électrolyte, l'ensemble étant placé dans un bac (*fig.* 4).

• Les **plaques.** Ce sont des grilles en alliage de plomb et d'antimoine sur lesquelles on place une couche d'un mélange d'oxyde de plomb, d'eau et d'acide sulfurique. Après une opération qu'on appelle « formation », le mélange est transformé en bioxyde de plomb pour les plaques positives et en oxyde de plomb pour les plaques négatives. Les grilles sont donc remplies par une pâte qui constitue la matière active de la batterie.

Contrairement aux piles, les batteries possèdent plusieurs électrodes positives et négatives reliées entre elles par des conducteurs en plomb.

• Les **séparateurs.** Les plaques doivent être isolées électriquement les unes des autres avec un écartement régulier. Les séparateurs doivent assurer ce rôle sans gêner la circulation de l'électrolyte et en maintenant la nature active des plaques positives.

• **L'électrolyte** est un mélange d'acide sulfurique et d'eau. Les proportions sont déterminées pour que la densité soit 1,26 ou 30° Baumé en fin de charge.

• Le **bac** est un récipient destiné à contenir l'ensemble plaques + séparateurs + électrolyte. L'ébonite, utilisée pendant très longtemps, est progressivement remplacée par le polypropylène. Il ne doit pas être attaqué par l'acide sulfurique et doit résister aux chocs et aux écarts de température.

• Les **autres éléments** sont :

* Le *couvercle.* Dans les anciennes batteries, il y avait un couvercle par compartiment, dont l'étanchéité était assurée par du brai. Actuellement, le couvercle est en une seule pièce et collé à l'araldite. Quand le bac est en polypropylène, le couvercle est chauffé et thermosoudé sur le bac.

* Les *connexions entre compartiments.* Le nombre de compartiments dépend de la tension désirée. Dans les anciennes batteries, les éléments sont connectés en

fig. 3

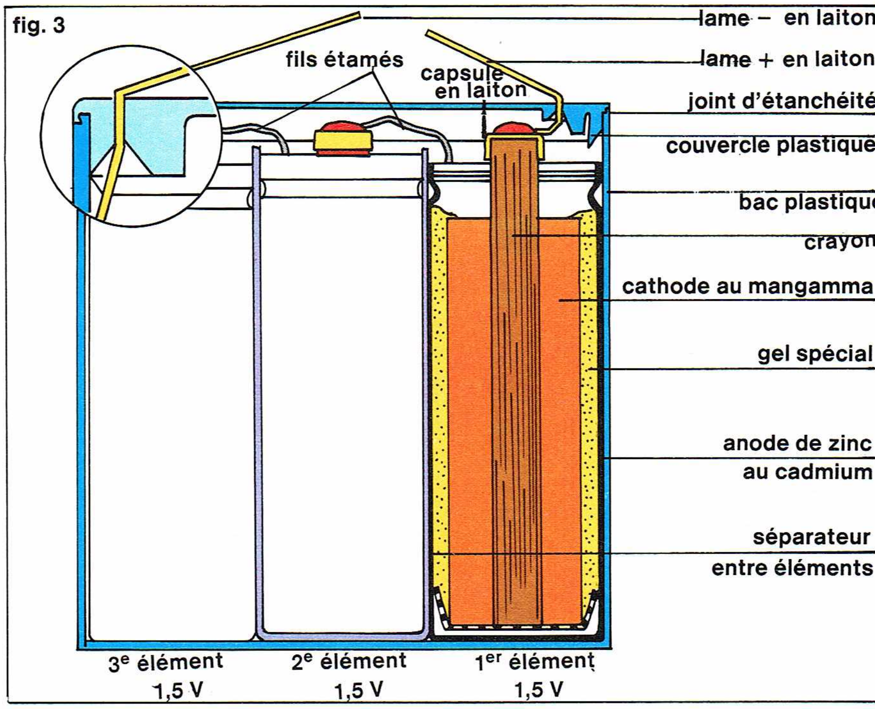

Richard Colin

▲ *Figure 3 : éléments constitutifs d'une pile sèche plate.*

Varta

◀▼ *Exemple de piles que rien ne différencie extérieurement (hormis l'habillage), alors qu'elles contiennent des éléments chimiques différents. Différents formats de piles (Varta) de 1,5 à 9 volts.*

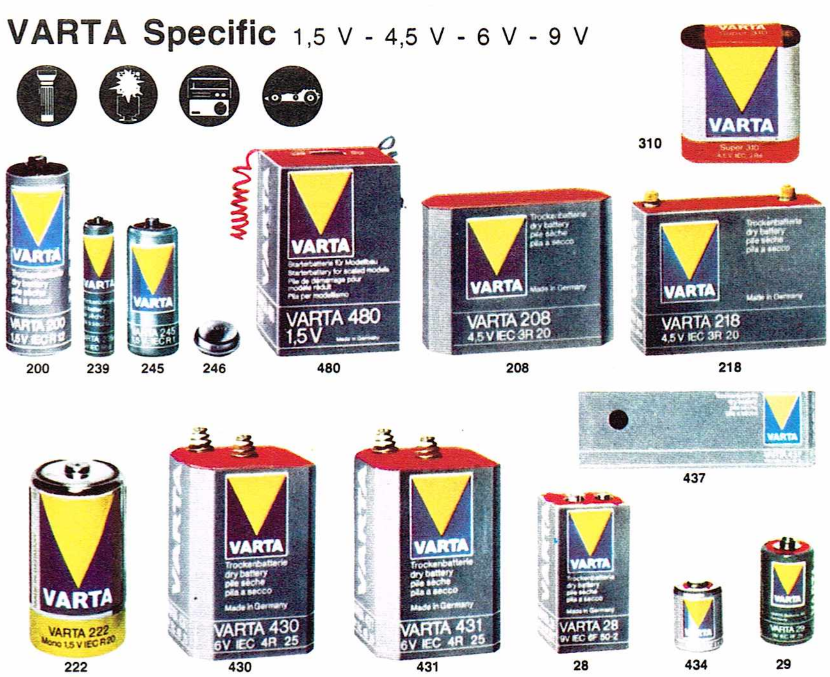

Varta

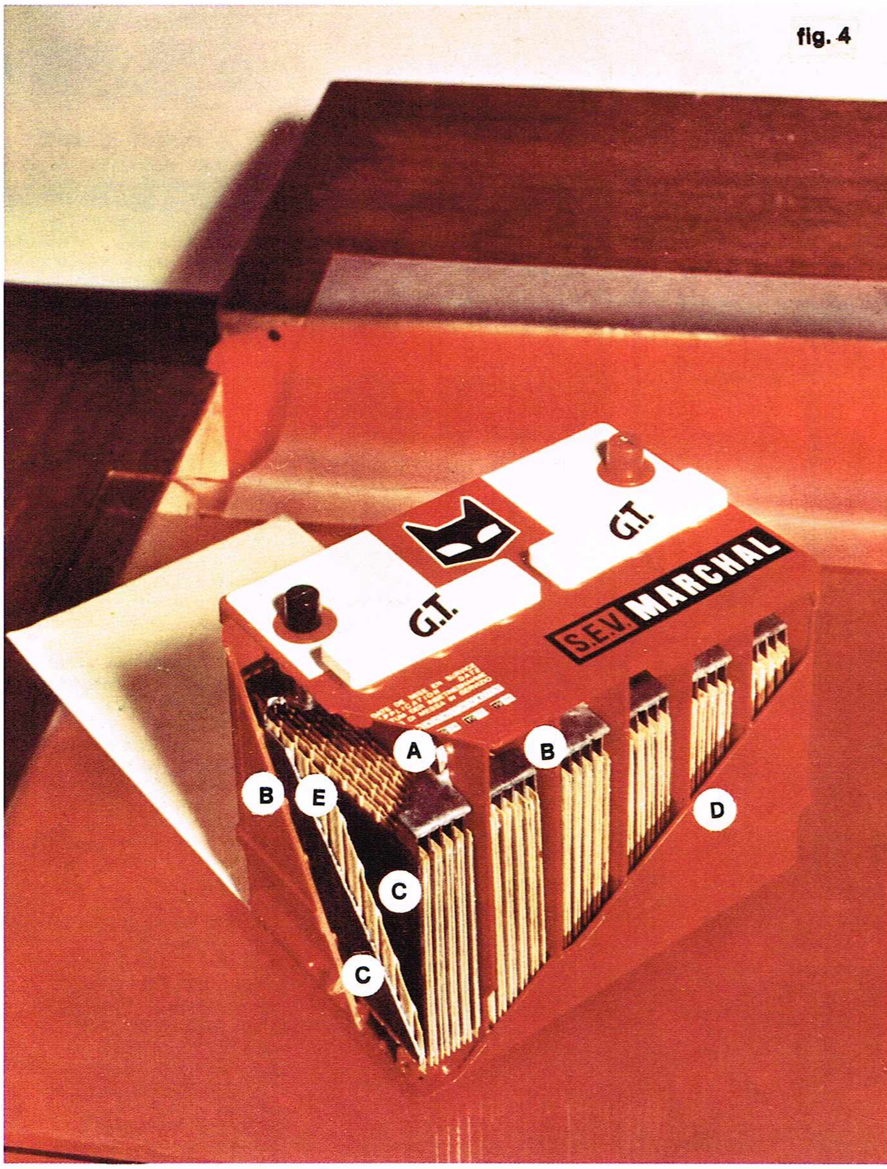

S.E.V. - Marchal

série à l'aide de ponts extérieurs qui traversent le couvercle. Dans les modèles les plus récents, ce sont des connecteurs qui traversent la cloison qui sépare les compartiments.

* Les *bornes de sortie*. Les liaisons électriques avec l'extérieur se font grâce à des bornes coniques placées à la partie supérieure. Pour éviter l'inversion des polarités, la borne positive a un diamètre plus grand que celui de la borne négative.

Fonctionnement d'un accumulateur au plomb

Tous les accumulateurs au plomb sont actuellement vendus sous forme de charge sèche. L'électrolyte est fourni séparément dans d'autres récipients. Dans cette configuration, le stockage est pratiquement illimité. Pour utiliser une telle batterie, il suffit de remplir le bac avec l'électrolyte qui est une solution de densité 1,26. Il n'y a alors aucune différence avec les anciens modèles qui étaient vendus avec l'électrolyte dans le bac.

La réaction chimique est la suivante et met en évidence la réversibilité des réactions :

$$PbO_2 + Pb + 2\,SO_4H_2 \underset{\text{charge}}{\overset{\text{décharge}}{\rightleftarrows}} 2\,SO_4Pb + 2\,H_2O$$

Pendant la décharge, le bioxyde de plomb de la plaque positive et le plomb de la plaque négative se combinent à l'acide sulfurique de l'électrolyte pour former du sulfate de plomb et de l'eau qui, en se mélangeant à l'électrolyte, fait baisser la densité. Pendant la charge, l'eau de l'électrolyte et le sulfate de plomb se combinent pour donner du bioxyde de plomb dans la plaque positive et du plomb dans la plaque négative et pour régénérer l'acide sulfurique.

Fabrication des accumulateurs au plomb

Les différentes phases de fabrication sont portées sur la *figure* 5. On peut les résumer de la façon suivante :

— Les grilles sont faites en alliage de plomb et d'antimoine, ce qui leur donne de bonnes caractéristiques mécaniques. Leur rôle est de supporter les matières actives. Elles n'interviennent pas dans la réaction chimique. Le plomb et l'antimoine sont fondus, puis coulés dans des moules dont la forme permet d'en faire des plaques positives et négatives.

— Les plaques sont obtenues à partir des grilles précédentes en les imprégnant d'une pâte de protoxyde de plomb spongieux. On concasse le plomb en une poudre très fine qui est chauffée dans un four pour être oxydée. Cette opération est surveillée minutieusement, car une oxydation trop poussée se traduirait par l'obten-

▼ *Figure 5 : synoptique de fabrication d'accumulateurs au plomb (d'après document S. E. V. - Marchal).*

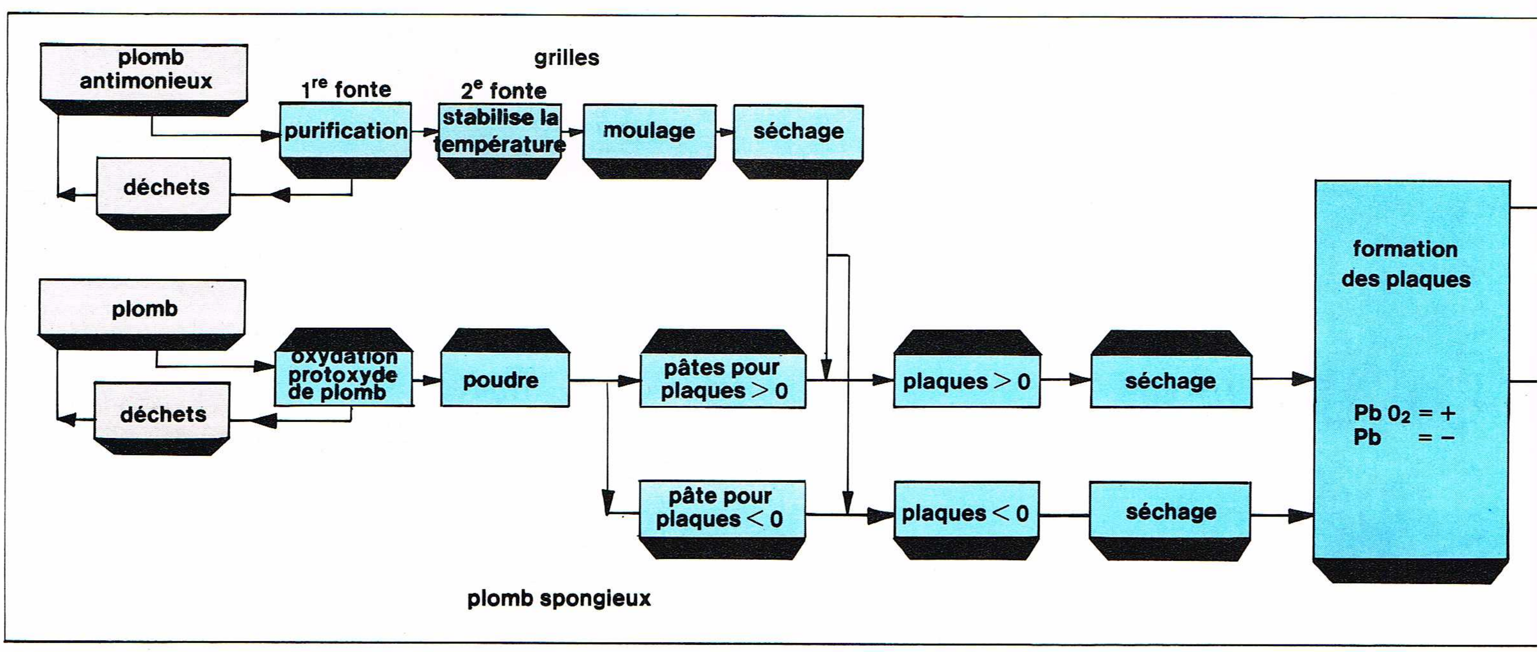

C. Bevilacqua

S.E.V. - Marchal

◀ *A gauche, un modèle de batterie datant de 1899 ; à droite, une batterie d'accumulateurs moderne.*

tion de minium. Un liant est mélangé à cette poudre, et la pâte obtenue présente l'aspect d'une argile spongieuse. Le liant permet de distinguer les plaques positives des plaques négatives.

Les premières ont une densité d'environ 4,25, alors que les secondes ont une densité d'environ 4,5. A titre indicatif, on peut rappeler que le plomb a une densité de 11,4.

— Les plaques sont ensuite formées. Cette formation est obtenue en empilant successivement les plaques positive, négative, positive, etc., dans des bacs remplis d'un mélange d'acide sulfurique et d'eau de faible concentration. On branche un générateur qui fait circuler un courant de charge. Une transformation a lieu : le protoxyde de plomb devient du peroxyde de plomb dans les plaques positives et du plomb pur dans les plaques négatives. Le générateur est débranché et les plaques sorties du bac.

— Les plaques positives sont délicatement et minutieusement lavées en eau courante de manière à éliminer l'acide et à stopper la réaction chimique. Elles sont ensuite séchées avant d'effectuer des tests de qualité : la perméabilité à l'acide, l'imperméabilité à l'eau et la résistance électrique.

— Les plaques négatives sont transportées dans des récipients pleins d'eau pour les placer dans une atmosphère de kérosène qui stabilise la réaction chimique et forme une couche protectrice. Le transport sous eau est indispensable, car le plomb à l'état pur s'enflamme à l'air.

— Le bac, réservoir destiné à recevoir les plaques, est maintenant fait en polypropylène. Ce nouveau matériau a une résistance aux chocs multipliée par 20 à — 18 °C par rapport à l'ébonite pour un gain de poids de l'ordre de 30 %. Il est, bien sûr, inattaqué par l'acide sulfurique. Pour une robustesse supérieure à celle de l'ébonite, la finesse des parois et de la cloison permet un gain en volume de 10 à 15 % au profit de la surface des plaques et de la quantité d'électrolyte.

— Les plaques sont ensuite introduites dans les bacs. Une batterie peut se composer de plusieurs éléments mis en série pour augmenter la tension aux bornes. Chaque élément comporte plusieurs plaques en parallèle. Les plaques positives et négatives doivent être isolées les unes des autres pour éviter les courts-circuits internes. Pour ce faire, on intercale des séparateurs qui présentent une face ondulée que l'on place face à la plaque positive de manière que le plus grand volume possible d'acide soit en contact avec cette plaque. Ils sont constitués en matière fibroporeuse qui permet le libre passage des ions.

— Les liaisons électriques de compartiment à compartiment se font actuellement directement à travers la cloison avec interposition d'un joint souple. Cette technique diminue la résistance des connexions et augmente la rigidité et le maintien des plaques qui sont ainsi rendues solidaires du bac.

◀ *Page ci-contre, figure 4 : A = passage direct de la connexion à travers la cloison du bac. B = la finesse des cloisons en polypropylène permet un gain en volume de 10 à 15 % par rapport aux bacs en ébonite au profit de la surface des plaques et de la quantité d'électrolyte. C = plaque. D = bac en polypropylène, matériau issu des industries du pétrole. Résistance aux chocs multipliée par 20 à — 20 °C et gain de poids de l'ordre de 30 %. Bac et couvercle sont coulés sous pression et soudés à haute température pour former un monobloc pratiquement indestructible. Intégralement imperméable à l'acide, même à long terme, il supprime toute fuite par porosité. E = séparateurs en matière fibroporeuse isolante.*

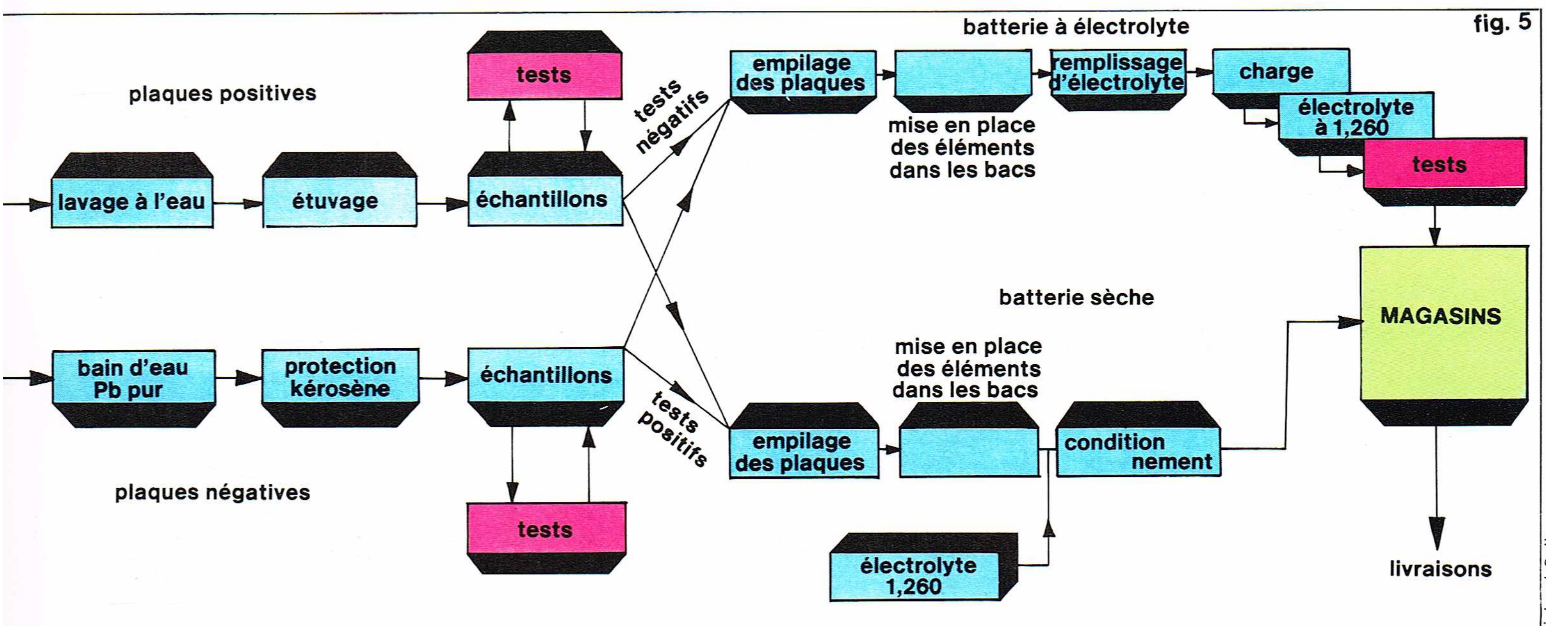

Richard Colin

▲ ***Chaîne de montage des plaques en éléments et assemblage dans le bac des batteries au plomb.***

— Le couvercle, de même nature que le bac, est soudé à celui-ci ou collé à l'araldite.

— Les batteries sont ensuite testées, puis stockées avant d'être emballées et livrées.

Types d'accumulateurs

On trouve, sur le marché, des accumulateurs au plomb qui nécessitent un entretien et d'autres qui en sont exempts. Les premiers sont très connus, ne serait-ce que par leur utilisation dans les véhicules automobiles. Les seconds reposent sur le même principe électrochimique que les précédents. Ils sont entièrement scellés, ce qui élimine le complément d'eau chimiquement pure.

Accumulateurs au plomb nécessitant un entretien

Leur constitution a été précédemment décrite.

Applications

Ces accumulateurs équipent les véhicules de tourisme, les véhicules utilitaires, les moissonneuses-batteuses, les tracteurs agricoles, les engins spéciaux, les sources de secours, etc.

Vérification d'une batterie

Une batterie neuve ne nécessite pratiquement pas de vérifications avant usage; par contre, une batterie qui a déjà servi doit être examinée sérieusement avant réemploi. L'énumération qui suit n'est pas exhaustive, elle ne fait que mettre en valeur les points principaux sur lesquels il est nécessaire de porter son attention.

* Il faut noter la date de vente de la batterie et s'assurer de sa date de dépose et du type de véhicule qu'elle alimentait.

* Examiner les faces et notamment le fond dont l'état illustre bien l'entretien du précédent utilisateur. Vérifier si le bac n'est pas cassé, fissuré, poreux en le posant sur une feuille de papier après l'avoir très soigneusement nettoyé.

* Vérifier les densités en débranchant la batterie, sans ajouter d'eau, en numérotant les éléments du pôle + vers le pôle —. Si la densité est homogène avec une dispersion inférieure à 0,05 et une valeur moyenne supérieure à 1,23, la batterie est en bon état; si la valeur moyenne est inférieure à 1,23, la batterie est à recharger. Si la densité est hétérogène avec une dispersion supérieure à 0,05, la batterie est douteuse, quelle que soit la valeur moyenne.

* Tester la décharge à l'aide d'un appareil qui mesure la tension aux bornes quand la batterie débite un courant dont la valeur voisine celle du courant de démarrage. Cette tension dépend de l'usure de la batterie et de la densité moyenne des éléments. Il faut maintenir constante l'intensité et tracer la courbe de variation de la tension.

Trois cas sont à considérer :

— Si la densité est haute et supérieure à 27 °B, la batterie est bonne si la tension ne chute pas au-dessous de 4,4 V pour une batterie de 6 V, et 8,8 V pour une batterie de 12 V.

— Si la densité est comprise entre 24 et 27 °B, la batterie est bonne mais doit être rechargée si la tension est stable et égale à 4 V pour une batterie de 6 V, et 8 V pour une batterie de 12 V.

— Si la densité est inférieure à 24 °B, il est recommandé de recharger la batterie avant de faire les tests. Dans ce cas, le test peut être satisfaisant alors que la batterie ne tient plus la charge parce que sa recharge est récente.

* Tests de conservation de charge : il faut charger la batterie après avoir vérifié les niveaux, noter les densités et la température, laisser reposer la batterie et noter périodiquement — quelques jours — les densités. Si la densité baisse de 2 °B par mois, la batterie est saine; de 4 °B par mois, la batterie est usée.

Une batterie défectueuse peut avoir un court-circuit à l'intérieur d'un élément, un court-circuit entre deux éléments, la cloison intermédiaire peut être fendue.

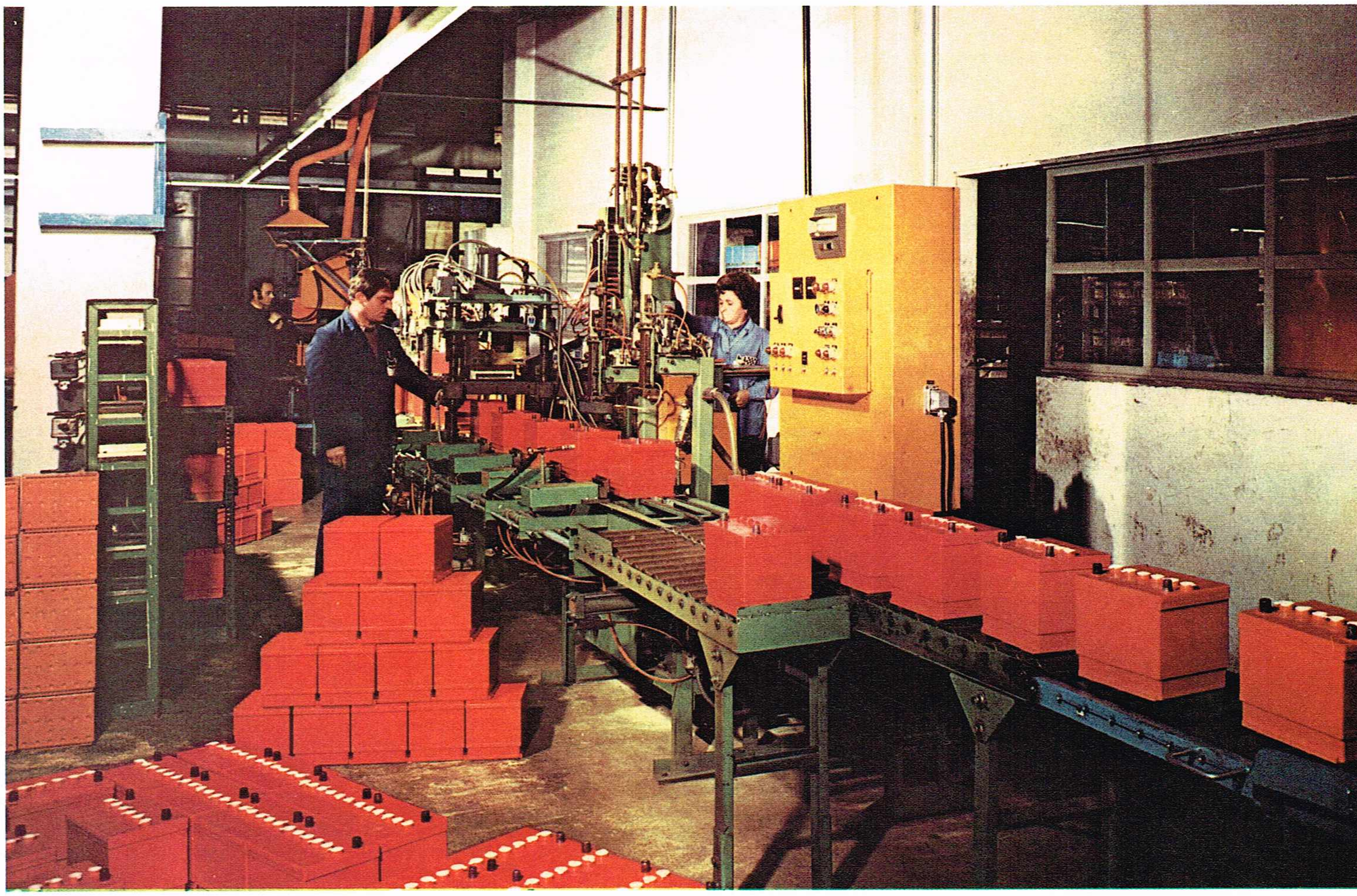

▲ *Chaîne de contrôle de l'isolation électrique entre les plaques et de l'étanchéité des batteries au plomb.*

Recommandations

Il est indispensable de vérifier régulièrement les niveaux, surtout par les fortes chaleurs où l'évaporation est plus importante et si les courants de fin de charge sont plus élevés. La batterie vieillit d'autant plus rapidement que les plaques sont découvertes. Les niveaux seront complétés par addition d'eau chimiquement pure. Ne jamais ajouter d'acide.

Recharger une batterie dont les densités sont inférieures à 27 °B ; le régime de charge doit être compris entre le 1/20ᵉ et le 1/10ᵉ de la capacité indiquée en Ah. Par exemple, une batterie de 45 Ah doit être rechargée avec une intensité comprise entre 2 et 4 ampères. Arrêter la charge quand apparaît un dégagement gazeux franc dans tous les éléments, quand la densité de l'électrolyte est constante et quand la tension est constante.

Après la charge, le niveau de l'électrolyte doit se situer à 10/15 mm au-dessus des plaques.

La batterie doit toujours être propre et sèche. Si l'électrolyte a débordé, nettoyer avec un mélange d'eau et de carbonate de soude et rincer à l'eau claire, puis sécher.

Les bornes et colliers doivent être enduits de vaseline pure. Les colliers et les bornes doivent être démontés et nettoyés sérieusement et régulièrement pour éviter la formation d'une couche isolante entre eux.

En cas de stockage, charger la batterie tous les mois. Si elle est restée trop longtemps déchargée, il faut lui faire subir une opération de « désulfatation » qui a pour but de réduire la sulfatation trop poussée qui a pris naissance. On peut soit la charger à 1/20ᵉ de sa capacité (2 A pour 45 Ah) pendant 2 heures après l'apparition des indices de fin de charge sans changer l'électrolyte, soit faire un traitement de désulfatation à l'eau. Il consiste à vider la batterie et la laisser s'égoutter, la remplir d'eau, la mettre en charge à 1/20ᵉ de sa capacité, vérifier la densité, renouveler les opérations précédentes tant que cette densité sera supérieure à 15 °B. Vider la batterie, laisser s'égoutter, la remplir avec une solution d'acide à 35/39 °B, la remettre en charge pendant deux heures et régler la densité à 30 °B environ par addition d'eau ou d'acide. Toute addition d'acide doit être suivie d'une charge d'une demi-heure minimale.

De réels progrès sont faits actuellement dans la réalisation des batteries ; les caractéristiques sont portées au *tableau* I.

Les caractéristiques des batteries varient dans de larges plages suivant les utilisations :

— batteries de démarrage pour automobiles et camions (capacité en 20 h) :
de 30 Ah, avec 9 plaques, de masse 13 kg avec liquide,
à 224 Ah, avec 26 plaques, de masse 40 kg avec liquide ;

— batteries avec électrolyte pour motocyclettes (capacité en 10 h) :
de 6 Ah avec une masse de 1,5 kg,
à 24 Ah avec une masse de 4 kg ;

▼ *Tableau I : caractéristiques des batteries d'accumulateurs au plomb nécessitant un entretien.*

Tableau I - Caractéristiques des batteries d'accumulateurs au plomb nécessitant un entretien (documentation SEV-Marchal)

Comparaison de maintien de charge dans le temps	
(test effectué avec décharge de 20 A à + 30 °C)	
— Batterie classique	: 78 mn
— Nouvelle batterie en ébonite	: 114 mn
— Batterie rouge en polypropylène	: 139 mn
Comparaison de durée, en utilisation continue du démarreur	
(test effectué avec décharge de 300 A à — 20 °C)	
— Batterie classique	: 1 mn 8 s
— Nouvelle batterie en ébonite	: 2 mn 5 s
— Batterie rouge en polypropylène	: 3 mn 9 s
Comparaison de la vitesse de rotation du démarreur	
(test effectué avec décharge de 300 A à — 20 °C)	
— Batterie classique	: 42 t/mn
— Nouvelle batterie en ébonite	: 51 t/mn
— Batterie rouge en polypropylène	: 61 t/mn

— batteries sèches pour motocyclettes (capacité en 10 h) :
de 5 Ah avec une masse de 1,5 kg,
à 37 Ah avec une masse de 13,5 kg ;

— batteries pour clôtures électriques (capacité en 200 h) :
de 12 à 70 Ah ;

— batteries pour la marine (capacité en 10 h) : de 105 Ah 12 V à 685 Ah 2 V, intensité maximale au démarrage 250 à 1 300 A.

Accumulateurs au plomb exempts d'entretien

Les plaques des grilles positives et négatives contiennent les masses actives. Des plaques positives sont prévues comme plaques d'extrémité contrairement aux constructions usuelles. Les plaques de même polarité sont amenées séparément au moyen de talons à travers le couvercle et là sont brasées avec des ponts polaires et ensuite scellées dans de la résine.

La séparation des plaques est réalisée par des séparateurs à nappe et ne peut s'échapper. La construction de la soupape ferme l'élément de façon étanche et évite d'autre part la sortie de l'électrolyte. La soupape assure également la garantie que la surpression de l'élément soit éliminée dans le cas d'une charge défectueuse. Chaque batterie est constituée de différents éléments qui sont branchés entre eux par des barrettes de liaison disposées et scellées dans les couvercles.

Applications

Appareils de radio et de télévision portatifs, magnétophones, appareils de mesure, commandes électriques, installations d'éclairage de secours, installations d'alarme, caméras électriques, installations d'alimentation de secours, installations d'émission et de réception radio, jouets, installations de signalisation et d'horloge, construction de maquettes (batteries d'entraînement, batteries de démarrage pour moteurs à combustion interne), appareils médicaux, calculateurs de table électroniques.

Décharge

En principe, la capacité pour 20 heures est indiquée comme capacité nominale (C_{20}) pour les petits accumulateurs au plomb exempts d'entretien.

Le courant de décharge nominal en 20 heures est I_{20}.

La tension nominale s'élève à 2 V par élément.

Le nombre des éléments par batterie est fonction des limites de tension supérieures ou inférieures exigées.

Les accumulateurs peuvent être très sollicités à un niveau élevé ; dans le cas d'une décharge continue, ils peuvent supporter sans difficulté des courants d'un ordre de grandeur de $40 \times I_{20}$ et momentanément jusqu'à un maximum de $400 \times I_{20}$.

La tension limite inférieure admissible et la capacité prélevable sont fonction du courant de décharge correspondant.

Il faut alors observer que la capacité prélevable décroît avec le niveau du courant de décharge. Les tensions de décharge indiquées ne devraient pas être inférieures dans l'intérêt de la longévité de la batterie.

Charge

La charge des accumulateurs doit en principe être réalisée avec une limitation de la tension du courant, et ce d'après une des deux méthodes de charge suivantes : courbe caractéristique UI et courbe caractéristique WU. Le courant de charge doit alors être réglé au maximum sur $14 \times I_{20}$.

La tension de charge doit être limitée :

— dans le cas du fonctionnement cyclique, c'est-à-dire du fonctionnement avec charge-décharge à un maximum de 2,35 V/élément ;

— dans le cas d'une charge permanente ou d'un fonctionnement avec disponibilité à 2,25-2,30 V/élément. Les courants de charge permanents ou moyens (courants de charge résiduels) s'établissent alors entre 5 et 15 mA.

Dans le cas d'une charge d'après la courbe caractéristique UI, le temps de charge s'élève à environ 15 heures. Le temps de charge jusqu'à la pleine charge des accumulateurs en service d'entretien, pour lequel la tension limite de charge se situe entre 2,25-2,30 V/élément, est en général compris, suivant le courant de charge initial, entre 20 et 48 heures. Le courant de charge résiduel, s'établissant dans le cas de ce mode de fonctionnement, garantit la préservation de la charge et peut s'écouler de façon permanente dans l'accumulateur sans effet préjudiciable, même lorsque aucun prélèvement de capacité n'a lieu pendant des périodes prolongées. D'autres genres de charges ne sont pas recommandés en raison de l'endommagement possible des accumulateurs. Si, dans des cas particuliers, des temps de charge particulièrement courts sont exigés, il est tout à fait possible d'exécuter une charge à tension constante sans limitation du courant.

La tension limite de charge ne devrait pas en règle générale dépasser 2,34 V/élément et, dans un cas exceptionnel, 2,4 V/élément. Il faut alors limiter le temps de charge au maximum à 15 heures pour éviter des surcharges importantes.

Rendement, facteur de charge

Tout comme dans le cas des batteries au plomb de construction classique, le rendement se situe à environ 90 % ; le facteur de charge s'élève donc à 1,1. C'est-à-dire que l'on doit charger les batteries avec une quantité d'électricité supérieure de 10 % à celle que l'on prélève.

Le rendement en watts/h se situe suivant la sollicitation entre 69 et 77 %.

La contenance d'énergie de la batterie se situe entre 60 et 63 Wh/litre ou 20 et 31 Wh/kg.

Autodécharge

Les accumulateurs au plomb présentent une très faible autodécharge.

L'autodécharge s'accroît de façon correspondante à des températures et une humidité de l'air plus élevées ; elle décroît de façon importante à des températures plus basses et s'arrête pratiquement à des températures inférieures à 0 °C.

Comportement de la température

Les températures admissibles pour l'exploitation de la charge et le stockage sont :

— charge : 0 à + 45 °C
— décharge : — 20 à + 45 °C
— stockage : — 30 à + 45 °C

Les capacités prélevables et le niveau de tension sont particulièrement fonction de la température comme dans le cas des accumulateurs au plomb de construction ouverte. Des températures plus élevées améliorent la capacité et le niveau de la tension, des températures plus faibles détériorent ces caractéristiques.

Longévité

Une longévité d'au minimum 200 cycles complets est escomptable pour des batteries utilisées de façon cyclique et en prenant comme référence le courant de décharge I_{20}. Le nombre de cycles s'accroît de façon importante dans le cas de décharges partielles. La valeur indicative ci-dessus mentionnée suppose un traitement parfait, en particulier une charge correcte, et est valable pour la température ambiante.

Les batteries destinées à un fonctionnement à charge permanente atteignent une longévité de 4 à 5 ans dans le cas d'une utilisation correcte.

Stockage

Les températures de stockage admissibles vont de — 30 °C à + 45 °C. Le stockage à humidité de l'air normale et à des températures comprises entre 10 et 20 °C est le plus recommandable.

Les accumulateurs doivent être normalement chargés avant le stockage. Dans le cas d'une température d'environ 20 °C, une durée de stockage d'environ 15 mois est possible sans recharge. Pour obtenir des valeurs de longévité optimales, des recharges sont recommandées après une durée de stockage de 4 à 6 mois.

Dans le cas de températures supérieures, la durée du stockage se réduit de façon correspondante, par exemple, à 45 °C environ 3 à 5 mois. Dans le cas de températures plus basses, l'intervalle jusqu'à la recharge s'accroît.

Les accumulateurs cadmium-nickel

Constitution d'un accumulateur cadmium-nickel

Il en existe deux types : les accumulateurs à électrodes standards et les accumulateurs à électrodes frittées. Ils se présentent sous trois formes : les éléments boutons à électrodes standards dont la capacité est comprise entre 10 mAh et 1 Ah, les éléments cylindriques à électrodes standards et frittées dont la capacité est comprise entre 100 mAh et 7 Ah, et les éléments prismatiques à électrodes standards et frittées de capacité comprise entre 1,6 Ah et 23 Ah.

Éléments boutons

Les éléments boutons se composent d'un godet formant boîtier (pôle positif) et d'un couvercle (pôle négatif), qui sont pourvus de cosses à souder dans les modes d'exécution normaux. Les électrodes sont constituées de pastilles pressées, enfermées dans une toile métallique en nickel, entre lesquelles se trouve un séparateur à haute porosité. La fermeture s'opère par le sertissage du bord du godet sur le couvercle, avec interposition d'un anneau d'étanchéité en matériau synthétique qui assure également l'isolement électrique (*fig.* 6).

Au lieu d'électrodes simples, certains éléments boutons de série sont munis d'électrodes doubles. Grâce à cette construction, ces éléments sont caractérisés par une résistance interne particulièrement faible et, de ce fait, se prêtent spécialement à des décharges très élevées sans variation de tension.

Éléments cylindriques

A électrodes standards

Les éléments cylindriques à électrodes standards se composent d'un godet en acier étiré à cannelures à l'intérieur duquel sont introduites les électrodes. L'électrode positive ainsi que les divers segments négatifs sont enveloppés chacun dans une toile métallique en nickel. Un séparateur à haute porosité isole les électrodes entre elles. L'électrode négative est située contre le boîtier métallique en un contact intime avec lui. L'étanchéité est assurée par une rondelle en matériau synthétique à même le couvercle de l'élément. La sortie étanche pour

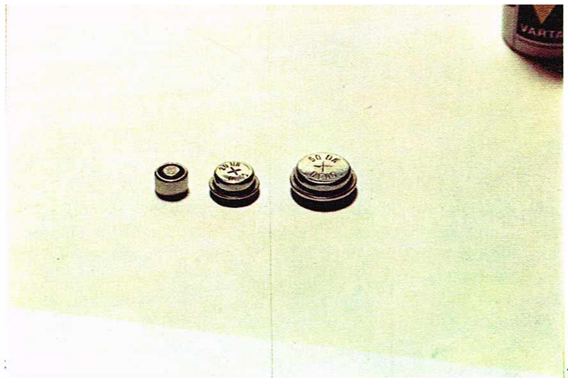
Varta

◀ *Accumulateurs Varta au cadmium-nickel ou au plomb, étanches, de 1,2 à 9 volts.*

Varta

Varta

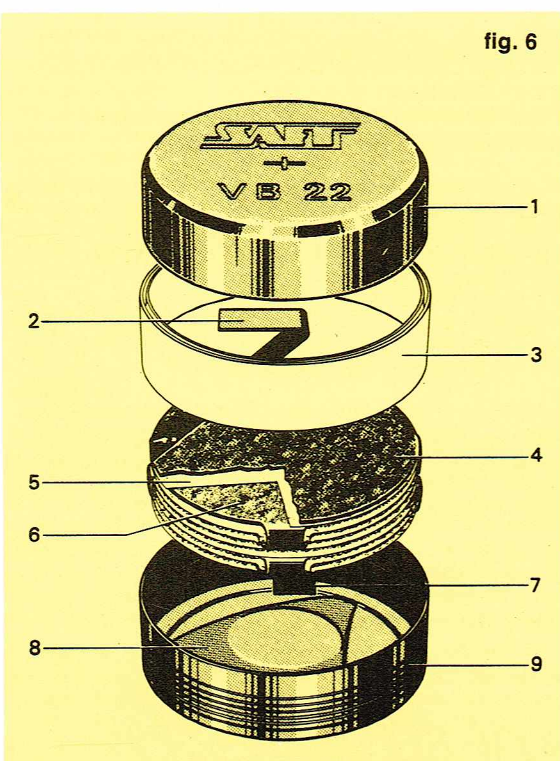

Saft

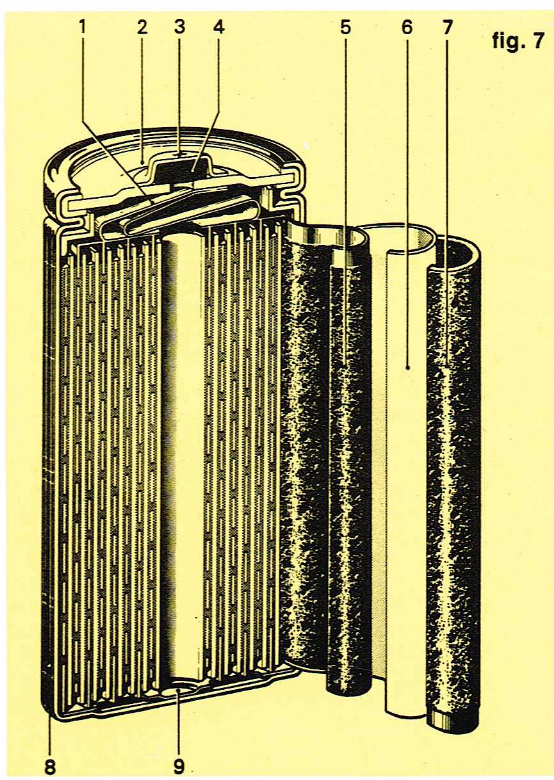

Saft

◀ *A gauche, figure 6 ; vue éclatée d'un élément bouton au cadmium-nickel : 1, coupelle positive ; 2, connexion positive ; 3, joint isolant ; 4, électrode positive ; 5, séparateur ; 6, électrode négative ; 7, connexion négative ; 8, ressort ; 9, coupelle négative.*

A droite, figure 7 ; vue éclatée d'un élément cylindrique au cadmium-nickel : 1, connexions positives ; 2, couvercle ; 3, bossage central (pôle positif) ; 4, dispositif de sécurité ; 5, plaque positive ; 6, séparateur ; 7, plaque négative ; 8, bec en acier nickelé ; 9, connexions négatives.

▶ *A gauche, figure 8 ; vue éclatée d'un accumulateur de puissance au cadmium-nickel particulièrement destiné aux applications nécessitant de très fortes intensités de décharge : 1, couvercle ; 2, circlip ; 3, rondelle élastique ; 4, rondelle plate ; 5, joint tore ; 6, borne ; 7, assemblage électrodes-bornes ; 8, séparateur ; 9, électrode négative ; 10, électrode positive ; 11, déflecteur ; 12, bac ; 13, joint tore ; 14, bouchon remplissage ; 15, soupape.*

A droite, figure 9 ; accumulateur tubulaire au cadmium-nickel spécialement destiné aux appareils de traction et de manutention : 1, bornes positives en acier nickelé ; 2, bornes négatives en acier nickelé ; 3, écrous de serrage des connexions en acier nickelé ; 4, rondelle de serrage en acier nickelé ; 5, écrous de presse-étoupe en acier nickelé ; 6, rondelles d'isolement en polyamide ; 7, tube positif en acier nickelé ; 8, séparateur en PVC ; 9, plaques négatives frittées ; 10, isolant interne en PVC ; 11, bacs en acier soudé ; 12, revêtement isolant en résine Epoxy ; 13, cale supérieure en polyamide ; 14, orifice de remplissage ; 15, clapet d'obturation ; 16, cale inférieure en polypropylène ; 17, semelle en élastomère.

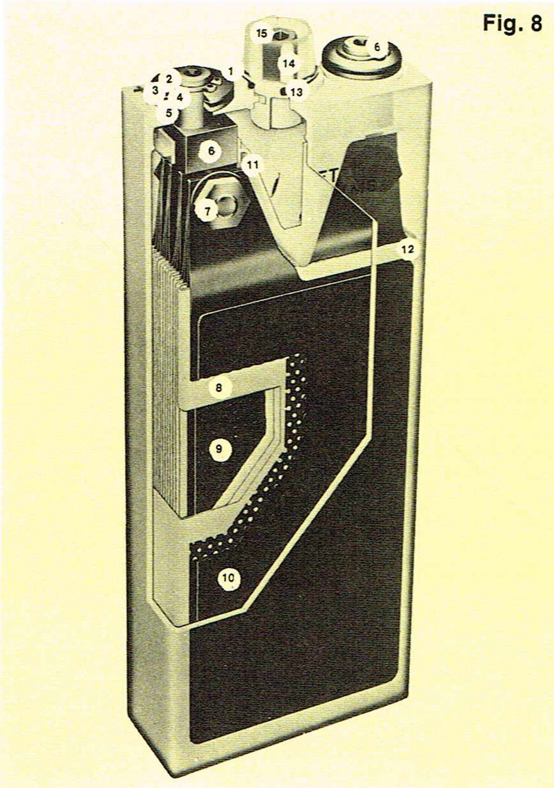

Fig. 8

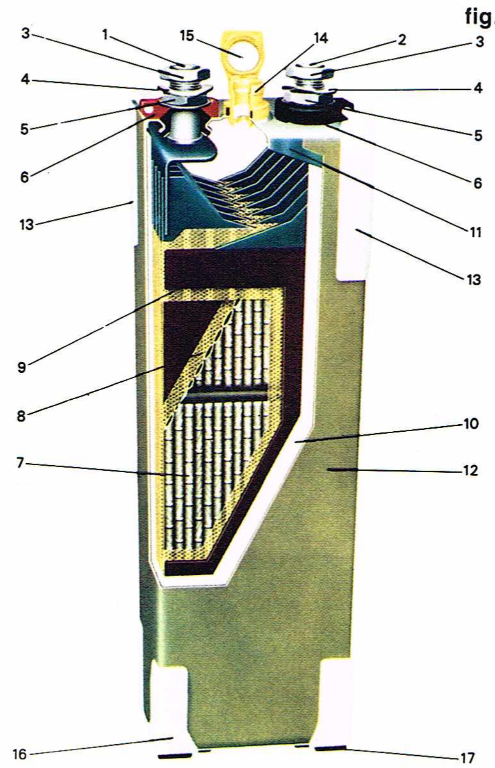

fig. 9

le pôle positif est pratiquée dans la rondelle qui sert de couvercle : ce pôle est constitué par un téton de contact ou par une cosse à souder suivant les types (*fig.* 7).

A électrodes frittées

Dans les éléments cylindriques à électrodes frittées, les électrodes ont la forme d'un enroulement fabriqué à partir de bandes frittées à haute porosité. Elles sont logées dans un boîtier d'acier étiré, nickelé.

Cette structure frittée des électrodes est imprégnée d'une combinaison nickel-oxygène pour l'électrode positive et cadmium-oxygène pour l'électrode négative. L'isolement des électrodes entre elles est assuré par un séparateur en tissu synthétique. Le conducteur de l'électrode négative est soudé au boîtier, tandis que l'électrode positive est reliée au couvercle du boîtier, également en tôle d'acier nickelé. Un anneau en matériau synthétique assure l'étanchéité de l'élément et l'isolement du couvercle du boîtier. L'électrolyte est constitué d'une lessive de potasse maintenue dans les électrodes et le séparateur.

Les éléments cylindriques à électrodes frittées présentent une résistance interne très faible. Ils sont donc particulièrement aptes aux grands débits dans de bonnes conditions de tension. Ces éléments peuvent débiter en continu des courants dont la valeur peut atteindre jusqu'à 20 fois l'intensité nominale et, pour des décharges brèves, jusqu'à 40 fois cette valeur. Dans les décharges par impulsions, ils peuvent même fournir des intensités encore plus élevées.

Éléments prismatiques

A électrodes standards

La structure des éléments prismatiques à électrodes standards ne se différencie que peu de celle des éléments au cadmium-nickel à sacs, aérés. La masse active est enfermée dans des sacs rapportés sur des plaques. Les plaques positives et négatives sont respectivement assemblées par jeux. Les deux jeux sont isolés l'un de l'autre par un séparateur en matériau synthétique. Alors que l'un des jeux de plaques est en contact électrique avec le boîtier, le pôle de l'autre traverse le couvercle du boîtier par une sortie isolée électriquement.

Les éléments de 4,5 Ah et plus sont équipés de bornes à vis ; au-dessous de 4,5 Ah, ils sont munis d'une borne à vis et d'une cosse à souder fixée sur le boîtier par quelques points de soudure électrique.

A électrodes frittées

Le principe de construction des éléments prismatiques à électrodes frittées est similaire, hormis le fait que leurs électrodes sont constituées par des structures frittées présentant une grande porosité. Elles sont imprégnées d'une combinaison nickel-oxygène pour la partie positive, et cadmium-oxygène pour la négative. Les plaques négatives et positives sont respectivement réunies en deux jeux d'électrodes. L'isolement des deux électrodes entre elles est pareillement assuré par un séparateur en matière synthétique.

Alors que l'un des jeux de plaques est en contact électrique avec le boîtier de l'élément, le contact de l'autre traverse le couvercle du boîtier par un orifice de sortie isolé. On utilise comme électrolyte une lessive de potasse maintenue dans les électrodes et le séparateur.

Fonctionnement d'un accumulateur cadmium-nickel

La réaction chimique est la suivante et met en évidence la réversibilité des réactions :

$$\underbrace{2\,NiO\,(OH)}_{\text{électrode positive}} + \underbrace{Cd}_{\text{électrode négative}} + 2\,H_2O \underset{\text{charge}}{\overset{\text{décharge}}{\rightleftarrows}} \underbrace{2\,Ni\,(OH)_2}_{\text{électrode positive}} + \underbrace{Cd\,(OH)_2}_{\text{électrode négative}}$$

Au cours de la décharge, la masse positive 2 NiO (OH) se réduit en 2 Ni $(OH)_2$, alors que Cd s'oxyde la masse négative. Nous voyons que les deux parties d'eau 2 H_2O proviennent de l'électrolyte.

Assemblage des éléments

Éléments boutons

On les assemble en série en les montant les uns sur les autres. Les liaisons électriques se font par soudure pour les éléments à cosses à souder ou par simple contact pour les éléments à boutons de contacts à pression. Il est évident que la meilleure solution est la première. Il ne faut jamais souder sur les éléments. Si l'on emploie

des ressorts de contact, utiliser de l'acier nickelé, et proscrire le cuivre et les alliages cuivreux qui peuvent donner naissance à des dépôts et engendrer la corrosion.

Éléments cylindriques et prismatiques

Sauf contre-indication du fabricant, il n'y a pas de difficultés à associer en série des éléments.

Caractéristiques

— La tension nominale d'un élément cadmium-nickel est 1,2 volt. C'est la valeur moyenne de la tension aux bornes au cours du temps total de décharge. Quand l'accumulateur vient d'être chargé, sa force électromotrice est comprise entre 1,35 et 1,40 volt.

— La capacité nominale est donnée pour une décharge en 10 heures et l'intensité nominale par la valeur du courant pendant ces 10 heures de débit, exception faite de certains types pour lesquels la durée de décharge est 5 heures. A 20 °C, la tension en fin de décharge est comprise entre 1 et 1,1 volt.

— La température influe faiblement sur la capacité et la tension, mais soulignons que les éléments à électrodes standards sont plus affectés par les basses températures que ne le sont les éléments à électrodes frittées.

— Le rendement est 0,72 pour les éléments à électrodes standards et 0,84 pour les éléments à électrodes frittées. Les facteurs de charge varient entre 1,4 et 1,2, ce qui signifie qu'il faut faire absorber à la charge 40 à 20 % de plus que la capacité qui avait été prélevée.

— L'autodécharge est faible pour les éléments à électrodes standards et légèrement plus élevée pour les éléments à électrodes frittées. Elle augmente avec la température et le degré hygrométrique. Elle s'annule pratiquement à 0 °C.

— La résistance interne dépend du niveau de charge, de la capacité et du mode de construction. Pour un élément bouton, à électrodes standards, la résistance interne est de l'ordre de 0,5 ohm au début de la décharge, alors qu'un élément cylindrique à électrodes frittées aura 0,01 ohm.

— Durée de vie. L'une des qualités les plus précieuses, qui, dans nombre de cas, est déterminante pour l'emploi de l'accumulateur au cadmium-nickel étanche, est son aptitude extraordinaire à résister aux efforts mécaniques les plus rudes et les plus forts, grâce à sa construction et aux matériaux qu'elle met en œuvre. Un autre avantage de l'accumulateur au cadmium-nickel réside dans sa grande aptitude au stockage, de sorte que sa durée en service ne dépend pratiquement pas de son ancienneté, mais des contraintes électriques imposées.

Avec des accumulateurs travaillant seulement en charge/décharge (fonctionnement cyclique), on table, par exemple, sur une durée de vie de plus de 500 cycles dans le cas des éléments à électrodes frittées, cela sous courant nominal. Il faut compter ensuite sur une réduction d'environ 20 à 25 % de la capacité, mais si la charge est faite chaque fois après une courte décharge partielle, la durée de vie, exprimée en nombre de décharges partielles, augmente considérablement. Avec les éléments à électrodes frittées en charge permanente, on peut compter sur une durée de vie de cinq ans environ, avec une réduction de la capacité d'environ 30 à 40 % lorsque l'intensité du courant de charge est comprise entre le cinquième et la moitié de l'intensité I_{10} du courant de décharge normal en 10 heures, appelée aussi intensité nominale de charge (I_{10}).

On dispose pareillement d'un nombre considérable de résultats de recherches, effectuées entre-temps, au sujet de l'influence de la charge rapide sur la durée de vie des éléments frittés, en particulier sous l'intensité maximale $20 \times I_{10}$ admise pour ce mode de charge. Si la charge rapide est menée de manière telle que 80 % de la capacité soit chaque fois à nouveau disponible, la durée de vie moyenne dépasse 500 cycles, avec une perte de capacité de 20 % environ. Ainsi, la durée de vie n'est pas affectée par la charge rapide.

Avantages des accumulateurs au cadmium-nickel

Ils sont utilisables quelle que soit la position où on les place, exécutables sous les dimensions les plus réduites et, comme d'autres éléments de circuits électriques, incorporables à demeure avec ceux-ci. Comme ils ne nécessitent aucun entretien, on les emploie principalement pour la fourniture de courant dans les petits appareils portatifs.

Ils ont une longue durée de vie ; une bonne tenue de la tension en cours de décharge, même aux débits élevés ; une insensibilité aux décharges profondes et aux surcharges ; des possibilités d'utilisation même aux basses températures jusqu'à — 40 °C, une grande résistance mécanique ; une autodécharge minime, une technique de charge des plus simples ; une aptitude au stockage quel que soit le niveau de la charge.

Les éléments boutons sont utilisés pour les appareils de prothèse auditive, les lampes de poche, les rasoirs électriques, les instruments de mesure, les jouets à moteur électrique, les générateurs de flashes, les Dictaphones de poche, les récepteurs radiophoniques, les installations horlogères et signalisatrices, les appareils électroniques, les commandes électriques, le fonctionnement des petits moteurs pour diverses applications, les émetteurs et récepteurs pour commande à distance.

Les éléments cylindriques sont utilisés pour les rasoirs électriques, les brosses à dents électriques, les appareils portatifs de radio, les électrophones et les téléviseurs portatifs, les lampes pour l'horlogerie et la signalisation, les commandes électriques, les instruments de mesure, les outils électriques, les jouets.

Les éléments prismatiques sont utilisés pour les radio-récepteurs, électrophones et téléviseurs portatifs, les installations radiophoniques d'émission et de réception, les instruments de mesure, les appareils générateurs de flashes, les commandes électriques, les Dictaphones, les installations de signaux d'alarme lumineux, et, en courant de secours, les installations de signalisation et avertissement de petite puissance.

Toute une série de batteries de piles sèches peuvent être remplacées par des éléments ou batteries au cadmium-nickel étanches, grâce à leurs dimensions extérieures identiques. Le *tableau* II donne quelques caractéristiques des accumulateurs cadmium-nickel.

▼ ***Tableau II :** caractéristiques de quelques types d'accumulateurs cadmium-nickel.*

Tableau II - Caractéristiques de quelques types d'accumulateurs cadmium-nickel

Éléments boutons à électrodes standard

La capacité en 10 heures varie :

— de 10 mAh pour une masse de 0,8 g, dimensions { ∅ = 7,65 mm ; h = 5,2 mm

— à 1 Ah pour une masse de 57 g, dimensions { ∅ = 50,3 mm ; h = 10 mm

Éléments cylindriques à électrodes frittées

La capacité en 5/10 heures varie :

— de 100 mAh pour une masse de 7,3 g, dimensions { ∅ = 15 mm ; h = 17 mm

— à 7 Ah pour une masse de 237 g, dimensions { ∅ = 33,5 mm ; h = 94 mm

— et 10 Ah pour une masse de 400 g, dimensions { ∅ = 42 mm ; h = 89 mm

Éléments prismatiques de petite puissance

La capacité en 10 heures varie :

— de 90 mAh pour une masse de 45 g, dimensions { L = 26 mm ; l = 15 mm ; h = 49 mm

— à 23 Ah pour une masse de 1 390 g, dimensions { L = 91 mm ; l = 51 mm ; h = 125 mm

Éléments prismatiques de grande puissance

Utilisés pour démarrage des moteurs thermiques, locomotives Diesel et locotracteurs, turbotrains, groupes électrogènes, alimentation des disjoncteurs, fourniture d'énergie de secours.

La puissance spécifique est très élevée : 400 W/kg et 1 100 W/dm³ à 20 °C.

La capacité en 10 heures varie :

— de 35 Ah à 320 Ah en bac acier ou bac plastique

Éléments prismatiques pour engins de manutention

La capacité en 5 heures varie :

— de 140 Ah à 1 000 Ah pour des masses de 8 à 40 kg

Brandt - Photo Bazaine Publicité

▲ *Place de l'équipement électroménager dans la cuisine moderne.*

ÉLECTROMÉNAGER

Ustensiles et appareils de préparation des aliments

Ustensiles de préparation des aliments

La panoplie d'ustensiles à main (le fouet à main, le pilon, le hachoir « bercoir ») a été complétée à partir de 1860 par une série d'ustensiles mécaniques. Les premiers à apparaître sont les batteurs et les éplucheurs de pommes, qui seront suivis du hachoir à vis, des râpes mécaniques et, vers 1920, du moulin à légumes. Celui-ci se présentait sous la forme d'une casserole équipée d'un moulinet et dont le fond était percé de trous. Il fut tout de suite très bien accueilli.

Aujourd'hui, les ustensiles tels que le presse-agrumes à main, le hachoir mécanique, la râpe à main ou mécanique, le couteau-éplucheur, le moulin à légumes, le fouet à main restent toujours présents sur le marché. En effet, il s'agit d'instruments de cuisine peu coûteux, pratiquement inusables et aux performances d'usage très satisfaisantes. L'utilisation d'un moulin à légumes pour passer la soupe est sans danger, la préparation d'une purée à l'aide d'un presse-purée, d'un moulin à légumes ou d'un fouet évite d'obtenir une « purée-colle », et aucun moyen ne permet d'effectuer l'épluchage d'un kilo de pommes de terre plus rapidement qu'un couteau-éplucheur.

Appareils de préparation des aliments

Au début des années 1950, l'introduction du moteur électrique a bouleversé le marché. Les nouveaux appareils sont alors apparus : la centrifugeuse, pour extraire le jus des légumes et des fruits, le mixer, pour obtenir les mélanges, le hachoir à couteau pour hacher la viande, le robot de cuisine combinant toutes ces fonctions grâce à ses multiples accessoires.

Ces appareils électriques ont permis de diminuer l'effort à fournir durant l'opération, mais leur usage est devenu de plus en plus complexe. Ils sont aussi plus coûteux que les ustensiles, leur bruit est souvent trop élevé, et la multitude de leurs accessoires en rend le rangement et le montage fastidieux. A titre d'exemple, si l'opération « passer la soupe » est réalisée non plus à l'aide d'un moulin à légumes mais d'un mixer bol, une série de précautions est à prendre, compte tenu de la vitesse de rotation du couteau (de l'ordre de 20 000 tours par minute).

Les appareils électriques n'ont donc pas pu remplacer les ustensiles, exactement comme le rasoir électrique n'a pas gagné la bataille contre la lame et le rasoir mécanique. De cet exemple nous pouvons déduire que l'introduction d'innovations techniques et technologiques n'améliore pas nécessairement la valeur d'usage du produit.

Battre et pétrir

Ustensiles et appareils : le fouet à main, le batteur mécanique, le batteur électrique, le pétrisseur électrique.

Au temps où la cuisson du pain se faisait au foyer, le pétrissage à la main était l'un des travaux domestiques les plus pénibles. Mais la tradition d'utiliser de la pâte levée pour le pain ou la pâtisserie se perd actuellement de plus en plus. D'autre part, la préparation des pâtes, telle la pâte feuilletée, brisée ou sablée, ne nécessite aucun appareil, puisque la pâte feuilletée se travaille exclusivement à la main et que la pâte brisée s'obtient plus facilement à la main qu'à l'aide d'un appareil.

En fait, on peut dire que le pétrissage est l'une des tâches culinaires où l'utilisation des appareils électriques n'est pas justifiée. Le pétrisseur électrique est donc rarement utilisé, et les spécialistes lui reprochent souvent une trop grande vitesse de rotation, néfaste au bon pétrissage.

Par ailleurs, l'utilisation de la pâte surgelée achetée dans le commerce a remplacé en grande partie sa préparation à la maison.

En revanche, lorsqu'il s'agit de battre les blancs en neige, l'utilisation de la fourchette, du fouet à main ou du batteur mécanique a généralement été délaissée au profit d'un batteur électrique. Les tout premiers batteurs mécaniques, datant du XIX^e siècle, témoignent aussi bien du souci d'alléger le travail que de celui de mettre à profit les inventions mécaniques de l'époque (découplage de vitesse par des roues dentées de différentes dimensions).

Le batteur électrique introduit sur le marché vers les années 1950 est souvent équipé de plusieurs types de fouets. Il peut être soit tenu simplement dans la main, soit posé sur un socle équipé d'un bol servant de pétrin, souvent entraîné dans un mouvement rotatif pendant l'action des fouets. Pour monter une sauce, telle une mayonnaise, à l'aide d'ustensiles à main ou mécaniques, il est préférable d'utiliser un batteur électrique, et à plus forte raison un mixer bol qui simplifie l'opération et donne de meilleurs résultats.

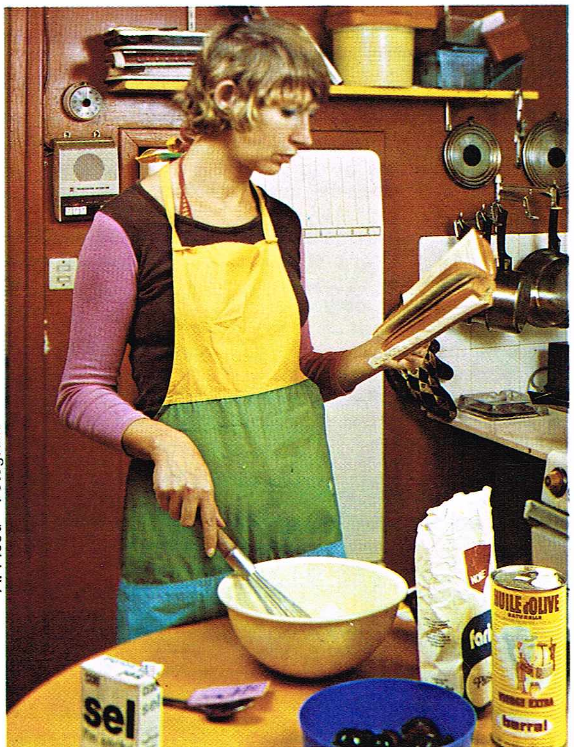

A. Picou - Fotogram

Mais, à nouveau, c'est la sauce préparée industriellement et achetée dans le commerce qui se popularise de plus en plus.

Écraser les légumes

Ustensiles et appareils : moulin à légumes, mixer bol, mixer plongeant.

Autrefois, le potage mijotait durant plusieurs heures sur un feu doux, et était consommé sans aucune préparation préalable. C'est seulement à partir des années 1920 qu'en France le potage aux légumes est passé au moulin. Celui-ci se présentait d'abord sous la forme d'une casserole percée de trous et dotée d'un moulinet, c'est plus tard qu'il a pris sa forme actuelle. Sa création est liée à la naissance de plusieurs entreprises, dont certaines ont pu, vers les années 1950, combiner un moteur électrique et des ustensiles, et développer ainsi la gamme du petit électroménager. Le succès du moulin à légumes est confirmé par sa longue présence sur le marché, après 60 ans d'existence.

Le mixer bol a en partie remplacé le moulin à légumes. Il est doté d'un moteur de faible puissance qui entraîne à grande vitesse le contenu situé au fond du bol (2 000 tours par minute). Il permet d'écraser plus finement les légumes et donne au potage un aspect de velouté. Mais son utilisation nécessite quelques précautions si l'on veut éviter les risques d'éclaboussures et les fausses manœuvres. De plus, il est très bruyant, son niveau sonore dépassant souvent 80 décibels. Les utilisateurs font également remarquer qu'un mixer bol ne peut pas remplacer complètement le moulin à légumes, parce qu'il ne permet pas de séparer les déchets (pépins, noyaux, peau).

Le mixer plongeant est fondé sur le même principe, mais le couteau est fixé sur un pied et plongé dans un récipient indépendant. Il doit être utilisé avec les mêmes précautions, mais son nettoyage est plus rapide. Son emploi est cependant à déconseiller pour la préparation de la purée, car la vitesse de son couteau est trop élevée, ce qui alourdit le mélange.

Hacher

Ustensiles et appareils : hachoir à main, hachoir mécanique, hachoir électrique.

Hacher la viande, les légumes et les herbes sont des opérations culinaires très courantes, et c'est le couteau de cuisine qui est le plus fréquemment utilisé, sauf pour la viande. Le hachoir à main, appelé aussi « bercoir », fait partie des rares ustensiles utilisés depuis des siècles, mais son utilisation exige une certaine habileté.

Actuellement, hacher la viande à la maison se fait de plus en plus rarement. En effet, la possibilité d'acheter la viande hachée a depuis une dizaine d'années pratiquement périmé l'utilisation d'un hachoir ménager, alors que celui-ci était indispensable pour la préparation de la charcuterie (saucisses, saucissons, tête pressée).

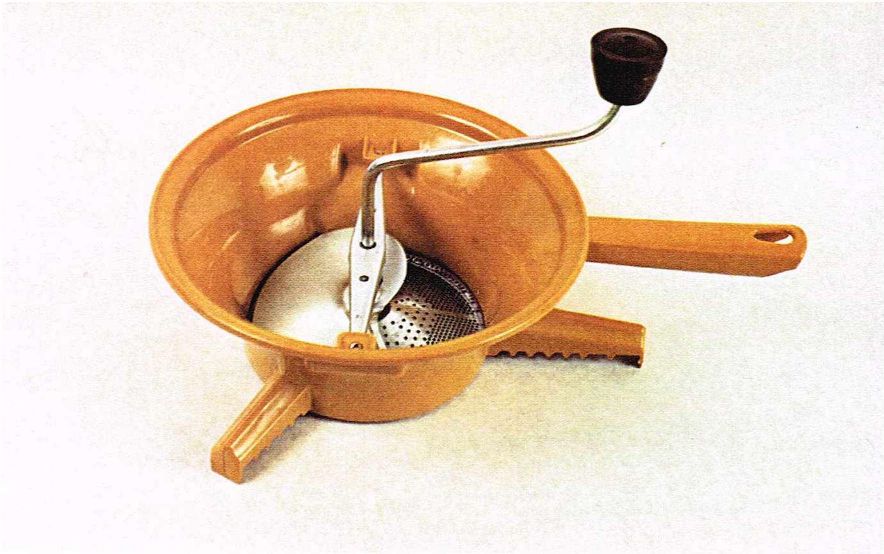

A. Hatala

▲ *Moulin à légumes.*

Le hachoir électrique a repris le principe de fonctionnement du hachoir mécanique (hachoir à vis) ; il est doté d'un entonnoir assez élevé et d'un poussoir afin d'éviter les fausses manœuvres. Il est généralement équipé de plusieurs grilles interchangeables qui définissent la finesse du hachage.

Apparu sur le marché depuis plusieurs années, le hachoir à couteau, tout comme le mixer bol, est équipé d'un couteau tranchant, mais sa mise en marche est seulement commandée par le couvercle qui assure la sécurité de son utilisation.

Utilisé uniquement pour les petites quantités, c'est un appareil très bruyant, et la qualité du résultat obtenu est inférieure à celle que donne le hachoir à vis. En effet, la viande est broyée, et la finesse du hachage dépend de la durée de fonctionnement.

Râper

Ustensiles et appareils : râpe à main, râpe mécanique, râpe électrique.

Bien que l'on puisse se procurer du fromage déjà râpé, râper le fromage ou émincer les légumes pour préparer un plat de crudités font toujours partie des opérations culinaires. La râpe à main, un des ustensiles de cuisine les plus anciens, se présente sous différentes formes : râpe à fromage, éminceur-râpe, râpe à fromage et légumes, qui donnent des résultats satisfaisants pour la préparation de petites quantités de légumes ou de fromage.

La râpe mécanique, d'un emploi plus facile, permet la préparation de quantités plus importantes, et elle comporte des disques ou des tambours-râpes interchangeables suivant le besoin.

La râpe électrique est l'un des accessoires du hachoir électrique ou d'un appareil multifonctionnel. Le résultat obtenu est très proche de celui que donne une râpe à main ou mécanique. Son emploi se justifie seulement pour des quantités importantes de légumes ou de fromage.

Wayne Miller - Magnum

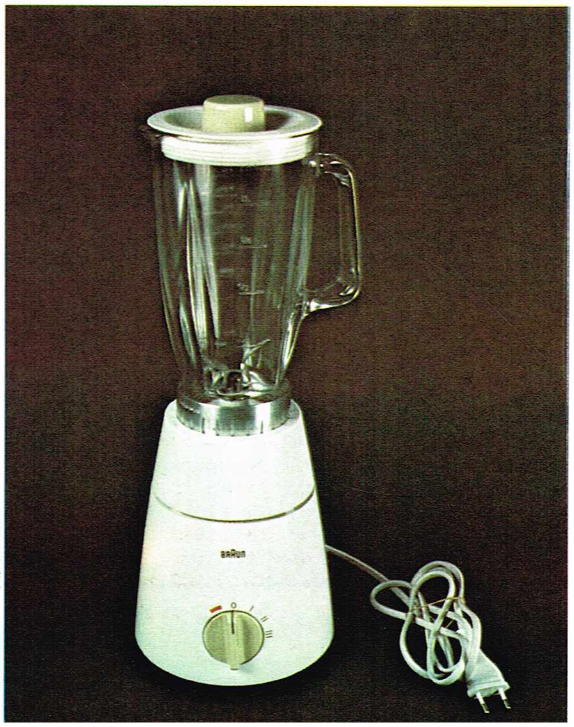

A. Hatala

◀ ***Le batteur à main a souvent été délaissé au profit du batteur électrique (photos de gauche). A droite, mixer bol électrique.***

Roger-Viollet

▲ *Machine à éplucher les pommes de terre (1924).*

Extraire le jus

L'habitude de consommer des jus de fruits et de légumes est très récente. Les **ustensiles et appareils** destinés à cet usage se divisent en deux groupes : les presse-agrumes (pour les agrumes) et les centrifugeuses (exclusivement réservées aux fruits). A noter cependant que, sur le plan nutritionnel, il est préférable de consommer les fruits entiers ; ceux-ci contiennent en effet la cellulose, un des éléments importants pour la digestion, alors que la préparation des jus consiste justement à séparer le jus de la cellulose.

Éplucher

C'est au début des années 1950 que l'éplucheur électrique a fait son apparition. Son emploi ne permet de diminuer la durée de l'opération qu'à partir d'une certaine quantité d'aliments à éplucher, c'est-à-dire environ 3 kg. Il est donc relativement encombrant, d'un prix d'achat élevé et n'apporte aucun gain de temps lorsqu'il s'agit des quantités utilisées généralement par une famille. Cela explique probablement sa disparition quasi totale aujourd'hui.

La cuisson des aliments

Principes physiques

Le processus de la cuisson est la transformation des caractéristiques d'un aliment sous l'effet d'un flux d'énergie, se traduisant par l'augmentation de la température de l'aliment au-delà de la température ambiante. La transmission du flux d'énergie nécessaire pour la cuisson peut être réalisée selon trois principes : la *conduction*, la *convection* ou le *rayonnement*.

Les échanges par **conduction** — échanges entre deux milieux mis en contact et immobiles — sont utilisés lors de la cuisson par contact, pour une grillade par exemple, la plaque de fonte transmettant la chaleur par conduction à la surface de la viande en contact avec celle-ci.

Les échanges par **convection** — échanges entre un corps et un fluide en mouvement — se caractérisent d'abord par la nature du fluide : l'air est utilisé pour la cuisson au four ou à la vapeur ; l'eau et l'huile sont utilisées pour la cuisson dans un liquide, pour la friture.

— Les échanges par *convection naturelle* sont liés au réchauffement de l'aliment par le fluide sans mouvement forcé, par exemple lors de la cuisson dans une casserole ou dans un four classique.

— Les échanges par *convection forcée* sont liés au réchauffement de l'aliment par le fluide dans un mouvement forcé, par exemple lors de la cuisson dans un four à chaleur tournante où l'action d'une turbine augmente la vitesse de l'air.

Les échanges par **rayonnement** — échanges électromagnétiques sans support matériel — se caractérisent par la transmission de la chaleur par des rayons émanant d'un corps chaud et analogues aux rayons lumineux.

La cuisson par rayonnement est utilisée, par exemple, dans le cas d'une rôtissoire où un rayonnement infrarouge émis par la résistance atteint directement la denrée exposée.

La cuisson par rayonnement est également utilisée dans le cas d'un four à micro-ondes, mais les ondes électromagnétiques utilisées sont de très haute fréquence (2 450 MHz).

Ces trois types de transmissions de flux d'énergie sont souvent combinés ; un four est en général équipé d'un élément chauffant pour effectuer en plus des cuissons par convection des cuissons par rayonnement ; une rôtissoire est très souvent équipée d'une porte amovible pour pouvoir être utilisée comme un four. Toutefois, malgré l'utilisation de plusieurs types de flux d'énergie dans un même appareil de cuisson, il est possible de les résumer (voir *tabl.* I).

▼ *Tableau I : appareils de cuisson et types de flux d'énergie.*

Tableau I
Appareils de cuisson et types de flux d'énergie

Flux d'énergie	Types de cuisson	Appareils de cuisson
Cuisson par conduction et convection	Cuisson dans un liquide - friture	Foyer de cuisson (plaques électriques, brûleurs à gaz, etc.)
	Cuisson dans une enceinte fermée	Four
Cuisson par rayonnement	Grillade ou rôtissage par rayonnement	Rôtissoire
	Réchauffage par rayonnement	Four à micro-ondes
Cuisson par conduction seule	Grillade par contact	Grill

Appareils de cuisson

Foyer de cuisson

Différentes sources d'énergie peuvent alimenter le foyer de cuisson : les combustibles solides, le gaz, l'électricité ou l'énergie solaire.

Depuis la maîtrise du feu par l'homme, le bois et plus tard le charbon sont utilisés pour la cuisson des aliments, tout d'abord pour le rôtissage et la grillade des viandes ; ensuite, avec l'apparition de la poterie, un vrai foyer de cuisson a pu être constitué pour la cuisson dans un liquide, la friture.

Cuisinières à combustibles solides

La cuisinière à combustibles solides était jusqu'à une période très récente construite en général en briques ou en pierres en même temps que la maison ; elle était équipée d'une plaque en fonte et éventuellement d'un four.

A l'âge des métaux, les récipients en poterie ont été remplacés par des récipients en fonte, en cuivre ou en plomb, et ils seront d'abord suspendus au-dessus du feu avant d'être plus tard posés sur la plaque qui délimite et enferme la source de chaleur (vers 1830).

A côté de Benjamin Franklin qui, en 1742, conçut la « Cheminée de Pennsylvanie », Siegfried Giedon cite

deux grands novateurs qui contribuèrent très largement à l'amélioration des appareils de cuisson à combustibles solides.

Le premier est Benjamin Thompson, comte de Rumfad (1753-1814), qui, officier tantôt dans l'armée britannique, tantôt dans l'armée bavaroise dont il devint le général en chef, fut également un important physicien de la fin du XIXe siècle. Ayant fondé un hospice à Munich, il fut amené à y construire pour la cuisine un four à chauffe indirecte dans lequel la fumée et la chaleur empruntaient un réseau de carneaux disposés autour des casseroles encastrées sur le fourneau. Il conçut également, pour des académies militaires et des hôpitaux, de vastes fourneaux dont le dispositif semi-circulaire évitait au cuisinier de se déplacer devant ses casseroles et ses marmites.

Par ailleurs, et partant du principe que la source de chaleur devait être enclose dans un minimum d'espace, il conçut de petits fours en fonte et aussi un fourneau portatif pour la cuisine. Celui-ci était équipé d'un système de casseroles encastrées dans le fourneau, et autour de celles-ci circulaient les gaz de combustion provenant d'un foyer conique suspendu. Un tel système, qui emprisonne la chaleur et qui favorise la circulation de l'air, fait penser aux cuisinières de notre époque.

Également de Rumfad, on peut citer un four à rôtir de forme cylindrique, en tôle, encastré dans la maçonnerie de brique qui contient aussi le foyer dont la flamme vient lécher la partie inférieure du four.

Rumfad a particulièrement insisté sur la nécessité de concentrer la chaleur autour des récipients de cuisson. Dans ce dessein, il proposa d'utiliser des rondelles de dimension intérieure variable permettant une meilleure adaptation aux différents récipients.

Les travaux de Philo Penfield Stewart (1798-1868) contribuèrent également à l'amélioration des appareils de cuisson. Missionnaire et professeur, il fut amené, dans le cadre de son enseignement à Oberlin College, à faire breveter un fourneau qu'il appela Oberlin. La vente de ce fourneau devait en effet permettre aux élèves de l'école de subvenir à leurs besoins. Il améliora par la suite le modèle et parvint à mettre au point un appareil qui s'inspire sans doute de celui de Rumfad en ce sens qu'il utilise également un foyer suspendu dans lequel on brûle du bois, mais dont l'efficacité est telle qu'il préfigure véritablement la cuisinière moderne.

La cuisinière à combustibles solides (bois ou charbon) fabriquée en fonte et éventuellement recouverte de plaques émaillées n'a commencé à se développer qu'au XIXe siècle (de 1830 à 1880), pendant la période qui fut marquée par le développement du fer forgé et de la fonderie. De nos jours, elle est encore utilisée à la campagne, aussi bien pour chauffer les pièces que pour la cuisson et éventuellement aussi pour chauffer l'eau. La vente de ce type de cuisinière est actuellement en progression.

● *Principe de fonctionnement*

En brûlant, le bois ou le charbon transmet de la chaleur qui est emmagasinée par la plaque de fonte (le foyer de cuisson) et par la paroi mitoyenne du four. La chaleur accumulée par la plaque de fonte est ensuite transmise aux récipients, et elle est surtout intéressante pour la préparation des plats mijotés où la cuisson est relativement longue, constante et à faible température (environ 90 °C). La chaleur accumulée par la paroi mitoyenne du four ainsi que la circulation de l'air chaud autour de l'enceinte du four permettent d'obtenir dans celle-ci des températures aux environs de 200 °C, suffisantes pour la préparation de rôtis ou de pâtisseries.

Brûleurs à gaz

Le gaz a d'abord été utilisé pour le chauffage (vers 1850), et c'est seulement entre 1880 et 1930 que son utilisation pour la cuisson s'est généralisée ; il fallait surmonter la réticence du public envers cette nouvelle utilisation du gaz comme source de chaleur pour la cuisson. Entre 1910 et 1930, apparaissent les premiers modèles courants, dont les formes sont influencées par le style de l'époque.

Les foyers de cuisson à gaz sont caractérisés par leur principe de fonctionnement, leur taille, leur puissance, leur principe d'allumage et leur système de sécurité.

● *Principe de fonctionnement*

Le foyer de cuisson à gaz (brûleur) est l'ensemble du dispositif destiné à réaliser le mélange du gaz et de l'air et

Boyer - Roger-Viollet

▲ *Cuisinières à foyer mobile (gravure de 1823, Bibliothèque nationale).*

à servir de support à la flamme. Il est réalisé soit en fonte émaillée, soit en un alliage métallique.

Le gaz traverse d'abord l'injecteur dont la section est proportionnelle à la puissance du brûleur et à la nature du gaz. Ensuite, sous l'effet de sa vitesse, il entraîne l'air dans le mélangeur qui comporte une bague de réglage de l'admission de l'air. Le mélange air-gaz passe ensuite dans la tête du brûleur et s'échappe par une série d'orifices.

L'injecteur des appareils permettant l'utilisation de tout gaz (gaz de ville, propane) doit être réglé ou échangé en fonction de la nature de celui-ci. Le réglage de l'admission de l'air doit aussi correspondre à la nature de ce gaz.

Récemment introduits sur le marché, les brûleurs à flammes autostabilisées ou les brûleurs à flammes « pilotes » sont conçus pour avoir des flammes stables, quel que soit le débit du gaz utilisé (*fig.* 1).

● *Puissance des brûleurs à gaz*

Les brûleurs à gaz sont classés en fonction de leur puissance nominale, c'est-à-dire en fonction de la quantité de chaleur fournie en une heure au débit maximal (mesuré en millithermies/heure ; 1 millithermie est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 °C la température de 1 l d'eau à 15 °C sous la pression atmosphérique normale, 1 th = 1,163 kW ; 1 mth = 1,163 W. Depuis janvier 1978, les mesures sont effectuées en W et remplacent les mesures en mth) [*tableau* II].

A titre d'exemple, un brûleur rapide de 3 000 mth (ou 3 500 W)/h dégage 50 mth/mn. Il fournit donc en 2 minutes la chaleur nécessaire pour porter 1 l d'eau de 20 °C à ébullition. A cause des pertes de chaleur (chaleur absorbée par le récipient et chaleur entraînée par l'air et les produits de la combustion), il faudra en réalité plus de temps (environ 3 minutes).

● *Allumage incorporé à l'appareil*

L'allumage électrique ou piézo-électrique incorporé permet d'allumer le brûleur sans avoir à utiliser un système d'allumage extérieur à l'appareil (allume-gaz,

▼ *Figure 1 : récemment introduits sur le marché, les brûleurs à flamme stabilisée* (a) *ou les brûleurs à flamme « pilote »* (b) *sont conçus pour avoir des flammes stables quel que soit le débit du gaz (document* Gaz de France, La cuisinière à gaz*).*

fig. 1

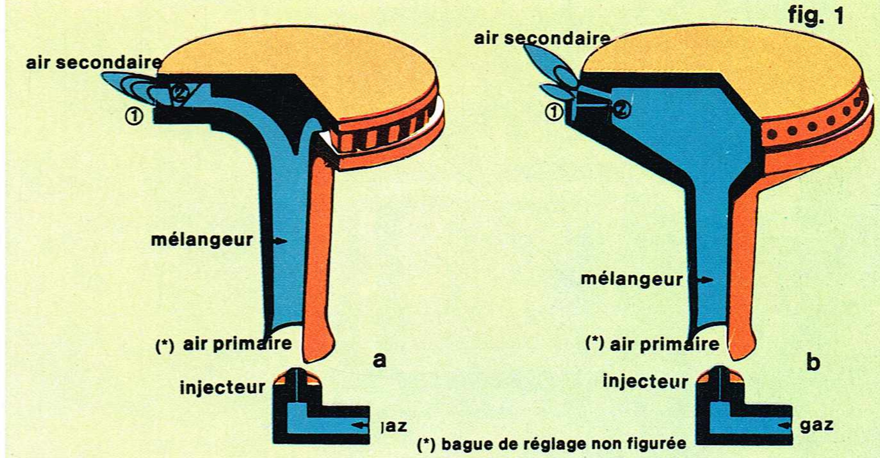

Gaz de France

Tableau II Puissance et diamètre des brûleurs à gaz		
Brûleur	Puissance (en W)	Diamètre (en mm)
Auxiliaire	< 1 100	40
Semi-rapide	1 100-2 200	40-50
Rapide	2 200-3 400	50-75
Ultra-rapide	> 3 400	80 et plus

▲ ***Tableau II : puissance et diamètre des brûleurs à gaz.***

▼ ***Figure 2 : allumage incorporé à l'appareil (voir développement dans le texte) [document*** **Gaz de France, La cuisinière à gaz].** ***Tableau III : puissance et diamètre des foyers électriques.***

allumettes). Chaque brûleur de la table de travail (du four et du grilloir) est équipé d'un dispositif d'allumage.

Les dispositifs d'allumage fonctionnent suivant différents principes (*fig.* 2).

* *Allumeur à production discontinue d'étincelles.* Chaque brûleur est équipé d'une bougie d'allumage (comparable aux bougies utilisées dans les moteurs de voiture), d'une commande d'allumage et d'un générateur d'étincelles (*fig.* 2a).

* *Allumeur à production continue d'étincelles.* Chaque brûleur est équipé d'une bougie d'allumage reliée par l'intermédiaire de résistances à un transformateur à haute tension (6 000 V). Un train d'étincelles se produit entre chaque bougie et la masse du brûleur si le contact est établi par un microrupteur (*fig.* 2b).

* *Allumage piézo-électrique.* Ce système fonctionne sans raccordement électrique ni piles : les charges électriques sont produites sur les faces de certains cristaux quand ils subissent un choc (piézo-électricité). Le choc sur un cristal, élément de forme cylindrique en quartz dont le diamètre est d'environ 15 mm, engendre un courant électrique qui provoque une étincelle entre la bougie et la masse métallique du brûleur (*fig.* 2c).

● *Dispositif de sécurité par le thermocouple*

Ce dispositif de sécurité peut exister sur les brûleurs de la table de cuisson, mais est plus généralisé sur ceux du four et du grilloir. Il permet, si pour une raison quelconque le brûleur vient à s'éteindre (à cause d'un courant d'air par exemple), d'arrêter le passage du gaz. Il fonctionne à l'aide d'un électro-aimant qui, alimenté par un courant sous faible tension (produit par le thermocouple), maintient le passage libre du gaz ; si l'électro-aimant n'est plus alimenté (le brûleur vient à s'éteindre, et le thermocouple n'est plus chauffé), il se sépare du clapet qui ferme le débit du gaz (*fig.* 3).

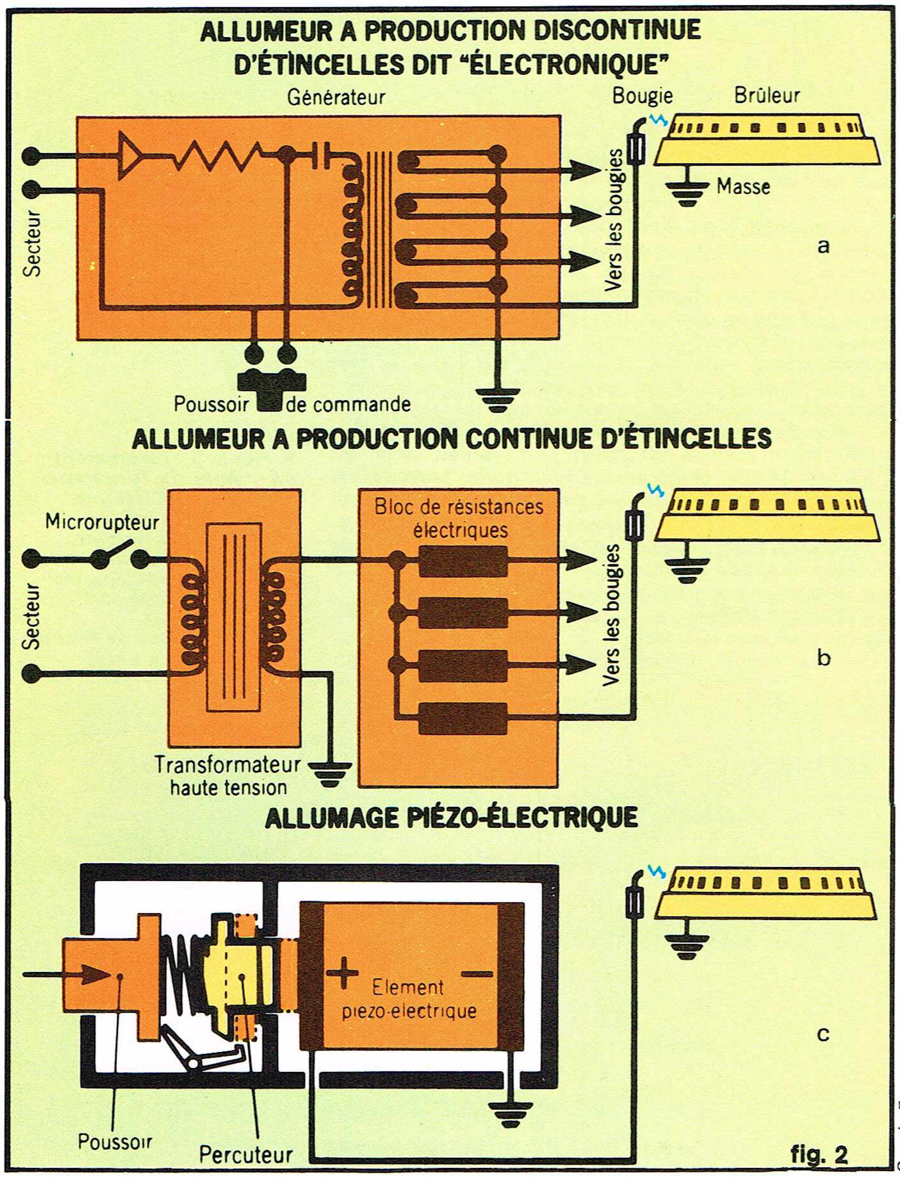

fig. 2

Gaz de France

Foyer de cuisson électrique

Entre 1890 et 1910, des études expérimentales ont été faites en Angleterre à propos de l'utilisation de l'électricité pour les cuisinières. Mais l'introduction du gaz occupe le marché, et les cuisinières électriques n'apparaissent que vers 1930. La cuisson à l'électricité connaît un développement très lent en France ; par contre, en Allemagne, elle a pratiquement remplacé la cuisson au gaz.

Les foyers de cuisson électriques sont caractérisés par leur principe de construction, leur taille, leur puissance et leur principe de réglage.

Principe de construction

Les premiers foyers électriques étaient des foyers constitués par des tubes à l'intérieur desquels la résistance est noyée dans du ciment isolant. Le flux de chaleur est transmis par rayonnement.

Presque tous les foyers électriques fabriqués actuellement consistent en une plaque en fonte qui recouvre et enferme les résistances posées sur un ciment réfractaire.

La plaque vitrocéramique, récemment apparue (vers 1970), utilise un matériau vitro-cristallin obtenu par le traitement thermique d'un verre spécial. Le vitro-cristallin est indilatable et peut subir sans se modifier un écart de température allant de 0 °C à 700 °C.

Actuellement, la plaque à induction est encore à l'état d'essai, mais elle devrait être prochainement commercialisée. Ce principe permet de chauffer directement le fond du récipient sans chauffer la plaque de cuisson et, de ce fait, de diminuer la consommation d'énergie et la durée de préchauffage.

● *Diamètre et puissance des foyers électriques*

Les dimensions des plaques sont normalisées en fonction des récipients ; 4 tailles existent actuellement : de 115 mm, de 145 mm, de 180 mm, de 220 mm. A chaque dimension de la plaque correspondent, selon le type de réglage et le type de plaque (normale ou « rapide », signalé par un point rouge au milieu de la plaque), des puissances indiquées au *tableau* III.

Tableau III Puissance et diamètre des foyers électriques	
Puissance (en W)	Diamètre (en mm)
500-1 000	115
1 000-1 500	145
1 000-2 500	160 ou 180
1 800-2 600	200 ou 220

● *Réglage du foyer de cuisson électrique*
Différents principes techniques sont utilisés pour régler l'allure de chauffe des foyers de cuisson. Ils peuvent être regroupés en deux catégories : le dispositif de réglage *linéaire* et le dispositif de réglage *en boucle* (feedback).

Dans le premier cas, une quantité d'énergie est envoyée régulièrement sans qu'un dispositif contrôle l'effet produit par cette quantité d'énergie. Il est impossible de stabiliser la température du récipient sans interventions successives. Le dispositif du réglage linéaire est réalisé soit par le réglage de puissance, soit par le réglage de la chaleur moyenne.

Dans le deuxième cas, la quantité d'énergie fournie est contrôlée par un dispositif de régulation (thermostat) qui capte la température du fond du récipient, la compare avec la température voulue ($t° = x°$) et réagit en fonction de l'écart par l'arrêt ou la mise en marche du flux d'énergie (*fig.* 4).

* *Réglage de la puissance.* Le mode le plus fréquent consiste à utiliser plusieurs résistances qui permettent d'obtenir six valeurs différentes de la puissance : allure forte, quatre allures intermédiaires, allure douce (*fig.* 5).

* *Réglage de la chaleur moyenne.* La puissance de la plaque reste toujours au maximum, et c'est la variation de la durée de passage du courant qui fait varier la chaleur moyenne émise. Exemple : une plaque d'une puissance de 2 600 W mise sous tension 15 secondes, puis hors tension 45 secondes et ainsi de suite, produit seulement un quart de sa puissance maximale, c'est-à-dire 850 W/h. Si cette même plaque est au contraire mise 45 secondes sous tension et 15 secondes hors tension et ainsi de suite, elle produit les trois quarts de sa puissance maximale, c'est-à-dire 1 750 W (*fig.* 6).

* *Réglage de la température.* Le réglage thermostatique a pour objet de maintenir à une température donnée le foyer de cuisson en fonction de la température du fond du récipient, mesurée à l'aide d'un palpeur avec lequel il est mis en contact. La gamme des différentes allures de chauffe est en général composée de 12 positions correspondant à 12 paliers de température allant de 50 à 200 °C.

Le four

Le four — une enceinte fermée — existait déjà à la période préhistorique, probablement à la période néolithique, et était essentiellement utilisé pour la cuisson du pain.

Dans le Vaucluse, les villages appelés Bories, et habités encore au XVIII^e siècle par les agriculteurs bergers, ont laissé une image assez exacte des premiers fours, c'est-à-dire une enceinte fermée en forme de pyramide, bâtie en pierres plates superposées, avec une ouverture pour la fumée. Elle était fortement chauffée au bois ; l'ouverture était ensuite fermée à l'aide d'une pierre plate, et la chaleur dégagée par les braises à l'intérieur de l'enceinte y faisait monter la température ambiante. C'est à ce

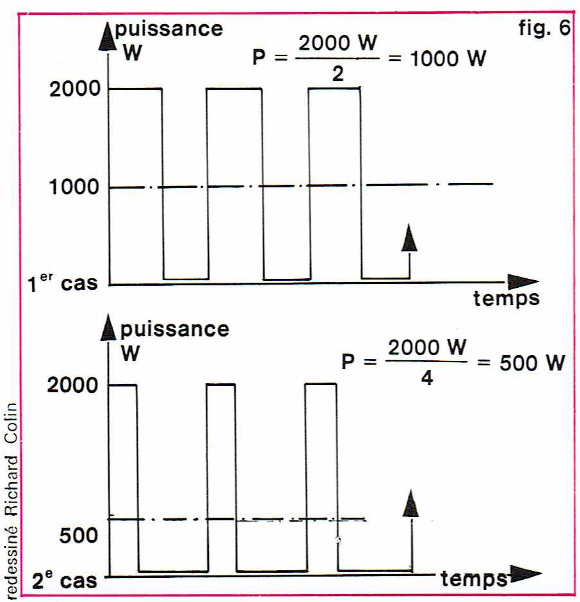

redessiné Richard Colin

Boyer - Roger-Viollet

▲ ***Cuisine électrique dans une armoire, meuble ouvert (1925).***

▼ ***Figure 3 : dispositif de sécurité par le thermocouple (document*** **Gaz de France, La cuisinière à gaz*****).***
Figure 6 : principe du régulateur d'énergie (réglage de la chaleur moyenne) [d'après document **Sodel, La cuisine à l'électricité].**

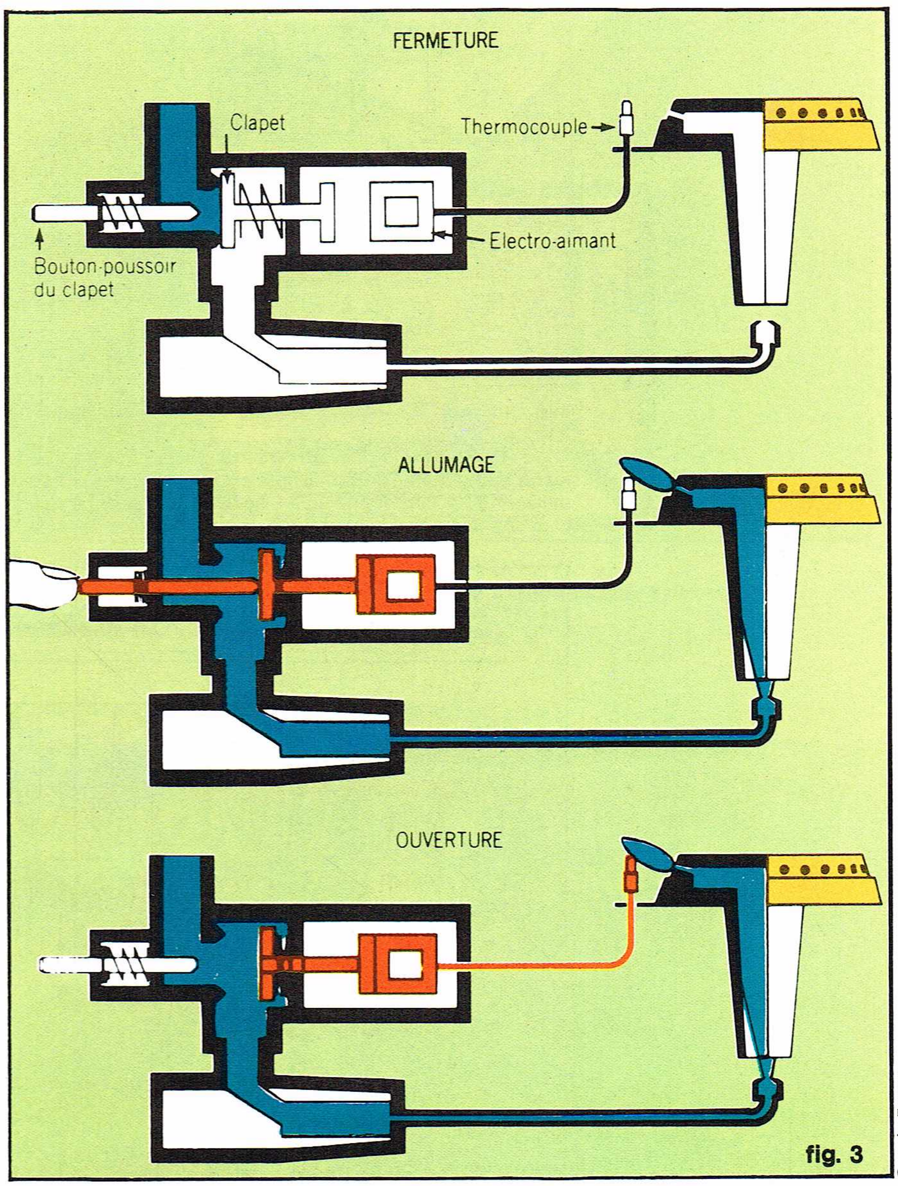

Gaz de France

▶ *Figure 4 : schéma de principe d'un foyer à réglage thermostatique dit « à palpeur » (document* **Sodel**, **La cuisine à l'électricité***).*

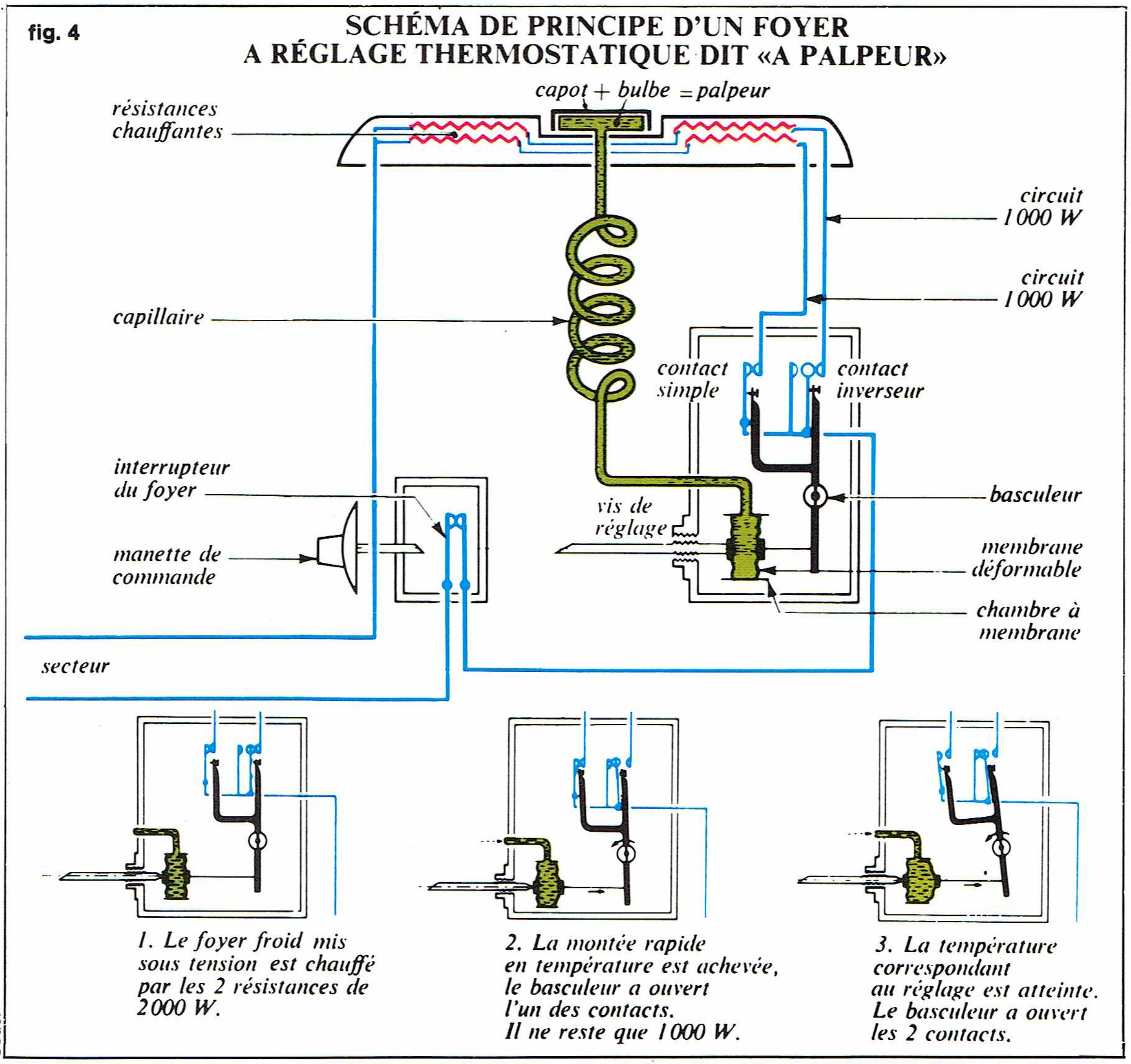

moment que les braises étaient écartées et que l'on enfournait le pain.

Ce type de four à pain est resté d'utilisation domestique jusqu'à la généralisation du métier de boulanger. Chaque maison à la campagne avait son four à pain. Celui-ci a pratiquement disparu aujourd'hui et a été remplacé par un four moins volumineux, utilisé non plus pour la cuisson du pain, mais bien pour la cuisson de la pâtisserie, des viandes, des gratins...

C'est à Benjamin Franklin, vers le milieu du XVIII[e] siècle, que revient l'idée de concevoir un four à disposer dans le foyer de la cheminée.

▶ *Figure 5 : réglage de puissance (6 allures de chauffe) [document* **Sodel**, **La cuisine à l'électricité**].

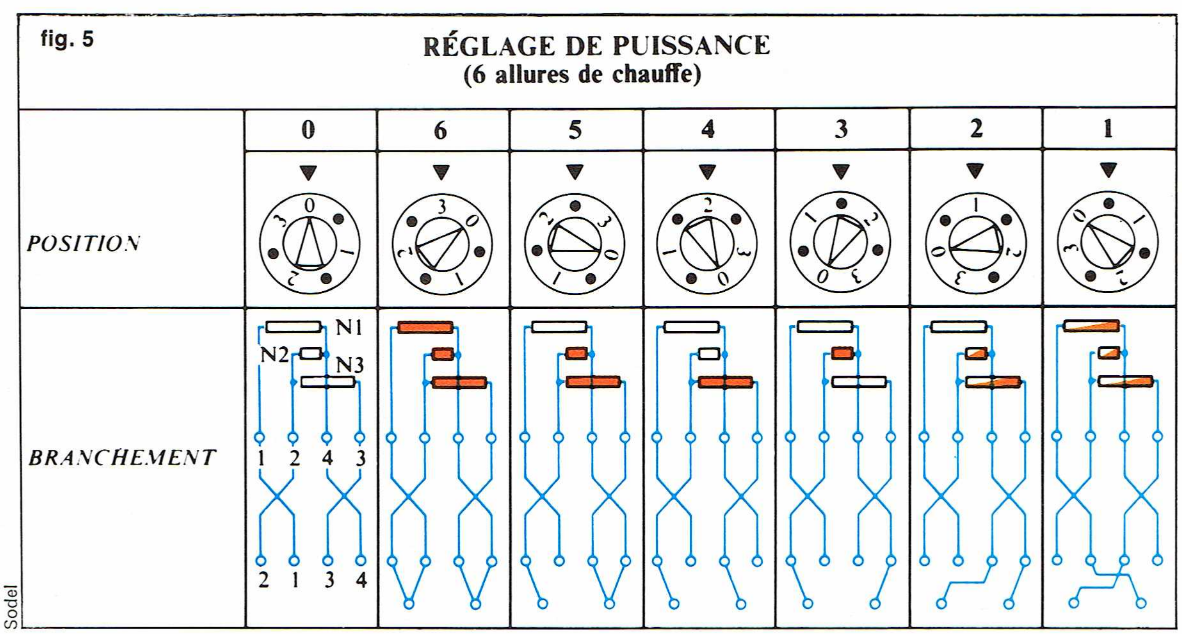

Le four à gaz

Les premiers modèles courants des fours de cuisinières à gaz furent équipés d'un thermostat à partir de 1915. Ce thermostat (découvert depuis 1850) permet de régulariser la température suivant l'opération culinaire à réaliser.

Les fours à gaz sont caractérisés par leur principe de fonctionnement, leur taille, leur principe d'allumage, le système de sécurité et le nettoyage.

● *Principe de fonctionnement*

* *Fours à convection naturelle.* L'enceinte est chauffée soit directement par les gaz chauds qui proviennent du brûleur (four à circulation directe), soit indirectement par l'air chauffé par les parois, les combustibles circulant à l'intérieur d'une double enceinte (four à circulation indirecte), ou encore par les deux (*fig.* 7a et 7b).

* *Fours à convection forcée* (utilisés uniquement dans les collectivités). Le réchauffement des denrées à cuire est effectué par les combustibles dans un mouvement renforcé par une turbine. Les températures nécessaires pour les différentes cuissons sont légèrement plus basses, et la chaleur est uniformément répartie dans l'enceinte (*fig.* 7c).

La turbine est placée dans le fond du four, les combustibles sont aspirés par son centre et circulent dans l'enceinte en cédant leur chaleur aux aliments que l'on a mis à cuire. Le four à convection forcée utilisé dans la restauration collective (cuisson sur plusieurs niveaux) est apparu sur le marché seulement en 1972.

* *Le grilloir.* Le four à gaz est équipé en général d'un grilloir placé sous la voûte pour réaliser les cuissons par rayonnement. Le grilloir est utilisé aussi bien pour les grillades que pour les cuissons à la broche. Les cuissons par rayonnement se font généralement la porte du four ouverte.

● *La taille du four*

La taille du four à gaz se situe entre 30 et 80 dm^3. La consommation d'énergie est proportionnelle aux dimensions du four, pour une même cuisson.

● *Principe d'allumage et système de sécurité*

Le principe d'allumage (électro- ou piézo-électrique) et le système de sécurité d'un four sont identiques aux brûleurs (voir chapitre *Brûleurs à gaz*).

● *Le nettoyage*

La cuisson des viandes à hautes températures (rôtissage entre 250 et 300 °C) peut être accompagnée de la projection des graisses sur les parois de l'enceinte. Le nettoyage manuel des parois du four est souvent malaisé.

* *Le nettoyage par catalyse.* Ce procédé a été introduit en France en 1968. Les parois du four sont revêtues de plaques en émail mat et poreux contenant du carbonate de tungstène qui oxyde les éclats de graisse se produisant pendant la cuisson. Après refroidissement du four et en cas de projections importantes, il est nécessaire d'utiliser une éponge, mais sans produits abrasifs. Le changement des parois (les plaques sont amovibles) est nécessaire tous les cinq ans à peu près.

Le four à l'électricité

Les premières démonstrations de la cuisson à l'électricité ont été entreprises vers 1890 en Angleterre, mais c'est seulement aux environs de 1930 que la cuisinière à l'électricité s'est largement répandue.

Les fours à l'électricité sont caractérisés par leur principe de fonctionnement, leur taille et le mode de nettoyage.

● *Principe de fonctionnement*

* *Fours à convection naturelle.* Le chauffage de l'enceinte du four est réalisé par un élément chauffant situé dans la partie inférieure (la sole), et généralement dissimulé par une plaque en tôle émaillée (afin de ne pas dégager de chaleur par rayonnement, mais seulement par convection). La quantité d'énergie émise par l'élément de la sole est contrôlée par un thermostat qui assure la cuisson des aliments de 80 à 250 ou 300 °C (*fig.* 8).

* *Fours à convection forcée.* Comme dans le cas du four à gaz, la turbine située au fond de l'enceinte accélère la vitesse de l'air chaud afin d'augmenter les échanges thermiques entre les aliments à cuire et l'air chaud. Les températures nécessaires pour les cuissons sont légèrement plus basses (diminution des éclats de graisse). La chaleur est uniformément répartie, ce qui facilite la cuisson sur plusieurs niveaux en même temps (*fig.* 9).

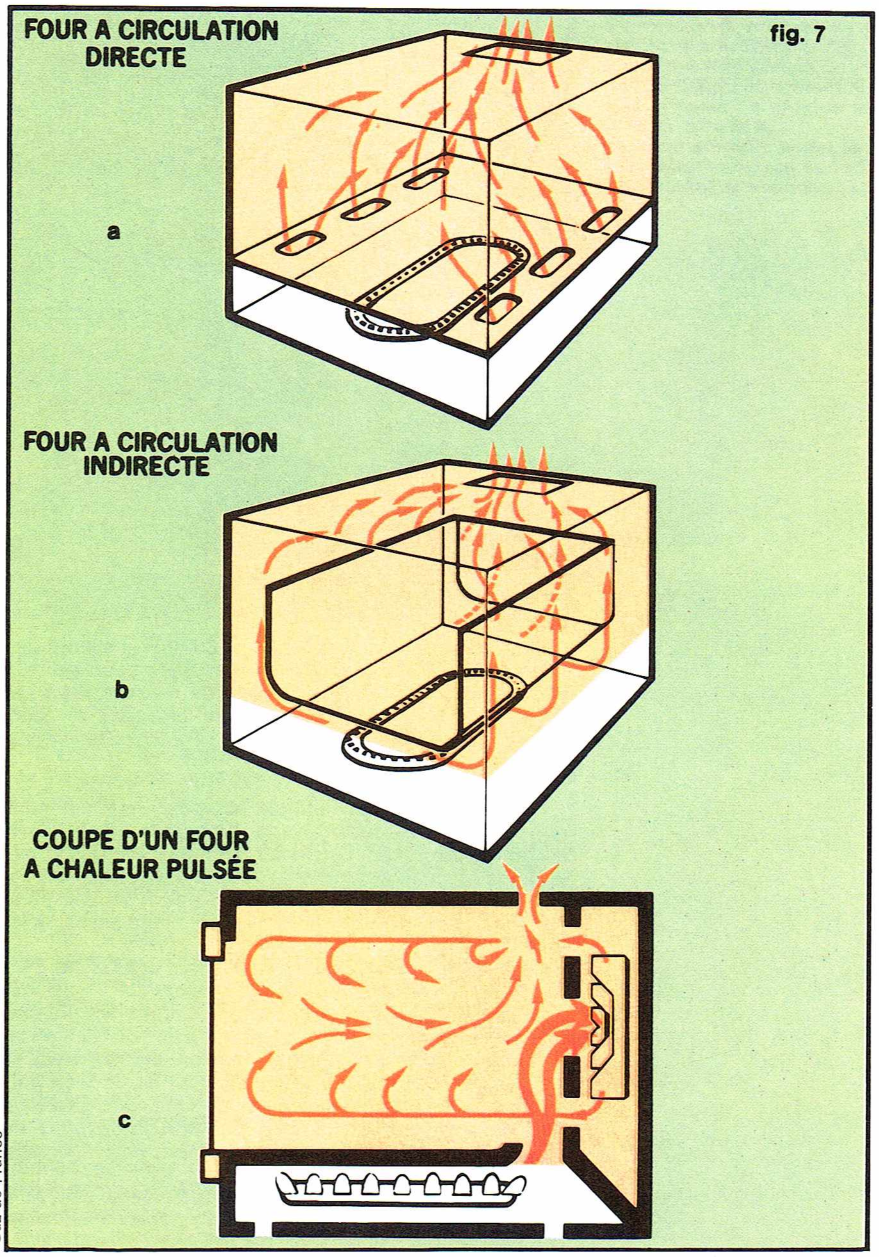

Gaz de France

▲ *Figure 7a et b : fours à convection naturelle : a, à circulation directe; b, à circulation indirecte; c, four à convection forcée (document* Gaz de France, La cuisinière à gaz*).*

▼ *Maison à cuisine électrique Knap (1909).*

Boyer - Roger-Viollet

▶ *Figure 8 : représentation schématique d'un four électrique à convection naturelle (d'après document Sodel, La cuisine à l'électricité). A droite, le four se place à bonne hauteur et se nettoie facilement par procédé automatique.*

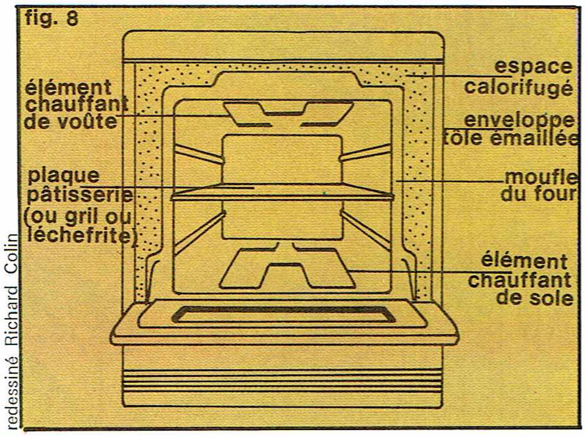

redessiné Richard Colin

Thomson - Photo Bazaine - Publicité

* *Le grilloir.* Les fours à convection naturelle et éventuellement les fours à convection forcée sont équipés d'un deuxième élément chauffant situé à la voûte. Cet élément de voûte qui transmet la chaleur par rayonnement sert essentiellement à griller, rôtir à la broche et dorer, il n'est pas contrôlé par un thermostat, et la cuisson s'effectue dans une enceinte ouverte.

● *La taille du four*

La taille du four varie entre 40 et 80 dm³ et est proportionnelle à la quantité d'énergie nécessaire pour élever la température. L'apparition du procédé de nettoyage par pyrolyse a changé la conception de l'enceinte du four; elle devient très bien calorifugée, et le préchauffement est rapide (moins de 10 minutes).

● *Le nettoyage*

Le four à convection naturelle équipé d'un grilloir, mais non d'un procédé de nettoyage (à pyrolyse ou catalyse), est en constante diminution sur le marché depuis l'apparition du procédé à catalyse (1968) et à pyrolyse (1969). Par contre, le four à convection forcée n'est généralement pas doté d'un procédé de nettoyage, étant moins salissant.

Le procédé à *catalyse* est le même que dans le cas d'un four à gaz (voir *Nettoyage du four à gaz*).

Le procédé à *pyrolyse* consiste à détruire les graisses et autres projections à une température de 500 °C environ pendant un cycle de nettoyage indépendant des périodes de cuisson. Ce procédé est commandé par un programmateur. Dès que la température de l'enceinte s'élève à 300 °C, un dispositif de sécurité verrouille la porte de celle-ci pour toute la durée du nettoyage (environ 80 minutes).

La consommation du cycle de nettoyage s'élève à 3 kW/h, mais cette augmentation de consommation est compensée par les économies réalisées pendant l'utilisation grâce à la meilleure isolation de l'enceinte.

Four à micro-ondes

Le four à micro-ondes est utilisé depuis une trentaine d'années dans la restauration collective pour réchauffer des portions individuelles, mais son usage domestique est très récent.

● *Principe de fonctionnement*

L'appareil est équipé d'un magnétron qui engendre des ondes électromagnétiques de haute fréquence de 2 450 mégahertz. Le magnétron, un oscillateur à haute fréquence, émet des faisceaux qui sont dirigés vers les pales d'une hélice où ils se réfléchissent pour balayer tout le volume de l'enceinte. Les molécules des denrées à cuire sous l'action des micro-ondes oscillent à très grande vitesse en changeant de place et provoquent un échauffement très rapide des matières organiques, au point d'en assurer la cuisson (*fig.* 10).

● *Caractéristiques d'usage*

Par ce procédé, l'aliment est chauffé comme par lui-même, mais ce four ne permet pas d'obtenir une température supérieure à 100 °C. De ce fait, il n'est pas possible de rôtir, griller, gratiner, ou faire dorer l'aliment, mais seulement de le cuire à l'étouffée, de le réchauffer ou de le décongeler.

* *Récipients à utiliser.* Le métal est un écran qui, contrairement au verre ou au carton, réfléchit les micro-ondes. De ce fait, aucun récipient en métal ou composé en partie de métal ne peut être utilisé, car il risque de surcharger l'appareil et de détraquer le magnétron.

* *Temps de cuisson.* Pour de petites quantités, il est très court (de l'ordre de quelques minutes). Il augmente avec la quantité d'aliments à cuire (par exemple, un poulet de 1 kg : 10 minutes). Le temps de cuisson doit être respecté scrupuleusement, à 30 secondes près, d'après le mode d'emploi.

● *Utilisation*

Afin de permettre non seulement de cuire, mais aussi de rôtir ou griller, certains fours à micro-ondes sont équipés d'un élément gril pour saisir les aliments cuits préala-

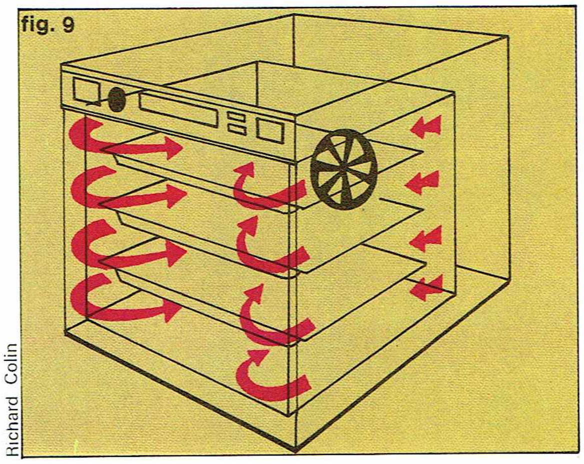

Richard Colin

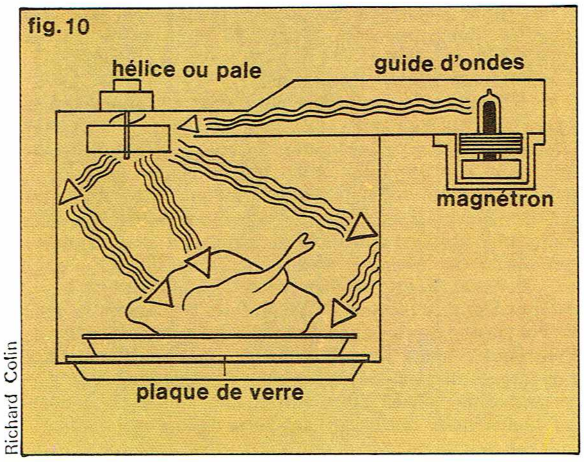

Richard Colin

▶ *Figure 9 : représentation schématique d'un four électrique à convection forcée. Figure 10 : schéma d'un four à micro-ondes.*

blement aux micro-ondes. Le four à micro-ondes, sans cet équipement, ne peut être utilisé que comme l'accessoire d'un four classique pour décongeler, réchauffer ou éventuellement cuire à l'étouffée quelques denrées en petites quantités, et le four classique sera utilisé pour la pâtisserie, les gratins, les rôtis.

● *La sécurité*

Les effets des micro-ondes sur l'organisme sont très mal connus. La vérification périodique par le service d'entretien est nécessaire pour dépister les fuites électromagnétiques éventuelles en cas d'usure des joints de la porte du four.

Aux États-Unis, les normes de sécurité sont en application depuis octobre 1971 et concernent :

— l'étanchéité de la porte ;

— le hublot de la porte, qui doit avoir une double épaisseur ;

— le double interrupteur de sécurité.

Le réfrigérateur

Récupération de la glace naturelle

Au XVIIIe siècle, en Europe d'abord, aux États-Unis ensuite, on entreprit d'entreposer pendant l'hiver de la glace susceptible d'être utilisée pendant les mois d'été. Les premières routes furent souterraines. Ce n'est qu'au XIXe siècle que l'on envisagea de construire des entrepôts en surface possédant des parois doubles comme celles des glacières des bateaux qui exportaient de la glace naturelle vers les tropiques, et qui pouvaient en transporter jusqu'à 30 000 tonnes.

A partir de là, toute une industrie d'extraction de la glace des lacs et des rivières s'était développée, qui faisait intervenir un outillage spécialisé. On utilisait en particulier la « charrue à glace » qui, vers 1820, fut mise au point aux États-Unis. Elle travaillait à la manière d'une scie, creusant de profondes saignées dans les blocs de glace.

A cela s'ajoutaient des outils pour aplanir et racler, des appareils de levage et des convoyeurs pour transporter la glace jusqu'aux entrepôts.

La conservation des aliments et le froid

Utilisées toute l'année, les glacières permettaient de conserver les denrées périssables et de suppléer éventuellement les autres procédés de conservation. La viande pouvait en effet être soit fumée, elle restait alors accrochée pendant des semaines dans la cheminée, soit salée, soit entourée de graisse sous forme d'un confit. Les fruits et légumes étaient entreposés dans des endroits frais et dans les caves où la température, aux environs de 10 ou 12 °C, restait constante toute l'année. Certaines viandes et certains fruits étaient séchés au soleil (poissons, champignons, raisins, figues, etc.).

Depuis 1795, date à laquelle Appert trouva le moyen de conserver les aliments par chauffage en vase clos, on savait également mettre en conserve une grande variété de denrées qui pouvaient être consommées ainsi pendant toute l'année.

Néanmoins, la découverte de la production artificielle du froid a complètement bouleversé les habitudes et les procédés traditionnels de conservation. Au XVIIe siècle déjà, on avait l'habitude en Italie de confectionner des « glaces » en plongeant un récipient rempli de crème sucrée dans de l'eau contenant du salpêtre dissous, ce qui constitue un mélange réfrigérant dans la mesure où la dissolution d'un solide dans un liquide entraîne une absorption de chaleur plus ou moins importante. Ce principe ancien est encore utilisé de nos jours, lorsqu'il s'agit de produire des pains de glace, le mélange utilisé étant celui du sel et de l'eau (saumure).

Une autre manière de produire du froid résulte de la détente d'un gaz. Ainsi opère-t-on pour la production de l'air liquide, mise au point par Georges Claude en 1917 d'après les travaux de Karl Ritter Von Linden, qui, en 1873, aboutirent en Allemagne à la fabrication d'une machine à produire le froid. Elle était elle-même issue des travaux de l'Américain Gorrie qui, en 1850, concevait la première machine frigorifique utilisant la détente de l'air comprimé, expérimentation déjà faite par Cullon vers 1780 lors de ses travaux sur la machine pneumatique.

D'une manière générale, la production du froid résulte des changements d'état subis par un fluide, corps liquide

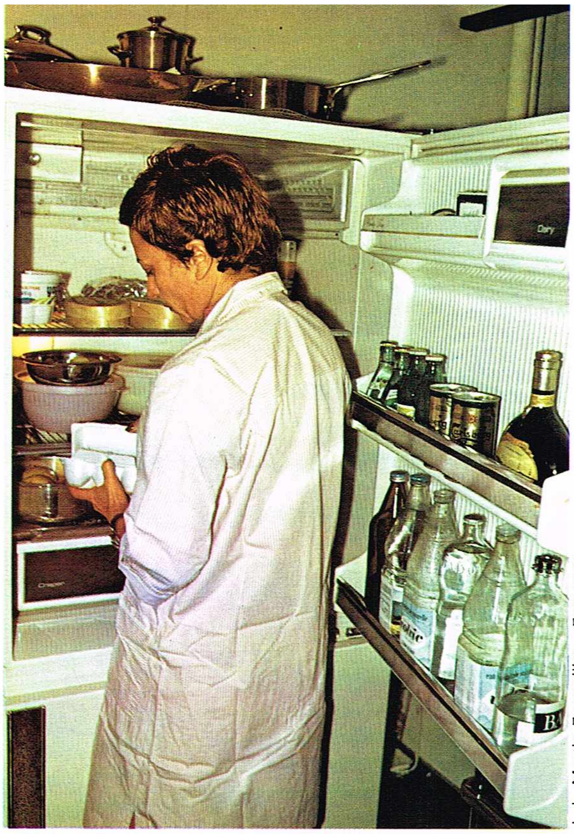

J.-L. Martin Fenouillet - Fotogram

◀ *Le réfrigérateur est devenu un élément indispensable de la cuisine et a modifié nos habitudes alimentaires.*

ou gazeux dit fluide frigorigène, qui engendre le froid suivant un cycle de transformations : évaporation, liquéfaction, évaporation. Au cours de son évaporation, le fluide absorbe la chaleur ambiante et produit donc du froid.

C'est Michaël Faraday qui, le premier, eut conscience de l'importance de la température dans les phénomènes de liquéfaction et de vaporisation des gaz. En 1823, il observa en particulier que le gaz ammoniac chauffé dans une branche d'un tube en V se recondensait dans l'autre branche. Ensuite de quoi, l'action de la flamme ne s'exerçant plus, l'ammoniac s'évaporait de nouveau avec production de froid intense.

Ainsi, Perkins, en Angleterre, invente en 1834 la machine frigorifique à compression permettant l'évaporation de l'éther dans le vide. C'est sur ce principe que fonctionne également l'appareil que Ferdinand Carré réalisa en France en 1860 et dont l'idée avait déjà été envisagée par Leslie en 1850. Siegfried Giedion parle ainsi de la glacière de Ferdinand Carré : « Elle était capable de fabriquer des milliers de kilos de glace à la fois et fut l'une des plus grandes attractions de l'Exposition universelle de Londres en 1862. Les visiteurs y voyaient d'énormes blocs de glace se faire de manière presque ininterrompue sous leurs yeux. »

Ces premiers appareils utilisaient le gaz ammoniac dans les circuits frigorigènes. Dès 1860, Carré envisagea de réaliser des appareils de petites dimensions susceptibles d'être d'un usage domestique. La production de chaleur était obtenue par l'utilisation d'un petit fourneau agissant sur une chaudière remplie aux trois quarts de gaz ammoniac, et prolongée par un récipient congélateur. Si l'appareil était d'assez petite taille, son emploi était compliqué. Il fallait au moins une heure pour obtenir un kilogramme de glace.

Par la suite, le procédé s'améliorant, il fut effectivement possible de réaliser des réfrigérateurs de petite taille. Vers 1900, en particulier, d'autres fluides que l'ammoniac furent utilisés dans les circuits frigorigènes : il s'agit de l'anhydride sulfureux, du chlorure de méthyle et de l'anhydride carbonique.

L'utilisation du moteur électrique rendit également possible la mise au point de petits réfrigérateurs à compression, de fabrication française.

C'est vers 1916-1917 que la grande industrie s'intéressa véritablement à la fabrication des appareils ménagers. En 1923, il existait 20 000 réfrigérateurs aux États-Unis. Le Salon des arts ménagers de 1925 permettra au public français d'acquérir des réfrigérateurs à absorption, fabriqués au Canada et aux États-Unis. C'est seulement vers 1939-1945 que la France, coupée des importations, commencera à construire ses premiers réfrigérateurs. A cette époque-là, plus de trois millions et demi de réfrigérateurs sont déjà utilisés dans les foyers américains.

▶ *Figure 11 : principe de fonctionnement d'un réfrigérateur : a, système à compression ; b, système à absorption (document* Sodel, La réfrigération domestique*).*

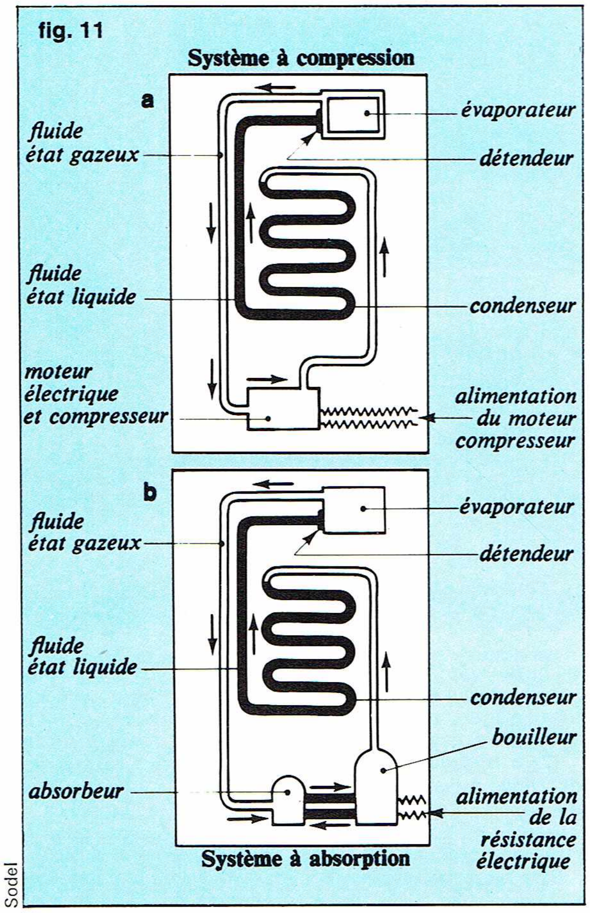

Principes de fonctionnement des réfrigérateurs actuels

Le cycle de transformations du fluide frigorigène (évaporation, liquéfaction, évaporation...) peut être obtenu par deux procédés :

— au moyen d'une source de chaleur (réfrigérateur à absorption) ;

— au moyen d'un compresseur (réfrigérateur à compression).

Ces deux procédés étaient en concurrence au début, mais le système à compression l'a emporté définitivement vers le milieu des années 1950.

Réfrigérateur à absorption

Ce type de réfrigérateur, toujours présent sur le marché, est en général de petites dimensions. C'est l'utilisation d'une source de chaleur qui permet d'effectuer le cycle de transformations du fluide frigorigène. Elle joue le rôle de moteur et envoie le fluide frigorigène, constitué d'ammoniac et d'eau, du bouilleur au condenseur où il se liquéfie. Il passe ensuite dans l'évaporateur et s'évapore en absorbant la chaleur à l'intérieur de l'armoire, en abaissant ainsi la température (*fig.* 11a).

Réfrigérateur à compression

Le réfrigérateur à compression, qui couvre presque la totalité du marché, utilise un compresseur entraîné par le moteur pour effectuer le cycle de transformations du fluide frigorigène. Le compresseur aspire celui-ci (le Fréon) et le comprime. Le fluide se liquéfie dans le condenseur. Il passe ensuite dans l'évaporateur, s'évapore en absorbant la chaleur à l'intérieur de l'armoire et en abaisse ainsi la température. Le fluide frigorigène à l'état de gaz est comprimé par le compresseur, et le cycle recommence.

Le thermostat, placé au contact de l'évaporateur, règle la fréquence des cycles de réfrigération : lorsque la température s'élève à l'intérieur de l'armoire, le thermostat commande la remise en marche du moteur (*fig.* 11b).

Le réfrigérateur

Le réfrigérateur maintient les denrées entreposées à une température de 0 à 6 °C. Le refroidissement a pour effet de retarder le processus de dégradation des produits végétaux et de ralentir la détérioration des matières d'origine animale pendant un ou deux jours.

Au cours des vingt dernières années, plusieurs innovations techniques et technologiques ont contribué à améliorer la valeur d'usage du produit. Les premières unités hermétiques fabriquées en France en 1954 regroupent le moteur et le compresseur, jusqu'alors indépendants et reliés par une courroie. L'utilisation de la mousse de polyuréthanne à partir de 1964 permet de réduire l'épaisseur des parois et d'augmenter l'isolation thermique des réfrigérateurs.

De plus en plus, le réfrigérateur est intégré dans le mobilier de cuisine, soit en tant qu'élément à encastrer, soit équipé d'un plan de travail.

Installation du réfrigérateur

Même si le réfrigérateur reste la plupart du temps un élément indépendant, différentes solutions permettent de l'intégrer plus facilement à d'autres éléments de cuisine.

● *Table top.* Les modèles de capacité moyenne, environ 140 l, sont équipés d'un plan de travail situé à une hauteur de 850 à 854 mm ou de 900 à 904 mm.

● *Modèles à encastrer.* Les modèles à encastrer sont équipés d'un dispositif d'aération par la façade et peuvent être encastrés soit sous un plan de travail, soit à la hauteur des yeux pour faciliter l'accès aux aliments entreposés.

● *Charnière à droite ou charnière à gauche.* Dans certains cas (côté du réfrigérateur adossé à un mur, par exemple), un seul sens d'ouverture de la porte est convenable. La plupart des appareils existent en version porte à droite (charnière à droite), mais il est possible de trouver des appareils équipés d'une porte à gauche (charnière à gauche). Certains modèles sont livrés avec les charnières à droite ou à gauche, et l'usager peut changer lui-même la porte de côté.

Le compartiment de conservation

Le réfrigérateur est souvent doté d'un compartiment de conservation : le conservateur, destiné à maintenir à basse température les produits surgelés ou congelés industriellement que l'on peut se procurer dans le commerce.

Après une période durant laquelle trois types de conservateurs étaient présents sur le marché, lesquels étaient différenciés par leur température (— 6, — 12, — 18 °C)

▼ *Figure 12 : réfrigérateurs ; a, classique ; b, « une étoile » avec compartiment de conservation intégré à — 6 °C, c, « deux étoiles » (conservation — 12 °C) ; d, « trois étoiles » (conservation — 18 °C).*

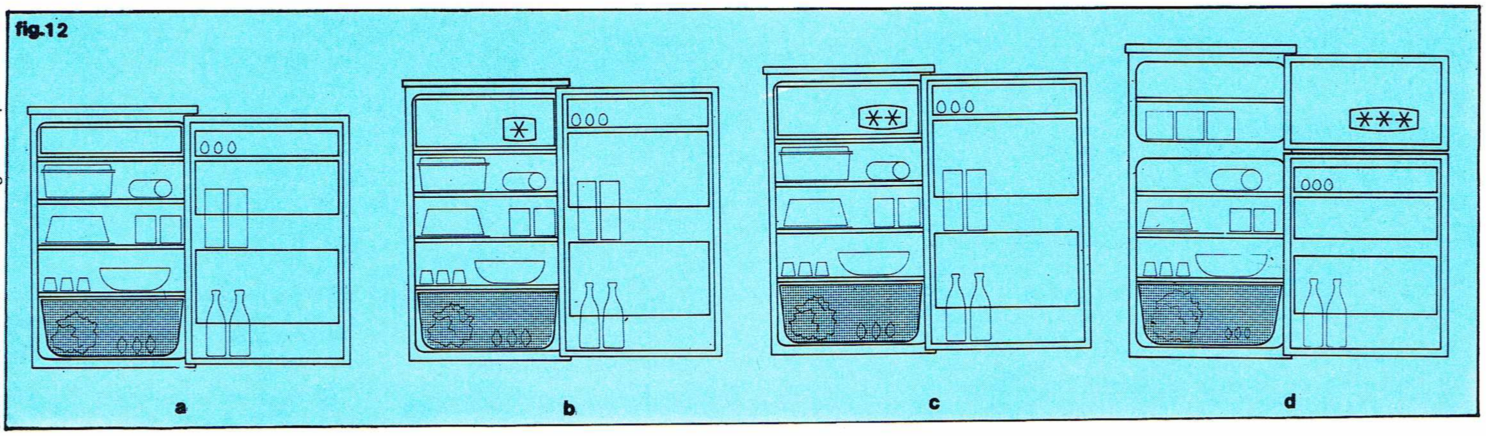

et prêtaient à confusion quant à leurs emplois, le marché actuel s'oriente exclusivement vers les conservateurs à — 18 °C signalés par l'estampille NF « trois étoiles » (***).
Le conservateur à — 6 et à — 12 °C fait partie du réfrigérateur, par contre le conservateur à — 18 °C est bien isolé et équipé d'une porte indépendante (*fig.* 12). Il permet de conserver les denrées surgelées industriellement pendant une longue période, mentionnée en général sur leurs emballages. La *figure* 13 donne les zones de froid d'un réfrigérateur et d'un réfrigérateur-conservateur.

Entretien du réfrigérateur

Le seul entretien du réfrigérateur est son dégivrage. L'humidité provenant des denrées est transformée en givre formé autour de l'évaporateur, qui augmente la consommation d'électricité et surcharge le compresseur. Il est donc recommandé de dégivrer une fois par semaine (dégivrage manuel ou semi-automatique) et, si possible de protéger les denrées entreposées par des emballages.

- *Dégivrage manuel.* L'arrêt de l'appareil, l'évacuation de l'eau et la remise en marche sont manuels. Les réfrigérateurs de ce type sont encore utilisés, mais en général pour de petits volumes.
- *Dégivrage semi-automatique.* L'arrêt de l'appareil et l'évacuation de l'eau sont manuels, mais le réenclenchement de la mise en marche est automatique.

Dans ces deux cas, l'eau de dégivrage est recueillie dans un bac spécial placé sous l'évaporateur, qu'il est nécessaire de vider après chaque opération.

- *Dégivrage automatique.* Aucune intervention de l'usager n'est nécessaire. Un cycle de dégivrage est programmé, et l'eau s'écoule hors de l'enceinte pour s'évaporer à l'extérieur de l'appareil. De ce fait, le givre est pratiquement inexistant sur l'évaporateur.

A chaque cycle de dégivrage, manuel ou automatique, le compartiment « une » ou « deux étoiles » (— 6 °C, — 12 °C) faisant partie de la même armoire est aussi dégivré et doit être vidé, les produits surgelés risquant d'être abîmés par la décongélation et la recongélation. Seul le conservateur « trois étoiles » (— 18 °C) n'est pas perturbé, étant un compartiment à part.

- *Dégivrage à air pulsé.* Il s'agit du dégivrage entièrement automatique des deux compartiments réfrigérateur et congélateur. L'air froid produit par l'évaporateur est aspiré par un ventilateur qui le distribue aux deux compartiments. L'évaporateur est situé dans un compartiment séparé. Ce type de dégivrage existe sur les combinés d'importation américaine. La consommation d'électricité est plus importante.

Réfrigérateur combiné avec un congélateur

Le réfrigérateur est souvent combiné avec un congélateur, permettant non seulement de conserver les denrées surgelées industriellement, mais aussi de congeler les denrées fraîches. Le combiné réfrigérateur-congélateur a généralement un compartiment congélateur peu volumineux (environ 40-80 l), ou bien un compartiment congélateur sensiblement équivalent au compartiment du réfrigérateur (environ 140 l). Dans ce cas-là, il est placé de préférence en bas, ce qui facilite l'accès plus fréquent au réfrigérateur se trouvant à la hauteur des yeux, et équipé de deux groupes hermétiques indépendants, ce qui permet d'en arrêter un (par exemple le réfrigérateur) et de laisser l'autre en marche en cas de besoin (*fig.* 14a).

Vedette - Photo Bazaine Publicité

◀ *En milieu rural, le congélateur, souvent de taille importante, peut être placé dans la cave ou le cellier.*

▼ *Figure 13 : zones de froid ;* a, *d'un réfrigérateur classique ;* b, *d'un réfrigérateur-conservateur (document* **Sodel**, **La réfrigération domestique***).*

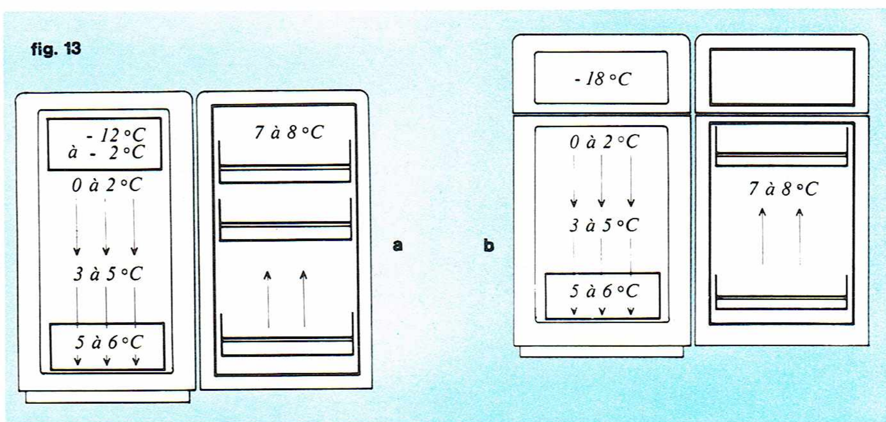

Sodel

Le congélateur

Les débuts de l'utilisation des congélateurs ont été beaucoup plus tardifs ; au départ, ils nous viennent des États-Unis (vers 1930). En France, il faut attendre les années 1950 pour que se généralise leur implantation. Elle s'est faite d'abord dans les milieux ruraux, où souvent le cultivateur procède à plusieurs congélations, comme celle des volailles, des quartiers de porc ou de bœuf élevés à la ferme, et conserve les fruits ou légumes récoltés ; puis dans les villes, où l'apparition des armoires aux dimensions semblables à celles du réfrigérateur et la combinaison possible avec celui-ci ont permis son utilisation dans les appartements relativement exigus. La congélation consiste à faire descendre, en vingt-quatre

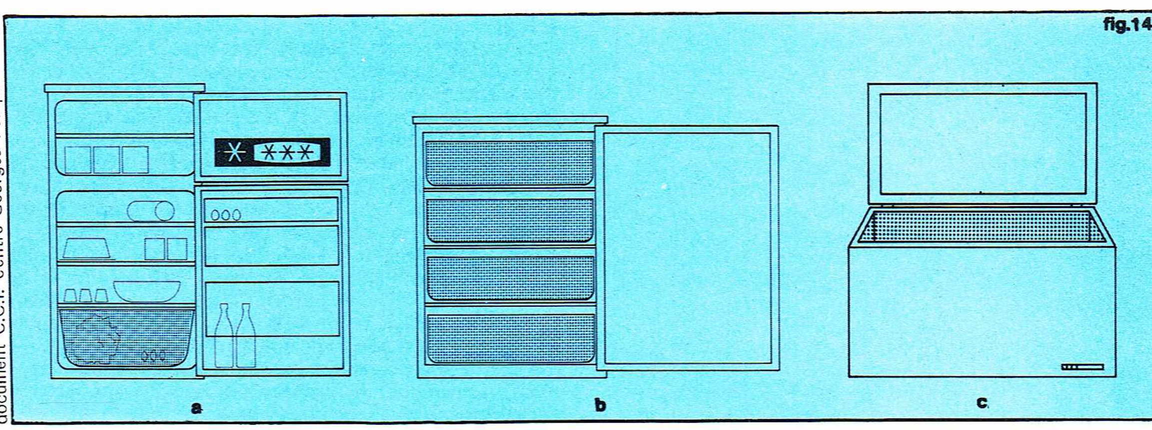

document C.C.I. centre Georges Pompidou

◀ *Figure 14 : le congélateur peut être intégré au réfrigérateur* (a) *ou être un meuble indépendant : congélateur-armoire* (b) *ou coffre* (c).

▶ *Un congélateur-armoire de 300 litres : la cuve en polystyrène ; puissance de congélation : 24 kg de denrées par 24 h ; puissance du compresseur : 235 W.*

Vedette - Photo Bazaine Publicité

▼ *La lessive en lessiveuse (1905).*

Roger-Viollet

heures, la température des denrées fraîches à — 18 °C. Le poids des denrées fraîches qui peuvent être congelées est compris entre 4,5 et 6,5 kg de viande suivant la norme NF Froid. La conservation consiste à maintenir en permanence cette température.

Le choix du congélateur

Le congélateur existe soit en combiné avec le réfrigérateur, soit sous forme de coffre ou d'armoire (*fig.* 14b et 14c). Sa fonction diffère selon son utilisation par une famille urbaine, une famille résidant en milieu rural ou dans une exploitation agricole.

Le citadin ne dispose, en général, que de produits surgelés achetés dans le commerce. Le réfrigérateur conservateur *** et le réfrigérateur-congélateur suffisent pour la conservation des surgelés et la congélation de petites quantités de denrées fraîches (réfrigérateur-congélateur). On peut prévoir 20 à 40 l par personne pour une famille urbaine.

Un résident en milieu rural peut souvent obtenir des denrées fraîches en se les procurant directement auprès des producteurs du voisinage. Le congélateur coffre ou armoire est donc plus intéressant (et on peut prévoir une capacité de 60 à 80 l par personne).

L'exploitant agricole a souvent intérêt à congeler les produits de son exploitation pour les consommer plus tard et réduire ainsi l'importance de ses achats de denrées à l'extérieur. On peut prévoir 80 à 200 l par personne. Pour la congélation proprement dite, il faut un appareil puissant et dont la température descende aussi bas que possible, c'est-à-dire qu'un congélateur petit (100 à 150 l) servira à tout congeler et à stocker certaines préparations sirupeuses et des plats cuisinés. D'autre part, une grande armoire de conservation (qui ne peut descendre qu'à — 18 °C, — 22 °C) pourra être utilisée pour stocker les denrées demandant ces températures pendant le temps de conservation.

L'intérêt de cette formule peut être résumé ainsi :

— meilleures conditions de congélation sans risques de réchauffer une masse déjà entreposée ;

— meilleure conservation des catégories de produits qui nécessitent des températures plus basses (préparations au sirop et plats préparés).

Dans ce cas, il faut préciser que l'on doit obligatoirement congeler dans le petit coffre.

● *Rangement.* Les congélateurs armoires sont souvent équipés de tiroirs permettant un rangement pratique des produits congelés. Les congélateurs coffres sont équipés de paniers de rangement (le rangement est moins pratique, mais la place disponible est mieux utilisée).

● *Aliments à congeler.* Il est possible de congeler :

— les aliments frais (fruits, légumes, poissons, viandes, volailles, gibier, etc.) ;

— les aliments cuits (pain, pâtes, pâtisseries) ;

— les plats préparés (potages, sauces, plats à l'étuvée, viandes cuites, etc.) ;

— les desserts (crèmes, gâteaux, glaces, etc.).

Le *tableau* IV donne les caractéristiques d'un réfrigérateur et d'un congélateur.

La machine à laver le linge

Avant la naissance des appareils à laver le linge

Il y a encore quelques dizaines d'années, laver le linge était une des activités ménagères les plus pénibles. Après avoir laissé tremper le linge, souvent dans de l'eau de pluie, durant une nuit, on le savonnait, le brossait à l'eau chaude. Quand l'opération du lavage était terminée, le linge était emmené à la rivière où les différentes pièces préalablement pliées étaient énergiquement frappées sur une planche en bois à l'aide d'un battoir, et ensuite rincées à l'eau courante. Après avoir tordu chaque pièce, la lessive était ramenée près de la maison et étendue à l'extérieur. Bien que très long, ce procédé gardait au linge toute sa fraîcheur.

L'industrialisation et l'exode rural ont rendu pratiquement impossibles le rinçage dans les rivières, souvent polluées, et l'étendage du linge à l'extérieur.

Au XIX[e] siècle, la lessive se faisait dans des lavoirs publics, devenus de véritables lieux de rencontre, où l'on disposait d'eau courante et de grandes cuves.

Plus tard s'est développé le métier de blanchisseur à qui une partie de la population confiera aussi bien le nettoyage que le repassage de son linge.

Historique de la machine à laver le linge

Les prémices

Les premières inventions concernant la machine à laver le linge s'échelonnent entre 1780 et 1800 et proviennent d'Angleterre. Elles concernent des appareils très encombrants, mus par des systèmes mécaniques comprenant des manivelles, des roues, des leviers, des contrepoids, etc., qui ne proposaient, hélas ! que de maigres résultats.

Le dispositif consistait la plupart du temps à mettre en mouvement un système à balancier frottant et pressant le linge sur la paroi inférieure d'un bac. Cette idée de reproduction du mouvement de la main d'une blanchisseuse frottant son linge sur une planche à laver sera reprise par la suite aux États-Unis, où un modèle datant de 1846 prolongea son existence jusque vers les années 1925 : une balancelle se déplace au-dessus d'une claie constituée par des rondins de bois espacés les uns des autres ; un vilebrequin communique à la balancelle et à la claie des mouvements d'aller et retour grâce auxquels le linge est frotté et pressé entre ces deux parties de l'appareil.

Un souci identique de reproduire le mouvement de la main se retrouve dans un principe d'essorage faisant en 1780 l'objet d'un dépôt de brevet et dans lequel on envisage de suspendre le linge humide à deux extrémités, le mouvement rotatif imprimé à l'une d'elles permettant de chasser l'eau du linge. En 1790, le linge humide sera placé dans un filet que l'on tordra ensuite grâce à l'utilisation d'une manivelle. Ce principe sera d'ailleurs repris au milieu du XIXe siècle, et le brevet déposé alors ne fera que modifier les principes de fixation du filet.

Parallèlement à l'avènement de moyens techniques propres à faire naître une véritable machine à laver, le début du XIXe siècle va être témoin d'un certain nombre d'améliorations fondamentales portant sur l'efficacité des produits de lavage. Auparavant, le linge était lavé dans un cuvier. La lessive était dissoute dans l'eau et on imprégnait le linge de cendres de bois (sels de sodium et de potassium). En 1800, Nicolas Leblanc découvre le procédé de fabrication industrielle du carbonate de sodium, et la lessiveuse qui opère automatiquement les étapes du lavage en cuvier fait son apparition.

La lessiveuse (*fig.* 15)

C'est une cuve en métal munie d'un double fond, perforé dans sa partie supérieure, et qui communique avec un tube central placé dans l'axe de la cuve. Ce tube est surmonté d'un capuchon en forme de champignon percé de trous à sa périphérie. Le linge est réparti autour du tube central, et la vapeur ainsi que le liquide, que bloquent les couches de linge, pénètrent dans le double fond, remontent par le tube jusqu'au champignon d'arrosage qui les redistribue ensuite sur le linge. Le détergent, dissous dans l'eau, traverse le linge, enlève les taches, puis pénètre à nouveau dans le tuyau pour recommencer le cycle. Pour obtenir le meilleur lavage possible, il est nécessaire de dissoudre d'abord le détergent dans l'eau tiède et, pour ce qui concerne la répartition du linge, sans tasser celui-ci, afin que la circulation de la vapeur et de l'eau se fasse dans de bonnes conditions, il est bon de placer les textiles les plus délicats sur le dessus et à plat. Il faut également prendre soin, en remplissant la lessiveuse d'eau, d'en recouvrir tout le linge.

Le cycle de lavage est extrêmement long. Il faut passer d'abord par le savonnage et le brossage du linge, procéder ensuite à l'ébullition, puis à de nombreux rinçages et essorages lorsque le linge est refroidi. Il faut également compter avec la manutention du récipient rempli qui représente un poids considérable. Par ailleurs, le lavage en lessiveuse n'est pas toujours très efficace, et les taches qui se trouvent au niveau des plis s'effacent, en particulier, très difficilement.

Les débuts de la machine à laver

Vers 1830, on voit apparaître en France des machines utilisant la circulation de l'eau bouillante et de la vapeur à l'intérieur de la masse de fibres textiles pour provoquer le nettoyage. Ces machines sont utilisées dans les blanchisseries de l'industrie textile et permettent de préparer les fils et les tissus pour la mise en teinture.

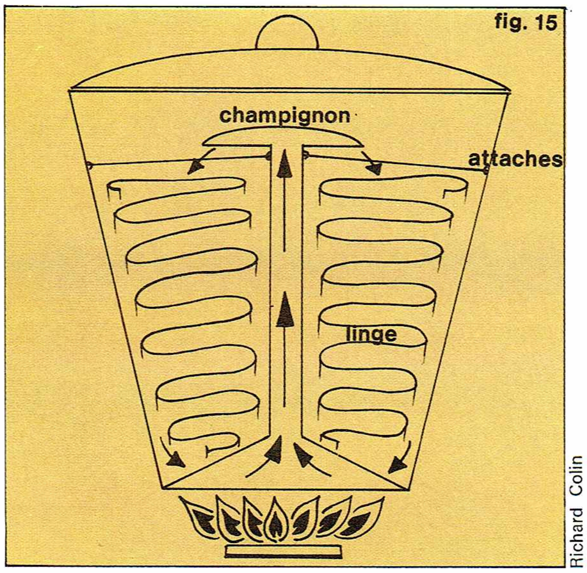

Richard Colin

◀ ***Figure 15 : schéma d'une lessiveuse traditionnelle. Le linge faisant obstacle au dégagement de la vapeur, celle-ci refoule l'eau chaude dans le champignon et provoque ainsi un arrosage continu.***

Jean-Baptiste Dumas, dans son *Traité de chimie appliquée aux arts* (1847), présente l'appareil dont le fonctionnement s'inspire directement de celui de la lessiveuse. La vapeur est obtenue dans une chaudière qui pulse l'eau chaude dans une tuyauterie jusqu'au cuvier où elle retombe en pluie uniforme sur le textile. Il s'agit là d'un ensemble parfaitement statique. Pour augmenter l'efficacité, il faudra y ajouter les effets de brassages et de frottages.

Ainsi, vers 1830, les tentatives de reproduction du mouvement manuel n'ayant guère donné satisfaction, nous allons voir apparaître les premières machines à tambour. L'idée de placer le linge dans un tambour rotatif à axe horizontal, pour permettre son brassage dans le liquide laveur, remonte à 1782 et fait à ce moment-là l'objet d'un brevet anglais. Néanmoins, dans la première moitié du XIXe siècle, le principe sera considérablement amélioré.

La « Tachemine », première machine à laver à tambour utilisée dans les blanchisseries françaises et qui date de 1840, est décrite de la manière suivante par F. Klein Rebour : « C'était un énorme tambour à quatre compartiments. Chaque compartiment possédait une ouverture percée sur le fond du tambour et par laquelle on introduisait le linge et le liquide laveur... Les quatre portes fermées hermétiquement, on mettait l'appareil en marche ; le linge était alors emporté dans un mouvement de rotation... Au début, le linge et le liquide reposaient sur la paroi extérieure du compartiment. Au premier quart de tour, le linge changeait de position, et se frottait contre la section formant croix au centre de l'appareil. Lorsque la machine avait fait un demi-tour, le linge était venu se masser dans l'angle droit, pour retomber, pendant le dernier quart de tour, sur la circonférence, où il se frottait de nouveau pendant que la machine recommençait un nouveau tour de rotation sur la droite. »

Le « Tonneau à cinq pans » qui remplaça la « Tachemine » comportait une porte sur la circonférence, qui facilitait le chargement mais également le déchargement, puisqu'il suffisait de renverser l'appareil porte ouverte pour que le linge tombât par gravité dans un récipient placé au-dessous. Dans cette machine, qui ne possédait plus de compartiments, se produisait, dans un premier temps, le glissement du linge sur le plan placé au-dessous lors de la mise en rotation. L'angle venait ensuite arrêter le glissement et bloquait le linge jusqu'à ce qu'il fût parvenu en partie haute, à la suite de quoi il retombait sur le plan horizontal qui, à ce moment-là, se trouvait à la partie inférieure, et ainsi de suite, d'où une succession de glissements et de frottements sur les parois ainsi que de chutes brutales dans le liquide laveur, dont l'émulsion à ce moment-là était si grande qu'il avait fallu percer des trous dans le fond du tambour pour éviter les explosions. Ces machines, mues à la main ou à l'aide d'un moteur,

Roger-Viollet

Boyer - Roger-Viollet

▲ *A gauche, buanderie de l'hôpital d'Argenteuil en 1932. A droite, retirage du linge d'une auto-laveuse.*

faisaient environ 28 à 30 tours par minute et pouvaient laver en un quart d'heure 10 à 15 kg de linge.

Sans quitter le domaine de la grande blanchisserie, un modèle de machine à laver, mis au point par James T. King aux États-Unis en 1851, va pour la première fois être fabriqué à une échelle véritablement industrielle. Siegfried Giedion, dans *Mecanization Takes Command*, explique qu'il exploitait la circulation naturelle de la vapeur et de l'eau bouillante, et que leur action était renforcée par le mouvement rotatif d'un cylindre (tambour), tournant concentriquement à l'intérieur d'un second cylindre, immobile celui-là, et chauffé par un foyer que l'on activait au-dessous. Les cylindres étaient remplis à moitié d'eau. Lorsque la vapeur commençait à s'échapper de la chaudière, on introduisait la quantité de savon nécessaire, puis, après quelques tours de tambour, le linge, qui séjournait entre 3 et 20 minutes, la chaudière étant mise en rotation de temps à autre. Le linge était alternativement plongé dans la vapeur dont le rôle était d'ouvrir les fibres et dans la mousse de savon qui permettait d'enlever la crasse.

Les appareils à usage domestique

Malgré les perfectionnements que vont subir à la fin du XIX^e siècle les machines à laver dans le cadre des laveries et des blanchisseries industrielles, ce n'est qu'au début du XX^e siècle que les appareils à laver le linge pénétreront dans les foyers américains. C'est sans doute en grande partie à cause des tarifs croissants pratiqués par les blanchisseries que les appareils domestiques vont faire leur apparition.

Il s'agira dans un premier temps de machines mues grâce à l'énergie musculaire, qui consisteront parfois en une simple amélioration de la lessiveuse, telle la « Merveilleuse » décrite dans *la Nature* du 15 mars 1924, et qui comporte un axe traversant le couvercle avec, à sa partie inférieure, un « organe malaxeur », permettant de communiquer au malaxeur un mouvement de va-et-vient pendant les opérations de chauffage et de rinçage.

L'idée ancienne du tambour à axe horizontal mû par une manivelle sera maintes fois remise à l'honneur. En France, la lessiveuse BRC, les machines Gyor, les machines Ducellier, etc., vers les années 1920, seront en particulier de ce type.

Néanmoins, les machines manuelles verticales qui voient le jour vers 1860 seront, au dire de Giedion, à cette époque, les plus employées aux États-Unis pour les usages domestiques.

Le linge placé dans le tonneau vertical peut y être brassé d'une manière plus ou moins complexe. En France, la « Lavandière » comporte un malaxeur constitué par « un plateau muni de quatre doigts verticaux actionnés par un levier à glissière » ; la « Nec plus ultra » possède un élément batteur « formé de deux palettes en bois qui reçoivent un mouvement alternatif produit par la rotation d'un volant-manivelle ». La laveuse-rinceuse « Aurore » utilise « deux fouloirs en bois, mobiles en tous les sens et jumelés sur un palonnier ». Ils sont supportés par une traverse qui s'élève et s'abaisse alternativement, etc.

Le problème de l'**essorage** est, quant à lui, résolu d'une manière générale par l'utilisation d'un dispositif annexe monté sur le tonneau et consistant à faire tourner en sens inverse un couple de deux rouleaux-presseurs qui chassent l'eau contenue dans le linge lorsque celui-ci passe entre eux.

Dès la fin du siècle dernier, l'idée de chasser en dernier lieu l'eau du linge en utilisant la force centrifuge avait tenté nombre d'inventeurs. Cette idée entraînait évidemment celle du cumul des opérations de lavage, rinçage, essorage dans le même récipient.

Comme l'essorage nécessite une plus grande vitesse de rotation, il fallut envisager des systèmes de changement de vitesse. Vers les années 1870, on commença à se pencher très sérieusement sur le problème. Néanmoins, pour obtenir de bons résultats, le moteur électrique était nécessaire. En 1878, un inventeur déposera ainsi un brevet de machine à laver et à essorer à bac unique actionné par un moteur électrique avec changement de régime manuel.

A partir de là, l'idée de la mécanisation intégrale du blanchissage familial fit son chemin, et l'on pensa à mettre au point un automate capable, sans intervention manuelle, de prendre le linge sale et de livrer le linge essoré. Pour résoudre ce problème compliqué, il faudra mettre au point des systèmes de contrôle automatiques capables de déclencher des électrovalves ainsi que de connecter et de déconnecter les contacts électriques commandant la rotation du tambour. Si le blanchissage

Roger-Viollet

▶ *Machine à laver le linge électrique ; essorage après lavage (1949).*

semi-automatique a été rendu possible seulement en 1920, c'est vers 1940 que l'automatisme intégral de la machine à laver individuelle verra le jour aux États-Unis.

La machine à laver le linge aujourd'hui

Le lave-linge à pulsateur

Le début du siècle a vu naître les premières machines à agitateur, dotées d'un mécanisme plongé dans l'eau : l'agitateur permettant le déplacement du linge. Les agitateurs, de formes variées (pales, spirales, ailettes), sont fixés dans la cuve et animés d'un mouvement de rotation. Ils étaient d'abord actionnés par une manivelle, remplacée plus tard par le moteur électrique.

Le perfectionnement de la machine à laver le linge a permis le remplacement de l'agitateur par une turbine jouant le rôle de pulsateur. Le lave-linge à pulsateur était pourvu d'un chauffage à gaz, aujourd'hui pratiquement abandonné au profit des lave-linge électriques.

Désormais le principe de fonctionnement par pulsateur est essentiellement utilisé pour les petits appareils portatifs de capacité de 1,5 kg de linge. Ces petites machines n'assurent ni le rinçage, ni l'essorage, rarement le chauffage, et le lavage y est effectué en général à une température de l'ordre de 60 °C (*fig.* 16).

● *Le problème de l'essorage*

Le lave-linge à pulsateur peut être couplé soit avec une essoreuse indépendante, soit avec une essoreuse incorporée dans le même bloc, constituant un appareil à deux cuves. Dans les deux cas, le linge doit être déplacé et traité par petites quantités.

L'essorage, c'est-à-dire la diminution de la quantité d'eau contenue dans le linge, est obtenu par la force centrifuge exercée sur le linge placé dans un cylindre perforé que l'on fait tourner à grande vitesse (1 500 tours par minute ou 2 800 tours par minute). L'efficacité de l'essorage dépend de la vitesse de rotation du panier.

Le linge essoré ne contient qu'entre 400 à 600 grammes d'eau par kilo de linge sec, ce qui permet un séchage rapide. Pour des raisons de sécurité, l'essoreuse est dotée depuis plusieurs années d'un freinage automatique qui fonctionne dès que l'on déverrouille le couvercle.

Le lave-linge à tambour

Les premiers lave-linge à tambour, apparus en France en 1955, sont actuellement les plus répandus. Depuis les années 1960, ils permettent d'effectuer l'ensemble des opérations telles que prélavage, lavage, rinçage et essorage sans intervention ni surveillance de l'opérateur.

● *Principe de fonctionnement*

Un tambour cylindrique en acier inoxydable, perforé et contenu dans la cuve, tourne autour d'un axe horizontal. Le linge, enfermé dans le tambour et immergé en partie, est mis en mouvement par les palettes du tambour qui soulèvent le linge avant de le laisser retomber. Durant le lavage et le rinçage, le mouvement circulaire du tambour répété alternativement dans les deux sens provoque le brassage du linge (100 tours par minute). Le temps de rotation est interrompu par les temps d'arrêt plus ou moins longs suivant la nature des textiles (*fig.* 17).

A la fin d'une des séquences du cycle (prélavage, lavage, rinçage), l'eau est évacuée au moyen d'une pompe de vidange.

L'opération du rinçage est répétée plusieurs fois et se termine par l'essorage. Le tambour tourne alors à grande vitesse; 300 tours par minute ou même 500 à 700 tours par minute, et une grande partie de l'eau contenue dans le linge est ainsi chassée puis évacuée par la pompe de vidange. Le linge essoré contient entre 700 et 1 200 g d'eau par kilogramme de linge sec.

● *L'utilisation du lave-linge*

Actuellement, le lave-linge est doté d'une très grande quantité de programmes (de 2 à 23), mais, dans la pratique, l'utilisateur n'en choisit que 4 ou 5. Ces différents programmes sont adaptés aux catégories de linge à traiter et définis par la durée de prélavage, et la température maximale de lavage, qui se situe à 30 °C, 40 °C, 60 °C et 95 °C.

En général, le tambour peut contenir entre 4 et 5 kg de linge de coton et environ 2 kg de textiles synthétiques. Le prélavage, que l'on peut comparer au trempage, est utile seulement si le linge est très sale.

Le temps de lavage dure environ 50 minutes; la cuve est remplie d'eau froide qui est chauffée en fonction des textiles à traiter.

La qualité du rinçage, répété plusieurs fois et réalisé dans une quantité d'eau plus importante que lors du lavage, détermine l'aspect du linge à la sortie de la machine. A chaque rinçage succède l'essorage; son efficacité est proche de celle de l'essoreuse indépendante. Elle dépend en effet de la vitesse de rotation, mais aussi

▼ ***Figure 16 : machine à laver à pulsateur. Ce principe est essentiellement utilisé pour les petits appareils portatifs sans éléments chauffants.***
Figure 17 : schéma d'une machine à laver le linge à tambour.

fig. 16

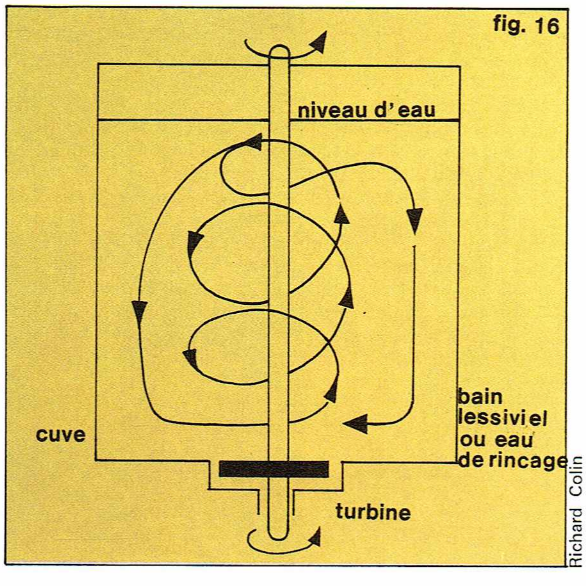

Richard Colin

fig. 17

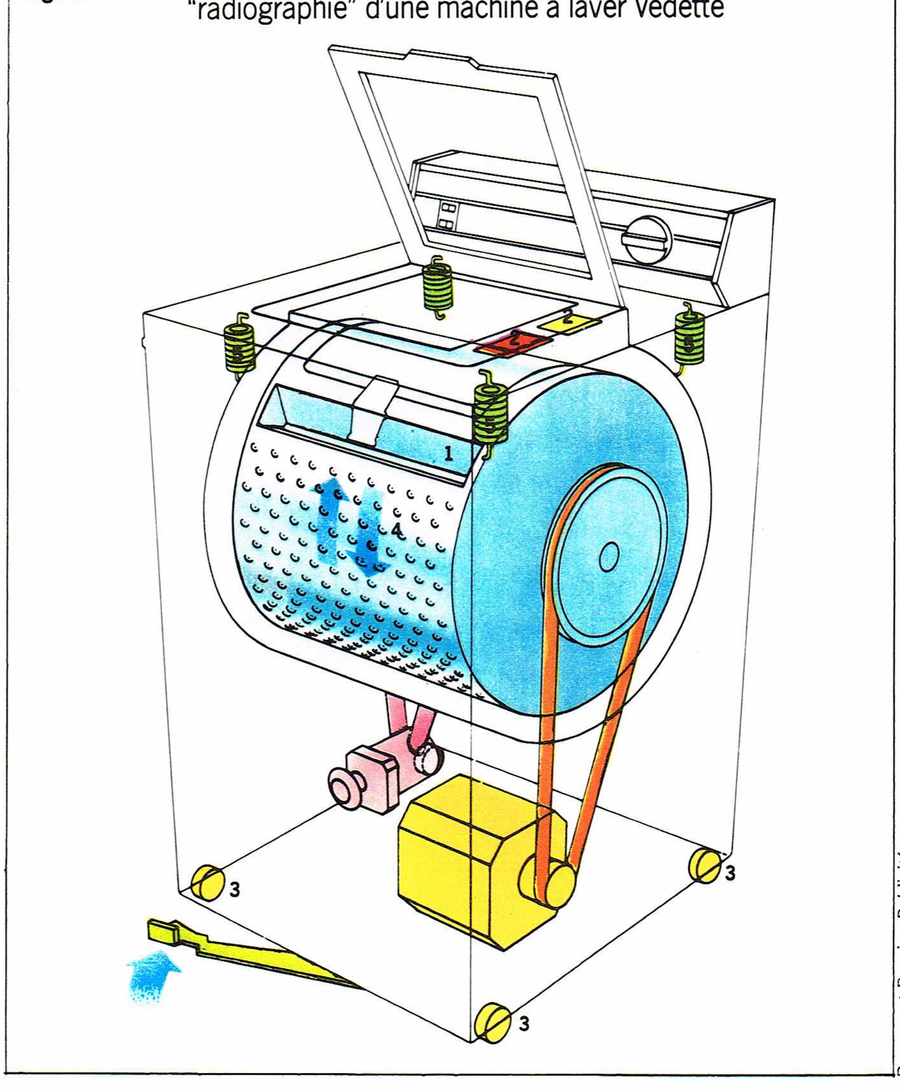

Document Bazaine Publicité

▶ *A gauche, machine à laver le linge à chargement frontal. Ce modèle permet d'utiliser le dessus de la machine comme plan de travail. A droite, machine à laver le linge à chargement par le haut.*

Wayne Miller - Magnum

Brandt - Photo Bazaine Publicité

du diamètre du tambour, plus grand pour la machine à laver.

● *Installation*

La machine à laver est généralement installée dans la cuisine ou dans la salle de bains. Elles ont toutes des dimensions normalisées : hauteur 850 mm, largeur 400 à 480 mm ou 600 mm, profondeur 600 mm.

Il existe deux principes de chargement du linge : le chargement frontal et le chargement par le haut.

● Les appareils à *chargement frontal*, constituant 25 % du marché, comportent un hublot en façade donnant accès à une ouverture du tambour destinée à y introduire le linge. La suspension du tambour est relativement fragile, l'arbre d'entraînement, fixé à l'autre extrémité, reposant sur deux paliers solidaires de la cuve.

Ce modèle permet d'utiliser le dessus de la machine comme plan de travail ou de lui superposer un séchoir rotatif. Certains modèles peuvent être encastrés sous un plan de travail. Dans ce cas, l'emplacement du filtre est important ; celui-ci pouvant être obturé lors du lavage, on doit pouvoir y accéder facilement pour le nettoyer.

● Les appareils à *chargement par le haut* sont équipés d'un tambour muni d'une ouverture périphérique fermée par une porte à glissière. On y accède en ouvrant le couvercle à charnière disposé sur le plan supérieur de la machine. Ces modèles sont intéressants pour leurs dimensions, la largeur inférieure à celle des modèles à chargement frontal permettant une capacité égale, mais aucun autre élément ne peut leur être superposé.

Le lave-linge est alimenté en eau froide par un tuyau souple livré avec la machine et raccordé à un robinet d'arrêt. La vidange est effectuée soit par un entonnoir spécial, relié à l'aide d'un siphon à la canalisation au sol, soit en accrochant directement la crosse du tuyau de vidange à un lavabo ou une baignoire.

fig. 18

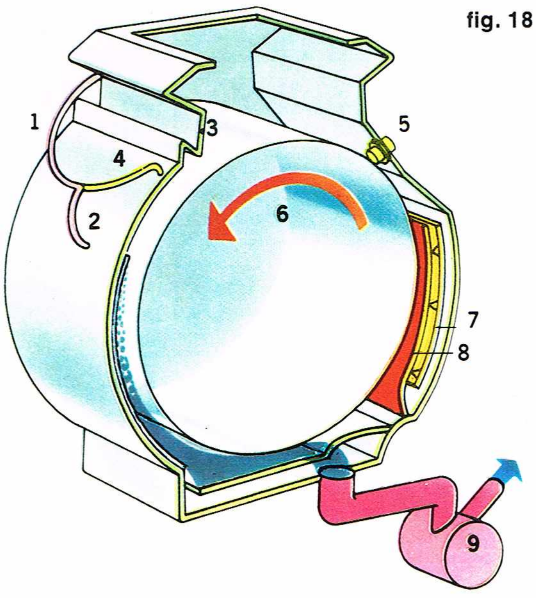

Document Bazaine Publicité

▶ ***Figure 18** : schéma de principe du fonctionnement de la machine à laver séchante. 1, tuyau d'arrivée d'eau ; 2, raccord sur la cuve d'arrivée d'eau ; 3, bulle thermostatique ; 4, tuyau dérivé et raccord sur la cuve : prise d'air ; 5, thermostat de sécurité (110 °C) ; 6, sens de rotation ; 7, réflecteurs ; 8, élément chauffant-séchage ; 9, pompe de vidange.*

Machine à laver le linge séchante

Le dernier modèle introduit en France il y a cinq ans ne constitue qu'une très faible proportion du marché (environ 1 %). Elle permet le séchage du linge dans le tambour servant au lavage et, de ce fait, est intéressante en cas de problème de place.

● *Principe de fonctionnement*

Son fonctionnement lors du lavage est identique à celui d'une machine à tambour. Lors du séchage, les résistances électriques blindées, placées au fond de la cuve et utilisées pour le chauffage de l'eau, assurent le chauffage de l'air de la cuve.

L'humidité de l'air est condensée à l'intérieur de la cuve grâce à la circulation continue d'une nappe d'eau froide sur une des parois de la cuve. La durée de séchage est très longue, environ 90 à 120 minutes, et implique une consommation importante d'eau pendant ce cycle (80 litres par heure environ). Certains modèles s'efforcent de pallier cet inconvénient par une circulation d'eau intermittente.

Mais le linge n'est pas suffisamment brassé, et son repassage est plus long. De plus, la capacité de séchage est la moitié de celle de lavage. Il faut donc soit laver seulement 2,5 kg de linge pour ne pas interrompre le cycle, soit en laver 5 kg et en enlever la moitié avant d'enclencher le cycle de séchage. Le thermostat interrompt le chauffage de l'air lorsque la température ambiante du tambour atteint 100 °C, c'est-à-dire lorsque la régulation thermostatique normale de séchage (90 °C pour le coton et 65 °C pour les synthétiques) est défectueuse.

Sèche-linge à tambour

Le sèche-linge à tambour est actuellement peu répandu en France, mais son utilisation est en voie de progression grâce à la qualité du service rendu.

Il se présente sous la forme d'une machine à laver, ses dimensions normalisées sont identiques ; de ce fait il peut être juxtaposé à la machine à laver ou bien être posé sur elle et former une colonne d'une hauteur de 1700 mm.

Il est doté d'un ventilateur qui brasse l'air chauffé seulement à 50 °C. Le débit de l'air chaud est très élevé, d'environ 150 à 200 m^3 par heure. L'air saturé d'humidité est expulsé par un orifice hors de la cuve. Le brassage du linge est assuré par la rotation du tambour ; il est sensiblement supérieur à celui des machines à laver, ce qui augmente sa capacité de séchage (environ 4 kg).

● *Installation*

L'installation du séchoir à tambour dans la salle de bains, généralement petite et peu aérée, n'est pas à conseiller, l'appel d'air étant trop important. Il est préférable d'évacuer l'air chaud et humide vers l'extérieur de la pièce à l'aide du tuyau ou de la buse d'évacuation.

Les armoires séchantes

Elles sont munies d'un ventilateur qui propulse de l'air préalablement chauffé par une résistance située au bas de l'appareil. La durée de séchage est plus longue que pour le séchoir à tambour, et le linge qui en sort est moins souple. Ce modèle relativement encombrant disparaît peu à peu du marché.

◀ ***Mise en place des assiettes dans le moto-laveur (modèle pour 60 assiettes).***

Boyer - Roger-Viollet

Le lave-vaisselle

L'invention de la machine à laver la vaisselle est relativement ancienne, puisqu'elle remonte à 1865. Néanmoins, c'est au cours des années 1920 que son usage se répand et que différents modèles sont développés.

Il s'agit presque exclusivement de machines à laver les assiettes. Celles-ci sont disposées dans un panier généralement circulaire, mis en mouvement à l'aide d'une manivelle à main. La machine n'utilise pas encore de pompe à eau. C'est un modèle de ce type qui pour la première fois sera présenté au public à la Foire-Exposition de 1910.

Les premières machines à laver la vaisselle à moteur électrique apparaissent vers les années 1930. Le chauffage peut être soit électrique, soit au gaz. Ces premières machines utilisent tantôt un panier fixe doté d'une pompe ou de palettes qui projettent l'eau de lavage, tantôt un panier rotatif, l'orientation des jets et le mouvement circulaire du panier permettant alors le lavage. Lorsque les modèles étaient de grosse capacité, le chauffage de l'eau était incorporé dans l'appareil.

Il faudra beaucoup de temps pour que le lave-vaisselle pénètre dans les foyers. En France, on devra attendre les années 1960 pour le voir utilisé d'une manière courante. Encore faut-il constater que son usage ne touche aujourd'hui qu'une fraction aisée de la population, et qu'une relative disparition de la domesticité justifie l'emploi du lave-vaisselle. Un rapide calcul de rentabilité permet d'ailleurs de constater que, chaque lavage de la vaisselle représentant maintenant une dépense de l'ordre de 2 ou 3 francs, l'amortissement de la machine étant mis à part, le travail à la main n'est plus rentable à partir du moment où celui-ci est rémunéré.

La production en série du lave-vaisselle a débuté en 1950 aux États-Unis. C'est à l'Allemagne qu'il a appartenu de développer un peu plus tard le modèle « européen ». Elle bénéficiait pour cela d'un savoir-faire technologique acquis lors de la mise au point de la machine à laver le linge, dont la conception est somme toute assez voisine.

Jusqu'à l'apparition des modèles de fabrication française, de nombreux critères ont freiné la vente de cet appareil dans notre pays, et, parmi eux, un encombre-

▼ ***Toute cuisine complètement équipée comporte maintenant un lave-vaisselle.***

Thomson - Photo Bazaine Publicité

▶ *Figure 19 : machine à laver la vaisselle.*
1, plan de travail en stratifié ;
2, 2 paniers amovibles, le panier supérieur est réglable sur 2 positions ;
3, réglage du cycle « spécial casseroles » ;
4, cuve en acier inox ;
5, contre-porte en acier inox ;
6, filtre de vidange ;
7, voyant de contrôle du niveau de produit de rinçage ;
8, bras d'aspersion ;
9, adoucisseur incorporé ;
10, voyant de contrôle de teneur en sel du bain régénérateur ;
11, distribution automatique du produit lessiviel ;
12, sécurité de porte.

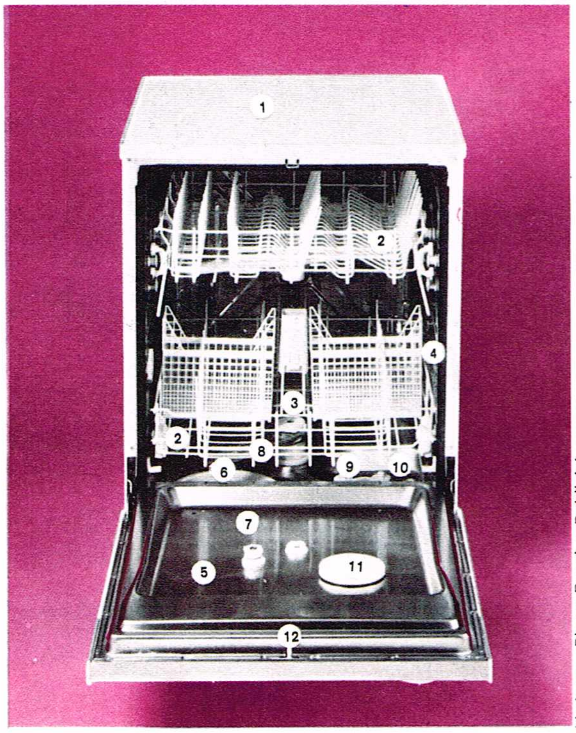

Vedette - Photo Bazaine Publicité

▼ *Figure 20 : schéma d'un lave-vaisselle.*

fig. 20

"radiographie" d'un lave-vaisselle Vedette

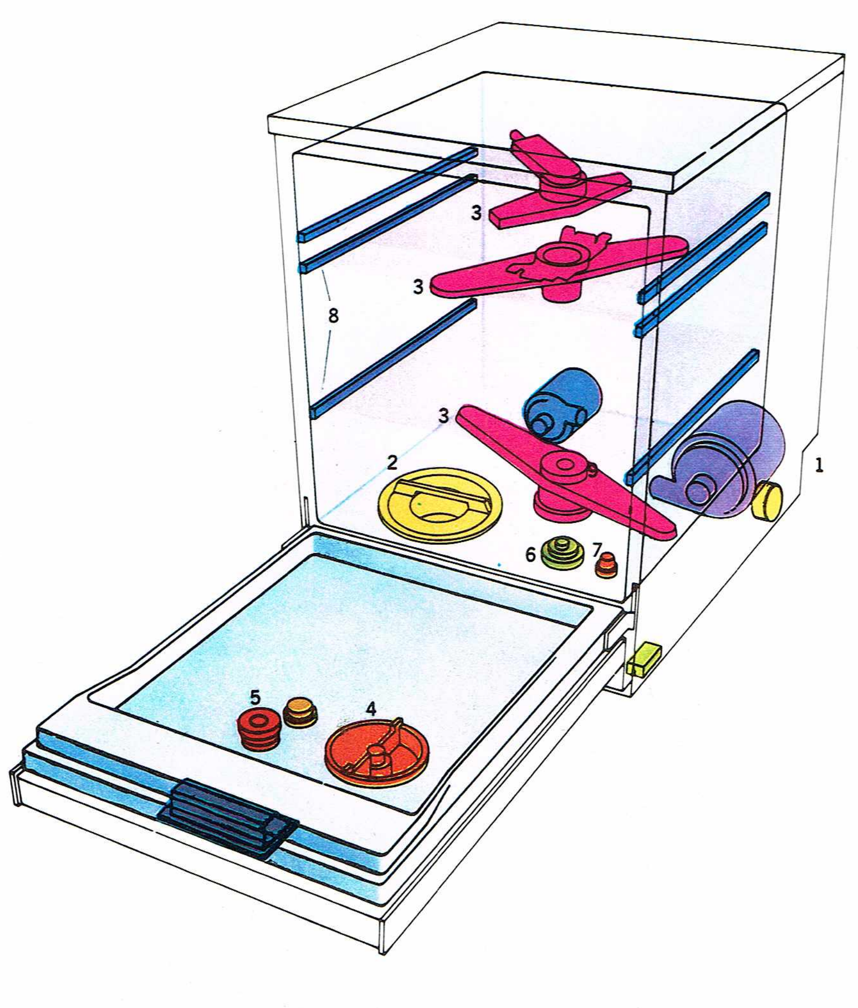

Document Bazaine Publicité

ment peu compatible avec le manque de place dont on dispose dans les cuisines françaises. Il faut ajouter à cela qu'il s'agit d'une machine relativement bruyante, et que, jusqu'à ce jour, son prix d'achat est relativement élevé.

Principes de fonctionnement

Le lavage s'effectue dans une cuve fermée, grâce à un jet d'eau rotatif.

Chaque cycle de lavage est composé de plusieurs étapes : prélavage, lavage, rinçage et séchage. La première opération est l'arrivée d'eau commandée par une électrovanne d'admission. Entre l'électrovanne et le réservoir, se situe l'adoucisseur qui traite la dureté de l'eau. L'eau introduite dans le lave-vaisselle est réchauffée dans la cuve pendant le cycle de lavage à 55-60 °C. La mise en mouvement de l'eau est effectuée par une pompe à moteur électrique (pompe d'aspersion) ; l'eau est projetée sur la vaisselle grâce aux bras d'aspersion ou bras rotatifs. L'évacuation des eaux sales se fait par la pompe de vidange.

Cycle de lavage

La cuve est équipée de plusieurs paniers pour recevoir la vaisselle. Les paniers inférieurs sont prévus pour recevoir verticalement les assiettes ou les récipients culinaires tournés vers le bas. Les couverts doivent être placés dans les corbeilles à couverts. Les verres, les tasses et les coupes doivent être placés dans le panier supérieur, tournés vers le bas pour recevoir le jet d'eau pendant le lavage.

Suivant le degré de remplissage du lave-vaisselle, il est possible d'utiliser le cycle complet (prélavage, lavage, rinçage, séchage), ou bien seulement le prélavage. Ce dernier enlève les résidus d'aliments et les empêche d'adhérer à la vaisselle en séchant, en attendant de finir le remplissage de l'appareil.

- *Prélavage*. D'une durée courte, environ 5 minutes, le prélavage utilise l'eau froide sans la réchauffer. Après le prélavage, l'eau s'écoule par l'intermédiaire de la pompe de vidange.
- *Lavage*. Le réservoir est rempli d'eau froide additionnée du produit de lavage. L'eau de lavage, préalablement chauffée, est mise en mouvement par une pompe d'aspersion. L'eau, retombée dans le fond de la cuve, passe à travers le filtre et est projetée à nouveau sur la vaisselle. L'eau ainsi recyclée et le produit de lavage contribuent à un nettoyage complet de la vaisselle.
- *Rinçage*. Pendant le rinçage, toute la saleté est éliminée de la cuve. Un produit de rinçage est ajouté au moment de la dernière phase, qui élimine ainsi toutes les traces. Le doseur prévu pour le produit de rinçage doit être rempli périodiquement (environ tous les 50 à 80 lavages).
- *Séchage*. A la fin du rinçage, la température de l'eau peut atteindre jusqu'à 70 °C. Pendant le séchage, la température est maintenue à 70 °C à l'aide d'un élément chauffant et permet l'évaporation du reste de l'eau.

Installation

L'installation d'un lave-vaisselle est assez onéreuse si c'est un installateur qui effectue le branchement d'eau et d'électricité.

Le dessus de l'appareil offre généralement un plan de travail (table top) à la hauteur de 850 mm.

Il est possible d'encastrer la plupart des appareils sous un plan de travail continu. L'encastrement d'un lave-vaisselle diminue considérablement son bruit qui dure tout au long du cycle de lavage (environ 60 minutes) et qui est relativement élevé (entre 50 et 75 décibels).

Entretien. Adoucissement de l'eau

Contrairement aux États-Unis où les habitations sont équipées d'un système de distribution d'eau chaude adoucie, en France, chaque lave-vaisselle comporte un adoucisseur d'eau, et généralement un corps de chauffe.

L'opération adoucissement consiste à substituer du sodium au calcium pour obtenir du carbonate de sodium qui, étant soluble, ne formera pas de dépôts. Cette transformation de la nature de l'eau est effectuée par le passage de l'eau à travers un corps poreux, une résine, qui se dégrade au cours de cette transformation ; il est donc nécessaire de procéder périodiquement à la régénération de l'adoucisseur avec du sel chimiquement pur.

PRODUITS TEXTILES ET LINGE DE MAISON

L'expression « linge de maison » désigne certains des produits fabriqués avec des fibres textiles et utilisés dans le cadre de la vie quotidienne. A partir des activités auxquelles ils se rapportent, à savoir la toilette, les repas, le sommeil, nous étudierons la conception de ces produits, leur fabrication, leur commercialisation et leur utilisation, sans chaque fois suivre cet ordre logique.

Nous distinguerons donc :
— le linge de toilette (les serviettes, gants et draps de bain, les peignoirs et draps de plage) ;
— le linge de table (les nappes et serviettes, les sets) et le linge d'office ;
— les parures de lits (les draps, traversins, taies, couvertures).

Le linge de toilette

Il est destiné à absorber l'eau ruisselant sur le corps après la toilette. Pour cet usage, que choisir parmi les principales fibres textiles ?

- *Fibres textiles naturelles*
  — animales (laine, soie) ;
  — végétales (coton, lin, chanvre, jute, etc.) ;
  — minérales (métaux).
- *Fibres textiles chimiques*
  — artificielles (cellulose, viscose, polynosique, acétate) ;
  — protéines animales ou végétales (caséine, arachide).
- *Fibres textiles synthétiques*
  — polyamides, polyesters, polyuréthannes ou élastomères, chlorofibres, acryliques, polypropylènes.

Le choix, établi en fonction des opérations de fabrication, de commercialisation et d'utilisation, s'est porté sur une fibre souple, résistante, douce, absorbante : le *coton*.

Le coton

L'« or blanc » : c'est ainsi qu'était appelé le coton dans l'Antiquité. Pendant des siècles, les voiles obtenus à partir du tissage de cette fibre sont restés des articles de luxe. Ce n'est qu'à partir de l'installation à Rouen, en 1534, de la première fabrique de cotonnade, que l'industrie cotonnière se développe. Elle connaît un grand essor à partir du XVIII[e] siècle, avec le développement de l'industrie de l'indienne.

La fibre de coton est le duvet renfermé dans des capsules qui adhèrent aux graines. La plante appartient à la famille des Malvacées. La culture du coton n'a lieu qu'en pays chaud, et la qualité de la fibre dépend de sa longueur. Elle peut aller de 9 à 50 mm, exceptionnellement jusqu'à 70 mm. Les cotons longues fibres de 25 à 50 mm sont les plus recherchés, les cotons courtes fibres de 9 à 25 mm sont d'usage plus courant. Les pays producteurs sont les États-Unis, l'U. R. S. S., la Chine, l'Argentine, le Brésil, le Pérou, l'Inde, le Pakistan, l'Égypte, le Soudan, le Mexique, la Turquie.

Après la cueillette, le coton est séché au soleil afin de faciliter l'égrenage qui séparera le duvet de la graine. Mis en balles, il sera expédié à la filature. C'est là que les fibres de coton, préalablement peignées (longues fibres) ou cardées (courtes fibres), seront réunies par simple torsion : ainsi sera obtenu le coton filé, ou *fils simples*. A partir de deux et parfois trois fils simples fortement tordus, chacun séparément dans un sens, et retordus en sens inverse, seront obtenus les *fils de coton retors* dits à 2 bouts ou 3 bouts. Les qualités principales de ces fils retors sont la résistance, la souplesse et la régularité plus grande, comparés aux fils simples. Afin de reconnaître la grosseur des fils, ceux-ci seront désignés par un numéro métrique (Nm). Celui-ci représente la longueur en kilomètres d'un kilogramme de fils. Plus le numéro métrique est élevé, plus le fil est fin. Par exemple : Nm 50 = 50 kilomètres par kilogramme.

Traitements des fibres de coton

Différents traitements des fils de coton permettent d'en modifier les apparences et d'apporter de nouvelles propriétés.

Roger-Viollet

▲ *Récolte du coton près d'Alanya (Turquie).*

- Le **mercerisage** est une opération qui consiste à plonger le fil tendu dans une solution de soude caustique, afin d'obtenir un brillant qui résiste à toutes les opérations successives et facilite la teinture.
- Le **glaçage** est une opération qui consiste à empeser le fil à l'aide d'une composition d'amidon ou de cire ; l'apparence n'est que temporaire, puisque le traitement disparaît au lavage.
- Le **flambage** est une opération qui consiste à brûler les particules de fibres afin de donner au fil un aspect plus régulier.
- Différentes firmes importantes ont mis au point des traitements qui sont leurs propriétés. Certains produits finis sont ainsi vendus, accompagnés du label justifiant l'utilisation de tel ou tel de ces traitements.
- Le **tissage** (*fig.* 1) est l'opération qui permettra la transformation des fils en un produit fini : le **tissu** est le résultat de cette opération. Il sera obtenu par l'entrelacement de deux séries de fils perpendiculaires entre elles. L'une des séries constitue la chaîne, l'autre la trame, la chaîne ou sens longitudinal du tissu, la trame ou sens transversal. On entend généralement par *fil* le fil de chaîne, par *duite* le fil de trame. Le *compte en chaîne* exprime le nombre de fils de chaîne au centimètre et le *duitage* celui des duites. La *laize* est la largeur du tissu entre les deux lisières.

Armure d'un tissu : terme exprimant la façon dont se croisent les fils de chaîne et ceux de la trame. Les armures principales sont de trois types :
— les toiles et dérivés (nattés, cannelés) ;
— les sergés et dérivés (chevrons) ;
— les satins et armures diverses, où nous ferons rentrer l'éponge de toilette.

Ourdissage : opération préliminaire au tissage, et quelle qu'en soit l'armure, c'est la mise en chaîne des fils ; ceux-ci sont toujours parallèles entre eux, et dans un ordre donné. Le rouleau qui les reçoit est appelé *ensouple*.

Les fils de chaîne, ainsi disposés sur le métier, sont passés dans les maillons centraux de fils métalliques, appelés *lisses*. Celles-ci sont supportées par des cadres appelés lames, et l'ensemble, *harnais*. Le mouvement des lames, l'une supérieure, l'autre inférieure, permet aux nappes de fils de former un angle appelé *foule*. Celui-ci permettra le passage du fil de trame. Le fil de trame (duite) est enroulé sur un tube appelé *canette*, et celle-ci est placée dans une navette dont le va-et-vient constant à travers la foule permettra la contexture du tissu.

Un perfectionnement récent a permis, sur certains nouveaux métiers à tisser, la suppression des navettes. Il s'agit de « machines à tisser » ; le passage du fil de trame

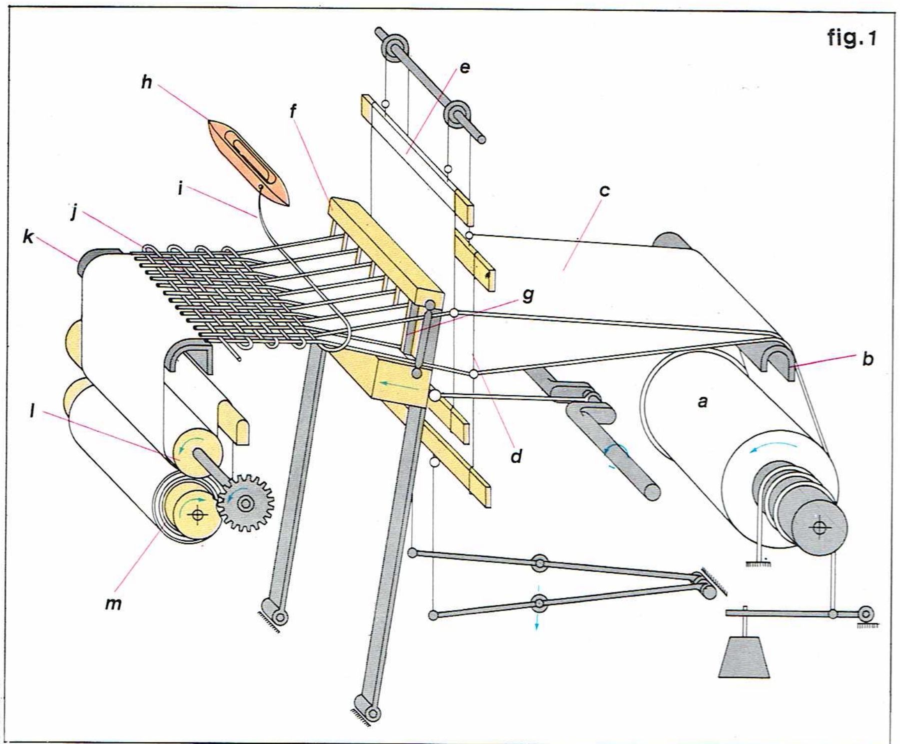

▲ *Figure 1 : schéma d'un métier à tisser mécanique ;* a, *ensouple arrière ;* b *poitrinière arrière ;* c, *fils ourdis ;* d, *lisse ;* e, *lame ;* f, *cadre ;* g, *peigne ;* h, *navette ;* i, *fil de trame ;* j, *tissage ;* k, *poitrinière avant ;* l, *rouleau guide tissu ;* m, *pièce de tissu terminée.*
▼ *Métier à tisser automatique avec carton perforé (programme) pour mécanique Jacquard.*
Figure 3 : schéma d'un métier Jacquard. Le prisme C *contient les lamelles du carton perforé* c *; celui-ci permet le passage dans chaque trou d'une aiguille* a. *Le crochet* A *vient s'accrocher sur le couteau* L *qui se soulève en entraînant le fil* F. m *et* s *: lisses.*

à travers la foule peut être obtenu par une pince fixée sur un projectile (machine à projectile), par une longue lance qui va chercher le fil à travers la foule (machine à lance), par deux aiguilles qui prennent simultanément en relais le fil au milieu du métier (machine à deux aiguilles), par un jet d'air comprimé ou un jet d'eau sous pression qui propulse le fil (machine à jet).

L'avantage de ces machines, en plus de la suppression des canettes, est leur plus grande vitesse. L'armure éponge, dont la caractéristique est la formation de bouclettes, est obtenue par l'apport sur les métiers propres à cette fabrication d'une chaîne supplémentaire dite chaîne de boucles (*fig.* 2).

Fabrication du linge de toilette

Dans le cas du linge de toilette, quatre types principaux de fabrication du produit serviront à diversifier les collections :

— les unis (couleur seule) ;
— les jacquards (dessin obtenu par tissage) ;
— les brodés (dessin obtenu par apport de broderie) ;
— les imprimés (dessin obtenu par apport d'impression).

La teinture

De façon générale, la fabrication du linge de toilette de coloris unis est obtenue au moyen d'une teinture des pièces de tissu. Celles-ci, tissées à l'aide des fils de coton écru (coloris originel), sont préalablement blanchies. Elles sont ensuite plongées à l'aide de rouleaux dans la cuve d'un bain coloré.

Il est aussi possible de réaliser des serviettes de toilette de coloris unis à partir de fils teints. Cette fabrication n'a d'avantage que pour les petites séries, puisqu'il conviendra de procéder à un ourdissage pour chaque couleur ; la réalisation sera donc moins rapide et le coût plus élevé.

Le tissage Jacquard

Nous venons d'exposer les généralités concernant le tissage. Elles sont indispensables à la compréhension de cette branche particulière qu'est le tissage au jacquard.

Cette mécanique doit son nom à son inventeur, Jacquard (vers 1805). Elle peut être considérée comme l'adaptation des métiers de deux de ses prédécesseurs : Falcon et Vaucanson. D'abord manuelle (c'est à partir de 1860 que le métier devient automatique), la mécanique Jacquard est indépendante du métier, elle se déplace au-dessus de lui (*fig.* 3). Elle remplace les lames des métiers à lames, et son innovation est la possibilité de faire se lever chaque fil de chaîne ou chaque groupe de fils isolément. Des séries de cartons perforés permettent cela,

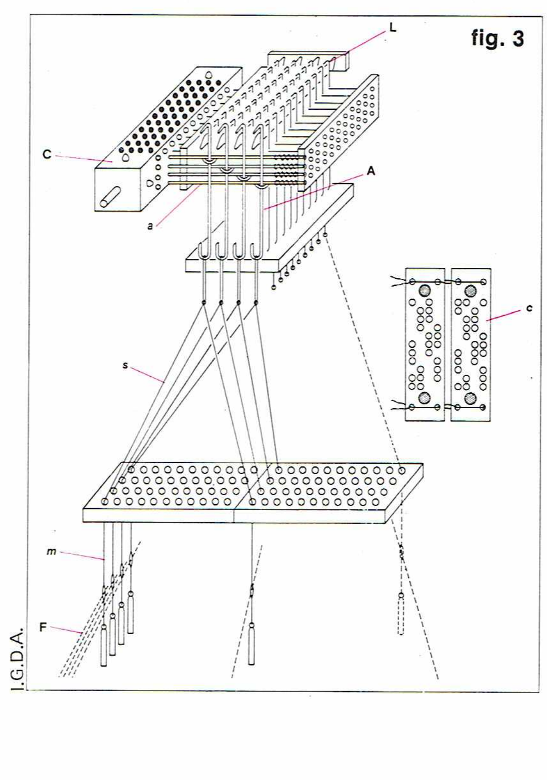

les perforations laissant agir des aiguilles, qui font se lever les fils de chaîne. Ce principe des cartons perforés ressemble à celui des « limonaires » ou « orgues de Barbarie ».

Dans le cas de la réalisation du linge de toilette sur mécanique Jacquard, il convient, avant tout, d'établir un dessin : c'est la composition. Le tracé définitif de ce dessin étant réalisé, il faut procéder à sa mise en carte ; à l'aide de celle-ci seront piqués les cartons afin que soit interprétée, en tissu, la création dessinée. Ces opérations sont antérieures au « montage » de la mécanique, qui est la mise en place des différents organes nécessaires à la fabrication d'un article déterminé.

La part prépondérante du « créateur textile » apparaît immédiatement, mais, afin que celle-ci trouve son accomplissement, le créateur doit être aussi un technicien. Continuons donc l'approche technique avant de nous pencher sur le problème de la « création ».

L'exécution d'un dessin nécessaire à la réalisation tissée est en général faite à l'échelle grandeur réelle. Le créateur doit savoir que la technique du jacquard-éponge ne lui permet généralement, dans sa composition, qu'un nombre restreint de possibilités de couleurs. En effet, les fils ne peuvent être que de deux couleurs différentes pour l'ensemble des fils de la chaîne de bouclettes. Cet ensemble peut être divisé en autant de bandes qu'il est souhaité, à condition que ces bandes soient formées de deux couleurs. Celles-ci peuvent être utilisées en toutes sortes de surfaces, selon le dessin.

A ces effets des deux couleurs pures peuvent s'ajouter des effets de mélange, des bouclettes des deux couleurs, ce sont les effets « chinés ». Quand l'une des couleurs de bouclettes est en plus grande quantité que l'autre, on a un effet de nuance différent. Il est ainsi possible d'avoir plusieurs chinés et de les associer de façon à obtenir des ombrés.

Il est également un effet très intéressant que permet le tissage de l'éponge au jacquard, c'est celui de parties où n'apparaissent pas les bouclettes. Ces parties qui restent en tissage plat apparaissent en creux. Utilisé comme contour, soulignant les parties du dessin, cet effet ciselé donne du relief. Il semble logique de n'utiliser cet effet qu'en petites surfaces, le propre de l'éponge étant d'absorber : lui retirer des boucles, n'est-ce pas aller à l'encontre de cette caractéristique ?

Assez souvent, certaines serviettes de toilette sont réalisées avec, à quelques centimètres de chacune de leurs bases, une bande transversale sans bouclette. Cette bande simple ou façonnée est appelée « chef ».

Quand on estime que le dessin a tenu compte de toutes les contingences techniques, qu'il est « mis au point », il convient de procéder à sa mise en carte. Celle-ci est une opération technique, mais elle aussi créative. Son but est la reproduction sur un papier dit de mise en carte, qui est quadrillé. La reproduction du dessin sur ce papier doit tenir compte de tous les effets obtenus par le nombre de fils et l'emplacement mathématique de ceux-ci. Sur ce papier seront indiquées les positions des fils de chaîne et des fils de trame à l'aide de la mise en couleurs, selon un code.

Le metteur en carte doit savoir transposer en respectant la qualité plastique du dessin et employer avec bonheur les différentes armures, de façon à prolonger l'intention créative. De la mise en carte dépend donc la bonne ou mauvaise interprétation du dessin, et à cet égard, le metteur en carte ne doit pas être un simple exécutant, mais également un créateur. La mise en carte réalisée de cette façon semble être actuellement le moyen le plus certain d'arriver à une réussite accomplie de la qualité créative.

Il existe depuis peu de temps une lecture électronique du dessin et de son application à la mise en carte. Cette nouvelle technique beaucoup plus rapide, donc d'un prix de revient moindre, ne semble pas rencontrer toutes les faveurs. Pour exacte qu'elle puisse être, elle laisse peu de place à l'interprétation, au prolongement de l'intention. Il semblerait qu'elle convienne mieux actuellement à des dessins simples, de moindre effet, et dont la maquette, établie de façon définitive, ne peut être améliorée au cours de la mise en carte.

Cette mise en carte terminée, on peut passer à la réalisation des cartons (caractéristique du tissage au jacquard), qui se fait en trois étapes :

— *première opération :* le carton doit être perforé, c'est le piquage ou perçage ;

— *deuxième opération :* le piquage doit être réalisé de façon conforme aux indications de la mise en carte, c'est le lisage ou lecture ;

— *troisième opération :* les cartons doivent être reliés entre eux, c'est le laçage ou le liage.

La stabilité dimensionnelle est indispensable aux cartons, c'est pourquoi ils subissent différentes préparations : le piquage se fait à la main, mécaniquement ou électriquement, trou par trou. Nous rappelons qu'un trou dans le carton permet la levée des fils de chaîne ou un pris ; la mise en carte représente celui-ci par un carreau noir, alors qu'elle représente par un carreau blanc l'immobilisation des fils de chaîne ou un laissé.

L'opération qui permet de transcrire toutes les données de la mise en carte s'appelle le lisage ; celui-ci commence par le bas de la mise en carte et par la première duite. Quand les cartons sont piqués, ils sont numérotés et placés les uns à côté des autres. Ils sont assemblés de façon à former l'ensemble nécessaire à la réalisation tissée, c'est le laçage.

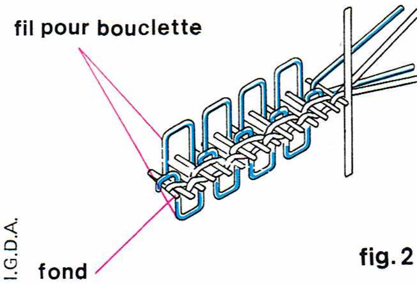

I.G.D.A.

fig. 2

▲ ***Figure 2 : détail de fabrication du tissu-éponge.***

La broderie

La broderie est l'opération qui consiste à superposer à un tissu, initialement prévu pour cela, un dessin réalisé par une aiguille et un fil qui, en passant et repassant, forment des points.

Ces points variés : de croix, de tige, de chaînette, de bourdon, de reprise, etc., sont un nouvel apport au tissage, et font l'objet d'une réalisation supplémentaire. Certaines broderies se font à l'aide de machines multi-têtes qui réalisent certains produits assez rapidement.

L'impression

Ainsi que dans la broderie, l'opération qui consiste à imprimer les produits-éponges consiste à superposer au tissu des couleurs. Il s'agit ici encore d'une réalisation supplémentaire.

L'impression des tissus remonte aux temps les plus anciens, mais alors il s'agissait le plus souvent d'une peinture ; certaines techniques, comme celle du batik, peuvent paraître très modernes par leur conception. Pratiqué surtout en Chine, en Inde, à Java, le batik consiste à dessiner sur le tissu à l'aide de cire, à tremper ensuite le tissu dans la teinture ; la cire agira ainsi qu'une réserve et empêchera le tissu d'être imprégné par la couleur à ces endroits.

● **L'impression à la planche** donna un essor important à la fabrication des cotonnades et indiennes. La technique consiste à graver une planche de bois, en laissant apparaître en relief les parties du dessin. Ces reliefs recouverts d'une pellicule de couleur, la planche sera appliquée, comme le serait un tampon, sur le tissu. Il faut graver une planche pour chacune des couleurs du dessin. Cette circonstance est très importante, puisqu'elle conditionne le prix de revient et le nombre de couleurs.

● **L'impression au rouleau** (*fig.* 4) : cette technique, moins ancienne que l'impression à la planche, consistait, au début, à graver des cylindres de bois. Ensuite furent utilisés des cylindres de cuivre, puis d'acier. D'abord gravée en relief, la gravure en creux se généralisa. On utilise un cylindre par couleur ; chacun est placé sur le pourtour d'un cylindre central, d'un diamètre plus grand, sur lequel passe le tissu. Celui-ci vient au contact des cylindres imprimeurs sur lesquels la couleur est déposée par des rouleaux encreurs. Une racle ne laisse la couleur déposée que dans les creux des cylindres imprimeurs.

L'opération qui consiste à faire adhérer définitivement la couleur aux fibres du tissu est appelée fixage. Ce fut un grand avantage lorsque cette technique vit le jour vers 1800. Elle consiste à mettre en contact le produit imprimé avec la vapeur d'eau à 100 °C.

● **L'impression au cadre ou à la lyonnaise :** utilisée à partir de 1920, cette technique a beaucoup changé les possibilités de réalisation des articles imprimés. Sur un cadre plat est tendue une toile fine ; les mailles des parties de celle-ci où les couleurs doivent pénétrer restent ouvertes, tandis que les parties où la couleur ne doit pas pénétrer sont obstruées à l'aide d'un vernis. Il faut un cadre par couleur. Chaque cadre

▶ *Figure 4 : impression au cylindre, à quatre couleurs ; a, tissu à imprimer ; b, tapis de dessous, molletonné et absorbant ; c, cylindre support rotatif ; d, rouleur imprimeur ; e, rouleur encreur ; f, récipient contenant le colorant ; g, raclette destinée à supprimer les excès de colorant.*

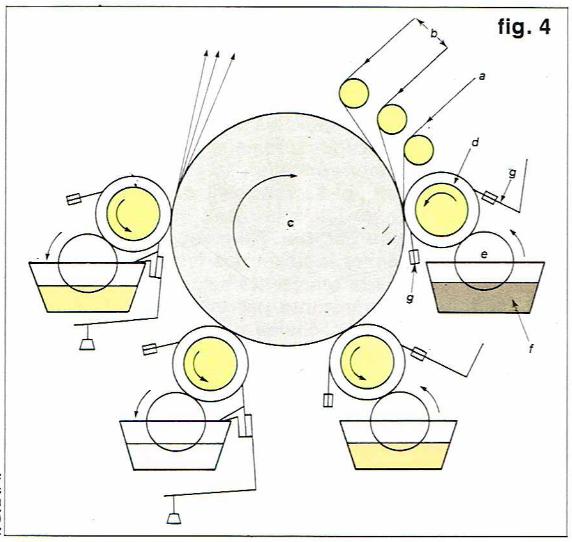

est appliqué sur le tissu, et la couleur est déposée manuellement à l'aide d'une racle, ainsi que dans l'impression à la planche (*fig.* 5).

* *Le cadre automatique* est le dérivé immédiat de l'impression au cadre manuel. Les cadres se lèvent automatiquement, même avec l'aide d'un programmateur si cela est nécessaire ; le raclage de la couleur est lui aussi automatique, de même que l'avancée du tissu sous les cadres.

* *L'impression au cadre rotatif :* utilisée depuis 1960, cette nouvelle technique consiste à projeter la couleur à l'intérieur d'un cylindre creux ; elle est répartie à l'aide de racle. Les cylindres sont composés d'une résille métallique, et, ainsi que dans le cadre plat, les parties restent ouvertes ou obstruées, suivant qu'elles doivent ou non recevoir la couleur. Le tissu passe sous le groupe de cadres, un cadre par couleur étant généralement nécessaire.

● **La couleur** utilisée pour l'impression doit être mélangée à un épaississant, afin de ne pas couler lors de son application, et afin d'obtenir des contours d'impression qui soient nets. Cet épaississant disparaîtra lors du fixage.

Bien qu'il se produise constamment des améliorations en ce qui concerne les techniques d'impression et les couleurs employées, il subsiste actuellement deux types de colorants qui fournissent deux qualités d'impression.

* *Les réactifs* ou *fixés-lavés*, qui imprègnent les fibres du tissu, peuvent être considérés comme une sorte de teinture. Ils doivent leur nom au fait que la couleur imprimée va virer après traitement et que l'excédent de couleur va disparaître après lavage.

▼ *Figure 5 : impression au cadre (sérigraphie). T : tissu à imprimer ; Q, cadre sur lequel est tendue la toile fine en rouge, partie de cette toile obstruée à l'aide d'un vernis, en noir, mailles ouvertes (m), formant motif, à travers lesquelles pourra passer le colorant. C : raclette permettant la répartition uniforme de la couleur.*

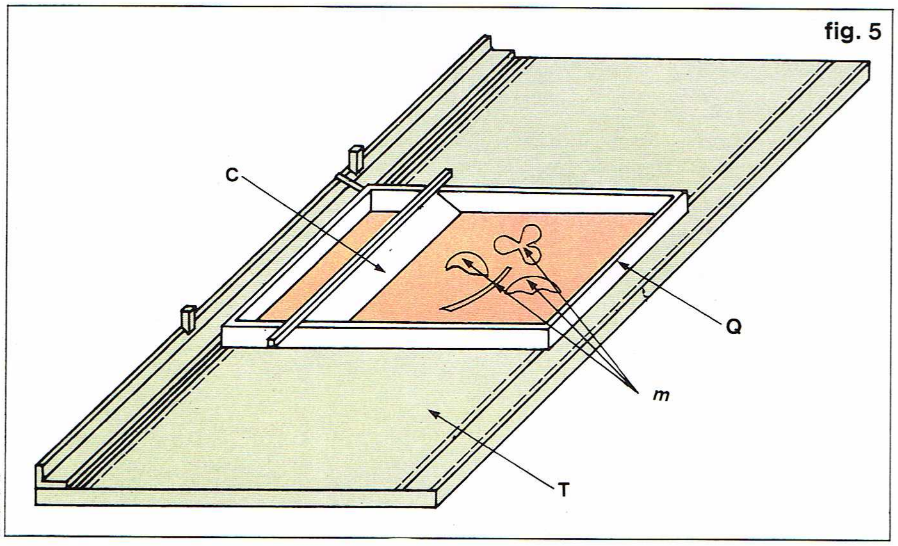

Ces coloris, qui sont plus solides, d'un touché plus souple que les pigmentaires que nous allons voir, sont aussi plus chers. Ils conviennent, pour cette raison, à des articles de haut de gamme, de marque.

* *Les pigmentaires*, qui déposent une pellicule sur les fibres du tissu, sont moins résistants, moins souples, mais aussi moins chers.

Cependant, selon les dessins, il convient d'utiliser tel ou tel type de colorants ; si un dessin comprend un large fond de couleur unie, celui-ci devra être réalisé en utilisant des fixés-lavés, de façon à obtenir un fond uniforme, souple et solide, ce qui serait très difficile avec les pigmentaires.

● **Technique du transfert :** cette nouvelle technique, qui fait penser à la décalcomanie, consiste, à l'aide d'un dessin imprimé sur un papier, à transférer celui-là sur le tissu à l'aide d'un pressage à chaud (200 °C) pendant 20 secondes. Cette technique particulièrement intéressante ne peut être utilisée que dans le cas des tissus de fibres synthétiques. Un de ses avantages est que toutes les couleurs se déposent en même temps. Ce procédé est surtout utilisé dans les tissus d'habillement.

Nous nous apercevons, après cet exposé concernant l'impression, que, pratiquement, tout dessin peut être reproduit ; mais ce qui est primordial, c'est le nombre de couleurs. En effet, les frais d'investissement occasionnés par la gravure d'un dessin, auxquels s'ajoutent les frais d'impression (plus il y a de couleurs, plus ils sont élevés), peuvent rendre un produit si cher qu'il sera invendable.

Nous parlerons, au moment opportun, de la préparation des dessins propres à l'impression. Nous avons abordé les principes généraux des possibilités actuelles de réalisation de l'éponge de toilette, voyons à présent la conception même de ce produit.

Conception du produit

La firme qui fabrique et qui commercialise des articles de linge de maison est tenue de constituer des collections. Des échantillons de ces collections seront présentés aux responsables (acheteurs) des différents points de vente. Ces collections doivent faire l'objet d'études approfondies, avec l'aide de créateurs formés pour cela ; lorsqu'elles sont conçues sans leur apport, elles ont des résultats souvent médiocres. Les créateurs sont, en général, de deux sortes : ceux qui fournissent des idées, donc des dessins, et ceux qui envisagent la conception d'une façon plus totale. Cette démarche porte un nom, le « design » ; trop souvent, l'emploi de ce mot est compris par le public comme synonyme de « carrosserie aérodynamique d'un objet ». Il s'agit bien plutôt d'une sorte de philosophie, dont la démarche a pour buts la conception du produit idéal et la conception idéale du produit. Pour ce faire, la connaissance de toutes les données est nécessaire.

Tel fabricant s'est assuré les services de tel designer (dans la profession, il est appelé le plus souvent « styliste »). Ils ont choisi, en accord avec la direction commerciale, le ou les sortes de produits à réaliser. Il pourra s'agir de produits vendus avec l'apport d'une marque, ou de produits anonymes, de ventes nationales, de ventes à l'export, de produits vendus chez des spécialistes, par les grands magasins, par les hypermarchés, par correspondance, etc.

Chacun de ces points, entre autres, doit être étudié à cause de sa spécificité propre. Si nous prenons l'exemple de la vente par correspondance à l'aide de catalogues, la « photogénie » de l'article est indispensable. Suivant les points envisagés, le prix de l'article joue un rôle important. Ainsi, un produit de « marque » trouvera son acquéreur à un prix relativement plus élevé qu'un produit anonyme. Pour toutes ces raisons, entre autres, le designer établira son plan de collection et la date de sortie de celle-ci.

Une date reste impérative en ce qui concerne le marché national et le linge de maison : la réclame de blanc qui a lieu pendant le mois de janvier. Depuis un siècle, cette réclame, installée par la distribution à une époque creuse de l'année, puisqu'elle succédait au mois des cadeaux, est restée implantée dans les magasins. Mais c'est un an avant cette mise en place des articles que les collections sont présentées.

Le designer, ayant établi son plan de collection,

commence d'œuvrer. Un des éléments principaux dont il devra tenir compte est la gamme de coloris des filés. Il devra établir les nuances et leur nombre, comparer ses propositions aux résultats des bains de teinture. Bien entendu, cette gamme de coloris devra être d'actualité et correspondre aux besoins de la tendance à la mode. Il s'agit bien d'une gamme dont la justesse et l'équilibre pourraient se comparer à l'accord des notes d'un instrument. Le nombre de couleurs d'une gamme idéale de filés se situe entre vingt et trente. C'est à partir de ces coloris et de cette gamme que seront réalisés les dessins tissés au jacquard.

Le plan de collection aura déterminé le nombre de ceux-ci, qui varie selon l'importance des firmes et aussi les besoins du marché. Ceux-ci peuvent dépendre de la conjoncture, des stocks d'invendus, des tendances de la mode et des endroits de commercialisation (spécialistes, grands magasins, hypermarchés, etc.). N'arrêtons pas notre investigation au côté trop restrictif d'une fabrication limitée. Considérons plutôt le cas d'une firme réalisant toutes les sortes de produits-éponges. L'équilibre de la collection est dû, en grande partie, au prix de vente des articles. Celui-ci dépend du poids, suivant la contexture ou compte de fils du produit, des dimensions, du pourcentage de fils couleurs et de l'apport de réalisations techniques supplémentaires (broderie, impression). Plus une serviette de toilette est légère, moins son tissage est serré, moins elle est chère. Elle est d'autant plus chère qu'elle est plus grande. A ce sujet, la variété des tailles, en France, est très étendue. Une taille de serviette de dimensions rationnelles prend une bonne place sur le marché européen : le 50 × 100 cm.

Une serviette de toilette réalisée en deux couleurs foncées sera d'un prix plus élevé que si elle était réalisée avec du blanc à cause du coût de la teinture : plus le coloris est foncé, plus il est cher. Le prix des filés teints peut varier de façon très importante suivant la provenance du pigment. Ces constatations parmi d'autres permettront le choix des dessins et leurs attributions à tel ou tel type de qualité.

La réalisation d'un dessin fait au jacquard étant prête, le designer doit procéder au choix des variantes de coloris. Il se servira de la gamme dont nous avons situé l'importance considérable. Toutes les notions d'associations colorées sont valables, mais à certain dessin conviendra une harmonie de camaïeux de tons pastel, tandis que tel autre dessin sera traité en couleurs et blanc, etc. Ce choix précisé, il faut trouver les deux variantes complémentaires; en effet, d'une façon générale, trois variantes de coloris sont nécessaires à la commercialisation des articles qui concernent le linge de maison.

La serviette-éponge qui sert de base de présentation à une collection est presque toujours vendue accompagnée des autres produits textiles nécessaires à la toilette, le gant, le drap de bain, le peignoir.

Deux formes de gants sont utilisées en France : le gant rectangulaire de dimensions 15 cm × 22 cm et le gant ovale avec un poignet latex. Dans ces deux cas, le gant paraît très adapté. Certains pays étrangers utilisent un carré de tissu-éponge qui est enroulé autour de la main; celui-ci paraît infiniment moins pratique. Le drap de bain est l'équivalent d'une grande serviette de toilette, il permet d'envelopper le corps et donc de faciliter l'absorption lors de la sortie du bain; ses dimensions moyennes sont de 80 cm × 130 cm. La serviette d'invité ou petite serviette ainsi que le peignoir font aussi partie, parfois, de l'ensemble des produits textiles en éponge de toilette. Mais ces points peuvent être situés après une sélection faite par un magasin, et donc complétés après la sortie de collection, dont l'élément majeur est la serviette.

L'ensemble des articles proposés peut être très varié, dans une collection d'éponges de toilette : une gamme d'unis, de préférence coordonnée avec les dessins, de façon à créer des ensembles, des rayés, des carreaux, des rayures ornées en bas de gamme, des petits jacquards blanc et ton pastel ou de deux tons pastel, en qualité moyenne, des grands jacquards, beige et couleurs et des tout-couleurs, des serviettes velours (bouclettes rasées), des tissus au mètre pour les peignoirs. Ce n'est ici qu'une vision étroite et momentanée des possibilités de construction d'une collection de linge-éponge destinée à la toilette.

Document Blangil

▲ ***Linge de toilette : selon les modes, les unis peuvent s'assortir aux fleurs ou aux motifs géométriques (création Roville - éponge, garantie Blangil).***

Roger-Viollet

◀ ***Affiche pour une exposition de blanc au magasin des Nouvelles Galeries à Marseille.***

P. Hinous - TOP

◀ ***La serviette éponge assortie aux couleurs de la salle de bain est un élément décoratif apprécié.***

Chaque fabricant est amené actuellement à réaliser une deuxième collection, celle du « drap de plage », les dates de sortie de cette collection se situant pendant les mois de juin et juillet. Après l'utilisation des collections, il est nécessaire de procéder à leur critique en fonction des futures collections, et d'aligner la conception sur les besoins du marché et sur les tendances de la mode.

Le marché du linge-éponge

Parmi les différents produits appelés « linge de maison », l'éponge, produit indispensable, s'adresse donc à plusieurs marchés : le linge de toilette, l'éponge cadeau, le peignoir, le drap de plage. Le marché de ces produits est en évolution constante; deux transformations importantes de notre époque ont aidé les réussites commerciales : l'amélioration de l'équipement sanitaire dans les anciens logements, mais surtout la construction importante de nouvelles habitations et donc de salles de bain. La consommation du linge de toilette se trouve ainsi forcément accrue par les nouvelles habitudes de vie; l'hygiène obtenue par le bain est de celles-là.

Autrefois, les achats de linge de maison se faisaient sous la forme d'un « trousseau » utilisé la vie durant. La diversité des collections, les nouveaux dessins, les nouvelles couleurs ont développé les impulsions d'achat.

S'il subsiste une période culminante des ventes, celle du blanc, le linge-éponge, grâce à la diversification des produits, est vendu toute l'année. Un marché qui prend une certaine place, actuellement, est celui de la boîte cadeau. Les qualités décoratives de l'éponge permettent des présentations très inattendues et des cadeaux personnalisés. Les créations nécessaires à ce marché iront sûrement en se développant : les coordonnées par deux ou plusieurs serviettes, par exemple.

Le marché du peignoir se trouve, lui, renouvelé par l'amélioration du produit; le peignoir de bain classique et traditionnel cède le pas à un article plus élaboré : le « homewear ». Bien qu'utilitaire, le peignoir de bain a tendance à devenir un vêtement d'intérieur, à s'intégrer parfaitement dans l'habitat.

Le tourisme, les loisirs, les vacances au bord de l'eau ont permis le développement d'un produit approprié à ce genre d'activité : le drap de plage. Le marché devient de plus en plus important; il suit en cela les besoins, eux aussi importants, d'évasion, de vacances. Nous verrons, quand il s'agira de la mode, que les sources d'inspiration et de création de ce genre de produit sont totalement différentes de celles de l'éponge toilette; les tailles de ces draps de plage le sont aussi, et sont très diverses selon les prix à atteindre; ils sont réalisés, parfois, en de très grandes dimensions. La taille « moyenne » étant de 80 × 130, de très beaux draps sont réalisés en 90 × 180.

La France importe annuellement le quart de sa consommation d'éponge. La première fabrique européenne est allemande; elle utilise 30 tonnes de coton par jour, elle tisse 130 000 serviettes de toilette, et 5 000 peignoirs par jour. La première fabrique française tisse 11 000 serviettes par jour. Cette différence énorme, en ce qui concerne la fabrication, laisse cependant une place aux produits français. La conception du produit, grâce aux créations sans cesse renouvelées, est surtout bien adaptée aux goûts spécifiques du pays.

La mode

Il n'est plus possible de concevoir à notre époque une collection sans tenir compte de l'influence importante de la mode dans le linge de maison. Elle est dirigée actuellement par les coloris et les dessins. Il est d'ailleurs intéressant de constater qu'un dessin quelconque aux jolies couleurs sera mieux apprécié qu'un beau dessin de coloris quelconque. Cette orientation de la mode peut être donnée par le prolongement d'une idée, d'une tendance, mais ce peut être aussi une rupture due à un genre qui a trop duré, qui a été trop vu.

Ainsi en est-il de certaines couleurs. Tous les dix ans environ, le coloris orange réapparaît, puis disparaît. Intense, il appartient à la famille des coloris vifs. Ces coloris, très utilisés dernièrement, se trouvent remplacés actuellement par des coloris plus neutres, plus rompus, dans le linge de toilette et le peignoir. Ainsi sont apparus les pastels subtils (champagne, vert d'eau, beige rosé, jaune paille), les tons naturels (écru, chanvre), les grisés, les sorbets (vanille, pistache, melon, fraise), les tons « masculins » (roux, tabac, marine). Le remplacement des coloris vifs, dans le linge de toilette, par des coloris subtils, trouve son équivalent dans le style des dessins. Les dessins de grands motifs sont remplacés par des motifs plus petits, plus sobres aussi, et souvent d'inspiration « rétro ». Ce retour au passé, pour intéressant qu'il soit, laisse cependant un regret, celui d'une époque en quête de son style.

Quand, aux environs des années 1960, ont été créés les dessins géométriques, ils apparaissaient comme d'inspiration contemporaine : la démarche suivait celle du mobilier. Assez vite, ces dessins furent remplacés par des fleurs géométriques qui pouvaient faire penser aux années 1925-1930, à l'exposition « arts déco ». Si, après cela, la tendance à une inspiration plus sobre et plus subtile s'explique, le fait qu'elle soit plutôt passéiste est moins explicable. Bien sûr, dans les collections se trouvent des unis, des faux unis obtenus par effet de tissage et aussi certains dessins géométriques. Mais la multiplicité des dessins Jacquard est surtout d'inspiration florale à l'ancienne : faut-il voir là les besoins du marché, et le souhait presque général des consommateurs de se meubler en styles anciens? La mode du vêtement, tellement diversifiée actuellement, il est vrai, semble suivre la même voie. Peut-être ce retour au passé est-il lié au mouvement écologiste? Le retour à la nature et la vie au naturel semblent à notre époque une profonde nécessité. Il faut aussi constater que, très souvent, les créateurs des styles anciens se sont inspirés directement des siècles qui les avaient précédés. Ainsi la mode se réfère-t-elle souvent à des personnages, des faits, des lieux marquants, afin de créer l'orientation du moment.

Nous voyons ainsi combien est importante la part de la mode dans ces produits, non seulement d'ailleurs au sujet de l'inspiration des dessins, mais de celle des couleurs, de celle du genre de tissage et des types de fabrication. En ce qui concerne les genres de tissage, si la bouclette reste l'élément majeur, la hauteur de celle-ci et sa densité sont d'importance première. A cause sans doute des achats d'impulsion, il est curieux de constater que, hormis les unis, il se vend surtout du décor en éponge de toilette. Où apparaît le mieux ce décor? Sur une bouclette dense. Pourtant, plus la bouclette est dense, et moins la serviette a de pouvoir absorbant. C'est le cas précisément du velours, qui trouve son emploi très bien adapté au peignoir. Il fait de très belles serviettes, dont le pouvoir absorbant n'est pas la qualité première.

Les types de fabrication dépendent aussi de la mode, les unis et faux unis s'exprimant par la couleur et la qualité du tissage. Les jacquards permettent dans ce produit, l'éponge, nous l'avons vu, de très belles réalisations. L'avantage est aussi d'avoir un envers à peine différent de l'endroit, d'où l'appellation de double face.

La broderie est d'un apport heureux dans des articles raffinés, sous forme de bourdons, de monogrammes, etc., où, bien entendu, elle n'est utilisée qu'en petites quantités, compte tenu des coûts de réalisation et du temps nécessaire à celle-ci.

L'éponge imprimée reste plus difficile d'emploi en ce qui concerne la serviette de toilette. Cette technique n'est sans doute pas celle qui convient le mieux à ce produit; en dehors des difficultés à imprimer les bouclettes, il peut paraître assez illogique de surcharger celles-ci d'un colorant qui ne vieillira pas aussi bien qu'elles. Peut-être son emploi est-il plus facile dans les tissus au mètre, destinés aux peignoirs.

Les draps de plage, nous l'avons vu, sont conçus pour les vacances, le soleil, la mer; ils sont d'une fantaisie souvent exubérante, presque toujours traités dans des coloris vifs. Ce sont, en tous les cas, ces coloris qui sont les plus appréciés. Deux couleurs dominent les ventes : le rouge et le bleu marine. Les dessins qui servent à ces articles sont presque toujours figuratifs; tous les objets ou attributs de la marine font partie des « classiques ». Le drap de plage peut être traité comme une affiche, une illustration, un poster. Les thèmes employés sont variés à l'infini, les paysages marins, les folklores, les animaux marins et sauvages, les sports, les personnages, etc., de préférence réalisés en jacquard, souvent avec effet de plusieurs chinés. Certains draps de plage sont aussi réalisés en impression sur des bouclettes, rases de préférence.

E. Berne - Fotogram

◀ ***Les couleurs chaudes réalisent 80 % des ventes, notamment en ce qui concerne le linge de table.***

▼ ***Les firmes sont tenues de constituer, pour le linge de maison, des collections dont les dates de sortie sont impératives. Ici, service de table (garantie Blangil, création de la Linière de Gérardmer). Service de table en coton tissé teint armure natté (garantie Blangil, marque J.M.D., création Dermurger).***

Le linge de table

Le décor de la table sera le plus souvent apporté par un produit étudié à cet effet : le linge de table.

Ici aussi, la première étape de l'étude de ce produit consiste à faire un choix parmi les fibres textiles ; il est toujours établi en fonction des opérations de fabrication, de commercialisation et d'utilisation. Le coton, bien sûr, entre pour une large part dans la fabrication des nappes, serviettes et torchons, le lin, le métis (mélange de deux fibres). Les fibres textiles chimiques ou synthétiques trouvent ici un emploi tout indiqué ; leur entretien facile pour le lavage et le repassage est un grand avantage. De même que l'éponge de toilette, le linge de table est réalisé en tissage, unis, rayés, carreaux, en jacquards et damassés, en brodés, en imprimés, dans un nouveau produit : le textilisé ou non-tissé, avec l'apport de teinture ou d'impression.

Les firmes qui fabriquent et commercialisent le linge de table sont, sans doute, plus diverses que celles qui fabriquent le linge-éponge. Suivant qu'elles se trouvent dans telle ou telle région de France, elles ont une vocation, une façon différente de réaliser les articles : le linge des Vosges, le linge basque, celui de Normandie ou de Cholet, de la région roennaise ou provenant du Nord ont gardé chacun ses particularités. Les demandes des clients sont souvent précises à ce sujet. Ainsi en est-il du linge basque, dont la réputation n'est plus à faire ; ce genre d'articles est réalisé dans d'autres régions, mais seuls les fabriquants basques bénéficient de l'appellation « linge d'origine basque ».

Quoi qu'il en soit, les firmes sont tenues également de constituer des collections dont le processus de présentation est le même que celui du linge de toilette et du linge de maison en général. Nous l'avons vu, cela implique des dates impératives de sortie des collections.

Ainsi que pour le linge de toilette, le « designer » chargé de la conception doit envisager un plan de collection ; celui-ci pourra être différent suivant la situation géographique de la fabrique, nous venons de le voir, suivant les possibilités de la fabrication et les investissements en matériel, ou certaines reconversions et les nécessités du marché.

Quelques firmes ont changé de cette façon le type d'articles qu'elles fabriquaient en changeant leur matériel. C'est ainsi que, se trouvant devant le renouvellement des batteries de métier à tisser, un fabricant a préféré monter à leur place une unité d'impression, de blanchiment et d'apprêts. Le produit fini n'est plus un tissé, mais il est devenu un imprimé, réalisé sur des tissus écrus, achetés.

Nous le verrons, les tendances mode influencent aussi le plan de collection pour ce produit. Il est impossible qu'une fabrique de linge de table réalise tous les produits actuellement sur le marché ; aussi nous proposons-nous de ne voir que les principaux.

Le « designer » qui aura la responsabilité d'une collection de linge de table en « tissés-teints », dessins obtenus

Document Blangil

Document Blangil

R. Guillemot - TOP

▲ *Les sets de tables, très utilisés dans d'autres pays, sont un peu délaissés en France, (ici, décoration Thibier).*

par tissage simple ou jacquard, devra aussi construire une gamme de fils dont il se servira pour les réalisations des dessins. S'il doit composer une gamme d'unis, ceux-ci seront le plus souvent réalisés par bains de teinture.

● **Le tissage :** en bas de gamme, une grande quantité de dessins sont réalisés en tissage simple, sous forme de carreaux ; le plus souvent, ce sont des carreaux vichy (carreaux de couleur et carreaux blancs), des carreaux écossais (carreaux multicolores), des carreaux madras (carreaux irréguliers), et beaucoup d'autres. En montant, nous trouverons le genre dessins basques, le plus souvent à fonds unis sur lesquels, en tissage Jacquard, seront comme apposées des sortes de broderies. En général, le tissu sur lequel sont réalisés ces dessins est composé d'une armure toile ou natté (accouplement de plusieurs fils). Un autre type de dessin est obtenu par variations et associations de plusieurs armures ; ainsi, l'apport de bandes satin sur un fond toile. Il existe de très nombreuses possibilités de réalisations tissées ; à cette diversité s'ajoute aussi la nature de la fibre, qui changera le produit, son prix et son utilité.

● **La broderie** trouve dans le linge de table une utilisation à laquelle elle convient parfaitement. Bien entendu, il ne s'agira pas d'articles premier prix. L'apport de la broderie peut aller de la nappe « utilitaire » avec des broderies simples, à la nappe « habillée », en macramé.

● **L'impression :** depuis l'utilisation des techniques aux cadres plats ou rotatifs, la souplesse d'utilisation de l'impression a rajeuni considérablement les collections de linge de table. Ces techniques sont adaptées parfaitement à ce type de produits.

● **Le non-tissé** ou **textilisé :** à partir des fils groupés par traitement mécanique ou chimique, sont réalisées des surfaces qui, dernièrement, ont été commercialisées en linge de table. La fabrication se fait sous deux formes :

— *la voie papetière* ou *humide :* les fibres en suspension dans l'eau sont liées entre elles par un épaississant, l'ensemble est disposé sur une toile qui absorbe l'eau ;

— *la voie textile* ou *sèche :* les fibres sont disposées sur des cylindres munis d'aspirateurs d'air ; un produit chimique liera les fibres entre elles.

Le linge de table réalisé à partir de ces nouveaux supports est teint ou imprimé. S'il ne supporte qu'un nombre limité de lavages, son prix est moins élevé que celui d'un tissage ; autre avantage, ce produit est utilisé sans ourlets ou ganses nécessaires aux produits tissés. La promotion et la commercialisation des nappes en non-tissé n'ont pas été bien faites. Ces nappes ont été mises en vente le plus souvent avec celles en papier. La nouvelle appellation « textilisé » et la commercialisation actuelle d'articles indéchirables, dont la durée d'utilisation est bien plus longue, devraient permettre au produit de mieux se situer.

Conception du produit

Le linge de table comprend différents produits :

* *Les nappes :* qu'elles soient réalisées en tissage, brodées ou imprimées, elles sont toujours confectionnées à partir d'une pièce de tissu, la laize, devenant la largeur de la nappe. Cette largeur varie suivant la qualité de l'article de 130 à 180 cm, la largeur courante étant 150 cm. La longueur est fonction du nombre de couverts ; les dimensions courantes sont : les 6 couverts 150 × 150, les 8 couverts 150 × 200, les 12 couverts 150 × 250. Il faut ajouter à ces trois dimensions la nappe ronde, le plus souvent de diamètre 180, et parfois des nappes ovales. La nappe 8 couverts 150 × 200 est la nappe la plus répandue. Mais la nappe ronde est de plus en plus demandée ; elle doit sans doute son essor aux ventes de tables rondes, très appréciées actuellement.

* *Les serviettes de table :* certaines nappes sont vendues sans serviettes mais plus rarement que l'inverse, les serviettes vendues à l'unité font un bon chiffre de vente, qu'elles soient unies ou à décor, tissées ou imprimées. Les serviettes dont le décor est assorti aux nappes, pour former un ensemble (le service de table), font les meilleures ventes. Une dimension est devenue standard : 50 cm × 50 cm. Très souvent, l'utilisateur doit se baisser et ramasser cette serviette, tombée au cours du repas à cause de son étroitesse. Il est très difficile de faire changer ces tailles, cependant qu'une serviette de 60 cm × 40 cm, donc de surface moindre, serait tellement plus adaptée.

* *Les sets de table :* très utilisés dans d'autres pays (au début ils étaient appelés « sets américains »), ils sont délaissés en France. Ces petits napperons, de format courant de 35 cm × 45 cm, sont cependant extrêmement pratiques.

La mode

La mode et ses tendances influencent aussi le produit linge de table ; l'évolution s'est faite ces dernières années surtout vers les dessins imprimés. Les chiffres suivants, pour fluctuants qu'ils soient, donnent une vision cependant assez précise du marché du linge de table : ventes 40 % d'unis, dont 4 % de blanc, 9 % de clairs, 27 % de vifs, 16 % de tissés, 2 % de rayés, 7 % de carreaux, 7 % de jacquards, 44 % d'imprimés.

Actuellement, la tendance du retour au naturel, au folklore, voit la nette remontée des unis, des tissés teints, des jacquards, des damassés et des brodés. L'utilisation des fibres naturelles suit cette évolution parfois avec des mélangés, ainsi le 50/50 (coton et polyester). Le choix des dessins, fait en fonction des tendances, l'est aussi en fonction de la destination du produit et suivant son usage, et bien entendu, adapté à la forme de la nappe. Suivant les circuits commerciaux, suivant le choix de la fibre, les dessins diffèrent.

Le problème de choix des dessins est mêlé de façon étroite à la mise au point de ceux-ci et aux variantes de couleurs. En ce qui concerne ces dernières, leur utilisation dans le cadre du linge de table est assez précisée. Les couleurs chaudes, rouge, orange, jaune, roux, brun, etc., doivent faire 80 % des ventes. Si ces couleurs chaudes sont les plus vendues en linge de maison, la différence est encore plus nette en ce qui concerne la table. Nous savons que les couleurs chaudes permettent une digestion plus facile, et le fait est que les aliments ne sont jamais de la couleur la plus froide.

La mise au point des dessins joue un rôle important dans la réussite des collections ; trois types de dessins servent à réaliser le linge de table, le dessin continu avec raccord, dans lequel seront coupées les nappes et les serviettes (carton ou gravure unique), le dessin placé avec ou sans raccord. Dans ce dernier cas est réalisé le dessin qui convient à chaque type d'articles. De même, sont réalisés séparément les cartons ou les gravures qui conviennent aux nappes et aux serviettes. Le troisième type est le nappage à la fois continu et placé, obtenu en plaçant des dessins de serviettes les uns à côté des autres, à raison de trois serviettes à la largeur (carton ou gravure

unique) ; la répétition de 9 serviettes permettra de confectionner la nappe 6 couverts, 12 serviettes la nappe 8 couverts, 15 serviettes la nappe 12 couverts.

Le marché du linge de table est très complexe, beaucoup plus difficile à cerner que celui du linge-éponge. Il faut considérer que, pour utilitaire que soit ce produit, il n'est peut-être pas tout à fait indispensable. En effet, les toiles cirées, les nappes de papier et le traitement des bois, les tables en lamifiés ou stratifiés, etc., permettent de prendre un repas sans nappe textile.

Le linge d'office ou torchons

Après avoir parlé du linge de table, il est logique de s'intéresser au produit destiné à essuyer la vaisselle : le linge d'office ou torchons.

Le choix concernant les fibres qui entrent dans la composition des torchons est assez simple, puisqu'il s'agit presque essentiellement du coton et du lin ou du mélange des deux fibres, le métis.

Le lin

Après le regard que nous avons porté sur le coton, voyons le lin, qui est aussi d'origine végétale. Les fibres se trouvent placées dans les tiges de la plante. La décomposition des différentes parties de la tige sera obtenue par le rouissage, qui consiste à immerger les bottes de lin. Diverses opérations permettent ensuite d'éliminer les parties non textiles et d'obtenir une filasse qui sera dirigée vers la filature. La commercialisation du lin « pur fil » est accompagnée du label « fleur bleue », couleur de la fleur du végétal.

De même que les deux produits linge de toilette et linge de table, les torchons sont réalisés en tissage rayés, carreaux, jacquards et aussi en imprimés, ou encore en « malimo », qui n'est plus un tissage mais un tricotage obtenu à l'aide de machines spéciales.

Il se fabrique des torchons dans les différentes régions de France, les mêmes que pour le linge de table.

Cet article implique aussi une étude très particulière et approfondie de la part du « designer ». Il y a une vision très caractéristique du torchon, dont le classique rayé à liteaux rouges est typique du genre. Les fantaisies tissées sont nombreuses tant en rayés qu'en carreaux; cependant, les coordonnées par trois sont très rationnelles, à savoir l'essuie-vaisselle, l'essuie-verres et l'essuie-mains. Les formes d'approche de ces trois types de produits varient à l'infini, aussi bien en ce qui concerne le choix des fibres que celui du tissage, des dessins et aussi des tailles, la taille courante étant de 50 × 75 cm. Les dessins, apparentés, seront suffisamment différenciés pour faciliter l'emploi de ces torchons.

Le lin conviendra parfaitement au torchon essuie-verres, fibre sans peluche, le pur fil est idéal pour cet emploi. Depuis quelques années, conjointement aux torchons à tissage classique de fils simples, sont commercialisés des torchons à fils irréguliers ou fils floches, dont le tissage, moins serré, est composé d'armures différentes afin de permettre une absorption meilleure : le « malimo » a ces qualités. Les absorbants, très appréciés, ont toutes les qualités demandées aux torchons.

Vers 1950 furent commercialisés les premiers torchons imprimés. Les premiers dessins adaptés au décor de cuisine, très graphiques, bien que de thèmes variés, plaisaient beaucoup. La décadence arriva vite, quand le marché se trouva envahi de dessins « chromo », avec les thèmes : coins de feu, cuivres étincelants, biches au bois, jusqu'à la copie de *la Joconde*. Il n'était pas rare de voir accrochés ces torchons sur les murs, ainsi que des tableaux. Le produit ne correspondait plus à son utilisation. Le temps a passé, il se refait du torchon imprimé de conception utilitaire, avec des dessins adaptés, et il se vend bien.

Il faut cependant envisager la question posée à la fabrication et à la distribution : existera-t-il encore des torchons en l'an 2000?... L'ensemble du marché utilise annuellement environ dix millions de mètres carrés de torchons représentant 2 500 tonnes de matières textiles. Il apparaît que 10 % seulement des foyers français sont équipés de machines à laver la vaisselle. L'utilisation de telles machines ne supprime pas, heureusement, l'habitude d'essuyer la vaisselle et les verres afin de les rendre étincelants. Par ailleurs, le torchon a, dans la cuisine, de multiples usages (essorer la salade, sortir un plat du four, etc.), pour lesquels les essuie-papiers ne peuvent le remplacer; ajoutons qu'il fait partie du décor traditionnel. Tout cela lui confère une personnalité, et celle-ci devrait continuer à le rendre indispensable.

Document Blangil

▲ ***Les fibres qui entrent dans la composition des torchons sont surtout le coton, le lin et un mélange des deux : le métis. Ici, torchons coton armure sergé, marque Phénix (garantie Blangil).***

Les parures de lit

Les fibres textiles choisies à l'origine de la création de ce produit sont surtout : le coton, 78 %, le polyester mélangé, 16 %, et les fibres diverses 6 %.

Les parures de lit sont réalisées en unis, en tissés, rayures, carreaux, en brodés, en imprimés. Les firmes qui fabriquent et commercialisent ces produits sont nombreuses et diverses par leur importance. Il s'agit d'un marché extrêmement vaste dont la production nationale annuelle avoisine les 30 000 tonnes, soit plus de 20 000 000 draps. A ces chiffres importants s'ajoutent ceux des importations (presque 1/4 en plus). Les firmes productrices se trouvent surtout situées dans le nord et l'est de la France.

Ainsi que dans les autres produits du linge de maison, le « designer » ou « styliste » envisage un plan de collection; ici, la diversification peut être très grande. La mode et ses tendances ont constamment et considérablement amélioré ces produits.

Nous ne nous arrêterons pas au cas des gammes d'unis, importantes et pastellisées actuellement, sinon pour rappeler que ces unis sont presque toujours mis au point pour être coordonnés avec les tissés ou les imprimés en tant que draps de dessus. Ces unis, teints en pièce, ou ces tissés, ces damassés suivent la même influence que les produits vus précédemment : le naturel, le folklore, avec beaucoup de subtilité aussi.

Les unis font 60 % du marché, les rayures et les carreaux 6 %, et les imprimés 34 %.

Jusque vers les années 1960, les parures de lit étaient restées très classiques, voire traditionnelles. Un peu de fantaisie existait dans des parements imprimés. Les couleurs étaient classiques aussi : bleu ciel, rose clair, vert nil, jaune paille. La vogue vint très vite du drap entièrement imprimé. Le plus souvent, la taie et le traversin étaient confectionnés dans le même tissu.

Les investissements ont été considérables, en ce qui concerne ce produit, en métiers à tisser grande largeur, aussi bien qu'en machines à imprimer, à cadres rotatifs

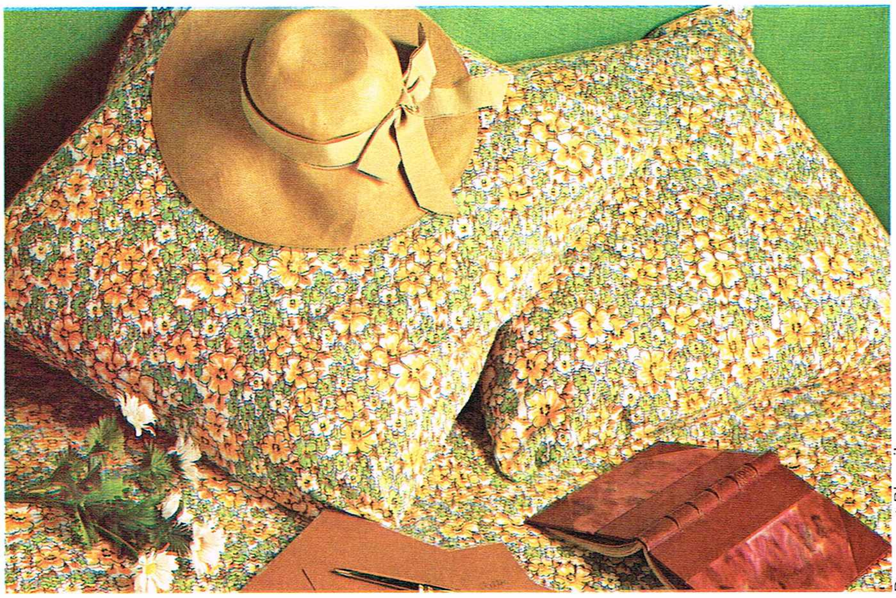

▲ *En haut, les unis font 60 % du marché des parures de lit. Ils peuvent être coordonnés avec des imprimés, ici, drap et taies en coton (garantie Blangil). Création les Tissages Modèles. Ci-dessus, il existe un grand nombre de dessins réalisés en tissu continu. Souvent de couleurs agressives, la tendance est aux couleurs plus douces. Ici, drap coton 100 %, motif « Liberty » (garantie Blangil, marque Essix-Solintex).*

le plus souvent. Les dimensions d'un drap de 2 personnes sont 240 × 310 cm, et 1 personne, 180 × 290 cm.

Un produit de base est né vers les années 1960 : le drap-housse. Il s'agit du drap de dessous ; cette housse confectionnée dans un drap est munie d'un élastique enserré dans un ourlet, qui lui permet de maintenir la housse sur le matelas ; les tailles sont de 180 × 190 cm et 90 × 190 cm.

Les dessins, variés à l'infini, ont été souvent excessifs, ainsi que leurs coloriages. L'association du marron et de l'orange se voyait partout, se trouvait, par excès, au seuil de la rupture entre le produit et le client, ainsi que nous l'avons vu au sujet du torchon.

La conception du produit a été repensée avec plus de subtilité, et s'il subsiste encore et sans doute toujours un grand nombre de dessins réalisés en tissu continu, l'apport principal de ces dernières années a été celui des motifs placés. Nous abordons véritablement le décor, le lit se pare. Les taies d'oreillers de format courant 75 × 75 cm sont imprimées séparément, de motifs placés, souvent encadrés, composés dans le carré. Les draps sont imprimés de motifs rappelant le dessin des taies, ainsi que les traversins.

La confection a fait un grand progrès également dans ce genre de produit, vers la subtilité : les taies à volants, les parures brodées à l'ancienne. Ce mot revient encore. Il faut aussi regretter, ainsi que nous l'avons exprimé au sujet de l'éponge, que le décor de ce produit soit souvent éloigné de ce que devrait être un véritable style contemporain.

Une innovation technique très récente, le drap réversible, a été fournie par la possibilité d'imprimer deux dessins différents recto verso, à condition que l'un comme l'autre soit très couvert. La réalisation se fait actuellement sur coton, et la satisfaction serait grande à la réalisation d'un dessin imprimé et de son envers de couleur unie.

En dehors des collections de parures de lits, destinées aux adultes, il existe des collections créées spécialement pour les enfants ; les dessins en sont figuratifs, le plus souvent.

* *La couette.* Il existe une façon de coucher différente de celle du lit habituel (drap de dessous ordinaire, à border ou housse, drap de dessus à border) : il s'agit du coucher à la façon scandinave. Le drap de dessus devient couette, donc non bordé. Pour le moment, ce genre de produits ne fait qu'un petit pourcentage du marché (5 % environ). Il devrait aller en progressant, si l'on tient compte de ses avantages : confort et chaleur, non-conformisme, rapidité à faire son lit. Les clients actuels sont les possesseurs de résidence secondaire, les enfants, les jeunes ménages.

* *La couverture.* Mais la majorité préfère le coucher classique : draps et couverture. Voyons ce dernier produit. Pourquoi une couverture traditionnelle ? Parce qu'elle répond à ce besoin de chaleur et de protection maternelle que nous connaissons tous. La couverture faisait jusqu'ici partie de la vie intime et elle était le plus souvent dissimulée. La valeur décorative de ce produit traditionnel était sans importance. En dehors des deux couleurs rose pâle et bleu ciel, il n'y avait pas tellement d'autre choix.

Le produit a suivi l'évolution du décor dans la maison. La couverture prend une fonction décorative ; on la montre, et son toucher, « son moelleux » la rendent accueillante. Les « designers » ont aussi fait évoluer ce produit ; les gammes de couleurs sont variées : des coloris chatoyants : des roux, miel, rouge, bleu, bronze, rose indien, whisky, chameau, sable, etc., mais aussi des tissés, des jacquards, plus rarement des imprimés.

Les fibres utilisées sont celles qui procurent le mieux la sensation de chaleur et de confort. Elles sont d'origine animale le plus souvent : la laine, le mohair, le mérinos, le poil de chameau, etc. A l'aide de ces fibres sont réalisées les qualités supérieures, le plus souvent unies et double face. La laine, grâce à son image de chaleur, de confort, de durabilité, fait aussi les hauts de gamme et les couvertures de grande taille : 240 × 260 cm et même 240 × 300 cm.

Les fibres artificielles permettent de fabriquer des couvertures moins chères (entre autres clientèles : les « jeunes ménages »). C'est le plus souvent avec ces fibres (la viscose, l'acrylique) que sont réalisés les dessins Jacquard.

Mais en ce qui concerne les couvertures, plus encore que dans les autres produits du linge de maison que nous avons vus, ce sont les couvertures unies qui sont le plus demandées.

L'une des opérations techniques particulières à la couverture est le « grattage » ou « lainage ». Les pièces de tissu passent sur des cylindres à dents d'acier. Ces sortes de brosses métalliques agissent dans le dessein d'ébouriffer le tissu.

★ *Le couvre-lit.* Apparenté à la couverture, le couvre-lit subit aussi les tendances de la mode. Il trouve son expression, actuellement, dans ce retour au naturel, au folklore. Les matériaux utilisés sont les gros tissages de coton, de laine, des flammés, des effets d'incrustation de motifs, plus légers : le piqué de coton blanc ; d'inspiration américaine : le patchwork ; les imprimés trouvent ici leur place.

Répartition du marché

Nous terminerons cet exposé concernant « les textiles et le linge de maison » par quelques chiffres comparatifs concernant la répartition du marché :

— volumes des ventes : lit : 65 % ; toilette : 20 % ; table : 9 % ; office : 6 % ;

— ventes réalisées selon les différents circuits de distributions du linge de maison :

détaillants : 23 % ;
grossistes : 18 % ;
grands magasins : 15 % ;
succursalistes : 10 % ;
V. P. C. : 9 % ;
divers et importations : 8 % ;
hypermarchés : 7 % ;
magasins populaires : 5 % ;
groupements d'achats : 5 %.

LE MOBILIER

Ce que l'on entend par mobilier couvre un champ étendu dans le domaine des objets et produits. D'après Littré, il s'agit :

— de l'ensemble des meubles qui sert à garnir une maison sans toutefois en faire partie ;

— de ce dont on peut faire l'inventaire (terme de jurisprudence qui désigne les choses qui peuvent se transporter sans détérioration dans l'habitat à l'exclusion de l'argent comptant, des pierreries, des dettes actives, des livres, des médailles, des instruments de sciences, des arts et métiers) ;

— de ce qui est mobile, de ce qui peut bouger, se déplacer, et, en simplifiant, de ce qui se « déménage ».

Les objets qui concourent à l'aménagement de notre habitat sont certainement, dans l'échelle catégorielle des produits qui nous entourent, ceux qui jouent le mieux le rôle de témoins. Ils parlent, ils nous offrent à la fois la clef et l'ouverture sur la compréhension de notre manière de vivre, sur notre intégration sociale et sur les relations profondes que nous pouvons forger entre nos objets et nous-mêmes : objet/fonction, objet/symbole. Selon Baudrillard : « Les objets sont porteurs de significations sociales indexées, porteurs d'une hiérarchie culturelle et sociale, et ceci dans le moindre de leurs détails : forme, matériau, couleur, durée, rangement dans l'espace... » D'autre part, l'ameublement met bien en évidence les interactions survenues entre l'évolution formelle des produits et l'évolution technologique.

Meuble :	un bien, ce que l'on possède et qui peut se déplacer ;
Mobilier :	l'ensemble des biens meublés déplaçables ;
Meublé :	habitat garni de meubles ;
Ameublement :	le « a » n'est pas privatif mais signifie le mouvement, la direction (« à » et « meubler ») ;
Meubles meublants :	objets servant à garnir un appartement.

Le mobilier est fonction du milieu et des techniques. C'est précisément l'étude qui a été faite par A. Leroi-Gourhan dans son livre *Milieu et Techniques*, où il s'efforce d'approfondir les différentes techniques d'acquisition, de consommation, de diffusion liées à la perméabilité du milieu technique au travers de nos objets : l'oreiller, le hamac ou les sièges sont étudiés en fonction de leur emploi dans la complexité de l'évolution des civilisations et de leurs interactions. Certains modèles fonctionnels comme le siège, l'armoire, la couche ou le lit ont traversé les siècles jusqu'à nous. Les Eskimos utilisaient au XII^{e} siècle le petit tabouret. A la même époque, on trouve l'utilisation de l'objet-coffre en Scandinavie, en Sibérie.

Ces modèles fonctionnels fondamentaux ont évolué considérablement, dans leur amélioration technique et dans leur aspect stylistique, jusqu'au début du XX^{e} siècle, sans toutefois que leur principe ait été modifié. Il semble que, dans le courant du XX^{e} siècle, le concept fonctionnel de base ait été profondément bouleversé pour certains objets. L'armoire, la commode sont des notions qui, pour la plupart des créateurs contemporains, paraissent dépassées. La cuisine a rationalisé son espace. Depuis les études de Gropius et Breuer qui étudiaient au Bauhaus les mouvements de la ménagère, elle offre une organisation fonctionnelle qui est presque stéréotypée dans les tâches.

Une autre conception de l'ameublement apparaît, liée aux nouvelles méthodes de fabrication, mais encore plus à l'évolution globale de notre environnement, par exemple à celle de l'architecture. Les sièges actuels offrent une manière décontractée de s'asseoir : banquettes à même le sol, simples coussins jetés.

L'espace se modifie : coins repas, coins détente, espaces à vivre.

Notre habitat semble se libérer du cloisonnement figé qui était celui du siècle dernier. Certaines salles de bains sont directement installées dans la chambre, et les cuisines s'intègrent dans le « living-room ». Les architectes créent les bureaux espaces paysagers. La conception de notre habitat devient plus souple, l'espace plus malléable. Le confort et l' « ambiance » priment.

Le mobilier reflète notre manière de vivre

Existe-t-il une relation directe entre les différentes manières de s'asseoir, notre comportement et les différentes formes de sièges ? Selon A. Leroi-Gourhan, il n'y aurait pas de liens absolus. Cependant, au travers de l'histoire, on note certaines corrélations. Sous Henri IV, les chaises ne comportent pas de bras ; elles sont appelées « chaises à vertugadin » du nom des sortes de crinolines que portent les femmes et qui, trop vastes pour s'accommoder des bras, doivent pouvoir déborder de tous côtés. Sous Louis XV, les menuisiers ont été contraints de reculer les bras des fauteuils pour répondre à la mode des robes à paniers. Sous le Directoire et sous l'Empire, le bras du fauteuil se retrouve à l'aplomb du pied, et la hauteur de l'accoudoir met en valeur les robes à taille haute.

Il est significatif de relever dans les différents catalogues d'ameublement actuels certains qualificatifs fréquemment utilisés. On peut ainsi dégager certaines notions propres à notre époque : la mobilité, l'empilage, le pliage, le démontage, l'emboîtage, la juxtaposition, la modularité, le meuble en kit, le meuble « à fabriquer soi-même », la couleur.

La mobilité

La notion de mobilité dans l'ameublement a varié selon les siècles et reflète notre conception de l'habitat. Au XVI^{e} siècle, dans l'inventaire du mobilier de Catherine de Médicis, le mobilier tout entier, comme son nom l'indique, est mobile, sauf quelques exceptions : chaque meuble est fabriqué afin de pouvoir être emballé et prendre place dans des coffres.

On détache les tentures et les tapisseries. On replie les tables à tréteaux et les chaises à tenailles. On démonte les lits pièce par pièce, et on emporte un nombre considérable de coussins destinés à garnir les sièges. A l'époque d'Henri IV et de Louis XIII, période de transition, on cesse de transporter le meuble, qui devient un élément stable. Sa construction se fait plus délicate, et la sculpture enrichit l'aspect des sièges. Sous Louis XIV, les lits sont parfaitement immobiles et placés dans des alcôves encadrées de rideaux. Sous Louis XV, la mobilité transparaît dans l'usage, et on trouve des mobiliers d'hiver et des mobiliers d'été, dont on fera varier la soierie. Plus tard, sous Napoléon III, les salons sont très encombrés, mais les meubles n'y ont pas de place bien définie, ils changent de place, et on voit apparaître les roulettes.

Actuellement, cette notion de mobilité se retrouve d'une manière paradoxale. D'une part, on assiste aux recherches d'intégration du mobilier dans l'architecture (a — meuble), en particulier, pour tout ce qui concerne la fonction rangement, les placards. Certains bancs ou sièges entourant des cheminées s'intègrent dans les volumes sols et murs. D'autre part, à l'inverse de ce mobilier intégré à l'architecture, on trouve l'usage du meuble « à jeter » en carton, en matière plastique.

Le pliage, l'empilage

Déjà sous Louis XIV, malgré la lourdeur et la massivité de l'ensemble des meubles, on trouve l'usage des « ployants » et des « perroquets », meubles pliants de faible volume que l'on utilisait dans les salles à manger et les carrosses.

Sous Louis XV, le pliant est dédaigné par le particulier parce qu'il est inconfortable. Il garde seulement sa faveur dans les pièces de représentation des demeures royales. C'est à la fin du XIX^{e} siècle, vers 1875, qu'apparaît la chaise longue pliante, modèle encore en usage de nos jours et qui semble avoir trouvé d'emblée sa forme parfaite. Cette chaise longue avait été réalisée pour une compagnie de navigation, d'où son nom de « transatlantique ».

Aujourd'hui, le manque d'espace, l'exiguïté des « surfaces à vivre » déterminent et conditionnent un nouveau type d'ameublement. Les chaises sont fréquemment pliantes, empilables ou possèdent à la fois ces deux caractéristiques. Les lits sont superposables. Ils peuvent se replier ou s'encastrer dans une bibliothèque, un mur aux fonctions multiples. Les canapés se replient, sont

J.-Ph. Charbonnier - TOP

D. Quarante

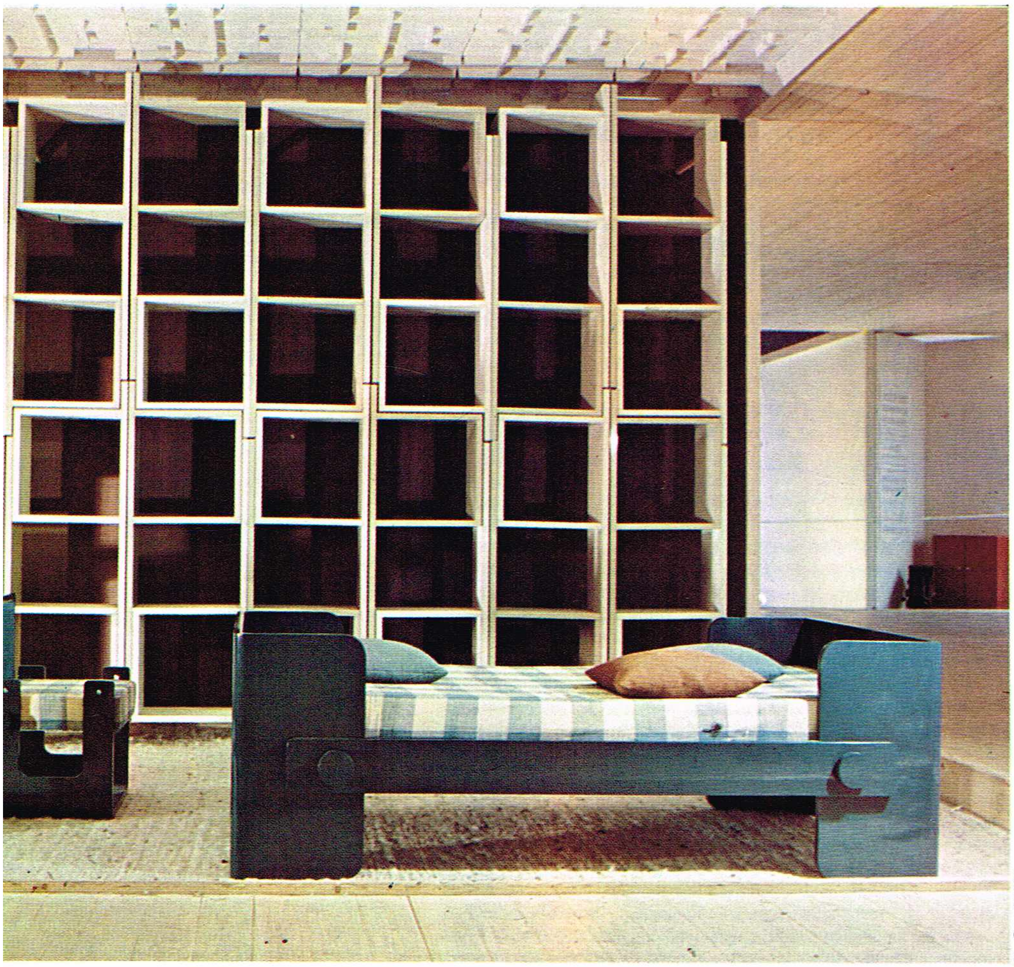

D. Quarante

convertibles, deviennent canapés-lits. Non seulement les meubles se plient, mais ils peuvent souvent se démonter ou s'emboîter. Certains sièges ont des structures démontables, et leurs garnitures se retirent par des systèmes de pression ou de fermeture à glissière. Il existe également des meubles qui se gonflent, se dégonflent et peuvent être transportés dans un sac. Enfin, les meubles actuels se juxtaposent entre eux ou bien sont composés d'éléments juxtaposables : ils sont modulables.

La modularité

Dérivée des notions précédentes, la modularité semble être une des grandes caractéristiques de notre ameublement : le mobilier peut s'adapter à des fonctions diverses de l'espace à vivre, il peut être évolutif dans le temps (le lit grandit avec l'enfant).

Salles de bains, bureaux, bibliothèques, salons sont composés d'éléments modulaires, ils sont transformables à volonté : quelques éléments de base suffisent à l'usager pour composer tables-lits, éléments de rangement. C'est le salon à géométrie variable. Selon Joe Colombo : « On programme son habitat soi-même dans le temps et l'espace. » Par ailleurs, la modularité répond souvent aux exigences de la production et de la distribution (facilité de stockage, suppression de l'assemblage).

Le meuble en kit et le meuble à construire soi-même

Comme de nombreux autres objets, le mobilier actuel est quelquefois vendu en kit, par éléments, en pièces détachées. On reconstruit seul son modèle. L'exemple du mobilier « puzzle wood » de G. Schneegans et G. Planchenault est significatif, à la fois éducatif, fonctionnel et économique.

On voit apparaître également le mobilier « à construire soi-même » à partir de pièces d'assemblages très simples ou à partir de modèles, de patrons proposés par les fabricants de produits semi-finis ou par les designers.

Cela implique souvent pour l'utilisateur l'achat d'un mini-outillage et d'un équipement permettant le travail du bois ou des stratifiés.

La couleur

Naturellement liée aux progrès de la chimie et à l'utilisation dans l'ameublement des nouveaux matériaux (gel-coat coloré des résines polyester, gammes très étendues de coloris dans les matières plastiques A. B. S. ou P.M.M.), la couleur apparaît quelquefois violente, franche (un certain jaune, un certain orange, un certain rouge, un certain bleu, un certain vert semblent styliser notre époque par leur emploi répétitif, systématique). Les bois eux-mêmes ont suivi cette évolution, ils sont laqués de couleurs vives, ou teintés.

On peut citer dans ce domaine les recherches de Verner Fanton qui a une conception globale de l'habitat, attachant une énorme importance à la couleur et « méprisant le caractère de froideur ou de chaleur en créant une atmosphère délibérée ».

La « transparence » marque également notre époque avec l'emploi des matières plastiques transparentes, de la glace (plateaux de table ou mobilier entièrement conçus en glace bombée). Transparence aussi dans l'architecture. La maison transparente, ouverte sur la nature, l'abolissement de la barrière visuelle, c'est aux architectes de 1930 que l'on doit cette première tentative. Mies Van der Rohe (qui fut le dernier directeur du Bauhaus de Dessau) conçut la maison Tugendhat. La vision de la nature est largement offerte par l'emploi de baies vitrées. La nature est mise en valeur par le contraste offert dans l'architecture intérieure : rigueur formelle, froideur des matériaux, fonctionnalisme sévère mais proposant une nouvelle conception de l'espace en abandonnant une fois pour toutes les schémas qui avaient été ceux de la bourgeoisie victorienne, nouvel espace, nouveau mobilier, simplicité des formes et des fonctions.

A la même époque, l'idée de la nature apparaît avec chaleur dans les intérieurs de Wright, qui ne cache pas les matériaux naturels, qui ne cherche pas à les imiter, mais qui ose les employer bruts : la pierre, le bois.

Le mobilier, ses charges symboliques

Notre ameublement, le choix que nous faisons de nos meubles, de leur organisation dans l'habitat, ne répondent pas toujours à des critères fonctionnels. Certaines chaises parfaitement inconfortables ont connu un réel succès. La notion de confort associé aux sièges est récente ; les sièges égyptiens ou romains ne se voulaient pas confortables, ils renforçaient l'autorité de leurs utilisateurs et dérivaient du trône. Au XVIIIe siècle, l'aspect des sièges renseignait déjà sur le rang social de leur possesseur. Les sièges moins coûteux étaient garnis de canne ; la richesse se marquait par la garniture, par les sculptures, les dorures dont le prix pouvait atteindre vingt fois le prix d'un fauteuil courant.

Notre mobilier renseigne notre entourage sur notre personnalité, notre rang social. Il nous fait « paraître ». Il devient *symbole*. Dans ce sens vont les recherches d'Ettore Sottsass, architecte italien qui retrouve dans les meubles qu'il dessine un nouveau rapport entre l'homme et l'objet : mobilier imprégné de symbolique et de poésie. L'*objet-meuble* est profondément lié aux facteurs de la mode. L'acte d'achat ne répond pas toujours à un choix rationnel, ce qui permet de lever un certain voile sur le comportement social et culturel de chacun, de chaque groupe au travers de son habitat.

Les différents fournisseurs d'ameublement correspondent bien schématiquement à différentes catégories sociales. Actuellement, on peut schématiser trois modes de distribution coexistants :

— le magasin spécialisé, possédant une surface d'exposition, un service après vente et quelquefois un service d'aménagement et d'architecture intérieure ;

— les grandes surfaces, situées fréquemment à l'entrée des villes et offrant un amoncellement impressionnant de mobiliers et de luminaires de tous styles ; la livraison est rare, et le montage simplifié au maximum ;

— les ventes par correspondance, sur catalogue, expériences récentes qui semblent avoir obtenu un certain succès. Le mobilier est livré directement chez l'usager qui se chargera de procéder au montage.

Cependant, la différenciation sociale se marque certainement plus dans le choix formel et dans l'organisation du décor que dans le prix d'achat. On a d'ailleurs assisté à l'apparition sur le marché d'un mobilier de série simple, bon marché, jeune, qui, vendu sur catalogue ou dans certains grands magasins, semble toucher une clientèle plus hétérogène, moins précise. Ce mobilier plus fonctionnel apparaît déchargé des connotations complexes qui affirmaient l'objet-meuble d'un rang social spécifique. Cette simplicité apparente n'est-elle pas elle-même un nouveau symbole ? Un retour au naturel ? Le choix des matériaux semble le prouver. Le dernier Salon de la Société des artistes décorateurs présentait différents mobiliers pratiquement tous réalisés en bois clair. Terence Conran dessine un mobilier contemporain dont les formes s'inscrivent sans heurts dans la tradition britannique (1964). Ce mobilier classique contemporain sera vendu dans des magasins spécialisés pour la maison, pour l'habitat.

Il ne faut pas non plus oublier que l'acte d'achat peut être motivé par des facteurs autres que le choix d'usage. On a écrit souvent que le désir de se meubler avec un mobilier ancien « de style » était en fait une sorte de refuge, un refus de l'actuelle société et une mauvaise adaptation à notre époque. Est-ce plutôt le fait d'un passage, d'une période de transition ? Ce retour au passé s'est manifesté avec excès dans les rayons de certains grands magasins (ce fut le phénomène Biba à Londres) : retour aux années 30, le meuble fétiche, le meuble antifonctionnel, ambiances de trompe-l'œil, le kitsch retrouvé, coussins plumes, fourrures, marbres, faux marbres, fausses fourrures, faux kitsch.

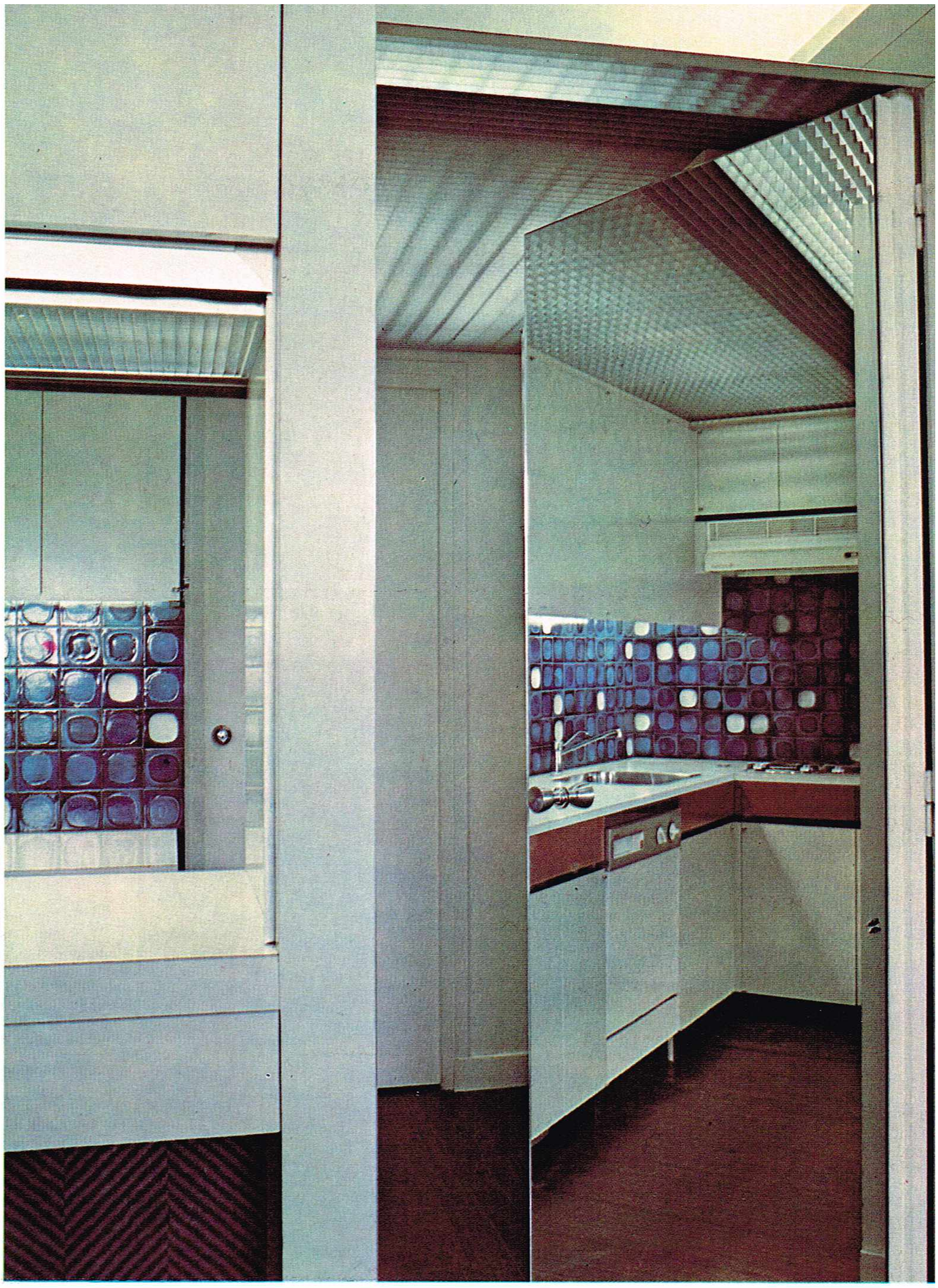

Architecte d'intérieur Berthet-Godet - photo Alain Dovifat

▲ La transparence marque notre époque dans l'architecture et dans l'ameublement. Ici, aménagement intérieur de J.-L. Berthet.
◀ Page ci-contre, en haut, à gauche ; on a imaginé des sièges gonflables. Ici, fauteuil gonflant en polyvinyl avec dessus cloqué (Aubert-Jungmann, Stinco - firme A. J. S. Aérolande). A droite, les chaises actuelles sont fréquemment pliantes ou empilables. Elles possèdent même souvent ces deux caractéristiques. Ici, chaise Plia de G. C. Piretti pour Castelli. En bas, la « modularité » semble être une des caractéristiques de notre ameublement. Le mobilier s'adapte à des fonctions diverses. Ici, le « lit qui grandit avec l'enfant », mobilier conçu par Danielle Quarante en 1967, pour Roche et Bobois.

1 Musée des Arts décoratifs

2 P. Hinous - TOP

3 J. Guillot - TOP - Musée des Arts décoratifs

Tableau évolutif des sièges de Henri IV au second Empire

1 - Henri IV - Chaise à bras

L'aspect de ce siège est carré et les courbes sont absentes. Le dossier, plus large que haut, est dans le même plan que les pieds postérieurs. Traverse reliant les pieds à leur partie inférieure. Le meuble repose sur le sol par des boules tronquées. Le siège et le dossier ont une garniture fixe et rembourrée (à l'âge précédent on employait des coussins mobiles), faite de cuir, de tapisseries et de velours.

Ces sièges sont en bois de chêne ou de noyer. Le bois est tourné pour les sièges de luxe et simplement équarri pour les sièges ordinaires. Il n'est qu'un support pour la tapisserie ou l'étoffe qui recouvre le siège.

2 - Louis XIII-Louis XIV - Fauteuil

A mesure que l'on avance dans le temps, les lignes s'assouplissent, les accoudoirs prennent une double cambrure pour se terminer en crosse à l'avant. La traverse d'entrejambe existe toujours à la base du fauteuil.

Le bois du dossier reste invisible. La garniture est en cuir réhaussée d'or ou d'argent, de tapisserie de soierie ou de velours. Généralement, la tapisserie du siège est assortie aux rideaux du lit, les sièges plus simples sont cannés.

Ce siège est en chêne ou en noyer, la sculpture apparaît et est parfois exubérante. Le bois est tourné.

3 - Louis XV - Fauteuil cabriolet

Le bois apparent est de règle. Triomphe de la ligne courbe, le galbe parfait est atteint entre 1750 et 1775. Disparition vers 1720 de la traverse d'entrejambe au bas des sièges. Les pieds se cambrent et se terminent en pied de biche. Le siège est l'œuvre du menuisier.

Le bois employé est le noyer ou le hêtre. L'assemblage se fait à tenons et mortaises avec chevilles de bois qui assurent la souplesse du siège.

Si l'ornementation du siège est importante, le menuisier confie le siège au sculpteur puis au doreur et au peintre. Le tapissier emploie de merveilleuses soieries qui constituent en général une partie considérable du prix de revient du siège. La tapisserie est rare, la canne employée sur les sièges simples, les passementeries sobres.

R. Guillemot - TOP

4

Document Hutin © by SPADEM 1978

5

4 - Louis XVI - Fauteuil

La ligne droite et les angles droits règnent mais on admet le plein cintre et le demi-cercle. Le dossier légèrement creusé est dit en « cabriolet », le dossier ovale est dit en « médaillon ». Les pieds sont tournés soit à cannelures verticales (pieds en carquois), soit à cannelures en spirale.

Le siège est en bois de noyer ou de hêtre peint dans des tons assortis à la boiserie (gris clair, vert d'eau, blanc et or).

La garniture de ce siège est en soierie à motifs de fleurettes ou à motifs pompéiens. Peu d'usage de la tapisserie. On retrouve toujours la canne sur les sièges simples. La toile imprimée fait son apparition, elle est moins chère que la soie, par exemple la toile de Jouy.

5 - Empire - Fauteuil

Les accotoirs sont dans le prolongement des pieds de devant alors qu'au XVIIIe siècle, ils étaient toujours en retrait. Cette mode se rattache à l'engouement pour les sphinx, les cariatides engainées et les lions monopodes. Les dossiers sont carrés et rembourrés, les pieds postérieurs sont cambrés et largement écartés. La palmette et les décors géométriques sont caractéristiques du style empire.

Les sièges, qui seront peints ou dorés, sont en if ou en hêtre et l'acajou prend une place très importante. Les sièges sont garnis d'étoffes lourdes, damas, velours cramoisis, brocart, soie brodée.

Les couleurs favorites sont le vert avec toutes ses nuances et le brun-rouge. Les galons jouent un rôle prépondérant et constituent un élément de transition entre le décor des étoffes et la sculpture des bois. Les fauteuils des palais impériaux sont souvent recouvert de tapisseries pour fournir des débouchés aux manufactures officielles.

6 - Second Empire - Borne de salon

Sans bois apparent, c'est le règne du capiton, des sièges confortables adaptés à la mode féminine très encombrante avec ses robes à crinoline. Les franges sont là pour masquer les pieds du siège.

Les sièges sont en acajou, en palissandre ou en bois vernis noirs incrustés de nacre et peints de couleur. L'innovation de cette époque est le papier mâché, procédé découvert par les Anglais en 1820 et dont la mode fut suivie par les fabricants français.

L'artisan disparaît pour faire place au fabricant qui exécute en grande série et qui a pour but de faire du bon marché. Les sièges sont recouverts de soieries brodées ou damassées. La passementerie est très importante : chenilles, franges, pompons. Les tapisseries de sièges redeviennent très à la mode.

R. Guillemot - TOP, chez Mme Debar, à Paris

6

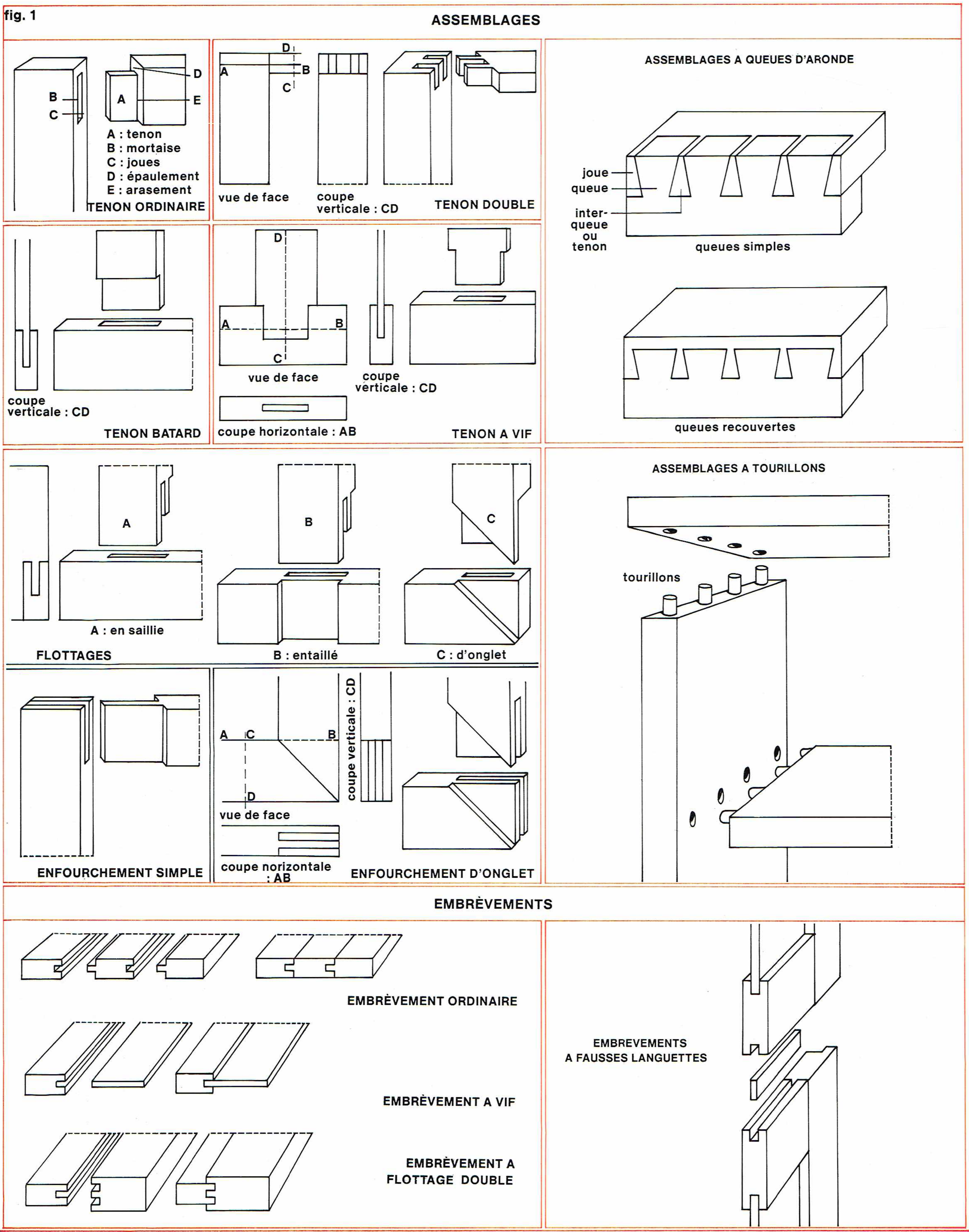
fig. 1
ASSEMBLAGES
B
C
A
D
E
A : tenon
B : mortaise
C : joues
D : épaulement
E : arasement
TENON ORDINAIRE
D
A
B
C
vue de face
coupe verticale : CD
TENON DOUBLE
ASSEMBLAGES A QUEUES D'ARONDE
joue
queue
inter-queue ou tenon
queues simples
queues recouvertes
coupe verticale : CD
TENON BATARD
D
A
B
C
vue de face
coupe verticale : CD
coupe horizontale : AB
TENON A VIF
A
B
C
A : en saillie
FLOTTAGES
B : entaillé
C : d'onglet
ASSEMBLAGES A TOURILLONS
tourillons
ENFOURCHEMENT SIMPLE
A
C
B
D
vue de face
coupe verticale : CD
coupe horizontale : AB
ENFOURCHEMENT D'ONGLET
EMBRÈVEMENTS
EMBRÈVEMENT ORDINAIRE
EMBRÈVEMENT A VIF
EMBRÈVEMENT A FLOTTAGE DOUBLE
EMBREVEMENTS A FAUSSES LANGUETTES

La fabrication du meuble

Persistance de la conception traditionnelle

Le meuble estampillé n'est plus fabriqué. Il fait partie du patrimoine de certaines familles. On le sauvegarde ou on le vend. Sa valeur marchande est cotée.

Au meuble-objet-œuvre, se substitue le meuble de série destiné au plus grand nombre, même si certains artisans réalisent encore des meubles « à la demande ». Récemment encore, mais exceptionnellement de nos jours, le meuble est l'œuvre complète d'un artisan-ébéniste. A l'artisan, entièrement responsable de son travail (il prenait personnellement la peine de juger de la qualité des bois qu'il allait employer), a succédé l'équipe chargée de la fabrication et de la finition du meuble. Le travail a été divisé. On trouve successivement : les traceurs, les débiteurs, les machinistes, les plaqueurs, les monteurs, les metteurs en couleurs, les vernisseurs, les finisseurs, les laqueurs, les marbriers.

La tradition dans la conception du meuble s'est poursuivie indépendamment de la division du travail. Le négociant-fabricant a encore souvent, à l'arrière de son magasin du faubourg Saint-Antoine, un atelier de réalisation. Il conçoit lui-même ses modèles, à moins qu'il ne fasse appel à un décorateur.

Les meubles sont réalisés dans les anciens ateliers artisanaux équipés cependant d'un outillage mécanique moderne et souvent important, relevant des techniques de transformation du bois. L'arrivée de la machine a décomposé les tâches à accomplir : tracer, scier, corroyer, assembler, coller, plaquer, monter, finir. Cette fragmentation n'a cependant pas modifié la conception générale du meuble. Les méthodes d'assemblage restent en grande partie traditionnelles, orthogonales, en dehors de certaines améliorations dues aux nouveaux collages (colles-contact au néoprène) ou à des apports de nouveaux systèmes de quincaillerie. On trouve en effet un grand nombre de modèles de paumelles, fiches, compas, charnières, qui permettent de fabriquer de petites séries de modèles sans avoir à faire réaliser spécialement des pièces conçues pour elles.

Cette tradition s'est légèrement enrichie de l'apport de certains matériaux nouveaux, en essayant de les adapter sans pour cela remettre en cause la conception même des meubles ; apport de certains vernis polyester et méthodes de mises en couleurs, emploi de stratifiés comme revêtements de surface, remplacement de certains panneaux sculptés en bois par une imitation moulée en polyuréthanne.

Les mousses plastiques sont apparues pour la garniture des sièges et ont complètement remplacé les garnitures traditionnelles sans, dans ce cas, modifier la forme extérieure des coussins. Aux tissus de lin, de laine, se sont substituées toutes les fibres synthétiques. Le cuir s'est vu remplacer par les revêtements vinyliques, tissus enduits, imitation cuir. Les matériaux que l'on appelle « véritables » semblent réservés à de très petites séries et sont en général destinés à une clientèle riche.

Cette fabrication traditionnelle a pu s'industrialiser grâce à l'arrivée du panneau de particules (matériau rigide, résistant, peu sensible aux écarts de température — les liants sont des résines thermodurcissables) qui est devenu le matériau de choix pour la fabrication de toutes les surfaces planes. C'est en Allemagne que cet emploi fut rapidement industrialisé. Cette industrie est actuellement puissante. On comprend le succès de ce matériau qui ne révolutionne aucunement l'aspect formel du mobilier. Il ne nécessite ni moule ni outillage vraiment nouveau. Il ne présente pas de risque ; les panneaux préenduits ou prédécoupés sont simplement assemblés.

En ce qui concerne l'emploi du polyméthacrylate de méthyle dans l'ameublement (PMM), plus connu sous le nom d'Altuglas ou de Plexiglas, il faut souligner qu'il a l'énorme avantage de se prêter comme tout thermoplastique aux techniques de pliage, formage et même injection, mais aussi de pouvoir se travailler comme du bois. Il se scie, se colle, se taraude. Aussi certains ébénistes ont-ils facilement pu se reconvertir dans le travail du PMM.

Parallèlement à cette fabrication du meuble qui semble figée dans sa tradition conceptuelle et qui ne s'enrichit d'apports technologiques que d'une manière anar-

fig. 2

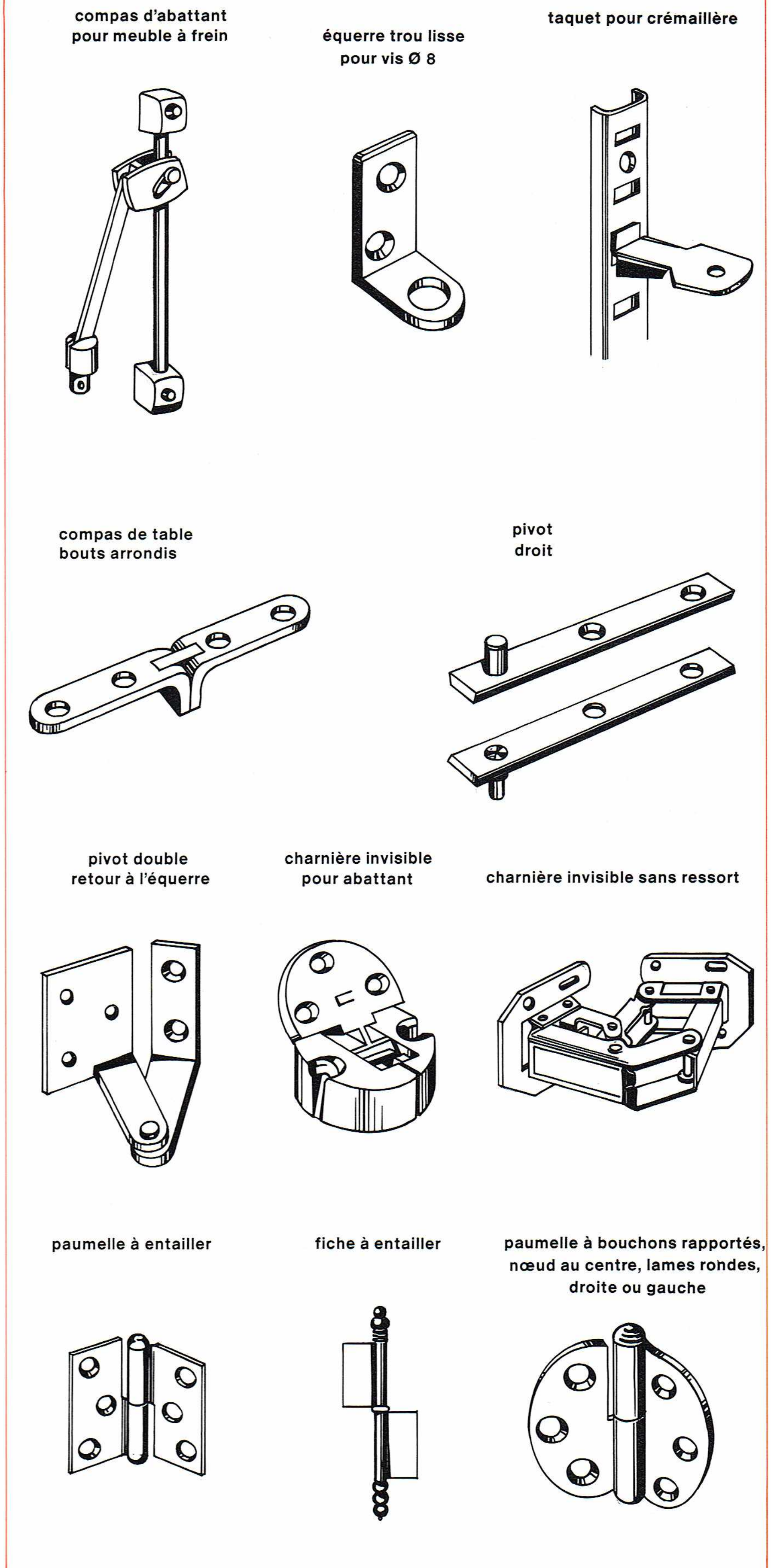

▶ *Aménagement de salle de bains de F. Catroux.*

◀ *Pages 122 et 123. Figure 1 : le bois et la fabrication du meuble, différents modes d'assemblage (d'après X. Hosch,* **Traité de dessin dans la construction du meuble,** *éditions Dunod). Figure 2 : modèles de pièces de quincaillerie qui permettent l'assemblage des divers éléments de menuiserie d'un meuble (d'après les catalogues de la société anonyme Béchu).*

R. Guillemot - TOP

chique, on assiste à un autre courant, à une révolution complète dans la conception et dans les méthodes de fabrication du mobilier contemporain.

Le mobilier contemporain, sa fabrication

La fabrication du meuble n'est plus l'apanage souverain de l'ébéniste. Un meuble peut être fabriqué dans une usine spécialement automatisée pour ce type de production, ou dans une usine fabriquant parallèlement des pièces pour l'industrie automobile ou pour le nautisme. Le meuble de série se fabrique à une cadence parfaitement programmée et selon un projet défini.

Les différentes étapes de la création et de la fabrication sont :

★ l'analyse du problème, qui s'effectue en liaison avec le service de marketing, le bureau de la recherche, l'équipe de conception design et produits ;

▶ *Siège de dactylo ; ce modèle répond à une fonction précise. Il a été conçu en tenant compte de certaines données ergonomiques. La hauteur de l'assise est variable, le dossier est réglable. Ce siège est équipé de roulettes.*

Flambo

▶ *Page ci-contre, photographies de plusieurs sièges qui ont eu leur importance quant à l'évolution des formes :* 1) *Rocking-chair Shaker (1820) ;* 2) *chaise de Michael Thonet (1867) ;* 3) *chaise de C. Mackintosh (1902) ;* 4) *fauteuil Rietveld (1917) ;* 5) *fauteuil Marcel Breuer (Bauhaus, 1925) ;* 6) *chaise-longue de Le Corbusier (1928) diffusée par Cassina ;* 7) *fauteuil de Mies Van der Rohe (1929) ;* 8) *chaise d'Antonio Bonet et Juan Kurchan (1938) diffusée par Airborne - Société française du siège.*

★ les propositions de solutions, de modèles ;

★ les réalisations de plans maquettes (conception des dessins techniques ; essais, résistance des matériaux ; calcul des coûts) ;

★ le projet final ;

★ la réalisation du programme de fabrication (essais, contrôle) ;

★ la livraison des produits, le service après-vente.

De nouveaux moyens, encore récents, deviendront une aide précieuse pour la conception des produits, et notamment des meubles ; il s'agit de l'informatique graphique, nouvel outil qui aide à concevoir et à visualiser les modèles. Ces systèmes permettent au créateur de dialoguer avec sa propre recherche. Il peut obtenir des plans sur papier ou sur calque à partir des informations rentrées et ensuite modifiées. Ce sont les périphériques graphiques. On peut également commander, à partir de ces données, des machines-outils à commande numérique qui permettent d'obtenir le modèle en trois dimensions.

Selon C. Eames, « les structures spécifiques et la technologie des computers peuvent aider la société à répondre aux besoins particuliers des individus ».

Malgré cela, la réalisation d'un prototype de siège en moulage plastique, destiné par exemple au thermoformage, passe encore très souvent par des étapes manuelles. A partir d'une maquette et de plans, une première forme grandeur nature va être élaborée en plâtre ou en balsa par le modeleur. D'après cette première forme qui a l'avantage de pouvoir, au fur et à mesure, se corriger facilement, on dessinera ensuite des plans de coupes successives, espacées de 15 mm à 50 mm selon le plan vertical. Ces dessins de coupes seront matérialisés par des gabarits en bois qui seront ensuite assemblés avec des intervalles convenables pour ne former qu'un bloc. Les intervalles de ce quadrillage de coupes seront ensuite comblés. Ce bloc ne subira que de très faibles corrections. Il sera utilisé pour l'exécution du moule.

Actuellement, la conception d'un meuble contemporain de série est confiée à une équipe qui comporte à la fois des représentants du service marketing, des représentants du service de fabrication et des designers. Le designer propose une réponse qui doit être un compromis entre toutes les données et les contraintes de départ : contraintes techniques, économiques, fonctionnelles, respect du cahier des charges du produit.

Certaines solutions répondent parfaitement au problème posé : à la fois innovation et respect des données. Dans le mobilier pédagogique proposé par Marc Berthier et D. Pigeon, les contraintes anthropométriques et ergonomiques de départ étaient parfaitement précisées. Les plateaux ne devaient offrir aucune possibilité d'accidents, être de teinte claire, ne comporter aucune arête blessante, correspondre aux normes de la Sécurité incendie. Les surfaces de travail devaient être mates, résister aux taches d'encre et aux entailles. Le souci d'économie a été pris en charge dans la conception de ces meubles, économie des matériaux et des moyens employés pour la fabrication. Le mobilier devait surtout s'adapter aux nouvelles conceptions pédagogiques, à une grande souplesse d'utilisation, à la polyvalence.

Comme nous venons de le voir sur cet exemple, la conception et la création du mobilier contemporain font appel à de nouvelles connaissances. Les données ergonomiques sont utilisées dans la conception des sièges et plus particulièrement des sièges destinés au transport ou aux collectivités, pour la recherche d'une position assise idéale selon l'usage du siège (siège de pilote, de conducteur, de dactylo). Il s'agit de sièges réglables permettant de respecter les différentes proportions anthropométriques et les différentes positions de l'usager. Il faut noter ici la complexité de l'utilisation des données anthropométriques ou des normes qui n'offrent qu'une valeur relative. Notre confort dépend de nos conventions sociales aussi bien que de la diversité de nos statures. Des recherches récentes portent également sur la conception de l'ameublement pour les handicapés moteurs, elles proposent des solutions adaptées.

Certains créateurs, depuis une vingtaine d'années, se sont efforcés, non pas de donner aux matériaux nouveaux l'aspect de matériaux déjà connus, mais un caractère propre ; en analysant notre manière de vivre, ils ont proposé des formes et des solutions nouvelles. Si l'apparition

1

E. Kossakowski - C.C.I. - Centre Georges-Pompidou

2

Peter Willi - C.C.I. - Centre Georges-Pompidou

3

Peter Willi - C.C.I. - Centre Georges-Pompidou

4

J. Guillot - TOP

5

J.-Ph. Charbonnier - TOP

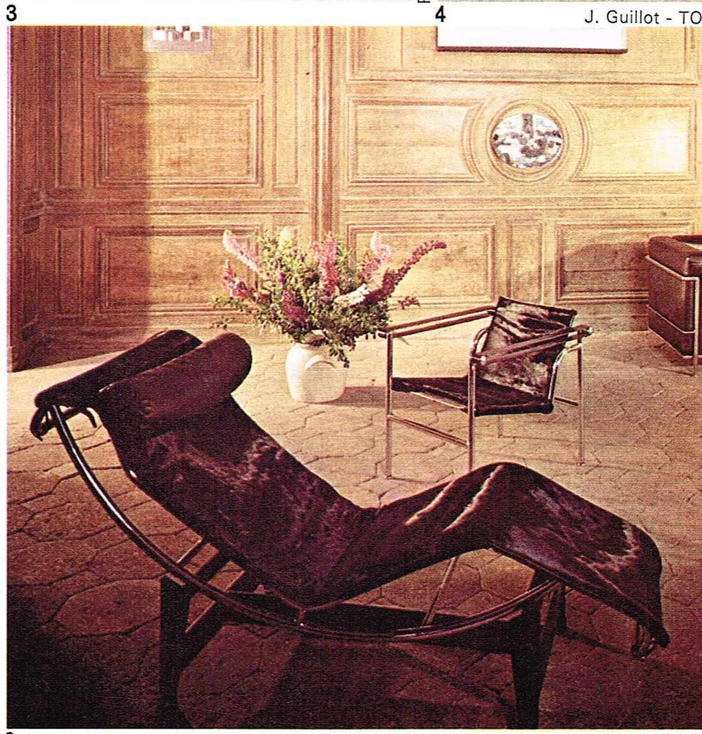

6

G. Ehrmann - TOP

7

E. Kossakowski - C.C.I. - Centre Georges-Pompidou

8

Peter Willi - C.C.I. - Centre Georges-Pompidou

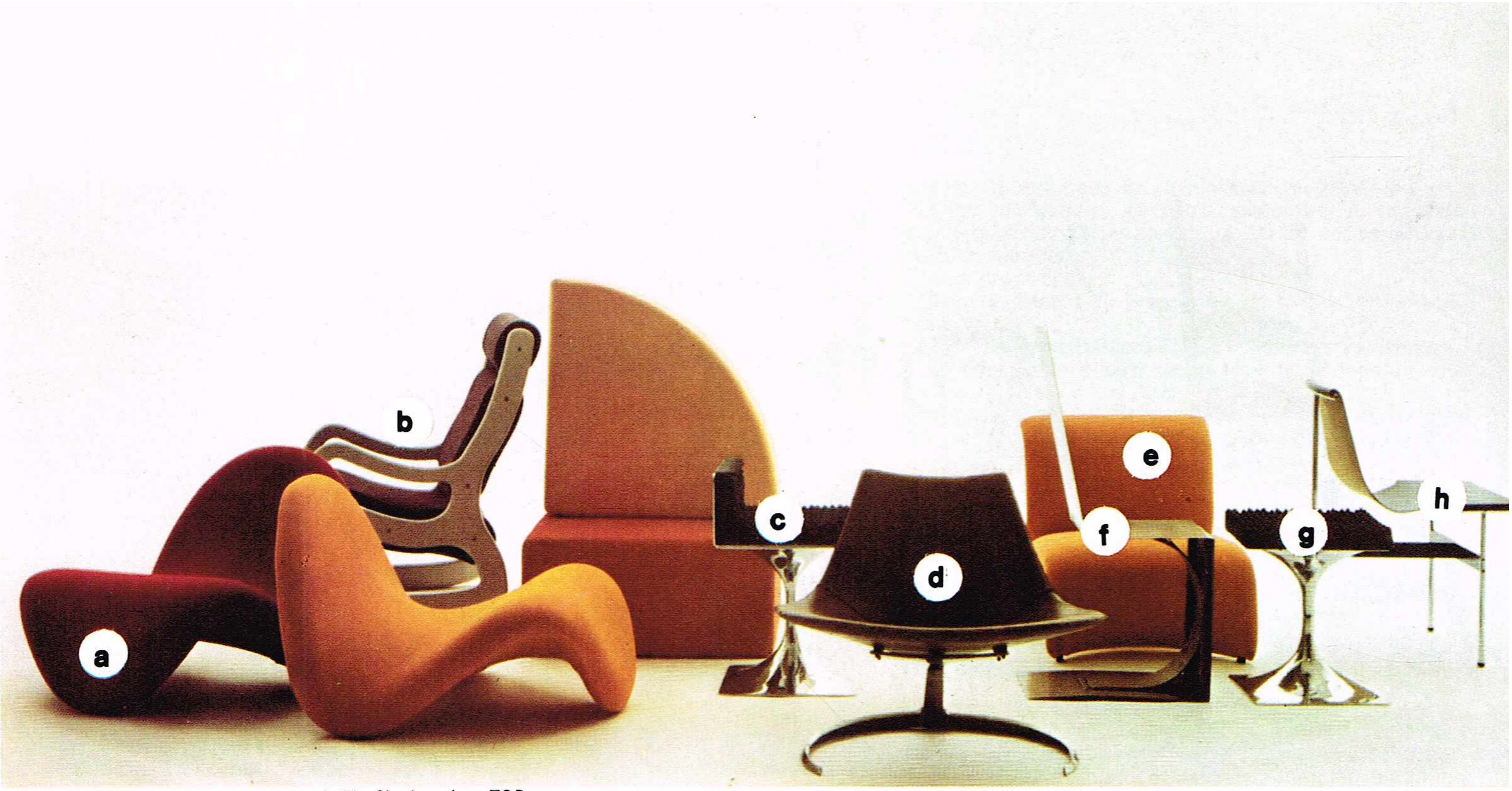

J.-Ph. Charbonnier - TOP

sur le marché d'un mobilier de série moulé ou embouti est récente, il ne faut cependant pas en oublier les sources, et le tableau chronologique des sièges nous rappelle les grands mouvements qui ont annoncé, depuis la fin du XVIIIe siècle, le design industriel : les Shakers, le mouvement Arts and Crafts, le Deutscher Werkbund, le mouvement de Stijl, le constructivisme, le Bauhaus, l'esprit nouveau et Le Corbusier, le New Bauhaus de Chicago.

Depuis les premiers meubles conçus et utilisés aux États-Unis par les Shakers vers 1850, en passant par la première chaise de série de M. Thonet vers 1859, les recherches de C. Mackintosh et l'emphase géométrique de ses modèles, les meubles de W. Taylor et de W. Morris pour la Red House de P. Webb, les chaises de Wright qui se rapprochent des recherches cubistes, depuis le fauteuil rouge et bleu de Rietveld (1917) qui reste pour nous l'image des principes de construction du mouvement de De Stijl, il semble qu'il y ait toujours eu un décalage entre ces recherches et l'ameublement couramment employé à la même époque, décalage qui persista pendant de nombreuses années. Les expériences fonctionnelles de M. Breuer, les recherches de Stijl semblent éloignées du mobilier effectivement en usage et contrastent avec la survivance de la tradition des décorateurs-ébénistes français copiant Riesener ou Jacob.

L'histoire du mobilier ne peut se dissocier de celle des matériaux nécessaires à sa fabrication. Le bois, l'industrie du bois règnent dans la fabrication traditionnelle. L'idée d'employer pour l'ameublement des matériaux autres que le bois est récente, de même l'idée des techniques empruntées à d'autres industries. Ces transferts techniques sont à la base de la conception du mobilier contemporain, comme nous allons le voir.

▼ *L'emploi du stratifié s'est étendu aux éléments de rangement souvent intégrés dans l'architecture. Ici, aménagement de Max Garnault.*

La maison française - cliché J.P. Leloir

Les matériaux

Ce mobilier actuel a évolué très vite grâce à une technologie nouvelle. Aux assemblages orthogonaux du bois a succédé la possibilité du moulage des matières plastiques, du cintrage des métaux. L'arrivée du bois moulé a aussi contribué à la modification des formes (angles arrondis). On retiendra une grande liberté d'expression autorisée par les nouveaux apports de la technologie et par les nouveaux matériaux.

Le contre-plaqué moulé

Le bois employé traditionnellement dans l'ameublement a bénéficié de l'invention du contre-plaqué (feuilles de placage collées par pression en alternant le sens des fils), et ensuite de l'invention du contre-plaqué moulé par pression. On situe les débuts de l'utilisation de cette technique vers 1930 (le bois courbé avait, lui, déjà été utilisé par M. Thonet beaucoup plus tôt). Le Finlandais A. Aalto dessine pour la première fois en 1930 des meubles en bois moulé d'une grande simplicité. Il emploie le bouleau lamellé et courbé. En 1952, Arne Jacobsen, architecte danois, mettant en application les données de l'ergonomie, dessine des chaises d'une conception parfaite en employant le teck lamellé et moulé. En France, Jacques Dumond dessine en 1957 un des premiers modèles de série en contre-plaqué moulé. Il dessinera plus tard de nombreux modèles alliant à la fois les connaissances techniques traditionnelles et des formes actuelles parfaitement fonctionnelles. En 1943 déjà, il proposait un fauteuil dessiné selon des normes anatomiques.

Aux États-Unis, Charles Eames orientait ses recherches vers de nouvelles techniques, proposant en particulier d'employer certaines des techniques propres à l'aéronautique. Il sera également un des premiers à utiliser le contre-plaqué moulé, et sa chaise longue, dont l'assise et le dossier sont deux pièces autonomes, reste un exemple classique des premiers essais de l'emploi de ce matériau. Actuellement, on utilise le contre-plaqué moulé pour la fabrication en série d'assises de sièges. Des

Architecte d'intérieur Berthet-Godet - photo Alain Dovifat

◀ *La première et principale utilisation des stratifiés dans l'ameublement fut celle des meubles de cuisine. Ici, une cuisine avec plan de travail en lamifié blanc de J.-L. Berthet.*
◀ *Page ci-contre, en haut : sièges des années 1959-1968.*
a) siège de P. Paulin pour Artifort - ossature métallique, toile caoutchouc, mousse et jersey;
b) fauteuil J.-P. Laporte pour Thonet, contre-plaqué laqué, housse mobile, mousse polyester sur sangle lastex;
c) chaise de R. Tallon, pour Galerie Lacloche - siège chromé avec dosseret;
d) Fabricius et Kastholm (Danemark) pour Yvon Schlechter : chauffeuse, coque de bois moulé, acier inox, vachette;
e) Hugues Steiner pour Steiner - « Kaido » - mousse armaturée recouverte de jersey;
f) J.-Ph. Charbonnier - prototype en acier;
g) R. Tallon, tabouret chromé, aluminium poli et mousse de polyester;
h) Erwine Laverne pour Bofinger (États-Unis), cuir et métal.

profilés de grande dimension offrent toute une gamme de variations de formes. On obtient un produit fini par débitage et usinage. Les modules ainsi créés forment des tables basses, des étagères, des éléments de rangements.

Le stratifié

C'est un matériau constitué par une superposition de couches de papier kraft imprégné de résines thermodurcissables que l'on expose à une température voisine de 150 °C et à une très forte pression (100 kg au cm²). Il y a formation d'un matériau homogène par polymérisation. On obtient des plaques d'une épaisseur variant autour de 15/10 de mm. La première feuille de papier peut être imprimée avant la polymérisation, ce qui donne des aspects de surfaces colorés ou imitant le bois, le liège... Certains de ces panneaux ont les caractéristiques de pouvoir se cintrer, se former.

Ce nouveau matériau de revêtement a d'abord été adopté par les fabricants traditionnels d'ameublement. Son aspect de surface permettait d'imiter les différentes essences de bois. Il résiste bien à la chaleur, aux rayures, à l'abrasion. Il a une bonne tenue à la lumière. Pour les fabricants, le coût d'installation est peu élevé. La première utilisation fut celle des meubles de cuisine, du mobilier de bureau pour collectivité. Son emploi est très étendu actuellement : mobilier pour enfants ou même mobilier de bibliothèque, tables basses ou plateaux de tables de salles à manger, aménagement des salles de bains.

Le métal - Le fer, l'emploi du tube d'acier, l'acier inoxydable, l'aluminium

C'est au milieu du XIXᵉ siècle que sont apparus les premiers meubles en fer dans l'ameublement. Dans un ouvrage de 1865, on peut lire : « A côté de l'industrie des meubles en bois exotique ou en bois indigène, il faut en citer une autre qui, éclose il y a à peine une trentaine d'années, a fait des progrès considérables, nous voulons parler de la fabrication des lits, des sièges pour jardin en fer plein et en fer creux laminé. » A ce moment, l'emploi de la *fonte* autorise la fabrication de

Bureau de France - cliché C. Braud

◀ *L'idée d'employer pour l'ameublement des matériaux autres que le bois est récente, de même que l'idée d'employer des techniques empruntées à d'autres industries. Ici, aménagement de bureau par Max Garnault.*

▶ *A gauche, les contraintes techniques imposées par l'acier inoxydable (ici, emploi d'une bande d'acier), le souci de l'unité du dessin ont abouti à cette forme qui se présente comme une recherche exigeante (siège de J. A. Motte). A droite, canapé boudin de P. Paulin pour Mobilier international.*

J.-A. Motte

J.-Ph. Charbonnier - TOP

piétement de bancs ou de tables dont l'aspect se surcharge d'éléments symboliques : courbes biomorphiques, rosaces, fleurs, allégories. Le moulage de fonderie autorise une exubérance formelle qui sera caractéristique du milieu du XIXᵉ siècle.

A partir des années 1925, c'est une tout autre démarche qui aboutira à l'emploi du *tube d'acier* dans l'ameublement. Deux modèles de chaises seront présentés à l'exposition du Werkbund en Allemagne, celle de Mart Stam et celle de Mies Van der Rohe. Toutes les deux utilisent pour la première fois la technique de la suspension en porte-à-faux *(cantilever)* en employant le tube d'acier coudé. Double innovation formelle, car, dans la chaise de Mies Van der Rohe, du même coup se trouvaient supprimés les pieds arrière des chaises et réalisée une amélioration fonctionnelle par l'élasticité de la forme. Au même moment, Breuer dessine des chaises en tube d'acier chromé, influencé par l'emploi de ces matériaux dans l'industrie du cycle. On citera aussi les recherches de Le Corbusier autour de 1927 (fauteuil et chaise longue de repos adaptables).

Ces modèles vont servir de références à certains modèles plus actuels. On pense au mobilier en tube laqué de Gae Aulenti (Italie). David Rowland dessine en 1970 une chaise en acier embouti sous pression, calculée avec précision, et qui permet, selon le texte du brevet, d'empiler quarante chaises sur une hauteur de 1,20 m. Ce sont aussi les recherches de Verner Panton, architecte danois qui, utilisant les mousses de plastique sur armature métallique, crée de nombreux modèles aux formes souples (1969). Le tube d'acier est aussi utilisé comme armature supportant des mousses de latex moulées. Ce sont les formes ondulantes et confortables des sièges de Pierre Paulin (1970) ou d'Olivier Mourgue.

L'emploi du *fil d'acier chromé* est dû à un sculpteur, Harry Bertoia, lorsqu'il propose sa fameuse famille de sièges dont les assises sont des treillis de fils d'acier (États-Unis, 1952).

L'*acier inoxydable* a fait son entrée récente dans l'ameublement grâce à l'utilisation de la tôle (tôles polies, tôles gravées, tôles minces plaquées ou tôles pliées), à la réalisation d'éléments emboutis ou pliés, et à l'utilisation de tubes assemblés par brasure, par soudure électrique par points. Les tubes carrés peuvent être cintrés. On citera les premières recherches de J. A. Motte qui sont très significatives dans l'emploi de ce nouveau matériau. La structure des sièges souligne la technique utilisée.

L'*aluminium* est d'un emploi nouveau. Il offre l'avantage d'être léger, de bien vieillir grâce aux différents traitements de surface. Il offre de bonnes caractéristiques mécaniques. De nombreuses variétés de formes peuvent s'obtenir par la fonderie. C'est cependant un matériau cher et difficile à employer. Il est principalement utilisé pour réaliser des piétements de chaises ou de tables et des pièces de quincaillerie. En France, en 1966, Roger Tallon proposait des modèles de sièges en aluminium et également une série de mobilier en matière plastique.

▼ *Thermoformage des matières plastiques.*

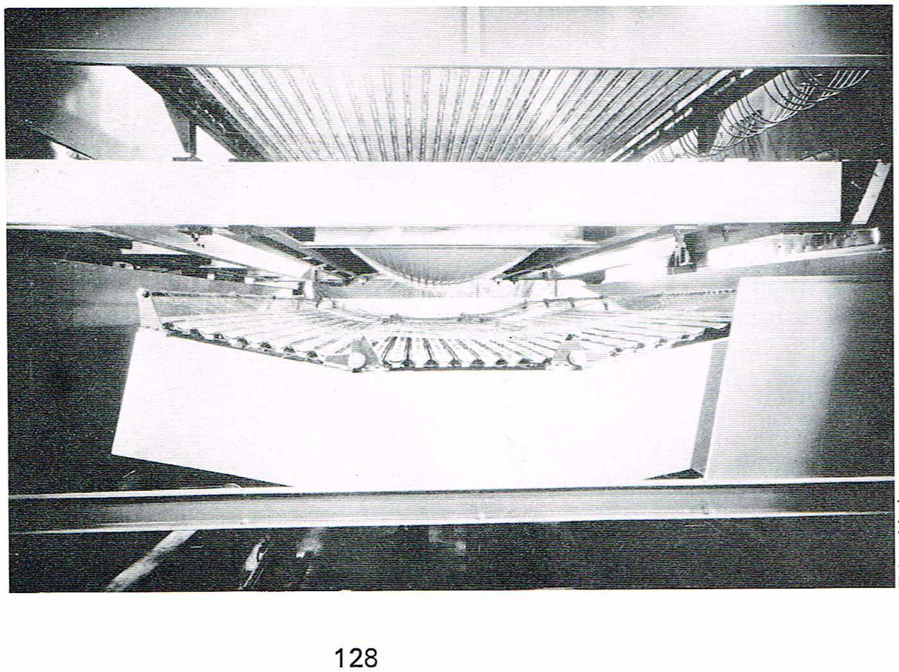

Tabur Marine

Les matières plastiques

Au départ matériau de remplacement, les matières plastiques ont été utilisées — principalement aux États-Unis — pour copier des modèles anciens. Le polyuréthanne, par exemple, se prête admirablement au moulage des formes sculptées complexes : en France, on connaît les fausses poutres en chêne, certains éléments de mobilier. L'apport des matières plastiques ne se limite pas à la copie, loin de là ; il est fort important, et certains diffuseurs ont pu proposer au public des gammes complètes de mobiliers.

Les techniques de transformation des matières plastiques ont été exposées dans le volume *Technologie III*, fascicule 198, p. 289. Celles qu'utilise l'industrie de l'ameublement sont essentiellement les suivantes.

- L'*extrusion* permet de réaliser des plaques et des profilés. Cette technique est à la base du thermoformage.
- Le *thermoformage :* les matériaux employés sont l'ABS, le polystyrène, le polyméthacrylate. Cette technique permet, entre autres choses, d'envisager de petites séries (10 à 500 pièces). On utilise un moule en plâtre pour les très petites séries, un moule en bois, en polyester ou en aluminium pour des séries importantes.
- L'*injection* permet la réalisation de pièces de grande série. Cette technique atteint une grande précision dimensionnelle. Elle permet la confection de formes complexes — nervures et cavités. Cependant, la complexité

de la forme entraîne la complexité de l'outillage qui peut devenir très onéreux.

- Le *moulage à froid* peut être une technique manuelle à l'aide d'un pistolet ou peut se faire sous presse. On emploie du polyester armé de fibres de verre. Ce matériau a l'avantage d'être très résistant et offre une très bonne tenue à l'extérieur.
- L'*expansion* (ou le moulage des mousses). Cette technique emploie de la mousse de polyuréthanne à densité variable et utilise soit des moules en silicone ou en élastomère de polyuréthanne permettant des contre-dépouilles (petites séries 100 à 200), soit des moules en stratifié, en polyester armé de fibre de verre (100 à 1 500 pièces), soit des moules métalliques pour de grandes séries. Le matériau offre d'énormes avantages dans la conception des sièges par la possibilité de surmoulages de densités différentes.

Dans l'ameublement, les principales matières plastiques utilisées actuellement sont : le polypropylène, le polyéthylène, le polystyrène-choc, le polyuréthanne, le polyester et l'ABS (acrylonitrile butadiène styrène).

C'est à Eero Saarinen, architecte finlandais émigré aux États-Unis, que revient le mérite d'avoir utilisé pour la première fois les matières plastiques dans l'ameublement. Il dessine en 1956 sa fameuse chaise tulipe dont l'assise est en polyester moulé et fibre de verre, et dont le pied, unique et central, est en fonte d'aluminium. Cette création servira ensuite de schéma à de multiples autres dessins. Il en existe de nombreuses variantes et copies.

En Grande-Bretagne, en 1963, Robin Day dessine une chaise empilable destinée à de très grandes séries. Le piètement est en tube d'acier chromé, avec embouts de caoutchouc et la coquille en polypropylène.

En Allemagne, en 1966, Helmut Bätzner, architecte, dessine une chaise empilable de grande série en polyester armé de fibres de verre et moulée en une seule opération par moule et contre-moule sous pression. Cette chaise représente un aboutissement des techniques du moment et une réponse fonctionnelle : légèreté, maniabilité, empilage, inaltérabilité aux intempéries.

La Finlande est représentée en 1968 par Eero Aarnio qui oriente ses recherches vers l'utilisation du plastique dans l'ameublement et propose des modèles en polyester comme le fauteuil « sphère » (1966) et le fauteuil « Pastilli » (1968).

Dans ce domaine, l'influence des recherches italiennes autour des années 1960 a été très importante. Les designers italiens se sont orientés vers des solutions totalement nouvelles. Le siège « Memoria » est une structure gonflable qui épouse la forme du corps par le réglage de la pression. D'autres créateurs utilisent la mousse ultra-compressée qui s'expansera au contact de l'air, lorsque l'acheteur ouvrira l'enveloppe de la galette

E. Kossakowski - C.C.I. - Centre Georges-Pompidou

◀ *La chaise tulipe d'Eero Saarinen comprend une assise en polyester moulé et en fibre de verre et un pied unique et central en fonte d'aluminium, finition Rilsan (1956).*

dont il vient de faire l'achat. On citera Anna Castelli, qui dessine en 1954 des éléments modulaires de cuisine et utilise les matières plastiques (l'ABS), et surtout Joe Colombo, qui a largement représenté l'Italie dans l'ameublement contemporain. Il dessine de nombreux modèles de sièges et, en 1968, propose un « système programmable pour habiter », qui est un « Meccano aux développements infinis composés de panneaux en équerre pouvant selon les cas être utilisés comme piètement, tables basses, bureaux, châssis pour fauteuils et lits ».

D'autres matériaux sont employés dans l'ameublement contemporain, le fibrociment moulé (réalisation de mobilier d'extérieur), le carton (sièges d'enfants, éléments modulables de rangement), le rotin. La tôle laquée, dont l'emploi semblait jusqu'ici réservé au mobilier de collectivité, bureaux, hôpitaux, trouve sa place dans l'habitat particulier.

Certains matériaux obtiennent le droit d'apparaître dans le cadre du décor familial. Certaines recherches effectuées pour le dessin des sièges de collectivités ou destinés aux transports en commun ont des prolongements intéressants sur la conception des sièges de l'habitat particulier, sur la liberté de conception des formes, sur l'emploi de matériaux non traditionnels ou sur l'amélioration du confort.

▼ *Fauteuil « sphère » (1966) d'Eero Aarnio (Finlande). Chaises moulées de Joe Colombo aisément utilisables dans un jardin.*

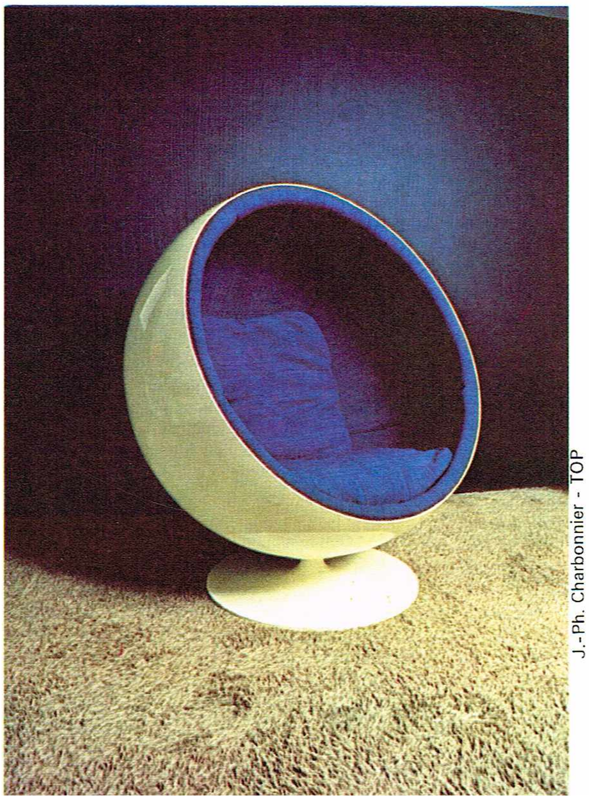

J.-Ph. Charbonnier - TOP

P. Hinous - TOP

revue Embouteillage - conditionnement

▲ *Le conditionnement attire l'attention par sa forme, sa couleur et le graphisme publicitaire.*

▼ *Ces produits sont tous des boissons, et pourtant nous ne saurions les confondre. Ils ont tous la personnalité que leur confère leur conditionnement : forme du contenant, habillage et bouchage de celui-ci.*

E. Boubat - TOP

EMBALLAGE ET CONDITIONNEMENT

Notions mal perçues, professions décriées et, selon certaine littérature, source de tous les maux de la terre, telles sont de prime abord les premières composantes externes qui caractérisent aux yeux de nombreuses personnes une des interprofessions les plus indispensables au monde dans lequel nous vivons.

Nous allons donc, dans les pages qui suivent, lever le voile sur ces notions en nous attachant à les lier au quotidien avant de donner une idée d'ensemble de la force économique que représente ce secteur. Nous développerons ensuite les techniques et technologies industrielles couramment mises en œuvre dans les ateliers de conditionnement. Un chapitre traitera à ce niveau de certaines opérations technologiquement superflues mais imposées par le paramètre consommateur inclus dans la notion de conditionnement. Le problème des déchets sera abordé par la suite avec référence à l'environnement. Notre conclusion sera le trait d'union entre toutes ces facettes sous les traits de la législation et de la réglementation qui se doivent de donner à chaque paramètre la place qui lui revient.

Ne pas confondre emballage et conditionnement

De tout temps et sous toutes les latitudes, l'homme a eu besoin de transporter des produits d'un point à un autre : de la maison au lieu d'activité, de l'échoppe

voisine à son domicile, tout simplement d'un point à un autre d'une pièce, etc. Ces objets, ces produits transportés devaient l'être de façon simple et dans les meilleures conditions.

Nous en arrivons tout naturellement à la notion de support de transport dont découle la notion d'*emballage*. Le support de transport n'enveloppe pas obligatoirement le produit ou l'objet dans son intégralité, au contraire de l'emballage. Une barquette contenant un produit quelconque ne devient emballage que lorsqu'on lui ajoute un couvercle (cas du sucre) ou un film plastique (cas des bouteilles ou des boîtes regroupées en fardeaux).

L'emballage doit son développement à celui des moyens de transport, qui, tout en facilitant les échanges, ont imposé des contraintes supplémentaires. Ils ont exigé des produits à durée de vie allongée, des produits mieux protégés, plus compacts, offrant des volumes morts plus réduits, etc. Nous noterons d'ailleurs à ce niveau que l'homme, en créant l'emballage, n'a fait que transposer une notion des plus naturelles. Nous aurions pu commencer notre propos par la phrase lapidaire : « Au commencement était l'emballage, ou presque », car, dans la nature, tout est protégé, tout est emballé : la graine est enfermée dans la coque du noyau du fruit, lequel est à son tour protégé par sa peau ; de même le pépin de pomme ou de poire deux fois protégé ; de même le petit pois dans sa gousse ; le germe de blé dans le grain, et même l'embryon dans le corps des mammifères.

Ainsi, l'emballage est noble ; nous remarquerons encore que la nature a su en créer de beaucoup plus sophistiqués que ceux qui font l'admiration de nos consommateurs béats. Même les problèmes de calage pour le transport ont été résolus, témoin ces jumeaux ou ces triplets douillettement au chaud dans le sein de leur mère et que le liquide amniotique protège de l'extérieur. Force nous est de constater que l'homme demande à son emballage les mêmes caractéristiques que celles que la nature a conférées à ses « enveloppes » : rôle de protection, rôle de transport.

Poursuivant nos recherches parmi les trésors dont la nature nous gratifie, nous avons encore la surprise de nous apercevoir qu'elle a découvert il y a quelques millénaires la notion de *conditionnement*, car enfin, pourquoi les produits de l'agriculture ont-ils des formes différentes, des couleurs variées ? Il faut bien qu'ils se différencient les uns des autres ! Allons plus loin encore et prenons conscience — des expériences scientifiques l'ont prouvé — que ces formes et ces couleurs ont un rôle : ce sont elles qui attirent les insectes, les animaux. Cette attitude réflexe existe, c'est évident chez le consommateur qui passe devant un linéaire de grande surface. Certains points, certains emballages, certaines présentations attirent son attention. D'autres, au contraire, le laissent sans réaction.

L'emballage met en jeu un matériau brut qui n'a d'autre but que celui de protéger le mieux possible le produit ou l'objet qu'il contient en vue de son transport ou de son stockage plus ou moins prolongé ; le meilleur emballage sera, parmi les solutions possibles, la solution la plus simple, et globalement la moins coûteuse. Nous reviendrons sur cette notion ultérieurement.

Dès que l'on ajoute un accessoire à cet emballage sans personnalité, ou dès que l'on sort de la forme la plus rationnelle, on entre dans le domaine du conditionnement : c'est ainsi que l'on peut considérer la bouteille de vin classique d'un litre (litre syndical « 6 étoiles ») comme un emballage, alors que toute bouteille fantaisie de la même contenance pourra être qualifiée de conditionnement ; la bouteille nue est un emballage, alors que la bouteille habillée a subi l'opération de conditionnement.

Un autre distinguo possible est le suivant : l'emballage est un fait tangible et objectif, alors que le conditionnement fait appel à des notions éminemment subjectives.

Tableau I

Matériaux d'emballage en France en milliers de tonnes

Matériaux	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977
Fer-blanc							
Production d'emballages, total	489	492	527	541	485	485	538
dont boîtes de conserves	313	300	312	318	291	269	321
dont emballages divers	146	162	180	187	161	181	183
dont bouchage	30	30	35	36	33	35	34
Aluminium							
Consommation d'emballages, total	42	45	48	52	50	52	53
dont feuille mince pour enveloppage, nue ou en complexes	20	20	21	21	22	22,5	23
dont capsules et coupelles	4	5	6	8	6,5	7	7,2
dont tubes souples	5	6	6	7	6,5	6,5	6,3
dont boîtes étuis, aérosols	13	14	15	16	15	16	16,3
Verre							
Production d'emballages, total	1 682	1 879	2 023	2 282	2 219	2 293	2 444
dont bouteilles	1 407	1 579	1 703	1 958	1 925	1 973	2 100
dont flacons et pots	275	300	320	324	294	320	344
Papiers et cartons							
Production d'emballages, total	2 341	2 513	2 754	2 940	2 368	2 690	2 793
Papier, production pour emballages, total	768	701	745	787	831	662	738
dont sacs grande contenance	234	245	264	281	222	240	260
dont sacs petite et moyenne cont.	79	77	77	84	71	66	68
dont papiers traités et complexes	88	93	96	100	115	130	140
dont papiers en l'état	300	330	350	366	254	302	300
Carton ondulé production, total	1 260	1 363	1 487	1 531	1 266	1 448	1 500
Carton plat consommation, total	380	445	480	578	440	504	525
Bois							
Total, production	1 200	1 300	1 400	1 342	975	1 300	1 300
dont caisserie	647	748	829	815	600	775	750
dont emballages légers	520	520	540	498	350	500	525
dont fibre	33	32	31	29	25	25	25
Jute							
Total emballages	21	19	17	15	12	10	8
Pellicule cellulosique							
Consommation, total	26	30	32	32	24	28	28
Plastiques							
Consommation, total	397	474	540	577	501	560	599
dont film de PEbd et end.	171	185	200	224	189	210	225
dont film de PEhd	0,3	0,8	1,5	2	3,5	4	6
dont film de PP	1,2	1,8	2	3	3,5	4	5
dont film de PA	2,5	3,2	3,5	4	4	2,5	3,5
dont film de PVC rigide	12	16	18	22	20	21	22,5
dont film de PVC souple	3	3	3	3	2	2	2
dont film de PVDC et end.	6	8	9	10	11	12	13
dont film de polyester	0,4	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7	0,5
dont bouteilles PVC	80	110	130	120	110	130	135
dont bouteilles PE (85 % PEhd)	44	52	63	70	63	69	75
dont récip. thermoform. PS	36	45	55	62	43	48	51
dont bouchages ts plast.	26	30	33	35	32	34	36
dont PS expansé moulé	12	15	16	16	14	17	18
dont PS expansé extrudé	2,5	3,2	4,2	5	5,5	6	6,5

▲ *Tableau I : matériaux d'emballage en France, en milliers de tonnes. (Source : étude annuelle de la revue* Emballages, *publiée en décembre 1977.)*

Panorama de l'interprofession de l'emballage et du conditionnement

Il est difficile de chiffrer avec précision l'interprofession de l'emballage et du conditionnement dans la mesure où toutes les industries, à quelques exceptions près, font appel aux emballages pour l'expédition de leurs produits, et que les produits de grande distribution sont tous soumis au processus de conditionnement. Le *tableau* I nous semble plus parlant par ses chiffres qu'un long discours. Il fait le point sur la consommation des divers matériaux utilisés pour l'emballage et le conditionnement des produits, qu'ils soient alimentaires ou non.

Globalement parlant, ce sont quelque 7,5 millions de tonnes de matériaux qui sont transformées annuellement en emballages ou qui entrent dans la fabrication des accessoires du conditionnement (bouchons, étiquet-

tes, etc.). Cela représente un chiffre d'affaires dépassant quinze milliards de francs. Quelque 170 000 familles vivent de cette industrie. Ainsi que nous le disions plus haut, il faut ajouter à ces chiffres ceux qui concernent les constructeurs de matériels permettant la mise en œuvre des divers matériaux et même, puisque le recyclage est désormais à l'honneur, les chiffres afférents aux professions qui vivent de la récupération et de la transformation industrielle des matériaux d'emballage récupérés.

L'emballage : ses tenants et ses aboutissants

Protection et transport, tels sont les rôles de l'emballage, avons-nous dit! Nous sous-entendions évidemment la présence d'un produit, d'un contenu, et c'est en fonction de ce produit que l'emballage sera conçu dans son détail. Un emballage type boîte d'allumettes conviendra très bien pour des clous, alors qu'il ne viendra à l'idée de personne d'enfermer un liquide dans un tel contenant.

Il nous faut donc connaître le contenu et son devenir. Sera-t-il consommé rapidement? Devra-t-il être transporté loin du lieu de production ou de conditionnement? Et comment? Est-il destiné à une collectivité, à la grande distribution, au commerce traditionnel, aux circuits C. H. R. (cafés-hôtels-restaurants)? Un flot de questions dont les réponses orienteront le choix final quant au matériau à mettre en œuvre, quant à la dimension de l'emballage, quant aux accessoires à prévoir.

Avant d'aller plus avant dans ce développement, nous voulons faire remarquer qu'il existe plusieurs types d'emballages : nous appellerons *emballages primaires* ceux qui sont directement au contact du produit : feuille enveloppant la tablette de chocolat, boîte contenant des légumes, un liquide. Ce sont ces emballages qui passent sur les machines industrielles, l'un après l'autre, dans l'atelier de conditionnement.

Les *emballages secondaires* sont destinés à la fois au transport et à la présentation : présentation dans les grandes surfaces, sur les linéaires; transport par la ménagère du lieu d'achat au domicile. Tels sont les fardeaux d'eaux de source ou les fardeaux de bouteilles de bière sous film rétractable ou sous carton plat. Tels sont aussi les suremballages contenant un flacon de parfum, une bouteille d'apéritif, etc.

Quant aux *emballages tertiaires*, ils sont exclusivement emballages de transport. Ils permettent de transporter un maximum de produit à chaque opération. Les palettes sous housse rétractable, les caisses-palettes, les conteneurs-fils, les containers font partie de cette catégorie.

Emballage et contenu

Nous nous intéressons particulièrement, à ce niveau, à l'emballage primaire. Comment peut-on définir le produit à emballer? Il possède :

— une nature physique : est-il solide, gazeux? s'agit-il d'un liquide plat, visqueux, huileux, gazeux? etc.;

— une nature chimique : a-t-il une réaction acide, alcaline? est-il oxydable? etc.;

— une nature bactériologique;

— une densité : caractéristique importante pour définir la résistance du matériau à prévoir;

— une nature alimentaire ou non.

Il peut en outre :

— avoir subi ou devoir subir dans son emballage certains traitements physiques : emballage à froid ou à chaud, pasteurisation, stérilisation, rayons gamma, etc.

Importent encore :

— les conditions d'emballage : température, pression, etc.;

— les conditions climatiques : pour le conditionnement du produit, pour son transport, pour sa distribution et sa vente.

Revenons un peu sur certains paramètres pour mieux en comprendre la portée. Le risque d'oxydation du produit conduit à choisir un matériau qui fait barrière à l'oxygène, mais aussi qui ne laisse pas passer les radiations lumineuses oxydantes, notamment les ultraviolets. C'est ainsi que l'on utilise une couche de papier aluminium en sandwich entre deux couches de polyéthylène dans les emballages pour jus de fruits ou que l'on teinte le verre et traite le plastique pour s'affranchir des rayons ultraviolets nocifs à la bière.

L'état bactériologique des produits alimentaires est un souci de tous les instants pour le conditionneur qui doit choisir un matériau stérile ou stérilisable. On flambe les boîtes-métal; on traite les complexes-carton en laiterie par l'eau oxygénée que l'on évapore ensuite, avant remplissage.

Un produit alimentaire apporte des contraintes particulières, car il peut y avoir des risques pour la santé du consommateur. Outre les risques dus à des développements microbiens, les pouvoirs publics ont voulu réglementer les conditions du contact matériau-produit alimentaire. Nous nous référons sur ce sujet à une directive européenne publiée en 1972 qui reprend de nombreuses dispositions de la réglementation française existant antérieurement, notamment la notion de *listes positives*. « Tout ce qui n'est pas expressément autorisé est interdit. » Des listes ont été dressées de substances acceptées après tests et jugées sans risque pour le consommateur. Le fabricant peut élaborer l'emballage qu'il souhaite à la condition expresse de choisir ses « ingrédients » dans les substances autorisées. Il est, bien entendu, possible de proposer des substances nouvelles qui pourront être acceptées et venir compléter la liste dès lors qu'il aura été prouvé qu'elles sont sans danger. Cette notion demeure valable pour les vernis qui recouvrent l'intérieur des boîtes en fer-blanc et pour tous les bouchons. Par ailleurs, une limite de migration des composants de l'emballage vers le produit a été fixée au niveau européen, qu'il convient de ne pas dépasser. Mentionnons également à ce niveau le cas particulier des eaux minérales soumises à autorisation complémentaire du ministère de la Santé et de la Sécurité sociale. Si le verre est accepté sans réticence aucune, le matériau plastique doit recevoir un agrément particulier. Cet agrément concerne uniquement le couple *compound défini-eau de source déterminée* (le compound est la matière première utilisée pour la fabrication des récipients plastiques). Il n'est pas question d'utiliser ce même compound pour fabriquer des récipients destinés à contenir l'eau jaillissant de la source voisine, aussi rapprochée soit-elle de la première.

En cas de traitement physique faisant suite à l'opération d'emballage, le contenant devra être en mesure de tenir parfaitement à cette opération. C'est ainsi qu'un complexe à base de carton ne convient absolument pas s'il faut appertiser le produit après conditionnement, puisque l'on plonge le récipient dans l'eau. En cas de pasteurisation ou de stérilisation, opérations qui provoquent un échauffement entraînant simultanément une dilatation volumétrique du contenu et une augmentation de pression dans l'espace mort de la boîte ou de la bouteille, il convient de prévoir un matériau supportant températures et pressions élevées. A noter que, si l'on connaît depuis quelque temps déjà les plastiques stérilisables, ce n'est que tout récemment que la première boîte de conserve en matière plastique a fait son apparition outre-Atlantique.

Ce que demande à l'emballage le conditionneur

Le conditionneur veut, bien entendu, que le produit qu'il a amoureusement élaboré parvienne dans un état d'égale qualité au consommateur final, d'où le choix du matériau.

Mais il faut aussi que cet emballage soit susceptible d'accepter les cadences imposées par les machines industrielles. Il existe des machines qui remplissent jusqu'à 100 000 bouteilles de 50 centilitres par heure; certaines autres fabriquent jusqu'à 16 cartouches de chasse par seconde. A ces vitesses, la bouteille instable tombe, la bouteille trop fragile ou trop légère se casse, l'emballage possédant une ouverture étroite ne se remplit pas complètement. Ce ne sont là que quelques exemples montrant combien la conception d'un emballage est importante.

Autre paramètre d'importance : le coefficient d'efficacité de l'emballage, qui doit être le plus proche possible de 1. Ce coefficient mesurant le rapport du volume (ou du poids) du contenu au volume (ou au poids) de l'ensemble contenant-contenu influe énormément sur le prix de revient du stockage dans les entrepôts. Plus on s'éloigne de la valeur 1, plus le stockage coûte cher. Si

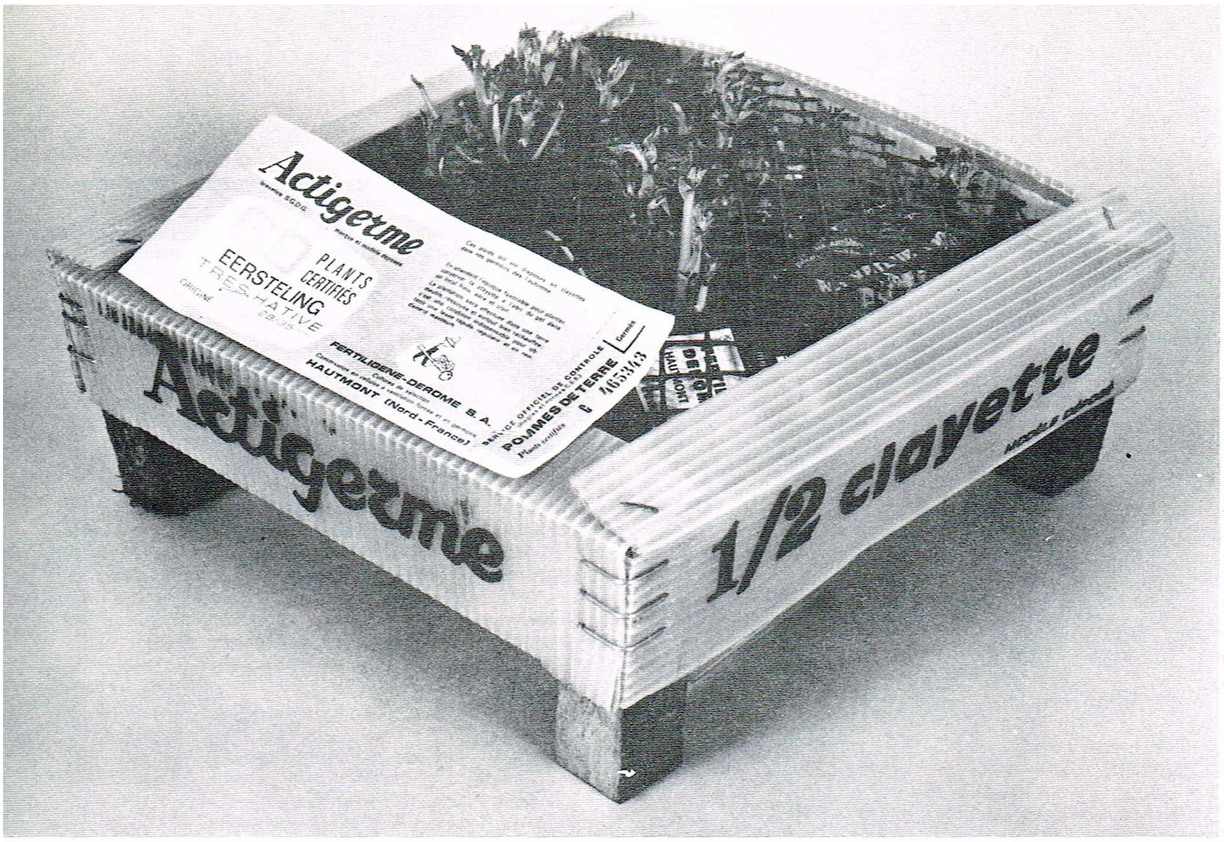

◀ ***Clayette en Akylux pour l'emballage des plants de pommes de terre. Ce matériau, facile à imprimer, remplace avantageusement le carton dès que des conditions particulières exigent un emballage insensible à l'humidité.***

document groupe de Kaysersberg

le coefficient d'efficacité volumétrique s'éloigne trop de 1, cela signifie, au niveau de l'emballage primaire, un emballage trop grand pour le contenu (présentation jugée plus tard trompeuse par le consommateur) ; au niveau de l'emballage secondaire ou de l'emballage tertiaire, cela implique une mauvaise étude de ce dernier ou la nécessité de revoir la forme et le volume de l'emballage primaire. C'est à cette notion que se rattache l'emballage-module de la palette. Si le coefficient d'efficacité pondéral s'éloigne trop de 1, cela peut signifier que l'on a choisi un emballage peut-être trop gros ou peut-être trop grand. Mais une chose est certaine, on retrouvera cet excédent de poids sur les zones de stockage, ce qui pourra imposer dans certains cas des gerbages à hauteur plus réduite ou, si l'on désire conserver la hauteur de stockage, imposera de prévoir des sols plus résistants.

A noter encore que l'industriel n'aime pas être contraint à envisager des équipements spéciaux imposés par l'emballage choisi. Il préférera utiliser un matériel de série éventuellement amélioré à l'usine plutôt qu'un prototype qui risque de lui apporter plus de déboires que de satisfactions. Il préférera aussi aux emballages préformés les découpes à monter et les emballages à plat qui, peu volumineux, se stockent sans difficulté.

Emballage et transport

Tous les moyens de transport étant possibles *a priori*, l'emballage gagnera toujours à être le plus compact et le plus léger possible pour gagner de la place et du poids.

En outre, c'est là que règne en maître l'emballage tertiaire que nous avons défini plus haut. Compte tenu des effets liés au transport (accélérations, chocs), les charges devront être parfaitement formées et stables, c'est pourquoi on utilise les techniques de cerclage des charges, de houssage des palettes, de dépôt de colles froides ou thermofusibles entre les cartons pour assurer l'unité de la charge, etc. Les emballages de regroupement (casiers, caisses, cartons) devront être suffisamment résistants pour ne pas se déformer ou se rompre sous l'effet de mouvements répétés transversaux. Comme dans le cas de la palettisation, l'emballage unitaire de chargement gagnera à être un module du plateau des camions ou de celui des wagons, selon le moyen de transport utilisé.

Citons encore le cas particulier du transport maritime, pour lequel les emballages doivent en plus posséder des propriétés de résistance à l'air salin. Il existe des traitements du carton qui le rendent insensible à l'eau. L'utilisation de palettes plastiques permet d'éviter les ennuis de la palette bois qui, très vite, pourrit.

Le retour en usine des emballages ou supports de transport coûte cher. Aussi a-t-on intérêt à s'équiper en matériels n'occupant qu'un faible volume à vide : feuilles-palettes au lieu de palettes, palettes emboîtables, casiers gerbables - emboîtables, par exemple.

Point de vue de la distribution sur l'emballage

Autant sinon plus encore que l'industriel conditionneur, l'homme de la distribution met l'accent sur le prix de revient du stockage, qu'il cherche à limiter le plus possible. Nous retrouvons donc la notion de coefficient d'efficacité évoquée plus haut. Pour lui, la solution la meilleure sera toujours celle qui réduit ce stockage au minimum, voire même l'élimine totalement. Il faut se rendre compte que c'est la grande distribution qui, voulant supprimer les stocks d'emballages rendus par la clientèle, a incité au développement des emballages non retournables.

Aisément manutentionnable, l'emballage dont rêve le distributeur devra en outre pouvoir se positionner facilement dans les linéaires. Il faudra notamment qu'on puisse, sans manutention supplémentaire, apposer l'étiquette de vente mentionnant le code article et son prix sur les emballages regroupés pour le transport en caisses, en caisses-palettes, etc. Dans cet ordre d'idée, la priorité sera donnée aux suremballages qui laissent visibles et disponibles à la vente le produit moyennant une opération simple (découpage de la housse, libération d'un rabat ou d'un couvercle, etc.).

La *figure* 1 donne, sous forme de schémas simples, l'ensemble des impératifs prioritaires auxquels doit satisfaire l'emballage vu par les yeux de notre distributeur.

Nous ajouterons à ces paramètres la composante décompte des achats au niveau des caisses. Des études de rentabilité ont été effectuées, selon lesquelles l'enregistrement par la caissière d'un achat n'est pas rentable pour la grande surface en dessous d'un certain montant unitaire, lequel a été calculé avec précision. C'est ce qui explique au niveau industriel, à la demande de la grande distribution, le développement des emballages de vente regroupant plusieurs yaourts, plusieurs bouteilles, plusieurs piles électriques, etc.

Les paramètres économiques de l'emballage

Ainsi que nous l'avons déjà signalé, l'emballage doit avoir un prix de revient aussi faible que possible, ce que l'on peut obtenir en agissant sur l'un ou l'autre des paramètres suivants : la nature du matériau, son épaisseur, la quantité utilisée. Économiquement parlant, un bon emballage doit économiser plus qu'il ne coûte. On fera intervenir tous les facteurs influant sur ce coût, depuis la naissance de l'emballage jusqu'à sa destruction totale.

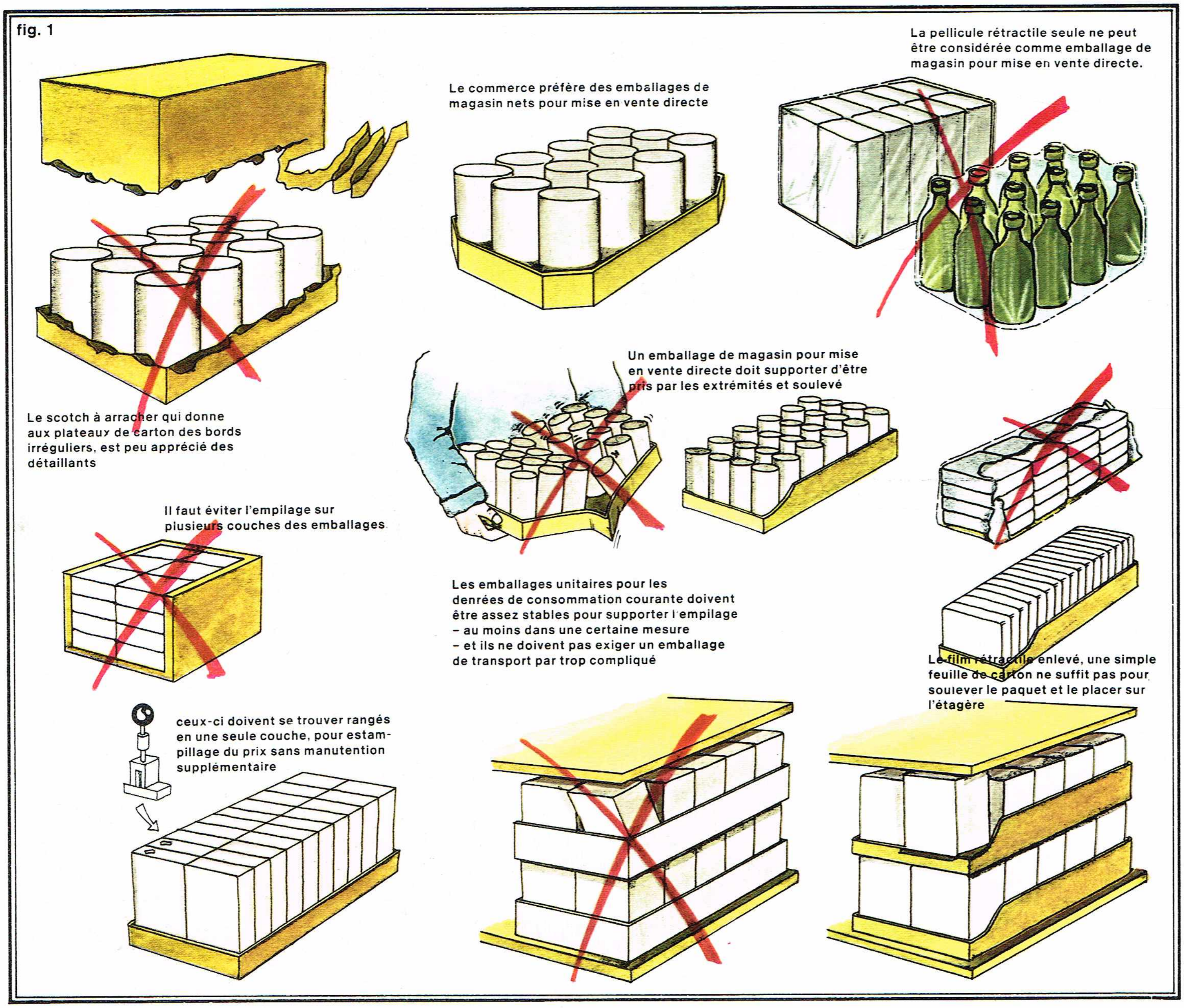

▲ *Figure 1 : quelques caractéristiques de l'emballage souhaité par la distribution.*

Le problème des déchets est donc crucial, et le bilan économique global peut amener, dans certains cas, à privilégier un matériau dont la mise en œuvre coûte plus cher mais dont le recyclage est plus aisé. Sont également à prendre en compte le volume occupé en cours de stockage (coefficient d'efficacité volumétrique), les éventuelles économies de main-d'œuvre réalisables et autres services aux divers stades de la vie de l'emballage.

Rappelons une fois encore qu'il importe de bien cerner le but poursuivi dans l'élaboration de l'emballage. L'adage longtemps en application du « Qui peut le plus, peut le moins » doit absolument être proscrit : il est caractéristique d'un emballage mal étudié. Les principales questions que tout bon concepteur devrait se poser sont les suivantes :

— Cet emballage a-t-il une raison d'être ? Si l'écrin du flacon de parfum s'explique, il serait absurde de concevoir un emballage carton pour une bouteille de vin de consommation courante. A moins évidemment que vous ne deviez confier cette bouteille à une société de transport ou à l'office des postes !

— Cet emballage ne peut-il utiliser un matériau moins cher ?

— Cet emballage a-t-il besoin d'être aussi rigide ? aussi lourd ?

— Ne peut-on simplifier le système utilisé ?

— Ce système répond-il aux paramètres qui régissent le cycle de vie du produit ?

C'est ainsi que l'on a assisté à la disparition des croisillons chaque fois que la chose se révélait possible dans les caisses carton dites américaines. Puis est apparue la technique du « wrap-around » ou de l'enveloppage des charges grâce à laquelle les surfaces de carton nécessaires ont pu être réduites. Vint ensuite l'emballage composite carton-plastique avec le conditionnement en barquettes sous film rétractable ou étirable. En matière de palettisation, le feuillard plastique plus léger a détrôné le feuillard métal pour l'opération de cerclage. L'utilisation de la housse rétractable s'est aussi généralisée. Depuis quelque temps, on assiste à un certain développement du film étirable dans ce même domaine.

Au niveau national, il convient également de prendre en compte les disponibilités en matières premières. La France doit importer la majeure partie des fournitures pour le secteur de l'emballage, alors qu'elle dispose de ressources pour ce qui est du papier et de l'aluminium, ce qui devrait conduire à privilégier ces matériaux. Cette idée est toutefois un peu utopique dans la mesure où la mise en œuvre de l'aluminium utilise beaucoup d'énergie, cependant que notre pâte à papier est inapte à la fabrication d'emballages-carton de bonne tenue. C'est ainsi que l'élaboration des complexes à base de carton utilise des produits importés des pays scandinaves. Mais le recyclage de ces produits, déjà entré dans les mœurs, permet d'éviter une trop forte hémorragie de devises.

On retrouve le papier recyclé dans les journaux, les sacs grande contenance, les emballages de regroupement ou d'expédition en carton plat et en carton ondulé, etc. Nous reviendrons ultérieurement sur le problème important du recyclage des matériaux.

Les matériaux d'emballage

Tous les matériaux sont utilisés dans le domaine de l'emballage. Ils peuvent l'être seuls ou en association sous forme d'emballage composite ou complexe.

Le verre

C'est certainement le plus ancien des matériaux utilisés dans l'emballage, notamment pour le transport et la manutention des liquides. On lui attribue de nombreuses qualités qui expliquent son développement prodigieux. Parmi celles-ci, citons celles qui nous semblent les plus importantes :

— le verre peut être considéré comme chimiquement inerte lors de son utilisation avec les produits alimentaires ;

— le verre est hygiénique ; il se lave remarquablement bien ;

— le verre est imperméable ; les gaz, la vapeur, les liquides et les odeurs ne le traversent pas ;

— le verre n'a pas d'odeur et ne retient pas les odeurs, ce qui est extrêmement important pour les produits alimentaires ;

— le verre est rigide ; il conserve donc sa forme d'origine ;

— le verre est transparent ; il permet de voir les produits contenus et de contrôler leur pureté ;

— le verre résiste aux chocs thermiques nécessaires dans les opérations de stérilisation ; il est stable vis-à-vis de la température ;

— le verre a une résistance mécanique élevée qui lui permet de résister aux chocs dus au passage sur les chaînes d'embouteillage à haut rendement ; il permet un encaissage et un décaissage mécaniques ; il permet de résister à de fortes pressions internes ;

— le verre peut être obtenu dans les formes les plus diverses, en production de très grandes séries, et peut être travaillé à des cotes très précises ;

— le verre peut être obtenu dans des colorations très variées ; si cela est nécessaire, le choix d'une couleur convenable assure la protection contre les radiations nuisibles ;

— le verre a un prix de revient relativement bas ;

— le verre peut être allégé dans des proportions très importantes, et son comportement amélioré par des traitements de surface ;

— le verre est un matériau connu depuis longtemps ; les problèmes comme le bouchage, l'étiquetage, la décoration sont bien résolus.

Composé à 70 % de silice, le verre comporte en quantités moindres d'autres éléments tels qu'oxyde de sodium, chaux, magnésie et alumine. Suivant les propriétés recherchées, on adjoindra à ces composants de base certains oxydes métalliques tels qu'oxydes de fer, de chrome ou de nickel responsables de la couleur finale. On distingue les verres blancs, mi-blancs, champagne clair et champagne foncé, feuille morte, jaunes ou ambre.

Réputé chimiquement inattaquable, sauf par l'acide fluorhydrique, le verre subit toutefois des modifications de surface au contact des produits qu'il contient. Elles sont de faible importance, et des traitements de surface permettent, en cas de besoin, de les réduire davantage encore. De ce fait, on peut considérer, à bon droit, que la réputation d'innocuité dont jouit le verre est parfaitement vérifiée, notamment en ce qui concerne les produits alimentaires.

Quant à la coloration du verre, si elle s'explique par certaines traditions (la bouteille de champagne est verte ; la bouteille d'eau minérale est blanche, etc.), elle trouve aussi sa raison d'être dans les propriétés barrières qu'elle confère au matériau, notamment vis-à-vis des rayonnements lumineux. Ces propriétés sont particulièrement appréciées pour le conditionnement de la bière, de l'huile et de certaines conserves alimentaires. La courbe de la *figure* 2, qui donne le taux de transmission de différents verres de même épaisseur suivant la longueur d'onde des radiations, montre que les verres blancs ou mi-

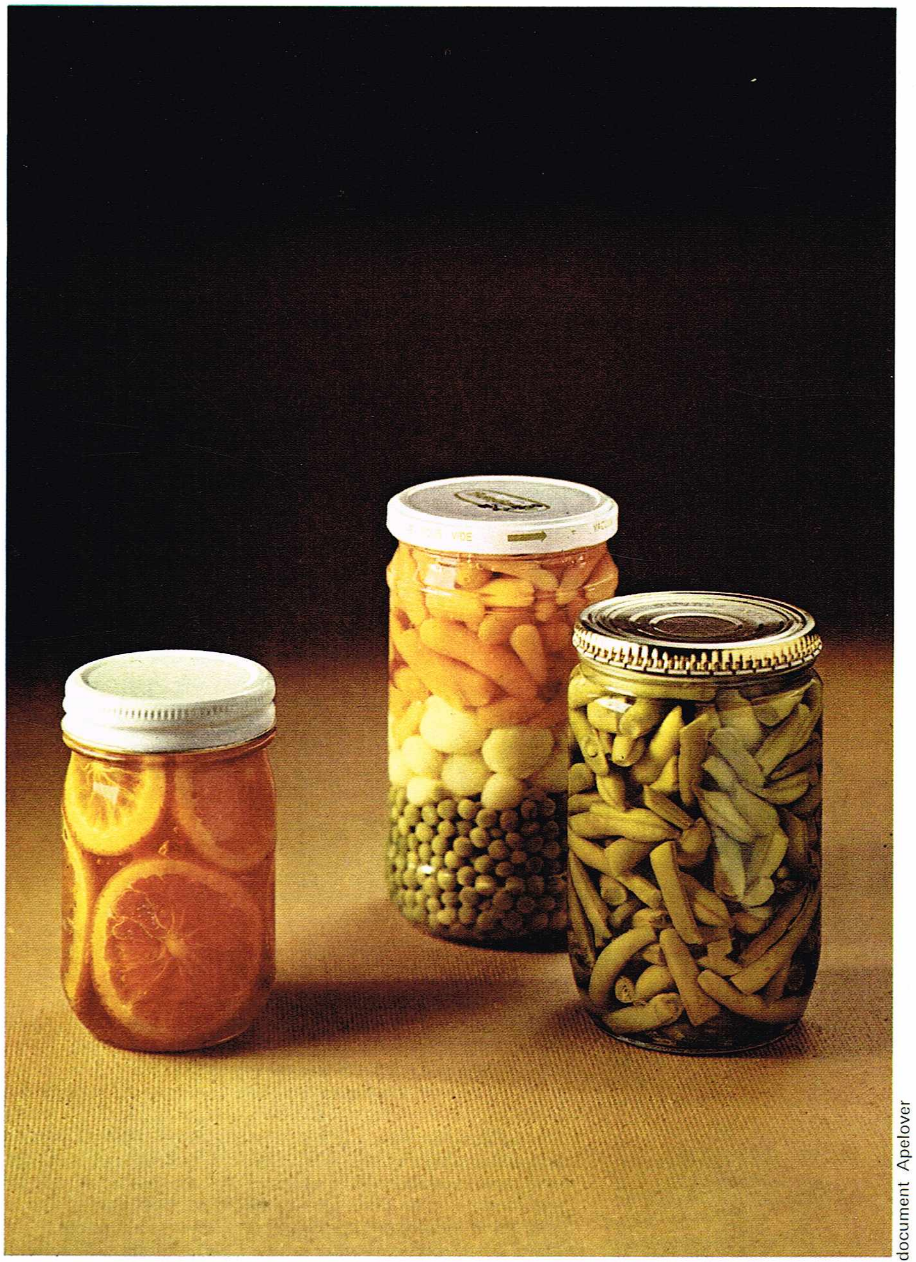

document Apelover

▲ *Le verre regagne des points dans la conserve alimentaire.*

▼ *Figure 2 : courbes de transmission de la lumière de différents verres, épaisseur 2 mm (d'après P. A. Caron,* **Nouvelle Encyclopédie internationale du conditionnement des liquides,** *C.F.E., Paris).*

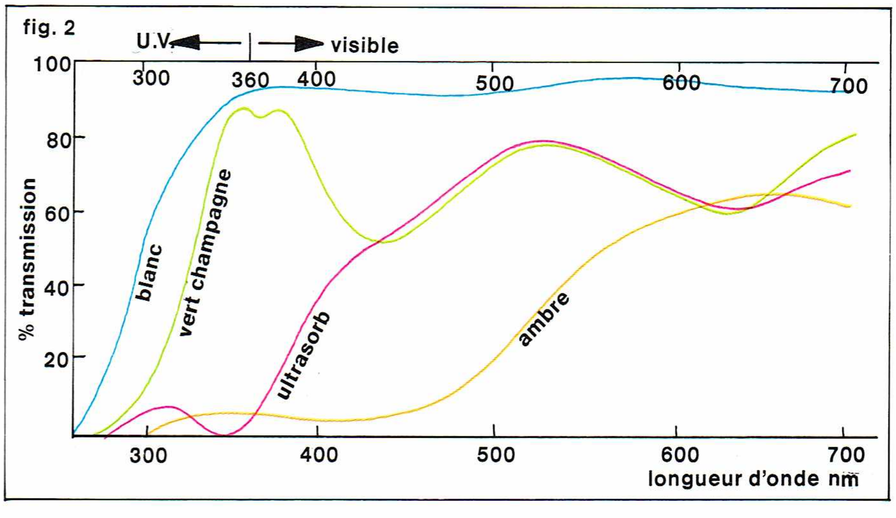

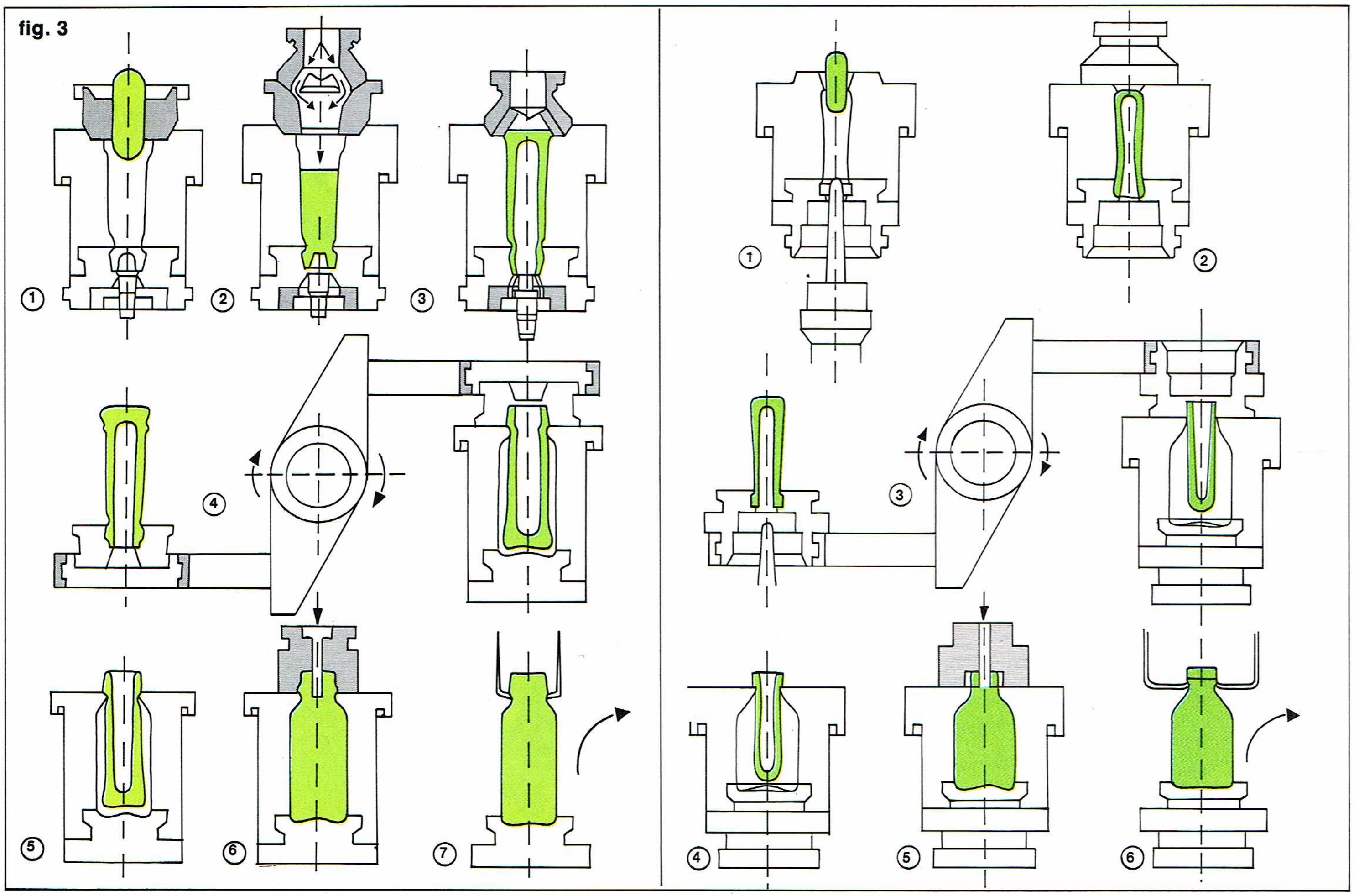

▲ *Figure 3 ; principes de fabrication des bouteilles : à gauche, technique « soufflé - soufflé » ; 1) alimentation ; 2) compression par soufflage de la masse pâteuse ; 3) soufflage de l'ébauche ; 4) transfert du moule ébaucheur au moule finisseur ; 5) réchauffage ; 6) soufflage final ; 7) extraction. A droite : technique « pressé - soufflé » ; 1) alimentation ; 2) pressage de la masse pâteuse par piston en forme de doigt ; 3) transfert du moule ébaucheur au moule finisseur ; 4) réchauffage ; 5) soufflage final ; 6) extraction.*

blancs ont une transmission non négligeable dans l'ultraviolet, zone de longueurs d'onde où les rayonnements sont, en général, les plus nuisibles.

Pour certains produits sensibles également aux rayonnements du visible, on choisira de préférence un verre de couleur vert foncé (type ultrasorb) ou ambre. Toutefois, nous signalerons que l'absorption par un milieu de radiations lumineuses engendre de la chaleur, ce qui peut dans certains cas poser des problèmes. Nous avons ainsi pu constater une élévation de température de 20 à 29 °C du produit contenu dans une bouteille blanche. Cette élévation de température était de 20 à 40 °C avec une bouteille ambre.

Principe de la fabrication des bouteilles, flacons et pots en verre

Les matières premières contrôlées et dosées sont intimement mélangées entre elles avant de subir la fusion dans un four alimenté en continu dont la température dépasse 1 500 °C. L'évacuation du verre fondu se fait, par quantités unitaires délivrées aux moules de fabrication, par des canaux appelés feeders.

Cette opération comporte deux phases :

— réalisation du col du récipient par soufflage ou injection de la paraison dans un moule ébaucheur ;

— soufflage de l'ébauche précédente dans un second moule.

Suivant la technique utilisée dans le moule ébaucheur, on obtient un récipient réalisé en « soufflé-soufflé » ou en « pressé-soufflé » (*fig.* 3).

L'intérêt de cette dernière technique réside dans la précision plus grande des dimensions intérieures du récipient fabriqué. Le prix de revient n'est toutefois pas le même. Cet aspect de la question est important si l'on pense aux difficultés afférentes au bouchage lorsque l'on utilise des opercules ou des bouchons qui prennent appui sur les parois intérieures du récipient.

La bouteille, sortie de la machine à 500 °C environ, est recuite afin d'éliminer les tensions internes du verre qui apparaissent au cours de son passage dans les moules et de son refroidissement brutal en quelques dizaines de secondes. Un contrôle statistique termine les opérations de fabrication.

Rappelons que les récipients en verre sont des récipients-mesures, ce qui signifie que, dans des conditions standards, ils contiennent une quantité de produit définie à l'avance : 25 cl, 50 cl, 65 cl, 1 litre, etc.

Les verreries livrent les emballages verre aux industriels sous forme de charges palettisées généralement regroupées sous housses rétractables.

La maîtrise des conditions de fabrication des emballages en verre a permis par ailleurs aux verriers de mettre sur le marché des contenants très allégés capables de concurrencer très fortement les autres matériaux, qu'il s'agisse des métaux, des cartons ou des plastiques. Il est évident que cette génération de produits plus légers n'a plus les mêmes caractéristiques de résistance et qu'il ne saurait être question d'envisager leur réemploi en tant qu'emballages industriels.

Des traitements de surface du verre peuvent se révéler nécessaires : amélioration du coefficient de glissement, ce qui diminue les risques de rayures dus au contact du récipient avec les chaînes de transporteurs ou des récipients entre eux, augmentation de la dureté superficielle du verre par traitements chimiques ou physiques.

Le fer-blanc

Mince tôle d'acier doux dont les deux faces sont couvertes d'une pellicule d'étain, le fer-blanc est un produit robuste, résistant, facile à travailler ou à assembler, facile à produire en grande quantité et, par suite, un produit bon marché. L'étain intervient comme protecteur contre la corrosion de l'acier doux trop sensible aux nombreux composés organiques d'origine animale ou végétale. Légèrement entamé, l'étain ne donne que des composés inoffensifs pour l'organisme ; toutefois, c'est un métal cher. Aussi lui cherche-t-on des remplaçants : chrome, aluminium, émail.

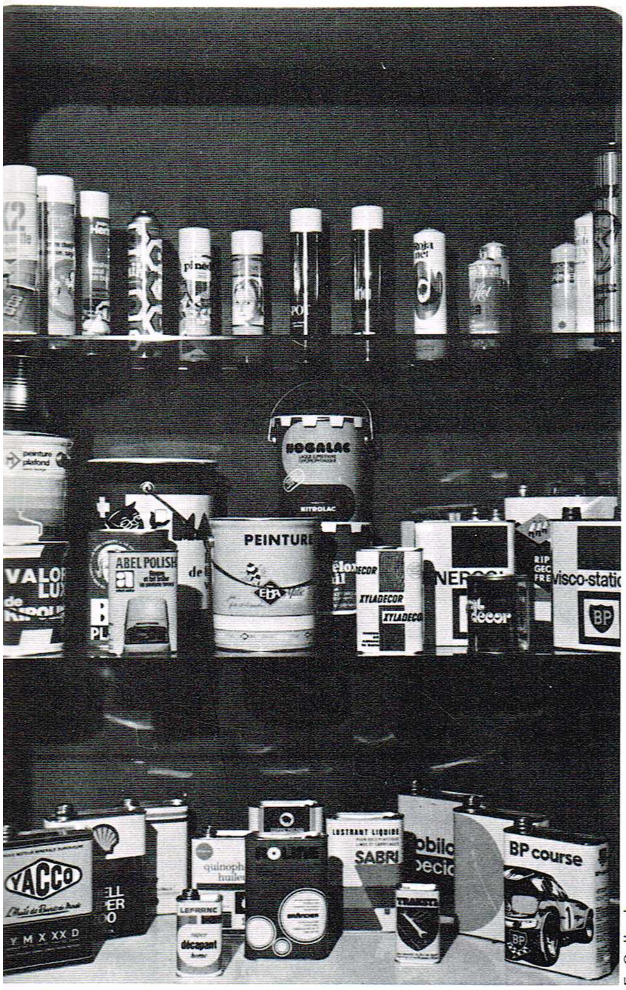
F. Collard

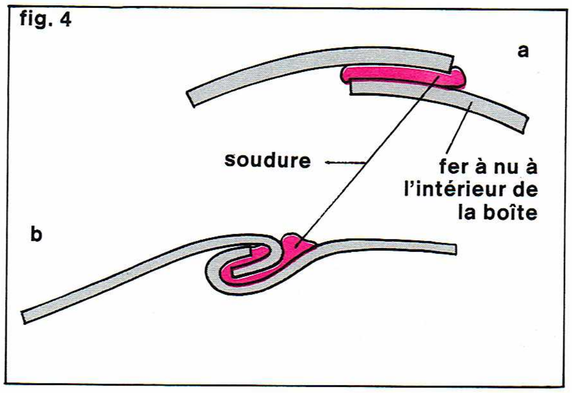

◀ *Le fer-blanc est un excellent matériau d'emballage. Recyclable, il permet en outre de riches décorations. Toutes les formes sont possibles.*
Figure 4 : soudure du fer-blanc :
a) corps soudé à plat ;
b) corps agrafé contre-soudé.

Le dépôt métallique se fait soit en plongeant les plaques d'acier dans de l'étain liquide, soit par électrolyse. Les récipients métalliques comprennent tous un corps, un fond et une fermeture, le corps et le fond pouvant, dans certains cas, être fabriqués simultanément et sans discontinuité (boîtes fabriquées par emboutissage, filage par choc). Les emballages métalliques se distinguent par leur technique de fabrication, leur forme géométrique et leur fermeture.

Pour ce qui est de la fabrication, on peut procéder par emboutissage, technique d'usage courant pour les boîtes à cigares, les boîtes pour produits pharmaceutiques, pour bonbons, ainsi que les « bombes » pour aérosols ou les cartouches et bidons pour gaz liquides. Le filage par choc permet d'obtenir les tubes pour comprimés ou pour poudres de pharmacie, mais également les corps d'aérosols.

En ce qui concerne les emballages trois-pièces, le corps est obtenu par enroulement en tube d'un flan de fer-blanc, la jonction entre les lèvres se faisant par agrafage (avec ou sans joint suivant l'étanchéité désirée), soudure à plat (à l'étain ou électriquement), agrafage et contre-soudure, collage où l'on remplace la soudure par une matière thermocollante très résistante. Cette dernière méthode permet d'utiliser de l'acier sans étain ou avec un métal de remplacement, à condition toutefois de vernir le récipient correctement (*fig.* 4).

Notons encore que certains emballages sont des composites dont le fer-blanc n'est que l'un des composants. C'est ainsi que certains liquides ou certains produits pâteux sont conditionnés dans des emballages dont le corps est en carton seul ou revêtu d'aluminium ou de plastique, le fond et la fermeture étant en fer-blanc. Il peut en être de même avec un emballage dont le corps est en plastique rigide.

Toutes les formes sont possibles et existent sur le marché : rectangulaires, ovales, rondes, trapézoïdes. Le couvercle peut être coiffant ou rentrant. Il peut faire appel à la technique dite de l'ouverture facile, que celle-ci soit partielle (boîtes de bière) ou totale (conserves de pâté, lubrifiants auto, etc.).

Le fer-blanc peut être verni intérieurement ou extérieurement, opérations qui ont lieu soit sur la feuille avant mise en œuvre, soit sur l'emballage ou la partie d'emballage réalisés.

Le fer-blanc se prête très bien aux traitements thermiques : appertisation, pasteurisation, stérilisation.

L'aluminium

Métal issu industriellement de la bauxite, l'aluminium et ses alliages utilisés dans le domaine de l'emballage résistent parfaitement aux atmosphères traditionnelles grâce à la protection que leur assure la fine couche d'alumine qui les recouvre. Insensible aux produits neutres, faiblement acides ou faiblement basiques, ce qui est le cas des produits alimentaires ou de consommation courante, il faut en revanche protéger le métal contre les solutions fortement conductrices qui créeraient une corrosion électrolytique. Cela peut se faire soit par anodisation, ce qui a pour effet d'augmenter l'épaisseur de la couche d'alumine, soit par dépôt d'un vernis du type époxy.

L'aluminium ne donne aucun goût aux aliments, et ses sels ne sont ni toxiques, ni colorés. En outre, comme le fer-blanc, l'aluminium est particulièrement bien adapté aux traitements thermiques de l'industrie alimentaire.

Ce métal est utilisé, dans le domaine qui nous concerne, soit en feuilles minces, soit en tubes, soit en boîtes et boîtiers aérosols, soit en chaudronnerie pour la construction de containers, citernes et fûts.

La feuille mince, grâce à son prix, a peu à peu pris la place des feuilles d'étain. Ses principales utilisations sont les suivantes, en fonction de l'épaisseur :

— 0,009 mm (9 millièmes) : nu, gaufré, double ou contre-collé pour l'emballage du chocolat, de la confiserie, de la biscuiterie, du beurre, de la margarine ou pour la confection de sachets pour potages, desserts, pour la fabrication d'étiquettes, etc. ;

— 0,012 mm (12 millièmes) : pour l'emballage des fromages fondus (après laquage 2 faces) ;

— 0,025 à 0,030 mm (25 à 30 millièmes) : pour les capsules de surbouchage ;

— 0,050 à 0,100 mm (50 millièmes à 10 centièmes) : pour les capsules de bouteilles de lait ou de pots de yaourt ;

— 0,100 à 0,150 mm (10 à 15 centièmes) : pour les capsules déchirables ;

— 0,200 mm (20 centièmes) : pour les capsules destinées aux liquides sous pression ou pour les capsules large ouverture.

En emballage, la feuille mince d'aluminium est souvent liée à d'autres matériaux. Les complexes sont obtenus par collage, calandrage ou extrusion, ce qui permet, pour une faible épaisseur globale, d'obtenir un ensemble plus performant. Les tubes souples sont réalisés par filage et recuisson leur donnant leur souplesse. Quant aux boîtes en aluminium, on utilise les techniques d'emboutissage ou de filage par choc déjà mentionnées au paragraphe précédent pour le fer-blanc. Un recuit suit toujours ces opérations. Le bord de la boîte sera ensuite tombé pour en permettre le sertissage ultérieur. Cette technique, légèrement aménagée, permet la fabrication des boîtiers aérosols monoblocs, mais, au lieu de tomber le bord, on rétreint le haut du tube par passage dans un

Sicopal

▶ *Quelques possibilités du plastique en matière d'emballages primaires.*

fig. 5

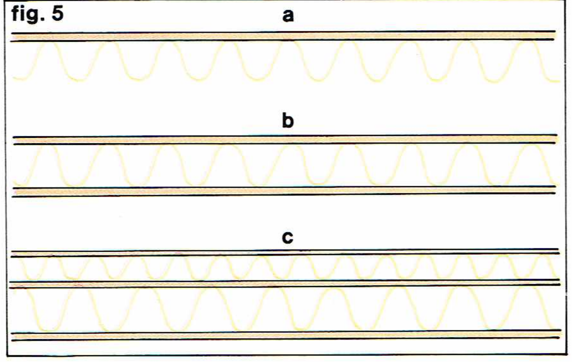

▶ *Figure 5 ; diverses qualités du carton ondulé : a, simple face (1 couverture + 1 cannelure) ; b, double face (2 couvertures + 1 cannelure) ; c, double double (2 couvertures + 2 cannelures + 1 feuille médiane).*

très grand nombre de matrices de manière à amener l'ouverture au diamètre voulu. Pour les boîtiers deux pièces, on travaille par filage en sens inverse avec une matrice généralement tronconique. Après avoir coupé le tube à la longueur désirée, on tombe le bord afin de permettre le sertissage ultérieur.

Signalons l'existence, dans ce secteur de la boîte-métal, de techniques modernes utilisant le laser pour les soudures et les découpes, techniques promises à un brillant avenir.

Les papiers et cartons

Ils interviennent dans l'emballage à la fois comme supports d'emballage (blister-packs, skin-packs) et comme suremballages. Leur première caractéristique est leur perméabilité importante qui explique d'ailleurs leur imprimabilité. Les cartons sont d'excellents supports de matériaux-barrières et présentent en outre les avantages suivants : prix relativement faible, légèreté, destruction aisée, opacité aux rayonnements, et notamment aux ultraviolets. En outre, ils sont par essence recyclables.

Les diverses qualités de carton existant sur le marché sont obtenues par le collage d'un certain nombre de qualités de papiers. Dans l'industrie de la caisse-carton, il est fait usage soit de carton ondulé, soit de carton compact. Le premier se compose de deux feuilles extérieures ou couvertures accolées à une couche intermédiaire ondulée ; dans le cas du carton compact, la couche intermédiaire est compacte (*fig.* 5).

Ce sont les papiers de couverture qui confèrent à l'ensemble les qualités recherchées, d'où l'importance de la résistance à l'éclatement, de la résistance au déchirage, de l'épaisseur du papier et de l'aspect de la surface devant favoriser d'un côté le collage avec les couches voisines.

En tant qu'emballage primaire, c'est-à-dire emballage contenant le produit, le carton doit posséder des propriétés particulières que l'on obtient par imprégnation (carton plongé dans un bain contenant le liquide d'imprégnation), ou par enduction (application d'une couche de plastique sur le support papier). Ces propriétés dépendent, bien entendu, du produit au contact.

Les plastiques

Matériaux apparus sur le marché ces dernières années, les plastiques ont pris la place des matériaux traditionnels pour le conditionnement de certains produits. Plus légers, ils ne demandent pas de technologie compliquée pour leur mise en œuvre. Ils résistent souvent mieux aux agents chimiques et atmosphériques. C'est à ces caractéristiques que l'on doit le développement de la bouteille plastique pour les eaux minérales, du casier plastique remplaçant le casier de bois, des housses plastiques pour la confection des unités de transport.

Les plastiques les plus utilisés sont les polyéthylènes basse et haute densité (pour les bouteilles de lait, les casiers plastiques, les bouchons thermoformés), le chlorure de polyvinyle PVC tant décrié ces dernières années (pour les bouteilles destinées aux eaux minérales, au vin, etc.), le polystyrène (bacs plastiques, pots de yaourt, etc.), le polypropylène (petit flaconnage, bouchages, pots divers).

Des matériaux nouveaux sont apparus récemment sur le marché dans le domaine des boissons gazeuses pour lesquelles aucune solution totalement satisfaisante n'a été trouvée à ce jour. Aucun plastique n'étant absolument étanche aux gaz, la notion de solution optimale d'emballage prend toute sa valeur, car il faut, plus que pour n'importe quel autre matériau, prendre en considération le délai normal de consommation du produit, au bout duquel on peut estimer que celui-ci aura été absorbé. On comprend aisément qu'une bouteille en polyéthylène basse densité, type bouteille de lait, ne puisse convenir pour un produit dont le délai de consommation peut atteindre plusieurs mois. L'emballage optimal permettra

◀ *Des poignées en plastique permettent le regroupement des emballages sous forme d'unités de vente aisément transportables par la ménagère (brevet Agrip'Cols, Dayné et Gaston).*

document Dayné et Gaston

donc, outre le transport et la manutention du produit, sa conservation pendant le temps juste nécessaire à sa commercialisation et à sa consommation. Il est à remarquer qu'avec les matériaux plastiques, on ne garantit plus la conservation absolue du produit mais sa conservation relative : les modifications pouvant intervenir au cours d'un laps de temps déterminé demeureront quantitativement en deçà d'une certaine limite fixée à l'avance : perte de poids, perte de gaz, pénétration d'oxygène, etc. La valeur marchande du produit a aussi son importance dans le choix du matériau. Un produit cher laissera plus de latitude dans ce choix qu'un produit bon marché.

Mise en œuvre des plastiques

Ces matériaux, comme leur nom l'indique, sont plastiques, c'est-à-dire malléables, modelables dans certaines conditions, de température notamment. C'est ainsi que la technologie de fabrication des emballages en matière plastique commencera toujours par une phase de chauffage du matériau visant à le ramollir.

L'opération essentielle de la technologie des plastiques est l'*extrusion*, qui consiste à réchauffer progressivement la matière de départ, qui est alors sous forme de granulés, dans un canal comportant une vis sans fin dont le pas se réduit progressivement. Le matériau ainsi malaxé devient pâteux et sort de l'extrudeuse par une filière dont la forme dépend de l'utilisation ultérieure : plate, elle donne naissance suivant l'épaisseur retenue à des plaques ou à des films ; annulaire, elle libère une gaine qui pourra être pincée et gonflée dans le dessein de gonfler le film de façon bidimensionnelle ou sera reprise sous la forme de paraison dans une machine réalisant la fabrication de corps creux par soufflage.

Si l'on étire le film avant refroidissement, on aura un film rétractable qui reviendra à ses dimensions normales si on le chauffe légèrement. La rétraction peut être de 20 à 50 %. Que la tête de boudineuse délivre la « paraison » dans un moule, et l'on obtient un matériel d'*extrusion-soufflage* couramment utilisé dans l'industrie.

Certains objets sont fabriqués par *injection*, l'extrudeuse étant alors remplacée par un corps chauffant. Un piston d'injection délivre à chaque course une quantité définie de matière pâteuse dans le moule. Après refroidissement, la pièce injectée est libérée. Alors que l'extrusion est une opération continue, l'injection est par essence discontinue.

Il est possible d'allier la technique de soufflage à la technique d'injection, ce qui permet d'obtenir des corps creux dont les tolérances de fabrication, notamment au niveau de la bague, sont beaucoup plus précises que par extrusion-soufflage.

De nombreux emballages sont obtenus également à partir de feuilles prédécoupées ou de rouleaux de plastique par la technique du *thermoformage*. Après chauffage du matériau, celui-ci est formé par un « poinçon » contre une matrice qui lui donne sa forme extérieure. Une technique voisine consiste, après chauffage, à aspirer la feuille pour l'amener au contact de la matrice. Avec cette technique, on peut travailler en continu.

Pour terminer ce chapitre sur les plastiques, mentionnons encore une technique surtout utilisée pour les emballages de grand volume : le *rotomoulage* (*fig.* 6). Il consiste à faire couler la résine plastique, préalablement fluidifiée, à l'intérieur d'un moule creux tournant autour de deux axes.

fig. 6

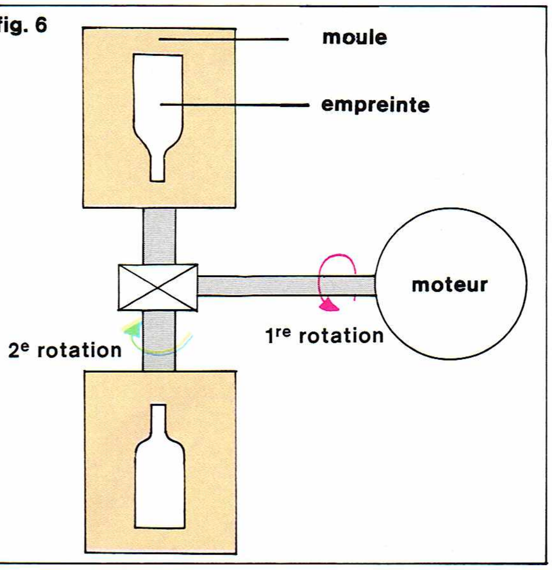

◀ *Figure 6 : rotomoulage. Il consiste à faire couler la résine plastique, fluidifiée, à l'intérieur d'un moule creux tournant autour de deux axes.*

▶ *Tableau II : caractéristiques des composants entrant dans les matériaux modernes.*

▼ *Figure 8 : principes du dépôt d'un plastique sur un support plastique :* a) *placage;* b) *coextrusion (exemple avec 3 couches).*

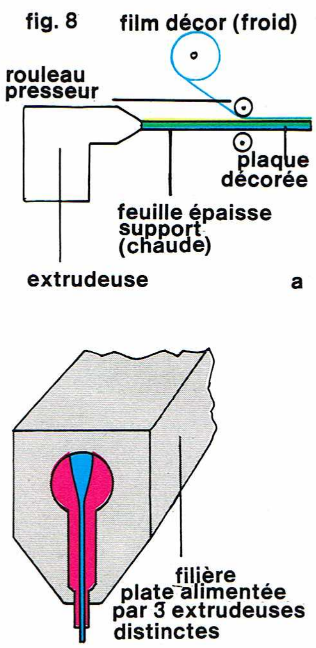

▼ *Figure 7 : principe de dépôt d'un plastique sur un support non plastique; a, enduction; b, contrecollage; c, extrusion-lamination.*

Tableau II

Caractéristiques des composants entrant dans les matériaux modernes

Caractéristiques	Principaux plastiques utilisés dans les complexes							Principaux substrats utilisés dans les complexes			
	PVC	PE	PP	PVD	PTE	PA	Pellic. cellul.	Papier	Carton	Alumin.	Tissu
Résistance mécanique		+	++	+	++	++		+	++	++	++
Imperméabilité aux gaz	++			++	+	+				++	
Perméabilité aux gaz		+	+					++	+		++
Imperméabilité vapeur d'eau		++	++	++			+			++	
Perméabilité vapeur d'eau	+				+	+	++	++	+		
Transparence	++	+	++	+	++	+	++				
Opacité								++	++	++	+
Tenue à froid		+			+	+		+	+	++	+
Tenue à chaud			+		+	+		+	+	++	+
Thermosoudure	+	++	++	++		++					
Collage	+			+			++	++	++		
Imprimabilité	++	++	++	++			++	++	++	++	+

PVC : polychlorure de vinyle - PE : polyéthylène - PP : polypropylène - PVD : Polyvinylidène - PTE : Polytéréphtalate d'éthylène - PA : polyamide.

Les matériaux complexes

Ils ont pris un développement très important ces dernières années du fait des extraordinaires possibilités qu'ils offrent en matière d'emballage. Composites d'un genre particulier, ils cumulent les avantages des matériaux qui les composent sans toutefois prendre en compte leurs défauts. Les principales caractéristiques recherchées sont les suivantes : résistance mécanique, inertie chimique, imperméabilité ou perméabilité, soudure, impression, faible prix de revient. Les complexes sont réalisés soit à partir de plastiques différents associés entre eux, soit à partir de plastiques et d'un substrat : papier, carton, aluminium, tissu, etc.

De nombreux emballages couramment manipulés par les ménagères sont réalisés en matériaux complexes ou utilisent pour leur fermeture un tel matériau. Citons par exemple la boîte-carton de lait pasteurisé réalisée en complexe trois couches *polyéthylène-carton-polyéthylène,* la boîte-carton de lait longue conservation UHT réalisée en complexe cinq couches *polyéthylène-aluminium-polyéthylène-carton-polyéthylène,* le pot de yaourt ou de dessert gélifié dont la fermeture est réalisée en complexe aluminium-polyéthylène. Tous les emballages souples destinés aux plats cuisinés entrent dans cette catégorie, ainsi que les petits sachets distribués dans les avions pour se rafraîchir le visage.

Il importe de bien comprendre qu'entre les composants du complexe il y a liaison effective et pas seulement juxtaposition ou simple contact (dans ce cas, l'emballage est un composite, mais pas un complexe; c'est le cas d'emballages du type bouteille plastishield ou bouteille pelable).

Le *tableau* II, donnant les caractéristiques des éléments les plus courants composant les complexes, permet de mieux comprendre le choix de telle ou telle combinaison en fonction du produit à emballer et de la protection à mettre en œuvre : protection physique, chimique, contre les rayonnements lumineux, etc.

Réalisation des complexes

Le dépôt d'un film plastique sur un support : film plastique de nature différente, papier, carton, feuille mince d'aluminium, tissu, peut se réaliser par plusieurs techniques. On en distingue deux groupes suivant que le support est ou n'est pas un plastique.

Si le support n'est pas un plastique, on pratiquera par contre-collage du film plastique sur le support préalablement étendu d'une couche d'adhésif (polyéthylène sur carton, par exemple), par enduction sur le support (PVC sur du tissu, par exemple), ou par extrusion-lamination (cas du polyéthylène sur papier ou sur aluminium) [*fig.* 7].

Si le support est lui-même un plastique, on procédera par placage d'un film mince pressé à froid sur une feuille extrudée de forte épaisseur encore chaude (cas du dépôt d'un film ABS sur une feuille de PVC ou de polyéthylène), par coextrusion pour deux films plastiques de nature différente s'autocollant à chaud (polyéthylène sur polyamide, par exemple) [*fig.* 8].

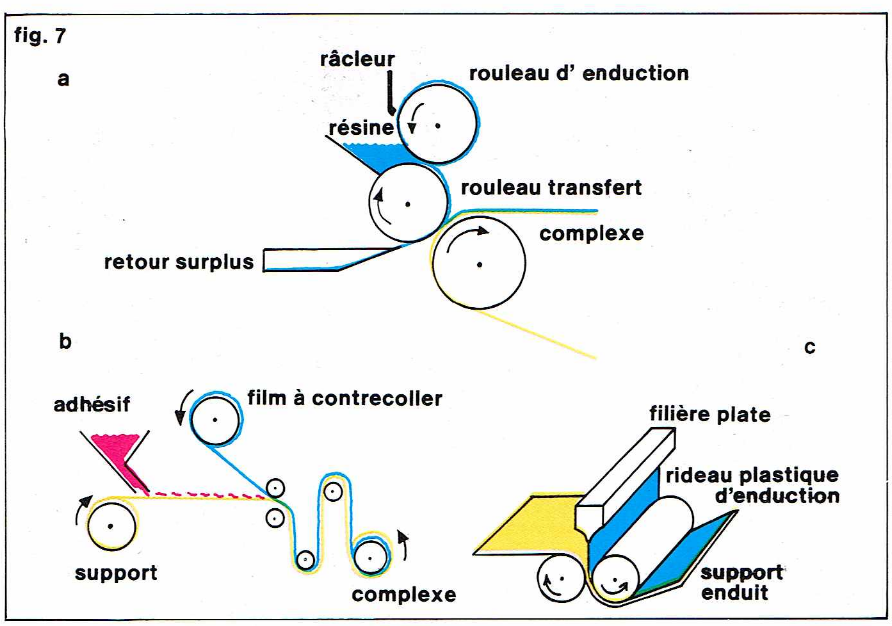

fig. 9

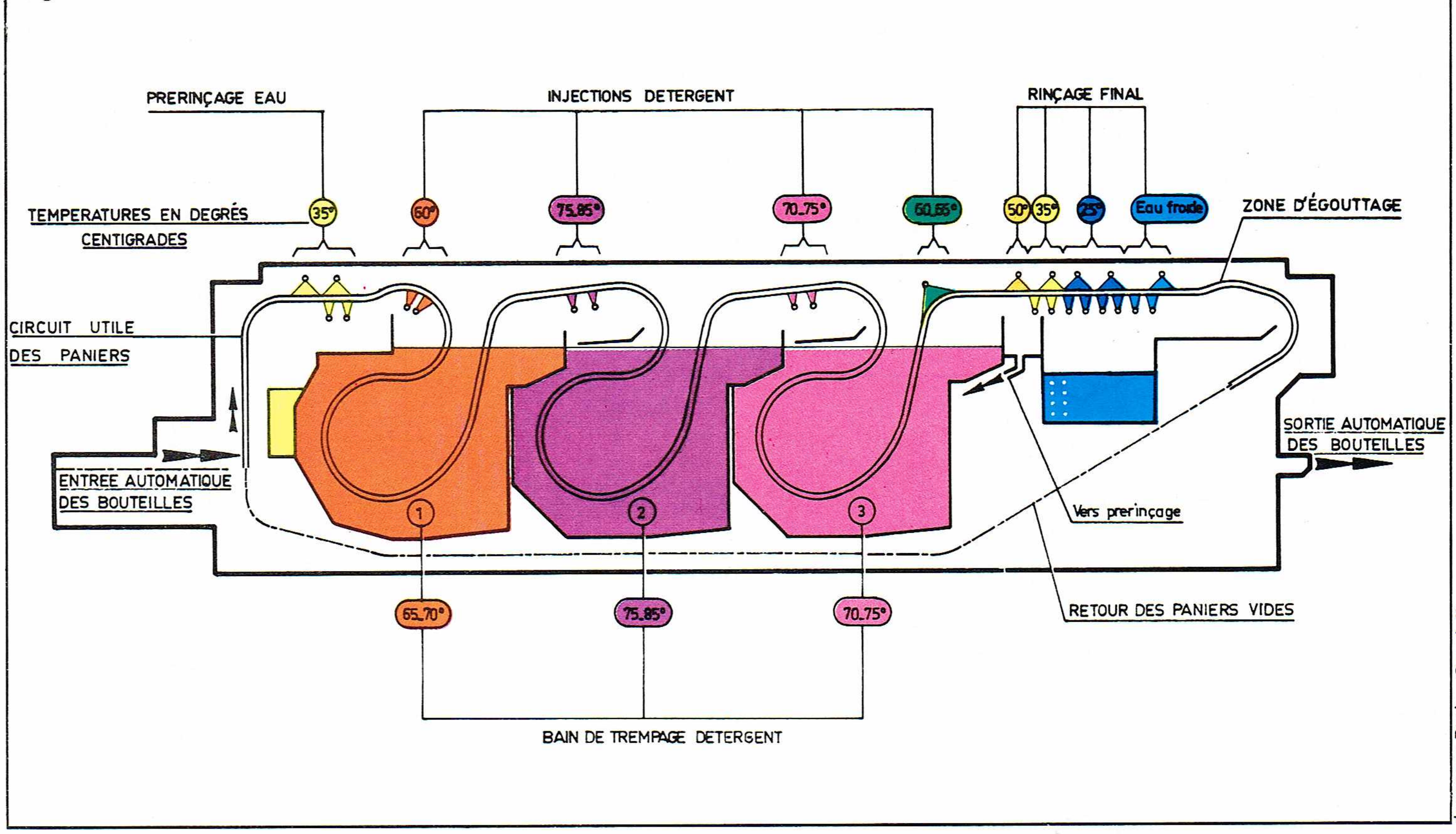

document Baele - Gangloff

▲ ***Figure 9 : schéma de principe du circuit de lavage d'une laveuse à trois bains.***

La mise sous emballage des produits au niveau de l'atelier de conditionnement

Cette opération se fait suivant deux processus différents selon que l'emballage préexiste ou qu'il est réalisé simultanément au conditionnement du produit. Nous allons donc étudier ces deux cas en nous limitant à l'emballage primaire.

Le produit est délivré dans un préemballage

La mise sous emballage du produit comprend trois phases essentielles : la préparation de l'emballage, son remplissage et sa fermeture.

Préparation de l'emballage

Pour des raisons de commodité et de prix de revient, les emballages sont livrés aux industries sous forme de charges palettisées qui en comprennent un nombre important. La tendance est au groupement des contenants par lits superposés sous housse rétractable. Il va donc falloir passer de cette charge unitaire de transport à l'emballage primaire que traiteront les machines de la ligne de conditionnement. On fera appel au matériel dénommé dépalettiseur par couches. La tête de dépalettisation se compose d'un ensemble de ventouses pour la prise des boîtes-métal, d'une série de barres ayant un profil spécial ou de boudins gonflables qui s'insèrent entre les bouteilles et les saisissent par le goulot, ou bien encore d'un jeu de grappins pneumatiques en nombre égal au nombre de bouteilles de la couche. Chaque récipient est alors pris séparément.

Si l'on a affaire à des emballages consignés, ce qui est habituel dans le secteur des boissons, les retours se font en casiers de bois ou de plastique palettisés. Après dépalettisation, c'est-à-dire passage de l'unité palette à l'unité casier, il faut encore franchir une étape : celle du décaissage à la suite duquel l'unité de traitement sera la bouteille. Ces matériels sont semi-automatiques ou automatiques suivant les cadences. Certaines entreprises toutefois ne possèdent pas encore ces types de machines, et le travail se fait à la main. Il faut dire que de tels investissements doivent se justifier.

Avant remplissage, l'emballage doit être traité afin de ne contenir aucune impureté susceptible d'altérer le produit qu'il contiendra, aucun corps indésirable. On pourra ainsi pratiquer le soufflage ou le rinçage du récipient. Dans certains cas, cette dernière opération se fera avec le contenu futur (cas de l'avinage pour les vins). Pour les récipients consignés, on procédera au lavage de ceux-ci dans une machine dénommée laveuse dont nous donnons le schéma de principe à la *figure* 9. Les bouteilles enfermées dans les « paniers » circulent à travers la laveuse, traversent des bains de natures différentes, à températures différentes, subissent des

▼ ***Laveuse « single-end » montrant la table d'accumulation (à l'entrée) des bouteilles.***

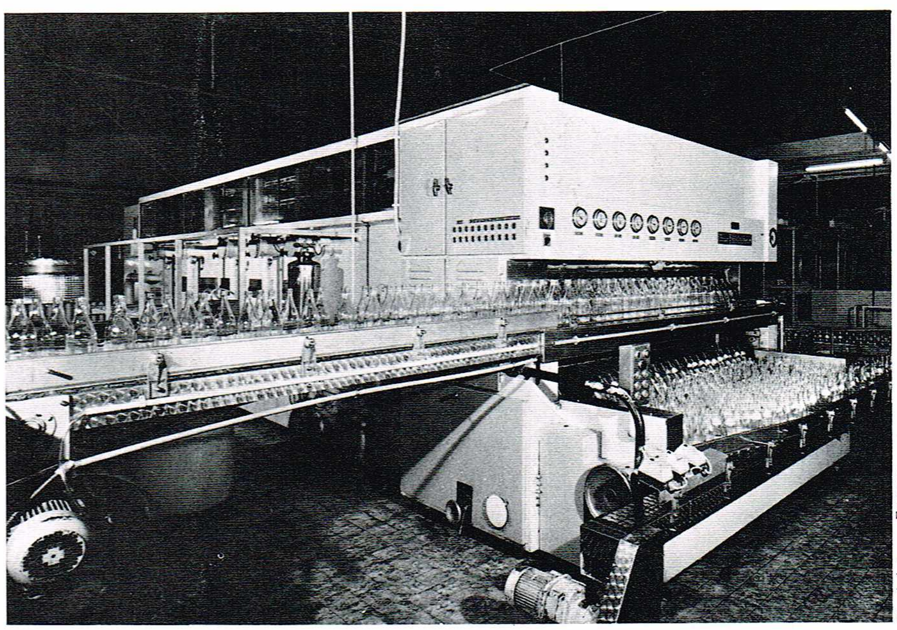

Stork Inter - France

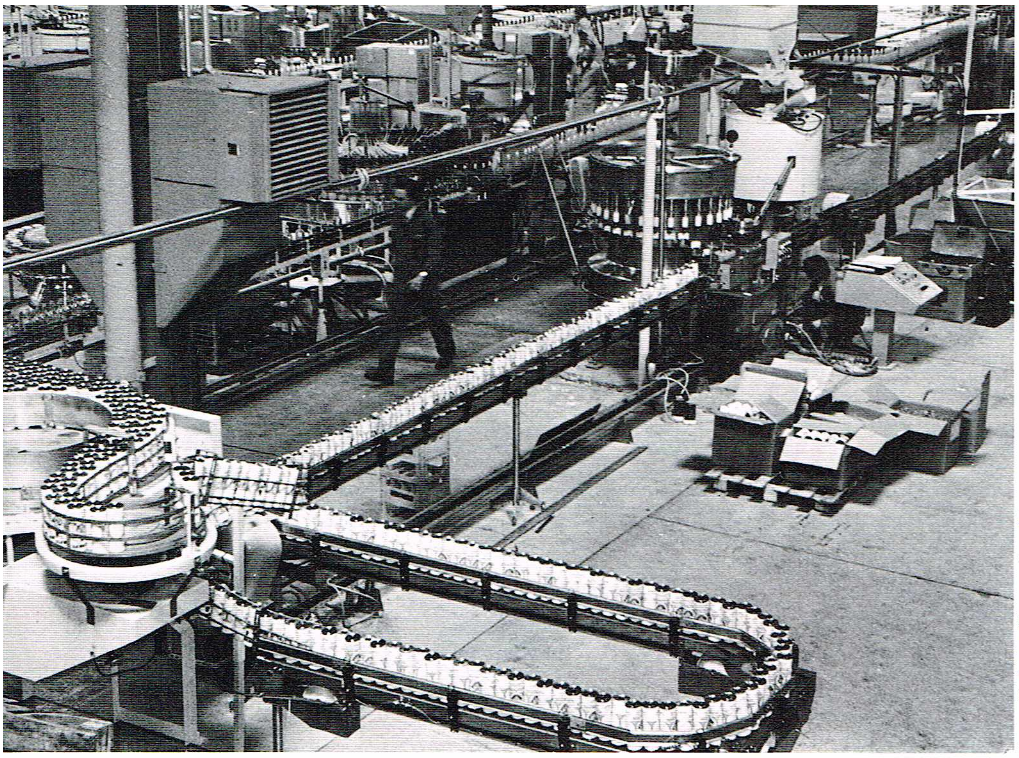

Revue Embouteillage - Conditionnement

▲ *Vue générale d'un atelier de conditionnement de sirops, en boîtes au premier plan, en bouteilles vers l'arrière.*

injections intérieures et des douches ou aspersions extérieures de divers types avant d'être rincées à l'eau claire et de revenir à température ambiante.

Les paramètres essentiels du lavage sont la concentration des bains de détergent (à base de produits sodés), la température des agents de traitement et la durée de chaque stade du traitement. Le diagramme des températures est particulièrement important, car il conditionne à la fois l'efficacité de l'opération et le rendement de celle-ci. Cette remarque est à rapprocher du fait qu'une bouteille résiste difficilement au choc thermique que lui impose le passage d'une température à une autre qui diffère de la première de plus de 35 °C. Quant à la concentration en détergent, on la suit à tout instant de manière à recharger le bain dès que cela se révèle nécessaire. A noter que la qualité du lavage est étroitement dépendante de la dernière eau de rinçage utilisée.

Insistons à ce niveau sur la différence qui existe entre nettoyage et stérilisation. Un récipient, fût-il bien lavé, n'est jamais stérile, car la dernière eau de rinçage contient des micro-organismes, mais, dès l'instant que ceux-ci ne sont ni pathogènes pour l'homme ni gênants pour le devenir du contenu, leur présence n'a aucune importance ; du moins est-ce exact tant que la population microbienne banale n'atteint pas une limite supérieure gênante pour les opérations ultérieures de pasteurisation, stérilisation ou appertisation. Nous reviendrons sur ce point.

On peut être amené, dans certains domaines spécifiques, à rechercher, en plus de la propreté, une certaine asepsie. On utilisera alors des produits désinfectants, bactériostatiques, voire même antiseptiques, qui pourront être ajoutés à la dernière eau de rinçage ou pulvérisés dans le récipient avant la phase de remplissage (produits pharmaceutiques, sérums et solutés injectables notamment).

Avant remplissage, les boîtes de conserve préalablement retournées sont flambées afin de détruire les germes en suspension dans l'air ou au contact du matériau.

Le remplissage du contenant

Tous les produits classiques mis dans des emballages, à l'exception du conditionnement aérosol, sont plus lourds que l'air, ce qui permet à chaque fois d'utiliser comme force active la gravité. Celle-ci étant généralement insuffisante pour assurer des débits industriels, on accélère l'opération de transfert soit en créant une dépression dans le contenant, soit en usant d'une surpression dans le réservoir tampon de la machine.

● Afin de délivrer dans chaque emballage la quantité requise de produit, on mesurera directement ou indirectement la masse délivrée : **par pesée** ou **volumétriquement.** Le principe volumétrique suppose malheureusement de nombreux temps morts, car il existe à chaque cycle de remplissage une phase de prédosage volumétrique. Aussi a-t-on tourné la difficulté en utilisant des récipients tous identiques en volume et en poids. Il suffit alors de les remplir jusqu'à un certain niveau repéré par rapport au fond ou au col du récipient. Les matériels existant sur le marché sont très nombreux, mais ils fonctionnent tous selon l'un des principes précités (*fig.* 10).

Pour les produits secs, on travaille généralement par pondération, la mesure de la masse déversée entraînant au moment adéquat l'arrêt de l'approvisionnement de la tête de remplissage ou obturant celle-ci lorsqu'elle est remplie en permanence. S'il y a plusieurs ingrédients, on passe successivement par autant de têtes de distribution qu'il y a d'ingrédients. Les produits pâteux sont soit traités comme des liquides (on les conditionne à chaud), soit délivrés par méthode volumétrique. Pour les confitures, on utilise la première technique, pour les produits cosmétiques, plutôt la seconde.

● Il est également possible de délivrer une dose volumétrique approximative mais insuffisante, qui sera complétée ensuite pour parvenir au poids ou au volume requis avant sortie de la machine. Dans le **cas des aérosols,** le produit noble est d'abord dosé volumétriquement et introduit dans le boîtier. On injecte ensuite le gaz propulseur sous forte pression, lequel se liquéfie dans l'emballage. Suivant que le gaz propulseur est soluble ou non dans l'agent actif liquide, on a un aérosol à deux ou à trois phases. Les techniques modernes permettent d'automatiser cette opération, les remplissages de gaz propulseur et de produit actif se faisant sous vide. Le récipient muni de sa valve simplement posée est

fig. 10

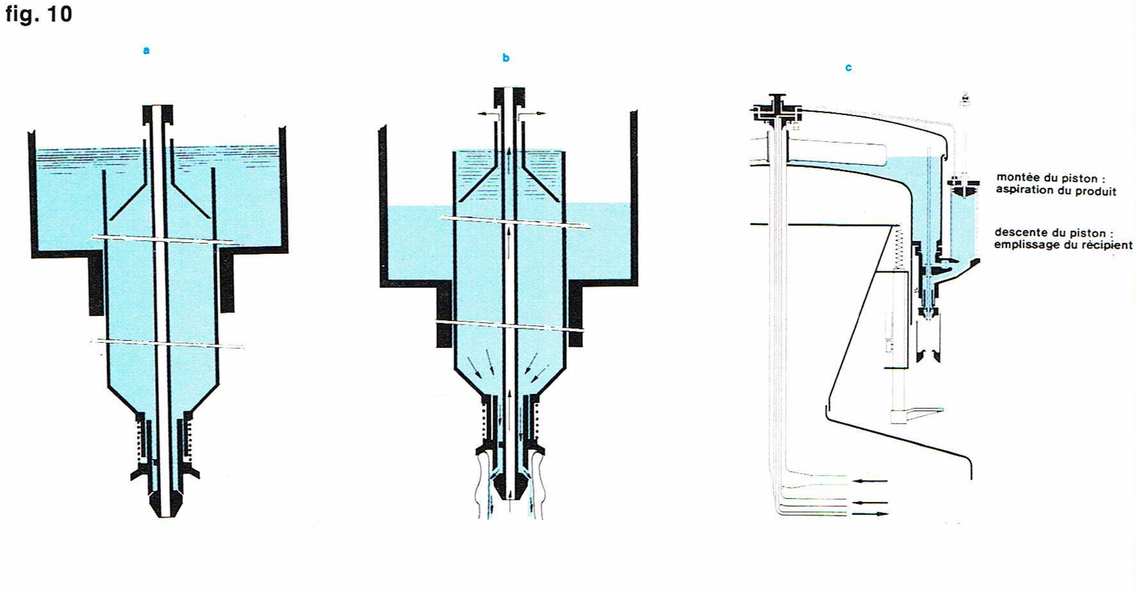

▶ *Figure 10 : techniques de remplissage volumétrique ; a, phase de prédosage (doseur à godets) ; b, phase de remplissage (doseur à godets) ; c, dosage à piston mobile (d'après la revue* **Embouteillage-Conditionnement***).*

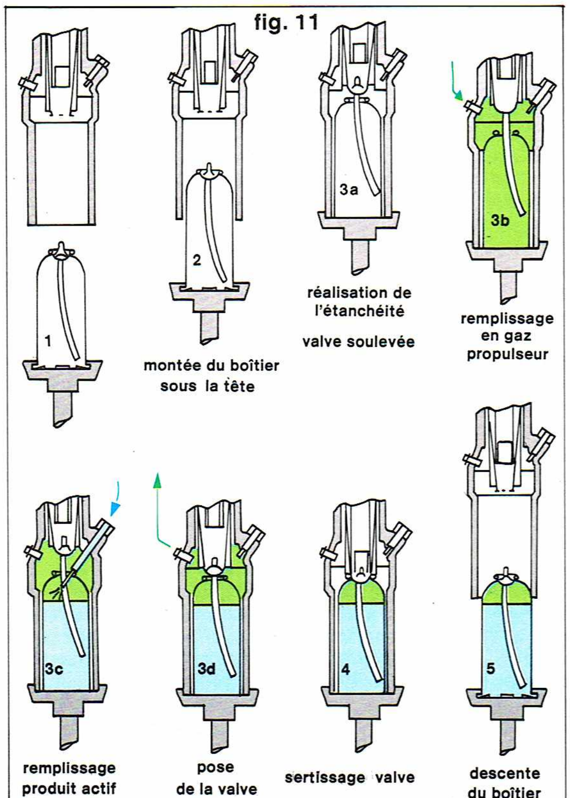

d'après P.A. Caron, Nouvelle Encyclopédie internationale du conditionnement des liquides, C.F.E. Paris).

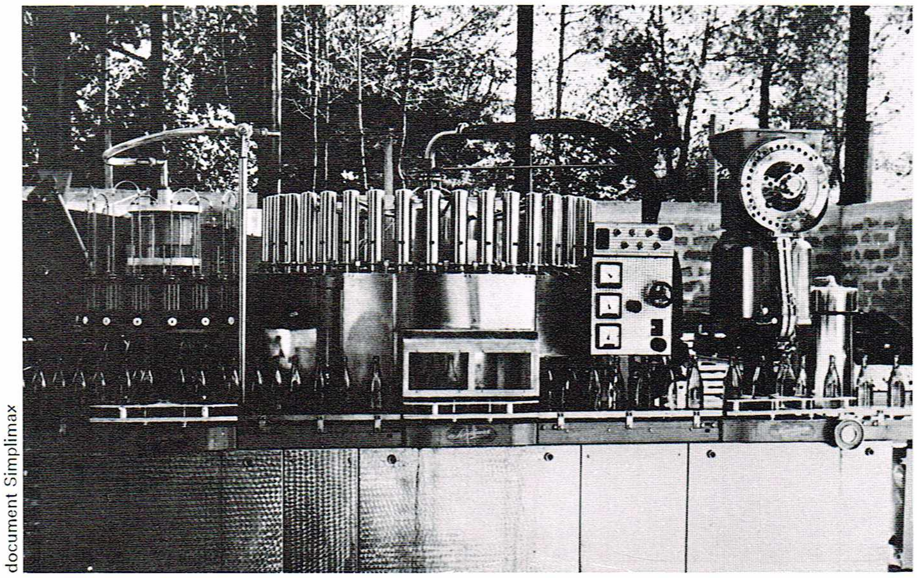

document Simplimax

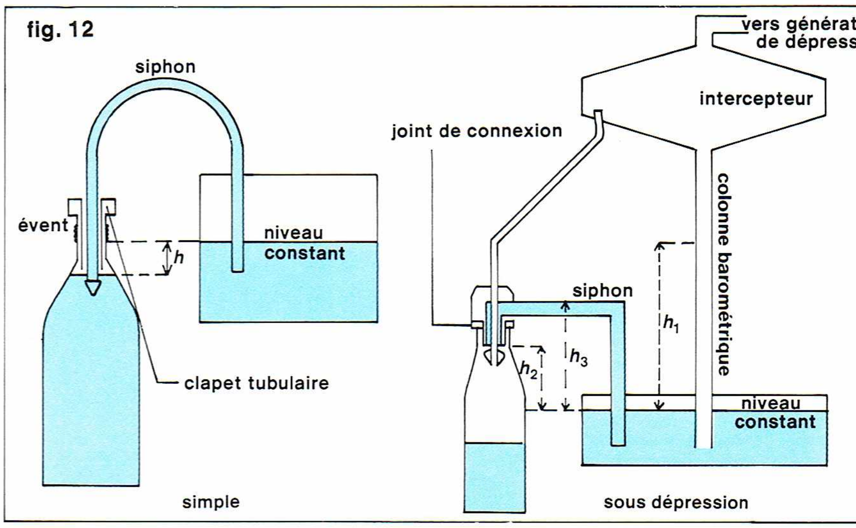

d'après la revue Embouteillage - Conditionnement.

▲ *Figure 11 : principe de remplissage automatique des aérosols.*
En haut, à droite, remplisseuse pour liquide gazéifié, avec prédosage volumétrique (cas des limonades).
Figure 12 : principe du siphonnage.
▼ *Tireuse, destinée aux liquides « plats », fonctionnant sur le principe du vide ou du semi-vide.*

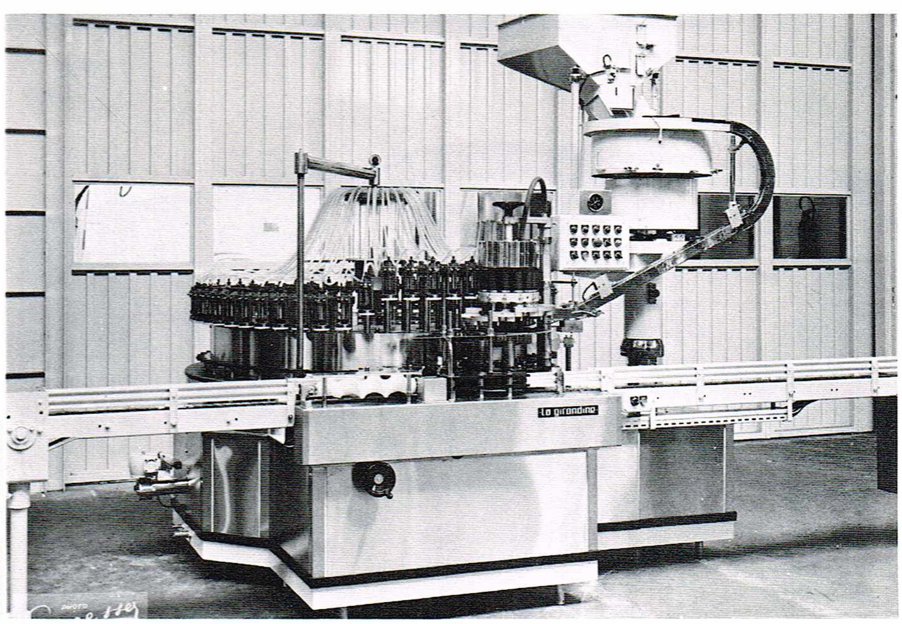

document La Girondine

préalablement purgé d'air. La valve est sertie au terme du processus, ainsi qu'on le voit sur la *figure* 11 .

● Le problème le plus complexe, en matière de remplissage, est posé par le cas des liquides, et tout particulièrement des boissons gazeuses. On fait appel à un matériel approprié dénommé **tireuse** qui se compose d'un réservoir de liquide, alimenté en continu avec régulation de niveau, et d'un certain nombre d'organes intermédiaires entre le réservoir et la bouteille : les becs ou soupapes. Suivant que le liquide est « plat » ou gazeux, la construction du bec n'est pas la même.

Le bec le plus simple est celui qui équipe les emplisseuses par *siphonnage* (*fig.* 12). Ces matériels fonctionnent selon le principe des vases communicants. Les siphons débouchent dans une cuve à niveau constant, sous une pression fixe et à une température donnée. Selon les constructeurs, la bouteille peut monter vers le bec, ce qui assure un vide constant dans le col, ou c'est le bec qui descend vers la bouteille. Ce qui est alors constant, c'est la hauteur de liquide par rapport au fond de la bouteille. En cas de bouteilles de tailles différentes, la plus petite sera donc plus remplie. Mais ces becs présentent de graves inconvénients, car une bouteille en mauvais état (ébréchée, fuyarde) sera remplie. En outre, ces becs « gouttent » ou se désamorcent. Et le réservoir de liquide, important, ne se vide pas commodément.

Une amélioration à cette technique a été apportée avec le *soutirage sous vide*. En effet, le siphon ne s'amorce que sous l'effet de la dépression régnant dans la bouteille, ce qui évite le remplissage des bouteilles ébréchées ou des fuyardes. Au désembectage de la bouteille, le siphon se désamorce, et les becs ne gouttent plus. Le réglage de la hauteur de liquide est facile, et le remplissage précis. Cette technique est dans certains cas la seule utilisable : pour les jus pulpeux, les sirops, les liquides peu fluides. On utilisera alors un vide poussé; pour des liquides fluides au contraire, un léger vide suffira.

● Une autre technique utilise tout simplement la **gravité.** C'est celle qui se rapproche le plus de l'opération que pratique la ménagère lorsqu'elle transvase un produit liquide quelconque d'un contenant de grand volume (fût, jerrican, bidon, etc.), assimilable au réservoir de notre soutireuse, dans une bouteille. L'entonnoir de la ménagère a son correspondant sur la soutireuse : le bec ou soupape de remplissage. Ce bec est directement en

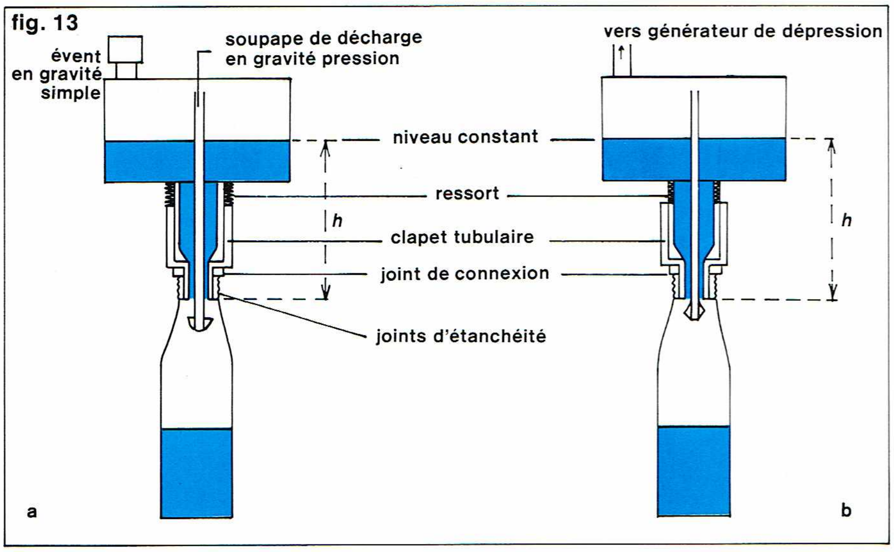

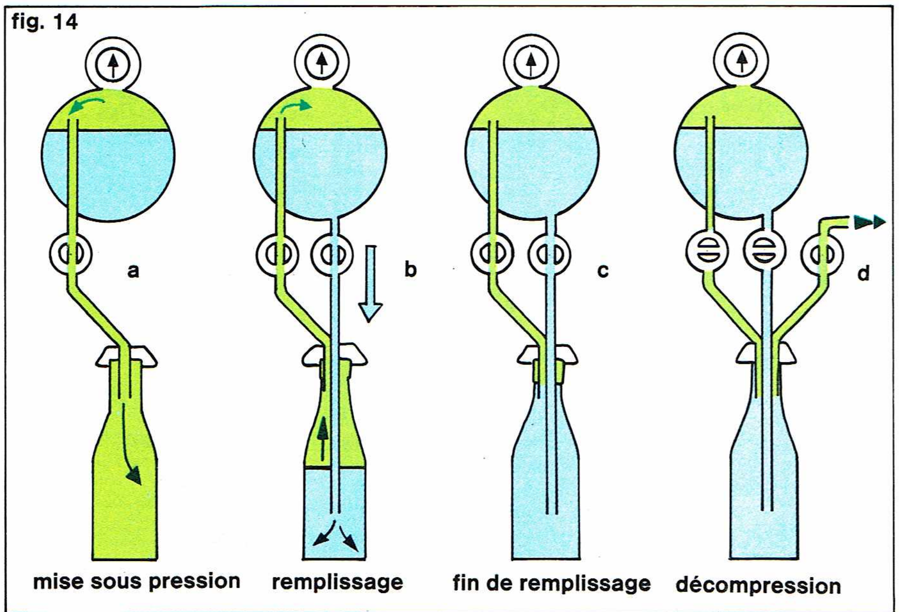

▲ *Figure 13 : technique de remplissage par gravité a, simple ou pression ; b, vide.*
Figure 14 : technique isobarométrique (figures 13 et 14, d'après la revue Embouteillage-Conditionnement*).*

▼ ***Soutireuse-boucheuse à grand rendement pour produits carbonatés.***

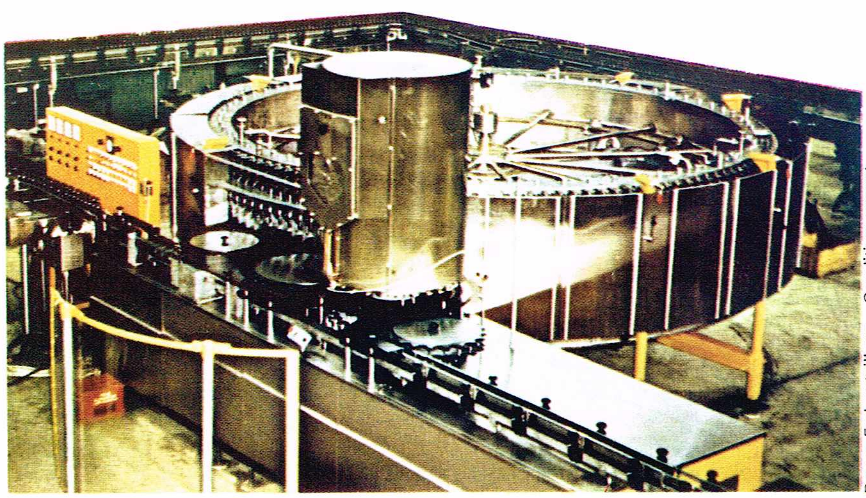

Revue Embouteillage - Conditionnement

charge sous le réservoir de la soutireuse dont il est solidaire. Dans le principe de l'emplissage par gravité simple, l'atmosphère au-dessus de la cuve est en communication avec l'air atmosphérique. Le bec comporte un tube de retour d'air et un clapet tubulaire obturant, au repos, l'orifice d'écoulement. La bouteille, à l'embectage, soulève elle-même le clapet, et le remplissage peut s'effectuer. Le niveau est établi par rapport au sommet de la bouteille.

Deux variantes sont possibles qui améliorent cette technique, notamment pour ce qui concerne les récipients ébréchés et les fuyards : la *gravité-pression* et la *gravité-vide* (*fig.* 13). Dans le premier cas, on met la cuve sous faible pression (maximum 100 millibars), par injection d'un gaz déterminé qui peut être de l'air, de l'azote, du gaz carbonique. La bouteille est mise à la pression de la cloche par l'intermédiaire du tube de retour d'air, et l'emplissage se fait comme précédemment, la pression n'ayant aucune influence sur la vitesse d'écoulement du liquide. Ce principe, s'il permet de travailler dans de meilleures conditions pour certains liquides particulièrement sensibles à l'oxydation (on effectue alors un remplissage sous gaz inerte), ne résout pas le problème des fuyards. Avec la gravité-dépression, on applique dans la cloche un vide de valeur absolue supérieure à la pression hydrostatique à l'extrémité du bec. Pas de bouteilles, ou bouteille ébréchée : la dépression n'est pas transmise à la bouteille, et le remplissage ne s'effectue pas. Contrairement à la gravité simple ou à la gravité-pression, le bec n'a pas besoin de joint d'étanchéité, puisque le vide maintient le liquide dans la cloche. Inconvénient en retour : lors de l'arrêt du matériel, il faut laisser la pompe à vide tourner si l'on ne veut pas que la cuve se vide.

La technique de la gravité présente l'avantage de pouvoir vider la cuve sans difficulté à la demande et n'impose pas un volume de réservoir important. Celui-ci peut être classique ou annulaire.

● Pour terminer ce chapitre, revenons sur la question du soutirage des liquides carbonatés, qui doivent être en permanence traités sous pression pour éviter leur dégazage et la formation de mousse trop abondante. On effectuera leur soutirage par la technique dite « **isobarométrique** » avec contre-pression de manière à assurer un écoulement calme du liquide (*fig.* 14). En outre, le dégazage étant d'autant plus faible que la température est plus basse, on travaillera à quelques degrés au-dessus de 0 °C.

Dans un premier temps, le récipient est mis sous pression par communication avec la cloche du réservoir. Le gaz s'écoule jusqu'à équilibre de pression. Le remplissage débute alors. A mesure que le niveau de liquide monte, le gaz contenu dans la bouteille retourne dans le réservoir par le canal de mise en pression. Lorsque le liquide atteint l'orifice de ce canal, le remplissage s'arrête. Il reste, avant désembectage, à ramener le vide dans le col de la bouteille à la pression extérieure, ce qui se fait progressivement par freinage du gaz libéré (sniftage). Préalablement au sniftage, les robinets de gaz et de liquide ont été fermés. Le soutirage proprement dit est alors terminé.

Montées sous le réservoir, les soupapes permettent de vider complètement celui-ci en fin de journée ou, en cas de changement de produit, en cours de journée. Des dispositifs de sécurité interviennent au cours de la mise en pression ou au moment du remplissage pour éviter ou interrompre le flot de liquide en cas de bouteille fêlée, ébréchée ou lors d'un bris de récipient.

La propreté et l'hygiène des matériels utilisés dans les industries alimentaires sont primordiales, car elles conditionnent la qualité du produit et ses chances de conservation. Pour cette raison, ces matériels seront soigneusement lavés après utilisation, rincés et stérilisés avant remise en marche. On pourra utiliser soit la chaleur, soit une solution désinfectante.

La fermeture du contenant

Avec sa fermeture, l'emballage est achevé, et on peut envisager son transport, son regroupement avec d'autres emballages semblables, sa distribution. Il devient ainsi une unité indépendante se suffisant à elle-même. Mais comment cette dernière étape se réalise-t-elle ?

On peut dire qu'il existe autant de types de fermetures que de types de contenants. Ces fermetures varient par

leurs principes, leurs dimensions, le matériau mis en œuvre, l'utilisation ou non d'accessoires de fermeture.

Sur le principe, la fermeture du contenant peut soit s'adapter directement sur le récipient (couvercle préformé sur baril de lessive ou capsule plastique enfoncée simplement sur la bague d'une bouteille), soit nécessiter une mise en forme ou l'intervention d'une opération supplémentaire (sertissage d'un couvercle sur une boîte de métal ou d'une capsule métallique à vis sur la bague d'une bouteille en verre; thermocollage d'une feuille complexe à base d'aluminium sur un pot plastique).

Dans tous les cas, l'ensemble de fermeture comprend un distributeur et une tête de fermeture. Le distributeur peut être solidaire ou non de la tête de fermeture. Dans le premier cas, l'emballage prend au passage la pièce au niveau du distributeur et se présente ensuite sous la tête munie d'un simple plongeur (piston animé d'un mouvement descendant) s'il suffit d'enfoncer un couvercle, un opercule ou une capsule en matière plastique. Pour un pot à large ouverture et bague à vis, le plongeur sera animé d'un mouvement rotatif assurant le serrage de la capsule sur les filets de l'emballage. Si le récipient est une boîte-métal, la tête permettra le sertissage du couvercle en trois passes. Les tubes souples seront fermés grâce à plusieurs plis pouvant être disposés de différentes manières (*fig.* 15).

Le thermoscellage consiste à appliquer une surface chaude sur une feuille complexe au contact du récipient. Le film plastique du complexe se ramollit et adhère à l'emballage. On peut, pour des récipients en verre, utiliser cette technique, mais après avoir déposé sur ceux-ci une mince couche de colle : la technique prend alors le nom de *thermocollage*. Ces techniques sont d'usage courant pour les yaourts et les desserts lactés, pour un certain nombre de plats cuisinés conditionnés en barquettes métal et pour les bouteilles de lait en plastique.

Comme pour le remplissage et peut-être parce qu'une fuite se perçoit mieux dans le domaine des liquides, les problèmes les plus sérieux se rencontrent dans le conditionnement des liquides. La notion d'étanchéité y est primordiale. Avant de voir les matériels et les techniques mises en œuvre dans ce cas particulier, il est bon d'avoir en mémoire qu'il y a une complémentarité nécessaire entre l'emballage et son système de fermeture, appelé ici bouchage. L'étanchéité ne pourra être assurée que dans la mesure où le bouchon se positionnera parfaitement sur la bague de la bouteille. Pour des raisons de tolérance de fabrication et également pour des raisons de compatibilité avec le produit contenu, les capsules métalliques sont doublées intérieurement par un joint qui assure l'étanchéité aux liquides et aux gaz. Pour les capsules plastiques, la souplesse du matériau remplit cette double fonction. Il en est de même pour le liège, lequel est comprimé latéralement avant enfoncement. Il adhèrera au verre latéralement, les lenticelles se comportant comme autant de microventouses.

L'opération de bouchage avec sertissage se déroule en trois temps :

— prise de la capsule ou du bouchon,

— écrasement du joint pour assurer l'étanchéité,

— sertissage sur la bague du récipient par matrice cylindroconique pour les capsules type couronne ou aluminium déchirable, ou sertissage par molettes métalliques sur le filet de bague pour les capsules à vis.

Toutefois, certaines capsules à vis métalliques et les capsules plastiques à vis ont déjà le filet réalisé. Une tête à visser suffira donc. A titre d'exemple, nous donnons à la *figure* 16 le schéma de principe du sertissage d'un bouchon Couronne.

fig. 15

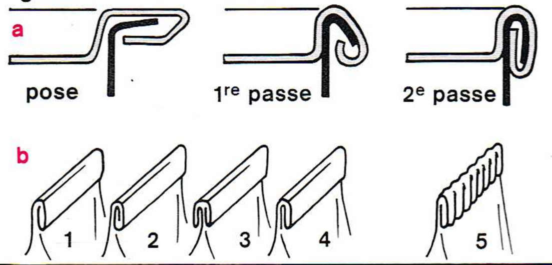

Revue Embouteillage - Conditionnement

▲ ***Distributeur de capsules et visseuses pour capsules plastiques à vis.***

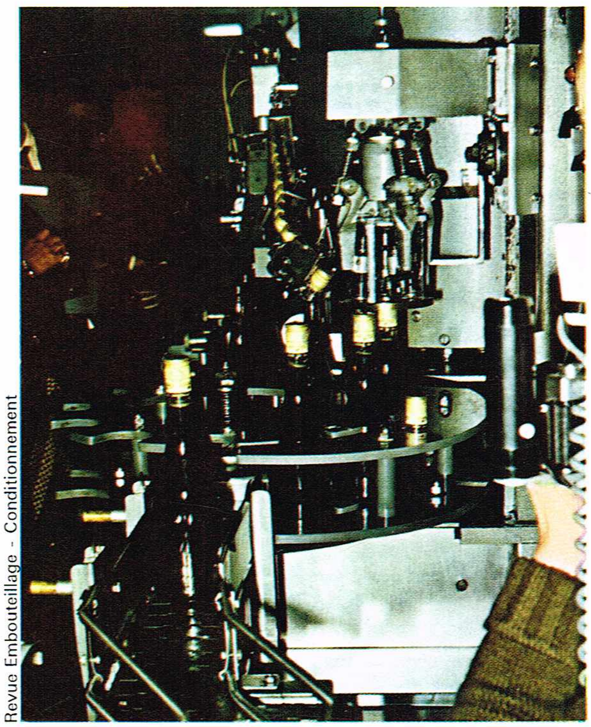

Revue Embouteillage - Conditionnement

◀ ***Distributeur et sertisseuse de capsules pour bagues à vis. On voit nettement la tête de sertissage équipée de 4 molettes métalliques.***

▼ ***A droite, figure 16 : principe de sertissage d'une capsule couronne (document Emballages Couronne). A gauche, figure 15 : a, phases du sertissage d'une boîte-métal; b, disposition possible des plis de scellage sur un tube souple métallique (d'après P.A. Caron,* Nouvelle Encyclopédie internationale du conditionnement des liquides, *C.F.E. Paris).***

fig. 16

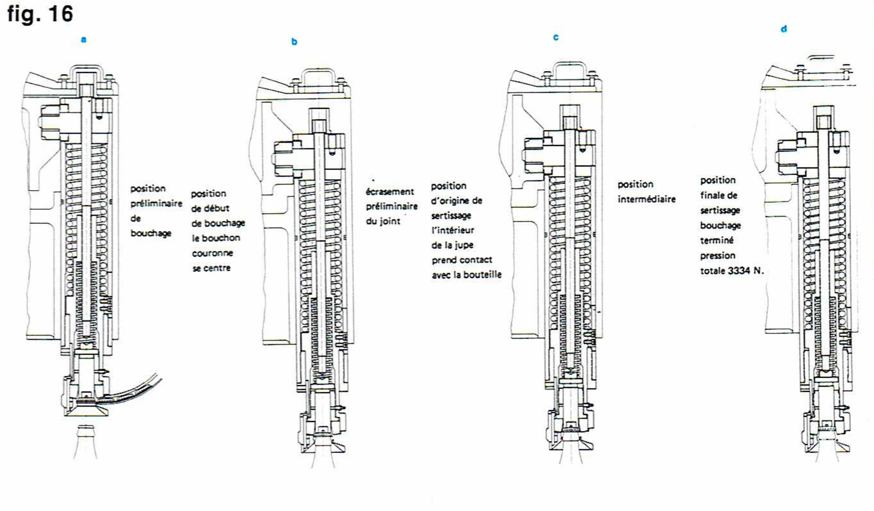

▶ *Figure 17 : succession des opérations d'emballage en « pure-pack » (à partir d'une découpe à plat) [d'après document SCAL].*

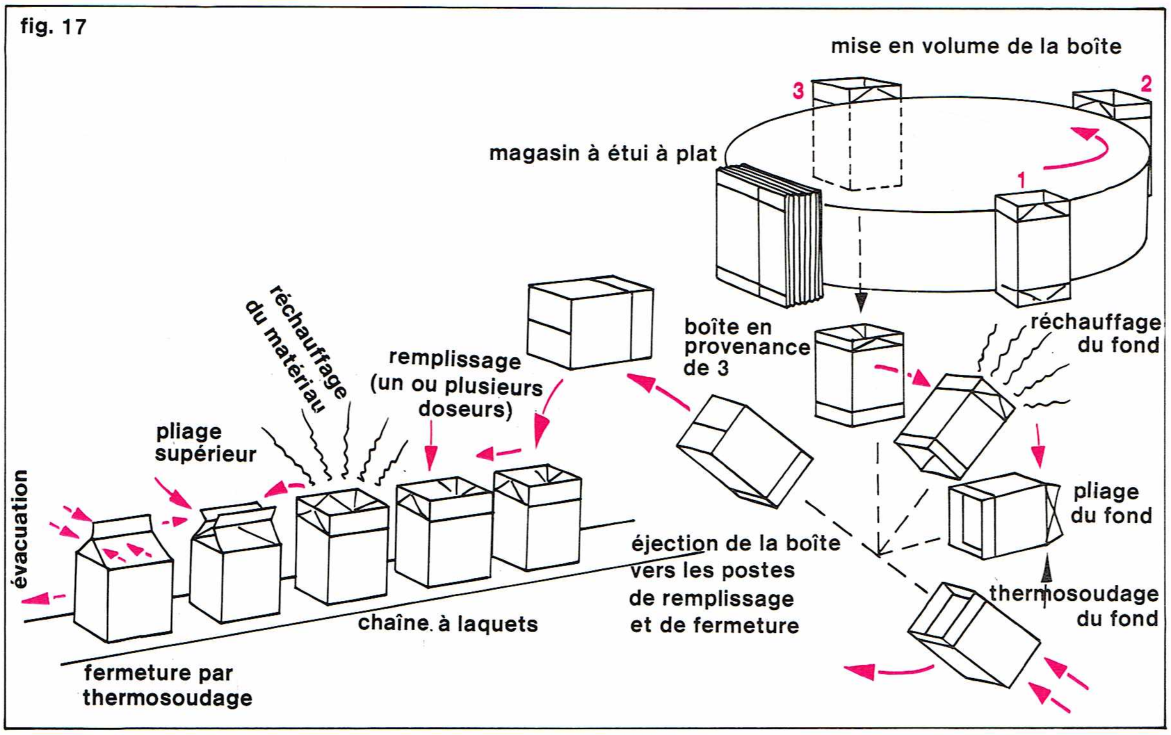

▼ *Figure 18 : principe de réalisation de l'emballage « skin-pack ». Figure 19 : emballage souple (d'après document SCAL).*

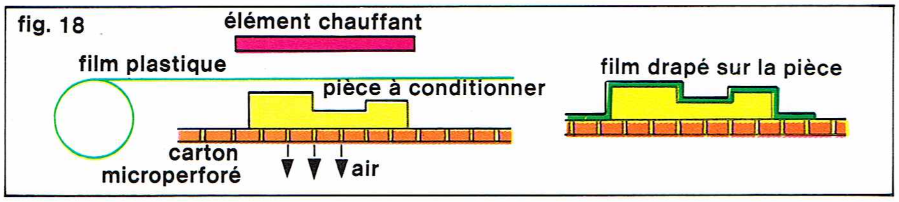

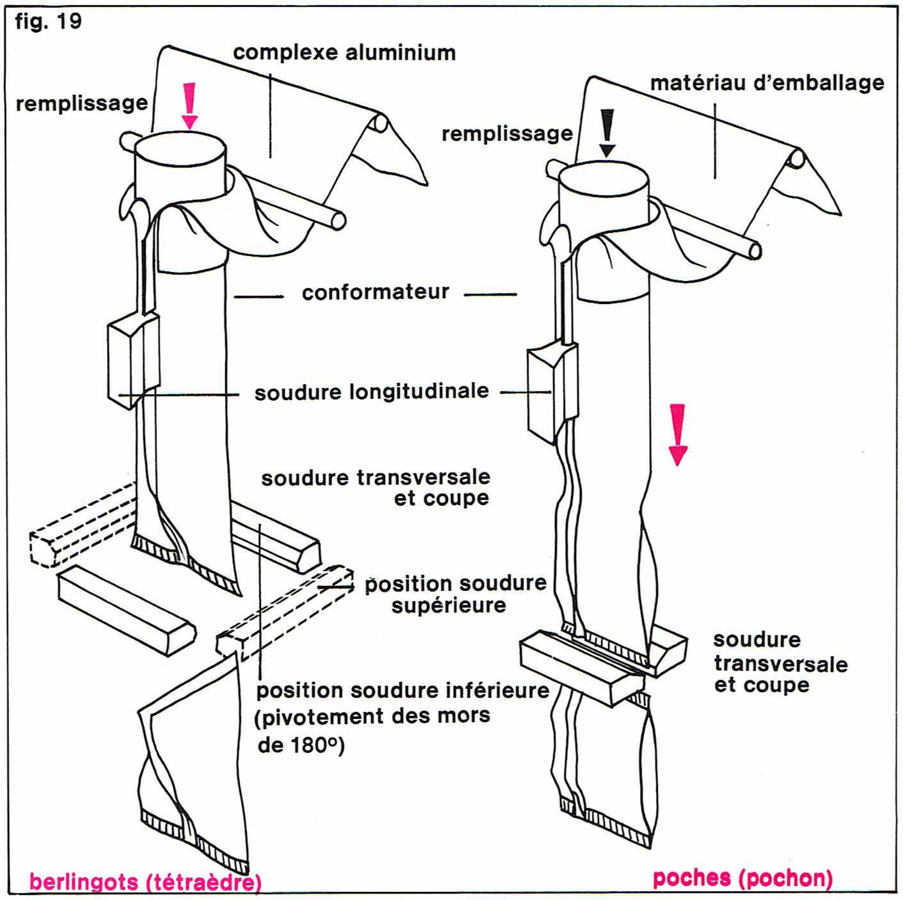

L'emballage se crée autour du produit

Nous voulons dire par là que l'emballage se forme à partir de découpes et qu'il est immédiatement rempli ou que le contenant prend la forme du contenu s'il est solide; il se crée effectivement autour du produit. Nous allons développer ces notions à partir de plusieurs exemples.

Réalisation de l'emballage à partir d'une découpe à plat

L'emballage d'origine américaine *pure-pack* est livré à l'industrie sous la forme de découpes, à plat, mais pliées et prêtes au passage sur machine adaptée. La succession des opérations d'emballage en *pure-pack* est la suivante (*fig.* 17) : les découpes sont ouvertes par ventouse et placées sur un mandrin à section carrée. Le fond est rabattu et collé par thermocollage. Puis l'emballage déposé sur une chaîne passe sous des becs doseurs au nombre de quatre, délivrant à chaque cycle 1/4 litre. Il est ainsi possible de remplir avec cette machine des emballages de volume 1/4 litre, 1/2 litre et 1 litre. La fermeture suit par pliage du haut de l'emballage et soudure des bords par thermosoudage polyéthylène-polyéthylène.

Enveloppage des produits

Cette technique est utilisée pour obtenir le conditionnement *skin-pack*; l'objet à conditionner, posé sur un carton thermocollant microperforé, sert lui-même de moule pour la formation de son emballage (*fig.* 18). En pratique, on thermoforme un film transparent sur le produit et le carton support. Ce film s'autocolle sur le support en drapant l'objet d'une mince pellicule; l'objet est alors parfaitement immobilisé dans son contenant. Une variante de ce procédé consiste à laisser couler un film à l'état visqueux sur le produit à conditionner.

Emballage par débordement

C'est ainsi que P. A. Caron appelait, dans son *Encyclopédie internationale du conditionnement des liquides*, la technique de la gaine continue remplie du liquide à conditionner dont le scellage, déterminant les dimensions des récipients produits, se fait à même le liquide. On peut effectivement parler de débordement, ce dernier étant constitué par du liquide situé au-dessus de la zone de scellage, et qui remplira le conditionnement suivant. On obtient de cette façon des poches de lait, des berlingots de shampooing ou des « briques » de jus de fruits (*fig.* 19).

Les emballages de regroupement et leur réalisation

Ces emballages ont pour but la constitution de conditionnements destinés soit à la présentation sur le lieu de vente, soit au transport par route ou par fer essentiellement. Il faut y ajouter également la rationalisation et la rentabilisation des zones de stockage. Ces emballages de regroupement utilisent depuis longtemps le carton et le plastique, mais également le métal, depuis quelque temps.

Le carton plat sert à la confection de fardeaux, de même que les films plastiques, que ceux-ci soient rétractables ou étirables. Le carton ondulé intervient dans la confection des caisses dites américaines avec ou sans croisillons et dans le regroupement par enveloppage ou *wrap-around*. Quant au polyéthylène haute densité, il permet la fabrication de casiers de bouteilles et de bacs divers. Enfin, le métal prend place dans ce secteur par le biais des containers-fils destinés aux grandes surfaces de vente.

Le remplissage des caisses américaines et des casiers plastiques utilise le même genre de matériel : l'*encaisseuse*. La technique la plus développée fait appel à des têtes composées d'autant de grappins que de bouteilles à prendre pour remplir la caisse. Une membrane annulaire, située latéralement dans le grappin, se gonfle et enserre le col du récipient, qui est alors transféré de la table d'accumulation dans la caisse. Un diviseur d'emballages alimente avec régularité les files de grappins. Un matériel fonctionnant sur le même principe permet le remplissage des containers-fils. Les cartons sont ensuite fermés par agrafage, par bande gommée ou par collage.

Le principe de l'*enveloppage des charges* est simple dans la mesure où le carton ondulé est plié autour de celles-ci de manière à les emprisonner étroitement. Les côtés sont simultanément rabattus et collés. L'opération d'enveloppage est réalisée souvent par descente du flan préalablement chargé dans une cheminée qui redresse le carton, lui donnant ainsi une forme de U. Une glissière supérieure rabat ensuite le carton au-dessus de la charge. Le collage se fait par colle froide ou, plus souvent, par colle thermofusible à prise rapide (*fig.* 20 et 21).

Les *multipacks* sont réalisés sur des machines automatiques qui utilisent des flancs de carton plat prédécoupés. Ceux-ci enveloppent la charge et, grâce à l'existence de languettes de formes différentes (triangulaires et rectangulaires), permettent de bloquer parfaitement l'emballage. Le fond ainsi verrouillé est solide et permet le transport sans difficulté. D'autres découpes de carton donnent des résultats comparables.

Plus particulièrement destinés aux emballages promotionnels, certains matériels regroupent les charges en nombre restreint sous carton ondulé. On obtient ainsi après montage des formes de type valisette munies de poignées. A noter que les découpes bien conçues permettent aussi le calage des contenus fragiles.

D'autres matériels encore pratiquent la préhension des bouteilles au niveau des bagues. Le plus courant de ces emballages est le *top-pack* qui se présente sous forme d'une seule pièce de carton fort, sans collage et sans assemblage, maintenant plusieurs récipients uniquement par leurs bagues. Comme les emballages multiples à entourage total cités précédemment, cet ensemble est préhensible par deux ouvertures ménagées à cet effet.

Récemment apparue sur le marché, une technique de regroupement des boîtes utilise une découpe plastique que l'on force sur les boîtes-métal. Celles-ci sont alors liées entre elles et forment ainsi un ensemble facile à manutentionner.

Avec le développement du *film plastique*, on a cherché à diminuer la quantité de carton mise en œuvre dans ces emballages de regroupements. Ainsi sont nées les machines à fardeler avec et sans barquette. La charge globale, enveloppée ensuite dans un film plastique rétractable, traverse un four de rétraction. Le film se rétracte et assure une parfaite tenue de l'ensemble. On peut également utiliser des films étirables, dont la mise en œuvre ne pose plus de réel problème aujourd'hui. Dans ce cas, des mâchoires saisissent le film et l'étirent dans les deux directions perpendiculaires. Puis elles drapent le film sur l'ensemble à emballer. Ce sont ou bien les mâchoires qui sont animées d'un mouvement par rapport

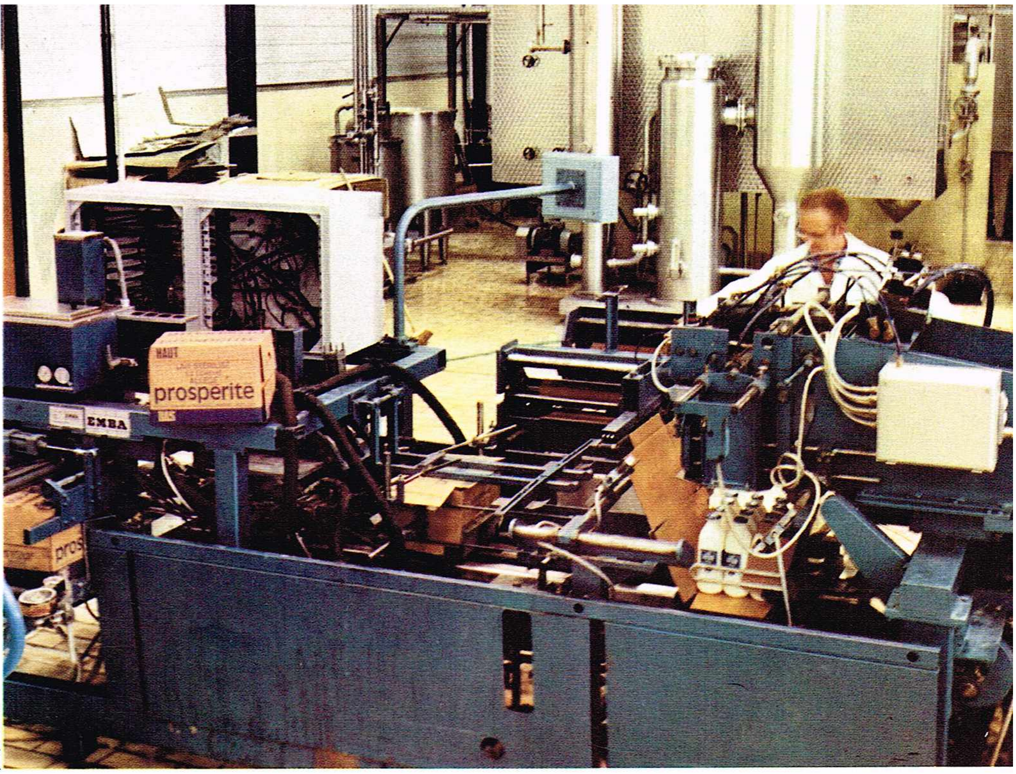

papeteries Léon Clergeau

▲ *Matériel destiné au regroupement des bouteilles de lait par la technique du « wrap-around », dite aussi d'enveloppage.*

▼ *Figures 20 et 21 : principe de l' « enveloppe des charges » ; le carton ondulé est plié autour de celles-ci de manière à les emprisonner étroitement. Les côtés sont simultanément rabattus et collés.*

fig. 20

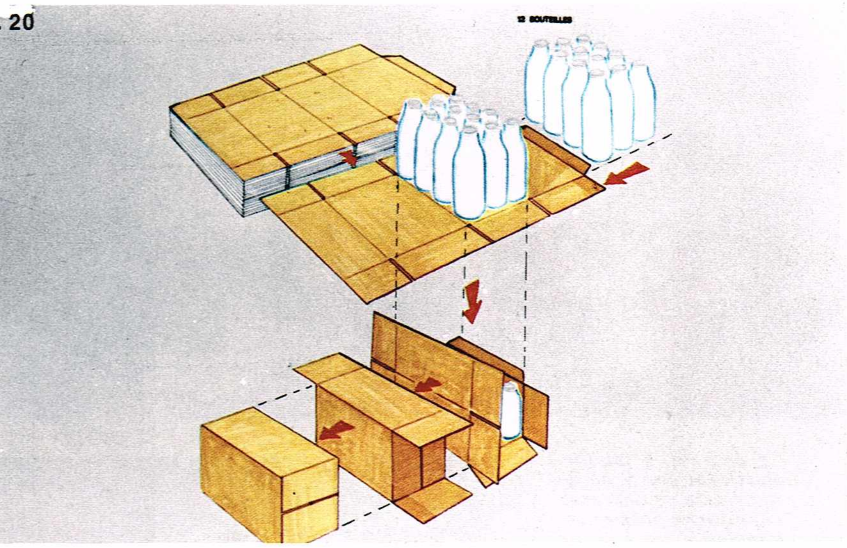

Revue Embouteillage - Conditionnement

fig. 21

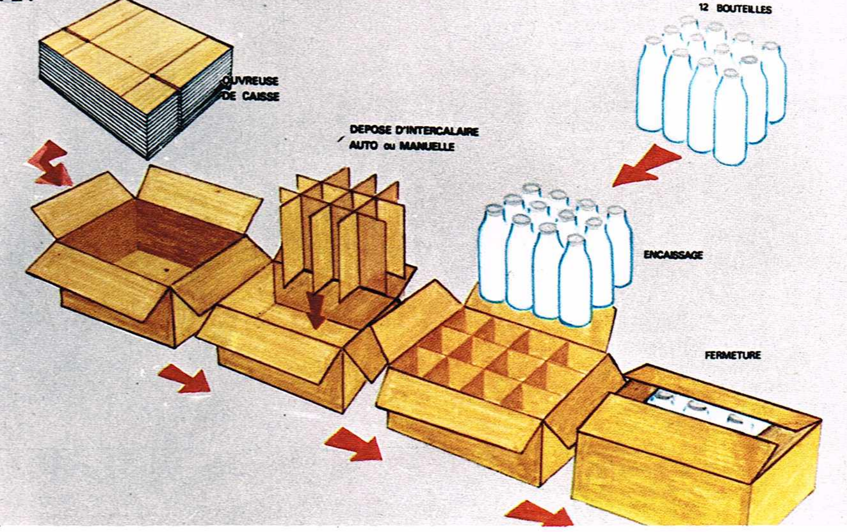

Revue Embouteillage - Conditionnement

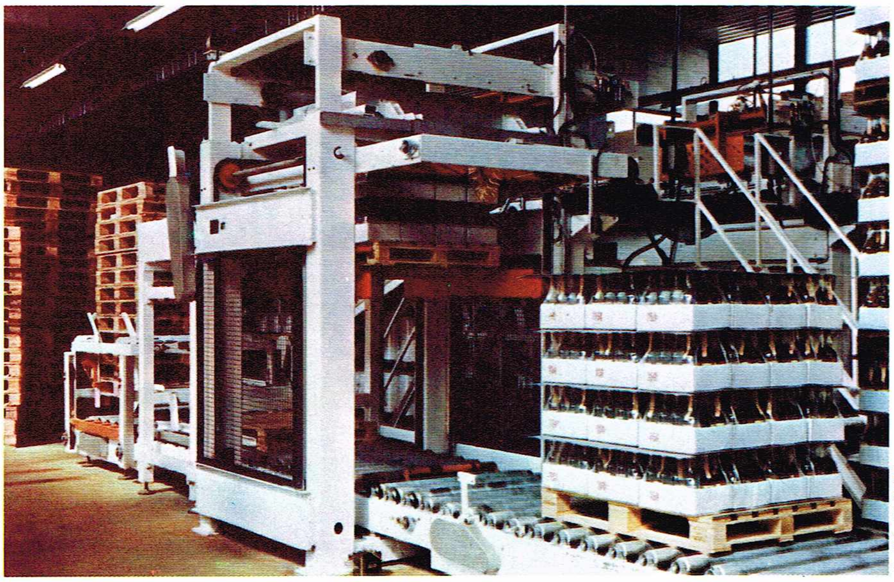

A. Bl. EMME

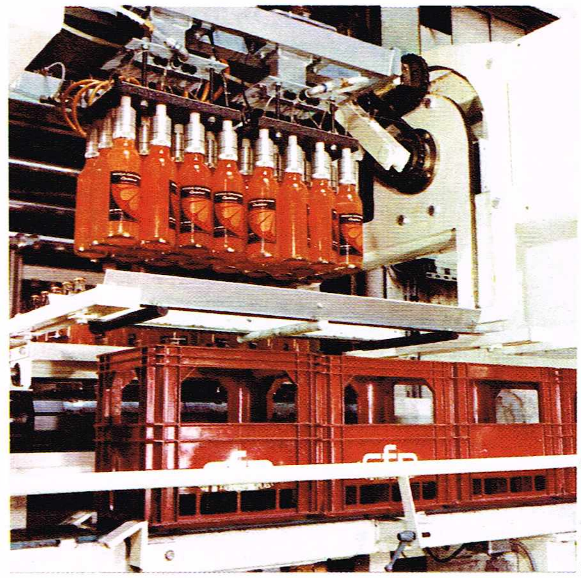

Stork Inter - France

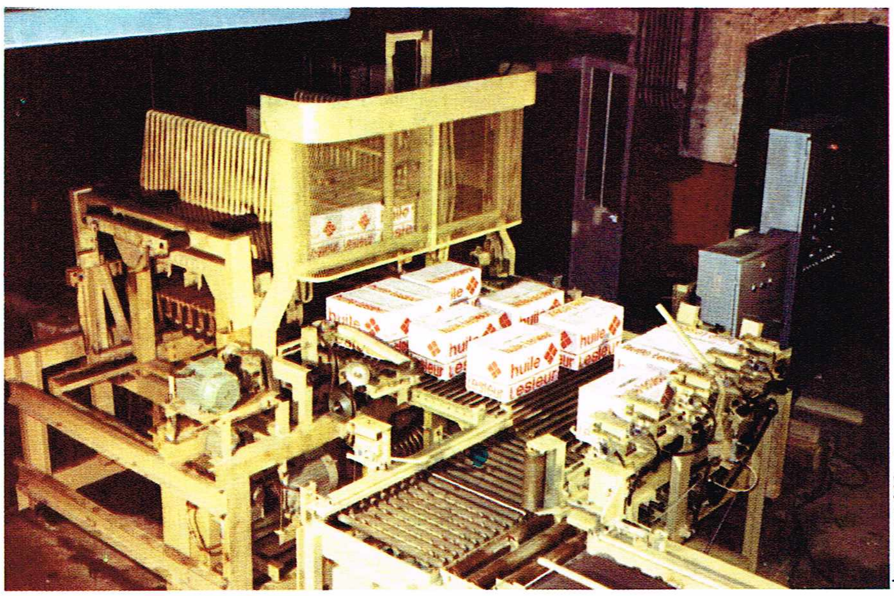

document Mépal

▲ En haut, à gauche, palettiseur par le haut ; la palette va chercher la couche préformée à la partie supérieure. En haut, à droite, encaisseuse pour casier standard CFP. Ci-dessus, palettiseur par le bas. La charge est compactée à chaque cycle ; préparation automatique de la couche au premier plan.

à la charge fixe, ou bien la charge qui se déplace verticalement, les mâchoires étant fixes (au moins dans un premier temps), et entraîne le film qui la couvre. Un point de colle ou un thermosoudage, et le regroupement est achevé.

En matière d'emballages de transport au niveau industriel, il faut surtout considérer les **charges palettisées** que de nombreux matériels automatiques sont susceptibles de réaliser. Ces appareils fonctionnent en gros selon quatre principes : palettisation par le haut ; palettisation par le bas ; palettisation par transfert de couches préformées avec changement de niveau ; palettisation par piles (*fig.* 22).

Dans le premier cas, la couche se forme sur un rideau qui s'efface pour déposer celle-ci sur la palette ou sur la couche inférieure, et ainsi de suite jusqu'à ce que la palette soit complète. Dans le second cas, la couche préformée est introduite dans l'appareil qui la soulève pour permettre à une nouvelle couche de pénétrer. Les deux couches sont soulevées simultanément, et ainsi de suite. La palette n'intervient qu'à la fin du cycle. Dans la palettisation par transfert, le plateau portant la couche préformée se meut verticalement et horizontalement afin de déposer sa charge à la hauteur voulue sur la palette en cours de réalisation. Si on lui accorde un mouvement supplémentaire dans la troisième direction, le même équipage peut desservir simultanément plusieurs postes de palettisation. Dans le dernier cas, un ou deux empileurs précèdent le poste de rassemblement des piles. Ils travaillent généralement en alimentation par le bas.

Les charges palettisées manquent en général de stabilité ; aussi améliore-t-on celle-ci en déposant un ou deux traits de colle sur le dessus des cartons afin de lier les couches entre elles, ou bien en houssant les palettes et en les passant au four de rétraction. Il est également possible de cercler les palettes en utilisant un feuillard métallique ou plastique. Des ficeleuses sont même apparues sur le marché ces derniers temps, qui utilisent un cordage.

A noter que la palette en bois est concurrencée par des palettes en plastique et des palettes en matériaux pressés, ainsi que par les feuilles-palettes plus légères ; mais elle demeure toutefois la plus couramment utilisée.

Le traitement des produits en vue de leur conservation

Ce sont surtout les produits alimentaires qui sont concernés par ce traitement, lequel vise avant tout à détruire les micro-organismes contenus dans le produit ou qui lui ont été apportés par l'emballage et ses accessoires. Il s'y ajoute parfois un problème de stabilité physico-chimique du contenu. Ce dernier point, que nous

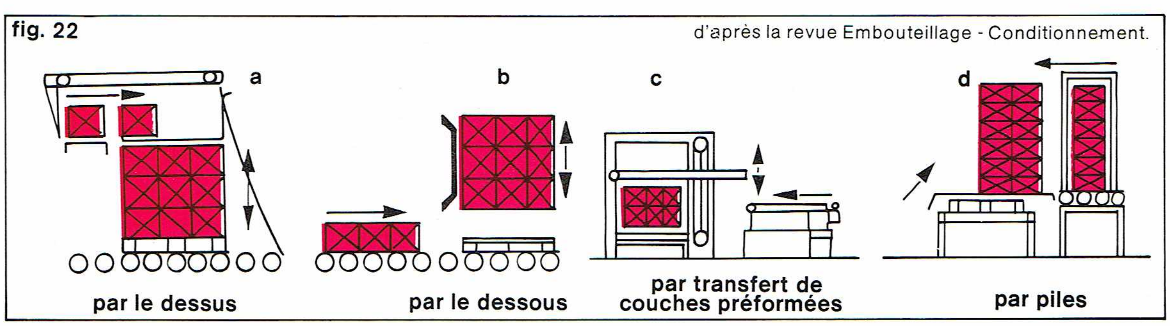

▶ Figure 22 : diverses techniques de palettisation (d'après la revue Embouteillage Conditionnement*).*

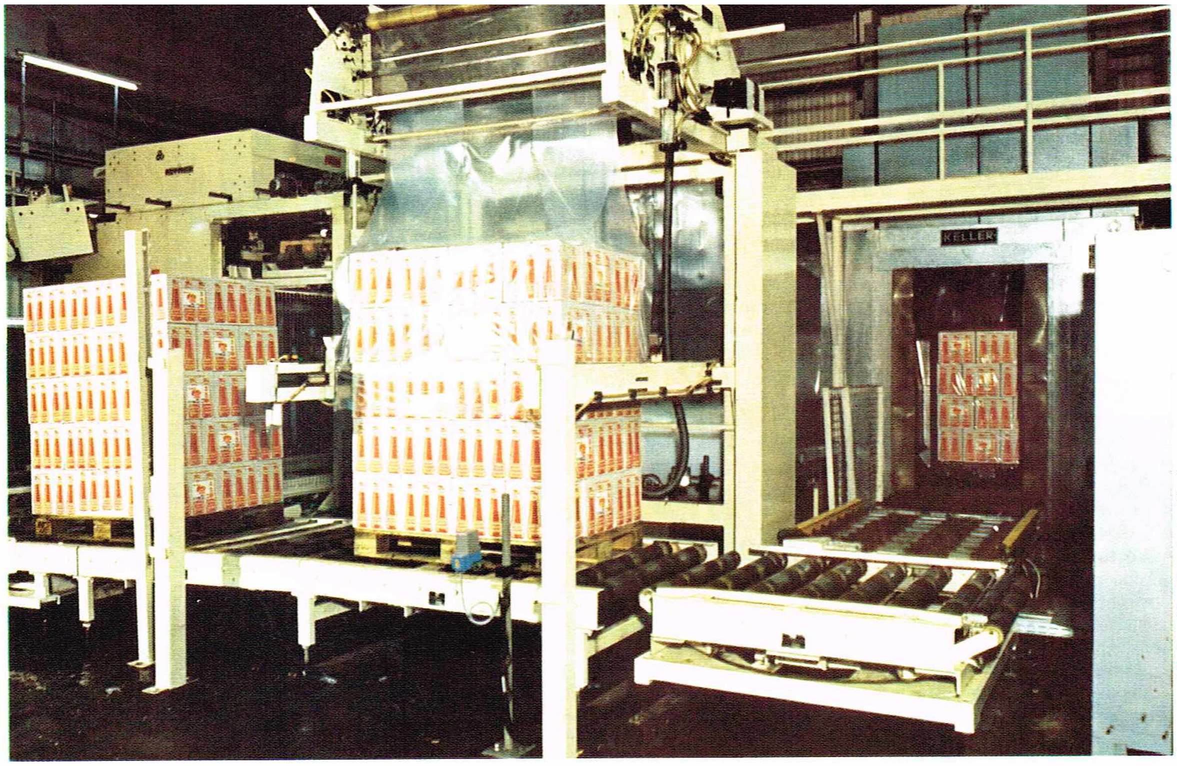

document Keller-Evraf - photo Hartmann

◀ ***Housseuse de palettes; à droite, on voit l'entrée du tunnel de rétraction.***

ne faisons que mentionner, met en jeu des méthodes qui agissent sur le produit avant son entrée dans la salle de conditionnement : chauffage, refroidissement, collage, suivis souvent de filtration ou de centrifugation pour éliminer les particules étrangères. En revanche, la stabilité microbiologique des produits met en jeu des techniques qui méritent d'être développées. En France, celles qui sont autorisées pour les produits alimentaires sont essentiellement physiques et utilisent la chaleur comme agent actif. On les nomme, suivant les secteurs, *appertisation, pasteurisation, stérilisation*.

Appertisation

Le principe en est simple. Exposés à la chaleur, les micro-organismes sont détruits au bout d'un temps d'autant plus court que la température est plus élevée. On soumettra donc les produits emballés à un traitement thermique plus ou moins prolongé. Le temps d'exposition doit être suffisant pour que le traitement soit bactériologiquement efficace; il ne doit pas l'être trop, car le produit en souffrirait : goût de pain cuit de la bière, caramélisation des produits sucrés, etc. Il n'est pas non plus question de soumettre brutalement le produit à une température trop élevée, car certains emballages ne résisteraient pas à ce choc thermique, notamment les emballages en verre. Pour les boîtes-métal, on peut immerger l'emballage dans un bain à température élevée sans crainte.

Toutefois, et dans chaque cas considéré, il est bon de se rappeler que le produit présente toujours une certaine inertie et que, traversant une zone à 50 °C, par exemple, il n'atteint généralement pas cette température en bout de parcours. Nous retrouvons ici, vis-à-vis de l'emballage, le même phénomène que dans une laveuse de bouteille, mais il est nettement plus marqué, dans la mesure où l'inertie d'un récipient vide est très inférieure à celle d'un récipient plein. Il faudra donc pratiquer par paliers de température pour atteindre la zone la plus chaude d'abord, pour revenir à température ambiante ensuite. La stabilité des températures de chaque zone devra faire l'objet d'une attention particulière. Les chocs thermiques, même s'ils ne provoquent pas de bris de bouteilles dans la machine (stérilisateur, pasteurisateur), fragilisent le matériau et peuvent provoquer des casses ultérieurement, en particulier à l'encaissage où les bouteilles subissent des chocs mécaniques.

Des études approfondies sur l'efficacité des traitements thermiques ont montré que le temps de traitement nécessaire est divisé par 10 si l'on augmente la température de 7 °C pour une même efficacité, et inversement. Ainsi donc, une minute de traitement à 60 °C a le même effet que 6 secondes de traitement à 67 °C ou que

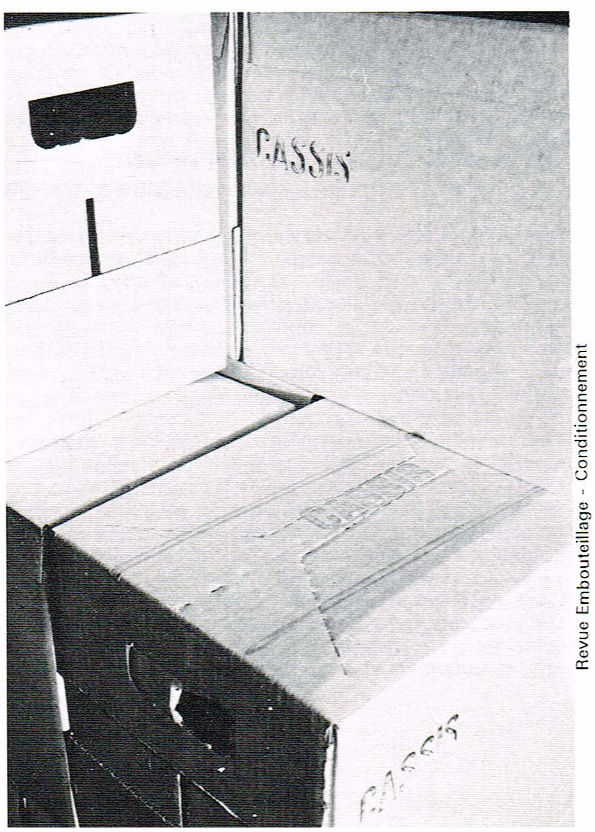

Revue Embouteillage - Conditionnement

document S.A.T.

◀ ***A gauche, deux traits de colle aident à stabiliser une charge palettisée. La séparation des cartons se fera par simple arrachage. A droite, rétraction d'une housse au moyen d'un pistolet de rétraction.***

10 minutes à 53 °C. Il est alors possible, connaissant le diagramme de pasteurisation température-temps et choisissant un « étalon efficacité », de chiffrer le résultat global d'un traitement thermique. Des tests en laboratoire à l'échelon industriel peuvent conduire à la définition, pour chaque produit, d'une limite en deçà de laquelle il ne faut sous aucun prétexte descendre, pour obtenir une appertisation, une pasteurisation ou une stérilisation correcte.

Ces tests prennent en compte une population microbienne existant *a priori* dans le produit; ainsi donc, si la population réelle dépasse ce chiffre, malgré le respect du diagramme de traitement déduit du calcul théorique, l'efficacité sera insuffisante, et les micro-organismes ne seront pas tous détruits, ce qui nous conduit à souligner une fois encore combien les précautions d'hygiène sont importantes à tous les stades de la fabrication; elles seules permettent de parvenir en bout de chaîne à une population microbienne aussi réduite que possible. Certains principes doivent être bien assimilés par le personnel, notamment en ce qui concerne la vitesse de multiplication des germes à température ambiante : il suffit de 24 heures à un micro-organisme pour engendrer une population aussi nombreuse que celle de l'agglomération parisienne (plus de cinq millions d'individus). La vitesse de multiplication augmentant avec la température ambiante dans les conditions normales de travail, on s'efforcera de manutentionner les produits à basse température si l'on désire leur assurer des temps de conservation importants. C'est ainsi que les liquides alimentaires sont souvent stockés et emballés à quelques degrés au-dessus de zéro : lait, bière, cidre, etc.

▼ *Figure 23 : principe de fonctionnement du pasteurisateur-tunnel. En bas, ligne d'embouteillage équipée d'un pasteurisateur. On reconnaît une soutireuse à l'arrière-plan et une étiqueteuse au premier plan (réalisation Cifal-Bulgarie).*

fig. 23

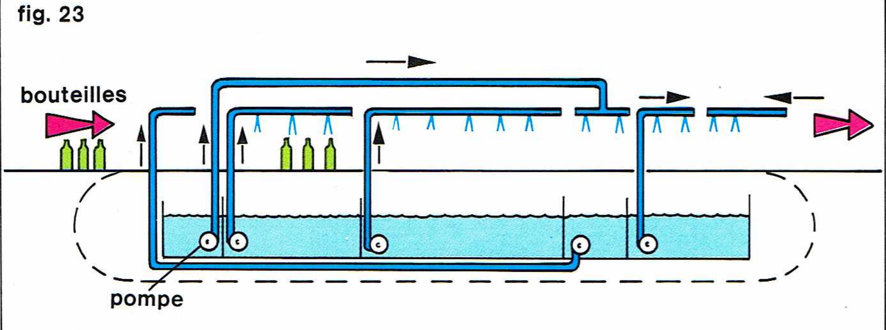

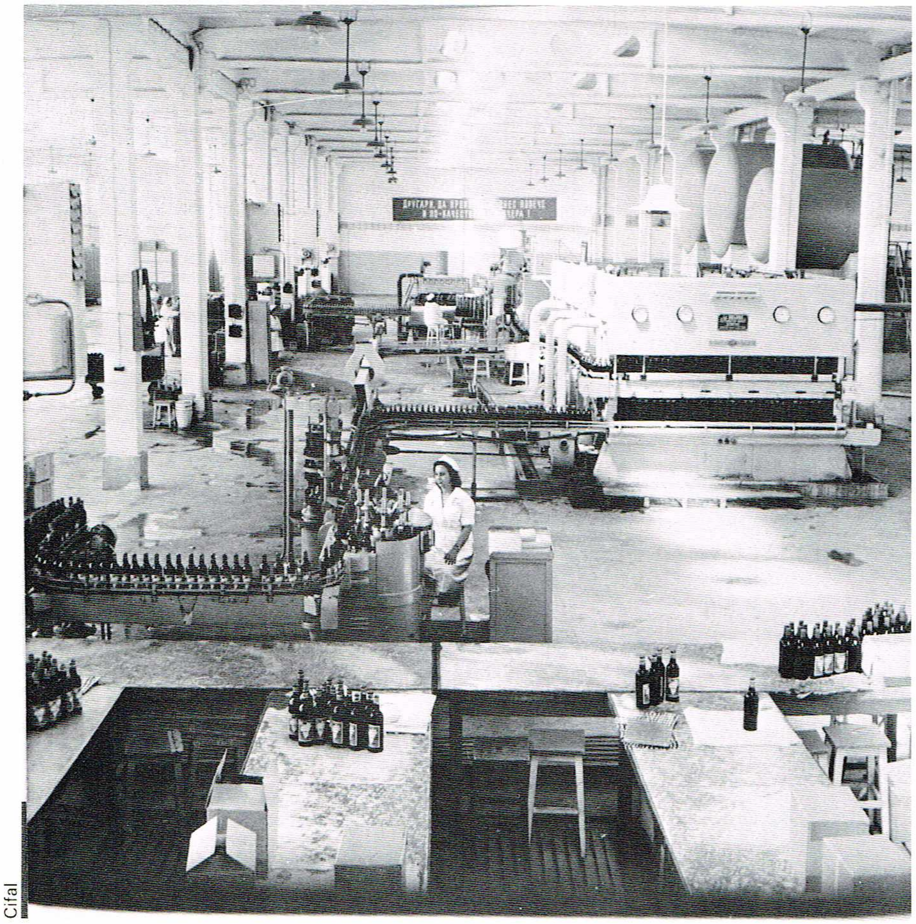

Pasteurisation

Il existe deux types de *pasteurisateurs :* des pasteurisateurs à entrée et sortie du même côté, et des pasteurisateurs-tunnels où entrée et sortie sont diamétralement opposées. Les emballages pleins sont chauffés par aspersion à l'eau chaude. Dans le premier modèle de pasteurisateur, l'eau arrose successivement les bouteilles du brin entrée de la chaîne et celles du brin sortie. Elle réchauffe ainsi les premières bouteilles, et refroidit ensuite les secondes. A noter que les récipients sortent du pasteurisateur à une température supérieure à la température ambiante, voisine de 35 à 40 °C. Le refroidissement s'achève sur la chaîne, en aval du pasteurisateur. En ce qui concerne les pasteurisateurs-tunnels (*fig.* 23), l'eau qui a réchauffé les récipients sur une certaine zone est récupérée dans un bac, repompée, et sert à refroidir les bouteilles dans la zone de retour à température ambiante. Par leur construction, les matériels du premier type sont plus compacts, mais ils sont limités en rendement; les seconds, au contraire, peuvent recevoir un, deux, voire trois niveaux, ce qui augmente sensiblement les possibilités offertes. Un constructeur italien de pasteurisateurs présentait récemment un matériel réalisant le traitement de 120 000 bouteilles par heure.

Stérilisation

Le principe fondamental de la *stérilisation* est le même que celui de la pasteurisation, à ceci près que la température maximale atteinte est plus élevée. L'agent de chauffage est alors la vapeur. Le matériel n'est plus en longueur mais en hauteur (tour de stérilisation), et les récipients montent et descendent plusieurs fois dans cette tour.

Au cours de ces opérations, le liquide se dilate plus que son emballage, d'où la nécessité de toujours prévoir un espace mort dans le récipient. Mais cet espace contient toujours un gaz dont la pression va augmenter elle aussi. Aussi faut-il trouver le compromis qui permet d'absorber la dilatation du liquide, l'augmentation de pression, sans pour cela mettre au contact du produit un agent risquant de l'altérer. C'est une des raisons qui amènent des industries à mettre en œuvre des techniques particulières au niveau du remplissage afin de remplacer l'air présent dans les emballages vides par un gaz inerte vis-à-vis du produit (gaz carbonique pour la bière et les boissons carbonatées; azote pour les jus de fruits, etc.) Le simple chauffage d'un produit dans un récipient dont la fermeture est appropriée permet de chasser une grande partie de l'air contenu dans l'espace mort (la pression comprime le joint et permet le passage du gaz vers l'extérieur). Au refroidissement, le joint reprend sa place, et il se crée un vide relatif dans l'espace mort. Il se passe un phénomène similaire si le produit est mis chaud dans son emballage avec fermeture immédiate du contenant.

Il est également possible de pratiquer, pour des durées de conservation imposées plus réduites, le **traitement thermique du produit avant l'emballage.** Dans certains cas, ce traitement s'identifie à une phase de la fabrication (cas de la confiture). Mais il importe de remarquer qu'aucun traitement ultérieur de stabilisation n'intervenant, les conditions hygiéniques de travail au-delà de la préparation des emballages et après l'appareil de traitement du produit doivent être parfaites.

La moindre inattention, une machine mal nettoyée, mal désinfectée, et c'est le drame : une fabrication perdue parfois et une image de marque de la société et du produit gravement ternie. Le produit en vrac est porté pendant un temps très court (90 secondes au lieu de 50 minutes de traitement en pasteurisation) à une température plus élevée que pour la pasteurisation (90 °C au lieu de 62 °C). Il est ensuite ramené à sa température initiale avant remplissage du contenant. On peut aussi profiter de ce traitement pour effectuer un remplissage à chaud (brasserie et traitement du lait pasteurisé).

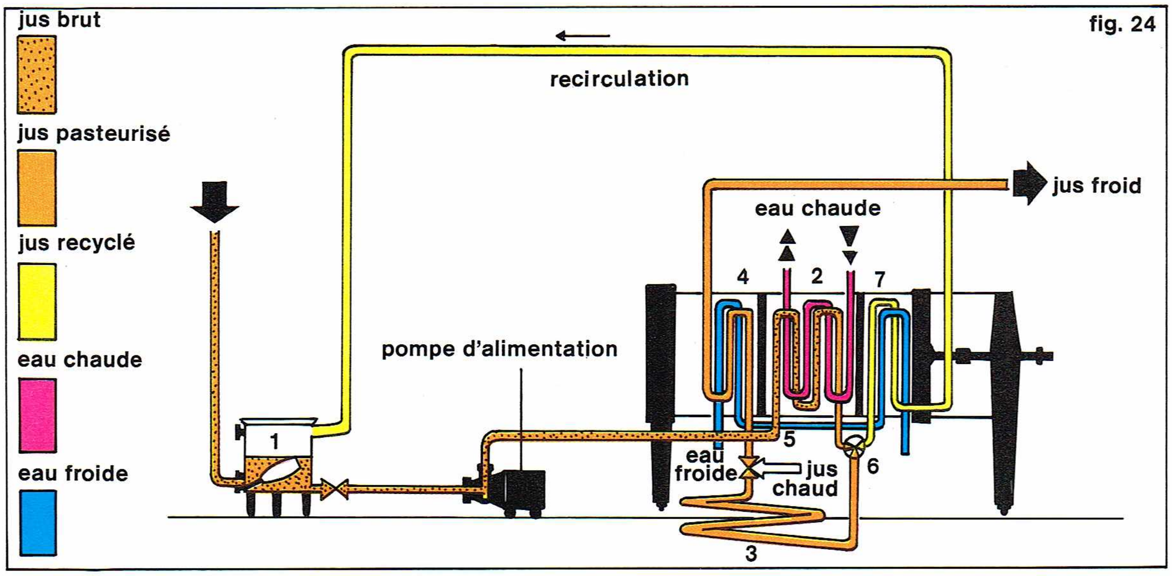

◀ *Figure 24 : schéma de principe d'une installation de pasteurisation en vrac de jus de fruits (document Société A.P.V., Evreux).*

Le matériel utilisé est un échangeur dans lequel le produit circule à contre-courant du fluide de traitement. On utilise, pour des raisons d'économie, le produit traité chaud pour réchauffer le produit non traité, à son entrée dans l'appareil. Les échangeurs sont soit du type tubulaire, soit, beaucoup plus fréquemment, du type à plaques. Le produit à traiter circule entre les plaques (une sur deux) à contre-courant avec le fluide de chauffage, lequel se trouve entre les plaques restées libres. Ces deux circuits ne se mélangent pas (*fig.* 24).

Le lait UHT subit aussi un traitement thermique, mais sa durée est très courte : 1 à 2 secondes ; et la température très élevée : 150 °C. On obtient ce résultat par injection de vapeur d'eau à la température requise dans le lait, par exemple.

Nous signalons également une technique utilisée pour le traitement thermique de certains produits, dont le vin : le **traitement par rayons infrarouges.** Le chauffage du produit se fait par contact avec des éléments générateurs de rayons infrarouges.

Pour terminer ce chapitre de la stabilisation des produits en vue de leur conservation, il nous faut aussi mentionner l'utilisation dans les produits alimentaires de **conservateurs chimiques.** Pour pouvoir être utilisés, ils doivent avoir été expressément autorisés. Là encore, comme pour les produits admis au contact des denrées alimentaires, une liste positive a été dressée. Ils n'ont pas d'action bactériologique, mais surtout un effet anti-oxydant.

La manutention et le stockage des emballages

Il y a à la fois peu et beaucoup à dire sur ce sujet. Nous ne pourrons donc ici que l'aborder en cernant les postes où il y a transfert ou transport des emballages. Nous excluons immédiatement ce qui se passe dans les machines en rappelant qu'à l'entrée d'un matériel les emballages sont mis au « pas », par exemple par une vis et une étoile, afin de synchroniser leur mouvement avec celui des parties mobiles dudit matériel : sellettes porte-emballages et têtes des remplisseuses, têtes des boucheuses, paniers des laveuses, etc.

Dans l'atelier de conditionnement, les zones de transfert correspondent aux passages d'un matériel au suivant. Les récipients sont toujours entraînés par un transporteur, mais, en cas d'accumulation, le transporteur doit pouvoir continuer à tourner sans qu'il en résulte pour autant un risque pour l'emballage. C'est ainsi qu'une lubrification des chaînes suffira pour des bouteilles mais que, pour des casiers, il faudra se tourner vers d'autres techniques : rouleaux débrayables par exemple. Plus les cadences sont rapides, plus les vitesses des emballages sont grandes, et plus le bruit est important.

Revue Embouteillage - Conditionnement

▼ *Les chaînes (ici, à palettes) doivent être parfaitement lubrifiées pour permettre le glissage sous les bouteilles en cas d'accumulation.*

De nombreuses difficultés apparaissent, et la meilleure solution — mais elle n'est pas toujours réalisable — consiste à manutentionner individuellement chaque contenant du début à la fin de la chaîne de conditionnement. On pourra au moins synchroniser les machines et les transporteurs de manière à faire varier les vitesses des machines et des transporteurs en fonction de l'environnement amont et aval, avec une limite supérieure évidemment : celle des machines installées. Tout serait simple si les machines tournaient toutes en même temps à la même vitesse, mais il y a les impondérables (pannes, incidents de fonctionnement) et les arrêts d'alimentation normaux (changement de produit à la remplisseuse, par exemple). Il faut donc prévoir des tampons entre les machines pour qu'il n'y ait jamais d'arrêt, si possible, de l'ensemble. Cela explique que les transporteurs n'aient pas partout, sur le circuit bouteilles ou sur le circuit boîtes, la même largeur. On peut temporairement emmagasiner des casiers, par exemple pour garder un tampon disponible, sur le circuit caisses, entre la décaisseuse et l'encaisseuse.

Les transporteurs les plus couramment utilisés sont les suivants : transporteurs à rouleaux commandés ou non, transporteurs à roulettes, transporteurs à chaîne (parmi lesquels ascenseurs et descendeurs pour changement de niveau), transporteurs à palettes, transporteurs à courroie (permettant aussi le changement de niveau), convoyeurs à chaîne tractive (aériens ou encastrés dans le sol).

Un certain nombre de machines ne travaillent bien qu'avec une accumulation en amont, d'où la présence

▶ *Sous housse protectrice, le stockage des emballages neufs peut se faire à l'extérieur.*

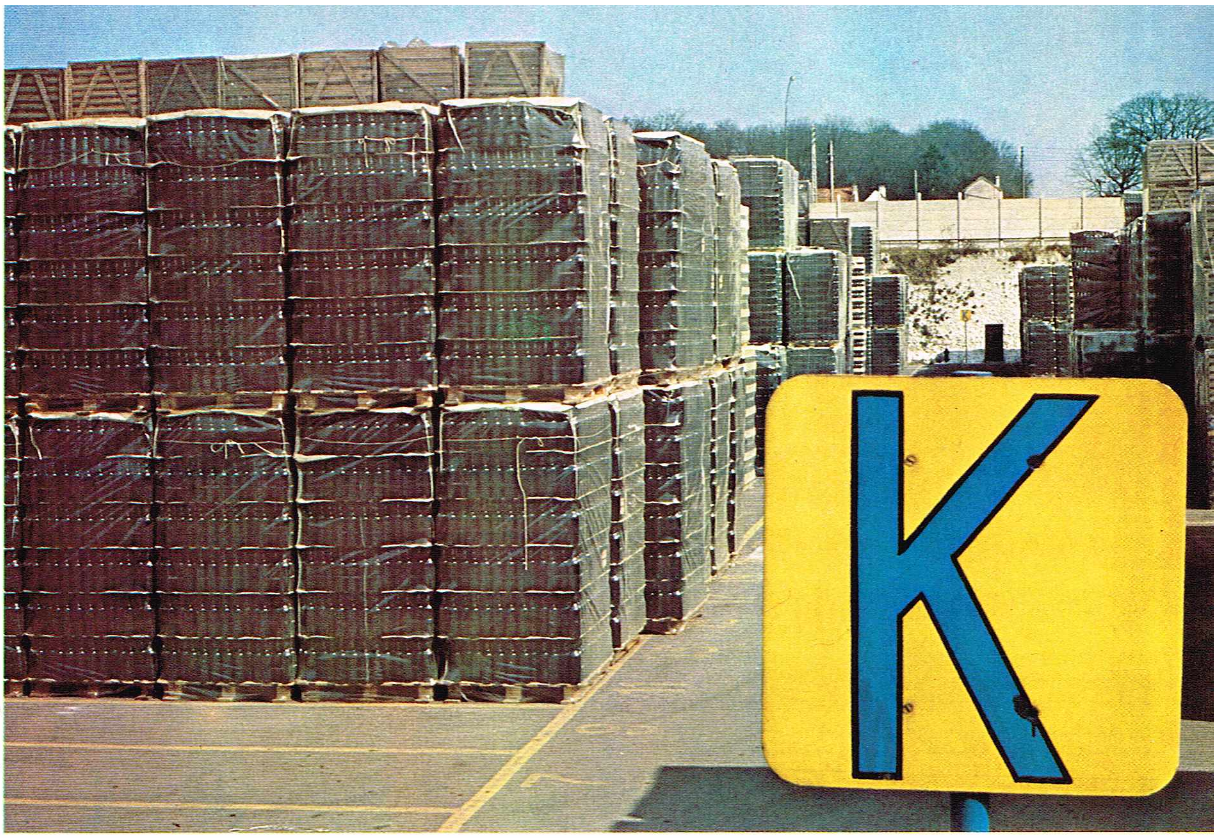

Ian Berry - Magnum

à l'entrée de ces matériels d'une table permettant une alimentation correcte. C'est le cas des laveuses et des encaisseuses, par exemple. Ces tables d'accumulation sont composées d'un nombre important de convoyeurs unitaires juxtaposés et synchronisés quant à la vitesse d'entraînement. Inversement, il faut dégager rapidement des ensembles d'emballages au niveau d'autres matériels tels que dépalettiseurs par couches ou décaisseuses. On utilise alors une table de déchargement, sœur jumelle, dans sa conception, de la table d'accumulation.

Le stockage des emballages comprend deux sections : la zone « vide » et la zone « plein ». Pour la zone « vide », et chaque fois que la chose est possible, on stocke à l'extérieur. Cela n'offre aucun inconvénient pour les emballages consignés revenant de la clientèle en casiers plastique, ni pour les récipients neufs livrés sur palettes par couches avec barquettes ou intercalaires et recouvertes d'un film rétractable. Il faut toutefois penser que les palettes en bois sont sensibles à l'eau. On conservera juste la quantité suffisante d'emballages vides à proximité des zones de dépalettisation.

En revanche, les emballages pleins devront être sous toit, car le froid, le soleil ou les intempéries risquent de nuire au produit, à son emballage ou à son suremballage. Le soleil nuit aux qualités organoleptiques de la bière ; le froid risque de faire éclater des bouteilles après prise en masse du contenu ; l'eau n'arrange pas les cartons. Enfin, en matière d'emballages vides, on ne laissera pas à l'extérieur des récipients livrés en cartons.

Pour les découpes de carton mises en œuvre dans le suremballage, il faudra respecter certaines conditions de température et d'hygrométrie dans les zones de stockage réservées à cet effet. Les matériels qui traitent le carton pour l'emballage primaire de produits alimentaires ou pour le suremballage de conditionnements unitaires sont très sensibles à l'état du matériau. On peut voir le rendement de ces machines varier de plusieurs points si le degré d'hygrométrie s'éloigne de son optimum voisin de 45 % (ce qui correspond à 5 % d'humidité relative au niveau du carton). Pour les rouleaux de complexes à base de carton, on estime qu'un stockage au sec sans souci d'hygrométrie et de température suffit.

Ainsi que nous l'avons déjà signalé, l'espace immobilisé coûte cher, aussi a-t-on intérêt à stocker un maximum de produits sur un minimum d'espace. Cela se fera en regroupant les emballages sous forme de charges aussi compactes que possible. Ces charges pourront, en outre, être gerbées sur plusieurs hauteurs. On sera, bien entendu, limité par la hauteur sous plafond, mais plus encore par la résistance du sol, à considérer avant de modifier un système de stockage. C'est ainsi qu'une société a vu un jour le plancher de son premier étage s'effondrer parce

▶ *Au niveau des zones de stockage de chargement, les charges palettisées sont manutentionnées le plus souvent par des chariots élévateurs autonomes.*

Ian Berry - Magnum

qu'elle avait décidé de stocker des cartons à plat au lieu de cartons préformés comme elle le faisait jusqu'alors.

Autre disposition intéressante, la juxtaposition des zones dévolues au plein et au vide dans la mesure où, les stocks « respirant », il est possible d'empiéter en cas de besoin sur la zone voisine. Il faut effectivement savoir qu'un stock minimal est indispensable et que celui-ci évolue dans une année, la demande n'étant pas constante. La consommation des boissons rafraîchissantes augmente en été, et il faut, en prévision de cette demande accrue, un stockage prévisionnel multiplié par 2 ou 3.

La manutention des charges palettisées s'effectue par transpalettes à traction manuelle ou électrique, avec conducteur porté ou non, par chariots élévateurs à fourches électriques, à moteur à gaz ou Diesel, ceux-ci étant seuls capables de gerber les palettes, encore qu'il existe quelques matériels du type gerbeurs de palettes correspondant à un transpalette perfectionné.

Depuis quelque temps et afin de mieux gérer les stocks, des magasins à grande hauteur ont été construits, pilotés par ordinateur. Ils sont composés de cellules affectées à certains produits et référencés par l'ordinateur. Un « transtockeur » introduit les charges dans ces alvéoles suivant les disponibilités et les reprend en fonction de la demande du service commercial.

Nous serions incomplet sur ce sujet si nous ignorions les **accessoires d'emballage et de conditionnement.** Il s'agit des détergents pour le lavage, des lubrifiants de chaîne, des bouchons et capsules, des étiquettes, de la colle, des bandes gommées, des agrafes, des housses plastiques, des feuillards, etc. Ils ne sont évidemment pas stockés avec les emballages pleins ou vides mais dans des lieux qui leur sont propres, à proximité du point d'utilisation souvent, et dans les conditions requises. L'humidité est encore l'ennemi n° 1, notamment pour les joints liège, pour les étiquettes. Le gerbage inconsidéré de certains types de capsules peut entraîner des déboires lors de leur mise en œuvre.

Le conditionnement et son environnement

Ainsi que nous le disions au début de notre développement, le terme de conditionnement fait intervenir des paramètres subjectifs. Il s'agit en fait de conférer à un produit, par le biais d'un emballage approprié, les caractéristiques que le consommateur souhaite lui attribuer *a priori*. Dans ces conditions, il est probable que celui-ci aura des motivations d'achat.

Conditionner quelqu'un, c'est agir sur son inconscient pour provoquer une modification de ses réactions et les orienter dans un sens souhaité. Conditionner un produit signifiera modifier ses paramètres intangibles, et notamment sa présentation extérieure pour le parer de qualités attractives. Il est évident que, pour des produits de première nécessité, cette notion de conditionnement est devenue particulièrement importante du fait de la mutation des formes de commerce ces dernières années. Avec le développement du libre-service et des grandes surfaces, le produit industriel de grande consommation doit être son propre vendeur. Le commerçant traditionnel connaissait ses produits et conseillait sa clientèle en fonction de ses habitudes et de ses penchants connus de lui. Tout cela a disparu aujourd'hui, et le consommateur fait son choix parmi de nombreux produits similaires qu'il ne connaît pas ou qu'il connaît mal. Il faut donc d'abord attirer son attention, ensuite l'intéresser et lui plaire pour déclencher, en troisième étape, l'acte d'achat. Les motivations régissant chacune de ces étapes sont étudiées depuis de nombreuses années, et quelques conclusions ont déjà pu être tirées.

Comment un conditionnement peut-il attirer l'attention ?

Trois possibilités à ce niveau : l'emballage en lui-même est particulier; une couleur ou un motif coloré caractérise l'emballage; un graphique particulier frappe l'œil au passage.

- L'emballage peut se distinguer par le **matériau** mis en œuvre ou par sa **forme.** Dans le secteur des liquides alimentaires, où le verre prédomine, une boîte en métal ou un emballage en complexe-carton attire l'attention, de même des bocaux en verre au milieu du rayon des conserves de légumes essentiellement constitué de boîtes métalliques. La forme de l'emballage peut aussi compter dans la mesure où intervient à un moment déterminé une forme nouvelle : vin en carafes ou en aiguières; eau en bouteilles plastiques à section carrée; pâté en terrines; boîtes de bonbons ayant la forme de personnages célèbres (Donald, Mickey, père Noël, saint Nicolas, etc.) ; bas et collants pour femme dans des pommes de plastique, etc.
- Nous savons tous que certaines **couleurs** attirent nos regards plus que d'autres : un rouge vif plus qu'un bleu pâle, un vert plus qu'un beige, un blanc plus qu'un gris, etc. Le support de ces couleurs peut être l'emballage lui-même ou un de ses accessoires : surcapsules, étiquettes. Dans certains cas, des décors répétitifs marquent la présence des emballages par l'harmonie d'ensemble qui s'en dégage : vague de certaine marque laitière bien connue.
- Les **graphismes** permettent aussi d'attirer l'attention de l'acheteur potentiel dans la mesure où, se détachant sur un fond relativement terne, ce sont eux qui agissent comme une couleur vive. La forme d'ensemble du *sigle,* sa compacité, sa perception sont autant d'éléments qui

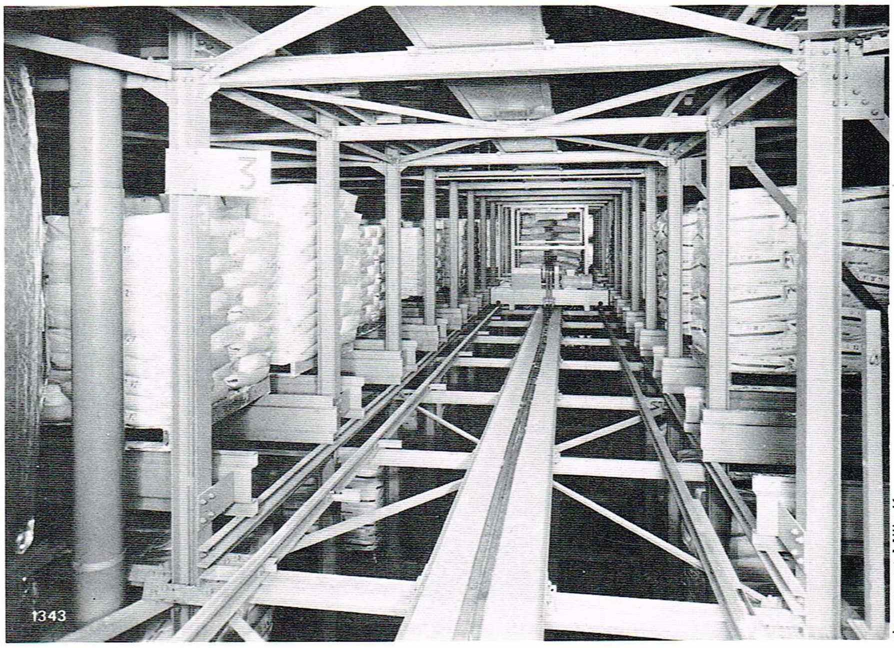

document Mills K.

▲ ***Dans ce magasin à grande hauteur, les alvéoles, à chaque niveau, sont desservis par un « transrobot ».***

Revue Embouteillage - Conditionnement

▼ ***Un décor motif répétitif est un élément de repère, un signal motivant pour le consommateur.***

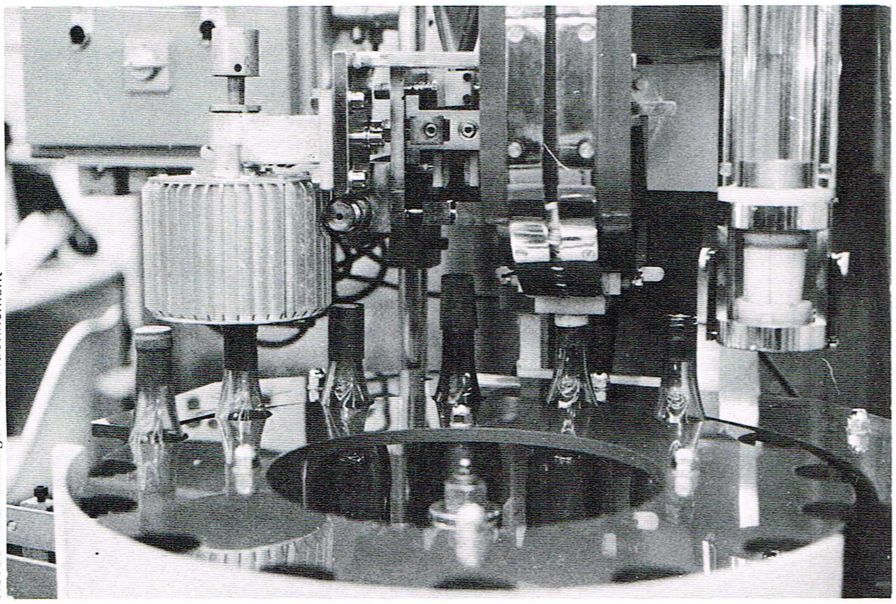

Revue Embouteillage - Conditionnement

▲ *Il est possible de remplacer la surcapsule par un simple manchon rétractable qui donne une présentation comparable au surbouchage. Sur ce document, les diverses phases de l'opération.*

jouent sur l'attrait que pourra exercer l'emballage dans un linéaire.

Car finalement, tout cela est bien relatif. Si tous les produits étaient emballés dans des récipients de même couleur, ils auraient beau, pris séparément, attirer l'œil, rien d'important ne les distinguerait, regroupés côte à côte. C'est par rapport aux emballages concurrents qu'il faut tester le sien. Dans l'ensemble, un conditionnement bien étudié gagne à être revu deux ans plus tard, car, en général, quand une présentation a du succès, elle est très vite imitée.

Il existe des matériels conçus pour la comparaison de deux emballages. Leur principe est simple : partant d'un dispositif optique déréglé, on amène celui-ci progressivement à la netteté. Le sujet testé indique ses impressions, ce qu'il voit, dans quel ordre, l'emballage qu'il reconnaît le premier, etc. Grâce à ces analyses fines portant sur plusieurs types de conditionnements, on peut choisir celui qui a le meilleur impact. A noter que le graphisme est testé lui aussi sur ce même appareil. Après mise au point, on laisse la personne testée observer le conditionnement pendant des temps déterminés, de plus en plus longs. On note, pour chaque produit, le temps minimal de vision nécessaire à sa reconnaissance.

Cela est très important dans les linéaires où le consommateur donnera la préférence à une marque qui lui a déjà donné satisfaction si, lors d'un autre achat, il la reconnaît par son sigle. A moins qu'il n'en ait entendu parler lors d'une séquence publicitaire à la radio ou à la télévision. Ce sigle est une chose primordiale, car, pour le fabricant, c'est un signal dirigé vers le consommateur. Il doit d'ailleurs être doublé de signaux secondaires qui identifient et expliquent les fonctions, attributs et qualités du produit. C'est ainsi que la couleur rouge désigne le lait entier, la couleur bleue le lait demi-écrémé. Chaque industriel peut jouer sur un clavier de couleurs pour différencier ses diverses fabrications.

Comment un conditionnement peut-il intéresser et plaire ?

Il convient de rappeler que l'emballage et ses accessoires sont le seul lien entre le fabricant du produit et le client, c'est pourquoi l'image de marque, ou l'image du produit, dépend souvent de la perception de l'emballage. Or celle-ci se fait à deux niveaux : au moment du choix-achat et à celui de la consommation-jugement.

Dans le premier cas, nous sommes amené à l'attractivité de l'emballage. Contrairement à une opinion assez répandue, le consommateur ne lit pas toujours l'information sur l'emballage au moment de l'achat, mais souvent ensuite, à son domicile. On a constaté par exemple que, pour des produits présentés à table dans leur emballage, beaucoup de personnes contemplent, lisent, jugent au moment exact où, la bouche pleine au repas, empêchées de dialoguer, leurs yeux se fixent par besoin sur l'emballage. C'est à ce moment curieux, apparemment sans intérêt, que se construit souvent dans le cerveau de beaucoup de consommateurs l'image qu'ils se font d'une entreprise et de ses produits. Cela explique l'importance que l'on attache à cet instrument privilégié de communication.

Plaire, l'emballage le peut dans la mesure où il renferme ce que le consommateur recherche pour son existence quotidienne : sel, pain, sucre, eau, huile, etc. Dans ce cas, le consommateur est guidé par des questions de prix surtout. En revanche, pour des produits moins courants, de valeur marchande plus élevée, le consommateur est sensible à la perception globale du produit ; il transfère au contenu les impressions que lui laisse le contenant. Ainsi, le matériau plastique est considéré comme une formule moderne, pratique, de notre temps, mais avec beaucoup d'inconvénients, cependant que le verre demeure dans l'esprit de bien des gens une formule traditionnelle à laquelle il faut rester fidèle ; le consommateur est d'avis que le verre assure une conservation optimale, alors que le plastique en donne une mauvaise. On trouve des résultats semblables si on considère les rapports contenant-contenu au niveau de l'hygiène du contenu et de la santé : la plus mauvaise conservation des propriétés organoleptiques est attribuée au métal.

Une bouteille de vin aura plus de succès si elle est en verre que si elle est en plastique, car le vin est considéré comme un produit noble : il « mérite » donc le verre. En revanche, l'eau de source se contente de la bouteille plastique, car c'est la légèreté de l'emballage qui prime ; nous y ajouterons la couleur légèrement bleutée de l'emballage qui, dans l'esprit du consommateur, rappelle la limpidité des torrents de montagne et symbolise la pureté. Le lait, symbole de pureté et d'hygiène, ne saurait être emballé dans un emballage aux couleurs criantes, la couleur blanche doit prédominer ; en outre, le complexe-carton semble mieux accepté que la bouteille plastique.

Dans certains cas, le conditionnement se doit de répondre au désir psychologique de l'acheteur. C'est ainsi que le chef de produit de *Meccano* expliquait récemment : « Pour les cadeaux de Noël ou d'anniversaire, nous ne pouvons pas présenter de jouets dans des boîtes trop petites. Tout simplement parce que cela ne correspondrait pas à l'image que se font les enfants d'un cadeau de Noël. Par contre les boîtes qui complètent les hobbys avec des accessoires sont plus fonctionnelles. » La dimension a aussi son impact. *Unilever* a ainsi préféré rejeter une proposition de ses services techniques visant à diminuer la hauteur de ses barils du fait de progrès technologiques réalisés au remplissage, par crainte de voir ses ventes diminuer. Le consommateur est en effet très sensible au volume extérieur. Il se satisfait alors d'une impression, fût-elle fausse.

Autre élément qui intéresse le consommateur, mais au niveau de la consommation ou de l'utilisation du produit : le service rendu par l'emballage. Est-il facile à ranger ? Est-il facile à ouvrir ? Peut-on le refermer ? Répond-il à l'utilisation que l'on veut en faire : pique-nique, repas à la maison, repas en collectivités, etc. ?

Enfin la question de l'environnement peut intervenir aussi, le consommateur étant beaucoup plus sensibilisé aujourd'hui aux problèmes des déchets de consommation.

Le consommateur a également ses habitudes, qui changent périodiquement sous l'effet de facteurs variés. On conditionne les pâtes sous papier jaune, car cela rappelle le jaune d'œuf, et partant, la fabrication artisanale de ce produit. On ne concevait pas le sirop de menthe autrement que vert ou le sirop de fraise que rouge. Aujourd'hui, c'est la mode des produits sans colorants... Les modes de vie changent.

La présentation plus ou moins luxueuse influe sur le choix au niveau du linéaire, de même que la figure imprimée représentant le contenu, car le consommateur aime « voir » ce qu'il achète, même si l'impression reprend un dessin imitant la réalité, souvent même en la perfectionnant. La quantité de produit induit une réaction tendant à donner une idée de consistance à l'acheteur. Nous pourrions donner encore de nombreux exemples montrant à quel point le consommateur tend à acheter en fonction de stimuli induits par l'emballage.

Voyons maintenant les techniques qui permettent de personnaliser un produit.

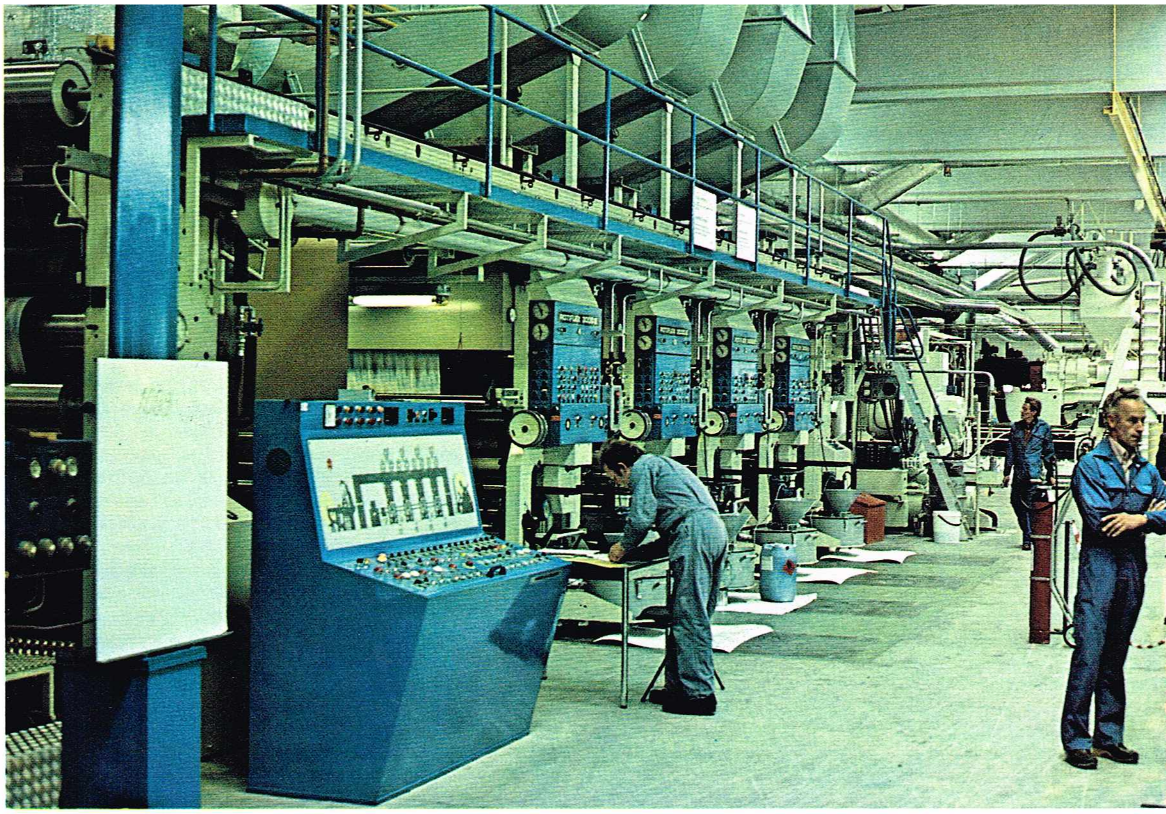

Revue Embouteillage - Conditionnement

◀ ***Imprimeuse flexo à 4 postes permettant la réalisation simultanée d'emballages différents, textes et décors.***

De l'emballage au conditionnement : les techniques de mise en œuvre

Impression directe du contenant, habillage de celui-ci, telles sont les deux techniques principales qui permettent de donner à l'emballage cette touche subjective qui fait de lui un conditionnement.

L'impression directe du contenant

Cette impression se fait avant arrivée à l'atelier de conditionnement, directement sur le matériau : pour les boîtes de métal, sur la feuille de métal avant qu'elle soit découpée ; pour le carton plat destiné aux emballages de groupements sur machine, directement à partir du rouleau avec réalisation ultérieure des découpes ; cependant que, pour le carton ondulé, l'impression se fait ordinairement sur la découpe préréalisée. Une technique nouvelle imprime le papier de couverture en rouleau avant son assemblage sur le train d'ondulage. Les complexes sont également imprimés directement à partir du rouleau sur le carton avant enduction de polyéthylène chez certains fabricants, sur le polyéthylène externe pour d'autres. La technique d'impression peut être de trois types : typographie, flexographie, offset ou héliographie (*fig.* 25).

La **typographie** et la **flexographie** utilisent un matériau (plomb, caoutchouc ou plastique) gravé à l'envers. La forme en relief ainsi obtenue, appelée cliché, est enduite d'encre et reportée sur le matériau à imprimer.

L'**offset** utilise une plaque traitée différentiellement en zones prenant l'encre et en zones ne prenant pas l'encre. Les premières correspondent aux caractères devant être imprimés. La plaque offset est obtenue par report de la plaque à imprimer sur une plaque métallique en zinc, en aluminium, le plus souvent composée de plusieurs métaux. La technique transfert est la photogravure. Portant l'image à l'endroit, cette plaque sera cintrée sur un cylindre, mouillée, puis encrée à chaque tour. Les zones encrées seront transmises au papier par un cylindre intermédiaire appelé blanchet.

Dans l'**héliographie**, l'impression des plaques se fait en creux par un procédé photomécanique. Cette technique permet d'obtenir en une fois une application d'encre d'épaisseur variable. On obtient ainsi toutes les nuances de l'original, la plus grande intensité d'impression correspondant aux creux les plus profonds. On obtient la forme d'impression par gravure chimique à travers une réserve obtenue par voie photographique soit d'un cylindre de cuivre, soit d'une plaque en cuivre ajustée ensuite sur un cylindre. La copie s'opère sous positif, puisque les éléments imprimants sont en creux.

Le principe de la machine est le suivant : le cylindre « gravé » tourne, partiellement immergé, dans un bac d'encre assez volatile. Celle-ci ruisselle sur les blancs et remplit les creux. Une lame d'acier souple, la racle ou le « docteur », essuie le cylindre. Le papier, en bobine ou en feuilles, est pressé par un autre cylindre habillé de caoutchouc et reçoit une épaisseur d'encre variable. Il est ensuite séché.

Cette dernière technique donne de loin les meilleurs résultats, mais elle coûte plus cher que l'offset et, surtout, que la typographie. Elle ne devient valable que pour de grandes productions ou pour des productions dans lesquelles le rendu des couleurs et des détails est primordial.

La **reproduction des couleurs** peut se faire par les trois techniques. On les décompose suivant les composantes fondamentales (rouge, bleu, jaune), et on réalise autant de clichés ou autant de plaques qu'il y a de couleurs. Avec la couleur noire et la couleur or, on travaille généralement en cinq temps d'impression. Les couleurs doivent, bien entendu, être repérées les unes par rapport aux autres.

fig. 25

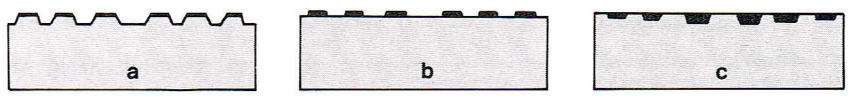

▼ ***Figure 25 : éléments imprimants ; a, typo : éléments imprimants en relief ; b, offset : éléments imprimants et non imprimants sur le même plan ; c, hélio : éléments imprimants creux proportionnels à l'intensité.***

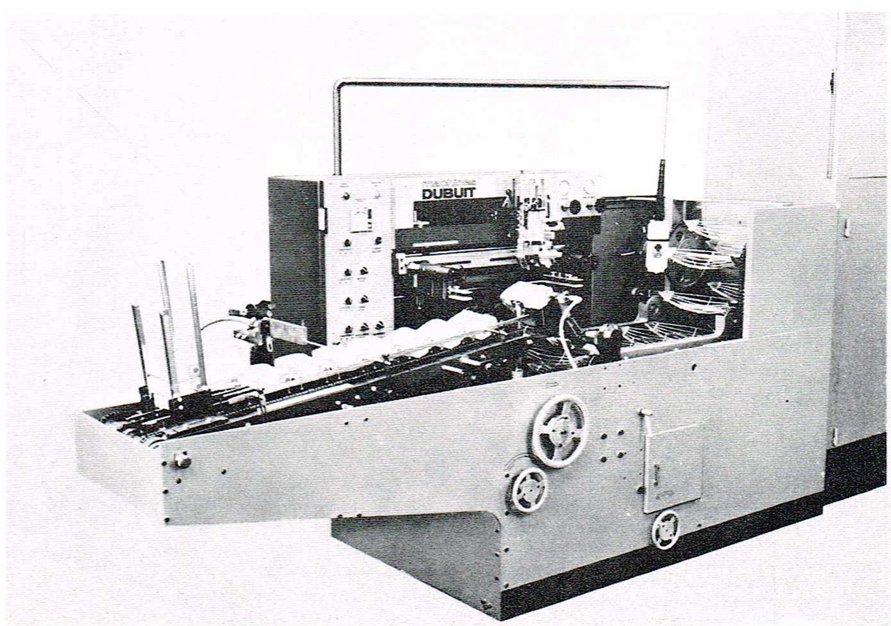

document Machines Dubuit

▼ ***Impression de contenants plastiques par sérigraphie.***

▶ *Figure 26 : principe du gaufrage.*

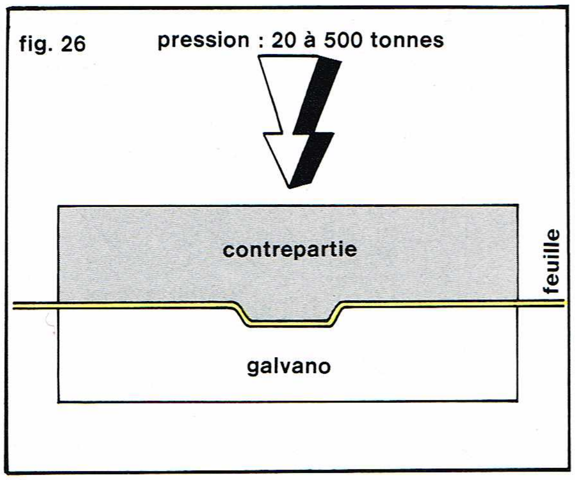

Les feuilles métalliques destinées à la fabrication des capsules peuvent aussi être réalisées par l'une de ces techniques, mais il faut concevoir le décor et le graphisme en tenant compte de la déformation que fera subir au métal l'opération d'emboutissage. Cette méthode est toutefois inapplicable dans le cas des capsules à jupes longues. Il faut alors faire appel à une méthode par report ou à la **sérigraphie**. Cette dernière technique, appelée aussi impression à l'écran de soie, est très utilisée pour la décoration des bouteilles plastiques. Elle utilise une toile tendue sur un cadre appuyé sur le support à imprimer. L'encre déposée sur cet écran est poussée par une racle et passe à travers les mailles libres. A la sortie de l'appareil, un four sèche le contenant.

▼ *Figure 27 : schéma de principe du staniolage (d'après document Baele-Gangloff).*

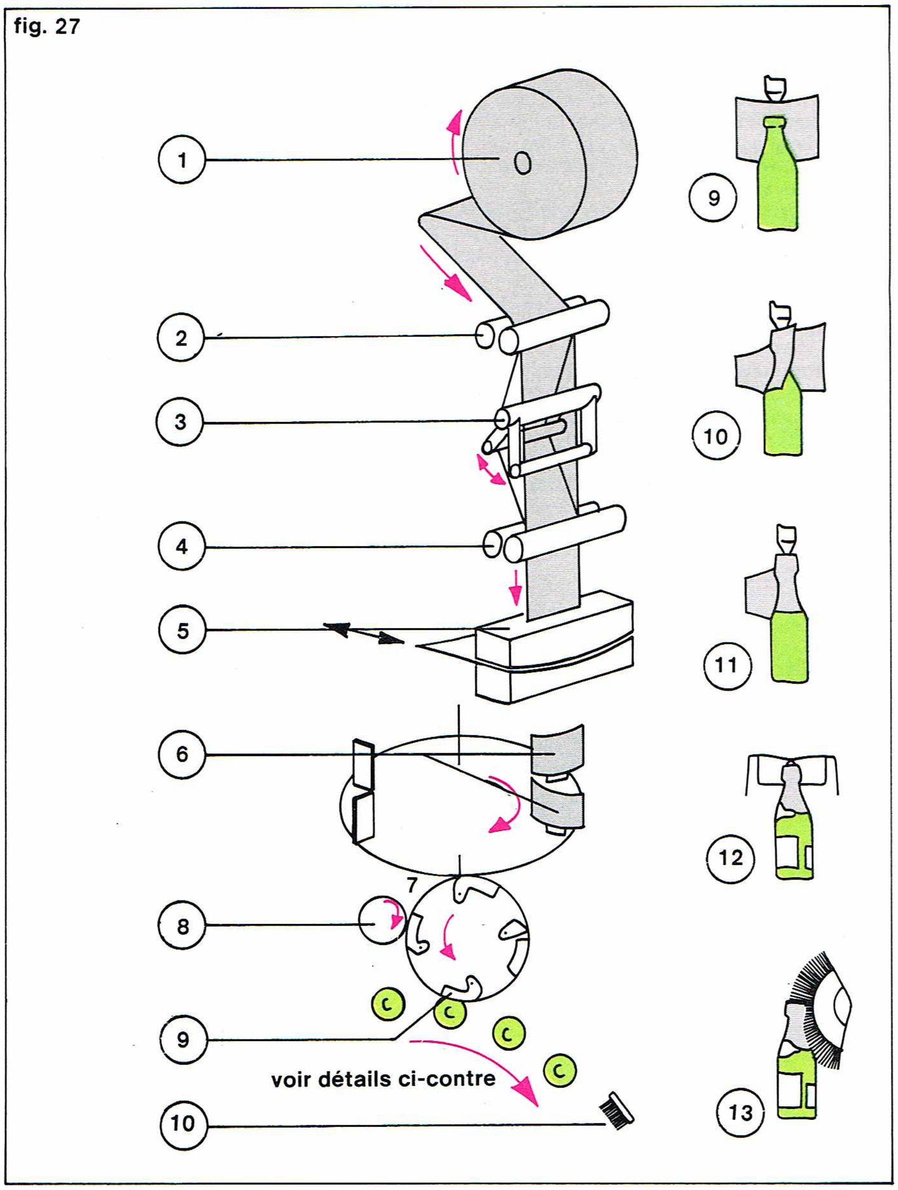

Dernière technique apparentée aux précédentes, car elle personnalise le contenant : le **gaufrage** des matériaux ; mais il ne s'agit pas d'impression au sens propre du terme. On fait subir au matériau un traitement mécanique visant à lui donner un relief, la feuille est pressée entre une forme en creux (galvano) et une forme en relief (contrepartie) [*fig.* 26]. De telles techniques sont utilisées pour les capsules et surcapsules (en tête et sur la jupe), pour les aérosols, sur les étiquettes, etc.

Habillage du contenant

Il s'agit de la pose de surcapsules, de stanioles ou d'étiquettes, pour ce qui concerne les contenants destinés aux liquides que nous étudions plus particulièrement dans ce chapitre.

La **pose des surcapsules** utilise un distributeur de capsules suivi d'un matériel d'adaptation sur le col de la bouteille : plongeur permettant le simple enfoncement de la capsule dans certains cas. Les capsules en matières plastiques sont ouvertes par des crochets, cependant que la bouteille pénètre à l'intérieur. Les crochets se retirent ensuite. Pour les capsules en aluminium ou en plomb-étain, le sertissage sur le col s'effectue par lissage du métal sur le col du contenant au moyen d'une tête centrifuge à molettes en caoutchouc rappelant les têtes utilisées pour le sertissage des capsules métalliques sur les bagues à vis.

Les **stanioles** sont délivrées par bandes à partir de rouleaux de papier aluminium. Encollées, elles sont déposées sur le col de la bouteille et drapées sur celui-ci.
Le principe de la stanioleuse est schématisé *figure* 27. La bobine d'aluminium **1** est placée sur un axe à la partie supérieure du poste. La feuille est engagée entre deux couples de rouleaux caoutchouc **2** et **4** qui la font progresser en continu. Entre ces deux couples de rouleaux, est placé un bras de tension mobile **3** qui, au moment de la découpe **5**, tire la feuille d'aluminium, immobilisant ainsi les rouleaux inférieurs **4** entraînés par friction et absorbant le surplus d'aluminium déroulé pendant le temps nécessaire à la découpe. Après cette opération le bras de tension revient en arrière, libérant ainsi le surplus d'aluminium qu'il avait absorbé. La découpe de la feuille d'aluminium par le couteau **5** est commandée par deux cames fonctionnant dans un bain d'huile. La longueur de la staniole est déterminée par la vitesse de rotation des rouleaux d'entraînement, qu'il est possible de modifier en changeant le rapport des pignons de commande. Après sa découpe, chaque staniole est réceptionnée, puis maintenue par des plaques **6** munies de ventouses d'aspiration. Ces plaques conduisent les découpes d'aluminium vers un cylindre de reprise à pinces **7** qui les reprendra et viendra les déposer sur le col de la bouteille. Pendant ce transport, la feuille d'aluminium passe contre un rouleau encolleur **8** alimenté en continu par une pompe qui dépose les bandes horizontales de colle sur toute la surface de la feuille. Lors de l'apposition sur la bouteille **9**, la feuille d'aluminium est fermement pressée sur le col qui s'enfonce légèrement dans des tampons de caoutchouc mousse. La bouteille passe ensuite dans une rampe assurant son enroulement autour du col, ainsi que son lissage, par deux pivotements successifs **10** et **11**, un tour complet assurant un lissage plus poussé autour du goulot. La staniole est alors rabattue sur le bouchon par des galets **12**, puis éventuellement lissée par une brosse **13**.

Les **étiquettes** livrées en paquets de mille sont déposées sur les récipients par une machine appelée étiqueteuse. Ce matériel peut utiliser des étiquettes autocollantes ou non. Les premières, qui se développent actuellement sur le marché, sont encore d'un prix de revient relativement élevé qui les limite aux produits à forte valeur marchande et à étiquetage simple. Les matériels sont en ligne, et, au passage de l'emballage, l'éti-

quette se trouve décollée de son support papier et est transférée sur l'objet à étiqueter. Toutefois, les cadences réalisées sont relativement faibles, et la pose de l'étiquette n'est pas toujours absolument parfaite.

Avec les étiqueteuses traditionnelles, les étiquettes sont prises par « palettes » préalablement encollées, transmises à un cylindre rotatif qui les dépose sur l'objet à habiller. Au cours de ce transfert, les étiquettes sont saisies soit par aspiration, soit par des pinces montées sur le cylindre transfert. Les étiquettes sont ensuite lissées par courroies, brosses ou éponges. L'étiqueteuse peut être conçue « en ligne » ou « rotative » (*fig.* 28). Dans le premier cas, l'emballage traverse la machine suivant une ligne droite, et le lissage est réalisé par deux courroies à vitesse différentes entraînant la rotation du contenant, ce qui applique l'étiquette sur sa surface. Dans l'autre version, la bouteille entre sur un carrousel. Une tête la maintient fermement et lui impose des mouvements de rotation à certains moments. Durant son passage sur le carrousel, l'emballage reçoit son étiquette ou ses étiquettes (car il est possible d'en positionner plusieurs simultanément ou successivement). Le lissage se fait aussi sur le carrousel. A noter que, le mouvement des récipients étant totalement commandé, cette technique garantit une présentation parfaite du conditionnement : centrage des étiquettes; position des étiquettes, collerettes, contre-étiquettes les unes par rapport aux autres. On peut repérer le contenant muni d'un ergot, d'une encoche pour unifier la présentation et centrer les décors, les surbouchages luxueux par rapport à une génératrice définie.

Signalons que l'opération d'étiquetage au niveau des cadences industrielles demande des conditions opératoires bien étudiées, des matériels en parfait état et des accessoires d'étiquetage (colle et étiquettes) bien choisis. L'étiqueteuse est un matériel très sensible, et la moindre saleté gêne considérablement son bon fonctionnement. Suivant le matériau d'emballage, les conditions de l'étiquetage (bouteilles chaudes ou froides, mouillées ou non), le devenir du produit et sa destination (pôle Nord ou pays équatoriaux), la nature des étiquettes (papier, aluminium, complexe), le système d'encollage et la température d'encollage, l'industriel dispose d'une vaste gamme de colles parmi lesquelles il devra choisir celle qui est la plus adaptée à son cas particulier. Autres questions importantes à ce niveau : l'emballage devra-t-il être réutilisé ou non? faudra-t-il décoller ultérieurement les étiquettes? Si oui (cas des bouteilles consignées), il faut utiliser une colle qui se dissolve bien dans les produits lessiviels utilisés afin d'éviter un encrassement des laveuses par du papier en bouillie.

Quant au papier des étiquettes, il doit être coupé dans le bon sens (les fibres dans le sens de la largeur de l'étiquette). Dans le cas contraire, elles tiennent mal, et finissent par se décoller totalement.

Revue Embouteillage - Conditionnement

▲ ***Étiqueteuse rotative à un poste appliquant simultanément l'étiquette de corps et l'étiquette d'épaule.***

Conditionnement et information du consommateur

Parmi les informations que le conditionnement transmet au consommateur, certaines sont d'ordre légal; d'autres sont des compléments que le fabricant estime souhaitables pour une meilleure jouissance du produit qu'il conditionne.

Les informations obligatoires concernent la désignation précise du produit, le nom du fabricant ainsi que son adresse, celui du conditionneur et son adresse, s'il est différent du précédent, la quantité contenue en volume ou en poids, des mentions légales, pour certains produits tels que les eaux de source, « Autorisation préfectorale du... », « Autorisation du ministère de la Santé publique du... », la composition pour les produits préemballés (y compris les additifs et les colorants), la date de péremption s'il s'agit de denrées périssables, des informations concernant les conditions normales d'utilisation du produit. « Après ouverture, à conserver au froid et à consommer rapidement » (mention obligatoire pour le lait stérilisé ou le lait stérilisé UHT), etc. Pour certains produits, des textes prévoient des mentions obli-

fig. 28

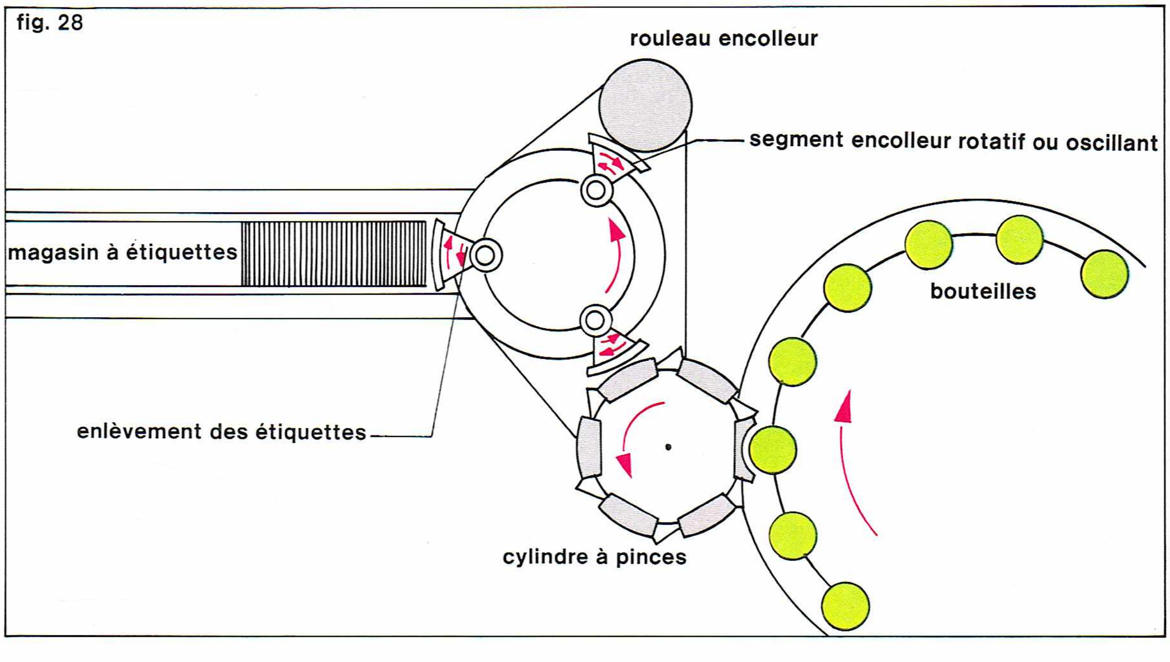

◀ ***Figure 28 : détails du mécanisme d'une étiqueteuse.***

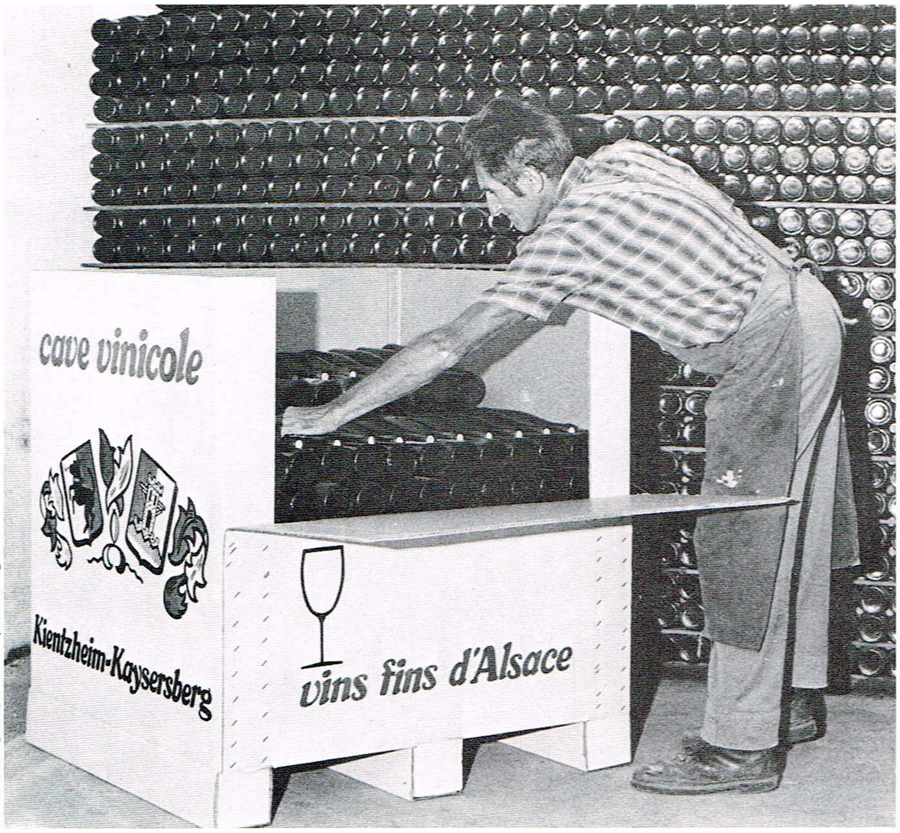

document groupe de Kaysersberg

▲ *Très facilement remis à plat après usage, cet emballage perdu en carton ondulé est recyclable.*

gatoires ou une couleur spécifique. C'est le cas notamment de tous ceux qui renferment des substances vénéneuses : articles d'entretien, cosmétiques, produits de jardinage, etc. C'est ainsi que le contenant de certains produits d'entretien doit être totalement entouré d'une bande verte portant en lettres noires très apparentes le mot « dangereux ».

Conscients de l'importance du dialogue qui se noue avec la clientèle par le biais de l'emballage et afin de lui donner un cadre reproductible, les industriels français ont décidé d'apporter leur concours aux consommateurs en participant à la définition d'étiquettes informatives dans le cadre de l'Association française pour l'étiquetage informatif (AFEI). Celle-ci constitue un cadre librement offert aux producteurs, consommateurs ou distributeurs permettant de mentionner toutes les performances et informations résultant d'un accord entre les deux partenaires avec contrôle, *a posteriori*, de l'exécution de décisions prises en commun.

L'emballage source de déchets et d'énergie

Qu'il soit consigné ou non, l'emballage finit un jour sa vie d'accessoire du conditionnement. Que devient-il ? Apparemment, et c'est ainsi que nombre de consommateurs voient la chose, l'emballage devient un déchet, un rebut sans intérêt que l'on jette. On ne sait pas très bien ce qui se passe au-delà de la poubelle, de la décharge, et cela n'a guère d'importance. Voilà une attitude fort négative.

Le consommateur a été sensibilisé ces derniers temps à l'impact de l'environnement sur sa vie, mais a-t-il réellement vu la totalité du problème ? Certainement pas ! On crie haro sur les industries qui polluent et qui perturbent notre cadre de vie. On a raison ! Mais il est curieux de constater que ceux qui crient le plus fort sont souvent ceux-là mêmes qui jettent l'enveloppe d'un bonbon ou un mégot de cigarette sur le trottoir ou encore abandonnent boîtes de conserve et papiers gras sur un lieu de pique-nique, exemples de tous les emballages dont on s'est « débarrassé ». En fait, il faut ramener le problème à ses justes dimensions et constater que ces faits relèvent davantage d'un manque de civisme et de correction que de la nature des emballages à polluer.

En matière de déchets, il convient également de distinguer entre les déchets industriels provenant de la fabrication des emballages et les déchets de consommation repris au niveau des collectes d'ordures. Les déchets industriels sont immédiatement récupérés et recyclés, parfois sur place (granulation d'une bouteille plastique non conforme et utilisation des granulés « mélangés » au compound neuf). Le verre est réutilisé immédiatement en verrerie et stocké dans les industries de l'emballage en vue d'un retour à la verrerie la plus proche. Les déchets de fer-blanc sont désétamés et réutilisés aussitôt en sidérurgie avec, corrélativement, une récupération non négligeable d'étain. Il en est de même pour l'aluminium, pour les papiers et cartons réincorporés au niveau de la fabrication de pâte à papier.

En France, le volume des ordures ménagères aura été en 1977 de quelque 14 millions de tonnes sur lesquelles les emballages ont une part de 45 % (soit environ 5,3 tonnes), qui se décompose ainsi :
- — matières plastiques : 5 % ;
- — papier-carton : 20 % ;
- — bois : 6 % ;
- — métal : 5 % ;
- — autres matériaux : 3 %.

Ces ordures ménagères peuvent être traitées de diverses façons : 32 % sont incinérées et libèrent une énergie calorifique ou électrique pouvant être utilisée par la suite (c'est ainsi que l'on peut dire que les ordures ménagères de dix habitants peuvent chauffer un habitant et lui donner de l'eau chaude toute l'année) ; 12 % subissent un traitement de compostage et de broyage ; le reste, soit 48 %, est mis à la décharge. Il est dommage de se priver des possibilités de réutilisation du matériau qu'offrent les emballages. Le verre récupéré, ou calcin, favorise la fusion dans les fours de verreries en diminuant la température requise, ce qui se traduit par un gain en matière et en énergie.

Pour les matières plastiques, et notamment pour le PVC, des études et des recherches récentes ont permis de chiffrer le coût global de vie d'une tonne de compound PVC utilisé pour la fabrication de bouteilles jusqu'à sa destruction par incinération : 17 027 thermies. Si l'on régénère le PVC (rendement de l'opération : 89,7 %), on conserve un potentiel énergétique important de 14 419 thermies. En tenant compte des besoins énergétiques pour cette régénération (1 251 thermies), c'est 82 % de l'énergie dépensée pour la fabrication du compound d'origine qui a été récupérée.

Ce bilan positif a incité les industriels à rechercher des utilisations possibles à cette matière régénérée. La législation excluant son usage en tant que contenant pour des produits alimentaires, on s'est orienté vers des objets finis présentant un caractère d'utilité et de pérennité, objets d'une valeur aussi élevée que possible, pour per-

Revue Embouteillage - Conditionnement

▶ *Ces bouteilles primées au niveau européen ont été réalisées avec 80 % de verre recyclé non trié.*

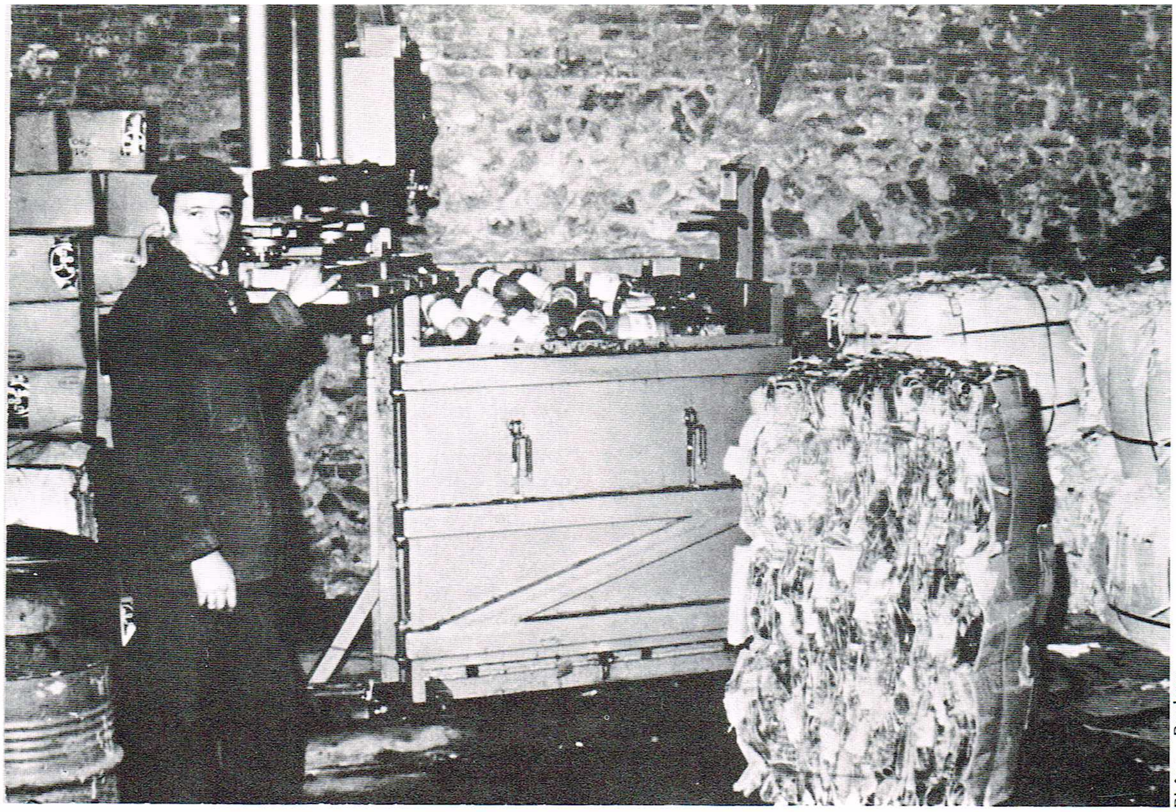

Rhône - Poulenc

◀ ***Après collecte sélective, les emballages sont compactés par types de matériaux; ici, papiers-cartons et récipients plastiques.***

mettre certaines dépenses au niveau de la récupération et du traitement. Il ne faut pas, en outre, que ces objets viennent à se substituer à d'autres actuellement réalisés à partir de matières et matériaux disponibles en France, mais il serait souhaitable au contraire qu'ils puissent prendre la place de produits ayant un fort impact sur la balance des paiements. Pour ces raisons, le choix s'est fixé sur les tuyaux et les gaines plus particulièrement utilisés pour le passage des câbles, l'évacuation des eaux, l'assainissement et le drainage. Ce sont des marchés à forte croissance (+ 20 % annuellement) qui représentent plus de 100 000 tonnes par an.

Ce taux de recyclage des matériaux d'emballage est actuellement le suivant :
— métal (essentiellement fer-blanc) : 60 %;
— verre : 38 à 40 %;
— papiers-cartons : 40 %;
— matériaux plastiques (essentiellement PE, PS, PVC) : 15 à 17 %.

Ces chiffres ne sont pas négligeables, et l'on s'étonne de cet engouement soudain pour le recyclage des matériaux. Depuis longtemps, l'industrie revend ses déchets d'emballage, mais le gaspillage demeurait au niveau des déchets ménagers. Mis à part le compostage dont le bilan n'était pas négatif, puisqu'il apporte à l'agriculture

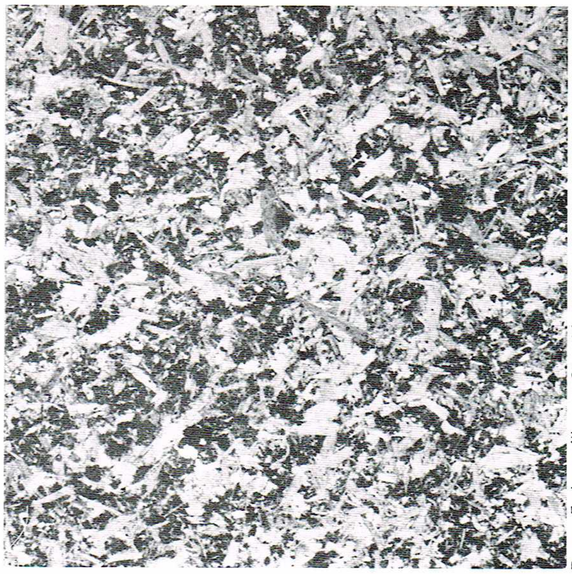

Revue Embouteillage - Conditionnement

◀ ***Les panneaux de particules de ce type utilisent, pour leur réalisation, des déchets d'emballages à base de complexes-cartons.***

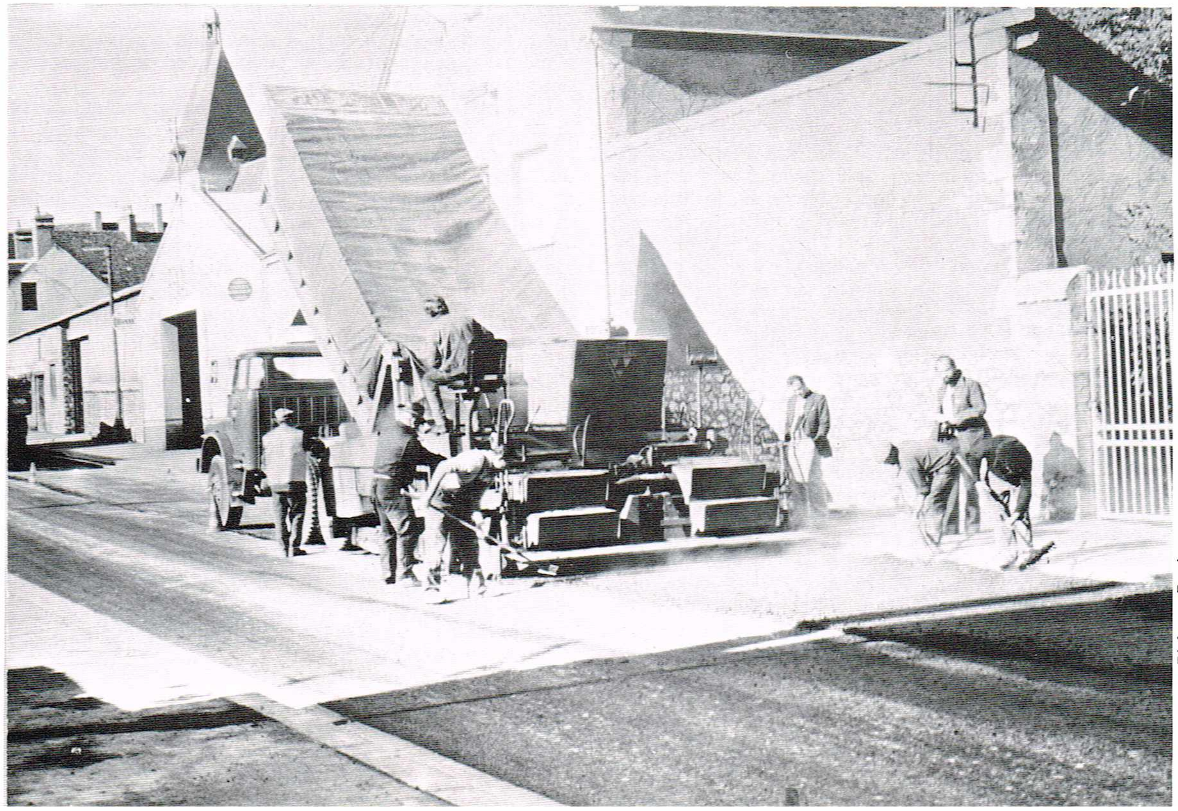

Rhône - Poulenc

◀ ***Les déchets de PVC entrent dans la composition du revêtement mis en œuvre sur nos routes.***

des engrais, la décharge, contrôlée ou non, et l'incinération étaient les solutions principales. On récupérait le métal, car son tri ne pose pas de gros problèmes, mais il n'en était pas question pour les autres matériaux, notamment le verre et le plastique.

C'est en 1971 que, pour la première fois, l'association « Progrès et Environnement » mit sur pied une opération « Vacances propres » dans dix-huit villes françaises, mais ce n'est qu'en 1974 que le but fut la récupération des emballages perdus en vue du recyclage des matériaux. On demanda aux ménagères de mettre de côté les emballages en papier-carton, plastique et métal. Un ramassage était organisé en plus des ramassages normaux. Puis on remplaça un des ramassages quotidiens par un ramassage des seuls emballages.

Des villes telles que Le Havre, Villefranche-sur-Saône et Lyon devaient prouver que les municipalités y trouvaient leur compte dès lors que l'infrastructure était en place. Les collectes concernent soit le verre et le plastique, soit le verre, le plastique et le métal. On peut penser que ces expériences, qui sont passées à l'état d'habitudes dans de nombreuses villes, continueront à se développer au cours des prochaines années sur une grande partie du territoire français.

De nombreuses recherches continuent à être faites par l'industrie à la demande des pouvoirs publics. On est parfois arrivé à de curieuses utilisations des matériaux d'emballage. C'est ainsi que la Société chimique et routière d'entreprises générales, la SCREG, avec l'appui du groupe Rhône-Poulenc, a mis au point un nouveau revêtement routier à base de goudron de houille (remplaçant le bitume). L'addition de PVC à ce revêtement permet des performances remarquables et des économies substantielles. Des réalisations existent dans le réseau routier français et sont très satisfaisantes. Par ailleurs, le groupe norvégien Elopak a conçu une utilisation du déchet complexe dans lequel sont conditionnés le lait et certaines boissons aux fruits : la production de panneaux de particules, similaires aux panneaux en bois, utilisables par les entreprises de construction.

Emballages et conditionnements : législation et réglementation

Législation et réglementation concernant les emballages et conditionnements sont actuellement très mouvantes. Elles s'affinent mois après mois, non plus au niveau national, mais à l'échelon européen. On demande au conditionnement d'apporter une information loyale, précise, complète et compréhensible. Loyale, car une information approximative ou déformée induit le consommateur en erreur; précise, donc indiquant non seulement les prix, mais tous les éléments indispensables à la formation du jugement; complète, en spécifiant les bonnes conditions d'utilisation du produit, les règles d'entretien à respecter; compréhensible, donc rédigée en langage accessible à tous.

La loi du 1er août 1905 sur la répression des fraudes reconnaît, dans son article II, le droit pour l'acheteur d'avoir des renseignements suffisants à sa disposition, puisqu'il stipule notamment qu'il devra être statué par des règlements d'administration publique sur les mesures à prendre en ce qui concerne « les inscriptions et marques indiquant soit la composition, soit l'origine des marchandises que, dans l'intérêt des acheteurs, il y a lieu d'exiger sur les factures, sur les emballages, sur les marchandises elles-mêmes, à titre de garantie de la part des vendeurs, les indications extérieures ou apparentes, le mode de présentation, nécessaires pour assurer la loyauté de la vente et de la mise en vente, ainsi que les marques spéciales qui pourraient être apposées facultativement ou rendues obligatoires sur les marchandises françaises exportées à l'étranger ».

En 1972, un décret a généralisé l'indication, sur les étiquettes des produits alimentaires préemballés, d'un certain nombre de mentions telles que poids ou volume, composition (avec détail des additifs et colorants), nom du producteur ou du conditionneur (à qui on peut s'adresser en cas de contestation), dates de péremption (s'il s'agit de denrées périssables), etc. Depuis l'arrêté du 16 septembre 1971, l'indication du prix de tous les produits et services offerts aux consommateurs doit être réalisée par étiquette, écriteau ou affiche. Un autre arrêté, du 20 septembre 1973 celui-là, prévoit que pour certaines denrées préemballées habituellement vendues en vrac (viande, charcuterie, fruits et légumes, etc.), l'étiquette devra porter, outre le prix et le poids, le prix au kilo.

Lors d'une récente journée d'étude et de concertation organisée par l'Institut français de l'emballage et du conditionnement, l'IFEC, M. Souverain, inspecteur général au Service de la répression des fraudes et du contrôle de la qualité, a fait le point sur la situation réglementaire européenne en ce qui concerne le secteur de l'emballage. Une réglementation se met peu à peu en place, dont devront s'inspirer ultérieurement les législations nationales. Dès la fin de 1976, une directive cadre était adoptée à ce sujet par le Conseil des Communautés. Elle donne les grandes lignes de ce que devra être la réglementation afférant à la compatibilité contenant-contenu dans le secteur privilégié du conditionnement alimentaire. Ces matériaux et objets au contact des denrées alimentaires ne doivent présenter aucun danger pour la santé humaine ni entraîner une modification inacceptable de la composition des denrées. Cette loi-cadre annonce des directives spécifiques pour chaque matériau, dont une seule a été promulguée à ce jour : celle qui concerne les matières plastiques et qui doit entrer en vigueur en mai 1978. Ces directives spécifiques doivent comporter notamment :

— si possible et si nécessaire, la liste des substances et matières dont l'emploi est autorisé à l'exclusion de toutes autres;

— les critères de pureté de ces substances et matières;

— les conditions particulières d'emploi de ces substances et matières et/ou matériaux et objets dans lesquels ces substances et matières ont été utilisées;

— des limites spécifiques de migration de certains constituants ou groupes de constituants dans ou sur les denrées alimentaires;

— une limite globale de migration des constituants dans ou sur les denrées alimentaires;

— si nécessaire, des prescriptions visant à protéger la santé humaine des risques éventuels pouvant résulter d'un contact buccal avec des matériaux et objets;

— d'autres prescriptions permettant d'assurer le respect des dispositions de la directive générale;

— les règles de base nécessaires à la vérification du respect des dispositions précédemment édictées.

Pour les matières plastiques au contact des denrées alimentaires, si la liste positive des matières et substances admises est d'ores et déjà dressée, à l'heure où nous rédigeons ce document, les limites de migration totale et de migrations spécifiques n'ont pas encore été définies.

La Communauté européenne a aussi abordé le service de l'environnement et de la protection des consommateurs avec l'élaboration d'un projet de directive qui rejoint les prescriptions des textes français, avec, notamment, sur les préemballages, le prix à l'unité de mesure, et elle s'intéresse maintenant à l'élimination des déchets et aux économies de matières premières.

Côté quantitatif, la protection du consommateur passe aussi par le respect des volumes délivrés en préemballages, ce qui a été traité par des directives en décembre 1974 et janvier 1976. On a notamment limité le choix des volumes possibles pour les préemballages et défini la valeur nominale des préemballages par le volume effectivement contenu. La notion de volume ras-bord qui avait cours en France auparavant a été abandonnée. Une marque de conformité doit être portée sur le préemballage sous la forme d'un « epsilon renversé ». Les méthodes de contrôle du volume contenu par ces préemballages ont aussi été définies.

Dans le détail des directives en préparation, nous pourrions encore développer de nombreux points de réglementation, mais tous visent à parvenir à un consensus entre les partenaires (industriel; distributeur; consommateurs; pouvoirs publics) afin d'assurer la loyauté dans les transactions et les échanges. C'est sur cette constatation, la recherche du développement des échanges par la suppression des entraves liées aux réglementations nationales nécessairement différentes, que nous terminerons notre propos, lequel, partant des richesses naturelles, nous a ramené à celles-ci, puisque l'emballage n'est finalement que l'étape privilégiée d'un cycle naturel orienté par l'homme.

LE MÉDICAMENT

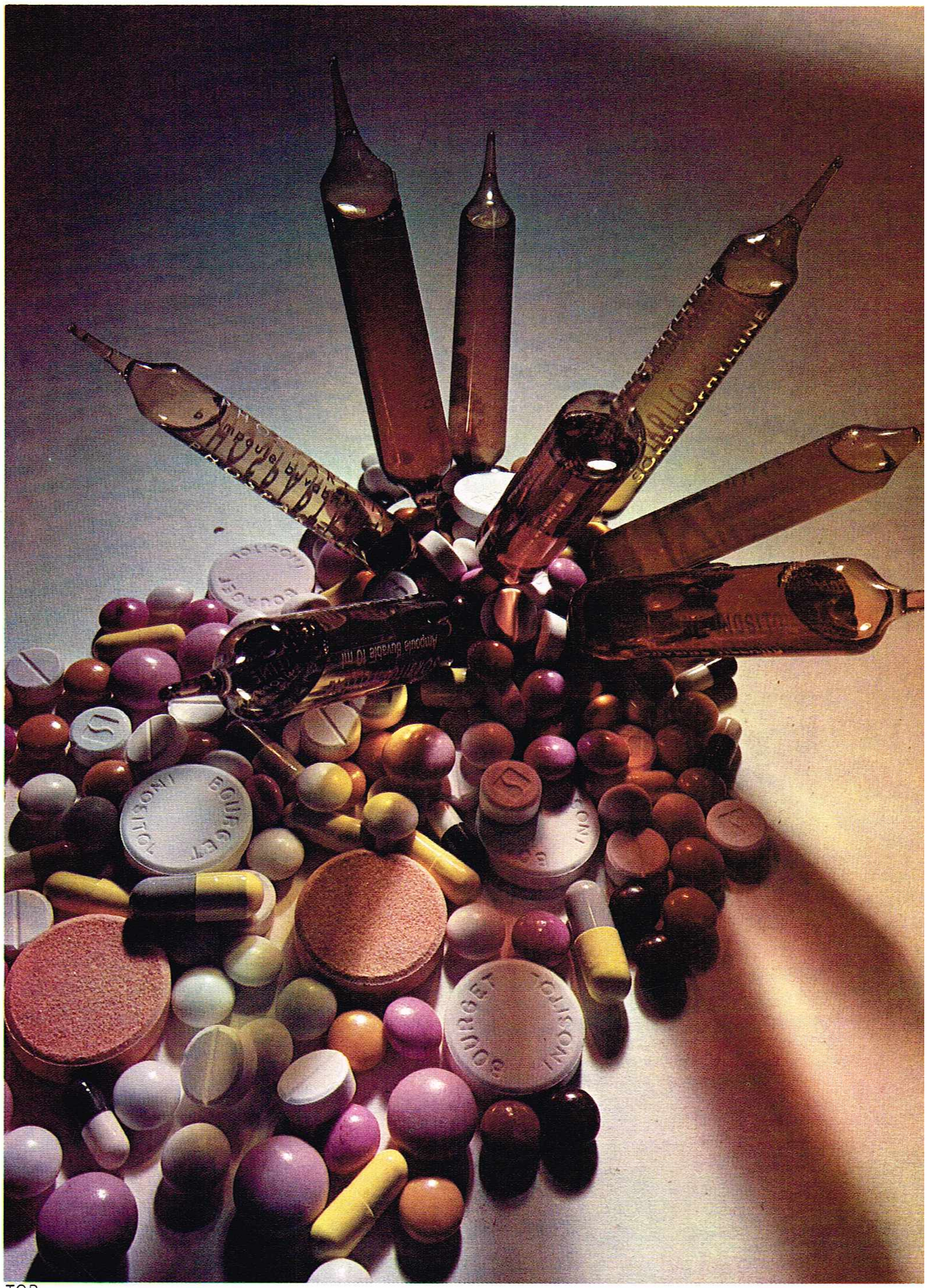

TOP

▲ ***Produit destiné au grand public, le médicament prend des formes et des couleurs attrayantes.***

En général, la notion précise de médicament est mal perçue des non-spécialistes. Il est communément admis qu'un médicament est différent d'un aliment et, bien sûr, d'un poison, encore que cette distinction soit due bien souvent à l'emploi et à la dose. Ainsi, les solutions nutritives administrées par voie parentérale (c'est-à-dire sous forme injectable) à des malades des services de réanimation ne comportent bien souvent que des substances banales, mais leur mode d'administration, leur stérilité obligatoire en font véritablement des médicaments. De même, des substances très actives et donc très toxiques telles que les curares, la morphine, présentées pour un usage médicamenteux, cessent d'être poison ou drogue au sens commun du terme. On voit donc apparaître dans la notion de médicament le *but thérapeutique*, la *présentation* et la *dose*.

Il peut être un produit destiné presque au grand public (certaines formes d'aspirine, laxatifs, dermopharmacie) ou un produit d'usage restreint soumis à prescription médicale. Dans ce cas, son originalité réside dans le fait que la cible publicitaire (le prescripteur) n'est pas le consommateur, encore que celui-ci ne paie pas la totalité du prix grâce aux couvertures sociales (assurance maladie) qui tendent à répartir sur la collectivité les risques individuels.

Le médicament, dans les pays à haut niveau de vie, est soumis à une réglementation toujours plus contraignante et à un contrôle de prix de plus en plus efficace. Cela est dû à une augmentation préoccupante de sa consommation, voire de sa surconsommation, et à l'attention que les pouvoirs publics portent aux dépenses de santé.

QUESTIONS LIÉES A LA TECHNOLOGIE

A quoi sert le médicament ?

Cette question est en apparence simple, mais nous allons voir que la réponse doit être nuancée. Le médicament sert à soigner les malades, et non les maladies : dans cette optique apparaissent des notions évidentes quand il s'agit de substances antibiotiques, d'insuline, d'anticoagulants. Mais le dernier exemple cité comporte également une notion de *prévention :* il s'agit de prévenir la formation de caillots dans l'organisme. De même, des substances iodées utilisées comme opacifiants radiologiques sont, à juste titre, classées dans les médicaments : ces opacifiants sont souvent injectables, donc stériles, et leur technologie est rigoureusement la même que celle des autres formes injectables. Le médicament apparaît donc parfois comme produit de *diagnostic*.

De la notion de médicament de la douleur on glisse lentement à celle de médicament du *confort*, et on a parlé, d'ailleurs à tort (mais le fait n'est pas dénué de signification), de « pilule du bonheur », savant dosage d'excitant et de tranquillisant.

Il faut également bien admettre que la notion de thérapeutique au sens traditionnel du terme n'a généralement rien à voir avec l'administration de la « pilule » anticonceptionnelle qui, soit dit en passant, n'est pas une pilule mais un comprimé. (Cette incidente illustre bien les limites de la connaissance du grand public en technologie pharmaceutique. Sur le même plan, le « cachet » d'aspirine a depuis bien longtemps cédé la place à un comprimé, mais l'expression subsiste.)

De même, si l'on veut bien garder à l'esprit que le médicament est destiné aux soins des *malades*, il faut également savoir que tout malade présente une composante fonctionnelle et une composante psychologique, ce qui fait que la même maladie peut avoir des manifestations différentes; même si les altérations objectives sont les mêmes chez deux malades, l'un peut garder une activité professionnelle et l'autre solliciter un arrêt de travail de la part de son médecin. Comment, dans ce cas, ne pas reconnaître que le médicament lui aussi a une composante psychologique énorme? De nombreux facteurs socioculturels ont une importance primordiale dans l'explication des différences d'habitudes thérapeutiques selon la civilisation que l'on considère. L'un des meilleurs exemples, légèrement en marge, il est vrai, de la notion classique de médicament, est celui des pratiques d'anesthésie en Occident et en Chine. Chez nous, on utilise l'anesthésie générale avec perte de conscience du patient opéré; ailleurs, l'acupuncture, aidée de l'emploi d'anesthésiques locaux, suffit.

On peut cependant définir le médicament d'après son usage. C'est un produit conçu pour apporter, à l'endroit où il est actif, une substance utile à l'homme (ou à l'animal). Ainsi la pénicilline en sac de cinquante kilogrammes n'est pas un médicament. Mais considérons un flacon stérile contenant une quantité soigneusement déterminée d'un sel soluble de pénicilline, accompagné d'une ampoule de solvant, stérile lui aussi; le tout supporte un étiquetage précis, un mode d'emploi, avec éventuellement indications et contre-indications : c'est un médicament.

I.G.D.A. - Rassegna medica

▲ *Mandragore : les propriétés de cette plante ont été décrites par Dioscoride. L'écorce, macérée dans du vin, a des propriétés sédatives.*

Historique de l'évolution

De tout temps, les hommes ont cherché à se soigner, et les premiers médicaments ont été faits à partir de substances d'origine naturelle : minérale, végétale ou animale. Les démarches intellectuelles utilisées ont été des plus diverses; parfois l'observation jouait un grand rôle, parfois on se fiait à des raisonnements des plus hasardeux :

— théorie des « signatures », qui liait l'aspect extérieur de la plante à un rôle thérapeutique éventuel (on peut citer l'usage de plantes rappelant l'aspect des serpents en cas de morsures de ces animaux, et l'aspect du ginseng : encore de nos jours, il sert d'argument publicitaire pour suggérer un pouvoir de régulateur hormonal, voire d'aphrodisiaque) ;

— association de l'amertume au pouvoir fébrifuge (justifiée dans le cas de l'écorce de quinquina utilisée dans le paludisme).

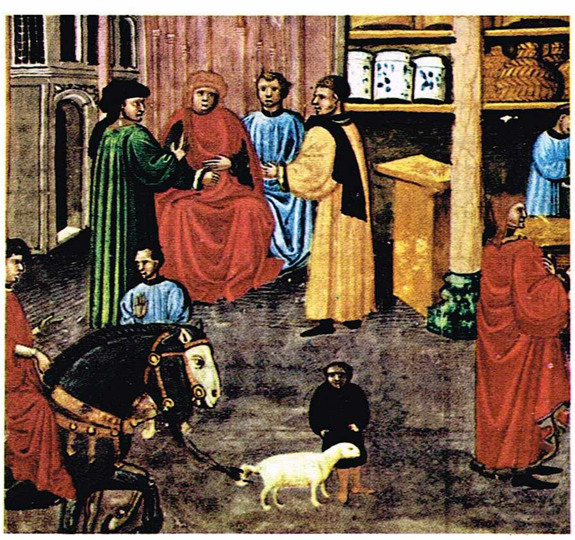

Carlo Erba

▶ *Une pharmacie italienne du XV^e siècle (miniature d'un manuscrit d'Avicenne, Bologne, bibliothèque universitaire).*

On trouve dans la médecine populaire, chez nous, des restes de cette période, et la thérapeutique moderne a souvent bénéficié de traditions fort anciennes. On doit cependant admettre que les premières thérapeutiques ont été fort hasardeuses et bien peu efficaces, d'où une recherche de procédés mystérieux de préparation qui suppléait, par la composante psychologique, à l'inefficacité biologique. De même, la célèbre thériaque comprenait plusieurs dizaines de composants, heureusement inactifs ou presque.

Les techniques employées étaient simples (préparation de tisanes, d'emplâtres, confection de pilules, de sirops), ou plus complexes (distillation à sec de produits divers). Mais les résultats étaient souvent mauvais, et, par exemple, il a subsisté longtemps la formule d'un sirop dit antiscorbutique qui ne contenait plus de vitamine C.

Mais ce sont le développement de la chimie, de la médecine scientifique et les découvertes technologiques, la seringue et l'aiguille par Pravaz (1853), la compression des poudres et les théories de Pasteur, qui ont fait du XIX^e siècle le début de la thérapeutique rationnelle.

Développement de la chimie

Les matières premières d'origine naturelle contiennent, à côté des molécules actives, de nombreux composants inutiles ou même nuisibles; ces molécules actives sont en quantités variables selon l'origine géographique, les conditions climatiques, l'époque de la cueillette s'il s'agit de plantes. Il est souvent difficile, dans ces conditions, de standardiser une préparation, d'où l'utilité de la chimie extractive pour isoler les principes actifs, les purifier, les identifier, et les utiliser comme médicament. On peut ainsi citer des cas majeurs dans le règne végétal : hétérosides cardiotoniques, alcaloïdes de l'ergot de seigle, antibiotiques; et dans le règne animal : héparine, insuline, enzymes. La possibilité de doser les principes actifs dans la plante permet ensuite d'améliorer les conditions de recueil, de sélectionner des espèces ou de créer des hybrides particulièrement utiles; c'est, par exemple, le cas des quinquinas producteurs de quinine.

Les progrès de la chimie ne se sont pas limités à l'extraction et à l'identification des molécules intéressantes : de nombreuses synthèses ont permis d'abaisser les coûts de production, et surtout de préparer des dérivés présentant des actions thérapeutiques nouvelles et des effets secondaires moindres. Ainsi l'extraction de la cocaïne des feuilles de coca a-t-elle été suivie de la synthèse d'anesthésiques locaux ne présentant pas l'action de stupéfiants. Des hémisynthèses de pénicillines diverses ont donné des dérivés à spectre antibactérien plus large ou actifs par voie digestive, ou résistants aux enzymes microbiens (les pénicillinases).

De même, des molécules entièrement synthétiques comme les sulfamides, certains anti-inflammatoires ont contribué à augmenter de façon déterminante l'arsenal thérapeutique. Citons enfin la possibilité de synthétiser des dérivés hydrosolubles pour la préparation de formes injectables par voie intraveineuse : anti-inflammatoires, camphre, etc.

Progrès de la médecine scientifique au XIX^e siècle

Notre projet n'est pas de retracer, même grossièrement, l'histoire de la médecine à travers les civilisations. Bornons-nous à remarquer que les médecins de Molière ne pouvaient guère passer pour des esprits rigoureux. C'est un Laënnec, un Claude Bernard, un Pasteur qui, en alliant des dons exceptionnels d'observation à un véritable esprit scientifique, ont permis l'avènement d'une médecine et d'une thérapeutique rationnelles.

Louis Pasteur, en jetant les bases d'une véritable bactériologie, a permis de dégager des notions jusque-là inconnues comme l'asepsie et la stérilité, qui ont permis

F. Arborio Mella

Carlo Erba

◀ *A gauche, couverture d'une pharmacopée rédigée par un médecin allemand. A droite, salle à air ambiant stérile du département de lyophilisation d'un établissement pharmaceutique.*

de concevoir une chirurgie propre, de traverser sans trop de risque la peau des patients.

Principales découvertes technologiques

Le médicament a bénéficié tout au long de son histoire des progrès de la science et de la technique dans pratiquement tous les domaines. Nous verrons, par exemple, que c'est la technologie de l'électronique et de l'aérospatiale qui a fait évoluer le problème des enceintes stériles. Cependant, deux types de progrès nous semblent déterminants : la découverte de la seringue et de l'aiguille par Pravaz (1853), de l'ampoule par Limousin, permettant, avec les travaux de Pasteur, la pratique de l'injection parentérale; ensuite, la fabrication des comprimés. La première presse fut brevetée en 1843 par l'Anglais Brockedon, et les premières machines furent fabriquées en 1875 aux États-Unis par Remington. Plus récemment, les progrès de la lyophilisation (voir plus loin) et la réalisation de membranes qui sont des filtres bactériologiques fiables ont permis la fabrication industrielle de préparations injectables stériles à partir de substances ne supportant ni l'action de la chaleur ni la conservation en présence d'eau.

Perspectives d'avenir

Nous avons vu que les progrès de la chimie ont permis d'abord d'isoler, d'identifier, éventuellement de doser des principes actifs dans des substances d'origine naturelle. Parfois, cependant, on dut faire appel à des techniques biologiques pour doser ces principes actifs et déterminer leur pureté. C'est ainsi qu'héparine, insuline, antibiotiques, etc., font encore actuellement appel à des techniques biologiques *in vivo* ou *in vitro* pour leur dosage. Pendant longtemps, et jusqu'aux années 1960, les normes de l'industrie pharmaceutique concernaient le taux de principe actif dans une préparation et sa conservation. On s'est ensuite aperçu, notamment grâce à l'affinement des techniques de chimie analytique et de la radio-immunochimie, des variations importantes du taux du médicament circulant dans l'organisme pour deux préparations en apparence identiques; pire encore, pour une même préparation, deux malades différents pouvaient faire apparaître un devenir métabolique très peu comparable. Une nouvelle science était née, et son nom un peu barbare est « pharmacocinétique ».

Actuellement, chaque principe actif, chaque forme médicamenteuse donne lieu à des études chez l'animal, chez l'homme sain et chez les malades; de nombreuses molécules connues depuis longtemps font l'objet d'une nouvelle formulation, destinée à limiter ainsi les effets secondaires indésirables en augmentant l'activité curative. L'idéal, dans certains cas, serait de prévoir une libération automatisée : on peut, par exemple, imaginer un « pancréas artificiel » libérant de l'insuline selon les besoins grâce à une électrode sensible au taux de glucose circulant. Des études en ce sens ne relèvent pas de la science-fiction, et de nombreuses équipes y travaillent déjà.

De même, la plupart des médicaments introduits dans la circulation générale imprègnent tous les tissus sans distinction. Il serait commode de les guider jusqu'à la cible désignée, ce qui éviterait bien des effets secondaires nocifs. C'est le cas des antitumoraux qui sont toxiques pour tous les organes comportant des cellules se reproduisant très rapidement : moelle osseuse, cellules germinales, etc. Une forme médicamenteuse adressant électivement l'agent actif sur la ou les tumeurs d'un organisme est toujours recherchée.

Technologie de fabrication

Principales méthodes de fabrication

Pulvérisation des solides

Les matières premières d'origine naturelle ou synthétique ne se présentent pas, en général, sous une forme directement utilisable. Les solides, par exemple, doivent souvent être pulvérisés, et le but est de préparer un produit de granulométrie donnée. L'idéal serait, bien sûr, d'obtenir des grains de taille uniforme et de dimensions données. L'appareillage diffère selon les caractères physiques du produit à pulvériser (matériau cassant, élastique ou fibreux, teneur en eau, taille des grains, sensibilité à la chaleur) et selon la quantité à traiter.

Les appareils utilisés peuvent être :

★ *Au laboratoire.* Mortiers couverts ou non, porphyres, broyeurs à hélice (du type des moulins à café électriques), tamis ou cribles pour des substances très friables ou des agglomérats, moulins (du type des moulins à poivre). Dans ce cas, on recherche plus la commodité que l'économie d'énergie.

★ *En industrie.* Concasseurs à mâchoires (les mâchoires sont commandées par un excentrique), broyeurs à cylindres tournant en sens inverses et pouvant être cannelés

fig. 1

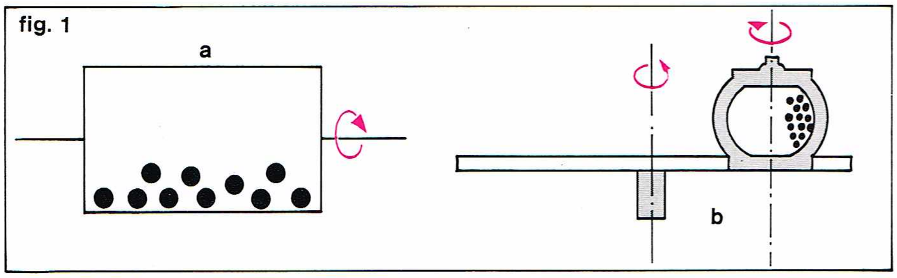

▲ *Figure 1 : a, broyeur à boulets; b, broyeur planétaire à boulets (d'après A. Le Hir,* **Abrégé de pharmacie galénique,** *Éd. Masson, Paris, 1974).*

ou non, broyeurs à pointes, à marteaux (dans ce cas, l'enceinte contenant le produit à pulvériser sert de tamis; les marteaux sont lancés à très grande vitesse et provoquent des chocs; l'appareil fonctionne en continu), les broyeurs à galets ou à boulets (*fig.* 1) [l'enceinte contenant le matériau à pulvériser renferme des boules de métal ou de porcelaine; la rotation de cette enceinte sur elle-même provoque de très nombreux chocs dont on peut augmenter l'efficacité en disposant le broyeur en excentrique sur une roue tournant à grande vitesse pour les broyeurs de type « planétaire »; on obtient ainsi très rapidement des particules de la taille du micromètre], microniseurs à air comprimé ou broyeurs à jet (c'est l'air comprimé qui, parcourant le matériau, provoque les chocs utiles, et cela sans échauffement de la poudre). Dans certains cas, on est conduit à utiliser des adjuvants de pulvérisation (sels solubles pour le broyage de métaux non cassants; le sel est ensuite éliminé par lavage à l'eau).

Contrôle granulométrique des poudres

On utilise pour cela des séries de tamis à mailles rigides et bien calibrées, allant de 1,25 mm (poudre grossière) à 125 micromètres (poudre très fine), voire à 50 micromètres. Une poudre officinale ne doit laisser que 5 % de son poids au maximum sur le tamis de module supérieur, et au plus 40 % de son poids doit pouvoir traverser le tamis de module inférieur.

Le microscope équipé d'un micromètre permet d'examiner des particules plus fines, de voir leur forme, leur répartition; cette opération est très utile mais fastidieuse.

Des compteurs électroniques de particules en *suspension* dans une solution d'électrolytes permettent de dénombrer des particules correspondant à un poids donné de poudre : les compteurs de Coulter. Une paroi percée d'un microtrou sépare deux compartiments, renfermant chacun une électrode. La suspension est poussée à travers le microtrou. Chaque particule qui le traverse fait varier le courant électrique circulant entre les deux électrodes, et cela d'autant plus qu'elle est plus volumineuse. Les impulsions en résultant sont dénombrées et peuvent même être classées selon leur taille, permettant d'évaluer la répartition de la granulométrie. Cet appareil sert aussi à dénombrer des particules qui peuvent se trouver dans les solutés (solutions) injectables ou à faire en biologie clinique des numérations globulaires.

Pour des poudres encore plus fines (jusqu'à 10^{-8} m), on étudie leur sédimentation au sein d'un liquide parfois sous ultracentrifugation.

En pharmacie, il est souvent capital de maîtriser convenablement une pulvérisation : la granulométrie d'une poudre intervient dans la vitesse de dissolution *in vitro* ou *in vivo* (dans ce dernier cas, l'action thérapeutique en dépend souvent : une poudre trop fine peut donner lieu à une inactivation par le suc gastrique, une poudre trop grossière peut ne pas se dissoudre suffisamment et être inactive). La granulométrie intervient dans l'homogénéité et la stabilité des mélanges de poudres, dans la qualité des comprimés, la stabilité des suspensions, etc.

Préparation des mélanges pulvérulents

De nombreux facteurs interviennent dans cette préparation dont le but est de fournir un mélange aussi homogène que possible : ce sont la granulométrie des composants, leurs densités, leurs proportions. Chaque cas nécessite des études soignées, car il est inconcevable, par exemple, que dix pour cent d'un lot de fabrication renferme soixante pour cent de la quantité totale d'un principe actif.

Dans une officine classique, on utilise le mortier selon des règles bien précises dans le cas où l'un des composants est très minoritaire (par exemple, utilisation d'un colorant servant de témoin); l'industrie a vu se développer de nombreuses formes plus ou moins sophistiquées de mélangeurs dont les mouvements sont étudiés pour une meilleure efficacité : tambours mélangeurs, mélangeurs planétaires, mélangeurs type pétrin, mélangeurs à vis, mélangeurs à projection, etc. Chaque opération est ensuite contrôlée du point de vue de son homogénéité.

Dissolution

C'est une opération très importante, car de nombreux médicaments sont présentés sous forme de solutés (préparations injectables, sirops, potions, gouttes, collyres, etc.).

Les facteurs intervenant dans la dissolution sont multiples; il convient de bien les connaître. Les principaux concernent la **solubilité** qui dépend de la constitution chimique et de la polarité respective du solvant et du corps dissous. Les solvants polaires (eau, alcool) dissolvent les électrolytes et les corps polaires (alcools, amines, acides), alors que les solvants apolaires (huiles, par exemple) dissolvent les substances apolaires (carbures, molécules lourdes comportant de nombreux cycles aromatiques, vitamines liposolubles, stéroïdes).

La solubilité dépend de la température et beaucoup du pH. Ainsi, les produits possédant une fonction amine sont solubles dans l'eau en milieu acide : c'est le sel qui se forme, et celui-ci est polaire et hydrosoluble. Au contraire, les amines de haut poids moléculaire que sont les alcaloïdes sont très peu solubles dans l'eau en milieu neutre ou alcalin. A l'état de bases, elles se dissolvent au contraire dans les solvants peu polaires : huiles, benzène, éther. Les barbituriques, les phénols, les acides organiques sont solubles en milieu alcalin sous forme de dérivés sodiques.

Enfin, signalons que certaines substances modifient beaucoup l'hydrosolubilité : la caféine se dissout bien en présence de benzoate de sodium, la quinine en présence d'uréthanne. Certains surfactifs permettent d'obtenir des solutions colloïdales micellaires de produits hydrophobes (*fig.* 2). Au contraire, on observe un relargage dû à la diminution de la solubilité (essences, savons de sodium en présence de chlorure de sodium). Tous ces facteurs doivent être parfaitement maîtrisés pour l'obtention des solutions.

Cependant, en technique industrielle, la solubilité n'est pas le seul point important. La **vitesse de dissolution** impose des limitations pratiques à toute opération. Il ne peut par exemple être question d'agiter pendant plusieurs semaines un mélange pour atteindre la dissolution totale d'un produit à une concentration voisine de la saturation. La vitesse de dissolution est théoriquement donnée, pour une dissolution isotherme, par la formule de Noyes et Whitney (1897) :

fig. 2

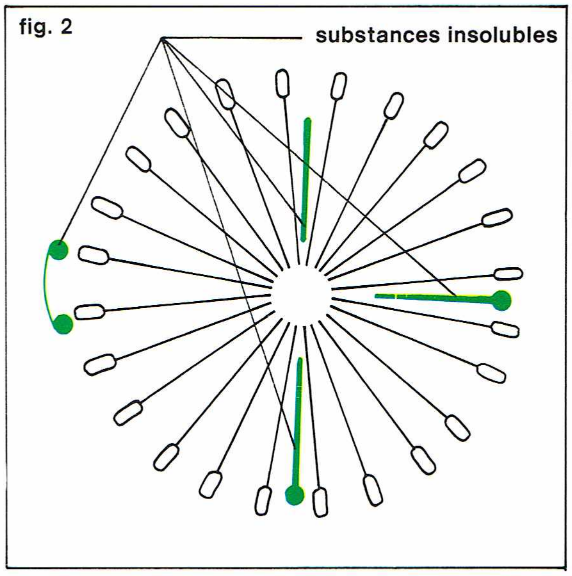

▶ *Figure 2 : insertion dans les micelles (d'après A. Le Hir,* **Abrégé de pharmacie galénique,** *Éd. Masson, Paris, 1974).*

$$\frac{dc}{dt} = K \cdot S_t \, (C_s - C_t)$$

t est le temps, *c* la concentration, S_t est la surface du solide restant à dissoudre à l'instant *t*, C_s la concentration à saturation, et C_t la concentration à l'instant *t*. K est une constante qui dépend de la vitesse de diffusion des molécules dissoutes, de l'agitation éventuelle, de la viscosité de la solution, etc.

Il est impossible de connaître avec précision la surface du solide à chaque instant. De même, la concentration à saturation n'est pas une constante ne dépendant que de la température et du système liquide-solide considéré. On peut, en effet, démontrer que pour un système et une température donnés la concentration d'une solution saturée dépend légèrement, mais de façon significative, de la taille des grains de solide non dissous en équilibre avec la solution; quoi qu'il en soit, on peut retenir que la vitesse de dissolution tend vers zéro quand on s'approche de la saturation parce que S_t et $(C_s - C_t)$ diminuent. Pour dissoudre rapidement un produit, on a intérêt à partir d'une poudre fine (S élevée) et à agiter vigoureusement.

Enfin, la dissolution d'une substance peut être endo- ou exothermique. La thermodynamique nous montre qu'il faut refroidir dans le cas d'une substance qui libère des calories en se dissolvant, et qu'il faut chauffer dans le cas contraire. Il existe de nombreux agitateurs avec des systèmes de contrepales qui provoquent des turbulences au sein du mélange. La dissolution en pharmacie est pratiquement toujours suivie d'une filtration qui permet d'éliminer des impuretés insolubles et fournit des solutions limpides.

Avant d'examiner la filtration, il nous est nécessaire de dire quelques mots sur la **dissolution extractive**, ou extraction. C'est, par exemple, la fabrication des teintures (au sens pharmaceutique du mot), des extraits ou le stade préalable à l'isolement d'un principe actif à partir d'une matrice inerte. Les matières premières sont souvent des végétaux, et il s'agit de ne retenir que des principes intéressants dégagés de la chlorophylle, des fibres, etc. Le solvant peut être l'eau, l'alcool, plus anciennement des vins ou du vinaigre.

La méthode la plus simple est la *macération* à froid pendant un temps assez long le plus souvent. On peut encore opérer par *infusion* ou par *décoction* (si l'on continue à chauffer après l'ébullition). Le meilleur moyen utilisé quand on veut une extraction presque complète est la *percolation* ou *lixiviation*. Le principe est le même que celui de la préparation classique du café filtre. Ces techniques sont bien connues pour la préparation de tisanes et de boissons diverses, mais, dans le cas des médicaments, elles sont en général minutieusement décrites, notamment la lixiviation qui fournit les teintures « héroïques » (ou toxiques) : ténuité de la poudre, appareillage, titre de l'alcool, durée de l'opération, etc.

Filtration

Dans le domaine du médicament, la filtration a une importance capitale, surtout quand il s'agit de la préparation de solutés injectables. C'est tout d'abord un procédé mécanique qui permet d'éliminer tout ce qui a une taille supérieure aux pores du filtre. Il s'y ajoute une adsorption, phénomène physique qui concerne une fixation de corps dissous par la surface du filtre qui est en général énorme (surfaces des pores comprises). Enfin, certaines membranes filtrantes sont de véritables filtres bactériologiques qui fournissent des filtrats stériles.

D'après ce qui précède, chaque filtration pose un problème. Le filtre idéal ne se colmate pas, a un maximum de pores calibrés et de même taille, permet une filtration rapide, supporte la pression et est stérilisable; ce filtre idéal n'existe pas. On utilise des filtres fibreux : fibres de cellulose (papier-filtre classique), fibres d'amiante (maintenant pratiquement éliminées), fibres de matières plastiques. Des membranes d'esters de cellulose prennent une place de plus en plus importante depuis que l'on sait relativement bien maîtriser la formation des pores et préparer ainsi des filtres bactériologiques. Les filtres bougies classiques (qui avaient donné lieu à la définition ancienne des « virus filtrants ») sont de moins en moins utilisés : ils se colmatent, donnent des filtrations lentes

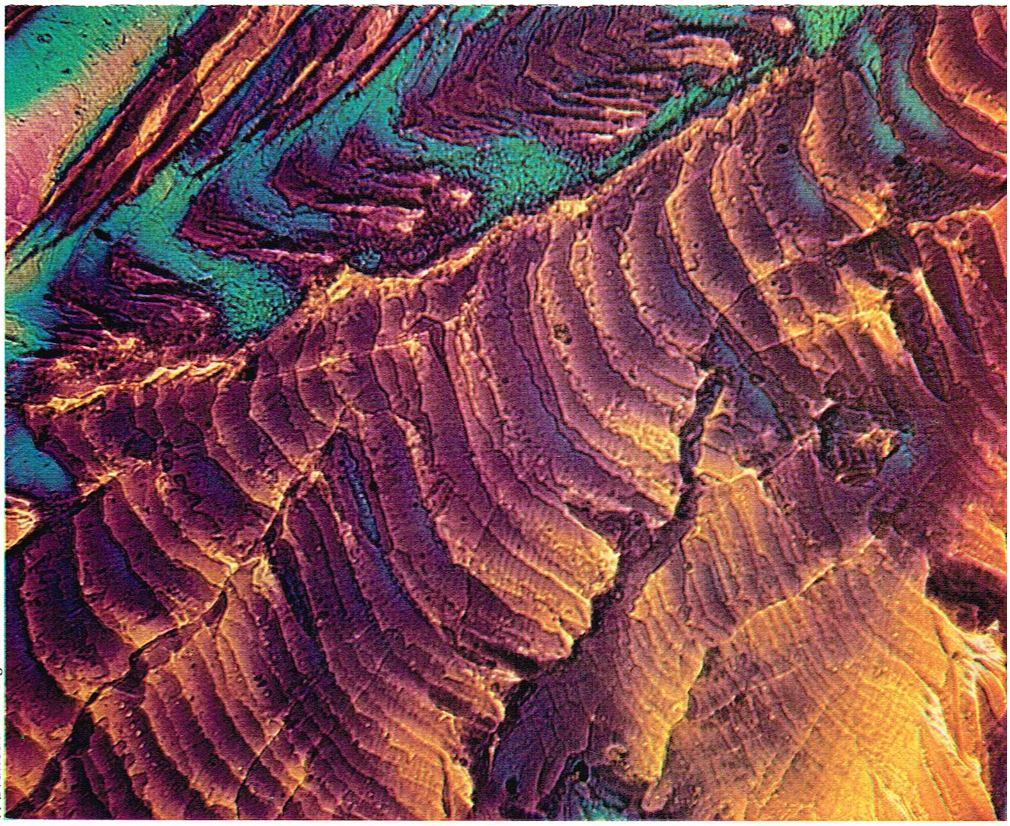

Y. Bruneau - Fotogram

▲ ***L'acide acétyl-salicylique, dit plus communément aspirine, vu au microscope polarisant.***

avec une grande perte de charge. Le verre fritté fournit des filtres très robustes, relativement bien calibrés, facilement stérilisables en chaleur sèche ou humide.

Souvent une filtration nécessite l'emploi d'adjuvants qui évitent le colmatage, éliminent par adsorption spécifique certains composés : charbon végétal pour les substances pyrogènes (voir plus loin), kaolin, terre d'infusoires. Le matériel utilise souvent, pour accélérer le procédé, soit une dépression du côté du filtrat, soit, plus souvent, une surpression du côté amont du filtre, soit, dans des filtres du type essoreuse, la force centrifuge. Il convient dans tous les cas de contrôler le résultat de l'opération : numération des particules, éventuellement contrôle de stérilité, non-adsorption des principes dissous, recherche d'impuretés pouvant être apportées par le filtre.

Dispersions

Par dispersion on entend un mélange interne de deux phases non miscibles : solide-liquide dans les suspensions, liquide-liquide dans les émulsions, liquide-gaz dans les aérosols. Cette dernière éventualité sera traitée à part; dans les formes pharmaceutiques, la formation de l'aérosol n'est réalisée qu'au moment de l'administration.

Émulsion

La phase dispersante est appelée phase continue (ou phase externe). Elle entoure complètement les fins globules de phase dispersée (ou phase interne ou discontinue). Une émulsion n'est jamais qu'un système instable qui se rompt plus ou moins vite par *coalescence* des globules de phase dispersée et séparation complète des phases, par *crémage* ou *sédimentation* des globules à la surface ou au fond du récipient, ou par un mécanisme mixte (coalescence et crémage dans le cas d'un mélange huile-eau). La vitesse *v* de crémage ou de sédimentation est donnée par la loi de Stokes :

$$v = \frac{2\, r^2 g \, (D_1 - D_2)}{9\, \eta}$$

où : *r* est le rayon des globules,

g est l'accélération de la pesanteur,

$(D_1 - D_2)$ est la différence de densité entre les deux phases,

η est la viscosité de la phase continue.

On voit qu'une émulsion est d'autant moins sujette à crémage que le rayon des globules est plus petit, que la différence des densités est plus faible et que la viscosité de la phase dispersante est plus élevée. Le phénomène de coalescence dépend de la tension interfaciale entre les deux liquides. Celle-ci a tendance à réduire la surface de séparation et donc à provoquer la démixion.

Cela explique les règles de préparation des émulsions : obtenir des globules très fins, augmenter la viscosité du

▶ *Figure 3 : séchoir à cylindre (d'après A. Le Hir, Abrégé de pharmacie galénique, Éd. Masson, Paris, 1974).*

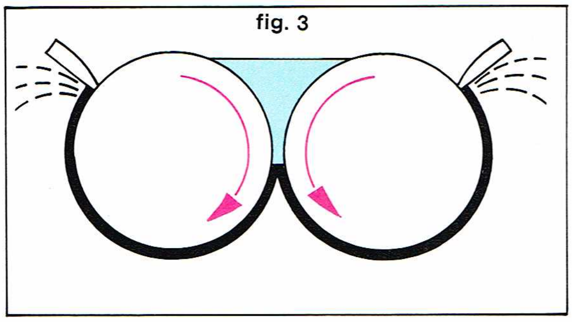

milieu continu, abaisser la tension interfaciale au moyen de surfactifs. Les produits utilisés sont appelés émulsionnants. Ce sont des gommes, des dérivés de la cellulose (carboxyméthylcellulose), alginates, pectines, protéines, qui agissent surtout sur la viscosité ; ce sont encore des surfactifs ioniques et non ioniques : saponines, stérols, lécithines, qui agissent sur la tension interfaciale. Des études très poussées d'émulsionnants se font grâce à des mélanges ternaires : eau, surfactif, huile de vaseline ; de nombreuses formulations commercialisées ont une stabilité convenable.

Le matériel nécessaire à l'échelle industrielle est constitué d'agitateurs à hélices, à palettes, à turbines, ou de malaxeurs pour des émulsions épaisses. Il faut contrôler soigneusement la température des mélanges. Dans certains cas, on est conduit à utiliser des broyeurs dits colloïdaux ou des homogénéisateurs à filières pour réduire et uniformiser la taille des globules. La phase dispersée, si les globules étaient parfaitement sphériques, pourrait représenter 74 % du volume total, chiffre qui peut même dans certains cas être dépassé. Les émulsions courantes ont des globules dont la taille est de l'ordre du micromètre.

L'essai des émulsions est très important pour le résultat de chaque opération : détermination du « sens » de l'émulsion (huile dans l'eau, soit H/E, ou eau dans l'huile, soit E/H). Cela se fait par dilution ou en utilisant un colorant (hydrosoluble ou liposoluble) qui s'étend dans la phase continue ; l'examen au microscope permet de mesurer la taille des globules et d'évaluer leur uniformité. Des études rhéologiques (mesure de la viscosité) sont également du plus haut intérêt. Enfin on étudie la stabilité à la centrifugation. Signalons que, dans le domaine du médicament et des produits apparentés, le problème est de déterminer à la fois une formule et un mode de préparation qui donnent des émulsions stables et reproductibles.

Remarque : Pour des quantités faibles de produit hydrophobe et en présence de surfactif, il peut se former au sein de la phase aqueuse des agrégats moléculaires organisés en lamelles ou en sphères ; ce sont des micelles, et on parle alors de solutions micellaires ou de pseudo-solutions. Celles-ci sont limpides. Le produit insoluble est fixé soit à l'intérieur, soit, plus rarement, à l'extérieur des micelles. On peut ainsi dissoudre des quantités notables de substances apolaires en présence de savon, de laurylsulfate de sodium, etc.

Suspensions

La phase dispersée est un solide, la phase dispersante un liquide. L'exemple type est la suspension de sulfate de baryum ; ce produit hautement insoluble est un sel d'élément lourd opaque aux rayons X et servant à l'examen radiologique de l'appareil digestif.

Les suspensions peuvent être préparées par voie chimique en provoquant, dans des conditions opératoires soigneusement étudiées, la précipitation d'un sel insoluble. Très souvent, on opère par microbroyage en milieu liquide ou à sec de façon à obtenir des particules de la taille du micromètre. Des surfactifs, des épaississants, des tampons pour contrôler le pH sont nécessaires pour la stabilité. La physique des suspensions est très complexe, et la charge électrique des particules est un facteur déterminant de stabilité. On peut la déterminer en suivant au microscope la migration de ces particules dans un champ électrique. D'autre part, les petits cristaux ont tendance à se redissoudre, alors que les plus gros croissent, ce qui altère les propriétés de la suspension. Tout cela fait que les essais sont primordiaux : contrôle de stabilité, d'homogénéité, comportement rhéologique, taille des particules, etc.

Dessiccation ou séchage

C'est une opération qui a pour but d'éliminer un constituant volatil en laissant un résidu d'évaporation généralement solide. Le constituant volatil peut être un alcool, mais c'est généralement de l'eau, nécessaire pour certaines réactions biologiques ou chimiques, tandis que la dessiccation l'est souvent pour une bonne conservation. Exemples les plus classiques : les laits de régime, le plasma humain ; mais la dessiccation est nécessaire pour de nombreuses matières végétales, pour les granulations par voie humide (voir ci-dessous), etc.

L'eau à éliminer peut être une eau de constitution ou eau de cristallisation : dans ce cas, elle est difficile à enlever sans dénaturation du produit. Elle peut être adsorbée physiquement sur des surfaces et les produits pulvérulents fixant facilement de la vapeur d'eau atmosphérique ; l'équilibre adsorption-désorption doit être bien connu pour la détermination des conditions opératoires. Enfin, l'eau dite libre imprègne les substances à sécher.

Le séchage enlève l'eau libre, parfois l'eau adsorbée, rarement l'eau de constitution. Il consiste généralement à faire passer le liquide à l'état gazeux, et la vitesse de séchage dépend de la vitesse d'évaporation de l'eau au niveau de la surface du solide et de sa vitesse de migration à l'intérieur de ce solide ; elle dépend donc de la pression partielle de la vapeur du solvant et du taux d'humidité relative de l'air ambiant, de son renouvellement, de la surface du solide, de la quantité de calories apportées pendant l'opération. La maîtrise de la température est souvent capitale pour avoir une grande vitesse d'évaporation (celle-ci absorbe des quantités énormes d'énergie, car la chaleur latente de vaporisation de l'eau est très grande : 537 calories par gramme à 100 °C) ; d'autre part, une surchauffe est à proscrire pour de nombreux composés fragiles. Le choix du procédé de dessiccation est donc très important, de même que le contrôle des moyens mis en œuvre.

Les appareils industriels utilisent l'air chaud dans des étuves isothermes, et surtout dans des séchoirs à lit d'air fluidisé : l'air arrive à la base de la poudre ou du granulé à sécher. Celui-ci est brassé en tous sens, suspendu sur le matelas d'air. Des séchoirs continus à contre-courant ont aussi de gros avantages. Le matériau à sécher parcourt un tunnel traversé en sens inverse par de l'air à température convenable et à humidité relative contrôlée. On évite ainsi la formation d'une croûte superficielle qui s'opposerait au séchage en profondeur. Des séchoirs tunnels à rayonnement infrarouge donnent aussi de bons résultats. Des fours à hyperfréquences, assez chers mais rapides, apparaissent également sur le marché.

On sèche également sous vide, ou sur déshydratant. Pour des extraits secs, pour certains laits, des séchoirs sur cylindre (*fig.* 3) fournissent un rendement horaire important. On peut opérer sous vide pour des produits plus fragiles.

Enfin, la nébulisation, très courante dans l'industrie alimentaire, est appliquée aussi en pharmacie. La solution ou la suspension à sécher est dispersée en fines gouttelettes d'environ 0,1 mm de diamètre, ce qui représente 70 m^2 par litre de liquide. Ces gouttelettes sont lancées à grande vitesse au contact d'air à 180 °C environ et sèchent en une fraction de seconde. L'air chaud peut être remplacé par un gaz inerte. Le nébulisat obtenu est très poreux, facilement soluble dans l'eau ; le procédé s'applique même à des substances fragiles, car la phase délicate qui est le chauffage d'un produit encore humide a une durée très limitée.

Lyophilisation

C'est une technique très employée pour la dessiccation de produits fragiles et chers. Elle s'est imposée dans le cas des médicaments et fonctionne à échelle industrielle pour des antibiotiques, des fractions de sang humain, des vaccins, des souches bactériennes, de très nombreuses formes injectables. Le principe en est simple : la solution à déshydrater est congelée très rapidement à — 50 ou — 70 °C. Un vide très poussé fait ensuite passer la glace

à l'état de vapeur sans repasser par l'état liquide : c'est une sublimation, qui permet de contourner le « point triple » où, vers 0 °C et 4,58 mm de mercure, les trois phases (liquide, solide, gaz) peuvent exister en équilibre (*fig.* 4).

Schématiquement, le liquide est congelé dans une enceinte appelée évaporateur, reliée à une seconde enceinte appelée condenseur et portée à une température plus basse que celle de l'évaporateur (*fig.* 5). Le tout est relié à une station de pompage. Les tuyaux doivent être très larges, car la vapeur d'eau sous très basse pression représente un volume énorme (10 m^3 pour 1 g d'eau sous 0,1 mm de mercure). D'autre part, en l'absence d'autre action que le pompage, l'évaporateur étant refroidi par la vaporisation de glace, l'opération s'arrêterait pratiquement quand les deux enceintes seraient à la même température. Il est donc nécessaire de compenser par un réchauffage prudent les pertes caloriques de l'évaporateur sans arriver à la fusion de la glace. Les appareils sont donc soigneusement régulés avec de multiples sondes de température, de pression, et de multiples sécurités.

La sublimation laisse un produit poreux de volume sensiblement égal à celui de la solution initiale et se remettant instantanément en solution. Toute réaction enzymatique, toute vie bactérienne est stoppée à la congélation et devient ensuite impossible dans le produit sec. Mais la plupart des bactéries gardent leur pouvoir de reproduction et leurs caractéristiques génétiques.

Réalisation technique

La congélation s'effectue en général dans les flacons qui doivent contenir ensuite le lyophilisat ; elle doit être brutale pour éviter la formation de microcristaux qui peuvent faire éclater les cellules. En outre, le refroidissement lent d'une solution saline entraîne d'abord une cristallisation de la glace, ce qui implique des surconcentrations locales en substances dissoutes et une possibilité de dénaturation des protéines ; c'est pourquoi on procède à une congélation par aspersion d'alcool froid souvent saturé de glace carbonique vers — 70 °C, ou par un

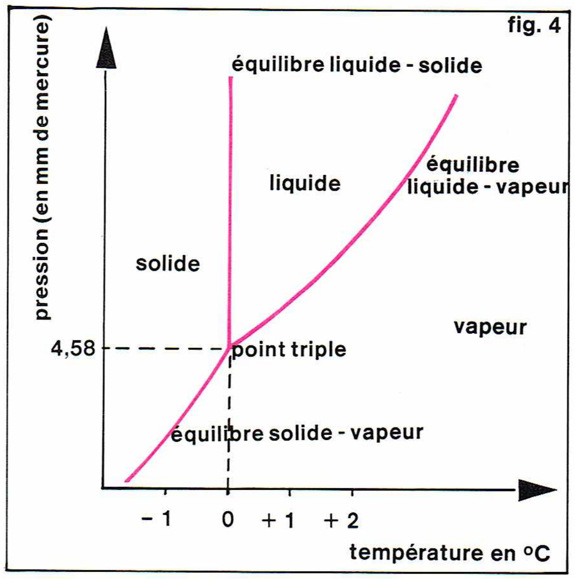

◀ *Figure 4 : diagramme des trois états de l'eau.*

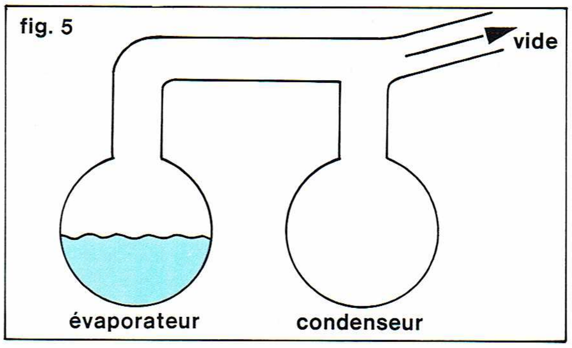

◀ *Figure 5 : représentation schématique d'un lyophilisateur (d'après A. Le Hir, Abrégé de pharmacie galénique, Éd. Masson, Paris, 1974).*

Scala

◀ *Laboratoire d'une ancienne pharmacie : la somptuosité du décor montre le haut niveau de considération dans lequel était souvent tenu l'art pharmacologique. Ici, l'officine des essences pharmaceutiques de Santa Maria Novella, à Florence.*

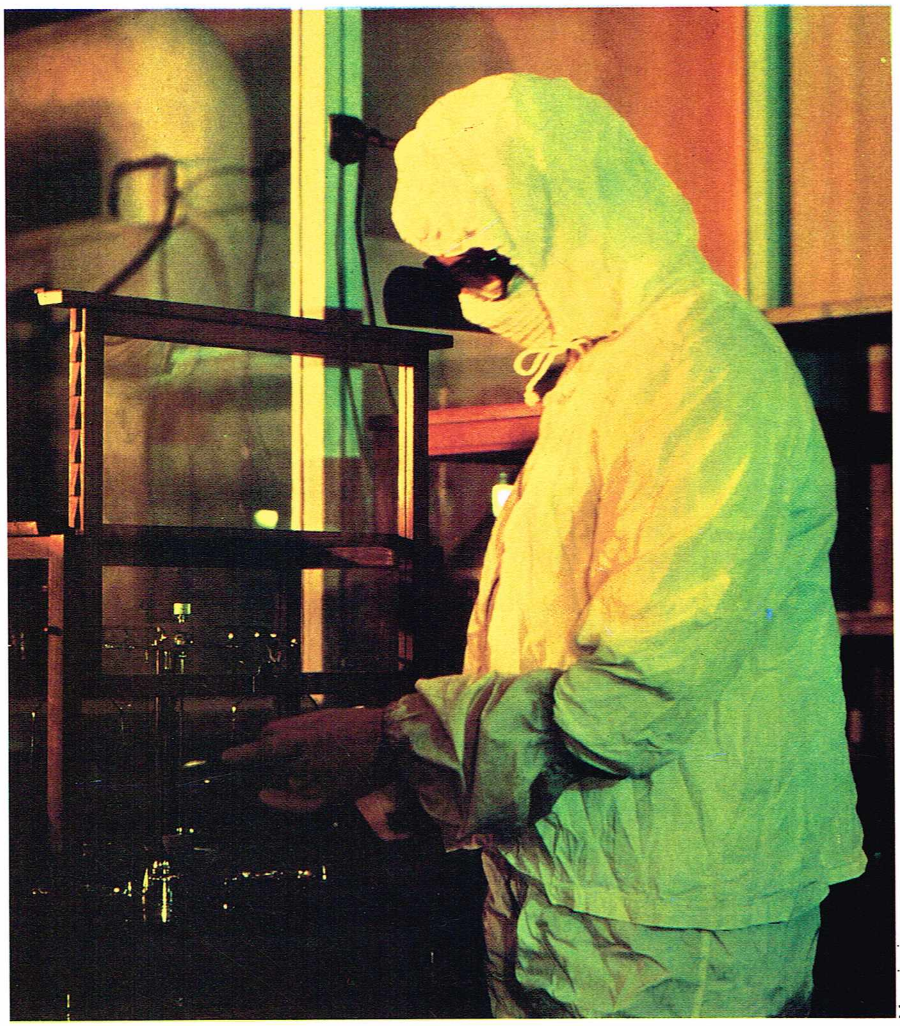

Maggioni

▲ *Manipulation dans un laboratoire de microbiologie sur des souches productrices d'antibiotique. Des précautions très strictes sont prises pour assurer la pureté microbiologique de l'inoculum : de celle-ci dépendra le rendement de l'opération industrielle appelée fermentation.*

courant d'air froid. Les flacons de grand volume sont soumis à une rotation sur eux-mêmes pour coller le liquide aux parois, accélérer le refroidissement et ensuite augmenter la surface d'évaporation. Le chauffage de l'évaporateur pour compenser la perte de calories par sublimation est le point le plus délicat.

Chaque opération industrielle est soigneusement programmée pour éviter les pertes de produits chers ou précieux : antibiotiques, dérivés du sang humain, lait de femme, greffons. Le piégeage de la vapeur est assuré par condensation à très basse température sur de grandes surfaces. Les résidus d'humidité sont ensuite enlevés à température ordinaire grâce à des déshydratants ou par pompage. Les pompes (pompes à palettes pour le vide primaire, et pompes à diffusion pour le vide secondaire) doivent permettre d'atteindre 0,1 ou 0,01 mm de mercure.

De nombreux médicaments sont instables en présence d'eau et non stérilisables à sec. La filtration stérilisante suivie de lyophilisation permet seule d'obtenir des formes pharmaceutiques stériles et instantanément solubles. Malgré le prix de revient de la méthode, celle-ci s'étend à l'industrie alimentaire : champignons, café soluble, etc.

Granulation

Cette opération intervient dans la fabrication de plusieurs formes pharmaceutiques. Le granulé peut être administré directement, mais souvent il sert à la fabrication des comprimés.

La granulation a pour but de transformer un mélange pulvérulent en agrégats solides souvent poreux. Les agrégats s'écoulent mieux que les poudres pour les préparations volumétriques : comprimés, gélules, etc.

La granulation peut être faite par voie humide ou par voie sèche. Dans le premier cas, on ajoute au mélange un liquide qui a un pouvoir solvant moyen vis-à-vis des constituants. On peut encore ajouter un agglutinant : sirop de sucre, solution de gomme, par exemple. On obtient une masse compacte qui est passée à travers un tamis grossier sous l'action de la pression. Les appareils à granulation rappellent les moulins à légumes ménagers. Le séchoir à lit d'air fluidisé peut être également utilisé. Sur la poudre en suspension sur un matelas d'air on verse un liquide de mouillage qui fait s'agglomérer en grains les particules. Un courant d'air chaud provoque ensuite le séchage.

La granulation par voie sèche est réservée aux substances qui ne supportent pas la voie humide ou le séchage qui la termine. Le mélange est comprimé dans des presses classiques ou entre deux cylindres tournant en sens inverse. Les comprimés ou les plaques sortant des cylindres sont ensuite broyés et tamisés.

Le contrôle des granulés est un contrôle de granulométrie, de dureté, de densité apparente, de fluidité et de porosité.

Stérilisation

C'est une opération qui vise à priver un produit des micro-organismes vivants qui le souillent. Dans le domaine du médicament, tout traitement trop violent étant généralement exclu, on se fonde sur des études statistiques. On sait, par exemple, que trois minutes à 120 °C équivalent à 30 minutes à 110 °C et à 4 heures à 100 °C vis-à-vis des spores très résistantes de *Clostridium botulinum*. On définit une température et une durée de stérilisation qui sont capables de réduire une population de ce germe d'un facteur très grand : 10^{12} par exemple.

Pour la stérilisation d'une solution injectable, on applique les principes suivants : on part d'une solution aussi peu contaminée que possible (produits propres, verrerie traitée à l'eau de Javel, eau fraîchement distillée, locaux spécialement conçus et fréquemment désinfectés, laissés sous lampes germicides la nuit, etc.). La solution est filtrée parfois sur membrane stérilisante, conditionnée et aussitôt portée à l'autoclave. Si chaque flacon contenait au départ 10^5 germes de même résistance que le *Clostridium botulinum* cité plus haut, il pourrait rester un germe pour 10^7 flacons.

Le contrôle de stérilité est obligatoire. Sur chaque lot de stérilisation un certain nombre d'ampoules et de flacons servent à ensemencer des milieux de culture pour germes aérobies, anaérobies, et pour des champignons microscopiques. Si aucune pousse n'est décelée après 7 jours, le soluté est considéré comme stérile.

La stérilisation par la chaleur s'effectue dans des autoclaves contenant un peu d'eau. La vapeur produite chasse l'air grâce à une vanne de purge et permet d'atteindre ensuite une température homogène déduite d'une mesure de pression (120 °C pour 1 atmosphère par exemple). On ouvre l'autoclave après refroidissement à 100 °C pour éviter une condensation sur le matériel stérilisé.

Les opérations industrielles sont réalisées sur le même principe, mais avec un matériel plus évolué. L'air est évacué par des pompes, la vapeur est injectée sous pression, réchauffée et brassée en permanence, puis remplacée en fin d'opération par de l'air comprimé pour éviter l'explosion des récipients. Cela accélère le refroidissement. On enregistre en continu la température de l'autoclave, et souvent celle de l'intérieur d'un flacon témoin. Dans certains cas, une suspension microbienne test est jointe au lot à stériliser. La présence d'eau est déterminante : les spores de tétanos sont détruites en atmosphère humide en 15 minutes à 120 °C, et en atmosphère sèche en trois heures à 160 °C. Ainsi, les solutions huileuses sont très difficiles à stériliser, de même que le matériel. La stérilisation par des antiseptiques phénoliques est parfois autorisée pour les produits fragiles.

Conditionnement aseptique

Dans certains cas déjà évoqués, le conditionnement est fait aseptiquement dans des salles stériles, ou encore dans des vitrines ou hottes à « flux laminaire ». De l'air filtré stérile y est soufflé sans turbulence de façon continue. Le personnel disparaît sous des vêtements stériles avec coiffe, masque et souvent lunettes, imposées par l'usage des lampes ultraviolet germicides. La technologie des filtres a bénéficié des apports des industries électronique et aérospatiale.

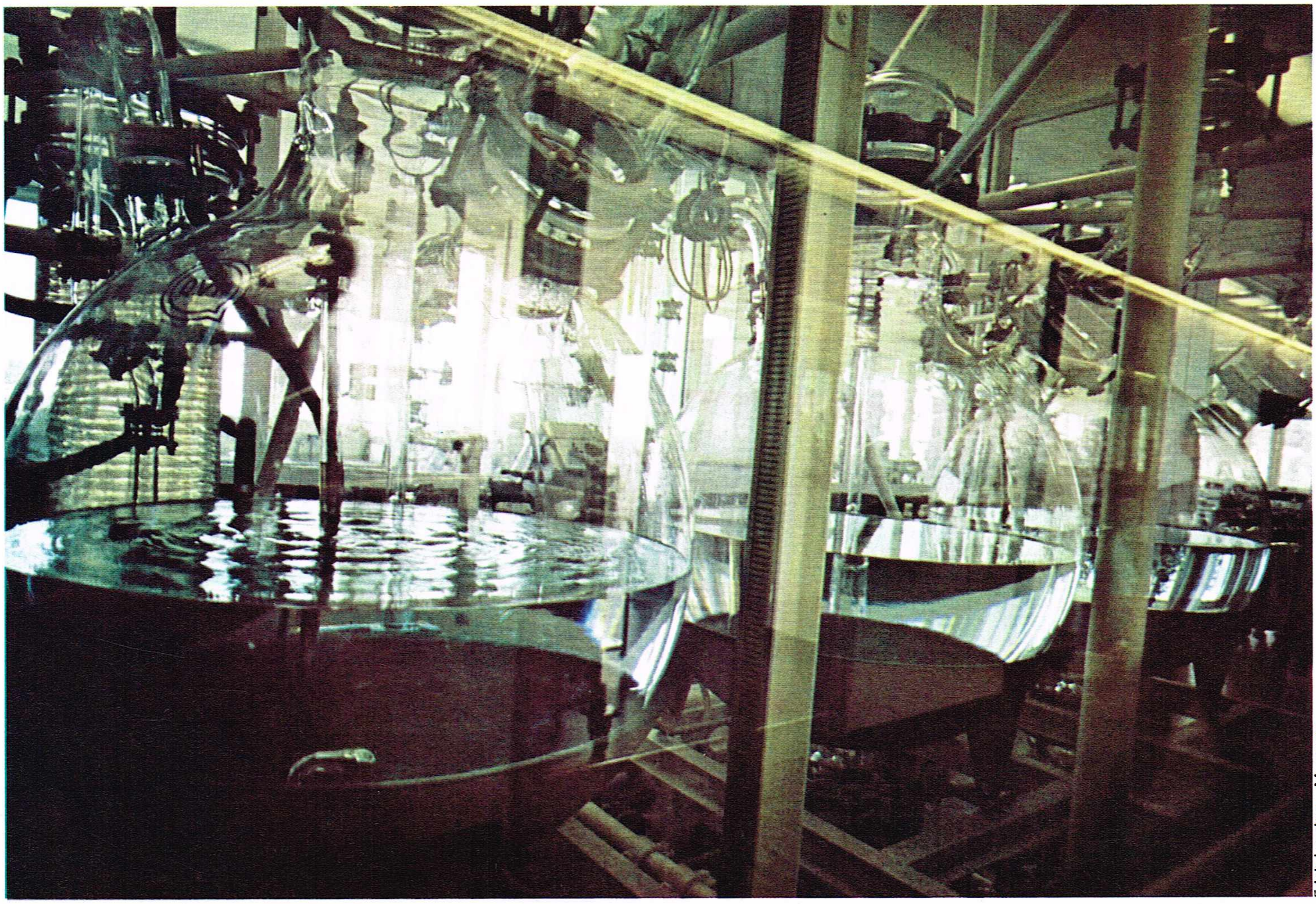

▲ *Le principal excipient des médicaments liquides est l'eau distillée. On la prépare par évaporation, suivie de condensation. Ici, préparation de l'eau distillée des laboratoires Laroche.*

Principaux matériaux utilisés

Excipients

Il est très rare que les principes actifs puissent être employés seuls : leur goût est désagréable, les quantités à utiliser sont trop faibles, etc. On fait appel à un *excipient* simple ou composé qui reçoit le principe actif. L'excipient est parfois un *véhicule* servant à transporter le médicament à son lieu d'absorption dans l'organisme. Parfois il aide le principe actif à jouer son rôle : c'est un *adjuvant*.

Eau distillée

Le principal excipient est l'eau distillée. On la prépare dans des appareils comprenant une chaudière servant d'évaporateur et un condenseur où la vapeur, soigneusement débarrassée de gouttelettes qu'elle pourrait entraîner (primage), retourne à l'état liquide. En général, on élimine la fraction la plus volatile (gaz dissous par exemple) en jetant la « tête » de distillation. De même, la fraction de « queue », qui pourrait être souillée par la décomposition de sels minéraux, n'est pas conservée : on garde le « cœur » de la distillation.

Les appareils sont en silice, en Pyrex et souvent en acier inox. Le principal problème est le coût de l'opération : il faut 537 calories pour transformer 1 gramme d'eau à 100 °C en vapeur à la même température. D'où une grande dépense d'énergie et d'eau froide pour la condensation. De nombreux dispositifs industriels (distillateurs à effets multiples, à thermocompression) permettent d'abaisser le coût de l'opération en récupérant les calories.

Eau déminéralisée

L'eau est purifiée par passage sur des colonnes de *résines échangeuses d'ions*. Une résine sous forme acide échangera les ions métalliques contre des protons H^+. On la régénère avec des acides concentrés. Une autre résine échangera les anions contre des hydroxyles OH^-. On la régénère par des bases fortes. Parfois les deux résines sont réunies dans une même colonne (lits mélangés), et l'eau obtenue est très pure (environ 10 microgrammes de sels par litre). La régénération est effectuée après séparation des deux résines dans des installations spécialisées.

Le procédé est économique ; s'il est bien conduit, l'eau ainsi préparée est excellente, souvent dépourvue de substances organiques retenues par adsorption.

L'*osmose inverse* est un procédé qui consiste à faire passer de l'eau sous pression à travers une membrane de très faible porosité. Les ions minéraux se concentrent dans la fraction non filtrée. Avec plusieurs étages successifs, on obtient une eau très pure sans particules, sans bactéries, sans ions. C'est un procédé très économique, qui s'étend beaucoup, mais n'est pas encore admis pour la préparation de solutés injectables.

Autres excipients

De nombreux autres excipients sont utilisés. Nous les citerons à propos des formes médicamenteuses détaillées ci-après. L'eau étant d'un emploi très général, il nous a semblé utile de la traiter à part.

Matériaux de conditionnement

Verres

De la même façon, un matériau de conditionnement surpasse tous les autres pour les liquides : il s'agit du verre, qui est préparé par fusion de sable (silice) et de carbonates alcalins et alcalino-terreux (sodium, potassium, calcium). De petites quantités de borate lui confèrent un faible coefficient de dilatation et une grande neutralité chimique.

En effet, par contact prolongé avec l'eau, un verre normal relâche des ions alcalins. Pour éviter cet inconvénient, les récipients à liquides injectables sont soit

Ian Berry - Magnum

▲ *Le verre est très utilisé comme matériau de conditionnement des médicaments, en particulier sous forme d'ampoules. Ici, scellage d'une petite série d'ampoules aux laboratoires Castaigne S. A.*
▼ *Le comprimé est la forme médicamenteuse la plus répandue et peut être fabriqué industriellement à grande échelle, comme le montre la photographie ci-dessous.*

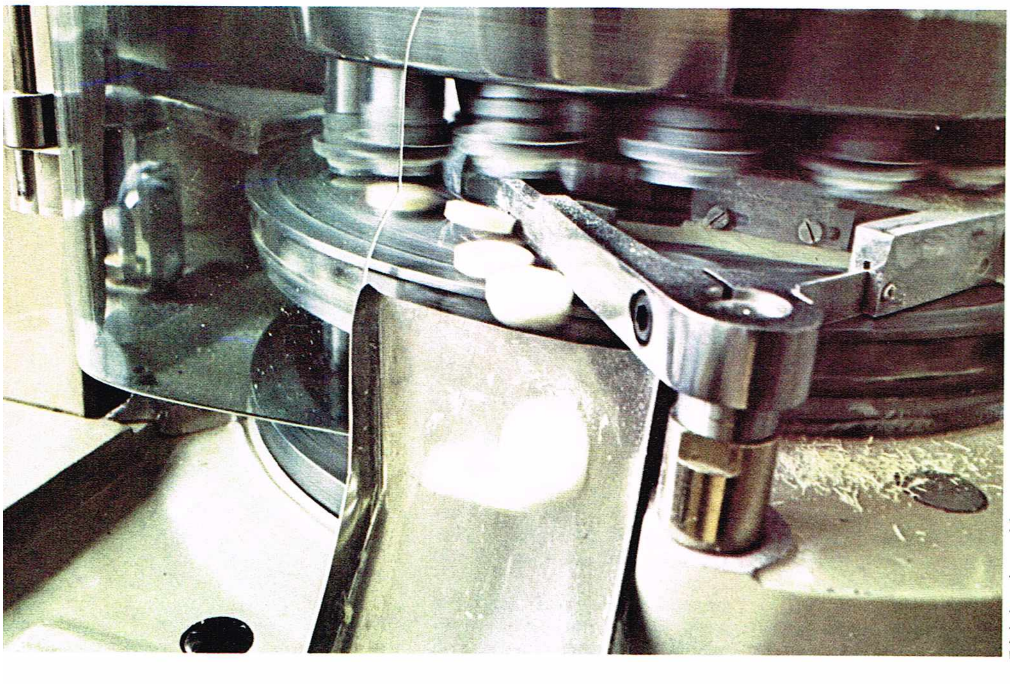

Erich Lessing - Magnum

neutres dans la masse, soit traités en surface. On injecte à chaud dans les récipients un gaz acide qui permet après lavage d'obtenir une pellicule très mince dépourvue d'ions alcalins. Ces derniers récipients ne peuvent servir qu'une fois. Le verre est lourd, cher, cassant, mais il est transparent et thermosoudable (ampoules). Son inertie et son innocuité sont éprouvées, et, malgré les progrès réalisés, le plastique idéal qui le remplacera dans tous les cas n'est pas encore découvert.

Principales formes médicamenteuses

Formes orales liquides

Les **potions** sont des mélanges contenant diverses solutions, des sirops et de l'eau. Leur composition est souvent déterminée par une prescription médicale pour un seul malade, et leur conservation est médiocre. Au contraire, les **sirops** sont saturés de sucre qui leur confère, quand ils sont bien faits, une conservation convenable, car les micro-organismes ne peuvent y pousser. Ils sont soit simples, soit composés. Préparés généralement à partir de sucs végétaux, ils ont souvent bon goût et servent également d'édulcorants. On peut dans certains cas les préparer à partir d'extraits concentrés et de sirop de sucre dit « simple ». De même, des **émulsions** et **suspensions buvables** sont parfois commodes pour les jeunes enfants, mais leur conservation est souvent délicate. On est parfois obligé de diluer dans un sirop excipient un granulé de médicament enrobé d'un vernis insoluble : c'est une suspension extemporanée. Les **ampoules buvables**, en verre coloré pour éviter les confusions avec les ampoules injectables, sont chères et, d'ailleurs, peu employées à l'étranger. Toujours stériles, elles ont une meilleure conservation que sirops et potions.

Formes orales solides

Les **comprimés** sont obtenus par agglomération sous pression d'une ou plusieurs substances médicamenteuses additionnées ou non d'adjuvants. C'est la forme médicamenteuse la plus répandue : emploi facile, bonne conservation, dosage unitaire précis, fabrication industrielle à grande échelle et de prix restreint, possibilité d'enrobage pour masquer un mauvais goût ou pour éviter la désagrégation dans l'estomac sont les principaux avantages.

La fabrication des comprimés est simple : on part d'un mélange de poudres : principe actif, diluants, lubrifiants, agglutinants, éventuellement délitants, ou désintégrants, de formulation en général très étudiée. Ce mélange est granulé, puis comprimé dans des machines alternatives (*fig.* 6) ou rotatives entre deux poinçons (*fig.* 7). Le rendement horaire d'une machine rotative peut atteindre 100 000 à l'heure. Les conditions de fabrication sont soigneusement mises au point pour obtenir une bonne reproductibilité, une biodisponibilité convenable. Des contrôles à tous les stades de fabrication sont nécessaires : dureté, homogénéité de poids, qualité de l'enrobage, etc.

Les **capsules** sont des globules creux à base de gélatine et dont la cavité est remplie d'un mélange médicamenteux. Les *capsules molles* sont généralement préparées à partir du mélange gélatineux coulé en deux feuilles qui sont soudées autour du médicament injecté par une pompe volumétrique. Les *capsules dures* ou *gélules* sont composées d'une enveloppe de gélatine en deux parties qui s'emboîtent et peuvent être scellées. Le remplissage est fait volumétriquement par une poudre ou un granulé dont l'excès est ôté par arasage ; ou encore, on injecte dans la partie inférieure la plus fine une sorte de comprimé peu tassé préparé dans un compresso-doseur. Ce sont les gélules qui, de loin, sont les plus utilisées. Cette forme est en constante expansion malgré son prix élevé et la difficulté de préparation qui nécessite une atmosphère contrôlée pour assurer une constance de la forme géométrique des enveloppes. Mais la fabrication est relativement simple, réalisable en officine à partir d'enveloppes vides. Il n'y a pas de problème de délitement.

Les autres formes orales solides sont les **poudres,** les **granulés** ou *saccharures granulés,* enrobés ou non, les **cachets** : deux capsules de pâte azyme cuite sont réunies après remplissage, soit par emboîtage, soit par collage après humidification des bords. Leur conservation est médiocre, car les produits sont en contact avec l'air.

Les **pilules** sont réalisées par division d'une masse pilulaire faite de principes actifs solides ou pâteux additionnés de miel, de sirop ou de poudre inerte selon les cas. Les pilules sont ensuite roulées pour être bien sphériques et éventuellement enrobées. Cette forme, de moins en moins fréquente en officine, est devenue très rare à l'échelle industrielle, car la préparation en est compliquée et lente.

Rappelons que toutes les formes orales solides destinées à la voie générale doivent donner lieu à des essais de biodisponibilité *in vitro* et surtout *in vivo* pour s'assurer que le principe actif ne sera absorbé ni trop vite ni trop lentement, pour maintenir le plus longtemps possible la concentration sanguine entre les limites de toxicité et d'efficacité. D'où des études poussées sur chaque nouvelle formulation.

Formes réservées à la voie parentérale

Il s'agit de solutés injectables dont le volume va d'une fraction de millilitre au litre. Les solutés sont généralement limpides, à l'exception de quelques émulsions ou suspensions. Ils sont stériles et apyrogènes.

On dit qu'une préparation est *pyrogène* si son injection détermine un accès fébrile dû à des produits assez mal connus venant du métabolisme bactérien et non détruits à la stérilisation ; cela est surtout à craindre pour des solutions de grand volume. Les substances pyrogènes peuvent souiller des principes actifs (glucose, amino-acides, citrates, etc.), et des précautions très strictes doivent être prises lors de la fabrication : essai des produits de départ, traitement des récipients et conduites par des oxydants, emploi d'eau distillée depuis moins de trois heures ou conservée à plus de 60 °C, filtration sur charbon, etc. Le contrôle d'apyrogénéité se fait en suivant la température rectale du lapin auquel on a administré la préparation. Un autre test de nature immunologique, le « Limulus test », est à l'étude ; il remplacera peut-être les servitudes des essais chez l'animal.

Les préparations injectables sont souvent neutres pour être à un pH physiologique et isotoniques, c'est-à-dire que des cellules mises en contact avec le soluté ne tendent ni à perdre de l'eau ni à en gagner. En pratique, l'abaissement cryoscopique d'un soluté est de 0,55 °C, sans quoi il est dit hypo- ou hypertonique, et des précautions d'emploi s'imposent.

Les solutés sont présentés en flacons sertis pour de gros volumes ou quand ils sont à préparer extemporanément à partir d'un lyophilisat et d'une ampoule de solvant. Les petits volumes sont présentés en ampoules à une ou deux pointes remplies unitairement avec des seringues de précision (ampoules bouteilles), ou encore après évacuation de l'air qu'elles contiennent par action du vide.

Les collyres

Préparations généralement liquides destinées au traitement des yeux, ils sont délivrés en flacons de petit volume munis d'un compte-gouttes et contiennent généralement un antiseptique pour rester relativement propres pendant leur durée d'emploi. Pour les opérés, on utilise des ampoules jetées aussitôt après usage. Leur fabrication rappelle celle des solutés injectables. Ils sont stériles, neutres, isotoniques et, en général, limpides.

Les suppositoires

Ce sont des préparations de consistance molle ou solide destinées à être introduites dans le rectum. Au départ, leur action était locale (suppositoires à la gélatine glycérinée, par exemple), puis ils ont été adaptés à la voie générale (antibiotiques, fébrifuges, etc.), sauf dans les pays anglo-saxons, très réticents à cette forme pourtant commode chez les jeunes enfants.

Les excipients sont soit des graisses naturelles (beurre de cacao) ou semi-synthétiques fondant dans le rectum, soit des produits hydrosolubles (gélatine) ou s'émulsionnant avec l'eau (polyéthylèneglycols). Cette dernière solution est préférée pour les pays chauds. Principe actif et excipient sont mélangés et fondus à une température aussi basse que possible, puis coulés dans des moules refroidis servant parfois d'emballage. Un contrôle sévère de la température est nécessaire, de même qu'une agitation permanente pour éviter toute sédimentation.

fig. 6

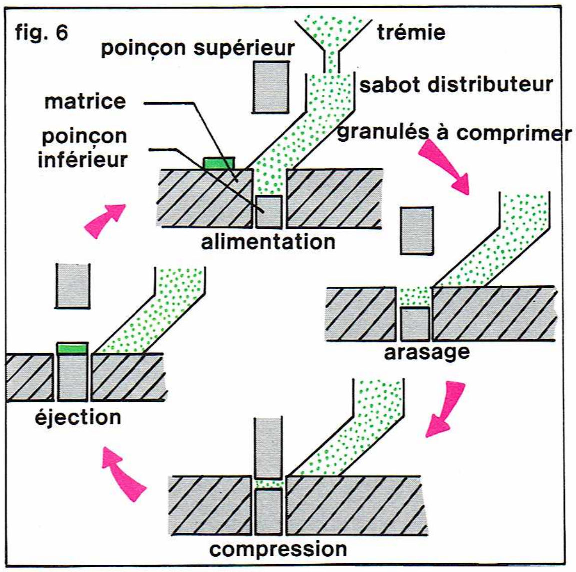

◀ *Figure 6 : différentes phases de la compression (d'un comprimé) sur machine alternative (d'après A. Le Hir,* Abrégé de pharmacie galénique, *Masson, Paris, 1974).*

▼ *Figure 7 :* a, *machine à comprimer rotative ;* b, *déplacement des poinçons dans une telle machine (d'après A. Le Hir,* Abrégé de pharmacie galénique, *Masson, Paris, 1974).*

fig. 7

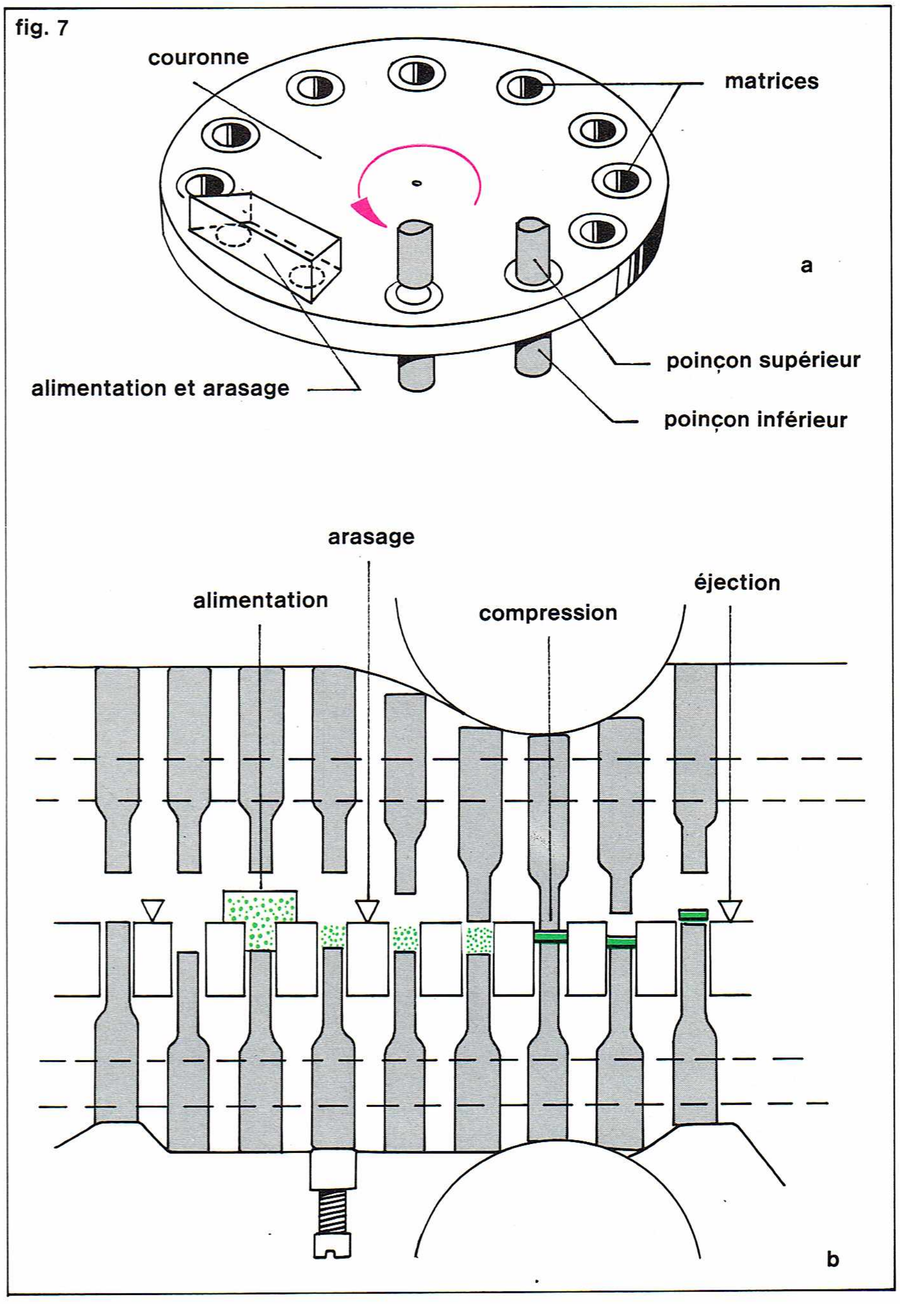

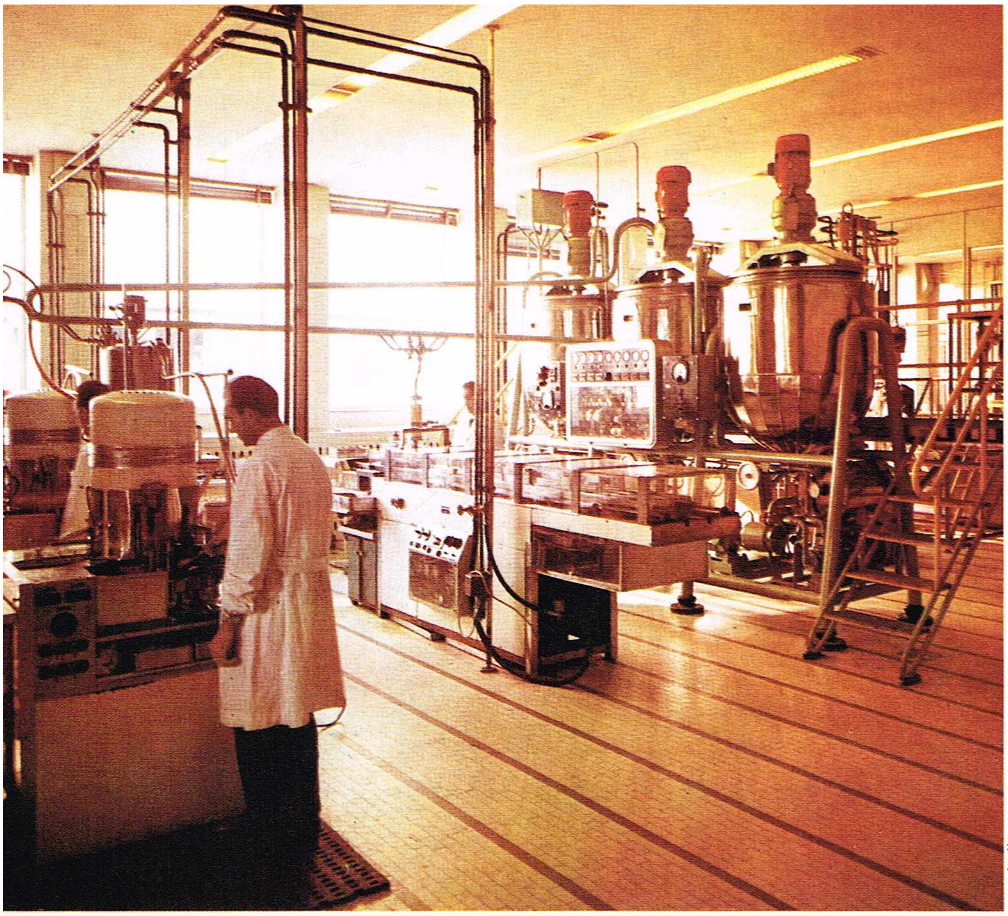

Farmitalia

▲ *Unité de préparation de suppositoires.*

Les pommades

Destinées à être déposées sur la peau ou les muqueuses, elles contiennent un ou plusieurs principes actifs dispersés dans un excipient hydrophobe (vaseline) ou hydrophile (polyéthylèneglycols). Les excipients hydrophiles ou les émulsions facilitent le mélange avec le sébum des follicules pileux et, par là, la pénétration des principes actifs à travers la peau. La faveur des utilisateurs joue surtout pour des produits lavables, mais il se pose alors des problèmes de conservation.

Les pommades sont faites au mortier à l'officine ou dans des malaxeurs mélangeurs dans l'industrie.

Autres formes

Nous citerons enfin sans les développer les *comprimés* et les *ovules gynécologiques*, les *aérosols vrais* préparés extemporanément dans des générateurs donnant des particules relativement calibrées de quelques micromètres de diamètre qui peuvent atteindre les alvéoles pulmonaires. Les *bombes aérosols* courantes servent à délivrer des « faux » aérosols non calibrés et destinés à la peau, la gorge ou la muqueuse nasale. N'oublions pas les gouttes nasales, les collutoires, gargarismes, lavements, et les anciennes fumigations, inhalations, cigarettes, bougies, etc. L'arsenal médicamenteux est varié, mais, en fait, un petit nombre de formes représente l'immense majorité des unités thérapeutiques délivrées.

Contrôle des formes pharmaceutiques

Toute forme pharmaceutique industrielle doit donner lieu à une mise au point dont nous avons donné quelques éléments. Dans les pays évolués, les gouvernements augmentent sans cesse le nombre des essais qui précèdent l'application à l'homme : essais analytiques, essais pharmacologiques, essais toxicologiques, puis essais cliniques.

L'autorisation de lancer un nouveau médicament prend de sept à dix ans, et les dossiers à fournir représentent souvent un volume de plusieurs mètres cubes. Chaque lot de matière première est, bien sûr, contrôlé selon les normes de la pharmacopée si elle y figure ou selon des normes définies par le fabricant et agréées par le ministère de la Santé pour les autres produits. Chaque lot de fabrication est ensuite soumis à des contrôles stricts en cours de procédé et sur le produit terminé. Tout cela augmente les investissements et les coûts, entraînant une concentration de l'industrie pharmaceutique et la course à la production.

▶ *Page ci-contre, avant d'être lancé, un nouveau médicament est largement expérimenté sur l'animal. Ici, expérimentation sur des lapins aux laboratoires Labaz (recherche de substances pyrogènes).*

QUESTIONS LIÉES A L'USAGER

Marketing

Nous avons vu en introduction que la définition du médicament n'est pas toujours évidente ; il est souvent nécessaire pour restaurer une fonction vitale, mais on glisse au produit de confort, à la diététique, à la cosmétologie et tout simplement à une sorte de potion magique où la part psychologique est prépondérante. De même, le circuit commercial est variable : la vente en pharmacie confère en général une bonne image de marque ; mais, dans certains pays, la distribution de nombreux produits médicamenteux est assurée par des « drugstores » ou des supermarchés : vitamines, chewing-gums ou chocolats purgatifs, aspirine, dentifrices spéciaux, tisanes, etc. L'utilisateur peut être le malade, le médecin et plus souvent l'infirmière dans le domaine hospitalier. En France, le remboursement par les organismes spéciaux n'est d'ailleurs possible que pour les médicaments dont la publicité est réservée au corps médico-pharmaceutique. Cependant, le chiffre d'affaires d'une officine est dû pour environ un tiers à l'autoprescription. Ainsi, la situation est complexe, différente selon les pays.

Ce qui apparaît comme une constante, c'est la surveillance des prix de cession et des marges bénéficiaires pour tout ce qui fait l'objet d'une couverture sociale. Compte tenu des coûts d'étude et de lancement, le nombre des produits originaux lancés chaque année décroît sans cesse. Il est de quelques unités pour le continent nord-américain. En France, des formulations perfectionnées apparaissent pour des produits déjà connus. L'amélioration porte sur la biodisponibilité, la présentation, parfois l'économie du temps d'infirmière (seringues préremplies, conditionnement unitaire).

La durée de vie d'un médicament est une donnée très variable. Des modes passent ; on peut sans crainte employer ce mot en constatant d'énormes disparités dans la consommation de certains produits d'un pays à l'autre : par exemple, la France consommait à elle seule les deux tiers des sels de bismuth produits mondialement. Les accidents neurologiques graves dus à leur emploi sont apparus ces dernières années seulement et n'ont pas reçu d'ailleurs d'explication satisfaisante. Mais le résultat est que ces sels sont en cours d'abandon sans que la santé publique en semble perturbée. Le fameux « baume du tigre », produit miracle en Extrême-Orient, est pratiquement inconnu ailleurs.

Certains médicaments disparaissent parce que leur activité a beaucoup baissé. C'est le cas de nombreux antibiotiques auxquels les germes deviennent résistants en quelques années par la faute d'une prescription aveugle et anarchique.

Il est sûr que l'abus des médicaments est une plaie des pays civilisés. Mais qui nierait l'intérêt de l'insuline, de la digitaline ou des antituberculeux ? Même le sinistre thalidomide est précieux dans certaines formes de lèpre. Face à cette situation complexe, le marketing n'est pas chose simple.

Le médicament face au design

Deux tentations s'opposent. Ou bien, par une présentation originale et séduisante, on cherche à en faire un produit attrayant. Une débauche de colorants dans sa préparation ou sa présentation le fait paraître moins triste et plus facile à absorber. Mais ce n'est pas sans risque : les enfants sont tentés d'en abuser ; l'emploi de colorants a mauvaise presse ; de plus, l'utilisateur se limite à son aspect au lieu de lire l'étiquette, et de nombreuses confusions sont possibles. Ou bien, on supprime les couleurs, on normalise la présentation, et il y a perte de critères de reconnaissance. A l'heure actuelle, il semble que la balance penche du premier côté, mais il n'est pas dit que la tendance ne s'inversera pas.

Nous avons dû, à travers ce rapide survol, laisser dans l'ombre certains points particuliers, poser des questions sans y apporter de réponse. Le médicament est devenu sujet d'actualité. La littérature le concernant surabonde. Comment se peut-il qu'il reste aussi mal connu ? Peut-être ces quelques pages contribueront-elles à le faire mieux percevoir ; c'est le souhait de l'auteur.

Ian Berry - Magnum

▶ *Méthode classique : culture du bacille diphtérique pour la production de toxine; on ensemence le germe dans un flacon plat offrant une large surface de contact avec l'air pour faciliter le développement du microbe aérobie. La culture a été filtrée sur bougies pour recueillir la toxine dans le grand flacon. On y ajoute 2 % de formol, et, après une incubation de deux semaines à l'étuve à 37 °C, la toxine est transformée en anatoxine, inoffensive et vaccinante. Tel est le principe de la méthode originale de Gaston Ramon.*

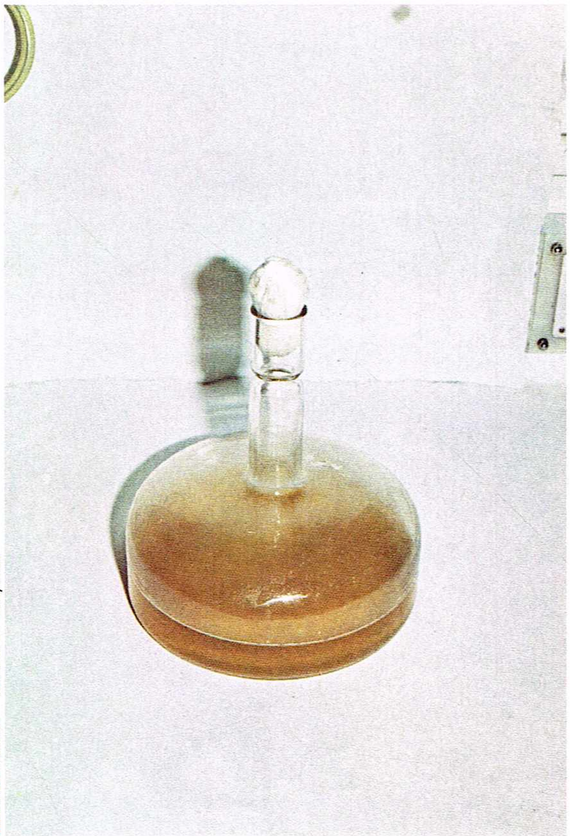

Institut Pasteur - Cliché E. Relyveld

Institut Pasteur - Cliché E. Relyveld

LES VACCINS

L'époque contemporaine, c'est-à-dire la période débutant avec le deuxième quart du XXe siècle, où interviennent pour l'humanité les effets cumulés de la révolution industrielle, du progrès scientifique et de l'évolution de la médecine, est caractérisée par l'accroissement accéléré de la population mondiale et l'allongement progressif de la durée moyenne de la vie humaine. Si, dans l'ensemble, l'amélioration du niveau de vie moyen, l'évolution de l'alimentation et de l'hygiène, l'accroissement des biens de toute nature à répartir entre les hommes ont joué un rôle indéniable dans cette évolution démographique, il n'en demeure pas moins que le facteur majeur est représenté par la disparition des maladies infectieuses responsables des grandes épidémies et par la réduction progressive de la mortalité infantile, ces deux facteurs agissant directement sur la démographie.

En dehors des grandes épidémies dévastatrices qui ont pratiquement disparu, c'est surtout l'enfance qui est sensible aux maladies infectieuses. La mortalité infantile était, pour 1 000 naissances vivantes :

— en 1770, de 252;
— en 1870, de 178;
— en 1970, de 20;
— en 1976, de 12,6.

Cette même mortalité infantile qui, en 1880, était de 218 en Hollande, de 178 en Suisse, n'est plus, en 1970, que de 14 et 17. Elle s'abaisse au-dessous de 12 pour la Suède : on approche du minimum raisonnablement possible.

La variole, depuis 3 000 ans la plus grande tueuse d'hommes, n'existe plus que sur un territoire restreint en Afrique Noire; la diphtérie, le tétanos sont vaincus par le vaccin, la poliomyélite a disparu des pays qui vaccinent. Résultat : la France connaît en 1976 un taux brut de mortalité de 10,5 dans lequel les maladies infectieuses ne comptent plus que pour 91 sur 10 000 décès. L'espérance de vie est à la naissance de 69 ans pour les hommes, de 77 ans pour les femmes.

Conséquences : en 1970, le rythme de croissance de la population n'est, avec la diminution de la natalité, que de 0,80 pour l'Europe et de 1,84 pour l'Amérique du Nord, régions les plus évoluées. Mais il est de 2,20 pour l'Asie et de 2,85 pour l'Amérique du Sud, ce qui correspond à une population multipliée par 10 en 50 à 60 ans.

En contrepartie, avec un taux brut de reproduction de 0,89, la France verra sa population, actuellement en faible augmentation apparente du fait de l'allongement de la durée moyenne de la vie, diminuer au fur et à mesure de la disparition des tranches les plus âgées, remplacées par des générations de plus en plus réduites en nombre.

On voit, en dernière analyse de ces considérations démographiques, dont l'incidence sur le devenir du globe est évidente, qu'elles sont avant tout le résultat immédiat de la pratique généralisée des vaccinations, car celles-ci manifestent leur efficacité même parmi les populations du tiers monde chez qui l'hygiène alimentaire demeure précaire, le niveau de vie bas et l'alimentation insuffisante. Elles contrebalancent et ralentissent temporairement dans les pays évolués les effets de la dénatalité en masquant le déclin de la population qui en est la conséquence.

On peut donc dire que les vaccinations sont devenues l'un des points forts parmi les facteurs essentiels de l'évolution du monde moderne.

Pourquoi vacciner ?

L'idée de vacciner part d'une observation multiséculaire : les individus qui ont été atteints d'une maladie infectieuse dont la mortalité est naturellement élevée et qui ont survécu, sont épargnés et ne rechutent point lors d'une nouvelle offensive du même mal. Un millénaire avant notre ère, les Chinois s'efforçaient de se protéger contre la variole, maladie hautement épidémique avec une mortalité très élevée, en insérant dans l'épiderme des sujets à protéger un fragment de fil de soie passé dans une vésicule de varioleux où le virus était atténué par une longue dessiccation.

Une variante de cette méthode, malgré tout aléatoire et souvent dangereuse, la *variolisation*, connut en Europe une assez grande faveur lorsqu'elle y fut introduite en Angleterre par lady Montagu, épouse d'un ambassadeur en Turquie. Mais elle fut supplantée par la vaccination au moyen du cow-pox lorsqu'en 1796, le médecin anglais Edward Jenner, qui avait appris d'un pasteur

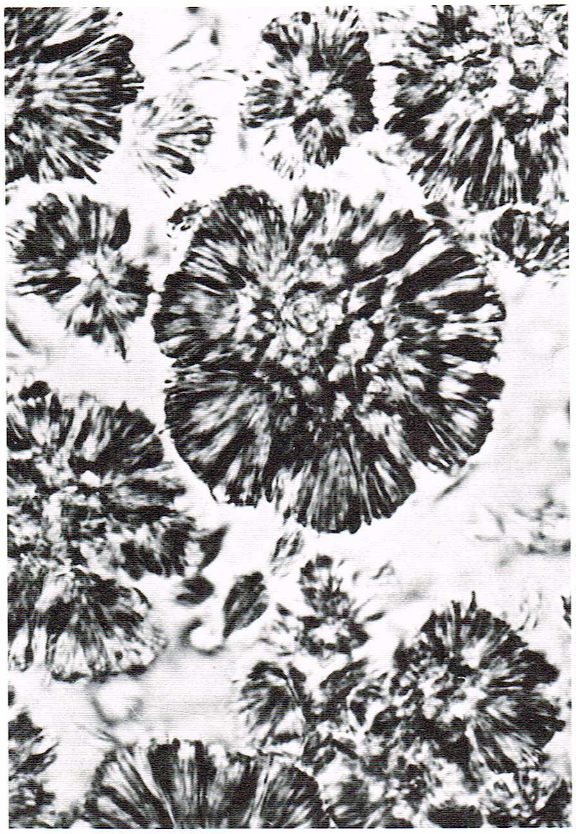

Institut Pasteur - Cliché E. Relyveld

◄ ***Toxine diphtérique à l'état cristallisé. Le développement des techniques de purification des toxines permet d'obtenir celles-ci à l'état cristallisé avec un degré de pureté quasi absolu. Toute espèce de substance étrangère provenant du milieu de culture en est éliminée. La toxine est ensuite traitée pour être transformée en anatoxine. C'est le principe même des méthodes modernes de préparation des vaccins.***

français que cette maladie bénigne des vaches, transmissible à l'homme, semblait les protéger contre la variole, en fit l'expérimentation systématique et démontra irréfutablement que l'inoculation de la vaccine, qui ne cause chez l'homme qu'une légère lésion locale, protégeait efficacement contre la redoutable variole, dont la mortalité restait de 20 à 80 %.

La vaccination antivariolique fut progressivement adoptée par tous les pays civilisés, mais il s'écoula près d'un siècle avant que d'autres méthodes, pour créer la résistance aux maladies infectieuses, viennent donner naissance au principe systématique des vaccinations.

C'est Louis Pasteur qui, en 1880, à la suite d'une observation fortuite, s'engagea sur la voie de l'atténuation des germes. Il avait observé qu'une culture vieillie du microbe du choléra des poules devenait incapable de communiquer la maladie à ces volatiles, mais les rendait résistantes à une inoculation de culture fraîche, régulièrement mortelle pour les sujets qui n'avaient pas préalablement reçu la culture atténuée. Le problème consistait alors à trouver pour chaque germe infectieux la méthode qui permettrait d'obtenir régulièrement et sans danger le degré d'atténuation assurant la protection contre la maladie. En effet, et quel que soit le germe ou la méthode d'atténuation considérée, le résultat n'est obtenu qu'à l'intérieur d'un paramètre assez étroit : insuffisamment atténué, le germe reste virulent, trop inactivé, il ne protège plus.

Pasteur et ses collaborateurs surent mettre au point les techniques adaptées à chacun de leurs essais, et qui restent valables pour le choléra des poules, le charbon des herbivores, le rouget des porcs, la péripneumonie des bovidés. Le triomphe de Pasteur culmina lorsqu'en 1885, il réussit, après la vaccination du chien contre la rage, à protéger l'homme contre l'infection rabique régulièrement mortelle en mettant à profit la longueur de l'incubation du mal pour protéger les mordus par des injections de moelle de lapin rabique atténuées par la dessiccation et injectées en séries de virulence croissante.

En 1897, le bactériologiste britannique sir Almroth Wright montrait que des bactéries, non plus atténuées, mais tuées, étaient, à condition d'en injecter une quantité suffisante, capables d'immuniser contre la maladie. Appliquée tout d'abord à la lutte contre les fièvres typhoïdes, la méthode fut appliquée à bien d'autres germes bactériens, mais avec des succès variables.

En 1924, Gaston Ramon, en France, démontrait que les *toxines* microbiennes pouvaient, sous l'influence de la chaleur et du formol, être transformées en un produit stable, antigénique et inoffensif, l'*anatoxine*, capable de vacciner efficacement contre la diphtérie et contre le tétanos.

C'est aussi en 1924 qu'étaient rapportés à l'Académie de Médecine les résultats de longues recherches poursuivies depuis 1908 par Calmette et Guérin avec un bacille tuberculeux bovin atténué, le BCG, pour protéger l'homme contre la tuberculose.

Progressivement se généralisaient les vaccinations contre les maladies bactériennes, mais la variole et la rage exceptées, toutes les maladies à virus résistaient aux tentatives d'en atténuer le germe pour en tirer un vaccin.

Alors que la fièvre jaune reculait régulièrement en Amérique par l'application des mesures anti-moustiques dans les villes, une grave épidémie africaine devait permettre d'en obtenir un vaccin, d'abord par l'adaptation à la souris (Sellards et Laigret, 1932), puis par mutation dans l'œuf de poule incubé (Theiler et Smith, 1937). Les maladies à virus successivement vaincues par la vaccination furent la grippe (1943-1957), la poliomyélite (1954-1955), la rougeole (1959), la rubéole (1966), pour ne citer que les plus importantes.

Avec l'évolution des techniques et l'introduction des méthodes récentes de fractionnement et d'atténuation des antigènes, on peut dire qu'en règle générale tout agent infectieux qui peut être isolé, caractérisé et cultivé est potentiellement un vaccin. Depuis la décennie 1955-1966, la phase des tentatives expérimentales de préparation des vaccins est achevée, et l'ère industrielle est ouverte.

Principe des vaccinations

Les vaccinations ont pour but d'établir dans un organisme donné, homme ou animal, un état réfractaire à l'infection analogue à celui que donnerait à cet organisme une maladie naturelle victorieusement surmontée.

L'expérience montre que si l'individu a reçu un *antigène* (et les bactéries ou les virus sont des antigènes parmi une infinité d'autres), l'organisme vivant réagit par la formation d'*anticorps* généralement identifiables dans le sang circulant et localisés en majeure partie sinon en totalité dans la zone dite gamma des globulines du sérum, d'où le terme général de *gamma-globulines* appliqué à la fraction du sérum isolable par électrophorèse ou par précipitation fractionnée qui renferme des anticorps.

Ces anticorps sont spécifiques, c'est-à-dire qu'ils n'agissent que sur l'antigène correspondant, et ils sont capables de neutraliser *in vitro* l'antigène qui a provoqué leur apparition. Cette réaction de neutralisation peut être

▼ ***Les méthodes de titrage*** in vitro, ***pour lesquelles on emploie des plaques de perspex à godets que l'on remplit avec les réactifs, permettent, en rendant visibles les réactions antigène-anticorps, de titrer la virulence d'un antigène, de mesurer le niveau des anticorps d'un sérum, de contrôler la spécificité d'un germe, etc.***

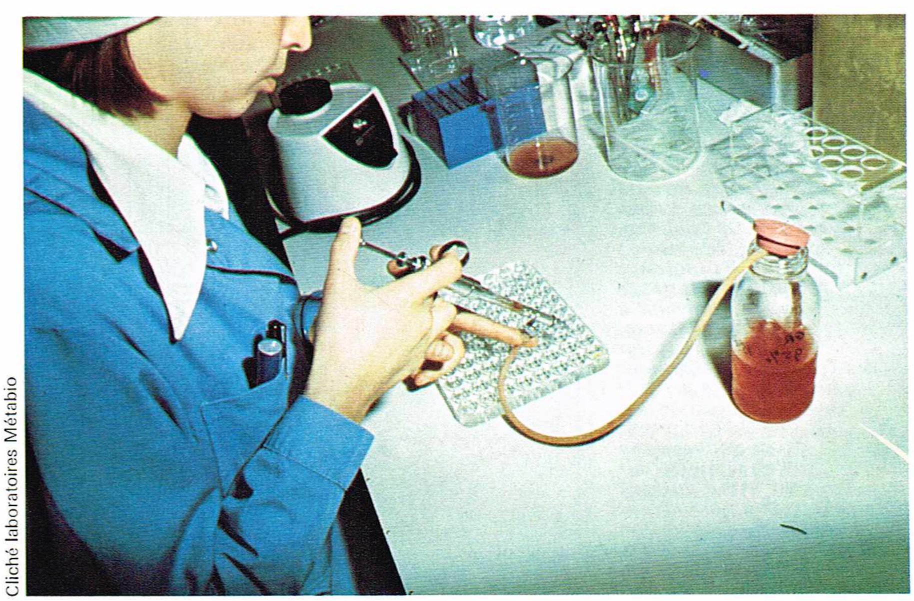

Cliché laboratoires Métabio

mise en évidence de différentes manières (titrage de la virulence résiduelle, déviation du complément, floculation initiale, immuno-électrophorèse, immuno-fluorescence, marquage isotopique, etc.) directes ou indirectes, permet d'identifier et de doser les anticorps, de suivre l'immunisation d'un sujet par la maladie ou la vaccination et de contrôler la persistance de son immunité.

La durée de persistance des anticorps, témoins de l'immunité, est extrêmement variable, en relation avec la durée de l'immunité de la maladie naturelle et la qualité de l'antigène reçu. La durée de protection peut ainsi soit s'étendre sur de très nombreuses années (fièvre jaune), ne durer que quelques années seulement (variole, tétanos), un an (grippe), voire quelques semaines à deux ou trois mois (choléra).

Lorsqu'une vaccination a été correctement pratiquée, et qu'après le délai habituel à ce type de vaccination le niveau des anticorps commence à baisser, une seule injection, dite *de rappel*, suffit à relever rapidement, parfois en 48 heures, les anticorps à un niveau efficace. D'où l'intérêt pour l'entretien de l'immunité des injections systématiques de rappel dans les délais que l'expérience portant sur des milliers d'observations a permis d'établir avec une précision suffisante. L'Organisation mondiale de la Santé (OMS) a ainsi fixé pour chaque vaccination exigible internationalement un délai correspondant (six mois pour le choléra, trois ans pour la variole, dix ans pour la fièvre jaune), qui fixe les durées administratives de la validité des certificats internationaux.

Le dosage des anticorps circulants permet généralement de mesurer avec précision le degré de protection assuré contre les maladies, principalement celles dues à des germes qui envahissent l'organisme par le courant sanguin et que la présence des anticorps suffit à arrêter.

Il n'en n'est pas de même dans certaines maladies du système nerveux, dont la rage est le type. En ce cas, l'immunisation fait bien apparaître des anticorps circulants témoins de la réaction de l'organisme à l'antigène, mais ils ne suffisent pas toujours pour assurer l'état réfractaire du système nerveux. Celui-ci paraît être essentiellement sous la dépendance de certains lymphocytes (lymphocytes T, originaires du thymus) dont l'état de résistance peut être apprécié par la transformation blastique (formation de rosettes) *in vitro* au contact de l'antigène. Si l'acquisition de l'état réfractaire par les lymphocytes T s'accompagne toujours de l'apparition des anticorps circulants, la réciproque peut n'être pas vraie, l'aptitude à sensibiliser les lymphocytes T étant, en particulier et outre la qualité de l'antigène administré, sous la dépendance de facteurs individuels ou génétiques, souvent difficiles à apprécier.

D'autre part, il existe des infections (par exemple les maladies éruptives de l'enfance) pour lesquelles les anticorps circulants, témoins de l'immunité, peuvent disparaître du sang pour un certain nombre d'années sans que l'état d'immunité ait complètement disparu. Il est probable qu'en cas de réinfection par le germe causal, le début de la multiplication de ceux-ci agisse par effet de rappel et provoque une rapide remontée des anticorps à un titre suffisant pour protéger l'organisme avant la fin de la période d'incubation de la maladie.

Enfin, les anticorps qui apparaissent dans le sérum de certains sujets sans que ceux-ci aient à aucun moment présenté de signe d'infection, anticorps auxquels on attribue l'immunité « naturelle » à l'infection, sont toujours l'effet d'infections inapparentes immunisantes, relevant de contaminations latentes par des germes, souvent très atténués, en circulation dans l'environnement des sujets en apparence spontanément immunisés. C'est le cas, par exemple, dans la poliomyélite, où l'on observe, en particulier chez les enfants du tiers monde vivant dans des conditions d'hygiène précaires, l'apparition successive dès la première enfance d'anticorps contre chacun des trois types du virus poliomyélitique. Il suffit que la même population soit placée dans des conditions d'hygiène et d'environnement satisfaisantes pour que l'on n'observe plus l'apparition de cette immunité dite « naturelle ». D'où l'infection clinique à un âge plus avancé et de gravité croissante de la poliomyélite observée au fur et à mesure des progrès de l'hygiène, et l'impérieuse nécessité d'une vaccination précoce des enfants dans les pays évolués. De même, les Africains passent pour avoir une immunité naturelle à la fièvre jaune, qui est en réalité la traduction des infections bénignes du jeune âge en milieu endémique. Il suffit que les enfants africains naissent et grandissent dans des régions indemnes de fièvre jaune pour que leur sensibilité au virus soit aussi grande que celle des Européens de race blanche. La vaccination a précisément pour objet de faire apparaître chez les sujets non protégés l'état d'immunité qu'en région d'endémie les populations acquièrent spontanément mais au risque d'infections cliniques ou d'épidémies.

fig. 1

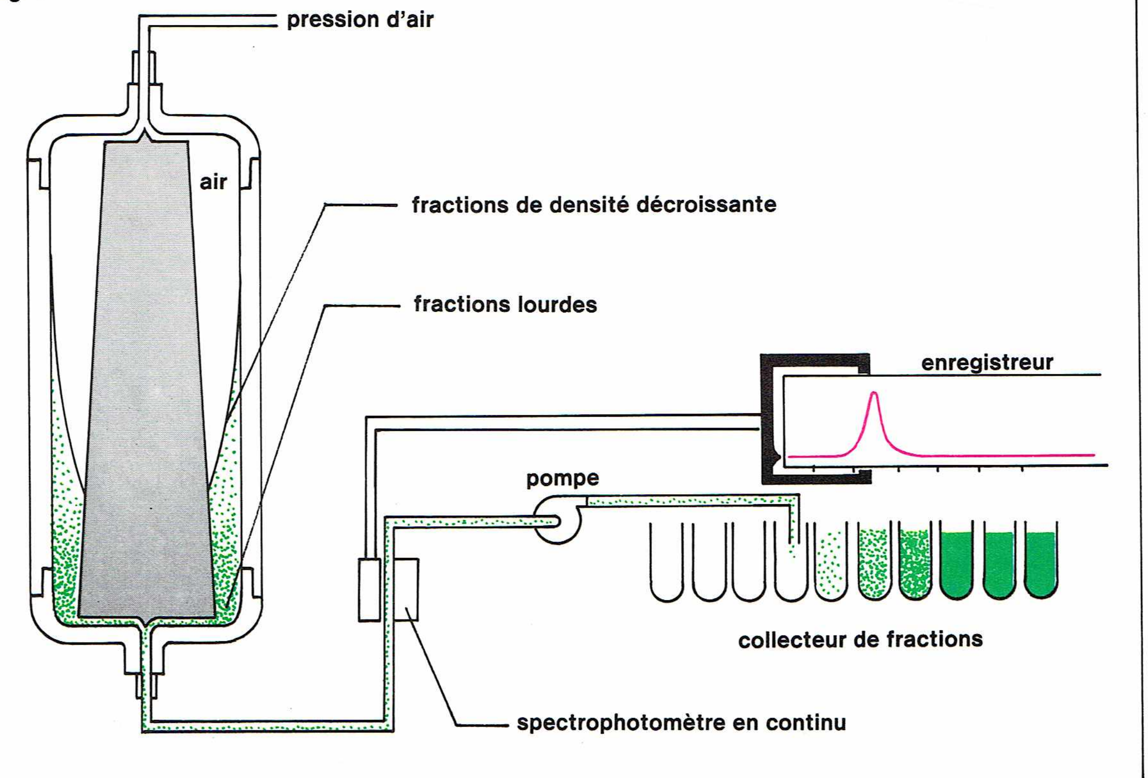

▶ ***Figure 1 : schéma de principe de la centrifugation en gradient de densité. Suspendues dans une solution de densité croissante du bas vers le haut (sucrose, chlorure de césium) à l'intérieur d'une centrifugeuse tournant à grande vitesse, on peut isoler des fractions renfermant exclusivement le produit que l'on recherche. Un collecteur de fractions et un enregistreur de densité optique en continu permettent de contrôler l'opération (d'après George B. Cline, University of Alabama, Birmingham, Alabama).***

Types et catégories de vaccins

Considérés selon la nature de l'antigène formant leur principe actif, les vaccins peuvent être divisés en vaccins contre les maladies bactériennes (tuberculose, typhoïde, dysenterie, méningite, coqueluche), contre les maladies à microbes toxigènes (diphtérie, tétanos, botulisme), et enfin contre les maladies causées par des virus (grippe, rage, poliomyélite). Chacun de ces trois groupes principaux de vaccins correspond à une technologie particulière.

Dans chacun de ces groupes, les vaccins peuvent être soit à germes tués ou inactivés, soit à germes vivants ou atténués. Si l'agent pathogène agit par sa toxine, on dirige contre lui une vaccination anatoxique. Enfin on qualifie souvent de vaccins chimiques des vaccins dont le principe actif est non pas l'ensemble du germe pathogène, mais une fraction particulière extraite du corps bactérien ou du virion par des méthodes chimiques (détersifs) ou physiques (ultrasons). Ces fractions (comme celles obtenues en fractionnant les virus) sont séparées par divers procédés, parmi lesquels la centrifugation en gradient de densité, dite centrifugation zonale, offre un haut rendement à une production industrielle (*fig.* 1).

D'autre part, du point de vue de l'application pratique et de la réglementation, il faut considérer trois sortes de vaccinations : les *vaccinations obligatoires* imposées par la loi à tous les citoyens ou à certaines catégories d'entre eux, les *vaccinations facultatives* dont l'initiative est laissée au médecin en fonction des indications propres à chaque cas, et les *vaccinations potentielles* correspondant à des vaccins à l'étude, dont la production est souhaitable ou envisagée mais qui n'ont pas encore atteint le stade de la libre production ni de l'emploi généralisé.

Vaccins bactériens tués

La première condition pour préparer un vaccin bactérien est d'obtenir en culture et, à l'état pur, le germe que l'on veut transformer en vaccin. Les méthodes classiques partent du matériel contaminé (sang, pus, expectoration, organes prélevés à l'autopsie, etc.) que l'on ensemence, après dilution convenable, sur un milieu solide sélectif (gélose au sang, par exemple) pour obtenir des colonies séparées développées à partir d'un seul microbe. Celui-ci est repiqué, sa pureté vérifiée à l'aide de nouvelles dilutions, contrôlé quant à sa spécifité au moyen de sérum neutralisant ou agglutinant, puis soumis à des épreuves d'antigénicité. En effet, dans une population microbienne, tous les descendants des bactéries originelles n'ont au même degré ni la virulence, ni l'aptitude à provoquer un titre élevé d'anticorps chez l'animal auquel on les inocule.

On sélectionne ainsi une ou des souches de microbes qui sont choisies suivant les cas pour leur meilleure antigénicité, leur aptitude à la production de toxines, leur identité génétique et antigénique avec l'agent en cause dans l'épidémie à combattre.

La souche retenue est stockée après ensemencement sur un milieu de réserve et dans des conditions assurant sa meilleure conservation (froid, dessiccation, etc.). Un échantillon en est remis à la Collection nationale des types microbiens qui en vérifie les caractères lorsque l'autorité nationale de contrôle n'impose pas le choix d'une souche microbienne déjà connue et éprouvée.

Les milieux de production sont ensemencés à partir de précultures tirées des souches types. Ces précultures, assimilables aux « pieds de cuve » des industries de fermentation, servent à leur tour à ensemencer largement les milieux où le germe sera récolté. La culture en boîte de Roux, abandonnée pour la culture en milieu liquide en flacons, est maintenant partout remplacée par la culture en fermenteurs, récipients de vaste capacité en verre ou en acier inoxydable où les conditions les plus favorables à la multiplication du germe (composition du milieu, température, pH, oxygénation ou anaérobiose, agitation) sont maintenues automatiquement.

On s'efforce d'obtenir ainsi le meilleur développement dans le minimum de temps, ceci autant pour augmenter le rendement que pour réduire les chances de mutation du germe au cours de sa multiplication. Les microbes sont récoltés dès que leur concentration aborde le plateau qui termine la courbe logarithmique de croissance (*fig.* 3).

Les bactéries sont alors séparées des milieux de culture, généralement par centrification, et remises en suspension dans un milieu neutre isotonique, puis inactivées. Cette inactivation est obtenue par différentes techniques propres à chaque fabrication : chauffage (méthode la plus courante), action des rayons ultraviolets, addition d'antiseptiques (formol le plus souvent, parfois phénol ou alcool) ou d'un inhibiteur se détruisant en se combinant

fig. 2

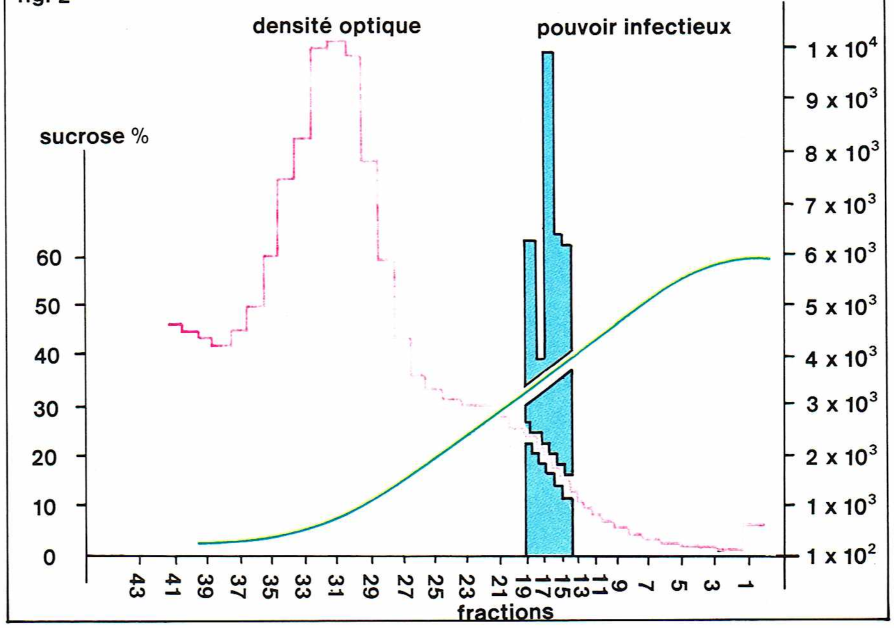

▲ ***Figure 2 : résultat d'une séparation de l'antigène rabique dans un milieu complexe au moyen de la centrifugation en gradient de densité. On voit que la densité optique maximale rassemblant des éléments étrangers au vaccin se situe en un point différent de la fraction renfermant l'antigène spécifique (fractions 19 à 14). On peut ainsi obtenir par simple centrifugation un degré de purification très poussé de l'antigène (courbe de J. F. Lavender et R. M. Van Frank,*** **Applied Microbiology,** ***1971, vol. 22, p. 361).***

Document Ifia

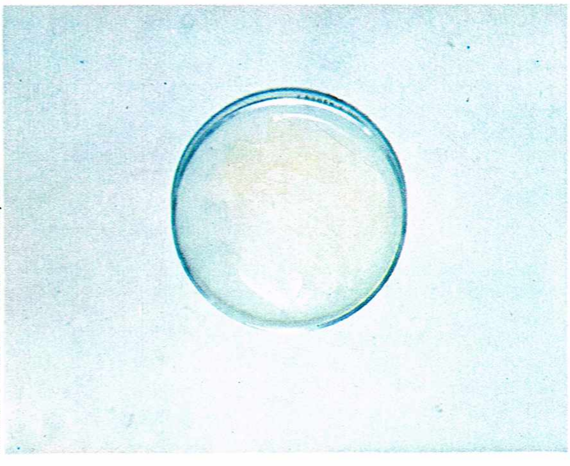

Institut Pasteur - Cliché E. Relyveld

◀ ***Boîte de Pétri ensemencée avec une dilution croissante d'une culture microbienne. On voit les colonnes isolées produites à partir d'un seul microbe, permettant la sélection d'un clone microbien. Culture pure obtenue à partir d'un microbe sélectionné par la méthode des dilutions.***

▶ *A gauche, fermenteur en verre pour culture microbienne en masse. On voit au sommet de la sphère en verre d'Iéna le moteur qui assure l'agitation du milieu, les tubes qui contrôlent l'arrivée du milieu de culture, l'alimentation en oxygène, le maintien du pH, etc. A droite, culture de germes microbiens en cuves de plusieurs centaines de litres. Du ballon de verre de 100 litres on est passé à la cuve en inox de 1 000 litres, avec contrôle électronique de tous les paramètres, résultat obtenu en dix ans de recherches conjointes de l'O. M. S. et de l'institut Rockefeller, relayés par les usines de production industrielle. C'est ainsi que l'institut Mérieux a pu, en 1974-1975, faire face à la production nécessaire pour vacciner 80 millions de Brésiliens atteints par une épidémie de méningite cérébrospinale.*

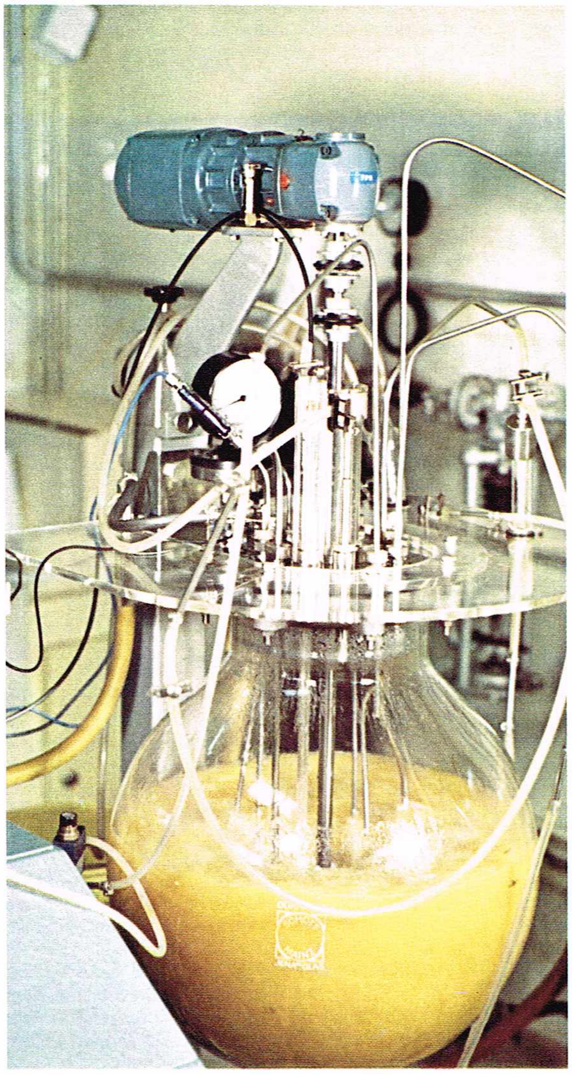

Institut Pasteur - Cliché E. Relyveld

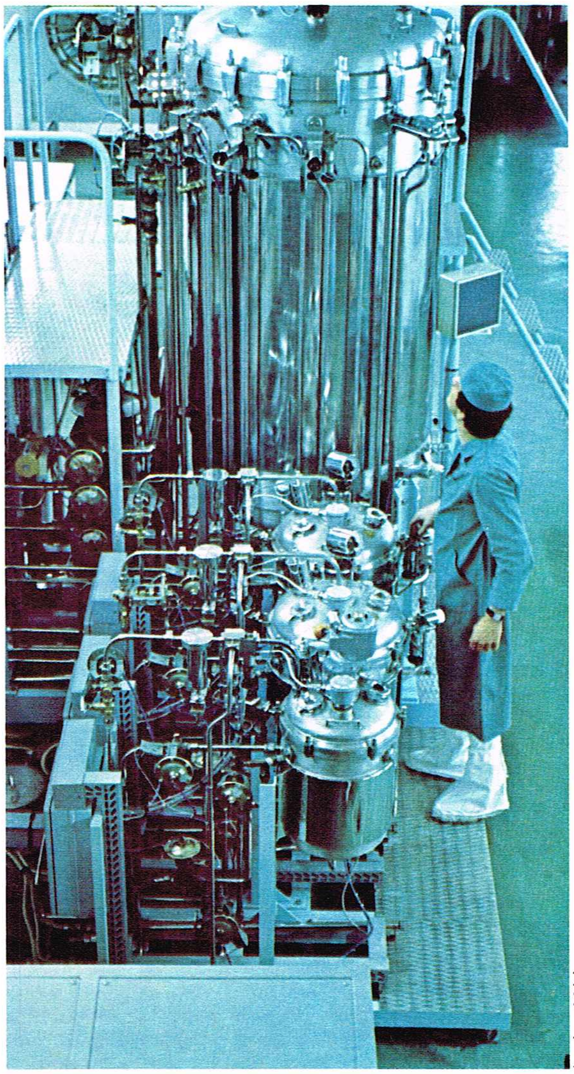

Institut Mérieux

Institut Pasteur - Cliché E. Relyveld

▶ *Préparation de la préculture qui servira à ensemencer une cuve de fermentation. A partir d'une culture pure, on ensemence le germe dans des fioles d'Erlenmeyer qui donneront une culture concentrée, laquelle servira à ensemencer la cuve de fermentation.*

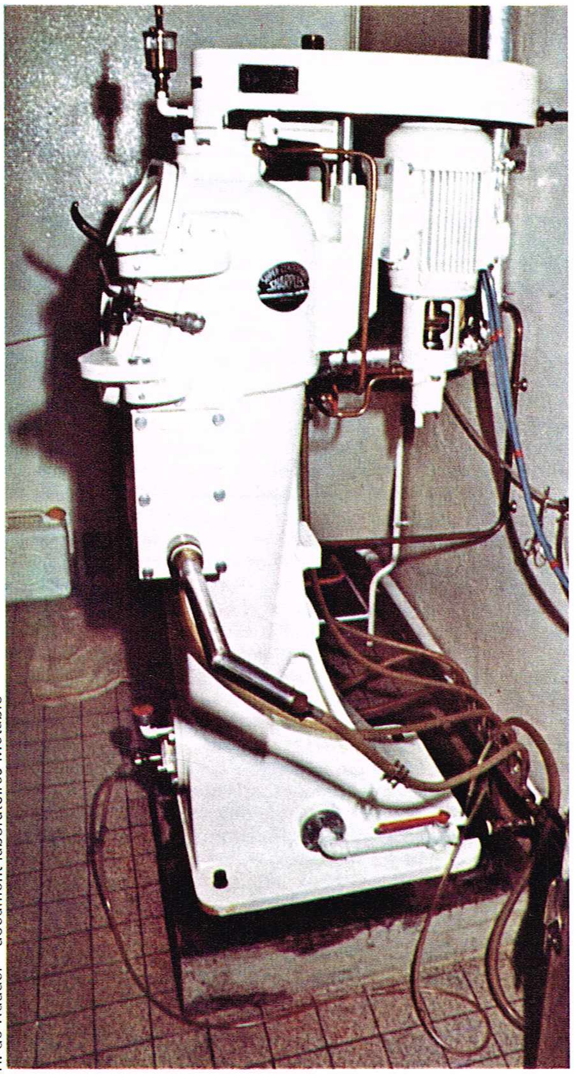

R. de Rudder - document laboratoires Métabio

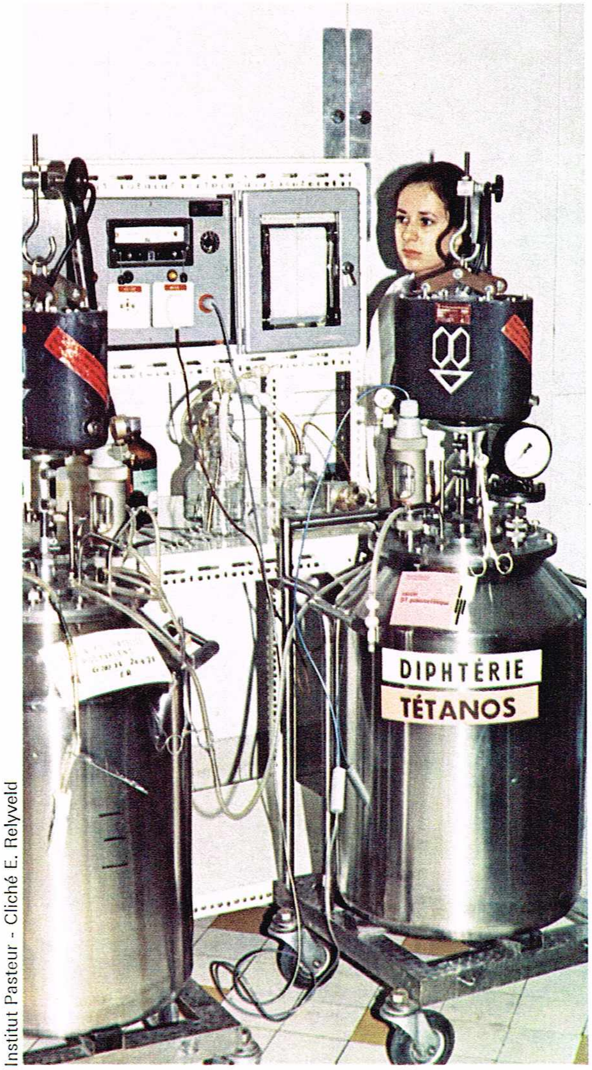

Institut Pasteur - Cliché E. Relyveld

◀ A gauche, centrifugeuse Sharpless. La culture microbienne est injectée dans le bol vertical d'une centrifugeuse tournant à très grande vitesse. Les microbes sont collectés sur la paroi du bol tournant qu'il suffit, après avoir fait passer plusieurs centaines de litres de culture, de rincer avec un milieu isotonique pour recueillir une culture concentrée et purifiée. A droite, préparation moderne des vaccins anatoxiques associés, purifiés et adsorbés. Les bonbonnes d'anatoxine reçoivent un facteur adsorbant (phosphate de calcium) sur lequel se fixent les antigènes (diphtérie, tétanos, poliomyélite), ce qui permet de préparer des vaccins polyvalents associés purifiés et très concentrés, où chaque antigène n'occupe qu'une fraction du volume total de 1 ml correspondant à la dose vaccinante.

aux protéines (bêta-propiolactone), cette dernière méthode donnant un produit final très pur et de bonne antigénicité.

La concentration du vaccin est finalement ajustée par néphélométrie, contrôlée au moyen de comptages électroniques, à la quantité de germes par millilitre désirée, et répartie stérilement en ampoules correspondant à une dose, généralement de l'ordre du millilitre.

On a essayé, pour des vaccins dont l'antigénicité reste malgré tout faible, et le pouvoir vaccinant parfois aléatoire (choléra, peste), de fractionner la cellule bactérienne et d'en extraire les constituants (ribosomes, antigènes flagellaires, fractions glyco-protéiques) ayant un pouvoir antigénique plus élevé et plus spécifique. Les résultats obtenus jusqu'ici, quoique prometteurs, ne se sont pas encore imposés, et ces techniques demandent de nouvelles études.

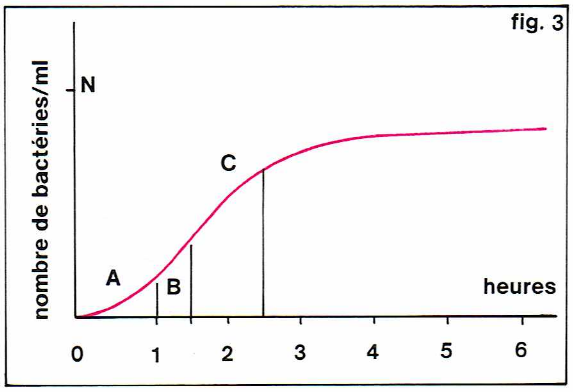

◀ Figure 3 : courbe donnée par un opacimètre enregistreur (microbio-photomètre Michel Faguet) de la croissance d'un microbe dans un milieu liquide. La croissance débute par une phase de latence, *qui est la période comprise entre l'instant de l'ensemencement et le moment où le taux de croissance devient constant. C'est à ce moment que débute la* phase exponentielle. *Elle se poursuit jusqu'au moment où, du fait de certains facteurs (appauvrissement de la culture en divers éléments, accumulation dans la culture de substances toxiques produites par ladite culture elle-même, etc.), le taux de croissance commence à diminuer et finit par s'annuler : c'est la* phase stationnaire, *elle-même suivie par une* phase de décroissance. *L'étude de la courbe ci-dessus permet de situer l'intervalle correspondant à la phase exponentielle. Ainsi, la portion de la courbe située entre* B *et* C *est comprise dans cette phase. Pour préparer un vaccin, on arrêtera la culture au point C qui contient le maximum d'éléments jeunes en phase de reproduction.*

Cependant de bonnes méthodes de fractionnement permettent maintenant d'arriver à préparer des vaccins efficaces contre les germes de maladies respiratoires (vaccins ribosomaux), contre les pneumocoques ou contre les méningocoques. Il est même possible avec de tels vaccins d'arriver à immuniser en injectant au sujet à vacciner une quantité de protéines qui n'excède pas 40 microgrammes : le perfectionnement de ces méthodes domine de toute évidence l'avenir des vaccins bactériens.

Vaccins anatoxiques

Lorsque l'élément vaccinant est, non pas le corps microbien, mais la toxine sécrétée par la bactérie, à la fin de la culture en milieu liquide et lorsque la production de toxine atteint son acmé, on sépare les microbes du milieu par filtration sur bougies qui ne laissent passer que la toxine. Celle-ci est alors additionnée de formol selon la technique de Ramon, et incubée jusqu'à sa transformation complète en anatoxine, ce qui est contrôlé par l'inoculation de doses élevées à des cobayes qui doivent demeurer indemnes. Le titre en anatoxine est calculé par la méthode de la floculation initiale au contact de dilutions d'un sérum spécifique. Les anatoxines sont de bons antigènes, particulièrement stables.

Vaccins bactériens atténués

La plupart des vaccins bactériens sont tués : l'organisme réagit par la formation d'anticorps à l'introduction de l'antigène bactérien.

Mais il est des germes contre lesquels il s'immunise mal, sa résistance ne se manifestant que tant que des germes sont présents dans l'organisme : si cet organisme est stérilisé, sa susceptibilité réapparaît, et la réinfection reste

Institut Pasteur - P. Lépine

▲ *Culture du virus polio en flacons plats de 5 litres. L'opératrice vérifie au microscope le développement de la couche monocellulaire de cellules rénales de singe. Lorsque le tapis cellulaire est continu, on ensemence avec le poliovirus.*

▶ *Page ci-contre, en haut, dans une chambre étuve de vaste dimension, les flacons ensemencés avec le virus sont placés côte à côte sur des plateaux qu'un moteur électrique anime d'un mouvement lent d'agitation. On hâte ainsi la libération du virus poliomyélitique dans le milieu de culture qui sera recueilli après la destruction du tapis cellulaire.*

possible. Dans de telles maladies, la vaccination est remplacée par la *prémunition*, c'est-à-dire par l'infection préalable et volontaire de l'organisme par un germe très atténué, ne déterminant pas de réactions pathologiques mais qui, par sa seule présence, oppose une barrière à l'implantation de germes virulents. Le cas le plus connu de maladies à prémunition est celui de la tuberculose et de sa prévention par le BCG. Chez l'homme, on peut encore citer la peste et le vaccin préparé avec la souche EV atténuée du bacille pesteux (employé surtout à Madagascar) et le vaccin atténué contre la tularémie utilisé en URSS.

Il va de soi que de tels vaccins ne peuvent être préparés qu'à partir de souches rigoureusement contrôlées, soigneusement entretenues et dont les propriétés comme l'innocuité ont fait l'objet de longues recherches. En règle générale, la licence de fabrication de tels vaccins n'est accordée qu'à des laboratoires présentant toutes les garanties qui ont été strictement codifiées par l'OMS. Ces vaccins présentent en outre une fragilité sous l'influence des agents physiques (chaleur, lumière) et une date rapprochée de péremption qui interdisent pratiquement tout stockage prolongé.

Vaccins à virus inactivés

Les mêmes principes généraux que pour les vaccins bactériens tués président à la conception des vaccins à virus atténués, mais avec des techniques de production sensiblement différentes et des manipulations beaucoup plus délicates.

L'isolement d'une souche virale se fait le plus souvent par inoculation du matériel pathologique à un animal sensible, parfois choisi à l'origine pour orienter un diagnostic incertain. On s'assure ensuite de l'innocuité et de la pureté de la souche par des passages successifs et par la mise en culture sur cellules sensibles (dites permissives).

Les techniques de cultures des virus sont de mise au point récente. Pendant longtemps, on n'a pu entretenir les virus, qui ne poussent pas sur les milieux bactériologiques usuels, que par passages continus sur l'animal sensible. Faute de culture on se servait du matériel animal comme d'un flacon de culture : moelle de lapin, puis cerveau du mouton pour la préparation du vaccin antirabique, cerveau de souris pour celle du vaccin contre la fièvre jaune (vaccin dit « de Dakar ») ou contre la dengue. Ces techniques sont aujourd'hui pratiquement abandonnées ou en voie de l'être : les vaccins produits sur l'animal renferment, à côté de l'antigène vaccinal en quantités pondérales infimes, une masse de produits étrangers surtout protidiques provenant de l'animal et dont l'injection à l'homme est inutile, parfois dangereuse.

Les virus, dont l'équipement enzymatique est incomplet, ne peuvent se reproduire que dans des cellules vivantes et à leurs dépens. C'est le développement, à partir de 1950, des méthodes de cultures cellulaires qui a rendu possible la culture *in vitro* sur une grande échelle de très nombreux virus, aujourd'hui à la base de la production des vaccins viraux.

Schématiquement, la culture d'un virus aboutissant à la production d'un vaccin se fait en plusieurs temps.

Dans un premier temps, on ensemence des cellules sensibles (obtenues isolées ou en petits amas confluents par une trypsination préalable) dans un récipient approprié et dans un milieu complexe renfermant les facteurs nutritifs (acides aminés, vitamines, oligo-éléments) additionnés d'une quantité de sérum animal jeune (sérum de poulain, sérum ultrafiltré de veau, albumine sérique humaine) destiné à stimuler le départ de la culture et la multiplication cellulaire. Les cellules, déposées sur la surface interne du récipient, poussent lentement. Il est parfois nécessaire de renouveler le milieu après quelques jours.

Au bout d'une semaine environ, les cellules se sont multipliées et forment un tapis monocellulaire continu. A ce moment, on retire le liquide de croissance et on le remplace par un milieu pauvre, sans sérum, destiné à assurer quelques jours la survie des cellules, et on ajoute le virus provenant d'une précédente récolte : c'est le deuxième temps de la culture.

Après peu de jours, deux à quatre en général, le virus qui a infecté les cellules s'y est multiplié et a déterminé leur mort en créant le plus souvent des lésions cellulaires caractéristiques (effet cytopathique). On récolte alors, dans un troisième temps, le liquide surnageant, qui présente un titre de virulence élevé, et on inactive le virus par une technique qui n'en dénature pas le fragile antigène. L'action de la chaleur est généralement nuisible. On lui préfère soit le formol à faible dose agissant trois jours à l'étuve ou une vingtaine de jours à la glacière, soit la bêta-propiolactone dont l'action est immédiate et qui ménage le pouvoir antigénique. L'acide phénique a été employé pour inactiver le virus rabique, les rayons UV pour le virus herpétique.

Le véritable problème consiste à obtenir de grandes quantités de cellules permettant de recueillir un volume suffisant de milieu virulent pour que le vaccin puisse être produit aseptiquement avec un minimum de manipulations.

Trois types de cultures cellulaires sont susceptibles d'aboutir à la production d'une grande masse de cellules. Ce sont :

1 - les cultures de première explantation ;
2 - les cultures de cellules diploïdes ;
3 - les cultures de cellules en lignée continue.

Seules les cultures du troisième type se prêtent à une culture en suspension libre, dans des récipients de grande capacité où le milieu de culture est soumis à une régulation automatique comme pour la culture des bactéries. Mais il s'agit toujours soit de lignées cellulaires établies à partir de tumeurs cancéreuses, de caractère nettement pathologique (par exemple, la lignée Hela établie à partir du cancer utérin d'une malade), soit de cellules humaines ou animales obtenues en lignée continue (par exemple, la lignée BHK de cellules de hamster), cellules qui peuvent croître indéfiniment. Toutes ces cellules ont perdu l'inhibition de contact qui fait que des cellules venant à s'affronter arrêtent leur croissance, et présentent des polyploïdies ou des anomalies des chromosomes, bref des caractères néoplasiques. De telles cellules, même inactivées, sont jugées impropres à la préparation de vaccins destinés à l'homme et ne sont tolérées parfois que pour des animaux dont la vie économique de courte durée fait qu'ils seront sacrifiés avant l'apparition éventuelle de tumeurs.

Seules sont utilisables en pratique les cultures cellulaires des types 1 et 2.

Celles du premier type se font à partir d'organes d'un animal sain, sacrifié pour la récolte, dont les cellules sont obtenues à partir d'un organe prélevé stérilement, haché et trypsiné. Le rein, dont la structure est surtout épithéliale, est l'organe qui se prête le mieux à la mise en culture (rein de singe, de veau, de porc) ; le testicule, la thyroïde, le thymus, le tissu fibreux ne sont guère employés que pour des recherches expérimentales.

Avantages des cellules de première explantation : grande facilité d'obtention, démarrage de la culture facile, exigences en sérum limitées. Inconvénients : possibilité de mise en culture de virus latents de l'animal (virus spumeux des singes, virus B du rhésus, virus des trayeurs chez le mouton, etc.), matériel hétérologue pour l'homme.

Les cellules à utiliser pour la culture des virus en vue de la préparation de vaccins, ne pouvant se multiplier en suspension libre, doivent donc de toute nécessité reposer sur une surface solide où elles se multiplieront jusqu'à rencontrer les cellules voisines et former un tapis cellulaire.

Les premières cultures en masse ont d'abord utilisé les classiques flacons de Roux, récipients aplatis d'environ un litre de capacité, ce qui permet d'étaler environ 250 ml de liquide nutritif sur une des faces du flacon reposant à plat. Très vite, ils ont été remplacés par des flacons à large surface où l'on peut observer la croissance cellulaire au microscope à travers la paroi de verre : la récolte de chaque flacon est d'environ 2,5 litres, soit dix fois plus que dans les flacons de Roux.

Plus récemment, on est passé à la fabrication en cuves de grande capacité à l'intérieur desquelles soit on place des empilements de plateaux de verre espacés de 5 mm environ servant de support aux cellules, soit on remplit l'espace libre avec une masse de billes de plastique offrant aux cellules toute la surface désirable pour se multiplier en masse. Cette dernière technique paraît susceptible de grands développements.

Institut Pasteur - P. Lépine

Depuis quelques années, les cultures du type 2 rencontrent une faveur croissante auprès des laboratoires nationaux. Les cellules diploïdes sont des cellules normales, de l'homme en particulier, souvent des cellules de l'épithélium pulmonaire, qui, mises en culture, pourront normalement se diviser une quarantaine de fois avant de mourir. Un stock de cellules n'ayant subi que peu de divisions est mis à l'état de vie ralentie à très basse température. Pour les besoins de la production, on prélève quelques cellules qui sont mises dans un milieu four-

▼ ***Inoculation des œufs : l'inoculateur automatique permet de désinfecter la coquille, de la percer et d'inoculer les virus vivants dans les œufs embryonnés à raison de trois douzaines à la minute.***

Institut Armand-Frappier, Laval des Rapides, Canada

▶ *Prélèvement à la main par aspiration du contenu des œufs ensemencés avec le virus grippal.*

R. de Rudder - document laboratoires Métabio

nissant une croissance rapide, et qui, toutes les 48 heures, sont remises en suspension et réensemencées avant qu'elles aient subi l'arrêt de croissance par inhibition de contact. Le nombre des cellules double à chaque division, et, celles-ci survenant en quelques heures, on obtient une croissance logarithmique qui permet en deux semaines de tapisser d'un lit continu un grand nombre de flacons. Avantages : les cellules sont connues, leur pureté et leurs propriétés éprouvées; elles forment, dans le cas de vaccins humains, un matériel homologue et sont sensibles à des virus poussant difficilement sur des cellules d'autres espèces (varicelle, rubéole). Inconvénients : manipulations nombreuses et délicates, exigences nutritives assez strictes, croissance malgré tout limitée, volumes recueillis plus faibles que par la précédente méthode. Sur le plan théorique enfin, on peut se demander si l'injection à l'homme d'un matériel d'origine humaine doit nécessairement être inoffensive; mais rien jusqu'ici ne paraît devoir justifier une telle restriction.

Quelques virus ne se multiplient bien, après y avoir été adaptés, que dans l'œuf de poule fécondé et incubé formant un milieu clos et stérile, dont on récolte par aspiration les liquides amniotique et allantoïdien (grippe, oreillons) ou l'embryon total (fièvre jaune) quelques jours après l'inoculation. La production en masse de ces vaccins est évidemment liée aux contingences de l'approvisionnement en œufs fécondés, ce qui peut poser des problèmes en temps d'épidémie ou de demandes subitement accrues.

Pratique des vaccinations

Les vaccinations obligatoires sont, en France, dans l'ordre où elles ont été édictées par le législateur :

— la vaccination antivariolique (loi du 15 février 1902) ;

— la vaccination antidiphtérique (loi du 25 juin 1938) ;

— la vaccination antitétanique (loi du 24 septembre 1940) ;

— la vaccination BCG contre la tuberculose (loi du 5 janvier 1950) ;

— la vaccination contre la poliomyélite (loi du 30 janvier 1964).

Cette obligation s'étend à tous les sujets de moins de 20 ans chez lesquels il n'est pas reconnu de contre-indication médicale à la vaccination. Au cas où le médecin décèlerait une contre-indication à la vaccination (prématurité, impétigo, affection fébrile évolutive, maladie organique grave), il doit établir un certificat médical précisant le caractère définitif ou temporaire de la contre-indication, et dans ce dernier cas la durée de celle-ci ne peut dépasser la durée d'un an (arrêté du 10 septembre 1941).

Cette obligation est assortie de sanctions : en vertu de l'article R 26 du Code pénal français, les infractions aux textes concernant les vaccinations obligatoires constituent une contravention de première classe passible d'une amende pénale. La récidive constitue une contravention de deuxième classe aggravant les pénalités.

Enfin l'obligation vaccinale implique en contrepartie la responsabilité de l'État en cas d'accident dû à la pratique de la vaccination. L'article L 10-1 du Code de santé publique précise que « la réparation de tout dommage imputable directement à une vaccination obligatoire pratiquée dans les conditions visées au présent Code et effectuée dans un centre agréé de vaccinations, est supportée par l'État » (loi du 1er juillet 1964). L'article L 10-2 de la loi du 26 mai 1975 a étendu cette couverture aux vaccinations obligatoires lorsqu'elles sont pratiquées par un médecin en dehors d'un centre agréé.

De même, dans les pays du Marché commun, les textes légaux ont prévu la responsabilité des pouvoirs publics pour les dommages éventuels causés par les vaccinations obligatoires, bien que certains pays (Belgique, Italie) n'envisagent cette réparation que si le tribunal civil établit qu'il y a eu faute professionnelle de la part du médecin vaccinateur ou du fabricant du vaccin.

La vaccination anti-typho-paratyphoïdique (bacille d'Eberth, para A et para B) n'est obligatoire que dans l'armée (loi du 14 avril 1936) et dans les professions et établissements ou entreprises exposés à un risque professionnel (loi du 27 août 1938). Elle peut, en temps et en zones d'épidémie, être rendue obligatoire par arrêté préfectoral pour les sujets âgés de 10 à 30 ans. Elle peut être imposée aux sujets reconnus porteurs de germes exerçant une profession ou un commerce où ils peuvent être cause de contagion (alimentation, hôtellerie).

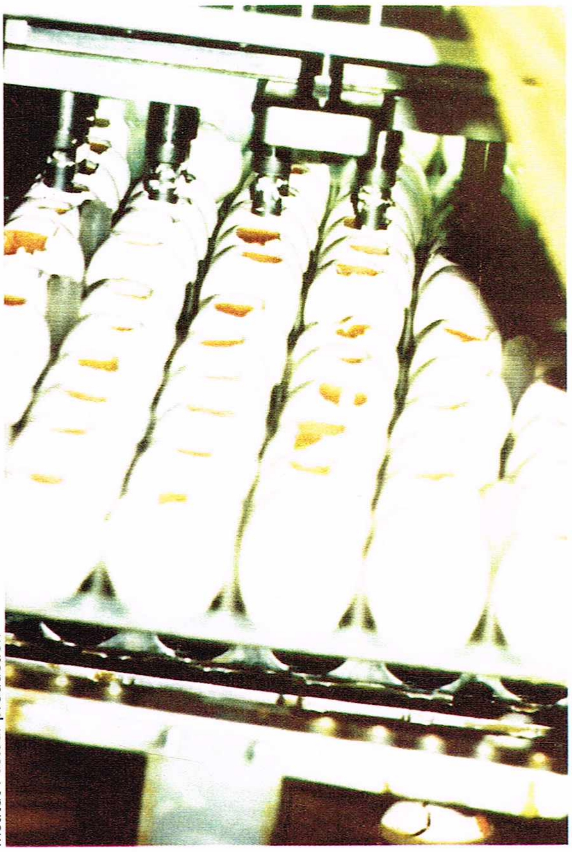

Institut Pasteur production

Tableau I
Chronologie des vaccinations (calendrier de l'Institut Pasteur)

Premiers jours	Vaccination par le B.C.G.
Entre le 3e et le 5e mois	Vaccination anticoquelucheuse (1)
6e mois	Vaccination antivariolique
Entre le 7e et le 9e mois	Vaccinations associées (2) { antidiphtérique, antitétanique, antipoliomyélitique
Entre le 10e et le 12e mois	Vaccination par le B.C.G. si *l'enfant ne l'a pas reçue à la naissance*
Entre 15 et 18 mois	Rappel de la vaccination anticoquelucheuse
Entre 18 mois et 2 ans	Rappel des vaccinations associées { antidiphtérique, antitétanique, antipoliomyélitique
A 2 ans	Vaccination par le B.C.G. si *l'enfant ne l'a pas encore reçue*
A partir de 2 ans	Vaccination contre la rougeole Vaccination antitypho-paratyphoïdique (TAB) si *l'enfant vit ou doit se rendre dans un pays d'endémie*
A 6 ans	Vaccination obligatoire par le B.C.G. si *l'enfant ne l'a pas encore reçue*
A 6 ans	Rappel des vaccinations associées { antidiphtérique, antitétanique, antipoliomyélitique
A 10 ans	Revaccination antivariolique
A 11 ans	Rappel des vaccinations associées { antitétanique, antipoliomyélitique
A 12 ans	*Pour les filles :* vaccination contre la rubéole
A 16 ans	Rappel des vaccinations associées { antitétanique, antipoliomyélitique
Entre 6 et 20 ans	Rappel de B.C.G. si *la réaction tuberculinique est négative*
A 20 ans	Revaccination antivariolique

(1) Une variante consiste à pratiquer à cette période les vaccinations associées anticoquelucheuse, antidiphtérique et antitétanique, dont l'injection de rappel sera faite entre 15 et 18 mois.
(2) Le vaccin anticoquelucheux, s'il n'a pas été administré entre le 3e et le 5e mois, peut être injecté dans la même séance, mais en un autre point du corps.

▲ *A gauche, fabrication du vaccin grippal. Une fois la culture du virus obtenue après incubation des œufs, la machine ouvre les œufs et en aspire le contenu. Tableau I : chronologie des vaccinations, dit « calendrier de l'Institut Pasteur ».*

Calendrier des vaccinations

La multiplicité des vaccinations, l'obligation légale de pratiquer certaines d'entre elles à des âges déterminés, les règles d'administration de chaque vaccin et la nécessité pour certains de plusieurs interventions imposent dans la pratique vaccinale d'adopter un certain calendrier.

Il est de règle générale d'observer entre les vaccinations, avant de passer d'une vaccination à une autre, un délai minimal de 15 jours à 3 semaines lorsque l'antigène injecté était du type inactivé, et un délai de deux mois lorsque la vaccination est faite avec un agent du type atténué.

Cette règle est justifiée par le fait que, dans le cas d'un vaccin inactivé, l'organisme à vacciner reçoit en une ou plusieurs fois la quantité totale d'antigène à laquelle il réagit immédiatement par l'élaboration d'anticorps. Dans le cas d'un agent atténué, au contraire, on introduit en une seule fois dans l'organisme à vacciner la quantité minimale du germe dont la multiplication ralentie assurera progressivement la réponse de l'organisme : il convient donc de laisser à ce dernier le temps d'élaborer son immunité avant de lui demander un effort supplémentaire pour passer à une autre vaccination.

Enfin, les délais à respecter peuvent être raccourcis à quelques jours lorsqu'il s'agit de procéder à un rappel de vaccination, la réponse de l'organisme étant en ce cas quasi immédiate.

Des considérations d'épidémiologie ou de sécurité conduisent d'autre part à fixer un optimum d'âge et un ordre de priorité aux vaccinations qui s'adressent à l'enfant.

Le législateur a, en 1902, décidé que la primo-vaccination antivariolique devait être pratiquée au cours de la première année de vie. C'est en effet le moment où l'organisme réagit favorablement avec le moindre risque de complications encéphalitiques. Mais on sait aussi que lorsque la mère a été elle-même vaccinée, ses anticorps transmis par voie placentaire à l'enfant protègent celui-ci pendant les premiers mois et font échec à la vaccination. D'où l'habitude de pratiquer celle-ci après le sixième mois et avant la fin de la première année de la vie de l'enfant.

La vaccination BCG doit, selon l'esprit des promoteurs, être pratiquée dès la naissance afin d'intervenir avant toute possibilité de contamination de l'organisme par un bacille virulent. Cette pratique a été longtemps et est encore généralement respectée. Toutefois, avec la réduction à laquelle on assiste de l'endémie tuberculeuse, de nombreux pédiatres estiment que, le nouveau-né vivant dans des conditions d'hygiène et d'environnement satisfaisantes, sa contamination au cours des premiers mois est improbable, et que l'on peut sans risque attendre l'achèvement des autres vaccinations au cours de la première année pour pratiquer ensuite la vaccination BCG avant que l'enfant entre en contact avec le milieu extérieur, c'est-à-dire en tout cas avant l'âge de la fréquentation scolaire. Cette attitude rencontre la faveur croissante des pédiatres.

Il est parfaitement possible d'élaborer un calendrier comportant l'administration successive de chacun des vaccins, qu'ils soient obligatoires ou simplement formellement indiqués (coqueluche, rougeole). Mais, d'une part, cette procédure comporte de multiples interventions par la répétition des actes, et d'autre part elle a de grandes chances d'être bouleversée par des incidents tels que déplacements de voyages, otites ou simples rhumes, voire maladies éruptives, pendant lesquels on s'abstient de vacciner.

▶ *Présentation moderne des vaccins. Le vaccin polyvalent purifié et concentré est enfermé dans une ampoule stérile qui se transforme en seringue. Le capuchon de l'aiguille stérile (en haut) se visse sur le piston de caoutchouc dans le corps de la seringue (en bas), ce qui permet de faire l'injection sans aucune manipulation du vaccin.*

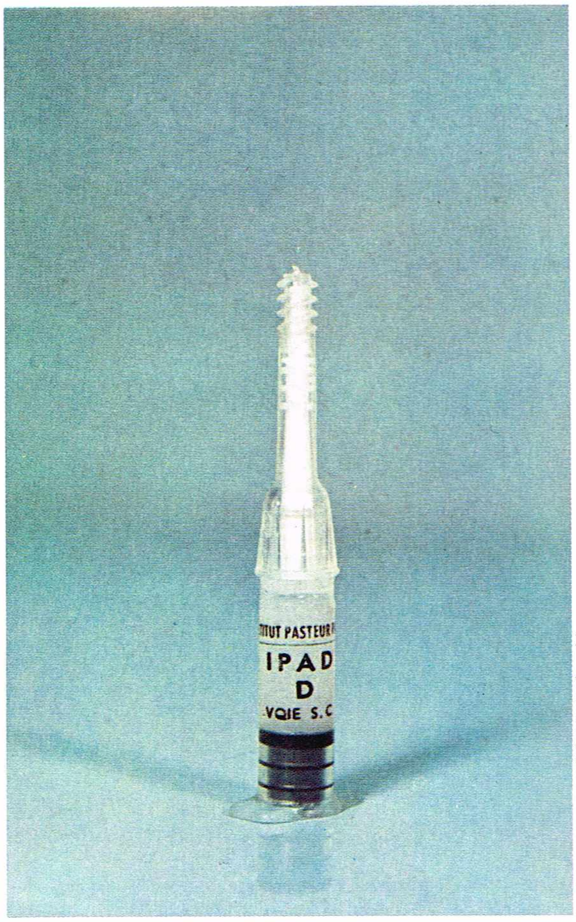

Institut Pasteur - Cliché E. Relyveld

La solution est apportée par les *vaccins associés*, mélanges de vaccins unissant plusieurs antigènes agissant de façon synergique, c'est-à-dire qu'il n'y a pas simple addition mais renforcement de l'effet vaccinal d'un antigène par un autre. La technique de préparation de ces vaccins doit donc tenir compte, non seulement du volume total à injecter, lequel doit rester minime, mais des interactions possibles des antigènes, certaines associations exerçant non pas un effet synergique mais une réciproque action dépressive sur la réponse immunitaire.

On associe couramment et sans problème les anatoxines (diphtérie et tétanos : vaccin DT) et facilement celles-ci avec l'antigène coquelucheux (DTC). Mais la technique est déjà plus délicate lorsque l'on veut réaliser un vaccin quadruple (DTC-polio couramment utilisé au Canada), car le vaccin polio est lui-même déjà un vaccin associant trois types antigéniques différents.

Enfin, si l'on considère que la vaccination contre la coqueluche, bien que non obligatoire, est celle dont la nécessité apparaît la plus évidente chez le très jeune enfant chez qui la maladie est l'une des causes principales de décès, alors que les chances de contracter la poliomyélite ou le tétanos sont très réduites à cet âge si la mère a été elle-même vaccinée, les pédiatres sont conduits à considérer la vaccination coquelucheuse comme de première urgence, à pratiquer isolément, les vaccinations associées étant reportées après le sixième mois.

C'est la technique résumée dans le schéma de vaccinations dit « calendrier de l'Institut Pasteur » (*tabl.* I) établi d'après les recommandations de l'Académie de Médecine (1965). Ce tableau couvre les indications actuelles des vaccinations pour les sujets vivant en métropole.

Au-delà de 20 ans, on ne pratiquera plus que tous les 8 à 10 ans des rappels avec l'association polio-anatoxine T, qui ne donne lieu à aucune réaction, ou encore en pratiquant tous les 10 ans une injection d'ana-T, et en donnant tous les 5 ou 6 ans un rappel de polio atténué par voie orale.

Il y a lieu d'y ajouter, en cas de voyage ou de séjour en région d'endémie amarile (Afrique intertropicale, régions de jungle en Amérique centrale et du Sud), la vaccination contre la fièvre jaune, et épisodiquement, en cas d'épidémie, celle contre le choléra. La vaccination contre le typhus exanthématique n'est plus que rarement indiquée (en territoire d'endémie), celle contre la peste n'est plus pratiquée (efficacité aléatoire, antibiothérapie satisfaisante).

Conservation des vaccins

L'efficacité d'un vaccin, si parfait fût-il à l'issue de la chaîne de fabrication, est liée au maintien de son pouvoir antigénique, lequel est l'attribut de quelques molécules protéiques, fragiles tant par leur labilité propre que par leur sensibilité à tous les facteurs de dénaturation (lumière, chaleur, composition du milieu, agents physiques, etc.) pouvant intervenir pendant la durée du stockage et de la distribution.

Le procédé de conservation le plus généralement valable est le stockage à une température basse et constante aux environs de + 4 °C. La congélation peut être néfaste, ou même dénaturer complètement certains vaccins (vaccin antirabique), et il convient en général de l'éviter.

Le mode idéal de conservation est représenté, pour les vaccins qui le supportent (en particulier la plupart des vaccins à virus atténué, mais non le vaccin poliomyélitique), par la lyophilisation ou cryodessiccation qui consiste à sublimer sous vide à très basse température l'eau (qui représente plus de 98 % du volume du vaccin) : le résultat est une pellicule de vaccin desséché adhérant à une paroi de l'ampoule de verre ; au moment de l'emploi, on reconstitue le volume primitif en introduisant la quantité nécessaire d'eau pure dans l'ampoule. Dans certains cas, l'addition préalable d'hydrate de carbone (glucose, gomme arabique) au vaccin à lyophiliser constitue un facteur supplémentaire de conservation en enrobant l'antigène d'une couche protectrice.

Quel que soit le mode de conservation adopté, son efficacité doit être testée, et la durée de validité du vaccin évaluée avec une marge suffisante de sécurité. Le conditionnement final du vaccin doit porter de façon apparente une date de péremption au-delà de laquelle le vaccin n'est plus valable.

Pour les vaccins susceptibles de supporter un long stockage en vrac à très basse température, la durée de validité commence à courir à partir de la date du dernier titrage précédant le conditionnement de distribution. Les limites de validité, sont, dans tous les cas, vérifiées et sanctionnées par l'autorité nationale chargée du contrôle.

Technologie de l'application des vaccins

La technique d'application des vaccins varie suivant que l'on envisage leur application à des individus, des groupes ou des masses de populations.

Vaccinations individuelles

Le cas type est celui des vaccinations de l'enfant, en pratique libérale privée : les vaccins, autrefois présentés en ampoules de verre d'une dose pour en remplir une seringue à injection de 0,5 à 1 ml, ont partout fait place à l'ampoule-seringue auto-injectable, où une dose de vaccin remplit une seringue de plastique à usage unique, évitant ainsi toute manipulation avec possibilité d'erreur de dosage ou de contamination du contenu ainsi que tout risque de transmission d'une infection (tuberculose, syphilis) par remploi de seringues ou d'aiguilles insuffisamment stérilisées. Les techniques modernes d'adsorption et de concentration des antigènes permettent la réalisation de vaccinations assurant jusqu'à quatre antigènes différents sans augmentation du volume total à injecter qui ne dépasse pas 1 ml.

Vaccinations collectives

C'est le cas des vaccinations pratiquées à l'école, au régiment lors de l'incorporation, ou dans les diverses collectivités. La méthode la plus couramment employée reste celle de la seringue individuelle, mais pour des raisons d'économie de temps et de prix on emploie souvent des boîtes de seringues individuelles toutes montées, stérilisées à l'avance à l'autoclave, que l'on remplit en puisant dans des flacons multidoses. La

Institut Mérieux

méthode n'est acceptable que si les seringues stériles sont en nombre suffisant pour que chaque sujet vacciné ait la sienne (pas de restérilisation en cours de séance) et si chaque flacon multidose est détruit en fin de séance (pas de remploi d'un flacon ouvert).

Vaccinations de masse

Dès que le nombre des sujets à vacciner dépasse environ 200 par séance, il est nécessaire de faire appel à des équipes de vaccination et à des méthodes plus expéditives. La plus largement employée est celle du *Pedo-jet* ou *Imojet* où le vaccin, stocké dans de grands récipients stériles, est envoyé sous pression dans une sorte de pistolet où chaque pression de la détente envoie à grande vitesse un jet filiforme de vaccin qui traverse l'épiderme sans perforation préalable. Les sujets à vacciner défilent devant une équipe de vaccinateurs, dont le premier désinfecte la peau à l'alcool (généralement au niveau du deltoïde), le suivant opère au pistolet (l'injection dure une fraction de seconde et est indolore), et le troisième tamponne le document individuel et la liste nominative des vaccinés.

On peut ainsi opérer plusieurs milliers de vaccinations par jour et assurer l'immunité de toute une population en peu de temps. La méthode est précieuse en temps d'épidémie (vaccination contre la fièvre jaune ou la méningite cérébro-spinale) ou lorsqu'il faut vacciner des populations dispersées sur de grandes étendues et que l'on ne peut rassembler qu'à l'occasion d'une campagne programmée.

Incidents, accidents des vaccinations

Les vaccinations donnent parfois lieu à des incidents (réaction locale : rougeur, douleur; réaction générale : courbatures, mouvements fébriles) de nature bénigne et le plus souvent évitables (repos, administration d'un antihistaminique). Plus rarement, voire très exceptionnellement, on peut assister à de véritables accidents d'une gravité variable. Les plus sérieux sont les risques d'encéphalopathies qui, de façon peu explicable, surviennent après certaines vaccinations : c'est la vaccination contre la variole qui était la plus exposée (un cas sur 25 000 vaccinations certaines années), mais de façon très irrégulière. L'emploi de souches sélectionnées (souche Lister), une technique améliorée de vaccination (piqûre dermique) ont pratiquement fait disparaître ce risque d'encéphalite, le plus redouté de tous. D'autres vaccinations (coqueluche, rougeole) ont donné, très exceptionnellement, lieu à des accidents analogues; les vaccinations anatoxiques et poliomyélitiques ne sont pas considérées comme présentant un risque.

Les techniques modernes de préparation des vaccins, en éliminant la plus grande partie du matériel protidique étranger à l'antigène, font pratiquement disparaître tout risque d'accident dû au vaccin.

Mais l'acte vaccinal, comme toute action humaine, comporte sa part de risque, si infime fût-il : il convient dans l'analyse des accidents de distinguer ce qui est redevable au vaccin en tant qu'antigène de ce qui relève le plus souvent d'une faute humaine ou professionnelle

▲ Vaccination au pistolet : le pistolet injecteur sans aiguille (IMOJET Mérieux) rend possibles les vaccinations de masse sans risque de contamination par la seringue. Cette technique a permis, lors de l'épidémie brésilienne de méningite cérébrospinale, de vacciner la population au rythme de 2 millions de personnes par jour à Sao-Paulo. C'est la méthode de choix pour les vaccinations collectives.

(emploi d'un matériel non stérile, d'un vaccin altéré, erreur de technique dans l'application, négligence des contre-indications).

Il est souhaitable que les accidents de vaccination, en raison même de leur caractère très exceptionnel, fassent chaque fois l'objet d'une enquête approfondie afin d'en mieux prévenir le retour.

▲ *La vaccination préventive des poulets leur assure une protection efficace contre les épidémies.*

▼ *Les vaccinations en médecine vétérinaire sont le plus souvent des vaccinations de masse s'étendant à tout un troupeau, à toute une région.*

Vaccinations en médecine vétérinaire

Les vaccinations employées, avec des applications croissantes, en médecine vétérinaire, obéissent exactement aux mêmes principes et répondent aux mêmes catégories que les vaccinations en médecine humaine. Leur technologie de fabrication n'en diffère fondamentalement en rien.

Il y a cependant dans les modalités de leur application de sérieuses différences entre les vaccinations employées chez l'animal et celles en application chez l'homme. Cela pour des raisons qui sont évidentes.

- Il peut être jugé comme plus économique à la longue et donnant plus de sécurité du point de vue de la protection de la santé humaine de procéder à l'éradication par abattage plutôt qu'à la vaccination des troupeaux atteints d'une affection transmissible à l'homme : la méthode a été appliquée pour la tuberculose bovine et pour la fièvre aphteuse aux États-Unis. Mais elle doit être généralisée pour être efficace et ne saurait être appliquée à l'homme qui peut rester porteur de l'infection.
- La protection assurée par un vaccin n'est intéressante que pour la durée de la vie économique de l'animal, mais elle doit être assurée rapidement et avec un minimum d'intervention : c'est dire que les méthodes vaccinant en une seule injection, fût-elle massive, seront préférées aux méthodes demandant plusieurs injections.
- Pour assurer une meilleure protection de l'ensemble d'un troupeau, on peut envisager d'employer un vaccin donnant par exemple un accident mortel sur plusieurs milliers de vaccinations, éventualité absolument inacceptable chez l'homme, mais dont les incidences économiques peuvent être acceptées par l'éleveur, voire couvertes par une assurance, en échange d'une meilleure protection.
- En dehors du cas de la vaccination individuelle des animaux de compagnie, pour lesquels les exigences sont à peu près identiques à celles des vaccinations humaines, les vaccinations en médecine vétérinaire sont le plus souvent des vaccinations de masse s'étendant à tout un troupeau, à toute une région : le prix du vaccin doit rester modéré pour ne pas grever exagérément l'exploitation, et surtout il doit rester inférieur au prix de l'assurance du bétail. L'assurance couvre l'éleveur sans lui demander de travail ni déranger le vétérinaire, ce qui n'est pas le cas du vaccin : ce dernier doit donc représenter un avantage économique.

En dépit des contraintes, la fabrication des vaccins vétérinaires est généralement plus rentable pour le producteur que les vaccins humains. Les dossiers sont moins longs à établir, les autorisations plus faciles, les responsabilités moins lourdes. Équipement et personnel techniques sont d'un niveau comparable, mais les lots de vaccins vétérinaires, portant sur des masses plus grandes, ont un meilleur rendement. Enfin, l'exportation ne se heurte pas, sauf en des pays de technicité très évoluée aux mêmes obstacles que les vaccins humains.

On retrouve en médecine vétérinaire les mêmes types de vaccins : vaccins bactériens tués (charbon), vaccins bactériens vivants (fièvre ondulante), vaccins à virus inactivé (rage), vaccins à virus atténués (maladie de Carré), vaccins anatoxiques (botulisme). Leurs techniques de préparation et de contrôle sont calquées sur celles des vaccins humains. Il n'est pas jusqu'à l'obligation légale de la vaccination (fièvre aphteuse) qui ne se rencontre dans la réglementation, qui tend à se rapprocher de plus en plus de celle qui régit les vaccinations humaines.

Réglementation

Tous les pays producteurs de vaccins appliquent une réglementation devenue progressivement assez stricte. Jusqu'en 1955, il suffisait à un laboratoire de recherches

de mettre au point une technique expérimentale, d'en démontrer par des essais appropriés l'innocuité et l'efficacité, d'y joindre quelques essais cliniques, pour obtenir quasi automatiquement du laboratoire national de contrôle l'autorisation de débit correspondant à la mise sur le marché du produit.

Les accidents survenus aux États-Unis (« Cutter incident ») lors de la mise en œuvre du premier vaccin poliomyélitique type Salk, dont l'un des six producteurs autorisés livra dans le circuit public des lots de vaccin où le virus n'était pas totalement inactivé, avec pour conséquence des poliomyélites d'inoculation, ont totalement modifié la situation. Les National Institutes of Health des États-Unis ont introduit une étroite réglementation, reprise par l'OMS et appliquée dans tous les pays producteurs de vaccins.

La production d'un vaccin nouveau débute par le dépôt d'un dossier de fabrication très complet (300 à 500 pages) auprès de l'autorité nationale, énumérant et décrivant avec précision les souches employées, leur origine, leurs milieux de culture et de conservation, leur essai, le mode de préparation du vaccin, les contrôles de toute nature opérés avant, pendant et après la fabrication, les épreuves servant à tester l'innocuité, l'efficacité, l'absence d'effet tératogène ou d'induction de néoplasies, le mode et la durée de conservation, la résistance aux facteurs détériorants : chaleur, lumière, et tous les éléments d'appréciation imaginables.

Au vu du dossier, l'autorité nationale désigne trois experts : le premier pour l'expertise toxicologique (vérification des propriétés et actions toxiques possibles à courte, moyenne et longue échéance), le second pour étude pharmacologique (contrôle expérimental de l'efficacité). En possession des deux premiers rapports, et s'ils sont favorables, le troisième expert procède aux essais cliniques sur des groupes contrôlés dont le nombre doit être suffisant pour donner une valeur statistique aux résultats finals.

Par exemple, pour un vaccin contre la rougeole, le groupe essayé doit comporter dix mille sujets n'ayant pas au préalable d'anticorps décelables, qui seront vaccinés et comparés à un groupe non vacciné de même importance. On observera les cas de rougeole survenant spontanément dans l'un et l'autre groupe, et après trois ans on procédera au titrage des anticorps des sujets vaccinés comme des sujets non vaccinés (ou du moins de ceux qui pourront être retrouvés au bout de ce temps...).

L'ensemble des expertises dure un minimum de trois ans dans la meilleure éventualité et peut se poursuivre pendant une durée allant jusqu'à dix ans, surtout si l'on estime qu'il existe le moindre risque oncologique ou teratogène à l'emploi du vaccin.

Tous les résultats étant jugés favorables (sinon il y a rejet, et il faut recommencer à zéro sur de nouvelles bases), le vaccin nouveau se voit donner une autorisation limitée aux essais par des spécialistes cliniciens : cette période est d'environ deux ans avant que le producteur reçoive finalement une autorisation provisoire de débit, constamment révisable en cas d'incidents ou de simple suspicion d'incidents (c'est ainsi que le vaccin antiherpétique, surtout thérapeutique, dont les résultats cliniques étaient satisfaisants, a été retiré du commerce sur la simple suspicion, non prouvée, d'une communauté antigénique supposée entre l'antigène herpétique inactivé et le virus hypothétique responsable de la transformation cancéreuse des cellules du col utérin chez la femme).

Marché des vaccins

Une fois accepté par l'autorité nationale, un vaccin est théoriquement exportable sur le vu du dossier d'agrément du pays producteur. Mais un pays est toujours libre de procéder à de nouveaux contrôles, voire d'imposer de recommencer toute la procédure selon la législation du pays où le vaccin est importé. C'est le cas notamment des États-Unis qui n'autorisent qu'un vaccin produit et contrôlé localement, ce qui pratiquement revient à opposer à l'importation une barrière absolue.

Comme les pays industrialisés ont pratiquement tous des laboratoires nationaux de fabrication de produits biologiques, le même scénario tend à se reproduire partout, même à l'intérieur du Marché commun. Quant aux pays en voie de développement, trop pauvres ou trop démunis de technologie pour produire eux-mêmes leurs vaccins, ils ne peuvent généralement consacrer que des sommes dérisoires à l'achat des vaccins à l'étranger et comptent le plus souvent sur la compétition politique entre les grands États pour obtenir gratuitement les vaccins dont ils ont besoin. En outre, la plupart du temps, l'application en est mal surveillée, ce qui rend très aléatoires les résultats finalement rapportés.

De sorte qu'en fin de compte le marché des vaccins est le plus souvent limité au territoire national et à quelques pays ayant conclu des accords commerciaux incluant les produits biologiques.

Les vaccinations principales s'adressant essentiellement à l'enfance (diphtérie, polio, tétanos, coqueluche, BCG), le marché potentiel est exprimé par le nombre des naissances annuelles et celui des rappels, au nombre de trois ou quatre, s'adressant à la fraction (au maximum 35 %) de la tranche d'âge qui entretiendra régulièrement son immunité jusqu'à l'âge adulte : au total un marché assez étroit, gouverné par des contrats de fourniture aux autorités sanitaires qui contrôlent les marchés.

C'est la raison pour laquelle, dans presque tous les pays, la fabrication des vaccins humains est l'œuvre de laboratoires nationaux, pour lesquels le problème de rentabilité n'est pas posé, ou d'instituts subventionnés et contrôlés par l'État. Dans les pays où subsiste l'économie de marché, seules de très grandes firmes industrielles aux activités multiples conservent une branche biologique de fabrication de vaccins qui est, pour la firme productrice, une contribution à son image de marque et à son prestige plus qu'une source de profits.

Quant aux pays dont l'économie est planifiée par l'État, la production des vaccins obéit sur le plan national aux impératifs de la politique sanitaire se traduisant par de vastes campagnes de vaccinations généralisées, ce qui a l'avantage de fournir en peu de temps des résultats statistiquement valables et idéologiquement exploitables, permettant, sur le plan international, de procéder auprès des pays du tiers monde à des exportations massives sans contrepartie financière.

Paradoxalement, le marché des vaccins vétérinaires est plus ouvert, avec des prix de fabrication moins élevés, des marges bénéficiaires plus libres et un renouvellement constant du cheptel dont la durée de vie économique est de deux à trois ans. Cependant, ici encore, différentes considérations favorisent la fabrication sur place des vaccins : prix de la main-d'œuvre, conditions de transport ou encore interdiction de la manipulation de certains virus (fièvre aphteuse aux États-Unis, peste équine en Europe) par crainte légitime d'épizooties dans des régions où ne se manifeste pas la maladie.

De toute façon, aucune production de vaccin ne peut, par les seuls bénéfices qu'elle procure, assurer les frais de la recherche, seule source de progrès et d'incitation aux vaccins qui restent à découvrir.

BIBLIOGRAPHIE

ALBRIGHT C., *Microsymposium on Separation of Plant Cell Particulates,* Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, 1970. - ANDERSON N. G., *Analytical Techniques for Cell Fractions,* Analytical Biochemistry, vol. 28, 1969. - CLINE GEORGE B., *Continuous Sample Flow Density Gradient Centrifugation,* University of Alabama, Birmingham, Alabama, 1972. - GERNEZ-RIEUX C. et GERVOIS M., *Protection conférée par le BCG pendant les vingt années suivant la vaccination,* Bull. Org. Mond. Santé, vol. 48, 1973. - LÉPINE P., *les Vaccinations,* coll. « Que sais-je? » n° 1618, P. U. F., 1975. - MANDE R., *Actualité de la vaccination contre la coqueluche,* Bull. Acad. Nat. Méd., vol. 159, 1975. - O. M. S., *Standardization of Cell Substrates for the Production of Virus Vaccines,* Joint WHO-IABS Symposium, Genève, 13-15 décembre 1976. - RELYVELD E. H., *le Phosphate de calcium comme adjuvant dans les vaccinations de l'homme,* Annales Inst. Pasteur, vol. 116, 1969; *Nouveaux Procédés de préparation de vaccins et leur utilisation en pratique médicale,* l'Industrie nationale n° 3, 1977. - SHORTMAN K., *Progress in Separation and Purification,* vol. 2, p. 167, Wiley Interscience, 1969.

L'INDUSTRIE ALIMENTAIRE

L'industrie alimentaire produit des aliments à partir de matières premières biologiques d'origine animale et végétale, et également, mais pour une moindre part, microbienne.

Cette définition générale très schématique ne prend tout son sens que si les notions complexes de *matières premières biologiques*, de biotechnologie et enfin, et surtout, d'*aliments* qu'elle contient sont précisément définies. Entrer dans cette complexité est essentiel, puisqu'en définitive le produit alimentaire fabriqué par l'industrie doit être adapté à l'homme, à ses besoins nutritionnels, psychosensoriels, affectifs et symboliques.

S'il est acceptable que l'homme moderne fasse quelques efforts d'adaptation à des produits alimentaires nouveaux, ces efforts doivent rester limités. L'industrie alimentaire, qui n'a pas encore complètement pris conscience du rôle fondamental qu'elle joue dans la société moderne et, partant, de l'importance de sa responsabilité, a quelquefois tendance à considérer le produit alimentaire comme n'importe quel autre produit industriel. Toutes les techniques psychosociologiques, et principalement la publicité, qui font vendre les produits doivent ici être utilisées avec beaucoup de précautions. L'innovation elle-même doit être dans ce domaine beaucoup plus canalisée que dans d'autres et orientée vers une finalité qui ne doit pas être uniquement dictée par le marketing. S'il est évident que l'industrie, par la dynamique et l'efficacité de ses méthodes, reste la seule capable de faire une production de masse qui réponde aux exigences de l'économie moderne, il est non moins évident que les contraintes nées de la nature des matières premières et la finalité des produits finis impriment à l'industrie alimentaire une spécificité qui fait l'unité et l'originalité de ce secteur industriel.

Et cela malgré l'extrême diversité tant technologique qu'économique que l'on y rencontre. A tel point que l'on utilise souvent comme appellation, au lieu d'industrie alimentaire, l'expression industries alimentaires ou, plus généralement, industries agricoles et alimentaires. Cette dernière appellation se retrouve dans les textes officiels.

▼ *Vue partielle d'une fabrique de pâtes alimentaires.*

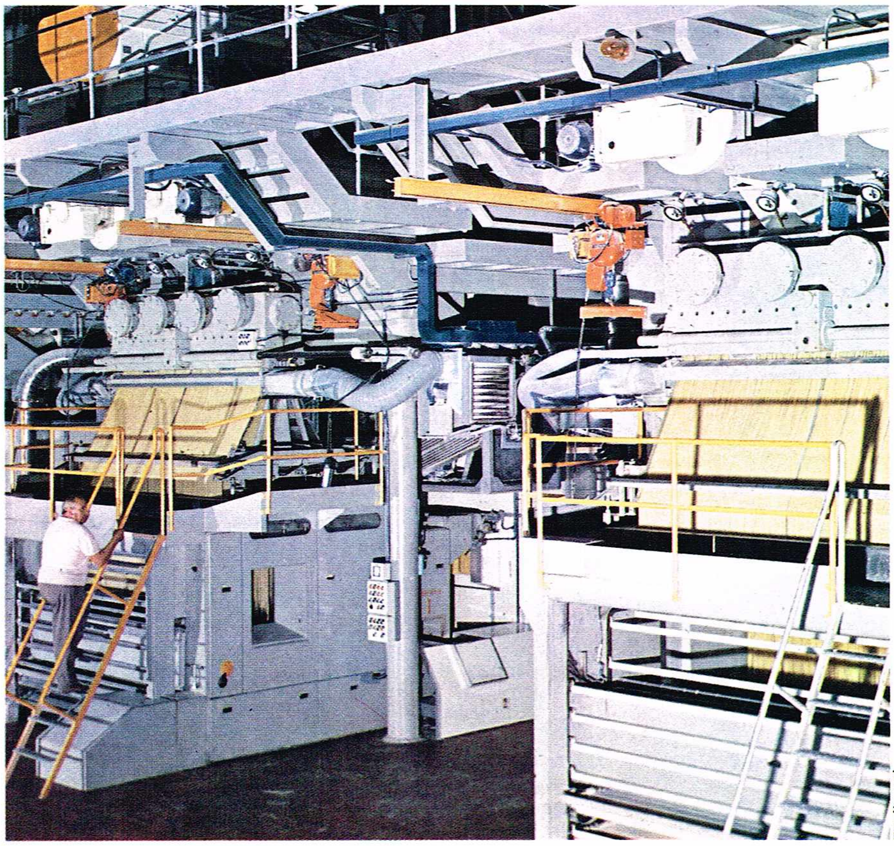

Braibanti

Il existe une Direction au ministère de l'Agriculture, une école d'ingénieurs et des laboratoires de recherche portant ce nom. Sans s'attarder sur une terminologie vieille de plus d'un demi-siècle, on peut toutefois regretter que celle-ci mette plus l'accent sur la diversité que sur l'unité de ces industries.

Mais il y a plus grave, dans la mesure où la terminologie traduit l'état de dépendance dans lequel se trouve l'industrie alimentaire vis-à-vis de l'agriculture, qui a pendant très longtemps considéré cette industrie comme une sorte de diverticule sans grande importance. Il en a résulté un effort de recherche en rapport avec l'intérêt accordé. La conséquence est celle que l'on connaît : une industrie agro-alimentaire encore mineure sous la tutelle d'une puissante agriculture.

Un secrétariat d'État aux Industries alimentaires a été créé en 1976 dans le dessein de doter la France d'une industrie alimentaire digne de son agriculture. Il semble que ce secteur industriel ait des potentialités très importantes et soit de ce fait promu à un grand avenir. Certains économistes pensent qu'il sera, dans les prochaines décennies, la « locomotive » qui entraînera toute l'économie, à l'instar de ce qui s'est passé pour l'astronautique ou le nucléaire. Déjà, maintenant, le chiffre d'affaires des industries alimentaires se rapproche de celui de l'agriculture.

Les problèmes qu'aura à résoudre, dans les années à venir, l'industrie alimentaire sont de deux ordres : les problèmes de qualité pour les pays nantis et les problèmes quantitatifs pour le tiers monde. Si les seconds restent les plus préoccupants puisqu'ils concernent la faim dans le monde, les premiers sont sans doute les plus difficiles à résoudre, puisqu'ils exigent une parfaite maturité de l'industrie alimentaire. Celle-ci n'est qu'un maillon, certes très important, de la chaîne alimentaire qui comprend les industries en amont de l'agriculture (engrais, industries phytopharmaceutiques), l'agriculture, la distribution et la consommation. Aucun problème de la chaîne alimentaire ne peut être abordé en ignorant les autres maillons. Or, entre l'agriculture dont est issue l'industrie agro-alimentaire et l'industrie vers laquelle elle se tourne, l'équilibre est difficile à trouver. Il semble que, pour se libérer du grand état de dépendance qui a été longtemps le sien vis-à-vis de l'agriculture, et pour des raisons d'efficacité dans la recherche du profit, elle ait trop brutalement basculé vers l'industrie, avec les conséquences que l'on décrira plus loin.

Importance sur le plan économique

En France, l'industrie alimentaire a un poids économique très important, puisqu'elle se situe pour le chiffre d'affaires en deuxième position, après le secteur bâtiments et travaux publics, mais la valeur ajoutée brute est inférieure à celle de l'ensemble des activités industrielles. Environ 5 000 entreprises de plus de 5 salariés emploient 380 000 personnes, soit environ 7 % des salariés de l'industrie.

Sans entrer dans le détail des chiffres, qui évoluent, on peut dégager quelques traits caractéristiques de l'économie de l'industrie agro-alimentaire. La taille des entreprises est faible ; l'effectif et le chiffre d'affaires sont en moyenne peu élevés, une quarantaine d'entreprises seulement emploient plus de 1 000 personnes. Le quart environ de ces entreprises fait un chiffre d'affaires supérieur à 10 millions de francs. La coexistence d'entreprises artisanales et de très grandes sociétés multinationales s'observe en général, mais la structure des entreprises est fort différente suivant le secteur considéré. Par exemple, dans le cas de la raffinerie de sucre, le nombre d'entreprises pour un même chiffre d'affaires est très faible par rapport au secteur des épices, café, chicorée (179 entreprises contre 8 pour la raffinerie).

Pluralité des technologies

La pluralité des technologies du secteur alimentaire n'a pas d'équivalent dans d'autres domaines industriels.

Il existe environ une quarantaine de branches d'importance très différente et souvent très éloignées technologiquement les unes des autres : il n'y a pratiquement aucun point commun entre la fabrication des jus de fruits et celle des pâtes alimentaires.

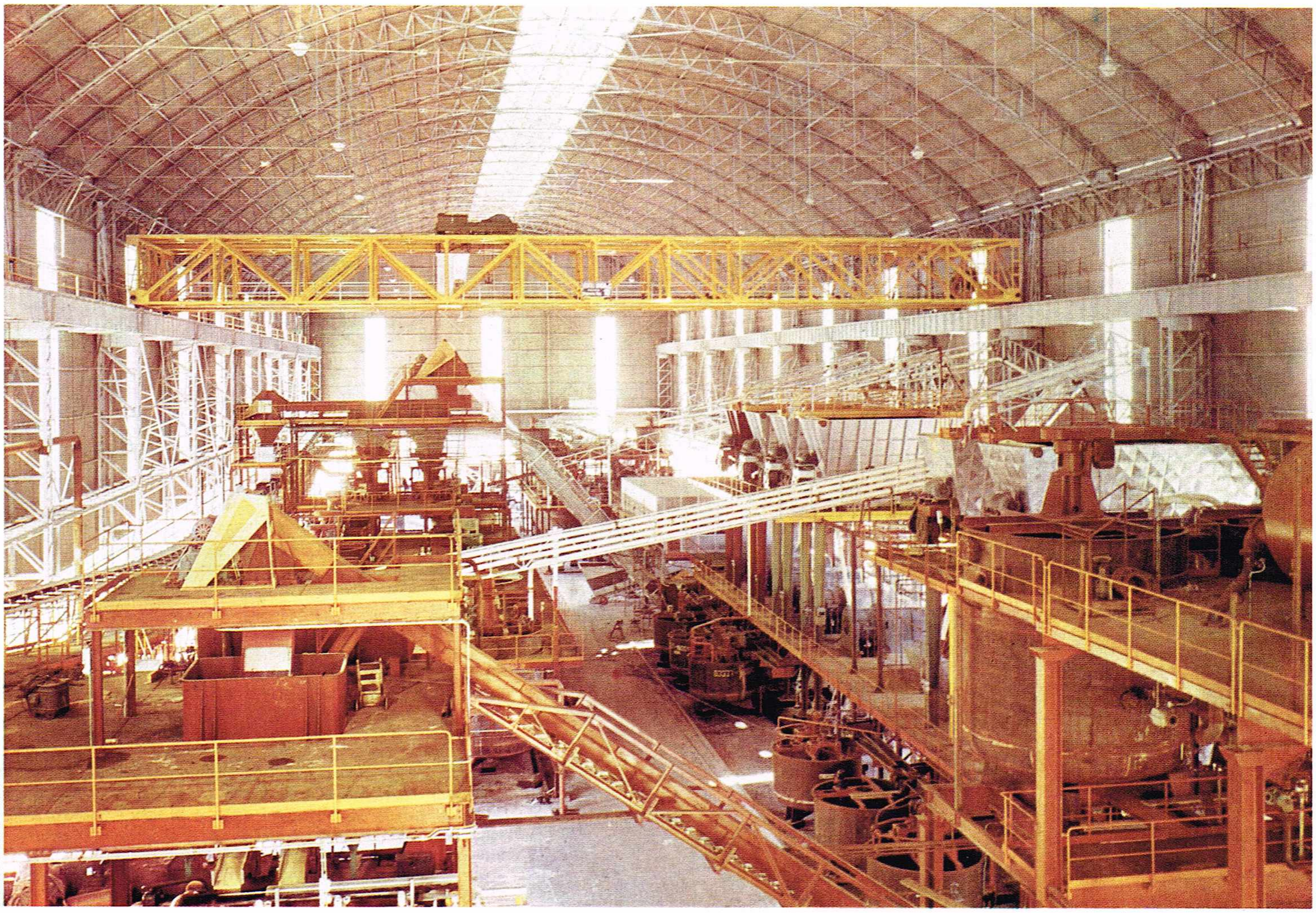

Montecatini Edison

▲ *Première étape de l'intervention de l'industrie dans l'agriculture : la fabrication des engrais. Ici, production de sels de potasse, atelier de centrifugation.*

D. Czap - TOP

◀ *Culture de la tomate en serre.*

▶ *Les techniques de l'industrie alimentaire sont très variées. Il en existe une quarantaine de branches. Ici, fabrication de la sauce tomate.*

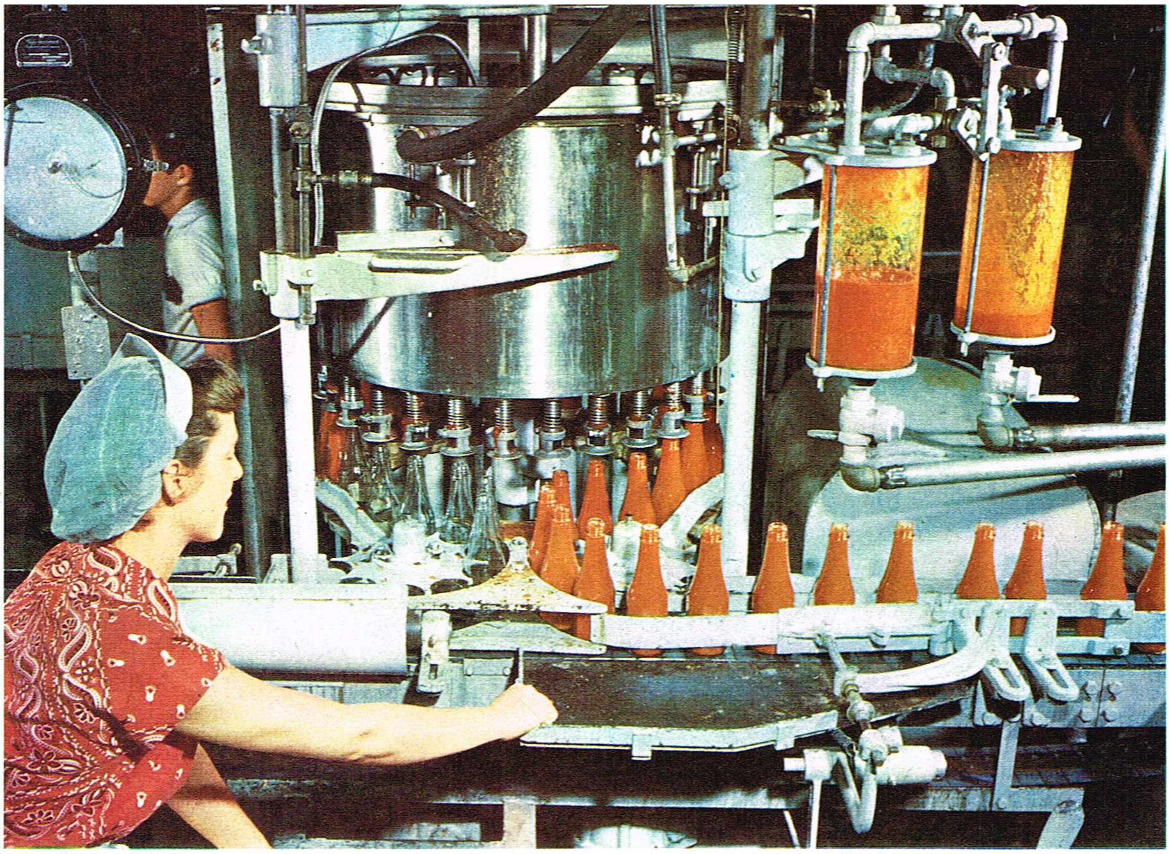

Marka

▼ *Ci-dessous, les halles de Rungis, « ventre de Paris ». En bas, fabrication des jus de fruits Volvic.*

L. Rousseau - TOP

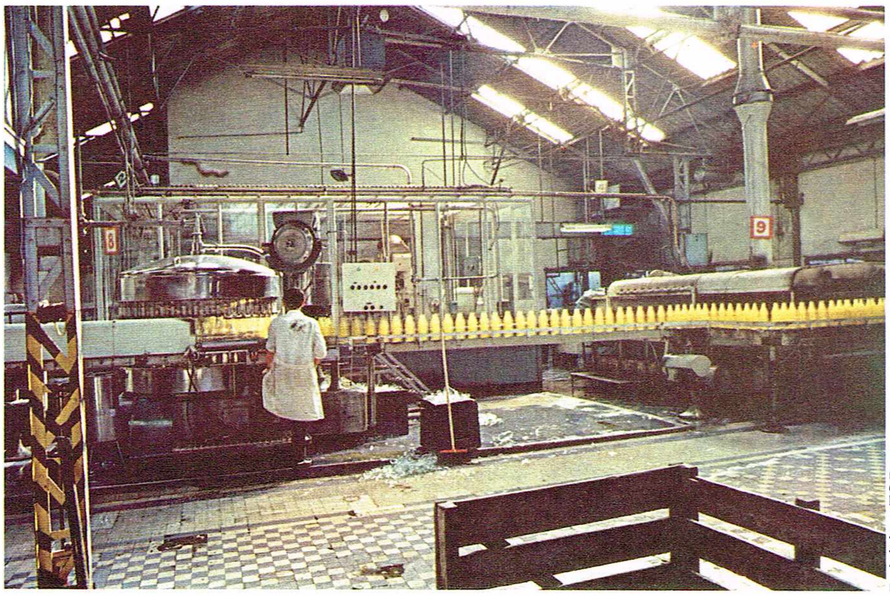

F. Jalain - TOP

Les différences se retrouvent encore à l'intérieur d'un même secteur alimentaire ; la laiterie présente une grande variété de technologies : fabrication du fromage, du lait concentré, du lait en poudre, de lactoprotéines, etc. C'est le cas aussi de la confiserie : la fabrication d'une pâte d'amandes est très éloignée de celle d'un fruit confit.

Au travers de cette pluralité des technologies, on peut dégager toutefois la véritable unité des industries alimentaires. C'est la finalité et le caractère biologique des matières premières qu'elles traitent et des produits qu'elles fabriquent. Il s'agit de produits destinés à être consommés, ce qui implique qu'ils possèdent des qualités nutritionnelles, hygiéniques et organoleptiques ; le maintien de ces qualités exige des traitements particuliers respectant la fragilité de la matière biologique.

Bien que progressant très vite, le niveau technologique dans l'industrie alimentaire est relativement bas, comparé en particulier à celui des autres secteurs de l'industrie. Le budget consacré à la recherche-développement, qui peut être considéré comme une mesure de ce niveau technologique, est le plus faible du secteur industriel : 1 % seulement, et quelquefois moins, du chiffre d'affaires. A l'autre extrémité, l'aérospatiale, dont le chiffre d'affaires est inférieur à la moitié de celui des industries alimentaires, investit treize fois plus en recherche et développement. En fait, 1 % seulement des firmes fait de la recherche, qui n'occupe au total, en comptant les quelques centres techniques, que 500 chercheurs, soit environ un salarié pour 1 000. Cette situation, bien évidemment, met certains secteurs de l'industrie alimentaire en état de grande dépendance vis-à-vis d'autres branches industrielles, ce qui favorise les transferts technologiques de ces branches industrielles vers les industries alimentaires.

Toutefois ces transferts ne peuvent se faire en pratique que si les industries alimentaires sont tournées vers l'extérieur, réceptives, préparées. Or la part des investissements réservée aux recherches extérieures, qui facilitent ces transferts, ne représente que 10 % du budget total de recherche de l'industrie alimentaire. Ainsi, l'effort qu'elle fait pour réaliser les transferts technologiques est encore relativement faible.

Évolution technologique

De nombreux produits alimentaires sont depuis longtemps définis sur le plan de la composition, et les procédés artisanaux traditionnels permettent d'obtenir d'excellents produits sur le plan organoleptique. Mais ces procédés présentent certains inconvénients, en particulier l'inconstance des propriétés organoleptiques. De plus, les normes hygiéniques sont très difficilement respectées. D'autre part, ce mode de fabrication est tout à

Galbani

fait impropre à la production de masse qui semble être une nécessité économique actuelle. Il est donc nécessaire de repenser la fabrication des aliments à l'échelle industrielle.

Dans la plupart des cas, le passage du stade artisanal au stade industriel s'est fait sans modification fondamentale des technologies, par simple rationalisation des processus de fabrication. La fabrication artisanale des produits alimentaires exige la mise en œuvre de plusieurs techniques différentes effectuées en postes séparés. L'alimentation de ces postes nécessite généralement une manutention importante. Dans un premier temps, cette manutention a été réduite (transport des matières par pneumatique, par bande, etc.). Ensuite, l'automatisation s'est installée, permettant d'avoir des lignes de fabrication complètement programmées. Ces améliorations n'impliquent en aucune manière une évolution technologique, il s'agit simplement d'une rationalisation du travail industriel.

Parallèlement à cette automatisation, des progrès importants ont été réalisés qui ont porté principalement sur l'augmentation de la capacité unitaire des appareils, sur la réduction de tout ce qui freine la continuité des processus. L'objectif principal était de transformer le discontinu en continu et d'améliorer ainsi la productivité. Depuis quelque temps, l'utilisation d'aciers spéciaux dans le matériel destiné à l'industrie alimentaire s'est généralisée.

Tenant compte des résultats obtenus en génie chimique, les processus technologiques eux-mêmes ont été repensés en termes d'opérations unitaires communes aux différentes technologies verticales des industries alimentaires, et également sous forme de transfert de chaleur, de matières. En fait, l'évolution des industries alimentaires ne peut se faire harmonieusement que par le développement parallèle, d'une part, des connaissances sur la composition des aliments, sur leur évolution bio-physico-chimique au cours des processus technologiques et de la conservation, et, d'autre part, du génie alimentaire. Or l'on constate que c'est principalement le développement de ce dernier qui fait progresser les industries alimentaires sur le plan de la productivité. Le génie alimentaire, bénéficiant très largement des apports du génie chimique, s'est développé d'une façon beaucoup plus rapide que les connaissances fondamentales sur les aliments.

Cela a créé une sorte de dysharmonie qui est à l'origine de divers problèmes. Le principal d'entre eux vient de l'adaptation de l'aliment à la machine, rendue souvent nécessaire par cette évolution déséquilibrée. La conséquence la plus marquante a été une « chimisation » de plus en plus poussée de l'industrie alimentaire, qui a provoqué depuis quelque temps une très vive réaction des consommateurs.

J. Monin - TOP

▲▼ *Ci-dessus et ci-dessous : deux étapes de la fabrication artisanale du fromage. En haut, fromagerie moderne ; nous sommes bien loin de la fabrication artisanale.*

J. Monin - TOP

Ian Berry - Magnum

Cette relative importance du hardware par rapport aux connaissances des mécanismes fondamentaux des technologies résulte, bien sûr, de l'intérêt immédiat de la recherche d'une meilleure rentabilité des processus de fabrication. Le génie chimique a pris en charge l'industrie alimentaire en négligeant la nature des produits qu'elle traite.

Apport des techniques nouvelles

Sans faire une monographie de toutes les techniques nouvelles qui ont été ou qui seront utilisées à court terme dans les industries alimentaires, nous allons prendre trois exemples de techniques de pointe particulièrement intéressantes :

— la technique des enzymes immobilisées;
— les techniques de séparation : ultrafiltration, électrodialyse, osmose inverse;
— la cuisson-extrusion.

Technique des enzymes immobilisées

Les micro-organismes sont depuis très longtemps utilisés dans les industries alimentaires (fabrication du vin, du pain, du fromage, etc.), mais, depuis un siècle environ, on sait quels sont les responsables moléculaires des différentes réactions que provoquent ces micro-organismes : ce sont les enzymes, polymères d'acides aminés, qui contrôlent l'ensemble des processus biochimiques à l'intérieur des cellules dans des conditions douces de température, de pression et de pH.

Les enzymes présentent une grande spécificité d'action. La technologie enzymatique regroupe tout ce qui concerne les problèmes posés par les enzymes au niveau du micro-organisme lui-même jusqu'à l'enzyme purifiée. Ces problèmes sont de nature extrêmement variée. On peut donc bien ici parler de technologie enzymatique, et l'une de ses techniques est celle des enzymes immobilisées.

La **technologie enzymatique** s'est considérablement développée avec l'isolement des enzymes à l'état cristallisé. Des préparations enzymatiques sont utilisées dans l'industrie alimentaire, panification, brasserie, etc. Le prix élevé de ces préparations, leur faible disponibilité (c'est

▲ *La recherche constante de la rentabilité de la fabrication des produits alimentaires amène à une automatisation poussée, aux dépens parfois du produit traité.*

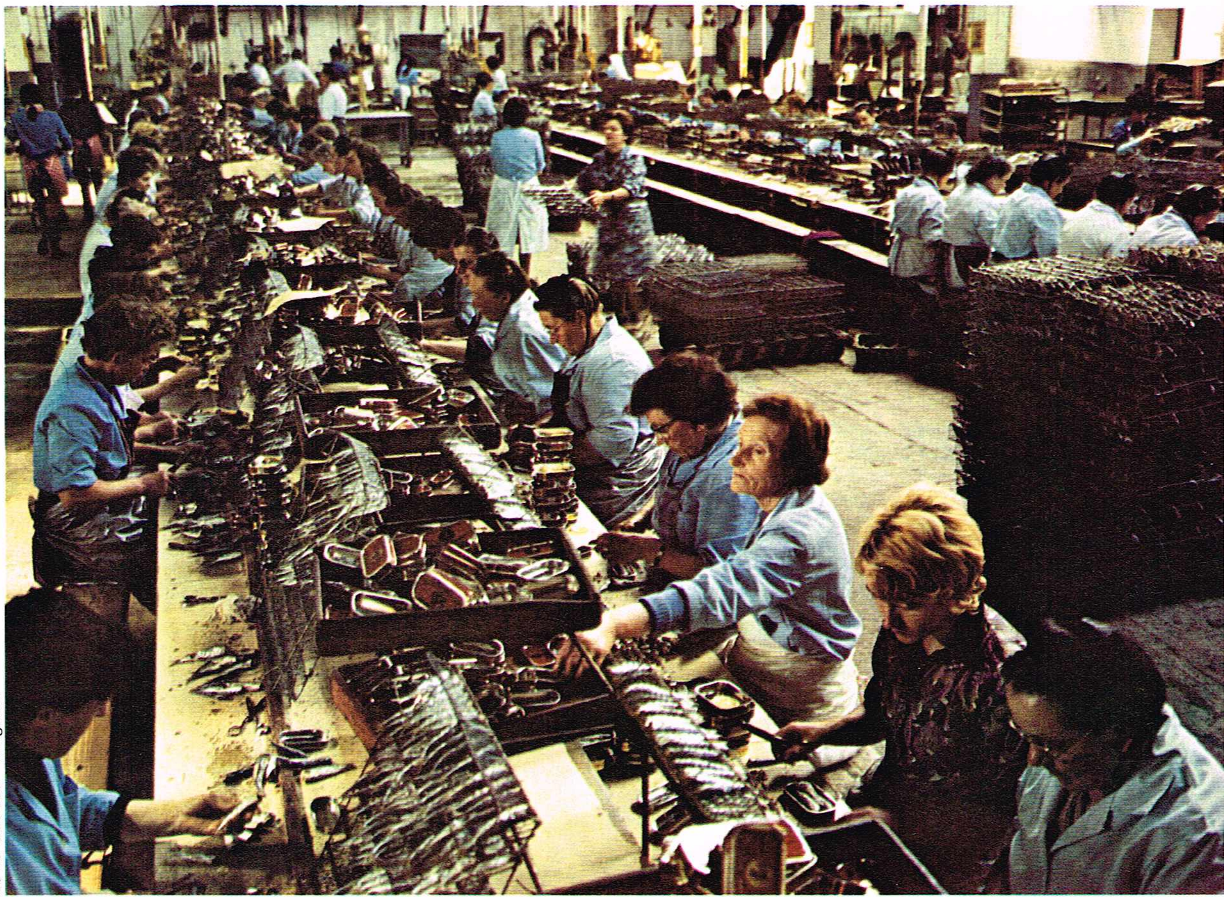

G. Le Querrec - Magnum

▶ *La fabrication des conserves de poisson demande une manutention importante.*

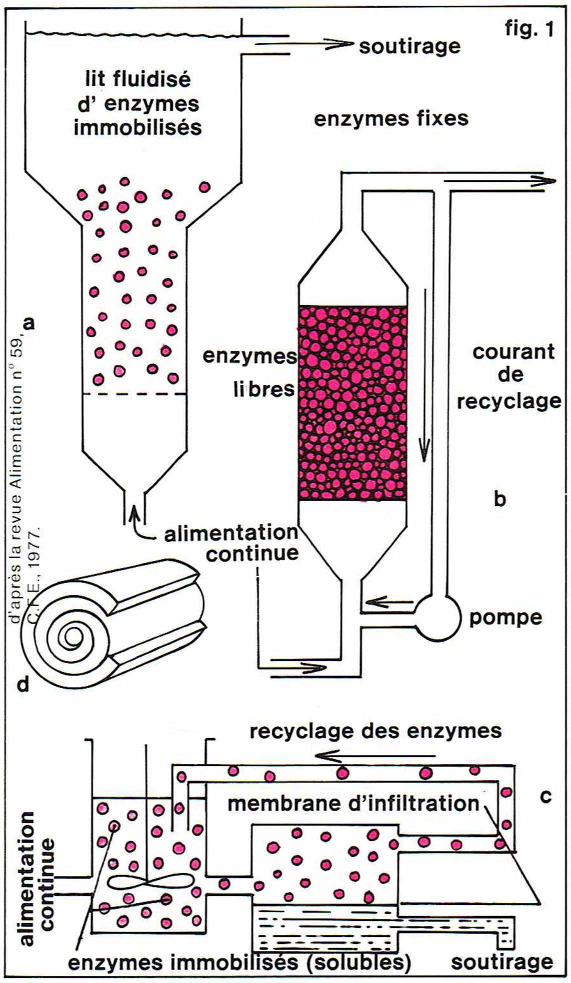

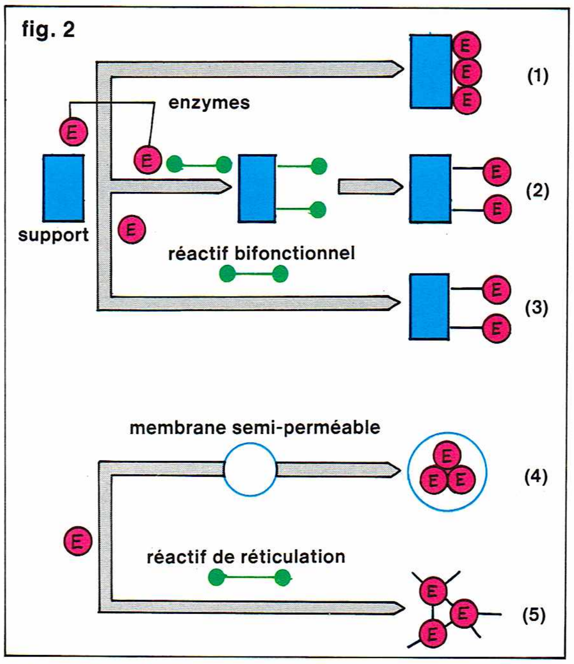

◀ *Figure 1 : a, encore assez peu utilisés, les réacteurs à lits fluidisés sont très efficaces quant au transfert de matières et de chaleur, mais consomment moins d'énergie ; b, de loin les plus courants, les réacteurs à lit fixe ont une activité élevée par unité de volume ; c, moins efficaces, à durée de séjour de la matière égale à celle des réacteurs à lits fluidisés ou fixes, les dispositifs à lit agité sont cependant utilisables pour les substrats insolubles ou colloïdaux ; d, la technique à membrane enroulée augmente la surface de contact entre enzymes et réactifs. En associant une membrane porteuse d'enzymes et une membrane d'osmose inverse, on obtient un dispositif efficace de traitement des eaux usées.*

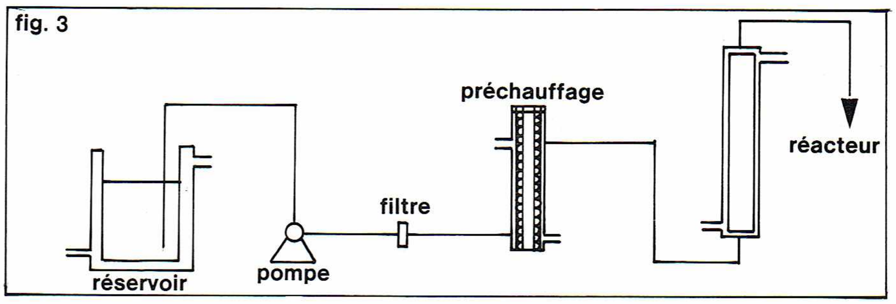

le cas actuellement de la présure) font que l'on peut prévoir un certain développement de la technique des enzymes fixées qui, entre autres avantages, permet de faire une économie d'enzymes.

Voici quelques chiffres en millions de francs pour les principales enzymes utilisées dans l'industrie alimentaire aux États-Unis. Pour l'amyloglucosidase, qui transforme l'amidon en glucose, 8,5 millions en 1971, prévisions pour 1980 : 13 millions. Pour l'amylase bactérienne, utilisée en brasserie, 23 en 1971 et 42 en 1980. Pour la protéase utilisée en fromagerie et brasserie, 5 en 1971 et 23 en 1980. Pour la gluco-isomérase, largement utilisée actuellement aux États-Unis pour transformer le dextrose du sirop de glucose en fructose, 5 millions en 71, 30 en 1980.

L'industrie des enzymes est en plein développement. Les enzymes sont immobilisées de façon très diverse. Tout d'abord, elles peuvent être fixées sur support. La gamme des supports possibles est extrêmement vaste : polymères naturels (polypeptides), polymères synthétiques, verre poreux ou minéraux argileux. Le choix du support est un cas d'espèce, il se fait en fonction de la nature de l'enzyme et des caractéristiques du réacteur enzymatique utilisé (*fig.* 1). Il peut y avoir absorption des enzymes sur un support (*fig.* 2). On peut également greffer sur ce dernier un réactif fonctionnel qui va réagir avec l'enzyme. Souvent, on utilise un réactif bifonctionnel qui réagit à la fois avec le support et l'enzyme. L'enzyme peut être emprisonnée dans un réseau gel d'amidon ou de polymère synthétique (*fig.* 3).

Les enzymes encapsulées sont intéressantes sur le plan médical. Le substrat pénètre à l'intérieur de la capsule. Il est transformé par l'enzyme, et les produits de réaction sont libérés à travers la capsule. L'enzyme reste constamment isolée et, de ce fait, à l'abri de tous les processus immunologiques d'élimination.

Voyons les **propriétés** de ces enzymes immobilisées. Quel intérêt a-t-on à faire ces fixations ? Les enzymes fixées qui conservent leur spécificité permettent de travailler en continu, ce qui est extrêmement important sur le plan industriel. Elles donnent de meilleurs rendements et elles présentent une meilleure stabilité en température. Cette dernière caractéristique est intéressante, puisqu'elle permet, dans certains cas, d'accélérer la réaction sans compromettre la durée de vie de l'enzyme. A une même température, la durée de vie est augmentée dans des proportions importantes ; elle peut passer de quelques heures à l'état libre, à plusieurs mois à l'état fixé.

Les avantages des enzymes fixées sont appréciables. De ce fait, leurs **applications industrielles,** bien qu'encore relativement limitées, devraient prochainement se développer largement. Quelles sont les applications

▲ *Figure 2 : trois types de supports, cinq modes de fixation (d'après la revue* Alimentation, *n° 59, C. F. E., 1977). Figure 3 : schéma de montage d'une réaction en flux continu sur réacteur-colonne fixe porteur d'enzyme immobilisée sur support (d'après la revue* Alimentation, *n° 59, C. F. E., 1977).*

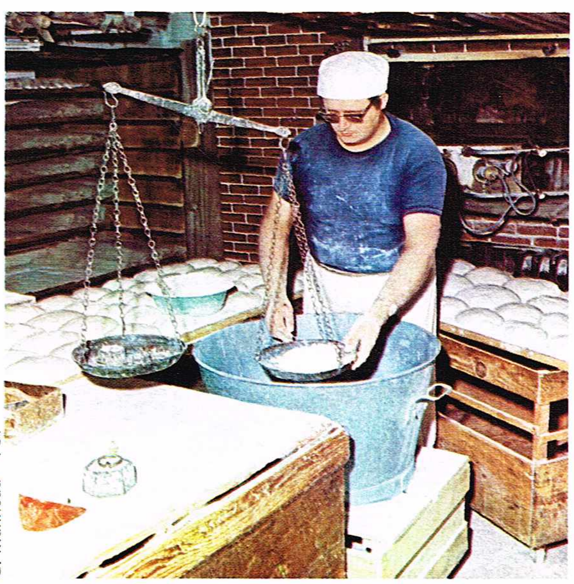

G. Marineau - TOP

◀ *Les micro-organismes sont utilisés depuis très longtemps dans la fabrication de produits alimentaires comme le pain, mais on ne connaît que depuis un siècle environ les responsables de ces réactions.*

actuelles de ces enzymes immobilisées ? Aux États-Unis et en Italie, des usines pilotes utilisant la bêtagalactosidase fixée fabriquent des laits diététiques destinés aux personnes qui ne supportent pas le lait (en particulier les gens de race noire qui ne peuvent pas hydrolyser le lactose en glucose et galactose parce qu'il leur manque cette enzyme).

Le cas de la présure est très intéressant à considérer. Les disponibilités en cette enzyme sont de plus en plus réduites, tout simplement parce que la production de fromages augmente constamment alors que le nombre des veaux de lait diminue. L'Institut national de la recherche agronomique (INRA) s'est bien occupé de cette question et a déjà proposé des solutions, en particulier celle qui consiste à utiliser les enzymes fixées. La coagulation du lait par la présure se fait en deux temps. Dans le premier se produit l'hydrolyse enzymatique qui peut s'effectuer à basse température (10 °C). Dans le deuxième, on observe la coagulation (30 °C). La connaissance du mécanisme de la coagulation a été à l'origine de l'utilisation de la technique des enzymes fixées en fromagerie. Le lait à 10 °C passe dans un réacteur contenant de la présure fixée. L'enzyme fait son travail. Le lait sortant du réacteur est porté à 30 °C et caille. On peut travailler en continu et en utilisant une quantité extrêmement réduite de présure, grâce au système d'enzyme fixée. C'est un exemple qui illustre bien le travail qu'il est nécessaire de faire sur le plan fondamental pour pouvoir ensuite utiliser valablement les différentes techniques existantes. La technique des enzymes immobilisées a été appliquée dans des conditions optimales grâce à une connaissance approfondie des mécanismes fondamentaux de caillage du lait.

La glucose isomérase permet de transformer le dextrose en fructose. Il est possible d'augmenter ainsi le pouvoir édulcorant du sirop de glucose et d'obtenir de ce fait des matières sucrantes qui concurrencent directement le saccharose. Des unités de production utilisant la glucose isomérase fixée fonctionnent déjà aux États-Unis. L'amidon, dans un premier temps, est transformé quantitativement en glucose par l'amyloglucosidase fixée.

Des enzymes immobilisées sont utilisées dans la fabrication de la méthionine, acide aminé utilisé dans l'industrie de l'alimentation animale pour valoriser les protéines.

Une autre application industrielle des enzymes fixées appelée à un grand développement est la fabrication des capteurs. Dans l'industrie, pour réaliser l'automatisation des processus, on a besoin d'un nombre toujours plus grand de capteurs qui donnent des informations sur le déroulement des différentes opérations. Actuellement, ces capteurs sont en nombre limité, ils informent principalement sur les conditions de milieu (pH, température, pression, etc.). Les informations qu'ils fournissent ne sont pas toujours suffisantes. Il est quelquefois nécessaire de connaître l'évolution quantitative d'un composé, par exemple celle du glucose au cours de l'hydrolyse de l'amidon ou d'un acide aminé au cours d'une fermentation. La technique des enzymes immobilisées permet de réaliser ces capteurs qui sont constitués d'électrodes classiques recouvertes de membranes porteuses d'enzymes. Ces électrodes permettent, avec une très grande spécificité, de doser en continu un composé donné en se fondant sur une mesure de pH ou de potentiel d'oxydoréduction. (A l'université de Compiègne, différentes électrodes de ce type, en particulier pour le dosage des acides aminés, ont été mises au point.) Des électrodes à enzymes fixées existent pour les sucres. Dans ce cas, l'électrode de base est une électrode polarographique, puisque c'est une concentration en oxygène que l'on mesure, les sucres étant oxydés en acide gluconique par voie enzymatique. On peut signaler pour mémoire toute une série d'applications médicales extrêmement intéressantes, dont l'examen dépasse le cadre du sujet traité. Enfin, sur le plan scientifique, la technique des enzymes fixées a permis de mieux comprendre les mécanismes d'action des enzymes en facilitant la réalisation de modèles expérimentaux.

Les enzymes immobilisées ne présentent pas que des avantages, elles posent également quelques problèmes. D'abord, leur prix de revient est relativement élevé. L'installation nécessaire est plus compliquée que dans le cas de l'utilisation d'enzymes non fixées. Les conditions optimales doivent être déterminées et le choix des supports effectué dans chaque cas particulier. La lutte contre la contamination bactérienne est plus préoccupante ici que dans les techniques traditionnelles.

L'intérêt de la fixation s'accroît lorsque le prix de revient de l'enzyme s'élève ou lorsque le procédé, ou la réglementation, exige que l'enzyme soit séparée du produit. (On ne risque pas de la retrouver dans le produit, puisqu'elle est liée à son support.) Évidemment, cette technique n'est applicable que si les produits sont en solution.

Techniques de séparation sur membranes

Ces techniques sont relativement anciennes, mais elles ont fait récemment l'objet de développements importants grâce, en particulier, aux progrès de la chimie des plastiques. Ainsi, les membranes ont pu devenir opérationnelles et, de ce fait, intéressantes sur le plan industriel.

On distingue trois types principaux de techniques de séparation sur membrane : l'électrodialyse, l'osmose inverse et l'ultrafiltration. L'**électrodialyse** effectue une action discriminatoire entre les composés dissous à l'état moléculaire et les composés dissous à l'état ionisé. L'**osmose inverse** permet de séparer le solvant du soluté. En fait, c'est un moyen élégant de concentrer les solutions. Quant à l'**ultrafiltration**, elle sépare les composés en fonction de la taille de leurs molécules. Ces trois techniques de séparation ne sont pas concurrentes. Elles permettent de résoudre des problèmes différents posés par certaines technologies. La technique de l'ultrafiltration va plus particulièrement être examinée.

Le principe de l'ultrafiltration est simple (*fig.* 4a et b) : les grosses et les petites molécules sont séparées les unes des autres par un passage à travers une membrane. Les petites molécules se retrouvent dans l'ultrafiltrat, et le rétentat est constitué des grosses molécules. Des filtrations efficaces et des débits élevés sont obtenus grâce à l'utilisation de membranes asymétriques; ce sont des membranes dont la taille des pores est variable : gros au départ, les pores diminuent de taille dans le sens du déplacement du liquide. De plus, des mouvements turbulents assez efficaces sont nécessaires pour éviter la formation de couches limites, c'est-à-dire l'entassement des grosses molécules au niveau de la membrane.

L'acétate de cellulose, utilisé au début pour la fabrication des membranes, a été rapidement remplacé par le polychlorure de vinyle et les polystyrènes, plus résistants.

L'ultrafiltration est utilisée en laiterie pour la valorisation des sous-produits. Elle permet en particulier d'obtenir des fractions enrichies en protéines. Cette technique utilisée en fromagerie permet d'obtenir un concentré en protéines, sorte de préfromage (*fig.* 5). Les pertes sont réduites, puisque toutes les protéines solubles sont retenues,

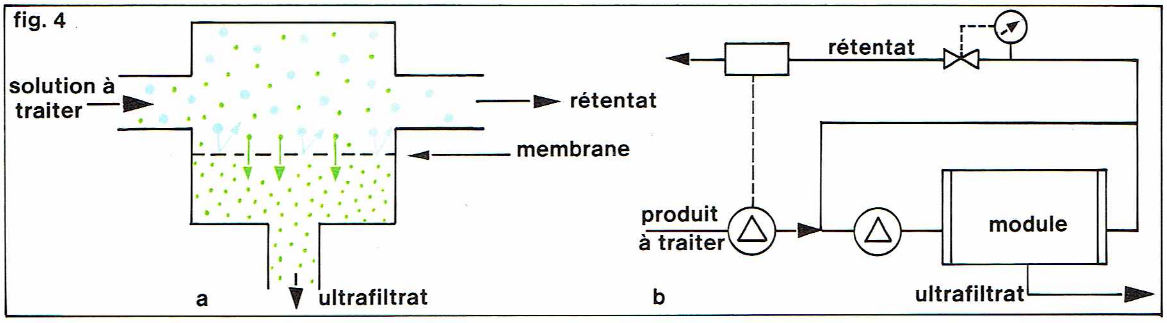

▶ *Figure 4 : ultrafiltration : a, principe physique de séparation des graisses et des petites molécules; b, schéma de l'installation (d'après la revue* Alimentation, *n° 59, C. F. E., 1977).*

contrairement à ce qui se passe en technologie fromagère traditionnelle. On fait agir la présure sur le préfromage. Il en résulte une économie en cette enzyme, puisque la quantité de matière traitée est plus faible. Globalement, le bilan est très positif ; d'une part, le rendement augmente du fait de la conservation des protéines solubles et, d'autre part, une moindre consommation de présure est nécessaire.

Ainsi, les techniques de séparation constituent un apport intéressant pour l'industrie alimentaire, principalement dans le domaine des sous-produits, mais également dans le cadre de technologies traditionnelles où elles interviennent d'une façon ponctuelle comme dans l'industrie fromagère.

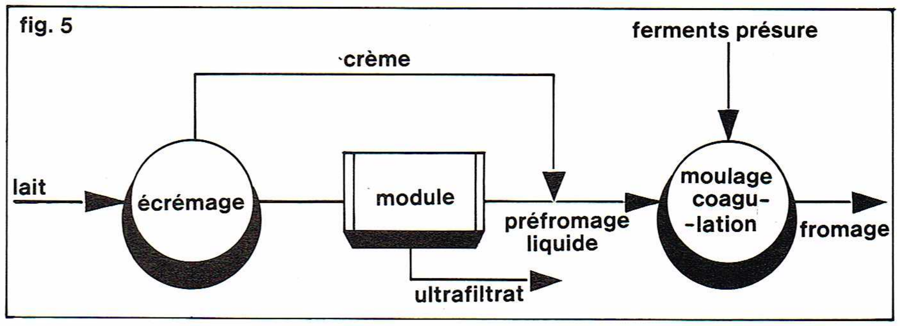

▲ *Figure 5 : application de l'ultrafiltration en laiterie (d'après la revue* Alimentation, *n° 59, C. F. E., 1977).*

La cuisson-extrusion

Cette technique introduit simultanément, en industrie alimentaire, la nouveauté des processus et celle des produits. Le principe consiste à cuire en continu sous l'action conjuguée de la température, de la pression et d'une agitation intense, une matière première ou un mélange de matières premières. Le produit est façonné à la sortie de l'extrudeuse.

Le très brusque passage à la pression atmosphérique crée une détente de la vapeur d'eau contenue dans le produit, ce qui entraîne une expansion de celui-ci. On obtient ainsi des produits très allégés. Les extrudeuses modernes comprennent essentiellement un fourreau chauffé (par circulation de vapeur d'eau, par chauffage électrique, ou par courant induit), une ou deux vis à la géométrie compliquée et variable suivant la nature des produits à traiter (il faut aussi tenir compte de la chaleur dégagée par le système de vis qui, du fait des frottements extrêmement importants, élève très rapidement la température de l'ensemble).

La durée du processus est extrêmement brève : de l'ordre de quelques secondes ; on observe une montée très rapide en température au cours de la cuisson-extrusion, suivie d'une chute tout aussi rapide au cours de l'expansion.

Les facteurs influençant la cuisson-extrusion sont : le débit d'alimentation, la vitesse de rotation et le nombre des vis ainsi que leur géométrie, l'hydratation du produit, qui joue un rôle très important, et enfin, évidemment, la température et la pression. La cuisson-extrusion est d'abord une technique de cuisson au sens propre, c'est-à-dire une technique qui entraîne des transformations physico-chimiques qui permettent d'obtenir des produits de bonne acceptabilité digestive. Dans le cas des produits amylacés, on observe, sur le plan chimique, des hydrolyses des molécules d'amidon plus ou moins importantes. Sur le plan physique, la désorganisation des réseaux pseudo-cristallins de l'amidon qui intervient au moment de la cuisson proprement dite est suivie au cours de l'extrusion d'une réorganisation partielle de ce système.

La cuisson-extrusion résulte d'un transfert technologique de l'industrie des plastiques, où elle est utilisée très largement, vers l'industrie alimentaire. Les « amuse-gueules », produits nouveaux que cette technique permet de fabriquer, ont pris un développement considérable ces dernières années. Contrairement aux autres techniques examinées, la cuisson-extrusion ne s'intègre pas dans une technologie traditionnelle, elle est surajoutée, elle représente en elle-même une technologie.

Il ne faut pas croire que les possibilités de la cuisson-extrusion soient limitées à l'obtention de gadgets alimentaires. Elles peuvent, au contraire, s'étendre à d'autres domaines : farines instantanées pour enfants, produits de confiserie, protéines texturées. Dans ce dernier cas, la cuisson-extrusion est plus rentable et beaucoup plus facile à appliquer que le filage des protéines.

La cuisson-extrusion présente des inconvénients, en particulier au niveau de la coloration et de l'aromatisation des produits. Ses avantages sont : matériel peu encombrant, entretien facile, frais de fonctionnement relativement faibles, procédé continu et extrêmement bref.

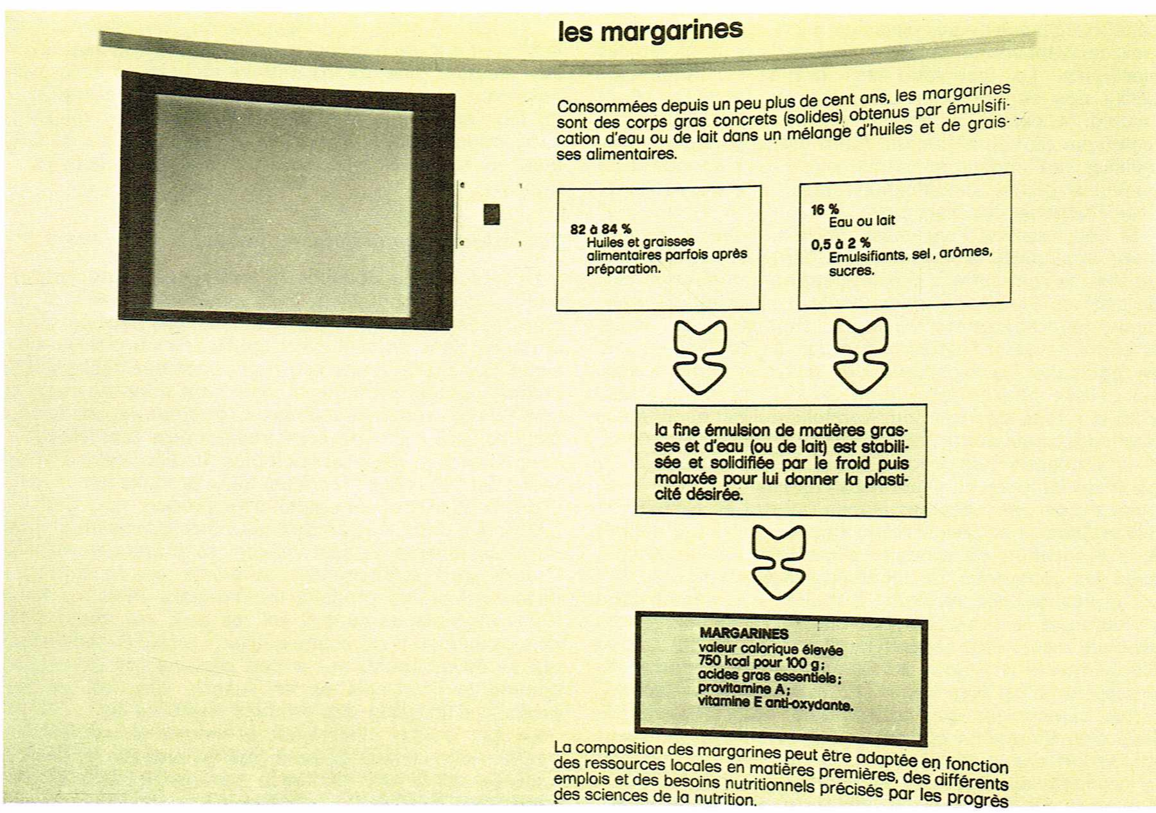

Palais de la Découverte - Paris

◀ *La margarine : un exemple bien connu de « produit nouveau » imitant un produit traditionnel, le beurre.*

▶ ***Glucides, protides et lipides sont les trois grands groupes de substances composant essentiellement les aliments.***

eux-mêmes dans l'ensemble du monde vivant :
- les oses pour les glucides
- les acides aminés pour les protides (ou protéines)
- les acides gras pour les lipides.

Ce sont les fournisseurs de l'énergie et des éléments de synthèse.

les glucides : Les glucides sont des composés largement répandus dans la nature : le sucre, l'amidon, la cellulose, le glycogène sont les plus connus. Les plus simples d'entre eux ont une saveur sucrée dont ils tirent leur nom (glucis = doux).
Ce sont des composés le plus souvent ternaires : carbone, hydrogène et oxygène. Ces 2 derniers sont dans la même proportion que dans l'eau, mais ce fait est sans signification. Ils sont composés de chaînons carbonés assymétriques porteurs de fonction hydroxyle (alcool) ou carboxyle (cétone ou aldehyde).
Ils représentent l'élément énergétique par excellence.

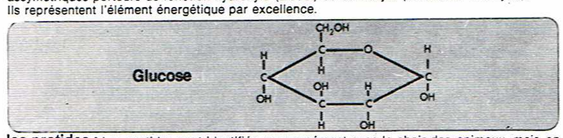

les protides : Les protides sont identifiés communément avec la chair des animaux, mais on les trouve également dans les vegétaux.
Ils sont composés essentiellement de carbone, d'oxygène, d'hydrogène et d'azote (composés quaternaires).
Les protéines sont constituées de chaînes d'acides aminés reliés entre eux par des liaisons peptidiques. La longueur de ces chaînes est très variable : de quelques acides aminés (8 pour la vasopressine ou l'ocytocine) jusqu'à plusieurs milliers.
Pour une même protéine leur nombre et leur ordre sont strictement déterminés selon le code génétique.
Ce sont les éléments fondamentaux des structures des cellules vivantes. Ils ont les fonctions les plus variées : matériau de constitution, régulateur du métabolisme, fournisseur d'énergie.

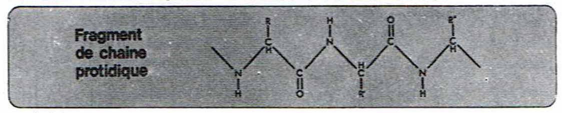

les lipides ou corps gras : Les lipides sont des composés ternaires caractérisés par leur insolubilité dans l'eau et les milieux aqueux organiques, leur solubilité dans l'éther, le benzène, le chloroforme.
Ils sont constitués d'acides gras combinés le plus souvent à l'état naturel à un trialcool : le glycérol (sous forme de triglycérides), parfois à une amine alcoolique.
Ce sont essentiellement des éléments de réserve (importante énergie chimique sous un faible volume), mais également des éléments de structure importants (certains organites cellulaires, membranes endoplasmiques, fibres nerveuses).

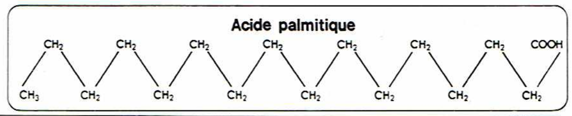

Aucun aliment n'est vraiment "complet" et ne suffit à une alimentation humaine équilibrée. La plupart d'entre eux ont une dominante dans leurs qualités nutritionnelles et la nature de leur apport. Ceci permet de les réunir en grands groupes.

Palais de la Découverte - Paris

La cuisson-extrusion est un cas particulier. Elle peut à la limite être considérée comme une technologie, puisqu'elle part des matières premières pour arriver au produit fini. Cette technologie originale pour les industries alimentaires permet d'obtenir des produits nouveaux. Bien que de nombreux efforts soient faits pour élargir ses possibilités, il ne semble pas qu'elle puisse valablement s'insérer dans les technologies traditionnelles, et encore moins les remplacer.

Il est intéressant de noter que les trois techniques examinées, bien que fort éloignées les unes des autres, bénéficient à des degrés divers du même transfert technologique ayant son origine au niveau de la technologie des plastiques. La technique des enzymes immobilisées utilise des supports en polymères synthétiques, dont l'emploi a permis de rendre opérationnelle l'ancienne technique de l'ultrafiltration. Enfin certaines extrudeuses utilisées en industries alimentaires correspondent, à quelques petites modifications près, à celles utilisées dans l'industrie des plastiques.

Si l'on examine l'ensemble des techniques nouvellement appliquées à l'industrie alimentaire, on constate qu'elles se sont surtout développées en amont et en aval de celle-ci. En amont, on trouve les industries qui fabriquent des matières premières pour l'industrie alimentaire, et parmi celles-ci l'industrie des dérivés de l'amidon où, en particulier, la technique des enzymes immobilisées est utilisée pour la fabrication de l'isomérose. En aval, c'est la valorisation des sous-produits qui fait appel à des techniques nouvelles comme les techniques de séparation pour l'obtention de fractions enrichies en protéines à partir de lactosérum. Dans les deux cas, amont et aval, nous avons des industries jeunes qui ont eu à résoudre des problèmes nouveaux relativement simples par rapport à la fabrication de produits alimentaires, sans avoir à subir les contraintes de technologies existantes.

De plus, et c'est important à souligner, la composition chimique et le comportement biophysico-chimique des produits traités sont généralement connus, ce qui permet d'appliquer la technique au moment le plus opportun du processus. C'est bien loin d'être le cas pour les technologies alimentaires qui, rappelons-le, ont surtout bénéficié d'améliorations portant sur la continuité et l'automatisation des processus dans le dessein d'augmenter la productivité. Quelques technologies verticales traditionnelles ont toutefois fait l'objet de recherches fondamentales, par exemple la fromagerie. Il est alors possible d'utiliser une technique nouvelle au bon endroit dans les meilleures conditions d'efficacité et de rentabilité.

Dans la plupart des cas, les techniques extérieures, pour ne pas les appeler nouvelles, ont des difficultés à s'inclure dans des technologies traditionnelles de fabrication des aliments. Il semble que ce qui limite les transferts technologiques soit actuellement le faible niveau des connaissances des mécanismes des processus de fabrication. Les transformations importantes qui entraînent les transferts nécessitent des investissements qu'hésitent à faire les industriels de l'industrie alimentaire, peu enclins à prendre des risques. Ceux-ci peuvent être d'autant plus grands que les techniques extérieures ne seront pas appliquées au mieux de leur efficacité et de leur rentabilité, la conséquence de cette mauvaise application étant l'obtention de produits finis aux qualités plus ou moins éloignées de celles des produits traditionnels.

Techniques nouvelles et produits nouveaux

Une technique nouvelle ne donne pas automatiquement un produit nouveau. Dans la mesure où elle s'intègre bien à une technologie traditionnelle, elle peut permettre d'obtenir dans de meilleures conditions un produit classique. Si, à elle seule, elle représente une technologie, comme la cuisson-extrusion, elle peut donner naissance soit à des « produits nouveaux » (produits expansés pour apéritif), soit à des produits traditionnels (confiserie). A l'opposé, avec des technologies traditionnelles, il est tout à fait possible de fabriquer des « produits nouveaux ».

Les critères de nouveauté d'un produit sont difficiles à définir *a priori*. Un produit peut être considéré comme nouveau lorsque sa composition, sa présentation ou sa finalité sont suffisamment différents de ce que l'on observe dans les produits traditionnels. Mais les habitudes alimentaires sont si solides qu'il est très difficile de s'en écarter. Il en résulte que les « produits nouveaux » qui se développent, mis à part certains cas particuliers comme le coca-cola et les snacks, sont en fait des produits d'imitation des produits traditionnels.

Le cas le plus célèbre est la margarine qui imite le beurre. Actuellement on peut citer les protéines végétales texturées qui tentent d'imiter la viande et le *High Fructose Corn Sirup* (HFCS).

Burk Uzzle - Magnum

◀ ***Alignement de conserves dans un supermarché : l'aliment n'est pas directement visible ; c'est avec l'emballage que le consommateur a le premier contact.***

▼ ***Poule, citron, céleri, beurre, oignons, vin blanc... tout ce qu'il faut pour une bonne recette à la française.***

Mark Antman - Fotogram

LES ALIMENTS

La *fonction de nutrition* consiste pour l'animal à intégrer à son organisme certains composés du milieu extérieur afin de lui permettre de vivre. Ces composés ou nutriments se trouvent dans les « aliments » qui peuvent être considérés comme des substances complexes recherchées par l'animal pour satisfaire ses besoins nutritionnels. Ils ont un contenu *psychosensoriel et affectif* qui leur permet d'être sélectionnés parmi l'ensemble des substances de l'environnement de l'animal.

Le contenu psychosensoriel d'un aliment, c'est-à-dire son apparence (couleur, forme), son goût, son arôme, sa texture, joue un rôle primordial dans sa sélection par l'animal, et également dans le plaisir que celui-ci éprouve en le consommant. A tel point que l'homme ou les animaux affamés peuvent restés indifférents à des nutriments chimiquement purs qui leur seraient proposés et qui leur permettraient pourtant de survivre. A l'inverse, des produits sans nutriments, mais pourvus d'un contenu psychosensoriel, seront sélectionnés et ingérés par l'animal sans, bien entendu, le nourrir.

Instinctivement, les animaux savent établir des relations entre les qualités sensorielles et la valeur nutritive des aliments. Ils arrivent à équilibrer leurs repas de façon à satisfaire parfaitement leurs besoins physiologiques tout en mangeant ce qu'ils aiment et désirent.

Il est ainsi remarquable de constater que, dans des conditions de totale liberté alimentaire, la stabilité pondérale de l'animal est maintenue avec une extrême précision grâce à de subtils mécanismes de régulation. L'homme, dans les sociétés évoluées, possède encore cette aptitude qui lui permet d'équilibrer ses repas, bien qu'elle soit émoussée par les conditions artificielles d'existence et culturellement déviée. Encore faut-il que cette aptitude puisse s'exercer. Très souvent, l'aliment industriel n'est pas directement visible, et c'est avec l'emballage que le consommateur a le premier contact. L'aliment lui-même est si profondément et si souvent modifié que plus aucun système de référence ne permet de le situer, de le choisir. Ingérer un aliment dans une société industrielle n'est plus un acte de responsabilité individuelle mais collective. Le mouvement des consommateurs peut s'expliquer en partie par la frustration née de ce transfert de responsabilités.

Le relâchement des liens au sein de la famille ou

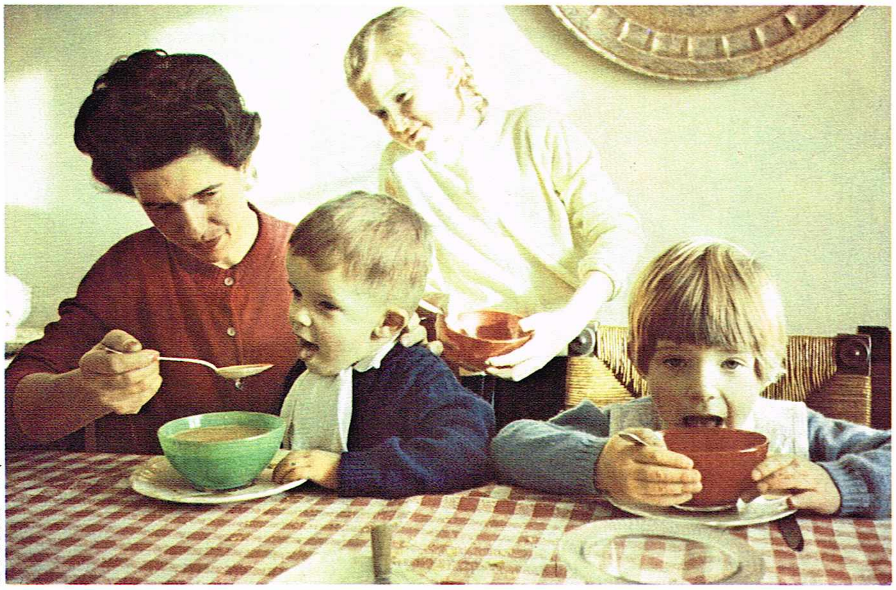

E. Boubat - Top

▲ *L'alimentation est une des relations privilégiées fondamentales qui s'établissent entre parents et enfants.*

▼ *Figure 1 : de nombreuses substances entrent dans la composition des aliments.*

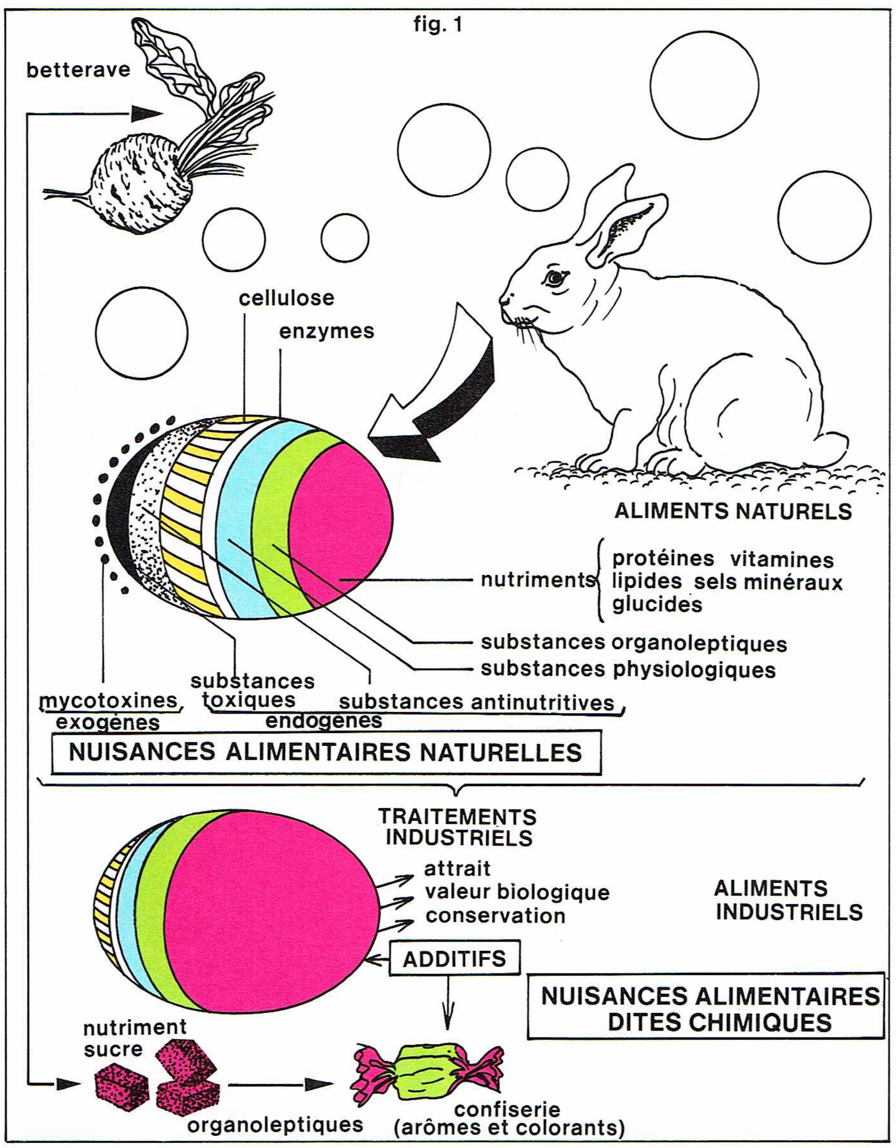

même la ruine de ses structures traditionnelles ont de nombreuses causes, parmi lesquelles il faut retenir l'alimentation. Les relations privilégiées fondamentales qui s'établissent entre enfants et parents naissent de l'aliment. Par la suite, la mère transforme et valorise les aliments que le père a sélectionnés et acquis dans des conditions difficiles, quelquefois au péril de sa vie comme l'homme préhistorique. Dans les sociétés modernes, les enfants s'aperçoivent très vite que le père n'a qu'un rôle modeste dans la vie de la famille, elle-même située dans un environnement pléthorique. Quant à la part de la mère dans la transformation et la valorisation des aliments, elle est généralement peu importante, et même souvent inexistante. La cellule familiale n'est plus seule à offrir la sécurité essentielle, celle de la nourriture. Elle s'en trouve dévalorisée.

Définition des aliments

Les aliments, dans le cas le plus général, peuvent contenir, outre les nutriments ou trophines :
— de l'eau;
— des substances non métabolisées (cellulose pour l'homme);
— des corps à action pharmacodynamique (alcaloïdes, théobromine, caféine, etc.);
— des enzymes;
— des substances antinutritives ou toxiques.
— des composés donnant aux aliments leur contenu psychosensoriel (arômes, colorants);

Les nutriments ou trophines n'existent pas à l'état libre dans la nature. Ils jouent un rôle biochimique fondamental. Ils se répartissent en cinq grands groupes de composés : les protéines, les lipides, les glucides, les sels minéraux et les vitamines.

Les protéines

Ce sont de grosses molécules se présentant en longues chaînes dont les maillons sont constitués d'acides aminés, c'est-à-dire de molécules possédant à la fois une fonction acide et une fonction amine. Les différents acides aminés sont liés entre eux par des liaisons peptidiques.

Les différentes molécules de protéines se distinguent les unes des autres par le nombre total, la nature et les proportions des acides aminés qui les composent. De ce fait, le nombre des molécules de protéines possible est considérable.

Il existe une vingtaine d'acides aminés différents dans les protéines, dont huit ne peuvent être synthétisés par l'organisme humain adulte; ce sont les *acides aminés essentiels :* méthionine, thréonine, tryptophane, isoleucine, leucine, phénylalanine, lysine, et valine.

Les besoins en acides aminés essentiels ont été fixés par les experts de la FAO/OMS. Ils varient en fonction de nombreux facteurs : âge, sexe, activité exercée, climat, etc. Les chiffres suivants sont valables pour un individu dont l'âge est compris entre vingt et quarante ans et dont l'activité est modérée. Ils sont exprimés en mg par kg de poids vif et par jour :

Acides aminés	
histidine	0
isoleucine	10
leucine	14
lysine	12
méthionine + cystine	13
phénylalanine + tyrosine	14
thréonine	7
tryptophane	3,5
valine	10

Par exemple, un homme de 70 kg âgé de 35 ans et ayant une activité modérée aura besoin chaque jour de (10 × 70) 700 mg d'isoleucine et de (12 × 70) 840 mg de lysine.

Chez l'enfant, les besoins en acides aminés sont relativement plus élevés, la constitution des tissus au cours de la croissance nécessitant une quantité importante de protéines. De plus, l'histidine est pour la première année de la vie un acide aminé indispensable. Pour satisfaire les besoins en protéines de l'organisme humain, les acides

fig. 2

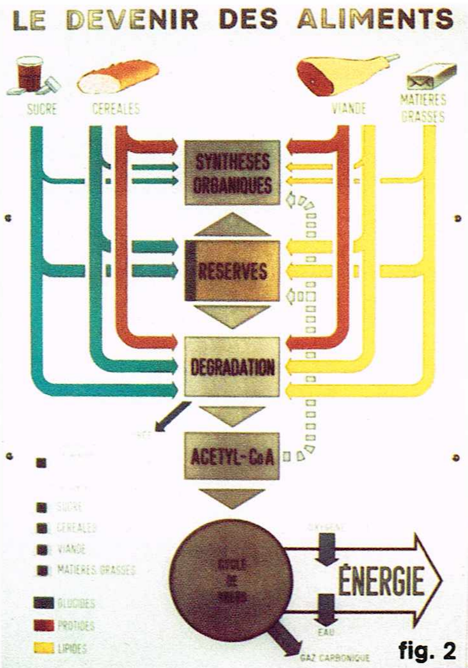

fig. 3

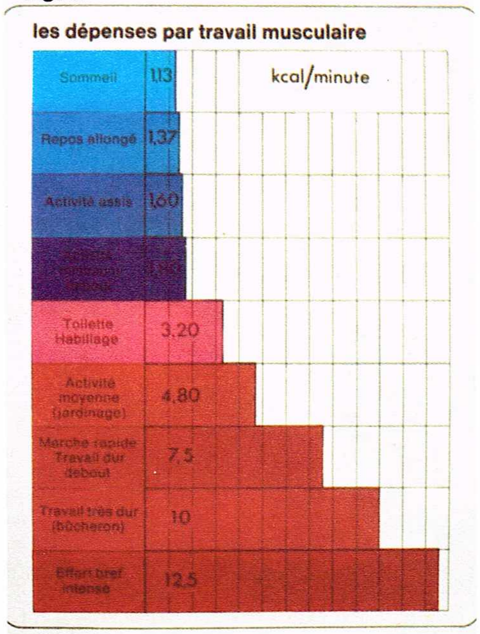

fig. 4

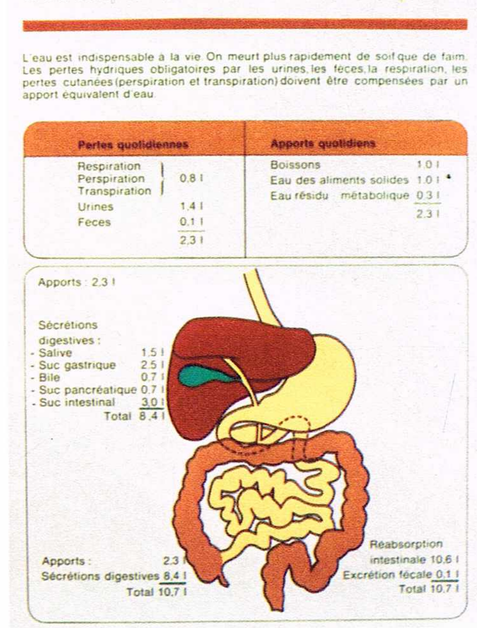

fig. 5

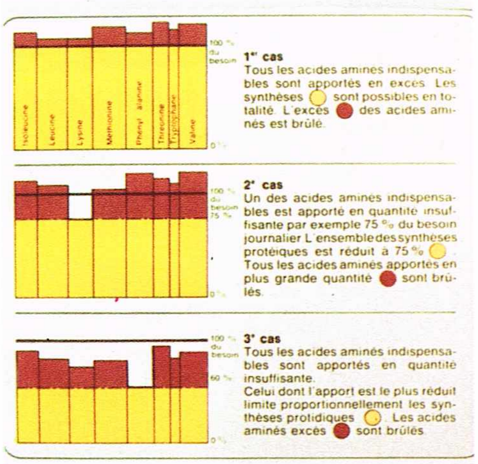

fig. 6

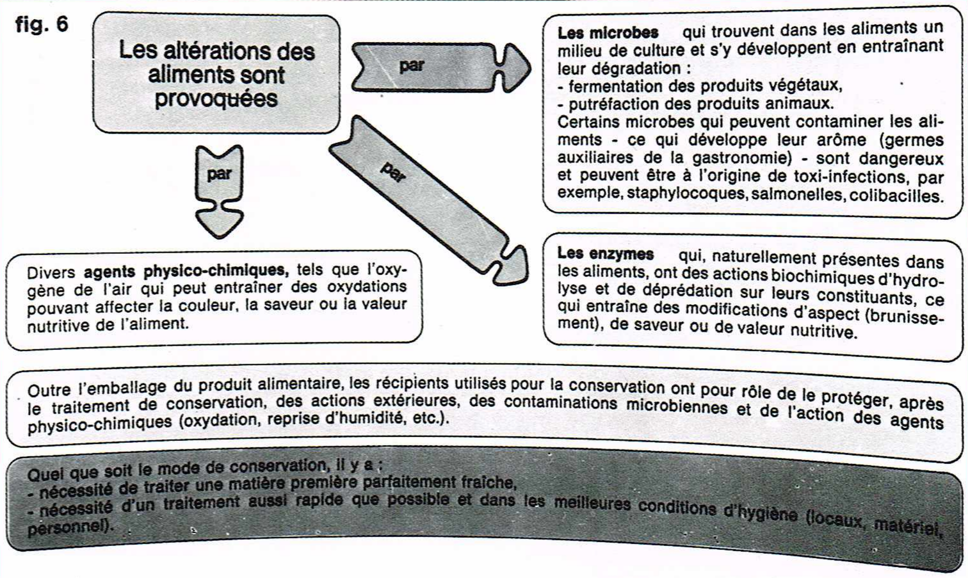

Les modifications apportées par la cuisson

fig. 7

Beaucoup d'aliments d'origine animale peuvent être digérés à l'état cru mais la cuisson accentue leur saveur et ramollit les fibres conjonctives.

Les aliments végétaux ne peuvent être consommés crus qu'en quantité limitée. La cuisson ramollit les gaines cellulosiques et rend l'amidon plus digeste. Certains principes nocifs des aliments sont éliminés par la cuisson.

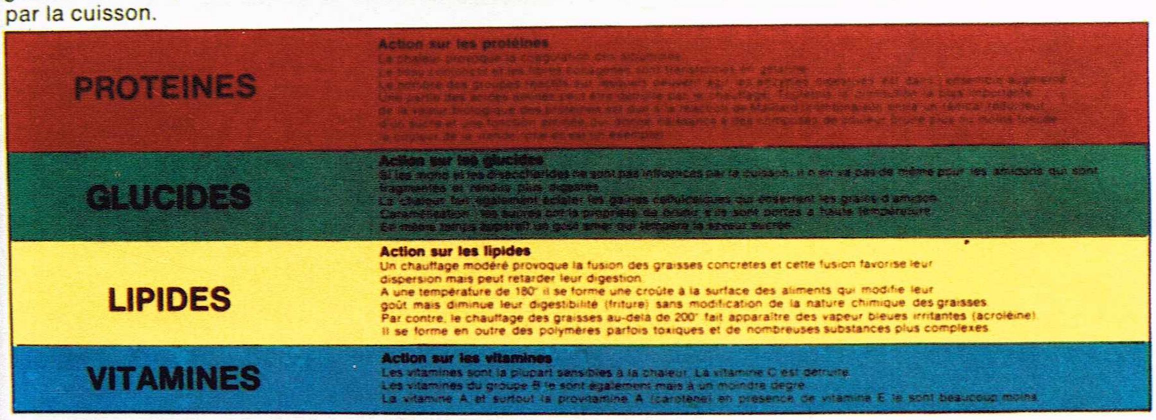

Six documents Palais de la Découverte - Paris

▲◀ Figure 2 : le devenir des aliments.
Figure 3 : les dépenses par travail musculaire.
Figure 4 : le besoin en eau.
Figure 5 : les acides aminés indispensables.
Figure 6 : la conservation des aliments.
Figure 7 : les modifications apportées par la cuisson.

L. Rousseau - Top

▲ *Les protéines d'origine animale présentent la plus grande valeur biologique. Le poisson, en particulier, apporte des acides aminés correspondant au besoin physiologique de l'homme.*

aminés doivent être présents simultanément en qualité et en quantité dans la ration alimentaire.

Sources de protéines

Les deux principales sources sont les animaux et les végétaux ; une troisième, bien qu'actuellement pondéralement très faible, commence à être prospectée : les micro-organismes.

Les *protéines d'origine animale* présentent la plus grande valeur biologique, c'est-à-dire qu'elles renferment les acides aminés essentiels dans les proportions qui sont plus ou moins proches de celles correspondant aux besoins physiologiques de l'homme. Ce sont également les plus chères. Ces protéines se trouvent dans la viande, le poisson, les œufs, le lait et ses dérivés. Ce groupe d'aliments couvre une très large part des besoins en protéines des Français.

Les *protéines d'origine végétale*, surtout celles provenant de céréales, qui servent de base à l'alimentation d'une grande partie de la population du monde, sont déficientes en certains acides aminés essentiels, en particulier la lysine. Ces protéines, bien qu'en constante diminution relative par rapport aux protéines animales, représentent encore une part importante des protéines totales de la ration de l'habitant des pays développés.

Les protéines végétales peuvent satisfaire les besoins en acides aminés essentiels à condition que la ration fasse appel à un nombre suffisant de sources, de façon que les différents acides aminés essentiels soient présents qualitativement et quantitativement.

D'autres sources de protéines végétales sont actuellement prospectées : protéines de feuilles, de tourteaux d'oléagineux (en particulier du soja), de champignons.

Enfin, les *protéines microbiennes* pourraient apporter quelques compléments aux disponibilités en protéines.

Rôle des protéines

Les protéines ont un rôle plastique, elles forment et renouvellent les différents tissus. Elles entrent dans la constitution des enzymes biocatalyseurs qui sont à la base de toutes réactions vitales. Elles interviennent dans les processus immunologiques.

Une bonne composition en acides aminés essentiels est une condition nécessaire mais non suffisante pour satisfaire les besoins en protéines d'un organisme. Il faut que ces acides aminés soient disponibles. Une ration équilibrée contient environ 12 % de protéines qui doivent pouvoir être transformées en acides aminés par les enzymes au cours de la digestion. C'est en effet sous cette forme d'acides aminés que les protéines traversent la barrière intestinale et sont utilisées par l'organisme.

La digestibilité est fonction :

— de l'origine des protéines (les animales sont plus digestibles que les végétales) et de leur état (les protéines chauffées et dénaturées sont digérées plus facilement) ;

— de la présence dans la ration de substances antinutritives, en particulier des substances antiprotéines génétiques qui inhibent les enzymes (notamment la trypsine) qui hydrolysent les protéines ;

— des variations individuelles dans l'équipement enzymatique ; certaines personnes ne peuvent hydrolyser jusqu'au stade acides aminés des protéines, par exemple celles de l'œuf ou du poisson. Cela a pour conséquence immédiate une mauvaise utilisation des protéines de la ration et quelquefois, si une partie de ces protéines est absorbée par la muqueuse intestinale, le déclenchement de manifestations allergiques plus ou moins graves, signe d'intolérance de l'organisme vis-à-vis de ces protéines qui se comportent alors comme de véritables antigènes ;

— au cours de la digestion normale, les protéines subissent une série d'actions enzymatiques dont les principales sont sous le contrôle de la pepsine et de la trypsine. La première intervient dans l'estomac en milieu acide en fragmentant les longues chaînes protidiques en tronçons plus courts, les polypeptides. Ceux-ci, au cours du tractus intestinal, seront en partie hydrolysés en acides aminés par la pepsine en milieu basique. L'action sera complétée par une autre enzyme, l'érepsine.

Après passage au travers de la barrière intestinale, les acides aminés servent pour une très large part à édifier ou à renouveler les protéines tissulaires par le processus inverse de l'hydrolyse observé au cours de la digestion. Le rendement de l'opération est d'autant meilleur que les acides aminés se retrouvent dans le plasma dans des proportions plus proches de celles observées pour les protéines tissulaires. Dans le cas contraire, une partie plus ou moins importante d'acides aminés pourra être métabolisée avec production d'énergie et formation de déchets azotés.

Petit - Fotogram

Valeur biologique des protéines

Elle est en relation avec la composition en acides aminés essentiels, et fonction de l'un ou de plusieurs d'entre eux qui s'y trouvent en quantités insuffisantes et qui deviennent de ce fait des facteurs limitants. La protéine de l'œuf est la protéine de référence. Elle ne contient aucun facteur limitant. Les protéines du lait et de légumineuses présentent respectivement une légère et une forte déficience en méthionine. Les protéines des céréales contiennent de faibles quantités relatives de lysine.

Ces défauts nutritionnels peuvent être corrigés soit par un mélange judicieux de différentes protéines se complétant réciproquement, soit en ajoutant à la protéine déficiente le ou les acides aminés (obtenus par synthèse) qui lui manquent. Cette intersupplémentation entre protéines ou la supplémentation par des acides aminés de synthèse s'effectue très couramment et très précisément dans l'industrie de l'alimentation animale pour l'établissement des formules d'aliments.

L'intersupplémentation est réalisée instinctivement par les animaux omnivores qui recherchent une alimentation diversifiée. Par exemple, les protéines des céréales dont le facteur limitant est la lysine sont très valorisées par des protéines de légumineuses, de viande (ou encore de levure ou d'algue, riches en lysine).

La diversification des aliments est en rapport avec le niveau de vie des populations. Les habitants des régions sous-développées ont très peu d'aliments à leur disposition. Le riz est l'aliment principal d'une grande partie des populations d'Asie. A l'opposé, les habitants des pays développés disposent d'une gamme importante d'aliments qui s'élargit considérablement au niveau des classes aisées de ces pays.

Comme l'intersupplémentation n'intervient que très peu ou pas du tout dans le cas d'une alimentation très peu ou non diversifiée, la qualité nutritionnelle des aliments doit être bonne.

◄ ***L'œuf est donné très tôt en nourriture aux enfants. La protéine de l'œuf est la protéine de référence.***

▼ ***Les habitants des pays sous-développés ont une nourriture très peu diversifiée ; le riz est l'aliment principal en Asie (à gauche) ; à l'opposé, les habitants des pays développés disposent d'une gamme importante d'aliments (à droite).***

E. Boubat - Top

Magnum

▶ *Culture de soja; cette légumineuse est cultivée surtout en Chine, en Asie orientale et aux États-Unis.*

Marka

▶ *Page ci-contre, les céréales fournissent 50 % des protéines consommées dans le monde. Dans les pays développés, leur culture est mécanisée à l'extrême et vise à de hauts rendements.*

Pour la FAO, les protéines constituent le nœud du problème alimentaire mondial, mais l'importance de cette question ne doit pas faire oublier le rôle fondamental joué dans les cas de malnutrition par d'autres nutriments comme les vitamines ou les sels minéraux, quelquefois négligés.

En comptant en moyenne 55 g de protéines par habitant et par jour, il faut, pour nourrir la population du globe, 60 millions de tonnes de protéines par an. La production est de 70 millions de tonnes environ. Les pertes par gaspillage sont importantes, mais c'est surtout le déséquilibre nutritionnel entre les pays riches (surconsommation) et les pays pauvres qui crée le problème préoccupant de la malnutrition. Le problème est aggravé par le fait que les pays nantis sont séparés des pays déficitaires, géographiquement certes, mais également de bien d'autres façons.

▼ *Culture expérimentale du maïs.*

D. Czap - Top

A cet aspect quantitatif s'ajoute le problème qualitatif. La relativement faible quantité de protéines dont disposent les pays en voie de développement est constituée de protéines à faible valeur biologique, généralement carencées en lysine. Comme il n'est pas question de répartir équitablement les protéines disponibles, il faut trouver de nouvelles sources pour résoudre le problème de la malnutrition dans le monde. Plusieurs solutions peuvent être envisagées :

— améliorer les rendements des céréales qui fournissent 50 % des protéines consommées dans le monde, 37 % dans les pays développés, 57 % dans les pays en voie de développement;

— sélectionner des variétés à hautes teneurs en protéines comme le maïs mutant opaque 2 qui est également riche en lysine;

— obtenir des protéines à partir de soja, de fourrages, d'algues, de micro-organismes (levures, champignons, bactéries).

Consommation et productions nouvelles

★ Les *protéines animales* (viandes, œufs, poissons, lait) représentent environ le tiers des protéines consommées dans le monde (16 % dans les pays les plus défavorisés, 70 % aux États-Unis, 50 % en Europe avec l'URSS, 2/3 en France).

Leur prix est élevé, 1 hectare produit par an : 100 kg de protéines de bœuf, 500 kg de protéines de blé, 3 000 kg de protéines de fourrage si celui-ci est cultivé, 1 500 kg s'il s'agit de prairies naturelles. Dans le cas de certaines algues, on peut atteindre 30 000 kg de protéines.

Le tiers de la production d'aliments est utilisé pour l'élevage de bétail (viandes, lait). Le rendement de conversion est faible. Pour qu'il produise 1 kg de protéines animales, il faut donner à un bœuf 7 kg de protéines végétales.

★ On peut utiliser directement certaines *protéines végétales* (oléagineux, luzerne) de composition proche de celle des protéines animales.

Le tourteau de soja dégraissé contient environ 50 % de protéines. Le prix de revient de ces protéines représente 3 % du prix de revient de la viande de bœuf. Le tourteau de soja, qui a été longtemps un sous-produit de l'extraction de l'huile de soja, est maintenant devenu

un produit noble. Les *protéines de soja* sont déjà largement utilisées dans les industries alimentaires en panification, dans la fabrication de produits d'imitation du lait (en Californie, notamment, le lait de soja représente le 1/5 du lait consommé; Nestlé tente de produire un lait purement végétal dans le Sud-Est asiatique; les sachets de lait en poudre qui accompagnent les repas d'avions sont souvent constitués de produits végétaux), en remplacement des protéines de viande en charcuterie. Ces protéines peuvent être texturées, puis additionnées de matières grasses, d'arômes, de vitamines, et supplémentées en acides aminés, et imiter de ce fait la viande. Il existe aux États-Unis toute une série de viandes végétales.

De 1959 à 1974, la consommation en France de protéines végétales a diminué de 30 % pour les céréales, de 21 % pour les pommes de terre. Pendant la même période, la consommation de protéines animales a augmenté de 30 % pour la viande, et 70 % pour les produits laitiers (fromages).

La consommation globale de viande aux États-Unis a triplé ces vingt dernières années. Les éléments rationnels comme la prise de conscience nutritionnelle semblent entrer pour une faible part dans l'explication de cet accroissement de la consommation. L'élévation du niveau de vie dans ce domaine, au lieu de développer le culturel, ne permet, semble-t-il, que de mieux satisfaire l'instinct.

La viande conserve dans nos sociétés modernes le symbolisme qu'elle avait dans les peuplades primitives. Il est évident que, même si elles sont enfouies dans le subconscient, les images de puissance animale liées à la viande motivent la consommation de plus en plus importante de celle-ci. Plus le niveau de vie augmente, plus l'individu s'éloigne de la nature. Le micro-environnement sécurisant qu'il a su créer autour de lui l'a rendu progressivement vulnérable dans le milieu naturel en diminuant sa force physique et ses capacités instinctuelles. Conscient de cette faiblesse biologique, il recherche des compensations en consommant des aliments symboles de la puissance animale.

L'homme des peuplades primitives, en mangeant tel ou tel organe de son ennemi, pense ainsi lui prendre sa force, son intelligence ou son habileté. La viande rouge garde encore dans nos sociétés une puissance symbolique très grande, surtout si elle est saignante. On pense qu'un anémique va retrouver sa vigueur en la consommant, qu'elle va lui redonner « du sang ». Il est intéressant de noter par exemple quelles différences symboliques considérables présentent les viandes blanches et les viandes rouges.

Des considérations économiques tendent à s'opposer à cet accroissement constant de la consommation de viande.

En France, pour produire le demi-million de tonnes de protéines animales consommées (qui représente les deux tiers des protéines totales), il faut utiliser plus de 8 millions de tonnes de protéines végétales, parmi lesquelles un demi-million de tonnes de *protéines de soja importées*.

Il est tentant, sur un plan purement rationnel, de « court-circuiter » l'animal en fabriquant des protéines semblables en partant directement des protéines végétales. Dans cette tentative, deux types de problèmes sont rencontrés : l'imitation nutritionnelle et l'imitation organoleptique de la viande. Le premier peut être résolu facilement. La composition en acides aminés du soja est proche de celle de la viande et peut facilement être ajustée grâce à l'utilisation judicieuse d'acides aminés, éventuellement d'oligo-éléments. Le deuxième est plus complexe. Il comprendra l'aromatisation et la texture.

En fait, sur le plan de la composition chimique, il est relativement facile de reproduire un aliment proche de la viande en ajoutant aux protéines végétales équilibrées de la graisse, des glucides, des vitamines, et également un arôme ou des précurseurs d'arômes qui développeront, au cours de la cuisson, l'arôme-viande choisi (d'excellents arômes-viande sont maintenant fabriqués, en utilisant généralement la réaction de Maillard). Ces produits imitant la viande peuvent intervenir dans différents produits de charcuterie et dans des plats cuisinés.

La texture, facteur essentiel d'une bonne acceptabilité des AVIV (aliments végétaux imitant la viande), peut être obtenue grâce à deux techniques : l'extrusion et le

Marka

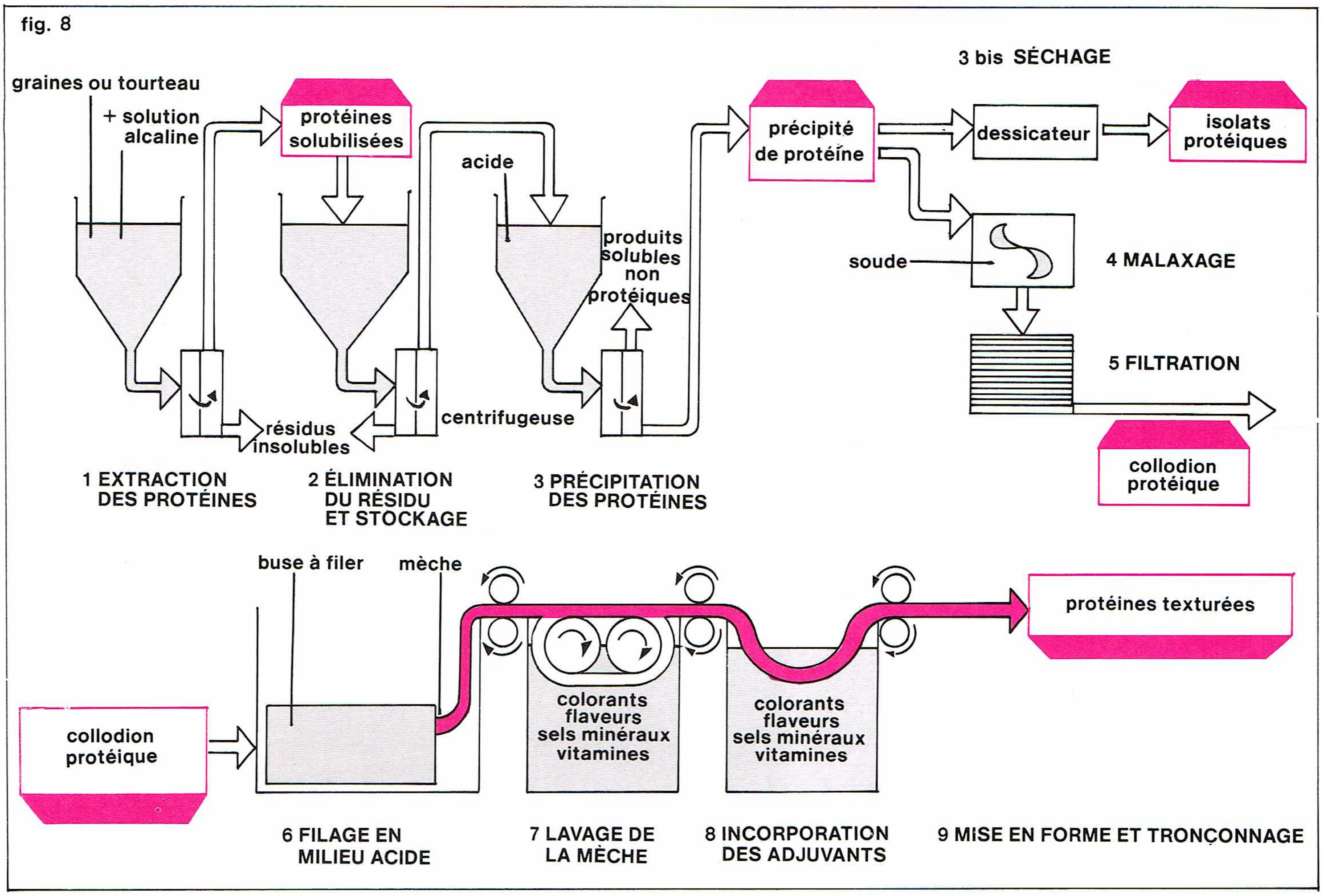

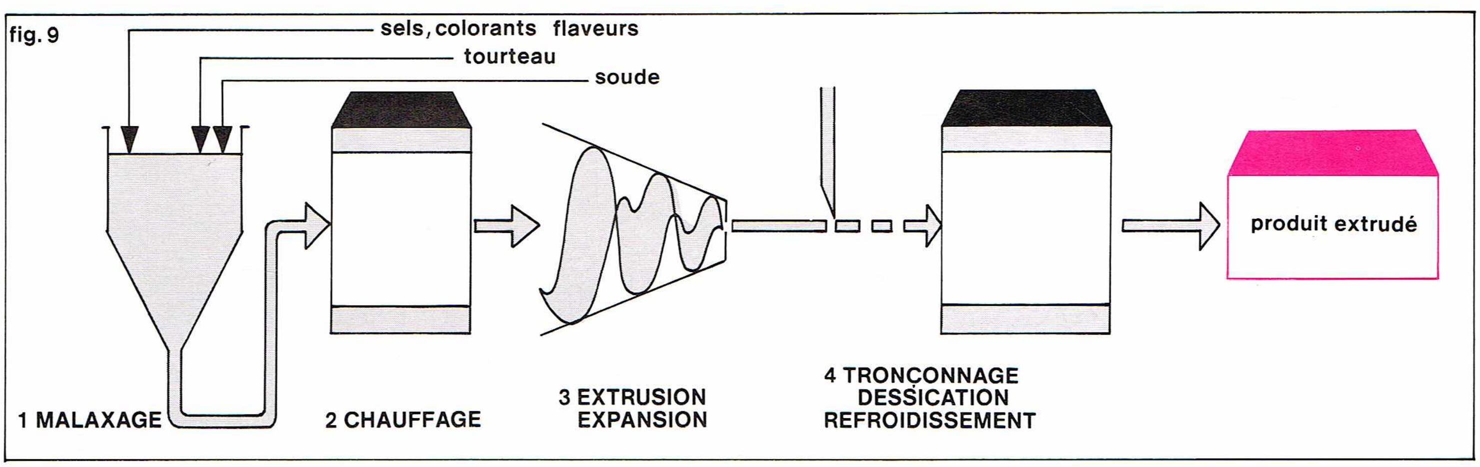

▲ *Figure 8: extraction sélective, filage et texturation de protéines végétales. Figure 9 : thermo-extrusion de tourteaux riches en protéines.*

filage. Ces techniques essaient de reproduire la structure fibrillaire de la viande.

● Il y a deux générations de *produits extrudés*. La première s'obtient à partir de tourteaux d'oléagineux renfermant environ 50 % de protéines. Le tourteau subit un traitement alcalin ; il est aromatisé et coloré, puis extrudé à 150 °C. Dans la deuxième génération de produits extrudés, la texture se rapproche de celle que l'on obtient par filage.

La masse constituée de farine de tourteau d'oléagineux, turbo-séparée et renfermant environ 60 % de protéines et d'eau, est portée à 250 °C et soumise à des actions mécaniques très énergiques, puis extrudée au travers de filières de très petits diamètres. Au cours de l'expansion des fibres, une partie de l'eau est vaporisée ; on peut obtenir un produit final ayant une humidité de l'ordre de 7 %. Le but des actions mécaniques obtenues grâce au choix judicieux des profils de vis est de détruire les structures quaternaires et tertiaires des protéines globulaires afin de les « dérouler ». La pression et les contraintes mécaniques imposées au moment du passage dans la filière orientent les molécules parallèlement et favorisent ainsi la formation de liaisons intermoléculaires (liaisons hydrogène, ponts disulfure) qui stabilisent, avec la dénaturation entraînée par le choc thermique, la texture fibrillaire obtenue. Le produit ainsi formé a une capacité de réhydratation qui peut aller jusqu'à 4 fois le poids de matières sèches.

● L'obtention de protéines texturées par *filage* est plus complexe. Elle nécessite tout d'abord de partir de protéines purifiées. Cette purification comprend une dissolution des protéines en milieu alcalin, une séparation de ces protéines par filtration ou centrifugation, enfin une précipitation en milieu acide. Elle est donc relati-

vement complexe, mais, en contrepartie, elle présente l'avantage de pouvoir utiliser pratiquement toutes les sources de protéines, et en particulier les fourrages ou les feuilles.

Pour le filage, on forme en milieu alcalin une pâte, qui passe sous pression à travers des bacs immergés dans un milieu acide où les protéines coagulent. Les fibres obtenues, de quelques micromètres de diamètre, sont lavées, puis organisées en faisceaux réunis entre eux par des liants contenant lipides, glucides, sels minéraux, arômes.

Les produits filés reviennent plus cher que les produits extrudés, mais leur structure est plus proche de celle de la viande, et leur composition peut être parfaitement définie et maîtrisée. Ces produits peuvent être congelés, et leur conservation ne présente pas de problèmes sur le plan microbiologique. Ils peuvent être utilisés tels quels ou en mélange avec d'autres viandes, et en particulier des viandes de qualités inférieures auxquelles ils redonnent la texture qui leur manque.

★ Les productions végétales et animales fournissent actuellement la totalité des protéines consommées dans le monde. Mais une nouvelle source de protéines commence à être exploitée ; les *micro-organismes*. Après la culture des végétaux et l'élevage des animaux, la culture des levures, champignons, algues et bactéries pourrait contribuer à apporter une solution au problème des besoins mondiaux en protéines.

Les micro-organismes renferment entre 40 à 70 % de protéines (pourcentages exprimés par rapport à la matière sèche) riches en lysine. Leur croissance est très rapide : les bactéries doublent leur masse toutes les trente secondes, les levures toutes les deux heures et les champignons toutes les cinq à six heures. Lorsque le bœuf produit 1 kg de protéines, dans le même temps le soja en produit 10, les levures 10^5, et les bactéries 10^{11}. Ces micro-organismes poussent sur des supports hydrocarbonés très variés : paraffines du pétrole, lactosérum de fromageries, mélasses de sucreries, déchets végétaux, eaux usées et également méthanol et éthanol.

Contrairement à la culture des végétaux et, à un degré moindre, à l'élevage des animaux, les paramètres de la production de micro-organismes peuvent être parfaitement maîtrisés. En particulier, les fantaisies climatiques qui ont une si grande importance en agriculture n'ont aucune influence sur le développement des micro-organismes qui s'effectue dans des conditions parfaitement contrôlées à la manière des productions industrielles. Les rendements sont élevés et parfaitement prévisibles. La place nécessaire est également beaucoup plus réduite que ne l'exigent les productions végétales et animales.

Cette culture est actuellement faite principalement pour obtenir des aliments pour bétail à partir de sous-produits hydrocarbonés de l'industrie alimentaire ou de l'agriculture. Dans ce cas, le développement des micro-organismes est arrêté lorsque la *biomasse* (les micro-organismes eux-mêmes) est telle que l'ensemble support hydrocarboné-micro-organismes représente un aliment équilibré en protéines.

Des travaux de laboratoire entrepris dès 1957 par la Société BP ont permis la production d'environ 20 000 t de levures sur paraffine de pétrole dès 1963. Mais l'augmentation du prix du pétrole a fait brusquement perdre de l'intérêt à ce substrat.

On pourrait utiliser les protéines de micro-organismes, dont l'emploi est actuellement limité à l'alimentation animale, en petites quantités dans l'alimentation humaine, après les avoir débarrassées des acides nucléiques qu'elles contiennent en quantités importantes. En effet, ceux-ci se métabolisent en acide urique, qui peut provoquer de nombreux troubles (lithiases, goutte...). La Société Nestlé, en particulier, s'efforce de mettre au point des protéines de micro-organismes destinées à l'alimentation humaine.

De nombreuses barrières sont à franchir (psychologiques, toxicologiques, réglementaires...) avant que l'utilisation de ces protéines entre dans le domaine des réalités. Les protéines peuvent être texturées, suivant les techniques décrites plus haut, et c'est ainsi que l'on obtient le steak de pétrole, pour lequel les journalistes, en leur temps, ont fait une large publicité.

Certains champignons présentent un avantage particulier sur les levures dans la mesure où ils hydrolysent la cellulose, permettant ainsi d'élargir considérablement les possibilités d'utilisation des supports hydrocarbonés. A ce point de vue, les cultures mixtes sont très intéressantes ; les substrats cellulosiques sont, dans un premier temps, transformés par les champignons en glucose qui servira d'aliment aux levures qui pourront se développer dans un deuxième temps.

Les algues mono- ou pluricellulaires ont un rendement photosynthétique élevé. Des usines pilotes ont permis d'obtenir une production en matières sèches de l'ordre de 50 tonnes par an et par hectare.

Il est difficile de prévoir quels développements seront donnés à ces nouvelles productions de protéines. On peut voir là une solution au problème de la faim dans le monde, et plus particulièrement de l'insuffisance qualitative de l'apport protéique.

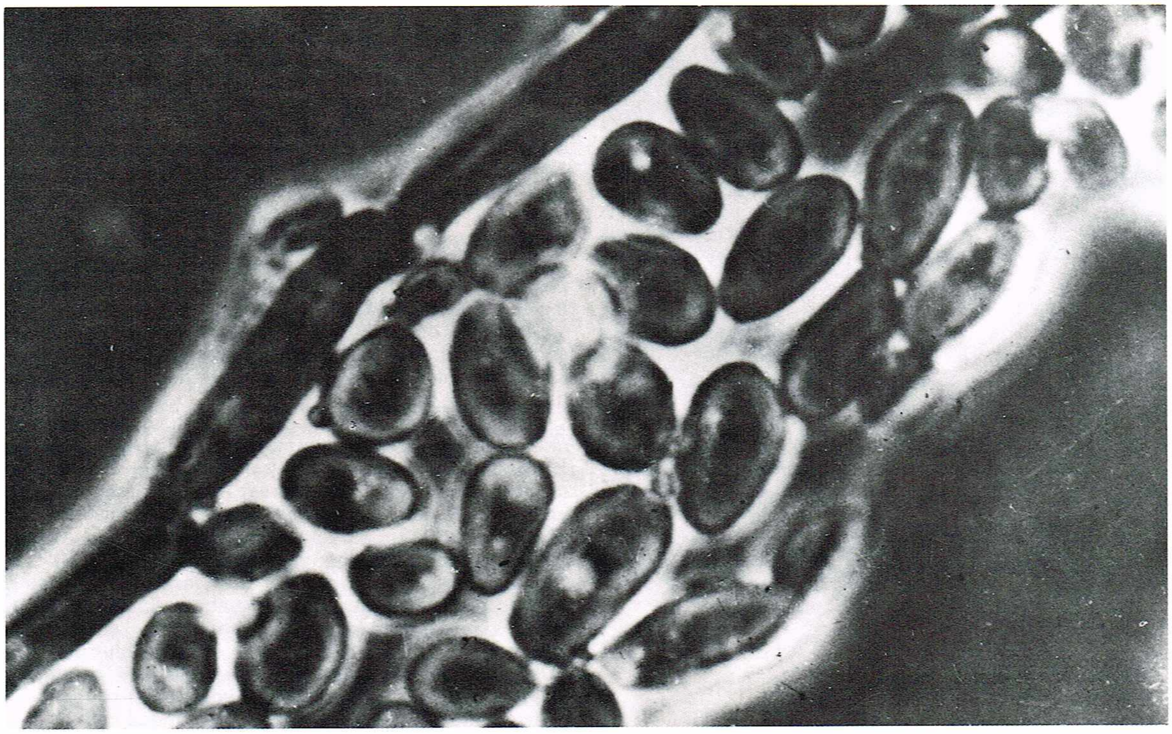

◀ *Cultures de levure photographiées au microscope.*

Burlot - Cedus

▲ *Le sucre peut prendre bien des aspects différents (voir page 207).*

▼ *Les pommes de terre contiennent de l'amidon, forme glucidique assimilable la plus importante.*

J.-Loup Martin - Fenouillet - Fotogram

Ces voies nécessitent un niveau technologique élevé, ce qui les limite, paradoxalement, aux pays occidentaux qui les destinent principalement à la valorisation de leurs déchets.

★ Une autre source de protéines de bonne valeur biologique pourrait être développée, c'est la *pisciculture*. Le poisson est intéressant : son squelette est relativement faible ; c'est un animal à sang froid, qui ne fait donc pas de dépense énergétique pour la thermorégulation. Le taux de conversion des protéines alimentaires est élevé (4 fois supérieur à celui du bétail). Enfin, le poisson présente une forte reproduction.

Les glucides

Les glucides sont des molécules de tailles variées dont les maillons sont des polyalcools possédant une fonction aldéhyde ou cétone.

Leurs propriétés sont fonction du nombre de maillons qui les composent. S'ils en possèdent un, deux ou trois, ils sont solubles dans l'eau, cristallisent et présentent une saveur sucrée ; c'est le cas du glucose, du fructose, du galactose (un maillon), du sucre que nous consommons, le saccharose, le lactose (deux maillons). C'est à ces glucides que l'on réserve plus particulièrement le terme de sucres. Les molécules qui possèdent plusieurs maillons peuvent les libérer sous l'influence de certaines enzymes ou sous l'action des acides. Ainsi, le saccharose peut libérer le glucose et le fructose qui le composent et donner ainsi le *sucre inverti*.

Si le nombre de maillons est important, le pouvoir édulcorant disparaît, les molécules deviennent incristallisables et donnent des gels dans l'eau. C'est le cas, par exemple, de l'amidon qui peut renfermer plusieurs centaines de maillons de glucose. L'amidon est très représenté dans le règne végétal (céréales, pommes de terre). C'est la forme glucidique assimilable la plus importante. Par hydrolyse totale, il libère les molécules de glucose qui le composent. Industriellement, il est hydrolysé partiellement de façon à obtenir toute une série (selon le degré d'hydrolyse) de « sirops de glucose » constitués d'un mélange de glucose, de maltose, de maltotriose, de dextrines, dans des proportions variables, c'est-à-dire d'un mélange de glucose et de divers polymères (composés contenant plusieurs maillons de ce sucre simple). Les sirops de glucose sont très largement utilisés en industrie alimentaire : biscuiterie, pâtisseries, boissons, crèmes glacées, confitures, fruits au sirop, sauces. Ils interviennent soit comme anticristallisants, soit pour modifier la HRE (humidité relative d'équilibre), la viscosité, la pression osmotique.

Le pouvoir sucrant de ces sirops de glucose varie avec leur composition, mais il est toujours bien inférieur à celui du sucre. Récemment, il a été augmenté grâce à la transformation d'une partie du glucose en fructose, dont le pouvoir sucrant est élevé. Le nouveau produit obtenu, l' « isomérose » ou HFCS (high fructose corn syrup), pourrait entrer en concurrence avec le sucre, du moins dans une partie des applications de celui-ci. Mais à ce niveau interviennent pour une part prépondérante les problèmes économiques et politiques. Contrairement à ce qu'a écrit Roderik Panter (*Avenir 2000,* nº 40), il ne s'agit pas de « la découverte la plus intéressante dans le domaine des édulcorants, probablement plus prometteuse que la saccharine ou que les cyclamates ». En effet, l'isomérose n'est pas comparable aux édulcorants de synthèse comme la saccharine et les cyclamates dont le but est de donner un goût sucré sans apport de calories. L'apport calorique du HFCS est identique à celui du sucre.

Les sucres simples sont directement assimilables, leur rôle physiologique est principalement énergétique. Ils fournissent à l'organisme une part importante des calories qui lui sont nécessaires ; ils interviennent également dans la constitution des molécules complexes, c'est le cas du ribose qui participe à la constitution des ADN et ARN (acides désoxyribonucléique et ribonucléique).

Les autres glucides comme l'amidon subissent, sous l'action d'enzymes, au cours du tractus digestif, diverses séries d'hydrolyses qui les ramènent à l'état d'oses simples. C'est sous cette forme que les glucides traversent la barrière intestinale. Des glucides comme la cellulose qui ne peuvent pas être hydrolysés au cours de la digestion sont « évacués » sans aucune modification.

Un groupe de glucides très important en technologie alimentaire est constitué par les épaississants-gélifiants comme la pectine des fruits, les gommes et les alginates qui sont tous de grosses molécules capables de donner des gels.

Les besoins en glucides de l'organisme sont essentiellement quantitatifs; il n'y a pas de glucides essentiels. Les calories apportées par les glucides doivent représenter environ 50 % des calories totales. Les besoins en glucides sont la plupart du temps totalement couverts, ce qui fait que ce groupe de nutriments ne pose pas de problèmes nutritionnels.

Les lipides

Les lipides sont constitués pour leur majeure partie de triglycérides qui sont des esters de glycérol (ou glycérine qui est un trialcool) avec les acides gras. Les triglycérides se différencient les uns des autres essentiellement par la nature des acides gras (longueur de la chaîne hydrocarbonée, insaturation) et la position de ceux-ci dans la molécule de glycéride.

Les corps gras naturels contiennent également en petite quantité des phospholipides comme les lécithines et diverses substances liposolubles en petite quantité : vitamines, stérols, terpènes, hydrocarbures.

Les triglycérides, sous l'influence d'enzymes (lipases), peuvent être hydrolysés partiellement ou totalement. On peut obtenir ainsi les acides gras libres, les mono- et les diglycérides. Les transformations sont effectuées au cours du tractus digestif, les matières traversant la barrière intestinale sous forme d'acides gras et de monoglycérides.

Besoins en lipides

Les graisses doivent fournir au maximum le tiers des calories de la ration alimentaire. La proportion de matières grasses dans cette ration est en relation directe avec le niveau de vie des individus. Si la consommation anormalement élevée de matières grasses observée dans nos sociétés pléthoriques (plus de 40 % des calories de la ration sont apportés par les matières grasses dans la ration des Américains) présente des inconvénients pour la santé, il en est de même pour les régimes carencés en graisses. En dehors de leur rôle dans la saveur des aliments et de l'effet de satiété qu'elles procurent, du fait qu'elles séjournent dans l'estomac plus longuement que les autres nutriments, les matières grasses apportent de l'énergie sous forme concentrée (1 g de graisse fournit 9 calories, alors que les glucides et les protides n'en fournissent que 4) et surtout donnent à l'organisme l'acide gras qu'il ne peut synthétiser, c'est-à-dire l'acide linoléique. 2 % des calories totales de la diète de l'homme adulte doivent provenir de cet acide gras essentiel, soit 6 g pour un régime de 2 700 calories.

Les lipides jouent un rôle très important dans l'élaboration du cerveau et du système nerveux central. Ils ont une action biologique indirecte par l'intermédiaire des vitamines liposolubles qu'ils véhiculent (A, D, E, K).

Vitamines et sels minéraux

● Les **vitamines** sont des nutriments indispensables qui se trouvent dans les aliments en petite quantité. Elles jouent le rôle de biocatalyseurs.

On distingue le groupe des vitamines liposolubles (A, D) apportées par les graisses, et les vitamines hydrosolubles comme la vitamine C qui se trouve plus particulièrement dans les fruits et légumes.

● Les **minéraux** peuvent intervenir en quantité importante, comme le calcium pour la constitution du squelette, ou à très faible dose (oligo-éléments).

Autres composés

● L'**eau** joue un rôle important en biologie. Quelques propriétés particulières de l'eau seront développées dans le chapitre *Conservation des aliments*.

● Les **composés non assimilables** peuvent être apparemment sans intérêt biologique, telle la cellulose pour l'homme. Cette notion est relative : la cellulose est source de nutriment pour les ruminants. Chez l'homme, les fibres cellulosiques jouent un rôle important dans le transit intestinal. Actuellement, les nutritionnistes attirent l'attention sur tous les inconvénients que présente pour la santé une alimentation contenant très peu de fibres cellulosiques, comme notre alimentation moderne.

Des régimes diététiques enrichis en cellulose, allant du pain complet au son de blé à mélanger avec la confiture ou le yaourt, sont proposés aux consommateurs.

● Les **composés à finalité organoleptique.** Cet important groupe de substances fait l'objet d'un chapitre spécial *(Les additifs organoleptiques)*.

● Les **composés à action physiologique.** Ils sont représentés par différents groupes de corps qui agissent sur certaines fonctions physiologiques : les alcaloïdes comme la caféine, que l'on trouve dans le café et le thé, la théobromine, que l'on trouve dans le cacao, en fournissent de bons exemples.

● Les **enzymes.** Ce sont des catalyseurs biochimiques qui permettent le déroulement de nombreuses réactions, souhaitées ou non (voir chapitre *Enzymes immobilisées*).

● Les **substances antinutritives** et les **substances toxiques.** Elles sont responsables des *nuisances alimentaires naturelles,* qui peuvent être d'origine endogène ou exogène. Les premières sont dues à la présence de substances toxiques ou simplement antinutritives se trouvant naturellement dans l'aliment. Les composés toxiques, comme ceux contenus dans les champignons vénéneux ou les amandes amères (acide cyanhydrique), sont bien connus.

En revanche, l'existence de substances antinutritives est souvent ignorée. Ce sont des composés aux natures chimiques et aux mécanismes d'action fort différents. En fait, leur seul point commun est l'effet négatif qu'elles exercent sur l'état de nutrition. On distingue :

— les *substances anti-protéino-génétiques* qui dépriment l'utilisation, la digestion ou le métabolisme des protéines; c'est le cas notamment de l'antitryptase du blanc d'œuf; gober un œuf est donc une mauvaise pratique sur le plan nutritionnel; cette antitryptase est détruite à la chaleur;

— les *substances antiminéralisantes* comme l'acide phytique ou l'acide oxalique qui insolubilisent le calcium (substances anticalcifiantes);

— enfin les *substances qui inactivent les vitamines* comme l'ascorbase du chou qui provoque l'oxydation de l'acide ascorbique ou vitamine C.

Il est évident que la présence de substances antinutritives, et plus encore de substances toxiques, fait perdre à l'aliment sa finalité, qui est de maintenir la vie de l'organisme. Mais il est important de considérer que l'aliment peut être une source potentielle de nutriments. A la limite, on peut en effet imaginer qu'un produit

◄ *Page ci-contre, en haut,*
1, pain de sucre; 2, fondant; 3, sucre candi brun et blanc; 4, sucre en grains; 5, cassonade; 6, sucre liquide; 7, sucre Adant (sucre de luxe); 8, sucre glace; 9 et 10, vergeoise brune et blonde; 11, sucre semoule ou sucre en poudre; 12, sucre cristallisé blanc; 13, sucre en morceaux.

▼ ***Les vitamines sont des nutriments indispensables. La vitamine C se trouve plus particulièrement dans les fruits.***

Top

▶ *Pulvérisation de produits désherbants avant l'apparition du produit cultivé. Leur présence dans les aliments sera considérée comme nuisible.*

M. Pedone

naturel qui entraîne la mort lorsqu'on le consomme puisse devenir une excellente source de nutriments, une fois débarrassé des substances toxiques qu'il contient. Il y a de nombreux exemples de produits valorisés sur le plan biologique par les traitements technologiques qui détruisent les substances toxiques ou antinutritives.

Les nuisances naturelles d'origine exogène sont dues à des substances toxiques provenant de l'activité biologique de certains micro-organismes se développant sur les matières premières alimentaires ; dans ce groupe, il faut noter l'importance prise, ces dernières décennies, par les mycotoxines, et plus particulièrement les aflatoxines sécrétées par une moisissure, l'*Aspergillus flavus*, qui se développe sur les matières premières humides.

Classification des aliments

Plusieurs systèmes ont été proposés en fonction :

— de l'origine (aliments d'origine minérale, végétale ou animale) ;

— de la composition en nutriments, aliments lipidiques (beurre), protéiques (viande), glucidiques (pomme de terre) ;

— de la finalité biologique (aliments énergétiques, plastiques, catalytiques) ;

— de critères diététiques (groupes d'aliments). Ce sont les groupes I : viandes, poissons ; II : lait, fromages ; III : corps gras ; IV : pain, céréales ; V et VI : légumes et fruits crus et cuits ;

— des traitements appliqués : « aliments naturels » ou « aliments industriels ».

Les traitements technologiques valorisent les aliments naturels tant sur le plan économique que sur le plan biologique en éliminant les déchets, les substances toxiques ou antinutritives. Ces traitements augmentent l'attrait, la valeur biologique et la conservation des aliments, mais introduisent des substances chimiques étrangères aux aliments, dont certaines ne sont pas sans risques pour la santé et sont de ce fait à l'origine des nuisances alimentaires dites chimiques.

Le consommateur moyen retient surtout ce type de nuisance en oubliant trop vite que la nature n'est pas toujours animée des meilleures intentions envers lui. Les sources naturelles de nutriment peuvent présenter de réels dangers pour l'homme. Les substances étrangères aux aliments que l'on trouve dans ceux-ci sont toutes, par définition, d'origine exogène et artificielle. Elles sont généralement présentes dans l'aliment en très faible quantité, le plus souvent à l'état de traces.

Elles se répartissent en plusieurs groupes :

— Les substances utilisées au cours du développement, des traitements, du stockage et de la conservation des produits végétaux et animaux destinés à être consommés directement ou après transformation. Certaines de ces substances comme les pesticides, les antibiotiques, les hormones peuvent se retrouver dans les produits alimentaires destinés à la consommation.

— Les substances ajoutées au cours de la fabrication des aliments. Ce sont les additifs proprement dits : tensio-actifs, colorants, arômes, etc. Ces composés permettent de faciliter la fabrication et d'améliorer la conservation des aliments. Ils peuvent préserver la valeur nutritive de ceux-ci et en augmenter l'attrait. Mais leur action sur la santé est discutable. Le nombre des substances utilisées comme additifs augmente chaque année, et leur connaissance approfondie dans le contexte technologique et toxicologique devient de plus en plus nécessaire.

— Les substances qui se forment pendant les processus des technologies alimentaires et la conservation des matières premières et des produits finis : produits de pyrolyse, produits d'oxydation, etc. Dans cette catégorie, on rencontre des substances dont l'effet néfaste sur la santé est reconnu depuis longtemps. Certaines d'entre elles sont cancérigènes.

— Les substances provenant de l'environnement immédiat de l'aliment. Elles peuvent avoir pour origine la pollution générale de l'atmosphère et de l'eau. C'est le cas du méthylmercure contaminant les poissons à Minamata au Japon, du plomb tétraéthyle dans l'atmosphère, dû à la combustion des carburants, du PCB (polychlorobiphényl), et même des éléments radioactifs. Elles peuvent également provenir des matériaux de l'emballage qui constituent l'environnement le plus immédiat de l'aliment. Des monomères des emballages en plastique, en particulier le chlorure de vinyle, peuvent diffuser dans l'aliment et le contaminer.

— Enfin, les produits de réaction des substances étrangères aux aliments entre elles ou avec les constituants de ceux-ci : formation d'épichlorhydrine par réaction de l'oxyde d'éthylène utilisé comme fumigant sur les chlorures contenus dans les produits traités.

Cela fait un nombre considérable de composés qui peuvent être divisés en deux grandes catégories : les substances ajoutées volontairement et les substances

▶ *Page ci-contre, figure 10.*

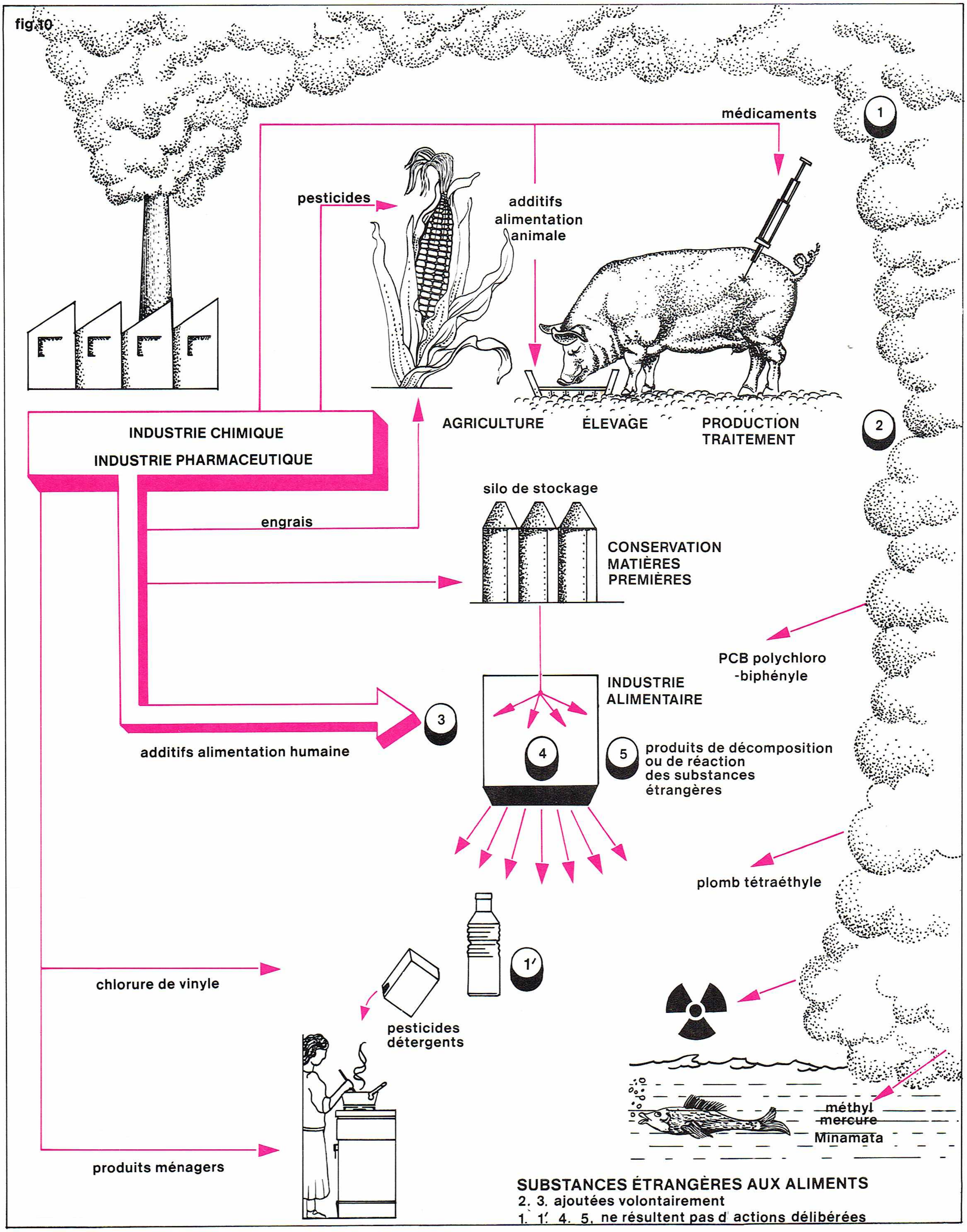

fig.10

SUBSTANCES ÉTRANGÈRES AUX ALIMENTS
2. 3. ajoutées volontairement
1. 1′. 4. 5. ne résultent pas d' actions délibérées

fig. 11

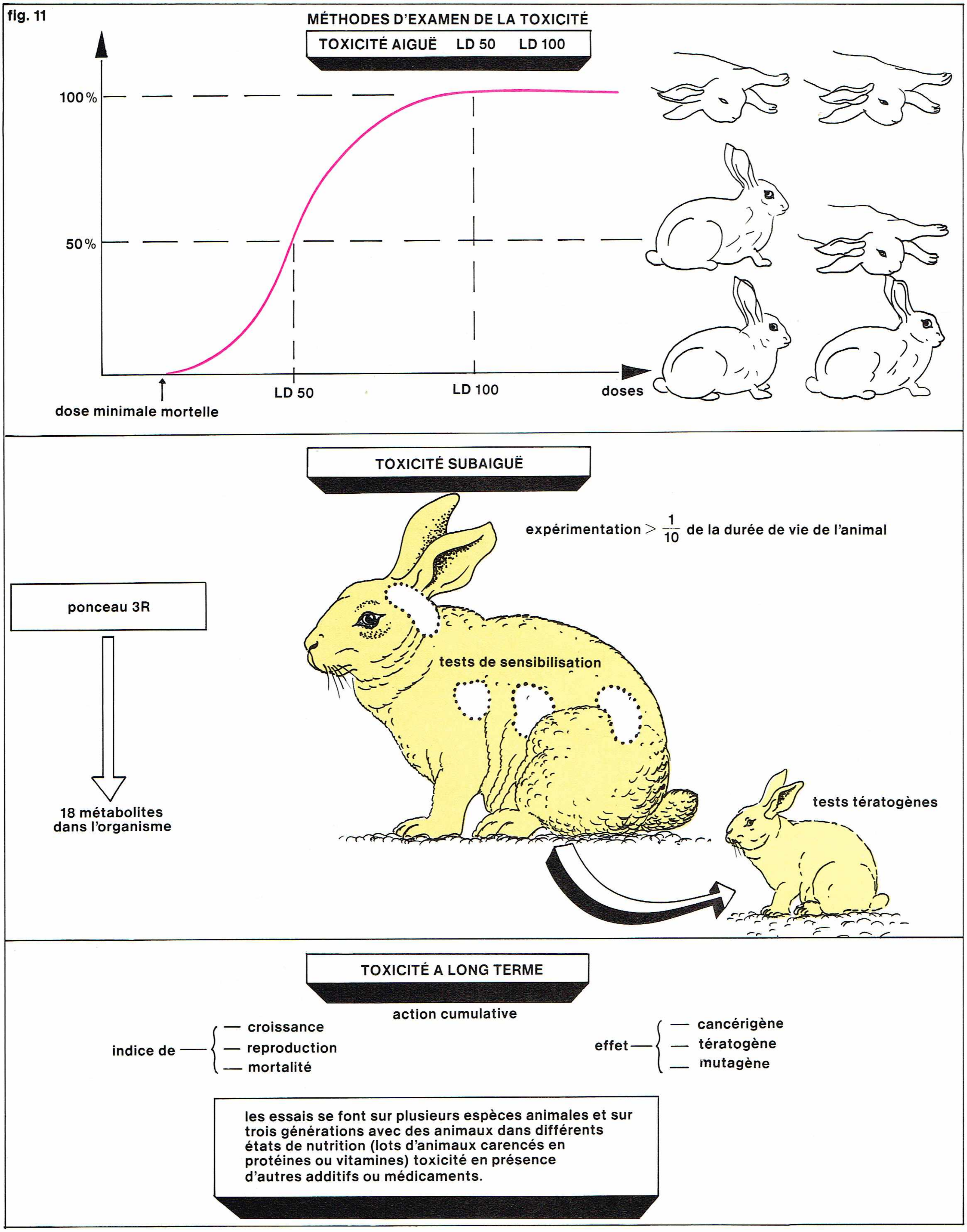
MÉTHODES D'EXAMEN DE LA TOXICITÉ
TOXICITÉ AIGUË LD 50 LD 100
100 %
50 %
dose minimale mortelle
LD 50
LD 100
doses
TOXICITÉ SUBAIGUË
expérimentation > 1/10 de la durée de vie de l'animal
ponceau 3R
18 métabolites dans l'organisme
tests de sensibilisation
tests tératogènes
TOXICITÉ A LONG TERME
action cumulative
indice de — croissance — reproduction — mortalité
effet — cancérigène — tératogène — mutagène
les essais se font sur plusieurs espèces animales et sur trois générations avec des animaux dans différents états de nutrition (lots d'animaux carencés en protéines ou vitamines) toxicité en présence d'autres additifs ou médicaments.

dont la présence dans les aliments ne résulte pas d'une action délibérée.

Substances ajoutées volontairement

Cette première catégorie est la mieux définie et la mieux réglementée. Elle est représentée d'une part par les pesticides utilisés en agriculture et les additifs employés en alimentation animale, et d'autre part par les additifs intervenant dans la fabrication des aliments destinés à l'homme. Ces deux types de substances se distinguent l'un de l'autre par différentes caractéristiques; l'une d'elles est la chronologie de leur apparition dans l'histoire de l'aliment (les pesticides étant utilisés en amont). De plus, les substances du premier groupe, en particulier les pesticides, sont considérées comme indésirables dans les aliments, alors que la plupart de celles du second groupe peuvent s'y retrouver légalement.

Substances étrangères aux aliments

La deuxième grande catégorie de substances étrangères comprend celles qui contaminent les aliments ou qui se forment en leur sein au cours des opérations de fabrication, de conditionnement, de transport ou de conservation.

Ces substances étrangères aux aliments posent une série de problèmes très complexes, de nature : toxicologique, juridique, psychophysiologique, analytique, économique et technologique. Ces problèmes ont pris une grande importance à la suite de la rencontre de deux courants opposés : d'une part celui des agriculteurs et des industriels qui estiment nécessaire pour leur production et leur fabrication d'utiliser un nombre de plus en plus important de produits chimiques, et d'autre part celui des consommateurs qui considèrent que ces produits chimiques mettent leur santé en danger.

Problèmes toxicologiques

Les substances toxiques agissent :

— soit en modifiant l'utilisation digestive des aliments : par irritation du tube digestif, ce qui entraîne un effet purgatif; par inhibition des enzymes digestives; par action sur la flore intestinale (antiseptique, antibiotique); en la diminuant, on risque de réduire les synthèses des vitamines des groupes B et K qu'elle effectue;

— soit par action toxique proprement dite, qui peut être directe sur un organe (foie), une fonction (fonction rénale, spermatogenèse), un système enzymatique (blocage des sites SH des protéines enzymatiques); ou indirecte après réaction des substances toxiques sur les aliments, les médicaments ou entre elles. L'acide nitreux provenant des nitrites utilisés en charcuterie pour conserver la couleur rouge des viandes peut réagir avec des amines secondaires des aliments pour donner naissance à des nitrosamines cancérigènes.

La toxicité des substances est évaluée à partir des essais effectués sur la toxicité aiguë, subaiguë et à long terme.

La *toxicité aiguë* détermine la dose minimale mortelle. Pour les substances étrangères aux aliments, et en particulier dans le cas des additifs alimentaires, la toxicité aiguë n'a guère de signification, elle est toujours beaucoup plus élevée que les doses d'utilisation. Les substances dont l'emploi est autorisé en alimentation ne peuvent présenter, bien entendu, au maximum qu'une très faible toxicité, absolument indécelable lors des essais de toxicité aiguë. Pour ces substances, ce sont les essais de toxicité à long terme qui sont les plus riches d'enseignements.

Le problème qui se pose est celui de l'ingestion de faibles doses répétées. Si les substances sont éliminées au cours du métabolisme, il y a peu de risques. Au contraire, si elles s'accumulent régulièrement, la quantité présente dans l'organisme peut être importante au bout d'un temps suffisamment long et poser des problèmes de toxicité. Ces rétentions de substances par l'organisme peuvent être conditionnées par des facteurs d'ordre physique : c'est le cas de composés solubles dans les graisses qui s'accumulent dans certains tissus (hépatique, nerveux, adipeux). Les facteurs d'ordre chimique jouent un rôle également important dans les phénomènes de rétention. Certains composés peuvent se lier aux protéines du foie jusqu'à saturation.

La détermination de la *toxicité subaiguë* et *à long terme* nécessite toute une série d'essais relatifs à l'examen des tissus, à la localisation et à la répartition de la substance à examiner ainsi que de ses métabolites, à la sensibilisation et à l'accoutumance, aux effets tératogènes, à la fertilité. Ces essais doivent être faits sur différents types d'animaux et doivent tenir compte des divers états de nutrition (animaux carencés en protéines, en vitamines). Ils sont longs et très coûteux. Même quand ils peuvent être effectués d'une façon complète, il est toujours difficile de conclure à l'innocuité d'une substance avec une probabilité suffisamment sécurisante.

Problèmes posés par le comportement alimentaire de l'homme

L'acte alimentaire est sous la dépendance de deux groupes de facteurs : les facteurs internes, qui comprennent des motivations physiologiques (le point de départ de l'acte alimentaire est la nutrition cellulaire), des motivations psycho-sensorielles, qui concernent les sensations organoleptiques (ouïe, odorat, goût); elles permettent l'identification des aliments et la recherche du plaisir, motivations essentiellement humaines; elles tiennent principalement dans le symbolisme des aliments. « L'homme consomme autant de symboles que de nutriments » : l'aliment qui donne de la force, qui fait grandir, qui valorise.

Les facteurs externes concernent le comportement individuel, les habitudes, les mœurs et coutumes.

Il existe entre les deux groupes de facteurs un système d'ajustement qui établit une correspondance plus ou moins précise entre les besoins cellulaires et les objets alimentaires convoités. Le conditionnement joue un rôle important dans le domaine alimentaire. L'exemple des colorants est intéressant à ce sujet : le consommateur choisit spontanément un aliment agréablement coloré plutôt qu'un autre aux teintes déplaisantes. La campagne contre les colorants a inversé ce comportement; l'aliment sans couleurs ou à la limite aux couleurs désagréables est considérablement valorisé aux yeux du consommateur par rapport aux autres.

Problèmes technico-économiques

Deux grandes questions auxquelles il n'est pas facile d'apporter de réponses rationnelles restent posées. Elles concernent d'une part l'intérêt réel des divers traitements chimiques au niveau des productions animales et végétales, et d'autre part la nécessité technologique des additifs dans l'industrie alimentaire. La deuxième question constitue la pierre d'achoppement du mécanisme de demande d'autorisation d'emploi de nouvelles substances chimiques en alimentation. C'est donc à ce niveau qu'une attention particulière doit être apportée.

Problèmes de réglementation

Il existe un droit dit alimentaire inspiré par des considérations scientifiques, technologiques et d'hygiène, et dont l'objectif est la défense du consommateur, en particulier la protection de sa santé. Le champ d'applications de cette branche du droit couvre les domaines de l'agriculture et des industries agricoles et alimentaires en considérant toutes les opérations de la production à la consommation. La réglementation est fondée sur le principe de l'interdiction (tout ce qui n'est pas autorisé est interdit), ce qui entraîne l'établissement des listes positives d'additifs. (A opposer au principe de l'abus.)

Devant l'affirmation d'impératifs technico-économiques et l'incertitude des toxicologues, il est souvent très difficile de prendre des décisions au sujet de l'inscription d'une substance nouvelle sur les listes positives.

Problèmes analytiques

L'importance des problèmes analytiques apparaît :

— sur le plan toxicologique (études des métabolites);

— sur le plan de la réglementation (pureté des additifs, contrôle des teneurs dans les produits finis, détermination de la DJA [dose journalière admissible]);

— sur le plan technologique (détermination du rôle des additifs).

La détermination de quantités très faibles de substances dans des milieux complexes nécessite l'utilisation de méthodes très élaborées.

◀ *Page ci-contre, figure 11.*

Cedus

Tito Barbery - Top

▲ *A gauche : un laboratoire de « goûteurs » ; à droite : enfants mangeant des sorbets. Les propriétés psychosensorielles de l'aliment déterminent son choix et sont l'origine du plaisir éprouvé.*

LES ADDITIFS ORGANOLEPTIQUES

Les propriétés organoleptiques des aliments, c'est-à-dire celles qui impressionnent les sens, jouent un rôle fondamental dans l'appétence, qui est, sur un plan général, le désir instinctuel qui porte vers tout objet propre à satisfaire un penchant naturel. Les propriétés résultant du contenu psychosensoriel de l'aliment déterminent son choix et sont à l'origine du plaisir éprouvé en le mangeant. Pratiquement, les propriétés organoleptiques concernent tous les sens.

La vue est un des premiers sens intéressés : l'apparence, la couleur, la forme sont intégrés avant la préhension de l'aliment.

L'odorat joue un rôle prépondérant, non seulement dans le choix des aliments, mais également dans le plaisir ou le déplaisir qu'ils procurent. L'odeur peut être définie comme l'ensemble des sensations résultant de l'excitation de l'organe olfactif par les molécules odorantes.

Le goût permet de percevoir les quatre saveurs fondamentales (acide, salée, amère et sucrée), grâce aux récepteurs gustatifs qui se trouvent dans la bouche, et plus précisément sur la langue. Dans le langage courant, le domaine du goût est plus vaste et englobe les odeurs. En réalité, en mangeant un aliment, les sensations olfactives et gustatives sont simultanément intégrées. Pour rendre compte de cette impression globale des deux sens, on a proposé le mot flaveur, de l'anglais *flavour*, qui couvre l'ensemble complexe des sensations olfactives et gustatives perçues pendant la consommation d'un produit alimentaire.

Il est intéressant de noter que, si les sens de l'olfaction et de la gustation interviennent quasi simultanément dans le plaisir ou le déplaisir éprouvé lorsque l'aliment se trouve dans la bouche, seule l'olfaction est impliquée dans le choix de l'aliment. Cette propriété est relativement limitée, en particulier chez l'homme, mais peut prendre chez certains animaux une importance très grande. Notamment, chez les insectes, où l'on observe différents chimiotropismes qui peuvent s'exercer sur une grande distance et avoir pour finalité l'exercice de la fonction de nutrition... mais également celle de reproduction.

La texture pour les aliments solides ou la rhéologie pour les aliments liquides ou pâteux sont évaluées grâce aux mécanorécepteurs d'organes tactiles de la région buccale.

Enfin l'ouïe intervient également dans l'ensemble des sensations ressenties en mangeant un aliment. Ceci a d'ailleurs été exploité sur le plan publicitaire (chocolat Crunch, par exemple).

A la limite, tout additif créant, améliorant ou stabilisant le contenu psychosensoriel d'un aliment peut être considéré comme un additif à finalité organoleptique. Dans la pratique, cette appellation est réservée aux colorants et aux arômes dont l'utilisation quelque peu abusive dans les aliments industriels a fait l'objet, en particulier pour les colorants, de très vives critiques de la part des associations de consommateurs. Les Américains utilisent pour désigner ce groupe d'additifs l'expression *food-appeal*, par analogie avec *sex-appeal*. Ces *food-appeals* sont en fait toutes les substances qui, ajoutées à un aliment, augmentent son attrait, le rendent plus désirable.

La couleur des aliments

L'importance des couleurs dans l'environnement social de l'homme est très grande. Chaque individu éprouve leurs effets psychophysiologiques ; un milieu bleu est sédatif, alors qu'un rouge est stimulant. Les couleurs peuvent être inhibitrices ou dynamogéniques ; elles peuvent éveiller le sentiment du plaisir ou de l'empêchement.

Dans la corrélation très précise qui est établie d'instinct par l'animal entre la qualité nutritionnelle des aliments et leur apparence, la couleur intervient pour une large part. Par exemple, la couleur d'un fruit renseigne sur son état de maturité et permet ainsi à l'animal de le consommer au moment précis où il atteindra sa plus grande valeur nutritionnelle et où il lui procurera le plaisir maximal. Mais cette relation subtile entre aspect et contenu, rarement trompeuse dans les produits naturels, n'existe plus dans les produits alimentaires industriels où la coloration est généralement exogène.

Les colorants sont utilisés dans différents desseins et tout d'abord pour redonner aux aliments leur couleur d'origine perdue au cours des traitements technologiques. Le reverdissage des légumes verts, petits pois, haricots verts en conserve, par le sulfate de cuivre est une pratique courante encore dans certains pays. Elle n'est plus autorisée en France. Dans la coloration des fruits confits par des colorants synthétiques, il s'agit de redonner aux fruits, qui l'ont perdue pratiquement en totalité au cours des divers traitements subis, une coloration qui rappelle celle d'origine.

Les colorants sont également utilisés pour obtenir une coloration constante pour certains produits agricoles sujets à des variations saisonnières, comme le beurre, dont la coloration est en relation avec l'alimentation des vaches, elle-même fonction de l'époque de l'année. Les beurres d'hiver sont plus clairs que les beurres d'été, les vaches consommant en cette saison des aliments riches en carotène qui donne au beurre sa couleur jaune. Le consommateur accepte difficilement les variations qualitatives des aliments, et l'industrie s'efforce de lui présenter des aliments constants, ce qui l'oblige, compte tenu de la variabilité des matières premières, à des ajustements plus ou moins importants.

La coloration peut être faite dans un souci d'analogie ou d'évocation. Par exemple, dans le cas des sirops ou

des confiseries, le colorant a pour but de les rendre attrayants en rappelant le végétal en rapport avec l'aromatisation utilisée. Les sirops de menthe et de citron, normalement incolores, sont artificiellement colorés respectivement en vert et en jaune.

La coloration peut aller dans le sens de certaines habitudes alimentaires. Les poulets à chair blanche sont difficilement acceptés dans le sud de la France où l'on préfère la chair colorée. Les aliments composés, insuffisamment riches en caroténoïdes, destinés aux élevages du Midi sont additionnés de colorants qui permettent d'obtenir la chair jaune appréciée.

Enfin, les colorants peuvent être employés avec des intentions frauduleuses pour tromper le consommateur sur les qualités substantielles de l'aliment. Par exemple, les pâtes alimentaires peuvent être colorées en jaune pour donner l'impression qu'elles sont aux œufs ou qu'elles contiennent plus d'œufs qu'en réalité.

Différents colorants sont utilisés dans l'industrie alimentaire. Tout d'abord les **colorants naturels,** d'origine minérale comme l'oxyde de fer de teinte ocre ou le bioxyde de titane blanc, d'origine animale comme le carmin de cochenille extrait de la femelle de *Coccus cacti,* insecte élevé au Mexique, enfin d'origine végétale comme les chlorophylles, les caroténoïdes, les anthocyanes, etc., c'est-à-dire toutes les substances qui colorent naturellement les végétaux.

Avant la campagne faite contre les colorants, les colorants naturels avaient des applications relativement réduites en alimentation où les colorants synthétiques dominaient largement. Depuis cette campagne, la tendance s'inverse, et les colorants naturels bénéficient d'un regain d'intérêt.

La plupart des **colorants synthétiques** se rattachent à deux grandes familles chimiques, les dérivés azoïques, qui comprennent les deux tiers des colorants synthétiques autorisés, et les dérivés du triphényl méthane. Ce sont tous des colorants acides solubles dans l'eau.

Les colorants synthétiques présentent des avantages non négligeables sur les colorants naturels : ils sont moins chers, ils ont un pouvoir colorant plus élevé ; il est aisé de réaliser des teintes et des nuances subtiles grâce à de judicieux mélanges de colorants de base. Enfin, les colorants synthétiques supportent beaucoup mieux que les colorants naturels les divers traitements technologiques de l'industrie alimentaire, ce qui explique l'importance qu'ils ont prise au cours des dernières décennies.

Du fait de leur utilisation trop systématique et quelquefois abusive, ils ont dans un premier temps été le point de mire des associations de consommateurs luttant contre l'utilisation des additifs. Pour beaucoup de personnes, les colorants restent les additifs par excellence, alors qu'en fait, ils n'en représentent qu'une faible fraction, certes la plus voyante.

Ce « privilège » se retrouve sur les plans toxicologique et réglementaire. Les colorants sont de loin ceux des additifs qui ont fait l'objet du plus grand nombre d'études toxicologiques. Toutes les informations disponibles sur eux ont permis d'établir très rapidement une liste positive au niveau de la CEE.

Les colorants liposolubles présentent quelquefois une toxicité marquée et sont en règle générale considérés comme suspects. Les colorants hydrosolubles ne sont pas, à l'opposé, systématiquement dépourvus de toxicité, mais ils suivent un cheminement de détoxication qui aboutit assez rapidement à leur élimination et ne présentent que peu ou pas, contrairement aux colorants liposolubles, d'effets de sommation ou cumulatifs. Ils n'en sont pas pour autant à l'abri de toute critique. A la suite de divers travaux de recherche entrepris sur eux par des laboratoires de toxicologie, nous assistons à des retraits successifs de colorants des listes officielles, à tel point que celles-ci se réduisent progressivement comme peaux de chagrin. Il est certain que ces retraits, qui s'effectuent dans l'atmosphère passionnée créée par les associations de consommateurs, ne sont à la limite pas plus justifiés scientifiquement que les inscriptions sur les listes positives.

Le cas de l'amarante, colorant synthétique rouge, est très significatif. A la suite de résultats récents obtenus par des laboratoires russes et américains concluant à une certaine toxicité de ce colorant, le processus administratif de retrait de l'amarante s'est déclenché. Au niveau de la CEE, les experts ont considéré que l'expérimentation n'était ni suffisante ni suffisamment bien menée pour remettre en question l'autorisation d'utilisation de ce colorant. Par contre, l'administration française, qui reste souveraine en l'occurrence sur le plan national, a décidé son retrait. C'est possible dans le cadre des accords au sein de la Communauté à condition qu'au moins un produit alimentaire continue à être coloré avec l'amarante. Le produit, choisi compte tenu de sa faible diffusion, est le caviar. Ainsi donc, l'amarante est actuellement interdite en France pour la coloration de tous aliments, sauf le caviar.

De nombreuses critiques ont été faites aux expérimentations russes. Il semblerait que les toxicologues n'aient pas disposé d'un colorant pur. Les conclusions portées par eux sur la toxicité du colorant seraient en fait à attribuer aux substances annexes.

En réalité, la molécule d'un colorant n'est jamais obtenue pure par synthèse. Différentes impuretés l'accompagnent, ainsi que des isomères du colorant. Suivant le degré de purification et le type de synthèse, on trouve des substances annexes qualitativement et quantitativement très variables. De plus, la molécule active avec ses satellites n'est jamais utilisée pure mais additionnée de charges minérales, généralement de sulfate de sodium en quantités importantes, de l'ordre de 60 % du colorant alimentaire. Si la toxicité du sulfate de sodium ne pose pas de problèmes, il peut être accompagné lui-même d'impuretés minérales toxiques...

C'est, bien entendu, la toxicité de l'ensemble du colorant alimentaire qui doit être finalement évaluée, puisque c'est lui qui est utilisé dans la coloration des aliments. Mais il est extrêmement important de déterminer l'origine d'une toxicité lorsqu'elle existe. Si l'on sait par exemple que la toxicité d'un colorant alimentaire est en fait due à un isomère de la molécule principale colorante, on agira au niveau de la synthèse de façon à éviter la formation de cet isomère. Si cela est impossible, on tentera de l'éliminer au cours des phases de purification.

Quant aux colorants naturels, contrairement à une idée trop généralement répandue, ils ne sont pas *a priori* à l'abri de critiques sur le plan toxicologique. Certes, ils ont pour eux, sur ce plan, l'avantage de se trouver dans les fruits et légumes que nous consommons régulièrement. Il est difficile de ce fait de concevoir qu'ils puissent présenter une quelconque toxicité. Pourtant, les toxicologues ne sont pas en mesure de démontrer leur parfaite innocuité, dépourvus d'information qu'ils sont à leur sujet.

De plus, le problème est tout à fait différent suivant que l'on considère le colorant dans son contexte naturel, c'est-à-dire dans le fruit ou légume qu'il colore, ou après séparation de ce contexte naturel. Dans ce dernier cas, les procédés d'extraction utilisés apportent des modifications plus ou moins profondes. Le colorant de base est généralement accompagné dans les extraits commerciaux de très nombreuses substances aux effets biologiques mal connus ou inconnus. L'expérimentation toxicologique, qui n'est pas dépourvue de difficultés avec les colorants synthétiques, devient dans le cas des colorants naturels plus complexe encore.

Les arômes alimentaires

Ils constituent, avec les colorants, le groupe important des additifs organoleptiques ou *food-appeal.*

Les arômes, contrairement aux colorants, ne correspondent pas à des composés définis sur le plan chimique. Ce sont des mélanges très complexes de molécules organiques aux fonctions variées : acides, cétones, aldéhydes, esters, etc. L'arôme du café par exemple renferme plusieurs centaines de composés chimiques différents. Ceux-ci varient à la fois sur le plan quantitatif et sur le plan qualitatif en fonction de différents facteurs comme la variété, l'origine géographique.

L'aromatisation des aliments, facteur essentiel de la qualité organoleptique, peut être obtenue et maintenue de différentes façons.

Dans le cas de l'**aromatisation endogène,** l'arôme fait partie intégrante de l'aliment, soit qu'il préexiste dans les matières premières, étant de ce fait antérieur au processus technologique d'obtention de l'aliment, soit qu'il se forme au cours de la fabrication.

Le premier cas est illustré par les jus de fruits ou les

Cedus

▲ *Les confitures ne se font plus que rarement à la maison, mais elles sont toujours aussi attrayantes.*

confitures, produits alimentaires dans lesquels l'arôme est apporté par les fruits. Les processus technologiques d'obtention des jus de fruits ou des confitures devront être effectués de telle façon que les pertes ou les transformations d'arômes soient réduites au minimum. Dans le second cas, on peut citer le chocolat ou le pain dont les arômes respectifs se forment au cours du processus de fabrication. Celui-ci devra donc être mené de façon que l'arôme optimal se forme.

Le deuxième grand groupe d'aromatisation des produits alimentaires est l'**aromatisation exogène**, dans laquelle l'arôme, sous les différentes formes proposées par les fabricants de produits aromatiques, est ajouté à l'aliment. C'est uniquement dans ce cas que l'on peut parler d'arôme en tant qu'additif.

L'additif arôme peut être ajouté :

— soit pour aromatiser totalement un produit ; c'est le cas de certains articles de confiserie, en particulier les sucres cuits dont l'essentiel sur le plan quantitatif est un mélange de sucre et de sirop de glucose qui n'a pas d'arôme propre ;

— soit pour compléter ou renforcer une aromatisation endogène affaiblie par les traitements technologiques ou tout simplement insuffisante au départ ; un produit aromatisé aux fruits aura besoin d'être renforcé par un arôme additif si les fruits ont perdu tout ou partie de leur propre arôme ou si la quantité de ceux-ci incorporée au produit est insuffisante pour lui communiquer une aromatisation satisfaisante ;

— soit pour apporter une note complémentaire à un produit déjà aromatisé ; les exemples sont très nombreux d'associations d'arômes dont les effets organoleptiques sont des plus appréciés. Nous entrons ici dans le domaine de l'art culinaire où les arômes sont l'objet de subtiles combinaisons dont la finalité est, comme pour la musique avec les notes et la peinture avec les couleurs, le plaisir maximal des sens.

A côté de ces symphonies aromatiques malheureusement exceptionnelles, on peut trouver, parmi les produits alimentaires industriels, des exemples intéressants d'associations d'arômes. On a depuis longtemps ajouté au chocolat, au cours de sa fabrication, de la vanilline ou de l'éthyl vanilline, arômes synthétiques de vanille, ou même de la vanille naturelle. Ces additifs aromatiques se marient parfaitement avec l'arôme cacao endogène.

Les fabricants d'arômes proposent aux utilisateurs une très grande variété de produits qui se présentent sous formes liquide ou solide.

Les matières aromatisantes naturelles sont des mélanges complexes de substances sapides, odorantes ou odorigènes obtenues par des procédés physiques à partir des produits végétaux ou animaux appelés *aromates et denrées aromatiques* (fruits, cacao, vanille). Les matières aromatisantes synthétiques peuvent être identiques aux substances que l'on trouve dans les matières aromatisantes naturelles (citral, vanilline), ou différentes (artificielles). Les matières aromatisantes naturelles peuvent être renforcées par des matières aromatisantes synthétiques analogues aux composés que l'on retrouve dans la nature.

Il existe également une catégorie de matières aromatisantes dont l'importance grandit et qui est obtenue par la réaction de Maillard, c'est-à-dire par réaction des acides aminés sur les sucres réducteurs.

Du fait de la complexité de sa composition, l'aromatisation exogène pose de nombreux problèmes qui ont tous pour origine la difficulté de définition objective des arômes. D'énormes progrès réalisés en chimie analytique, en particulier en chromatographie en phase gazeuse, sur colonne capillaire en verre, couplée à la spectrométrie de masse, ont mis en évidence la complexité de la composition des arômes et leur caractère fluctuant au travers de ses variations qualitatives et quantitatives. Cette complexité apparaît de plus en plus grande au fur et à mesure de l'amélioration des performances analytiques, et le chimiste est partagé entre la satisfaction purement méthodologique que lui procurent de telles performances et l'inquiétude d'être progressivement englué dans une situation qui risque de devenir inextricable. Ceci explique que les arômes soient certainement les additifs actuellement les moins connus tant sur le plan chimique que toxicologique.

L'effet sensoriel d'une aromatisation, c'est-à-dire la qualité organoleptique qu'elle communique à l'aliment, doit pouvoir être évalué. Pour ce faire, le scientifique doit tenter d'objectiver le plaisir. Comment ? Tout d'abord en utilisant les sens, en particulier le goût et l'olfaction comme instruments de mesure. En choisissant les opérateurs et en analysant statistiquement les informations qu'ils donnent, il est possible d'obtenir une fiabilité acceptable pour une méthode subjective. Contrairement aux dégustations ou tests organoleptiques, l'analyse sensorielle n'a pas pour but de porter des jugements de valeur, toujours relatifs et de ce fait discutables, mais de mettre en évidence des différences. Par exemple, l'analyse sensorielle permettra de savoir si l'échantillon A est différent de l'échantillon B. L'examen organoleptique dira, avec toutes les réserves que l'on peut faire à ce type d'appréciation, que A est meilleur que B.

Une autre approche plus rationnelle consiste à identifier et à évaluer les différents composés chimiques responsables de l'arôme, et à essayer d'établir une relation entre cette composition et les impressions sensorielles ressenties. C'est une approche longue et difficile qui exige d'importants moyens en matériel (techniques chromatographiques, spectromètre de masse, entre autres) et qui, il faut bien le dire, est encore loin à l'heure actuelle d'être opérationnelle.

▼ *Arômes naturels utilisés en confiserie.*

Cedus

D. Bouquignaud - Top

◀ *La chocolaterie a un aspect affectif et symbolique, particulièrement au moment des fêtes de Pâques.*

Quels que soient les critères retenus pour l'évaluation de la qualité organoleptique, il est nécessaire d'avoir une référence, un étalon. En toute logique, il semble évident de choisir le bon produit. Mais qu'est-ce que le bon produit ? Voilà une notion extrêmement fluctuante qui varie en fonction de nombreux facteurs, habitudes alimentaires, coutumes, conditionnement et nature des individus. Certains des fromages typiques que nous apprécions font l'objet, à l'étranger et en particulier aux États-Unis, de réactions de rejet, voire même de dégoût.

Une fois la référence choisie, il faut déterminer les composantes objectives de son contenu psychosensoriel et ensuite jouer sur les paramètres des processus de fabrication de façon à s'en rapprocher le plus possible.

Il est intéressant d'illustrer ce chapitre sur les arômes par un exemple typique d'aromatisation endogène, la chocolaterie, et un cas où l'aromatisation exogène est fondamentale, la confiserie.

Pour situer le problème, dans un premier temps, il est utile de définir comparativement ces deux industries, qui présentent des points communs et des différences notables.

● En ce qui concerne les **points communs,** il faut tout d'abord noter que les industries de la chocolaterie et de la confiserie fabriquent toutes les deux des produits dont l'importance du contenu psychosensoriel et affectif est la caractéristique principale. Les produits de confiserie et de chocolaterie sont faits pour le plaisir. L'aspect nutritionnel, en l'occurrence, est plutôt un facteur d'inhibition du désir. Le consommateur de nos sociétés pléthoriques est, vis-à-vis de ces aliments particuliers, placé devant cette douloureuse alternative : ou éprouver, en les consommant, un plaisir quelque peu gâché par la crainte de grossir, ou de déclencher, en s'abstenant, un processus de frustation. L'aspect affectif et symbolique de ces produits est très marqué, en particulier en France où leur consommation s'effectue principalement au moment des fêtes (Pâques, Noël).

Ces deux industries ont sensiblement le même poids économique, et leurs intérêts sont défendus sur le plan national, le plan international et celui de la CEE par des organismes communs. Dans les deux cas, le sucre intervient pour une très large part comme matière première. Enfin les deux secteurs s'interpénètrent au niveau de la confiserie de chocolat.

● Les **différences** apparaissent lors de l'examen des principes des technologies. Si l'importance quantitative du sucre est du même ordre de grandeur dans les deux industries, son rôle est fondamental en confiserie où ses propriétés physiques, solubilité, cristallisation, décristallisation, sont à la base des multiples technologies de cette industrie, alors qu'en chocolaterie le sucre se comporte pratiquement comme un constituant physiquement et chimiquement inerte n'intervenant dans le processus de fabrication du chocolat qu'en fonction de sa granulométrie. L'industrie de la confiserie repose donc sur la technologie du sucre, qui se déroule en milieu hydrophile, celle de la chocolaterie sur la technologie du cacao, laquelle s'effectue en phase lipidique.

Enfin, la chocolaterie présente une certaine homogénéité technologique. Au contraire, la confiserie est caractérisée par une grande pluralité des technologies se répercutant sur le plan de l'aromatisation qui est représentée par les trois grands types décrits précédemment. L'aromatisation endogène préexistant au processus technologique se rencontre dans les pâtes de fruits et dans les pâtes d'amandes dont le seul arôme est celui des fruits ou des amandes les composant. L'aromatisation endogène formée en cours de fabrication se rencontre dans les caramels dont l'arôme résulte de la réaction de Maillard entre les acides aminés du lait et les sucres réducteurs. Pour la grande majorité de tous les autres produits de la confiserie, dont la liste est longue (sucres cuits, confiseries gélifiées, pâtes à mâcher, chewing-gum, pastilles, etc.), l'aromatisation est exogène. En chocolaterie, l'aromatisation est endogène, formée au cours du processus de fabrication.

★ La confiserie : aromatisation exogène

Bien que la confiserie regroupe un grand nombre de technologies parfois très différentes les unes des autres, il est possible de trouver une base technologique commune dans la plupart des cas. En effet, le processus de fabrication consiste généralement dans un premier temps à mettre en solution du sucre cristallisé, puis à évaporer l'eau de cette solution (cela reste valable même dans le cas de la fabrication du sucre cuit par cuisson-extrusion, procédé qui est actuellement au stade expérimental, où le sucre est décristallisé par dissolution dans l'eau du sirop de glucose) afin d'obtenir le saccharose sous forme amorphe ou vitreuse en évitant sa cristallisation (sucres cuits) ou en le faisant cristalliser d'une façon déterminée (fondants, fudges, etc.). Tout l'art du confiseur consiste donc à empêcher ou à favoriser suivant le cas la cristallisation du saccharose après avoir procédé préalablement à sa décristallisation en créant l'aromatisation et la coloration (caramels), ou en les choisissant judicieusement et en s'efforçant de les maintenir tout au long du processus de fabrication (pâtes de fruits : aromatisation endogène ; sucres cuits : aromatisation exogène).

Évidemment, le but de l'addition d'arômes est d'obtenir un produit fini présentant de bonnes caractéristiques organoleptiques, or la qualité de l'arôme ajouté n'entraîne pas d'emblée celle du produit fini. Les divers constituants non aromatiques des produits de confiserie (sucre, sirop de glucose, gomme) ainsi que les traitements qu'ils subissent sont quelquefois à l'origine de profondes modifications de l'arôme de départ. La formulation de l'arôme doit donc être faite en considérant le produit fini.

Diverses réactions, principalement chimiques, peuvent avoir lieu au cours de la fabrication et de la conservation d'un produit de confiserie. Ces réactions, ainsi que les conséquences des propriétés physiques des arômes, se manifestent notamment au cours de la distillation et de l'entraînement à la vapeur. Elles provoquent des modifications favorables ou défavorables de l'arôme ainsi que la perte de la totalité des constituants aromatiques ou de certains d'entre eux. Ces modifications de l'aromatisation sont sous la dépendance des différents paramètres physiques de la fabrication et de la conservation.

Au cours de la fabrication, c'est certainement la température qui a le rôle le plus important. Elle est différente suivant que la fabrication est effectuée à la pression atmosphérique ou sous pression réduite, ou encore en continu ou en discontinu. Dans les installations modernes, les températures utilisées pour la fabrication des sucres cuits varient de 110 à 130 °C. Si les réactions chimiques sont surtout fonction de la température, la volatilité des composés aromatiques est influencée à la fois par la température et la pression. Les pertes qu'elle occasionne sont sensiblement les mêmes, toutes choses égales par ailleurs, que l'on travaille à température élevée à la pression atmosphérique ou à basse température sous pression réduite.

Pendant la conservation, c'est principalement le temps,

Cedal

Cedal

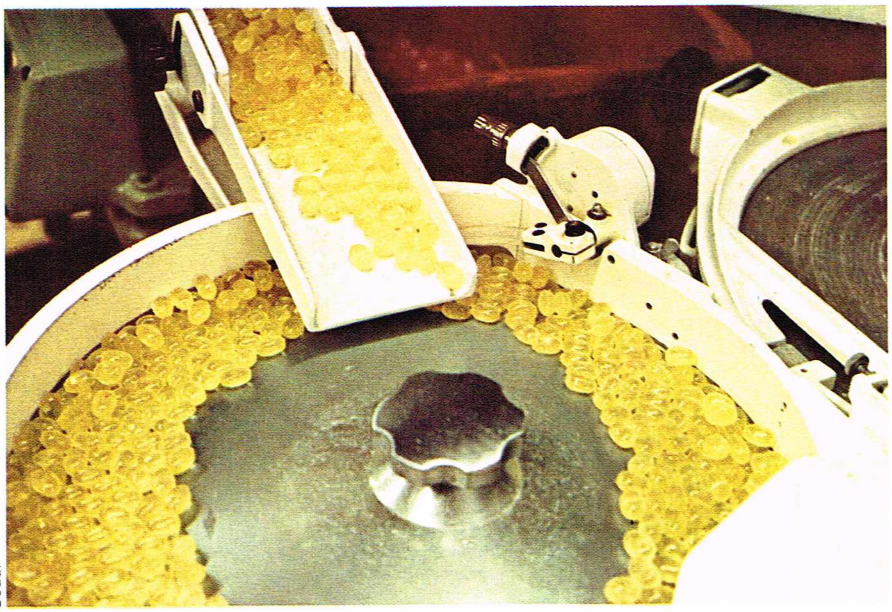

Cedal

▲▶ *Deux phases de la fabrication de bonbons (en haut, à gauche et ci-dessus). En haut, à droite, la coloration dans la masse de la confiserie peut-être avantageusement remplacée par celle du papier d'emballage.*

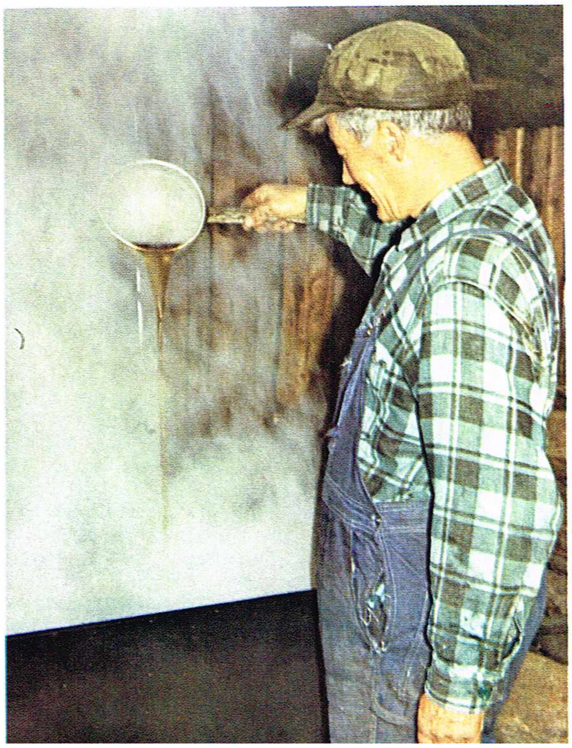

Y. Pillonel - Fotogram

▶ *Essais de viscosité du sirop d'érable.*

l'oxygène et l'humidité relative de l'air qui sont à l'origine des modifications les plus importantes. L'altération organoleptique des produits de confiserie au cours de la conservation débute généralement lorsque la structure physique est modifiée. Cela est particulièrement net avec les produits comme les caramels mous ou les pâtes à mâcher qui ont des structures dispersées. Les matières grasses et les composés hydrophiles finement émulsionnés sont stabilisés par la viscosité du milieu ; si celle-ci vient à baisser à la suite d'une prise d'humidité ou de la cristallisation d'une partie du saccharose en solution, l'émulsion est rompue. Les composés lipophiles se séparent alors du milieu hydrophile. En venant à la surface du produit, ils perdent la protection qu'ils avaient dans la structure dispersée où la phase continue, non seulement isolait des substances lipophiles du milieu extérieur, mais créait elle-même, du fait de sa composition (sucres réducteurs), un milieu favorable à leur conservation. Les matières s'oxydent alors, ce qui a pour conséquence une altération des propriétés organoleptiques du produit fini.

Les produits utilisés pour l'aromatisation exogène des articles de confiserie peuvent varier à l'infini au gré de la fantaisie du fabricant. Leur but est de donner à ceux-ci une aromatisation aussi attractive que possible. Ils doivent présenter un pouvoir d'aromatisation élevé et un support le plus neutre possible. L'eau, les matières grasses, les composés azotés ou glucidiques qui accompagnent les composés aromatiques dans les aromates ou les extraits peuvent, aux températures utilisées, provoquer des réactions compromettant l'aromatisation désirée.

Les produits aromatiques posent également en confiserie le problème de leur incorporation. Ils sont constitués de composés en général peu ou pas solubles dans l'eau, qui doivent être dispersés dans une masse hydrophile (sucre, sirop de glucose, eau).

Étant donné la très faible importance du rapport composés aromatiques/produits finis, et la cadence de production des installations modernes, il est nécessaire de diluer les composés aromatiques dans des solvants. Ceux-ci sont limités en nombre par la réglementation en vigueur. L'alcool est trop volatil et peut favoriser des pertes d'arôme au moment de l'incorporation, par volatilisation brutale et distillation azéotropique. On préfère les solvants lourds comme le diéthylèneglycol.

Bien entendu, les solvants utilisés doivent présenter une totale neutralité de goût. La dispersion s'effectue d'autant mieux que la masse est plus fluide, c'est-à-dire qu'elle est à plus haute température. Pour éviter les décompositions par pyrolyse, il faut toutefois éviter d'incorporer l'arôme, en particulier les huiles essentielles, à des températures supérieures à 120 °C. Au cours du refroidissement de la masse, la viscosité s'élève rapidement et la phase dispersée est figée. Tant que le sucre cuit conserve la forme vitreuse qui le caractérise, la dis-

J. Guillard - Top

J. Guillard - Top

▲ *A gauche, plantation de cacaoyer. A droite, séchage du cacao à Santo Amoro.*

persion reste stable malgré la non-miscibilité des deux phases. Il faut noter que l'aromatisation des sucres cuits est essentielle. Si l'on peut concevoir de tels produits non colorés, l'absence d'aromatisation leur enlèverait tout intérêt organoleptique.

Les arômes naturels purs sont très chers et donnent des résultats médiocres en confiserie pour les raisons qui ont été décrites ci-dessus. Les arômes artificiels peuvent avoir sur le plan commercial un effet dévalorisant pour le produit fini. L'arôme naturel renforcé avec des composés synthétiques semble être une solution satisfaisante pour ce secteur de l'industrie alimentaire. A la limite, technologiquement, la confiserie serait tentée d'adopter des arômes de synthèse reproduisant les caractéristiques du produit naturel et présentant un pouvoir aromatique et une stabilité plus grands que celui-ci.

D'ailleurs, il en est de même et pour les mêmes raisons (températures élevées au cours de la fabrication) pour les colorants naturels qui tiennent très mal en confiserie, particulièrement dans le cas des sucres cuits.

L'utilisation exclusive d'arômes et de colorants naturels aboutit à l'obtention de produits aux colorations disgracieuses et aux aromatisations faibles et dénaturées. Si l'on ajoute que les arômes et colorants naturels reviennent considérablement plus cher que les colorants et arômes synthétiques, l'on comprend que l'industriel hésite à adopter spontanément une telle solution.

En ce qui concerne la coloration, qui, nous le rappelons, n'est pas fondamentale en confiserie, puisqu'elle ne concerne que l'aspect sur lequel on peut agir par l'intermédiaire de l'emballage, le problème posé par les associations de consommateurs a été résolu d'une façon radicale en la supprimant. Alors que, pendant très longtemps, la coloration avait un pouvoir attractif, c'est maintenant son absence qui est recherchée. Il y a là un exemple de conditionnement culturel typique. Sur le plan commercial, un tel produit est valorisé par rapport à une confiserie colorée, qui a pourtant un prix de revient plus élevé. Nous nous trouvons là devant un type de paradoxe très fréquent dans le domaine marginal des produits diététiques où certains produits alimentaires non raffinés (sucres, huiles, etc.), recherchés pour leur intérêt biologique, sont vendus beaucoup plus cher que les mêmes produits raffinés dont le prix de revient est évidemment plus élevé.

Les arômes, après les colorants, commencent à faire l'objet de critiques de la part des associations de consommateurs. Les positions de repli seront infiniment plus difficiles à trouver que pour les colorants.

★ La chocolaterie : aromatisation endogène

L'aromatisation en chocolaterie est essentiellement, endogène, formée au cours du processus technologique.

Schématiquement, mais précisément, fabriquer du chocolat consiste à traiter le cacao, le sucre et éventuellement d'autres matières premières comme le lait de telle façon que l'on obtienne un produit d'aromatisation optimale qui se présente sous forme d'une dispersion de particules non grasses d'environ 20 μm de cacao et de sucre dans une phase lipidique continue amenée au cours du refroidissement sous une forme cristalline stable. Cette définition fait apparaître l'importance de l'aromatisation en chocolaterie.

Outre son rôle essentiel dans la qualité du chocolat, l'arôme cacao est utilisé dans de nombreux produits alimentaires. Dans ce cas, le cacao, et en particulier la poudre du cacao, joue le rôle d'aromate.

L'industrie de la chocolaterie utilise la fève de cacao ; celle-ci est obtenue dans les pays producteurs par traitement de la graine, à l'aide d'une série de fermentations qui donnent naissance aux précurseurs d'arômes, substances à partir desquelles se forment les arômes au cours de la torréfaction du cacao.

Si les autres phases de la fabrication du chocolat ne sont pas négligeables sur le plan de l'aromatisation finale, ce sont incontestablement la fermentation et la torréfaction qui jouent le rôle déterminant dans cette aromatisation.

Ces deux phases ont fait l'objet de recherches très approfondies en particulier dans les laboratoires européens.

▼ *Chocolaterie. Moulage de poissons en chocolat.*

D. Bouquignaud - Top

La qualité des aliments

C'est une notion fondamentale, difficile à saisir dans sa relativité et sa pluralité. Elle préoccupe de plus en plus les industriels évolués et responsables.

Parmi les multiples formes que prend la qualité, trois se détachent nettement : la qualité nutritionnelle, la qualité hygiénique, la qualité organoleptique.

Un aliment est de bonne **qualité nutritionnelle** lorsque, donné à un individu, il lui permet de vivre d'une façon optimale. Cette qualité peut se définir objectivement à partir des compositions qualitative et quantitative en nutriments de l'aliment. Elle varie suivant les individus, en particulier suivant leur âge, leur sexe, leur activité. Un régime carencé en histidine aura de graves conséquences pour l'enfant dans la première année de sa vie, alors qu'il ne présentera aucun inconvénient pour un organisme adulte capable de synthétiser l'histidine, qui n'est plus pour ce dernier un acide aminé essentiel.

Une ration apportant une quantité de calories suffisante pour la vie d'une personne sédentaire sera insuffisante pour un travailleur de force.

Sans insister sur cet aspect, il faut dire que l'état de santé de l'individu conditionne la valeur nutritive des aliments. On peut citer à ce sujet une infinité d'exemples allant du diabétique, chez lequel le sucre aggrave la maladie, jusqu'à l'hypercholestérolémique, qui devra éviter tous aliments riches en cholestérol.

La qualité nutritionnelle dans le cas d'un animal omnivore comme l'homme est en fait une notion globale qui doit porter sur l'ensemble de la ration. A la limite, plus la variété des aliments consommés est grande, moins la qualité nutritionnelle de chacun d'entre eux pris séparément est importante, puisque, par le jeu des complémentarités et des supplémentations, les chances d'obtenir une ration équilibrée augmentent. A l'opposé, pour les animaux qui par nature ont une alimentation très spécialisée (carnivores, herbivores) ou pour les omnivores contraints à manger des aliments très peu diversifiés, comme c'est le cas pour une très forte proportion de la population humaine du globe, la qualité nutritionnelle des aliments est essentielle. Pour les habitants des pays occidentaux, dont l'alimentation est pléthorique, la qualité nutritionnelle est devenue inversement proportionnelle à sa valeur calorique ; de peur de grossir, ils réduisent la consommation d'aliments riches en calories comme les glucides ou les lipides.

La **qualité hygiénique** est importante. Une enquête récente de la Fondation pour la nutrition a montré qu'elle est actuellement la principale préoccupation des consommateurs vis-à-vis de leur alimentation.

Il est tout à fait évident qu'un aliment doit être dépourvu de toute toxicité ou de tout facteur antinutritif compromettant l'utilisation des nutriments. Or l'aliment est un excellent milieu de culture pour les germes microbiens banals et pathogènes, qui peuvent être à l'origine d'intoxications graves et quelquefois mortelles. Certaines bactéries agissent par l'intermédiaire de leurs toxines, comme les staphylocoques ou le *Clostridium botulinum*, qui sécrète une toxine extrêmement dangereuse. Cette bactérie se développe dans les conserves mal stérilisées. D'autres bactéries agissent directement, comme les salmonelles ou les streptocoques.

L'industrie alimentaire a été à l'origine d'une nette amélioration sur ce plan. Les fabrications artisanales s'effectuaient autrefois, et continuent d'ailleurs à s'effectuer actuellement, dans des conditions d'hygiène quelquefois discutables. Le manque de formation professionnelle et l'absence de prise de conscience de l'importance du problème d'hygiène en alimentation y sont sans doute pour beaucoup. Mais c'est surtout le prix de la propreté qui n'est pas à l'échelle artisanale. Lorsque, sur le plan réglementaire, la quantité maximale de germes totaux à été fixée à 100 000 au gramme pour les glaces, on s'est rapidement aperçu que si, dans les conditions de l'industrie, on pouvait facilement respecter cette limite, celle-ci était toujours très largement dépassée dans les fabrications artisanales, aussi propres fussent-elles.

L'industrie a éliminé les risques d'intoxication aiguë. Malheureusement, il semble que les risques à long terme ont été augmentés par la « chimisation » des industries alimentaires. Ce sont ces risques nouveaux, insidieux, plus ou moins bien définis, hypothétiques ou réels, qui ont amorcé le mouvement des consommateurs. Toutes les substances étrangères que l'on rencontre dans les aliments industriels (polluants de toutes natures, pesticides, additifs) sont systématiquement suspectées. C'est sans doute un des principaux problèmes que l'industrie alimentaire aura à résoudre dans les années à venir et qui nécessitera de repenser toutes les technologies verticales.

▶ Page ci-contre, en haut, l'obtention de la qualité sous toutes ses formes est une préoccupation nouvelle de l'industrie ; ici, laboratoire de contrôle d'une fabrique de sucre, Marseille.

La production artisanale d'aliments est caractérisée par une grande variabilité de la **qualité organoleptique** des produits finis ; cette variabilité est la conséquence d'une mauvaise connaissance des différents paramètres qui interviennent dans un processus de fabrication. La qualité organoleptique peut atteindre des sommets inégalés ou s'effondrer suivant l'artisan, mais également suivant les aléas des conditions de la fabrication. Un fromage peut être plus ou moins bien fabriqué et, de ce fait, plus ou moins bon. Mais une bonne fabrication peut être à la merci d'accidents divers, et en particulier, dans le cas du fromage, être l'objet d'une contamination par des micro-organismes indésirables qui dévient les processus normaux d'affinage.

Cette inconstance dans la qualité des produits artisanaux, au niveau principalement de la couleur, de l'arôme et de la texture, est mal acceptée par le consommateur qui souhaite chaque jour retrouver les mêmes propriétés pour les produits qu'il achète.

Comme les autres industries, l'industrie alimentaire a le souci de la standardisation. Après avoir défini le produit à l'aide de différents critères choisis et quantifiés, l'industrie s'efforce, tout au long des processus de fabrication, de maintenir ces critères constants. Cela revient pratiquement à ne tolérer des variations qu'à l'intérieur de limites, fixées *a priori*, aussi étroites que possible. Il est évident que ces limites peuvent être très étroites, par exemple pour les critères permettant de caractériser les dimensions d'une pièce métallique. Elles seront, en revanche, relativement larges dans le cas des produits alimentaires, où les facteurs de variations sont extrêmement nombreux.

Cette standardisation des produits alimentaires a été faite dans de nombreux cas à un niveau de qualité médiocre, si bien qu'elle a eu pour conséquence une *banalisation des aliments* sur le plan organoleptique. Si la « chimisation » des industries alimentaires est profondément ressentie par les consommateurs comme un risque pour leur santé, la banalisation organoleptique a engendré une sorte de frustration qui détourne progressivement le consommateur des produits industriels. Le produit naturel reprend alors pour lui tout son intérêt, puisqu'il est, lui semble-t-il, à la fois dépourvu de dangers pour sa santé et source de plaisir.

D'importants efforts sont faits actuellement pour obtenir des aliments d'une innocuité parfaite. Mais lorsque les qualités nutritionnelles et hygiéniques auront atteint des valeurs satisfaisantes, le consommateur ne disposera par pour autant d'un bon aliment. La valeur nutritionnelle et l'absence de toxicité représentent deux composantes fondamentales de la qualité, mais la composante hédonique de celle-ci doit être considérée, contrairement à ce qui s'est passé jusqu'à présent, comme très importante. Après les deux autres, la qualité organoleptique doit faire l'objet d'une attention particulière. L'industriel aura toujours présent à l'esprit qu'un aliment doit avoir certes une valeur nutritive et être dépourvu de toxicité, mais également procurer le maximum de plaisir à celui qui le consomme.

Cet aspect de la qualité n'est pas la préoccupation des seuls gastronomes. Les nutritionnistes lui accordent, de nos jours, une grande importance.

La réglementation définit généralement certains aliments en fixant des limites maximales pour les constituants dévalorisant le produit fini, et minimales pour les constituants « nobles ». Par exemple, les pâtes aux œufs doivent contenir au moins 14 % d'œufs, le sucre vanillé au moins 10 % de vanille en gousse. Alors qu'à l'inverse, la teneur en eau des confitures ne doit pas dépasser 40 %.

Outre ces exigences quantitatives, la législation impose des contraintes qualitatives, notamment dans le cas des appellations traditionnelles. Un extrait de vanille doit être obtenu à partir de gousses de vanille et ne pas contenir,

même comme renfort, des constituants aromatiques synthétiques. Le chocolat doit être fabriqué avec du beurre de cacao, matière grasse extraite de la fève de cacao, et non avec des graisses de remplacement, aussi bonnes et aussi proches du beurre de cacao soient-elles.

La viande, le lait doivent avoir les origines que nous leur connaissons, et en tout cas ne pas être obtenus à partir de protéines végétales, aussi parfaite que puisse être l'imitation. Il s'agit là d'une conception éthique de l'authenticité, de la pureté des matières premières. La France lui est très attachée. A l'opposé, en Grande-Bretagne, cette conception a peu de signification. Actuellement, compte tenu du prix des matières premières et de l'importance des conséquences économiques que cela entraîne, des révisions déchirantes de conception sont en cours.

Objectivement, il est très possible de se satisfaire, pour un aliment, des trois qualités précédemment définies sans se préoccuper de l'authenticité de ses différents constituants. Ainsi, le chocolat, produit alimentaire constitué de sucre, pâte de cacao et beurre de cacao, est défini et protégé par une réglementation déjà très ancienne. On peut, dans l'état actuel de nos connaissances, fabriquer un chocolat en remplaçant le beurre de cacao par des matières grasses aux caractéristiques proches de celui-ci sans modifier la qualité du produit fini. Il est vraisemblable que l'on pourra faire de même avec les constituants non gras du cacao. Ce qui aboutirait à la limite à faire du chocolat sans cacao. Si les trois qualités, nutritionnelle, hygiénique et organoleptique atteignent dans ce produit les mêmes niveaux que dans le chocolat traditionnel, rien de rationnel n'empêche de les confondre. Seule l'éthique de la pureté ou de l'authentique peut les distinguer.

Jusqu'à présent, les conceptions de l'aliment étaient nettement séparées. Les uns ne voyaient que la finalité, c'est-à-dire l'obtention des trois qualités fondamentales, les autres défendaient l'authenticité des produits. Actuellement, on assiste à la naissance d'un compromis entre les deux positions, les tenants de la sacro-sainte notion de « pureté » laissant, sous la pression de l'économie, s'ouvrir une brèche dans leur conception. Même si pour l'instant la porte ne s'entrouvre que légèrement, on peut prévoir que rien dans l'avenir ne pourra l'empêcher de s'ouvrir plus largement.

Obtention et contrôle de la qualité

L'obtention de la qualité sous toutes ses formes est une préoccupation nouvelle de l'industrie. Jusqu'à présent, seule la qualité « marketing », *celle immédiatement apparente*, était recherchée.

L'industrie alimentaire commence à prendre conscience des vrais problèmes de qualité, mais surtout, et c'est là un élément intéressant, elle accepte ses responsabilités dans ce domaine comme les consommateurs l'ont contrainte à le faire, car en définitive, aux yeux de ceux-ci, seule l'industrie est responsable de ce qu'elle produit. Le transfert de responsabilité vers les instances officielles qui ont conclu à l'innocuité de certains produits (liste positive des additifs), ou vers l'agriculture qui fournit les matières premières à l'industrie, est de moins en moins effectué.

L'exemple des pesticides est significatif à ce sujet : lorsqu'on les retrouve dans les produits alimentaires au-delà des doses tolérées, c'est vers celui qui les fabrique que les consommateurs se retournent. Et la défense de l'industriel qui consiste à dire : « Je n'y peux rien, ce sont les matières premières que l'agriculture me fournit qui sont polluées », représente un argument de bien peu de poids dans le dialogue industriel-consommateur.

Conscients de cela, certains industriels contrôlent les matières premières qu'ils reçoivent et éliminent celles qui leur semblent contenir des quantités de pesticides anormalement élevées. Cela nécessite de leur part une certaine organisation et surtout de posséder un laboratoire ou un service « qualité », ce qui ne se conçoit que pour les affaires relativement importantes.

A la limite, les firmes multinationales vont jusqu'à prévoir les réactions des consommateurs et devancent quelquefois les décisions des instances nationales et internationales. Cela a été le cas pour l'amarante qui a été retirée des fabrications avant que la décision de retrait soit prise officiellement.

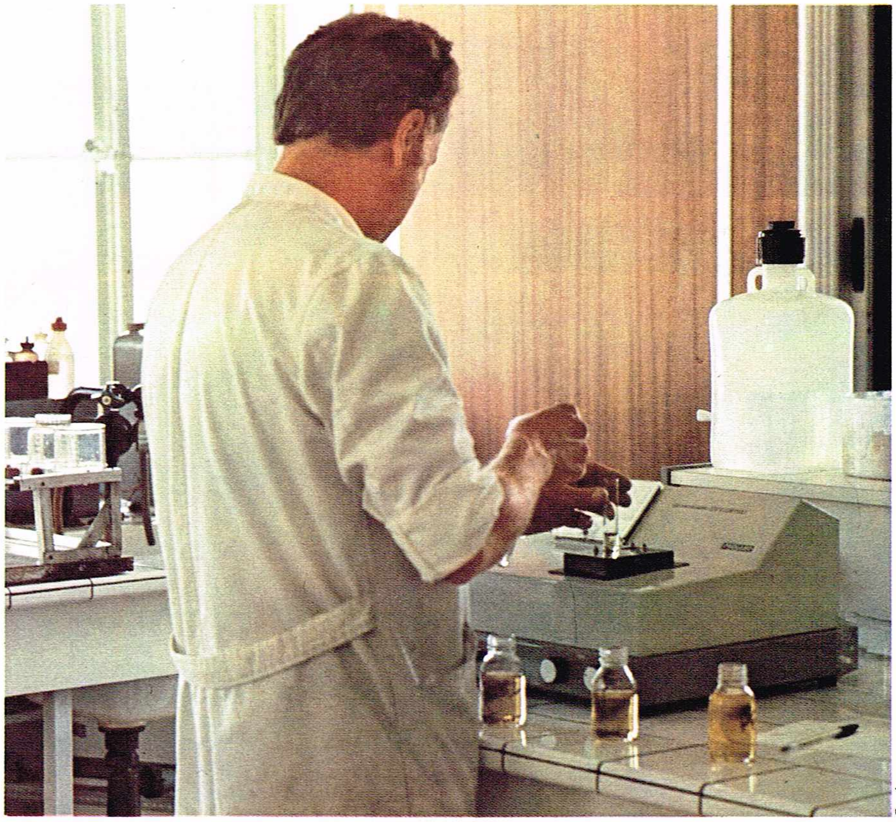

Cedus

L'obtention de la « qualité » dans ses multiples aspects exige au départ une certaine politique de la firme qui définit les finalités à atteindre. Il faut ensuite avoir les moyens de cette politique, moyens importants, puisqu'en fait les actions s'exercent à tous les niveaux et dans tous les secteurs de la firme, et qu'il faut pouvoir en contrôler constamment les effets. Cette phase du contrôle de la qualité, certes très importante et très onéreuse (elle exige des laboratoires de plus en plus perfectionnés), n'est qu'un aspect de l'obtention de la qualité.

▼ Laboratoire de contrôle du lait. Des analyses sont effectuées pour déterminer le pourcentage de matières grasses contenues dans le lait (contrôle du lait à Milan).

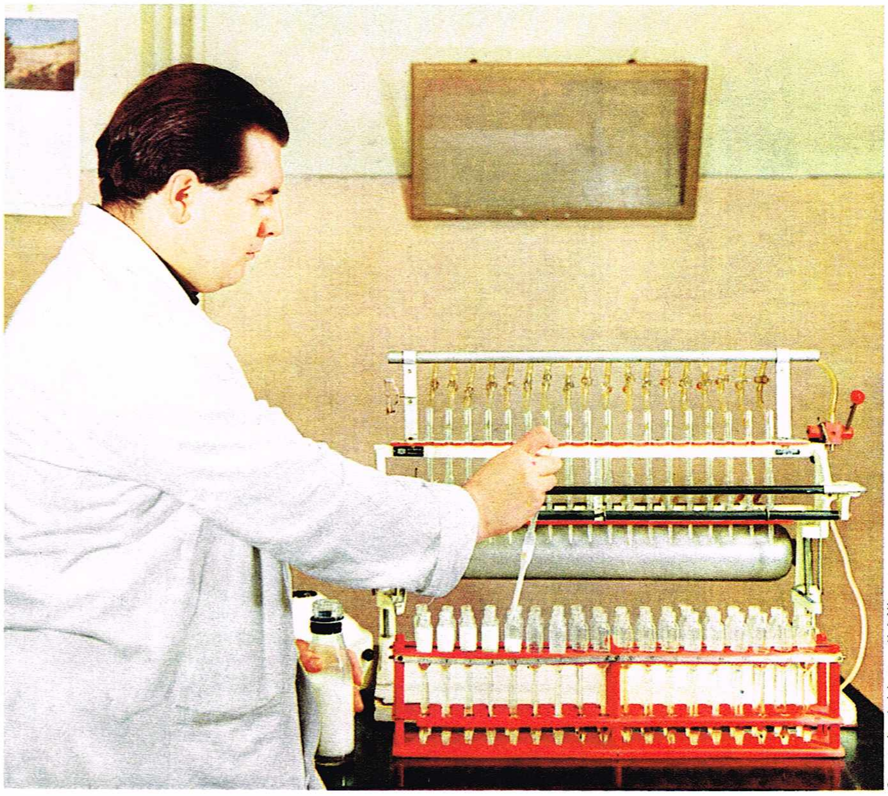

Centrale del latte di Milano

Ian Berry - Magnum

▲ *Pour répartir la vente d'un produit alimentaire tout au long de l'année, il faut résoudre le problème de la conservation. Ici, traitement des pommes en vue de leur conservation.*

▼ *Appareils pour la pasteurisation des jus de fruits.*

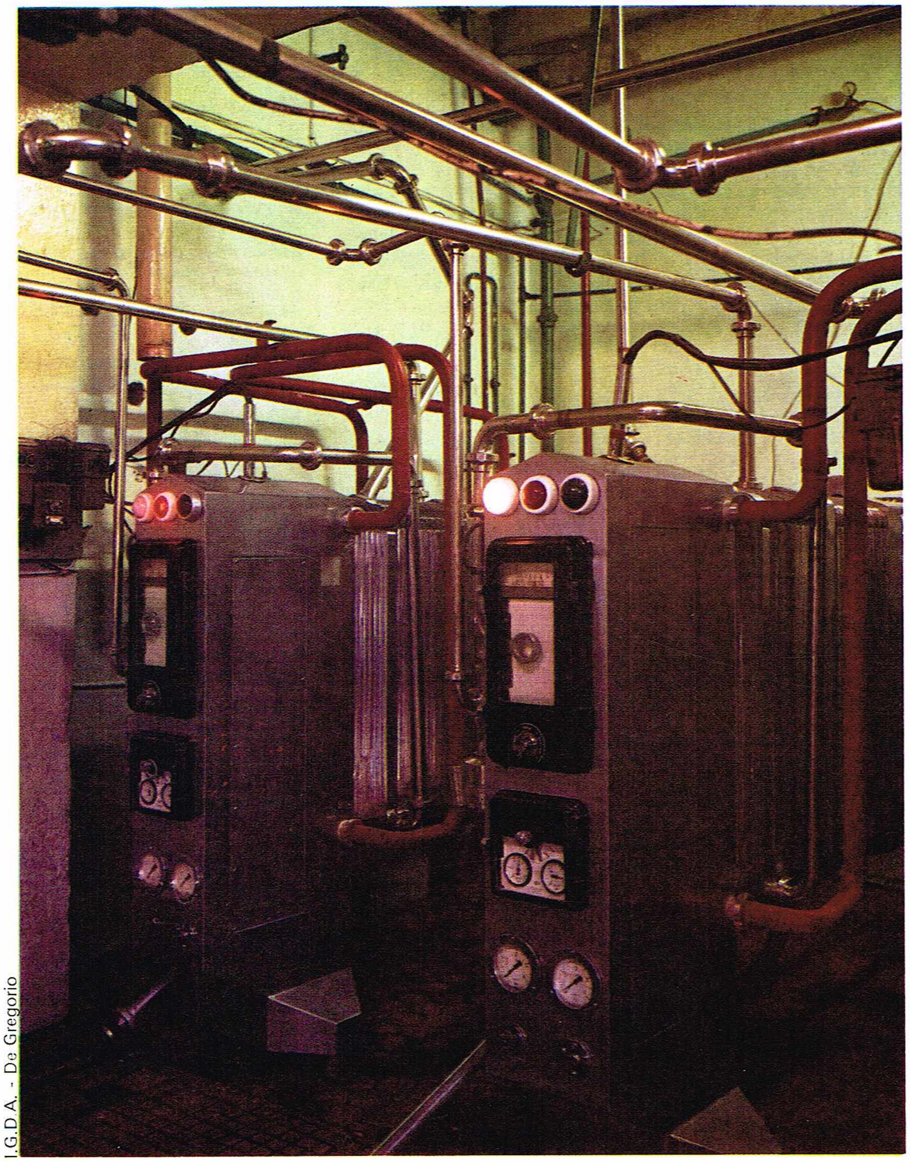

I.G.D.A. - De Gregorio

La conservation des aliments

Les produits alimentaires sont, par leur composition, relativement fragiles. Ils subissent au cours du temps, dans des conditions normales de conservation et suivant leur nature, différentes modifications qui peuvent avoir des origines biologiques, chimiques ou physiques : putréfaction des produits carnés, fermentation des produits végétaux, hydrolyses, oxydation des matières grasses.

Le maintien des qualités organoleptiques, nutritionnelles et hygiéniques des aliments est un problème qui préoccupe les hommes depuis très longtemps. Il se pose encore aux industriels pour s'affranchir du caractère saisonnier des productions agricoles, dans certaines industries agricoles comme celles qui fabriquent des confitures, des fruits confits, des arômes de fruits (ces industries peuvent répartir leur activité sur toute l'année si les fruits sont conservés), et du caractère saisonnier de certaines industries alimentaires comme la chocolaterie (les produits de cette industrie sont surtout vendus à Pâques et Noël). Pour des questions de productivité, une répartition de la production est nécessaire, ce qui implique de pouvoir conserver les produits en attendant les périodes de vente maximales.

D'autre part, les circuits de distribution archaïques qui persistent encore imposent aux produits une durée de conservation longue dans des conditions difficiles.

Enfin, le consommateur aimerait voir se prolonger le plus longtemps possible, pour des questions pratiques, l'état de fraîcheur dans lequel se trouvait le produit au moment de l'achat.

Modifications des aliments ayant des causes biologiques

Les aliments constituent un milieu favorable au développement des germes microbiens qui y trouvent les nutriments indispensables à leur croissance. L'action des micro-organismes sur les aliments peut être bénéfique : c'est le cas en brasserie, en fromagerie, en vinification où les produits résultent du travail des micro-organismes. Cette action peut également provoquer une détérioration ou une contamination de l'aliment, due soit à des germes banals, soit à des germes pathogènes. Les pâtisseries, les produits de charcuterie, les glaces contiennent quelquefois de grandes quantités de germes banals, plusieurs centaines de milliers par gramme. Leur nombre est fonction des soins en matière d'hygiène au cours de leur préparation.

Les germes banals ne présentent, comme leur nom l'indique, aucun risque pour la santé, mais si leur nombre est très important (malpropreté des fabrications), les chances qu'ils soient accompagnés de germes pathogènes augmentent. Bien entendu, pour ces derniers, la réglementation est sévère et ne tolère pas leur présence dans les aliments.

Les germes banals et pathogènes peuvent être présents dans les aliments sans que les qualités organoleptiques de ceux-ci en soient modifiées. En revanche, le développement de ces micro-organismes dans un aliment entraîne de profondes modifications de celui-ci, qu'il s'agisse de la putréfaction des viandes provoquée par les bactéries, ou des profondes altérations des produits végétaux consécutives au développement des moisissures ou des levures. Le développement de certaines moisissures, comme l'*Aspergillus flavus*, peut rendre l'aliment très dangereux. En effet, insidieusement, cette moisissure sécrète une toxine qui est considérée comme un des plus puissants facteurs cancérigènes hépatiques connus.

L'altération d'origine biologique des aliments n'est pas due à la seule présence des micro-organismes, mais à leur développement. Ce qui veut dire qu'un aliment se conservera :

— s'il ne contient pas de micro-organismes, ce qui est évident et ne se rencontre pratiquement pas, ou si les micro-organismes qu'il contenait ont été tués, et dans les deux cas à condition que l'aliment ne soit pas contaminé au cours de sa conservation ;

— si l'on empêche les micro-organismes présents dans l'aliment de se développer.

Centrale del latte di Milano

▲ *Implantation pour le traitement du lait longue conservation par le procédé U.H.T. (stérilisateur ultra-haute température).*

● **L'élimination des micro-organismes** se fait **par traitement chimique** (il faut considérer ici la température et le temps : moins la température est élevée, plus le temps de traitement doit être long, et inversement). Les germes pathogènes sont plus sensibles que les germes banals.

— La *pasteurisation*, qui s'effectue à température relativement basse (72 °C pendant 15 secondes), élimine préférentiellement les germes pathogènes. Les produits bien pasteurisés ne présentent plus de risque pour la santé mais leur conservation n'est pas assurée, puisque les germes banals n'ont pas été tués.

— Dans la *stérilisation* (quelques minutes à 115 °C), au contraire, tous les germes sont tués. Si les produits restent à l'abri des contaminations ultérieures, comme c'est le cas dans les boîtes de conserve ou les bouteilles de lait, la conservation est pratiquement illimitée. Ce traitement thermique présente l'inconvénient — et cela d'autant plus qu'il s'effectue à température plus élevée — de détruire des nutriments, et en particulier de dénaturer les protéines. Pour le lait, outre les pertes importantes en vitamines B_1, C, B_{12}, en acide folique et en protéines, la stérilisation traditionnelle provoque des modifications également sur le plan organoleptique.

Récemment, la *stérilisation UHT* (Ultra-Haute Température) a permis de pallier ces inconvénients. Le procédé est fondé sur la constatation qu'une augmentation de température a plus d'effet sur la vitesse de destruction des micro-organismes que sur la vitesse des réactions chimiques (dégradation des nutriments). Le lait est traité à 145 °C pendant 1 à 2 secondes. Ni les nutriments ni les qualités organoleptiques ne sont altérés par ce traitement.

Bien entendu, les aliments stérilisés ne se conserveront qu'aussi longtemps qu'ils resteront à l'abri des contaminations microbiennes. Les contenus d'une boîte de conserve ou d'une bouteille de lait s'altèrent très vite après l'ouverture de ces récipients.

● La deuxième possibilité de conservation des aliments est de créer des **conditions physiques** ou de milieu telles que les micro-organismes ne puissent se développer.

En ce qui concerne les conditions physiques, la température joue un rôle de premier ordre. Tous les êtres vivants présentent des températures auxquelles leur activité est optimale. Nous avons vu que les températures élevées détruisent la matière vivante. A l'opposé, les températures basses ralentissent les activités vitales. Au froid, les produits alimentaires s'altèrent moins vite parce que l'activité des micro-organismes est réduite. Si la température est suffisamment basse, on peut obtenir

▼ *Visite de contrôle d'un entrepôt de viandes congelées à Montevideo (Uruguay).*

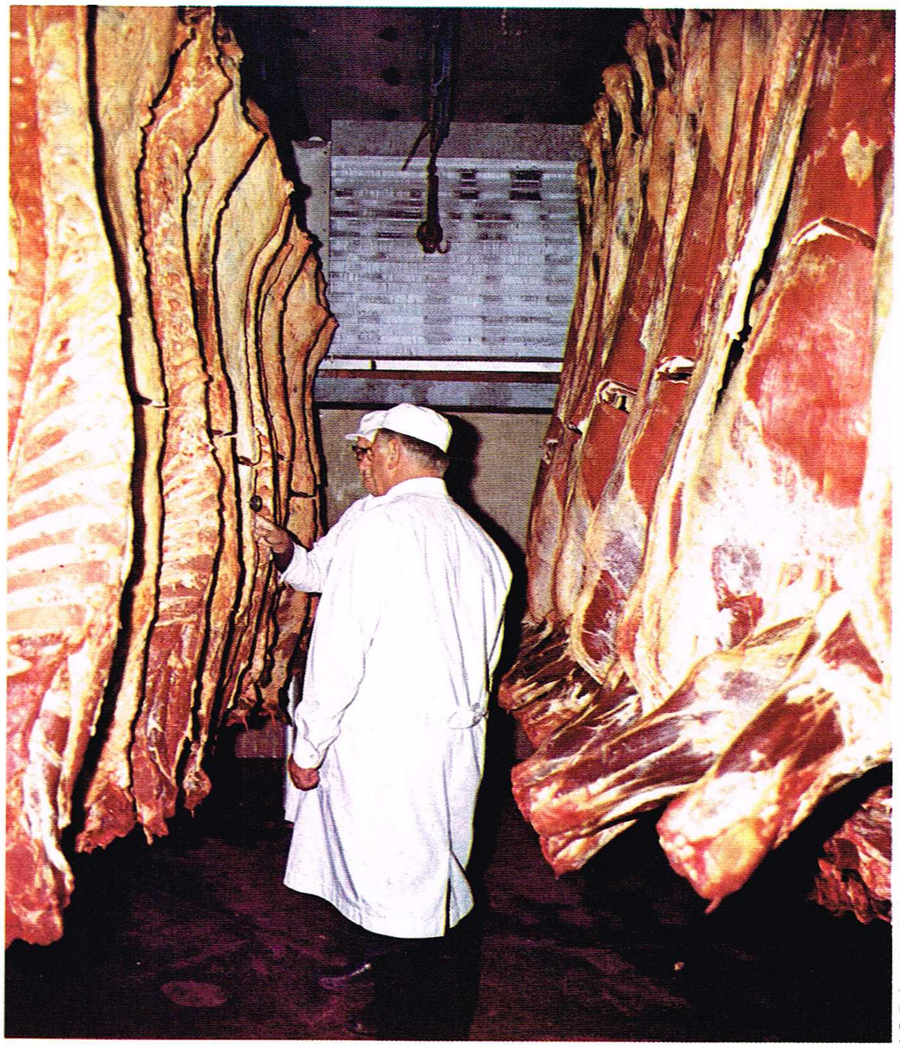

I.G.D.A. - Leigheb

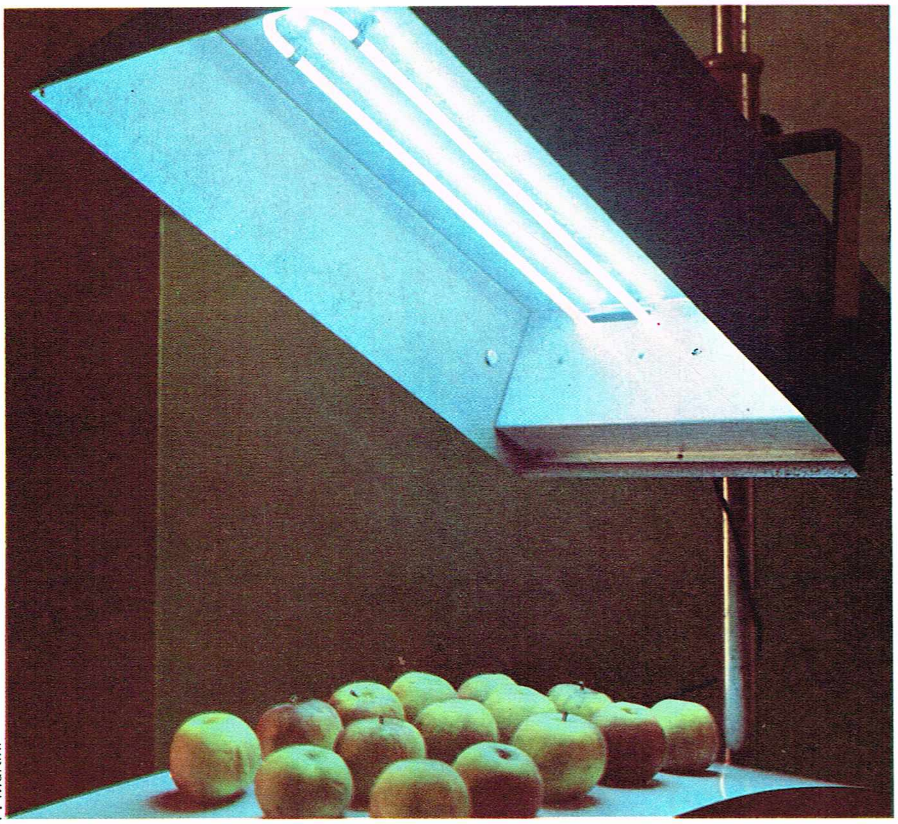

P. Martini

▲ *Irradiation par les ultraviolets de fruits destinés à être conservés. Cette méthode n'est pas encore très répandue.*

▼ *Porte de chargement d'un lyophilisateur (Lio Prodal - Messine).*

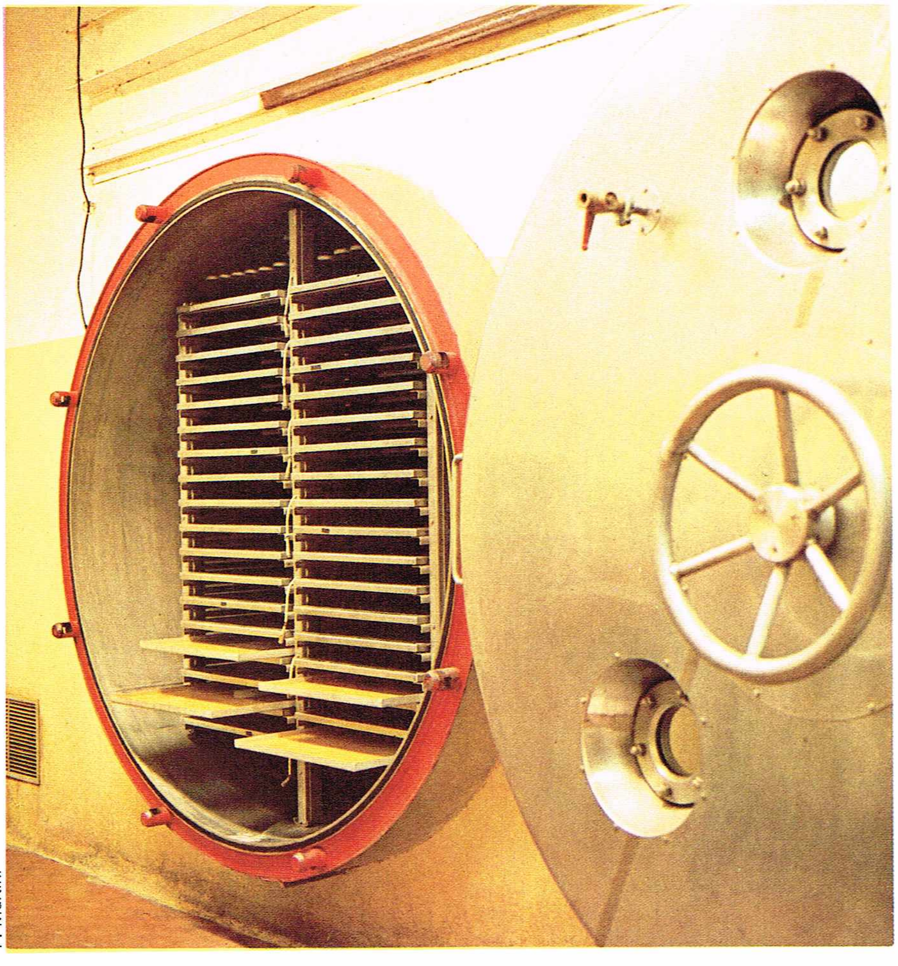

P. Martini

la mort apparente des bactéries, moisissures, levures... Il s'agit bien d'une mort apparente. En effet, si la température redevient normale, les micro-organismes reprennent leur activité.

— La *congélation* présente l'inconvénient d'altérer les tissus. Par contre, la *surgélation*, qui porte les aliments à une température plus basse, environ — 20 °C en un temps très court, forme des microcristaux de glace qui ne traumatisent pas les cellules comme les gros cristaux formés au cours de la congélation. Les produits surgelés retrouvent donc leur aspect d'origine lorsqu'ils sont portés à température ordinaire. La surgélation stabilise la population microbienne au niveau de départ pendant tout le temps qu'elle dure. Elle permet de conserver les qualités nutritionnelles et organoleptiques des aliments : c'est une des meilleurs méthodes de conservation des produits alimentaires. Mais elle exige une chaîne du froid continue sur le plan de la distribution et sur le plan des ménages (nécessité d'avoir des freezers). Cette technique s'est considérablement développée aux États-Unis. Les durées de conservation sont très longues : 1 an pour les fruits et légumes; 9 mois pour les viandes, volailles; moins de 6 mois pour les poissons.

— L'*irradiation*, elle aussi, diminue l'action des enzymes et ralentit l'activité des micro-organismes. Les aliments sont traités soit par rayons X, soit par des faisceaux d'électrons. Cette technique a été expérimentée dans plusieurs pays après la Seconde Guerre mondiale. Elle a donné des résultats intéressants dans le traitement des pommes de terre, qui voient leur pouvoir germinatif inhibé, d'où une conservation plus longue de ces végétaux.

Bien que des résultats encourageants aient été obtenus pour différents produits alimentaires, cette méthode a du mal à quitter le stade expérimental. Il faut dire que « l'image de marque » de l'irradiation n'est pas excellente dans l'esprit du public; de plus, ce traitement altère quelque peu les produits sur le plan organoleptique (saveurs déplaisantes, modifications de texture et de couleurs) et sur le plan nutritionnel (destruction de certaines vitamines).

● Les micro-organismes ont besoin pour vivre d'une certaine quantité d'eau qu'ils trouvent dans de nombreux aliments naturels (l'eau entre pour plus des trois quarts dans la composition de la matière vivante). La **déshydratation** des aliments, en éliminant cette eau indispensable à la vie des micro-organismes, stoppe leur activité.

— Le moyen le plus simple de déshydrater les aliments est de les *sécher au soleil ou à l'air chaud*. Les modifications qu'ils subissent dans ces conditions sont très importantes tant sur le plan organoleptique que sur le plan nutritionnel.

— La *lyophilisation* est une technique de déshydratation peu traumatisante pour le produit. Elle consiste à le refroidir brutalement à — 60 °C, puis à sublimer sous vide la glace formée. C'est une technique chère qui ne s'applique qu'à certains aliments de luxe (café soluble) pouvant être traités en couches minces.

— Les *micro-ondes* offrent une nouvelle approche de la déshydratation. Elles permettent un dégagement très rapide de chaleur dans toute la masse du produit. Il n'y a pas de gradient de température (le réchauffement ne s'effectue pas de la périphérie vers l'intérieur comme dans les procédés traditionnels). Cette technique, qui peut être utilisée pour déshydrater les aliments, est actuellement surtout mise en œuvre pour chauffer et cuire (un poulet peut être cuit en 5 minutes). Les qualités nutritionnelles et organoleptiques des aliments cuits de cette façon sont excellentes.

D'autres techniques plus traditionnelles sont utilisées industriellement pour le séchage des produits alimentaires :

— L'*atomisation* consiste à pulvériser au sommet d'une tour une solution ou une suspension dans un courant d'air chaud. L'eau des fines gouttes est évaporée presque instantanément, la poudre sèche est recueillie à la base; les réglages doivent être tels que les calories apportées par l'air chaud soient juste suffisantes pour évaporer l'eau sans élever la température du solide afin d'éviter d'altérer les qualités nutritionnelles et organoleptiques.

— Le séchage *Hatmaker* est également très utilisé. Il consiste à faire passer en couche mince la solution ou la suspension à évaporer sur des rouleaux chauffés; le

J.N. Reichel - Top

▲ *Séchage du poisson au bord de la mer à Nazaré (Portugal).*

produit sec est détaché du rouleau par raclage ; il se présente alors sous forme de minces copeaux. Les procédés d'atomisation et Hatmaker sont très utilisés dans l'industrie laitière.

● On peut également **limiter ou inhiber le développement des micro-organismes** en intervenant sur la composition du produit alimentaire.

L'eau dans un aliment se présente sous deux formes, une dite libre et l'autre liée. Les proportions de chacune d'entre elles dans l'eau totale sont fonction de la nature et de la taille des molécules solubles de l'aliment. Le développement des micro-organismes est fonction de l'activité de l'eau qui mesure le degré de liberté de celle-ci :

$$\text{activité de l'eau } (a\,\omega) = \frac{\text{molécules d'eau}}{\text{molécules d'eau} + \text{molécules solubles de l'aliment}}$$

Chaque type de micro-organisme exige une valeur minimale de l'activité de l'eau au-dessous de laquelle il ne peut plus se développer. En modifiant la quantité de molécules dissoutes, on peut plus ou moins abaisser la valeur de l'activité de l'eau et entrer dans des zones où le développement des micro-organismes n'est plus possible.

Ainsi, une quantité suffisante de *sucre* pourra empêcher le développement des micro-organismes. Si le saccharose est partiellement hydrolysé en fructose et glucose, l'activité de l'eau sera abaissée (d'où une meilleure conservation), puisqu'à poids égal de sucres le nombre de molécules sera plus important dans le cas du saccharose hydrolysé que dans le cas du saccharose tel quel.

Le *sel*, qui agit lui aussi sur l'activité de l'eau, est utilisé dans la conservation des aliments.

● Un autre moyen d'éviter le développement des micro-organismes est d'agir directement sur eux au moyen de divers **composés chimiques.** Parmi la gamme très vaste des substances possibles (antibiotiques, bactériostatiques, antiseptiques...), un nombre très restreint de conservateurs est autorisé dans les aliments : l'acide sorbique et ses sels, l'acide benzoïque et ses sels, les esters propyliques et éthyliques de l'acide parahydroxybenzoïque, les nitrites et nitrates, l'anhydride sulfureux et ses sels. Chacun de ces conservateurs a un spectre d'action microbienne spécifique. Par exemple, les dérivés de l'anhydride sulfureux agissent plus efficacement sur les moisissures et les bactéries que sur les levures.

Le Service des fraudes en France s'est toujours efforcé de limiter le plus possible l'utilisation des conservateurs chimiques antimicrobiens en alimentation, et cela bien avant que les consommateurs remettent en cause les additifs en général. Cette politique a pour but de favoriser les mesures d'hygiène en industrie alimentaire.

Modifications des aliments ayant des causes chimiques

Compte tenu de la complexité de la composition des aliments, le nombre de réactions chimiques possibles entre les différents constituants est relativement grand. Ces réactions, qui se déroulent précisément au cours de la conservation des aliments, sont très rapides pendant leur fabrication, notamment lorsque celle-ci comporte des traitements thermiques.

● Pendant la conservation, les réactions qui compromettent le plus les qualités organoleptiques des aliments sont les **réactions d'oxydation.** Elles sont en particulier responsables des changements de couleur et de saveur. Le beurre exposé à l'air et à la lumière s'oxyde. Il devient blanc à la suite de la destruction par oxydation des pigments caroténoïdiques qui le colorent naturellement en jaune. Sa saveur devient désagréable (goût de suif) du fait de la nature des divers composés résultant de la scission des glycérides oxydés.

Sans entrer dans le détail du mécanisme de l'oxydation, on peut écrire que celui-ci comprend trois phases principales :

— Une *phase d'initiation* au cours de laquelle se forment, à partir des molécules oxydables, comme en particulier les acides gras insaturés, des radicaux libres particulièrement réactifs. Cette formation est catalysée par la chaleur, les rayons ultraviolets et les traces de métaux comme le cuivre, le fer.

Si l'on symbolise par RH une molécule organique possédant un hydrogène mobile (H), la réaction s'écrira :

$$\text{RH} \xrightarrow[\text{UV, traces métalliques}]{\text{chaleur}} \text{R}\bullet + \text{H}\bullet$$

La molécule RH donnera dans cette phase d'initiation le radical R•.

— Une *phase de propagation :* au cours de cette phase, les molécules d'oxygène se fixent sur les radicaux très réactifs R• pour donner des radicaux hydroperoxydes (ROO•)

$$R^\bullet + O_2 \rightarrow ROO^\bullet$$

Ces radicaux réagissent avec les molécules RH pour donner des hydroperoxydes ROOH et des radicaux R• qui réagissent à leur tour sur des molécules d'oxygène, et, de proche en proche, les molécules RH se transforment en hydroperoxydes.

A ce stade du processus d'oxydation, il n'y a pas encore de modification sensible des qualités organoleptiques du produit. Seul le chimiste est à même de montrer que le produit est en voie de dégradation.

— Une *phase terminale* au cours de laquelle les radicaux formés réagissent deux à deux en se neutralisant réciproquement. Mais surtout, et c'est le point le plus important sur le plan organoleptique, les hydroperoxydes se décomposent en donnant naissance à des composés divers responsables de la saveur fort déplaisante des produits oxydés.

Il faut bien distinguer cette altération, qui est la rancidité oxydative, d'une autre plus généralisée, qui est la rancidité hydrolytique. Dans le cas du beurre, par exemple, cette dernière est due à l'action d'enzymes microbiennes qui hydrolysent les glycérides et libèrent les acides gras. Plus ceux-ci ont des chaînes courtes, plus leur arôme est important.

L'acide butyrique, acide gras caractéristique du beurre, formé d'une chaîne hydrocarbonée très courte (6 atomes de carbone), a un arôme très prononcé. A l'inverse, l'acide stéarique (18 atomes de carbone) a peu d'effet organoleptique.

Lorsque de très petites quantités d'acide butyrique sont libérées par l'action des enzymes (lipases), le beurre prend un goût de rance désagréable. Ce défaut apparaît très vite avec les beurres fermiers préparés sans précautions hygiéniques particulières et conservés à la température ordinaire. Les micro-organismes se développent, et leurs enzymes libèrent l'acide butyrique. Le beurre préparé dans de bonnes conditions, mieux encore s'il est pasteurisé et conservé au froid, aura peu de chances de rancir, puisque les germes microbiens seront faibles au départ et qu'ils ne trouveront pas les conditions physiques de leur développement.

La rancidité hydrolytique est un phénomène qui se développe dans la masse du produit si celui-ci n'a pas été préparé proprement, ou, dans le cas contraire, en surface à la suite d'une contamination microbienne postérieure à la fabrication. La rancidité oxydative se développe toujours en surface, là où le contact est possible entre le produit et l'oxygène de l'air. Les rancidités oxydatives et hydrolytiques ont des conséquences organoleptiques semblables ; le goût est désagréable dans les deux cas. Leurs conséquences nutritionnelles sont différentes. Dans le cas de la rancidité hydrolytique, il n'y a pas d'altération des acides gras qui se sont détachés de la molécule des glycérides tout en gardant leur intégrité. Cette scission de la molécule des glycérides se produit d'ailleurs au cours de la digestion des lipides.

Par contre, dans la rancidité oxydative, les modifications sont très profondes, puisque les molécules sont détruites. Sur le plan nutritionnel, cela présente deux inconvénients, d'une part, l'oxydation pourra provoquer une carence en acide gras essentiel (acide linoléique) ; d'autre part, les petites molécules résultant de la dégradation des molécules oxydées peuvent présenter une certaine toxicité.

Comment éviter l'oxydation des constituants des produits alimentaires ? Tout d'abord en évitant de détruire ou d'éliminer au cours des processus technologiques les substances antioxygènes contenues naturellement dans les aliments et qui les protègent (voir *Le raffinage des matières grasses*). Ensuite en isolant les produits finis de l'environnement extérieur, c'est-à-dire en les plaçant à basse température, à l'abri de l'air et de la lumière. Ces deux dernières conditions peuvent être satisfaites grâce à des emballages judicieusement choisis.

Enfin, il est possible d'ajouter certaines substances antioxygène d'origine synthétique ou naturelle. Celles qui sont autorisées par la réglementation sont en nombre limité comme les conservateurs antimicrobiens. On peut citer l'acide ascorbique (vitamine C), les tocophérols (vitamine E), les gallates, le BHT (butylhydrotoluène) et le BHA (butylhydroxyanisol), et l'anhydride sulfureux. Ce dernier est également un conservateur antimicrobien.

Comme les molécules oxydables, les molécules d'antioxygène donnent naissance, dans la phase d'initiation, à des radicaux. Ces radicaux étant très stables, il n'y a pas de propagation. Les préparations commerciales d'antioxygènes renferment plusieurs additifs. En général, on utilise 2 ou 3 antioxygènes qui sont accompagnés d'un acide qui en augmente l'efficacité. De plus, un additif complexe les traces métalliques qui catalysent l'oxydation. Enfin, un émulsifiant permet de disperser les antioxygènes dans le produit alimentaire.

Modifications des aliments ayant des causes physiques

Ces modifications sont très variées.

● La **cristallisation** du dextrose dans le miel ; du saccharose dans les confitures, les sirops, les confiseries ; de l'amidon dans le pain. (La composante physique du rassissement du pain est la pseudo-cristallisation des molécules d'amidon.)

● Le **polymorphisme** des glycérides est responsable des défauts quelquefois observés lors de la conservation des produits de chocolaterie, comme le blanchiment gras, et de problèmes divers dans l'industrie des matières grasses.

● Les séparations de phases peuvent apparaître dans les émulsions.

● Les **sorptions et désorptions** d'eau jouent un rôle très important dans la conservation des aliments. Entre un produit alimentaire et l'atmosphère qui l'entoure, il y a des échanges d'eau qui aboutissent suivant les cas soit à une dessiccation, soit à une réhydratation du produit. C'est évidemment l'eau libre (définie dans le paragraphe *Modifications ayant des causes biologiques*) qui s'échange et qui, en définitive, détermine la valeur de l'humidité relative d'équilibre (HRE). L'air contient une certaine quantité de vapeur d'eau qui est mesurée par une humidité relative (HR), c'est-à-dire le rapport existant, à une température donnée, entre la quantité d'eau présente et la quantité maximale (vapeur d'eau saturante) possible à cette température. L'HRE d'un aliment correspond à la valeur de l'HR de l'atmosphère dans laquelle il se trouve et avec laquelle il est en équilibre (c'est-à-dire qu'il ne perd ni ne gagne d'eau). En pratique, pour la déterminer, différents échantillons de l'aliment sont placés dans des atmosphères à HR variées ; pesés périodiquement, certains des échantillons vont prendre du poids, d'autres vont en perdre. Un des échantillons gardera un poids stable ; la valeur de l'HR de l'atmosphère dans laquelle il se trouvait déterminera la valeur de son HRE.

Il est possible de jouer sur l'HRE d'un aliment en modifiant sa composition. Si on souhaite éviter qu'un produit ne se dessèche, par exemple de la pâte d'amandes, on peut remplacer une partie du saccharose par du sucre inverti qui, en doublant le nombre de molécules pour un même poids, diminue l'eau libre. Certains additifs comme la *glycérine* ou le *sorbitol* permettent d'éviter le dessèchement.

Ces sorptions et désorptions d'eau peuvent avoir diverses conséquences sur la conservation en provoquant des modifications non seulement physiques mais également chimiques et biologiques. Un des nombreux problèmes de la technologie alimentaire est de faire coexister des composés hydrophiles et hydrophobes dans des structures artificielles équilibrées. Les matières grasses (hydrophobes) ont très peu d'affinité pour les sucres et toutes les matières hydrophiles en général. Il faudra donc procéder à des dispersions, émulsions et stabiliser ces systèmes de façon à éviter leur évolution au cours de la conservation. C'est là qu'intervient un très important groupe d'additifs, les *tensio-actifs* (émulsifiants), parmi lesquels la lécithine, émulsifiant naturel, et les monoglycérides et microglycérides. Ces composés permettent de créer des structures dispersées, mais ils doivent être aidés dans certains cas pour la conservation de cette structure par un autre groupe important d'additifs, les gélifiants épaississants, qui, en augmentant la viscosité des milieux, les stabilisent. Ce sont principalement des gommes, des alginates, des pectines, des dextrines.

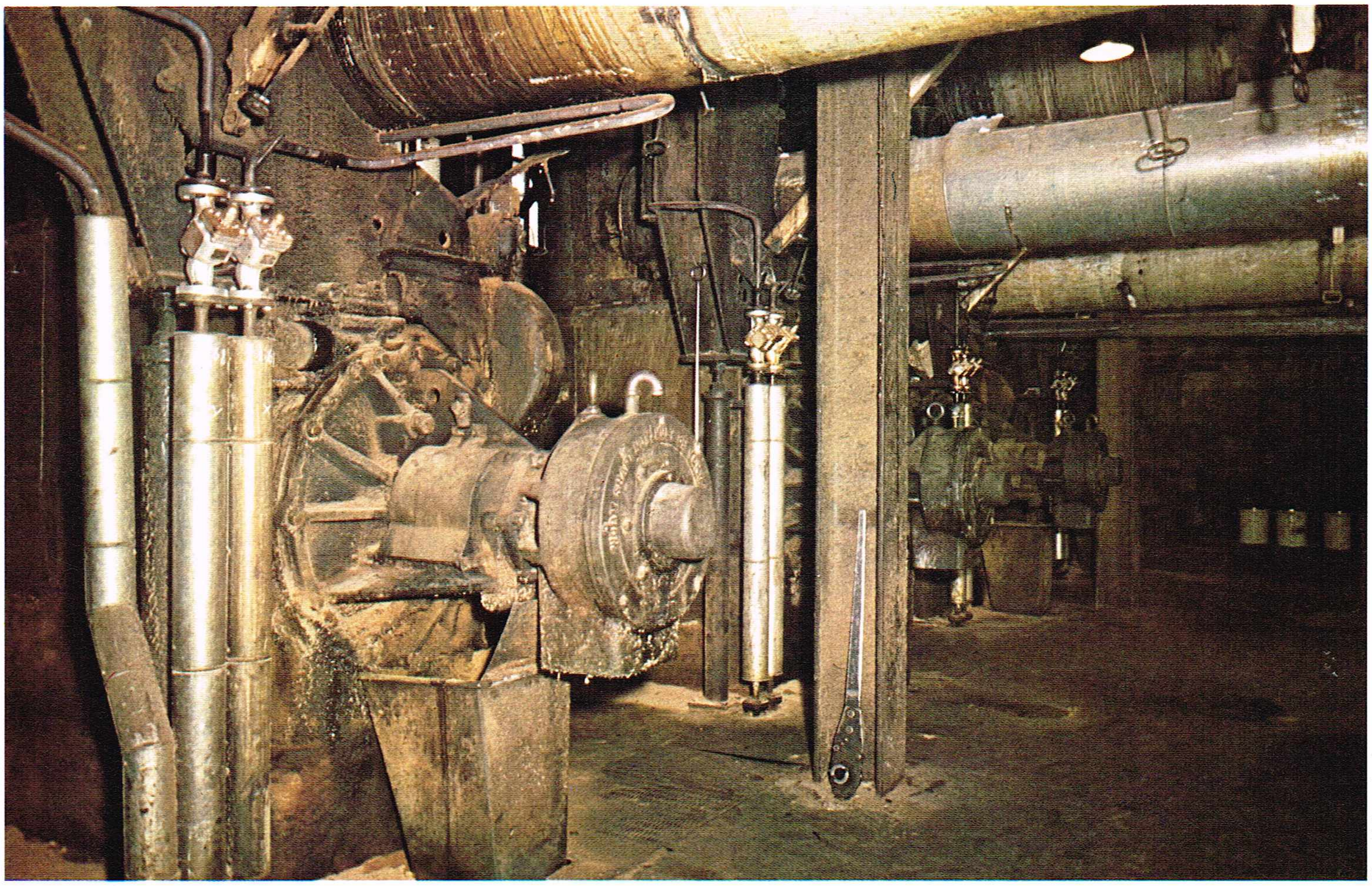

Photothèque Lesieur

▲ ***Les graisses et huiles végétales peuvent être obtenues par pression continue des graines.***

L'INDUSTRIE DES CORPS GRAS

L'industrie des corps gras, que nous prenons ici comme exemple d'industrie alimentaire, est intéressante à étudier dans la mesure où elle constitue une sorte de carrefour pour plusieurs technologies : celle de l'industrie agricole, quand elle se contente d'extraire les huiles et graisses des produits naturels qui les contiennent; celle de l'industrie alimentaire, quand elle élabore des produits composites comme la margarine; celle enfin de l'industrie chimique, quand elle modifie, transforme, la nature des corps gras.

Si les glucides et les protéines font l'objet de diverses transformations et modifications, celles-ci sont certainement chimiquement les plus profondes et économiquement les plus généralisées au niveau des corps gras.

Les graisses animales sont obtenues par fonte des tissus adipeux, qui est effectuée soit à la vapeur, soit à sec et, pour éviter l'apparition de couleurs, d'odeurs indésirables, à des températures ne dépassant pas 80 °C. Les huiles de poissons sont extraites des poissons broyés cuits et pressés à chaud. Le tourteau est utilisé en alimentation animale comme source de protéines.

Les graisses et huiles végétales peuvent être obtenues par pression ou par solvants à partir des graines oléagineuses (*fig.* 12 et 13).

Les différentes matières grasses peuvent subir deux grands types de traitements : les traitements de raffinage, et les traitements entraînant des modifications plus ou moins profondes des matières grasses.

Le « raffinage »

Raffiner signifie rendre plus fin, plus pur. Raffiner du sucre, c'est tenter d'obtenir la molécule de saccharose à l'état pur. Les industriels ont d'ailleurs parfaitement réussi dans cette voie, puisqu'ils peuvent aujourd'hui proposer aux consommateurs du sucre commercial renfermant plus de 99,7 % de saccharose, c'est-à-dire une pureté que l'on n'atteint généralement que pour les produits traités pour analyse. Cette pureté n'a pu être obtenue que grâce à l'évolution rapide de la technologie sucrière qui a atteint un des niveaux les plus élevés du domaine agro-alimentaire.

Si l'on comprend l'intérêt commercial d'une telle pureté — constante de la qualité, blancheur, cristallisation, solubilité, neutralité gustative, valeur ajoutée plus importante (celle-ci étant liée au niveau technologie) —, on saisit peut-être moins bien son intérêt nutritionnel. N'élimine-t-on pas ainsi certains composés mineurs sur le plan quantitatif mais présentant une certaine valeur biologique, et accompagnant naturellement le saccharose dans la canne et même la betterave ? Certains le pensent, qui proposent à des fins diététiques des sucres roux, c'est-à-dire non raffinés (à des prix quelquefois plus élevés que le sucre raffiné).

Sur le plan de l'utilisation industrielle, la qualité chimique du sucre est par contre très importante, car les composés mineurs, jouant alors le rôle d'impuretés, peuvent intervenir sur la couleur, le goût, etc., des produits finis. Un sucre cuit (bonbon anglais) ou un sirop doivent être fabriqués avec un sucre suffisamment pur. Pour le premier, des couleurs et arômes indésirables qui sont le fait des impuretés peuvent se développer au cours des traitements thermiques que comprend le processus de fabrication des produits de confiserie. Dans les deux cas, confiserie et sirops, les impuretés peuvent compromettre les effets de l'arôme et des colorants ajoutés à ces produits. Dans d'autres cas, la pureté du sucre a beaucoup moins d'importance : il est en effet secondaire d'utiliser, par exemple pour la chocolaterie, un sucre très blanc. Toutefois, force est de constater qu'il n'existe maintenant sur le marché que des sucres de qualité supérieure, fruits d'une technologie avancée, diront les sucriers, mais ayant aussi, par voie de conséquence, la valeur ajoutée la plus forte. L'industriel utilisateur n'a en fait plus la possibilité de choisir la qualité de sucre correspondant à ses besoins. Il est pratiquement contraint de prendre la qualité supérieure, même si celle-ci ne lui est pas nécessaire.

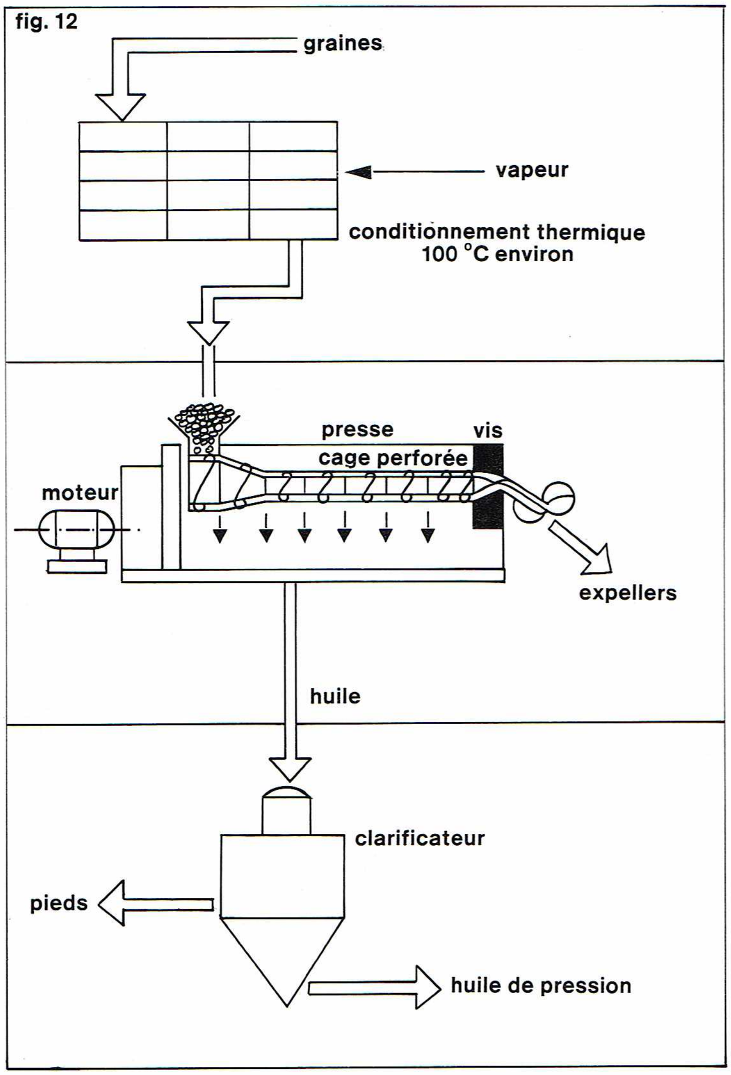

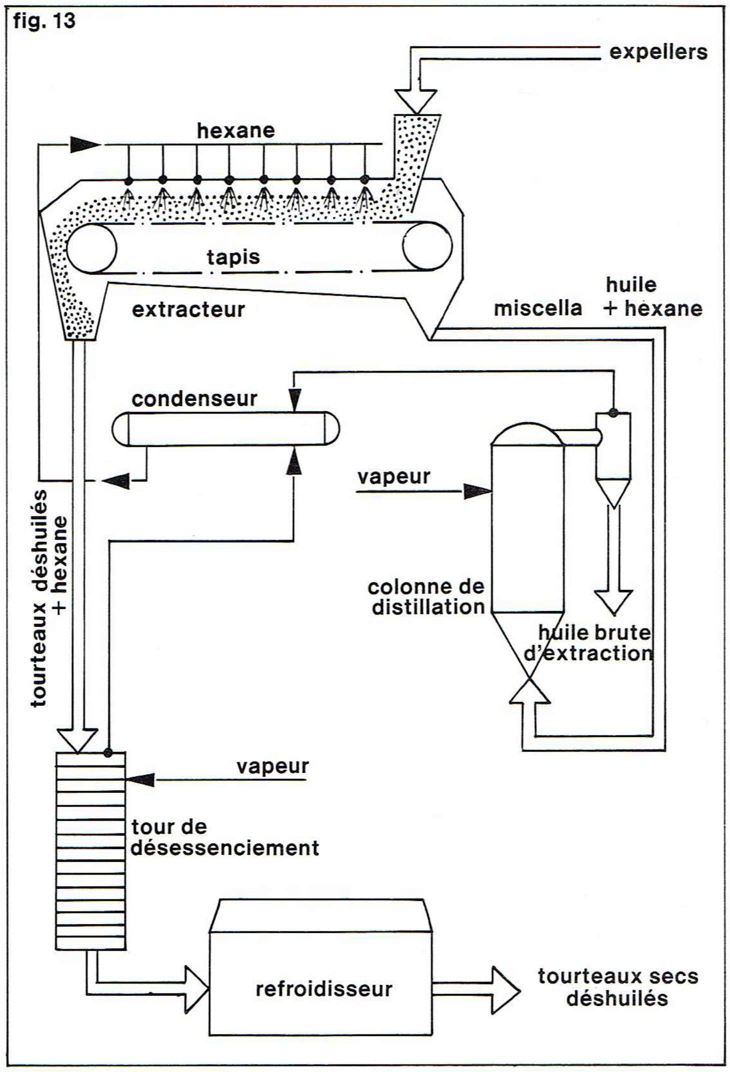

▲ Figure 12 : schéma de principe de la pression des graines, opération aboutissant à l'obtention d'huile brute limpide (d'après document Lesieur).
Figure 13 : schéma de principe de l'extraction de l'huile à partir du tourteau (résidu de la graine après pression) [d'après document Lesieur].

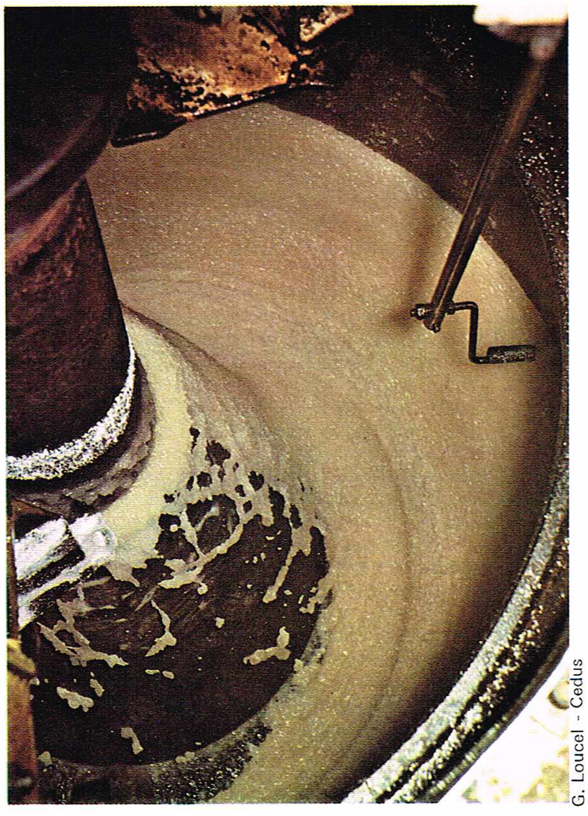

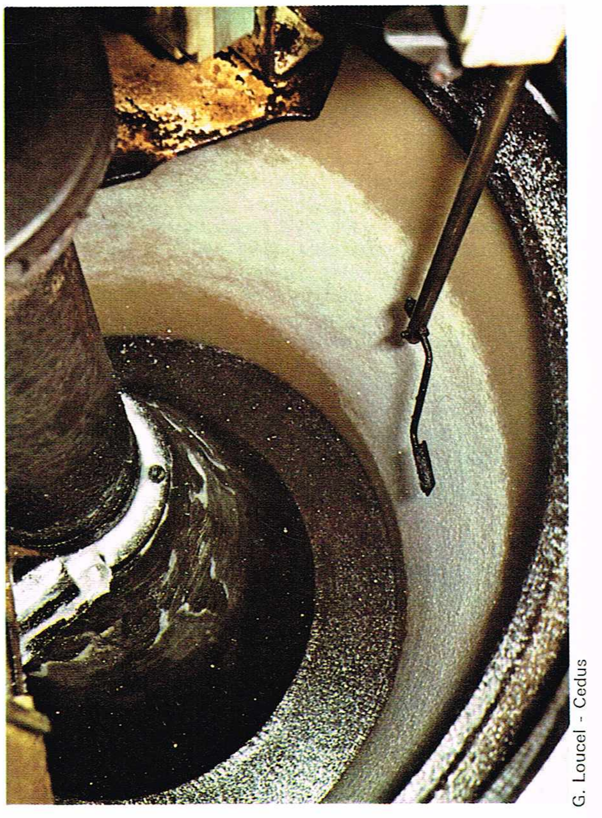

▶ De gauche à droite, respectivement, trois étapes successives du turbinage du sucre, opération qui consiste à séparer les cristaux de sucre des impuretés qui donnent à la masse cuite sa coloration brune ; le sucre obtenu est très blanc et très pur, c'est le sucre cristallisé qui contient plus de 99,7 % de saccharose.

Dans le cas des matières grasses, le raffinage a également deux finalités : l'une concerne la qualité des matières grasses et, plus particulièrement, des huiles consommées en l'état, l'autre la pureté nécessaire aux opérations de modification profonde comme l'hydrogénation et la transestérification. Dans le premier cas, les différentes opérations de raffinage — neutralisation, décoloration, démucilagination, désodorisation (*fig.* 14) — ont pour but de modifier les caractères organoleptiques de l'huile brute telle qu'elle est obtenue après extraction par pression ou par solvant.

Avant d'aborder les différentes phases du raffinage et d'examiner leur intérêt, il faut noter que *ce traitement est d'autant plus nécessaire que l'huile est de plus mauvaise qualité*.

En particulier, si les graines oléagineuses sont stockées dans des conditions défavorables, une fermentation peut se développer et être à l'origine d'une teneur élevée en acides gras (libérés à partir des glycérides grâce à des lipases microbiennes), d'odeurs et de couleurs anormales, qu'il faudra éliminer ou réduire.

Les graisses de bonne qualité provenant de graines saines peuvent aussi subir les opérations de désodorisation et de décoloration, bien qu'elles présentent des odeurs et des couleurs *sui generis,* non désagréables et même quelquefois plaisantes, cela dans un dessein de standardisation, les produits alimentaires devant présenter toujours les mêmes caractéristiques. La couleur naturelle orange des huiles de palme varie dans des limites assez larges. Cette coloration due à des caroténoïdes est utilisée en margarinerie pour donner aux produits finis leur teinte ; la constance de celle-ci ne peut être maintenue que par le jeu de décolorations partielles et de mélanges judicieux.

Le traitement peut être effectué pour obtenir une *neutralité organoleptique* de la matière grasse. Ainsi, le beurre de cacao non raffiné présente une odeur agréable et une couleur jaune paille. Celle-ci n'a aucun inconvénient dans le cas de l'utilisation de beurre de cacao dans le chocolat, la coloration de ce dernier n'étant pratiquement pas influencée par la teinte pastel du beurre de cacao ajouté. Par contre, il n'en est pas de même avec les confiseries au beurre de cacao du type chocolat blanc, où les colorations synthétiques, vert, rouge, bleu, que l'on donne à ces produits peuvent être modifiées.

En ce qui concerne l'arôme naturel du beurre de cacao, on peut être surpris que l'on soit amené à l'éliminer (nous

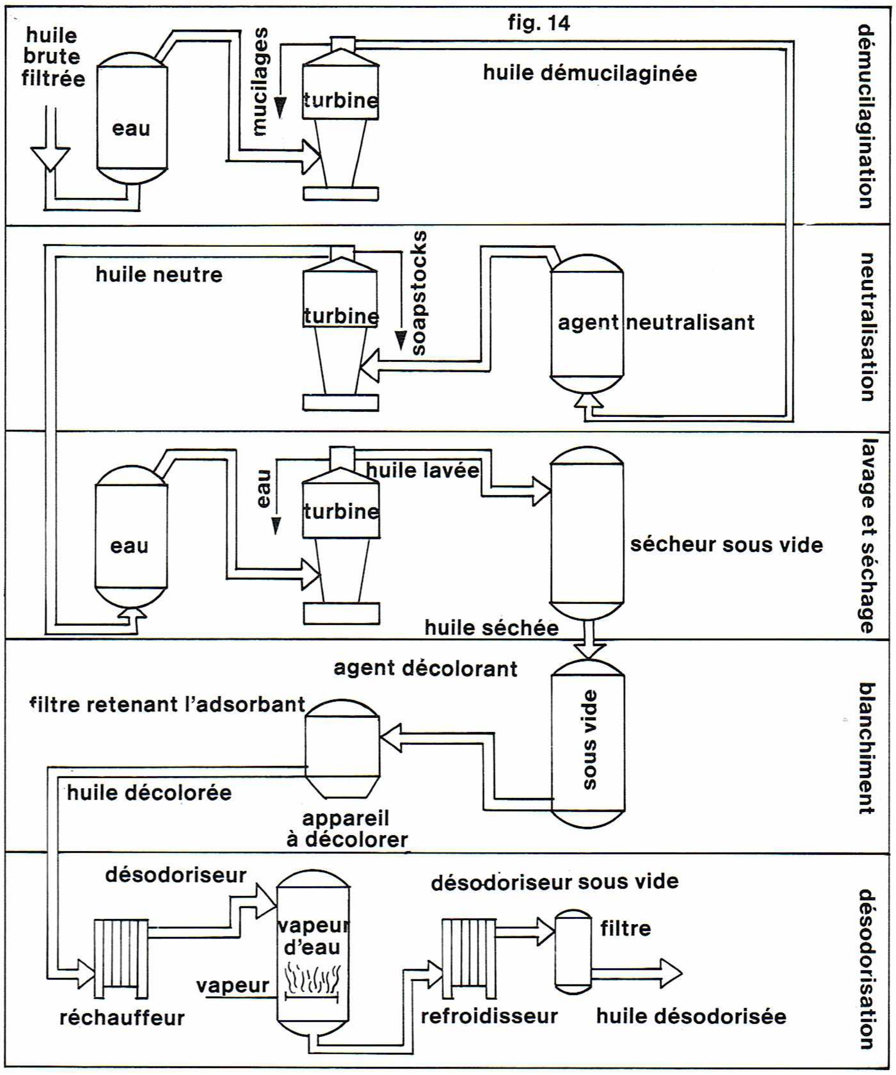

▲ *Figure 14 : schéma de principe des différentes opérations de raffinage des huiles végétales (d'après document Lesieur).*

G. Loucel - Cedus

▼ *Atelier de filtration des huiles végétales.*

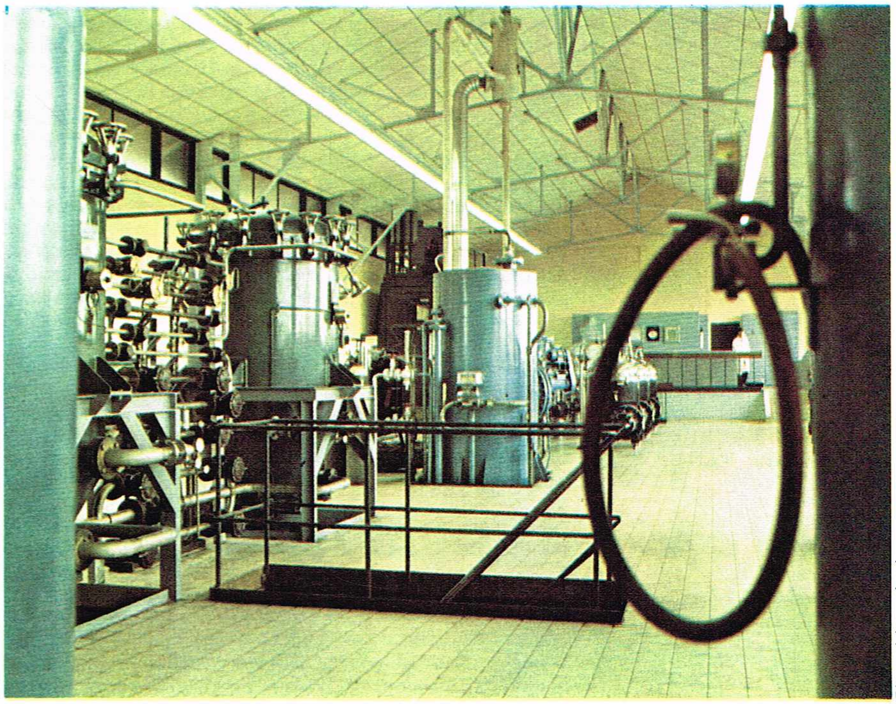
Photothèque Lesieur

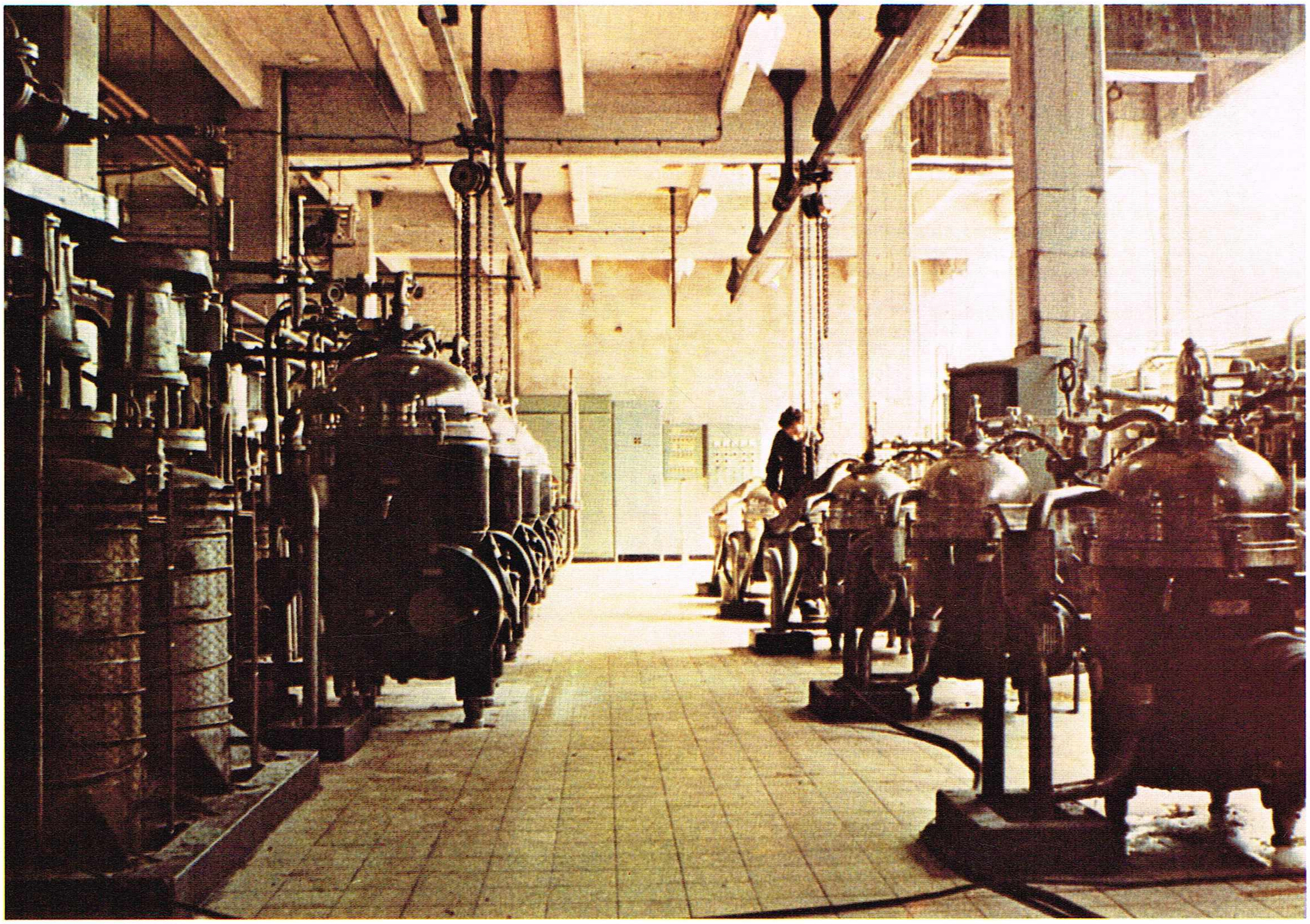

Photothèque Lesieur

▲ ***Hall de raffinage des huiles végétales; les centrifugeuses visibles sur cette photo servent à éliminer les substances insolubilisées au cours du raffinage.***

sommes toujours placés ici dans le cas de matières grasses obtenues à partir de graines oléagineuses non altérées) en chocolaterie. Il faut savoir que le chocolat est constitué de sucre, de pâte de cacao (fèves de cacao broyées) et de beurre de cacao, et que les fèves utilisées pour la fabrication de la pâte ne sont pas les mêmes que celles dont on extrait le beurre de cacao. Le chocolatier fait un mélange subtil de fèves de différentes origines, mélange qui lui permet d'obtenir après torréfaction un arôme particulier. Il est bien évident que si, à cette composition, il ajoute un beurre de cacao non désodorisé, l'arôme de ce beurre, aussi agréable soit-il, compromettra celui savamment élaboré par le chocolatier. Le beurre de cacao n'est généralement pas fabriqué par les chocolatiers mais par des industries spécialisées. Les fèves utilisées pour sa préparation sont des fèves de qualité courante (Cameroun, Côte-d'Ivoire), alors qu'interviennent dans la composition des bons chocolats des fèves originaires d'Amérique du Sud.

Neutralisation

L'acidité des graisses et huiles doit rester dans certaines limites fixées pour chacune d'entre elles. Lorsque ces limites sont dépassées, les matières grasses font l'objet d'un traitement de neutralisation ou de désacidification. Cette acidité peut être gênante à la fois sur le plan organoleptique et sur le plan technologique dans le cas où la graisse subit des traitements de modification.

Les matières grasses, après extraction, sont analysées en vue de déterminer la quantité d'acides gras libres qu'elles contiennent. Les résultats d'analyse permettent de déterminer avec précision la quantité d'hydroxyde de sodium ou de potassium nécessaire pour neutraliser l'acidité excédentaire, c'est-à-dire la quantité d'acides gras située au-delà de la limite supérieure admise. Ainsi donc, la neutralisation peut n'être que partielle.

Les savons formés (sels de sodium ou de potassium d'acides gras), hydrosolubles, passent dans la phase aqueuse, laquelle est éliminée ensuite par centrifugation. Cette opération de neutralisation présente certains inconvénients. Tout d'abord, les hydroxydes de sodium ou de potassium peuvent provoquer une légère saponification des glycérides eux-mêmes, ce qui entraîne une perte en matière grasse. Cette perte peut être aggravée par l'entraînement d'une partie de celle-ci au cours de la séparation de la phase aqueuse. Les acides gras peuvent être ensuite récupérés à partir des savons et utilisés pour effectuer la synthèse de glycérides.

L'élimination des acides gras des matières grasses par distillation sous pression réduite s'effectue avec un meilleur rendement (pas de pertes en matières grasses) et permet une récupération directe des acides gras pour les synthèses. Cette méthode commence à remplacer la technique de neutralisation, qui conserve malgré tout certains avantages. Elle permet d'éliminer une partie des phospholipides, jouant alors le rôle d'une prédémucilagination. Mais surtout, elle permet de détoxifier les huiles renfermant des *aflatoxines*. On sait en effet que le cycle lactone des aflatoxines est ouvert en milieu alcalin. L'apparition du groupement acide rend la molécule polaire et permet son élimination dans la phase aqueuse contenant les savons. Bien entendu, le traitement alcalin des matières grasses n'a pas été conçu à l'origine pour détoxifier les huiles, et cela est d'autant plus évident que l'on neutralisait les matières grasses bien avant de soupçonner l'existence même des aflatoxines. Mais il se trouve *a posteriori* que ce traitement est un excellent moyen de détoxifier les huiles contaminées.

Décoloration

Les colorants naturels, caroténoïdes, chlorophylles, qui se trouvent normalement dans les matières grasses,

ainsi que les composés colorés qui apparaissent dans les graisses altérées à la suite de réactions biochimiques catalysées par des enzymes, peuvent être fixés par des absorbants divers (charbons activés, etc.).

Cette opération présente parfois quelques inconvénients, dans les cas où les matières grasses contiennent des hydroperoxydes. En effet, à partir de ces composés peuvent se former des *triènes conjugués* dont l'innocuité est généralement mise en doute.

La décoloration des matières grasses comestibles n'est pas autorisée par voie chimique.

Désodorisation

Elle se fait par entraînement à la vapeur des substances aromatiques. Pour éviter d'altérer la matière grasse au cours de cette opération, il est nécessaire de travailler en l'absence d'oxygène et d'opérer très vite.

En pratique, cette phase du raffinage est effectuée en continu à température relativement élevée (140 à 150 °C) sous pression réduite (4 à 5 mm de Hg) avec de la vapeur d'eau débarrassée d'oxygène. Malgré ces précautions, on observe au cours de la désodorisation une perte sensible en tocophérols.

Démucilagination

Cette opération a pour but d'éliminer, principalement, les phospholipides contenus dans la matière grasse, ainsi que, secondairement, des substances hydrophiles de structure polysaccharidique comme les gommes. Ces substances s'insolubilisent par fixation d'eau et ont tendance à floculer au sein des huiles, entraînant des troubles généralement peu appréciés des consommateurs.

Ce phénomène, qui se produit lentement au cours de la conservation, est en fait provoqué et accéléré au cours du traitement de démucilagination qui consiste à insolubiliser par la vapeur d'eau les phospholipides et autres substances, puis à les séparer de la matière grasse par centrifugation. On observe également, au cours de cette phase du raffinage, une perte en matière grasses, celles-ci étant entraînées avec la fraction riche en phospholipides.

Les matières grasses destinées à être hydrogénées doivent impérativement subir le traitement de démucilagination, les phospholipides représentant de véritables poisons des catalyseurs d'hydrogénation (les pores de ceux-ci étant bouchés par les phosphatides).

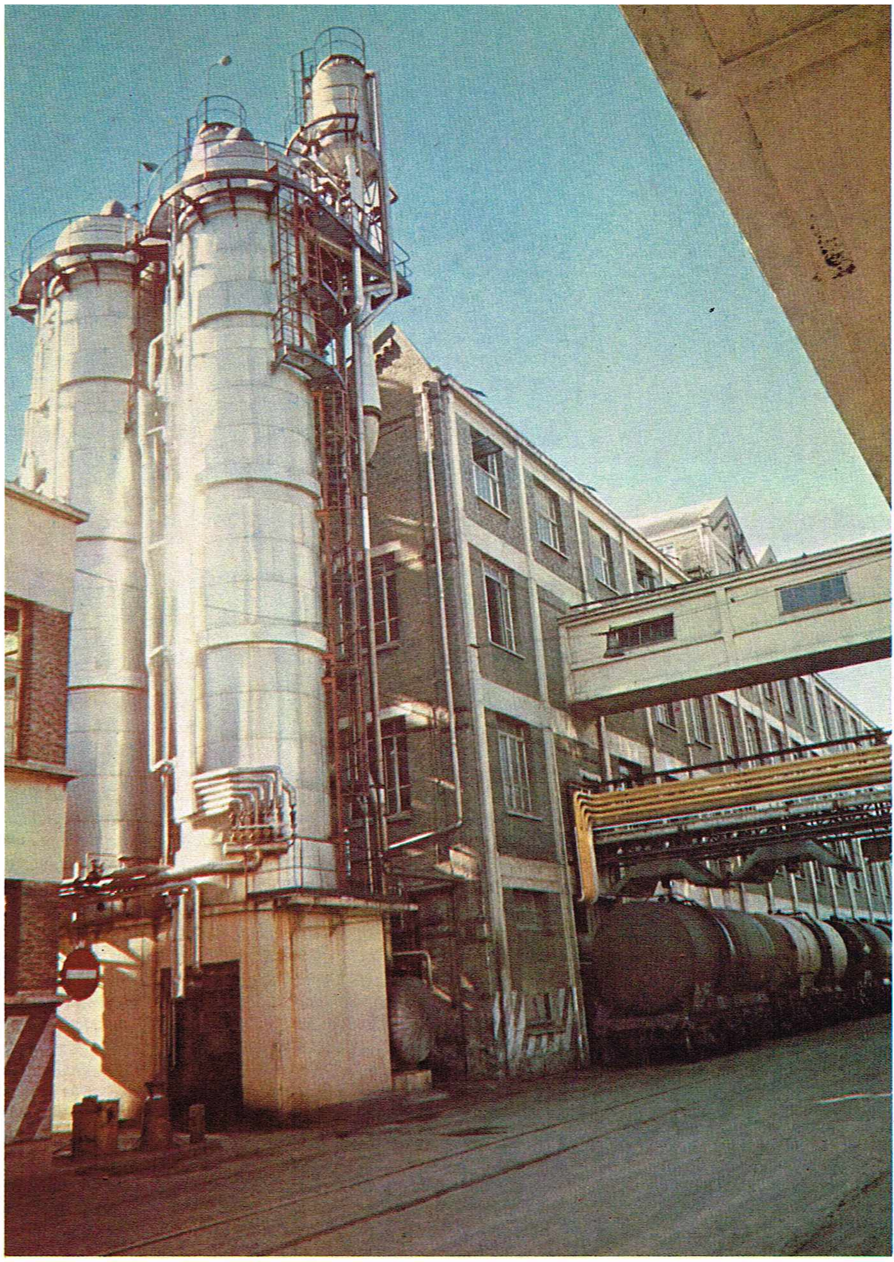

Photothèque Lesieur

▲ ***Dans un dessein de standardisation (les produits alimentaires devant toujours présenter les mêmes caractéristiques), les huiles doivent subir une opération de désodorisation qui s'effectue à 150 °C et sous pression réduite dans des colonnes de désodorisation.***

Les traitements de modification des matières grasses

Les opérations de raffinage qui viennent d'être examinées peuvent être considérées comme des opérations de « purification », avec les réserves qui ont été faites précédemment. Elles ne modifient en rien la composition de la fraction glycéridique de la graisse, c'est-à-dire de sa fraction principale. Une graisse raffinée se voit débarrassée de divers composés accompagnant les glycérides mais reste fondamentalement inchangée. En revanche, les modifications qui vont maintenant être étudiées sont telles, dans certains cas, qu'il n'est plus possible de reconnaître la matière grasse d'origine.

Le chimiste, dans ce domaine, a des possibilités pratiquement illimitées. Il peut fabriquer de nombreux corps gras répondant à des caractéristiques précises nées d'un besoin technologique ou imiter très précisément la nature en reproduisant une matière grasse existante.

Bien entendu, ces modifications fondamentales sont faites dans le dessein de se libérer des contraintes économiques qui pèsent sur ce secteur de l'industrie alimentaire. Les coûts (graines oléagineuses) des matières premières présentent de grandes variations. Des facteurs climatiques, agronomiques, sociologiques, politiques, difficilement prévisibles, en particulier dans les pays en voie de développement, créent un marché extrêmement aléatoire.

Les matières premières qui peuvent être utilisées dans l'industrie des corps gras sont relativement nombreuses : graisses végétales, tissus animaux, y compris ceux de poissons. Toutes ces matières grasses présentent des compositions très variées. Leurs disponibilités en quantités ainsi que leurs prix sont extrêmement fluctuants, alors que les demandes en produits finis sont relativement bien formulées tant sur le plan qualitatif que sur le plan quantitatif. Elles concernent principalement les margarines et les matières grasses destinées aux industries utilisatrices (comme la biscuiterie, la confiserie, la chocolaterie), aux huiles de friture et de table, etc. Tous ces produits ont des caractéristiques définies qui doivent demeurer constantes. Leurs prix doivent rester aussi stables que possible.

Les mécanismes régulateurs qui permettent de satisfaire aux exigences des consommateurs et des industries utilisatrices de matières grasses se situent au niveau des modifications qui peuvent être apportées à la composition des graisses initiales.

Les propriétés sur lesquelles portent les modifications concernent la valeur nutritive, les caractères organoleptiques, la stabilité chimique (résistance à l'oxydation), les caractéristiques physiques, principalement la cristallisation et la fusion. Trois grands types de modifications sont réalisés industriellement : le mélange et le fractionnement; l'inter- et l'intra-estérification; l'hydrogénation.

Le mélange et le fractionnement

Ce groupe de techniques ne provoque pas de modification de la structure des molécules de triglycérides, qui conservent leur intégrité; seule la composition en glycérides des matières grasses est plus ou moins modifiée. Les propriétés et les compositions varient d'une façon simplement additive ou soustractive.

Trois techniques principales de **fractionnement** par cristallisations sont utilisées : le fractionnement simple, le procédé Lanza et le fractionnement par solvant. Ces techniques sont fondées sur les différences de propriétés physiques, et en particulier des points de fusion que présentent les glycérides qui constituent les matières grasses. Il est donc possible de séparer dans un mélange les glycérides à haut point de fusion des glycérides à

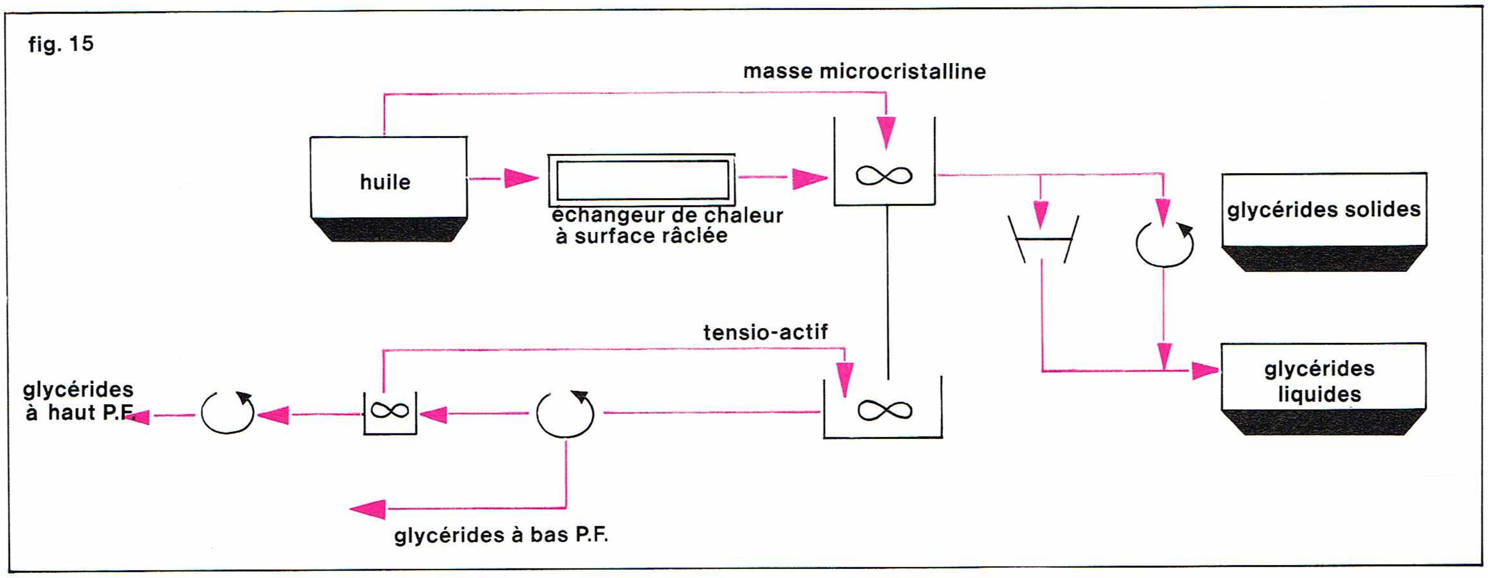

▲ *Figure 15 : schéma de principe de la technique de fractionnement des huiles en vue de la séparation de glycérides solides, liquides et à haut P.F.*

bas point de fusion. En effet, par refroidissement d'un mélange de glycérides fondus, on observera dans un premier temps la cristallisation des premiers qu'on pourra séparer des glycérides restés à l'état liquide par filtration ou centrifugation.

La technique de fractionnement devra donc comprendre schématiquement trois phases principales : la nucléation ou formation de germes cristallins, la croissance des cristaux (ces deux premières phases sont obtenues par refroidissement de la masse liquide), et enfin la séparation des cristaux du liquide. Cette dernière phase est très importante, puisqu'elle détermine le rendement de l'opération et conditionne les deux précédentes.

Un refroidissement rapide de la masse liquide favorise la formation de petits cristaux, du fait, d'une part, du fort degré de surfusion atteint de cette façon et, d'autre part, de la présence de la forme métastable α qui a une grande tendance à la microcristallisation. Les microcristaux ont l'inconvénient d'enfermer un pourcentage important de phase liquide, ce qui compromet évidemment le rendement de l'opération.

Il faut donc réaliser un refroidissement très graduel qui nécessite des temps et des installations importants ; la solution de compromis a été trouvée en séparant le refroidissement et la cristallisation. Cette dernière s'effectue rapidement en continu dans un échangeur à surface raclée qui permet des échanges thermiques de grande efficacité. On obtient une masse microcristalline à laquelle on ajoute une fraction de la matière grasse non traitée restée à l'état liquide. Tandis que s'établit un équilibre, on observe la fusion des plus petits cristaux et la croissance des plus gros ainsi que la transformation de la forme α en formes cristallines stables. On obtient en définitive une bonne cristallisation, qui n'est pas identique à une macrocristallisation, mais qui présente sur celle-ci l'avantage d'être plus rapide.

Dans le cas de cette première technique de fractionnement, la séparation des cristaux est rendue difficile du fait de la viscosité atteinte à basse température par la phase liquide glycéridique. Cette séparation est effectuée par décantation, filtration ou centrifugation (*fig.* 15).

Une variante du procédé qui vient d'être décrit consiste à ajouter à la masse microcristalline une solution aqueuse d'un agent tensio-actif (décyl- ou dodécylsulfonate de sodium) ; celle-ci déplace la phase liquide glycéridique se trouvant à la surface des cristaux en les mouillant. Les cristaux « mouillés » sont ensuite séparés de la phase lipidique liquide par décantation, ou mieux par centrifugation. Ils sont fondus, puis séparés de la phase aqueuse par centrifugation. La phase liquide glycéridique ainsi obtenue est lavée à l'eau. La solution aqueuse contenant la substance tensio-active est recyclée.

L'utilisation de solvants (généralement hexane, acétone) présente *deux avantages* principaux. D'une part, la *viscosité* de la phase liquide est sensiblement abaissée, ce qui améliore la séparation des cristaux ; d'autre part, la *cristallisation* des glycérides a tendance à s'effectuer *sous les formes cristallines* β ou β'. Il n'y a pas de formation de cristaux mixtes. Les gros cristaux se forment donc facilement, et cela d'autant plus que les mouvements des molécules sont facilités par la faible viscosité du milieu. Les cristaux formés peuvent être séparés avec un bon rendement par filtration, la quantité de glycérides liquides retenus étant alors faible.

Il est facile de contrôler les rendements de ces différents procédés en déterminant l'indice d'iode des cristaux séparés. Cet indice est fonction du degré d'insaturation des glycérides, et varie en raison inverse de leur point de fusion (P. F.). Ainsi, une matière grasse, une fraction glycéridique ou même un glycéride présentant un indice d'iode élevé auront un point de fusion faible.

Le rendement d'une opération sera, toutes choses égales par ailleurs, d'autant meilleur que l'indice d'iode des cristaux séparés sera plus faible. Les indices d'iode des fractions solides obtenues par les différents procédés décrits varient d'une façon décroissante lorsque l'on va du premier au dernier. Comme l'on pouvait s'y attendre, c'est évidemment le procédé de fractionnement par solvant qui donne les meilleurs rendements, et le fractionnement simple les plus mauvais. Toutefois, il faut noter que ce dernier procédé permet d'obtenir des fractions glycéridiques sans l'aide d'aucun agent technologique, ni solvant, ni tensio-actif. En principe, ces composés ne devraient pas se retrouver dans les fractions séparées par les procédés les utilisant.

La législation est d'ailleurs nette à ce sujet, en particulier pour les résidus de solvants. Mais le problème semble se situer moins au niveau des traces de solvants, hexane ou acétone, qui peuvent être en fait relativement faciles à éliminer, qu'au niveau des impuretés non volatiles contenues dans les solvants et qui se retrouvent dans le produit (matières grasses) après élimination complète des solvants. Cela est toutefois moins important qu'il n'apparaît à première vue, puisque le solvant est généralement recyclé.

Ainsi, c'est surtout au début d'un cycle, lorsque du solvant nouveau est utilisé, que les risques de retrouver des impuretés non volatiles dans les matières grasses sont les plus grands. Ensuite, c'est du solvant recyclé, c'est-à-dire débarrassé de ses impuretés, qu'on utilise, additionné seulement d'une petite quantité de solvant nouveau correspondant aux pertes observées au cours du recyclage.

Ce fractionnement des matières grasses peut avoir de *multiples applications*, mais les plus courantes dans le domaine alimentaire consistent soit à *retirer une fraction glycéridique gênante* à une graisse pour qu'elle présente les propriétés souhaitées, soit à *extraire d'une graisse une fraction glycéridique* intéressante par ses propriétés.

Le cinquième environ des glycérides des suifs de bœuf et de mouton sont constitués de glycérides à haut point de fusion (il s'agit de glycérides saturés à P. F. 40-44 °C). La présence de ces glycérides limite l'utilisation de ces graisses en alimentation. Ils ne fondent pas dans la

bouche, ce qui a un effet organoleptique tout à fait déplaisant. Par fractionnement, on peut obtenir à partir de ces suifs près de 3/4 de glycérides utilisables en margarinerie. La fraction glycéridique saturée peut être utilisée par ailleurs, soit pour *la préparation de monoglycérides* utilisés comme émulsifiants en alimentation, soit en interestérification avec des huiles.

Dans le procédé de frigélisation, les glycérides du type S_2U (coton environ 20 %, maïs, arachide environ 10 %) sont retirés des huiles de table pour éviter leur cristallisation à basse température (lors de la conservation au réfrigérateur), qui entraîne un trouble peu apprécié du consommateur. Le coût de cette opération est en relation étroite avec les débouchés des glycérides S_2U extraits. Ceux-ci contiennent un pourcentage élevé en acide palmitique et, de ce fait, sont utilisés pour limiter la tendance à la recristallisation des margarines qui contiennent beaucoup de C_{18} (tournesol, soja, etc.).

La frigélisation est appliquée également à des huiles hydrogénées. L'hydrogénation est quelquefois appliquée à l'huile de soja pour augmenter sa stabilité en réduisant le taux d'acide linolénique très sensible à l'oxydation. Bien que l'hydrogénation soit très limitée, il se forme quand même trop de glycérides à haut point de fusion pour que l'huile puisse être utilisée telle quelle comme huile de table. Une élimination de ces triglycérides permet d'obtenir une huile à la fois relativement stable et limpide. Si, sur le plan de l'aspect et de la conservation, le bilan est positif, on peut faire quelques réserves sur le plan nutritionnel. En effet, la diminution de l'acide linoléique et l'apparition inévitable au cours d'une hydrogénation partielle d'acides gras trans peuvent être considérés comme des éléments négatifs.

La *consistance des matières grasses* est en rapport étroit avec le pourcentage de phase liquide qu'elles contiennent. Les matières grasses, même les plus concrètes, renferment toujours un certain pourcentage de phase liquide, et cela encore à des températures relativement basses : — 10 °C. Cette phase liquide est évidemment constituée de glycérides à bas point de fusion. L'élimination par fractionnement d'une partie des triglycérides à haut point de fusion aura pour but de modifier le rapport phase solide/phase liquide et, de ce fait, la consistance de la graisse.

Le *second groupe important d'applications du fractionnement* concerne l'extraction à partir d'une matière grasse d'une fraction glycéridique aux propriétés particulières.

L'huile de palme reste à ce point de vue une source très intéressante de glycérides aux applications diverses. On peut obtenir, par fractionnement par solvant en deux étages, trois fractions : une liquide, utilisée comme huile de friture ou comme matière première pour la margarinerie; deux solides, parmi lesquelles une fraction riche en triglycérides mono-insaturés symétriques qui peut être utilisée dans la fabrication d'équivalents du beurre de cacao.

Les trois techniques de séparations par fractionnement sont appliquées à l'huile de coprah palmiste. Une fraction dont le point de fusion est de 32 à 35 °C est utilisée en confiserie dans les couvertures. Des fractions à P.F. plus élevés peuvent être obtenues par hydrogénation. La fraction liquide hydrogénée donne des produits utilisés également en confiserie, biscuiterie, etc.

Estérification, trans-estérification, inter- et intra-estérifications

Les techniques de fractionnement permettent de modifier la composition des mélanges de glycérides que sont les matières grasses sans toucher à la structure de ceux-ci pris séparément. Les techniques de trans-estérification atteignent la molécule dans son intégrité. Elles modifient la répartition des acides gras dans les molécules de glycérides. Les acides gras eux-mêmes ne sont pas touchés dans cette opération.

Dans l'intra-estérification, les acides gras se réarrangent à l'intérieur d'une molécule de glycérides. Dans l'inter-estérification, ce réarrangement s'effectue entre molécules de glycérides. L'intra-estérification ne se produit jamais seule au cours du traitement des graisses qui, toutes, renferment plusieurs glycérides différents.

Intra-estérification

ABC $\rightleftarrows$ CAB, où A, B, C sont des acides gras différents.

Inter-estérification

$$AAA + BBB = ABB + BAB + AAB + ABA$$

La **cinétique de cette réaction** est difficile à contrôler. A l'équilibre, on obtient les 6 glycérides qui figurent dans les deux termes de la réaction. Leurs proportions peuvent être théoriquement déterminées *a priori* par le calcul. Si *a* et *b* sont respectivement les concentrations en acides gras A et B, les fractions molaires des différents glycérides obtenus à l'équilibre seront données par les formules suivantes :

AAA		a^3	
AAB	A_2B	$2\,a^2b$	$3\,a^2b$
ABA		a^2b	
ABB	B_2A	$2\,b^2a$	$3\,ab^2$
BAB		b^2a	
BBB		b^3	

La trans-estérification, après avoir désorganisé la structure des glycérides naturels, réarrange donc les acides gras au hasard dans les molécules. Cette répartition n'est pas toujours souhaitée. Il est possible de la modifier en déplaçant l'équilibre, en éliminant par exemple les glycérides à haut point de fusion : c'est *l'inter-estérification dirigée* qui combine l'inter-estérification et le fractionnement. Ce procédé peut s'effectuer en continu. La séparation des fractions glycéridiques solides peut être réalisée jusqu'à l'obtention du mélange recherché. En fait, cette technique relativement compliquée est beaucoup moins utilisée que l'inter-estérification dirigée.

Les **catalyseurs** utilisés au cours de l'inter-estérification sont surtout des catalyseurs basiques. Ils sont plus actifs que les catalyseurs acides (acide sulfurique, acide parasulfurique). Les alcoolates de sodium présentent l'avantage de permettre le travail à basse température, ce qui rend possible l'inter-estérification dirigée. Il est en effet impératif dans ce cas que la température soit telle que l'on puisse avoir une phase solide et une phase liquide, puisque ce procédé est fondé sur le déplacement de l'équilibre thermodynamique par retrait de la phase solide.

Les huiles doivent être traitées avant inter-estérification afin d'éliminer les acides gras et l'eau.

L'hydrogénation

Les techniques d'inter-estérification ne modifient pas la nature des acides gras entrant dans la composition des glycérides, mais seulement leur position au sein de ces molécules. A la limite, il est tout à fait envisageable de revenir à l'état initial, c'est-à-dire de retrouver la structure qu'avaient les molécules de glycérides avant l'inter-estérification.

▼ ***Figure 16 :* *hydrogénation partielle de l'acide oléique.***

fig. 16

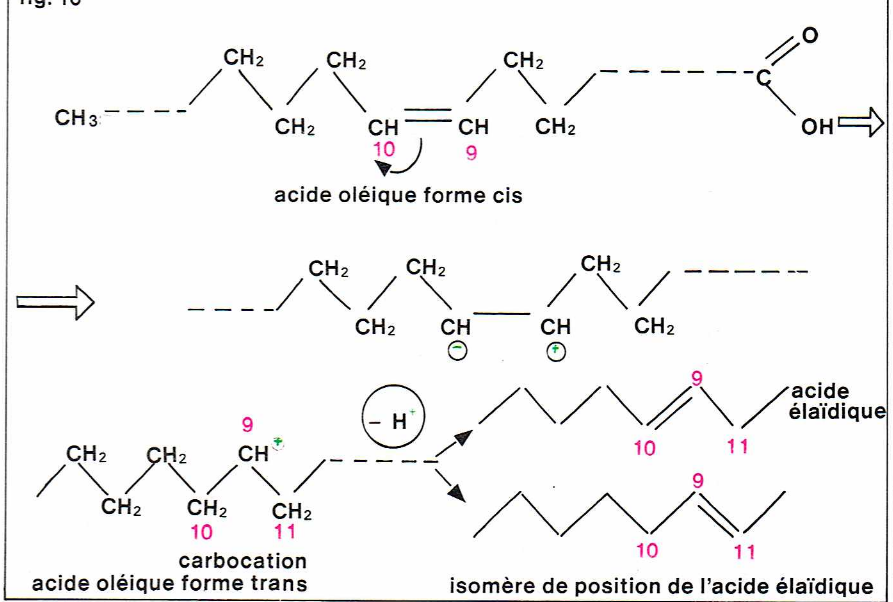

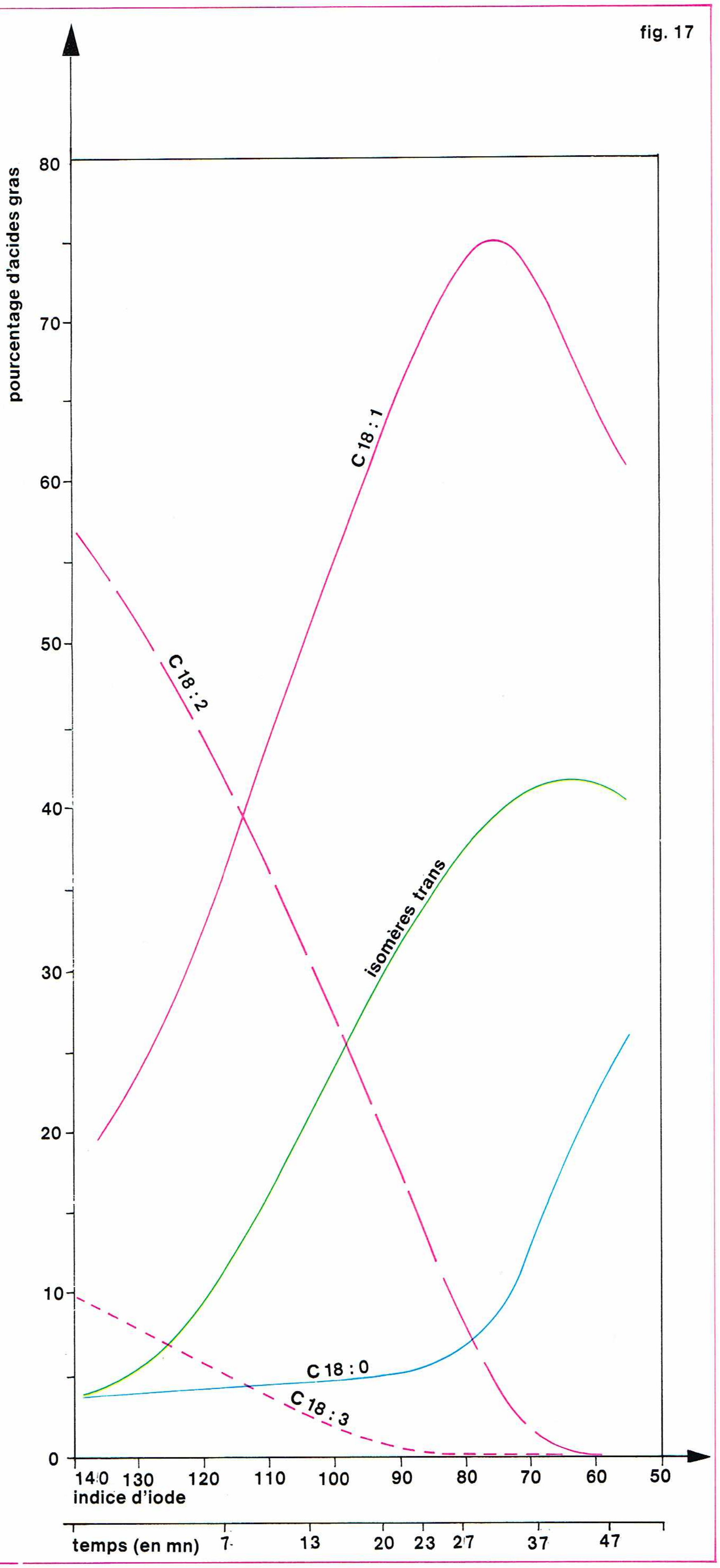

Dans le cas de l'hydrogénation, les acides gras sont modifiés dans leur nature mais non dans leur répartition. Cette modification de nature entraîne une modification des propriétés des glycérides, puisque celles-ci sont liées au type et à la répartition des acides gras qui les constituent. *Le but principal du traitement est d'élever le P.F.* des glycérides. Il est ainsi possible de fabriquer à partir d'huiles des graisses concrètes. L'hydrogénation présente également l'avantage d'augmenter la résistance à l'oxydation des matières grasses.

L'hydrogénation consiste à saturer les doubles liaisons des acides gras insaturés. L'hydrogénation peut être complète et aboutir à l'acide saturé correspondant. Par exemple, en partant de l'acide oléique, acide gras mono-insaturé à 18 atomes de carbone, il est possible d'obtenir, suivant que *l'hydrogénation est partielle ou complète*, des dérivés trans de l'acide oléique, dont l'acide élaïdique, ou de l'acide stéarique, acide saturé contenant le même nombre d'atomes de carbone que l'acide oléique. Les points de fusion de ces acides vont croissant, de l'acide oléique (P.F. + 14 °C) à l'acide stéarique (P.F. + 70 °C), en passant par l'acide élaïdique (P.F. + 51 °C) [*fig.* 16].

La **cinétique de la réaction** d'hydrogénation, schématisée par les courbes (*fig.* 17) relatives à l'huile de soja, permet de voir l'évolution des différents acides de cette huile en fonction du temps (en ordonnées les pourcentages d'acides gras, en abscisses les indices d'iode et le temps).

L'indice d'iode de l'huile de soja avant hydrogénation est de 135; il ne cessera de baisser, bien entendu, au cours de l'hydrogénation. La composition en acides gras de départ est donnée en lisant les pourcentages correspondant aux différents acides gras situés sur la verticale de l'indice d'iode 135, soit :

55 % pour l'acide linoléique;
21 % pour l'acide oléique;
8 % pour l'acide linolénique;
4 % pour l'acide stéarique.

Le reste, soit environ 12 %, est constitué d'acide palmitique qui ne figure pas sur le graphique. En effet, cet acide gras n'intervient pas dans la cinétique de l'hydrogénation de cette huile, du fait qu'aucun acide gras insaturé à 16 atomes de carbone ne se trouve dans l'huile de soja. L'acide palmitique, seul acide à 16 atomes de carbone, étant saturé, reste insensible à l'hydrogénation. Sa teneur n'est donc pas modifiée au cours du traitement.

Un examen rapide du graphique montre que les teneurs en acides oléique et élaïdique croissent très vite pour atteindre un maximum vers 75-70 d'indice d'iode. La teneur en acide stéarique croît lentement jusque vers 85 d'indice d'iode, puis plus rapidement de 85 à 60. Les teneurs en acides linoléique et linolénique décroissent rapidement. Le premier a pratiquement disparu à 60 d'indice d'iode, le second dès 95.

Le schéma des réactions qui se déroulent au cours de l'hydrogénation est le suivant :

acides gras tri-insaturés (ex. : ac. linolénique) → acides gras di-insaturés (ex. : ac. linoléique) → acides gras mono-insaturés (ex. : ac. oléique) → acides gras saturés

La **sélectivité de l'hydrogénation** pour les acides gras insaturés ne peut être obtenue qu'en jouant sur les rapports des constantes de vitesse de réaction, lesquels peuvent être déterminés par calcul à partir des compositions en acides gras initiales et finales et des catalyseurs employés.

Sur le schéma de l'hydrogénation de l'huile de soja, il ressort nettement que la baisse des teneurs en acides gras insaturés est concomitante avec l'élévation des teneurs en acides oléiques, en dérivés trans, et en acide stéarique. Si l'on résout de cette façon le problème de la stabilité de l'huile de soja, par élimination des acides gras très insaturés particulièrement sensibles à l'oxydation, on crée par ailleurs des problèmes nutritionnels. En effet, la perte en acide linoléique, acide gras *indispensable*, qui peut être totale si l'on atteint l'indice d'iode de 60, est préjudiciable à la valeur biologique de l'huile de soja

ainsi traitée. D'autre part, la présence de quantités quelquefois importantes d'isomères trans dans une telle graisse n'est pas pour le moins souhaitée par les nutritionnistes.

Le problème à résoudre dans des huiles comme celle de soja est de réduire le plus possible la teneur en acide linolénique en maintenant le taux d'acide linoléique (acide gras essentiel) et en s'efforçant de former le minimum de dérivés trans. Il est alors possible d'obtenir des huiles de table de bonne stabilité qui ont conservé leur valeur biologique.

A partir des différentes réactions qui se déroulent au cours de l'hydrogénation, il est possible d'établir un système d'équations qui peut être résolu par ordinateur. On obtient une parfaite concordance entre la simulation du processus et les données expérimentales.

Le **choix du catalyseur** est très important. Les catalyseurs à base de cuivre ont une sélectivité élevée, c'est-à-dire qu'ils favorisent la transformation d'acides très insaturés en désinsaturés. Ils ont d'autre part tendance à former une faible quantité de dérivés trans. Par contre, leur durée de vie est très courte, et leur élimination du produit fini est relativement difficile.

fig. 18

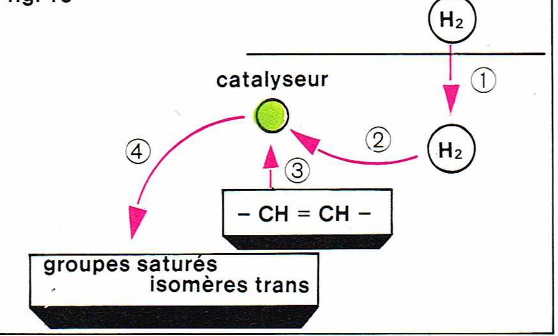

Dans le cas de l'huile de soja, l'hydrogénation est très partielle, puisque l'on descend rarement au-dessous de 115 d'indice d'iode. Pour l'obtention de graisses concrètes à partir d'huiles, il faut aller plus loin, et les **produits de transformations peuvent être variés** : isomères de position, isomères de conjugaison, stéréo-isomères trans. Les différents isomères peuvent se trouver dans les produits finis en quantités importantes et toujours très variables. De nombreux facteurs jouent sur leur proportion : l'influence de la taille des pores des catalyseurs au nickel sur les quantités des différents isomères trans formés en est un exemple typique.

L'hydrogénation s'effectue par *catalyse hétérogène*. Il faut donc, pour qu'elle se déroule dans de bonnes conditions, qu'un certain nombre de transferts soient réalisés. Tout d'abord le transfert de l'hydrogène gazeux vers la phase liquide puis, à l'intérieur de celle-ci, vers le catalyseur. Il faut ensuite, bien entendu, que la partie insaturée accède au catalyseur et rentre en contact avec l'hydrogène. Enfin il faut que la molécule hydrogénée puisse repasser dans le milieu (*fig.* 18).

L'hydrogène, qui est préparé par divers procédés (électrolyse, gaz à l'eau, dissociation, NH_3), doit être pur et en particulier ne doit pas contenir de soufre, d'hydrogène sulfuré mono- et dioxyde de carbone.

Les graisses à hydrogéner doivent être raffinées. Elles ne doivent contenir ni savons, ni eau, et seulement des traces d'acides gras libres et de phosphatides. Ces derniers bouchent les pores du catalyseur dont les dimensions sont supérieures à 20 Å pour permettre aux molécules de diffuser.

La température d'hydrogénation se situe entre 120 et 200 °C. Le catalyseur représente entre 0,02 et 0,7 % de la quantité d'huile traitée. La vitesse d'agitation varie entre 70 et 150 t/mn.

L'hydrogénation est contrôlée par l'indice d'iode, l'indice de réfraction ou la mesure des quantités d'hydrogène absorbées. Après hydrogénation, l'huile est séparée du catalyseur par filtration après refroidissement vers 90 °C. L'huile est ensuite raffinée.

◀ ***Page ci-contre, figure 17 : cinétique de la réaction d'hydrogénation de l'huile de soja à 150 °C et sous 3 atmosphères de pression d'hydrogène.***

◀ ***Figure 18 : transferts d'hydrogène lors de l'hydrogénation de l'huile par catalyse hétérogène.***

▼ ***Conditionnement des huiles de table en bouteilles de matière plastique.***

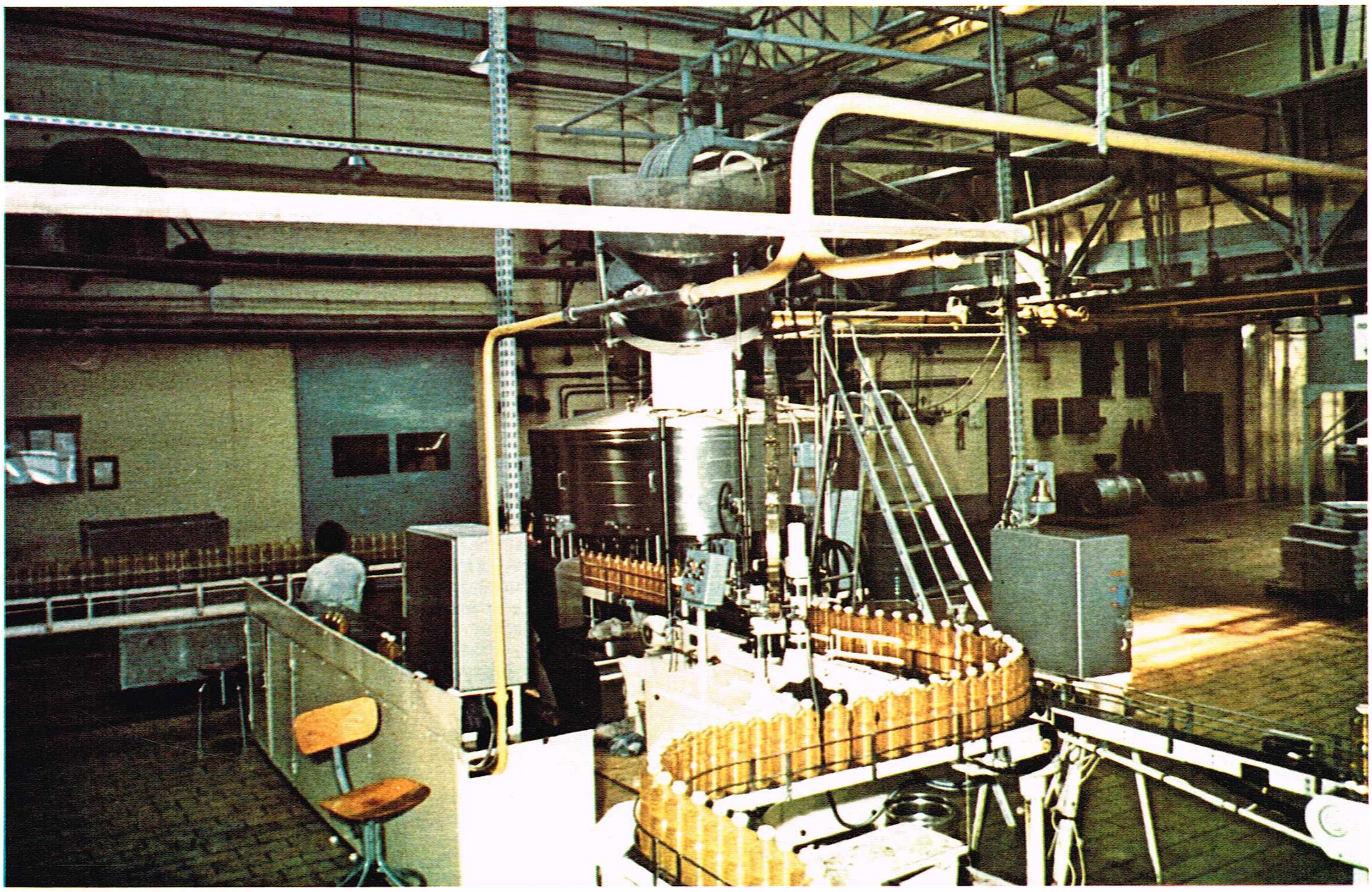

Photothèque Lesieur

J. Guillard – Top

▲ *44 % des Français se rendent en vacances au bord de la mer. En 1976, chacun a disposé d'environ 35 cm de littoral.*

LES LOISIRS

LOISIRS ET SOCIÉTÉ

L'évolution des loisirs

Les loisirs tiennent une place privilégiée dans la vie quotidienne des Français en 1978. C'est un phénomène récent; dans un laps de temps très court au regard de l'histoire de l'humanité, les hommes sont passés d'une situation d'esclaves du travail à une relative libération par rapport à celui-ci et à une prééminence, dans leur esprit, des loisirs sur le travail. Cette modification profonde des mœurs et des mentalités se manifeste par l'évolution de la définition donnée au mot loisir au cours des temps.

L'*Encyclopédie* de Diderot et d'Alembert précisait, à la fin du XVIII^e siècle, que le loisir se comprenait comme « le temps vide que nos devoirs nous laissent, et dont nous pouvons disposer d'une manière agréable et honnête ». Pour Marx, le loisir était nécessaire dans la mesure où il était conçu comme un repos; il permettait la détente du travailleur en vue d'une meilleure productivité. Le dictionnaire Larousse en sept volumes, paru dans les premières années de ce siècle, donnait du loisir la définition suivante : « Temps disponible en dehors des occupations régulières, distractions, occupations auxquelles on se livre de son plein gré, pendant le temps qui n'est pas pris par le travail ordinaire »; il associait au mot loisir le mot désoccupation : « Le loisir est un repos d'un moment; c'est le temps de liberté que laissent les occupations ordinaires, et dont on dispose souvent pour faire des choses fort utiles ou au moins prendre une distraction souvent nécessaire. » C'est donc au début du XX^e siècle seulement que sont perçues deux notions nouvelles concernant les loisirs : c'est une liberté, et il est nécessaire d'en disposer.

La première définition positive du loisir apparaît seulement en 1930; il y a alors passage de la notion de temps à celle d'activité.

Le Littré, édition de 1960, affirme que le loisir est « l'état dans lequel il est permis de faire ce que l'on veut ». On est passé en quelques années de la notion d'activité à celle d'état, reconnaissant ainsi la parité entre activité consacrée au travail, et activité consacrée au loisir.

Le métier, la profession sont un état, le loisir en est devenu un lui aussi, et gagne peu à peu ses lettres de noblesse.

Les sociologues et les écrivains qui se penchent sur le problème des loisirs en donnent la définition suivante : c'est la liberté d'être, la disponibilité totale pour un ensemble d'activités choisies délibérément, et sur lesquelles aucune pression extérieure ne peut être exercée. C'est la possibilité pour l'homme de réaliser une partie de ses aspirations, de s'épanouir en dehors des contraintes habituelles au milieu du travail. La grande nouveauté du XX^e siècle, outre la modification dans l'approche de la notion de loisir, est que celui-ci est associé à tous les âges de la vie, et à toutes les catégories sociales dans une proportion toujours plus grande. A cette évolution dans sa conception et dans son champ d'applications s'est ajoutée une transformation totale dans sa structure.

Des loisirs toujours plus nombreux sont offerts aux Français; ils sont de plus en plus sophistiqués, et la technologie prend une grande part dans la fabrication de leurs supports. Mais le loisir sous-entend une totale disponibilité de l'esprit, que la manière de vivre actuelle engendre rarement.

Pourquoi une civilisation de loisir?

Depuis 1936, date des premiers congés payés, les loisirs ont pris une place grandissante dans la vie quotidienne des Français. La notion de loisirs, nous l'avons vu, a évolué depuis le XVIII^e siècle; mais ce n'est qu'à l'époque où l'on reconnaît aux gens le droit aux vacances que le loisir devient une réalité pour l'ensemble des Français.

De 1936 à 1978, les choses ont encore beaucoup évolué; on a assisté à une véritable transformation du

système de valeurs dans lequel nous vivons : le travail n'est plus la seule motivation des Français.

Le principal changement intervenu dans leur mentalité est que le loisir est devenu nécessité dans le contexte socio-économique de notre époque. La reconnaissance du droit au loisir est l'un des aboutissements de la lutte pour la dignité de l'homme; diverses étapes ont marqué cette lutte : reconnaissance des droits des travailleurs, premiers congés payés, droit au repos hebdomadaire. Pour l'adulte comme pour l'enfant, le loisir sous toutes ses formes n'est plus la récompense que l'on octroie au travailleur sérieux, méritant, ou à l'enfant sage; à notre époque, c'est une nécessité pour l'équilibre de tous les individus et de la société.

Nos ancêtres — dit-on — savaient mieux vivre que nous. Avant la Révolution, 150 fêtes chômées (mais non rémunérées) venaient rompre le rythme du travail. La Révolution française, en supprimant les corporations, a fait reculer la reconnaissance du droit au loisir; c'est seulement en 1874 que l'on interdit d'employer dans les mines les enfants de moins de 12 ans. La première limitation légale du temps de travail n'intervient qu'en 1892; en 1904, la journée de travail est limitée à 10 heures pour les femmes. Depuis 1906, une journée hebdomadaire de repos est octroyée aux travailleurs; en 1919, la semaine légale de travail est ramenée à 48 heures (soit 8 heures par jour pendant 6 jours), mais la mise en application de cette mesure n'est pas généralisée. En 1936, le Front populaire décide de limiter la semaine de travail à 40 heures; par suite des circonstances économiques, puis internationales, cette loi ne sera appliquée que longtemps après.

En 1936, la véritable naissance de la société des loisirs s'effectue avec l'octroi des deux semaines obligatoires de congés payés tous les ans; en 1956, une troisième semaine est accordée aux salariés, et une quatrième en 1969; les revendications syndicales actuelles pour une cinquième semaine payée en hiver (qui se pratique déjà dans bon nombre d'entreprises) ne reçoivent pour l'instant aucun écho auprès du patronat et des pouvoirs publics. Depuis une dizaine d'années, deux journées de congé hebdomadaire sont octroyées à tous les salariés, alors que l'on assiste à une diminution des heures de travail. Dans l'industrie par exemple, en 1970, les salariés français travaillaient 44 heures par semaine; en 1974, leur semaine de travail était ramenée à 42 h 30 (la même année, les Anglais employés dans l'industrie travaillaient 41 h 30, les Allemands 42 h).

Parallèlement à la diminution des horaires, on assistait à l'introduction, dans les méthodes de travail, de pratiques nouvelles (le plus souvent importées des États-Unis et des pays scandinaves) : journée continue, horaires mobiles... La généralisation progressive de la mensualisation, les aides en cas de chômage et de maladie apportent aux travailleurs une sécurité financière qui leur permet de penser aux loisirs.

Enfin, l'élévation de l'espérance de vie, l'abaissement de l'âge de la retraite drainent vers les loisirs une catégorie de gens qui ont rarement pris le temps de vivre.

L'une des causes principales du développement en quelques années de la civilisation des loisirs (que l'on fait naître habituellement en 1950) réside dans la transformation totale des structures sociales. Depuis cette date, la répartition des salariés par branches d'activité s'est profondément modifiée; le secteur primaire, traditionnellement peu touché par les loisirs, regroupait 34 % de la population en 1946, et seulement 15 à 16 % de nos jours. Le secteur secondaire a en partie bénéficié de l'exode rural (31 % en 1946, 40 % actuellement); mais c'est essentiellement le secteur tertiaire, celui des services, qui a connu une forte croissance. Cette nouvelle activité économique conditionne le développement de la consommation des loisirs de masse.

Entre 1962 et 1972, le nombre de cadres moyens a augmenté de 34 %, et celui des cadres supérieurs et professions libérales de 30 %. Or, ce sont les catégories sociales qui sont les plus perméables à la civilisation des loisirs, et qui consomment le plus de ses biens; ce sont également ceux qui contribuent au renouvellement des types de loisirs proposés, en suscitant une offre toujours plus diversifiée. C'est ainsi qu'entre 1958 et 1968, parmi les douze produits qui ont eu le plus fort taux de croissance, dix concernaient les loisirs.

Collection Viollet

Collection Viollet

▲ *En haut, ouvriers au travail. Ci-dessus, la société des loisirs naît réellement en 1936, avec l'octroi de deux semaines de congés payés tous les ans pour les salariés.*

▼ *Goûter de personnes du troisième âge. L'élévation de l'espérance de vie et l'abaissement de l'âge de la retraite drainent vers les loisirs les personnes du troisième âge (Centre éducatif et culturel du Val d'Yerres - Essonne).*

J.-Ph. Charbonnier – Top

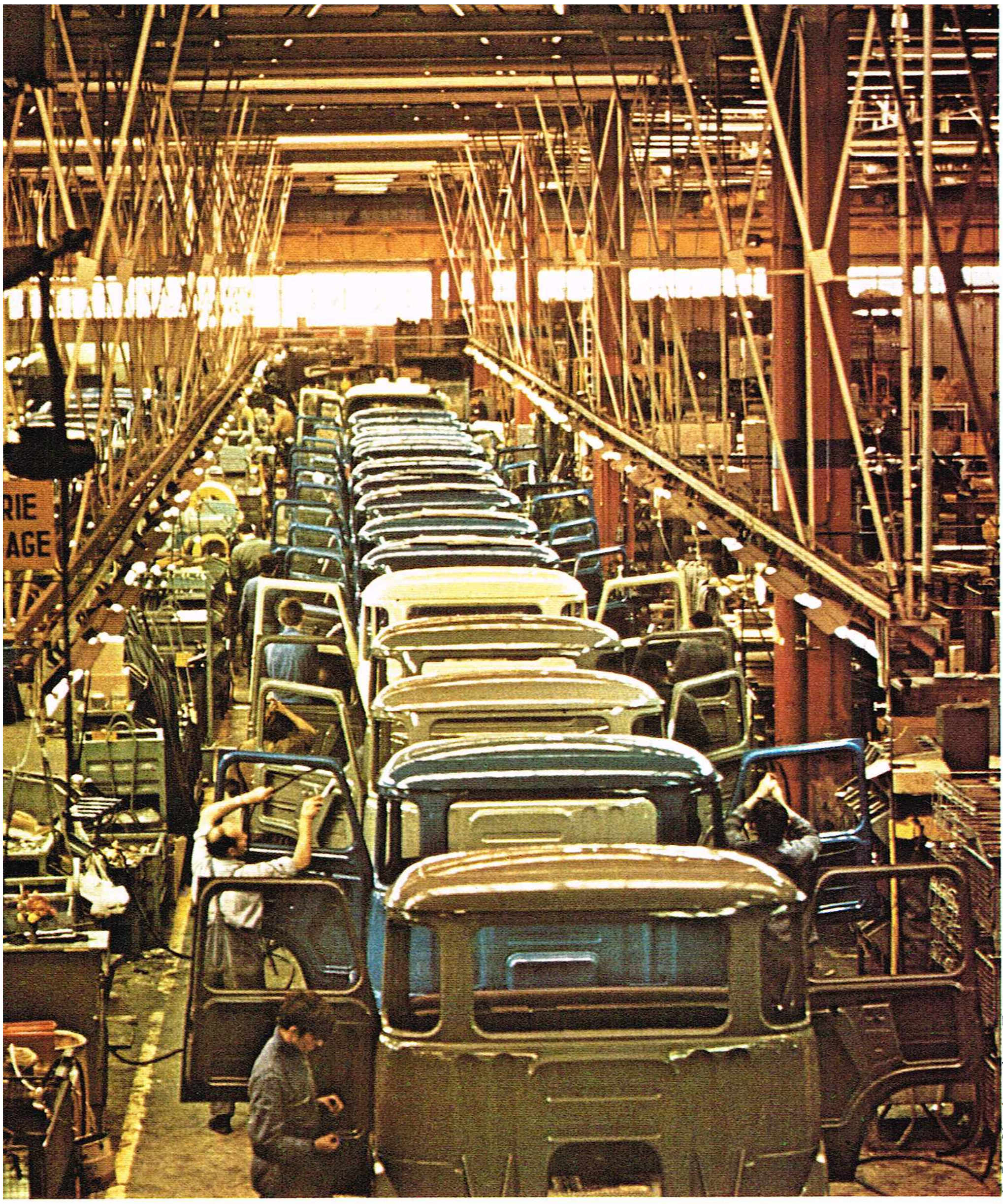

J.-Ph. Charbonnier – Top

▲ *La mécanisation du travail a contribué à déséquilibrer la vie du travailleur en enlevant à son labeur son intérêt et sa finalité (usine Renault-Saviem).*

▼ *En Région parisienne, 50 % des habitants perdent chaque jour plus d'une heure dans les transports, et 30 % plus de deux heures.*

G. Marineau – Top

La mécanisation a allégé le travail humain; elle a également contribué à déséquilibrer la vie du travailleur, en enlevant à son labeur son intérêt et sa finalité. C'est l'une des explications que fournissent le plus volontiers les sociologues pour expliquer le développement de l'ère du loisir. C'est ainsi que s'est progressivement dégagée la nécessité de prendre des vacances, afin de retrouver l'équilibre nerveux compromis pendant l'année de travail. Le loisir de fin de journée, de fin de semaine ou de fin d'année permet la détente après des heures de travail souvent pénibles (travailleurs manuels ou employés d'exécution sont usés par l'uniformité de leurs tâches, alors que les cadres et les chefs d'entreprise subissent le « stress », conséquence de leurs responsabilités). Au temps consacré au travail viennent s'ajouter, dans de nombreux cas, de longues heures de transport (50 % des habitants de la région parisienne perdent tous les jours plus d'une heure dans les transports, et 30 % plus de deux heures). La moyenne nationale hebdomadaire d'heures de transport s'établit autour de 4 h 30. 42 % des salariés de la région parisienne passent plus de douze heures par jour en dehors de leur domicile; 16 % d'entre eux utilisent quotidiennement au moins trois modes de transport différents. Si l'on tient compte des trajets, certains salariés actuels atteignent une fatigue proche de celle de l'ouvrier de 1830, qui habitait à la porte de son usine, où il travaillait 73 heures par semaine.

La progression du loisir vient également de l'évolution des moyens de communication et d'information : la radio, la télévision, les journaux sont des loisirs en eux-mêmes, et véhiculent des idées et des informations sur les loisirs. Ils imposent à l'ensemble de la population française l'image d'un homme du XXe siècle, actif et dynamique dans la réalisation de ses désirs.

Mais plus qu'à toute autre chose, la naissance et le développement de la société des loisirs sont liés à la formidable expansion économique des années 50 à 60; de 1950 à 1956, le pouvoir d'achat des Français s'est accru de 36 % en francs constants. Après dix ans de crise économique (de 1929 à 1939), suivis de dix ans de crise mondiale (assortie de nombreuses difficultés de ravitaillement), les Français ont ressenti, en 1950, le désir de profiter pleinement des avantages qui leur étaient offerts. Enfin, l'éloignement de la religion et de son culte, tout comme la précarité de la situation internationale, donnent envie aux Français de « consommer » du loisir.

Les loisirs, conséquence de l'industrialisation, jouent un rôle capital pour rendre plus humaine la civilisation postindustrielle. En 1978, les hommes ont besoin de sociabilité, de relations humaines chaleureuses, vraies; c'est dans l'exercice en commun d'un loisir que les Français surmontent leur isolement et leurs difficultés relationnelles.

Le développement des loisirs

« Le loisir déferle sur l'homme comme une avalanche printanière », constate Jean Fourastié *(Des loisirs, pour quoi faire ?)*.

En 1936, 550 000 personnes ont bénéficié des billets populaires de congé annuel, premier pas vers le tourisme de masse. Depuis 1960, 5 millions de billets populaires de congé sont distribués tous les ans (alors que seulement 18 à 20 % des vacanciers partent en vacances en train). 1,7 million de billets de week-end sont vendus toutes les semaines en France, manifestant l'importance que revêt le départ de fin de semaine pour nos compatriotes. Si le nombre des voyageurs en train tend actuellement à se stabiliser, le kilométrage parcouru augmente considérablement : 32 milliards de km en 1960, 51 milliards en 1976.

La progression de la vente des voitures est également significative de l'évolution de la société de loisirs ; en 1951, le parc automobile de tourisme était constitué de 1,7 million de véhicules; en 1977, on en dénombrait 16,2 millions. On prévoit qu'en 1985, 20 millions d'automobiles seront en circulation. 31 % du budget des loisirs est consacré à la voiture (contre 12 % en 1950).

En 1976, le parc des vélos, dont l'utilisation est essentiellement touristique, comprenait 12,2 millions d'unités; le cyclomoteur et plus récemment la moto constituent un des modes de loisirs les plus recherchés par les jeunes. On comptait 5,9 millions de cyclomoteurs en 1976

(contre 227 000 en 1951) et 400 000 motos (contre 250 000 en 1959).

L'augmentation du trafic aérien est également symptomatique de la société des loisirs, ainsi que l'évolution des prix de ce mode de transport. Le tableau suivant indique le nombre de passagers par km/transportés :

		Coefficient de remplissage moyen
1950	1 milliard 117 millions	64,7 %
1955	2 milliards 300 millions	67,1 %
1960	4 milliards	62,5 %
1965	6 milliards 350 millions	56,5 %
1970	10 milliards 660 millions	53,8 %
1975	18 milliards	58,7 %
1977	20 milliards 800 millions	62,1 %

En 25 ans, les tarifs aériens en francs constants ont baissé de 64 %, sous la pression des créateurs de produits « tourisme aérien » : charters, « trains du ciel » qu'un Américain a mis en place pour la première fois à la fin de 1977. Il offrait à cette époque la possibilité de faire l'aller-retour Londres-New York pour 1 180 F. Cette démocratisation incontestable du tourisme ne va pas sans un appauvrissement des prestations offertes. Mais le système a l'avantage de secouer la léthargie des compagnies régulières (il y a dix ans, sur l'Atlantique Nord, 54 % des passagers voyageaient à plein tarif; ils ne sont plus aujourd'hui que 29 %).

Les loisirs comptent beaucoup dans la vie quotidienne des Français. La consommation actuelle d'une famille d'ouvriers en biens de loisirs, transports exclus, avoisine les 7 % du revenu annuel (contre 10 % pour les Allemands). La période de congé coûte à chaque ménage approximativement un mois de son revenu. En moyenne, le Français consacre à l'ensemble de ses loisirs 1/6 de ses revenus (contre 1/10 en 1950).

Certains types de loisirs ont été délaissés au profit d'autres : c'est le cas des spectacles, qui représentaient 7 % du budget loisirs en 1950, et seulement 2 % actuellement; de même, les journaux et périodiques ne totalisent plus que 3 % des dépenses de cette branche en 1977 (contre 8 % en 1950) ; enfin, 40 % du budget loisirs était

F. Gohier – Pitch

G. Moore – Top

▲ *En 1978, 31 % du budget des loisirs des Français est consacré à l'automobile (contre 12 % en 1950).*

◀ *Malgré la grande prolifération des journaux et périodiques, leur achat ne représentait plus en 1977 que 3 % du budget loisirs, contre 8 % en 1950.*

▼ *La civilisation des loisirs donne naissance à son exploitation commerciale.*

Top

▶ *Le jardinage hebdomadaire représente une compensation physique et une détente pour la majorité des Français.*

G. Schachmes – Parimage

consacré aux cafés en 1960, et seulement 18 % en 1970. Ces divers postes n'ont pas évolué en même temps que l'ensemble des autres biens de loisirs, et les dépenses qui leur sont consacrées n'ont pas suivi le rush que ces derniers ont connu.

En même temps que la civilisation des loisirs, naît son exploitation commerciale : en 1950, se crée le premier village du Club Méditerranée ; en 1964, le « village de loisir » apparaît à la Foire de Paris ; le marché du disque, de la télévision, de la photo, des articles de sport s'élargit ; la publicité prend son véritable essor, et crée les besoins, qu'elle soutiendra et qui la nourriront en retour, en inventant les produits ou les biens appropriés.

Le loisir vécu

De nombreux sociologues définissent le loisir en fonction du travail, de la famille, et de l'ensemble du contexte social vécu par les Français ; il ressort de leurs études que sa pratique est le plus souvent liée à l'insatisfaction rencontrée dans le travail ; cela est particulièrement vrai pour les jeunes. Le temps de loisir doit donc être un moyen terme entre la vie quotidienne d'un individu, avec tout ce qu'elle comporte de contraintes, et les réactions instinctives de chacun à l'égard de la société. Le loisir est une rupture avec la vie professionnelle, quelquefois même avec la vie familiale.

La fragmentation du temps est née avec l'industrialisation, qui a, pour la première fois, imposé des heures strictes de travail aux hommes. Aujourd'hui, en contrepartie des horaires précis, se développe la notion de temps à soi. Les conditions de travail influencent l'homme dans sa recherche de loisirs ; Jean Fourastié *(Des loisirs, pour quoi faire ?)* reproche à l'homme de mal vivre son travail comme ses loisirs : « Ignorant le vrai repos comme le vrai labeur, on en arrive à transposer dans les loisirs les rythmes et les événements du travail. » L'hygiène de vie déteint sur l'hygiène des loisirs. Des loisirs bien vécus ont une action bénéfique sur le travail, car, selon Pierre Naville, il y a « transformation de l'illusion professionnelle en conscience objective du métier et de ses conditions d'exercice ». L'introduction même du loisir dans le contexte professionnel ne peut être que salutaire à tous (matches sportifs entre usines...).

Malgré l'engouement actuel pour toutes les formes de détente, il est néanmoins intéressant de noter le fait suivant : en dehors du temps normal de travail, nombre d'ouvriers (environ 25 %) cherchent à accomplir des heures supplémentaires. Lorsqu'on demande aux intéressés la raison de cette pratique qui empiète sur leurs heures de liberté, ils répondent : « C'est pour pouvoir consommer plus de loisirs. » Même aujourd'hui, le désir de gagner plus d'argent est la préoccupation dominante de nombreux salariés, et passe avant la revendication d'un allongement du temps de loisirs. De même, près de 50 % des retraités continuent à travailler après l'âge légal de la retraite ; tous ne le font pas par nécessité financière.

L'explication d'une telle attitude réside dans le fait que de nombreuses personnes ne savent pas utiliser leur temps libre, et découvrent l'ennui.

En France, l'idée de loisir, bien que familière à tous, n'est pas encore intégrée pleinement dans le contexte social ; il n'existe pas de politique globale, réfléchie et concertée du loisir. Le « marché du loisir » se compose donc de biens commerciaux, ou encore de prestations fournies par des associations ; mais leurs moyens sont limités, et elles ne peuvent faire face à la demande grandissante d'évasion. Les Français ressentent comme une nécessité le dépaysement, le changement de vie ; le loisir doit délivrer l'esprit des automatismes mentaux ou physiques liés à l'activité professionnelle. Joffre Dumazedier classe les loisirs en trois catégories : le délassement, le divertissement, le développement de la personnalité ; ces trois fonctions sont étroitement imbriquées, et sont vécues par tous les individus à des degrés différents. La possibilité offerte à chacun de choisir son loisir est un défi posé à l'homme, qui ne peut que rarement exercer son libre arbitre. Or le loisir n'est pas une inaction, il demande une réflexion, un effort, afin d'être conçu au mieux des intérêts de l'homme dont le temps libre est compté.

Il y a loin du loisir-repos du travailleur manuel excédé de fatigue des siècles derniers, ou du XX^{e} siècle industriel, aux loisirs assumés par l'individu. Pour un bon équilibre de l'homme et de la société, l'idéal serait que le travailleur manuel recherchât ses distractions dans le domaine de l'esprit. Le travailleur intellectuel, celui qui est enfermé dans un bureau, pourrait trouver dans la nature et l'exercice la compensation physique qui lui est refusée toute la semaine. Mais ce schéma utopique est rarement suivi, même si le jardinage hebdomadaire sévit chez les cadres moyens et supérieurs. Dans la pratique, on constate que l'homme est en général prisonnier d'un nombre limité de centres d'intérêts. La tendance générale

à la spécialisation se retrouve jusque dans les loisirs, qui sont trop souvent la prolongation du travail. C'est ainsi que, d'après une enquête effectuée par Joffre Dumazedier à Annecy, le thème le plus souvent choisi en matière de lecture concerne la profession.

Trois étapes peuvent être définies dans l'évolution de l'attitude de l'homme en face de ses loisirs :

— dans un premier temps, les loisirs prolongent le métier, soit que celui-ci convienne particulièrement à l'intéressé, soit par conditionnement et automatisme;

— dans un second temps, l'individu accepte et recherche des loisirs organisés, dont l'organisation même lui offrira des possibilités diverses d'expression et de réalisation; ainsi, des activités plus variées seront pratiquées, et l'enrichissement se manifeste d'une manière incontestable; de très nombreuses personnes ne dépassent pas ce stade, et trouvent dans les loisirs organisés la pleine réalisation de leurs désirs;

— enfin, quelques personnes en arriveront à rechercher, individuellement ou collectivement, des formes d'activités qui leur sont propres. C'est la meilleure forme du loisir de l'homme intelligent, car elle est source de créativité.

Ce schéma est, bien sûr, théorique, mais il a l'intérêt de permettre une certaine classification des hommes en face de leurs loisirs.

En 1970, on pouvait encore se poser le problème suivant : allons-nous vers une société de consommation dont la motivation principale serait la quête du profit (en vue d'un surcroît de consommation), ou bien vers une société de loisirs : la technique au service de l'homme pour une vie plus équilibrée? Aujourd'hui, après plusieurs années de crise économique mondiale qui ont restreint la croissance de notre niveau de vie, le problème ne se pose plus dans les mêmes termes. On sait maintenant que l'énergie ne doit pas être gaspillée; que nous devrons pendant quelques années nous contenter de maintenir le niveau actuel de notre train de vie, et que l'écologie n'est pas un vain mot. Cet obstacle économique à nos projets n'est-il pas une bonne chose? Il est certain, en effet, que les Français deviennent plus exigeants en s'enrichissant. Sans choisir entre l'esclavage productif et la liberté improductive, les événements nous conduisent à moyen terme vers une plus grande sagesse.

L'homme de la fin du XX[e] siècle est aliéné par la surabondance des possibilités de loisirs et son désir de toutes les connaître; il ne fait alors que les survoler, et il est insatisfait de cette précipitation. Or, il a besoin de sérénité et d'apprentissage pour que sa personnalité se développe harmonieusement. De plus, la fatigue nerveuse ressentie par l'ensemble de nos concitoyens aboutit à une disponibilité toute relative à l'égard des loisirs. Dès 1970, Jean Fourastié écrivait : « On ne sait pas encore quel peut être le remède à cet état de choses; un retour au passé ? » Il était en cela quelque peu prophète, puisque, depuis plusieurs années, la tendance, en matière de loisir, de travail, de mode, réside dans un retour vers la nature et les valeurs anciennes : renouveau du travail manuel et de l'artisanat, mode des vacances à la campagne... Grâce à ce retour à la nature, l'homme espère renouer le contact avec les individus qui l'entourent; il veut se replacer dans un environnement à taille humaine.

La fièvre des voyages à l'étranger s'estompe, et les Français redécouvrent leurs campagnes, leurs montagnes; le loisir remplit alors son rôle originel : faire retrouver à l'homme son équilibre physique, moral et intellectuel. Le loisir, encore trop souvent perçu comme une nécessité de s'amuser à tout prix, évolue favorablement vers la redécouverte de la liberté. L'étude de l'évolution des loisirs aux États-Unis nous montre que les Américains

▼ *A gauche, la tendance en matière de loisirs réside de plus en plus dans un retour vers la nature et vers la revalorisation du travail manuel et de l'artisanat. A droite, potier artisanal.*

A. Held – Top

M. Delacour – Pitch

F. Darras – Fotogram

▲ *La visite d'un musée représente un loisir culturel non négligeable (ici, le musée national d'art moderne du centre Georges-Pompidou).*

se sont essentiellement tournés vers la pratique des sports de plein air. Le fort pourcentage des gens qui pratiquent régulièrement un sport peut s'expliquer par le taux d'urbanisation (75 %) ; le sport est le garant du bon équilibre de l'ensemble de la population. Cette évolution des États-Unis, que l'on considère comme en avance sur nous, laisse présager un engouement des Français pour les disciplines sportives.

Beaucoup de jeunes Français réfutent la société de consommation. Cette évolution se dessine déjà chez ceux qui ont de 25 à 35 ans, pour qui le travail n'est plus une finalité; cette attitude aboutit à une promotion de l'homme, à un plus large accès à la culture et aux loisirs; la progression de l'instruction (scolarisation à tout âge, de l'école maternelle à l'université du troisième âge), l'accroissement de la formation permanente en sont des éléments déterminants. Les projets des sociologues sont théoriquement très enrichissants; il reste à savoir ce qu'il en sera dans la pratique.

Comment savoir si la promotion en faveur du travail manuel, si la demande réitérée des syndicats professionnels pour la diminution des heures d'école consacrées à l'enseignement général (afin de favoriser l'enseignement professionnel) ne vont pas à l'encontre de l'éducation des loisirs? La spécialisation des hommes, à quelque niveau qu'elle se situe, fait régresser, semble-t-il, les possibilités d'épanouissement de la personnalité. Le développement récent du recyclage, de la formation permanente favorise l'accès à la culture; mais leur spécification à des sujets techniques, leur nécessité grandissante d'efficacité économique rendra-t-elle, dans l'avenir, beaucoup de services aux hommes pour bien vivre leurs loisirs?

En 1970, on pensait que l'on s'orientait vers une « cérébralisation » des masses; dans le même temps, le développement de la télévision annihilait les possibilités de réaction des hommes. Ces deux éléments contradictoires ont donné naissance à l'honnête homme de loisirs actuel, mal dans sa peau, déraciné, solitaire. Dans le passé, les gens ont eu à lutter contre la tyrannie d'une personne physique bien définie; l'homme se bat aujourd'hui contre des abstractions : administration déshumanisée, voisinage anonyme et indifférent; ce contexte conditionne toute la recherche de l'individu en matière de loisirs : il veut avant tout sortir de sa solitude. L'espérance des associations d'accueil et d'animation du XX^{e} arrondissement de Paris est exemplaire : on rencontre un désir unanime de se retrouver dans un climat sain, d'être accueilli et non pas seulement pris en charge. Pour poursuivre avec cet exemple parisien, 75 % des habitants de Paris sont des transplantés, isolés au milieu de millions d'inconnus. La rencontre se fait au sein d'associations qui tendent à recréer une vie de quartier.

Loisirs et culture

Pour Joffre Dumazedier, le loisir est « un élément central de la culture vécue par des millions de travailleurs ». De fait, les Français ressentent de plus en plus la nécessité d'approfondir les questions auxquelles ils sont quotidiennement confrontés. Mais qui sont ces personnes qui sont les plus désireuses d'acquérir une culture, et quels sujets les intéressent en priorité? La nécessité d'une culture populaire est évidente, ne serait-ce que pour réduire l'écart culturel existant entre le public dit « cultivé » et l'ensemble des Français; cette culture populaire fait partie des loisirs et est inhérente à la phase postindustrielle de notre société.

De nombreux sociologues prennent comme hypothèse de travail que la culture doit s'imposer aux individus dans le cadre de leurs loisirs; nous rappelons pour notre part les différentes définitions exposées précédemment, et qui montraient combien les liens entre loisirs et liberté sont étroits.

Si la culture fait effectivement partie des loisirs, elle doit être le résultat d'un choix délibéré. C'est par choix que l'on perfectionne sa culture générale, et non par une nécessité inéluctable liée au développement du progrès technique, rendant nécessaire l'approche des techniques par la culture.

La culture conçue comme loisir, ce peut être la lecture, ou toute activité de création ou de compréhension d'une œuvre, la participation à une troupe de théâtre amateur, la visite des musées et expositions, la pratique (ou l'écoute) de la musique, la peinture ou la sculpture. L'extension de la culture, extension désirée par tous les responsables de la politique des loisirs, ne risque-t-elle pas d'aboutir à son nivellement par le bas, à la braderie d'une culture au rabais, afin qu'elle devienne accessible à tous? « La civilisation des loisirs n'est pas le passage des loisirs raffinés d'une élite à des loisirs dévalués par la masse; il n'y a pas de culture aristocratique face à une culture populaire mais une seule et unique qui est culture humaine » (Jean Fourastié, *Des loisirs, pour quoi faire ?*). Il est certain, et les chiffres (voir plus loin) le prouvent, que la vraie culture n'intéresse qu'une élite; plutôt que de vulgariser la culture, plutôt que de la réserver à quelques privilégiés, il est nécessaire d'éduquer. Œuvre de longue haleine, que la structure scolaire actuelle ne semble pas favoriser.

Le livre est, dans tous les milieux, le symbole de la culture et du loisir. Posséder un beau livre est déjà en soi une source de jouissance esthétique, et la lecture apporte à l'homme actuel l'alibi qui lui manque dans sa vie quotidienne. La lecture est certainement un des loisirs les plus complets. On a souvent répété que les media — presse, télévision, radio — ont réduit le temps que les Français lui accordaient; celle-ci a toujours été l'apanage d'une classe déterminée; le rôle des media a été plutôt positif en ce domaine, puisqu'en faisant connaître les livres et leurs auteurs, ils ont donné au public le désir de les lire.

L'élévation générale du niveau d'instruction a incontestablement servi le goût de lire, et les nouvelles techniques ont fait baisser le prix des livres. Le succès du Livre de poche, créé en France en 1953, a été foudroyant. De plus, sa diffusion n'a plus été limitée aux librairies ou aux gares; pour la première fois, des livres étaient mis en vente dans des grandes surfaces, magasins d'alimentation, stations d'essence, etc. Le livre allait au lecteur.

Les clubs de livres constituent également une nouveauté tendant à prouver que celui-ci se porte bien; ils offrent par rapport aux librairies traditionnelles des innovations intéressantes. Le premier d'entre eux, le « Club français du livre », est né en 1946. Tous font amplement appel à la publicité et intéressent particulièrement les jeunes.

Enfin, de nombreuses bibliothèques se sont développées sur tout le territoire : municipales, nationales, scolaires, privées, associatives... Mais les bibliothèques ont une fréquentation moyenne, car les prestations offertes ne sont pas toujours de qualité (13 % des Français y sont inscrits).

En 1977, 73 % des Français possédaient des livres; ceux qui n'en possédaient aucun appartenaient au milieu rural, étaient des ouvriers non qualifiés, ou des retraités. Ceux qui lisent le plus sont les jeunes de 15 à 24 ans, ainsi que les cadres moyens, les cadres supérieurs et les membres des professions libérales.

En France, les romans policiers, d'espionnage ou de science-fiction ainsi que les romans contemporains attirent 50 % des lecteurs. 44 % des suffrages se portent sur la littérature classique et 42 % en faveur des livres d'histoire. En 1977, 14 % des Français avaient lu de 1 à 4 livres, 40 % de 5 à 49 livres, et 16 % plus de 50 livres dans l'année. 53 % des ouvriers et 42 % des agriculteurs lisent au moins un livre par an.

Les ouvrages documentaires sont ceux qui attirent le moins de lecteurs, alors que la littérature de fiction (romans, nouvelles) constitue de 60 à 80 % des prêts en bibliothèques. Les romans sont préférés par les femmes, les romans policiers, les livres techniques et les ouvrages scientifiques par les hommes. Malgré le développement que l'on peut constater, la pénétration du livre n'est pas manifeste dans de nombreux milieux. Le développement de la production littéraire, dont l'importance dans l'élévation du niveau culturel des Français est à souligner, ne suffit pas en lui-même. L'abondance de livres peut aussi quelquefois décourager d'éventuels acheteurs.

Joffre Dumazedier expose, dans *Vers une civilisation de loisirs*, les résultats d'une enquête effectuée par ses collaborateurs et lui-même dans la ville d'Annecy. Il résulte de cette étude que, dans la grande majorité des cas, la population est indifférente à l'acquisition des connaissances. 60 % des personnes interrogées n'ont pu désigner un réel centre d'intérêt sur douze sujets proposés. Seulement 25 % des sondés se sont révélés intéressés, et ont dégagé les deux sujets les plus motivants : leur métier et la géographie. Selon Joffre Dumazedier, dans tous les milieux sociaux, « une minorité d'individus manifeste un réel appétit de connaissances ». Néanmoins l'intérêt pour l'approfondissement des connaissances concernant le métier pratiqué semble réel : cela confirme ce que nous écrivions plus haut, à savoir que les loisirs sont donc le plus souvent choisis en fonction de l'activité professionnelle. 28 % des personnes interrogées sont intéressées par la géographie, 26 % par leur métier, 23 % par la médecine, 20 % par l'histoire, 19 % par le bricolage, 19 % par l'éducation; l'art et la littérature viennent seulement en 11ᵉ place avec 18 % des suffrages, et les questions économiques et politiques au 13ᵉ rang. En règle générale, l'intérêt des individus se cristallise sur les questions d'ordre pratique et technique (médecine, éducation, bricolage).

Parmi les ouvriers, seulement 6,8 % de réponses positives concernent l'approfondissement des connaissances; les centres d'intérêt se portent sur des questions à dominantes pratique et technique. Parmi les artisans et petits commerçants, 8,4 % de réponses sont positives; chez les cadres moyens, le taux de réponses favorables à l'acquisition de connaissances est le plus fort : 14,4 %; ceux-ci sont les plus éclectiques dans le choix de leurs centres d'intérêt, qui sont très divers. Il en est de même pour les industriels et les gros commerçants, mais à un degré moindre; les artisans sont attirés par tout ce qui concerne leur métier, et ne dédaignent pas la culture générale. Les cadres supérieurs et professions libérales ignorent les questions techniques; leur intérêt se porte vers l'économie politique et la psychologie. Enfin, les employés se passionnent pour les questions pratiques, le calcul et la culture générale. Comme on peut le constater, les centres d'intérêt sont divers selon la catégorie socio-professionnelle à laquelle on s'adresse; on remarque que la différenciation culturelle est directement liée à la

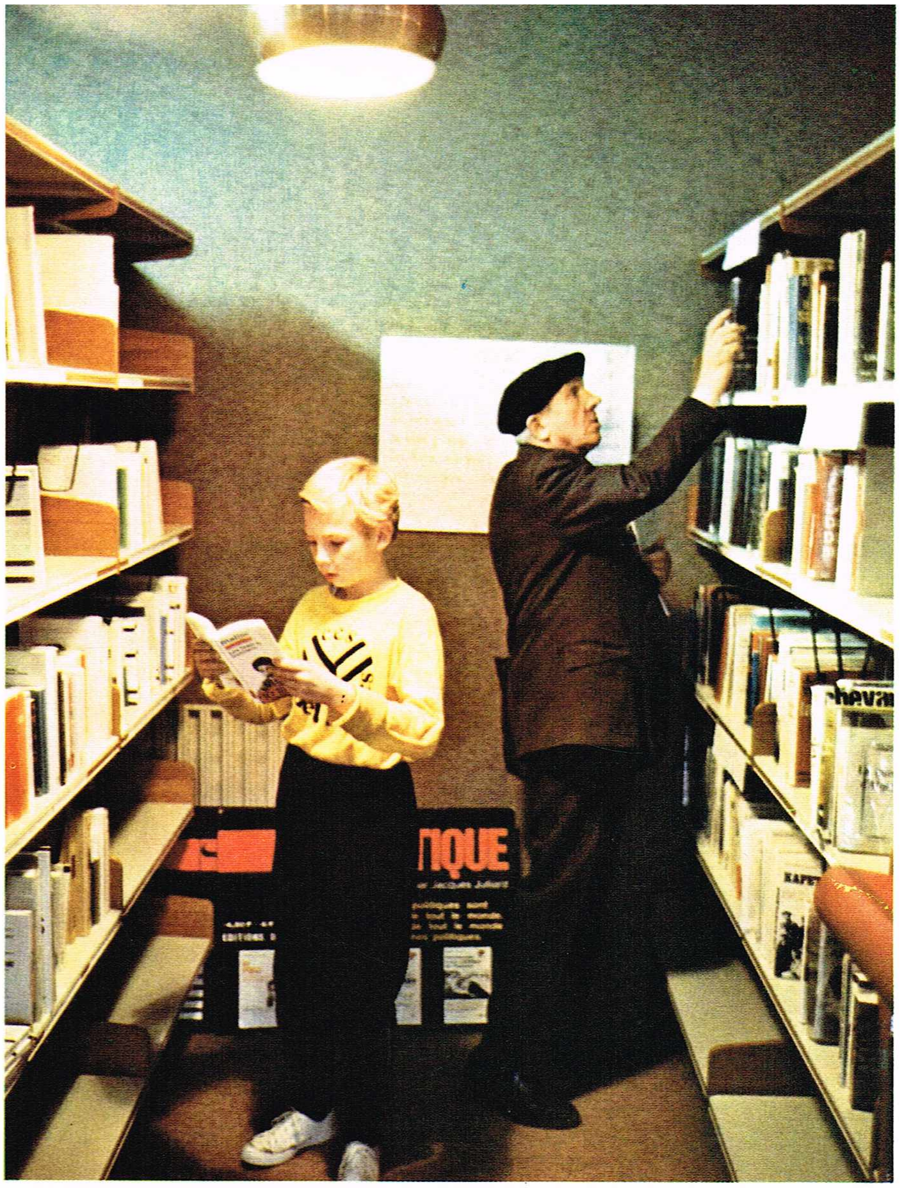

J.-Ph. Charbonnier – Top

▲ ***Malgré le nombre important de bibliothèques leur fréquentation reste moyenne (13 % seulement des Français y sont inscrits) Centre éducatif et culturel du Val d'Yerres - Essonne].***

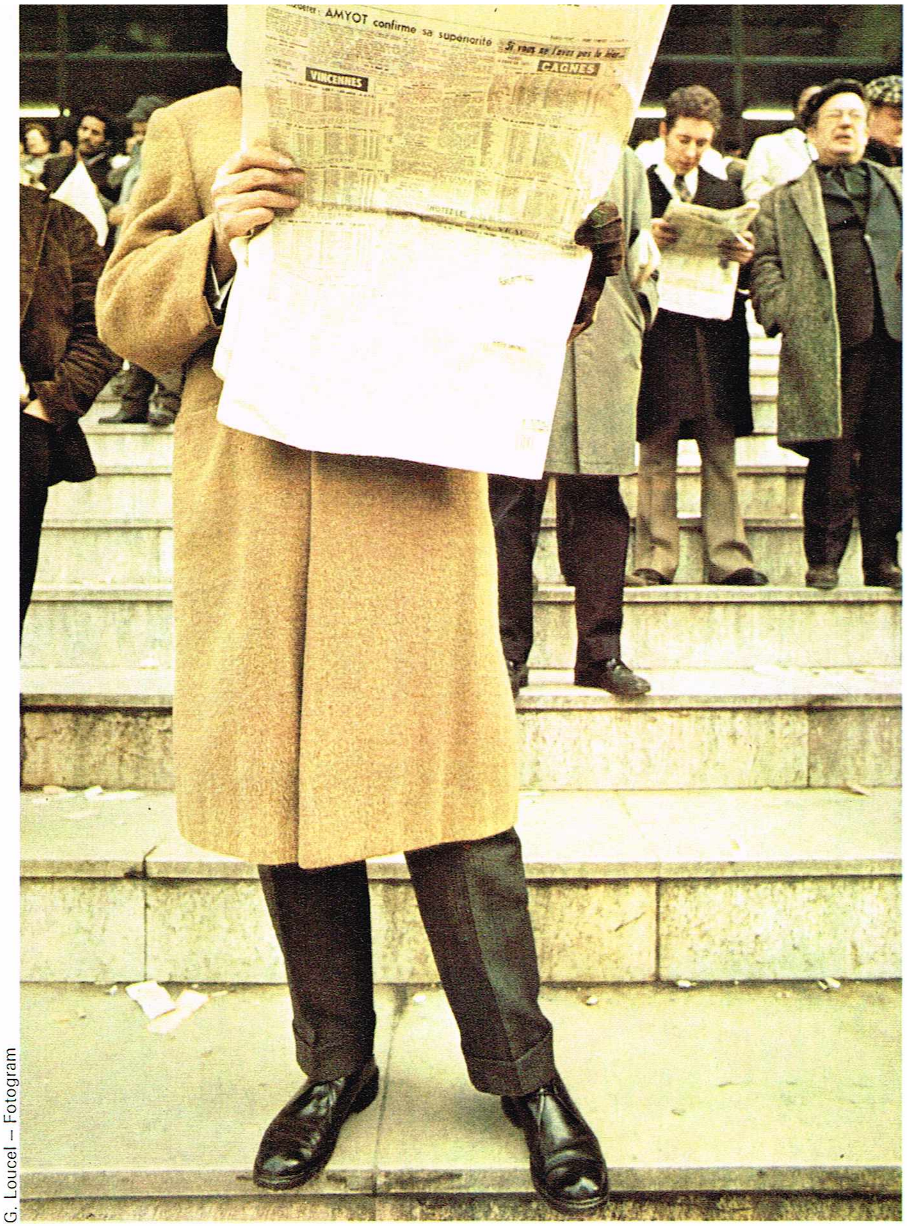

G. Loucel – Fotogram

▲ *Lire un quotidien représente une détente pour 55 % des Français, mais cette activité, qui occupe de 30 mn à 1 heure, souffre de la concurrence de la télévision.*

▼ *Enfants lisant des magazines.*

G. Blondeau – Pitch

hiérarchie sociale et professionnelle. Dans tous les cas, chez les femmes comme chez les hommes, le centre d'intérêt le mieux perçu vient en prolongation de la profession exercée.

Lire un quotidien est, pour les Français, une habitude, et un délassement en fin de journée. 55 % d'entre eux environ lisent quotidiennement un journal, quelquefois deux (un quotidien d'audience nationale et un quotidien régional), 23 % n'en lisent jamais. Cette activité prend tous les jours de 30 minutes à 1 heure, et a souffert de la concurrence de la télévision (70 % des Français lisaient un quotidien en 1960). Les rubriques les plus lues sont les nouvelles locales (80 % de lecture régulière), les bandes dessinées et les faits divers. Les articles de politique générale ou documentaires viennent loin derrière.

Les citadins lisent en grande majorité au moins un hebdomadaire, leur récente prolifération permet une grande diversité dans les sujets traités (23 magazines féminins, 34 magazines illustrés, 5 magazines de télévision, 13 magazines de bricolage, 19 magazines sportifs).

La scolarité semble avoir une influence limitée sur la recherche culturelle de l'adulte ; en effet, les sujets traités à l'école ne correspondent pas aux centres d'intérêt des adultes. Alors que la scolarité amène les enfants à étudier des sujets abstraits, l'adulte se tourne vers des disciplines pratiques et techniques. Deux questions viennent alors à l'esprit :

— est-ce que le contenu des programmes scolaires est inadapté au goût de l'ensemble des Français ?

— est-ce la méthode utilisée pour présenter les sujets abstraits aux enfants qui est mauvaise, les prédisposant mal à l'égard de la culture pour le reste de leur vie ?

Quoi qu'il en soit, la scolarité n'a pas réussi à donner aux Français le goût de l'acquisition des connaissances ; les responsables de la culture doivent en tenir compte, ainsi que des aspirations des hommes vers la réflexion concernant les activités de la vie quotidienne.

La culture pour les Français

Pour 60 % des Français, la culture, c'est la lecture (livres 41 %, périodiques 59 %) ; 8 % des personnes interrogées pensent que la culture est la conséquence de l'expérience ; les conférences, cours et cercles d'étude ne conduisent que dans une faible proportion (8 %) à un enrichissement des connaissances. Enfin, la conversation, les échanges avec d'autres personnes remportent 7 % des suffrages, et les méthodes audio-visuelles 5%. On peut déduire de ces quelques chiffres que, face à la culture collective, c'est la culture individuelle qui remporte le plus de succès.

Un dernier chiffre résume la situation de la culture populaire en France : les préoccupations artistiques et littéraires sont le fait des jeunes adultes jusqu'à quarante ans et sont proportionnellement cinq fois plus fortes chez les cadres que chez les ouvriers. Le maintien des disparités culturelles est incontestable, même si une certaine évolution se fait sentir (par autodidactisme) ; la démocratisation de la culture n'a pas abouti ; la faute en incombe au public lui-même et à la carence de politique globale en la matière (manque d'identification entre le loisir vécu et la culture). En fait, la culture en France est ressentie comme un enrichissement livresque, le plus souvent limité aux problèmes techniques et pratiques, et réservé à une catégorie sociale déterminée.

Le loisir quotidien

La durée moyenne du loisir quotidien est de deux heures et demie, compte tenu du fait que certaines activités utiles, tel le bricolage, sont considérées comme un loisir par bon nombre de gens (60 %). De plus, on estime habituellement que les deux tiers des journées de repos (week-end, jours fériés) sont consacrés à la détente. C'est ainsi par exemple qu'on évalue la durée hebdomadaire de loisirs d'un ouvrier urbain de 20 à 30 heures. Ce potentiel important d'heures de disponibilité explique que notre civilisation puisse être appelée « civilisation des loisirs » ; cette affirmation est néanmoins contrebalancée par le fait suivant : le surmenage intellectuel du personnel d'encadrement, le surmenage nerveux de l'ensemble des

J.-M. Steinlein – Pitch

J. Delacour – Pitch

▲ *A gauche, certaines activités utiles et productives, comme le bricolage, sont assimilées à un loisir. A droite, les travaux manuels féminins, le tricot par exemple, représentent une forme non négligeable de semi-loisir.*

travailleurs rendent difficile une véritable détente. Depuis 1960, on a assisté à une légère diminution du temps de travail ; mais le temps réservé aux transports a augmenté et la durée des loisirs est restée constante.

Afin de considérer l'ensemble des loisirs quotidiennement pratiqués par les Français, il est utile de souligner une tendance nouvelle, liée à la stagnation du pouvoir d'achat des familles : le besoin de loisir se mêle à la nécessité économique ; de nombreuses activités manuelles progressent qui, tout en procurant une détente à ceux qui les pratiquent, leur permettent d'en retirer un revenu : bricolage, jardinage sont ressentis comme un loisir, alors qu'ils apportent un supplément de ressources, ou évitent des dépenses. Ce phénomène est lié au désir des Français d'augmenter leur revenu plutôt que d'accroître la durée de leurs loisirs. Les sondages d'opinion montrent que les salariés, et plus encore les commerçants et les artisans, préfèrent une augmentation de leur revenu à une diminution de leur temps de travail ; de plus, l'allongement du loisir quotidien et hebdomadaire recueille plus de suffrages que la prolongation des vacances. L'aménagement du temps de travail prend également une grande importance dans les revendications des salariés.

Les Français se livrent à de nombreuses activités de semi-loisirs : travaux manuels féminins, tels le tricot, la couture, la décoration ; le jardinage et le bricolage sont les activités les plus pratiquées par les hommes. La civilisation du produit manufacturé a engendré, paradoxalement, des bricoleurs et des inventeurs.

Les cadres sont particulièrement attirés par le jardinage, qui leur apporte une saine détente, et un changement total d'activité. Loin d'aller en s'atténuant, cette occupation se développe en liaison avec l'accroissement du nombre des maisons individuelles et des résidences secondaires (51 % des Français possèdent une maison individuelle). 30 000 résidences secondaires sont construites tous les ans en France, et un nombre au moins égal sont remises en état. 2 800 000 ménages disposent au sens large d'une résidence secondaire (propriété, location à l'année, utilisation régulière de la propriété de parents ou d'amis). Ces résidences se situent en moyenne à 138 km de la demeure principale. 50 % des résidences secondaires appartiennent à des Parisiens. 18,2 % des ménages possèdent une résidence secondaire (la moyenne parisienne s'élève à 42 %). Ce phénomène est très caractéristique, puisque la France est le pays qui en comporte le plus par habitant. Enfin, 3 ménages sur 4 sont propriétaires de leur résidence ; 30 % d'entre elles ne sont pas utilisées pendant les vacances d'été ; sur 100 résidences, 60 sont à la campagne, 17 à la mer, 11 à la montagne, et 12 à la ville.

Ce développement récent de la maison individuelle, en tant que demeure principale ou secondaire, est une des manifestations symptomatiques de l'emprise des loisirs sur notre société. En effet, pour jouir tranquillement de leur fin de journée ou de semaine, les travailleurs ont tendance à s'installer en dehors du centre des villes. « Le droit au loisir s'accompagne d'un droit au bonheur individuel pour chaque membre de la famille, dans la famille ou en dehors de la famille » (Fourastié, *Les loisirs, pour quoi faire ?*).

Mais le développement de l'achat du sol par des tiers rend difficile l'accès aux bois, aux champs et à divers lieux de promenade. Les villes s'étendent, les propriétés privées surgissent en tous endroits, limitant les possibilités de promenades ; les sentiers de grandes randonnées, dont la fréquentation s'accroît du fait de la mode du retour à la nature, sont en partie aménagés ; 500 000 amoureux de la nature s'y retrouvent, pour vivre au rythme de leurs pas ; 22 000 km de sentiers ont été balisés par le Comité national des sentiers de grande randonnée en 30 ans. 17 millions de journées de sentier en 1976 : un bilan encourageant pour les amateurs.

La randonnée a évolué, et le randonneur d'aujourd'hui a abandonné la tente pour profiter de diverses formules d'hébergement chez l'habitant. Mis en place il y a seu-

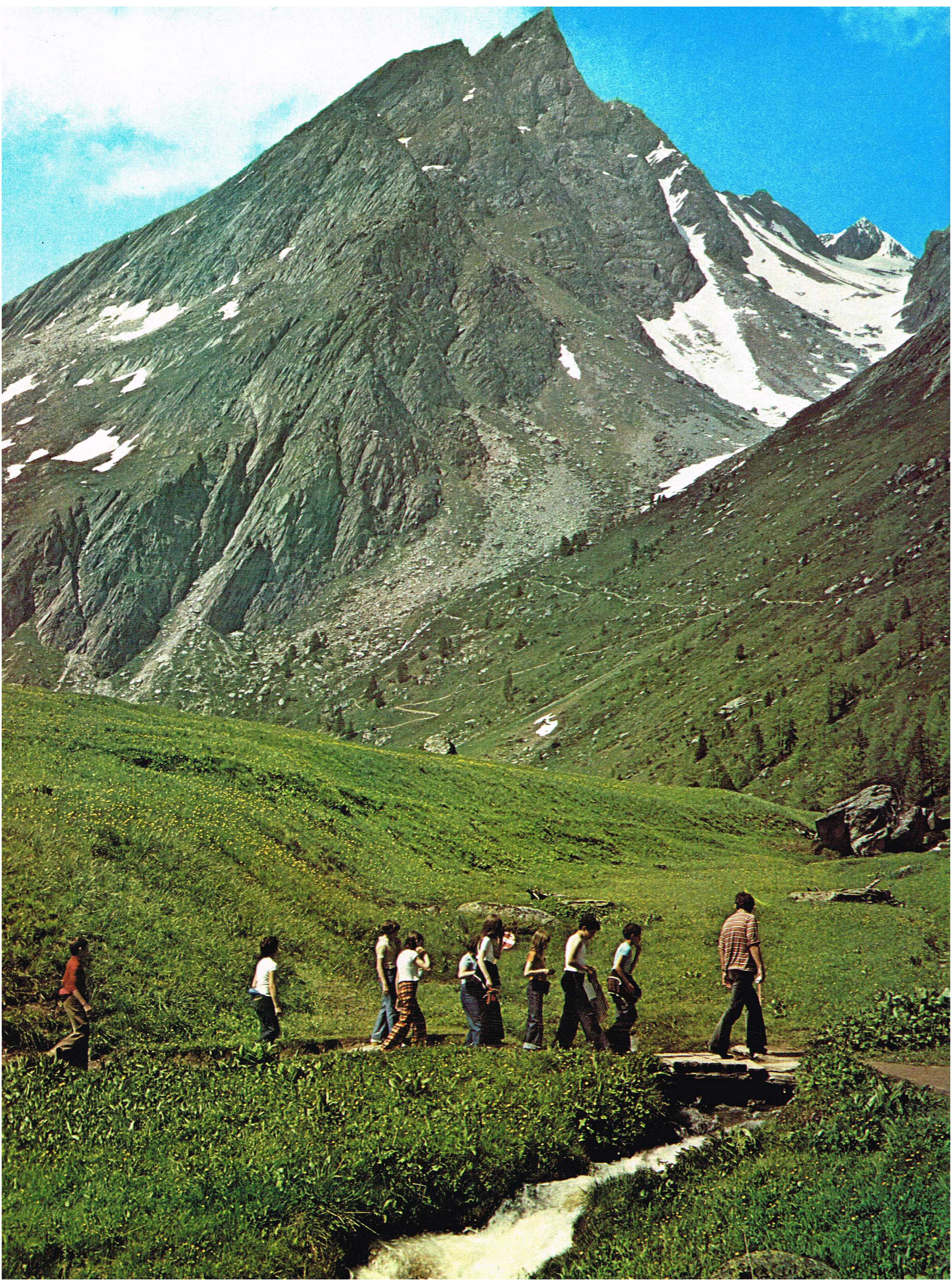

lement dix ans, les gîtes d'étape sont aujourd'hui au nombre de 150.

Une autre manifestation du retour à la nature de l'homme de l'âge du loisir réside dans le nombre de pêcheurs : plus de 4 millions actuellement.

De même, le développement de la pratique du poney a montré une évolution manifeste. L'équitation sur poney, introduite en France il y a seulement six ans, regroupe 135 clubs et 30 000 enfants. Cette véritable école maternelle de l'équitation répond à la tendance des parents à diversifier les loisirs de leurs enfants. Il y a parallèlement une démocratisation de la pratique du sport équestre.

Les loisirs et la famille

Vivre ses loisirs, ce n'est plus aménager le temps en dehors du travail, *c'est aménager sa vie ;* d'où la nécessité d'une bonne appréhension des loisirs par l'ensemble des membres de la famille. Le loisir au sein de la cellule familiale se caractérise par deux tendances paradoxales : d'une part, la volonté des adolescents d'individualiser leurs loisirs, d'autre part l'interpénétration du monde des loisirs des enfants et de celui des parents. Ce sont souvent les jeunes qui ont fait connaître à leurs parents la nécessité de bien vivre leurs loisirs. L'indépendance des adolescents, des enfants même, s'est affirmée depuis quelques années; c'est bien souvent le sujet de conflits, d'incompréhension, qui se manifestent en particulier à l'occasion de l'attitude des uns et des autres vis-à-vis de l'argent.

Les jeunes vivent leurs loisirs en groupe, en communion d'idée avec d'autres adolescents; de ce fait, les loisirs de leurs parents leur paraissent stériles (télévision, tiercé...), trop fondés sur une société de consommation qu'ils rejettent. Tout cela évoque en eux la hiérarchie, qui représente à leurs yeux le monde des adultes et ses compromissions. Paradoxalement, cette résistance aux modes de loisirs des parents se traduit chez ces derniers par une stimulation bénéfique. L'industrie et le commerce n'ont pas tardé à profiter du potentiel offert par les loisirs des adolescents; c'est ainsi que toute une presse spécialisée tend à enfermer les adolescents dans leur monde, celui des « copains », qui comprend son langage, son imagerie, ses signes de reconnaissance. Cette canalisation des besoins des jeunes contribue à les scléroser, à les confiner dans un monde idéal; à côté de cela, la vie de famille leur paraît bien terne.

Actuellement, les loisirs des jeunes tournent essentiellement autour des cyclomoteurs et motos, qui leur octroient une impression d'indépendance (ce qui rend leurs parents particulièrement réticents) ; un adolescent trouve dans la pratique de la moto de nombreux plaisirs : celui de la vitesse, de la conduite dangereuse et grisante, du bruit, celui de dominer une mécanique puissante, et surtout la joie de partager l'ensemble de ces plaisirs avec d'autres jeunes. Les sorties, grande articulation des loisirs des jeunes, se heurtent encore quelquefois à l'incompréhension des parents; elles répondent pourtant au désir profond de l'adolescent : se fondre dans la masse de ses pairs, leur ressembler, ne pas se singulariser par rapport à eux... attitude qui prédispose les adultes qu'ils deviendront à s'entasser sur des plages. La « bande » peut devenir, en cas de carence de la famille, le milieu d'élection de l'adolescent.

Divers sondages et études sociologiques montrent que les parents, contrairement aux enfants, vivent leurs loisirs individuellement, ou bien en tant que couple. La référence au groupe est beaucoup moins forte que chez les jeunes, bien qu'il y ait une évolution en ce sens. Les adultes conçoivent leurs loisirs comme couple, mais non comme parents, conséquence de l'indépendance croissante des enfants à leur égard. Dans un monde déshumanisant sur le plan du travail, des transports, des charges diverses, des relations avec les autres adultes et avec les enfants, les parents ressentent les loisirs comme la période où ils devraient enfin penser à eux, oublier totalement la famille, quelquefois même le conjoint.

Les hommes éprouvent, plus que les femmes, le désir de se retrouver entre eux, échappant ainsi à l'univers familial dominé par la femme. Celle-ci est plus attachée aux liens tissés par la famille, et ce jusque dans le choix de ses distractions; l'apport des magazines féminins en ce domaine est symptomatique : l'identification avec la vie apparemment facile des images narcissiques qui y sont présentées lui fait ressentir plus lourdement la médiocrité de ses loisirs. Si certains magazines féminins

◀ ***Page ci-contre, en 30 ans, 22 000 km de sentiers pédestres ont été balisés par le comité national des sentiers de grande randonnée. 500 000 amoureux de la nature les parcourent chaque année.***

J.-P. Ferrero – Pitch

J.-L. Chedal – Pitch

◀ ***Plus de 4 millions de Français s'adonnent à la pêche.***

G. Marineau – Top

▲ *La « Bande » peut devenir le milieu d'élection de l'adolescent.*

ont tenté, dès les années 1970, de présenter à la femme la vie telle qu'elle est, leur courte apparition dans les kiosques à journaux suffit à prouver que les mentalités n'ont pas encore beaucoup évolué sur ce point. 26 % des femmes lisent régulièrement un magazine, et 20 % de temps en temps. Les femmes se reconnaissent volontiers moins exigeantes que les hommes en matière de loisirs.

En ville, 42 h 30 sont en moyenne consacrées toutes les semaines à l'économie ménagère dans les foyers sans enfants, et respectivement 66, 78 et 83 heures dans les ménages avec 1, 2 ou 3 enfants (d'après une étude d'A. Girard). La grande majorité de ces travaux incombe à la ménagère, même si le partage des tâches domestiques tend à entrer dans les mœurs.

Une femme mariée, sans enfant et sans profession, peut s'octroyer quatre heures de loisirs (ou semi-loisirs) par jour. En revanche, une femme qui a des enfants et une occupation professionnelle ne dispose le plus souvent que de moments très limités de liberté. Mais elle parvient tout de même à remplir ses devoirs familiaux, alors que ses heures de présence à la maison sont très réduites. L'écart entre les temps de présence de la femme au foyer et de la femme qui travaille, et la similitude des résultats obtenus posent le problème de l'organisation du travail ménager (qui entre en jeu lorsque la mère de famille travaille au dehors). C'est ainsi que, lorsqu'une femme au foyer française passe 5 heures à accomplir l'ensemble des tâches qui lui incombent, une ménagère américaine passe 1 h 30. L'écart de modernisation des équipements entre la France et les États-Unis n'explique pas tout. La principale différence réside dans la conception que la société française, et la femme au foyer elle-même, ont du rôle de la ménagère; les loisirs ne lui sont pas nécessaires, puisque de toute façon, « elle ne travaille pas ». Elle ne revendique pas comme un droit ce que les hommes ont obtenu depuis longtemps : la liberté. Le fait de prendre soin des enfants et du ménage est une fuite, et une justification de sa position de non-salariée. Si la femme au foyer ne sait pas toujours vivre ses loisirs, on assiste néanmoins à une évolution, dans les milieux aisés en particulier, comme l'appartenance à des clubs.

Pour la femme qui travaille, la notion de loisir est souvent étrangère à sa vie : assumer à la fois une occupation professionnelle, les tâches domestiques, passer de nombreuses heures chaque jour dans les transports ne lui laisse que peu de temps libre. La participation du mari et des enfants aux travaux ménagers est devenue indispensable, et entraîne pour la femme qui travaille une libération de ses charges familiales. Elle choisit alors de passer ses moments de liberté en compagnie de son mari, puisque la femme, plus que l'homme, vit ses loisirs en tant que membre d'un couple, et non en tant qu'individu isolé.

C'est en fonction de la manière dont ses parents vivent ses loisirs que le bébé, puis l'enfant, enfin l'adolescent, apprendra à assumer les siens; l'attitude plus ou moins positive des parents face aux distractions de leurs enfants influencera la recherche des futurs adultes qu'ils deviendront en matière de loisirs. L'important est que l'enfant ait, dès son plus jeune âge, la possibilité de choisir entre diverses formes de loisirs; il aura plus tard l'envie de les approfondir. La tendance actuelle est à la valorisation de la personnalité de l'enfant; de ce fait, les échanges sont plus fructueux entre parents et enfants, et prédisposent les premiers à partager les loisirs des seconds. Une enquête dévoile que les parents qui ont

M. Desjardins – Top

▶ *Les loisirs actuels de la jeunesse sont consacrés en grande partie à la pratique de la moto.*

déclaré participer aux jeux de leurs enfants par plaisir étaient 14 fois plus nombreux que ceux qui voyaient dans cette contribution un devoir éducatif.

La télévision et la radio

Le loisir vécu en famille est avant tout la télévision. Sur les 2 h 30 de loisirs quotidiens dont disposent les Français, 2 h 20 sont en moyenne passées devant le petit écran ; c'est dire l'importance de la télévision, l'impact que celle-ci peut avoir sur la vie des Français et leur culture. 82 % des Français possèdent un récepteur de télévision ; en 1950, 297 télévisions étaient commercialisées ; il existe, en 1977, un parc de 14 500 000 récepteurs. De 1960 à 1970, plus de la moitié des ménages s'en sont équipés. 76,8 % des Français regardent au moins une fois par jour la télévision.

La télévision est l'un des phénomènes-loisirs les plus typiques de notre époque ; son développement a amené une uniformisation des attitudes en face des problèmes de la culture. Tous, de l'ingénieur au balayeur, ingurgitent régulièrement la même somme de connaissances, d'émotions, d'informations. La télévision a peut-être réussi là où la scolarisation a échoué : elle a amené une homogénéité que la culture n'a pas pu créer. La facilité offerte par le loisir à domicile évite au télespectateur d'avoir à choisir la manière dont se déroulera sa soirée. Il est si facile de pousser un bouton...

La télévision apporte à tous une information qu'il semblait invraisemblable de collationner quelques années avant son apparition ; son action est par là positive, car elle offre une possibilité de connaissance à certaines personnes qui n'auraient jamais eu le désir ou la possibilité d'y accéder. Mais l'abondance des informations nuit à leur bonne compréhension ; c'est ainsi que l'on constate que les personnes qui retirent le plus de bienfaits de la télévision sélectionnent soigneusement leurs programmes (c'est une forme de choix, par rapport à celles qui « consomment » en permanence les programmes télévisés). Néanmoins, la télévision, véhicule d'un enrichissement culturel, a participé beaucoup plus à la vulgarisation de l'art, de la littérature ; elle a été l'instrument d'un nivellement culturel de la majorité des Français, nivellement qui s'effectue à un niveau parfois décourageant. Le fait de digérer au préalable l'ensemble des informations apportées, de faire appel exclusivement à la sensibilité du téléspectateur, a atrophié les possibilités de jugement du public.

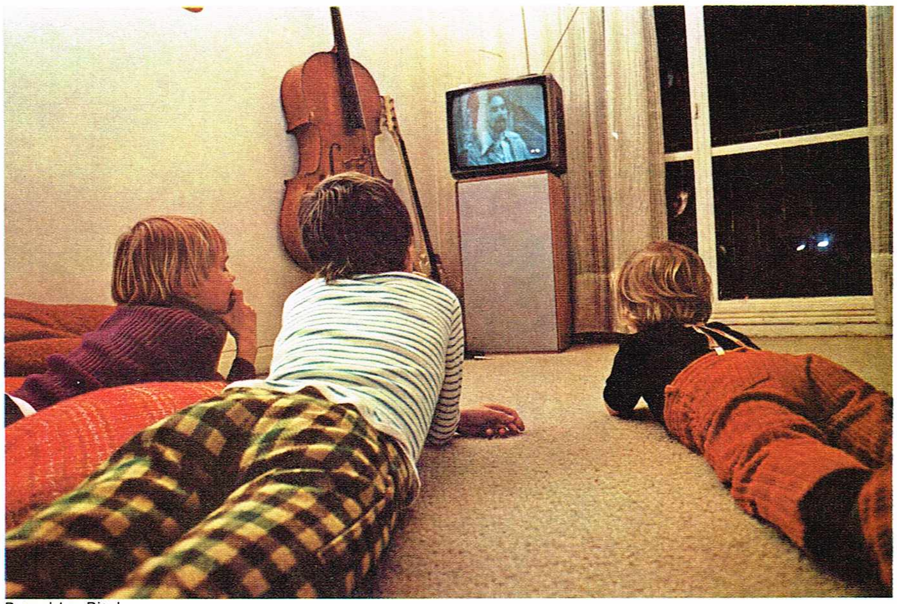

Petzold – Pitch

▲ *La télévision, partie intégrante de la famille, restreint bien souvent les échanges entre mari et femme, et parents et enfants.*

Ainsi, l'action du petit écran peut être positive ou négative ; elle est positive tant qu'elle est le véhicule nécessaire de l'information, de l'extension de la culture, de l'affinement de la sensibilité, ou tout simplement du divertissement pur. Mais son action peut être négative pour tout ce qui implique un conditionnement : dans la vie quotidienne, elle devient une habitude dont on pourrait difficilement se passer, et même dont l'absence laisse désemparé ; elle annihile la faculté de choisir son loisir, et fait disparaître de l'horizon des téléspectateurs toutes les autres possibilités qui leur sont offertes ; elle peut nuire en particulier au cinéma, au théâtre, aux rencontres entre amis ou membres de la famille. La télévision, qui reste le loisir le plus pratiqué en France, est aussi l'un de ceux qui sont les plus mal vécus ; ses relations avec la culture restent le plus souvent lointaines, du fait de l'éventail de personnes auquel elle s'adresse. Il est difficile de faire comprendre une œuvre littéraire ou artistique à un public aussi divers que peut l'être celui de la télévision ; la personnalisation nécessaire à l'éducation est impossible.

La télévision est par essence tyrannique ; elle est là, dans la pièce de séjour, faisant partie intégrante de la famille. Elle sonne bien souvent le glas des échanges entre mari et femme, entre parents et enfants. A une époque où la famille ne se réunit plus, dans la grande majorité des cas, que pour le repas du soir, la télévision vient s'immiscer entre ceux qui sont réunis autour de la table. Après vingt-cinq ans de télévision, on constate que les comportements se sont peu modifiés en la matière, même si des ménages possédant un récepteur depuis de nombreuses années tendent à reprendre leur liberté, mais cette tendance n'est pas générale.

Si l'écoute de la télévision n'a pas tué le goût du bricolage, elle a fait d'autres victimes : le cinéma, la radio, les relations familiales ; en ce qui concerne la lecture, 50 % des téléspectateurs déclarent lire moins depuis qu'ils ont un récepteur ; mais on constate généralement qu'au bout d'un certain temps, les émissions de vulgarisation littéraire redonnent aux Français le goût de lire ; en un mot, si on lit moins, on lit mieux. L'introduction de la télévision en couleurs dans un nombre croissant de foyers a permis le franchissement d'un nouveau palier, et a entraîné un regain d'intérêt pour le petit écran. L'influence de la télévision s'affirme, et avec elle sa responsabilité sociale. Cela conduit à souhaiter qu'une politique concertée de recherche soit mise en place, pour aboutir à une meilleure programmation, à partir de données scientifiques rigoureuses (sondages sérieux sur la composition socioprofessionnelle des téléspectateurs, sur leurs goûts conscients et inconscients, sur la meilleure manière de les divertir ou de leur faire apprécier une forme raffinée de culture). Il sera difficile d'obtenir que la télévision ne soit plus le véhicule de l'uniformisation des aspirations humaines dans une gamme médiocre : « La médiocrité est élevée au rang d'une valeur. » La

J.-P. Benier – Parimage

◀ *Même si le partage du travail domestique tend à entrer dans les mœurs, la grande majorité des travaux ménagers incombe à la femme.*

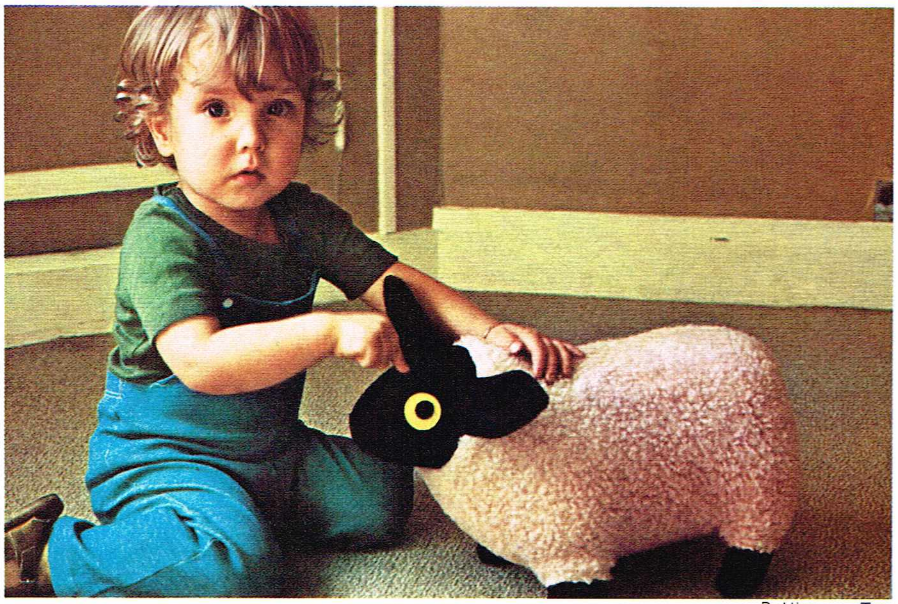

P. Hinous – Top

▲ *Les fabricants se sont penchés sur la conception du jouet pour répondre aux désirs de l'enfant suivant son âge.*

télévision, plutôt que de stimuler la démarche mentale de la population, la freine, et impose à tous la conservation de modèles traditionnels en de nombreux domaines.

C'est dire beaucoup de mal d'un mode de loisir choisi, ou plutôt « subi », par la très grande majorité de la population. Mais il convient de reconnaître ses mérites : elle aide à vivre les personnes isolées et âgées. Les chiffres suivants résument l'attitude des téléspectateurs français : 20 % d'entre eux estiment qu'ils ont approfondi leur culture, 19 % qu'ils se sont divertis, 29 % qu'ils se sont à la fois cultivés et divertis, et 16 % qu'ils se sont ennuyés. Mais ils ont le plus souvent continué à passer leurs soirées, confortablement installés dans leur fauteuil, les yeux rivés sur le petit écran.

A l'origine réservée aux personnes aisées et cultivées, la télévision est devenue le moyen de divertissement de ceux pour qui le mot loisir n'a pas de signification propre. De plus en plus, elle est reniée par tous ceux qui accordent leur temps à d'autres formes de loisirs.

La radio a tout d'abord souffert de la concurrence de la télévision. Mais il s'est très vite avéré que télévision et radio étaient complémentaires, et elles ont trouvé toutes deux leurs places dans notre société.

La durée hebdomadaire d'écoute de la radio avoisine les 17 heures; les plus fidèles auditrices sont les femmes inactives de moins de 60 ans. 93 % des foyers sont équipés; 71 % des Français écoutent la radio tous les jours. Les jeunes écoutent davantage la radio que les adultes, et les milieux cultivés plus que les milieux modestes (plus attirés par la télévision).

Ces loisirs s'imposent à la famille : la radio, la télévision, la chaîne haute fidélité, une fois intégrés dans le contexte familial, dont l'utilisation est quotidienne et systématique, ne font plus intervenir la notion de choix.

Les jeux

Les loisirs en famille, ce sont aussi les jeux; les jeunes en retrouvent le goût, peut-être parce qu'ils favorisent les échanges de groupe. Actuellement, 68 % des Français possèdent un ou plusieurs jeux de société (dont 20 % les échecs). En 1976, on a vendu 330 000 *Monopoly* et 500 000 *Scrabble*.

L'attitude des parents à l'égard des jouets des enfants s'est profondément modifiée; dans le même temps que l'on reconnaissait à tous la nécessité de vivre les loisirs à sa guise, on reconnaissait à l'enfant le droit de posséder ses jouets, qui deviennent éléments de son éducation. On sait aujourd'hui que les jouets permettent à l'enfant de développer son intelligence et sa sensibilité au monde extérieur et ainsi d'apprendre à vivre.

Comme Montaigne, il convient de considérer les jeux « comme les plus sérieuses actions des enfants ». C'est pourquoi les fabricants se sont penchés sur la conception du jouet, pour répondre aux désirs de l'enfant. On a pu associer chaque jouet à l'âge de l'enfant; la taille et la couleur sont des éléments à ne pas négliger. On s'est aperçu aussi que le jouet préféré de l'enfant était révélateur de son caractère.

Tout comme l'ensemble des produits de loisirs, le jouet a suivi la quête de la société vers une plus grande communion avec la nature; c'est ainsi que l'on voit renaître dans les magasins de jouets les vieux jeux en bois.

Le jeu, qu'il soit le fait de l'adulte ou de l'enfant, se traduit par un certain nombre de caractéristiques (Roger Caillois, *les Jeux et les Hommes*), qui sont :

— la liberté : le jeu perd sa nature de divertissement dès lors qu'une obligation, de quelque nature qu'elle soit, y est mêlée;

— l'incertitude du déroulement, du résultat à obtenir;

— l'improductivité : le jeu ne crée pas de biens;

— les lois qui régissent un jeu sont différentes des règles habituelles de la vie quotidienne;

— le jeu est fictif, il est accompagné « d'une conscience spécifique de réalité seconde ou de franche irréalité par rapport à la vie courante ».

Chaque ménage français a acheté en moyenne pour 146 francs de jouets par enfant en 1977 et y consacre 6 % de son budget-loisir. Chaque année apporte son lot de jeux et jouets nouveaux; les jeux éducatifs sont les plus recherchés par les familles (15 % des ventes); viennent ensuite les jeux de société (12 %), les poupées (10 %), les animaux en peluche (6 %), les trains et circuits auto (4,5 %), les vélos (3 %), les jouets musicaux (2 %). On remarque la persistance, en bonne place, des jeux éducatifs dont chaque famille se fait un devoir de doter ses enfants. D'autre part, l'électronique s'introduit progressivement dans les jeux pour enfants et grandes personnes.

Jeu d'adulte comme jeu d'enfant apporte à l'individu qui le pratique un délassement réel; l'enfant qui sait jouer sera un adulte qui saura assumer ses loisirs.

Les jeux de hasard et les jeux d'argent remportent un succès croissant : la fréquentation des hippodromes va en s'amplifiant; autrefois réservées à une élite aristocratique, les courses sont devenues un loisir populaire. Le tiercé et sa formidable percée en sont l'une des manifestations les plus probantes. Créé en 1954 par le Pari mutuel urbain, 177 000 bordereaux étaient enregistrés en moyenne tous les dimanches cette année-là; vingt ans plus tard, plus de 12 millions de bordereaux sont perforés chaque semaine; 7 millions de joueurs misent 80 millions de francs tous les dimanches (ce n'est qu'une moyenne, des montants beaucoup plus importants sont enregistrés les jours de prix importants). Pour relancer la Loterie nationale et concurrencer le tiercé, le Loto a été mis en place au mois de mai 1976. Un an après son lancement, 5 800 000 bulletins étaient comptabilisés en une seule semaine.

A la télévision, à la radio, dans les journaux, les incitations aux jeux et concours sont permanentes. Ce succès récent des jeux de hasard est lié à trois notions : le jeu répond à la nécessité pour l'homme de s'évader de son univers quotidien en rêvant — à bon compte — aux gains fabuleux de certains « veinards »; une semaine d'espoir, d'évasion et de rêve pour quelques francs.

Le jeu est devenu une exigence permanente liée à la nécessité du loisir. Mais le jeu va quelquefois si loin qu'il arrive que « la vie jouée se développe au détriment de la vie engagée ».

Les spectacles

Le **cinéma** est la 73^{e} industrie française par son importance. Le cinéma mondial traverse une crise dont il est difficile de dire si elle est structurelle ou conjoncturelle; après une période faste correspondant aux années d'avant-guerre (débuts du cinéma parlant) et d'après-guerre, le cinéma connaît une baisse sensible de fréquentation. C'est ainsi qu'en 1957, les Français allaient 9,2 fois par an au cinéma, contre 8 fois en 1960 et 3,3 fois en 1976.

51 % des Français vont au moins une fois par an au cinéma. En 1960, 360 millions de places de cinéma ont été vendues, et en 1976 170 millions; la France se situe au 28^{e} rang mondial pour la fréquentation moyenne par habitant.

Deux raisons à cette désaffection envers le cinéma : l'implantation croissante de la télévision, à un moindre degré la fatigue après une journée de travail, et le temps

de transport pour se rendre au cinéma (disparition des salles de quartier). En ce qui concerne la concurrence de la télévision, des experts américains ont observé que 2 % de récepteurs de télévision en plus sur une zone donnée faisait baisser la fréquentation des salles environnantes de 1 à 10 %.

30 % du public de cinéma déclare se fier aux critiques; ces personnes vont donc voir un film précis, dont elles connaissent le thème principal et la valeur artistique. Deux attitudes différentes sont à remarquer : celle des spectateurs actifs, qui acceptent les nouveautés de tout ordre et qui sont en état de totale disponibilité pour recevoir pleinement le film proposé; ils fréquentent volontiers les ciné-clubs, dont les projections sont suivies de débats. Les autres sont les spectateurs passifs, qui n'attendent de la séance de cinéma qu'un pur divertissement.

Il est plus difficile de cerner les goûts du public, liés à l'environnement culturel de chaque individu. Plusieurs motivations expliquent le désir de se rendre au cinéma :

— C'est une libération vis-à-vis de la routine quotidienne, même s'il n'offre pas forcément des prestations différentes de celles de la télévision; plus que la lecture, il offre la possibilité d'une évasion totale, l'image étant plus mobilisatrice. On va au cinéma pour tout oublier pendant une heure et demie ou deux heures, et l'on y parvient plus facilement qu'avec la télévision.

— C'est un passe-temps, un véritable loisir-détente, où l'effort à fournir est réduit.

— Beaucoup de spectateurs recherchent, dans le cinéma comme dans la lecture, la possibilité de nourrir leurs rêves futurs; l'identification aux héros leur permet de se reporter à une vie imaginaire plus passionnante que la routine journalière. Le succès des films dits commerciaux le prouve, c'est-à-dire ceux qui utilisent les thèmes chers à toutes les époques et à tous les hommes : l'amour, l'érotisme, le luxe, la violence, l'aventure, le rire.

— L'engouement pour les derniers films comiques prouve que les Français ont besoin de gaieté, et qu'ils attendent du cinéma une distraction, un divertissement. Les films qui font appel à l'absurde ou à l'humour noir connaissent un regain de popularité. Le réalisme de l'œuvre est un élément important de sa réussite, dans la mesure où une situation ou une personnalité trop irréelles annihilent les possibilités d'identification du spectateur avec le héros. La réalité doit être embellie, mais dans une limite raisonnable; c'est l'une des recettes du succès d'un film en cette fin de XXe siècle.

— Sortir est une fête, ce qui donne au cinéma une légère supériorité par rapport à la télévision. Assister à la projection d'un film en commun est toujours plus exaltant que de le regarder seul chez soi. Il suffit pour prouver ce fait de regarder à la télévision un film déjà vu au cinéma; l'impression que l'on ressent est différente, l'attention qu'on lui réserve moins totale; l'adhésion de tout l'être n'est pas aussi exclusive.

Quelles sont les exigences des spectateurs en matière de cinéma? La majorité des spectateurs mettent l'accent non sur la qualité esthétique d'un film, sur la recherche effectuée par le metteur en scène, sur le travail des acteurs, mais sur l'action, sur l'intérêt dramatique. La vérité du cinéma en tant qu'art n'est ressentie que par un nombre restreint de personnes; le charme de l'image ou de la musique agit plus sur le spectateur que l'innovation ou la recherche d'effets nouveaux. Le cinéma, qui reste le plus souvent l'occasion d'une sortie familiale, est aimé du public dans la mesure où il présente des films de bonne qualité mais d'accès facile, qui lui apportent une distraction et une évasion réelle.

De 1947 à 1951, les spectacles de **théâtre,** de **ballets, concerts** et **conférences** gagnaient 100 millions d'adeptes, alors que le cinéma en perdait déjà 60 millions. Depuis cette date, le phénomène s'est stabilisé; la naissance, après la guerre, du théâtre d'avant-garde et toutes les recherches en la matière ont été très contestées par le public, qui y voyait de simples jeux intellectuels stériles.

Actuellement, 12 % des Français vont une fois par an au théâtre, 2,6 % à l'opéra, 7,8 % fréquentent les nombreux festivals qui animent les régions touristiques.

42 Français sur 100 visitent au moins un monument par an, 27 un musée, 18 une exposition.

B. Asset – Pitch

▲ *La grande salle du Palais des Congrès de la Porte Maillot à Paris, où se déroulent ballets, pièces de théâtre et concerts.*

En revanche, 47 % des Français vont, au moins une fois par an, s'amuser dans une **fête foraine,** 25 % sont allés danser dans un **bal public,** 24 % ont assisté à un match sportif et 10 % à une séance de cirque. La fréquentation des fêtes foraines et des bals publics est principalement le fait des milieux ruraux, pour lesquels un mouvement d'organisation des loisirs s'était amorcé en 1936-37. Ces premières tentatives ont avorté du fait de la guerre, et les loisirs à la campagne se limitent le plus souvent à la télévision, aux fêtes de village ou aux réunions de famille. C'est à la campagne que se maintient surtout la notion de fête; qu'elle soit la réunion d'amis ou de membres de la famille, la fête est passée de mode dans les milieux urbains.

La principale occasion de fête est Noël; si celle-ci s'est le plus souvent vidée de son contenu religieux, elle reste, dans tous les milieux, la célébration de la famille. La fête des mères et la fête des pères sont l'objet d'une exploitation commerciale systématique. Leur succès symbolise néanmoins le désir ressenti par un nombre croissant d'un renforcement des liens familiaux, et la volonté renaissante de se regrouper en famille.

▼ *Producteur important, la France ne se situe qu'au 28e rang mondial pour la fréquentation moyenne par habitant des cinémas.*

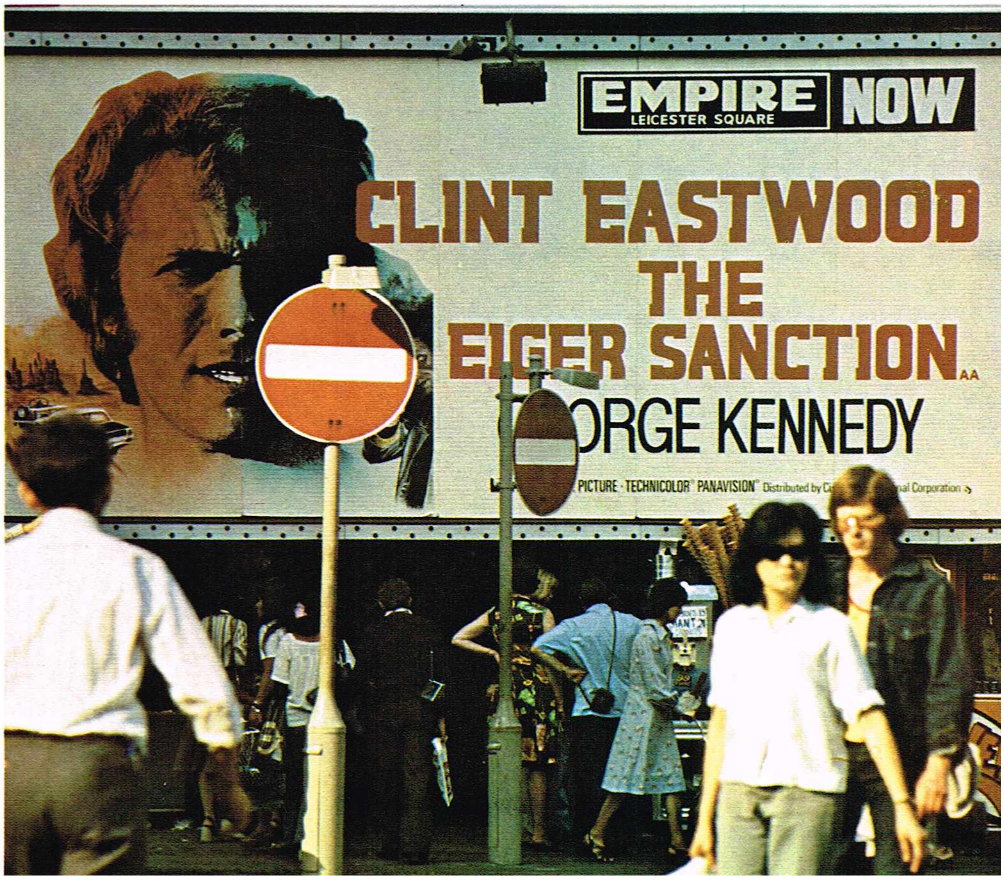

R. Poinot – Top

A. Valtat – Top

▲ *Le cyclotourisme, alliant le plaisir du sport à la découverte des paysages, connaît un regain de succès depuis quelques années.*

Le loisir, ou la fête du corps

11 % des Français font régulièrement de la gymnastique. 9 % pratiquent un sport individuel d'une manière continue, et 7 % un sport d'équipe. 50 % des Français font de l'exercice : de la marche à pied à la compétition. Une évolution favorable se fait sentir, en faveur du développement du sport en liaison avec le besoin nouveau de vie « naturelle ». Après la frénésie des années 1960 pour des loisirs toujours plus sophistiqués, nous redécouvrons les joies du sport. Depuis 1946, les diverses fédérations voient croître leurs effectifs d'affiliés de 5 % par an.

Qu'ils soient ou non motivés par l'esprit de compétition, les Français pratiquent des sports très divers : du canoë-kayak (dont la fédération regroupe 12 000 licenciés) à la chasse (plusieurs millions de chasseurs). Le cyclotourisme, activité de plein air qui allie le plaisir du sport à l'appréciation des lieux visités, connaît un regain de succès depuis quelques années. Un randonneur moyen parcourt annuellement 8 à 10 000 km, et 28 % des Français font de la bicyclette d'une manière régulière. Le football est le sport français le plus pratiqué : 18 000 associations regroupent 1 300 000 joueurs ; le judo, dont la propagation en France est récente, compte 600 000 pratiquants.

On compte, dans l'hexagone, un pêcheur pour douze habitants (contre 1 pour 7 aux États-Unis et 1 pour 700 en Allemagne fédérale). Chacun d'entre eux dispose de 70 mètres de berges, et de 500 m² de plan d'eau, et pêche en moyenne 2 kg de poisson par saison.

Les sports autrefois réservés à une élite, navigation de plaisance, tennis, équitation, connaissent aujourd'hui un fort développement ; 380 000 licenciés pour le tennis, 387 000 bateaux de plaisance de longueur égale ou supérieure à 2,5 m (contre 575 000 en Grande-Bretagne). La voile attire de nombreuses personnes (73 000 affiliés).

Si la pratique des sports tend à s'intensifier, l'assistance aux rencontres sportives a pâti des effets de la télévision au cours des années 1960. Malgré un regain d'intérêt dû aux victoires internationales, les clubs sportifs doivent utiliser différents artifices pour attirer les supporters : « achats » de vedettes de la discipline, occultage des rétransmissions des rencontres dans les régions concernées, appel à la publicité de marques, etc.

Le développement du sport a été très rapide. A la fin du XIXe siècle, seuls les jeunes nantis pratiquaient un sport ; aujourd'hui, si le pourcentage des pratiquants réguliers reste faible, chacun a tout de même la possibilité de choisir une discipline sportive.

Avec le nombre des pratiquants s'est développé celui des supporters ; la télévision a creusé leurs rangs, mais certains clubs de football ou de rugby continuent à soulever l'enthousiasme des foules ; les supporters de Marseille ou Saint-Étienne, par exemple, font corps avec l'équipe et ses dirigeants. Les déplacements de l'équipe sont suivis par des milliers de personnes ; une véritable exploitation commerciale se greffe sur ce phénomène (journaux, prix des places, vente de gadgets ou de tee-shirts). Le moindre événement ou scandale prend de l'importance et divise les familles intéressées. Cette nécessaire évasion constitue une vie parallèle, au sein de laquelle joueurs et supporters sont mêlés, sans distinction de rang social.

F. Jalain – Top

▶ *Vue nocturne de la Foire du Trône à Paris. 47 % des Français fréquente au moins une fois par an une fête foraine.*

Le sport, pratiqué par tous ?

A l'école primaire, six heures hebdomadaires doivent être réservées à l'éducation physique et sportive, dans le cadre du tiers temps pédagogique. Cette éducation est assurée par les instituteurs et les institutrices, dans les classes, au même titre que les autres disciplines (arrêté du 6 août 1969 instituant le tiers temps pédagogique à l'école primaire). On sait quelle a été l'efficacité de cette mesure, qui impose à des professeurs l'enseignement de l'éducation physique ; bien sûr, depuis cette date, 37 % des enseignants ont bénéficié soit de la visite des conseillers pédagogiques départementaux ou de circonscriptions, soit des journées d'information organisées à leur intention. Le résultat de cette politique est que, de l'aveu même du secrétariat à la Jeunesse et aux Sports, la durée moyenne des cours d'éducation physique à l'école primaire est de 2 h 55 mn par semaine, soit moins de la moitié de la durée prévue en 1969. L'évolution est notable (2 h 10 mn en 1972), mais l'insuffisance des horaires et des installations subsiste.

Dans l'enseignement secondaire, trois heures d'éducation physique et sportive sont obligatoires dans le premier cycle, deux heures dans le second cycle. Cet horaire, insuffisant en lui-même, n'est pas toujours respecté dans son intégralité ; les équipements sportifs scolaires existent, mais leur utilisation n'est pas toujours rationnelle.

L'ASSU, Association du sport scolaire et universitaire, a été mise en place après la guerre ; depuis cette date, le nombre des affiliés a été multiplié par 18. Son objet est d'organiser et de développer le sport amateur de compétition pour les élèves et les étudiants.

Le brevet sportif populaire stimule également l'esprit de compétition ; 530 000 personnes l'avaient obtenu en 1947, 1 400 000 en 1975.

En dehors des diverses structures citées, et dans le cadre d'une nouvelle orientation sportive définie en 1971, les centres d'animation sportive (CAS) sont des organismes destinés à assurer la continuité entre la formation de base indispensable, donnée à l'école, et une pratique sportive diversifiée répondant aux goûts et aux aptitudes de chacun, susceptibles de se poursuivre sous forme de compétition, ou sous forme de loisir sportif. Il y avait, en 1976, 505 CAS, fréquentés par plus de 500 000 enfants.

47 000 terrains de plein air existaient en France à la fin de 1974, 10 400 installations sportives couvertes, 2 488 piscines, 85 patinoires, 212 frontons, 11 tremplins de ski, 346 stands de tir, 83 centres de tir à l'arc, 650 centres équestres, 46 pistes cyclistes, 15 circuits automobiles...

Les loisirs en commun

Les loisirs sont difficiles à pratiquer là où règne l'anonymat : grandes villes, cités-dortoirs, campagnes isolées. L'absence de lieux naturels de rencontre dans les villes, par exemple des squares avec bancs, rend difficile la communication entre les individus, et favorise la naissance et l'épanouissement des associations en tout genre. C'est ainsi que 28 % des Français sont membres d'une association. 9,9 % appartiennent à une association sportive (1 400 à des associations de jeunesse et d'éducation populaire en France en 1976), 3,6 % à un syndicat, 3,2 % à un groupement culturel, 2,3 % à une association artistique, 2,2 % à une association de parents d'élèves, 2 % à un mouvement religieux, 0,9 % à des groupements d'information sur l'éducation des enfants, 0,7 % à un parti politique ; la fréquentation moyenne de ces « clubs » est d'une fois par mois.

On remarque le caractère masculin de la pratique associative, qui par ailleurs décroît avec l'âge, notamment à l'occasion du mariage. Elle est plus répandue chez les cadres moyens et supérieurs, les professions libérales, les agriculteurs ; elle est rare chez les ouvriers spécialisés et les manœuvres. La principale caractéristique des membres de ces diverses associations est leur niveau d'étude : beaucoup de bacheliers et de diplômés de l'enseignement supérieur. Les agriculteurs se regroupent dans leurs syndicats, les cadres supérieurs dans les clubs culturels, les cadres moyens dans les associations sportives.

L'intérêt pour les loisirs en commun, et plus particulièrement les loisirs d'animation, se manifeste de plus en plus : l'isolement des individus dans les villes-dortoirs, la disparition de la vie de quartier dans les grandes villes font que les centres d'animation deviennent l'*oxygène* de la vie de tous. Ils redonnent à la ville une taille humaine.

D. Goldberg – Camera-Press – Parimage

▲ ***Même si la télévision a diminué le nombre des supporters sportifs, certains matches de football continuent à soulever l'enthousiasme des foules.***

L'homme membre d'un club est collectivement valorisé, alors qu'individuellement il est souvent timide, ou conscient de ses carences. D'où le succès de ces regroupements parfois antinaturels. Lorsqu'il se crée un endroit où les individus peuvent se rencontrer, le goût de la fête renaît ; cela se fait parfois spontanément, comme ce fut le cas avant la démolition des Halles parisiennes. Les sociologues et animateurs insistent sur le fait que ceux qui se rendent en ces lieux sont disponibles, prêts à accueillir toutes les suggestions en matière de loisirs. Le but des professionnels du loisir est de compenser par l'animation les carences de la vie quotidienne. Au début, un schéma était imposé aux adhérents des diverses associations telles que les Maisons de jeunes et de la culture (MJC), les établissements d'accueil pour le troisième âge et autres structures d'animation. Les responsables de ces associations se sont très vite aperçus que deux erreurs fondamentales étaient commises : d'une part, vouloir à tout prix faire le bonheur des autres malgré eux, l'échec relatif de nombreuses MJC en est la preuve ; d'autre part, il était irréaliste et inhumain de séparer les individus selon leur âge, ce qui a conduit de nombreuses associations culturelles et de loisirs à se transformer en Maisons pour tous, qui, plutôt que d'imposer un certain nombre d'activités, les proposent à leurs adhérents : des techniciens sont à la disposition des amateurs qui désirent apprendre la poterie, le théâtre ou la photo. En offrant plutôt des suggestions et aides techniques que des cadres rigides, ces Maisons pour tous permettent en outre aux diverses générations de se rencontrer, aux enfants de côtoyer des personnes âgées, à tous de sortir de leurs « ghettos » personnels. En fait, selon le mot d'un animateur : « Les animateurs ne devraient pas exister » ; ils sont le fruit de l'impossibilité des gens à s'assumer jusque dans leurs loisirs.

Dans leurs formes améliorées, les organisations éducatives ou récréatives représentent la forme la plus originale des loisirs de l'homme de la fin du XX^e siècle. Elles ont remplacé les patronages et autres œuvres à but confessionnel, et s'étendent à tous les âges et à toutes les couches de la société ; elles sont liées à l'urbanisation croissante et à la civilisation postindustrielle, dont elles veulent être des palliatifs.

Le danger de telles organisations est que l'individu, s'y sentant en confiance, ait de la peine à accepter l'arrivée d'autres personnes dans le clan formé, ainsi que l'ouverture à d'autres formes de loisirs ou de culture. Cela conduit à une sclérose de la personnalité et à l'uniformisation des goûts et des réactions. Mais leur effet bénéfique sur le plan de l'organisation des loisirs équilibre les inconvénients évoqués.

Quelques adresses utiles

Associations sportives et culturelles

Directions départementales de la jeunesse et des sports
A Paris : 17, bd Morland - 75181 Paris-Cédex 04.
Tél. 277-15-50 - Postes : 30-58 et 30-59.

En Province : Préfecture du département.

Centre d'information et de documentation jeunesse (C.I.D.J.)
Délégation générale : 101, quai Branly - 75740 Paris-Cédex 15. Tél. 566-40-20.

Fédération des maisons des jeunes et de la culture (F.M.J.C.)
54, bd des Batignolles - 75017 Paris. Tél. 387-66-83.

Union régionale des maisons des jeunes et de la culture (U.N.I.R.E.G.)
168 *bis*, rue Cardinet - 75017 Paris. Tél. 627-79-74.

Fédération des centres sociaux et socio-culturels de France
4, bd de Strasbourg - 75010 Paris. Tél. 206-27-86/87-88.

Fédération française de camping et de caravanning
78, rue de Rivoli - 75004 Paris. Tél. 272-84-08.

Touring Club de France
65, av. de la Grande-Armée - 75782 Paris-Cédex 16. Tél. 502-14-00.

Association française des stations vertes de vacances
Préfecture de la Sarthe - 72000 Le Mans.

Syndicat national des agences de voyages
6, rue Villaret-de-Joyeuse - 75017 Paris. Tél. 380-41-72.

Fédération nationale des syndicats d'initiative et offices de tourisme
127, Champs-Élysées - 75008 Paris. Tél. 720-43-06.

Activités diverses

Bibliothèques et discothèques
Mairies des communes.

Conservatoires de musique
Mairies des communes.

Conservatoires d'art dramatique
Mairies des communes.

Maison des métiers d'art français
28, rue du Bac - 75007 Paris. Tél. 261-58-54.

Centre international d'art et d'artisanat
86-90, passage Brady - 75010 Paris. Tél. 236-59-10.

La Vie créatrice
9, place St-Liphard - 45130 Meung-sur-Loire.

Centre culturel de la fédération française de diffusion artistique et culturelle
Aiglun 04000 Digne.

Association francaise des chasseurs de son
19, rue des Bernardins - 75006 Paris.

Association nationale des clubs aérospatiaux
Palais de la Découverte. Av. Franklin-Roosevelt - 75008 Paris.

Fédération française d'aéromodélisme
52, rue Galilée - 75008 Paris. Tél. 720-52-32.

Union nationale des groupes folkloriques
72, rue du Général-Leclerc - 94410 St-Maurice.

Fédération française de danse d'art chorégraphique et d'expression corporelle
3, rue St-Charles - 75015 Paris.

Fédération française des échecs
105, bd de Sébastopol - 75002 Paris.

Fédération française de scrabble
87, av. Jean-Baptiste Clément - 92100 Boulogne-Billancourt.

Fédération nationale des sociétés photographiques de France
9, rue Faraday - 75017 Paris. Tél. 924-64-11.

Association des photographes animaliers
30, rue St-Marc - 75009 Paris.

Association sportive de la chasse photographique française
60, rue des Archives - 75003 Paris.

Fédération nationale de yoga
3, rue Aubriot - 75004 Paris.

G. Schachmes - Parimage

Les Français et leurs vacances

Partir en vacances est devenu, en 1936, un droit. C'est aussi une nécessité, du fait du développement de l'urbanisation créant un besoin d'évasion (les agriculteurs ressentent moins que les autres le besoin de partir). 500 000 personnes sont parties en vacances en 1936, 2 millions en 1937 ; après la Seconde Guerre mondiale, c'est vers 1950 que les Français prennent l'habitude des vacances ; à cette date, 49 % des citadins sont partis durant l'été, en 1957, 62 %. Actuellement, 80 % des Parisiens partent en vacances (la moyenne nationale dépasse les 50 %) ; l'accroissement annuel du nombre des vacanciers se stabilise autour de 1 %, après avoir connu une plus forte expansion entre 1950 et 1960.

52 % des Français partent au moins une fois par an en vacances, contre 64 % des Américains, 64 % des Suédois, 48 % des Allemands de l'Ouest, 31 % des Italiens et 19 % des Soviétiques. En 1975, la durée moyenne du séjour en vacances d'un Français s'établissait autour de 26 jours ; c'est la durée moyenne la plus longue : États-Unis : 22 jours ; Allemagne fédérale : 22 jours ; Italie : 18 jours ; URSS : 17 jours.

Les Français qui partent le plus sont ceux qui sont âgés de 30 à 39 ans ; ceux qui partent le moins sont les personnes de plus de 70 ans. Les Français consacrent un mois de leur revenu à leur budget vacances ; 80 % d'entre eux partent en voiture, 14 % par le train.

Les vacances d'été mobilisent le plus grand nombre de Français ; elles durent en moyenne 21,8 jours (16 jours pour les agriculteurs, 23 jours pour le personnel de service et les patrons, 24 jours pour les ouvriers, 27 jours pour les cadres moyens, 30 jours pour les employés, 31 jours pour les cadres supérieurs et professions libérales).

En 1976, 14 % des agriculteurs sont partis en vacances d'été, 32 % des inactifs, 50 % des ouvriers, 55 % des patrons de l'industrie et du commerce, 63 % des employés, 80 % des cadres moyens, 85 % des cadres supérieurs et membres des professions libérales.

18 % des jours de vacances se sont déroulés à l'étranger, principalement en Espagne, au Portugal, en Italie. Parmi les gens qui sont restés en France, 35 % sont allés chez des amis ou dans leur famille, 24 % ont fait du camping, 14 % ont loué une villa ou un appartement, 8,5 % se sont rendus dans leur résidence secondaire, 10,8 % ont été à l'hôtel. 44 % des vacanciers se sont rendus au bord de la mer (où chacun d'entre eux a disposé de 35 cm de littoral !), 27 % à la campagne, et 17 % à la montagne.

Les vacances d'été signifient encore, pour beaucoup de salariés, l'apogée des loisirs de l'année entière ; toute une industrie annexe s'est d'ailleurs greffée sur ce phénomène : mode vestimentaire, articles de sport, etc. L'homme « se réalise » en vacances, son comportement est différent de celui qu'il a le reste de l'année : généralement, l'argent le préoccupe moins (même s'il se prive pour ce faire pendant une partie de l'année), et cette possibilité le valorise. Le degré de satisfaction, le contentement retiré des vacances influeront sur l'atmosphère de la vie familiale pendant le reste de l'année.

▲ Partir en vacances est devenu, en 1936, un droit. C'est aussi une nécessité.

▼ Les vacances d'été mobilisent le plus grand nombre de Français. Ici, le col du Pourtalet vers l'Espagne.

Cherville - Fotogram

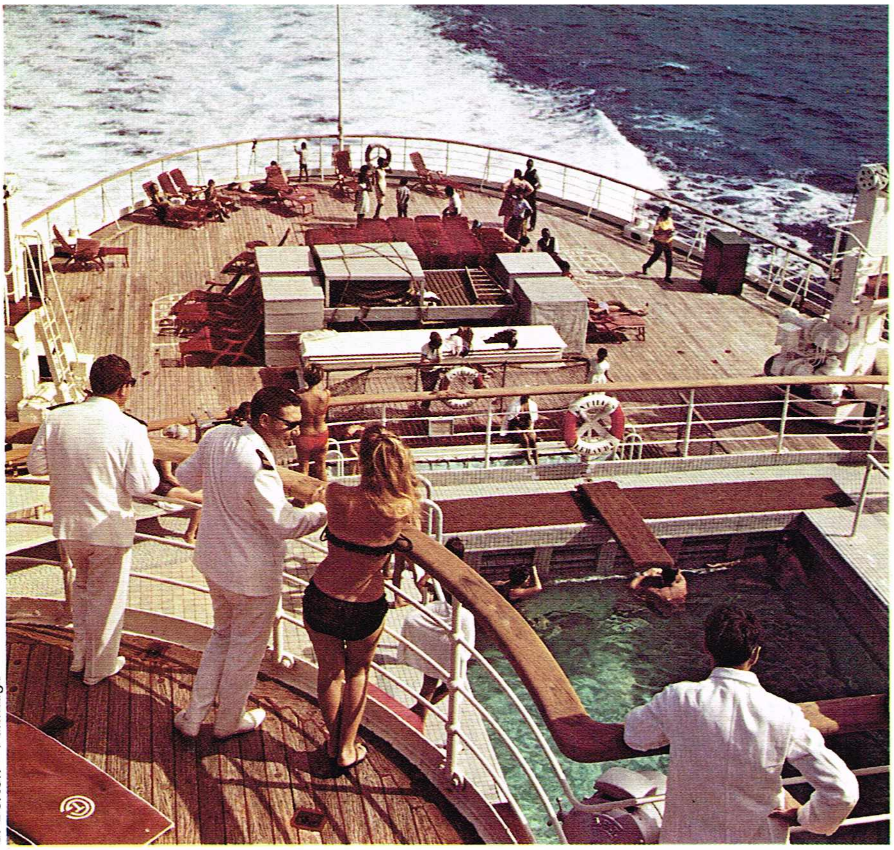

S. Berton - Parimage

▲ *La détente s'accompagne le plus souvent de la pratique modérée d'un sport.*

▼ *Le marché des sports d'hiver (à droite) représente une industrie florissante dans laquelle le ski de randonnée (ci-dessous) occupe une place importante.*

Les individus, fatigués par leur année de travail, partent en vacances pour se reposer; la détente s'accompagne le plus souvent de la pratique modérée d'un sport (natation, marche, excursions, vélo). Les touristes sont volontiers sédentaires, ils disent être fatigués par le rythme de vie qui leur est imposé toute l'année. Il en résulte que beaucoup d'entre eux se retrouvent à la même période, entassés aux mêmes endroits.

Le Français en vacances, bien qu'avide d'évasion, transpose le plus souvent l'atmosphère étouffante de son environnement habituel. Or les vacances sont l'occasion rêvée pour l'approfondissement des relations entre citadins et ruraux, mais les contacts « différents » sont presque toujours impossibles. Les vacances, entend-on dire, permettent aux différentes classes sociales de se côtoyer; la réalité est autre : on constate tout d'abord que les gens se regroupent en certains endroits, en fonction de leur situation financière. D'autre part, lorsque des contacts ont lieu, on s'aperçoit qu'ils restent le plus souvent superficiels, et que, sitôt les vacances terminées, les relations s'estompent.

Les vacances d'hiver

De nombreux Français choisissent de ne prendre que trois semaines de vacances l'été, pour couper l'année par une semaine de détente en hiver. Pendant la saison 1975-1976, 16,2 % des Français sont allés en vacances d'hiver pour une durée moyenne de 14,9 jours; les plus longs séjours sont le fait des employés, du personnel de service, des cadres supérieurs et membres des professions libérales. 3,2 % des agriculteurs sont partis, 8 % des ouvriers, 13,4 % des patrons, 20 % des employés, 33 % des cadres moyens, 46 % des cadres supérieurs et membres des professions libérales.

51,3 % des vacanciers d'hiver se sont rendus chez des parents ou amis, 6,5 % ont loué un appartement, 1,9 % ont fait du camping, 13 % se sont rendus dans leur résidence secondaire et 16 % à l'hôtel.

Contrairement à une idée reçue, les vacances d'hiver ne se déroulent pas toutes en montagne; 16,6 % des vacanciers vont à la mer, 31,4 % à la campagne, 28,8 % en montagne (dont 20,6 % pour pratiquer le ski ou autres sports d'hiver), 32,1 % à la ville, alors que 11 % des vacanciers d'hiver suivent un circuit touristique.

Le marché des sports d'hiver représente une industrie florissante, dont le chiffre d'affaires connaît une hausse annuelle de 10 à 15 %. 1 500 000 personnes sont allées aux sports d'hiver en 1973-1974, et 2 400 000 en 1976-1977.

Le ski de fond, pratiqué il y a dix ans par quelques fanatiques, devient un phénomène de masse, et rassemble 450 000 adeptes en France. Sa formidable évolution dans le marché des sports d'hiver a permis à des petits villages de se spécialiser dans les pistes de fond, villages de moyenne montagne, dont les ressources financières étaient insuffisantes pour subvenir à l'équipement d'une station moderne.

Les vacances organisées

Le Français part en vacances pour se relaxer; mais au repos succède quelquefois l'ennui. C'est pourquoi les vacances organisées connaissent depuis quelques années un regain de succès; la possibilité d'être délivré

R. Dumas - Fotogram

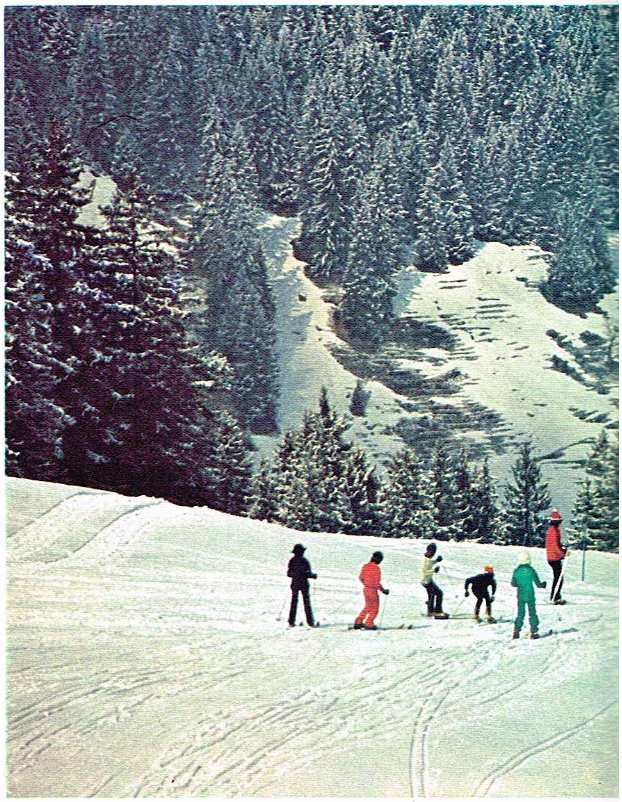

de tout souci matériel, de profiter des diverses activités et animations prévues, fait que 15 % des Français choisissent cette formule (contre 70 à 80 % des Allemands et des Scandinaves).

Depuis 28 ans qu'ils existent, les clubs de vacances ont connu un formidable développement; l'un d'entre eux, dont le premier village a été créé en 1950, en compte aujourd'hui 75 répartis dans toutes les régions du monde, dont la capacité d'hébergement représente 45 000 lits. Les activités sportives proposées sont multiples, et l'animation constante; les personnes qui choisissent ce style de vacances sont souvent celles qui ont des difficultés à nouer des relations dans leur vie quotidienne. Très souvent, la participation aux activités offertes fait partie des règles du jeu, et ceux qui ne s'y soumettent pas sont exclus de la minisociété qui est recréée, et qui se referme sur elle-même; les gens qui partent en club n'y vont ni pour faire du tourisme, ni pour se mêler à la vie locale, mais pour y lier des relations, le plus souvent superficielles. L'attitude du vacancier en club est fondamentalement passive; mais chacun a l'impression merveilleuse de compter pour les autres.

55 % des gens qui fréquentent les clubs de vacances ont entre 25 et 39 ans, 32 % entre 40 et 59 ans; très peu de jeunes et de personnes âgées choisissent cette formule. La clientèle des clubs se décompose ainsi : 25 % de cadres supérieurs et membres de professions libérales, 25 % de cadres moyens, 21 % d'inactifs, 16 % d'employés, 10 % de patrons de l'industrie et du commerce, 0,3 % d'ouvriers et d'agriculteurs. 70 % de la clientèle est une clientèle d'habitués.

A côté des clubs, les vacances sociales, organisées notamment par les Villages Vacances Famille, offrent des prestations différentes. Un certain nombres d'activités sont prévues, des prestations sont offertes (garde des enfants), une équipe d'animation est à la disposition des vacanciers.

En plus de ces actions ponctuelles, la nécessité se fait sentir, chez les salariés ne partant jamais en vacances, d'une aide de l'État sous la forme d'un chèque vacances projet actuellement à l'étude.

Le camping

Le camping est né du double désir des Français de prendre des vacances à bon compte, et de transformer, pour quelques semaines, leur mode de vie; le camping

F. Valla - Pitch

▲ ***Le ski de fond devient un phénomène de masse, et rassemble aujourd'hui 450 000 adeptes en France (Moucherotte, Vercors).***

▼ ***Depuis 28 ans qu'ils existent, les clubs de vacances ont connu un formidable développement.***

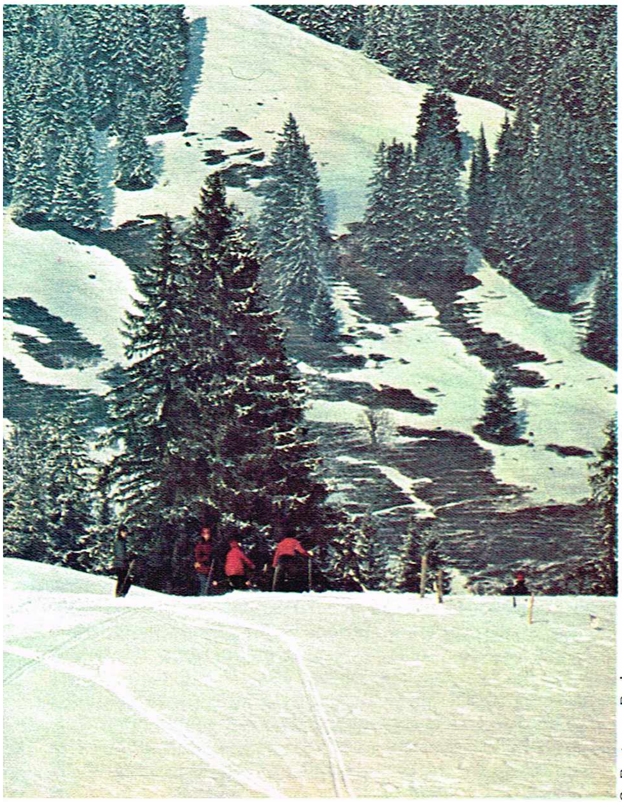

S. Berton - Parimage

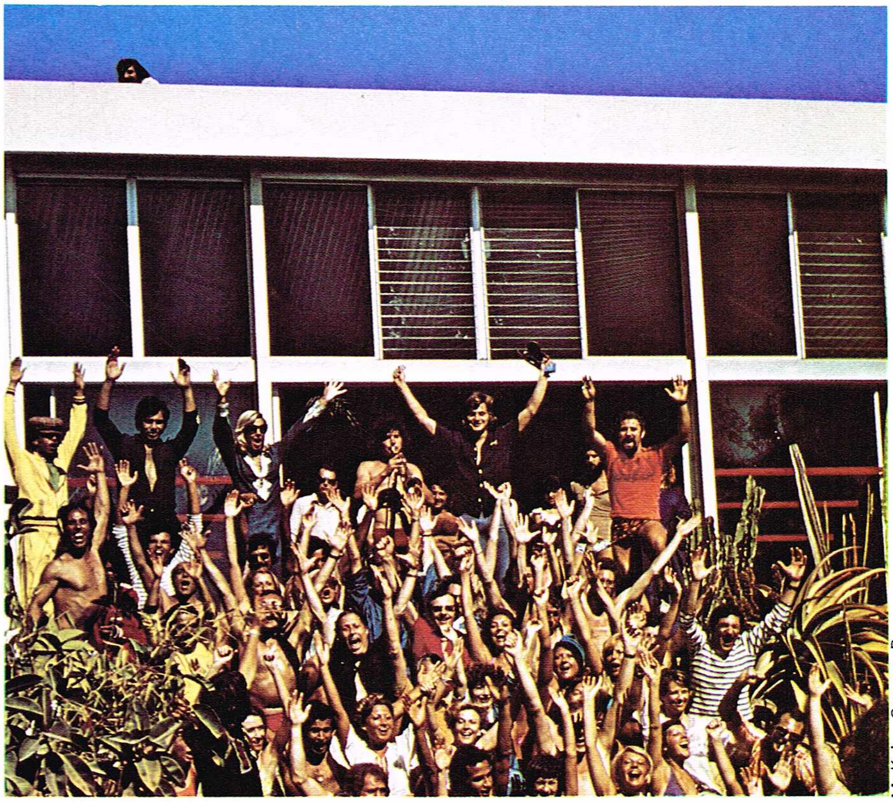

M. Kuh - Camera-Press

T. Boulley - Fotogram

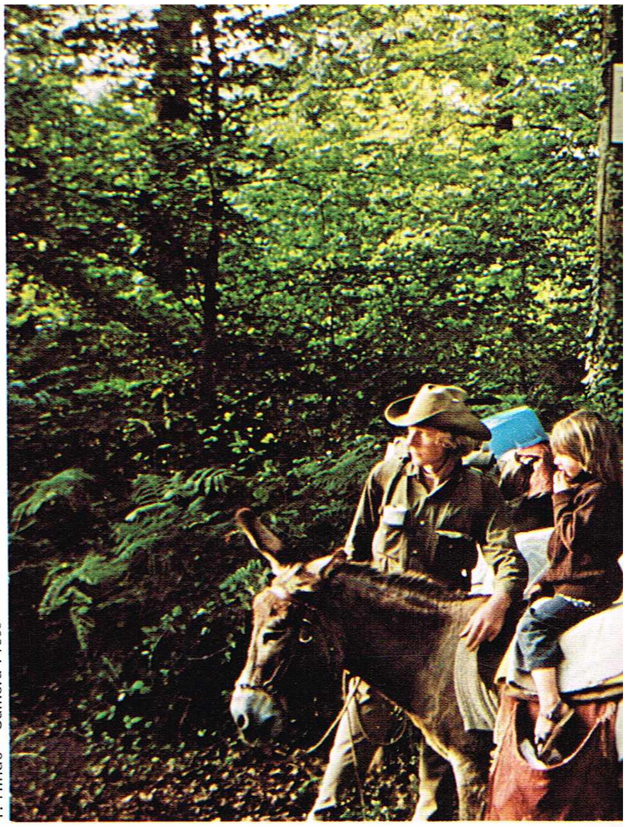

T. Hinde - Camera Press

Petzold - Pitch

▲ En haut et ci-dessus, la récente mode d'un retour à la nature n'est pas étrangère à la vogue du camping.
▼ Le prodigieux développement de l'auto-stop ainsi que les possibilités qui leur sont offertes par les chemins de fer permettent à un nombre croissant de jeunes de se déplacer.

E. Berne - Fotogram

apporte également la possibilité de circuler plus facilement en vacances. La récente mode d'un retour à la nature n'est pas non plus étrangère à la vogue du camping. 5 500 terrains classés, outre de nombreuses places de camping à la ferme ou de camping sauvage, accueillent 6 millions de campeurs en France. En 1965, l'ensemble des adeptes du camping avait passé sous la tente ou dans la caravane 58 millions de nuitées (141 millions en 1976).

Le parc des caravanes était constitué de 52 000 véhicules en 1970, et de 86 000 en 1976.

Quant au naturisme, les premiers centres sont nés en Allemagne en 1903, puis en France en 1904 ; actuellement, 200 associations regroupent 60 000 adhérents. 55 % d'hommes et 45 % de femmes passent leurs vacances dans les camps de naturisme (21 000 places) ; la moyenne d'âge est de 39 ans pour les hommes, et de 34 ans pour les femmes. 80 % des naturistes sont représentés par des ménages accompagnés de leurs enfants de moins de 15 ans.

Les naturistes se composent pour 28 % de cadres moyens, 17 % de cadres supérieurs et membres de professions libérales, 13 % de patrons, 25 % d'employés, et 10 % d'ouvriers. Le naturisme a connu, depuis 1956, un fort accroissement (10 fois plus d'adeptes en 1976 qu'en 1956).

Les vacances des jeunes

Contrairement à leurs aînés, vacanciers sédentaires, les jeunes rêvent d'évasion et de dépaysement ; ils recherchent bien sûr la découverte de nouveaux horizons, mais également le contact avec la population des régions qu'ils traversent.

De nombreux organismes participent à cette quête des jeunes et leurs noms sont particulièrement évocateurs : « Jeunesse et Reconstruction », « Opération Emmaüs », « Terres d'aventures », « Nomades-expéditions ».

Les adolescents profitent également des charters, dont l'activité s'intensifie régulièrement. Air Charter International, filiale d'Air France, a véhiculé 19 000 personnes vers la Grèce en 1970, 51 000 en 1973, et 95 000 en 1976.

Enfin, de nombreuses structures d'accueil à bon marché permettent aux jeunes qui le désirent de voyager à bon compte en France et en Europe : 48 600 lits leur étaient ainsi offerts en France en 1974 (auberges de jeunesse, centres d'accueil urbains, centres de montagne). Ils sont principalement répartis dans la région parisienne, le Centre, la Bretagne et les régions du Midi. Le prodigieux développement de l'auto-stop ainsi que les possibilités qui leur sont offertes en Europe par les chemins de fer permettent à un nombre croissant de jeunes de se déplacer.

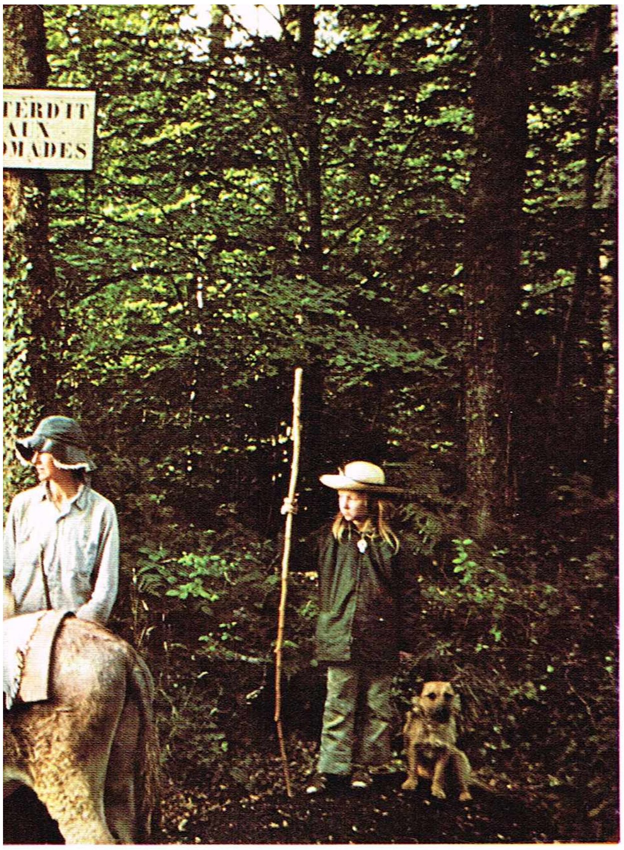

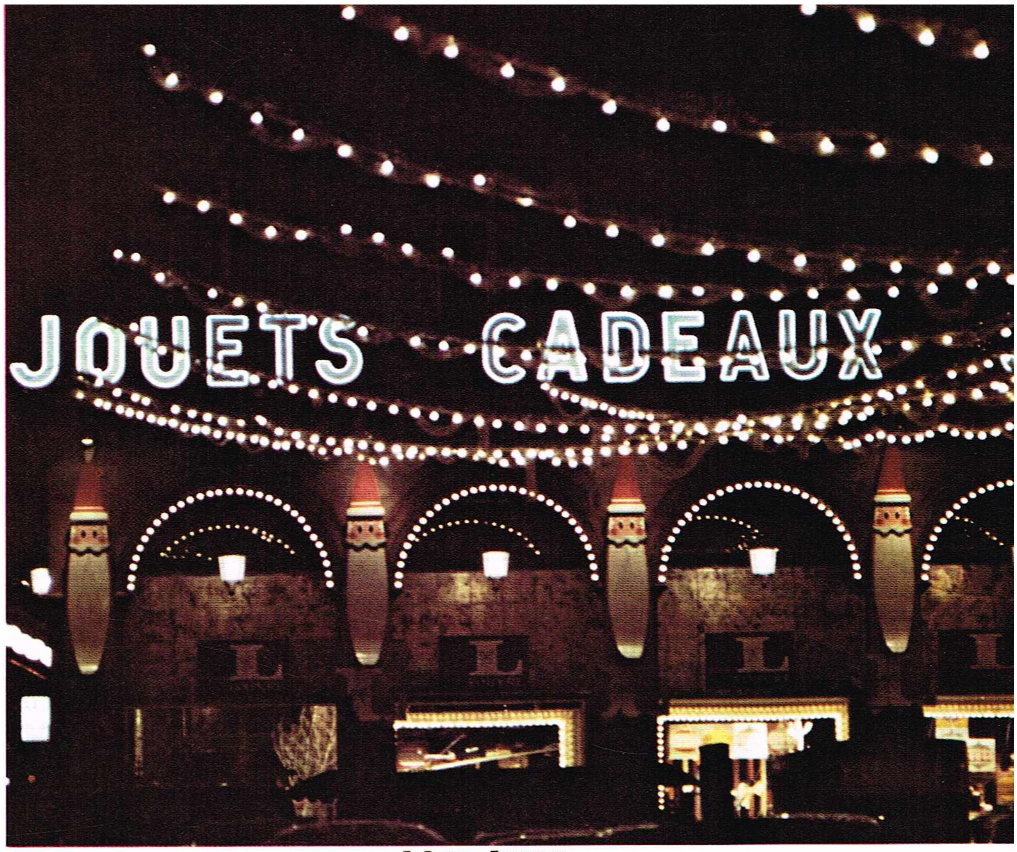

E. Berne - Fotogram

▲ *Au centre, des vacances différentes : certains partent pour quelques semaines avec un cheval et une roulotte. Ci-dessus, c'est à travers les jeux que se manifeste le mieux notre civilisation des loisirs.*

La jeunesse actuelle voyage sans se soucier des conditions de confort dans lesquelles ces déplacements s'effectuent; elle est désireuse avant tout d'éloignement, de dépaysement.

Les enfants, quant à eux, peuvent actuellement bénéficier de plus de 500 000 places dans les centres de vacances et de loisirs : colonies maternelles, camps et colonies de vacances, centres de vacances d'adolescents.

Des vacances différentes

Un double courant se fait sentir chez les Français en vacances. Beaucoup sont encore avides d'exotisme, de tranquillité, de relaxation. Mais certains tentent ce qu'il était inconcevable de faire il y a seulement trente ans : ils descendent l'Allier en kayak; ils partent pour quelques semaines dans les massifs isolés du centre de la France avec un cheval et une roulotte; ils remontent lentement le cours du magnifique canal du Midi en house-boats; 2 millions de randonneurs partent chaque été, sac au dos. Après avoir été bien loin, les Français apprennent à découvrir la France, à vivre pendant un mois en harmonie avec sa nature; ils s'épanouissent dans la redécouverte d'un rythme de vie humain, qui ne prend pas pour référence les heures de travail ou de télévision, mais le lever et le coucher du soleil.

Un antitouriste, beaucoup plus heureux que le touriste d'hier des stations balnéaires; un touriste qui refuse que son temps de loisir soit préparé par d'autres, ce touriste « nouvelle manière », c'est peut-être l'homme de loisir de demain; celui qui donne, dès aujourd'hui, en tête de ses préférences en matière de sorties les promenades à la campagne, puis le pique-nique, les promenades dans les espaces verts en ville, le cinéma et les matches de sport.

Les valeurs morales traditionnelles attachées à la prééminence du travail perdent de la vigueur avec la montée d'une génération sensibilisée aux problèmes du loisir. Mais le développement de la civilisation des loisirs implique la canalisation, pour une meilleure organisation, de toutes les pulsions nouvelles en la matière. La volonté, qui s'affirme chaque jour, de l'indépendance de l'homme vis-à-vis des loisirs ne va-t-elle pas se heurter à une réglementation contraignante, ou à une commercialisation abusive?

La situation matérielle de l'homme de l'an 2000 est difficile à prévoir. Ces obstacles divers : réglementation, commercialisation, croissance plus modérée du niveau de vie, vont lui donner un autre profil. Mais sa volonté d'indépendance, sa créativité réussiront-elles à créer une autre forme de loisir plus adapté? L'homme de loisir d'aujourd'hui, intelligent, se veut indépendant. Réussira-t-il à le rester?

LOISIRS ET TECHNIQUE

Jouets et jeux

Vers une civilisation du jeu

C'est à travers les jeux que se manifeste le mieux notre civilisation des loisirs. En effet, l'activité ludique a dépassé depuis longtemps le stade représenté par son instrument, le jouet, pour envahir tous les secteurs de notre existence. Aujourd'hui, nous apprenons en jouant, nous travaillons en jouant, et nos instants de détente sont consacrés en grande partie aux jeux. La psychanalyse elle-même s'est approprié le jeu, à travers le psychodrame. Le langage publicitaire parvient lui aussi à récupérer le jeu pour des activités qui semblent pour le moins éloignées de toute occupation ludique : « Sur le matelas X, dormir devient un jeu d'enfant. » Il serait puéril de ne voir dans ces manifestations qu'un phénomène de vocabulaire; à travers elles, c'est l'évolution de notre civilisation qui est concernée. A l'ère moderne, où le pain est obtenu sans trop de problèmes, toute aspiration devient jeu. En allant jusqu'à transformer le travail en jeu, notre société crée un temps de loisir fictif qu'elle n'a pas les moyens de dispenser à tous. Cela conduit à une transformation de la notion de jeu, autrefois synonyme de rêve, aujourd'hui réalité palpable, mise à la disposition de chacun.

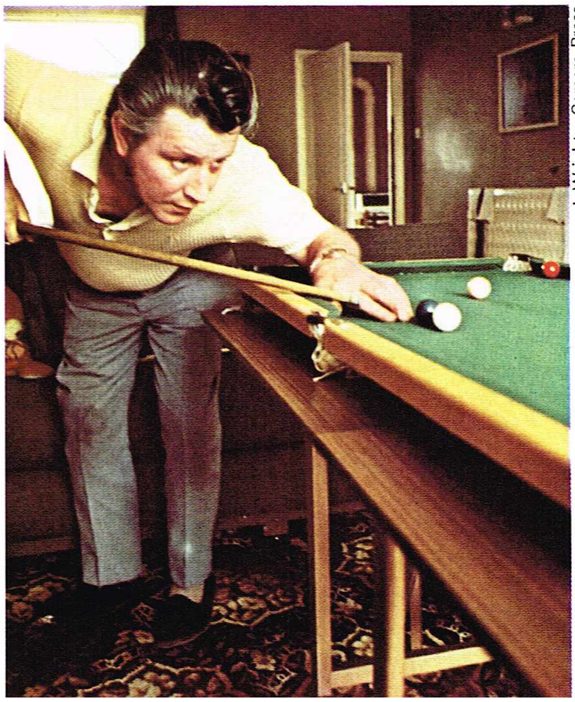

J. Wright - Camera Press

◀ *Nos instants de détente sont consacrés en grande partie aux jeux.*

F. Darras - Fotogram

▲ *On assiste à une vague croissante des jeux éducatifs ; ici, un atelier d'enfants au centre Beaubourg.*

Au temps où le jouet n'était qu'un jeu d'enfant

Il y a vingt ans, jouets et jeux étaient encore deux phénomènes distincts, se manifestant par une séparation du monde de l'enfance et de celui des adultes. Abandonner ses jouets représentait encore dans les années 1950 un symbole de mûrissement. Arrivé à l'âge d'homme, l'adolescent devait rejeter tous ces symptômes de puérilité et consacrer son temps aux « choses sérieuses ».

Adulte, l'homme n'abandonnait pas pour autant le jeu. Qu'il se manifeste dans la pratique d'un sport ou dans celle des jeux de hasard, le jeu marquait nettement la différence entre temps de travail et temps de loisir. Il était alors inconcevable et fort mal considéré de se livrer à une activité ludique, y compris à l'intérieur de la cellule familiale : il s'était créé une sorte de tabou du jeu, et l'on ne pouvait s'y adonner que dans des clubs, sportifs ou privés, comme pour le billard ou la roulette. Ce phénomène était dû essentiellement à deux faits : absence de pouvoir d'achat chez l'adolescent (et *a fortiori* chez l'enfant) et masculinisation du jeu. Sans pouvoir d'achat, l'enfant restait dépendant des choix parentaux ; l'adolescent se trouvait sous la même dépendance matérielle, avec en outre l'interdit pesant sur le jouet qui le concernait spécialement, en tant que futur adulte. Passer du jouet au jeu devenait alors une affaire d'hommes. Pour la jeune femme, l'enfant était considéré comme le prolongement naturel de la poupée : le jouet s'était transformé naturellement en jeu. Chez le jeune homme en revanche, on considérait que le jouet devait mourir avec l'adolescence. Passé ce stade, le jeu devenait le privilège du guerrier, son droit au repos.

L'ère du jeu

Depuis les années 1960, on assiste à une évolution décisive du jouet, de son industrie et de la notion même du jeu. Par sa production en grande série, le jouet se diversifie ; par l'évolution des mœurs, il n'est plus réservé au domaine de l'enfance ; par le soutien des media, il devient un produit de grande consommation.

Le jeu a perdu le caractère péjoratif qu'on avait pu lui attribuer auparavant. Le temps que chacun lui accorde est beaucoup plus important que celui qui lui était réservé par les générations précédentes. Non que la durée consacrée aux loisirs soit aujourd'hui plus grande, mais parce que le jeu devient un facteur de cohésion familiale. Les jeux de société permettent ainsi à la famille de se retrouver plus souvent.

Mais c'est sans doute à l'influence des media, et plus particulièrement à celle de la télévision, que l'on doit d'assister à une évolution rapide de la conception et de l'importance des jeux dans notre société.

L'animation : une forme de jeu imposée

Parallèlement aux jeux de toutes sortes qui trouvent leur place dans la vie quotidienne, une nouvelle forme de jeux a fait son apparition, qui reprend à son compte beaucoup de manifestations de l'enfance et qui se complaît dans l'obéissance à un nouveau dieu : l'animateur. Faute de pouvoir créer — ou de chercher à le faire — de nouveaux divertissements, l' « honnête homme » de notre temps remet ses plaisirs entre les mains de ce professionnel du jeu. Cela se manifeste essentiellement dans les villages de vacances, où tout est conçu pour la détente optimale du client. On assiste là encore, comme à la télévision, au choix délibéré du jeu conçu davantage pour le plaisir, parfois sadique, du spectateur (mais les tartes à la crème d' « Intervilles » sont-elles autre chose qu'un avatar des jeux du cirque de la Rome antique ?) que pour celui du participant.

L'animation ne se cantonne plus dans les périodes de vacances et s'implante dans les villes, à longueur d'année. D'abord sous forme d'animation commerciale, dans les grandes surfaces ou les rues commerçantes. Forme déguisée d'une technique de vente, elle n'en rencontre pas moins un succès considérable. Acheter devient en réalité l'occasion d'une détente, et jouer fait oublier l'achat.

Mais l'animation n'a pas toujours cet aspect mercantile ou imposé. De plus en plus, les municipalités utilisent les services d'animateurs, chargés davantage de créer des occasions de vente, de jouer le rôle de catalyseurs, que d'imposer un certain type de plaisirs programmés. L'animation devient alors synonyme de participation, et le jeu-spectacle devient jeu actif. Cette transformation progressive est à souhaiter, car elle débouche sur un meilleur apprentissage du temps de détente et donc sur une réelle civilisation des loisirs : le jeu est devenu partie intégrante de notre existence.

Vers une nouvelle forme de jeu

Même pour les jeunes enfants, le jouet n'a plus la même signification qu'autrefois ; il est devenu un produit de la culture. Lorsque la majorité des enfants apprit à lire, il se créa très vite des bibliothèques afin d'inciter à la lecture et de faciliter sa pratique. On assiste aujourd'hui à un phénomène semblable avec le jouet : de plus en plus se créent dans de nombreuses communes françaises des ludothèques, sortes de bourses d'emprunt de jouets. Le jouet perd ainsi de son caractère personnel pour acquérir une dimension sociale.

Dans les séminaires de formation permanente destinés aux cadres, il n'est pas rare de voir utiliser des jeux comme outils pédagogiques : ce peut être un simple jeu de cubes que le stagiaire doit empiler afin d'évaluer ses capacités de prévision, et cela peut aller jusqu'à l'utilisation d'ordinateurs dans le cas de « jeux économiques », où l'on assiste au spectacle curieux de cadres supérieurs sérieux et pondérés allant jusqu'à se battre pour des guerres fictives, comparables à de modernes parties d'échecs. Peut-être assistera-t-on bientôt à l'entrée du jeu dans les usines ou les bureaux, comme facteur d'émulation. Retrouvera-t-il un jour sa réelle

fonction de détente, nul ne le sait; mais ses rapports avec la vie quotidienne ne seront plus les mêmes.

Les jeux traditionnels

Au hit-parade des jouets, les enfants du XX^e siècle paraissent élire les mêmes best-sellers que leurs prédécesseurs du Moyen Age et même de l'Antiquité. Les osselets connaissent toujours une vogue égale, si ce n'est que la matière plastique s'est substituée aux os de mouton; les poupées ressemblent davantage aux actrices de cinéma américain qu'aux petites filles modèles de la comtesse de Ségur, mais elles sont toujours bercées avec la même tendresse qu'au siècle dernier; les G.I.'s ont pris la place des soldats de plomb de l'Empire, sans pour autant diminuer l'ardeur combative des garçonnets. En apparence, rien n'a changé.

Un impôt sur l'avenir : le jouet évolutif

En réalité, on assiste à une transformation de la notion même de jouet. La poupée se met à grandir avec la petite fille, le soldat devient un homme qui grandit avec le petit garçon. Le jouet devient réellement actif. Non seulement pour les enfants, mais aussi pour les parents. Pour une somme relativement modeste, la poupée peut être achetée nue, ou pratiquement, ainsi que le soldat; c'est l'assurance, pour le fabricant, d'achats successifs et naturellement plus coûteux. On assiste ainsi à une sorte d'impôt levé sur les parents, impôt d'autant plus pernicieux qu'il est soumis au choix de l'enfant.

En réalité, pratiquement tous les jouets connaissent aujourd'hui l'influence de ce même phénomène. Ce qui était auparavant du domaine réservé des jeux de construction (style « Meccano » ou « Lego ») se répand à d'autres genres. Le succès des « Playmobil », sortes de personnages de plastique aux possibilités d'habillages multiples, en est la preuve. Ce n'est plus le jouet en lui-même qui intéresse l'enfant, mais la possibilité de le transformer, avec un seul jouet d'en faire plusieurs dizaines d'autres. Cette multiplication conduit à une transformation du jeu chez l'enfant. Il n'est plus le personnage central des jeux, il en est le maître, et déjà l'animateur; ainsi, il se vend moitié moins d'épiceries, de marchandes des quatre-saisons ou de bureaux de poste qu'il y a vingt ans, parce que l'enfant abandonne un rôle direct sur le jouet et se projette sur ses personnages. Il apprend ainsi plus jeune à se situer dans un contexte social, il devient adulte plus tôt.

La vogue actuelle des jeux de société correspond à une évolution semblable. Si les petits chevaux, le jeu de l'oie et autres nains jaunes subsistent encore, ils ont cédé le pas à de multiples jeux, dont le « Monopoly » est l'exemple le plus connu. L'enfant apprend à conduire avec les « Mille Bornes », à jouer les détectives avec « Cluedo », à la politique avec le « Président ». Mais plus que leur impact éducatif, souvent fort restreint, c'est leur importance sur le groupe qui ressort du choix de ces jeux; ils représentent, tant pour l'enfant que pour les parents, la possibilité de se retrouver en famille.

Le train électrique a subi le même recul. Jeu solitaire, il est devenu le privilège de collectionneurs pour la plupart adultes. Il est aujourd'hui supplanté par les circuits de voitures électriques où la compétition est de règle, et nécessite donc la participation de plusieurs enfants ou adultes.

De la mécanique à l'électronique

Les voitures à friction, les trains mécaniques, les avions à moteur à caoutchouc sont pratiquement tombés en désuétude. La voiture à pédale a cédé le pas à la voiture électrique, le ressort à la pile et le baby-foot sur table au football électronique. Le monde de l'enfance évolue en parallèle avec celui des adultes; il va même jusqu'à le précéder. Cela explique en partie la rapidité avec laquelle les enfants peuvent se lasser d'un jeu; curieux par nature, ils rejettent très vite tout ce qui n'est pas dernière nouveauté. Les ventes des voitures ou avions fonctionnant par télécommande avec fil ont considérablement baissé depuis la vulgarisation des premiers jeux électroniques. Le disque et la minicassette ont eux aussi largement profité de cet engouement.

Avec l'apparition des microprocesseurs et le développement des jeux électroniques, on assiste au développement du « jeu-gadget ». Profitant du support de la télévision, les vidéojeux envahissent les foyers, jouant un peu le rôle du train électrique chez les générations précédentes : destinés en principe aux enfants, ou aux adolescents, ils exercent plus de fascination sur les adultes. En 1976, on en comptait 15 000 en France, 300 000 en 1977, et l'on envisage leur vente à près d'un million pour 1978. Parallèlement, les prix baissent en proportion. En décembre 1976, le boîtier de commande coûtait 600 à 800 F; en 1978, seulement 200 à 250 F, et l'on estime que d'ici à 1980, il ne coûtera plus qu'environ 50 F.

En réalité, ces jeux ne représentent pas de réel danger pour l'avenir des jeux plus traditionnels. Ils sont davantage le fait d'une mode, et leur courbe d'utilisation, après achat, ne cesse de décroître.

Apprendre en s'amusant

La soif de savoir qui se manifeste aujourd'hui chez l'adulte ne peut qu'influencer le comportement des parents vis-à-vis de leurs enfants. C'est ainsi qu'on assiste à une vogue croissante des jeux éducatifs. Du berceau à l'âge d'homme, l'enfant est influencé dans ses jeux par le choix des parents. Ce phénomène se double du fait d'une éducation scolaire qui, dès la maternelle, cherche à utiliser le jeu comme support pédagogique. De plus en plus, *apprendre à jouer devient synonyme d'apprendre à vivre.* Par leur participation active à ces jeux, les parents ne se contentent pas de donner leur caution, ils cherchent eux-mêmes à s'auto-éduquer.

E. Andersson - Fotogram

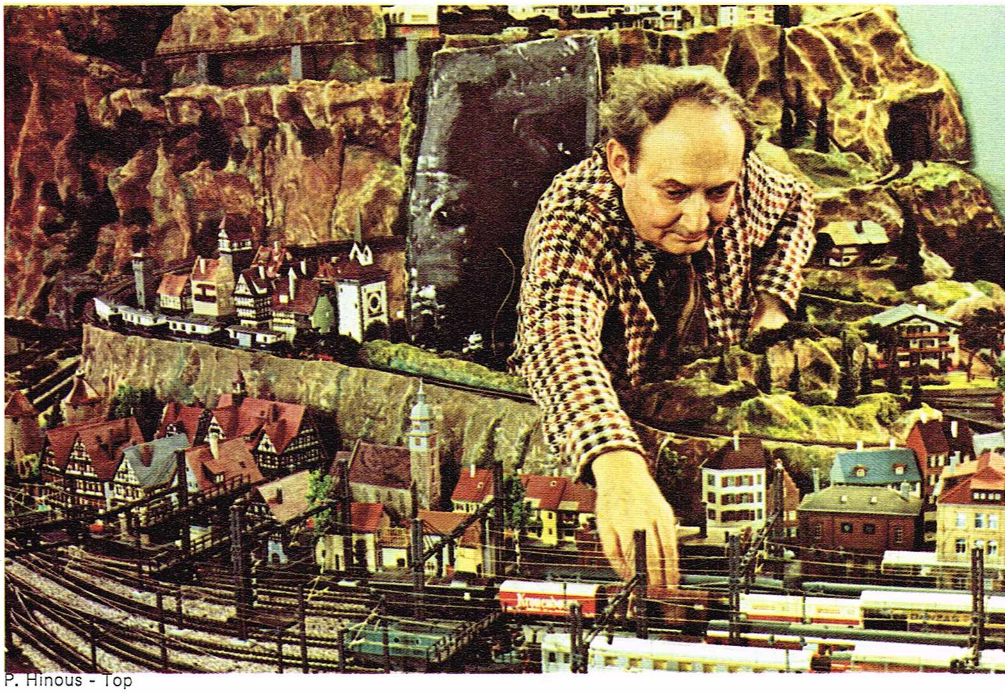

P. Hinous - Top

▲ ***En haut, la vogue actuelle des jeux de société, ici le*** Monopoly, ***représente, tant pour l'enfant que pour les parents, la possibilité de se retrouver en famille. Ci-dessus, le train électrique, jeu solitaire, a subi un recul et est devenu le privilège de collectionneurs pour la plupart adultes.***

M. Desjardins - Top

▲ *Les jeux évolutifs, par boîtes de montage successives, s'ils proposent des modèles, sont très vite repensés par l'enfant.*

▼ *Très vite, sont disposées devant l'enfant des pièces de plastique de couleurs et de formes différentes, destinées à éveiller son attention et sa curiosité.*

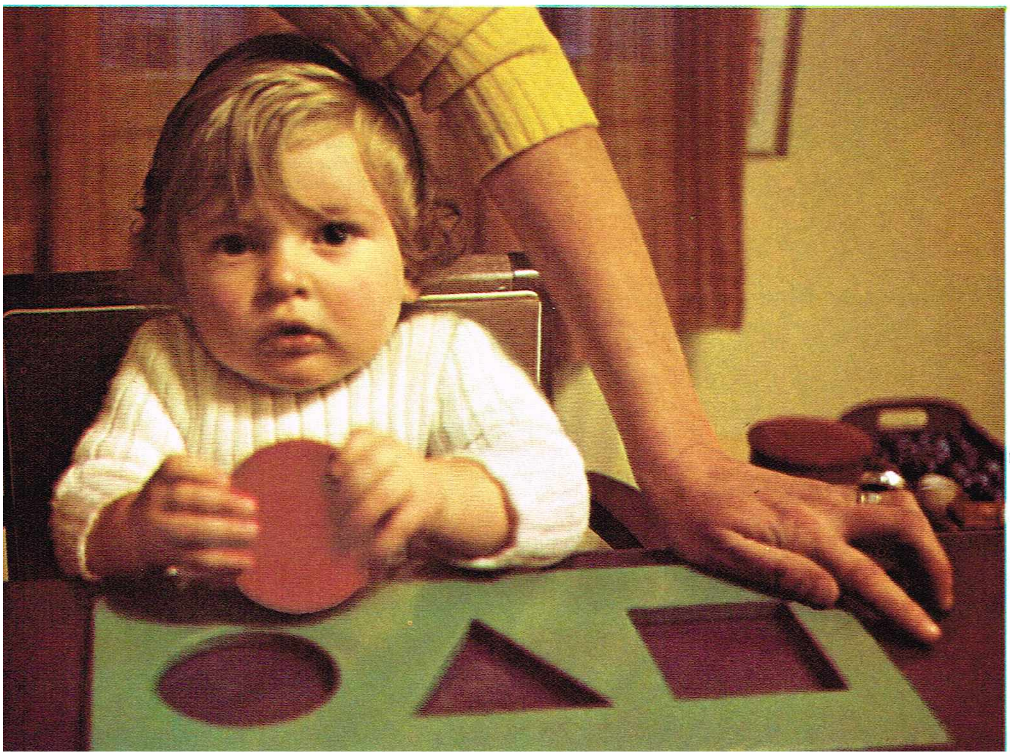

M. Fraudreau - Top

Le jeu de cubes pédagogique

Si le bébé au berceau trouve toujours auprès de lui un poupon de laine ou quelque animal en peluche, à peine a-t-il ouvert les yeux que sont disposés devant lui hochets et pièces de plastique de couleurs et de formes différentes, destinés à éveiller son attention et sa curiosité. Très vite, le traditionnel jeu de cubes est remplacé par des éléments gigognes, par des boîtes qu'il s'agit d'ouvrir avec des clefs de couleurs différentes, des tirelires où il faut faire entrer des disques de tailles diverses. La découverte du monde extérieur se fait par la volonté, ou d'après le choix et la vision qu'en ont les adultes. Le processus d'appréhension de l'existence se fait à vitesse accélérée, comme s'il y avait une volonté manifeste de faire grandir plus vite l'enfant, au rythme de notre existence.

Un peu plus tard, les jeux de construction remplacent ces jouets d'initiation. Ils ont le mérite de laisser à l'enfant l'imagination dans la création. Les jeux évolutifs, par boîtes de montage successives, s'ils proposent des modèles, sont très vite repensés par l'enfant ; la briquette de plastique ne devient plus maison ou voiture, mais murs d'un univers qui n'appartient qu'à lui : le jeu évolutif se transforme insensiblement en jeu créatif. Ce ne sont pas les boîtes successives de tel ou tel fabricant qui vont permettre à l'enfant d'appréhender ou d'imiter le monde extérieur, mais le choix qu'il fera des possibilités d'utilisation.

On a pu constater ainsi qu'il y avait une certaine désaffection vis-à-vis des jeux de construction mécanique comme le célèbre « Meccano » au profit des possibilités d'échafaudages qu'offrent les pièces de plastique du « Lego ».

Les jeux scientifiques

Le jeu scientifique n'est pas une nouveauté. Dès la fin du XIX^{e} siècle, de nombreux modèles réduits de machines fonctionnant grâce à la vapeur apparaissent sur le marché en même temps que les premiers coffrets de « petit chimiste ». Se développant de pair avec les découvertes techniques, ces coffrets de futurs professionnels couvrent aujourd'hui pratiquement tous les domaines scientifiques où une application à la portée de tous est réalisable. C'est le cas de la chimie, de l'électricité, de la radio, de l'électronique.

Apprendre en s'amusant ne correspond plus alors à une découverte de l'existence, mais à une option sur l'avenir. Incitation à choisir une profession, le jouet scientifique perd de son caractère ludique pour s'insérer dans un cadre pédagogique global. En réalité, tout se passe comme si l'on recherchait dans le jouet une systématisation de l'apprentissage. Il devient très difficile de faire la part des choses entre l'objet utilitaire et le jeu : on assiste à un détournement de cet objet au profit de l'activité ludique. C'est ainsi qu'en se démocratisant, les calculatrices électroniques sont devenues un objet de jeu ; plusieurs ouvrages consacrés à leur utilisation en tant que tel sont parus.

Le jeu scientifique entre donc dans ce mouvement général, qui conduit à considérer tout ce qui n'est pas activité professionnelle personnelle comme possibilité de loisir et de détente.

Jeux éducatifs et media

On a vu que l'indice d'écoute des chaînes de radio obtenait son meilleur score à l'heure des jeux de toutes sortes. Les sommes susceptibles d'être remportées n'expliquent pas à elles seules ce succès chez les auditeurs. Ce phénomène est encore plus marquant à la télévision, avec des émissions-vedettes comme les « Jeux de 20 heures » ou « Les chiffres et les lettres ». Plus qu'à l'esprit de compétition, ils font appel à la réflexion individuelle et démontrent que le temps de loisir peut ne pas être réservé uniquement à des activités « défoulantes », y compris chez les adultes.

Radio et télévision n'ont d'ailleurs pas le monopole des jeux éducatifs. En vingt ans, le nombre de revues consacrées aux mots croisés et à leurs dérivés (chassé-croisé, jeux fléchés, etc.) est passé de 11 à 87 ; un certain nombre d'entre elles sont réservées aux enfants, phénomène très récent. Le mot lui-même est devenu support de jeu, comme le prouve aussi le succès grandissant du « Scrabble ».

◀ *Plus qu'à l'esprit de compétition, les jeux éducatifs, tel le Scrabble, font appel à la réflexion individuelle et démontrent que le temps de loisir, y compris pour les adultes, n'est pas uniquement réservé à des activités « défoulantes ».*

E. Berne - Fotogram

Vers une éducation des jeux

Pendant longtemps, on a considéré que la génération qui nous succéderait allait vivre une véritable civilisation des loisirs, grâce à la réduction du temps de travail par rapport au temps de liberté. L'évolution de la notion de jeu et la crise économique mondiale semblent aller à l'encontre de cette prédiction. Cela ne veut pas dire pour autant que le loisir conservera la portion congrue au cours des années à venir. En réalité, il semble que l'on se dirige vers une solution de compromis, où les loisirs s'inscriront dans le cadre du temps de travail. Ce phénomène est déjà observable dans certains pays scandinaves ainsi qu'au Japon, où une heure quotidienne est consacrée, à l'intérieur de l'entreprise, à des activités de détente pure, comme la relaxation, à la pratique de certains sports ou même à des jeux divers. Trois tendances semblent cependant devoir se dessiner : un retour aux sources du jouet, assimilable au mouvement écologiste actuel; le développement des jeux à grand spectacle, favorisé par le support audio-visuel, et enfin l'essor du marché des jeux programmables en cassettes.

Pour un retour aux sources du jouet

Tandis que se développe une forme de mécanisation croissante du jouet, on assiste en ce moment à un retour à des jouets « naturels », parfois réduits à une simple forme en bois. Loin d'être une manifestation passagère d'un goût et d'une mode « rétro », il semble qu'il s'agisse là d'un retour volontaire à des jouets plus simples, plus directement accessibles à l'enfant et qui ne servent plus seulement d'alibi aux parents. C'est ainsi que se sont ouvertes pratiquement simultanément dans toute l'Europe des boutiques de jouets présentant des objets qui avaient depuis longtemps disparu des vitrines modernes : toupies de bois, totons, cerceaux, ou formes scandinaves simplifiées à l'extrême, ainsi que découpages, images d'Épinal et poupées de chiffon.

Même si ce retour aux sources correspond à un désir non formulé des parents d'une simplification ou même d'une abstraction des jouets, force est de constater que les enfants éprouvent autant sinon plus de plaisir à manipuler ces jouets que d'autres plus sophistiqués et plus mécanisés. Peut-être est-ce là l'expression d'une volonté de conserver les choses du passé, propre à notre époque. Lassé des jouets qui se brisent, des piles qui s'usent à peine utilisées, l'enfant choisirait inconsciemment ce qu'il peut manipuler, transformer au gré de son imagination, sans jamais rien détruire. On est en tout cas forcé de constater que cette attitude correspond à tout un mouvement actuel vers la simplicité et la pérennité de l'objet, à un « instinct ludique écologiste », comme l'a appelé J. Lullien, pédagogue et animateur.

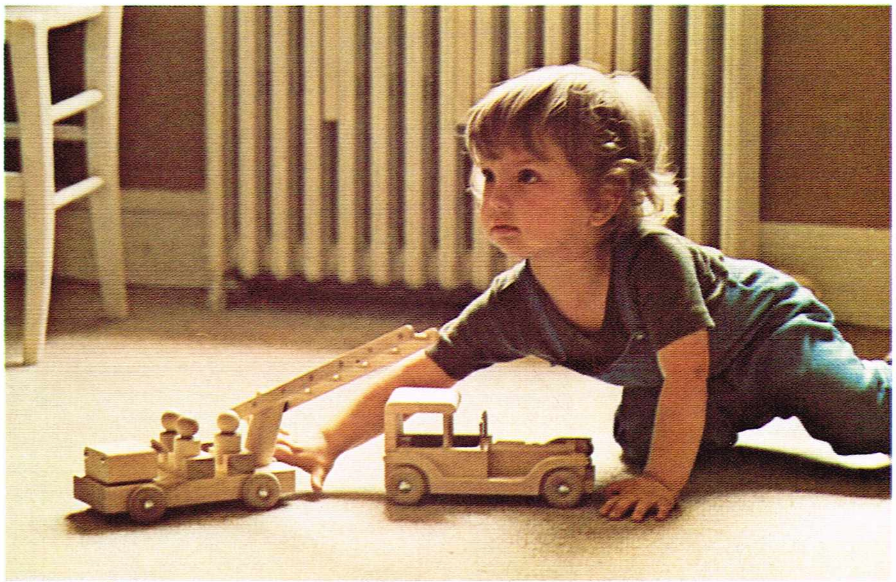

P. Hinous - Top

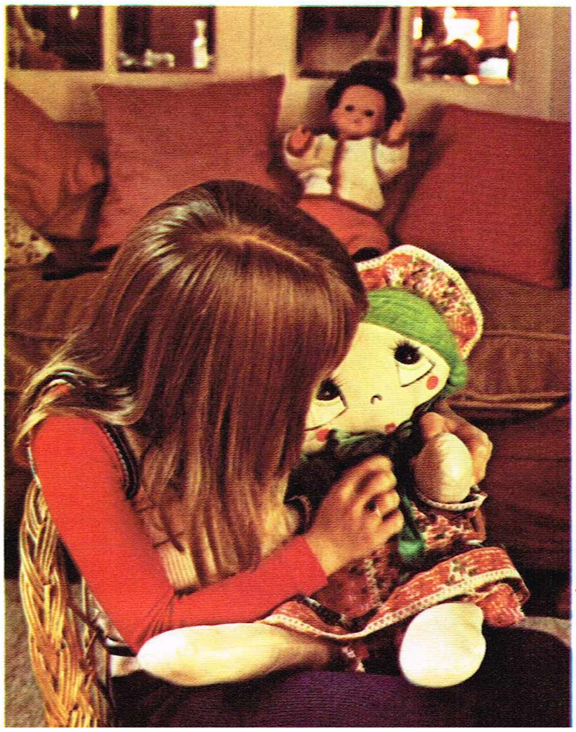

I. Farkas - Fotogram

▲◀ *On assiste en ce moment à un retour des jouets « naturels » : jouets en bois (ci-dessus) et poupée de chiffon (ci-contre).*

J. Andanson - Sygma

▲ *La télévision a pris le relais de ces nouveaux jeux du cirque.*

Les nouveaux jeux du cirque

L'arène traditionnelle ne suffit plus à satisfaire les innombrables amateurs de jeux à grand spectacle; la télévision a pris le relais de ces nouveaux jeux du cirque. Considérées par certains comme des spectacles dégradants, par d'autres comme des exhibitions humiliantes, il faut constater que des émissions comme « Intervilles » attirent un public sans cesse plus nombreux. Un championnat d'Europe de boxe ou une coupe du monde de football immobilise des centaines de millions de télespectateurs devant le petit écran.

Dans l'avenir, le développement de ces jeux semble inéluctable. En 1972, une chaîne de télévision allemande projeta un film de fiction représentant une compétition d'un nouveau genre : les candidats à cette sorte de remake de « gendarmes et voleurs » devaient affronter une bande de malfaiteurs durant plusieurs heures. Les armes étaient réelles, tout comme les balles, et les spectateurs de l'émission pouvaient intervenir par téléphone pour dénoncer le candidat aux gangsters ou le renseigner pour l'aider à échapper à ses poursuivants.

A la suite de cette émission totalement fictive, le standard de la chaîne de télévision fut assailli d'appels émanant de télespectateurs désireux de participer, comme candidats, délateurs ou même gangsters, à ce jeu d'un nouveau genre !

Sans aller jusqu'à cette extrémité, qui serait cependant tout à fait envisageable, on peut considérer que ce type d'émission, le jeu à grand spectacle, connaîtra un succès de plus en plus large. Le concurrent devient en effet une sorte de héros mythique, qu'il soit boxeur, avant-centre de football ou simplement homme-mémoire d'une émission comme « La tête et les jambes ». Connaissant la gloire, il risque de tomber aussi vite que le gladiateur des arènes romaines. Si notre civilisation occidentale offre le pain, elle ne propose jamais assez de jeux au télespectateur — héros dans son fauteuil.

Les jeux-télé en cassettes

Les vidéo-jeux connaissent à l'heure actuelle une vogue grandissante. Fondés sur l'emploi des microprocesseurs (mini-ordinateurs), ils permettent déjà, en branchant un boîtier de commande sur n'importe quel téléviseur, de se livrer aux joies du tennis, du football, du squash, installé dans le fauteuil de son salon. Ces jeux sont de plus en plus conçus pour être programmables, c'est-à-dire pour permettre l'adaptation de nouvelles séries de jeux au fur et à mesure que ceux-ci apparaissent sur le marché. C'est ainsi que l'on pourra bientôt s'adonner par téléviseur interposé à la bataille navale, à la course automobile ou encore au combat de chars.

De la même manière, ou envisage de commercialiser des jeux éducatifs sur cassette spécialisée. Il existe déjà des jeux d'échecs avec micro-ordinateur, ainsi que des « Master-mind ». S'ils sont encore relativement chers (2 500 F environ), on peut être assuré qu'ils connaîtront une diminution de prix spectaculaire, à l'image des calculatrices électroniques. Mais il faut cependant ne pas se leurrer quant à la volonté des futurs joueurs de se livrer à ces jeux faisant davantage appel à l'intelligence. Lors d'une enquête sur les vidéo-jeux, 306 réponses ont été obtenues. Sur celles-ci, 236 interviewés optaient en faveur de la course auto, de la bataille navale et du tir, alors que 70 seulement envisageaient des options plus « intellectuelles ».

Quelles que soient les options choisies, l'évolution certaine — et déjà programmée — se fera en faveur d'un terminal domestique ayant le téléviseur comme organe de lecture. Ce terminal pourrait être programmé localement par cassettes ou par un ordinateur central, contactable par téléphone. Ce qui, il y a vingt ans à peine, apparaissait comme une idée de science-fiction devient aujourd'hui réalité. Le jeu sera l'un des principaux bénéficiaires de cette évolution.

D. Goldberg - Sygma

Les loisirs de consommation

La lecture

D'après le Canadien Marshall Mc Luhan, notre civilisation est arrivée à la fin de l'ère de la communication imprimée pour entrer dans celle de l'audio-visuel. Pourtant, si l'on regarde les devantures des librairies, les kiosques à journaux, les bibliothèques de gare, il semble que la chose imprimée n'a pas cessé de se développer. Le succès d'émissions télévisées comme « Apostrophes » peut faire croire que l'industrie du livre n'a jamais été aussi florissante qu'aujourd'hui. La création quasi hebdomadaire de nouveaux journaux ou magazines paraît confirmer cette tendance.

Journaux et magazines : sources de loisirs?

Moyen de communication de masse *(mass media)* le plus ancien, le journal fut pendant longtemps le moyen de divertissement (au sens large du terme) le plus répandu chez l'adulte. En 1939, les Français consommaient quotidiennement 12 millions d'exemplaires de journaux, pour une population de 39 millions d'habitants. En 1974, cette consommation était toujours stabilisée à 12 millions d'exemplaires, mais pour une population de 50 millions d'habitants.

Si la presse reste aujourd'hui la principale source d'informations pour 46 % du public, comme source de divertissement elle arrive très loin (10 %) derrière la télévision (75 %) et la radio (15 %).

Ce phénomène ne touche pas que la presse d'information, il en est de même pour les magazines. Dans la liste des vingt plus importants magazines français, le premier *(Télé 7 jours)* et le troisième *(Télé-Poche)* meilleur tirage sont ceux de revues consacrées aux programmes de télévision! Parallèlement, les revues techniques consacrées aux loisirs de toutes sortes (bricolage,

Martin-Fenouillet - Fotogram

▲ Le succès d'émissions télévisées comme « Apostrophes » peut faire croire que l'industrie du livre n'a jamais été aussi florissante qu'aujourd'hui.

◀ La bande dessinée, s'est imposée depuis quelques années au public français et s'est taillé une part de marché importante dans l'édition.

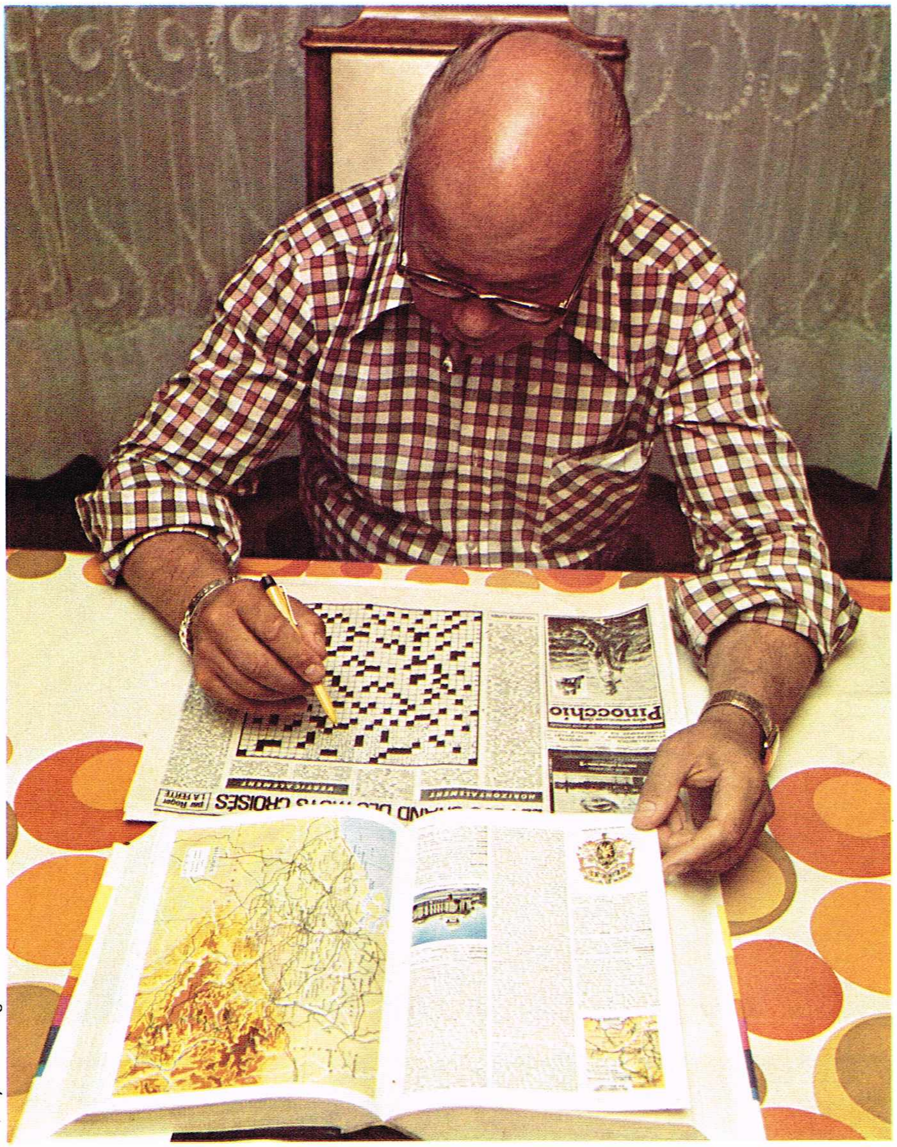

G. Guy - Parimage

▲ *En vingt ans, le nombre de revues consacrées aux mots croisés et à leurs dérivés est passé de 11 à 87.*

▼ *La naissance du transistor : un second souffle pour la radio qui conserve un public important durant la journée.*

Nicolas - Fotogram

musique, sports, etc.) n'atteignent en réalité que des tirages restreints (15 à 20 000 exemplaires en moyenne). Tout se passe en fait comme si la lecture était devenue une affaire de spécialistes, réservée aux seuls initiés.

Cette généralisation ne semble cependant pas s'appliquer à la presse pour enfants et pour adolescents. Un nouveau « créneau » s'est en effet ouvert avec l'apparition de magazines réservés aux jeunes enfants qui n'ont pas encore été touchés par la télévision. D'autre part, la bande dessinée s'est imposée depuis quelques années au public français et s'est taillé une part de marché importante dans l'édition.

Le livre : de la poche à la bibliothèque

En 1978, chaque Français n'achète qu'un livre par an ! Cette statistique peut paraître aberrante lorsque l'on compare à ce chiffre le tirage de certains livres dits « de poche » (qui peut atteindre le million d'exemplaires). Mais le lecteur français semble vouloir se singulariser : les Américains avaient inventé les collections de poche pour jeter le livre après l'avoir lu ; à l'inverse, nous le conservons des années dans nos bibliothèques, peut-être par respect de la chose imprimée. Le coût du livre joue sûrement beaucoup dans cette situation. Une soirée au cinéma revient pratiquement au même prix que l'achat d'un livre. Le choix est manifestement tout à l'avantage du cinéma, qui supporte mieux la passivité.

Cependant, le Français lit, puisque d'après une enquête de l'ARC (Société d'études de marché) réalisée en 1974, près des trois quarts des Français possèdent au moins un livre. Mais que trouve-t-on dans sa bibliothèque ? Toujours en 1974, 56,4 % des Français possèdent un dictionnaire ou une encyclopédie ; 51,6 % des romans modernes ; 50,1 % des romans policiers, d'espionnage et de science-fiction ; 44,2 % des romans classiques ; 42,5 % des ouvrages historiques ; 36,2 % des livres techniques, scientifiques, politiques, psychologiques, philosophiques ; enfin, 25,1 % possèdent des livres d'art. Romans modernes et romans policiers, romans d'espionnage et de science-fiction se partagent donc la faveur du lecteur moyen : le divertissement pur reste le motif essentiel de la lecture.

Curieusement, et sans doute parce qu'elle a pris une nouvelle forme, l'encyclopédie connaît un regain d'intérêt, grâce aux publications hebdomadaires. La possibilité de relier ces revues attire une clientèle de plus en plus nombreuse. Il est intéressant de constater que, selon 80 % de lecteurs, cet achat est fait « pour les enfants, plus tard ». Les nouvelles générations trouveront-elles un regain d'intérêt dans la lecture ? Hormis le phénomène de la bande dessinée, assimilable à l'audio-visuel, rien ne permet encore de l'affirmer.

Radio et télévision

Dans le domaine des loisirs, radio et télévision se taillent la part du lion au sein des mass media, avec un net avantage pour la télévision. Si notre civilisation est bien celle des loisirs, elle est surtout celle des loisirs audio-visuels. Symbole ou recherche de facilité, l'image qui nous en a été donnée ces dernières années correspond en fait aux balbutiements de ces techniques nouvelles. L'utilisateur même du son et de l'image ne s'accommode plus d'un rôle purement passif ; il cherche autre chose — notamment à s'exprimer — et le monopole actuel ne pourra longtemps résister à ce désir grandissant.

La radio : un futur instrument d'échange?

La radio a connu son plus grand développement en France entre les deux guerres. Instrument d'information autant que de divertissement, elle rencontrait alors la faveur de la majorité des Français. Avec la croissance et l'essor de la télévision, elle connut une récession brutale. Mais la naissance du transistor devait lui donner son second souffle. Si elle ne peut concurrencer la télévision le soir, elle conserve un public important durant la journée, public composé essentiellement de femmes et de jeunes.

Si elle n'apparaît qu'à 15 % des Français comme la principale source de divertissement, c'est qu'ils y voient avant tout un moyen d'information immédiate. Il est encore trop tôt pour s'appuyer sur de telles données et annoncer à terme le déclin de la radio comme source de

loisirs. En effet, un phénomène nouveau se manifeste depuis quelques années. En 1962, Radio-Caroline, la première « radio-pirate », émit au large des côtes d'Angleterre des émissions destinées aux jeunes auditeurs passionnés de ce qu'on allait appeler la pop-music. C'était la première brèche ouverte dans le monopole de la radio britannique.

Aujourd'hui, cette innovation a fait tache d'huile. En Italie, plus de mille radios parallèles font concurrence aux émetteurs officiels. Émettant sur ondes ultra-courtes, ces radios disposent d'un matériel léger, donc aisément transportable, et offrent à tout mouvement, organisme ou personne la possibilité de s'exprimer en dehors de tout contrôle. La contagion a gagné la France, où plusieurs tentatives d'émission sont réalisées tous les jours.

La lutte entre l'État et ces radios marginales tourne à l'heure actuelle à l'avantage du premier, qui parvient à brouiller les émissions. Il paraît néanmoins difficile d'endiguer un tel mouvement. Du jour où le monopole a accepté l'implantation de radios périphériques, la faille était créée. En outre, peut-on arrêter un mouvement qui fait passer l'auditeur du rôle de récepteur passif à celui d'émetteur actif ? La tentation de « parler dans le micro », de s'exprimer, ne serait-ce qu'une fois, sur les ondes, est trop forte pour qu'on puisse revenir en arrière. La radio est loin d'être morte, elle est à naître, sous une autre forme.

Télévision pour tous et par tous

Plus de 80 % des ménages français se trouvent aujourd'hui en possession d'un récepteur de télévision. Pour 75 % d'entre eux, c'est le premier moyen de divertissement. Cela est dû au fait qu'avant tout, la télévision représente le fournisseur privilégié d'images, donc le premier fournisseur de rêves. Supplantant les magazines (en dix ans, un hebdomadaire comme *Paris-Match*, fondé essentiellement sur l'image, qui diffusait à deux millions d'exemplaires, est tombé à 650 000), mettant en danger l'industrie cinématographique, elle s'est imposée comme le support essentiel des loisirs.

Il serait hâtif de penser qu'on assiste au développement du plus important fournisseur de loisirs de notre époque. La télévision n'en est qu'à ses balbutiements et répond au désir quasi unanime de se détendre à peu de frais, du fond de son fauteuil. Comme pour la radio, il y a là un instrument d'action en puissance. Soumise au même monopole que la radio, la télévision reste dans un carcan et doit, pour maintenir l'intérêt, relancer périodiquement des émissions au succès éprouvé, à peine déguisées sous une autre enveloppe. Tout comme celui de la radio, son monopole est déjà attaqué de toute part.

La télédiffusion, ou télévision par câble (TAC), risque de bouleverser nos habitudes de spectateurs. Il s'agit d'une technique permettant de transmettre images et sons, non plus sans fils, mais par câble. Ainsi, chaque ville peut disposer d'un émetteur qui lui est propre et transmet ses émissions locales, par câble. Quant aux liaisons nationales ou interurbaines, elles restent assurées par faisceaux hertziens. Encore au stade expérimental, la TAC a déjà été testée aux États-Unis, où plus de 15 millions d'Américains y sont reliés. En France, Grenoble et Créteil sont sur le point de développer cette forme de diffusion. Des programmes de télévision axés sur la vie locale, sur la communication directe et donnant aux particuliers la possibilité de s'exprimer sur ce qui les intéresse, transformeraient l'attitude du télespectateur.

Là encore, il semble que cette évolution soit inéluctable. C'est peut-être avec le premier instrument de divertissement de masse mis entre les mains de ses utilisateurs que l'on pourra réellement parler de civilisation des loisirs, à condition que ces mêmes utilisateurs aient appris à la maîtriser.

Disques, cassettes et haute fidélité

Le développement de l'édition musicale et de l'industrie phonographique est la manifestation la plus spectaculaire de notre ère de l'audio-visuel. Les vrais best-sellers de notre temps ne sont plus les prix Goncourt, mais les « Disques d'or » de tel ou tel chanteur. Alphonse Daudet n'aura jamais connu autant d'amateurs que depuis l'enregistrement des *Lettres de mon moulin* par Fernandel. Le grand essor du disque est, malgré tout, quelque chose de récent : c'est avec l'avènement du rock et de la pop-music qu'il se manifeste. L'extension du pouvoir d'achat des adolescents, phénomène d'abord spécifiquement américain, mais qui se répandit très vite en Europe, a permis au disque, puis aux appareils reproducteurs, de se répandre et de voir leur prix d'achat considérablement diminuer, tout du moins en francs constants. Par contagion et par goût, les teen-agers des années 1960 devenus adultes vont continuer à se passionner pour la musique, et l'on assiste au développement de la haute fidélité.

Le disque : expansion ou disparition?

L'irrésistible ascension du disque s'est faite grâce au 45 tours. Moins cher que le 33 tours, plus facilement transportable, de qualité technique inégale, mais toujours

T. Henstra - Camera Press

▲ Plus de 80 % des ménages français possèdent aujourd'hui un récepteur de télévision.

▼ Le développement de l'édition musicale et de l'industrie phonographique est la manifestation la plus spectaculaire de notre ère de l'audio-visuel.

D. Bouquignaud - Top

Y. Coatsaliou - Sygma

▲ *L'industrie du disque est en plein essor, et le MIDEM, gigantesque foire annuelle du disque, prouve sa bonne santé.*

audible même sur de petits électrophones portatifs, il réunissait les conditions idéales pour attirer les faveurs du public le plus jeune, c'est-à-dire de celui qui a justement favorisé son essor. Cependant, le désir de qualité s'est manifesté quand l'auditeur a pris de l'âge, et, hormis le « tube » que l'on écoute le temps d'une mode, la préférence s'est très vite manifestée pour le 33 tours, qui permet une écoute plus tranquille et de meilleure qualité.

Il s'est produit un phénomène d'osmose au cours de ces dernières années, qui a favorisé le développement d'autres genres musicaux. Musique classique et jazz ont largement profité du mouvement pop-music, et l'on a même assisté au lancement de véritables « tubes » classiques, comme l'*Adagio* d'Albinoni. L'industrie du spectacle est devenue indissolublement liée à celle de la phonographie. Une vedette se lance par le disque, et l'on assiste à ses concerts parce que l'on possède un de ses enregistrements. L'industrie du disque est en plein essor, et le MIDEM (Marché international du disque et de l'édition musicale), gigantesque foire annuelle du disque, prouve sa bonne santé.

Cependant, on assiste à une remise en cause continuelle du disque. Fragile, encombrant, nécessitant un matériel coûteux pour le reproduire, il fait l'objet d'attaques régulières. Le lancement des premières minicassettes et du lecteur portatif fut considéré par certains comme l'annonce de la mort du disque à plus ou moins longue échéance. Mais les producteurs et fabricants ne semblent pas vouloir le délaisser. Des techniques nouvelles sont à l'étude, qui permettent d'envisager un développement continu du disque; ces techniques consistent essentiellement en méthodes de lecture révolutionnaires, tel le laser, dont l'avantage essentiel est de ne pas entraîner d'usure du microsillon.

Depuis plusieurs années, un projet est en cours d'étude aux États-Unis. S'il se concrétisait, il sonnerait le glas tant du disque que de la cassette actuels. L'enregistrement serait réalisé sur un cristal minuscule dont la capacité représenterait des centaines d'heures d'audition : une sorte de microfilm musical. S'il se développe, il est cependant probable qu'il restera, du moins dans un premier temps, l'apanage de discothèques nationales, et non de particuliers.

La cassette ou la musique en boîte

Les partisans du magnétophone ont trouvé dans la minicassette des avantages que ne présentaient pas les anciens lecteurs. Difficulté de rangement des bandes magnétiques, encombrement important du matériel, manipulations complexes, fragilité des bandes et des têtes faisaient reculer plus d'un amateur de musique enregistrée. Car si le véritable chasseur de sons continue à utiliser des magnétophones perfectionnés, il ne représente qu'un auditeur sur cent amateurs de ce type de reproduction sonore.

On peut considérer que l'avènement de la minicassette marque la naissance véritable du magnétophone, même si la France ne possède encore que peu d'équipements de ce type (27 % des ménages, pour 70 % aux États-Unis).

L'amélioration des techniques et le développement des lecteurs de cassettes haute fidélité ont largement contribué à ce développement. Aux bandes magnétiques à l'oxyde de fer et à l'oxyde de cobalt a succédé le ruban au bioxyde de chrome, permettant l'enregistrement de fréquences plus élevées. Mais le phénomène de distorsion est plus important sur ce dernier modèle que sur les précédents, ce qui a nécessité l'installation de systèmes « Dolby » ou « DNL » sur les appareils reproducteurs, systèmes destinés à réduire cette distorsion. La qualité de reproduction du système à cassettes n'a pas encore atteint celle du disque, et le lecteur de cassettes, même de haute fidélité, n'est encore considéré la plupart du temps que comme un auxiliaire de la reproduction par disque.

En réalité, la véritable évolution du système à cassettes s'est manifestée avec son installation dans la voiture, couplé ou non à l'auto-radio. En 1977, 60 % des véhicules français équipés d'auto-radios l'étaient aussi d'un lecteur de cassettes.

Haute fidélité ou piège de la mode?

La chaîne haute fidélité est devenue un élément essentiel du train de vie, tant en France qu'en Europe ou aux États-Unis. Signe extérieur de richesse, elle attire des amateurs de plus en plus nombreux, et elle est devenue une nécessité pour tout jeune cadre qui se respecte. Mais ce moyen de reproduction fait davantage l'affaire de ses promoteurs plus qu'elle ne favorise le goût de la musique de qualité chez son client. Le « tableau de bord » rutilant ou la puissance annoncée impressionne plus l'amateur moyen que les qualités de reproduction. Qu'entend-on par haute fidélité? Selon A. Ollagnon, « c'est l'absence d'infidélités perceptibles. Son but essentiel consiste dans une restitution de plus en plus fidèle de sons ». Cela implique plusieurs conditions : une chaîne ne vaut que par la valeur de ses différents éléments ; sa qualité de reproduction dépend de la dimension et des caractéristiques acoustiques de la pièce dans laquelle elle est installée. Peu d'installations tiennent compte de ces conditions fondamentales.

L'avènement des chaînes « compactes », c'est-à-dire regroupant en un seul élément les différents constituants de la chaîne, a été critiqué par les puristes de la « Hi-Fi », qui leur reprochent leur fidélité moindre et leur fragilité. Le succès qu'elles rencontrent auprès de la clientèle actuelle tend à prouver que cette simplification était nécessaire. De toute manière, il est à prévoir que les nouvelles techniques d'enregistrement bouleverseront très vite ce jeune marché. Le microcristal et la lecture par laser rendront sûrement d'ici quelques années les éléments actuels aussi « rétro » que le gramophone à pavillon de nos grands-pères.

De toute manière, la haute fidélité aura eu le mérite d'attirer vers la musique un nombre croissant d'auditeurs. Un ménage sur trois possède aujourd'hui au moins un appareil reproducteur. Contrairement à ce que l'on aurait pu penser, elle n'a pas fait déserter les salles de concerts, elle a concouru au contraire à les remplir. Pour ses loisirs, le Français consacre trois fois plus de temps à la musique qu'il y a vingt ans.

Photos, films et magnétoscope

Notre civilisation de l'image se devait de déboucher sur une pratique active de l'audio-visuel. La baisse des coûts a entraîné une démocratisation certaine de la photographie et du film d'amateurs. La fabrication en grande série d'appareils simplifiés a permis de faire venir à la photo un grand nombre d'amateurs effrayés auparavant par les difficultés techniques.

Grâce au magnétoscope, le marché de l'image va encore s'agrandir davantage au cours des années à venir, et la télévision perdra ce rôle d'émetteur passif pour devenir un élément essentiel de l'équipement ménager, remplaçant peu à peu l'album de famille.

Photo et cinéma d'amateur

Les Français possèdent aujourd'hui plus de quinze millions d'appareils photographiques, soit près d'un appareil par foyer. Il faut dire que les constructeurs ont tout fait pour réduire au minimum les difficultés techniques que peut poser la prise de vue. Grâce à l'électronique, même les appareils de bas de gamme sont équipés de dispositifs supprimant les réglages essentiels, c'est-à-dire l'ouverture du diaphragme et le temps de pose. Le flash, souvent incorporé, résout les problèmes posés par la photographie intérieure. Inventeurs et grands consommateurs de photographies, les Français sont paradoxalement peu techniciens en ce domaine. Sur les 15 millions d'appareils vendus, les trois quarts sont des modèles simplifiés à l'extrême et coûtent moins de 150 F. Ce fait, observé dans les autres pays occidentaux, explique le succès des appareils à développement instantané, même si le coût de la pellicule est encore élevé. La disparition du monopole du système Polaroïd devrait permettre une diffusion plus large de cette technique.

D'un coût nettement plus élevé que la photographie, le cinéma amateur est moins pratiqué. On compte trois millions de caméras utilisées en France. Contrairement à une idée toute faite, l'emploi de la caméra est plus facile que celui de l'appareil photo. Les caméras 8 mm sont aujourd'hui pratiquement abandonnées au profit du super 8. Si les plus simples d'entre elles ne permettent de faire que des films de vacances ou de souvenirs, les plus élaborées peuvent atteindre la qualité de caméras professionnelles.

Le propriétaire d'une caméra présente une caractéristique particulière : très vite, il cherche à réaliser de véritables films, au lieu de simples albums de souvenirs à projeter à la famille et aux amis. Cette tendance est d'autant plus répandue que des cinéastes professionnels ont montré l'exemple en tournant en 16 mm, et même en super 8, des films qui ont été « gonflés » par la suite pour permettre leur projection dans des salles de spectacles. Cette aspiration à une forme de professionnalisme correspond à une certaine réalité. En 1975, la télévision française a lancé un appel à tous les détenteurs de films d'amateurs pour réaliser une série d'émissions où les

G. Loucel - Fotogram

▲ *L'extension du pouvoir d'achat des adolescents a permis au disque, puis aux appareils reproducteurs, de se répandre et de voir leur prix d'achat diminuer en francs constants.*

▼ *Les Français possèdent aujourd'hui plus de quinze millions d'appareils photographiques, soit près d'un appareil par foyer.*

J.P. Bourret - Pitch

▶ *D'un coût nettement plus élevé que la photographie, le cinéma amateur est moins pratiqué.*

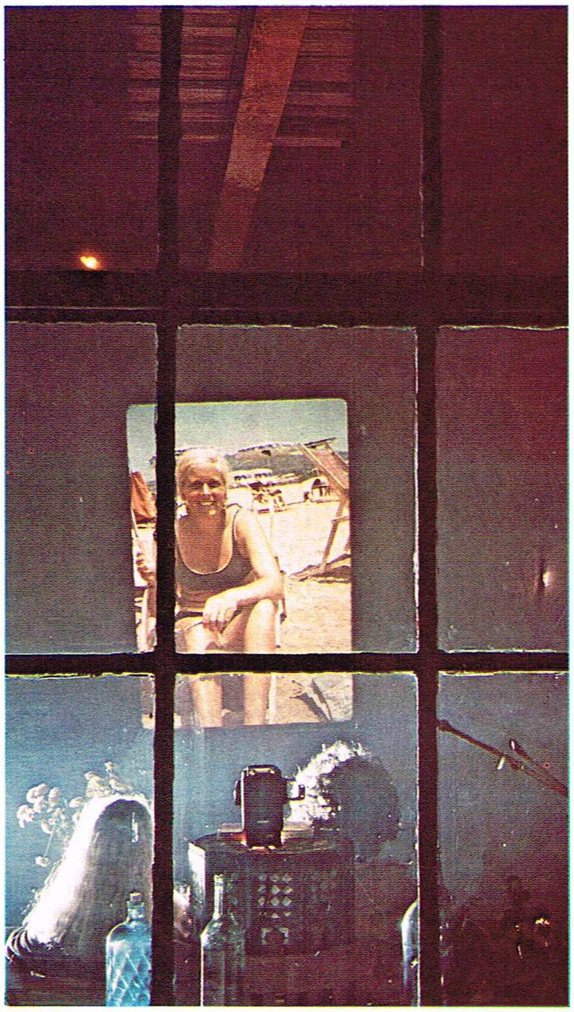

T. Henstra - Camera Press

▶ *Page ci-contre, la Comédie française de nuit ; le théâtre traverse une crise, il est très difficile de prévoir s'il en sortira indemne.*

▼ *Premier divertissement audio-visuel par la fréquentation pendant de longues années, le cinéma traverse actuellement une crise profonde.*

M. Lecomte - Fotogram

réalisations les plus intéressantes seraient projetées. Non seulement les films affluèrent, mais leur qualité n'avait rien à envier à certains courts métrages professionnels.

Tout comme pour la photographie, les procédés de développement instantanés devraient favoriser l'essor du cinéma d'amateur.

La vidéo : un studio de télévision à la portée de tous

Plus que le cinéma, c'est sans doute un autre type de technique qui entraînera un réel développement du film d'amateurs : la vidéo, procédé dérivé de la télévision et utilisable par elle. Un ensemble vidéo se compose d'une caméra, d'un magnétoscope (sorte de magnétophone à images) et d'un récepteur-contrôle adapté à la réception. Supprimant la phase de développement du film et permettant un contrôle immédiat de la qualité de l'image, il donne naturellement beaucoup plus de possibilités que le film amateur. D'un emploi aussi simple que le magnétophone, il est utilisable par tous. Le seul frein à son succès immédiat réside dans son prix (environ 10 000 F).

Avant qu'elle devienne à la portée de tous, la vidéo sera commercialisée sous d'autres formes, permettant sinon l'émission, du moins la réception d'émissions. Avec le seul magnétoscope, il est déjà possible en effet d'enregistrer films, spectacles de variétés ou toutes autres émissions sur vidéodisque ou vidéocassette et de les reprojeter à l'infini sur un simple récepteur de télévision. On peut ainsi se constituer une véritable vidéothèque et se projeter les plus belles heures du cinéma et de la télévision.

Enfin, lorsque la vidéo sera plus largement répandue, il deviendra possible de réaliser soi-même ses films et de les projeter à toute une ville, grâce à la diffusion par câble.

Théâtre et cinéma

Le théâtre traverse une crise, et il est difficile de prévoir s'il en sortira. Sa fréquentation a diminué de moitié depuis la Dernière Guerre. En dehors des théâtres classiques et de ceux qui présentent des pièces de boulevard, rares sont les salles qui affichent complet plus de quelques semaines. Les structures se sont pourtant transformées pour lutter contre cette désaffection du public : la taille des salles a été réduite, les prix ont peu augmenté, les pièces présentées impliquent moins de protagonistes, etc. Il faut cependant se rendre à l'évidence : le théâtre n'a plus les faveurs du public.

En réalité — les déclarations des spectateurs potentiels le confirment — ce n'est pas le genre de spectacle qui est remis en cause (il suffit pour s'en rendre compte d'observer les indices d'écoute de l'émission télévisée « Au théâtre ce soir »), mais plutôt l'effort qu'il demande : effort pour louer les places, pour se déplacer, etc.

Sans aller jusqu'à prédire la disparition du théâtre sous sa forme traditionnelle — des réussites spectaculaires, comme celles du théâtre de Reims ou de celui de Lyon, contredisent cette théorie — on peut penser que le public délaissera cette forme de spectacle tant qu'elle ne lui apportera pas un renouveau de forme et de structure. Les expériences du Living Theatre, faisant appel à la participation du public, ou du Théâtre du Soleil d'Ariane Mnouchkine, permettent d'espérer qu'on évitera le pire.

Le cinéma : la fin d'un règne

Premier divertissement audio-visuel par l'ancienneté et premier par la fréquentation durant de longues années, le cinéma traverse actuellement une crise profonde que ne peuvent masquer les nombres d'entrées de certaines productions spectaculaires. Alors que la photo et le cinéma amateur connaissaient de 1950 à 1962 un accroissement de consommation de 762,1 %, le cinéma accusait durant la même période une diminution de 85,7 %.

Ce phénomène semble dû en partie à l'évolution des spectateurs. Les classes ouvrière et paysanne ont davantage déserté les salles obscures que les étudiants et les cadres supérieurs ; lorsque le cinéma redevient la distraction populaire qu'il a toujours été, les salles se remplissent à nouveau.

Mais c'est sans doute à la concurrence de la télévision que le cinéma doit d'avoir perdu une grande partie de son public. Offrant le même service, c'est-à-dire le même plaisir sonore et visuel, la télévision présente en outre le double avantage de ne pas obliger à se déplacer et de ne pas forcer à débourser une somme quelconque (même si la gratuité du spectacle télévisé n'est qu'apparente). Il reste au cinéma à produire des films à caractère popu-

Parimage

A. Picou - Fotogram

▲ ***Il y a encore quelques années, le carnaval (ici, à Nice) permettait, dans de nombreuses villes de France et d'Europe, de « faire la fête ».***

laire et à offrir au spectateur des sensations nouvelles, qu'il ne pourra éprouver devant son récepteur. C'est ce qu'il tente de faire — et réussit — avec la vogue actuelle des films à catastrophe. Il est cependant difficile de dire ce que deviendra le cinéma lorsque le film en cassettes permettra à chacun de regarder chez soi les plus grands films de l'histoire du cinéma, aussi facilement que l'on glisse aujourd'hui une cassette dans un lecteur.

Le bricolage

Pour les rois du système D, il était normal que le bricolage soit la première activité de détente des Français : neuf Français sur dix le pratiquent, ne serait-ce qu'une fois de temps en temps, sans toujours considérer qu'il s'agit là d'un loisir, mais bien plus souvent d'une nécessité.

Pratiqué pendant longtemps d'une manière anarchique et individualiste, il connaît maintenant un développement commercial et une organisation parfaitement structurée. Plus de 50 livres ou encyclopédies paraissent chaque année sur ce sujet. Trente revues mensuelles ou hebdomadaires sont éditées. Plus de 2 000 centres de bricolage (avatars modernes des anciennes drogueries) ont ouvert leurs portes en France.

Longtemps laissé à l'initiative individuelle, le bricolage a été aussi « récupéré » par le système commercial et s'est calqué, en France comme en Europe, sur le modèle américain. Le magasin spécialisé ne se contente plus de vendre outils et matériaux de base. Il fournit des kits (prêts-à-monter) de toute sorte : avec quelques heures de travail et beaucoup de patience, chacun peut construire des objets allant du poste de radio au bateau et même à l'avion, en passant par la copie d'un clavecin du XVIII[e] siècle.

En réalité, il est difficile de considérer cela comme du bricolage pur. Le prix d'achat du coffret de montage dépasse la plupart du temps, lorsqu'on se donne la peine d'y ajouter celui des heures de travail, le prix réel de l'objet fini. Tout se passe en fait comme si le bricolage n'était qu'une sorte de professionnalisation parallèle. On peut tout y assimiler, depuis le travail au noir jusqu'à la plus sophistiquée des inventions proposées au concours Lépine (5 000 d'entre elles sont présentées chaque année). Les Français restent très prudents quand il s'agit de répondre à des questions portant sur le bricolage. A les en croire, nul ne toucherait jamais un outil de sa vie. Cependant, les ventes de perceuses, de scies électriques et autres instruments comparables ont été multipliées par cent en l'espace de dix ans.

La fête

Jusqu'au XX[e] siècle, les seules occasions réelles de divertissement pour l'ensemble de la population se manifestèrent à travers les fêtes : royales ou populaires, religieuses ou laïques ; elles correspondaient à un besoin réel de défoulement. Avec le développement des industries du loisir et l'avènement des congés payés, bien des fêtes ont disparu, et nombreux sont ceux qui déplorent cet abandon graduel. Cependant, nous continuons à consacrer une part importante de notre temps de détente à des manifestations qui, si elles ne sont pas toujours considérées comme des fêtes, n'en apparaissent pas moins comme de nouvelles formes de celles-ci, plus adaptées à notre mode de vie.

Fêtes traditionnelles, fêtes spontanées

Noël, le nouvel an, la fête des mères, autant d'occasions de « faire la fête » qui subsistent de nos jours. Chaque année, on annonce que jamais les Français n'ont acheté autant de cadeaux, dépensé autant d'argent pour les réveillons, quelles que soient les circonstances économiques. Il s'agit là pourtant de fêtes programmées, considérées davantage comme des obligations que comme des possibilités réelles de s'évader du quotidien. Acceptées par la force de l'habitude, elles ne correspondent pas à des besoins de licence comme ceux qui se sont manifestés de tout temps à l'égard des fêtes, si ce n'est à travers des manifestations parallèles comme le concert d'avertisseurs du 31 décembre.

C'est pourtant davantage dans ces explosions spontanées qu'apparaît la nécessité de la fête. Il y a encore quelques années, le carnaval permettait, dans de nombreuses villes de France et d'Europe, d'actionner cette soupape de sûreté. Abandonné ou récupéré au profit des commerçants de tous ordres, il ne permet plus cette explosion naturelle qui le caractérisait.

L'encadrement trop strict de la fête contribue largement à sa disparition. C'est ainsi que, malgré leurs excès, les journées de mai 1968 apparurent à beaucoup comme une sorte de gigantesque fête. Aujourd'hui encore, les bagarres qui suivent immanquablement les bals de pays correspondent en profondeur à ce besoin de défoulement. Ne trouvant pas matière à faire réellement la fête, on tente de la détruire.

Festivals et fêtes politiques

De plus en plus, les villes organisent chaque année des festivals artistiques ou culturels, suivant en cela l'exemple donné par Avignon au début des années 1950. Le nombre même de ces festivals prouve l'intérêt que leur manifeste le public. Derrière l'alibi du spectacle se cache en réalité un besoin de fête. Qu'il s'agisse de concerts classiques ou de jazz, de représentations théâtrales classiques ou modernes, de ballets, l'action ne se déroule pas seulement sur la scène, mais aussi à l'extérieur de la salle, dans la rue, pendant des journées entières.

Les festivals estivals voient ainsi chaque année surgir un certain nombre de marginaux, et l'on peut retrouver un semblant d'esprit des fêtes du Moyen Age. Les hippies ont remplacé l'échoppe des boutiques, et les baladins ont resurgi sous la même forme. En effet, depuis quelques années, on assiste à une renaissance des jongleurs, bateleurs et autres cracheurs de feu. Il ne peut s'agir uniquement d'un mouvement sporadique. C'est bien des profondeurs qu'est réapparu la fête dans la rue.

Les festivals ne sont en réalité qu'un prétexte à la fête, et le spectacle réel est au dehors des murs.

D'une tout autre manière, les partis politiques ont relancé une forme de festivités avec leurs grandes réunions annuelles; conçues au départ comme moyen de recrutement et de financement, elles se sont élargies rapidement à d'autres activités. Encadrée, commercialisée, la fête politique a ouvert ses portes aux chanteurs et aux baladins. Initialement scène de propagande, elle a perdu quelque peu de cet aspect pour devenir scène tout court. Une fois de plus, le spectateur, même militant, a profité de cette occasion de se retrouver au sein d'un vaste groupe pour imposer son désir de fête.

Fêtes communales et animation urbaine

Les fêtes votives ont tendance à disparaître dans les petits villages de campagne, de même que les kermesses et autres fêtes communales. Pour la plupart organisées par le clergé local, elles s'éteignent avec lui. Cela ne signifie pas pour autant la disparition de la fête : simplement la recherche d'une autre forme de divertissement, plus adaptée à l'évolution des mœurs.

C'est ainsi que diverses expériences d'animation rurale ont été tentées depuis quelques années. Par exemple, plusieurs hameaux de l'Ardèche se sont regroupés pour préparer ensemble pendant six mois un spectacle sur un thème donné. Réticents de prime abord, les habitants se sont pris au jeu et montent chaque année une nouvelle création, pour leur seul bénéfice. Alors que la télévision avait supprimé cette forme de fête qu'était la veillée, ce type de manifestations a ainsi recréé un nouvel esprit de communauté.

Les villes cherchent, elles aussi, de plus en plus à retrouver une animation naturelle, en dehors des périodes estivales. Refusant de se cantonner dans l'organisation de festivals dont l'apport est essentiellement ponctuel, elles tentent, par des manifestations quotidiennes et gratuites, de se redonner une âme. Des équipes d'animation sont ainsi engagées pour concevoir et organiser, avec le concours de la population, une vie quotidienne différente, parsemée de petits événements formant une trame de fête permanente. Lancées il y a quelques années par plusieurs villes pilotes, notamment Grenoble et Angoulême, ces expériences ont rencontré un accueil favorable de la part des citadins, qui se sentent ainsi directement concernés par la vie de leur cité.

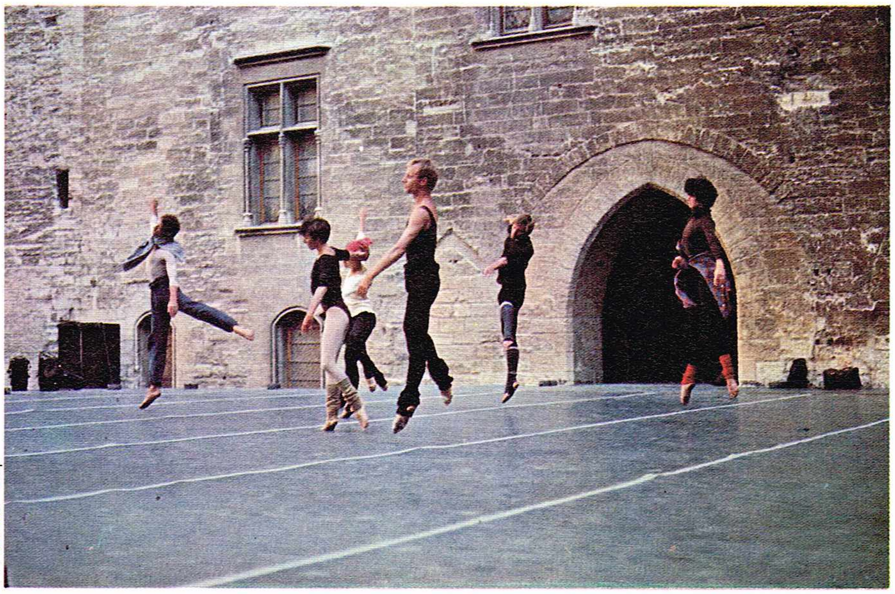

P. Putelat - Top

A. Picou - Fotogram

▲ *De plus en plus, les villes organisent chaque année des festivals artistiques ou culturels, suivant en cela l'exemple donné par Avignon (en haut). Depuis quelques années, on assiste à une renaissance des jongleurs, des bateleurs ou des mimes, comme ici, sur le forum Beaubourg à Paris.*

G. Marineau - Top

◀ *D'une tout autre manière, les partis politiques ont relancé une forme de festivité avec leurs grandes réunions annuelles : ici, la fête de « l'Huma ».*

A. Keler - Sygma

▲ *Devenu spectacle de masse, le sport se doit de satisfaire aux exigences du public (ici, départ d'un Tour de France).*

Les sports

Plus de 200 magazines sont consacrés à tous les types de sports en France. Un quotidien, *l'Équipe,* tirant à 600 000 exemplaires, lui est exclusivement réservé. Radios et télévision lui consacrent en moyenne 10 % de leurs programmes. Pourtant, 39,4 % des adultes n'ont jamais pratiqué de sport; 32,6 % en ont pratiqué durant leur jeunesse mais ne s'y adonnent plus; 15,1 % pratiquent un sport de manière irrégulière et 14,9 % de manière régulière.

A comparer ces chiffres, il apparaît que les Français considèrent le sport avant tout comme un spectacle et qu'ils pratiquent pour toute activité physique la contemplation de la télévision! Or, si cette observation reste valable pour l'adulte actuel, les choses ont considérablement évolué depuis une dizaine d'années. Les inscriptions de jeunes aux différentes fédérations se multiplient. On assiste à un regain d'intérêt pour le sport. Prise de conscience et efforts des éducateurs, influence et soutien de l'État, influence des parents, tout a sans doute concouru à cette évolution. Mais il ne faut pas sous-estimer l'élément primordial que représente la télévision en ce domaine. Paradoxalement, si celle-ci a favorisé l'apathie des adultes, elle a en même temps développé chez l'enfant le désir de pratiquer un sport. Les médailles d'un Jean-Claude Killy et les buts marqués par Saint-Étienne ont fait davantage pour la promotion du sport en France que tous les efforts de recrutement. Les inscriptions dans les fédérations sont fonction des victoires que nos vedettes sportives remportent dans leur domaine.

Loisir apprécié du plus grand nombre, le sport est aussi tributaire de techniques; se voulant amateur, il est aussi professionnel; action, il est la plupart du temps perçu comme spectacle. Le sport porte en soi ses contradictions, et vouloir le définir est déjà le restreindre. Étymologiquement cependant, il est avant tout un jeu. En effet, le mot sport vient du vieux français « desport », qui signifie s'amuser, de toutes les manières. Lorsqu'il passe en Angleterre, le mot s'applique aux jeunes nobles qui ont le temps de se livrer à des occupations divertissantes. Il revient alors en français avec le sens de compétition et perd de son caractère de classe, tout en conservant sa signification de loisir. Peut-on aujourd'hui encore parler du sport comme d'un réel loisir?

Le sport est-il encore un jeu?

Peut-on parler du même loisir lorsque, amateur-spectateur, on regarde un match de football à la télévision, lorsqu'on se déplace pour encourager l'équipe de son cœur, lorsqu'on pratique le football de temps à autre, le dimanche matin, ou lorsque l'on fait partie d'une équipe, même d'amateurs?

Pourtant, ces quatre attitudes correspondent au même terme de sport ou sportif. Si le sport est défini comme une pratique suivie, dans ce cas seuls 6 à 10 % de la population française (chiffre d'ailleurs équivalent pour les autres nations) font réellement du sport. Encore faut-il ajouter que les quatre cinquièmes de ce nombre ont entre 15 et 24 ans.

En fait, il paraît aberrant de limiter le sport à sa pratique exclusive ou à une affiliation à un club quelconque. Ce n'est pas parce que l'on se contente d'assister à un match devant son récepteur de télévision que le sport ne représente pas un loisir. Dans ce cas, le spectateur des salles de concerts ne pourrait être considéré comme un amateur de musique. Tout se passe comme s'il ne manquait aux Français que l'occasion de pratiquer. Le cross annuel du *Figaro*, qui compta plus de 23 000 participants, amateurs pour la plupart, en est la preuve.

Finalement, c'est lorsque l'on arrive à un haut degré de pratique qu'il devient difficile de considérer le sportif comme un réel amateur, notamment en athlétisme.

Technicité et commercialisation du sport

Devenu spectacle de masse, le sport se doit de satisfaire aux exigences du public. La première d'entre elles est de voir tomber les records; cette volonté a entraîné une technicité de plus en plus complexe; la « glorieuse incertitude » du sport est réduite au strict minimum. La recherche de la meilleure compétitivité a transformé une activité improvisée en véritable science. Cette technicité se manifeste sur trois plans: amélioration des performances physiques, amélioration des matériaux utilisés, amélioration des instruments de contrôle.

Les performances individuelles ne sont pas isolées des influences techniques. En 1896, le 100 m était remporté aux Jeux olympiques en 12 secondes. En 1968, Hines passait la barre, considérée comme infranchissable, des 10 s en réalisant 9,95 s. L'évolution morphologique ne suffit pas à expliquer ce progrès. Les techniques d'en-

J.-P. Laffont - Sygma

traînement, la diététique, le suivi médical ont largement contribué au gain de ces 2 s. A tel point que certains pays ont pu être accusés de pratiquer une forme de dopage sur leurs athlètes. Les techniques même de pratique ont favorisé cet essor (notamment, pour le saut en hauteur, le « Fosbury Flop », utilisé en 1968 pour la première fois).

La recherche de nouveaux matériaux plus compétitifs fait aussi partie de l'évolution des sports. La fibre de verre, si elle a transformé la vie du pêcheur, a surtout considérablement fait évoluer les prouesses des sauteurs à la perche. Enfin, l'électronique appliquée aux contrôles des temps a permis, en donnant une précision inconnue jusqu'alors, de motiver davantage les sportifs.

Cette évolution des techniques est comparable à un système économique : création de techniques, incitation au rendement, et enfin, contrôle. Le sport devient alors un phénomène économique. S'il ne rapporte pas toujours sur le plan monétaire, il est porteur d'idéologie. Cette évolution est sensible en tout pays, et le nombre de médailles emportées aux Jeux olympiques peut avoir autant d'importance au plan politique qu'à celui de l'évolution de l'économie.

Amateurisme et professionnalisme

Étant au départ défini comme loisir, il était naturel que le sport fût fondé sur la notion d'amateurisme. Mais pour maintenir cette image de marque, il eût fallu qu'il restât réservé à de petits cercles, que la notion de record n'entrât pas en ligne de compte, ni, par voie de conséquence, celle de compétition.

On comprend aisément qu'en matière de course automobile, de tir ou de tout autre sport faisant spécifiquement référence à une technique, on envisage une évolution passant par des progrès technologiques, mais on peut s'étonner de voir cette notion s'implanter dans l'athlétisme. Cependant, il faut se rendre à l'évidence : le sport tel que l'envisageait le baron Pierre de Coubertin est mort. Les nations qui ne remportent pas de médailles aux Jeux olympiques sont celles qui croient encore à une éthique sportive fondée sur l'amateurisme. États-Unis, Allemagne de l'Ouest, Allemagne de l'Est et Union soviétique ont évolué dans le même sens. L'athlète est formé pour le sport, pour remporter des médailles. Le schéma de production se retrouve dans le sport comme dans le commerce : compétitivité, contrôle, production. Depuis 1936, les Jeux olympiques sont devenus le théâtre d'une lutte d'influence : les batailles se gagnent autant sur le terrain sportif que sur le terrain politique ou militaire.

Peut-on encore réellement parler de loisir lorsque le sport devient pure technique ? Ne devrait-on pas davantage évoquer le mot d'industrie ?

Qui récupère qui ? Les skis X lorsque Jean-Claude Killy remporte trois médailles d'or ou le ski français, poussé et motivé par les victoires de ce même champion ? Les victoires de Saint-Étienne en Coupe d'Europe ont joué davantage en faveur du football que l'entraînement scolaire. On a appris d'autre part que le champion suisse de ski en 1977 utilisait un matériel standard. La technique n'aurait-elle rien à voir avec la réussite personnelle ? Le record ne signifie rien. La pratique d'un sport semble par contre essentielle.

▲ La recherche de la meilleure compétitivité a transformé une activité improvisée en véritable science (ici, la finale du saut à la perche aux Jeux olympiques de Montréal en juillet 1976).

▼ Peut-on encore parler de loisir lorsque le sport devient pure technique ?

Robin - Fotogram

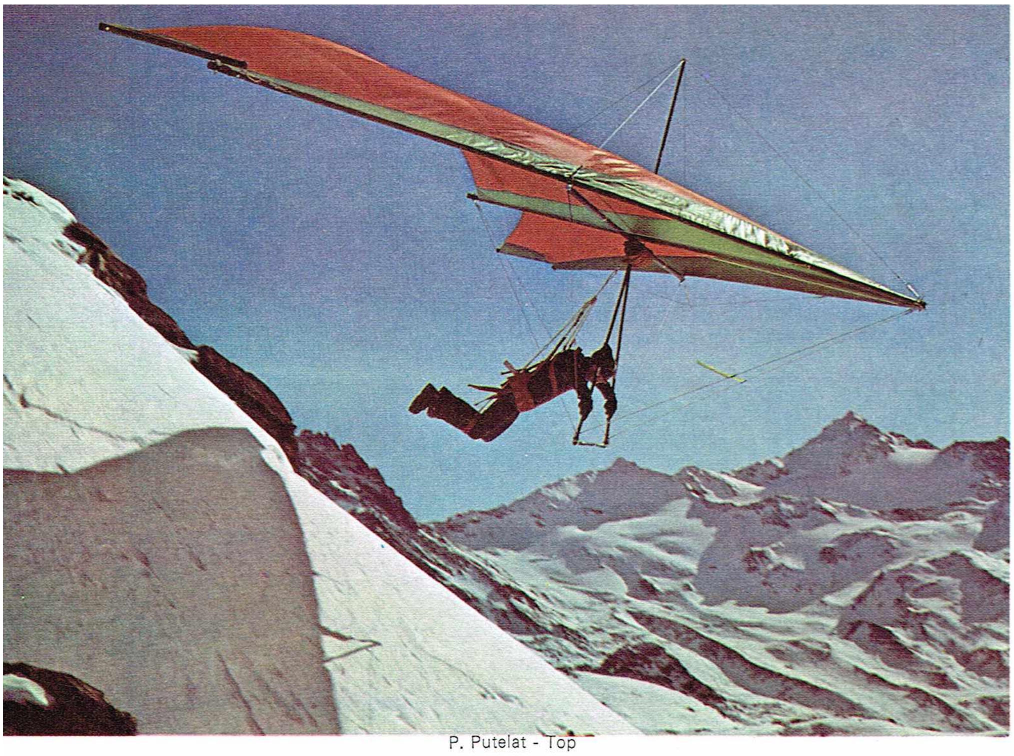

P. Putelat - Top

▲ *Le deltaplane (ou vol libre) se pratique désormais n'importe où.*

Ainsi, il devient impossible à l'amateur de rester compétitif s'il n'entre pas dans le système sportif « productif ». Le véritable esprit sportif n'est plus qu'une apparence. L'athlète, s'il veut conserver la vedette, et le mot prend ici tout son sens, n'a d'autre possibilité de le faire que par le professionnalisme. Même si les apparences sont sauvegardées, c'est-à-dire lorsqu'il est en quelque sorte subventionné, on ne peut considérer qu'il s'agisse encore là de réel amateurisme. Le sport est devenu spectacle et se doit d'être rentable pour faire suffisamment d'entrées.

Le sport dans la rue

Face à cette évolution de l'esprit comme de la pratique des sports, on peut penser qu'en se démocratisant, le véritable sport est devenu une affaire exclusivement populaire, qui se situe hors des compétitions, hors des stades. Que disent les chiffres ? Les sports les plus pratiqués en France sont le football (1 046 068 licenciés en 1975), le ski (538 431 licenciés), le judo (375 937 licenciés) et la pétanque (327 562 licenciés). A l'exception du ski, qui ne demande d'ailleurs pas nécessairement un matériel compliqué lorsqu'il est pratiqué pour le plaisir, ces quatre sports les plus populaires ne font aucunement appel à une technique sophistiquée.

On assiste donc à une scission de plus en plus nette entre le stade et la rue. Au premier le professionnalisme et le vedettariat, à la seconde le véritable amateurisme et la gratuité. Pour cette seconde catégorie, il devient d'ailleurs de plus en plus difficile de faire la part des choses entre sport et loisir. Les défenseurs et pratiquants de la chasse (ils sont 2 214 000 en France) considèrent cette activité comme essentiellement sportive, tout du moins est-ce là l'argument le plus fréquemment utilisé pour justifier leur goût. De la même manière, plus de cinq millions d'amateurs s'adonnent à la pêche, considérée par contre essentiellement comme une détente. Mais c'est en créant ainsi une distinction nette entre sport et loisir que l'on supprime la notion même d'esprit sportif. En perdant cet aspect de détente, et donc de gratuité, toute activité sportive conduit immanquablement au professionnalisme.

Sports écologiques

Il arrive fréquemment que de nouveaux sports fassent leur apparition ; ils correspondent le plus souvent à une mode, et il est difficile de prévoir leur évolution. C'est ainsi qu'après avoir fait fureur au cours des années 1960, le karting connaît une nette régression. L'évolution des techniques est pour beaucoup dans ces transformations, mais c'est sans nul doute au phénomène écologique que l'on doit l'engouement actuel pour de nouvelles pratiques sportives.

Tout ce qui fait appel aux éléments naturels a contribué à lancer ou à développer ces modes. La mer avait permis le surf, mais l'absence de rouleaux ne le rendait praticable qu'en de rares endroits des côtes françaises. Qu'importe, le wind-surfer (planche à voile) se développa. Né en 1969 aux États-Unis, ce sport compte aujourd'hui 7 000 adeptes en France. Le vol à voile n'était pas accessible à tous ? On crée le Deltaplane (ou vol libre). Tracté tout d'abord en ski nautique, il se libère en 1968 de toute attache et se pratique n'importe où, pourvu qu'il y ait une dénivellation suffisante. Même si celle-ci n'existe pas, on y pourvoit artificiellement. En 1977, un Anglais traverse ainsi la Manche, après avoir été largué à 6 000 mètres d'altitude du haut d'une montgolfière. Cette dernière revient même à la mode, puisque quatre écoles de pilotage existent en France.

L'évolution économique restreint les possibilités de consommation d'essence ? Alors, le char à voile, déjà pratiqué en Égypte et dans la Chine anciennes, renaît et se développe (600 licenciés en France). Quant au patin à roulettes traditionnel, il subit lui aussi l'évolution des mœurs et se transforme en skate-board (planche à roulettes) ; 400 000 de ces petits bolides ont été vendus en France en 1977 (plus de 20 000 000 aux États-Unis). Ce qui hier encore n'était qu'un jeu est en passe de devenir un sport avec ses pistes, ses compétitions et ses vedettes, puisqu'il serait question que le skate-board soit reconnu comme discipline olympique.

▼ *A gauche, le wind-surfer compte aujourd'hui 7 000 adeptes en France. A droite, la pétanque, avec 327 562 licenciés, fait partie des sports les plus pratiqués par les Français, après le football, le ski et le judo.*

J.-G. Ferrero - Pitch

F. Peuriot - Pitch

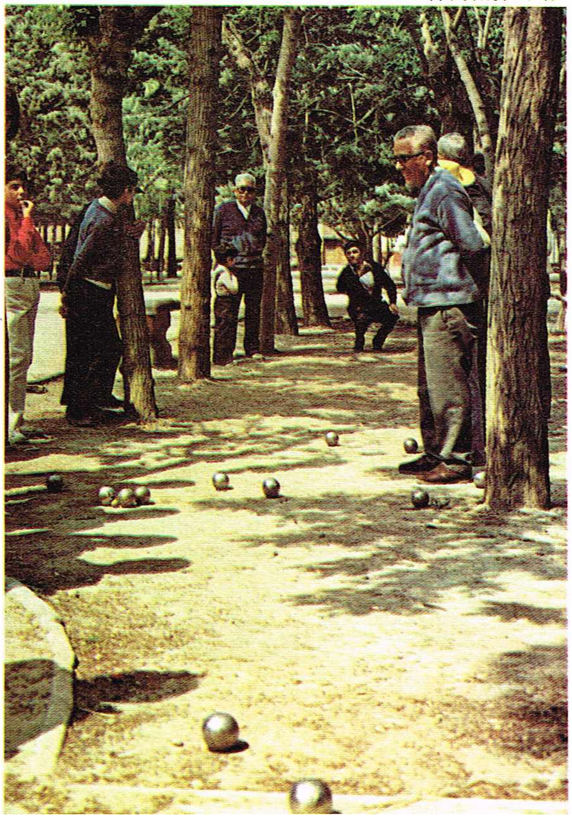

Le sport en l'An 2000 : simplicité et grand spectacle

Même s'il est trop tôt pour faire la part de ce qui n'est qu'une mode et de ce qui sera couramment pratiqué demain, on peut prévoir à travers l'évolution actuelle du sport à quoi ressemblera cette activité dans quelques années. Il y a de fortes chances pour que le sport de grande compétition se développe de plus en plus, bénéficiant de l'apport croissant de la télévision. En élargissant ainsi le public, en développant une forme de chauvinisme à laquelle il paraît difficile d'échapper, le sport de spectacle évolue vers une commercialisation à outrance ainsi que vers un professionnalisme total. La civilisation des loisirs est inséparable du spectacle, et sans revenir aux jeux du cirque romain, on peut parfaitement concevoir qu'un film comme *Rollerball* devienne une réalité.

Parallèlement à cette évolution, le mouvement en faveur de sports de délassement pur doit s'amplifier, à la faveur du phénomène écologiste déjà évoqué. L'engouement pour la bicyclette n'est plus seulement une toquade. La « petite reine » est redevenue un instrument de détente, et même un moyen de transport. Pliante, elle est facile à transporter, plus légère et plus maniable, elle est accessible à tous. Tout favorise d'ailleurs son essor. Seize gares de la région parisienne proposent des bicyclettes de location et des itinéraires de petite randonnée ont été répertoriés dans toute la France.

La marche devrait elle aussi se développer. Déjà 21 000 kilomètres de sentiers de grande randonnée sont balisés en 1978. Si les amateurs de trekking (randonnée en moyenne montagne, au Népal notamment) sont encore très peu nombreux, ce sport se développe sur toutes nos montagnes.

Aménagement des infrastructures

Répondant à ce désir manifeste de considérer le sport comme loisir, on assiste depuis quelques années à un développement considérable des structures d'accueil et de pratiques sportives, tant en France qu'à l'étranger. Le phénomène le plus remarquable est celui des sports d'hiver. Chaque année, on remarque une augmentation du nombre de vacanciers allant de 10 à 15 %. En 10 ans, plus de 200 000 lits ont été créés. Près de 40 stations accueillent chaque année 2 500 000 à 3 millions de skieurs. L'aménagement de ces stations évolue de la même manière : consacrées à l'origine au ski de descente, elles s'ouvrent de plus en plus largement au ski de randonnée. Pour pallier la défection des éléments naturels, certaines se sont dotées d'un canon à neige.

Les stations d'été ont subi la même évolution. Longtemps l'apanage des petites plages ou villes balnéaires, les vacances d'été ont, en se démocratisant, favorisé la naissance d'immenses complexes touristiques, notamment sur la côte méditerranéenne. L'aménagement du Languedoc-Roussillon a prouvé qu'il était possible de créer, de toute pièce, des structures d'accueil.

Ces stations sont généralement bien conçues sur le plan des équipements sportifs ; il a fallu cependant rapidement mettre en place des modules d'animation pour pallier leur manque de vie réelle. Le succès du sport « clefs en main » s'est surtout manifesté à travers l'essor considérable des villages de vacances, qui présentent l'avantage de proposer la formation et la pratique de techniques relativement onéreuses, comme la voile, l'équitation et la plongée sous-marine.

Longtemps boudées des Français, les vacances à la campagne ont elles aussi bénéficié de l'aménagement de structures d'accueil. Le « tourisme vert » s'est organisé au cours des cinq dernières années en regroupant les habitants désireux de loger des touristes ainsi qu'en créant des activités sportives et même artisanales.

Parallèlement, le camping s'est considérablement développé, grâce au succès grandissant du caravanning (on dénombrait, en 1977, 600 000 caravanes en France). Les terrains de camping, dont le nombre a triplé en dix ans, ont suivi cette évolution. Après s'être électrifiés, avoir installé l'eau courante et créé des boutiques de vente, ils se munissent petit à petit de structures d'animation, aussi bien sportive que de détente pure. On en arrive en réalité à la création de véritables villages de vacances de toile.

J. Guillot - Top

Fotogram

▲ *En haut, l'engouement pour la bicyclette n'est plus seulement une toquade. Ci-dessus, les vacances d'été ont, en se démocratisant, favorisé la naissance d'immenses complexes touristiques, notamment sur la côte méditerranéenne (La Grande Motte - Hérault).*

F. Jalain - Top

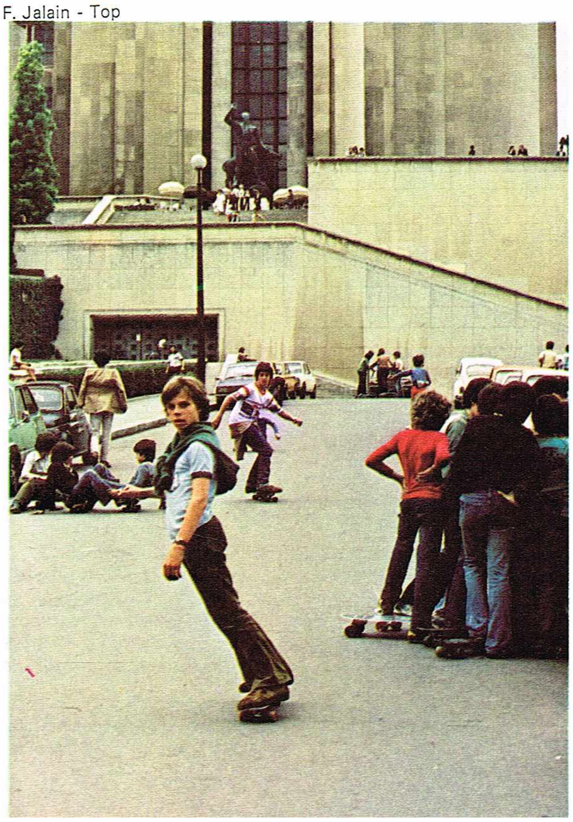

◀ *Le skate-board : ce qui hier n'était qu'un jeu est en passe de devenir un sport à part entière.*

P. Lebrun - Parimage

▲ *Les clubs du troisième âge : pour donner aux retraités une place réelle dans notre société des loisirs.*

Les loisirs du troisième âge

8 % de la population mondiale est âgé de plus de 60 ans. En France, les plus de 65 ans auront augmenté en l'an 2000 de 29 % par rapport à 1970. Cette population, à qui l'on a donné le nom peu poétique de « troisième âge », ne cesse d'augmenter, tandis qu'en même temps l'espérance de vie se prolonge et que l'âge de la retraite est avancé. Souvent isolés de leurs familles, ayant perdu les privilèges de l'âge, les retraités n'ont plus de place réelle dans notre société des loisirs.

Cependant, depuis quelques années, deux phénomènes ont commencé à transformer le sort du troisième âge : les clubs et l'université. La nécessité d'agir en faveur des personnes âgées a été paradoxalement ressentie chez les jeunes générations, notamment dans le cadre des Maisons de jeunes et de la culture.

▶ *Page ci-contre, le Club Méditerranée a mis à la portée de tous la pratique de sports variés et lancé un mode de loisirs inconnu jusqu'alors.*

Les clubs du troisième âge

En 1977, il existe 10 700 clubs fréquentés par 2 000 000 de personnes. Le mouvement est né dans certaines MJC où animateurs et jeunes gens décidèrent de briser la solitude des personnes âgées de leur quartier et de leur assurer un certain nombre de possibilités de loisirs. Lieux de rencontres à l'origine, ces clubs ont débouché très vite sur des types d'activités très divers. Les ateliers de bricolage, d'artisanat, de photographie se sont multipliés.

Petit à petit, les retraités ont pris eux-mêmes en main l'organisation de leurs loisirs. On assiste aujourd'hui dans ces clubs à la reconstitution d'une minisociété, adaptée au rythme de vie des personnes du troisième âge. Cette société a recréé un encadrement calqué sur celui de la vie active. L'ancien instituteur y redevient naturellement formateur : les rôles sociaux sont réinstitués.

J.-N. Reichel - Top

▼ *Vacances insolites, le house-boat ou la roulotte paraissent devoir entrer dans les mœurs.*

L'université du troisième âge : l'art de réapprendre la vie

Si la formule du club paraît séduisante, elle présente l'inconvénient de cantonner les personnes âgées dans leur milieu et de les isoler du monde extérieur. Or l'âge de la retraite, c'est aussi l'âge de la liberté retrouvée. Ce qui était corvée durant la vie active peut tout à coup devenir plaisir à l'âge de la retraite. Le mot loisir ne prend alors plus le même sens qu'auparavant. C'est à partir de cette constatation qu'a été fondée à Toulouse, en 1973, la première université du troisième âge. Depuis lors, une douzaine d'autres centres semblables ont ouvert leurs portes, pour répondre aux nombreuses demandes.

Pour éviter l'écueil du cloisonnement, les générations se mêlent sur les bancs de ces universités. Les programmes sont conçus entre professeurs et étudiants, de même que sont établis les horaires. Les sujets abordés sont multiples : langues étrangères, mathématiques, vie politique, français, droit; ils correspondent entièrement aux cours donnés dans les universités d'origine.

Certaines universités consacrent aussi une partie de leurs programmes à l'artisanat. Le sport n'est pas oublié, pas plus que les contacts avec le monde extérieur par le biais de visites organisées.

Loisirs organisés et vacances insolites

Créé en 1950, le Club Méditerranée a lancé un mode de loisirs inconnu jusqu'alors. Son succès retentissant tient au fait qu'il prend en charge la totalité des loisirs du vacancier, le libérant de tout souci matériel, puisque même l'argent est transformé en « colliers » de troc. Chaque village (76 en 1977) a ses spécialités sportives, allant de la voile à l'escalade, et met à la portée de tous la pratique de ces sports. Ce phénomène est particulièrement intéressant, car il correspond à une tendance généralisée qui s'est maintenue jusqu'à ce jour : l'unification des modes de vie pendant les vacances, ainsi que la fusion des couches sociales. C'est ainsi que la clientèle du club compte 55 % d'employés, 35 % de profession libérales et 10 % d'étudiants. A la vie sportive, il a tenté d'allier une vie culturelle en créant des soirées de concerts classiques, des soirées théâtrales, artistiques.

Il faut noter que le principe du Club a été repris par de nombreuses organisations parfois plus anciennes, comme le Touring Club de France, les Villages Vacances Famille. C'est ainsi que plus de 1 500 personnes pratiquent en France ce type de loisirs. Le succès des clubs étrangers promus par les agences de voyage prouve qu'il s'agit bien là d'un choix d'époque.

Depuis quelque temps, cependant, on assiste à une évolution des goûts chez l'amateur de voyages organisés. On ressent comme une sorte de lassitude vis-à-vis des loisirs de groupe, qui se manifeste par le choix de plus en plus fréquent du voyage « à la carte » où le touriste choisit de partir individuellement, sur un programme qu'il définit lui-même, l'agence de voyage ne servant alors que d'organisateur et de relais aux différentes étapes.

Cette transformation progressive a conduit les organismes touristiques à créer un certain nombre de formes de vacances encore appelées « insolites », mais qui paraissent devoir entrer dans les mœurs. Le souci d'indépendance du vacancier moderne peut ainsi s'exprimer à travers un voyage en roulotte sur les routes d'Irlande ou du Massif central, dans la traversée du Sahara en Land-Rover, dans la navigation fluviale à bord d'un house-boat ou dans une expédition le long du Niger en pays Dogon.

Plus qu'une mode, cette orientation actuelle des vacances démontre une évolution de mentalité. La découverte de nouvelles contrées perd de son intérêt si elle n'est pas faite au rythme de la vie quotidienne indigène. Il se crée un besoin de découvrir le monde, non plus en touriste, mais d'une manière approfondie. A la soif de connaissance a succédé une soif de communication avec le monde et avec les autres. L'exotisme n'est plus dans les paréos des vahinés, il réside dans une ferme du Cantal. Le succès du « tourisme vert » relève du même phénomène.

M. Kuh - Camera Press

VENDREDI 13

J.-N. Reichel - Top

▲ *Pêcher, chasser et cultiver, cela correspond à un atavisme profond.*

▶ *Page ci-contre, le* pop *: une nouvelle forme artistique qui manifeste surtout la volonté du public de trouver un langage qui lui soit perceptible (ici, un groupe de pop-music).*

▼ *On remplace le safari meurtrier par le safari-photo pour protéger les espèces en voie de disparition.*

A. Picou - Fotogram

Les loisirs de demain

Quelle que soit la forme de loisirs envisagée, on s'aperçoit qu'ils ont connu dans cette seconde moitié du XXe siècle une évolution semblable. Le processus en a été le suivant : mécanisation (ou meilleure connaissance par développement de l'information), industrialisation, démocratisation et organisation d'infrastructures à une grande échelle.

A peine ce phénomène de masse s'est-il manifesté qu'une volonté d'individualisme dans les loisirs s'est développée, sans doute par refus de l'industrialisation. Tout se passe comme s'il n'y avait pas naissance d'une civilisation des loisirs, mais plutôt naissance d'une commercialisation de ceux-ci. Une véritable civilisation des loisirs s'appuierait sur une répartition *quotidienne* du temps de détente. Or depuis la naissance des congés payés, le temps consacré aux loisirs s'est accru annuellement (la durée des vacances a été allongée) mais non ponctuellement. Le temps imparti à la détente ne peut être compressible si l'on veut parler de loisirs.

On assiste cependant depuis quelque temps à une sorte d' « autogestion » du loisir personnel, qui se manifeste à travers des phénomènes de masse, qui ne peuvent uniquement s'expliquer par une volonté passagère. Tout se passe comme si notre société reprenait ces constantes pour créer des modes et les industrialiser. Loisir et détente semblent faire partie de nos rares occupations échappant à un quelconque instinct grégaire, tout du moins lorsqu'il y a choix et action de la part de l'individu, et non plus seulement soumission à un spectacle imposé (télévision, par exemple). L'évolution paraît devoir aller vers ce libre arbitre, et cela permet d'envisager ce que sera réellement une société des loisirs, peut-être celle de l'an 2000.

Du jardinage à l'artisanat

Toute activité obligatoire pour la survie de l'espèce à une époque donnée de notre histoire paraît s'être transformée par la suite en loisir. Planter du maïs pour se nourrir n'est jamais apparu comme une détente pour les professionnels de l'agriculture ; par contre, à peine le citadin a-t-il le temps et l'espace nécessaires pour se constituer un jardin potager dans sa résidence secondaire que le jardinage devient loisir. Cultiver son jardin devient synonyme de retraite, donc de possibilité de choisir son occupation. Ce qui n'est plus contrainte devient plaisir. Si la France compte autant de pêcheurs, de chasseurs et de jardiniers, c'est que cela correspond à un atavisme profond. Ce qui était nécessité devient jeu et l'on en arrive à une conception du loisir mi-utilitariste, mi-ludique.

L'avenir de ces occupations est déjà tracé. Les préoccupations de sauvegarde de la nature viennent au secours des activités de détente : on plante des radis parce que l'on n'en trouve plus de comestibles sur le marché, on élève des lapins pour les mêmes raisons, et l'on remplace le safari meurtrier par le safari-photo pour protéger les espèces en voie de disparition.

Ici apparaît la première manifestation de la volonté du consommateur de loisirs, face à une industrie qui souhaiterait lui imposer ses règles : la défense des bébés-phoques passe avant les intérêts des manufactures d'armes. Même s'il se crée une industrie de sauvegarde, elle aura été imposée par l'individu.

Le bricolage a évolué de manière semblable. Activité secondaire (dont le travail « au noir » reste l'un des avatars), elle représente néanmoins la plus grande partie du temps consacré aux loisirs ; échappant au système économique, elle a été reprise par ceux-ci. Les développements du kit, du « *do it yourself* » (faites-le vous-même), et des nombreux commerces consacrés au bricolage en sont la preuve. Même ainsi récupérée, cette volonté implique un choix de retour à la création individuelle, échappant à l'emprise de la technique.

On retrouve ce phénomène dans l'essor des stages consacrés à l'artisanat. Alors qu'il s'agit bel et bien d'un travail, cette activité est prise sur le temps de loisir. Suivre des cours de poterie dans l'Aveyron, de tissage dans le Vaucluse ne correspond plus à une recherche de profit matériel, mais bien à un gain personnel. On a l'impression qu'au même moment où l'homme a pris conscience de la nécessité de protéger les richesses naturelles qui l'entourent, il a cherché à se protéger lui-même.

De l'artisanat à l'art

A l'époque où les esthètes se plaignent d'une stagnation de la peinture ou de la musique, on n'a jamais compté tant de peintres du dimanche et d'orchestres amateurs. Les Anglo-Saxons ont même créé le mot *pop* (populaire), qui s'applique aussi bien à la musique (pop-music) qu'à la peinture ou à la sculpture (pop'art), pour définir cette nouvelle forme artistique. Si elle définit un art destiné au public, elle manifeste surtout la volonté de ce même public de trouver un langage qui lui soit perceptible.

Notre civilisation est celle du facteur Cheval comme celle du concours Lépine. L'œuvre d'art s'est démystifiée en descendant dans la rue, elle n'est plus seulement réservée à des artistes, mais est devenue accessible aux amateurs. Le cas des arts plastiques n'est pas unique, mais se retrouve aussi dans l'écriture : alors que peu de personnes lisent réellement, il arrive en moyenne chaque jour cinquante à cent manuscrits sur le bureau des grands éditeurs. Il ne s'agit plus d'écrire pour être lu, mais d'écrire pour agir, pour se détendre. Quel propriétaire d'une caméra Super 8 mm n'a pas au moins une fois tenté de réaliser un film d'imagination pure? En 1969, la municipalité de Montpellier a installé dans un jardin public un mur régulièrement reblanchi sur lequel chacun peut venir écrire une phrase, dessiner une caricature ou s'exercer au graffiti. Le mur ne cesse d'être recouvert d'inscriptions. Plus qu'un besoin de s'exprimer, c'est un désir de création personnelle qui se manifeste ainsi. On assiste à un jaillissement spontané de l'art populaire qui, débarrassé du qualificatif « naïf » qui le caractérisait auparavant, devient une constante des loisirs actuels.

L'expression artistique à la portée de chacun, voici l'un des facteurs de l'évolution des loisirs dans l'avenir. Ainsi, depuis 1968, les murs ont la parole, et les affiches publicitaires deviennent le support d'une expression qui touche sinon à la philosophie, du moins à l'expression de la sagesse populaire. Là encore, il faut noter que ce mouvement spontané a été repris par notre société de loisirs de consommation, puisque des éditeurs ont réalisé plusieurs livres recueillant les meilleures manifestations de cette volonté d'expression.

De la culture à l'intellect

Pendant longtemps, se cultiver ne fut pas considéré comme un loisir, tout au moins pour l'ensemble de la population. Cela demandait une disponibilité de temps et d'esprit dont peu d'hommes pouvaient disposer. Le développement des Maisons de la culture a commencé à modifier cet état de fait. Réservées au départ aux jeunes, c'est-à-dire à la couche de population disposant du maximum de temps de détente, elles ont cependant implanté la notion d'une culture accessible à tous.

Longtemps considérées comme des ghettos, inspirant davantage la méfiance que le respect, elles ont fini par s'ouvrir largement à toutes les couches sociales. C'est d'ailleurs elles qui sont à l'origine de la plupart des clubs du troisième âge. C'est ainsi que la première Maison de la culture ouverte à tous, le centre Beaubourg, comptait accueillir 5 000 visiteurs par jour. Plus d'un an après son ouverture, elle continue de recevoir 20 000 visiteurs quotidiennement. En dehors de la curiosité pure pour son architecture, ce qui attire surtout les visiteurs ce sont ses installations de vidéothèque.

Beaubourg n'est pas une exception. Les bibliothèques et les discothèques connaissent une fréquentation en progression constante. Les centres urbains ne sont pas les seuls à bénéficier de cet intérêt pour la culture, puisque les bibliobus qui se multiplient dans les campagnes connaissent un succès du même ordre.

Des mass media aux media personnalisés

Le développement de la formation permanente marque de la même manière l'intérêt porté au développement intellectuel. Les stages de formation sont considérés avant tout comme des périodes de loisir, au grand dam de leurs animateurs. Sur ce point, la frontière entre le travail et la détente est encore très floue. Quel que soit l'intérêt professionnel que ses concepteurs veulent y voir, il faut considérer avant tout l'intérêt personnel que ses bénéficiaires y trouvent.

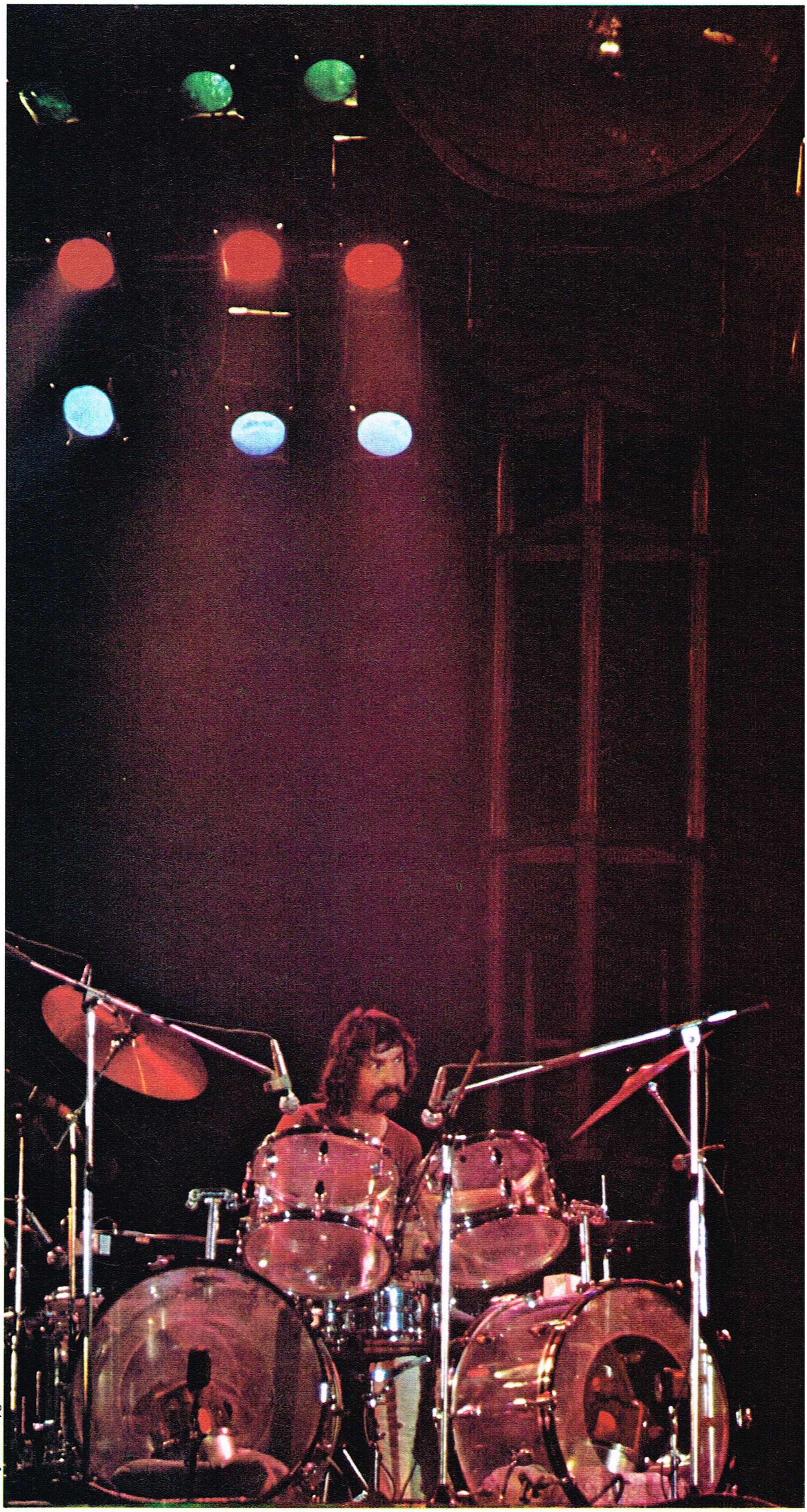

A. Dejean - Sygma

F. Darras - Fotogram

▲ ***Première Maison de la culture ouverte à tous, le centre Beaubourg attire davantage les visiteurs par ses installations de vidéothèque que par son architecture propre.***

Cette recherche intellectuelle se manifeste même dans la science. 90 % des astronomes sont amateurs et apportent autant leur contribution aux découvertes que les professionnels. Les sociétés savantes du XIX^e siècle ont laissé la place à des clubs de plus en plus nombreux, composés de membres amateurs, dans des domaines aussi techniques que l'astronautique. Le chercheur actuel est souvent quelqu'un qui pratique ses recherches sur son temps de loisir. Ses découvertes n'en sont pas moins importantes pour autant : elles risquent même de faire évoluer davantage la société, n'étant pas soumises au visa de la science officielle.

L'intérêt manifesté pour la chose intellectuelle touche même la télévision, considérée pourtant comme instrument de loisir purement passif. Ces dernières années, deux émissions connurent un excellent indice d'écoute, supérieur à celui de nombreux spectacles de variétés : « La caméra explore le temps » et les émissions médicales. Le succès actuel du jeu « Les chiffres et les lettres » est la preuve que le spectateur peut rechercher autre chose qu'un simple divertissement.

Le développement de ce que l'on a appelé l'ère de l'audio-visuel a pu faire croire que le consommateur de spectacles télévisés ou radiodiffusés allait se contenter de réagir d'une manière passive à ce qui lui était présenté. En réalité, il n'en est rien : un mouvement de refus (peut-être dû à la médiocrité ou au manque d'imagination des programmes) se dessine actuellement dans tous les pays développés.

Il existe en Italie plus de 1 500 stations de radio émettant sur les longueurs d'onde officielles. Le mouvement a gagné la France et tend à se développer, allant à l'encontre d'un monopole condamné tôt ou tard à disparaître. De même, si les gouvernements hésitent à autoriser le procédé de télédiffusion par câble, c'est qu'ils craignent d'assister à une évolution comparable.

Bien plus qu'une volonté de créer des stations concurrentielles vis-à-vis des compagnies autorisées, c'est un désir de s'exprimer qui se manifeste ainsi. Les murs ont eu la parole, il est normal que les écrans l'aient aussi. Au besoin de spectacle correspond un besoin au moins aussi important de communication, sans passer par les institutions officielles du loisir organisé.

L'apport essentiel de la science et des techniques en matière de loisirs ne réside pas dans la communication de masse. En se miniaturisant, en mettant l'électronique à la portée de tous, en simplifiant son utilisation, l'outil scientifique permet la communication de petits groupes entre eux, ramenant l'information et la récréation à une échelle plus humaine.

Vers un nouveau type de société

Développement de la création personnelle, dans la fabrication de biens comme dans celle d'œuvres d'art, approfondissement intellectuel et communication de groupes humains réduits semblent être les trois axes vers lesquels se dirige notre société actuelle en matière de loisirs. Cela représente une vision plus optimiste de l'avenir que l'image du loisir-spectacle dont on a longtemps cru qu'il serait notre lot.

Une société de loisir allait de pair avec une société sans cesse plus productive. La crise économique comme les réalités écologiques ont transformé cette hypothèse. Ne pouvant produire davantage, nous ne pouvons plus espérer diminuer nos heures de travail. C'est donc vers une société d'utilisation du temps de loisir que nous avons le plus de chance d'aller. Les moments où nous pouvons nous consacrer à des activités de détente sont à gagner sur la durée des transports, sur la simplification des tâches ménagères et simplement sur une meilleure organisation de nos loisirs.

L'organisation du travail peut aussi largement contribuer à cette évolution. En 1974, les Anglais en firent l'expérience en découvrant qu'en réduisant la semaine de travail à trois jours au lieu de cinq, pour des raisons économiques, le rendement restait le même. Dans les deux cas (aménagement des loisirs ou organisation du travail), la science a son mot à dire.

Les techniques peuvent favoriser la création d'un nouveau type de société qui, si elle n'est pas aussi largement ouverte aux loisirs qu'on pouvait l'espérer, aura au moins le mérite de créer un nouvel art de vivre.

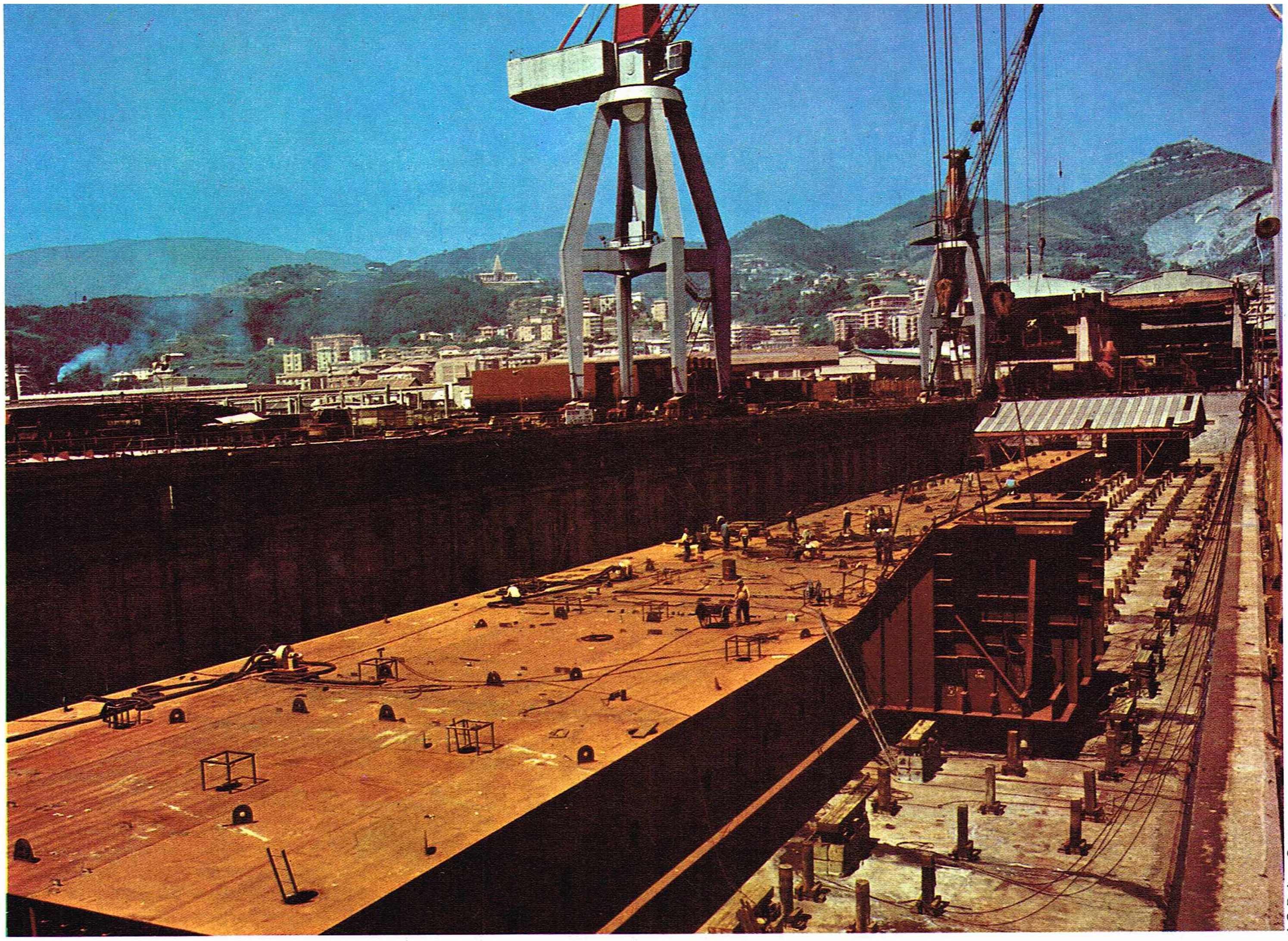

I.G.D.A. - Costa

▲ ***Construction d'un pétrolier dans un chantier naval. Contrairement à l'industrie automobile, cette construction se fait sur projet spécial non répétitif.***

TECHNIQUE ET SOCIÉTÉ

La technique et l'histoire humaine

S'il faut en donner une définition, on peut dire que la technique constitue l'« ensemble des activités de production et de transformation que l'homme exerce sur son milieu ».

P. Ducasse, dans son Histoire des techniques, *note ainsi que « c'est avec l'homme que les techniques prennent leur développement complet, parce que l'homme est non pas un simple répétiteur des procédés industriels de la vie, mais un novateur, un prodigieux inventeur de mécanismes nouveaux, tout différents de ceux que la nature, par l'instinct, avait associés à la forme même du corps de l'animal, à son rythme ».*

En définitive, la technique est bien davantage qu'une simple reproduction des conditions matérielles de la vie : c'est l'élargissement de ces conditions.

*L'*Encyclopédie Alpha des *Éditions Atlas présente, dans sa rubrique « Technique », une remarquable synthèse historique sur le rôle des techniques dans l'évolution des activités humaines. Nous lui emprunterons l'essentiel de ce paragraphe.*

Dès la Préhistoire, l'histoire des techniques prend une forme caractéristique : succession de véritables révolutions et non progrès constant où les découvertes s'ajouteraient aux découvertes, sans rupture. Les vestiges matériels ont amené à distinguer, par exemple, un âge de la pierre taillée et un âge de la pierre polie. Mais les deux étapes les plus importantes doivent sans doute être cherchées ailleurs. C'est la technique du feu et ensuite l'agriculture qui mettent fin au règne de la cueillette et de la chasse. Si l'on désigne par ce terme à la fois l'agriculture et l'élevage (qui paraissent indissociables dès le commencement), on peut penser avec Leroi-Gourhan *(Origine et Diffusion de la connaissance scientifique)* que l'introduction de l'agriculture représente « le fait le plus important », la révolution technique la plus bouleversante qu'ait connus l'humanité.

Cependant, malgré l'importance des réalisations égyptiennes, mésopotamiennes, indiennes et chinoises, c'est à l'époque classique de la civilisation grecque que l'on voit la technique prendre son orientation décisive. Là, en effet, elle commence à être liée aux sciences naissantes : mathématiques et mécanique. Pour la première fois, les instruments vont être conçus d'une manière rationnelle, déduits de connaissances scientifiques et non plus fabriqués de manière empirique par « essais et erreurs ». Ainsi, l'usage instinctif du levier remonte aux premiers âges de l'humanité, mais seul Archimède sut en donner la théorie physique, ce qui permettait, à partir d'un principe, de varier le champ des applications. De même, les Anciens surent utiliser la vis non seulement comme moyen d'assemblage, mais aussi comme instrument susceptible d'exercer de vigoureux efforts de pression ; ils découvrirent aussi que la vis engrenant sur une roue dentée (vis sans fin) permettait de transformer l'un dans l'autre des mouvements de rotation exécutés dans des plans différents. Ajoutons l'utilisation de la

▶ *Construction des fortifications de Syracuse à l'aide de palans et de leviers selon la théorie physique d'Archimède (gravure d'Edelinck, Bibliothèque Nationale).*

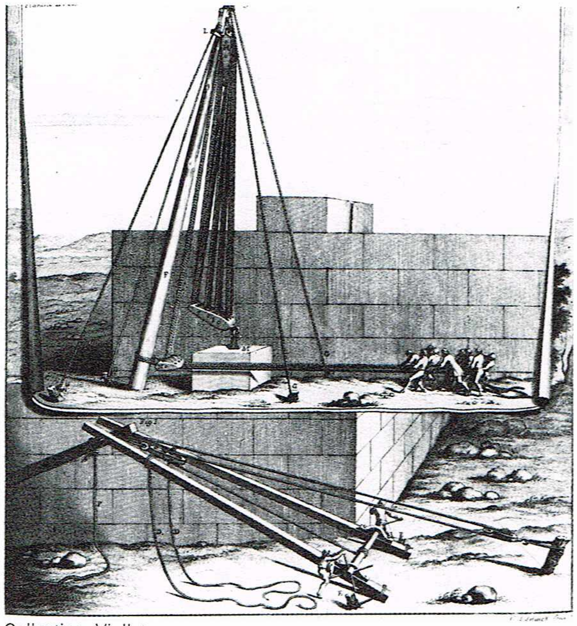

Collection Viollet

force motrice de l'eau, mais aussi de l'élasticité des gaz, ainsi que l'usage des transmissions mécaniques, et nous aurons une idée du développement technique de la Grèce.

Développement qui allait de pair avec une certaine dépréciation du travail manuel, abandonné aux esclaves. Ainsi devait être tarie la source de l'invention mécanique. Le monde romain n'ajoute pas grand chose aux découvertes grecques, et le début du Moyen Age européen marque plutôt une régression. Il faut attendre au moins le X^e siècle pour assister à un nouveau départ des techniques. Insistons surtout, comme l'a fait Lefebvre des Noettes, sur la modification de l'attelage : on remplace l'ancien collier, qui gêne le cheval en comprimant sa gorge, par le collier d'épaules, qui permet de capter toute sa force motrice.

Ainsi ont été libérées bien des forces humaines susceptibles d'être alors utilisées dans les nouvelles industries qui se développent : mines, métallurgies, architecture, etc. La multiplication des machines au XV^e siècle, favorisée par le développement du capitalisme commercial mais aussi par l'apparition de nouveaux procédés métallurgiques (laminoirs, fonderies, tréfileries), donnera son assise technique à la Renaissance. Usher, par exemple, a montré l'importance du progrès technique dans l'imprimerie (1440-1445) et comment celui-ci donne les conditions du passage à la technique moderne.

Désormais, et alors même que les autres secteurs ne sont pas négligés, chaque siècle va voir le progrès révolutionner au moins une grande branche de la production. Au XVII^e siècle, c'est l'introduction des manufactures. Au XVIII^e siècle se développent, surtout à l'initiative de l'Angleterre, les machines à filer et à tisser, et aussi les « pompes à feu », qui utilisent la pression de la vapeur pour assécher les mines. Cependant, c'est le XIX^e siècle qui mérite le nom de siècle de la vapeur, même s'il accomplit des progrès décisifs dans l'utilisation de l'énergie hydraulique, même s'il voit l'introduction de nouvelles sources d'énergies : électricité, moteur à explosion, etc. Quant au XX^e siècle, plutôt que d'énumérer la suite de bouleversements qui le caractérisent jusqu'à l'âge de la cybernétique, il convient de remarquer la forme spécifique que les mutations y prennent. Elles semblent bien, en effet, affecter les conditions de travail au moins autant que les moyens de travail. Nous voulons ici parler de la « taylorisation » qui reste attachée non seulement au nom de F. W. Taylor, mais à celui de Ford : tandis que le premier tentait de réduire le temps passé à une tâche par chaque ouvrier, le second introduisait le travail à la chaîne.

De tels développements ne pouvaient aller sans une modification du statut même de la technique dans la civilisation. Dans l'Antiquité, les philosophes ou les mathématiciens eux-mêmes ont très souvent dédaigné la technique. Cette attitude se modifiera radicalement à la Renaissance. Comme le rappelle avec force G. Canguilhem *(Descartes et la technique)*, « après Léonard de Vinci et Bacon, et comme eux, Descartes relève le travail, la construction des machines — et l'accommodement par eux de la nature à l'humanité — du mépris dans lequel les avait tenus la pensée philosophique des Anciens ». Descartes ne rêvait-il pas d'une philosophie qui nous ferait « comme maîtres et possesseurs de la nature » ?

A sa suite, la pensée rationaliste va exalter la technique comme le moyen par lequel l'ordre humain peut s'inscrire dans le monde et triompher du désordre et de l'imprévisibilité. L'activité technique, qui ne cesse de s'accroître, sera l'objet d'une attention incessante.

D'une part, on s'intéresse au progrès technique pour lui-même, à son étendue, à son mode de développement. Diderot recense dans *l'Encyclopédie* toutes les techniques connues à son époque. Kant souligne la spécificité des techniques et montre comment elles ne peuvent être réduites à l'acquisition d'un savoir théorique. Anticipant souvent sur les résultats des sciences, semblant parfois former la condition de leurs progrès, les techniques ne peuvent en aucun cas être tenues pour de pures applications de leurs démonstrations. En effet, ainsi que l'indique G. Simondon *(Du mode d'existence des objets techniques)*, la science, conceptuelle, constitue un système de compatibilité entre les gestes techniques et les limites que le monde

▼ *Dessins de machines servant à l'utilisation de la force motrice et à la remontée mécanique des eaux, par Léonard de Vinci.*

Collection Viollet

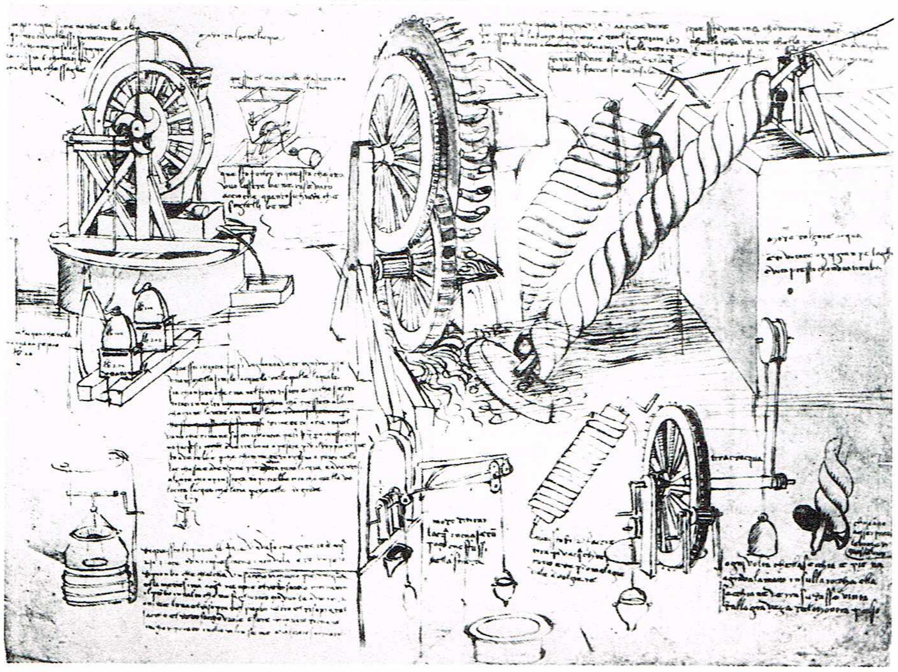

impose; elle permet le dépassement de ces limites, elle ne fournit pas le modèle de toute expérience. Un exemple est resté célèbre, celui de la machine à vapeur : alors que la théorie des phénomènes que cette machine utilise ne devait être élaborée qu'au XIXe siècle, Denis Papin, dès 1698, la réalisait d'une manière satisfaisante. Mais il ne faut sans doute pas en rester à des exemples partiels. Si l'on prend le cas d'une science globale, comme la mécanique classique, on voit qu'elle trouve ses conditions de possibilité dans l'extraordinaire développement des machines à la Renaissance. B. Gille a ainsi montré *(les Ingénieurs de la Renaissance)* que ce sont les problèmes posés par le fondement des machines de guerre qui ont obligé à abandonner les conceptions dynamiques de l'Antiquité; mieux encore montre-t-il que la physique classique n'a pu se représenter le mouvement comme un phénomène unique que dans la mesure où la Renaissance avait produit des machines qui transformaient un mouvement droit en mouvement circulaire (système bielle-manivelle, par exemple). Dans cette perspective, le rapport entre technique et technologie (entendue comme discours bien fondé sur la technique) apparaît comme un rapport dialectique d'information réciproque.

Par ailleurs, — et c'est surtout ce deuxième point qui nous intéresse ici — la technique, par l'importance qu'elle prend dans la vie sociale, par les transformations qu'elle introduit dans l'ordre vital, fait l'objet d'un autre type d'intérêt. Elle n'est pas seulement considérée en elle-même, d'un point de vue épistémologique, mais dans ses rapports avec l'ensemble des activités des hommes, d'un point de vue éthique, peut-on dire. Ou elle devient valeur en soi, orientant l'existence, promise à un avenir prestigieux; ou, au contraire, accusée de gigantisme, critiquée parce qu'elle dénature le monde et falsifie les rapports de l'homme avec celui-ci, elle fait l'objet d'une remise en question radicale. Entre le meilleur des mondes et le retour aux sources, entre une fiction angoissante et le regret stérile du passé, n'est-il pas possible de trouver un juste usage de la technique?

L'homme contemporain et la technique

Depuis la fin des années 1960, l'opinion publique commence effectivement à se préoccuper des effets « néfastes » de la technique. Alors qu'auparavant une large majorité de la population pensait que le progrès technique arriverait tôt ou tard à les supprimer, on est aujourd'hui de plus en plus conscient du fait que ce n'est pas « après coup » que l'on peut facilement pallier de tels effets. Il faut donc prévoir, dès la conception de nouveaux produits ou lors de l'élaboration de nouveaux processus technologiques, la mise en œuvre d'une méthodologie permettant de prévoir ces effets et éventuellement de prendre les mesures nécessaires pour qu'ils ne se produisent pas.

Dans l'introduction des présents volumes consacrés à la technologie, Guy Deniélou affirmait : « Plus qu'une technique, moins qu'une science : voilà une définition de la technologie qui ne fait, en l'occurrence, qu'enregistrer approximativement l'opinion courante, celle de l'homme de la rue. » Et il ajoutait : « Au rebours, l'université de Compiègne propose sa définition

Vautier

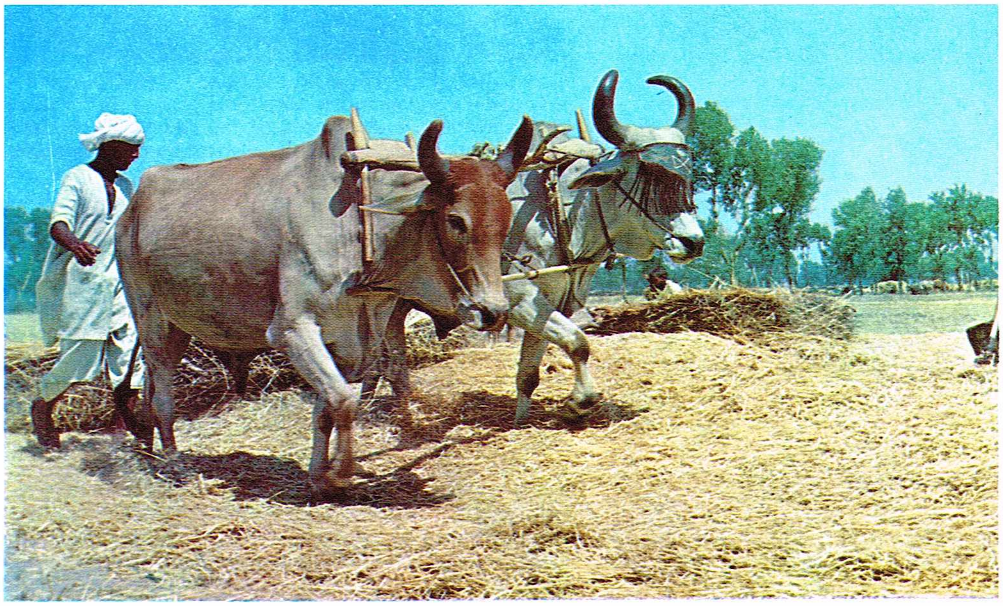

Vautier

▲▼ Trois étapes de l'évolution technique encore vivantes :
en haut, des femmes boliviennes labourant à l'aide d'une araire, à 4 000 m d'altitude;
ci-dessus, un attelage de bœufs munis de colliers de garrot, au Bangla-Desh;
ci-dessous, une machine agricole tirée par un tracteur.

EDENA - M.T.A.

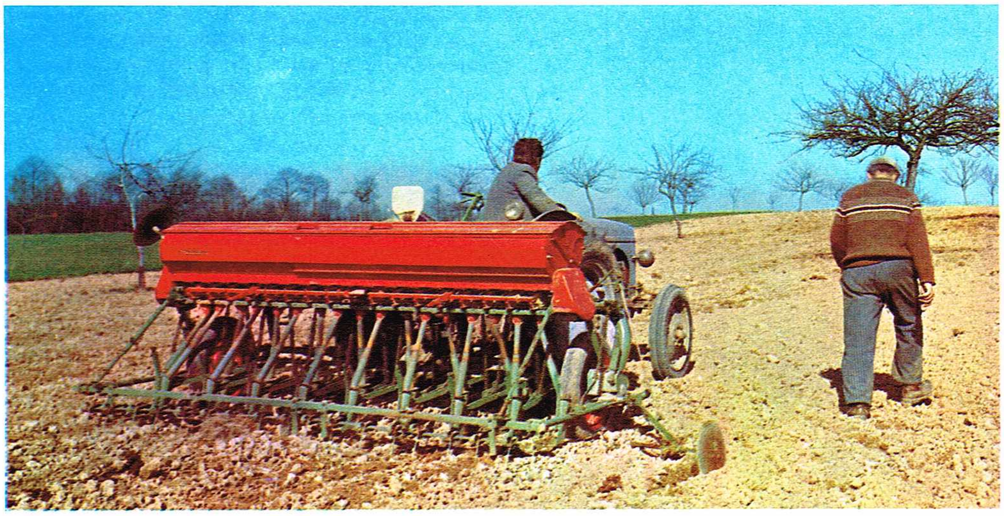

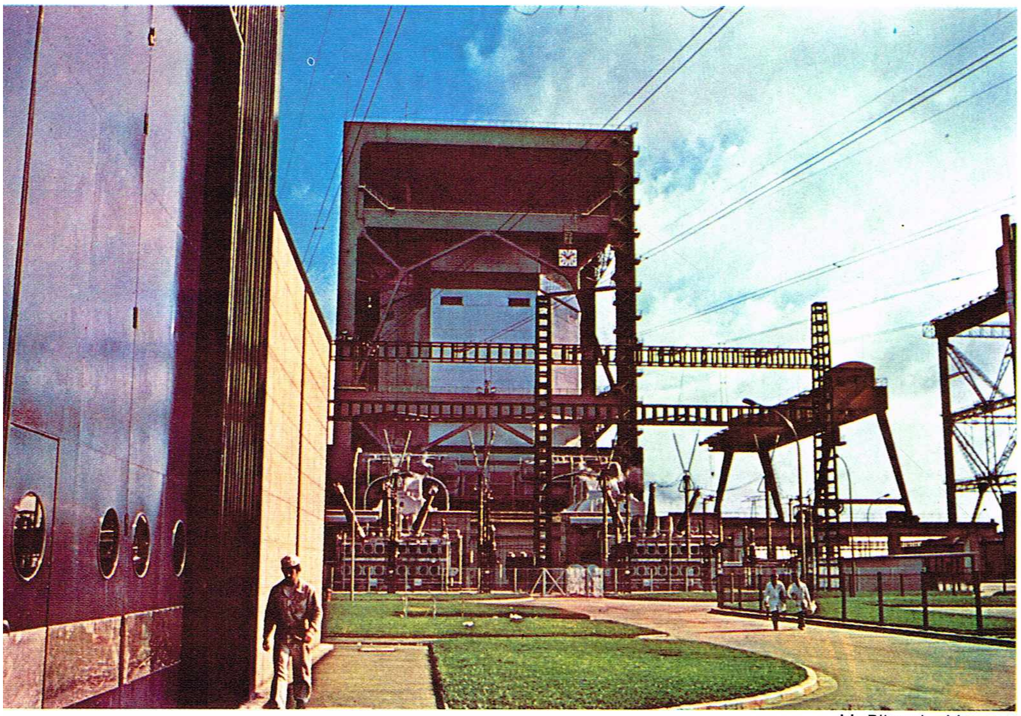

M. Riboud - Magnum

▲ **Le développement en France de la production d'énergie d'origine nucléaire : la centrale de Saint-Laurent-des-Eaux.**

officielle de la technologie : c'est le nom de la science quand elle prend pour objet les produits ou les procédés de l'industrie humaine. »

Or un nombre croissant de citoyens estime que la technologie règne désormais en maître — sans partage — dans notre monde moderne, et même qu'elle en est devenue une drogue, au sens où celui-ci ne peut plus s'en passer, et en redemande toujours davantage. Ce phénomène apparaît à beaucoup comme d'autant plus regrettable et inquiétant que plus la technologie est sophistiquée, plus il devient difficile de la contrôler.

D'où viennent ces interrogations, cette remise en question de la technologie ?

Quelque bienfaisantes que soient certaines applications de la technologie pour diminuer la peine et la souffrance des hommes, le rythme accéléré auquel elles se développent et leur introduction dans une société humaine insuffisamment préparée à les recevoir ou trop lente à s'y adapter nous semblent aujourd'hui n'être pas sans danger.

Les récents et puissants moyens d'action de la technologie créent pour notre espèce un milieu nouveau entraînant des mutations sociales, économiques et spatiales incontestables. Le danger économique apparaît aujourd'hui à tous. Il résulte d'une ivresse technique et d'un développement trop rapide de l'industrie dans des conditions où le progrès technique, au lieu d'être mis au service de tous les hommes, vient souvent les concurrencer victorieusement.

Cette prise de conscience par l'homme de son aliénation face à certaines formes du progrès technique et son inquiétude quant à l'évolution de la technologie font que science et technologie, bases de la société et de l'activité humaine, sont aujourd'hui mises en cause. Le problème se pose donc de maîtriser les effets inattendus et non désirés que l'évolution de certaines techniques peut induire, et d'orienter la technologie dans des directions acceptables sans étouffer l'innovation.

La société, la technologie et l'État

Si l'on constate aujourd'hui une interdépendance croissante de la science et de la technologie, cela tient sans doute en partie à la nécessité d'une plus importante et plus efficace intervention de l'État en vue de résoudre un certain nombre de contradictions engendrées par un progrès technique trop rapide.

Cette interdépendance se retrouve par exemple dans le récent développement des « sciences opérationnelles », concept introduit par Marcuse puis repris et développé par Jürgen Habermas. Ces sciences « opérationnelles » se différencient de ce qu'on appelle souvent la « big science » ou la science au sens classique du terme par le fait qu'elles donnent naissance dans une période relativement courte à des techniques directement utilisables dans la pratique. Certaines de ces techniques sont des outils de planification ou de gestion créés spécialement pour gérer les contradictions du progrès technique ou, en d'autres termes, pour résoudre les problèmes auxquels l'État a réduit ces contradictions, afin de légitimer son intervention.

Cette forme d'intervention, parce qu'elle se distingue des formes autoritaires de la période pré-industrielle — légitimées par la religion ou d'autres concepts normatifs — et du « laissez-faire » de la période d'industrialisation — légitimé par l' « égalité théorique des chances » —, s'est développée pour éviter des conflits sociaux qui auraient pu naître des contradictions de la société technique. Cette nouvelle forme d'intervention, qui se fonde sur une « conscience technique » de la population, sera appelée ici l' « intervention rationnelle ».

L' « Évaluation Sociale de la Technologie » : un nouveau mode d'intervention de l'État

En même temps que la technique devient ainsi un outil pour l' « intervention rationnelle », elle engendre aussi ses propres contradictions. D'une certaine manière, les risques créés par ces contradictions sont les plus dangereux, puisqu'ils concernent les outils mêmes de l' « intervention rationnelle ». C'est donc un objectif crucial pour l'État que de les éviter : il s'agit en quelque sorte du « cœur » du système social — en tout cas dans les pays industrialisés — puisque, malgré la « conscience technique », ne pas parer aux risques liés à des techniques majeures peut conduire à des situations explosives, voire à une révolte. Illustrons cette hypothèse par un exemple.

Une méthode rationnelle pour résoudre la crise de l'énergie (qui est bien sûr un problème important dû à une contradiction fondamentale du progrès technique) est de trouver de nouvelles sources d'énergie. Pour l'instant, la « meilleure » des sources possibles, c'est-à-dire la plus efficace compte tenu des contraintes politiques, économiques et techniques, semble être en France l'énergie nucléaire. Mais il y a des risques associés à l'utilisation de l'énergie nucléaire. Ne pas éviter — ou mal prévoir — ces risques menace directement la « conscience technique » ; si un accident majeur survenait dans une centrale nucléaire et entraînait un nombre élevé de victimes, la foi en la technique pour résoudre les problèmes de la société pourrait diminuer substantiellement et il deviendrait difficile de légitimer l'intervention de l'État par la science et la technologie. En conséquence, si de tels incidents se répétaient, la « conscience technique » pourrait s'effacer au profit d'une conscience de classe ravivée, qui elle-même pourrait conduire à renverser les forces qui détiennent actuellement le pouvoir en s'appuyant sur la rationalité légitimante de la technique.

La thèse exposée ici est que la méthodologie qui s'est développée aux États-Unis sous le nom de « Technology Assessment » (TA) et qui est actuellement introduite en France sous le nom d' « Évaluation Sociale de la Technologie » (EST), ou « Évaluation des options technologiques », ou encore « Évaluation technologique », a été développée aux États-Unis comme un nouvel outil technocratique permettant d'évaluer les « coûts » et les « bénéfices » sociaux, politiques, économiques et techniques des effets de la technologie afin de les réformer ou de les remplacer par d'autres techniques comportant

moins de risques. L'EST ne reconnaît pas les composantes idéologiques de la science et de la technologie et ne cherche pas à identifier les déterminants sociopolitiques du développement de nouvelles techniques. Elle ne remet pas en cause ce développement et tend à le considérer comme bénéfique en soi, quelles que soient ces techniques. Toutes les définitions qui ont été données de l'EST, aussi bien aux États-Unis qu'en France, confirment qu'il s'agit d'un outil créé pour éviter les risques inhérents à la technique elle-même, mais non pour analyser leur nature et déterminer leur origine.

Comme tend à le montrer une recherche en cours à l'Institut d'urbanisme de Paris, cette fonction première de l'EST pourrait avoir comme conséquence de constituer un instrument de planification des relations inter-industrielles correspondant à la nécessité historique, pour certains secteurs économiques, de gérer les incidences de technologies appartenant à d'autres secteurs sur les ressources nécessaires à la production (ressources en matière première, en fluides naturels, en énergie, en main-d'œuvre, en marchés, en crédits, etc.). Mais si cette hypothèse est vérifiée, elle n'en demeure pas moins une conséquence du rôle initial de l'EST, conséquence cependant inévitable dans un système où les limites de l'intervention de l'État se situent au niveau du respect des lois du marché.

Introduction de l'EST aux États-Unis

La notion de « Technology Assessment » fut présentée à la Chambre des Représentants en mars 1967 par E. Daddario, rapporteur de la proposition de loi HR 6688 « visant à fournir une méthodologie permettant d'identifier, d'évaluer, de faire connaître au public et de gérer les implications et les effets de la recherche appliquée et de la technologie ». Cette loi, qui fut votée, créa l'Office of Technology Assessment (OTA) et l'Office of Technology Assessment Board (OTB), organe directeur de l'OTA, au sein du Congrès américain. Dans un discours prononcé au cours du 90e Congrès en 1968, Daddario donna une définition plus détaillée du concept et expliqua ses intentions concernant « la poursuite de cet axe d'enquêtes pour le pouvoir législatif » : « La possibilité pour la branche législative de notre gouvernement de réaliser l'Évaluation Sociale de la Technologie nous permettra de déployer des ressources bien définies en argent, en facilités et en main-d'œuvre qualifiée dans le domaine de la science et de la technologie afin de profiter au maximum des bénéfices offerts à la société. »

Daddario suppose clairement dans son discours que le TA devrait permettre de limiter les risques liés à la technique afin de maximiser ses effets bénéfiques. Il accepte la croissance technologique comme une donnée essentiellement « bonne » mais reconnaît qu'il faut lui associer des problèmes de « sécurité ». Ces problèmes, qui ne sont pas en général des conséquences directes de la technique mais plutôt des effets secondaires, doivent être résolus par le TA : il semble possible, si on les prévoit, de définir des moyens et des méthodes permettant de les éviter.

Dès lors, le thème central est de réformer la technique et d'éviter les risques qui l'accompagnent : le Technology Assessment est clairement une excroissance de la situation socio-politique — et non pas de notre expertise technique —, et il est très lié à des objectifs politiques.

Le TA (ou l'EST) peut être considéré comme étroitement lié à la planification (au sens américain du terme « planning »), voire même comme son prolongement. D'après Daddario, sa première fonction est de constituer un outil d'aide à la décision : « Le TA a été développé au sein du Congrès comme un outil permettant à ce dernier d'acquérir les moyens de définir une politique de la recherche appliquée et de la technologie, et de prendre suffisamment tôt les décisions sociales mettant en jeu des facteurs techniques. »

Quelle était la raison immédiate qui a poussé à introduire le TA à la fin des années 1960 ? Pourquoi cela n'a-t-il pas été fait plus tôt ? Une réponse a été donnée par le Dr Vary Coates, de George Washington University : « Cela s'est produit à un moment où le public était de plus en plus inquiet des dangers qui résultaient pour sa vie et sa santé de la contamination de l'environnement par les sous-produits des processus chimiques et industriels. De plus, d'importants projets publics, tels que le développement des autoroutes et des aéroports, avaient occasionné un grand nombre de protestations, de manifestations et d'actions judiciaires leur causant des retards coûteux. Dans cette atmosphère, le concept de Technology Assessment gagna l'approbation à la fois des législateurs, des professionnels et des spécialistes universitaires de la politique de la recherche scientifique. »

Il fallait trouver une solution pour prévenir l'aggravation de ces mouvements et éviter ainsi qu'ils ne dégénèrent, solution qui ne pouvait émerger que de l'intérieur du cadre institutionnel. Le TA satisfaisait à cette contrainte : sa mission exploratoire et de prévention au sein de l'organisme de décision institutionnel — le Congrès — n'avait pas pour but le changement mais plutôt un rééquilibrage du pouvoir. Le TA ne menaçait pas la notion de « progrès scientifique et technique » ; ayant ses racines officielles dans les milieux législatifs et académiques, il allait employer les méthodes fondamentales de l' « establishment » scientifique dérivant des valeurs essentielles du libéralisme américain : le processus du TA implique une analyse critique comme fondement d'une décision politique concernant le choix d'une technique. Mais cette critique, correspondant aux besoins du Congrès, avait sa place parmi les mécanismes institutionnels : elle était « utile » à la société et elle était « efficace ». Dans la plupart des cas, le TA tente de trouver les « meilleurs » moyens pour prévoir les effets secondaires d'une technique et trouve donc sa place au sein de ce qu'elle appelle le phénomène technique : « La recherche des meilleurs moyens dans tous les domaines. »

C'est donc désormais au Congrès, en tant qu'émanation suprême du peuple américain, qu'incombe le redoutable honneur de choisir les grandes options technologiques du pays. Le « congressman » qui doit se prononcer tous les jours sur telle innovation technologique a besoin d'informations concernant les effets de son éventuelle application ; c'est précisément la tâche de l'OTA que d'aider le législateur dans sa prise de décision en analysant pour lui les différentes conséquences, directes ou indirectes, de l'utilisation de telle ou telle technologie. Afin d'être la plus objective possible, cette analyse que se veut être le « Technology Assessment » demande l'exploration des effets physiques, biologiques, économiques, sociaux et politiques que peuvent engendrer des applications du pouvoir scientifique.

Créé légalement par le « Technology Assessment Act » en 1972, l' « Office » n'a été opérationnel qu'à partir de janvier 1974 ; son activité n'a cessé de croître depuis, et comme rien ne limite *a priori* la nature des sujets d'étude, de nombreux « assessments » ont été entrepris à la requête du Congrès dans des domaines aussi divers que l'énergie, la nourriture, les océans, les transports, la santé, les communications, les ressources en matériaux, le commerce international.

Corps étranger, récemment introduit dans le bastion législatif, l'OTA demeure vivement critiqué ; on lui reproche une croissance rapide, et une efficacité au-dessous de ses moyens potentiels ; cependant aucun phénomène de rejet n'est encore apparu, car en tant que « boule de cristal » du Congrès, l'OTA semble « reconnu d'utilité publique ».

Apport et limites de l'EST

Si l'Évaluation Sociale de la Technologie est, selon Bereano, « une invention sociale qui facilitera le contrôle approprié des inventions physiques par la société », il est naturel de se demander comment elle procédera pour y parvenir et ce que l'on entend par « approprié ». En ce sens, l'EST rencontre les mêmes problèmes que la planification en général.

Définition de l'intérêt public

Dans les deux cas, en effet, la formulation des objectifs est un élément majeur. « En termes sociaux, la formulation des objectifs dépend du concept d'*intérêt public* et ce concept a une composante normative qui lui est inhérente » (R. A. Carpentier).

Mais l'intérêt public est impossible à définir, malgré de nombreuses tentatives en ce sens. Des critères économiques d'optimalité tels que celui de Pareto ont été

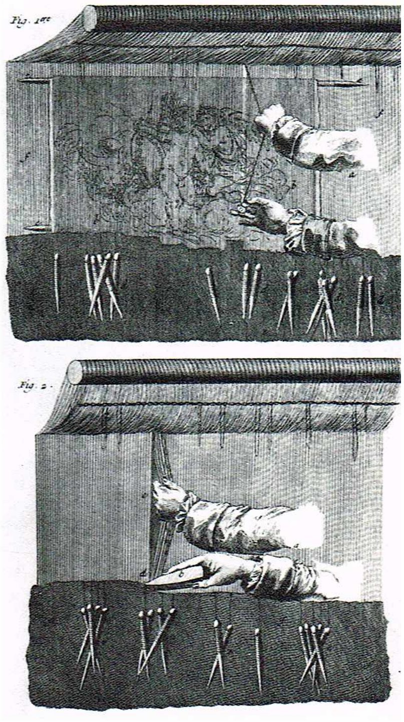

Collection Viollet

▲ *Tapisserie de haute lisse de la manufacture des Gobelins : tracé du dessin et service du peigne.*

▼ *Gravure représentant une ancienne forge.*

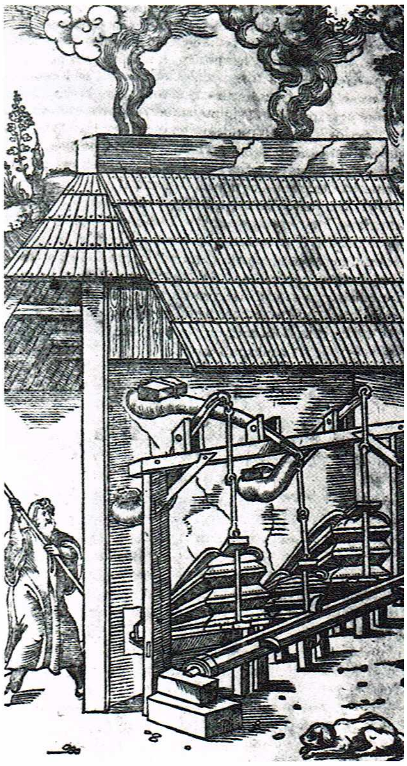

Collection Viollet

proposés, mais tous sont apparus comme subjectifs et favorisant certaines fractions de la société. Ce conflit entre les objectifs publics et les intérêts particuliers a été illustré par un auteur américain, G. Hardin, dans *la Tragédie des communes*. Cet auteur en déduit la nécessité d'une intervention autoritaire pour régler le problème. Une telle solution, bien qu'elle semble être la seule possible, n'est pas compatible avec l' « intervention rationnelle » caractéristique de la société technique. C'est pourquoi l'un des thèmes qui revient le plus souvent dans l'Évaluation Sociale de la Technologie est celui de l'importance relative à accorder aux intérêts en présence. Il ne peut y avoir de solution purement « rationnelle » à ce problème : à un certain niveau dans le processus de décision, il faut inclure, de manière explicite ou non, un jugement de valeur irrationnel. Certains experts de l'Évaluation Sociale de la Technologie, par exemple Brooks et Bowers, ont reconnu cette contrainte : « L'affectation de coûts et de bénéfices à différents groupes est fondamentalement politique, et le but de l'EST est de clarifier les choix politiques plutôt que de fournir une réponse définitive. » Mais quels sont ces choix politiques et est-il possible de les clarifier sans les influencer ? Est-il possible de décrire *tous* les choix politiques possibles associés au développement d'une technique donnée ?

Si la réponse à la deuxième question est négative, — et c'est le cas le plus souvent — la décision de décrire certains choix politiques plutôt que d'autres est elle-même une décision politique. Mais qui est capable de reconnaître réellement ses propres jugements de valeur dans un tel processus de décision ?

EST et participation

Dans la tradition américaine du « libéralisme d'intérêts de groupe », l'Académie nationale des sciences (NAS) résoud le problème en soulignant que « bien entendu, la meilleure garantie d'objectivité peut bien être d'ouvrir le nouveau mécanisme au plus grand nombre possible d'influences contradictoires plutôt que de rejeter toute influence globalement ». Et la manière de réaliser cette condition est « de fournir des canaux bien définis à travers lesquels des groupes de citoyens, des associations privées ou leurs représentants puissent faire connaître leurs vues et, s'ils insistent, être entendus » (*fig.* 1).

Brooks et Bowers ont essayé de rendre la notion de participation à l'EST plus « démocratique » : « La difficulté ne réside plus dans la représentation des groupes qui perçoivent directement la mise en cause de leurs intérêts soit positivement soit négativement, mais en réalité elle provient du peu d'influence qu'ont dans le processus de décision les groupes pour qui les effets sont moins évidents ou plus éloignés dans le temps. »

Il ne s'agit pas ici de condamner les défenseurs de ces propositions concernant l'EST : étant exposés aux conflits d'objectifs inhérents à toute évaluation de politique, ils essayent de les gérer de la manière qui, pour eux, semble la « meilleure », c'est-à-dire la plus « généreuse ». Mais ils ne voient pas que le public, le plus souvent, n'est pas prêt à participer sauf dans des cas très particuliers.

En fait, ce qui est nouveau dans l'EST par rapport aux autres techniques de limitation des risques telles que les études d'impact et la Rationalisation des Choix Budgétaires (RCB), c'est que l'on s'intéresse principalement à l'évaluation des effets sociaux. En cela, l'EST semble être une réponse à l'agitation sociale de la fin des années 1960 aux USA qui tentait de s'attaquer aux racines de la société américaine en prenant la science elle-même comme cible, principalement en raison de son rôle dans la guerre du Viet-Nam. Cela a eu pour résultat de modifier les priorités dans l'orientation de la politique de la science correspondant au déclin des objectifs militaires et spatiaux et au regain de l'importance des objectifs sociaux.

L'EST peut, en partie, être considérée comme une tentative de récupération des revendications sociales de cette crise. Elle permet d'éviter les conflits causés par la crainte d'une technologie perçue comme « mauvaise » voire « incontrôlée » (A. Staropoli).

C'est ainsi que le besoin de « participation », souvent mentionné dans l'EST, rejoint la notion humaniste d'une « démocratie participante » du « Port Huron Statement » en le faisant entrer dans le cadre des institutions libérales. L'EST prend en compte un certain nombre de facteurs, qui ne le sont pas habituellement dans un programme technologique. Elle constitue un pas vers le contrôle de la production et du développement de la technologie par l'État.

▼ *Figure 1 : schéma d'un processus d'Évaluation Sociale de la Technologie intégrant la participation des groupes concernés (d'après Eberhard K. Jochem dans* Principes méthodologiques pour l'Évaluation Sociale de la Technologie, *O.C.D.E., 1975).*

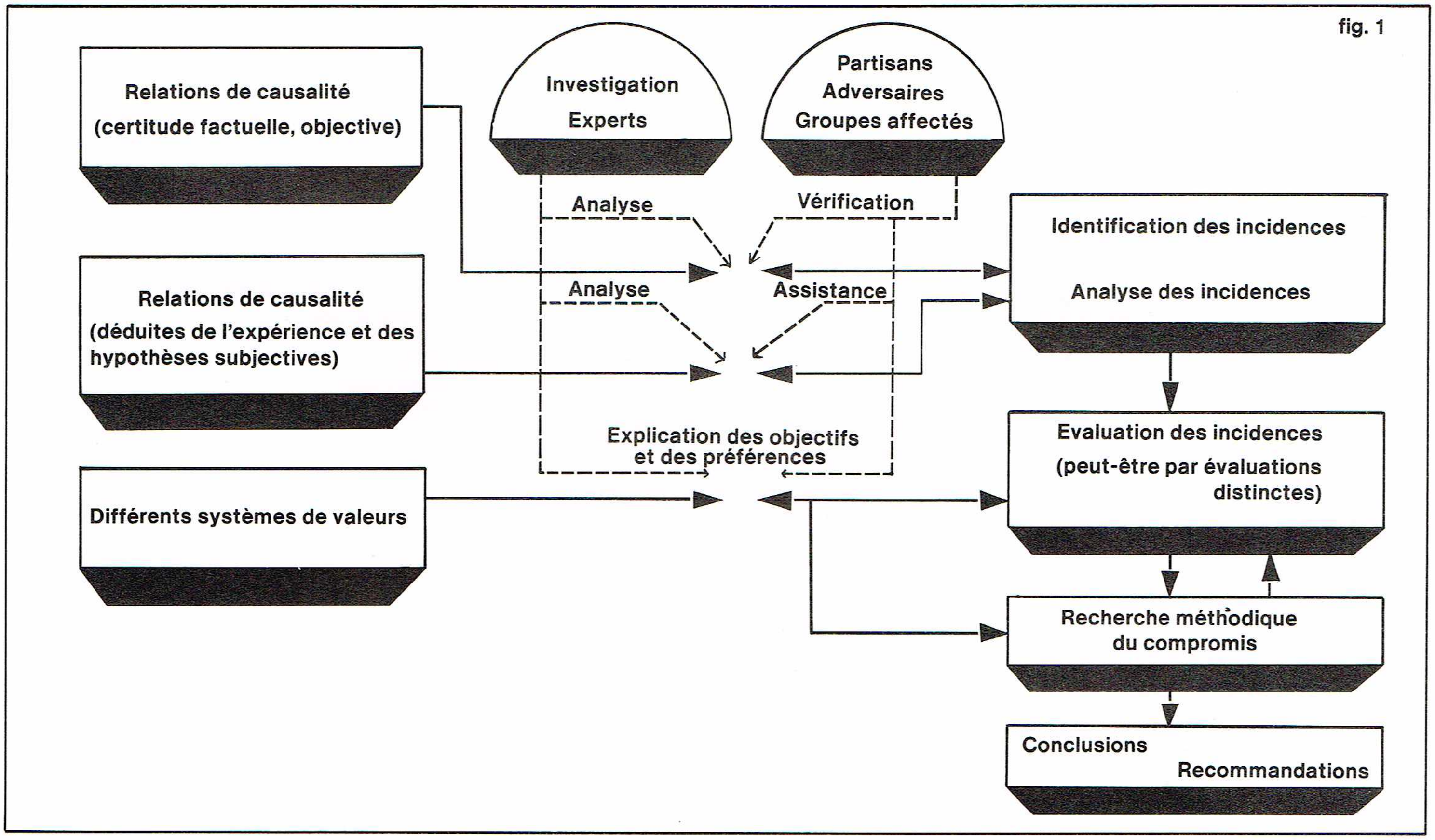

Apport méthodologique de l'EST

En tant que processus de contrôle politique, l'EST nécessite la création d'une méthodologie pour la prévision, l'analyse et l'évaluation, bien que très souvent cette dernière étape soit laissée à la discrétion du lecteur. Ainsi, dans la pratique, l'EST ne peut être utilisée sans l'aide d'experts. Quelle est la différence entre ces experts et les experts traditionnels ?

Un certain nombre d'inventaires ont été faits des études d'EST. Certains d'entre eux constituent en fait de véritables « évaluations » de l'Évaluation Sociale de la Technologie. Ils montrent que, bien que l'EST ait apporté des méthodes d'analyse plus « méthodiques », plus « efficaces », ces méthodes n'en sont pas moins des outils existants utilisés depuis bien longtemps. Des outils d'aide à la décision tels que la Rationalisation des Choix Budgétaires (RCB), l'analyse de systèmes, la recherche opérationnelle, la méthode de Delphes, etc. peuvent tous être utilisés dans une EST. L'utilisation des ordinateurs a permis à ces outils de devenir extrêmement sophistiqués. Dans une EST, ces méthodes sont combinées et étendues parce que les problèmes soulevés avant que l'analyse puisse être faite sont plus complexes, comme le montre l'étude de la MITRE Corporation (Martin V. Jones : *Technology Assessment Methodology*, MITRE, 1971) :

« Parmi les diverses méthodes et techniques utiles à l'EST qui ont été recensées par Joe Coates — et d'autres —, on peut citer la méthode de Delphes, l'analyse d'impacts croisés, les arbres de pertinence (chaînes d'impact), les matrices de pertinence, l'extrapolation, l'analyse morphologique, l'analyse de systèmes, d'autres techniques de modélisation, de simulation, les scénarios et les jeux, les techniques d'enquêtes sociales, les techniques de participation et les processus contradictoires. »

Il est nécessaire (bien que discutable) de distinguer entre les EST dont le contenu ne s'étend pas au-delà de l'énumération de tous les effets de second et troisième ordres, et celles qui comprennent en plus une évaluation de ces effets.

La première catégorie est « plus neutre » en ce sens qu'elle ne fait pas clairement la différence entre les « bons » et les « mauvais » effets. Mais, surtout, son orientation correspond à un processus d'évaluation qui tend vers un travail d'experts en méthodologie de l'EST, à l'instar de certains processus de planification (transports urbains, par exemple), dans lesquels plusieurs alternatives sont présentées « objectivement » aux instances chargées de prendre les décisions. Comme pour d'autres techniques de planification, les évaluateurs « technologiques » essaient de paraître scientifiquement « sérieux » et « objectifs », et passent plus de temps à développer des techniques « bonnes » et « efficaces » pour améliorer la méthodologie de l'EST qu'à l'analyse proprement dite.

Les équipes qui ont tenté de conduire une EST du second type, c'est-à-dire incluant une évaluation des effets de la technique et la proposition de politiques appropriées relativement à la technique correspondante, se sont vite rendu compte de la rareté des outils disponibles pour un tel travail. Elles se sont trouvées directement confrontées au problème de la définition de l' « intérêt public » lorsqu'elles n'ont pas contourné ce problème en utilisant une forme d'analyse coûts-bénéfices, qui traduit de la manière la plus « technocratique » les externalités en coûts économiques et rationalise ainsi les effets sociaux en termes financiers. Si les valeurs sont explicitées — mais nous avons vu que c'est rarement le cas — et si les choix politiques sont énoncés clairement, cela diminue le plus souvent leur audience et leur force de persuasion, car le rapport de l'étude apparaît alors comme l'expression des idées particulières du groupe politique correspondant.

Les experts défendent leur point de vue en insistant sur le fait qu'en raison de l'impossibilité de changer le monde du jour au lendemain, il vaut mieux s'attacher à le réformer plutôt que d'attendre à ne rien faire : « Une plus grande tragédie consisterait à rester sur la touche en proclamant "que sera sera" et à ne rien faire. La descente aux enfers les yeux ouverts n'est peut-être pas confortable pour l'homme, mais elle est plus facile à défendre que celle d'un aveugle sur un tobbogan. » L'auteur de ces propos, Schooler, est un fervent défenseur de l'EST, en même temps qu'il se proclame ennemi résolu de la technocratie. Résumant les objectifs des groupes qui réalisent les EST, il ajoute : « Nous pouvons au moins espérer que nous anticiperons les effets non voulus, que nous évaluerons sérieusement les questions politiques et morales fondamentales qui seront soulevées et que nous poursuivrons des politiques fondées sur la prise en compte des "plus" et des "moins" de chaque alternative. »

L. Freed - Magnum

▲ ***Manifestation de vétérans contre la guerre du Vietnam à Washington.***

Comme l'indique Staropoli : « Il est donc clair que l'EST ne menace ni l'idéologie dominante ni les objectifs politiques fondamentaux ». On peut ajouter que cette méthodologie ne remet pas en cause l'importance des groupes de pression dans la politique américaine et qu'en plus, elle a préservé, en tout cas aux États-Unis, le cadre institutionnel des études techniques tout en essayant de faire participer les associations de citoyens aux décisions politiques concernant la technologie. De fait, aux États-Unis, on a pu assister à une institutionalisation complète de l'EST. L'OTA (Office of Technology Assessment), sous l'égide de E. Daddario et de J. F. Coates, a été créé comme un outil pour le Congrès, avec un personnel important et un budget d'environ 4 millions de dollars.

L'EST est devenu un moyen de combler le décalage — « gap » — existant au sein du libéralisme d'intérêts de groupes américains : « Le libéralisme s'oppose à la planification et ne reconnaît que le marchandage ("bargaining") [T. Lowi]. » L'EST est clairement un remède politique au marchandage entre l'État fédéral et les intérêts de groupe, y compris les groupes de consommateurs. L'intérêt que le gouvernement américain a montré pour l'EST en l'institutionalisant et en allouant d'importantes sommes d'argent à des évaluations particulières montre clairement qu'il s'est rendu compte des avantages d'un tel remède.

Pour gérer de manière « rationnelle » les dysfonctions de la société technique, des « techniques intellectuelles » (terme introduit par Dutton et Starbuck) ont donc été mises au point. A leur tour, ces méthodes ont été de plus en plus critiquées et le rôle des experts remis en question. Cette tendance s'est cristallisée à la fin des années 1960 aux États-Unis, et l'EST a constitué un effort pour la récupérer ainsi que la notion de « société démocratique », en prenant en compte puis en gérant les effets sociaux de la technique. C'est ainsi que l'EST est devenue un nouvel outil pour l' « intervention rationnelle », en évaluant et en évitant les risques inhérents à la technique. Ce rôle est représenté de manière symbolique par l'importante catégorie des EST « orientées sur un problème » ainsi qu'il est mentionné dans un rapport de la National Academy for Engineering. En raison de la rapidité avec laquelle elle a été introduite — rapidité due à l'urgence des problèmes à résoudre —, l'EST ne possède pas toujours sa propre « science opérationnelle » à laquelle elle pourrait se référer. C'est ainsi qu'au cours de son développement, l'EST a repris à son compte des méthodes appartenant à des techniques existantes telles que l'analyse de systèmes ou la recherche opérationnelle, et les a adaptées à ses propres besoins. Cependant, en définitive, il s'est ainsi créé — *a posteriori* — une « science opérationnelle » propre à l'EST, ce qui semble vérifier l'hypothèse d'Habermas sur l'interdépendance des sciences et des techniques.

Mise en œuvre de l'EST

Définition et nature de l'EST

De nombreuses confusions quant à l'interprétation de la notion d'« Évaluation Technologique » sont dues à des problèmes de définition; il arrive souvent que l'on se méprenne sur ce qu'est vraiment l'Évaluation Technologique, que l'on définisse ses buts de bien des manières, enfin que l'on confonde l'Évaluation Technologique avec les études classiques de nouvelles applications techniques et les études de marché. Bien que, par certains points, ces analyses ressemblent à des Évaluations Technologiques, elles en diffèrent par nombre d'aspects importants; ce qui les distingue, c'est que l'Évaluation Technologique précise dans quelle mesure l'innovation proposée est désirable vis-à-vis des besoins immédiats et qu'elle explore systématiquement ses conséquences à plus long terme.

A travers toutes les définitions qui ont pu être données de l'Évaluation Technologique, se dégage l'effort : d'appréciation du progrès technique, d'analyse systématique de systèmes socio-techniques, de recherche des incidences sociales, d'étude d'ensemble des avenirs technologiques et sociaux dans un processus d'analyse — prévision — évaluation des avenirs technologiques.

François Hetman dans un ouvrage publié par l'O.C.D.E. : *la Société et la Maîtrise de la technologie,* dégage les trois principaux domaines d'action de ce processus :

— l'observation et l'élimination des effets indirects négatifs des technologies existantes et la mise au point de nouvelles variantes socialement acceptables;

— l'examen critique et le choix des nouvelles technologies découlant de résultats scientifiques déjà connus ou susceptibles d'être obtenus;

— la nécessité d'une recherche originale pour la mise au point de nouvelles technologies désirables eu égard aux changements dans les fins collectives et aux priorités futures.

Il insiste sur le fait que l'Évaluation Technologique :

— porte sur l'avenir mais n'est pas une simple prévision, analyse les conséquences sociales du changement technologique;

— devrait être faite avant d'appliquer une technique nouvelle, afin de mettre en valeur les avantages et les effets secondaires.

On peut noter qu'aux États-Unis, les Évaluations Technologiques ont presque toujours porté de manière rétrospective sur une technique déjà mise au point et dont les conséquences étaient tangibles ou prévisibles.

Par ailleurs, la collaboration entre « innovateurs » et « évaluateurs » est une condition nécessaire à la validité de l'acte d'Évaluation Technologique qui doit être pensé de façon interdisciplinaire et ne peut en aucun cas se trouver sous la responsabilité d'un groupe de planificateurs. Les équipes d'Évaluation Technologique doivent être déterminées par l'environnement social, économique, juridique et politique dans lequel elles opèrent, afin d'être capables de rechercher systématiquement les incidences de la technologie sur les aspects matériels, économiques, sociaux et politiques de l'existence.

Enfin J. F. Coates, intervenant comme expert auprès de l'O.C.D.E., a indiqué, par quelques considérations et propositions de caractère général, quelle était sa conception de l'EST. Nous la résumerons en trois points.

Définition et objectif de l'EST

L'Évaluation Sociale de la Technologie :

— peut être définie comme une étude systématique des incidences que peuvent avoir sur la société l'introduction, la diffusion et la modification d'une technologie et, en particulier, des effets inattendus, indirects et éloignés dans le temps;

— est un instrument d'analyse politique ou un outil de prise de décision. On peut certes concevoir ses buts, ses techniques et ses méthodes comme fournissant des *inputs* (entrées) systématiques dans un processus plus large de décision politique et économique, mais le point essentiel demeure sa relation avec la prise de décision;

— devrait couvrir la totalité des conséquences prévues et imprévues; cependant, il est particulièrement important de mettre l'accent sur les effets dérivés, convergents, synergétiques et accidentels, éloignés dans le temps et accidentels, car, à long terme, ces conséquences peuvent devenir dominantes.

L'EST et la prise de décision

Les décisions sont prises de toute façon, mais les décisions fondées sur l'information sont généralement meilleures que celles qui ne le sont pas ou qui sont fondées sur une information insuffisante.

D'autre part, dans le passé, les décideurs politiques ont essayé de construire sur des certitudes. Or, dans le contexte contemporain, caractérisé par des technologies à développement et, souvent aussi, à rythme de changement rapides entraînant de multiples conséquences, les décisions politiques doivent être prises aussi bien à partir des certitudes que des incertitudes.

Nature de l'EST : un art

L'EST s'apparente à un art. Ce n'est ni une science, ni une discipline technique, ni une sous-division de la théorie économique, de la science politique ou du droit. Tout en puisant dans toutes ces disciplines, chaque évaluation doit correspondre à la logique intrinsèque de la technologie étudiée ainsi qu'au cadre de prise de décision dans lequel elle est réalisée. Pour une bonne part, les Évaluations de la Technologie sont des activités créatrices. Il ne faut donc pas y voir un effort pour trouver des formules, des modèles..., mais plutôt un art où l'unité côtoie la diversité et qui dépend du talent, de l'expérience et du perfectionnement continu des compétences. Cela vaut d'ailleurs aussi bien pour l'exécution que pour l'appréciation ultérieure de l'EST.

C'est pourquoi, il ne peut exister, pour les EST, de normes universelles relatives à l'ampleur, au détail, au caractère exhaustif de la méthodologie, à la mise à la portée du public, et enfin à l'objectivité et à la fiabilité.

Classification des EST

En raison même de leur variété, il va de soi que l'on peut classer les EST selon des méthodes très différentes. Parmi celles-ci nous en choisirons deux qui nous semblent particulièrement éclairantes sur la diversité des classifications possibles.

Première méthode

Cette méthode, préconisée par F. Hetman dans l'ouvrage déjà cité, se présente sous forme d'une typologie faisant référence essentiellement aux différents cadres méthologiques utilisables pour mener une EST.

Cette typologie donne un aperçu des différentes formes d'EST envisageables, depuis l'Évaluation ne couvrant qu'un seul aspect jusqu'à l'Évaluation Sociale exhaustive d'une Technologie.

● **Comparaison de performances techniques :** elle consiste essentiellement à hiérarchiser divers schémas envisagés en matière de développement technologique. On examine et on compare entre eux les performances, les avantages, les inconvénients et les aspects discutables de chaque variante, en fonction de considérations presque exclusivement techniques.

● **Prévisions d'accompagnement :** ce sont des projections d'une réalisation technologique comportant en outre une évaluation de ses aspects positifs tels qu'on les voit compte tenu de l'état présent des règles de l'art dans le domaine technologique correspondant. Les prévisions d'accompagnement ne mettent pas en question le bien-fondé d'une réalisation technologique en cours ou envisagée.

● **Efficacité de l'investissement :** elle correspond pour l'essentiel à des études comparatives coût-efficacité ou coût-avantage qui retiennent les développements technologiques les plus prometteurs dans un domaine déterminé, en vue de mettre en évidence la variante la plus avantageuse. Les données techniques sont traduites en termes économiques et exprimées en unités monétaires.

● **Calcul du coût économique global :** c'est un complément aux études de marché, fondé sur l'analyse des échanges interindustriels de tous les produits et procédés, et qui identifie en outre les effets indirects du stade de fabrication que l'on quantifie sous forme d'éléments de coût entrant dans le prix de vente.

● **Tableaux des incidences sur l'environnement :** ce sont des évaluations particulières exigées par la législation américaine sur la politique de l'environnement, et dont le but est de s'assurer que l'agrément et les qualités de l'environnement jusqu'ici non quantifiables seront pris correctement en considération dans la décision au même titre que les facteurs économiques et techniques.

● **Évaluation techno-économique :** elle constitue une évaluation détaillée des innovations technologiques. Elle accorde beaucoup d'attention à l'examen des caractéristiques matérielles de ces innovations et à la prévision des options technologiques qui pourront être offertes. Les coûts et avantages sont confrontés sur la base d'éléments essentiellement techniques et économiques.

● **Calcul du coût et de l'avantage techno-social :** ce sont des études d'avantages comparatifs de plusieurs projets ou options techniques ayant une composante sociale très marquée. Les caractéristiques techniques et les coûts économiques globaux sont évalués dans un premier temps. Ensuite, on repère les zones d'incidences sociales, et l'on calcule les coûts et les avantages sociaux à partir d'une échelle d'appréciations qualitatives.

● **Analyse multidisciplinaire de certains aspects déterminés :** il s'agit d'une évaluation exhaustive des coûts et des avantages propres à un projet ou à une option technique dont les dimensions et les caractéristiques ont été clairement tracées. On soumet un projet bien individualisé à une analyse multidisciplinaire afin d'identifier et de prendre en compte tous les aspects sociaux que ne fait pas apparaître l'analyse coût-avantage des facteurs primaires d'ordre matériel et économique.

● **Évaluation multi-incidences :** recherche de grande ampleur sur les problèmes posés par un certain développement technologique, où l'on s'occupe de tous les aspects que l'on estime pertinents et de toutes les incidences que l'on est capable de discerner. C'est une analyse ouverte qui n'est pas axée sur un projet clairement défini ou sur des impératifs ou des contraintes préalables. Elle se concentre sur une investigation approfondie des possibilités et des conséquences d'un développement ou d'une option technologique.

● **Évaluation Technologique exhaustive :** elle correspond à l'Évaluation Technologique au sens plein du terme. Elle s'efforce d'englober tous les aspects qui méritent d'être retenus et toutes les catégories d'incidences sociales d'une innovation potentielle. C'est une exploration ouverte de toutes les possibilités que l'on peut discerner dans une technologie et une interprétation d'ensemble de ses implications et de ses conséquences eu égard à tous les secteurs et sous-systèmes sociaux concernés.

Deuxième méthode

La deuxième classification est très différente. Son auteur, J. F. Coates, suggère l'utilisation d'une représentation matricielle permettant un croisement entre la nature de la technologie et le point de départ de l'évaluation (voir *tableau* I). Pour comprendre ce tableau, il convient de noter que le mot « technologie » y est pris dans une acception beaucoup plus large que précédemment, puisque l'auteur le définit comme étant « l'application de l'ingéniosité et des sciences de l'homme à la réalisation des objectifs humains ».

L'utilisation du concept de « technologie sociale » l'amène à faire plusieurs observations :

— les incidences indirectes d'une technologie sociale, telle que la poste, la conduite à droite ou la conscription générale, peuvent être importantes au second degré ;

— une grande partie du système de contrôle de notre société, sous la forme d'impôts, de lois, de prescriptions, etc., est l'incarnation de technologies sociales ;

— ces domaines n'ont guère été considérés jusqu'ici comme se prêtant à un effort méthodique d'invention. Ils souffrent donc d'une absence de recherche, d'analyse, d'évaluation et d'investigation systématiques ;

— le rôle des inventions sociales liées au contrôle social tendra à devenir relativement plus important dans une société de plus en plus ouverte et de plus en plus complexe.

Tableau I

Exemple de classification des études d'Évaluation Sociale de la Technologie

Technologie	Point de départ de l'évaluation		
	Problème	**Technologie**	**Projet**
Physique	Sources d'énergie	Énergie géothermique	Développement de ressources dans la vallée ABC
Biologique	Alcoolisme	Produits de lutte anti-alcoolique	Programme de lutte anti-alcoolique dans la ville XYZ
Sociale	Conduite en état d'ébriété	Moyens de traitement	Programme de traitement dans la ville M

▲ ***Tableau I : exemple de classification des études d'EST (d'après J. F. Coates dans* Principes méthodologiques pour l'Évaluation Sociale de la Technologie, *O.C.D.E., 1975).***

En ce qui concerne les lignes du tableau, les évaluations ayant pour point de départ :

— la *technologie*, répondent à la question : quels sont les effets sur la société d'une technologie spécifique (vidéo-téléphone, télévision par câble, satellites artificiels, etc.) ?

— un *projet*, sont centrées sur une application spécifique d'une technologie donnée, telle que le pipe-line trans-Alaska, le canal Rhin-Rhône, la route trans-amazonienne ;

— un *problème*, sont orientées vers les problèmes de la société auxquels la technologie est censée apporter une solution. Il faut d'ailleurs noter que, jusqu'à présent, les études exhaustives ayant pris un problème comme point de départ sont encore relativement peu nombreuses par rapport aux deux autres catégories.

Domaines d'application de l'EST

On conçoit intuitivement que le champ d'application de l'EST est quasiment illimité. Cependant il est bien évident qu'une Évaluation Technologique n'est en fait engagée qu'en référence avec les résultats que l'on attend d'elle, c'est-à-dire, en d'autres termes, avec son utilité.

F. Hetman suggère, dans son ouvrage *la Société et la Maîtrise de la technologie*, que l'EST est susceptible de remplir cinq fonctions.

M. Godfrey - Magnum

▼ ***Construction du pipe-line trans-Alaska.***

Surveillance des effets négatifs des technologies existantes

Ce n'est pas seulement lors de la révolution industrielle que l'homme s'est mis à intervenir dans l'ordre naturel comme le rappelle A. C. Sjoerdsma :

« Le fait est que l'homme, depuis le commencement des temps, n'a cessé de se mêler de la nature. Le bon sauvage est un mythe. Depuis la préhistoire, l'homme a éprouvé l'hostilité de la nature, et c'était de sa part un désir naturel, et même un devoir moral, que de chercher à améliorer une condition qui, auparavant, paraissait être inévitable, mais s'est révélée ensuite capable de perfectionnements. Des limites intrinsèques aux connaissances et aux capacités de l'homme, il résulte qu'il court certains risques en cherchant à progresser et en s'efforçant d'appliquer les résultats de cette recherche. C'est cependant à ses avantages, et non à ses inconvénients que se mesure une découverte scientifique ou technique. Les virtualités positives doivent être exploitées, cependant que les virtualités négatives peuvent rester en friche. »

La première application de l'EST est donc, assez logiquement : « l'observation et la surveillance des effets indirects négatifs des technologies existantes. Dans la plupart des cas, l'enchaînement de ces effets se présente comme un processus de causalité par rétroaction qui opère de façon cumulative à moins que l'on agisse délibérément pour l'arrêter ou l'orienter différemment. Alors qu'à l'origine les causes des effets indirects paraissent revêtir un caractère essentiellement matériel, ils deviennent "négatifs" parce que certains groupes de la société s'aperçoivent qu'ils menacent leur intégrité : la destruction du milieu physique va souvent de pair avec celle du milieu social, bien que cette dernière puisse résulter d'effets induits découlant de technologies qui ne sont pas dangereuses pour le milieu physique. Quel que soit son point de départ, l'étude des effets indirects négatifs de la technologie conduit nécessairement à approfondir l'évaluation, lorsque l'objectif ne se limite pas à donner un coup d'arrêt temporaire mais consiste à améliorer la situation et à la changer profondément. »

A cet égard, l'EST doit aider en particulier à mieux connaître :

Les seuils de sensibilité de l'opinion

Lorsque l'on étudie les conséquences sociales d'une technologie, il faut être conscient « les seuils de perception du public peuvent revêtir beaucoup plus d'importance que les seuils physiques, car tout en étant plus lents à se manifester, ils sont beaucoup plus prompts à susciter des réactions qui font boule de neige ». C'est pourquoi « les structures sociales et politiques doivent être traitées, non comme des paramètres, mais comme des variables susceptibles d'influer sur les évolutions technologiques par des actions irrégulières d'intensités diverses ».

Les interdépendances entre phénomènes technologiques et phénomènes sociaux

Le fait de rechercher une nouvelle forme de rationalité sociale, englobant l'étude simultanée et prospective de tous les aspects qui peuvent mériter d'être retenus, conduit à élargir immensément le champ des interdépendances entre phénomènes technologiques et phénomènes sociaux. Non seulement les divers secteurs de l'environnement humain sont liés entre eux mais, d'après William Kapp, « l'interaction des secteurs (ou systèmes de relations) socio-économiques, des secteurs physiques et des secteurs biologiques est beaucoup plus complexe et beaucoup moins explorée que le fonctionnement de n'importe lequel des divers systèmes que les disciplines universitaires traditionnelles ont isolés pour les étudier séparément en fonction de leurs objectifs particuliers ».

Par exemple, toujours selon le même auteur, « la qualité de notre environnement, comme en fait celle de notre société, constitue toujours une totalité ; autrement dit, les effets réels sous forme de dommages causés à la santé et à la vie humaine et les désagréments effectivement ressentis du fait de telle atteinte à l'environnement sont toujours fonction des effets combinés de l'ensemble des sources d'agression ».

En définitive, l'interdépendance n'est pas seule à jouer, car il s'y ajoute des effets d'interaction et de renforcement (ou d'amortissement) réciproques, si bien que, comme le note F. Hetman, « les états de la société correspondant à une technologie donnée ne sont pas un simple agrégat, mais plutôt une intégrale, ce qui rend toute analyse particulièrement malaisée ».

Les incidences inattendues sur les groupes sociaux

Une EST doit, dans la plupart des cas, se dérouler sur la base de connaissances incomplètes car les lois d'intégration des phénomènes sociaux sont très largement inconnues. Il est donc souvent opportun d'entreprendre une étude préliminaire pour identifier tous les facteurs susceptibles d'éventuels effets indirects et d'en choisir, ensuite, un certain nombre pour les évaluer en détail.

Aide à l'amélioration de la qualité de l'environnement

Les problèmes concernant la politique de l'environnement vont depuis des visions de catastrophe planétaire jusqu'aux inquiétudes causées par telle usine particulière et aux soucis vécus quotidiennement par les consommateurs.

C'est pourquoi l'Évaluation Technologique appliquée à l'environnement peut être envisagée à plusieurs niveaux :

— les éléments dont se compose l'environnement : eau, air, terre, utilisation des sols ;

— les entités économiques : usine, branche d'industrie, économie régionale ;

— les zones géographiques : au niveau local, régional, national ;

— les groupes sociaux : producteurs, consommateurs, administrations.

D'autre part, parmi les méthodes à caractère général qui sont utilisées dans ce domaine, on peut citer :

— le choix des instruments d'optimisation ;

— la confrontation par voie de matrice des causes de dégradation de l'environnement et des niveaux de qualité de l'environnement ;

— l'élaboration de « schémas » de l'environnement ;

— la démarche inspirée par une optique interventionniste ;

— le système d'évaluation de l'environnement (*fig.* 2) ;

— la matrice d'évaluation des incidences écologiques.

F. Hetman fait très justement remarquer : « En un sens, l'Évaluation Technologique appliquée à l'environnement est l'inverse de l'évaluation d'une technologie naissante, car au lieu de partir de l'instrument technique et d'en explorer les répercussions indirectes, on part d'un inventaire des impacts et on remonte jusqu'aux causes d'ordre technologique pour repérer les processus qui provoquent des effets nocifs et passer ensuite aux actions correctrices. »

Recyclage des ressources

Il est certain également que « l'Évaluation Technologique trouvera très largement à s'utiliser dans le domaine du recyclage, tant en ce qui concerne les résidus que la récupération des ressources non renouvelables, car ces aspects de la technologie ont été jusqu'ici négligés. L' "économie d'obsolescence" ou de "gaspillage", comme on l'appelle quelquefois, touche maintenant à sa fin, à mesure que l'homme devient de plus en plus conscient que les ressources non renouvelables ont des limites et peuvent rapidement s'épuiser, si on continue à les utiliser comme autrefois de manière extensive et rapace. Dans le cas des résidus, les études d'évaluation se centreront sur l'examen approfondi des déchets ou des polluants, de leurs circuits de diffusion, et des réservoirs ou dépotoirs dans lesquels ils s'accumulent. De son côté, la gestion des ressources naturelles réclamera un inventaire permanent et un réexamen scientifique des réserves, ainsi qu'une Évaluation Technologique continue qui servira de base aux changements dans les méthodes de production et à la mise au point de nouveaux procédés de recyclage ».

Tri des connaissances scientifiques et des résultats de la Recherche et Développement (R.-D.)

L'exploration de nouvelles possibilités technologiques offertes par les connaissances que l'on possède déjà et par les résultats actuels des activités de R.-D. représente un important champ d'application de l'EST.

fig. 2

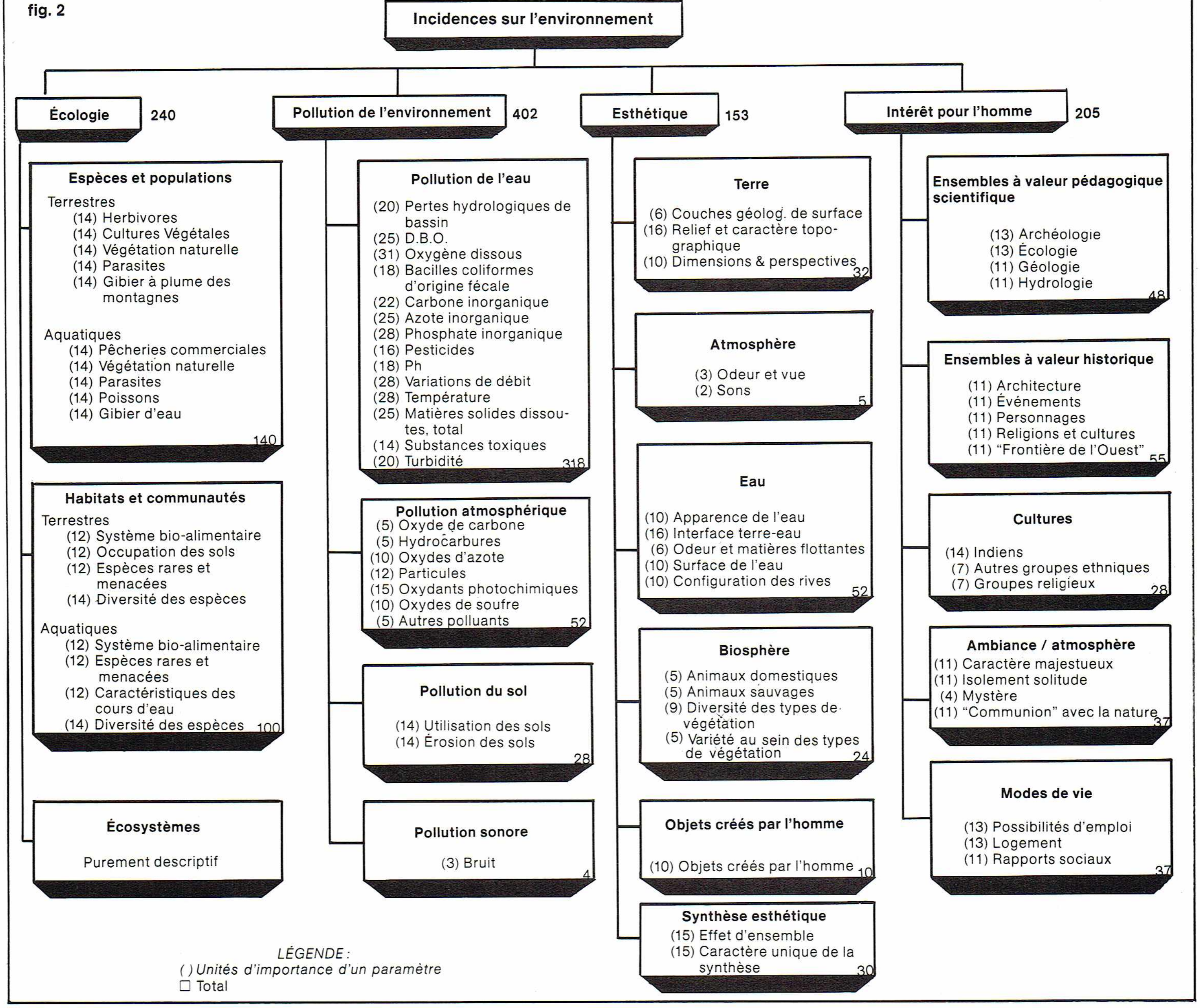

▲ *Figure 2 : schéma d'un système d'évaluation de l'environnement (d'après* **Environmental Evaluation System for Water Resource Planning Bureau of Reclamation,** *Ministère américain de l'Intérieur. Laboratoires Battelle de Columbus, janvier 1972 ; dans* **la Société et la Maîtrise de la Technologie,** *O.C.D.E., Paris, 1973).*

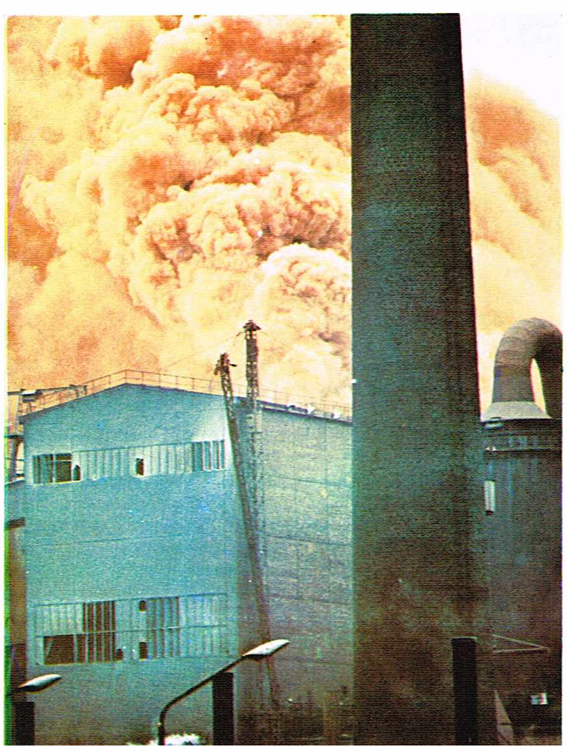

R. Burri - Magnum

◀ *Exemple de pollution atmosphérique d'origine industrielle.*

En effet, il est nécessaire d'examiner systématiquement les découvertes scientifiques recensées pour pouvoir choisir les technologies potentielles ayant un effet global socialement « bénéfique ». Cette procédure de dépistage vise d'ailleurs en même temps à empêcher que naissent de « mauvaises » technologies, car elle permet d'identifier des solutions qui peuvent se révéler nuisibles pour la société si elles se diffusent largement.

Selon F. Hetman, ce dépistage peut être envisagé comme un processus en trois stades :

— recherche des liaisons entre découverte scientifique et tendances technologiques ;

— recherche des liaisons entre tendances technologiques et répercussions sociales lointaines ;

— examen critique des choix techniques potentiels en s'aidant de toutes les catégories pertinentes de critères autres que purement économiques et techniques. C'est un exercice où il faut faire preuve d'une grande imagination pour tenir compte d'incertitudes particulièrement grandes et difficiles à réduire.

L'introduction de nouvelles technologies désirables

Il convient désormais d'aborder de façon nouvelle les problèmes de la technologie et de la société. « Dans cette optique, la technologie n'est plus considérée

comme une "fatalité" ou comme une source primordiale de changement qui s'imposerait à l'humanité par une espèce de force immanente et mystérieuse » (F. Hetman). On l'apprécie alors en tant que facteur social que l'on peut orienter vers des fins désirables et, en conséquence, elle n'est plus une variable indépendante du modèle macro-social mais une variable dépendante dans le schéma d'ensemble de la société.

Cette concentration de l'attention sur les objectifs signifie que pour les centres de décision, le problème majeur consiste dorénavant à définir les finalités de la société. Cette étape apparaît comme absolument décisive afin de permettre un « regroupement logique des programmes socio-économiques et des besoins technologiques qui en découlent ».

Établissement des priorités entre les sujets d'Évaluation

Quels sont les critères susceptibles de guider le choix parmi les nombreux sujets pouvant donner lieu à une Évaluation Technologique? Il convient avant tout de ne pas oublier qu'une EST est très souvent orientée vers un objectif politique : les critères d'établissement des priorités doivent donc le cas échéant tenir compte de cette donnée essentielle.

J. F. Coates (dans *Principes méthodologiques de l'Évaluation Technologique*) suggère de prendre en compte dix-huit critères applicables, à des degrés divers, dans la plupart des cas.

Nous ne développerons ci-après que les principaux.

Les possibilités de réalisation

Toutes les études potentiellement utiles ne sont pas nécessairement réalisables parce qu'elles dépassent soit nos possibilités, soit nos compétences actuelles. Le degré de possibilité de réalisation est donc très important. Il peut être nécessaire de procéder à une courte étude préliminaire pour déterminer la possibilité de réalisation.

Le budget

Une étude multidisciplinaire exhaustive d'une technologie importante qui nécessite une large gamme d'*inputs* peut demander le concours de six à trente spécialistes pendant une période de temps allant de quelques semaines à deux ans. Par conséquent, le personnel et les fonds nécessaires doivent être examinés en les comparant avec les emplois de substitution. Comme indication empirique, on peut citer le coût moyen d'un spécialiste/année qui est de 45 000 dollars aux États-Unis. Cette somme comprend le salaire, le coût du personnel auxiliaire, les fournitures courantes, les frais généraux, etc. Il s'ensuit qu'il doit y avoir un rapport d'équilibre entre l'étude envisagée et le budget disponible.

Les données

Il arrive souvent que les données nécessaires à l'étude ne sont pas disponibles ou ne le sont guère sous une forme directement utilisable. Ainsi, la mise au point de données originales ou la réorganisation des données disponibles peut constituer une tâche par trop difficile et empêcher la réalisation d'une étude réellement utile.

La redondance

L'organisme qui lance l'étude d'évaluation devrait savoir si le sujet à l'étude a déjà été traité quelque part. Peut-on construire sur un certain acquis? Comme on le verra plus loin, beaucoup de technologies dont l'évaluation a été recommandée par différents penseurs ont fait ou font l'objet d'une Évaluation Technologique. Il est important que le décideur en soit informé, non seulement pour préserver ses ressources, mais aussi pour éviter tout effet de surprise.

La sensibilité politique

Il n'est guère possible de traiter, dans une institution ou un cadre institutionnel donné, tous les problèmes importants au même moment car les coûts politiques — du simple fait de soulever la question, sans parler du risque politique des suites possibles — peuvent être par trop élevés. Une refonte de la Constitution pourrait en être un exemple extrême mais particulièrement important. L'élimination ou la transformation d'un grand organisme gouvernemental présente un risque similaire. Mais il peut être tout à fait pertinent pour un organisme de procéder à une étude consacrée à son propre fonctionnement et à sa forme institutionnelle.

La transférabilité des résultats

Ce peut être un critère utile, en particulier pour un organisme qui lance un programme d'EST. La mesure dans laquelle une évaluation est susceptible de renforcer, de clarifier et d'éclairer l'examen d'autres problèmes constitue en soi un apport positif. Même si elle ne va pas jusque-là, elle peut au moins constituer un facteur neutre. Ainsi, par exemple, la tentative d'évaluation des incidences d'horaires de travail différents peut éclairer les problèmes d'évaluation des incidences sur les différentes structures familiales ou sur les différents programmes d'enseignement.

Qui est à l'écoute?

Lorsqu'il n'existe pas de structure organisationnelle ou de lieu de responsabilité bien définis, l'évaluation des incidences d'une technologie risque de rester sans effet pratique. S'il n'y a pas à l'écoute des résultats une institution dont les compétences s'étendent au sujet à l'étude, l'évaluation n'aura guère qu'une valeur éducative diffuse à long terme.

L'étendue de l'étude

De toute évidence, un projet se chiffrant à des milliards de francs et dont la réalisation s'étend sur plusieurs années, tel que l'aménagement du Languedoc-Roussillon ou les grands programmes d'aménagement des rivières, etc., non seulement fournit une occasion de procéder à une évaluation, mais appelle virtuellement une évaluation en vue d'améliorer les plans. Dans le cas des projets importants, il est souvent difficile sinon impossible de faire des corrections après que le projet ait été achevé, tandis que cela peut être relativement facile au cours de la phase d'élaboration des plans.

L'irrévocabilité

Dans beaucoup de cas, les projets ne sauraient être résiliés ou annulés. Il est improbable qu'on détruise un barrage, qu'on fasse sauter un réseau routier ou qu'on démolisse une cité nouvelle. Mais la révocabilité peut souvent constituer une option dans le domaine de la technologie sociale.

Les incidences sur les possibilités futures

La question de savoir dans quelle mesure un projet donné obstrue les options politiques futures est étroitement liée au critère d'irrévocabilité. Le succès de la voiture automobile fondée sur le moteur à combustion interne a mis pratiquement fin à la mise au point d'autres moyens de transport fondés sur d'autres sources d'énergie dont le développement eût été utile. La réalisation d'un grand programme de travaux publics peut fermer la porte aux activités de loisir ou de plein air, compromettre l'exploration d'un site archéologique ou submerger un ensemble naturel ou historique comme le montre le cas du barrage d'Assouan. Les incidences sur les possibilités futures n'ont guère été prises en considération dans le passé, mais elles paraissent avoir une importance croissante pour la prise de décision future.

Le coût de la mise au point et de la diffusion de la technologie

Toutes choses étant égales par ailleurs, plus le coût est élevé et plus grande devrait être l'attention accordée à la pertinence de la décision. Il y a malheureusement de nombreuses exceptions à ce principe, les technologies militaires, par exemple.

Tous ces critères ne s'appliquent pas avec la même force aux évaluations entreprises par différents groupes ou par différentes organisations. Dans certains cas, d'autres critères peuvent être pertinents. C'est ainsi que la National Science Foundation des États-Unis a récemment dégagé des fonds pour financer des Évaluations Sociales de la Technologie sur des sujets tels que la mise au point de sources d'énergie solaire, de sources d'énergie géothermique, d'opérations bancaires électroniques, l'élevage intégré de porcs, le passage des pesticides chimiques aux pesticides biologiques, l'adoption du

système métrique, l'adoption d'horaires de travail alternatifs. La Fondation — qui joue un rôle particulier dans le cadre institutionnel de la recherche à l'échelle fédérale — a non seulement pris en considération l'importance de la technologie, la possibilité de réalisation, la redondance par rapport aux activités en cours, l'opportunité temporelle et la pertinence par rapport au cycle de décision, mais également adopté deux autres critères explicites : l'exploration et la stimulation de l'application des méthodes et des procédés systématiques aux problèmes complexes relatifs à la décision politique, et la stimulation de l'accroissement de la capacité organisationnelle dans le domaine de l'Évaluation Sociale de la Technologie.

Les critères et le choix de l'évaluation peuvent être influencés par la situation de stabilité, par opposition à la phase de démarrage. Une bureaucratie importante du secteur public ou du secteur privé qui s'avise d'évaluer son propre fonctionnement devrait mettre l'accent sur la pertinence politique, la disponibilité des données, etc. ; elle pourrait aussi mettre l'accent sur la sécurité et ne pas risquer l'avenir de l'organisation à laquelle elle appartient en choisissant un sujet trop large ou trop important. Toutefois, elle ne devrait pas choisir un sujet relativement banal car, dans ce cas, personne dans l'organisation ne serait intéressé ou n'assumerait la responsabilité d'agir selon les résultats de l'évaluation.

Détermination de l'étendue de l'étude

On s'attend tout naturellement à ce que les analystes d'une EST fassent une étude aussi approfondie et complète que possible. Cependant, en réalité, ils sont bien obligés de limiter leurs ambitions à cause d'un certain nombre de contraintes que le groupe consultatif de l'O.C.D.E. a classé de la manière suivante.

- **Limitations des ressources**
  — coûts (y compris les coûts « invisibles ») ;
  — moyens financiers (sources, disponibilité, souplesse) ;
  — temps ;
  — ressources humaines (talents, expérience, compétence des équipes d'évaluation).
- **Limitations des moyens de travail**
  — insuffisances de la base de données ;
  — problèmes d'organisation ;
  — limitation de l'accès aux informations privées ;
  — imprécision des méthodologies ;
  — incertitudes (hypothèses sur les incidences, états futurs de la société, critères de l'évaluation).
- **Limitations intrinsèques**
  Il est en effet difficile :
  — de tenir compte de toutes les incidences essentielles ;
  — de tenir compte en même temps des divers niveaux d'incidence ;
  — de tenir compte de tous les groupes sociaux concernés ;
  — d'obtenir un accord suffisamment étendu sur ce qui doit être considéré comme bon pour la société, en fonction de certains critères et valeurs implicites.

Il ne faut certes pas négliger — et encore moins ignorer — ces contraintes, mais il ne faut pas non plus sous-estimer les possibilités offertes aux analystes de déterminer l'étendue de leur étude d'une manière plus positive et plus constructive. Martin V. Jones suggère pour ce faire d'agir selon les principes suivants :

a) *Évaluer seulement un aspect d'un large domaine technologique*. Le plus sûr moyen de limiter l'étendue d'une EST est de limiter le domaine même de la technologie à l'étude. Ainsi, par exemple, une étude sur le traitement des eaux usées peut-elle se limiter à un seul procédé : le traitement biologique, ou/et à une seule catégorie d'eaux usées : les eaux industrielles.

b) *Réduire le nombre des sujets couverts*, par exemple en choisissant de ne pas examiner d'options ou de se limiter à un très petit nombre d'options.

c) *Limiter le nombre des parties affectées*, par exemple les groupes sociaux ou les secteurs géographiques dont la situation est évaluée dans l'analyse des incidences. Ainsi l'utilisation de l'énergie nucléaire peut-elle être étudiée quant à ses effets sur la santé et la sécurité uniquement des personnes travaillant dans les centrales

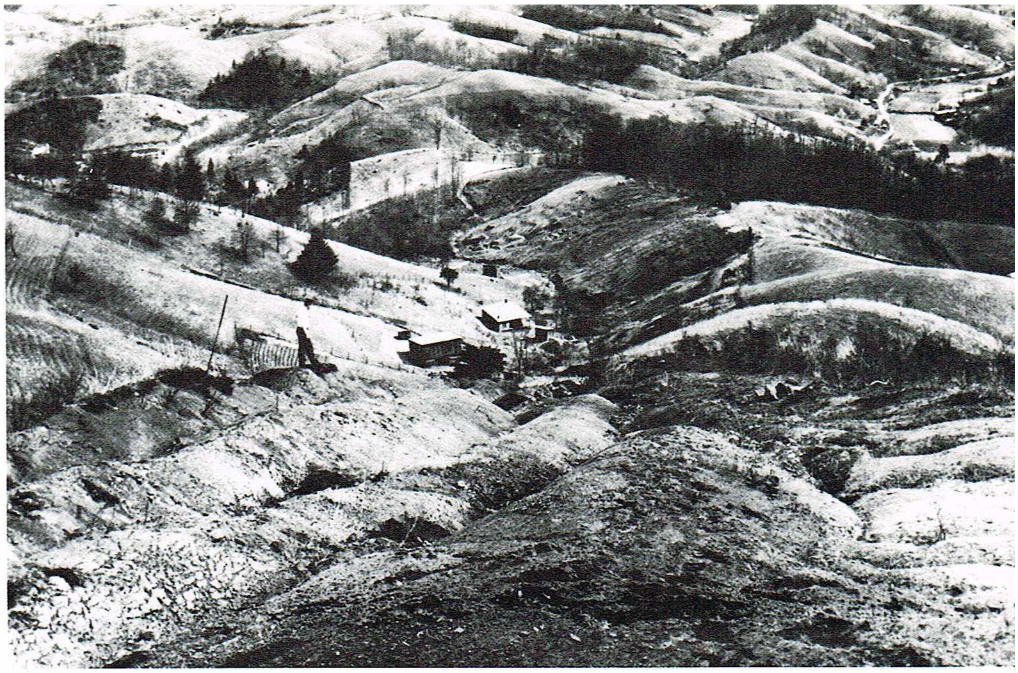

U.S.I.S.

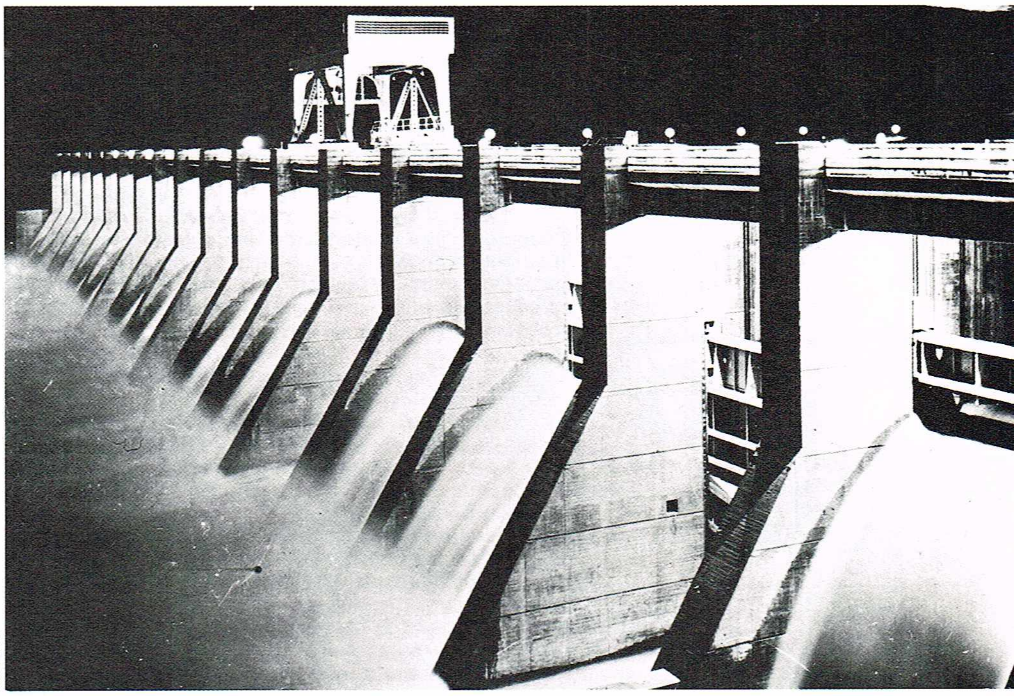

U.S.I.S.

▲ En haut, la vallée du Tennessee, aux États-Unis, fortement érodée par le déboisement, nécessitait des travaux d'irrigation et de nouvelles méthodes de culture.
Ci-dessus, vue de nuit du barrage Chickamauga sur le Tennessee.
▼ L'une des deux pépinières qui ont permis la plantation de 267 millions d'arbres dans la vallée du Tennessee.

U.S.I.S.

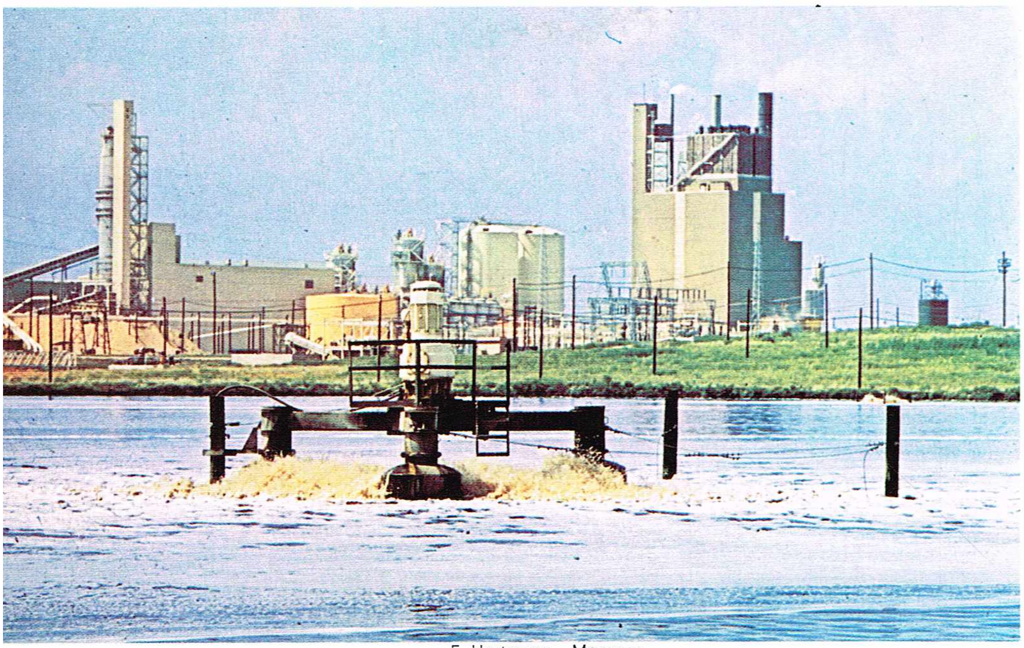

E. Hartmann - Magnum

▲ *Exemple de traitement des effluents liquides d'origine industrielle.*

de production ou aussi des employés des mines d'uranium, des habitants résidant près des usines...

d) *Réduire l'horizon temporel couvert par l'évaluation.* L'étendue d'une étude peut varier considérablement en fonction de l'horizon temporel que l'on veut couvrir. Il faut notamment décider si l'on entend effectuer une étude rétrospective — qui est essentiellement un constat *a posteriori* — donc relativement simple, ou bien une étude prospective, ou encore une étude s'efforçant d'explorer à fond aussi bien les incidences passées que les incidences futures.

e) *Réduire les catégories d'incidences étudiées.* Ainsi une étude étroitement focalisée sur les effets de l'automation peut-elle analyser soit les incidences à caractère économique (impact sur le niveau de l'emploi, les investissements, etc.), soit les incidences sociales (conditions de travail, horaires, etc.), soit les incidences industrielles (organisation de la production, etc.).

f) *Limiter le nombre des « niveaux » d'incidence.* Par exemple en ne prenant en considération que les incidences directes (de niveau 1) et en laissant de côté les incidences du second et du troisième degrés. Ce problème est important car beaucoup d'innovations technologiques ont une influence qui se répercute à travers plusieurs niveaux d'interactions.

g) *Déterminer la précision des réponses recherchées.* Une étude peut être réalisée bien plus vite si elle se limite à la recherche de réponses qualitatives plutôt que de réponses quantitatives; mais elle risque alors d'être moins utile (moins d'informations) et même de fournir

▼ *Protection du personnel travaillant dans la centrale de Saint-Laurent-des-Eaux.*

M. Riboud - Magnum

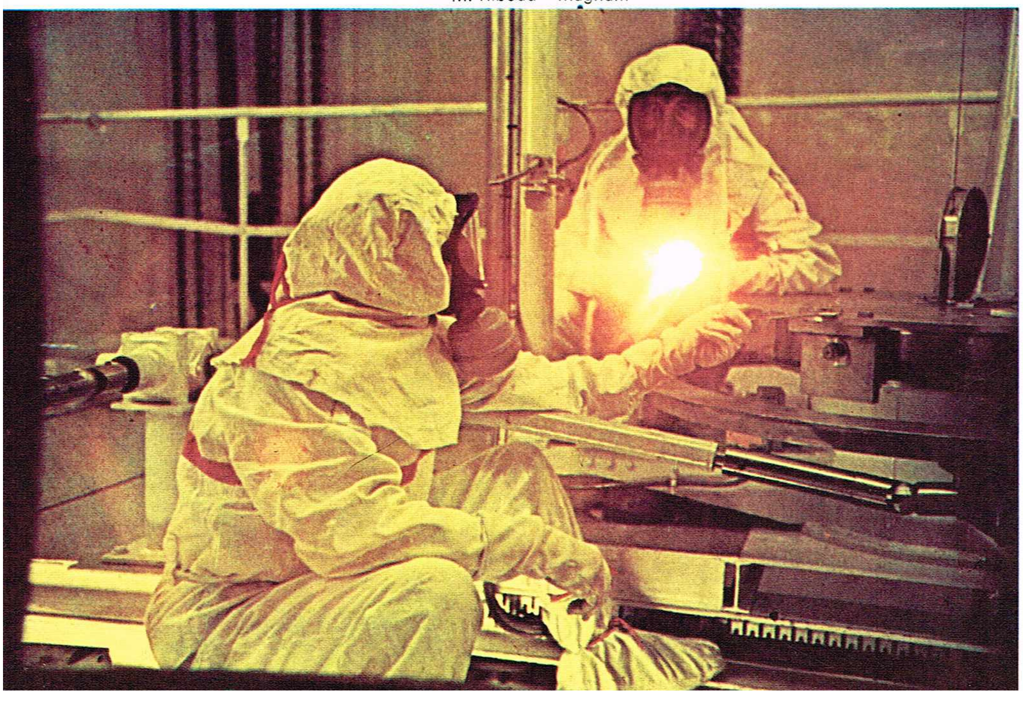

une information erronée. Cependant, sans doute vaut-il mieux encore avoir une réponse approximative à une question très pertinente qu'une réponse précise à une question de peu d'intérêt. En ce qui concerne le choix d'une méthode de mesure, on se reportera au *tableau* II.

Cadre méthodologique de l'EST

De nombreuses recherches et expériences méthodologiques sur l'EST ont été menées depuis une dizaine d'années dans la plupart des pays industriels occidentaux par des organismes tels que : administrations, universités, bureaux d'étude, etc.

La meilleure synthèse sur l'ensemble de ces efforts intellectuels nous semble être celle présentée par F. Hetman, de l'O.C.D.E., dans son ouvrage déjà cité. Nous lui emprunterons l'essentiel des éléments de cette partie.

Les points d'amorçage des études d'évaluation

La direction et l'organisation de la technologie sont des opérations très complexes. Cela explique d'ailleurs la très grande diversité des définitions que l'on a pu donner de l'Évaluation Technologique.

Du point de vue méthodologique, il est donc important de classer les efforts d'évaluation par rapport aux points du système auxquels on les amorce. Cet essai de taxonomie conduit à retenir essentiellement les points d'amorçage suivants :
— technologie,
— économie,
— société,
— individu,
— environnement,
— valeurs et contenu social des décisions,
dont on trouvera au *tableau* III une analyse de contenu plus détaillée.

En outre, chacun des points d'amorçage doit être défini par référence à un niveau possible ou désirable d'étude, d'analyse ou d'action :
— international,
— national,
— groupe social,
— branche d'industrie,
— spécialisation professionnelle ou scientifique.

L'expérience suggère également de tenir compte des observations suivantes :

★ Les premières questions que l'on se pose sont souvent relatives à des considérations technologiques. Or une analyse partant d'une technologie particulière risque fort de négliger certains « effets de systèmes » que l'on ne peut guère rattacher à une technique spécifique. Il paraît donc plus opportun d'explorer des faisceaux de technologies.

★ Il semble que les voies d'approche prenant comme point d'amorçage la société ou l'individu conviennent bien à la recherche des interactions entre facteurs et effets. Cependant ce type d'approche présente deux risques :

— surestimer l'élément non technique et négliger des innovations possibles ou des technologies de rechange qui pourraient atténuer les inconvénients sociaux d'une technologie donnée ;

— ne pas déboucher sur des évaluations convaincantes tant que l'on ne comprendra pas mieux les systèmes sociaux, les comportements humains et les liens que les uns et les autres entretiennent avec le progrès technique.

★ Le point d'amorçage, quel qu'il soit, doit être considéré comme un premier élément qui enclenche un examen plus détaillé d'autres aspects. Cela signifie qu'une évaluation complète doit s'appuyer sur une méthode qui prenne en compte toutes les dimensions importantes dans le cadre d'un système dynamique, quitte ensuite à les pondérer d'après leur portée par rapport au thème principal de l'évaluation. En définitive on a donc intérêt à élaborer pour chaque EST une matrice générale comprenant les voies d'approche possibles (lignes) et les niveaux d'analyse appropriés (colonnes).

Enfin, l'analyse des points d'amorçage possibles apporte également quelques indications quant à la construction d'un cadre méthodologique. F. Hetman distingue ainsi quatre types de cadres d'analyse.

★ Le mode d'approche **épistémologique** (axé sur la technologie) qui procède à une dissection logique

Tableau III

Bases conceptuelles des Évaluations Technologiques

I. Technologie

a) Capacité fonctionnelle
b) Système d'innovations interdépendantes
c) Processus d'amélioration d'une technologie
d) Transfert de technologie
e) Modalités juridiques et sociales d'introduction d'une technologie
f) Importance et ampleur de la diffusion
g) Contraintes et normes juridiques

II. Économie

a) Forces génératrices de progrès technologiques
b) Structure économique
c) Taille et répartition des entreprises
d) Degré de concurrence

III. Société

a) Sous-systèmes sociaux
b) Ventilation des ressources
c) Relations sociales

IV. Individu

a) Santé et espérance de vie
b) Situation professionnelle et position sociale
c) Instruction et culture
d) Qualité de vie
e) Qualité de l'insertion dans la société

V. Environnement

a) Ressources de l'environnement
b) Écosystèmes
c) Effets de la pollution sur la santé de l'homme
d) Environnements créés par l'homme

VI. Valeurs et aspects collectifs de la décision

a) Visibilité
b) Intérêts liés aux technologies existantes
c) Protagonistes et adversaires
d) Tierces parties affectées par la décision
e) Responsabilité de l'État

Tableau II

Les échelles de mesure

Échelle	Conditions de mesure	Principale caractéristique	Exemple	Mesures statistiques	Propriétés numériques
Nominale	Élaborer un ensemble de noms distincts pour chaque individu	Le plus faible niveau de mesure. Identifier (ou définir) des caractéristiques différenciables pour les individus	Numéro assigné à chaque joueur d'une équipe de football	Fréquence; mode (coefficient de corrélation)	Identité : ou $A = B$ ou $A \neq B$ Si $A = B$, $B = A$ Si $A = B$, et $B = C$, $A = C$
Ordinale	Comparer chaque individu selon un attribut commun et un seul	Premier niveau d'effort pour identifier (ou définir) un ordre de préférence	Ordre simple un individu dans chaque classe (Président des USA, Vice-Président des USA). Ordre faible : plus d'un individu dans chaque classe (étudiants de 1re année, 2e année, 3e année, etc.)	Fréquence, mode, médiane, centiles, rang, coefficients de corrélation	Identité et ordre : Si $A > B$, $B < A$ Si $A > B$ et $B > C$, $A > C$
D'intervalles	Définir une unité de mesure appropriée - Origine arbitraire	Les intervalles entre les points de l'échelle sont ordonnés. Un ensemble ordonné se compose de nombres réels	Échelle de température centigrade (Celsius) et Fahrenheit	Toutes les mesures ordinales plus l'écart-type, l'asymétrie, la covariance	Outre identité et ordre : en prenant une origine arbitraire, une différence peut être traitée comme une valeur absolue, et l'on peut supposer que les différences ont la propriété d'additivité
De rapport	Établir que l'échelle de mesure est étalonnée par rapport à une origine absolue ou « naturelle »	Le rapport d'une mesure à une autre reste le même quand l'échelle est transformée	Origine absolue : échelle de température Kelvin. Origine « normale » : calendrier grégorien	Toutes les mesures d'intervalle plus la variance	Identité, ordre, plus additivité : Si $A = P$ et $B > O$, $A + B > P$ $A + B = B + A$ Si $A = P$ et $B = Q$, $A + B = P + Q$ $(A + B) + C = A + (B + C)$

d'un objet technique de manière à établir la cohérence de toutes ses manifestations, et se conclut par la validation socio-technique d'une technologie.

★ Le mode d'approche **problématique** (axé sur un problème à résoudre) est suscité par un problème immédiat né des effets négatifs induits par une technologie. Il repose sur une acception élargie de l'offre et de la demande de ressources qui prend en compte les coûts et les avantages repérables.

★ Le mode d'approche **institutionnel** (axé sur les groupes d'intérêts) dont le point de départ est une institution ou un groupe affecté; son objectif est de parvenir à comprendre comment science et technologie entrent en interaction avec la société et avec ses organes de contrôle social.

★ Le mode d'approche **téléologique** (axé sur les objectifs) qui s'appuie sur l'idée d'un processus qui se déroule de manière « systémique » en englobant à la fois les diverses caractéristiques d'une technologie et ses conséquences principales appréciées en fonction d'un objectif technologique donné.

Pour compléter les instructions données dans ce paragraphe, on se reportera au *tableau* IV.

Cadre méthodologique général d'une EST

De nombreuses études ont été menées depuis une dizaine d'années afin d'esquisser un cadre méthodologique d'ensemble pour les EST.

Nous nous intéresserons plus particulièrement à la démarche méthodologique mise au point par la MITRE Corporation pour le compte de l'Office of Science and Technology des États-Unis à laquelle on se réfère en général.

★ **Démarche suivie par le ministère japonais du Commerce international et de l'Industrie**

Cette démarche (*fig.* 3) semble particulièrement convenir à une politique active d'introduction de nouvelles technologies dans le cadre du développement industriel du Japon. Elle s'apparente à une version élargie de l'analyse coût-avantage, et restreint donc l'Évaluation Technologique au travail d'analyse proprement dit. Ce point apparaît clairement lorsqu'on la compare aux démarches américaines présentées ci-après où l'on veille à prendre en compte les options, la faisabilité d'un éventail de solutions et les appuis politiques pouvant aider à la mise en œuvre d'une innovation technologique.

▲ *A gauche, tableau III : les bases conceptuelles des Évaluations Technologiques (d'après F. Hetman dans* **la Société et la Maîtrise de la technologie,** *O.C.D.E., Paris, 1973). A droite, tableau II : les échelles de mesure [d'après Marvin J. Cetron et Donald N. Diek, reproduit dans* **la Société et la Maîtrise de la technologie,** *O.C.D.E. 1973 (F. Hetman)].*

Tableau IV

Les modes d'approche fondamentaux de l'avenir

Mode d'approche de l'avenir	Démarche logique	Hypothèses sous-jacentes ou explicites	Principaux ensembles de méthodes
Prédiction	Subjective	Non spécifiées non explicitées	Formulation visionnaire Analogie intuitive
Prévision	Probabilité	Situation contextuelle constante	Extrapolation Corrélation Régression multiple Modèles statiques
Projection	Conditionnelle	Impact socio-économique constant	Corrélation Modèles mathématiques Analyse de sensibilité Simulation
Recherche prospective	Exploratoire, imaginative	Objectifs constants ou donnés	Opinions d'experts Groupes de créativité Modèles de simulation Modèles exploratoires
Planification centralisée	Normative ou autoritaire	Système socio-économique unique et constant	Modèles statistiques Modèles mathématiques Modèles itératifs
Programmation par objectifs	Décisionnelle	Variantes déterminées par le système	Analyse de systèmes Modèles de décision Simulation Analyse d'interactions

▲ *Tableau IV : les modes d'approche fondamentaux de l'avenir (d'après F. Hetman,* **la Société et la Maîtrise de la technologie,** *O.C.D.E., 1973).*

★ **Études expérimentales de la National Academy of Engineering**

Ces travaux sont intéressants car ils décrivent le processus d'Évaluation Technologique suivi au cours de trois expériences effectuées par des groupes d'études où siégeaient non seulement des spécialistes de l'évaluation mais surtout des spécialistes exerçant des responsabilités professionnelles dans le domaine considéré.

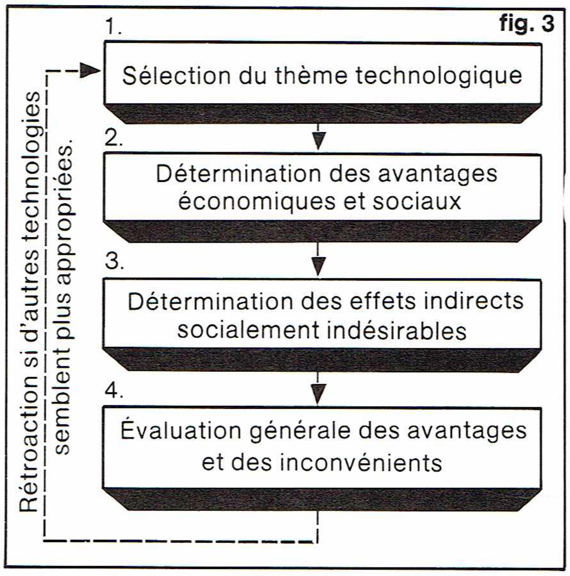

fig. 3

On peut estimer que le choix d'un optimum ou d'une ligne d'action n'est pas une tâche appropriée pour un groupe d'Évaluation Technologique et que de plus cette fonction doit rester la prérogative du décideur. Il n'en demeure pas moins que celui-ci attend des analystes qu'ils lui fournissent des éléments à partir desquels il pourra exercer son jugement.

★ **Études pilotes de la MITRE Corporation**

Ces travaux ont été effectués sous la direction de Gabor Strasser sur contrat de l'Office of Science and Technology selon un schéma méthodologique analogue au précédent mais plus élaboré, détaillé et perfectionné sur les plans conceptuel et empirique.

Ils ont conduit à des Évaluations Technologiques portant sur les gaz d'échappement des automobiles, les réseaux de communication par ordinateurs, les enzymes, la culture des océans et la pollution des eaux par les déchets ménagers.

Selon G. Strasser, la voie d'approche qui a été suivie du point de vue méthodologique combine deux démarches :

— la première consiste à analyser et à évoluer un problème réel précis, et aide à voir les choses de manière concrète et opératoire. Par exemple : mesures à prendre dans le cas du DTT, des gaz d'échappement, etc. ;

— la deuxième consiste à élargir les capacités des méthodologies existantes pour y englober l'Évaluation Technologique au sens général du terme. Par exemple : mise au point de techniques d'estimation des coûts plus complètes, définition des « interfaces » entre planifications à long et à court terme, etc.

La synthèse de ces cinq études a permis de distinguer et d'expliciter sept phases qui, d'après les auteurs, recouvrent tout l'éventail de l'exercice d'Évaluation Technologique (*fig.* 4).

On peut enfin représenter la démarche méthodologique de la MITRE Corporation d'une autre manière (*fig.* 5) et mettre ainsi en valeur les deux grandes parties du processus d'évaluation :

— la première partie (« contexte de l'Évaluation Technologique ») montre, d'une part, comment divers facteurs, qu'ils soient liés à la technologie (A) ou non (B), s'influencent réciproquement pour engendrer « les problèmes et les chances de la société » (D) et, d'autre part, identifie les mécanismes sociaux (C) grâce auxquels les conclusions d'une EST sont examinées et éventuellement mises en application ;

— la seconde partie (« éléments de l'Évaluation Technologique ») relie les capacités analytiques (E) utilisées dans une évaluation aux résultats (G) obtenus grâce à elle au cours de l'analyse (F).

Méthodes d'analyse pour une EST exhaustive

Pour établir un bilan social complet de la technologie, on peut faire appel à plusieurs méthodes afin :

— d'observer et d'inventorier les dimensions, incidences et conséquences intéressant la collectivité ;

— d'expliciter les interdépendances éventuelles entre ces divers éléments.

A la fin de cette partie consacrée aux aspects méthodologiques de l'EST, il nous paraît utile de citer la liste de ces méthodes, telle qu'elle a été établie par F. Hetman dans son ouvrage mentionné plus haut, ainsi que la description qu'il donne de chacune d'elles.

● **Le recensement des conséquences sociales** est un examen des relations fonctionnelles entre la technologie et divers aspects de la société. Ces relations peuvent être interprétées comme des réactions sociales à un développement technologique donné. Ces réponses sont interdépendantes dans l'espace et dans le temps, de sorte qu'il semble possible de distinguer plusieurs catégories d'effets — effets au premier degré, au second degré et au-delà. Ce genre de technique peut donner une vue d'ensemble des domaines et des ramifications possibles des conséquences sociales, mais elle ne met pas en évidence la logique interne du processus.

● **La méthode de Delphes** utilise en parallèle des groupes d'experts pour élaborer un tableau d'événements futurs et estimer la date à laquelle ils pourraient survenir. Elle repose sur des techniques non formalisées de collecte et de synthèse des jugements, intuitions et conjectures émanant de personnes qui sont censées disposer d'une information pertinente sur les multiples aspects de la société. On a élargi le champ de cette méthode pour y faire entrer une énumération systématique des principales conséquences attendues, un avis sur leur caractère désirable ou non, et des propositions quant aux moyens d'intervention souhaitables.

● **L'arbre de pertinence** représente une combinaison de la théorie des graphes et de l'analyse morphologique. On peut s'en servir dans les études d'Évaluation Technologique pour repérer des filières d'activités articulant procédés de fabrication et activités connexes, les besoins en main-d'œuvre qualifiée, les besoins de R.-D. et certaines incidences sociales, directes ou indirectes. Le problème principal de la technique de l'arbre de pertinence concerne la façon dont on dégage l'intensité des diverses ramifications et dont on arrive à relier les arcs et les nœuds stratégiques (*fig.* 6).

● **L'évaluation et l'interprétation d'événements** constituent une technique qui s'efforce d'explorer les liaisons entre événements et objectifs dans un domaine technologique donné. C'est une combinaison d'éléments divers appartenant à plusieurs techniques existantes, telles que :

— prévision intuitive;
— extrapolation de tendances;
— analyse de corrélation de tendances;
— démarche normative mettant particulièrement l'accent sur la méthode de Delphes. On peut utilement l'appliquer au cas de nouvelles technologies qui devraient se plier à un objectif social discernable.

● **La matrice de pertinence** consiste à traiter de manière explicite les interactions entre événements technologiques et conséquences sociales sous la forme d'une matrice. Les interactions entre technologie et société sont considérées comme des influences nettement déterminées de manière unilatérale, résultant d'un développement technologique donné. Elles sont généralement présentées comme des relations stables, ce qui n'est guère le cas dans la réalité.

● **L'analyse des interactions** (des incidences croisées) est une technique utilisée pour apprécier la probabilité de voir se produire tel ou tel événement futur en fonction de changements dans la probabilité de certaines évolutions attendues. Elle permet de choisir non seulement des événements futurs à caractère technologique, mais également des phénomènes d'environnement ou des phénomènes sociaux et politiques. L'inconvénient est que l'analyse d'incidences multiples exige une quantité énorme d'informations.

● **L'étude multidisciplinaire d'un système,** processus organisé en sept étapes, est spécialement conçue pour des études d'Évaluation Technologique. Elle commence par la définition d'un développement technologique et l'analyse de l'état présent des « règles de l'art ». Elle s'attache ensuite à repérer et à évaluer les zones d'impact et les aspects de la société qui peuvent être affectés par l'application de la technologie examinée. La comparaison des avantages et des inconvénients débouche sur des options envisageables pour l'action. Les aspects sociaux sont considérés à la fois comme objets et sources d'influence, obéissant pour l'essentiel à l'impulsion de la technologie.

● **La fonction d'évaluation technologique,** démarche axée sur un problème, loin d'être un enchaînement purement mécanique, comporte une interaction continuelle entre les divers stades opérationnels — lancement, identification des technologies, définition des tâches d'évaluation, choix des données, utilisation de règles de décision, détermination des actions à mener, évaluation, adaptation. Il y a sans cesse interdépendance entre tous ces stades, mais deux d'entre eux sont particulièrement cruciaux, à savoir le choix des informations et les règles de décision.

● **Les méthodologies finalisées** sont établies sous forme de modèles téléologiques où l'on part de la définition d'un état de choses souhaitable ou d'un faisceau d'objectifs. La phase suivante consiste à élaborer les données que l'on transformera en trois catégories d'indicateurs : technologiques, économiques et socio-politiques. Ces indicateurs sont articulés entre eux à l'aide de matrices d'appui mutuel, et l'on pondère les résultats en fonction de divers horizons temporels. Les résultats sont traités ensuite dans des matrices où l'on fait varier la pondération des incidences, afin d'obtenir une information sur la « valeur » globale de l'innovation technologique envisagée.

Contrairement aux démarches axées sur une technologie ou sur un problème, où le choix des objectifs reste ouvert, les modèles finalisés supposent l'ouverture des choix technologiques mais traitent les objectifs comme une contrainte. Les difficultés liées à la prévision, à l'explication des incidences et à l'évaluation sont transférées de la partie proprement technologique aux aspects concernant les objectifs et les décisions.

◀ ***Page ci-contre, à droite, figure 3 : démarche méthodologique pour l'EST du ministère japonais du Commerce international et de l'Industrie (d'après F. Hetman,* la Société et la Maîtrise de la technologie, *O.C.D.E., 1973).***

▼ ***Figure 4 : démarche méthodologique mise au point par l'Office of Science and Technology et la MITRE Corporation (d'après F. Hetman,* la Société et la Maîtrise de la technologie, *O.C.D.E., 1973).***

fig. 4

Phase 1	**DÉFINIR LE TRAVAIL D'ÉVALUATION :** Étudier les questions-clés et les principaux problèmes Délimiter le champ (extension et profondeur) de l'étude Mettre au point les règles essentielles à suivre dans le projet.
Phase 2	**DÉCRIRE LES TECHNOLOGIES CONCERNÉES PAR L'ÉTUDE :** Décrire la technologie principale que l'on évalue Décrire les autres technologies qui en sont les auxiliaires Décrire les technologies rivales de la première et des secondes
Phase 3	**FORMULER DES HYPOTHÈSES SUR L'ÉTAT DE LA SOCIÉTÉ :** Identifier et décrire les principaux facteurs non technologiques qui influent sur l'application des technologies étudiées
Phase 4	**IDENTIFIER LES ZONES D'INCIDENCE :** Déterminer les caractéristiques de la société qui seront le plus influencées par l'application de la technologie en cours d'évaluation
Phase 5	**PROCÉDER A UNE PREMIÈRE ANALYSE DES INCIDENCES :** Reconstituer l'ensemble du processus par lequel la technologie à évaluer fait sentir ses effets sur la société
Phase 6	**IDENTIFIER LES OPTIONS POSSIBLES POUR LES ACTIONS A MENER :** Définir et analyser divers programmes visant à obtenir l'avantage collectif maximum de la technologie examinée
Phase 7	**ACHEVER L'ANALYSE DES INCIDENCES :** Analyser dans quelle mesure chaque option changerait les incidences sociales de la technologie à évaluer, telles qu'elles ont été dégagées à la Phase 5

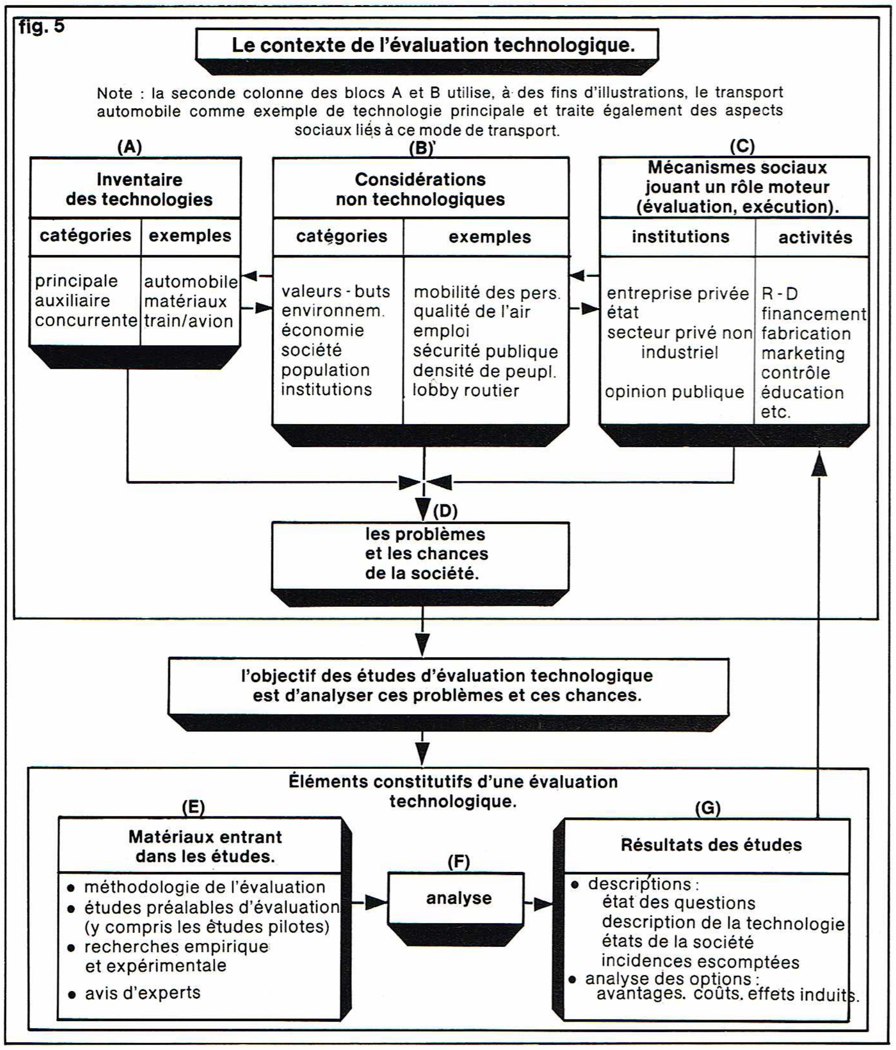

▲ ***Figure 5 ; schéma montrant la décomposition de la démarche méthodologique de la MITRE Corporation en deux grandes parties : le contexte et les éléments constitutifs d'une Évaluation Technologique** [**d'après A Technology Assessment Methodology, dans** la Société et la Maîtrise de la technologie, **O.C.D.E., 1973 (F. Hetman)**].*

L'EST et l'industrie

Introduction

De nombreux chefs d'entreprise américains ont apporté leur témoignage quant à l'utilisation qu'ils font de l'Évaluation Technologique afin de mieux comprendre l'environnement technologique futur. Le dernier volume de *Hearings before the Technology Assessment Board of the Office of Technology Assessment (ninety-fourth Congress of the USA),* qui résume et analyse les témoignages présentés lors de la deuxième session du 94ᵉ congrès des États-Unis, met en valeur les découvertes importantes et les opinions divergentes des divers participants. Nous rapporterons ici, le point de vue de D. F. Miller, chef de projet à l'OTA.

« Le "Technology Assessment" est une stratégie d'étude en évolution qui est maintenant adoptée à la fois dans le secteur public et le secteur privé.

— La stratégie de tout TA doit être faite sur mesure pour s'adapter aux ressources, au temps disponible et aux besoins des responsables des décisions.

— De plus, pour étudier les choix et les possibilités, le TA peut donner un avertissement précoce ou établir des conséquences qui n'auraient pas été prévues.

— Les dirigeants du gouvernement et de l'industrie estiment que c'est une méthode de plus en plus nécessaire pour comprendre les effets de la technique à moyen et long terme. Dans les deux secteurs, il y a une prise de conscience de plus en plus grande de l'importance du TA dans l'amélioration des procédés de politique de planification et dans l'élargissement des bases d'information pour les responsables des décisions.

— Le TA est utilisé par les grandes sociétés, comme outil de planification industrielle et comme base de départ pour une politique économique de l'entreprise.

— L'une des leçons les plus intéressantes est que l'industrie et le gouvernement recherchent et utilisent des moyens nouveaux et raffinés pour résoudre les problèmes complexes et multiples qui se présentent à la société actuelle » (*fig.* 7).

Nécessité de L'EST dans l'industrie

Nombreux sont les exemples qui montrent clairement la nécessité pour les entreprises industrielles de procéder à des EST. En effet, comment oublier que l'on n'est

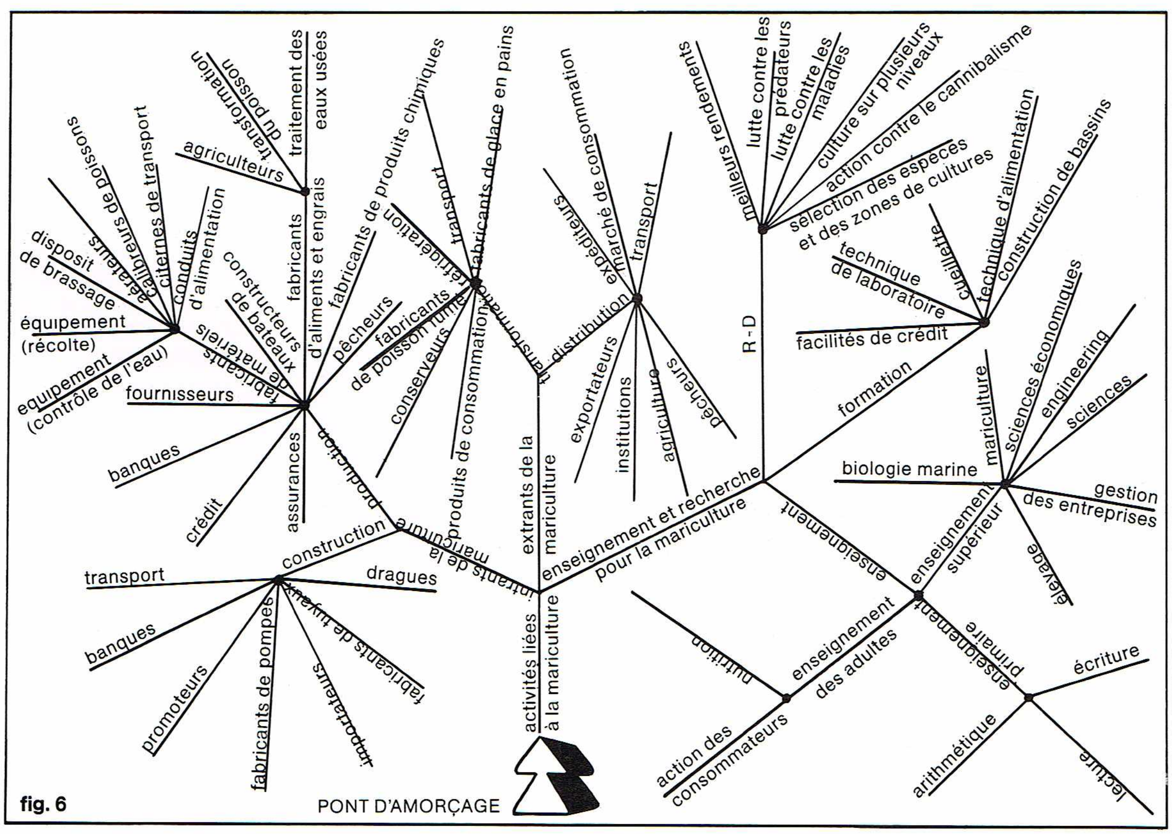

▶ ***Figure 6 : exemple de technique d' « arbre de pertinence », quelques éléments de la filière « Mariculture »** [**d'après Robert C. Landis, A Technology Assessment Methodology : Mariculture, dans** la Société et la Maîtrise de la technologie, **O.C.D.E., 1973 (F. Hetman)**].*

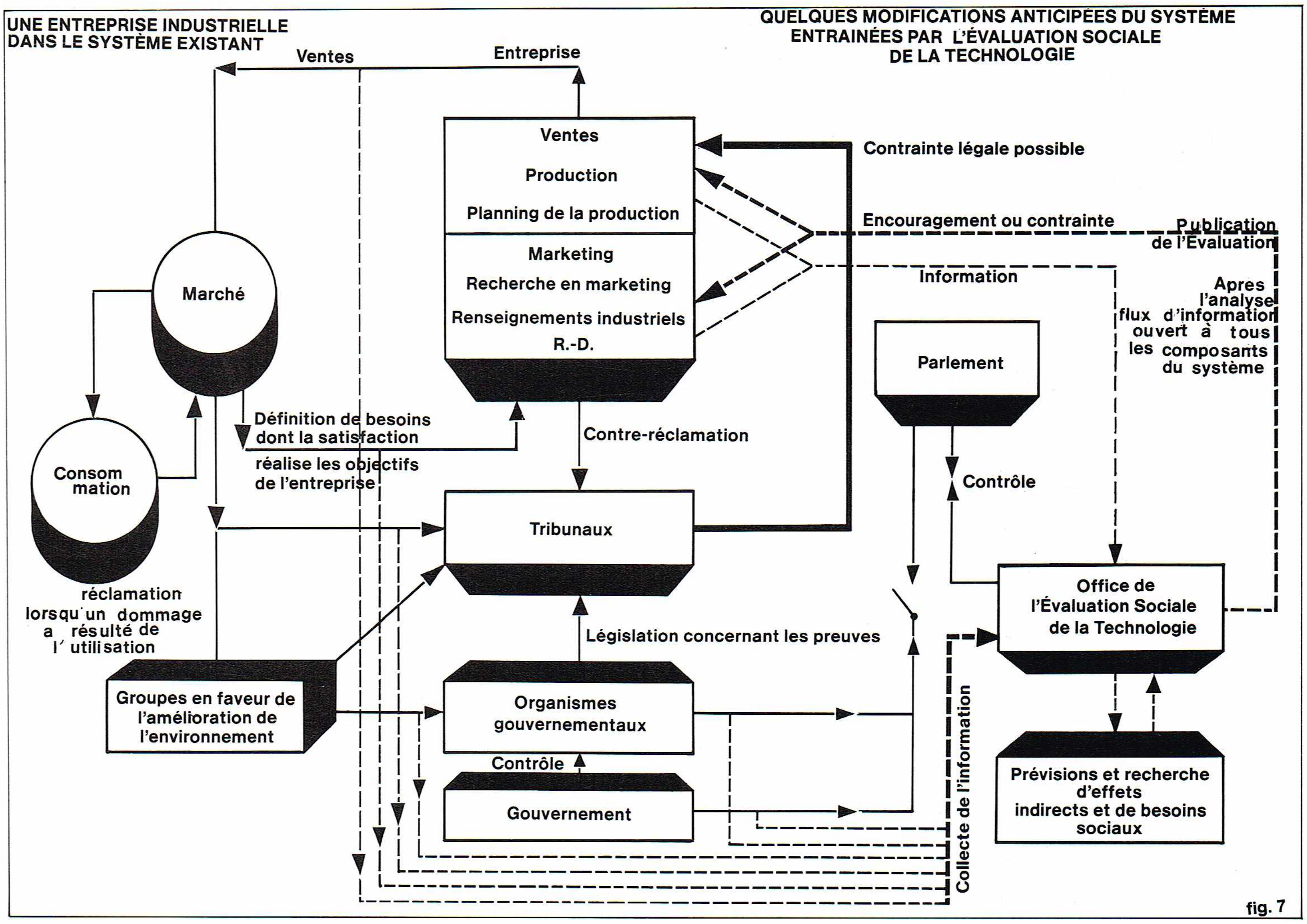

▲ ***Figure 7 : schéma des modifications susceptibles d'être entraînées par l'EST dans une entreprise industrielle (d'après Derek Medford dans* Principes méthodologiques pour l'Évaluation Sociale de la Technologie, *O.C.D.E., 1975).***

devenu réellement conscient des effets de la technologie médicale qu'à la suite de certains accidents comme ceux provenant de l'utilisation de la thalidomide et du talc de Morhange ?

Une catastrophe plus récente, à Seveso, a mis en évidence le fait que l'on était encore loin d'avoir procédé à toutes les études de risque nécessaires pour se prémunir contre les dangers — contamination, explosion, pollution, etc. — liés aux activités industrielles.

Notre dernier exemple sera celui d'un haut-fourneau récemment construit en Allemagne fédérale, dans la Ruhr. Lors de sa mise en service, on s'est rendu compte que les nuisances acoustiques engendrées par son fonctionnement étaient supérieures aux normes de bruit en vigueur et que les habitants concernés jugeaient cette situation évidemment insupportable.

Aucun de ces cas n'avait donné lieu à une EST. On pourrait ainsi citer bien d'autres exemples — l'aéroport de Narita au Japon, l'échouage de l' « Amoco-Cadiz » sur les côtes bretonnes... — où de nombreux problèmes et difficultés auraient pu être évités, ou du moins limités par une Évaluation Technologique.

Obstacles à l'introduction de l'EST dans l'industrie

Selon une enquête menée par Volker Oberkampf de l'Institut BATTELLE - Francfort auprès de 150 grandes entreprises industrielles européennes, il ressort que trois facteurs dominants font obstacle à l'introduction de l'Évaluation Technologique dans l'industrie.

L'Évaluation Technologique considérée comme un art

Les problèmes que l'on veut soumettre à une évaluation sont en général mal définis ou mal posés ; il y a donc peu de chances de leur trouver une solution optimale avec certitude. De plus l'identification et l'évaluation des impacts futurs d'une innovation technologique comportent nécessairement des incertitudes sur les interactions entre certains facteurs et sur leurs incidences car ces phénomènes ne peuvent être analysés qu'à l'intérieur des limites de nos connaissances actuelles et ne peuvent être discutés qu'à partir d'hypothèses.

Enfin, l'examen d'un problème par l'EST ne peut être entièrement formalisé et ne peut fournir au mieux que des lignes directrices de réflexion et d'action à l'intérieur d'un cadre méthodologique. J. F. Coates ne considère-t-il pas, d'ailleurs, comme nous l'avons dit précédemment, que l'EST est un art qui se prête mal à la formalisation ?

Par contre, lorsque l'on traite de problèmes bien définis — comme ceux rencontrés dans l'industrie : planification de la production, optimisation de circuits de distribution, etc. — à l'aide de méthodes relevant la plupart du temps de la recherche opérationnelle, on peut indiquer des objectifs, choisir des critères de décision et envisager les moyens d'aboutir à une solution de façon concrète et détaillée.

Les industriels, qui sont pragmatiques par nature ou du moins par nécessité, se tiennent donc dans une large mesure à l'écart des problèmes mal définis et par voie de conséquence sont souvent étrangers à l'EST, qui est la méthode la plus apte à résoudre les problèmes de cette nature.

Problèmes généraux liés à la nature de l'EST

L'introduction de l'EST dans l'industrie est également freinée par les difficultés auxquelles une équipe d'évaluation peut se heurter au cours de ses travaux, et qui, selon V. Oberkampf, ont une triple origine :

★ *Nécessité d'une vue « holistique »*

Maints problèmes ne peuvent être analysés en dehors du système des relations qui les lient à leur environne-

M. Riboud - Magnum

J. Gaumy - Magnum

▲ *En haut, contamination de la région de Seveso (Italie) par émanation de gaz toxiques d'origine industrielle. Ci-dessus, pollution des côtes bretonnes par l'échouage d'un supertanker : l' « Amoco-Cadiz ».*

ment. Ces problèmes sont donc caractérisés par une nature fortement interactive qui se prête bien à une méthode de résolution du type EST. Cela implique pour les analystes d'avoir une vue « holistique » du problème étudié et une capacité à accepter les exigences supplémentaires liées à la démarche méthodologique et à la mise en œuvre de l'EST.

Les interdépendances d'un sujet d'étude avec son milieu extérieur — par exemple d'une entreprise avec son environnement social, écologique, politique — doivent dans une EST être prises en compte d'une manière tout à fait explicite. Or, malheureusement, avec la plupart des méthodes d'aide à la prise de décision utilisées à l'heure actuelle dans l'industrie, les phénomènes qui ont une incidence importante — notamment dans le temps — sur le domaine qui fait l'objet d'une évaluation ne sont ou même ne peuvent pas être étudiés par les analystes. De sorte que, soit le contexte d'une innovation est considéré comme « figé » (analyse en fonction de l'hypothèse : toutes choses étant égales par ailleurs), soit même on l'ignore purement et simplement.

★ *Inadéquation des méthodes*

L'objectif premier de toute EST est d'établir un bilan exhaustif des incidences d'une innovation : effets directs ou indirects, immédiats ou différés, verticaux ou horizontaux (uni- ou pluridimensionnels)...

A cet égard la démarche de l'EST s'écarte nettement des méthodes en cours dans l'industrie et, par exemple, de celles utilisées pour les études de faisabilité, les études de marché, etc. Ces dernières ont en effet un champ d'investigation unique et sont « focalisées » vers l'analyse et la précision d'impacts unidimensionnels, c'est-à-dire exclusivement techniques, économiques, ou financiers.

Les innovations susceptibles d'être soumises à évaluation par les industriels peuvent souvent être analysées en faisant appel à des méthodes quantitatives de manière non seulement à identifier leurs impacts mais encore à mesurer l'intensité de ces incidences, c'est-à-dire obtenir des informations sur l'évaluation de ces impacts dans le temps.

Dans certains cas on peut considérer les résultats obtenus par ces méthodes comme réellement objectifs.

A l'opposé, dans le domaine social, l'analyste se trouve confronté à des phénomènes ou à des éléments essentiellement subjectifs qu'il est déjà malaisé d'appréhender et dont il est, *a fortiori*, plus difficile encore de prévoir l'évolution et d'évaluer l'importance.

Les professionnels désireux de mettre en œuvre des EST dans leur entreprise ont deux autres obstacles à surmonter :

— la grande variété des méthodes et des techniques utilisées pour l'EST et leur évolution permanente risquent fort de dépasser leur compétence ;

— au surplus, il est rare, en raison de leurs responsabilités professionnelles, qu'ils puissent consacrer un temps suffisant à des travaux d'évaluation.

★ *Nature interdisciplinaire des études d'évaluation*

Prendre la vue « holistique » évoquée précédemment requiert une approche interdisciplinaire. Des études récentes ont montré que cela était nécessaire non seulement pour garantir la qualité de l'évaluation mais aussi pour des raisons d'efficacité.

En effet, pour réduire la complexité et l'étendue du problème posé, il faut au préalable identifier l'ensemble des relations du système étudié par des méthodes telles que la méthode de Delphes, qui, on le sait, font appel à la participation d'experts de tous horizons.

Cependant la constitution d'une équipe pluridisciplinaire n'est pas envisageable dans la plupart des entreprises à moins d'avoir recours à des compétences extérieures pour une durée limitée à la période d'évaluation.

L'EST : une aide à la prise de décision politique

L'EST est essentiellement conçue pour aider à la prise des décisions politiques. C'est donc dans ce domaine qu'elle doit être la plus utilisée. Le jugement des décideurs s'exerce à partir des recommandations et sur les options qui leur sont présentées au sujet de problèmes donnant lieu à controverse. Mais il est aussi influencé par les opinions subjectives des groupes sociaux intéressés. Ainsi, l'étude d'un problème technologique spécifique devrait requérir non une EST, mais plusieurs. Cela est rarement le cas : la rigueur scientifique des recommandations et options proposées est alors fortement sujette à caution.

Cette situation conduit à envisager deux possibilités :

— soit entreprendre plusieurs EST sur une même innovation technologique, par exemple en prenant en considération les opinions des divers groupes sociaux concernés et/ou de différents consultants extérieurs ;

— soit analyser les opinions exprimées par les groupes sociaux au sujet d'un même problème à l'aide d'un modèle donnant des résultats satisfaisants sur le plan de l'objectivité.

Ces deux alternatives ne sont, en général, pas acceptables par les entreprises. En ce qui concerne la première, il n'est pas envisageable pour celles-ci d'entreprendre plusieurs EST en raison de la limitation de leurs ressources. Quant à la seconde, il n'est pas réaliste de penser que les entreprises puissent, dans l'immédiat, mettre en place des processus de consultation et de participation de leurs employés ou des citoyens à une grande échelle.

Cependant, pour certaines décisions, en particulier celles d'implantations et d'investissements, plusieurs entreprises ont déjà effectivement cherché à connaître l'avis de leur personnel. Il semble donc que ce soit plutôt dans ce sens que les choses devraient évoluer.

Recherche des conditions rendant possible l'introduction de l'EST dans l'industrie

Faisant la synthèse des éléments recueillis dans son enquête auprès des industriels, V. Oberkampf exprime l'opinion que, pour favoriser l'introduction de l'Évaluation Technologique dans l'industrie, il conviendrait d'entre-

prendre des recherches théoriques et expérimentales dans quatre directions :

Mise au point d'un cadre méthodologique préconisant une formalisation du processus d'évaluation réduite au minimum, de manière à ne pas heurter le pragmatisme des industriels.

Adaptation des méthodes existantes ou création de nouvelles méthodes d'analyses de manière à satisfaire les besoins spécifiques de l'industrie.

Mise au point d'un « mini-processus d'EST » pour les entreprises et identification des problèmes susceptibles d'être traités par cette démarche allégée.

Développement de la recherche sur les problèmes organisationnels des entreprises pour y faciliter la mise en œuvre de l'EST.

Conclusion

Limites et contexte de l'Évaluation Technologique

Les outils méthodologiques, aussi perfectionnés soient-ils, ne sont valables que dans le cas de leur intégration dans une analyse globale du système socio-économique et d'une coopération plus grande entre les « Évaluateurs Technologiques » et la sphère politique.

Les évaluateurs technologiques, souvent conditionnés par la méthode scientifique, ne cherchent pas à formuler des recommandations fondées sur des jugements de valeur et qui tendraient à modifier le système de valeurs existant; cela leur permet d'éviter les recommandations politiques trop précises.

L'attitude contraire consiste à expliciter les valeurs et les politiques sociales avant de procéder à l'évaluation considérée comme outil de planification et d'aide à la décision. A ce niveau, les limites de l'Évaluation Technologique viennent de la difficulté à comprendre simultanément les problèmes technologiques et les problèmes sociaux. Une analyse socio-technique globale aboutirait à la construction de modèles dynamiques prenant en compte la multitude des impacts d'une innovation technologique sur l'environnement, l'économie, la société et la sphère politique.

Ce type de modèle idéal, dont le but serait de placer l'Évaluation Technologique au-delà de la prévention des effets secondaires nocifs, en favorisant un développement social équilibré en fonction des valeurs et des besoins de la société, ne peut se concevoir que dans un cadre institutionnel qui associe les processus d'innovation et de décision. Dans cette perspective, la programmation à long terme de la recherche (afin de produire des connaissances exigées par la naissance de nouvelles technologies), et des transformations juridiques et sociales sont nécessaires à la concrétisation des aspects incitatifs et régulateurs de l'Évaluation Technologique.

En bref, aux États-Unis, le « Technology Assessment » est maintenant une discipline à part entière avec ses chercheurs et ses laboratoires. La création d'un « Office of Technology Assessment » au Congrès américain a rendu son utilisation systématique, en tout cas en ce qui concerne les choix technologiques importants. Dans certains cas, parce qu'une étude de TA avait montré les conséquences négatives d'une technologie en cours d'élaboration, il a pu être décidé de ne pas la réaliser; dans d'autres cas, les aspects positifs ont pu permettre d'accentuer les recherches. Il peut se produire, également, que la mise en place d'une équipe de TA, interindustrielle et en même temps interdisciplinaire, ait pour résultat de limiter considérablement les effets d'une ou de plusieurs technologies sur la société et sur l'environnement. De telles équipes peuvent également favoriser la collaboration au niveau de la recherche entre différents secteurs industriels et donner ainsi naissance à une sorte de planification interindustrielle, permettant par exemple d'éviter que l'imprévoyance de tel secteur industriel ait des conséquences néfastes, non seulement sur l'environnement, mais aussi sur d'autres secteurs industriels.

La France et l'EST

Bien que le problème se présente d'une manière tout à fait différente en France, et que l'évaluation des options technologiques semble avoir été depuis longtemps prise en compte, notamment dans l'action réglementaire de l'Administration (loi sur les Établissements classés, *J.O.*, Brochure 1001), il semble que nous assistions depuis quelque temps à un renouveau en matière d'Évaluation Technologique, qui se dessine à travers les quatre principales lois votées à une session parlementaire récente :

— Loi du 19 juillet 1976, relative à la Protection de la Nature.

— Loi du 19 juillet 1976 : Installations classées pour la Protection de l'Environnement.

— Loi du 7 juillet 1976 : Pollutions marines.

— Loi du 15 juillet 1975 : Élimination des déchets et récupération des matériaux.

La plus importante semble être la loi sur la protection de la nature. (Il est à signaler que le terme « étude d'impacts » entre pour la première fois dans le vocabulaire du législateur.) Bien qu'elle n'ait fait qu'entériner des pratiques administratives déjà anciennes, le fait d'avoir voulu donner un fondement légal à la doctrine constitue une étape dans la prise de conscience que les Évaluations Technologiques sont nécessaires à la protection de l'environnement.

Mais la notion même d' « environnement », difficile à limiter si elle s'étend à l' « ensemble des éléments et phénomènes tels que la modification de l'un ou de plusieurs d'entre eux soit ressentie par l'homme », peut transformer les « études d'impacts » prescrites par la loi en de véritables Évaluations Sociales de la Technologie au sens américain du terme, par l'intermédiaire d'un simple décret jouant sur la définition du mot environnement.

Récemment, un pas de plus semble avoir été fait par une proposition de loi visant à créer un Office pour l'évaluation des options technologiques au Parlement, l'expression « évaluation des options technologiques » étant définie ici comme l' « examen de toutes les incidences physiques, biologiques, économiques, sociales, politiques, que peut avoir l'introduction d'une nouvelle technologie ou l'utilisation nouvelle d'une ancienne technologie ».

Il semble donc que la pratique de l'évaluation des options technologiques soit en voie de s'institutionnaliser en France, et il sera peut-être difficile, dans la conjoncture actuelle, d'occulter longtemps sa dimension politique.

Exemples d'études d'Évaluation Sociale de la Technologie

Voyons maintenant ce que représente concrètement l'Évaluation Sociale de la Technologie. Nous avons choisi à dessein d'aborder des problèmes très différents : le choix entre différents systèmes avancés de propulsion automobile, la modification artificielle des conditions climatiques et, enfin, le développement de l'utilisation du vidéo-phone que nous analyserons en détail.

Évaluation de l'adoption de systèmes avancés de propulsion automobile

Objet de cette étude

Cette étude a été réalisée par un bureau d'études privé, *Hittman Associates,* en relation avec le *California Institute of Technology*. L'équipe chargée de cette étude comprenait huit membres du personnel de la société et trois personnes appartenant à l'URC (University Research Corporation), un organisme para-universitaire, chargées des considérations socio-économiques. L'étude fut lancée et financée par la Fondation nationale des sciences (NSF).

Les conclusions de l'étude étaient censées procurer des points de repère intégrés, factuels et analytiques permettant aux discussions professionnelles et publiques sur ce problème de se dérouler d'une manière plus raisonnée et avec plus d'informations. Son objet était d'examiner les conséquences aussi bien directes qu'indirectes de l'adoption de systèmes de propulsion automobile concurrents, susceptibles de respecter ou de dépasser les normes fédérales d'émission d'air « propre » de l'année 1975-76.

L'étude ne fait aucune recommandation relative au « meilleur » système de propulsion automobile. Une matrice fut construite pour faire ressortir les interrelations entre cinquante politiques fédérales possibles, chaque système possible et chacun des sept scénarios imaginés dans le cadre de l'étude relativement à ces systèmes.

Le groupe de recherche avait accès à un certain nombre de sources de données, parmi lesquelles on peut citer les données sur la recherche automobile, la pollution de l'air, et les données sur l'environnement fournies par les principaux constructeurs automobiles et l'Agence pour la protection de l'environnement (EPA). En raison de la nature très technique de cette étude, les chercheurs n'ont pas tenté de recueillir l'opinion des citoyens ou de groupes d'intérêts. Un modèle de simulation informatique a été utilisé pour quantifier les effets prévisibles sur l'économie, les transports, l'environnement, etc., de l'adoption de chacun des systèmes de propulsion automobile étudiés.

Composantes de la matrice

Les lignes de la matrice représentent les différentes options politiques possibles (50) regroupées en trois groupes :

a) Politiques de subventions du gouvernement, avec notamment les variantes suivantes : priorité à l'industrie, au consommateur ou aux collectivités locales.

b) Mesures fiscales comprenant notamment : les taxes fédérales ou d'État, les taxes locales, les primes au recyclage des déchets.

c) Mesures réglementaires :

— normes d'émission des gaz polluants, au niveau fédéral ou des États ;

— plafonnement de la production ;

— planification globale des transports et de l'utilisation du sol ;

— moratoire sur la construction des routes ;

— restrictions concernant l'utilisation des combustibles dans certaines zones ;

— rationnement de l'essence, du gas-oil et des pneus.

Les colonnes de la matrice indiquent d'une part les sept systèmes pris en compte :

1. cycle Rankine,
2. turbine à gaz,
3. cycle d'Otto avancé,
4. cycle d'Otto légèrement avancé,
5. cycle d'Otto rotatif,
6. batterie acide au plomb,
7. volant à inertie/système hybride.

Elles présentent d'autre part les sept scénarios retenus :

1. maintien des normes d'émission ; développement et commercialisation progressive du cycle Rankine et de la turbine à gaz ; retard dans l'introduction des systèmes avancés ;
2. maintien des normes, mais difficultés rencontrées dans le développement des nouveaux systèmes ; augmentation de l'intérêt pour le cycle avancé d'Otto ;
3. maintien des normes, mais le niveau d'émission de NO_x pour le cycle d'Otto avancé ne peut être atteint sur la base d'un entretien tous les 80 000 km ; abandon progressif du cycle traditionnel (Beau de Rochas) pour le cycle d'Otto avancé ;
4. subventionnement massif des transports en commun ;
5. renforcement des normes pour les émissions de NO_x ;
6. apparition de véhicules non polluants dans les zones urbaines ; généralisation de la 2e voiture ;
7. incitations au recyclage des matériaux venant des voitures hors d'usage.

Le modèle utilisé affecte à chaque case de la matrice un code binaire : 0 ou + selon l'absence ou l'existence d'une relation entre les composantes concernées de la matrice.

Les résultats fournis par la simulation de chaque scénario sont analysés à l'aide de graphes.

Conclusion

Cette étude ne permet pas d'évaluer des stratégies, mais elle fournit des informations aux instances qui prennent les décisions. Elle est principalement fondée sur un modèle informatique qui a révélé une richesse de relations et de conséquences qui n'étaient ni évidentes ni prévues. Il faut remarquer qu'il est impossible à un non-informaticien de comprendre ce qui est inclus dans le modèle et ce qui ne l'est pas ; de même, pour comprendre les différents scénarios, il est nécessaire de s'y connaître en mécanique automobile.

Il s'agit donc d'une étude faite par des experts pour des experts, qui reste absolument inaccessible à la plupart des gens, même dans la forme résumée sous laquelle elle a été diffusée. Une étude de ce type est cependant fort utile aux constructeurs d'automobiles, puisqu'elle leur donne des indications sur la manière d'adapter leur production aux contraintes qui vont découler d'une sévérité accrue des normes d'émission et de la crise de l'énergie. La plupart des stratégies envisagées dans la matrice sont des stratégies réglementaires, c'est-à-dire faisant appel à une action réglementaire des pouvoirs publics. Comme l'a montré T. Lowi, ces stratégies sont bien conformes aux pratiques habituelles du système politique américain lorsqu'il s'agit de se prémunir contre certains risques : « Si le gouvernement doit avoir une action réglementaire, comme on l'a affirmé, il a alors nécessairement besoin de scientifiques pour étudier en détail les mesures à prendre, avancer les arguments et les justifications en faveur de cette réglementation et mettre au point les techniques permettant aux industriels de les appliquer. » C'est précisément l'objet de cette étude.

Évaluation d'une modification artificielle des conditions climatiques

Objet de cette étude

Il s'agit d'une évaluation des effets de l'augmentation artificielle des chutes de neige en hiver dans le haut bassin du Colorado, étude réalisée par l'Institut de recherche de l'université de Stanford (SRI) pour le compte de la NSF.

Une vingtaine de personnes se sont partagé la responsabilité du projet ; la plupart étaient des chercheurs du SRI et les autres venaient soit de l'université de Californie, soit de bureaux d'études privés. Neuf autres consultants ont aussi été engagés pour traiter de sujets spécialisés tels que la météorologie, l'économie, les questions relatives à la législation et aux institutions.

L'étude a été engagée par le Comité interministériel sur la science de l'atmosphère. Il s'agit en quelque sorte d'une excroissance d'un programme opérationnel du ministère de l'Intérieur (Department of the Interior) sur les expériences de modification du temps.

L'étude fournit une série de recommandations pour la recherche et le développement visant à éclaircir certaines incertitudes qui compliquent la planification et les décisions dans le domaine météorologique. Elle comprend également des recommandations relatives à l'établissement d'un Comité fédéral pour la réglementation des modifications du temps.

Méthodologie

Un certain nombre d'outils statistiques classiques sont employés. Par exemple, on a calculé des coefficients de corrélation pour relier les modifications des chutes de neige aux décès causés par les principales insuffisances cardio-vasculaires, la grippe et la pneumonie, les accidents de la route, etc. Le rapport est centré sur une chaîne causale étroitement combinée à une analyse de systèmes.

Le modèle relie visuellement un certain nombre de considérations qui sont conceptuellement interdépendantes. Les principaux éléments étudiés dans l'analyse

▼ *Déclenchement volontaire d'une avalanche à Squaw Valley par le tir d'un canon de 105 mm.*

U.S.I.S.

du système sont : une définition (description technique) du système d'accroissement des chutes de neige ; les modifications initiales que ce système apporterait à l'environnement et aux systèmes écologiques et sociaux; les effets secondaires et tertiaires qui s'ensuivraient; les conséquences sur les décisions politiques et administratives de ces modifications; leurs conséquences sur les ressources naturelles.

Cette étude analyse différentes conséquences du projet : les risques d'avalanche ; les risques d'inondation ; les effets sur l'environnement (effets sur la faune, effets sur les rivières et les lacs, effets de l'iodure d'argent) ; les effets économiques (effets de l'augmentation de l'enneigement, besoins en eau, accroissement des disponibilités en eau et problème de la propriété de l'eau résultante).

Le rapport comprend des recommandations concernant l'action réglementaire, la recherche et le développement, les modifications à la législation et à la politique gouvernementale, les mesures de sécurité.

De plus, on a effectué une étude des comportements vis-à-vis de ces problèmes, en s'adressant principalement, mais non uniquement, aux résidents de la zone concernée. Cette étude a révélé qu'ils jugent l'expérience souhaitable parce qu'elle fournit davantage d'eau pour certains usages, à condition que les instances qui prennent les décisions prévoient des modes de contrôle prenant en considération les conséquences néfastes possibles pour eux.

Conclusion

Cette étude est plus accessible au citoyen moyen que la précédente, surtout sous sa forme abrégée, probablement parce que son sujet est beaucoup moins technique. Cette forme abrégée constitue de plus un effort de vulgarisation non négligeable qui était absent de l'étude précédente. Elle comprend l'évaluation des différentes politiques et des propositions concernant une « bonne » politique pour gérer le processus dans « l'intérêt général ». Elle intègre également une certaine forme de participation par le biais de l'étude des comportements.

Cependant, elle n'a pu éviter les inconvénients d'une telle approche ; comment le pourrait-elle d'ailleurs ? Son rôle n'est pas — comme pour toute Évaluation Sociale d'une Technologie — d'analyser les déterminants de la technologie à évaluer ni de mettre en cause la croissance technologique en général : « Nous pouvons éviter certains problèmes si nous interdisons le développement ou l'application d'une technique qui engendre des difficultés. Si le projet est suspendu, les bénéfices éventuels sont perdus. Une seule manière de régler les problèmes potentiels semble prometteuse : anticiper ces problèmes puis mettre en œuvre les moyens et les motivations permettant de les minimiser au sein des institutions qui seront amenées à développer et à appliquer cette technique. »

Les auteurs de l'étude estiment donc que les institutions chargées de promouvoir l'utilisation d'une nouvelle technique doivent impérativement se prémunir contre les difficultés ou les dangers qui pourraient en résulter. Deux situations peuvent se présenter : il s'agit ou bien d'organismes privés, qui doivent alors inclure un processus d'Évaluation Sociale de la Technologie dans leur action, ou bien d'organismes publics. Dans les deux cas, l'intervention de l'État est accrue, dans l'un par la voie réglementaire, dans l'autre par la voie administrative.

Quant à la « participation du public », qui se traduit dans cette étude par une « étude des comportements », elle semble avoir donné ici des résultats dérisoires : la conclusion à laquelle aboutissent les auteurs est que le public est prêt à accepter l'introduction du nouveau procédé à condition que ses « mauvais » effets soient contrôlés. Était-il vraiment nécessaire de faire une étude de « comportements » pour arriver à une telle conclusion ?

En résumé, bien que la deuxième étude puisse être considérée comme moins « technocratique » que la première, car elle est plus accessible au public, ni l'une ni l'autre ne permet la participation annoncée de celui-ci. Et après dix ans d'Évaluation Sociale de la Technologie aux États-Unis, pratiquement aucune étude de ce genre n'a su l'intégrer réellement.

On peut encore dire que ces deux études constituent un échantillon représentatif des EST réalisées dans ce pays.

Évaluation du développement du vidéo-téléphone

Objet de cette étude

Au cours des cent dernières années, le nombre des téléphones en France a augmenté considérablement. Il augmentera encore davantage dans les années qui viennent conformément à la volonté des pouvoirs publics. Le téléphone fait partie intégrante de la vie des Français et on l'utilise à tout instant et pour toutes sortes de raisons. Il est devenu absolument indispensable, à tel point qu'une personne qui n'en a pas chez elle est en quelque sorte « handicapée ». Il n'est donc pas exagéré de dire que le téléphone marque profondément notre société.

Le vidéo-téléphone est un téléphone auquel on a ajouté un récepteur de télévision; il permet ainsi de transmettre à la fois le son et l'image dans une conversation téléphonique.

Il n'y a pratiquement pas de vidéo-téléphones en service à l'heure actuelle en France ; mais que se passerait-il si on introduisait le vidéo-téléphone et si on le rendait accessible à tous ? Un grand nombre d'actions seraient facilitées : par exemple, le vidéo-téléphone peut être utilisé pour des communications en face à face, pour visualiser des textes télégraphiques, comme terminal d'ordinateur, et dans ce cas, il permet de voir d'un seul coup l'ensemble des informations nécessaires à un calcul. Les infrastructures de télécommunication nécessitées par le vidéo-téléphone permettent également de transmettre des données entre ordinateurs à des vitesses considérables : on peut ainsi reproduire des documents à distance avec beaucoup de détails en un temps record.

Il y a peut-être maintenant mille appareils de ce genre en service dans le monde. Malgré ce faible nombre, il a été possible de mettre en évidence certains des impacts que l'introduction et l'utilisation massive du vidéo-téléphone auraient sur la société.

Après avoir décrit rapidement les caractéristiques techniques du vidéo-téléphone nous évaluerons ses impacts économiques et sociaux.

Caractéristiques des différentes sortes de vidéo-téléphones

Vidéo-téléphones animés

Ce sont des appareils qui transmettent une image animée pouvant être celle de l'interlocuteur. L'exemple le plus connu est celui du *Picturephone* de la Companie Bell qui est actuellement utilisé à Pittsburgh et à Chicago. C'est le seul cas connu d'un tel service offert par une compagnie de téléphone.

On sait que pour transmettre une image par radio ou par câble comme dans le cas du vidéo-téléphone, il faut davantage de canaux que pour transmettre le son, car on transmet beaucoup plus d'informations à la fois : l'image est obtenue par le déplacement d'un faisceau lumineux à intensité variable selon des lignes horizontales de haut en bas de l'écran. Puisque l'œil humain retient une information lumineuse pendant un court espace de temps et

U.S.I.S.

◀ *Un des premiers modèles de vidéo-téléphone de la Bell Telephone (États-Unis).*

cliché CNET

U.S.I.S.

▲ *A gauche, modèle de vidéo-téléphone : le* Visiophone *de la société Matra (avec son nouveau terminal). A droite, modèle récent de vidéo-téléphone, le* Picturephone *(Bell Telephone System) est utilisé par la Westinghouse Electric Corporation pour les communications entre ses bureaux de Pittsburgh et New York.*

▼ *Tableau V : systèmes de vidéo-téléphones animés en service ou à l'étude.*

que ce faisceau lumineux se déplace très vite, on a l'illusion, en regardant l'écran, de voir une image alors qu'en réalité, à un instant donné, seul un point de cet écran est réellement lumineux (phénomène de rémanence).

Plus il y a de lignes horizontales à balayer par le faisceau lumineux, plus il y a d'informations à transmettre dans le même temps. La télévision française utilise, par exemple, des images définies par 625 ou 819 lignes. Comme l'écran du *Picturephone* est nettement plus petit qu'un écran de télévision moyen, on arrive à avoir une image nette avec seulement 251 lignes. Le faisceau lumineux étant obtenu par la projection d'électrons sur l'écran (principe du tube cathodique), le nombre de points d'impact par ligne est aussi une mesure de la quantité d'informations transmises : dans le cas de la télévision, on arrive à 800 points d'impact par ligne; dans le cas du *Picturephone,* on se contente de 211 points. Bien entendu, si elle était agrandie, l'image obtenue serait beaucoup moins nette qu'une image de télévision. Enfin, comme pour le cinéma, plus on produit d'images par seconde, plus le mouvement est décomposé et donc plus

Tableau V

Systèmes de vidéo-téléphones animés en service ou à l'étude

Pays	Fabricant	Nom du système	État d'avancement
États-Unis	Western Electric (Système Bell)	Picturephone	En service (Chicago et Pittsburgh)
	Stromberg-Carlson	Vistaphone	En cours de fabrication
	GTE	Pictel	Démonstration
Suède	L.M. Ericsson	—	Production limitée et essais
Grande-Bretagne	Post Office	Viewphone	Essais limités
	Pye	Videophone	Apparemment simple réservation d'appellation
	Plessy	—	Expérimental
Japon	Toshiba	—	—
	Fujitsu	—	—
	Nippon Electric	—	—
	Hitachi	—	—
Allemagne fédérale	Siemens	—	—
France	CIT-Alcatel Thomson-Brandt Matra	Visiophone	Démonstration
Pays-Bas	Philips	—	—

il paraît continu. Dans le cas du vidéo-téléphone, comme pour la télévision, trente images sont transmises à la seconde, ce qui augmente d'autant le nombre d'informations à transmettre dans le même temps.

La transmission téléphonique de l'image est donc beaucoup plus compliquée que celle du son. Par conséquent, elle nécessite des installations bien plus sophistiquées et donc bien plus coûteuses. L'information doit être « codée », c'est-à-dire transformée en impulsions électriques dans des centraux spéciaux relativement nombreux, car l'image non codée ne peut être transmise à plus de 9 km de son point d'émission.

D'autres compagnies fabriquent des appareils de ce genre. Le seul autre modèle qui soit commercialisé actuellement est celui fabriqué par Stromberg-Carlson. Ericsson a également mis un système au point en Suède, mais les appareils correspondants ne sont pas encore produits à grande échelle. En France, trois firmes ont travaillé en collaboration sur un système français, le *Visiophone.* Il s'agit de CIT-Alcatel, Thomson-Brandt et Matra. Un mini-réseau d'essai est à l'heure actuelle en cours d'expérimentation à Paris au sein des services de recherche des P.T.T., entre un certain nombre de bureaux de poste importants et le secrétariat d'État aux Télécommunications. Pour l'instant, il n'est pas question de permettre l'utilisation d'un tel système en France par des utilisateurs privés : la priorité est plutôt donnée à l'amélioration du réseau téléphonique classique qui est encore loin de répondre à la demande et pour lequel un effort considérable reste à faire.

Le *tableau* V fait le point sur les recherches effectuées dans ce domaine.

Vidéo-téléphones à images fixes

Ce sont des appareils qui, en plus de la voix, transmettent des images fixes. La conversation ressemble alors à la présentation d'un montage audiovisuel de diapositives. Il n'y a donc pas de spectateurs sur place, mais les téléspectateurs, à l'autre bout du fil, peuvent eux-mêmes répondre par un montage équivalent. L'avantage évident par rapport au système animé est que les infrastructures de télécommunication nécessaires (câbles, etc.) sont beaucoup moins importantes et finalement assez proches de celles du téléphone classique (la quantité d'informations à transmettre est en effet beaucoup plus faible, puisqu'il n'y a pas plusieurs images à la seconde mais une seule image pour plusieurs secondes). Par conséquent, l'utilisation d'un tel équipement dans un proche avenir par des utilisateurs privés est nettement plus probable que dans le cas précédent.

Du point de vue technique, le principe est assez simple : l'image est transformée en impulsions sonores qui peuvent ainsi être enregistrées sur un magnétophone classique. De plus il y a un gros avantage à pouvoir utiliser le réseau téléphonique existant : le coût d'une communication n'est pas plus élevé que celui d'une communication normale et il suffit d'acheter dans le commerce un visualisateur spécial pour transformer un poste classique en vidéo-téléphone à images fixes.

La firme américaine RCA a d'ores et déjà lancé un tel visualisateur, le *Videovoice,* disponible sur le marché

américain (on peut le louer comme on loue un photocopieur). Le seul inconvénient, c'est que pendant le temps de transmission de l'image (qui, comme nous l'avons dit, est « transformée en son »), c'est-à-dire pendant environ 55 secondes, il n'est pas possible de parler, sauf si l'on dispose d'un autre appareil de téléphone de part et d'autre. Si l'objet ou le document dont on veut transmettre l'image est mobile, une sorte de photographie instantanée est prise et c'est celle-ci qui est transmise. Si elle n'a pas été enregistrée, l'image qui apparaît à l'autre bout du fil reste en mémoire pendant environ 30 minutes.

Techniques concurrentes du vidéo-téléphone

Un certain nombre de techniques existantes ou en cours de mise au point peuvent apparaître comme concurrentes du vidéo-téléphone. Comme nous allons le voir, une seule rivalise réellement avec celui-ci, alors que les autres sont ou seront des compléments éventuels.

Appareils « Facsimile »

C'est le nom donné aux États-Unis aux appareils qui permettent de reproduire une image à distance. Ce genre d'appareil est par exemple utilisé par les reporters en mission pour transmettre des clichés à leur journal; il peut être utilisé avec des lignes téléphoniques ordinaires : un premier appareil code l'image à une extrémité et un second la décode à l'autre. On voit tout de suite qu'il peut servir à reproduire sur papier les images transmises par vidéo-téléphone, qu'il soit animé ou non. Un tel appareil utilisé seul peut cependant, dans de nombreux cas, remplacer le vidéo-téléphone, surtout le modèle statique.

Le modèle de « Facsimile » le plus répandu est celui de la firme Rank Xerox (le plus gros fabricant de photocopieurs) : le « télécopieur ». Le coût d'utilisation d'un « télécopieur » est nettement plus faible que celui d'un vidéo-téléphone statique : on peut en louer un pour environ 500 F par mois (1978), et le papier spécial nécessaire à la reproduction coûte environ 50 centimes la feuille. Cependant, le fait que la reproduction se fasse par un moyen mécanique engendre une perte de qualité à chaque reproduction. Un usage conversationnel comparable à celui du vidéo-téléphone statique est donc très difficile : à la troisième ou quatrième reproduction du même document — qui est par exemple l'objet d'une discussion —, on ne voit pratiquement plus rien.

Vidéo-cassettes

Il s'agit cette fois-ci tout simplement de bandes magnétiques comparables aux cassettes sonores couramment utilisées aujourd'hui, avec la seule différence que l'image est également enregistrée. Pour écouter et regarder la bande, il suffit d'utiliser un magnétoscope, c'est-à-dire l'équivalent d'un magnétophone pour les vidéo-cassettes. Un magnétoscope peut se brancher sur n'importe quel appareil de télévision. Pour effectuer les prises de vue, on se sert d'une caméra de télévision : l'image est ainsi directement enregistrée sur bande magnétique; elle peut être ensuite transmise par la poste.

L'inconvénient est bien entendu que toute conversation en temps réel est absolument impossible. Le gros avantage est que la capacité d'une cassette est énorme en ce qui concerne l'enregistrement de documents : en miniaturisant les textes à l'extrême, on arrive à enregistrer plusieurs ouvrages entiers sur une même cassette : environ 20 millions de mots sur une cassette de 60 minutes. Les vidéo-cassettes peuvent évidemment être utilisées en complément de vidéo-téléphones animés ou non : dans ce cas, le message transmis peut être un enregistrement de vidéo-cassette aussi bien qu'une conversation réelle.

Télévision par câble à deux directions

Alors que les deux systèmes précédents ne concurrencent pas réellement la vidéo-téléphonie, puisqu'ils ont des usages différents et peuvent être utilisés en complément d'un vidéo-téléphone, ce n'est pas le cas des systèmes de télévision par câble à deux directions, qui sont des systèmes conversationnels, indépendants du réseau téléphonique : tous les appareils d'un même secteur sont reliés par câble à un central muni d'une antenne collective et assurant les fonctions d'émission et de réception. Le système est donc une habile combinaison des techniques du téléphone et de la télévision.

U.S.I.S.

▲ Le Videovoice de la Radio Corporation of America (RCA) est un système permettant la transmission, à longue distance, d'images en noir et blanc.

Ce système est très répandu aux États-Unis pour la réception des programmes commerciaux de télévision, sans fonction émettrice bien entendu. Il permet ainsi à un téléspectateur relié au câble de recevoir des émissions de télévision assez éloignées : presque chaque ville américaine dispose de plusieurs chaînes de télévision locales. C'est ainsi que dans certaines villes, les abonnés au « câble TV » arrivent à recevoir plus de vingt chaînes provenant parfois de plus de dix villes différentes.

Un système à deux directions à l'aide duquel chaque abonné pourrait à son tour émettre une émission personnelle remplacerait avantageusement le vidéo-téléphone. Cependant, il faudrait alors créer des centraux comparables aux centraux téléphoniques et ceux-ci seraient bien plus complexes. Pour l'instant, les promoteurs du système limitent leur ambition à permettre une réponse statique de la part de l'abonné, c'est-à-dire l'envoi d'un document par voie téléphonique, par exemple en réponse à une émission télévisée arrivant par câble. C'est ce type de projet qui risque fort d'être mis au point et commercialisé prochainement. Il permettra par exemple à de très nombreuses personnes de participer simultanément à des jeux télévisés. Il pourra aussi donner un accès facile à des ordinateurs et chacun pourra par exemple jouer aux échecs sur sa télévision. Le problème en France est surtout un problème légal lié au monopole de l'État en ce qui concerne la radio et la télévision.

Vidéo-téléphone de l'avenir

Compte tenu de l'état d'avancement des connaissances techniques dans le domaine de l'électronique, de la télévision et des télécommunications, le vidéo-téléphone qui a le plus de chances d'être commercialisé dans les années à venir, et dont nous étudierons les

▼ Exemple de transmission visiophonique couplée avec un télécopieur sur le même canal (matériel Matra).

cliché CNET

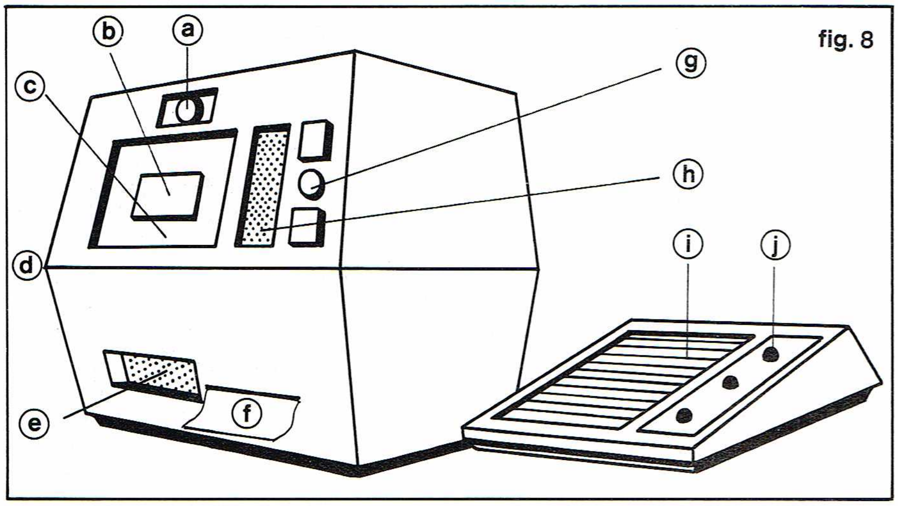

▲ *Figure 8 ; schéma du vidéo-téléphone de l'avenir :* a) *caméra vidéo avec cache permettant de se servir du dessus de l'appareil comme dans une photocopieuse pour la reproduction et la transmission de documents,* b) *petit écran pour la réception d'images « animées »,* c) *grand écran pour le fonctionnement en mode « statique »,* d) *la partie supérieure de l'appareil peut pivoter par rapport à la partie inférieure (modification de l'orientation de l'écran pour la réception et de la caméra pour l'émission),* e) *réceptacle pour* vidéocassettes, f) *sortie du papier provenant du « Facsimile » (comparable à une sortie d'imprimante d'ordinateur),* g) *sélecteur de mode animé ou statique,* h) *haut-parleur et micro,* i) *clavier alphanumérique complet,* j) *interrupteurs et boutons de contrôle de l'ensemble.*

▶ *Page ci-contre, figure 9 : l'interrogation de banques de données à partir d'un téléphone à clavier avec réponses sur écran de télévision.*

impacts sociaux et économiques, aura à peu de choses près les caractéristiques suivantes :

— un petit écran de télévision en couleur à définition équivalente à celle du *Picturephone ;*

— la possibilité de choix entre mode de fonctionnement « animé » et mode de fonctionnement « statique » pour la transmission de textes ou de documents graphiques préparés à l'avance et nécessitant une très bonne qualité de reproduction et une bonne précision ;

— en option, un appareil de reproduction sur papier « Facsimile » couplé à l'appareil ;

— en option, un enregistreur — lecteur de vidéo-cassettes — couplé également à l'appareil et capable de reproduire plusieurs minutes d'échanges « animés » ou des milliers de documents « statiques ». Les informations enregistrées sur vidéo-cassettes pourraient alors être soit en partie reproduites sur papier par l'appareil « Facsimile », soit retransmises au cours d'un échange ultérieur ;

— en option, un clavier électronique alphanumérique pour la transmission directe de textes ou documents écrits, et les échanges éventuels avec un ordinateur ;

— une sonnerie d'appel permettant de savoir qu'un autre utilisateur essaie d'établir le contact pour une communication vidéo-téléphonique, avec un dispositif permettant d'interrompre un usage non conversationnel de l'appareil ;

— un haut-parleur et un micro permettant de se servir de l'appareil les mains libres pour prendre des notes ou faire des calculs.

La *figure* 8 illustre ce vidéo-téléphone « de l'avenir ».

Utilisations potentielles du vidéo-téléphone

Si l'on vous demandait aujourd'hui si vous aimeriez posséder un vidéo-téléphone et quel usage vous pourriez en faire, vous répondriez peut-être que vous vous

A. Noguès - Sygma

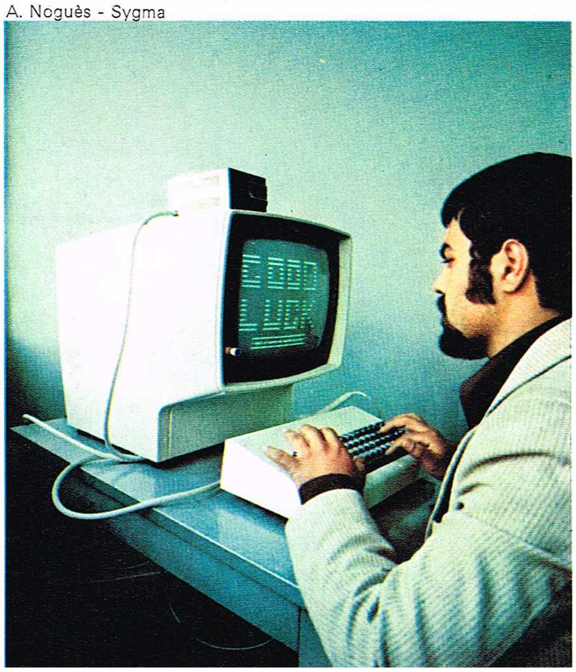

▶ *Console de visualisation (écran + clavier) couplée à un ordinateur.*

en passez très bien. Mais n'auriez-vous pas déclaré la même chose il y a quelques années au sujet des calculateurs de poches qui sont aujourd'hui si répandus ?

Toutes sortes de possibilités nouvelles liées à l'introduction généralisée du vidéo-téléphone auront des conséquences imprévues. Il n'est bien entendu pas possible d'énumérer toutes les utilisations potentielles du vidéo-téléphone. La liste qui suit n'est donc pas limitative.

Échanges « personne à personne »

— Servir de complément aux conversations téléphoniques normales ;

— permettre aux sourds-muets d'utiliser un mode de télécommunications ;

— faciliter une nouvelle sorte de « visites » dans les hôpitaux, les prisons et les postes de travail isolés (les phares par exemples) ;

— permettre la création de services de diagnostic médical et de consultations instantanés à domicile ;

— permettre des entretiens, des interviews, des auditions, des démonstrations à distance pour l'embauche, la prestation de services, la vente et les dossiers de crédit ;

— éviter des déplacements locaux ou lointains ;

— permettre des conférences à distance entre plusieurs personnes pour remplacer les petites réunions ;

— faciliter la participation à des événements éducatifs particuliers, à des conférences, à des expériences ; permettre les leçons particulières à distance ;

— ajouter un caractère humain à certains nouveaux services sociaux telles que les agences matrimoniales ;

— permettre la participation à des débats publics, par exemple municipaux ;

— permettre la création de nouveaux services tels que guichets de banque télévisés pour opérations ne nécessitant pas de remise de documents ou d'argent (par exemple pour les transferts ou la vente de titres).

Échanges « personne à personne » avec transmission de documents ou de graphiques

— Faciliter les révisions, les corrections, la mise en page, la présentation et l'estimation du coût de l'impression des textes scientifiques ou littéraires ;

— augmenter l'utilité de discussions fondées sur des graphiques ou des équations, des abaques, des tableaux, etc. ;

— permettre l'identification des objets volés ou perdus — ainsi que celle des enfants perdus ;

— permettre des déclarations politiques, commerciales ou religieuses personnalisées utilisant des bandes ou des vidéo-cassettes préenregistrées ;

— permettre de faire visiter « à distance » et sans déranger l'occupant actuel les logements à vendre ;

— rendre possibles des travaux dirigés à distance pour les étudiants ;

— faciliter l'accès aux dossiers médicaux et la lecture des diagnostics (radiographies, encéphalogrammes, cardiogrammes, radiogrammes et examen des tissus) et accélérer leurs tranferts.

Échanges « personne à ordinateur »

— Permettre l'accès à des services d'information, y compris des informations comparées sur les prix pour les consommateurs, les offres d'emploi (par exemple, celles de l'ANPE), les horaires des activités culturelles, y compris les concerts et les séances de théâtre et de cinéma, les horaires des transports urbains et interurbains, les informations météorologiques et sur l'état des routes et de la circulation, les informations boursières, les menus des restaurants, etc. (*fig.* 9) ;

— permettre d'obtenir en urgence des conseils médicaux ou concernant des réparations de plomberie ou d'électricité, ou sur le fonctionnement d'appareils ménagers ou la réparation des automobiles ;

— permettre des sessions de formation programmées sur ordinateur sur des programmes scolaires, ou concernant le bricolage, les activités sociales et des leçons de conduite automobile par simulation ;

— offrir des services de conseil pour des questions pédagogiques, personnelles (par exemple, psychanalyse) et conjugales avec l'aide simultanée d'ordinateurs et de conseillers ;

— permettre l'accès à des fichiers de données ou à des dossiers stockés dans la mémoire de l'ordinateur;
— faciliter les calculs complexes privés comme la déclaration d'impôts ou la tenue des comptes bancaires personnels;
— permettre la mise en page directe des journaux à partir d'articles envoyés par des reporters aux quatre coins du monde.

Échanges « personne à machine »
— permettre des systèmes de contrôle à distance pour renforcer la sécurité, la prévention du vol et de l'incendie, la prévision des tremblements de terre;
— permettre la surveillance à distance des personnes, par exemple des grands malades, des prisonniers ou des malades mentaux;
— rendre possibles la transmission et la réception de « courrier télévisé » en utilisant l'écran de l'appareil ou de courrier normal imprimé sur le papier du « Facsimile ».

Échanges « machine à machine »
— Transférer rapidement des fichiers d'un ordinateur à l'autre (en utilisant les infrastructures de communication mises en place pour le vidéo-téléphone).

Bien entendu, seules quelques-unes de ces applications pourront être abordées dans l'évaluation qui va suivre. La classification ci-dessus pourra cependant servir de guide.

Problèmes humains liés à l'introduction du vidéo-téléphone

L'idéal serait bien entendu que toute innovation technologique de l'importance du vidéo-téléphone corresponde réellement à un besoin véritable de l'homme, puisque, par la force des choses, il s'agit également d'une innovation sociale importante. En fait, ce n'est jamais ainsi que cela se passe : l'introduction de nouveaux produits correspond à la convergence de considérations économiques complexes et d'un avancement de la technologie permettant une production industrielle. Cela est vrai aussi pour le vidéo-téléphone. Par exemple le *Picturephone* de la Bell était déjà prêt sur le plan technique avant qu'il soit question de l'efficacité des vidéo-télécommunications du point de vue économique. Malgré cela, on observe qu'aujourd'hui certaines tendances vont dans le sens d'une prise en compte de considérations psychosociologiques dans la décision de fabriquer de nouveaux produits. Le développement d'études d'Évaluation Sociale de la Technologie comme celle-ci en est d'ailleurs la preuve. Nous ne reviendrons pas sur ces points qui ont été abordés précédemment. Nous traiterons ici principalement des impacts de l'usage du vidéo-téléphone comme moyen pour deux personnes ou plus de correspondre entre elles.

Vidéo-téléphone et vie privée

On parle beaucoup aujourd'hui des « atteintes à la vie privée » en faisant référence à certaines activités, comme celles attribuées au ministère de l'Intérieur : fichiers secrets, dossiers individuels d'activités sur ordinateur, tables d'écoute, etc. Mais ne doit-on pas considérer comme atteintes à la vie privée le démarchage à domicile, le bruit, les intrusions visuelles, etc.? Dans une certaine mesure, le vidéo-téléphone constitue également une sorte de nouvelle fenêtre sur la vie privée de ses utilisateurs.

Le téléphone ordinaire a lui-même certainement limité la vie privée des gens depuis cent ans qu'il existe, et modifié leur comportement. Avant le téléphone, ils ne pouvaient communiquer à distance que par lettre et cela leur laissait tout le temps de modeler l'image qu'ils voulaient offrir d'eux-mêmes; ils pouvaient aussi accorder des rendez-vous ou organiser des réunions pour se voir face à face. Le téléphone a créé un stade intermédiaire entre la lettre et la rencontre. Il y a cependant une différence importante : tandis qu'une lettre ou une rencontre se prépare, le coup de téléphone non seulement ne se prépare pas, mais en général ne s'annonce même pas. Il sonne au milieu d'une conversation, pendant un repas, lorsqu'on regarde la télévision...; de plus, on ne sait pas qui vous appelle, de sorte qu'on se sent pratiquement

4 **L'interrogation de banques de données à partir d'un téléphone à clavier avec réponses sur écran de télévision** fig. 9

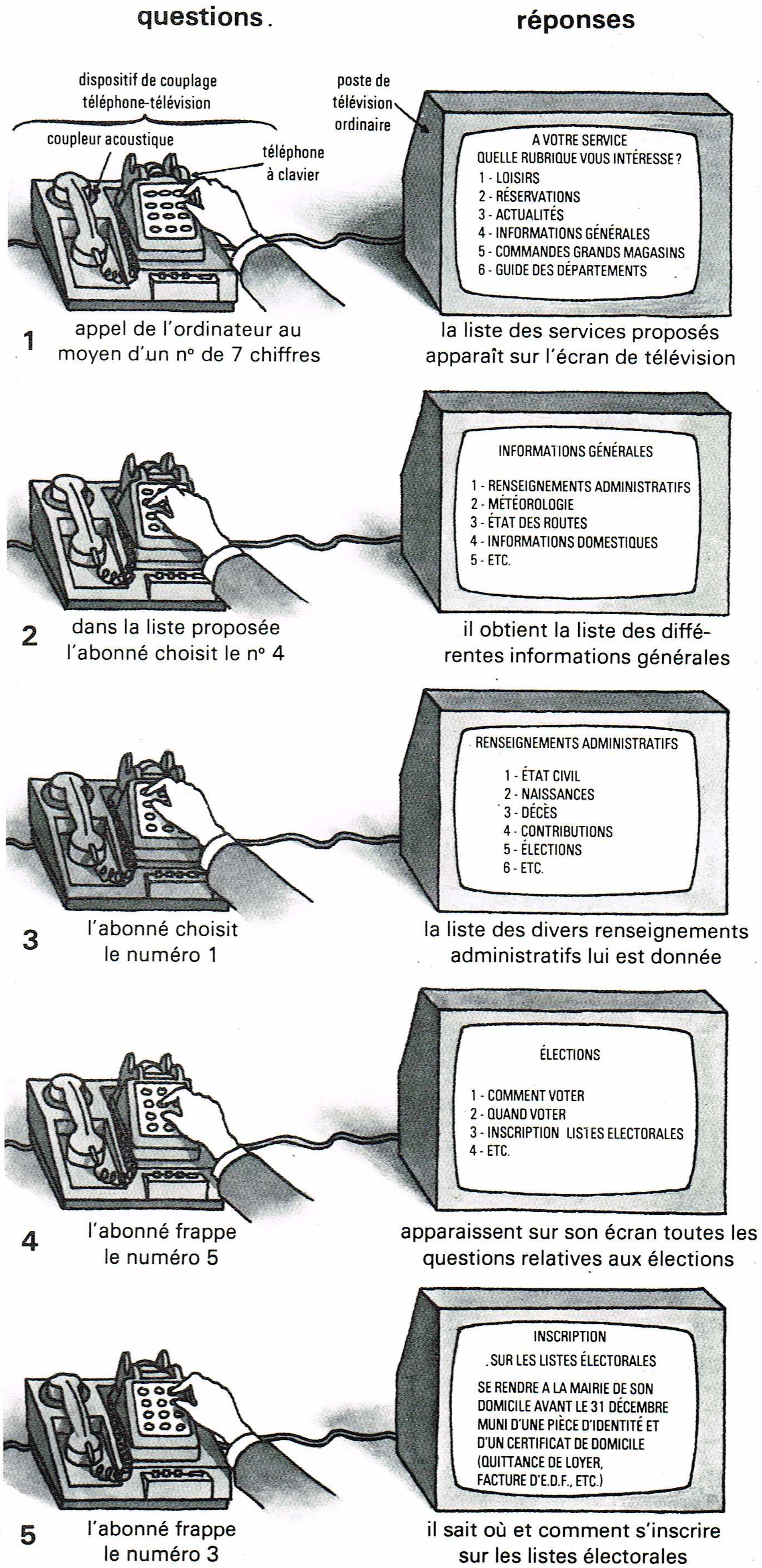

Tanguy de Rémur - L'Express

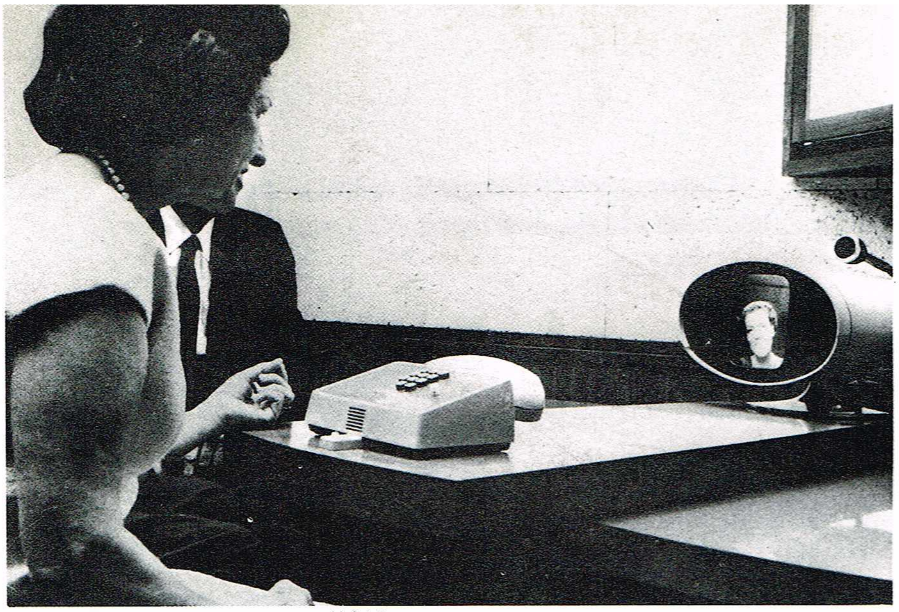

U.S.I.S.

▲ *Inauguration (juin 1964) de la mise en service commercial du système Picturephone (Bell Telephone Company) entre Washington, Chicago et New York par Madame Lyndon B. Johnson.*

toujours obligé de répondre. Certaines catégories de personnes, pour éviter ce type d'inconvénients, font filtrer leurs appels.

Avec le téléphone, tous ceux qui à un moment donné se sentent dérangés sont à leur tour une fois ou l'autre « dérangeurs ». Par ailleurs, le fait d'être invisible à celui qui est à l'autre bout du fil offre des avantages certains : sans paraître impoli on peut, tout en parlant, écrire une lettre, lire, faire des gestes ou des mimiques, etc. Des études ont montré combien certaines personnes sont préoccupées de la façon dont elles sont perçues par les autres; cela se traduit par des manœuvres complexes visant à cacher son embarras et à sauver la face lorsque les choses ne vont pas comme on l'avait espéré. De nombreuses personnes ont appris à contrôler leur image vocale, mais rares sont ceux qui savent de la même manière contrôler leur image visuelle.

Déformations des rencontres en « tête à tête »

A côté de quelques inconvénients évidents comme la limitation du champ de vision et, dans une certaine mesure, la mauvaise définition des couleurs, il y a d'autres phénomènes qui font que le vidéo-téléphone n'est pas encore l'équivalent électronique de la rencontre en « tête à tête ».

Une des causes de cette incapacité du vidéo-téléphone à donner une réplique exacte du « tête à tête » tient à l'extrême sensibilité des caméras dans la zone infra-rouge du spectre lumineux et à la transparence de la peau de l'homme sous cet effet infra-rouge. Ainsi la caméra peut faire ressortir la barbe d'un individu pourtant rasé de très près. Dans le futur, la technologie de ces caméras sera certainement modifiée pour pallier cet effet.

Un autre effet tient à la distance de vision qui sépare deux individus ou un groupe et un individu qui communiquent. Dans toutes les cultures, on a observé l'existence de distances optimales de vision appropriées à diverses situations. Le professeur Hall en a répertorié cinq :

— relation intime : distance inférieure ou égale à 54 cm;

— relation personnelle : distance comprise entre 54 cm et 1,20 m;

— relation sociale : distance comprise entre 1,20 m et 2,40 m;

— relation sociale plus lointaine : distance comprise entre 2,40 et 3,60 m;

— relation publique : distance supérieure à 3,60 m.

Pour le vidéo-téléphone, la distance optimale de vision est d'environ 1,20 m et tombe donc, selon Hall, dans la catégorie « relation personnelle ». Pour atténuer cet effet de distance, on peut imaginer quelques améliorations technologiques; par exemple, l'introduction d'un système de sélection permettrait de faire varier le champ et la distance de vision, ou encore la création d'un « coin vidéo » pourrait donner un décor approprié à la nature de la communication.

Un autre effet négatif résulte de l'exiguïté du champ de l'écran qui oblige chaque individu à fixer intensément son interlocuteur, en créant de part et d'autre une certaine tension nerveuse. Enfin il ne faut pas négliger le fait que, lors d'une première rencontre, la moindre timidité conjuguée à une tension visuelle anormalement intense contribue à donner une image de soi-même peu avantageuse.

Modifications des relations interpersonnelles et étude des comportements

De nombreuses expériences faites en laboratoire ont montré, par exemple, que les communications entre patrons et subordonnés étaient rendues difficiles par le vidéo-téléphone. Le patron reste en effet souvent orienté de profil et très décontracté alors que son employé se force, par politesse, à le fixer intensément et reste ainsi dans un état de tension permanente. Cependant il ne faudrait pas sous-estimer la probabilité d'une acclimatation des usagers aux relations vidéo. De plus, on peut imaginer une croissance de la demande pour le vidéo-téléphone par désir de se situer à un haut niveau de l'échelle sociale : c'est la course aux symboles, à la possession du plus grand nombre de gadgets électroniques attestant d'une réussite sociale. La nécessité économique d'une telle innovation reste, quant à elle, à démontrer.

Des études préliminaires menées par le professeur Reid et ses collègues conduisent à penser que non seulement la vidéo ne présente pas d'avantages considérables mais surtout que l'absence de tout réseau vidéo facilite même grandement toute tractation ou négociation commerciale. Le professeur Meier, quant à lui, exprime le sentiment que le « stress » des communications ne pourrait qu'être exacerbé par le vidéo-téléphone. Enfin, toujours selon lui, il semble que les relations téléphoniques présentent l'énorme avantage de ne pas figer les relations, de laisser en fait la possibilité d'une représentation imaginaire. Son grief majeur à l'encontre du vidéo-téléphone tient donc au fait qu'il risque d'épuiser totalement le champ des relations et de provoquer ainsi un appauvrissement des relations personnelles.

Caractéristiques des utilisateurs

Avec l'augmentation considérable du rôle de l'information dans la société et surtout l'importance croissante — au moins sur le plan quantitatif — du secteur tertiaire, si la diffusion du vidéo-téléphone « prend » dans les circuits de l'information, son développement a des chances d'être extrêmement rapide.

Cette diffusion pourrait être, dans un premier temps, le privilège des grands managers de l'industrie et donc des états-majors économiques pour lesquels toute innovation technologique a valeur symbolique (luxe, statut social). Le vidéo-téléphone serait certes considéré comme un moyen d'éviter de longs et coûteux déplacements, mais si les dirigeants des grandes sociétés l'adoptaient en premier, son image serait fortement associée à celle d'un nouvel attribut hiérarchique, même s'il contribuait à réduire l'aura de mystère dont les dirigeants aiment à s'entourer. Ces hypothèses reposent essentiellement sur les travaux du professeur Rogers qui a relevé certains traits communs aux personnes susceptibles d'adopter cette innovation technologique : ce sont des personnes jeunes, placées aux postes de commande du système économique, ayant le goût du risque et un champ d'action étendu à plusieurs continents. Selon lui également, les hautes instances de direction, qui cherchent souvent à garder leurs distances et même un certain anonymat hésiteraient à utiliser le vidéo-téléphone.

Insuffisance des recherches actuelles

Nos connaissances sur l'efficacité des différents systèmes de télécommunications et surtout sur les réponses humaines à l'introduction et à la diffusion de ces technologies sont encore notoirement insuffisantes. Il y a là sans aucun doute un vaste champ d'investigation pour les chercheurs en sciences humaines.

Illustrons ce propos par un exemple. La discrimination sous toutes ses formes (race, sexe, apparence physique, etc.) joue incontestablement un rôle non négligeable dans le fonctionnement du marché du travail. Les communications par le téléphone classique permettent des relations relativement « neutres » à cet égard, car il est difficile de cerner avec précision et certitude la personnalité que l'on ne « voit » pas. Le vidéo-téléphone apporte donc à un employeur des renseignements beaucoup plus complets sur son interlocuteur, peut-être même suffisamment complets pour qu'il puisse désormais se passer de rencontres réelles en tête à tête avant une embauche définitive. Les implications nombreuses et complexes de ce problème, en apparence limité et sans importance, n'ont, semble-t-il, pas encore été étudiées.

ENCYCLOPÉDIE DES SCIENCES

BIOLOGIE

I

GRANGE BATELIÈRE

GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

BIOLOGIE

I

GRANGE BATELIÈRE, PARIS - ÉDITIONS KISTER, GENÈVE - ÉRASME, BRUXELLES-ANVERS

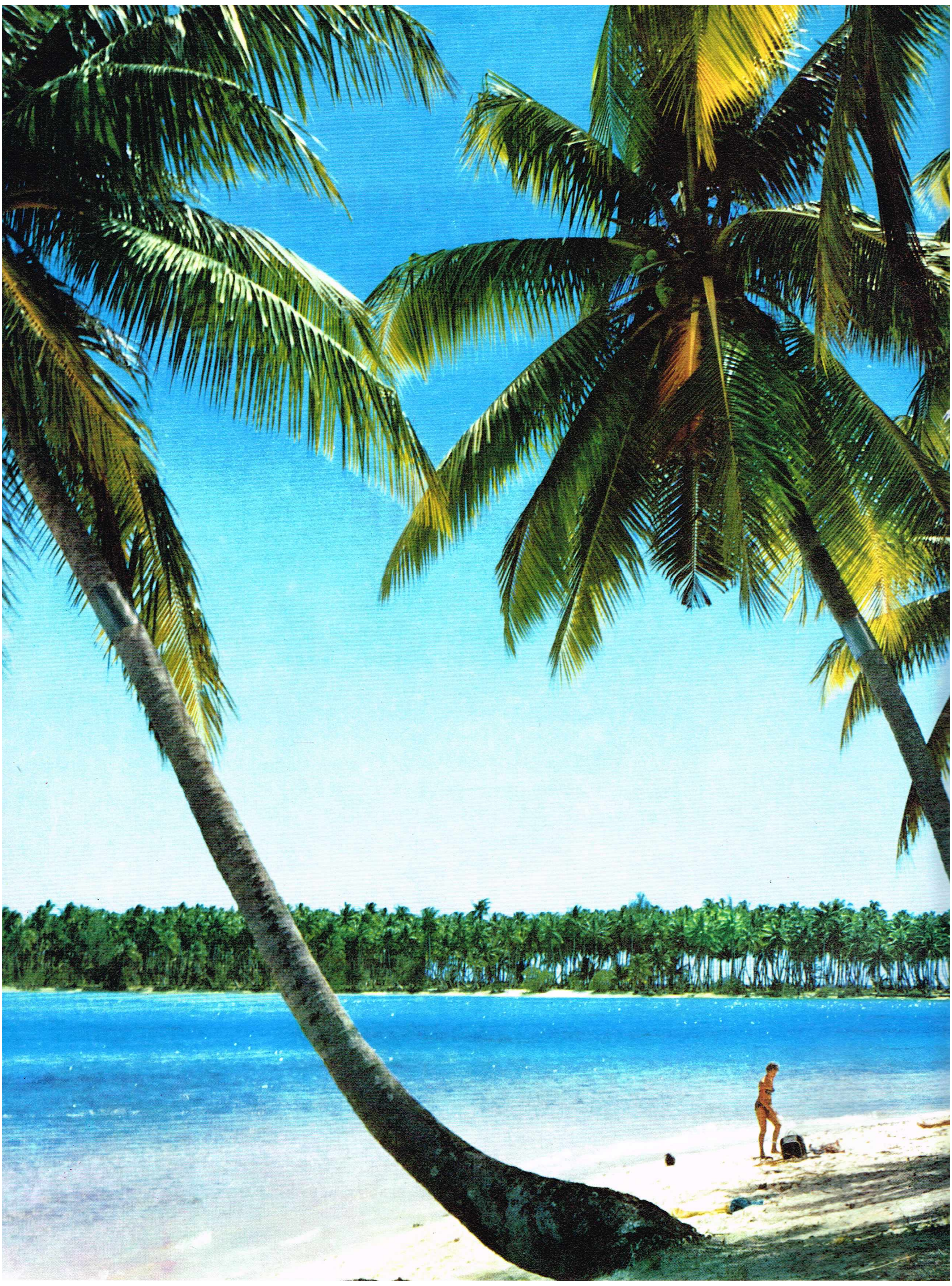

Réalisation	IDÉES ET ÉDITIONS 16, avenue de Friedland, 75008 Paris
Comité de direction	Cristobal de ACEVEDO, Simone DEVAUX, Uberto TOSCO.
Rédaction	Patrick PHLIPONEAU, Françoise MENU, Marie-Noëlle RENARD, Vanina DORÉ.
Recherche de l'illustration	Mathilde RIEUSSEC.
Mise en pages	Tito TOPIN et Serge BROCHE.
Illustrations techniques	Richard COLIN.
Coordinateur des dessins	Mario LOGLI.
Fabrication	Sylvie MARCHAND, Martine TOTIN.
Directeur de la publication	J.-P. BRÉVOST.

S. Prato

Ont collaboré à ce volume :

M. GUÉDÈS, pour l'Introduction.

J. BOUCHARD, pour :
1. Nature cellulaire des êtres vivants.
2. Les principaux constituants chimiques de la matière vivante et leurs fonctions.
3. Structure et fonctionnement de la cellule.

S. BLAISE ayant participé à la rédaction des questions relatives aux végétaux dans les deux premiers chapitres et à celle du texte consacré aux chloroplastes dans le troisième chapitre.

Y. BRYGOO, pour : Cycles de reproduction et sexualité.

Y. BRYGOO, G. LEBLON et J.-M. SIMONET pour : Génétique et hérédité.

M. GUÉDÈS, pour : Embryologie végétale.

Les schémas portant la référence Richard Colin ont été réalisés d'après des croquis fournis par les auteurs.

C. Bevilacqua

◀ *Le développement d'un être vivant est un phénomène merveilleusement programmé (dans lequel le hasard semble n'avoir aucune part); sur cette illustration, un fœtus humain au début de la neuvième semaine de vie intra-utérine (préparation du docteur C. Cavezzale).*

LA BIOLOGIE

On a soutenu récemment qu'une science de la vie, celle que G.R. Treviranus (1776-1837) et J.-B. de Lamarck (1744-1829) ont appelée la Biologie, n'avait pu voir le jour qu'au siècle dernier. En fait, la notion d'être vivant, animal ou végétal, distinct du monde inerte remonte à l'Antiquité et n'a cessé d'être clairement conçue depuis les philosophes présocratiques et Aristote (384-322 av. J.-C.) jusqu'à C. Linné (1707-1778) ou C. Bonnet (1720-1793). Outre la volonté de ne pas séparer fondamentalement ces êtres vivants du reste de l'univers, ce qui peut et doit toujours être une des idées directrices de la Biologie, on percevait bien ce qu'ils avaient de commun entre eux et qui les distinguait de la matière inerte.

Les êtres vivants ont une existence transitoire : ils naissent, croissent et meurent. Le plus souvent, leur naissance se fait à partir d'un germe très simple d'apparence qui provient d'un autre être vivant semblable, et ils sont eux-mêmes aptes à produire de tels germes à partir d'un certain stade de leur développement. Pourtant, jusqu'au siècle dernier, la question de savoir si les éléments du monde inerte sont susceptibles actuellement de s'organiser n'était pas tranchée : ce n'est qu'avec L. Pasteur (1822-1895), il y a à peine plus d'un siècle, que cette notion fut définitivement bannie. A toutes les époques, il s'était d'ailleurs trouvé des savants pour la nier, et, aux XVIIe et XVIIIe siècles, pour chercher des preuves expérimentales de sa négation.

Pour assurer la croissance quantitative et le développement qualitatif qui les amènent de l'état microscopique de germe à des dimensions qui, pour un séquoia ou un eucalyptus, peuvent dépasser celles des cathédrales, les êtres vivants doivent assimiler des quantités souvent énormes de substances. Dans le cas des végétaux, il est manifeste que ces substances sont empruntées au monde inerte ou sont d'abord mêlées à lui ; ainsi, on a cru jusqu'au XVIIIe siècle qu'ils se nourrissaient à partir de la terre avant de s'apercevoir que la plupart doivent beaucoup à l'air. Pour les animaux, qui consomment des végétaux ou d'autres animaux, le vivant se crée à partir de matière préalablement vivante.

Nuridsany et Pérennou

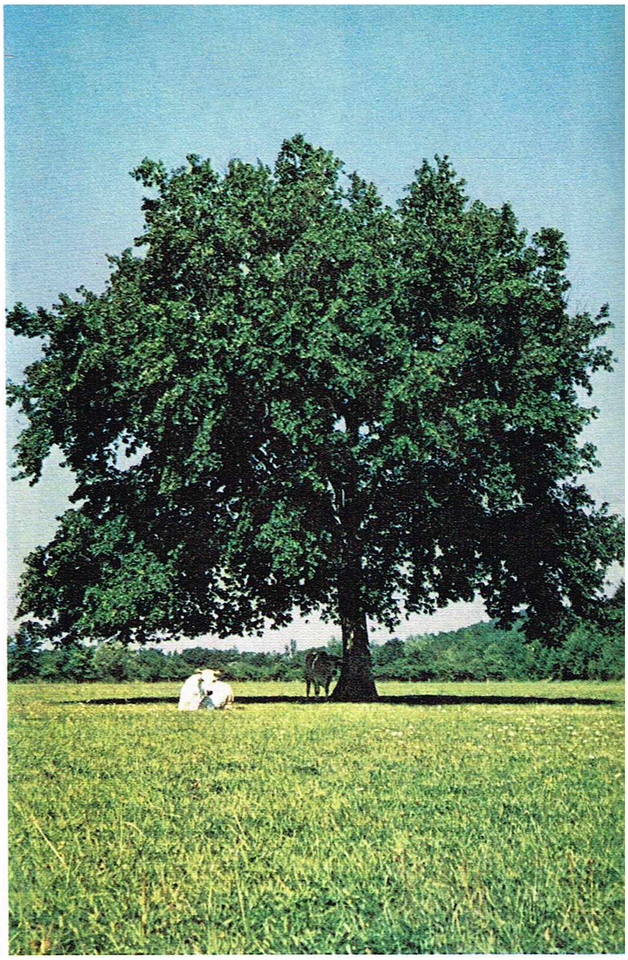

J. Six

▲ ***Pour assurer leur croissance quantitative et leur développement qualitatif, les êtres vivants (animaux et végétaux) doivent assimiler des quantités souvent énormes de substances : ici, à gauche, un gland de chêne commence à germer; à droite, un chêne adulte.***

Le développement d'un être vivant est un phénomène merveilleusement programmé dans lequel le hasard semble n'avoir aucune part. Dire que ce développement est programmé, c'est utiliser un terme « scientifique » qui est accepté par tous. Dans le passé, on a souvent dit que l'être qui subit ce développement montre par là qu'il a une « âme ». Il faut essayer de déceler ce qu'on tentait de désigner par ce terme.

L'âme et la forme

Pour beaucoup de penseurs, le monde en général manifeste une espèce d'organisation : il n'est donc nullement étonnant que l'univers ait été considéré comme un être vivant, aux Ve et IVe siècles av. J.-C., que ce soit par Parménide, Démocrite ou Platon. Cette idée d'un « organisme de la nature » se retrouvera notamment au XIXe siècle, en Allemagne, chez les « philosophes de la nature » ainsi que chez des savants qui cherchaient à extraire ce qu'il y avait d'acceptable dans les spéculations de ces philosophes. Dans ces conceptions, l'organisation, c'est l'âme du monde. Néanmoins les êtres vivants, au sens strict, présentent des caractères si marqués par rapport à la matière inorganique qu'il fallait leur attribuer une âme particulière, éventuellement rattachée à celle du monde. Plusieurs solutions sont alors possibles, dont certaines au moins relèvent de la science.

Pour Démocrite, le monde est formé d'atomes tous constitués de la même matière, homogènes, indestructibles, impénétrables, en nombre infini et d'une infinie variété de formes et de tailles. En obéissant aux lois de la nature, c'est-à-dire sans intervention du hasard, ces atomes forment divers agrégats, éléments visibles de l'univers, qui renferme essentiellement de l'eau et de la terre. Certains atomes sont particuliers : rassemblés en assez grand nombre et en masses relativement pures, ils forment le feu ; mais s'ils s'intègrent à une structure donnée en se mêlant étroitement, à des endroits précis, aux atomes qui la constituent, ils vivifient cette structure, qui devient un corps vivant.

A côté des atomes de feu disséminés partout à des endroits précis, et qui sont l'âme végétative, d'autres résident dans la poitrine et constituent l'esprit, la conscience de l'homme. On comprend l'importance du feu chez Démocrite : la vie est d'abord évidente chez les hommes et chez les animaux à sang chaud, et la disparition de celle-ci s'accompagne de leur refroidissement. Or, le feu est ce qui maintient la chaleur dans le monde inerte ; c'est donc lui qui maintient la vie. De plus, la respiration est indispensable à la vie comme l'air est indispensable au feu. Quant à l'esprit, s'il est concentré dans la poitrine, c'est assurément que l'homme heureux ou ému sent en cet endroit des manifestations concomitantes dans le rythme de son cœur et de sa respiration. Il était naturel qu'on songeât d'abord à placer là le siège des sentiments, comme le fait toujours le langage courant ; même le médecin grec Galien (130-200) n'y renoncera pas encore tout à fait.

Quoi qu'il en soit, on voit que c'est avec les éléments du monde ambiant que Démocrite construit les êtres vivants. Cependant, pour rendre compte des caractères propres à ces derniers, il a recours à la présence d'éléments ignés non moins naturels, mais convenablement localisés. D'autres avant lui avaient attribué la même fonction à l'air ou à l'eau. Au cours des siècles, apparaîtront beaucoup d'autres interprétations faisant dépendre la vie d'une matière vitale particulière ; le plus souvent, celle-ci ne sera pas formée d'éléments différents de ceux du milieu ambiant, et ne constituera pas tout à fait l'être vivant, mais le vivifiera seulement. Ce sera souvent le sang ou encore, selon G.-L. de Buffon (1707-1788), ce seront les molécules organiques, distinctes des molécules inertes.

Le caractère illusoire ou au moins insuffisant de cette explication ne pouvait manquer d'apparaître. En effet, dans la mesure où les atomes de feu doivent être convenablement « placés », le véritable principe vivificateur, c'est en fait le « plan » qui définit l'intrication des atomes banals de feu parmi les atomes banals de terre et d'eau dont est formé le corps. Mais une question surgit immédiatement; ce plan a-t-il un support matériel qui puisse en assurer à la génération suivante la réalisation identique?

Pour Platon (428-347 av. J.-C.), ce support matériel n'existe pas. L'être vivant est formé d'éléments inertes en eux-mêmes, mais vivifiés par la présence d'une âme immatérielle mais présente, et même sous trois formes. Elle est liée aux éléments du corps, à condition toutefois que ceux-ci soient conformés de façon à la recevoir. Voilà encore une théorie qui pose plus de problèmes qu'elle n'en résout. En effet, remplacer les atomes d'âme par une âme immatérielle ne simplifie nullement la question, d'autant moins que, dans une telle hypothèse, le corps devrait être organisé au préalable pour abriter cette âme. Nous retombons dans le même cercle vicieux que précédemment : pour recevoir son âme, l'être vivant doit déjà posséder une sorte d'âme qui est à la source de son organisation.

Pourtant, l'idée de Platon, plus ou moins modifiée, sera souvent reprise ultérieurement, soit qu'on attribue une pareille âme aux hommes comme aux animaux, et même aux plantes, soit qu'on la refuse, comme R. Descartes (1596-1650), aux animaux et aux plantes pour ne la laisser qu'aux hommes.

*Mais déjà Aristote (384-322 av. J.-C.), d'abord élève de Platon, perçoit l'inutile complication de la thèse de son maître ainsi que l'insuffisance de celle de Démocrite, et reconnaît l'importance de l'organisation sans avoir recours à l'artifice d'une âme surajoutée. Pour Aristote, c'est le mode d'organisation même du corps (sa forme) qui est son âme, qui détermine sa vie. L'âme est encore immatérielle, et Aristote en distingue plusieurs sortes, car un homme est plus riche de ce point de vue qu'un animal et un animal qu'une plante, mais, à vrai dire, cette âme n'a pas d'existence autonome, elle n'est pas surajoutée au corps. Contrairement à ce qu'on pourrait croire, une telle thèse est remarquablement proche de certaines conceptions modernes; il suffit pour s'en rendre compte de remplacer l' « âme » par l'*information.

Aristote n'envisage pas que des substances particulières entrent dans la constitution des êtres vivants, ni que des processus surnaturels leur permettent de croître et de se reproduire. D'après lui, chez les animaux, il se produit un échange continuel de substances avec le milieu externe. D'autres le soulignaient déjà avant lui; c'est ce que, plus tard, G. Cuvier (1769-1832) désignera par l'expression « tourbillon vital ». Cet échange permanent est évident puisque, même au repos, l'adulte ingère constamment tandis que son poids n'augmente pas ou peu. Pour Aristote, un organe est susceptible de communiquer, par le moyen de la chaleur, de mystérieux mouvements propres au sang qui le pénètre et par là de transformer ce sang en constituants qu'il pourra s'assimiler. De la même façon, c'est un sang tout spécialement préparé, manifestant les « mouvements propres » de tous les organes du corps, qui constitue la semence du mâle; celle-ci communique ses mouvements au sang menstruel et, grâce à cette dernière substance, ne donnera plus seulement un tissu ou un organe, mais un individu complet : c'est l'acte de la reproduction. La chaleur a d'ailleurs une grande importance dans l'influence de la semence, de même qu'un élément supplémentaire, le pneuma. *Mais si Aristote affirme l'aspect vivifiant du chaud, comme Démocrite le faisait du feu, il n'y voit plus l'âme, mais seulement son instrument. Au cours du développement, le sang de la femelle réalise matériellement et progressivement les organes de l'embryon, en obéissant à une cause finale : la forme de l'embryon à obtenir. Il effectue ce qu'il possédait en puissance (puisqu'il* peut *le faire !), mais le produit ne préexistait pas en lui matériellement. Aristote est donc ce qu'on appellera un* épigéniste.

Il est intéressant de démontrer le mécanisme du raisonnement antique. Que le sang soit fondamental à la vie n'est pas douteux, puisque sa perte entraîne la mort. Aristote savait, d'ailleurs, que l'intestin est richement vascularisé et en déduisait que les aliments convenablement préparés (par la chaleur!) sont absorbés pour être transformés en sang dans le cœur, le foie et la rate (organes gorgés de sang); c'est donc sur lui qui repose l'assimilation. Si, lors de la menstruation, on voit ce sang fuser naturellement par l'orifice qui donne issue à la vie, c'est qu'il intervient sûrement dans la génération, qui, pour Aristote, n'est qu'une assimilation particulière. Cependant, dans la mesure où la femme, être inférieur et faible, ne peut avoir le rôle prépondérant dans une pareille merveille, la semence que l'homme lui apporte, et qui est l'élément essentiel de la génération, doit appartenir aussi au sang (la femme ne faisant qu'en confirmer l'importance génératrice).

Il fallait que la confiance d'Aristote dans la raison fût bien forte pour soutenir que le sperme est du sang. Démocrite, lui, parlait de semences formées de particules empruntées à tout le corps, du mâle comme de la femelle. Pourtant, ces erreurs ne doivent pas nous inciter à considérer toute l'œuvre de ces penseurs comme « préscientifique ». A côté de ces spéculations, les vues générales d'Aristote sont de valeur durable et ne sont pas essentiellement différentes de celles de Claude Bernard (1813-1878) par exemple. Comme Aristote, celui-ci considérait que les êtres vivants sont constitués de matière ordinaire, sans âme matérielle ou immatérielle surajoutée, mais obéissent pourtant à une « consigne », un code, une information, en somme une cause finale, laquelle se manifeste lors de leur développement et de leur fonctionnement. D'ailleurs, en ce qui concerne la génération, Aristote avait le remarquable mérite de chercher un support matériel au passage de l'information d'une génération à l'autre par recours à des mouvements transmis, alors que Claude Bernard, pour sa part, se contentait de dire que la vie répète sa consigne.

Vitalisme et mécanisme

A partir de l'époque de Platon et d'Aristote, vont se développer dans la Biologie deux grands courants.

Pour le vitalisme *proprement dit, les êtres vivants ont une âme immatérielle, surajoutée, laquelle se manifeste directement par des phénomènes que nous constatons mais ne pouvons expli-*

▶ *Pour* Démocrite, *le feu, source de chaleur dans le monde inerte, était aussi source de vie.*

Sergio Larrain - Magnum

quer par des causes physico-chimiques. Au début du siècle dernier, le botaniste A.-P. de Candolle (1778-1842), par exemple, admettait que les mouvements de sommeil des feuilles sont dans ce cas, et cent ans plus tard, l'embryologiste H. Driesch (1867-1941) considérait encore que l'« entéléchie » (principe métaphysique qui détermine l'existence d'un être donné) dirige le développement. Nous avons là un courant platonicien, malgré le terme aristotélicien utilisé par Driesch, qui représente d'ailleurs un courant plutôt animiste que vitaliste. Une variante intéressante de ce vitalisme est la tentative d'unification d'É. Geoffroy Saint-Hilaire (1772-1844), qui n'admet pas d'âme, mais reporte sur la matière inerte des propriétés constatées chez les êtres vivants : il s'agit d'un monisme *vitaliste, comparable à celui de G. Cabanis (1750-1808).*

Pour les tenants du mécanisme, *qui sont véritablement aristotéliciens, les êtres vivants sont des machines et, par conséquent, révèlent une cause finale ; mais comme dans une machine conçue par l'homme, tout se fait en eux par un enchaînement de causes purement physico-chimiques. Telle est, par exemple, la position de Lamarck, qui explique ainsi non seulement le fonctionnement et le développement des êtres vivants, mais aussi l'apparition des groupes taxonomiques. C'est également le cas de Claude Bernard, qui ne s'occupera pas d'évolution. Certains mécanistes recherchent une substance vivante vivificatrice formée de matière usuelle. A la fin du* XVI^e^ *siècle, on verra même Brouault tenter de l'extraire des plantes par distillation !*

Chez les vitalistes, on parlera volontiers de force vitale, *et celle-ci sera distincte des forces physico-chimiques. Mais cette expression n'est pas réservée au vitalisme propre du premier courant, car Claude Bernard l'emploie aussi, en expliquant que « La force vitale dirige des phénomènes qu'elle ne produit pas ; les agents physiques produisent des phénomènes qu'ils ne dirigent pas. » Cependant, chez Claude Bernard, la « force vitale » n'est qu'un terme descriptif dénotant le « programme » d'application des causes physico-chimiques. Il faudra donc être prudent avant de qualifier de vitaliste proprement dit un auteur parlant de force vitale. En ce qui concerne les êtres actuels, les représentants du courant aristotélicien ne se distinguent pas des mécanistes, qui, de leur côté, ne nient point l'existence d'une information dans l'être vivant. Ils se refusent tout au plus à utiliser les mêmes mots pour la décrire.*

L'ÉVOLUTION

Il était naturel que fût posé très tôt dans l'histoire de la Biologie le problème de l'origine des êtres vivants, comme celui du monde en général. Les théories furent nombreuses, s'attachant évidemment surtout d'abord aux origines de l'homme.

Dans les années 300 apr. J.-C., Censorin soutenait ceux pour qui le monde vivant a toujours existé et raillait les hypothèses d'après lesquelles « Il fut un temps où les hommes n'existaient pas, et c'est la nature qui leur a d'abord donné l'être et la vie. » Il citait pourtant entre autres théories celle d'Anaximandre, pour qui « L'eau et la terre réchauffées [toujours la chaleur!] auraient produit des Poissons ou des animaux tout à fait semblables. En eux se seraient peu à peu formés des êtres humains qui y seraient restés enfermés, comme des fœtus [...], et qui, enfin, forçant cette prison, en seraient sortis, déjà capables de s'alimenter eux-mêmes. » Pour d'autres, en particulier pour Démocrite, les premiers hommes étaient formés à partir du limon et de l'eau, sans parler d'opinions bien plus étranges.

Mais Aristote, pour qui le monde, vivant comme inerte, existait de toute éternité, allait avancer une remarque de grande conséquence. Les êtres vivants, disait-il, forment une série ou peuvent être répartis en plusieurs séries suivant qu'on se fonde sur un ensemble d'organes ou un autre parce que tous s'approchent plus ou moins de la divinité (leur « cause finale »), l'homme étant celui qui s'en approche le plus. Ils sont donc, en déduira-t-on, susceptibles d'êtres disposés en une chaîne ou mieux en une échelle des êtres, ou de la nature (scala naturae). *Cette interprétation est en harmonie avec la conception platonicienne que Lovejoy a appelée le* principe de plénitude : *la divinité, étant toute-puissante et infiniment bonne, ne peut que créer toutes les possibilités, et, par conséquent, dans l'échelle de la nature, il existe tous les degrés de perfection... Les notions d'échelle de la nature et de principe de plénitude ont eu, au moins jusqu'au XIXe siècle, un rôle immense dans la pensée biologique et ont été vite mêlées aux doctrines chrétiennes. Elles se sont manifestées, par exemple, au début du siècle dernier chez certains embryologistes. Geoffroy Saint-Hilaire puis E. Serres (1787-1868) ont souligné que les animaux commencent leur développement de la même façon, mais le poursuivent plus ou moins loin sur une même voie. Ils ont tous la même tendance fondamentale qui, réalisée au degré le plus élevé atteint par la nature, conduit à la formation de l'homme. L'évolutionnisme s'emparera de cette conception avec E. Haeckel (1834-1919) qui en fera sa loi biogénétique fondamentale ; mais, à l'origine, elle était étrangère à la notion d'une histoire du monde vivant.*

Puisque les êtres peuvent être disposés en série, on se demanda si, au cours des temps, les termes de celle-ci n'étaient pas apparus successivement dans leur ordre de perfection croissante. On chercha, selon l'expression de Lovejoy, à « temporaliser » l'échelle des êtres. On doit citer notamment parmi les auteurs de ces tentatives G. de Leibniz (1646-1716), J.-B. Robinet (1735-1820) et Ch. Bonnet. Le premier admit un moment un véritable évolutionnisme, c'est-à-dire un lien génétique entre les groupes d'animaux : il envisageait des êtres aquatiques dont les descendants seraient devenus des Amphibiens puis des animaux terrestres. Chez Robinet, par contre, des germes créés à l'origine allaient réaliser chacun en leur temps leur état définitif : les groupes n'étaient donc pas fils les uns des autres. Chez Bonnet aussi, des germes créés à l'origine des choses pouvaient prendre des aspects successifs en rapport avec les conditions successives du globe, conséquences de révolutions. Il apparaît clairement qu'il n'y a pas, là non plus, de véritable évolutionnisme, mais un extrême polyphylétisme, puisqu'il y a autant de lignées que d'espèces actuelles. Notons que Bonnet rapprochait les modifications survenues dans chaque lignée des « révolutions » qu'on observe lors du développement embryonnaire du poulet, pourtant préformé dans son œuf, disait-il.

Avec **Lamarck**, *un évolutionnisme proprement dit devait se réaliser sur la toile de fond de la conception de l' « échelle » de la nature. Né en 1744, Lamarck ne devint zoologiste et évolutionniste qu'à 50 ans. Jusqu'à cet âge, il fut botaniste et, dans son premier ouvrage, en 1778, il était si préoccupé par l'échelle des êtres qu'il cherchait à en établir un tableau partiel en rassemblant des genres de plantes. Puis, rejoignant sur ce point Aristote, il s'aperçut de la difficulté de placer ainsi les êtres en une seule série; il lui fallut donc ramifier celle-ci pour pouvoir trouver dans chaque rameau une progression régulière. Mais dès lors, il n'y a plus un seul terme (l'homme), mais un terme par rameau. En outre, bien des caractères et les êtres qu'ils définissent ne peuvent être rangés dans ces rameaux. Lamarck va rendre compte de ce fait en inventant l'évolutionnisme : si l' « échelle de la nature » est ramifiée et s'il existe des êtres dont elle ne peut rendre compte, c'est que la tendance fondamentale de la nature à produire des êtres en progression graduée a été dérangée; mais comment cela est-il possible si ces derniers sont chacun le produit d'une opération particulière de la divinité toute-puissante? Lamarck répond qu'ils ne le sont pas. Pour lui, leur*

F. Arboria Mella

◀ *Pour Aristote, les êtres vivants peuvent être répartis en séries ; ils s'approchent aussi plus ou moins de la divinité, l'homme étant celui qui s'en approche le plus.*

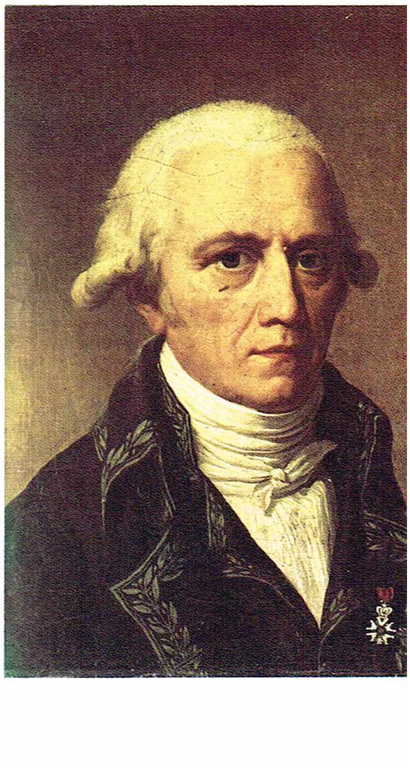

Photo Larousse

▼ J.-B. de Monet, chevalier de Lamarck, *né en 1744, conçut l'évolutionnisme sur la toile de fond de la conception de l' « échelle » de la nature.*

création est un processus naturel et nécessaire, comme d'ailleurs l'origine de la vie à partir de l'inerte. La genèse des espèces s'effectue par des modifications insensibles de la descendance de chaque être dans le sens voulu par la progression naturelle. Les tendances de l'inerte à produire l'animé et de l'animé à se compliquer de génération en génération ont été placées une fois pour toutes, par la divinité, dans les propriétés de la matière originelle; dès cet instant, tous ces phénomènes n'impliquent plus que des enchaînements purement matériels. Nous ne sommes pas loin, semble-t-il, de Démocrite!

Mais le milieu contrecarre la tendance à la progression naturelle, d'où une divergence buissonnante de la forme des êtres, à travers laquelle les lignes directrices ne se reconnaissent qu'au niveau de quelques caractères sur lesquels le milieu n'a pas prise. Pour que le milieu ait un tel rôle, il faut évidemment que les variations qu'il induit, directement chez les plantes, indirectement chez les animaux qui éprouvent des besoins et modifient eux-mêmes leur corps en conséquence, deviennent héréditaires. L'acquisition et l'hérédité de ces caractères adaptatifs sont les aspects classiques du lamarckisme, mais on voit qu'ils n'en sont que des aspects assez secondaires.

Un évolutionnisme d'inspiration comparable, dont les origines, probablement distinctes du lamarckisme, restent à étudier, se répandit dans le public à l'époque romantique, et tard dans sa vie, Geoffroy Saint-Hilaire développa des vues rappelant un peu celles de Lamarck, mais d'une manière qui, encore une fois, n'était pas faite pour retenir l'attention de ses pairs. En Allemagne, le courant de la Naturphilosophie *n'était pas évolutionniste à proprement parler, et J. W. von Goethe (1749-1832) ne l'était pas du tout. J. G. Herder (1744-1803) se contenta de temporaliser la chaîne des êtres. Cependant, vers 1850, le botaniste A. Braun (1805-1877) conçut un évolutionnisme dirigé dans lesquel il y avait un lien génétique entre les groupes successifs, qui ne devait pratiquement rien au milieu. Braun comparait aussi le développement de l'ensemble des êtres vivants au développement de l'individu, végétal en particulier. D'autres auteurs allemands, autrichiens et suisses suivirent cette voie.*

En Angleterre, un ouvrage de ***R. Chambers*** *(1802-1871) parut anonymement en 1844 sous le titre de* Vestiges of the Natural History of Creation, *et eut dix éditions jusqu'en 1853. Il présente un intérêt particulier, car les arguments anatomiques, paléontologiques, embryologiques et biogéographiques en faveur de l'évolutionnisme y sont exposés d'une manière remarquable, et, comme le montra d'abord Jean Rostand, c'est à Chambers plutôt qu'à Ch. Darwin (1809-1882) que revient le mérite de les avoir rassemblés. Chez Chambers, l'évolution est présentée comme issue d'une loi divine, tout à fait à la manière de la tendance à la progression mise dans la nature par le Dieu de Lamarck; comme ce dernier, Chambers admet l'existence de perturbations dues au milieu, mais il soutient qu'elles sont actuellement peu importantes. Il compare le développement du monde vivant à l'ontogénie d'un individu. L'ouvrage eut un grand succès auprès du public et pourtant le monde scientifique n'en souffla mot.*

Avant d'étudier les autres théories évolutionnistes, il faut signaler que le courant « progressionniste » qui envisage une simple temporalisation de la chaîne des êtres, continua à se manifester au siècle dernier, notamment avec L. Agassiz (1807-1873), et surtout que l'évolutionnisme dirigé de la lignée de Lamarck, Braun ou Chambers, s'il est passé au second plan parmi les savants, a continué à y trouver des adeptes, qu'il s'agisse de L. S. Berg (1876-1950), D. Rosa, H. Przibram ou A. Vandel; on pourrait peut-être ajouter ici L. Cuénot (1866-1951). A la limite de la science, il faut évoquer P. Teilhard de Chardin (1881-1955), à propos duquel on peut malheureusement craindre que le retentissement tardif connu par ses œuvres ne contribue à éloigner bien des savants d'un courant de pensée qui mérite toute leur attention.

L'évolution au hasard

Un autre courant évolutionniste naquit au XVIII[e] siècle. Il était tout différent et c'est de loin le plus puissant de nos jours. Vers le milieu du siècle, P.-L. Moreau de Maupertuis (1698-1759) développa la théorie suivante : des particules émises par les différents organes du corps et baignant dans les « semences » du mâle et de la femelle s'agrègent d'une façon déterminée pour former l'embryon; mais l'excès ou le défaut des unes ou des autres peut produire des monstres, dont certains sont ce que les néo-darwiniens appelleront des « monstres d'avenir », parce que leurs anomalies peuvent devenir héréditaires, les particules persistant de génération en génération à s'agréger de cette manière d'abord vicieuse. Alors, se demande Maupertuis, « Ne pourrait-on pas expliquer par là comment, de deux seuls individus, la multiplication des espèces les plus dissemblables aurait pu s'ensuivre? Elles n'auraient dû leur première origine qu'à quelques productions fortuites, dans lesquelles les parties élémentaires n'auraient pas retenu l'ordre qu'elles tenaient dans les animaux père et mère; chaque degré d'erreur aurait fait une nouvelle espèce, et, à force d'écarts répétés, la diversité infinie des animaux que nous voyons aujourd'hui serait apparue. » Maupertuis estime que les facteurs du milieu ont pu agir aussi, notamment peut-être chez les hommes, pour « fomenter les parties qui rendent la peau noire ».

Parmi les combinaisons fortuites de la nature, dit encore Maupertuis, « Il n'y avait que celles où se trouvaient certains rapports de convenance qui pussent subsister. » Et il donne l'explication suivante de la sélection des accidents : « Le hasard... avait produit une multitude innombrable d'individus; un petit nombre se trouvait construit de manière que les parties de l'animal pouvaient satisfaire à ses besoins; dans un nombre infiniment plus grand, il n'y avait ni convenance ni ordre; tous ces derniers ont péri [...]. Les seuls qui soient restés sont ceux où se trouvaient l'ordre et la convenance, et ces espèces que nous voyons aujourd'hui ne sont que la plus petite partie de ce qu'un destin aveugle avait produit. »

Cette conception est extrêmement importante d'un point de vue théorique, quoiqu'elle n'ait joué aucun rôle direct. Nous y trouvons l'idée d'une évolution globale due entièrement au hasard, ce qui ne signifie pas toutefois qu'elle soit entièrement matérielle : en effet, si Maupertuis, pour expliquer l'agrégation des particules lors de la génération, ne se satisfait pas de la seule attraction universelle et fait appel à leur « mémoire », il ne semble pas avoir cherché de support matériel à cette mémoire.

Comme Maupertuis conçoit aussi très clairement la sélection naturelle, il est bien compréhensible que le néo-darwinien Bentley Glass lui ait accordé beaucoup d'attention. On trouve chez Maupertuis le germe du darwinisme, ou du moins de la façon dont on va comprendre celui-ci au XX[e] siècle.

Darwin

C'est à Darwin qu'est due, avec la publication de son Origine des espèces *en 1859, l'introduction effective de l'évolutionnisme dans la science. Ses arguments étaient ceux de Chambers, plus développés encore car son érudition était immense. Lui-même ne considérait pas comme son mérite essentiel d'avoir accepté l'évolutionnisme et d'en avoir rassemblé les arguments. Mais il apportait une hypothèse mécaniste à l'extrême par laquelle il expliquait tout ou partie de l'évolution et, dans le contexte du milieu du siècle dernier, toute une*

partie très influente du monde scientifique ne fut conquise qu'à ce prix. Refusant les arguments de Chambers qui conduisaient à l'hypothèse d'une évolution dirigée, les savants furent cependant convaincus par ces mêmes arguments lorsque ceux-ci furent interprétés grâce à une autre hypothèse évolutionniste plus à leur goût. Bien peu avaient su ne s'attacher qu'à la seule partie qui subsiste actuellement de ces discussions, au fait de l'évolution elle-même.

Darwin avait constaté que les êtres vivants produisent dans leur descendance de nombreuses et infimes variations, dont les sélectionneurs tirent profit, pour l'isolement de races nouvelles d'animaux ou de plantes domestiques. La nature elle-même va alors agir pour lui comme un sélectionneur : à tout moment, les êtres doivent se défendre contre la compétition des autres êtres et les atteintes du milieu ; dans cette lutte pour la vie, dont l'intensité fut suggérée à Darwin par la lecture de Malthus, beaucoup d'êtres périssent ; ceux qui, pourvus par hasard des aptitudes convenables, survivent, se reproduisent préférentiellement et conduisent à des populations d'êtres adaptés aux conditions ambiantes, qui se maintiendront et s'étendront même tant que ces conditions demeureront stables. Leur modification entraînera par les mêmes processus la naissance d'autres êtres.

Expliquer tous les aspects des êtres vivants par un tel processus nécessite vite des postulats fantastiques. Il faudrait que la possession de quatre pétales par certaines fleurs eût un avantage sur la possession de cinq par d'autres, qui pourtant vivent mêlées aux premières. Il faudrait que les quadrupèdes fussent apparus parmi des animaux à deux, quatre, six, huit ou vingt-quatre pattes et que, bien que les hommes déplorent souvent de n'avoir pas quatre bras, l'expérience eût montré qu'il y avait dans la lutte pour la vie quelque avantage pour un être à n'en posséder que deux, qu'il soit d'ailleurs Reptile ou Mammifère. Si l'on admettait simplement que le nombre de quatre membres s'est maintenu parce que, sans avoir d'avantage particulier, il n'avait du moins pas trop d'inconvénients, se poserait le problème de savoir pourquoi le « hasard » en a créé quatre et non pas six ou huit, nombre qui aurait pu ne pas présenter d'inconvénients, et même avoir beaucoup d'avantages, et pourquoi, en ayant fait apparaître quatre, il n'en a pas fait naître ensuite six ou huit qui auraient pu subsister aussi pour les mêmes raisons, alors que ce même hasard se plaisait chez les Arthropodes à fabriquer tant d'appendices...

Darwin était bien conscient de ces difficultés et c'est pourquoi le darwinisme de Darwin est la chose la plus confuse qui soit, ce qui est tout à l'honneur de son auteur. En divers endroits, Darwin ne fait pas tout reposer sur la sélection ; il sépare les caractères adaptatifs triés grâce à elle de caractères taxonomiques (comme les quatre membres des Tétrapodes), lesquels, définissant des groupes de la classification naturelle, ne semblent rien avoir d'adaptatif. Mais à d'autres moments, il semble vouloir faire naître ceux-là aussi par l'action de la sélection sur la variation « hasardeuse ». Il raille la tendance de Lamarck à la progression, mais il considère, à un moment, comme évident que les variations, sur lesquelles la sélection travaille, ne se font pas en fait au hasard, sans quoi, dit-il, on ne pourrait expliquer la réalisation progressive d'une lignée de plus en plus différenciée dans un sens donné, ce que nous appelons l'orthogenèse. D'ailleurs, pour expliquer les adaptations elles-mêmes, il en vient, comme Lamarck, à admettre une influence modificatrice et non plus seulement sélectionnante du milieu, dont l'importance n'est pas très claire. Toutes ces hésitations traduisent la complexité du problème auquel Darwin s'était attaqué, et soulignent sa bonne foi, mais elles montrent comme on a tort de voir en lui le découvreur d'un monde nouveau. Il n'a ni découvert le fait de l'évolution ni élucidé son mécanisme. Car évidemment, si les variations sur lesquelles la sélection va s'appliquer apparaissent de façon ordonnée, le mécanisme de l'évolution repose au moins pour moitié sur celui qui règle leur apparition. Or, ce mécanisme reste, chez Darwin, sans explication.

Le néo-darwinisme

Par la suite, le darwinisme s'enrichira de la découverte des variations brusques, d'assez grande ampleur et héréditaires, que Darwin connaissait mais avait négligées. Ceux qui leur accorderont crédit pourront envisager de grands changements non adaptatifs ; ainsi, le rôle de la sélection décroîtra : celle-ci se bornera à rejeter les formes radicalement non viables. C. Dareste (1822-1899)

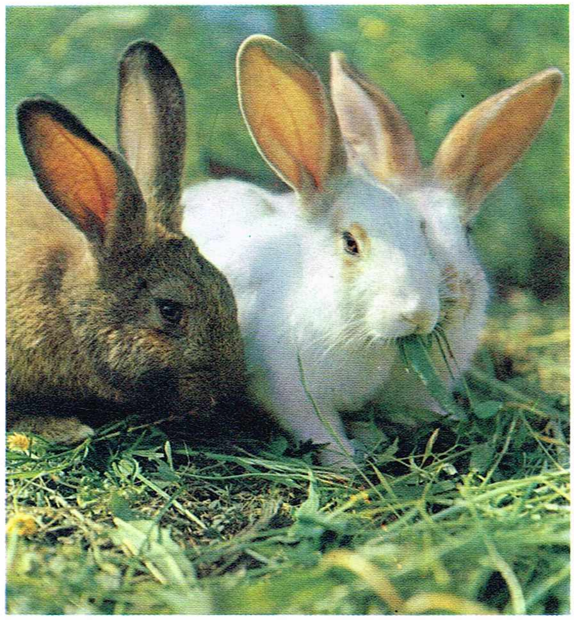

Titus

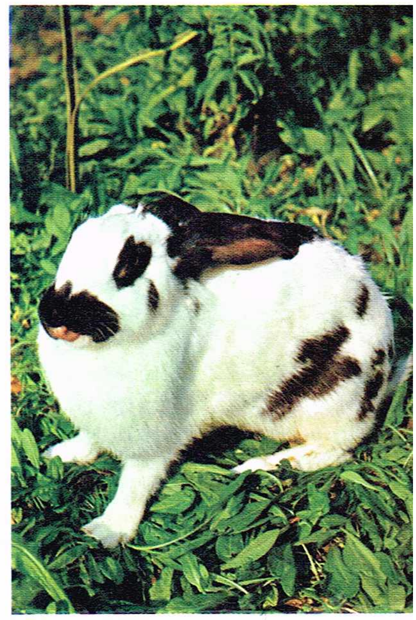

S.E.F.

▲ Les êtres vivants produisent dans leur descendance de nombreuses variations, dont les sélectionneurs tirent profit ; à gauche et à droite, lapins domestiques de races diverses. D'après Darwin, la lutte pour la vie agit dans la nature comme un sélectionneur. Cette sélection naturelle est le moteur de l'évolution.

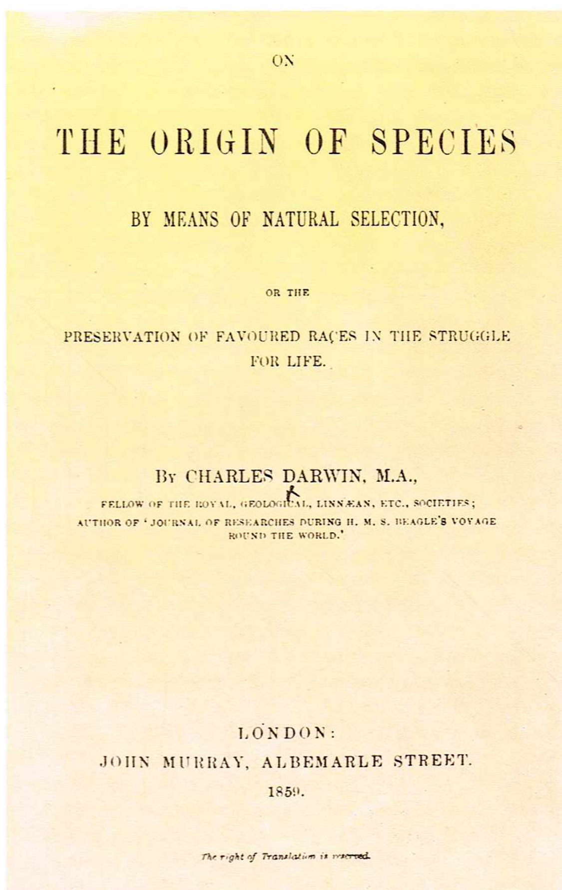

ON

THE ORIGIN OF SPECIES

BY MEANS OF NATURAL SELECTION,

OR THE

PRESERVATION OF FAVOURED RACES IN THE STRUGGLE FOR LIFE.

BY CHARLES DARWIN, M.A.,

FELLOW OF THE ROYAL, GEOLOGICAL, LINNÆAN, ETC., SOCIETIES;
AUTHOR OF 'JOURNAL OF RESEARCHES DURING H. M. S. BEAGLE'S VOYAGE ROUND THE WORLD.'

LONDON:
JOHN MURRAY, ALBEMARLE STREET.
1859.

The right of Translation is reserved.

F. Arborio Mella

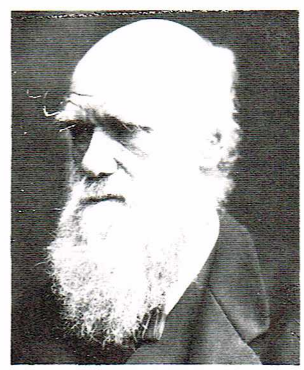

C. Bevilacqua

◀▲ *C'est à* Charles Robert Darwin *(1809-1882) qu'est due, avec la publication, en 1859, de son* Origine des espèces, *l'introduction effective de l'évolutionnisme dans la science.*

▶ *A gauche, parmi les cultures d'Oenothera de H. De Vries (1848-1935), apparurent des individus modifiés qui lui permirent de concevoir la notion de variation brusque ou mutation. Ici, des plantules blanchâtres se manifestent dans la postérité d'une plante normalement verte.*

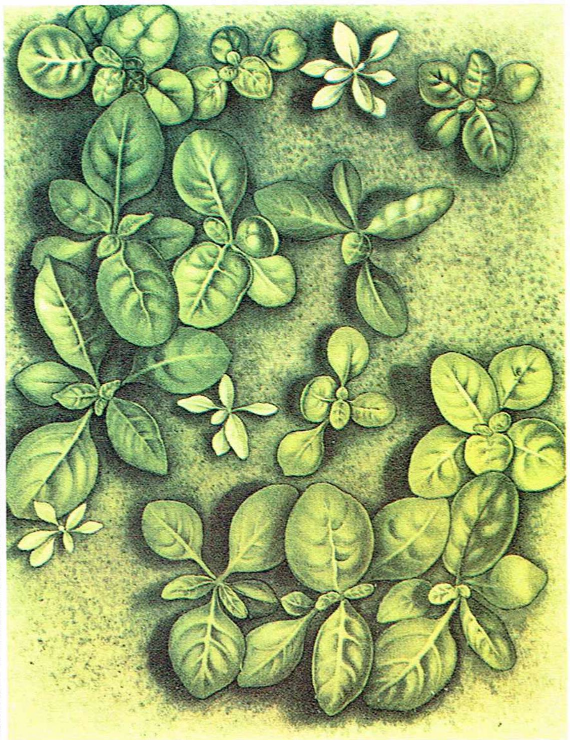

Muséum national d'histoire naturelle, Paris

tentera, comme É. Geoffroy Saint-Hilaire avant lui, d'obtenir des « monstres d'avenir », sources possibles de nouvelles espèces, en agissant sur des embryons de poulet dans leur œuf. Mais avec A. Weismann (1834-1914) apparaît un super-darwinisme qui deviendra le néo-darwinisme : les caractères acquis ne peuvent être héréditaires, pour des raisons aussi bien expérimentales que théoriques; en outre, tout relent de lamarckisme doit être expurgé. Seule l'apparition de petites et de grandes variations dûment sélectionnées explique l'évolution.

Mais comme Darwin, Weismann se heurte au problème posé par l'orthogenèse : il explique alors qu'il y a sélection germinale. Les particules des cellules sexuelles qui déterminent les caractères sont plus ou moins fortes; les plus fortes détournent la nourriture à leur profit, ce qui tend à renforcer encore leur importance. L'organisme s'obstine ainsi dans le développement du caractère que contrôlent ces puissantes particules. C'est à une théorie comparable que L. Whyte a abouti de nos jours.

Avec H. De Vries (1848-1935) va se préciser la notion de mutation, *variation brusque, imprévisible, héréditaire, dont l'apparition peut être observée dans les cultures et sur laquelle la sélection va pouvoir agir. C'est exactement ce qu'il fallait à Weismann. De Vries jouera un rôle essentiel dans la mise sur pied de la génétique. Bien que ses mutations d'*Oenothera *ne soient pas en fait de vraies mutations de gènes, mais surtout des cas d'aneuploïdie (modification de quelques unités du nombre de chromosomes), sa découverte va modeler le néo-darwinisme. Nanti des mutations qui fournissent l'explication de la variabilité de Darwin, le mutationnisme va prendre le nom de néo-darwinisme, ou théorie synthétique de l'évolution. Rejetant justement toute influence directe du milieu, celle-ci va acquérir droit de cité dans les pays de langue anglaise, puis bientôt un peu partout, surtout après que la génétique aura été fermement établie. Dans le premier quart de ce siècle, il y avait eu plutôt une certaine désaffection pour le darwinisme.*

Mais la théorie synthétique est maintenant la conception dominante. Le terme « synthétique », dû à G.G. Simpson, semble assez malheureux, car cette théorie ne constitue guère une synthèse des diverses explications possibles. C'est plutôt une théorie partielle, que Darwin n'aurait pas risquée.

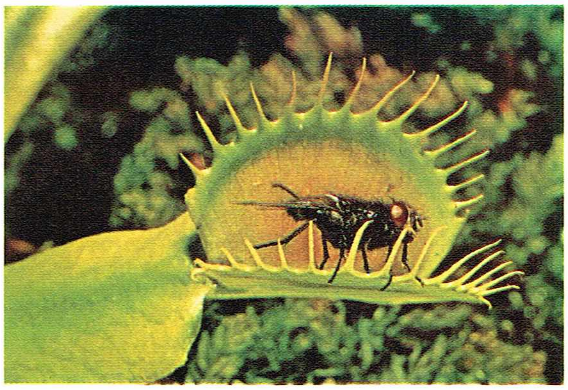

Nuridsany et Pérennou

LA STRUCTURE DES ÊTRES VIVANTS

On a reconnu depuis toujours, nous l'avons vu, l'importance de la forme acquise par un être vivant pour le caractériser. Il existe, d'ailleurs, des cas où la vie peut être interrompue par des conditions rigoureuses de température et d'humidité tandis que la forme subsiste, macroscopiquement comme moléculairement, en attendant que de meilleures circonstances permettent une véritable résurrection : c'est l'anabiose, qui se produit normalement chez divers animaux et végétaux (Mousses et Tardigrades qui les habitent) et qu'on peut obtenir expérimentalement pour les organes ou tissus d'autres êtres.

Il faut voir de plus près comment cette forme a été comprise par les biologistes. Les êtres où la vie est la plus développée sont justement les plus complexes et il est bien naturel de chercher à les décomposer en éléments plus simples. Mais rappelons immédiatement qu'il faut se garder d'imaginer qu'on a compris l'édifice parce qu'on a vu de quels matériaux il est composé. Reste le problème de l'organisation sous-jacente à leur mise en place.

Matière vivante et matière inerte

Comme les êtres vivants se réduisent tous finalement en poussière, nous n'avons pas été surpris de les voir interprétés en fonction des éléments de la chimie ancienne : dans l'Antiquité, ils comportaient du feu, de la terre, de l'eau, de l'air ou une partie seulement de ces éléments, et chaque organe était plus ou moins riche en certains de ces éléments. L'idée que les mêmes éléments forment le vivant et l'inerte est extrêmement répandue dans toute l'histoire. Si l'on admettait une matière vivante différente de la matière inerte, elle ne constituait pas tout l'organisme. Nourris d'humus, les végétaux n'étaient pour Linné que de l'humus, et pareillement les animaux qui s'en repaissent. Les vues de Buffon d'après lesquelles l'être vivant absorbe à la fois des molécules inertes et des molécules organiques, mais ne conserve que ces dernières, paraissaient faire exception; pourtant, il semble que, pour lui, la même matière de base forme les deux matières.

Cela explique que lorsqu'en 1828 F. Wöhler (1800-1882) prépara l'urée (substance organique), par isomérisation du cyanate d'ammonium (substance minérale), l'événement, important et remarqué d'un point de vue chimique, n'eut, contrairement à ce qu'on écrit parfois encore, aucune répercussion sur le crédit qu'on pouvait accorder au vitalisme. Vitalistes ou non, les biologistes admettaient très généralement que les vivants sont faits de matière inerte; la synthèse artificielle d'une substance présente chez un être vivant par un procédé de toute évidence très différent du processus naturel ne paraissait nullement aux vitalistes remettre en cause leur théorie, dans la mesure où il ne s'agit que d'une partie *de l'être en question. Toutefois, si l'on synthétisait chimiquement un*

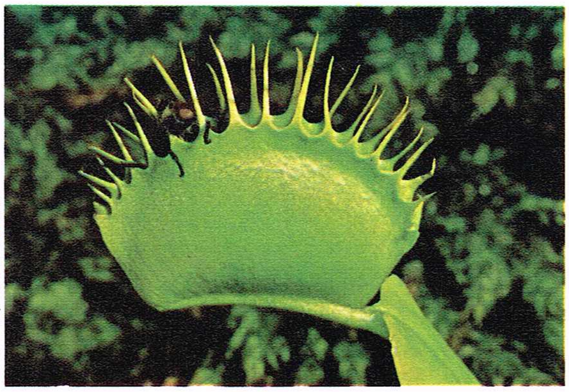

Nuridsany et Pérennou

C. Nuridsany

C. Nuridsany

◄▲ ***Ces quatre photos (page ci-contre à droite et ci-dessus) montrant la capture et l'ingestion d'une mouche par une dionée (« attrape-mouches »),*** **Dionaea muscipula,** ***illustrent un mode de nutrition rare chez les plantes : la prédation et la digestion des proies.***

être vivant entier, on aurait, semble-t-il, montré que celui-ci ne relève pas du vitalisme vrai, puisqu'il ne serait pas nécessaire de lui ajouter une âme immatérielle pour le faire vivre.

Tissus, organes et organisation

Entre la structure globale de l'individu et les éléments chimiques qui le constituent, le vide est trop grand : il faut chercher des structures intermédiaires à partir desquelles on puisse expliquer par degrés la complexité de l'ensemble.

Pour Aristote, qui sur ce sujet suit Platon d'assez près, les éléments forment d'abord des structures homéomères, *comme la chair, l'os ou le sang, organisées, mais homogènes dans leur composition. Des portions de ces substances sont à leur tour réunies suivant un plan précis pour former des structures hétérogènes, qui sont les organes.*

Théophraste, élève d'Aristote, ne manqua pas d'appliquer cette conception aux plantes et, deux millénaires plus tard, on retrouve chez Bichat (1771-1802) une conception fort comparable : des tissus, qui, il est vrai, ne sont plus tout à fait homogènes, sont rassemblés de différentes manières pour former divers organes dont les fonctions composites sont celles des tissus. Dans la période intermédiaire, beaucoup d'auteurs connaissaient évidemment l'existence des tissus, sans utiliser le terme. Signalons ici que la notion de tissu est étrangère à celle de cellule ; l'histologie dans son sens actuel ne pourra être envisagée qu'après l'établissement de la théorie cellulaire sur laquelle nous reviendrons.

*Dans l'organisme, les organes entretiennent entre eux des rapports et forment des appareils destinés à la réalisation d'une importante fonction. L'étude des organes est l'anatomie, dont le nom signifie étymologiquement dissection. Déjà pratiquée dans l'Antiquité, notamment par Aristote, qui semble avoir utilisé des planches anatomiques pour ses exposés, cette science connut une grande vogue au XVI*e *siècle ; à cette époque, A. Vésale (1514-1564) fut la figure marquante du renouveau de l'anatomie humaine. L'anatomie animale fit aussi de grands progrès, et la comparaison par P. Belon (1517-1564) entre le squelette de l'homme et celui de l'oiseau est justement célèbre, quoiqu'elle soit demeurée sans suite chez son auteur. Il s'agissait d'un essai d'anatomie comparée, dans lequel Belon se fondait sur la forme et la place des os des deux êtres en question pour les rapprocher. Cette méthode n'était pas très nette chez Aristote, qui comparait effectivement des organes, mais surtout d'après leurs* fonctions. *Le terme même d'anatomie comparée est utilisé surtout depuis N. Grew (1641-1712), auteur d'un ouvrage sur l'appareil digestif et d'un traité d'anatomie végétale. La*

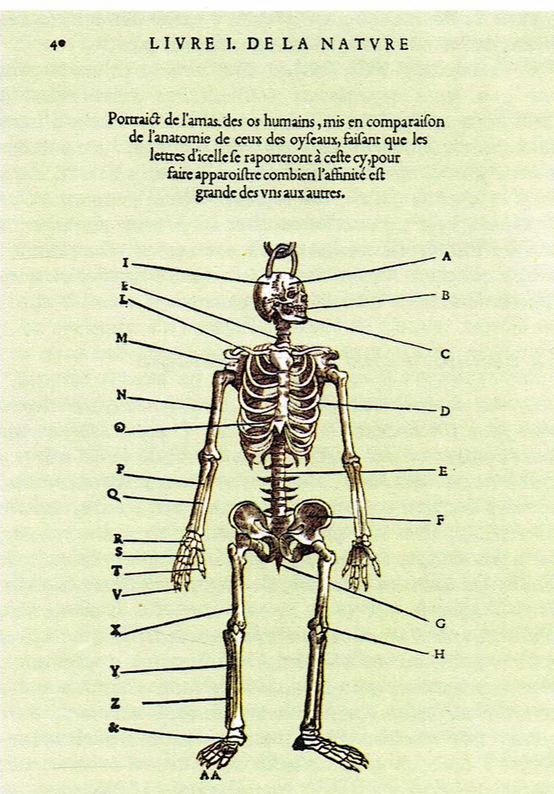

Muséum national d'histoire naturelle, Paris

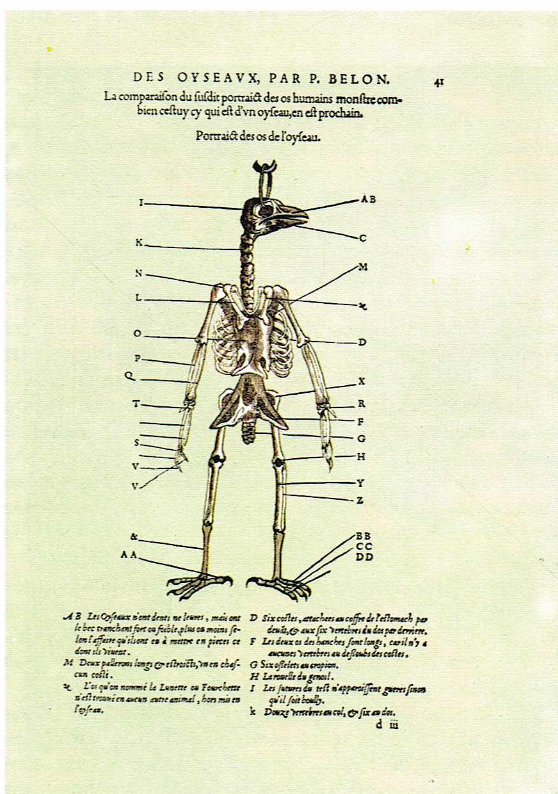

Muséum national d'histoire naturelle, Paris

Ferruzi

▼ **André Vésale** ***(1514-1564) fut, au XVI*e *siècle, la figure marquante du renouveau de l'anatomie humaine.***

◄ ***Ces deux gravures illustrent la célèbre comparaison entre le squelette de l'Homme et celui de l'Oiseau que présenta P. Belon (1517-1564) dans son*** **Histoire de la nature des Oiseaux** ***(Paris, 1555).***

S. Yoff - Jacana

▲ **Pour Goethe, le métamère est le véritable animal élémentaire; la métamérisation est manifeste chez les Annélides, ici** Hermodice caruncula**ta.**

comparaison des plantes et des animaux supérieurs révéla de grandes similitudes dans le plan de leur organisation. Celles-ci ne surprirent pas : depuis longtemps, les êtres étaient considérés comme des reflets plus ou moins fidèles d'une même divinité, ou du moins, chez Aristote, comme ayant celle-ci pour cause finale. É. Geoffroy Saint-Hilaire et ses adeptes vont pousser l'anatomie comparée à l'extrême et comparer dans tous leurs détails les organisations respectives d'un Vertébré, d'un Mollusque et d'un Arthropode! Cuvier devait réagir contre ces efforts stériles, ce qui sera le sujet de sa fameuse contreverse avec Geoffroy Saint-Hilaire, en 1830.

C'est avec Robinet et surtout Goethe qu'apparait la notion de type morphologique : si les êtres se ressemblent, c'est qu'ils sont des manifestations multiformes et plus ou moins parfaites d'un type idéal unique, qui, on le voit, n'est pas sans ressembler au Dieu d'Aristote. Cuvier aussi reconnut le bien-fondé de la notion de type, mais à condition d'admettre un nombre suffisant de types auxquels on ne rapportera que des animaux réellement comparables.

Multiplicité de l'être vivant

Nous avons jusqu'à présent décomposé l'individu, tout en reconnaissant implicitement qu'il mérite ce nom, c'est-à-dire que toutes ses parties doivent être présentes pour en faire un être vivant. Voyons maintenant les tentatives de remettre en cause cette individualité. Les êtres vivants au sens usuel sont-ils bien les atomes de la vie? Leur structuration demande cette explication; par exemple, pourquoi y-a-t-il une tête différente de la région postérieure? Pour tenter de rendre compte de ce fait, les penseurs vont d'abord admettre que l'organisme est multiple et constitué d'organismes plus simples, fondamentalement identiques, reflets eux-mêmes du type animal ou végétal, qu'il suffira alors de concevoir de façon bien plus simple. La tête diffère du tronc? Goethe répond que ce n'est là qu'une apparence parce qu'au niveau ostéologique, tous les deux sont en fait constitués de vertèbres: les lombaires sont différentes des dorsales, les céphaliques sont plus différentes encore, et voilà tout!

La suite des événements montra que cette idée contenait une part de vérité : une grande partie de la tête correspond à des métamères homologues de ceux du tronc (il est vrai qu'aucune des homologies de détail envisagées à cette époque ne s'est confirmée).

Mais il n'est pas indispensable d'accorder une valeur d'organisme aux éléments ainsi reconnus; or, c'est ce qui se produisit souvent. On obtint ainsi une explication un peu illusoire de la complexité de l'organisation, par recours à un atomisme biologique. De même que le monde tout entier est constitué d'atomes, de même, à un niveau supérieur, les êtres vivants seront formés d'êtres plus simples. Il reste évidemment à expliquer le mode de différenciation et d'union des êtres élémentaires.

Au XVII^{e} siècle, Cyrano de Bergerac envisageait que les grands animaux sont constitués de petits animaux. Au siècle suivant, on considérera l'arbre comme une colonie de rameaux poussant les uns sur les autres d'année en année. Goethe, d'abord partisan de cette interprétation très répandue jusqu'au siècle dernier, montra en 1790 que les plantes supérieures sont formées d'une succession de feuilles essentiellement identiques, d'abord végétatives puis sexuées et constituant la fleur. Cette interprétation est toujours admise, mais plus tard, Goethe prolongea sa théorie en admettant que la véritable plante est finalement la feuille, et la plante apparente une colonie de plantes élémentaires. De même, disait-il, les Insectes sont formés de parties successives (anneaux ou métamères), mais, à la différence des feuilles, tous les métamères sont ici déjà formés à la naissance de la larve. Chez lui, donc, le métamère est finalement le véritable animal élémentaire.

Cette idée se retrouve chez A. Moquin-Tandon (1804-1863) qui, en 1827, explique que les Annélides ou les Arthropodes sont des colonies dans lesquelles un individu, la tête, domine (au moins momentanément) et dirige l'ensemble. A. Dugès (1797-1838) distingue en 1832 des animaux bisériés, formés de deux rangées parallèles d'animaux élémentaires, des animaux radiaires, dont les composants sont disposés de façon rayonnante, et des animaux en grappe. Pour lui aussi, la centralisation des animaux complexes augmente de plus en plus au fur et à mesure qu'on s'élève dans l'échelle de la nature. Même à la fin du XIX^{e} siècle, E. Perrier (1844-1921) réinterprète encore l'ensemble des êtres vivants comme des « colonies animales », qu'il compare aux « colonies » végétales de feuilles.

Chez les botanistes, ces conceptions ont donné naissance au phytonisme. Dès 1832, E. Meyer (1791-1858) développe des vues comparables à celles de Goethe. Plus tard, C. Gaudichaud (1789-1864) parle dans le même sens, et, en 1925, G. Chauveaud (1859-1933) découpera encore les plantes en phyllorhizes, c'est-à-dire en plantes élémentaires munies chacune d'une racine.

A l'exception d'E. Perrier, ces auteurs n'envisagent pas que leurs organismes élémentaires aient existé à l'état libre. Malgré leurs erreurs, on doit garder de leurs conceptions l'idée de la métamérisation, qui est un des grands problèmes de l'évolution. Elle est présente dans la plus grande partie du règne animal, y compris les Vertébrés, et a été confirmée chez les plantes supérieures par les études de morphologie externe et d'anatomie : la tige qui porte les feuilles se laisse décomposer avec sa stèle en éléments emboîtés correspondant à celles-ci.

La cellule, l'œuf et la cytologie

On fut amené à découper les organismes à un niveau bien plus fin encore. D'Aristote et Théophraste à nos jours en passant par Buffon, on a remarqué que l' « âme » tout entière de l'être vivant doit être partout en lui, puisque souvent un fragment est susceptible de reproduire l'ensemble; ceci est spécialement net chez les plantes, où le bouturage, parfois à partir d'un simple fragment de feuille, est souvent possible. Le tout paraît donc contenu dans chaque partie, et H. Driesch voyait là la preuve du vitalisme vrai. Il en découle l'idée de scinder ce qu'on peut appeler individu en éléments très simples d'apparence, mais susceptibles de reproduire le tout. C'est ce qui a conduit au siècle dernier un botaniste allemand à la notion très confuse d'anaphyte, qui souvent se superposait à celle de cellule; cette dernière est la seule que nous examinerons, tout en signalant l'existence de

S. Yoff - Jacana

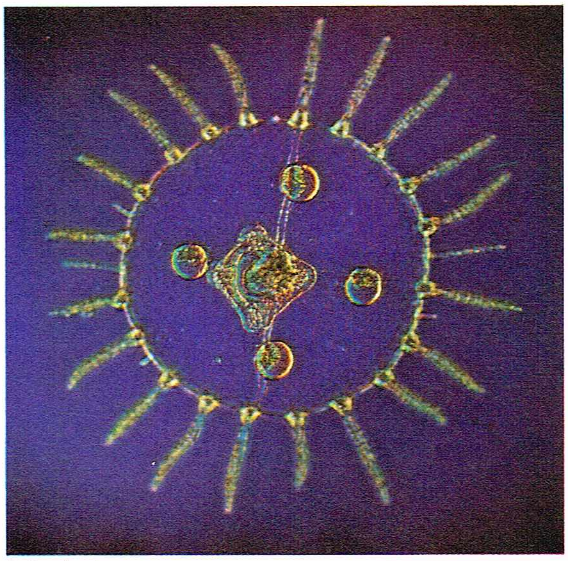

C. Carré - Jacana

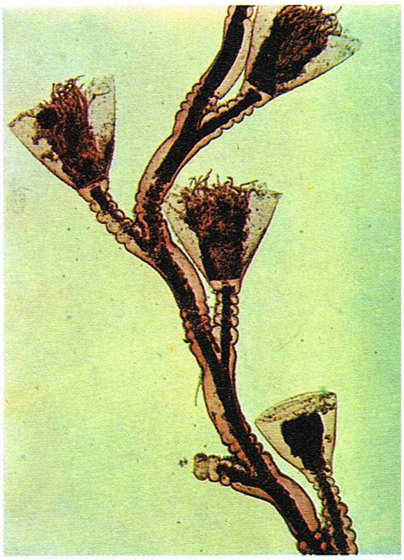

Nuridsany - Reichert

▲ A. Dugès *(1797-1838), pour qui les animaux sont des colonies, en distingue des radiaires (à gauche,* Aglaophenia pluma — *Cnidaire — et au centre, une leptoméduse) et d'autres en grappe (à droite, colonie d'Hydrozoaires* [Obelia gelatinosa]).

nombreuses autres théories micromeristes, *décomposant l'organisme en éléments hypothétiques qui ne sont pas des cellules et que nous retrouverons à propos de l'hérédité.*

R. Hooke (1635-1703) avait déjà remarqué l'existence dans le liège de cavités vides qu'il nomma cellules, mais il n'attribua pas de signification spéciale à ce fait. Dans leurs études d'anatomie végétale, M. Malpighi (1628-1694) et N. Grew virent des cellules, mais tandis que le premier les interprétait comme des utricules juxtaposés les uns aux autres, le second y voyait des cavités ménagées dans une substance fondamentale, elle-même fibrillaire. Aucun des deux ne chercha à interpréter les êtres vivants d'une manière nouvelle à partir de ces observations.

Au milieu du XVIII^e siècle, K. F. Wolff (1738-1794) observa la formation de cavités au sein de ce qu'il croyait être la substance fondamentale produisant l'embryon. Il s'agissait pour lui d'utricules séparés, susceptibles de devenir des parois de vaisseaux et des nerfs. Par contre, A. de Haller (1708-1777) adopta pour les animaux une interprétation comparable à celle de Grew, car, dans la mesure où son intérêt se concentrait sur les muscles et les nerfs, la fibre était pour lui l'élément fondamental.

Au début du XIX^e siècle, l'interprétation de Grew et Haller eut des partisans, en particulier C. F. de Mirbel (1756-1854) parmi les botanistes. Mais d'autres, surtout K. Sprengel (1766-1833) et G.R. Treviranus, montrèrent à leur tour que, chez les plantes, les cellules sont des entités distinctes que l'on peut artificiellement séparer. En fait, il s'en fallait de beaucoup que toutes les cellules que l'on voyait alors fussent de véritables cellules. Chez les animaux, il s'agissait souvent de simples cavités dans le tissu conjonctif lâche. Des grains d'amidon ainsi que de simples figures en diffraction dues à l'imperfection des microscopes étaient souvent aussi pris pour des cellules.

En 1839, T. Schwann (1810-1882), qui s'était déjà fait connaître par de très importants travaux, publia des observations précises sur des cellules animales qu'il sut voir dans de nombreux tissus et postula l'existence d'une structure cellulaire de tous les êtres vivants. La cellule lui apparaissait comme la plus petite unité viable. Mais Schwann, influencé par le botaniste M. J. Schleiden (1804-1881), admettait aussi, à la manière de Wolff, la formation des cellules à partir d'une substance fondamentale, le cytoblastème, par concrétion du nucléole, autour duquel se forme le noyau, bientôt entouré du cytoplasme et de sa membrane. Le noyau avait été reconnu d'abord en 1787 par F. Fontana (1731-1805), puis en 1833 par R. Brown (1773-1858) chez les végétaux, et revu par Schwann, en particulier, dans les cellules de la chorde de Poisson et de Batracien.

Parmi les autres auteurs qui, vers cette époque, s'intéressèrent à ces questions, il faut citer le botaniste P. J. F. Turpin (1775-1840) qui croyait déceler un mode de reproduction endogène des cellules végétales à partir de grains de « globuline » produits par leur paroi (lesquels n'étaient en fait que des grains d'amidon). La plus petite unité viable était pour lui le grain de globuline ; il était donc ce que J. R. Baker a nommé un « globuliste » et non pas l'auteur d'une véritable théorie cellulaire. On doit signaler que l'on sait maintenant obtenir un végétal entier à partir d'une seule ou de quelques-unes des cellules de ce dernier.

Lorsque Treviranus eut montré l'indépendance des cellules végétales, Mirbel adopta sa manière de voir en 1835. Il admit alors aussi que les utricules (cellules) se forment à la superficie d'utricules pères, le plus souvent entre ceux-ci, ou bien à l'intérieur d'eux. De plus, pour ce qui est de la reproduction, il émit l'hypothèse que l'œuf n'est pas autre chose qu'une cellule à partir de laquelle se forment toutes celles de l'individu. Il suggéra

▼ *Les grains d'amidon, mis en évidence, ici, par coloration à l'iode et par observation en lumière polarisée, furent, souvent encore au début du XIX^e siècle, confondus avec des cellules du fait de l'imperfection des microscopes.*

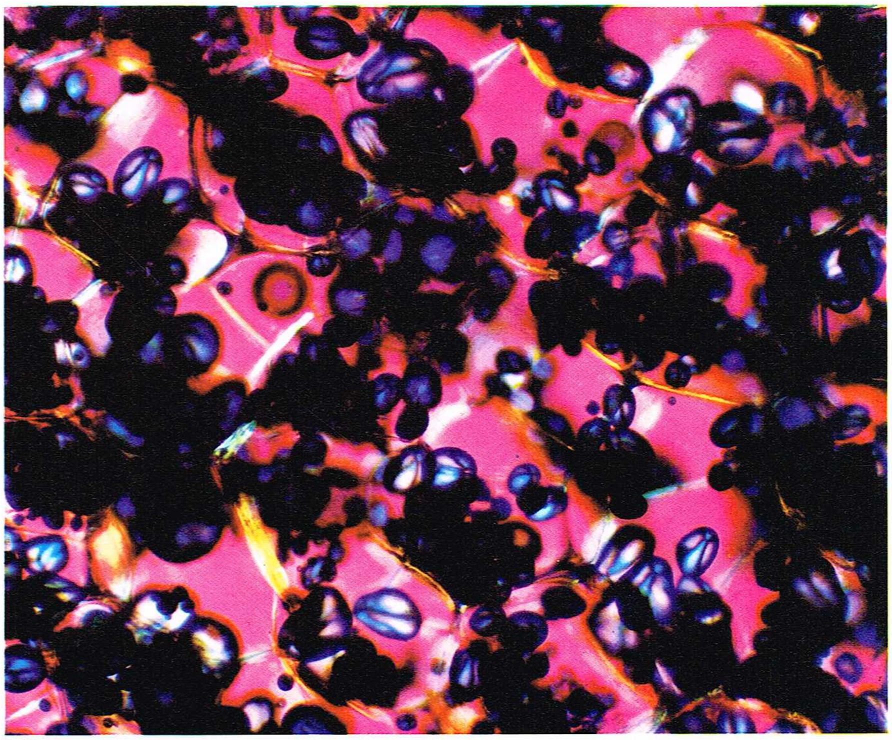

P. Castano

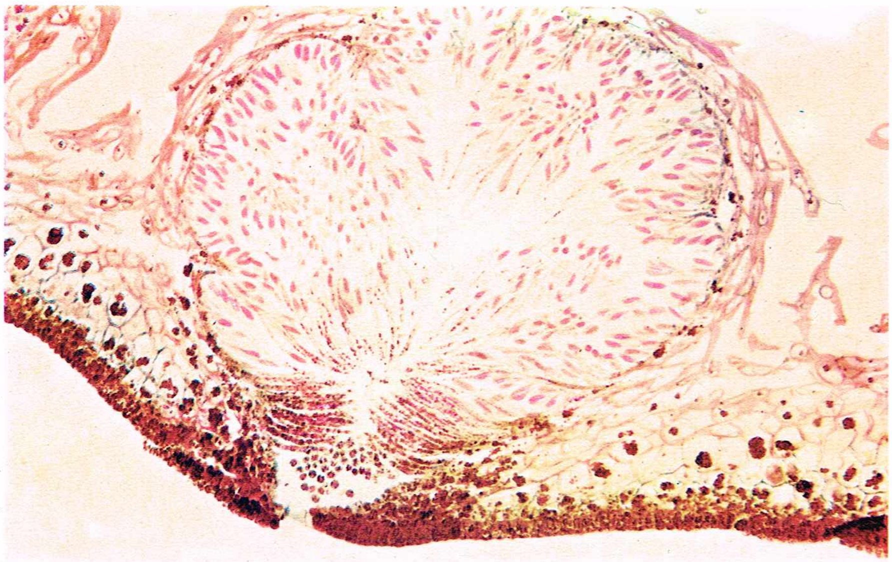

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

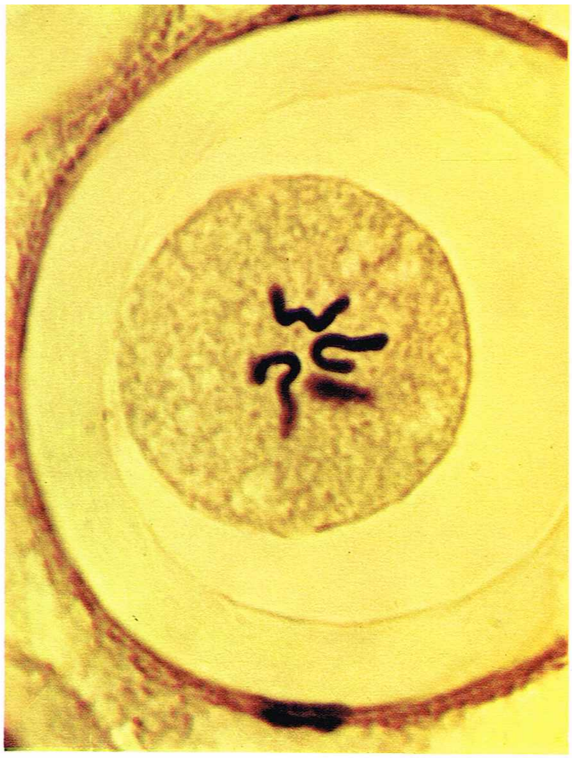

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

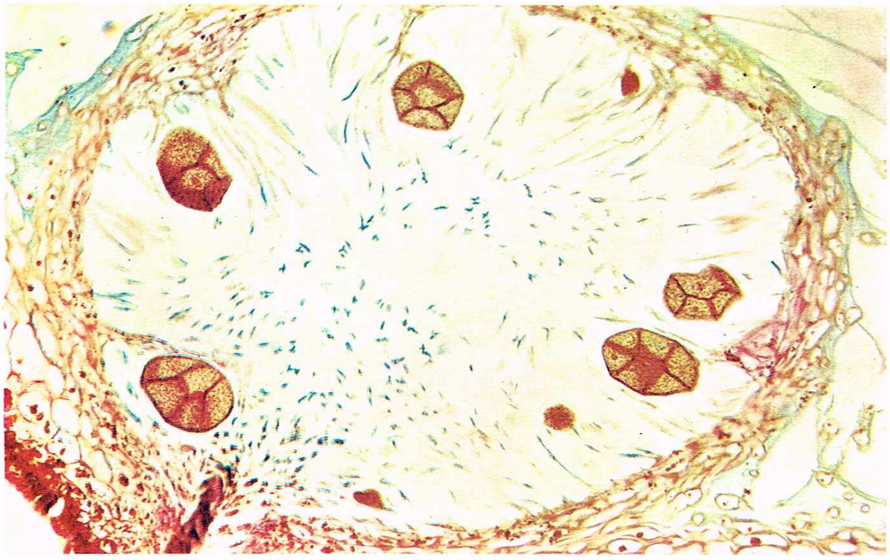

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲▶ *A gauche, conceptacles où se forment les cellules sexuelles mâles (en haut) et femelles (en bas) du* Fucus, *dont, en 1855,* G. Thuret *observa le premier le rapprochement. La réduction chromatique fut mise en évidence, en 1833, par* E. Van Beneden *(1845-1910) chez l'ascaris; à droite, division de la cellule œuf d'*Ascaris megalocephala.

alors en passant l'interprétation cellulaire des gamètes et de la fécondation.

Ce n'est qu'en 1856 que N. Pringsheim (1823-1894) observa chez l'Algue Oedogonium *l'union des cellules sexuelles, après que G. Thuret (1817-1875) eut vu leur rapprochement l'année précédente chez le* Fucus*; et c'est en 1877 que H. Fol (1845-1892) montra l'entrée d'un unique spermatozoïde dans l'œuf d'étoile de mer. Déjà, en 1843, M. Barry avait vu un spermatozoïde dans l'œuf de lapin et, en 1852, G. Newport (1803-1854) avait montré que des spermatozoïdes s'engagent dans la membrane cytoplasmique de l'œuf de triton. Au siècle précédent, d'ailleurs, L. Spallanzani (1729-1799) avait observé que le sperme de grenouille dénué de spermatozoïde n'est pas fécondant, mais il était de ceux qui pensaient que l'embryon provient de l'ovule, et ne pouvait en conséquence interpréter correctement sa trouvaille. Lorsqu'en 1824, J. L. Prévost (1790-1850) et J. B. Dumas (1800-1884) confirmèrent cette observation, ils furent conduits à attribuer un rôle fécondant au spermatozoïde. A la fin du XIX*[e] *et au XX*[e] *siècle, le phénomène de la fécondation fit l'objet de belles analyses expérimentales commencées par J. Loeb (1859-1924) et E. Bataillon (1864-1953), et ce dans le dessein de se passer de la fécondation afin de déterminer la parthénogenèse expérimentale.*

Parallèlement, la notion de protoplasme, qui d'abord ne signifiait pour J. E. Purkyné (1787-1869) que la substance fondamentale à partir de laquelle les cellules s'organisent (cytoblastème), fut précisée en 1852 dans un sens plus moderne par H. von Mohl (1805-1872), et, en 1846, C. Naegeli (1817-1891) montra que, la plupart du temps, les cellules se multiplient en fait par division. Il observa aussi que le noyau des cellules des poils staminaux de Tradescantia *se divise, mais n'en admit pas moins la formation libre des noyaux dans le cas général. La multiplication des cellules animales par le même processus de division fut bientôt démontrée par R. Remak (1815-1865). R. Virchow (1821-1902), pour sa part, soutint bien que les cellules naissent d'une cellule préexistante* (omnis cellula e cellula), *mais admettait encore la naissance endogène de celle-ci dans leur mère.*

Les travaux des biologistes permirent ensuite d'enrichir la cytologie, comme le note Hughes, d'un adage, « omnis nucleus e nucleo *». W. Hofmeister (1824-1877) étudia à nouveau la division du noyau des cellules des poils staminaux de* Tradescantia, *mais ne reconnut pas de chromosomes.*

L'étude de la division (segmentation) des œufs permit de voir le fuseau achromatique ainsi que des asters qui furent diversement interprétés. Les chromosomes furent reconnus, en 1879-1880, par E. Strasburger (1844-1912) chez les plantes, et W. Flemming (1843-1915) chez les animaux, ce dernier chercheur développant l'utilisation des colorations. A dire vrai, dès 1876, E. G. Balbiani (1826-1899) avait indiqué l'apparition des chromosomes puis leur division, qu'il croyait transversale, dans l'épithélium ovarien d'une sauterelle, et c'est ainsi que Strasburger les vit d'abord se diviser.

La réduction chromatique fut mise en évidence en 1883 chez l'Ascaris par E. Van Beneden (1845-1910); cette découverte permit de saisir le sens des globules polaires qu'on connaissait à l'œuf, mais pour Van Beneden, les chromosomes ne se divisaient pas à la première division. C'est un peu plus tard que Th. Boveri (1862-1915) et O. Hertwig (1849-1922) saisirent le véritable déroulement du processus, en le retrouvant dans la lignée mâle. Ces découvertes furent étendues aux végétaux en 1888-1891 par E. Strasburger et L. Guignard (1852-1928). Enfin, en 1898-1899, S. G. Navachine (1857-1930) et Guignard découvrirent la double fécondation chez les Gymnospermes et les Angiospermes, mécanisme qui fait toujours l'objet de recherches au microscope électronique.

Ce sont ces découvertes qui ont permis à E. Overton d'apporter, en 1893, le complément cytologique essentiel à celles d'Hofmeister sur l'alternance des générations : le gamétophyte formateur des gamètes est tout entier formé de cellules à nombre réduit de chromosomes

(haploïdes), ce qu'il put vérifier dans le cas de l'endosperme de Ceratozamia (Cycadacées). De plus, ces progrès rejoignaient magnifiquement les conclusions de la génétique renaissante, et permettaient de créer une histologie, science des tissus, qui est à présent fondée sur l'analyse de leurs constituants cellulaires et de leurs interactions.

La cytologie, en révélant que la cellule est bien l'élément structural de l'être vivant, allait tendre à se rapprocher des sciences physiologiques et biochimiques : en effet, c'est au niveau de la cellule que se produisent toutes les réactions du métabolisme, et toutes les actions des organes sont le résultat des processus intervenant dans leurs cellules. Une cytophysiologie ne devait donc pas tarder à naître.

Mais si toutes les cellules sont de petits êtres vivants constituant les grands, et qu'à ce niveau l'atomisme biologique se soit effectivement vérifié, si toutes les cellules sont potentiellement des œufs qui limitent étroitement leurs possibilités, lorsqu'elles se multiplient et restent adhérentes pour former un être complexe pluricellulaire, le problème se pose de la source et du transfert de l'information qui commande leur différenciation. D'ailleurs, tous les organismes ne sont pas cellularisés, et certains forment des siphons, ou syncytiums, à nombreux noyaux. Et même divisé en cellules, l'organisme reste un tout.

Si les espoirs d'atomisation de la vie sont de plus en plus confirmés, le problème de l'intégration de l'organisme reste fondamental, et il faut au moins que certains des « atomes » vitaux (cellule, noyau, acide désoxyribonucléique) possèdent l'information nécessaire pour la réaliser. Au siècle dernier, Claude Bernard introduisit la notion de milieu intérieur pour rendre compte des corrélations qui règlent l'activité des diverses cellules de l'organisme. Chacune, disait-il en 1878, travaille à préparer le milieu qui convient au fonctionnement de toutes les autres. Le phénomène de sécrétion interne qu'il découvrit a permis de rendre compte d'une partie de ces interactions. Les méthodes de culture in vitro d'organes, de cellules, et même d'organites servent précisément à analyser ce milieu intérieur en le reconstituant et en le modifiant. A l'échelle de la cellule, un milieu intérieur existe aussi, préparé par les divers organites. Par exemple, les mitochondries et l'ergastoplasme échangent des lipides dans une cellule végétale, et des protéines cytoplasmiques assurent ce phénomène qui doit permettre des corrélations entre ces organites (A. Ben Abdelkader, 1973).

DÉVELOPPEMENT ET GÉNÉTIQUE

Depuis toujours, on a cherché à se faire une idée du mystère de la génération. Nous avons déjà parlé des vues d'Aristote ; pour lui, la génération n'est pas essentiellement différente de la nutrition : elle met en cause le sang, spécialement le sang très élaboré de la semence mâle. Et, quand Aristote cherche une base matérielle à la ressemblance du produit avec ses parents, il explique que ce sont les mouvements propres qui, communiqués au sang de la semence, transmettent à la génération suivante la forme et l'âme. Il avait aussi discuté la possibilité d'une préformation totale de toutes les parties des animaux dans la semence mâle, parties qui n'auraient plus qu'à grandir, mais il rejetait cette thèse.

Pourtant, avant Aristote, la simple observation que les enfants ont beaucoup de traits de leur mère avait conduit Anaxagore, Parménide, Épicure et ses disciples à affirmer que deux semences, l'une mâle et l'autre femelle, sont nécessaires à la formation de l'embryon. Plus tard, Galien postula aussi l'existence d'une semence femelle, mais celle-ci ne servait qu'à la formation des annexes embryonnaires. Signalons, toutefois, que l'idée judicieuse de la participation de la mère conduira parfois à des erreurs : Buffon verra chez la femelle une liqueur comparable à celle du mâle, avec des animalcules !

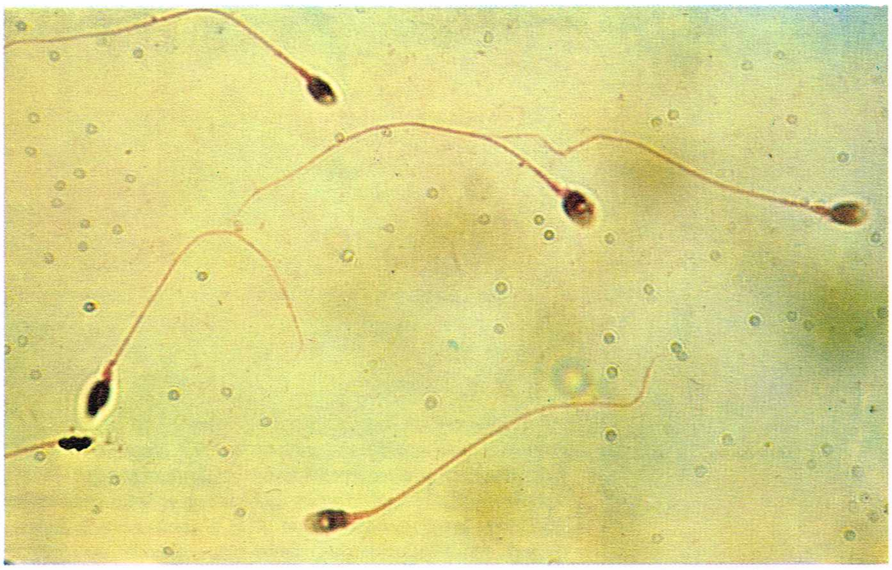

C. Bevilacqua

▲ ***Le microscope permit à** A. Van Leeuwenhoek **de découvrir, en 1679, les spermatozoïdes ou animalcules spermatiques ; ici, spermatozoïdes humains.***

Dans la première moitié du XVII^e siècle, W. Harvey (1578-1657) accorda une grande importance à l'œuf et vit dans la fécondation une sorte de « contagion » par la semence mâle ; cette dernière, sans qu'il y ait de transfert d'éléments matériels, induit le développement de l'œuf comme le ferait un aimant. Le développement du microscope permit à A. Van Leeuwenhoek (1632-1723) de découvrir, en 1679, les spermatozoïdes, ou animalcules spermatiques. Étant donné la tendance très générale d'attribuer au mâle un rôle prépondérant, on ne fut pas surpris de rencontrer ces petits êtres dans sa semence et on crut même qu'ils contenaient de petits fœtus. N. Hartsoeker (1656-1725) ou F. de Plantade (1670-1741) en dessinèrent même, le premier sans jamais prétendre les avoir vus.

Ainsi s'établit la théorie animalculiste : le produit est préformé dans les animalcules mâles, et il n'y a pas de raison pour que le fœtus ne comporte pas lui-même les germes de la génération suivante et ainsi de suite : il y a emboîtement.

Mais Malpighi, qui peut être considéré comme le fondateur de l'embryologie animale, avait vu qu'un œuf de poule non couvé présente déjà un embryon. En fait, cet œuf avait été abandonné trop longtemps au soleil et son développement avait commencé. Malpighi étudia le développement embryonnaire du poulet avec grand soin, mais de son observation initiale on tira une conclusion symétrique de celle des animalculistes : il y a bien préformation, mais c'est la femelle qui porte les générations emboîtées dans ses œufs. Au XVIII^e siècle, cette idée eut des défenseurs de marque avec Haller, Bonnet et Spallanzani. Ce fut la théorie oviste, que Bonnet voyait confirmée par la découverte qu'il avait faite de la parthénogenèse chez les pucerons.

C'est vers la fin du XVII^e siècle que plusieurs auteurs conçurent la notion d'une sexualité végétale. En 1682, Grew l'envisageait et indiquait que T. Millington (1628-1704) était aussi de cet avis. En Angleterre, au début du XVIII^e siècle, R. Bradley (?-1732) soutint aussi cette opinion, de même que S. Morland (1625-1695). En France, tandis qu'elle était rejetée par J.-P. Tournefort (1656-1708), elle était approuvée avec enthousiasme par son élève S. Vaillant (1669-1722) et soutenue aussi par E.-J. Geoffroy (1672-1731). En fait, ce furent surtout les observations et les expériences réalisées en 1694 par R.J. Camararius (1665-1721) qui établirent la nécessité d'un apport de pollen sur le stigmate pour que se forme le fruit. Linné s'empara de cette découverte, qu'il connut

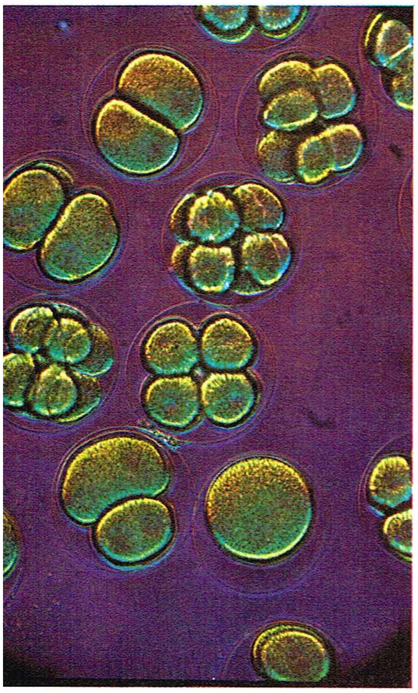

C. Carré - Jacana

▲▼ **Les premiers stades du développement de l'œuf d'oursin furent un objet essentiel des travaux d'embryologie expérimentale. On voit, en haut, l'œuf se segmenter tandis que le stade gastrula est atteint en bas; dans la blastula en forme de ballon s'est manifestée l'invagination d'une sorte de doigt de gant qui forme l'intestin primitif de la larve.**

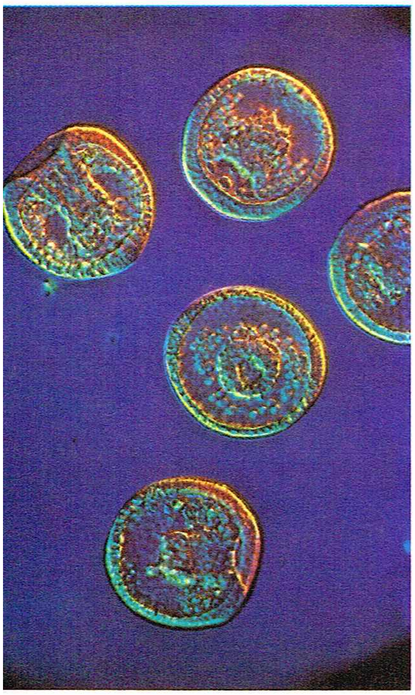

C. Carré - Jacana

par Vaillant, et s'en servit pour établir sa théorie de la sexualité. Il contribua aussi à l'étude expérimentale de la sexualité.

Au XVIII^{e} siècle, la théorie de l'emboîtement était généralement admise pour les végétaux, la plantule que présentait la graine semblant la confirmer. Pourtant, Morland et Geoffroy soutenaient que le pollen fournit les germes qui s'introduisent dans l'ovule. Au XIX^{e} siècle, d'interminables discussions furent suscitées par la théorie de Schleiden, pour laquelle le tube pollinique forme l'embryon à son extrémité.

Les phénomènes précis de la fécondation ne furent compris que vers la fin du XIX^{e}, et leurs détails sont d'ailleurs toujours à l'étude. Mais la germination du pollen de pourpier avait été observée dès 1823 par J.-B. Amici (1786-1863); ce dernier vit que le tube pollinique entre en contact avec le sac embryonnaire de l'ovule. C'est également durant le XIX^{e} siècle que furent élucidés, laborieusement, les principaux modes de la sexualité des Cryptogames, découvertes inaugurées en 1803 par les observations de J.-P. Vaucher sur la fécondation des Algues vertes d'eau douce. Enfin, la grande découverte, par Hofmeister, de l'alternance des générations ou, mieux, des formes, permit la synthèse de l'ensemble de toutes les connaissances acquises au milieu du siècle.

Le préformationnisme, qui paraît fantastique de nos jours, ne doit pas être hâtivement ridiculisé : la formation du fœtus et la conservation des caractères héréditaires sont un problème tellement difficile que leur véritable explication ne pouvait pas être découverte à cette époque et ne l'est toujours que très partiellement. Une solution simple consistait à admettre que le fœtus ne subit qu'une augmentation de taille, une « évolution », disait-on. Bonnet n'était pas fermé aux problèmes posés par ses idées : il en vint à admettre que le premier aspect d'un fœtus pouvait bien être très différent de celui de l'adulte. Il pensait aussi que le mâle, effectivement, joue un rôle, ce que montre de toute évidence la formation d'hybrides (les mulets par exemple). Enfin, il lui fallait admettre l'existence de germes dans les parties qui permettent la régénération de celles-ci et la reproduction asexuée.

Au milieu du XVIII^{e} siècle, G. F. Wolff se fit l'apôtre de l'épigenèse (théorie qui admet que l'embryon se forme graduellement, par différenciation de parties non préexistantes). En 1759, il publia dans sa Theoria generationis des observations très importantes sur le développement du poulet, mais aussi, chez les plantes, sur la formation des feuilles et des pièces florales. Par la suite, en 1766, parurent, outre ses travaux sur l'organogenèse de l'intestin, ses observations, tératologiques cette fois, qui le conduisirent à admettre l'homologie des feuilles et des pièces florales, comme Goethe allait faire vingt-cinq ans plus tard. Pour Wolff, les parties de l'embryon apparaissent par organisation d'une substance fondamentale (ou protoplasme dans sa première acception), du même genre que le cambium des arbres tel qu'on l'envisageait alors, et par où se fait l'accroissement en diamètre de ces derniers. Mais pour expliquer cette organisation, il devait faire appel à un principe organisateur, une force essentielle (vis essentialis), qui semble bien être l'âme de l'embryon. Elle n'a rien d'immatériel, mais Wolff ne nous donne pas non plus son fondement matériel. Deux mille ans après Aristote, l'épigenèse posait toujours autant de problèmes !

Au XIX^{e} siècle, tandis que la réalité de la fécondation devenait manifeste, la description du développement embryonnaire fit de grands progrès, d'abord chez les animaux, grâce à C. E. von Baer (1792-1876) qui, entre 1827 et 1837, établit la théorie des feuillets germinatifs, découvrit la chorde dorsale et montra la correspondance des stades du développement des Vertébrés inférieurs avec les premiers stades de celui des Vertébrés supérieurs. Chez les plantes supérieures, ce n'est guère qu'en 1870, avec J. Hanstein (1822-1880), que commence l'étude du développement de l'œuf, dont la formation par fécondation ne sera d'ailleurs établie qu'en 1877, par Strasburger.

La morphogenèse

C'est assez longtemps après la description du développement embryonnaire qu'on se préoccupa d'en étudier la physiologie; cette physiologie du développement est appelée actuellement morphogenèse.

C'est avec W. Roux (1850-1924) que les travaux de morphogenèse commencèrent dans leur esprit actuel; cependant, les premiers résultats de Roux, qui montraient qu'on peut obtenir des embryons partiels de grenouille par destruction d'un des deux blastomères de la première division, ou d'un à trois blastomères après la seconde, sont tout à fait identiques à ceux, bien plus détaillés, de Chabry, qui travaillait sur l'embryon d'une ascidie. Comme les blastomères ne donnent que la partie du corps qu'ils auraient donnée si l'on n'était pas intervenu, Roux en tira la conclusion que le développement se fait en mosaïque. Mais, bientôt, H. Driesch s'aperçut que les premiers blastomères d'oursin, isolés, donnaient des embryons complets : il y a régulation, et une cellule d'un jeune embryon se comporte comme un œuf entier. Ce pouvoir de régulation est la source de la formation des jumeaux et des monstres doubles. Il y a aussi une régulation des excédents, pour employer la terminologie d'E. Wolff : l'union de deux germes ne conduit alors qu'à un seul produit. Inversement, d'autres cas de développement en mosaïque seront mis en évidence, notamment chez les Annélides et les Mollusques.

En 1921, H. Spemann (1869-1941) introduisit définitivement la notion d'induction embryonnaire, en montrant que la greffe d'une lèvre dorsale de blastopore de triton dans la région latérale d'une gastrula détermine sur celle-ci la formation d'un embryon secondaire. Ce phénomène correspond au processus plus limité rencontré au niveau de la différenciation des organes et qui fait l'objet d'innombrables travaux, parmi lesquels il faut citer spécialement ceux qui se poursuivent dans le laboratoire d'E. Wolff. Au cours du développement, les parties de l'embryon agissent les unes sur les autres par l'intermédiaire de substances inductrices, ribonucléiques sans doute, qui ne sont pas sans évoquer des sortes d'hormones locales ou de médiateurs chimiques. Les corrélations entre parties se réalisent ainsi progressivement : par exemple, une évagination d'une vésicule de l'encéphale, future rétine, induit l'enfoncement d'un bouton ectodermique qui se creuse et va former le cristallin; celui-ci, à son tour, induira la différenciation en cornée de l'ectoderme, lequel s'est reconstitué en face de lui. C'est ce processus que Spemann commença à étudier dès 1901. On peut rapprocher de ce phénomène le fait que les organes sexuels de l'embryon, par les hormones qu'ils sécrètent, induisent leur propre différenciation. A cet égard, la démonstration par E. Wolff, en 1935, de la possibilité d'inverser le sexe de l'embryon de poulet sous l'action d'une hormone femelle eut un grand retentissement; on sait maintenant que l'embryon sécrète lui-même des hormones sexuelles, sous contrôle génétique bien entendu. Les travaux de morphogenèse s'orientent maintenant aux niveaux cytologique et biochimique.

La tolérance des embryons pour les greffes est à la base de l'expérimentation en embryologie. Elle s'étend aux organismes embryonnaires entiers, et on peut réaliser des chimères d'Urodèles viables dans lesquelles les moitiés antérieure et postérieure du corps appartiennent à deux espèces différentes. De beaux résultats ont été obtenus dans cette voie par C. Houillon.

L'étude de l'œuf indivis est également de grande importance. Si presque toute l'information est contenue dans les chromosomes, une partie se transmet aussi par le cytoplasme de l'œuf, dans lequel elle s'est manifestée

M. Pedone

▲ **Dans les fleurs doubles (ici des pivoines) se produisent spontanément des multiplications de pièces (pétales et étamines) que l'on commence à obtenir à volonté grâce à des techniques expérimentales de morphogenèse.**

d'abord. Depuis longtemps, on a remarqué la stratification des éléments cytologiques, qui annonce parfois plus ou moins la localisation des parties du futur embryon. Une extension intéressante, quoique encore problématique, des travaux concernant l'induction a consisté à s'attaquer non plus à des fragments de parois cellularisées, mais à des fragments du cortex de l'œuf où elle se produira. On retrouve là l'idée d'une différenciation précédant la cellularisation. De même, dans plusieurs cas, une partie du cytoplasme de l'œuf détermine les cellules qui s'y forment à devenir des cellules sexuelles et, chez l'Ascaris, agit sur les chromosomes complexes en empêchant leur fragmentation.

L'embryologie expérimentale des végétaux est bien moins avancée que celle des animaux. Pourtant, la polarité de l'œuf fait l'objet de travaux, en particulier chez les Algues. Comme la plante supérieure ne termine son développement qu'en fleurissant, il est normal d'attribuer à l'embryologie l'étude des apex végétatifs et floraux. L'expérimentation sur ces parties remonte à la fin du siècle dernier, notamment depuis les travaux de K. Goebel (1855-1931). Récemment, on a mis en évidence des faits comparables à ceux de la régulation en embryologie animale : sectionné longitudinalement, un apex donne deux apex normaux, et, s'il s'agit d'un apex floral, il pourra se former deux fleurs. Un jeune pétale, une jeune étamine, une jeune feuille, sectionnés en long, peuvent donner deux pièces normales (G.S. Hicks, T. Sachs). L'induction existe aussi : G. Camus a montré qu'un bourgeon greffé induit la différenciation d'un faisceau de bois ; l'apex surtout induit les régions latérales sous-jacentes à former des feuilles : isolées de lui par des entailles, ces mêmes régions produisent des ébauches de bourgeons (C.W. Wardlaw).

La sénescence

A l'inverse du développement, la sénescence est un ensemble de processus qui mènent l'organisme entier à la mort. Il s'agit d'un sujet encore fort mal connu. Chez les végétaux supérieurs, la sénescence de parties anciennes va de pair avec la morphogenèse : des feuilles sont mortes avant la floraison. Mais, même chez un embryon de Vertébrés, certaines parties sont sénescentes et se nécrosent bien avant la fin du développement : c'est le cas des membranes interdigitales, qui existent même chez un embryon de poulet dont les doigts ne seront point palmés ; la métamorphose s'accompagne de phénomènes d'histolyse. Il faut examiner, d'une part, la sénescence contrôlée de parties de l'organisme et, d'autre part, la sénescence généralisée qui mène celui-ci à la mort.

L'hérédité et le micromérisme

Aristote cherchait, sans atomiser l'organisme, à expliquer le modelage de l'embryon à chaque nouvelle génération, ce qui est nécessaire si l'on est épigéniste. La chose pourra paraître plus facile si l'on est, de plus, micromériste, *c'est-à-dire si l'on décompose l'organisme en atomes vivants susceptibles d'être transmis isolément. Buffon admettait que l'organisme présente un « moule interne » déterminant non seulement le contour externe, mais également la structure et la microstructure de la masse, et que ce moule interne s'adjoint les molécules organiques que l'organisme absorbe. Celles qui sont rejetées par le moule, parce que superflues dans l'adulte, servent à former les semences. De plus, sans qu'il ait précisé ce point, Buffon a envisagé, semble-t-il, une hérédité du moule interne : ce que la génération suivante reçoit, ce n'est pas un embryon tout préparé qui n'aurait qu'à grossir, mais une sorte de trame tridimensionnelle propre à organiser les molécules organiques pour constituer un être vivant.*

Avant Buffon, Maupertuis avait admis une double semence : pour lui, chaque semence est formée de « germes d'organes » qui, doués d'affinités avec ceux des germes qui doivent donner des organes voisins dans l'organisme, s'unissent à eux et assurent le développement de celui-ci. Chaque organe fournit ses germes ; si leurs affinités sont perturbées, celles-ci aboutissent à la formation de monstres. Maupertuis explique les affinités d'abord par une attraction newtonienne, puis, plus tard, par une mémoire fort mystérieuse. Ce ne sont plus tous leurs constituants, mais seulement les germes des organes qui sont les « atomes » vitaux.

Les théories microméristes furent nombreuses au XIX^e^ siècle. En 1864, H. Spencer (1820-1903) proposa son hypothèse des unités physiologiques. En 1868, Darwin conçut aussi une théorie de l'hérédité et du développement. Pour lui, les parties de l'organisme émettaient des gemmules *porteuses d'information héréditaire.*

Bien d'autres conceptions furent proposées, parmi lesquelles il faut mentionner celle formulée par K. Naegeli en 1884 ; celui-ci envisageait un système plasmatique continu (idioplasme), passant d'une cellule à l'autre de l'organisme et possédant en chacune d'elles le support de l'information héréditaire tout entière. Cet idioplasme *est disposé en cordons ; il détermine les caractères plus ou moins globaux de l'organisme, dont chacun est exprimé par un plus ou moins grand nombre de cellules, et non pas la forme d'une seule cellule. L'œuf reçoit un cordon mixte, provenant pour moitié du père et pour moitié de la mère. Dans les cellules, en particulier dans l'œuf, ce sont des différences de « tensions » qui expliquent que telle ou telle partie de cet idioplasme soit ou non fonctionnelle : c'est pourquoi la cellule, qui pourrait remplir toutes les fonctions, ne se livre qu'à une fonction particulière. C'est pour la même raison que les caractères maternels et paternels se manifestent aussi plus ou moins. Enfin, les cordons de l'idioplasme sont susceptibles de modifications, dans lesquelles le milieu n'est pour rien, et qui sont responsables de la variation.*

Deux autres théories importantes sont celles proposées par H. De Vries en 1889, et A. Weismann en 1892, qui admettaient aussi l'existence d'éléments déterminant les caractères, et les situaient dans le noyau (et même pour Weismann dans les chromosomes). Ces pangènes *de De Vries ou ces* déterminants *de Weismann migrent du noyau dans le cytoplasme pour agir sur la différenciation des cellules. Mais, tandis que chez De Vries la plupart des cellules sont dépositaires de l'ensemble de l'information concernant les caractères de l'organisme, chez Weismann elles perdent, lors de la différenciation, les déterminants qu'elles n'ont pas à exprimer. Comme lors de la réduction chromatique, il y a perte de la moitié du plasma germinatif des chromosomes qui renferme les déterminants ; cette perte se fait au hasard ; les cellules sexuelles et les œufs qui en résultent sont extrêmement divers. D'où la variabilité des caractères des enfants par rapport à ceux des parents.*

F. Arborio Mella

▲ **Gregor Mendel** ***(1822-1884), à qui l'on doit les recherches sur l'hybridation, qui permirent de fonder la génétique.***

Naissance et renaissance de la génétique

On comprend mal la vogue de toutes ces théories, alors que durant trente-cinq ans demeurait méconnue la seule qui reposât sur des faits expérimentaux, celle de **G. Mendel** *(1822-1884), publiée en 1865. A cet égard, on a fait remarquer qu'au moment de sa publication, la tendance générale était d'admettre que l'ensemble des caractères d'une espèce formait un bloc définissant l'« essence » spécifique, susceptible de se mêler à une autre dans un hybride, puis de s'en séparer ensuite, toujours en bloc, dans ses descendants. C'est ce qu'avait cru montrer en 1864 C. Naudin (1815-1899). Mais, un peu plus tard, d'autres théories postulaient justement l'indépendance des caractères, et Naegeli était un correspondant de Mendel, dont le travail était dûment cité parmi ceux concernant l'hybridation par le bibliographe B. D. Jackson, dès 1881, ainsi que par W. O. Focke, qui n'en avait nullement vu l'intérêt.*

Mendel n'était certes pas le premier à avoir procédé à des hybridations artificielles de plantes ; il faut citer à ce sujet J. G. Koelreuther (1733-1806) et A. Sageret (1763-1851), qui avait opposé en un tableau les caractères correspondants des parents, ceux que nous appelons alléliques ; il avait noté que, dans un couple, un des caractères domine l'autre à la première génération, mais que le caractère dominé ne disparaît pas pour autant, puisqu'on peut le retrouver dans les générations suivantes.

Mendel, qui avait étudié et enseigné la physique, devait être un mathématicien compétent, mais il ne faut pas chercher, comme on l'a fait parfois, à expliquer l'indifférence que rencontra son travail par l'utilisation qu'il fit de notations mathématiques, en fait extrêmement simples. C'est en étudiant des plantes différant par un, deux ou trois caractères et en comptant les types de plantes obtenus lors des quatre à six premières générations, que Mendel fut conduit à postuler prudemment l'existence, dans les hybrides, de couples d'éléments issus des parents, identiques ou différents, et, dans ce dernier cas, conditionnant les deux états d'un caractère. Ces éléments devaient demeurer associés de façon stable pendant toute la vie végétative de l'hybride, l'un seulement s'exprimant s'ils étaient différents, pour se séparer au moment de la formation des cellules sexuelles et s'associer au hasard avec les éléments correspondants du conjoint, ceci indépendamment pour les divers caractères. Bien entendu, Mendel admettait que l'œuf résulte de l'union des deux gamètes ainsi dépositaires de deux allèles, ceci à une époque où la thèse de Schleiden avait encore des partisans, et où de toute manière la nature de l'action stimulatrice du tube pollinique n'était pas comprise. Toutefois, il ne formulait pas d'hypothèse sur la nature et la localisation des éléments déterminant les caractères.

Mais Mendel n'excluait pas que des hybrides puissent conserver de façon stable un couple d'allèles qui seraient « conjugués totalement et d'une façon permanente ». Alors, écrivait-il, « l'hybride, de même que tout autre végétal fixé, resterait invariable dans sa descendance ». C'est justement ce qu'il trouva après avoir réalisé, à la suggestion de Naegeli, des hybrides de Hieracium, *et c'est également ainsi qu'il envisageait d'interpréter le polymorphisme des saules. Nous savons maintenant que ces faits s'expliquent par l'apomixie (type de reproduction où n'interviennent ni la méiose, ni la fécondation) et que Mendel s'était approché de l'interprétation juste de ce fait, quoiqu'il admît le rôle fécondateur du pollen de* Hieracium. *L'effet de la méiose est bien supprimé dans ces cas et il n'y a pas de disjonction.*

Enfin, en analysant le résultat de croisements de haricots qui différaient par la couleur des fleurs et des graines, Mendel obtint des résultats aberrants en apparence, mais qu'il interpréta judicieusement en admettant que cette coloration « est composée de deux ou de plusieurs couleurs complètement indépendantes, et dont chacune se comporte, chez la plante, comme tout autre caractère constant ». C'est ce que nous nommons maintenant la polymérie.

En 1899-1900, les résultats de Mendel furent retrouvés par De Vries (1848-1935), K. Correns (1864-1933) et E. von Tschermak (1871-1962) ; le premier fut amené à entreprendre de nombreuses hybridations pour vérifier sa théorie des pangènes. Par la suite, le mendélisme se répandit en Angleterre, surtout grâce à W. Bateson (1861-1926). En France, il connut de beaux débuts avec L. Cuénot, qui, en 1902, étendit au règne animal les résultats de Mendel, en étudiant la coloration du pelage des souris, et mit bientôt en évidence la notion de caractère létal chez ces mêmes animaux. Dès 1902, Cuénot parlait de déterminants chimiques des caractères, mais les temps n'étaient pas encore mûrs pour que la nature de ce que W. L. Johannsen allait appeler les gènes soit comprise. D'ailleurs, en France, la génétique, comme on appelait déjà cette nouvelle branche de la Biologie, allait souffrir d'une opposition considérable des savants les plus influents, qu'il s'agisse d'Y. Delage, de L. Blaringhem ou d'E. Rabaud ; ceux-ci étaient désireux de ne pas morceler le patrimoine héréditaire (sans doute parce qu'il ne faut pas morceler trop profondément l'organisme), et de ne pas éliminer la possibilité de sa modification directe par le milieu. Au contraire, entre les deux guerres, Jean Rostand consacra de brillants exposés à la génétique.

▼ ***A gauche, fleurs de haricot*** **(Phaseolus vulgaris)** ***; au centre, fleurs de haricots montrant de légères nuances de couleur, dues à la variabilité naturelle ; à droite, deux mutations spontanées chez le rat : absence de poils chez l'un, pelage albinos chez l'autre ; le mendélisme fut étendu au règne animal par*** **L. Cuénot** ***en 1902.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

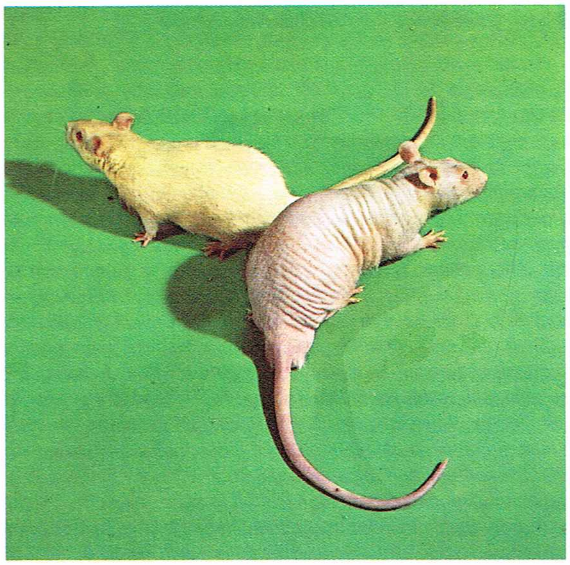

Lauros - Atlas - Photo

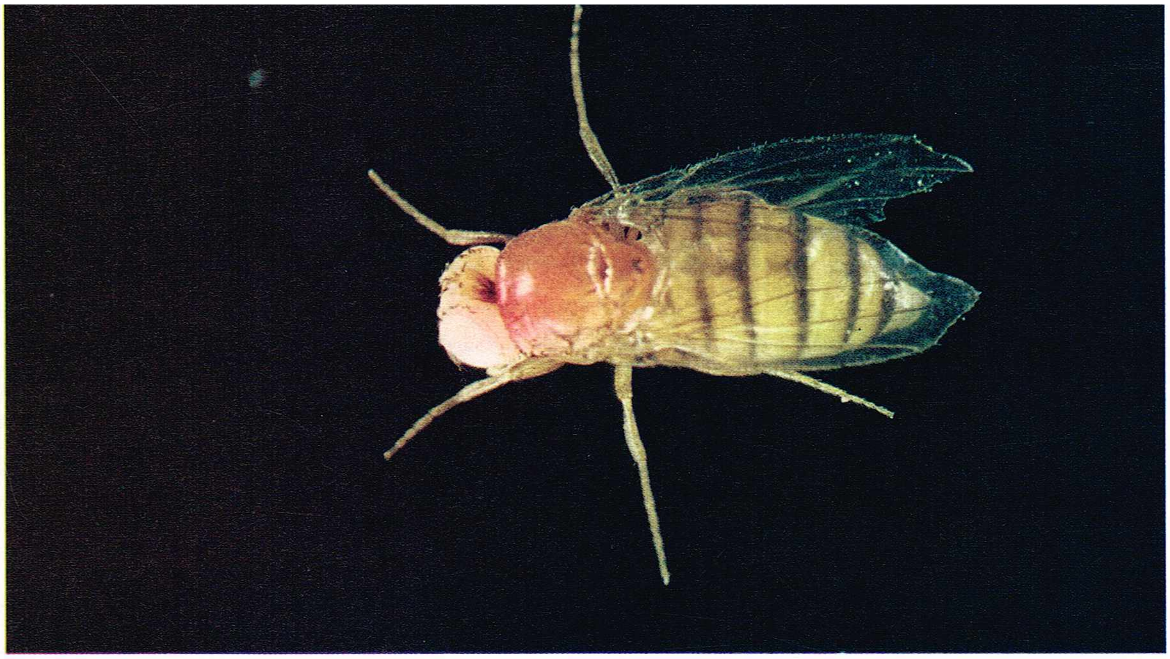

H. Chaumeton - Jacana

◀ *C'est à propos d'une mouche du vinaigre à yeux blancs (Drosophila melanogaster) que s'ouvrirent, en 1910, les recherches de T.H. Morgan sur la théorie chromosomique de l'hérédité.*

La théorie chromosomique de l'hérédité

Weismann avait postulé la présence, dans les chromosomes, de particules déterminant les caractères. Les phénomènes de réduction chromatique mettant en cause les chromosomes ne pouvaient manquer d'être rapprochés de la disjonction des caractères mendéliens. C'est ce qui ne tarda pas à se produire après 1900, avec les recherches de Th. Boveri, W. Sutton (1877-1916) et K. Correns.

En 1901, C. E. Mc Clung (1870-1946) avait envisagé l'hypothèse que le caractère déterminant le sexe mâle soit porté sur un chromosome déterminé. C'est par l'étude de la descendance d'un mâle à yeux blancs de drosophile (la mouche du vinaigre) que s'ouvrirent, en 1910, les recherches de T. H. Morgan (1866-1949). Celui-ci établit ainsi le mode de transmission d'un caractère lié au sexe. Bientôt, avec A. H. Sturtewant et C. H. Bridges notamment, il mit en évidence la transmission en bloc des caractères portés par un même chromosome, ce qui permit d'expliquer les « anomalies » notées par Bateson dès 1905.

On apprit bientôt à établir la carte des caractères sur les chromosomes. L'absence de disjonction entre deux chromosomes sexuels expliqua d'autres anomalies et fut également constatée cytologiquement. On découvrit, avec T. S. Painter, que les rangées transversales de chromomères, qui strient les chromosomes géants des glandes salivaires de la drosophile, constituent autant de marques constantes visibles directement et qui peuvent être mises en rapport avec les cartes géniques. On s'aperçut alors que certains caractères résultent de changements morphologiques subis par les chromosomes : des segments sont perdus, échangés, inversés, etc.

Les travaux allaient être étendus aux plantes grâce à C. D. Darlington et B. Mc Clintock. Ces dernières années, W. Nagl s'est intéressé à des chromosomes végétaux géants qui sont fort comparables à ceux de la drosophile.

La génétique n'avait utilisé que des caractères « mutés » spontanément. En 1927, par irradiation aux rayons X, H. J. Muller (1890-1967) va produire des mutations expérimentales, quoique de façon aveugle. Cette possibilité de faire « muter » des organismes, étendue grâce à la découverte d'agents chimiques mutagènes, sera très précieuse pour la génétique des Bactéries, des Virus et des Champignons.

A côté de la génétique animale et végétale, il faut dire un mot de la génétique humaine, qui présente de grandes difficultés puisque l'expérimentation, au moins au niveau de l'organisme entier, y est impossible et doit être remplacée par l'observation. Ce n'est qu'en 1956 que le nombre chromosomique de l'homme, longtemps estimé à 48, fut reconnu être de 46. En 1959, la découverte par J. Lejeune et R. Turpin de l'origine génétique du mongolisme, qui tient à la présence d'un chromosome supplémentaire, souleva un grand intérêt; de nombreuses anomalies de ce genre furent bientôt trouvées, rendant compte de divers états pathologiques congénitaux.

Les études génétiques furent étendues aux Bactéries à partir de 1946 lorsque J. Lederberg et E. Tatum découvrirent l'existence de leur « parasexualité », et les travaux de E. Wollman et F. Jacob eurent à ce sujet une importance essentielle. Des travaux de génétique furent aussi menés sur des Virus (bactériophages), et S. Benzer envisagea une génétique intragénique : le gène est lui-même susceptible d'être décomposé en plusieurs éléments. L'étude sur des Champignons devait mener aux mêmes notions, qui sont compréhensibles grâce à celles acquises sur la structure chimique de ce gène.

Gène et biochimie

Morgan ne se préoccupait pas de la nature du gène; cependant, bien vite, on chercha à déterminer sa constitution et son mode de fonctionnement. Dès 1902, A. Garrod (1857-1936) avait mis en évidence l'hérédité mendélienne de l'alcaptonurie de l'homme, anomalie métabolique dans laquelle l'urine, qui contient anormalement de l'acide homogentisique, noircit au contact de l'air. Déjà, en 1909, Garrod pensait que l'absence d'une enzyme décomposant normalement cet acide était la cause de cette anomalie et que la production de cette enzyme était normalement un caractère héréditaire. Comme les enzymes se révélaient être responsables de toutes les réactions métaboliques, si l'on pouvait lier le gène à l'enzyme, on pouvait aussi entrevoir son mode d'action sur tout le développement et le fonctionnement de l'organisme. Si diverses théories eurent cours suivant lesquelles le gène était une enzyme ou une protéine, il faut signaler que dès la fin du siècle dernier on avait envisagé le rôle héréditaire de la « nucléine » (c'est-à-dire des acides nucléiques), découverte en 1871 par J.F. Miescher (1844-1895).

Cependant, ce n'est qu'à partir de 1950 environ, avec les découvertes d'E. Chargaff, que les connaissances chimiques sur ces acides permirent de comprendre comment leurs molécules sont suffisamment variables pour représenter un très grand nombre de caractères. Dès 1944, A. T. Avery (1895-1949) avait montré que l'acide désoxyribonucléique est susceptible de transmettre un caractère chimique d'une souche bactérienne à une autre : c'est la transformation. *En 1947, A. Boivin (1895-1949) en déduisait que l'élément essentiel des gènes devait être cet acide, ce qu'A. D. Hershey et M. Chase vérifiaient en 1952, dans le cas des bactériophages.*

En 1957, J. Benoît tenta d'étendre la notion de transformation en injectant de l'ADN à des animaux supérieurs (canards); d'autres chercheurs effectuèrent des expériences analogues sur des cellules humaines ou de

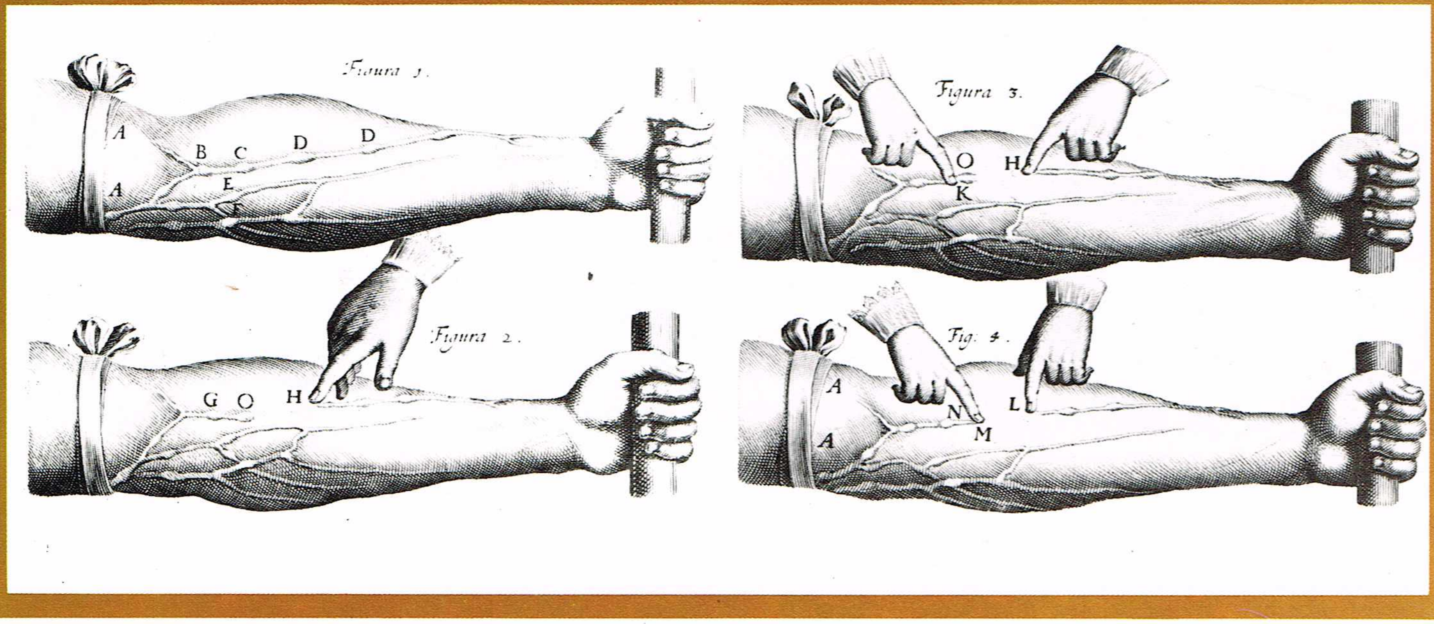

▲ La physiologie expérimentale apparut au XVII[e] siècle ; la découverte de la circulation du sang, par Harvey, en marque le début.

▼ Dans cette expérience de S. Hales *(1677-1761)*, l'arbre du milieu, greffé aux deux autres qui, seuls, sont enracinés, en reçoit la sève qui lui permet de survivre.

drosophile, et, en 1969, D. Hess obtint des résultats en ce qui concerne la coloration des fleurs de Petunia.

Dans l'intervalle, la notion introduite par Garrod d'un rapport entre le gène et une enzyme allait se préciser, en particulier grâce à des travaux de M. Wheldale (1880-1932) sur le contrôle génétique de la production des enzymes qui permettent la synthèse des pigments floraux, puis de J. B. S. Haldane (1892-1964) sur le même sujet. Le problème était alors de rendre compte de la manière dont l'ADN peut diriger la synthèse d'une protéine enzymatique. C'est G. Gamow qui eut, en 1954, l'idée de faire déterminer la place d'un acide aminé par la situation d'un trio de bases de la chaîne d'ADN. En 1958, F. H. C. Crick, tenant compte des résultats cytophysiologiques acquis au préalable et qui montraient l'importance de l'acide ribonucléique dans la synthèse protéique, proposa la voie maintenant si connue pour celle-ci. L'existence du moule ribonucléique, lui-même formé sur le moule de l'ADN, et sur lequel il postulait la synthèse des protéines, fut démontrée en 1961 par F. Jacob et J. Monod, tandis qu'à partir de cette même époque, la synthèse de produits comparables à l'ADN, jointe aux méthodes d'extraction des enzymes cellulaires, allait permettre à M. Nirenberg de synthétiser in vitro *des polypeptides en utilisant l'information de produits désoxyribonucléiques et de déchiffrer directement ce qu'on appelait désormais le* code génétique.

De nombreuses découvertes ont mené à ce qu'on peut appeler la théorie biochimique ou moléculaire de l'hérédité. Les gènes ne sont que des segments de la molécule d'ADN, et il n'est pas surprenant qu'on ait parlé d'unité intragénique : un gène complexe peut comprendre plusieurs segments successifs et la délimitation du gène peut être un peu arbitraire. Des processus de déclenchement de la synthèse d'un segment donné d'ADN sont actuellement étudiés.

La génétique biochimique doit beaucoup à des travailleurs français, mais, au début, elle ne connut en France guère plus de succès que la génétique tout court. L'indifférence remplaça seulement l'hostilité, jusqu'à ce que l'attribution d'un prix Nobel provoquât pour ces travaux un grand enthousiasme.

En somme, l'idée de préformation se trouve vérifiée : un code très précis est déposé dans une molécule volumineuse. La vis essentialis *de G. F. Wolff est due à la mise en œuvre de ce code, qui consiste à produire les catalyseurs enzymatiques qui constitueront progressivement ou entretiendront l'organisme, en engendrant des organites et des organes, lesquels sont eux-mêmes producteurs de substances assurant leurs rapports coordonnés avec le reste. C'est dans cette mesure qu'il y a épigenèse. On voit à quel point tout cela fournit une éclatante confirmation de la conception aristotélicienne !*

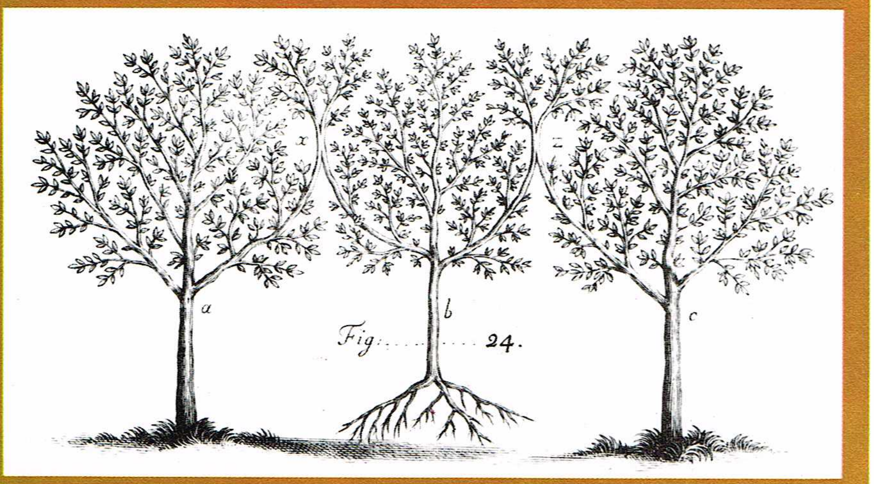

LA PHYSIOLOGIE

La tendance à décrire par des raisonnements mécanistes le fonctionnement de l'organisme se manifeste dès les origines de la pensée grecque et les auteurs qui, comme Aristote, affirmaient la nécessité d'une âme du vivant étaient souvent en même temps mécanistes. Aristote n'aurait point rejeté l'idée d'animal-machine et même l'homme-machine de La Mettrie (1709-1751) ne l'aurait sans doute pas surpris.

Mais les explications mécanistes que les Anciens donnaient étaient évidemment insuffisantes, parce qu'elles n étaient pas conçues suffisamment comme des hypothèses à vérifier. On ne cherchait pas assez à confronter les hypothèses à la nature par des observations comparatives et des expériences. R. Joly s'est appliqué à démonter cette façon de penser dans le cas des écrits d'Hippocrate et de ceux d'Aristote.

Pourtant, il ne faut pas exagérer cette faiblesse ; ainsi, Aristote discutait des observations propres à mettre les hypothèses à l'épreuve, et une expérimentation souvent

fort judicieuse se trouve chez Galien. Inversement ne voit-on pas de nos jours l'hypothèse néo-darwinienne, qui peut bien n'être qu'une grossière analogie, considérée par beaucoup comme le dogme sur lequel reposerait la biologie tout entière ?

Quoi qu'il en soit, c'est au XVII[e] siècle qu'apparut une physiologie véritablement expérimentale, dont la publication, en 1628, de la découverte de la circulation du sang par Harvey marque le début. Harvey, qui était par ailleurs un grand admirateur d'Aristote et de Galien, rassemblant diverses observations faites auparavant et saisissant l'impossibilité pour le sang d'être produit à la vitesse à laquelle il doit sortir du cœur, conçut qu'il devait circuler dans l'organisme. Il refit l'expérience très simple de Fabrice d'Acquapendente (1537-1619), mais en l'interprétant cette fois correctement : la pression sur une veine du bras entraîne l'accumulation du sang en amont de la zone en question et distend les régions de la veine porteuses de valvules.

Le travail de Harvey était aussi un essai de physiologie comparée car son auteur s'intéressait aux Poissons, aux Insectes et aux Vers. En cherchant à saisir la mécanique des mouvements du sang, il calcula, en particulier, le débit du sang dans le cœur : 540 livres devaient passer dans le ventricule gauche en une heure. Une telle précision dans la mesure est restée un trait marquant de la biologie anglo-saxonne.

En France, la physiologie générale fut représentée à cette époque par E. Mariotte (1620-1684), plus connu comme physicien. Ce mécaniste convaincu, du moins en ce qui concerne les animaux et les plantes, saisit la nécessité d'une pression importante pour maintenir la sève dans toute la hauteur d'une plante et considéra que cette pression était responsable de la croissance de la tige ainsi que du maintien en extension de ses organes.

Cette force responsable de la montée de la sève allait être un des objets d'étude de S. Hales (1677-1761) ; celui-ci montra le rôle de la transpiration et de la poussée radiculaire dans cette ascension, celui de la capillarité, envisagé par Malpighi, étant très faible. Par ailleurs, une grande partie des recherches de Hales concernait l'hémodynamique : il mesura les pressions artérielle et veineuse, évalua la résistance des capillaires à la progression du sang ainsi que la vitesse du sang dans les poumons, et montra que les muscles ne peuvent être, comme on le pensait auparavant, contractés par l'effet de la pression du sang artériel. A tous ces points de vue, il continua et enrichit les travaux de Harvey. Entreprenant des observations sur la respiration, il mit en évidence des faits intéressants, qu'il ne put toutefois pas comprendre ; s'il vit bien que l'animal utilise de l'air pour sa respiration, il se refusa à admettre qu'il ne fixait qu'un seul des composants de celui-ci, comme l'avait pourtant déjà soutenu, en 1668-74, J. Mayow (1640-1679), qui s'approcha beaucoup de la découverte de l'oxygène. Cependant Hales, constatant que la combustion et la respiration émettaient des vapeurs nocives, chercha à purifier cet air en le faisant traverser des filtres imbibés de « sel de tartre » calciné (potasse) ; il put ainsi respirer durant 8 minutes et demie, en circuit fermé, l'air d'un récipient, sans être incommodé ; il avait évidemment fixé, sans le savoir, le gaz carbonique expiré.

Au cours du XVIII[e] siècle, la physiologie s'enrichit des études de L. Spallanzani et d'A.-F. de Réaumur (1683-1757) sur la digestion. La « coction » des aliments, déjà envisagée par Aristote, se révéla due à l'action de produits de l'estomac, ce que J. B. Van Helmont (1577-1644) avait peut-être deviné en postulant l'existence de ferments. C'est avec Haller que la notion d'irritabilité propre des fibres musculaires se trouva mise en évidence et dissociée de l'aptitude du muscle à répondre à un stimulus nerveux. A vrai dire, Galien avait formulé l'idée de cette dualité. Le système nerveux, montra Haller par des expériences d'excitations et de lésions, est responsable de la sensibilité, et, en particulier, l'écorce cérébrale a un grand rôle dans le processus.

Au milieu du siècle, H.-L. Duhamel du Monceau (1700-1782), qui peut être considéré comme l'un des continuateurs de Hales, s'intéressa particulièrement aux arbres, dont il étudia l'accroissement en diamètre et le mouvement de la sève. Il s'occupa aussi de la croissance des os.

A la fin du siècle, avec le renouveau de la chimie, auquel sont liés en particulier les noms d'A.-L. de Lavoisier (1743-1794) et de J. B. Priestley (1733-1804), la physiologie enregistra de grands progrès dans la connaissance de la respiration. En collaboration avec A. Séguin (1767-1835), Lavoisier mit en évidence les échanges de gaz carbonique et d'oxygène et, s'il admit que la « combustion » correspondante prend place dans les poumons, il n'exclut pas qu'elle pût avoir lieu également dans les tissus, ce qui sera démontré au siècle suivant.

En ce qui concerne les végétaux, J. Ingenhousz (1730-1799) avait révélé, en 1779, que les plantes purifient l'air ordinaire au soleil et l'altèrent pendant la nuit. Il montra la fixation du gaz carbonique à la lumière et son émission à l'obscurité. La photosynthèse ainsi découverte devait être étudiée par J. Senebier (1742-1809) et assise sur des bases quantitatives par N.-T. de Saussure (1767-1845), qui nia malheureusement le rôle de la chlorophylle dans le phénomène.

Au XIX[e] siècle, toutes ces questions avancèrent de front à un rythme accéléré. Avec, en particulier, K. Ludwig (1815-1895), E. F. W. Pflüger (1829-1910) et P. Bert (1833-1886), le transport des gaz par le sang et la localisation tissulaire de la respiration proprement dite allaient être mis en évidence. Chez les végétaux, les rapports entre la respiration et la photosynthèse, les voies des échanges gazeux et l'augmentation de l'intensité respiratoire sous l'effet de la lumière firent l'objet des travaux de J. von Sachs (1832-1897), G. Bonnier (1853-1922) et L. Mangin (1852-1937). Bientôt, on découvrit la localisation cellulaire de la chlorophylle dans les plastes et on commença à étudier la sensibilité spectrale de celle-ci. Puis, au début du XX[e] siècle, F. F. Blackman effectua des travaux sur les modalités d'action de la lumière. Cependant, la connaissance des deux processus de la fixation du gaz carbonique ne sera acquise que pendant la seconde moitié du siècle.

Dans le domaine de la physiologie des nerfs et des muscles, ce fut A. Volta (1745-1826) qui établit l'excitabilité électrique de ces organes ; vers 1850, les manifestations électriques de leur activité furent mises en évidence par E. Du Bois-Reymond (1818-1896), découverte qui sera à l'origine de l'électrophysiologie. Le mystérieux fluide, ou influx nerveux, un des aspects du pneuma pour les Anciens, se manifeste au moins par des phénomènes électriques qui seront rapportés à des mouvements ioniques.

Galien distinguait déjà des nerfs moteurs, sensitifs et mixtes ; mais l'étude physiologique des deux racines des nerfs rachidiens commença seulement avec C. Bell (1774-1842) et F. Magendie (1783-1855). Bientôt, la notion d'arc réflexe allait pouvoir être conçue, en particulier par M. Hall (1790-1857), en 1837 ; toutefois, son support histologique ne put être établi solidement qu'à la fin du siècle, lorsque, vers 1889, A. Kölliker (1817-1905) montra que les fibres nerveuses ne sont que des prolongements des cellules de la substance grise ou des ganglions.

Galien avait aussi supposé que les lésions cérébrales ont un effet paralysant et anesthésiant. Cette idée allait se trouver confirmée scientifiquement par J. Legallois (1770-1814), qui trouva, en 1811, que la lésion d'une zone bulbaire entraîne un arrêt respiratoire ; il avait ainsi localisé une fonction nerveuse de commande. P. J. Flourens (1794-1867), pour sa part, s'attacha aux fonctions des parties de l'encéphale, en particulier du cervelet. En

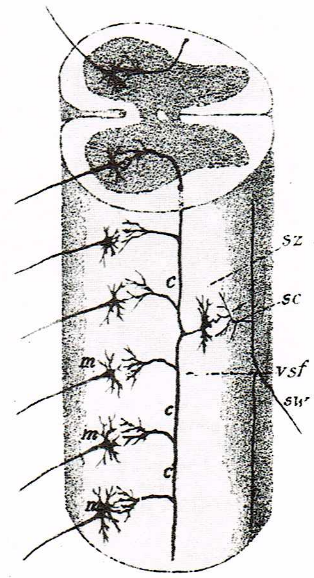

Muséum national d'histoire naturelle, Paris

▲ **A. Kölliker *(1817-1905)* *montra, vers 1889, que les fibres nerveuses ne sont que des prolongements des cellules de la substance grise ou des ganglions. Il schématisait ainsi des neurones de la moelle dans son grand* Handbuch der Gewebelehre des Menschen.**

Photo Lauros - Giraudon

▲ **La leçon de Claude Bernard,** ***peinture de Léon Lhermitte (1889), à la Sorbonne.***

1870, G. Fritsch (1838-1891) et E. Hitzig (1828-1907) montrèrent que l'excitation de zones déterminées de l'écorce cérébrale entraîne la contraction de muscles précis. Enfin, les observations de P. Broca (1824-1880), remontant à 1861 et montrant le rapport entre la perte du langage et la lésion asphyxique ou hémorragique d'une région du cortex cérébral gauche, allaient déjà dans le sens de la détermination de localisations cérébrales; celles-ci ont été et sont encore un important sujet de travaux physiologiques.

C'est également au cours du siècle dernier que le rôle centralisateur et coordonnateur du système nerveux apparut de plus en plus, et les corrélations à l'intérieur même de ses diverses parties, impliquant des inhibitions et des excitations, allaient former un sujet essentiel au début du XX^e^ siècle, en particulier dans les études de C. S. Sherrington (1857-1952). En outre, le système nerveux allait se trouver également impliqué dans le grand ensemble des fonctions endocriniennes.

Par ailleurs, O. Löwi (1873-1961) établit que le passage de l'influx nerveux d'un neurone à l'autre, et du neurone au muscle, met en cause des substances chimiques (adrénaline et acétylcholine) qui ne sont pas des hormones, mais de simples médiateurs, puisqu'elles ne se répandent pas dans l'organisme à partir du point de leur sécrétion (leur action est localisée). Il est remarquable que l'acétylcholine se soit aussi révélée être un médiateur chimique chez les plantes.

Mais le XIX^e^ siècle physiologique fut probablement dominé par la figure de Claude Bernard, dont on a pu dire qu'il était la physiologie même. A côté de travaux, tous essentiels, sur la digestion, mettant en évidence le rôle du suc pancréatique, sur le rôle vaso-moteur du système nerveux, sur l'exploration de la jonction neuro-musculaire grâce au curare, sur le transport des gaz par le sang, etc., Claude Bernard est surtout connu par sa découverte de la fonction glycogénique du foie dont l'étude lui permit, de 1848 à 1857, d'établir la notion de sécrétion interne : *le foie sécrète dans le sang du sucre (glucose) obtenu par destruction du glycogène qu'il a préalablement produit et mis en réserve à partir des aliments absorbés par l'intestin et apportés par le sang; la production du glucose se maintient dans l'organe isolé.*

La notion de sécrétion interne allait se trouver étendue grâce à celle d'hormone. A cette même époque, en effet, T. Addison (1793-1860) décrivait la maladie qui porte son nom et que C. E. Brown-Sequard (1817-1894) reproduisit expérimentalement, en 1856, par l'ablation des capsules surrénales. La même année, M. Schiff (1823-1896) montra l'effet fatal de l'excision de la thyroïde. Dès 1896, E. Baumann isolait de celle-ci un produit iodé (l' « iodothurine »). La mise en évidence des autres glandes endocrines, en particulier de l'hypophyse, et de l'activité endocrine d'organes dont d'autres fonctions étaient déjà connues (pancréas, intestin, rein, glandes génitales) s'est poursuivie jusqu'à nos jours. Ainsi était établi un aspect fondamental, s'ajoutant au rôle du système nerveux, des régulations qui maintiennent l'organisme en état stable (homéostasie).

Toutes ces activités endocrines avaient été révélées chez les Vertébrés; plus récemment, depuis les années 1920, une endocrinologie des Invertébrés s'est brillamment développée, d'abord chez les Insectes, puis chez les Crustacés, les Annélides, les Mollusques, etc., notamment grâce à J.-J. Bounhiol, V. B. Wigglesworth, A. Buternandt, M. Charniaux-Cotton, P. Joly, M. Durchon et beaucoup d'autres chercheurs. Des organes différents sont ici en cause, mais on observe de grandes analogies fonctionnelles avec les Vertébrés. Par ailleurs, la notion d'hormone peut être étendue aux interactions entre organismes entiers. Ainsi, c'est par une phéromone *complexe que la reine d'abeille rend stérile sa progéniture ouvrière et l'empêche de construire des cellules royales (J. Pain, 1954), et on peut considérer comme des hormones les substances attractrices ou répulsives émises par les Insectes, et dont l'effet était connu depuis longtemps : ce sont, en somme, des hormones gazeuses.*

Pendant ce temps, la physiologie végétale s'était développée dans la lignée des travaux déjà cités, par exemple en ce qui concerne l'étude de la croissance et des mouvements des organes ou de la migration des substances dans la plante (ce dernier domaine de recherche bénéficie beaucoup depuis une vingtaine d'années de l'utilisation des isotopes radioactifs).

Mais on devait aussi voir naître une endocrinologie végétale. C'est probablement à tort qu'on parle parfois d'absence de milieu intérieur chez les plantes. La notion de milieu intérieur n'implique pas nécessairement la présence de sang ou de lymphe. Lorsque des substances excitatrices ou inhibitrices de diverses fonctions peuvent circuler de cellule à cellule ou entre les cellules, l'ensemble est bien plongé dans un milieu intérieur. Au début du siècle, P. Boysen-Jensen et N. Cholodny devaient révéler l'existence d'une substance, l'auxine, conditionnant notamment la croissance des végétaux (ce te auxine fut extraite en 1926 par F. W. Went). Plus récemment, on découvrit d'autres hormones, les kinétines et les gibbérellines, les secondes jouant sans doute un rôle dans la floraison. L'éthylène, produit par de nombreux organes végétaux, est maintenant considéré comme une hormone gazeuse impliquée avec l'auxine dans des interactions complexes. Des substances à action humorale sont en cours d'étude chez les Cryptogames; à côté de l'auxine, on y trouve des hormones contrôlant la gamétogenèse et la fécondation, qui rappellent en

▼ ***En 1860-1861,*** **Louis Pasteur** ***(peint par Edelfelt — Musée Pasteur, Paris)*** **effectua un ensemble d'expériences à partir desquelles il fut admis que les micro-organismes ne peuvent provenir que de germes.** ***Il est pratiquement le fondateur de la microbiologie.***

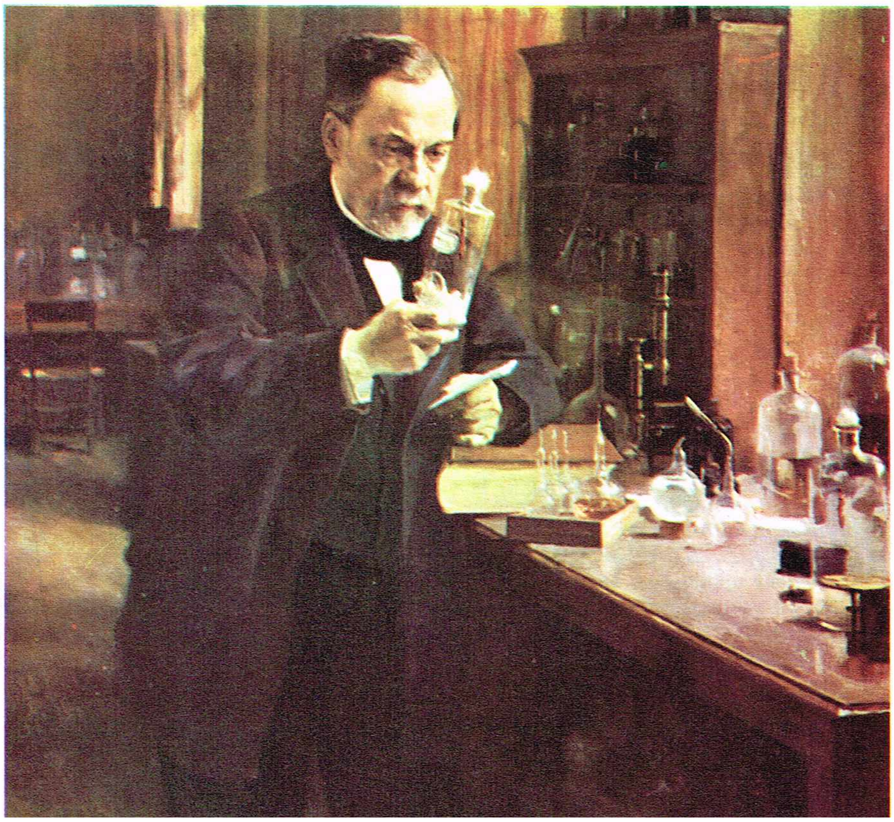

C. Ciccione

somme les phéromones; il est d'ailleurs probable que des substances de ce genre seront reconnues chez les plantes à fleur.

Les végétaux ont joué une part importante dans la création de la photobiologie. A côté de la chlorophylle, d'autres pigments responsables de réponses physiologiques à des lumières de diverses longueurs d'onde ont été découverts. Le plus célèbre est maintenant le phytochrome, connu depuis L. M. Flint, E. D. Mc Alister, H. A. Borthwick et H. S. Hendrick. Ce pigment est sensible aux radiations rouges et est impliqué dans de multiples phénomènes, à commencer par la germination des graines et l'activité de diverses enzymes. Son action semble mettre en cause la production d'acétylcholine, au moins dans le cas des mouvements d'ions (M. J. Jaffé). Par ailleurs, le temps d'exposition quotidien à la lumière, pendant un nombre souvent réduit de jours, indépendamment de ses conséquences trophiques, fut reconnu, en 1902, par J. Tournois puis, en 1920, par W. W. Garner et H. A. Allard, comme d'importance décisive pour la floraison de beaucoup de plantes, et ce phénomène du photopériodisme, qui met apparemment en cause une hormone inconnue, est actuellement l'objet de nombreux travaux. Les animaux sont également sensibles à la lumière, les rythmes d'éclairement étant importants, notamment pour régler la vie active et ralentie de certaines larves d'Insectes.

Enfin, les activités rythmiques des animaux et des végétaux, connues depuis toujours et déjà étudiées au début du siècle dernier par A.-P. de Candolle, retiennent l'attention des chercheurs, mais les travaux actuels semblent encore assez loin d'en fournir l'explication.

LA MICROBIOLOGIE

L'existence de la contagion était reconnue dès l'Antiquité, et on eut recours, pour l'expliquer, à des supports matériels appelés « miasmes ». L'intervention de germes animés fut même postulée, peut-être par G. Frascator (v. 1478-1553) et en tout cas par B. Marten en 1720, mais sans que ces vues soient démontrées et aient une influence quelconque.

A la fin du XVII^e siècle, Leeuwenhoek reconnut des animalcules et même des Bactéries. Ces animalcules furent un objet de curiosité et de discussions scientifiques durant tout le siècle suivant. Les Bactéries, très difficiles à voir avec les instruments de l'époque, sauf avec ceux de Leeuwenhoek, furent pourtant laissées de côté. Ford s'est récemment demandé si Leeuwenhoek ne se servait pas en fait de microscopes composés.

Le problème de la génération spontanée des animalcules agita l'opinion. L. Joblot (1645-1723), en 1718, et surtout L. Spallanzani, en 1765 et en 1776, s'élevèrent contre cette croyance très répandue, quoique réfutée par certains penseurs depuis toujours. Tous deux conclurent que des germes doivent être apportés dans une infusion pour qu'elle se charge d'animalcules. Bouillie suffisamment longtemps et ne recevant que de l'air stérilisé, elle demeurait stérile. Des expériences conduisant au même résultat furent menées au début du XIX^e siècle par F. Schulze (1815-1873) et T. Schwann, sans toutefois entraîner l'adhésion générale. D'autres travaux, en effet, étaient moins affirmatifs, et le phénomène, remis à l'ordre du jour en 1858 par F.-A. Pouchet (1800-1872), conduisit L. Pasteur (1822-1895) à effectuer, en 1860-61, un ensemble d'expériences à partir desquelles il fut admis que les micro-organismes ne peuvent provenir que de germes. Pourtant, en cherchant à répondre aux objections persistantes de F.-C. Bastian (1837-1915), les pastoriens découvrirent que des micro-organismes ou leurs spores résistent à des températures élevées, et mirent alors au point l'autoclave. Tout ceci révéla que, comme le reconnaissait Duclaux, bien que leur conclusion fût juste, les expériences de Pasteur n'étaient point absolument irréprochables.

Le second volet de l'histoire de la microbiologie est constitué par l'étude des fermentations. La levure de bière fut considérée comme un végétal en 1836 par C. Cagniard de Latour (1777-1859); en 1837, Schwann arriva à la même conclusion, en soulignant qu'elle est un Champignon et qu'elle est la cause de la fermentation alcoolique. Mais le désir d'expliquer trop hâtivement les faits par des considérations purement chimiques conduisit les chimistes J. Berzelius (1779-1848), F. Wöhler et surtout J. von Liebig (1803-1873) à s'opposer à cette découverte. Pour ce dernier, la fermentation ne pouvait être qu'une instabilité communiquée par un ferment purement chimique à la substance qui se décompose. En conséquence, la levure était un produit inerte en proie à une décomposition, qui entraînait celle du sucre tandis que cette levure était reproduite par des corps organiques mis en fermentation.

Lorsque Pasteur montra que de nombreuses fermentations sont causées par des micro-organismes, la levure apparut bien comme un ferment vivant; pourtant, E. Mitscherlich (1794-1863), en 1843, et M. Berthelot (1827-1907), en 1860, montrèrent qu'elle sécrète un ferment inerte soluble (susceptible, comme on le découvrit plus tard, de cliver le saccharose en glucose et fructose). On pouvait alors se demander si un autre ferment chimique ne causait pas aussi la fermentation. Certains le soutinrent sans pouvoir le prouver, et Pasteur l'envisagea mais n'obtint pas de résultats dans cette voie; c'est pourquoi il s'en tint à l'idée d'un ferment vivant. Étant donné les résultats expérimentaux de l'époque, il avait raison. Il était réservé à E. Büchner (1860-1917) d'extraire, en 1897, de la levure, une « zymase » propre à réaliser la fermentation alcoolique en l'absence de levure vivante; les études biochimiques deva ent en révéler, par la suite, la complexité enzymatique.

Le troisième volet de l'histoire de la microbiologie concerne la reconnaissance du pouvoir pathogène des micro-organismes. C'est en 1836-37 qu'A. Bassi (1773-1856) montra expérimentalement qu'une maladie du ver à soie, la muscardine, était causée par un Champignon, et qu'il révéla comment le détruire. Cette découverte le conduisit à des hypothèses sur le rôle de parasites vivants dans de nombreuses maladies contagieuses et à proposer, dans tous ces cas, la stérilisation soigneuse par des antiseptiques. Des pratiques de ce genre avaient cours, il est vrai, depuis longtemps, mais elles ne se répandirent qu'avec J. Lister (1827-1891) et Pasteur.

En 1837, A. Donné (1801-1878) observa deux Spirochètes, le tréponème de la syphilis, ainsi que le Trichomonas vaginalis. Dans le cas du tréponème, il se demanda s'il tenait là la cause de la maladie, mais ne put conclure. En 1840, F. O. Henlé (1809-1885) exposa une théorie cohérente de l'infection en se fondant sur les observations de Schwann, Cagniard de Latour et Bassi. Il envisagea l'existence de germes vivants responsables des maladies contagieuses et posa théoriquement les méthodes propres à la démonstration de cette hypothèse.

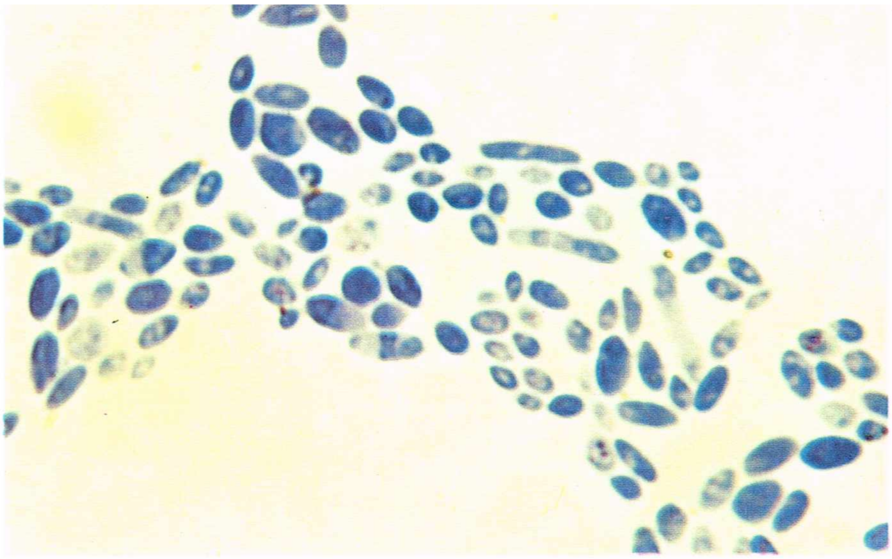

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***En 1836 déjà, la levure de bière*** **(Saccharomyces cerevisiae)** ***fut considérée comme un végétal par*** **C. Cagniard de Latour.**

A. Rizzi

▲ *Quelques exemples de cultures microbiennes en boîtes de Pétri.*

Grâce à Pasteur, C. J. Davaine (1812-1882), R. Koch (1843-1910) et bien d'autres, cette théorie devait devenir une réalité et la bactériologie s'établir comme science indépendante, non sans de nombreuses discussions sur la fixité des espèces bactériennes et sur la distinction entre les Bactéries d'une part et les Champignons et Protozoaires de l'autre, l'ensemble de l'étude des micro-organismes gardant une certaine unité, surtout pour des raisons techniques, sous le nom de microbiologie. A côté de la bactériologie médicale, le monde des Bactéries du sol, celui des Bactéries marines et l'ensemble des Bactéries pathogènes des plantes allaient constituer l'objet de branches très importantes de la microbiologie.

La technique des cultures pures et des cultures sur milieu solide (ces dernières dues à Koch) présentait un intérêt très général. Des cellules et organes animaux et végétaux pourraient aussi être cultivés de cette manière. Grâce à cette facilité de culture et à leur organisation simple d'Eucaryotes, les Bactéries se sont, dans la période récente, révélées un instrument expérimental magnifique pour la Biologie générale, quoiqu'on puisse estimer que l'intérêt se concentre un peu trop exclusivement sur elles, à certains points de vue.

L'antibiose, c'est-à-dire l'émission par un être de substances toxiques qui, répandues dans le milieu, empêchent le développement d'autres êtres, allait être découverte à propos de l'inhibition de cultures bactériennes. Outre des précurseurs comme Davaine, les noms d'A. Flemming (1881-1955) et de S. A. Waksmann (1888-1973) sont à signaler à ce sujet. Les antibiotiques sécrétés par des Champignons et des Bactéries allaient, à côté de leur immense intérêt thérapeutique, se révéler des instruments de dissection biochimique du métabolisme en empêchant sélectivement certaines de ses réactions.

S'inspirant peut-être de la vieille pratique de la prévention de la variole par l'inoculation du contenu de pustules d'une forme bénigne, ou mieux, de l'utilisation du contenu de vésicules provenant de bovins ayant une maladie voisine (cow-pox), Pasteur fut conduit à la découverte des vaccins au sens large, et montra comment atténuer la virulence de certains germes pathogènes. L'intérêt d'une pareille découverte était évidemment colossal. Les bases de l'immunité acquise ne furent toutefois pas comprises par lui. De longues recherches eurent lieu qui conduisirent H. Büchner (1850-1902) à la notion de substances (alexines) produites par l'animal récepteur, plus précisément par ses leucocytes. P. Ehrlich (1854-1915) effectua de nombreux travaux sur l'union des antigènes et des anticorps, qu'il considéra d'abord comme un phénomène chimique, tandis que K. Landsteiner (1868-1943) et J. Bordet (1870-1961) montrèrent qu'il s'agissait plutôt d'une sorte d'adsorption. Le premier s'illustra ensuite par la découverte des principaux groupes sanguins, tandis que le second découvrit notamment le complément et commença la mise au point des réactions de fixation de celui-ci, qui devaient ensuite prendre une grande importance diagnostique. Son collaborateur Gengou s'aperçut qu'à côté de cellules et de toxines, le lait aussi déterminait la formation d'anticorps spécifiques. Cette particularité fut alors reconnue aux substances à grosses molécules et à celles qu'on peut grossir par l'adjonction d'une autre (albumine).

Puisque les anticorps étaient reconnus comme des protéines, la séparation et l'étude biochimique de ceux-ci allaient devenir l'affaire de l'immunologie moléculaire, qui est actuellement l'une des branches les plus actives de la Biologie biochimique. A cet égard, il faut citer les noms de R. R. Porter et G. M. Edelman. Par ailleurs, la physiologie des organes producteurs ou modificateurs de cellules immunologiquement compétentes, en particulier du thymus, qui sécrète une sorte d'hormone particulière à rôle immunitaire, s'est trouvée renouvelée dans la période récente. En physiologie comparée, une immunologie des Arthropodes, des Vers, etc., commence à se développer. En outre, à côté de leur intérêt thérapeutique, les réactions immunologiques sont précieuses en Biologie pour la caractérisation et la localisation de substances contre lesquelles un anticorps a pu être préparé.

Enfin, chez les plantes, la présence des anticorps avait été envisagée il y a une cinquantaine d'années, mais elle ne semble pas avoir été confirmée. Du moins, on sait que, en réponse à l'infection, les plantes sécrètent des substances (phytoalexines) qui sont phénoliques et non pas protéiques.

De la microbiologie devait se détacher la virologie. Son origine remonte à 1892-1897, période au cours de laquelle on constata la possibilité, pour les agents de la mosaïque du tabac et de la fièvre aphteuse des bovins, de passer à travers les filtres de porcelaine. L'étude de la virologie ne peut être entamée ici, mais quelques exemples déjà cités ont montré son intérêt pour la Biologie générale.

LA BIOGENÈSE

Si l'idée de la génération spontanée a été rejetée, il n'est guère de biologistes qui se refusent à envisager une origine naturelle de la vie dans le passé. Les données

Marka

▶ *L'origine de la virologie remonte à 1892-1897, période au cours de laquelle on constata la possibilité pour l'agent de la mosaïque du tabac, dont on voit les effets ici, de passer à travers les filtres de porcelaine.*

d'observation sont fort peu claires, qu'il s'agisse de l'analyse chimique de sédiments terrestres ou de roches lunaires ou météoritiques. On a seulement trouvé des hydrocarbures de structure et de longueur définies, qui ne semblent pas pouvoir être apparus par hasard et sont très probablement d'origine biologique, dans des roches terrestres très anciennes, mais non antérieures aux plus anciens fossiles connus, et fournissant elles-mêmes des microfossiles (série d'Onverwacht en particulier).

Cependant, depuis 1950 avec M. Calvin et surtout depuis 1953 avec S. L. Miller, on a pu synthétiser des produits biologiques dans des conditions supposées comparables à celles de l'atmosphère primitive de la terre. Ainsi, une décharge électrique dans un mélange de méthane, d'ammoniaque, d'eau et d'hydrogène entraîne-t-elle l'apparition d'acides aminés (glycine, alanine), d'aldéhydes, d'acide cyanhydrique, d'acide formique et d'acide lactique notamment. Par polymérisation de l'acide cyanhydrique se forment aussi, dans ces expériences, des bases puriques et pyrimidiques, et même des porphyrines (substances essentielles de l'hémoglobine et des chlorophylles). Les acides aminés eux-mêmes semblent provenir de l'hydrolyse d'un polymère d'acide cyanhydrique.

Si une substance ainsi apparue favorise par catalyse les réactions qui conduisent à sa propre formation (autocatalyse), cette dernière va être grandement facilitée. On peut considérer cela comme un cas de sélection naturelle et parler de néo-darwinisme chimique; la chaîne de réactions alors en cause fonctionne plus intensément et utilise les produits de départ qu'elle « détourne » à son seul profit. Calvin a cherché, de même, à expliquer comment des molécules optiquement actives ont pu se former sélectivement (on sait que les êtres vivants n'utilisent, le plus souvent, que l'un des isomères optiques d'une substance, les acides aminés de forme L notamment).

S. Fox a pu, de son côté, produire des polypeptides en milieu anhydre par chauffage modéré d'acides aminés. De la même façon, Schramm a obtenu, surtout en milieu anhydre, des nucléosides à partir d'une base (adénine) et d'un sucre (ribose ou désoxyribose) et même des polynucléotides, c'est-à-dire des acides nucléiques, à partir de nucléotides ou de nucléosides. Ce résultat a été étendu par Calvin en effectuant des expériences en milieu aqueux, plus compatible avec les conditions terrestres primitives. Par l'emploi de dérivés de l'acide cyanhydrique, Calvin a pu unir des acides aminés, mais seulement à l'état de dipeptides. La présence d'une chaîne polynucléotidique, une fois constituée, exerce un effet favorisant sur la synthèse d'une chaîne complémentaire par une sorte d'autocatalyse. Une chaîne d'acide polyadénylique accélère ainsi la formation d'une autre d'acide polythymidylique.

Les chaînes peptidiques et nucléiques étant ainsi formées séparément, il faut rechercher le processus qui les a mises en rapport, de manière que les premières se forment, comme actuellement, sous la direction des secondes. Calvin a montré, à ce sujet, que l'adénine semble manifester une tendance plus forte à s'unir aux acides aminés, ce qui pourrait être à l'origine de la formation des acides ribonucléiques de transfert, où l'acide aminé est fixé à l'adénine d'une séquence cytidine-cytidine-adénosine. Un système de présentation des acides aminés de ce genre, en rendant plus efficace leur enchaînement, peut être conçu comme ayant un avantage sélectif : les acides aminés disponibles seront plus vite consommés par ce processus-là.

L'existence de chaînes peptidiques et nucléiques entraîne nécessairement leur organisation tridimensionnelle en hélice. De la même façon, l'apparition de molécules de lipides et de protéines conduit à la formation de structures membranaires qu'on peut produire artificiellement. C'est ainsi que se seraient formées les premières membranes cellulaires.

La sélection naturelle dont nous avons parlé expliquerait alors la suite de l'évolution, encore qu'on ignore pourquoi les Bactéries n'ont guère dépassé le stade de la cellule procaryote tandis que d'autres organismes ont accru leur complexité : est-ce seulement parce que, par hasard, ces dernières ont rencontré des milieux plus agressifs ? Ils vivent souvent maintenant dans les mêmes milieux que les Bactéries, tout en étant beaucoup plus compliqués que celles-ci.

Calvin a trouvé que l'aptitude des acides aminés à former des couples dipeptidiques dépend des acides aminés en cause; la fréquence des couples d'acides aminés successifs dans les protéines naturelles actuelles est plus ou moins en relation avec cette aptitude. Gavaudan et Besson ont, pour leur part, mis en évidence une remarquable loi mathématique régissant la succession des bases qui commandent la localisation des acides aminés dans les protéines. Ces découvertes pourraient donc laisser ouverte la possibilité d'une formation orientée de ces structures, due à des propriétés de la matière que nous ne connaissons pas encore, mais dont la biologie décrirait les manifestations. Sans doute une partie de ce qui apparaissait jouissait-il d'un avantage sélectif, mais ce n'est pas au hasard que tel ou tel être apparaissait.

LA BIOCHIMIE

La compréhension de la structure des substances de base des êtres vivants fut extrêmement laborieuse. La structure des glucides et des protéines doit énormément à E. Fischer (1852-1919). Les enzymes étaient connues depuis la découverte par A. Payen (1852-1871), et J.-F. Persoz (1805-1868), en 1833, de la « diastase », puis celle de la pepsine par Schwann en 1836, et plusieurs enzymes furent isolées peu après, notamment par E. Bourquelot (1851-1921). Leur rôle dans la fermentation, puis dans tout le métabolisme, devint clair progressivement après la découverte de la zymase par Büchner.

L'analyse plus fine du métabolisme passa par la découverte de très nombreuses enzymes et de substrats intermédiaires par des savants comme C. F. Cori, G. Embden (1874-1933), A. Harden (1865-1940), H. A. Krebs, D. Keilin (1887-1963), F. A. Lipmann, O. Meyerhoff (1884-1951), O. H. Warburg (1883-1970), H. O. Wieland (1877-1957) et W. J. Young (1878-1942).

Les méthodes de séparation des principes biochimiques par chromatographie, électrophorèse, etc., et de leur dégradation ménagée par des enzymes convenables permirent, notamment, à partir de 1950, le déchiffrement de l'ordre de succession (séquence) des acides aminés des chaînes protéiques. C'est d'abord F. Sanger qui détermina la séquence des acides aminés de l'insuline en 1945-55. Les travaux difficiles de ce genre se sont poursuivis, et l'on peut actuellement publier des atlas entiers de telles séquences.

La constatation par V. M. Ingram en 1958 de la signification biochimique d'une mutation humaine affectant l'hémoglobine de certains malades, dont un seul amino-acide est alors remplacé par un autre, eut une très grande importance dans l'établissement de la génétique biochimique. En outre, des méthodes comparables à celles utilisées pour les protéines ont permis à H. W. Holley, D.R. Mills et S. Spiegelman de déterminer la séquence des bases de certains ARN.

Parallèlement, l'utilisation des techniques biophysiques, jointes dans une certaine mesure à l'observation directe, mettait en évidence la disposition tridimensionnelle des molécules d'intérêt biochimique, au moins après leur séparation.

D'une manière générale, toutes les disciplines biologiques se ramènent à la biochimie, ou biologie moléculaire (en attendant d'aller plus loin encore : dès 1960 A. Szent-Gyorgyi écrivit une introduction à une biologie

Archivio Longo

▲ **Femelle de griffon allaitant ses nombreux chiots ; la capacité des nouveau-nés de « chercher » le mamelon maternel et d'en sucer le lait fait partie du comportement inné et se traduit par un comportement instinctif.**

sub-moléculaire !). C'est ainsi qu'après s'être appliqué à découvrir la structure des hormones, on s'occupe maintenant de préciser leur mode d'action au niveau biochimique. Comment sont-elles transportées ? Agissent-elles au niveau de la membrane des cellules-cibles sans y pénétrer ? Ou bien y pénètrent-elles et commandent-elles au noyau de diriger par des ARN de transfert convenables telle ou telle synthèse ? Ce sont quelques questions auxquelles on commence à donner des réponses.

LA PSYCHOPHYSIOLOGIE

Sans développer la question du psychisme, il faut néanmoins souligner son universalité. Il y a longtemps qu'on a envisagé de parler de psychisme des Protozoaires, et on ne voit pas pourquoi on refuserait le terme aux plantes, dont d'ailleurs les cellules banales possèdent des propriétés électrophysiologiques (conduction de potentiels d'action) comparables à celles des cellules nerveuses. Les comportements instinctifs se sont trouvés moins profondément séparés des conduites susceptibles d'apprentissage, puisque les jeunes animaux apprennent aussi. Inversement, les comportements conscients n'en sont pas moins souvent à base automatique.

Dans ce domaine aussi, on s'applique à chercher des fondements chimiques aux phénomènes observés. A côté de médiateurs présents dans l'organisme, et que l'on complète expérimentalement par un arsenal pharmacologique toujours plus important, des substances comparables aux phéromones sont souvent en cause dans les comportements animaux.

Au total, les phénomènes psychiques sont explorés comme les autres faits biologiques : leur description doit être soigneusement poursuivie et être enrichie de l'expérimentation et de la recherche de leur support physico-chimique.

La pensée elle-même ne paraît pas devoir être exclue de ces préoccupations. Toutefois, il faut bien voir que lorsque sera trouvé le fondement moléculaire des pensées, par elles-mêmes immatérielles, on ne les aura pas vraiment expliquées. On se heurte là à une des limites que le fondateur de l'électrophysiologie, E. Du Bois-Reymond, posait à la connaissance scientifique. Il faut s'empresser d'ajouter que le physicien rencontre un tout aussi grand mystère lorsqu'il parle de matière ou d'énergie. La compréhension de la nature de la matière, entendons maintenant celle qui constitue les particules « élémentaires » et qu'on assimile mystérieusement à l'« énergie », était l'autre limite posée par Du Bois-Reymond, qui ajoutait que les deux n'en faisaient peut-être qu'une. A ce point des choses, et en demeurant dans le domaine de la science, on conçoit bien que l'idée d'une âme immatérielle, à la manière platonicienne, avait malgré tout quelque justification !...

L'ANTHROPOLOGIE

L'homme est apparu plusieurs fois déjà dans notre exposé. Pendant longtemps, il parut normal de ne pas l'isoler du monde animal, dont il apparaissait comme l'aboutissement au moins rationnel. Les sentiments religieux jouèrent sans doute un grand rôle pour exagérer ce qui le séparait des autres êtres vivants. Non content de lui adjoindre sélectivement une âme immatérielle qui faisait de lui seul autre chose qu'une machine, on pouvait chercher à lui trouver une originalité morphologique qu'il n'a pas. Ainsi, l'essai d'anatomie comparée de Goethe sur l'os intermaxillaire fut suscité par la tentative qu'on avait faite de séparer l'homme des Mammifères par l'absence supposée chez lui de cet os. Actuellement, l'homme est à nouveau replacé dans le cadre du monde vivant, aussi bien d'un point de vue physique que psychique. Mais l'intérêt bien naturel qu'il a pour lui-même justifie l'existence de sciences indépendantes : l'anthropologie pour son étude physique et l'ethnologie pour celle de son comportement social. Cette dernière discipline assure la liaison entre la biologie et l'ensemble des sciences humaines, qui s'appliquent à décrire l'immense complexité du psychisme humain et de ses conséquences, en attendant que la biologie puisse peut-être un jour en rendre compte.

ÉPILOGUE

La biologie travaille à sa propre destruction. Elle se résoudra en biochimie, à un moment d'ailleurs où celle-ci ne sera qu'un département d'une physique devenue, comme l'indique l'étymologie du mot, l'étude de toute la nature. Pour sa consolation, la biologie aura auparavant absorbé toutes les sciences humaines. Mais pour tendre vers ce grandiose résultat unitaire, le meilleur n'est pas de vouloir réduire dès maintenant les sciences humaines à la biologie et celle-ci à une biochimie fondue à a physique.

La connaissance des problèmes mêmes dont on doit rendre compte est évidemment indispensable à leur solution. A tous les niveaux de l'organisation, tout reste à voir et à démontrer expérimentalement. Le morphogénéticien a besoin de la morphologie pour pouvoir l'expliquer. Le biochimiste a besoin de la morphologie cellulaire, sans cela il en serait peut-être encore à nous expliquer la vie par les colloïdes. Liebig avait tort de vouloir sauter l'étape du « ferment vivant » qu'est la levure, même si, effectivement, elle agit par des procédés chimiques. C'est pourquoi, dans une biologie moderne qui sait dépasser les enthousiasmes puérils, il y a place pour l'étude de ce qui s'observe à l'œil nu comme pour l'expérimentation à l'échelle des particules élémentaires. Ainsi s'achemine-t-on vers le dernier mot de l'étude unitaire de la nature, qui évidemment ne sera jamais dit !

MICHEL GUÉDÈS.

BIBLIOGRAPHIE

Se reporter aux bibliographies des différents chapitres qui seront ultérieurement développés dans le cadre des trois volumes consacrés à la Biologie.

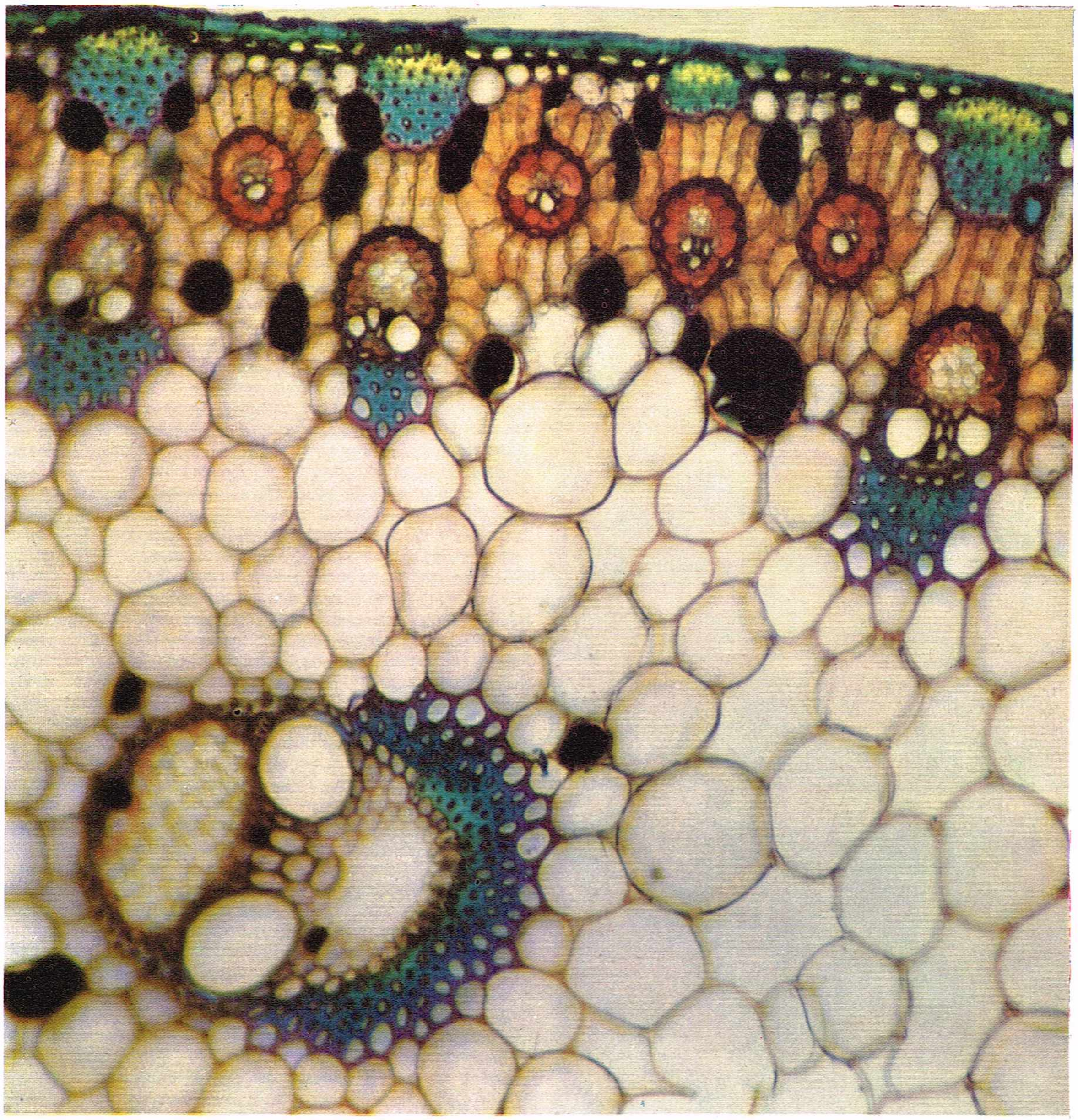

P. Castano

◀ *Les cellules peuvent être groupées en tissus qui ont des fonctions particulières; sur cette photo, on observera différents tissus végétaux mis en évidence par une coloration topographique (× 100 × 2,8).*

NATURE CELLULAIRE DES ÊTRES VIVANTS

Les méthodes modernes d'observation

Avec des facultés d'observation qui valaient certainement les nôtres, mais avec des moyens techniques bien modestes, l'homme de la préhistoire connut la complexité des êtres vivants qui l'entouraient.

Il sut qu'ils étaient constitués d'un grand nombre d'organes, animaux ou végétaux; les os ou le cœur, les racines ou les feuilles sont des organes que l'on apprend à distinguer dès l'enfance. Mais jusqu'à la fin de la seconde moitié du XVII^e^ siècle, on supposait encore que chaque être vivant n'était qu'une accumulation de substances à l'état « moléculaire », disposées d'une manière extrêmement subtile qui variait suivant la nature de l'organe. On estimait alors que l'homme ne pourrait jamais connaître l'organisation de la matière vivante. La tâche était vaste, pour ne pas dire immense; bien des gens durent penser, comme Bouvard et Pécuchet, que la substance dont nous sommes faits est « une matière ondoyante et fugace » et que « mieux vaudrait nous occuper d'autre chose ».

Cependant, pour certains, la difficulté qu'ils éprouvaient à percer ce « mystère » constituait l'attrait du jeu; or le jeu est un des plus sérieux qui soient puisqu'il a pour but la connaissance des « secrets » de la nature. On dit aujourd'hui que ces curieux-là sont des « chercheurs »; on disait autrefois des « savants »...

En fait, l'opiniâtreté de ces esprits méthodiques permit lentement de découvrir puis de comprendre ce qu'est la vie. Grâce au microscope, on put constater la nature cellulaire des êtres vivants; puis on se mit à étudier la nature chimique des éléments, des organites que l'on venait de trouver dans les cellules observées. La découverte primordiale fut, comme nous l'avons exposé précédemment, celle de la *cellule,* base unitaire, constituant élémentaire de tous les organes que l'on avait appris à connaître. Elle ne survint que très longtemps après l'invention d'un système optique préfigurant le microscope.

Malpighi ainsi que Leeuwenhoek et Swammerdam furent les premiers à observer et à décrire des cellules vivantes. Puis Corti montra que les cellules végétales contenaient une masse translucide faite d'organites doués de mouvement. L'idée prenait forme : les êtres vivants pouvaient tous être faits de cellules. Ensuite et pendant un demi-siècle, la recherche subit une éclipse. On peut penser que la faiblesse des microscopes que l'on avait utilisés ne permettait pas d'aller beaucoup

F. Arborio Mella

▲ *Jusqu'au XVIIIe siècle, les scientifiques s'attachaient à la description minutieuse de l'organisation des êtres vivants visibles à l'œil nu; ici, une planche ancienne représentant des plantes officinales (Bibliothèque nationale - Naples).*

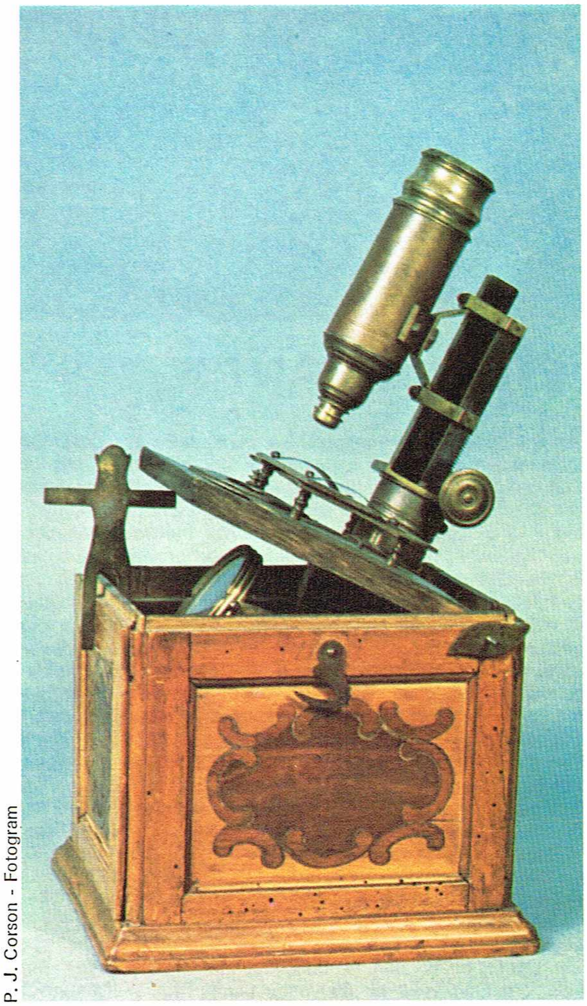

P. J. Corson - Fotogram

▶ *Les premiers microscopes, améliorés rapidement grâce aux progrès des techniques de l'optique, permirent d'entrevoir la nature cellulaire des êtres vivants; ici, un microscope à inclinaison réglable, datant de 1750.*

plus loin dans l'observation; il faut cependant nuancer cette appréciation : les dessins des premiers microscopistes ne manquaient pas de précision et restent, à tous égards, des documents admirables.

Le progrès des techniques optiques permit l'amélioration des microscopes; on les rendit plus maniables et ils devinrent alors des outils pratiques et capables de satisfaire la curiosité des observateurs, à la fois scientifiques et philosophes; on allait passer de la dispute philosophique de salon à la découverte de principes vitaux et à celle de la structure, voire du fonctionnement cellulaire; l'expérimentation scientifique devenait une réalité dans le domaine de la biologie. Si, du point de vue mécanique, les difficultés ne furent pas très grandes lorsque l'on voulut améliorer le microscope, il n'en fut pas de même avec les systèmes optiques; les premiers progrès techniques permirent cependant de belles observations et le mûrissement de la théorie cellulaire. Une nouvelle science apparut au XIXe siècle : l'*histologie*. Puis, les recherches et les descriptions successives qui allaient établir les bases morphologiques et fonctionnelles de la cellule conduisirent, à la fin du XIXe siècle, à la naissance de la *cytologie*.

A ce moment, la plupart des aberrations de l'optique du microscope étaient partiellement corrigées; en particulier, les aberrations chromatiques dues à l'inégalité de réfraction des composants spectraux de la lumière blanche et les aberrations de sphéricité. Jusqu'alors, l'agrandissement pratique ne dépassait guère 500. L'utilisation de plusieurs lentilles dans un même objectif et un traitement approprié du verre permirent de pallier tous les inconvénients majeurs. Il existe maintenant diverses qualités d'optique; les objectifs les moins parfaits, dits *achromatiques*, permettent déjà, dans l'ensemble, une excellente observation des détails cellulaires; mais les résultats sont plus spectaculaires avec les objectifs *planachromatiques*. Également, pour obtenir une luminosité maximale, on utilise parfois des objectifs traités à la fluorine. De plus, en immergeant l'objet et les objectifs les plus puissants dans un liquide dont l'indice de réfraction est proche de celui des lentilles, on évite les phénomènes de réflexion totale, notamment la perte de lumière entre l'objet et l'objectif. Le grandissement limite est environ 1 200. Mais il faut noter que les possibilités de grossissement du microscope sont toujours limitées par la nature même de la source lumineuse : en effet, pour un objectif puissant, même extrêmement perfectionné, le *pouvoir séparateur*, donc le grossissement, dépend directement de la longueur d'onde de la source lumineuse visible. Les plus faibles longueurs d'onde permettent les meilleures résolutions : c'est pourquoi une source bleue ou violette est particulièrement adéquate pour l'observation des détails cytologiques. En utilisant une source ultraviolette à vapeur de mercure, dont le spectre d'émission possède un pic aux alentours de 3 650 Å (1 angström = 1/10 000 micron, lequel est égal à 1/1 000 mm), il est possible de parvenir à une analyse plus fine; mais il est bien évident que l'observation ne peut pas être directe : il faut faire des photographies des images ultraviolettes, ce qui nécessite l'emploi d'émulsions spéciales et d'un système optique en quartz, qui absorbe très peu le rayonnement ultraviolet (UV); en France, de belles observations ont été effectuées de cette manière par J.-P. Thiéry dans le domaine hématologique (1960-65). Mais, là encore, le grandissement reste limité.

Alors que les physiciens parvenaient à rendre les microscopes réellement parfaits, les biologistes réussissaient à mettre au point des techniques de *coloration* particulièrement adaptées à tel ou tel type de cellule et à tel ou tel de leurs organites. Or, ces colorations ne peuvent se concevoir qu'après une *fixation* convenable des cellules, c'est-à-dire que l'on doit, avant de les colorer, tuer les cellules aussi rapidement que possible, sans pour autant modifier la structure du protoplasme, ou, du moins, sans trop la transformer. Ainsi, les pionniers de l'histologie purent constater que certaines fixations, trop violentes, provoquaient ce que l'on nomme des *artefacts*, c'est-à-dire des transformations qui donnent à certains éléments de la cellule un aspect tout à fait différent de la réalité (réalité qui est maintenant bien connue). Bien des observateurs ont ainsi décrit des organites et des struc-

tures souvent fort beaux, mais dépourvus de toute signification biologique. Dans l'ensemble, on a pu éviter cet écueil en n'utilisant plus qu'un petit nombre d'agents fixateurs chimiques ; ceux-ci sont adaptés et combinés pour obtenir des résultats optimaux suivant le type cellulaire que l'on étudie.

Plusieurs techniques microscopiques sont venues s'ajouter à celles dont il vient d'être question. Nous citerons d'abord la technique de *fluorescence ;* on utilise pour cela une source d'UV : le rayonnement incident provoque la fluorescence de certains organites cellulaires et l'image peut en être observée directement. On parle de *fluorescence primaire* lorsque les organites donnent une image colorée sans préparation particulière des cellules ; on parle de *fluorescence secondaire* s'il est nécessaire, pour obtenir une image, de traiter préalablement celles-là par une substance chimique. Voici quelques exemples : une fluorescence primaire particulièrement vive peut être obtenue en observant au microscope des fibres de coton éclairées par une source d'UV ; le coton apparaît en bleu vif. Il est bien sûr indispensable d'éliminer l'excès du rayonnement UV entre l'objet et l'œil de l'observateur : cet excès détruirait tout simplement la rétine ; on utilise donc des filtres d'arrêt qui sont appropriés à la source. La fluorescence bleue du coton est alors parfaitement visible sur un fond totalement noir. Un autre exemple, celui de la mise en évidence de la chlorophylle : on observe une feuille mince de plante aquatique, l'élodée par exemple, ou tout simplement une tranche fine de feuille de poireau, détachée avec une lame de rasoir ; elles apparaissent vivement colorées en rouge sous l'objectif d'un microscope à fluorescence ; en effet, la chlorophylle, contenue dans de petits organites caractéristiques des plantes photophiles, les chloroplastes, donne une fluorescence rouge, extrêmement facile à mettre en évidence et à localiser dans les cellules. Un troisième exemple, qui demande une technique de coupe nettement plus élaborée, est la mise en évidence de certaines vitamines, en particulier la vitamine A ; sur coupe faite dans un organe frais, non fixé, la vitamine A donne une fluorescence jaune verdâtre assez brillante, mais labile après moins d'une minute d'observation ; cela suffit pour qu'il soit possible de la localiser, voire de la doser. Les longueurs d'onde émises par les substances fluorescentes peuvent être déterminées par *spectrophotométrie*.

L'idée d'utiliser les propriétés fluorescentes de certains éléments chimiques contenus dans les organes vient sans doute de Brewster (1867), puis de Helmholtz (1896) ; mais elle fut vraiment mise en pratique en 1909 par R. Dubois pour la détection de la pyrophorine que l'on trouve dans le sang et les organites qui, chez certains Insectes, peuvent produire de la lumière. C'est à Montpellier que Derrien et Turchini réalisèrent les premières observations d'envergure avec cette technique ; à partir de 1924, ils réussirent à localiser diverses porphyrines et d'autres substances, très variées ; l'*histofluoroscopie* était née.

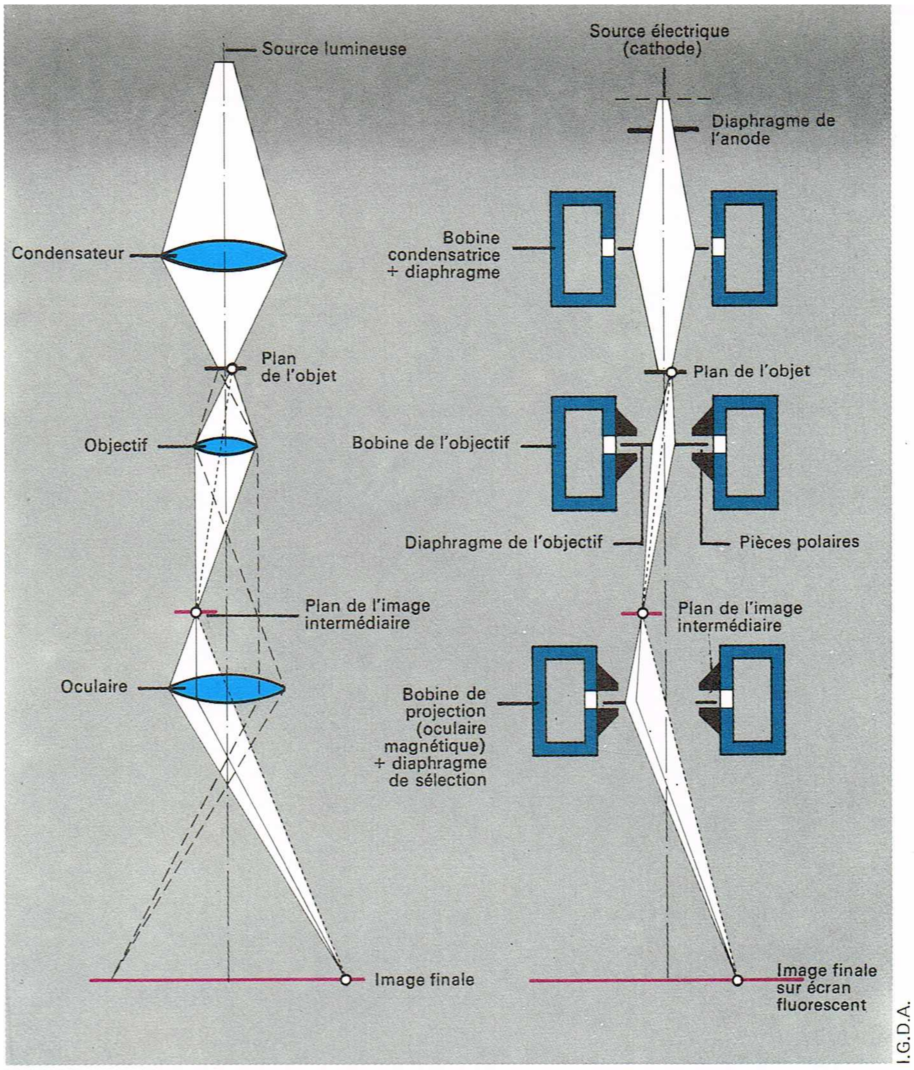

▲ ***Schéma très théorique montrant le parcours des rayons dans le microscope optique (à gauche) et le trajet du faisceau d'électrons dans le microscope électronique (à droite).***

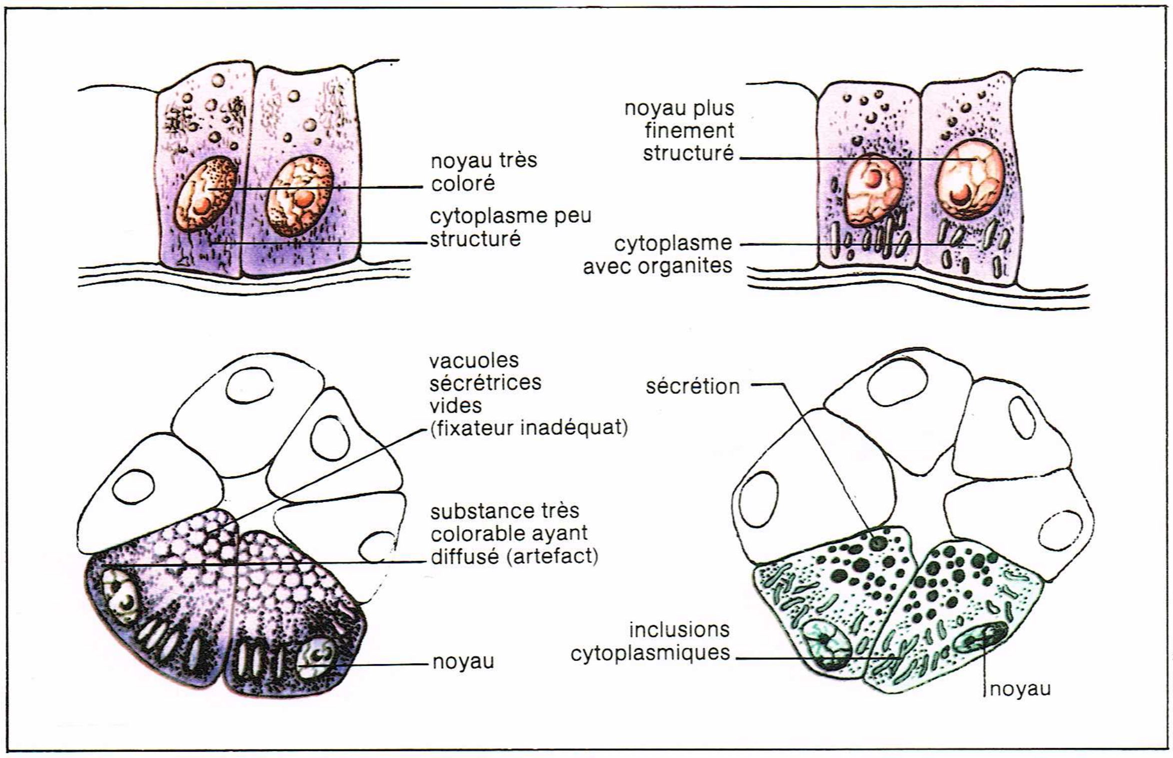

◀ ***Avant de colorer des cellules, il est généralement nécessaire de les tuer ; cette fixation entraîne parfois des modifications ou artefacts. En haut, des cellules de revêtement épithélial sont fixées par un mélange acide (à gauche) ou un mélange neutre (à droite) ; la coloration utilisée est la même dans les deux cas. En bas, des cellules glandulaires fixées et colorées de façon différente.***

J. Bouchard

▲▼ ***Des cellules traitées par une substance chimique, l'orange d'acridine, montrent une fluorescence secondaire lorsqu'on les observe au microscope en utilisant une source de lumière UV. En bas, coupe de peau où l'on distingue nettement l'épiderme et ses dérivés (follicules pileux et glandes); le derme et l'hypoderme sont moins fluorescents. En haut, à plus fort grossissement, on trouve des mastocytes, cellules du conjonctif à fluorescence extrêmement vive (cellules à histamine et héparine).***

Par ailleurs, on s'est aperçu que diverses substances, utilisées à des doses extrêmement faibles, permettent de mettre en évidence certaines cellules ou certains organites cellulaires : on parle alors de fluorescence secondaire. Ainsi, divers produits chimiques, dérivés de l'*acridine*, qui, par eux-mêmes, n'ont aucune fluorescence en UV, provoquent, lorsqu'on les emploie en très faible concentration, des fluorescences vertes, rouges, orange ou jaunes en pénétrant dans tel ou tel organite cellulaire; on peut ainsi traiter — pour ne pas dire colorer — des cellules vivantes, dont le noyau sera jaune ou vert et le reste du protoplasme souvent orange et chargé de granulations de couleurs diverses; des images splendides peuvent être ainsi obtenues avec des cellules sanguines ou, mieux, des cellules de moelle osseuse. Cette technique est couramment utilisée en clinique pour l'étude des cellules normales ou pathologiques prélevées au niveau du col utérin; la méthode, perfectionnée par divers auteurs, dont von Bertalanffy en 1956-1958, peut être appliquée à l'analyse de prélèvements cellulaires effectués dans de nombreux organes.

Récemment, la microscopie de fluorescence a trouvé une autre application : la recherche des protéines spécifiques dans la cellule; l'existence d'une protéine est rendue visible en UV par une substance qui, mise au contact des cellules, se fixe sélectivement sur elle et donne une brillante fluorescence (Coons); cette méthode permet l'étude des réactions d'immunologie au niveau cellulaire; elle a induit, en particulier, un nouveau développement des recherches de cancérologie ou de pathologie rénale; ainsi, au Canada, Gold et Freedman ont pu mettre en évidence l'apparition de certains cancers digestifs grâce à une technique d'immuno-fluorescence : à Villejuif, depuis 1966, Kleist et Burtin sont parvenus, en collaboration avec des Canadiens, à mettre au point un test qui pourrait permettre le dépistage, et doit être pratiqué sur une grande échelle.

Une autre technique d'utilisation du microscope a permis des progrès considérables dans l'étude des cellules observées à l'état frais; il s'agit de la *microscopie en contraste de phase*. On sait que les cellules vivantes sont translucides à l'état frais et qu'il est difficile d'étudier leur structure; cependant, on peut augmenter les contrastes en utilisant un dispositif optique adéquat; le principe est fondé sur les faibles différences d'indice de réfraction des organites cellulaires; or, avec un objectif normal, le microscope ne permet pas de distinguer ces organites qui provoquent cependant des différences de marche dans les ondes lumineuses qui les traversent; par contre, l'introduction d'une « lame de phase » dans l'objectif permet de transformer les variations de marche, donc de phase, en variations d'amplitude, et, dans ce cas, les organites deviennent distincts. Il faut savoir qu'un rayonnement lumineux qui traverse un organite donne deux rayons : l'un se dirige vers l'objectif en respectant les lois de l'optique géométrique, l'autre s'y dirige également, mais en subissant la diffraction; ce dernier rayon

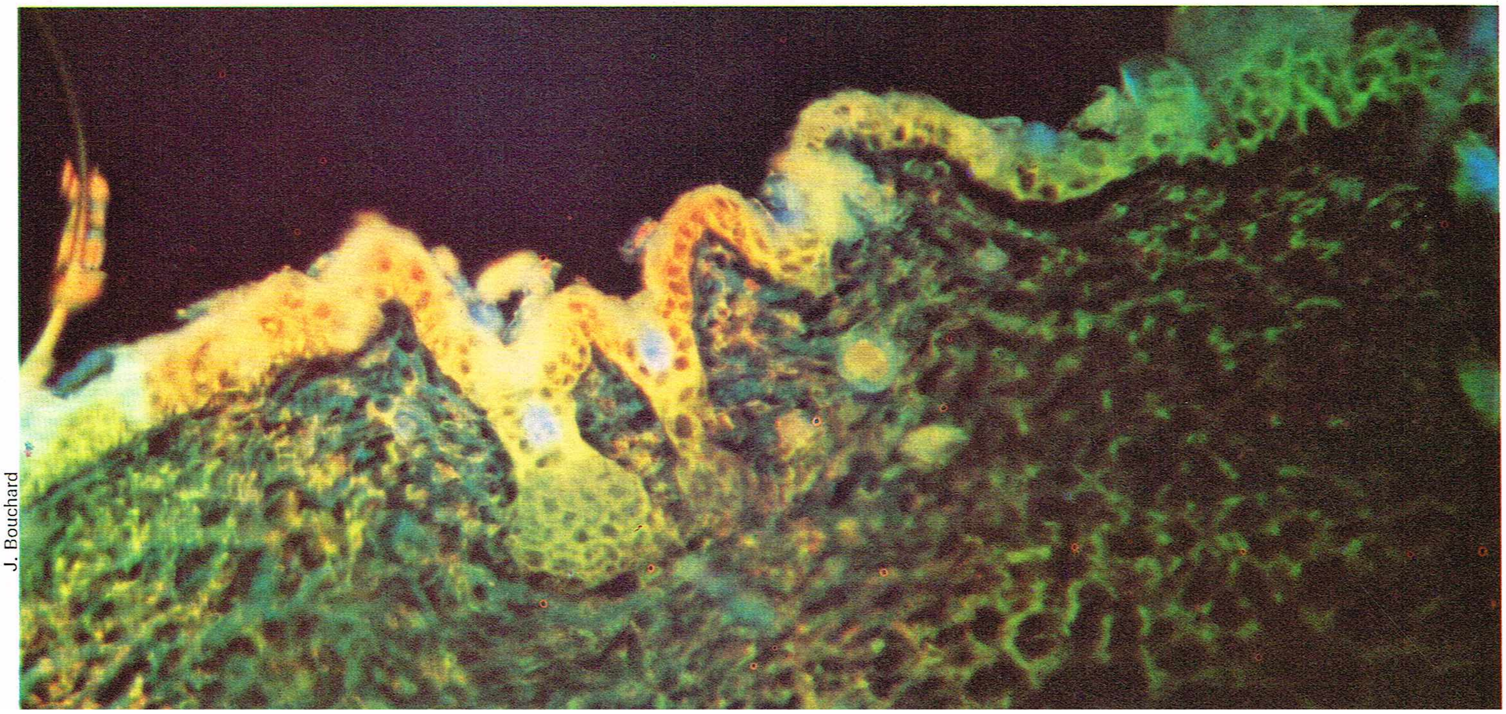

J. Bouchard

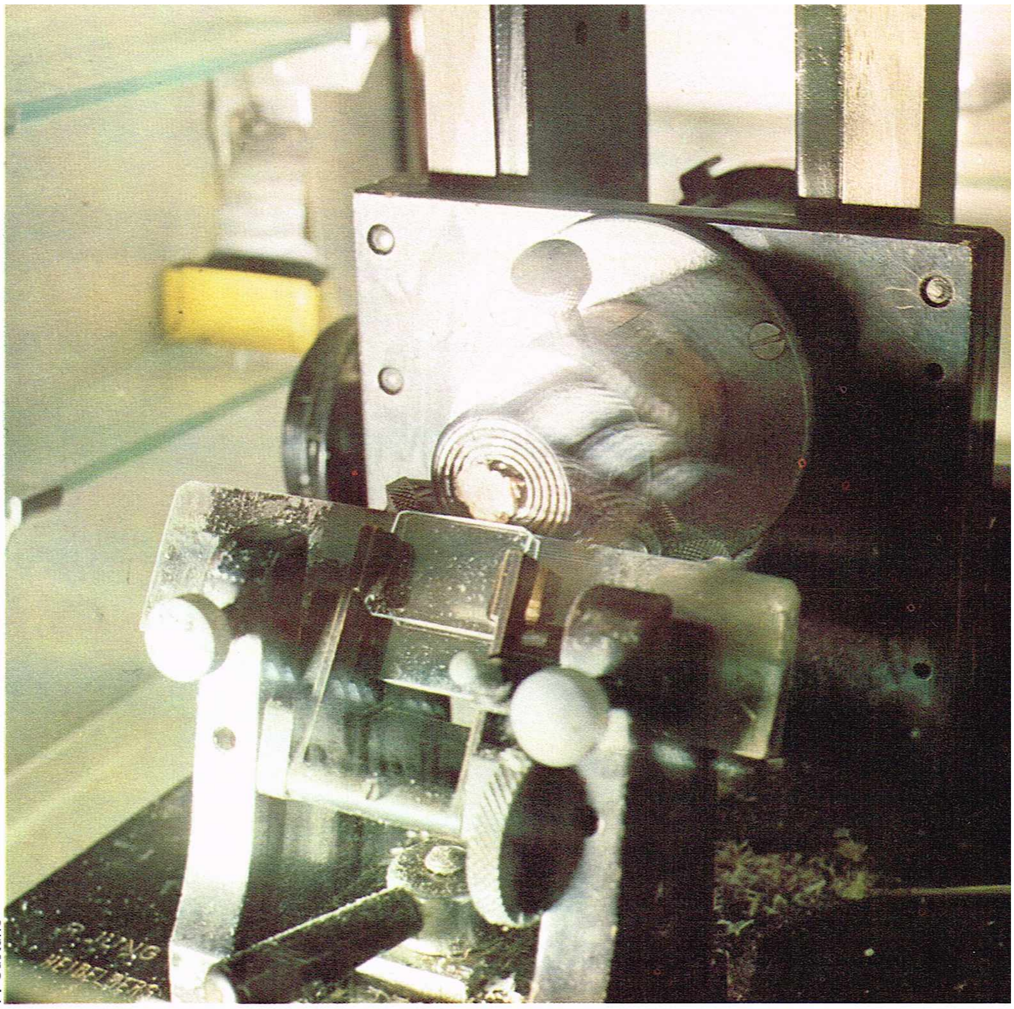

P. Castano

▲ *L'observation au microscope à UV nécessite la préparation de coupes très minces; celles-ci peuvent être réalisées à l'aide d'un microtome à congélation.*

est retardé de $\frac{1}{4}$ de phase par rapport à l'autre; la « lame de phase » peut être une mince couche de vernis, qui va précisément retarder le premier rayon, ou rayon normal, de $\frac{1}{4}$ de phase; ainsi, dans le plan-image, les deux rayons sont en phase et peuvent interférer : on observe alors un contraste entre le milieu cellulaire et l'organite dont les indices sont différents et, par conséquent, dont les images d'interférence sont différentes. Ce principe a été découvert par Zernike, en Hollande; il découle de la connaissance de la structure ondulatoire de la lumière, acquise par les travaux d'E. Abbe et de L. de Broglie. Un système plus précis que celui de Zernike a été mis au point par Françon; en outre, Nomarski a permis d'obtenir des résultats encore plus nets avec la technique d'examen en *contraste interférentiel*.

Les travaux effectués depuis une trentaine d'années ont beaucoup amélioré notre connaissance de la cellule vivante puisque sa structure peut être étudiée sans que l'on risque la création d'artefacts et puisque l'on peut observer son comportement. Ainsi, de belles recherches ont été faites sur des Protozoaires (Dragesco et Weill) ou sur d'autres matériels, comme les cellules urticantes des Cœlentérés (R. Weill). Mais les résultats les plus importants, en particulier dans le domaine de l'hématologie, furent obtenus avec des cellules cultivées. Les travaux de R. May et de son équipe ont permis de mieux connaître le mode de croissance des cellules nerveuses, dont on peut filmer les mouvements image par image : on peut ainsi observer, dans une projection de quelques minutes, les mouvements et la croissance qui se sont produits durant plusieurs heures de culture. Pour leur part, Bessis et Robineaux nous ont apporté des documents fondamentaux sur la structure et les mouvements de cellules contenues dans le sang ou les organes qui lui donnent naissance; de même, ils sont parvenus à étudier certains aspects des réactions immunologiques et du comportement des cellules cancéreuses; en fait, bien d'autres chercheurs ont utilisé le contraste de phase pour l'étude du cancer : citons Shelton, Sanford et Westfall ainsi que Landau et Peabody aux États-Unis, Fedoroff et Cook au Canada, ou Barski en France. Ils furent en quelque sorte des pionniers vers les années 1960.

Un progrès particulièrement spectaculaire fut effectué lorsque l'on demanda aux *techniques électroniques* de relayer les techniques optiques. L'idée était simple puisque l'on substituait aux lentilles optiques des lentilles électromagnétiques, la source lumineuse étant alors remplacée par un faisceau d'électrons; de ce fait, des lentilles électriques ainsi que des lentilles magnétiques constituées par des bobines plates, parcourues par un courant électrique, permettent de focaliser un rayonnement électronique tout comme les lentilles optiques focalisent les rayons lumineux. Or, le « message » donné par des électrons qui traversent un objet est en fait beaucoup plus précis que celui que porterait la lumière; la longueur d'onde associée à un électron est d'autant plus courte que sa vitesse est plus grande; cette vitesse est d'autant plus élevée que la différence de potentiel (ddp) qui sert à l'accélérer est plus forte; par exemple, pour une ddp de 150 V, la longueur d'onde associée à l'électron est déjà de 1 angström, soit 0,000 1 μ (ou millième de mm); ainsi, on conçoit aisément qu'un rayonnement électronique engagé dans un système microscopique permette une analyse extrêmement détaillée d'un objet à étudier. En utilisant de hautes tensions (60 000 V), on obtient une longueur d'onde inférieure à 1/20 angström; cependant, il existe, en microscopie électronique, des aberrations qui limitent les possibilités théoriques de l'analyse. Quoi qu'il en soit, on peut atteindre des grossissements impressionnants : on travaille de manière courante sur des cellules grossies 20 ou 30 000 fois; certains microscopes actuels permettent d'atteindre 50 000, voire 100 000 fois dans des conditions satisfaisantes; d'année en année, le pouvoir séparateur des appareils devient plus grand.

Toutefois, il sera impossible de dépasser la limite imposée par la longueur d'onde du faisceau d'électrons. En outre, le microscope électronique est un outil extrêmement coûteux et délicat; il faut, par exemple, obtenir un vide poussé pour que les électrons puissent traverser la préparation, parcourir le tube et donner une image sur écran fluorescent ou sur plaque photographique; ce vide doit être très constant et implique un système de pompage efficace et très sûr; par ailleurs, il faut bien en convenir, la confection des coupes à étudier est une opération extrêmement délicate; un faisceau d'électrons, même très rapides, ne saurait traverser des coupes épaisses de 2 à 5 μ telles qu'on en observe « en optique »; cependant, grâce aux coupes ultra-fines, qui sont l'œuvre de gens patients et obstinés, des découvertes réellement sensationnelles ont été faites depuis une vingtaine d'années; nous aurons l'occasion d'en parler. Enfin, la microscopie électronique comporte un inconvénient majeur : on ne peut observer que des cellules tuées. En conséquence, l'existence d'artefacts doit toujours être envisagée lorsqu'on travaille avec cette technique; néanmoins, en tenant compte de ce facteur, il est possible de faire des observations assez précises pour confirmer certaines découvertes des biochimistes ou pour faciliter l'interprétation de nombreux phénomènes biologiques.

C. Bouchard

◀ *Ensemble de cellules de la paroi de l'estomac d'une ascidie (Urocordés) observées au microscope électronique;*
1, membrane cellulaire;
2, noyau;
3, mitochondries.

▶ ***Schéma des différentes parties du microscope à balayage (scanning).***

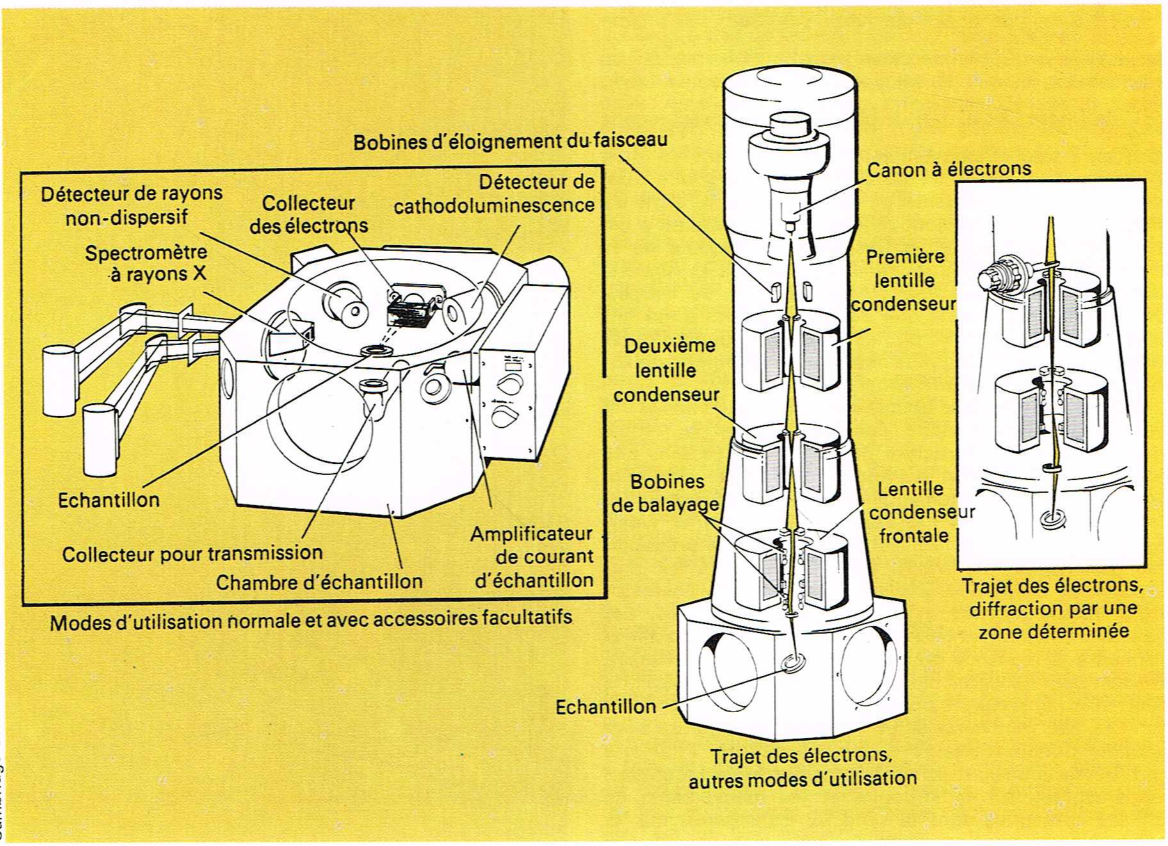

Cambridge Stereoscan

Pour clore l'énumération des techniques d'observation des structures, il nous faut citer très brièvement la technique du *microscope à balayage*, ou *scanning*, qui est dérivée des techniques électroniques. Dans ce cas, on commence par déposer à la surface de l'objet que l'on étudie un mince film métallique destiné à réfléchir les électrons et l'on observe alors le *relief* de l'objet. Le terme de « balayage » vient du fait que le pinceau d'électrons incidents est très étroit et explore successivement les différents points de la surface à étudier, tout comme cela se passe dans une caméra de télévision ; l'image produite par le pinceau réfléchi est également la conséquence du balayage d'un écran fluorescent ou d'une plaque photographique jouant le même rôle que le récepteur de télévision. Ici, les électrons du pinceau incident viennent buter à la surface de l'objet au lieu de le traverser, provoquant l'apparition d'électrons secondaires ou réfléchis dont la quantité et, par conséquent, le flux sont fonction de la pente de l'objet ou d'un de ses éléments. Plus le flux d'électrons secondaires en un point donné de l'objet est important, plus la tache correspondante est lumineuse sur l'écran d'observation. Ainsi sera restitué, le plus fidèlement possible, le relief. Dans la pratique, les objets ne sont pas coupés en fines tranches mais recouverts sur toute leur surface d'une fine pulvérisation d'or. Ce prétraitement implique une déshydratation spontanée — ou flétrissement — plus ou moins intense de l'objet dont les structures creuses et molles ont tendance à s'affaisser. Pour pallier cet inconvénient, on utilise maintenant un procédé de surgélation par l'azote liquide ; on évite ainsi l'aplatissement des grains de pollen, par exemple, ou des éléments qui constituent les stomates des végétaux, ce qui permet, dans un laps de temps relativement court, d'observer des structures non flétries. Par un tel procédé, il est possible d'étudier non seulement la surface d'organes entiers ou de cellules, mais aussi la surface de fracture de toutes sortes d'objets préalablement fragmentés ou coupés et très brièvement déshydratés avant d'être recouverts de métal (freeze etching) ; on peut ainsi observer un autre aspect du contenu de la cellule.

Nous venons d'évoquer la nature des moyens utilisés par les histologistes et les cytologistes pour l'observation de leurs matériels : nous verrons plus loin quels sont ceux des biochimistes.

Aspect d'une cellule vivante

Schéma de la structure de la cellule

Des cellules humaines sont faciles à observer : les cellules du revêtement de la cavité buccale. Il s'agit sans doute du matériel le plus commode, et, de fait, il est classiquement utilisé. En raclant délicatement la face interne de la joue avec n'importe quel instrument métallique non tranchant, on recueille quelques centaines de cellules buccales, qui demeurent en excellent état dans une goutte de salive ; cette goutte, placée sur une *lame* de verre et recouverte ensuite d'une mince *lamelle*, également de verre, peut être facilement observée au microscope. Sans autre préparation, à faible grossissement (100 ou 200), on voit déjà non seulement les contours des cellules, mais encore les traits essentiels de leur structure : si la plupart d'entre elles sont groupées en amas plus ou moins compacts formant des sortes de dallages grossiers, certaines sont bien séparées des autres et doivent être choisies pour l'examen.

Ces cellules ont un contour polygonal et leur épaisseur est faible ; les bords sont nettement délimités et plus ou moins plissés ; en manipulant les cellules avec une aiguille très fine, il est possible de voir que chacune comporte une pellicule de protection, ou *membrane*.

L'intérieur de la cellule est transparent, incolore et granuleux : c'est le *protoplasme*.

Occupant, en gros, le centre de cette cellule, la masse claire du *noyau* est parfaitement délimitable. Celui-ci est circulaire, parfois ovalaire, et de structure granuleuse ; ce sont sa paroi et ses granulations qui le rendent bien visible, assez brillant, ou, comme on le dit plutôt, assez réfringent.

Le reste de la cellule, qui correspond au *cytoplasme*, ou *hyaloplasme*, contient un grand nombre de fines granulations, apparemment immobiles, essentiellement groupées au voisinage du noyau. Une observation attentive à un grossissement supérieur (× 400) montre que ces granulations sont de formes différentes ; ces *inclusions cytoplasmiques* sont variées ; elles correspondent essentiellement à des gouttelettes de graisse, plus exactement de lipides, mais aussi à bien d'autres structures. Il est indispensable de régler très soigneusement l'éclairage qui parvient au contact de la lame de verre ; il convient,

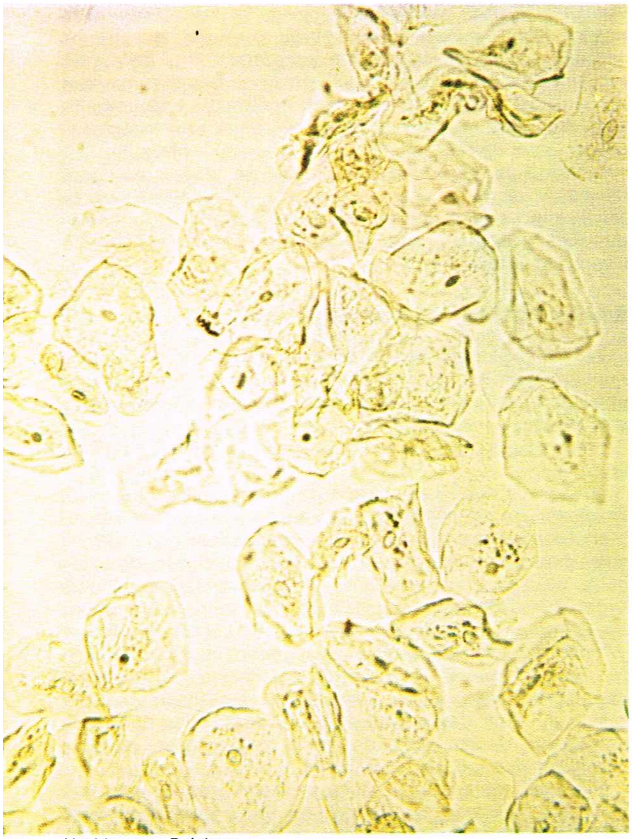

Nuridsany - Reichert

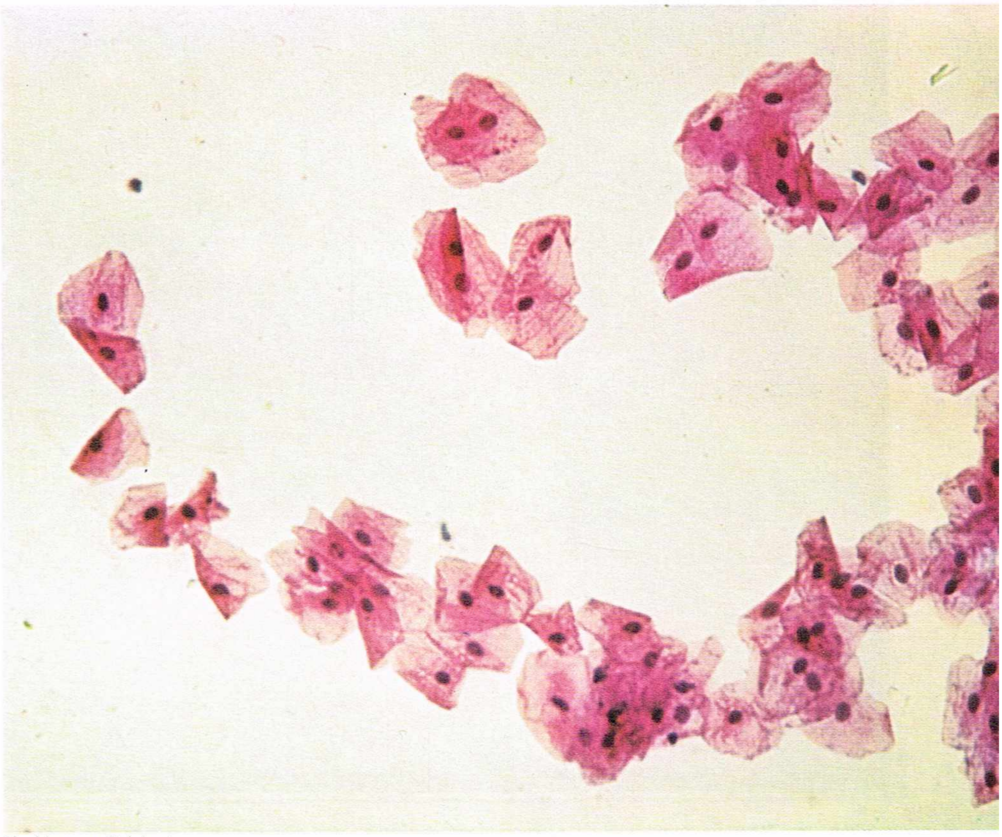

Nuridsany - Reichert

▲ ***Cellules épithéliales buccales observées au microscope optique.***
A gauche, cellules non colorées ; à droite, la coloration à l'*hématoxyline éosine *met en évidence les noyaux.

▼ ***Le microscope à balayage permet l'observation du relief des objets étudiés ; son grossissement atteint des valeurs importantes.***

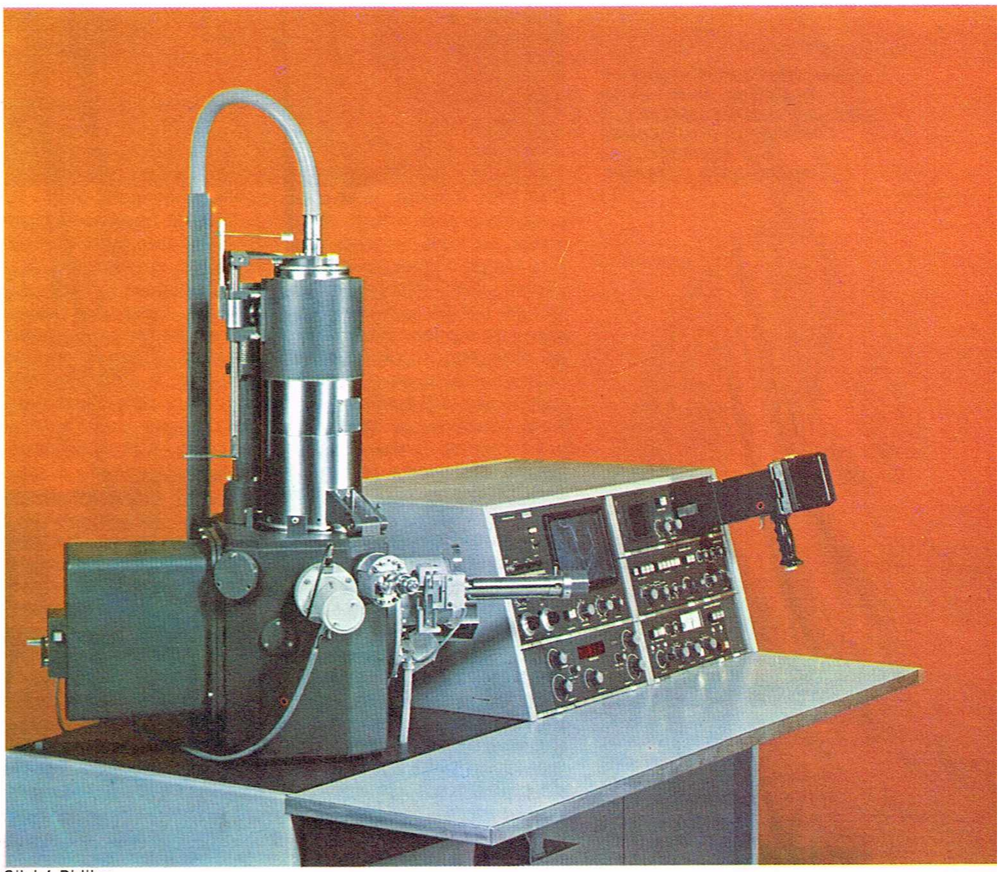

Cliché Philips

en particulier, de rechercher la position optimale du *diaphragme* du condensateur placé avant la lame et l'objet.

Pour connaître un peu mieux la nature de ces éléments, on *colore* certains d'entre eux avec des substances que l'on trouve très facilement dans le commerce.

Le *bleu de méthylène* est un colorant extrêmement pratique pour étudier les cellules en milieu aqueux ; il s'agit d'un colorant *vital,* c'est-à-dire susceptible d'être utilisé sur des cellules vivantes ; en fait, comme tous les colorants, il s'agit d'une substance toxique mais qui, lorsqu'elle est employée à très faible concentration, ne modifie pas notablement la vitalité des cellules et n'altère pas leur structure. Ce colorant nous permet de mieux observer l'organisation générale de la cellule : il se fixe essentiellement sur le noyau, plus exactement sur les éléments réfringents qui constituent ce que l'on appelle la *chromatine* du noyau ; celle-ci est en fait un enchevêtrement de filaments appelés *chromosomes,* contenant les caractères génétiques de l'individu. Peu à peu, la coloration bleue du noyau s'intensifie et la vitalité de la cellule diminue. La substance des chromosomes, qui réagit avec le bleu de méthylène, colorant basique, est donc une substance *basophile* (nous verrons ultérieurement que les chromosomes sont constitués de molécules acides). Par contre, le cytoplasme des cellules buccales n'est pas basophile. Si l'on observe les cellules contenues dans une goutte de salive et colorées par un mélange de bleu de méthylène et *d'éosine* (colorant acide rouge), on constate que le noyau devient bleu, alors que le cytoplasme apparaît rose pâle : le cytoplasme est donc une substance *acidophile.*

Ces quelques observations suggèrent déjà que la cellule est un organisme complexe mais dont il est possible de faire l'étude chimique, grâce au microscope. Les spécialistes de l'*histochimie* ou de la *cytochimie* disposent de nombreuses techniques de coloration qui ne font que s'accroître, ainsi qu'en témoignent les revues scientifiques. Il existe des colorations *topographiques,* où l'analyse chimique de la cellule ne peut être que très approximative, et des colorations *histochimiques* pour lesquelles nous avons affaire à des réactions spécifiques du colorant avec un substrat cellulaire localisé. Deux exemples peuvent être appliqués aux cellules buccales : le *vert Janus,* colorant vital, se combine spécifiquement

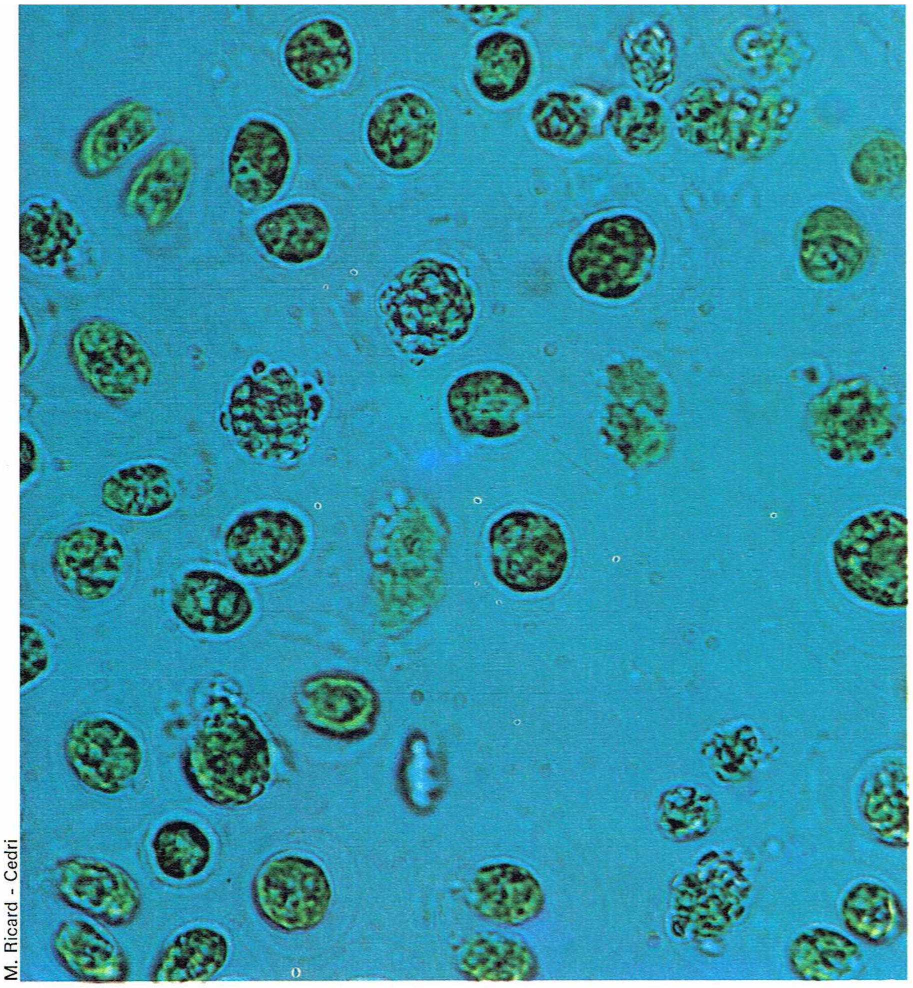

M. Ricard - Cedri

▲ *Les* **Chlamydomonas** *sont de petites Algues vertes unicellulaires facilement observables; elles sont mobiles grâce à deux flagelles et possèdent un chloroplaste très développé.*

▶ *Page ci-contre : au milieu, la mobilité des paramécies est due à l'existence d'organites locomoteurs spécialisés : les cils.*

aux *mitochondries,* usines respiratoires de la cellule; quant au *violet de crésyl,* il permet de mieux observer la chromatine du noyau, mais il doit être employé après fixation : on peut alors observer la présence dans les noyaux des *corps de Barr,* lesquels sont bien développés chez la femme; ils représentent ce qu'on appelle la chromatine sexuelle, particulièrement condensée, donc colorable.

Bien des cellules végétales sont aussi facilement observables. On peut s'en procurer partout, et l'observation microscopique en est extrêmement profitable; on en trouve dans l'eau des mares, sur les troncs des arbres ou sur les vieilles pierres. Il suffit, par exemple, de monter entre lame et lamelle, dans une goutte d'eau, une minuscule pincée de la poussière verte qui recouvre l'écorce des arbres, ou de prélever une goutte de l'eau verdie d'un vase à fleurs, ou encore de celle d'une mare, pour voir, avec un grossissement de 200 à 300, de nombreux petits corps arrondis, transparents, contenant une cupule verte; il s'agit d'Algues vertes unicellulaires appartenant à la classe des Chlorophycées : *Pleurococcus viridis* des arbres verdis, *Chlorella vulgaris* de l'eau des vases, diverses espèces de *Chlamydomonas* de l'eau des mares, où l'on trouve d'ailleurs énormément d'autres Algues.

En raison de sa complexité cellulaire, le *Chlamydomonas* mérite d'être observé avec beaucoup plus d'attention. Tout d'abord, la membrane cellulosique qui l'entoure est ferme et épaisse; elle forme même, à la partie antérieure, une papille saillante facilement observable (caractère propre aux *Chlamydomonas* et à quelques genres voisins).

Le *protoplasme,* c'est-à-dire la substance transparente qui remplit la cellule, est presque totalement occupé par une masse verte en forme de coupe, épaisse au fond, mais amincie sur les bords à la partie antérieure; on y devine également la présence du noyau. La coupe verte est un *chloroplaste,* et c'est l'accumulation de nombreuses cellules, toutes pourvues d'un tel chloroplaste, qui donne à l'eau de mare sa teinte verte. Une petite macule rouge, ou *stigma,* est visible sur le bord antérieur du chloroplaste. Dans l'épaississement basal du chloroplaste, on peut observer une partie plus sombre, bordée de petits corps réfringents. Il s'agit d'un *pyrénoïde,* élément propre à certaines Algues et qu'on ne rencontre pas dans le reste du règne végétal. Les colorants vitaux ou semi-vitaux, cités à propos des cellules buccales, peuvent être utilisés pour mettre en évidence le cytoplasme et le noyau. De plus, l'eau iodo-iodurée, ou lugol, qui tue les cellules, colore en jaune-brun les constituants de nature protéique : cytoplasme, noyau, ainsi que la masse sombre du pyrénoïde; les petits corps réfringents qui entourent ce dernier ainsi que d'autres, dispersés dans tout le chloroplaste, se colorent en bleu-noir : cette coloration est spécifique de l'amidon; elle permet de repérer ce corps chimique dans la masse verte du chloroplaste, et sa localisation même donne une première indication, extrêmement précieuse, sur le fonctionnement et le rôle important de ce dernier.

Mobilité des cellules vivantes

Le *Chlamydomonas* se déplace rapidement dans le minuscule aquarium que constitue la goutte d'eau coincée entre lame et lamelle; de même, beaucoup d'animalcules unicellulaires sont doués de mouvement.

Nous décrirons d'abord un exemple simple : il s'agit de l'amibe.

On trouve des amibes dans différents milieux liquides. Il en est de pathogènes, comme l'amibe dysentérique, mais heureusement, la plupart d'entre elles sont inoffensives pour l'homme. On en trouve, par exemple, dans les eaux douces plus ou moins polluées par des déchets organiques d'origine naturelle; on les voit fréquemment au printemps sur les feuilles des Mousses aquatiques *(Fontinalis antipyretica)* qui prospèrent sur les rochers, les murets immergés, et dans des mares où l'eau est cependant renouvelée; il en existe sur les débris qui gisent au fond des « mares à canards »; elles abondent également dans l'eau des parcs zoologiques où l'on maintient des tortues aquatiques.

Prenons simplement quelques fragments de Mousse du genre *Fontinalis* et plaçons-les entre lame et lamelle, dans une goutte d'eau; avec un grossissement d'environ 200, il est fréquent, après quelques minutes, de voir se déplacer de nombreuses amibes qui rampent sur la lame. Ces animaux, qui cherchent leur nourriture à la surface du verre comme ils la cherchaient sur les feuilles, se déplacent plus ou moins rapidement suivant l'espèce à laquelle ils appartiennent et suivant la température à laquelle on les observe. En gros, on peut dire que ces cellules ont un aspect assez peu différent de celui des cellules épithéliales buccales; mais elles sont extrêmement *déformables* et douées de *mouvement.* Précisons dès maintenant que de nombreuses cellules existant chez les animaux supérieurs sont également capables de se déplacer; leur mouvement est plus lent, mais il est de même nature; de telles cellules sont dites migratrices et jouent des rôles essentiels, en particulier pour l'élimination des Bactéries pathogènes; elles affluent en

G. S. Giacomelli

▶ *Les amibes sont des Protozoaires déformables; en effet, elles se déplacent en émettant des pseudopodes. Ceux-ci leur servent également à la capture des proies (phénomène bien visible sur cette photo).*

des points précis de l'organisme lors des réactions inflammatoires. En utilisant un grossissement plus fort (× 400), on voit aisément les grains et les organites contenus dans l'amibe ; ils sont groupés au centre de la cellule, alors que le cytoplasme, ou hyaloplasme périphérique, est parfaitement transparent. On constate par ailleurs que les éléments granuleux du cytoplasme sont mobiles et se déplacent de l'arrière vers l'avant lorsque l'animal rampe ; dans la partie la plus antérieure, on voit se former, de façon plus ou moins frappante suivant les espèces, des *voiles hyaloplasmiques,* parfois très larges ; dans d'autres cas, il apparaît seulement des prolongements, ou *pseudopodes,* lesquels peuvent être dus à un changement d'état physique du hyaloplasme suivant sa position par rapport au pôle antérieur de marche : le hyaloplasme axial, ou central, s'écoule sous forme de *sol* de l'arrière vers l'avant ; lorsque le sol atteint ce pôle, il s'écoule d'abord sur les côtés puis se *gélifie* superficiellement, tandis que les inclusions granuleuses demeurent dans une couche profonde.

La nature des forces qui sont mises en œuvre pour obtenir un tel mouvement est encore inconnue (Berkaloff, Bourguet, Favard et Guinnebault). Ainsi, dès ce stade de nos observations, nous constatons un phénomène qui, pour essentiel qu'il soit, n'a pas encore été compris. Retenons qu'outre la morphologie, la structure et la chimie de la cellule vivante, il est essentiel d'en connaître les propriétés physiques, propriétés qui varient considérablement suivant la nature de la cellule étudiée.

Un autre exemple de mobilité cellulaire nous est fourni par le règne végétal : il s'agit des Myxomycètes, Champignons inférieurs qui peuvent se déplacer à la façon des amibes ; en fait, ce ne sont pas des cellules proprement dites mais des *plasmodes,* masses protoplasmiques pourvues chacune de nombreux noyaux. On en trouve sur divers substrats : par exemple, sur des bois pourris ou des débris organiques épars sur le sol des forêts. Les plasmodes, bien visibles à l'œil nu, ont une consistance gélatineuse. Ils peuvent se reproduire en formant des spores uninucléées qui germent dans le film d'eau recouvrant les feuilles pourrissantes et les troncs morts : il en sort des spores nageuses, nues, pourvues de deux fouets inégaux. (Nous reviendrons sur leur mode de locomotion ; remarquons simplement que ces spores peuvent cesser de nager ; elles se déplacent alors à la façon d'une amibe [*Myxamoeba*]. Il est étonnant de constater que chez les végétaux, où les mouvements sont rares, une même espèce peut en présenter deux types différents.)

La mobilité cellulaire peut dépendre de l'existence d'*organites locomoteurs spécialisés :* les **cils** et les **flagelles.**

Nous prendrons comme exemple un type de Protozoaire extrêmement commun, dont le hyaloplasme est recouvert d'une toison de *cils* très denses : la paramécie. Cet animal n'est pas rare dans les milieux où l'on trouve des amibes ; il prolifère sur les feuilles en décomposition qui tapissent le fond des mares.

En fait, n'importe quel autre Cilié pourrait être pris comme exemple ; l'avantage des paramécies vient de leur taille relativement importante (150-200 μ), ce qui permet une observation facile au microscope. Les cils fins qui les recouvrent sont disposés en rangées parallèles ; ce sont leurs battements coordonnés qui permettent le déplacement de l'animal, lequel peut nager très rapidement. Une observation patiente permet de constater que l'animal possède une orientation, une polarité antéro-postérieure fixe, ce qui n'est pas le cas des amibes, dont le pôle antérieur n'est nullement déterminé de façon définitive. Notre Cilié possède une bouche toujours largement ouverte et située au tiers antérieur. De nombreuses rangées de cils convergent vers cet orifice, ou *cytostome,* qui se prolonge dans le corps de l'animal par un *cytopharynx* (dont nous verrons un peu plus loin l'importance). Si nous laissons sécher, sur une lame de verre, la goutte d'eau contenant les paramécies, celles-ci meurent sans perdre leur aspect caractéristique ; on peut alors fixer les animaux en plongeant rapidement la lame dans l'alcool ou dans l'éther ; sous l'objectif du microscope, on voit alors parfaitement les rangées de cils, et on constate qu'il existe à leur racine une petite granulation très réfringente : le *corpuscule basal ;* celui-ci est une sorte de « relais nerveux » qui permet les mouve-

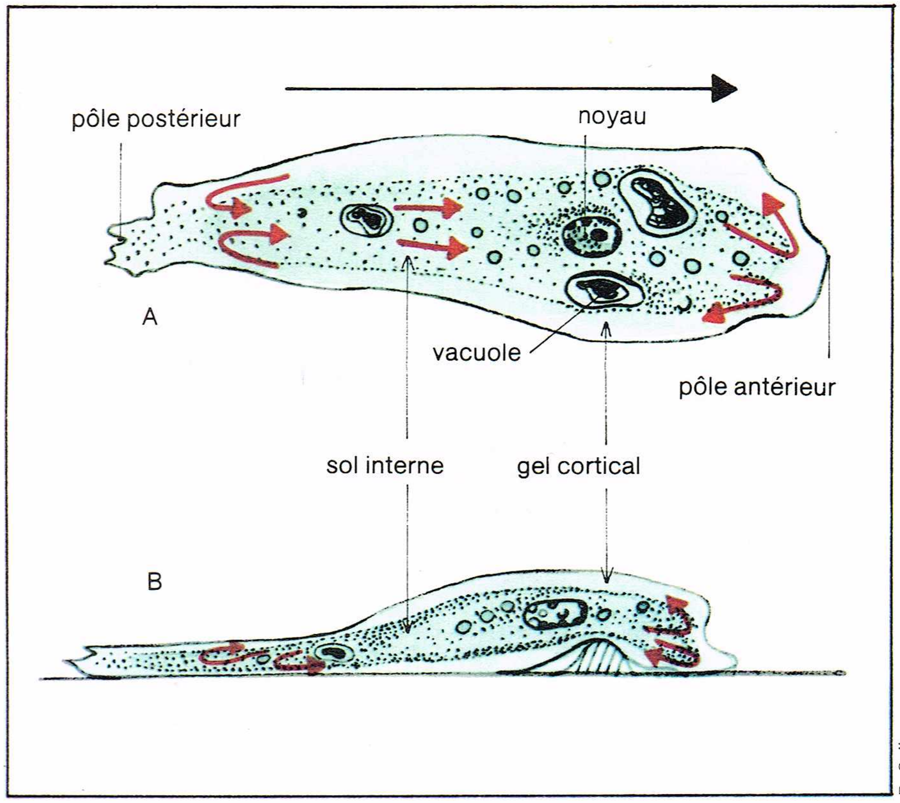

R. Colin

▲ Locomotion d'une amibe sur un substrat. A, vue de dessus ; B, vue latérale. Les flèches rouges indiquent le sens du déplacement des éléments du cytoplasme.

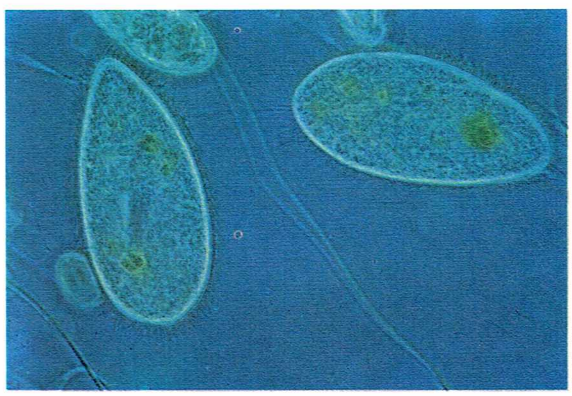

G. S. Giacomelli

▼ Disposition schématique de la ciliature d'une paramécie en vue latérale. Les lignes de points correspondent à l'insertion de cils.

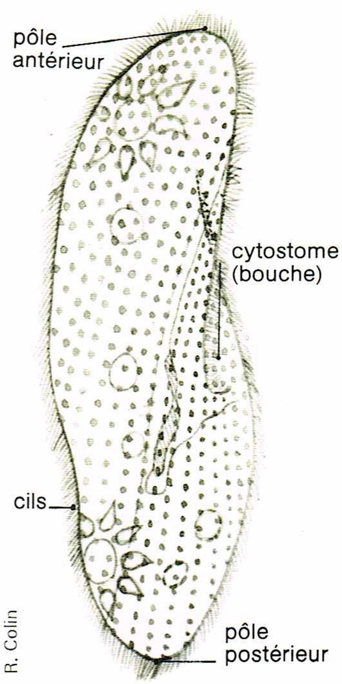

R. Colin

ments ciliaires coordonnés ; un traitement particulier des paramécies permettrait de mettre en évidence un réseau fibrillaire qui relie les très nombreux corpuscules basaux ; on utilise pour cela une technique d'imprégnation par un sel d'argent qui révèle la présence du réseau.

Cette description, extrêmement brève, de la structure d'un Cilié permet d'avoir une idée de la complexité de ces êtres unicellulaires doués de mouvement. Le mécanisme moteur fera l'objet d'une analyse ultérieure ; remarquons simplement ici que de telles cellules ne diffèrent pas considérablement de celles que l'on trouve dans les tissus et les organes de la plupart des êtres pluricellulaires : en effet, il existe des cellules ciliées dans l'épithélium qui tapisse de nombreuses cavités de l'organisme. Citons, par exemple, les cellules ciliées des bronches ou celles de l'œsophage de certains Vertébrés. Bien sûr, la ciliature n'implique pas ici un mouvement cellulaire : elle provoque le déplacement des fluides qui la baignent ; cependant, il faut souligner le fait que le mécanisme qui entraîne la mobilité de la paramécie est de même nature que celui qui permet les battements ciliaires des branchies de la moule ou de l'épithélium tapissant les cavités de nos sinus.

Parmi les Unicellulaires, on trouve aussi des animaux et des végétaux qui sont pourvus de *flagelles,* comme nous l'avons vu, précédemment, à propos des spores de Myxomycètes ; d'autres végétaux, surtout des Algues comme le *Chlamydomonas* cité plus haut, se déplacent grâce à des flagelles placés à la partie antérieure de la

▶ *Schéma des modes de nutrition et d'excrétion d'une paramécie. 1, membrane ondulante qui attire les éléments nutritifs en suspension dans l'eau; 2, vacuole digestive en formation* (endocytose) *; 3, migration des vacuoles digestives; 4, expulsion des déchets insolubles par un anus* (exocytose) *; 5, expulsion des déchets solubles par contraction de la vacuole pulsatile.*

▶ *Page ci-contre, en haut, phénomène de macrophagie observé au niveau d'une lésion pulmonaire, grâce à la microscopie électronique (× 5 000); 1, lumière d'un capillaire sanguin; 2, endothélium du capillaire; 3, cavité alvéolaire contenant des cellules sanguines; 4, épithélium de l'alvéole et tissu conjonctif; 5, globules rouges; 6, cellule migratrice; 7, cellule macrophage; 8, noyaux; 9, éléments phagocytés; 10, pseudopodes. En bas, schéma de cellule végétale montrant les échanges les plus frappants qui se réalisent à travers la membrane et le squelette cellulosique.*

▼ Trypanosoma gambiense *est un Protozoaire parasite, se déplaçant dans le sang grâce à un long flagelle d'un type un peu particulier (la base constitue une sorte de membrane ondulante).*

Nuridsany - Reichert

cellule; l'ondulation flagellaire, dont le mécanisme peut être rapproché de celui des cils, permet la traction de la cellule.

Dans d'autres cas, le ou les flagelles se trouvent à l'extrémité postérieure : la cellule est alors poussée, et le mouvement rappelle celui d'un têtard. Les spermatozoïdes de beaucoup d'animaux et les anthérozoïdes des végétaux, cellules reproductrices mâles, se déplacent grâce à des flagelles (cas de nombreuses Algues, de Champignons, de Mousses et de Fougères). Là encore, on peut dire que les cellules flagellées méritent une étude attentive; ainsi, dans le cas de la maladie du sommeil, les cellules des trypanosomes qui parasitent le sang de l'homme se déplacent grâce à un flagelle.

Les échanges chimiques avec le milieu extérieur

La cellule *absorbe* et *excrète;* dans certains cas, cela peut se voir à l'aide du microscope. Reprenons, pour étudier ces phénomènes, l'exemple des Protozoaires et de leurs homologues végétaux.

Chez les amibes ou les Ciliés, on peut facilement déceler l'existence de *vacuoles* dans le hyaloplasme; ces cavités jouent un rôle essentiel dans la nutrition et l'élimination des déchets de la digestion. Les vacuoles digestives peuvent être distinguées sans coloration, mais elles deviennent beaucoup plus visibles si l'on utilise le rouge neutre, colorant vital à faible concentration. Les Protozoaires, placés entre lame et lamelle dans la solution colorante extrêmement diluée, vont absorber les particules organiques nécessaires à leur nourriture et avaler en même temps une certaine quantité de rouge neutre. Ainsi, chez la paramécie, au fond du goulet du cytopharynx, la membrane cytoplasmique se déprime périodiquement, s'invagine et finit par délimiter une cavité sphérique dans laquelle les aliments et le colorant sont drainés; ensuite, celle-ci s'isole et s'enfonce dans le hyaloplasme : la vacuole est entraînée par un *courant de cyclose* que l'on peut rapprocher du courant permettant le déplacement de l'amibe. Durant cette migration, les substances nutritives sont entraînées dans le cytoplasme qui entoure la vacuole. Le rouge neutre demeure dans le liquide vacuolaire, ce qui permet ainsi de suivre la migration des vésicules digestives : elles restent plus ou moins alignées, formant un chapelet tout au long de l'animal; à la fin de la digestion, chaque vacuole vient s'accoler à la membrane plasmique au voisinage du pôle antérieur de la paramécie; elle ne contient plus que des produits de déchets, qui sont expulsés suivant un processus inverse de celui de l'absorption de la nourriture au fond du cytopharynx. Cette absorption est une *endocytose* et l'excrétion des éléments indigestes est appelée une *exocytose.*

Les vacuoles sont bien observables chez de très nombreux Protozoaires, en particulier chez les Ciliés du groupe des vorticelles; ces animaux possèdent un pédoncule et restent fixés sur le substrat, ce qui facilite l'observation microscopique; les paramécies offrent, en effet, l'avantage d'être souvent de grande taille, mais il faut avouer qu'elles sont bien remuantes! On tourne la difficulté en les emprisonnant dans des fibres végétales dilacérées ou, plus efficacement, en augmentant la viscosité du liquide; on utilise pour cela un gel d'agar dans lequel nos Ciliés nagent avec beaucoup de lenteur sans pour cela perdre leurs fonctions normales.

La *phagocytose* est une forme d'endocytose fréquente chez les organismes pluricellulaires. Citons, en particulier, le cas de certains globules blancs qui, dans le sang et les tissus, absorbent les Bactéries et les cellules mortes plus ou moins fragmentées (macrophagie). Beaucoup de cellules peuvent absorber un volume de liquide plus ou moins important et, par conséquent, les substances dissoutes ou en suspension : c'est ce qu'on appelle un phénomène de *pinocytose.* Celle-ci a pu être mise en évidence grâce à la microcinématographie en contraste de phase et en utilisant des cellules sanguines migratrices. L'absorption de gouttelettes aqueuses a été constatée dans beaucoup d'autres types cellulaires; c'est le cas, par exemple, des cellules de l'épithélium pulmonaire. Au microscope électronique, on peut voir sur des coupes ultra-fines que chaque cellule absorbe un très grand nombre de fines gouttelettes.

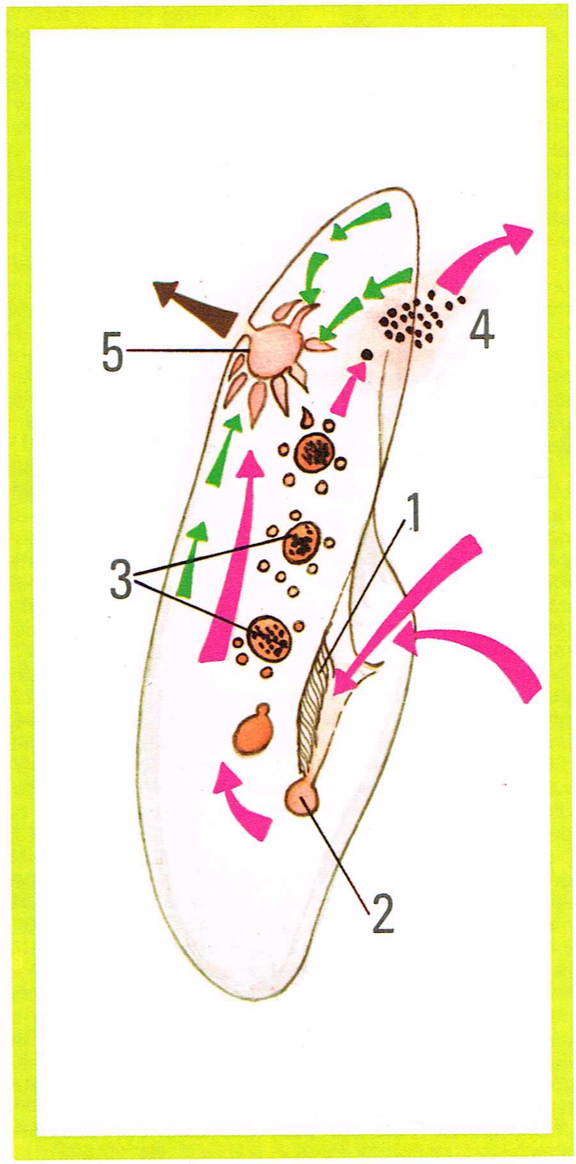

R. Colin

Nous avons décrit un exemple d'échange entre le milieu extérieur et la cellule. La première étape, c'est-à-dire la formation de la vésicule digestive, est très facile à observer, de même que l'étape finale qui aboutit à l'expulsion des déchets. Mais il se passe bien autre chose au sein de la cellule : *l'essentiel des échanges vitaux se fait à travers la membrane plasmique.* Dans le cas des Protozoaires, un rôle prépondérant est dévolu aux membranes des vacuoles, mais, pour l'ensemble des cellules vivantes, les transferts nutritifs et excréteurs se font à travers toute la paroi de la cellule ou du moins à travers de grandes surfaces membranaires.

Les échanges concernent aussi bien les gaz que les liquides et les sels dissous, et nous verrons également que des molécules organiques traversent la membrane.

Dans le cas des cellules végétales, nous n'avons guère l'occasion d'observer des phénomènes de phagocytose; il est cependant possible de constater l'existence d'échanges de nature chimique; ils doivent se faire à travers la paroi cellulosique, squelette propre aux végétaux. Celle-ci est doublée intérieurement par la membrane cytoplasmique : ainsi, si une vacuole excrétrice crève à la surface du cytoplasme, son contenu reste entre cette dernière et la paroi cellulosique. Les végétaux n'empruntent pas leur nourriture organique (proie, fragment végétal ou animal) au milieu extérieur : ils la fabriquent en utilisant les sels dissous et les gaz, libres ou dissous dans ce milieu. Ainsi, la vacuole que l'on trouve chez le *Chlamydomonas* peut devenir lentement rose en présence d'une solution de rouge neutre. Un fragment d'épiderme de bégonia révèle à l'observation microscopique

C. Bouchard

des vacuoles fortement colorées en mauve par des pigments anthocyaniques occupant presque la totalité des cellules épidermiques ; si ce fragment est monté entre lame et lamelle dans une goutte d'acide dilué, le liquide vacuolaire vire au rouge, ce qui prouve que l'acide pénètre dans la cellule ; par ailleurs, un lambeau identique, monté dans une goutte de solution alcaline, devient bleu. Dans les deux cas, il y a eu pénétration de substances chimiques du milieu extérieur dans la vacuole, les anthocyanes jouant le rôle de réactif. Ce phénomène peut même s'observer sans microscope en plongeant deux feuilles de chou rouge dans une solution acide ou basique. La pinocytose, absorption de gouttelettes liquides par le cytoplasme, est très peu répandue chez les végétaux. La diffusion des gaz peut être mise en évidence par une expérience relativement simple : l'action ménagée de l'hydrosulfite de sodium sur le bleu de méthylène provoque la réduction de ce dernier et sa transformation en un leuco-dérivé, incolore comme son nom l'indique ; des Algues vertes, par exemple des *spirogyres,* longs rubans de cellules mises bout à bout, immergées dans une solution de ce leuco-dérivé, et exposées à la lumière, vont induire la réaction inverse, c'est-à-dire la transformation du leuco-dérivé en bleu de méthylène. Or celle-ci n'est possible qu'en présence d'oxygène. Un gaz, l'oxygène, a donc diffusé de l'intérieur des cellules vers le milieu extérieur, le bleu de méthylène jouant le rôle de réactif que jouait l'anthocyane dans le cas du bégonia. Cette émission est d'une importance essentielle, puisque tout l'oxygène que nous respirons vient des végétaux verts.

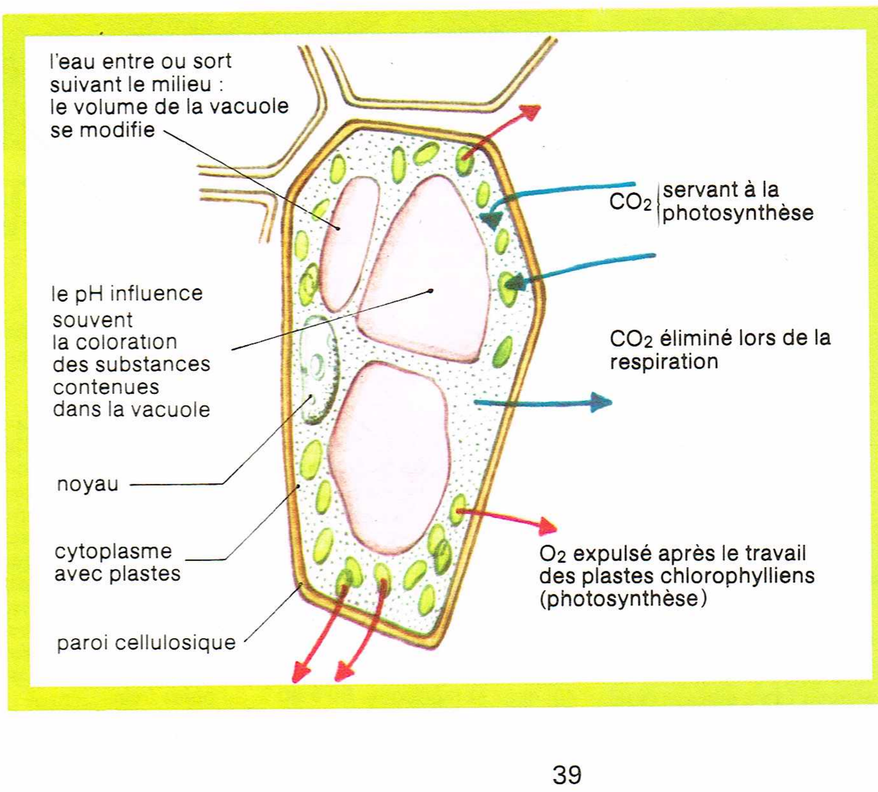

R. Colin

▶ *L'eau, constituant très important de tous les organismes vivants, représente 98% de la masse corporelle d'animaux marins planctoniques, tels que cette méduse (Cnidaires).*

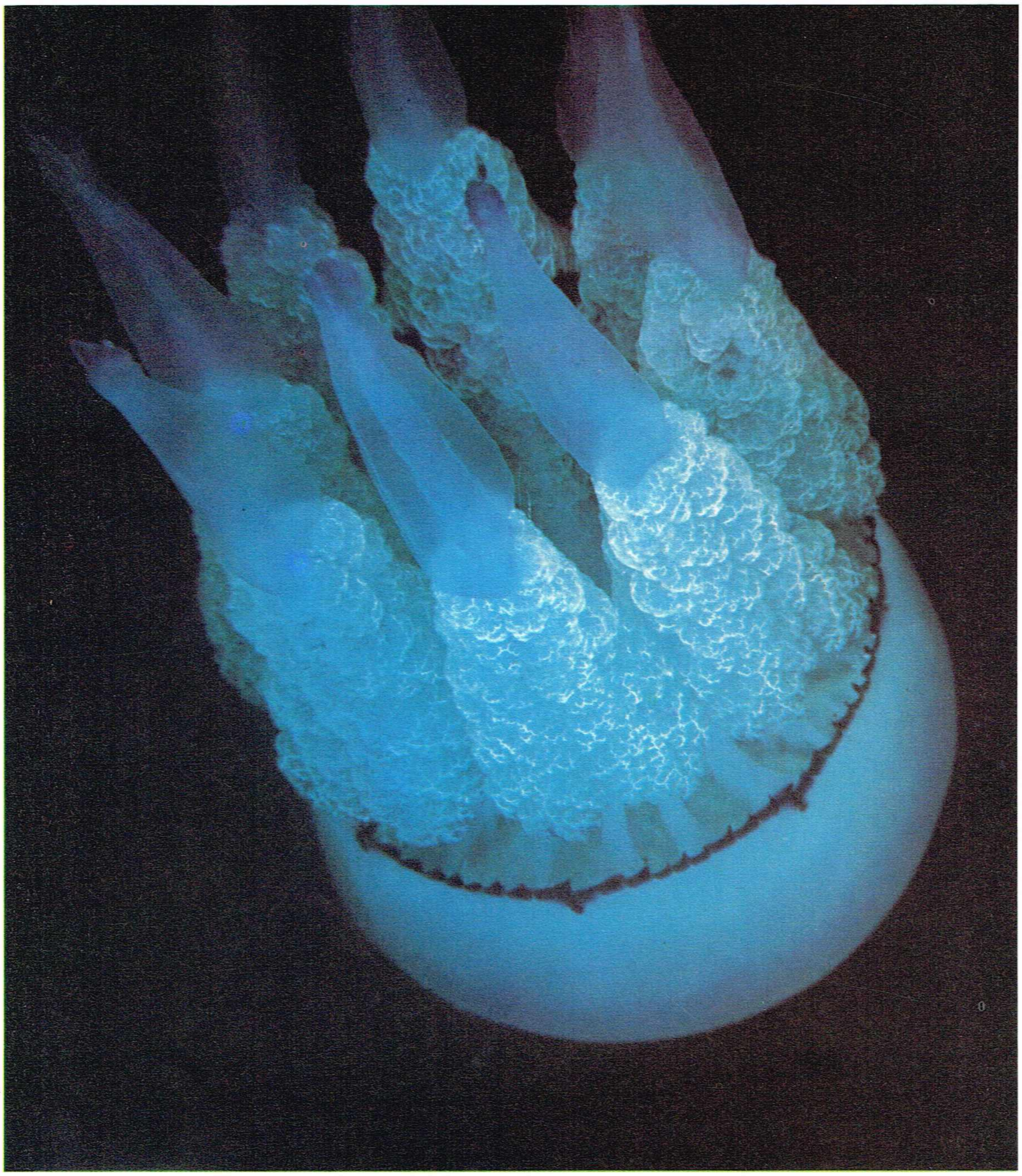

G. Munschy - Jacana

LES PRINCIPAUX CONSTITUANTS CHIMIQUES DE LA CELLULE VIVANTE

L'eau

Dans l'Antiquité, pour les disciples d'Épicure, voués au culte d'Aphrodite, l'eau représentait l'élément fondamental, source de toute vie.

L'eau est un constituant dominant de tous les organismes vivants : elle représente 63 % de la masse corporelle de l'homme et 98 % de celle des animaux marins, planctoniques, tels que les méduses, dont la consistance molle est bien connue. A l'inverse, l'eau est peu abondante dans le cas des organismes en vie ralentie : ainsi, les graines n'en contiennent que 10 % en moyenne; dans le règne animal, on constate le même phénomène chez les Crustacés Phyllopodes des mares temporaires, les Tardigrades et les Protozoaires Thécamibiens des Mousses. Remarquons enfin que, dans l'ensemble, la teneur en eau des végétaux est plus élevée que celle des animaux et représente 80 à 90 % du poids frais.

Pour chaque individu, la quantité d'eau diminue quand l'âge augmente. Cependant, la teneur en eau d'un organisme ne peut varier qu'entre des limites étroites, cela est surtout vrai chez les animaux; on estime qu'une déshydratation d'environ 10 % provoque la mort, chez les Mammifères; chez le nouveau-né, les mécanismes de régulation du métabolisme hydrique n'étant pas encore bien établis, la déshydratation peut avoir des conséquences catastrophiques bien en deçà du seuil de 10 %.

Les végétaux sont plus souples : chez la luzerne par exemple, le point de flétrissement irréversible est atteint pour un déficit en eau de 70 %; cependant la plupart des plantes s'installent dans un milieu dont la teneur en eau correspond à un optimum qui varie suivant chaque espèce; dans des cas extrêmes, les végétaux peuvent être alors aquatiques ou semi-aquatiques (par exemple, les plantes de haute montagne ou des forêts ombrophiles).

La molécule d'eau : propriétés physico-chimiques

La molécule d'eau, apparemment simple, est en fait très particulière. Les trois atomes (2 H et 1 O) qui la constituent sont placés aux sommets d'un triangle isocèle de proportions fixes.

L'*oxygène*, de nombre atomique 8, comporte deux couches d'électrons : la couche K, proche du noyau positif, est saturée à 2 électrons ; la couche L, plus éloignée, en comporte 6 alors qu'il en faut 2 + 6, soit 8, pour qu'elle soit saturée. En présence d'atomes d'hydrogène, l'atome d'oxygène se lie à *deux hydrogènes* par des liaisons de *covalence :* H et O mettent en commun 2 électrons, l'un de H, l'autre de O ; comme 2 H se lient à O de la même manière, par covalence, l'octet de O est saturé, tout comme le doublet des H. Il reste autour de O deux « doublets solitaires », qui se trouvent particulièrement attirés par les 8 protons de O. Ces 4 électrons négatifs se rapprochent du noyau électropositif et s'éloignent des noyaux H. En conséquence, l'oxygène va constituer un *pôle négatif* pour la molécule d'eau, alors que les pôles hydrogène deviennent *positifs,* relativement. La molécule d'eau est donc un *dipôle permanent.* Les molécules, dipolaires, s'orientent sous l'action d'un champ électrique et tendent à neutraliser ce champ. Une telle molécule dipolaire ne peut pas avoir une disposition simple ; c'est pourquoi on a envisagé l'existence d'une structure triangulaire (Bernal et Fowler). L'angle HOH serait de 109° ; les deux dipôles OH correspondraient à un dipôle théorique AB, avec pôle négatif A. Des analyses spectroscopiques délicates permettent d'évaluer la distance entre les atomes et entre les pôles théoriques.

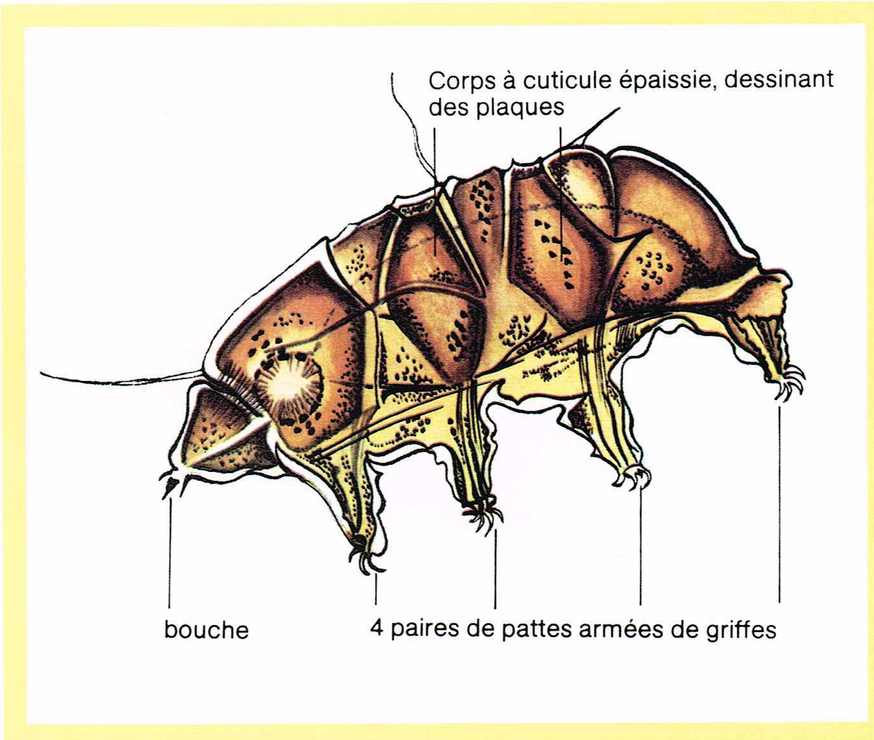

R. Colin

▲ **Echiniscus trisetosus** *est un Tardigrade commun dans les Mousses ; les Tardigrades sont doués du pouvoir d'anabiose : en cas de sécheresse prolongée, ils peuvent se déshydrater sans dommage ; la réhydratation entraîne le retour à la vie active.*

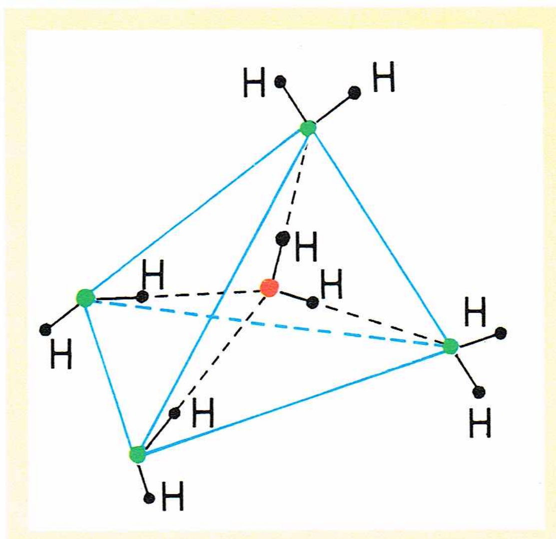

R. Colin

◄ *Structure tétracoordinée des molécules d'eau : en rouge, localisation de l'oxygène de la molécule d'eau centrale ; en vert, oxygène des molécules associées.*

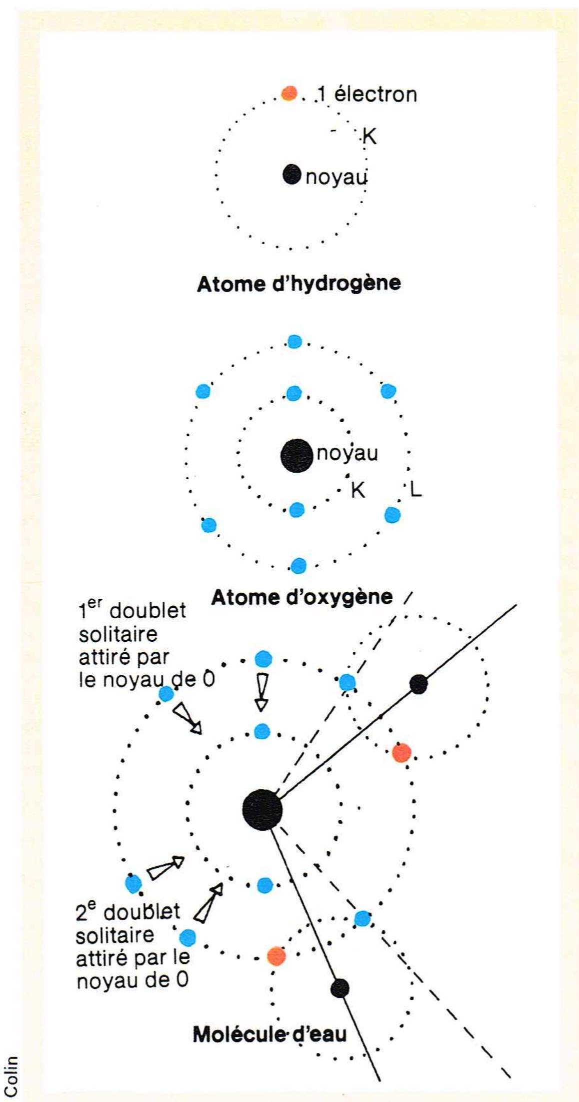

R. Colin

◄ *Représentation schématique des atomes d'hydrogène et d'oxygène et de la molécule d'eau. Un atome d'oxygène et deux atomes d'hydrogène s'associent pour saturer la couche K de l'hydrogène et la couche L de l'oxygène.*

Mais la molécule d'eau n'est pas libre : elle contracte avec d'autres molécules d'eau des *liaisons hydrogène.* Dans la molécule, H, lié à O, peut jouer le rôle d'accepteur d'électrons vis-à-vis d'une autre molécule. Dans l'eau pure, c'est l'oxygène d'une molécule voisine qui fournit 2 électrons supplémentaires à H. On a :

molécules associées

$$\underset{\text{(1}^{\text{re}}\text{ moléc.)}}{H_2O} \rightarrow \underset{\text{(2}^{\text{e}}\text{ moléc.)}}{H_2O}$$

Cette *liaison hydrogène* (→) est de type *coordinence* (O fournit les 2 électrons mis en commun avec H). C'est une liaison faible, donc labile ; elle est cependant d'une solidité supérieure à celles qui sont dues aux forces de Van der Waals (attraction complexe, bien qu'universelle, des particules neutres qui, pour entrer en contact, doivent être initialement extrêmement proches : l'attraction diminue en raison inverse de la 7e puissance de l'écart ; pour les particules électroactives, l'attraction diminue seulement en raison inverse du carré de l'écart).

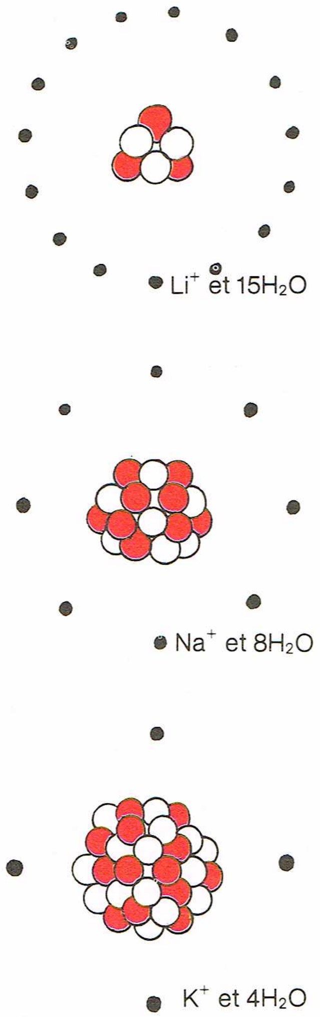

▲ ***Schéma de l'hydratation ou solvatation des ions.***

L'association des molécules donne généralement naissance à une *supermolécule* faite de 5 H_2O disposées de manière précise les unes par rapport aux autres. Dans l'eau liquide, on a donc une structure à courte distance bien définie : 1 molécule d'eau est entourée par une couronne de 4 autres molécules. Mais l'association va plus loin puisqu'il existe une seconde couronne qui en comporte 12... En fait, lorsque la température s'abaisse, les molécules tendent à se souder par des liaisons hydrogène; si l'agitation thermique est encore réduite, les groupements moléculaires tendent à constituer un édifice cristallin qui devient stable à 0 °C : il s'agit de la *glace*. Inversement, si l'on réchauffe la glace, l'édifice cristallin se désagrège, puis les couronnes se dissocient. En règle générale, les groupements atomiques sont d'autant plus nombreux que la température est plus basse; l'association d'une molécule avec d'autres est perpétuellement remise en cause par l'agitation thermique.

Notons qu'il existe plusieurs types d'eau liquide que l'on peut distinguer grâce à une technique d'analyse aux rayons X : il est possible de trouver trois types, plus ou moins compacts; *l'eau I* est une association de 1 molécule avec 4 autres molécules distantes de 2,8 Å (0,000 28 μ) qui, elles-mêmes, sont liées à 12 molécules distantes de 4,5 Å; dans *l'eau II*, plus dense, les 12 molécules périphériques sont à 4,2 Å; enfin, *l'eau III* comporte des molécules encore plus serrées. Pour une température donnée, l'une des trois variétés domine; cela explique les variations de densité de l'eau.

Cette brève description a été donnée pour que l'on puisse juger de la complexité des éléments qui paraissent les plus simples.

L'eau ordinaire est, de plus, un liquide partiellement ionisé.

Dans l'eau pure, il y a *dissociation ionique* d'une partie des molécules; en fait, la proportion des molécules d'eau ionisées est très faible. Cette dissociation intramoléculaire est un *phénomène dynamique :* dans un temps donné, *n* molécules se dissocient et, simultanément, *n* autres molécules se reconstituent à partir des ions préexistants. Schématiquement, tout se passe comme si l'on avait une simple ionisation de H_2O en ions H^+ et OH^-; les concentrations de ces ions sont égales à 10^{-7} équivalent g/l; ce chiffre peut être obtenu expérimentalement (détermination de la *constante de dissociation K* — loi d'action de masse).

L'eau est un milieu neutre; dans la pratique, on dit qu'elle a un pH de 7 (pH est le logarithme décimal négatif de la concentration en ions H^+). On utilise la même notation pour déterminer l'acidité (pH < 7) d'une solution ou son alcalinité (pH > 7).

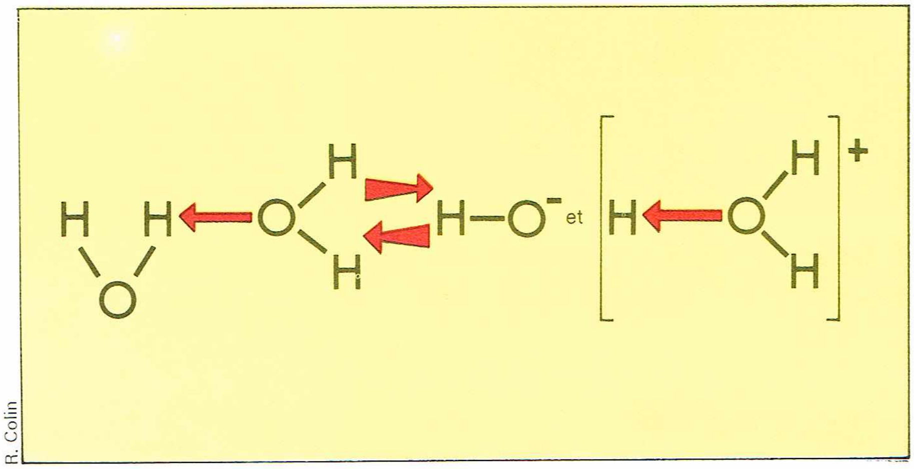

▲▶ ***Ci-dessus, schéma du principe d'ionisation de l'eau. A droite, un pH-mètre.***

Grâce à la structure de sa molécule, l'eau est un excellent *solvant* polaire pour les substances minérales dissociables en ions, ainsi que pour diverses molécules organiques à *radicaux hydrophiles* (— COOH ; C = O ; — OH ; — NH_2) ; ces radicaux ont eux-mêmes un caractère polaire très notable, si bien que la région polaire d'une molécule organique se trouve toujours orientée vers l'eau, qui compose une partie de la substance cellulaire. Ce point est d'une extrême importance pour la constitution des membranes cellulaires.

L'eau *favorise la dissociation ionique* des sels d'acides et de bases faibles (les sels d'acides forts et de bases fortes s'ionisent avant leur dissolution). Par ailleurs, les molécules d'eau polarisées se groupent autour des ions formés : c'est la *solvatation,* ou *hydratation des ions;* lors des expériences d'électrolyse, les ions migrent vers une électrode *en entraînant un cortège de molécules d'eau.* Dans la cellule également, un ion Li^+ (lithium), par exemple, entraîne en moyenne 15 molécules d'eau; 8 molécules forment une couronne autour de l'ion Na^+; il n'y en a que 4 autour de K^+, car cet ion est sensiblement plus gros que les précédents et le champ est moins important. Volumineux, les ions solvatés traversent plus difficilement les membranes que s'ils étaient seuls. De plus, il faut souligner l'importance de l'hydratation pour

les grosses molécules protéiques : une molécule protéique comporte généralement de nombreux radicaux chargés, qui, en s'attirant, provoqueraient une déformation préjudiciable à son bon fonctionnement : en s'installant autour de ces radicaux, une couche d'eau bipolarisée réduit les forces d'attraction et protège la molécule, donc son activité biologique.

Certaines autres propriétés de l'eau sont remarquables. Sa *tension superficielle* est élevée (73 dyn/cm à 18 °C) ; elle résulte de la forte attraction mutuelle des molécules (forces de Van der Waals). Une substance dissoute ne se répartit donc pas uniformément dans le solvant : elle s'accumule au contact de la couche de séparation (eau/air ou eau/lipides) lorsqu'elle abaisse la tension superficielle, et, inversement, elle s'y trouve moins abondante si elle élève cette tension. D'autre part, de la tension superficielle dépendent tous les mouvements cellulaires.

La *chaleur spécifique* de l'eau atteint une valeur élevée, deux à trois fois plus grande que celle des autres constituants biologiques : il faut 1 calorie pour faire passer 1 g d'eau de 14,5 °C à 15,5 °C, ce qui est très important. L'eau est donc un facteur de régulation thermique chez les végétaux et surtout chez les animaux. Parallèlement, lorsque la température augmente, la perte de poids par évaporation est faible.

Enfin, dans la nature, on constate parfois un phénomène de *surfusion* de l'eau : cela explique, avec d'autres facteurs, le maintien en vie à de très basses températures d'organes végétaux tels que les bulbes. Par contre, la plupart du temps, lorsque l'eau gèle, son augmentation de volume provoque des lésions dans les tissus, qu'ils soient animaux (par exemple, les doigts ou nez gelés) ou végétaux (ainsi, les chrysanthèmes, les dahlias ou les géraniums deviennent noirs après les premières gelées).

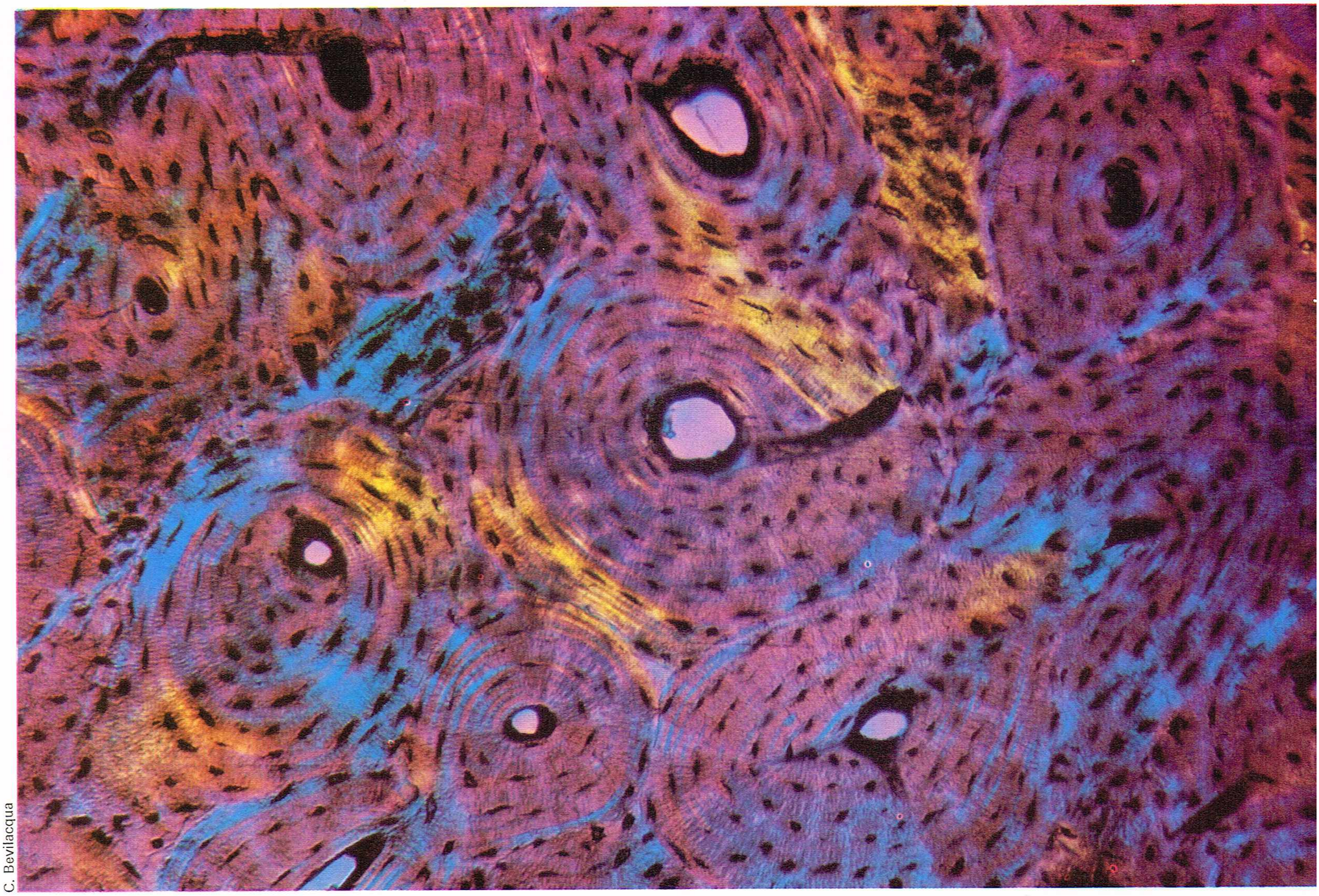

C. Bevilacqua

▲ *Les éléments minéraux sont des constituants de toutes les cellules ; autour des cellules, ils peuvent former l'essentiel des structures squelettiques ; ici, une coupe transversale d'os vue au microscope à lumière polarisée.*

Les éléments minéraux

Les éléments minéraux sont des constituants de toutes les cellules vivantes ; ils s'y trouvent le plus souvent sous forme dissoute, ce qui implique leur ionisation partielle, mais ils peuvent aussi constituer l'essentiel des structures squelettiques (os des Vertébrés, tests des Foraminifères et des Diatomées, etc.).

Abondance et importance des sels minéraux

L'analyse qualitative permet de trouver dans les organismes vivants des *cations,* parmi lesquels le sodium Na^+, le potassium K^+, le calcium Ca^{++}, le magnésium Mg^{++} et le lithium Li^+, ainsi que des *anions* tels que le chlore Cl^-, le sulfate SO_4^{--}, le carbonate CO_3^{--}, le nitrate NO_3^-, le phosphate HPO_4^{--}. Quatre métaux sont en liaison étroite avec diverses molécules organiques : le fer Fe, le cuivre Cu, le cobalt Co et le molybdène Mo. Le vanadium Vd, le cadmium Cd et le chrome Cr existent aussi chez certains êtres vivants. Il existe, en outre, de nombreux oligo-éléments qui seraient particulièrement importants chez les végétaux : le zinc Zn, le manganèse Mn, l'aluminium Al, le nickel Ni, le bore B, l'iode I, le fluor F, le brome Br, etc.

Dans un extrait tissulaire, il est possible de détecter certains cations grâce à une technique moderne d'analyse par *redissolution anodique :* les ions métalliques de l'échantillon sont d'abord attirés sur une cathode ; ensuite, on pratique une électrolyse inverse qui redissout les métaux de manière séquentielle ; durant cette phase, la redissolution (oxydation) produit des courants électriques mesurables ; on obtient une succession de pics correspondant à chacun des cations redissous. Le dosage des traces métalliques est alors possible. (C'est ainsi qu'on détermine le degré de pollution des eaux en mercure, Hg, ou qu'on recherche des cations essentiels pour la cellule.)

Dans la cellule, les éléments les plus abondants peuvent être détectés par examen microscopique. Durant plusieurs années, on a utilisé la technique de *micro-incinération,* dont le principe est très simple : des coupes de tissus étalées sur des lames peuvent être calcinées dans des fours de conception particulière, puis observées ensuite au microscope, après stabilisation des cendres ; or, les cendres de sodium, de calcium ou de potassium n'ont pas la même allure, la même « couleur », ce qui permet aux spécialistes de localiser, souvent précisément, les éléments minéraux principaux de la cellule. Cette technique était assez souvent employée il y a quinze ou vingt ans. Mais, depuis quelque temps, on utilise un système analyseur électronique, la sonde de Castaing, qui permet de détecter la présence d'un élément au niveau des constituants de la cellule et qui donne une idée assez précise de la concentration de cet élément.

On sait depuis longtemps que la bonne marche des processus vitaux dépend, dans des limites étroites, des *concentrations* des différents ions. De plus, il existe une *balance ionique* tissulaire : les proportions des différents ions doivent être des paramètres fixes ; elles varient plus ou moins selon les espèces, mais on peut faire un certain nombre de constatations générales : K^+ est 30 à 40 fois moins abondant que Na^+ ; il y a 5 à 7 fois moins de SO_4^{--} que de Cl^-, etc.

Loeb a mis en évidence l'existence d'*antagonismes* entre certains ions : l'adjonction d'*un* sel au milieu dans lequel se développe l'œuf de *Fundulus* (Poisson osseux)

▶ *A gauche, enregistrement du potentiel nécessaire pour la redissolution anodique de quelques éléments métalliques. A droite, mesure du taux du cuivre, du plomb et du cadmium dans un échantillon de sang (0,1 ml dissous dans 5 ml de solution d'acétate de sodium). Ces ions s'y trouvent à l'état de trace.*

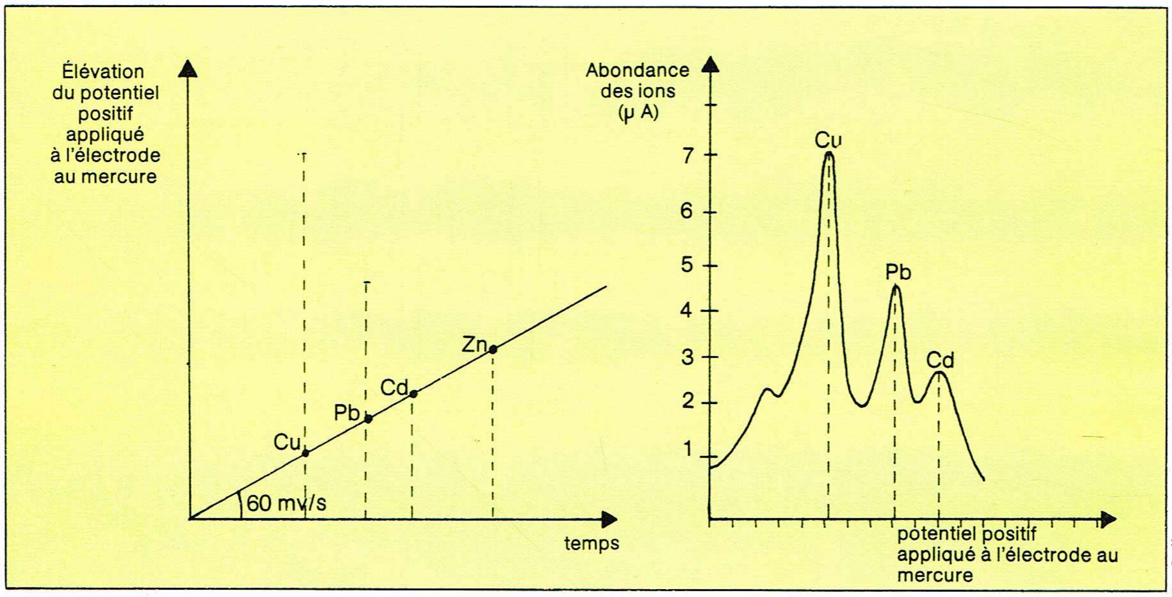

provoque la mort de cet œuf; curieusement, celui-ci se développe normalement en présence de *deux* sels donnant des ions métalliques, monovalents d'une part, et bi- ou trivalents d'autre part. Une expérience d'un autre type peut être faite avec un cœur de grenouille ou de tortue; un cœur isolé continue de battre, mais peut être bloqué en diastole (phase de décontraction) lorsqu'on le met en présence de Na^+ ou K^+; son blocage est systolique avec Ca^{++}. Plus récemment, on a constaté que K^+ diminue la viscosité du cytoplasme, alors que Ca^{++} l'augmente. Chez les plantes, un excès de potassium empêche ou retarde le flétrissement, à l'inverse du calcium.

Le tableau donné ci-dessous, emprunté à Loewy et Siekevitz, indique les proportions des principaux ions chez divers types d'animaux. Or, il existe une certaine similitude entre les proportions de ces ions dans l'eau de mer et dans les tissus animaux, ce qui peut sembler étonnant, puisque la vie animale évolue depuis 1,6 milliard d'années (sans compter l'évolution végétale, qui se poursuivrait depuis 3 milliards d'années). Sur un plan expérimental pratique, on utilise depuis longtemps des *solutions nutritives balancées* pour la culture de végétaux entiers ou fragmentés ou pour celle de cellules animales qui peuvent survivre et se multiplier; on parvient ainsi à obtenir *in vitro* des tissus ou des organes. Ces solutions ont une composition proche de celle des liquides physiologiques (Ringer, Locke, Tyrode, Trowell, Wolff et coll., etc.). Enfin, il faut souligner « l'unité, sinon de composition, au moins de besoins en ions, de formes vivantes aussi différentes qu'une cellule hépatique et qu'une cellule de bulbe d'oignon » (Durand).

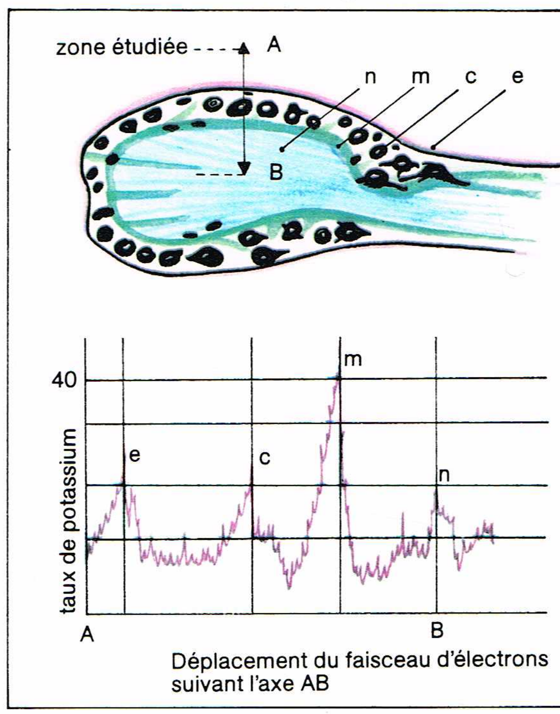

▶ *Structure schématique d'un ganglion nerveux de criquet (en haut) et résultat d'une analyse de la répartition de l'ion potassium à quatre niveaux de ce ganglion (en bas) : e, épinèvre ou couche protectrice; c, cortex riche en cellules nerveuses; m, couche de substances mucopolysaccharidiques; n, neuropile ou région médullaire comportant essentiellement des fibres nerveuses.*

	Na^+	K^+	Ca^{++}	Mg^{++}	Cl^-	SO_4^{--}
Eau de mer	100	2,2	2,3	12	120	7,2
Homme	—	3,5	1,7	0,83	71	1,7
Grenouille	—	2,4	1,9	1,2	72	
Baudroie (lotte)	—	2,8	1	1,6	72	
Coléoptère	—	11	0,93	17	34	0,13
Langouste	—	1,9	2,3	1	110	2,2
Praire	—	1,7	2,2	5,7	120	5,9
Holothurie	—	2,3	2,2	12	120	7,2

▶ *Tableau de la concentration des ions chez les êtres vivants; ces valeurs arbitraires sont calculées à partir de la concentration en sodium (100).*

Équilibres de concentration et balance ionique cellulaire

Lors de l'apparition de la vie, les premières « cellules » se sont constituées au sein de l'élément liquide; elles ne disposaient que de l'eau, des sels minéraux et des gaz venus de l'atmosphère; pour effectuer leurs synthèses, la seule source d'énergie était celle de la lumière solaire. Il s'agissait, bien sûr, d'êtres *autotrophes,* capables de trouver leur subsistance grâce à la photosynthèse. Leur structure devait être aussi simple que leurs moyens; si l'on étudie la constitution d'une Bactérie verte ou pourpre, ou bien encore d'une Cyanophycée, on y trouve un hyaloplasme entouré par une membrane plus ou moins épaisse et plus ou moins structurée; c'est au sein du hyaloplasme que se trouvent réparties les molécules dont dépend la vie. C'est donc cette *membrane plasmique* qui a permis l'*absorption* et, petit à petit, la *sélection* des éléments minéraux entrant dans la cellule. Sélection, car si l'analyse révèle que les éléments minéraux de la cellule sont les mêmes que ceux de la mer, il ne s'agit là que d'une approximation. Au cours de l'évolution, d'abord végétale puis animale, lorsque l'oxygène produit par des autotrophes a permis la vie des hétérotrophes et en particulier des animaux, il s'est constitué dans la cellule toute une série de compartiments, limités par d'autres membranes qui ont permis le fonctionnement semi-autonome des organites cellulaires, noyau ou mitochondries.

L'évolution a donc impliqué une complication croissante des systèmes de *flux ioniques* au niveau de *membranes multiples;* pourtant, le mode de sélection des éléments minéraux semble avoir peu varié. Pour R. Williams, c'est « de l'apport contrôlé de divers matériaux chimiques dans la cellule que découle cette évolution »; ces matériaux sont d'abord les minéraux.

Notion d'échange transmembranaire : principes

La concentration des éléments minéraux dans la cellule et dans ses constituants dépend de nombreux facteurs.

Mouvements passifs des molécules dissoutes : la diffusion

1° *Principes.*

Voici un exemple de *diffusion libre* au sein d'un solvant contenu dans un volume non compartimenté. Lorsqu'on verse dans un verre d'eau quelques gouttes de sirop de grenadine ou de menthe (soluté), on observe une diffusion lente des gouttes roses ou vertes. Il y a diffusion du soluté dans le solvant; en même temps, l'eau diffuse dans les gouttes en les diluant. En d'autres termes, soluté et solvant tendent chacun à occuper tout le volume qui leur est offert jusqu'à l'équilibre, jusqu'au stade où l'eau est uniformément colorée. Les éléments minéraux, à l'état de molécules ou à l'état d'ions, diffusent ainsi; le phénomène dépend du degré d'agitation thermique des particules dissoutes : celles-ci sont constamment en mouvement et ce mouvement constant est accéléré quand la température augmente. La diffusion se fait dans toutes les directions.

Voyons maintenant les cas de *diffusion à travers une paroi ou une membrane.* Imaginons un récipient plein d'eau et séparé en deux compartiments A et B par une paroi poreuse idéale, perméable à l'eau et aux particules dissoutes; dans un temps donné, il passe autant de molécules d'eau de A vers B que de B vers A (sinon, le niveau ne serait pas le même dans les deux compartiments). Ces compartiments sont en équilibre dynamique quand il y a deux flux de diffusion égaux et de sens opposé. Si l'on place deux liquides différents dans A et dans B ou deux solutions différentes dans ces compartiments remplis d'eau, la diffusion des deux liquides ou des deux solutés se fera à travers la paroi. Un équilibre qui sera également dynamique se trouvera constitué quand A et B contiendront le même nombre de molécules de chacun des deux liquides ou des deux solutés (non ionisés).

L'exemple du sirop de menthe nous a montré que la diffusion au sein d'un liquide est un phénomène apparemment lent. Il en est de même pour la diffusion d'éléments minéraux. Mais il faut signaler ce qui se passe réellement à l'échelle moléculaire.

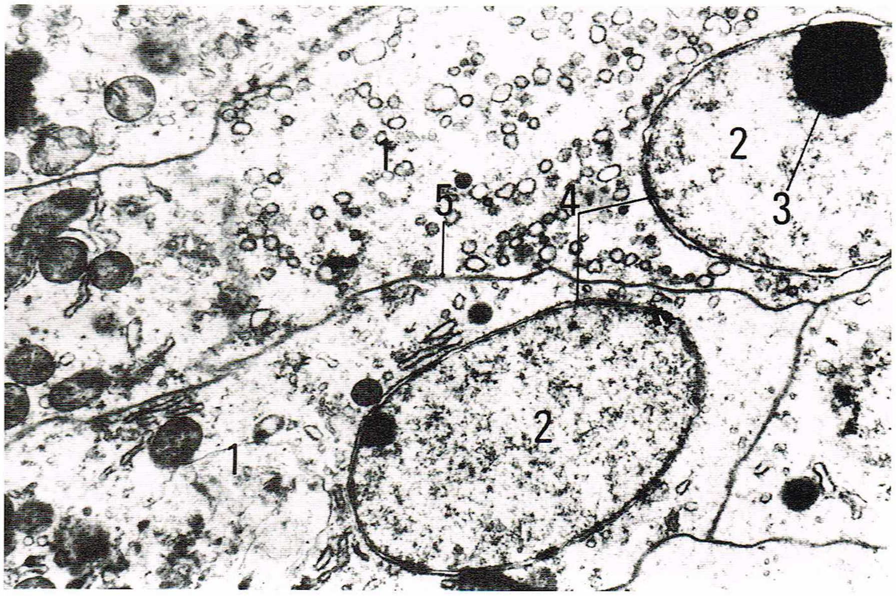

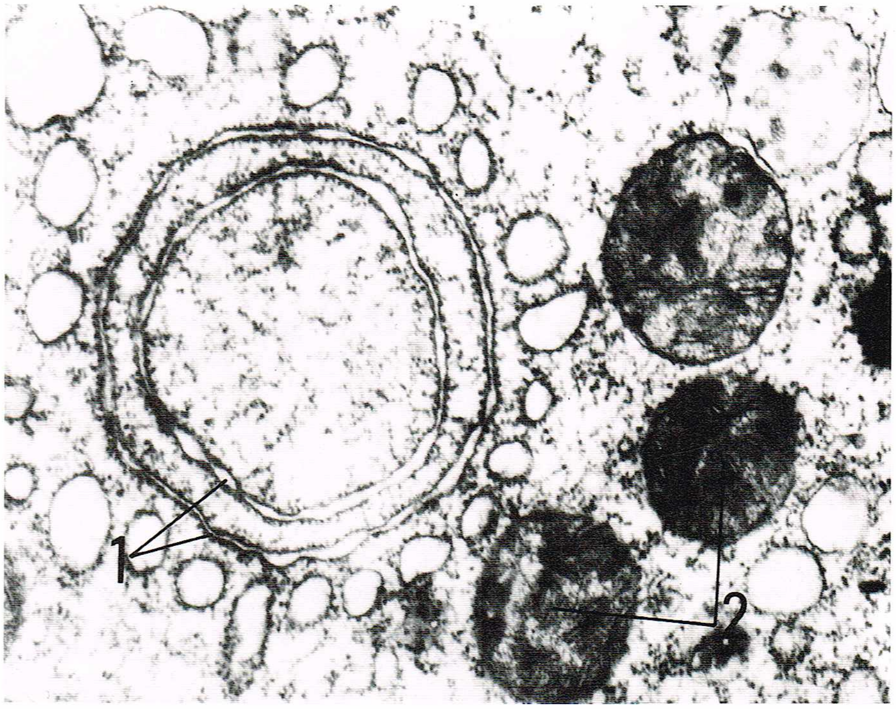

On imagine mal quelle peut être la vitesse d'une molécule : sa vitesse de diffusion est extraordinairement faible par rapport à sa vitesse réelle; la diffusion que l'on observe n'est en fait qu'un mouvement résultant, perceptible à notre échelle et qui s'effectue selon un axe préférentiel.

En réalité, les mouvements moléculaires se font avec changement constant de direction (par exemple, le mouvement brownien de particules visibles au microscope); ces mouvements sont extrêmement vifs; la vitesse réelle peut être calculée simplement.

Au niveau d'une paroi poreuse, on peut calculer l'importance de la diffusion en utilisant la *loi fondamentale de Fick :*

$$dm = S \cdot \frac{dc}{dx} \cdot dt \cdot D$$

(dm = quantité de substance diffusible qui traverse la paroi en 1 seconde; S = surface de cette paroi; dc = différence de concentration [ou d'activité] entre deux points situés à une distance dx l'un de l'autre, mesurée perpendiculairement à la paroi; dt = durée de l'expérience; D = constante de diffusion, valeur particulière à chaque substance pouvant diffuser, à température constante). On peut formuler ainsi la loi de Fick dans le domaine

▲ ***Les cellules possèdent des systèmes membranaires variés (observés ici au microscope électronique). En haut, cellules d'estomac d'ascidie : 1, cytoplasme; 2, noyau; 3, nucléole; 4, membrane nucléaire; 5, membrane cellulaire. En bas, détail du cytoplasme d'une cellule sexuelle femelle d'ascidie en croissance : 1, système membranaire formateur de vésicules; 2, mitochondries.***

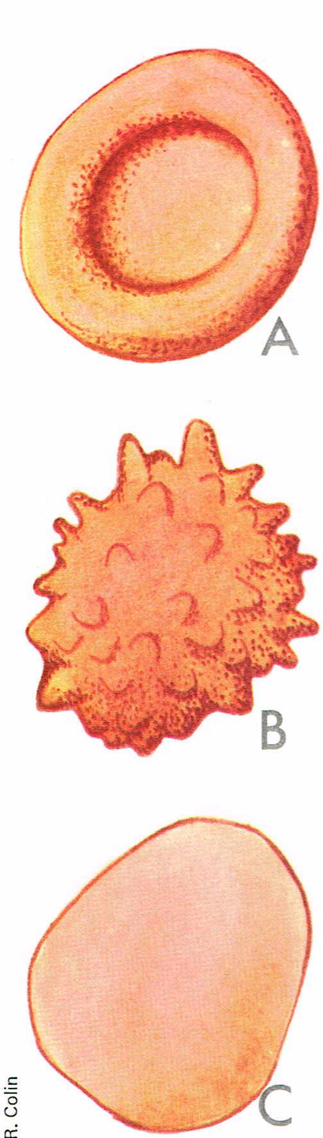

R. Colin

▲ ***Selon la concentration saline de la solution où elles se trouvent, les hématies présentent des aspects différents : aspect en milieu isotonique (A), en milieu hypertonique (B) en milieu hypotonique (C); dans ce dernier cas, il y a hémolyse; dans l'eau distillée, cette hémolyse provoque l'élimination presque totale de l'hémoglobine; les globules sont alors appelés « stromas » ou « ghosts ».***

cellulaire : la vitesse d'absorption d'une substance par la cellule est proportionnelle au *gradient de concentration* $\frac{dc}{dx}$.

En biologie, la diffusion au niveau des membranes constitue un *flux* exprimé en µmoles par cm^2 de membrane et par seconde : $F = D \cdot \frac{dc}{dx}$. Comme une partie de la substance peut être liée à des éléments de la solution qui bloquent la diffusion, le gradient $\frac{dc}{dx}$ concerne uniquement la substance libre. On définit un *coefficient d'activité* ou de *liberté* γ : $F = D \cdot \gamma \frac{dc}{dx}$. On a là une valeur négative, puisque la migration de la substance en solution se fait contre le gradient de concentration (Benoit).

Au niveau cellulaire, le *flux mesurable* pour une substance donnée *y* représente la résultante de deux flux unidirectionnels opposés qui existent au niveau de la membrane; cette résultante constitue le flux net. On peut déterminer les flux unidirectionnels; ainsi, on introduit dans le milieu extracellulaire une quantité connue de la substance rendue radioactive et l'on estime ensuite la vitesse de diffusion transmembranaire en la dosant dans la cellule après une durée déterminée; cela permet de trouver la valeur du flux entrant. La connaissance des flux est d'une extrême importance, en particulier pour la compréhension de l'activité nerveuse.

2° *Le flux osmotique : un exemple important « d'anomalie » de diffusion.*

Voyons d'abord le cas des globules rouges. Dans un premier temps, il faut préparer des solutions aqueuses de concentration croissante de chlorure de sodium, que l'on répartit dans une série de tubes de verre, ou dont on dépose quelques gouttes sur des lames. En ajoutant une petite quantité de sang frais aux différentes solutions, il est possible, après quelques instants, d'observer un certain nombre de phénomènes : dans les tubes, la coloration du mélange varie sensiblement; au microscope, on voit que les globules rouges, ou *hématies,* peuvent être approximativement classés en trois types suivant la concentration de la solution saline :

— pour une concentration de 8-9 °/₀₀, les hématies sont de forme normale;

— au-dessous de 7 °/₀₀, elles ont un aspect distendu; décolorées, elles paraissent sphériques dans l'eau pure;

— au-dessus de 10 °/₀₀, les hématies ont des contours crénelés; leur diamètre est réduit, et on a l'impression qu'elles sont contractées.

On peut, logiquement, en tirer les conclusions suivantes : si certaines concentrations de sel ne modifient pas l'état des globules — *solutions isotoniques* — les solutions concentrées — *hypertoniques* — provoquent un flux d'eau qui sort des hématies, alors que les solutions peu salées — *hypotoniques* — provoquent un flux d'eau qui passe du milieu extérieur dans les hématies; dans ce dernier cas, les membranes sont distendues par la pression, qui paraît être forte dans la cellule (hémolyse). *Tout se passe comme si la membrane cellulaire n'était pas perméable au sel mais très perméable à l'eau :* un flux d'eau plus ou moins intense se dirige du compartiment le moins concentré au compartiment le plus concentré. Ce flux d'eau, qui dépend du déséquilibre introduit dans la concentration saline du milieu contenant les hématies, est appelé *flux osmotique*.

Prenons maintenant un exemple végétal (d'ailleurs, les premiers travaux sur l'osmose furent effectués par un botaniste, Pfeffer : il employait les racines de diverses plantes, dont *Tradescantia discolor* [misères] et *Begonia manicata*) : les cellules de l'épiderme du bégonia rouge contiennent une vacuole volumineuse et vivement colorée, qui devient rose en milieu hypotonique; cette coloration est donc un indicateur qui permet de percevoir l'existence de flux osmotiques. Les vacuoles cytoplasmiques des cellules trempées dans l'eau deviennent roses et, en même temps, elles gonflent puisque l'eau traverse les membranes et envahit les cellules; l'eau traverse la membrane plasmique, comme attirée par les substances dissoutes dans chaque vacuole; cette membrane est dite *hémiperméable* puisqu'elle ne laisse passer que l'eau (du moins de façon évidente). La dilatation de la cellule n'est limitée que par la présence du squelette externe cellulosique; cette cellule gonflée d'eau est dite *turgescente.* Évidemment, si le fragment d'épiderme, au lieu d'être monté dans l'eau pure, est monté dans une solution contenant, par exemple, du sirop de menthe, solution plus concentrée que le liquide des vacuoles, l'eau va sortir de ces dernières, « aspirée » par le sirop, et les vacuoles vont devenir rouge très foncé, tandis que la menthe verte ne pénétrera nullement; ces vacuoles diminueront de volume en entraînant le cytoplasme, qui va se décoller de la paroi squelettique : il y aura phénomène de *plasmolyse*.

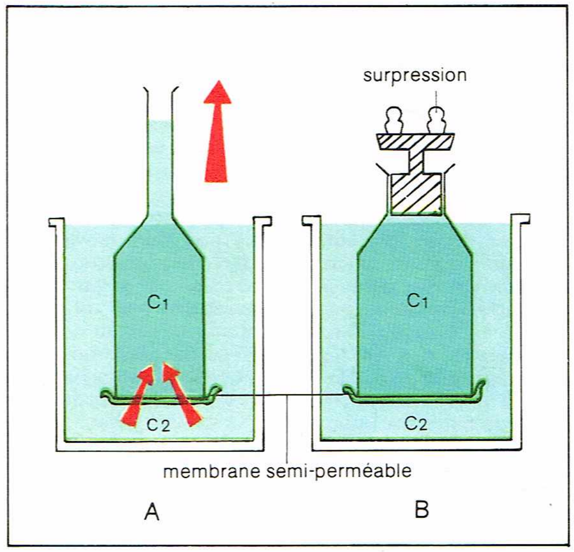

R. Colin

▶▲ ***Principe de l'osmomètre : en A, l'eau passe à travers la membrane semi-perméable, de la solution la moins concentrée (C_2) à la solution la plus concentrée (C_1); en B, la surpression empêche le passage de l'eau.***

Les flux observés dans les deux types de manipulations que nous venons de décrire, doivent impliquer l'existence d'une *différence de pression* entre le milieu extérieur et le milieu intracellulaire. La *pression osmotique* d'une solution par rapport à une autre peut être déterminée en appliquant la loi de Van't Hoff qui se résume par cette formule :

$$\text{Posm} = \pi = RT\,(C_1 - C_2)$$

(C_1 = concentration de la solution étudiée;
C_2 = concentration du compartiment extérieur)

Elle est donc fonction de la température T ainsi que de la différence de concentration du soluté dans chaque compartiment. Remarquons que si $C_2 = 0$, c'est-à-dire si le milieu extérieur est de l'eau pure, la pression dans le compartiment intérieur est : $\text{Posm} = RTC_1$; cela peut être rapproché de l'équation de Boyle et Gay-Lussac établie pour les gaz : $PV = nRT$ (où V est le volume et P la pression exercée par *n* molécules de gaz à la température T); en effet, $C = \frac{n}{V}$; donc, π ou $\text{Posm} = RT\frac{n}{V}$, d'où $\text{Posm} \cdot V = nRT$ on peut par conséquent dire que la pression osmotique d'une solution a la même valeur que la pression que devrait exercer la substance dissoute si elle se trouvait sous forme de gaz et occupait le volume correspondant; elle est d'autant plus forte que le soluté est plus concentré.

L'*osmomètre* de Dutrochet permet de mesurer cette pression osmotique. Il faut d'abord choisir une membrane; il en existe dans l'industrie, qui sont faites à partir de cellulose et de plastiques synthétiques; mais il en est d'autres, nettement semi-perméables : collodion, cellulose, membranes naturelles; par membrane naturelle on entend ici la vessie de porc, par exemple, ou la peau d'un Amphibien (grenouille ou crapaud); une telle membrane semi-perméable ne serait pas sensiblement différente de la membrane plasmique (selon Solomon et coll.); un autre procédé consiste à fabriquer une membrane en précipitant du ferrocyanure de cuivre dans les pores d'une paroi inerte.

L'osmomètre est monté comme l'indique la figure. En quelques minutes le volume de la solution augmente, et le niveau monte dans le tube; il monte d'autant plus que la pression osmotique est plus forte. Cependant, comme l'eau venant de l'extérieur dilue progressivement la solution, il est bien évident que la pression mesurable est nettement inférieure à ce que l'on pouvait attendre. On pallie cet inconvénient en plaçant un piston dans la

tubulure et en empêchant la montée du liquide; la pression que l'on doit exercer sur ce piston pour que le volume de la solution ne varie pas correspond à la pression osmotique. Durant l'osmose, la *migration du solvant* s'explique très simplement. Dans les deux compartiments, les concentrations de soluté sont C_1 et C_2, avec $C_1 > C_2$. Comme le soluté ne traverse pas la paroi, c'est l'eau qui la traverse, *tendant ainsi à égaliser les concentrations;* ce passage de l'eau peut être empêché en exerçant une surpression sur la solution C_1.

En utilisant le matériel végétal dont il a été question plus haut, il est possible d'avoir une mesure exacte de la pression osmotique au sein d'une vacuole. Il suffit de faire des montages dans une série de solutions de concentration connue. En laboratoire, on constitue une série de bains de concentration croissante en une substance donnée (sel ou sucre) et, par conséquent, de pression osmotique connue; on y met une série de coupes d'un tissu à étudier. Pour chaque bain on compte la proportion des cellules plasmolysées. A 50 % de cellules plasmolysées, on estime être à la phase de plasmolyse commençante, c'est-à-dire à la phase où le suc vacuolaire a une pression osmotique légèrement plus faible que celle du bain correspondant.

La pression osmotique d'une solution dépend du nombre de particules dissoutes; or, 1 molécule d'électrolyte fort donne 2 fois plus de particules qu'1 molécule non électrolyte.

De même que l'on parle de molarité, on parle d'*osmolarité :* 1 mole de glucose correspond à une pression de 1 *osmole,* mais une mole de chlorure de sodium correspond à 2 *osmoles*. Cette notion est très utile pour la préparation de milieux artificiels et de solutions-tampons. Remarquons que le calcul de l'osmolarité n'est pas toujours simple, car les électrolytes sont généralement incomplètement dissociés.

Notons enfin que le suc vacuolaire est enfermé dans une enceinte close et, lorsque l'eau entre, la vacuole gonfle jusqu'à buter contre les parois; le suc vacuolaire est alors comprimé et subit une contrainte, dite *pression de turgescence,* telle que si l'on perfore une paroi cellulaire, une gouttelette de liquide va immédiatement perler; il est évident que l'eau qui « veut » pénétrer dans la vacuole doit lutter contre cette pression interne.

Dans la nature, il n'existe pas de membranes totalement semi-perméables; en effet, ainsi que l'eau, certains éléments minéraux traversent ces parois; d'autre part, on estime que celles-ci sont pourvues de *pores,* plus ou moins larges, distincts des espaces intermoléculaires

Concentration moléculaire	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	2,0
Saccharose (sucre)	2,64	5,29	8,13	11,1	14,3	17,8	21,5	25,5	29,7	34,6	116,6
ou *Chlorure de sodium (sel)*	4,3	8,4	12,5	16,6	21,0	25,7	29,7	34,2	38,6	43,3	96,4

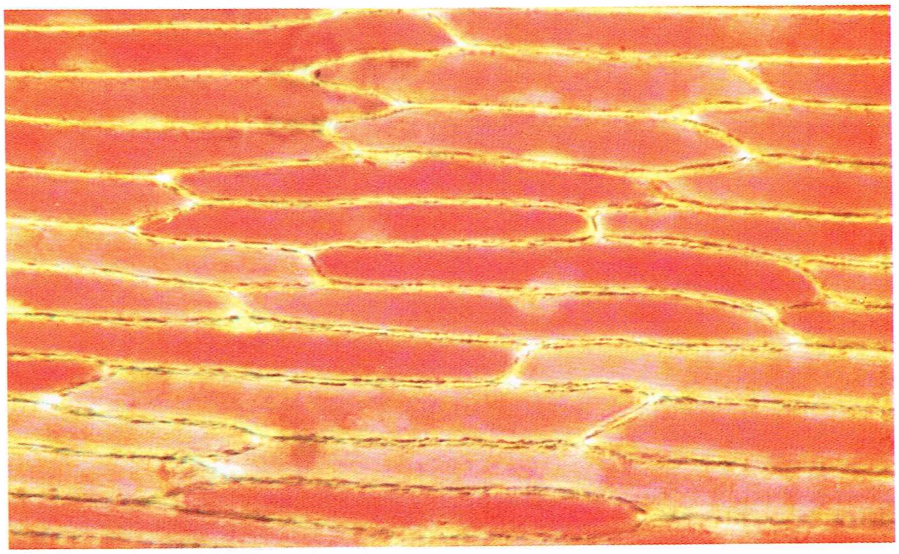

Nuridsany - Reichert

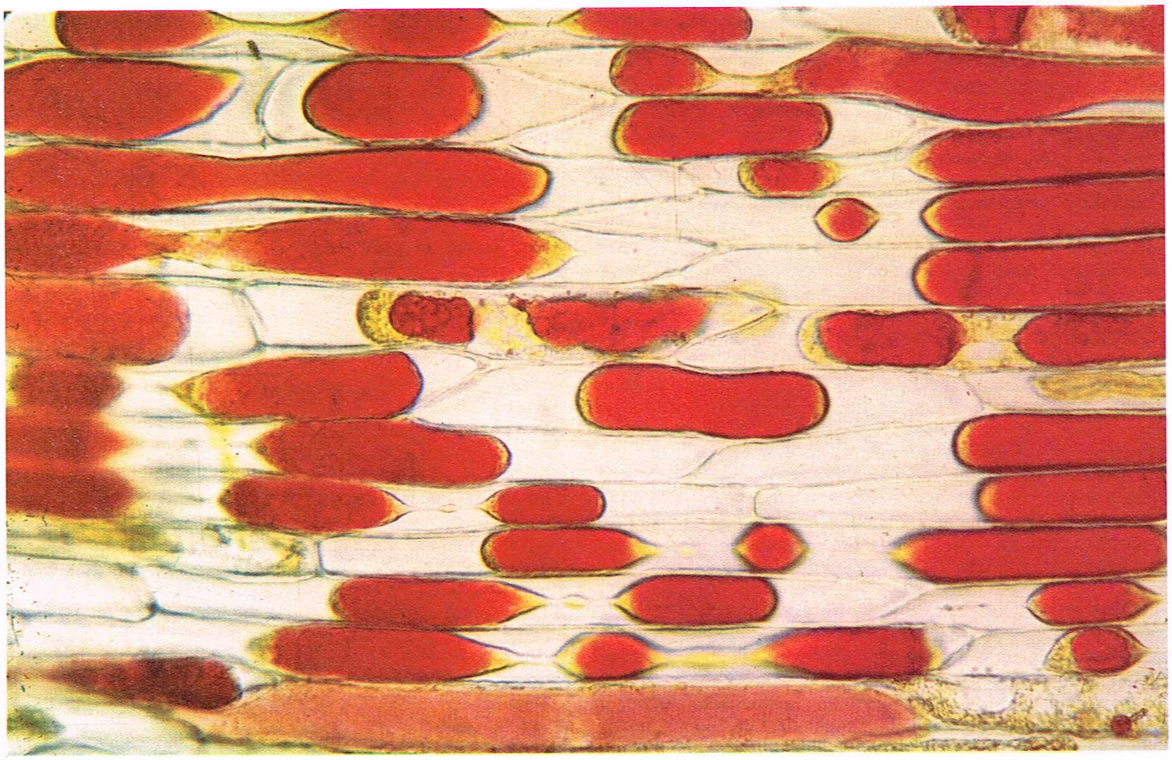

Nuridsany - Reichert

◀▲ En haut, tableau de la pression osmotique de solutions de saccharose et de chlorure de sodium; mesures réalisées à 20 °C et exprimées en atmosphères (d'après Bennet-Clark). En bas, cellules de l'épiderme de pétale de tulipe en état de turgescence. A gauche, ces mêmes cellules plongées dans une solution hypertonique de chlorure de sodium perdent de l'eau et leurs vacuoles se contractent, ces cellules sont en état de plasmolyse.

normaux qui seraient caractéristiques de véritables membranes semi-perméables. Donc, en plus du flux net de l'eau, on a un flux net de Na^+ ou de Cl^- par exemple; par ailleurs, une partie de l'eau et des molécules entrant dans la cellule passerait par des pores assez larges qui permettraient un *écoulement massif* du solvant, phénomène dit de *convection,* ou « drag effect ».

La polarisation électrique des membranes biologiques : mise en évidence d'un transport actif des ions

1° *Existence d'un « potentiel membranaire » lié à un flux passif des ions.*

Il existe toujours une *différence de potentiel* (ddp) entre les deux faces d'une membrane biologique; elle est en rapport direct avec une *inégalité des concentrations ioniques* entre la cellule et son milieu.

Pour un *modèle non biologique,* on démontre qu'une ddp membranaire Em existe et qu'elle dépend du potentiel électrochimique du système $\Delta\mu$. Dans des conditions expérimentales bien définies, $\Delta\mu$ est lié à Em et aux *concentrations ioniques* par l'équation suivante :

$$\Delta\mu = Ka \cdot Em + Kb \cdot \log \frac{C_1}{C_2}.$$

Un *équilibre* est atteint quand il n'y a *pas de flux net* d'électrolyte, c'est-à-dire quand $\Delta\mu = 0$. L'équation devient alors $Em = \frac{Kb}{Ka} \cdot \log \frac{C_2}{C_1}$ ou $Em = K \cdot \log \frac{C_2}{C_1}$; c'est la formule fondamentale de Nernst; la constante K varie suivant les conditions de température et la charge de l'ion étudié. Si $C_2 > C_1$, on l'applique telle quelle dans le cas d'un cation; par contre, il faut intervertir C_1 et C_2 s'il s'agit d'un anion. *A l'équilibre,* l'inégalité des concentrations est contrebalancée par l'existence de la différence de potentiel membranaire Em. On se sert de cette équation pour les systèmes membranaires biologiques *à l'équilibre* ou *au repos.*

Lorsque la concentration d'un ion donné est modifiée dans le milieu extérieur, le potentiel mesuré de chaque côté de la membrane biologique varie souvent de façon considérable. Cela implique l'existence, au moins momentanée, d'un *flux net* entre les compartiments; en d'autres termes, l'équilibre dynamique du flux entrant et du flux sortant est temporairement perturbé. La formule de Nernst ne s'applique plus à ce moment; le rapport des deux flux unidirectionnels varie en fonction du potentiel électrochimique (Téorell). Signalons que Goldmann a établi une formule dérivée de celle de Nernst et qui s'appliquerait de manière générale.

Les principes des mesures sont les suivants :

— *Concentrations extra- et intracellulaires.*

Pour déterminer ces concentrations, il faut calculer au préalable le volume total (Vt) du fragment d'organe étudié, puis les volumes extra- et intracellulaires (Ve et Vi) ; l'inuline, glucide végétal qui peut envahir les espaces extracellulaires sans pénétrer dans les cellules, permet d'y parvenir : on mesure d'abord la quantité d'inuline I absorbée par le tissu ; Ve = I/concentration extracellulaire de I (connue) ; on obtient ainsi le volume total des cellules, puisque Vi = Vt — Ve. Un calcul simple permet ensuite de déterminer la concentration intracellulaire d'un élément minéral quelconque lorsqu'on connaît sa concentration extracellulaire.

— *Mesure des flux ioniques par la méthode des isotopes.*

Dans la cellule, au repos ou non, la vitesse de pénétration d'un ion radioactif peut être mesurée avec une certaine exactitude. On utilise un système de « comptage à scintillation » : les rayonnements ionisants émis par les isotopes provoquent la *luminescence* de certaines substances lorsqu'ils les frappent; cette luminescence est mesurée grâce à un photomultiplicateur qui estime l'intensité de scintillation. Les dosages sont effectués sur des homogénats cellulaires.

Rappelons que la plupart des éléments ont plusieurs isotopes dont les propriétés chimiques sont voisines. Leur masse atomique est augmentée par adjonction de neutrons, ainsi que leur charge électrique lorsqu'ils sont ionisés, mais pas leur nombre de charge. En général, ce sont les isotopes instables ou radioactifs qui sont utilisés comme *traceurs* biologiques. Le type de rayonnement varie avec la nature de l'élément. Certains d'entre eux peuvent être dangereux pour l'expérimentateur (c'est le cas de l'iode). On utilise beaucoup le tritium, ^3H, dont le rayonnement est très peu pénétrant. Les doses que l'on emploie sont toujours faibles, de l'ordre de quelques millicuries : 1 curie correspond à $3,7 \times 10^{10}$ désintégrations/seconde (c'est ce qui se produit dans 1 g de radium).

— *Mesure de la différence de potentiel transmembranaire au niveau cellulaire.*

Il faut introduire une micro-électrode dans une cellule; l'électrode extracellulaire est baignée par le liquide interstitiel. La fabrication d'une *ultramicro-électrode* est assez délicate : l'extrémité doit avoir un diamètre inférieur à 1 μ; sinon, la pénétration dans la cellule provoque une lésion. A l'aide d'une microforge, on étire un tube de verre capillaire, puis on le casse. L'électrode, que l'on monte sur un micromanipulateur du type de Fonbrune, est remplie d'une solution concentrée de KCl, qui sert de conducteur. Étant donné que la pointe de verre de cette électrode n'est pas visible au microscope, on sait qu'elle est en place quand on enregistre entre les électrodes une ddp convenable. Le système enregistreur comporte, bien sûr, un amplificateur lié au voltmètre (sondes à charge cathodique, à tube thermo-ionique, ou à transistor à effet de champ [Benoit]).

2° *Le transport actif des ions.*

Voici des résultats qui servent de base pour l'étude des équilibres ioniques de la cellule vivante.

— Le milieu extracellulaire est électropositif.

— Le potentiel membranaire de la cellule au repos se situe aux environs de — 80 mv et dépend du matériel biologique étudié (la valeur négative est une convention).

— Les *mesures de concentration* des différents ions (voir le tableau) permettent de déterminer, grâce à l'équation de Nernst, la différence de *potentiel d'équilibre théorique* pour tel ou tel ion. Or, cette ddp est généralement différente de la *valeur mesurée.* Dans le cas de la cellule musculaire « striée » de Mammifère, dont le potentiel mesuré est de — 90 mv, seul l'ion chlore donne une valeur théorique identique; on obtient — 95 mv pour K^+ et + 65 mv pour Na^+.

— Inversement, pour une valeur mesurée de — 90 mv, on devrait avoir un rapport de concentrations égal à 31,6. C'est le cas pour le chlore, mais pas pour les autres ions.

— On peut en conclure que, sauf dans le cas du chlore, il n'y a pas d'équilibre électrochimique entre la cellule et son milieu. Il existe, pour la plupart des ions, un *flux net diffusionnel,* flux passif et qui dépend du déséquilibre électrochimique : Na^+ tend à entrer dans la cellule, et K^+ tend à sortir. Pourtant, *la cellule est capable de maintenir constantes ses concentrations ioniques :* K^+ est 38 fois plus abondant à l'intérieur de la cellule que dans le milieu, et c'est l'inverse pour Na^+.

— Plusieurs théories avaient été formulées pour tenter d'expliquer de quelle façon cela pouvait s'établir (Bernstein, 1908; Boyle et Conway, 1945).

Pour compenser ces flux nets la cellule effectue un *travail* qui lui permet de récupérer le potassium perdu et de rejeter le sodium en excès. On parle, dans ces cas, d'un *transport actif* des ions à travers la membrane (il n'y a pas de transport actif dans le cas du chlore).

— Il existe un rapport étroit entre les mouvements de K^+ et de Na^+ : des cellules maintenues en survie dans un milieu pauvre en K^+ absorbent en « remplacement » les ions Na^+. L'utilisation d'un milieu extérieur où le sodium est marqué permet de mettre en évidence une intense pénétration dans la cellule, combinée à un rejet rapide. On utilise le terme de *pompe à sodium* lorsqu'on évoque le transport actif des ions; cette pompe implique un *couplage des flux de sodium et de potassium.* Si l'on supprime K^+ du milieu extérieur, il y a diminution du transport actif de Na^+ vers l'extérieur, comme on peut le constater en marquant initialement la fibre nerveuse du calmar avec du radiosodium. On a *couplage* entre le flux entrant de K^+ et le flux sortant de Na^+ (Hodgkin et Keynes); si, par divers moyens, on inhibe la sortie de sodium, on inhibe du même coup l'entrée de potassium.

Le mécanisme du transport actif a pu être partiellement compris grâce à divers résultats, parmi lesquels nous citerons essentiellement ceux de Schoffeniels obtenus avec la peau de grenouille et par la méthode d'analyse des flux.

▶ *Page ci-contre, à gauche, en bas : représentation schématique du mouvement du potassium et du sodium à travers la membrane cellulaire; ce phénomène est connu sous le nom de « pompe à sodium ».*

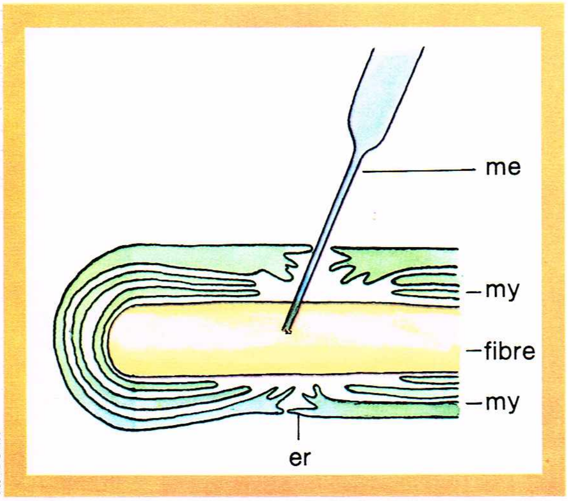

R. Colin

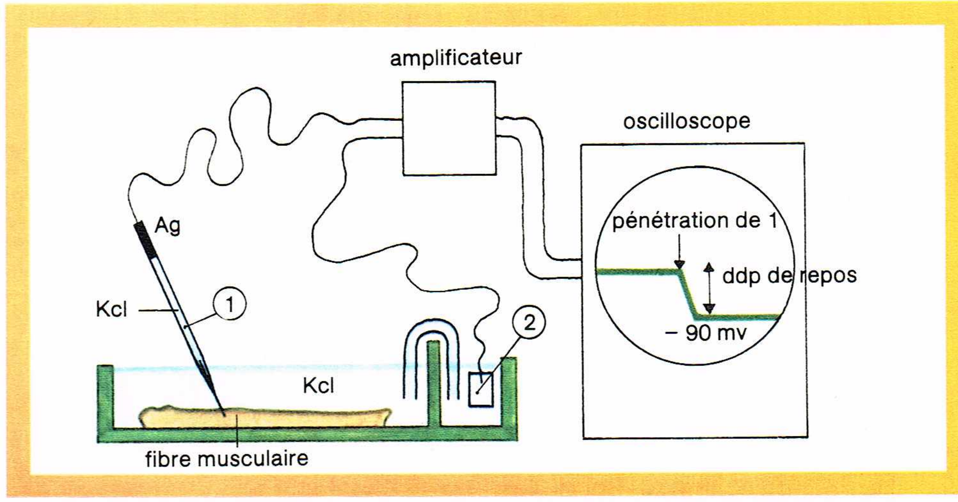

R. Colin

Dans une première série d'expériences, Schoffeniels a constaté que le transport actif de radiosodium est très important.

Dans une seconde expérience, il a procédé de la même manière, en bloquant les processus de dégradation des aliments cellulaires grâce à l'emploi du 2,4 *dinitrophénol* (DNP). Les effets se font sentir en quelques minutes : l'inhibition du métabolisme général bloque fortement les flux de Na^+ et inverse le potentiel mesuré. Dans

▲◄ ***A gauche, mise en place d'une micro-électrode (me) au niveau d'un étranglement de Ranvier (er) d'une fibre nerveuse entourée d'une gaine de myéline (my).***
A droite, mode de détermination du potentiel de repos d'une fibre musculaire : 1, micro-électrode remplie de KCl ; 2, électrode d'argent.

▼ ***En haut, étude du passage des ions K^+ et Na^+, au niveau d'une synapse ; les molécules de médiateur chimique (en noir) ouvrent les canalicules de la membrane cellulaire, permettant ainsi le flux des ions potassium et sodium.***

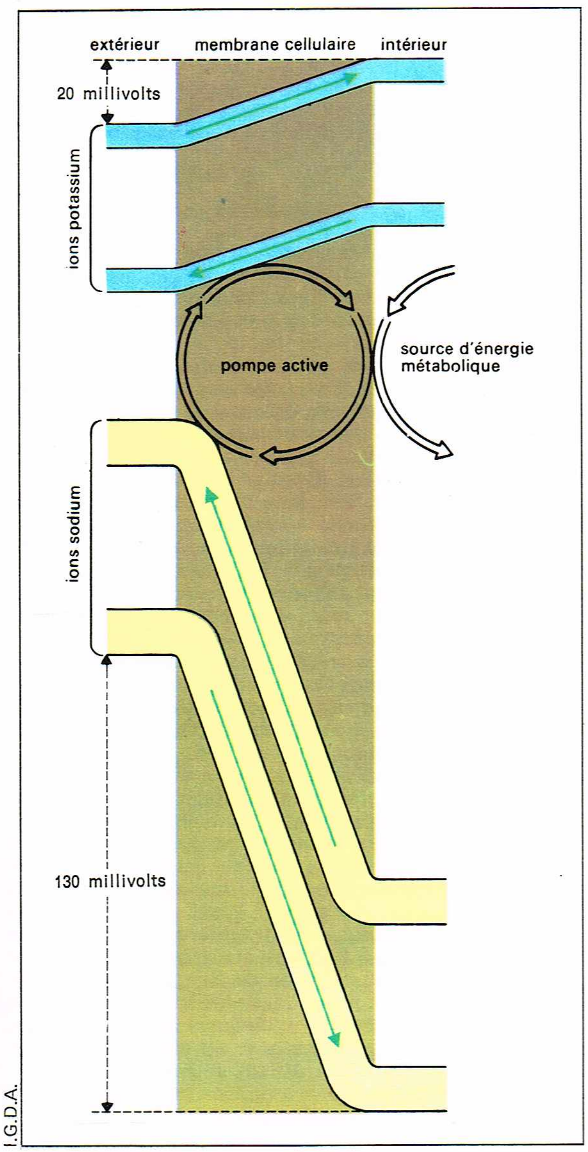

I.G.D.A.

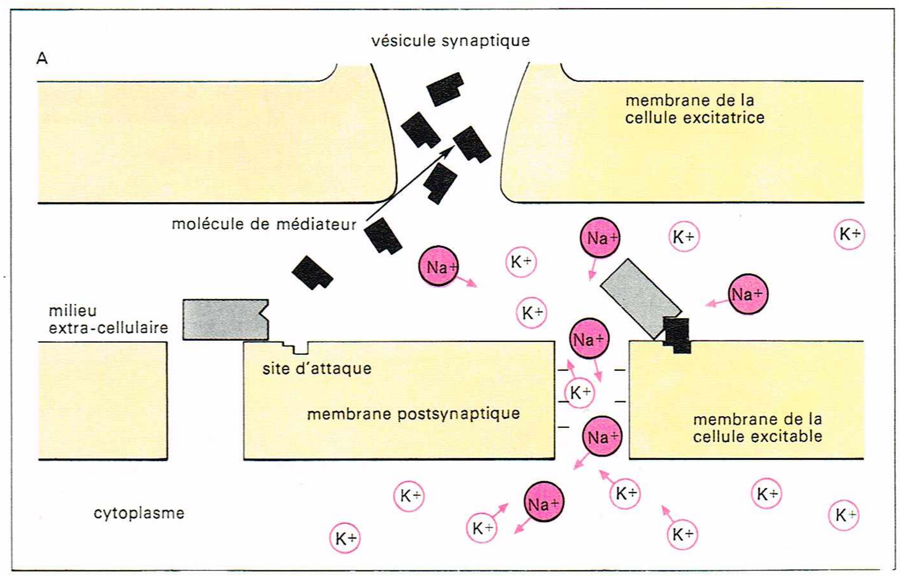

I.G.D.A.

Concentration de quelques ions biologiquement importants (d'après Ruch et Fulton, modifié)

	mEq/l Liquide extra-cellulaire	mEq/l Liquide intra-cellulaire (muscle)	Rapport (ion) ext. / (ion) int.	Potentiel d'équilibre en m v
Sodium	145	12	12,1	65
Potassium	4	155	1/39	— 95
Hydrogène	$3{,}8.10^{-5}$	10.10^{-5}	1/3,4	— 32
Chlore	120	3,8	31,6	— 90
Bicarbonate	27	8	3,4	— 32

ces cas, le rapport des flux est proche des valeurs calculées; le système membranaire est donc inerte, et les flux sont purement passifs. Dans le cas de la peau normale, les ions Na^+ sont transportés activement à travers « la membrane » et *l'énergie nécessaire vient du métabolisme cellulaire.*

Hodgkin et Keynes ont constaté, d'autre part, qu'un abaissement de température provoque déjà une *réduction* du transport actif pour la fibre nerveuse de la seiche; par contre, le transport actif est *amélioré* par une intense oxygénation du milieu qui active le métabolisme et donc la synthèse de produits phosphorés, riches en énergie.

▼ ***Résultat de l'expérience de Schoffeniels; le compartiment externe contenait 11,5 μ Eq./ml de sodium, et le compartiment interne 115 μ Eq./ml; noter l'importante variabilité individuelle : c'est un fait commun en biologie.***

Expérience de Schoffeniels (résultats simplifiés)

	Flux entrant	Flux sortant	ddp entre les 2 faces en mv	Rapport des flux mesuré	Rapport des flux calculé	
Valeurs obtenues avec la peau normale	0,34 0,44 0,23	0,09 0,14 < 0,01	62 82 72	3,66 3,07 28,5	0,01 0,02 0,02	➡ Transport actif important
Valeurs obtenues avec la peau + 2,4 DNP	0,25 0,05 0,03	1,57 0,56 0,22	— 11 — 6 — 7	0,16 0,09 0,15	0,15 0,13 0,13	➡ Blocage du transport actif

R. Colin

Voici ce qui se passe dans la seconde expérience de Schoffeniels. Le DNP empêche, dans la cellule vivante, la synthèse d'ATP, molécule riche en énergie et capable de la céder facilement pour déclencher les réactions biochimiques dont dépend le travail membranaire. L'ATP, ou adénosine triphosphate, a des fonctions diverses. La formule de l'ATP peut être simplifiée de la façon suivante :

$$\text{ATP} = \text{adénine} - \text{ribose} - \overset{1}{\text{P}} - \text{O} \sim \overset{2}{\text{P}} - \text{O} \sim \overset{3}{\text{P}};$$

le symbole ~ correspond à une liaison riche en énergie (Lipmann). Cette énergie libérable vient du fait qu'il s'agit d'une molécule *conjuguée : les électrons pi,* dépendant des doubles liaisons et ne participant donc pas à l'architecture rigide de la molécule, donnent à celle-ci *une énergie de résonance* (voir Florkin et Schoffeniels).

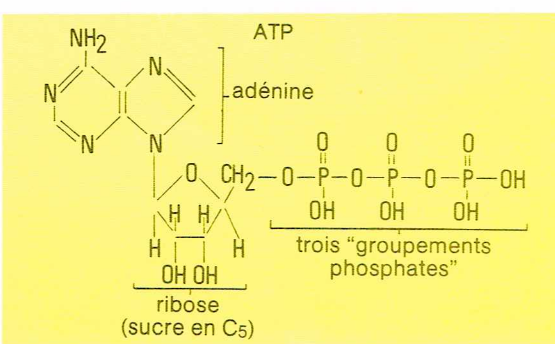

R. Colin

▼ ***Résultats graphiques d'une expérience de Caldwell et Keynes au sujet du flux de sodium sortant d'une fibre nerveuse géante de calmar. L'introduction de cyanure entraîne un blocage du transport actif de sodium; l'injection d'AMP ne produit aucune amélioration; celle d'ATP améliore temporairement l'activité membranaire.***

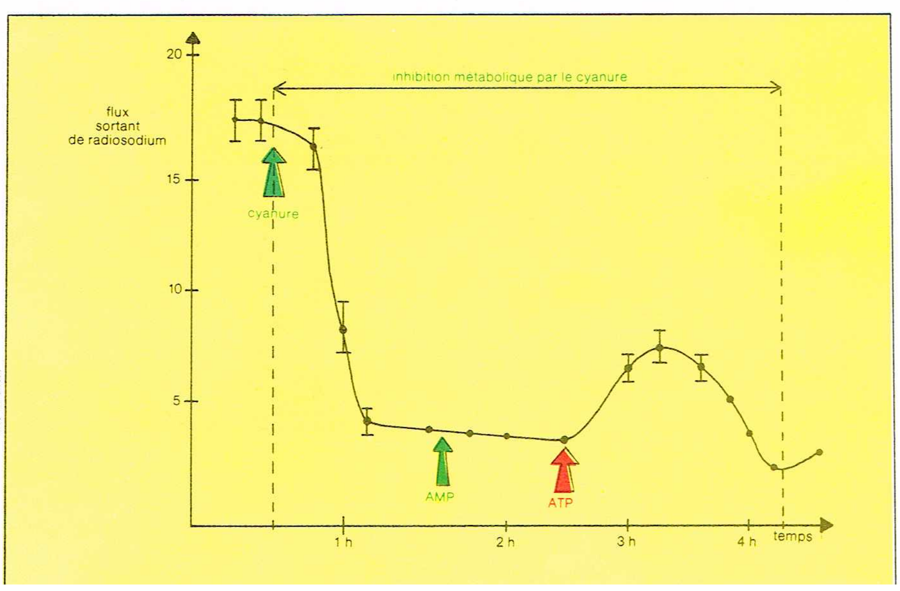

R. Colin

Deux confirmations du rôle de l'ATP dans le transport actif des ions ont été apportées, par Caldwell d'une part, Florkin et Schoffeniels d'autre part. Caldwell a inhibé d'abord le flux sortant de Na^+ dans une fibre nerveuse géante de Céphalopode; il a utilisé pour cela le cyanure, qui bloque les oxydations repiratoires et donc la synthèse de l'ATP. Il a montré que cette inhibition est levée par l'injection d'ATP dans la fibre et que l'efficacité d'une telle opération dépend directement de la quantité injectée. Florkin et Schoffeniels citent le cas des globules rouges hémolysés dans une solution très hypotonique mais à laquelle on a ajouté de l'ATP; cet ATP suffit à maintenir le transport actif de Na^+ : la membrane isolée (« ghost ») est réactivée par l'ATP; cette membrane plasmique reste donc vivante et fonctionnelle.

D'autres expériences donnent des résultats de même nature; *le couplage transport actif-métabolisme* est bien établi, mais, en fait, on ne connaît pas bien ce qui se passe au niveau de la membrane. Il est nécessaire de faire intervenir *une ou plusieurs enzymes qui catalysent la déphosphorylation de l'ATP;* en effet, comme la plupart des substances à liaisons riches en énergie, les molécules d'ATP, confrontées avec la réaction à déclencher, ici le transport actif, ne fourniraient cette énergie que très lentement, donc de manière inefficace; un catalyseur est donc nécessaire pour activer la réaction et permettre le couplage : il s'agit d'une ATPase. Une enzyme de ce type a été mise en évidence dans les membranes : elle ne peut agir qu'en présence d'un certain nombre de minéraux, ce qui montre que ces éléments jouent un rôle régulateur, au niveau enzymatique, sur leur propre concentration dans la cellule (Post et coll., et Skou, 1960). L'action de cette ATPase peut être bloquée, comme la « pompe sodium-potassium », par les substances cardiotoniques telles que la *digitaline* et l'*ouabaïne* (glucosides d'origine végétale).

Outre ces résultats, de nombreuses recherches sont en cours pour mieux connaître ce qui se passe au niveau des membranes.

Importance des éléments minéraux

Les cations les plus abondants de l'organisme

— Le *sodium,* le *potassium* et le *magnésium* sont des *stabilisateurs* de structures cellulaires : ils neutralisent les charges anioniques des grosses molécules et, en particulier, des radicaux phosphate.

— Au moins pour le potassium et le magnésium, on peut ajouter que ces ions *favorisent l'activité enzymatique :* certaines réactions, comme la combustion des sucres, la synthèse des matières grasses ou celle des protéines, réclament un optimum de concentration de ces ions dans la cellule. Ceux-ci ont un rôle régulateur.

— Une autre fonction, essentielle, concerne les ions Na^+, K^+, et Ca^{++} : il s'agit de l'*irritabilité cellulaire* et de la *conduction nerveuse.* Nous donnons ici le principe du phénomène. On sait depuis Bernstein que l'irritabilité se manifeste par une *dépolarisation* locale de la membrane de la cellule; pour une cellule nerveuse, cette dépolarisation *se propage* le long de la membrane, puis le long de la fibre nerveuse; la dépolarisation est très brutale mais enregistrable; elle correspond à l'entrée de Na^+ et à la sortie de K^+. Expérimentalement, on obtient ce résultat par une décharge électrique en un point de la cellule ou en utilisant un *médiateur chimique.* Dans les conditions naturelles, le médiateur vient d'une cellule voisine, accolée à celle que l'on étudie au niveau d'une *synapse :* il est initialement contenu dans des petites vésicules synaptiques et correspond à la *nor-adrénaline* dans le cas du système sympathique, et à l'*acétylcholine* dans le cas du système sensitivo-moteur rachidien. Ces médiateurs se fixent sur des sites actifs (protéiques) de la membrane à exciter, en provoquant un changement de configuration, qui permet l'*ouverture des points de passage ionique,* donc l'entrée de Na^+, etc. La structure de la protéine réceptrice de l'acétylcholine n'est pas encore connue, mais divers laboratoires y travaillent actuellement (Lee et Chang à Formose; Changeux, Meunier et coll. à Paris; Miledi et Potter à Londres). L'équipe de J.-P. Changeux a pu localiser les sites récepteurs grâce à l'immuno-fluorescence (1971). Ces recherches doivent permettre une interprétation généralisée

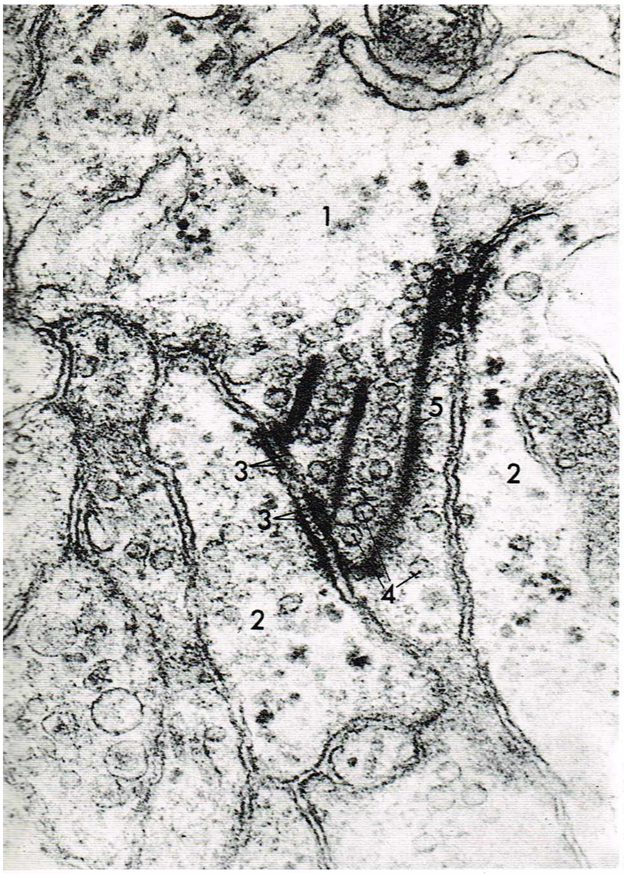

Photo G. Volle

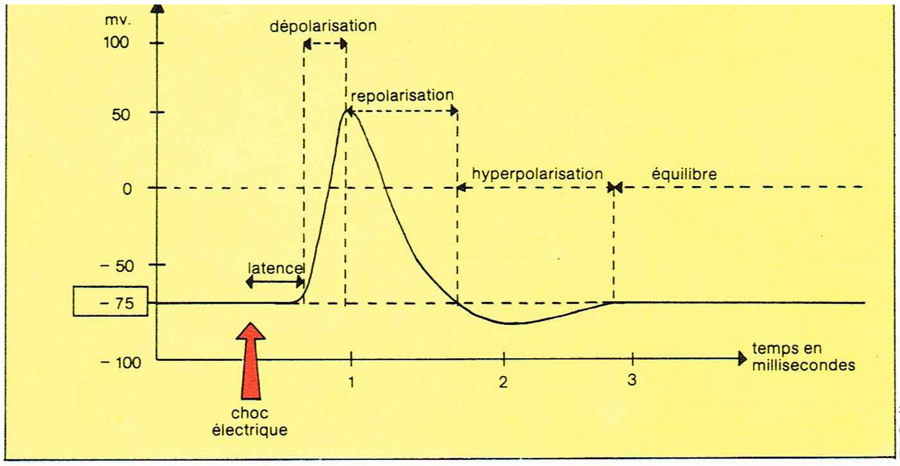

R. Colin

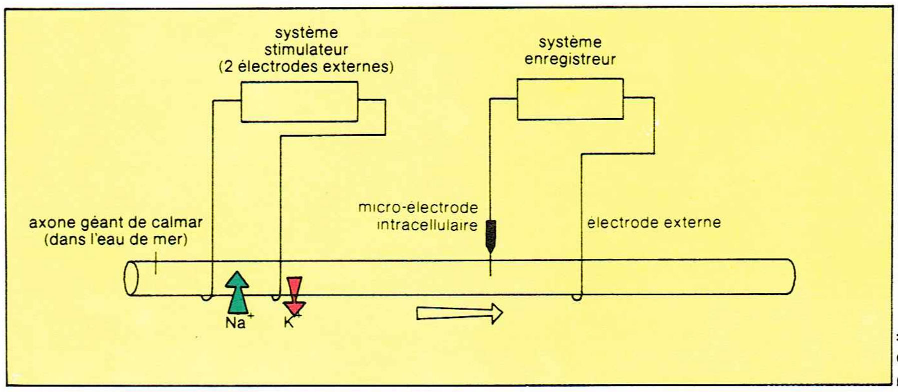

R. Colin

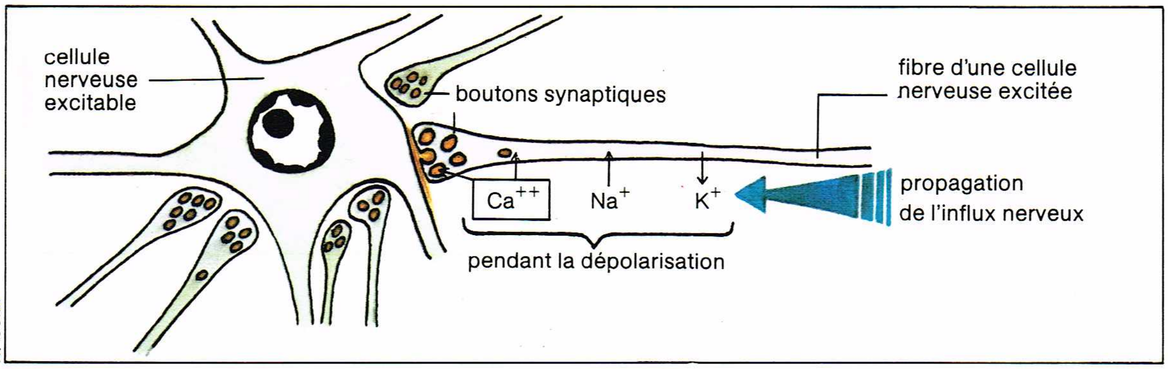

R. Colin

◄▲ A gauche, en haut : cliché en microscopie électronique montrant le contact synaptique entre deux cellules de l'organe frontal d'un Amphibien : 1, cellule sensorielle ; 2, cellules excitables ; 3, épaississements membranaires synaptiques ; 4, vésicules synaptiques ; 5, rubans synaptiques (organites mal connus, particuliers à cet organe). Ci-contre, schéma de la transmission de l'influx nerveux ; en orange, le médiateur. A droite, en haut, enregistrement de la dépolarisation membranaire. A droite, en bas, principe du montage des électrodes pour la détermination des effets d'une excitation électrique de la membrane.

des mécanismes de la transmission de l'influx. Il y aurait deux types de passages transmembranaires, les plus étroits permettant la sortie des ions K^+, petits car peu solvatés, alors que les ions Na^+ passeraient par des ouvertures plus larges. Après la phase d'excitation, une enzyme membranaire hydrolyse spécifiquement le médiateur en excès, ce qui, en déplaçant l'équilibre de liaison médiateur-site actif, libère les sites actifs et rend à la membrane sa perméabilité de repos.

Le rôle du calcium est fondamental durant la période d'excitation et celle de retour à la normale : lorsque l'onde de dépolarisation *(l'influx)* se propage dans la fibre nerveuse, Ca^{++} entre dans cette fibre à la suite du Na^+ ; il se trouve ainsi en contact avec les vésicules synaptiques du bout de cette fibre et il s'incorpore à leur membrane, dont il provoque la *rupture* (rupture d'émulsion). Cela libère le médiateur et induit l'excitation d'une cellule voisine.

D'autre part, durant la période de retour à la normale, le calcium joue un rôle important dans l'hydrolyse de l'ATP, donc dans la libération d'une énergie qui est indispensable au réamorçage de la pompe Na — K.

— *La contraction musculaire* dépend directement des ions Mg^{++} et Ca^{++}. Ceux-ci favorisent l'hydrolyse de l'ATP ; l'énergie est libérée, ce qui permet la contraction des myofibrilles. Parallèlement, le calcium pénètre activement dans le hyaloplasme de la cellule musculaire, lorsque celle-ci est excitée, et se fixe sur un complexe protéique, la *troponine ;* or, ce complexe inhibe la contraction des myofibrilles. Le rôle du calcium est donc double : il favorise le couplage hydrolyse ATP/contraction et, parallèlement, il élimine l'effet inhibiteur de la troponine. Enfin, la relaxation des myofibrilles ne peut s'effectuer que si le calcium est activement rejeté hors de la cellule.

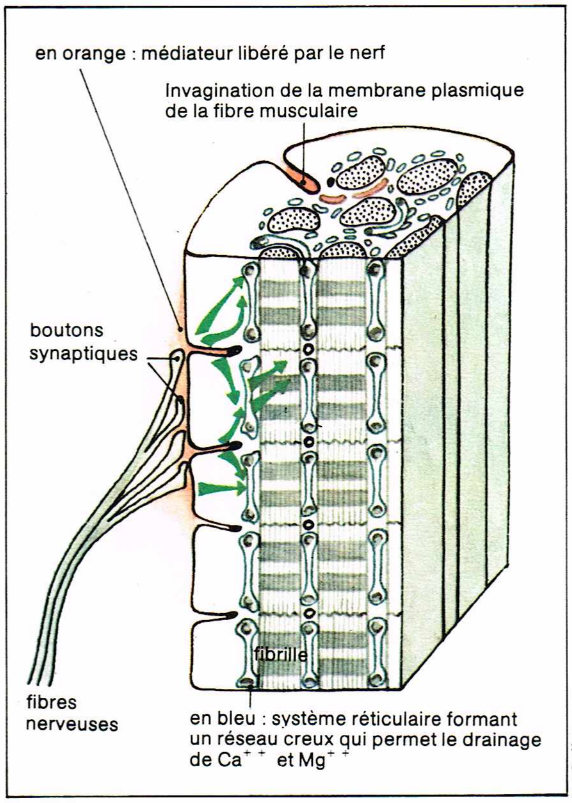

R. Colin

◄ Action du calcium sur la fibre musculaire : le médiateur, libéré par le nerf, pénètre dans de profondes invaginations de la fibre musculaire et permet l'entrée du calcium dans un réseau étroitement accolé aux fibrilles contractiles.

— Sans évoquer dès maintenant le rôle du calcium dans la formation des éléments squelettiques du règne animal, signalons qu'il possède encore d'autres fonctions.

Le calcium permet la *sécrétion hormonale ;* les cellules qui synthétisent les hormones peuvent subir une excitation d'origine nerveuse ; elles reçoivent, en quelque sorte, un message qui modifie leur perméabilité membranaire : le calcium entre dans ces cellules, brise les membranes des vésicules de sécrétion, permettant ainsi l'expulsion de l'hormone dans le courant sanguin. Ce phénomène rappelle celui qu'on a noté pour les vésicules synaptiques.

Enfin, l'ion Ca^{++} est fondamental pour la *coagulation sanguine* au niveau des plaies. On sait depuis 1905 que le sang contient une protéine particulière, le *fibrinogène,* qui perd son caractère de solubilité en présence d'une enzyme, la *thrombine ;* cette enzyme ne se trouve pas dans le sang circulant : celui-ci contient, en fait, une *prothrombine* qui, pour devenir active, nécessite des ions Ca^{++} :

prothrombine + Ca^{++} + kinase (2ᵉ enzyme) → thrombine ;
fibrinogène + thrombine → fibrine → caillot.

De plus, si on décalcifie du plasma et si on le conserve au froid, il ne coagule plus lorsqu'on le recalcifie (Quick, 1943) ; par contre, une addition minime de plasma frais dont on a enlevé la prothrombine (par adsorption sur alumine) permet la coagulation. Il y a donc un facteur supplémentaire, labile. Ce facteur correspondrait au moins à 5 substances différentes. Quoi qu'il en soit, la coagulation dépend fondamentalement du Ca^{++} et se trouve abolie lorsque le sang contient des complexants, ou *chélateurs,* qui accaparent le calcium et le rendent inactif (par exemple, l'acide citrique et diverses substances utilisées expérimentalement).

Chez les végétaux, le calcium diminue la perméabilité cellulaire, freine l'absorption de l'eau et accélère la transpiration ; c'est, à l'inverse de K^+, un facteur de flétrissement ; d'ailleurs, Ca^{++} est un antagoniste de la plupart des autres cations. Enfin, le calcium entre dans la constitution du squelette végétal puisqu'il se trouve sous forme de pectate de calcium dans la lamelle moyenne qui relie les capsules cellulosiques de toutes les cellules.

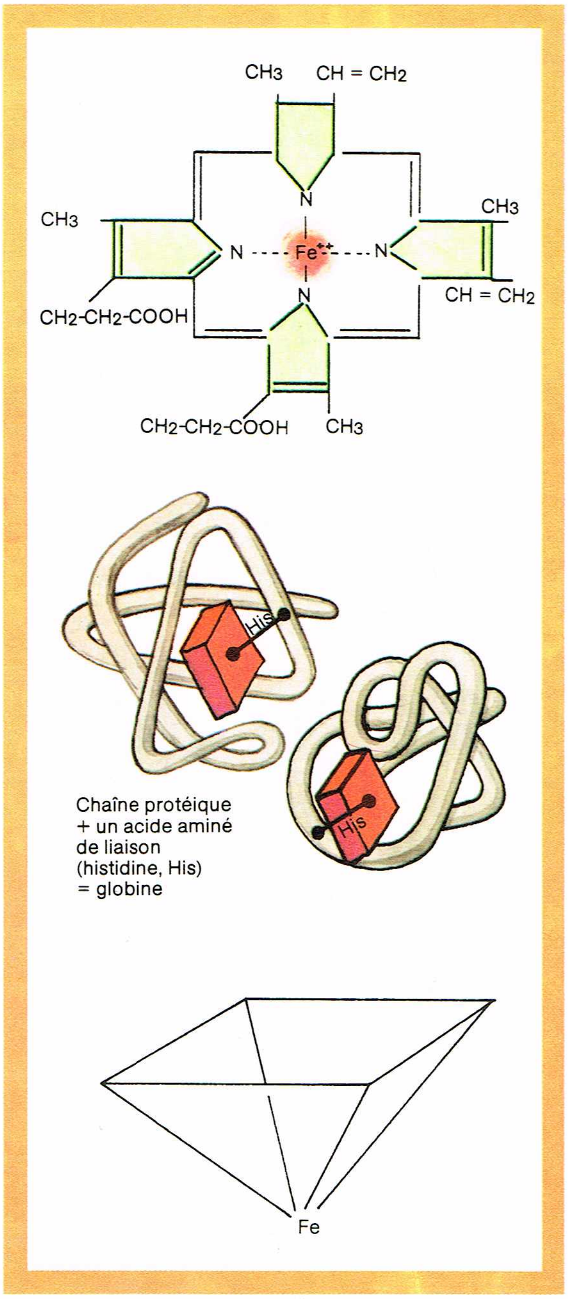

▶ ***Représentation schématique de l'hémoglobine : en haut, structure de la ferroprotoporphyrine ou hème (en vert, un groupement pyrrolique) ; au milieu, schéma d'une demi-molécule d'hémoglobine ; le fer englobé dans l'hème (ici en rouge) est entouré par un peloton protéique ; en bas, disposition du fer dans l'hème.***

R. Colin

Les oligo-éléments

Si les métaux alcalins, alcalino-terreux et terreux sont relativement abondants chez les êtres vivants, il n'en est pas de même pour divers métaux qualifiés d'oligo-éléments. Il s'agit, surtout, du zinc, du fer, du cuivre du cobalt et du molybdène. On pourrait aussi qualifier d'oligo-éléments divers éléments, moins abondants que les chlorures, sulfates ou phosphates et nitrates : le brome, l'iode, le fluor et le bore.

En général, les oligo-éléments métalliques ne sont pas ionisés : ils sont essentiellement *liés* à des molécules, souvent lourdes ; l'ensemble constitue un *complexe organométallique.*

Un exemple biologique bien connu a été particulièrement étudié ces dernières années : il s'agit de *l'hémoglobine* des globules rouges, complexe protéique comportant un atome de fer ferreux. Le fer est le point d'accrochage de l'oxygène respiratoire. Le métal est dit *tétracoordiné* puisqu'il est attaché à quatre groupements particuliers, ou *groupements pyrroliques,* l'ensemble étant fixé à un acide aminé, l'histidine. Le tout constitue la partie active de l'hémoglobine : la ferroprotoporphyrine, ou *hème.* L'hémoglobine est en fait une molécule beaucoup plus volumineuse, puisque l'hème est relié à une chaîne d'autres acides aminés, constituant la *globine ;* il faut 4 globines pour faire une molécule d'hémoglobine.

Cette brève description donne une idée de la façon dont un oligo-élément peut être inclus dans une molécule organique. Durant la respiration, l'oxygène se lie au fer et provoque une déformation de l'hème : l'atome de fer, au lieu d'occuper un sommet de tétraèdre, vient se placer dans le plan des 4 groupes pyrroliques *(transition allostérique) ;* cela provoque une tension de la chaîne d'acides aminés à laquelle l'hème est relié. Selon Williams, cette tension augmente, chez les autres globines qui lui sont associées, la susceptibilité de liaison avec d'autres atomes d'oxygène ; il y a donc message et ce que l'on appelle un *effet coopératif* (Durand) ; de même, lorsque une globine cède son oxygène aux cellules qui en ont besoin, les autres globines sont très fortement incitées à en faire autant (Monod, Wyman et Changeux, 1964).

D'autres substances, à rôles variés, sont construites sur un plan général qui rappelle celui de l'hémoglobine : ainsi, la *myoglobine,* dont les globines ne sont pas associées, sert de réservoir d'oxygène pour le muscle. Là encore, le fer joue un rôle déterminant dans la fonction de l'hème. Signalons aussi les *cytochromes,* qui constituent une partie des « ferments respiratoires » transportant les électrons jusqu'à l'oxygène durant l'oxygénation des substances de réserve.

De telles molécules peuvent être au *fer* ou au *cuivre* suivant le groupe zoologique auquel elles appartiennent : les hémoglobines des Vertébrés contiennent du fer, les *hémocyanines* des Mollusques ou des Arthropodes du cuivre. D'autres groupes, comme les Annélides marines, ont des pigments au fer dont le groupement macromoléculaire protéique n'est pas celui des hémoglobines ; pourtant, l'hème est identique. Ce dernier, qui joue le rôle déterminant, constitue le *groupement prosthétique* de ces complexes. Un tel groupement tétrapyrrolique existe aussi chez certaines enzymes (catalase et peroxydase).

Enfin, il faut remarquer que les *chlorophylles,* pigments végétaux, sont construites autour d'un groupement

prosthétique héminique. Cette fois, c'est le magnésium qui prend la place du fer ou du cuivre dans ce groupement; il ne s'agit pas d'un oligo-élément.

Toutes ces molécules sont très stables. On en tire argument pour leur attribuer une origine extrêmement éloignée, thèse qui semble renforcée par le fait qu'elles sont universellement répandues dans la nature. Les êtres vivants auraient trouvé, d'emblée, les molécules à la fois les plus stables et les plus efficaces.

Deux autres éléments métalliques, dont il est moins souvent question, jouent un rôle important : le *cobalt* et le *molybdène*.

Le cobalt entre dans la constitution de la *vitamine* B_{12}, ou cyanocobalamine; il occupe la même position que celle tenue par le fer dans les groupements héminiques. Chez les Vertébrés, c'est un stimulant de la multiplication des globules sanguins *(hématopoïèse)*; cette vitamine doit être absorbée avec la nourriture, car elle n'est pas synthétisée par l'organisme; par contre, elle l'est par les Bactéries et les Algues.

La *nitrogénase*, enzyme bactérienne au molybdène, permet la fixation et l'assimilation d'azote atmosphérique, c'est-à-dire d'un élément qui, tel quel, ne sert à rien pour la majorité des êtres vivants. Des Bactéries fixant l'azote se trouvent en abondance dans les nodosités des racines de Légumineuses, et elles favorisent la croissance de ces plantes (symbiose).

Il faut insister sur le fait qu'un grand nombre d'enzymes comportent un métal dans leur groupement prosthétique : en fait, leur activité dépend directement de la présence de ce métal, c'est-à-dire de son existence dans la nourriture ou dans le sol.

Par contre, un excès de certains ions dans le milieu où vivent, par exemple, des animaux aquatiques peut entraîner une intoxication; ainsi, le cuivre de certaines peintures utilisées sur les bateaux peut empêcher la croissance d'animaux fixés sur les coques (bougis). On sait, par ailleurs, que des Poissons peuvent concentrer le mercure dans leurs tissus et provoquer l'intoxication de l'homme qui s'en nourrit, etc.

L'individu et la régulation minérale de la cellule

Nous venons de donner un aperçu de l'importance des éléments minéraux dans la cellule; or chez la plupart des êtres vivants, chaque cellule fait partie de tissus et d'organes dont le fonctionnement dépend de systèmes régulateurs hiérarchisés.

A l'échelle de l'individu, la régulation ionique ne s'effectue pas seulement au niveau de chacune des cellules qui le constituent; cette régulation dépend plus ou moins de *systèmes excréteurs* contrôlés par des *mécanismes hormonaux*. En particulier, l'édification d'un squelette complexe nécessite des conditions ioniques extrêmement précises.

Absorption et excrétion minérales

On sait que, chez les Vertébrés, des variations de la composition ionique du sang et du liquide interstitiel entraînent des troubles cellulaires graves. Le problème est beaucoup plus nuancé pour les autres groupes d'animaux ou pour les végétaux.

Chez les *Invertébrés marins*, les cellules sont adaptées au degré de minéralisation de l'eau dans laquelle ils vivent. Il faut le souligner : la composition ionique du milieu intracellulaire est en équilibre avec le liquide interstitiel, et ce dernier n'est pas très différent de l'eau de mer (Jost). Or, il y a des animaux qui ne supportent pas de grandes variations de salinité de l'eau (animaux *sténohalins*), alors que d'autres, moins nombreux, peuvent s'adapter à l'eau saumâtre comme à l'eau de mer normale, et même à l'eau sursalée des flaques supralittorales (animaux *euryhalins*). Dans le premier cas, l'adaptation cellulaire est faible, comme chez la plupart des Vertébrés. Dans le second cas, on peut avoir une importante modification de la pression osmotique des cellules lorsque la salinité se trouve modifiée (par exemple, chez les moules et autres animaux pœcilosmotiques). D'autres euryhalins côtiers n'ont pas un grand pouvoir de régulation osmotique; c'est le cas de *Carcinus maenas*, dont la concentration ionique intercellulaire devient intermédiaire entre

F. Albergoni

▲ *Le molybdène est un oligo-élément entrant dans la composition d'une enzyme, la nitrogénase que l'on trouve dans les Bactéries fixatrices d'azote atmosphérique, qui vivent en symbiose dans les racines de Légumineuses où elles déterminent la formation de nodosités; ici nodosités d'*Albizzia *contenant la Bactérie* Rhizobium leguminosarum.

▼ *Le cobalt entre dans la composition de la vitamine* B_{12} *observée ici au microscope à lumière polarisée après cristallisation.*

Nuridsany - Reichert

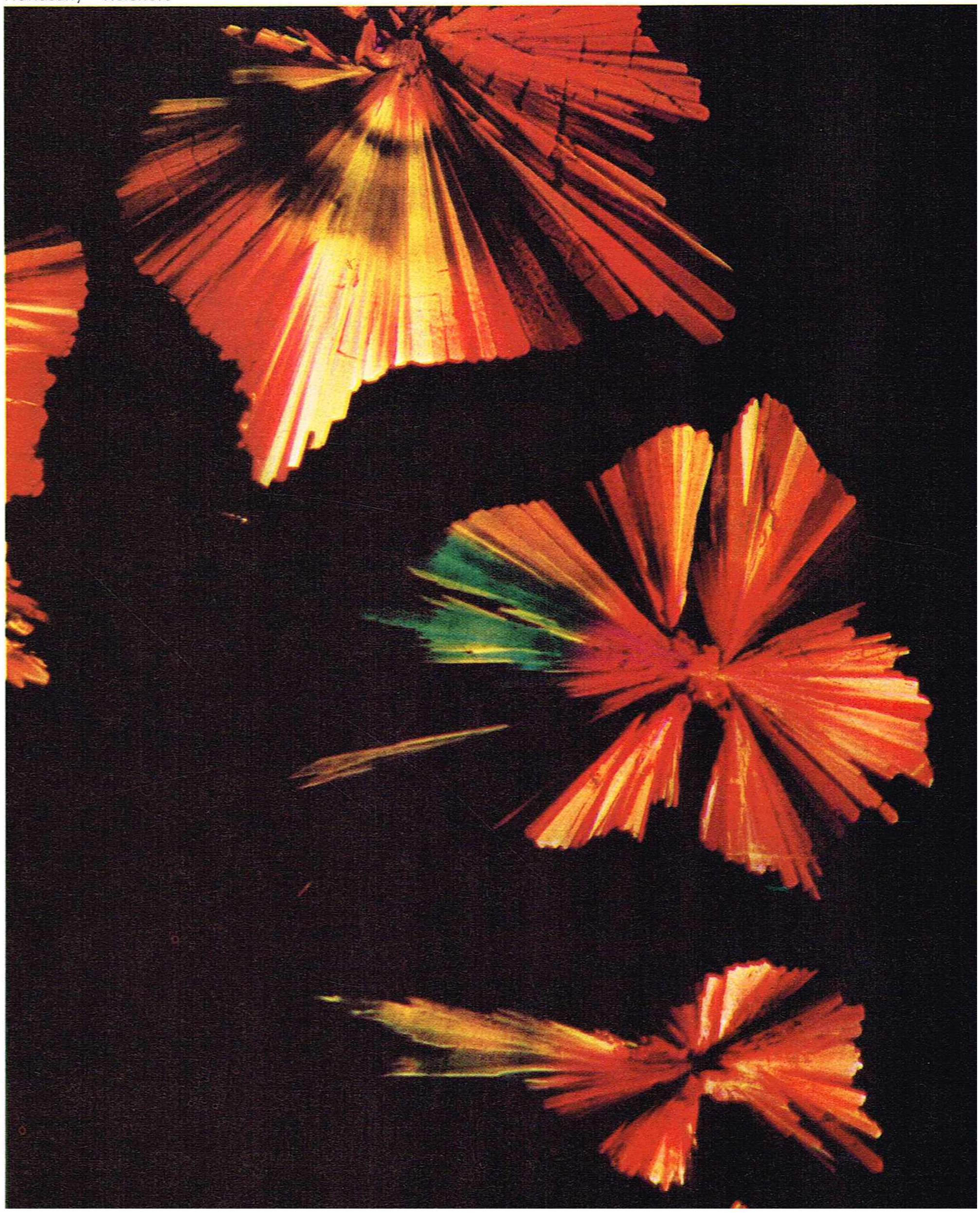

C. Rives - Marina - Cedri

▲ **Carcinus maenas** *(Crustacé) est un animal euryhalin protégé des variations de flux ionique par son tégument épais et par un mécanisme excréteur complexe.*

celle de l'eau de mer et celle de l'eau douce lorsqu'il pénètre dans un estuaire; le tégument, épais, réduit les flux, jouant le rôle de tampon; en outre, il existe, chez cet animal, une régulation complexe des flux ioniques, non seulement au niveau des cellules de tous les organes, mais surtout au niveau de *cellules excrétrices* d'organes bien particuliers qui ont une fonction prédominante. Il y a donc les euryhalins « souples », à cellules adaptables (moules), et ceux qui le sont beaucoup moins et qui ont besoin de systèmes de régulation plus puissants, organes excréteurs plus élaborés, capables de réduire les variations du milieu intérieur. Chez les *Poissons marins,* on constate que le rein devient un organe volumineux et complexe; important chez les Poissons marins osseux (Téléostéens), celui-ci l'est encore plus chez les Poissons cartilagineux (Sélaciens) dont le milieu intérieur est, pour certains ions, plus concentré que l'eau de mer.

▼ *Le calcium entre dans la constitution du « squelette » des Algues calcaires. Ici, plusieurs espèces dans une flaque littorale (Atlantique).*

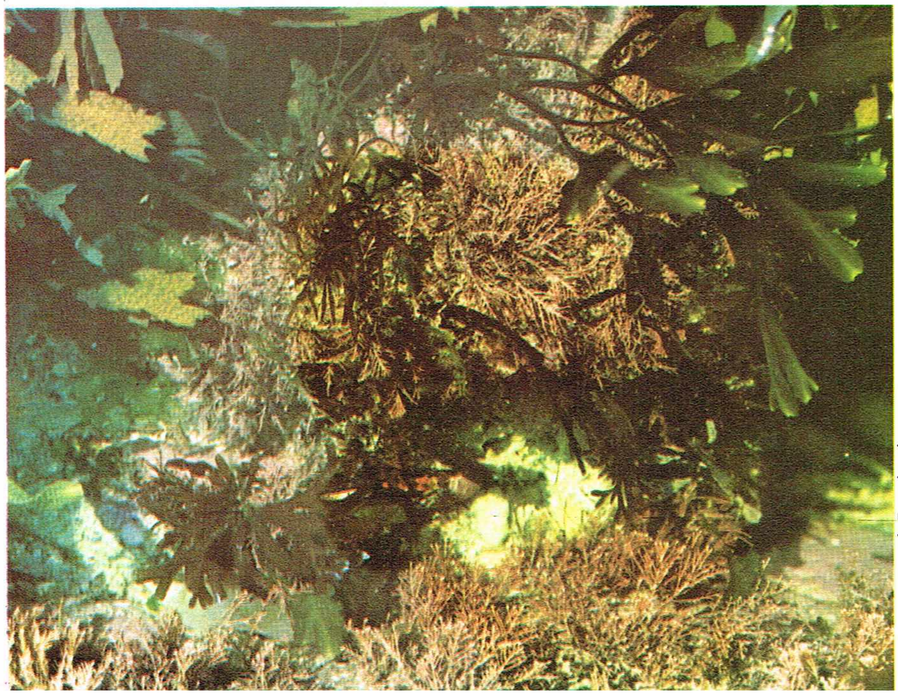

J. Bouchard

Les animaux *d'eau douce* ont à faire face à un sérieux problème de dilution. La régulation osmotique et ionique peut être importante chez les Invertébrés; des systèmes excréteurs, plus ou moins complexes, se constituent chez les groupes les plus évolués. Chez les Vertébrés, les limites de tolérance sont étroites; les mécanismes et les organes d'excrétion sont toujours complexes. Ces animaux doivent arrêter la fuite de leurs éléments minéraux et limiter la pénétration d'eau. Chez les Téléostéens d'eau douce, qui sont extrêmement menacés par la dilution, le rein glomérulaire est d'une extrême importance : l'excrétion de l'eau se fait essentiellement au niveau des glomérules, petits pelotons vasculaires très nombreux, dont la surface d'échange est très grande.

Les *Oiseaux* et les *Mammifères,* animaux particulièrement évolués, ont une économie hydro-minérale excellente : leur peau est couverte d'une couche imperméable à l'eau, ce qui empêche toute influence du milieu extérieur; le tube digestif et surtout les reins sont capables de *réabsorber, selon les besoins,* une grande partie de l'eau que filtrent les glomérules; enfin, le métabolisme, toujours intense chez ces animaux à sang chaud, fournit aux cellules de grandes quantités d'eau après combustion intracellulaire des aliments. L'ensemble n'est pas simple mais très efficace. Notons que la réabsorption rénale de l'eau et les mouvements de l'ion sodium sont contrôlés par des facteurs hormonaux (par exemple, la vasopressine hypophysaire).

Chez les *végétaux,* nous savons que la racine absorbe l'eau et les sels minéraux indispensables à l'équilibre ionique de toute la plante et que chaque plante a un biotope préférentiel, un sol de « prédilection », où la répartition des ions correspond le mieux à ses besoins particuliers (plantes calcicoles, ou calcifuges, nitrophiles, etc.). Les plantes peuvent absorber des éléments *chélatés;* c'est le cas de l'atome de fer : enfermé dans une grosse molécule à un ou plusieurs cycles comparables à des pinces, il ne précipite pas dans le sol sous forme de rouille insoluble. Il reste ainsi disponible dans le milieu extérieur; puis il pénètre dans les cellules sous forme de chélat; la partie organique du chélat sera ensuite dégradée et le fer libéré. Dans le sol, les acides humiques sont chélateurs et protègent ainsi le fer utile à la plante.

Chez les végétaux, on ne trouve pas d'organes excréteurs à proprement parler : parfois, toute la plante peut fonctionner comme un organe excréteur, selon des modalités différentes suivant les groupes. Chez les Phanérogames, la racine peut jouer un rôle particulièrement intéressant. C'est le cas du blé, qui, après l'épiaison, élimine du potassium au niveau des racines.

Cas particulier des éléments permettant l'édification d'un squelette

Le squelette peut être constitué de dérivés du *silicium.* C'est le cas des Algues telles que les Diatomées, dont le protoplasme comporte un exosquelette, ou *frustule;* c'est aussi le cas de Protozoaires Rhizopodes, comme les Radiolaires, qui se fabriquent un squelette d'une extrême délicatesse, ajouré, ornementé, très variable suivant les espèces et dont Haeckel a donné de très belles représentations. Chez les Métazoaires, la majorité des Éponges possède aussi un squelette de spicules siliceux. Ces groupes constituent à cet égard des cas très exceptionnels dans le monde vivant, et l'on a peu de données sur les caractéristiques biochimiques de ces squelettes et sur leur genèse.

Chez les Radiolaires, le squelette est de nature variable : silice, ou silicate de calcium ou d'aluminium. Il est de silice amorphe (non biréfringente) chez les Éponges. Selon P. Rietschel, on ne sait rien sur les lois qui régissent la formation de ces éléments de soutien. On peut se demander comment ces êtres, tous marins (à l'exception d'une partie des Diatomées), s'y prennent pour extraire le silicium de l'eau, pour le concentrer puis l'agencer de manière aussi complexe. Ces êtres vivants sont loin d'être négligeables car ils sont localement extrêmement abondants. Or, il est curieux de constater que tous sont considérés comme très primitifs; on peut faire la même remarque pour les prêles, végétaux terrestres dégénérés où le silicium, sous forme de silice, assure la minéralisation des membranes, ainsi que pour les charas,

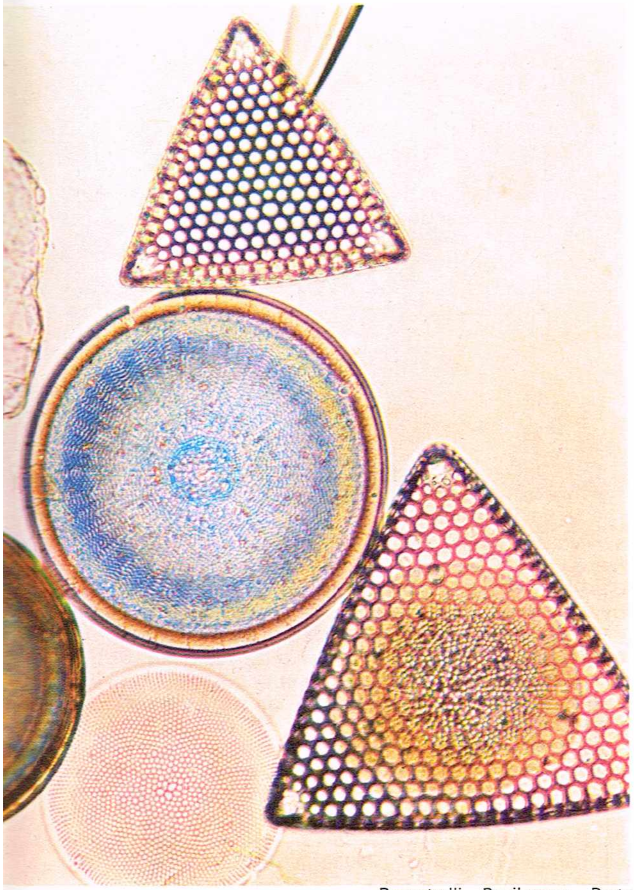

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

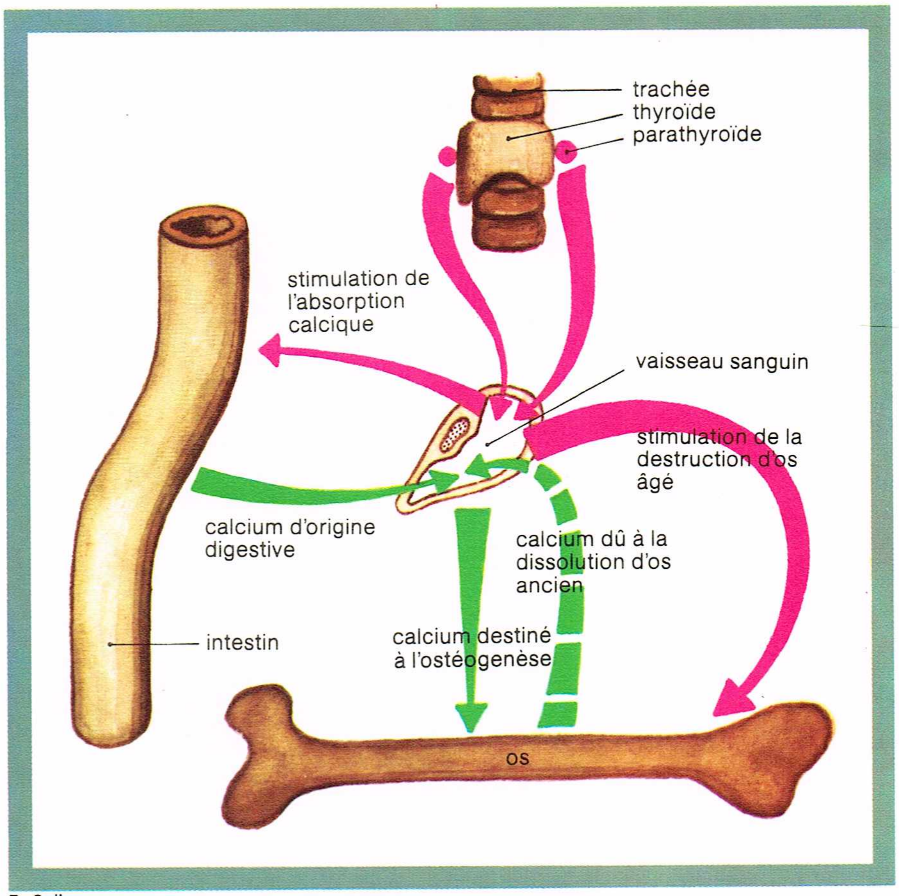

R. Colin

▲ *A gauche, les Diatomées sont des Algues microscopiques munies d'un exosquelette (frustule) constitué de dérivés du silicium.*
A droite, édification de l'os grâce aux vitamines D_2 et D_3 et à l'hormone parathyroïdienne.

ces Algues vertes qui peuvent envahir les mares ; peut-être n'est-ce là qu'une coïncidence, car certaines Monocotylédones comme les carex et surtout les Graminées ont des tissus qui comportent des concrétions siliceuses dont le rôle de soutien n'est pas négligeable.

En général, les éléments squelettiques sont constitués par des sels de *calcium* et de *magnésium*. Il peut s'agir de carbonates, de phosphates tricalciques chez les animaux et les Algues calcaires, ou d'oxalates, comme chez nombre de végétaux. Ces sels existent dans le squelette sous forme de précipités. Les Mollusques peuvent former une coquille, tandis que les Crustacés et les Échinodermes fabriquent une carapace tégumentaire ; le squelette interne, assez peu développé chez la plupart des Crustacés, est très remarquable chez les Vertébrés.

Les problèmes de physiologie cellulaire dont dépend la formation du squelette sont très divers. Selon Durand, seuls les minéraux solubilisés dans l'organisme répondent à des lois biochimiques générales.

Nous donnons ici quelques indications qui correspondent à des faits observés chez les Vertébrés. Auparavant, il faut noter que la formation du squelette, aussi bien chez les Mammifères que chez les Mollusques, est due à des produits de sécrétion de cellules spécialisées ; il ne s'agit pas d'une calcification intracellulaire.

Selon Williams, contrairement aux cations monovalents, Ca^{++} se fixe particulièrement sur les membranes des vésicules hyaloplasmiques ; au contact des cellules squelettogènes, Ca^{++} active les processus d'émission des sécrétions. L'ion joue un rôle de commutateur qui permet la mise en route du mécanisme squelettogène. Une *phosphatase alcaline* (une enzyme émise par les cellules) s'attaque alors aux molécules de phosphate dissoutes dans le milieu interstitiel : il y a hydrolyse (ou fragmentation) de ces molécules ; en conséquence, les ions PO_4^{---} sont en excès dans le liquide ; ils se combineraient au calcium *pour former un sel insoluble* (Robinson). Ensuite, a lieu la phase de modelage du squelette : le précipité de phosphate tricalcique se dépose au contact d'une matrice protéique sécrétée par les cellules ostéogènes : tout se passe comme si le précipité s'orientait et cristallisait.

Ces phénomènes sont sous la dépendance indirecte de 2 *vitamines*, la D_2 et la D_3, solubles dans les lipides (huiles et graisses). Ces vitamines ont un rôle direct dans le transport actif du Ca^{++} à travers l'intestin ; absorbé, cet ion passe ensuite dans le sang et est utilisé pour l'édification du squelette. D'autre part, ces vitamines permettent la destruction des parties les plus internes, les plus anciennes des os déjà formés, ce qui, indirectement, favorise la néoformation d'os jeunes périphériques. Ce phénomène est confirmé en utilisant du calcium marqué. Ajoutons que le *phosphore* suit les migrations du calcium.

De plus, une hormone, l'hormone parathyroïdienne, ou *parathormone*, stimule une partie des effets des vitamines, à savoir l'absorption intestinale du calcium alimentaire et le remaniement de l'os âgé, mais non directement l'ostéogenèse à partir du sang. Les mécanismes biochimiques permettant le transport actif sont de nature complexe ; on estime, en effet, que les vitamines modifient la perméabilité par voie génétique ; elles servent de messager pour déclencher, au contact des acides nucléiques, la synthèse d'une substance protéique spécifiquement chargée de modifier la perméabilité intestinale du calcium.

Chez les Vertébrés, groupe évidemment bien étudié, il reste encore des incertitudes quant à la façon dont se déroulent les processus biochimiques de l'ostéogenèse. De plus, des expériences ont montré que certaines régions du système nerveux (l'hypothalamus, le toit diencéphalique, voire l'épiphyse) peuvent influencer l'ossification (Thillard).

Bien sûr, les problèmes sont encore plus divers chez les Invertébrés. Par exemple, chez les Mollusques, à coquille externe généralement bien développée, la formation de ce squelette dépend de l'existence de phosphatases que l'on trouve en abondance dans le manteau. Mais on en trouve aussi en d'autres points du corps, et il semble que la mobilisation du calcium s'effectue un peu partout ; au niveau du manteau, l'apport de sels de calcium véhiculés par le sang permet la formation d'un précipité extracellulaire de carbonate et cela grâce à la participation d'une *série d'ions* et de *molécules protéiques*. Ce problème est très complexe (Grassé et Tétry) mais dépend directement de la balance ionique.

▶ A gauche, un daim (Dama dama) ; chez les Cervidés, la croissance cyclique des bois nécessite un apport calcique important; leur chute est due à un déséquilibre phosphocalcique qui est sous la dépendance d'hormones. A droite, les stries d'accroissement bien visibles sur cette moule impliquent des variations de l'équilibre du calcium.

Photo Researchers International

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Quelques exemples de troubles périodiques de l'équilibre du calcium

Les faons du cerf d'Europe sont dépourvus de bois, mais, dès le mois d'octobre, il se constitue chez les mâles, que l'on appelle des hères, des pivots osseux surmontant les frontaux ; ils croissent, forment une dague et repoussent la peau qui persiste et constitue le velours; celui-ci, mal vascularisé, finit par tomber, et, à la fin de la deuxième année, la dague tombe également; dès que la cicatrisation est terminée, un second bois repousse à partir du pivot : il est plus grand que la dague ; ainsi, d'année en année, les bois deviennent de plus en plus grands et de plus en plus robustes. Une telle croissance cyclique nécessite un apport calcique extrêmement important. Le mécanisme, qui a fait l'objet d'études expérimentales, est hormonal. On a constaté qu'un faon castré n'acquiert pas de bois; par contre, un adulte castré reconstitue des bois, peu développés et conservant leur velours; l'ensemble forme ce qu'on appelle une « perruque d'os ». Wislocki a montré, sur le cerf de Virginie, que la castration, au début de la croissance des bois, n'entraîne pas leur chute, mais seulement la conservation du velours; par contre, les bois tombent si la castration est opérée sur un animal à bois nus; le mécanisme est donc fort complexe. Il y a une combinaison des effets de deux types d'hormones : les hormones testiculaires et les hormones hypophysaires. Le déséquilibre phosphocalcique dont dépend l'ostéogenèse se produit durant la période de repos sexuel, au moment où les testicules sont inactifs; c'est seulement au début de l'hiver que la peau disparaît, c'est-à-dire au début de la phase de rut, au moment où les testicules s'accroissent.

Un autre exemple, extrêmement intéressant, correspond non à l'hypertrophie d'un élément squelettique, mais à l'élimination d'énormes quantités de calcium lors de la ponte chez les Oiseaux. Citant le cas du pigeon, Jost parle d'une *mobilisation du calcium des os* qui, en période de ponte, provoque une calcémie 20 fois supérieure à la normale. En schématisant, la ponte utilise l'équivalent de 1/6 du calcium du squelette entier; cela implique un effort métabolique très intense.

Voici, très brièvement, la succession des phénomènes biochimiques impliqués dans la genèse de la coquille de l'œuf. Le calcium sanguin est lié à des molécules volumineuses; juste avant la ponte, il s'accumule dans les os, venant à la fois du sang et du tube digestif, où le transport actif intestinal devient plus intense. Cette *accumulation* dépend d'hormones œstrogènes synthétisées par l'ovaire, mais dépend aussi des parathyroïdes, ainsi que nous l'avons dit plus haut. A ce stade pré-ovulatoire, les travées osseuses sont très serrées et compriment le canal médullaire des os longs (os folliculinique). Après la ponte ovulaire se produit une véritable révolution physiologique : les os se dissolvent en partie, d'une manière très brutale, tandis qu'on observe une chute des œstrogènes sanguins; le calcium plasmatique devient surabondant, et l'utérus y puise le matériel nécessaire à l'élaboration de la coquille où s'accumule la calcite ($CaCO_3$).

Ces exemples représentent des cas particulièrement frappants. Il faut cependant ajouter que les êtres vivants suivent des rythmes de croissance et d'activité qui peuvent impliquer des variations de l'équilibre du calcium ainsi que d'autres éléments minéraux; si ces variations sont en général discrètes, leur importance est grande pour l'individu. On en voit, par exemple, les traces sur une coquille de Mollusque : les stries d'accroissement périodique sont très souvent parfaitement visibles; chez la moule, le rythme essentiel est celui des marées (Le Gall).

BIBLIOGRAPHIE

DURAND M. et FAVARD P., *la Cellule,* Hermann, Paris, 223 p., 1967, 4e tirage : 1972. - FLORKIN M. et SCHOFFENIELS E., *Biochimie et Biologie moléculaire,* Desoer, Liège, 578 p., 1967. - GIESE A.C., *Cell Physiology,* Saunders Co, Philadelphie-Londres, 534 p., 1958. - KAYSER C., *Physiologie,* Éd. Médicales, Flammarion, 1963. - KRUH J., *Biochimie,* Hermann, Paris, 501 p., 1971. - KRUYT H.R. et OVERBEEK J. Th. G., *Initiation à la chimie physique,* Masson, Paris, 236 p., 1961.

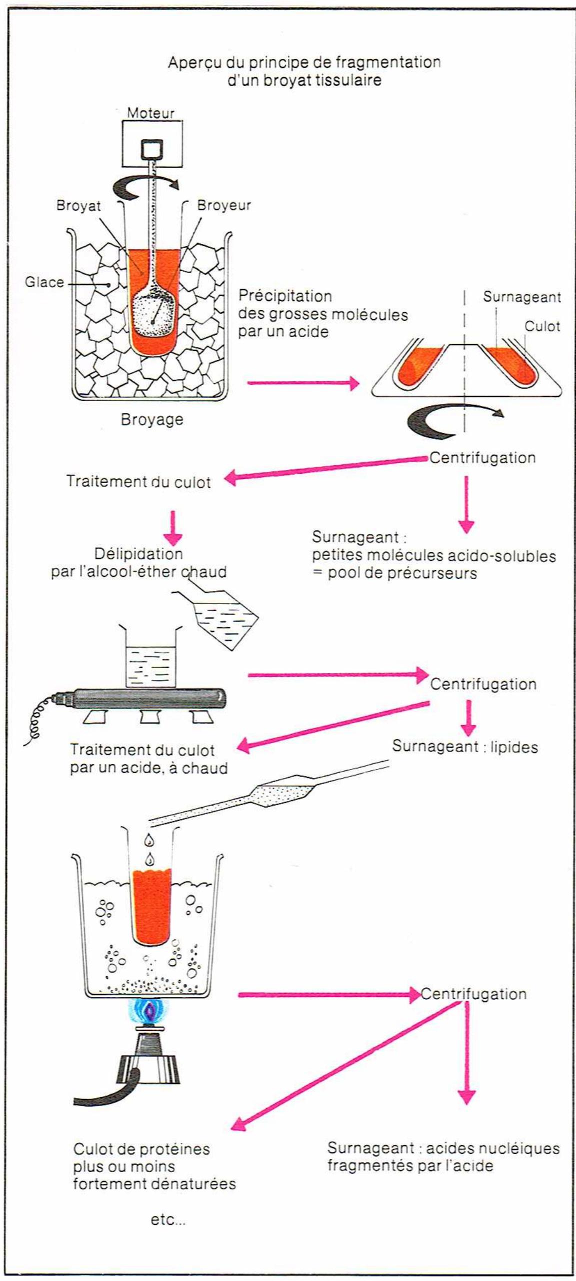

Richard Colin

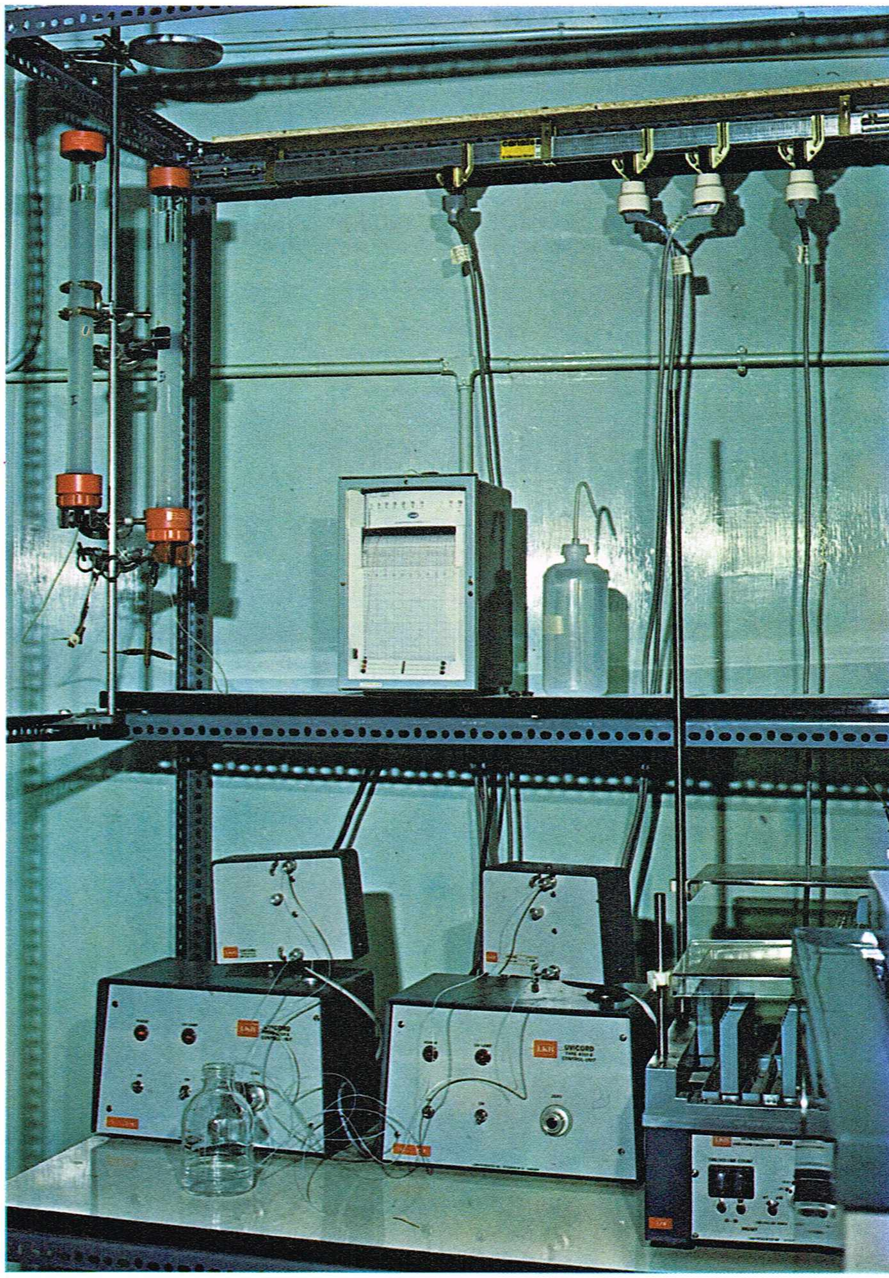

Docteur Fine, Centre national de Transfusion sanguine, Paris - Lauros

▲ ***L'analyse des constituants de la matière vivante nécessite une longue préparation préliminaire; à gauche, les différentes étapes de ce travail. A droite, l'appareillage pour l'analyse par chromatographie de partage associé à un système de détection et d'enregistrement automatique.***

LES MOLÉCULES ORGANIQUES

Préambule technique. Avant de décrire les groupes de molécules fondamentales, il faut dire un mot des méthodes qui permettent de les mettre en évidence dans des broyats cellulaires.

Le *travail préparatoire du biochimiste*. L'analyse s'effectue en utilisant un *broyat* d'un organe aussi homogène que possible, c'est-à-dire contenant une seule catégorie de cellules ou du moins une catégorie dominante (par exemple, le foie, le cerveau, l'épiderme, etc.).

Le broyat est *centrifugé* à basse température. Pour une sédimentation des molécules moyennes, il faut aller jusqu'à 60 000 tr/mn. Les petites molécules se trouvent alors dans la partie supérieure (le *surnageant*) et peuvent être séparées des grosses molécules qui restent dans le fond du tube centrifugeur (le *culot*).

La *dialyse* est utilisée dans une seconde étape de fractionnement : elle s'effectue à travers une membrane non semi-perméable dont la porosité est connue (« boudin de dialyse »).

Les *fractions* que l'on obtient sont traitées séparément par des réactifs, qui vont *précipiter* certains types de molécules. Par exemple, un réactif A à large spectre chimique permet la précipitation de nombreuses espèces moléculaires; on centrifuge à nouveau pour étudier séparément le *culot* et le *surnageant;* d'une part, on traite le surnageant avec un second réactif B, plus sélectif, qui va seulement précipiter certaines molécules, etc.; d'autre part, on traite le culot avec un réactif B' qui redissout le précipité; puis, avec un réactif C, plus sélectif que A, on précipite certaines molécules, etc.

Chaque fraction, précipitée puis redissoute, peut être ensuite analysée par différentes méthodes.

La *chromatographie*. Cette méthode a été mise au point au début du siècle par le botaniste Tswett. Celui-ci travailla sur les pigments végétaux; en versant un extrait végétal dilué dans la partie supérieure d'une colonne de verre contenant du carbonate de calcium $CaCO_3$ finement pulvérisé, Tswett observa que différents pigments se répartissaient par *bandes* à l'intérieur de la colonne; autrement dit, la migration de chaque type de pigment s'effectuait à une vitesse particulière. Des rinçages successifs permettaient alors à certains pigments de parcourir toute la colonne alors que d'autres demeuraient *adsorbés* aux particules de carbonate.

On donna, par la suite, le nom de chromatographie à cette technique qui permet, de la même façon, de séparer les constituants incolores d'un mélange chimique quelconque.

L'adsorption dépend de la *surface* d'adsorbant disponible pour les substances en solution. Lorsqu'une molécule se stabilise à un certain niveau de la colonne, on a un *équilibre réversible*. Il est possible d'établir des courbes représentant l'adsorption en fonction de la concentration de la solution. On parle *d'isothermes d'adsorption*, car les courbes diffèrent en fonction de la température.

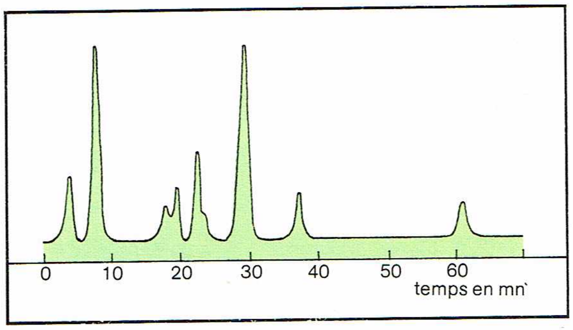

Richard Colin

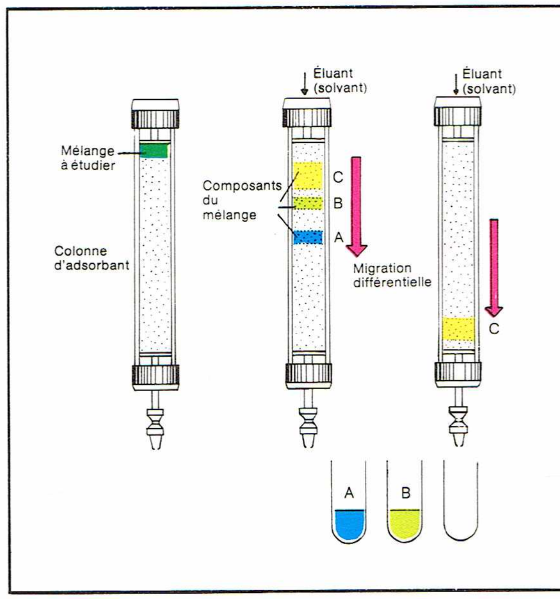

Richard Colin

▶ *A droite, principe de la* **chromatographie sur colonne** *: les différents constituants du mélange migrent plus ou moins vite et sont récupérés successivement. A gauche, un exemple de* **chromatogramme** *obtenu grâce à un système de détection des constituants ; à chaque pic de la courbe correspond une substance déterminée.*

L'adsorption est faible pour la plupart des éléments minéraux ; elle est forte pour les chaînes organiques aliphatiques (chaînes linéaires) et très forte pour toutes les substances à noyau aromatique ou cyclique. Lorsque, dans une solution, les substances sont mêlées, chacune est moins adsorbée que si elle était seule ; de plus, une substance très adsorbable freine les substances moins adsorbables : en d'autres termes, une petite quantité d'une substance très adsorbable peut inhiber l'adsorption de plus grandes quantités d'autres substances à coefficient d'adsorption inférieur. Signalons que cette notion, fondamentale en recherche, permet également de comprendre le phénomène qui se produit dans les empoisonnements par occupation de certains sites organiques par diverses substances : ainsi, l'uréthane, agent toxique (cancérigène chez la souris) peut empêcher l'adsorption du glucose au niveau cellulaire.

Lorsqu'elle est pratiquée à la façon de Tswett, la *chromatographie* est dite *de partage* puisque, sur deux substances contenues dans la colonne, l'une est adsorbée tandis que l'autre la parcourt. On utilise des adsorbants de nature diverse, et l'analyse d'une solution peut être faite sur plusieurs adsorbants, ce qui améliore les résultats : en effet, chaque substance dissoute peut avoir une affinité différente pour chacun de ceux-ci. On utilise couramment l'alumine, le phosphate tricalcique, la silice, le silicate de magnésium et le charbon. Il existe dans le commerce des produits dont les caractéristiques sont bien déterminées.

La *chromatographie sur papier* est fondée sur le même principe, mais elle est adaptée à l'étude de petites ou de très petites quantités de liquide. Un papier de type papier-filtre remplace la colonne ; il est placé verticalement dans une enceinte saturée d'humidité. La solution à étudier est déposée en haut du papier ; puis, à partir du bord supérieur, on imbibe le papier par capillarité avec un solvant organique, qui va progressivement descendre, entraînant préférentiellement les molécules à groupements hydrophobes, alors que les molécules essentiellement hydrophiles migrent beaucoup plus lentement ; cette technique rappelle le système à colonne, mais elle a l'avantage de faire intervenir un facteur supplémentaire : l'affinité des molécules pour l'eau ou pour des solvants organiques (du type butanol par exemple). La méthode convient pour toutes les familles de molécules organiques.

Pour mettre en évidence les molécules entraînées, on a recours à des procédés de *révélation physique* ou *chimique*. Dans le premier cas, on utilise souvent l'éclairage ultraviolet, qui donne une série de taches de lumière visible au niveau de chacun des composants de la solution entraînés sur le papier ; c'est la révélation par *fluorescence*. Dans le second cas, on utilise, par exemple, la *ninhydrine*, qui permet de colorer les éléments azotés tels que les acides aminés, qui deviennent ainsi visibles en lumière blanche.

On peut améliorer l'analyse en reprenant la feuille du chromatogramme, en la faisant tourner de 90°, et en recommençant l'opération avec un *second solvant* organique ; le nouveau solvant entraîne les taches suivant une nouvelle verticale et d'une manière qui n'est jamais exactement identique à celle du solvant initial. On a donc un *chromatogramme à deux dimensions*, très nettement affiné par rapport au premier : en effet, deux substances qui étaient confondues en une seule tache avec le premier solvant peuvent être séparées avec le second.

Voisine de la chromatographie sur papier, la *chromatographie sur couche mince* permet d'obtenir des résultats encore un peu plus précis : on utilise plusieurs types de couches poreuses, véritables émulsions coulées sur des plaques de verre.

Dans une méthode chromatographique assez différente des précédentes, on a recours à un *tamis moléculaire* (« gel-filtration »). L'adsorbant, utilisé dans une colonne, est constitué par des molécules organiques, les dextranes, qui sont des polymères de glucides ; la sélection se fait en fonction de la taille des molécules, et parfois de leur poids moléculaire.

La *chromatographie sur résine échangeuse d'ions* mérite une brève description. Dans le cas d'une *résine cationique*, les cations de la solution prennent la place des radicaux Na^+ de la résine ; dans le cas d'une *résine anionique*, les anions en solution s'échangent avec les OH^- ou les Cl^-. Les ions fixés sont ensuite décrochés en

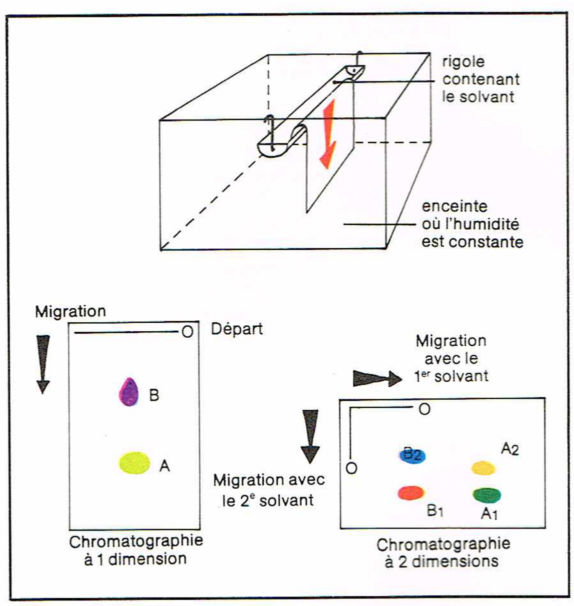

Richard Colin

▶ *Principe de la* **chromatographie sur papier** *; dans ce cas, le solvant entraîne la solution à étudier qui a été préalablement déposée sur un papier-filtre (en haut) ; on obtient une* **chromatographie à une dimension** *; en faisant tourner le papier d'un angle de 90°, et en utilisant un deuxième solvant, on peut réaliser une* **chromatographie à deux dimensions** *; celle-ci permet une analyse plus fine.* A_1*,* A_2*,* B_1*,* B_2 *correspondent aux quatre produits contenus dans le mélange initial.*

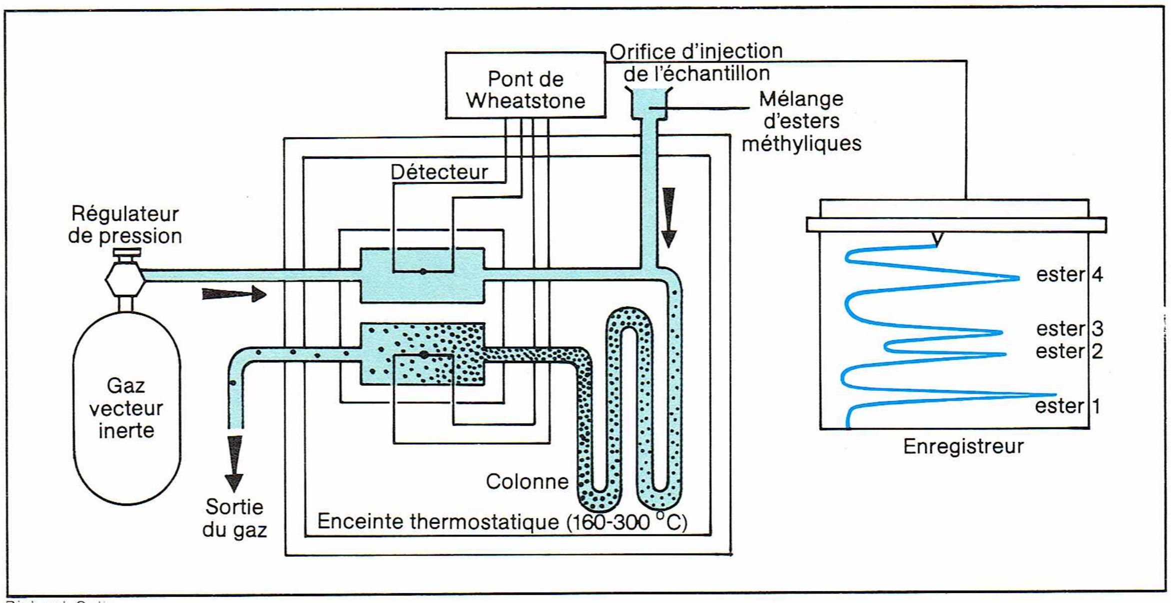

Richard Colin

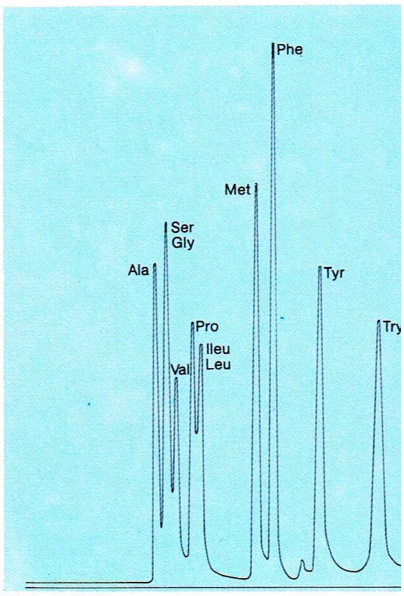

Richard Colin

versant un *éluant* dont le pH est lentement modifié : ils sont *entraînés séquentiellement*. Les fractions recueillies successivement permettent l'analyse du liquide biologique. Cependant, Kruh note que les solutés s'adsorbent partiellement aux particules de la résine, ce qui rend l'interprétation des résultats délicate.

Enfin, on peut effectuer des *chromatographies en phase gazeuse*. Par exemple, pour déterminer la composition d'un extrait en acides gras constitutifs des graisses, on prépare une solution d'esters méthyliques de ces acides; ils sont volatils et peuvent être entraînés à chaud (entre 160 et 300 °C) par un gaz inerte (l'argon ou l'hélium par exemple), dans une colonne contenant un liquide également inerte adsorbé à une poudre de silicone ou de polyéthylène glycol. A la sortie de la colonne capillaire, un système de détection automatique permet d'enregistrer la succession des différents esters; en effet, ces derniers migrent plus ou moins vite dans la colonne suivant leur affinité pour le gaz ou le liquide inerte. C'est, en phase gazeuse, une variante de la chromatographie de partage.

L'électrophorèse. L'analyse des constituants d'un liquide biologique peut être faite en entraînant les molécules grâce à un courant électrique : en effet, leur vitesse de migration dépend de leur charge propre. La technique, perfectionnée en Suède par Tiselius, permet des études très précises sur certains groupes de molécules, en particulier sur les divers acides aminés constitutifs des protéines. On travaille souvent entre 2 et 4 °C pour éviter les perturbations dues aux courants de convection. Cette méthode, très précise, permet de déterminer non seulement la composition d'un mélange, mais aussi le poids de chacun des constituants.

La migration des molécules peut être analysée grâce à une méthode optique fondée sur le fait que les molécules en transit modifient l'indice de réfraction du liquide. On obtient directement une image aisément photographiable du train de molécules (Toepler).

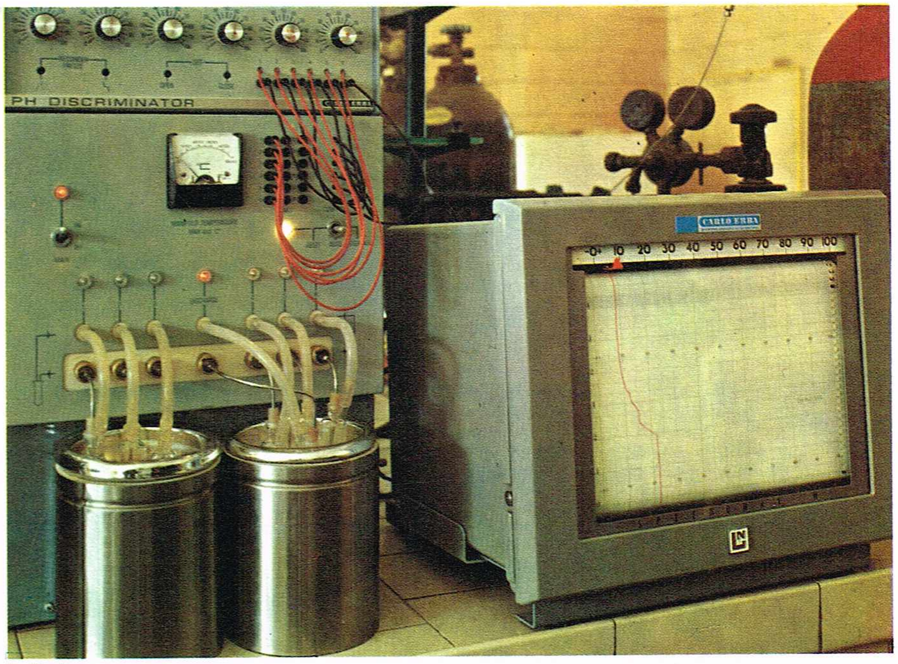

A. Rizzi

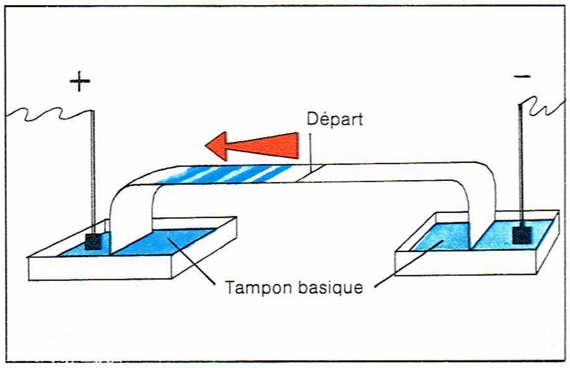

Richard Colin

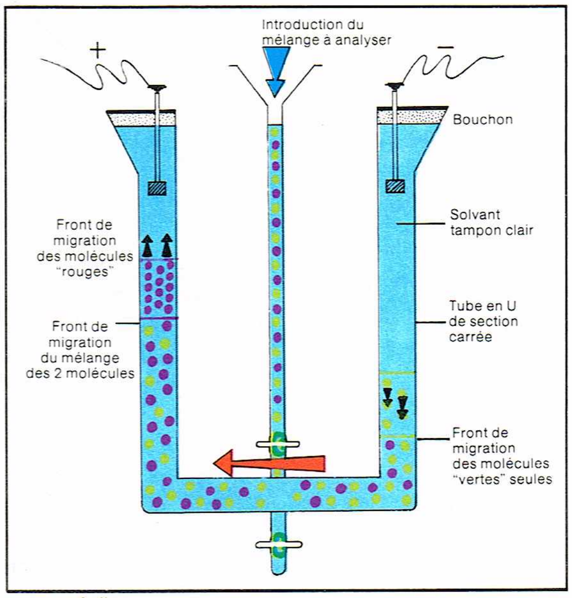

Richard Colin

▲ En haut, à gauche, principe de la* chromatographie en phase gazeuse*; à droite, résultat de l'analyse d'un mélange d'acides aminés obtenu par cette technique; chaque pic de la courbe correspond à un acide aminé déterminé. En bas, détail de l'appareillage nécessaire à la* chromatographie en phase gazeuse *: sur la gauche, les récipients servant à la récolte des constituants; à droite, l'enregistreur automatique.

◀ Principe de* l'électrophorèse sur papier *(à gauche) et selon la méthode de Tiselius (à droite) : dans un tampon basique les substances chargées négativement migrent vers l'anode (+).

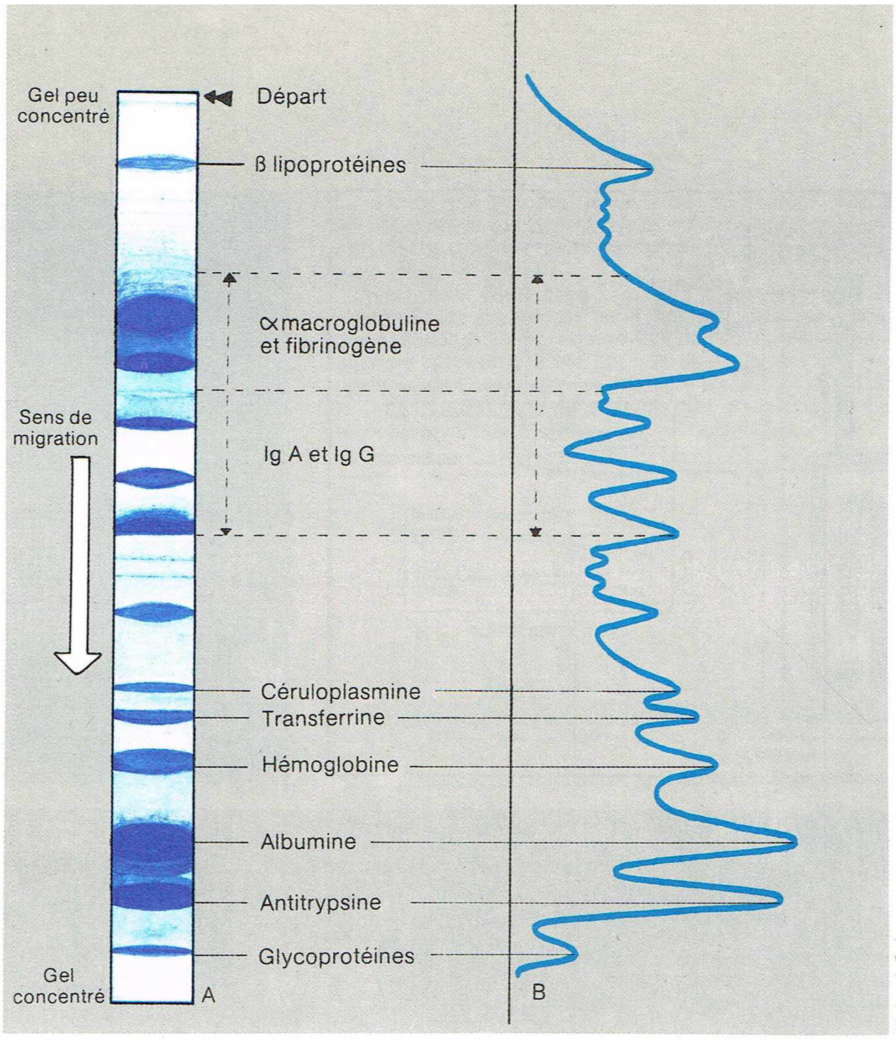

Richard Colin

▲ *L'électrophorèse peut s'effectuer sur du papier recouvert d'un gel de polyacrylamide de concentration croissante : on parle d'électrophorèse « gradipore » (A). Les résultats sont traduits sous forme de courbe (B).*

▼ *A gauche,* spectrophotométrie d'absorption. *Cette technique de dosage est fondée sur le fait que les substances absorbent électivement une ou plusieurs longueurs d'onde de la lumière visible et de l'ultraviolet; à droite : on peut doser par cytophotométrie certaines substances chimiques colorées sur coupes histologiques. Cas de l'ADN après réaction de Feulgen.*

L'*électrophorèse sur papier* est une variante très employée. Il suffit de tremper une bande de papier dans un solvant, puis d'ajouter à une extrémité le mélange à étudier; on fait ensuite passer un courant dans l'axe du papier : les substances migrent en formant des bandes parallèles, lesquelles sont ensuite révélées. Il existe des systèmes perfectionnés qui permettent d'obtenir automatiquement une traduction graphique des séries de bandes colorées.

L'*électrophorèse sur fil* permet d'analyser de très petits volumes de liquides biologiques.

La *spectrophotométrie d'absorption*. Cette technique sert non seulement à doser ou à identifier une substance, mais aussi à mettre en évidence une réaction. Elle est fondée sur le fait qu'une solution colorée absorbe en fait la couleur complémentaire. La lumière utilisée est issue d'un monochromateur, et le rayonnement sera plus ou moins absorbé dans la solution colorée. L'absorption est mesurée grâce à un spectromètre (Beer et Lambert).

Kruh note que cette technique est devenue l'une des principales méthodes de dosage, car elle permet de travailler sur des *solutions incolores,* en utilisant les longueurs d'onde de l'ultraviolet que peuvent donner les monochromateurs à arc de mercure ou au xénon. Cette méthode permet aussi de doser les produits d'une réaction. Il est toutefois plus délicat de rechercher la composition d'un mélange, d'identifier ses constituants. Or, on sait que les substances biologiques absorbent électivement une ou plusieurs longueurs d'onde du visible et surtout de l'UV. Des appareils modernes très perfectionnés permettent d'obtenir des enregistrements graphiques sous forme de courbes d'absorption très détaillées. En comparant avec des courbes de référence correspondant à des substances connues, il est possible d'identifier la nature des constituants du mélange; en effet chacun de ceux-ci implique un ou plusieurs pics d'absorption caractéristiques.

Les méthodes qui viennent d'être évoquées sont d'un intérêt très général; c'est pourquoi elles ont été citées avant l'étude des substances elles-mêmes. Il existe d'autres techniques qui sont adaptées à des molécules particulières; nous les signalerons ultérieurement.

Par ailleurs, il existe en *histochimie* de très nombreuses techniques qui permettent de mettre en évidence tel ou tel type de substance observable au microscope dans la cellule fixée, voire dans la cellule vivante.

A. Rizzi

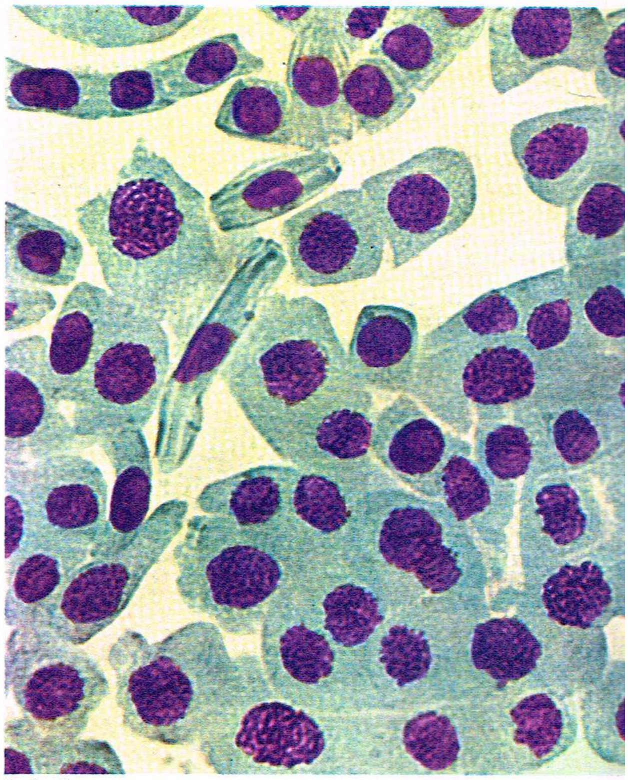

C. Bevilacqua

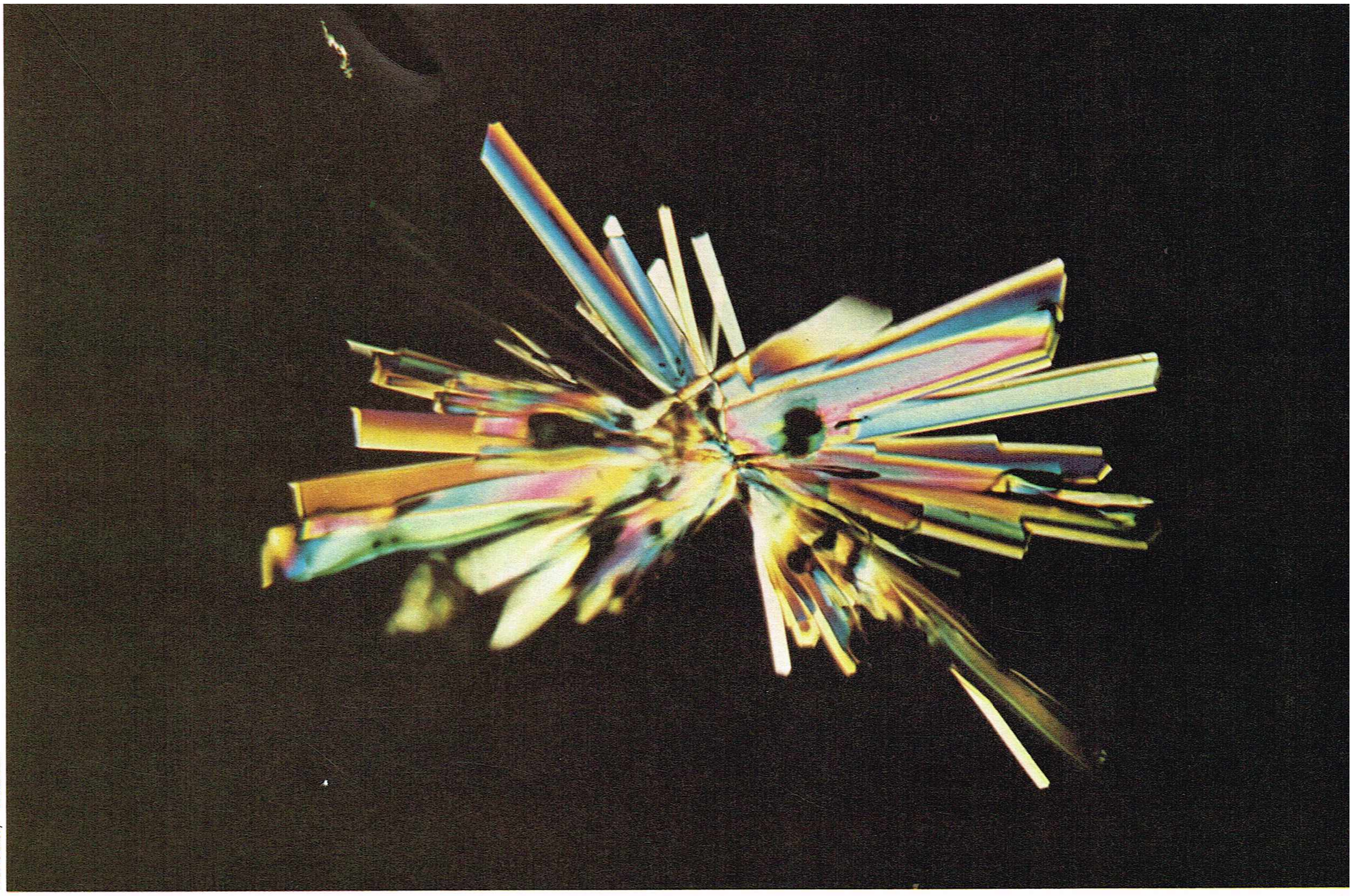

Nuridsany - Reichert

▲ *Les glucides représentent de 50 à 80 % du poids sec des végétaux et un peu moins dans le cas des animaux. Le glucose, observé ici en lumière polarisée, est un des sucres les plus répandus.*

LES GLUCIDES

D'après Heller, les glucides représentent généralement de 50 à 80 % du poids sec des végétaux. La proportion est moins forte chez les animaux. On connaît bien les *sucres,* dont la saveur est très caractéristique. On les désignait autrefois sous le terme d'hydrates de carbone et les Anglo-Saxons parlent de carbohydrates, ce qui, somme toute, est une caractérisation approximativement valable puisque leur formule brute ne comporte que du carbone, de l'hydrogène et de l'oxygène : $Cn(OH_2)m$. Cette formule est valable pour les *oses,* ou sucres simples, ainsi que pour les *holosides,* polymères des oses, mais pas pour les *hétérosides,* lesquels comportent d'autres éléments.

Les oses

L'ose le plus répandu dans la cellule et le plus connu est le *glucose ;* celui-ci est très abondant dans le miel. On l'utilise parfois pour faire des confitures, car il est de saveur moins sucrée que le saccharose du commerce, lequel est un diholoside. Les botanistes l'appellent sucre de raisin.

Les oses ne peuvent pas être hydrolysés ; il ne s'agit donc pas de polymères et ce sont des glucides simples. Ils forment des cristaux. Leurs solutions ont des propriétés optiques dont il est nécessaire de parler : elles modifient un faisceau de lumière polarisée. Ces propriétés permettent de déterminer la nature d'un ose ou de le doser en solution.

Rappel de la notion de lumière polarisée

La lumière polarisée est un rayonnement lumineux dont la vibration s'effectue dans *un seul plan* de l'espace, alors que la lumière qui vient du soleil ou qui sort d'un monochromateur vibre dans tous les plans de l'espace orientés suivant l'axe de propagation. La lumière non polarisée correspond à des vibrations transversales : en schématisant, on considère des vibrations rectilignes qui « changent de direction dans le plan perpendiculaire au rayon un grand nombre de fois par seconde » (M. Curie). On peut obtenir un rayonnement qui ne vibre que dans un seul plan : c'est *la lumière polarisée rectiligne.* Nous allons voir à présent comment divers cristaux sont capables de transformer la lumière en lumière polarisée.

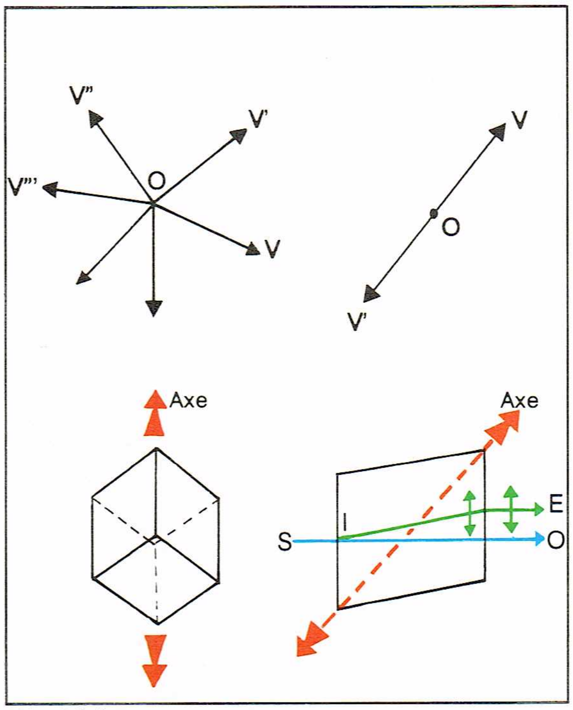

Richard Colin

◀ *En haut, représentation schématique des vibrations de la lumière ; la lumière non polarisée (à gauche) vibre dans tous les plans passant par l'axe optique O ; la lumière polarisée (à droite) vibre dans un seul plan. En bas, à gauche, un cristal de spath d'Islande, à six faces losangiques égales servant à l'obtention de lumière polarisée ; à droite, trajet d'un rayon lumineux dans le spath : SO, rayon ordinaire ; SE, rayon extraordinaire.*

Pour observer la *double réfraction à travers un cristal,* on choisit un grand cristal de *spath d'Islande* (calcite très transparente) ; celui-ci appartient au système cristallin rhomboédrique : c'est un cube étiré suivant une de ses diagonales (il a donc six faces losangiques égales) ; cette diagonale devient l'axe optique du cristal. Un objet observé à travers un cristal ou une lame de spath donne deux images ; il y a donc, au sein du cristal, deux modes de cheminement des rayons lumineux.

Le schéma (p. 61) montre qu'un rayon SI normal à l'une des faces donne : d'une part, un rayon SO qui n'est pas dévié, le *rayon ordinaire,* qui suit les lois de l'optique géométrique ; d'autre part, un rayon SE, ou *rayon extraordinaire,* nettement réfracté. On a une image ordinaire et une image extraordinaire d'un objet S. Le cristal permettant de les obtenir est dit *biréfringent* ou *anisotrope.* Or, les rayons qui traversent le spath sont polarisés : on a pu montrer que la vibration du rayon ordinaire se fait dans un *plan perpendiculaire au plan de figure,* alors que la vibration du rayon extraordinaire se fait dans le *plan de la figure ;* pour disposer d'un seul type de rayonnement polarisé, il faut éliminer l'autre...

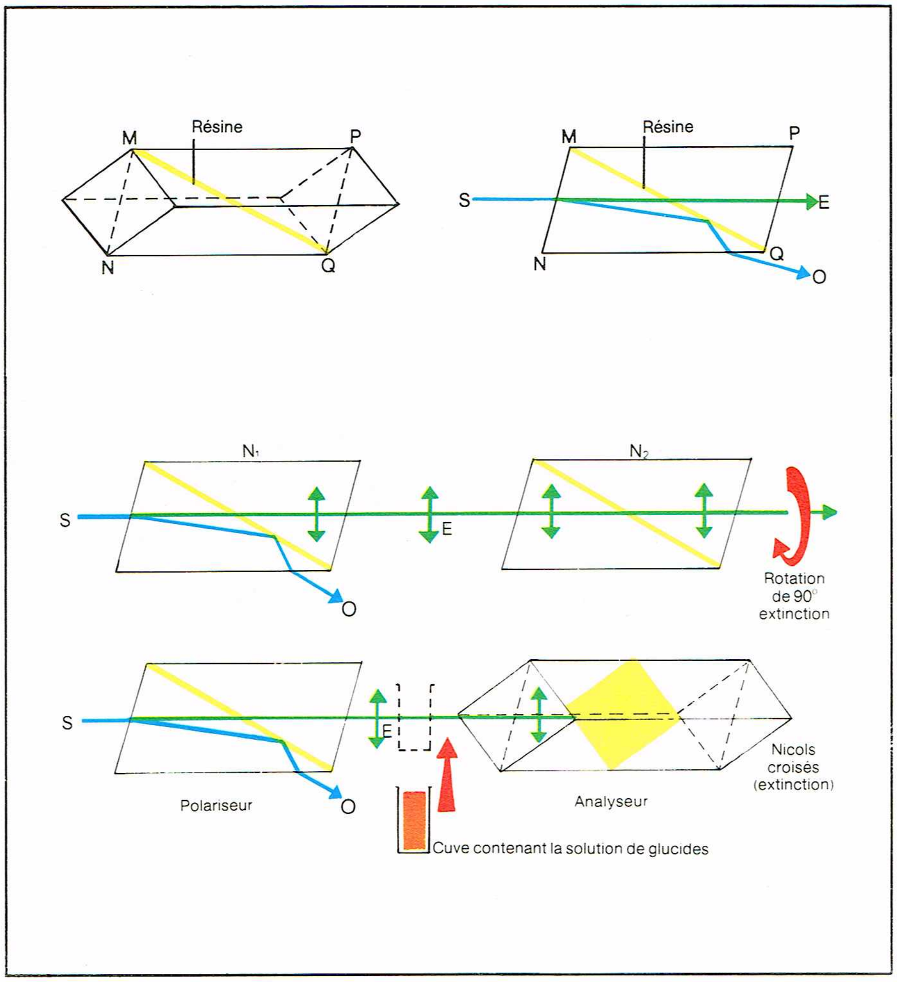

Richard Colin

▲ ***Obtention de la lumière polarisée selon la méthode de Nicol, qui utilisait pour cela un cristal de spath.***

Pour obtenir un *faisceau de lumière polarisée,* il y a plusieurs méthodes ; la plus intéressante est celle de Nicol. Pour cela on taille le cristal de spath suivant un plan perpendiculaire au plan MNPQ de la figure (ci-dessus) et passant par MQ. On recolle les deux moitiés en utilisant une résine naturelle d'indice convenable, le baume du Canada. A travers le cristal ainsi reconstitué mais truqué, on fait passer un faisceau de lumière venant de la source S. En entrant dans le spath, ce faisceau se dédouble comme précédemment ; le rayonnement ordinaire est réfracté dans le spath et subit la *réflexion totale* en atteignant le baume ; par contre, le rayon extraordinaire traverse le baume, l'autre moitié du cristal, puis ressort ; on a donc un seul faisceau de lumière polarisée à la sortie du cristal, et la vibration se fait dans le plan de la figure.

Le faisceau de lumière polarisée peut être éliminé en utilisant un second cristal placé sur le même axe que le premier. En effet, si le plan de collage du second nicol N_2 (passant par MQ) est *perpendiculaire* au plan correspondant du premier nicol N_1, le système élimine le rayonnement transmis par N_1. Par contre, la lumière polarisée traverse N_2 si le plan de collage est parallèle à celui de N_1. On a donc une extinction avec des *nicols croisés* dont l'un a été tourné de 90° par rapport au premier.

Influence des glucides sur la lumière polarisée

Les cristaux des glucides sont biréfringents. De plus, les solutions possèdent un *pouvoir rotatoire ;* en effet, si l'on place entre des nicols croisés une cuve plate à faces parallèles, contenant la solution à étudier, la lumière polarisée traverse le second nicol, ou nicol analyseur ; pour obtenir de nouveau l'extinction, il faut tourner l'analyseur d'un certain angle, vers la droite ou vers la gauche ; cet angle dépend de la nature du glucide que l'on étudie.

Arago mit en évidence, en 1811, le pouvoir rotatoire de certaines substances, en utilisant des lames de quartz placées entre les nicols. En 1815, Biot découvrit que certains liquides possédaient également cette propriété. Par contre, la plupart des substances liquides ainsi que les substances amorphes, telles que le verre ou certains cristaux, n'ont pas ce pouvoir rotatoire. En fait, celui-ci est réservé aux cristaux et aux molécules qui présentent une *dissymétrie* (c'est-à-dire dont l'arrangement doit être tel qu'ils ne soient pas superposables à leur image donnée par un miroir plan). Tous les cristaux sont dans ce cas et sont biréfringents sauf les cristaux du système cubique (par exemple, le diamant), car l'image spatiale d'un cube est également un cube, superposable au premier.

Avec certaines substances douées de pouvoir rotatoire, il faut tourner l'analyseur vers la droite pour avoir l'extinction ; on les appelle *dextrogyres* (+) ; avec d'autres, dites *lévogyres* (—), l'extinction s'obtient en tournant l'analyseur vers la gauche. Pour une substance dextrogyre, il existe un *isomère* lévogyre dont les propriétés chimiques sont les mêmes, alors que les propriétés biologiques sont différentes en général. Ces isomères sont dits *énantiomorphes* (du grec *enantios,* qui signifie contraire) ou, plus simplement, *inverses optiques.* Dans un cristal, on peut avoir une combinaison équimoléculaire des deux inverses ; cette combinaison donne une forme *racémique.* L'étude de ces formes a été effectuée par Pasteur entre 1848 et 1858 ; celui-ci démontra l'existence des inverses et la nature du racémique en triant sous la loupe des cristaux d'acide tartrique ; dans le cas du fructose, sucre abondant dans les fruits, il utilisa une autre technique : la levure de bière consomme préférentiellement le fructose dextrogyre naturel ; si on lui fournit le racémique, elle s'attaque au sucre dextrogyre et l'élimine ; il reste donc l'isomère lévogyre... Tous les oses comportent deux formes énantiomorphes à pouvoir rotatoire spécifique.

Pour doser les sucres, on peut utiliser un *saccharimètre,* polarimètre qui rappelle le système précédent. On utilise aussi le *polarimètre Laurent,* plus complexe mais fondé sur le même principe.

Nature chimique des oses

La formule brute des oses peut être déterminée par combustion. La molécule est une chaîne non ramifiée ; chacune comporte à la fois une fonction aldéhydique CHO et une ou plusieurs fonctions alcooliques dont une fonction alcool primaire CH_2—OH.

L'ose le plus simple, ou *biose,* comporte deux atomes de carbone ; on l'appelle aldéhyde glycolique :

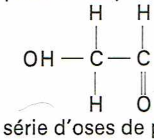

Il existe toute une série d'oses de poids moléculaire plus élevé. Ils sont constitués par adjonction de *n* fois 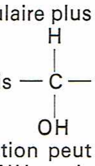

entre les deux carbones du biose. Cette adjonction peut être effectuée par le procédé de Kiliani (ose + CNH → nitrile alcool, qui, hydrolysé puis réduit, fournit un ose enrichi d'un carbone).

Le premier ose obtenu, un *triose,* comporte *deux formes énantiomorphes,* l'une dextrogyre, l'autre lévogyre. C'est le glycéraldéhyde (la glycérine comporte aussi trois carbones).

Ces énantiomorphes sont affectés du signe correspondant à leur pouvoir rotatoire ; on les désigne, de plus, par les lettres D et L.

La méthode de Kiliani permet d'obtenir un *tétrose* qui comporte quatre formes : les deux énantiomorphes venant du D (+) glycéraldéhyde gardent devant leur nom la lettre D, mais sont alors D (+) et D (—) ; il en va de même pour les deux isomères optiques venant du L (—) glycéraldéhyde : ils sont L (+) et L (—). Les lettres désignent donc leur origine par rapport au triose et les signes leur pouvoir rotatoire. Ces conventions s'appliquent également aux autres oses.

A partir des quatre tétroses, on peut obtenir un *pentose* avec *huit formes* isomériques; deux d'entre celles-ci correspondent aux *riboses,* dont l'importance biologique est fondamentale puisqu'ils entrent dans la constitution des acides nucléiques, molécules supports de l'information génétique. De la même manière, on obtient *seize formes* isomères pour l'*hexose;* deux d'entre ces formes correspondent au *glucose,* qui est l'ose le plus abondant de la cellule. C'est également ainsi qu'on synthétise les formes de l'*heptulose* à sept carbones.

Ces oses peuvent exister sous deux états chimiques : nous venons d'évoquer l'existence d'une série *d'aldoses* pour lesquels il n'y a qu'un alcool primaire et, à l'autre bout, un radical aldéhyde; or il existe aussi une série de *cétoses,* isomères des aldoses et qui ont deux fonctions alcool primaire et une fonction cétone C = O. Comme on le voit, la diversité des oses est importante. Signalons que la nomenclature des oses a été établie par Wohl et Freudenberg.

Les oses sont, tout compte fait, les molécules organiques les plus simples, et cependant nous voyons qu'ils peuvent avoir un nombre important d'isomères.

La question de la structure des oses n'est pas épuisée ! En effet, les molécules en solution possèdent une structure qui n'est pas celle que l'on vient de donner... Jusqu'à présent nous avons vu des molécules linéaires; cependant, en solution, les *molécules se cyclisent,* et la fonction aldéhyde qui est à l'une des extrémités (1) sert à « boucler la boucle » : il se forme un *pont oxygène* entre les carbones 1 et 3 pour les tétroses, 1 et 5 pour les hexoses. En conséquence, la fonction aldéhyde du sucre disparaît dans les formes cycliques. En solution, il y a trois formes : la forme linéaire, de D glucose par exemple, qui ne représente qu'une petite partie de l'ensemble; le D glucose α et le D glucose β cycliques, qui sont des formes abondantes.

Ces formules (Tollens) ont seulement une valeur didactique : le *pont oxygène,* entre les carbones 1 et 5, donne à la molécule une forme qui rappelle le *noyau pyran;* c'est pourquoi on parle, dans ce cas, non de glucose, mais de *glucopyrannose* (Haworth).

Enfin, il existe une *forme instable* des oses qui correspond à un autre type de formule cyclique : il s'agit des *furannoses,* où le pont oxygène se situe entre 1 et 4. On parlera, par exemple, du D (+) glucofurannose, forme α ou forme β. Seuls les pentoses ont une forme furanose stable (par exemple, le ribose).

Nous avons donné les caractères essentiels de la structure chimique des oses; celle-ci n'est pas simple, mais il était important de souligner que la stéréochimie des substances organiques joue un rôle fondamental dans leur activité physiologique.

La recherche des oses

Il existe diverses réactions colorées permettant de caractériser certains oses; ces réactions, obtenues avec des phénols, permettent aussi le dosage. Les sucres réducteurs (aldoses essentiellement) peuvent aussi réagir avec des métaux lourds et donner un précipité.

Au cours des visites médicales, on utilise couramment ce principe pour mettre en évidence les glucides dans les urines.

La solution bleue de liqueur de Fehling (sulfate de cuivre en milieu alcalin) donne un précipité rouge brique d'oxyde de cuivre quand on la chauffe en présence d'un ose réducteur de l'urine. Ce type de réaction se produit avec divers sels de métaux lourds : l'ose réduit le sel en libérant le métal ou en provoquant la formation d'un oxyde.

La chromatographie sur papier permet de déterminer la nature des sucres d'une solution. La révélation se fait par le nitrate d'argent ammoniacal qui précipite à chaud après sa réduction par les oses (aldoses); on compare ensuite avec des chromatogrammes témoins faits avec des sucres connus.

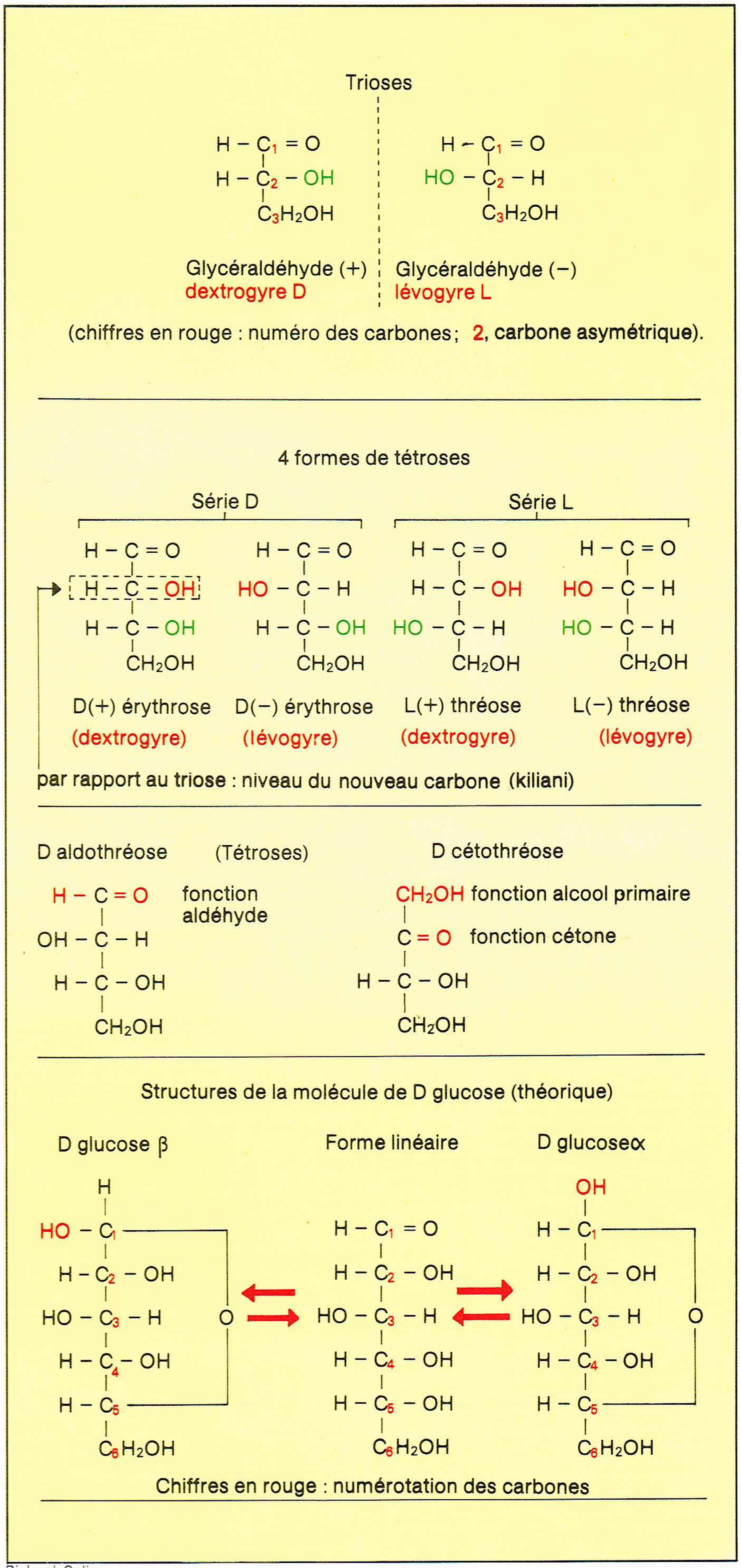

Richard Colin

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

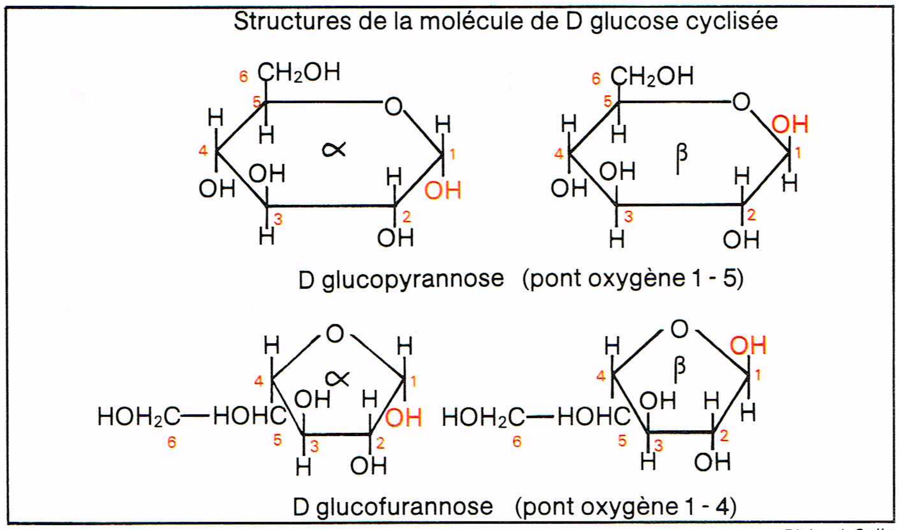

Richard Colin

▲ *En haut, les oses sont des substances largement répandues que l'on trouve en grande quantité dans les fruits; dans les dattes (fruit de* **Phoenix dactylifera**) *le glucose représente 32 % du poids frais et le fructose 24 %.*

▶ *Absorption sélective du glucose au niveau des cellules de l'intestin : en vert et en bleu, deux isomères du glucose qui pénètrent moins bien que ce dernier; la pénétration des oses, qui s'effectue selon le gradient de concentration des sucres, n'est pas un transport actif, mais une diffusion facilitée.*

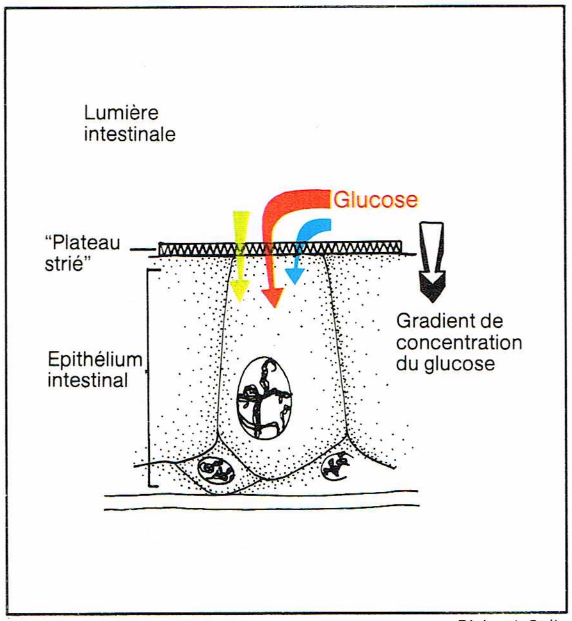

Richard Colin

Les oses dans la nature

Les oses sont des substances très largement répandues. En particulier, le *glucose* constitue le *combustible* essentiel pour l'activité cellulaire puisqu'il fournit, en se dégradant et en se fragmentant, l'énergie nécessaire à la synthèse des molécules les plus diverses. Il peut être stocké dans les cellules végétales : il constitue 32 % du poids frais des dattes, 8 % de celui des raisins et 1,6 % de celui des tomates; il s'agit du *D* (+) *glucopyranose*. Par ailleurs, le *D* (—) *fructose,* ou sucre de fruit, représente 24 % du poids des dattes, de 7 à 8 % du poids frais des poires, des pommes et des cerises; on en trouve également dans le sperme, bien que ce sucre soit peu abondant chez les animaux. Le *galactose,* plus fréquent chez les animaux, se trouve cependant aussi chez les végétaux, dans les gommes et les mucilages. Quant au *ribose* et au *désoxyribose,* ils entrent dans la constitution des acides nucléiques responsables de la coordination des synthèses et de la transmission des caractères génétiques.

Les animaux absorbent des glucides avec leur nourriture; quand il s'agit de sucres complexes, ils sont dégradés pour obtenir des oses, puis absorbés par les cellules; les glucides sont stockés : il s'agit généralement de sucres polymérisés pour former le glycogène.

Les plantes peuvent synthétiser les oses en utilisant l'énergie solaire, l'eau et le gaz carbonique de l'air (c'est la photosynthèse, particulière aux plantes pourvues de pigments chlorophylliens). Elles peuvent stocker un polymère du glucose, l'amidon; de plus, la cellulose des parois squelettiques est aussi du glucose polymérisé.

Passage des oses dans la cellule animale

Au niveau membranaire, le glucose est rapidement absorbé par les cellules; ce phénomène fut mis en évidence, dès 1898, par Conheim sur des anses isolées d'intestin de chien. En 1902, Nagano découvrit que l'absorption est sélective, c'est-à-dire qu'elle n'est pas égale pour les isomères du glucose tels que le galactose ou le mannose. De 1956 à 1959, Crane et Wilson ont montré que la structure D pyranose était un des facteurs essentiels de pénétration des oses dans la cellule.

L'absorption des sucres nécessaires pour le métabolisme a pu être considérée comme un transport actif dépendant du degré d'activité respiratoire de la cellule (Fisher et Parson, 1949). En 1957, en faisant varier la température, Papadopoulos et Roe ont montré *in vitro,* avec des cultures de tissus, que l'absorption d'un ose se fait à la même vitesse que la phosphorylation des hexoses en présence d'ATP, donc à la même vitesse que le métabolisme. On estime maintenant qu'il ne s'agit pas d'un véritable transport actif mais d'une *diffusion facilitée,* la pénétration dans les cellules s'effectuant dans le même sens que le gradient de concentration des sucres (Benoit).

Principe de la synthèse des oses dans les cellules végétales. La photosynthèse

La synthèse des oses dans les cellules végétales dépend directement de la présence de *chromoprotéines.* Les pigments chlorophylliens sont les plus importants; le groupement prosthétique de la *chlorophylle* a un noyau porphyrique magnésien rappelant celui de l'hémoglobine. Il existe une chlorophylle *a* et une chlorophylle *b.* La chlorophylle est responsable de la coloration verte des végétaux, c'est-à-dire que le spectre d'absorption de la chlorophylle est maximal dans le rouge. Le mécanisme sera vu plus précisément en étudiant les phénomènes qui se déroulent au niveau des plastes colorés de la cellule végétale.

Les holosides à petites molécules

Constitués de deux ou trois molécules, on les appelle encore des *oligosaccharides.* Deux ou trois molécules d'oses se condensent en perdant une ou deux molécules d'eau.

Le **saccharose** est abondant dans la canne à sucre, la betterave, la carotte, etc. Son hydrolyse donne une molécule de D (+) glucose α et une molécule de D (—) fructose β. Leur liaison se fait au niveau des groupements réducteurs; le saccharose n'est donc pas réducteur. La

L. Garbison - Fotogram

G. Frizzi

canne à sucre (Graminée) a une tige, ou chaume, remplie d'une moelle constituée de cellules dont la vacuole contient du saccharose en solution. Il suffit de presser le chaume pour en extraire le jus de canne, qui contient 5 % de saccharose; ce dernier est centrifugé et cristallisé. Les cellules du tubercule de betterave à sucre contiennent aussi du saccharose, que l'on extrait par percolation par l'eau chaude.

◀▲ ***A gauche,***
des touffes de canne à sucre,
Graminée dont la tige contient une solution
de saccharose à 5 %.
A droite,
un Protozoaire Flagellé vivant en symbiose
dans le tube digestif du termite
Calotermes lucifugus, ***permettant ainsi la dégradation***
de la cellulose ingérée par ce dernier.

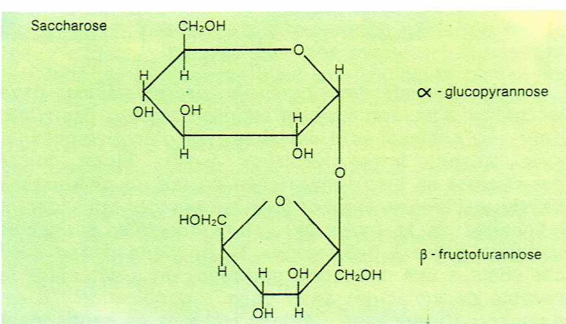

Richard Colin

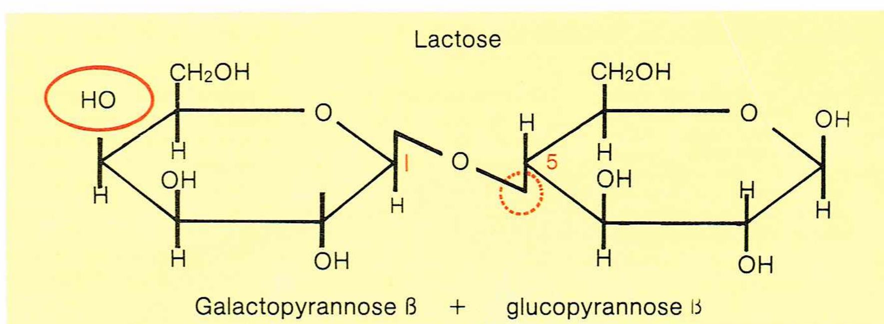

Richard Colin

Le saccharose ne pénètre pratiquement pas dans les cellules animales vivantes; chez les Vertébrés, une enzyme digestive l'hydrolyse au niveau de l'intestin, ce qui permet donc l'absorption des oses libérés.

Chez les Insectes, l'hémolymphe qui constitue le fluide sanguin, assez pauvre en cellules, contient une grande quantité de **tréhalose,** glucide formé par condensation de deux molécules d'α glucopyrannose.

Le **maltose** ne diffère du tréhalose que par un détail puisque c'est un diholoside fait d'α et de β glucopyranose. Il est important du point de vue alimentaire : il résulte, en effet, de l'hydrolyse enzymatique de l'amidon exogène et se transforme en glucose en présence d'une enzyme intestinale : la *maltase.* Un mécanisme de même nature se produit chez les végétaux : au moment de la germination, l'amidon endogène se transforme en maltose.

Le **cellobiose** vient de l'hydrolyse de la cellulose; il est, par conséquent, important dans la nutrition de tous les animaux mangeurs de bois, c'est-à-dire les xylophages, tels que les tarets, qui possèdent une enzyme : la *cellulase,* capable de fournir le diholoside. Il est également important pour d'autres xylophages (Longicornes, etc.) ou pour les termites et les Ruminants; dans ces deux derniers cas, des Ciliés ou des Bactéries vivent en symbiose dans le tube digestif et digèrent la cellulose en libérant le cellobiose, qui sera ensuite dégradé puis utilisé par l'hôte.

Le **lactose,** sucre du lait, n'a pas une saveur très sucrée. Il est fait d'une molécule de D glucopyrannose β et d'une molécule de D galactopyrannose β. Son importance est relativement grande : on en trouve de 4 à 7 % dans le lait de vache.

A part le saccharose, tous ces diholosides sont réducteurs puisque leurs molécules constitutives sont liées en 1—4, ce qui laisse un aldéhyde libre. Il existe aussi des triholosides mais d'importance biologique réduite : le **raffinose** et le **gentianose.**

Les holosides à grosses molécules, ou polysaccharides, ou polyosides

Il en existe plusieurs types, suivant la nature des molécules de base; les plus importants sont les polyglucoses.

La **cellulose** forme, chez les végétaux, de très longues *chaînes de molécules* de D (—) glucopyrannose; ces chaînes ont de 600 à 12 000 Å de long et sont réunies en *faisceaux* d'environ 60 Å de diamètre, appelés micelles, elles-mêmes réunies en *fibrilles élémentaires* groupées en *microfibrilles* d'environ 100 Å; ces microfibrilles sont encore associées en *fibrilles* de 0,1 à 1 μ de diamètre. Les fibrilles forment soit des réseaux, soit des systèmes hélicoïdaux dans les membranes primaires des cellules

végétales. Dans les membranes secondaires de certaines cellules, présentant, entre autres, la particularité d'être étirées et portant le nom de *fibres,* les fibrilles se regroupent en trois zones, sous forme de systèmes hélicoïdaux pouvant tourner en sens inverse les uns des autres et dont le pas est serré ou lâche. Ces fibres, formées par la cellule, se trouvent dans la tige du lin et au niveau de longs poils unicellulaires, sur les graines du cotonnier.

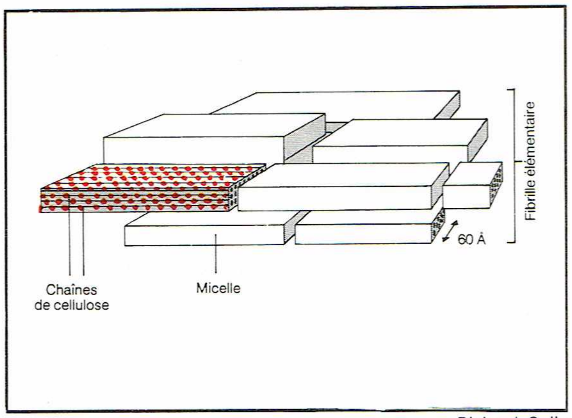

Richard Colin

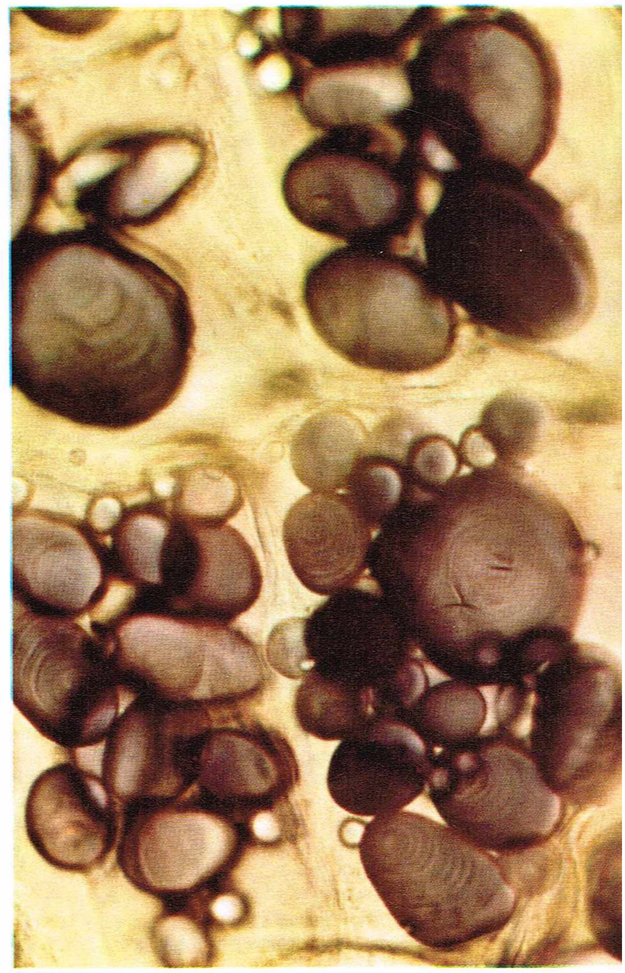

P. Castano

▶ A gauche, structure et disposition des micelles constituant une fibrille élémentaire de cellulose. A droite, grains d'amidon de tubercule de pomme de terre, colorés par l'iode (× 500).

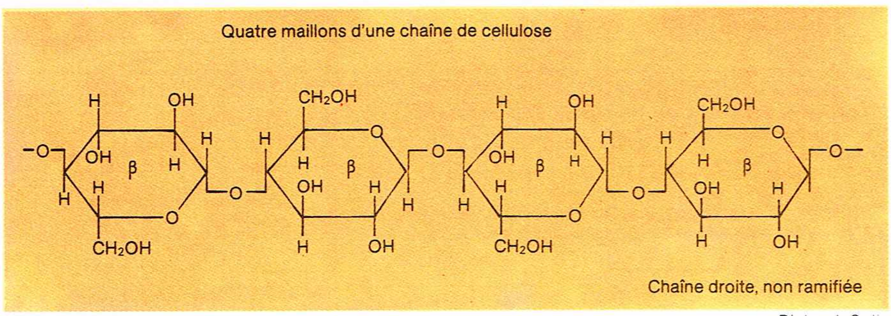

Richard Colin

▲ Détail de la macromolécule de cellulose; cette chaîne non ramifiée compte de 2 000 à 3 000 molécules de glucose dans le cas de la fibre de coton et seulement 250 pour le bois.

Dans le cas du coton, la macromolécule de cellulose, non ramifiée, comporte de 2 000 à 3 000 molécules de glucose; dans la cellule du bois, elle en compte seulement 250 unités. Le degré de polymérisation a pu être estimé par une méthode d'analyse viscosimétrique (Einstein), nécessitant une mise en solution de la cellulose. Le poids moléculaire des celluloses a pu être confirmé par des méthodes plus récentes mais plus complexes. La chaîne n'est *pas ramifiée;* par méthylation et hydrolyse, on obtient des tri- et des tétraméthyl-glucose.

En hydrolysant partiellement la cellulose en milieu acide, on peut observer une propriété intéressante de petits polymères, les **glucosanes;** en présence d'iode (solution de $I_2 + IK$), ces polymères se colorent en bleu. Ainsi, on peut constater que les parois cellulosiques de la graine de datte, particulièrement épaisses, sont constituées par des emboîtements de couches alternativement claires et foncées, donc par un squelette cellulosopectique complexe (nous reviendrons sur cette coloration caractéristique des polymères glucosidiques). La synthèse de la cellulose par la cellule n'est pas un phénomène simple, et il a fallu attendre que la méthode des traceurs radioactifs soit mise au point pour commencer à mieux en comprendre le mécanisme.

La **callose,** macromolécule végétale voisine, est formée par des glucoses β liés en 1—3. En hiver, la callose oblitère les tubes criblés, empêchant la circulation de la sève élaborée.

L'**amidon,** abondant dans la pomme de terre et dans tous les féculents, est répandu chez la plupart des végétaux et même chez les micro-organismes. Il constitue des grains insolubles dans le hyaloplasme. C'est une substance formée à partir des oses de la photosynthèse et mise en réserve dans la cellule. L'hydrolyse ne donne pas de cellobiose, mais du maltose et, enfin, du D glucose. La méthode viscosimétrique montre qu'il s'agit d'un polymère de 100 à 2 000 molécules qui forment un ensemble *ramifié* comme on peut le constater par méthylation et hydrolyse : on obtient du diméthylglucose.

En fait, il existe *deux types de macromolécules* dans les grains d'amidon visibles au microscope : l'*amylose,* dont les chaînes sont linéaires (D glucopyranose α, avec liaisons intermoléculaires 1—4); l'iode colore ces chaînes en bleu foncé (c'est en fait un phénomène physique, l'iode se logeant dans les espaces qui séparent les unités de la molécule); l'*amylopectine,* à chaînes ramifiées grâce à des liaisons 1—6; l'iode donne avec ces chaînes une coloration pourprée; on a déterminé le nombre de molécules entre chaque ramification : il est d'environ 10 glucoses. Certains amidons ne contiennent que des chaînes ramifiées d'amylopectine : c'est le cas du riz et du maïs. On a découvert ces dernières années que ces molécules sont spiralées.

L'hydrolyse de l'amidon est d'une grande importance, à la fois pour la mobilisation des réserves lorsque le besoin s'en fait sentir pour le végétal et pour la nutrition des animaux : c'est le cas de l'homme, mais aussi de tous les omnivores ou herbivores, sans oublier les xylophages, qui digèrent non seulement la cellulose, mais aussi l'amidon mis en réserve dans le bois.

On peut effectuer des digestions *in vitro :* pour ce faire, on utilise l'*amylase* salivaire, qui fragmente la molécule en gros tronçons, les *dextrines,* qui se colorent en rouge avec l'iode quand la fragmentation enzymatique n'est pas trop poussée; ensuite, les petits fragments ne se colorent plus. Dans l'organisme, le processus aboutit au maltose, lequel est ensuite hydrolysé par une autre enzyme spécifique. Des diastases existent en abondance dans les plantes en germination, lors de l'utilisation des réserves pour la croissance de la plantule.

Le **glycogène** est, comme l'amidon, un polyoside de réserve. Bien qu'on l'appelle amidon animal, il existe chez certains Champignons, dont les Levures. On le trouve dans une très grande variété de cellules animales, en particulier musculaires et hépatiques.

Le glycogène est une macromolécule formée par plus de 15 000 « résidus » de maltose, donc par plus de 30 000 molécules de D glucopyranose en liaison 1—4. Cela

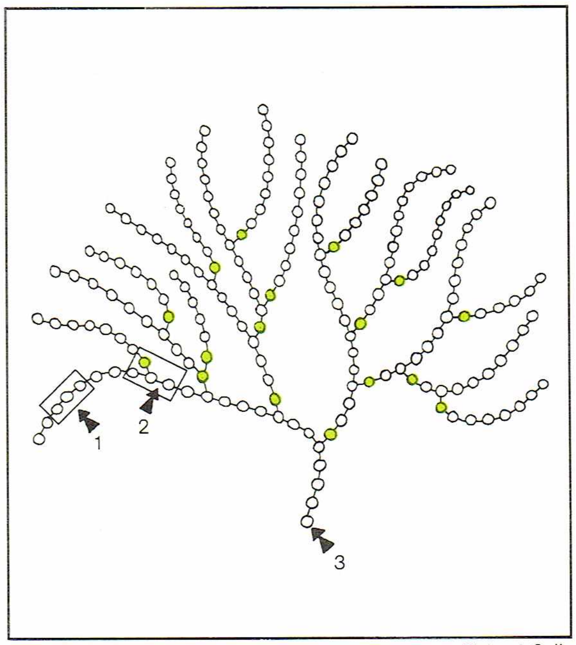

Richard Colin

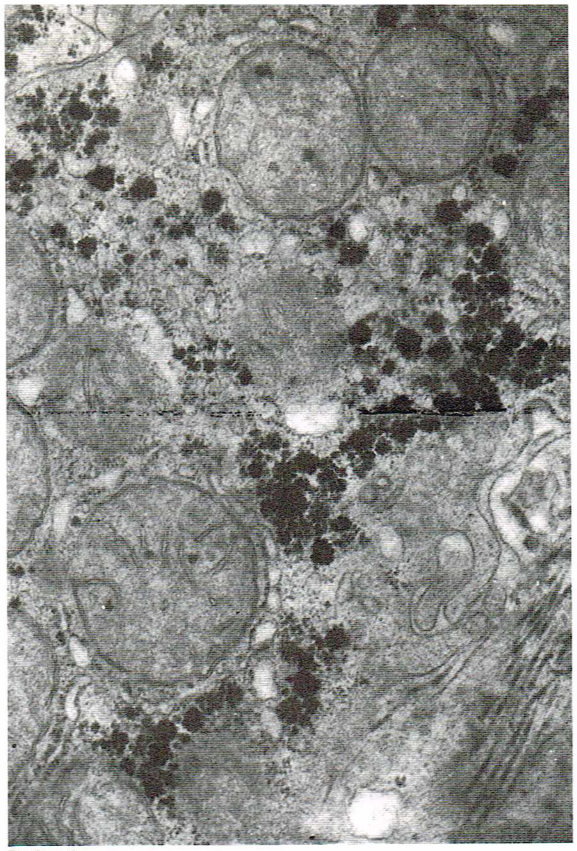

B. Graaf

J. Bouchard

donne des *chaînes très ramifiées*, encore mal connues jusqu'à ces dernières années. Les ramifications se font périodiquement sur la chaîne : une branche pour environ 5 résidus maltose (10 glucoses). Là encore, il s'agit d'une ramification par liaison 1—6, mais l'ensemble est beaucoup plus buissonnant que pour l'amylopectine, cela est confirmé par l'abondance du diméthylglucose obtenu après méthylation et hydrolyse. Ces macromolécules forment des solutions colloïdales ; une coloration spécifique permet de mettre le glycogène en évidence dans la cellule.

Notons ici, comme l'a souligné Durand, que les différences stéréochimiques entre les polyholosides qui ont été décrits jusqu'à présent sont très minimes : la *cellulose* est faite de β glucose ; c'est une molécule plane, non ramifiée ; l'*amidon* est fait d'α et de β glucose ; c'est une molécule spiralée, linéaire ou ramifiée ; le *glycogène* est fait d'α et de β glucose, mais la macromolécule spiralée est fortement ramifiée. Si les différences stéréochimiques sont légères, les propriétés biologiques sont bien différentes ; de telles constatations pourraient d'ailleurs être faites pour bon nombre de substances chimiques, biologiquement actives sous une forme et parfaitement inactives lorsqu'il s'agit d'un isomère.

Pour être utilisé par les cellules, le glycogène doit être dégradé. Il s'agit d'une *phosphorolyse :* l'acide phosphorique coupe les chaînes et se lie à une molécule de glucose, donc en position 1. Ensuite, le glucose est métabolisé : il sert pour la respiration et la synthèse d'une foule de molécules diverses. La phosphorolyse n'est possible qu'en présence d'une enzyme, la *phosphorylase ;* celle-ci, pour être active, nécessite le concours d'une autre enzyme, la *phosphorylase kinase*. Cependant, au cas où, dans une cellule, il y aurait trop de phosphorylase kinase, donc une trop forte activation de la phosphorylase et une dégradation trop rapide du glycogène, il existe une autre enzyme qui contrebalance le phénomène : la *phosphorylase phosphatase*. Il y a mieux encore : la phosphorylase kinase peut être activée par deux moyens connus qui impliquent l'existence d'AMP (adénosine monophosphate : 3',5',AMP cyclique) ou d'un facteur protéique allié aux ions Ca^{++}. On a, dans le cas de cette phosphorolyse, une exemple particulièrement net qui montre la complexité des phénomènes de régulation biochimique essentielle. La glycogénolyse est un phénomène encore mal connu ; on sait beaucoup de choses sur le muscle et le foie des Mammifères, mais on connaît mal les autres organes, y compris le foie et le muscle, des autres animaux.

Le phénomène inverse, c'est-à-dire la *formation des réserves glycogéniques*, peut se faire de diverses façons qui dépendent du matériel chimique disponible.

A partir du glucose se forment successivement deux dérivés phosphorylés, ce qui nécessite l'aide de deux

▲ ***Le glycogène** est un polyoside de réserve abondant dans les cellules musculaires et hépatiques.*
A gauche,
structure schématique du glycogène : 1, chaîne non ramifiée ; 2, ramification ; 3, le premier sucre réducteur porte en C_1 une fonction aldéhyde.
Au milieu,
rosettes de glycogène dans le hyaloplasme d'une cellule de foie d'embryon d'oie.
A droite,
coupe d'épiderme d'embryon de souris ; les cellules contiennent du glycogène coloré en rouge par la méthode P.A.S.

▼ *Schéma de la synthèse (à gauche) et de la dégradation (à droite) du glycogène ; la glycogénonéogenèse n'est pas représentée ici.*

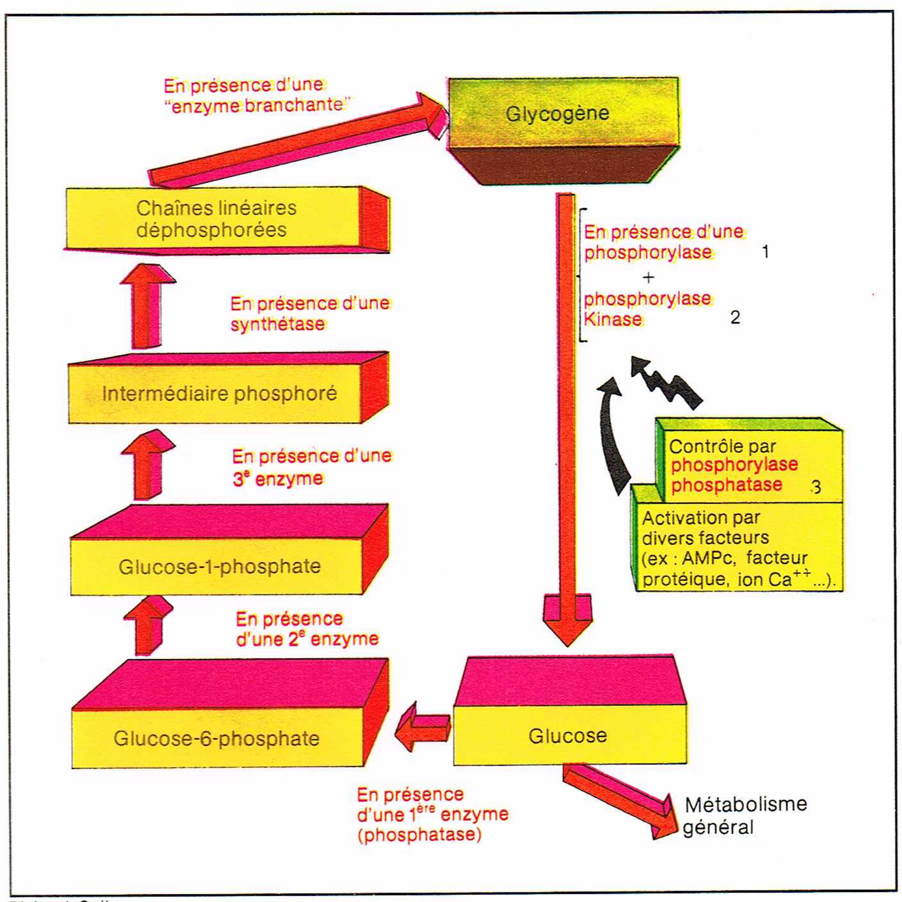

Richard Colin

Archives P2

▲ *Les gommes qui s'écoulent le long des arbres fruitiers blessés ou vieillissant sont constituées par des* arabanes, *polysaccharides spécifiquement végétaux.*

▼ *Les* pectines *forment un ciment qui unit les membranes cellulosiques des cellules végétales. Abondantes dans les fruits, ce sont les pectines qui permettent la gélification des confitures; ici une coupe de cerise (partie charnue).*

Nuridsany - Reichert

enzymes; puis, la polymérisation se produit en présence d'une enzyme spécifique, la *glycogène synthétase.* En fait, la succession des étapes est un peu plus complexe; par exemple, la synthétase ne permet que les liaisons 1—4; pour que se forment les ramifications, il faut une *enzyme branchante* permettant des liaisons 1—6. Cela constitue la *glycogénogenèse.*

A partir d'autres précurseurs, tels que des acides pyruvique et lactique, des acides du cycle respiratoire (cycle de Krebs) ou des acides aminés, la cellule fabrique aussi du glycogène. On parle de *glycogénonéogenèse;* elle implique des séries d'enzymes.

Il existe un équilibre entre la synthèse du glycogène et sa phosphorolyse. Selon Florkin et Schoffeniels, « c'est le rapport des concentrations de phosphate inorganique et de glucose-1-phosphate qui commande le sens de la réaction ». La synthèse du glycogène se ferait à partir du moment où il y a plus d'une molécule de glucose-1-phosphate pour trois molécules de phosphate minéral.

Il faut préciser que la formation (anabolisme) et la dégradation (catabolisme) du glycogène sont sous la dépendance de mécanismes hormonaux complexes.

Autres polysaccharides spécifiquement végétaux

Les **mannanes** sont des polyholosides (200 mannoses) non ramifiés qui constituent l'essentiel de la membrane squelettique de certaines graines de palmiers (comme le *Phytelephas,* qui donne le corozo de caripe, ou ivoire végétal). On les trouve aussi dans le bois des Conifères.

Un dérivé du mannose, le mannitol, qui est un hexalcool, se trouve dans les mannes, c'est-à-dire dans les exsudations sucrées qui apparaissent sur les feuilles du tilleul ou du frêne. Faut-il voir là un rapport avec la manne dont parle l'Ancien Testament? Dans ce cas, ce polyoside aurait du moins une importance historique.

Les **galactanes** existent dans le bois et les graines. Ils sont faits de 120 molécules de galactose.

Dans les tubercules de certaines Composées, comme le *Dahlia,* on trouve un **fructosane** d'environ 35 D glucoses: c'est l'*inuline.* Il y a des fructosanes dans beaucoup de groupes, en particulier chez les Bactéries.

Les **xylanes,** très communs, constituent l'essentiel des membranes lignifiées, éléments essentiels du bois. Leurs macromolécules sont ramifiées, formées de *D xylose* et, parfois, d'arabinose, qui sont deux sucres en C_5.

Les **arabanes** forment les gommes, telles que celles qui s'écoulent le long des arbres fruitiers lorsqu'ils vieillissent ou lorsqu'ils ont été blessés. La gomme arabique était considérée jusqu'en 1960 comme un polymère de l'arabinose; il est facile de provoquer l'hydrolyse acide de la gomme et de caractériser ces pentoses libérés à l'aide d'une réaction colorée en présence d'orcine. Mais on sait maintenant, grâce à l'utilisation de techniques nouvelles, qu'il s'agit de *sels de polyuronides* (acides dérivés des oses) et que les mucilages de diverses plantes, dont la graine de lin, sont des molécules très ramifiées et formées de *divers sucres.*

Nous venons de signaler l'existence de polymères où une partie des chaînes est, en fait, constituée non d'oses, mais d'acides uroniques, dérivés d'oxydation de ces oses. Il existe des polyuronides chez la plupart des végétaux. Les polyuronides les plus courants sont les **pectines.** Certains sont des constituants importants des parois cellulaires végétales; on sait depuis longtemps qu'il existe, entre les loges du squelette cellulosique, une substance qui cimente celles-ci et qui se colore électivement par le rouge de ruthénium. Cette partie du squelette, ou squelette pectique, est assez résistante et peut être observée facilement sur des coupes d'organes végétaux débarrassés de toute trace de protoplasme par un traitement vigoureux à l'hypochlorite de sodium (eau de Javel). D'autre part, certains de ces composés sont solubles dans l'eau : on les trouve dans les liquides cellulaires, par exemple dans les cellules de la pomme et surtout de la poire et de la tomate; ce sont eux qui permettent la gélification des confitures; lorsque la chair de la poire et de la tomate devient presque liquide, les pectines se solubilisent et les cellules deviennent libres à la maturité. L'acide pectique est une chaîne droite d'acides D galacturoniques en liaison 1—4.

Polysaccharides aminés plus spécifiquement animaux : les polyglucosamines

L'exemple de la **chitine** est important puisque c'est un des constituants essentiels du tégument des Arthropodes. De plus, il en existe chez les Champignons. Il s'agit de chaînes formées de molécules de N acétylglucosamine.

Le dimère que l'on obtient par hydrolyse correspond au *chitobiose,* qui peut être rapproché du cellobiose.

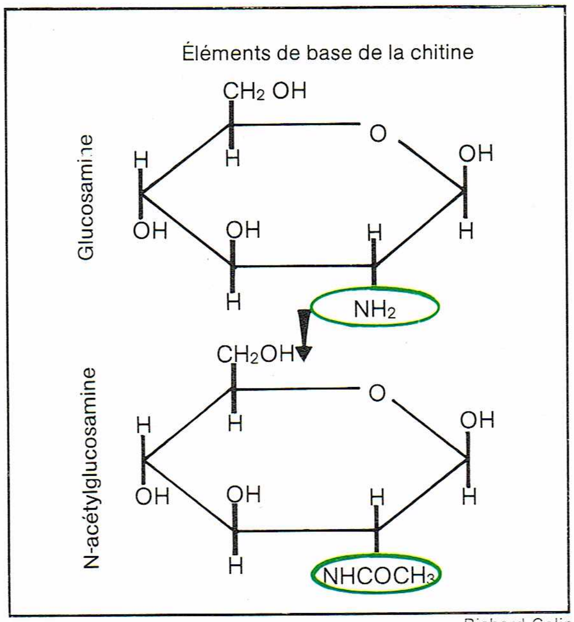

Richard Colin

Les hétérosides

On trouve des hétérosides, de types différents, dans de nombreuses familles de végétaux. Par hydrolyse de la molécule, on libère une ou plusieurs molécules d'oses, mais aussi des substances non glucidiques.

L'**amygdaloside,** substance contenue dans les amandes amères et dégageant une odeur caractéristique, est formé de deux molécules de glucose, d'une molécule d'acide cyanhydrique HCN et d'une molécule d'aldéhyde benzoïque

$$C_{20}H_{27}NO_{11} + 2H_2O \rightarrow 2\,C_6H_{12}O_6 + HCN + C_6H_5CHO$$

amygdaloside — glucose — ald. benzoïque

Notons que HCN est une substance extrêmement toxique pour la cellule vivante, dont il bloque la respiration ; il ne peut exister une telle molécule qu'à l'état de complexe dans un organisme vivant.

Les **anthocyanes** sont des substances solubles dans les vacuoles, qu'elles colorent en rouge, en mauve ou en bleu. Les anthocyanes sont composés d'un *ose,* le plus souvent du *glucose* ou du *galactose,* et d'*anthocyanide.* L'anthocyanide est un noyau hétérocycle (un noyau pyran entouré de deux noyaux benzéniques) ; c'est un noyau flavone. Une solution d'anthocyane traversée par la lumière absorbe l'UV et le vert-jaune ; elle laisse donc passer les autres longueurs d'onde et apparaît rouge, mauve, etc. Le pH peut modifier la couleur des anthocyanes : un pH acide donne une teinte virant au rouge, un pH basique une teinte virant au bleu. Heller précise que des ions métalliques, par exemple l'aluminium, peuvent être chélatés ; le chélat obtenu est bleu : ainsi, les *Hortensia,* naturellement roses, deviennent bleus lorsqu'ils sont arrosés d'une solution contenant des sels d'aluminium.

Les **composés flavoniques,** voisins des anthocyanes, sont dissous dans les vacuoles ; ils sont responsables de la couleur jaune des pièces florales, de certains bois et de certaines écorces. Beaucoup de composés flavoniques sont incolores pour l'homme mais peuvent paraître « colorés » aux abeilles, dont l'œil est sensible aux ultraviolets.

Les **tanins** sont des composés phénoliques dissous ou précipités dans les cellules des parenchymes corticaux de certains arbres, du chêne par exemple. On en trouve en quantité dans les galles provoquées par les piqûres d'Insectes ou par leurs larves (galles du chêne et de l'églantier). Les tanins empêchent la putréfaction des peaux d'animaux naturalisés ou préparés pour leur fourrure ; le bois de chêne ou de châtaignier, dont on fait des tonneaux, est également protégé par les tanins contre la putréfaction.

Enfin, les tanins jouent un rôle important dans la conservation et la maturation des vins (ils précipitent les protéines du jus de raisin).

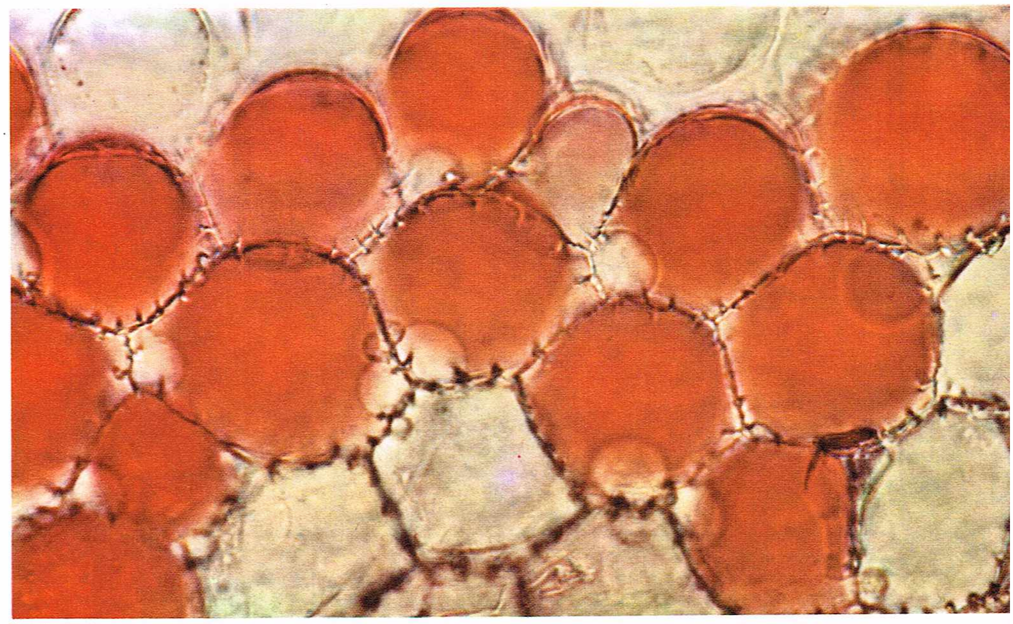

▼ *A gauche, formule de la N-acétylglucosamine, élément de base de la* **chitine.** *A droite, cellules papilleuses de l'épiderme de la face supérieure d'un pétale de* **Pelargonium** *; ces cellules montrent une grande vacuole remplie d'***anthocyane** *qui donne sa couleur au pétale.*

S. Blaise

Les mucopolysaccharides

Les mucopolysaccharides sont assez difficiles à classer ; en effet, s'ils sont communs dans les cellules ou dans le milieu interstitiel, ils s'y trouvent combinés à des protéines, l'ensemble formant des *mucoprotéines,* ou protéines polysaccharides, ou *P. P.* (Schubert, 1964).

Le poids moléculaire et la structure sont variables suivant les types de mucopolysaccharides. Ainsi, pour l'**acide hyaluronique,** substance constituant l'essentiel du ciment intercellulaire, le poids moléculaire varie de 1 à 5 × 10⁶, suivant le mode d'extraction ; la molécule est pelotonnée, ce qui explique la remarquable viscosité des solutions, même diluées. Les chiffres sont encore plus imprécis pour l'**acide chondroïtine sulfurique,** substance très condensée qui forme l'abondant ciment du cartilage.

▼ *Le tissu cartilagineux contient beaucoup de* **mucopolysaccharides** *; sur cette coupe colorée par le bleu de toluidine,* **l'acide chondroïtine sulfurique** *apparaît en rouge (métachromasie ; embryon d'Oiseau).*

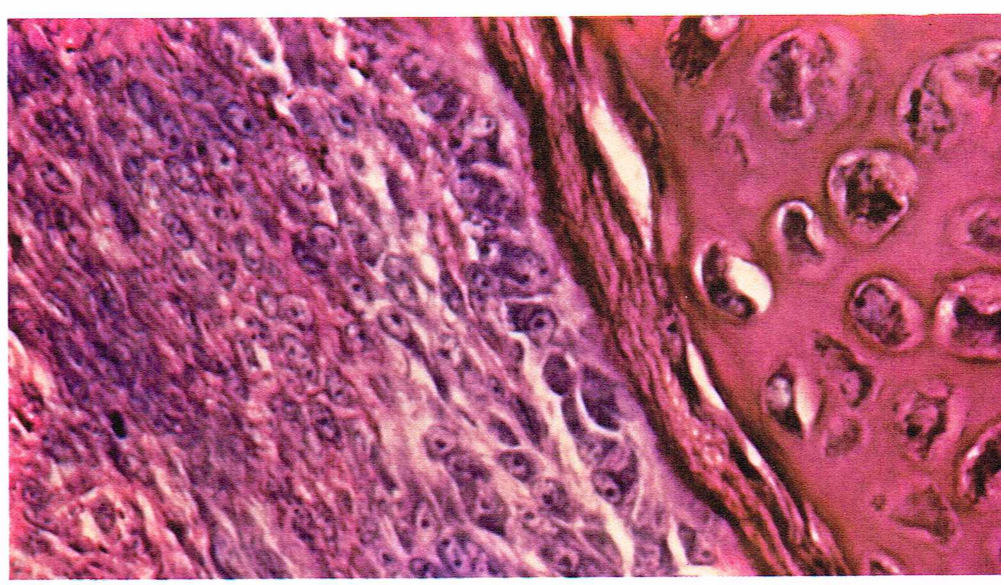

J. Bouchard

▼ ***Structure d'un mucopolysaccharide : le radical acide qui est ionisé donne un caractère anionique à la macromolécule; certains mucopolysaccharides peuvent être encore plus acides; les alcools restants sont remplacés par un acide soufré.***

Les molécules sont construites de manière homogène, c'est-à-dire que les motifs moléculaires obtenus par hydrolyse sont semblables pour un mucopolysaccharide donné; selon Durand, cette caractéristique exclut la possibilité d'une architecture complexe du polymère. Chaque dimère des chaînes est constitué par deux molécules dérivées des oses et liées en 1—3. Par contre, les dimères sont soudés en 1—4. Les dérivés des sucres sont de types divers : acides uroniques, sucres aminés, esters-sels sulfuriques.

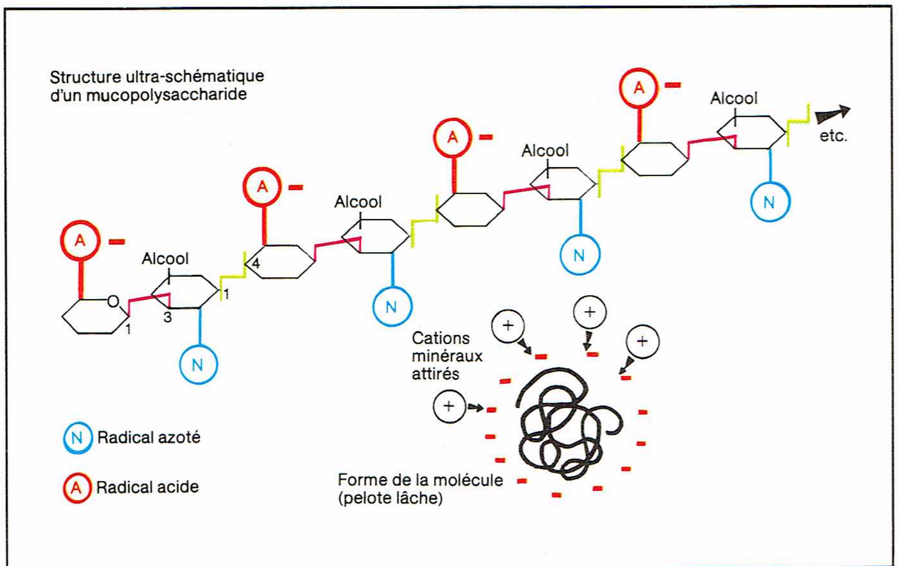

Richard Colin

▶ ***Mise en évidence des lipides dans les cellules sexuelles de l'ovaire de carpe; une coloration particulière les fait apparaître sous forme de grains noirs; ils sont absents dans les cellules sexuelles jeunes, qui sont de petite taille.***

R. Bauchot

Bien qu'ils soient extracellulaires et qu'ils participent de loin au métabolisme, les mucopolysaccharides, qui sont d'ailleurs assez mal connus car très complexes et très variés, sont loin de jouer un rôle secondaire. De leur abondance dépend la structure physique de la substance fondamentale du tissu conjonctif; certaines affections, en modifiant leur synthèse, entraînent des anomalies organiques, en particulier la viscosité de ces glucides est réduite dans le cas de proliférations de type tumoral. L'**héparine** empêche la coagulation du sang et intervient dans l'élimination du caillot hémorragique, lors des étapes finales de la cicatrisation d'une plaie par exemple. D'autres polysaccharides proches de l'héparine seraient impliqués dans les processus de tumorisation expérimentale chez les Rongeurs (Mizuno et Fujii, 1969). Par ailleurs, certains mucopolysaccharides, en formant un revêtement de nature spécifique à la surface des hématies, déterminent chacun des groupes sanguins; plus généralement, ce sont des facteurs essentiels des *mécanismes de reconnaissance* des cellules; on a montré que des mucopolysaccharides sont responsables de *propriétés antigéniques* liées à la coque de micro-organismes, donc du comportement et de la pathogénie de diverses Bactéries.

▼ ***Ces cellules, observées dans un ganglion lymphatique, contiennent de l'héparine, un mucopolysaccharide empêchant la coagulation sanguine.***

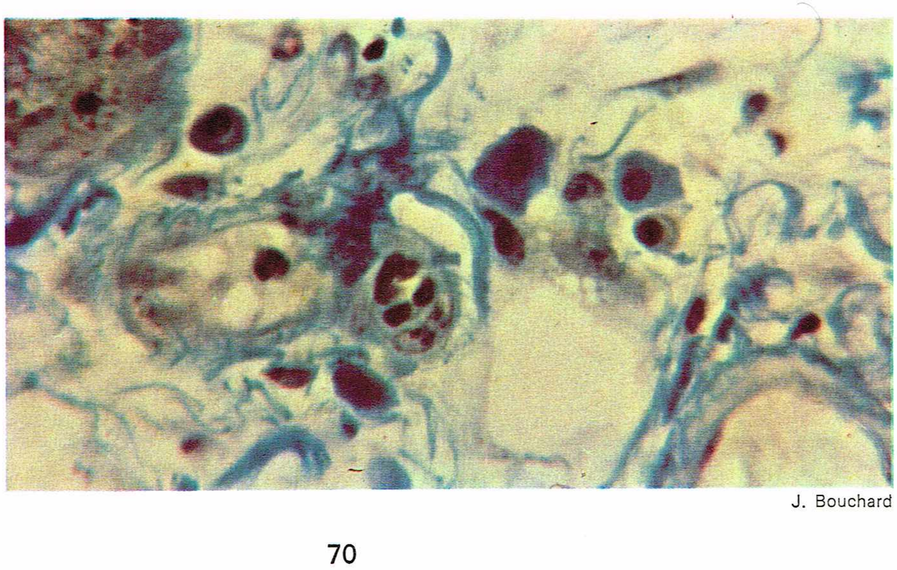

J. Bouchard

LES LIPIDES

Les lipides se présentent sous des formes variées : huiles, graisses, cires, lécithine du jaune d'œuf par exemple. Leur composition chimique est plus ou moins complexe : ils peuvent être constitués des mêmes éléments que les glucides, mais certains d'entre eux comportent des éléments nouveaux; c'est le cas, par exemple, pour les phospholipides du cerveau.

Les lipides sont en fait une famille assez hétérogène. Ils ont cependant une propriété commune, fondamentale pour la vie : ils sont solubles dans les solvants organiques mais très insolubles dans l'eau. Ils comportent des *radicaux hydrophobes,* dont les fonctions sont dominantes. Cependant, il existe dans toutes les molécules de lipides un *pôle hydrophile ionisable ;* on a, par exemple, une longue chaîne hydrophobe de groupes CH_2 et, à l'extrémité, on trouve un groupe COOH hydrophile et ionisable; on parle de grands ions organiques (Langmuir et Harkins). De telles substances sont dites *amphipolaires.*

Huiles, graisses et cires, les lipides ternaires (C, H, O)

La molécule des lipides ternaires, formée seulement de carbone, d'hydrogène et d'oxygène, rappelle celles des hydrocarbures paraffiniques. En général, ces lipides sont saturés. Ce sont des *esters* (ou *esters-sels*) résultant de la réaction entre des acides gras et des alcools. Les *acides gras*, lorsqu'ils sont saturés, ont pour formule générale $CH_3(CH_2)nCO_2H$, *n* pouvant être un nombre élevé, notamment dans le cas des cires.

L'*alcool* le plus fréquemment utilisé pour l'estérification au sein de la cellule est le *glycérol*, $CH_2OH—CHOH—CH_2OH$, trialcool bien connu sous le nom de glycérine.

Les acides gras

On constate que les acides gras eux-mêmes sont amphipolaires, à groupement hydrophile acide organique C = O.
\OH

Voici trois exemples :
Acide palmitique : $CH_3 — (CH_2)_{14} — CO_2H$
Acide stéarique : $CH_3 — (CH_2)_{16} — CO_2H$
Acide oléique (non saturé) :
$CH_3 — (CH_2)_7 — CH = CH — (CH_2)_7 — CO_2H$

Des acides aliphatiques (linéaires) de ce type, mais moins riches en carbone, ne sont pas des acides gras; ils sont en effet solubles dans l'eau :

Les acides gras possèdent une propriété d'une importance telle qu'il est nécessaire de la décrire précisément : versés à la surface d'une solution aqueuse, ils se disposent en un *film monomoléculaire;* on estime que, dans certains cas, de tels films peuvent avoir une structure qui s'apparente à celle des membranes cellulaires. La formation d'un film s'obtient aussi bien avec les acides gras que les esters de ces acides (Raleigh). Il suffit d'une très petite quantité de substance pour obtenir un film de grande surface. On obtient, sans précautions particulières, une couche de molécules qui restent dispersées à l'interface eau-air; le pôle hydrophile est en bas, au contact de l'eau, alors que la chaîne aliphatique est plus ou moins dressée hors de l'eau. Si l'on augmente la quantité d'acide gras ou d'ester, les molécules se rapprochent et l'on obtient un film continu. Langmuir a fait l'expérience suivante : si l'on verse avec précaution l'acide gras, on constate que ses molécules ont, en s'étalant, assez de force pour repousser deux fines plaques de verre posées à la surface de l'eau; cette force augmente si l'on comprime le film entre les plaques. Tout se passe comme si le film était un gaz bidimensionnel (Kruyt et Van Overbeek).

L'appareillage décrit sous le nom de « balance de Langmuir » permet de déterminer les forces et d'établir plusieurs conclusions : l'une des plaques maintenues en surface n'est pas mobile et supporte une balance de torsion qui permet de mesurer la pression transmise, quand on les comprime, par les molécules d'acides gras. La compression se fait en déplaçant la seconde plaque. La force qui s'oppose à la compression a une double origine : l'agitation moléculaire (thermique) et la répulsion électrostatique des molécules.

On peut établir, pour chaque acide gras, une courbe représentant la pression observée, en fonction de l'aire disponible pour une molécule. La pression augmente très rapidement lorsque l'aire disponible diminue, puis elle atteint un maximum avant de redescendre brusquement. Que s'est-il passé en surface? Quand on déplace la plaque mobile, les molécules dispersées sont amenées à former un film continu; la pression s'accroît fortement; ensuite, au niveau du maximum, il se produit un plissement du film, dont les molécules manquent d'« espace vital », et le pli se brise; d'où une baisse immédiate de la pression latérale de la part du film.

Langmuir ne connaissait pas la structure amphipolaire des molécules qu'il étudiait; il la découvrit par le calcul et constata que leur longueur est beaucoup plus importante que leur diamètre; en effet, au moment de la rupture du film, chaque molécule occupe l'aire minimale; on peut donc connaître son diamètre si l'on connaît le nombre total de molécules, et on trouvera sa longueur puisque l'on connaît le volume total de l'acide gras utilisé. Des recherches plus récentes ont montré que le film est d'autant plus résistant que les molécules sont plus longues.

Une conséquence de ces expériences, et non des moindres, est qu'il est possible d'étudier ces films en utilisant le microscope électronique; les résultats sont extrêmement spectaculaires.En combinant divers lipides pour qu'ils constituent ces membranes artificielles, on peut obtenir des figures qui rappellent plus ou moins ce que l'on observe au sein des membranes cellulaires. Des coupes faites perpendiculairement à la surface montrent l'arrangement des longues molécules, une telle manipulation peut permettre de constituer des *modèles* qui autorisent des raisonnements comparatifs.

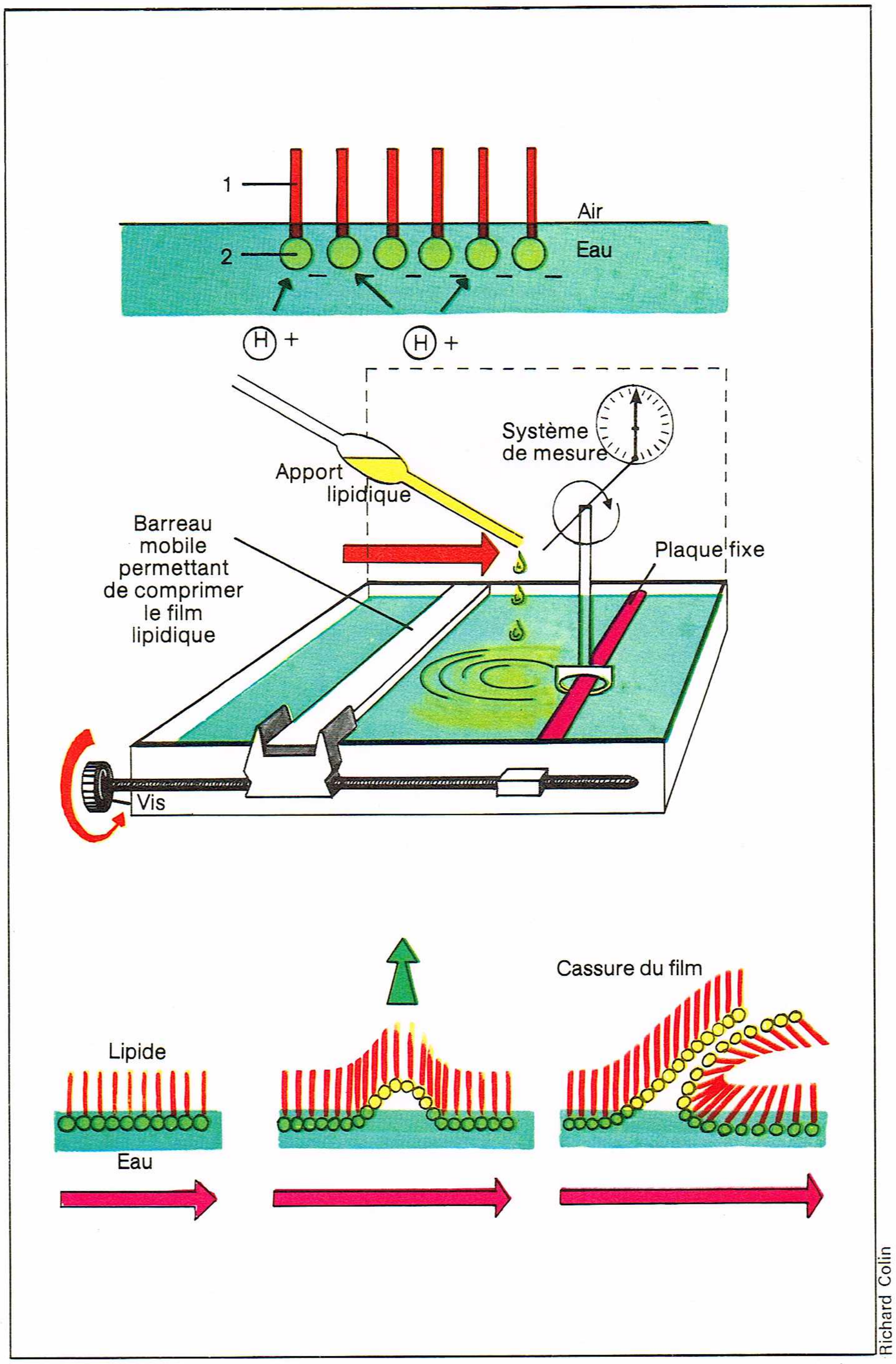

▲ ***En haut, disposition des molécules d'un film de lipides à la surface de l'eau : 1, longue chaîne hydrophobe; 2, pôle hydrophile ionisable. Au milieu, principe de la balance de Langmuir. En bas, rupture du film de molécules lipidiques lors d'une compression latérale.***

Nature, origines et rôles des lipides ternaires

Les acides gras sont, en général, combinés à divers types d'alcools : le *glycérol* (à deux fonctions alcool

▶ *Coupe d'embryon d'arachide* (Arachis hypogea) *colorée au soudan III; les lipides apparaissent en orange.*

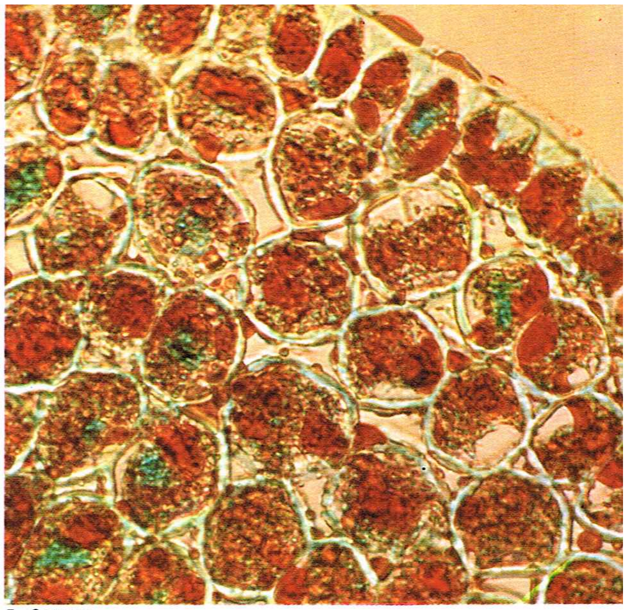

P. Castano

primaire et une secondaire), les *alcools* de poids moléculaire élevé, les *stérols* à molécules polyaromatiques. Chez les animaux, il est peu fréquent que les acides soient à l'état libre; ainsi, l'acide linolénique (la « vitamine » F selon Kayser) régulariserait la perméabilité cellulaire.

Les glycérides

Nature des glycérides. Les *acides gras végétaux* les plus répandus sous forme de glycérides sont : l'*acide oléique* commun et abondant dans la plupart des graines végétales; l'*acide linoléique,* lui aussi fréquent; l'*acide palmitique,* un des constituants de l'huile de palme; l'*acide linolénique* de l'huile de lin, utilisé dans la fabrication des peintures à l'huile et qui joue un rôle important comme siccatif de par sa rapidité à durcir par oxydation des chaînes carbonées; l'*acide arachidique* de l'huile d'arachide, ou huile de cacahuète; l'*acide ricinoléique* de l'huile de ricin.

Tableau de la teneur en acides gras de quelques huiles (en % du total d'acides gras).

Huile	Origine	Palmitique	Oléïque	Linoléïque	Linolénique
Olive	Péricarpe d'*Olea europaea* Olivier	10	70-80	7-10	—
Palme	Péricarpe d'*Elaeis guineensis* Palmier à huile	35-43	40-50	7-10	—
Lin	Graines de *Linum usitatissimum* Lin cultivé	6-16	13-36	10-25	30-60
Noix	Graines de *Juglans regia* Noyer	7	16	72	4

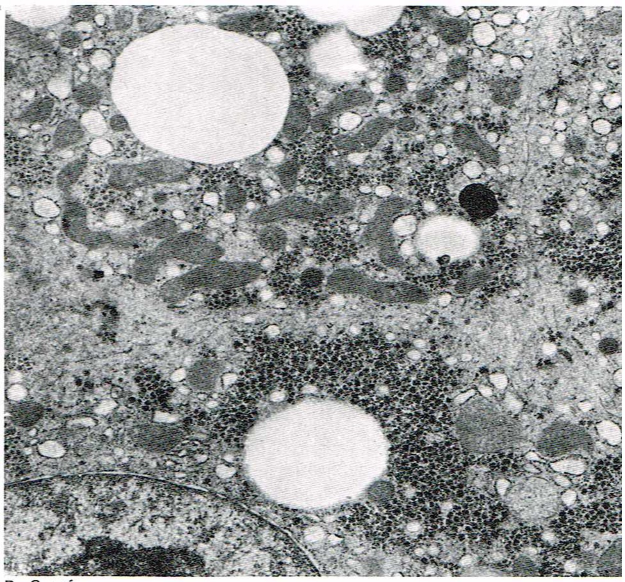

B. Graaf

▲▶ *Coupe de tissu hépatique d'une oie soumise à une alimentation hautement énergétique; ce « foie gras » montre une étroite association entre les lipides (gouttelettes « blanches ») et les glucides (glycogène sous forme de petites rosettes noires).*

Parmi les glycérides végétaux, on trouve des *beurres,* comme le beurre de cacao (utilisé, entre autres, pour la fabrication des suppositoires), des *graisses,* mais plus souvent des *huiles* plus ou moins visqueuses; ces dernières se trouvent sous forme de fines gouttelettes dans le cytoplasme, un peu à la manière de l'huile dans une vinaigrette fortement agitée. Il s'agit de substances de réserve abondantes dans les graines dites oléagineuses : soja, tournesol, chanvre, lin, colza, arachide, noix, ricin, olive, noix de coco (qui donne l'huile de coprah, utilisée dans la fabrication des savons et des bougies).

Les glycérides animaux peuvent exister sous forme d'*huiles* (huile de foie de morue, par exemple) ou de *graisses* (graisse de porc, graisse humaine, etc.).

Ces corps gras naturels sont des triglycérides qui servent de réserves énergétiques. Ils résultent de l'estérification du *glycérol* par trois acides gras qui ne sont pas toujours de même nature.

La formule générale est la suivante :

$$\begin{array}{r} CH_2 - O - CO - R_1 \\ | \quad\quad\quad\quad\quad\quad \\ R_2 - CO - O - CH \quad\quad\quad\quad\quad\quad \\ | \quad\quad\quad\quad\quad\quad \\ CH_2 - O - CO - R_3 \end{array}$$

Les radicaux R correspondent aux chaînes d'acides gras.

Le glycérol des cellules vivantes est sous forme L, ce qui confirme que la vie sélectionne d'emblée, pour tous les êtres, certains types de molécules dont la stéréochimie est essentielle. Une telle sélection reste bien mystérieuse.

Origine des glycérides. Dans l'organisme d'un Vertébré, les triglycérides qui sont absorbés avec la nourriture sont attaqués par une diastase : la *lipase digestive* du pancréas et de l'intestin; cette enzyme provoque une hydrolyse. Or, les enzymes lipolytiques sont hydrosolubles, alors que les lipides sont hautement hydrophobes; comment la réaction peut-elle donc s'effectuer? Il y a d'abord émulsion des glycérides : les molécules lipidiques se groupent en agrégats, ou *micelles,* sous l'action de la *sécrétion biliaire.* Dans une micelle, toutes les chaînes aliphatiques sont tournées vers le centre, alors que les pôles hydrophiles ionisés forment une couche externe continue. L'émulsion est produite par les *acides choliques* (C_{24}) de la bile et par leurs *sels* qui constituent eux-mêmes des micelles analogues à celles des savons; ces micelles s'adsorbent aux graisses, et les chargent électriquement tout en les stabilisant en milieu aqueux. C'est alors seulement que peuvent agir les lipases. Après l'absorption intestinale, les glycérides hydrolysés sont recombinés, en fonction de divers facteurs.

Chez les Vertébrés, la composition des graisses varie suivant l'âge de l'individu, la nature de l'organe et même en fonction des conditions climatiques; on sait, par exemple, que les corps gras à point de fusion bas sont abondants chez les hommes constitutionnellement adaptés au froid, comme les Esquimaux; la trioléine domine chez eux, en particulier, sous la peau des mains et du visage, exposés au froid.

Mais tous les corps gras du type des glycérides ne sont pas d'origine aussi directement alimentaire. C'est évidemment le cas des végétaux qui les synthétisent *de novo,* mais c'est aussi celui de tous les animaux. Chez ces derniers, une partie des lipides vient du métabolisme général. La synthèse est une nécessité physiologique; des lipides de structure sont indispensables, et il y a toujours une synthèse minimale d'acide gras même chez les maigres; toutefois, dans les cas de surnutrition, le métabolisme entraîne la mise en réserve de graisse. L'excès de glucides favorise particulièrement l'accumulation de graisse : outre les observations chimiques, les expériences chez l'animal sont très probantes; ainsi, le marquage par des isotopes radioactifs des glucides ingérés entraîne rapidement une accumulation de la radioactivité dans le tissu adipeux. Des acides gras sont néo-formés en abondance lorsque la nourriture est plus riche que l'optimum nécessaire pour les fonctions essentielles.

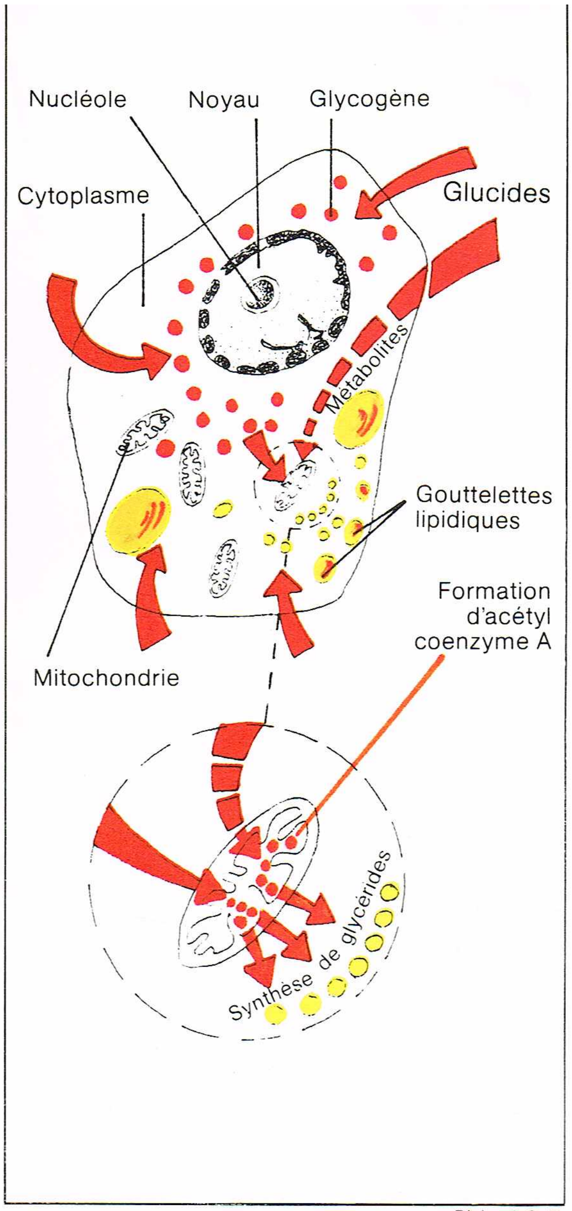

Richard Colin

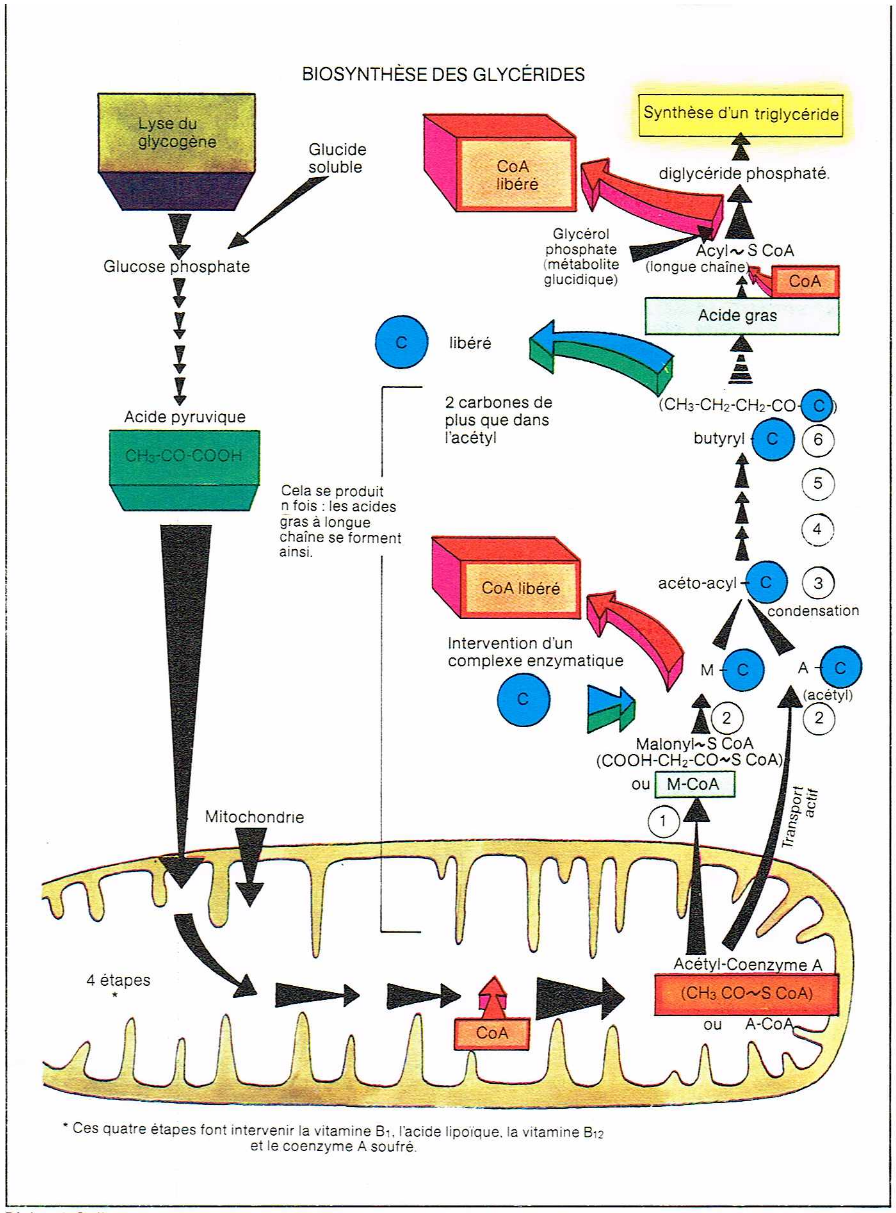

Richard Colin

◄▲ ***A gauche, schéma de la localisation de la synthèse des lipides dans une cellule. A droite, les grandes étapes de la biosynthèse des glycérides à partir des glucides.***

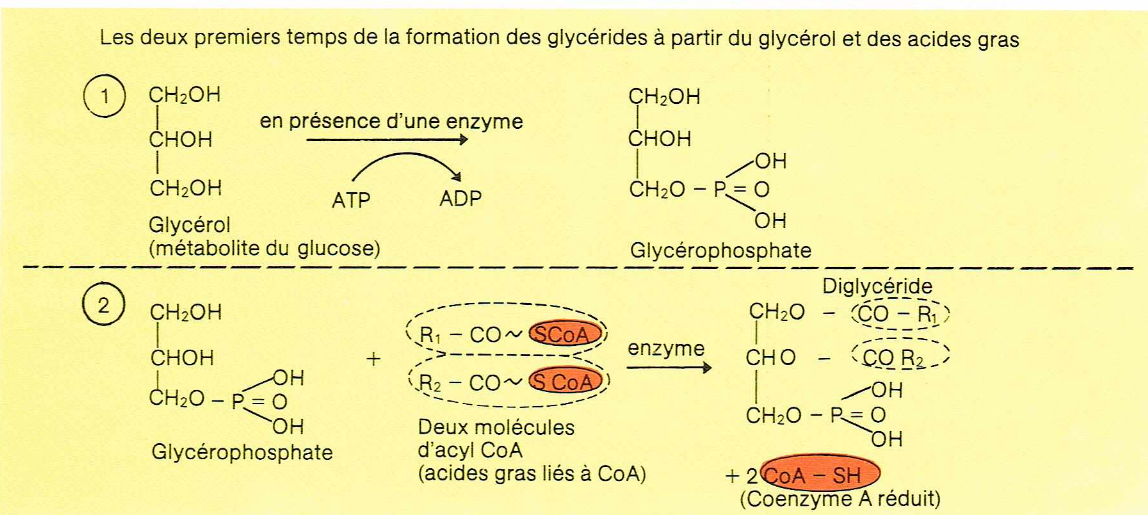

Richard Colin

◄ ***Détail de la synthèse des glycérides ; deux étapes de la formation d'un diglycéride à partir du glycérol et de deux acides gras liés au coenzyme A.***

Ces synthèses sont extrêmement complexes. Les premières étapes se déroulent dans les *mitochondries,* organites cytoplasmiques fonctionnant comme des unités de production. Les mitochondries élaborent, surtout à partir des glucides, un substrat complexe : *l'acétyl-coenzyme A* (ou acétyl CoA, ou encore acétyl SCoA) ; la source d'énergie est l'ATP. Le reste de la synthèse se fait dans le hyaloplasme, après transport actif du substrat à travers la membrane de la mitochondrie. Cela implique un nombre d'étapes élevé, donc la participation de nombreuses enzymes spécifiques de chaque réaction : il y a, en effet, six étapes avant l'adjonction de deux carbones à l'acétyl CoA ; l'adjonction de 2 autres carbones à l'acide déjà formé nécessite six nouvelles étapes, identiques aux précédentes. On conçoit aisément que la synthèse d'un acide en C_{18} n'est pas un phénomène simple... Mais les choses ne s'arrêtent pas là ! Il faut ensuite que se fasse la synthèse des triglycérides, celle-ci nécessite une phosphorylation du glycérol en présence d'ATP, puis condensation du glycérol phosphate avec un, puis deux acides gras néo-formés.

Après enlèvement de PO_3H_2 en présence d'une enzyme phosphatasique, le diglycéride se combine avec R_3 CO ~ SCoA et donne le triglycéride et du coenzyme A—SH ou coenzyme inactivé sur le plan thermodynamique.

La nécessité d'un tel travail devrait logiquement freiner la gourmandise de bien des personnes gagnées par l'embonpoint ! Hélas, ce dernier n'a pas toujours des

▶ *Les rayons dans lesquels se développent les larves d'abeille (ici* **Apis mellifica***) sont constitués de cire, céride sécrété par les glandes spéciales des ouvrières.*

causes simples ; il dépend souvent de facteurs nerveux et hormonaux ainsi que de relations entre le métabolisme des graisses et celui du glycogène.

Dégradation des glycérides. En se dégradant, les glycérides fournissent une quantité considérable d'énergie. Un seul « acide gras » en C_6 permet ainsi la biosynthèse de 45 ATP, alors que la dégradation du glucose n'en fournit que 38. Cette énergie est en partie utilisée pour la régulation de la température durant l'hiver, au moins pour les Vertébrés homéothermes, c'est-à-dire à température fixe (Oiseaux et Mammifères). Le reste est utilisé pour des synthèses multiples.

La dégradation avec oxydation est encore un phénomène mitochondrial, mais cette fois en totalité. Il y a plusieurs oxydations successives sur les carbones β, et, à chaque oxydation, deux carbones sont éliminés (Lynen).

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

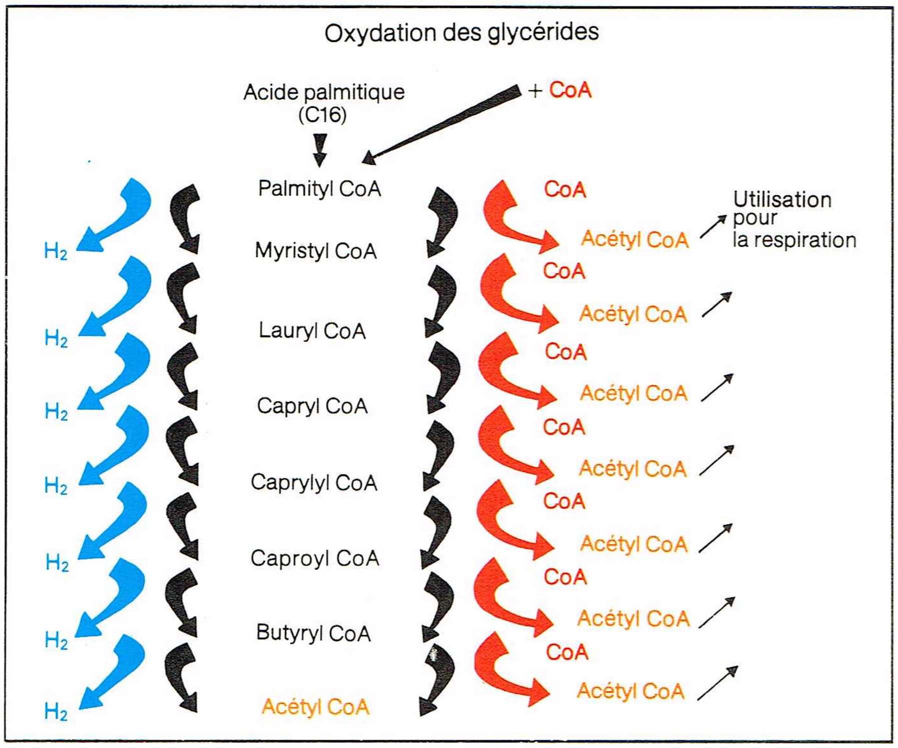

Richard Colin

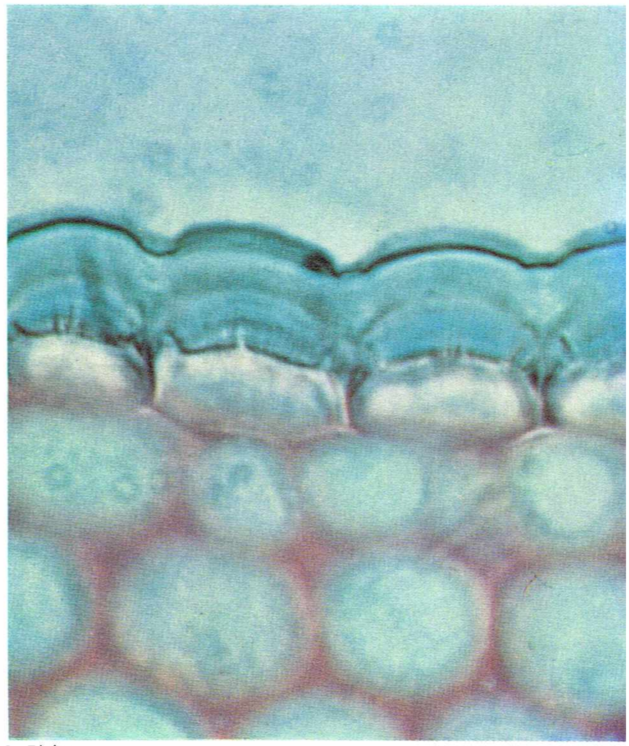

S. Blaise

▲▶ *A gauche, principe de l'oxydation des glycérides : il y a réduction progressive de la longueur des chaînes d'acides gras, chaque molécule d'acétyl CoA éliminée comportant deux carbones arrachés à l'acide gras. A droite, coupe de feuille de houx (***Ilex aquifolium***) montrant l'épaisse cuticule de cutine qui recouvre les cellules épidermiques.*

Les cérides

Les cérides résultent de l'estérification entre des *alcools supérieurs* et des *acides gras à longue chaîne.* C'est le cas du **blanc de baleine** (en fait de cachalot macrocéphale), cire constituée par du palmitate de cétyle, solide, incolore, qui fond à 62 °C. Son importance économique est limitée : on ne peut même pas en faire de la margarine (par hydrogénation) ; toutefois, ce lipide sert à fabriquer des produits de beauté (crèmes et rouges à lèvres) ou des cirages.

Un autre type de céride correspond à un composant de la **cire d'abeille,** constituée par un mélange d'esters dont le monoalcool, à longue chaîne, est de formule $C_{30}H_{61}OH$ (alcool myricilique).

Chez les végétaux, les cires sont des sécrétions épidermiques. A la surface de certains fruits, comme la pomme ou la prune, ou de certaines feuilles, comme celles du chou, on constate l'existence d'une couche un peu poisseuse sur laquelle l'eau glisse et qui brille quand on la frotte. On utilise les jeunes feuilles du palmier à cire *(Copernicia),* lesquelles sont recouvertes d'un épais enduit cireux.

La **cutine** constitue les cuticules qui, à la surface des feuilles, tapissent les cellules épidermiques, en particulier si les feuilles persistent pendant l'hiver (houx, aucuba) ; cela leur donne une apparence vernissée.

A rapprocher des cérides, la **subérine,** constituant principal du liège, est localisée dans les parois de cellules mortes et remplies d'air de ce tissu à la fois imperméable et plus léger que l'eau.

▶ *Coupe de peau de souris, montrant, sous l'épiderme, le derme coloré en vert, et contenant des glandes sébacées dont les cellules ont un cytoplasme très clair et sont riches en lipides qui sont excrétés par le canal du follicule pileux (esters du cholestérol).*

Les stérides

Ce sont des esters de *stérols* et d'acides gras. On connaît bien la **lanoline** extraite du suint de mouton ; c'est la sécrétion des glandes sébacées de la peau de cet animal. Dans cette substance complexe, le *cholestérol* estérifie les acides oléique, palmitique (C_{16}) et stéarique. La structure du cholestérol montre qu'il s'agit d'une *molécule polyaromatique* possédant une seule fonction alcool.

Chez les Vertébrés, la synthèse du cholestérol, qui se produit après une longue suite de réactions, a lieu dans presque tous les organes. Son utilisation dépend étroitement des demandes du métabolisme général, gouverné en particulier par la glande thyroïde.

Signalons une propriété fort intéressante des stérides : bien que franchement hydrophobes, ils jouent un rôle fondamental dans le métabolisme de l'eau ; l'adjonction d'un stéride à un glycéride, corps également hydrophobe, permet l'adsorption par celui-ci d'une grande quantité d'eau ; l'affinité relative du glycéride pour l'eau peut être multipliée par cinq cents. Le *coefficient lipocytique,* ou rapport cholestérol sur acides gras, est intimement lié à la quantité d'eau qui peut entrer dans une cellule. Les stérides sont alors des facteurs d'hydratation de la peau (Montagna).

Les lipides complexes

Les phosphoaminolipides, ou glycérophosphatides

Universellement répandus, les phosphoaminolipides jouent un rôle essentiel dans la constitution des membranes cellulaires. On en trouve également dans les réserves du jaune d'œuf. Certains phospholipides sont particuliers au règne végétal : c'est le cas de la *phytine* des grains d'aleurone (grains de réserve contenant des substances diverses et que l'on trouve en particulier dans certaines graines). La phytine a longtemps été administrée comme fortifiant ; malheureusement, on a découvert récemment qu'elle n'est vraisemblablement pas assimilée par l'organisme humain.

L'acide phosphatidique, molécule de glycérol estérifiée par deux acides gras et par l'acide phosphorique, joue un rôle d'intermédiaire dans la synthèse des triglycérides. Pour passer aux phosphoaminolipides, il faut que l'une des deux fonctions acides du phosphate estérifie la fonction alcool d'une substance azotée, plus précisément aminée : sérine, éthanolamine ou choline. Dans la formule de phosphoaminolipide, XN représente un monoalcool aminé.

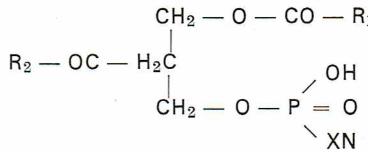

Les trois monoalcools aminés les plus répandus dans la cellule sont :

la sérine : 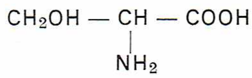

l'éthanolamine : 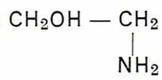

la choline : 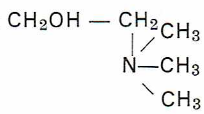

Les esters sont *amphotères,* acides par le phosphoryle (et, dans certains cas, par l'acide organique sérine), basiques par la présence des groupes aminés NH_2 ou N triméthylé.

Les **lécithines.** Il en existe plusieurs types ; celle de l'œuf est bien connue, mais il en existe beaucoup d'autres, dans toutes les cellules. Ce sont des phosphatidylcholines qui diffèrent suivant la nature des radicaux R_1 et R_2 des acides gras qui estérifient les deux premières fonctions alcool du glycérol.

Avec les phosphoprotéines (vitelline ou phosphovitine), les lécithines constituent un matériel de réserve tout à fait fondamental pour l'embryon de nombreuses espèces animales. Il n'y a pas de lécithines dans les réserves adipeuses des adultes ; par contre, elles jouent un rôle dans l'édification des membranes. L'absorption des lécithines par le tube digestif des animaux se fait comme celle des glycérides, grâce à des *lécithinases.*

Les **céphalines.** Ce sont des phosphatidyléthanolamines, très abondantes au niveau du cerveau et des nerfs des animaux supérieurs. Leur rôle est extrêmement important : la *myéline* constitue un manchon isolant autour de beaucoup de fibres nerveuses de Vertébrés, manchon d'origine strictement membranaire.

Les sphingolipides

Ils peuvent être phosphorylés ou non. Dans tous les cas, par rapport aux glycérophosphatides, un alcool en C_{18},

▼ *Ci-dessous, formule de la* sphingomyéline. *En bas, coupe transversale de nerf de Mammifère montrant, sous une gaine peu colorée, de nombreuses sections de fibres myélinisées ; la myéline, qui a été colorée par le noir soudan, forme un manchon autour des fibres nerveuses.*

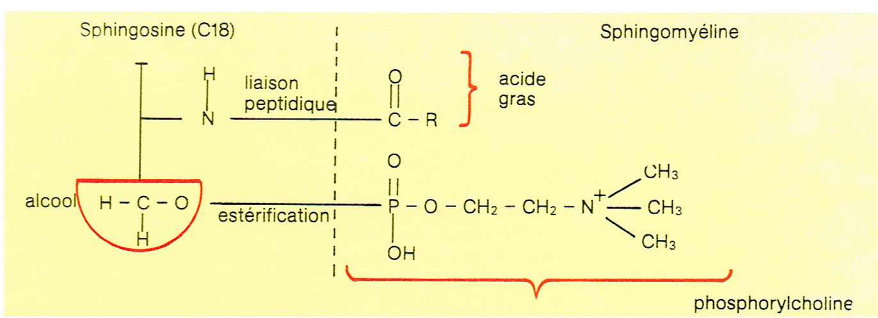

Richard Colin

la *sphingosine,* remplace le glycérol ; de plus cet alcool est aminé. On trouve des **sphingomyélines** et des **cérébrosides** avec les céphalines, c'est-à-dire au niveau des membranes, en particulier dans la myéline.

Remarquons ici que toutes les molécules lipidiques trouvées dans les membranes ont une morphologie assez semblable ; ce qui frappe surtout, c'est l'importance des chaînes linéaires d'acides gras hydrophobes et l'existence d'un pôle hydrophile complexe, par exemple, la phosphoryl choline pour les lécithines ou les sphingomyélines ; ce pôle hydrophile joue un rôle considérable dans la perméabilité cellulaire. En mélangeant tous ces lipides, dans des proportions diverses, on a pu obtenir des membranes artificielles (ajoutons cependant que les lipides ne sont pas les seuls constituants des membranes naturelles).

J. Bouchard

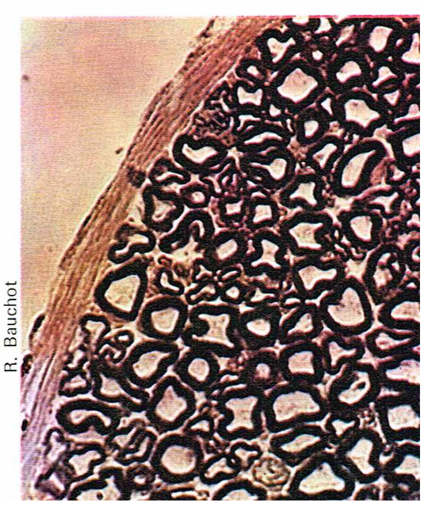

R. Bauchot

Substances pouvant être rapprochées des lipides

Ce sont les stéroïdes, qui jouent un grand rôle chez les Vertébrés, les caroténoïdes, synthétisés par les végétaux, et diverses substances végétales qualifiées de lipoïdes.

Les stéroïdes

Nous étudierons le cholestérol, et d'autres stéroïdes des Vertébrés tels que le coprostérol, les acides biliaires, les vitamines D et les hormones stéroïdes.

Le cholestérol

Le *cholestérol* possède un pôle hydrophile et une volumineuse zone hydrophobe. Ses propriétés de solubilité sont donc celles des autres lipides. Ses dérivés sont très nombreux et toujours très importants.

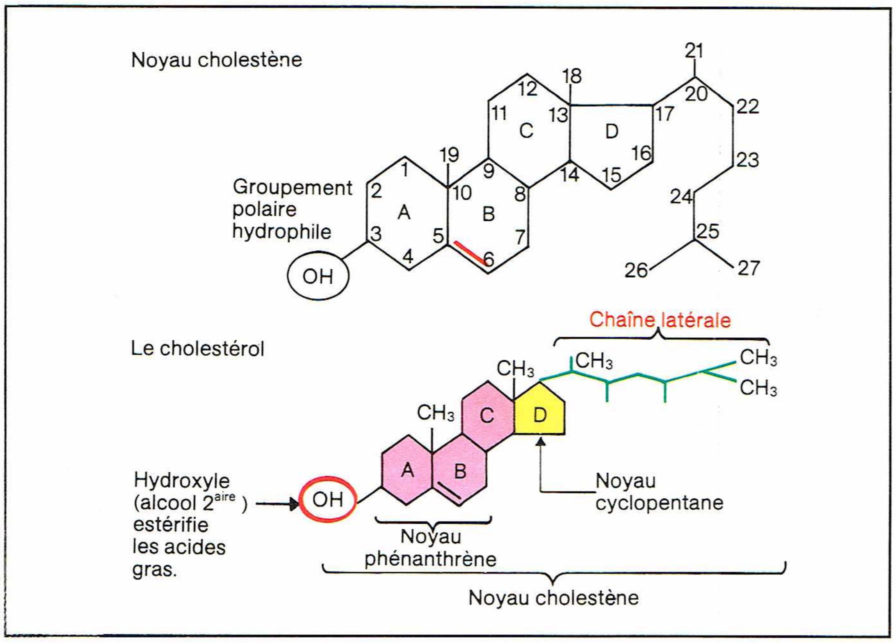

Richard Colin

▼ *En haut, représentation du* **noyau cholestène** *qui est la structure de base des* **stéroïdes** *; cette molécule est dans son ensemble fortement hydrophobe. En bas, formule du* **cholestérol.**

C'est un stéroïde de structure, qui participe à la formation des membranes, et un précurseur des sels biliaires, de beaucoup d'hormones, etc.

Sa synthèse est ralentie quand la nourriture en contient déjà. L'équilibre est dû à une *régulation allostérique,* c'est-à-dire que le produit final freine l'activité enzymatique au début de la chaîne de synthèse.

Substrat initial	Intermédiaires	Produit final
A ⟶	B ⟶ C ⟶ D...	⟶ X

(blocage : X ⟶ A)

Si l'équilibre entre le cholestérol et les phospholipides est perturbé, l'augmentation pathologique du premier entraîne la formation de calculs biliaires ou un « encrassement » des vaisseaux, en particulier des artères qui irriguent le muscle cardiaque (athérosclérose). On peut d'ailleurs se demander comment le cholestérol est solubilisé dans le sang, puisqu'il est hydrophobe et que le plasma, transparent, ne contient pas d'émulsions; en fait, le cholestérol s'y trouve lié à des protéines solubles qui servent de transporteurs; de même, les phospholipides, les stérides et les stéroïdes sont mis en solution grâce à de telles protéines, du type des globulines.

L'importance du cholestérol est moindre chez les animaux inférieurs, mais elle est loin d'être négligeable. Les végétariens en absorbent car ce stéroïde existe chez presque toutes les plantes. Cependant cet apport de cholestérol venant de la nourriture n'est pas toujours suffisant. Par exemple, certains Insectes hébergent dans leur tube digestif des symbiontes (parfois des parasites) qui effectuent la synthèse du cholestérol au bénéfice de leur hôte. Par eux-mêmes, les Insectes sont incapables d'effectuer une telle synthèse à partir des substrats qui conviennent pour les Vertébrés (Allais, 1974). Seuls les Annélides et une partie des Mollusques peuvent y parvenir. En fait, les Crustacés et les Insectes synthétisent leur cholestérol à partir de stérols végétaux en C_{28} ou $_{29}$.

Chez les plantes, l'**ergostérol,** très voisin, existe avec d'autres stérols dont les proportions varient suivant les espèces.

Pour Lederer, les stérols, qui n'existent pas chez les Bactéries, se seraient développés chez les êtres vivants « pour permettre » la formation des membranes multiples et plus ou moins rigides caractérisant les pluricellulaires.

Le coprostérol et les acides biliaires

Ce sont des produits de dégradation du cholestérol; ce dernier est dégradé au niveau du foie et, phénomène remarquable, les fragments éliminés sont d'une importance biologique fondamentale. Ce sont des *déchets utiles.* Une partie du cholestérol passe dans le réseau dense des canalicules excréteurs biliaires, dans le canal cholédoque et l'intestin; là, des Bactéries le transforment en *coprostérol,* qui, après hydroxylation et substitution de radicaux méthylés, donne des *acides biliaires* à chaîne hydrophobe latérale très raccourcie. En même temps, ces acides se conjuguent à des acides aminés (glycocolle et taurine). Nous avons déjà noté que ces acides biliaires, dérivés les uns des autres, favorisent l'absorption intestinale des lipides alimentaires en stabilisant, en émulsionnant ces substances.

Les vitamines D

La **vitamine D_2,** ou **calciférol,** dérive de l'ergostérol végétal, et la **vitamine D_3,** ou **cholécalciférol,** vient du cholestérol (Windaus). Ces vitamines sont importantes pour la fixation du calcium dans le squelette des Vertébrés. On y retrouve la structure stéroïde, mais avec ouverture du cycle B; cela entraîne la formation de trois doubles liaisons résonnantes, qui impliquent une très haute activité biochimique de la vitamine D.

Cette transformation des deux stérols s'effectue sous l'action d'un rayonnement ultraviolet, les longueurs d'onde les plus pénétrantes étant les plus efficaces. Chez les Vertébrés, il s'agit donc d'un phénomène qui concerne uniquement la peau; par contre, il peut se produire dans tout l'organisme chez les animalcules et les végétaux marins planctoniques par exemple; secondairement, la vitamine peut s'accumuler, tout au long de la « chaîne alimentaire », dans les autres organes de Vertébrés, en particulier le foie : on sait que les huiles de foies de Poissons (morue ou flétan par exemple) sont particulièrement riches en cholécalciférol (le record est détenu par le foie de thon); toutefois, on en trouve aussi dans le jaune d'œuf et le beurre.

Les hormones stéroïdes

Dérivées du cholestérol, il en existe trois types : les *hormones génitales mâles* et *femelles* ainsi que les *hormones corticales de la glande surrénale.*

Une hormone est une substance produite par un groupe de cellules et qui agit à distance sur des organes bien précis; cette spécificité d'action dépend de la constitution chimique de la substance en question (Starling). Plus précisément, c'est une substance sécrétée par une *glande endocrine* et agissant sur des *récepteurs,* ou *effecteurs,* après avoir été véhiculée par un liquide interstitiel et par le sang. Il existe des hormones inhibitrices ou, au contraire, activatrices. Une hormone peut agir sur un seul organe-cible, plus généralement, sur l'activité de plusieurs organes, voire de tout l'organisme.

Les **hormones génitales.** Si l'existence d'hormones génitales mâles a été envisagée puis vérifiée depuis longtemps, les hormones femelles ont été mises en évidence assez tardivement. En étudiant des animaux qui avaient subi l'ablation des ovaires, Iscovesco rétablit chez eux, vers 1912, un certain équilibre physiologique en leur administrant des extraits ovariens obtenus avec des solvants des lipides. L'ovaire se comportait en glande endocrine, suivant la définition de Claude Bernard. Butenandt, puis Allen et Corner, en 1929-1930, purent cristalliser l'hormone ovarienne à partir d'extraits fractionnés. Des synthèses d'hormones femelle et mâle ont été réalisées vers 1933-1935.

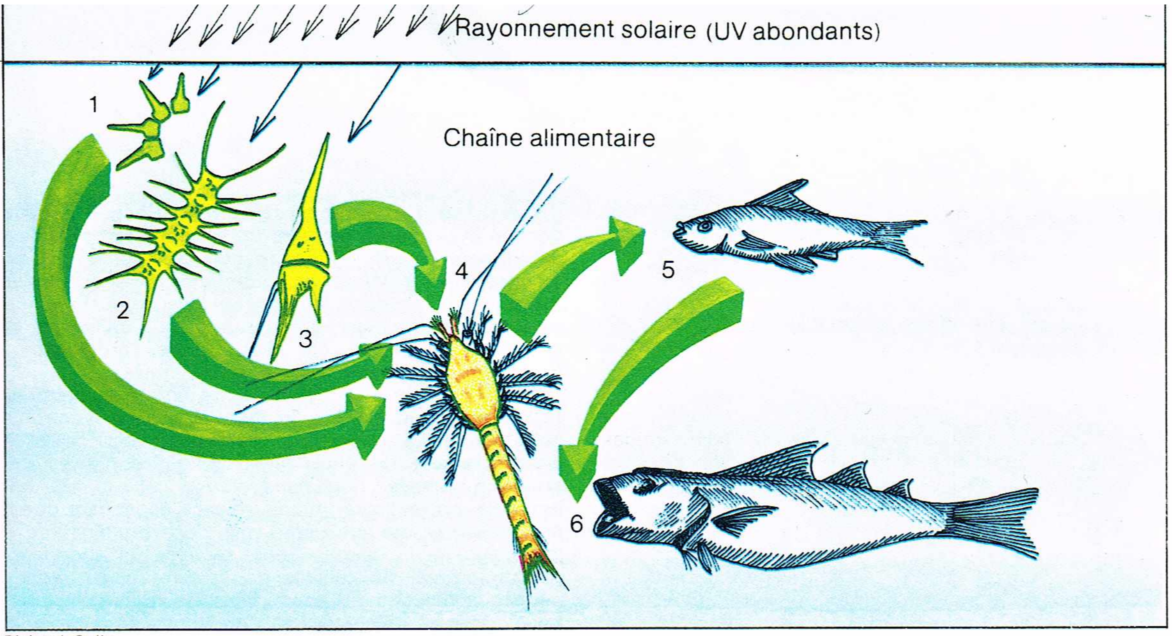

Richard Colin

◄ *Principe d'accumulation de la vitamine D dans une chaîne alimentaire (en milieu marin) : 1, 2, 3, phytoplancton ; 4, Crustacé planctonophage ; 5, Poisson carnivore intermédiaire ; 6, Poisson carnivore de bout de chaîne ; les Poissons accumulent la vitamine D au niveau du foie.*

◄▼ *A gauche, schéma de la synthèse de la vitamine D_2.*

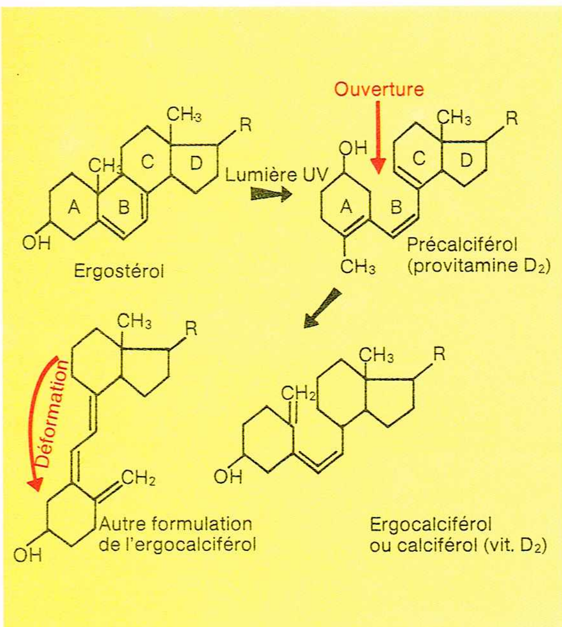

Richard Colin

La **testostérone** est l'hormone génitale mâle testiculaire. Elle détermine la formation des spermatozoïdes et contrôle le développement du « tractus génital » ; de plus, cette hormone contrôle les différents caractères sexuels secondaires, aussi bien morphologiques (ils sont multiples) que psychiques. Ajoutons que le rôle général de stimulation métabolique de la testostérone est loin d'être négligeable.

Dans l'ovaire, il existe deux hormones génitales femelles : l'**œstradiol,** qui est sécrété avant la ponte de l'ovule, et la **progestérone,** qui est sécrétée après cette ponte. L'action de l'œstradiol n'est pas simple ; chez les Mammifères, elle contrôle les caractères sexuels secondaires et prépare le tractus génital, en particulier l'utérus, qui doit recevoir l'ovule après la ponte. La progestérone complète l'effet de l'œstradiol sur l'utérus et permet la liaison de l'œuf avec la mère (nidation de l'œuf) s'il y a eu fécondation.

Les **hormones stéroïdes de la surrénale.** Depuis Brown-Sequard, on savait que la glande surrénale, dont les activités sont complexes, avait un fonctionnement de glande endocrine ; de fait, on y a trouvé des hormones stéroïdes, en particulier : l'aldostérone et le cortisol.

L'**aldostérone** agit sur le rein, en modifiant les possibilités de transport actif de Na^+. Dans la sécrétion de cette hormone, le rein et la surrénale se contrôlent mutuellement : toute perte d'eau et de Na^+ entraîne la sécrétion de la surrénale et inversement.

Le **cortisol** favorise la glycogénoéogenèse à partir de substances azotées. De plus, il a un rôle anti-inflammatoire qui freine la multiplication et l'activité des cellules lymphoïdes ganglionnaires et thymiques. La synthèse de cortisol est contrôlée par l'hypophyse.

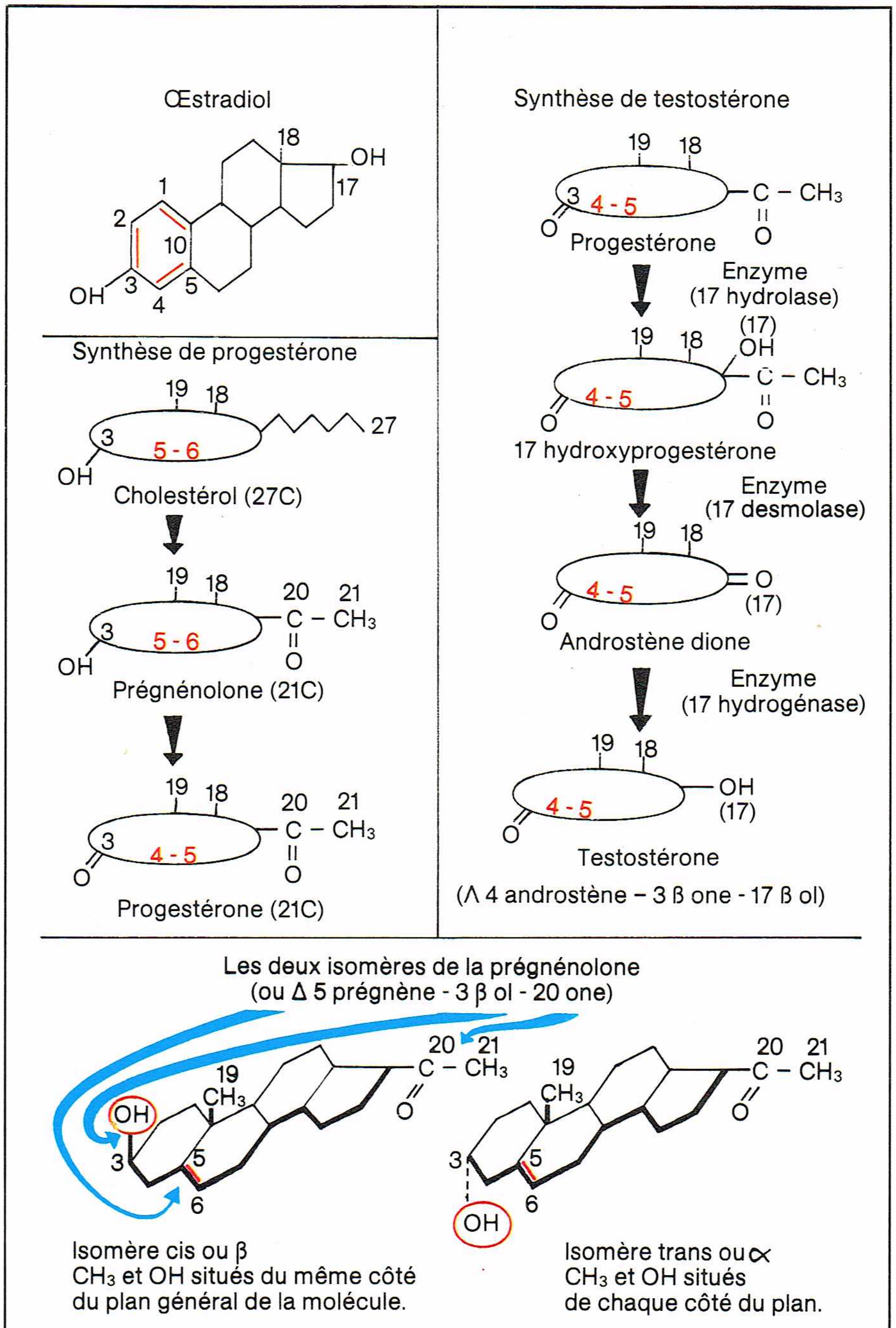

▲ *Formules et schémas de la synthèse des hormones génitales mâles et femelles. Ces hormones sont toutes dérivées du cholestérol et naissent les unes des autres.*

Richard Colin

▶ *Coupe de testicule montrant les tubes séminifères entre lesquels se trouvent des cellules interstitielles; les testicules sont le lieu d'une synthèse intense d'hormone androgène, la testostérone; cette hormone mâle est aussi synthétisée en petite quantité chez les femelles dans le corps jaune.*

▼ *Frottis vaginal de souris, réalisé au moment de la ponte ovulaire (œstrus); sous l'influence des hormones œstrogènes, les cellules épithéliales cornées desquament; chez les femelles récemment castrées, qui sont presque totalement dépourvues d'œstrogène, on n'observe jamais ce phénomène.*

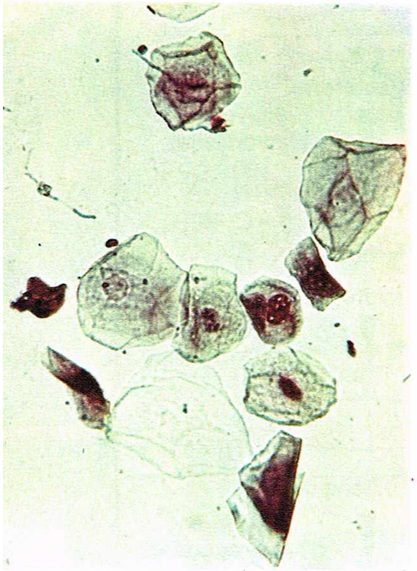

J. Bouchard

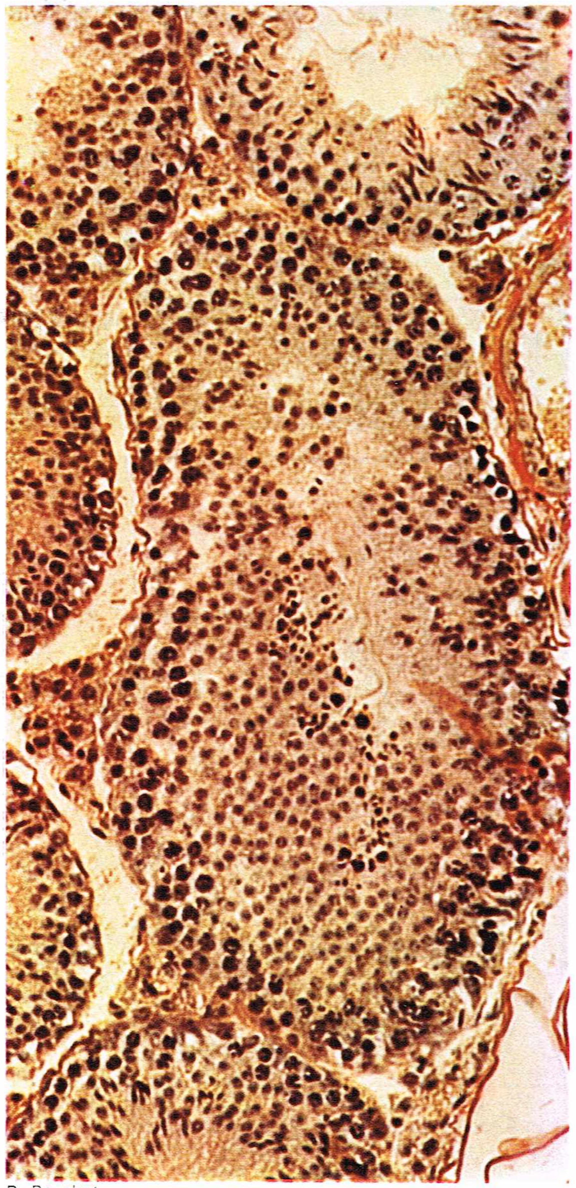

R. Bauchot

Synthèse d'hormones stéroïdes. Chaque gonade, comme la surrénale, contient un mélange fort complexe d'hormones. Aussi l'étude ne doit pas porter sur des glandes prises isolément : les hormones naissent les unes des autres. C'est donc leur filiation que nous allons voir ainsi que leurs lieux d'accumulation. L'utilisation de précurseurs marqués par des isotopes radioactifs a facilité l'établissement des voies de synthèse.

Dans l'organisme, la synthèse des hormones stéroïdes implique la mise en jeu de toute une série d'enzymes spécifiques. La *desmolase* commence par briser la chaîne latérale du cholestérol, qui devient alors une hormone femelle, la *prégnénolone;* celle-ci est une hormone progestative, moins efficace cependant que la *progestérone,* qui en dérive par déshydrogénation et isomérisation. La progestérone, sécrétée en abondance par un groupe de cellules de l'ovaire *(corps jaune),* permet la nidation de l'œuf. Mais les processus métaboliques ne s'arrêtent pas là : on trouve dans ce corps jaune des hormones mâles, ou *androgènes.*

Il y a, bien sûr, un métabolisme du même genre dans le testicule mais, dans ce cas, la *testostérone* est fabriquée de manière plus intense. Si nous continuons l'étude des processus métaboliques, nous constatons un fait surprenant : si la gonade mâle synthétise d'abord des hormones progestatives puis son hormone typique, la testostérone, il est curieux d'apprendre qu'un testicule de taureau, par exemple, la transforme partiellement en hormones femelles œstrogènes... Il se produit d'abord des modifications au niveau du carbone 19 de la testostérone, puis celui-ci finit par disparaître, et on aboutit à l'*œstradiol.* Cette hormone est en équilibre avec une autre, l'*œstrone,* ou œstradiol oxydé en 17.

Le noyau des hormones femelles œstrogènes est un *œstrène* en C_{18}, non saturé.

On trouve, bien sûr, la même chaîne de réactions dans le follicule ovarien, c'est-à-dire le complexe de cellules qui entourent l'ovocyte, cellule sexuelle femelle.

Par rapport à ces réactions, effectuons maintenant un retour en arrière jusqu'à la progestérone; celle-ci, dans le *cortex de la surrénale,* va donner naissance à l'*aldostérone,* processus qui fait intervenir des hydroxylases : progestérone → désoxycorticostérone (progestative) → corticostérone → aldostérone.

Toutes ces hormones sont en C_{21} et agissent au niveau du rein et du foie.

Toujours dans le cortex surrénalien, la seconde hormone essentielle est le *cortisol,* qui se forme à partir de prégnénolone ou de progestérone. Il y a trois étapes qui impliquent des hydroxylases. Le noyau reste à 21 carbones. Il y a équilibre du cortisol avec une autre hormone, la *cortisone,* ou cortisol oxydé en C_{11}.

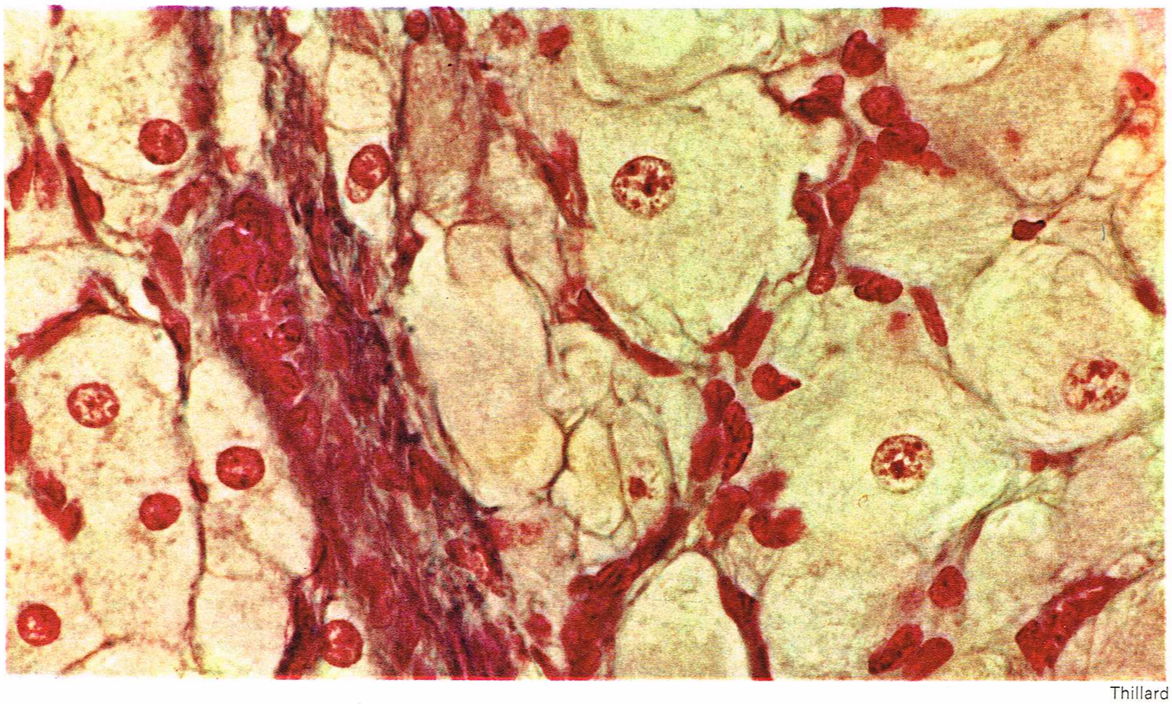

▶ *Coupe de corps jaune d'une lapine gestante; les cellules glandulaires fabriquent une grande quantité de progestérone, hormone stéroïde qui permet la nidation de l'œuf dans la paroi de l'utérus.*

Thillard

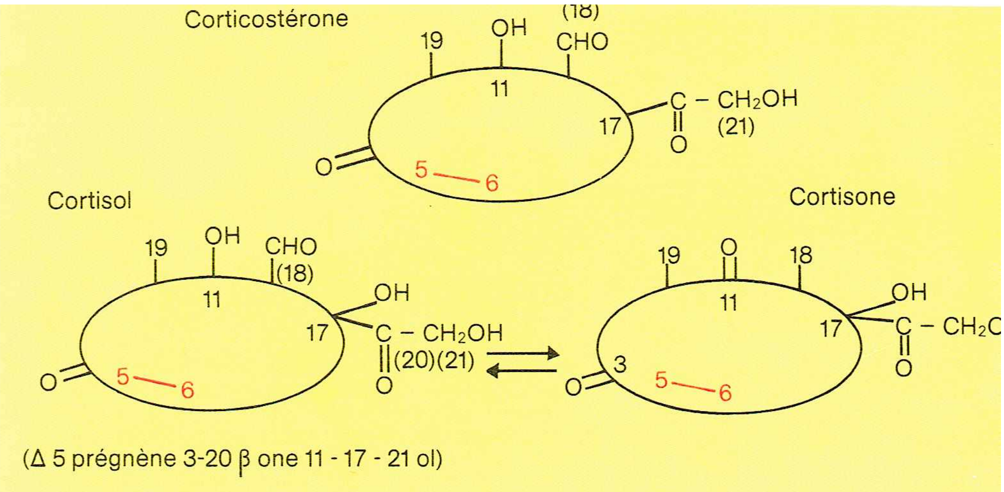

Richard Colin

▲ ***Trois hormones stéroïdes synthétisées par le cortex de la glande surrénale : la* corticostérone *est un intermédiaire de la synthèse de l'aldostérone à partir de la progestérone ; le* cortisol *se forme à partir de la prégnénolone ou de la progestérone et est en équilibre avec sa forme oxydée ou* cortisone.**

Ces hormones agissent sur les fonctions de certaines cellules des lignées sanguines (système lymphoïde), mais leur action directe concerne le métabolisme glucidique. Si les mécanismes ne sont donc pas simples dans le cortex de la surrénale, ils sont encore compliqués du fait que la glande utilise la prégnénolone pour fabriquer, d'autre part, des hormones androgènes typiquement surrénaliennes, en particulier la *déhydroépiandrostérone.*

De toute évidence, les mécanismes hormonaux sont d'une grande complexité ; si l'on se limite à l'étude des seules hormones stéroïdes, sécrétées par plusieurs glandes, il est souvent difficile d'interpréter les résultats d'expériences effectuées sur telle ou telle de ces glandes. En voici un exemple. L'ablation des ovaires d'une souris provoque une baisse brutale du taux d'hormones femelles dans le sang ; en conséquence, le cycle œstrien est interrompu, et les parois du vagin et de l'utérus ne montrent plus aucun signe d'activité : parallèlement, les glandes mammaires ne subissent plus aucune croissance périodique. Cependant, après quelques semaines, le taux d'hormones sexuelles sécrétées par les surrénales peut être suffisant pour qu'une certaine activité devienne notable au moins au niveau vaginal, ainsi que l'on peut s'en rendre compte en étudiant les cellules prélevées pour la préparation de frottis vaginaux. Le taux d'hormones sexuelles peut être assez élevé dans le sang pour rendre délicate l'interprétation de phénomènes observables, non seulement dans le tractus génital, mais dans beaucoup d'autres organes ; ainsi, la croissance des cellules de l'épiderme peut être influencée par ces hormones, comme elle l'était chez les femelles non castrées. Aussi, quand on veut évaluer l'influence des hormones sexuelles sur la croissance de tumeurs épidermiques expérimentales, il est difficile d'effectuer une comparaison entre femelles normales et castrées puisque toutes les castrées *ne l'ont pas été complètement sur le plan physiologique.*

Un autre phénomène complique encore les conditions de sécrétion hormonale chez les femelles : lors de la *gestation,* le *placenta* synthétise diverses hormones stéroïdes.

Transport, mode d'action et élimination des hormones stéroïdes. Les hormones stéroïdes sont liées, au niveau sanguin, à des protéines plasmatiques ; elles sont ainsi solubilisées et transportées vers les organes cibles. On a dit qu'elles peuvent avoir une action non négligeable sur le métabolisme général ; cependant, elles modifient essentiellement la physiologie des organes cibles de la sphère génitale. On a constaté que les hormones stéroïdes pénètrent dans les cellules de ces organes et vont activer une protéine réceptrice du hyaloplasme ; secondairement, la protéine agit sur le noyau et certains déterminants génétiques : des expériences montrent que des agents toxiques, utilisés pour bloquer la synthèse des substances du noyau, détruisent l'efficacité des hormones stéroïdes. Les mécanismes précis de ces phénomènes sont mal connus. L'élimination des hormones stéroïdes se fait essentiellement au niveau du foie ; c'est particulièrement net pour les œstrogènes (Israël, 1937). Dans tous les cas, il y a d'abord conjugaison de la molécule avec un sulfate ou un acide glycuronique ; ensuite, il y a plusieurs étapes de dégradation complexes.

Les caroténoïdes

Les *pigments caroténoïdes,* extrêmement répandus dans le règne végétal, ne sont pas synthétisés par les animaux ; par contre, ceux-ci peuvent en accumuler dans leurs tissus si leurs aliments sont riches en caroténoïdes. Ces substances sont dérivées de l'*isoprène :*

$$CH_2 = \underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{C}} - CH = CH_2$$

Ce corps n'existe pas tel quel dans les tissus végétaux, mais il peut s'y trouver sous forme plus ou moins polymérisée ou *terpénique :* il s'agit alors des *latex* dont le terme ultime de condensation correspond aux caoutchoucs.

Dans la synthèse de caroténoïdes, il y a d'abord condensation de huit molécules d'isoprène, ce qui aboutit à la formation d'une chaîne aliphatique ; ensuite, celle-ci se cyclise à chaque extrémité.

Le pigment pris comme type par Florkin et Schoffeniels est le **lycopène,** qui donne sa couleur rouge à la tomate ; comme tous les caroténoïdes, il est très liposoluble, et se dissout, par exemple, dans l'huile d'une vinaigrette. Sa formule brute est $C_{40}H_{56}$.

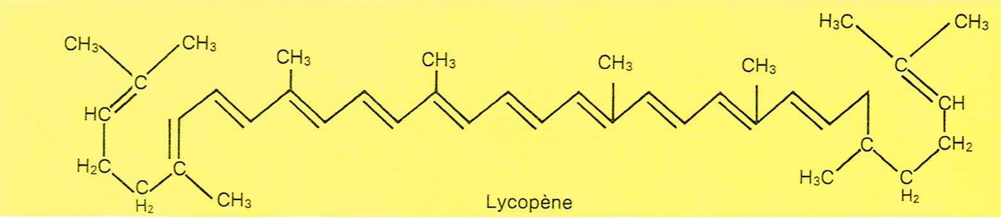

Richard Colin

▲ ***Formule du* lycopène, *pigment caroténoïde qui donne sa couleur rouge à la tomate.***

Cette tendance à la cyclisation est maximale dans le cas des molécules oxygénées ; il s'agit des **carotènes** contenus dans les fruits sucrés tels que l'orange, l'abricot, mais aussi dans la carotte. Beaucoup de ces pigments possèdent des fonctions alcool ou cétone, alors que la **crocétine** du safran est acide. On connaît plus de trente caroténoïdes pigmentaires. Lorsqu'ils comportent 40 carbones, ces pigments jouent un rôle dans la photosynthèse glucidique à partir du carbone atmosphérique.

Chez les animaux, les carotènes jouent un rôle important dans le phénomène de la vision ; par bipartition des molécules, ils fournissent la *vitamine A,* qui participe à la fabrication du *pourpre rétinien,* ou *rhodopsine,* pigment photosensible de la rétine. Les pigments caroténoïdes sont utilisés par les animaux dans l'élaboration de leurs couleurs spécifiques ; par exemple, les tons jaunes et rouges des Oiseaux sont une conséquence de la nourriture qu'ils absorbent ; ces pigments sont répartis à l'état diffus dans les éléments de la plume.

E.P.S.

◀ ***Les tons jaunes et rouges des plumes d'Oiseaux sont dus à des pigments caroténoïdes diffus.***

Les lipoïdes

De nombreuses plantes sont dites aromatiques parce qu'elles dégagent un parfum spécifique. Cette propriété, utilisée par l'homme dans la composition des parfums ou pour donner du goût aux aliments cuisinés, est due à des **terpènes**, principaux constituants des inclusions huileuses que l'on trouve dans certains tissus sécréteurs; ces huiles sont souvent volatiles et entourent d'un air parfumé la plante dont elles s'échappent. Il suffit souvent de rompre ou de froisser la feuille pour favoriser la volatilisation de l'huile. Si cette gamme d'arômes enchante l'homme, il ne s'agit le plus souvent que d'excrétions de la plante.

Citons comme **essences**, encore appelées huiles essentielles, celles du thym, de la menthe, du romarin, de la lavande (toutes plantes appartenant à la famille des Labiées), du géranium, du houblon, du laurier, des agrumes. En ce qui concerne ces derniers, il suffit de plier une peau d'orange devant la flamme d'une bougie pour s'apercevoir qu'un petit jet de substance inflammable s'échappe des minuscules poches de l'écorce.

Le **latex**, ou lait, de nombreuses plantes *(Hevea, Ficus, Euphorbia)* contient des polyterpènes très polymérisés, qui, une fois coagulés, deviennent élastiques (caoutchouc de l'*Hevea*).

Les **résines** des Conifères sont des produits d'oxydation des terpènes. Les térébenthines extraites du pin maritime sont des oléo-résines, solutions visqueuses de résine dans des essences.

Le **camphre** est une cétone mono-terpénique extraite de divers arbrisseaux asiatiques, dont le cinnamome.

Enfin, les **gibberellines** sont les principales hormones de croissance et de floraison.

▶ *L'amanite tue-mouches,* Amanita muscaria, *contient un alcaloïde très toxique, la* muscarine, *responsable d'empoisonnements très graves.*

S. Viola

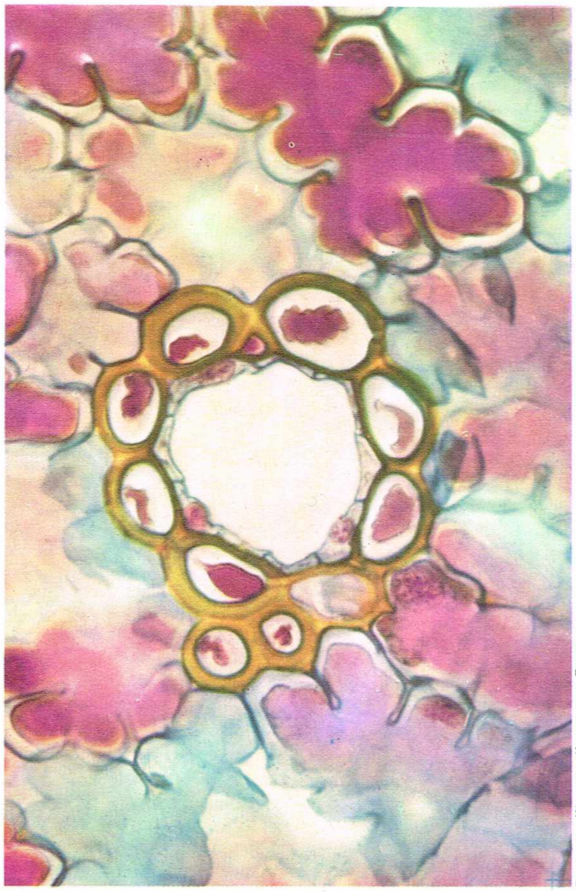

▶ *Coupe transversale d'aiguille de pin, montrant un canal résinifère entouré par des cellules de soutien; les petites cellules internes sécrètent les résines qui sont des produits d'oxydation des terpènes.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

LES ALCALOIDES

Il est difficile de donner une définition des alcaloïdes. Pour Heller, il s'agit « de composés aminés à réaction plus ou moins basique où l'azote est en général inclus dans un cycle ». Les alcaloïdes sont très vraisemblablement des produits de dégradation des acides aminés, des terpènes, etc. Seuls seront cités ici les plus connus pour leur utilisation pharmaceutique ou leurs propriétés narcotiques.

La **colchicine,** extraite du colchique *(Colchicum automnale),* est un dérivé de la phénylalanine. C'est un poison de la cellule en division et du système nerveux.

La **nicotine** du tabac, la **conicine,** poison violent extrait de la ciguë, et la **ricinine,** autre poison violent contenu dans les graines de ricin, sont à rapporter aux alcaloïdes à noyau pyridinique.

Parmi les alcaloïdes à noyau indole, on peut citer la **strychnine,** extraite de la noix vomique *(Strychnos nux-vomica),* et l'**ergotamine,** extraite de l'ergot du seigle, Champignon parasite des épis de cette plante. Les chroniques du Moyen Age renferment de nombreux récits d'épidémies de gangrène accompagnée de convulsions, de vertiges, de léthargie, et conduisant leurs victimes à la folie : il s'agissait d'intoxications chroniques par des farines de seigle ergoté; la maladie était souvent appelée « feu de saint Antoine ». Dans les années 1950, des accidents se sont encore produits en France.

Le plus connu des alcaloïdes à noyau quinoléique ou isoquinoléique est la **quinine,** extraite de l'écorce de quinquina; il s'agit d'un fébrifuge puissant utilisé dans le traitement du paludisme.

Les alcaloïdes du **curare** (poison tiré de divers arbustes et lianes, voisins du *Strychnos*) appartiennent à ce groupe. Les Indiens d'Amazonie en imprégnaient leurs fléchettes, afin de paralyser la proie ou l'ennemi.

Des capsules de pavot incisées avant maturation, s'écoule un lait, ou latex, dont les gouttes, en se solidifiant à l'air, constituent l'**opium.** De ce produit on extrait

divers alcaloïdes : la **narcotine** et la **papavérine,** qui sont à noyau quinoléique ; la **morphine** et la **codéine,** qui ont un noyau phénantrène.

Parmi les alcaloïdes présentant un noyau tropane ou norlupinane, on peut citer l'**atropine,** extraite de la belladone et de la jusquiame, qui, entre autres effets, dilate la pupille et excite le système nerveux central, et la **cocaïne,** extraite du coca, qui possède des propriétés anesthésiques et hypnotiques. Les Indiens des Andes utilisent encore aujourd'hui les feuilles de coca en infusion et mâchent un mélange de feuilles et d'une poudre grise ; le mélange d'alcaloïdes, jauni par le coca, leur donne une grande résistance au froid et à la fatigue ; grâce à ses effets, certains Incas porteurs de messages pouvaient courir deux jours de suite à travers la montagne.

La **caféine** et la **théobromine,** que l'on trouve toutes deux à des doses différentes à la fois dans le café, le thé et le cacao, sont des excitants. Il s'agit d'alcaloïdes à noyaux puriques.

La **muscarine,** de l'amanite tue-mouches, est un alcaloïde quaternaire à trois groupes N méthyl ; elle est très toxique.

Comme on le voit, dans la plupart des cas, les alcaloïdes sont des substances plus ou moins toxiques, parfois extrêmement dangereuses, qui provoquent une accoutumance très préjudiciable pour l'individu qui les utilise.

LES PROTIDES

Il existe une famille de substances caractérisées principalement par leur richesse en *azote ;* il s'agit des *protides,* dont les molécules comportent du carbone, de l'hydrogène, de l'oxygène ainsi qu'une forte proportion d'azote et parfois du phosphore. Ce sont des molécules souvent volumineuses ; elles sont fondamentalement constituées par des *acides aminés ;* assemblés d'une manière précise, divers acides aminés forment des *peptides* et des *polypeptides,* ou des *protéines* lorsque le nombre des acides est important et lorsqu'ils constituent des chaînes reliées entre elles par un certain nombre de *ponts.*

On distingue les protéines de *structure,* c'est-à-dire qui participent à l'architecture cellulaire, des protéines *enzymatiques,* dont le rôle est de faciliter, de *catalyser* certaines réactions biochimiques. Une troisième catégorie de protéines correspond aux *anticorps,* molécules fabriquées « à la demande » par un organisme, lorsque celui-ci doit lutter pour éliminer des protéines étrangères introduites au sein des tissus et constituant ce que l'on appelle des *antigènes ;* ces antigènes ne sont rien d'autre que des protéines de structure ou des enzymes venant de l'extérieur, provenant, par exemple, de Bactéries introduites dans l'organisme. (Notons que bien d'autres macromolécules peuvent aussi jouer le rôle d'antigènes.)

Les acides aminés, molécules typiques du monde vivant

Les protéines sont répandues chez tous les êtres vivants. A 100 °C, l'hydrolyse acide d'une protéine donne une solution claire contenant de nombreuses substances aminées. Une hydrolyse partielle fournit des *peptides* et, si elle est plus poussée, une série d'*acides aminés,* que l'on peut ensuite séparer par chromatographie : leur vitesse de migration permet de déterminer la composition de la protéine initialement isolée. L'étude d'un très grand nombre d'hydrolysats de cette nature a montré que, dans le monde vivant, il n'y a guère plus d'une vingtaine d'*acides aminés* (A.A.).

La nature complexe de chaque protéine et la spécificité de sa fonction dépendent de l'*agencement* des acides aminés qui la constituent. Dans une cellule, il existe une multitude de protéines différentes.

Structure chimique des acides aminés

Les acides aminés sont tous construits selon cette formule schématique, dans laquelle R est un radical plus ou moins complexe :

$$R - CH\begin{matrix} \diagup NH_2 \\ \diagdown COOH \end{matrix}$$

Ces molécules, comportant une fonction acide organique COOH ionisable et une fonction amine NH_2 ionisable, sont donc des substances *amphotères :* en solution aqueuse, les deux fonctions se dissocient lorsque le pH est adéquat ; pour être plus précis, la fonction NH_2 est ionisée en milieu acide (acide chlorhydrique), mais pas la fonction COOH ; l'acide aminé se comporte en cation :

$$\underset{\displaystyle NH_2}{R - \overset{}{CH}} - COOH \xrightarrow{HCl} \underset{\displaystyle NH_3^+}{R - CH} - COOH \text{ et } Cl^-$$

En milieu alcalin sodique, l'inverse se produit et l'acide se comporte en anion :

$$\underset{\displaystyle NH_2}{R - CH} - COOH \xrightarrow{NaOH} \underset{\displaystyle NH_2}{R - CH} - COO^- \text{ et } Na^+$$

Les fonctions COOH et NH_2 ne sont pas, en général, de la même force, et *la fonction acide prédomine.*

La méthode *électrophorétique* permet d'obtenir la migration sélective d'un mélange d'acides aminés en fonction des faibles différences de charge de ces acides pour une solution à pH donné. Cette analyse, très précise, permet de corroborer des résultats obtenus par chromatographie avec les mêmes mélanges. A pH franchement acide, tous les acides aminés migrent vers la cathode (chargée négativement), alors qu'ils migrent vers l'anode en milieu franchement alcalin.

Ce phénomène mérite quelques explications ; un A.A. en solution donne quatre types de particules :

la particule neutre (non polarisée) $\quad \underset{\displaystyle NH_2}{R - CH} - COOH$

la particule bi-ionisée, ou ion double, ou dipôle, ou zwitterion $\quad \underset{\displaystyle NH_3^+}{R - CH} - COO^-$

l'ion positif $\quad \underset{\displaystyle NH_3^+}{R - CH} - COOH$

l'ion négatif $\quad \underset{\displaystyle NH_2}{R - CH} - COO^-$

La particule neutre, qui n'existe qu'en proportion infime, est donc négligeable en général. L'ion double ne migre pas lors d'une électrophorèse. Dans le cas où il y a autant d'anions que de cations dans la solution d'un acide aminé, le pH correspond à ce que l'on appelle le point *iso-ionique* de cet acide. Dans un certain nombre de cas, le radical R peut subir une ionisation, ce qui complique la situation.

Notons que le carbone qui porte les fonctions NH_2 et COOH est un carbone asymétrique ; on doit donc envisager l'existence d'*isomères optiques.* Si l'on considère tous les A.A. comme dérivant du type le plus simple, la sérine, elle-même construite sur le modèle du glycéraldéhyde, on établit une filiation qui rappelle celle des glucides :

$$CH_2OH - \overset{\displaystyle NH_2}{\underset{\displaystyle H^{\bullet}}{C}} - COOH \qquad CH_2OH - \overset{\displaystyle OH}{\underset{\displaystyle H}{C}} - COH$$

L sérine (A.A.) *L glycéraldéhyde (glucide)*

On a donc une série L d'acides aminés qui sont construits comme la L sérine, COOH étant à droite dans toutes les formules ; la série L contient aussi bien des substances dextrogyres (+) que lévogyres (—). Il y a, de même, une série D, mais seule la série L est naturelle, alors que c'est l'inverse dans les glucides.

Il existe divers types d'acides aminés. On peut les classer en sept ou huit groupes, suivant des critères qui varient selon les auteurs. Le tableau qui suit (page 82) s'inspire de ceux de Kruh et Durand.

Méthodes d'analyse ou de dosage d'un mélange d'acides aminés

La *chromatographie sur papier.* On utilise successivement deux solvants ; le chromatogramme est donc à

Tableau des Acides aminés

Acides aminés aliphatiques — monoacides — monoaminés

Acides aminés simples

NOM	SYMBOLE	FORMULE	REMARQUES
— Glycocolle	GLY	$H-CH(NH_2)-COOH$	essentiel dans le tissu conjonctif.
— Alanine	ALA	$CH_3-C^{*}H(NH_2)-COOH$	* carbone asymétrique comme pour les acides suivants.
— Valine	VAL	$(CH_3)_2CH-C^{*}H(NH_2)-COOH$	un carbone de plus, diméthylé.
— Leucine	LEU	$(CH_3)_2CH-CH_2-C^{*}H(NH_2)-COOH$	
— Isoleucine	ILEU	$(CH_3-CH_2)(CH_3)CH^{\oplus}-C^{*}H(NH_2)-COOH$	⊕ second carbone asymétrique.

Tous ces acides aminés sont très abondants dans l'organisme.

Acides aminés monoalcools

NOM	SYMBOLE	FORMULE	REMARQUES
— Sérine	SER	$CH_2OH-C^{*}H(NH_2)-COOH$	dans les phosphoprotéines et très abondante dans la soie.
— Thréonine	THR	$CH_3-CHOH^{\oplus}-C^{*}H(NH_2)-COOH$	deux carbones asymétriques.

Acides aminés soufrés

NOM	SYMBOLE	FORMULE	REMARQUES
— Cystéine	CYS	$HS-CH_2-CH(NH_2)-COOH$	deux molécules se combinent pour former la cystine : R—S—S—R La cystéine permet la formation de *ponts disulfure* entre deux éléments protéiques.
— Méthionine	MET	$CH_3-S-CH_2-CH_2-CH(NH_2)-COOH$	essentielle, mais peu abondante.

Acides aminés aliphatiques — diacides — monoaminés

NOM	SYMBOLE	FORMULE	REMARQUES
— Acide aspartique	ASP	$COOH-CH_2-CH(NH_2)-COOH$	base de la composition des protéines acides.
— Acide glutamique	GLU	$COOH-CH_2-CH_2-CH(NH_2)-COOH$	

Acides aminés aliphatiques — monoacides — monoaminés pourvus d'une fonction amide (à la place du second acide des A.A. diacides)

NOM	SYMBOLE	FORMULE	REMARQUES
— Asparagine	ASN	$CONH_2-CH_2-CH(NH_2)-COOH$	
— Glutamine	GLU	$CONH_2-CH_2-CH_2-CH(NH_2)-COOH$	

Acides aminés aliphatiques — monoacides — diaminés

NOM	SYMBOLE	FORMULE	REMARQUES
— Lysine	LYS	$NH_2-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-CH(NH_2)-COOH$	base de la composition des protéines basiques.
— Arginine	ARG	$NH{=}C(NH_2)-NH-CH_2-CH_2-CH_2-CH(NH_2)-COOH$	

Acides aminés cycliques

Acides aminés aromatiques à noyau benzénique

NOM	SYMBOLE	FORMULE	REMARQUES
— Phénylalanine	PHE	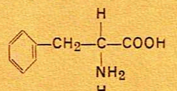	on devrait l'appeler benzylalanine.
— Tyrosine	TYR	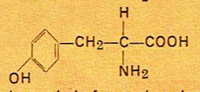	= parahydroxyphénylalanine.

Ces acides aminés, fort importants, sont à la base de la formation des pigments mélaniques et ils se trouvent dans la plupart, des protéines.

Acides aminés cycliques ou cycliques et aromatiques

NOM	SYMBOLE	FORMULE	REMARQUES
— Tryptophane	TRY	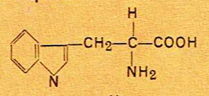	
— Histidine	HIS	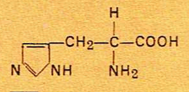	
— Proline	PRO	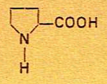	c'est une imine fort importante pour la forme de la protéine.

deux dimensions. Cette méthode est qualitative. La révélation des taches d'A.A. se fait grâce à la *ninhydrine;* ce composé oxyde chaque A.A. du chromatogramme et le *fragmente* avec libération d'ammoniac (NH_3). Or, la ninhydrine réduite se combine à une molécule de ninhydrine intacte et une molécule de NH_3 libéré, en donnant une coloration violette (sauf pour la proline et l'hydroxyproline, acides iminés qui donnent une réaction jaune) ; il faut donc traiter par la ninhydrine *en excès*.

La *chromatographie de partage sur colonne de résines échangeuses d'ions* est une méthode qualitative et quantitative qui s'affirme depuis quelques années.

En milieu acide, les résines cationiques dont le groupement actif est SO_3HNa^+ échangent leur sodium pour se lier avec l'ion

$$R - \underset{\large NH_3^+}{\overset{\large H}{\underset{|}{\overset{|}{C}}}} - COOH,$$

puisque, dans ces conditions, à pH acide, l'A.A. fonctionne comme une base. Plus l'A.A. est basique et plus il se fixe sur la résine. Dans un deuxième temps, on fait passer sur la résine une solution tampon dont on augmente lentement le pH : les fonctions COOH des acides aminés fixés sur les résines vont donc être ionisées graduellement. Ces acides eux-mêmes seront décrochés et entraînés par l'*éluant*. Ils ne se décrocheront pas tous au même pH : un premier A.A. sera entraîné lorsque le pH de l'éluant sera identique au point iso-ionique de l'acide (pHi) ; un second A.A. sera entraîné quand le pH, en augmentant, deviendra égal au pHi de celui-ci, etc. Quand on augmente régulièrement le pH de l'éluant, on dit qu'on provoque un *gradient de pH*. Durant la chromatographie, les A.A. se répartissent entre la résine et l'éluant : c'est donc un partage des A.A. entre l'adsorbant et l'éluant.

On recueille les *fractions* successives du liquide qui sort de la colonne pendant que le pH de l'éluant augmente; on dose ensuite, par la ninhydrine, les A.A. dans chaque fraction : ces dosages sont faits par spectrophotométrie (autrement dit, par mesure de l'absorption d'une lumière de longueur d'onde donnée par le complexe à la ninhydrine; pour la plupart des A.A, $\lambda = 570$ mμ sauf pour la proline, où $\lambda = 440$ mμ). Les fractions doivent être d'autant plus nombreuses que le mélange est plus complexe. On aboutit alors à une série de résultats permettant d'obtenir une courbe : à chacun des pics de celle-ci correspond la *vague* de passage d'un A.A.

Ces opérations sont relativement longues. Dans la pratique l'expérimentateur est amené à comparer de nombreux extraits, et l'on a dû mettre au point un système analyseur automatique. Cette innovation est capitale car elle évite au chercheur de se consacrer essentiellement à la technique.

La *méthode électrophorétique*. Les acides aminés sont entraînés sur du papier ou sur du gel d'amidon; en effet, il faut freiner leur migration, qui serait trop rapide en milieu purement aqueux : les A.A. sont de petites molécules très mobiles dans le champ électrique. On opère à pH4, par exemple, afin d'avoir une large répartition des substances, les unes allant vers l'anode et certaines vers la cathode.

L'*utilisation des isotopes* permet d'améliorer l'étude d'un chromatogramme, par exemple. On ajoute à la solution que l'on doit étudier une dose connue de l'A.A. que l'on veut y doser; cet acide aminé est marqué par un isotope radioactif. Ensuite, par chromatographie, on extrait la totalité de l'A.A. et on mesure sa radioactivité spécifique; elle est, si l'on peut dire, diluée; on peut alors calculer la quantité d'A.A. non marqués.

Enfin, on peut *doser* un acide aminé par une technique purement biologique. On utilise des souches de *Bactéries auxotrophes;* ce sont des mutants qui, à partir d'un milieu de culture simple, sont incapables de synthétiser l'un des A.A. nécessaires à leur croissance, alors qu'ils synthétisent les autres. Lorsqu'on ajoute l'A.A. en question au milieu contenant ces germes, la croissance se produit et permet la formation de colonies. Or la vitesse de croissance de telles colonies dépend directement de la quantité d'A.A. introduite dans le milieu. Si on mesure le diamètre des colonies témoins ayant reçu des quantités connues de l'A.A., on peut en déduire très simplement sa concentration dans la solution expérimentale que l'on étudie parallèlement.

Les peptides

Les *peptides* sont constitués par la liaison de deux ou de plusieurs acides aminés.

Mode de liaison des acides aminés : la liaison peptidique

On peut schématiser ainsi la liaison peptidique entre deux acides aminés :

$$R_1 - \underset{\large NH_2}{\underset{|}{CH}} - COOH + R_2 - \underset{\large NH_2}{\underset{|}{CH}} - COOH \rightarrow H_2O + \begin{array}{l} R_1 - CH - COOH \\ \qquad\;\; | \\ \qquad\;\; NH \\ \qquad\;\;\;\; | \\ R_2 - CH - C = O \\ \qquad\;\; | \\ \qquad\;\; NH_2 \end{array}$$

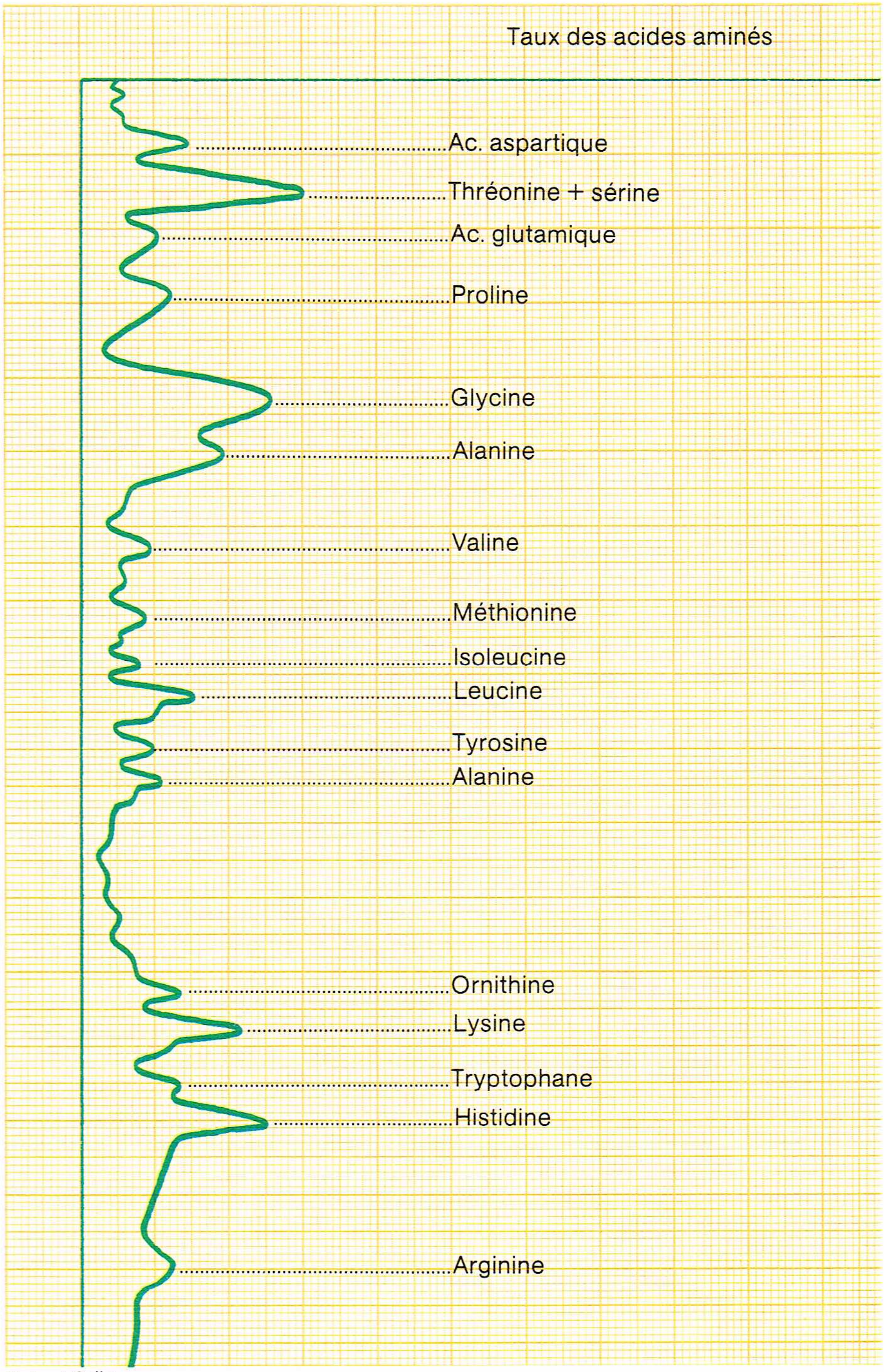

▼ ***Résultat de la séparation des acides aminés de l'hémolymphe d'une chenille femelle de Lépidoptère*** **(Plodia interpunctella)**, ***par chromatographie sur une résine échangeuse d'ions (d'après Morère).***

Richard Colin

▶ *Représentation schématique du mode de liaison particulier aux acides aminés* **la liaison peptidique.** *Les groupements R, caractéristiques de chaque acide, sont disposés de façon alternée; les distances interatomiques sont fixes.*

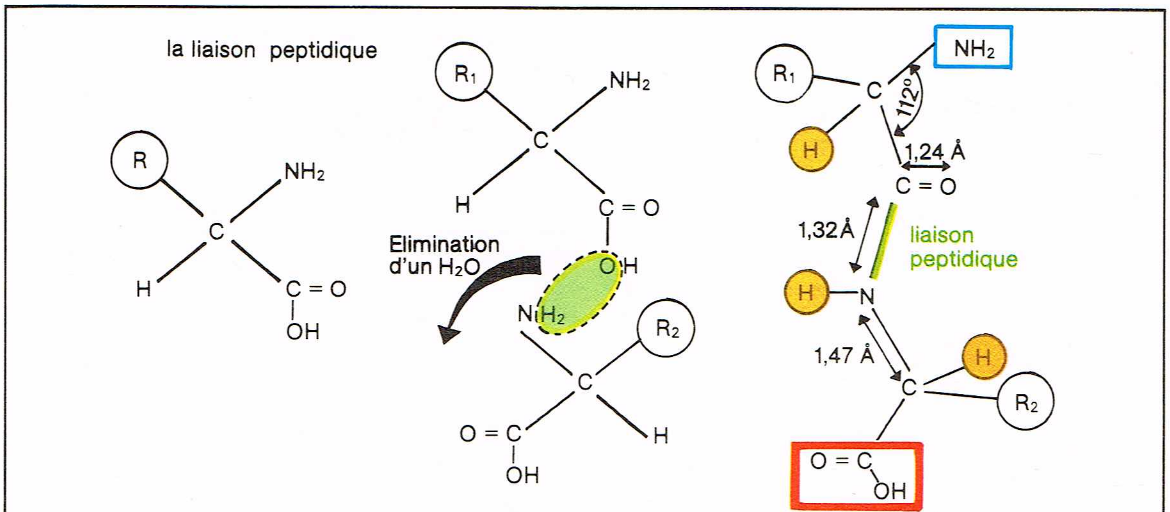

Un acide aminé — Combinaison de deux acides aminés. Disposition théorique. — Positions relatives des atomes ou fonctions.

Richard Colin

▼ *Deux représentations de la structure secondaire de certains polypeptides : en haut, forme en hélice (d'après Pauling); en bas, forme en accordéon (d'après Durand); les résidus R de chaque acide aminé sont en dehors de la spire ou de la chaîne; la cohésion de la spire ou des chaînes de l'accordéon est assurée par des liaisons hydrogène.*

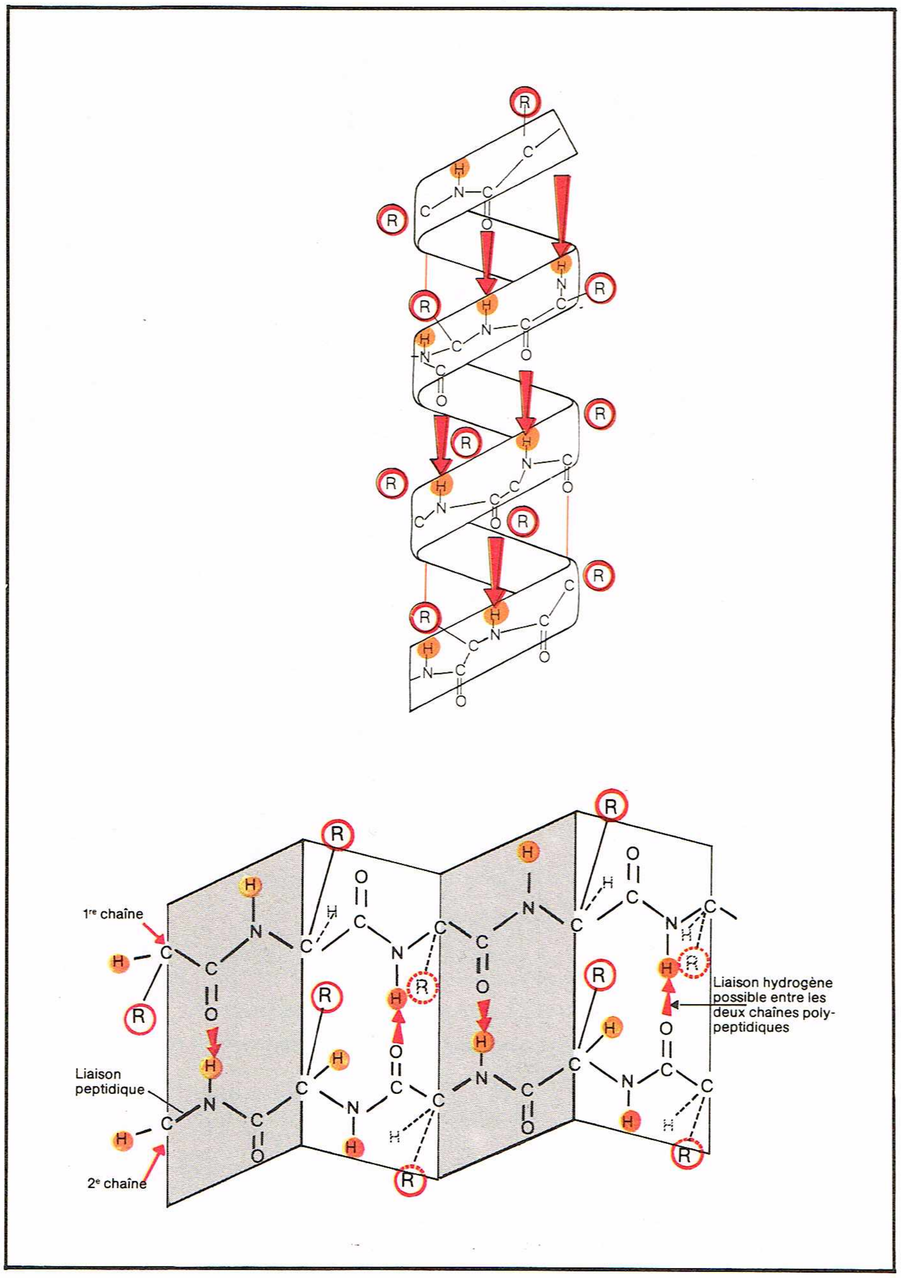

Richard Colin

Cette liaison peptidique peut s'établir entre de nombreux acides aminés. On parle dans ce cas de *molécules polypeptidiques;* ces polypeptides ne sont pas encore des protéines, car leur poids moléculaire est inférieur à 6 000, et, d'autre part, il n'y a pas, entre les A.A., d'autres liaisons covalentes que les liaisons peptidiques; autrement dit, il n'y a *pas de ponts* entre différents points d'une chaîne polypeptidique plus ou moins pelotonnée.

En 1951, Pauling et Corey ont pu préciser la topographie de molécules de peptides en utilisant une technique de *diffraction des rayons X.* Ils avaient constaté que des molécules polypeptidiques montrent un retour périodique des structures analogues : les rayons X ont permis d'une part de localiser les atomes d'une chaîne et, d'autre part, de déterminer la *périodicité* des liaisons peptidiques. Cette périodicité peut être calculée précisément.

En effet, ces chercheurs avaient commencé par étudier des cristaux d'acides aminés et de peptides *simples;* ils constatèrent que les résidus R des acides aminés sont en dehors du plan des atomes de la liaison peptidique, et ils purent mesurer les distances interatomiques de cette liaison. Ils en ont déduit la *longueur théorique* d'une *chaîne* de polypeptide fibreux synthétique et ont comparé cette valeur avec la valeur *mesurée* par diffraction : cette dernière longueur représentait seulement la *moitié* de la longueur théorique. En conséquence, ils en déduisirent que la chaîne devait être *pliée en accordéon* ou bien *spiralée :* ainsi prenait corps la notion de *structure secondaire;* celle-ci est rendue particulièrement stable par l'existence de *liaisons hydrogène* qui se font entre les groupements C = O et N — H au sein de la même chaîne spiralée, ou de deux chaînes voisines pliées en accordéon, H jouant le rôle d'accepteur d'électrons vis-à-vis de O.

Pour des polypeptides formés d'acides simples (monoacides, monoaminés), les propriétés physico-chimiques dépendent particulièrement des deux radicaux ionisables *terminaux.* Ce n'est pas le cas des peptides comportant des acides aminés *diacides* ou *diaminés :* leur présence implique l'existence d'autres points ionisables répartis le long de la chaîne.

De même qu'on a défini un point *iso-ionique* pour les acides aminés, on peut en définir un pour les polypeptides. Ce pH se définit pour des molécules dans l'*eau pure.* Mais dans un milieu biologique les peptides sont dissous dans un environnement comportant des *électrolytes.* Ceux-ci forment une *couche ionisée* autour des particules de polypeptides; des ions Cl^-, par exemple, se disposent au contact de radicaux NH_3^+ (surnuméraires) et neutralisent la particule cationique. On distingue donc le pH du *point iso-ionique* et celui du *point isoélectrique,* ou pH correspondant à une molécule liée à des électrolytes. On détermine le point isoélectrique en recherchant à quel pH une molécule peptidique, dissoute dans un liquide biologique, ne migre pas dans un champ électrique.

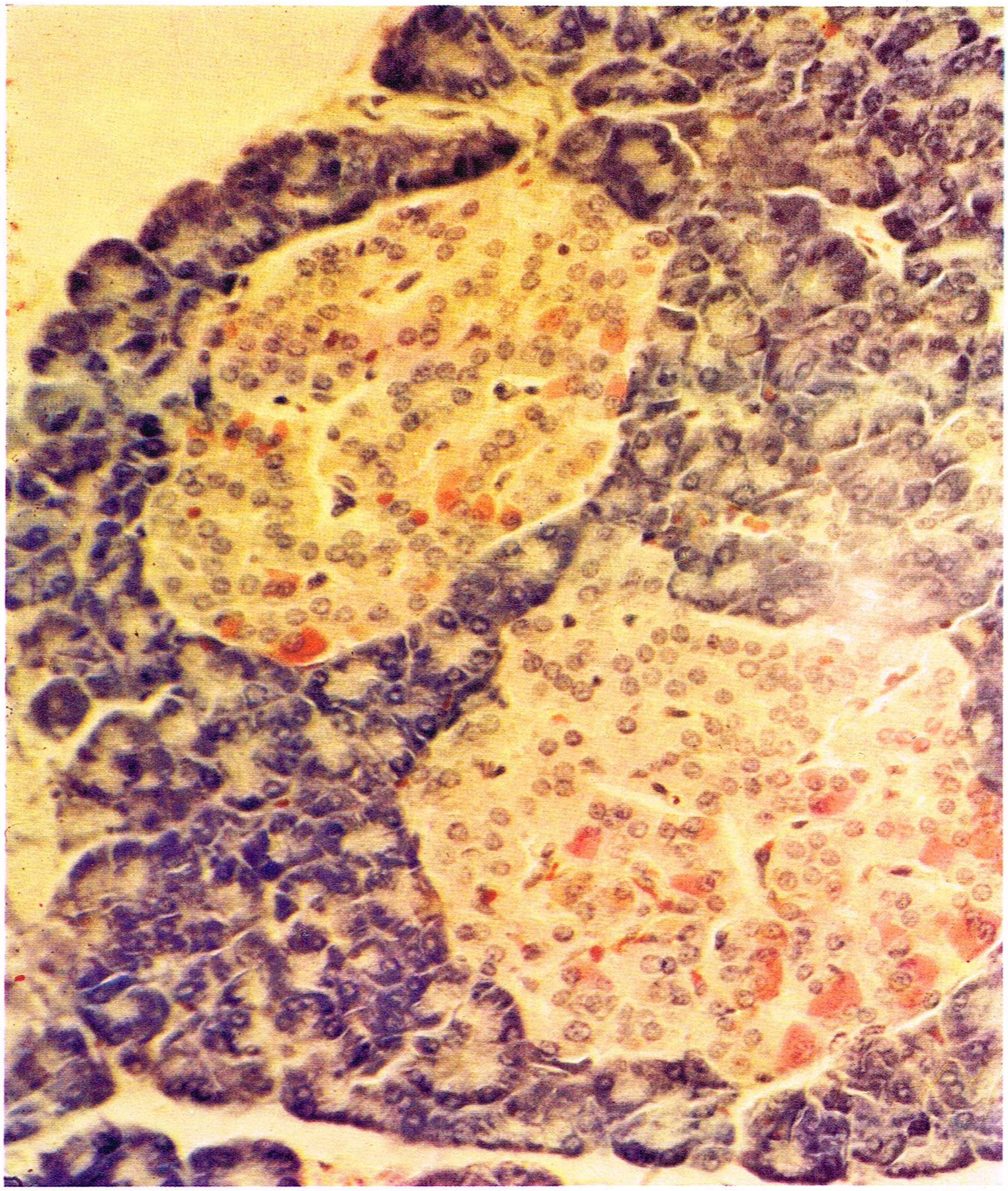

F. Treilhou

Structure primaire de l'insuline

Chaîne A: NH_2 – GLY – ILEU – VAL – GLU – GLU – CYS – CYS – ALA – SER – VAL – CYS – SER – LEU – TYR – GLU – LEU – GLU – ASP – TYR – CYS – ASP – COOH

Chaîne B: NH_2 – PHE – VAL – ASP – GLU – HIS – LEU – CYS – GLY – SER – HIS – LEU – VAL – GLU – ALA – LEU – TYR – LEU – VAL – CYS – GLY – GLU – ARG – GLY – PHE – PHE – TYR – THR – PRO – LYS – ALA – COOH

Richard Colin

▲ ***A gauche, cellules* à insuline *des* îlots de Langerhans *du pancréas de souris; cellules claires sur la préparation (fuchsine-paraldéhyde et coloration topographique). A droite,* structure primaire *de l'insuline; en vert, sur la chaîne B, la séquence indispensable au fonctionnement de l'hormone.***

Quelques peptides et leurs fonctions

Il s'agit souvent de molécules à rôle hormonal; celles-ci sont tout aussi importantes que les hormones stéroïdes lipidiques.

Les hormones pancréatiques des Vertébrés

L'**insuline**, une des hormones pancréatiques, est maintenant connue avec beaucoup de précision; cette substance, constituée par l'accolement de deux chaînes de polypeptides dont le poids moléculaire est un peu inférieur à 6 000, se place à la limite des protéines.

Le pancréas est une glande abdominale constituée de cellules diverses : on y trouve des massifs de cellules sécrétrices *exocrines* fabriquant un suc digestif et, d'autre part, des massifs de cellules *endocrines* dont le produit de sécrétion est capté par le sang, et qui constituent les *îlots de Langerhans,* bien visibles, par exemple, chez l'homme ou la souris. L'insuline, sécrétée par certaines des cellules de ces îlots, joue un rôle vital sur le métabolisme glucidique.

Nature de l'insuline. A la fin de la dernière guerre, l'insuline était un des seuls protides dont on connaissait (dans le désordre) la composition en acides aminés; on pouvait aussi l'obtenir pure. Sanger entreprit l'étude de la disposition précise de ces acides aminés. Un tel travail pouvait paraître utopique, étant donné leur nombre élevé dans la molécule. Ce chercheur mit au point une technique de détermination de l'*acide aminé terminal*. Dans un premier temps, il fixait sur le NH_2 terminal une molécule de *dinitrofluorobenzène* (DNFB), ce qui se traduisait par une réaction colorée. Dans un second temps, il *fragmentait* la chaîne polypeptidique par hydrolyse acide; il lui était alors possible, par chromatographie, de déterminer l'acide aminé terminal préalablement coloré en jaune par le DNFB. En fragmentant partiellement les chaînes par hydrolyse ménagée ou par l'action d'enzymes qui entraînent la rupture de certaines liaisons peptidiques, Sanger put déterminer pour chaque fragment la nature de l'acide aminé terminal. En poursuivant patiemment les fragmentations, puis les analyses chromatographiques, et en

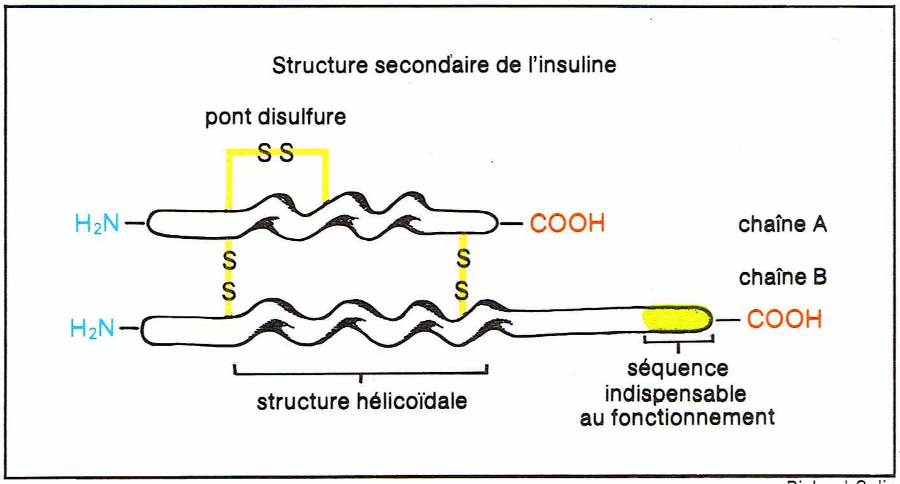

Richard Colin

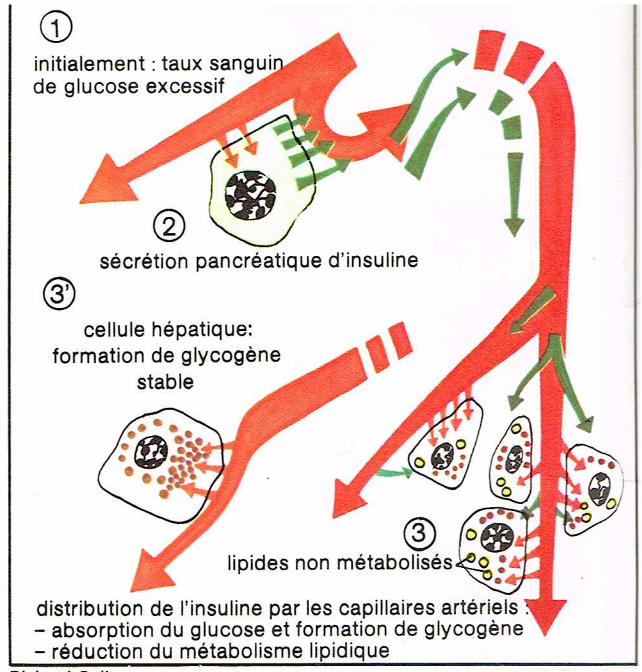

Richard Colin

▲ ***A gauche,* structure secondaire *de l'insuline. A droite,* principe de fonctionnement *de l'insuline : le résultat est une diminution de l'hyperglycémie, un retour au taux normal (la largeur des flèches rouges est proportionnelle au taux de glucose véhiculé).***

regroupant tous ses résultats, Sanger parvint à établir la *séquence* des acides aminés constituant chacune des deux chaînes de l'insuline. Ce travail remarquable lui prit dix ans, avec l'aide de Tuppy et Thomson. Il ouvrit aux biochimistes un champ d'expérimentation extraordinairement vaste et propre à susciter l'enthousiasme. En 1958, Sanger fut lauréat du prix Nobel de chimie.

Voici la réaction clé, celle qui permet la détermination de l'acide aminé terminal.

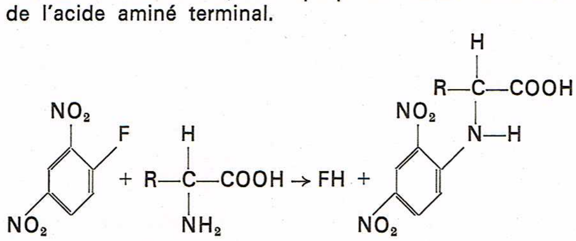

dinitrophényl-amino-acide (DNP-A.A.)

Une autre réaction, celle d'Edman, apporte maintenant une amélioration particulièrement appréciable. Si le principe de fixation d'une substance sur le NH_2 terminal est encore le même, cette fixation entraîne la *libération* de l'acide aminé terminal; bien des manipulations se trouvent ainsi évitées. Le réactif est le *phénylisothiocyanate*. Après chaque fixation et libération automatique de l'acide aminé terminal, le reste polypeptidique est repris, retraité, etc. On obtient d'emblée la séquence des acides aminés, sans qu'il soit nécessaire de regrouper les résultats. Il existe à présent des analyseurs de séquence entièrement automatisés.

Ces méthodes d'analyse des séquences d'acides aminés donnent la *structure primaire* précise de la chaîne que l'on étudie. L'utilisation des rayons X a permis de déterminer les structures d'ordre supérieur et de bien concevoir la forme de la molécule.

La fonction de l'insuline. L'insuline *régularise la glycémie.* Quand le taux de glucose sanguin tend à augmenter (dans les cas d'excès d'aliments sucrés par exemple), l'insuline accroît la perméabilité membranaire pour le glucose et favorise le stockage de celui-ci dans les cellules; parallèlement, cette hormone augmente le transport membranaire des groupes phosphates, qui se lient ensuite au glucose dans la cellule. On dit que l'hormone est *hypoglycémiante,* puisqu'elle permet la capture du glucose. On estime qu'il y a une intense absorption du glucose par les cellules, mais aussi une importante rétention de ce glucide au niveau du foie. De plus, l'insuline limite l'utilisation métabolique des lipides et des protides et empêche donc leur « fonte », leur interconversion en glucides; ce rôle serait essentiel (Kayser).

L'insuline possède aussi une action *oligo-urique :* lorsque le taux de glucose augmente dans le sang, l'insuline freine l'élimination d'eau. Comme on le voit, son activité est complexe.

La sécrétion de l'hormone est déterminée par l'influence directe du taux de glucose sur les cellules des îlots pancréatiques. Divers mécanismes biochimiques peuvent contrôler cette sécrétion : si elle est excessive ou si l'on injecte de l'insuline à un animal normal, cet excès est inactivé par rupture des ponts disulfures qui relient les deux chaînes, par formation d'anticorps et par inhibition enzymatique au niveau du foie. Une sécrétion insuffisante de l'insuline entraîne une *hyperglycémie* et des troubles graves, qui constituent le *diabète.*

Le déterminisme moléculaire du fonctionnement de l'hormone. Celui-ci dépend de certains points particuliers de la molécule : seule la portion terminale carboxylée de la chaîne B est une séquence indispensable au fonctionnement; elle existe chez différentes espèces animales. Par contre, une partie de la chaîne A est variable. Il semble donc que les insulines trouvent leur origine paléontologique chez un ancêtre commun et que, à partir d'un archétype, diverses mutations se soient produites dans chaque rameau de l'arbre évolutif.

Portant sur la partie terminale indispensable de la chaîne B, ces mutations auraient été létales; mais, en se produisant ailleurs sur la chaîne, elles n'ont pas empêché la survie des animaux (Durand). On peut toutefois envisager qu'une partie de ces mutations non létales aient eu des conséquences défavorables pour la survie de l'espèce; dans ce cas, elles auraient donc été létales à long terme; par contre, on peut penser que certaines d'entre elles ont pu favoriser le métabolisme de telle ou telle espèce dans un milieu donné; la variabilité interspécifique de la chaîne A serait alors la conséquence de ces mutations favorables.

▼▶ ***A gauche,* glomérule *humain normal (coloration par un sel d'Ag); l'argent imprègne en particulier la membrane basale et la périphérie de la capsule de Bowman. A droite,* glomérulopathie *diabétique entraînant, progressivement, la quasi-inactivité de filtration des glomérules (aspect en « pain à cacheter »).***

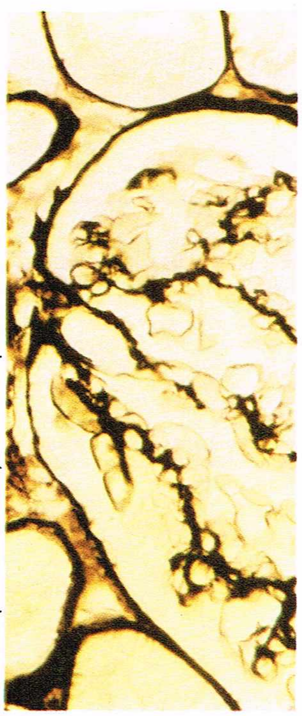

Service du professeur Bariety - Photo Hôpital Broussais

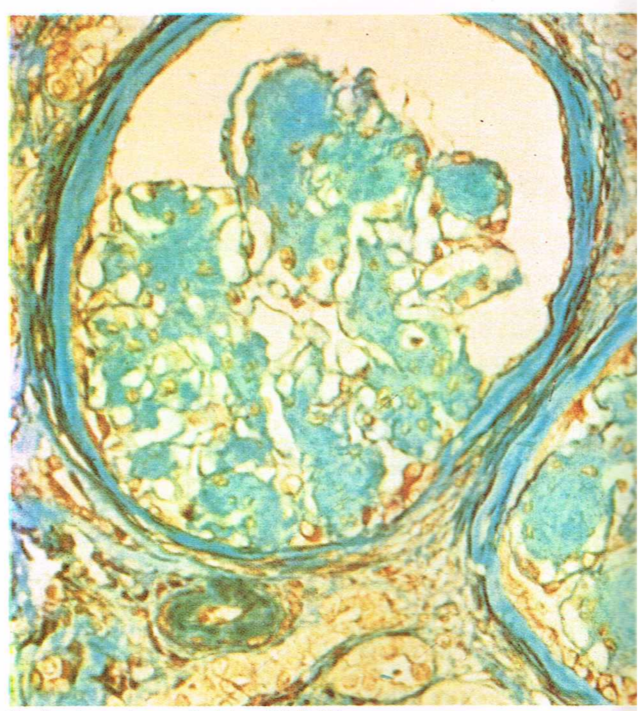

Service du professeur Bariety - Hôpital Broussais

Le **glucagon** est une hormone sécrétée dans le pancréas par une partie des cellules des îlots de Langerhans. Cette hormone est antagoniste de l'insuline ; son poids moléculaire est de 3 500, et sa chaîne ne comporte que 29 acides aminés. Cette hormone, découverte en 1923 par Kimball et Murlin, est hyperglycémiante ; elle provoque un accroissement de la glycogénolyse hépatique. L'origine cellulaire précise du glucagon n'a pas toujours été démontrée chez les Vertébrés, et son mode d'action n'est pas simple.

Les hormones peptidiques de l'hypophyse

L'hypophyse, glande complexe appendue au plancher du cerveau de tous les Vertébrés, sécrète un assez grand nombre d'hormones, qui, souvent, *contrôlent* le fonctionnement des autres glandes endocrines. Son fonctionnement est lui-même *contrôlé* par le cerveau.

Hormones peptidiques du lobe postérieur de l'hypophyse

— La *vasopressine* contrôle les échanges hydriques au niveau membranaire. Elle est synthétisée dans la partie proprement nerveuse de l'hypophyse et ne comporte que 9 acides aminés.

Cette hormone, *antidiurétique* (ADH), agit directement sur le rein des Vertébrés. De plus, elle joue vraisemblablement un rôle dans l'excrétion urinaire active de Na^+ (Morel, 1955) et de K^+ (Sartorius et Roberts, 1949) ; son action compenserait donc celle de l'aldostérone, hormone stéroïde qui favorise la réabsorption de ces ions. D'autre part, la vasopressine permet une augmentation de l'absorption d'eau par la paroi intestinale. Des expériences effectuées sur les Amphibiens et les Reptiles montrent que son rôle est d'empêcher la déshydratation cellulaire dans tous les tissus.

La sécrétion d'ADH est en rapport direct avec la pression osmotique du plasma sanguin ; cette pression est détectée par des récepteurs nerveux situés dans la paroi de l'artère carotide et reliés au plancher du cerveau (Verney). Si la pression osmotique est trop forte, l'hormone est sécrétée, ce qui entraîne une *réabsorption d'eau* à partir de l'urine en formation dans les tubes excréteurs rénaux ; parallèlement, il y a une intense absorption de l'eau au niveau de l'intestin. Le mécanisme régulateur est très

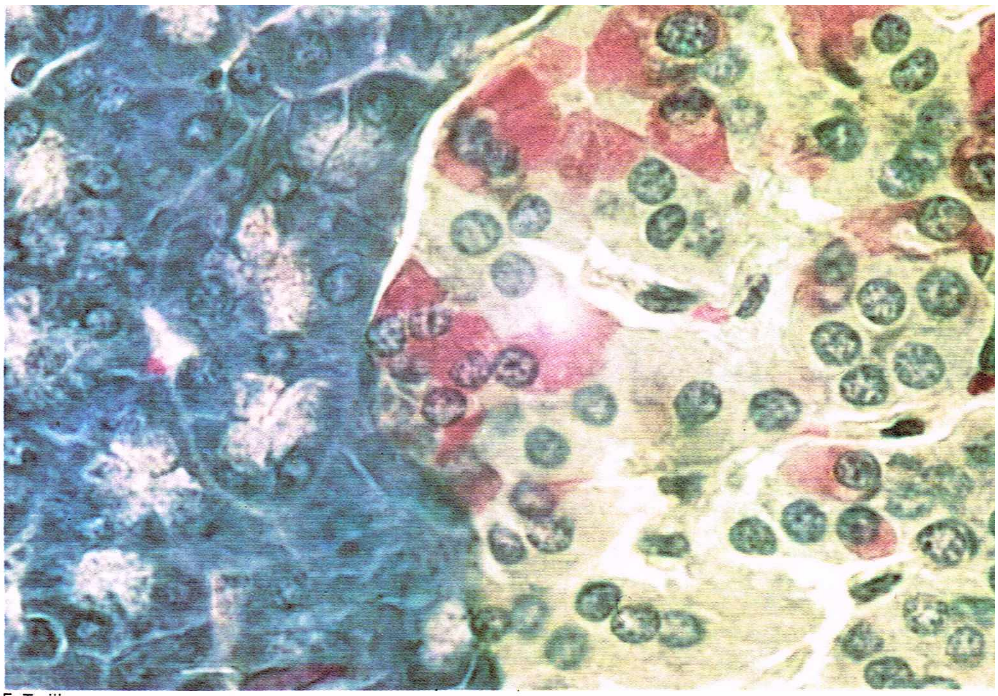

F. Treilhou

▲ ***Cellules à glucagon (ici, en rose) des îlots de Langerhans (fuchsine-paraldéhyde et coloration topographique).***

◄▼ ***A gauche, localisation de l'hypophyse intermédiaire chez le chat. A droite, sites d'action de l'ADH sur un élément excréteur rénal (néphron).***

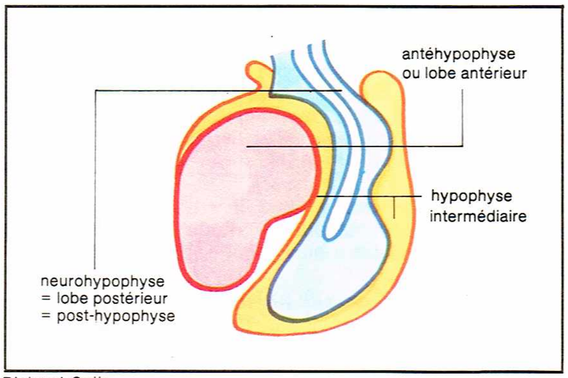

Richard Colin

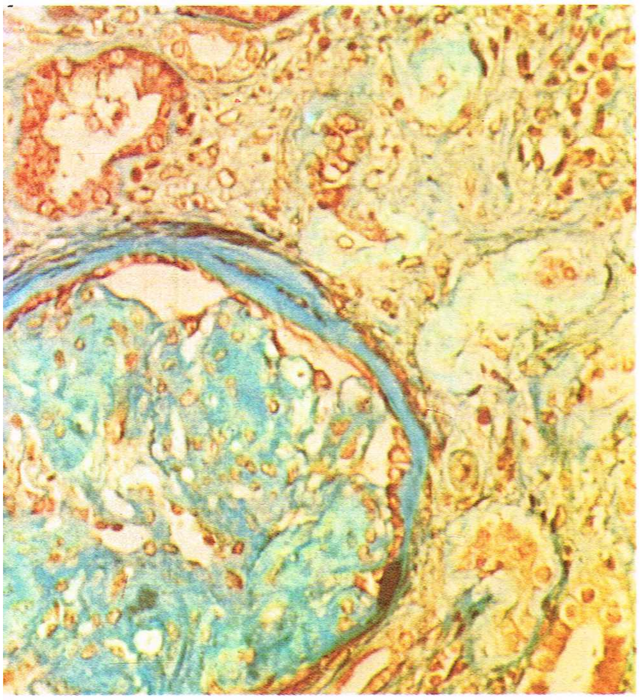

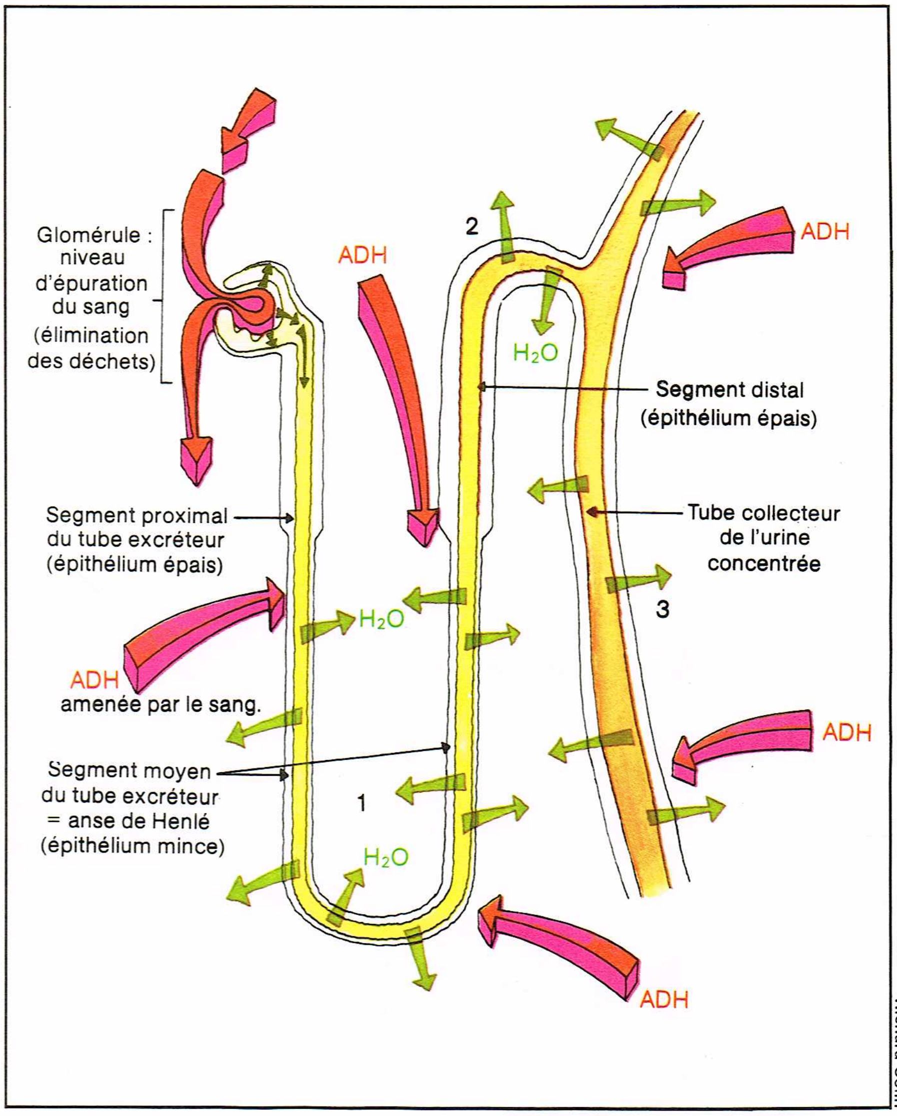

Richard Colin

clair, et l'on voit que le *contrôle nerveux* cérébral est essentiel.

Le *diabète insipide* est une maladie qui dépend d'une sécrétion de vasopressine anormalement basse. Il se manifeste par une excrétion urinaire excessive, entraînant souvent une déshydratation catastrophique; en conséquence, le taux de glucose augmente dans le sang trop concentré, d'où le nom de diabète. Dès 1913, Camus et Roussy ont provoqué expérimentalement le diabète insipide, chez des animaux, en lésant leur plancher cérébral (hypothalamus).

— L'*ocytocine* déclenche les *contractions utérines* et l'*excrétion lactée*. Cette hormone est aussi un peptide à 9 acides aminés, dont 2 seulement diffèrent de ceux de la vasopressine.

L'action de l'ocytocine est complexe : fondamentalement, elle provoque la contraction de fibres musculaires; les organes cibles sont essentiellement l'utérus et la glande mammaire. Au niveau mammaire, la succion du mamelon lors de la tétée stimule, par voie nerveuse, la sécrétion neurohypophysaire d'ocytocine et de vasopressine; l'excrétion aqueuse urinaire est par conséquent réduite par la vasopressine, cela limite la perte d'eau impliquée par la lactation suivie de l'expulsion du lait consécutive à l'action de l'ocytocine (Montastruc). L'ocytocine ne favorise pas la fabrication du lait, mais elle produit la contraction des gaines musculaires des canaux galactophores, donc l'éjection du lait. Le nourrisson qui tète ne pompe pas réellement le lait de sa mère, mais excite le mamelon, provoquant ainsi l'excrétion du lait qu'il se contente ensuite d'avaler; de même, le fait de traire une vache à la main n'implique pas un pompage.

La vasopressine et l'ocytocine, chimiquement voisines, sont étroitement associées sur le plan physiologique, et, selon Stutinsky (1951), leur synthèse est la conséquence d'un *mécanisme neuro-sécréteur* qui prend son origine dans le plancher cérébral et qui, par voie nerveuse, entraîne un précurseur vers la posthypophyse (migration des hormones associées à une protéine, la neurophysine); la question sera discutée en étudiant le système nerveux.

Hormones peptidiques du lobe antérieur de l'hypophyse ou lobe glandulaire

— L'*hormone adrénocorticotrope (ACTH)* ou *corticostimuline*. Comme son nom l'indique, cette hormone agit sur le cortex de la glande surrénale et contrôle la formation du cortisol. L'ACTH est un polypeptide constitué par une chaîne de 39 acides aminés. Comme pour l'insuline, une fraction de cette chaîne est indispensable pour l'activité biologique (elle est constante), et la séquence des autres acides aminés varie suivant les espèces de Mammifères. La sécrétion d'ACTH est réglée par un centre cérébral du plancher hypothalamique. Il se formerait, à ce niveau, un précurseur de l'hormone, capable de migrer jusqu'à l'hypophyse.

— L'*hormone de stimulation mélanocytaire (MSH)*. Il y a en fait plusieurs hormones de ce type. Elles provoquent l'expansion des « pseudopodes » des cellules pigmentées de la peau (les *mélanocytes*), ce qui entraîne un assombrissement de celle-ci. On a longtemps cru que la MSH et l'ACTH ne constituaient qu'une seule hormone; elles sont en fait mélanisantes chez les Poissons et les Amphibiens. Il a été prouvé récemment que leur constitution chimique est seulement voisine; la forme α de la MSH comporte 13 acides aminés, qui sont identiques à ceux que l'on trouve dans le groupement actif de l'ACTH. Il existe une différence cependant : l'inversion du NH_2 et du CO_2H terminaux. Le nombre d'acides aminés de la MSH α varie suivant les espèces. Quant à la forme β elle comporte 9 acides aminés identiques à ceux de la séquence active de l'ACTH. De telles ressemblances impliquent l'existence vraisemblable d'un précurseur commun. Et pourtant, il faut préciser que le territoire de formation de ces deux types d'hormones n'est pas le même : l'ACTH est proprement antéhypophysaire, alors que les MSH sont synthétisées par un groupe de cellules formant coin entre la post- et l'antéhypophyse, au niveau de l'*hypophyse intermédiaire;* il est vrai que l'origine embryologique de ces deux types de cellules est la même.

Le rôle de l'hypophyse intermédiaire dans la production de la MSH est mis en évidence par l'expérience suivante : quand on la détruit chez de jeunes Amphibiens, on obtient des adultes albinos; si la glande est détruite par un parasite, le résultat est le même. Remarquons cependant que chez certaines espèces, qui ne possèdent pas ces cellules intermédiaires, les MSH sont produites par le lobe antérieur.

On décrit classiquement une maladie correspondant à l'hypersécrétion de MSH : il s'agit de la *maladie bronzée d'Addison*. Elle est la conséquence d'une insuffisance surrénalienne qui entraîne la réduction du taux des hormones corticostéroïdes (cortisol, etc.) et secondairement l'hypertrophie pathologique de l'hypophyse, donc l'hypersécrétion de MSH. La peau de l'addisonien devient très pigmentée. L'insuffisance surrénalienne induit donc une *défreination antéhypophysaire* et l'hypersécrétion de MSH « qui survient à l'ombre de celle de l'ACTH » (Kayser).

Chez le Mammifère normal, il y a équilibre entre les sécrétions de corticostéroïdes d'une part et celles de MSH — ACTH d'autre part.

Mode d'action de ces hormones polypeptidiques au niveau cellulaire

Il semble que ces hormones agissent, pour la plupart, suivant un mécanisme commun. En effet, transportées jusqu'aux cellules cibles, elles se fixent sur leur membrane et induisent la formation d'un composé dont l'importance est évidemment primordiale : il s'agit de l'*AMP 3'5' cyclique* (AMP = adénosine monophosphate, substance voisine de l'ATP); dans la membrane d'une cellule « choisie », l'hormone active une enzyme,

▼ ***A gauche,* mélanocytes *mis en évidence dans la queue d'un jeune triton (contraste interférentiel).* La MSH *provoque l'expansion des « pseudopodes » des mélanocytes, ce qui entraîne un assombrissement de la peau.* *A droite, mode d'action des* hormones peptidiques *sur la* cellule-cible.**

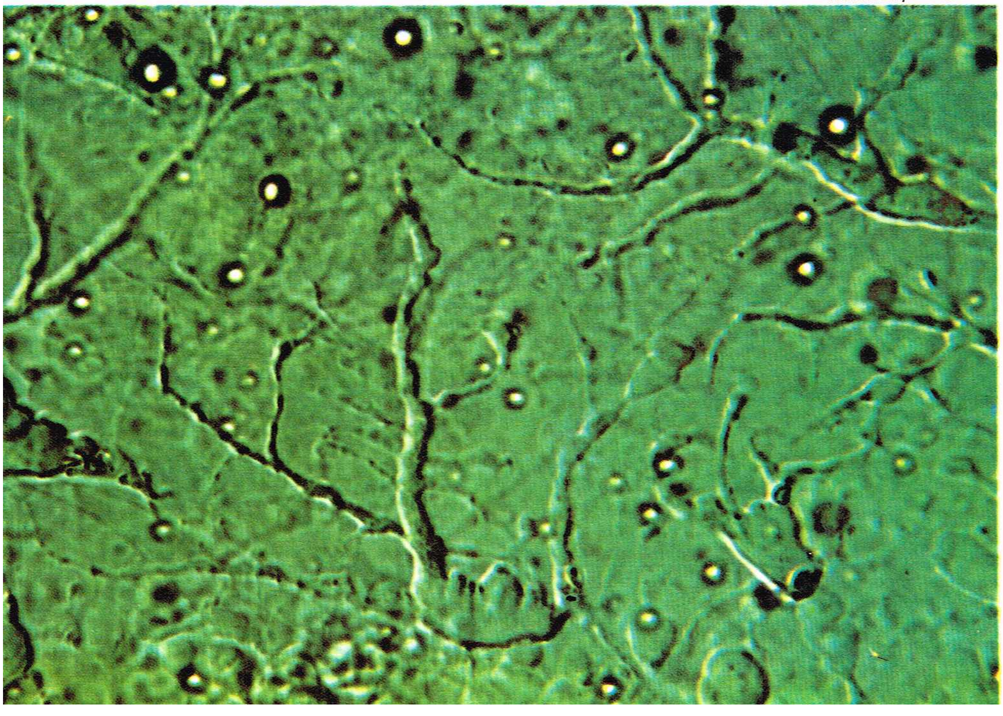

Nuridsany - Reichert

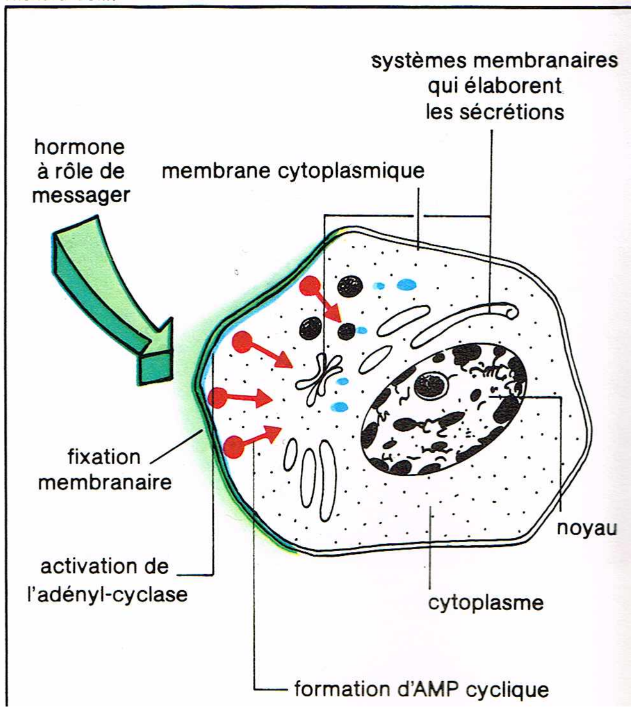

Richard Colin

l'*adénylcyclase,* qui permet la formation d'AMP cyclique. Cette substance a ensuite une action intracellulaire, qui varie avec le type de cellule. Krech a montré que, par elle-même, l'hormone n'a pas d'activité biochimique particulière, mais seulement une fonction de messager.

Une hormone peptidique de l'hypothalamus

Le cerveau synthétise des molécules peptidiques hormonales. Dans l'hypothalamus (partie ventrale du cerveau), il existe une hormone d'une grande importance pratique, la *TRH (thyrotropin releasing hormone),* responsable du bon fonctionnement de la *thyroïde.* Elle agit d'abord sur l'antéhypophyse, favorisant alors la formation d'une stimuline qui est ensuite directement active sur la thyroïde. D'autre part, cette TRH détermine le *comportement* de l'être humain; si l'individu n'en synthétise pas assez, il sombre dans un état dépressif qui n'est que trop fréquent. La TRH jouerait un rôle dans la formation de dopamine (amine biogène) à partir de tyrosine; or la dopamine est un médiateur chimique essentiel au niveau cérébral et le précurseur d'un autre médiateur, la noradrénaline. En thérapeutique on dispose d'un certain nombre de « médicaments » antidépressifs tels que le tryptophane qui permet la synthèse de sérotonine, amine biogène qui agit dans le cerveau *avec* les autres médiateurs; un traitement des malades par le tryptophane et la TRH permet d'améliorer considérablement le comportement des dépressifs graves (Prange et Wilson, 1972).

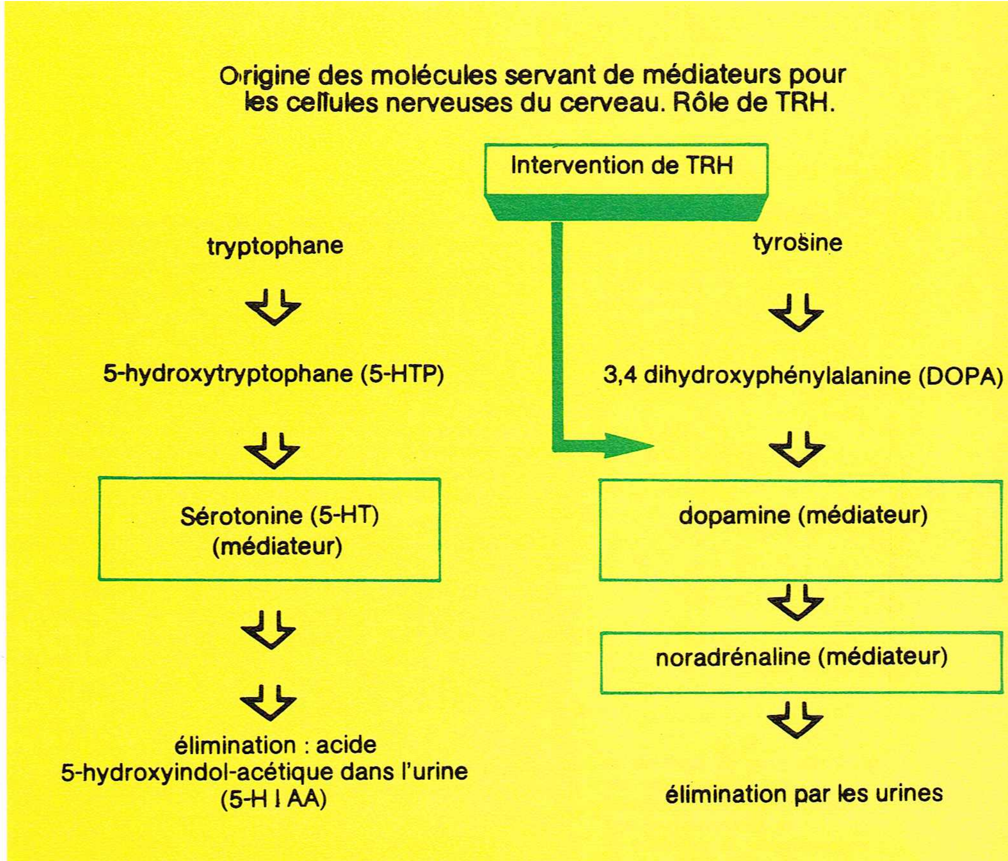

Richard Colin

▲ *L'action conjuguée de la* **TRH** *(thyrotropin releasing hormone) et du* **tryptophane** *permet d'améliorer considérablement le comportement des dépressifs graves.*

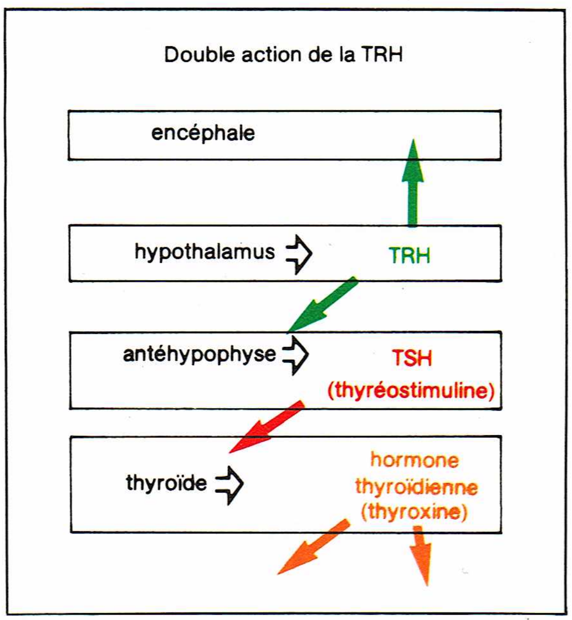

Richard Colin

◀ *La* **TRH** *est responsable du bon fonctionnement de la* **thyroïde**; *d'autre part, elle détermine le* **comportement** *de l'être humain.*

Peptides à rôle antibiotique

Les peptides antibiotiques sont produits par des micro-organismes ou des moisissures; très nombreux, ils ont des propriétés antibactériennes mais peuvent aussi intervenir spécifiquement au niveau de certaines étapes métaboliques communes à la plupart des êtres vivants; c'est cette dernière propriété qui empêche l'utilisation de beaucoup de produits antibiotiques (peptides ou autres) en thérapeutique.

Les gramicidines du *Bacillus brevis*

Ce sont des cyclo-peptides. On y trouve des acides aminés « extraordinaires », non incorporés dans les protéines naturelles, et des stéréo-isomères D, ce qui est anormal. Florkin et Schoffeniels ont mis en évidence le fait que ce caractère « aberrant » des acides aminés constituant ces peptides est commun à tous les peptides antibiotiques. C'est le cas, par exemple, des *tyrocidines* à D phénylalanine.

Les pénicillines

Leur importance est à la fois biologique et historique, puisqu'elles ont été à la base de toutes les recherches d'antibiotiques (Flemming). Divers Champignons Ascomycètes du genre *Penicillium* contiennent des dérivés d'un dipeptide, l'α-formyl-glycyl-D-pénicillamine. Dans le cas de la pénicilline G, le dipeptide est cyclisé.

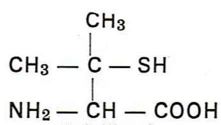

pénicillamine

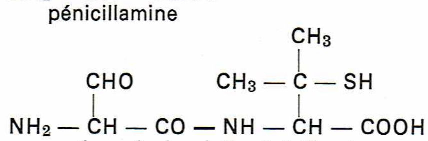

α-formyl-glycyl-D-pénicillamine

Les pénicillines freinent la croissance des Bactéries en se combinant avec les peptides de leur membrane.

Quelques polypeptides notables

Le **glutathion** est un tripeptide répandu chez les végétaux et les animaux. Il est constitué par la cystéine, l'acide glutamique et le glycocolle (CYS-GLU-GLY).

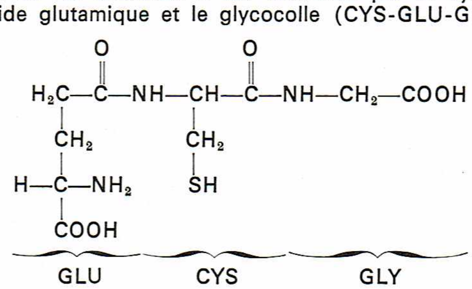

Le glutathion intervient dans le métabolisme de la phénylalanine et de la tyrosine; c'est un coenzyme important pour l'excrétion urinaire normale.

On trouve aussi la **carnosine** (β-alanyl-L-histidine) ainsi que l'**ansérine,** son dérivé méthylé, dans les muscles des Vertébrés.

L'**acide pantothénique** est d'une grande importance; c'est un des constituants du coenzyme A, substance indispensable pour la respiration cellulaire et pour la synthèse des glycérides. Beaucoup de Mammifères sont incapables de fabriquer cet acide; leur nourriture doit donc le fournir. On en trouve dans les végétaux. Remplissant une fonction clé dans le métabolisme, ce peptide permet la régénération des organes de certains animaux blessés (ce phénomène a été étudié chez les Amphibiens par Raunisch, en 1950). Étant précurseur d'un coenzyme, l'acide pantothénique peut être considéré comme une vitamine.

La **phalloïdine** est un polypeptide végétal présent dans les Champignons et responsable de la plupart des empoisonnements qui se produisent dans nos

▼ *Les* **pénicillines** *(peptides antibiotiques) sont extraites de divers Champignons Ascomycètes tels que* **Penicillium notatum.**

C. Bevilacqua

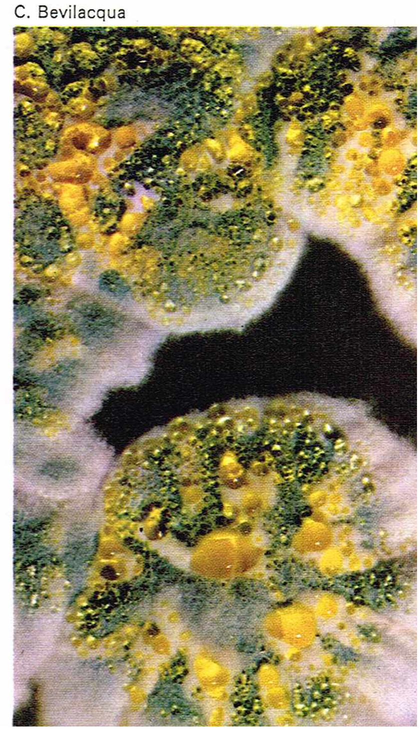

▶ ***L'empoisonnement phalloïdien est dû essentiellement à l'ingestion de l'amanite phalloïde* (Amanita phalloides)*, espèce très commune dans les bois de chênes et de châtaigniers.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

régions; l'empoisonnement phalloïdien est dû essentiellement à l'ingestion de l'amanite phalloïde, espèce très commune, particulièrement dans les bois de chênes et de châtaigniers. Ce Champignon contient, en fait, plusieurs toxines : l'*amanitine,* un alcaloïde, l'*amanita-toxine,* substance phénolique provoquant une paralysie, et la *phalloïdine,* polypeptide responsable de l'hémolyse catastrophique qui apparaît vingt-quatre heures après l'ingestion d'un fragment de Champignon. Aucun antidote n'est jusqu'à présent vraiment efficace : on introduit dans l'organisme une dose importante de sel pour tenter de compenser les troubles de perméabilité des globules rouges mais le traitement n'est pas suffisant pour les cas les plus graves. L'actualité montre qu'il y a peut-être des méthodes mieux adaptées; l'avenir le dira vraisemblablement.

Le venin des serpents contient des polypeptides qui sont responsables de troubles nerveux et de paralysies pouvant entraîner la mort. Les toxines bloquent la transmission nerveuse en se fixant sur les récepteurs protéiques des médiateurs normaux du système nerveux. Ainsi, l'α-**bungarotoxine** du bongare de l'Inde et de Formose agit sur les récepteurs de l'acétylcholine (Lee et Chang, 1960), et cela quel que soit le type de Vertébré mordu. Tous les autres serpents venimeux, en particulier les cobras, ont des *neurotoxines* semblables; les Vipéridés possèdent, en outre, des **hémorragines** provoquant à la fois une hémolyse et une dégradation des parois capillaires.

Les sérums antivenimeux sont obtenus en affaiblissant d'abord la toxicité des venins, que l'on injecte ensuite à des chevaux; le sang de ces derniers fabrique des antitoxines. La détoxication initiale des venins est obtenue par chauffage (Phisalix et Bertrand, 1894) ou par oxydation (Calmette, 1896). On utilise depuis trente ans la méthode de Ramon qui permet l'obtention rapide des sérums antivenimeux (anavenins); dans ce cas, les polypeptides sont préalablement atténués par le formol. Les sérums fabriqués dans le monde entier sauvent des milliers de vies humaines. Dans la péninsule indienne, le naja et le bongare font, chaque année, des dizaines de milliers de victimes.

Les protéines

Les protéines sont plus lourdes et plus complexes que les polypeptides. Il en existe un nombre considérable dans le monde vivant; on en trouve même chez certains fossiles, mais sont-elles autochtones? Avant de donner des exemples de protéines actuelles, il est nécessaire de souligner leurs caractéristiques physico-chimiques.

Propriétés des solutions colloïdales protéiques

Si beaucoup de substances signalées dans les pages précédentes peuvent constituer des *solutions colloïdales* (polysaccharides, polypeptides), cette propriété est très remarquable chez les protéines. Lorsque la solution

▼ ***A gauche, le schéma A figure le mode de fonctionnement normal de la transmission nerveuse; le schéma B illustre l'action de l'α-*bungarotoxine*, toxine polypeptidique qui se lie irréversiblement à la protéine réceptrice membranaire (ici d'une portion d'électroplaque de l'organe électrique d'un Poisson [Poisson torpille ou gymnote]); la localisation de la toxine se fait après incorporation d'iode radioactif dans la molécule.***

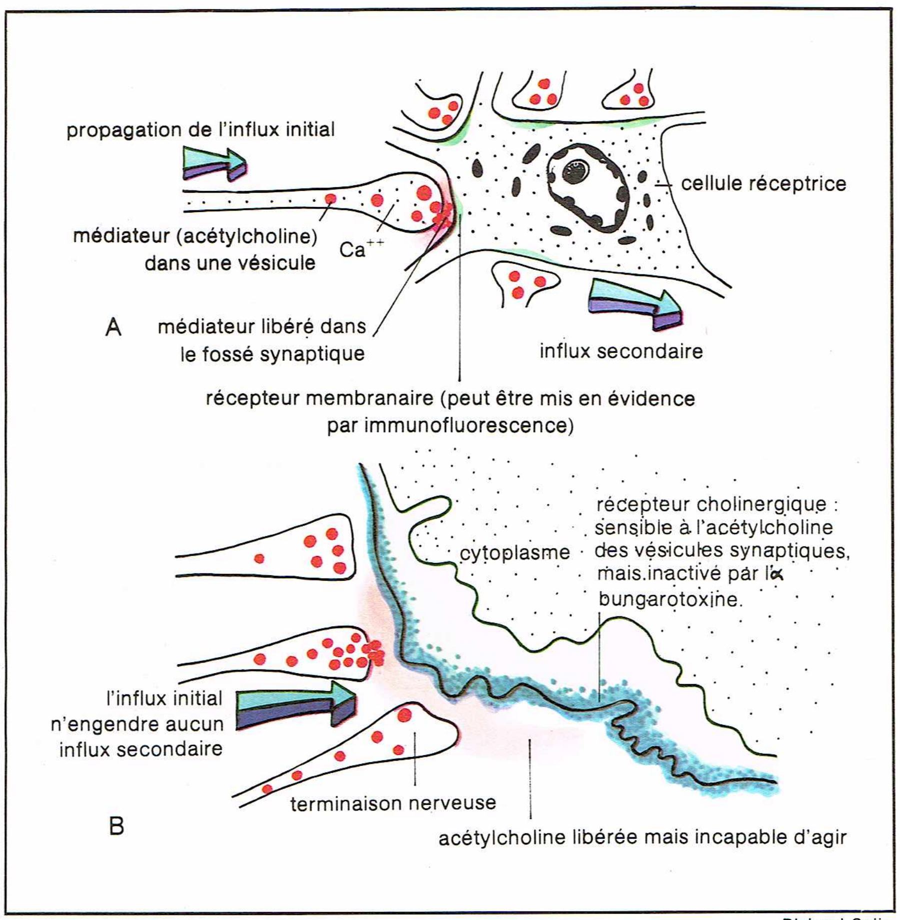

Richard Colin

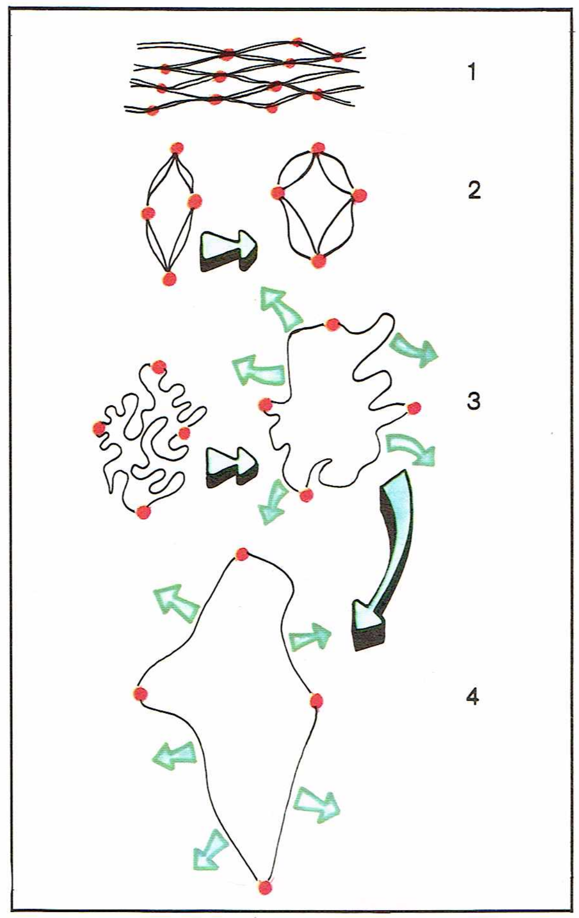

Richard Colin

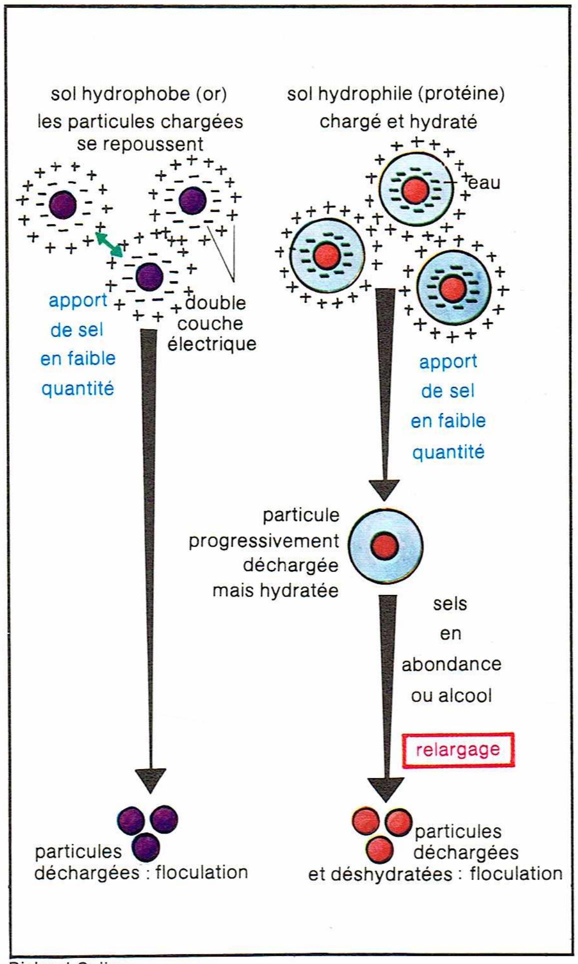

◀ *Floculation d'une protéine après* **relargage.**

Richard Colin

est fluide il s'agit d'un *sol,* et on parle de *gel* dans le cas d'une solution de consistance gélatineuse.

Les substances qui sont en solution colloïdale *diffusent mal* et *ne dialysent pas* à travers du papier parcheminé ou une membrane de cellophane; ces caractères sont valables pour les protéines mais aussi pour les polysaccharides. Les substances pouvant former des sols ont une pression osmotique très faible et, parallèlement, n'influent guère sur les points d'ébullition et de congélation de l'eau. Cette pression osmotique est encore appelée *pression oncotique*.

Les particules en solution colloïdale diffusent latéralement la lumière (c'est l'*effet Tyndall*), et cela même si la solution paraît claire à l'œil nu; l'ultramicroscope permet de distinguer les particules diffusantes (fond noir).

Dans un sol stable, on ne constate aucune décantation; par contre, les particules peuvent se déposer si le sol est soumis à une *ultracentrifugation ;* la plupart des sols se dissocient dans une centrifugeuse pouvant atteindre 60 000 tours-mn et 300 000 g, c'est-à-dire quand la force centrifuge est 300 000 fois supérieure à la force du champ de gravitation. Les substances dispersées dans le sol peuvent s'y trouver à l'état *monomoléculaire* ou *polymoléculaire ;* dans le dernier cas, on parle de *particules micellaires* (colloïdes d'association).

Degré d'instabilité des solutions colloïdales : la floculation

On distingue en chimie physique des colloïdes *hydrophobes* et des colloïdes *hydrophiles ;* en biologie, nous n'aurons affaire qu'aux seconds.

Si les colloïdes hydrophobes (un sol d'or par exemple) *floculent* en présence de petites quantités d'électrolytes ajoutées à la solution, des quantités plus importantes sont nécessaires pour faire floculer un sol hydrophile (un sol de gélatine par exemple). Dans le premier cas, l'électrolyte décharge les particules polarisées du sol d'or, et, comme il n'y a plus alors de répulsion électrostatique entre ces particules initialement de même signe, elles s'agrègent et provoquent la floculation : l'électrolyte a éliminé la double couche électrique entourant les particules. Dans le cas d'un sol hydrophile, de protéine par exemple, la même quantité d'électrolyte ne produit aucun effet; si sa concentration est augmentée, la charge périphérique des particules disparaît, mais il reste encore de l'*eau d'hydratation polarisée* (eau liée) en contact étroit avec la protéine; si la concentration augmente encore, l'électrolyte déshydrate les particules : c'est le *phénomène de relargage* qui entraîne la floculation de la protéine.

En résumé, dans un sol hydrophile, les premiers milliéquivalents d'électrolyte éliminent d'abord la double couche électrique; puis, sa concentration croissant, l'électrolyte déshydrate les microparticules, ce qui provoque leur floculation.

Tous les électrolytes n'ont pas le même pouvoir de floculation. Kruyt et Van Overbeek donnent les séries suivantes, par ordre d'activité décroissante :
anions : sulfate SO_4^{--} > citrate $C_6O_7H_5^{---}$ > tartrate $C_4H_4O_6^{---}$ > acétate CH_3COO^- > chlorure Cl^- > bromure Br^- > nitrate NO_3^-;
cations : lithium Li^+ > sodium Na^+ > potassium K^+ > rubidium Rb^+ > cæsium Cs^+ et magnésium Mg^{++} > calcium Ca^{++} > baryum Ba^{++}.

Pour les premières étapes de l'analyse biochimique, on peut ainsi, grâce à divers ions, fractionner un mélange de macromolécules (floculations différentielles). Mais la floculation ne se produit pas pour tous les groupes de protéines, et elle dépend du pH de la solution colloïdale.

Viscosité des solutions colloïdales protéiques et mesures électrophorétiques

En solution, les protéines, plus ou moins nettement chargées suivant le pH, vont migrer dans un champ électrique, tout comme les peptides. L'*électrophorèse* des protéines est une technique très commune. On détermine également, pour les protéines, un *point isoélectrique*, pH pour lequel il n'y a pas de migration. La viscosité d'un sol de protéine augmente de part et d'autre du pHi, et la vitesse de *migration électrophorétique* varie donc suivant le pH de l'extrait étudié.

Réactions chimiques des protéines

Réaction xanthoprotéique

Cette réaction est très facile à observer; il suffit, par exemple, de déposer une goutte d'*acide nitrique,* chaud et dilué à 20-30 %, sur un morceau de mie de pain, pour voir, après quelques instants, la mie de pain virer au jaune : la farine contient des protéines qui sont responsables de cette réaction. De même, si l'on manipule sans précautions un flacon d'acide nitrique, celui-ci est toujours suffisant au niveau du bouchon pour jaunir les doigts...

Si l'on chauffe une solution protéique en présence d'acide dilué à 20 %, un précipité blanc se forme, devient rapidement jaune, puis orange. Le précipité blanc est seulement un précipité protéique dû à un excès d'acidification; ces particules deviennent jaunes si la protéine contient des acides aminés à noyau benzénique, ce qui est généralement le cas.

Réaction de Millon

Le réactif est complexe et contient des nitrates de mercure, de l'acide nitrique et de l'acide nitreux. Quelques gouttes dans une solution protéique provoquent d'abord le précipité blanc déjà évoqué; en chauffant avec précaution, le mélange devient rouge brique; cette réaction dépend de la présence de tyrosine dans la protéine.

Réaction du biuret

Lorsqu'on ajoute quelques gouttes d'une solution diluée de sulfate de cuivre au liquide contenant la protéine préalablement alcalinisée par la soude, il se forme aussitôt une coloration rouge virant au violet. Cette réaction, qui était le test préféré de nos vieux maîtres, est encore utilisée pour les tests courants d'analyse biologique (des papiers sont imprégnés de réactif). La réaction n'est pas simple : la couleur rouge dépend de l'existence de liaisons peptidiques alors que la coloration bleue qui se surajoute est due à la formation d'amines cuivriques complexes; les mêmes colorations sont obtenues en remplaçant la protéine par le biuret (d'où le nom de la réaction) ou l'oxamine ($COHN_2$ — $CONH_2$) ou encore la malonamide ($CONH_2$ — CH_2 — $CONH_2$), substances aminées mais ne comportant pas de liaisons peptidiques.

◀ *Page ci-contre, à droite, mode de gonflement d'un gel mis en présence d'eau : 1, gel « sec », à mailles étroites; 2, gonflement d'une maille; 3, gonflement d'un gel à mailles faites de filaments pelotonnés; 4, mailles dont les sinuosités sont presque totalement étirées (cas de la gélatine). Le gonflement est favorisé par un acide ou une* **base : charge électrique accrue;** *il est réduit par la présence de* **sels** *qui diminuent* **la charge.**

Réaction d'Adamkiewicz

Les protéines contenant du *tryptophane* donnent une réaction violette avec l'acide glyoxylique. Cet acide existe comme impureté dans l'acide acétique; il suffit donc d'ajouter de l'acide acétique ordinaire à la solution protéique.

Réaction du soufre

La plupart des protéines contiennent du soufre, excepté le caséinogène du lait; donc, en général, si l'on ajoute à une solution alcaline de protéines quelques gouttes d'acétate de plomb, il est facile d'obtenir à chaud un précipité noir de sulfure de plomb; en effet, le soufre des acides aminés se fixe sur le sodium dans le cas où l'on alcalinise à la soude, puis le sulfure de sodium formé (Na_2S) réagit avec l'acétate de plomb pour former le précipité noir de sulfure de plomb.

Quelques expériences

Ces réactions colorées, qui peuvent être observées sans difficultés sur les extraits les plus divers, peuvent être également utilisées sur des coupes de tissus frais faites « à main levée »; ainsi, les graines constituent un excellent matériel d'observation dont il est intéressant d'étudier la structure au microscope. On peut employer, par exemple, la graine du haricot ramollie dans l'eau. On effectue des coupes à l'aide d'une lame de rasoir. Au microscope, la réaction xanthoprotéique montre que, chez le haricot, les protéines sont uniformément réparties dans tout le protoplasme des cellules. La réaction d'Adamkiewicz est particulièrement nette; en effet, les protéines du haricot contiennent beaucoup de tryptophane. Par contre, en utilisant un autre type de graine, tel que le ricin (Binet), après élimination par l'alcool absolu de l'huile contenue dans les coupes, on observe que les protéines sont essentiellement accumulées dans des corpuscules de réserve, ou *grains d'aleurone*.

Mais cette dernière réaction est particulière au règne végétal. Chez les animaux, des observations de ce genre montrent une répartition uniforme des protéines.

Principaux types de protéines de structure

Parmi les protéines, on distingue les *protéines de structure* et les *protéines enzymatiques* qui sont très peu concentrées dans les cellules.

L'hydrolyse des protéines de structure peut donner seulement des acides aminés : il s'agit alors d'*holoprotéines*. Si elle donne aussi d'autres substances, on a affaire à des *hétéroprotéines,* ou *protéines conjuguées,* dont les groupements étrangers sont qualifiés de *groupements prosthétiques*. Ces hétéroprotéines seront signalées dans le texte.

Protéines à molécules globulaires

Les molécules sont sphéroïdales ou peu allongées. Ce sont des protéines en général *isostables* (stables au pHi).

Les albumines

Ce sont des holoprotéines dont le pHi est voisin de 5; elles sont très solubles dans l'eau, comme dans les solutions salines peu concentrées; les solutions concentrées les font floculer (phénomène de relargage). On utilise en général le sulfate d'ammonium $SO_4(NH_4)_2$ pour les extraire. Leur poids moléculaire (PM) avoisine 60 000. Comme leur taille est relativement petite, elles exercent une influence sur la pression osmotique du sérum, donc dans les échanges hydriques (J. D. Weill).

Les électrophorèses sur papier ainsi que les chromatographies sur tamis moléculaires permettent de distinguer parfaitement les albumines des autres protéines. Leur dosage, effectué grâce à des systèmes automatiques, permet de surveiller les activités du foie (catabolisme-synthèse).

Il existe trois types d'albumines très communes. La *sérum-albumine* du sang, faite de plus de 500 A.A., constitue la protéine la plus abondante du sérum; elle transporte diverses molécules à rôle biologique important (telles que l'iode, la bilirubine, etc.) ainsi que les médicaments (selon Kruh).

Le sérum contient, en fait, plusieurs dizaines de protéines différentes. Pour effectuer un tri grossier, on précipite, par le sulfate d'ammonium moyennement concentré, toutes les protéines, à l'exception des sérum-albumines, qui restent en solution; on peut donc les séparer, puis les extraire ensuite en les floculant par un apport d'électrolyte concentré. Il y a environ 50 mg d'albumines par gramme de sérum. La *lactalbumine* se trouve dans le lait et l'*ovalbumine* dans le blanc d'œuf.

Les globulines

Leur poids moléculaire moyen est de 150 000 et leur pHi est proche de 7. Certaines de ces protéines sont solubles dans l'eau (protéines isostables), mais d'autres floculent et ne sont solubles que dans les solutions salines très diluées, qui accentuent leur charge.

L'électrophorèse du sérum donne trois groupes de bandes qui correspondent aux types de globulines à pHi différents; celles-ci sont nommées α, β et γ. Les chromatographies sur tamis moléculaires, qui permettent une ségrégation des particules en fonction de leur taille, montrent que les poids moléculaires varient entre 44 000 et 1 500 000 (Weill).

Le fractionnement des globulines se fait souvent en employant la méthode de Cohn, méthode fondée sur une série de précipitations grâce à des sels en solution à différents pH; cette réaction a lieu en présence d'alcool, celui-ci favorisant les floculations en accélérant l'élimination de l'eau liée aux molécules.

— *Les α globulines*. Elles ont un poids moléculaire compris entre 50 000 et 300 000.

- Elles sont souvent liées aux glucides pour former des hétéroprotéines, les *glucoprotéines :* les α mucoprotéines, α glycoprotéines, et les haptoglobines.

Un ensemble important de glucoprotéines correspond aux facteurs qui déterminent les *groupes sanguins* et qui se trouvent au niveau des globules rouges.

L'*haptoglobine* du sérum est une glucoprotéine dont le rôle biologique n'est pas encore connu avec certitude; on sait qu'elle joue un rôle important dans les phénomènes d'oxydation et qu'elle est alors en combinaison avec l'hémoglobine. La concentration en haptoglobine varie dans certains cas pathologiques et, en particulier, quand il y a lésion inflammatoire aiguë. Elle diminue quand de l'hémoglobine passe dans le plasma (anémies hémolytiques ou troubles postopératoires). Le dosage de cette substance présente un grand intérêt diagnostique. Dans l'espèce humaine, il existe plusieurs types d'haptoglobines; elles servent à déterminer des *groupes sériques,* complémentaires de ceux des globules rouges. La connaissance de ces haptoglobines, qui migrent à des vitesses différentes par électrophorèse, permet d'améliorer les conditions de transfusion sanguine et facilite une analyse plus précise des populations humaines.

- D'autres α globulines se lient à des lipides; ce sont des α *lipoprotéines* de densité très variable. En ce qui concerne les lipides, nous avons souligné l'importance en milieu aqueux de ces liaisons pour le transport de différentes molécules essentielles. De plus, les lipoprotéines forment les membranes de la cellule et de divers organites hyaloplasmiques.

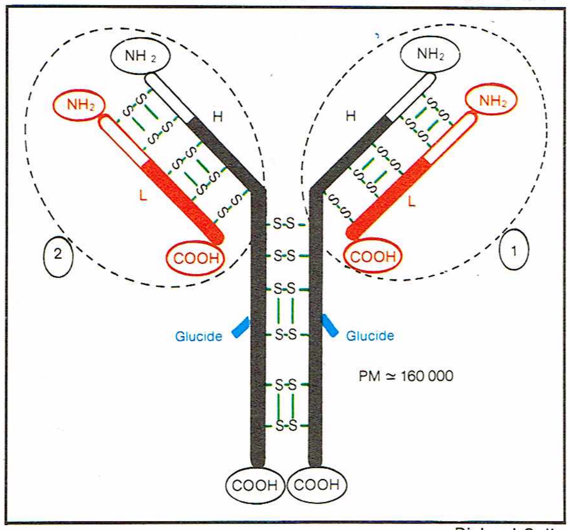

Richard Colin

▶ ***Structure très schématique des Ig G : quatre polypeptides identiques deux à deux; deux chaînes légères (L), en rouge; deux chaînes lourdes (H), en noir; deux sites fonctionnels 1 et 2; leur nature varie suivant celle de l'antigène; l'ensemble de la molécule est très pelotonné, contrairement à ce qui est représenté.***

— *Les β globulines.* Leur déplacement électrophorétique est plus lent. Kruh cite deux exemples de β globulines biologiquement intéressantes : la transferrine et la céruloplasmine.

● La *transferrine* migre relativement vite; son poids moléculaire est de 88 000. Son importance est fondamentale : c'est elle qui capte le fer absorbé par l'organisme (diverses affections entraînant un appauvrissement en transferrine provoquent des anémies résistantes à une thérapeutique martiale).

● La *céruloplasmine,* qui migre très près de la transferrine, est un transporteur du cuivre, métal essentiel (en petites quantités) dans un grand nombre de réactions enzymatiques. L'absence de cette globuline caractérise la maladie de Wilson.

● Les *β lipoprotéines* sont les plus grosses molécules du plasma; leur poids moléculaire atteint 1 500 000; ce sont des hétéroprotéines qui migrent très lentement, elles sont formées par la liaison de β globulines et de cholestérol ou de stéroïdes : elles ont une grande importance pour le transport des hormones stéroïdes.

— *Les γ globulines.* De poids moléculaire voisin de 160 000, elles migrent encore plus lentement que les autres globulines (à l'exception des β lipoprotéines, exceptionnellement volumineuses). On compte plusieurs bandes de γ globulines sur les papiers d'électrophorèse (ou les gels de polyacrylamide du commerce, dont la concentration progressivement croissante permet à la fois l'électrophorèse et le tamisage moléculaire : *électrophorèse gradipore*).

Ces globulines comprennent tous les *anticorps* formés par l'organisme et véhiculés par le sang : il s'agit des *immunoglobulines*.

Les anticorps sont des molécules protéiques de défense qui se forment en réponse à la pénétration dans l'organisme de protéines étrangères (injections expérimentales, pénétration bactérienne, transplantation de tissus ou d'organes). Les anticorps sont doublement spécifiques; ils reconnaissent les protéines de l'espèce à laquelle appartient l'organisme et même ses protéines individuelles; de plus, ils peuvent reconnaître les protéines étrangères (antigènes) et secondairement se combiner avec elles pour les inactiver.

● *Les immunoglobulines G, ou Ig G.* Elles ont donné lieu aux études les plus complètes. Leur poids moléculaire est de 150 000. Chaque molécule est faite de 4 chaînes : 2 chaînes lourdes H *(heavy)* de PM 50 000 et 2 chaînes légères L *(light)* de PM 25 000.

Des liaisons entre les acides aminés soufrés de ces chaînes sont figurées par des ponts disulfure (S-S); de plus, des reploiements des chaînes sont dus à d'autres ponts disulfures, formés entre deux niveaux de la même chaîne. Cette *structure primaire* complexe des Ig G n'est connue que depuis 1969.

La liaison de l'antigène se fait à un niveau constitué par les chaînes L et la moitié N terminale des chaînes H (moitié terminée par un NH_2 libre). Les Anglo-Saxons donnent le sigle F-a-b (antigene binding) à ce site qui s'adapte à l'antigène. Ce site est bien fait de deux moitiés, à la fois issues de L et de H : on peut le constater par digestion enzymatique partielle de ces anticorps. Ces observations ont été effectuées essentiellement sur des malades cancéreux atteints de myélome (tumeur d'une lignée de globules blancs croissant dans la moelle osseuse) ; les cellules de la tumeur, qui prolifèrent activement, fabriquent beaucoup d'anticorps, et tous sont identiques : la tumeur est un clone issu de la multiplication exubérante d'une cellule tumorale originelle (Kruh). Or, il est facile d'isoler les chaînes L des immunoglobulines rejetées dans l'urine de ces malades (protéine de Bence Jones) et d'en étudier ensuite la structure; celle-ci varie suivant les malades, et la variation ne se produit que sur la partie N terminale; on peut en déduire que c'est cette partie terminale qui détermine la spécificité de l'anticorps; on arrive à la même conclusion pour les chaînes H. Il est évident que l'étude de la structure des Ig G va permettre de préciser leur fonctionnement.

Le *dosage* des immunoglobulines permet de mesurer le degré de résistance des individus vis-à-vis des multiples infections qui les menacent; il est, bien sûr, essentiel pour le traitement des enfants, dont l'aptitude à synthétiser des anticorps peut être insuffisante. Une hypo- ou une agammaglobulinémie peuvent être suspectées dès la naissance dans les cas d'atrophie squelettique ou musculaire, et, chez les jeunes enfants, les angines et la toux sont des indices de même nature. Chez l'adulte, le dosage permet de contrôler l'état de sujets particulièrement vulnérables; on le pratique aussi lors du traitement chimique des cancéreux. Le dosage est fondamental pour la surveillance des patients porteurs d'organes greffés et qui ont besoin d'un traitement destiné à prévenir la destruction du greffon par le malade lui-même.

On constate, en outre, que certaines maladies immunologiques (polyarthrites, lupus érythémateux) impliquent un taux élevé d'Ig G. Il en est de même des affections cardiaques, des tuberculoses, de la syphilis et des troubles ganglionnaires qui ne sont pas immédiatement décelables par l'étude clinique.

Signalons aussi le cas des *ictères,* ou *jaunisses* : les Ig G peuvent être excessivement abondantes s'il s'agit d'une hépatite; par contre, leur taux n'est pas modifié s'il s'agit d'une stase au niveau biliaire provoquée par un calcul ou une tumeur.

● *Les immunoglobulines A,* ou *Ig A.* On connaît moins bien leurs fonctions; on sait qu'elles apparaissent vers 5 ou 6 ans chez la plupart des enfants et que leur absence ou leur insuffisance va de pair avec des troubles neurologiques. Les adultes peuvent en être dépourvus, ce qui s'explique mal. Par contre, l'abondance des Ig A irait de pair avec des affections virales aiguës. De plus, comme pour les Ig G, leur taux est très élevé chez des malades atteints de myélome multiple; un tel dépistage effectué précocement permet un traitement rapide du cancer.

● *Les immunoglobulines M, ou Ig M.* Elles ont un poids moléculaire pouvant atteindre 900 000. Dans l'espèce humaine, leur quantité augmente avec l'âge. Leur présence est décelable chez le nourrisson qui a contracté une infection (la rubéole par exemple) lors de sa vie intra-utérine. Chez les adultes, les Ig M jouent un rôle important lors de la phase aiguë des infections et dans les hépatites virales. On connaît mal leurs fonctions dans le cas de maladies tumorales, mais elles doivent être importantes, puisque certaines néoplasies entraînent un grand accroissement du taux d'Ig M.

Quelques remarques sur l'analyse et le dosage des protéines médicalement intéressantes

Il existe une méthode d'analyse et de dosage des immunoglobulines qui présente un intérêt tout particulier; le *dosage par immuno-précipitation.* Si l'on met en présence un antigène et son anticorps, ils forment un complexe qui flocule, donc repérable et dosable. Dans une boîte de Pétri, on place les deux substances à quelque distance l'une de l'autre et on les fait *diffuser* sur un milieu adéquat (méthode de la double diffusion mise au point par Oudin et Ouchterlony) ; ces substances migrent et floculent lorsqu'elles se rencontrent : on observe alors une ligne, un front plus ou moins profond et plus ou moins dense; la substance obtenue peut être dosée

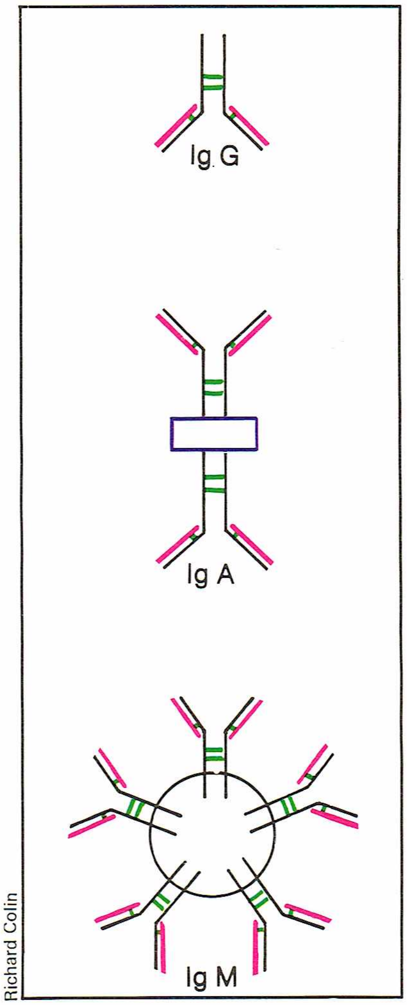

Richard Colin

▲ ***Schéma comparatif des différentes immunoglobulines : en vert, ponts disulfures entre les chaînes.***

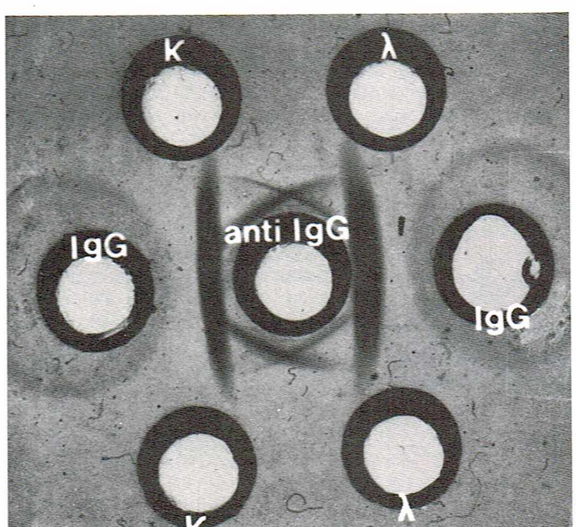

Service du professeur Bariety - Hôpital Broussais

◀ ***Technique d'immunoprécipitation (Ouchterlony). Au centre de la plaque : sérum anti-Ig G humain; à gauche, et à droite, on a placé deux échantillons d'Ig G normales; elles réagissent avec le sérum anti-Ig G en donnant l'une et l'autre un précipité abondant. Au-dessous et au-dessus, il s'agit d'échantillons contenant seulement la protéine de Bence Jones (2 formes; urinaires); la réaction de précipitation est nette, mais beaucoup moins intense.***

▼ *A - Principe de fonctionnement d'un anticorps : à gauche, deux molécules que l'organisme considère comme antigènes; à droite, l'organisme fabrique un type de molécule dont la structure peut s'adapter à celle de l'antigène. Il y a deux sites d'adaptation par molécule d'anticorps, 1 et 2. B - Principe de la méthode d'immunofluorescence directe : à chaque expérience, il faut préparer un sérum spécifique de l'antigène. C - Immunofluorescence par la méthode indirecte (schéma de principe). Le sérum spécifique n'est plus nécessaire : les Ig de mouton anti-Ig-lapin peuvent être stockées; la méthode est très sensible.*

par une méthode optique (la *néphélémétrie*). Il existe des systèmes automatiques permettant de doser en même temps toutes les globulines dont il a été question, mais aussi la sérum-albumine, la transferrine, etc.

Le dosage des protéines, quelles qu'elles soient, est, en clinique, d'une grande importance diagnostique pour l'étude des maladies rénales. En général, les protéines ne traversent pas les membranes cellulaires. Mais certaines d'entre elles peuvent traverser les parois capillaires, autrement dit, les parois des cellules qui tapissent la face interne des plus petits vaisseaux; il y a ainsi *filtration des protéines* au niveau de milliers de glomérules, pelotons vasculaires chargés de l'épuration rénale du sang. Chez un sujet sain, il y a *réabsorption* de la quasi-totalité des protéines filtrées; elle s'effectue à travers les parois de milliers de tubes excréteurs; ainsi, l'urine normale ne contient que de petites quantités de protéines, albumines et globulines.

Des dosages précis peuvent être effectués par des méthodes très sensibles. On a recours à l'électrophorèse sur papier ou sur gel d'amidon. La technique idéale est cependant l'*immuno-électrophorèse*, mise au point par Grabar en 1952; elle implique une électrophorèse préalable sur gel d'agar, puis une précipitation des protéines à étudier grâce à un *immun-sérum* (sérum antialbumine, sérum anti-Ig G, etc., ou un sérum antiprotéique total; ces sérums contiennent les anticorps capables de réagir avec les substances à doser). Il s'agit donc d'une adaptation à l'étude des solutions protéiques complexes de la technique d'immuno-précipitation.

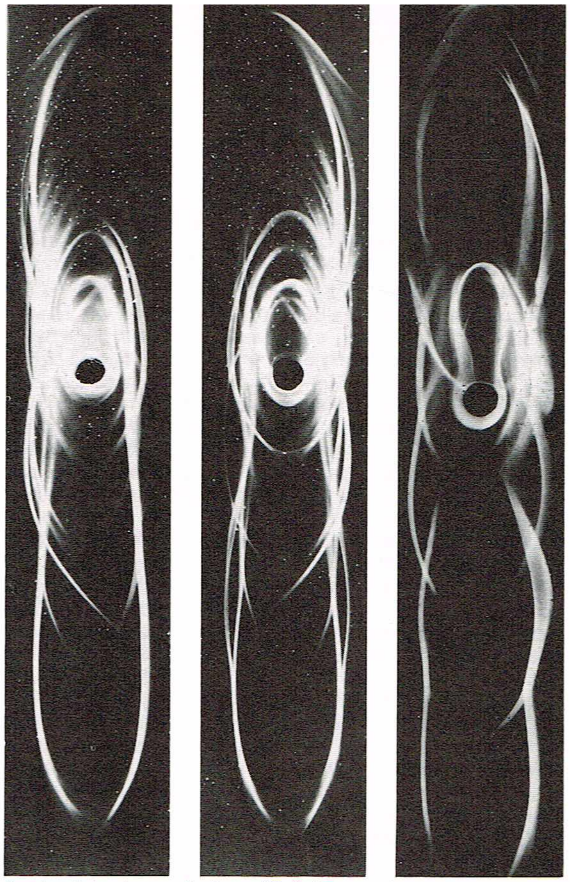

Service du professeur Bariety - Hôpital Broussais

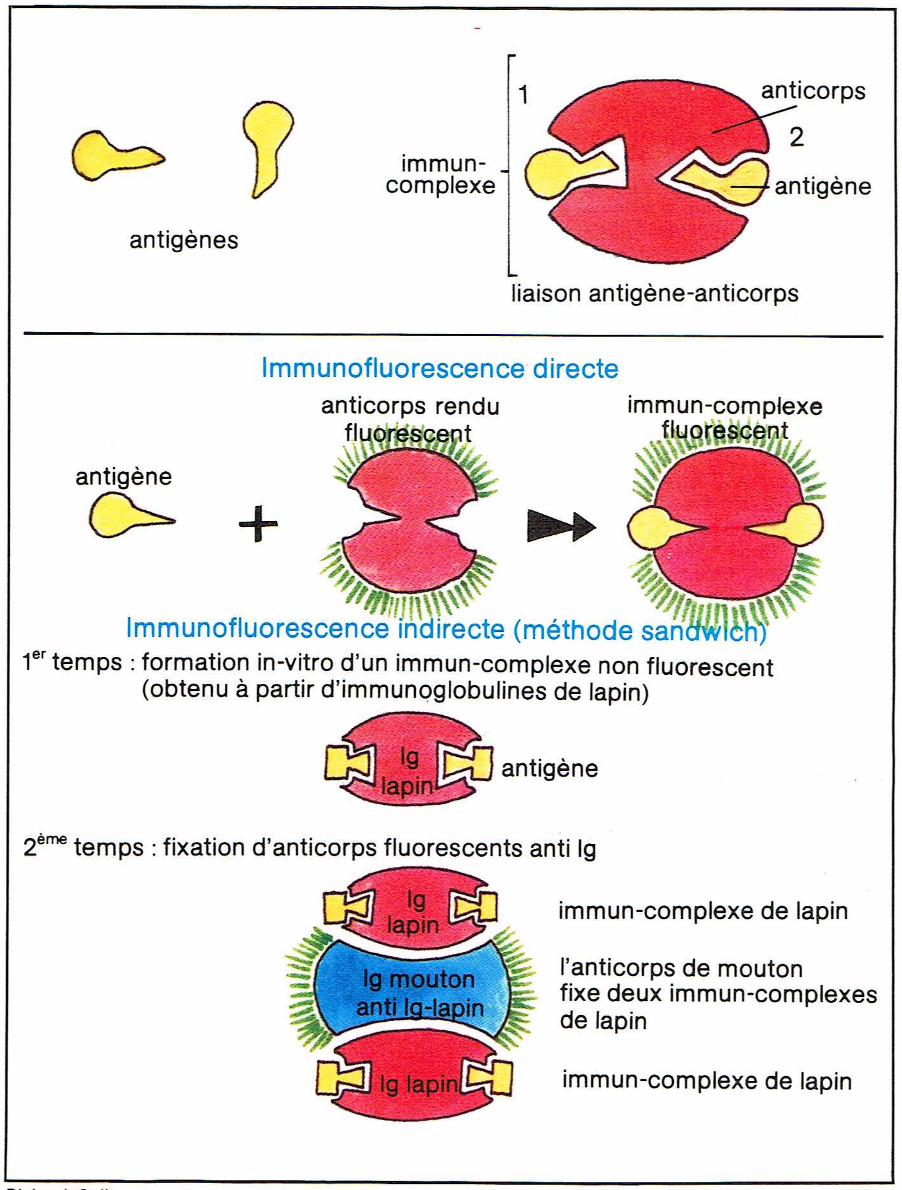

Richard Colin

Il arrive, dans divers cas pathologiques, que la perméabilité du glomérule soit totalement modifiée ou que la réabsorption protéique s'effectue mal. On observe alors une *protéinurie* non physiologique, qui peut être fort grave. C'est le cas de l'expulsion de la protéine de Bence Jones dont on a parlé plus haut; les chaînes L de cette protéine sont ainsi parfaitement mises en évidence dans l'urine grâce à un sérum de cheval anti-Ig G L.

Au niveau histologique, la technique de Coons (1942) permet de déceler, à la surface de la membrane cellulaire, l'existence d'une substance impliquée dans une réaction immunologique, en particulier d'une protéine. On peut « fabriquer » des *anticorps fluorescents* qui, mis en contact avec la cellule, permettront de localiser l'antigène (immunofluorescence directe). On utilise plus généralement une méthode dérivée, la « méthode-sandwich ».

On peut aussi conjuguer des enzymes aux anticorps ou leur incorporer des éléments marqués. Dans ce dernier cas, la localisation peut même être faite au microscope électronique (Bressard, 1973).

Les protéines basiques

Il en existe deux types principaux; on les trouve dans les cellules et non dans leur environnement.

— *Les histones*. Ces protéines sont accumulées dans le noyau. Elles contiennent environ 15 % d'acides diaminés, qui leur donnent une réaction basique notable. Leur pHi avoisine 10. Leur poids moléculaire est compris entre 10 000 et 20 000. Des extraits montrent qu'il existe essentiellement trois fractions, plus ou moins riches en *lysine* et en *arginine*. Les solutions acides permettent d'extraire ces protéines.

Les histones se fixent au matériel chimique dont dépendent les caractères génétiques de l'être vivant, c'est-à-dire à l'acide désoxyribonucléique; elles auraient pour effet d'inhiber l'activité de certains sites génétiques de cet acide. On dit que, lorsqu'elles sont combinées aux histones, ces régions sont *muettes* (Kruh). Il s'agit d'une combinaison extrêmement importante, car on pense qu'elle est réversible suivant les conditions biologiques, en particulier, lors de la transformation tumorale. Avec les histones, nous sommes au cœur du problème de la « différenciation » cellulaire et de la « dédifférenciation ».

— *Les protamines*. Ce sont des protéines encore plus nettement basiques que les précédentes; elles sont essentiellement constituées par de l'*arginine*, de l'*histidine* et de la *lysine*. Elles sont complexes, bien que leur poids moléculaire soit réduit (5 000). On en trouve de faibles proportions dans la plupart des tissus, mais elles sont abondantes dans les laitances des Poissons; elles sont associées au matériel génétique de tous les spermatozoïdes.

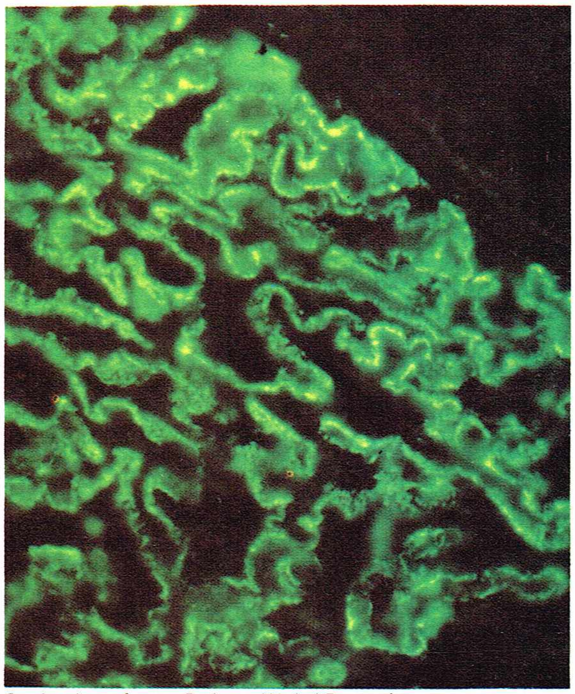

Service du professeur Bariety - Hôpital Broussais

◄ *Technique d'immunofluorescence appliquée à l'étude d'une glomérulonéphrite humaine; le sérum anti-Ig G se fixe sur des dépôts protéiques du glomérule, qui vont de pair avec des troubles de perméabilité considérables.*

◄ *Page ci-contre, en haut:* **immuno-électrophorèse sur gélose.** *Dans la cupule creusée au centre des trois plaques, il y a en* **a** *du sérum humain normal, en* **b** *et* **c** *de l'urine concentrée pathologique. Des sérums de cheval anti-sérum humain ont été versés dans les gouttières longitudinales. Chaque ligne de précipité correspond à une protéine humaine. Les images* **b** *et* **c** *sont celles d'une protéinurie non sélective; en* **b**, *les Ig G passées dans l'urine, en* **c**, *les Ig A.*

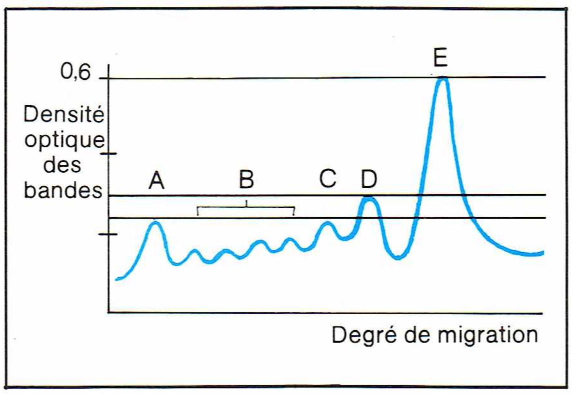

Richard Colin

◄ *Chromatographie des* **histones** *extraites de l'intestin.*

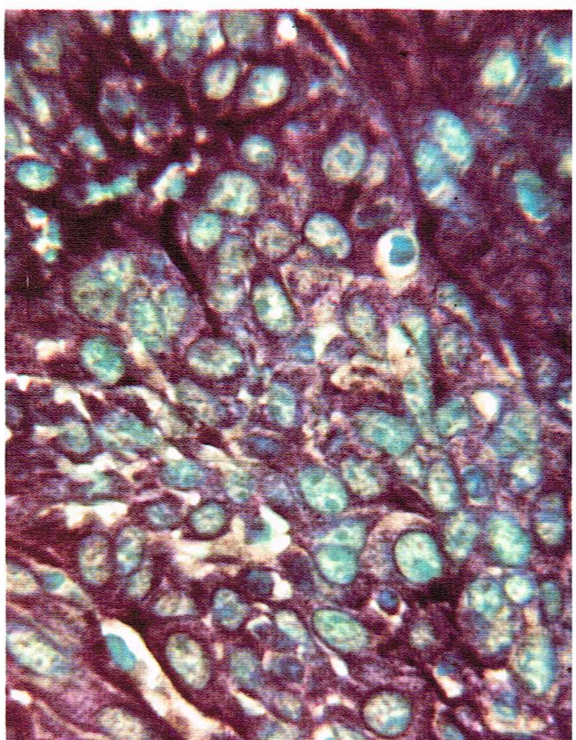

J. Bouchard

◄ *Coupe de tissu épidermique (tumoral) de souris; mise en évidence des* **histones** *(coloration combinée au fast-green-eosine) que l'on repère au sein du noyau, essentiellement au niveau de la chromatine.*

Les protéines acides

Jusqu'à ces dernières années, peu d'études ont été entreprises dans le domaine des protéines acides, qui sont assez peu connues; celles-ci, variables suivant les espèces, s'avèrent pourtant d'une grande importance biologique. En 1972, Davis et ses collaborateurs ont montré qu'un organe en contient plusieurs sortes; leur nombre peut atteindre une trentaine et elles jouent un très grand rôle dans les mécanismes génétiques. En 1969, Hancock avait montré, grâce à des cultures de cellules de souris, que les protéines nucléaires « non histones », c'est-à-dire essentiellement les protéines acides, sont combinées aux chromosomes lors de la division cellulaire. Le rôle des histones et des protéines acides apparaît de plus en plus fondamental, tant dans la croissance et la multiplication cellulaires normales que dans les cas pathologiques tumoraux.

Quelques protéines végétales

Il existe d'autres protéines globulaires : les *gliadines*, ou *prolamines*, riches en proline et en acide glutamique, et les *glutéines*. Leur pHi est voisin de 7, ce qui les rend insolubles dans l'eau pure. Elles sont bien connues chez les végétaux (graines du blé et du maïs).

Protéines hormonales du lobe antérieur de l'hypophyse

— *L'hormone de stimulation folliculaire, ou folliculostimuline (FSH).* Cette hormone est sécrétée par certaines cellules de l'antéhypophyse; elle favorise, chez la femelle, la sécrétion endocrine du follicule ovarien, donc la sécrétion d'œstrogène. La FSH est une protéine de structure assez mal connue; la molécule est liée à une copule glucidique complexe : il s'agit donc d'un glucoprotide.

L'étude de cas pathologiques ou de résultats expérimentaux permet de préciser ses effets. Ainsi, on a montré que l'insuffisance antéhypophysaire provoque une involution des caractères sexuels secondaires. Chez la femme, les règles sont supprimées ainsi que la libido. Chez l'animal jeune, l'ablation antéhypophysaire a pour effet de bloquer le développement de l'appareil génital, qui reste infantile, et, chez l'adulte, d'arrêter totalement les fonctions sexuelles. L'injection d'œstrogènes permet la maturation des follicules ovariens atrophiés (Williams, 1940).

Un bel exemple du contrôle mutuel exercé par la FSH et les œstrogènes peut être observé dans l'expérience suivante : si l'on injecte une hormone œstrogène à un animal non hypophysectomisé, les doses faibles favorisent la croissance folliculaire sans modifier la sécrétion de FSH; par contre, les doses élevées arrêtent totalement la synthèse hypophysaire de FSH. La synthèse de cette hormone hypophysaire dépend de la stimulation du plancher cérébral.

La *FSH n'agit pas que chez la femelle :* cette hormone est la même chez le mâle et permet la *maturation* des cellules sexuelles : son rôle est donc tout aussi essentiel.

— *L'hormone lutéinisante (LH).* Chez la *femelle*, elle agit sur le corps jaune; si ce dernier persiste, ce qui est le cas s'il y a eu fécondation, cette sécrétion de l'antéhypophyse est indispensable pour que l'embryon reste dans l'utérus; cependant, la synthèse serait en partie le fait du *placenta* (Philipp et Gey). On a remarqué que la LH ne suffit pas pour stimuler la formation de la progestérone (hormone stéroïde) à partir du corps jaune : il faut, en effet, l'action de deux hormones hypophysaires : la *LH* et la *prolactine*.

Chez le *mâle*, la LH a pour fonction de stimuler la croissance des cellules interstitielles et le fonctionnement des glandes sexuelles annexes.

Il est évident que les fonctions des stimulines ne sont pas faciles à déterminer. Les sécrétions hypophysaires mâle et femelle diffèrent par les proportions d'hormones FSH et LH.

La structure de la LH est celle d'une protéine à poids moléculaire variable suivant l'espèce : 40 000 chez le mouton, 70 000 chez le porc. De plus, il y a de nettes différences du point de vue physico-chimique; en particulier, le point isoélectrique est, pour ces deux espèces, respectivement de 4,6 et de 7,4; la différence est très considérable et implique une composition très différente. La LH est aussi un glucoprotide, comme la FSH.

▶ *Page ci-contre, étudiant la structure primaire de l'hémoglobine, Zuckerkandl constata que les séquences communes à deux espèces sont d'autant plus nombreuses que celles-ci sont moins éloignées du point de vue systématique; ce qui est le cas — rappelons-le s'il en est besoin — pour le porc et le cheval par exemple (Ongulés Artio- et Périssodactyles).*

▼ *A gauche, coupe de thyroïde de souris (coupe dite « semi-fine » : le milieu d'inclusion, une résine synthétique, permet d'effectuer des sections de faible épaisseur, environ 1µ). Les vésicules thyroïdiennes contiennent un stock abondant de sécrétion dont le volume dépend de la TSH qui parvient aux cellules grâce à un réseau de capillaires sanguins (bleu ciel). A droite, la position de certains acides aminés est sensiblement la même pour toutes les* hémoglobulines *et les* myoglobines. *Ces A.A. sont souvent placés à des niveaux où deux boucles de la chaîne sont rapprochées (ici, la myoglobine = 153 A.A.).*

Comme pour la FSH, la concentration de LH dans l'organisme dépend du taux d'une hormone ovarienne : la progestérone. Les influences sont réciproques, chacune des hormones déterminant le taux de l'autre. Le système nerveux exerce encore un contrôle sur l'ensemble du mécanisme. Ainsi, chez le canard, Benoit a pu montrer que la lumière, en excitant le tractus optique puis le cerveau, provoque une réaction au niveau du plancher cérébral ; cette réaction déclenche les synthèses antéhypophysaires qui sont responsables de la maturation génitale. Il faut noter aussi l'influence des facteurs psychiques sur ces sécrétions ; ainsi un choc visuel stimule la formation de LH chez le pigeon, et une émotion violente peut provoquer un arrêt de sécrétion des gonado-stimulines chez la femme.

Les problèmes posés sont très complexes ; ainsi, les hormones, tant hypophysaires que sexuelles, peuvent agir en *synergie* et, d'autre part, il existe de grandes différences d'activité selon les espèces.

— *La thyréostimuline, ou hormone thyréotrope.* Découverte en 1929 par Aron ainsi que par Loebb et Bassett, cette hormone stimule toutes les étapes de la synthèse d'hormone thyroïdienne, la *thyroxine*, hormone contrôlant le catabolisme cellulaire, c'est-à-dire les combustions nécessaires pour les synthèses. La thyréostimuline se présente sous forme d'un glucoprotide de poids moléculaire voisin de 10 000. On connaît assez mal la structure de cette hormone.

Son rôle a été montré très clairement de diverses manières. Citons simplement l'expérience de Bottari (1957). Ce chercheur cultivait des fragments thyroïdiens et les traitait par diverses doses de stimulines ; puis il introduisait de l'iode radioactif 131 dans le milieu de culture et déterminait ensuite, demi-heure par demi-heure, le taux d'hormone thyroïdienne libéré par les fragments cultivés ; en trois heures, le taux de thyroxine marquée subissait un accroissement extrêmement significatif. En effet, la thyréostimuline, grâce à un système de transport actif, permet à la thyroïde d'extraire les traces d'iode contenues dans le sang. La thyroxine est une iodothyronine, c'est-à-dire un métabolite fortement iodé d'une protéine globulaire. D'autre part, la lyse de cette protéine dépend aussi de la thyréostimuline. La synthèse de la stimuline est contrôlée, en retour, par la thyroxine (Aron).

— *La somatotrophine, ou hormone somatotrope (STH).* C'est l'hormone de croissance, protéine variable suivant les espèces. Son poids moléculaire est de 46 000 chez le bœuf, de 25 400 chez le singe, et de 27 100 chez l'homme. Si les hormones du porc ou du bœuf n'agissent pas chez le singe ou chez l'homme, celles de l'homme et du singe sont efficaces chez le rat. En fait, il existe un noyau actif polypeptidique commun mis en évidence par digestion partielle de STH grâce à la chymotrypsine (endopeptidase). Le mode d'action de cette hormone est complexe. Des injections ne provoquent pas les mêmes résultats chez le jeune et chez l'adulte : chez le jeune, elles peuvent entraîner le gigantisme ; chez l'adulte, il y a au contraire un métabolisme excessif des lipides qui se dégradent, ainsi qu'une utilisation excessive des protides et des glucides, avec hyperglycémie et glycosurie ; Houssay provoquait ainsi des troubles rappelant le diabète par injection de STH. Comme un excès de STH amène des perturbations qui rappellent l'hypofonctionnement des cellules à insuline du pancréas, on peut dire, pour simplifier, qu'il y a un antagonisme entre l'hormone de croissance hypophysaire et le pancréas endocrine sécréteur d'insuline. En fait, le processus est encore plus complexe, l'action de la STH dépendant du fonctionnement de toutes les glandes endocrines.

Une hétéroprotéine globulaire très particulière : l'hémoglobine

L'importance de l'hémoglobine est telle qu'il est nécessaire de l'étudier plus particulièrement, d'autant que sa structure est maintenant connue d'une manière fort détaillée. Il s'agit d'une hétéroprotéine que l'on place parmi les *chromoprotéines ;* la coloration est due à la présence d'éléments métalliques dans la molécule.

— *Généralités.* Le métal de la molécule d'hémoglobine est un atome de fer ; il est lié à un ensemble de 4 noyaux pyrroliques et à l'histidine (acide aminé cyclique) ; l'ensemble forme la *ferroprotoporphyrine,* ou *hème,* groupement actif de la molécule ; le « résidu histidine » est lié à une longue chaîne polypeptidique de globine (chaîne α comportant 141 acides aminés ou chaîne β avec 146 acides aminés). La structure primaire de la molécule a été établie par Braunitzer, grâce à la méthode de fragmentation, puis de détermination des acides aminés terminaux.

L'hémoglobine humaine est appelée Hb A. Il existe aussi, au moins chez l'homme adulte, une petite quantité d'une autre hémoglobine (Hb A_2) dont les chaînes β sont remplacées par des chaînes δ, très peu différentes. Par ailleurs, avant la naissance, on distingue une hémoglobine fœtale (HbF) où les chaînes β sont remplacées par des chaînes γ, relativement différentes. Les hémoglobines de ce type n'ont pas la même vitesse de migration électrophorétique. En 1971, Rosa et ses collaborateurs ont montré que l'hémoglobine F reparaît chez l'adulte : son taux augmente progressivement et dépendrait du passé clinique de chacun ; les maladies acquises induiraient la formation de cette protéine fœtale.

— *Structure secondaire.* Depuis 1940 environ, on se demandait quelle pouvait être la structure secondaire de la globine ; en effet, certaines expériences montraient que les chaînes des acides aminés ne pouvaient pas être

F. Treilhou

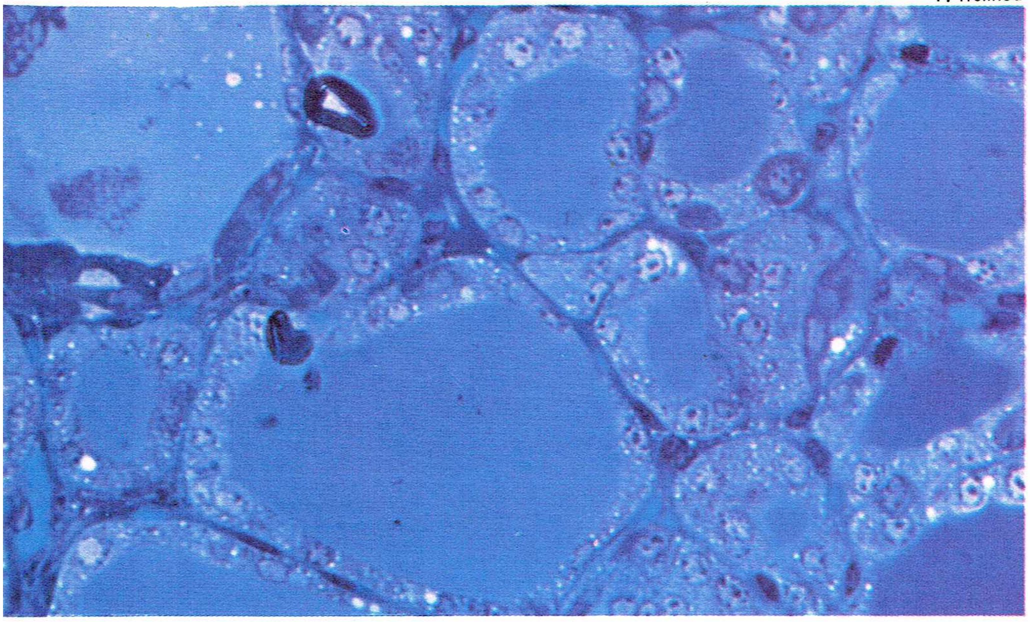

Richard Colin

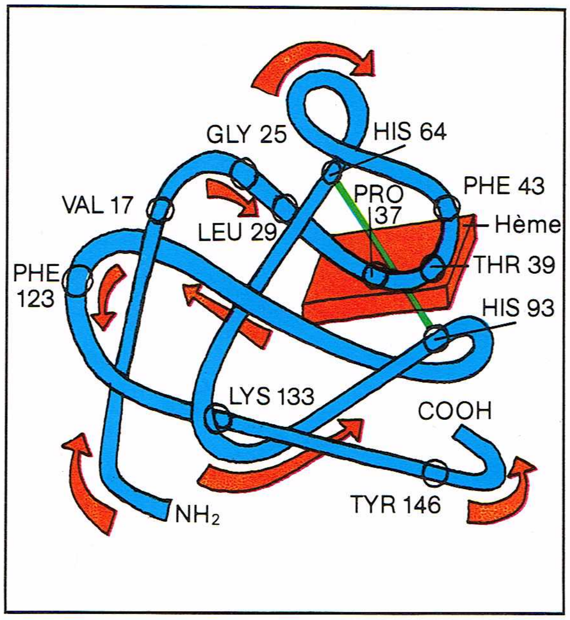

de forme quelconque; l'existence de chaînes spiralées ou pliées en accordéon devait être envisagée. L'organisation secondaire fut déduite des analyses faites par la méthode de diffraction des rayons X.

Pour les protéines globulaires, telles que l'hémoglobine, la forme de la structure secondaire n'est pas celle d'un accordéon, mais d'une *spirale* (Perutz, 1951), dite spirale α. On démontre qu'il existe 3,6 résidus R par tour de spire, soit 18 pour 5 tours. Chaque tour de spire est relié au précédent et au suivant par des liaisons hydrogène. La position des résidus R des acides aminés, résidus extérieurs à la spire, n'a pas d'influence sur la structure secondaire : on dit qu'ils n'ont pas d'*influence stérique;* par contre, ils favorisent la cohésion de l'ensemble par des liaisons hydrogène supplémentaires non négligeables.

Perutz a montré, dès 1949, que, dans le cas particulier de l'hémoglobine, la *dénaturation* chimique par rupture des liaisons hydrogène donne naissance, à partir de la protéine globulaire, à des chaînes polypeptidiques longues, non spiralées. Il existe une méthode optique permettant de confirmer l'existence de la structure secondaire des protéines natives. Ainsi, la spiralisation entraîne une dissymétrie moléculaire qui donne à une chaîne polypeptidique un pouvoir rotatoire caractéristique en lumière polarisée (Fitts et Kirkwood, 1956; Yang et Doti, 1957).

— *Structure tertiaire*. On savait depuis longtemps que les particules protéiques devaient avoir des formes complexes. La viscosité des molécules globulaires (en pelotons) dépend directement de leur conformation; le fait que la viscosité soit caractéristique d'une protéine donnée tendait à prouver que la structure globulaire de chaque espèce moléculaire devait être quelque chose de fixe. On constata d'abord que les pelotes des protéines globulaires n'étaient pas fortement serrées; en effet, la viscosité augmente plus vite que la longueur des chaînes, ce qui signifie que la pelote emprisonne une partie du solvant (ce phénomène n'a aucun rapport avec la solvatation).

Grâce à la technique de diffraction des rayons X, Perutz et Kendrew purent analyser plus précisément la structure globulaire de l'hémoglobine. Pour permettre l'interprétation des diagrammes, ils substituèrent des atomes de *métaux lourds* en des points connus de la molécule et les utilisèrent comme repères. La masse des résultats fut traitée par ordinateur; on obtint ainsi la reconstitution spatiale d'un *modèle moléculaire*.

A l'heure actuelle, peu de molécules protéiques sont aussi bien connues que l'hémoglobine. La forme de la molécule, à vrai dire très curieuse, est une forme fixe, très stable dans les conditions physiologiques : la spire de globine conserve une *structure tertiaire* caractéristique, et l'hème s'accroche à un niveau précis.

Comment cette forme peut-elle s'établir? Comment peut-elle être conservée? On sait que l'intégrité de la structure secondaire est maintenue par des liaisons *hydrogène* nombreuses; celles-ci interviennent aussi dans le cas de la structure tertiaire, mais il existe d'autres types de liaisons qui jouent un rôle essentiel : on trouve des *ponts disulfure,* facilement établis entre les radicaux sulfhydrilés des acides aminés soufrés; de telles liaisons covalentes existent dans la plupart des protéines. Les chaînes latérales de divers acides aminés peuvent présenter d'autres types de relations : des *attractions électrostatiques* entre NH_3^+ et COO^-; des *attractions de deux points hydrophobes* (le milieu biologique étant aqueux, les points hydrophobes se groupent); des *attractions du type Van der Waals* entre deux pôles identiques hydrophiles.

Pour tenter d'expliquer la structure tertiaire des hémoglobines, on a dit que le « centre » de cette protéine globulaire comporte un maximum d'acides aminés à radicaux libres hydrophobes, donc groupés par leur commune « désaffection » pour le solvant aqueux, alors que la périphérie comporte des acides à radicaux hydrophiles. Il faut remarquer que les coudures de la chaîne sont souvent dues à l'existence, à ce niveau, d'un acide aminé particulier (Neurath) : ainsi le *glycocolle,* dépourvu de radicaux latéraux, se prêterait au reploiement de la chaîne; Pauling considère que la *proline* joue le même rôle. Celle-ci, quand elle est intégrée dans un polypeptide, entraîne logiquement la formation d'un coude.

Marka

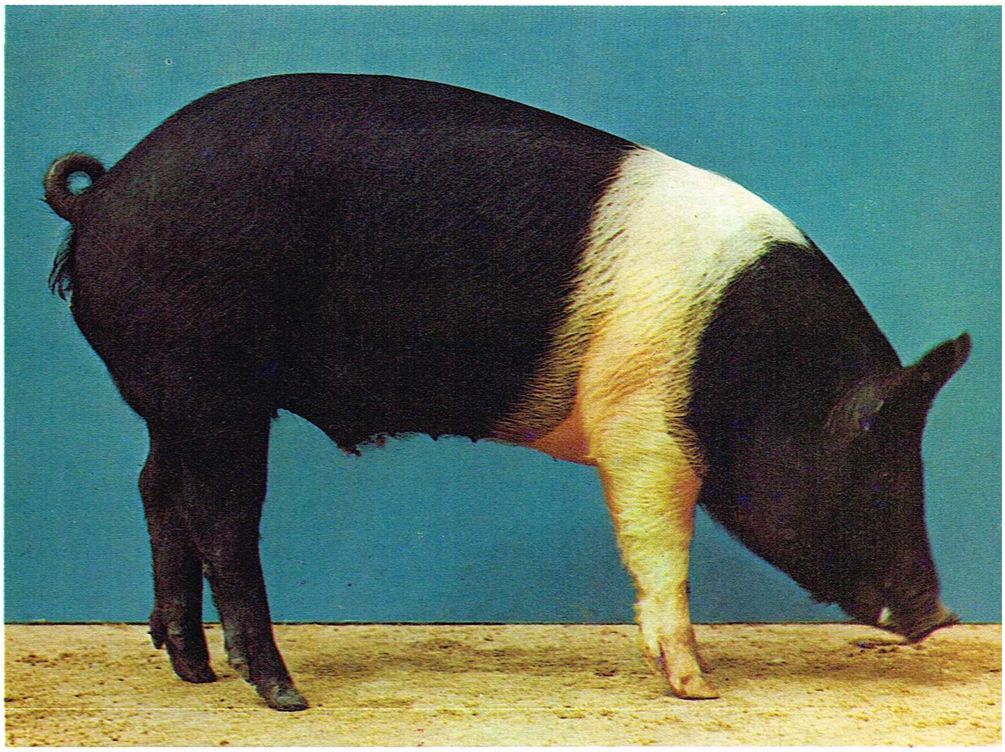

D. Yacar

Dans le cas de la globine, il est exact que plusieurs coudes de la molécule se font au niveau de molécules de proline.

En 1966, Zuckerkandl a comparé la structure primaire de divers types d'hémoglobines chez les Mammifères. Il a constaté qu'il existe de nombreux *points d'identité* entre les hémoglobines des différentes espèces. Il observa, en outre, que plus les espèces comparées sont voisines (le gorille et l'homme, le porc et le cheval par exemple), plus les séquences identiques d'acides aminés sont nombreuses. Enfin, résultat surprenant à première vue, la structure tertiaire des chaînes β est la même dans tous les cas étudiés.

On revient, en conséquence, à l'idée que les organismes vivants ont « choisi » d'emblée le type parfait de la molécule biologiquement active pour une fonction donnée. En d'autres termes, la structure tertiaire de l'hémoglobine est une structure fonctionnelle primitive, déterminée au moment de l'apparition des Mammifères, alors que la structure primaire serait susceptible d'une évolution et d'une adaptation à des conditions de vie qui se modifient. Les points d'identité subsistant entre les espèces les plus primitives et celles que l'on considère comme les plus évoluées correspondent seulement à une vingtaine d'acides aminés, souvent groupés.

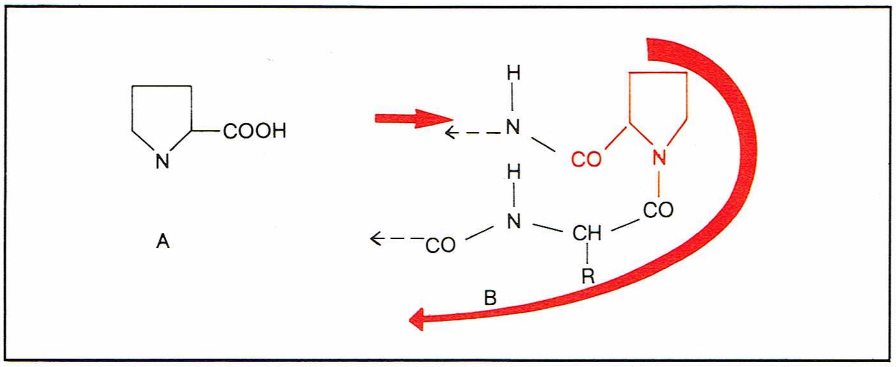

Richard Colin

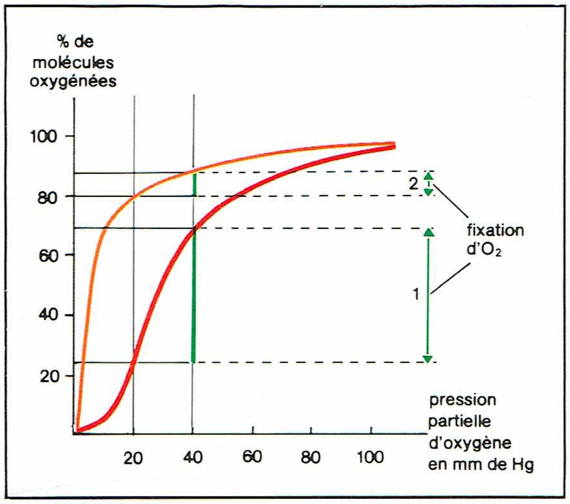

Richard Colin

▲ *A gauche, représentation schématique du rôle de la* **proline** *dans le reploiement des chaînes protéiques : A, molécule de proline (acide iminé); B, plusieurs prolines sont placées au niveau des coudes des* **chaînes de globine.** *A droite, conséquence de l'effet coopératif des molécules d'hémoglobine; ici, courbes de saturation de la* **myoglobine** *et de* **l'hémoglobine** *par l'oxygène de l'air : pour des pressions partielles d'oxygène relativement élevées (pression atmosphérique), l'hémoglobine fixe beaucoup plus d'oxygène (1) que la myoglobine (2). Inversement, au niveau des* **tissus** *où la pression est* **inférieure à la pression atmosphérique,** *Hb* **cède** *beaucoup plus d'oxygène que ne le fait la myoglobine.*

Si les différences sont grandes entre les chaînes de globine des Mammifères, il faut imaginer qu'elles se sont établies lentement par des mutations successives et très nombreuses, chaque substitution d'un acide aminé donnant un mutant dont les descendants n'ont peut-être pas évolué pendant plusieurs dizaines de millions d'années. Chaque substitution s'est faite en respectant le caractère hydrophile ou hydrophobe de l'acide aminé initial, ainsi, on peut supposer que l'évolution et la sélection ont entraîné, de mutation discrète en mutation discrète, d'énormes transformations de la structure primaire sans altérer notablement la forme fonctionnelle de l'hémoglobine.

— *Structure quaternaire.* La molécule d'hémoglobine n'a pas seulement une structure tertiaire : la structure quaternaire est obtenue par l'accolement de 4 « molécules » fondamentales, formées chacune de l'hème et de la globine. La structure quaternaire de l'hémoglobine correspond donc à 2 chaînes de globine α et 2 chaînes β. C'est sous cette forme de tétramère que l'hémoglobine est réellement efficace du point de vue respiratoire comme *transporteur d'oxygène*. Il existe dans les muscles une *myoglobine* qui a la même constitution d'ensemble que la molécule fondamentale d'hémoglobine, mais qui est très loin d'être aussi importante du point de vue respiratoire : demeurée à l'état de monomère, elle assure seulement la mise en réserve temporaire de l'oxygène. Une anecdote au sujet de la myoglobine : lorsque Kendrew entreprit de l'étudier, on ne connaissait pas sa structure primaire; seuls quelques fragments de la chaîne avaient été analysés. Kendrew construisit un modèle grâce à la technique de diffraction des rayons X, et c'est alors seulement que, à partir de la structure tertiaire, il réussit à reconstituer l'ensemble de la structure primaire; en effet, connaissant une partie des acides aminés ainsi que la conformation de la molécule, on peut prévoir que les « trous » de la chaîne sont occupés par certains acides aminés, et non par d'autres. Les résultats qu'il obtint furent confirmés par la suite.

— *Fonctionnement de l'hémoglobine.* Les 4 molécules fondamentales d'hémoglobine sont intimement accolées pour former un complexe globulaire. Lors de l'oxygénation, au niveau des branchies des Poissons ou des poumons des Mammifères, l'atome de fer d'un hème se déplace par rapport au plan tétrapyrrolique; ce déplacement, estimé à 7 Å, est très largement suffisant pour déclencher, dans les trois autres molécules associées, une absorption rapide d'autres atomes d'oxygène; c'est l'*effet coopératif* qui est encore mal connu.

Perutz et ses collaborateurs ont montré que dans certaines anémies cette déformation de l'hémoglobine est impossible : il n'y a pas chez les malades de synthèse des chaînes de globine α, et leur hémoglobine, nommée β_4, est très insuffisante pour l'oxygénation. En fait, il existe de nombreux types d'anomalies. L'anomalie S s'observe dans les cas de *drépanocytose* (anémie falciforme), c'est-à-dire chez les personnes dont les hématies ont un *aspect de croissant* sur les frottis effectués pour l'observation microscopique; dans le sang circulant, bien oxygéné, ces globules rouges ont une forme normale; ils prennent une forme en croissant quand la tension de O_2 baisse. On a montré que l'hémoglobine de telles hématies est très peu différente de la normale. Pourtant, cette anomalie va de pair avec une tendance chronique à l'asphyxie, qui peut être mortelle. Cette maladie de biosynthèse est assez répandue pour que l'on pratique systématiquement l'analyse de l'hémoglobine chez un très grand nombre d'individus; on a ainsi constaté une répartition géographique souvent très nette pour beaucoup d'anomalies, véritables maladies génétiques à l'échelle d'une population.

L'analyse rapide des hémoglobines, c'est-à-dire le dépistage des anomalies, est rendue possible par la technique dite des « empreintes digitales ». On hydrolyse l'hémoglobine par la trypsine, qui libère des polypeptides; on effectue alors une chromatographie sur papier, suivie, sur le même papier, d'une électrophorèse dans une direction perpendiculaire à la chromatographie. On constate ainsi que l'hémoglobine S ne diffère de la normale que par *une tache,* ce qui correspond à la substitution d'un seul acide aminé d'un polypeptide, la valine remplaçant l'acide glutamique (Ingram).

On systématise la nomenclature des hémoglobines, dont la liste s'allonge. Ainsi, l'hémoglobine humaine (A) normale s'écrit : Hb A, ou Hb α_2^A, β_2^A; alors que l'hémoglobine fœtale s'écrit : Hb F, ou Hb α_2^A, γ_2^A. Dans le cas de l'hémoglobine sans chaînes α, on utilise le sigle Hb β_4^A, etc.

— *La synthèse de l'hémoglobine.* Cette synthèse comporte un nombre d'étapes élevé. Nous en donnerons un aperçu instructif.

● *La synthèse de l'hème* est effectuée par des cellules sanguines jeunes, qui, chez l'adulte, sont contenues dans la mœlle osseuse. Le fer dissous dans le sang est transporté par une protéine plasmatique qui favorise son entrée dans les cellules : il s'agit d'une glycoprotéine, une β_1 globuline, la *transferrine*. La transferrine se fixe

préférentiellement sur les cellules souches de la lignée des globules rouges, ou *lignée érythrocytaire*. Il existe des *sites récepteurs* de transferrine à la surface des membranes de ces cellules; seul le fer pénètre dans le hyaloplasme, la transferrine étant alors libérée. Le fer parvient aux mitochondries qui effectuent secondairement la synthèse de l'hème (Shemin), pour laquelle plusieurs enzymes sont nécessaires. Les étapes ont été étudiées en utilisant des précurseurs radioactifs ingérés par l'animal ou ajoutés à un milieu de culture dans lequel on incube des cellules jeunes d'Oiseaux et de Mammifères. C'est le glycocolle qui sert de base à la construction. La synthèse de l'hème est contrôlée par l'hème lui-même, qui, s'il est en excès, freine l'utilisation du glycocolle (Karibian et London). La globine, toujours en excès, contrôle aussi cette synthèse (Odartchenko).

● *La synthèse des 4 globines* s'effectue directement au contact d'une « forme » existant à l'intérieur des cellules jeunes de la lignée rouge et constituée par des *acides nucléiques*. On estime qu'une chaîne α de globine nouvellement formée *va chercher* une chaîne β en formation sur un site voisin; autrement dit, les structures de la chaîne α sont telles qu'elles favorisent une coaptation avec la chaîne β en formation et qu'elles permettent, en conséquence, sa libération dans le hyaloplasme à partir des sites nucléiques de synthèse : le taux de globine β dépend directement du taux de globine α. Le tétramère normal α_2 β_2 se forme ensuite par une coaptation de même nature. La synthèse de globine serait contrôlée par l'hème : l'absence des précurseurs de l'hème freinerait la formation de globine (Morell et coll.).

● *La liaison de l'hème et de la globine* s'effectue à un stade encore mal déterminé (Kruh).

Cet aperçu du mode de synthèse de l'hémoglobine permet de concevoir quelle peut être la complexité de la formation d'une protéine; celle-ci fait intervenir des mécanismes subtils, qui impliquent une régulation, un contrôle continu des réactions, contrôle qui s'effectue à divers niveaux tant au sein d'une cellule souche que dans l'organisme entier. De telles synthèses, qui se déroulent durant toute la vie de l'individu, puisque les hématies ont une vie assez courte et sont donc continuellement renouvelées, mettent en jeu des systèmes régulateurs perfectionnés et stables. Odartchenko estime à $2 \cdot 10^{11}$ le nombre de globules rouges fabriqués en 24 heures par un être humain. Si la synthèse de toute protéine, même « simple », est un phénomène très complexe, il faut signaler toutefois que la synthèse de l'hémoglobine est, en fait, particulièrement compliquée. Cela tient à sa constitution dualiste et à sa structure quaternaire.

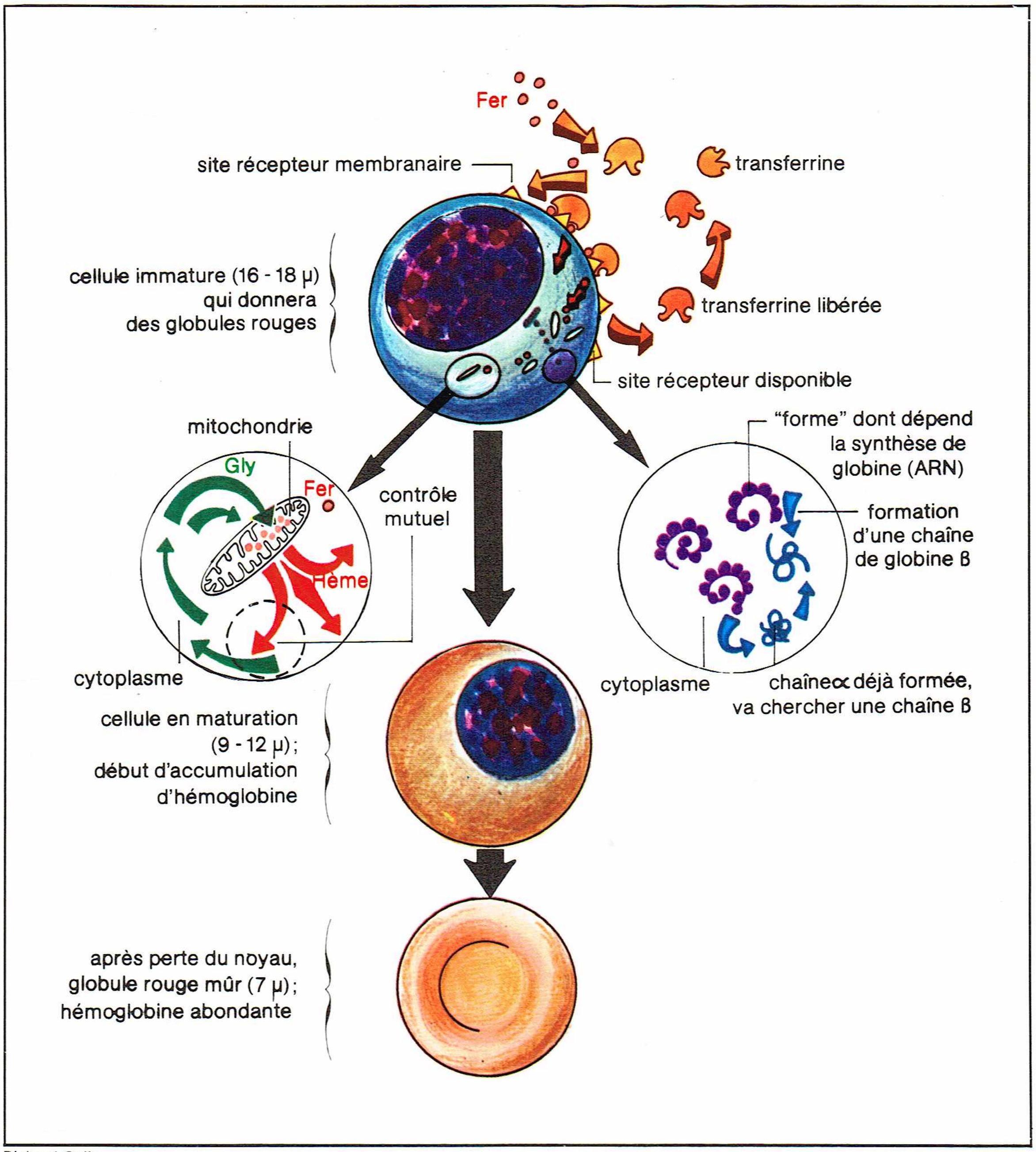

Richard Colin

◀ ***Représentation schématique de la*** **synthèse de l'hémoglobine.**

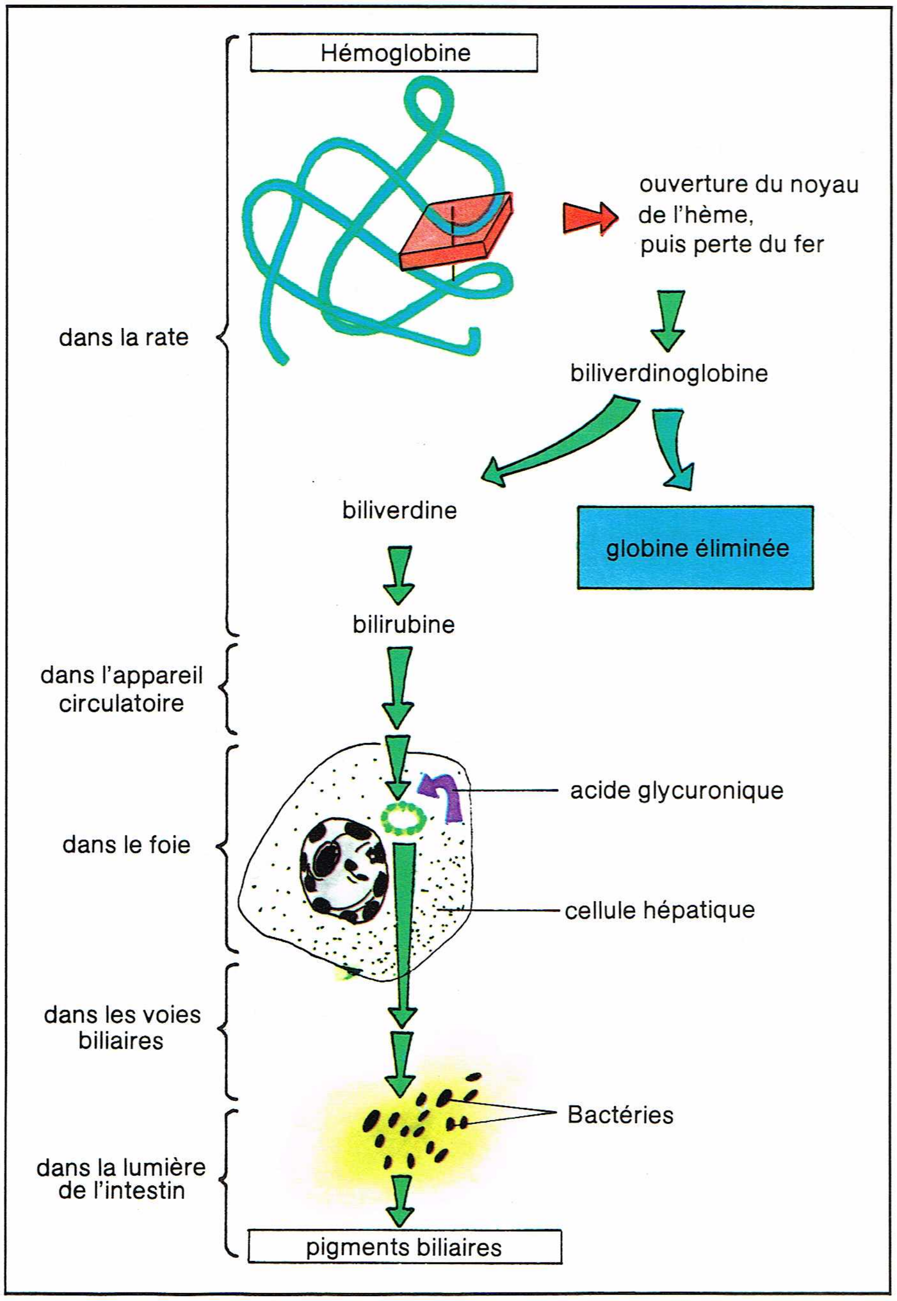

Richard Colin

▲ ***La* dégradation de l'hémoglobine *se produit lors de la dégénérescence des globules rouges vieillissants.***

— *La dégradation de l'hémoglobine* se produit lors de la dégénérescence des globules rouges vieillissants; c'est un processus qui concerne $2 \cdot 10^{11}$ cellules par 24 heures dans le cas de l'homme. Après 120 jours de vie, les hématies sont détruites, en particulier dans la rate. L'hémoglobine subit de profondes modifications. On constate d'abord l'ouverture du noyau de l'hème, puis la perte du fer : on obtient la *biliverdinoglobine;* ensuite, la globine disparaît, et les constituants de l'hème déformé représentent la molécule de *biliverdine,* secondairement transformée en *bilirubine*. Celle-ci est emportée par le courant circulatoire, puis extraite par les cellules hépatiques où elle se combine à l'acide glycuronique; la substance ainsi formée est expulsée dans la lumière de l'intestin par l'intermédiaire des voies biliaires. La flore bactérienne intestinale poursuit la transformation qui aboutit aux *pigments biliaires* (ne pas confondre avec les acides biliaires).

Si la conjugaison de la bilirubine avec l'acide glycuronique ne peut pas se faire dans le foie, la bilirubine s'accumule alors dans le sang; dans d'autres cas, si les voies biliaires sont obturées par un calcul ou une tumeur, la bilirubine conjuguée ne peut pas atteindre l'intestin et retourne dans le sang. Dans les deux cas, le résultat est une jaunisse.

Remarquons enfin que les métabolites bactériens de la bilirubine conjuguée ne sont pas entièrement éliminés par la voie intestinale; en effet, une partie d'entre eux sont réabsorbés par le système circulatoire de l'intestin et entraînés vers les reins pour être éliminés avec l'urine. Ce phénomène, absolument normal, n'est pas clairement interprété. Par ailleurs, les A.A., libérés par la protéolyse de la globine, sont *réutilisés* ou fragmentés avec *élimination* d'*urée.*

Protéines à molécules fibreuses, ou protéines fibrillaires

Il existe deux types distincts de protéines fibrillaires : les *protéines* facilement *solubles* et les *protéines peu solubles* ou *pratiquement insolubles* (scléroprotéines).

Protéines solubles

Nous verrons très rapidement la nature et la fonction de deux protéines solubles, le *fibrinogène* et l'ensemble *actine-myosine*. Ces protéines ont été très étudiées. Il en existe d'autres, dont nous aurons l'occasion de parler lors de l'analyse des phénomènes de division cellulaire.

— Le *fibrinogène*. Cette protéine est un matériel de base pour la coagulation sanguine, puisqu'elle se transforme en fibrine, insoluble en présence d'ions Ca^{++}. Le fibrinogène du plasma sanguin est une substance volumineuse de poids moléculaire 340 000. Sa structure est déjà fibrillaire. On y a trouvé 6 chaînes polypeptidiques partiellement spiralées et liées par des ponts disulfure. Durant une électrophorèse du plasma, le fibrinogène migre avec les globulines. La *thrombine,* enzyme responsable de sa transformation en fibrine, sectionne la molécule en lui enlevant deux groupes de peptides, les *fibrinopeptides* (Laki, 1960), soit, au total, 30 acides aminés, parmi lesquels beaucoup d'*acide glutamique;* le reste de la molécule, devenu instable, va s'associer avec d'autres restes de fibrinogène, grâce à des liaisons hydrogène extrêmement nombreuses; l'ensemble constitue alors un feutrage de *fibrine,* substance insoluble et fortement polymérisée.

Dans le plasma, les molécules de fibrinogène se repoussent grâce à leurs *charges négatives,* qui sont dues aux acides glutamiques; il ne saurait donc y avoir de groupement des molécules fibrillaires de fibrinogène. L'élimination des charges négatives est donc à la base de la formation de fibrine dans le caillot qui se constitue, par exemple, dans une blessure. Le caillot se redissout durant la première étape de cicatrisation. Cette dissolution est due à une enzyme, la *fibrinolysine,* qui digère totalement le réseau. Mais, pour agir, l'enzyme doit être activée, et il est bien évident que cette activation n'est pas possible dans le plasma du sang circulant, car, après une blessure, le caillot ne pourrait pas se former... Cette redissolution n'est pas un phénomène plus simple que la formation du caillot; elle implique la mise en jeu d'un système régulateur enzymatique très élaboré.

— *La myosine et l'actine : un ensemble protéique contractile*. Ce sont des protéines des muscles, plus précisément des myofibrilles. On peut les extraire par des solutions salines concentrées qui provoquent leur floculation. Ces deux substances constituent 80 % des protéines obtenues de cette manière.

● L'*actine* a un poids moléculaire variant entre 56 000 et 70 000. En effet, suivant le degré de polymérisation, elle existe sous forme globulaire ou sous forme fibrillaire. La forme fibreuse atteint 300 Å de long, ce qui permet son observation au microscope électronique.

● La *myosine* est plus lourde (son poids moléculaire est de 468 000) et plus longue (1 600 Å). Elle comporte une partie globuleuse et une partie fibreuse qui constituent la méromyosine. Insistons, comme Favard, sur le fait que la myosine est non seulement une protéine de structure, mais aussi une protéine enzymatique; en effet, elle catalyse l'hydrolyse de l'ATP, qui entraîne la contraction; seule la méromyosine globulaire est responsable de cette hydrolyse. Rappelons que les cations jouent un rôle essentiel dans le phénomène de contractilité : une excitation d'origine nerveuse se transmet aux cellules musculaires et provoque la *mise en contact* du Ca^{++} venant de l'extérieur avec l'ATP et le complexe d'actomyosine. La contraction a pu être observée *in vitro* (Szent Györgyi, 1941; Hayashi, 1952; Weber, 1956).

Si on ne connaît pas parfaitement le mécanisme biochimique de la contraction, on a toutefois constaté des faits importants : les fibres d'actine et de myosine sont parallèles et leur disposition est alternée. Dans la cellule musculaire, les deux protéines peuvent réagir entre elles, puisque les fibres sont extrêmement proches les unes des autres. Huxley (1962) estime que la contraction est une liaison momentanée de la méromyosine globulaire et de l'actine; durant cette réaction, les molécules des deux types glissent l'une par rapport à l'autre.

Protéines insolubles ou peu solubles

— Le *collagène* est la protéine de ce groupe la plus abondante chez les animaux. Il se présente sous forme de fibres bien distinctes au microscope électronique, groupées en faisceaux plus ou moins denses suivant les espèces et l'âge des individus. On en trouve aussi bien chez des Invertébrés très primitifs que chez les Mammifères, où il est souvent abondant. C'est une substance

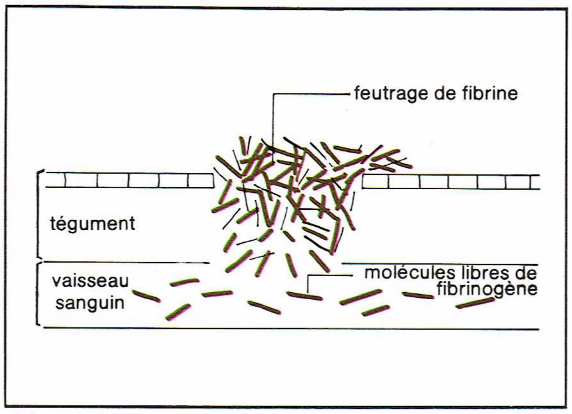

Richard Colin

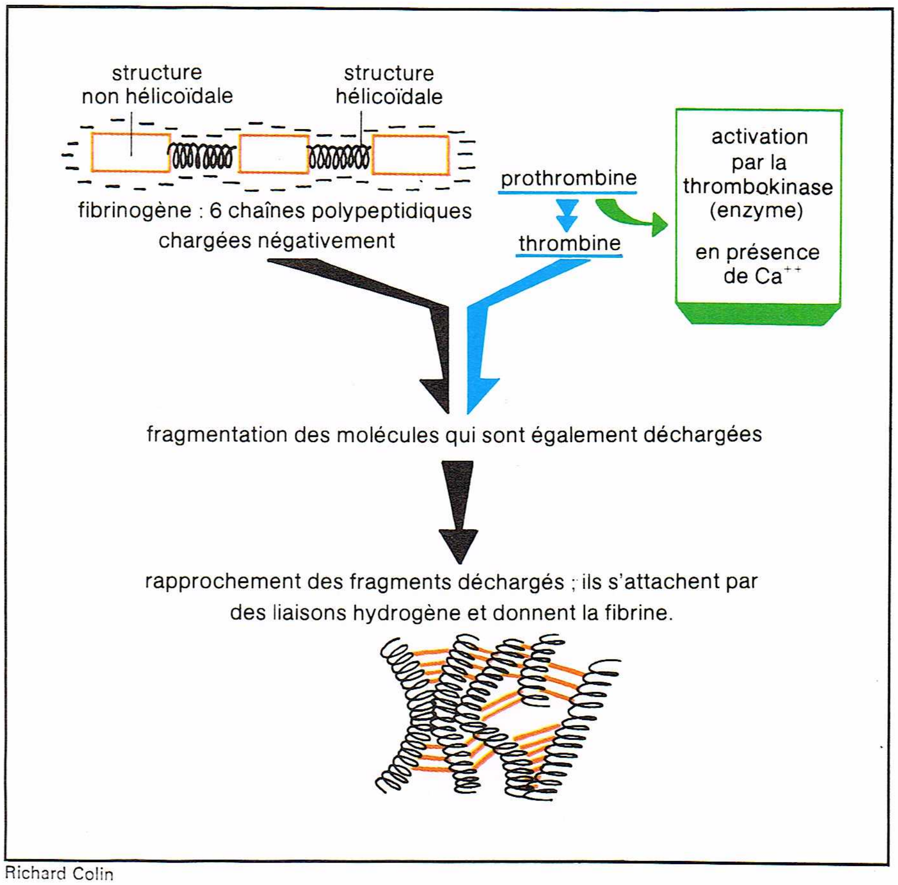

Richard Colin

▲ ***A gauche, formation de fibrine au niveau d'une plaie.***
A droite, formation de la fibrine à partir du fibrinogène, protéine de base pour la coagulation du sang.

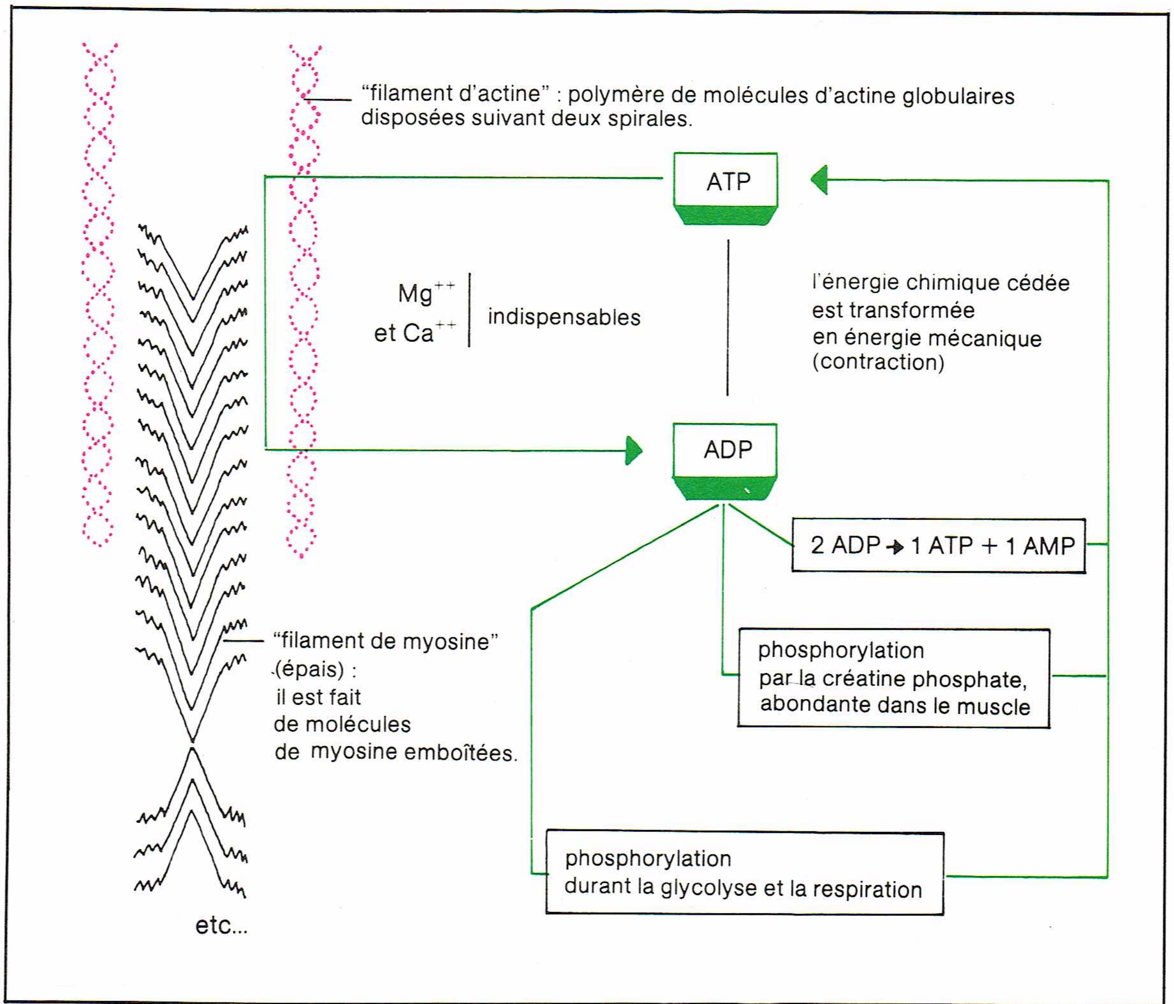

Richard Colin

◀ ***Structure schématique de l'actine et de la myosine; principe chimique de la contraction.***

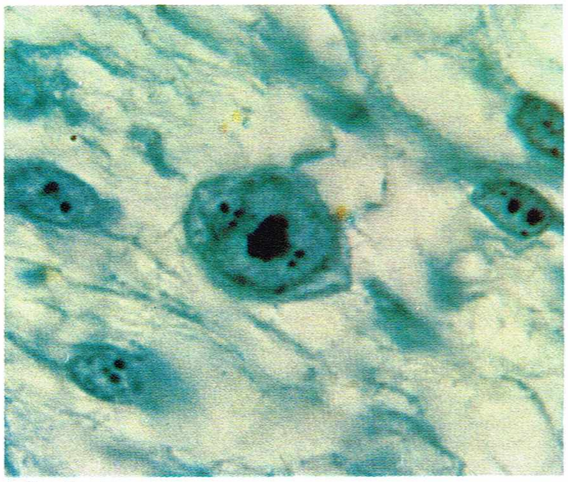

J. Bouchard

▶ *Apparition des* **fibres** *de* **collagène** *dans le* **conjonctif** *lâche d'un* **embryon de poulet de** *13 jours.*

extracellulaire, fabriquée par des cellules nommées *fibrocytes,* qui s'entourent d'un lacis de fibres ; les fibres des cellules voisines se mêlent pour former des réseaux, lesquels sont très facilement observables en microscopie ordinaire. Chez les Mammifères, le collagène constitue l'essentiel des tendons, de la cornée de l'œil et du derme de la peau ; de plus, il est un des constituants du cartilage ou des os et se trouve en abondance dans tout ce que l'on appelle le *tissu conjonctif,* c'est-à-dire le tissu plus ou moins lâche ou plus ou moins dense qui emballe tous les organes. C'est donc une substance d'une extrême importance qui joue un rôle protecteur et un rôle de soutien tout à fait essentiel. Les fibres sont à la fois souples et très résistantes.

Le collagène est soluble dans l'acide acétique dilué. Ainsi, un fragment de peau de souris ou de poulet « gonfle » assez rapidement dans l'acide à 3-5 %, et le derme devient totalement transparent à la température ambiante. Curieusement, si l'on neutralise la solution, le feutrage tend à se reconstituer, ce qui montre que la structure du collagène dépend du pH du milieu.

J. Bouchard

▶ *Abondance du* **collagène** *dans le tube digestif ; ici, coupe transversale d'œsophage de salamandre ; la lumière est limitée par un épithélium très plissé (rose) et qui est doublé par un feutrage de conjonctif dense (bleu) ; l'ensemble est entouré par une couche musculaire mince (mauve).*

P. Castano

▶ *Exemple de* **fibres collagènes** *vues au microscope électronique. Aspect strié caractéristique.*

Une solution acétique de collagène peut être fractionnée par ultracentrifugation. On obtient alors des molécules de *procollagène* et de *tropocollagène*. Le tropocollagène a été particulièrement étudié par Schmitt chez les Poissons. La molécule mesure environ 3 000 Å, et son poids moléculaire est de 350 000.

La structure primaire est très caractéristique : le *glycocolle* y est très abondant et on y trouve, par ailleurs, des acides aminés « rares » (l'*hydroxyproline* et l'*hydroxylysine*).

Le collagène a une structure tertiaire ; 3 polypeptides sont associés dans la molécule ; chacun de ces polypeptides possède une spiralisation secondaire et une spiralisation tertiaire (Kruh).

Un certain nombre d'expériences ont permis de mieux comprendre de quelle façon les molécules de collagène se trouvent associées dans les fibres que l'on voit nettement au microscope ordinaire.

La protéine change de structure à partir de 60 °C, et la fibre se raccourcit. Il s'agit là d'un effet que l'on observe pour toutes les protéines fibrillaires. La cuisson du collagène entraîne sa dénaturation et sa dissolution partielle : le bouillon dans lequel on a fait cuire une tête de veau donne, en se refroidissant, une gélatine qui n'est autre qu'un *gel de collagène dénaturé*. Le collagène qui subsiste dans les tissus cuits s'y trouve sous forme partiellement soluble, ce qui donne à la tête de veau sa consistance molle quand elle est encore chaude ; après un séjour au froid, elle prend une consistance de caoutchouc. Donc, le collagène dissous constitue à chaud une solution colloïdale, laquelle se gélifie à froid. Cette gélification est une sorte de floculation stable : les

particules en solution se groupent et forment des *réseaux* dont la structure est fragile puisqu'un léger chauffage suffit à redonner au gel sa structure de sol ; il y a une grande quantité d'eau entre les mailles de ces réseaux. L'*ionisation* du milieu par des acides ou des bases favorise le gonflement : l'accroissement de la charge électrique au niveau du réseau de gélatine facilite l'écartement des mailles. Par contre, les *sels neutres*, en empêchant la formation d'une double couche électrique, freinent l'hydratation. Ces quelques faits montrent à quel point la composition ionique du milieu et la charge au niveau des molécules colloïdales sont essentielles. La solution de gélatine obtenue par chauffage est faite de molécules dénaturées de manière *irréversible*.

La dénaturation peut être *réversible* si les conditions d'attaque sont différentes. Le collagène peut être extrait par une *solution saline physiologique* à partir des tissus du veau. Ce collagène observé au microscope électronique n'est pas dénaturé. Cette solution de collagène provenant d'un individu jeune (« collagène jeune ») se gélifie si l'on chauffe modérément ; là encore, il n'y a pas de dénaturation. Le collagène des adultes n'est pas soluble dans les solutions physiologiques : il faut *acétifier* le milieu pour obtenir une solution colloïdale. C'est pourquoi on peut estimer qu'il existe un plus grand nombre de liaisons intermoléculaires pour le collagène « âgé » que pour le collagène « jeune ». On peut vieillir expérimentalement du collagène « jeune » en le chauffant modérément durant plusieurs heures. Le gel ainsi obtenu ne peut être dissous que dans une solution acétique. Si on prolonge le chauffage, toute dissolution devient impossible. Le résultat est le même si l'on neutralise la solution acide de collagène âgé : on obtient un gel qui résiste à divers traitements physico-chimiques modérés. Ce collagène vieilli, tout comme le collagène âgé, correspond à l'association de molécules de tropocollagène, molécules disposées parallèlement et liées par des ponts d'autant plus nombreux que le collagène est plus âgé. Les molécules se présentent en rangées longitudinales dont chaque élément est décalé par rapport aux rangées parallèles voisines.

Quel est le mode de liaison des molécules de collagène natif ? Il s'agit de *liaisons diester*. Initialement, dans le collagène « jeune » — dont les molécules libres sont faites de 3 chaînes — les liaisons ester groupées 2 par 2 servent à rapprocher l'acide aspartique d'un polypeptide et le polypeptide suivant, ou précédent, *de la même chaîne* : il y a estérification entre un radical COOH de l'acide aspartique et un radical alcool secondaire d'un sucre en C_6 accroché sur le second polypeptide.

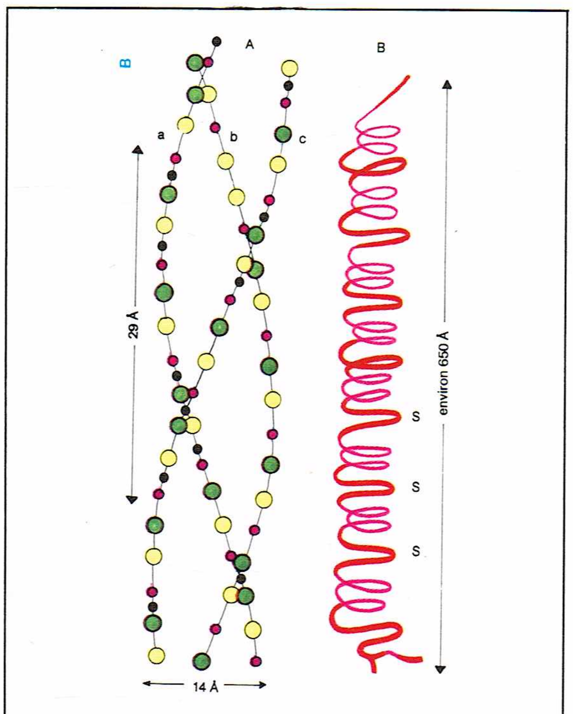

Richard Colin

◀ *A gauche, A,* **structure du tropocollagène** *formé de trois filaments polypeptidiques : en vert,* **l'hydroxyproline ;** *en jaune, la* **proline ;** *en rose, le* **glycocolle** *(ces 3 acides aminés ne contractent pas de liaisons hydrogène) ; en noir, x ou nx acides aminés (liaisons hydrogène possibles). Séquence oligopeptidique de la chaîne* **a** *ou* **c** *; x-gly-pro-hypro-gly-x ; la chaîne* **b** *(où les* **x** *n'ont pas été figurés) est différente des deux autres. A droite, B,* **super-structure hélicoïdale** *de chaînes polypeptidiques ; les portions de filaments (S) qui apparaissent en sombre au microscope électronique ont une structure moins régulière que les filaments du schéma A.*

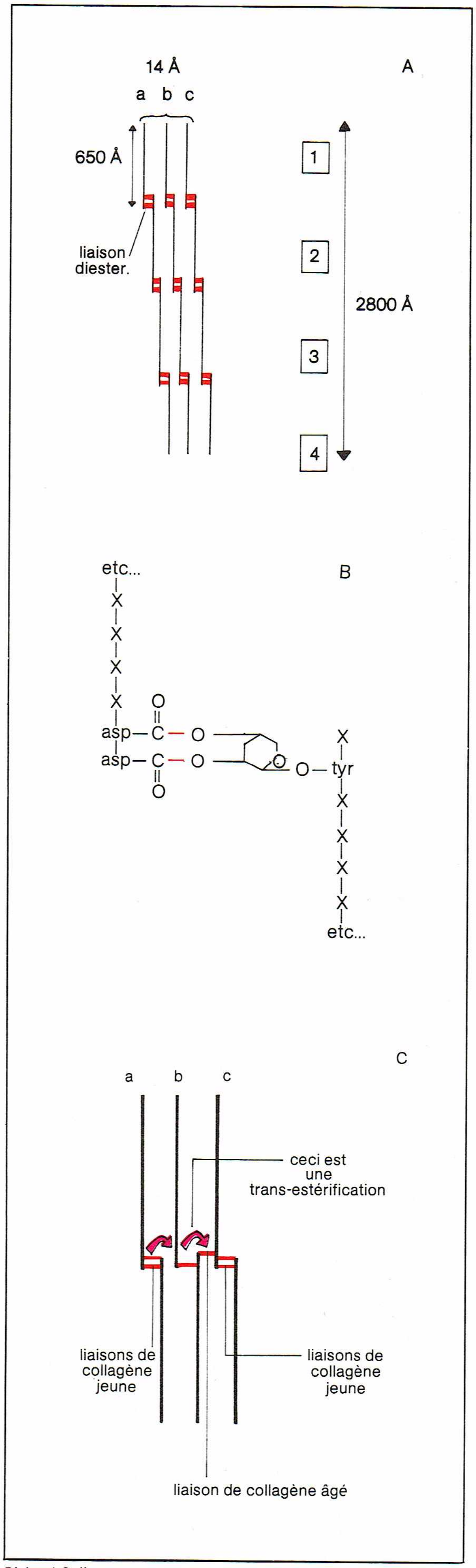

Richard Colin

◀ *A droite, de haut en bas, A, mode d'association des* **filaments du tropocollagène ;** *3 chaînes, chacune comprenant, ici, quatre polypeptides (1-2-3-4). B, détail d'une* **liaison diester** *; deux liaisons ester sont figurées en rouge. C,* **transestérification** *entre les protofibrilles du* **collagène âgé.**

Les liaisons diester concourent à donner à chacune des trois chaînes polypeptidiques une structure nettement fibrillaire, puisque les polypeptides de chaque chaîne sont faits de peptides courts et qui sont liés bout à bout; les liaisons diester n'assurent aucunement la cohésion des 3 chaînes de la molécule, mais seulement celle des polypeptides de chacune des chaînes.

Lorsque le collagène vieillit, les liaisons ester se déplacent : certains des ponts qui assuraient la structure fibrillaire vont alors servir à relier deux chaînes voisines d'une molécule (transestérification). La structure fibrillaire va persister, mais la liaison des trois polypeptides va devenir plus stable. Ensuite, des liaisons vont pouvoir s'établir entre les chaînes voisines de deux molécules ou de *n* molécules disposées côte à côte ou bout à bout. On aura donc une grande cohésion des molécules de collagène « âgé », ce qui explique que la solubilité devienne plus faible.

La sécrétion de molécules de tropocollagène a été mise en évidence lors d'observations faites durant la cicatrisation de plaies cutanées; il se forme, à la surface des fibrocytes, des extrusions, sortes de bulles très réfringentes au microscope optique et qui constituent autant de vésicules d'expulsion du tropocollagène (Stearns et travaux biochimiques de Gross, Lapière et Tanzer).

Dans certains cas pathologiques, la structure des molécules de collagène est anormale; c'est ce qu'on appelle les « maladies du collagène », qui sont sérieuses. Nous verrons l'importance des anomalies de formation du collagène lors de la production expérimentale de tumeurs épithéliales; chez l'animal normal, il existe un équilibre de croissance de l'épithélium (épiderme) et du tissu d'emballage collagène; cet équilibre est rompu dans le cas des tumeurs épithéliales, et le collagène ne forme plus un support ni une barrière efficace contre l'invasion tumorale.

Outre le collagène, on trouve dans les tissus conjonctifs d'autres types de protéines fibreuses : la réticuline et l'élastine.

— Les fibres de *réticuline* sont mêlées aux fibres de collagène; elles sont particulièrement denses à la limite de l'épithélium et du tissu conjonctif. Leur structure est aussi complexe que celle du collagène, mais elles sont plus petites. La réticuline est une glycoprotéine très riche en glucides divers. Montagna estime que cette fibre a la même origine que le collagène. Il précise que le derme de l'embryon ne comporte que des fibres de réticuline et considère, avec Gross, que le précollagène, formé de molécules non encore liées, mais seulement groupées, constitue le matériau de base pour la synthèse des deux types de fibres. En 1934, Bensley avait déjà constaté, grâce à la technique de diffraction des rayons X (pourtant encore peu perfectionnée dans le domaine de la biologie), que les fibres embryonnaires donnent un spectre peu différent de celui du collagène.

Il existe des anomalies de formation de la réticuline. En particulier lors de la croissance de tumeurs épidermiques, les fibres de réticuline ne forment plus un feutrage dense sous l'épiderme.

— Les *fibres élastiques* et l'*élastine* sont repérables sur les coupes histologiques, grâce à leur forte réfringence et à leur colorabilité particulière. Ces fibres sont abondantes dans le derme des Vertébrés; chez les Mammifères elles forment une gaine autour des follicules pileux; il existe une gaine de même nature autour des glandes et dans la paroi des vaisseaux artériels qui sont soumis à des variations importantes de pression lors des contractions cardiaques. Par ailleurs, les disques intervertébraux sont des coussins de tissu conjonctif chargé de fibres élastiques.

L'élastine est formée de protéines de type albumine et de protéines fibreuses extrêmement résistantes vis-à-vis des agents chimiques : des *scléroprotéines*. La structure précise de l'élastine est mal connue.

— La *kératine* forme la couche protectrice cornée qui recouvre la peau des Mammifères, des Oiseaux et des Reptiles; les poils, les ongles, les sabots, les cornes, les plumes et les écailles (sauf celles des Poissons) sont constitués de kératine.

C'est une scléroprotéine contenant en abondance des *acides aminés soufrés*. Des ponts disulfure lui donnent une grande solidité. On distingue deux types de kératines, dont l'une est insoluble dans un mélange (pourtant vigoureux) d'acides nitrique et sulfurique auquel on ajoute du peroxyde d'hydrogène. Les kératines provenant

▼ A gauche, mise en évidence des fibres de réticuline dans une coupe de peau de souris; on voit ici deux follicules pileux reliés à l'épiderme (à gauche). L'imprégnation par un sel d'argent montre nettement la couche de réticuline qui double entièrement la face interne de l'épiderme et des follicules. Le derme, essentiellement collagène, contient peu de fibres argentophiles (méthode de Gordon et Sweet).

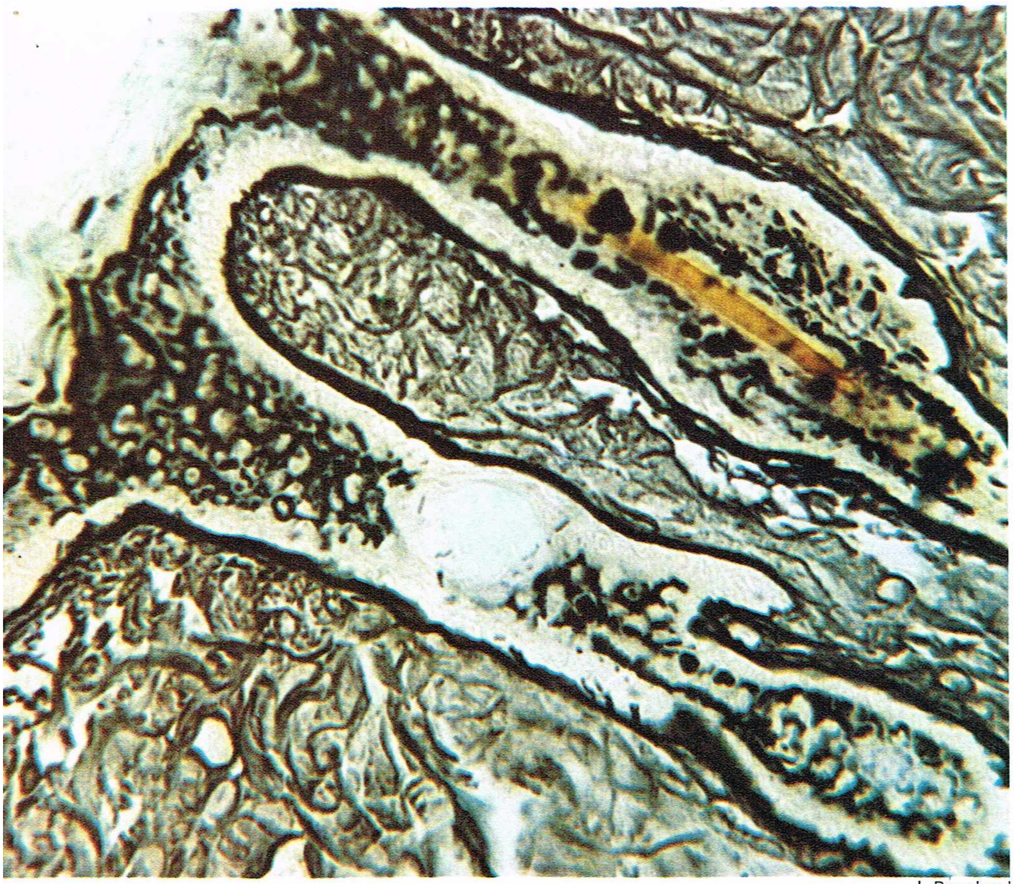

J. Bouchard

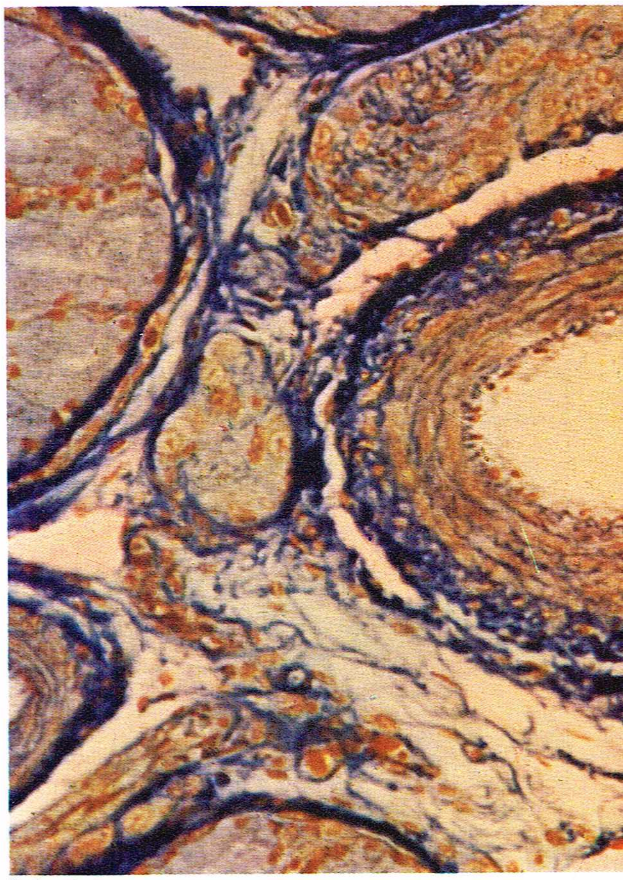

R. Bauchot

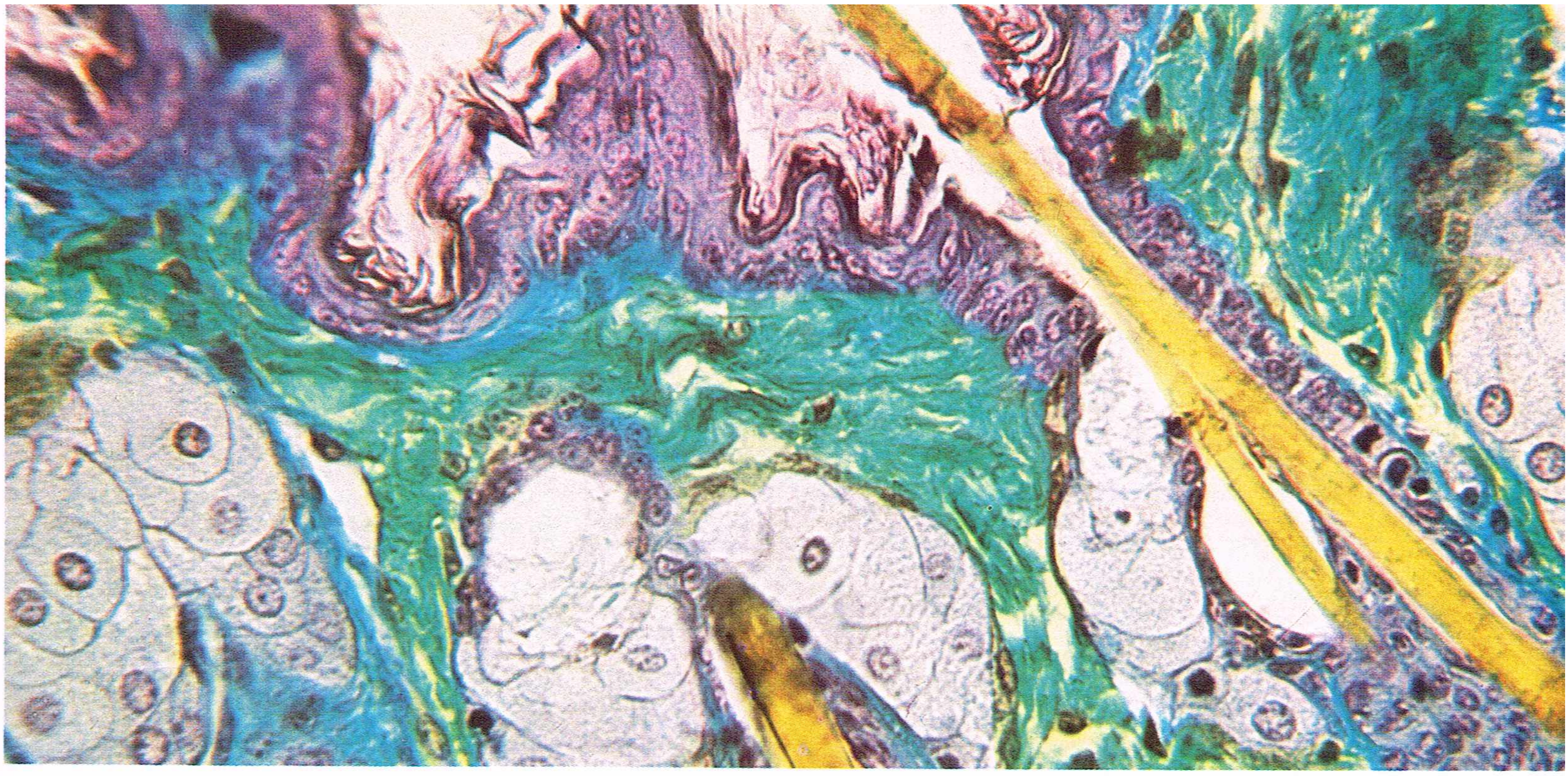

J. Bouchard

des différents types de phanères ou de la couche cornée sont nettement biréfringentes et donnent, à l'analyse aux rayons X, des diagrammes assez voisins. On retrouve la même périodicité de 5,15 Å pour les fibrilles de prékératine, que l'on observe dans toutes les cellules épidermiques, même les plus jeunes; ces fibrilles constituent les *tonofibrilles,* structures de soutien de ces cellules.

La formation de la kératine molle de l'épiderme est un phénomène continu qui s'effectue à la même vitesse que la multiplication des cellules de l'épiderme : il y a un renouvellement constant de la couche cornée. L'évolution des cellules épidermiques vivantes se fait toujours dans le sens de la kératinisation; cela implique la mort des cellules qui se chargent de tonofibrilles puis de kératine dense. Ce phénomène dépend d'une multitude de facteurs externes ou internes.

▲ ***Sur une coupe de peau de souris, mise en évidence des poils formés de kératine dure et qui apparaissent en jaune dans deux follicules pileux; la kératine molle de l'épiderme apparaît en rose violacé; sa structure est visiblement feuilletée (coloration topographique après fixation au liquide de Bouin qui contient de l'acide picrique-jaune).***

▼ ***A gauche, coupe d'artère. Voir les fibres musculaires lisses (en rose) et les éléments fibreux conjonctifs (en bleu); à la périphérie, le collagène forme un manchon assez dense; au sein de la gaine musculaire on voit quatre couches concentriques de fibres élastiques (coloration Azan).***
A droite, coloration topographique d'une coupe d'oreille de souris; à la base du conduit auditif externe, l'épiderme élabore un très grand nombre de cellules cornées, ou kératinisées, qui s'accumulent avant de desquamer. L'épiderme apparaît ici en rose violacé; la kératine, en rose franc, est feuilletée; sous le derme, très dense (gris verdâtre), on voit des éléments du cartilage (aspect très spécial; coloré en vert).

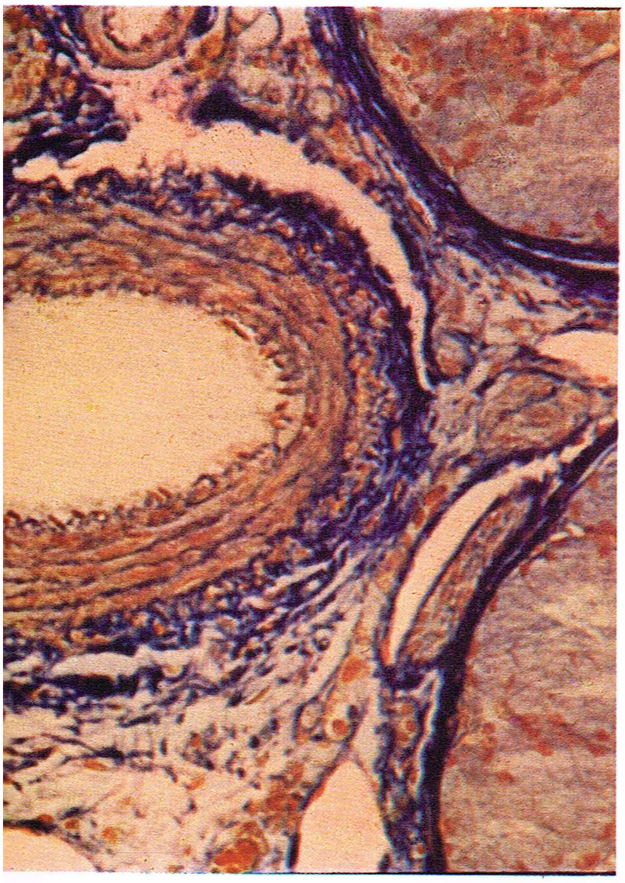

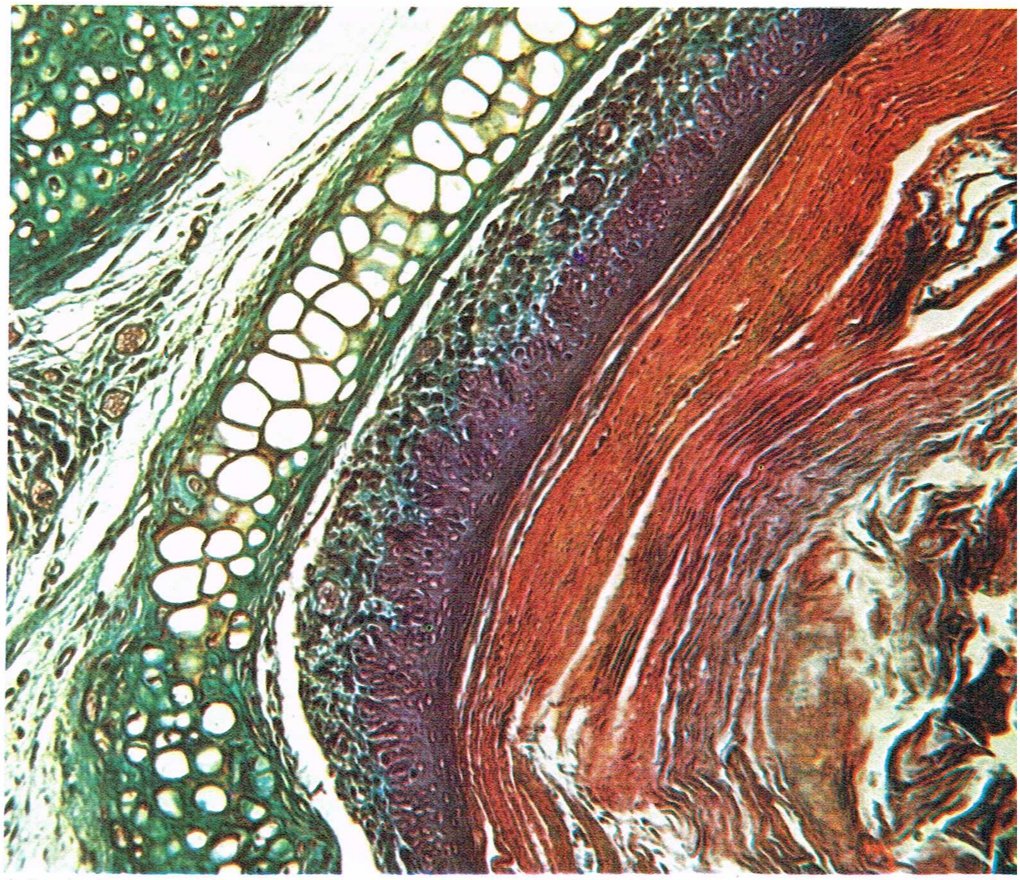

J. Bouchard

Notions sur les protéines à rôle biocatalytique : les enzymes

Nous avons étudié un certain nombre de *protéines de structure,* plus particulièrement celles dont la conformation et les fonctions sont les plus significatives. Nous abordons maintenant un autre type de protéines : les *enzymes.*

Les enzymes ne peuvent être classées en fonction de leurs caractères morphologiques ou structuraux, qui sont extrêmement variés, mais selon des propriétés communes que nous analyserons un peu plus loin.

La découverte des phénomènes de catalyse

En 1806, Clément et Desormes constatèrent que l'hydrolyse du saccharose était accélérée par des traces d'acides minéraux. Ensuite, en 1817 et en 1831, Davy puis Phillips montrèrent l'influence de petites quantités de platine sur le déroulement de réactions en chimie minérale. C'est à Berzélius (1845) que l'on doit la notion de *phénomène catalytique;* dans ce processus, une substance qui n'a aucun rapport avec la réaction chimique étudiée joue cependant un rôle déterminant. Ostwald donne la définition suivante d'un *catalyseur :* c'est une matière qui, sans apparaître dans le produit final d'une réaction, modifie cependant la vitesse de cette réaction. Ajoutons quelques précisions importantes. La composition chimique du catalyseur n'est pas modifiée, même s'il subit des transformations intermédiaires; celles-ci sont en effet *transitoires.* Le catalyseur agit en quantités très faibles par rapport aux substances de la réaction. Lorsqu'un *équilibre de réaction* est obtenu, le catalyseur ne le modifie pas.

Les *enzymes* sont les catalyseurs biologiques. Les pionniers de l'étude de ces protéines furent Croft Hill à la fin du XIXe siècle et Bourquelot à partir de 1913.

Les problèmes posés par la catalyse

Notions essentielles de thermodynamique et notion de couplage

Les réactions biochimiques, chimiques ou simplement mécaniques suivent les lois de la thermodynamique.

— *L'énergie potentielle* d'un système peut servir à fournir un *travail;* mais dans ce cas, il y a toujours *perte* d'une partie de cette énergie. Ainsi, un corps qui glisse sur un plan incliné fournit un travail W, mais il y a toujours un frottement, donc un gaspillage d'énergie potentielle. Le travail, ou *énergie libre,* est égal à l'énergie potentielle moins l'énergie perdue. C'est parce que tout système perd de l'énergie en fonctionnant qu'il est impossible de le faire fonctionner au même degré en sens inverse si on ne lui fournit pas un surcroît d'énergie.

— L'énergie libre (F) d'un système est égale à l'énergie totale potentielle, ou *enthalpie* (H), diminuée d'une valeur proportionnelle à l'énergie inutilisable, ou *entropie* (S). $F = H - TS$ (T étant la température à laquelle fonctionne le système). Cependant, la *valeur absolue* de l'énergie potentielle ne peut pas être connue; on en détermine seulement des *variations.* C'est pourquoi on doit écrire :

$$\Delta F = \Delta H - T\Delta S$$

Comme on le voit, seule T est une valeur absolue déterminable. Une modification *spontanée* d'un système ne peut se produire que s'il y a diminution de l'énergie libre.

A noter que l'équation ci-dessus est souvent écrite sous la forme : $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ (G étant l'initiale du physicien américain Gibbs, qui fut un des pionniers de la thermodynamique moderne).

Les réactions chimiques impliquent des variations caloriques plus ou moins importantes. La chaleur de réaction est comptée positivement quand elle est cédée au milieu; au contraire, elle est comptée négativement s'il faut fournir de la chaleur pour que la réaction se fasse (réaction non spontanée). Si l'on doit fournir de la chaleur pour qu'une réaction se déclenche, celle-ci est dite *endothermique,* et cela implique une augmentation de l'énergie totale; ΔH est donc positive. Inversement, si une réaction se fait spontanément, elle est *exothermique,* et ΔH est négative (il y a production de chaleur). Les variations d'énergie concernent à la fois l'énergie libre F et l'entropie S.

Une réaction spontanée est dite *exergonique,* alors qu'une réaction qui implique une augmentation d'énergie libre F est dite *endergonique.*

En biologie, il est fréquent que se trouvent *couplées* deux réactions qui sont, en quelque sorte, complémentaires sur le plan thermodynamique : une réaction exergonique peut fournir son énergie pour que se produise une réaction endergonique. Dans ce cas, l'énergie libre produite par la réaction exergonique doit être un peu supérieure aux besoins de l'autre; c'est-à-dire, comme le notent Florkin et Schoffeniels, « il faut que la réaction totale soit exergonique ».

Notion d'activation d'une réaction

En principe, lorsqu'une réaction est exergonique, elle est possible du point de vue thermodynamique, et l'on pourrait s'attendre qu'elle se déclenchât. Pourtant, cette condition nécessaire est loin d'être suffisante; ainsi, la nitroglycérine ou l'essence possèdent un ΔF d'oxydation nettement négatif, et, pourtant, leur combustion ne se déclenche pas spontanément (ce qui est heureux...) ; dans le premier cas, un choc peut être suffisant pour provoquer l'oxydation explosive, dans le second, il faut une étincelle. Cet *appoint* d'énergie correspond à *l'énergie d'activation* (Arrhenius).

Cela s'explique par le fait que l'énergie totale d'une molécule n'est pas intégralement utilisable pour une réaction. Au niveau moléculaire, on sait qu'il existe plusieurs formes d'énergie — translation moléculaire, énergie électronique, de rotation et de vibration. Seule l'énergie de vibration détermine les possibilités de réaction. Elle correspond aux vibrations effectuées par les atomes de part et d'autre de leur position d' « équilibre » dans la molécule (Amiel) ; elle est quantifiable.

L'activation donne le « coup de pouce » qui permet la réaction exergonique entre deux espèces moléculaires; l'énergie d'activation qui doit être fournie est d'autant plus grande que l'énergie de vibration des molécules est plus faible par rapport au contenu énergétique total de celles-ci.

Soit deux espèces moléculaires A et B dont la réaction exergonique implique un ΔF négatif. La réaction n'aura lieu que si l'on ajoute un facteur C qui apporte une énergie d'activation E :

$$A + B \text{ non réagissants}$$
$$\text{mais } A + B + C \rightarrow AB + C$$

Divers facteurs permettent l'activation. Par exemple, une élévation de 10 °C multiplie par 2 ou 3 le nombre de molécules activées dans une solution de saccharose à hydrolyser; le phénomène est important au niveau cellulaire sauf chez les homéothermes (Oiseaux et Mammifères). Divers ions sont d'excellents activateurs permettant les réactions au niveau de la cellule.

Le rôle du catalyseur

Un catalyseur, plus particulièrement une enzyme, agit en *abaissant l'énergie d'activation* nécessaire pour qu'une réaction soit possible — réaction exergonique simple ou rendue exergonique par couplage.

▼ ***Représentation schématique de la notion de couplage.***

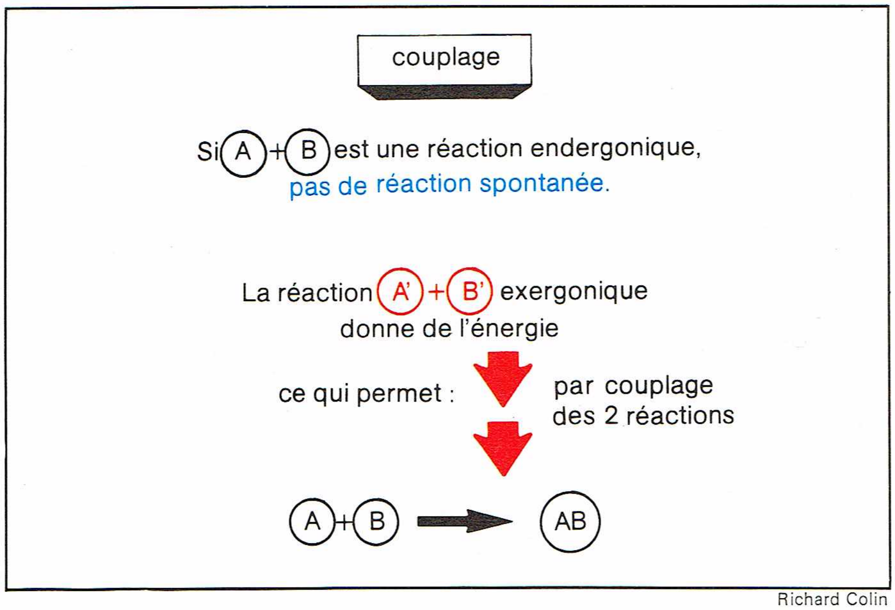

Richard Colin

Conditions d'activité d'un catalyseur

Les catalyseurs que l'on utilise en chimie sont de nature diverse; ils peuvent être « physiques » (comme les corps poreux) ou chimiques. Les catalyseurs biologiques, ou enzymes, ont une activité purement chimique.

L'enzyme se lie temporairement au substrat

L'enzyme, catalyseur chimique, se fixe sur le substrat, c'est-à-dire sur le matériel de la réaction (V. Henri) :

$$S + E \leftrightarrows ES \rightarrow \text{Produit} + E$$

L'enzyme se trouve régénérée à la fin de la réaction. Insistons sur le fait que le premier temps est réversible et que la vitesse des réactions dépend de constantes, toutes différentes :

$$[E] + [S] \underset{Kb}{\overset{Ka}{\leftrightarrows}} [ES] \xrightarrow{Kc} [P] + [E]$$

Cette liaison enzyme-substrat peut être mise en évidence dans certains cas favorables, par exemple, dans la réduction de H_2O_2 (peroxyde d'hydrogène) par le pyrogallol en présence de *peroxydase*. La peroxydase est une enzyme de coloration brune; durant la réaction l'enzyme vire au vert puis au rouge. La transformation transitoire de l'enzyme a été étudiée en spectrophotométrie; fournissant initialement quatre pics, elle passe par un état transitoire à deux pics avant de retrouver ses caractéristiques.

L'activité dépend de la température

La vitesse de réaction est maximale pour une température précise; il existe donc un *optimum de température*. Pour une température donnée, on peut effectuer une *série de dosages* du substrat (S) et du produit formé (P) en fonction du temps (t) : $V = \frac{dS}{dt} = \frac{dP}{dt}$. La courbe des vitesses en fonction de la température est une courbe en cloche : la protéine enzymatique *se dénature* assez brutalement entre 40 et 60 °C.

L'activité dépend du pH

Il existe un pH optimal pour toutes les réactions enzymatiques. En deçà et au-delà des limites de cet optimum, l'enzyme se dénature; de plus, l'ionisation du substrat varie avec le pH ambiant et, même si l'enzyme n'est pas encore inactivée, le substrat devient plus difficile à atteindre pour l'enzyme.

On connaît l'exemple de la *pepsine* gastrique, enzyme qui fragmente les protéines en s'attaquant aux acides aminés comportant un noyau aromatique au voisinage de la liaison peptidique (tyrosine ou phénylalanine). Les premiers expérimentateurs, au temps de Spallanzani ou de Réaumur, connaissaient l'action protéolytique du suc gastrique. Mais il fallut attendre Eberlé, Müller et Schwann pour savoir que ce suc acide était plus actif qu'une solution de HCl au même pH. La pepsine n'est efficace qu'en milieu acide. En 1881, Langley effectua une étude précise de l'influence du pH. Dès 1880, Heidenhain suggéra que l'*enzyme active* était une combinaison de HCl et d'une propepsine, ou pepsinogène. Cependant, c'est seulement en 1938 que l'on put isoler le pepsinogène et le cristalliser. Cette enzyme devient la pepsine à pH 6, mais son optimum est beaucoup plus bas; ainsi, elle digère l'hémoglobine à pH 0,2; *l'optimum varie avec la nature du substrat;* pour beaucoup de protéines le pH optimal de la pepsine est au voisinage de 4. En fait, les propriétés du suc gastrique ne sont bien connues que depuis les travaux de Bergmann et Fruton (1941), complétés par ceux de Hirschowitz (1957).

Structure et fonctionnement des enzymes

On classe les enzymes suivant la nature des réactions qu'elles catalysent. La description précise d'un tel classement serait, ici, très fastidieuse. Nous tenterons de donner une idée de la nature des enzymes en décrivant la structure et le fonctionnement de certaines d'entre elles, que les spécialistes commencent à bien connaître.

La nature protéique des enzymes est établie depuis 1922. Avant Wilstätter, on pensait que les « ferments » biologiques étaient d'une nature particulière et que les protéines qui leur étaient associées correspondaient à des impuretés; on mettait donc sur le compte de l'extraction les réactions protéiques produites par les enzymes que l'on tentait d'analyser. Les enzymes sont cristallisables (Summer, 1926; de nombreux travaux de Northrop). Certaines de ces enzymes sont *purement protéiques*. Mais d'autres, fort nombreuses, comportent des *portions non protéiques* et de nature variée; dans ces derniers cas, la protéine enzymatique représente *l'apoenzyme*, et la molécule complémentaire correspond au *coenzyme*, ou *coferment*.

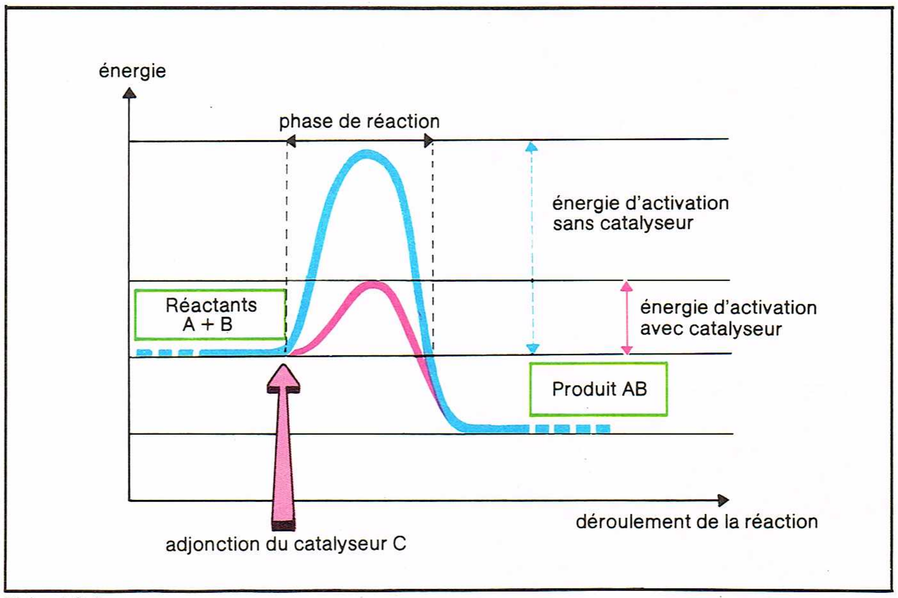

Richard Colin

▲ ***Le rôle du catalyseur : il abaisse l'énergie nécessaire à l'activation d'une réaction.***

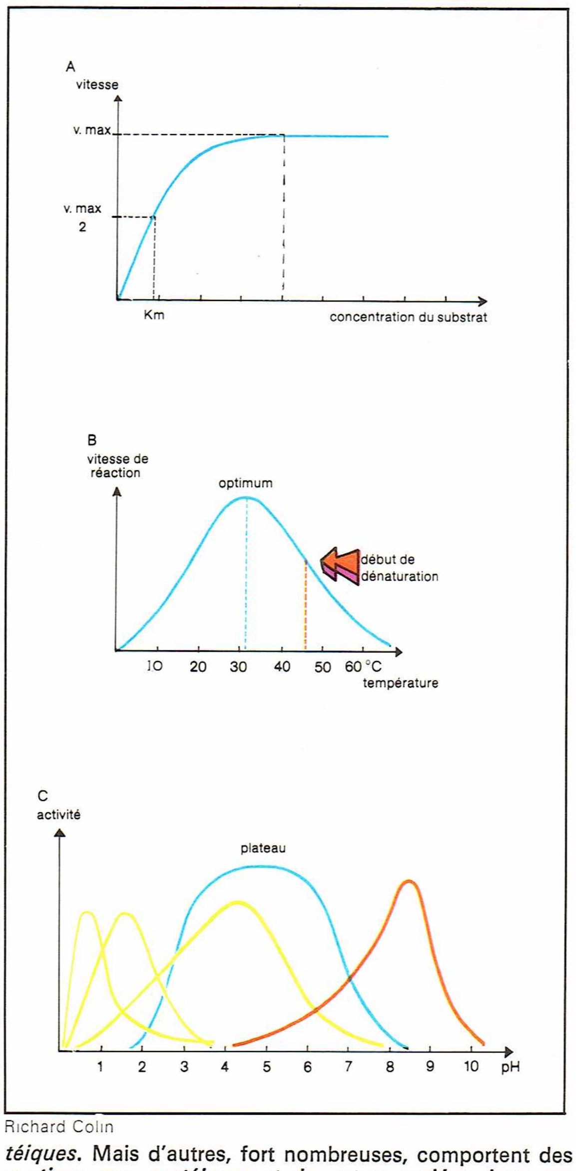

Richard Colin

◀ ***De haut en bas : A, variation de la vitesse d'une réaction enzymatique en fonction de la quantité de substrat; cette réaction est caractérisée par la vitesse maximale et une constante dite constante de Michaelis (Km). B, influence de la température sur la vitesse d'une réaction enzymatique. C, influence du pH sur l'activité des enzymes : en bleu, enzyme à optimum mal définissable, mais très active entre pH 3 et 6 (invertase); en rouge, enzyme à optimum très net situé entre pH 8 et 9 (trypsine du pancréas); en vert, enzyme à optimum variable suivant la nature du substrat (pepsine de l'estomac).***

J. Bouchard

▶ *Exemple de larves d'Insectes à régime alimentaire xylophage : larves de* Rhagium *(Coléoptères Longicornes) se nourrissant au niveau des couches externes du bois de Conifères, qu'elles digèrent partiellement grâce aux hydrolases contenues dans leur tube digestif.*

G. Blondeau - Pitch

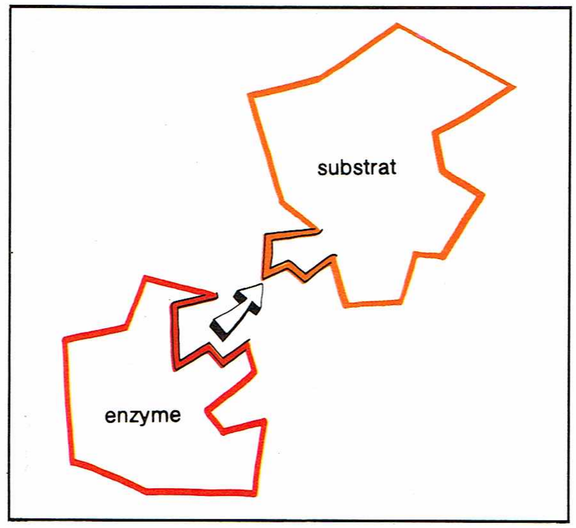

Richard Colin

▶ *A gauche, un représentant de la famille des Dermestidés* (Anthrenus museorum). *Les larves de certaines espèces de cette famille de Coléoptères se nourrissent des exuvies abandonnées après la mue par d'autres Insectes; l'équipement enzymatique de leur tube digestif est donc très particulier puisque le fond de la nourriture est essentiellement constitué par la chitine.* A droite, adaptation enzyme-substrat *: la configuration stérique du substrat permet l'action de l'enzyme.*

▼ *Représentation schématique du* degré de spécificité *des enzymes.*

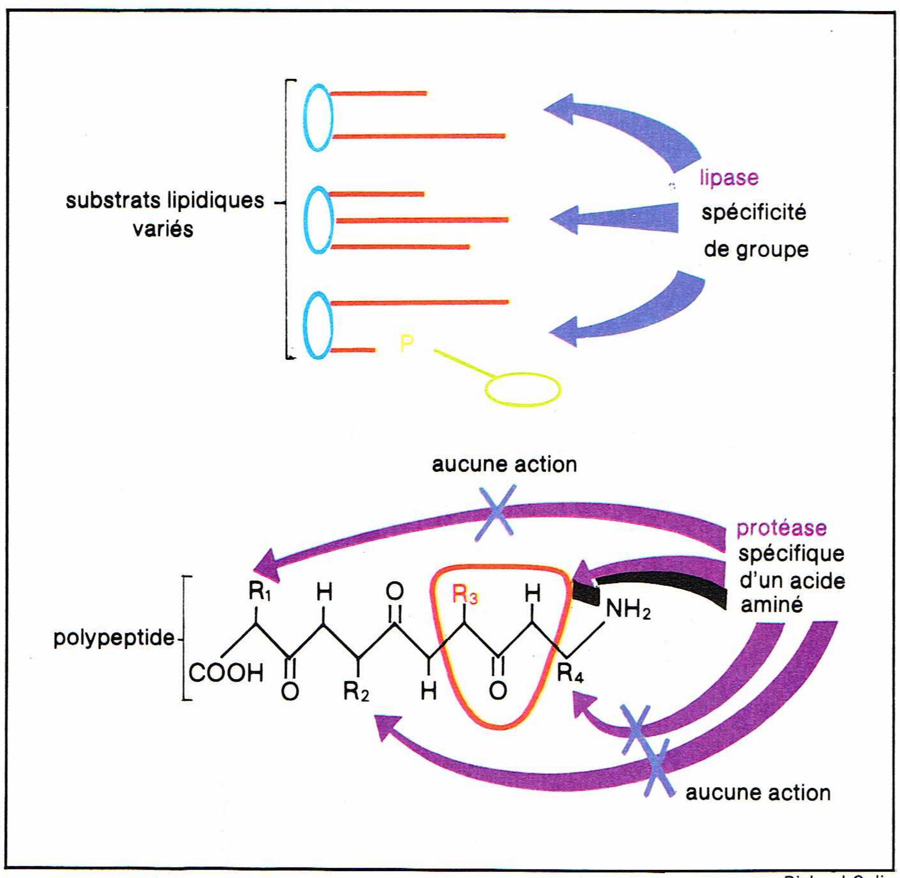

Richard Colin

Enzymes purement protéiques

Relativement peu nombreuses, ces protéines permettent généralement des réactions d'*hydrolyse :* ce sont des *hydrolases*. Dans le tube digestif, elles fragmentent les macromolécules qui servent à l'alimentation. Il en existe beaucoup d'autres au sein des cellules les plus diverses; celles-là sont utilisées dans certaines réactions de dégradation et, tout particulièrement, à la fin de la vie cellulaire quand se déclenchent les processus d'autolyse aseptique. On distingue les *hydrolases des glucides,* les *lipases* et les *protéases;* chacun de ces groupes est fait de sous-groupes correspondant à des enzymes de *spécificité* différente.

Si la spécificité enzyme-substrat n'est pas très grande, dans le cas des lipases, par exemple, on parle d'enzymes ayant une *spécificité de groupe,* l'enzyme pouvant s'attaquer à des lipides variés. Dans le cas des protéases, on constate que la fixation d'eau sur la molécule de substrat se fait à un niveau déterminé : certaines opèrent sur les liaisons peptidiques et l'enzyme « choisit » une liaison peptidique particulière; ce choix est fonction de la configuration mutuelle de l'enzyme et du substrat. On dit que le niveau de réaction avec le substrat est déterminé par la *configuration stérique* de la molécule au voisinage du point d'hydrolyse; cette notion s'applique à toutes les enzymes possédant une spécificité précise.

Le mécanisme d'action des hydrolases est encore incomplètement connu. Barnard et Laidlaw l'expliquent par le caractère bifonctionnel de la protéine enzymatique : $—NH_3^+$ peut céder un proton au substrat et $—COO^-$ peut en récupérer un autre. Autrement dit, l'enzyme se comporte comme un *conducteur d'électrons.* Cette protéine semi-conductrice serait parcourue par les électrons pi délocalisables, électrons d'un pool macromoléculaire (Florkin et Schoffeniels). Ainsi, l'étude des propriétés électriques de certains acides aminés constitutifs de protéines tend à prouver qu'il existe des *sites actifs* particuliers dont dépend le pouvoir catalytique.

Quelques hydrolases particulièrement importantes

— *La trypsine*. D'origine pancréatique, elle hydrolyse les protéines en s'attaquant très spécifiquement aux liaisons peptidiques situées juste à côté de l'arginine et de la lysine contenues dans les chaînes. L'enzyme ne reconnaît pas une certaine liaison peptidique, mais bien plutôt l'*encombrement stérique* des deux acides aminés cités; remarquons que la structure générale de ces derniers est très voisine.

— *La chymotrypsine*. Également d'origine pancréatique, sa spécificité diffère de celle de la trypsine; par contre, son mode d'action fait penser à celui de la pepsine gastrique : comme celle-ci, la chymotrypsine s'attaque à des liaisons peptidiques au voisinage d'un acide aminé aromatique du substrat protéique, par exemple, la tyrosine ou la phénylalanine. Cependant, alors que la pepsine n'agit que sur des liaisons peptidiques d'acides aminés ionisés (NH_3^+, COO^- libres), la chymotrypsine « se contente » de la présence du seul acide aromatique. Son action est donc plus générale.

Cette enzyme est très utilisée par les biochimistes pour fragmenter les chaînes protéiques en des points précis et déterminer ensuite les résidus C-terminaux des polypeptides libérés; ils obtiennent ainsi de nombreux points de repère pour l'analyse des macromolécules complexes.

Comme beaucoup d'enzymes, la chymotrypsine est issue d'un zymogène, le chymotrypsinogène, protéine de 246 acides aminés. Pour aboutir à la chymotrypsine il faut une réaction enzymatique préalable qui, en éliminant un court segment du chymotrypsinogène, permet l'établissement de la structure secondo-tertiaire dont dépend le fonctionnement de l'enzyme active.

Trypsine et chymotrypsine sont des *endopeptidases* qui s'attaquent à des points précis disposés tout au long des chaînes polypeptidiques de substrat.

— *La ribonucléase*. Elle fournit un autre exemple d'enzyme purement protéique. Elle catalyse la fragmentation des molécules d'acide ribonucléique (ARN). L'hydrolyse se produit en des points très précis des très longues chaînes d'ARN.

La constitution de cette enzyme est assez bien connue depuis les travaux de Stein et Moore (1960). Il s'agit d'une seule chaîne de 124 A. A., chaîne pelotonnée car il existe des liaisons disulfure qui, établies à des niveaux précis, déterminent la structure tertiaire de la chaîne.

On peut détruire complètement l'activité de la ribonucléase en lui adjoignant de l'acide iodo-acétique. Cet acide se lie avec l'histidine en position 119, et il suffit donc d'une très faible modification de la molécule pour l'inactiver. D'autre part, la rupture de la chaîne au niveau 20-21 et l'élimination du bout de cette chaîne entraînent aussi la perte d'activité de l'enzyme; cette extrémité 1-20 occupe dans la ribonucléase native une position voisine de l'autre extrémité, en particulier de l'histidine 119. Enfin, les acides aminés 121 et 124 jouent un rôle extrêmement important. On considère que deux acides aminés sont directement responsables de l'efficacité de l'enzyme : l'HIS 119 et l'HIS 12, qui se trouvent très près l'un de l'autre, comme le montre un schéma de structure tertiaire. Le *site actif*, c'est-à-dire l'ensemble des acides aminés qui sont responsables du contact avec le substrat, se trouve donc localisé autour de ces deux histidines. Mais il comprend deux zones à fonction différente : un *site de fixation* enzyme-substrat et un *site catalytique* de réaction. Le site catalytique correspond au niveau des histidines déjà citées, tandis que le site de fixation est fait d'une portion de la chaîne comportant une série d'acides aminés basiques : ceux-ci s'attachent donc facilement aux radicaux acides libres des ARN.

Comme nous l'avons dit, la notion de site actif est valable pour les autres enzymes, et l'on connaît à présent la nature des sites de beaucoup d'entre elles. Généralement, chaque site correspond à un petit nombre d'acides aminés actifs.

Nous avons également vu que l'acide iodo-acétique se fixe spécifiquement sur l'histidine 119 de la ribonucléase; il s'agit toutefois là d'un fait très exceptionnel, en ce sens que peu de substances sont en mesure d'inactiver l'enzyme en s'attaquant à un seul point précis : le di-isopropyl fluorophosphate (DFP) se combine spécifiquement à la sérine; le parachloromercuri-benzoate (PCMB) agit de même sur la cystéine ainsi que les arsenicaux (ce qui explique, en grande partie, les effets toxiques de l'arsenic); mais dans les deux cas, l'agent chimique n'agit pas aussi précisément que l'acide iodo-acétique sur la ribonucléase.

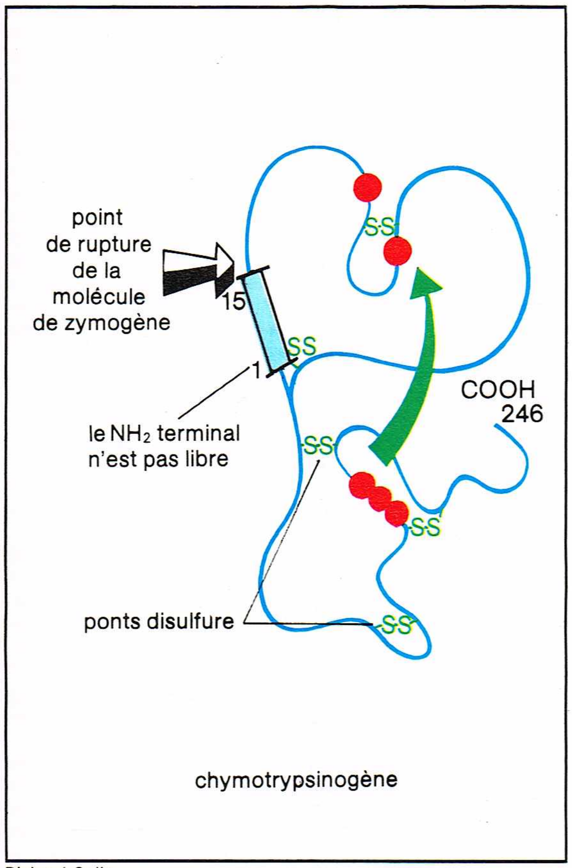

Richard Colin

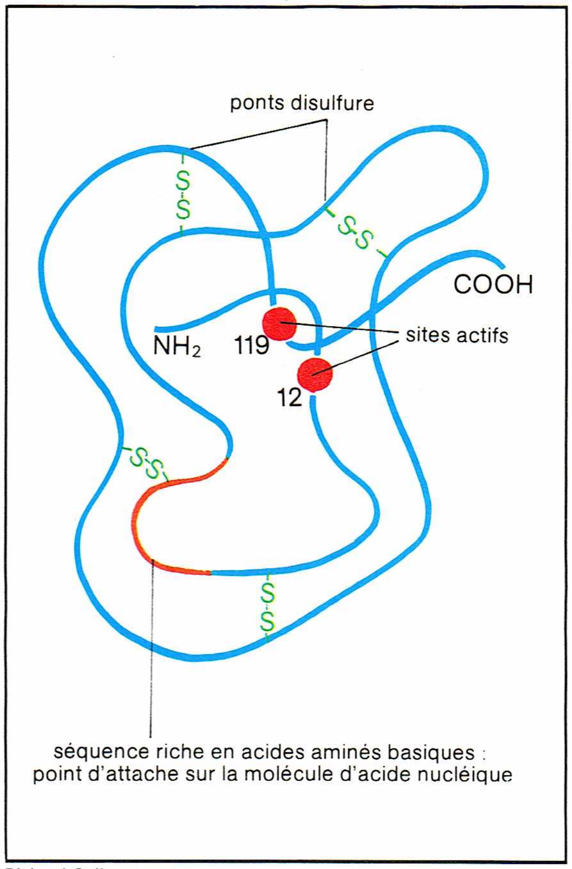

Richard Colin

◀ *A gauche, obtention de* **chymotrypsine** *par activation du* **chymotrypsinogène** *: après élimination de 15 A.A. (segment épais), le rapprochement (flèche verte) de deux portions de la molécule constitue le* **site catalytique** *(points rouges). A droite, structure schématique de la* **ribonucléase.**

Enzymes complexes. Nature des coenzymes

L'association de deux molécules, l'une protéique, l'autre de nature très variable, constitue l'enzyme *stricto sensu.*

La partie protéique des enzymes complexes peut être comparée, approximativement, à ce que nous venons de voir pour les enzymes purement protéiques. Cette protéine, qui constitue l'*apoenzyme,* possède une partie du site actif, puisque la liaison enzyme-substrat se fait à son niveau ; par contre, le site catalytique est constitué par la partie non protéique ou *coenzyme* (cette partie est encore appelée cosubstrat par Karlson et divers biochimistes). On qualifie également le coenzyme de *groupement prosthétique* (= « groupement ajouté », suivant l'étymologie grecque). Le rôle de l'apoenzyme protéique est de reconnaître la molécule de substrat et de s'y accrocher en entraînant le coenzyme. Le rôle de la protéine dans la spécificité de la réaction est facilement mis en évidence ; ainsi, diverses enzymes à rôles biologiques très différents comportent cependant le même coenzyme.

L'apoenzyme joue parfois un rôle plus direct dans la catalyse ; les exemples sont rares ; dans le cas des *transaminases,* chargées du transfert d'un NH_2 d'un acide aminé sur un acide à fonction cétonique, et des *décarboxylases,* les réactions catalysées par ces enzymes sont bien différentes, et elles ont cependant le même coenzyme ; l'apoenzyme protéique joue donc un rôle catalytique. D'ailleurs, il n'existe qu'une vingtaine de coenzymes, alors que le nombre d'enzymes dépasse très largement le millier. Le cas des transaminases et des décarboxylases n'est sans doute pas exceptionnel. La liaison apoenzyme-coenzyme est de force très variable suivant la nature de l'enzyme. Étant donné qu'il y a peu de coenzymes, on les classe facilement suivant leur nature ou suivant leurs fonctions.

▶ **Constitution schématique d'une enzyme complexe.**

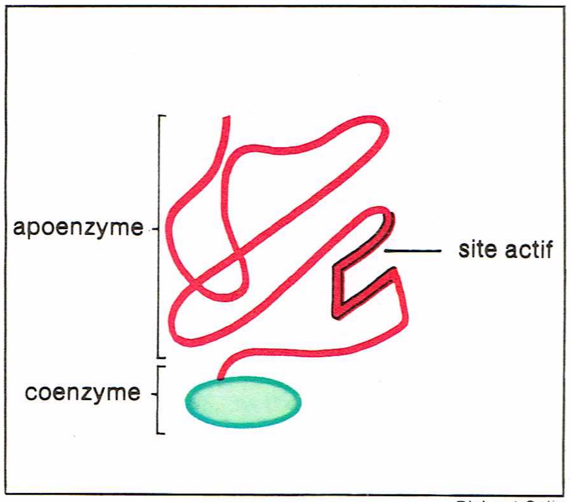

Richard Colin

▼ ***Exemple de réaction de transamination : ici, la transamination a deux fonctions : d'une part, elle facilite l'introduction d'un métabolite dans le cycle de Krebs, d'autre part, elle permet la formation d'un A.A. nouveau. Son rôle permet donc une modulation du métabolisme en fonction des besoins.***

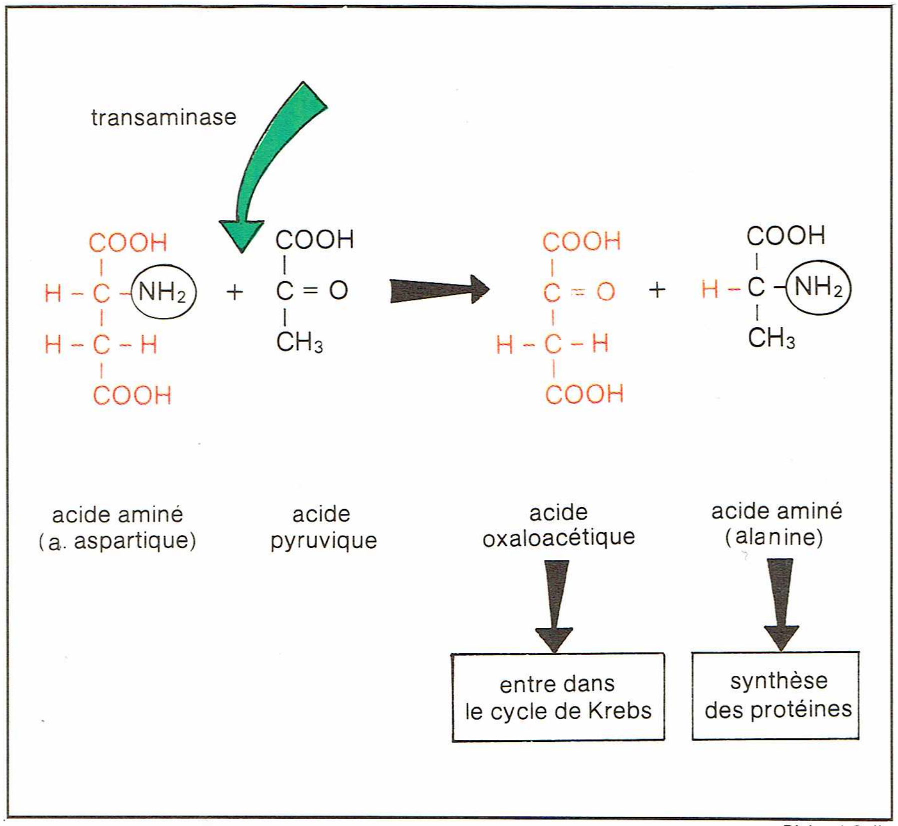

Richard Colin

■ *Coenzymes d'oxydo-réduction.*

Ce sont des molécules servant au transfert d'électrons ou d'hydrogène (réactions d'oxydo-réduction).

Les réactions cellulaires d'oxydo-réduction sont à la base des mécanismes vitaux ; elles amènent la formation de molécules riches en énergie, indispensables pour toutes les synthèses. Des oxydations interviennent dans la dégradation des substances constituant la cellule, en particulier des réserves glucidiques ou autres. En d'autres termes, des matériaux de toute nature se dégradent pour que les constituants cellulaires se renouvellent *(turn-over).* Le niveau énergétique total est maintenu malgré les pertes qui sont imputables à l'activité de la cellule et dépend d'un apport de nourriture strictement régulé en fonction de cette activité.

Toutefois, l'oxydation des divers substrats ne se fait pas directement en présence de l'oxygène dissous dans les milieux extra- ou intracellulaires ; en effet, cette oxydation conduirait à un dégagement brutal d'énergie calorique, véritable flambée dans laquelle on peut imaginer que toute la cellule se volatiliserait... En réalité, l'oxydation d'un substrat se fait *par étapes,* ce qui implique une fragmentation de la libération d'énergie et son utilisation rationnelle ; on peut faire une analogie avec une succession de petits barrages bien répartis sur le cours d'une rivière tumultueuse et irrégulière, et qui en « civilisent » le débit.

Les oxydations du substrat sont couplées avec la *réduction* de substances actives, qui sont des *transporteurs d'électrons ou d'hydrogène.* Ces transporteurs sont peu nombreux ; il s'agit des *coenzymes* des *déshydrogénases.* Des *séries* de transporteurs sont impliquées dans le mécanisme : on peut dire qu'ils se passent des électrons arrachés au substrat et qu'ils les amènent ainsi à l'accepteur final, c'est-à-dire à l'oxygène. Chaque coenzyme des déshydrogénases accepte d'abord, puis cède au coenzyme voisin les électrons qui proviennent de la déshydrogénation du substrat (oxydation).

On observe une nette diminution du potentiel énergétique des électrons (e^-) entre le moment où les atomes d'hydrogène sont arrachés au substrat et celui où ils parviennent à l'oxygène : pour un électron, le potentiel redox (réduction-oxydation) passe de — 0,5 volt à + 0,75 volt. Cette diminution du potentiel négatif est liée au fait que des quanta énergétiques sont prélevés à plusieurs niveaux dans la chaîne des transporteurs et utilisés pour la phosphorylation de molécules telles que l'ADP : c'est le couplage dit des *phosphorylations oxydatives* (Lowy). Williams compare l'ensemble à une centrale électrique cellulaire dont le potentiel serait capté en différents points ; poursuivant l'analogie évoquée précédemment, nous dirons que l'énergie est captée au niveau de barrages établis sur le cours de notre rivière tumultueuse.

Détaillons un peu le phénomène. Une première déshydrogénase de la *chaîne respiratoire,* qui arrache H_2 au substrat, va ensuite le passer à une seconde déshydrogénase ; dans la réaction de transfert, l'énergie libérée va servir à la formation d'une molécule d'ATP (à partir d'ADP et de phosphore inorganique). Les *deux premiers coenzymes* responsables sont la *nicotinamide-adénine-dinucléotide* (NAD) et la *flavine-adénine-dinucléotide* (FAD).

● La **NAD** comprend deux *nucléotides,* c'est-à-dire deux molécules de *ribose* — un sucre en C_5 — phosphorylées et combinées à deux bases azotées hétérocycliques, l'*adénine* et la *nicotinamide ;* les nucléotides sont reliés par leur groupement phosphorylé — pont pyrophosphate. C'est le noyau de la nicotinamide qui va capter l'hydrogène du substrat ; ce noyau est fortement résonnant et comporte un atome d'azote ; après combi-

naison avec le ribose, l'azote d'un tel noyau constitue un pôle positif, d'où le sigle NAD^+. Un atome d'hydrogène se fixe sur ce noyau ainsi qu'un électron, ce qui implique une délocalisation des électrons pi et des doubles liaisons. On écrit : $NAD^+ + 2\,H \rightarrow NADH + H^+$, ou, en simplifiant : $NAD + 2\,H \rightarrow NADH_2$ (Kruh).

● Dans la phase suivante, H_2 est repris par le second coenzyme, la **FAD**, qui devient $FADH_2$. Les déshydrogénases à FAD ont un potentiel d'oxydo-réduction supérieur à celui des déshydrogénases à NAD, ce qui explique qu'elles puissent capturer l'hydrogène de ces enzymes : les FAD déshydrogénases oxydent ou, ce qui revient au même, déshydrogènent les enzymes à $NADH_2$.

La FAD est encore faite de deux ribonucléotides liés par un pont pyrophosphate et comportant une base purique, l'adénine; de plus, un groupement flavinique, hétérocycle à trois noyaux azotés, constitue la partie active du coenzyme : deux atomes d'hydrogène vont s'y fixer au contact de deux azotes du noyau flavine — encore appelé noyau alloxazine. Ce coenzyme réduit va pouvoir céder ensuite son hydrogène en présence d'une autre enzyme, le *cytochrome b*, mais nous étudierons ce processus un peu plus loin.

NAD et FAD sont des coenzymes qui peuvent être combinés à des déshydrogénases très diverses, puisqu'elles doivent s'adapter à des substrats très divers. L'apoenzyme protéique est structuralement adapté au substrat, tandis que son coenzyme attaque n'importe quelle substance hydrogénée.

La *vitamine PP*, ou *niacine*, n'est autre que le précurseur de NAD, puisqu'il s'agit de la *nicotinamide*. Cette substance, absolument essentielle, est une vitamine hydrosoluble antipellagreuse : sa carence entraîne d'abord un érythème cutané avec des troubles au niveau du revêtement gingival, puis des saignements et des incidents plus graves du métabolisme général; enfin, si la carence persiste, il apparaît des troubles nerveux qui précèdent la mort. Cependant, sauf dans certains cas extrêmes, l'organisme des Vertébrés peut synthétiser cette vitamine à partir d'un acide aminé, le tryptophane. Les peuples dont l'alimentation est à base de maïs peuvent en présenter une carence très grave; cette Graminée contient, en effet, fort peu de tryptophane, et la vitamine elle-même s'y trouve sous une forme complexée non assimilable. Notons que la quantité de vitamine nécessaire par jour est de 12 à 18 mg dans l'espèce humaine; cela donne une idée des concentrations auxquelles peuvent agir les vitamines et, secondairement, des enzymes fondamentales de l'organisme; cette dose quotidienne mesure l'intensité du *turn-over* de la substance.

La *vitamine* B_2 ou *riboflavine* est le précurseur de FAD. Pour obtenir le coenzyme, il faut une phosphorylation qui donne la flavine mononucléotide, et celle-ci se combine à l'acide adénylique, ou phospho-adénine ribose (qui constituait déjà la moitié de la molécule de NAD). La vitamine B_2 est encore appelée *ferment jaune;* cette coloration est commune aux molécules, de nature diverse, qui comportent un groupement flavinique (cas des papillons jaunes). Au niveau cellulaire, après centrifugation de tissus homogénéisés, les culots de mitochondries, organites hyaloplasmiques chargés d'enzymes respiratoires, sont nettement jaunes.

La carence en B_2 ne produit pas de signes cliniques manifestes chez l'homme, et il existe vraisemblablement une voie de biosynthèse, même si elle n'est pas suffisante pour assurer les besoins de l'organisme. Ceux-ci avoisinent 2 mg par jour, mais dépendent de l'âge et des constituants de la nourriture. Cette vitamine existe dans de très nombreux aliments. Kayser note que, durant la dernière guerre, malgré de sévères restrictions alimentaires, les Anglais n'ont jamais souffert d'avitaminose B_2, les feuilles de thé contenant une certaine quantité de cette substance, heureusement thermostable. Par contre, dans nombre de pays chauds, où les aliments sont fréquemment séchés au soleil, l'avitaminose existe car la riboflavine est photosensible.

● Dans la « chaîne respiratoire », d'autres enzymes vont poursuivre le travail commencé par les déshydrogénases à NAD et FAD : ce sont les **cytochromes**. Leurs coenzymes sont construits comme le groupement prosthétique de l'hémoglobine; ils ont un noyau tétrapyrrolique.

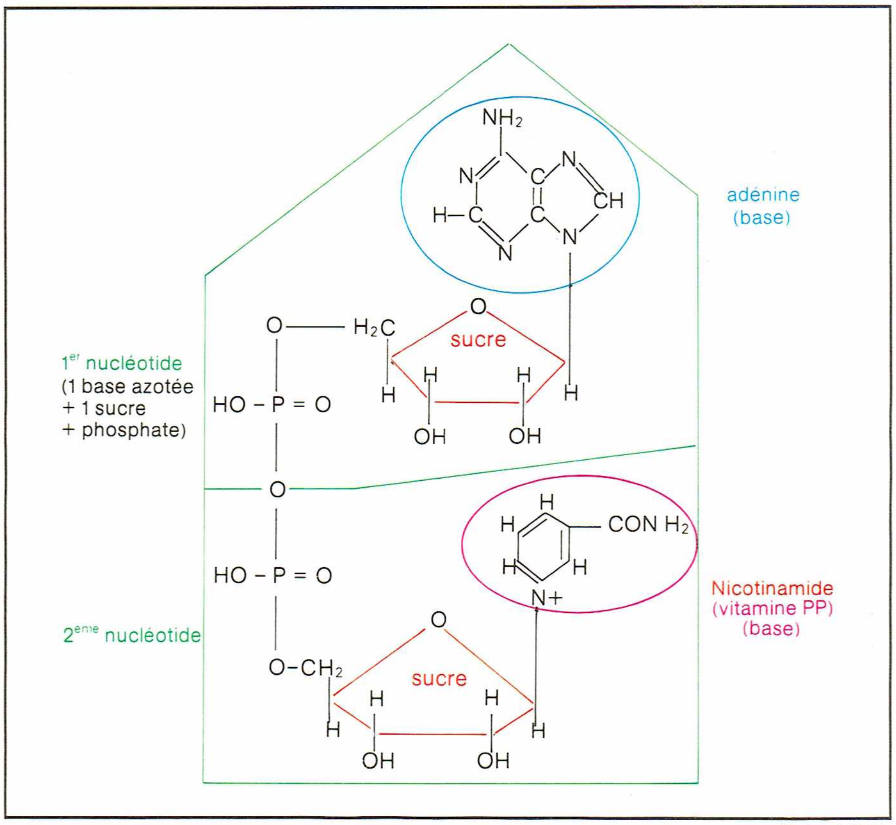

Richard Colin

▲ ***Formule développée du NAD (nicotinamide-adénine-dinucléotide), premier coenzyme intervenant dans les réactions cellulaires d'oxydo-réduction.***

▼ ***Formule développée du FAD (flavine-adénine-dinucléotide), coenzyme intervenant dans la phase suivante de la réaction.***

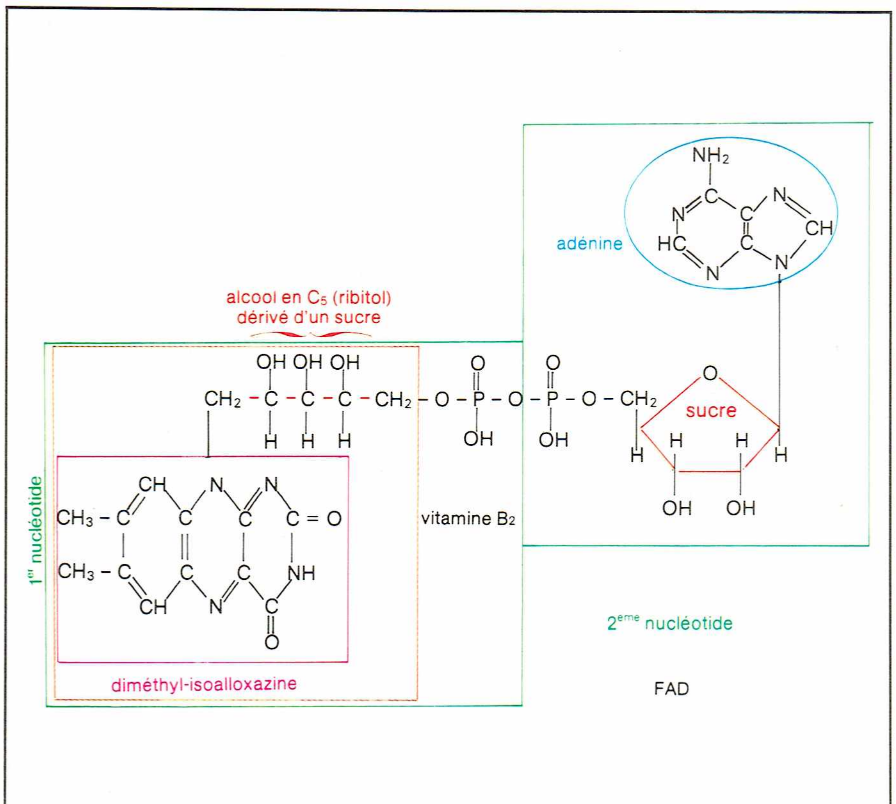

Richard Colin

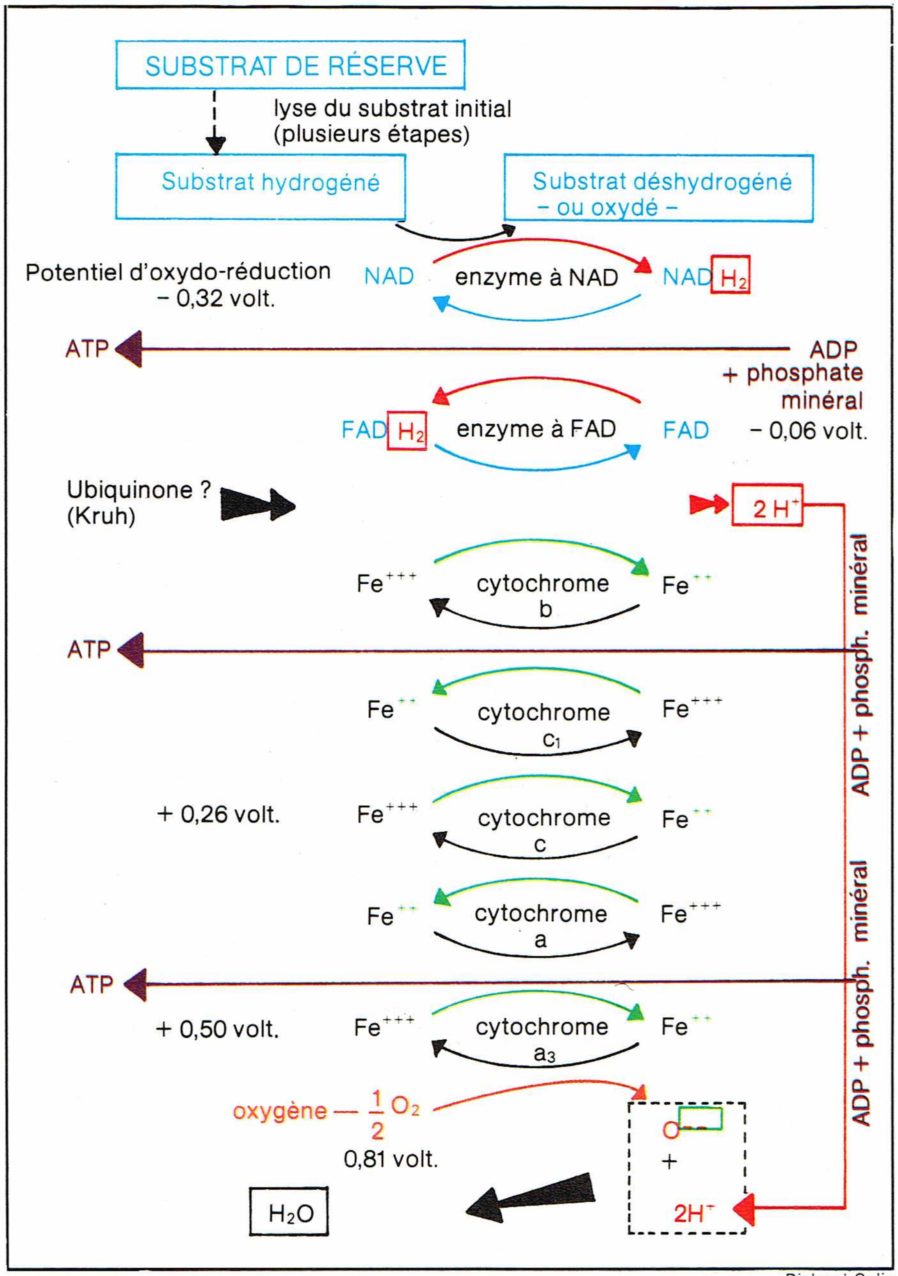

Richard Colin

▲ ***Schéma de la « chaîne respiratoire » assurée par une série d'enzymes complexes.***

Ce qui se passe théoriquement est brièvement représenté par le schéma ci-dessus.

On voit ainsi que les cytochromes sont des transporteurs d'électrons, mais non d'hydrogène.

La raison d'être de cette série d'enzymes à potentiel d'oxydo-réduction de plus en plus grand est de fragmenter, comme nous l'avons dit, la perte d'énergie que représente l'oxydation globale : substrat $+ \frac{1}{2} O_2$. En trois points de la chaîne respiratoire, *3 molécules d'ATP sont formées* grâce à l'énergie fournie par l'oxydation du substrat, c'est-à-dire après la capture de 2 H par les déshydrogénases et le transport de deux électrons le long de la chaîne des cytochromes.

Ce que sont les cytochromes et leurs coenzymes.

Les premières découvertes précises sur les cytochromes datent de 1925, année où Keilin les mit en évidence, d'abord chez les Insectes, grâce à la méthode d'analyse spectroscopique : il constata que les extraits cellulaires contenaient un mélange d'enzymes de nature voisine, mélange indispensable pour la respiration ; par ailleurs, Warburg mit en évidence l'influence de l'oxyde de carbone sur un « ferment respiratoire » (Atmungsferment) qui est très proche du cytochrome *a* de Keilin. Actuellement, on a montré que plusieurs dizaines de cytochromes pouvaient exister chez les êtres vivants.

On ne connaît pas complètement la succession des enzymes, donc des coenzymes. Le fractionnement de la chaîne et son analyse posent des problèmes d'une très grande complexité. Ainsi, on a déterminé une molécule nouvelle, le coenzyme Q, ou ubiquinone, mais on ne sait pas très bien à quel niveau elle agit ; on ne l'a donc pas placée dans le schéma (Favard). Certains cytochromes sont franchement hydrosolubles et d'autres liposolubles, l'ubiquinone par exemple. Il s'agit d'hétéroprotéines comportant à la fois du fer et du soufre, ou bien du cuivre (cytochrome *a*). Si l'on sait que le fer permet le transfert des électrons le long de la chaîne respiratoire, on ne connaît pas précisément la fonction de tous les ions métalliques.

A titre d'exemple, précisons que l'on trouve 104 acides aminés dans la chaîne du cytochrome *c* ; celui-ci comporte un coenzyme à groupement voisin de l'hème (mésoporphyrine substituée). Les coenzymes tétrapyrroliques ont une structure propre à chaque cytochrome.

Quelques remarques. Selon une conception moderne (Williams), les cytochromes, protéines enzymatiques à structure tertiaire bien précise, subissent des modifications structurelles, provoquées, de proche en proche, par la présence d'un électron sur la première de ces protéines et son passage sur la protéine suivante ; les modifications alternatives et rythmiques du premier cytochrome, qui se produisent chaque fois qu'il prend puis cède un électron, entraînent, indépendamment du transport direct de cet électron, une modification semblable de tous les autres cytochromes de la chaîne ; on a, en conséquence, un *effet coopératif* de nature identique à celui que l'on notait lors de l'oxydation d'une molécule d'hémoglobine ou, plus exactement, de l'une des quatre molécules associées.

De l'eau est formée au contact des mitochondries ; elle peut être éliminée ou utilisée pour les besoins cellulaires. De plus, des protons H^+, en se combinant aux anhydrides d'acides phosphoriques, augmenteraient le stock de pyrophosphates :

$$2\,HPO_4^{--} + 2\,H^+ \rightarrow H_2P_2O_7^{--} + H_2O.$$

Les pyrophosphates, s'ils passent en milieu alcalin en traversant la membrane cellulaire, s'hydrolysent en libérant l'énergie stockée, ce qui permet la synthèse de diverses molécules.

En somme, les oxydo-réductions dont sont responsables les protéines enzymatiques entraînent la fabrication de molécules riches en énergie à partir de substrats de réserves constitués par apport nutritif. Ces molécules, plus ou moins riches, sont, schématiquement, de deux types : d'une part, l'ATP qui intervient dans un très grand nombre de réactions dont dépendent la vie et l'activité de l'individu, et, d'autre part, les pyrophosphates stockés dans la cellule.

Les coenzymes des cytochromes sont synthétisés par la cellule. Les porphyrines des coenzymes sont fabriquées par les mitochondries, ce qui implique, comme pour la synthèse de l'hème, l'intervention de plusieurs enzymes.

● **Régulation de l'activité des enzymes d'oxydo-réduction. Effets des agents toxiques**

Le fonctionnement des enzymes d'oxydo-réduction dépend de divers facteurs qui agissent en découplant les phosphorylations oxydatives ou en bloquant l'action des coenzymes. Ainsi, l'*hormone thyroïdienne* empêche la synthèse excessive de molécules phosphorylées ; les variations importantes du métabolisme, c'est-à-dire finalement de l'excrétion de CO_2 et d'H_2O, dépendent directement du fonctionnement de la thyroïde ; par ailleurs, dans toutes les cellules, un agent chimique de nature mitochondriale, le *mitochrome,* permet une régulation du taux des phosphorylations.

D'autre part, bien des substances se révèlent toxiques pour la cellule en empêchant l'activité des cytochromes : la *naphtoquinone* bloque le transfert des électrons ; l'*uréthane* agit de la même manière au niveau du cytochrome *b ;* l'*oxyde de carbone,* les *cyanures* et l'*hydrogène sulfuré* inactivent le cytochrome a_3. La fumée du tabac contient ces trois dernières substances ; chargée de cancérigènes, comme les fumées d'échappement de nos moteurs, la fumée de tabac est donc également riche en gaz asphyxiants ; bien des insuffisances respiratoires et des affections bronchopulmonaires rebelles à tout traitement sont dues à ces gaz qui dégradent, désorganisent et mortifient la cellule vivante.

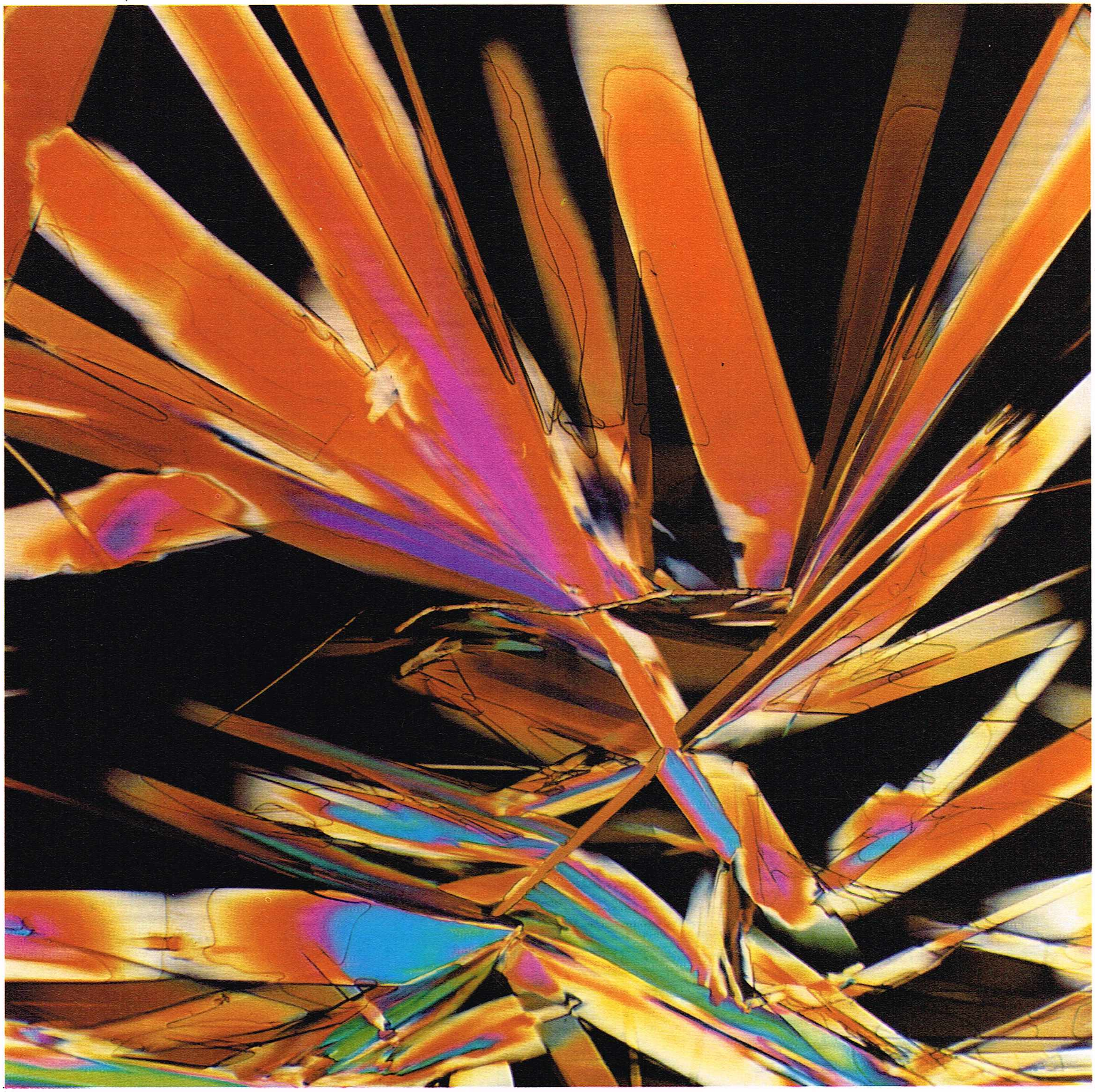

P. Castano

▲ *Cristaux* ***de vitamine*** B_1, ***ou pyrophosphate de thiamine, vus au microscope en*** *lumière polarisée.* ***Cette vitamine est nécessaire à l'utilisation de l'acide pyruvique pour la synthèse de molécules riches en énergie.***

■ *Coenzymes des transférases.*

Les *transférases* permettent le transfert de radicaux d'une molécule à une autre : ce sont les transméthylases, les transaminases, les phosphokinases, etc.

Durand souligne l'importance de deux coenzymes indispensables pour ces transférases : l'*ATP* et le *coenzyme A* ; nous y ajouterons l'*acide folique* et le *phosphate de pyridoxal*, ou *vitamine* B_6.

● **L'adénosine triphosphate, ou ATP**

Nous commençons à connaître cette substance clef, dont nous avons déjà noté l'importance dans la régulation ionique au niveau membranaire. Lâchement associé aux apoenzymes des *phosphokinases*, il phosphoryle diverses molécules sur lesquelles ces protéines sont venues s'adapter; cette phosphorylation est indispensable pour de très nombreuses réactions.

● **Le coenzyme A, ou CoA**

Lié à des protéines spécifiques pour former les *transacétylases*, ce coenzyme soufré permet le transfert de radicaux acétyle $CH_3—\overset{\overset{\displaystyle O}{\|}}{C}—$.

En particulier, il catalyse le transfert d'acétyle sur l'acide oxaloacétique, avec formation d'acide citrique ; c'est une des phases essentielles de la dégradation des glucides de réserve et, partant, une des réactions qui permettent à la cellule de trouver l'énergie nécessaire pour son activité.

— Plusieurs étapes conduisent des réserves à l'acide pyruvique. En présence de deux enzymes, une déshydrogénase à NAD et une décarboxylase à CoASH, l'acide pyruvique perd un CO_2 et cède de l'hydrogène, tandis que le coenzyme CoASH se charge d'un radical acétyle, c'est-à-dire du substrat fragmenté.

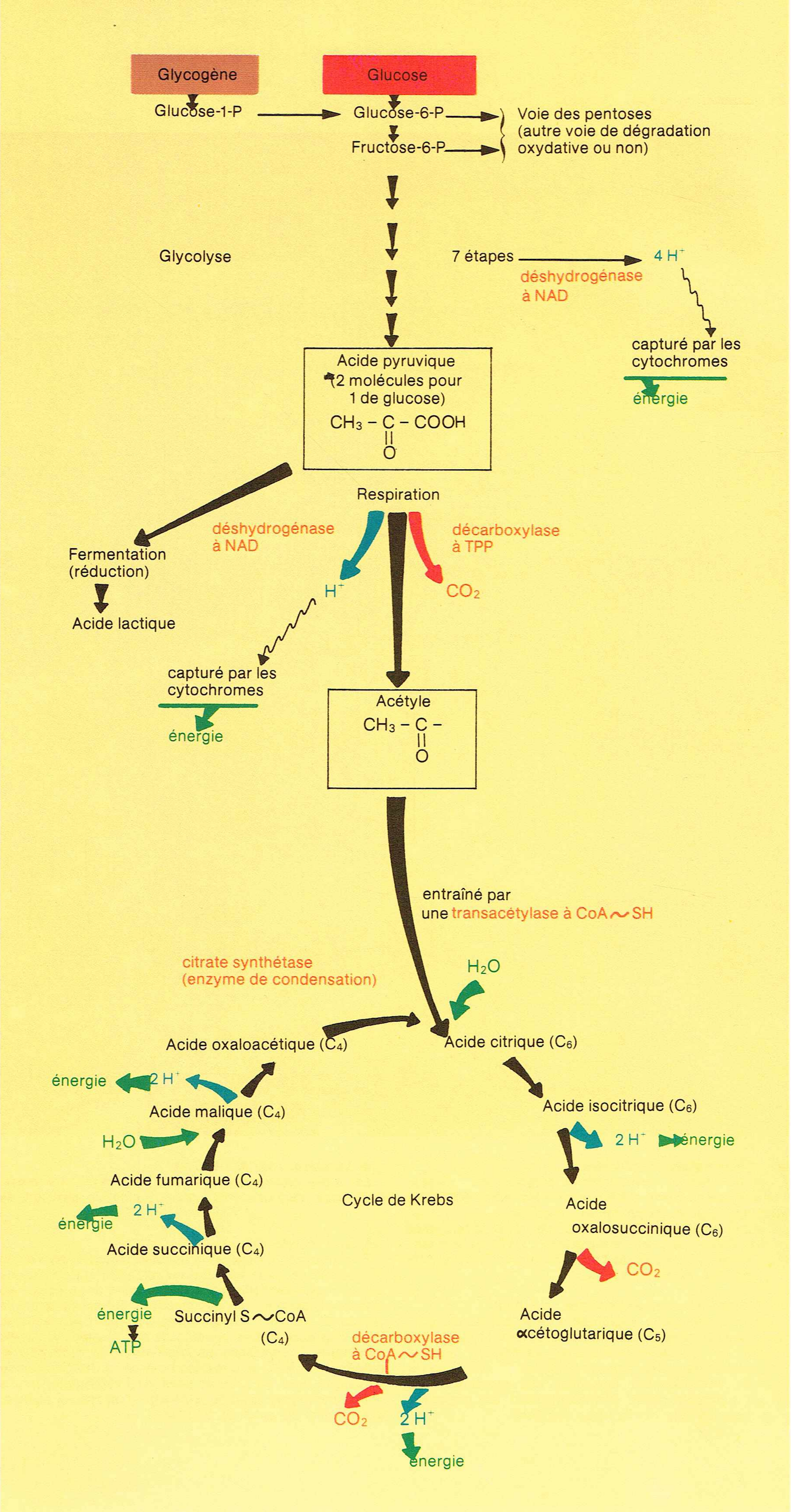

▶ ***Représentation schématique des étapes de dégradation des glucides : niveaux d'intervention de CoASH; niveaux d'intervention de la chaîne enzymatique respiratoire (cytochromes). H+ est transporté vers l'oxygène par NAD, FAD et les cytochromes de la chaîne respiratoire qui interviennent donc à plusieurs niveaux; l'énergie captée sert à la formation d'ATP, ou de GTP (guanosine triphosphorée), molécules à contenu énergétique élevé.***

Richard Colin

— En présence d'eau, le radical acétyle est transféré sur un acide en C_4, l'acide oxaloacétique : le coenzyme A est alors régénéré après formation d'un acide en C_6, l'acide citrique. Puis cela entraîne la libération d'une grande quantité d'énergie.

Ces réactions, qui constituent une décarboxylation oxydative, représentent un carrefour métabolique primordial; en effet, si cela ne se produit pas, l'oxydation ultérieure des substrats, *en présence d'oxygène*, est absolument impossible (respiration); la cellule doit alors survivre en utilisant une voie de dégradation anaérobie, ou fermentation, et cela est loin d'être toujours réalisable. Notons quelques précisions utiles sur la respiration : l'acide citrique est entraîné dans une série de réactions qui permettent une libération fractionnée de l'énergie contenue dans la molécule de substrat. Finalement, ce parcours aboutit à la formation d'acide oxaloacétique; l'ensemble constitue donc un *cycle* puisque cet acide est alors capable de se transformer à nouveau en acide citrique au contact d'un nouvel acétyl CoA; c'est le *cycle de Krebs* (1938). Notons que des déshydrogénases, puis les cytochromes, dont nous avons parlé plus haut, permettent à ce cycle de « tourner », puisqu'il implique non seulement une élimination de CO_2, mais aussi la formation de H_2O en présence d'oxygène. On voit que les transférases à CoASH et les enzymes telles que les cytochromes participent conjointement à la fragmentation du substrat. Tout cela n'est qu'un schéma.

Le coenzyme A est directement impliqué dans un autre type de réaction d'oxydation, celle des lipides. En effet, Lynen a montré en 1955 que les acides gras se combinent d'abord avec le CoA d'une enzyme spécifique avant d'être oxydés en plusieurs étapes. En bref, le CoA permet les dégradations des glucides ou des lipides, dégradations indispensables pour la synthèse de nouvelles molécules, très diverses. Ce coenzyme joue un rôle plus direct dans la synthèse des lipides : l'acétyle qu'il arrache à un métabolite des glucides peut être utilisé pour la construction d'un acide gras de réserve (voir « lipides »).

● **L'acide folique**

L'acide folique, extrait des feuilles d'épinard par exemple, est une vitamine constituée par la combinaison d'acide glutamique et d'un noyau complexe (ptéroyl).

Cette vitamine est un coenzyme des *transformylases* qui permettent le transfert de radicaux formyle —CHO ou hydroxyméthyle CH_2 — OH. Chez l'animal, sa carence entraîne une anémie et des troubles divers, en particulier de l'absorption intestinale des glucides et des lipides. Il semble que l'acide folique agit en parallèle avec une autre vitamine à fonction de coenzyme, la *vitamine B_{12}*, ou *cyanocobalamine*. La structure de cette molécule, à la fois nucléotidique et porphyrinique, suggère qu'elle peut jouer un rôle dans les oxydations au niveau des acides nucléiques de cellules qui se divisent activement : moelle osseuse, revêtement intestinal, etc.

● **Le phosphate de pyridoxal : dérivé de la vitamine B_6**

C'est un coenzyme des *transaminases*. L'enzyme, après adaptation sur une molécule aminée particulière, permet le transfert de NH_2 sur un acide cétonique. Cette vitamine est essentielle pour le métabolisme des acides aminés, aussi bien pour leur *synthèse à partir d'autres acides aminés* donneurs de NH_2 que pour leur *catabolisme* (dégradation); elle permet aussi la synthèse de molécules diverses à partir de matériaux accepteurs de NH_2 transféré.

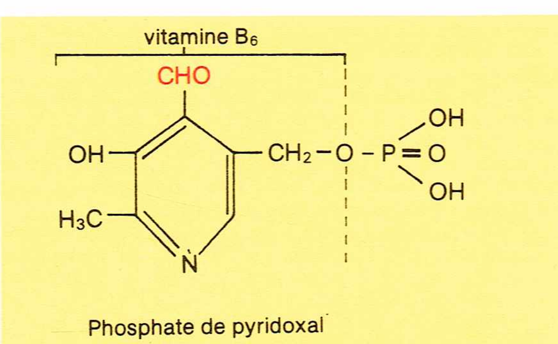

Richard Colin

▲ *Structure du* **phosphate de pyridoxal**; *en rouge, le radical permettant la capture d'un NH_2.*

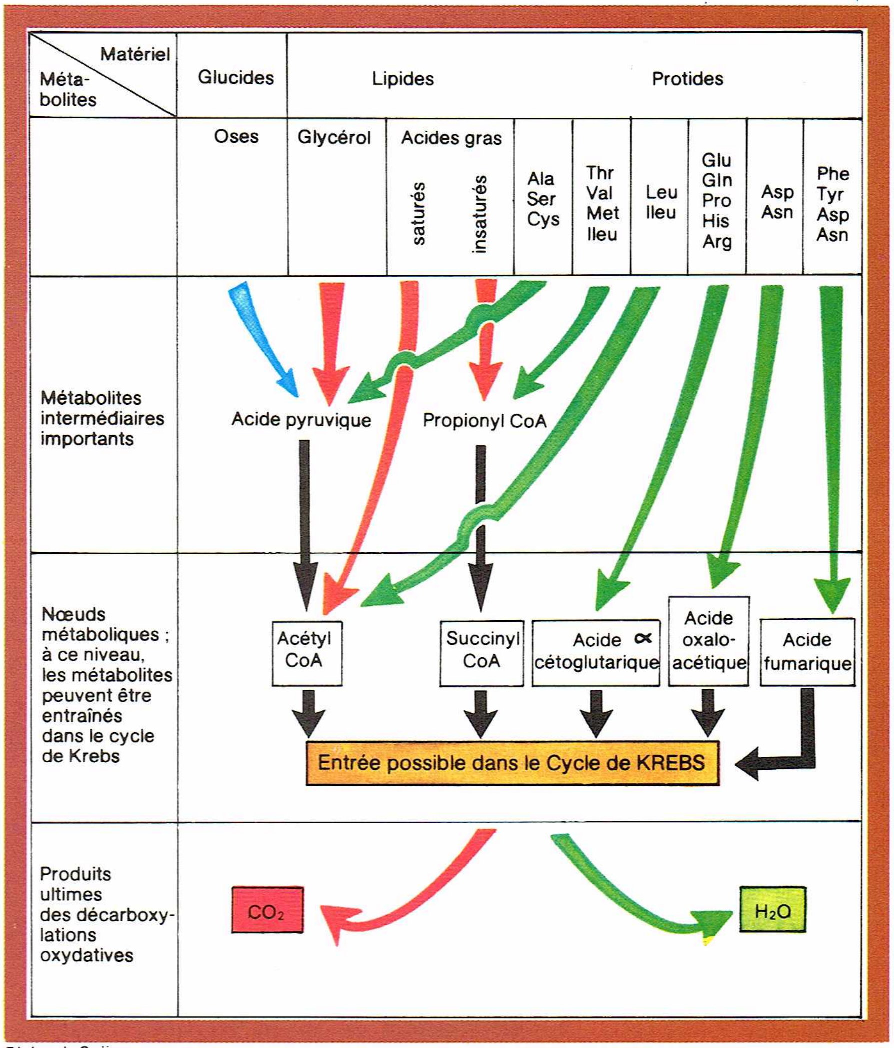

Richard Colin

▲ *Modes de* **dégradation** *de divers substrats (d'après Kruh).*

La carence en vitamine B_6 entraine des troubles assez peu fréquents et qui ne se produisent que dans les régimes trop riches en protéines. Ces dernières, plus exactement, les acides aminés, se révèlent antagonistes du coenzyme. Nous avons là un exemple de blocage enzymatique par excès de substrat, notion sur laquelle nous reviendrons. Les seuls cas de carence véritable ont été observés, il y a quelques années, chez des nourrissons américains ayant absorbé de manière régulière des aliments qui avaient été soumis à des températures trop élevées (« baby food »).

En fait, il n'y a pas de cas notables de carence en B_6 : la nourriture de l'homme, même si elle est trop souvent réduite, contient assez de cette vitamine : les légumineuses et les céréales sont des sources suffisantes. Cependant, on estime que, durant la grossesse, l'augmentation considérable des besoins énergétiques peut entraîner une avitaminose B_6; celle-ci se traduirait par des nausées.

■ *Remarques sur les divers types de coenzymes.*

Avant d'en terminer avec les notions essentielles qui concernent les coenzymes, remarquons que nombre d'entre eux sont des vitamines ou des composés comportant dans leur molécule un facteur vitaminique. Il s'agit de vitamines *hydrosolubles*, dont beaucoup appartiennent au groupe B. Nous avons vu, rappelons-le, les fonctions des vitamines suivantes : la nicotinamide, ou PP, la riboflavine, ou B_2, la thiamine, ou B_1, l'acide folique, la vitamine B_{12}, le pyridoxal, ou B_6. Les autres coenzymes peuvent être des *porphyrines* liées à des atomes métalliques — coenzymes des cytochromes — ou des *molécules complexes* comme l'ATP ou le coenzyme A. Il existe aussi divers coenzymes *purement métalliques :* nous n'avons pas envisagé ces cas, qui concernent des réactions enzymatiques en fait très diverses et beaucoup moins étudiées.

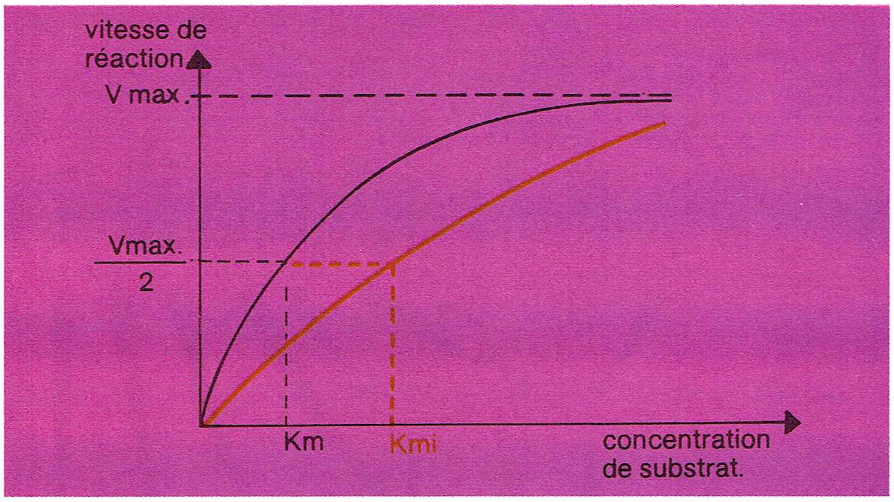

Richard Colin

▲ *Action d'un* **inhibiteur compétitif;** *en noir, la courbe de réaction sans inhibiteur. On note qu'en présence d'inhibiteur, la réaction est faible et que la constante de Michaelis est considérablement plus élevée* (**Kmi** *au lieu de* **Km**).

Phénomènes d'inhibition et d'activation des enzymes

Les substances qui inhibent ou favorisent l'action d'une enzyme sont des *effecteurs*. Leur mode d'action est très variable : ils peuvent, en effet, agir sur l'apo- ou le coenzyme, sur l'ensemble enzyme-substrat ou encore sur le substrat seul (Kruh).

De très nombreuses réactions dépendent d'**inhibiteurs,** qui sont dits **compétitifs** parce que leur structure moléculaire est proche de celle du substrat. Leur affinité pour l'enzyme est très nettement supérieure à celle du substrat normal, et, d'autre part, ils ne peuvent pas participer à la chaîne des réactions biologiques : on constate alors un *blocage* métabolique au niveau de ces inhibiteurs, le substrat normal restant inemployé. On a : $E + S + I \rightarrow (EI) + (ES)$; (EI) étant un complexe métaboliquement inactif.

Plus le substrat est abondant et moins l'effet de l'inhibiteur se fait sentir : l'inhibition est une réaction réversible.

On connaît un très grand nombre d'inhibiteurs compétitifs, chimiquement très voisins des substrats normaux. Ainsi, une préparation d'acide succinique en présence de succinodéshydrogénase doit donner de l'acide fumarique; il s'agit là d'une étape du cycle de Krebs, grand pourvoyeur d'énergie pour la cellule; une faible quantité d'*acide malonique* ajoutée à la préparation freine considérablement l'action de l'enzyme; introduit dans l'organisme, l'acide malonique entraîne un ralentissement métabolique et un empoisonnement très préjudiciable.

Un mécanisme du même ordre permet de provoquer une paralysie plus ou moins intense quand on introduit dans l'organisme des *amines quaternaires*

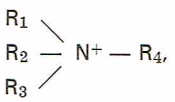

qui entrent en compétition avec l'acétylcholine, l'un des médiateurs chimiques essentiels du système nerveux des animaux; en effet, sa formule est la suivante :

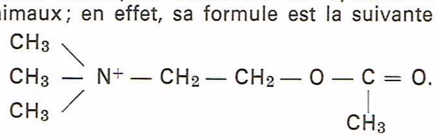

▼ **Inhibition** *de la formation d'acide fumarique par l'***acide malonique.**

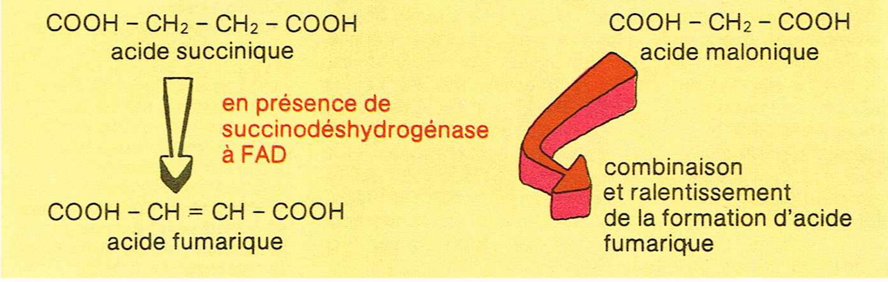

Richard Colin

L'acétylcholinestérase, combinée aux amines anormales, ne peut plus agir sur l'acétylcholine, son substrat normal. Chez des animaux qui comportent des médiateurs d'une autre nature, il est bien évident que les amines quaternaires ne sont pas paralysantes. En électrophysiologie, la technique de compétition permet en fait de déterminer la nature des médiateurs particuliers.

Un troisième exemple, important dans la pratique, correspond aux analogues de divers acides aminés ou de bases puriques ou pyrimidiques, substances biologiques essentielles pour l'élaboration des chromosomes, etc. Il s'agit des *antimétabolites,* qui jouent un grand rôle comme agents anticancéreux. Introduits dans le milieu intérieur, ces inhibiteurs entrent en compétition avec des molécules tout à fait indispensables pour la vie et la multiplication de la cellule. Il existe une panoplie de substances antimétabolites qui peuvent, très généralement, ralentir les effets destructeurs des tumeurs.

Enfin, l'action antibactérienne des *sulfamides,* découverte par Tréfouel, Bovet et Nitti (1935), s'explique, comme on le sait maintenant, par l'effet inhibiteur qu'ils exercent sur l'enzyme responsable de l'intégration d'acide para-aminobenzoïque dans la molécule d'acide folique : nombre de Bactéries sont incapables de se multiplier sans acide folique, substance vitaminique dont nous avons déjà évoqué le rôle.

Beaucoup d'inhibiteurs ne sont pas compétitifs

Ce ne sont pas des analogues de substrats normaux.

L'inhibiteur peut se combiner à l'enzyme sans empêcher le site actif de se lier au substrat normal. On obtient alors un complexe du type (SEI). L'enzyme a toujours la même affinité pour le substrat, mais la vitesse de réaction est ralentie. Ainsi, l'ion Pb^{++} inhibe l'uréase. Le complexe produit est biologiquement inactif, comme dans les cas de compétition.

L'inhibiteur peut se combiner au site actif et supprimer toute activité enzymatique. Les composés arsenicaux se lient aux enzymes à cystéine dans le site. CN— et CO se combinent à Fe et Cu des enzymes métalliques, de même que les fluorures se lient aux enzymes à Mg. Enfin, le cas de l'EDTA, ou éthylène-diamine-tétra-acétate, est très important car il bloque des enzymes à métaux divers.

L'inhibiteur peut modifier la structure spatiale de l'enzyme et empêcher sa coaptation avec le substrat.

Généralement, ces inhibiteurs agissent de façon irréversible, ce qui explique l'extrême gravité des intoxications qu'ils peuvent entraîner.

Inhibition par excès de produit

Paradoxalement, le produit normal de certaines réactions peut inhiber la poursuite de celles-ci à partir du substrat encore intact. Il y a donc autorégulation des réactions. Ainsi, le *glucose,* produit de dégradation du *glycogène* animal, se comporte en inhibiteur vis-à-vis de la réaction de déphosphorylation d'un *substrat intermédiaire,* le *glucose-6-phosphate*. Donc, si la dégradation du glycogène est excessive, et si, en conséquence, du glucose s'accumule dans la cellule, celui-ci bloque la transformation de glucose-6-phosphate, et cela même s'il y a une quantité notable d'enzyme, la *glucose-6-phosphatase,* dans le protoplasme; le résultat est identique quand on introduit un excès de glucose dans le milieu.

Enfin, l'**excès d'un substrat** entraîne un ralentissement des réactions qui le concernent. Cela peut s'expliquer en imaginant que la coaptation des molécules d'enzyme et de substrat s'effectue alors de façon anormale.

Les agents **activateurs** sont moins connus que les inhibiteurs.

— *Rôle protecteur*. Divers *thiols* jouent un rôle protecteur vis-à-vis d'enzymes comportant de la cystéine dans leur site actif, et qui sont donc sensibles aux cyanures et à l'oxyde de carbone. La cystéine ou le glutathion peuvent être ainsi des contrepoisons plus ou moins efficaces dans les cas d'asphyxie.

— *Rôle activateur direct*. L'ion Mg^{++} est, classiquement, un activateur des réactions de transfert du phosphore. Aussi cet ion est-il nécessaire lors de la contraction musculaire qui implique la mise en jeu de l'ATP; il en est de même durant la division cellulaire, pendant que se construit le fuseau achromatique indispensable à la

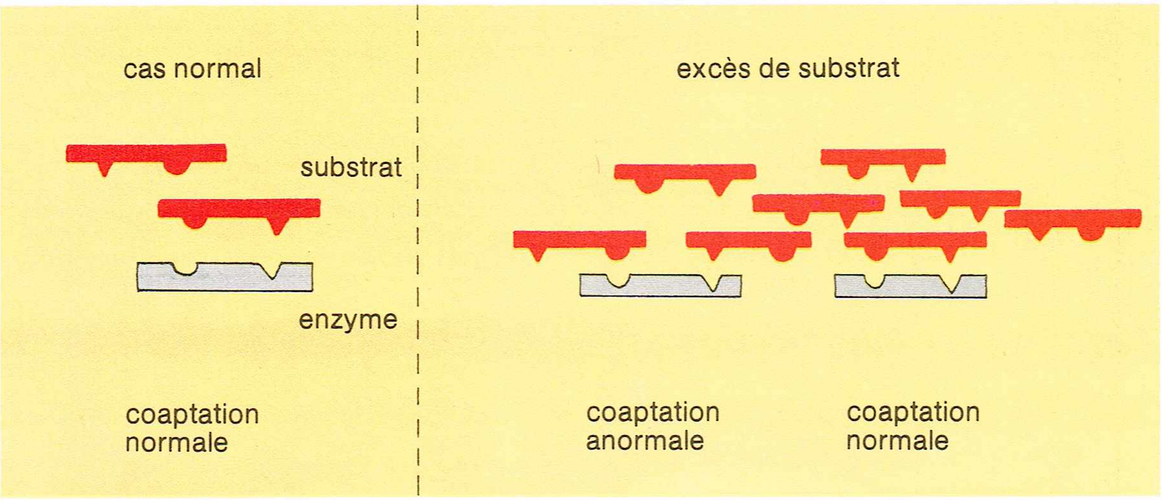

Richard Colin

◀ *Principe de l'*inhibition *par* excès de substrat.

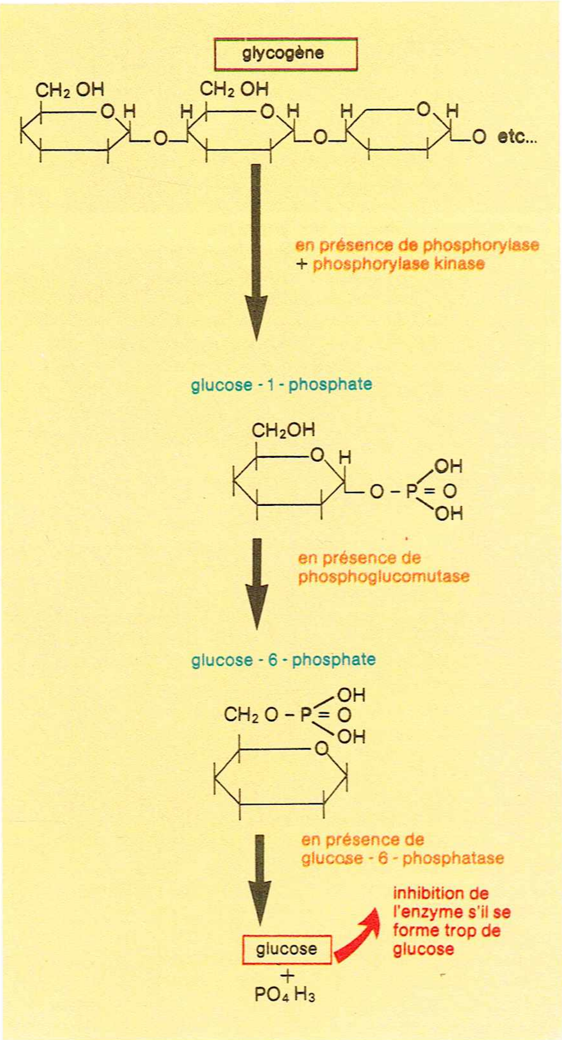

Richard Colin

◀ **Inhibition** *par* **excès de produit :** *cas de la dégradation du glycogène.*

migration des chromosomes. Il existe d'autres exemples, mais, dans beaucoup de cas, on ne sait pas toujours si les ions sont véritablement les activateurs ou s'ils font partie intégrante du complexe enzymatique; certains ions sont en effet des coenzymes, ainsi que nous l'avons déjà signalé.

Étude particulière des **effecteurs allostériques.**

Selon Kruh, les effecteurs allostériques sont les agents régulateurs les plus importants de l'organisme. La notion d'allostérie et de transition allostérique est, semble-t-il, très récente, bien que divers travaux datant de 1940 (Dische-Novick et Szilard) montrent que l'on s'intéressait déjà au problème à cette époque.

Voici un fait noté parmi d'autres; il a été observé chez une Bactérie extrêmement commune, le colibacille *Escherichia coli* (matériel très facile à cultiver en laboratoire : il a servi à un nombre d'expériences réellement incalculable). La L-isoleucine est normalement synthétisée à partir d'un autre acide aminé, la L-thréonine, et cette synthèse implique un nombre élevé d'*étapes intermédiaires;* si l'on ajoute de la L-isoleucine au milieu de culture, on constate que la Bactérie cesse immédiatement de synthétiser de la L-isoleucine. On pourrait donc penser qu'il s'agit là d'une réaction d'inhibition par excès de produit telle qu'elle a été décrite précédemment; il n'en est rien. *Ici, le produit final d'une série de réactions inhibe une enzyme, laquelle catalyse une des réactions initiales. La structure du produit est alors, en général, très différente de celle du substrat initial* (→ allostérie). Cette observation et son interprétation constituent un pas important dans l'étude des mécanismes enzymatiques (Changeux, 1964; Monod, Changeux et Wyman, 1965).

A (L-thréonine) → B → C → D → E → L-isoleucine

(thréonine désaminase)

inhibition allostérique

La L-isoleucine est une *molécule-signal,* de petite taille par rapport aux enzymes, et capable de s'ajuster sur des sites récepteurs d'une enzyme particulière, en l'occurrence, la thréonine désaminase. Un tel ajustement est réversible, ce qui permet une régulation extrêmement précise des mécanismes biochimiques, régulation effectuée au niveau de la première réaction de la chaîne.

Avec Monod, Wyman et Changeux, on est amené à considérer que la structure quaternaire de certaines protéines enzymatiques dépend de l'adaptation d'*activateurs* et d'*inhibiteurs allostériques* sur des sites spécifiques des enzymes : un activateur donnera à telle enzyme une structure qui lui permettra de recevoir secondairement un substrat; par contre, un inhibiteur donnera à la même enzyme une structure qui l'empêchera d'accepter le substrat. Les enzymes seraient constituées de *plusieurs protomères* possédant chacun les trois sites dont il vient d'être question. La combinaison d'un *ligand* (effecteur) avec un protomère entraîne la déformation du ou des

▼ *Le colibacille* **Escherichia coli** *est une Bactérie communément cultivée et utilisée en laboratoire.*

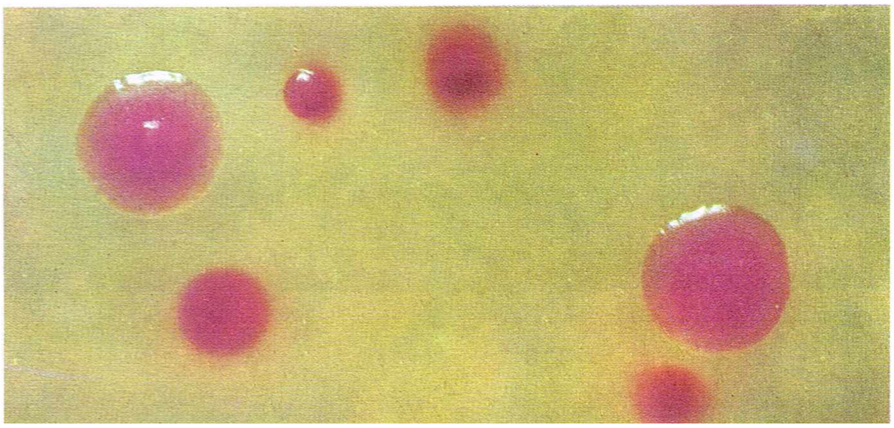

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

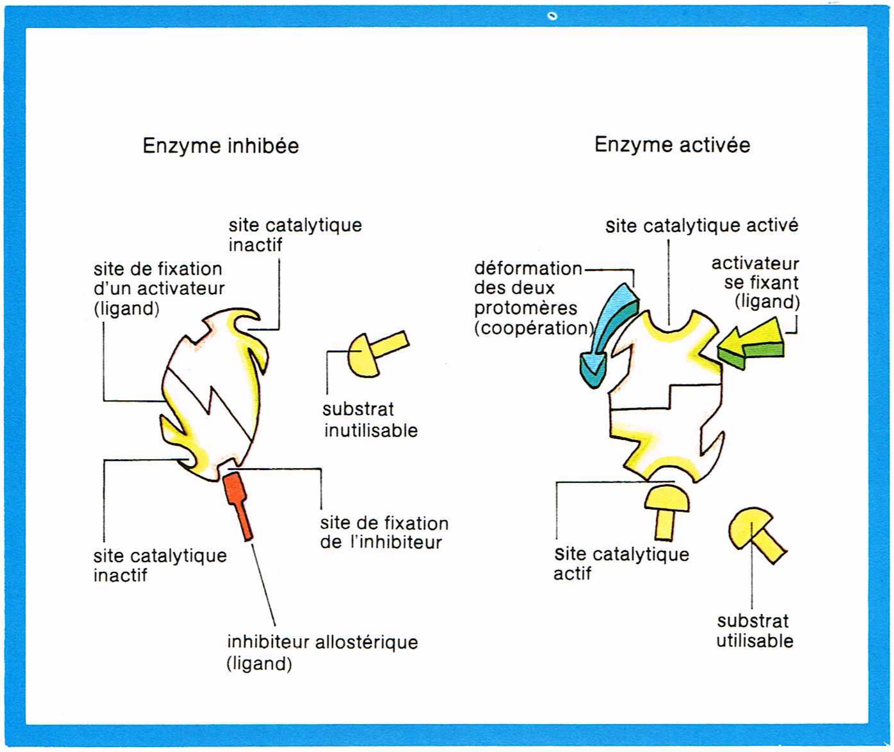

Richard Colin

▲ ***Interprétation du phénomène* d'allostérie ; *l'activateur apparaît dans la cellule quand il ne se forme pas assez de produit (ex. : isoleucine).***

▼ ***Coupe de pancréas de lapin, fixée au tétroxyde d'osmium (OsO_4) et colorée au* bleu de méthylène. *Les grains de zymogène (proenzyme) sont bien visibles.***

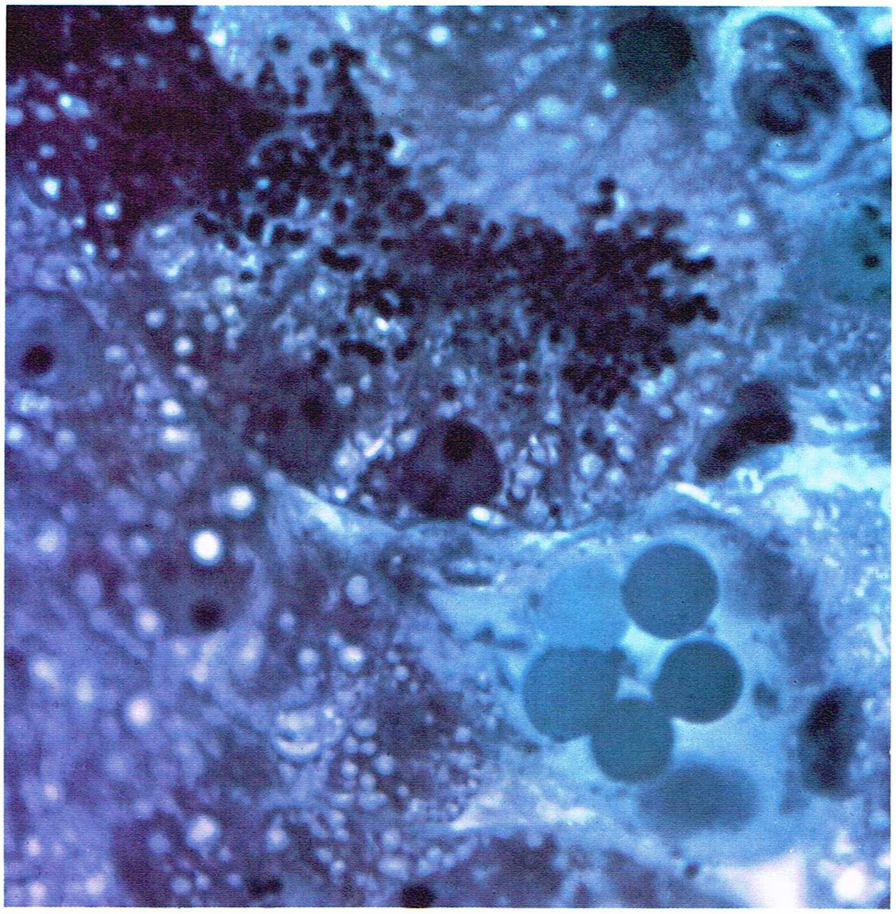

P. Castano

protomères adjacents qui sont symétriques du premier ; ces autres protomères peuvent alors recevoir le substrat et catalyser sa transformation. Il y a donc là un effet *coopératif* (nous en avons déjà parlé au sujet de l'hémoglobine, qui peut être considérée comme une molécule tétramère enzymatique). Dans le cas de la thréonine désaminase, si la quantité de substrat est faible, la réaction « ne marche pas » ; il existe donc un seuil d'efficacité allostérique, et cela ne se produit que dans le cas des enzymes à molécules possédant une structure quaternaire. On peut estimer qu'il s'agit là d'une évolution de l'enzyme, laquelle se trouve ainsi mieux adaptée à sa fonction puisqu'elle ne *transforme que l'excès de substrat.* En d'autres termes, dans la mesure où elle n'agit qu'au-dessus d'un seuil, elle ne « vide » pas la cellule d'un substrat qui, même peu abondant, peut être éventuellement utilisé pour une autre voie métabolique.

La notion d'enzyme vient de la constatation que de telles protéines sont actives à de très faibles concentrations et que les réactions produites sont d'envergure considérable. Pourtant, cela ne doit pas masquer une autre réalité, à savoir que des protéines abondantes dans un organisme peuvent avoir, elles aussi, une activité de type enzymatique. Ainsi l'hémoglobine, en transportant l'oxygène, va catalyser la combinaison $2\ H^+ + O^{--}$, sans subir aucune modification chimique. De même, et c'est peut-être un exemple plus frappant, le complexe protéique contractile des muscles, l'*actomyosine,* mis en présence d'ATP et de Ca^{++}, catalyse la déphosphorylation de l'ATP, ce qui signifie qu'elle possède un site stéréospécifique ; après la réaction, l'actomyosine n'est pas modifiée. Nous avons là deux *protéines de structure* qui se comportent comme des enzymes.

Il semble qu'il faille méditer les mots de M. Durand, qui estime qu' « *a priori,* il ne semble pas y avoir de raison pour que l'explication du *fonctionnement* par la *structure* ne puisse pas être étendue à toutes les protéines ». L'enzymologie est une science jeune, pleine de promesses ; bien des problèmes, en particulier ceux qui touchent à la santé, devraient trouver leur solution grâce à elle.

Les acides nucléiques

C'est dans la seconde moitié du XIXe siècle que l'on découvrit les chromosomes, organites très colorables qui sont constitués au sein du noyau cellulaire. On en connut la composition chimique vers 1870 : le biologiste allemand Miescher, tout en soulignant leur caractère *acide,* montra que du *phosphore* s'y trouve en abondance. Ses recherches préfigurent celles des biochimistes de notre temps. Son matériel était assez original : il utilisait le liquide du pus de malades hospitalisés, liquide extrêmement riche en globules blancs. Miescher avait là une source de *cellules déjà en suspension* et pouvant être récupérées en grandes quantités par le lavage de pansements. En effectuant une digestion enzymatique du cytoplasme, il était alors possible d'obtenir une suspension de noyaux ; Miescher purifiait cette suspension par agitation, au froid, dans un mélange d'alcool et d'éther, ce qui permettait l'élimination des particules agglutinées sur les noyaux ; à chaque étape de la manipulation, il vérifiait au microscope l'état du matériel qu'il traitait, ce qui, selon Durand, devient à notre époque une « précaution essentielle et souvent négligée ».

L'analyse des noyaux purifiés montrait qu'ils contenaient, de manière régulière, 9,5 % de phosphore ; cela impliquait l'existence d'une nouvelle famille de substances phosphorées et azotées, qui parurent à Miescher aussi importantes que les protéines. Il se rendait compte que c'était là que devait se trouver le nœud du problème de la croissance cellulaire, et il souhaitait que des chimistes professionnels vinssent aider le biologiste pour déterminer « les rapports entre les matériaux nucléaires, les protéines et leurs produits métaboliques immédiats ». Ces espoirs passaient pour chimériques à la fin du siècle...

Il existe, en fait, deux types principaux de substances nucléiques ; les unes, très abondantes dans les *noyaux,* correspondent aux *acides désoxyribonucléiques (ADN) ;*

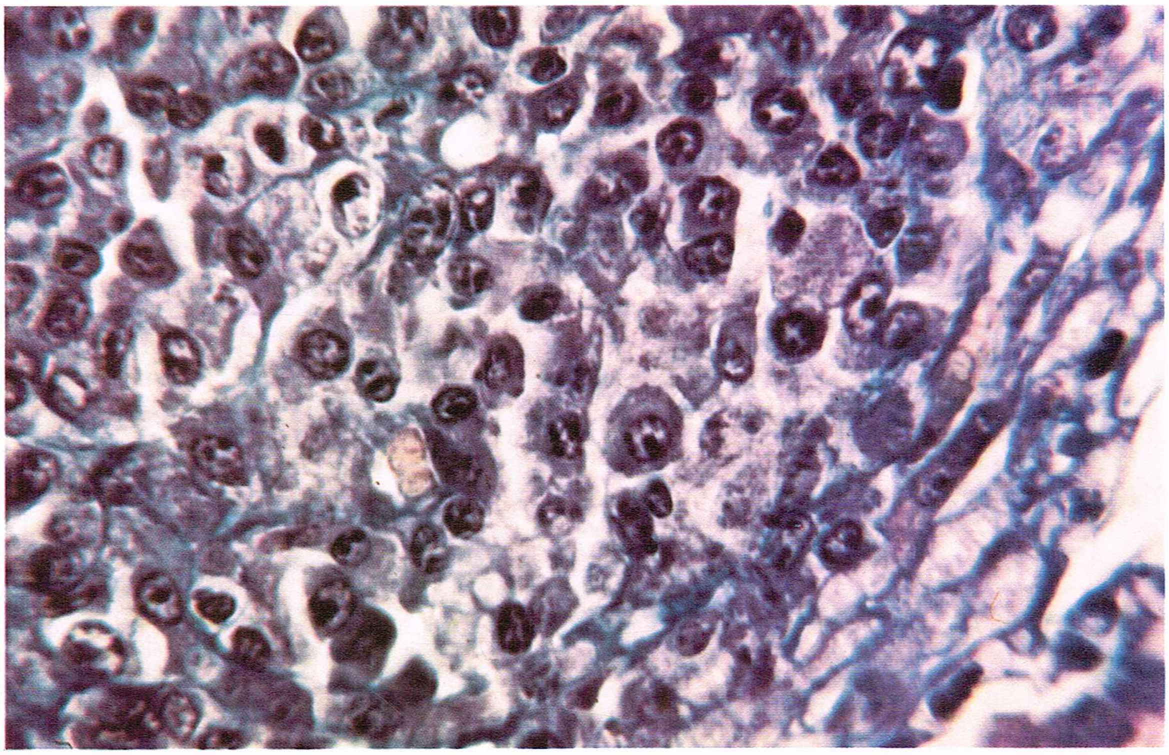

J. Bouchard

◀ *Coupe d'une tumeur pulmonaire de souris ; mise en évidence de la basophilie cytoplasmique par une coloration topographique.*

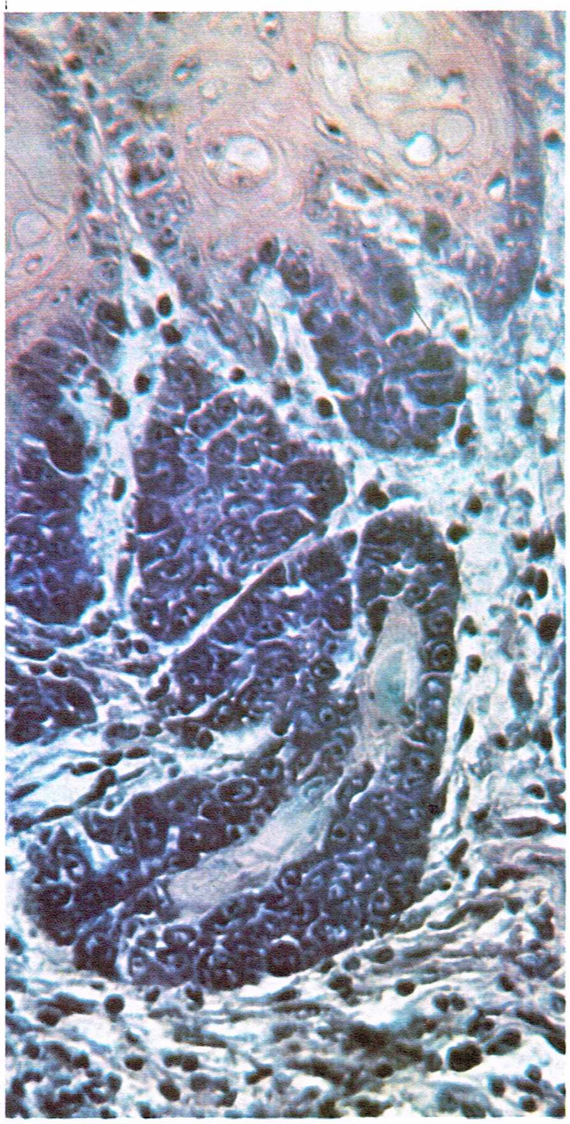

J. Bouchard

◀ *Coupe d'une tumeur épidermique de souris. L'utilisation du* bleu de toluidine *(+ éosine) permet de mettre en évidence la* basophilie du cytoplasme *des cellules tumorales en croissance désordonnée ; elles sont particulièrement riches en* ARN.

les autres se trouvent *dans le cytoplasme* et sont les *acides ribonucléiques (ARN)*, dont la structure rappelle celle des ADN. Bien sûr, les ARN ne pouvaient pas être étudiés par le procédé de Miescher.

Les acides nucléiques sont électivement colorables dans les *cellules fixées,* c'est-à-dire tuées par une substance ou un mélange de substances qui, en quelque sorte, gèlent les phénomènes métaboliques et empêchent la dégradation des structures visibles au microscope. Ainsi, la *basophilie nucléaire* due à l'ADN est observable en employant la technique de Feulgen : on effectue d'abord une hydrolyse partielle des cellules à étudier, puis on les traite par le réactif de Schiff, qui forme avec l'ADN un complexe rouge violacé. La *basophilie cytoplasmique* due à l'ARN est parfaitement visible avec des colorants bleus tels que le *bleu de toluidine ;* cette réaction n'est pas absolument spécifique des ARN : elle est également manifeste au niveau de l'ADN du noyau. Les techniques de coloration des acides nucléiques seront signalées ultérieurement, mais il convient de noter ici que l'histochimie permet de distinguer des molécules somme toute assez peu différentes, puisque, dans le cas des acides nucléiques, c'est de la nature du glucide qu'ils contiennent que dépend la colorabilité.

Nature chimique élémentaire des acides nucléiques

On trouve dans la molécule de ces acides des *bases azotées,* substances dérivées de la *purine* ou de la *pyrimidine ;* ces bases sont combinées à un *glucide* pour former des *nucléosides.* Chaque nucléoside est *lié à de l'acide phosphorique ;* l'ensemble constitue un *nucléotide,* nettement acide.

Le **sucre** est soit le *ribose* (dans l'ARN), soit le *désoxyribose* (dans l'ADN), glucide en C_5, à pont oxydrique en 1-4. Dans le second cas, la fonction OH en C_2 est remplacée par un atome d'hydrogène.

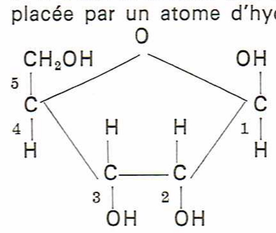

D + ribose

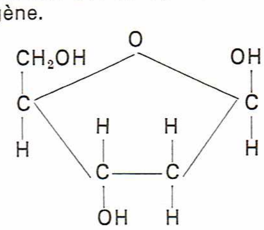

désoxyribose
(2 Désoxy − D ribose)

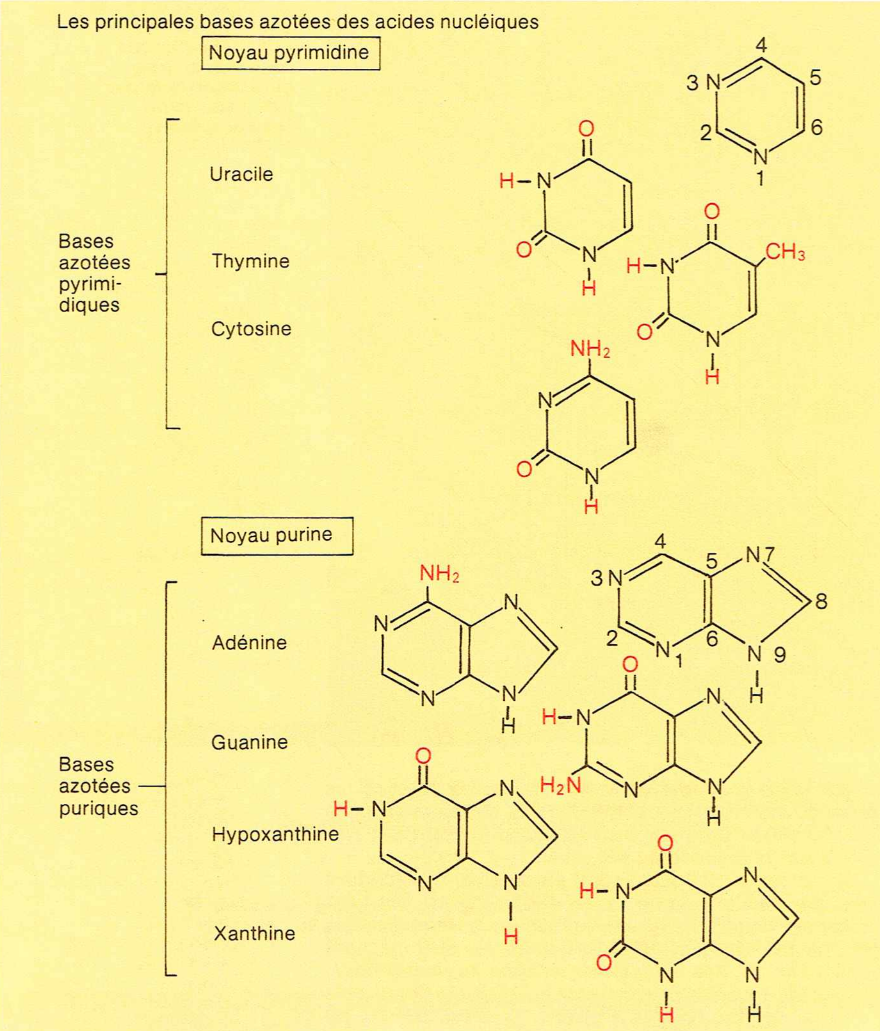

Richard Colin

▲ *Les* **bases azotées** *constitutives des* **acides nucléiques** *sont combinées à un* **glucide** *pour former des* **nucléosides.**

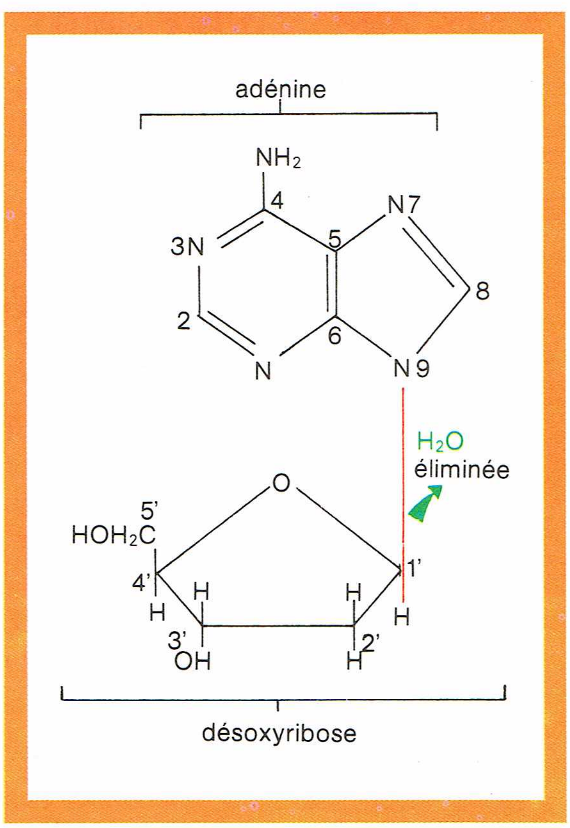

Richard Colin

▶ *Représentation du* **nucléoside** *de l'adénine :* **l'adénosine** *; en rouge, la liaison* **N-glycosidique.**

Les **bases pyrimidiques** dérivent de la pyrimidine, noyau hétérocyclique hexagonal à deux azotes en positions 1 et 3. Il s'agit d'oxypyrimidines : l'*uracile* (U), la *thymine* (T) et la *cytosine* (C).

Les **bases puriques** sont dérivées de la purine, substance résultant de l'accolement d'un noyau pyrimidine et d'un noyau imidazole, hétérocycle pentagonal à deux azotes en positions 7 et 9. Ce sont l'*adénine* (A), la *guanine* (G). L'*hypoxanthine* (H) et la *xanthine* (X) sont des bases puriques servant d'intermédiaires et n'entrant pas dans la composition des acides nucléiques.

La synthèse des bases à partir d'éléments simples met en jeu des molécules riches en énergie; compte tenu des possibilités de délocalisation électronique, l'énergie d'une molécule de base est d'environ 54 kcal M^{-1}, ce qui est très important et qui compense la dépense nécessaire à la synthèse (Pullman). Ces molécules à énergie de résonance élevée étaient conformées, il faut bien le souligner, pour jouer un rôle biologique important car elles sont très *stables :* en effet, lorsqu'elles sont soumises à des radiations ionisantes ou ultraviolettes, elles ne subissent pas de modifications; or, une telle irradiation UV se produit sur la terre, l'atmosphère n'étant pas assez épaisse pour l'éliminer. Cependant, cette épaisseur s'est accrue très progressivement, au fur et à mesure du développement des végétaux verts, producteurs d'oxygène. On peut donc estimer que, durant l'évolution, de telles molécules ont été rapidement sélectionnées en fonction de leur stabilité. D'ailleurs, leur rôle est tellement fondamental que cette stabilité est une nécessité absolue.

En lumière ultraviolette, chacune des bases absorbe préférentiellement certaines longueurs d'onde et donne, par conséquent, un spectre caractéristique; on utilise cette propriété pour des micro-analyses.

La liaison aboutissant à la formation d'un **nucléoside** s'effectue (avec élimination d'eau) entre un radical alcool secondaire du glucide et un groupement NH de la base azotée; il s'agit d'une liaison N-glycosidique. Par exemple, l'adénosine est un de ces nucléosides, de même que la désoxyadénosine; le désoxynucléoside de la thymine est la thymidine, substance très utilisée en biologie expérimentale pour estimer les taux de synthèse nucléique (ADN).

Les nucléosides se trouvent à l'état libre dans la cellule et représentent une partie de la fraction des substances acido-solubles. On peut les extraire en traitant par un acide un culot de centrifugation, effectué à partir de n'importe quel type cellulaire. Le rôle de ces nucléosides est de servir de *précurseurs* pour les synthèses nucléiques : avec d'autres petites molécules, toutes acido-solubles, ils constituent un stock, un *pool* de précurseurs, véritables pièces détachées de la machine cellulaire. Ce stock montre que la cellule synthétise continuellement ces pièces détachées, « en prévision » des besoins qui se font sentir de manière périodique : en effet, les synthèses nucléiques se produisent durant certaines phases de la vie de la cellule, de façon nettement discontinue.

Un **nucléotide** est formé par estérification entre l'acide phosphorique et la fonction alcool primaire d'un nucléoside. En principe, il peut y avoir estérification au niveau de la fonction alcool secondaire en C_3, mais, dans les faits, c'est la liaison en C_5 qui se produit. On devrait dire en 5' car la nomenclature conventionnelle est 1, 2, 3... pour la base azotée, mais 1', 2', 3'... pour le sucre du nucléoside. Les nucléotides sont des acides forts. Ce sont, par exemple, les acides adénylique, guanylique, thymidylique, etc. Les molécules peuvent être mono-, di- ou triphosphoriques. On utilise des sigles pour les désigner.

Citons, dans le cas de l'adénine : l'adénosine monophosphate (AMP), l'adénosine diphosphate (ADP), et l'adénosine triphosphate (ATP).

Rappelons que de nombreux nucléotides (particulièrement l'ATP) ont un rôle direct à jouer dans le métabolisme. De plus, ils sont à la base de molécules plus complexes, à rôles variés; par exemple, l'uridine-diphospho-glucose (UDPG) détermine le métabolisme du glycogène; quant aux fonctions de NAD ou de FAD, elles ont été évoquées lors de l'étude des enzymes et des coenzymes. Autrement dit, le pool de précurseurs des acides nucléiques fournit des pièces pour divers mécanismes biochimiques, dont la glycolyse et la

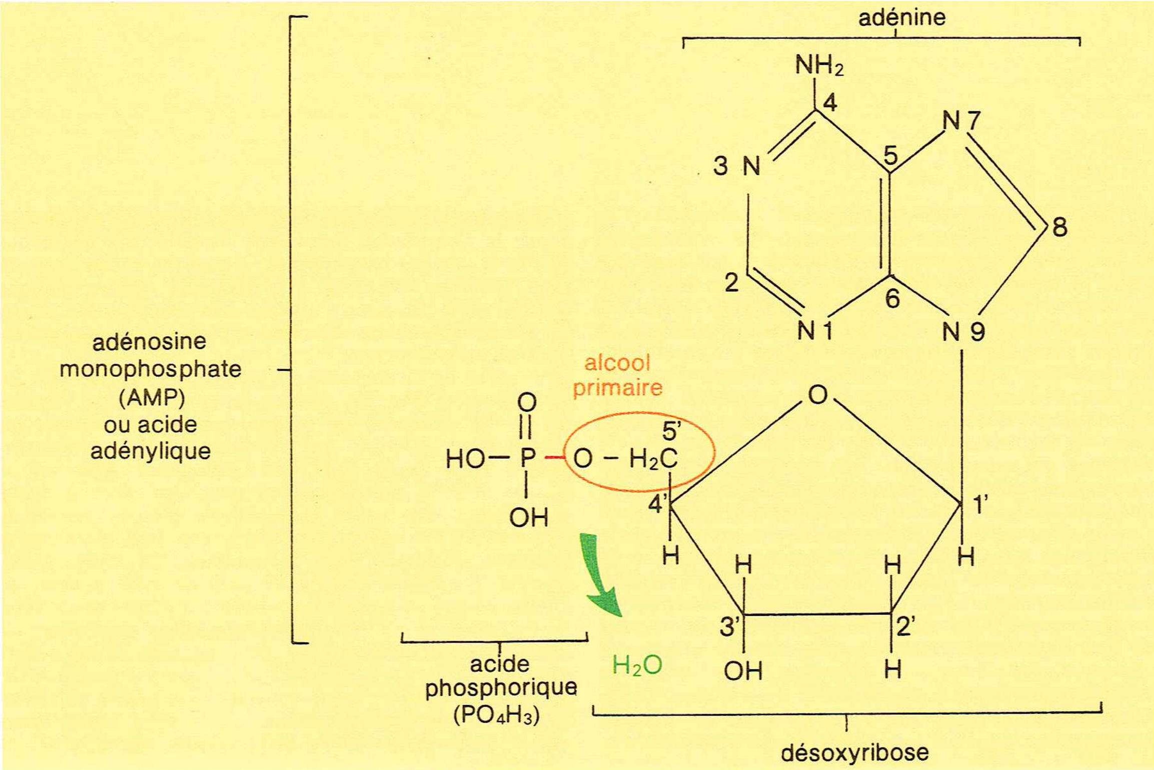

Richard Colin

◀ *Un* nucléotide (*ici,* un désoxyribonucléotide) *est formé par estérification d'un nucléoside par l'acide phosphorique.*

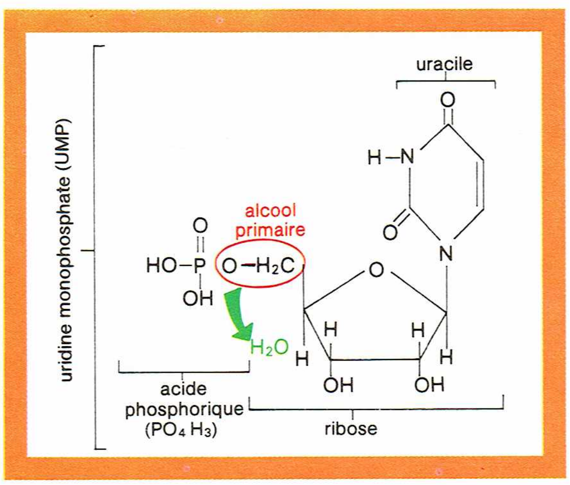

Richard Colin

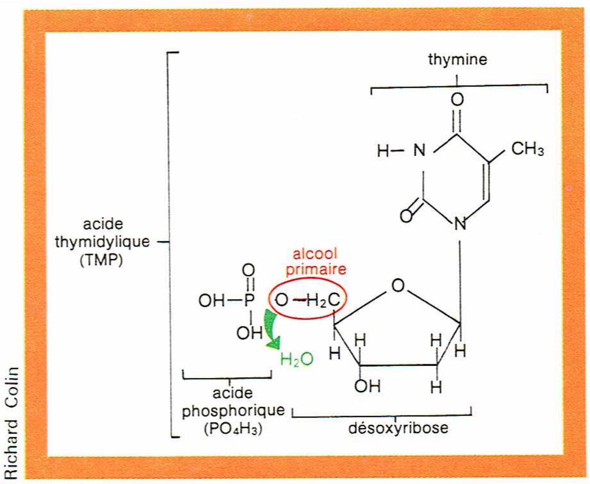

Richard Colin

◀ *A gauche, formule d'un autre nucléotide :* l'acide thymidylique *(TMP). A droite, l'*uridine monophosphate *(UMP), l'un des éléments essentiels des ARN. L'uracile est la base « complémentaire » de l'adénine.*

respiration sont les plus remarquables. Les molécules d'acides nucléiques sont de hauts polymères des nucléotides.

Structures et fonctions des acides nucléiques

Il nous a paru important d'indiquer par quels moyens on est parvenu à connaître les fonctions des acides nucléiques. Nous utilisons, notamment, les éléments fournis par S. Meryl Rose (1970) ainsi que les mises au point de Watson et de Durand.

ADN et nature des gènes

L'étude des acides nucléiques est également celle de la nature et du fonctionnement des *gènes*.

La notion de gène

On sait que le moine Mendel publia en 1866 les résultats de ses expériences sur des pois : il montra comment s'effectue la répartition des caractères parentaux dans la descendance. Mais ses travaux n'eurent à cette époque aucun retentissement. Vers 1870, Miescher découvrit les acides nucléiques, sans qu'il soit possible d'effectuer aucun lien avec les travaux de Mendel, lesquels étaient pratiquement oubliés. Il fallut attendre le début du XXe siècle pour que l'on exhumât les conclusions de Mendel.

En 1902-1903, W.S. Sutton, alors qu'il était encore étudiant, constata que les cellules sexuelles contiennent deux fois moins de chromosomes que les cellules dont elles proviennent. C'était là une confirmation morphologique, au niveau cellulaire, des travaux de Mendel; en effet, ces résultats impliquaient que chaque cellule sexuelle contenait la moitié de l'information génétique. A la même époque, Boveri montra de manière brillante que des anomalies du nombre des chromosomes entraînent la formation d'animaux anormaux. En d'autres termes, Boveri faisait dépendre la croissance harmonieuse de facteurs contenus dans les chromosomes. Mais de quels facteurs s'agissait-il? De protéines ou d'acides nucléiques? Il fallut attendre 1943-1950 pour le savoir. Entre-temps, bien des chercheurs entreprirent l'étude détaillée des chromosomes, et les généticiens multiplièrent les observations pour tenter de résoudre la question. Les matériels biologiques employés furent extrêmement divers; Boveri, par exemple, travaillait sur l'œuf d'oursin, matériel encore très utilisé car il est très pratique. Cependant, il y a mieux, puisque l'étude des Bactéries a permis les progrès très récents d'une biochimie qui nous touche à plus d'un titre.

Toujours en 1902, C. E. Mac Clung découvrit que l'homme possède deux chromosomes sexuels de forme différente; en liant ce résultat à celui de Sutton, Mac Clung put estimer que, dans un spermatozoïde, l'un de ces chromosomes devait induire la naissance d'un mâle, alors que l'autre, contenu dans un second spermatozoïde, permettait la naissance d'une femelle. Chacun de ces chromosomes contenait donc une *information génétique,* responsable de la détermination du sexe d'un embryon.

En 1910, T. H. Morgan publia des résultats tout à fait extraordinaires mais qui, à cette époque, furent très généralement méprisés. Avec ses élèves, il montra que la répartition entre les descendants des caractères biologiques parentaux dépend directement de la *structure* des chromosomes. Pour cela, il utilisait la drosophile, une petite mouche très commune, ou mouche du vinaigre, que l'on trouve aussi très fréquemment sur les fruits trop mûrs, et qui présente l'avantage de ne posséder qu'un tout petit nombre de chromosomes. Dans la descendance de ces mouches prolifiques, en étudiant des caractères

pris deux à deux, Morgan constata que certains se comportaient indépendamment, comme s'ils étaient portés par des chromosomes différents, alors que, par contre, il existait des groupes de caractères liés, donc « installés » sur le même chromosome. Cela revenait à dire qu'*un chromosome est fait d'éléments disposés de manière extrêmement rigoureuse, chaque « élément chimique de base » correspondant à un gène dont dépend un caractère morphologique ou biochimique précis.* Cette idée, qui nous paraît logique, fut très mal accueillie lorsqu'elle fut émise.

Morgan remarqua un autre fait essentiel : les chromosomes d'une même *paire* peuvent échanger des gènes. Autrement dit, une portion d'un chromosome peut prendre la place de la portion homologue du chromosome de la même paire. On donna le nom de *crossing-over* à ce phénomène, qui se produit, dans les cellules sexuelles femelles, au moment de la formation de l'ovocyte, c'est-à-dire juste avant la formation de cellules contenant deux fois moins de chromosomes que les cellules originelles.

En 1913, grâce à la notion de crossing-over, Sturtevant put déterminer l'espacement relatif des gènes (nous dirions maintenant la longueur des tronçons de molécule correspondant à un gène donné). En comparant les fréquences des crossing-over entre chacun des gènes pris deux à deux, Sturtevant et Morgan établirent des *cartes génétiques*. Ces résultats étaient d'une extrême importance. Mais il fallut attendre les années 1930-1935 pour que les biologistes acceptassent le travail de Morgan et de ses collaborateurs. Pourtant, ainsi que le remarquait récemment J. Rostand, ces travaux auraient dû susciter bien des enthousiasmes. Certes, dès l'abord, nombre de jeunes chercheurs se passionnèrent pour de telles découvertes, mais il n'en fut pas ainsi pour la plupart des « maîtres », comme les nomme G. Duhamel.

La nature d'un gène

On pensait, du temps de Morgan, que les gènes étaient de nature protéique, ce qui ne favorisait pas la compréhension du rôle des acides nucléiques...

Le travail d'Avery, Mac Leod et Mac Carty fut une étape décisive : en 1944, ces auteurs montrèrent que des ADN extraits de souches bactériennes peuvent modifier la structure de certaines autres souches et leur donner certains de leurs caractères. Avant eux, Griffith, en 1928, avait préparé la voie en publiant certains résultats fort troublants qui montraient que des Bactéries atténuées pour la vaccination pouvaient modifier les caractères d'autres souches bactériennes : « quelque chose » passait des Bactéries inactivées aux Bactéries actives, quelque chose dont la nature devait être déterminée. Avery et ses collaborateurs cherchèrent alors systématiquement l'agent transformateur.

A partir de ce moment, on assista au mûrissement du problème, et bien des travaux (ceux de Mirsky, Pollister et Swift) permirent de confirmer et de généraliser les conclusions d'Avery. Les résultats les plus frappants furent sans doute ceux des virologistes (Hershey et Chase, 1952), qui, travaillant avec des virus à ADN, montrèrent que seule la molécule d'acide nucléique pénètre dans la cellule parasitée par le virus, alors que le manteau protéique reste à l'extérieur. En 1953, Lwoff parvint à prouver que l'ADN viral se mêle à celui de l'hôte, ce qui fut confirmé en 1958 par Zinder et en 1960 par Lederberg : l'information génétique permettant la multiplication ultérieure du virus au sein de la cellule hôte est portée par l'ADN seul. Mais il y a des virus à ARN, dépourvus d'ADN; on a constaté que l'ARN est aussi porteur d'information génétique. Donc, il fallait envisager les rapports entre les différents types d'acides nucléiques.

Les structures de l'ADN

Il faut d'abord envisager la structure primaire, puis étudier les niveaux d'organisation plus complexes.

— *Structure primaire de l'ADN.* Sa détermination n'est pas simple, car on ne peut pas couper le bout des chaînes, comme cela se fait pour les protéines. Chaque élément est un nucléotide : il s'agit donc d'une longue *chaîne de polynucléotides* (Watson et Crick, 1953) : il y a estérification entre la fonction alcool en C_3 de l'un des nucléotides et l'acide phosphorique d'un autre.

L'hydrolyse enzymatique ne pose pas de problèmes techniques. On obtient des polynucléotides plus petits, que l'on fragmente ensuite en effectuant une ségrégation méthodique des portions obtenues, ou *oligo-nucléotides,* de taille de plus en plus petite. Un tel fractionnement progressif de l'ADN fournit un « énorme puzzle » qui, ainsi que le fait remarquer Durand, est extrêmement difficile à manipuler et à mettre en ordre ! Tout se complique aussi pour les organismes supérieurs, car on ne sait pas combien chaque noyau peut contenir de molécules d'ADN...

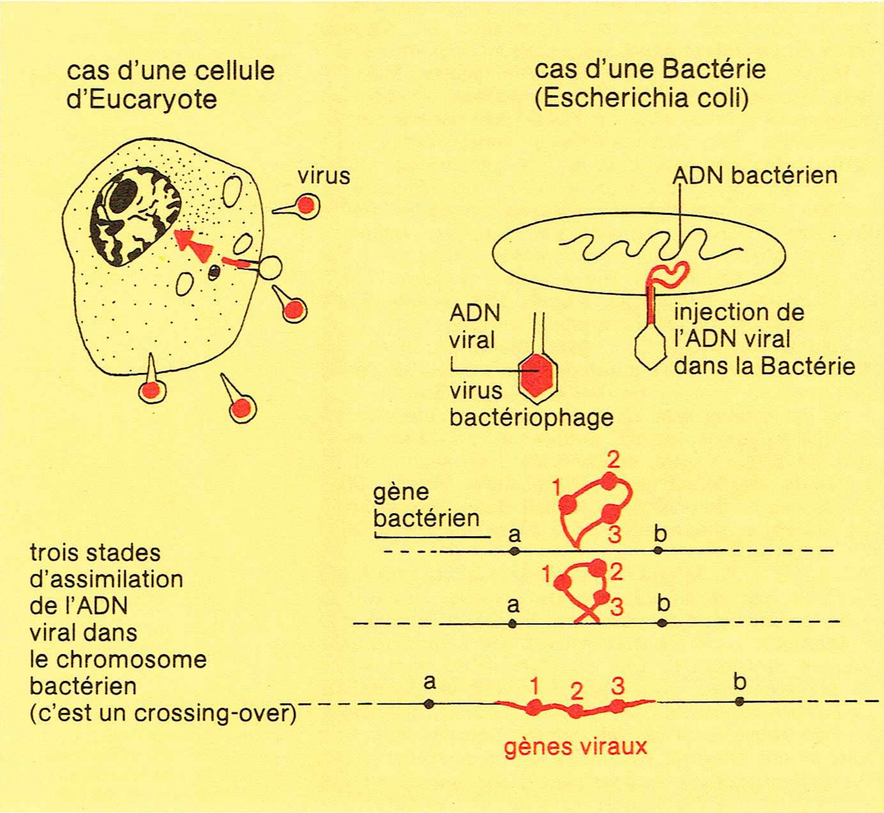

Richard Colin

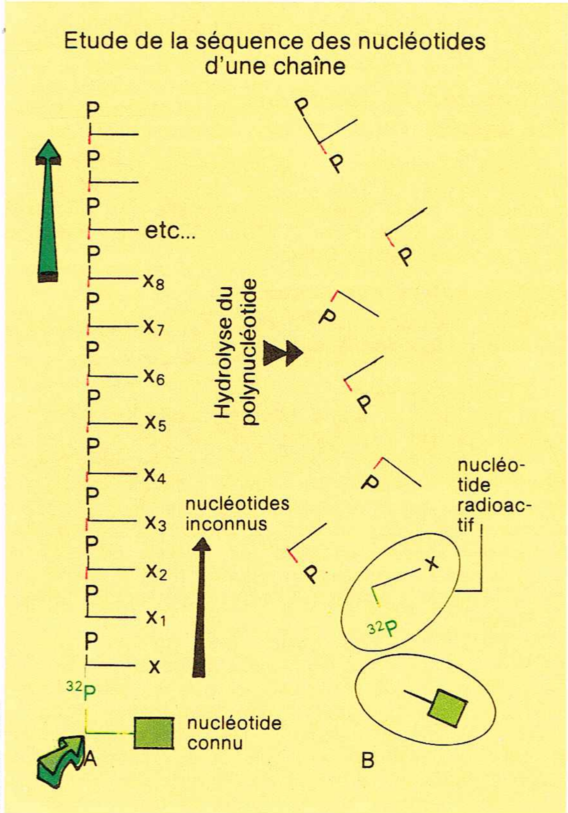

Richard Colin

▼ *A gauche, représentation schématique de l'infection virale et de l'incorporation de l'ADN viral à l'ADN de l'hôte. A droite, principe de détermination du nucléotide terminal d'une chaîne en formation : A, liaison d'un nucléotide radioactif (^{32}P) et d'une chaîne de polynucléotides en cours de synthèse ; B, après hydrolyse, chaque nucléotide entraîne le phosphore du nucléotide suivant. Ensuite on chromatographie.*

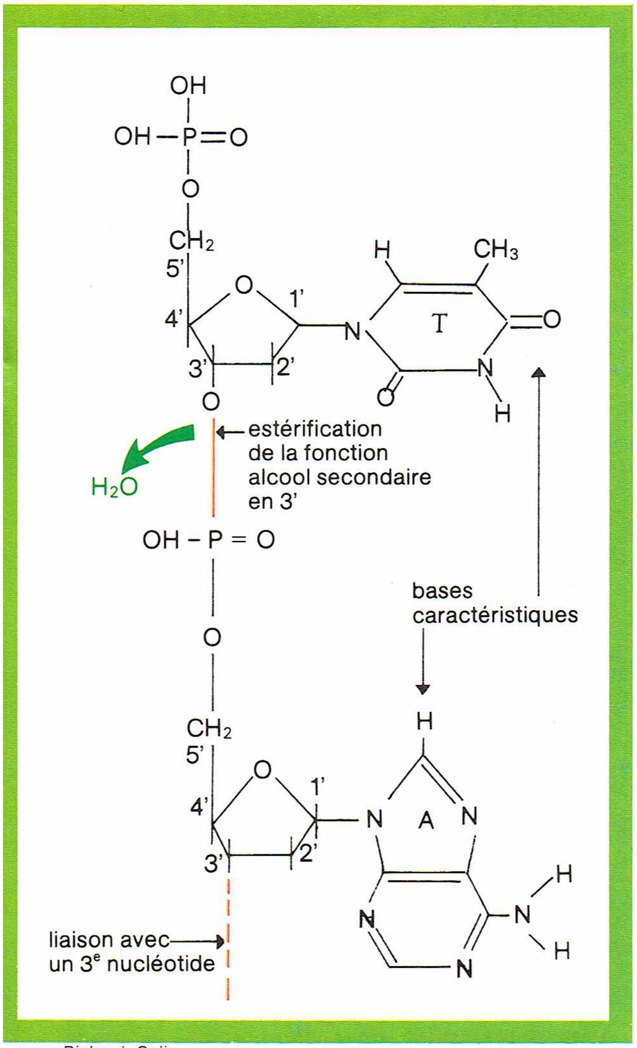

Richard Colin

En simplifiant beaucoup, le schéma page 122, fait d'après les travaux de Josse, Kaiser et Kornberg (1961), explique plus précisément quel est le principe d'une des méthodes d'analyse du nucléotide terminal.

Puis on recommence avec un autre polynucléotide afin de déterminer leur degré d'identité; c'est donc une méthode comparative. Cela laisse entrevoir l'énormité de la tâche et l'extrême patience des chercheurs qui voudraient parvenir à établir une séquence nucléotidique; par exemple, le bactériophage T_2 (virus) possède une seule molécule d'ADN comportant déjà 200 000 nucléotides. L'analyse complète serait donc une véritable besogne expiatoire. En fait, il semble qu'il soit encore bien difficile de parvenir à la connaissance des séquences. On ne dispose pas d'une technique adéquate véritablement pratique.

— *Structure secondaire de l'ADN.* Dès les années 1950, les spécialistes virent que la fibre d'ADN était constituée de *deux éléments accolés*. En 1953, grâce à une technique cristallographique, Watson and Crick purent montrer l'existence de ces deux chaînes. Tenant compte des résultats d'autres chercheurs, en particulier de ceux de Wilkins et Franklin, ils en vinrent à concevoir la molécule d'ADN comme une *double hélice :* on aurait alors deux chaînes antiparallèles constituées de phosphates et de désoxyriboses alternés et portant *latéralement* les bases azotées. Depuis 1953, tout porte à croire que cette *structure secondaire* est une réalité. La solidité de la double hélice est assurée par des *liaisons hydrogène* entre les bases. Watson et Crick donnent donc un modèle qui ressemble à un escalier en colimaçon dont les marches seraient les bases azotées. L'importance d'un tel modèle, qui a valu le prix Nobel à ses inventeurs, est considérable : tous les mécanismes de la synthèse protéique en dépendent étroitement.

◄ ***En haut, mode de liaison de deux nucléotides; un* polynucléotide *est formé de nucléotides disposés suivant la ligne figurée en rouge. En bas, représentation schématique d'une chaîne de nucléotides (en rouge, liaisons ester).***

▼ ***A gauche, mode d'*appariement *des bases placées face à face dans la double hélice : en orangé, les liaisons hydrogène; N et O jouent le rôle de donneurs d'électrons pour H (d'après Watson). A droite, structure schématique de l'ADN : les brins sont disposés suivant deux* hélices*; en orangé, les liaisons hydrogène établies entre les* bases *des nucléotides placés face à face.***

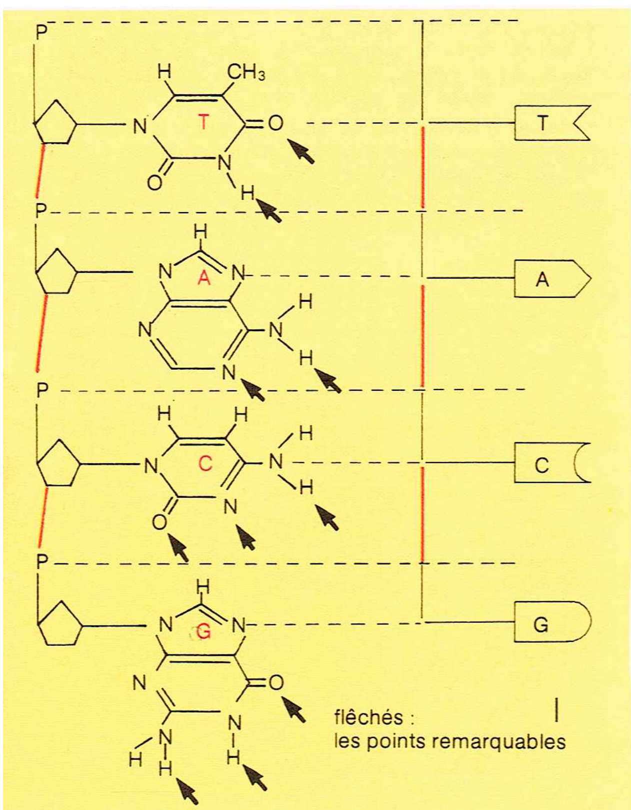

Richard Colin

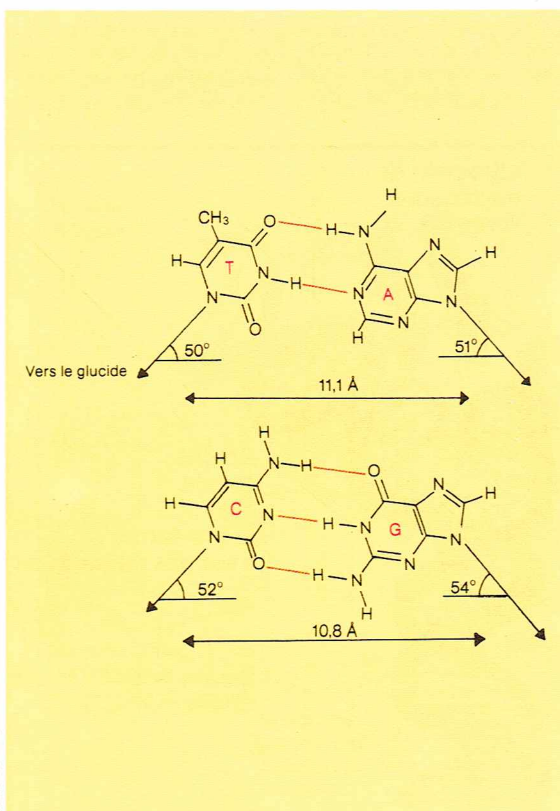

Richard Colin

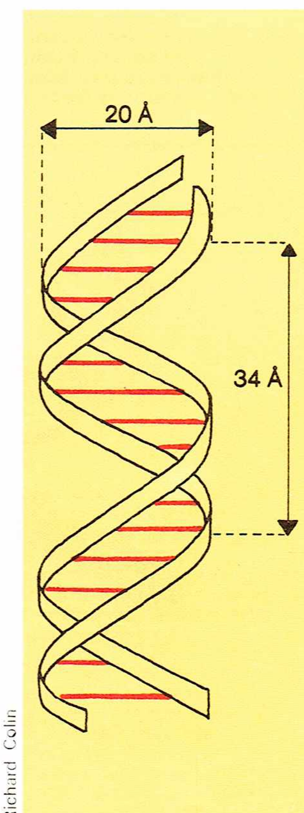

Richard Colin

Mais il faut dire que l'on avait déjà pressenti l'existence d'une structure complexe de l'ADN. Ainsi, l'ADN, extrait avec maintes précautions, et que l'on peut considérer comme natif, possède, ainsi que le fait remarquer Durand, « une densité et une viscosité incompatibles avec l'existence d'une fibre simple, unique, complètement étendue ». Mieux : certaines fonctions des nucléotides, à savoir NH_2 et CO—NH, sont masquées dans l'ADN (Gulland et Jordan, 1947). Il était donc logique de penser que ces fonctions étaient engagées dans des liaisons stables ; en effet, on ne pouvait les rompre qu'en milieu très acide ou très alcalin. De plus, des mesures de spectres dans l'ultraviolet montrent que les valeurs obtenues s'éloignaient sensiblement de celles que les spécialistes pouvaient attendre en tenant compte du nombre d'atomes de phosphore, donc de nucléotides, de la molécule. Par contre, les résultats sont en accord avec ce nombre si l'on soumet l'ADN natif à des traitements drastiques tels qu'un chauffage à 100 °C ou un traitement ionique (R. Thomas, 1953). Or on savait que ces expériences modifiaient les structures secondo-tertiaires ; on avait donc affaire à une *dénaturation* des acides nucléiques. Il devenait alors nécessaire de déterminer le type de structure secondaire de ces molécules.

C'est là qu'intervinrent Wilkins, puis Watson et Crick. Comme pour la structure des protéines, l'étude des diagrammes de diffraction des rayons X a permis de se faire une image de la molécule ou, du moins, d'une portion de celle-ci (la molécule n'est pas homogène). La distance qui sépare les bases est régulière et de l'ordre de 3,4 Å ; ce sont des éléments hydrophobes des acides nucléiques ; ces bases ont alors tendance à se rapprocher en milieu aqueux, donc dans la cellule vivante ; ce caractère augmente, bien entendu, la stabilité des liaisons hydrogène qu'elles établissent d'une hélice à l'autre.

La *disposition des bases* placées face à face n'est pas quelconque. Cela pouvait être déduit des constatations faites par Chargaff entre 1951 et 1955 : l'analyse de l'ADN de différents micro-organismes montre en effet que le *rapport purine-pyrimidine* est toujours très voisin de 1. Avec ses élèves, ce chercheur rejeta l'éventualité d'une coïncidence. De multiples analyses lui montraient qu'il s'agissait là d'un fait d'ordre général. Mieux encore, le rapport 1 existe aussi entre l'adénine (A) et la thymine (T) ou entre la guanine (G) et la cytosine (C). Un appariement de l'adénine et la thymine comme de la guanine et la cytosine parut donc extrêmement vraisemblable pour Chargaff. Ces résultats remarquables furent confirmés par Wyatt, qui montra que le rapport A/T est le même pour onze virus d'Insectes.

Le Rubicon était franchi. L'existence de cette structure primaire-secondaire dans laquelle les bases sont réparties de manière équilibrée permettait de concevoir le mode de reproduction de la molécule d'ADN. Watson et Crick purent en conclure que, lors de la multiplication cellulaire, au moment de la *réplication* de l'ADN, *chaque hélice originelle, complémentaire de l'autre, attire, dans le bon ordre, les éléments d'une hélice complémentaire nouvelle*. Cette idée constituait une révolution que Morgan eût accueillie avec allégresse. Les confirmations ne tardèrent pas à se multiplier.

Par exemple, entre 1957 et 1958, Taylor, Woods et Hughes ainsi que Meselson et Stahl procédèrent à des marquages chromosomiques par des traceurs radioactifs ; à la première division des cellules marquées, chaque hélice originelle des chromosomes était fortement marquée, mais pas l'hélice néoformée. Il s'agissait là d'une confirmation éclatante des déductions de Watson et Crick : on parle d'une *reproduction semi-conservatrice* de la molécule d'ADN. Outre le cas de la Bactérie *Escherichia coli*, cette reproduction a été démontrée dans les cellules d'organismes Eucaryotes, à noyaux typiques (Peacock, 1963 ; Prescott et Bender, 1963 ; Taylor et coll.).

Dès lors, on se demanda si la réplication se faisait à partir d'un point privilégié de la molécule, donc du chromosome. A cet égard, les résultats ont été très différents suivant le matériel biologique : il semble, en fait, que le clivage et la réplication des deux hélices originelles ne soient pas directement comparables à l'ouverture d'une fermeture à glissière. Dans un chromosome, l'incorporation d'un précurseur marqué « se poursuit autour de multiples foyers localisés » (Odartchenko, 1968). Selon Denis (1974), chez un Amphibien, le xénope, il y aurait 15 000 points d'initiation sur un brin d'ADN.

— *Structure tertiaire de l'ADN*. Dupraw tenta de *voir la molécule d'ADN* en utilisant une technique très subtile : il provoquait l'étalement d'une molécule d'ADN à la surface d'un liquide. Il montra, en 1965-1966, que l'ADN peut posséder une *structure tertiaire très repliée*. Mais il semble que l'on ne connaisse pas la disposition de la ou des molécules d'ADN dans un chromosome.

Remarques utiles pour comprendre le mode d'action de l'ADN

— *L'ADN est-il identique dans toutes les cellules somatiques d'un individu ?*

La cellule œuf contient de l'ADN qui se reproduit, identique à lui-même, dans toutes les cellules filles somatiques ; seules les cellules germinales sont diffé-

▼ *A gauche, principe* de formation de l'ADN *à partir de chacun* des brins *initiaux ; reproduction semi-conservatrice (d'après Stent). A droite, courbe* de dénaturation thermique *de l'ADN (d'après Marmur et Doty).*

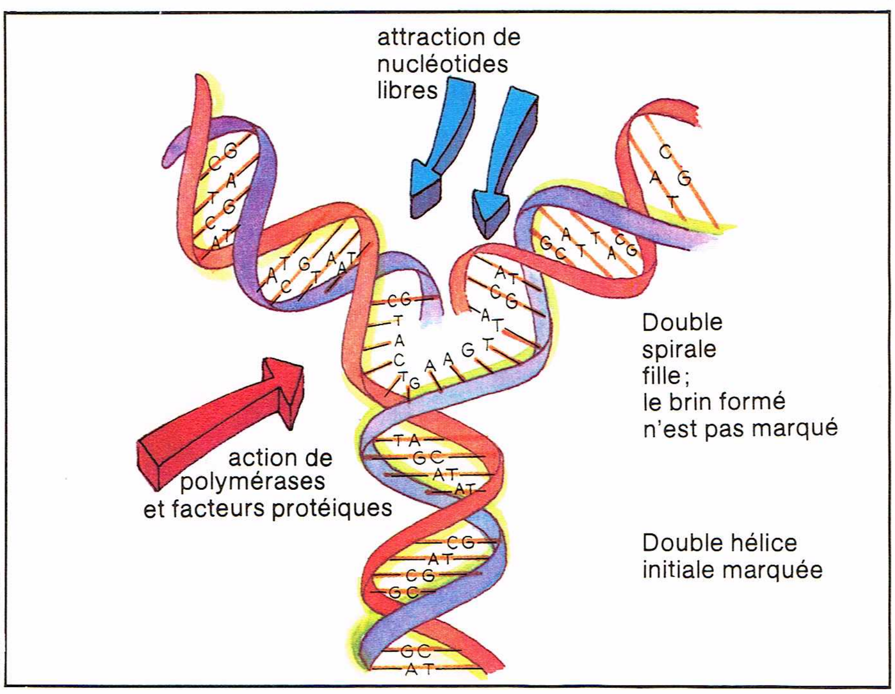

Richard Colin

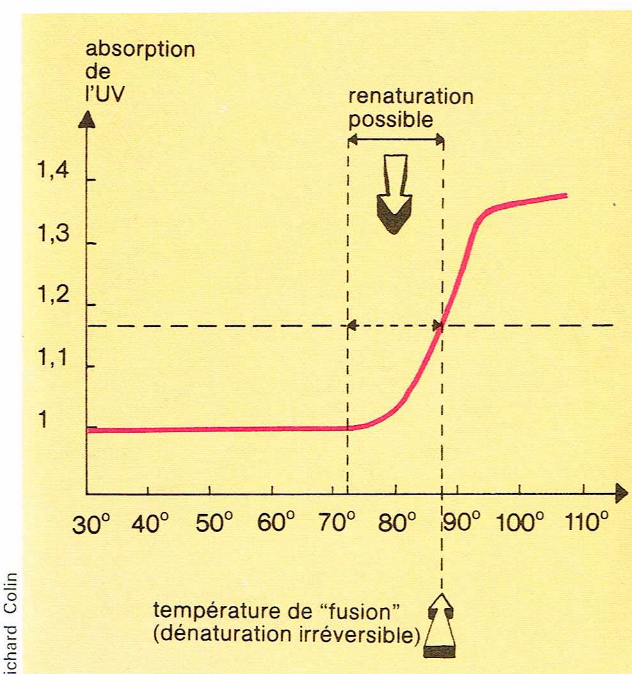

Richard Colin

rentes puisque, nous l'avons vu, celles-ci comportent la moitié du matériel chromosomique somatique. L'identité de l'ADN est qualitative et quantitative. *C'est un postulat,* qui semble être admis de manière générale sans qu'il existe, toutefois, de preuves directes formelles.

On considère comme preuves indirectes de cette identité les faits suivants : la sédimentation *in vitro* de l'ADN des différents tissus d'un même animal se fait de la même manière (Kit, 1963) ; les cellules d'un même individu ont un ADN nucléaire dont la composition en bases paraît être identique (Hoyer, Mac Carthy et Bolton, 1964) ; *in vitro,* l'activité chimique de l'ADN de différentes cellules somatiques d'un même individu paraît être la même (Mac Carthy, 1966).

Les expériences de *dénaturation* puis de *renaturation* paraissent être fort intéressantes. On sait que la dénaturation de l'ADN se fait à chaud, au-dessus de 85 °C. Elle permet le clivage des deux hélices de la molécule et leur déspiralisation. Lorsque cela se produit, les propriétés physiques de l'ADN se modifient ; ainsi, le spectre d'absorption en lumière ultraviolette est augmenté de 40 % par rapport à l'ADN natif (Marmur, Lane et Doty, 1960). Or, la température de dénaturation (encore appelée *température de fusion*) de l'ADN dépend de l'espèce vivante à laquelle on s'est adressé : si la molécule est riche en guanine et cytosine, dont l'appariement se fait par 3 liaisons hydrogène, la température de fusion est supérieure à celle qui convient pour une molécule comparativement plus riche en adénine et thymine, bases qui n'établissent entre elles que 2 liaisons. De même, le spectre UV de l'ADN dénaturé est également caractéristique d'une espèce et, semble-t-il, d'un individu.

Un ADN dénaturé peut être renaturé si on réduit lentement la température ; la dénaturation peut donc être un phénomène réversible (Marmur et Doty, 1962). Mais la renaturation n'est vraiment totale que dans le cas de l'ADN bactérien, où deux hélices libérées sont en fait *parfaitement complémentaires* et peuvent ainsi s'accoler sur toute leur longueur. La recombinaison est incomplète chez les Eucaryotes dont les molécules d'ADN, issues de cellules différentes, sont imparfaitement complémentaires ; on dit qu'il y a *hybridisation imparfaite ;* on peut donc penser que les cellules d'un Eucaryote, dont les molécules d'ADN dénaturé se recombinent mal, possèdent plusieurs ADN nucléaires plus ou moins différents. Cela oblige à reconsidérer le postulat évoqué au début de ce paragraphe. Nous y reviendrons dans un autre chapitre.

— *Les structures de la molécule d'ADN sont-elles les mêmes chez tous les êtres vivants ?*

Nous avons donné un aperçu des structures primaire et secondaire de l'ADN et précisé que l'on devait envisager l'existence d'une structure tertiaire. Mais il semble que, pour l'instant, les techniques d'extraction soient encore trop violentes pour qu'il soit possible de déterminer cette structure ; en effet, une simple agitation de l'extrait ou le prélèvement à la pipette provoque une fragmentation des chaînes d'ADN.

Pourtant, des constatations génétiques et des observations en microscopie électronique faites sur des virus (Weil et Vinograd, 1963) ou sur des Bactéries (Cairns, 1963) permettent de dire que les chaînes de l'ADN des micro-organismes peuvent présenter une disposition circulaire. En 1965, Hotta et Bassel ont même décrit une structure du même genre dans le cas du blé et de cellules de Mammifères ; une partie de l'ADN extrait des cellules de divers Eucaryotes se présente effectivement sous une forme circulaire. Il s'agit de l'ADN mitochondrial.

— *La structure primaire n'est pas homogène d'un bout à l'autre de la molécule.*

Bien sûr, on ne connaît pas dans le détail la succession des innombrables nucléotides d'une séquence : on connaît seulement des portions de molécules. Cependant, on constate que certaines d'entre elles représentent des gènes, alors qu'il en existe d'autres, de nature différente, qui doivent avoir d'autres fonctions. En fait, l'hétérogénéité de la molécule d'ADN peut être constatée par l'étude cytologique des chromosomes et par l'analyse chimique de séquences.

L'observation des chromosomes montre qu'ils comportent des portions de colorabilité différente : l'*hétérochromatine,* très colorable durant tout le cycle cellulaire, et l'*euchromatine,* peu colorable sauf au moment

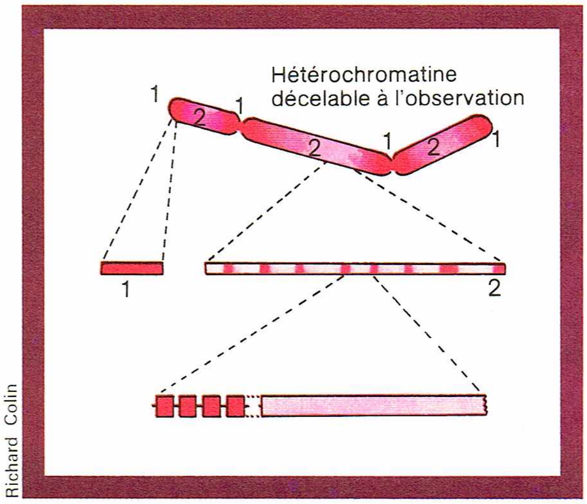

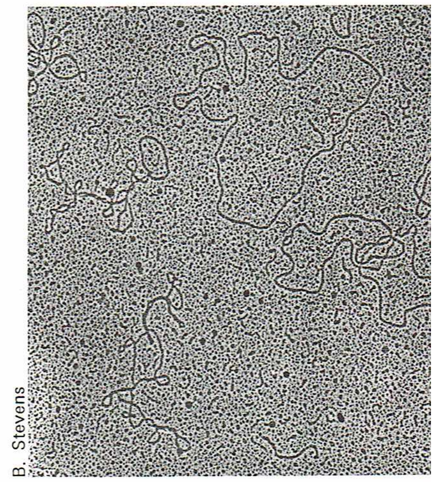

▲ *A gauche, schéma de distribution des séquences répétées de l'ADN dans le génome des Eucaryotes : 1, régions privilégiées constituées par un ADN hautement redondant ; 2, régions contenant un ADN moyennement redondant et réparti par bandes, indiscernables en microscopie. (d'après Guillé et Quétier). A droite, ADN purifié extrait de mitochondries isolées du foie de rat (Sinclair et Stevens). Les molécules, circulaires, ont une longueur d'environ 5 µ ; plusieurs d'entre elles ont la forme torsadée, et l'une, la forme dite ouverte (microscope électronique).*

de la multiplication cellulaire. La notion d'hétérochromatine fut établie par Heitz en 1933 ; elle représente une discontinuité dans la structure du chromosome.

Par ailleurs, vers 1961, l'analyse de l'ADN nucléaire a montré qu'il existe un *ADN principal* et un *ADN satellite* dont les caractères physico-chimiques sont particuliers. Si l'hétérochromatine est une discontinuité structurale visible, le satellite est la preuve d'une hétérogénéité biochimique. Diverses méthodes ont été employées pour découvrir et étudier ce satellite, la plus spectaculaire étant sans doute celle d'*ultracentrifugation analytique.* On connaît le principe de la centrifugation à grande vitesse, ou ultracentrifugation ; chaque molécule à centrifuger subit une force centrifuge qui peut atteindre 300 000 g (g correspondant à la pesanteur terrestre). Dans le cas présent, il s'agit d'une centrifugation *isopycnique,* ou à *équilibre de densité.* On centrifuge à grande vitesse le mélange d'une solution d'un sel lourd, le chlorure de césium ClCs, et d'une solution contenant l'ADN à étudier ; les molécules de ClCs migrent, et leur concentration augmente progressivement vers le fond du tube centrifugeur : on a un *gradient de ClCs ;* de même, les molécules d'ADN migrent sous l'action de la force centrifuge ; si elles n'ont pas toutes le même poids moléculaire, leur migration s'effectue *avec la tranche de solution de ClCs,* dont elles possèdent la densité (méthode isopycnique).

On peut alors effectuer une analyse optique de la répartition des ADN dans le gradient de ClCs ; cette

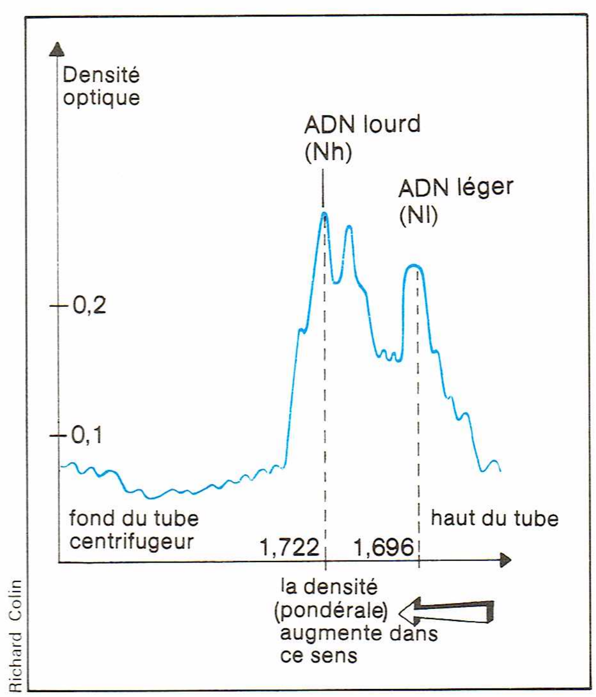

◀ *Courbe d'analyse en gradient de ClCs d'un mélange d'ADN extraits du noyau (germinations de 11 jours de graines de Cucumis) ; le pic d'ADN lourd n'apparaît qu'à certains stades de la germination des Dicotylédones (Guillé) : il correspond à un ADN satellite, riche en G + C ; l'autre pic correspond à l'ADN principal (Nl) [d'après Fasquel].*

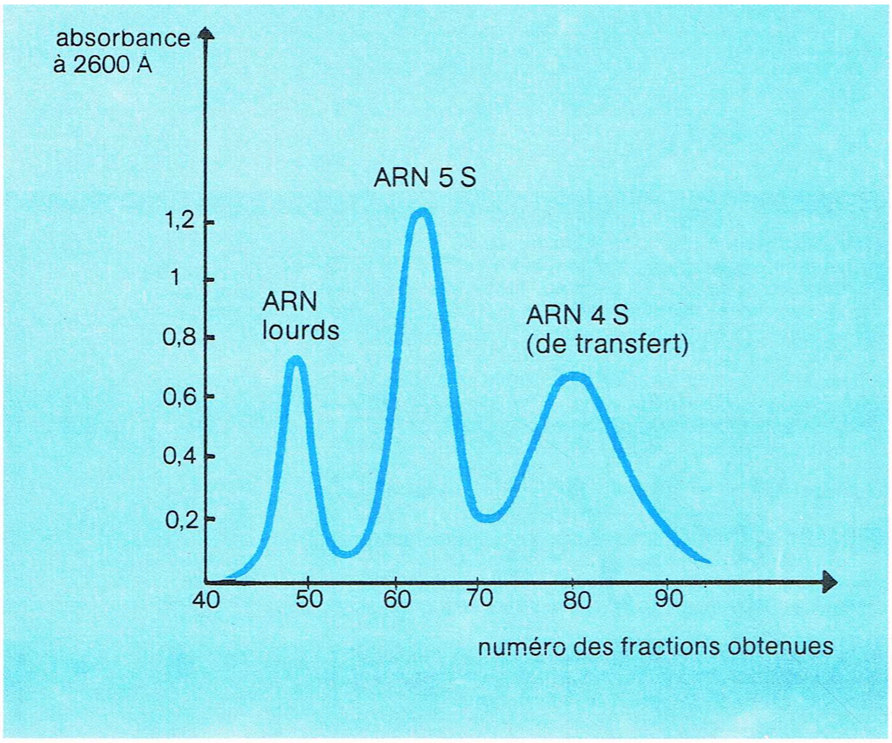

Richard Colin

▲ Mise en évidence des ARN dans l'ovocyte de xénope (début de maturation) : l'ARN extrait des cellules est fractionné par chromatographie sur colonne. L'adsorbant utilisé (Sephadex) permet un tri des molécules en fonction de leur taille ; la courbe est établie par dosage photométrique. Absorbance = degré d'absorption d'un faisceau de lumière monochromatique par la substance que l'on étudie ; les ARN-4 S sont très abondants (d'après Denis).

elle n'est active qu'en présence de facteurs protéiques, permettant, en particulier, l'*initiation* et la *terminaison* des chaînes d'ARNm, mais qui pourraient aussi *« choisir »* les portions de chaînes d'ADN à transcrire. Chez les Eucaryotes, il existe au moins trois types d'ARN polymérases (Chambon). Les conditions d'activité de ces enzymes sont peu connues. Il est possible de bloquer expérimentalement la synthèse d'ARN messager grâce à un antibiotique, l'*actinomycine D*.

Il est possible de détecter la synthèse nucléaire d'ARNm et d'observer ce que devient celui-ci. En 1964, Prescott, en ajoutant à des cultures de Protozoaires de la cytidine (cytosine plus ribose) marquée au tritium (^{3}H), put obtenir une réaction nucléaire positive. Voici une description rapide de cette expérience. Les Protozoaires employés étaient des *Tetrahymena pyriformis,* espèce assez voisine de la paramécie. Placés pendant quelques minutes dans le milieu marqué, ils furent ensuite prélevés et fixés rapidement. On en effectua alors des coupes fines qui furent montées sur des lames de verre puis recouvertes d'une émulsion de type photographique *sensible aux électrons* libérés par le tritium de la cytidine. Après une exposition de plusieurs semaines, les coupes (et l'émulsion superposée) furent alors colorées, observées au microscope et photographiées. Ces photographies permirent d'observer des grains noirs d'argent dans le noyau et au voisinage immédiat du noyau de *Tetrahymena*. Ce résultat confirme l'idée que l'ARNm se forme au contact des chromosomes.

On peut aller plus loin dans l'analyse : si, après le marquage, on replace les animaux dans l'eau et si on les fixe seulement 1 h 30 après ce changement de bain, on constate, sur des coupes préparées comme précédemment, que les grains d'argent ne sont plus visibles dans le noyau, mais qu'ils sont presque tous accumulés dans le hyaloplasme. Cette technique, dite d'*histo-autoradiographie,* permet donc d'affirmer qu'il y a eu *migration* de l'ARN à travers la membrane nucléaire : le travail de synthèse protéique s'effectue dans le hyaloplasme. C'est là un point capital.

Les ARNm formés ne se trouvent pas en grandes quantités dans la cellule. D'après Odartchenko, ils ne représentent que 2 % de l'ARN total d'une Bactérie (il y aura donc lieu de s'intéresser à la nature et au rôle des autres ARN). Toutefois, les ARNm sont la clé des synthèses correctes. La durée de vie d'un ARNm est très courte chez les micro-organismes (quelques minutes), tandis qu'elle peut être fort longue chez les Eucaryotes évolués, tels que les Oiseaux ou les Mammifères ; ces faits furent mis en évidence grâce à l'actinomycine D, qui, bloquant la synthèse d'ARNm, n'empêche cependant pas les synthèses protéiques : il existe donc, au moins dans certaines cellules, des *réserves* d'ARNm qui permettent ces synthèses (Revel et Hiatt, 1964 ; Humphreys et coll., 1964 ; Scott et Bell, 1965, etc.). Cela est très frappant dans le cas de bien des œufs d'Invertébrés qui, semble-t-il, portent dans leur hyaloplasme toute l'information génétique nécessaire aux premières étapes de formation de l'embryon (Reverberi, 1964-1965).

Il est possible d'extraire des ARN messagers, mais cela n'est pas facile. Le phénol permet une extraction de tous les ARN : il précipite les protéines mais laisse les ARN en solution ; par centrifugation à froid dans un gradient de saccharose, on obtient une lente ségrégation des ARN cellulaires de poids, donc de longueurs, différents. On détermine alors leur ***coefficient de sédimentation,*** qui se mesure en unités Svedberg (S) ; ils se répartissent ainsi en trois groupes essentiels :

ARN 26-28 S (ARN lourd) ou 23 S des Bactéries
ARN 18 S ou 16 S des Bactéries
ARN 4 S

Où sont les ARNm ? Malheureusement, ils ne représentent qu'une petite partie de l'ensemble et leur étude est extrêmement difficile. Burny et Chantrenne (1964), Burny et Marbaix (1965) ont isolé un ARN 9 S, messager responsable de la synthèse d'hémoglobine chez le lapin. La méthode d'extraction est due à Huez et ses collaborateurs, et l'étude de la composition en bases de cet ARN à Kruh (1966) ; cette composition est surprenante, car on y trouve une grande abondance d'adénine (Lim et Canellakis, 1970), substance qui est apparemment inutile pour la synthèse de la chaîne d'hémoglobine... Quoi qu'il en soit, fin 1973, Brachet constatait que seul ce messager était vraiment déterminable et isolable ; la même année, Guillé et Quétier firent la même constatation. Ces remarques, encore valables, montrent à quel point notre connaissance des ARNm est médiocre et fragmentaire.

D'autres résultats ont révélé que le problème est extrêmement complexe. Ainsi en 1965, Scherrer, Marcaud, Zajdela, Breckenridge et Gros ont montré que, chez le canard, les cellules de la lignée des globules rouges contiennent un autre messager, qui sédimente à 50 S. Ce résultat fut confirmé par d'autres travaux de Scherrer et ses collaborateurs (1966) et de l'équipe d'Attardi (1966). Ces auteurs considèrent cet ARN géant comme un précurseur de l'ARNm fonctionnel ; cette hypothèse est actuellement acceptée (travaux sur l'œuf de xénope). Selon Georgiev, ce type de messager lourd serait ensuite fragmenté dans le cytoplasme.

La traduction.

— La traduction, ou formation d'une protéine particulière à partir d'une séquence nucléotidique, est un phénomène assez compliqué. Il faut noter, dès à présent, que les autres ARN de la cellule sont appelés *ARN ribosomiques* (ARNr) et *ARN de transfert* (ARNt). Les ARNr sont contenus dans les *ribosomes,* organites de très petite taille répartis dans le hyaloplasme ; ce sont les ARN 28 S et 18 S que nous avons signalés plus haut et qui sont associés à un ARN 5 S, beaucoup moins abondant. Ces ARN ribosomiques ne peuvent fonctionner qu'avec l'aide d'ARN légers 4 S, ou ARN de transfert. Tous ces ARN sont indispensables pour la synthèse protéique.

— Pourquoi cette synthèse protéique nécessite-t-elle un matériel nucléique aussi divers ? N'est-il pas concevable que l'ARNm soit directement capable d'effectuer un tri des acides aminés, qui, à son contact, se disposeraient d'une manière spécifique et dépendant seulement de la nature de sa séquence nucléotidique ? En fait, cela est impossible car les acides aminés n'ont aucune affinité particulière pour les nucléotides. Par exemple, les groupements hydrocarbures de l'alanine ou de la leucine ne sont pas seulement incapables de former des liaisons hydrogène avec l'ARNm, mais sont repoussés par les bases ; Watson estime que la surface des molécules d'ARNm ne se prête aucunement à l'adaptation des acides aminés. La synthèse protéique est donc très complexe et n'a rien à voir avec une adaptation directe d'acides aminés sur une matrice d'ARN contenant l'information génétique. Dans ces conditions, puisque les généticiens ont montré que les séquences de l'ADN et de l'ARN messager qui en dérive déterminent la séquence des acides aminés qui constituent les protéines, il devient évident que des *molécules adaptatrices* interviennent pour lier les acides aminés à la matrice d'ARNm. Ce mécanisme est, d'ailleurs, nettement plus rationnel sur le plan thermodynamique, puisqu'il ne nécessite pas une modification conformationnelle du groupement latéral de chacun des acides aminés, ce qui impliquerait l'entrée en action d'un nombre élevé d'enzymes.

estiment qu'il dépend d'un *gène réplicateur,* activé par une molécule protéique jouant le rôle d'initiateur (théorie du *réplicon*). Un stock de phosphate et de nucléosides constituants des quatre nucléotides de l'ADN est bien sûr indispensable, de même que l'ion Mg^{++}. Une telle synthèse peut être réalisée *in vitro,* en l'absence de tout élément « vivant ». La réplication comporte parfois des *anomalies* dont il sera question dans le chapitre « génétique ».

Remarquons qu'il existe des organismes où l'ADN ne comporte qu'*un seul brin.* Cette constatation, assez récente, a été faite chez des virus parasites de Bactéries. On s'est alors demandé comment se produit la réplication; certains chercheurs faisaient intervenir des molécules intermédiaires, mais celles-ci n'ont jamais été mises en évidence. En réalité, l'*ADN viral,* ou *brin +,* s'incorpore au chromosome de l'hôte, dont il possède au moins une partie des séquences; il s'ensuit la formation, suivant le principe normal, d'un *brin* — complémentaire, *puis* celle d'un nombre élevé de brins + constituant le « noyau » des particules virales qui seront ensuite libérées.

Soulignons ici l'importance des Bactéries et des virus à ADN dans l'étude des processus biochimiques et génétiques. En effet, ces organismes ne comportent qu'une seule molécule d'ADN, et l'on conçoit aisément qu'ils puissent constituer le matériel le plus simple, donc le plus pratique à étudier, d'autant que leur reproduction est extrêmement rapide. Pour *Escherichia coli,* l'ADN a un poids moléculaire de $2 \cdot 10^9$, et sa longueur totale est voisine du millimètre; pour le chromosome du virus bactériophage T_2, la longueur est de 52 μ, taille qui permet une observation directe (Cairns). C'est à partir des virus et des Bactéries que l'on a constaté que la renaturation *in vitro* peut aboutir à des molécules circulaires.

La transcription : ADN → ARN

Les travaux de Watson et Crick, de Taylor ainsi que de Meselson et Stahl ont permis non seulement de déterminer la conformation fondamentale de l'ADN, mais aussi de comprendre de quelle façon peut se former l'acide ribonucléique (ARN). L'ARN se forme au contact de l'un des brins d'ADN du chromosome. L'ADN sert de matrice pour la mise en ordre des nucléotides qui comportent comme sucre le ribose et non plus le désoxyribose. L'ordre des bases de l'ADN détermine celui des bases de l'ARN (Doi et Spiegelman, 1962). La liaison des nucléotides se fait aussi par estérification, après que chacun d'entre eux s'est adapté à un nucléotide complémentaire de l'ADN matriciel. Mais l'ARN ne contient pas de thymine : l'adénine de l'ADN se couple avec l'uracile du futur ARN. On a donc, pour l'ARN, la formule nucléotidique AUGC (adénine-uracile-guanine-cytosine). Le mécanisme porte le nom de *transcription.*

réplication — transcription

ADN ⟶ ⟶ ARN

En d'autres termes, l'ADN, qui porte l'information génétique, ne permet pas directement la synthèse de protéines : il transmet cette information à une autre molécule, l'ARN, ou plutôt à *plusieurs molécules* d'ARN qui sont le reflet de la structure de portions d'ADN. Ces substances ont des poids moléculaires essentiellement différents. Elles comportent, comme l'ADN, des portions redondantes.

On parle ici de molécules d'*ARN messagers,* ou ARNm (Jacob et Monod, 1961). La structure primaire de l'ARN messager est très voisine de celle de l'ADN. Par contre, il n'y a pas de spiralisation régulière du brin d'ARN formé. De plus, on n'observe jamais deux brins complémentaires dans la même molécule.

Lorsqu'il existe des liaisons hydrogène entre nucléotides, ceux-ci appartiennent au même brin et sont rapprochés par reploiement de la chaîne. Certains ARN peuvent avoir une structure secondaire (voir plus loin).

On peut se demander comment s'effectue la synthèse d'ARN messager. En effet, par quel prodige la cellule va-t-elle utiliser l'uracile et non plus la thymine ? En outre, pourquoi n'y a-t-il qu'un seul brin ? Si tout n'est pas encore éclairci, on sait néanmoins que la synthèse dépend essentiellement d'une enzyme découverte chez *Escherichia coli* par Chamberlain et Berg en 1962 et rapidement étudiée par Haselkorn en 1964 : c'est l'*ARN polymérase;*

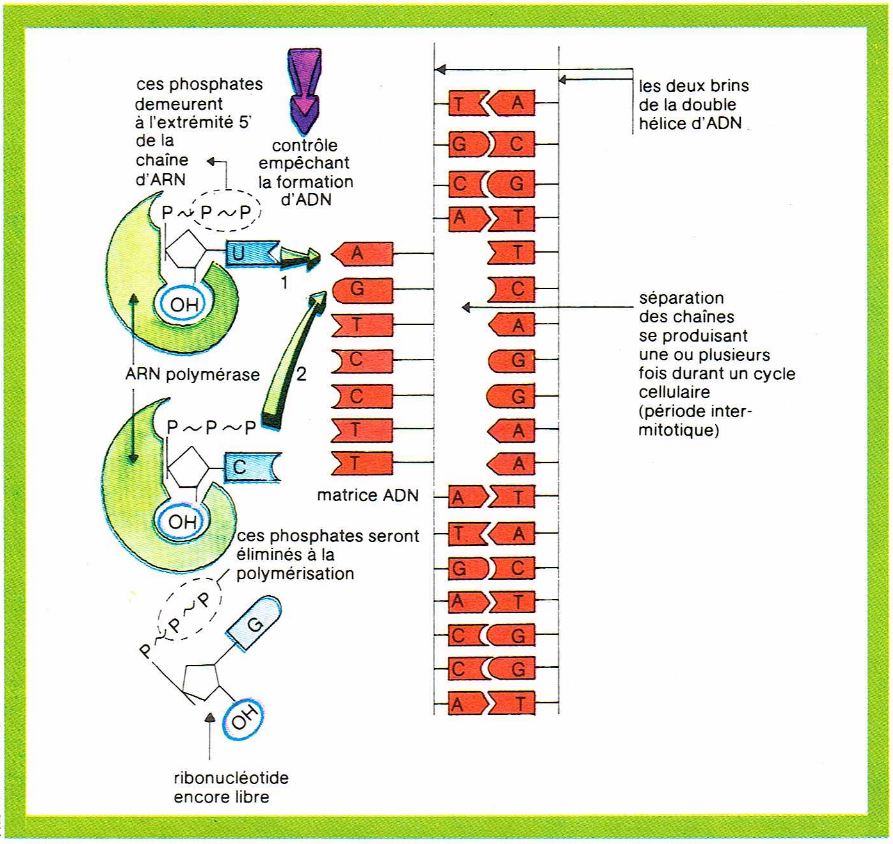

▲ ***Principe de formation des ARN (noter que le substrat utilisable est un triphosphate, riche en énergie).***

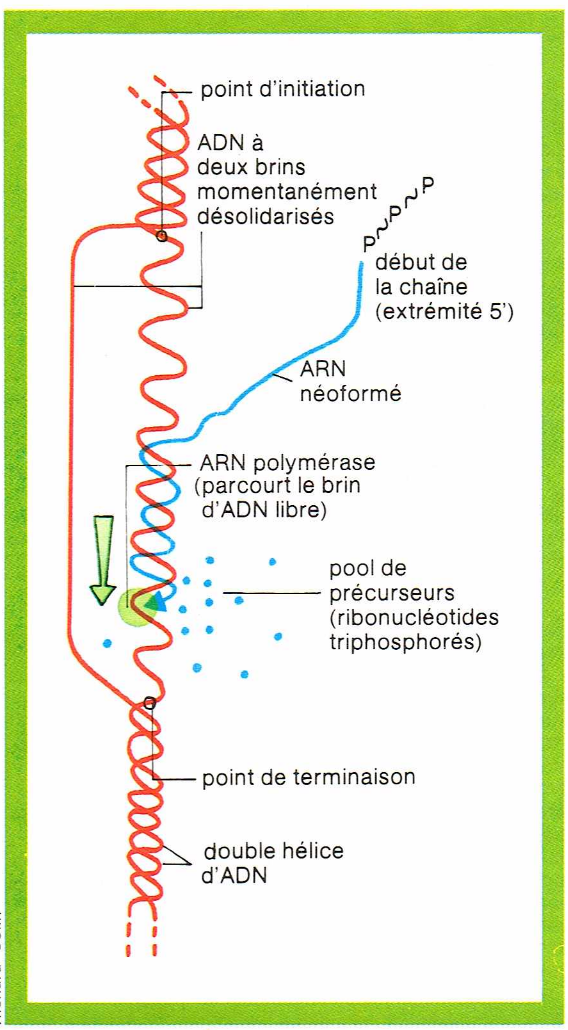

◀ ***Schéma du mode de synthèse des ARN (d'après Watson).***

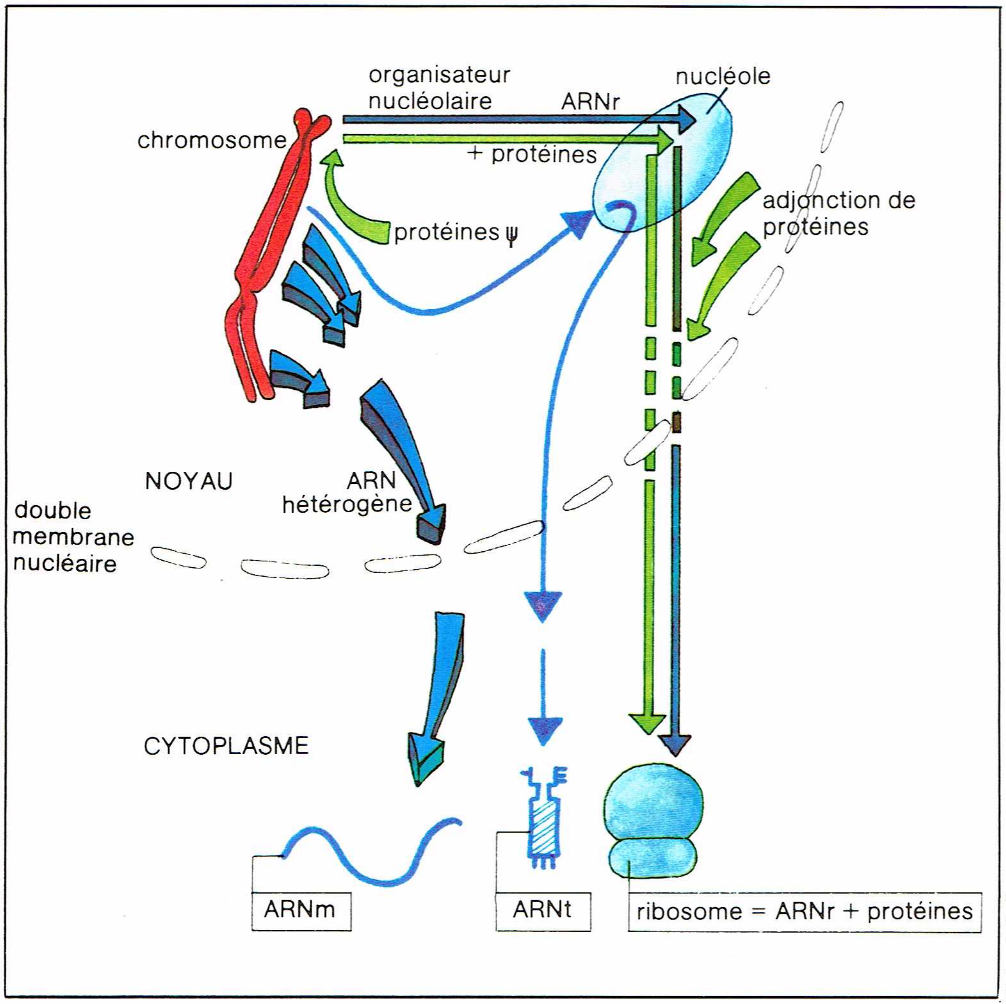

Richard Colin

▲ *Principe de la* formation *et de la* migration *des trois types d'*ARN.

▶ *Page ci-contre, représentation schématique développée du mécanisme de traduction du code lors de la synthèse protéique.*

▼ *A gauche, constitution hypothétique du* ribosome : *2 sous-unités de taille différente.*
A droite, ribosomes *vus en microscopie électronique (× 100 000) dans une cellule épithéliale de rein de lapin.*

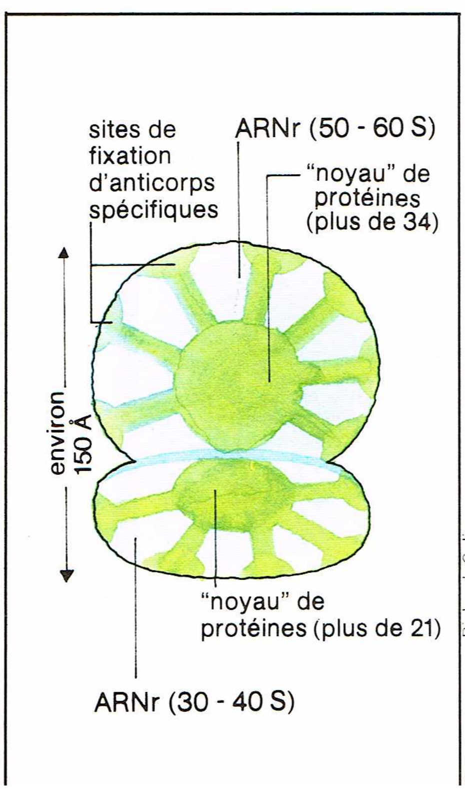

Richard Colin

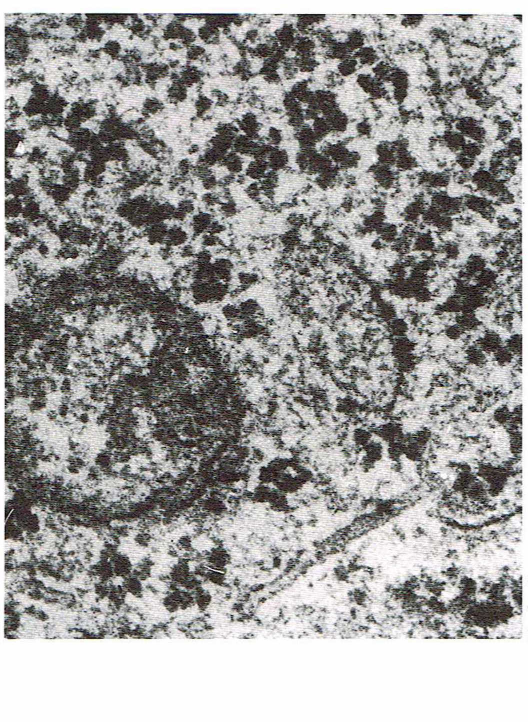

P. Castano

Remarquons, par ailleurs, que les gènes de l'ADN qui déterminent les ARNt ne codent pas pour la fabrication de protéines; de plus, chez les animaux supérieurs, 1 % seulement de l'ADN code pour les protéines. On voit donc que l'*hétérogénéité fonctionnelle* de l'ADN est très frappante; cela confirme les constatations faites par les cytologistes et les biochimistes.

Le mécanisme paraît pouvoir fonctionner avec l'ADN et les ARN messager et de transfert; mais il n'en est rien : la présence des ARN ribosomiques est nécessaire. Comme les ARNt, ceux-ci sont formés sur de courtes portions du chromosome. *C'est au contact des ARNr que le codage pour les protéines peut s'effectuer grâce aux ARNm et ARNt.*

— Les ARNr, formés au niveau des chromosomes, s'accumulent dans le nucléole (chez les Eucaryotes) avant de passer ensuite dans le hyaloplasme. Ils ne jouent aucun rôle de matrice : en effet, leurs nucléotides sont rapidement méthylés, donc inactivés. On estime maintenant que les ARN ribosomiques s'associent très précocement à des protéines de structure, à l'intérieur même du noyau; passant dans le hyaloplasme, ces molécules associées constituent des ribosomes dont nous verrons ultérieurement la disposition dans le cytoplasme. Travers estime qu'un facteur ψ, formé de deux protéines, permet à une ARN polymérase spécifique de déclencher la synthèse d'ARN ribosomiques à partir de portions de la matrice d'ADN; ensuite, ces protéines resteraient combinées au ribosome.

Les ribosomes, organites extrêmement petits, sont faits de deux parties, ou *sous-unités,* que l'on peut séparer par ultracentrifugation. Le coefficient de sédimentation des ribosomes complets est de 70 S; ils contiennent 50 % d'eau; après dessiccation, on y trouve 27 % de protéines. La *première* sous-unité (50 S), la plus volumineuse, contient une très grande molécule d'ARN 23 S d'environ 3 200 nucléotides; ceux-ci sont associés à 34 protéines, toutes différentes (Garrett et Wittmann, 1973), qui ont été déterminées après élimination de l'ARN par une électrophorèse à deux dimensions sur couche mince d'un gel de polyacrylamide. On trouve aussi dans cette sous-unité une seconde molécule d'ARNr 5 S faite de 120 nucléotides associés à 34 protéines. La *seconde* sous-unité (30 S) comporte un ARNr 16 S de 1 600 nucléotides associés à 21 protéines.

Une telle complexité révèle la difficulté qu'il y a à comprendre ce qui se passe dans le ribosome. Un tel type de ribosome a été décrit chez une Bactérie, *Escherichia coli,* mais il n'est pas certain que les ribosomes des Eucaryotes soient aussi « simples »... En fait, chez les Eucaryotes, les ribosomes sont sensiblement plus volumineux (Favard, 1973), mais on y trouve aussi deux sous-unités, 60 S et 40 S, et il semble bien que ceux-ci n'aient pas un degré de complexité nettement plus grand. Enfin, comme le remarque Simonet, « les ribosomes d'Eucaryotes traduisent des messagers avec les ARNt d'*E. coli* et inversement ». Ils ne sont donc pas fonctionnellement différents.

— Quelle est la fonction des protéines du ribosome lors de la traduction? Il est encore trop tôt pour répondre à cette question. Selon Favard, les ARNr seraient situés en position périphérique, ce qui permettrait la liaison des deux sous-unités du ribosome par des ions Mg^{++} disposés entre deux groupements phosphatés. Cette idée se trouve confirmée par des digestions ménagées à la ribonucléase (enzyme) : les ARNr sont très sensibles à cette diastase et ne sont donc pas protégés par une gangue protéique externe. Cependant, selon Garrett et Wittmann, les protéines sont au moins *partiellement* externes, même si elles doivent constituer ce que Favard appelle le noyau du ribosome; ces auteurs se fondent sur des expériences très précises : des anticorps spécifiques de chaque protéine se fixent sur la surface des ribosomes; de plus, des digestions ménagées par des protéases, également spécifiques, permettent de supprimer de telles réactions anticorps-antigènes. Rien de tout cela ne permet d'entrevoir le rôle des protéines ribosomiales, du moins *a priori.*

Cependant, Garrett et Wittmann estiment que la répartition des protéines ribosomiales implique un échange de certaines d'entre elles entre les sous-unités : cela faciliterait ce qu'ils appellent « les étapes mécaniques spécifiques de la synthèse protéique ».

— Voici comment on peut schématiser les étapes d'une telle adaptation. La *sélection* de chacun des acides aminés, puis son *accrochage* sur l'adaptateur, se font grâce à une enzyme spécifique, l'*amino-acyl-ARNt synthétase*. Celle-ci reconnaît à la fois l'acide aminé et l'adaptateur. Nous savons que les protéines enzymatiques comportent ainsi plusieurs sites qui leur permettent d'effectuer la coaptation de deux molécules qui, *a priori*, n'ont aucune affinité. L'adaptateur est un ARN, l'*ARN de transfert*. Son rôle est de transférer l'acide aminé contre la matrice d'ARNm. On pourrait s'étonner du fait que l'adaptateur soit un ARN ; il faut toutefois se souvenir que l'ARNm est *monocaténaire* (constitué d'un seul brin), ce qui lui permet de se lier préférentiellement à un autre ARN par des ponts hydrogène ; le système est donc tout à fait remarquable. Il n'y a pas nécessairement un accolement complet des deux ARN, mais la complémentarité de deux courtes portions suffit à lier un ARNt à l'ARNm issu du noyau.

Les ARN de transfert sont appelés ARN solubles (ARNs), bien que tous les ARN le soient. En fait, ils sont les seuls qui ne constituent pas de figures, voire d'organites, visibles dans les cellules grâce au microscope électronique. L'ARNt, léger, à coefficient 4 S, comporte environ 80 nucléotides ; son poids moléculaire est de 25 000. La chaîne est repliée en épingle à cheveux, formant une structure en double hélice, mais qui reste imparfaite. En 1964, on a constaté que les séquences contenaient des *bases rares* qui empêcheraient certaines portions de la molécule de se spiraler, faute de réelle complémentarité. Watson considère que ce sont les portions non spiralées qui peuvent se lier à l'enzyme de coaptation, ou à une portion de l'ARNm. Lors du transfert de l'acide aminé « choisi » par l'enzyme, l'ARNt porte cet acide aminé fixé en position terminale 3′ sur l'adénine. Puisqu'il existe 20 acides aminés fondamentaux, il y a au moins 20 ARNt différents, dont la conformation permet l'adaptation sur un point particulier de l'ARNm.

— Il faut citer le travail essentiel de Gamow, publié en 1954. Dès cette époque, il estima que le *code génétique* était formé d'unités de *3 nucléotides*, unités que l'on doit concevoir aussi bien pour les ADN que pour les ARNm ou les ARNt décrits dix ans plus tard ; en effet, sachant que l'ADN contient les quatre nucléotides A, T, G et C, on peut avoir 64 combinaisons différentes si on les prend 3 par 3 ; par contre, il y en a moins de 20 si on les prend 2 par 2, ce qui exclut la possibilité que 2 nucléotides liés puissent coder pour l'un des 20 acides aminés. L'idée était séduisante ; par la suite, elle fut confirmée maintes fois. Trois nucléotides de l'ARNm constituent un *codon* suffisant pour expliquer l'incorporation d'*un certain* acide aminé dans une chaîne polypeptidique. Donc, pour chacun des ARNt spécifiques d'un acide aminé, il existe un *anticodon* de 3 nucléotides, complémentaire du codon de l'ARNm. Le code des acides nucléiques, porté par l'ARNm, *se traduit*, en présence des ARNt, par la synthèse d'un polypeptide préalablement défini.

Théoriquement, il doit y avoir au moins 20 enzymes de coaptation dans chaque cellule et au moins 20 ARNt différents. Cependant, il y a une *dégénérescence du code* qui fait que plusieurs types d'ARNt peuvent être spécifiques d'un même acide aminé ; en fait, le code génétique est déterminé, dans bien des cas, par plus d'un codon ou triplet de nucléotides (Watson).

— Les chercheurs se sont posé deux questions primordiales au sujet des ARNt : de quelle façon se forment-ils et, d'autre part, à quel niveau se fait le codage que l'on vient d'évoquer ?

On pouvait se demander si l'ARNt n'était pas capable d'autosynthèse, ou d'autoréplication, comme l'ADN ou l'ARN monocaténaire des virus, lequel peut se reproduire en présence d'*ARN synthétase*, au moment de l'infection de la cellule hôte. Watson considère comme une réponse essentielle le fait que des ARNt puissent s'hybrider avec des molécules d'ADN isolées et déspiralisées : ces hybridations montrent que des portions de ces deux types de molécules sont complémentaires, et l'on est en droit de penser que les ARNt se forment au contact de matrices d'ADN. Les points des molécules d'ADN où se fait cette synthèse d'ARNt représenteraient nettement moins de 1 % de la longueur d'une fibre, ce qui est une proportion étonnamment réduite si l'on pense à la concentration élevée des ARNt par rapport aux ARNm dans la cellule.

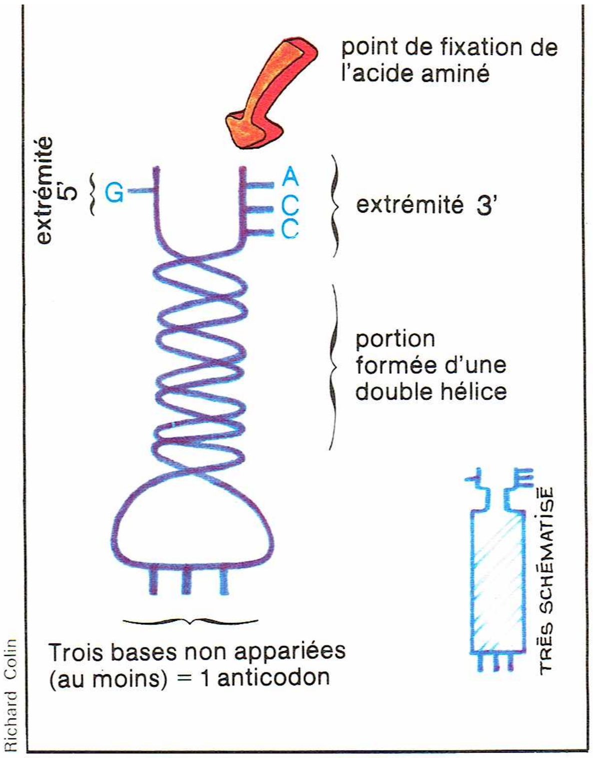

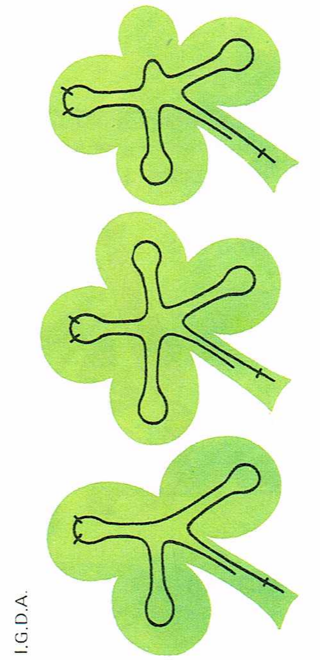

▲ *A gauche, constitution schématique d'un* **ARN de transfert** *;*
la conformation des différents **ARNt** *(vingt au moins) permet l'adaptation sur un point particulier de l'ARNm.*
A droite, représentation de la forme « en trèfle » de trois molécules d'ARNt **(ou ARNs)** *: de haut en bas, ARNt-tyrosine ; ARNt-sérine ; ARNt-alanine.*

▼ *Mode d'accrochage d'un* **acide aminé** *sur l'***ARNt** *correspondant.*

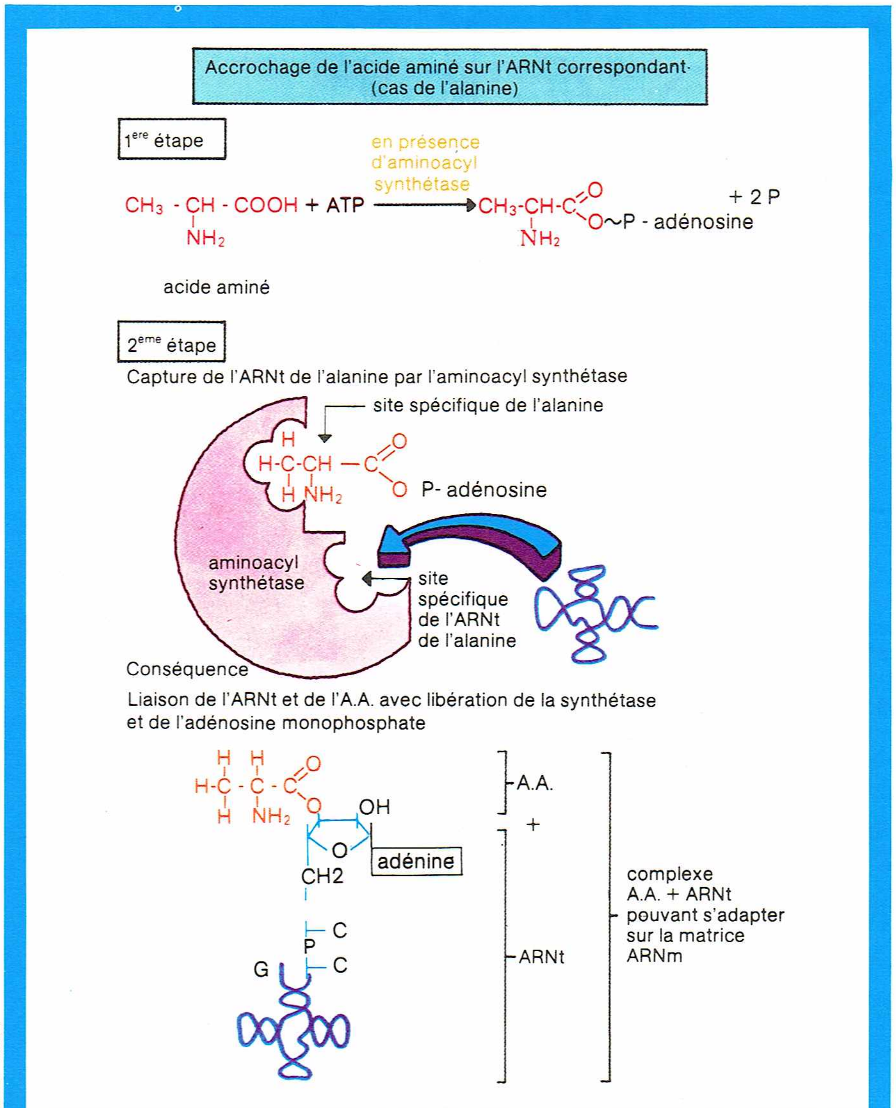

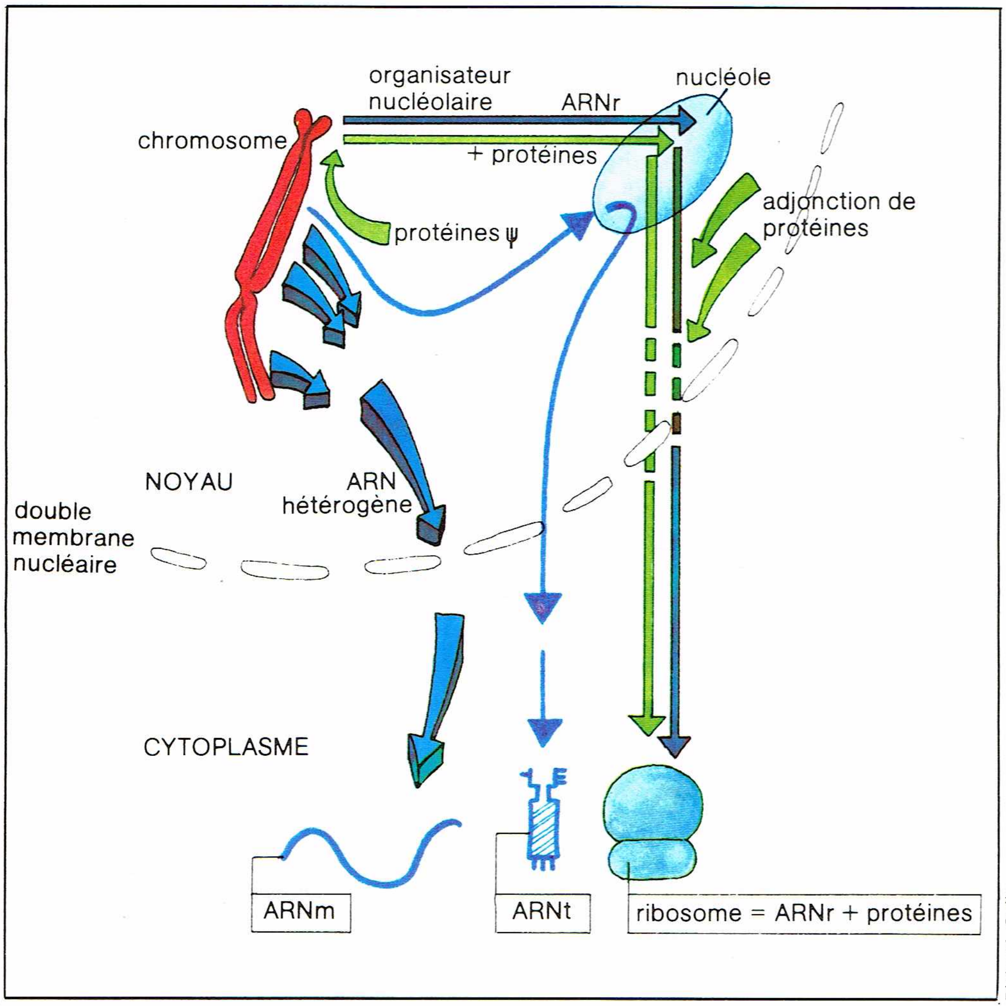

Richard Colin

▲ *Principe de la* formation *et de la* migration *des trois types d'*ARN.

▶ *Page ci-contre, représentation schématique développée du mécanisme de traduction du code lors de la synthèse protéique.*

▼ *A gauche, constitution hypothétique du* ribosome *: 2 sous-unités de taille différente.*
A droite, ribosomes *vus en microscopie électronique (× 100 000) dans une cellule épithéliale de rein de lapin.*

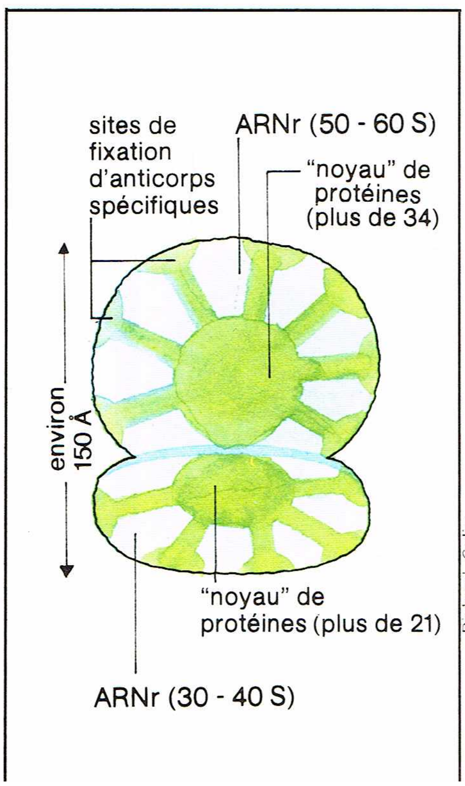

Richard Colin

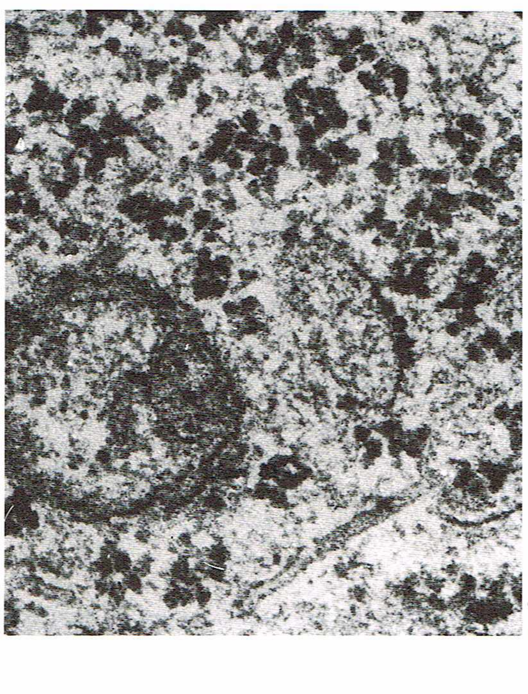

P. Castano

Remarquons, par ailleurs, que les gènes de l'ADN qui déterminent les ARNt ne codent pas pour la fabrication de protéines; de plus, chez les animaux supérieurs, 1 % seulement de l'ADN code pour les protéines. On voit donc que l'*hétérogénéité fonctionnelle* de l'ADN est très frappante; cela confirme les constatations faites par les cytologistes et les biochimistes.

Le mécanisme paraît pouvoir fonctionner avec l'ADN et les ARN messager et de transfert; mais il n'en est rien : la présence des ARN ribosomiques est nécessaire. Comme les ARNt, ceux-ci sont formés sur de courtes portions du chromosome. *C'est au contact des ARNr que le codage pour les protéines peut s'effectuer grâce aux ARNm et ARNt.*

— Les ARNr, formés au niveau des chromosomes, s'accumulent dans le nucléole (chez les Eucaryotes) avant de passer ensuite dans le hyaloplasme. Ils ne jouent aucun rôle de matrice : en effet, leurs nucléotides sont rapidement méthylés, donc inactivés. On estime maintenant que les ARN ribosomiques s'associent très précocement à des protéines de structure, à l'intérieur même du noyau; passant dans le hyaloplasme, ces molécules associées constituent des ribosomes dont nous verrons ultérieurement la disposition dans le cytoplasme. Travers estime qu'un facteur ψ, formé de deux protéines, permet à une ARN polymérase spécifique de déclencher la synthèse d'ARN ribosomiques à partir de portions de la matrice d'ADN; ensuite, ces protéines resteraient combinées au ribosome.

Les ribosomes, organites extrêmement petits, sont faits de deux parties, ou *sous-unités,* que l'on peut séparer par ultracentrifugation. Le coefficient de sédimentation des ribosomes complets est de 70 S; ils contiennent 50 % d'eau; après dessiccation, on y trouve 27 % de protéines. La *première* sous-unité (50 S), la plus volumineuse, contient une très grande molécule d'ARN 23 S d'environ 3 200 nucléotides; ceux-ci sont associés à 34 protéines, toutes différentes (Garrett et Wittmann, 1973), qui ont été déterminées après élimination de l'ARN par une électrophorèse à deux dimensions sur couche mince d'un gel de polyacrylamide. On trouve aussi dans cette sous-unité une seconde molécule d'ARNr 5 S faite de 120 nucléotides associés à 34 protéines. La *seconde* sous-unité (30 S) comporte un ARNr 16 S de 1 600 nucléotides associés à 21 protéines.

Une telle complexité révèle la difficulté qu'il y a à comprendre ce qui se passe dans le ribosome. Un tel type de ribosome a été décrit chez une Bactérie, *Escherichia coli,* mais il n'est pas certain que les ribosomes des Eucaryotes soient aussi « simples »... En fait, chez les Eucaryotes, les ribosomes sont sensiblement plus volumineux (Favard, 1973), mais on y trouve aussi deux sous-unités, 60 S et 40 S, et il semble bien que ceux-ci n'aient pas un degré de complexité nettement plus grand. Enfin, comme le remarque Simonet, « les ribosomes d'Eucaryotes traduisent des messagers avec les ARNt d'*E. coli* et inversement ». Ils ne sont donc pas fonctionnellement différents.

— Quelle est la fonction des protéines du ribosome lors de la traduction ? Il est encore trop tôt pour répondre à cette question. Selon Favard, les ARNr seraient situés en position périphérique, ce qui permettrait la liaison des deux sous-unités du ribosome par des ions Mg^{++} disposés entre deux groupements phosphatés. Cette idée se trouve confirmée par des digestions ménagées à la ribonucléase (enzyme) : les ARNr sont très sensibles à cette diastase et ne sont donc pas protégés par une gangue protéique externe. Cependant, selon Garrett et Wittmann, les protéines sont au moins *partiellement* externes, même si elles doivent constituer ce que Favard appelle le noyau du ribosome; ces auteurs se fondent sur des expériences très précises : des anticorps spécifiques de chaque protéine se fixent sur la surface des ribosomes; de plus, des digestions ménagées par des protéases, également spécifiques, permettent de supprimer de telles réactions anticorps-antigènes. Rien de tout cela ne permet d'entrevoir le rôle des protéines ribosomiales, du moins *a priori.*

Cependant, Garrett et Wittmann estiment que la répartition des protéines ribosomiales implique un échange de certaines d'entre elles entre les sous-unités : cela faciliterait ce qu'ils appellent « les étapes mécaniques spécifiques de la synthèse protéique ».

Mécanisme de la traduction

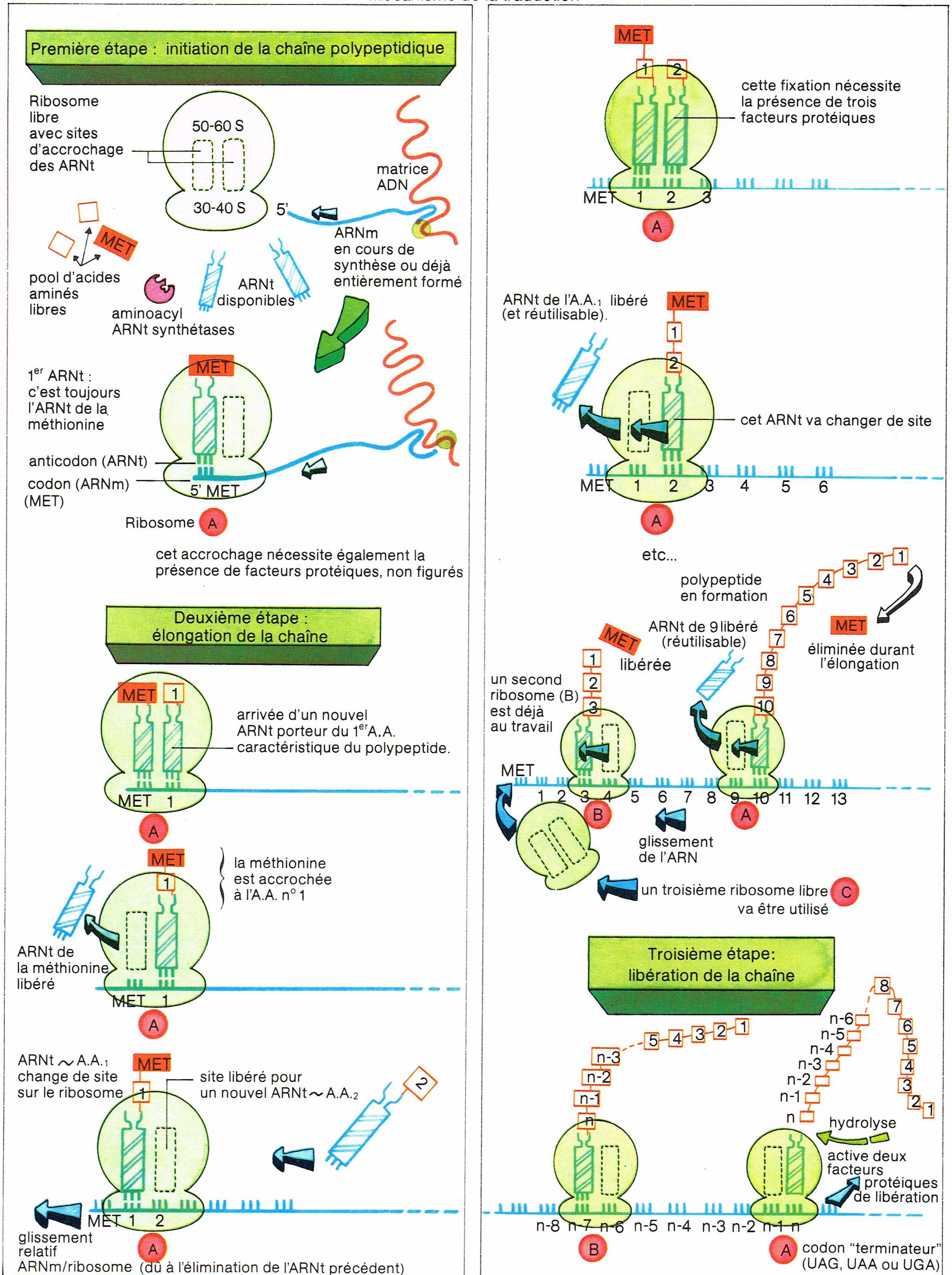

Richard Colin

▶ *Page ci-contre, principes du contrôle des synthèses protéiques (micro-organismes).*

— On cherche actuellement à savoir sur quelles séquences des molécules d'ARNr se trouve installée chacune des protéines. Un certain nombre de chercheurs essaient d'établir une *carte des liaisons,* espérant ainsi comprendre le mode de fonctionnement précis de l'organite. Au Japon, Nomura est parvenu à combiner *in vitro* des sous-unités de l'ARNr 16 S avec des protéines isolées, l'ensemble constituant des sous-unités biologiquement actives. On peut concevoir des reconstitutions de types divers, en particulier celles où l'on recombine tous les constituants moins un, ce qui peut ensuite entraîner un trouble précis de la biosynthèse effectuée *in vitro*. C'est un travail d'une ampleur considérable, fondamental pour la compréhension des mécanismes vitaux.

L'importance des protéines ribosomiales apparaît essentielle. En 1972, Kurland a montré que certaines protéines associées à l'ARNr 16 S sont indispensables pour que l'ARNt chargé de son acide aminé se fixe sur le ribosome. De plus, des mutations affectant des protéines ribosomiales changent la fidélité de la lecture, ce qui implique des ambiguïtés, puis des erreurs de codage (Gorini et coll. ; Picard).

— Que se passe-t-il durant le codage au niveau ribosomial ? Watson qualifie le ribosome d' « usine de la synthèse protéique », et Favard de « machine lectrice d'ARN messagers, qui assemble des acides aminés en chaînes protéiques ». Ces images évoquent la tête de lecture d'un magnétophone, dont la bande magnétique correspondrait à l'ARNm. Mais il est peut-être préférable d'assimiler le ribosome à une lentille de projection cinématographique : l'ARNm, qui serait la pellicule, *défilerait par saccades* derrière le ribosome-objectif, qui projetterait, non pas un enchaînement d'images, mais une chaîne polypeptidique, *traduction* fidèle du message...

Le mécanisme a été découpé en *trois étapes*. Pour que se fasse l'*initiation* d'une chaîne polypeptidique, il faut un contact entre un codon de l'ARNm et la sous-unité 30 S d'un ribosome ; cela implique l'existence d'un ARNt particulier (ARNt formyl-méthionyl) et de facteurs protéiques agissant en présence de molécules riches en énergie (GTP).

Le contact ne s'effectue pas à n'importe quel endroit de la chaîne d'ARNm. La lecture commence par l'extrémité 5' de cette chaîne ; comme cette extrémité correspond aux premiers nucléotides d'ARNm synthétisés au niveau de l'ADN, il peut y avoir contact entre des ribosomes et des molécules d'ARNm encore incomplètes. Ensuite, durant la phase d'*élongation* de la chaîne polypeptidique, la lecture se poursuit le long de l'ARNm dans le sens 5' → 3'. Toute une série de codons défilent alors au contact du ribosome ; chacun de ces codons « choisit » parmi les ARNt qui sont au voisinage du ribosome celui dont les bases non appariées lui sont complémentaires ; cet ARNt se fixe donc sur le codon complémentaire de l'ARNm et entraîne son acide aminé spécifique ; celui-ci est alors accroché au bout de la chaîne polypeptidique en formation, puis l'ARNt se détache tandis qu'un nouveau codon se présente au contact du ribosome, etc. Chaque fois qu'un ARNt perd sa liaison avec la chaîne polypeptidique en formation, il est libéré dans le hyaloplasme et peut donc servir ultérieurement pour transporter une autre molécule de son acide aminé spécifique, ce qui lui permet de participer de nouveau à la synthèse polypeptidique. Cette libération d'un ARNt est le signal d'un glissement de l'ARNm sur le ribosome : un nouveau codon se présente alors, ainsi que nous l'avons vu. Trois facteurs protéiques sont nécessaires pour que l'élongation puisse se faire ; ils permettent d'une part la fixation de l'ARNt, chargé de son acide aminé, sur le ribosome, et d'autre part le déplacement relatif de la chaîne d'ARNm au contact du ribosome ; la synthèse polypeptidique se fait donc de manière saccadée... La fin de croissance du polypeptide correspond à la phase de *libération,* durant laquelle il y a hydrolyse du complexe ARNt-polypeptide ; cela dépend de deux facteurs protéiniques, ou facteurs de libération, dont on ne connaît pas précisément le mode d'action ; ils seraient activés par certains codons jouant le rôle de signaux de fin de synthèse (ponctuation sur l'ARNm : UAG, UAA' et UGA = codons terminateurs ; de plus, aucun ARNt ne correspond à ces codons particuliers). Tout le processus est extrêmement rapide : l'élaboration d'une molécule polypeptidique de poids moléculaire 40 000 prend environ 10 secondes.

Une molécule d'ARNm est en contact avec plusieurs ribosomes échelonnés sur des segments d'environ 80 nucléotides ; l'ensemble de ces ribosomes forme un *polysome*. Autrement dit, la traduction, au niveau des ribosomes, des informations apportées par l'ARNm se fait à une cadence extraordinaire, plusieurs chaînes polypeptidiques se formant presque *simultanément*. Cette utilisation intensive des molécules d'ARNm permet une synthèse protéique fort importante ; il ne faut donc pas s'étonner que les ARNm soient, pondéralement, aussi peu abondants dans tous les types cellulaires : malgré leur faible concentration (1 à 2 % de l'ARN total), ils sont extrêmement efficaces.

Si, à l'heure actuelle, on possède un schéma du mécanisme de la synthèse protéique, il est évident que bien des points sont encore obscurs. Par exemple, on peut se demander à quoi servent les portions redondantes de l'ADN et, par ailleurs, la complexité du ribosome peut laisser perplexe.

— Notons, enfin, que l'on peut déterminer la constitution d'un ARN messager de telle ou telle protéine à partir de la séquence des acides aminés de celle-ci, puisque, en principe, chaque acide aminé de la protéine implique l'existence d'un codon particulier de l'ARNm. Il faut, bien sûr, effectuer des corrections, compte tenu de la dégénérescence du code. Il est, théoriquement, moins difficile de déterminer ainsi la structure primaire d'un ARNm que par l'analyse directe...

Principes du contrôle des synthèses protéiques

La synthèse des différents types de protéines se fait à des vitesses très différentes

Cette synthèse peut être régulière ou très nettement discontinue, et varie suivant les conditions du milieu. L'expérimentation a essentiellement porté sur les Bactéries, matériel pratique et réagissant très rapidement aux variations des conditions chimiques.

La concentration d'une protéine bactérienne peut varier considérablement suivant les conditions de nourriture d'une colonie. Par exemple, le taux de β *galactosidase* augmente dans des proportions de 1 à 1 million si la Bactérie *Escherichia coli* est cultivée sur un milieu dépourvu de lactose ou, au contraire, sur un milieu dont la source de carbone est essentiellement constituée par ce

▼ *En haut, schéma du principe de fabrication des chaînes polypeptidiques (d'après Watson). En bas, action de la* β **galactosidase** *; cette enzyme n'est synthétisée que si sa présence est nécessaire.*

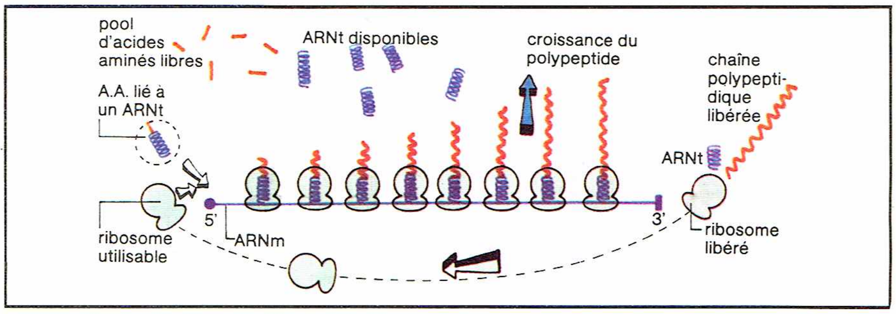

Richard Colin

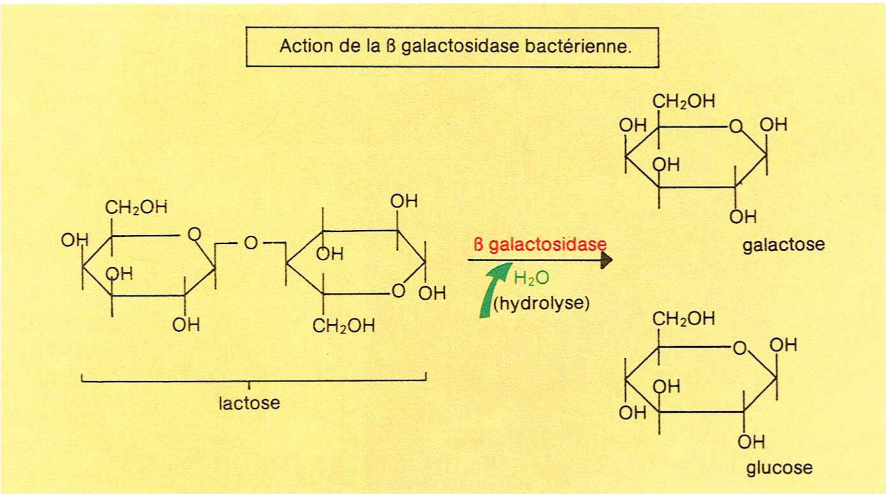

Richard Colin

diholoside : l'enzyme qui peut hydrolyser le lactose, la β galactosidase, n'est synthétisée à partir des matrices ADN-ARNm que si sa présence est nécessaire ; autrement dit, s'il n'entre pas de lactose dans la Bactérie, le gène codant pour la β galactosidase est inactif. Le lactose est un *facteur inducteur* pour cette enzyme, qui est *inductible.* (Toutes les enzymes ne sont pas inductibles.)

Par ailleurs, le taux des enzymes qui permettent la synthèse des acides aminés est voisin de zéro si le milieu contient déjà des acides aminés. Dans les deux cas, il y a adaptation de la cellule à son milieu. On estime que l'abondance d'une protéine dans la cellule dépend souvent de la quantité d'ARNm qui code pour cette protéine.

Substances jouant le rôle de répresseurs vis-à-vis de l'ADN qui permet l'élaboration des molécules d'ARNm

Il y aurait des répresseurs spécifiques de chaque type protéique, c'est-à-dire de chaque gène codant pour une protéine. Ces *répresseurs endogènes* sont eux-mêmes codés par des *gènes régulateurs,* portés par l'ADN. Toutefois, tels quels, ils ne sont pas capables de bloquer la synthèse d'ARNm : il faut pour cela qu'ils soient *activés ;* cette activation se produit grâce à des *co-répresseurs* spécifiques de chacun des répresseurs. En fait, chaque répresseur existe dans la cellule, soit sous forme activée après la liaison avec un co-répresseur, soit sous forme inactivée après liaison avec une molécule d'*inducteur.* Ainsi, nous avons vu précédemment que la synthèse de la β galactosidase nécessite la présence d'un inducteur, le lactose ; cet inducteur agit en se combinant au répresseur et en l'inactivant ; le répresseur ne peut donc plus empêcher la synthèse de l'ARNm responsable de la synthèse de cette enzyme. Watson note que ce n'est pas le lactose lui-même qui est l'inducteur, mais un dérivé très voisin, qui se forme quand le lactose entre dans la cellule.

Précisons que certains répresseurs contrôlent la synthèse de plusieurs protéines. Toujours dans le cas de la *β galactosidase,* le répresseur de cette enzyme contrôle aussi une *perméase* responsable de l'entrée du lactose dans la cellule. Or, ces deux enzymes sont liées, en ce sens qu'elles interviennent conjointement dans le métabolisme. Sur l'ADN qui code pour ces enzymes, les deux gènes sont adjacents ; ils forment ce que l'on appelle un *opéron* (Jacob et Monod, 1961) ; l'opéron permet la synthèse d'une molécule d'ARNm codant pour les deux enzymes. *Autrement dit, l'ensemble des nucléotides adjacents qui codent pour une molécule unique d'ARNm, et dont la synthèse est contrôlée par un répresseur unique, constitue un opéron.* Sur un opéron, il peut exister 1, 2 ou même un assez grand nombre de gènes (10 dans le cas de la biosynthèse de l'histidine). Le modèle est plus ou moins différent pour les Eucaryotes.

On peut se demander comment fonctionnent les répresseurs activés. Des travaux de génétique ont montré qu'ils n'agissent pas directement sur l'opéron mais sur une portion adjacente de l'ADN, qui a été appelée *opérateur :* si une mutation produit une modification de l'opérateur, le répresseur activé normal devient inefficace, et la synthèse d'ARNm se poursuit régulièrement, comme si le répresseur n'existait pas. L'*AMP cyclique* est indispensable pour que le gène opérateur soit efficace ; cette molécule agit en association avec un facteur protéique, le CAP (*catabolite gene activator protein*), mis en évidence par Beckwith et Pulman. On sait peu de chose sur le contrôle de la synthèse des répresseurs eux-mêmes.

Une remarque importante : la synthèse de certaines protéines n'est pas contrôlée par un système répresseur aussi direct

Par exemple, les enzymes qui entraînent la dégradation du glucose sont synthétisées « sans contrôle » ; en conséquence, leur taux n'est pas modifié par un apport ou par une réduction du glucose dans le milieu extracellulaire. Dans ce cas, et dans les cas semblables, la synthèse protéique s'effectue à une vitesse que l'on peut qualifier de vitesse maximale. Celle-ci dépend de divers facteurs, et elle est différente suivant le type de protéine synthétisée. La connaissance de ces facteurs est encore très imprécise ; il s'agit là d'un problème fondamental. On pense que le contrôle dépend des diverses enzymes qui conditionnent la synthèse des ARN ribosomiques.

Richard Colin

Conditions de synthèse de la β galactosidase (enzyme inductible qui hydrolyse le lactose) (Micro-organismes)

En présence de lactose :

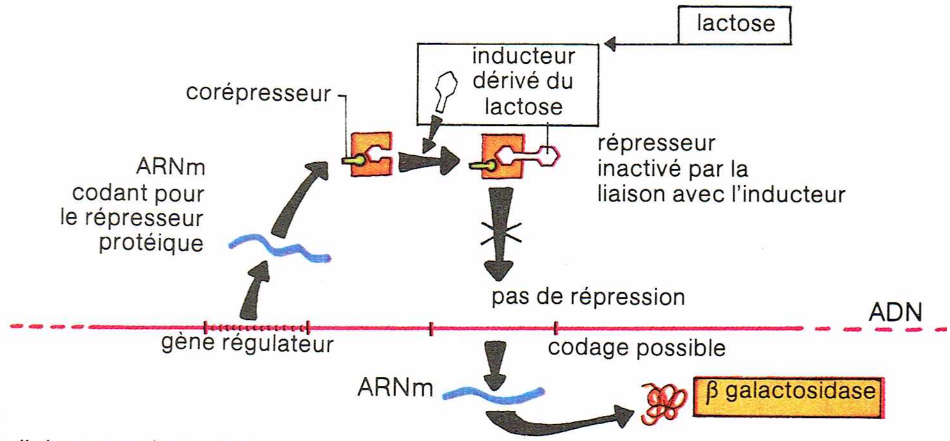

En l'absence de lactose :

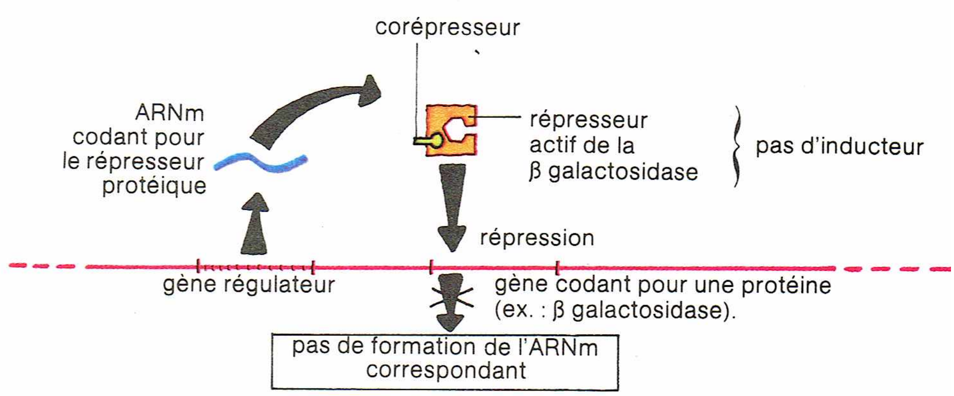

Régulation de la synthèse d'enzymes inductibles : β galactosidase galactoside perméase (Micro-organismes)

En l'absence de lactose :

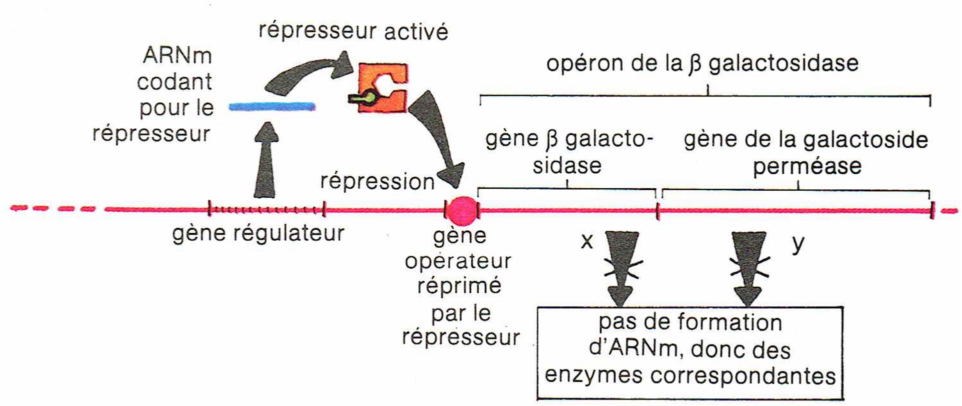

Cas d'un mutant dont le gène opérateur est modifié

En l'absence de lactose :

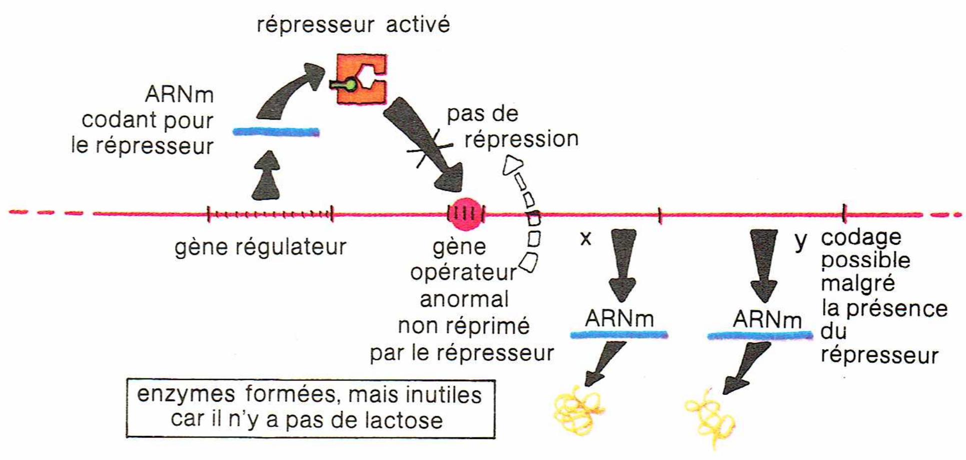

Modification expérimentale des synthèses d'acides nucléiques et de protéines

Des mutations provoquées permettent de modifier notablement les taux des synthèses nucléiques et protéiques ; il en sera question ultérieurement. Certaines substances chimiques peuvent freiner ou bloquer les synthèses à un niveau précis. D'autres peuvent avoir des effets très importants, mais moins définis.

Effets des antibiotiques

On peut empêcher la transcription, c'est-à-dire la synthèse des ARN, en introduisant dans l'organisme de l'*actinomycine*. Cette substance se combine aisément aux fibres d'ADN. Par exemple, elle empêche la poursuite du développement embryonnaire de l'œuf d'Amphibien si elle est administrée assez tardivement, c'est-à-dire juste avant la mise en place des organes ; par contre, elle est inactive durant la période initiale du développement : en effet, durant la segmentation de l'œuf, les premières cellules utilisent des ARNm préexistants, fabriqués par l'ovocyte avant la fécondation ; la fixation de l'actinomycine sur l'ADN est alors inefficace tant qu'il n'est pas nécessaire de synthétiser de nouveaux ARN (Brachet et coll., 1964).

La traduction peut être bloquée par la *puromycine,* qui agit au niveau des ribosomes et empêche donc la synthèse des protéines. En reprenant l'exemple de l'œuf, on constate que l'action de cette substance antibiotique se manifeste dès le début de la segmentation, au stade 2 ou 4 cellules (Brachet, 1964 ; Legros et Brachet, 1965). L'œuf ne contient donc pas un stock suffisant de protéines pour poursuivre son développement. On obtient les mêmes résultats avec la *cycloheximide*. Chez *Escherichia coli,* la synthèse protéique peut être inhibée par la *spectinomycine,* un antibiotique aminoglucosidique se fixant sur la sous-unité 30 S du ribosome. L'effet de la *streptomycine,* bien qu'un peu plus complexe, est sensiblement le même. Dans les deux cas, les antibiotiques ne modifient qu'un acide aminé de l'une des nombreuses protéines contenues dans le ribosome (Funatsu, 1972 ; Kurland, 1972). Garrett et Wittmann citent également le cas de la *kasugamycine,* qui provoque une modification apparemment très minime de l'extrémité des chaînes d'ARNr (Helser et coll., 1971).

La *tétracycline* agit en empêchant la fixation des ARNt sur le ribosome. La *lincomycine,* la *sparsomycine* et le *chloramphénicol* empêchent la formation des liaisons peptidiques. D'autres antibiotiques bloquent l'élongation des chaînes polypeptidiques en agissant sur les facteurs protéiques du ribosome.

La connaissance du ribosome est donc d'une grande importance non seulement du point de vue fondamental, mais aussi, comme on peut s'en rendre compte, du point de vue de la biologie médicale.

Effets des histones

On sait que les histones sont étroitement associées aux molécules d'acides nucléiques. Chez un embryon, un apport exogène d'*histones* provoque des effets qui rappellent beaucoup ceux de l'actinomycine (Brachet, 1964). Dans ce cas, les résultats sont très frappants ; car les premières cellules de l'embryon n'ont pas, à proprement parler, de périodes de repos durant leur cycle de reproduction : les synthèses sont importantes et seulement interrompues durant la mitose (ce dernier point serait d'ailleurs discutable). Les histones inactivent l'ADN sur lequel elles agissent globalement, sans manifester d'affinité pour telle ou telle séquence. Cependant, selon Denis (1974), les histones endogènes subissent des modifications après leur synthèse : après acétylation et méthylation de certains de leurs constituants, ces protéines basiques pourraient « choisir » telle ou telle séquence de l'ADN ; l'action des histones est donc vraisemblablement compliquée par celle de leurs dérivés.

Remarquons que les antibiotiques et les histones sont capables d'arrêter les synthèses protéiques en agissant à des niveaux bien précis du mécanisme, mais avec des effets extrêmement différents suivant le type de cellule traité. Ainsi, l'embryon est particulièrement sensible aux histones, de même que les Bactéries à l'action de certains antibiotiques tels que le chloramphénicol, alors que des cellules de Vertébrés ne subissent aucun dommage (Ehrenstein et Lipmann, 1961 ; Pouyet, 1968). Il s'agit là d'un point essentiel : on peut ainsi, lors d'une infection, bloquer les synthèses protéiques de Bactéries, donc provoquer leur mort, sans perturber les cellules du malade.

Effets des alkylants et de divers composés nitrés artificiels

Certaines molécules modifient la structure de la chromatine sans empêcher la croissance de la cellule : ces agents peuvent provoquer des *mutations*. Ce sont les « moutardes » au soufre (les gaz de combat du type ypérite) et à l'azote, les époxydes, les éthylène-imines, les méthane-sulfonates, et les lactones. Outre leur toxicité, évidemment très frappante pour les fortes doses, ces substances sont mutagènes et cancérigènes ; chez la souris et surtout chez le rat, on provoque, en les injectant, des sarcomes, ou tumeurs conjonctives (Haddow, 1958 ; Mac Donald, 1961). L'ADN est altéré par les alkylants (Brookes et Lawley, 1961). Il y aurait entrecroisement et soudure des brins d'ADN, ce qui entraînerait des aberrations lors de la mitose, l'erreur introduite étant durable et reproductible.

Certains composés nitrés provoquent des aberrations de la synthèse de l'ADN ; ils sont alors mutagènes et peuvent être considérés comme cancérigènes.

On cite souvent le cas, très frappant du point de vue de la mutagenèse et même de la tumorigenèse, du *méthylnitroso-uréthane,* de la *diméthylnitrosamine* et de la *nitrosoguanidine*. Ce dernier composé est, à l'heure actuelle, très couramment utilisé pour provoquer des mutations

▼ En haut, représentation schématique du niveau d'action de quelques antibiotiques : l'actinomycine D empêche la transcription en se fixant sur l'ADN (guanine essentiellement) : la puromycine est un « analogue » des ARNt, qui peut entraîner des aberrations et l'arrêt de la synthèse des protéines. En bas, action des alkylants sur les acides nucléiques (selon Brookes et Lawley) : liaison aberrante entre la guanine et la thymine (cross-linkage) ; R : corps contenant un ou deux groupements alkyls CH_3 (CH_2) n.

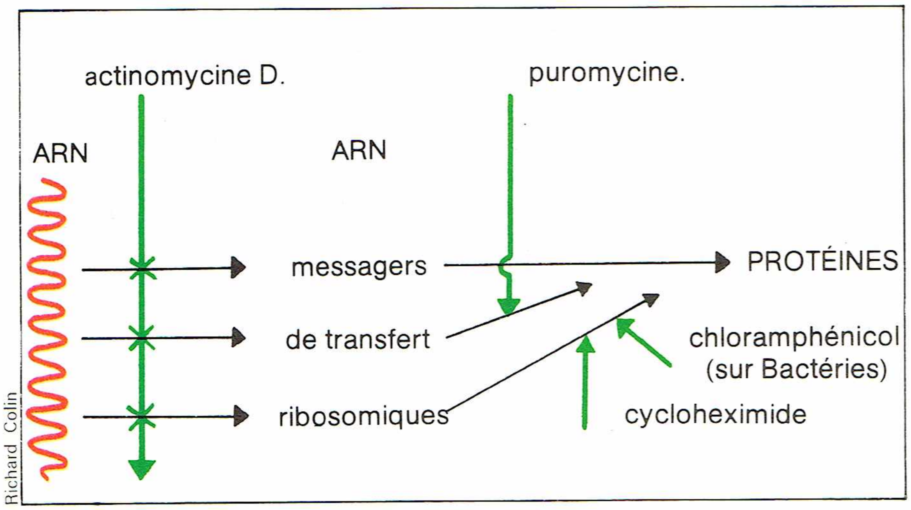

Richard Colin

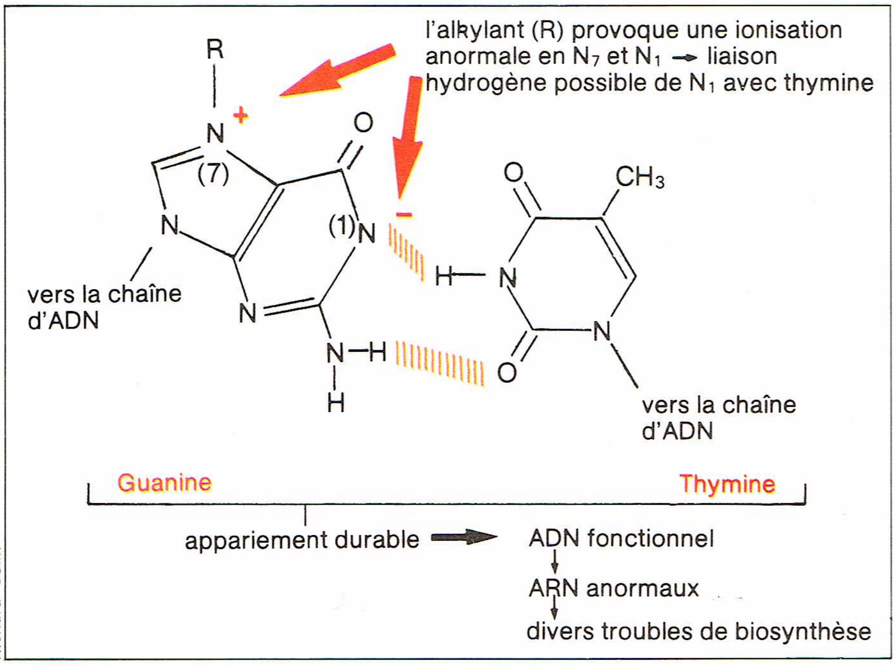

Richard Colin

chez les Bactéries; il s'agit, bien sûr, d'une substance extrêmement délicate à manier, étant donné le danger qu'elle représente. Magee et Schoental précisaient dès 1964 que l'absorption de ces molécules par voie buccale provoque de graves lésions du tube digestif; par voie respiratoire, elle déclenche une congestion et un œdème pulmonaire, et ensuite, des tumeurs peuvent se former chez le rat. Une seule dose de certains de ces composés nitrés peut induire des tumeurs. On n'insistera jamais assez sur les précautions qui doivent être prises quand on manipule des substances toxiques, en particulier des mutagènes. Boyland et Roe ont montré, en 1964, qu'il existe des nitrosamines dans la fumée de tabac.

Effets des antimétabolites

Les antimétabolites agissent sur divers types de molécules. Ceux qui *ralentissent* les synthèses d'acides nucléiques sont particulièrement importants : ils provoquent une altération chromosomique et une baisse du taux des divisions cellulaires (Biesele, 1961). Il peut s'agir d'analogues des bases puriques ou pyrimidiques ou d'analogues de substances immédiatement nécessaires pour la biosynthèse des nucléotides.

— Les *antifoliques* sont des analogues de l'acide folique, dont l'activité vitaminique a déjà été évoquée. Or, l'acide folique permet la biosynthèse des bases puriques et des nucléotides. Les antifoliques les plus connus, l'*aminoptérine* et l'*améthoptérine*, ont été employés dans la lutte antitumorale.

— Les *antipurines* sont des analogues des purines. Ces substances bloquent généralement l'une des étapes de la synthèse des nucléotides puriques. De nombreuses molécules ont été expérimentées, en particulier la *2,6-diaminopurine* et la *8-azaguanine*. La *6-mercaptopurine* s'est révélée moins toxique pour l'individu et cependant relativement efficace sur certaines tumeurs; elle provoque la formation d'un nucléotide anormal qui entraîne la mort de la cellule.

— Les *antiglutamines* empêchent les transferts de NH_2, qui sont nécessaires à la formation des purines et de la cytosine.

— Les *antipyrimidines* ralentissent les synthèses de pyrimidines; comme dans le cas des antipurines, il y a compétition avec le substrat normal pour un site enzymatique responsable d'une étape ultérieure de la biosynthèse. Ces analogues des pyrimidines sont également capables de s'incorporer activement dans un ARN qui ne peut donc plus synthétiser de protéines normales (par exemple, le bromo-uracile est mutagène). Des milliers d'antipyrimidines ont été essayées; peu d'entre elles sont utilisables en thérapeutique; il s'agit de composés fluorés, bromés ou iodés, qui, dans l'ensemble, sont dangereux pour l'organisme.

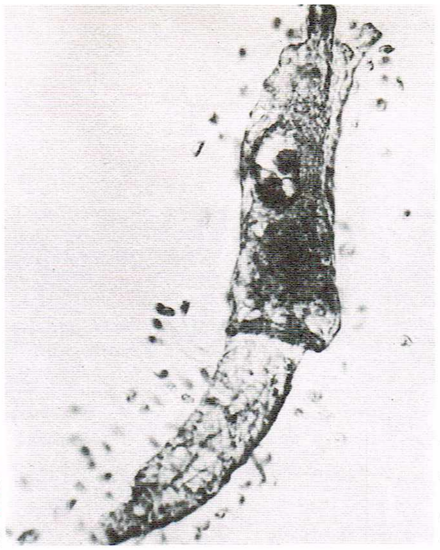

J. Bouchard

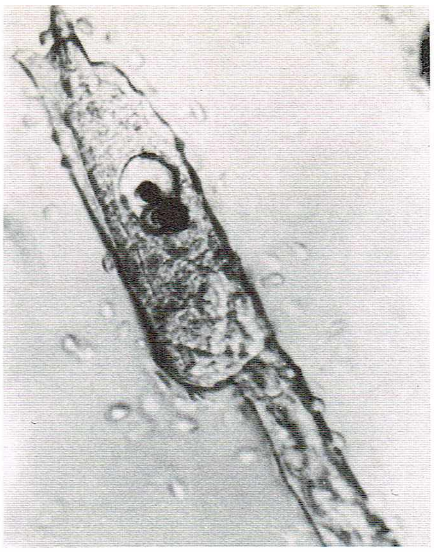

J. Bouchard

▲ *A gauche, larve « têtard » d'ascidie : aspect du corps et d'une partie de la queue d'un animal* normal. *A remarquer, dans la région moyenne du corps, l'existence d'un « cerveau », la vésicule cérébrale, qui contient deux organes récepteurs pigmentés (mélanines dérivées de certains A. A.).*
A droite, têtard traité par la 6-mercaptopurine *(2 × 10^{-4} M) et présentant une queue très courte déformée et un corps subnormal; mais la synthèse des mélanines cérébrales est totalement bloquée (à dose faible, la 6 MP bloque essentiellement le codage permettant la formation de tyrosinase, enzyme mélanisante).*

▼ A, *action comparative d'un analogue des purines sur des cultures normales et tumorales (d'après Rich et Eidinoff); les cellules normales sont des fibroblastes d'embryon de poulet : les cellules tumorales proviennent d'un cancer humain (lignée H. Ep. 1, Sloan Kettering Institute, N.Y.).* B, *la synthèse de ce ribotide (nucléotide) est un exemple de* « synthèse létale ». C, *action d'une* antipyrimidine.

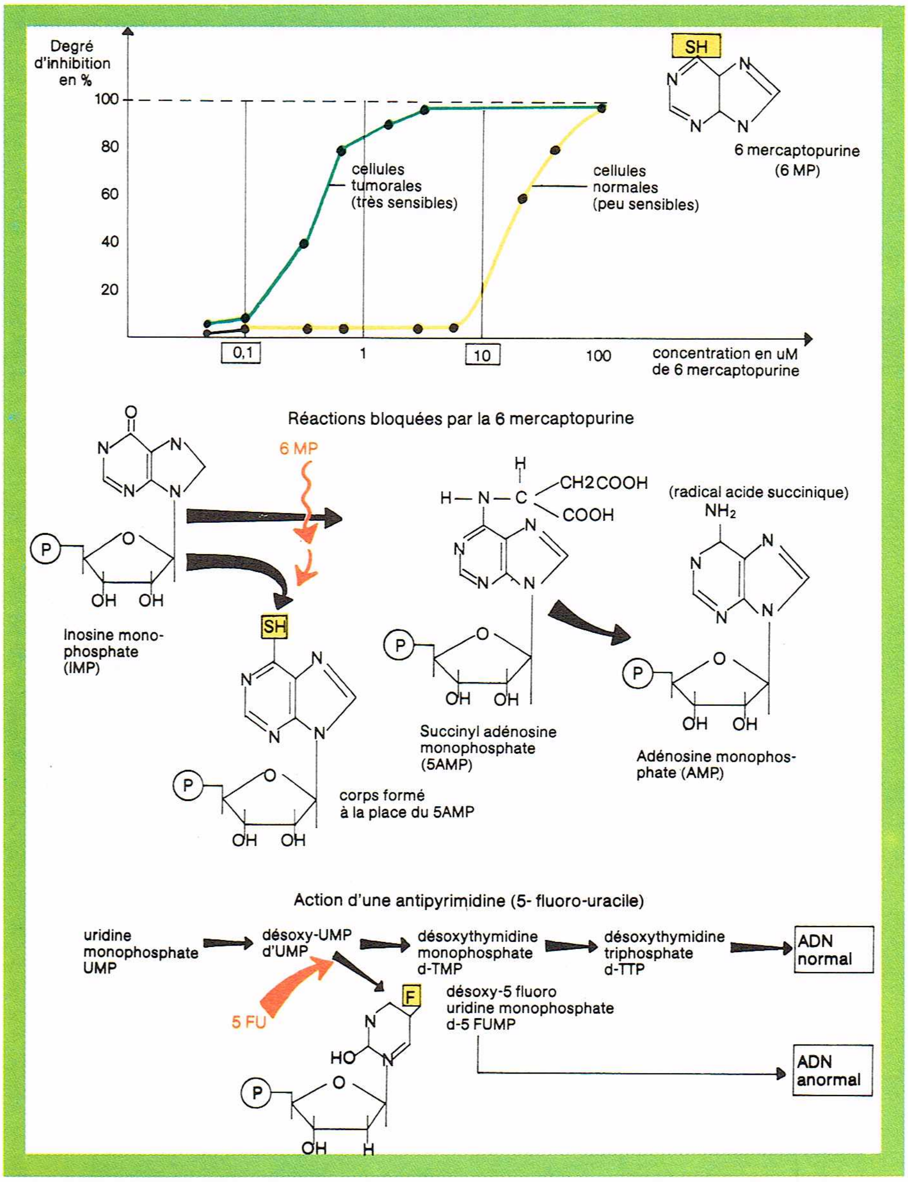

Richard Colin

BIBLIOGRAPHIE FONDAMENTALE

BERKALOFF A., BOURGUET J., FAVARD P. et GUINNEBAULT M., *Biologie et Physiologie cellulaire,* Hermann, éd., Paris, 322 p., 1973. - DENIS H., *Précis d'embryologie moléculaire,* Presses univ. de France, 232 p., 1974. - DURAND M. et FAVARD P., *la Cellule,* Hermann, éd., Paris, 223 p., 1972. - FLORKIN M. et SCHOFFENIELS E., *Biochimie et Biologie moléculaire,* Desoer, éd., Liège, 578 p., 1967. - GARRET R.A. et WITTMANN H.G., *Structure et Fonction du ribosome,* in *Endeavour,* vol. XXXII, n° 115, p. 8-14, 1973. - GUILLÉ E. et QUÉTIER F., *Heterochromatic, Redundant and Metabolic DNA : a New Hypothesis about Their Structure and Function,* in *Progress in Biophysics and Medecular Biology,* vol. 27, p. 121-142, 1973. - KARLSON P., *Biochimie,* Doin, éd., Paris, 403 p., 1964. - KAYSER C.H.L., *Physiologie,* Éd. Médicales, Flammarion, 1963. - KRUH J., *Biochimie,* Hermann, éd., Paris, 501 p., 1971. - KRUYT H.R. et OVERBECK J. Th. G., *Initiation à la chimie physique,* Masson et Cie, éd., 236 p., 1961. - MONTAGNA W., *The Structure and Function of Skin,* Acad. Press., New York, 356 p., 1956. - ODARTCHENKO N., *Production cellulaire érythropoïétique,* Springer-Verlag, éd., Berlin-Heidelberg-New York, 107 p., 1968. - WATSON J.D., *Biologie moléculaire du gène,* Édiscience, éd., Paris, 492 p., 1968.

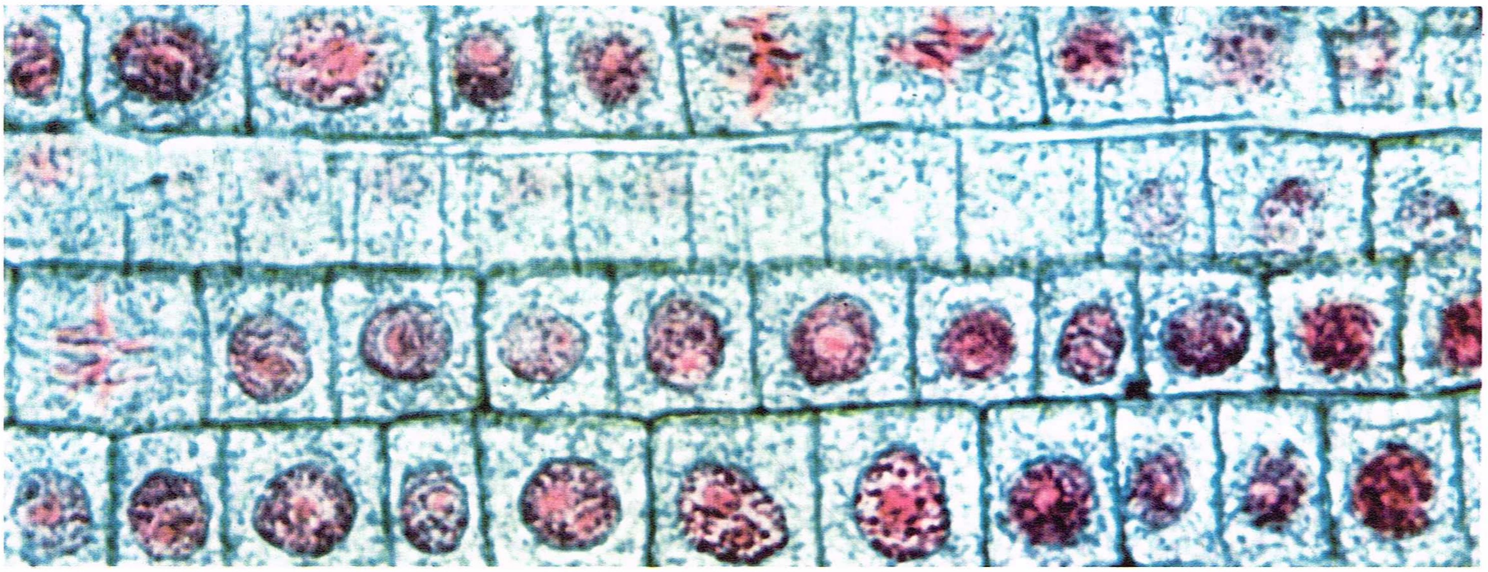

Archives P2

▲ *Coupe longitudinale du tissu méristématique de la racine d'un* Allium *: voir les noyaux; de plus, remarquer les* chromosomes *particulièrement beaux chez les végétaux durant la division cellulaire.*
▶ *Page ci-contre, coupe dans le tissu conjonctif d'un Invertébré; mise en évidence des acides nucléiques par la* coloration au vert de méthyle-pyronine *: l'*ADN *est coloré en vert et les* ARN *en rose (noter l'abondance des ARN dans le nucléole).*

STRUCTURES ET FONCTIONNEMENT CELLULAIRES

ORGANISATION DE LA CELLULE

Le noyau cellulaire

Le noyau existe dans toutes les cellules, à l'exception des Bactéries. Découvert à la fin du XVII[e] siècle, il ne fut guère décrit avec précision avant Heidenhain.

Observation du noyau en microscopie optique

Le noyau de la cellule vivante est observable avec n'importe quel type de microscope. Il peut être étudié très précisément chez des cellules cultivées.

Étude au microscope à contraste de phase

Le microscope à contraste de phase permet de bien observer les constituants du noyau vivant. La *membrane* nucléaire est très facile à voir; elle entoure la *chromatine,* qui baigne dans un *suc nucléaire* hyalin; de plus, le noyau contient souvent un ou plusieurs *nucléoles.* La réalité de la membrane peut être mise en évidence par microdissection de la cellule; grâce à un micromanipulateur (principe de De Fonbrune), on peut extraire le noyau cellulaire de la masse cytoplasmique. La chromatine constitue des mottes de taille et de forme assez irrégulières, dispersées dans le suc nucléaire, mais dont un grand nombre sont en contact avec la membrane. Le nucléole, généralement subsphérique, est d'aspect granuleux; en 1956, Chèvremont l'a décrit comme un « réseau ténu portant de petits granules plus ou moins groupés ».

Étude par la microcinématographie

La microcinématographie, technique qui permet une étude de la cinétique des constituants cellulaires, montre que les granulations se déplacent fréquemment et qu'elles entrent souvent en contact avec la membrane nucléaire; dans ces cas, le nucléole émet des substances qui *traversent* la membrane nucléaire pour gagner le cytoplasme. Cette activité du nucléole et, parallèlement, son volume varient en fonction des conditions dans lesquelles se trouve la cellule observée (Frédéric, 1953).

Étude précise du noyau et de ses constituants : fixation puis coloration

— *Fixation*

L'étude du noyau peut être réalisée sur des coupes d'organes (donc de cellules) préalablement fixés. La fixation est une coagulation des particules colloïdales contenues dans la matière vivante; elle peut être obtenue par différents facteurs physiques ou chimiques. Les images observables sont différentes suivant le type de fixateur utilisé. Chaque fixateur chimique possède, bien sûr, des propriétés différentes; notamment, la vitesse de pénétration dans la cellule est un facteur fondamental; de ce point de vue, l'acide acétique est un excellent fixateur, très pénétrant. Par ailleurs, les effets chimiques des fixateurs sont tels que ceux-ci ne permettent jamais la fixation de tous les constituants cellulaires dans des conditions satisfaisantes. Ainsi, l'acide acétique permet de fixer convenablement les éléments du noyau, mais détruit d'autres organites (les mitochondries cytoplasmiques par exemple).

Les meilleurs résultats sont obtenus grâce à des fixateurs oxydants où l'on a combiné différentes substances : les plus utilisées sont l'acide acétique, l'aldéhyde formique (formol), l'acide picrique, le bichromate de potassium, le chloroforme, l'alcool (ce dernier pénétrant mal dans la cellule, on ne peut donc l'utiliser seul), etc. On utilise de nombreux mélanges, auxquels on donne le nom de leur inventeur : Carnoy, Helly, Bouin, etc.

Un des meilleurs fixateurs est l'*acide osmique* (tétroxyde d'osmium, OsO_4); on l'emploie seul, mais il ne fixe que de très petits fragments d'organes car il est très peu pénétrant. Pour l'étude du noyau, on utilise fréquemment le *mélange de Bouin* (formol, acide picrique et acide acétique) ou de *Helly* (formol, bichromate de potassium et sel de mercure).

— *Colorations*

Les colorations doivent être adaptées au fixateur choisi; on trouve à ce sujet des précisions essentielles dans le traité de Langeron. Il existe des colorations nucléaires simples, suffisantes pour distinguer les constituants. On utilise non seulement des produits basiques (bleu de méthylène, vert de méthyle), mais aussi des substances dont le mode d'action est quasiment inconnu : ainsi, l'*hématoxyline* est un colorant d'origine végétale, et cette « laque » ne se conduit pas simplement comme un colorant basique (Bloom et Fawcett, 1968).

J. Bouchard

▶ *Mise en évidence de la* chromatine *de l'œuf d'*Ascaris megalocephala univalens*; on a utilisé le* bleu de toluidine *(pH5) et « différencié » dans l'acide acétique, pour n'obtenir qu'une coloration chromatinienne (œuf observé* in toto*).*

— *Colorations spécifiques*

Pour une étude plus précise de la nature chimique des constituants du noyau, il est nécessaire d'utiliser certains colorants dont l'action est plus spécifique et mieux connue ; les teintures peuvent être de véritables *tests d'histochimie*.

Ainsi, le **bleu de toluidine** se fixe uniquement sur les acides nucléiques de la chromatine et du nucléole ; sa spécificité n'est pas très étroite, mais un artifice permet d'obtenir que seul l'ADN soit coloré ; pour cela, on hydrolyse au préalable tout ce qui est ARN en utilisant la *ribonucléase*, puis, après lavage, on colore l'ADN au bleu de toluidine.

La **réaction de Feulgen**, plus utilisée que la précédente, permet de localiser directement l'ADN. Des cellules ou des coupes de tissus sont traitées par une solution d'acide chlorhydrique, destinée à provoquer une hydrolyse ménagée de l'ADN sans entraîner sa dépolymérisation : les conditions choisies sont telles que seules les bases puriques sont éliminées ; l'ADN ne comporte plus alors que des bases pyrimidiques, dont la thymine, qui lui est spécifique. On procède alors à la coloration : le *réactif de Schiff*, leuco-dérivé de la fuchsine basique, peut alors se fixer sur les résidus de désoxyribose comportant encore la thymine et la cytosine ; dans le même temps, il retrouve sa coloration initiale, rouge plus ou moins pourpre. Cette mise en évidence est une réaction typique en histochimie, et, si les conditions de travail sont strictement uniformisées, il est possible de doser la quantité d'ADN contenue dans un noyau en employant un système photométrique, dont le principe est assez simple. La valeur histochimique du test est facile à prouver : on utilise pour cela une enzyme, la *désoxyribonucléase* ; les cellules traitées par cette enzyme ne peuvent plus être colorées par le réactif de Schiff, puisque l'ADN est alors totalement hydrolysé.

Enfin, par la **technique de Brachet** au *vert de méthyle* et à la *pyronine*, il est possible d'obtenir, en même temps, une coloration différentielle de l'ADN et de l'ARN d'un noyau : quand elle est convenablement appliquée, cette technique permet de colorer l'ADN en vert et l'ARN en rose.

Les colorations classiques et celles d'histochimie mettent bien en évidence les acides nucléiques : on voit ainsi que la chromatine est Feulgen +, donc très riche en ADN, tandis que les nucléoles sont Feulgen —, donc riches en ARN. Dans certaines cellules, on peut mettre en évidence la présence d'ADN dans la partie corticale du nucléole, et il en existe de petites quantités à l'intérieur même de l'organite.

D'autres techniques d'histochimie peuvent être mises en œuvre pour localiser diverses substances du noyau ; nous en citerons les résultats essentiels.

On peut constater que le noyau contient des protéines. Il y a des *protéines acides* et surtout une quantité importante d'*histones* (décelables par la technique au *fast-green*). Ces histones sont liées à la chromatine. Dans les spermatozoïdes, les *protamines* remplacent les histones.

Diverses enzymes peuvent être mises en évidence dans le nucléoplasme ou dans la chromatine et le nucléole. Ainsi, la *phosphatase alcaline*, ou *phosphomonoestérase alcaline*, est repérable ; elle est d'autant plus abondante que l'activité cellulaire est plus grande.

Certains auteurs ont montré qu'il existe des lipides dans le noyau, en particulier au contact de la chromatine (Gahen, 1965) ; ces *phospholipides* jouent un rôle important dans le maintien de l'architecture moléculaire de l'ADN lié aux histones par des ponts salins.

▼ A gauche, coloration des noyaux de cellules épidermiques par la réaction de Feulgen spécifique de l'ADN ; peau, localement cornée, de crapaud (pustule). A droite, aspect du noyau dans divers types de cellules (champ combiné) ; coupe de moelle osseuse (souris) : la coloration à l'hématoxyline, après utilisation d'un fixateur acide, permet d'observer aisément le noyau mais rend impossible l'étude des organites cytoplasmiques (microscopie optique). 1, épithélium d'un capillaire ou endothélium ; 2, cellules jeunes de la lignée érythrocytaire (blastes) ; celle-ci donne les globules rouges ou hématies ; 3, hématie (anucléée) ; 4, cellule mère des mégacaryocytes qui sont à l'origine des plaquettes sanguines ; 5, mégacaryocyte ; 6, cellule de la lignée histio-monocytaire ; 7, globule blanc « polynucléaire ».

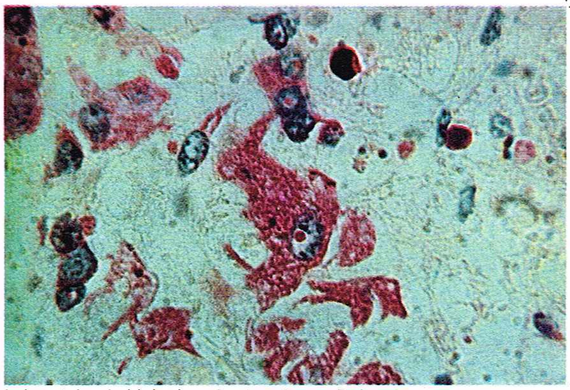

Laboratoire de biologie animale - Orsay. Pr Lender

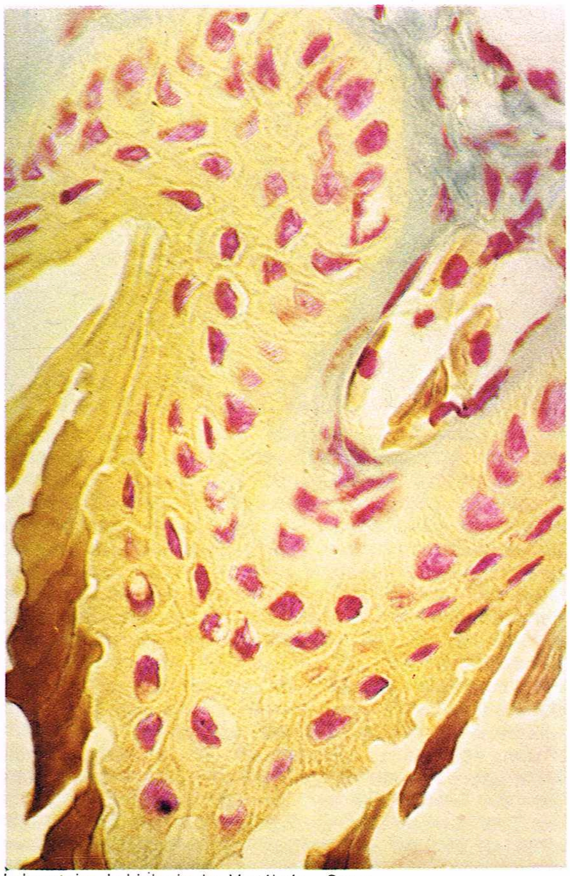

- Laboratoire de biologie des Vertébrés - Orsay

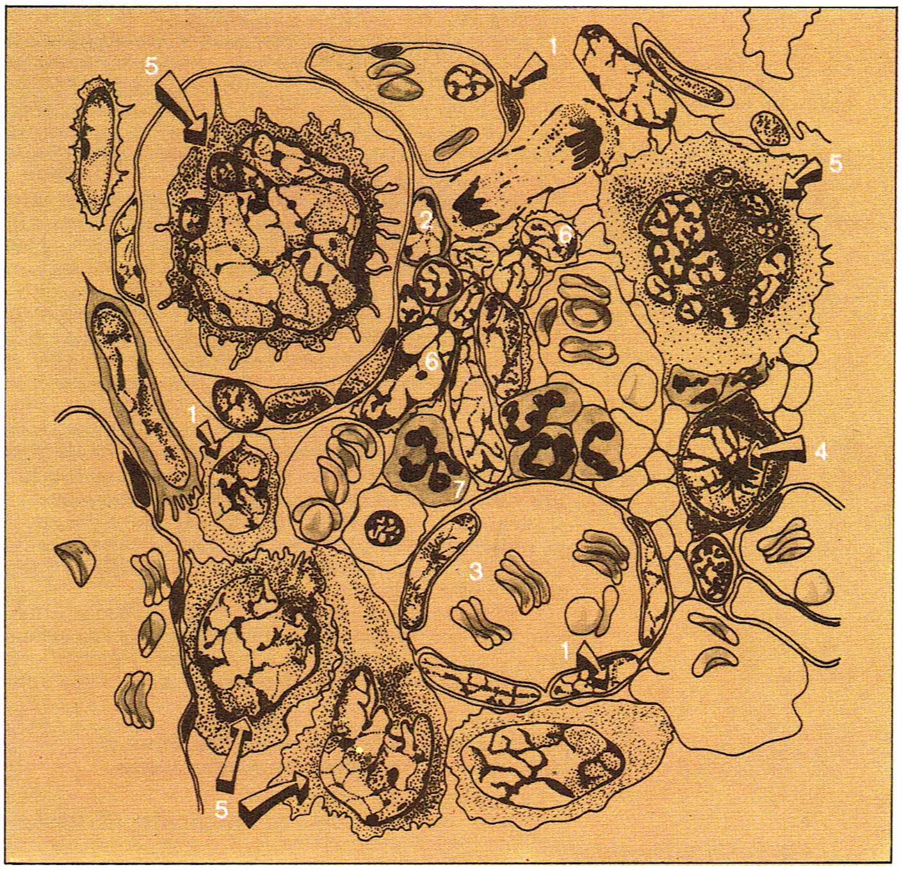

Richard Colin - document C. Bouchard

▶ *Page ci-contre, en haut : à gauche, mise en évidence de* **noyaux de cellules** *animales (larve d'Amphibien) par une* **coloration** *topographique; à droite, coupe de ganglion sympathique de souris : le nucléole est visible dans le noyau de plusieurs cellules nerveuses. On voit ici que sa colorabilité n'est pas homogène : de la chromatine lui est associée (coloration topographique).*

— *Autres techniques de localisation*

On utilise assez souvent l'observation en **lumière ultraviolette** pour mettre en valeur les acides nucléiques. L'orange d'acridine provoque une belle fluorescence de la chromatine et du nucléole. Certaines techniques permettent le dosage de l'ARN ou de l'ADN. Il s'agit donc de réactions aussi fructueuses que, par exemple, celle de Feulgen. Nous y reviendrons lors de l'étude des chromosomes.

La **micro-incinération** de cellules (à une température de 500 à 600 °C) permet de localiser les éléments minéraux les plus abondants de la cellule. Cette méthode fut très utilisée par Policard (1931-1940), Scott (1933-1943) et Gage (1938). Elle demande beaucoup d'habitude, car il faut distinguer les éléments en déterminant la couleur des cendres visibles au microscope. Ainsi, Policard a pu montrer que, dans la cellule, le noyau est une véritable réserve de calcium, ce qui a confirmé les résultats obtenus grâce à des méthodes histochimiques, parfois discutées (Lison).

On utilise maintenant la **microsonde électronique** (sonde de Castaing) pour localiser les éléments minéraux dont le coefficient d'absorption est très spécifique. Le calcium est solidement associé à l'ADN de la chromatine; comme le fait remarquer Favard, il ne peut être extrait du noyau qu'en détruisant l'ADN par la désoxyribonucléase. Il y a d'autres éléments dans le noyau, en particulier le magnésium, activateur de la phosphatase (Chèvremont). L'existence de Fe^{++}, Co^{++} et Zn^{++} doit être notée, car ces ions bivalents modifient la configuration des nucléoprotéines (Kabat, 1967), ce qui peut être important, en particulier, lors de la division cellulaire.

Analyse chimique de noyaux

Il ne s'agit pas, cette fois, d'une étude microscopique, mais d'une analyse chimique des « fractions noyaux » obtenues par élimination du cytoplasme, centrifugation et purification des noyaux d'un grand nombre de cellules, toutes identiques.

Pour cela, on broie un fragment d'organe dans un milieu convenable, contenant du saccharose et des ions Ca^{++} (la membrane nucléaire n'est pas nettement lésée); ensuite, on effectue une centrifugation différentielle qui permet d'obtenir la fraction contenant les noyaux. Après purification, cette fraction est analysée selon les méthodes décrites dans les chapitres précédents.

Cette analyse confirme et précise tout ce qui est observé avec les méthodes d'histochimie. Comme le remarque Favard, les proportions de chacun des constituants chimiques ne sont pas les mêmes suivant le type cellulaire étudié. Par exemple, le noyau du spermatozoïde renferme environ 60 % d'ADN, alors que celui d'une cellule femelle mûre, l'ovocyte, n'en contient que 1 %.

Pour un type cellulaire donné, les proportions d'ADN, d'ARN et de protéines basiques sont fixes, comme on s'en rend compte en analysant les noyaux de cellules hépatiques de plusieurs individus de la même espèce. Cette observation confirme l'étroite interdépendance de ces trois groupes moléculaires. Notons qu'il est difficile de chiffrer la quantité de protéines acides présentes dans le noyau; en effet, il s'agit d'enzymes et de protéines de structure qui résistent mal au fractionnement des constituants cellulaires.

Si l'on compare les valeurs absolues d'ADN contenues dans les noyaux de différents types cellulaires, on constate que, pour une espèce donnée, les chiffres sont toujours très voisins, sauf en ce qui concerne les cellules sexuelles. Chez le coq, il y a environ $2,5 \cdot 10^{-9}$ mg d'ADN par noyau de *cellule somatique,* alors que le noyau du spermatozoïde, *cellule germinale* mâle, n'en contient que $1,26 \cdot 10^{-9}$ mg, soit la moitié de la valeur précédente.

L'étude des ions qui sont liés à l'ADN peut être effectuée avec précision; le système qui permet le dosage de cations par « redissolution anodique » fournit des résultats intéressants, qui ne pourraient pas être obtenus d'une autre manière.

Étude structurale et aperçu fonctionnel du noyau en microscopie électronique

Le contenu du noyau

L'étude de la cellule au *microscope électronique* implique une fixation préalable. De plus, il convient de « colorer » les structures afin d'augmenter les contrastes. La fixation et la préparation sont des techniques délicates qui demandent énormément de soin et de patience. L'*acide osmique* est un bon fixateur; on l'utilise généralement après un passage de la pièce à fixer dans une solution de *glutaraldéhyde.* Les durées de fixation et les concentrations dépendent directement du type cellulaire étudié.

La préparation des pièces demande plusieurs lavages par des *solutions tampons,* qui préviennent tout gonflement ou toute rétraction des organites cellulaires. En fait, s'il existe des principes communs, chaque chercheur doit adapter le traitement de ses pièces à la nature des structures qu'il veut analyser dans tel ou tel type cellulaire.

L'observation de préparations fixées ne donne jamais de grands contrastes en microscopie électronique : les images obtenues sont généralement très grises. Il convient donc de « colorer » ces préparations (le terme n'est pas très adéquat puisque le faisceau électronique ne donne que des images en noir et blanc). On n'utilise guère que trois ou quatre techniques différentes : la coloration à l'*acétate d'uranyle* permet une excellente observation des membranes cellulaires; le *citrate de plomb* met en valeur les autres constituants, la chromatine, le nucléole ou les ribosomes; on utilise parfois une solution de *bichromate de potassium,* qui fournit en particulier de bonnes images des membranes; enfin, la *double coloration* à l'*acétate d'uranyle* et au *citrate de plomb* est universellement utilisée.

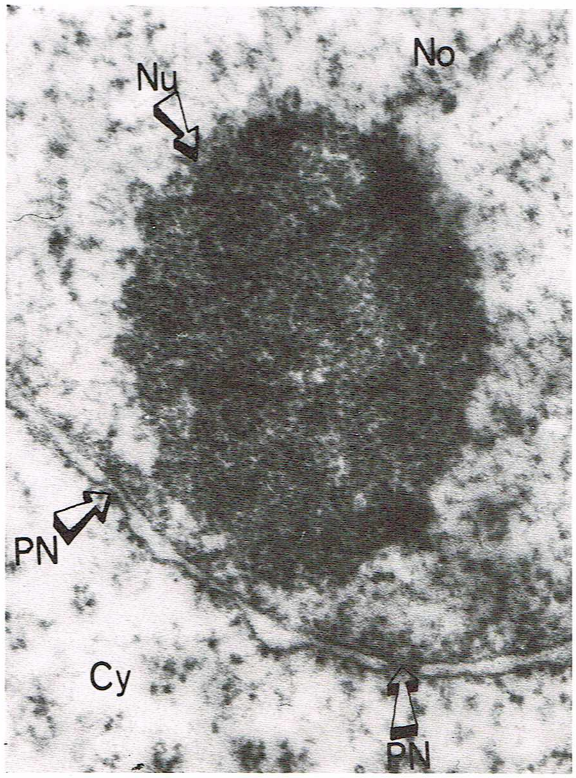

C. Bouchard

▶ **Nucléole** *d'une cellule d'ascidie observé à fort grossissement; on y voit très nettement les amas de particules d'*ARN ribosomique *(microscopie électronique). No, noyau; Nu, nucléole; Pn, pore nucléaire; Cy, cytoplasme.*

L'ultrastructure du *nucléoplasme* est « très simple » puisqu'il s'agit d'un gel de protéines dont la configuration n'est pas décelable. Cependant, de place en place, au contact de la membrane nucléaire, le nucléoplasme est plus dense aux électrons (la nature et les fonctions de ces zones posent des problèmes). On estime que la dégradation des sucres se produirait au niveau du nucléoplasme.

Ce qui frappe essentiellement quand on observe l'ultrastructure d'un noyau, c'est l'abondance de la *chromatine.* Il est toutefois difficile d'analyser précisément les images; en effet, on y distingue une structure fibrillaire, dont il semble impossible de comprendre l'organisation. Selon Favard, « il n'y a aucun moyen d'en relier les aspects morphologiques aux données biochimiques ».

Dans l'ensemble, il faut constater qu'à l'heure actuelle la structure fine du matériel génétique ne peut pas être comprise avec l'aide du microscope électronique. Les résultats obtenus avec un matériel particulièrement favorable, tel que des spermatozoïdes en formation, laissent espérer que des précisions seront obtenues dans l'avenir;

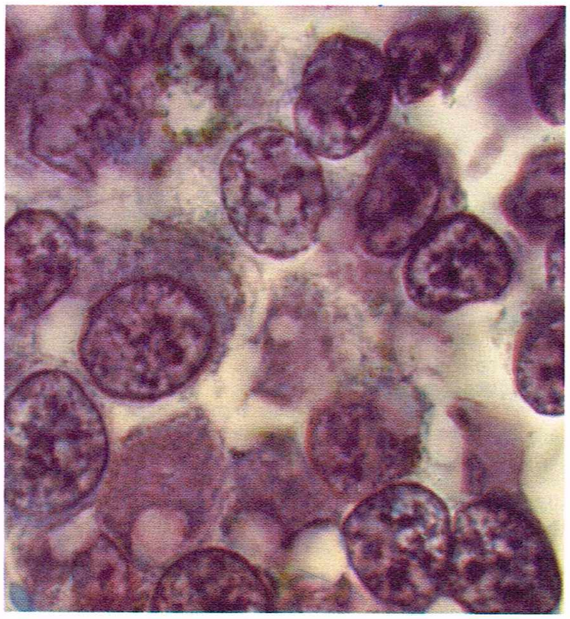

P. Castano

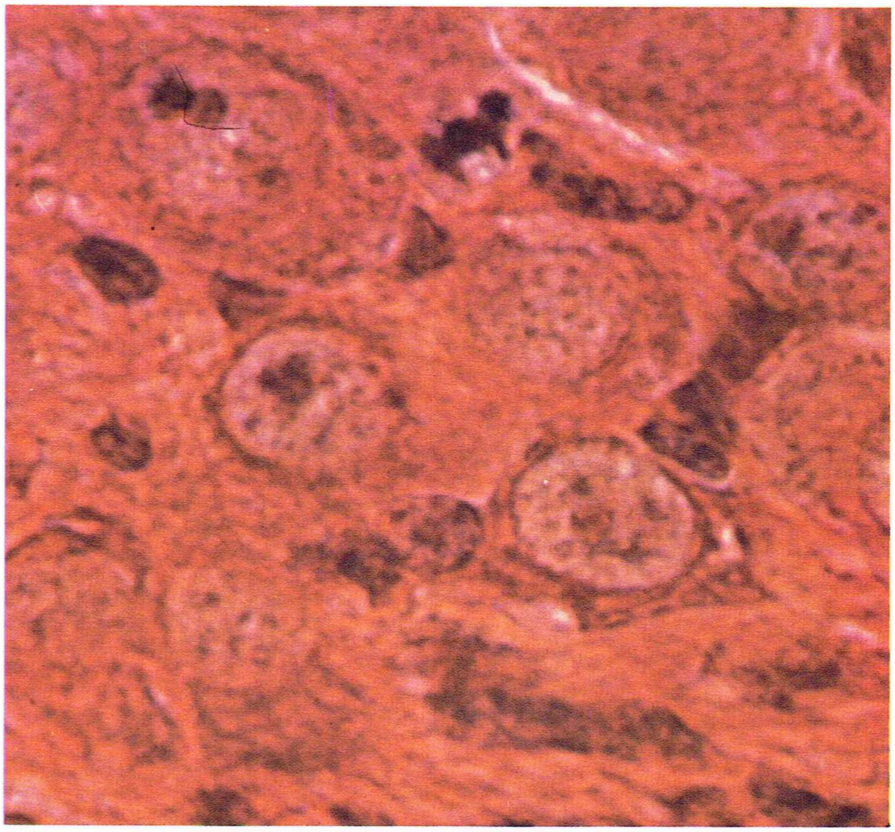

C. Bouchard

J. Bouchard

◀ *Aspect ultrastructural du noyau d'une cellule de Mammifère :* **nucléoplasme** *finement granuleux; masses de* **chromatine** *polymorphes et dispersées, mais souvent en contact avec la* **membrane nucléaire** ; **nucléole** *repérable : structure particulière par rapport à la chromatine.*

on a des raisons de penser que les filaments observés dans les noyaux des cellules fixées à l'osmium correspondent à des nucléo-histones. Il convient de perfectionner les techniques de fixation ; cependant, si le microscope peut encore être amélioré, il faut ne pas oublier que le pouvoir séparateur ne peut pas être augmenté indéfiniment.

Dans le cas des *nucléoles,* les résultats sont plus satisfaisants : on observe, à l'intérieur d'une masse spongieuse constituée de fibres et de particules, un réseau de nucléoplasme contenant de la chromatine. Il est possible d'effectuer, à partir d'une quantité importante de noyaux dont on extrait les nucléoles, une analyse chimique du nucléole permettant d'interpréter les données ultrastructurales; cette analyse nécessite la préparation d'une « *fraction nucléoles* » purifiée. On peut alors confirmer les données d'histochimie : on constate que ces organites contiennent essentiellement de l'ARN, lequel correspond aux éléments particulaires du nucléole. On estime, d'autre part, que les éléments fibrillaires disposés au contact des particules d'ARN sont des protéines associées.

Les résultats obtenus grâce aux techniques d'observation et aux techniques biochimiques permettent donc d'avoir une idée de la structure du contenu des noyaux.

Bref aperçu fonctionnel

De ces résultats, les spécialistes peuvent tirer des conclusions concernant le mode de fonctionnement de la chromatine et du nucléole.

On sait que l'ADN contient l'information génétique; le cas le plus « simple » est celui des Bactéries dont la chromatine est seulement faite d'un long filament d'ADN très replié. Chez les Eucaryotes, la chromatine est associée non seulement à des protéines mais aussi à de l'ARN ; cela ne peut être constaté que par l'analyse chimique.

Dans la cellule qui ne se divise pas, l'ADN est métaboliquement stable, ainsi qu'on a pu le montrer grâce à l'emploi de précurseurs marqués. Par contre, la chromatine synthétise continuellement les ARN; ceux-ci passent dans le cytoplasme (rappelons cependant que des synthèses protéiques peuvent s'effectuer déjà dans le noyau). Enfin, le nucléole, typique des Eucaryotes, est un lieu d'accumulation d'ARN précurseur d'ARN ribosomiques; cet ARN, synthétisé au contact de la chromatine, a une composition en bases très voisine de celle des ribosomes.

La connaissance précise de la structure du noyau est indispensable pour l'étude de nombreux problèmes, notamment ceux des modifications nucléaires qui apparaissent dans les cellules tumorales ou dans les cellules d'animaux traités par des pesticides tels que le DDT. En 1974, D. David a montré quelles sont les conséquences d'un traitement des œufs d'Oiseaux par le DDT. Cet auteur souligne, dans le noyau, l'appauvrissement du nucléoplasme et une réduction de la taille des nucléoles, qui sont susceptibles de perdre leur structure typique;

▼ *Un exemple de modification de la structure du noyau après* **intoxication** *de la cellule par un* **insecticide,** *ici le DDT : on y observe un œdème nucléaire, la formation de gouttelettes lipidiques et la réduction de la taille du nucléole qui peut se vacuoliser. En rouge, ADN associé au nucléole ; en bleu, ARN granulaire ; en bleu-vert, ARN central* **fibreux,** *associé à des protéines.*

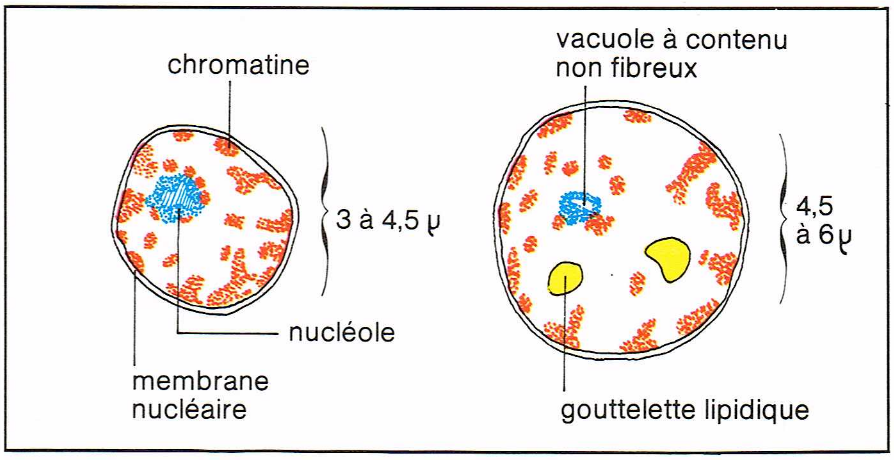

Richard Colin

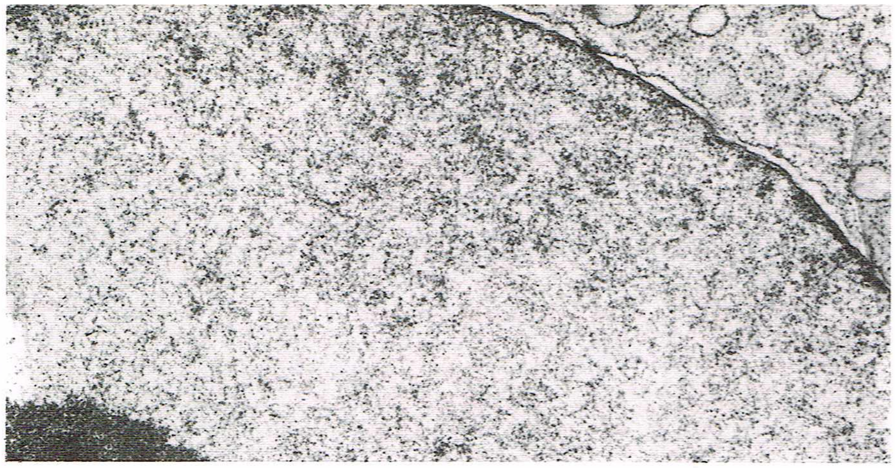

Photo Beaumont

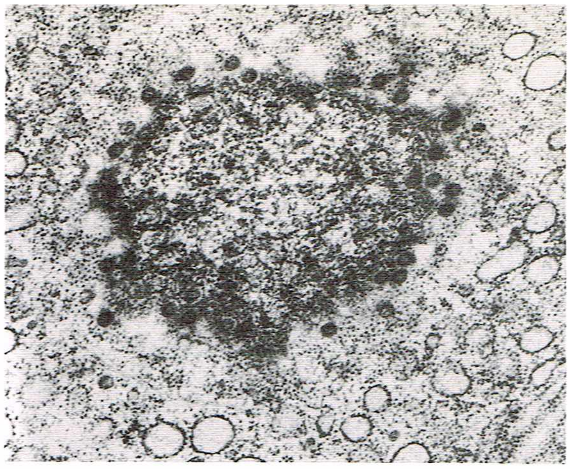

Photo Beaumont

▲ *A gauche, coupe de la* double membrane nucléaire *d'une cellule d'Amphibien : remarquer, à gauche, les granulations cytoplasmiques disposées tout au long de la membrane externe (ribosomes) ; cytoplasme riche en éléments cavitaires. A droite, coupe tangentielle de la membrane nucléaire montrant les* pores nucléaires : *cercles sombres à cœur clair comportant un point central plus dense.*

▶ *Remarquer la densité des* pores nucléaires *sur une coupe localement tangentielle de noyau de cellule d'ascidie.*

▼ *Passage du matérie nucléaire dans le cytoplasme (cellule souche de spermatozoïde d'ascidie). Ici,* « l'émission nucléaire » *se fait à travers trois points (pores) de la membrane nucléaire ; cela suggère que les ARN puissent migrer essentiellement à travers les pores.*

l'ensemble des résultats montre une diminution de l'activité du noyau pouvant aller jusqu'à l'involution de la chromatine ; ces troubles, qui surviennent parallèlement à de graves anomalies de l'embryogenèse (des hémorragies hépatiques ou des malformations diverses), peuvent être à la base de la mortalité des Oiseaux constatée en laboratoire par les scientifiques (Lutz, Meiniel, Roux, etc.) ou sur le terrain par les chasseurs, les éleveurs et d'autres chercheurs (Ramade, Boulekbache, etc).

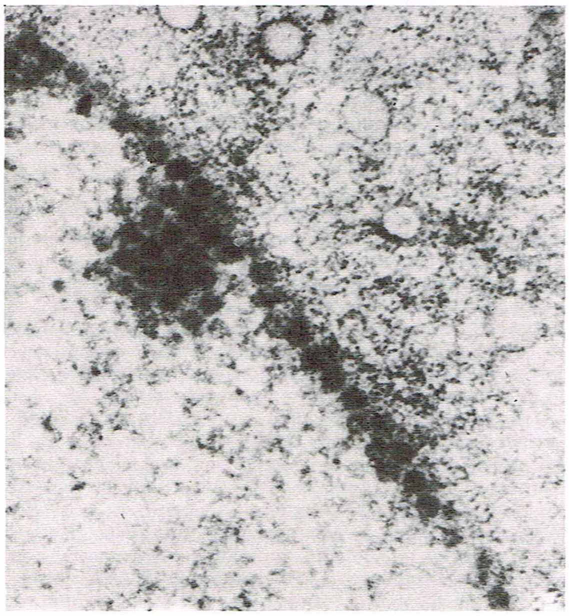

C. Bouchard

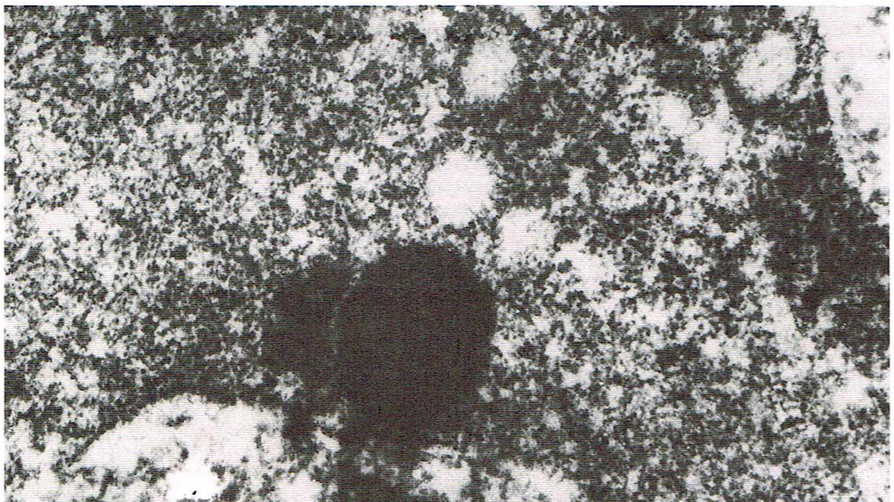

C. Bouchard

Le problème de la membrane nucléaire

Le noyau contient le matériel génétique fondamental de la cellule ; il en est le centre biochimique et, si l'on peut dire, la capitale économique. Si la chromatine permet la synthèse de très nombreuses substances, qui migrent ensuite dans le reste de la cellule, ce phénomène dépend toutefois d'un afflux préalable de différents matériaux qui s'accumulent dans le noyau. Le noyau est donc un lieu de transit, lequel s'effectue à travers une *membrane,* dont les caractères sont intéressants.

Les images de microscopie électronique montrent que la membrane nucléaire est toujours double et qu'il existe, entre la membrane interne et la membrane externe, un espace périnucléaire nettement distinct.

L'ultrastructure de cette membrane n'est pas simple. En effet, avec un agrandissement de 160 000 à 250 000, on voit qu'elle est faite de feuillets qui, selon Northcote, lui donnent une épaisseur d'environ 40 Å. L'analyse chimique de fractions de membranes nucléaires a permis de voir qu'elles contiennent essentiellement des phospholipides et des protéines. On ne connaît pas, par contre, la nature du contenu de l'espace périnucléaire ; Favard note que celui-ci peut contenir des granulations, voire des gouttelettes de lipides ; si le transit de certaines substances semble donc se faire directement à travers les réseaux phospho-lipo-protéiques, il faut ajouter que la membrane nucléaire est percée d'un grand nombre de *pores,* dont la taille varie suivant les espèces et la nature des cellules étudiées.

Les pores sont bien observables sur des coupes tangentielles au noyau ; ils le sont encore mieux sur des préparations de membranes isolées, puis disposées perpendiculairement au faisceau d'électrons ; il s'agit là d'une technique extrêmement délicate et très intéressante (Comings et Okada, 1970). On constate ainsi que le nombre de pores par μ^2 est en moyenne de 50, et que le pore est une structure bien organisée, fort différente d'un simple trou. Le diamètre des pores est toujours grand, ce qui tendrait à faire penser que n'importe quelle substance chimique peut emprunter de tels goulets pour passer du cytoplasme vers le noyau, ou inversement, mais il n'en est rien. Comme l'écrit Favard, « il existe à l'intérieur des pores une substance qui n'apparaît pas morphologiquement différente du nucléoplasme et qui joue le rôle de filtre ». En effet, des expériences montrent que des microparticules injectées dans une cellule se concentrent d'abord à l'extérieur de la membrane nucléaire, puis pénètrent dans le noyau, à condition que leur diamètre soit nettement inférieur à celui des pores (Feldherr, 1965). La charge électrique au niveau des membranes, en particulier des pores, est certainement un facteur essentiel pour la sélection des substances pouvant transiter. On le voit, une étude approfondie des pores est devenue nécessaire (Markovics et coll., 1974).

Enfin, il faut préciser que les pores sont en contact direct avec le matériel chromatinien. Cela peut apparaître sur des coupes totales des cellules les plus diverses, et la relation est évidente sur des membranes étalées (Comings et coll., 1970). Dans ce dernier cas, on observe que la chromatine est disposée en étoile autour des pores. On peut penser que la relation entre la chromatine et les pores nucléaires n'est pas seulement topographique, et l'on est tenté de croire que l'évacuation des ARN se fait à travers les pores ; toutefois, ce passage dans le cytoplasme nécessite un travail de la part de la cellule puisque l'abaissement de la température et, en général, toute diminution de l'activité métabolique d'une cellule provoquent un arrêt du transit des ARN vers le cytoplasme ; on ne sait donc pas comment s'effectue le passage de telles substances, qui ne migrent pas par simple diffusion.

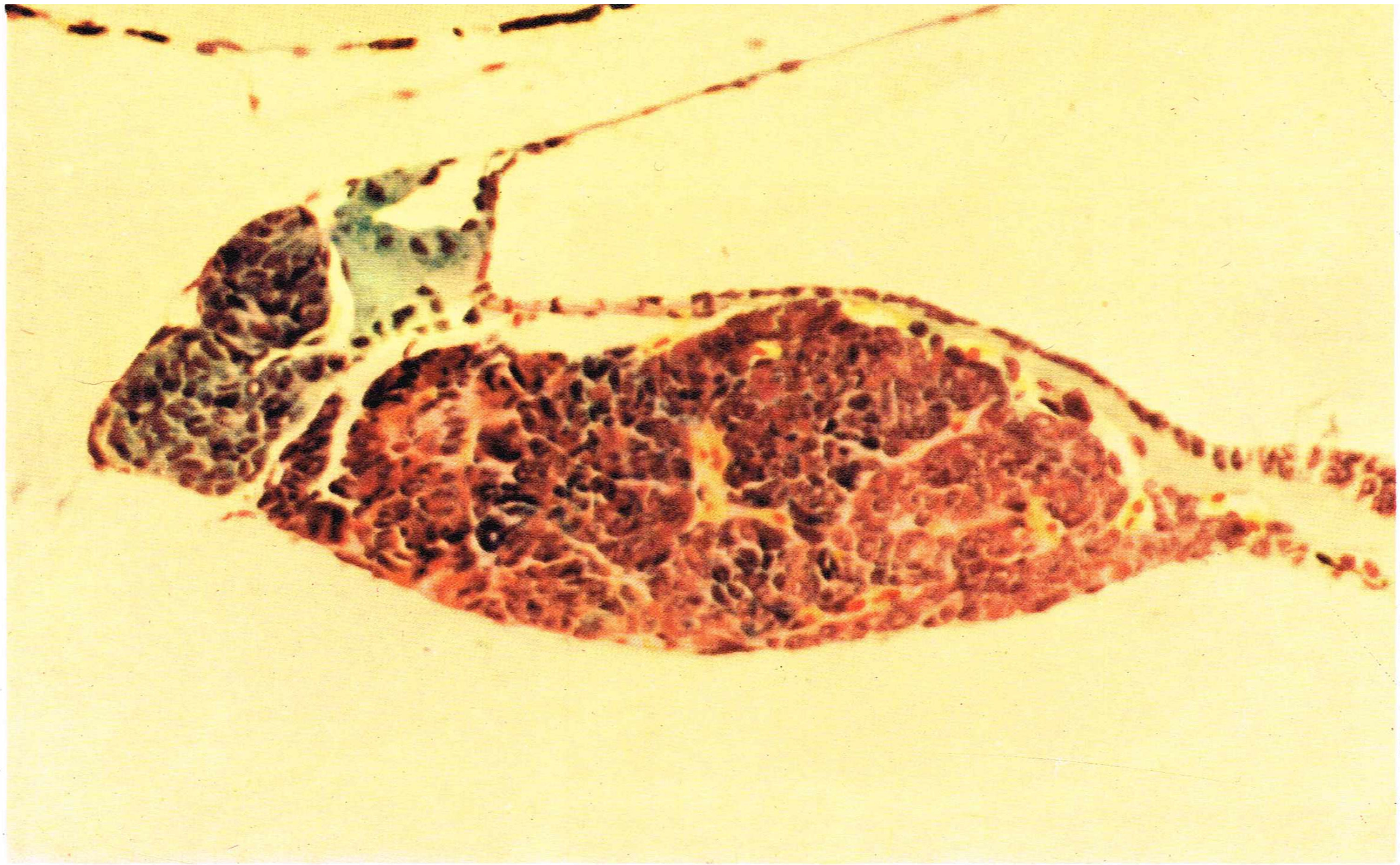

Laboratoire de biologie des Vertébrés - Orsay

Le compartiment cytoplasmique

Le compartiment cytoplasmique présente une structure extrêmement complexe, et les organites qu'il contient varient considérablement suivant l'être vivant que l'on étudie, et même suivant le type cellulaire. Sur le plan de l'organisation, le noyau est un compartiment simple, alors que le cytoplasme, par sa diversité, peut caractériser, différencier, telle ou telle cellule particulière.

Il faut donner une définition du *milieu* dans lequel baignent les *organites* cytoplasmiques avant de décrire, très schématiquement, la structure de ces organites, puis leurs fonctions respectives.

Le hyaloplasme

Le hyaloplasme est une masse vitreuse dont la consistance (gel ou sol) peut varier considérablement suivant les conditions ambiantes. Du point de vue chimique, il est totalement impossible d'en donner une définition; la nature de ses constituants et leurs proportions sont éminemment variables.

On a dit que le hyaloplasme est « optiquement vide ». Cette définition donnée par les anciens microscopistes est encore valable : en effet, la plupart des molécules qui constituent le hyaloplasme ne peuvent même pas être mises en évidence par un faisceau d'électrons.

Cependant, depuis longtemps, on a décelé des substances réagissant de façon plus ou moins caractéristique avec certains colorants d'histochimie. Ainsi, le glycogène apparaît sous forme de grains ou de flaques roses ou rouges après un traitement oxydant et une coloration par le réactif de Schiff; divers lipides peuvent être décelés par des colorants, comme le noir Soudan. Les réactifs spécifiques des ARN donnent une coloration de fond légère : le hyaloplasme contient 10 à 20 % de l'ARN total de la cellule (ARNm et ARNt). L'abondance des protéines peut être mise en valeur par le jaune naphtol S (Deitch, 1966). Divers procédés d'histochimie permettent d'évaluer l'abondance de telle ou telle substance dans le hyaloplasme. En microscopie électronique, les techniques sont plus délicates.

Il est essentiel de souligner que le hyaloplasme est le *carrefour* de la plupart des voies métaboliques. C'est le réseau colloïdal du hyaloplasme qui établit le contact entre le noyau et les divers organites cytoplasmiques, véritables usines de la cellule. De plus, il existe toute une série de phénomènes métaboliques dont l'essentiel se passe au sein du hyaloplasme, et qui s'effectuent grâce à une grande diversité d'enzymes.

Les organites cytoplasmiques et la membrane cellulaire

Les ribosomes

Une partie des ARN qui migrent dans le cytoplasme s'associent pour former les *ribosomes*.

Ceux-ci ne sont pas visibles au microscope optique. Palade les découvrit en 1953, lorsque l'on commença à obtenir de bonnes images en microscopie électronique. Les ribosomes peuvent être observés dans toutes les cellules, après une fixation à l'acide osmique. Ils sont subsphériques et ont une taille moyenne de 150 Å. Leur nombre est extrêmement variable suivant le matériel étudié; ils sont particulièrement abondants, par exemple, dans le cytoplasme des cellules pancréatiques ou dans les cellules génératrices des globules sanguins. Ils peuvent être isolés dans le hyaloplasme ou bien former des amas, ou *polysomes*.

▲ *Coupe d'hypophyse d'Amphibien, colorée par la technique de Herlant; on voit nettement que l'antéhypophyse est faite de cellules très différentes les unes des autres par leur cytoplasme.*

▼ *Localisation des protéines sulfhydrilées dans l'épiderme d'Amphibien (elles sont très abondantes dans le cytoplasme); à la base de l'épiderme, la mélanine (noire) contenue dans les cellules pigmentaires délimite bien l'épiderme du derme (coloration selon la méthode de Chèvremont).*

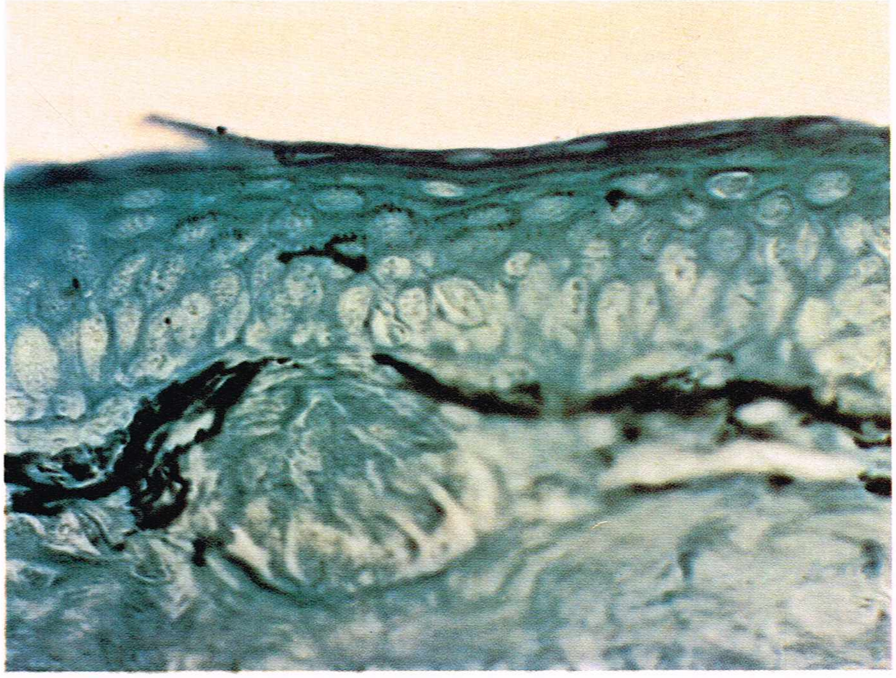

Laboratoire de biologie des Vertébrés - Orsay

▶ **Polysomes** *d'une cellule de Mammifère (tumeur pulmonaire) : 1, coordonnées des polysomes les plus nets ; 2, noyau ; 3, corps de Golgi (microscopie électronique).*

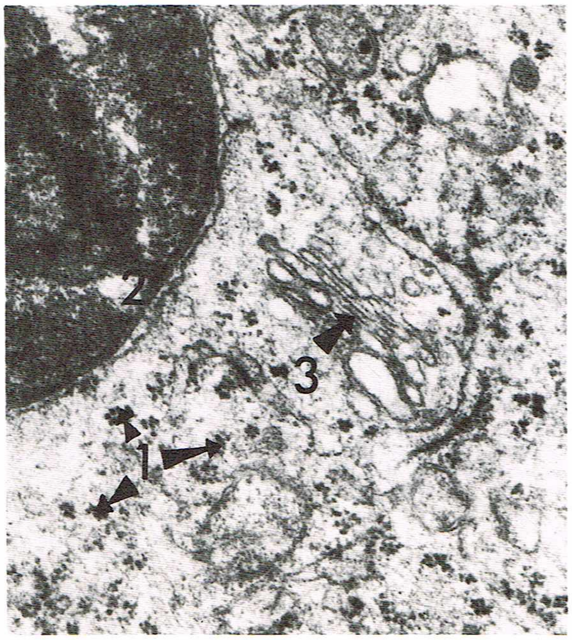

J. Bouchard

L'étude précise du ribosome, qui nécessite un grossissement voisin de 200 000, montre qu'il est fait de deux sous-unités. L'aspect des ribosomes correspond-il bien à une structure réelle, ou s'agit-il d'un artefact de fixation ? C'est la première hypothèse qui est correcte. En effet, l'aspect de ces organites est remarquablement homogène quel que soit le type de cellule choisi et quelle que soit la fixation ; de plus, les biochimistes montrent que l'activité biochimique des particules de 150 Å de diamètre, sédimentées par ultracentrifugation, est toujours la même.

L'analyse des fractions ribosomes montre que les ribosomes des Bactéries contiennent 50 % d'eau et que la proportion est de 80 % chez les Eucaryotes. Ils sont essentiellement constitués d'ARNr et de protéines associées dont les proportions sont fixes pour un type cellulaire donné.

Les deux sous-unités des Eucaryotes, de taille inégale, sont plus lourdes que celles des Bactéries : 60 S et 40 S contre 50 S et 30 S. En fait, chaque sous-unité contient une seule chaîne d'ARNr, celle-ci étant un peu plus lourde chez les Eucaryotes. On trouve aussi dans les ribosomes une petite proportion d'ARN 5 S.

Enfin l'analyse a permis de constater qu'il existe, dans les polysomes, une chaîne d'ARN messager qui sert de support aux ribosomes ; d'excellentes préparations montrent en effet un filament de 15 Å de diamètre, sur lequel les ribosomes sont régulièrement disposés.

Les systèmes cavitaires

Divers types de cavités, limitées par des membranes, peuvent être observés dans la cellule fixée.

Le réticulum endoplasmique

La structure du réticulum endoplasmique fut progressivement décrite à partir de 1945-46. Les premières observations, dues à Porter et Palade, furent faites au microscope électronique : s'il est possible de déceler ce système grâce au microscope à lumière, celui-ci ne permet pas d'en analyser la structure.

Les anciens histologistes avaient constaté que divers types de cellules comportaient dans leur cytoplasme ce qu'ils appelaient un *ergastoplasme,* ou substance chromidiale. Ainsi, dans une cellule de glande salivaire ou de pancréas, on peut mettre en évidence un ergastoplasme très basophile, qui occupe une grande partie du cytoplasme. Les images que l'on obtient après fixation au liquide de Bouin et coloration au bleu de toluidine sont particulièrement démonstratives. Or, les résultats sont très différents avec d'autres fixateurs ; suivant les cas, la coloration peut être diffuse ou bien se répartir comme si les corps basophiles constituaient des lamelles. C'est pourquoi, en 1956, Chèvremont insistait sur le fait que l'aspect de l'ergastoplasme décrit correspond à un artefact ; il notait, en outre, que le terme d'ergastoplasme était employé par certains spécialistes du microscope électronique lorsqu'ils parlaient d'un système d'apparence lamellaire ou membraneuse (Claude, 1954). Il y avait donc une imprécision quant à l'utilisation du terme ergastoplasme. En fait, le réticulum endoplasmique représente une partie de cet ergastoplasme qu'il est si facile de déceler en microscopie ordinaire, même si l'image est fausse...

Après les premières observations de Porter et Palade, divers chercheurs mirent en évidence des lamelles dans plusieurs types de cellules (Dalton et coll., 1950 ; Oberling et coll., 1951 ; Palade, 1952 ; Sjöstrand, 1953). Il devint clair que toutes les cellules des Eucaryotes possèdent ce système de lamelles, voire de tubules, dont le polymorphisme est un des caractères frappants. D'après Chèvremont, ces lamelles sont souvent associées à « des grains extrêmement ténus » qui ne sont autres que des ribosomes.

En fait, l'ergastoplasme correspond à une partie des lamelles du réticulum endoplasmique, sur lesquelles s'accumulent de très nombreux ribosomes riches en ARN, substance très basophile.

Dans leurs recherches, les cytologistes furent beaucoup aidés par les biochimistes. Dès 1938, Claude avait pu isoler une fraction *microsomes* en centrifugeant à 18 000 g pendant 1 heure. Bien des auteurs constatèrent alors l'existence des microsomes dans tous les types cellulaires et montrèrent que ces corps contiennent une assez grande variété de molécules et que l'ARN y est abondant. On en vint à penser que les microsomes étaient le résultat de la fragmentation du système lamellaire dont nous avons parlé.

▼ *A gauche, le cytoplasme des cellules du pancréas exocrine est particulièrement basophile, riche en « substance chromidiale » qui constitue l'ergastoplasme (larve d'Amphibien ; coloration au bleu de toluidine). A droite, ergastoplasme abondant au sein du hyaloplasme des cellules du pancréas exocrine d'Amphibien (microscopie électronique).*

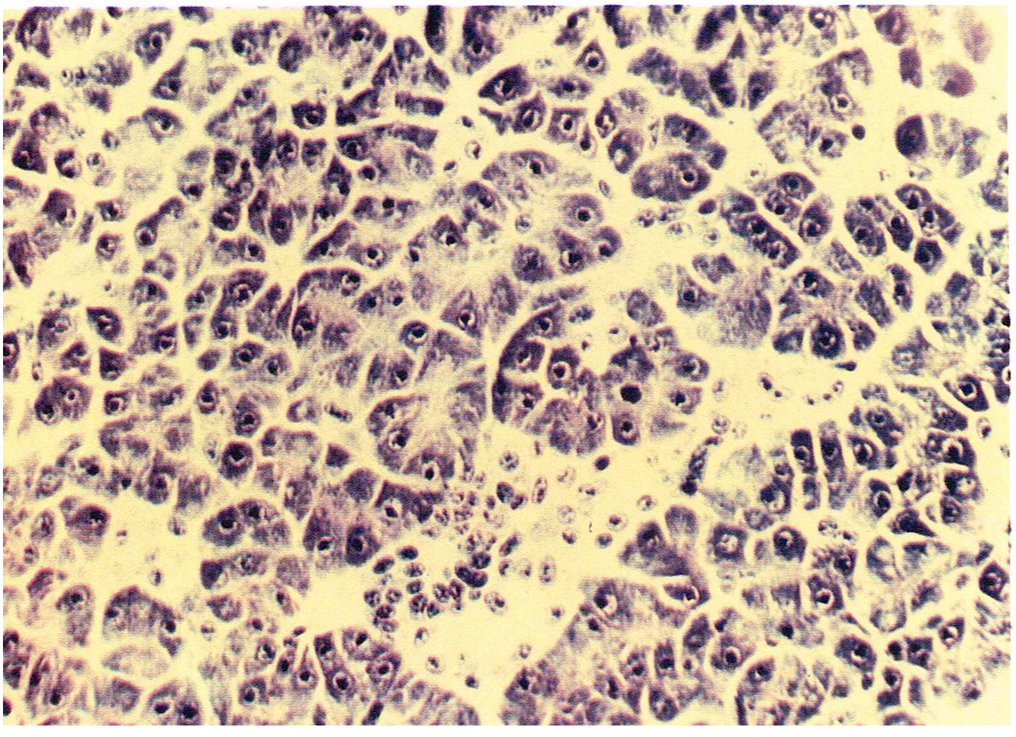

Laboratoire de biologie des Vertébrés - Orsay

A. Beaumont

La structure lamellaire et vésiculaire du réticulum n'est-elle pas un artefact dû aux traitements que l'on fait subir aux cellules? Après les travaux de Fauré-Frémiet, de Bessis, de Lehmann, de Chèvremont et de Vendrely, qui travaillaient tous sur le cytoplasme de cellules fixées mais préalablement étalées (cellules macrophages, amœbocytes, cellules sanguines), J.-P. Thiéry put montrer que *les lamelles du réticulum existent bien dans les cellules vivantes;* en observant en lumière UV des cellules sanguines (plasmocytes), il montra que la structure lamellaire du réticulum était parfaitement visible et bien soulignée par le revêtement des ribosomes, qui absorbent considérablement les courtes longueurs d'onde (1963). D'autre part, grâce au microscope polarisant, on put constater que le cytoplasme de cellules vivantes comporte un matériel biréfringent, donc nettement orienté.

La structure fine du réticulum endoplasmique est maintenant bien connue. Il s'agit de cavités, de forme très variable, limitées par une membrane. Celle-ci est absolument identique à celle du noyau. Par contre, selon Northcote, elle est en général moins épaisse que la membrane cytoplasmique, ou *plasmalemme* (25 à 40 Å au lieu de 75 Å). Ces cavités sont souvent aplaties, et leur épaisseur est inférieure à 500 mμ. Mais elles peuvent être tubulaires ou former franchement des vésicules.

On constate parfois qu'il existe des liens étroits entre le système contenu dans le hyaloplasme et la double membrane nucléaire : celle-ci semble bourgeonner des tubules ou des lamelles de réticulum. En fait, l'espace périnucléaire n'est qu'une *différenciation* des cavités du réticulum : les membranes nucléaires et celles du réticulum sont de nature et d'origine identiques. Rappelons que les membranes nucléaires sont percées de pores d'environ 500 Å; des pores du même type peuvent exister dans les membranes d'éléments du réticulum *(sensu stricto)*. On peut se poser des questions quant aux fonctions des lamelles qui sont ainsi perforées *(lamelles annelées);* elles existent dans le cytoplasme de divers ovocytes (Favard, 1958; C. Bouchard, non pub.), ou dans des cellules pancréatiques en croissance (Beaumont, 1972; Magnier, 1974).

Le réticulum endoplasmique peut présenter deux aspects : il peut être *granulaire* ou *agranulaire;* en effet, les membranes ne sont pas toujours tapissées par des ribosomes disposés côte à côte, à la face externe. Le réticulum agranulaire, ou lisse, peut être extrêmement abondant; c'est le cas des cellules interstitielles du testicule, par exemple, ou de celles que l'on trouve dans diverses glandes endocrines.

Un mot de la constitution chimique du réticulum. La nature de la membrane du réseau est remarquable. Elle a été déterminée à partir de la fraction microsomes, où l'on a éliminé les ribosomes par action du désoxycholate de sodium (émulsifiant) suivie d'une nouvelle centrifugation à 20 000 g. On trouve ainsi 35 % de phospholipides, comme dans la membrane nucléaire, et environ 60 %

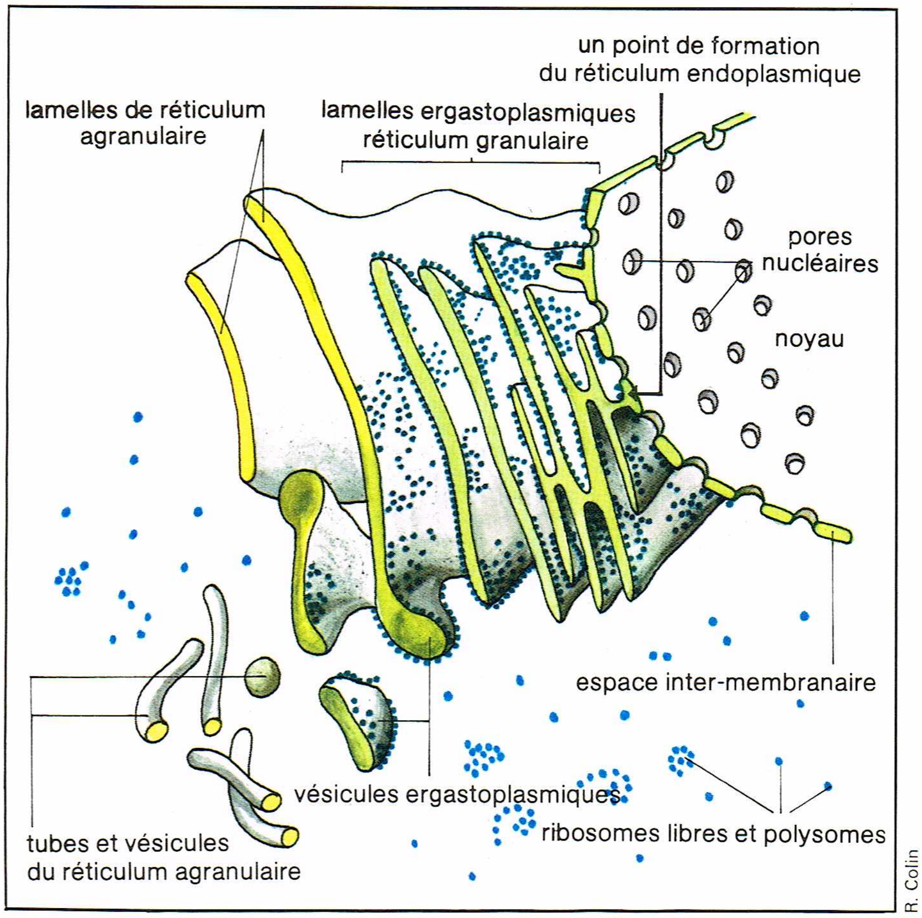

▲ *Représentation schématique montrant les rapports entre le noyau et le* **réticulum endoplasmique***; on voit ici divers aspects de ce dernier.*

▼ *A gauche,*
aspect du noyau d'un ovocyte d'ascidie montrant que des éléments se forment à partir de la membrane externe; ici, formation directe d'une **lame de réticulum** *qui, secondairement, bourgeonne des* **vésicules granuleuses** *(microscopie électronique).*

A droite,
lamelles annelées *observées dans l'ovocyte d'ascidie. Elles prennent naissance au niveau de la membrane nucléaire; leur lumière contient un matériel dense aux électrons et l'extérieur de la paroi est tapissé d'un très grand nombre de particules ribosomiques (microscopie électronique).*

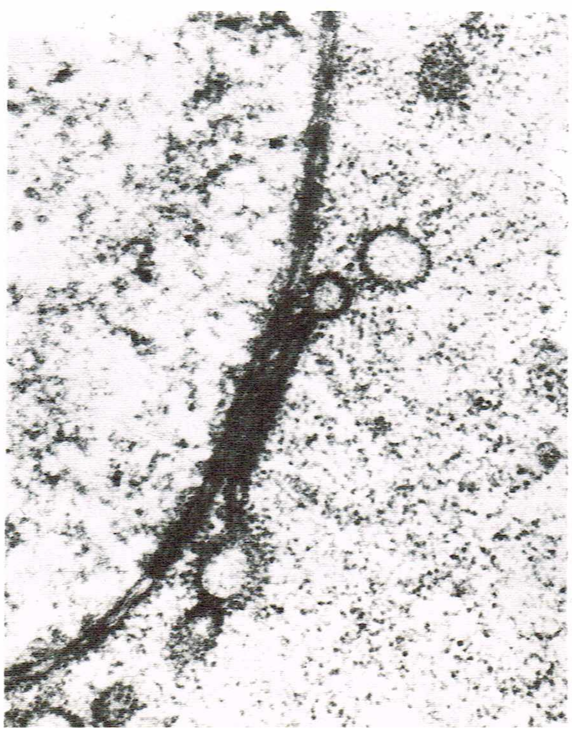

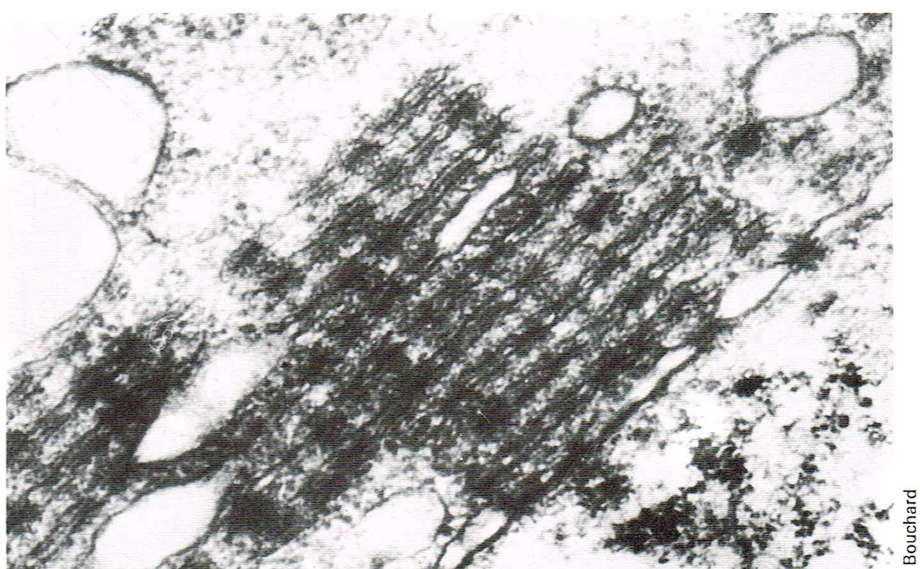

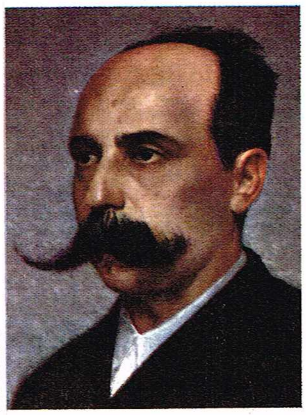

F. Arborio Mella

▲ *Le cytologiste italien* **Golgi.**

de protéines (poids sec). Or, une partie de ces protéines sont des enzymes (phosphatases et estérases par exemple) et certaines servent au métabolisme des stéroïdes. Cette composition permet de penser que les fonctions du réticulum sont assez variées.

L'appareil de Golgi

En 1898, le cytologiste italien Golgi décrivit dans des cellules nerveuses une zone cytoplasmique particulière où s'accumulent les sels d'argent. Proche du noyau, cette zone comporte des éléments filamenteux, l'ensemble constituant un système d'aspect subsphérique; cet appareil réticulaire interne, suivant l'expression de Golgi, fut très étudié par la suite (par Cajal et Cowdry par exemple); Chèvremont estime que, vers 1939, plus de 2 000 travaux avaient été consacrés à l'appareil de Golgi. Cependant, ce n'est que maintenant que l'on découvre certains aspects fort intéressants de ce système cavitaire absolument fondamental pour la vie de la cellule.

Sur cellules fixées (et bien fixées car les artefacts sont fréquents), la forme de l'appareil de Golgi est typique de chaque espèce cellulaire quand on effectue une imprégnation argentique des coupes. Dans l'ensemble, il s'agit d'un réseau de fins cordons et de canalicules dont il est difficile de dire s'ils sont isolés ou, au contraire, plus ou moins anastomosés. On observe que le « Golgi » est particulièrement développé dans certaines cellules, dont l'activité est évidemment frappante puisqu'il s'agit des cellules nerveuses et des cellules glandulaires. Selon Cowdry, l'appareil change de forme suivant l'état fonctionnel de la cellule, en conservant cependant des caractères particuliers au type de cellule étudié.

▶ *Mise en évidence de* **l'appareil de Golgi** *sur une coupe de canal excréteur génital d'embryon de poulet mâle. Une coloration histochimique par l'osmium permet de repérer les éléments golgiens qui apparaissent sous forme de réseaux très sombres dans les cellules qui revêtent le canal.*

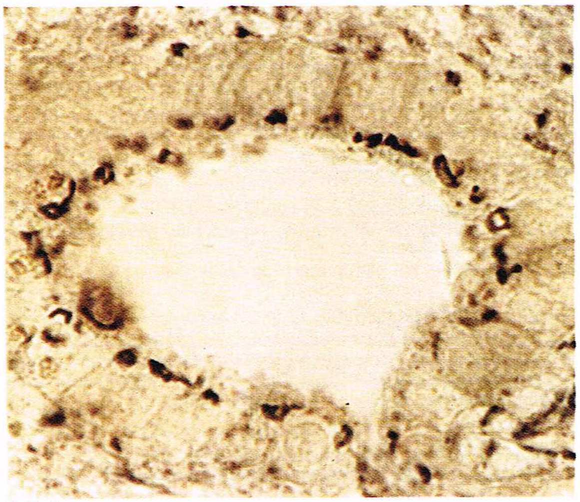

G. Volle

En 1956, Chèvremont posait encore la question de l'existence du système. Il insistait sur le fait que l'observation de cellules vivantes n'apportait aucun argument irréfutable. Il notait toutefois que le microscope à contraste de phase donnait quelques résultats encourageants, puisque la zone de Golgi, zone claire et généralement non granuleuse du cytoplasme, subissait des variations de volume et de structure quand on activait le métabolisme ou quand on introduisait des agents dénaturants dans la cellule (détergents). En fait, aucune structure détaillée n'est observable dans la cellule vivante avec l'aide du contraste de phase. Par contre, les colorations vitales donnent des résultats plus notables : divers auteurs ont pu montrer de cette manière qu'il existait au voisinage du noyau, dans la zone correspondant au Golgi, une accumulation de petites vacuoles (vacuome), dont le nombre et l'agencement dépendaient de l'état physiologique de la cellule (Ludford; Lasfargues et Di Fine, 1950; travaux de Parat et de Painlevé, complétés par le botaniste Guilliermond). On pouvait alors penser qu'il existait un rapport entre ce vacuome et l'appareil de Golgi, artefact mis en évidence dans les cellules fixées. Nous verrons que la réalité est en fait très complexe.

En 1954, Sjöstrand et Hanzon découvrirent, avec l'aide du microscope électronique, un système complexe fait de *cavités* limitées par de minces membranes et qui montraient des relations topographiques avec des *vacuoles de sécrétion;* ils estimaient qu'il s'agissait là de l'appareil de Golgi. L'amélioration du matériel électronique permit la confirmation de leurs travaux. En 1966, Mollenhauer et Morré décrivirent avec précision la structure du complexe golgien mis en évidence chez des végétaux.

On donne le nom de *dictyosome* au système de lamelles, ou *saccules,* qui constitue une partie de la zone de Golgi. La structure d'un dictyosome n'a que de lointains rapports avec celle de l'appareil observé après imprégnation argentique. Les lamelles sont disposées comme une pile de soucoupes. Elles peuvent être de forme régulière, ou bien comporter des inflexions plus ou moins nombreuses et plus ou moins marquées selon le type cellulaire. Néanmoins, dans presque tous les cas, on distingue une face convexe et une face concave. Autour de cette accumulation de saccules, on observe des *vésicules* de taille diverse; elles sont souvent abondantes et volumineuses du côté convexe de la pile des lamelles et, en général, nettement plus petites à la périphérie des lamelles ou du côté concave. On a pu constater récemment que les vésicules observées du côté convexe tendent à se grouper, à s'aligner et à se souder, formant ainsi une *nouvelle lamelle;* on avait cru, auparavant, que ces vésicules naissaient à partir de la lamelle la plus externe. Quant à la lamelle la plus interne, celle qui est à la face concave du dictyosome, elle peut être fenestrée. De petites vésicules naissent au bord latéral des saccules.

▼ *A gauche, structure de l'appareil de Golgi (ascidie); on distingue nettement la pile de saccules minces, et la fenestration de l'un d'eux (en bas) à la face de maturation. A droite, trois aspects de l'appareil de Golgi dans une coupe de tube digestif d'ascidie; la forme dépend du plan de coupe (microscopies électroniques).*

C. Bouchard

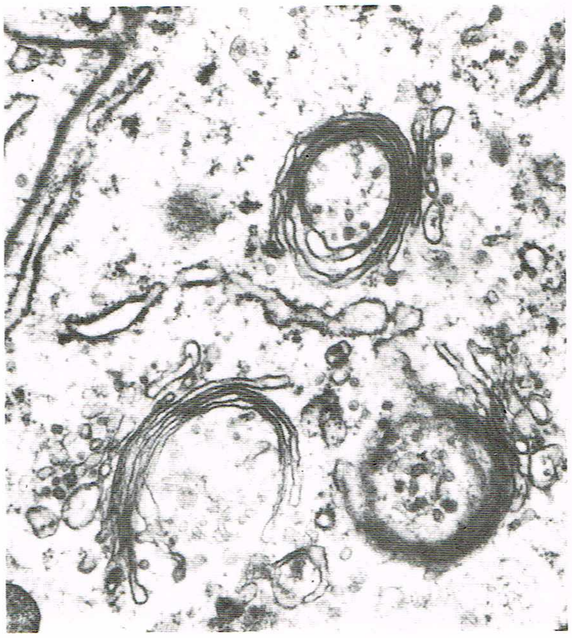

C. Bouchard

En 1968, Grove, Bracker et Morré ont constaté des détails d'un grand intérêt. La face concave de chaque saccule du dictyosome comporte une membrane dont l'épaisseur est toujours voisine de 75 Å, alors que celle qui limite la face convexe est sensiblement plus mince (25 à 40 Å). De plus, la membrane de 75 Å, dite *unitaire*, est plus dense aux électrons. Les caractères de ces membranes « épaisse » et « mince » doivent être rapprochés, respectivement, de ceux de la membrane cytoplasmique (plasmalemme) et du réticulum endoplasmique. Cette observation constitue un argument en faveur de l'hypothèse selon laquelle l'appareil de Golgi se formerait à partir de vésicules lisses détachées du réticulum endoplasmique. Ainsi, selon Northcote, on peut écrire : enveloppe nucléaire → réticulum endoplasmique → vésicules → appareil de Golgi ⇆ plasmalemme.

En décembre 1973, dans un travail consacré à l'étude des cellules sécrétrices de l'oviducte, Cl. Boisseau a très méticuleusement décrit la structure et l'évolution de l'appareil de Golgi. Il a parfaitement mis en évidence l'accumulation initiale de vésicules du réticulum endoplasmique, la formation des saccules lamellaires, leur maturation, qui va de pair avec une accumulation de matériel dense dans les cavités, puis la fragmentation et la vésiculisation de ces saccules mûrs. Nous reviendrons sur les caractères des vésicules et de leur contenu.

Récemment, Favard écrivait que la constitution chimique de l'appareil de Golgi est encore peu connue. En effet, il est bien difficile d'obtenir une fraction « Golgi » pure à partir de broyats cellulaires : une partie du réticulum endoplasmique migre avec les dictyosomes durant l'ultracentrifugation (Kuff et Dalton, 1959). On constate cependant la richesse du dictyosome en phospholipides ; on y trouve également des protéines, parmi lesquelles diverses enzymes. Selon Keenan et Morré (1970), la composition du Golgi est intermédiaire entre celle du réticulum et celle du plasmalemme.

Les autres cavités cytoplasmiques

Le cas des mitochondries mis à part (nous le verrons plus loin), on trouve dans les cellules diverses *vacuoles*, qui sont souvent extrêmement développées chez les végétaux. Dans l'ovocyte des animaux, il y a toujours une certaine quantité de *vésicules chargées de matériel vitellin*. Beaucoup de cellules comportent aussi des *lysosomes* chargés d'enzymes lytiques et des *vacuoles digestives*, ou de *phagocytose*. La nature et l'origine de ces constituants cytoplasmiques seront décrites quand nous étudierons les fonctions du réticulum et du Golgi.

Les filaments intracytoplasmiques

Le cytoplasme de diverses cellules contient des éléments fibrillaires groupés sous le nom de *filaments ;* ceux-ci sont, en fait, de nature assez variée puisqu'ils peuvent être à peine perceptibles au microscope électronique ou bien constituer des structures assez épaisses et contractiles, très caractéristiques des cellules musculaires.

En microscopie optique, on connaît depuis longtemps l'existence de *tonofibrilles* qui forment des faisceaux très apparents, dans les cellules jeunes de l'épiderme par exemple. On pensait autrefois que ces filaments passaient d'une cellule à l'autre ; l'observation de coupes d'épiderme laissait supposer l'existence de nombreux ponts intercellulaires. Le microscope électronique a montré qu'il n'en est rien : il n'y a pas de continuité d'une cellule à une autre, mais seulement contiguïté. Ces *tono-filaments* ont un diamètre de 50 Å. Ils sont constitués par une protéine sulfhydrilée qui, dans l'épiderme, lorsque les cellules vieillissent, devient la kératine. On distingue en outre d'autres types de filaments, qui existent dans bien d'autres cellules, normales ou tumorales. Des microfilaments d'un diamètre de 70 Å se trouvent à peu de distance de la membrane cytoplasmique des cellules à pseudopodes.

On sait depuis longtemps que les cellules musculaires contiennent un grand nombre de filaments dits contractiles, qui s'associent généralement d'une manière beaucoup plus complexe que les filaments dont nous avons déjà évoqué l'existence ; on les appelle les *myofilaments*. Nous étudierons d'abord la disposition et la nature des myofilaments de muscles striés, c'est-à-dire de muscles qui permettent les mouvements squelettiques, les mouvements du bras par exemple. Chaque cellule musculaire,

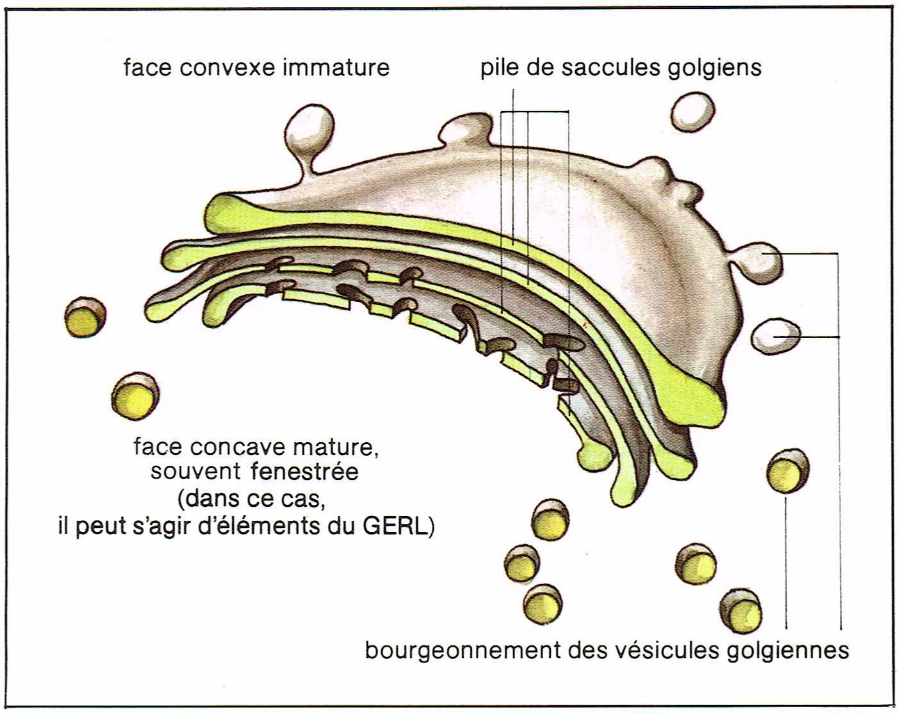

R. Colin

▲ *Représentation schématique d'un appareil de Golgi, ou* **dictyosome**, *coupé suivant un diamètre des saccules. Autour de cette accumulation de saccules, on observe des* **vésicules**, *souvent abondantes et volumineuses du côté convexe de la pile, plus petites à la périphérie ou du côté concave.*

▼ **Filaments intracytoplasmiques** *dans les cellules d'un canalicule du pancréas exocrine (protée). Les filaments sont disposés en faisceaux sensiblement parallèles à la limite du canalicule (microscopie électronique).*

A. Beaumont

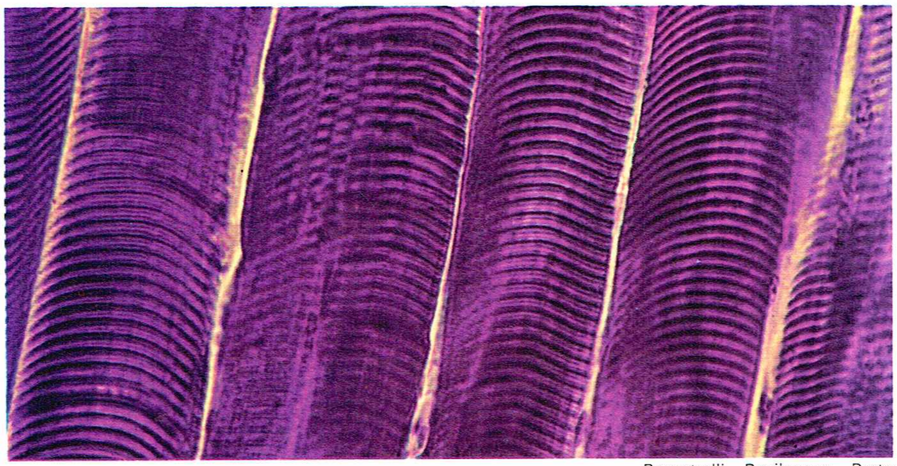

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

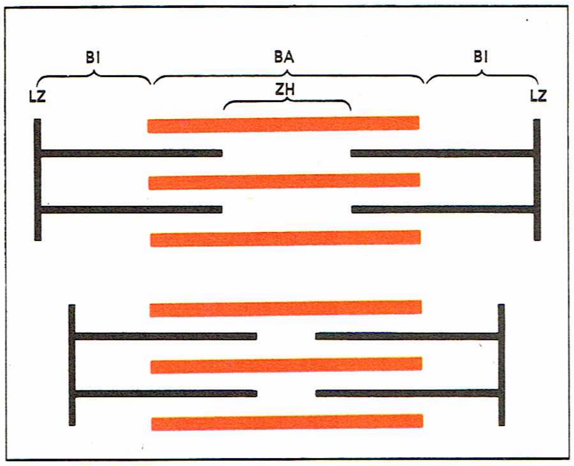

I.G.D.A.

▲ *A gauche, section longitudinale d'un muscle strié. A droite, représentation schématique d'une section transversale de* myofibrille *dans laquelle est mis en évidence le double réseau de filaments :* BI, *bande I;* BA, *bande A;* LZ, *ligne ou strie Z;* ZH, *zone H, moins dense et située au centre de la bande A; en noir, les filaments* d'actine; *en rouge, les filaments de* myosine *(d'après Hanson et Huxley).*

ou « fibre » musculaire, contient plusieurs noyaux (c'est donc un syncytium) et de nombreuses *fibrilles,* ou *myofibrilles,* très faciles à voir en microscopie optique. Chacune des myofibrilles contenues dans le hyaloplasme est elle-même constituée de plusieurs éléments. A grossissement moyen (500), on y découvre des bandes transversales claires et sombres, disposées de manière très régulière. Chaque bande claire comporte en son milieu une ligne sombre transversale, parfaitement visible avec un objectif à immersion : on l'appelle *strie Z.* On nomme *sarcomère* une portion de myofibrille comprise entre deux stries Z. Dans chaque sarcomère, on trouve une bande claire, puis une bande sombre assez large et, de nouveau, une bande claire. L'observation en lumière polarisée permet de constater que les myofibrilles sont biréfringentes, donc constituées par un matériel anisotrope, lui-même fibreux. Cependant, toute la myofibrille n'est pas nettement anisotrope : on y distingue, en effet, une succession de bandes transversales sombres (*isotropes*) et claires (*anisotropes*). Or, les bandes anisotropes biréfringentes correspondent aux bandes sombres observées en lumière normale; on peut donc penser que ces bandes sombres, qui apparaissent très brillantes en lumière polarisée, sont constituées par un matériel densément fibrillaire; ces bandes sont désignées par la lettre A; par contre, on utilise la lettre I pour les autres bandes (isotropes). Un sarcomère mesure entre 1 et 3 μ chez les Mammifères, mais il peut atteindre 17 μ chez certains Insectes. Dans tous les cas, les bandes transversales des myofibrilles sont situées au même niveau pour l'ensemble d'une fibre; autrement dit, il semble que les stries Z soient continues d'une fibrille à une autre.

Toutefois, nous n'avons pas là tous les détails de structure des myofibrilles. Des études ont été faites au microscope à contraste de phase et en utilisant la technique de diffraction des rayons X (Astbury). Les résultats ont montré qu'il existait dans les fibrilles des structures plus ténues, dont la périodicité pouvait être déterminée. L'étude de coupes ultra-fines, effectuées pour le microscope électronique, a permis de mieux comprendre la constitution des myofibrilles (Hanson et Huxley, 1957). Elles comportent deux types de filaments disposés parallèlement et suivant l'axe de la myofibrille : des *filaments fins* (100 Å de diamètre) et des *filaments épais* (50 Å). La répartition de ces filaments dans un sarcomère est la suivante : l'anisotropie de la bande A correspond à une zone de cytoplasme où les filaments sont très serrés et très nombreux; par contre, la bande isotrope contient seulement des filaments fins dont la densité est insuffisante pour donner une biréfringence nettement décelable en lumière polarisée. Observées au microscope électronique, des coupes transversales faites au niveau des bandes A et I montrent que la disposition des filaments est très régulière, ce qui confirme les résultats obtenus par l'étude des diagrammes de diffraction des rayons X : dans la bande A, on constate un arrangement hexagonal des myofilaments.

Des myofibrilles, on extrait des protéines, essentiellement l'*actine* et la *myosine,* ou protéines contractiles. Certaines solutions salines permettent l'extraction de la myosine seule; dans ce cas, les filaments épais disparaissent. A d'autres concentrations, ces solutions permettent d'éliminer l'actine de la myofibrille; alors, parallèlement, les filaments fins ne sont plus visibles.

Des techniques de « coloration » particulières permettent d'observer de façon plus approfondie la structure des filaments (coloration négative). Les filaments fins sont constitués par une double hélice d'actine. Les filaments épais sont faits d'environ deux cents molécules de myosine, disposées en chevrons. On a tenté de reconstituer *in vitro* des filaments de « protéine contractile »; en 1962, Huxley est parvenu à précipiter la myosine en solution, et il est apparu que les molécules se disposent comme dans un filament épais observé *in situ.* Ces myofilaments sont à rapprocher de ceux qui se trouvent dans les fibres du *syncytium cardiaque.*

Par contre, on ne voit pas de bandes transversales au niveau des fibrilles des muscles des autres viscères; on parle donc de *fibres musculaires « lisses »,* terme, à vrai dire, assez peu significatif. Ces fibres sont nettement biréfringentes en lumière polarisée.

Depuis quelques années, on a constaté que des filaments protéiques du *type actine* existent dans le cytoplasme de beaucoup de cellules. Dans le cas des amibes et des Myxomycètes, des filaments cytoplasmiques sont groupés en faisceaux; ces filaments, de 70 Å de diamètre, ont été découverts en 1964 par Wolfarth-Bottermann. On tend à rapprocher les mouvements amœboïdes et les mouvements de cyclose très facilement observables chez les végétaux; mais là, nous avons affaire à des structures ténues, plus difficiles à étudier que dans le cas du muscle.

Les tubules cytoplasmiques, ou microtubules, et les centrioles

Les *microtubules* cytoplasmiques, que l'on ne peut pas étudier au microscope à lumière, sont devenus un important sujet de préoccupation pour les spécialistes du microscope électronique; en effet, leurs rôles sont encore mal connus. Il s'agit d'éléments longs et fins, de 250 Å de diamètre, qui paraissent lisses et dont seule la partie corticale est dense aux électrons; cette écorce est faite d'éléments fibrillaires accolés, dont le diamètre serait de 40 Å (Porter et coll., 1965).

On trouve ces microtubules dans de très nombreux types cellulaires, végétaux ou animaux. Chez les végétaux, les microtubules sont disposés parallèlement à la membrane cytoplasmique et à son voisinage; de plus, ils sont abondants dans le hyaloplasme, et paraissent orientés en fonction des mouvements de cyclose. Chez les animaux, ils sont particulièrement nombreux dans les cellules nerveuses et dans les spermatozoïdes; ils constituent des éléments essentiels des cils et des flagelles; enfin, ils jouent un rôle fondamental dans le déroulement de la division cellulaire.

Les *protofibrilles,* de 35-40 Å de diamètre, qui constituent chaque microtubule, seraient de même nature chimique dans tous les cas. La protéine dont ils sont faits, ou *tubuline,* a un coefficient de sédimentation de 6 S (Borisy et Taylor, 1967) et un poids moléculaire voisin de 52 000. Cependant, Raff et Kaumeyer estiment que les microtubules contiennent deux protéines, comportant l'une et l'autre une grande proportion de diacides aminés et d'un acide à fonction alcool primaire, la sérine (1973).

C. Bouchard

En utilisant une technique de marquage, on a montré que les méthodes d'extraction de la tubuline ne sont pas parfaites (Burnside et coll., 1973). La caractérisation des constituants des microtubules reste donc un problème.

La disposition des microtubules contenus dans les cils ou dans les flagelles, dont le diamètre est de 0,2 μ, est la suivante. Sur une coupe transversale, on trouve 9 groupes de 2 tubules, et, au milieu de cette couronne de 18 tubules, on voit aussi 2 microtubules isolés. Entre les tubules centraux et la couronne périphérique, on trouve, enfin, une couronne d'éléments annexes, les fibres secondaires (de 50 Å de diamètre). Les tubules périphériques comportent de très petites expansions latérales, les « bras ». Sur coupe longitudinale du cil, on voit que les microtubules, qui s'étendent dans tout le cil (ou le flagelle), se prolongent dans le hyaloplasme cortical jusqu'à un *cinétosome*, corpuscule également fait de microtubules (9 × 3 microtubules) et appelé aussi *corpuscule basal*. Notons que, dans bien des cas, le cinétosome est en rapport avec des *racines ciliaires* faites de fibres protéiques dont la structure rappelle celle du collagène : chacune des racines, en contact avec un cinétosome, se joint aux autres pour former un faisceau parfois très volumineux.

Enfin, il faut préciser que la structure des cinétosomes est la même que celle des *centrioles*, que l'on trouve dans toutes les cellules vivantes, Bactéries et végétaux supérieurs mis à part. Chaque cellule possède deux centrioles disposés en croix (diplosome), jouant un rôle important dans sa division. Curieusement, la composition chimique d'un centriole est très complexe : on y trouve des protéines (50 %) ainsi que des glucides et des lipides (11 %), mais aussi 3 % d'ADN et 2 % d'ARN. Ces acides nucléiques sont colorables; Fautrez estime que leur importance est essentielle pour le déclenchement de la division cellulaire (résultats obtenus, en 1963, avec l'œuf d'un Crustacé primitif bien connu des aquariophiles, *Artemia salina*). Par ailleurs, parmi les protéines, il y a une très grande abondance d'enzymes dont dépend le catabolisme des glucides (Seamann, 1960). On voit ainsi que le centriole est un corpuscule dont l'importance n'est pas négligeable.

◀ ***Localisation du* centriole *dans une cellule animale (ascidie) : 1, les deux éléments du centriole disposés à 90° ; 2, noyau ; 3, cytoplasme chargé de vésicules (microscopie électronique).***

▼ ***A gauche, coupe longitudinale d'un* cil, *on distingue nettement les microtubules axiaux et les groupes de microtubules périphériques. A la base, le* cinétosome *relié à la racine ciliaire (microscopie électronique) [cellule de l'oviducte d'ascidie]. A droite, structure schématique d'un cil et de son* cinétosome, *corpuscule également fait de microtubules.***

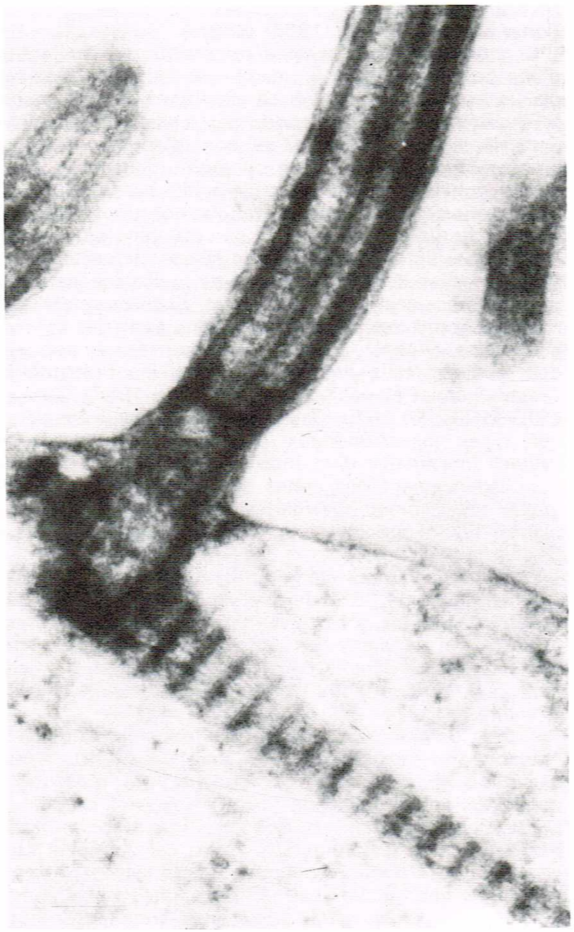

C. Bouchard

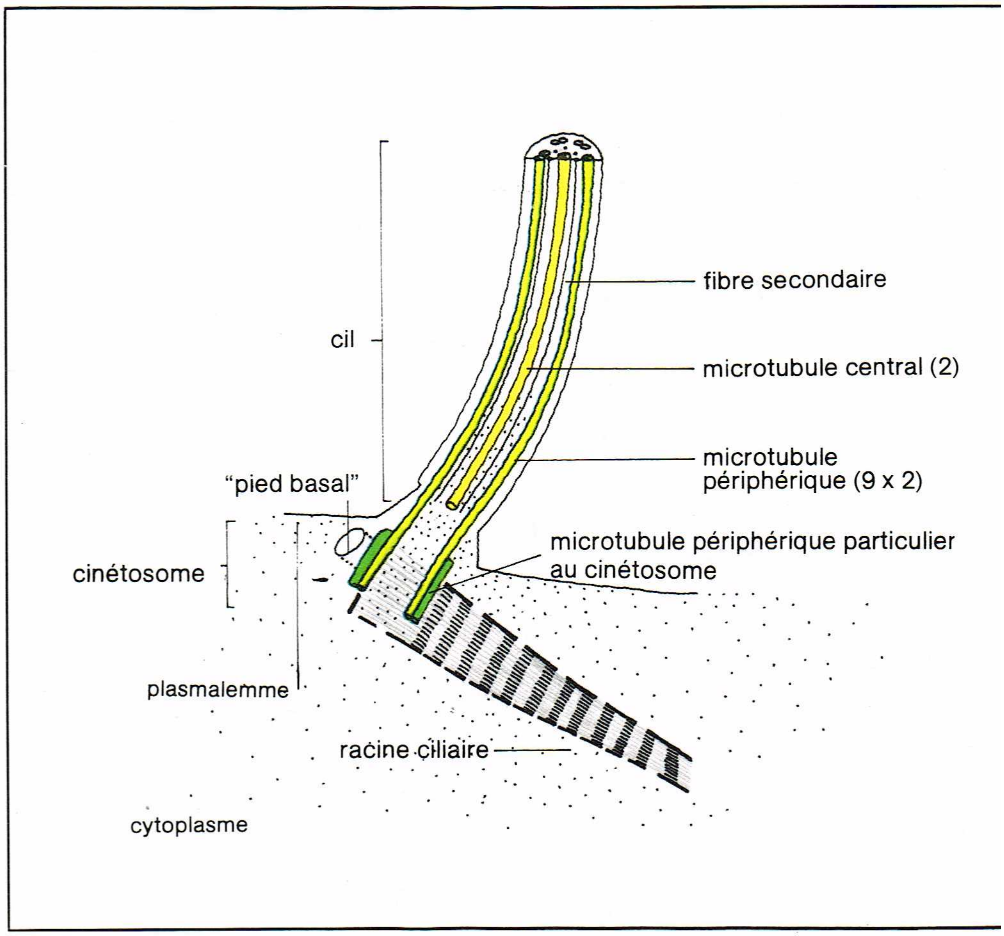

R. Colin

▶ *Mise en évidence des* mitochondries *dans le pancréas d'un* Amphibien (Alytes) *; colorées par la fuchsine (méthode d'Altman), elles apparaissent en rouge dans le cytoplasme. Un massif de cellules sécrétrices exocrines, coloré en gris-vert, montre à la fois des* mitochondries *et des grains de sécrétion qui ont également « pris » la fuchsine (accumulation à l'un des pôles de chaque cellule).*

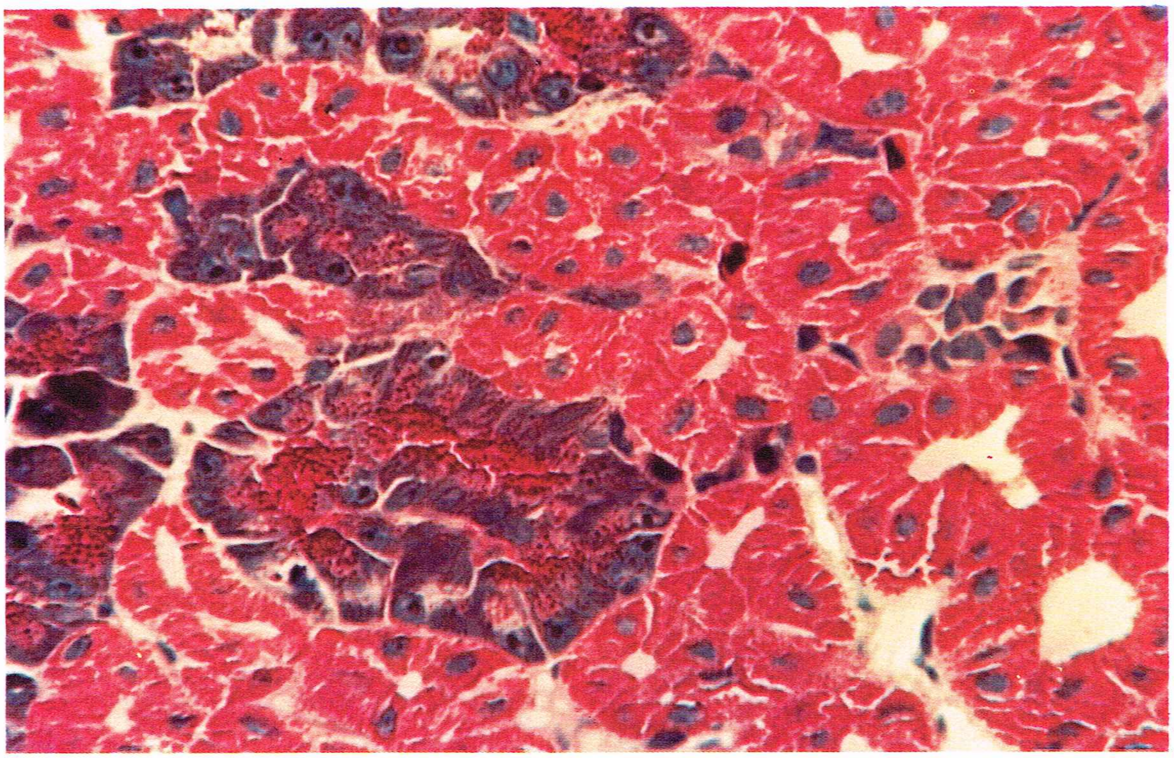

Laboratoire de biologie des Vertébrés - Orsay

Les mitochondries, organites semi-autonomes de la cellule

Les *mitochondries* sont des organites cytoplasmiques dont la découverte remonte à la fin du siècle dernier. C'est Altmann qui, en 1890, les mit en évidence en utilisant des fixateurs et des colorants particuliers. Mais la plupart des biologistes ne crurent pas tellement à la réalité de ces corpuscules et virent en eux des artefacts, et cela malgré les observations effectuées par Benda en 1898. Altmann et Benda décrivaient ainsi des grains et des bâtonnets, dont l'ensemble constituait le chondriome. Sans se laisser paralyser par le spectre des artefacts, bien des chercheurs ont ensuite tenté de connaître la nature et les fonctions des mitochondries (on parlait à l'époque de chondriosomes) ; Meves, Dubreuil, Regaud et Cowdry furent parmi les pionniers. Cependant, il fallut attendre les techniques du microscope électronique et de la biochimie moderne pour commencer à connaître ces organites.

Toutes les cellules des Eucaryotes contiennent des mitochondries. La disposition et la densité de celles-ci varient suivant le type de cellule. Si leur aspect est très variable, on peut, dans un type donné de cellule, leur trouver des caractères fixes. Cependant, il apparaît que ces organites sont à la fois mobiles dans le cytoplasme et très déformables. La technique de microcinématographie a permis d'analyser leur comportement *in vitro :* en filmant une cellule « image par image », avec un intervalle de 5 à 20 secondes entre chaque photographie, il est possible de constituer un film qui accélère les mouvements de la cellule et de ses organites. En 1928, Canti obtint des résultats en filmant seulement en fond noir. Les images données par le contraste de phase sont toutefois beaucoup plus suggestives : on vit ainsi que les chondriosomes, organites bien réels, sont extrêmement déformables ; Fell et Hugues, en 1949, puis Frédéric et Chèvremont, ainsi que Gey nous ont montré que ces organites ont une activité très intense : ils se tordent, se déplacent continuellement, se raccourcissent ou s'allongent, et peuvent même se fragmenter ou se souder. En 1956, Chèvremont notait que cette activité n'était pas due à une véritable contractilité des organites, mais plutôt « à des processus où interviendraient d'intenses changements dans les conditions de surface ».

En tout état de cause, l'introduction dans le milieu de culture de divers agents modifie le comportement des chondriosomes ; en particulier, les détergents provoquent leur fragmentation ; par ailleurs, la réduction du taux d'oxygène entraîne des transformations qui peuvent être irréversibles.

La structure des mitochondries est toujours caractéristique au microscope électronique. Elle fut analysée par Porter, Claude et Fullam (1945), Oberling, Bernhard et coll. (1952), ainsi que Palade et Sjöstrand ; ces derniers, grâce à des coupes ultrafines (épaisseur inférieure à 0,1 μ), décrivirent l'essentiel de l'organisation d'une mitochondrie ; les détails n'ont été bien observés que dans les années 60 (André, 1960 ; Fauré-Frémiet, Favard et Carasso, 1962 ; Hernandez-Moran, 1964 ; Porter et Badenhausen, 1965 ; etc.).

Chaque organite comporte *deux membranes* limitantes, d'une épaisseur de 75 Å (membrane unitaire), séparées par un espace très marqué. La membrane interne envoie à l'intérieur de la mitochondrie des replis, des invaginations, les *crêtes,* ou *cristae,* qui sont plongées dans une *matrice mitochondriale* plus ou moins dense aux électrons (considérée comme semi-rigide par Volfin). On décrit dans cette matrice des granulations, dont la densité dépend du type cellulaire et de son état physiologique.

La disposition des crêtes varie suivant la cellule : par exemple, elles sont nombreuses et feuilletées dans les cellules musculaires, et longues et disposées parallèlement au grand axe de la mitochondrie dans des cellules germinales (André). Elles peuvent constituer, non pas des feuillets, mais des tubules chez les Protozoaires (Fauré-Frémiet et coll., 1962 ; Schuster, 1965 ; Charret, 1970-1973). En 1973, Cassier et Fain-Maurel ont décrit des types mitochondriaux plus complexes dans les cellules intestinales d'un Insecte *(Petrobius) :* dans ce cas, l'agencement des crêtes est extrêmement régulier, proprement géométrique (crêtes prismatiques, lamellaires, planes ou zigzagantes et perforées, crêtes lamellaires à piliers).

On trouve d'autres éléments dans les mitochondries. Des particules de 85 Å de diamètre tapissent la surface externe des crêtes, s'y trouvant accrochées par un court pédoncule (ces *particules élémentaires* n'ont peut-être pas cette allure dans la cellule vivante). Enfin, il existe, dans la matrice, un autre type de particules, de 120 Å de diamètre.

Il est évident, *a priori,* que la constitution chimique de la mitochondrie ne peut pas être simple. On l'étudie sur des culots de centrifugation. Claude (1940), puis Hogeboom, Schneider et Palade (1948) furent les premiers à utiliser cette technique. Leurs études furent approfondies par Kennedy et Lehninger ainsi que par André et coll. La pureté des « fractions mitochondries » est un problème technique très délicat. Les culots purifiés doivent être traités par des tensio-actifs ou des ultra-sons (sonication)

▶ *Page ci-contre, en bas à gauche, coupe mince d'un culot de* mitochondries *isolées* (Candida utilis) *montrant de nombreux ribosomes mitochondriaux le long des crêtes et de la membrane interne. Plusieurs de ces ribosomes sont alignés, formant des* polysomes *caractéristiques. A droite, mise en évidence de l'*ADN *extrait d'une mitochondrie de* Tetrahymena *; cet aspect n'est qu'un reflet très imprécis de la configuration de cet ADN ; en fait, la molécule serait constituée de deux brins spiralés (microscopies électroniques).*

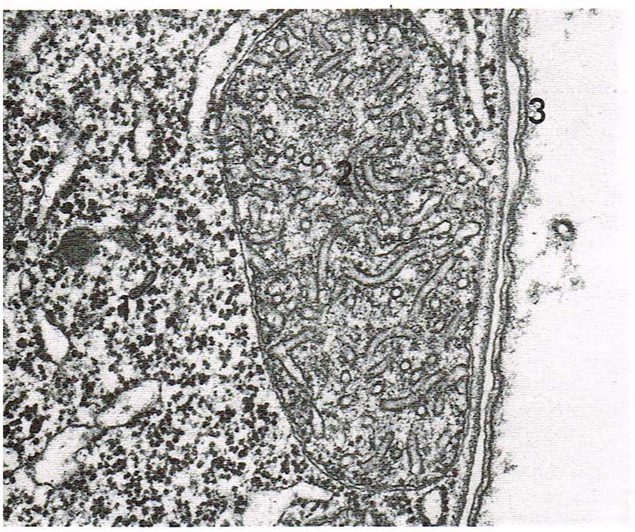

R. Charret

A. Beaumont

pour que les mitochondries éclatent; une nouvelle ultracentrifugation donne une « fraction membranes » et une « fraction matrice »; en isolant la fraction membrane et en la traitant aux ultra-sons, on provoque la libération des particules élémentaires; on effectue alors une troisième centrifugation. L'analyse globale des constituants de la mitochondrie montre que cet organite contient relativement peu d'eau (66 %) mais une proportion importante de *protéines* et de *lipides;* cela se comprend aisément, puisque les systèmes membranaires sont extrêmement développés; d'autre part, parmi les protéines, on trouve de *très nombreuses enzymes*. Une « carte » de répartition de ces dernières permet de voir qu'elles ont une localisation généralement très précise, matricielle ou membranaire. Les *cytochromes* sont abondants et constituent l'essentiel des particules élémentaires. Outre ces composés, dont la fonction sera discutée un peu plus loin, on trouve aussi dans les mitochondries des *nucléotides,* en particulier de l'ADP et de l'ATP, ainsi que des *coenzymes,* FAD et NAD, dont nous avons déjà évoqué le rôle. Enfin, on a récemment constaté que les mitochondries contiennent des *acides nucléiques*; en 1964, Luck y a mis en évidence un ADN, en utilisant un Champignon très apprécié des généticiens, *Neurospora;* cet ADN est présent sous forme d'une molécule circulaire de $5\ \mu$ de longueur, ce qui rappelle le chromosome bactérien. En 1966, Nass a pu obtenir des images semblables chez les animaux. André et coll., en particulier R. Charret, sont parvenus à mettre en évidence des filaments d'ADN expulsés des mitochondries par choc osmotique et absorbés sur un film de carbone qui tient lieu de porte-objet pour l'observation électronique. Dans le cas du Protozoaire Cilié *(Tetrahymena)*, la molécule est très longue (supérieure à $40\ \mu$) et ne paraît pas être circulaire. Par ailleurs, on a découvert l'existence de *ribosomes* souvent associés en *polysomes;* ces particules, extrêmement riches en ARN, sont très nettement observables chez *Tetrahymena*.

▲ *A gauche,* **mitochondrie à crêtes tubulaires** *(2) d'un Protozoaire* **(Tetrahymena)** *dont on voit nettement la membrane (3); le cytoplasme (1) est chargé de ribosomes.*
A droite, **mitochondries** *mises en évidence dans une cellule d'Amphibien : la double membrane est bien visible; les crêtes, ici transversales, sont des replis de la membrane interne; le stroma est ici dense et granuleux (microscopies électroniques).*

▼ *Ci-dessous, schéma de localisation des enzymes par rapport aux constituants de la mitochondrie; les particules élémentaires sont vraisemblablement des artefacts, mais elles permettent de voir que nombre d'enzymes sont localisées au contact des crêtes.*

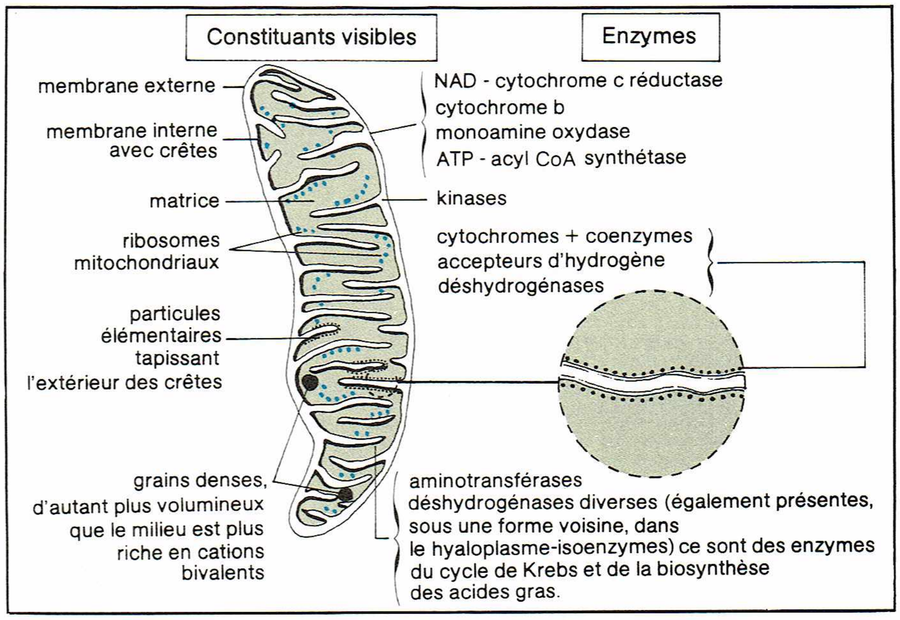

R. Colin

L.B. Stevens

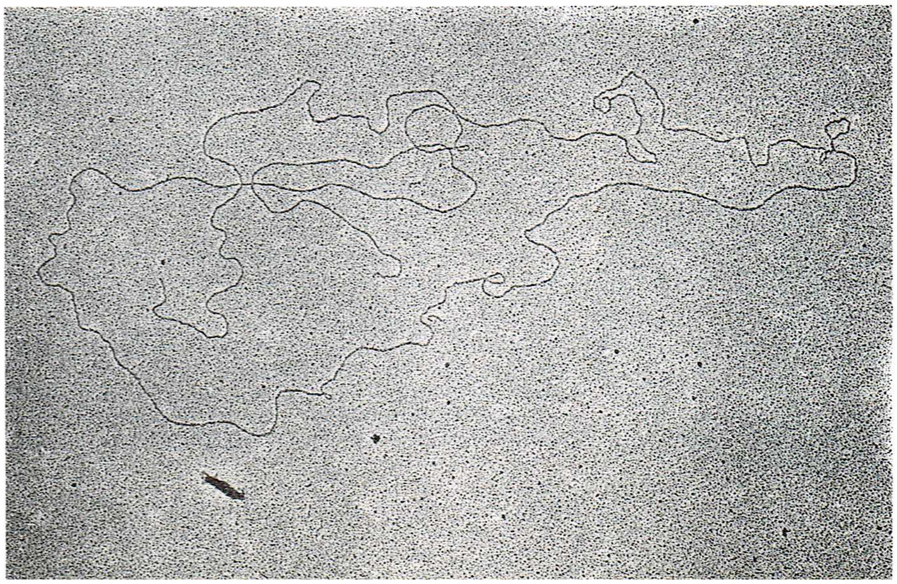

R. Charret

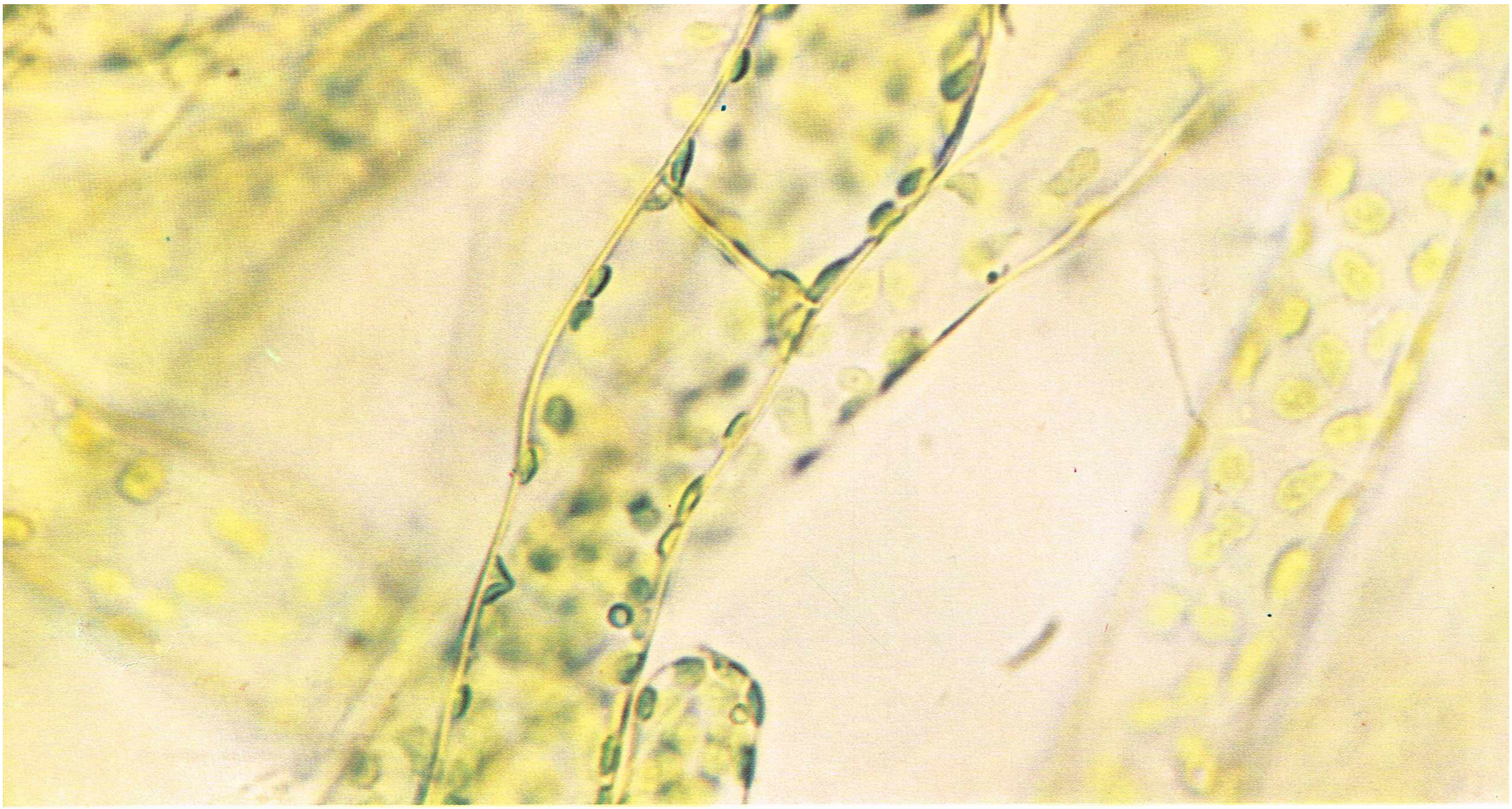

S. Blaise

▲ Chloroplastes *mis en évidence dans les cellules d'un prothalle de Fougère cultivé en milieu liquide.*

Les plastes des végétaux

Il existe différents types de *plastes* chez les végétaux. Les plus importants sont les *chloroplastes,* corpuscules de structure complexe contenant un pigment vert magnésien à noyau tétrapyrrolique.

Chloroplastes et chromoplastes

Chacun sait que le vert des plantes tache les vêtements et part difficilement à l'eau. Cela est dû à un pigment que l'on peut extraire en broyant des feuilles d'un végétal quelconque dans un mortier, avec du sable fin et de l'alcool fort; la belle liqueur verte obtenue est une solution de *chlorophylle* brute. En trempant une feuille de papier-filtre dans cette solution, on obtient, à la limite d'ascension du liquide, deux bandes colorées superposées : une bande verte, correspondant à la fixation de la chlorophylle sur les fibres de papier, et une bande jaune, correspondant à deux autres pigments, la xanthophylle et le carotène; ces derniers colorent, seuls, les plantes étiolées, certaines racines comme la carotte, des fruits, des fleurs ou des graines; leur teinte est normalement masquée par le vert de la chlorophylle. Chez de nombreuses Algues, un pigment proche de la xanthophylle et du carotène s'ajoute à la chlorophylle brute et impose sa couleur : il s'agit, chez les Algues brunes, de la fucoxanthine, chez les Algues rouges, de la phycoérythrine, et chez les Algues bleues, de la phycocyanine. La poussière verte qui recouvre l'écorce des arbres exposés à des vents chargés d'humidité, est constituée par une multitude d'Algues unicellulaires, transparentes *(Pleurococcus viridis),* qui contiennent une petite cloche, ou cupule, verte; cette cupule est un *chloroplaste.* Les Algues vertes ont, en général, un nombre faible et défini (de 1 à 4) de chloroplastes, encore appelés *chromatophores;* ceux-ci ont une forme différente suivant les espèces, les genres, les familles : lames, lentilles, hélices, anneaux, rubans, cupules. Chez les végétaux supérieurs, chaque cellule en contient un grand nombre sous forme de pastilles de 4 à 10 μ de long sur 1 à 4 μ d'épaisseur, disséminés dans le cytoplasme, où ils sont entraînés par des mouvements de cyclose (mouvements lents du cytoplasme, facilement observables chez certaines plantes au microscope, l'élodée du Canada par exemple).

Chaque chloroplaste, quelle que soit sa forme, est comparable à un petit laboratoire, parfaitement équipé en produits chimiques et extrêmement complexe, tant par son fonctionnement, qui en fait le *facteur essentiel du maintien de la vie sur terre,* que par sa structure. Pour résumer cette complexité, on peut dire tout simplement qu'un chloroplaste est construit de façon à présenter, pour un volume donné, le maximum de surfaces fonctionnelles, c'est-à-dire de membranes.

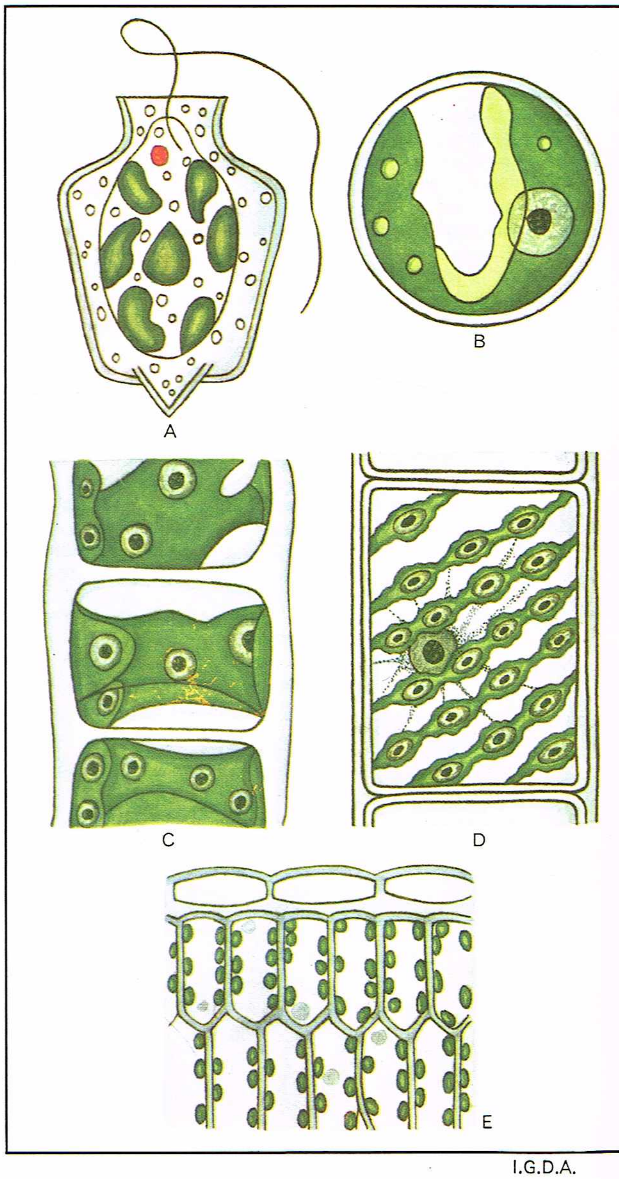

I.G.D.A.

▶ *Les* chloroplastes *ont une forme différente suivant les genres, les espèces, les familles de végétaux :* *A,* Stombomonas vermonti; *B,* Chlorella vulgaris; *C,* Ulothrix zonata; *D,* Spirogyra crassa; *E, chez les végétaux supérieurs, les chloroplastes sont sous forme de pastilles disséminées dans le cytoplasme.*

I.G.D.A.

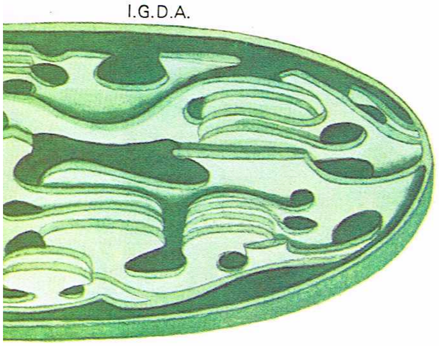

▼ *Reconstitution schématique, d'après Bogen, d'une partie d'un* chloroplaste.

Le chloroplaste des végétaux supérieurs est une sorte de disque limité par une double membrane lipoprotéique et rempli d'une substance fondamentale, ou stroma, dans lequel la membrane lipoprotéique interne émet des replis aplatis (crêtes) ou tubulaires (villosités). En outre, dans le stroma se trouvent des saccules, poches aplaties comparables à des bouillottes en caoutchouc, qui, par endroits, s'associent entre eux ainsi qu'avec les crêtes de la membrane interne; il se forme alors des piles de saccules circulaires (ou disques) qui constituent les *granums*. C'est au niveau de toutes ces membranes internes que serait localisée la chlorophylle; comme l'écrit A. Nougarède : « Elle n'y est pas à l'état colloïdal mais adsorbée sur un matériel protéique en un film monomoléculaire. » La question de savoir comment, au niveau des lamelles, se répartissent les différentes molécules : lipides, protéines, pigments (compte tenu des données fournies par les différentes méthodes d'exploration, tels la microscopie électronique, le cryodécapage), n'est pas encore résolue.

Si les chloroplastes des Algues, ou chromatophores, montrent une structure lamellaire sans différenciation en granums, ils présentent par contre souvent des granulations tout à fait particulières, appelées *pyrénoïdes*, et autour desquelles sont élaborés des grains d'amidon; il s'agit de zones très finement granuleuses et un peu plus denses que le stroma du plaste.

Le stroma renferme des gouttelettes lipidiques et des grains d'amidon provenant de l'activité photosynthétique (synthèse de substances grâce à l'énergie solaire).

Dans ce microlaboratoire parfaitement conçu que représente le chloroplaste existe tout un équipement en substances chimiques complexes, équipement essentiellement nucléique (ARN et ADN) et enzymatique. Chez les chloroplastes *jeunes*, les enzymes sont abondantes : déshydrogénases, amylases, phosphorylases, etc.; la chlorophylle et les pigments caroténoïdes sont évidemment essentiels.

Le rôle physiologique des chloroplastes peut se résumer en une équation globale simple :

$$6CO_2 + 6H_2O \xrightarrow{lumière} C_6H_{12}O_6 + 6O_2$$

Dans le phénomène que résume cette réaction, la lumière extérieure (en général, la lumière solaire) est la source d'énergie. La chlorophylle se contente de capter l'énergie solaire, et ce sont les enzymes énumérées plus haut qui permettent les réactions chimiques complexes conduisant à la synthèse des substances organiques. Les quanta de lumière et les molécules de CO_2 sont les seuls composants empruntés directement au milieu extérieur. Le CO_2 est celui que rejettent les êtres vivants au cours de la respiration. L'eau, la chlorophylle et les enzymes sont fournies par la cellule. Un phénomène apparemment secondaire dans cette série de réactions, mais qui revêt une importance primordiale pour les êtres vivants, est la libération d'oxygène qui repart dans l'air extérieur et sera absorbé par tout ce qui respire, puis donnera en échange du gaz carbonique, etc.

Autres plastes

Il semble exister plusieurs types de plastes, revêtant des aspects différents en fonction des substances qu'ils élaborent; il a été question jusqu'ici surtout des deux premiers types : les *plastes chlorophylliens*, ou chroroplastes des Algues et organes aériens (feuilles et tiges) des végétaux supérieurs qui élaborent de la chlorophylle et de l'amidon, et les *chromoplastes* des fruits, des fleurs et de certains organes souterrains, qui élaborent des pigments caroténoïdes. Mais on trouve aussi, surtout dans les organes souterrains (racines, rhizomes, tubercules, etc.), des amyloplastes qui élaborent uniquement de l'amidon. En fait, il n'y a qu'une seule catégorie de plastes, les différents types pouvant se transformer les uns dans les autres et tous dérivant des proplastes méristématiques de structure voisine de celle des chondriosomes : ainsi, chez une pomme de terre exposée partiellement à la lumière pendant sa croissance, les amyloplastes vont se transformer en chloroplastes; une tomate verte rougira, en mûrissant, par transformation des chloroplastes verts en chromoplastes orange. Ceci s'observe chez beaucoup de fruits à maturation et chez les feuilles en automne.

Dans les *amyloplastes*, l'amidon se dépose en couches concentriques à partir d'un point originel, le hile, couche correspondant au dépôt d'amidon en 24 heures. Suivant les cas, l'amyloplaste peut contenir de 1 à 5 grains d'amidon. La forme et les dimensions des grains sont variables, mais assez constantes pour une espèce donnée.

Dans les chromoplastes, le pigment caroténoïde peut être dissous dans les globules lipidiques; c'est le cas chez de nombreuses fleurs, dans les pétales devenus jaunes. Il peut aussi être porté par des sortes de feuillets, ou tubes, aux parois pluristratifiées de nature lipidoprotéique (longtemps pris, au microscope optique, pour des inclusions cristallines). On peut en observer dans les chromoplastes de la racine de carotte.

La membrane cytoplasmique

— *Structure.*

En microscopie optique, on distingue difficilement la membrane d'une cellule animale ou végétale. Chez les végétaux, la limite cellulaire est cependant beaucoup plus facile à repérer car il existe, autour des cellules, une enveloppe cellulosique parfaitement observable, constituant un « squelette » extracellulaire.

La membrane cytoplasmique proprement dite est toujours extrêmement mince (75 Å), et seule l'observation au microscope électronique permet d'en analyser les éléments. C'est un ensemble très structuré, qui comporte *trois couches* bien distinctes : une couche externe dense aux électrons, une couche intermédiaire claire et une couche interne dense. Parfois, la couche externe est doublée par une autre couche, encore plus externe, mais, fondamentalement, la structure à trois couches se retrouve dans n'importe quel type cellulaire (membrane unitaire de Robertson, 1959).

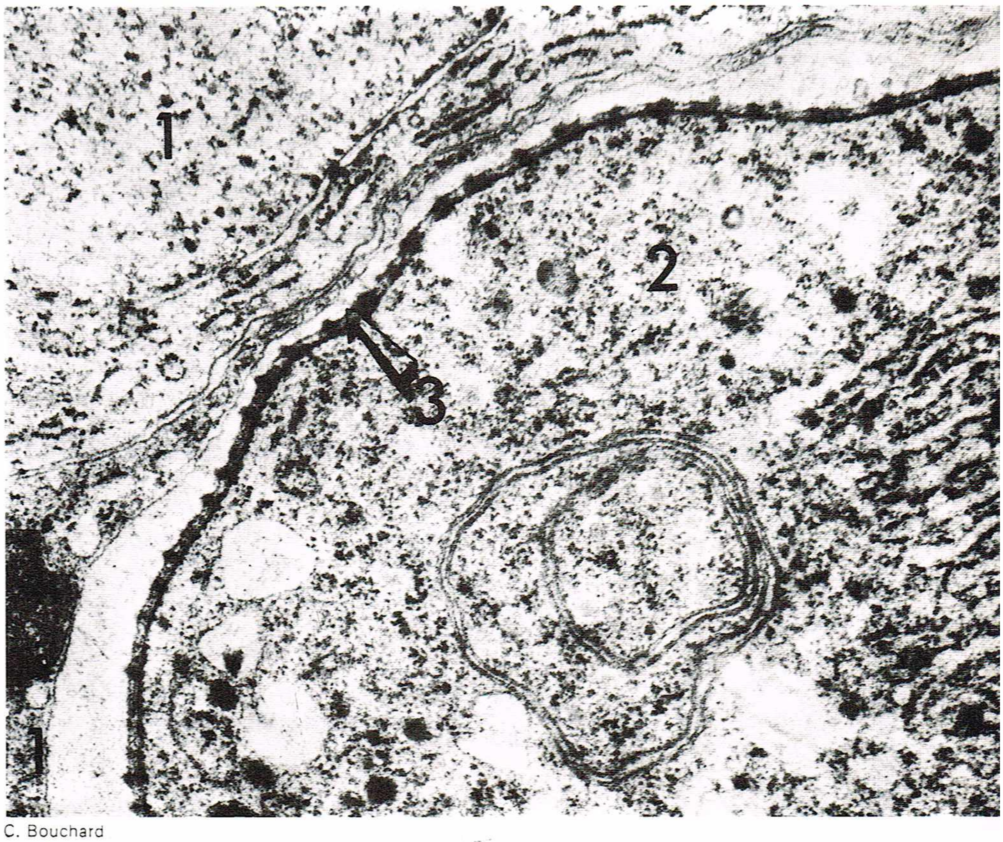

C. Bouchard

▲ ***Le plasmalemme est un élément cellulaire structuré. Microscopie électronique d'une grégarine (Protozoaire parasitant ici le tube digestif d'une ascidie). Sa paroi cytoplasmique est particulièrement complexe 1, cellule de l'hôte; 2, grégarine; 3, plasmalemme de grégarine.***

— *Nature chimique de la membrane.*

Overton avait remarqué, dès 1902, que les cellules absorbent très facilement les lipides; d'autre part, comme les enzymes des lipides, ou leurs solvants, modifient et détruisent partiellement les membranes, on a pu penser qu'elles étaient essentiellement constituées de lipides. Cependant, des mesures de tension superficielle au niveau de la membrane montrent qu'il n'y a pas de contact direct entre les lipides et le milieu extérieur (Favard, 1973). Comme la surface des cellules montre une activité enzymatique et qu'il est possible, en utilisant les méthodes d'immuno-fluorescence, d'y mettre en évidence des protéines spécifiques, on doit penser que la membrane est faite de lipides et de protéines.

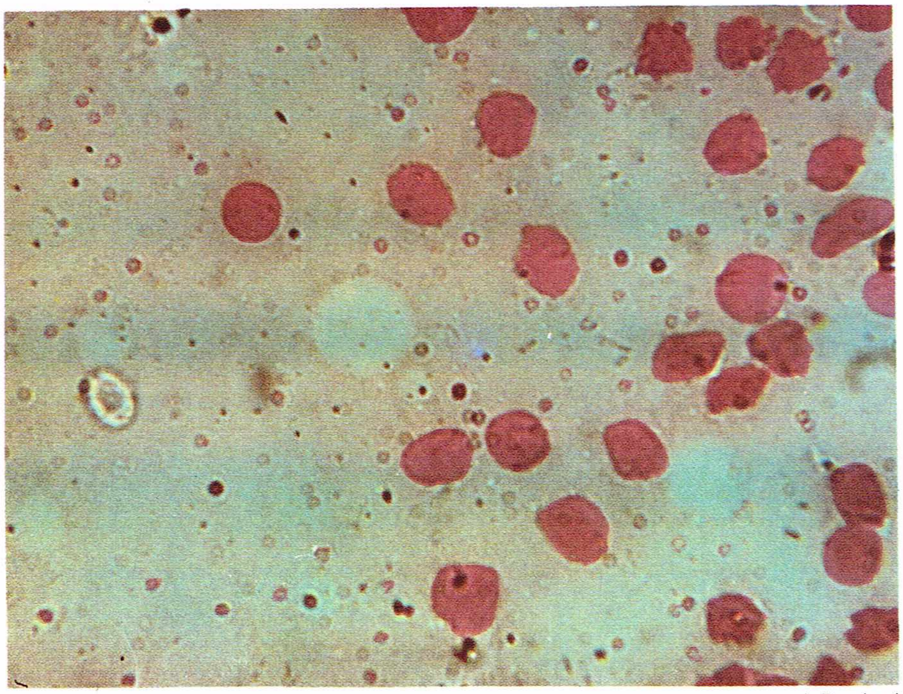

J. Bouchard

▲ ***Globules rouges distendus en milieu hypotonique; une grande partie de l'hémoglobine a traversé le plasmalemme.***

On peut effectuer une analyse chimique de membranes isolées en centrifugeant des hématies en milieu hypotonique et en recueillant un culot de « fantômes d'hématies ». On collecte aussi par centrifugation les membranes d'autres types cellulaires; le traitement qui précède cette centrifugation est alors très différent. Les hématies sont évidemment le matériel le plus pratique, ce type de cellule étant extrêmement simple; dans les autres cas, il y a toujours un risque de contamination du culot par des substances cytoplasmiques, voire nucléaires (Emmelot, Benedetti et Rümke, 1964).

Les lipides sont représentés par des *phospholipides* (lécithines et céphalines); on trouve toujours une certaine proportion de *cholestérol*. En quantité variable suivant les types cellulaires, l'analyse révèle la présence de *cérébrosides* tels que les *gangliosides* (l'un de leurs constituants, l'acide sialique, se trouve en bout de chaîne hydrophile; cet acide joue un rôle essentiel dans la polarisation électrique des membranes). Les protéines sont plus diverses; certaines ont été isolées puis caractérisées; elles sont souvent associées à d'autres familles chimiques (lipoprotéines et mucoprotéines). Les enzymes membranaires sont également diverses; Favard souligne l'importance de phosphatases et de l'ATPase.

— *Localisation des constituants.*

Pour localiser les constituants, il était nécessaire de reconstituer des membranes artificielles en recombinant certaines molécules protéiques et lipidiques. Stoeckenius parvint à faire l'étude de ces membranes au microscope électronique (1959) : il constata que les protéines se disposent de chaque côté d'un film de phospholipides. Ce résultat confirmait l'hypothèse de Davson et Danielli, qui, dès 1936, et en tenant compte des analyses chimiques et des caractères physiques des membranes naturelles, avaient tenté une schématisation de leur architecture moléculaire. Depuis, bien des travaux ont été réalisés. On pense maintenant que cette architecture peut être fortement modifiée, pendant un temps plus ou moins long, suivant l'état physiologique de la cellule et les variations du milieu extérieur. Bien sûr, ces modifications structurales, normalement réversibles, n'affectent pas toujours l'ensemble de la membrane. Benedetti et Emmelot ont montré, en 1965, que *les phospholipides peuvent prendre une disposition micellaire favorisant le passage de l'eau;* il ne faut toutefois pas oublier que les techniques de fixation des membranes provoquent certainement des artefacts, d'autant plus gênants que l'on étudie des structures plus fines, ce qui est bien le cas de la membrane. Notons que des produits chimiques d'origine naturelle sont capables de modifier considérablement la *perméabilité* mais aussi la *charge* de la membrane cytoplasmique; citons seulement à ce sujet le cas des dextranes ou de l'héparine (Hagmar Bjorn, 1972); cela montre la sensibilité, la *plasticité* de la membrane, celle-ci devant être à la fois fonctionnelle et structurale. Enfin, la nature des protéines de la membrane n'est pas la même sur les deux faces. On étudie beaucoup, depuis quelques années, les mucoprotéines externes, extrêmement développées chez l'amibe, et plus difficilement visibles à la surface des autres cellules animales; ces mucoprotéines forment un *« coat »* (manteau), qui peut être mis en évidence par certaines techniques de coloration. Ce revêtement, toujours essentiel, est d'une importance biologique toute particulière pour les cellules qui sont en contact avec un milieu de composition plus ou moins variable (l'épithélium de la vessie urinaire par exemple); on constate que seule la portion apicale de ces cellules comporte un « coat » à la fois épais et actif sur le plan biochimique (Pisam et Ripoche, 1973).

▼ ***Structure schématique de la* membrane cytoplasmique *selon l'interprétation de Davson et Danielli.***

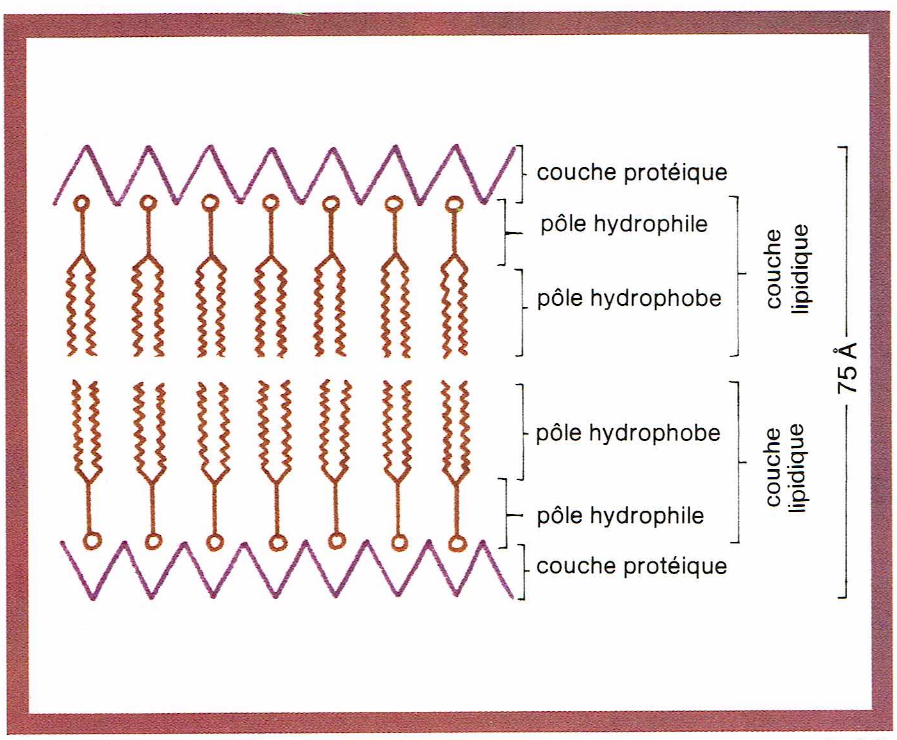

R. Colin

SCHÉMAS DE FONCTIONNEMENT DE LA CELLULE

Le fonctionnement de n'importe quelle cellule est d'une très grande complexité. Nous tenterons d'en décrire schématiquement les principaux aspects. Le plan que nous suivrons sera très proche de celui que nous avions adopté au début de ces textes, lorsque nous avons donné les caractères essentiels d'une cellule et de son comportement.

Déplacements de la cellule

Nous avons déjà décrit les mouvements de l'amibe et de cellules ciliées ou flagellées. Bien qu'ils soient encore très mal connus, ces phénomènes méritent une étude un peu plus détaillée.

Mouvements amœboïdes

Les cellules sont très souvent capables de se déplacer. La microcinématographie en accéléré a permis de faire *in vitro* des observations précises; mais on peut déceler des mouvements cellulaires par l'analyse méthodique de coupes histologiques : par exemple, on constate que toutes les *cellules embryonnaires* sont mobiles; la *mise en place* des organes implique souvent des déplacements importants des cellules qui vont constituer les ébauches; ainsi, comme nous le verrons ultérieurement, des cellules qui constituent une partie des glandes surrénales des Vertébrés, viennent, en fait, du bord de la gouttière ner-

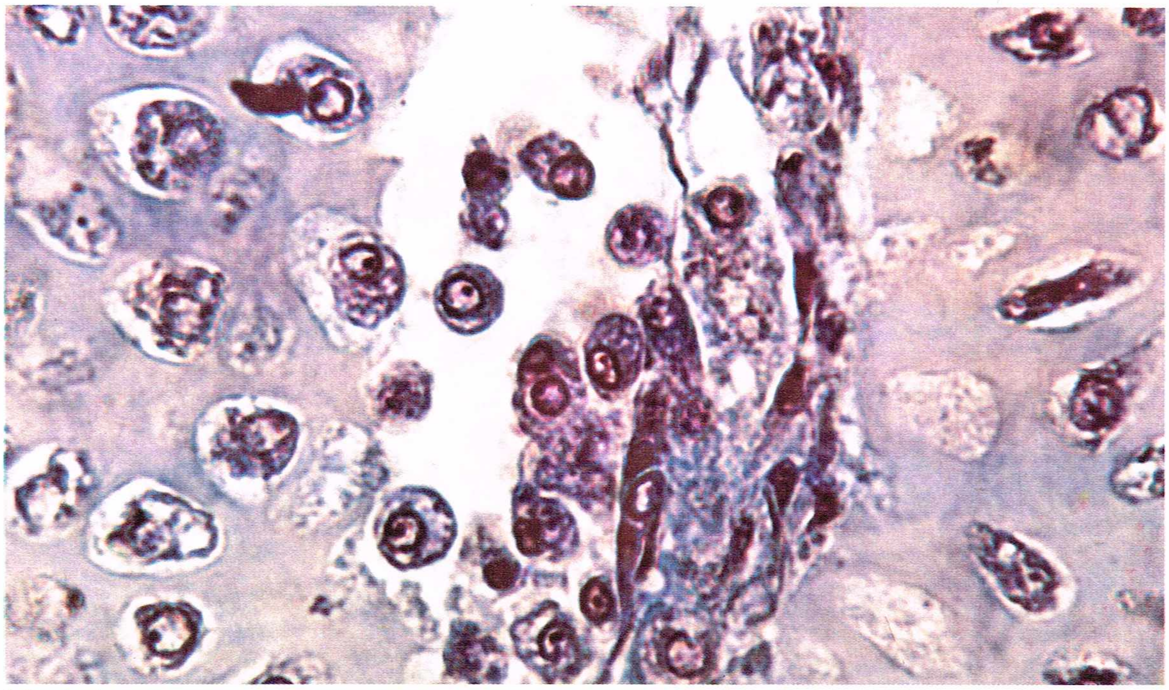

J. Bouchard

◀ ***Les cellules du cartilage,*** *qui sont enchâssées dans une substance interstitielle abondante et solide,* **peuvent être mobilisées** *durant le processus d'ostéogenèse : localement, la substance interstitielle est dissoute ; les cellules* **changent de forme,** *sont libérées dans la cavité creusée, puis se groupent et vont participer à la formation de la trame conjonctive qui va se calcifier (ici, cas particulier de l'ossification chez l'embryon d'Oiseau).*

veuse donc d'une région très éloignée du site définitif. Les exemples seraient innombrables.

Au cours de la croissance, on constate que la plupart des cellules tendent à se fixer, puis à s'immobiliser ; c'est le cas des cellules du cartilage ou de l'os et, bien sûr, des cellules végétales : l'édification d'un squelette quelconque implique une immobilisation. Suivant le type cellulaire, les mouvements amœboïdes peuvent être plus ou moins prononcés chez l'animal adulte.

C'est chez les Vertébrés que les mouvements ont été le mieux étudiés. Depuis les observations de Jolly (1913) et de Comandon, de nombreux auteurs se sont intéressés aux déplacements des cellules telles que les globules blancs du sang, ou *leucocytes* (Frédéric, Robineaux, Bessis, Policard, etc., de 1930 à nos jours). En contraste de phase, l'accélération du mouvement permet de voir que ces cellules émettent des *pseudopodes,* qui se forment en des points quelconques de la cellule. Ces pseudopodes peuvent être de simples expansions cytoplasmiques, larges ou fines. Souvent la croissance du pseudopode est précédée par la formation d'une très mince nappe purement hyaloplasmique, ou *« membrane » hyaline ;* Robineaux et Frédéric ont pu analyser le déroulement de ce phénomène essentiel, qui permet la capture des Bactéries contenues dans le milieu *(phagocytose).* Lorsqu'elle se déplace, la cellule semble prendre appui et se haler sur son ou ses pseudopodes. La déformation générale de la cellule en mouvement peut être très grande, ce qui lui permet de s'insinuer entre d'autres cellules et de traverser la paroi des vaisseaux *(diapédèse).* Comme le cytoplasme, le noyau montre alors une très grande plasticité.

A 37 °C, la vitesse d'un leucocyte (polynucléaire neutrophile) est en moyenne de 36 μ/mn ; elle atteindrait au maximum 1 μ/s, ce qui est considérable. Cette vitesse diminue si la température s'abaisse ou si le taux de calcium tombe en dessous de la normale. Le déplacement est toujours orienté : la cellule est sensible à diverses substances chimiques, qui ont donc un rôle attractif (chimiotactisme).

Dans les tissus conjonctifs des Vertébrés, on trouve également des *histiocytes,* plus particulièrement des *macrophages,* histiocytes chargés du « nettoyage », de l'élimination des particules étrangères ou des cellules mortes. Les macrophages émettent non seulement des pseudopodes, mais aussi ce que l'on nomme des « membranes ondulantes ». Il s'agit d'expansions foliacées et très mobiles, que Carrel comparait à un « voile de soie très mince agité par le vent ». Ces membranes jouent un rôle déterminant dans la capture des débris.

Ces mouvements du cytoplasme sont, nous l'avons dit, la conséquence d'un *changement d'état* local du hyaloplasme fondamental. La cellule possède une *polarité :*

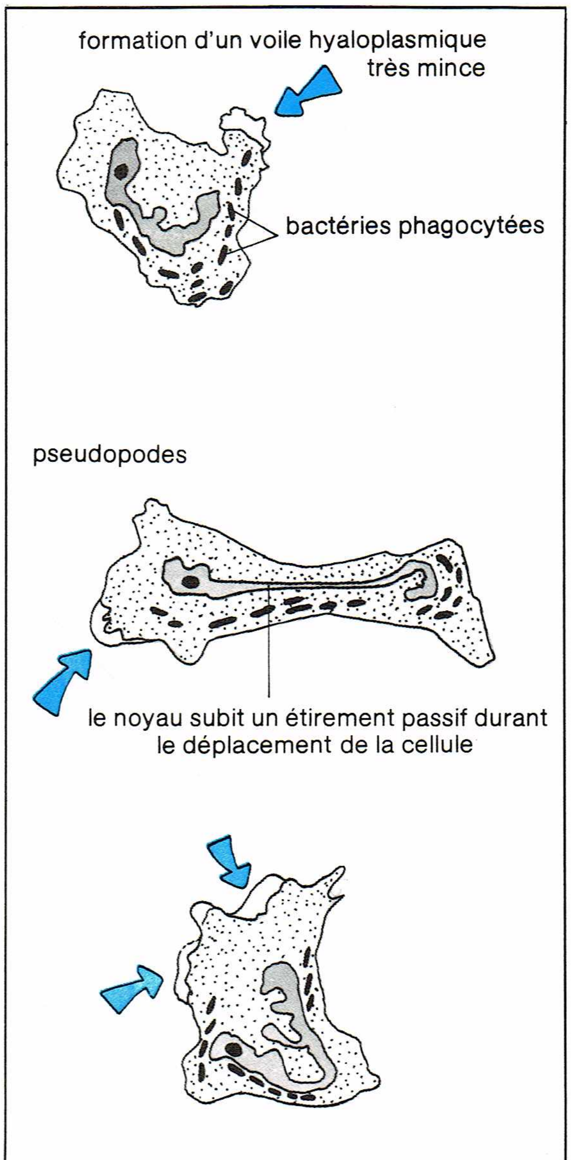

R. Colin

◀ ***Représentation schématique de* mouvements amœboïdes :** *ici, trois aspects d'un globule blanc « polynucléaire » observé pendant environ 5 mn en culture* **in vitro.**

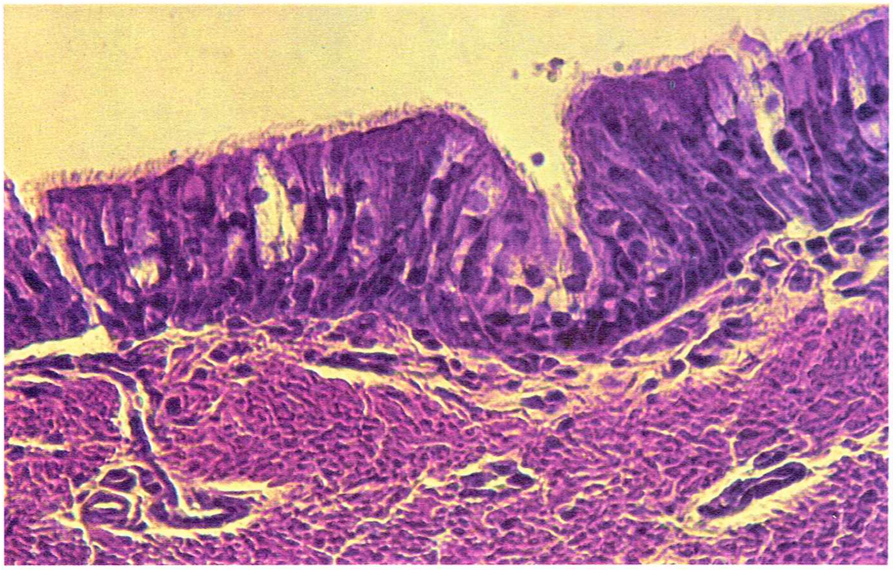

C. Bevilacqua

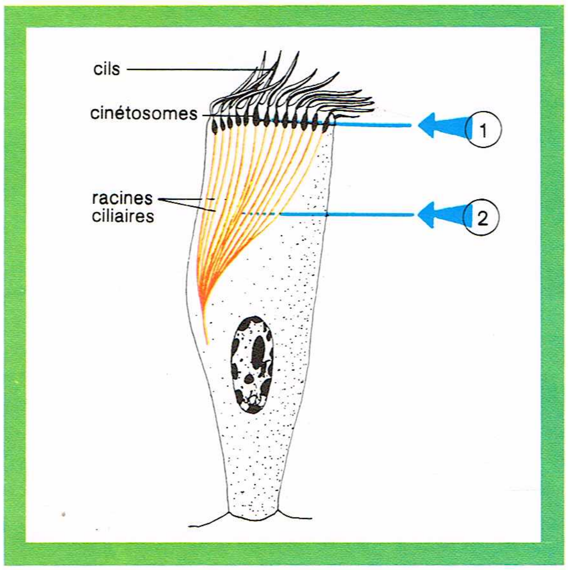

R. Colin

▲ *A gauche, coupe d'un épithélium trachéen montrant l'architecture des cellules prismatiques riches en cils vibratiles, intercalées avec des cellules « caliciformes » sécrétant du mucus (coloration topographique). A droite, représentation schématique du principe de l'expérience de Worley (cellule d'épithélium intestinal de Mollusque); les cils sectionnés suivant le plan 1 ne manifestent plus aucune activité; une section pratiquée au niveau 2 n'empêche pas les cils de battre, mais leurs mouvements ne sont plus coordonnés.*

au pôle antérieur, l'endoplasme en migration se gélifie en venant occuper un niveau plus cortical. Des expériences faites sur les Myxomycètes montrent que le hyaloplasme contient un complexe protéique assez semblable à l'actomyosine. En microscopie électronique, on observe des faisceaux de filaments qui sont peut-être responsables d'une partie du mécanisme permettant les déplacements : ils possèdent en effet une activité ATPasique, activité fondamentale pour la contraction de type musculaire.

Cils et flagelles

Nous savons que cils et flagelles permettent des mouvements, souvent très rapides, de cellules animales ou végétales. Nous connaissons déjà l'essentiel de leur structure. Ils se forment grâce à l'intervention des centrioles. Favard considère la maturation du spermatozoïde comme un exemple typique : l'allongement de l'un des éléments centriolaires de la spermatide (jeune spermatozoïde encore globulaire) permet la formation du flagelle durant la spermiogenèse; ensuite, de nouveaux microtubules s'édifient dans l'évagination flagellaire. Le processus est le même pour des Ciliés du type vorticelle, mais, dans ce cas, il se forme de nombreux centrioles corticaux, lesquels sont responsables de l'apparition de cils; quand l'animal se fixe et que son pédoncule se forme, les cils disparaissent mais les centrioles ou corpuscules basaux persistent.

Les battements ciliaires ou flagellaires ont une fréquence qui varie entre 500 et 1 300/minute, l'optimum d'activité dépendant de la nature de la cellule et des conditions du milieu ambiant. Le mouvement est déclenché par les centrioles; par microdissection, il est possible de couper les connexions cils-corpuscules basaux-racines. En 1941, Worley a montré que les corpuscules basaux permettent bien les mouvements des cils, mais que la coordination est assurée par le réseau de racines ciliaires. On constate qu'il existe généralement une onde de battements ciliaires : selon Sleigh (1957), c'est la contraction d'un premier cil qui entraîne celle du suivant, etc. En fait, le mécanisme qui entraîne le déclenchement coordonné des battements n'est pas élucidé.

On a une idée de la nature et de la disposition des pièces motrices des cils et flagelles, et on tente actuellement d'interpréter leurs fonctions. Les relations des organites cellulaires et des flagelles sont fréquemment très complexes, mais fort intéressantes; on peut l'observer chez un Protozoaire pourvu de plusieurs flagelles, *Trichomonas*. Les flagelles libres ainsi que celui qui reste inclus dans la pseudomembrane ondulante sont en rapport étroit avec les microtubules du *blépharoplaste*, organite dérivé du centriole, auquel il reste lié; de plus, le blépharoplaste (homologue des corpuscules basaux des Ciliés) est étroitement associé à des faisceaux de microtubules qui parcourent toute la cellule, formant ce que l'on appelle l'*axostyle;* enfin, le blépharoplaste est relié par un filament parabasal à un organite, qualifié de *corps parabasal,* et qui n'est autre que l'appareil de Golgi. S'il est donc bien évident que l'appareil de Golgi influence la mécanique des battements flagellaires, son rôle exact n'est toutefois pas connu. Dès 1933, Duboscq et Grassé ont estimé que cet organite est une source d'énergie pour les éléments moteurs des Protozoaires. Cependant, l'axostyle n'est pas seulement un élément de soutien; en effet, chez divers Flagellés proches de *Trichomonas,* il se déforme et provoque une ondulation de toute la cellule : il est donc, lui-même, un organe locomoteur; de plus, sa constitution chimique rappelle celle des flagelles et des cils : le complexe protéique trouvé à ce niveau est identique à ce que Gibbons a décrit, de 1962 à 1965, chez les Ciliés : la *tubuline* est, en fait, associée à plusieurs autres protéines : la *dynéine,* la *nexine* et des *protéines secondaires*. Comme la microscopie électronique révèle que les microtubules de l'axostyle sont effectivement reliés par des ponts protéiques (dynéine) extrêmement fins (Mooseker et Tilney, 1973) et comme les microtubules ne seraient pas contractiles par eux-mêmes, on peut estimer que c'est la protéine de liaison qui se contracte, provoquant un glissement des microtubules les uns sur les autres, donc l'ondulation de l'axostyle. (Ce phénomène, s'il a effectivement lieu, est d'une importance biologique absolument essentielle : nous y reviendrons en étudiant la division cellulaire.) Or, l'ondulation de l'axostyle peut être obtenue *après son isolement* dans un milieu contenant de l'ATP et des ions Mg, observation qui rend de plus en plus énigmatique le rôle du Golgi et du matériel centriolaire. Quoi qu'il en soit, on peut estimer que *la mobilité cellulaire est due à l'association temporaire de molécules protéiques* (Inoué et Sato, 1967).

Mouvements intracytoplasmiques. La cyclose

Les mouvements intracytoplasmiques sont évidents quand on observe une paramécie dont les vacuoles digestives ont été colorées par du rouge neutre. La cyclose des végétaux est encore plus commode à étudier; il suffit d'observer au microscope une feuille d'élodée : on voit les chloroplastes se déplacer tout autour de la vacuole centrale, entraînés par le mouvement cytoplasmique. Ce flux, qui dépend directement de la température et des conditions d'éclairement, mérite beaucoup d'attention car il pose un problème de même nature que ceux que nous avons évoqués dans les lignes précédentes.

On estime que les forces qui entraînent le mouvement de cyclose prennent naissance au niveau de l'interface sol-gel. Comme le précise Favard, la destruction locale d'une très petite quantité de hyaloplasme cortical gélifié provoque l'arrêt de la cyclose. Dans ce gel cortical, le microscope électronique révèle la présence de très nombreux *microtubules* orientés parallèlement à la surface. On a maintenant des raisons de penser que des protéines contractiles prennent appui sur ces microtubules; c'est leur contraction qui entraînerait la cyclose.

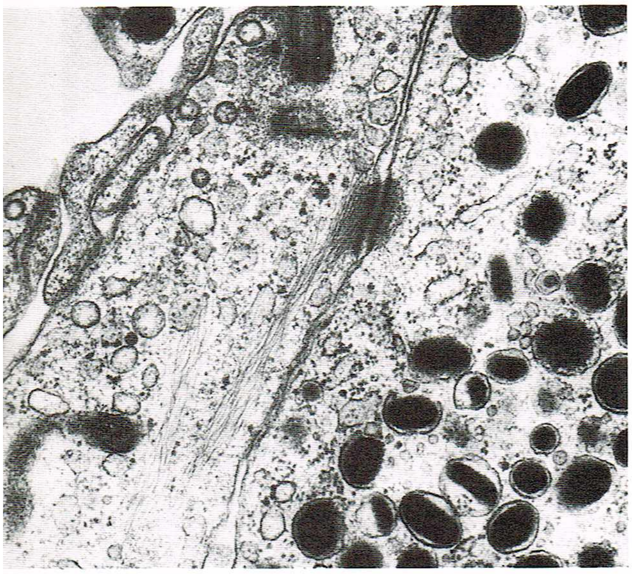

A. Beaumont

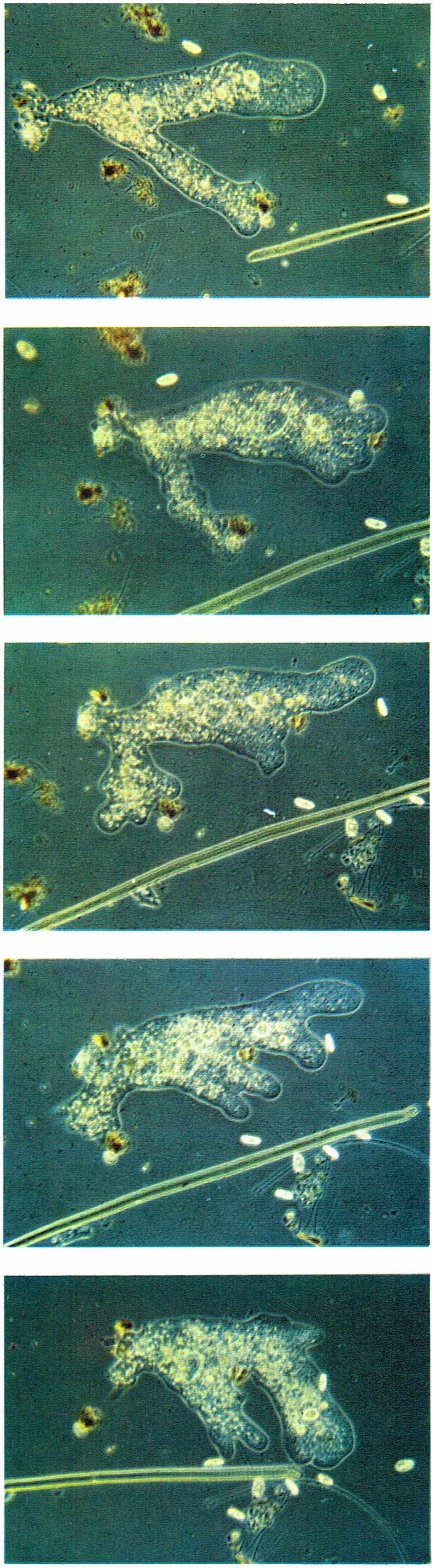

G.S. Giacomelli

◀ *A gauche, microscopie électronique d'un desmosome entre deux cellules de pancréas exocrine (Amphibien); à ce niveau, l'espace intercellulaire est rempli de matériel dense aux électrons; au voisinage de la membrane cytoplasmique, le hyaloplasme est également très dense; un faisceau de tonofilaments se termine au niveau de cette zone dense.*

◀ *De haut en bas, ces cinq illustrations montrent la formation des pseudopodes et le mode de progression chez l'amibe* Amoeba proteus.

Remarques générales sur la forme et la mobilité des cellules

La plupart des végétaux et des animaux unicellulaires se déplacent, d'une manière ou d'une autre; il en est de même pour les cellules jeunes des pluricellulaires. Cela implique des déformations plus ou moins importantes des cellules, même chez les Flagellés ou les Ciliés pourvus d'organes locomoteurs très complexes. Toutefois il ne faut, à cet égard, pas perdre de vue le fait que toutes les cellules vivantes possèdent une *forme,* une « allure » qui, dans l'ensemble, est assez caractéristique; de fait, un équilibre est réalisé entre le maintien de la forme et le « besoin » de mouvement du protoplasme. Cet équilibre n'est pas le même pour chaque espèce cellulaire : ainsi, le maintien de la forme paraît être extrêmement rigoureux pour les cellules de notre épiderme, alors que le hyaloplasme n'est pas mécaniquement inerte; par contre, chez l'amibe, le hyaloplasme est éminemment plastique, mais on peut cependant déterminer telle ou telle espèce grâce aux caractères précis des pseudopodes : leur nombre, leur forme, leur comportement permettent de « s'y retrouver » dans une taxonomie, au demeurant fort complexe (traité de Kudo). Entre ces extrêmes, il y a tous les intermédiaires.

Le maintien de la forme d'une cellule est réalisé par différents moyens. Nous avons vu qu'il existait de nombreux *microtubules* parallèles à la surface de la cellule des végétaux supérieurs; on estime que ces tubules confèrent une certaine rigidité au cytoplasme cortical, ce qui permet à la cellule d'acquérir une forme polyédrique et non subsphérique. C'est aussi le cas, de manière particulièrement frappante, pour les axones des cellules nerveuses, c'est-à-dire pour les très longues expansions cytoplasmiques chargées de conduire l'influx : les microtubules, très serrés, constituent une part essentielle du volume des axones, au point qu'ils donnent à ceux-ci une biréfringence très remarquable. Il existe d'autres exemples : les *tonofilaments* signalés dans le cas des cellules épidermiques sont également des éléments de soutien très efficaces; ils convergent au niveau de points précis du plasmalemme qui sont « en contact » avec une cellule voisine; ces points particuliers correspondent à des *desmosomes.* Un desmosome est constitué par deux épaississements discoïdaux du plasmalemme de deux cellules voisines; on trouve, entre ces épaississements, dans l'espace intercellulaire, une accumulation de matériel dense aux électrons et qui sert de *ciment* pour la liaison des cellules épithéliales.

Enfin, il faut noter que bien des types cellulaires sont associés dans un tissu, non seulement par des desmosomes, mais aussi par contact direct et local des *membranes qui se soudent* au niveau de *« barres terminales »;* de plus, les cellules peuvent s'associer en s'emboîtant, sans aucune soudure, suivant le principe tenon-mortaise, grâce à des *interdigitations.* Dans tous les organes ani-

maux, les espaces intercellulaires sont occupés par une solution complexe où l'on trouve diverses molécules, en particulier des mucopolysaccharides ; l'*acide hyaluronique* est un constituant essentiel de cette solution, plus ou moins dense chez les Vertébrés.

Certaines variations du milieu intercellulaire, d'ordre physiologique ou pathologique, peuvent entraîner la libération et, parallèlement, la mobilisation des cellules qui formaient un organe. Cela se produit dans les cas de bourgeonnement, chez les Invertébrés coloniaux par exemple, et dans les cas de remaniement tissulaire, de régénération et de tumorisation (invasion cellulaire avec ou sans métastases).

Le type le plus parfait d'association cellulaire est réalisé par les cellules des végétaux qui sécrètent un squelette pectocellulosique ou par les cellules de l'os et du cartilage des Vertébrés qui se trouvent enchâssées dans une matière fondamentale, un milieu intercellulaire extrêmement solide.

En résumé, il apparaît que la forme d'une cellule et sa mobilité sont des caractères étroitement liés. Parler des mouvements d'une cellule implique donc que l'on parle de sa forme caractéristique ; cela d'autant plus que, dans bien des cas, les éléments contractiles moteurs du cytoplasme prennent appui sur des éléments tels que les microtubules, structures semi-rigides de la cellule.

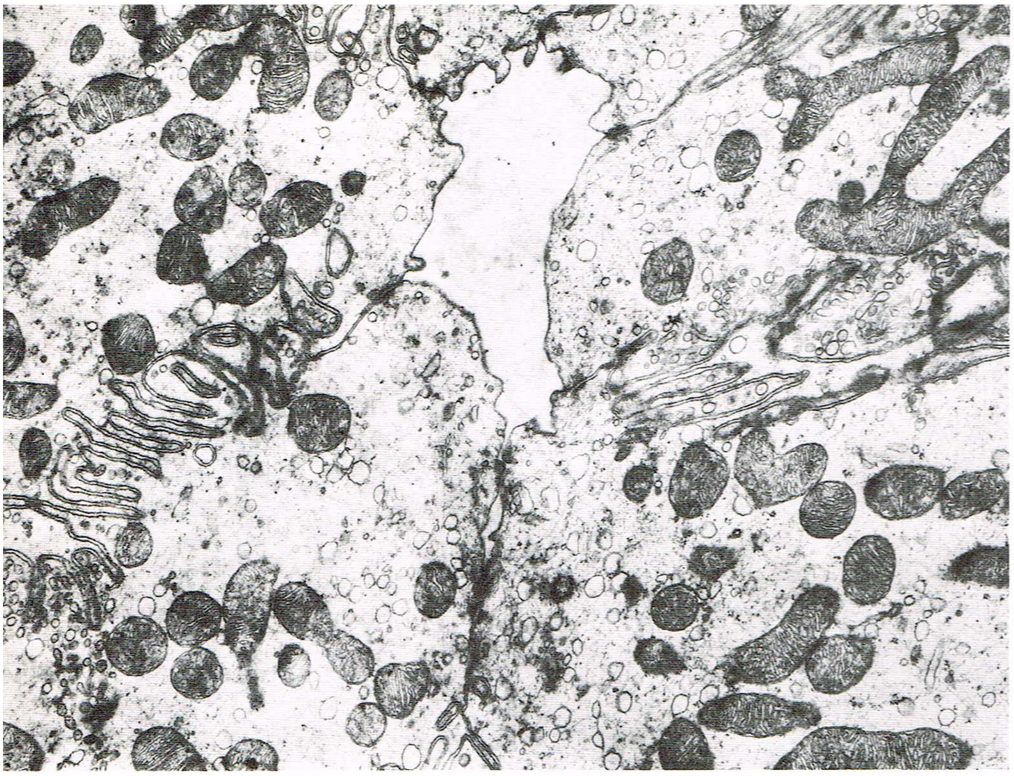

A. Beaumont

▲ *Association de cellules d'un canal excréteur suivant le* principe tenon-mortaise ; *dans ce cas particulièrement frappant, les* interdigitations *cellulaires assurent la solidité de l'épithélium (Amphibien ; microscopie électronique).*

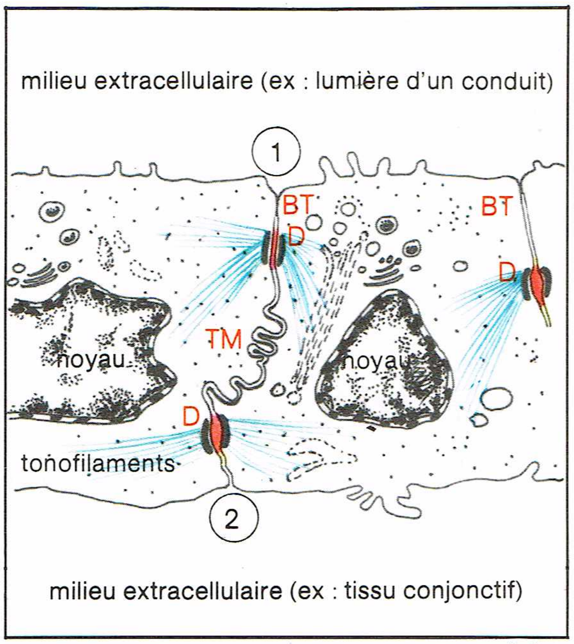

R. Colin

▶ *Représentation schématique des* dispositifs d'accrochage *entre des cellules voisines : au niveau des* barres terminales *(BT), les membranes cytoplasmiques, accolées, empêchent le passage direct des substances de 1 vers 2 ; au niveau des* desmosomes *(D), les membranes sont relativement plus écartées (en rouge, espace intercellulaire chargé d'un ciment dense aux électrons ; en noir, matériel dense accumulé dans les cytoplasmes, c'est à ce niveau que convergent les tonofilaments) ; emboîtement de deux cellules suivant le* principe tenon-mortaise *(TM)*

J. Hourdry

▶ Microvillosités *de l'épithélium intestinal d'Amphibien (fixation glutaraldéhyde-acide osmique) ; les* microvillosités *saillant dans la lumière sont soutenues, au sein du cytoplasme, par un « squelette » de* microfilaments *(microscopie électronique).*

Rapports de la cellule avec son milieu

L'activité cellulaire se manifeste par l'*absorption* de corps chimiques très divers et par l'*excrétion* de déchets ou la *sécrétion* de substances dont le rôle est très précis. Les cas particuliers sont innombrables, et nous ne donnerons ici qu'un schéma d'ensemble.

Absorption de substances chimiques

L'absorption de substances peut se faire, par diffusion ou par transport actif, à travers les espaces intermoléculaires du plasmalemme. On sait que l'existence de pores membranaires temporaires est très discutée. Quel que soit le système de transport, la microscopie électronique permet de constater que les cellules dont l'activité d'absorption est importante sont pourvues d'un plasmalemme de très grande surface : l'augmentation de surface est réalisée par la formation de *profondes invaginations* cytoplasmiques ou, au contraire, de *microvillosités*. On comprend facilement l'importance d'une telle augmentation de surface : la cellule rénale, par exemple, absorbe intensivement des molécules de déchets qui pourront être ensuite expulsées dans les voies urinaires ; c'est donc une fonction considérable ; la cellule intestinale absorbe, par contre, les molécules nutritives. Favard estime que la surface d'une cellule intestinale pourvue de microvillosités est « dix mille fois supérieure à ce qu'elle serait si la membrane plasmique était plane ».

L'absorption peut s'effectuer selon d'autres modes permettant la capture de particules volumineuses ou de gouttelettes qui seront ensuite entraînées dans le cytoplasme. Le mécanisme est assez semblable à celui de la formation des vacuoles nutritives d'un Protozoaire Cilié.

On parle de *phagocytose* quand la cellule absorbe des particules (ferritine, Bactéries, etc.) et de *pinocytose* quand elle capture du liquide.

On sait que la phagocytose est un système d'absorption très utilisé par diverses cellules sanguines ou par des cellules apparentées, telles que les histiocytes que l'on trouve dans le conjonctif. La capture des Bactéries est encore appelée *microphagie* (Metchnikoff), et celle des débris de cellules mortes, voire de cellules entières, correspond à la *macrophagie*. La phagocytose est déterminée par la nature chimique de la particule. En effet, la cellule ne capture pas n'importe quoi. Une amibe, par exemple, subit un chimiotactisme qui lui permet de rechercher sa nourriture ; d'autre part, les leucocytes peuvent « choisir » d'une manière assez semblable : l'injection d'une suspension de streptocoques et de *Bacillus proteus* dans la cavité péritonéale d'un animal de laboratoire est suivie par une augmentation d'activité des leucocytes se trouvant dans cette cavité, mais ceux-ci ne phagocytent que le *Bacillus proteus* (Bordet) ; cette faculté discriminatoire de la cellule phagocytaire est un

J. Bouchard

◀ ***Phénomène de* pinocytose *chez la souris. La formation d'une microvésicule d'endocytose est bien observable ; on voit que cette vésicule entraîne, au sein du hyaloplasme, un matériel dense aux électrons et qui tapisse la surface du plasmalemme :*
vp, *vésicule de pinocytose (microscopie électronique).***

phénomène encore imparfaitement interprété. Par contre, on a établi depuis longtemps que les immun-sérums, injectés dans l'organisme d'un animal chez lequel on déclenche une infection expérimentale, favorisent l'activité phagocytaire (Stuhlman). On sait quelles sont les substances favorisantes ; leur production dépend directement du pouvoir de défense de l'animal qui a servi à la préparation du sérum. La cinétique de la phagocytose, en particulier de la macrophagie, a été bien étudiée, grâce à la microscopie en contraste de phase. L'importance des membranes ondulantes est un des caractères essentiels des cellules phagocytes : ces voiles hyaloplasmiques permettent d'englober le matériel à absorber.

La pinocytose est de nature très voisine, mais il faut en distinguer deux modalités. Dans la première, correspondant à la pinocytose observée en *microscopie optique,* avec des macrophages, la membrane ondulante prend dans le milieu une gouttelette de liquide, qui est ensuite entraînée dans le cytoplasme, puis fragmentée. Ce phénomène, découvert par Lewis en 1931, n'avait guère retenu l'attention à l'époque, mais, dès 1953, Chèvremont pensait qu'il s'agissait là d'un processus d'intérêt général. Dans la seconde modalité, l'utilisation du microscope électronique a permis de constater qu'il existe une *micropinocytose* très importante chez un très grand nombre de types cellulaires. Ainsi, Fawcett a pu la mettre en évidence au niveau du plasmalemme de jeunes globules rouges (1965) ; il a vu se former de très petites invaginations de la membrane, qui s'emplissent de matériel protéique dense aux électrons, matériel protéique d'abord *concentré* sur des points précis du plasmalemme ; ensuite, ces invaginations, qui pénètrent de plus en plus dans le cytoplasme se pédiculisent, s'étranglent et se transforment en *microvésicules,* lesquelles vont transiter fort loin dans la cellule. La micropinocytose s'observe dans de nombreuses cellules, essentiellement des cellules animales. Le phénomène est vital pour les Ciliés ; on le retrouve aussi, par exemple, dans les cellules du revêtement des alvéoles pulmonaires ou dans les cellules hépatiques, thyroïdiennes, etc. Comme la phagocytose, la pinocytose est déclenchée par des stimuli de nature chimique ; par exemple, un Protozoaire Cilié ne constitue pas de vacuoles de pinocytose si le milieu est une solution purement minérale, et un apport de peptides induit leur formation.

Que deviennent les substances absorbées ? Biosynthèse des acides nucléiques.

De très nombreuses substances peuvent traverser le plasmalemme ; par contre, les molécules très volumineuses pénètrent dans la cellule par pinocytose ou phagocytose.

Les substances qui traversent le plasmalemme sont directement utilisables pour des synthèses ; par contre, pour que la pinocytose et la phagocytose puissent intervenir dans l'alimentation cellulaire, il faut que des enzymes traversent la membrane des vacuoles et fragmentent les grosses molécules.

Enfin, la pinocytose peut être simplement un système de transport à travers la cellule : les substances absorbées sont ensuite rejetées (par exemple, lumière intestinale → cellule intestinale → sang).

Dans le cadre de cet exposé, il est rigoureusement impossible d'envisager ce que vont devenir la plupart des molécules absorbées. Nous nous bornerons au cas des précurseurs des acides nucléiques.

— *La biosynthèse des acides nucléiques. Interprétation des faits expérimentaux.*

Tout le fonctionnement de la cellule dépend des acides nucléiques. Savoir comment ils se forment et ce qu'ils deviennent est donc crucial.

La biosynthèse des *nucléotides* s'effectue grâce à de petites molécules facilement absorbées. Elle nécessite la présence de molécules riches en énergie, en particulier de l'ATP. Trois acides aminés sont indispensables : l'acide aspartique, le glycocolle et la glutamine. Le glucide est utilisé sous forme de 5' phospho-ribosyl-pyrophosphate. La synthèse des nucléotides *pyrimidiques* s'effectue dans le noyau ; elle est très active dans le noyau quiescent, c'est-à-dire entre deux divisions mitotiques. La synthèse des nucléotides *puriques* est particulièrement complexe.

Chez *Escherichia coli,* certaines mutations peuvent impliquer des arrêts de biosynthèse (Cohen et Barner, 1954) ; la Bactérie peut ainsi devenir exigeante en

▼ ***Biosynthèse des* nucléotides pyrimidiques *(d'après Karlson) : exemple de la synthèse d'uridine-5'-phosphate (UMP).***

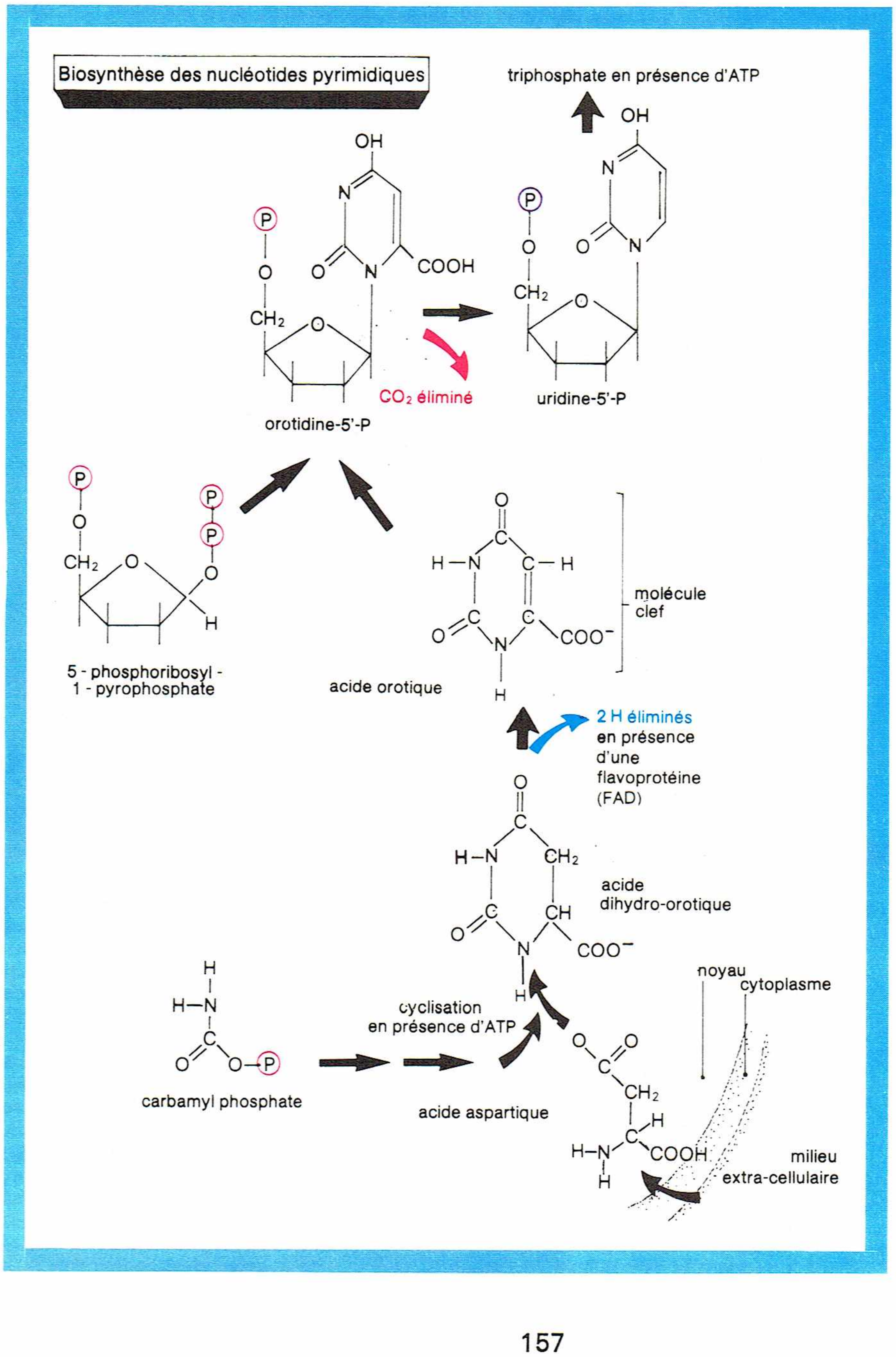

R. Colin

thymine, et il faudra lui fournir la base pour que la synthèse se poursuive.

La biosynthèse des *acides nucléiques* dépend de facteurs qui sont bien mal connus : un « événement préalable » (Odartchenko) doit avoir lieu pour que la reproduction de l'ADN se déclenche. Une réserve, un *pool* de nucléotides est, bien sûr, indispensable, mais des modifications du *pool* de désoxyribonucléosides n'influent pas sur l'ADN polymérase ou sur la synthèse d'ADN. On estime que l'événement préalable est constitué par la synthèse d'une courte séquence d'ARN « paradoxal », synthèse dépendant d'un système hypothétique, le *réplicon*.

On peut mettre en évidence la *synthèse d'ADN* en introduisant de la thymidine marquée (thymidine tritiée ^3H) dans l'organisme ou dans le milieu de culture des cellules que l'on veut étudier; on utilise diverses concentrations de thymidine, puis on prélève des cellules après des périodes plus ou moins longues. Il est alors possible d'effectuer des autoradiographies qui permettent de *localiser* les sites de synthèses de l'ADN et de voir quelle est la *cinétique* de cette synthèse.

La dose de thymidine utilisée est, chez un Mammifère, voisine de 0,5 μC/g de poids corporel; il est donc bien évident que l'animal subit alors une certaine irradiation, mais il ne semble pas qu'elle provoque de troubles suffisants pour perturber notablement l'expérimentation.

Après un temps d'irradiation jugé suffisant, on peut révéler puis observer les émulsions photographiques coulées sur les cellules à étudier. On repère des grains d'argent au niveau de la chromatine. Il y a aussi marquage cytoplasmique, mais il est labile et très difficile à étudier. La vitesse d'incorporation de thymidine tritiée n'est pas la même dans le noyau et dans le cytoplasme, ce qui tend à prouver que les ADN sont fonctionnellement bien différents dans ces deux sites. Seules les cellules capables de se diviser ultérieurement sont « marquées ».

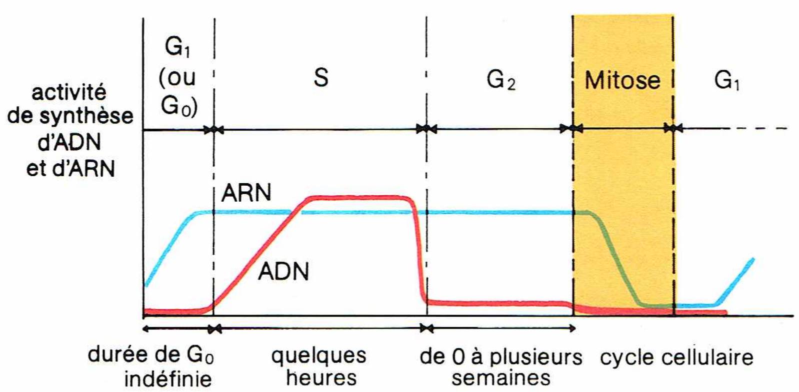

R. Colin

▲ ***Représentation schématique du cycle des synthèses d'acides nucléiques : on distingue des phases durant le cycle cellulaire (leur durée, relative, varie énormément selon les cas, et est ici totalement arbitraire; les taux relatifs d'ADN et d'ARN synthétisés sont également arbitraires).***

Dans une même population cellulaire, le marquage n'est pas général : en effet, la synthèse d'ADN ne s'effectue pas entièrement durant la période qui sépare deux divisions mitotiques; on détermine ainsi, dans le noyau « quiescent », une période de synthèse, S, qui est encadrée par deux périodes d'inactivité (sur le seul plan de l'ADN) ou périodes G_1 et G_2 (G vient de l'anglais *gap*, brèche). La synthèse d'ADN demande généralement plusieurs heures : 7-8 h pour les cellules de la moelle osseuse, par exemple (Odartchenko). Pour les cellules qui ne se divisent pas — soit qu'elles n'en aient plus la possibilité, soit qu'elles restent en réserve — on définit une période G_0; ces cellules ne peuvent être décelées que par un traitement continu ou répété à la thymidine ^3H. Certains chercheurs ont constaté qu'il devait exister, dans des cellules qui ne se divisent pas, un remaniement métabolique discret de l'ADN (Roels, 1966; Pelc, 1964). Ce point reste discuté. Ce remaniement porterait sur les portions hétérochromatiniennes. Le problème est important pour tous les phénomènes génétiques, puisque l'on envisage que l'hétérochromatine effectue un contrôle quantitatif de l'activité des gènes de structures (Guillé et Quétier, 1973).

— *La synthèse des ARN cellulaires se fait essentiellement au contact de l'ADN nucléaire.* Cela peut être mis en évidence par la technique de marquage. Des résultats, très démonstratifs, ont pu être obtenus (Zalokar, 1960; Prescott, 1964) grâce à l'uridine et à la cytidine H. La cellule absorbe continuellement le matériel nécessaire à la formation des précurseurs et en fait autant des précurseurs eux-mêmes. En fait, la synthèse d'ARN s'effectue de façon quasi continue au niveau du matériel chromatinien; on note une seule interruption, qui correspond à la fin de la division cellulaire; cependant, durant la mitose, la cellule accumule encore des précurseurs, et cela même s'ils ne sont pas entraînés dans les synthèses d'ARN. Les ARN fabriqués dans le noyau sont ensuite transportés dans le cytoplasme; nous avons vu qu'il en existe trois formes et nous savons qu'ils permettent les synthèses protéiques.

Mais une partie de l'ARN synthétisé ne quitte pas le noyau, ou du moins s'y trouve retenue plus longtemps (Prescott, 1963). On parle d'un *ARN lié à la chromatine* par l'intermédiaire de protéines acides ou neutres, elles-mêmes plus ou moins associées aux protéines basiques (histones); des régions déterminées de la chromatine pourraient alors être reconnues par des *ARN chromosomiques* spécifiques (Guillé et Quétier). Heyden et Zachau (1971) ont cependant montré que l'ARN chromatinien peut jouer un rôle d'ARN de transfert; par ailleurs, les expériences de Dahmus et Mac Connell (1969) ont souligné la diversité des ARN chromosomiques, nettement plus *variés* que les ARN de transfert. De toute manière, le rôle de ces ARN particuliers doit être important car ils ne se lient pas n'importe comment à l'ADN : ils se fixent sur des segments redondants (expériences d'hybridation de Sivolap et Bonner, 1971).

L'*ADN extrachromosomique* peut être décelé par ultracentrifugation. On le trouve dans les mitochondries et les chloroplastes. En 1966, Nass, Van Bruggen, Sinclair et Stevens, simultanément, ont vu des molécules circulaires d'ADN mitochondrial. Cet ADN est observable dans divers matériels; Stevens en a trouvé chez les Levures et Charret en étudie non seulement l'aspect mais aussi la transcription, grâce à une technique d'extraction fort délicate : des *ARNm en formation* sont parfaitement observables. Des polysomes l'ont été également sur les filaments d'ARNm. L'*ADN mitochondrial* contient aussi l'information nécessaire pour *divers ARNt*. Mais dans la mitochondrie, une partie des ARNt s'hybride seulement avec l'ADN nucléaire (Cohen et coll., 1970); selon Aloni et Attardi (1972), il semble qu'une partie des ARNt mitochondriaux soient d'origine nucléaire. La synthèse des ARN propres à la mitochondrie est difficile à étudier, car l'actinomycine D ne traverse pas ses membranes (Neubert et coll., 1968; Delain, 1972). Pourtant, cette substance (AMD) freine l'incorporation mitochondriale d'uridine tritiée : selon Curgy (1973), l'AMD empêcherait, dans le hyaloplasme, la synthèse de facteurs protéiques responsables de la transcription au niveau mitochondrial.

Toute activité de biosynthèse dépend de la structure et du fonctionnement des acides nucléiques.

— *Problèmes fonctionnels posés par la structure hétérogène des acides nucléiques.*

L'existence d'une *redondance interne* dans le génome est un problème fascinant; elle existe, à des degrés différents, chez la plupart des organismes vivants et semble déterminer une partie des mécanismes des synthèses protéiques.

Chez des virus (Bactériophages) et des Bactéries, on a trouvé de *longues séquences de pyrimidines* sur la molécule d'ADN (« clusters »). Quant aux Eucaryotes, ils montrent plusieurs types de séquences redondantes : par exemple, des *poly A-T* de Levures, du crabe et de la drosophile, et des séquences d'ADN *amplifiées*. Guillé et Quétier notent que l'ADN satellite redondant de la souris a été le mieux étudié; mais il y en a aussi chez les plantes (Guillé et Quétier, 1970) ou d'autres animaux. Le cas des Amphibiens, et en particulier de l'œuf de

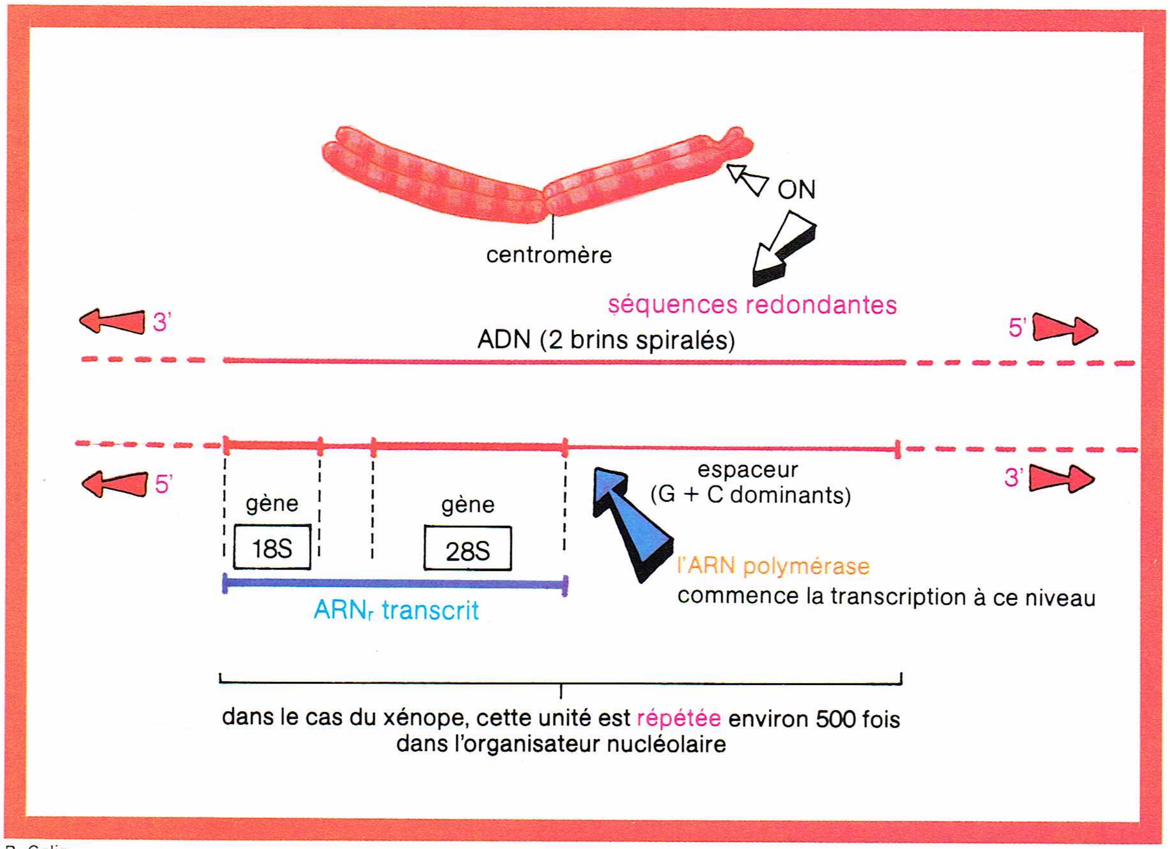

R. Colin

◀ ***Représentation schématique de l'aspect d'un* chromosome *d'Amphibien comportant un* « organisateur nucléolaire ».**

xénope, mérite quelques remarques ; selon Denis (1974) aucun gène de structure n'a encore été isolé ou caractérisé dans les cellules somatiques des Eucaryotes, mais il est possible d'y parvenir avec les gènes qui codent pour les ARN ribosomiques 28S, 18S et 5S. Les deux premiers gènes sont contenus dans les *organisateurs nucléolaires,* sites bien localisables en microscopie optique sur deux chromosomes (voir « mitose »). Chaque organisateur comporte 500 gènes 28S et 18S, tous identiques et placés « à la queue leu leu » *(séquences redondantes)*. Or la partie transcrite de chacun des gènes correspond seulement au quart de la longueur totale des deux brins d'ADN. Le reste est constitué par une séquence où la guanine et la cytosine sont très abondantes. Ces deux bases représentent 66 % du poids de l'ADN considéré, alors qu'il n'y en a que 42 % dans le reste des brins d'ADN chromosomique ; on comprend aisément que l'ADN qui code pour les ribosomes constitue « un satellite bien distinct en gradient de CsCl ». Quant aux gènes 5S, on les trouve sur plusieurs chromosomes, ils sont localisés à leur extrémité. Chez le xénope, on a dénombré 50 000 gènes 5S. Dans chacun d'eux, la partie pouvant être transcrite ne représente que 1/6 de la longueur du gène (Brown et coll., 1970 et 1971). Qu'il s'agisse des gènes codant pour les ARN 28S et 18S ou pour les 5S, on voit que la redondance des séquences d'ADN est très importante et que, d'autre part, les portions ne pouvant être traduites constituent l'essentiel de cet ADN.

Quelle serait la signification des redondances ? Selon Denis, elles auraient un rôle dans l'*architecture* de la chromatine située en bout de chromosome, ou au niveau d'étranglements (voir « mitose »). Cette interprétation, qui date de 1967 (« housekeeping » de Walker), est contestée (Southern, 1970). Guillé et Quétier ont proposé un schéma de fonctionnement dans lequel les redondances constitueraient un système de *codage quantitatif*. Ils remarquent d'abord que l'hétérochromatine du bout des chromosomes et des points « particuliers » tels que les centromères (voir « mitose ») contiennent les séquences redondantes, et cela chez tous les organismes étudiés ; par contre, l'hétérochromatine intercalaire, nettement répartie tout au long des chromosomes, ne contient que des nucléotides répétés ; ces résultats ont été obtenus par autohistoradiographie (Yunis et Yasmineh, 1969-1970, et Henning et coll., 1970). Partant du principe que *chaque gène est en fait un complexe, constitué par la séquence génétiquement active et une portion d'ADN où les nucléotides sont disposés de manière plus ou moins hautement répétitive,* ils estiment que ces nucléotides ou des groupes de nucléotides correspondent à des *tickets* de fonctionnement. En d'autres termes, un ticket donne au gène associé la possibilité de coder pour un

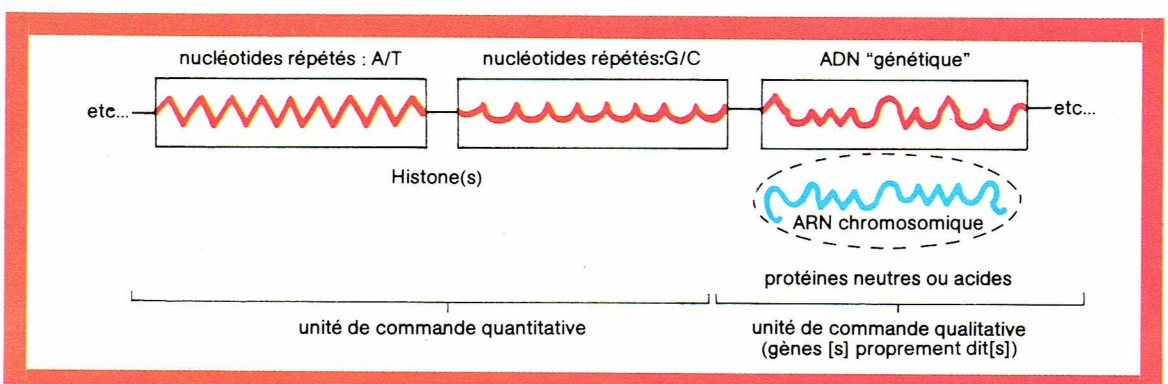

R. Colin

◀ ***Schéma de la structure d'une unité de synthèse de l'ADN (d'après Guillé et Quétier).***

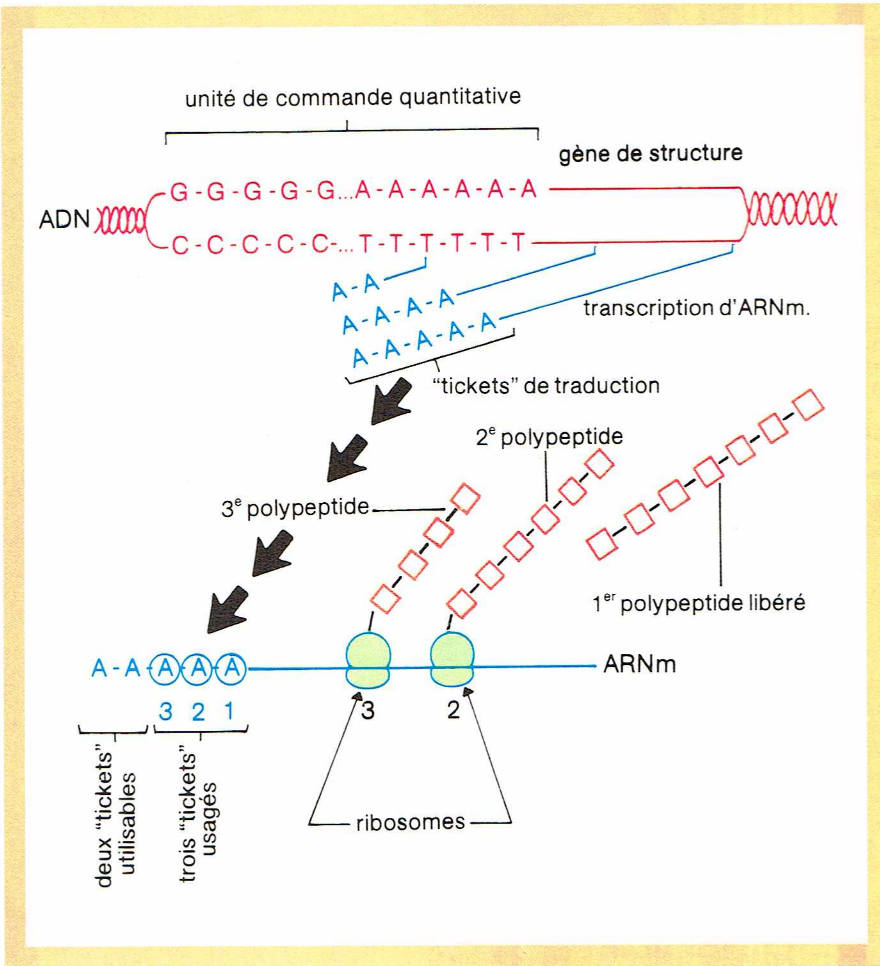

R. Colin

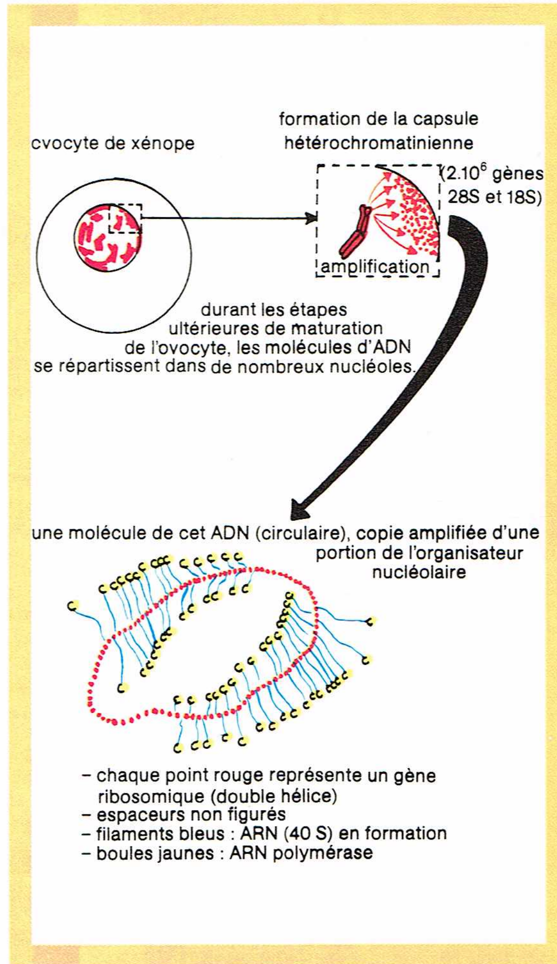

R. Colin

▲ ***A gauche, principe d'action des « tickets » constitués ici de nucléotides répétés (d'après Guillé et Quétier).*** ***A droite,*** **localisation et transcription** ***de l'ADN*** **extrachromosomique** ***de l'ovocyte de xénope (d'après Denis, Miller et Beatty).***

ARN; le ticket lui-même n'est *pas nécessairement transcrit* et, de toute manière, est « éliminé » avant la traduction.

Ces auteurs constatent l'existence de faits lourds de signification.

Pour être efficaces, les zones qui comportent des nucléotides répétés *doivent être reconnues* par des polymérases ou des répresseurs; or, la chose est possible (Kubinski, 1966, etc.). Ensuite, après réplication ou transcription, les produits calqués sur la forme d'hétérochromatine *pourraient comporter des nucléotides répétés;* en fait, c'est le cas pour la molécule d'ADN répliqué de Bactériophages ou de la Bactérie *E. coli* (Malling et de Serres, 1970). Les résultats sont assez voisins, mais plus complexes, avec les Eucaryotes. Des redondances ont été trouvées (Hurwitz, 1963; Georgiev et coll., 1971; Coutelle, 1970) dans le cas des cellules hépatiques ou celui des jeunes hématies chez lesquelles l'ARNm 9S, responsable de la synthèse de la chaîne de l'hémoglobine, comporte 550 nucléotides, alors que 420 seulement jouent un rôle dans le codage. L'expérimentation *in vitro* confirme ces résultats : les gènes codant pour l'ARN ribosomique du foie de rat, par exemple, peuvent se répliquer en présence d'ADN polymérase d'*E. Coli,* et l'ADN obtenu est riche en A + T. Enfin, Guillé et Quétier estiment que leur schéma serait vérifié si l'on pouvait mettre en évidence une *usure ou une élimination* des tickets; or, en 1970, Dawid et ses collaborateurs ont constaté que, dans l'ovocyte d'Amphibien, le gabarit responsable de la formation d'ADN redondant comporte une série de *nucléotides méthylés* (Me—C, méthylcytosine). En outre, les variations des caractères physico-chimiques de l'ADN satellite (Salomon, 1969) peuvent être expliquées par une *méthylation plus ou moins importante de la cytosine* (Southern, 1970). Ainsi la méthylation augmente durant le développement embryonnaire (Denis, 1974). On peut alors penser que la méthylation provoque l'usure de tickets successifs, puis leur élimination juste avant la traduction. Quoi qu'il en soit, il est évident qu'il reste beaucoup à faire dans l'étude de l'hétérochromatine.

— *Adaptation des acides nucléiques à des besoins fonctionnels particulièrement importants.*

Dans certains cas, on peut constater que la cellule possède une quantité d'ADN « anormalement » élevée, indispensable à l'élaboration *rapide* de matériel ribosomique (donc protéique) : ainsi, lors de la *maturation des cellules sexuelles femelles.*

Voyons le cas de l'ovocyte d'Amphibien; l'ADN chromosomique manifeste une hyperactivité qui aboutit à la formation d'un ADN nucléaire extrachromosomique fortement amplifié. Il s'agit là de la *capsule hétérochromatinienne,* observée en microscopie optique, qui peut contenir 2 millions de gènes 28S et 18S; cette chromatine amplifiée est une copie de l'organisateur nucléolaire. L'ADN en excédent permet la formation de nombreux nucléoles et, par la suite, une très grande quantité d'ARNr s'accumule dans le cytoplasme, formant une réserve pour le reste du développement embryonnaire (Denis, 1974). Le cas de l'ovocyte des Insectes inférieurs est très voisin de celui des Amphibiens.

Un autre mode d'hypertrophie temporaire de l'ADN correspond à la formation de *chromosomes géants* ou *polytènes,* dans les cellules nourricières de l'ovocyte des Insectes supérieurs. Cette fois, l'ovocyte comporte un taux d'ADN normal, bien que, là encore, de très grandes quantités d'ARNr soient nécessaires pour provoquer sa maturation. En fait, ce sont les cellules nourricières qui lui fournissent l'ARN : chaque chromosome se divise un grand nombre de fois, les filaments d'ADN restant accolés sur toute leur longueur et formant un *faisceau* qui constitue le chromosome géant. La cellule nourricière est donc pourvue d'un très grand nombre de séquences codant pour les ARN : dès qu'ils sont formés, elle les « passe » à l'ovocyte qui est à son contact.

Des cas d'*amplification* des gènes codant pour les ARNr ont pu être montrés chez les Poissons. Par contre, cela ne se produit pas chez les Sauropsidés dont les œufs sont cependant très volumineux; les ARN sont fournis à l'ovocyte par de nombreuses cellules nourricières.

Si la cellule sexuelle femelle (ou ses cellules nourricières) peut souvent accumuler un ADN redondant

extrachromosomique, il apparaît que les *cellules somatiques* n'ont en général pas ce moyen d'adaptation, et cela même si leur activité est importante sur le plan de la synthèse protéique (cellules séricigènes du ver à soie, par exemple). Pourtant, il faut noter l'existence de cas de *polyténie* assez fréquents (glandes salivaires d'Insectes). Chez les Sciaridés (petits moucherons détritivores dont certaines espèces vivent dans les maisons), les glandes salivaires comprennent des chromosomes polyténiques sur lesquels on distingue des dilatations *(puffs)*. Elles contiennent un ADN synthétisé en excès et codant pour les ARN. Pourtant, si l'on ne trouve pas dans les cellules somatiques une grande abondance d'ADN redondant (amplifié), nous savons que chaque chromosome en particulier en comporte. Cela doit permettre à la cellule de s'adapter aux besoins de l'organisme. Ainsi, le niveau d'activité d'une enzyme dépend du *nombre* de copies génétiques permettant sa formation; de même, la quantité d'hémoglobine synthétisée par un globule rouge en croissance est programmée en fonction du nombre de molécules d'ARNm.

Guillé et Quétier (1970), Fantoni et ses collaborateurs (1972) ont montré que les groupes de gènesqui ont le plus grand nombre de séquences répétées sont également ceux dont l'expression génétique est la plus intense.

— *Comment le fonctionnement des acides nucléiques est-il déterminé ? Problème de la différenciation cellulaire.*

En décrivant les acides nucléiques, nous avons dit que certaines molécules, *extracellulaires ou non*, pouvaient induire ou bloquer l'activité de gènes de structure. L'existence de telles substances, effectuant un contrôle de l'activité génétique, n'est plus à démontrer, bien que leur nature soit loin d'être connue. Il s'agit là d'un problème essentiel puisque ces phénomènes sont à la base de la *différenciation cellulaire*.

A partir d'une cellule indifférenciée, l'œuf, de nombreuses cellules vont se former qui s'engageront dans des voies très variées : chaque lignée cellulaire va posséder des caractères physiologiques et structuraux bien particuliers. Cette différenciation se produit *sans la moindre intervention du milieu qui entoure l'œuf* puis l'embryon. C'est donc dans l'œuf que sont contenus tous les renseignements qui permettront l'organogenèse. Dès la fin du siècle dernier, les premiers embryologistes pressentirent que le *cytoplasme* devait contenir des substances dont dépendait la différenciation des lignées. Mais leurs moyens d'investigations ne permettaient pas d'aller plus loin dans l'analyse.

Le problème de la différenciation peut être abordé à l'échelle de *l'organisme déjà constitué*, larvaire ou adulte. Ainsi, on peut constater que la différenciation d'une cellule est *modulée* (Bessis) par les conditions de son développement, autrement dit par les facteurs physiques et surtout chimiques que lui impose son environnement. Celui-ci est constitué par le contact et les sécrétions des cellules voisines; et le milieu extérieur à l'organisme n'est pas sans effets. Il fallut attendre les années 1950 pour que les premières idées précises sur la différenciation commençassent à prendre corps.

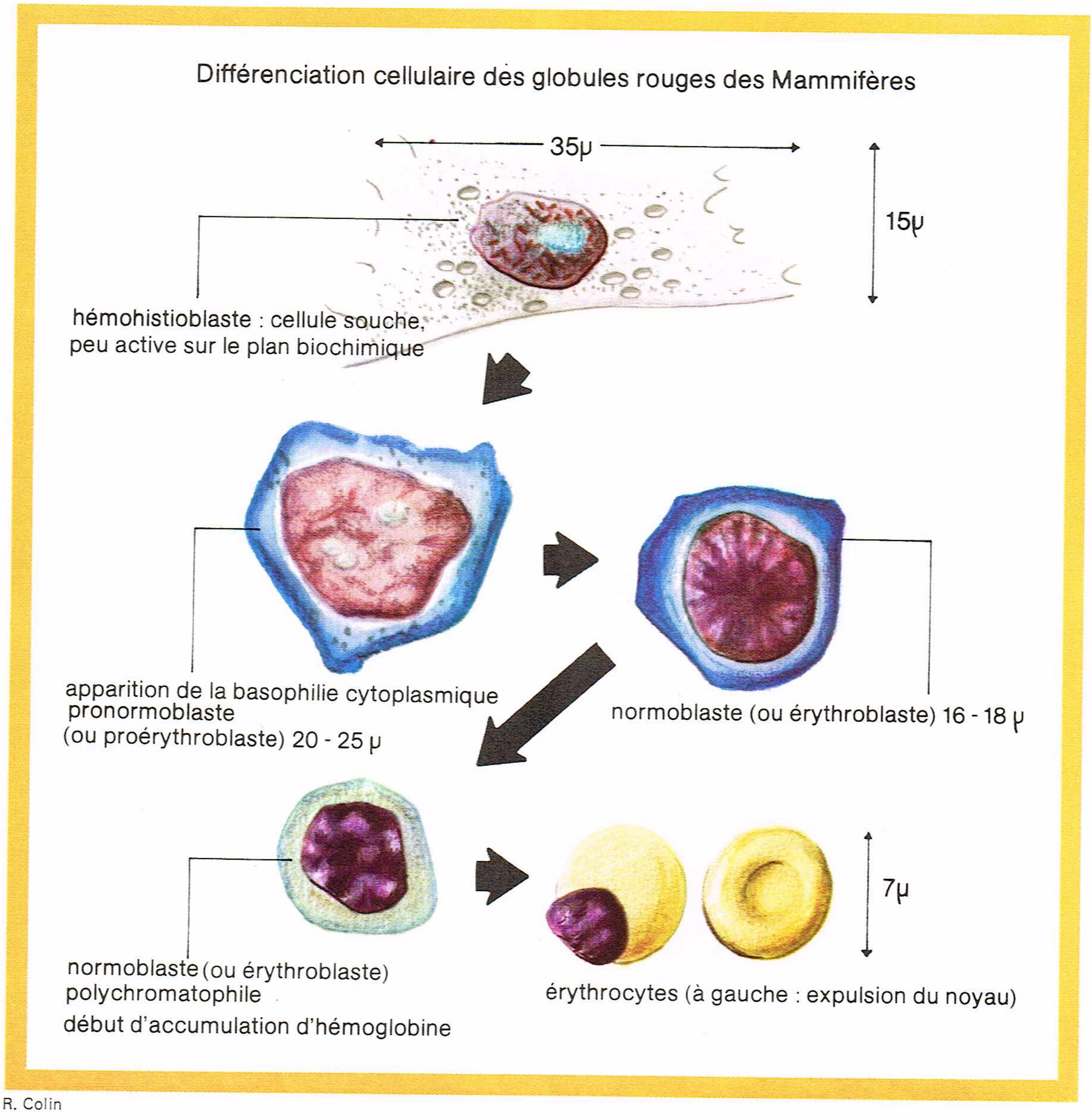

R. Colin

◀ ***Représentation schématique de la différenciation cellulaire** : ici, cas des globules rouges de Mammifère. Des exemples aussi nets sont, dans l'ensemble, très exceptionnels pour d'autres types cellulaires.*

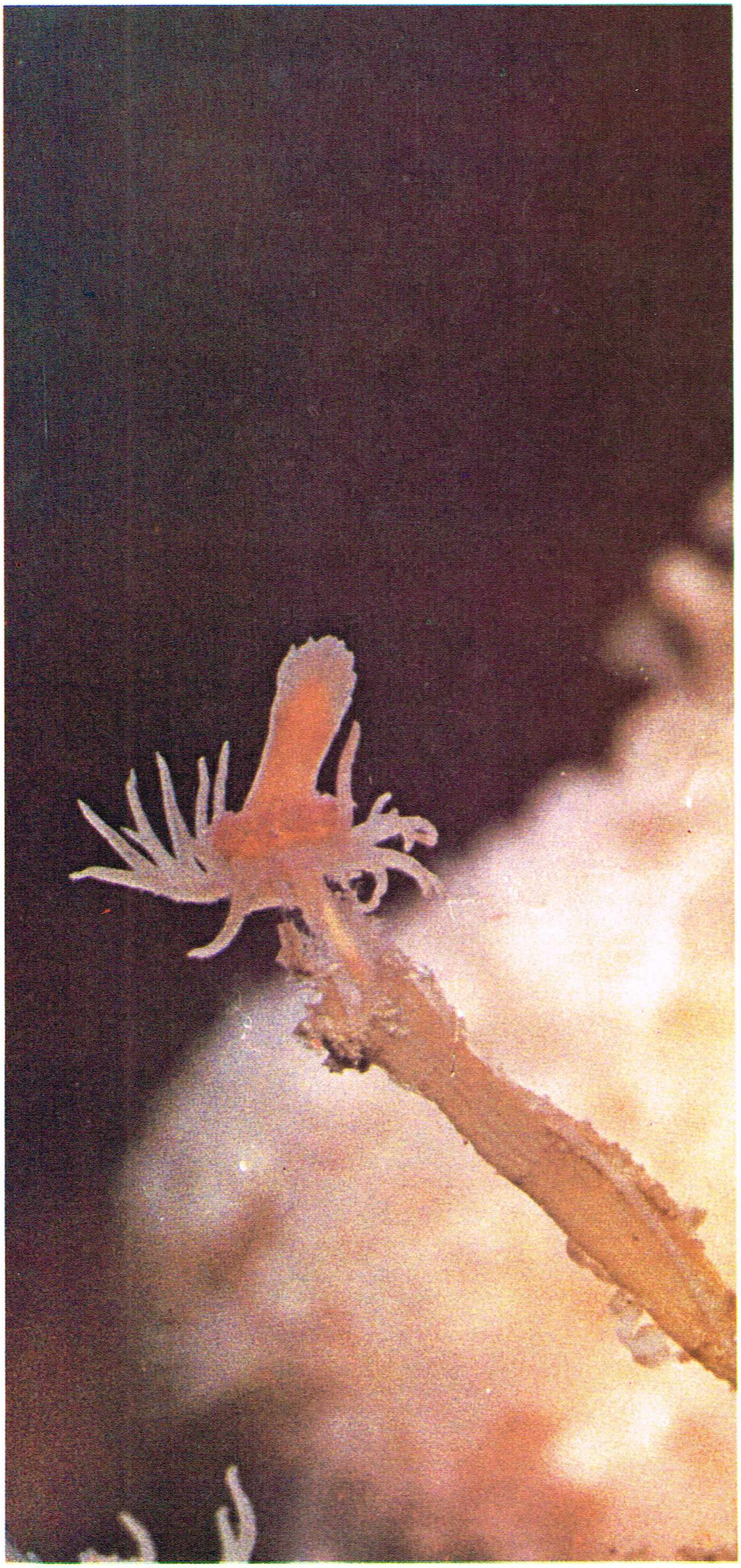

H. Chaumeton - Jacana

Dès 1938, Barth avait effectué une observation intéressante : il coupait certains polypes d'Hydraires *(Tubularia)*, puis il associait deux fragments pourvus de tentacules. La régénération, très anormale bien sûr, s'effectuait de telle façon que l'une des « têtes » prenait, si l'on peut dire, le pas sur l'autre : la « tête » la plus active permettait la reconstitution d'un polype entier, au détriment de l'autre tête inhibée par des substances fabriquées par la première. On pouvait donc penser que l'activité génétique de la deuxième tête était déterminée par ces substances qui, lui faisant perdre ses caractères de « tête », lui en faisaient acquérir d'autres, ce qui permettait la reconstitution d'un polype sub-normal ou normal. Pour S. Meryl Rose, ce genre d'inhibition pourrait être rapproché des phénomènes qui s'observent chez des animaux sociaux tels que les termites, dont les sexués peuvent inhiber la maturation sexuelle des nouvelles nymphes (Ligh et Weesner, 1951) ; de même chez les abeilles et les fourmis, chez lesquelles il existe une « hormone sociale », découverte par Butler en 1954 et mise en évidence chez les reines, la phéromone.

Dans le cas de *Tubularia*, les substances permettant la modulation sont émises dans l'organisme et elles agissent sur des groupes de cellules, adjacentes ou non. Dans le cas des Insectes sociaux, l'inhibition des nymphes vient du milieu extérieur. Mais la différence ne semble pas être fondamentale.

D'autres expériences permirent une meilleure approche du problème de la croissance et de la différenciation. Braun, en 1952, cultivant un micro-organisme *(Brucella abortis)*, vit que celui-ci fabriquait et excrétait beaucoup d'alanine, ce qui freinait l'expansion de la culture. *A priori*, on peut voir là une simple intoxication par des produits de déchet ; pourtant, à la fin de la croissance de la souche normale, il se formait *toujours* des variants, beaucoup moins sensibles à l'alanine. Un troisième type pouvait se développer lorsque la croissance de ces variants se ralentissait. On avait donc la preuve que quelque chose de *nouveau* était induit par les substances émises. Était-ce le mécanisme de base de la différenciation ? La même année, Rose constatait un phénomène de même nature chez l'embryon, puisque le produit d'un gène A bloque le fonctionnement du gène A de cellules voisines, moins proliférantes ; ensuite ces cellules inhibées utilisent un gène B, jusque-là *masqué*.

C'est en 1963 que Mac Auslan put constater la *nature protéique des répresseurs* qui, en cultures de tissus, agissent sur les acides nucléiques ; ses résultats sont d'une extrême importance (voir schéma).

En fait, on peut *envisager qu'un gène soit successivement démasqué puis masqué (switch-on, switch-off)*. De toute évidence, le répresseur est protéique puisque la puromycine empêche totalement sa formation. Spirin, en 1966, a montré qu'il n'agit pas, en fait, sur le gène TK, mais sur son ARN messager, ce dernier ne pouvant plus se lier aux polysomes (il y a masquage au niveau de la traduction).

Le problème est, comme on le voit, complexe. La nature précise des molécules qui peuvent entraîner la répression des gènes ou l'inhibition des ARNm correspondants est encore presque totalement inconnue. A partir de 1950, les travaux de Stedman firent penser que des histones pouvaient agir comme des inhibiteurs spécifiques ; bien des travaux ont effectivement montré que l'ADN débarrassé de ses histones permet, en milieu artificiel, une production accélérée de protéines (Allfrey, 1961 ; Mirsky et coll., 1963). De même, Bonner et ses collaborateurs (1963) ont montré que, chez le pois, les protéines associées à l'ADN empêchent la synthèse de globuline dans les bourgeons. Mais, en 1970, Ptashne et Gilbert en sont venus à penser que l'inhibition ne viendrait pas des histones mais plutôt des autres protéines et, en particulier, chez *E. coli*, des protéines acides associées à l'ADN.

De toute manière, l'étude de l'influence de facteurs chimiques sur l'expression génétique est compliquée par le fait que ces facteurs induisent généralement le *fonctionnement* des gènes et beaucoup moins souvent leur *orientation définitive*. Ainsi l'action des *hormones spécifiques d'un organe cible ;* Odartchenko note que les travaux sont multiples : Stockdale et Topper (1966), en particulier, ont tenté d'établir des relations entre le fonctionnement de l'ADN et la différenciation sous con-

trôle hormonal; mais il n'est pas encore possible de conclure « quant au mode d'action primaire de l'hormone ». La « différenciation » constatée au niveau de certaines cellules peut fort bien n'être qu'une série de phénomènes secondaires affectant des cellules qui, *auparavant*, sont déjà déterminées, prêtes à suivre telle ou telle ligne évolutive. Notons le cas de l'érythropoïétine, facteur stimulant la différenciation des globules rouges : le réveil de l'érythropoïèse s'effectue chez des cellules d'aspect fort « banal », *apparemment* très indifférenciées, mais où le degré de différenciation ne peut pas être déterminé, du moins avec les techniques actuelles. Les résultats sont de même nature avec les couples organes génitaux/œstrogènes ou androgènes, foie/hormone de croissance et foie/thyroxine, etc. Définir le degré d'engagement vers la différenciation est presque une gageure : l'exemple des cellules *maintenues en culture* le montre clairement. La plupart des cellules perdent assez rapidement leurs caractères quand elles sont mises en culture; pourtant, ces cellules, qui ont acquis un aspect et une activité biochimique de type « banal », demeurent encore très « orientées », comme on peut s'en rendre compte en les greffant ou en leur faisant subir divers traitements (Cahn, 1968). Coleman, par exemple, maintient différenciées des cellules cartilagineuses en traitant ses cultures par la thyroxine et en réduisant la tension d'oxygène. L'*état* différencié est un état « stable », et l'*aspect* indifférencié ne signifie rien de précis.

Trois types d'expériences vont nous permettre d'avancer un peu.

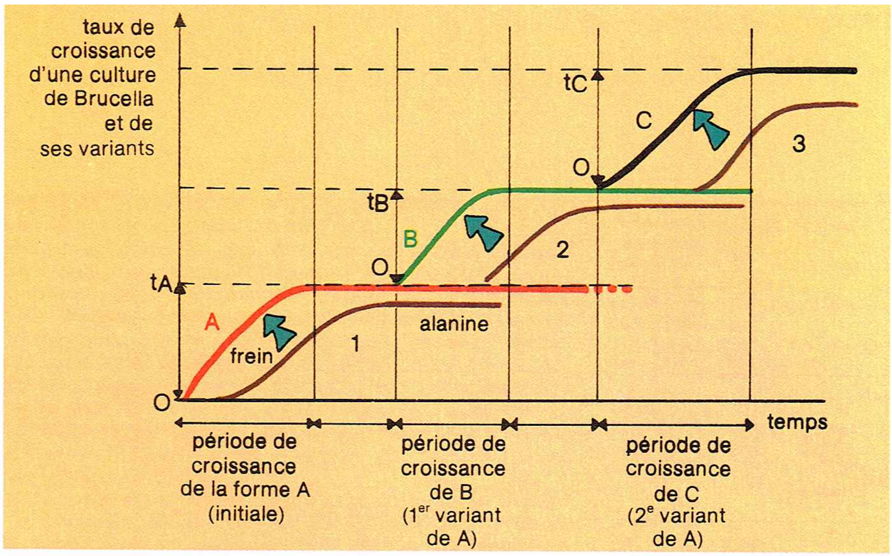

R. Colin

▲ *Représentation schématique des observations de Braun sur des cultures de* **Brucella** *: 1, 2 et 3 sont les substances émises par A, B puis C; chacune se révèle toxique en freinant la croissance des cultures de A, B puis C; mais B « pousse » en présence de 1, C de 2, etc.*

◀ *Page ci-contre, aspect de* **Tubularia**, *dont la couronne de tentacules est bien visible (Cœlentérés, Hydrozoaires, Hydraires).*

▼ *A gauche, la multiplication puis la différenciation des cellules sécrétrices de la glande mammaire sont déterminées par les hormones œstrogènes et progestatives. On voit ici une coupe de cette glande qui montre plusieurs îlots de cellules différenciées (coloration topographique). A droite, schéma des expériences de Mac Auslan : on notera que dans une cellule témoin infectée, il se forme à partir de la 4e heure un ARNm 2 codant pour une protéine 3 qui réprime, au niveau de l'ADN, la synthèse de l'ARNm 1 codant pour TK.*

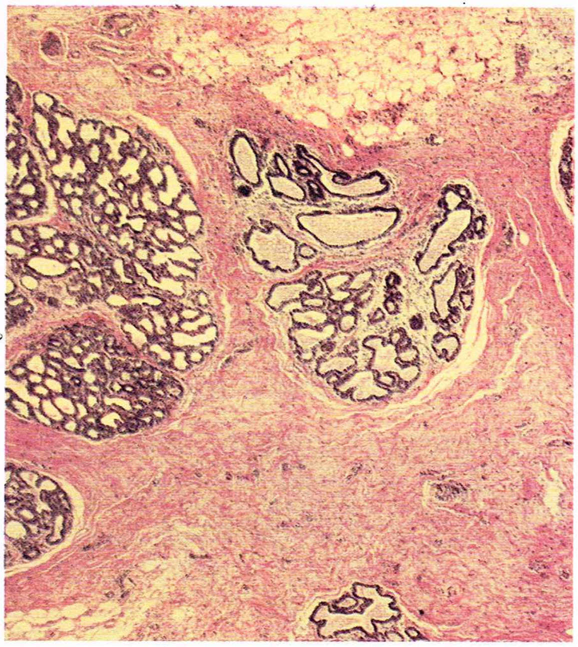

C. Bevilacqua

— Un cas d'induction d'enzyme a été assez étudié pour qu'il mérite d'être souligné (Denis, 1974). Il s'agit de la production expérimentale de *glutamine synthétase* par les cellules de la rétine de l'embryon de poulet. On peut en déclencher la fabrication précoce grâce à l'hydrocortisone, hormone qui démasque le gène responsable de la transcription de l'ARN messager codant pour la protéine enzymatique.

— Une autre induction, beaucoup plus spectaculaire, correspond chez les Vertébrés à la formation du système nerveux grâce à une excitation chimique venue de l'axe conjonctif sous-jacent. Mais la nature de « la » substance inductrice n'est pas connue avec certitude : la neuralisation s'obtient expérimentalement en soumettant le *territoire* nerveux (et non l'ébauche) à divers traitements chimiques. Certains pensent que l'inducteur serait protéique et que, dans ce cas, la fixation sur l'ADN pourrait être directe. Par contre, s'il s'agit d'une petite molécule, Denis envisage l'existence d'une réaction-relais : avant de se fixer, cette molécule se combinerait avec des protéines réceptrices; c'est ce qui se produit, par exemple, avant qu'une hormone, telle que la cortisone, se fixe

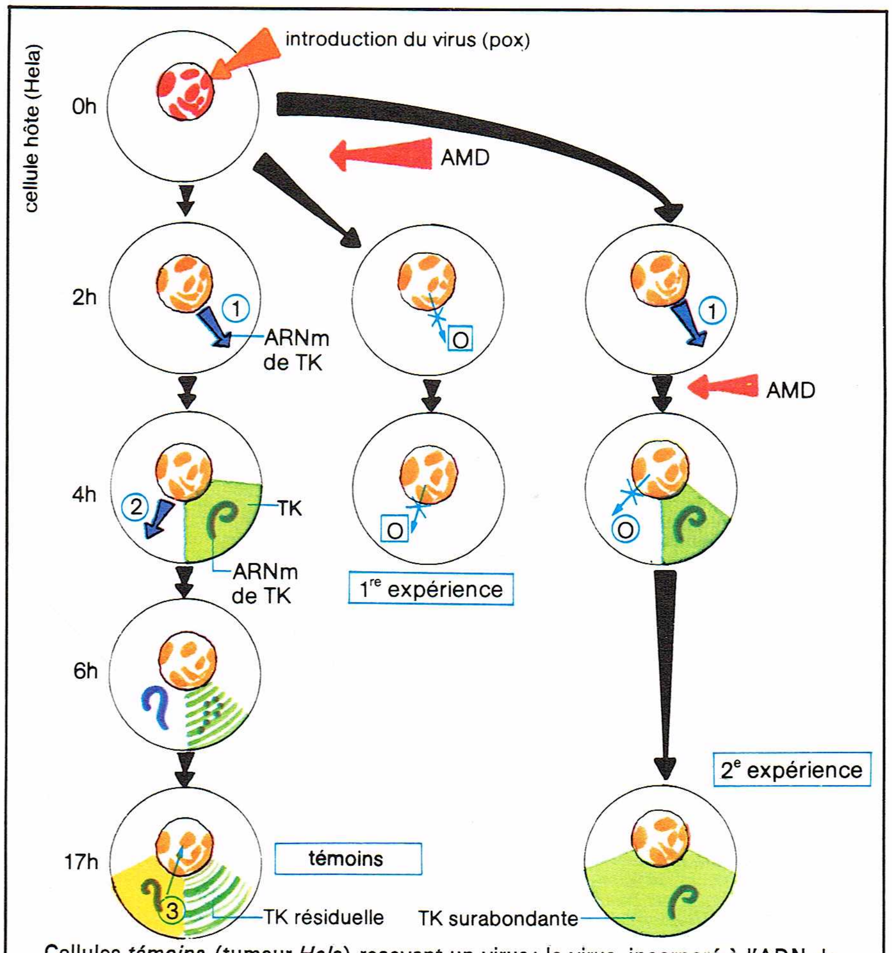

Cellules *témoins* (tumeur *Hela*) recevant un virus; le virus, incorporé à l'ADN de l'hôte, induit la synthèse d'ARN messagers, en particulier (1), qui code pour la *thymidine kinase TK* (en vert). TK est synthétisée pendant 6 h au maximum.
1re expérience : introduction d'actinomycine D (AMD) avant la 2e heure qui suit l'infestation virale → aucune synthèse de TK (l'ARNm correspondant n'est pas transcrit).
2e expérience : AMD ajoutée à la culture entre la 2e et la 4e heure → synthèse de TK; en effet son ARNm était déjà formé avant l'apport d'AMD.
Cette synthèse dure 17 h.

R. Colin

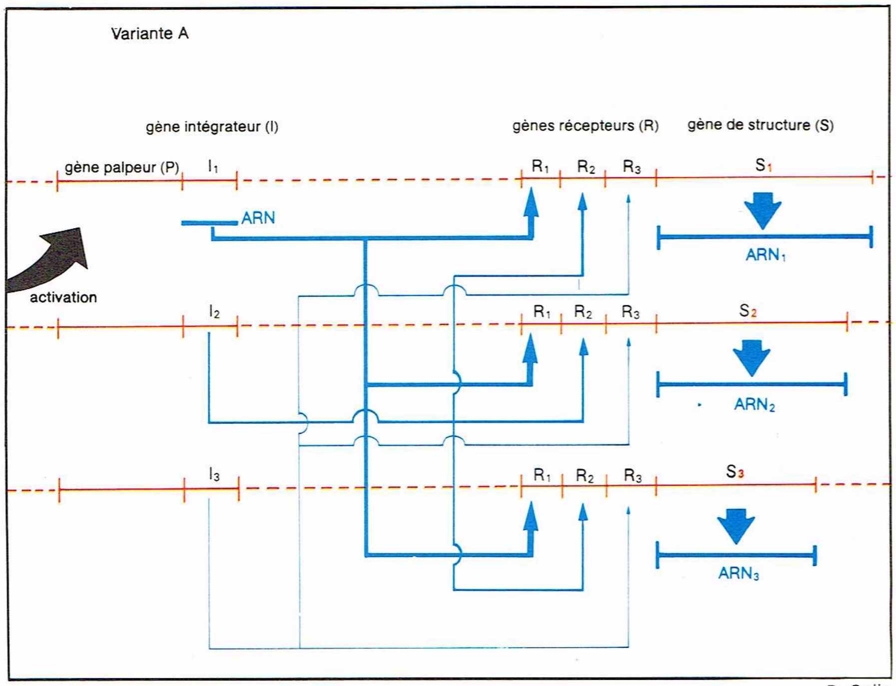

R. Colin

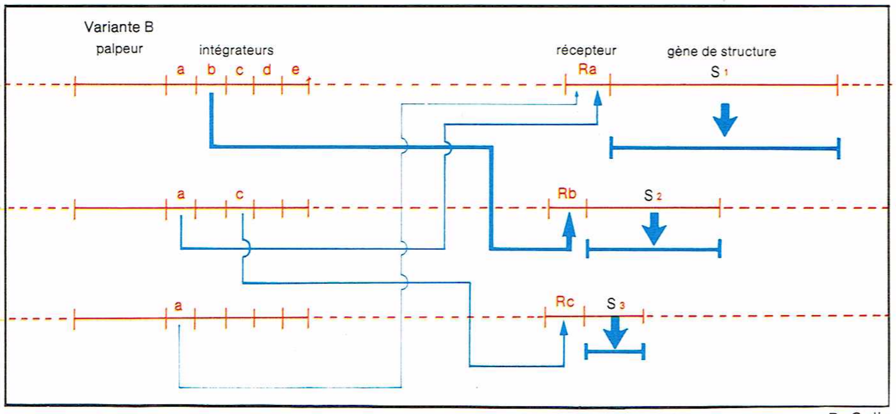

R. Colin

▲ *En haut, coordination de l'activité génétique (modèle de Britten et Davidson, variante A) : les trois éléments de l'ADN représentés sont situés, les uns par rapport aux autres, à des distances très variables sur la molécule. Noter qu'un même intégrateur (I_1 par exemple) peut activer plusieurs gènes de structure en agissant, par l'intermédiaire d'un ARN spécifique, sur un même récepteur associé à différents gènes S. En bas, variante B : l'ensemble palpeur-intégrateur, identique dans les trois cas, permet l'activation de plusieurs gènes de structure (selon Denis, la réalité biologique correspondrait à la combinaison des deux variantes).*

sur l'ADN (protéines allostériques). Ces hypothèses montrent que l'impact de la molécule inductrice *peut être direct,* ou nécessiter aussi la présence de *molécules protéiques intermédiaires spécifiques,* capables de reconnaître telle ou telle partie du génome. Les faits expérimentaux sont réduits, mais ils permettent d'envisager les mécanismes.

— Enfin, les effets que produit une hormone des Insectes, l'*ecdysone,* sont extrêmement évocateurs et *directement observables.* L'ecdysone, hormone de type stéroïde, sécrétée par une glande contenue dans le thorax et contrôlée par le « cerveau », est responsable de la métamorphose des Insectes (Wigglesworth, 1965). Si l'on administre de l'ecdysone à une larve âgée de chironome (Diptères), l'animal entreprend sa pupaison et, durant ce temps, on voit apparaître d'importantes modifications au niveau des chromosomes géants; on voit se développer ce que l'on appelle des *puffs* (des bouffées). Les puffs avaient été observés dès 1952 (Beerman) lors de l'évolution normale de divers Diptères : sur les chromosomes géants, ils apparaissent comme des épaississements, des hernies, bien visibles, très localisées et toujours transitoires. Ces puffs, qui incorporent l'uridine marquée, fabriquent donc de l'ARN; au niveau d'un puff, on peut estimer qu'un gène ou qu'un groupe de gènes sont en activité, *la localisation des puffs sur les chromosomes dépendant des organes* (peu de gènes fonctionnent ensemble sur un même chromosome). C'est en 1961 que Clever parvint à provoquer la formation de puffs chez la larve : l'action de l'ecdysone apparaissait donc clairement. On peut penser que les hormones des Insectes permettent une modulation de l'activité génétique, donc une réelle *différenciation par dérépression.* Chaque organe réagit de façon très spécifique vis-à-vis des hormones; ainsi, la maturation de la glande salivaire du chironome implique seulement la différenciation de quatre cellules sécrétrices et elle est sous la dépendance d'un seul puff chromosomique (Beermann, 1961). Bien des expériences effectuées avec la β-ecdysone ont confirmé que la différenciation cellulaire qui permet la formation de l'Insecte parfait est sous contrôle hormonal (Shrihari, 1974).

Le problème de la différenciation peut être aussi abordé en étudiant l'*œuf.* Cependant l'expérimentation et les interprétations sont généralement très délicates; on obtient depuis quelques années des résultats intéressants, bien que très insuffisants pour comprendre comment s'installe le mécanisme de *filtrage de l'information génétique.* L'œuf est certainement la cellule la plus complexe que

▶ *Chromosomes géants et puffs dans une cellule de glande salivaire de chironome (Diptère Nématocère) [contraste interférentiel].*

Nuridsany - Reichert

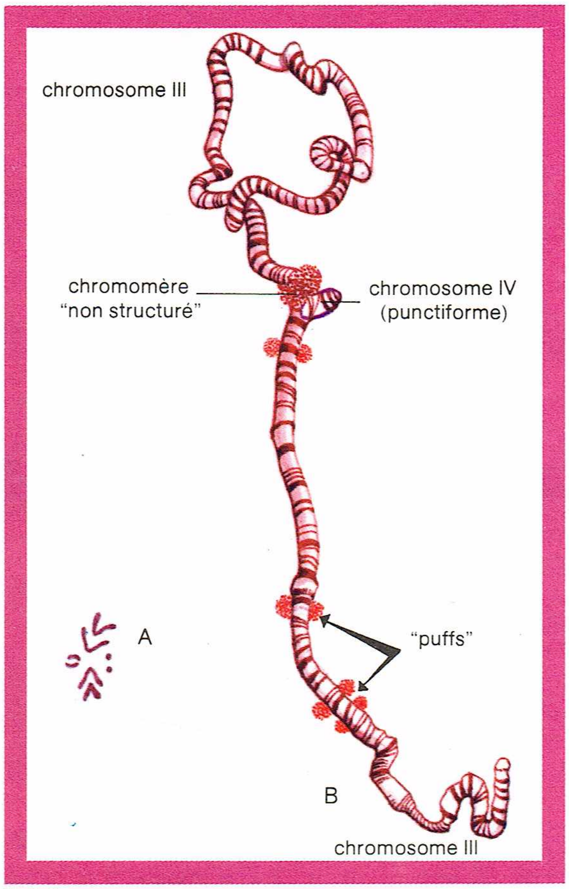

R. Colin

◀ ***Aspect de chromosomes polytènes de cellule de la glande salivaire de la drosophile (d'après Painter) : A, chromosomes ordinaires de drosophile; B, chromosomes salivaires polytènes (III et IV).***

l'on puisse imaginer. Elle contient, semble-t-il, tout le programme nécessaire pour le développement harmonieux de l'individu et, si « l'avenir est dans les œufs » (Ionesco), ce développement est bien loin d'être le même pour chacune des cellules qui en dérivent. On doit envisager plusieurs *modèles* pour tenter d'expliquer cette différenciation (qui peut être très précoce, c'est le cas des œufs « en mosaïque », ou bien relativement tardive, cas des œufs à régulation), que nous étudierons en embryologie.

Compte tenu de ce que l'on sait quant à la nature de la chromatine des Eucaryotes, il est intéressant de citer ici le modèle de Britten et Davidson (1969) qui permet d'avoir une idée des *systèmes de coordination.* Il fait appel à quatre types de gènes, dont le fonctionnement est étroitement lié. Ces gènes ou *groupes* de gènes seraient répartis en deux groupes essentiels : un groupe *palpeur et intégrateur* (P.I.) et un groupe *récepteur et structural* (R.S.). Les faits montrent qu'il n'y a pas de continuité topographique entre ces deux groupes. Par ailleurs, nous savons que l'activité d'un gène de structure (1) se manifeste en même temps que celle d'un ou de plusieurs autres gènes de structure différents (2), (3), etc. La synthèse de l'hémoglobine, par exemple, implique l'activité conjointe des gènes codant pour la chaîne α et pour la chaîne β, ainsi que des gènes codant pour les enzymes dont dépend la synthèse de l'hème. Or, les gènes qui gouvernent la formation des *deux* chaînes de la globine ne sont pas physiquement liés, contrairement à ce qui se produit pour les gènes ribosomiques 28S et 18S, disposés « en tandem ». Connaissant ces données, on peut alors comprendre l'importance du modèle évoqué (P.I.R.S.). Un gène palpeur, *activé par un effecteur* spécifique venu du cytoplasme, et peut-être même de l'extérieur de la cellule, induirait le fonctionnement d'un gène intégrateur adjacent; l'intégrateur produirait un ARN capable de déclencher, *à distance,* le fonctionnement d'un gène récepteur, lequel est à même d'entraîner la transcription du gène de structure qui lui est associé. On a donc là un système à fonctionnement horizontal. Cependant, l'ARN formé par l'intégrateur I pourrait agir sur *plusieurs* groupes R.S. Cette fois, le fonctionnement est vertical; un groupe P.I. déterminerait donc la formation de plusieurs ARNm codés par des gènes de structure très distincts.

La programmation peut être plus complexe : on envisage qu'il existe plusieurs groupes P.I. permettant l'activation de gènes de structure physiologiquement associés. De plus, il n'y aurait pas un, mais plusieurs gènes intégrateurs attachés à chacun des gènes palpeurs. On voit que l'activité de l'ensemble des gènes qui doivent coopérer pour produire une protéine histospécifique peut être modulée en fonction des effecteurs qui parviennent au contact de la chromatine. L'ensemble palpeur-intégrateur serait constitué par des séquences répétitives d'ADN.

Ce modèle permet de comprendre pourquoi le D-ARN (ce symbole est dû au fait que l'hétérogénéité de sa structure le rapproche de l'ADN formateur) synthétisé par les jeunes embryons change continuellement (Denis, 1974). En effet, cet *ARN stocké ne serait pas entièrement constitué par des messagers,* mais comporterait alors des quantités importantes d'ARN capable d'activer les gènes de structure. On peut aussi envisager que les ARN messagers soient synthétisés en deux temps; dans un premier temps, c'est l'ensemble R.S. qui serait transcrit en totalité, ce qui produirait des D-ARN lourds, lesquels se fragmenteraient dans un deuxième temps pour libérer les messagers, nettement plus légers.

Il reste cependant des points à éclaircir. Ainsi, l'activation des gènes de structure dépend-elle *directement* d'une partie du D-ARN, ou bien celui-ci code-t-il pour une protéine qui, elle, s'adapterait sur les gènes récepteurs? Denis estime que cette dernière éventualité est douteuse puisque le D-ARN ne sort pas du noyau. Rappelons cependant que les ribosomes se constituent dans le noyau. Y sont-ils totalement inactifs? Si le D-ARN agit directement, il semble que cela soit dû aux nucléotides répétés; ainsi, en 1969, Melli et Bishop ont montré que l'hybridisation d'un ARN et d'un ADN de rat se fait essentiellement au niveau de fractions redondantes du génome (voir aussi Robertson et coll., 1969, et Koch et Cruceanu, 1971). Dans l'état actuel des connaissances, il semble difficile d'être plus précis. Tout compte fait, on n'a jamais très bien observé ce qui se passe *au contact* de la chromatine; les études biochimiques sont délicates, et le microscope électronique ne permet pas encore de débrouiller sa structure fine. On peut se demander quel est le rôle des protéines qui gainent les filaments de chromatine; les histones, peu variées, ne peuvent pas avoir une activité spécifique, mais en est-il de même des *protéines non histones?* Lostraba et Wang (1974) ont constaté que celles-ci contrôlent une partie de l'activité de l'ADN; Davis et coll., en 1972, ont pu montrer la diversité des protéines acides contenues dans la cellule; enfin, si, pour un même individu, les protéines nucléaires non histones sont sensiblement les mêmes dans les cellules de divers organes, certaines sont histospécifiques.

On le voit, un certain nombre de faits permettent d'avoir une idée de la façon dont s'effectue la différenciation cellulaire; toutefois, ce problème, un des plus cruciaux que l'on puisse envisager, n'est pas encore effectivement compris. Il règne une obscurité presque totale sur la façon dont les gènes palpeurs sont activés. Certes, on sait que les hormones et les inducteurs décelés chez l'embryon jouent un rôle fondamental; mais on doit envisager l'existence d'intermédiaires, en particulier de protéines, lesquels seraient les responsables immédiats de la différenciation. Ces intermédiaires sont vraisemblablement indispensables; ainsi, Kröger et Müller (1973) ont montré que divers ions pouvaient, comme des hormones, provoquer la formation de puffs chez le chironome; or, rien ne permet de penser que le sodium ou le magnésium puissent agir directement sur des sites particuliers du génome.

— *Le milieu ambiant de l'individu peut entraîner des aberrations des acides nucléiques et de leur fonctionnement.*

Nagl et Rücker (1972) ont montré que des régulateurs de croissance introduits dans un milieu où sont cultivées des cellules de *Cymbidium* (orchidée australienne) provoquent une polyténie des chromosomes et une amplification de l'hétérochromatine. Ces résultats, très symptomatiques, montrent ainsi que le milieu peut

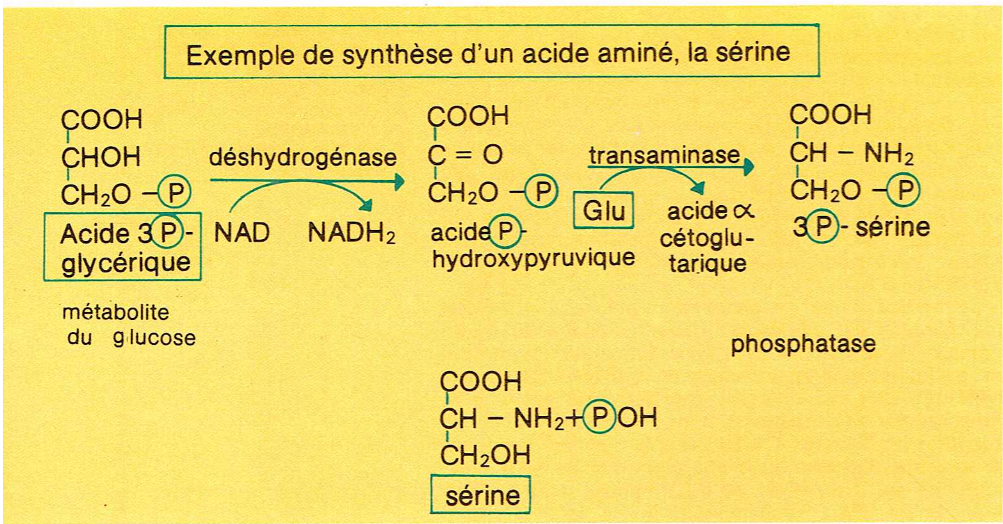

R. Colin

▲ ***Exemple de synthèse d'un acide aminé : la*** **sérine.**

modifier considérablement la quantité d'ADN et, en particulier, celle de l'*hétérochromatine*. En fait, si l'on modifie expérimentalement le taux d'hétérochromatine, aussi bien chez le maïs que chez la drosophile ou la souris, l'activité de la cellule s'en trouve considérablement perturbée ; cela prouve que les contrôles s'effectuent au niveau de l'ADN redondant (Mac Clintock, 1967 ; Hamerton, 1968 ; Green, 1968 ; etc.), les séquences de nucléotides répétés jouant le rôle de signaux de déclenchement (initiation) ou d'arrêt de synthèse (terminaison). Ces expériences pourraient être raffinées en tenant compte du modèle moléculaire quantitatif de Guillé et Quétier.

Enfin, il apparaît que l'hétérochromatine est *particulièrement sensible* vis-à-vis de nombreux agents : les antimétabolites, les analogues, les carcinogènes et les virus (Huang, 1967 ; Évans, 1967). Cette fragilité entraîne des cassures, des aberrations des chromosomes, qui peuvent subir des délétions, des translocations ou des amplifications. Il semble possible que des conditions de milieu, drastiques ou non, entraînent des transformations plus ou moins considérables du génome, transformations souvent létales pour la cellule, mais pas obligatoirement. Il est tentant de voir là un des modes de transformation des espèces ; par ailleurs, l'hétérochromatine, point faible de la cellule, pourrait être à la base de l'évolution tumorale.

Les modes de synthèse au niveau du cytoplasme et le devenir des produits élaborés

Nous partons des acides nucléiques.

— *Synthèses et accumulation dans le hyaloplasme.*

Les ribosomes qui parviennent dans le hyaloplasme participent aux synthèses protéiques en association avec les ARNt et les ARN messagers venus également du noyau. La cellule contient un stock plus ou moins important de ribosomes libres, encore inactifs. Groupés sur un brin d'ARNm, ils deviennent fonctionnels et permettent l'assemblage des acides aminés entraînés par les ARNt. Ces acides aminés peuvent être d'origine *exogène* ou *endogène*. Dans le premier cas, ils sont drainés par le milieu extracellulaire nourricier, puis absorbés. Dans le second, leur biosynthèse se fait à partir d'autres acides aminés et de métabolites des glucides. Chez l'homme, des acides aminés sont synthétisables : le glycocolle (à partir de la sérine), la cystéine, la tyrosine (par oxydation de phénylalanine) et la proline. Les autres, par contre, doivent être apportés à la cellule *(acides aminés essentiels)*. La nature de ces derniers peut être différente suivant l'espèce considérée (les Bactéries ont des pouvoirs de synthèse plus vastes, de même que les Champignons et les autres végétaux).

Les protéines fabriquées « par » les polysomes sont dispersées dans le hyaloplasme. Il s'agit soit de protéines de structure, soit d'enzymes. Dans le premier cas, elles forment le fond, la trame du hyaloplasme ainsi que les constituants filamenteux et microtubulaires ; de plus, certaines d'entre elles participent à l'édification des systèmes membranaires lipoprotéiques. Dans le second cas, les enzymes peuvent être dispersées ou bien incorporées à des éléments figurés ; leur rôle est de favoriser la synthèse des molécules les plus diverses.

— *Synthèse et accumulation au niveau des systèmes cavitaires.*

Les ribosomes peuvent aussi se disposer à la surface des membranes du réticulum endoplasmique. Dans ce cas, associés à des ARN messagers, ils participent à la synthèse de protéines, en particulier enzymatiques, dont le devenir est très différent puisqu'elles pénètrent *dans* le réticulum (rét. granulaire, ou REG). Ces protéines seront souvent utilisées de façons différentes.

● *Accumulation dans le réticulum.*

Les protéines peuvent demeurer dans le réticulum et y constituer des *réserves*. C'est, notamment, le cas dans l'ovocyte de l'écrevisse : les protéines se condensent et forment des *grains de vitellus,* réserves complexes

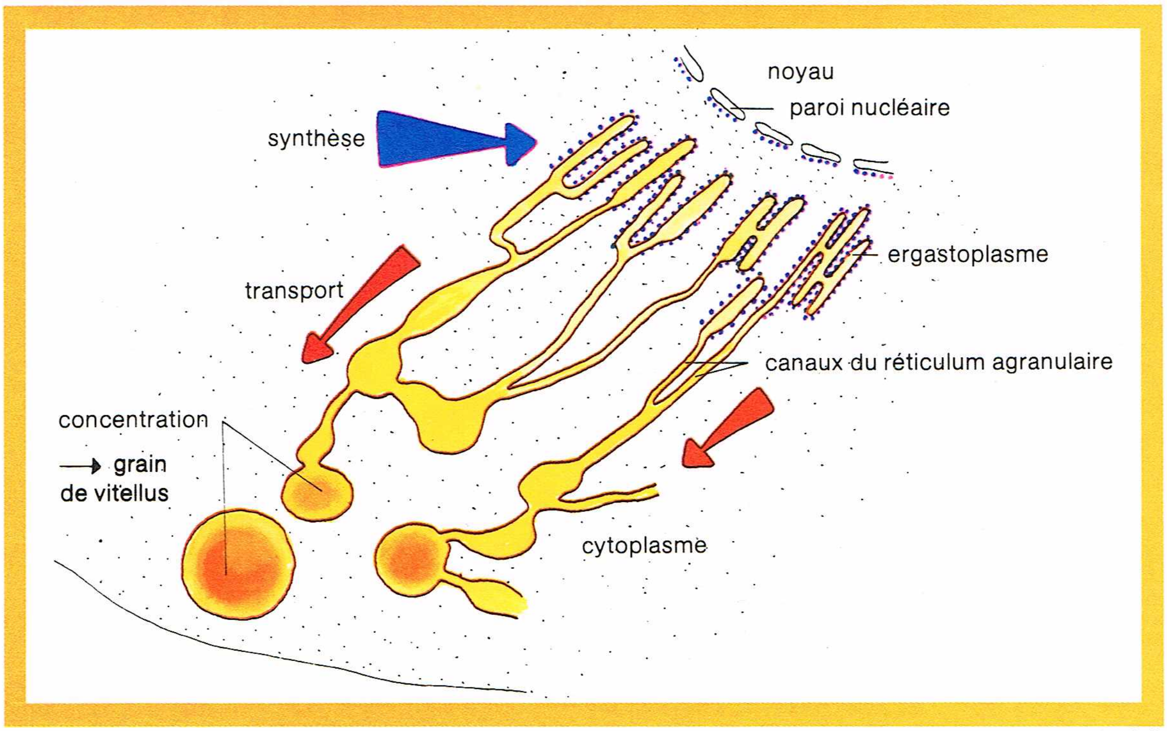

R. Colin

▶ ***Rôle schématique du*** **réticulum endoplasmique** ***(écrevisse) dans la synthèse et l'accumulation du vitellus (d'après Favard).***

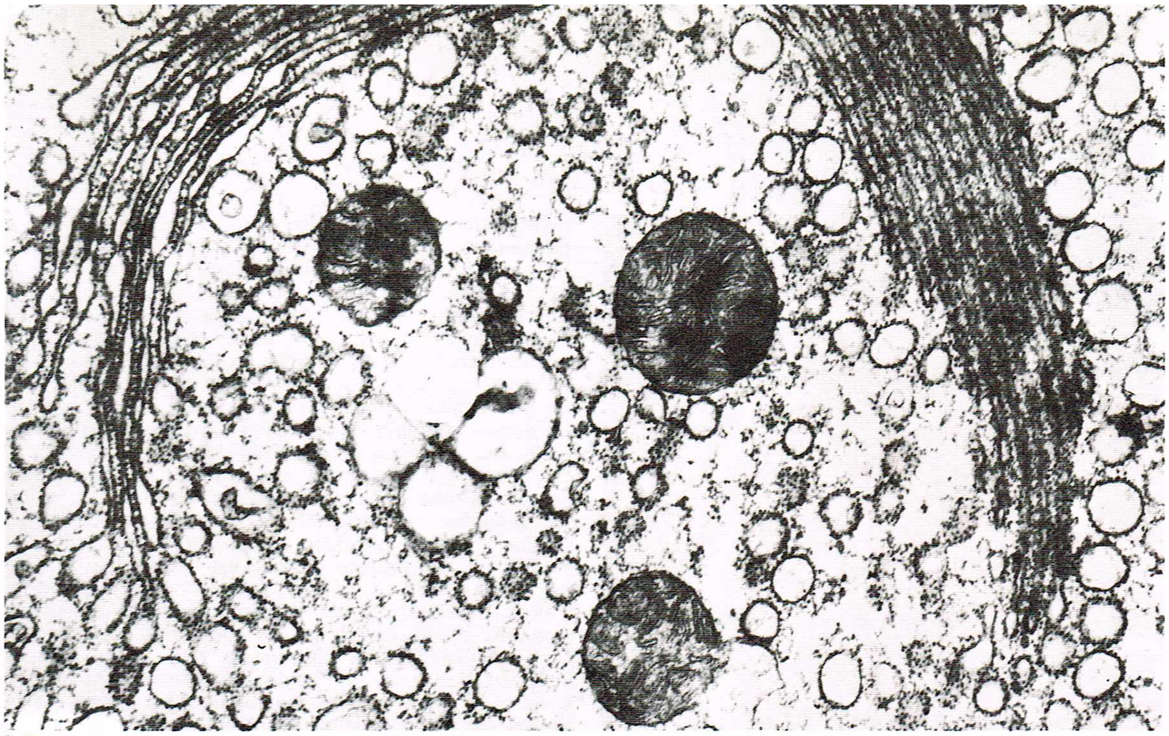

C. Bouchard

◀ *Microscopie électronique montrant l'abondance du* **réticulum granulaire** *(ergastoplasme) dans un ovocyte d'ascidie. Les lames d'ergastoplasme, qui, localement, possèdent une structure de* **lamelles annelées** *(en haut), bourgeonnent un très grand nombre de* **vésicules** *chargées de produits synthétisés.*

qui seront utilisées par l'embryon; les phospho-lipoprotéines sont abondantes dans le vitellus de bien des espèces animales. Chez les végétaux, le principe d'accumulation est le même : les vacuoles, d'origine réticulaire, se fragmentent, concentrent leur contenu pour constituer les *grains d'aleurone,* où les protéines forment un globoïde, voire un cristalloïde chez certaines graines (Poux, 1962). De la même manière, les *anticorps* des plasmocytes que l'on trouve chez les Vertébrés supérieurs s'accumulent dans le réticulum et peuvent y constituer des structures paracristallines (Thiéry, 1965).

Bien souvent, l'accumulation de matériel protéique se fait en réalité dans le réticulum lisse (REL). Il peut y avoir des communications entre les deux types de cavités réticulaires (ovocytes) ou bien transformation du REG. Il y aurait donc une évolution du système réticulaire, avec dégranulation. Mais celle-ci n'implique pas que le réticulum devienne inactif : ce système membranaire lisse comporte en effet des enzymes dont les fonctions varient avec le type de cellule. Elles peuvent ainsi entraîner la *synthèse de substances nouvelles, non protéiques,* ce qui correspond, par exemple, à la formation des hormones stéroïdes; on assiste alors à une hypertrophie et à une accumulation considérable du réticulum lisse (Fawcett, 1963). Par ailleurs, le réticulum lisse peut *modifier* les produits fabriqués au niveau granulaire.

Enfin, ce système membranaire peut *émettre des vésicules,* qui se dispersent alors dans le hyaloplasme. Un exemple caractéristique : certains auteurs ont constaté que, dans les cellules hépatiques et nerveuses du rat, des vésicules se détachent du réticulum lisse et constituent ce que l'on nomme *corps denses d'accumulation enzymatique* (Novikoff et coll., 1962-1963). On y trouve essentiellement de la *phosphatase « acide »* (action à pH voisin de 5) ou phosphomonoestérase, puissant agent d'hydrolyse de glucides phosphorés.

● *Transferts golgiens.*

Une partie des protéines et des substances contenues dans les cavités réticulaires passent dans les saccules golgiens. Cette formulation est d'ailleurs inexacte puisque les saccules golgiens naissent à partir du système réticulaire endoplasmique : il y a migration d'éléments réticulaires, qui bourgeonnent sur le réticulum (Ovtracht et coll., 1973), puis se soudent pour former les cavités aplaties et discoïdales, appelées saccules golgiens. Cependant, il existe une communication latérale directe entre certains éléments du réticulum lisse et des saccules déjà formés; il s'agit de tubules qui sont soudés au bord des disques sacculaires et que l'on nomme *boulevards périphériques.* Autrement dit, les substances qui sont formées dans le réticulum peuvent entrer par deux voies dans le système golgien afin de s'y concentrer et, éventuellement, d'y subir des modifications. Ces modifications sont entraînées par les enzymes qui sont contenues dans les parois des saccules « mûrs ». Les faces immature et mature des dictyosomes n'ont pas la même activité.

Schématiquement, le complexe golgien donne naissance à deux types de produits; les *produits d'accumulation,* destinés à l'usage de la cellule elle-même, et les *produits de sécrétion,* qui seront expulsés dans le milieu ambiant.

■ Les *produits d'accumulation* sont entraînés au sein du hyaloplasme dans de petites vésicules qui, semble-t-il, naissent par fragmentation de saccules golgiens situés à la face interne, concave, du dictyosome. Ces vésicules golgiennes constituent des *lysosomes primaires;* en effet, elles contiennent diverses hydrolases, peut-être plus ou moins modifiées par rapport aux produits du réticulum endoplasmique (Hourdry, 1968). Ces hydrolases vont servir à l'alimentation de la cellule, ainsi que nous le verrons un peu plus loin; en 1963, on en connaissait une quinzaine (de Duve), et maintenant quarante. La cathepsine et la collagénase sont spécialisées dans l'attaque de protéines; les nucléases digèrent des acides nucléiques; l'α glucosidase fragmente le glycogène; la β glucuronidase, la β galactosidase, l'α mannosidase, l'arylsulfatase, etc., s'attaquent aux mucopolysaccharides et à leurs dérivés; enfin, la *phosphatase acide* agit sur les esters phosphatés (revue de Hourdry, 1968). Cette dernière enzyme, très caractéristique des lysosomes, peut être fort bien mise en évidence au microscope optique (Gomori, 1952). Point important : on ne trouve jamais de lipase dans les lysosomes. Les lysosomes sont des éléments cellulaires universellement répandus (de Duve, 1963-1974).

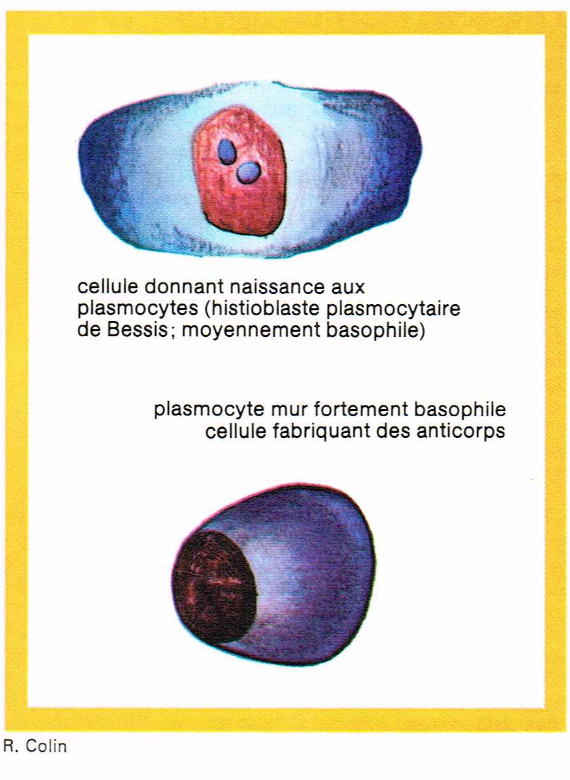

R. Colin

▼◀ *A gauche, différenciation des* **plasmocytes** *. A droite, dans une* **vésicule golgienne** *(d'une cellule de tube digestif d'ascidie en microscopie électronique), prête à se détacher, on voit se former un* **granule** *dense aux électrons.*

C. Bouchard

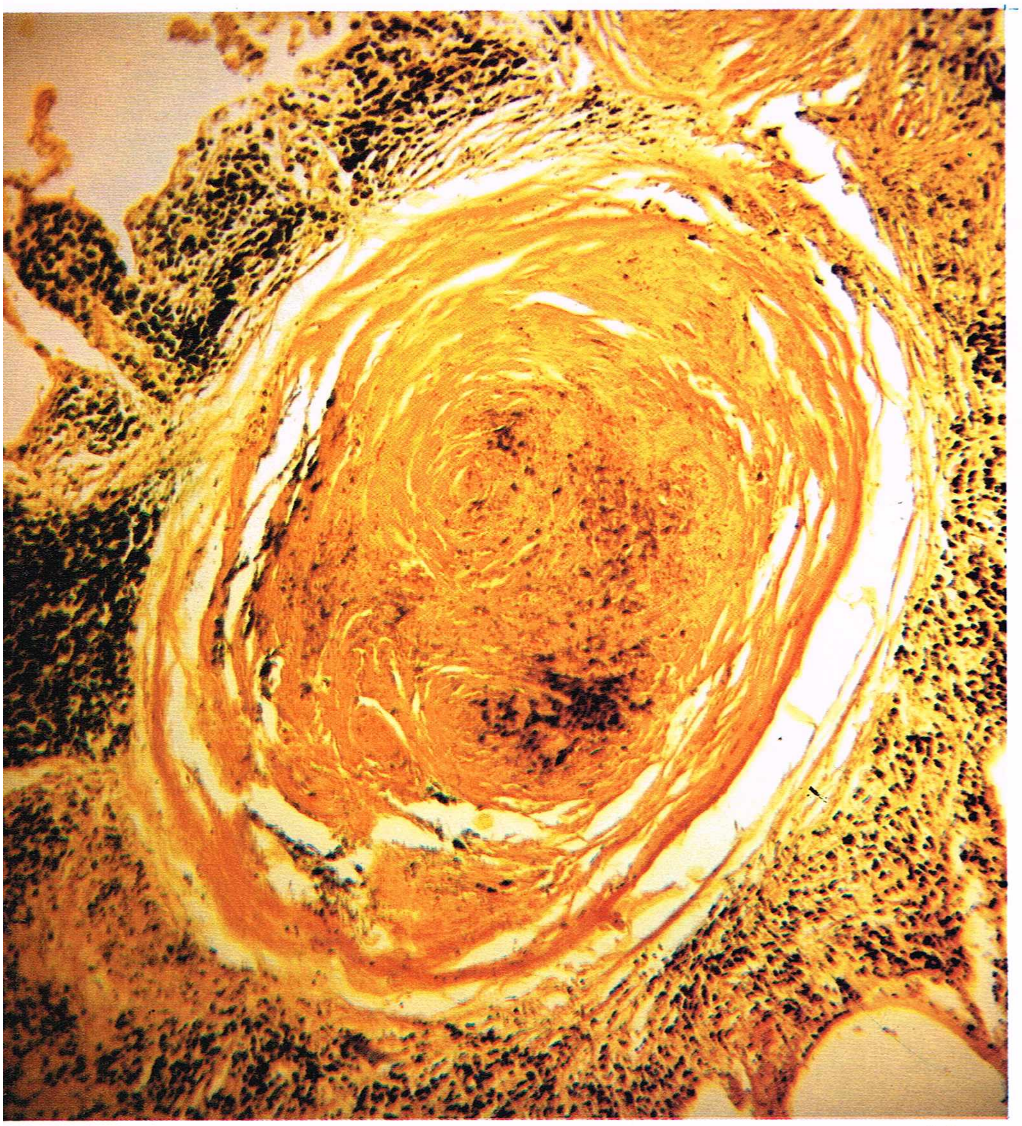

P. Castano

▲ ***L'absorption de silice par des cellules pulmonaires peut entraîner leur dégénérescence; cette accumulation se fait souvent sur une grande échelle, ce qui provoque, dans le poumon, la formation de nodules dégénérés et fibreux dont l'élimination est impossible (coloration topographique).***

Nous allons étudier maintenant le mode de fonctionnement des lysosomes primaires. Cela va nous entraîner assez loin, car ces éléments cellulaires ne sont pas les seuls qui contiennent des hydrolases. On appelle également lysosomes les *vacuoles digestives,* les *vacuoles autolytiques* et les *corps résiduels.*

L'hétérophagie

La pinocytose et la phagocytose entraînent la formation de vacuoles, de taille diverse, entourées par un fragment du plasmalemme. Ces vacuoles sont encore appelées *phagosomes* par Straus (1963) et de Duve (1963).

Les petites vacuoles de pinocytose fusionnent pour donner des phagosomes de taille variable; on en trouve dans de nombreux types de cellules animales : les cellules rénales absorbent ainsi des protéines (l'hémoglobine par exemple) dans des conditions expérimentales ou pathologiques (Miller et Palade, 1964). On a observé un phénomène de même nature dans le rein, le foie, l'intestin et certaines cellules sanguines (Straus, 1961 à 1967). *L'endocytose est sélective.* Quant aux vacuoles de phagocytose, elles peuvent contenir des Bactéries ou des virus, des débris de cellules voisines ou même des cellules entières et plus ou moins dégénérées. Après ces processus d'endocytose, les phagosomes se chargent en hydrolases; cette charge enzymatique vient de lysosomes primaires ou de corps denses (réticulaires) qui ont *fusionné* avec les phagosomes. Autrement dit, les enzymes qui sont déversées dans les phagosomes viennent aussi bien du réticulum endoplasmique que du Golgi, les modalités étant différentes suivant le type de cellule que l'on étudie (Wetzel et coll., 1965; Hugon et Borgers, 1966).

Cependant, il n'y a pas dans la cellule que des vésicules golgiennes (ou lysosomes primaires) et des corps denses. On décrit aussi des *cytosomes,* dont l'origine est variable et qui constituent une variété de grands lysosomes présents dans le muscle cardiaque et dans certaines cellules macrophages pulmonaires; des *coated vesicles* trouvées par Friend et Farquhar, en 1967, dans les canaux déférents du rat, sont aussi des lysosomes : ces vésicules, de petite taille et chargées d'enzymes, naissent à partir de saccules golgiens, comme les lysosomes primaires, mais leur membrane est extérieurement tapissée par une couche de particules à disposition radiaire (leurs caractères physiologiques ne sont guère connus); enfin, les *granules des macrophages et des polynucléaires* du sang sont formés par des protéines enzymatiques, dont l'activité phosphatasique est vigoureuse (Cohn et Hirsoh, 1960; Cohn et Wiener, 1963; Seeman et Palade, 1967). Tous ces éléments cytoplasmiques sont entourés d'une membrane de type unitaire. L'importance de celle-ci est absolument primordiale, compte tenu du grand pouvoir lysant des enzymes qui y sont enfermées. Parfois cette membrane peut céder, et la cellule en meurt. Tous ces éléments possèdent le même pouvoir : celui de fusionner avec des vacuoles d'endocytose et d'y déverser leurs enzymes. Les phagosomes deviennent alors des *phagolysosomes,* ou *lysosomes secondaires,* petits estomacs qui digèrent une grande partie du matériel englouti. Les produits d'hydrolyse sont ensuite absorbés par le hyaloplasme périphérique, devenant ainsi directement utilisables pour les biosynthèses. Pourtant, certaines molécules contenues dans le phagolysosome ne sont pas totalement digérées, si bien que la vacuole se charge en *matériel dense,* souvent finement granuleux et, dans bien des cas, les lipides qui ne sont pas attaqués s'accumulent, formant des couches, des lamelles très serrées; on les décrit sous le nom de *figures myéliniques :* en effet, les lipides s'y organisent un peu comme dans les gaines de myéline du système nerveux des Vertébrés (Behnke, 1963). Ainsi, dans les cellules où l'endocytose est un phénomène physiologique essentiel, répondant à leurs besoins nutritionnels ou permettant l'élimination de cellules nécrosées et de particules indésirables, de nature diverse, les déchets non utilisables sont accumulés dans des corps résiduels, qui, chez la plupart des animaux, persistent indéfiniment. Une telle accumulation est de règle, par exemple, dans les cellules « rénales » des ascidies : les déchets azotés finissent par cristalliser dans les vacuoles lysosomiales. Chez les animaux, l'existence de corps résiduels nombreux est un signe de vieillissement; petit à petit, la congestion de la cellule finit par être préjudiciable à celle-ci. Cela est particulièrement grave dans le cas où elle accumule des éléments cristallins pouvant perforer la membrane du corps résiduel : des hydrolases sont alors libérées dans le cytoplasme et entraînent sa dégradation ; c'est le cas des cristaux de silice qui sont absorbés par certaines cellules du poumon (silicose) ou des cristaux d'urate de sodium qui se forment au niveau des articulations chez les goutteux. La membrane des lysosomes secondaires peut être également rompue par certaines Bactéries; ainsi, le streptocoque peut envahir la cellule qui l'a phagocyté, libérant des toxines qui agissent conjointement avec les hydrolases.

Chez les animaux inférieurs et, par ailleurs, dans des cas particuliers où la cellule dispose « d'un émonctoire naturel » (cellules hépatiques accolées à un canalicule biliaire), les corps résiduels peuvent être éliminés dans le milieu, ce qui n'entraîne aucun préjudice pour l'organisme.

Cette endocytose inverse, ou *exocytose,* est considérée par de Duve (1974) comme une « défécation cellulaire ». Un tel mécanisme est assez exceptionnel.

On voit bien quel est le rôle des produits réticulo-endoplasmiques plus ou moins modifiés et concentrés par les corps de Golgi, mais qui demeurent normalement à l'intérieur de la cellule, sauf dans des cas particuliers. L'un de ceux-ci mérite d'être souligné : la cellule peut parfois produire des lysosomes destinés à une *digestion extracellulaire* extrêmement circonscrite; ainsi, les *ostéoclastes,* qui sont chargés des remaniements osseux, libèrent des hydrolases qui dissolvent les structures, les travées anciennes, préparant ainsi un espace dans lequel des ostéoblastes viendront fabriquer de l'os neuf.

L'autophagie.

L'activité des hydrolases lysosomiales peut se manifester de manière fort différente : il ne s'agit plus d'une digestion de matériel capté hors de la cellule, mais de la dégradation d'une partie du cytoplasme de la cellule elle-même. Ce phénomène, appelé *autophagie,* se produit dans des circonstances diverses. Il s'agit souvent d'une adaptation à des conditions anormales : le *jeûne* et des *remaniements tissulaires* constituent des situations très favorables à son déroulement.

Dans le cas du jeûne, la cellule ne reçoit pas la part de nourriture qui lui serait nécessaire et, pour « satisfaire sa faim », consomme une partie de son propre cytoplasme. Il peut s'agir seulement de la digestion d'une mitochondrie (Novikoff et Essner, 1962), mais la cellule s'attaque généralement à un ensemble hétérogène d'organites et de grains de sécrétion (Hourdry, 1968). Voici comment le drame se noue : il se forme une vacuole autophagique limitée par une membrane de type unitaire ou même par deux membranes concentriques qui englobent et ségrègent une partie du cytoplasme *(cytolysome)*. Jusqu'en 1965, on pensait que cette membrane se formait *de novo* (Ashford et Porter, 1962; Policard, 1965). Mais on estime maintenant qu'une telle origine est exceptionnelle (Napolitano, en 1963, a décrit l'exemple des cellules adipeuses, pauvres en matériel membranaire). En fait, les vacuoles autolytiques peuvent se former à partir de membranes golgiennes ou réticulaires. En 1965, Brandes et Bertini ont envisagé l'hypothèse que les cytolysomes dérivent de saccules golgiens, ce qui fut confirmé en 1968 par Frank et Christensen. Par ailleurs, des éléments du réticulum peuvent s'enrouler, isolant ainsi un volume de cytoplasme assez important (travaux de Novikoff et coll., et Beaulaton, 1967) ; les éléments ségrégés sont alors entourés par un sac très aplati, ce qui explique l'existence de la double membrane évoquée plus haut. L'origine des hydrolases, qui sont alors détectées dans les vacuoles autophagiques, a été beaucoup discutée par les auteurs que nous venons de citer. Certains estiment, preuves à l'appui, que des lysosomes primaires seraient incorporés à ces vacuoles; d'autres pensent que des saccules golgiens peuvent introduire leurs enzymes dans la portion de cytoplasme qu'ils entourent; un phénomène de même nature se produirait à partir du réticulum (Beaulaton y a décelé une forte activité initiale durant la formation de la vacuole). En fait, les modalités sont vraisemblablement différentes suivant les types cellulaires et les conditions du milieu. De Duve insiste sur l'importance des lysosomes primaires dans la formation des enzymes des vacuoles autophagiques (1974).

Quoi qu'il en soit, comme dans le cas d'hétérophagie, les produits de la digestion traversent ensuite la membrane de la vacuole et sont introduits dans les cycles de synthèse. L'autophagie est un processus qui permet à une cellule soumise à des restrictions de survivre en économisant sur l'ensemble de ses activités physiologiques. L'autophagie entraîne la formation de *corps résiduels* contenant souvent des *corps myéliniques,* et, en conséquence, la sénescence de la cellule est accélérée. Les carences alimentaires sont donc à la base d'un vieillissement cellulaire, qui, chez les Vertébrés, est très généralement irréversible; il n'en est pas de même pour les Protozoaires, chez qui les corps résiduels sont éliminés dans le milieu. Ces carences sont, évidemment, particulièrement dangereuses pour les individus dont l'organisme est en pleine croissance, qu'il s'agisse de jeunes animaux ou d'enfants.

L'autophagie se produit aussi de façon très frappante durant des *remaniements tissulaires impliquant une certaine dédifférenciation.* Après une blessure, bien des tissus se transforment à tel point que, localement, de nombreuses cellules jouxtant le niveau de lésion perdent leurs caractères particuliers (cas de cellules musculaires, E. Hay, 1959). La dédifférenciation morphologique est une conséquence de l'atrophie de certains organites préexistants et même d'une élimination de ces organites par autophagie. Ainsi, chez certaines espèces d'ascidies, l'ablation de l'ovaire entraîne une dédifférenciation des cellules qui constituent l'extrémité de l'oviducte resté en place; ces cellules perdent notamment leurs cils; des éléments basaux sont alors inclus dans des vésicules autophagiques, avant d'être progressivement

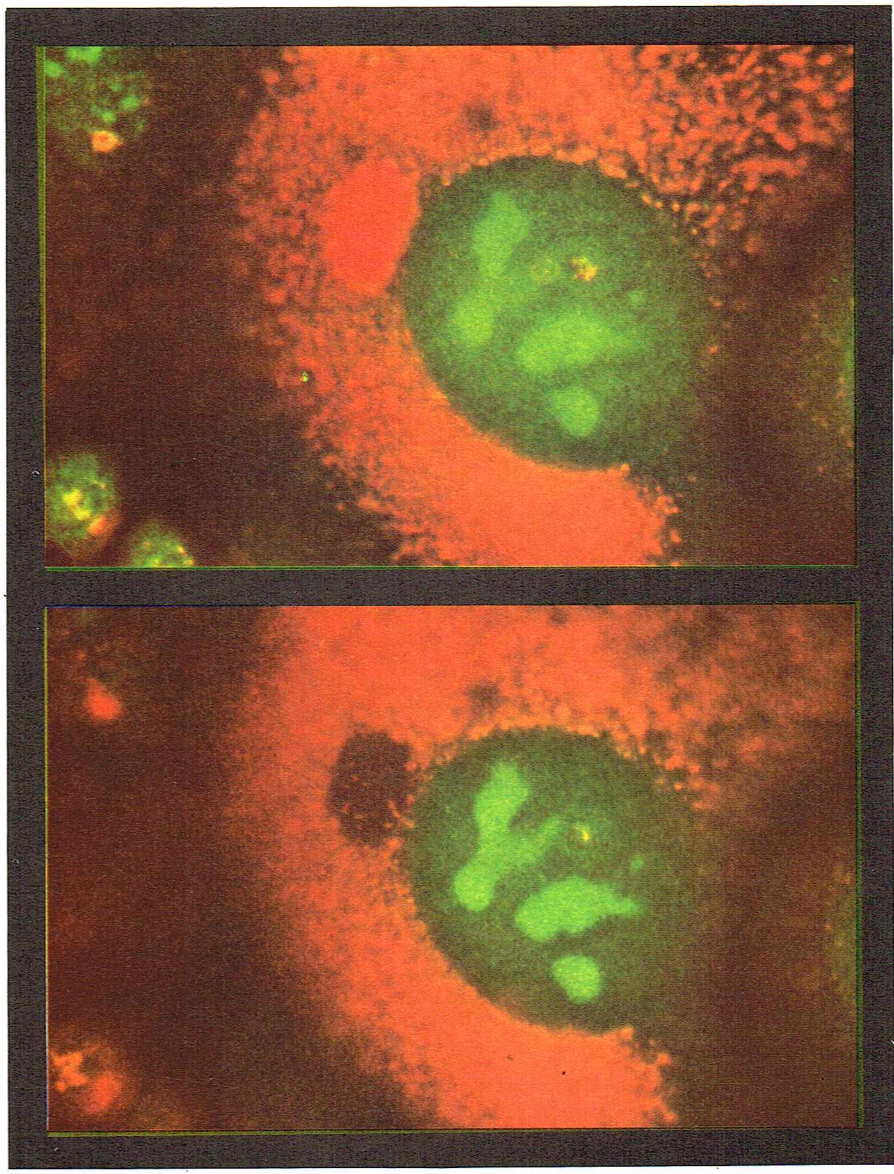

Unité INSERM de recherches sur la physiologie et l'immunologie cellulaires. (Dr. R. Robineaux).

▲ Lysosomes *mis en évidence, dans une cellule vivante, par un fluorochrome : l'*acridine orange. *Le document du haut montre une vacuole noire au-dessus du noyau coloré en vert; le document du bas montre la même vacuole, après fusion des lysosomes avec elle, colorée de ce fait en orange. C'est une image typique d'*autophagolysome.

F. Treilhou

◀ *Détection d'une* activité phosphatasique acide *au niveau des* lysosomes *(ly) de cellules thyroïdiennes (souris). Trois portions de cellules sont visibles sur cette microphotographie électronique.*

▶ *A gauche,* **corps myélinique** *(CM) observé dans une volumineuse* **vacuole autophagique** *de l'épithélium de l'oviducte d'ascidie : no, noyau ; cy, cytoplasme ; co, conjonctif (microscope électronique). A droite,* **vacuoles autolytiques** *de l'épithélium intestinal d'Amphibien durant la métamorphose : 1, deux mitochondries et un peu de cytoplasme sont ségrégés dans une petite vacuole à double membrane, 2, dans cette vacuole, la digestion des organites ségrégés est déjà avancée (microscopie électronique).*

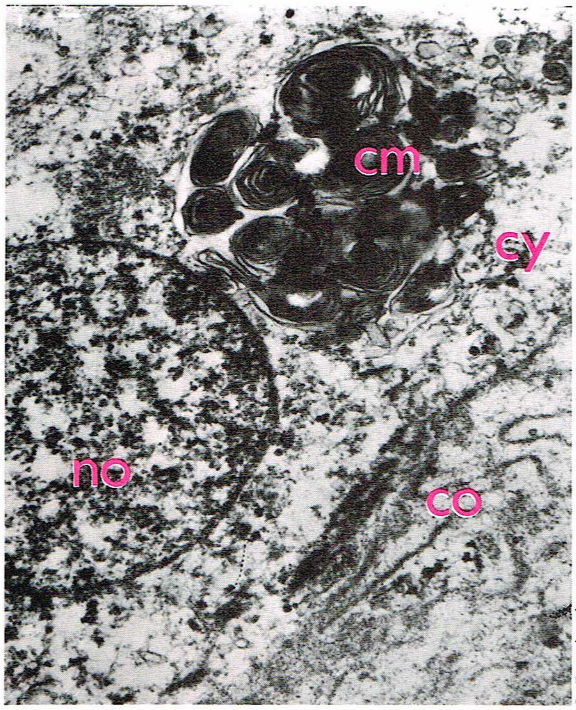

C. Bouchard

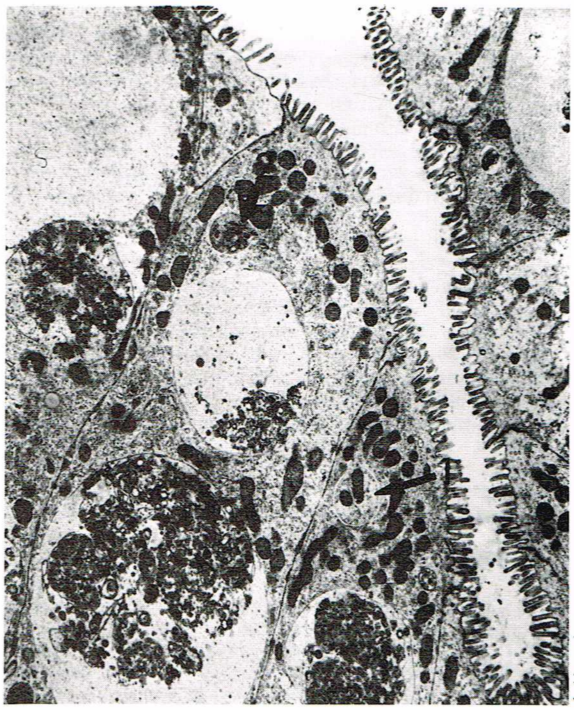

J. Hourdry

digérés. A partir de ces cellules, il se reforme un ovaire. Cette nouvelle différenciation dépend de facteurs neurohormonaux (C. Bouchard, 1966).

Selon Hruban et ses collaborateurs (1963), les produits libérés par les vacuoles autolytiques interviendraient dans la morphogenèse et la différenciation. L'étude des phénomènes de cicatrisation et de régénération doit permettre d'approfondir notre connaissance des activités lysosomiales.

L'autophagie peut être observée dans des *organismes intoxiqués* par des agents chimiques ou physiques. Ainsi, les rayons X en provoquent l'apparition au niveau des cellules intestinales (Hugon et Borgers, 1965-1966). En agissant sur le catabolisme ou sur les biosynthèses, divers produits chimiques peuvent entraîner la dégradation locale du cytoplasme, en particulier au niveau du foie, organe extrêmement sensible car il participe à une foule de réactions fondamentales (comme le disait A. Lacassagne, les hépatocytes sont « hautement spécialisés dans des fonctions multiples »). Les premières observations précises de ce phénomène ont été effectuées par Hruban et ses collaborateurs ainsi que par Ashford, Porter et Novikoff entre 1962 et 1963. Si l'action des substances cancérigènes n'est pas encore bien connue, on a toutefois constaté que les hydrocarbures qui provoquent des tumeurs de la peau se trouvent rapidement concentrés dans des lysosomes secondaires.

▶ *Mise en évidence d'une* **activité phosphatasique acide** *dans l'appareil de Golgi ; cellule pancréatique d'Amphibien. Les saccules golgiens se détachent en noir sur le fond gris du cytoplasme. Noter la réaction noire au niveau de petits* **lysosomes** *et de* **lysosomes secondaires** *contenant des éléments déjà partiellement digérés.*

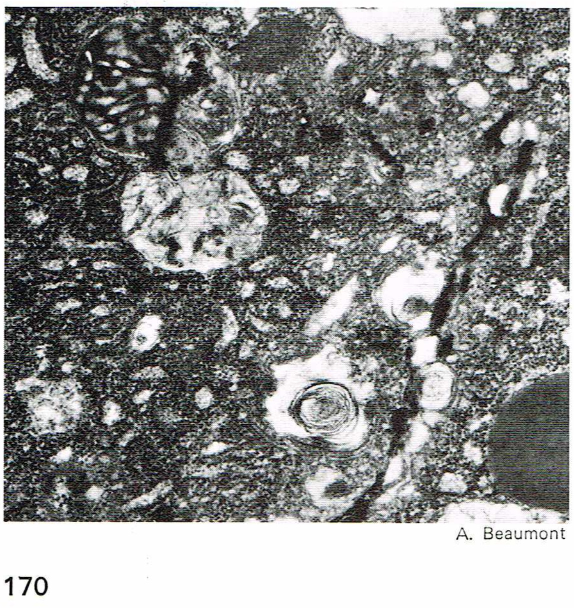

A. Beaumont

Tous les phénomènes de dégénérescence tissulaire normale, cyclique ou non, s'accompagnent d'autophagie. Chez les Insectes, le moment de la métamorphose est crucial : la formation de tissus nouveaux est immédiatement précédée d'une lyse de tissus « larvaires ». Rasch et Gawlik (1964) ont observé l'autophagie chez les Diptères, et d'autres auteurs l'ont mise en évidence dans différents groupes (chez les Lépidoptères, les Blattidés, etc.).

Chez les Vertébrés, il en est de même à divers stades de l'élaboration des organes (Behnke, 1963), des populations cellulaires nouvelles tendant à remplacer celles du jeune embryon. Durant la métamorphose des Amphibiens, les réactions des cellules constituant les organes larvaires sont de même nature que chez les Insectes (Hourdry, 1969-1973).

Des observations intéressantes ont été faites chez les Mammifères. Ainsi, *après la lactation,* certaines cellules antéhypophysaires contiennent des vacuoles autophagiques ; en effet, leur rôle lactagogue est terminé (Smith et Farquhar, 1965). Les cycles sexuels, en particulier le *cycle œstrien,* entraînent des réactions autophagiques au niveau des cellules en involution. On observe des phénomènes très frappants dans le cas extrême des cellules de la prostate des animaux *castrés* (Swift et Hruban, 1964). Ces exemples montrent que l'autophagie ne permet pas toujours la survie des cellules qui se trouvent dans de mauvaises conditions métaboliques ; si ces conditions sont nettement défavorables, l'autophagie aboutit à une sorte de suicide. Une partie des produits de dégradation est ensuite utilisée par les cellules voisines, en croissance plus ou moins active ; en somme, ce suicide se pratique dans l'intérêt collectif.

Il ne faut pas penser que l'autophagie est un phénomène très exceptionnel ou bien seulement périodique ; elle est, semble-t-il, fréquente dans des conditions normales. Ces foyers d'autolyse physiologique sont responsables d'une partie du *turn-over (renouvellement)* de la matière vivante. Ericson et ses collaborateurs (1965) estiment que l'autophagie est le processus normal de dégradation des mitochondries usagées ; mais bien sûr, les phénomènes sont alors très discrets.

— *Synthèses au niveau des systèmes cavitaires et sécrétion des produits.*

Une partie du matériel protéique élaboré au niveau du réticulum endoplasmique granulaire (ergastoplasme) peut être ultérieurement rejetée à l'extérieur de la cellule : il s'agit alors d'une *sécrétion.* Mais il serait faux de penser que, seul, l'ergastoplasme intervient dans les synthèses de sécrétions. Essayons, dans un exposé forcément schématique, de voir les faits.

● *Devenir des produits de l'ergastoplasme.* Avant de sortir de la cellule, ces produits peuvent suivre deux voies.

■ *Migration directe,* sans transit par les saccules golgiens. Ce mode de migration peut être démontré pour certains types de lipoprotéines, les VLDL (very low density lipoproteins; $d < 1,006$) ou LTBD (lipoprotéines de très basse densité). Leur existence avait été décelée dans le foie de Mammifères par Jones et ses collaborateurs, ainsi que par Stein en 1967. Ces molécules ont une importance fondamentale puisqu'elles fournissent des triglycérides endogènes; la cellule intestinale synthétise aussi des LTBD. En fait, le foie et l'intestin fabriquent 90 % des triglycérides que l'on trouve dans le sang (De Pury et Collins, 1972); le rôle du foie est, de loin, le plus important (Canedella, 1974).

Les équipes d'Ovtracht (1970), puis de Morré (1971), ont mis en évidence la formation de LTBD au niveau de l'ergastoplasme, puis leur migration dans les *boulevards périphériques,* système de tubules issus du réticulum agranulaire et qui enserre l'appareil golgien. La maturation du produit s'effectuerait dans le boulevard périphérique, puis dans les vésicules de sécrétion émises après un bref contact avec le bord latéral des saccules golgiens... On voit que le mécanisme est subtil ! Ovtracht, Morré, Cheetham et Mollenhauer (1973) ont pu constater, en isolant des fractions, boulevard périphérique, saccules golgiens, etc., que les enzymes contenues dans les tubules du boulevard en font une unité particulière, aussi distincte du réticulum que des saccules golgiens. Après formation des granules de sécrétion, les phénomènes de maturation se poursuivent; Vernier a

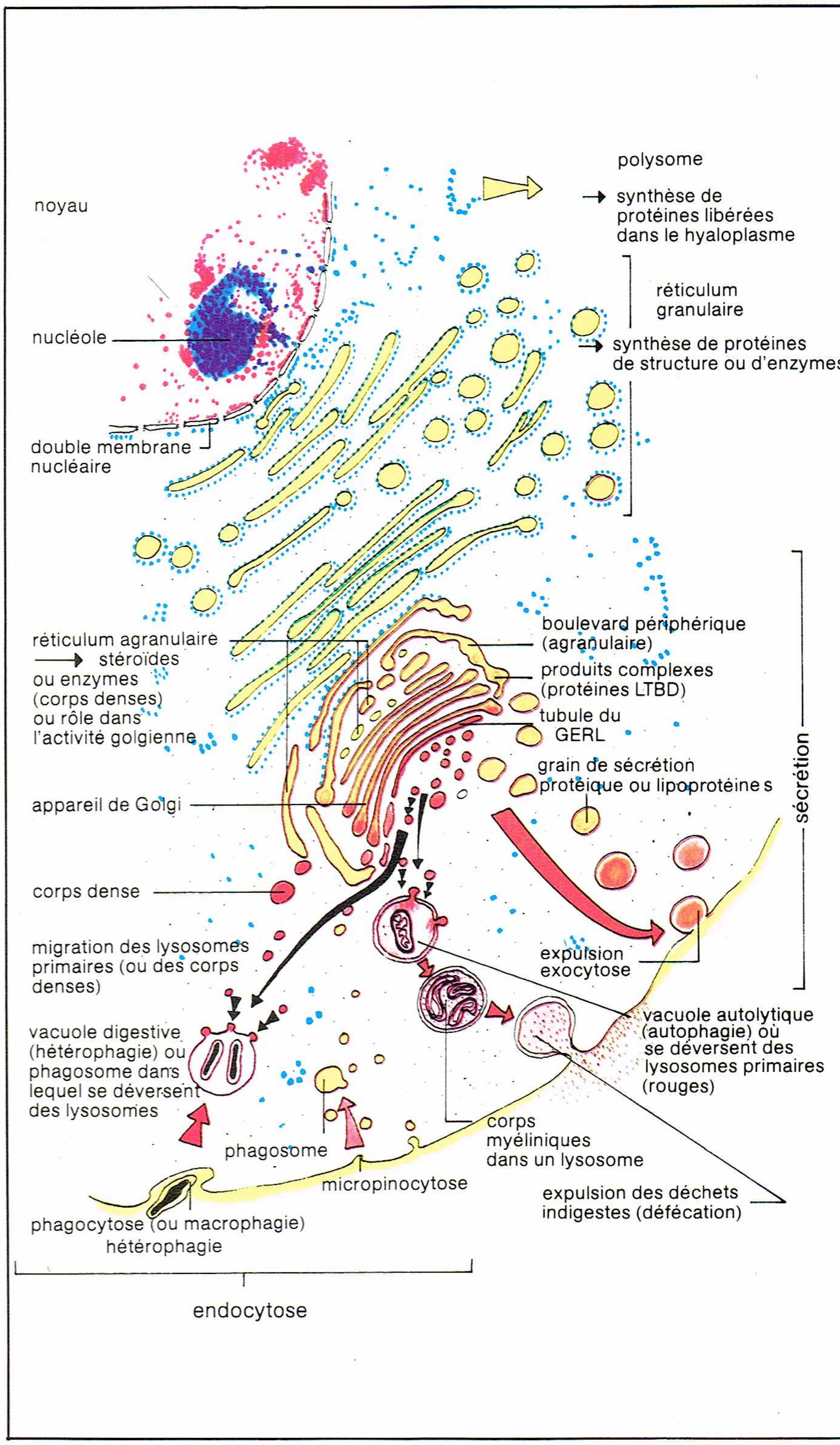

Richard Colin

▲ ***Représentation schématique des*** **activités** ***au niveau du*** **cytoplasme; *noter que le boulevard périphérique et le GERL sont seulement visibles dans des cas favorables.***

J. M. Vernier

◄ ***Élaboration des*** **lipoprotéines de très basse densité** ***dans une cellule hépatique (truite) : R, éléments du réticulum endoplasmique; SG, saccules golgiens; VG, vésicules golgiennes contenant des granules synthétisés dans le réticulum; LTBD, lipoprotéines accumulées dans les vésicules golgiennes hypertrophiées; CV, « coated vesicles », qui, formées par le Golgi, viennent s'accoler, puis se déverser dans les vésicules de sécrétion (microscopie électronique).***

▶ *A gauche,* **vésicules sécrétrices** *de cellules pancréatiques endocrines (cellules A à grains),* **à glucagon** *(Amphibien). Les vésicules de sécrétion, très denses aux électrons, sont extrêmement nombreuses ; elles se forment sur les bords des dictyosomes ; on voit ici deux systèmes golgiens. A droite,* **grains de zymozène** *dans des cellules de pancréas exocrine* **(Rana temporaria)** *; certains de ces grains sont sur le point d'être expulsés (microscopies électroniques).*

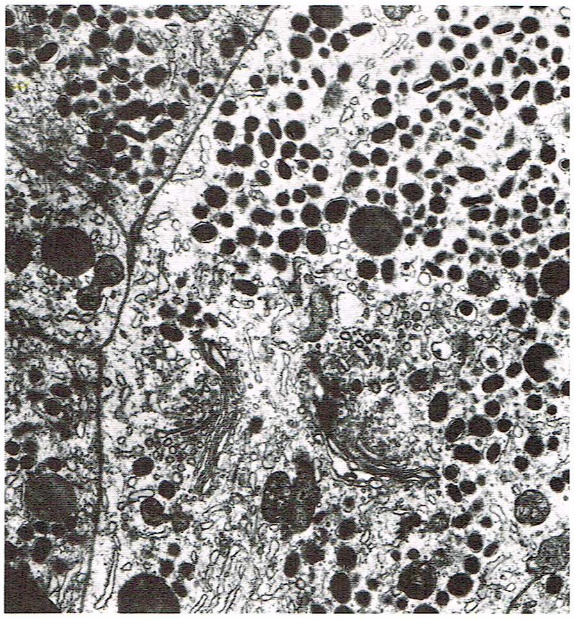

A. Beaumont

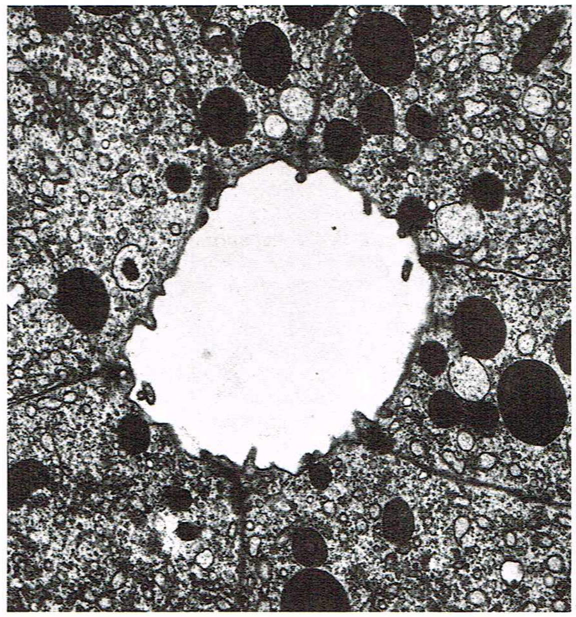

A. Beaumont

▶ *Page ci-contre, en bas, coupe histologique d'œsophage d'Amphibien (coloration topographique) sur laquelle on observera la sécrétion de* **mucopolysaccharides,** *ou mucoprotéines, drainée vers l'un des pôles cellulaires puis accumulée au voisinage de la lumière du tube digestif.*

▼ *Représentation schématique de la* **sécrétion de protéines cuticulaires** *chez un Crustacé Décapode* **(Palaemon)** *[d'après Chassard, Bouchaud et Hubert].*

montré (1974) que, chez la truite, les « coated vesicles » venues de la face concave du corps de Golgi se soudent aux vésicules de sécrétion observées dans le foie. L'hypothèse de Morré, selon laquelle la synthèse des LTBD se ferait suivant un processus à étapes multiples, avec addition successive de lipides, de stérols et de polysaccharides sur le composant protéique initial (apoprotéine), est, actuellement, partiellement vérifiée. La sécrétion est le produit de plusieurs sites cytoplasmiques : sécrétion initiale au niveau de l'ergastoplasme, maturation dans le boulevard périphérique et au sein des vésicules de sécrétion, dans lesquelles se déverse, au moins dans *certains cas,* le contenu de nombreuses « coated vesicles » d'origine golgienne. On doit envisager, par ailleurs, que les produits élaborés au sein du hyaloplasme participent à l'une des étapes du processus, voire à plusieurs : il leur suffit, pour cela, de traverser l'un des systèmes membranaires... On le voit, l'étude des LTBD est à peine commencée. Notons que le mode de synthèse des autres fractions lipoprotéiques est très mal connu.

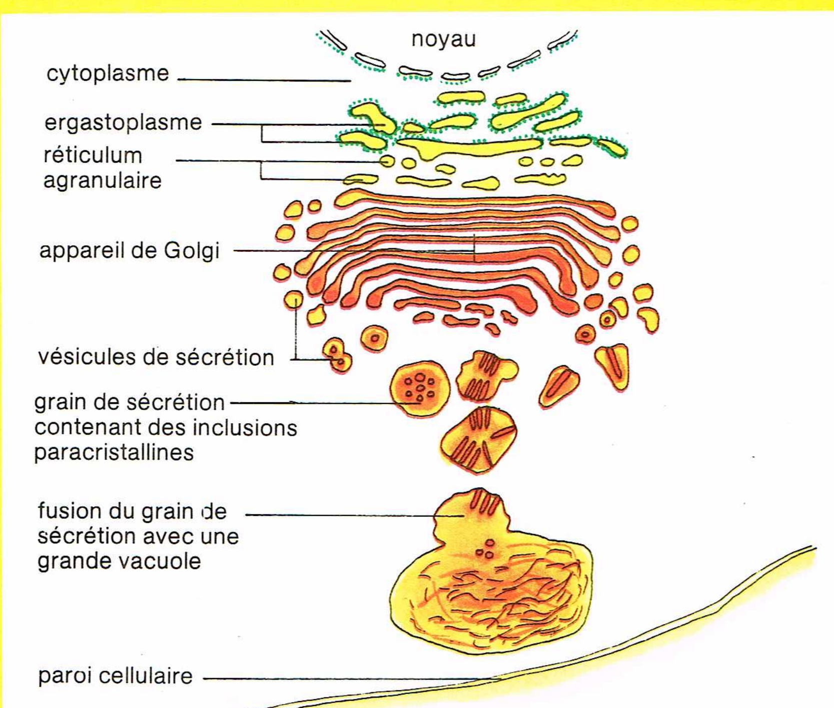

Richard Colin

■ *Migration à travers le système sacculaire golgien.* Un exemple très typique, et en même temps historique, nous est fourni par le travail fondamental de Caro, Palade et Siekievitz (1962-1964) sur la synthèse de la sécrétion *pancréatique exocrine* chez le cobaye. L'injection d'acides aminés marqués (LEU—^{3}H par exemple) montre que l'incorporation est maximale au bout de cinq minutes dans les cavités de l'ergastoplasme, lieu d'accumulation des protéines formées au contact des ribosomes. Vingt minutes après l'injection, la radioactivité est maximale dans les saccules golgiens mais elle persiste encore dans les cavités ergastoplasmiques jouxtant les saccules golgiens proximaux (immatures). Après une heure, toute la radioactivité se trouve concentrée dans les vésicules golgiennes, éliminées trois heures plus tard par exocytose. La sécrétion, ou grain de zymogène, est restée emballée dans les systèmes membranaires ; ceci rappelle ce que nous avons vu dans le cas des lysosomes : dans un cas comme dans l'autre, le produit constitué, *à forte activité enzymatique,* ne doit pas avoir de contact avec le hyaloplasme. C'est un caractère que l'on trouve aussi dans les autres cellules sécrétrices, alors même que le produit n'a pas d'activité lysante ; mais, dans tous les cas, la membrane vésiculaire évite la dispersion dans le cytoplasme du matériel sécrété (Jamieson et Palade, 1967).

Outre la formation des grains de sécrétion enzymatiques, l'ergastoplasme participe à la synthèse de divers produits qui sont concentrés, puis modifiés dans le complexe golgien. Des protéines de structure se forment de cette manière : *collagène* du tissu conjonctif ; *protéines cuticulaires* des Crustacés par exemple. Dans le cas du tissu conjonctif, Green et Goldberg (1965) ont décrit la formation *in situ* des fibres collagènes. De leur côté, Hay et Dodson ont obtenu de très belles images de sécrétions de tissus en culture et constaté en particulier que la structure périodique caractéristique du collagène apparaît bien avant l'expulsion du matériel synthétisé : le collagène natif est transporté vers l'extérieur dans des vésicules oblongues, qui s'allongent, tandis que les fibrilles s'édifient. Diegelmann et Peterkofsky (1972) ont montré que la migration des vésicules golgiennes vers l'extérieur dépend de systèmes de microtubules et, par conséquent, de la contractilité de protéines associées ; en effet, la colchicine et la vinblastine, alcaloïdes antagonistes des microtubules, n'empêchent pas la synthèse de collagène marqué à la proline ^{14}C, mais l'expulsion de cette sécrétion devient impossible. Enfin, Chassard, Bouchaud et Hubert (1973) ont pu mettre en évidence, au niveau du tégument d'une crevette *(Palaemon),* une sécrétion de protéines cuticulaires, dépendant directement du cycle des mues. Des observations de ce genre sont toutefois assez peu nombreuses, et l'on est mal informé sur les mécanismes précis qui permettent la formation des structures protéiques extracellulaires.

Chez les végétaux, bien que ce phénomène soit relativement rare, certains produits peuvent être sécrétés d'une manière semblable. Le matériel synthétisé peut être organisé très précocement dans le Golgi. Ainsi, Manton a montré que les saccules golgiens des cellules épidermiques d'Algues contiennent déjà des écailles, qui s'agrandissent progressivement et qui sont par la suite apposées à l'extérieur du plasmalemme (1966 et 1967).

On peut rapprocher de ce type de synthèses celle des *mucoprotéines,* souvent abondantes à la surface d'un épithélium (côlon : Leblond et coll. 1966, ainsi que Thiéry, 1969) ou, qui, plus généralement, constituent le *cell-coat,* ou *glycocalix*. Grâce à l'autoradiographie, Young a montré que le soufre, nécessaire à la synthèse de nombreuses mucoprotéines, est rapidement incorporé par l'appareil de Golgi de divers types cellulaires (1973). Boisseau a méticuleusement étudié la formation des mucoprotéines dans l'épithélium de l'oviducte (1973). Les images qu'il a obtenues au microscope électronique, en utilisant l'oviducte d'un Amphibien *(Pleurodeles),* permettent de se faire une idée excellente de ce qui se passe au niveau golgien, puis lors de la concentration du produit de sécrétion. Les vésicules de sécrétion s'accolent et fusionnent pour donner des *vacuoles de concentration* dont le contenu est très dense, puis les produits de la sécrétion sont expulsés à la surface du plasmalemme qui est alors tapissé d'un coat fort important. La concentration qui précède l'expulsion serait due à des phénomènes de transport actif au niveau de la membrane des vésicules (Whetsell et Bunge, 1969). De plus, il y a enrichissement en *glucides,* comme le montre la méthode spécifique de Thiéry (1967), qui permet de mettre en évidence les polysaccharides. Ils se forment dans les saccules golgiens et s'accumulent progressivement dans les saccules distaux ; leur combinaison avec les protéines forme la sécrétion mucoprotéique. L'auteur souligne la complexité de structure des saccules distaux et celle du mode de formation des microvésicules de sécrétion qui se détachent latéralement ou qui naissent par fragmentation (« fenestration » des saccules). Ajoutons que Novikoff, Essner et Quintana (1964) décrivent dans la concavité du complexe golgien ce qu'ils appellent le GERL, système dont l'individualité n'est pas évidente pour bien des types cellulaires. *Le GERL serait une région spécialisée de l'ergastoplasme, contenant de la phosphatase acide, située à la face concave du Golgi et pouvant former des lysosomes* (Novikoff, 1972). Ainsi,

F. Treilhou

C. Bouchard

dans le cas de l'oviducte de triton, Boisseau envisage que le GERL puisse intervenir dans l'activité sécrétoire. Quoi qu'il en soit, son matériel cellulaire permet de percevoir, de manière exceptionnellement nette, comment s'effectue la synthèse des protéines puis des mucoprotéines qui en dérivent lors du transit golgien.

La glycocalix est en perpétuel renouvellement comme l'a démontré, en particulier, Rambourg (1971). Durant le développement d'un organe, les propriétés chimiques de la glycocalix varient en fonction de la différenciation des cellules qui la constituent (second travail de Boisseau, 1973).

Le rôle que joue la glycocalix dans la perméabilité cellulaire est encore assez mal connu. En utilisant l'épithélium de la vessie urinaire de grenouille, dont les cellules transportent de l'eau et du sodium, Bourguet et Maetz (1961) avaient montré que les hormones neurohypophysaires modifient la perméabilité ; or, selon Pisam et ses collaborateurs (1970), l'ocytocine réduit la charge portée par la membrane apicale de ces cellules, ce qui

▲ *A gauche, cellule embryonnaire de thyroïde de souris. On y voit le* dictyosome *à saccules fenestrés et les* vésicules *golgiennes qui s'accumulent à la face de maturation où, de plus, un tubule, assez dense aux électrons,* correspondrait *à l'ébauche du* GERL. *A droite, la surface des cellules peut être tapissée par des substances* mucopolysaccharidiques *(coat ou glycocalix) ; dans le cas de cet oviducte d'ascidie, l'accumulation de telles substances est très nette sur la paroi qui borde la lumière du tube (m. électroniques).*

Laboratoire de biologie des Vertébrés - Orsay

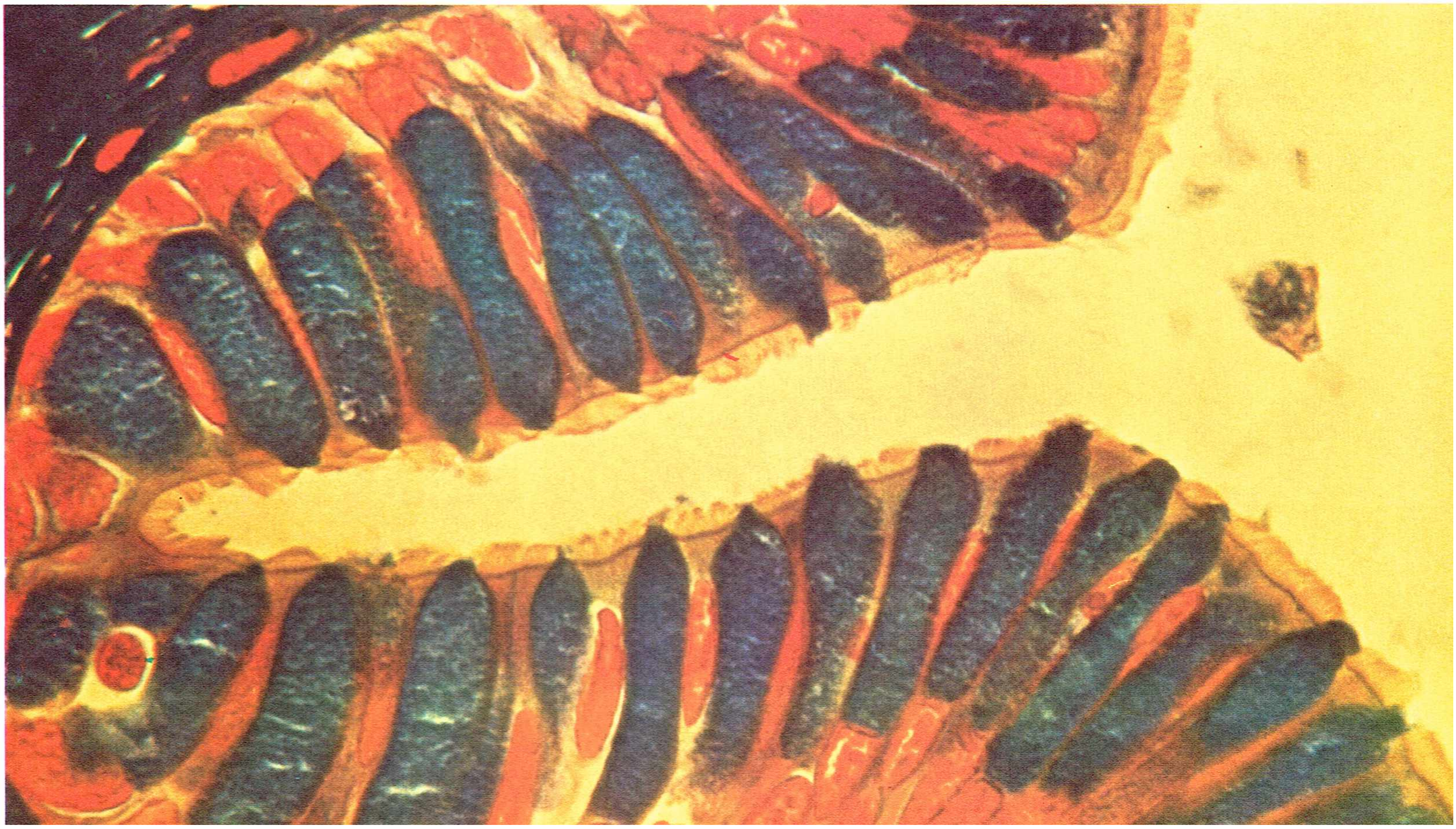

conduit à penser que les mucoprotéines de la glycocalix sont modifiées. En 1973, Pisam et Ripoche, en constatant que la vitesse de sécrétion de ces molécules n'est pas nettement influencée par l'ocytocine, concluent seulement à une modification, par l'hormone, de la configuration stérique de ces macromolécules. Il est encore trop tôt, semble-t-il, pour tenter d'établir des corrélations entre l'ultrastructure du coat et sa physiologie. Quoi qu'il en soit, la couche externe de la membrane unitaire, présente dans tous les types cellulaires, est faite essentiellement de mucoprotéines (Favard), et la glycocalix n'est, selon toute vraisemblance, qu'un élément surajouté à la surface de cellules qui sont en contact avec des liquides de composition plus ou moins variable : face apicale des cellules vésicales, rénales, intestinales. Elle est très notable à la face externe de l'endothélium des vaisseaux capillaires et à la surface des cellules qui bordent les « espaces de Disse », système particulier des sinusoïdes hépatiques (Shea, 1970). On constate aussi la formation d'une glycocalix importante à la surface de cellules sexuelles femelles en croissance, chez des animaux où cette maturation s'effectue au contact de la lumière du conduit génital (exemple des ascidies). Lehninger (1968) a suggéré que le « cell-coat » puisse jouer un rôle fondamental dans les *échanges ioniques,* puisque des mucosubstances tapissent même les neurones (rien n'est encore venu démentir cette hypothèse). On peut aussi penser que la glycocalix possède par ailleurs un *rôle protecteur,* un rôle de tampon entre la cellule et son milieu ; ainsi, l'amibe possède un revêtement mucoprotéique fort important qui doit lui permettre de supporter des variations de milieu assez considérables et d'évoluer sans dommages entre les particules d'un substrat qui risquerait de léser un plasmalemme nu.

Certaines *hormones* sont sécrétées suivant le processus que nous venons de décrire pour la glycocalix. C'est le cas d'hormones antéhypophysaires telles que FSH et LH. La *copule glucidique* de ces glucoprotides est accrochée aux polypeptides dans les saccules golgiens (Herlant, 1963 ; et surtout Racadot et coll., 1965). De plus, la vasopressine et l'ocytocine posthypophysaires auraient un précurseur commun d'origine cérébrale ; ce précurseur, ou produit de *neurosécrétion* (Stutinsky, 1951), serait formé au niveau golgien. Chez les Invertébrés Herlant-Meevis (1966) a démontré l'origine golgienne de la neurosécrétion observée dans les cellules ganglionnaires des Vers, des Mollusques et des Insectes ; les résultats sont similaires chez des Échinodermes (Unger). Il se peut qu'il en soit de même pour les autres groupes où la neurosécrétion a pu être caractérisée à partir de techniques histochimiques (Tuniciers : C. Bouchard et T. Lender, 1972). *La sécrétion serait réglée, dans la cellule, grâce à l'intervention de lysosomes* qui, fusionnant avec les grains de sécrétion, entraîneraient leur inactivation (Smith et Farquhar, 1966 ; Farquhar, 1969 et 1971 ; de Duve, 1974). Ce phénomène est qualifié de *crinophagie*. Ces lysosomes prendraient naissance à partir des tubules du GERL.

Notons enfin que la *membrane des vésicules* de sécrétion est incorporée au plasmalemme à la fin du processus d'exocytose (Northcote, 1971). Ainsi, au fur et à mesure des synthèses qui se produisent dans tout le cytoplasme de la cellule quiescente, celle-ci augmente de volume, et, simultanément, du matériel membranaire neuf, synthétisé au niveau de l'ergastoplasme et mûri dans le système golgien, vient fusionner avec le plasmalemme préexistant. L'activité des enzymes, que l'on a pu mettre en évidence au niveau de ces membranes en formation, est continuellement modulée par des mécanismes de rétro-action (« feedback ») et par l'ensemble des facteurs dont dépendent la croissance et la différenciation cellulaire (Smith et Farquhar, 1966 ; Hopkins 1969). La « sécrétion » de plasmalemme neuf dépend directement de l'abondance du système réticulo-golgien de la cellule (Boisseau). L'utilisation des hormones pour activer ces synthèses permettra peut-être d'établir des corrélations entre les observations biochimiques et ultrastructurales.

● *Devenir des substances dont la synthèse débute dans l'appareil de Golgi.*

D'après ce qui vient d'être dit, on serait conduit à croire que *les dictyosomes n'opèrent qu'en permettant la maturation des produits élaborés par l'ergastoplasme,* et cela en fixant des glucides — des glucides aminés ou des acides sialiques (eux-mêmes dérivés de glucides) — sur le matériel protéique en transit. Erreur grossière ! En effet, les saccules golgiens, utilisant les enzymes fabriquées au niveau de l'ergastoplasme ou des polysomes cytoplasmiques, *synthétisent aussi des polysaccharides.*

Northcote (1972) insiste sur le fait que les vésicules golgiennes participent de plusieurs manières à l'édification des *membranes cellulaires végétales :* les parois vésiculaires contribuent elles-mêmes à l'accroissement du plasmalemme, et leur contenu, essentiellement polysaccharidique, permet la formation du matériel membranaire pecto-cellulosique. Par contre la cellulose ne serait pas fabriquée dans le Golgi, mais à partir du plasmalemme et des enzymes adéquates (Northcote, 1969), ces dernières transitant néanmoins dans des vésicules golgiennes. L'ensemble des produits de sécrétion peut être conduit de manière organisée jusqu'à la surface des cellules végétales : ainsi s'expliquerait la formation d'épaississements bien localisés, spiralés ou réticulés, au contact de la paroi (cellules du bois par exemple).

● *Remarques au sujet d'un recyclage du matériel sécrété.*

Le matériel extra-cellulaire sécrété par les divers tissus peut subir des remaniements. Ainsi, dans les organes en croissance très active, tels que les méristèmes radiculaire ou foliaire, et dans le bois, une partie du matériel pecto-cellulosique est *réutilisé,* réabsorbé par les cellules (Buvat, 1958 et 1966 ; Coulomb, 1973). Ce dernier, en étudiant la croissance de la racine de scorsonère, a montré que les cellules pratiquent l'hétérophagie. A partir de la membrane cytoplasmique, il se forme des vésicules d'endocytose qui se groupent et se trouvent bientôt entourées d'une membrane commune. L'ensemble porte le nom de *corps multivésiculaire* (CMV). La cellule absorberait donc l'équivalent d'une glycocalix de cellule animale ; dans ce cas elle contient divers composés pecto-cellulosiques, mais aussi des fibres de cellulose. Dans les CMV, les polysaccharides peuvent rester stockés, puis servir aux besoins de la cellule qui se divise, ou bien ils peuvent être entraînés dans les vacuoles très typiques des végétaux ; dans ce dernier cas, les CMV se soudent aux vacuoles, puis leur contenu se mêle au leur avant d'être plus ou moins dégradé. Entamée au sein des CMV — ils contiennent des hydrolases qui, vraisemblablement, leur sont apportées par des vésicules golgiennes (protophytolysosomes) — la dégradation se poursuit dans les vacuoles. Ainsi, les composés « squelettiques » en excès ou indésirables sont éliminés lors de l'évolution de la paroi et de la croissance tissulaire. Cette élimination est un recyclage de matière. (N.B. : il y a d'autres types de CMV, d'origine golgienne — ce sont des lysosomes, fréquents chez les animaux.)

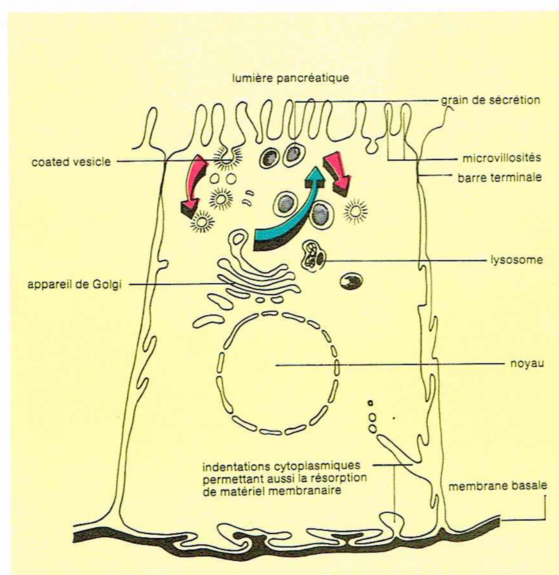

Richard Colin

▶ **Les « coated vesicles » de la cellule pancréatique exocrine. Durant une période d'intense sécrétion enzymatique, elles jouent un rôle essentiel dans la récupération par endocytose du matériel membranaire synthétisé en excès. L'ergastoplasme n'est pas représenté (d'après Geuze et Poort).**

A. Beaumont

◀ ***Exemple d'accumulation de substances dans les mitochondries : outre les grains denses de nature minérale qui sont visibles dans la plupart de ces mitochondries, on trouve, dans l'une d'entre elles, deux corps paracristallins (pancréas de grenouille en microscopie électronique). Noter dans le haut du document la présence d'un corps multivésiculaire.***

On observe dans les cellules animales un autre type de recyclage des membranes : dans les cas de sécrétion intense, le plasmalemme tend à devenir surabondant et la cellule doit donc *résorber l'excédent*. Elle le fait en réabsorbant de petites surfaces membranaires par un *processus du type endocytose*. Il apparaît de petites invaginations qui se pédiculisent puis se séparent du plasmalemme, formant ainsi des vésicules dont la face externe est souvent tapissée d'éléments radiaires; ces *« vésicules tapissées »* sont donc une forme de *coated vesicles* à migration centripète, contrairement à celles du Golgi. Dans le cas des glandes séminales du rat, les « vésicules tapissées », qui entraînent une gouttelette de liquide extra-cellulaire chargée de protéines, vont s'incorporer au complexe golgien — ce qui complique donc son fonctionnement. Geuze et Poort ont montré que les cellules exocrines du pancréas récupèrent de la même manière une partie du matériel membranaire excrété (1973). Heuser et Reese (1973) constatent un mécanisme du même genre après une période d'intense fonctionnement de l'extrémité synaptique des axones : l'expulsion du médiateur chimique contenu dans les vésicules synaptiques golgiennes (Teichberg et Holtzman, 1973) est suivie par la récupération de matériel membranaire. Insistons sur le fait que ces vésicules tapissées sont chargées du transport sélectif de protéines extracellulaires (Droller et Roth, 1966; ovogenèse des Poissons; Fawcett, 1965; Roth et coll., 1962 à 1964, et Slautterback, 1967, travaux divers sur l'ovocyte d'Insecte ou sur l'épiderme de l'hydre, en particulier).

Activités mitochondriales

L'exposé des phénomènes sera très bref, le problème ayant été maintes fois abordé dans différentes revues.

Favard classe les activités physiologiques mitochondriales de la manière suivante; phosphorylation oxydative, concentration de substances, processus de synthèse.

Les mitochondries et la respiration. En 1913, Warburg fut sans doute l'un des premiers à penser que ces organites jouaient un rôle important dans ce phénomène. Bensley, en 1930, fit une tentative pour les isoler, mais ce furent Hogeboom, Schneider et Palade qui y parvinrent en 1948. La même année, Kennedy et Lehninger parvinrent à cette conclusion : la mitochondrie est un ensemble enzymatique, « isolé », original par rapport à tous les organites cellulaires (cyclophorase). On trouve des mitochondries dans toutes les cellules qui sont *plus ou moins directement* au contact de l'air *(aérobies)*; leur fonction est de parfaire la dégradation des glucides qui peut être amorcée en l'absence d'oxygène (en milieu *anaérobie*). La participation de l'oxygène permet une dégradation totale et la formation d'une importante quantité d'ATP riche en énergie.

L'analyse des schémas de dégradation des glucides a déjà été esquissée. Les premières étapes s'effectuent dans le nucléoplasme et le hyaloplasme. En *milieu oxygéné*, ce qui se passe dans les mitochondries a été évoqué lors de l'étude des coenzymes; l'acide pyruvique, en présence de CoA et d'une *déshydrogénase*, devient l'acétyl-CoA qui, après hydrolyse, donne avec l'acide oxaloacétique un produit de condensation, l'acide citrique; dès ce stade, le métabolite du glucose est entré dans le cycle de Krebs, constitué par une série de réactions proprement *respiratoires*; elles ont pour but de fractionner la libération d'énergie à partir de l'acide citrique et ne se déroulent qu'en présence d'oxygène. Le cycle de Krebs est un système de décarboxylation et de déshydrogénation, c'est-à-dire de fabrication d'eau et de CO_2 en présence d'oxygène; il permet une libération considérable d'énergie qui sert à la synthèse d'ATP. L'ensemble du système respiratoire est encore appelé système de *phosphorylation oxydative; les enzymes qui en sont responsables sont contenues dans les mitochondries*. Ce sont donc des organites absolument essentiels puisqu'ils permettent l'élaboration de la grande majorité des molécules riches en énergie. Les enzymes du cycle de Krebs sont localisées dans la matrice soluble. Les enzymes de la chaîne respiratoire sont situées dans la membrane interne, et les unités qui permettent le couplage des oxydations et des phosphorylations correspondent aux particules de 85 Å que Green (1968) et Racher (1968) ont pu repérer tout au long de cette membrane. On tente actuellement de *reconstituer* in vitro *les mécanismes naturels* à partir d'ensembles multienzymatiques; mais leur fonctionnement dépend aussi de la présence des membranes qui ne seraient pas seulement des supports physiques (Volfin, 1974).

Le *découplage* des phosphorylations et des oxydations peut être obtenu par le dinitrophénol, tandis que l'oligomycine empêche les oxydations. L'étude précise des phosphorylations, qui impliquent en fait des intermédiaires sur la voie de formation de l'ATP, est extrêmement difficile, compte tenu, en particulier, de la labilité des structures mitochondriales. Les expériences qui consistent à désactiver des fractions de mitochondries, puis à restaurer le couplage en ajoutant telle ou telle fraction protéique membranaire, pourraient apporter des précisions importantes sur le mode d'élaboration de l'ATP (Racker et Sanadi, 1973). En fait, on sait très peu de chose sur le couplage et la formation des liaisons riches. Les processus dont nous avons déjà parlé concernaient la dégradation des glucides. Or, divers métabolites des lipides ou des protides peuvent être finalement incorporés dans le cycle de Krebs. Ainsi, l'acétyl ~ S CoA, qui résulte de la dégradation des lipides par β-oxydation des acides gras (Lynen), est directement associé à la formation d'acide citrique. La dégradation des protéines avec production d'urée ne fournit qu'une petite quantité d'énergie; par contre, une partie des acides aminés se transforme en acide glutamique, lequel, après désamination, donne l'acide α cétoglutarique, un des éléments du cycle respiratoire. Les mitochondries exercent donc leur action non seulement sur les glucides, mais aussi sur les autres grandes familles chimiques.

Cependant, il ne faut pas en conclure que toutes les voies de dégradation passent par les mitochondries bien que leur activité soit prééminente; divers types de molécules disposent de plusieurs voies. Quand des cellules vivantes sont placées en milieu *anaérobie* ou très appauvri en oxygène, elles peuvent évidemment en mourir; pourtant certaines d'entre elles survivent et, faute de pouvoir respirer, dégradent leurs réserves glucidiques en produisant de l'acide lactique, facilement dérivé de l'acide pyruvique (effet Crabtree). Le bilan énergétique est alors très faible, limité à la formation de 2 ATP au lieu de 38 en milieu aérobie. Cette *fermentation lactique* est possible pour les Bactéries anaérobies facultatives (*Thermobacterium* des yaourts, d'autres espèces des céréales et streptocoques responsables de la fermentation spontanée du lait). Elle serait également importante pour certaines souches de cellules cancéreuses. La *fermentation alcoolique* se produit suivant un processus analogue chez certains types cellulaires. Il existe aussi des *fermentations butyrique* (vibrion découvert par Pasteur en 1860), *butylique* ou *métanique*. Replacée en milieu aérobie, la cellule retrouve son activité respiratoire, qui prend alors le pas sur la glycolyse anaérobie (effet Pasteur).

Les mitochondries et la ségrégation de constituants chimiques de la cellule.

Une mitochondrie en bon état accumule Na^+ et K^+ ainsi que Ca^{++} dont la pénétration dépend de la quantité d'ATP (Lehninger et coll., 1964) : il s'agit d'un *transport actif*. La concentration peut être assez forte pour entraîner la formation de granules dans la matrice

(Peachey, 1962-1964). De même, diverses molécules peuvent s'y accumuler, en particulier des granules protéiques de nature vitelline (dans l'ovocyte de planorbe, par exemple [Favard et Carasso, 1958], ou chez la grenouille [Ward, 1960]).

De fait, la perméabilité des membranes mitochondriales est très sélective pour les ions ou les divers types moléculaires.

Les techniques d'étude, qui sont complexes, ont permis de bien connaître les mouvements d'ions et il est même possible d'évaluer, au niveau de la mitochondrie, l'effet de divers antibiotiques sur la perméabilité aux cations. Chappell et Haarhoff (1967), Duée et Vignais (1969) sont parvenus à montrer qu'il existe des systèmes de transport différents suivant les types de cellules d'un même organisme; par exemple, ils sont très peu variés pour une cellule musculaire, extrêmement différenciée, polarisée du point de vue fonctionnel et chez laquelle les rapports cytoplasme-mitochondrie sont « fort simples »; cela est très différent dans une cellule hépatique où l'activité métabolique est très intense et concerne des substrats extrêmement variés.

Les synthèses mitochondriales.

Les mitochondries peuvent effectuer des synthèses protéiques. Elles utilisent à cet effet les acides aminés dissous dans le cytoplasme; l'assemblage se fait grâce à leurs acides nucléiques, au contact des ribosomes de la matrice. Au niveau membranaire, 25 % des protéines sont représentées par des enzymes. Bien sûr, il n'est pas toujours possible de savoir si telle ou telle enzyme a été formée dans la mitochondrie ou dans le hyaloplasme.

La synthèse lipidique peut être mise en évidence au niveau des membranes; ainsi, Luck (1963) a montré qu'elles incorporent de la choline marquée. La mitochondrie, d'après Volfin, est capable de former tous les acides gras qui lui sont nécessaires, le cytoplasme ne jouant alors qu'un rôle secondaire.

▼▶ A gauche, représentation schématique de la croissance des mitochondries *chez* Neurospora *(Champignon Ascomycète) en présence de* choline radioactive*; elles sont capables de se diviser après avoir fabriqué leurs lipides membranaires (d'après une expérience de Luck). A droite, microphotographie électronique d'une mitochondrie associée à un ergastoplasme très abondant et très organisé.*

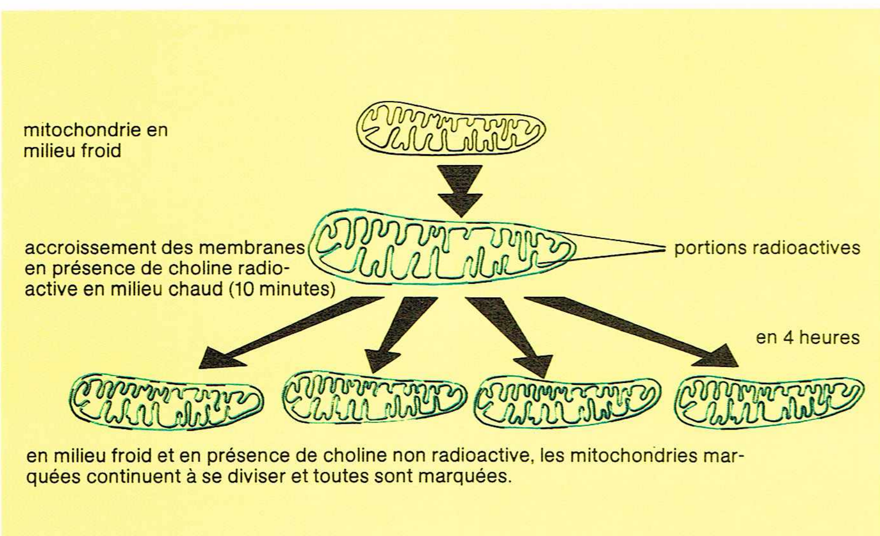

Richard Colin

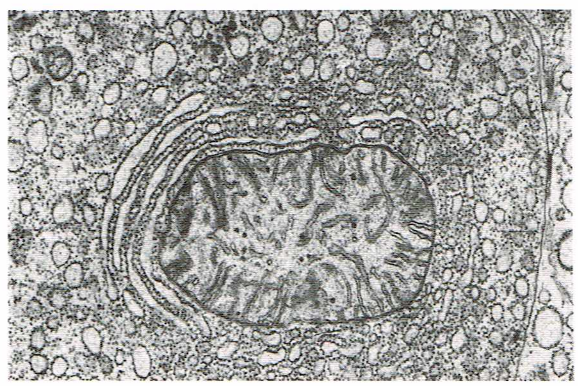

A. Beaumont

Les rapports de la mitochondrie avec son milieu.

La mitochondrie a besoin, pour vivre, non seulement de métabolites dissous dans le hyaloplasme où elle baigne, mais aussi de molécules complexes, toutes préparées — enzymes, coenzymes, etc. D'autre part, elle possède de l'ADN et des ARN qui lui donnent les moyens d'effectuer des synthèses protéiques et, secondairement, lipidiques; une partie de ses ARN, toutefois, est d'origine nucléaire.

Si l'on raisonne de la même manière pour le reste de la cellule, on voit qu'elle est capable d'effectuer la quasi-totalité de ses synthèses, bien que la mitochondrie lui apporte beaucoup en fabriquant l'essentiel de son ATP. En somme, il y a là une *situation de dépendance mutuelle* que l'on pourrait qualifier de *symbiose,* si la cellule et ses mitochondries n'avaient pas la même origine. Dès 1890, alors qu'il ne possédait évidemment aucune donnée biochimique, Altmann vit dans les mitochondries des Bactéries devenues les hôtes permanents des cellules.

Y a-t-il des points communs entre les mitochondries et les Bactéries? L'ADN mitochondrial est souvent circulaire, ce qui rappelle ce que l'on trouve dans le cas des Bactéries. Les ribosomes mitochondriaux de 120 Å ont un coefficient de 70 S, comme les ribosomes bactériens. Mitochondries et Bactéries aérobies, enfin, contiennent toutes les enzymes nécessaires à la respiration. Le système de la chaîne respiratoire est situé, dans les deux cas, au contact d'une membrane de type plasmique.

Quelles sont, d'autre part, les différences notables? Il en existe deux qui sont frappantes : par rapport aux Bactéries, les mitochondries sont beaucoup plus pauvres en systèmes biochimiques; par contre, elles ont un complexe membranaire très important, sur lequel se localise le système enzymatique respiratoire. En suivant l'hypothèse d'une éventuelle symbiose, ces différences s'expliquent avec facilité. Les premières cellules infestées, vivant grâce à la glycolyse anaérobie, auraient pu tolérer ces Bactéries « parasites », sans doute exceptionnellement puissantes sur le plan de l'activité phosphorylante. Ensuite, de mutation en mutation, les Bactéries seraient devenues plus utiles en hypertrophiant leur système membranaire; dans le même temps, devenues « paresseuses », elles auraient « renoncé » à effectuer bon nombre de synthèses puisque leur hôte leur fournissait non seulement le gîte, mais le couvert... Reste à s'expliquer l'origine des dites mutations.

Ajoutons que les mitochondries ne sont pas morphologiquement inertes : elles se gonflent ou se contractent en fonction de la composition ionique du cytoplasme; elles se déforment grâce à un système contractile du type actine-myosine. Il est même très vraisemblable qu'elles peuvent se déplacer; ainsi, dans les cellules d'animaux carencés (Palade, 1959), on les voit s'accoler à des globules lipidiques du cytoplasme qu'elles entourent, se nourrissant ainsi des seules réserves que l'animal possède encore durant le jeûne. Les mitochondries se rassemblent également autour d'organites dont l'activité biologique est essentielle : ribosomes, fibrilles contractiles du muscle (Auber et Couteaux, 1963) ou microtubules du flagelle des spermatozoïdes (Fawcett et Ito, 1965). Dans ces cas, il semble que les mitochondries interviennent, dans le sens mécanique du terme, pour aider à la réalisation du travail cellulaire. Enfin, les mitochondries ont la capacité de faire des petits! Elles se reproduisent indépendamment du cycle de reproduction cellulaire comme on l'a établi au moyen de techniques de marquage radioactif (Luck).

Sans aller jusqu'à parler de symbiose, il y a des faits qui montrent l'existence d'un *équilibre* entre la cellule et ses mitochondries, puisque la cellule peut, dans divers cas, survivre quelque temps en milieu anaérobie. Le nombre de mitochondries est régulé de façon à permettre un fonctionnement maximal de leurs enzymes : elles se trouvent dans un milieu où les substrats sont légèrement en excès. De plus, les cellules dévorent leurs mitochondries après quelque temps d'activité, et l'autophagie s'exerce essentiellement sur des mitochondries isolées. L'activité reproductrice de celles-ci leur permet de compenser les pertes. Il y a donc équilibre et même lutte, comme dans tous les cas de symbiose authentique.

LA MULTIPLICATION CELLULAIRE VÉGÉTATIVE

La multiplication cellulaire peut se faire par division « directe » de la cellule (on appelle *amitose* la division directe des cellules nucléées). Cela se produit essentiellement chez les Unicellulaires. Dans le cas des Pluricellulaires, la division est indirecte (mitose).

Division cellulaire directe

Cas des Bactéries.
Le bacille subtil, qui envahit en deux jours la surface d'une décoction de foin, peut être observé au microscope dans une chambre humide contenant un peu de cette décoction. Si la température est suffisamment élevée, chaque Bactérie se divise toutes les 20 à 30 minutes.

Cas des Unicellulaires.
L'amitose peut s'observer chez de nombreux végétaux unicellulaires. Le cas des Diatomées est très caractéristique : le noyau s'étrangle et se clive dans le cytoplasme, puis celui-ci donne naissance aux nouvelles parois qui protégeront les cel.ules filles ; il s'agit d'un matériel qu'il est facile d'observer.

La division directe est le mode de reproduction ordinaire de la plupart des Protozoaires. Le clivage nucléaire, suivi du clivage cytoplasmique, s'opère d'une manière apparemment très simple si l'on observe une amibe ou une paramécie vivant dans un milieu de culture assez riche pour favoriser la division. Pourtant, le cas des Ciliés est déjà très complexe puisque l'on y trouve un *macronucleus* et un *micronucleus;* ainsi, chez *Tetrahymena,* la division du premier est une division directe, alors que le second se divise par mitose. Elliott a montré, en 1963, que lors de la reproduction végétative le macronucleus double d'abord sa teneur en acides nucléiques, bourgeonne, puis se divise après élimination des bourgeons dans le cytoplasme. Mais les faits sont sensiblement plus compliqués ; avant la division, Elliott constate qu'il y a plusieurs vagues de bourgeonnement du macronucleus et que les bourgeons éliminés drainent, dans le cytoplasme, des corpuscules formés d'ARN. Durant ces phénomènes, le noyau synthétise beaucoup d'ARN, dont une grande partie passe dans le cytoplasme (Sirlin, 1960). On voit que cette amitose est un phénomène fort complexe (il n'est d'ailleurs pas identique chez tous les Ciliés). On peut se demander, avec Ray (1963), comment le mécanisme de division directe du macronuleus se trouve contrôlé chez ces animaux. En effet, sans qu'il soit possible d'y voir se former des chromosomes, la division permet le partage régulier du lot d'ADN entre les cellules filles. Bien plus, depuis 1932, A.M. Elliott conserve une souche de *Tetrahymena,* dépourvue de micronucleus, sans observer d'aberrations d'ordre génétique. Enfin, Ray a constaté que le nombre de granules Feulgen + (ADN) est extrêmement variable suivant les individus de l'espèce sauvage. Ces granules correspondraient à l'hétérochromatine, et les filaments ténus qui leur sont attachés représenteraient l'euchromatine incapable de se condenser durant l'amitose. En ce qui concerne la migration et la séparation de deux lots de chromatine, la microscopie électronique ne permet pas de voir des structures contractiles ni de découvrir des systèmes microtubulaires tracteurs ou conducteurs au niveau des granules Feulgen +.

Cas des Pluricellulaires.
Sans être fréquente, la division directe est possible chez les Pluricellulaires. En 1887, Arnold constata le phénomène en observant des leucocytes vivants de grenouille. En 1928, sur coupes histologiques, Charipper et Dawson observèrent des cas d'amitose dans les

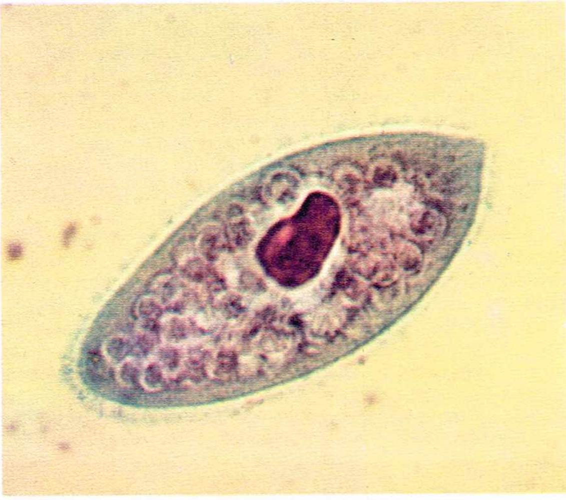

C. Bevilacqua

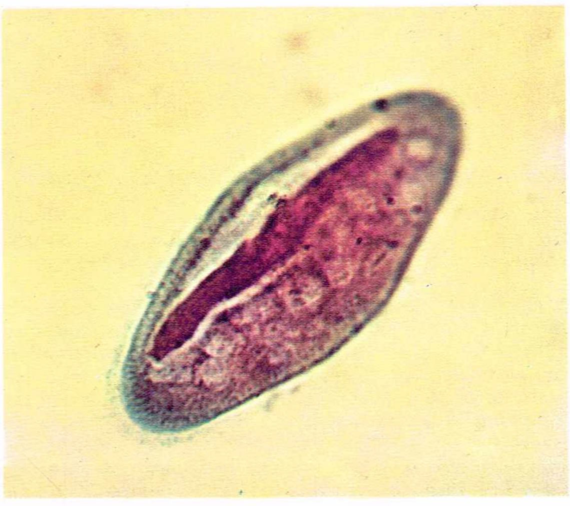

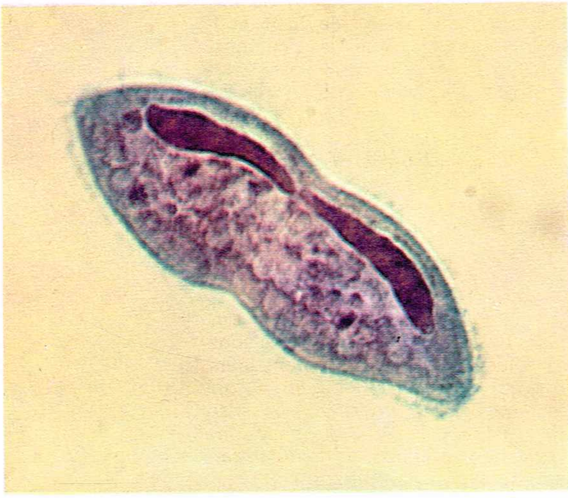

C. Bevilacqua

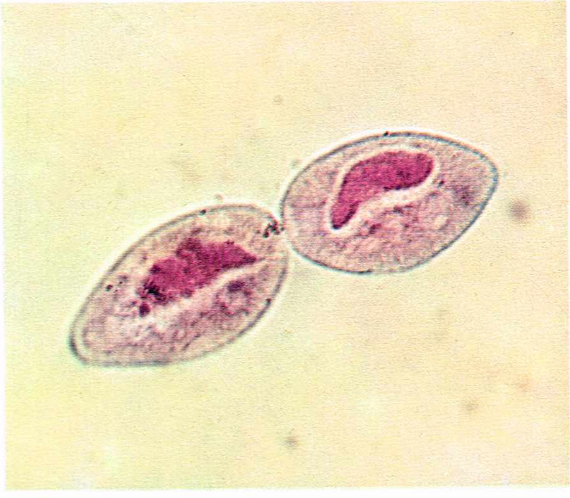

◀ ***Ces quatre microphotographies représentent différentes phases de la division ou reproduction asexuée chez une paramécie*** **(Paramecium putrinum) [*préparations fixées et colorées*].**

érythrocytes nucléés de *Necturus*. Il faut toutefois souligner que, souvent, la division du noyau n'est pas suivie de clivage cytoplasmique *(nucléodiérèse sans cytodiérèse)*.

Hugues notait, en 1952, que l'amitose était exceptionnelle en cultures de tissus.

La formation de cellules binucléées par clivage nucléaire direct est fréquente dans les tissus glandulaires d'Insectes ou de Crustacés (Kater, 1940). Il en est de même dans le muscle et le foie de Vertébrés adultes, où la mitose n'est plus guère possible dans les conditions normales (Münzer, 1925; Clara, 1931; Brues et Marble, 1937); en vieillissant, le tissu perd la possibilité de s'accroître par mitoses (Wilson et Leduc, 1948); mais si l'on enlève une partie du foie, les cellules qui subsistent retrouvent leur activité mitotique (Abercrombie, 1957; Oide, 1958; J. Bouchard). Selon H. C. Elliott (1936), la division totale est un phénomène normal au sein du tissu cartilagineux. De plus, si l'on provoque la prolifération du cartilage, ce qui est possible chez la souris par exemple, on observe d'abord une activité mitotique, puis, au bout de deux semaines, les cellules ne peuvent plus se multiplier que par amitose, complète ou incomplète (May et Bouchard, 1962). Au sein de tissus greffés et subissant un début de dégénérescence, la division directe et, plus souvent, la formation par amitose de cellules binucléées ne sont pas exceptionnelles (Bouchard et May, 1960). On serait tenté de penser que la division cellulaire directe, au moins chez les Vertébrés, est un processus qui tend à remplacer la division mitotique dans des tissus adultes, voire plus ou moins sénescents. Il s'agirait d'une réaction de souffrance. Il serait cependant risqué de généraliser : J. A. Thomas, de 1935 à 1938, a montré que certaines cellules embryonnaires cultivées pouvaient se reproduire par amitose; avec des cellules musculaires, Chèvremont aboutit à des conclusions du même ordre, ce qui fut confirmé par Bassleer (1962); de plus, toujours d'après Chèvremont, dans une lignée de cellules dont on suit le devenir en contraste de phase, des divisions amitotiques s'observent entre deux divisions mitotiques.

Division cellulaire indirecte : la mitose

Les aspects d'une cellule en division

La division mitotique peut être observée sur le vivant ou sur coupes histologiques. Elle suit une période « quiescente », ou *interphase*, plus ou moins longue.

● Grâce à la *culture de tissus* et à l'emploi du *contraste de phase*, on peut analyser les transformations que subit la cellule vivante durant la mitose. L'observation doit se faire à température constante (37,5 °C pour les animaux à sang chaud). On voit alors que la mitose comprend plusieurs étapes.

La **préparation à la mitose.** Cette préparation n'est pas nettement décelable par l'observation directe; rappelons qu'elle comprend essentiellement une phase S durant laquelle le taux d'ADN est multiplié par deux, puis une phase G_2, durant laquelle divers matériels sont synthétisés. A la fin de G_2, *le noyau gonfle* nettement.

La **prophase.** Le nombre de grains de chromatine du noyau augmente; puis ceux-ci tendent à fusionner, formant progressivement des filaments ou des bâtonnets, qui deviennent de plus en plus nets; par contre, le ou les nucléoles s'estompent puis disparaissent. Enfin, très brusquement, la membrane nucléaire se désagrège. Cette phase dure au total environ 10 minutes.

La **prométaphase.** Elle est caractérisée par une amélioration du dessin des chromosomes qui peuvent se déplacer plus ou moins mais sans direction préférentielle. Cette phase est très généralement assimilée à tort à la prophase.

La **métaphase.** Les chromosomes se rassemblent, formant une sorte d'étoile, ou *plaque métaphasique;* on a l'impression qu'ils sont reliés les uns aux autres en un point et que les extrémités de chacun d'eux sont libres dans le plan équatorial. Prométaphase et métaphase durent au total de 25 à 35 minutes.

L'**anaphase.** Brusquement, les chromosomes se séparent en deux groupes, qui migrent vers les pôles de la cellule; chaque groupe forme une sorte de calotte dont les éléments sont disposés comme les baleines d'un parapluie. Une étude plus attentive permet de voir qu'à la fin de la métaphase chaque chromosome était en fait constitué de deux moitiés séparées par une très mince bande claire longitudinale, mais qui restaient soudées en un point, le *centromère;* or, au début de l'anaphase, il y a dissociation des deux éléments du chromosome, ou chromatides, et rupture du centromère. Lors de la migration polaire, les deux groupes de chromosomes sont en fait identiques, constitués par des *chromatides sœurs*. L'anaphase dure de 3 à 8 minutes.

La **télophase.** C'est l'inverse de la prophase. Les chromosomes perdent leur netteté, ils ont l'air de gonfler, puis ils forment une masse dont le dessin devient très imprécis. Cette masse devient subsphérique, s'éclaircit et les nucléoles reparaissent ainsi que la membrane nucléaire, A ce moment, le cytoplasme se clive *(plasmodiérèse)*. et les deux cellules se séparent progressivement.

L'ensemble des processus est de durée variable, comprise entre 40 et 60 mn.

La mitose implique d'*importantes modifications cytoplasmiques*. Dès la prophase, on remarque l'apparition, près du noyau, d'une masse claire qui ne contient pas de mitochondries et semble constituée d'éléments rayonnants; elle porte le nom d'*aster;* celui-ci se divise avant ou pendant la prophase; chaque élément effectue alors une migration en sens inverse autour du noyau, de telle sorte qu'à la prométaphase les chromosomes sont *inclus* dans une masse fusiforme de cytoplasme sans organites

▶ *Division du* micronucleus *de* Tetrahymena. *C'est une* division indirecte, *avec formation de microtubules bien distincts (fuseau mitotique). Comme dans le cas des autres Ciliés, le macronucleus subit, lui, une division directe (il n'est pas visible ici). Noter que la division se fait après une synthèse d'ADN chromatinien : les traces noires contournées correspondent à l'incorporation de thymidine ^3H (autoradiographie) [microphotographie électronique].*

R. Chavret

et dont les extrémités sont représentées par les asters. Les mitochondries sont très souvent groupées près du noyau avant la disparition de la membrane; puis elles s'amincissent et se répartissent apparemment en deux lots à l'anaphase. Leur morphologie typique est reconstituée après la séparation des deux cellules. Dès 1910, Fauré-Frémiet avait remarqué cette répartition en étudiant la division des Protozoaires vivants. En général, il n'y a pas de véritable « chondriodiérèse » durant la mitose. Les mitochondries sont réparties passivement et de manière approximative. En d'autres termes, la multiplication des mitochondries est indépendante de la mitose.

▼ ***Ces quatre photographies montrent les différentes phases de la mitose végétale. A gauche, on observera au centre (2ᵉ cellule), une prophase une métaphase déjà avancée (4ᵉ cellule); et à droite (3ᵉ cellule) une anaphase. Au centre, également une métaphase, et dans le bas, une cellule en fin de prophase. A droite, une anaphase très nette, les chromosomes migrent vers les pôles, chaque groupe forme une calotte dont les éléments sont disposés en baleines de parapluie.***

En bas, au centre, une télophase observée dans une cellule de racine de jacinthe. On notera que, comme il s'agit de cellules végétales, la mitose est dépourvue d'asters.

G. S. Giacomelli

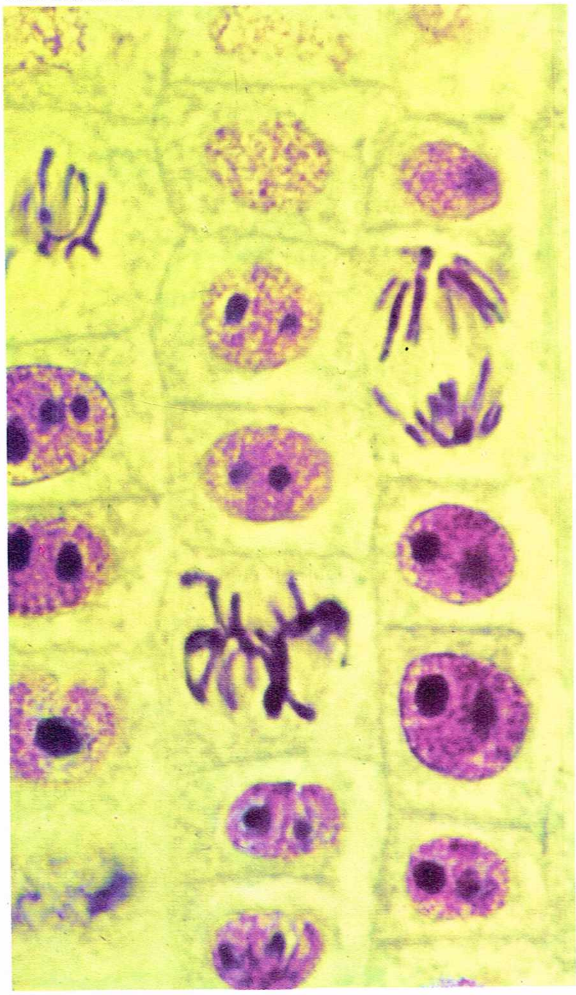

G. S. Giacomelli

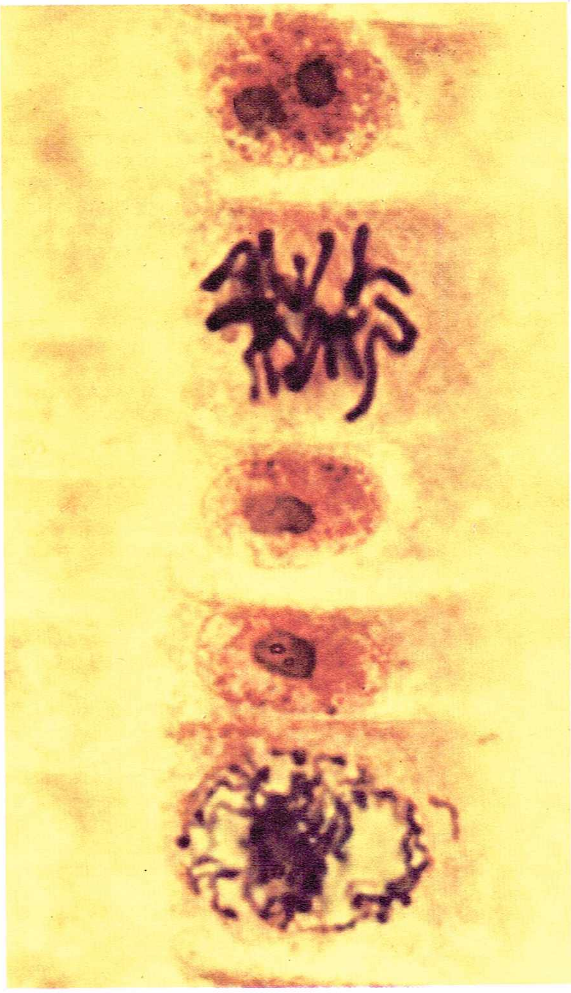

G. S. Giacomelli

H. Chaumeton - Jacana

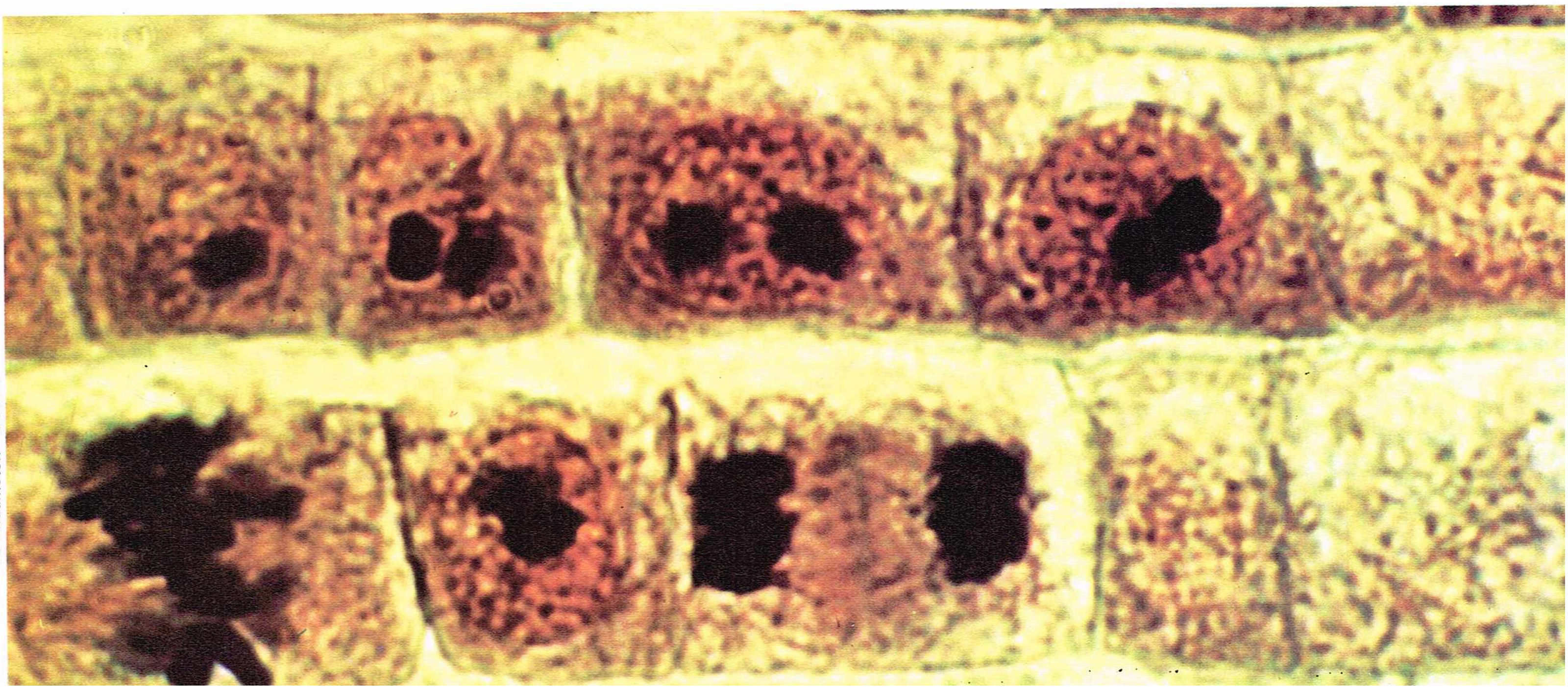

▶ ***De haut en bas et de gauche à droite, les différentes phases de la mitose animale (cellule somatique).***

Le cortex cellulaire se modifie beaucoup à partir de la fin de la métaphase : on voit apparaître des *boules amiboïdes,* expansions cytoplasmiques trapues et très mobiles. (Des prises de vues cinématographiques réalisées image par image accélèrent ces mouvements et donnent l'impression que le cytoplasme bouillonne.) La mitose terminée, les mouvements s'arrêtent. Ajoutons, pour finir, que la cellule qui entre en mitose acquiert toujours une forme plus ou moins subsphérique, ce qui est le signe de variations de la tension superficielle.

L'analyse précise de la mitose a pris plusieurs décennies, mais, Lewis, dès 1924, avait réalisé un film sur le phénomène; utilisant d'autres types cellulaires, Strangeways et Canti (1927), puis Comandon, Jolly et de Fonbrune parvinrent à plus de précision en éclairage normal ou sur fond noir; c'est le contraste de phase qui permit d'améliorer les résultats (Hughes et Fell, 1949; Gey, 1951; Frédéric et Chèvremont, 1951, etc.). Mais il faut insister sur le fait que la technique n'est pas tout : n'importe quelle cellule en division ne permet pas toujours une observation claire des faits, et il a fallu choisir les types cellulaires les mieux adaptés (grande taille, nombre de chromosomes aussi faible que possible, cytoplasme clair, pauvreté en granulations lipidiques ou en pigments, etc.). Le choix d'un matériel d'étude est la démarche initiale et sans doute la plus importante pour le chercheur.

● Observée au *microscope polarisant,* la cellule animale vivante offre un aspect bien différent, qui permet de préciser les faits déjà notés.

Durant la mitose, il apparaît des éléments biréfringents dont l'importance est absolument primordiale. Ainsi, les *asters* tranchent sur le fond sombre de la cellule en prophase; avant le début de la métaphase, on voit que du matériel biréfringent s'installe entre les deux pôles astériens en migration : il forme le *fuseau mitotique.* La biréfringence de l'ensemble augmente progressivement puis, à partir de la fin de la métaphase, tend à diminuer au niveau du fuseau. Dans l'ensemble, la structure nettement fibrillaire du fuseau et des asters est toujours perceptible (Hughes, 1952). Elle est particulièrement frappante dans les ovocytes de certaines Annélides marines, les cellules sexuelles mâles d'Insectes ou les pollens (Inoué, à partir de 1951). Par contre, elle est très difficile à observer en lumière polarisée avec l'œuf d'oursin ou les cellules d'embryon de poulet en culture (Schmidt, 1939; Swann, 1952; Hughes, 1952). Selon ce dernier, de telles différences sont en rapport direct avec le nombre de chromosomes de l'espèce étudiée : si le nombre est élevé, le nombre de fibres paraît être plus grand, et celles-ci seraient plus fines que pour les cellules à nombre de chromosomes restreint. Mais cela n'est pas évident.

Observant avec précision la structure du complexe fibrillaire fusorial, Inoué a découvert chez une Annélide, le chætoptère, un type de fibres que l'on a retrouvées, depuis, chez tous les types cellulaires, animaux et végétaux : il s'agit des *fibres chromosomiques,* de diamètre un peu supérieur aux autres et qui relient chaque chromosome au centre astérien.

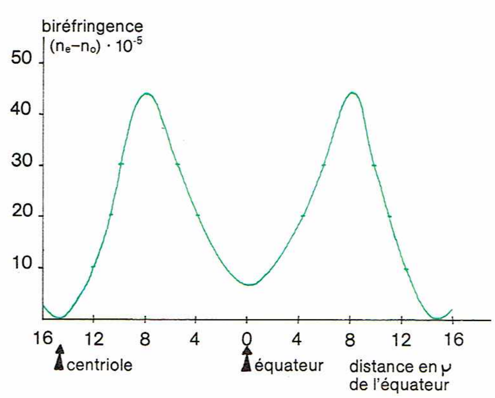

▶ ***Représentation schématique de la biréfringence** le long de l'axe du fuseau achromatique : mitose d'œuf d'oursin (d'après Hughes).*

Richard Colin

LES PHASES DE LA MITOSE
(cellule somatique animale)

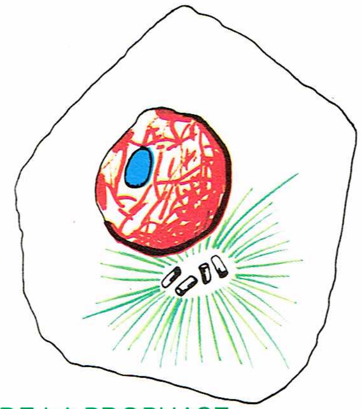

DÉBUT DE LA PROPHASE

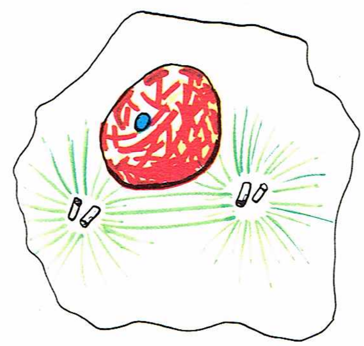

MILIEU DE LA PROPHASE

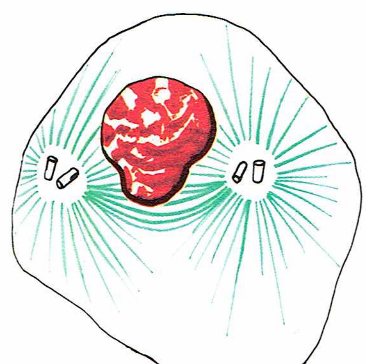

FIN DE LA PROPHASE

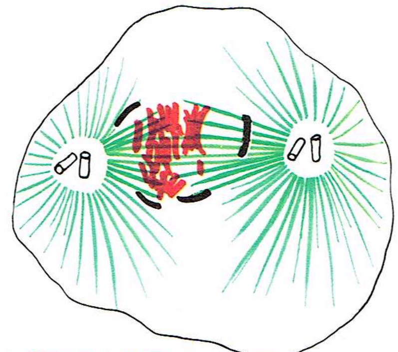

PROMÉTAPHASE

- chromatides non spiralées
- nucléole très visible
- centriole dédoublé
- fibres astériennes en formation

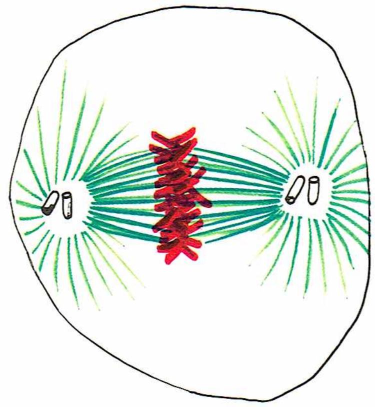

MÉTAPHASE

- chromosomes groupés en plaque équatoriale
- les fibres chromosomiques et fusoriales coexistent

-chromatides toujours non spiralées
- nucléole régressant
- les centrioles se repoussent
- asters bien nets
- fibres continues entre les centrioles

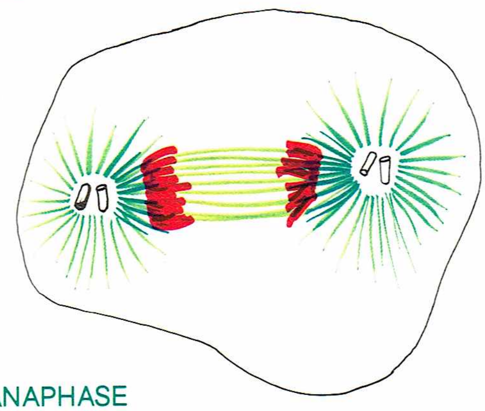

ANAPHASE

- les chromosomes, dont les centromères se sont dédoublés, migrent vers les pôles, tandis que les fibres chromosomiques se raccourcissent
- il apparaît de nouvelles fibres entre les deux lots de chromosomes : les fibres interzonales (vert-jaune)
- les fibres continues régressent.

- chromatides très nettement spiralées
- nucléole invisible
- noyau plus ou moins déformé
- la migration des centrioles se poursuit
- asters entièrement constitués
- fibres continues de plus en plus nombreuses

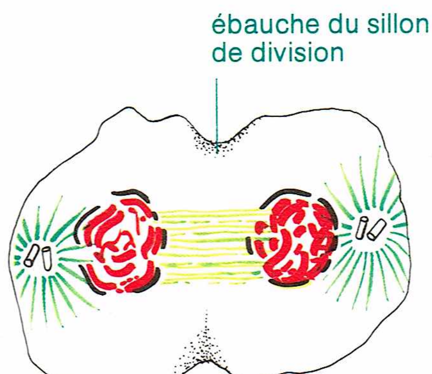

TÉLOPHASE

- les chromosomes se déspiralisent
- la membrane nucléaire se reforme
- le sillon de division s'ébauche.

- chromosomes tendant à se grouper
- membrane nucléaire fragmentée. Elle finit par disparaître.
- les pôles de la division sont déterminés
- les fibres chromosomiques se forment (vert foncé)

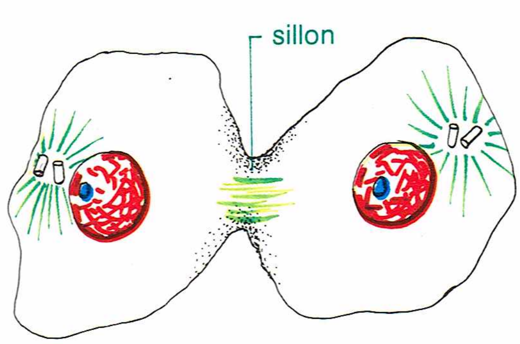

FIN DE TÉLOPHASE ET CYTODIÉRÈSE

- les chromosomes sont totalement déspiralisés.
- le nucléole se reforme
- les fibres astériennes régressent
- les restes de fibres interzonales persistent encore dans le cytoplasme qui relie les cellules filles.

Richard Colin

Soulignons le fait que seules les cellules animales possèdent des asters notables. Les plantes ont des *mitoses anastrales,* ce qui tendrait à prouver que les fibres astériennes ne jouent pas un rôle absolument essentiel dans la mitose. Peut-être vaudrait-il mieux dire que la structure microscopique, voire moléculaire, des pôles mitotiques peut être organisée de plusieurs manières, lesquelles sont également favorables à la division.

La technique de microscopie en lumière polarisée est encore très utilisée de nos jours, en particulier par les spécialistes de thermodynamique qui cherchent à comprendre le mode de fonctionnement précis du complexe fusorial (Stephens, 1973).

● *L'étude de matériel fixé permet de préciser les observations.*

■ L'observation de la *chromatine* et des *chromosomes* est grandement améliorée par la coloration des cellules. Nous savons que la réaction de Feulgen est positive au niveau de l'ADN, ce qui permet de voir plus nettement les chromatides, de localiser précisément le centromère et, dans certaines conditions, de distinguer des structures à l'intérieur de chaque chromatide.

Le nombre de chromosomes est fixe pour toutes les cellules somatiques des individus d'une espèce donnée.

L'œuf de tous les êtres vivants comporte un nombre *pair* de chromosomes; c'est une *cellule diploïde* (2 *n*). Ensuite, la cellule œuf peut avoir deux modes évolutifs : les cellules qui en dérivent pour donner l'individu peuvent être *diploïdes* ou *haploïdes;* dans ce dernier cas, le nombre de chromosomes est réduit de moitié (*n*). Par contre chez un Mammifère, les organes ne comportent que des cellules diploïdes, excepté les glandes sexuelles. C'est la division de ces cellules diploïdes, ou mitose, qui nous retient pour l'instant.

Il ne faut cependant pas oublier que le cycle de vie des Champignons est essentiellement haplobiontique et que celui des Fougères et de nombreuses Algues est haplo-diplobiontique.

L'observation directe de mitoses ne permet pas souvent de dénombrer précisément des chromosomes préalablement colorés : ceux-ci restent toujours plus ou moins groupés. De fait, les cas favorables sont exceptionnels; ainsi, l'*Ascaris* du cheval fournit des œufs très clairs et de taille suffisante pour que l'on puisse y dénombrer 4 chromosomes *(A. megalocephala bivalens);* de même, l'œuf de drosophile en comporte 8 (2 *n* = 8). Avec les Vertébrés, la difficulté d'observation augmente; les Amphibiens sont cependant assez favorables car ils ont de grandes cellules, on compte déjà 24 chromosomes chez la salamandre, et davantage chez les Oiseaux (souvent plus de 60). Dans ce dernier cas, les dénombrements ne peuvent être faits qu'en observant les cellules bien étalées qui se développent en culture de tissus (Chèvremont). Chez les végétaux, les problèmes sont du même ordre. Toutefois, l'étude de certains pollens peut être faite directement (Swanson, avec *Tradescantia*).

Diverses techniques permettent de préparer les cellules en mitose pour effectuer le décompte des chromosomes. L'*écrasement* des cellules *(squash)* donne de bons résultats.

Depuis 1960, selon de Grouchy, l'étude des chromosomes a pu être entreprise de manière plus systématique et avec une technique très efficace. On utilise des cultures ou des cellules maintenues en survie et *bloquées en métaphase* par un agent chimique; lorsque le blocage concerne un nombre suffisant de cellules, on provoque dans le milieu un *choc hypotonique* (Hsu et Pomerat, 1953) entraînant leur gonflement et la dispersion des chromosomes dans chacune d'elles. Après fixation du matériel, on peut aussi écraser les cellules afin de mieux distinguer chacun des chromosomes.

Les faits montrent qu'il n'y a pas de rapport étroit entre le nombre de chromosomes d'une cellule et le degré d'évolution de l'individu auquel elle appartient. Par exemple, le nombre est voisin chez des formes aussi éloignées que l'homme, le chat, la souris et les céréales; de plus le saumon possède 60 chromosomes, nombre nettement supérieur au nôtre.

Fait curieux, on s'est aperçu que le nombre des chromosomes n'est pas toujours aussi constant qu'on le pensait : pour un même individu il est possible de trouver, dans divers tissus, des variations qui, chez les Mammifères, peuvent atteindre jusqu'à 5 ou 7 chromosomes de plus ou de moins par rapport au lot normal d'une espèce donnée.

Ce phénomène d'*aneuploïdie* concerne évidemment un nombre assez faible de cellules. Biesele, dès 1944, s'était posé la question de savoir quelles pouvaient être les limites d'aneuploïdie tolérées. Timonen et Thermann (1950) constatèrent que les anomalies numériques augmentaient avec l'âge du sujet. Nous verrons dans un chapitre ultérieur que diverses anomalies du nombre de chromosomes peuvent affecter l'ensemble des cellules d'un individu; ces anomalies, décelées depuis peu, car elles concernent seulement un ou deux chromosomes, induisent dans l'espèce humaine des malformations et des arriérations mentales définitives. C'est là un des types de maladies génétiques (Lejeune, Gautier et Turpin, 1959). Il semble que l'aneuploïdie soit exceptionnellement importante chez la souris, en particulier au niveau du foie; mais, en ce qui concerne ce dernier, nous sommes en fait devant un nouveau problème, celui de la *polyploïdie :* le nombre de chromosomes peut être triploïde ou tétraploïde; certains tissus sont alors *hétéroploïdes :* les cellules contenant *n*, 2 *n*, 3 *n*, 4 *n* et parfois 8 *n* chromosomes. Ce dernier nombre correspond aux cellules hépatiques de l'organe en « régénération » mis en évidence par Beams et King en 1942. (Biesele estimait déjà qu'il y avait 4 à 5 % de cellules octoploïdes dans un foie normal.)

L'aneuploïdie et l'hétéroploïdie ne se manifestent pas seulement chez les Mammifères. Le cas des Amphibiens est un des plus classiques depuis les recherches de Fankhauser (1945); cet auteur a, de plus, montré que l'hétéroploïdie pouvait être obtenue chez ces animaux en traitant l'œuf par un choc thermique. Chez les Arthropodes, le cas d'*Artemia salina* est le mieux connu; il y a des races de ploïdie fort différente (Artom, 1912-1928; Barigozzi, 1941). Une punaise aquatique, *Gerris lateralis,* comporte des cellules hautement polyploïdes (Geitler, 1937). En fait, chez les Insectes, on trouve fréquemment ce que l'on nomme l'*endomitose,* c'est-à-dire la multiplication de chromosomes qui restent accolés dans le noyau (→ chromosomes polytènes); ce processus n'est pas extrêmement net chez *Gerris,* mais est évident chez *Drosophila, Culex* ou *Sciara,* trois Diptères fort communs (Painter et Reindorp, 1939; Berger, 1937). Enfin, la polyploïdie n'a rien d'exceptionnel chez les végétaux, et nous verrons qu'elle peut être accentuée par diverses techniques expérimentales.

▼ *Le nombre de chromosomes peut être extrêmement réduit chez certaines espèces; dans le cas de la variété* **univalens** *d'***Ascaris megalocephala,** *on voit que l'œuf, observé* **in toto,** *comporte deux* **chromosomes.** *Ils sont clivés; il s'agit donc d'une fin de métaphase (coloration au bleu de toluidine dilué).*

J. Bouchard

La **forme** et la **structure** des chromosomes ne sont pas quelconques.

■ Dès l'interphase, on peut constater que la colorabilité des éléments chromatiniens n'est pas homogène : on distingue des *grains* et des *filaments* chromatiniens; mais, de plus, on trouve parfois un « élément particulier », dit *hétéropycnotique*, dont la nature n'est pas toujours la même. Heitz a montré qu'il pouvait s'agir de portions de chromosomes. Dès 1892, Rosen avait constaté cette colorabilité particulière chez les plantes. Au début du siècle, Mac Clung puis Montgomery montrèrent que certains corpuscules hétéropycnotiques, ou *hétérochromosomes*, étaient liés à la détermination du sexe.

La coloration des chromosomes métaphasiques permet de distinguer leur forme et de déceler des chromosomes sexuels. La structure fine des divers types chromosomiques d'une cellule est actuellement l'objet de nombreuses études.

— La *forme des chromosomes* est caractéristique pour toutes les cellules d'une espèce donnée. On les classe en fonction de la *longueur des chromatides* et de la *position des centromères*. Pour une analyse précise, il faut photographier des métaphases, fixées après passage en milieu hypotonique, agrandir les photos, puis découper les chromosomes, que l'on groupe deux par deux (dans le cas de cellules diploïdes). En comparant une panoplie de femelle et une panoplie de mâle, il apparaît des différences, plus ou moins sensibles; chez un Mammifère, par exemple, on constate que les deux sexes ont en commun des paires de chromosomes, appelés *autosomes*, et qu'ils diffèrent par deux chromosomes sexuels, ou *hétérochromosomes*. Les chromosomes sexuels sont assez faciles à distinguer chez le mâle : ce sont ceux qui restent quand on a réussi à grouper tous les autres deux par deux... et ils sont d'ailleurs très différents l'un par rapport à l'autre; on les appelle X et Y. Chez la femelle, il s'agit de deux chromosomes X, que les spécialistes parviennent assez facilement à découvrir. On établit ainsi un *caryotype* pour une espèce donnée (par exemple : homme : 44 A + XY; femme : 44 A + XX). Mais ce schéma n'est valable que pour un certain nombre d'espèces, d'ailleurs fort différentes puisqu'il s'applique aussi bien à l'homme qu'à la drosophile. En fait, le nombre total de chromosomes peut être impair chez le mâle de certaines espèces : il n'y a alors qu'un hétérochromosome contre deux chez la femelle. C'est le cas de l'Hémiptère *Protenor* (♀ : 12 A + XX; ♂ : 12 A + XO) ainsi que d'autres Hémiptères, de Coléoptères et d'Arachnides. Un troisième type est représenté par les papillons (♀ : autosomes + XO; ♂ : autosomes + XY). Enfin, les espèces à chromosomes sexuels multiples ne sont pas rares (cas des mantes, de drosophiles américaines et de certains Crustacés par exemple). Un tel phénomène peut apparaître chez des espèces du type XX et XY : ainsi, il existe une proportion d'hommes dont les cellules comportent trois hétérochromosomes.

— La *structure des chromosomes* est loin d'être évidente. En général, les colorations classiques par des laques, des bleus ou des violets basiques, le carmin ou même le réactif de Feulgen, ne donnent pas une idée précise de leur constitution. Quelques traits généraux peuvent cependant être notés sur le chromosome anaphasique, c'est-à-dire sur une chromatide. On y trouve deux *subchromatides*, généralement arrangées en spirale l'une autour de l'autre (Mickey, 1946). Mais cela ne peut se voir que chez des espèces à chromosomes de grande taille; on a beaucoup utilisé la drosophile (cellules ganglionnaires) et des Orthoptères. Un Amphibien, *Ambystoma*, fut étudié par Creighton, et Fell et Hugues parvinrent même à observer des unités filamenteuses encore plus nombreuses dans les chromosomes anaphasiques de rate de souris en culture. Nebel, en 1941, obtint des résultats de même nature avec des plantes *(Tradescantia* et *Trillium) :* il trouva quatre éléments spiralés dans chaque chromatide, résultats confirmés, en 1963-1964, par Gimenez-Martin et Lopez-Saez grâce à l'*Endymion*. Le nombre des subchromatides ou des « mi-subchromatides » n'aurait aucun rapport avec le nombre de filaments d'ADN existant réellement (Manton). Dans la plupart des cas, l'étude précise est rendue très difficile par la présence de la *matrice* nucléoprotéique des chromosomes : les histones et les protéines acides masquent les structures.

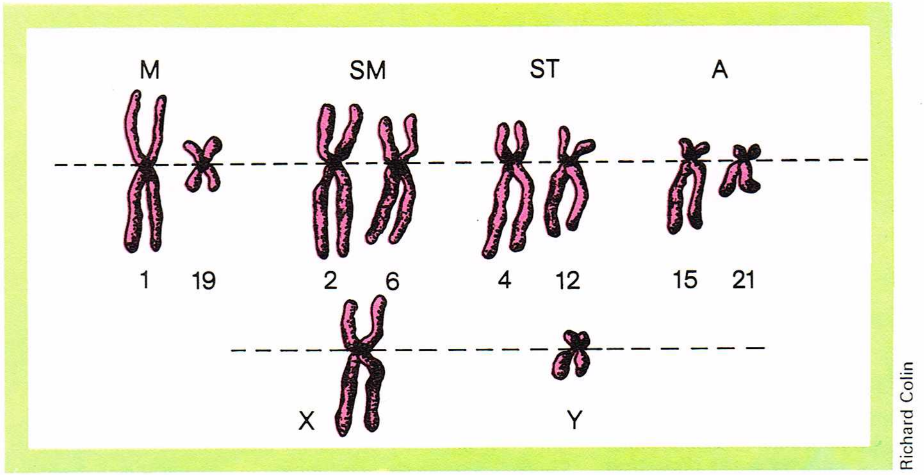

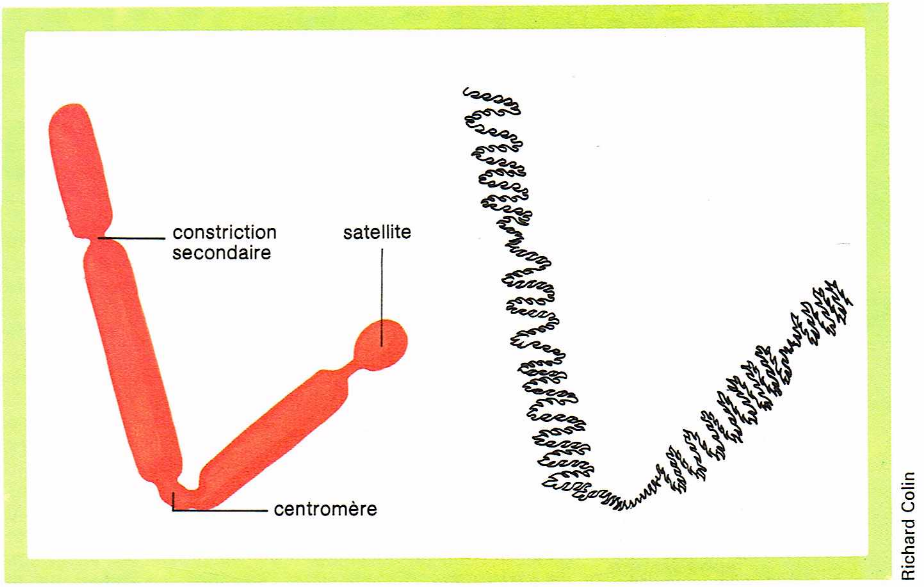

▲ ***En haut, représentation schématique de la forme de quelques chromosomes humains métaphasiques :***
M, métacentriques;
SM, submétacentriques,
ST, subterminaux;
A, acrocentriques (ou terminaux).
Les chromosomes humains sont au nombre de 44 autosomes (numérotés par paires) auxquels il faut ajouter deux chromosomes sexuels XX ou XY.
En bas, organisation et structure hypothétique d'un chromosome; la spiralisation mineure, serrée, entraîne un raccourcissement; la spiralisation majeure, plus lâche, augmente encore la condensation de la chromatine.

Pourtant, l'exemple des chromosomes polyténiques des Diptères peut donner une idée complémentaire sur l'arrangement de l'ADN. Dès 1933, Heitz et Bauer et, en 1935, Painter et Bridges montrèrent l'intérêt que présentent ces chromosomes géants; on les voit facilement en extrayant les glandes salivaires des larves et en les montant entre lame et lamelle après coloration. Chaque chromosome est fait de disques empilés, alternativement clairs et sombres; si l'épaisseur des disques est très variable tout au long du chromosome, *la topographie en est extrêmement précise pour une espèce donnée*. Pour environ 1,2 mm « de chromosome », on trouve en moyenne 6 000 disques (Bridges). Mais chaque disque sombre, ou *chromomère*, est fait d'éléments plus petits (Caspersson, 1936; Frey-Wyssling, 1953). L'analyse méticuleuse de ces chromosomes géants a permis d'établir des cartes qui servent de base pour l'étude des sites d'action des hormones et des inhibiteurs de la synthèse protéique (Ashburner, 1974).

On a, bien sûr, cherché à retrouver dans d'autres types de cellules, et chez de très nombreux êtres vivants, une structure chromosomique à bandes transversales. Elle peut parfois être entrevue en contraste de phase, mais en 1949, Chèvremont et Firket ont obtenu des résultats plus nets grâce à l'histochimie : la recherche de phosphomonoestérase alcaline permet d'obtenir une forte réaction des chromosomes, et l'on y décèle une série de bandes plus ou moins colorées; cette enzyme, impliquée dans le renouvellement des acides nucléiques, permet donc de mettre en évidence l'hétérogénéité de la structure longitudinale des chromatides. On dispose maintenant de techniques encore plus significatives. On élimine, par un traitement des chromosomes à la trypsine, une partie de la matrice protéique puis on colore la chromatine,

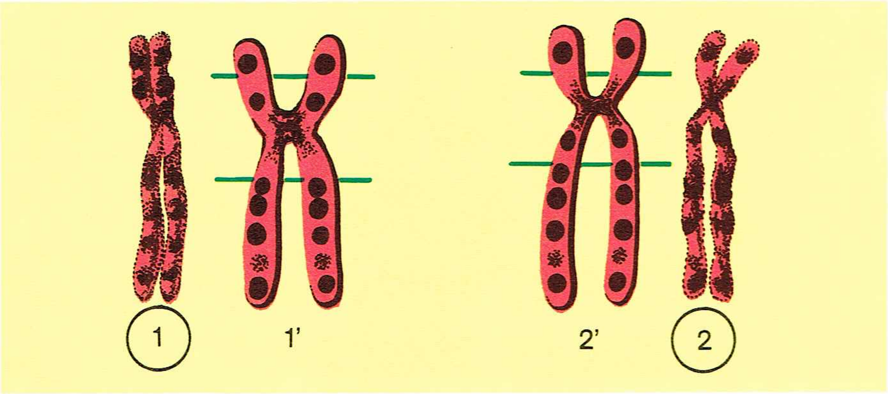

Richard Colin

▲ *Aspects de chromosomes colorés après digestion partielle par la trypsine; les masses de chromatine sont réparties de manière extrêmement précise : 1, chromosome 5 de chimpanzé; 2, chromosome 5 de l'homme (d'après une préparation de de J. de Grouchy). Les schémas 1' et 2' précisent les différences notables entre les deux espèces : les chromocentres situés entre les traits verts sont inversés chez l'homme par rapport au chimpanzé.*

qui offre alors un aspect en chapelet (Trosko et Wolff, 1965). Selon de Grouchy, la chymotrypsine serait particulièrement active pour la digestion préalable : on peut obtenir, sur chaque chromosome, des bandes de coloration distincte, très caractéristiques de chacun d'eux (1974). Cependant, dès 1970, Caspersson et Zech, en Suède, étaient parvenus à faire apparaître de véritables topographies de bandes grâce à l'observation en lumière UV de chromosomes colorés par la quinacrine (antipaludéen) ; l'essor qu'a pris la recherche dans le domaine de la structure fine du chromosome dépend essentiellement des travaux de ces chercheurs, dont les résultats étaient, à l'époque, saisissants. En 1971, Dutrillaux et Lejeune obtinrent aussi d'excellentes images en traitant les chromosomes par la chaleur avant de les colorer. Ces techniques permettent l'analyse des anomalies de structure responsables de malformations de l'individu.

■ Le chromosome suit un cycle de *spiralisation* et de *déspiralisation* durant la mitose.

De Robertis, Nowinski et Saez ont précisé ce phénomène en 1965. A la prophase, chaque chromatide (ou ses sous-unités) s'enroule pour former une spirale « dont le pas est très petit ». Il y a donc raccourcissement de l'ensemble, ce qui donne la *spirale mineure*. Celle-ci s'enroule ensuite, beaucoup plus lâchement (moins de 30 tours), et donne la *spirale somatique*, ce qui aboutit à l'élaboration du chromosome métaphasique où la condensation de chromatine est maximale. Au voisinage du centromère, il n'y a pas de spiralisation somatique, et l'étranglement qui en résulte est parfaitement visible. La télophase est caractérisée par une déspiralisation progressive, qui devient « complète » à l'interphase (en fait, les chromocentres du noyau interphasique sont des portions de chromatides encore spiralées). Remarquons ici que, dès 1938, Cleveland avait décrit les deux types de spiralisation chez des Protozoaires Flagellés (Holomastigotoïdes) ; le matériel était particulièrement favorable puisqu'il y a très peu de chromosomes et qu'ils sont de bonne taille; mais ces résultats, qui portaient sur des êtres familiers pour les seuls spécialistes, n'ont pas suffisamment retenu l'attention des chercheurs.

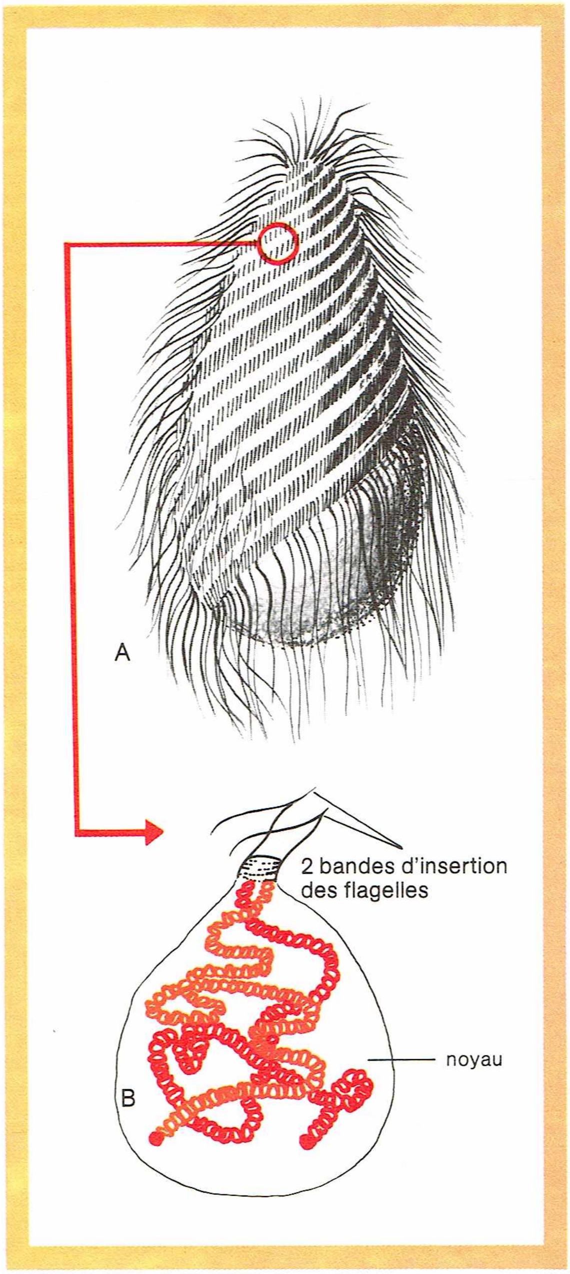

Richard Colin

▶ *Représentation schématique de la spiralisation des chromatides chez un Flagellé Holomastigoïdes (Hypermastigines). A, aspect de l'animal; B, les 2 chromosomes se spiralisent ainsi dès le début de la prophase, il y a combinaison de deux spiralisations.*

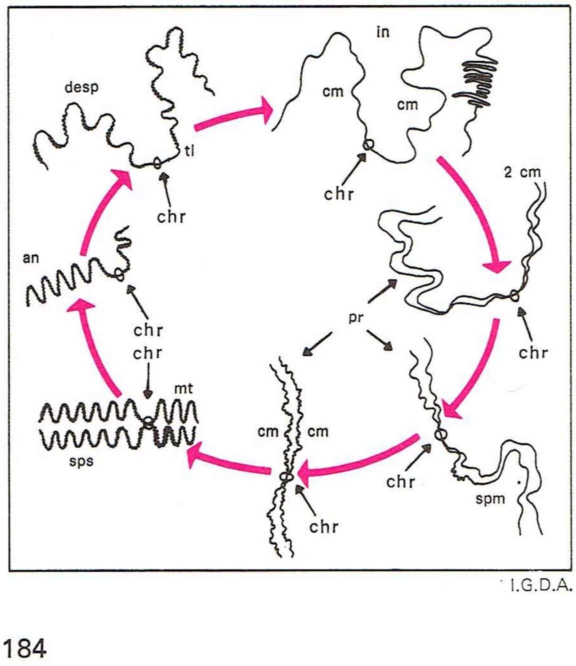

I.G.D.A.

▶ *Représentation schématique du cycle de spiralisation des chromatides (d'après De Robertis et coll.) : à l'interphase (in), chromosome à une seule chromatide (cm), à double hélice, déspiralisée sauf en certains points ou chromocentres (chr); la prophase (pr) suit la synthèse d'ADN et les deux chromatides se spiralisent progressivement (spiralisation mineure [spm]); à la métaphase (mt) une seconde spiralisation somatique se superpose à la première (sps); à l'anaphase (an), séparation des chromatides; à la télophase (tl), déspiralisation (desp).*

L'asymétrie moléculaire des chromosomes. On pense généralement que, durant la mitose, l'ADN nucléaire se répartit de façon identique entre les cellules filles; il n'en est rien : la *répartition de l'ADN dans les cellules somatiques diploïdes est essentiellement asymétrique* (Lark, Consigli et Minocha, 1966). Le phénomène serait à la base du processus de différenciation et de l'équilibre de la croissance tissulaire. L'observation morphologique des chromosomes répartis dans deux cellules sœurs conduit à penser que les deux lots sont essentiellement symétriques. Pourtant, il existe des exceptions chez les végétaux (Stebbins, 1965) et chez certains Métazoaires inférieurs, voire même dans les cellules nerveuses des Vertébrés. Mais ces exceptions ne sont peut-être que des caricatures, très grossies, de ce que l'on trouve au niveau moléculaire chez l'ensemble des êtres vivants; l'existence d'une symétrie morphologique ne peut permettre d'exclure l'éventualité d'une asymétrie moléculaire. Résumons les faits observés par Lark et ses collaborateurs qui travaillaient sur des cultures de tissus primaires (cellules de départ prélevées directement sur l'animal) subissant un court marquage

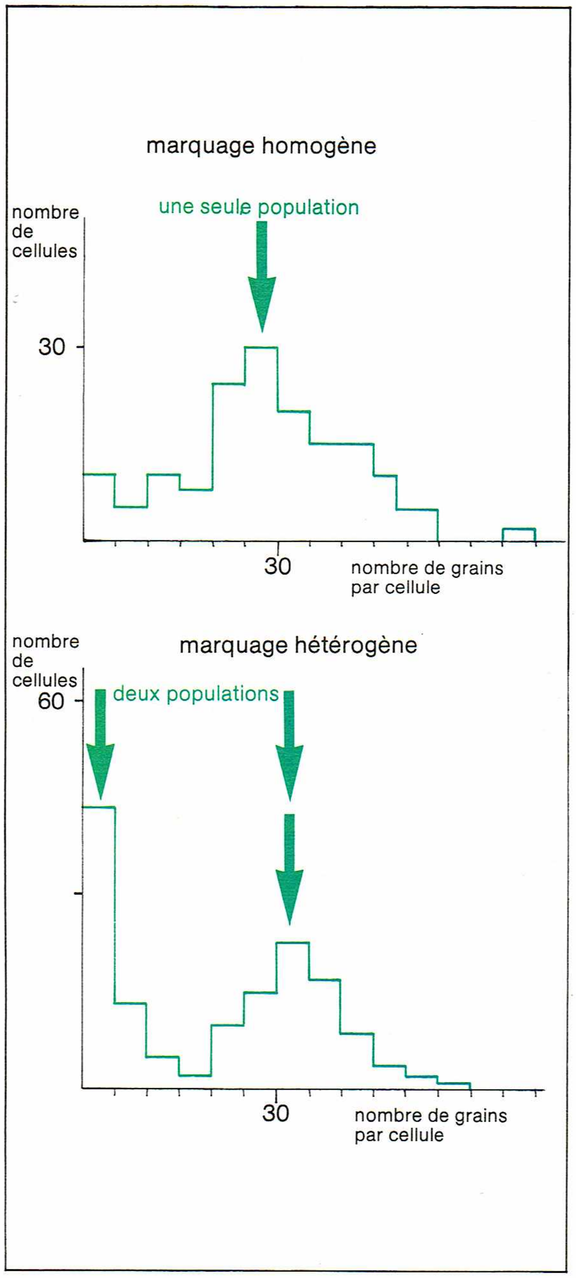

Richard Colin

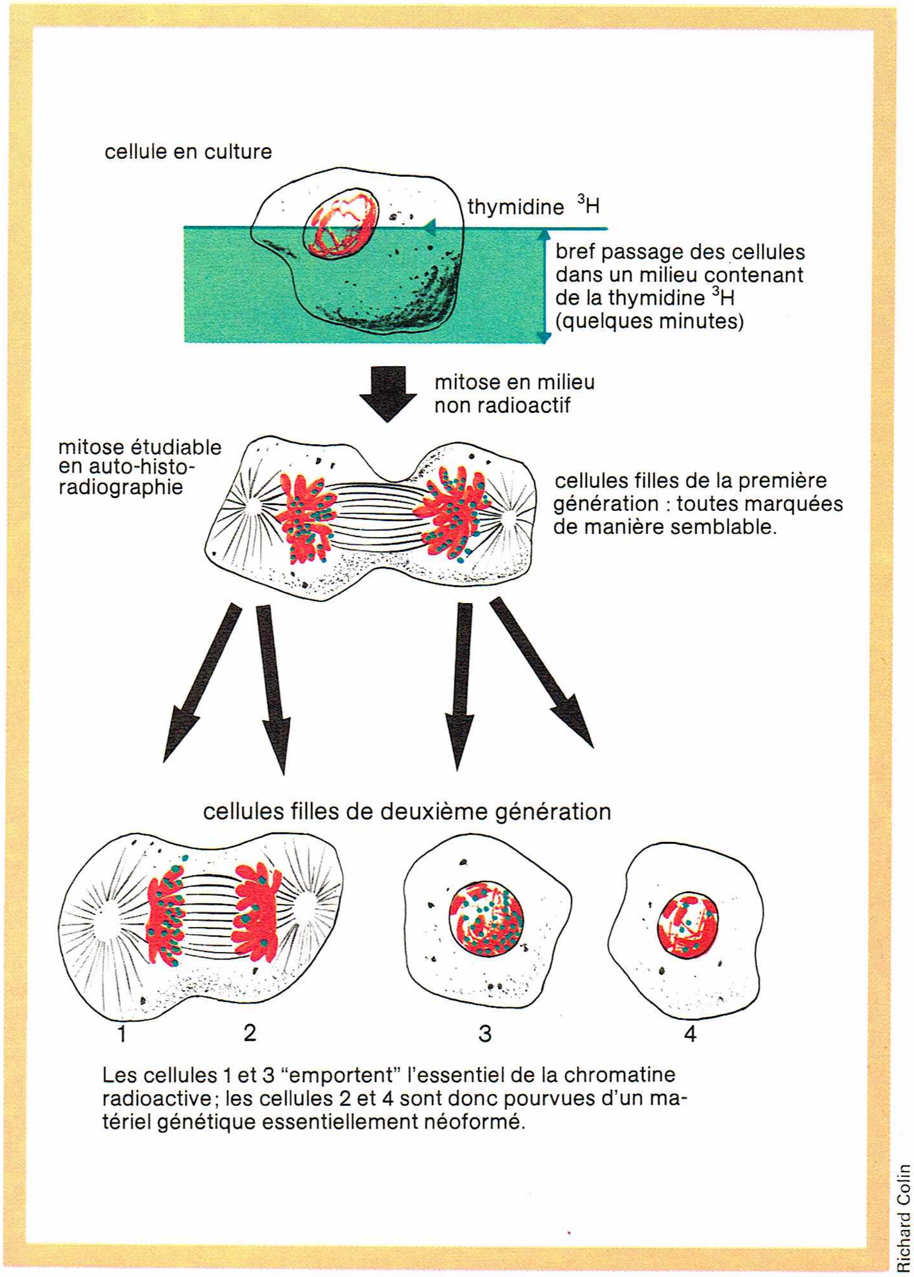

Richard Colin

à la thymidine ^{3}H. A la seconde génération, qui se produit dans un milieu dépourvu de marqueur, on voit apparaître *deux populations* cellulaires; cela signifie que la répartition, à la seconde génération, de l'ADN marqué à la première génération, se fait de façon très inégale : les chromatides marquées des divers chromosomes *tendent à rester groupées* dans l'une des cellules filles de cette seconde génération. C'est là une preuve fondamentale de l'asymétrie constitutionnelle des chromosomes. Comme le souligne Odartchenko, « une division somatique peut parfaitement être asymétrique quant à l'âge relatif de l'ADN de deux cellules filles, alors que l'aspect morphologique de ces dernières est semblable ». Des conclusions de même nature peuvent être tirées des travaux de Cottier et ses collaborateurs (1964-1969), qui ont analysé le comportement de cellules érythropoïétiques marquées avant la première génération.

■ L'observation du *complexe astérien* et *fusorial*. On qualifie cet ensemble de *système achromatique*. La fixation, puis la coloration de la cellule, facilitent l'observation des *structures fibreuses*, qui se distinguent plus ou moins du reste du protoplasme. Suivant leur localisation, les fibres achromatiques sont dites *astériennes, continues, interzonales* et *chromosomiques*.

La coloration permet aussi de remarquer que les pôles d'une métaphase sont occupés par un *centriole*, ou *diplosome*. En effet, les colorants basiques permettent d'y mettre en évidence une certaine quantité d'ARN (Fautrez et coll., 1960). En fait, *la mitose débute par la division du diplosome* de la cellule interphasique.

Localisation du centriole.

La constitution du centriole interphasique a été décrite. Le centriole peut être très allongé chez divers Protozoaires Flagellés, tels que ceux qui vivent en symbiose dans le tube digestif de nombreux termites. C'est le cas de *Barbulanympha*, très bien étudié par Cleveland (1963). Selon ce dernier, aucune cellule ne montre le rôle des centrioles dans la production des figures achromatiques aussi clairement que *Barbulanympha*. En effet, ce cas permet de voir que l'ensemble du centriole n'est pas directement au centre des fibres astériennes; seul un point particulier, d'aspect hyalin, le *centrosome*, correspond au lieu de convergence des fibres; il s'agit d'abord des fibres astériennes, puis des fibres continues et chromosomiques. Le matériel est assez favorable pour que l'on puisse observer bien des détails sur le vivant. Cleveland rapporte qu'en 1931, il avait étonné, puis enthousiasmé, en leur faisant observer ses animaux, des sommités scientifiques de l'époque : Wilson, Morgan, Mac Clung et Conklin n'avaient jamais vu un tel système achromatique. Conklin parla même de faire du trapèze sur le fuseau — boutade significative!

▲ A gauche, histogramme correspondant aux résultats chiffrés de l'expérience de Lark et coll. sur une culture de cellules embryonnaires : à gauche, 24 heures après le bref passage dans la thymidine ³H, les chiffres montrent que la répartition de la radioactivité (nombre de grains d'Ag) est homogène dans la population de cellules filles (essentiellement 1re génération) ; à droite, plus tard, après la deuxième série de mitoses, les cellules constituent deux populations dont le marquage est très différent.

A droite, schéma de l'expérience de Lark et coll.; les grains verts correspondent aux grains d'Ag apparaissant dans l'émulsion.

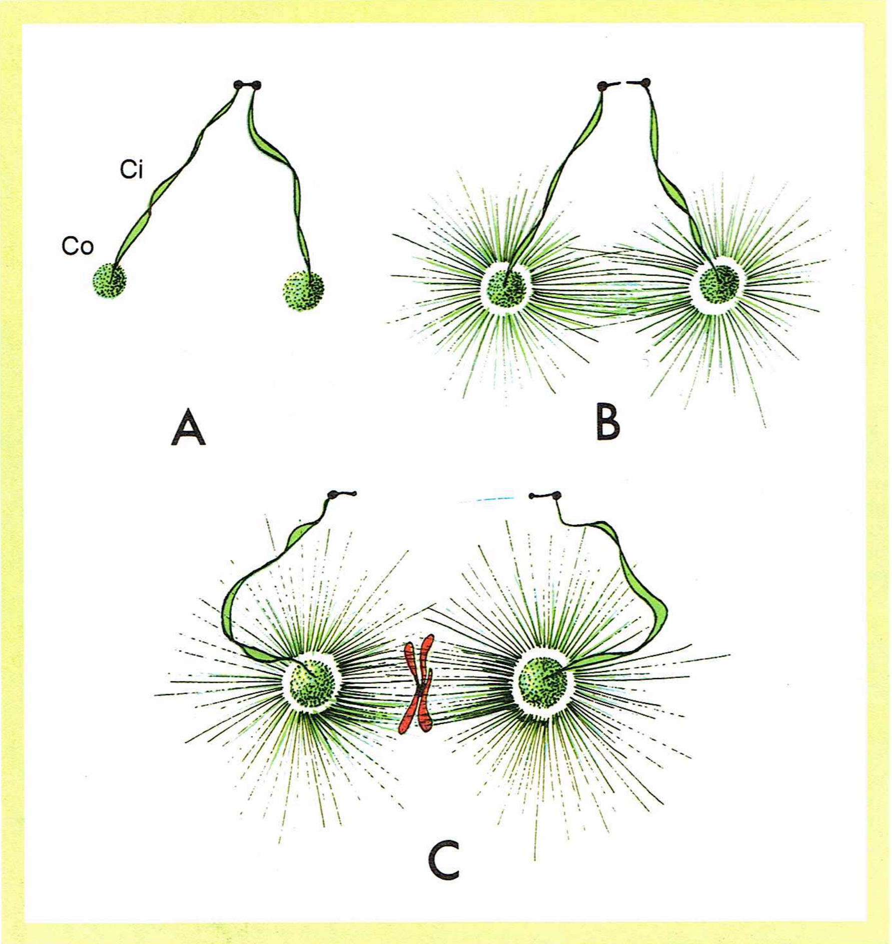

Richard Colin

▲ *Matériel achromatique de* **Barbulanympha** *(d'après Cleveland) : Ci, centriole très allongé ; Co, centrosome autour duquel s'organisent les fibres astériennes puis fusoriales ; A, dans la cellule en interphase ; B, début de prophase ; C, appareil achromatique durant la métaphase.*

Le centriole est un organite allongé, rubané, nettement spiralé. Selon Burke (1963), il y a une foule d'intermédiaires entre le centriole décrit par Porter (1957), Oberling et Bernhard (1961) dans les cellules de Vertébrés et celui de *Barbulanympha*. De plus, il existe des cellules qui sont dépourvues de centriole ; c'est le cas de cellules des Myxamibes, des Myxomycètes et de Champignons ; cependant, il serait remplacé, chez le Champignon *Neurospora* par exemple, par une plaque disposée à la surface de la cellule (Winckle et coll., 1971) ; d'autre part, chez le Myxomycète *Physarum,* Tanaka (1973) a repéré, en microscopie électronique, un organite peu structuré, logé dans une encoche de chaque noyau et qui joue le rôle de centre durant la mitose. Divers Champignons possèdent aussi des centres polymorphes rappelant celui de *Physarum*.

Avant la mitose, le centriole se divise ; c'est-à-dire que l'on trouve alors deux diplosomes qui, par la suite, se repoussent et migrent pour former les deux pôles de la future mitose. Cette division centriolaire peut être extrêmement précoce ; ainsi, elle se produit au milieu de la période G_1 chez certaines cellules observées en culture (Rattner et Phillips, 1973) ; la migration des diplosomes fils ne se produit qu'au début de la prophase. Cet exemple montre bien qu'il est très difficile de dire à quel moment commence vraiment la division cellulaire.

Il y a, autour des cylindres qui forment les centrioles, une condensation de molécules, nettement visible en microscopie électronique. On est encore mal renseigné sur la nature de cette condensation qui est assez structurée et comporte des bras courts à disposition rayonnante.

L'appareil achromatique.

L'appareil achromatique est fait d'éléments qui peuvent être isolés et manipulés par microdissection sous l'objectif du microscope. Il s'agit de fibres qui sont dues à la polymérisation d'un complexe protéique dissous dans le cytoplasme durant l'interphase. Divers travaux ont permis de faire le point sur cette polymérisation (Fauté-Frémiet, 1970 ; Dustin, 1972 et 1974).

Au « début » de la mitose, on constate que la région du centriole est plus visqueuse, plus ferme que le reste du cytoplasme ; ensuite, pendant que se forment les asters, on perçoit très bien que ces éléments correspondent à des zones de cytoplasme ayant perdu toute fluidité ; le fuseau lui-même apparaît nettement gélifié : grâce aux outils de microdissection, on peut l'étirer, dissocier les constituants, et même l'extraire.

L'extraction peut être effectuée sur des populations cellulaires par la méthode due à Mazia, qui employait des œufs d'oursins (1955). On fait agir sur les œufs une solution d'alcool et de digitonine ; après avoir passé plusieurs semaines à — 10 °C dans le mélange, les œufs sont agités, et les appareils achromatiques se trouvent libérés, ce qui permet l'analyse chimique. Mazia put ainsi constater qu'il s'agissait de matériel protéique. Par une ultracentrifugation analytique, qui nécessite une redissolution dans un produit tel que le salyrgan ou le p-chloromercuribenzoate (Zimmermann, 1958), on peut mettre en évidence deux pics protéiques ; de plus, on observe environ 6 % d'ARN associé (Zimmermann, 1963) ; il est donc bien évident que la composition de l'appareil achromatique n'est pas homogène. Rustad montra, en 1959, que l'ARN est particulièrement abondant au niveau des fibres interzonales de l'anaphase.

Après les travaux de Mazia et de son équipe, c'est seulement vers 1968 que les problèmes de la nature, puis des fonctions de l'appareil achromatique, furent mis à l'ordre du jour ; ils le sont encore, et pour longtemps... On nomme *tubulines* les protéines du complexe isolé par Mazia et Zimmermann (Adelman, 1968). Bibring et Baxandall, en 1971, virent que celles-ci sont chimiquement liées aux protéines microtubulaires des flagelles de spermatozoïdes : en effet, leurs propriétés antigéniques sont voisines. Bryan et Wilson (1971) en montrèrent le caractère acide. Raff et Kaumeyer (1973) parvinrent à déterminer leur composition en A.A. : elles sont riches en diacides et en sérine, A.A. à radical alcool primaire, lequel permettrait une intervention de l'AMP cyclique sur le fuseau. Enfin, les radicaux SH y sont notables (Nickolson et Veldstra, ainsi que Hauser, 1972).

L'étude au microscope électronique permet de constater que les systèmes fibrillaires sont en fait constitués par des *microtubules* (MT). Autrement dit, les éléments astériens ou fusoriaux sont construits comme les unités fondamentales des centrioles. Tous ces MT sont formés de 12 ou 13 sous-unités, probablement disposées suivant une hélice (Porter, 1966 ; Olmsted et coll., 1971 ; Warner et Satir, 1973) ; chaque MT est donc un hétérofilament. La formation des MT s'effectuerait sous la dépendance de facteurs dits de nucléation (Borisy et Olmsted, 1972). La notion n'est pas encore très précise. Les tubulines dissoutes dans l'ensemble de la cellule et qui forment un *pool,* un *stock,* disponible pour la mitose, sont assemblées au voisinage de *centres organisateurs* plus ou moins connus ; quoi qu'il en soit, il apparaît que les MT se forment à la périphérie du centrosome et qu'ils prennent contact avec les centromères qui relient les chromatides d'un chromosome. Durant une bonne partie de la mitose, les centromères restent accrochés aux MT.

Deux observations doivent être soulignées. La première concerne la disposition précise des microtubules les uns par rapport aux autres ; la seconde correspond aux rapports MT astériens-membrane nucléaire durant la migration des centrioles fils.

— En étudiant au microscope électronique les MT métaphasiques de l'ovocyte de souris, Burkholder (1972) a mis en évidence des *ponts,* régulièrement espacés, reliant des MT parallèles. Ces ponts ont le même aspect que les MT eux-mêmes. Turner (1972) a montré, dans le testicule de *Gerris,* l'existence d'« expansions courbes » des MT fusoriaux qui peuvent relier plusieurs de ces microtubules. D'après Mac Kinnon et ses collaborateurs (1973), le manchon périnucléaire de microtubules qui s'élaborent avant la métaphase de cellules sexuelles mâles du rat comporte des « ponts entrecroisés » qui relient ces éléments. Comme des ponts on été découverts entre les MT de l'axostyle des Flagellés (Mac Intosch, 1969), on peut penser qu'il y a une certaine uniformité dans les dispositions relatives des MT qui sont impliqués dans des mouvements intracellulaires évidents. Il en est de même dans le cas de MT qui s'étendent tout au long

des axones des cellules nerveuses; or, il y a un transport de vésicules de sécrétion vers l'extrémité des fibres motrices; dans ce dernier cas, Burton et Fernandez (1973) sont parvenus à montrer que les ponts seraient de nature polysaccharidique, et porteurs de charges anioniques fort nombreuses, auxquelles vient se lier une grande quantité d'ions Ca^{++}.

— Favard, d'autre part, souligne que, durant la migration des centrioles fils, on peut observer, en face de chacun d'eux, une dépression de la membrane nucléaire; les MT astériens semblent repousser cette membrane. Cette observation doit être rapprochée de celles, plus anciennes, de Fell et Hugues, de Smith et de Hughes-Schrader (1943-1949) : pour ces auteurs, les pôles astériens agissaient directement sur le noyau et même sur les chromosomes, dont ils déterminaient le *groupement* à la prophase, du moins dans les cas où leur nombre n'est pas trop élevé. Ces deux résultats montrent que les pôles ont une influence importante sur le comportement du noyau et de ses organites.

● *Données physiologiques et ultrastructurales résultant de l'étude du cytoplasme durant la mitose.*

Ces données sont de nature diverse : mesures de viscosité, de perméabilité, d'intensité respiratoire; observation de la plasmodiérèse, de la croissance du plasmalemme, etc.

Quelques remarques préliminaires.

La morphologie de la cellule en division se modifie toujours; il y a une tendance à l'arrondissement, qui devient très net à la prométaphase. Si la cellule possède des cils, on constate qu'ils peuvent se résorber; c'est le cas des cellules œsophagiennes (Kindred, 1927) ou des Ciliés Hypotriches étudiés par Stein dès la fin du XIXe siècle; les autres Ciliés montrent aussi une régression de leurs organes locomoteurs durant la mitose. Dans l'ensemble, les phénomènes d'excrétion ou de sécrétion se trouvent ralentis ou arrêtés. Nous savons également que la structure des mitochondries se modifie. On doit donc s'attendre, en étudiant la physiologie du cytoplasme d'une cellule en division, à constater d'importantes variations.

Variations de viscosité.

Dès la fin de la prophase, la viscosité générale du cytoplasme diminue (Heilbrunn, 1921; Carlson, 1946). Les mesures peuvent être faites par l'étude du mouvement brownien, de la cyclose ou de la vitesse de sédimentation des organites de cellules centrifugées. Par contre, la viscosité est fortement augmentée, à l'anaphase, dans la région interzonale, entre les deux lobes de chromosomes. Pour Spek (1923) et Bujard (1941), la mitose est la conséquence de changements d'état physique du cytoplasme. De fait, une augmentation de pression du milieu ambiant induit un arrêt de la multiplication cellulaire (Marsland, 1942).

Variations de perméabilité.

Elles ont été mesurées par diverses techniques (Herlant, 1920; Lillie, 1916). Les résultats ne concordent pas toujours; souvent, la cellule qui va se diviser devient beaucoup moins perméable, et le phénomène inverse se produit à la fin de l'anaphase, juste avant le clivage. La plupart des travaux ayant trait à ces variations ont été faits sur des œufs; mais il s'agit comme nous le verrons d'un matériel extrêmement spécial. En 1973, Stalk et Warner, qui travaillent sur l'œuf de xénope, ont pu montrer que les cellules sont assez peu sensibles aux variations du taux de Na^+ et K^+ dans le milieu : le potentiel de membrane n'est pas modifié durant les premières phases de la mitose, mais il l'est, *au début du clivage*, par le potassium. Ce résultat est très significatif : il montre que la membrane *néo-formée* qui se constitue dans le sillon de clivage n'a pas la même perméabilité que le reste du plasmalemme de la cellule en division.

Variations de l'activité respiratoire.

Selon Chèvremont, il y aurait, à la prophase, une tendance à l'asphyxie de la cellule, avec accumulation de substances toxiques résultant du métabolisme. Il note, de plus, que l'augmentation expérimentale du taux de CO_2 dans le milieu provoque l'apparition *précoce* de figures astériennes. Réciproquement, l'excès d'oxygène est toxique pour la mitose dans les cultures de tissus (Frédéricq, J. Bouchard), ainsi que durant le développement de l'œuf d'ascidie (Bouchard, 1966). L'asphyxie favoriserait la « coagulation » des colloïdes ou, du moins,

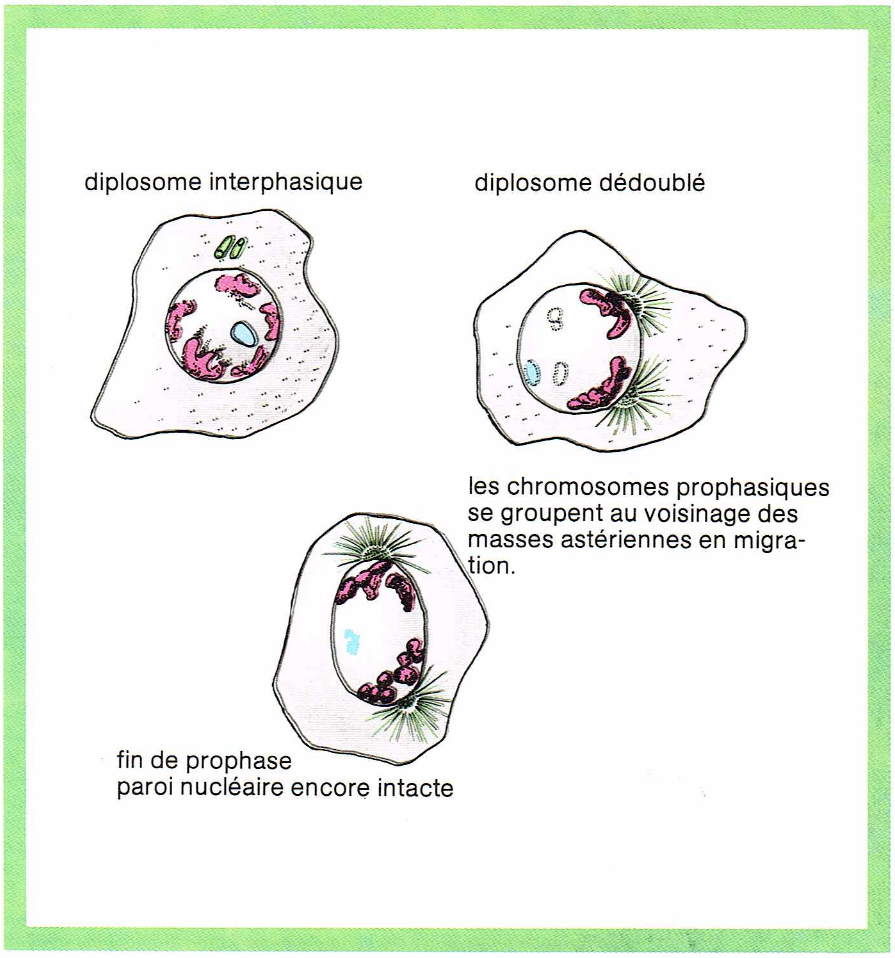

▲ ***Représentation schématique de l'*****influence des pôles** ***sur la répartition des chromosomes dans certaines cellules animales (spermatocyte d'Invertébré). Selon Schrader et Hughes, divers résultats de cette nature montrent que les pôles ont un effet sur les chromosomes bien avant la métaphase.***

▼ **Variations de viscosité** ***durant le cycle de la cellule (cellule nerveuse d'Insecte) : $P_1 \rightarrow P_4$, stades de la prophase; M, métaphase; A, anaphase; T, télophase; I, interphase. On notera que, dès la fin de la prophase, la viscosité générale du cytoplasme diminue (d'après Carlson).***

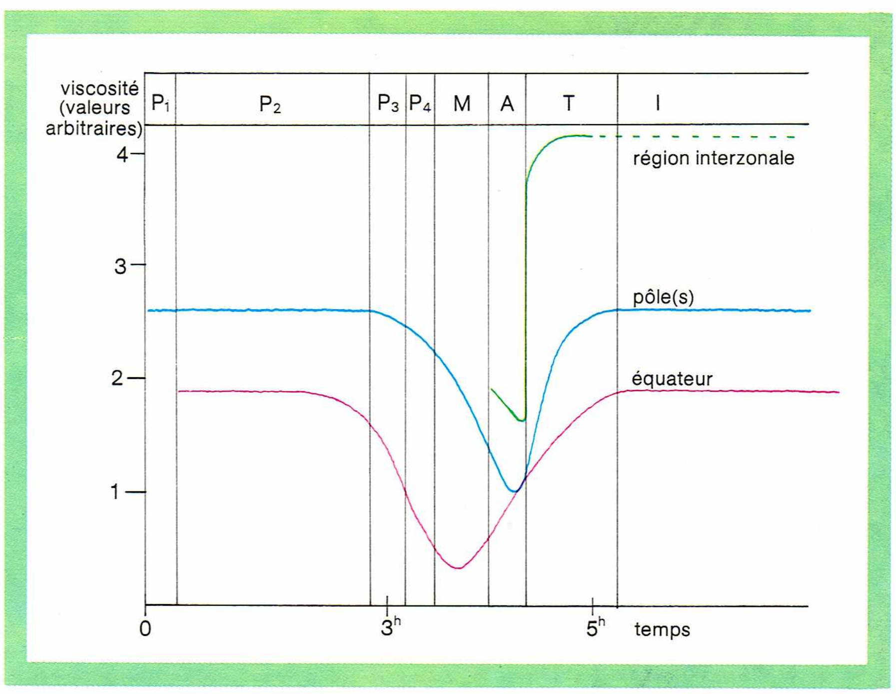

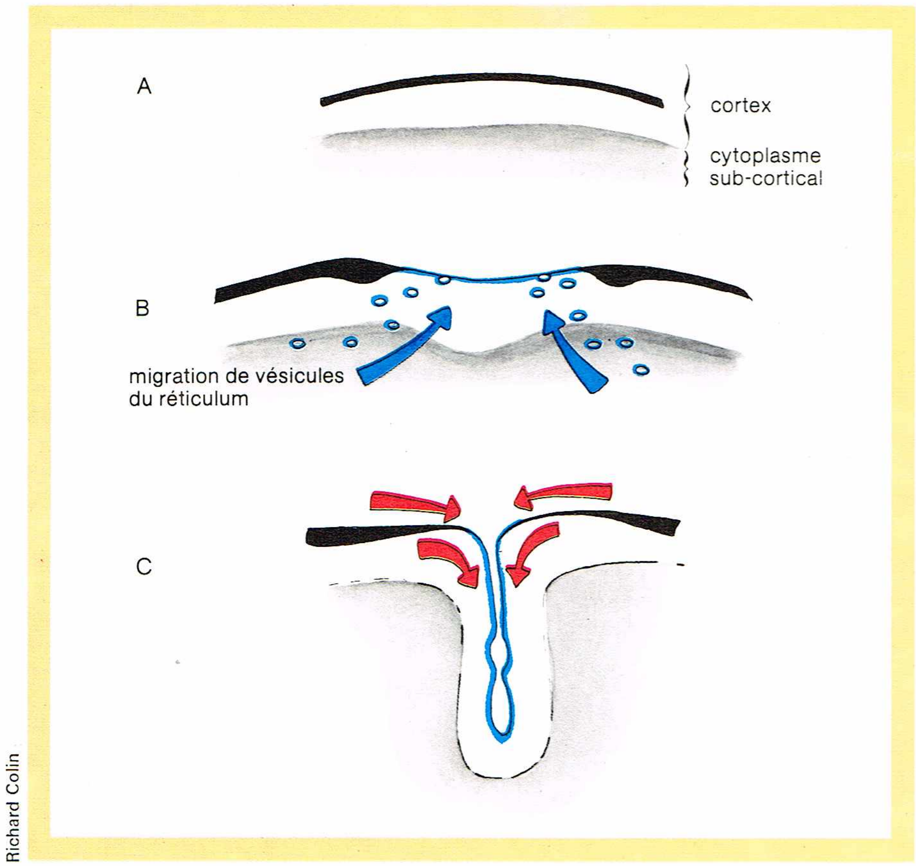

▲ ***Représentation schématique de la formation du** sillon **de clivage télophasique (cas de l'œuf) : A, cortex de l'œuf avant la division; B, formation du présillon dépigmenté; C, début du clivage avec invagination du cortex et du plasmalemme néo-formé.***

▼ ***Représentation schématique du** principe **de la cytodiérèse** chez les végétaux supérieurs : A, formation du phragmoplaste (Ph) à partir des vésicules golgiennes; B, la soudure des vésicules et la coalescence des produits de sécrétion permettent la formation des membranes et du cytosquelette.***

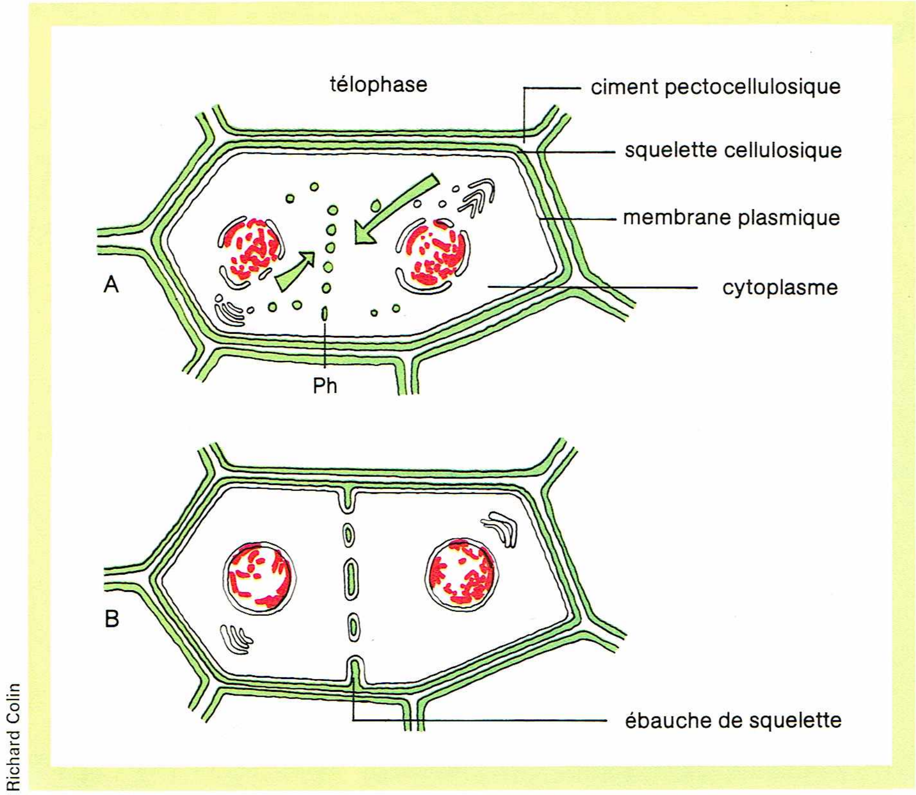

pourrait modifier localement l'équilibre sol-gel. A l'anaphase, le plasmalemme devenant perméable au CO_2 endogène ainsi qu'aux substances de déchets, l'équilibre sol-gel tendrait à se rétablir.

Cependant, l'oxyde de carbone peut inhiber la division de *certains* œufs (Brachet, 1934; Hörstadius, 1940). Les agents qui bloquent les phosphorylations semblent plus efficaces : le dinitrophénol empêche la mitose au moment de la prophase ou lors du clivage (Clowes et coll., 1934 à 1950; Brachet, 1951-54). Slack et Warner (1973) constatent pourtant que le DNP ou des cyanures n'agissent pas sur la mitose de l'œuf de xénope; toutefois, l'*injection* de DNP dans le milieu intercellulaire, proprement intra-embryonnaire, bloque totalement le développement.

L'ensemble de ces observations montre bien que le problème de l'activité respiratoire durant la mitose est encore entier.

Étude particulière du cytoplasme cortical et du sillon de plasmodiérèse.

Les caractères physico-chimiques du cytoplasme cortical sont assez différents suivant qu'il s'agit d'un œuf, d'une cellule animale ou d'une cellule végétale.

— *Dans le cas de l'œuf,* un certain nombre de résultats peuvent être signalés. Travaillant sur l'œuf de l'oursin *Arbacia,* Brown, en mesurant la viscosité du cortex en fonction du degré d'avancement de la mitose, put constater que cette viscosité devenait subitement plus grande quelque temps avant le clivage (1934). Oddo et Esposito sont parvenus à montrer, chez plusieurs espèces d'oursins, que du potassium entre dans la cellule après fécondation, puis qu'il en sort peu après et que, par la suite, cet ion pénètre de nouveau, atteignant une concentration maximale au moment du clivage (1951). Divers auteurs ont estimé que des mouvements de calcium se produisent au sein de l'œuf durant la division. Heilbrunn et Wilson, en 1949, estimaient que les augmentations de viscosité du cortex puis du reste du cytoplasme étaient en rapport direct avec la concentration de Ca^{++}; corrélativement, l'héparine, antagoniste de cet ion, empêche la gélation et, secondairement, le clivage de l'œuf d'un Ver marin *(Chaetopterus).* De ces travaux, comme de ceux de Mazia et de Shapiro effectués sur *Arbacia,* il ressort que l'ion calcium joue un rôle essentiel dans la division de l'œuf d'animaux marins; ce fait est maintenant confirmé.

Dans le cas des œufs qui se développent en eau douce, on connaît surtout le comportement de l'œuf d'Amphibien. Sentein, en 1961, a montré que le cytoplasme cortical est directement influencé par la *croissance des MT astériens,* qui est maximale juste avant le clivage : la membranogenèse serait la continuation de la fibrillogenèse astérienne centrifuge. Dès 1937, Schechtman avait montré que le cortex est constitué de deux couches, dont seule la plus externe est pigmentée; selon lui, la formation du sillon se fait en deux temps : constitution d'un présillon dépigmenté, puis invagination du cytoplasme cortical gélifié et dépigmenté. Pour Sentein, les deux phénomènes sont, comme nous le verrons plus loin, de nature différente : le deuxième temps est dépendant des MT astériens (1961). Durant le premier temps, l'apparition du sillon dépigmenté est due à la coalescence de nouveaux éléments membranaires qui s'adjoignent, à ce niveau, à la membrane préexistante (Selman et Waddington, 1955; Zotin, 1969). L'utilisation du microscope électronique permet de voir que des vésicules du réticulum endoplasmique s'incorporent au plasmalemme : c'est le phénomène d'*exocytose* (Thomas, 1968; Arnold, 1969; Fullilove et Jacobson, 1971; Gwynn et Jones, 1972). Il y aurait aussi insertion directe de molécules précurseurs de la membrane (Bluemink, 1970-71). Le deuxième temps du clivage peut être perturbé par des agents toxiques, tels que le phényluréthane (Sentein, 1961) ou la cytochalasine B (Bluemink et de Laat, 1973); dans ce cas, le sillon ne s'invagine pas, et la zone dépigmentée s'élargit par adjonction de matériel membranaire. *Quelques minutes après la formation du sillon dépigmenté,* le potentiel membranaire augmente brutalement, ce qui implique une augmentation de la perméabilité (Woodward, 1968; de Laat et coll., 1973).

— *Dans le cas* d'autres types de cellules animales, on possède fort peu de documents sur leur clivage et, à plus forte raison, sur leur cortex. Buck et ses collaborateurs ont obtenu, en 1962-1964, la preuve que des vésicules

détachées du réticulum permettent l'accroissement de la membrane durant la mitose des Amphibiens ou des Mammifères. Pour Rappaport (1971), les molécules synthétisées dans le hyaloplasme joueraient un rôle important. Le mode de séparation des cellules est très différent de ce que l'on observe dans le cas des œufs : les cellules filles s'éloignent progressivement l'une de l'autre, tandis que la nouvelle membrane se constitue. Cela est particulièrement net dans le cas des fibroblastes en culture (Gray, 1931 ; Hugues et Swann, 1948). Autre point très notable, les asters sont de petite taille. Enfin, dès l'anaphase, on note un « bouillonnement » cytoplasmique *(bubbling)* dont l'existence est assez rare dans le cas des œufs ; ce phénomène est mal connu.

— *Chez les végétaux,* le clivage s'effectue de manière très différente. Les éléments de la nouvelle membrane sont synthétisés au niveau des systèmes cavitaires, puis transportés dans des vésicules golgiennes, qui s'aplatissent, s'alignent puis se soudent, formant ce que l'on nomme le *phragmoplaste,* particulièrement bien développé chez les plantes à fleurs.

Ces faits montrent bien que la mitose peut être extrêmement différente suivant le type de cellule observé.

L'analyse expérimentale de la mitose : radiations et antimitotiques

La cellule vivante est sensible à divers facteurs, physiques ou chimiques. La réaction globale peut être une perturbation métabolique plus ou moins importante ou une dégénérescence totale avec destruction et nécrose des organites. C'est durant la mitose, plus précisément au « début » de la division, que la sensibilité cellulaire est maximale. Certains facteurs vont affecter la synthèse d'ADN durant la phase S prémitotique, d'autres vont empêcher la formation du fuseau, etc. En comparant le mode d'action de différents facteurs utilisés à des moments différents de la mitose ou des synthèses qui la précèdent, il devient possible de disséquer le phénomène et de tenter de l'interpréter.

● *Certains facteurs modifient essentiellement l'équipement chromosomique de la cellule.*

Il peut s'agir de facteurs physiques ou chimiques, dont l'action est maximale durant la phase S (phase de synthèse d'ADN nucléaire).

— Le cas des *radiations ionisantes* est bien connu. Les rayons X et les rayons γ provoquent des aberrations de la disposition des nucléotides de l'ADN ; la cellule subit des *mutations,* et la structure des chromosomes peut aussi être fortement altérée ; les radiations provoquent des *crossing-over,* des *cassures* de chromatides avec délétion de certains éléments qui peuvent, dans d'autres cas, se souder sans ordre sur d'autres chromatides. Les coupes histologiques d'organes irradiés contiennent des mitoses qui sont, très généralement, anormales : on peut ainsi constater des « collages » de chromosomes, ou des cassures ; dans le premier cas, les deux lots de chromosomes anaphasiques ne parviennent pas à se dissocier complètement, et des « fils » de chromatine traînent dans la région interzonale ; dans le deuxième cas, des fragments de chromosomes demeurent également dans cette région, mais sans aucun lien avec le reste de la chromatine, et peuvent aussi être éliminés et rejetés dans le hyaloplasme qui baigne le fuseau. Si les doses sont plus fortes, la mitose ne se fait pas ; quand elle s'ébauche, on constate que les noyaux sont généralement très hypertrophiés, les cellules présentant un aspect « pseudoprophasique » (Bloom). Dans un noyau prophasique, les chromosomes sont souvent hypochromatiques, très hétérogènes, voire vacuolisés. Dans le tissu irradié, la dégradation peut être plus ou moins importante et, en utilisant des doses répétées, il est possible de détruire quasi totalement une portion d'organe sur laquelle on a focalisé le rayonnement. Celui-ci agit indifféremment sur les cellules saines et les cellules tumorales (Bacq et Alexander).

— De très nombreuses substances chimiques, parfois appelées *radiomimétiques,* peuvent avoir des effets semblables. C'est le cas des *ypérites* (Hughes et Fell, 1949 ; Sentein, 1955-1957, etc.). Comme dans le cas des radiations ionisantes, si la lésion mitotique n'est pas trop intense, les cellules filles se forment et présentent une structure nucléaire aberrante. Chacune d'elles peut contenir plusieurs noyaux qui correspondent aux différents « paquets » de chromosomes, dont la migration a été normale ou non ; les « micronoyaux » peuvent être nucléolés. Divers *alkylants* à propriétés mutagènes peuvent avoir le même type d'action ; c'est le cas du myleran, étudié par Chèvremont et ses collaborateurs (1959), ou de la sarcolysine (Bassleer et Desaive, 1971).

— Le cas des *antimétabolites* est un peu différent : ces substances introduisent des perturbations dans la synthèse de l'ADN, et, secondairement, à l'anaphase empêchent les chromosomes de migrer normalement. Dès 1954, Jacobson ainsi que Benitez et ses collaborateurs avaient montré que les antifoliques bloquent la mitose en moins d'une heure ; or, le temps qui sépare S de la métaphase est toujours nettement plus long ; on peut donc en déduire que les antimétabolites agissent aussi sur le mécanisme de migration chromosomique de l'anaphase. Selon Biesele, le mouvement serait inhibé par un trouble initial des synthèses d'ATP nécessaires pour l'activation du fuseau ; l'atteinte initiale serait mitochondriale. Cela montre à quel point il est difficile de juger précisément du mode d'action d'un antimitotique.

Depuis plusieurs années, divers antimétabolites sont utilisés en chimiothérapie anticancéreuse ; on estime en effet que les cellules tumorales ont une susceptibilité particulière vis-à-vis de ces substances (Biesele, 1961). Cela tiendrait au fait que le caryotype des cellules tumorales est généralement bien différent de celui des cellules normales homologues et que, de toute manière, la population de cellules d'une tumeur est hétérogène, le caryotype de chacune des cellules étant très variable (Hauschka, 1958 ; Biesele et coll., 1959, etc.). On pense que, dans ces conditions, les antimétabolites peuvent agir différemment sur les cellules normales et tumorales. L'utilisation d'antimitotiques pour un but thérapeutique est toujours une affaire délicate : chaque type de tumeur possède des caractères qui la rendent sensible à telle substance plutôt qu'à telle autre ; l'hétérogénéité est si poussée qu'une tumeur de même nom peut réagir de façon différente d'un individu à l'autre. Il faudrait donc « tester » préalablement la sensibilité de fragments de la tumeur, maintenus en culture *in vitro,* vis-à-vis d'antimétabolites ou de radio-mimétiques ; on serait alors en mesure de choisir le traitement approprié (Bickis, Henderson et Quastel, 1966). Les faits montrent que des agents antimitotiques peuvent agir préférentiellement

▼ **Cycle d'une cellule *en culture (fibroblaste de poulet). Noter la longueur de la phase de synthèse de l'ADN qui dure 4 à 5 heures ; ensuite, la cellule reste « en attente » pendant plusieurs heures avant de se diviser (d'après Bassleer).***

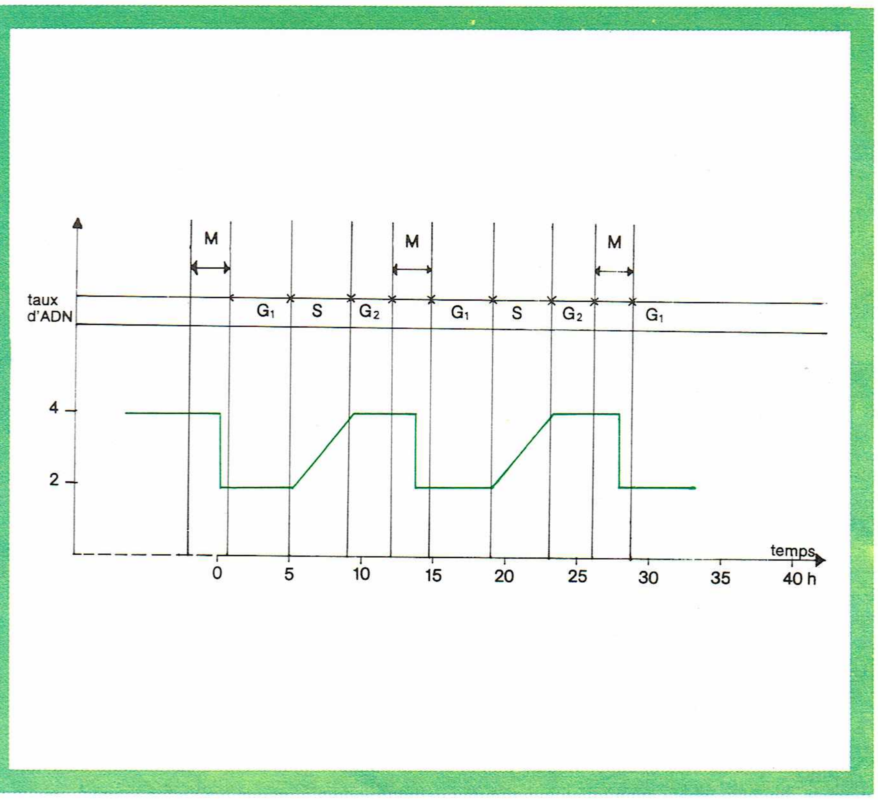

Richard Colin

sur des cellules tumorales, donc sur *certains types de chromosomes* plus ou moins anormaux. L'efficacité des antimétabolites dépend aussi de *conditions enzymatiques :* les cellules tumorales sont souvent plus pauvres en enzymes; si des enzymes du catabolisme des purines, des pyrimidines ou des amino-acides aromatiques viennent à manquer, il est bien évident que les antimétabolites, qui sont des analogues de ces corps, ne seront pas détruits dans les cellules tumorales appauvries (Baker, 1959).

— Comme Sentein l'a bien mis en évidence, en 1961, dans ses expériences sur l'œuf d'Urodèle, la plupart des agents chimiques qui lèsent les chromosomes peuvent aussi modifier l'activité de l'appareil achromatique. L'effet sur l'ADN peut être mesuré. Chèvremont et ses collaborateurs ont montré, par dosage cytophotométrique, l'intensité des dégâts causés par le DG 428 de Bayer; cet antimétabolite est utilisable sur divers types de cellules tumorales (Westphal et Bierling, 1959); Chèvremont a constaté que, *in vitro,* la réaction de Feulgen devient quasi nulle après quelques jours de traitement. Selon Bassleer et Chèvremont (1973), il resterait cependant des ADN nucléaires, mais ceux-ci seraient profondément anormaux.

— Par contre, certaines substances, fort nocives pour la mitose, peuvent augmenter considérablement la teneur en ADN des cellules traitées. C'est le cas du myleran (Chèvremont et Bassleer, 1968), avec lequel des fibroblastes en culture deviennent octoploïdes ou hexadécaploïdes (16 *n*). Les cellules, bien qu'énormes, peuvent demeurer viables, ce qui, évidemment, est un inconvénient fondamental pour l'utilisation thérapeutique du produit en question. Des effets de même nature sont également observés avec d'autres corps (la mitomycine C, le melphalan, la sarcolysine, la daunomycine ou l'actinomycine D). Cela montre que l'utilisation de tel ou tel antimitotique doit être précédée d'un grand nombre de recherches destinées à évaluer, dans différentes conditions, et parfois avec des matériels biologiques très inattendus, quels peuvent être les effets *majeurs* et *mineurs* du produit. On utilise maintenant des « cellules-tests » de nature très variée : fibroblastes, souches tumorales (cellules *Hela*) connues dans le monde entier, épiderme de la queue de triton, épiderme de souris, œuf d'Amphibien, plasmodes de Myxomycètes, Algues unicellulaires, etc. L'œuf d'ascidie peut également être un bon matériel (Reverberi; J. et C. Bouchard).

— Un certain nombre de substances peuvent provoquer des aberrations nucléaires qui ne sont pas toujours évidentes. Les résultats sont moins spectaculaires que dans les cas précédemment évoqués; les effets se traduisent par une impossibilité, pour les cellules, d'entrer en mitose. Hughes et l'équipe de Chèvremont ont ainsi pu constater que des corps de nature très différente provoquaient des inhibitions des synthèses d'ADN, d'ARN ou des protéines qui leur sont associées. Le blocage se fait durant la phase S du cycle ou en « post-synthèse » (G_2); en effet, la formation de l'ADN et des protéines basiques (histones) s'effectue parallèlement, ce qui n'est pas le cas des protéines acides, synthétisées durant une bonne partie du cycle de la cellule. Comme la chromatine, le nucléole est très sensible. Fait remarquable, les mitochondries des cellules traitées montrent souvent des aberrations structurales; en particulier, leur ADN devient franchement décelable par la réaction de Feulgen; quant à l'importance de telles perturbations, observées depuis 1953 dans le laboratoire de Chèvremont, il sera impossible de la mesurer tant qu'on ne connaîtra pas les rôles précis de l'ADN mitochondrial.

● *Il existe des substances dont l'action antimitotique primitive est de désorganiser l'appareil achromatique.*

La **colchicine** est une des substances antimitotiques les plus anciennement connues. Pernice, en 1889, constata qu'une décoction du colchique *(Colchicum automnale)* pouvait provoquer une augmentation très importante du nombre de métaphases observables dans l'épithélium du tube digestif. Dustin, en 1934, tenta d'approfondir la question et suggéra que la substance pouvait provoquer *l'apparition de nouvelles mitoses;* comme l'effet du colchique était extraordinaire, il y avait tout lieu d'entreprendre une étude précise de cet excitant mitotique. Or, peu de temps après la caractérisation de l'alcaloïde responsable, Dustin et son équipe se rendirent compte que la colchicine a seulement pour effet de *bloquer les mitoses en métaphase,* celles-ci s'accumulant ainsi dans les organes traités; le processus est qualifié de *stathmocinèse.*

On a d'abord pensé que la colchicine ne modifiait pas la prophase. De fait, en 1952, en cinématographiant des cultures de tissus, Bucher vit que la prophase n'était pas nettement perturbée. Mais de fortes doses provoquent un retour en arrière des prophases (Eigsti, 1949) ou, dans certains cas, en fin de prophase, un blocage extrê-

***▼ A gauche, œuf d'Urodèle traité par la* triéthylène mélamine *(TEM). Les chromosomes sont fragmentés et migrent anormalement durant l'anaphase; l'appareil achromatique ne subit pas de modifications notables (coloration de Flemming; en rouge, les grains de vitellus). A droite, formule développée de la* colchicine.**

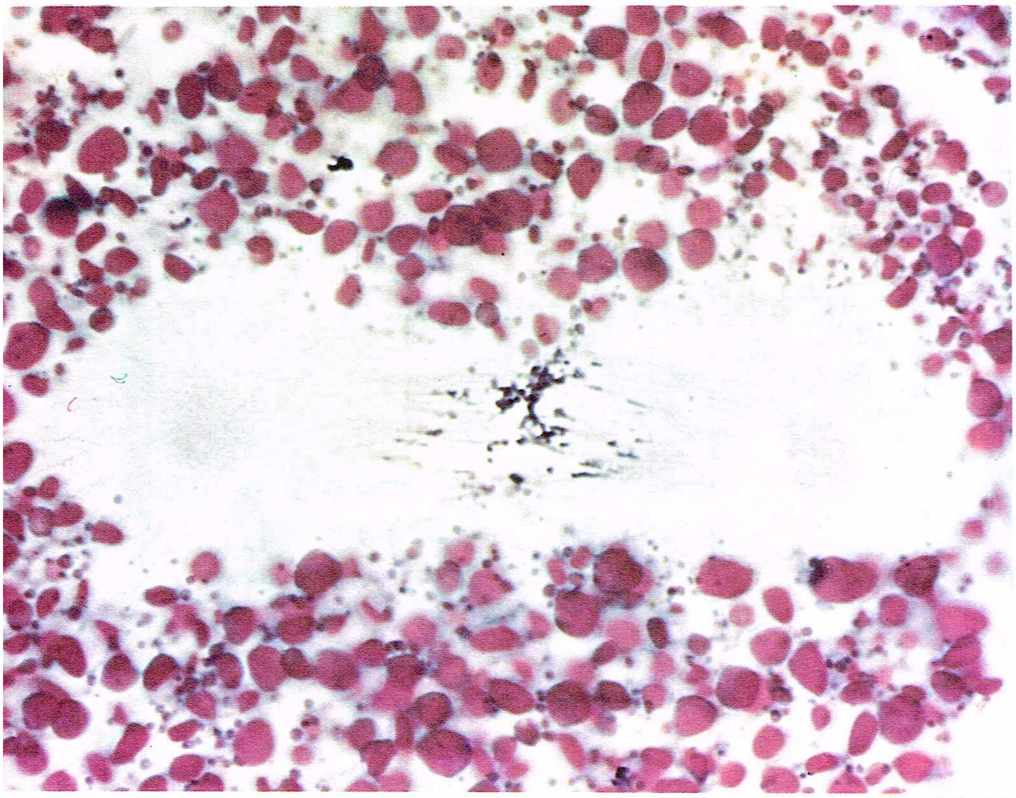

P. Sentein

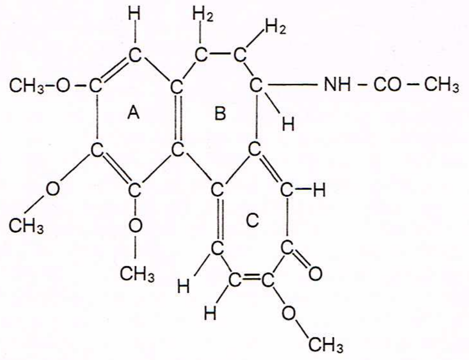

Structure de la colchicine (selon Loudon)

Richard Colin

mement spectaculaire (Delcourt, 1938). Pour Dustin Jr. (1955), la colchicine ralentit l'anachromase; cela est évident dans le cas des cellules épidermiques de la souris (Bouchard et May, 1963 et 1966).

Dès à présent, il faut signaler que les résultats sont nettement différents suivant le matériel biologique utilisé. L'effet de la colchicine peut être, selon le matériel, la température et la concentration, plus ou moins marqué au niveau de la métaphase. En 1951, Gaulden et Carlson, en faisant agir cet agent sur des cellules nerveuses de sauterelle, mirent en évidence trois types d'anomalies structurales : les fortes concentrations (50 à 25×10^{-6} M) provoquent un retour des prophases à l'état quiescent; aux alentours de $2,5 \times 10^{-6}$ M, les chromosomes sont excessivement contractés puis se groupent sans ordre et peuvent former des amas, vaguement subsphériques *(métaphases en boules)*; ou bien encore, ils se dispersent dans la cellule *(métaphases explosées)*. De toute manière, *ni le fuseau ni les asters n'apparaissent dans ces cellules;* vers $1,9 \times 10^{-6}$ M, la colchicine permet la formation d'une plaque métaphasique *(métaphases en étoiles)*, et, cette fois, une partie de l'appareil achromatique peut se former : les fibres chromosomiques sont bien apparentes. Ces types d'anomalies se retrouvent dans presque tous les tissus des êtres vivants. Un blocage optimal est obtenu, chez les Mammifères, par une dose de 1 mg/kg (Brues, 1951), et les effets sont observables 8 à 10 heures après injection du produit. (Ce temps peut varier suivant les tissus : 7 heures sont nettement suffisantes pour l'épiderme de la souris.)

Comme on peut le constater par incorporation de colchicine tritiée, la colchicine détruit les microtubules en se fixant sur le stock protéique précurseur (Taylor, 1965). C'est la destruction du fuseau achromatique qui entraîne les aberrations décrites précédemment. Certaines cellules peuvent cependant « passer au travers » : leur division est normale, ce qui prouve que la susceptibilité des cellules d'un même tissu peut être différente; en fait, *il n'y a jamais un blocage complet,* quelle que soit la dose. De plus, une dose trop forte entraîne la pycnose des cellules et la dégénérescence des tissus; la substance antimitotique devient alors cytotoxique, puis toxique pour l'individu (comme n'importe quelle autre drogue utilisée à dose excessive). L'action d'un antimitotique doit être étudiée avec les concentrations optimales, qui ont été bien établies avec attention (Brues 1937-1951; Lits, 1936; Sentein, 1940-1961).

J. Bouchard

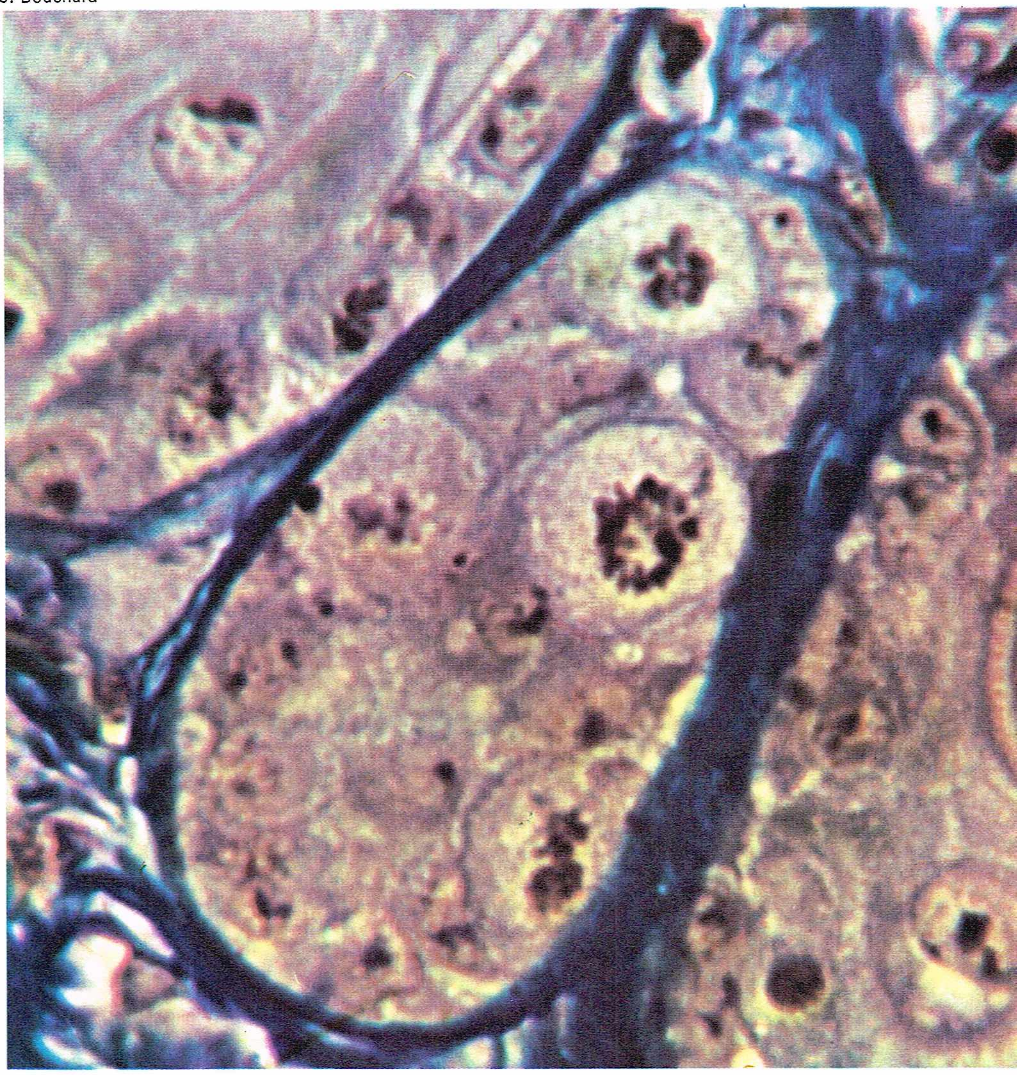

▲ *Cellules épithéliales de follicules pileux en régénération; coupe de peau de souris, coloration topographique, colchicine 1 mg/kg. On observe dans les tissus en croissance une accumulation de mitoses dites en étoiles lorsque la concentration de l'antimitotique est faible ou lorsque les cellules sont résistantes.*

J. Bouchard

◀ *Dans les cellules épithéliales de follicules pileux normaux, la colchicine provoque l'accumulation de métaphases en boules (colchicine 1 mg/kg; coupe de peau de souris; coloration topographique).*

▶ *Œuf de pleurodèle en deuxième division de segmentation ; au début de la prophase, on observe des déformations considérables du noyau ; les fibres fusoriales continues commencent à se former ; la coloration (safranine-bleu de méthyle) met en évidence les grains de vitellus (rouges) et les fibres « achromatiques » (bleues) ; la chromatine est encore assez diffuse (bleu violacé).*

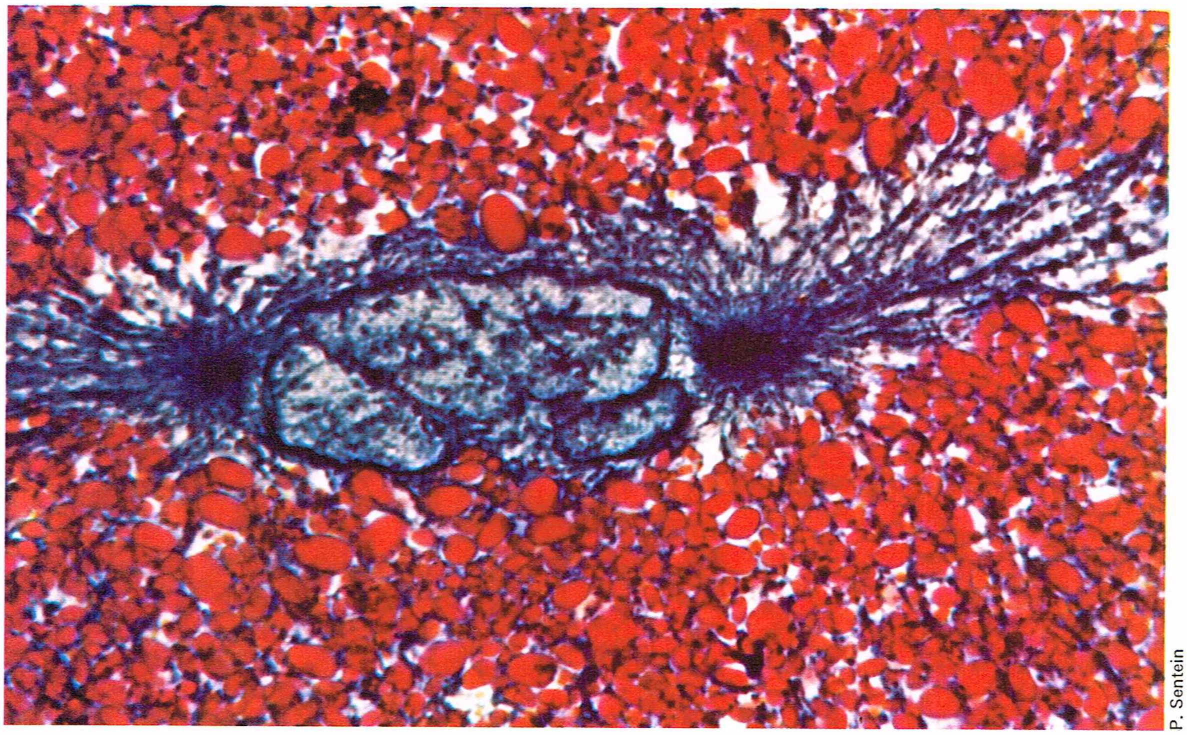

P. Sentein

Après action de la colchicine, les chromosomes peuvent être observés sans préparation ou après écrasement de la cellule. On constate qu'ils sont typiquement métaphasiques, voire anaphasiques, puisque les chromatides sont totalement séparées : on parle de *bimétaphases*. Ce caractère est particulièrement net chez les végétaux. Les effets de la colchicine sont lentement *réversibles ;* aussi est-il possible, dans certains cas, d'obtenir une reconstitution du noyau sans plasmodiérèse (on a donc une cellule tétraploïde) ; *la polyploïdie* peut être ainsi obtenue expérimentalement, au moins chez les plantes. Chez les animaux, on peut « fabriquer » des œufs polyploïdes, mais il y a ensuite une régulation du nombre des chromosomes de l'embryon. La dégradation du matériel achromatique déjà structuré ne se produit pas de façon quelconque. La colchicine agit d'abord sur les fibres astériennes, puis sur les fibres continues du fuseau ; enfin, les fibres chromosomiques sont détruites. Cette destruction se fait par fragmentation des microtubules ; le microscope électronique permet de voir que les fragments gonflent puis se fondent dans le hyaloplasme, où leur accumulation peut conduire à la formation d'un *globule hyalin,* parfaitement visible dans les neuroblastes de sauterelle (Gaulden et Carlson) ou les cellules d'*Allium*. Des modifications de même nature peuvent apparaître durant le développement de l'oursin *Arbacia*.

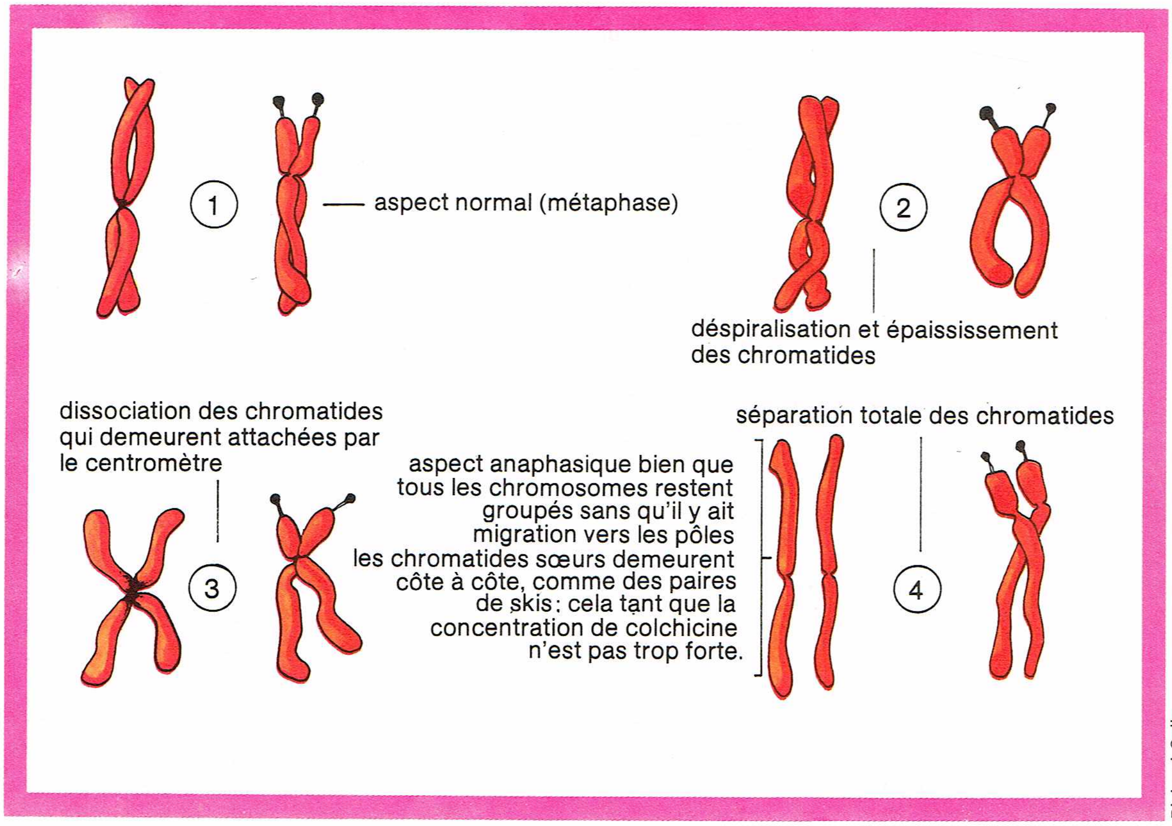

Richard Colin

▶ ***Évolution de deux chromosomes végétaux d'une cellule traitée par la* colchicine (Allium) [*d'après Levan*].**

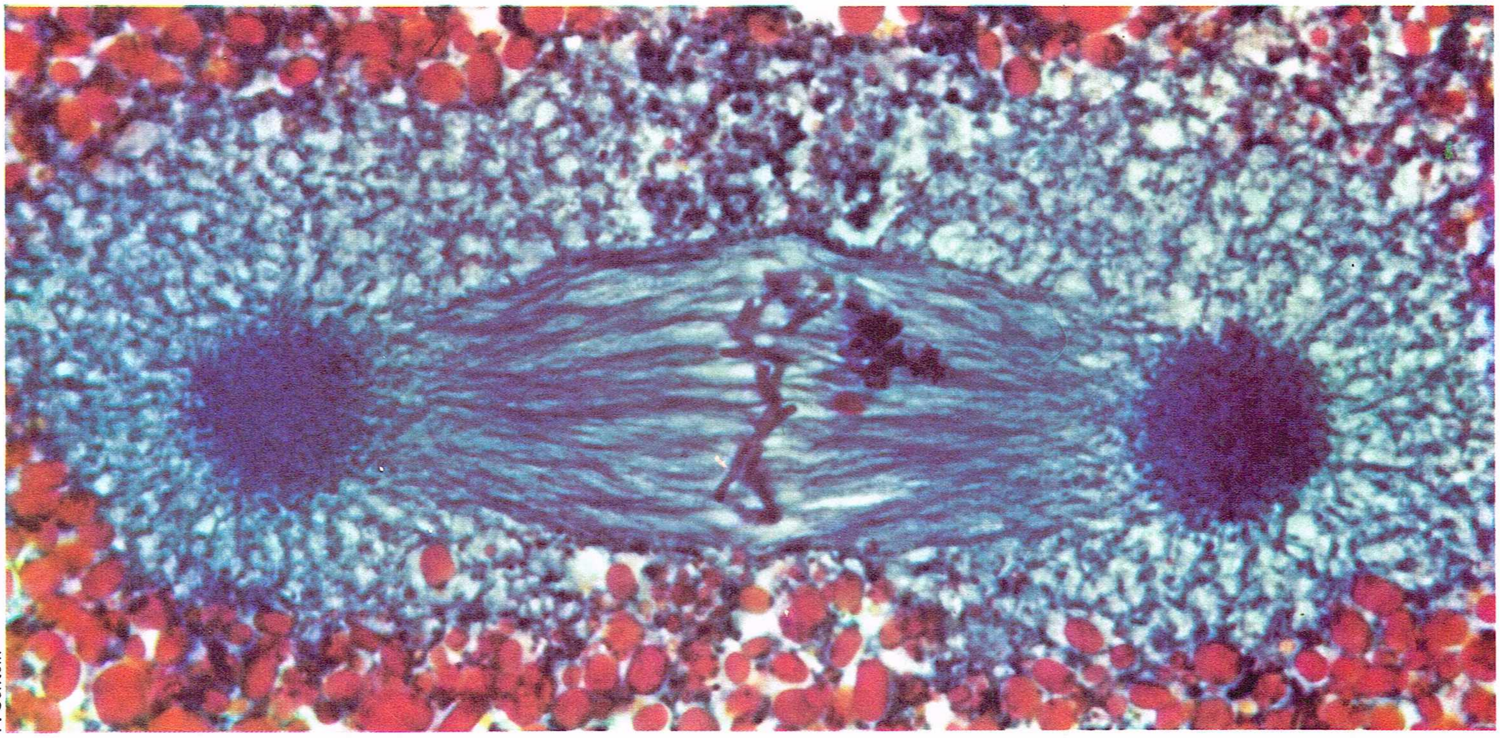

P. Sentein

▲ ***Œuf de triton en* métaphase de 2e division de segmentation**
(coloration safranine-bleu de méthyle) :
les fibres astériennes sont peu développées ;
les fibres fusoriales sont au maximum de leur développement ;
les chromosomes (violacés) sont disposés en plaque équatoriale.

En utilisant l'**acénaphtène,** substance mille fois moins active que la colchicine, Levan est parvenu, en 1954, à une analyse très précise de ces phénomènes. Il semble que le mécanisme soit le même avec différents types d'agents « antifusoriaux ». Les résultats obtenus avec les *mitoses de segmentation de l'œuf* (5 à 6 clivages) sont extrêmement intéressants ; ils permettent une « dissection » des phénomènes de la division. Toutefois, il faut remarquer, avec Chèvremont, que les cellules qui se forment à partir de l'œuf sont fondamentalement différentes des cellules d'un organisme adulte. Les différences portent sur divers points : le rapport nucléocytoplasmique, le contenu en ADN, les activités de synthèse, très inégalement réparties, les enzymes latentes ; de plus, l'embryon des animaux expérimentaux ne prélève aucune nourriture dans le milieu. Enfin, la colchicine est beaucoup moins efficace sur le fuseau durant la segmentation. Quoi qu'il en soit, l'étude de l'œuf d'Urodèle est des plus instructives. Sentein, dont les observations sont absolument fondamentales, utilise ce matériel depuis 1947.

Il faut décrire rapidement la mitose de segmentation. Tout d'abord, soulignons le fait que les asters sont visibles durant toute la segmentation. Entre la fin de la première télophase et la fin de la prophase suivante, le noyau subit l'influence des pôles ; il se déforme, tourne de 90°, ce qui est en liaison avec la disposition du futur plan de clivage, puis prend une forme de galette, entre les pôles astériens ; en même temps, *les fibres fusoriales naissent et se développent considérablement, tandis que les fibres astériennes tendent à se raccourcir*. Il y a, durant la segmentation, une *alternance de croissance et de régression des asters et du fuseau*. Ce mécanisme n'est plus apparent quand l'embryon s'organise ni, à plus forte raison, chez la larve et l'adulte. C'est donc là un aspect de la mitose assez caricatural mais extrêmement utile pour l'expérimentateur. L'appareil achromatique « n'a pas seulement une fonction nucléaire, mais aussi une fonction d'organisation architecturale du cytoplasme et de la membrane » (Sentein, 1961).

Suivant le moment où il a fait agir l'antimitotique, Sentein a obtenu deux types de résultats avec l'œuf de *Triturus helveticus* traité par le **phényluréthane.**

Dans le premier cas, la *fibrillogenèse interne* (fusoriale) est inhibée : dans le second, il n'y a pas de *fibrillogenèse externe* (astérienne). Le fait que dans les deux cas le nombre des centrioles soit nettement augmenté montre que l'inhibition exercée par l'antimitotique sur les microtubules astériens ou fusoriaux provoque une libération plus ou moins intense des centrioles, lesquels tendent à se *multiplier anarchiquement*. Dans la cellule normale, la formation de microtubules inhibe cette tendance des pôles à la multiplication anarchique (1962). En somme, *la tendance naturelle du hyaloplasme est de fibriller :* si l'on empêche la formation des microtubules de l'appareil achromatique, ce sont les *microtubules des centrioles* qui se multiplient ou qui peuvent même se former n'importe où, peut-être *de novo*, à partir du *stock de protéines microtubulaires* (SPM) non polymérisées.

▼ ***Représentation schématique de* deux effets d'un antimitotique**
obtenus par traitement de l'œuf de triton :
dans l'expérience A, les cellules sont traitées alors que le fuseau se forme ;
dans l'expérience B, les cellules sont traitées
alors que les asters se développent (d'après un travail de Sentein
sur le* phényluréthane, *moins brutal que la colchicine).

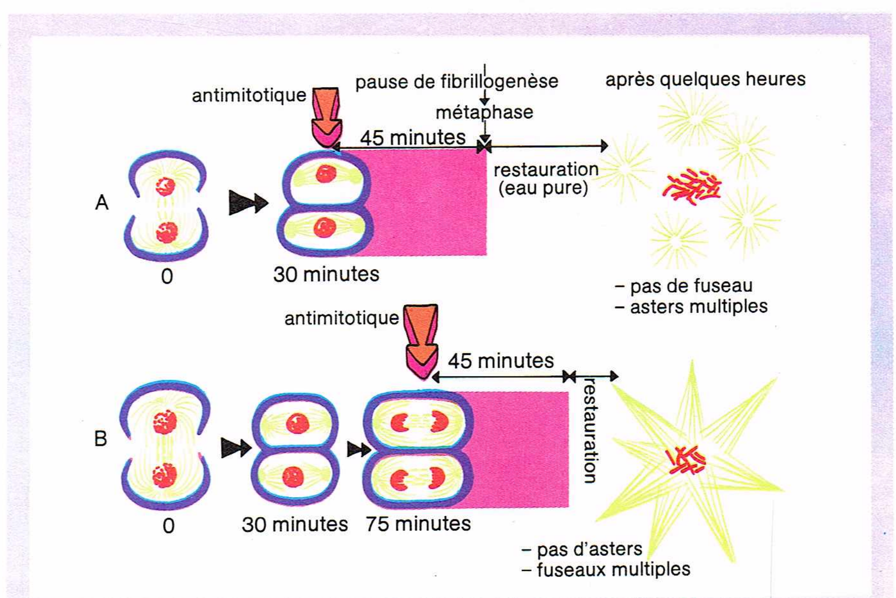

Richard Colin

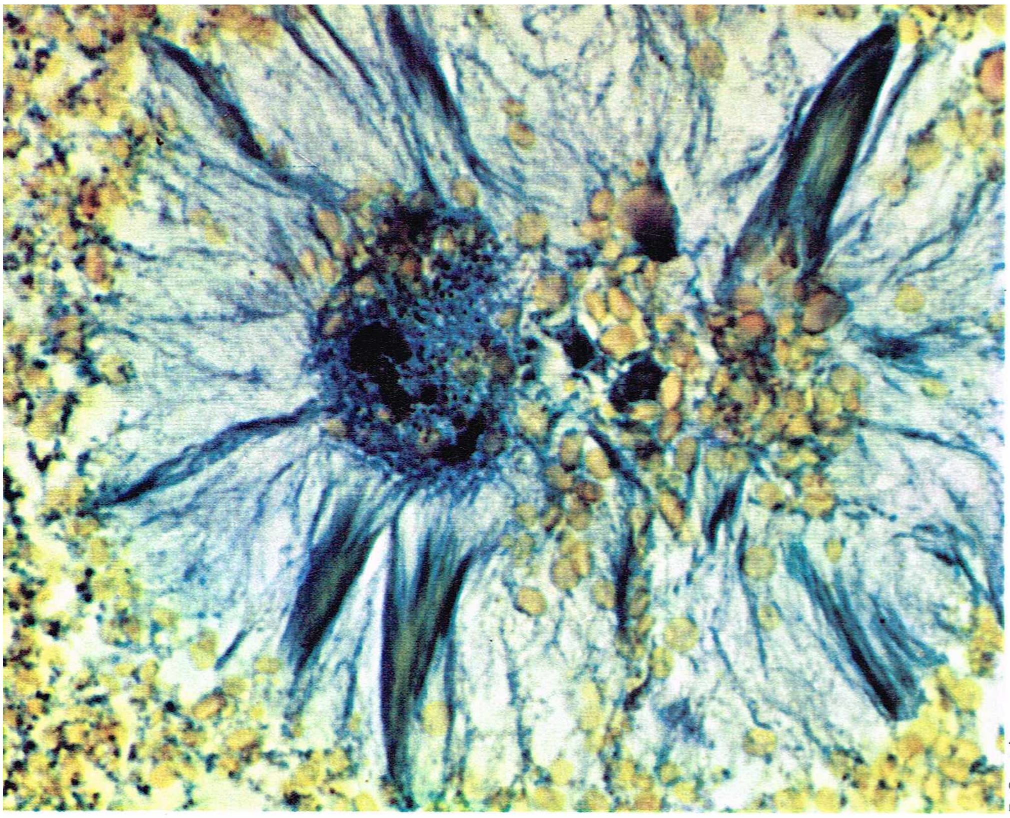

P. Sentein

En faisant agir l'*acide butyrique,* qui tend à perturber la polarité sans empêcher la formation de MT (microtubules), on obtient des cellules dont l'aspect diffère suivant le moment où l'antimitotique a été appliqué, mais qui, dans tous les cas, sont abondamment pourvues de pôles anarchiques et de longs microtubules (Sentein, 1968).

Sentein est parvenu à montrer comment ces antimitotiques perturbent le *clivage*. En effet, les « antifusoriaux » tels que la colchicine, l'acénaphtène, le phényluréthane ou l'acide butyrique empêchent aussi la formation du sillon de clivage. Il a observé que, durant la segmentation normale, il se forme, entre les deux lots de chromosomes anaphasiques, plus précisément à l'équateur du fuseau, une *zone claire,* ou *diastème,* qui, après la régression des fibres fusoriales, acquiert une structure fibrillaire secondaire. Cette fois, les MT sont transversaux. Ce diastème s'accroît vers la phériphérie, vers le cortex de la cellule, et les microtubules semblent destinés à drainer des plaquettes vitellines près de ce cortex. Autrement dit, durant la mitose, il y a un « balancement » non seulement entre la fibrillation astérienne et fusoriale, mais aussi entre la fibrillation de l'appareil achromatique et du diastème. Or, si l'on fait agir l'acide butyrique, la mitose est plus ou moins inhibée, mais, par contre, le diastème se forme, s'accroît, acquiert des microtubules et prend souvent des proportions extravagantes; la disposition de celui-ci étant anormale, le clivage ne se fait pas; la

▲ **Mitose complètement dissociée** ***obtenue après action de l'*acide butyrique** ***sur l'œuf de triton : la chromatine est placée sans ordre (coloration Feulgen, bleu de méthyle).***

▼▶ ***A gauche, si l'on replace les œufs dans l'eau pure après traitement antimitotique, la mitose peut se poursuivre; ici, l'œuf, d'abord traité par l'acide crotonique, donne une image télophasique à trois ou quatre pôles; le matériel achromatique est donc fonctionnel, mais très anormal si l'on en juge par la forme tout à fait aberrante des noyaux reconstitués (coloration safranine, bleu de méthyle, orange G). A droite,*** **mitose multipolaire** ***obtenue après action de l'*acide butyrique** ***sur l'œuf de triton : le matériel « achromatique » est très abondant mais désordonné (coloration Feulgen, bleu de méthyle; les chromosomes ne sont pas repérables sur cette coupe).***

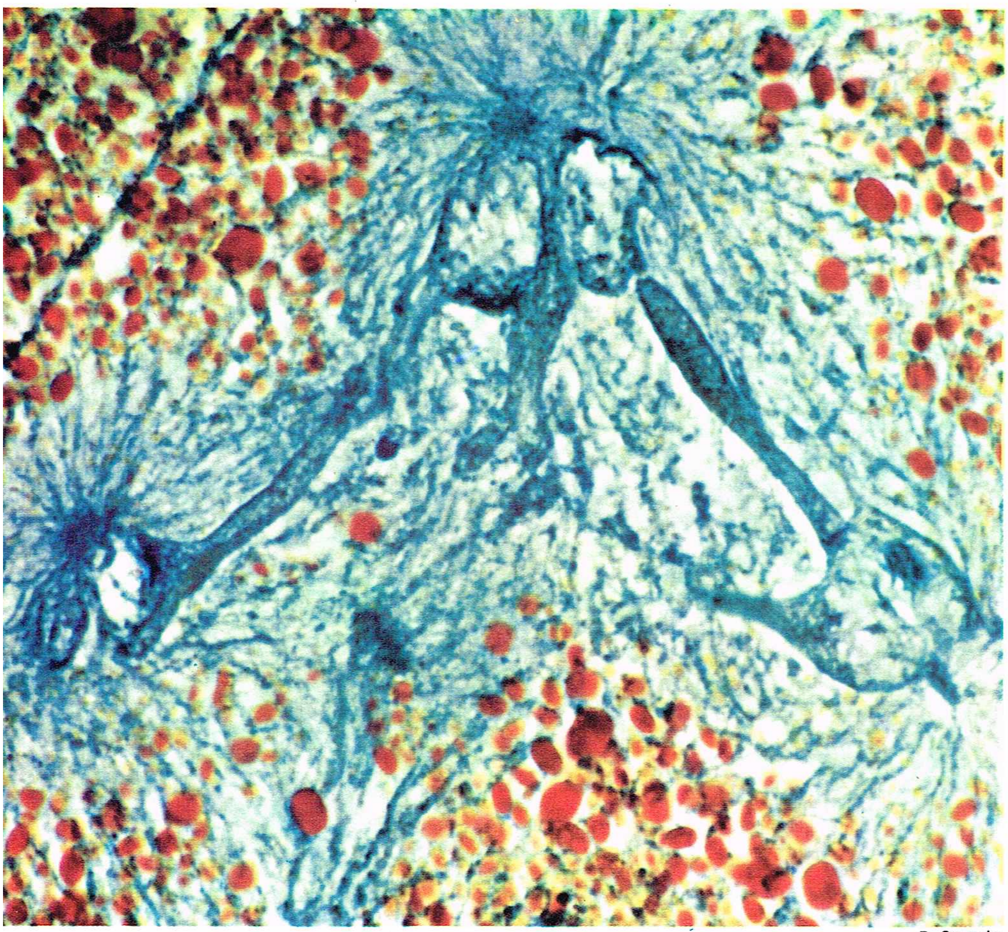

P. Sentein

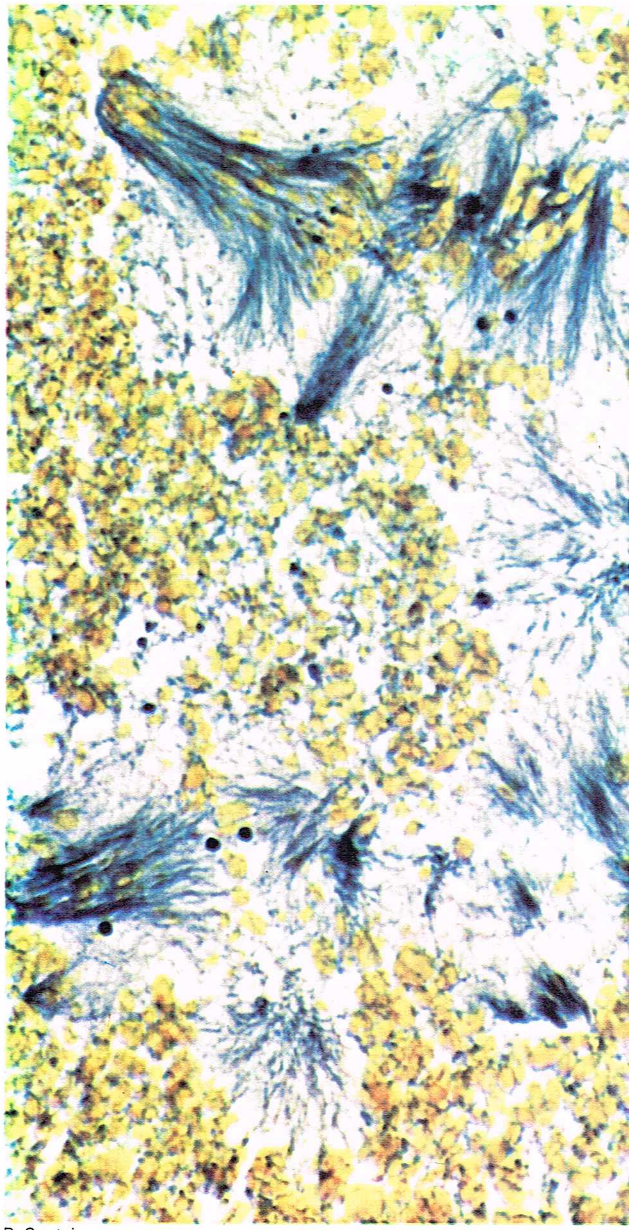

P. Sentein

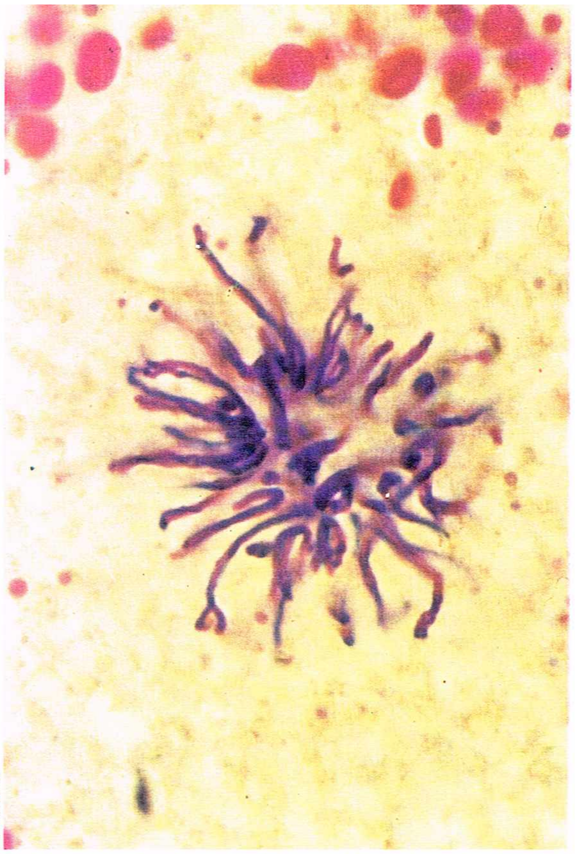

P. Sentein

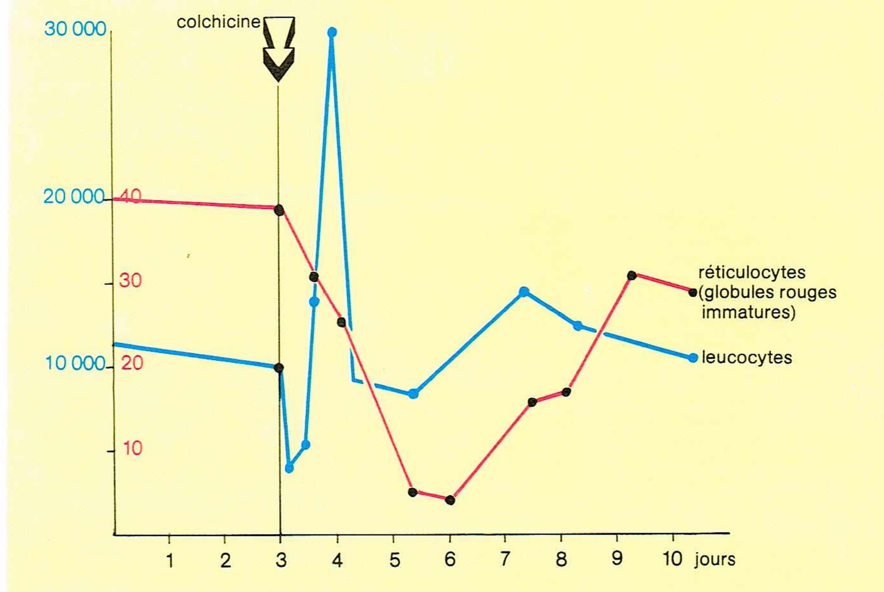

Richard Colin

◀▲ *A gauche, vue polaire d'une* **métaphase en étoile** *bloquée par un antimitotique détruisant l'*ensemble *des microtubules (hydrate de chloral; coloration de Flemming); les chromosomes, manifestement clivés, ne sont pas liés à des fibres nettes.*
A droite; action de la **colchicine** *sur le nombre des cellules contenues dans le sang* **circulant du lapin.** *La chute du taux de réticulocytes (nombre estimé pour 1 000 globules rouges) est très importante; c'est l'indice d'une anémie brutale mais transitoire : les cellules souches sont momentanément incapables de se diviser. La chute est moins nette pour les leucocytes (globules blancs); de plus, elle est suivie d'une brutale augmentation (leucocytose) qui correspond à un « balayage de la moelle » par la colchicine. On notera que les troubles sont intenses mais pas toujours faciles à interpréter.*

cellule demeure totalement indivise ou bien des sillons s'ébauchent, sans pouvoir évoluer; la cellule bourgeonne et prend un aspect perlé. Fait particulièrement curieux, si la fibrillation est, somme toute, moins intense que dans un diastème normal, on trouve, dans la zone claire aberrante, des micro-asters et des hémifuseaux disposés sans aucun ordre. On voit que la mitose normale est le résultat d'équilibres fort complexes et beaucoup plus variés que ce que l'on pouvait imaginer en étudiant seulement l'organisme adulte. En 1968, Sentein concluait à l'existence de mécanismes du type *feed-back :* dans la cellule normale, des circuits de rétroaction maintiendraient, d'une part, la cohérence des deux pôles principaux de la mitose, lesquels sont responsables de la polarisation de la fibrillogenèse, et, d'autre part, la cohérence de l'appareil achromatique et du diastème; ainsi, certains antimitotiques, tel l'acide butyrique, inhibent d'abord le clivage et libèrent l'ensemble achromatique en lui permettant d'entraîner la division nucléaire, laquelle peut se produire plusieurs fois avant que la drogue dépolarise et inactive le fuseau; dans l'œuf normal, la formation des sillons de clivage ralentit et régularise les mitoses de segmentation.

Quelles sont les conséquences de l'arrêt du clivage et des troubles de l'appareil mitotique?

— Un blocage véritablement total du clivage donne naissance à des *œufs plasmodiaux* quand les cellules sont soustraites à l'action de l'antimitotique. Le nombre et la taille des noyaux sont variables. Les centrioles sont d'autant plus nombreux que l'inhibition de l'appareil achromatique a été plus longue. Quant aux noyaux, ils peuvent être *polyploïdes* (en effet, pour des concentrations optimales, *les chromosomes ont pu se cliver plusieurs fois durant le traitement antimitotique*). En somme, en jouant sur la nature de la drogue, sa concentration et la durée du traitement, il est possible d'obtenir une dissociation plus ou moins complète des rapports qui existent normalement entre la fibrillogenèse du sillon, celle des pôles et la duplication des chromosomes.

— Les antimitotiques peuvent produire des troubles importants chez l'individu; l'utilisation de ces drogues est donc toujours délicate. La colchicine provoque des troubles nerveux, avec vomissements, diarrhées et, fréquemment, des hémorragies. Ces effets se comprennent facilement : la substance agit nettement sur les MT des cellules nerveuses (sans les détruire) et bloque l'activité du revêtement intestinal, dont la croissance est normalement continue. Il y a, de plus, un ralentissement considérable de la multiplication de cellules sanguines. Si la colchicine est un antimitotique dangereux, on considère que certains des antimitotiques modernes le sont moins. En fait, la colchicine n'est utilisable que pour le traitement de lésions superficielles, épidermiques (Sentein, 1940). *En revanche, la colchicine s'est avérée extrêmement utile pour l'étude de divers problèmes biologiques.* Si les tentatives pour déterminer, grâce à elle, la durée de la mitose ne sont guère concluantes, elle rend de grands services pour localiser, dans les tissus, les zones d'activité mitosique, ou *foyers prolifératifs*. En effet, l'accumulation des mitoses colchicinées permet de repérer des foyers de prolifération qui, observés sans traitement, pourraient passer inaperçus; les observations sont souvent vérifiées par l'emploi de thymidine tritiée, qui permet de s'assurer que l'accumulation des mitoses est bien la conséquence d'une accélération du rythme mitotique (activation des synthèses d'ADN) et non pas la conséquence d'un allongement démesuré de la durée de la mitose (Iversen, 1962). Dans le domaine endocrinologique, les résultats sont intéressants, mais compliqués du fait que la colchicine paraît agir en synergie avec diverses hormones (Allen et coll., 1937; Dornfeld, 1951;

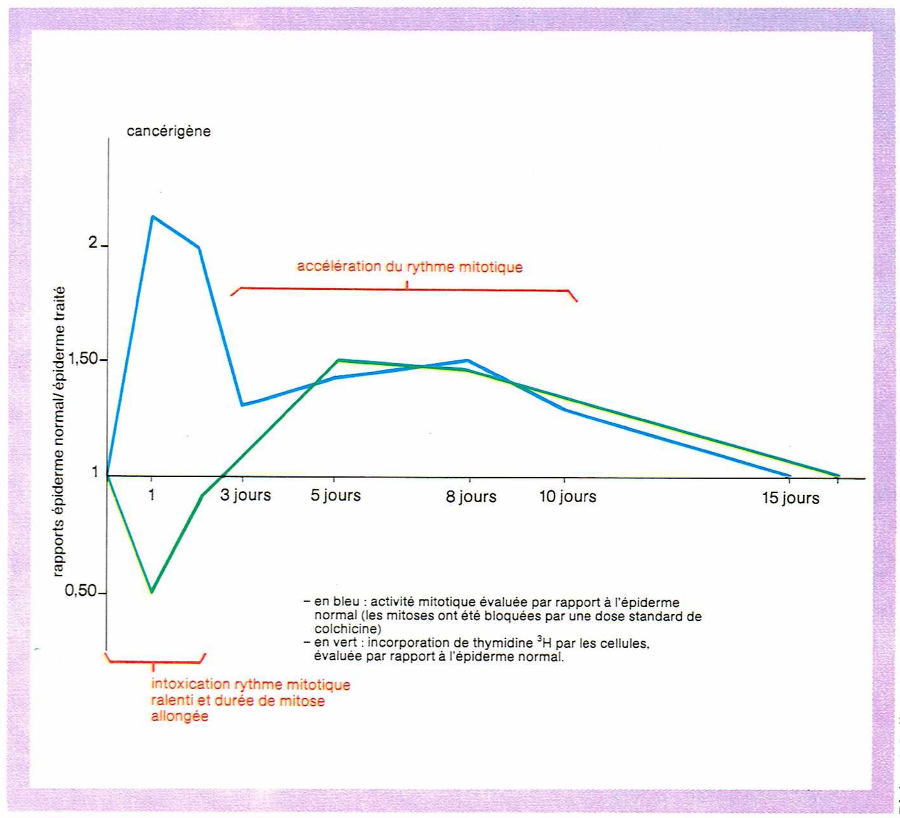

Richard Colin

▲ *Détermination* **de l'activité mitotique réelle** *d'un tissu (épiderme de souris) après un traitement excitateur par un mélange cancérigène (d'après Iversen et Evensen). On observera que peu de temps après le traitement cancérigène (les 2 premiers jours), les cellules sont « choquées », puis elles réagissent ensuite en se multipliant intensément (du 3^e au 8^e jour), ce qui correspond à une forte incorporation du traceur.*

▼ Le phényluréthane *provoque la formation* de mitoses pluripolaires *qui peuvent évoluer quand l'œuf est remis dans l'eau; selon la concentration de l'antimitotique, cette multiplication des pôles peut être intense, mais les fibres astériennes sont réduites (P. Sentein a compté 20 pôles dans cet œuf qui demeure totalement indivis).*

P. Sentein

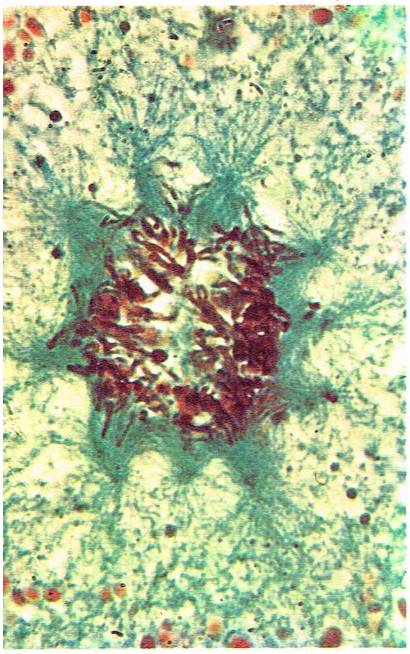

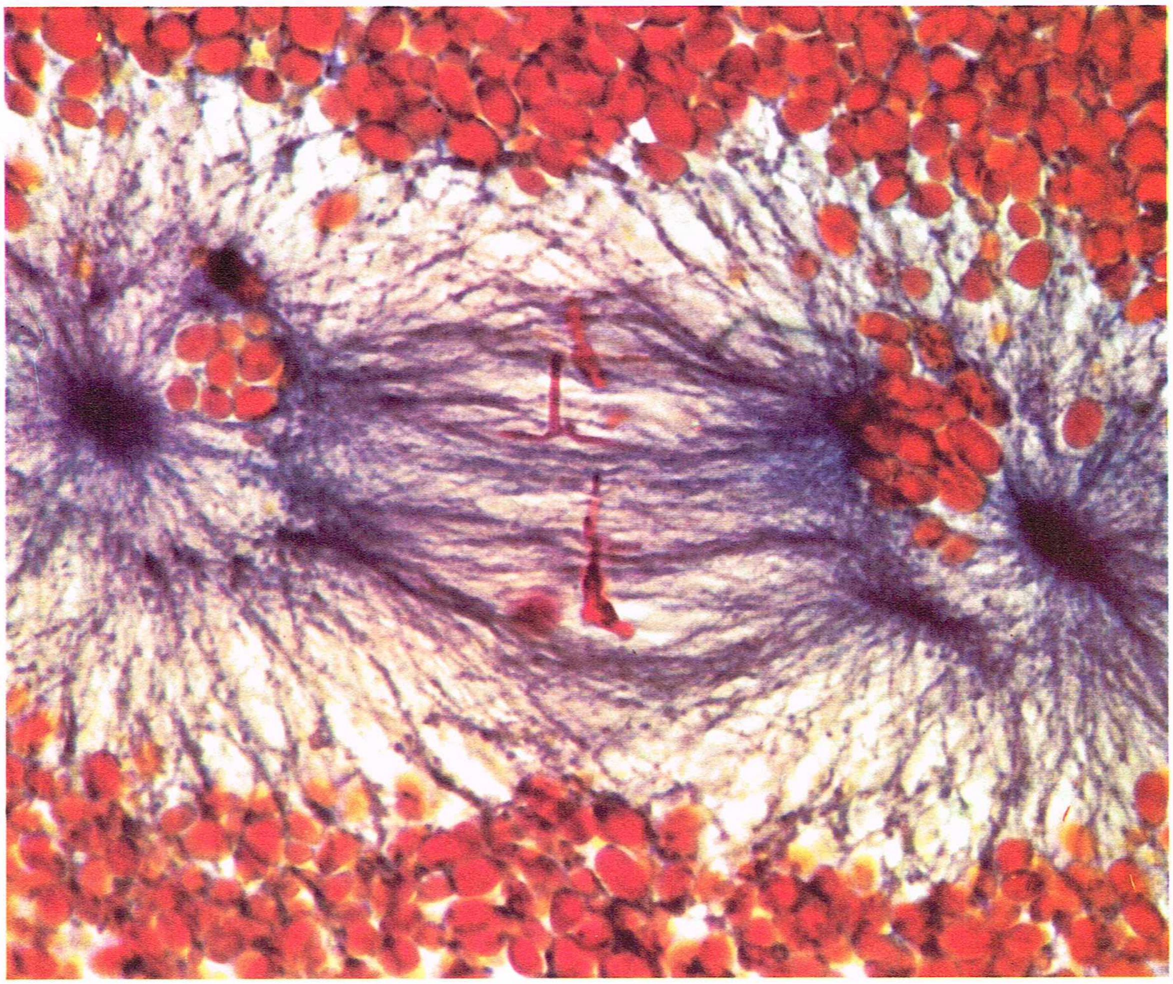

P. Sentein

▶ *De haut en bas, l'action du* dioxyde de sélénium *(M/100)* produit seulement *une* destruction localisée des microtubules. *On voit ici que du hyaloplasme, chargé de grains de vitellus (rouges), prend la place des MT détruits; noter que les chromosomes sont lésés (coloration safranine, bleu de méthyle, orange G). Au milieu, action de la* vincaleucoblastine *sur l'œuf d'Amphibien (au stade morula). Aucune trace de fibres astériennes ou fusoriales n'est visible; les chromosomes sont totalement épars et en nombre excessif (coloration de Flemming). En bas,* anomalie de migration chromosomique *produite par un hydrocarbure cancérigène,* le 3, 4 benzopyrène *(goudrons de houille et fumée du tabac, par exemple). Dans certaines conditions, ce type d'anaphase n'est pas exceptionnel dans l'épiderme ou les follicules pileux traités par cette substance (coloration topographique).*

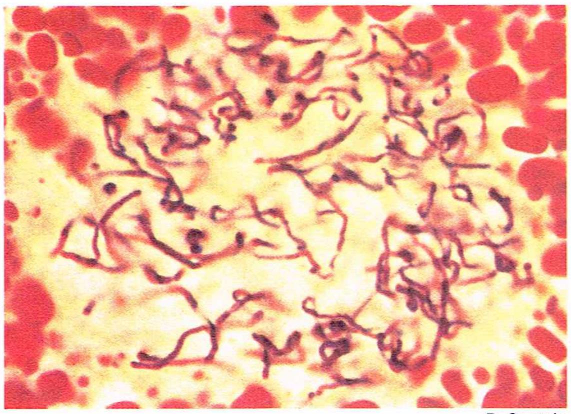

P. Sentein

J. Bouchard

Eigsti et Dustin, 1955). Cette substance a permis, *in vitro*, une analyse précise des conditions de croissance cellulaire, en particulier après stimulation hormonale (nombreux travaux de Bullough et Laurence; Gelfant, 1963, etc.). En outre, la *régénération* tissulaire et la *formation des tumeurs* peuvent être mieux étudiées en employant la colchicine durant l'expérimentation (Ancona, 1942; Dustin Sr., 1936-1943; Lüscher, 1946; Herlant, 1948; Dustin Jr. et coll., 1961, etc.). Cependant, au sujet de la tumorigenèse expérimentale, Dustin Jr. a noté que cet antimitotique n'avait pas été employé comme on aurait pu l'espérer : certaines études ont été faites sur la peau traitée par des cancérigènes (Dustin, 1938; Bernelli et Zazzera, 1952; Paletta et Cowdry, 1942; Bouchard et May, 1966; Bouchard, 1971), mais cela n'a, semble-t-il, pas été le cas pour la cancérisation expérimentale du foie par les colorants azoïques, ainsi que pour bien d'autres tumeurs.

Outre la colchicine et les substances dépolarisantes déjà citées, on utilise très souvent maintenant les alcaloïdes de la pervenche : la **vincristine** et surtout la **vincaleucoblastine.** Les travaux effectués avec ces substances sont extrêmement nombreux. Leurs effets sur la mitose sont, *grosso modo,* les mêmes que ceux de la colchicine. Notons pourtant que ce type d'alcaloïde peut provoquer des anomalies nucléaires importantes; d'après Bassleer, Parmentier et Desaive (1973), la vincaleucoblastine entraîne, dans certaines conditions, une forte augmentation de la teneur des cellules en ADN et en protéines, ce qui risque de fausser nombre de résultats déjà obtenus.

Brigg, Cornman, Brachet, Lehmann, Gavaudan, Sentein et beaucoup d'autres ont recherché des antimitotiques dépolarisants et mesuré leurs effets sur des matériels très divers. La liste de ces produits serait fort longue. Pour en avoir une idée, on peut se reporter à la revue d'Eigsti et Dustin et aux travaux de Sentein. Signalons, enfin, que divers cancérigènes se sont révélés antimitotiques.

Régulation et déterminisme de la mitose

Avant d'évoquer une régulation et un déterminisme éventuels de la mitose, il faut préciser comment on interprète sa mécanique.

● *La mécanique de la mitose : comment les chromosomes peuvent-ils migrer? Comment peut donc s'effectuer le clivage ?*

— On a commencé, au siècle dernier, par parler d'une « force vitale mitotique » *(sic)*. Passant de la métaphysique à la physique, on a ensuite envisagé une *théorie électromagnétique* (Hartog, Gallardo, Lillie, etc.). De fait, en regardant un film sur la division mitotique de cellules cultivées *in vitro*, on a l'impression que les chromosomes se déplacent comme s'ils étaient attirés par des pôles aimantés. On peut ainsi tenter de réaliser un modèle mitotique en utilisant deux aimants et de la limaille de fer, mais on aura bien du mal à produire des mouvements de limaille pouvant, même de loin, s'apparenter à la mitose réelle! Cependant, on ne doit pas *a priori* éliminer l'éventualité de forces électromagnétiques dont l'action se ferait sentir dans la cellule. N'oublions pas que, vers 1965-1966, on a envisagé que des champs magnétiques puissent perturber la multiplication de cellules cancéreuses, hypothèse qui a entraîné des controverses (Lacassagne; Mathé). Aussi, comme le point ne paraît pas avoir été fait sur la question, il convient d'être prudent au sujet d'une théorie électromagnétique de la mitose. Divers faits prouvent que d'autres forces interviennent en priorité dans ce phénomène.

Avec Van Beneden, on a longtemps pensé que la migration des chromosomes était due à des *propriétés contractiles* des fibres de l'appareil achromatique. En fait, les microtubules qui constituent cet appareil paraissent être des structures dépourvues, par elles-mêmes, d'un « pouvoir de traction ». Mais quel est le rôle des ponts, des « bras », observables tout au long de microtubules métaphasiques (Burkholder et coll., 1972)? Ils seraient contractiles (Mac Intosh, 1969), mais la nature de ces bras serait toutefois différente de ce que l'on observe au niveau des microtubules des cils, des flagelles ou de l'axostyle de Protozoaires. Avec Mac Kinnon et ses collaborateurs (1973), divers auteurs pensent que, dans le cas de l'appareil achromatique, ces bras représenteraient des portions de microtubules à *des stades différents d'organisation*. Dustin, qui paraît douter également de leur pouvoir contractile, met l'accent sur le fait que les microtubules mitotiques paraissent être assez nettement différents de ce que l'on trouve dans des complexes plus structurés : les centrioles, les corpuscules basaux, l'axostyle et les microtubules des cellules nerveuses (1974). Deux points essentiels doivent être précisés pour que l'on comprenne mieux comment fonctionnent les divers systèmes microtubulaires; il faut, d'une part, étudier le *turnover* des protéines de base, puis leur vitesse d'assemblage et, d'autre part, tenter de mieux connaître les protéines et les mucopolysaccharides qui sont, dans certains cas, étroitement *associés* à ces MT.

— La théorie selon laquelle *tous les mouvements mitotiques dépendraient d'une variation locale et réversible de la structure colloïdale* du protoplasme ne manque pas d'intérêt. Nous avons vu que Chèvremont insiste beaucoup sur l'importance des variations de viscosité observées dans la cellule en division; de même, Sentein parle d'une « onde de gélation » qui affecterait successivement les différents points chauds de la cellule. Il semble bien qu'il y ait, durant la prophase des cellules de l'adulte, une compression du noyau par les fibres astériennes et, vraisemblablement, par les fibres fusoriales continues en formation; ensuite, dès la prométaphase, les chromosomes sont repoussés et se trouvent progressivement disposés suivant l'équateur du fuseau. Pour expliquer le mouvement des deux lots de chromosomes anaphasiques, on pourrait envisager aussi l'hypothèse suivante : la portion interzonale du fuseau se gélifierait de proche en proche, repoussant ainsi les chromosomes vers les pôles; en 1974, Margulis a précisé cette hypothèse. Par ailleurs, il apparaît clairement que la formation du sillon de clivage est la conséquence d'une gélification du cytoplasme sub-cortical, mais il semble que le mécanisme précis de l'invagination ne soit pas totalement interprété. La notion de « gélification » n'est d'ailleurs pas claire, puisque ce terme est employé à la fois pour la fibrillogenèse et pour l'augmentation de viscosité du cortex de l'œuf où ne se forment pas de microtubules. On trouve cependant des *microfilaments* de type actine dans le fond des sillons de clivage (Perry et coll., 1971).

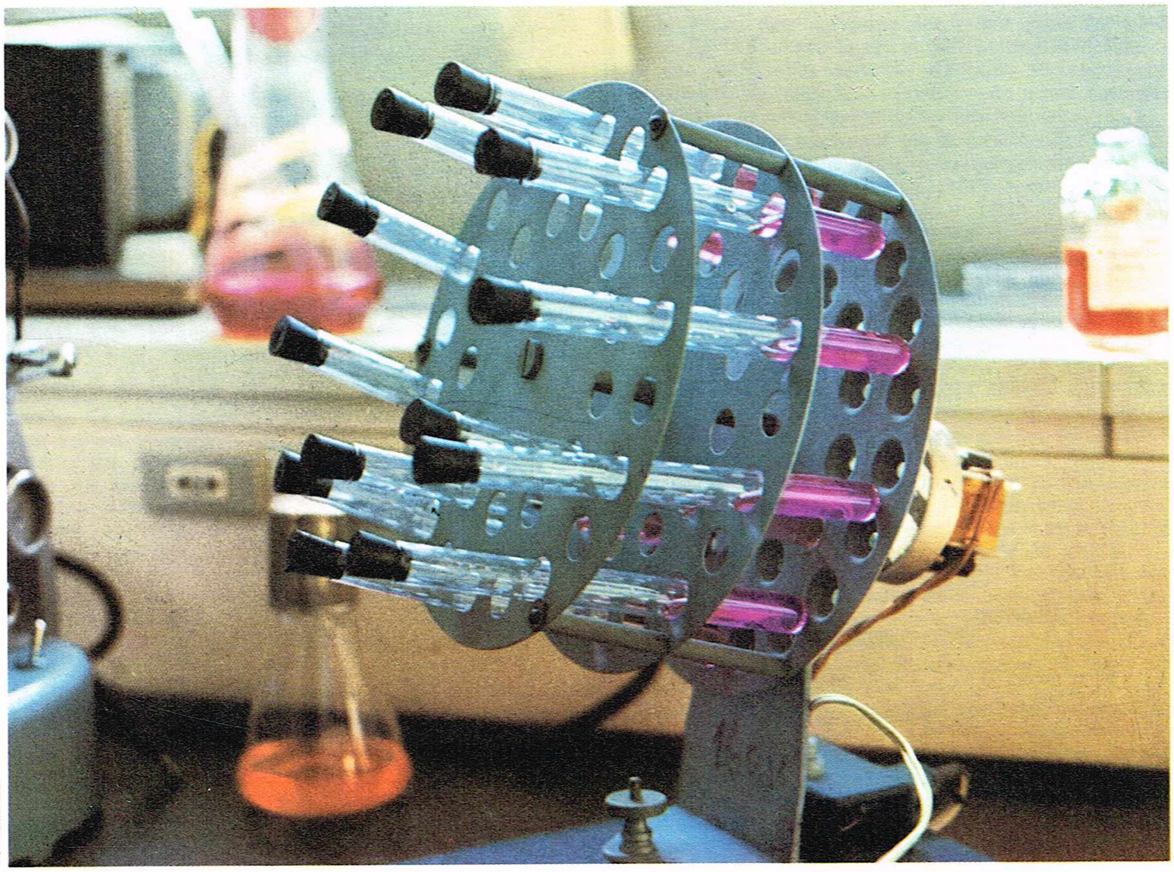

P. Castano

◀ ***La culture de tissus nécessite la confection de milieux nutritifs complexes; ils peuvent être entièrement synthétiques ou enrichis par 5 à 10 % de sérum (veau ou cheval par exemple). On voit ici un tambour rotatif pour culture en « tubes roulants »; le milieu est liquide; l'ensemble du système doit être maintenu dans une enceinte thermostatée.***

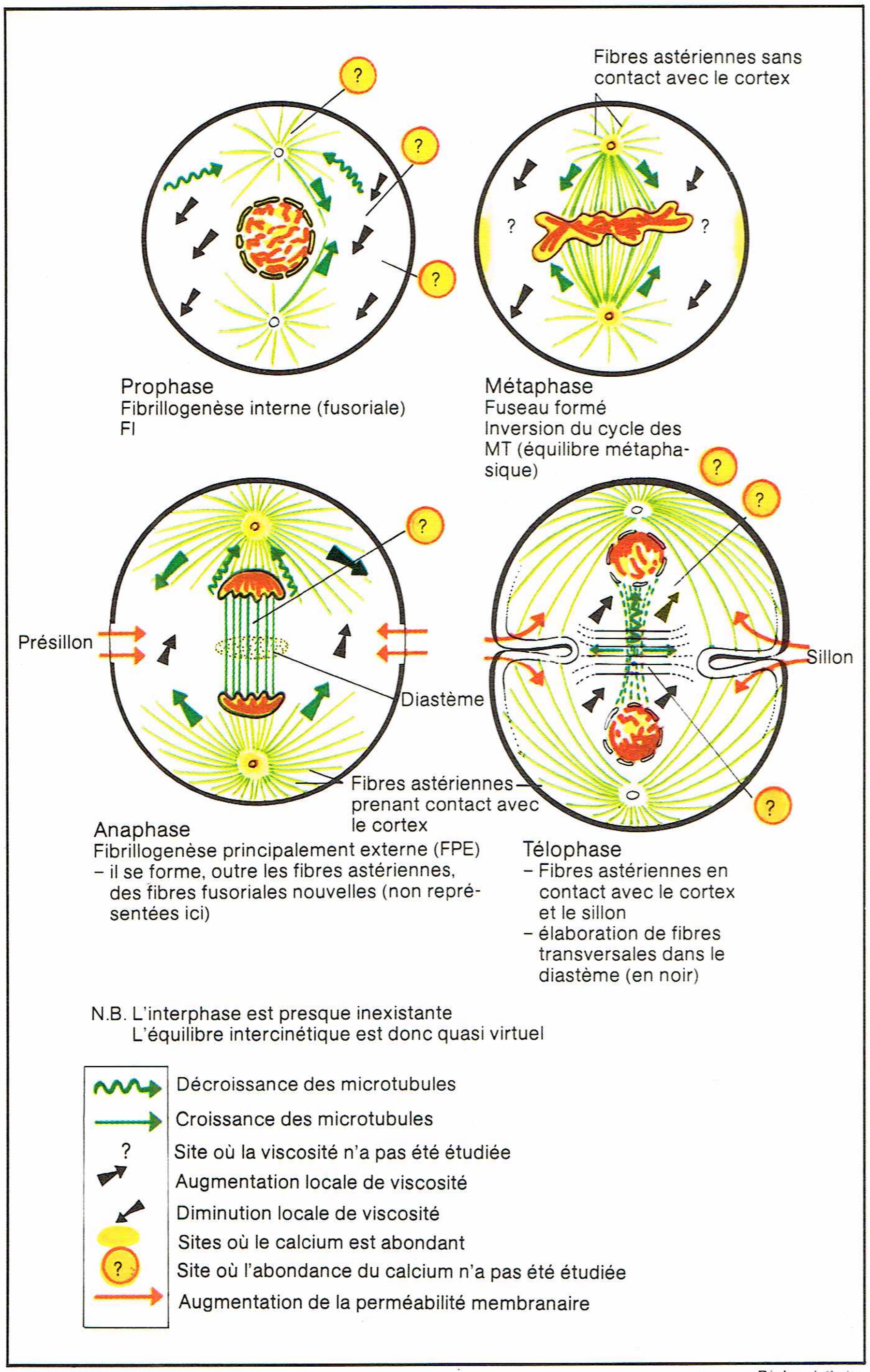

Richard Colin

Comme le diamètre des MT est relativement grand (250 Å), on peut penser que leur lumière joue un rôle particulier ; il ne semble pas qu'à l'heure actuelle on ait envisagé l'existence d'un *flux* d'eau (voire d'éléments minéraux) à l'intérieur des MT. Pourtant il faut rappeler que la viscosité d'une solution colloïdale dépend du pH et de la concentration des divers ions qui s'y trouvent, et que, dans la cellule en division, il existe des points de viscosité fort différente. Or, en chimie des colloïdes, les *phénomènes électrocapillaires* sont d'une grande importance ; ainsi, quand il existe une ddp entre les extrémités d'un tube capillaire, on constate que du liquide se déplace dans le tube *(électro-osmose)*. Enfin, rappelons que les ions Mg^{++} sont indispensables pour la formation des MT, que les ions Ca^{++} jouent un rôle régulateur fondamental (Shelanski, 1973), et que ces mêmes ions *Ca^{++} et Mg^{++} se fixent en abondance sur les chromosomes* durant la mitose, les neutralisent progressivement, *au point que toutes les cendres observées après micro-incinération paraissent être accumulées à leur surface* (Scott, 1930 ; Funaoka et coll., 1930 ; Barigozzi, 1937 ; Williamson et coll., 1944 ; Favard, 1973). D'autres ions pourraient être impliqués : selon Kabat (1967), *divers ions auraient une action sur les histones et la mitose ;* pour Rubin (1972), ou Williams et Lœb (1973), *le zinc serait essentiel.*

De toute évidence, le problème de la *viscosité* doit être lié à celui de la *répartition de l'eau et des cations durant la mitose.* Il conviendrait donc de localiser plus précisément ces ions et de mesurer d'éventuelles différences de potentiel intracellulaires. On pourrait alors vérifier si les phénomènes alternatifs, que Sentein a parfaitement mis en évidence dans l'œuf d'Urodèle, sont en relation avec un *système de pompage et de répartition* de l'eau et des cations de la cellule.

Enfin, Inoué et Sato (1967) estiment que la migration des chromosomes anaphasiques vers les pôles est due à une *dépolymérisation* progressive des fibres chromosomiques ; sans être contractiles, les microtubules entraîneraient les chromosomes durant cette phase de raccourcissement. Sentein a constaté que cette dépolymérisation a lieu après une déformation, un « pelotonnement » des MT qui font alors penser à des « cheveux dont on brûle le bout ». Dans deux mises au point récentes (1972-1974), Dustin estime que cette dépolymérisation est le seul phénomène qui paraisse entraîner la migration anaphasique. Ceci est peut-être excessif.

On le voit, ces théories ne permettent pas encore d'avoir une idée précise de la mécanique du clivage.

● *Régulation de la mitose.*

On sait depuis longtemps que de nombreuses substances modifient le rythme des divisions mitotiques d'une population cellulaire. Il y a des facteurs *accélérateurs* et des facteurs *freinateurs*.

Les facteurs accélérateurs

On pourrait envisager que, dans un tissu, la prolifération soit *entretenue* et *stimulée* par des facteurs produits au sein même du foyer prolifératif, lequel serait susceptible de faire « tache d'huile ». Scribner et Boutwell, en 1972, ont constaté que des tissus en régénération contiennent des protéines particulières, dont certaines sont peut-être des facteurs d'accélération de la mitose.

▲ Mécanique de la mitose et viscosité cytoplasmique (œuf). Le calcium augmente la viscosité du cytoplasme (ex. : Baker et coll., 1972) ; il agit localement durant les différentes étapes de la mitose, mais on ne sait pas très bien d'où il vient : pour Tilney et Marsland (1969), il sort du noyau quand la membrane disparaît (fin de prophase) ; pour Gingell (1970), il vient de l'extérieur ; pour Timourian et coll. (1972), il est libéré par les asters.

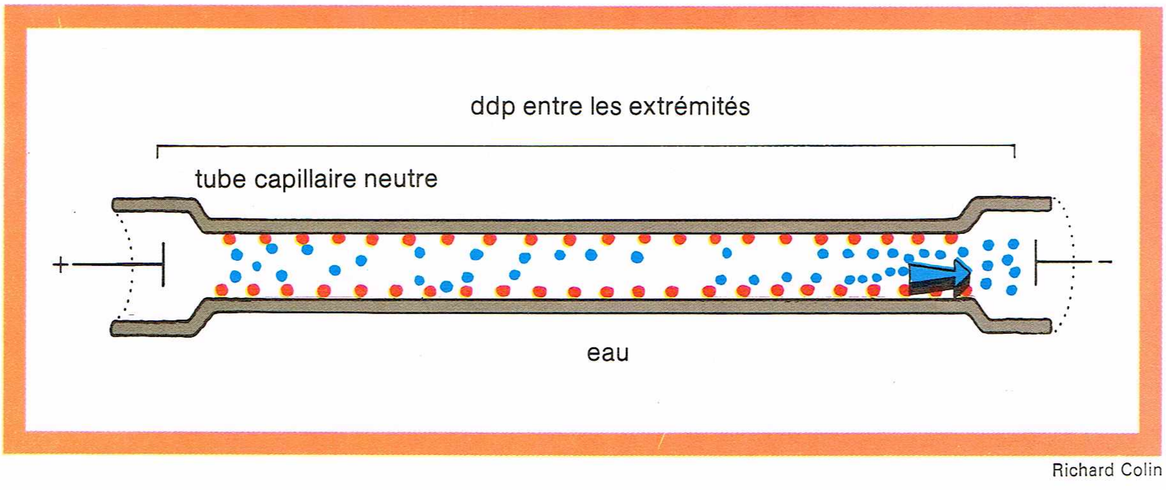

Richard Colin

Dans les tissus tumoraux, on a découvert une glycoprotéine qui pourrait jouer ce rôle (Dufour et coll., 1967 ; Remacle-Bonnet, 1972). Mais, dans l'ensemble, il existe peu d'indications sur de tels facteurs, qui paraissent avoir été peu étudiés.

Dans des tissus lésés, Haberland avait pensé pouvoir mettre en évidence l'existence de *nécrohormones :* celles-ci favoriseraient la prolifération cellulaire, permettant ainsi de compenser la perte de substance vivante entraînée par le traumatisme. Fischer ainsi qu'Éphrussi ont constaté que de tels facteurs mitogènes se développent en culture de tissu quand on enlève une partie de l'explant. Il semble toutefois que l'étude du problème n'ait pas été approfondie.

Quoi qu'il en soit, on sait que des *produits de dégradation des protéines* peuvent accélérer la mitose. Verne et ses collaborateurs, en 1938, ont montré que le *glutathion* a une certaine activité sur des cultures de tissus. Divers auteurs, dont Hammet (1936), ont souligné l'importance des substances *sulphydrilées.* Mais on peut se demander si le renforcement de l'activité mitotique est dû à une action directe ou à une « simple » amélioration du milieu nutritif. Selon Fischer (1950), les acides aminés sont apparemment peu efficaces, alors que les peptides et les polypeptides favorisent la division ; il y aurait selon cet auteur une action directe de ces molécules sur la mitose. En 1973, Melbye et Karasek ont émis des doutes sur l'efficacité d'un produit de dégradation très avancée des protéines, la *putrescine;* cette « amine biogène », qui apparaît au sein de tumeurs cancéreuses, est considérée, par Pohjanpelto et Raina, comme un puissant activateur de la multiplication de cellules anormales.

Les *extraits embryonnaires* ont une activité bien connue sur les cultures de tissus. Par exemple, le broyage d'embryons de poulet donne un liquide épais qui, après sédimentation des particules solides, est un remarquable excitant de la division des cellules cultivées ; ce fait a été observé dès 1912, par Carrel. Cet extrait est de composition chimique extrêmement complexe ; le mélange n'a aucune spécificité zoologique : l'extrait de poulet fait pousser tout aussi bien des cultures de cellules de Mammifères ou d'Oiseaux. Gaillard, en 1942, a montré que son efficacité dépend de l'âge de l'embryon utilisé ; fait très intéressant, cet auteur a pu favoriser, *in vitro,* la multiplication puis la différenciation des cellules génératrices de l'os ; au lieu d'obtenir une culture de cellules « indifférenciées », de type fibroblastes, comme cela se serait produit s'il avait ajouté au milieu de l'extrait d'embryon jeune, il a provoqué une évolution subnormale en traitant ses cultures par des extraits d'embryons de plus en plus âgés. Bassleer et Chèvremont, en 1973, ont émis l'idée que l'ARN, l'acide pantothénique et la pantéthéine soient les éléments essentiels des extraits, éléments qui s'avèrent actifs non seulement en culture de tissus, mais aussi au cours de la régénération cutanée.

Les *extraits de tissus adultes* ne sont pas sans effets sur la division. Mais les résultats sont extrêmement variables ; il y a tout lieu de penser que ces différences sont dues au mode de préparation des extraits et à la nature du matériel cellulaire cultivé. Une chose est certaine : on peut cultiver des tissus grâce à l'apport nutritif et, peut-être, grâce à l'activité excitatrice d'extraits de certains organes adultes (Doljanski et Hoffmann, 1943). De toute manière, il faut avouer que la complexité des extraits a très généralement conduit les expérimentateurs au désespoir. Comme les extraits d'embryons âgés, les extraits de cellules adultes permettent d'obtenir une différenciation en culture : Lewis, en 1917, Odiette, en 1933, et Porter, en 1952, ont ainsi constaté que des fibroblastes peuvent, dans ces conditions, se diviser et synthétiser du matériel permettant l'assemblage de fibres collagènes ; Porter y parvint en ajoutant à un milieu de culture synthétique très pauvre (Locke) une petite quantité de bouillon de bœuf. Pruniéras souligna, en 1965, que le sérum prélevé dans le sang de divers animaux permettait la croissance *in vitro* des cellules épidermiques de Mammifères adultes. Depuis lors, divers auteurs ont confirmé les effets du sérum et tenté de préciser son mode d'action (Seifert et Paul, 1972). Melbye et Karasek, en 1973, ont trouvé dans *le derme* un facteur qui excite la multiplication des cellules épidermiques ; ce facteur n'est pas une protéine, car il est dialysable. Ce type de recherche doit permettre de reprendre le problème dans des conditions mieux contrôlables ; partant d'un tissu donneur et non plus d'un organe, on peut envisager de déterminer la nature des facteurs actifs.

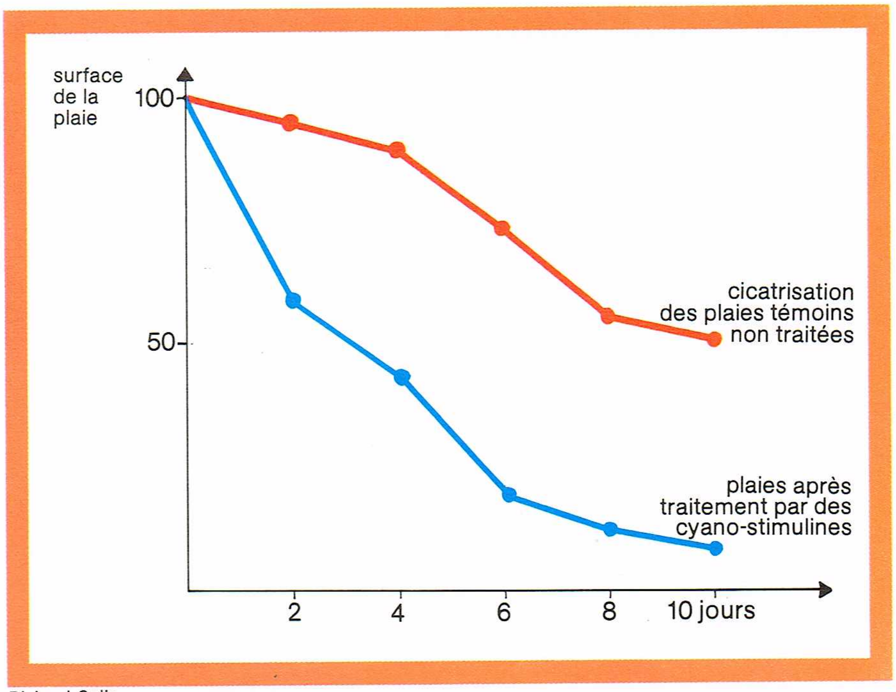

Richard Colin

▲ **Influence de stimulines *extraites d'Algues Cyanophycées sur la cicatrisation de plaies cutanées du mouton ; la cicatrisation accélérée est la conséquence d'une stimulation de l'activité mitotique au bord de la plaie (d'après Lefèvre, Laporte et Flandre).***

Il faut citer un type d'expérimentation, fort intéressant, qui tire son principe d'un travail effectué par Prévot en 1964. Cet auteur a montré que l'on pouvait isoler de certaines Bactéries un principe actif stimulant le système réticulo-endothélial (cellules reponsables des phénomènes antixéniques ou de défense). Cette découverte a un double intérêt : d'une part, elle constitue un apport pour la biologie fondamentale et, d'autre part, elle permet de penser que l'on peut augmenter artificiellement les réactions de défense de l'organisme vis-à-vis des Bactéries, des virus, etc. (Halpern, 1964). La phytohémagglutinine (PHA) des Légumineuses a des effets de même nature. En 1965, Lefèvre et ses collaborateurs montraient que des substances extraites d'Algues microscopiques permettaient de hâter la cicatrisation de plaies cutanées, et d'activer, *in vitro,* la multiplication cellulaire.

L'influence des *hormones* sur la prolifération de tissus normaux a fait l'objet d'une revue récente (Epifanova, 1971). Bien évidemment, leur action porte essentiellement sur les *organes cibles* (par exemple, les œstrogènes agissant sur l'appareil génital femelle). Les synthèses d'ADN sont nettement augmentées. Rappelons cependant que les effets des hormones peuvent se faire sentir sur bien d'autres organes (travaux de Bullough). Pullinger, en 1949, établit une relation entre le taux de mitoses observé dans la glande mammaire de souris castrées et la quantité d'œstrogènes qu'il administrait. Lacassagne avait montré, quelques années auparavant, que les œstrogènes étaient indispensables pour déclencher la formation de tumeurs mammaires, à forte activité mitotique, chez la souris femelle ou mâle. En fait, l'action de chaque hormone est *normalement contrebalancée* par celle des autres. Ainsi, la castration chez la souris est suivie de phénomènes endocriniens compensatoires qui modifient l'activité proliférative de la plupart des autres tissus (Wooley et coll., 1939) ; on pourrait alors estimer que les gonades agissent comme des inhibiteurs de la multiplication incontrôlée des cellules de la surrénale, voire de leur transformation tumorale (Little, 1947). Cependant toutes les hormones ne sont pas mitogènes.

Chez les végétaux, la croissance des tissus est accélérée par les *auxines* et les *kinines.* Ces substances n'ont pas le même mode d'action : les auxines permettent l'accroissement volumétrique des cellules, et les kinines excitent leur prolifération. Les auxines, en favorisant les synthèses, amèneraient la cellule au stade adéquat pour la division ; mais seules les kinines permettent la

◀ *Page ci-contre, en bas* **principe de l'électrosmose :** ***en rouge, les ions adsorbés par la paroi du tube, par exemple OH^- ; en bleu, les ions libres pouvant être entraînés vers une électrode ; ici H^+ est entraîné vers la cathode (—).***

J. Bouchard

J. Bouchard

▲ *A gauche, mise en évidence de l'activité mitotique dans l'ovaire de souris par blocage à la colchicine; les hormones hypophysaires, qui stimulent l'activité génitale, provoquent une accélération du rythme mitotique (ici, au niveau des cellules folliculaires entourant l'ovocyte). A droite, coupe dans une tumeur mammaire de souris (non colchicinée) dont la croissance est très rapide; l'activité sécrétoire de la glande n'est pas abolie, même si elle est anormale. Les tumeurs mammaires de la souris ne se développent spontanément que si le taux des hormones génitales est suffisant (coloration topographique).*

mitose complète. On estime que l'une de ces kinines est l'hormone de blessure, ou acide undécène 1,10-décarboxylique, qui est libéré par lésion ouverte ou par contusion (Apffel, 1959). L'adénine serait une autre kinine. Bien des substances permettant la mitose végétale ont été découvertes. L'une des plus puissantes correspond à la *kinétine,* ou 6-furfurylaminopurine (Miller, 1953-1956). Plus récemment, plusieurs dérivés se sont révélés intéressants. Chez les plantes, la production de ces hormones se fait au niveau des cellules vasculaires. Si l'on trouve certaines kinines dans divers tissus animaux, il semble que leur action soit essentielle seulement chez les végétaux. Pourtant, parmi d'autres travaux, il faut noter ceux d'Orr et Swain (1957), qui ont constaté que ces hormones végétales excitent la mitose dans certaines cultures de tissus humains.

L'AMP cyclique

Depuis 1970, on cherche à savoir si l'AMP cyclique (adénosine 3'-5'-monophosphate cyclique) est un facteur mitogène. Cette substance « à tout faire » est en fait impliquée dans de nombreux mécanismes biochimiques, mais la question n'est pas tranchée dans le cas de la mitose. Mac Manus et Whitfield furent les premiers à montrer que de petites doses d'AMP cyclique stimulent la synthèse d'ADN et la mitose de cultures de cellules sanguines naturellement réprimées (lymphocytes du thymus). Ces résultats furent confirmés *in vivo*, sur des cellules de moelle osseuse et de thymus, par Rixon et ses collaborateurs, en 1970. L'AMP non cyclique n'a aucun effet. L'injection de l'AMP cyclique-dibutyrique marqué induit également la multiplication, et l'on constate que le pool des phosphates de la cellule augmente considérablement (Cros et Ord, 1971). Par contre, Johnson et Abell, en 1970, n'ont obtenu aucun effet de l'AMPc sur les synthèses d'ADN des lymphocytes du sang circulant. En 1972, Avener et ses collaborateurs ont montré que l'AMPc et son dérivé butyrique n'avaient pas toujours des activités identiques, et que celles-ci pouvaient même être radicalement opposées. L'action de l'AMPc exogène est donc bien loin d'être clarifiée.

D'autres chercheurs ont *stimulé la synthèse d'AMPc,* dans des cellules en prolifération. Certaines substances, employées à des doses bien précises, permettent d'y parvenir (citons par exemple l'isoprotérénol, ou la concanavaline A). L'ensemble de leurs résultats montre qu'une élévation de l'AMPc intracellulaire, produite par activation de l'adényl-cyclase, catalyse la synthèse à partir d'ATP, entraîne une inhibition de la division cellulaire (Abell et coll., 1970; Smith et coll., 1971; King et coll., 1972; Sheppard, 1971). D'autre part, certaines conclusions tirées par Otten et ses collaborateurs, en 1971, paraissent être sans équivoque : dans 13 lignées cellulaires différentes, le taux d'AMPc intracellulaire est inversement proportionnel à la vitesse de synthèse d'ADN. Sheppart, en 1972, a confirmé ce résultat en travaillant sur des cellules infestées par des virus et sur des cellules excitées par du sérum, par des enzymes et par l'insuline, qui favorisent la multiplication; dans tous les cas, la concentration intracellulaire d'AMPc diminue. Inversement, la *prostaglandine* E_1, qui est un inhibiteur de certaines cellules tumorales, augmente la synthèse d'AMPc.

Tout n'est pas dit sur cette substance. En effet, certains chercheurs estiment que l'AMPc pourrait être un *signal* de déclenchement de la mitose; ensuite, sa concentration diminuant dans la cellule, la division s'effectuerait (Abell et coll., 1973). En fait, l'analyse de cellules normales montre que le taux de ce nucléotide varie durant le cycle cellulaire et qu'il est minimal pendant la mitose (Zeilig et coll., 1972).

Cependant, depuis quelque temps, on se pose des questions au sujet d'un autre nucléotide, GMPc, dont l'effet sur la mitose serait peut-être au moins aussi important (Hadden et coll., 1972), comme intermédiaire entre le plasmalemme et l'ADN nucléaire.

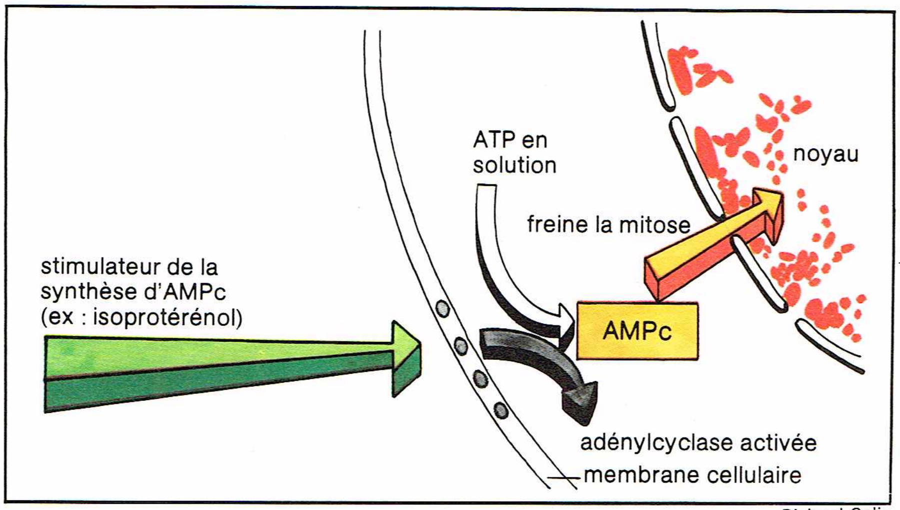

Richard Colin

Les facteurs freinateurs

Outre les antimitotiques déjà évoqués et les substances toxiques dépourvues de toute activité spécifique, certains facteurs chimiques peuvent freiner la multiplication.

L'*héparine* est un produit naturel qui, expérimentalement, peut inhiber la division de l'œuf de chætoptère, par exemple (Heilbrunu et Wilson, 1949). Elle agit sur les propriétés physiques de la cellule; on en trouve dans un grand nombre d'organismes. Ce mucopolysaccharide acide complexe (sulfaté) peut être détecté sur coupes histologiques, ou par l'analyse d'extraits tissulaires. Il en existe aussi bien chez les Bactéries que chez les Échinodermes. Son rôle est important chez les Vertébrés : elle possède des propriétés anticoagulantes, bien connues. Dès 1935, Jorpes avait décelé sa présence dans les *mastocytes* qui existent en plus ou moins grande abondance au sein de tous les revêtements conjonctifs des Mammifères. Et, de fait, l'héparine est un produit de sécrétion des mastocytes, qui la libèrent dans des conditions physiologiques très variées, ce qui constitue la « dégranulation » (Asboe-Hansen, 1957). Or, on trouve un très grand nombre de mastocytes dans divers cas de tumeurs, en particulier lors de la tumorisation de l'épiderme de la souris (Fiore Donati et coll., 1962; Scelsi et Bertoli, 1969; Kim Yong Whan, 1970, etc.); selon Levillain et ses collaborateurs (1972), l'héparine favorise l'action de certains antimitotiques; Mizuno et Fujii ont montré, en 1969, que l'héparine ou des MP voisins se trouvent sécrétés durant les processus de cicatrisation et de tumorisation. L'ensemble des résultats laisse à penser qu'une partie des produits de sécrétion des mastocytes joue un *rôle régulateur au cours des phases de prolifération cellulaire;* cependant, de nouvelles expériences sont, bien sûr, nécessaires. Remarquons, en outre, que l'héparine modifie la charge des membranes cellulaires (Hagmar Bjorn, 1972); il est alors vraisemblable que la perméabilité et donc la viscosité du cytoplasme, qui dépend de l'ionisation intracellulaire, s'en trouvent altérées.

Dans n'importe quel tissu, les cellules s'inhibent mutuellement; on parle d'*inhibitions de surface*. Le phénomène a été découvert par Medawar, et, depuis, de nombreuses recherches ont été effectuées dans ce domaine. Chaque type cellulaire porte des sites récepteurs à la surface de son plasmalemme, d'où l'importance des expériences concernant le *cell-coat*. Des modifications du coat peuvent entraîner la disparition des inhibitions de surface; ainsi, Chapron a constaté, en 1972, que la dopamine, amine biogène précurseur de l'adrénaline, modifie la glycocalix et lève les inhibitions. Les inhibitions de contact sont levées lors de la « transformation » de cellules en cultures, c'est-à-dire durant leur cancérisation, ou au moment de la « régénération » d'un épithélium stratifié, comme l'épiderme, à plusieurs couches de cellules (Mac Nutt et coll., 1973). Selon Heidrich et Ryan (1971), le taux d'AMP cyclique des cellules dépendrait des inhibitions de surface. Cependant, pour Seifert et Paul (1972), le contact entre les cellules n'affecte pas l'AMPc, du moins dans leurs conditions de travail... Son taux dépendrait uniquement des facteurs mitogènes contenus dans le sérum servant aux cultures.

Nous savons que les *histones* jouent un rôle dans la régulation des synthèses d'ADN. Il est très vraisemblable que les *protéines acides* sont au moins aussi importantes; leur mode d'action, apparemment fort complexe, n'est pas encore connu (Courtois, Dastugue et Kruh, 1974).

D'autre part, Bullough et son équipe ont découvert, dans les tissus normaux, des substances qui limitent la multiplication cellulaire. Ces substances, les *chalones,* seraient spécifiques de chaque tissu. Elles ont été mises en évidence chez diverses espèces animales (Bullough et Laurence, 1960-1970; Iversen, 1969; Hennings et coll., 1969; Frankfurt, 1971, etc.). Ce sont les expériences de cicatrisation et de régénération qui ont permis d'envisager l'existence de telles substances. En effet, dans ces cas, on peut penser, avec Paul Weiss (1955), que les cellules qui jouxtent la blessure se multiplient grâce à l'intervention positive d'hormones traumatiques; mais, si l'on est sceptique quant à l'efficacité de ces hormones, on peut imaginer que les cellules du tissu normal sécrètent en permanence une substance permettant une sorte d'*autorégulation du tissu;* dans ce cas, après la blessure, les cellules survivantes devraient perdre la propriété de sécréter cette substance et se trouveraient ainsi libérées sur le plan mitotique. Ce raisonnement a entraîné Bullough et ses collaborateurs dans un vaste travail expérimental. Utilisant l'épiderme de la souris, ces chercheurs parvinrent à extraire un agent freinateur sécrété durant la maturation des cellules normales; selon eux, cet agent pourrait être perdu, en partie avec les cellules desquamées et en partie par diffusion dans le derme. Il pourrait aussi être instable. En fait, dès 1957, Weiss et Kavanau avaient émis l'idée de l'existence de tels facteurs; ils avaient même publié une théorie générale de la croissance et de la régénération envisagées sous un angle cybernétique. En 1962, Iversen et Evensen parvinrent à vérifier cette théorie en comparant des séries de résultats expérimentaux et des séries de courbes théoriques établies par le calcul.

J. Bouchard

◀ *Coupe effectuée dans une tumeur expérimentale de l'épiderme de souris. En haut, trois groupes de cellules tumorales d'un vert bien différent de celui du conjonctif sous-jacent; les mastocytes, dont on considère qu'ils freinent la mitose par libération d'héparine, forment ici un cordon rouge-orangé (coupe à congélation; coloration par l'orange d'acridine et observation en lumière UV).*

◀ *Page ci-contre, en bas, élévation expérimentale de la synthèse d'AMP cyclique (AMPc) et inhibition mitotique.*

▼ *Schéma du principe de régulation de la multiplication cellulaire dans le cas de l'épiderme (d'après Iversen).*

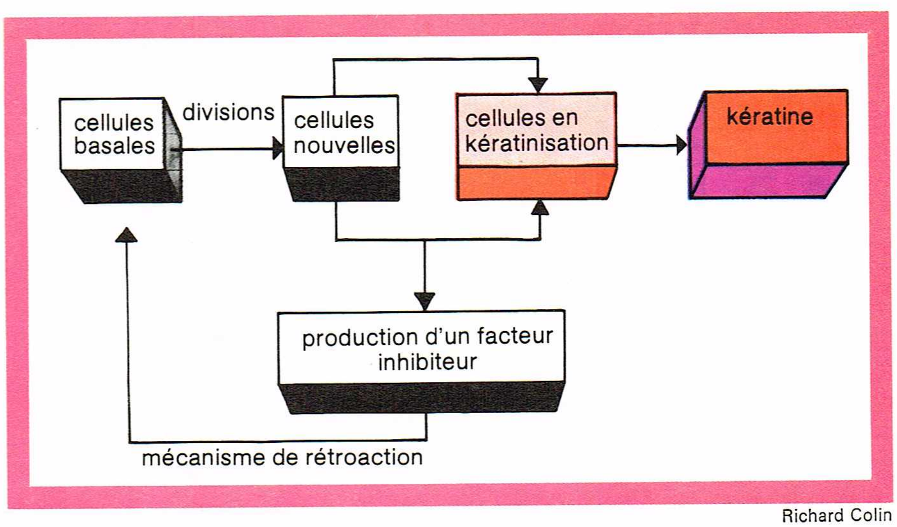

Richard Colin

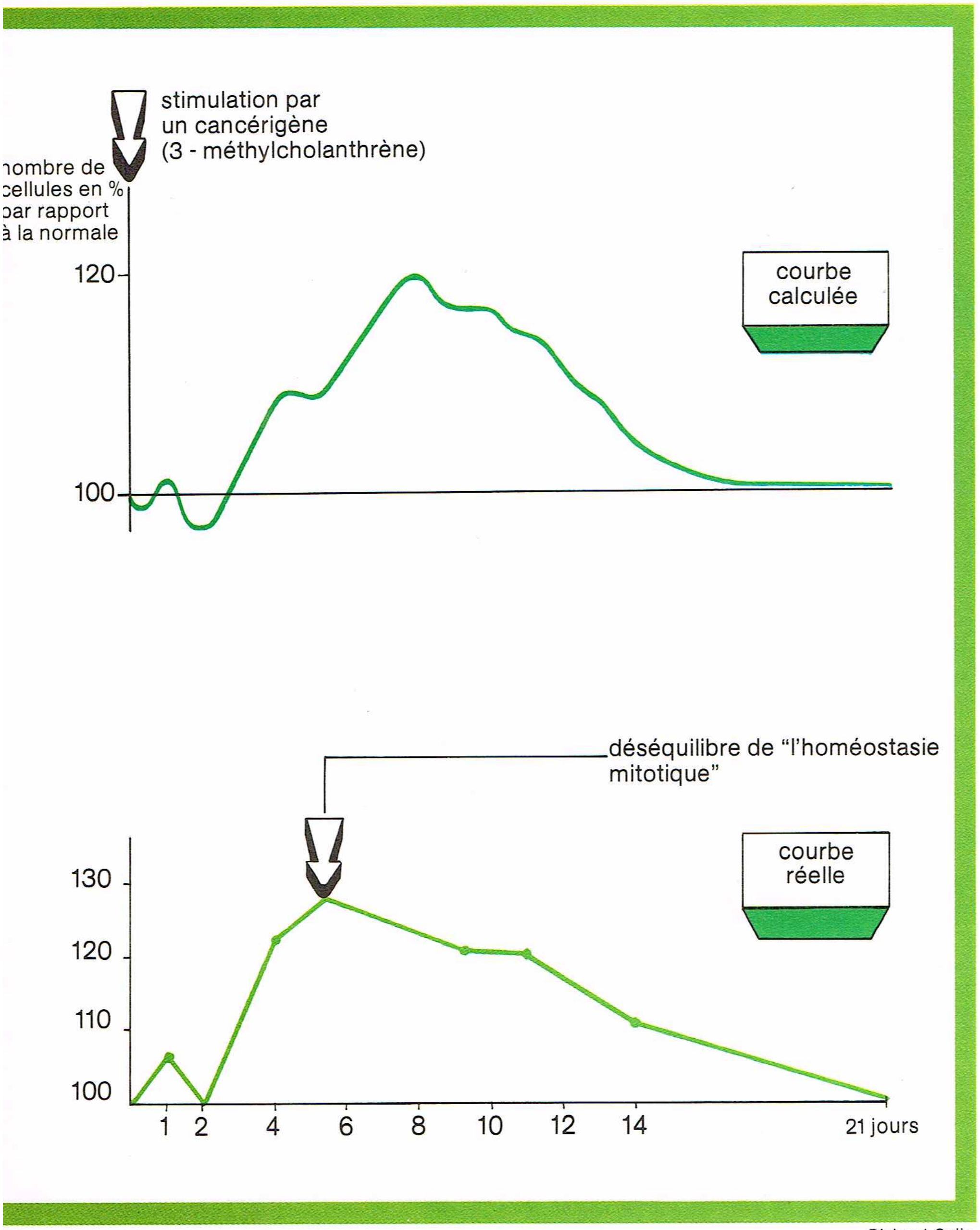

Richard Colin

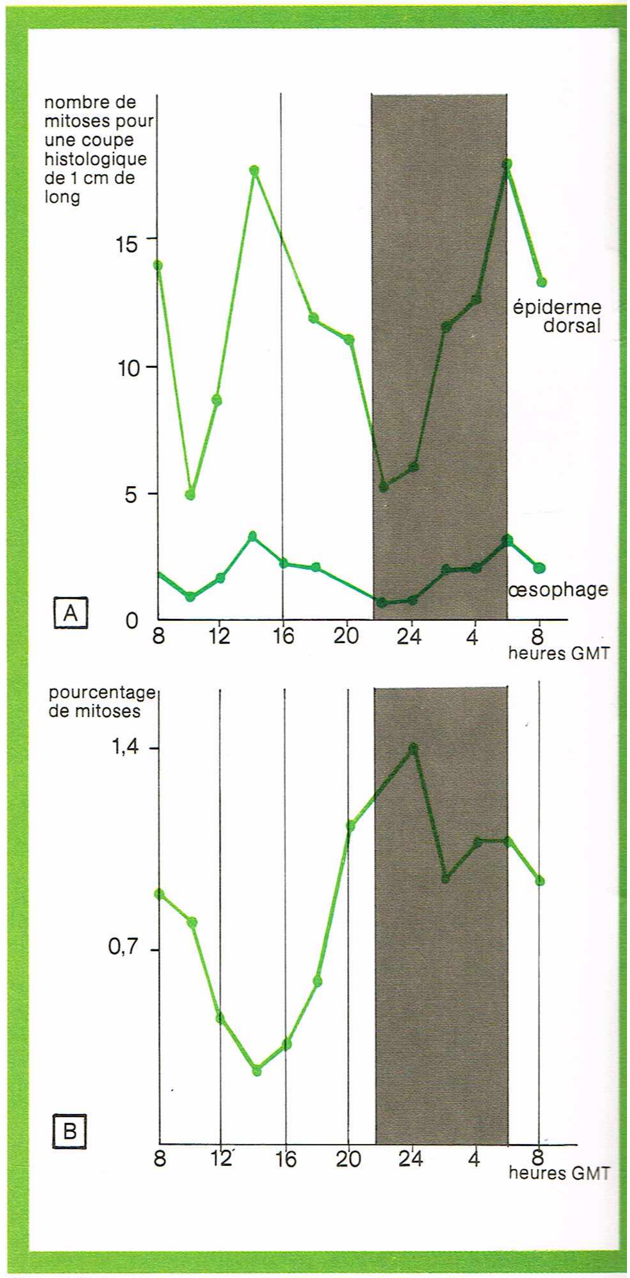

Richard Colin

▲ *A gauche, vérification du mécanisme de régulation proposé par Bullough et Iversen, dans le cas de la peau stimulée par un cancérigène : la courbe théorique a été établie par ordinateur en tenant compte des données de l'épiderme normal et du mécanisme schématisé plus haut.*

A droite, A, mise en évidence d'un rythme mitotique dans des tissus épithéliaux de Mammifère (souris) [d'après Bullough]; B, rythme mitotique dans l'épiderme de souris « hairless » (mutant à peau nue) : ce graphique, s'il est comparé au précédent, montre qu'il y a de grandes variations suivant la souche d'animaux étudiés (d'après Evensen).

L'activité des chalones serait renforcée par l'*adrénaline*. Dès 1962, Bullough et Laurence avaient constaté que les hormones de la surrénale (glucocorticoïdes, adrénaline et noradrénaline) sont antimitotiques pour plusieurs tissus. La surrénalectomie produit une réaction inverse. Mieux, un *stress* produit une émission d'adrénaline et, secondairement, le taux mitotique baisse, au niveau de l'épiderme par exemple; si l'on met la peau en culture, on constate que les mitoses redeviennent nombreuses, et cela d'autant plus que le choc a été plus fort; donc, l'adrénaline agit sur la préprophase (G_2) sans inhiber les synthèses préparatoires.

Ces résultats ont conduit Bullough à interpréter les variations du taux mitotique normal observées durant une période de 24 heures *(rythme nycthéméral)*. Selon lui, durant la période d'activité des souris, l'organisme est soumis à des stress multiples, impliquant l'émission d'adrénaline. Pour Evensen, qui obtient d'ailleurs une courbe totalement différente, les taux mitotiques observés n'ont aucun rapport avec l'activité mitotique proprement dite : à un taux élevé correspond non pas une forte activité de division, mais un allongement de la mitose (1963); selon lui, le *taux réel* des divisions resterait le même durant 24 heures. En fait, il existe bien un rythme nycthéméral, ou circadien, qui concerne essentiellement la durée de la mitose, et ce rythme est aboli par ablation des surrénales. Bien que l'existence d'un complexe chalone-adrénaline ait été mise en doute, en 1971, par Laurence et Hansen, le débat n'est pas clos (Bassleer et Chèvremont, 1974).

Quoi qu'il en soit, on ne doute plus guère de l'existence des chalones. Certains chercheurs ont pu en isoler à partir de différents tissus. Selon Verly et ses collaborateurs (1971), il s'agit de molécules de taille moyenne, essentiellement de petits polypeptides; dans l'épiderme, la chalone serait une glycoprotéine. Si l'on prend le cas de l'épiderme humain, relativement épais, il apparaît que la chalone, synthétisée par les cellules en maturation, qui sont repoussées vers la surface de la peau, diffuse jusqu'à l'assise génératrice profonde et freine l'activité mitotique (Iversen et coll.; Elgjo et coll.; Bullough et coll.). Le même phénomène de diffusion a été constaté pour un tissu lâche hématopoïétique (Paukovitz, 1971).

De très nombreux chercheurs travaillent actuellement sur le problème des chalones. Il est vraisemblable que divers facteurs naturels, intrinsèques et extrinsèques, peuvent entraver l'activité mitotique; les chalones sont sans doute parmi les plus intéressants. On peut se demander si les chalones agissent toujours de la même façon sur tous les tissus; pour Bullough et Laurence (1966), elles agissent à la fin de la phase G_2;

toutefois, dans le cas du foie, organe extrêmement pauvre en mitoses, le blocage se ferait en fin de « présynthèse », entre les phases G_1 et S (Verly et coll., 1971 et 1973).

Un essai d'interprétation du cycle mitotique

Avant la mitose, ou phase M du cycle, il se passe dans la cellule des événements nombreux, bien que très discrets pour l'observateur, et que les techniques biochimiques et histochimiques permettent d'entrevoir. La phase de synthèse d'ADN nucléaire, ou phase S, est encadrée par les phases G_1, puis G_2. Mais ces « gaps » ne sont pas de simples trous dans l'activité biosynthétique; en G_1, il se forme des ARN et des protéines; il en est de même en G_2, *mais la nature des produits n'est pas identique*. Ainsi, les *protéines non histones* (essentiellement acides) sont fabriquées surtout en G_1; selon Salas et Green (1971), il pourrait s'agir de protéines initiatrices des synthèses d'ADN; pour Mitchison (1971), « l'initiateur », d'origine cytoplasmique, devrait atteindre un *degré critique* pour jouer son rôle : dès 1968, on a pu montrer, chez les Mammifères, que les synthèses d'ADN commençaient au contact de la membrane nucléaire, là où s'attachent les fibres de chromatine (Comings et Kakefuda). Remarquons, à ce sujet, que la duplication de l'ADN se fait de façon nettement asynchrone; certains chromosomes se répliquent précocement, d'autres le font très tardivement; et, dans un type cellulaire donné, on constate que le processus est remarquablement constant (Taylor, 1960; Cleaver, 1967; Charret, 1969; Sandritter, 1970; etc.). Durant les phases S et G_2, les activités enzymatiques sont augmentées (Vendrely, 1971). Chaque enzyme se forme à un moment précis du cycle. En G_2, bien que le taux d'ADN nucléaire ait doublé, ainsi que celui des histones et d'une bonne partie des autres protéines, la *cellule est encore incapable de se diviser;* durant cette période, *il apparaît de nouvelles protéines acides,* caractéristiques et manifestement indispensables pour que se déclenche la mitose (Stein et Baserga, 1972). Au total, juste avant celle-ci, on a généralement le *même rapport :* 4 ADN/4 protéines (Bassleer, 1968). *Mais il ne suffit pas toujours que les taux tétraploïdes soient atteints pour que la mitose se produise;* dans divers cas, la cellule devient octoploïde (8 ADN/8 protéines). *En fait, on ne connaît pas le facteur qui permet la mitose.* Mais, si, par un antimitotique tel que le myleran, on freine la synthèse d'ADN, le taux de protéines continue d'augmenter, et, en général, la cellule ne se divise pas, sauf dans le cas de certaines cellules tumorales (Bassleer et coll., 1973). Ainsi, diverses études expérimentales montrent que le génome consiste en une *combinaison fixe d'ADN, d'histones et de protéines acides.* Les protéines acides seraient-elles régulatrices de la mitose ? Il s'agirait alors d'une régulation immédiate. Notons ici un fait capital : *juste avant la mitose, le taux de protéines non histones qui se lient à l'ADN double brutalement;* ces protéines, qui étaient momentanément en réserve au voisinage de la chromatine, se combinent à celle-ci au dernier moment; cela n'est pas le cas pour les histones (Hancock, 1969).

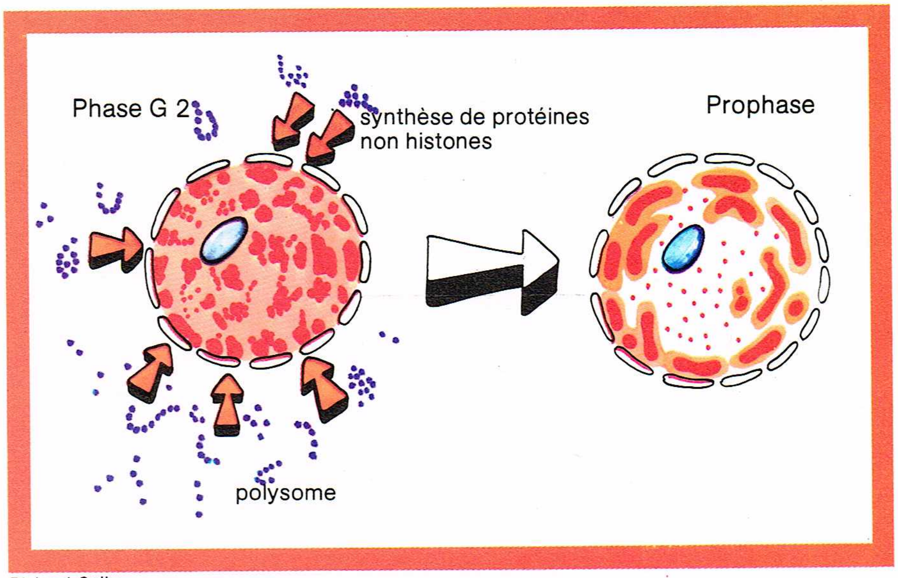

Richard Colin

▲ ***Représentation schématique illustrant les données de Hancock, selon lesquelles les protéines non histones, d'abord accumulées dans le noyau, se lient brutalement à l'ADN juste avant le déclenchement de la mitose.***

Que peut-on dire *du stock de protéines microtubulaires* (SPM) ? Forrest et Klevecz, en 1972, ont montré que la synthèse du SPM s'effectue en G_2 ou dès le milieu de la phase S dans certaines souches cellulaires. Or Gelfant avait déjà constaté, en 1963, que, dans un épiderme en *cicatrisation,* donc durant une période de *grande activité mitotique, la phase G_2 est très courte,* sinon inexistante : on doit donc envisager, dans le cas de la cellule normale, la possibilité d'un *effet inhibiteur du SPM en excès.* Remarquons d'abord que, après la mitose, les protéines microtubulaires dépolymérisées persistent dans la cellule durant toute la phase G_1 : leur destruction précède immédiatement la nouvelle phase S (Forrest et Klevecz) ; donc, la mitose qui suit est sous la dépendance directe des synthèses de protéines microtubulaires effectuées en G_2. Des résultats obtenus avec l'épiderme de souris traité à la colchicine tendent à confirmer l'hypothèse d'un blocage. Supposons qu'il en soit ainsi :

— Une étude des effets progressifs de la colchicine sur le taux mitotique de l'épiderme normal montre que cette substance, qui *provoque d'abord une dénaturation* d'une partie du SPM, déclenche ainsi le processus d'entrée en mitose : on note l'existence d'une onde précoce de mitoses normales; ensuite, la dénaturation se poursuivant, apparaît une deuxième onde de mitoses, qui, cette fois, correspondent aux stathmocinèses (septième heure).

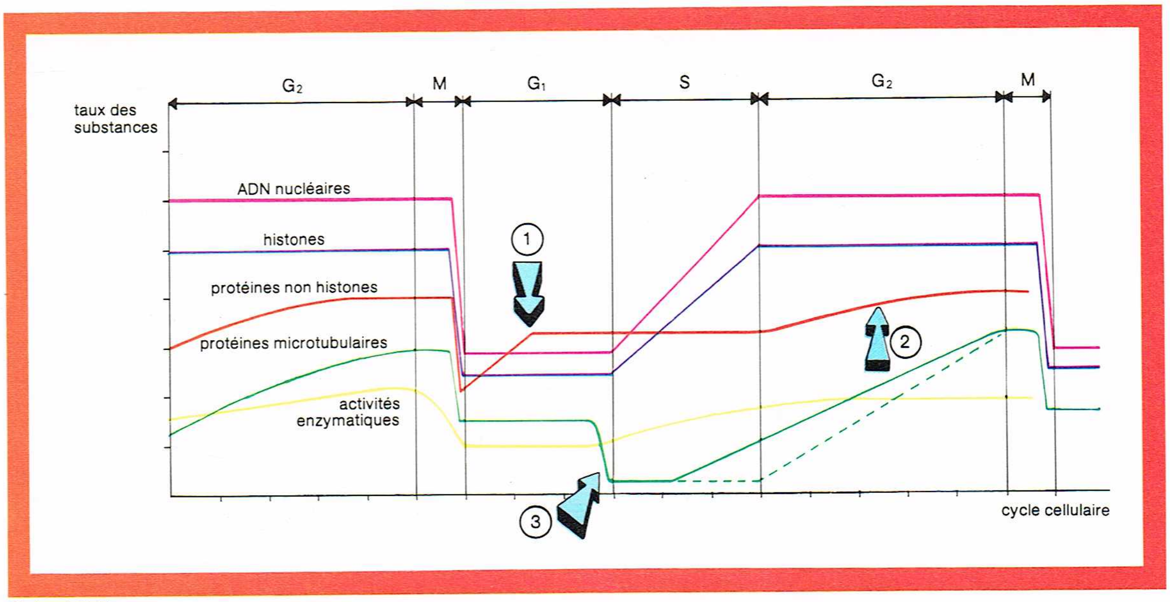

Richard Colin

◀ ***Variations du taux de substances*** **qui sont essentielles** ***pour la*** **mitose :** ***ici les valeurs relatives sont totalement arbitraires et uniquement destinées à fixer les idées du lecteur; les flèches bleues 1 et 2 indiquent la formation en deux*** **temps des protéines non histones;** ***la flèche 3 indique la dégradation*** **du stock de protéines microtubulaires.** ***Les données actuelles ne sont pas suffisantes pour établir des courbes correspondant aux divers ions de la cellule.***

▶ ***Aspect de tissu épidermique cicatriciel chez la souris; on repère bien le niveau de section de la peau : l'épiderme est très épaissi par rapport à la normale (coloration topographique).***

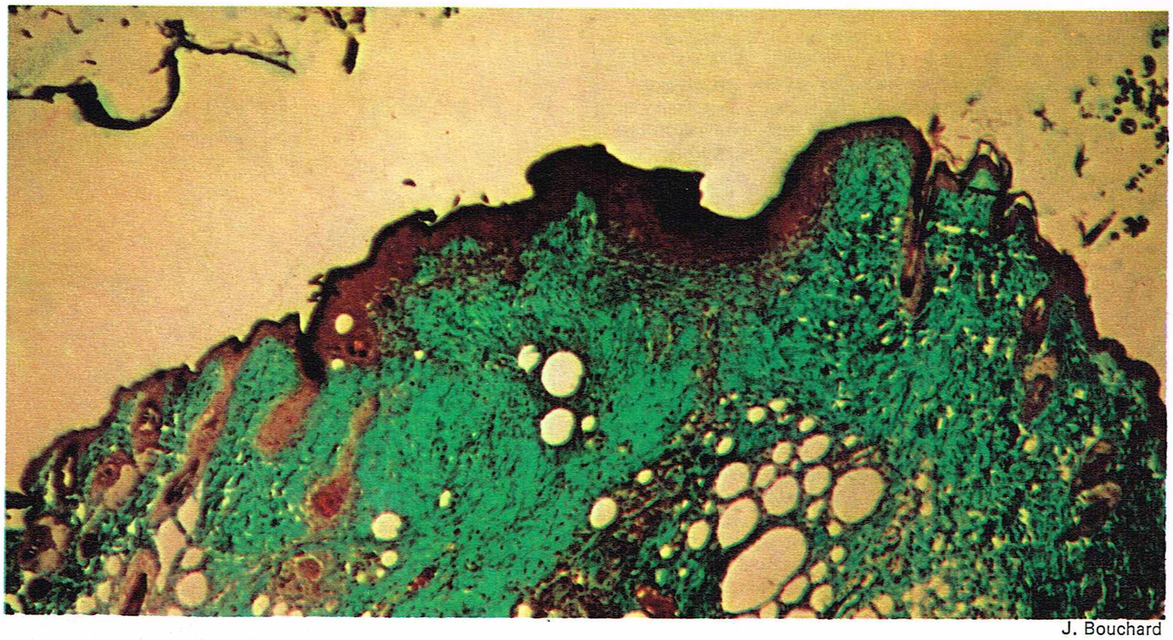

J. Bouchard

— Dans un épiderme en cicatrisation-régénération, la première onde de mitoses n'apparaît pas; on trouve seulement l'onde tardive de stathmocinèses. Si l'on se souvient que, dans ce cas, l'épiderme est fait de cellules à phase G_2 très écourtée, alors qu'elle peut durer *15 jours* dans l'épiderme normal (Gelfant, 1962-1966), on est en droit de penser que les cellules en régénération ne subissent aucune action freinatrice de la part du SPM; sitôt terminées les synthèses indispensables, elles se divisent sans attendre; puis, en présence de colchicine, la mitose s'effectue sur ce même rythme, conduisant à l'accumulation de métaphases bloquées. Ici, l'antimitotique *ne déclenche pas* l'apparition de l'onde précoce de mitoses *libérées* de l'influence du SPM, puisque celui-ci n'est nullement excédentaire.

Peut-on envisager que, durant G_2, le SPM soit lié aux protéines acides? Au moment de la mitose, l'utilisation d'une partie du SPM pour l'élaboration de l'appareil achromatique permettrait alors la libération de protéines acides et leur brusque liaison avec l'ADN. Souvenons-nous que les antimitotiques dépolarisants, qui empêchent la formation des asters, puis du fuseau, n'entravent pas la condensation des chromosomes, ni leur clivage (du moins si les concentrations utilisées n'ont pas d'effet de type radiomimétique). On obtient même des cellules qui peuvent être hautement polyploïdes!

Comme pour la plupart des phénomènes biologiques, la division cellulaire est sous la dépendance de mécanismes antagonistes. La cellule normale synthétise des substances, telles que les chalones, dont le rôle est d'inhiber sa multiplication et celle des cellules voisines. Par contre, lors de lésions qui impliquent une réparation tissulaire, la sécrétion d'inhibiteurs serait diminuée, voire bloquée, ce qui permettrait à des hormones ou à des substances excitatrices (nouvellement formées?) d'entraîner la préparation de la cellule, puis l'entrée en mitose. En fait, on ne sait pratiquement rien de précis quant à l'influence éventuelle non seulement des hormones, mais également de toutes les autres substances drainées par le liquide intercellulaire. Pourtant, il faut bien les étudier si l'on veut tenter d'expliquer l'entrée en mitose de l'œuf et des Unicellulaires. La division est un phénomène périodique, et cette pulsion doit essentiellement dépendre de facteurs très généraux. L'influence de l'ionisation du milieu est certainement méconnue. On sait maintenant que les variations du potentiel membranaire se produisent durant le cycle de multiplication; il importe de savoir si cela correspond à des variations de concentration ionique au sein de la cellule. Divers chercheurs s'intéressent depuis peu à ces problèmes déterminants (Williams et Lœb, 1973; Sachs et coll., 1974; Timourian et coll., 1974). N'oublions pas que les ions jouent un rôle essentiel dans la configuration, la structure tertiaire des macromolécules, et que, durant la mitose, d'énormes variations structurales affectent les constituants cellulaires.

Mitose et différenciation

A priori, on peut penser que la division n'est possible que pour les cellules indifférenciées ou, du moins, peu spécialisées. Autrement dit, la différenciation impliquerait une diminution considérable de l'activité mitotique, voire son arrêt total. Bien qu'un peu schématique, ce point de vue correspond, dans l'ensemble, à une réalité : cependant, tout porte à croire que l'activité mitotique d'une grande variété de cellules « indifférenciées » demeure faible sinon nulle; après une période de « repos » plus ou moins longue, c'est-à-dire correspondant à une

▼ ***Variations du taux mitotique de l'épiderme de souris durant les heures qui suivent une injection de colchicine (peau normale ou « régénérant »).***

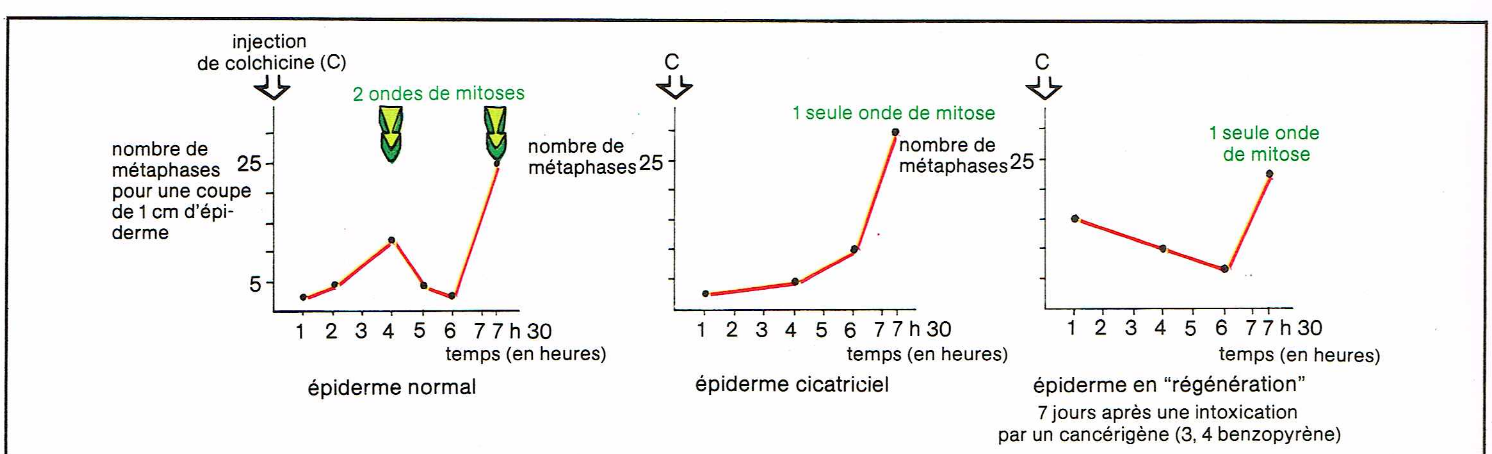

Richard Colin

inhibition qui peut être due aux facteurs du milieu, elles peuvent reprendre leur activité mitotique. S'il *apparaît*, dans l'ensemble, que la mitose et la différenciation sont des processus qui s'excluent mutuellement, il faut souligner que la réalité est plus complexe. Comme nous avons eu l'occasion de le voir, la différenciation n'est pas un état immuable; la culture de cellules *in vitro* ou même des variations du milieu intercellulaire de l'individu entraînent une modulation au degré de différenciation et l'apparition de nouvelles mitoses.

Des cellules différenciées peuvent fort bien se diviser; c'est évidemment le cas pour les Unicellulaires, mais aussi pour des cellules de Mammifères; les exemples ne sont pas très nombreux comme on doit s'en douter, mais on peut citer le cas de tumeurs thyroïdiennes, à cellules hautement différenciées, et qui, cependant, se divisent activement; ce phénomène s'observe aussi dans les tumeurs mammaires de la souris. L'activité mitotique *peut* donc n'avoir aucun rapport avec le degré de différenciation apparent.

En fait, dans l'organisme normal, les cellules peuvent évoluer dans plusieurs voies; certaines conservent le pouvoir de se diviser très activement, alors que d'autres se différencient de façon définitive (cellules épidermiques, cellules kératinisées); mais il en existe qui, différenciées ou non, quittent temporairement le cycle de la mitose, mais gardent la possibilité d'y revenir après stimulation; c'est le cas des cellules hépatiques ou des fibrocytes qui sécrètent le collagène. Pour certains biologistes, les cellules différenciées, mais en attente, seraient en phase G_1 du cycle, tandis que d'autres estiment qu'il existerait une phase distincte, ou G_0, dont les caractéristiques sont encore très mal connues (Lajtha, 1963; Epifanova et coll., 1969). De plus, n'oublions pas que, dans certains tissus, les cellules peuvent rester pendant des semaines en G_2.

J. Bouchard

◀ ***Dans certaines conditions, la transplantation d'un fragment d'organe sous la peau de la souris provoque la prolifération de l'épiderme et des follicules pileux qui se trouvent au voisinage du transplant. L'image histologique rappelle ce que l'on observe dans les jours qui suivent un badigeonnage de l'épiderme avec une solution cancérigène (coloration topographique).***

BIBLIOGRAPHIE FONDAMENTALE

ABELL C.W. et MONAHAU T.M., *The Role of Cyclic AMP in the Regulation of Mammalian Cell Division*, in *J. Cell Biol*, v. 59, n° 3, 1973. - BASSLEER R. et CHÈVREMONT M., *le Cycle cellulaire et ses modifications expérimentales par des agents antimitotiques*, in *Bull. Assoc. Anatom.*, v. 57, n° 159, 1973. - BERKALOFF A., BOURGUET J., FAVARD P. et GUINNEBAULT M., *Biologie et physiologie cellulaire*, Hermann Éd., Paris, 1973. - BESSIS M., *Traité de cytologie sanguine*, Masson Éd., Paris 1954. - BIESCLE J.J., *On The Mechanisms of Antimitotic Action as Studied with Cancer Cells and Antimetabolites in Path. Biol.*, v. 9, n° 5-6, 1960. - BLOOM W. et FAWCETT D., *A Textbook of Histology*, Saunders Éd., Philadelphie, Londres, Toronto, 1968. - BOISSEAU Cl., *Étude ultrastructurale de l'oviducte du triton Pleurodeleswaltlic*, in *J. Microsic*, v. 18, n° 3, 1973. - BULLOUGH W.S. et LAURENCE E.B., *The Diurnal Cycle in Epidermal Mitotic Duration and its Relation to Chalone and Adrenalin*, in *Exp. Cell Res.*, v. 43, 1966. - *The Role of Glucocorticoid Hormones in the Control Epidermal Mitosis (Mouse)*, 1968. - *Chalone Control of Mitotic Activity in Sebaceous Glands*, in *Cell. Tissue Kinetics*, v. 3, n° 3, 1970. - CHÈVREMONT M., *Cytologie et histologie*, Desoer, Éd., Liège, 1956. - DENIS H., *Précis d'embryologie moléculaire*, Presses universitaires de France, 1974. - DURAND M. et FAVARD P., *la Cellule*, Hermann Éd., Paris, 1972 (4e tirage). - DUSTIN P. Jr., *Some Recent Adventice in the Study of Microtubules and Microtubule Poisons*, in *Archives de biologie*, t. 85, Bruxelles, 1974. - DE DUWE C., *The Lysosome Concept*, Ciba Found., Reuck et Cameron Éd., Londres, 1963. - *Les Lysosomes*, in *la Recherche*, n° 49, 1974. - EIGSTI O. et DUSTIN P. Jr., *Colchicine in Agriculture, Medecine, Biology and Chemistry*, The Iowa *State College Press, Ames*, 1957. - GARRETT R.A. et WITTMANN H.G., *Structure et fonction du ribosome*, in *Endeavour*, t. 23, n° 115, 1973. - GUELFANT S., *The New Theory on the Mechanism of Cell Division*, in *Cell Growth and Cell Division*, Acad. Press Éd., New York et Londres, 1963. - GUILLÉ E. et QUÉTIER F., *Heterochromatic, Redundant and Metabolic DNAs: a New Hypothesis about their Structure and Function*, in *Progress Bioph. Molec. Biol.*, v. 27, 1973. - HOURDRY J., *Données cytologiques et cytochimiques sur l'évolution des lysosomes*, in *Ann. Biol.*, fasc. 9-10, 1968. - HUGHES A., *Mitotic Cycle*, Butterworths Éd., Londres, 1952. - IVERSEN O.H., *Chalones of the Skin*, Ciba Foundat. Symposium (Homeostat Regulators), Londres, 1969. - KARLSON P., *Biochimie*, Doin Éd., Paris, 1964. - KUDO R.R., *Protozoology*, Thomas Éd., Springfield, Illinois, 1954. - LANGERON M., *Précis de microscopie*, Masson Éd., Paris, 1942. - LEVINE L., *The Cell in Mitosis (Symposium)*, Acad. Press. Éd., New York et Londres, 1963. - LISON L., *Histochimie et cytochimie animales*, Gauthier-Villars Éd., Paris, 1960. - MAGNAN CP., *Traité de microscopie électronique*, Hermann, Éd., Paris, 1961. - MOOSEKER M. et TILNEY L.G., *Isolation and Reactivation of the Axostyle. Evidence for a Dynein-like ATPase in the Axostyle*, in *J. Cell Biol.*, v. 56, n° 1, 1973. - NORTHCOTE PH., *l'Appareil de Golgi*, in *Endeavour*, t. 30, 1972. - ODARTCHENKO N., *Production cellulaire érythropoïétique*, Springer-Verlag Éd., Berlin, Heidelberg, New York, 1968. - OVTRACHT L., MORRÉ D.J., CHEETHAM R.D. et MOLLENHAUER H.H., *Subfractionation of Golgi Apparatus from Rat Livers: Method and Morphology*, in *J. Microsc.*, vol. 18, n° 1. - ROTH D., LONDON M. et MANJON M., *Binding Specificity and Affinity of Acriflavine for Nucleic Acids in Stain Technol.*, v. 42, n° 3, 1967. - SENTEIN P., *l'Action des antimitotiques pendant la segmentation de l'œuf et le mécanisme de cette action*, in *Path. et Biol.*, v. 9, n° 5-6, 1960. - *Le Mécanisme normal de la mitose pendant la segmentation de l'œuf d'Urodèle*, C.R. Acad., Sc., 253. - *La Dynamique de l'appareil achromatique et ses relations avec la dynamique de la segmentation dans l'œuf d'Urodèle*, in *C.R. Acad., Sc.*, v. 253, 1961. - *Dissociation des différents mécanismes de la mitose de segmentation*, in *C.R. Acad. Sc.*, v. 254, 1962. - *Formation du diastème dans la segmentation normale et remaniement artificiel de la fibrillogenèse par des substances chimiques*, Congrès d'embryologie, Orsay, 1968. - *Le Blocage de la centrosphère dans l'œuf en segmentation et sa signification*, in *Bull. Assoc. Anatom.*, n° 149, 1970. - SINCLAIR J.H. et STEVENS B.J., *Circular DNA Filaments from Mouse Mitochondria*, in *Proceed Nation. Acad. Sc.*, v. 56, n° 2, 1966. - VOLFIN P., *la Mitochondrie: centrale énergétique de la cellule*, la Recherche, n° 15, 1971. - WATSON J.D., *Biologie moléculaire du gène*, Édiscience Éd., Paris, 1968. - VOLFE, *Biology of the Cell*, Wadsworth, Éd., Belmont, Californie, 1973.

CYCLES DE REPRODUCTION ET SEXUALITÉ

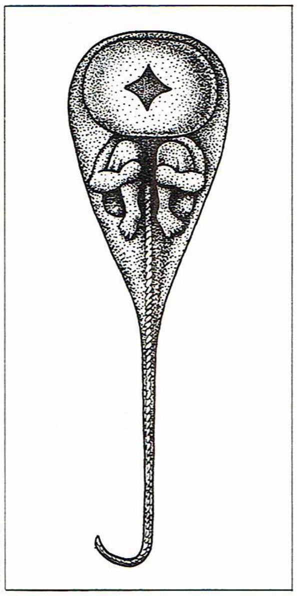

▲ **L'« homunculus »** ***que les premiers cytologistes virent dans la tête d'un spermatozoïde humain.***

Les chapitres précédents ont permis d'analyser la structure et la multiplication de la cellule, cette unité élémentaire de la vie. Nous y avons décrit les modalités de la division cellulaire normale, la *mitose,* et le rôle essentiel joué par certains organites cellulaires, les *chromosomes,* supports de l'information génétique. Dans le monde vivant, beaucoup d'espèces ne sont pas constituées d'individus unicellulaires; en particulier, tous les organismes vivants que l'on peut voir facilement à l'œil nu sont des êtres pluricellulaires composés de centaines, de milliers, de millions, voire même de milliards de cellules. Le problème de la reproduction de ces organismes a été posé bien avant que l'on connût l'existence de la cellule, mais il ne fut correctement résolu que le jour où prit corps la théorie cellulaire.

Jusqu'au milieu du XVII[e] siècle, il était admis qu'un certain nombre d'espèces d'ordre inférieur apparaissaient par génération spontanée et que de la pourriture naissaient asticots, limaces, grenouilles, Insectes, etc. Mais, à cette époque, comme le dit Jean Rostand, « une réaction se dessine un peu partout contre la superstition, le préjugé théologique et le principe d'autorité. L'esprit critique s'éveille ou se libère à la fois d'Aristote et de la Bible ». On ne veut plus croire, on veut comprendre; les observations se font plus minutieuses et l'expérimentation commence. C'est cet esprit qui animait l'Italien Francesco Redi lorsqu'il plaça des morceaux de viande dans des bocaux, dont certains furent laissés ouverts tandis que les autres étaient recouverts d'une gaze. Quelques jours après, les viandes contenues dans les fioles ouvertes étaient remplies de vers, alors qu'il n'y en avait aucun dans les fioles bouchées. La viande était donc incapable par elle-même de produire des asticots. La présence de ceux-ci n'était due qu'à la ponte des mouches.

Cette expérience paraît aujourd'hui d'une simplicité enfantine, mais à son époque elle était révolutionnaire, comme l'a bien montré Jean Rostand : « L'expérience de Redi avait une portée considérable. Ce qui est vrai des larves de mouches ne le serait-il pas aussi des autres bêtes ou plantes qu'on croit engendrées de la sanie ou de la décomposition ? Partout où l'on penche à voir une genèse équivoque ou spontanée, n'a-t-on pas affaire à un développement de germe inaperçu ? C'est, en effet, ce que pense Redi. Il faut, d'après lui, renoncer à la vieille doctrine qui fait naître le vivant du non-vivant. Entre le vif et l'inerte, la séparation est beaucoup plus tranchée qu'on ne l'imaginait de prime abord. Si la matière vivante peut périr, la matière morte, elle, ne peut s'animer, et donc, tout ce qui vit provient nécessairement d'une vie préexistante. »

▶ **Francesco Redi** ***(1626-1698) [Musée d'histoire naturelle, Florence].***

G. Dagli Orti

Cette conception de la continuité vitale ne fut cependant totalement admise que deux siècles plus tard, après les expériences de Pasteur, car la révélation, grâce au microscope, de l'existence de tant de « petites bêtes » redonna aux partisans de la génération spontanée l'espoir que les Bactéries et les Infusoires pouvaient apparaître spontanément dans un milieu convenable.

Avant même que fût posé le problème de la génération spontanée, il était admis que, chez les espèces supérieures, l'embryon naissait et s'organisait par une sorte de fermentation de la masse fluide et amorphe constituée par le mélange des semences des deux parents. D'après cette théorie, dite de l'*épigenèse,* l'embryon se constituait spontanément à partir du milieu formé par les semences, de la même manière que les asticots se formaient spontanément à partir de la viande. A ces idées, héritées de la Grèce antique, s'opposèrent celles des *préformationnistes.* Pour résoudre le problème posé par le passage de l'inorganisé à l'organisé, ces derniers supposaient qu'il existait dans la semence un embryon préformé que la nourriture dilatait et amplifiait. La question se posa alors de savoir laquelle des semences mâle et femelle apportait le germe contenant l'embryon préformé. A ce sujet, les avis étaient divergents. Les *ovistes* pensaient que le germe était dans l'œuf et que le rôle du parent mâle se réduisait à stimuler la croissance du petit animal qui y était contenu. Mais, lorsqu'en 1677 furent découverts les « animalcules » qui existent dans le sperme, beaucoup de naturalistes considérèrent que c'étaient les spermatozoïdes qui contenaient les germes. Un cytologiste alla même jusqu'à dessiner un petit « homunculus » dans la tête du spermatozoïde.

Au cours du XVIII[e] siècle, aucun argument décisif ne permit de départager les partisans de l'épigenèse et de la génération spontanée des partisans des germes. Toutes les observations accumulées au cours de cette période semblaient renforcer chacune des deux écoles. Elles préparèrent toutefois la naissance de la théorie qui permit de mettre tout le monde d'accord : la *théorie cellulaire,* formulée, en 1839, par les biologistes allemands Schleiden et Schwann.

Ces chercheurs définirent la cellule et son noyau comme l'unité élémentaire de la vie. Jean Rostand décrit ainsi l'importance de cette conception : « Cette théorie ne tarda pas à s'imposer dans le double domaine de la zoologie et de la botanique. Son succès fut immédiat, aucune résistance n'entrava ses progrès. C'est qu'elle correspondait exactement à l'état où se trouvait déjà parvenue la science de la vie. Nullement révolutionnaire, venant juste à son heure, comme appelée par les faits, elle groupait en une vaste et cohérente synthèse un ensemble de données généralement admises, qui n'attendaient que d'être ainsi rassemblées et ordonnées pour s'éclairer les unes par les autres. »

Le développement embryonnaire put être expliqué par des divisions, des transformations ou des déplacements de cellules, et l'origine de chaque individu ramenée à la formation de la cellule œuf. La cellule œuf associe l'idée de germe avec l'idée de préformation puisqu'elle contient en puissance l'être futur et qu'elle n'est pas quelque chose d'amorphe.

Les rôles respectifs de l'ovule et du spermatozoïde dans la fécondation furent éclaircis par Oscar Hertwig qui, en 1875, assista à la fusion de leurs deux noyaux dans l'œuf fécondé d'oursin. Il interpréta et généralisa cette observation en affirmant que la fécondation consiste essentiellement en la fusion de deux noyaux : le noyau d'origine maternelle, celui de l'ovule, et le noyau d'origine paternelle, celui du spermatozoïde. A la même époque, Édouard Strasburger décrivait la division cellulaire, ou mitose, et mettait l'accent sur le comportement de certaines particules facilement colorables, qui se divisent en deux. En 1888, ces particules seront appelées chromo-

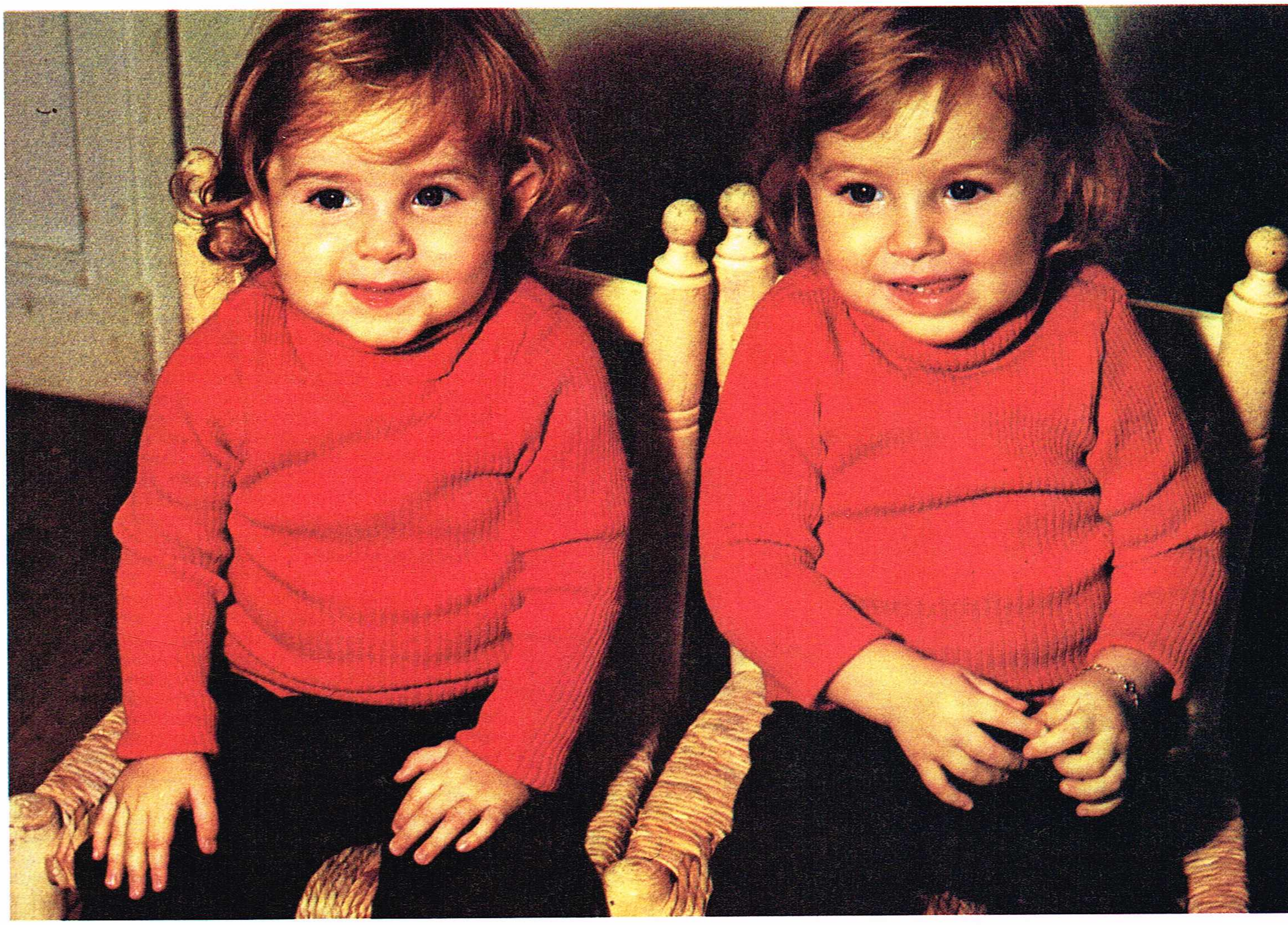

▲ ***La ressemblance, si frappante, qui existe entre les vrais jumeaux permet d'illustrer la reproduction conforme, ou mitose, et la différenciation cellulaire.***

somes. Une constatation très importante fut alors faite par Édouard Van Beneden sur l'ascaris, un ver parasite de l'intestin. Van Beneden observa, d'une part, que le nombre de chromosomes dans les noyaux des ovules est identique au nombre de chromosomes dans les noyaux des spermatozoïdes et, d'autre part, que ce nombre représente la moitié de celui présent dans les cellules qui donnent naissance aux gamètes (ovules ou spermatozoïdes). C'était la mise en évidence de la réduction chromatique au cours de cette division cellulaire particulière que représente la *méiose*. Grâce à ces résultats, apparut alors l'idée que les chromosomes pouvaient être les organites jouant le rôle prépondérant dans les phénomènes d'hérédité. C'est sur cette base que Weismann développa sa *théorie chromosomique de l'hérédité,* théorie qui ne connut son plein développement que plus tard, en 1900, lorsque furent redécouvertes les lois énoncées par Mendel dès 1865. Morgan put alors faire la corrélation entre la ségrégation des caractères et la ségrégation des chromosomes. Les principales règles qui régissent la formation des êtres pluricellulaires étaient ainsi connues.

Après ce rapide historique, voyons maintenant comment se pose le problème de la reproduction sexuée dans le cadre de la théorie cellulaire, étant établi d'autre part que les chromosomes sont le support de l'information génétique. La première chose qui frappe quand on examine l'ensemble des représentants d'une espèce donnée, par exemple l'espèce humaine, c'est la très grande variabilité à l'intérieur d'un même schéma d'organisation. Si l'on étudie par exemple les cheveux, on remarque que, d'une part, tous les individus de l'espèce humaine en sont ou en ont été pourvus, mais, que, d'autre part, ces cheveux peuvent être crépus, frisés, plats, blonds, châtains ou noirs. La présence de cheveux est une caractéristique constante de l'espèce humaine; par contre, leur structure peut varier énormément. Ce genre de constatation peut être fait pour une quantité d'autres caractères, et les possibilités de combinaison de ces caractères sont telles qu'il n'existe pas, à part quelques exceptions, deux individus absolument identiques.

Les exceptions sont de deux types : d'une part, celles dues au hasard, dans les cas très rares où l'on observe les mêmes caractères dans deux individus différents non apparentés (ce sont les *sosies*), et, d'autre part, les *jumeaux* univitellins, c'est-à-dire les jumeaux issus d'un même œuf. La ressemblance si frappante qui existe entre les vrais jumeaux permet d'illustrer la reproduction conforme, ou mitose, et la différenciation cellulaire, dont l'étude sera entreprise dans des chapitres ultérieurs. A l'origine des vrais jumeaux, il n'y a qu'une cellule œuf dont les produits de la première division (la première mitose), au lieu de rester accolés ensemble pour constituer un seul organisme, se séparent et constituent chacun un organisme entier. Ces deux cellules donnent naissance à deux organismes parfaitement identiques, montrant ainsi qu'à l'issue de la mitose elles étaient identiques dans leurs potentialités.

Ces potentialités s'expriment au cours du développement embryonnaire, pendant lequel les cellules se spécialisent peu à peu et n'expriment plus qu'une partie de leurs possibilités. C'est cette spécialisation qui rend les cellules si différentes les unes des autres dans un organisme, ces différences d'aspect ne traduisant pas des échecs de la mitose mais simplement des expressions différentes des possibilités cellulaires. Si on fait abstraction de tous les facteurs externes qui agissent sur ce développement, et ils sont très nombreux, on peut dire que l'individu est défini dès que l'œuf est constitué. La grande variabilité que l'on observe au niveau des différents individus d'une même espèce correspond donc, dans la majorité des cas, à la variabilité des potentialités des différents œufs qui leur ont donné naissance. D'où

▶ ***Représentation schématique d'un cycle* diplobiontique *et d'un* cycle haplobiontique *; l'espèce humaine, dont la très grande majorité des cellules est diploïde, est définie comme une espèce diplobiontique.***

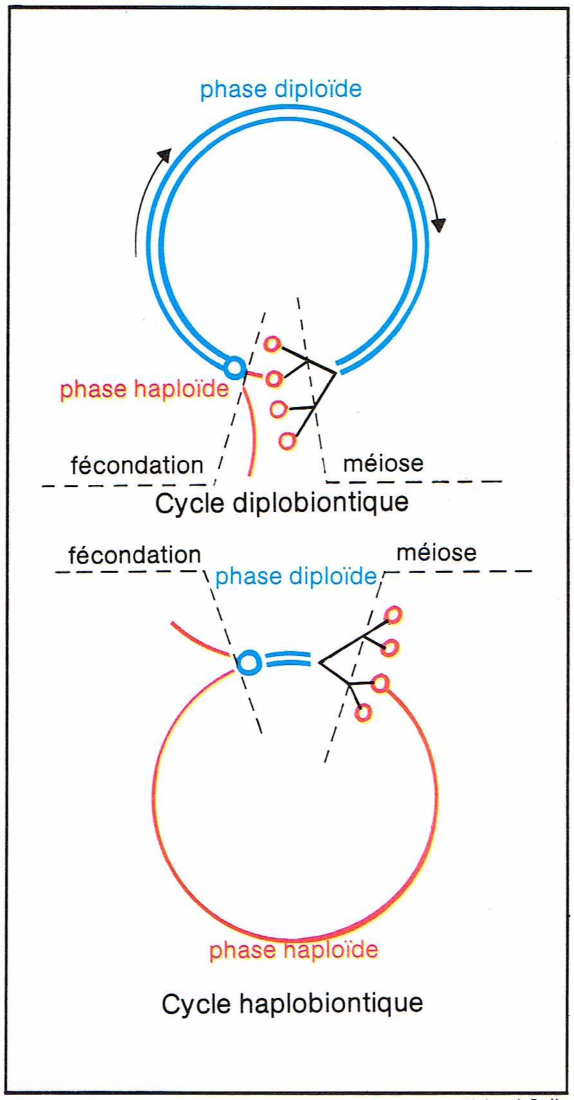

Richard Colin

▶ ***Page ci-contre, représentation schématique de la* méiose.**

vient cette variabilité ? Si l'on considère un couple de parents, on s'aperçoit que les descendants, bien qu'ayant certaines caractéristiques de leur père ou mère, sont très différents les uns des autres ; un couple donné de parents est donc capable de donner des œufs très différents les uns des autres. Sachant qu'un œuf est constitué par la fusion d'un ovule et d'un spermatozoïde, c'est au niveau de ces gamètes qu'il nous faudra rechercher la variabilité observée.

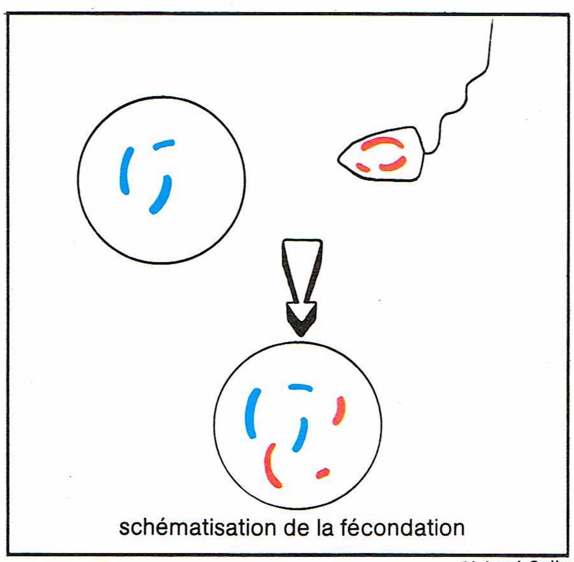

Richard Colin

▶ ***La* fécondation *est le phénomène qui, par la fusion de deux gamètes haploïdes, conduit à la formation d'une cellule diploïde, appelée œuf ou zygote.***

Notion de cycle

Chaque espèce est caractérisée par l'existence d'un nombre défini de chromosomes dans chacun des noyaux de chacune de ses cellules. Pour l'espèce humaine, ce nombre est de 46. Nous avons vu que les gamètes contiennent moitié moins de chromosomes (par exemple, les ovules et les spermatozoïdes humains ne contiennent chacun que 23 chromosomes). Lors de la fécondation, l'union de l'ovule et du spermatozoïde permet de rétablir le nombre de 46 chromosomes. Par définition, on dira que les cellules à 46 chromosomes sont *diploïdes* et que les gamètes à 23 chromosomes sont *haploïdes*. Une autre façon d'exprimer cet état de choses est de dire que chaque gamète ne contient qu'un seul lot de chromosomes et que la cellule œuf issue de la fusion des deux gamètes en contient deux lots, ou 2 n chromosomes. Dans la genèse d'un individu on peut ainsi définir deux phases : la *phase haploïde*, c'est-à-dire la phase où les cellules ne contiennent que n chromosomes (pour l'espèce humaine, cette phase est représentée par nos gamètes), et la *phase diploïde*, c'est-à-dire la phase où les cellules contiennent 2 n chromosomes ; cette dernière phase est la phase prépondérante pour l'espèce humaine ainsi que pour tous les animaux ou végétaux supérieurs ; c'est celle que constitue notre corps, dont la quasi-totalité des cellules est diploïde. Les seules cellules haploïdes que nous ayons sont les gamètes que nous produisons.

Le mécanisme particulier qui régit la formation de ces gamètes pour permettre ainsi la réduction chromatique, le passage de la phase diploïde à la phase haploïde, est la *méiose*, ensemble de divisions cellulaires particulières dont nous analyserons plus loin les modalités.

Comme on vient de le voir, les cellules de l'espèce humaine sont dans leur très grande majorité des cellules diploïdes : l'espèce humaine est ainsi définie comme une espèce à *cycle diplobiontique* par opposition aux espèces à *cycle haplobiontique,* dont la majorité des cellules est haploïde. Les espèces à *cycle haplodiplobiontique* sont les espèces dont les phases haploïde et diploïde ont toutes les deux une certaine importance. Les espèces à cycle diplobiontique se caractérisent donc par une phase haploïde très réduite : le nombre de générations cellulaires réalisé par les cellules haploïdes est très réduit, et la méiose, c'est-à-dire le mécanisme qui permet le passage de la phase diploïde à la phase haploïde, est immédiatement suivie par la fécondation, mécanisme qui permet le passage de la phase haploïde à la phase diploïde.

Chez les espèces à cycle diplobiontique, les gamètes sont directement les produits de la méiose. Les espèces à cycle haplobiontique, par exemple les Champignons, ont, au contraire, une phase diploïde très réduite : la fécondation, qui permet la constitution d'une cellule diploïde, est immédiatement suivie par la méiose.

Ainsi, les gamètes ne sont plus les produits de la méiose ; ils ne sont, parmi toutes les cellules de la phase haploïde, que des cellules particulières, celles qui participent à la fécondation.

La fécondation et la méiose sont donc les deux mécanismes qui constituent les charnières d'un cycle. Ils permettent respectivement le passage de la phase haploïde à la phase diploïde et le passage de la phase diploïde à la phase haploïde. Nous allons examiner plus en détail ces deux mécanismes, plus particulièrement celui de la méiose ; celle-ci permet en effet de rendre compte de l'énorme brassage génétique qui a lieu d'une génération à l'autre.

La fécondation

Comme nous venons de le voir, la fécondation est le phénomène qui, par la fusion de deux gamètes haploïdes, conduit à la formation d'une cellule diploïde, appelée *œuf*, ou *zygote ;* la fécondation permet ainsi le passage de la phase haploïde à la phase diploïde.

Dans la majorité des espèces, la fécondation a lieu entre des gamètes de tailles différentes ; on dit qu'il y a *anisogamie*. Le gamète femelle est immobile et possède un cytoplasme riche en réserves. Le gamète mâle, beaucoup plus petit, est mobile et ne contient que très peu de cytoplasme. Cette disparité dans les tailles des deux

gamètes est en rapport avec une différence au niveau de leur participation respective dans la constitution du cytoplasme et des réserves de l'œuf. Par contre, chaque gamète contribue de façon équivalente à la fabrication du noyau de l'œuf : chacun des deux gamètes contient *n* chromosomes. Une fois que la fusion des deux cellules est réalisée, la cellule œuf contient les deux noyaux haploïdes. Ces deux noyaux fusionnent à leur tour et le nouveau noyau contient ainsi la somme des chromosomes apportés par chacun des gamètes : ce nouveau noyau est diploïde.

Pour simplifier la suite de l'exposé, nous appellerons les *n* chromosomes apportés par l'un des gamètes : « chromosomes rouges », et les *n* chromosomes apportés par l'autre gamète : « chromosomes bleus ». Les deux gamètes apportent dans l'œuf non seulement le même nombre de chromosomes, mais aussi les mêmes types de chromosomes. Par exemple, si l'un des deux gamètes apporte un petit, un grand et un très grand chromosome, l'autre gamète apportera également un petit, un grand et un très grand chromosome. Dans le noyau diploïde issu de la fécondation, chaque chromosome rouge se retrouvera donc en présence de son chromosome homologue bleu (les exceptions à cette règle seront envisagées au cours de l'étude du déterminisme du sexe).

Dans le cas d'un cycle diplobiontique, le noyau diploïde se divise suivant les modalités de la mitose, et ainsi tous les noyaux qui en descendent sont identiques entre eux et contiennent chacun 2 *n* chromosomes : *n* chromosomes bleus et *n* chromosomes rouges. Par exemple, dans le cas de l'espèce humaine, la quasi-totalité des cellules de notre corps contient 46 chromosomes : 23 nous viennent de notre mère, et les 23 autres nous viennent de notre père. Parmi toutes les cellules, les seules qui ne soient pas diploïdes sont les gamètes, haploïdes. Ceux-ci descendent de cellules diploïdes qui, en se divisant, n'ont pas suivi les modalités de la mitose, qui maintient le nombre de chromosomes, mais ont suivi les modalités d'un autre type de division cellulaire : la méiose.

La méiose

On appelle méiose les processus nucléaires qui permettent le passage de la phase diploïde à la phase haploïde. La méiose est un ensemble de deux divisions cellulaires dont seule la première est précédée d'une duplication des chromosomes. Pour en comprendre mieux les mécanismes, nous considérerons une cellule diploïde issue de la fécondation des deux gamètes portant *n* chromosomes bleus et *n* chromosomes rouges. Le noyau de la cellule qui va subir la méiose est ainsi constitué de 2 *n* chromosomes. Rappelons que, dans la plupart des organismes, chaque chromosome est doté d'un seul centromère, strictement localisé, organite qui commande les mouvements des chromosomes. Nous appellerons centromères bleus les centromères des chromosomes bleus et centromères rouges les centromères des chromosomes rouges.

De même que pour la mitose, alors que le mécanisme est continu, on peut décrire la méiose comme une séquence d'événements touchant les chromosomes : prophase I, métaphase I, anaphase I, télophase I, puis prophase II, métaphase II, anaphase II et télophase II. Du fait de la complexité et de la durée des événements qui se déroulent pendant la première partie de la première division de la méiose, la prophase I a été subdivisée en stades : leptotène, zygotène, pachytène, diplotène et diacinèse.

La méiose débute, comme la mitose, par une visualisation des chromosomes à l'intérieur du noyau : ceux-ci, au nombre de 2 *n*, apparaissent sous forme de très fins filaments *(stade leptotène)*. Chacun de ces filaments est déjà composé de 2 molécules d'ADN, dont la réplication s'est faite avant que des événements optiquement visibles aient eu lieu. Aux stades suivants *(zygotène* et *pachytène)*, on observe un *appariement des chromosomes*. C'est le phénomène le plus caractéristique de la méiose (il est totalement absent de la mitose). Chaque chromosome, tout en se condensant, c'est-à-dire en se raccourcissant et en devenant plus épais, s'apparie à son chromosome homologue. Cet appariement se fait point par point, centromère à centromère, bout de chromosome à bout

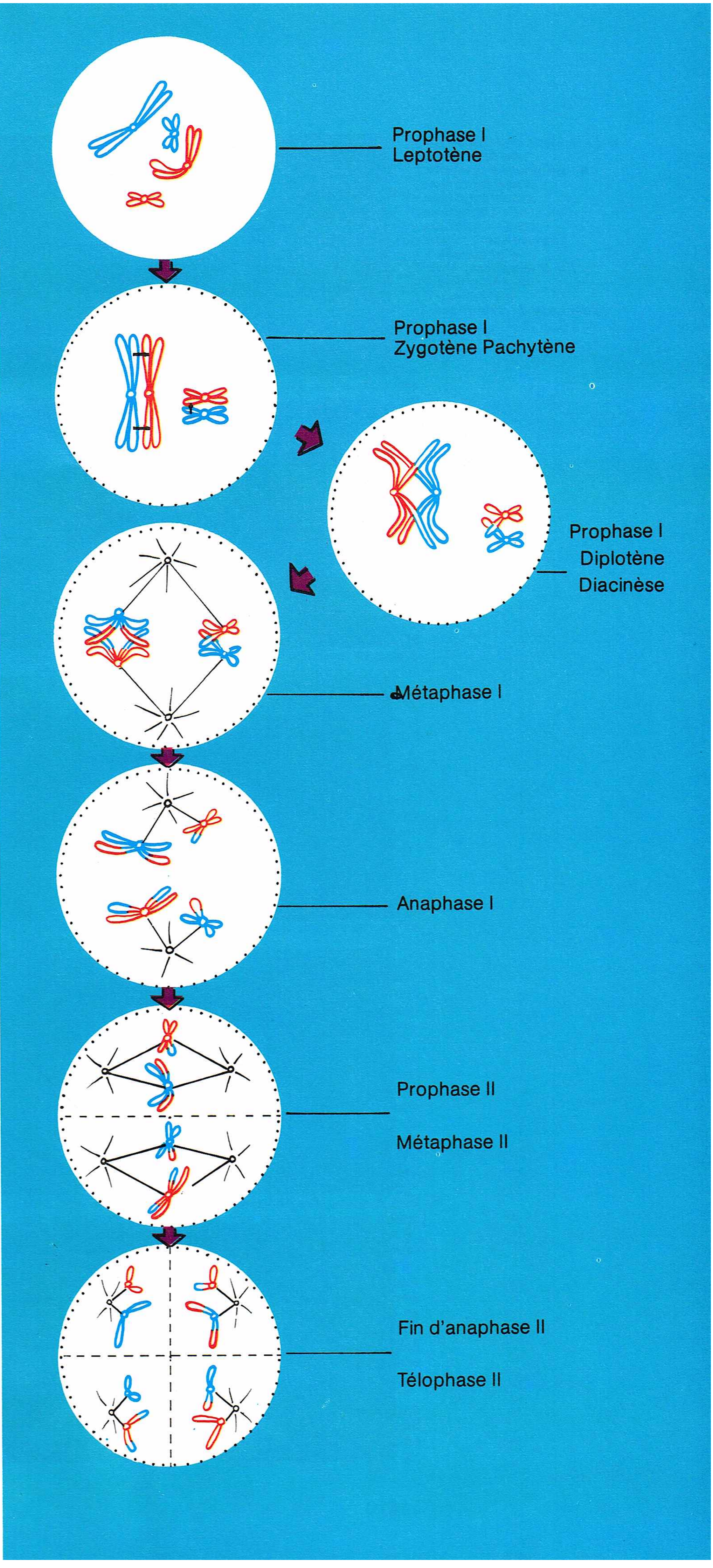

Richard Colin

▶ *La* méiose *chez le seigle; de haut en bas et de gauche à droite : stade* leptotène; *stade* zygotène; *stade* pachytène; *stade* diplotène; métaphase 1 ; *début d'*anaphase 1 ; *fin d'*anaphase, *début de* télophase 1 ; métaphase 2; anaphase 2; télophase 2.

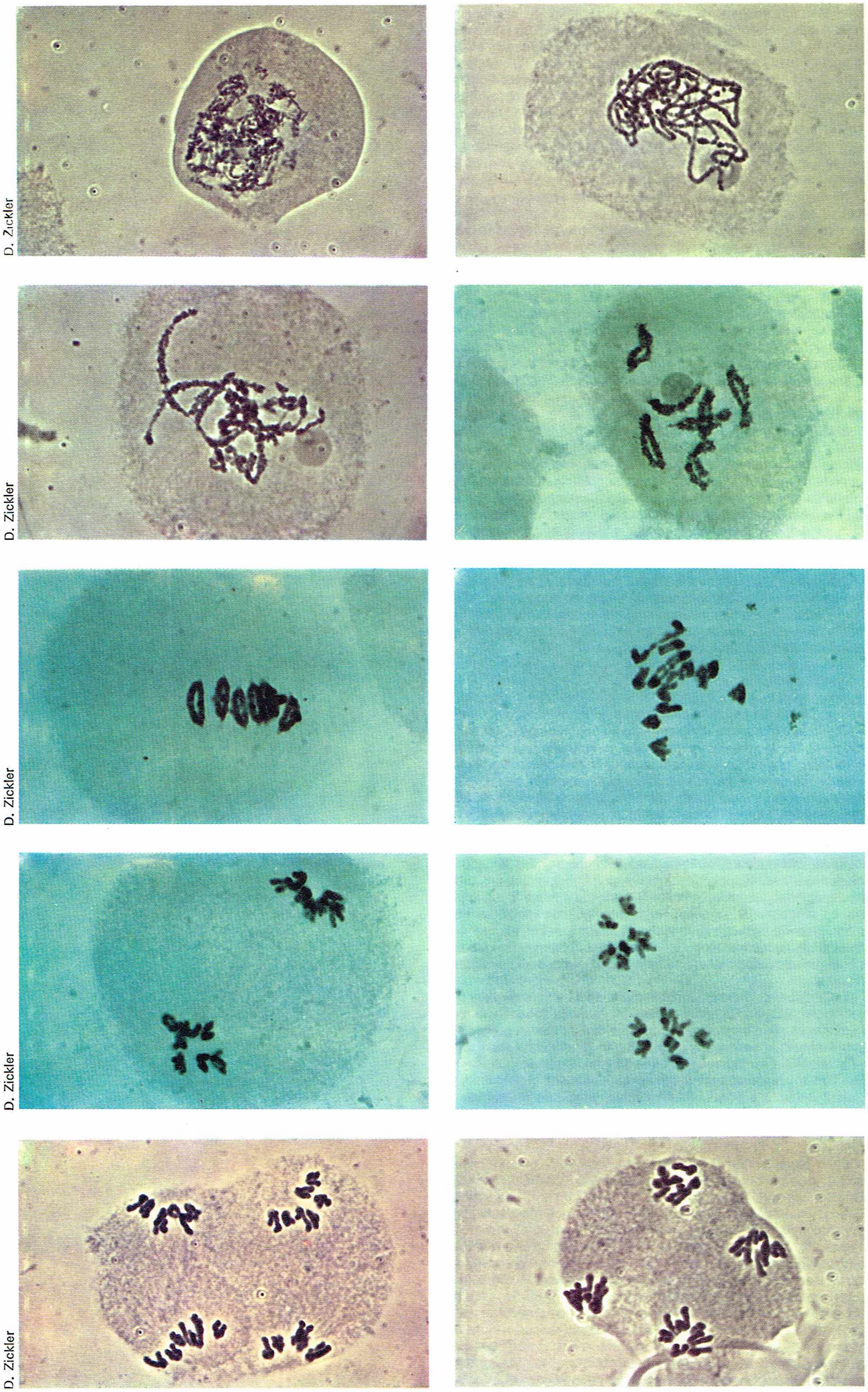

de chromosome, chromomère à chromomère et, en anticipant l'étude des gènes, gène à gène. Lorsque chaque chromosome rouge s'est ainsi apparié à son homologue bleu, le noyau contient alors *n* paires de chromosomes appariés *(n bivalents)*.

Dès la fin de l'appariement, on peut observer que chaque chromosome est formé de 2 *chromatides* étroitement accolées. Chaque chromatide contient une molécule d'ADN : c'est la visualisation de la duplication de l'ADN. Au total, chaque bivalent comptera ainsi 4 chromatides, 2 rouges et 2 bleues, mais n'a encore, à ce stade, que 2 centromères, 1 centromère rouge et 1 centromère bleu.

Aux stades suivants de la prophase I *(diplotène* et *diacinèse)*, on observe que les chromosomes continuent à se condenser et apparaissent de plus en plus courts et épais. Alors qu'au cours des stades précédents les chromosomes homologues s'étaient appariés de façon très étroite, au cours du diplotène et de la diacinèse, les chromosomes ont tendance au contraire à se séparer comme s'ils se repoussaient. En fait, ils ne se séparent pas entièrement, car ils restent attachés les uns aux autres en un certain nombre de points appelés *chiasmas*.

Une observation attentive montre que les chiasmas ne sont en fait que des points où les chromatides appariées changent de partenaire. Autrement dit, alors qu'au début de la division chaque chromosome rouge, constitué d'un centromère rouge et de deux chromatides rouges, s'était apparié à un chromosome bleu ayant lui aussi son centromère et ses deux chromatides, on observe qu'au niveau des chiasmas des échanges ont eu lieu : un morceau de chromatide bleue prend la place de son homologue rouge et réciproquement. Un centromère bleu, par exemple, se retrouve associé avec une chromatide bleue et une autre chromatide dont une partie est bleue et une extrémité est rouge. Réciproquement, le centromère rouge homologue se retrouve associé avec une chromatide rouge et une chromatide dont une partie est rouge et une extrémité est bleue.

Les points du chromosome où se forment des chiasmas ne sont pas déterminés à l'avance : à chaque méiose, leur nombre et leur position varient. Ils sont disposés de façon aléatoire sur les bras des chromosomes. Les chiasmas sont la visualisation d'événements qui se sont déroulés au cours de la phase d'appariement. Nous verrons plus loin les conséquences génétiques de ces échanges entre chromatides.

Durant la fin de la prophase I (stade *diacinèse*), la condensation des chromosomes est devenue très intense; ceux-ci ne restent attachés qu'au niveau de leurs chiasmas. D'ailleurs, ces derniers commencent leur terminalisation, c'est-à-dire glissent vers les extrémités des chromosomes : les chromatides qui ont subi des échanges glissent l'une sur l'autre, sous l'effet des forces de répulsion qui semblent exister au niveau des chromosomes. Les croisements entre chromatides que l'on peut observer à ce stade tardif de la prophase ne correspondent donc plus aux lieux où des échanges se sont opérés.

Au cours de la *métaphase*, les *n* bivalents se disposent sur le plan équatorial, de telle sorte que les deux centromères de chaque bivalent sont de part et d'autre du plan.

A l'*anaphase*, les centromères sont tirés vers les pôles de la cellule et amènent avec eux les chromosomes qui leur sont liés. A la fin de ce stade, de chaque côté de la cellule, on trouve ainsi *n* chromosomes composés chacun de 2 chromatides.

La deuxième division de la méiose commence immédiatement sans qu'il y ait une nouvelle synthèse d'ADN. D'un point de vue cytologique, cette seconde division ressemble beaucoup à la mitose d'une cellule haploïde (*n* chromosomes). La première partie *(prophase II)* en est cependant plus courte, les chromatides étant déjà différenciées. Les *n* centromères de chacune des deux cellules se disposent sur le plan équatorial à la *métaphase*, puis se scindent en deux; c'est à l'*anaphase* qu'a lieu la répartition des chromatides. Chaque chromatide se retrouve maintenant avec son propre centromère et prend le nom de chromosome. A la fin de cette seconde division *(télophase II)*, on se trouve donc en présence de 4 cellules contenant chacune *n* chromosomes. Suivant les organismes, ces cellules haploïdes donneront naissance à des gamètes, ou se développeront pour donner naissance à un organisme haploïde qui différenciera des gamètes (le *gamétophyte* chez les plantes).

Il est nécessaire de revenir sur certains aspects de la méiose pour en voir les conséquences au niveau du brassage génétique. Tout d'abord, considérons le devenir d'une seule paire de chromosomes homologues : 1 chromosome bleu et 1 chromosome rouge. Au cours de la méiose, nous avons observé que chacun de ces 2 chromosomes se duplique en 2 chromatides, qu'il s'apparie pour former un bivalent, et qu'ensuite chacune de ces 4 chromatides se retrouve dans une des 4 cellules issues d'une méiose. Considérons maintenant le chromosome de façon plus précise et, en particulier, son centromère, l'élément qui, par l'intermédiaire de fibres contractiles, permet aux chromosomes de se déplacer du plan équatorial vers un pôle de la cellule.

Dans un premier temps, le centromère bleu s'apparie au centromère rouge, puis s'en sépare et la première division les sépare complètement, de telle sorte que d'un côté se trouve un centromère bleu et de l'autre un centromère rouge.

A la seconde division, chacun de ces 2 centromères se divise et donne 2 centromères qui vont aller chacun dans une des 4 cellules produites par la méiose. On observe ainsi que 2 des 4 cellules filles auront un centromère bleu et que les 2 autres cellules auront un centromère rouge. On remarque d'autre part que la séparation entre le bleu et le rouge se fait dès la première division, c'est-à-dire que, dès la première division, d'un côté il n'y a que du bleu et de l'autre que du rouge.

Examinons maintenant ce qui se passe pour les bras des chromosomes. Dans un premier temps, considérons le cas où aucun chiasma n'a eu lieu sur un des bras du chromosome. Après la phase d'appariement, puis la première division, le centromère bleu sera donc associé à 2 chromatides bleues, et le centromère rouge à 2 chromatides rouges. A la deuxième division, quand les centromères se scindent en deux, il y aura donc, d'un côté, 2 cellules contenant chacune 1 chromatide entièrement rouge et, de l'autre côté, 2 cellules contenant chacune 1 chromatide entièrement bleue.

Supposons maintenant qu'au cours de la phase d'appariement un chiasma ait eu lieu sur ce bras chromosomique. Le chiasma, comme on l'a vu précédemment, est la conséquence d'un échange de morceaux de chromatides *(crossing-over)*. A la première division, nous avons donc : d'un côté, un centromère bleu associé à une chromatide bleue, et une chromatide « remaniée » dont la partie proche du centromère est bleue alors que son extrémité est rouge; de l'autre côté, de façon symétrique, il y a un centromère rouge associé à une première chromatide entièrement rouge et à une deuxième chromatide dont l'extrémité est bleue.

A la deuxième division, on trouvera : d'un côté, 2 cellules contenant respectivement une chromatide entièrement bleue et une chromatide remaniée dont l'extrémité est rouge; de l'autre côté, 2 cellules contenant respectivement une chromatide entièrement rouge et une chromatide remaniée dont l'extrémité est bleue.

L'effet du crossing-over que nous venons d'analyser n'est intéressant que dans la mesure où, si l'on fait le raisonnement inverse, il permet de savoir si, au cours d'une méiose donnée, un crossing-over a eu lieu ou non. Supposons, par exemple, que l'on possède sur le bras chromosomique étudié des « marqueurs » permettant de distinguer le chromosome bleu du chromosome rouge. (La nature de ces marqueurs sera étudiée plus en détail au cours du chapitre concernant la génétique.) Supposons que le chromosome bleu possède aux points A et B les marqueurs *a* et *b*, alors que le chromosome rouge possède en ces mêmes points A et B les marqueurs *a'* et *b'*. Si aucun crossing-over n'a lieu entre A et B, les chromosomes resteront soit bleus, soit rouges entre A et B, et les quatre produits de la méiose seront constitués respectivement de 2 cellules contenant chacune 1 chromosome portant *a* et *b* ainsi que de 2 cellules contenant chacune 1 chromosome portant *a'* et *b'*. Si un crossing-over a lieu entre A et B, 2 des 4 chromatides resteront inchangées et les 2 autres seront remaniées. Les 4 produits de la méiose contiendront respectivement des chromosomes ayant les structures suivantes : *ab*, *ab'*, *a'b* et *a'b'*.

Par le raisonnement inverse, si on connaît la structure des chromosomes bleus *(a, b)* et rouges *(a', b')* avant la méiose, l'analyse des produits de celle-ci permet de dire s'il y a eu ou non crossing-over entre *a* et *b*.

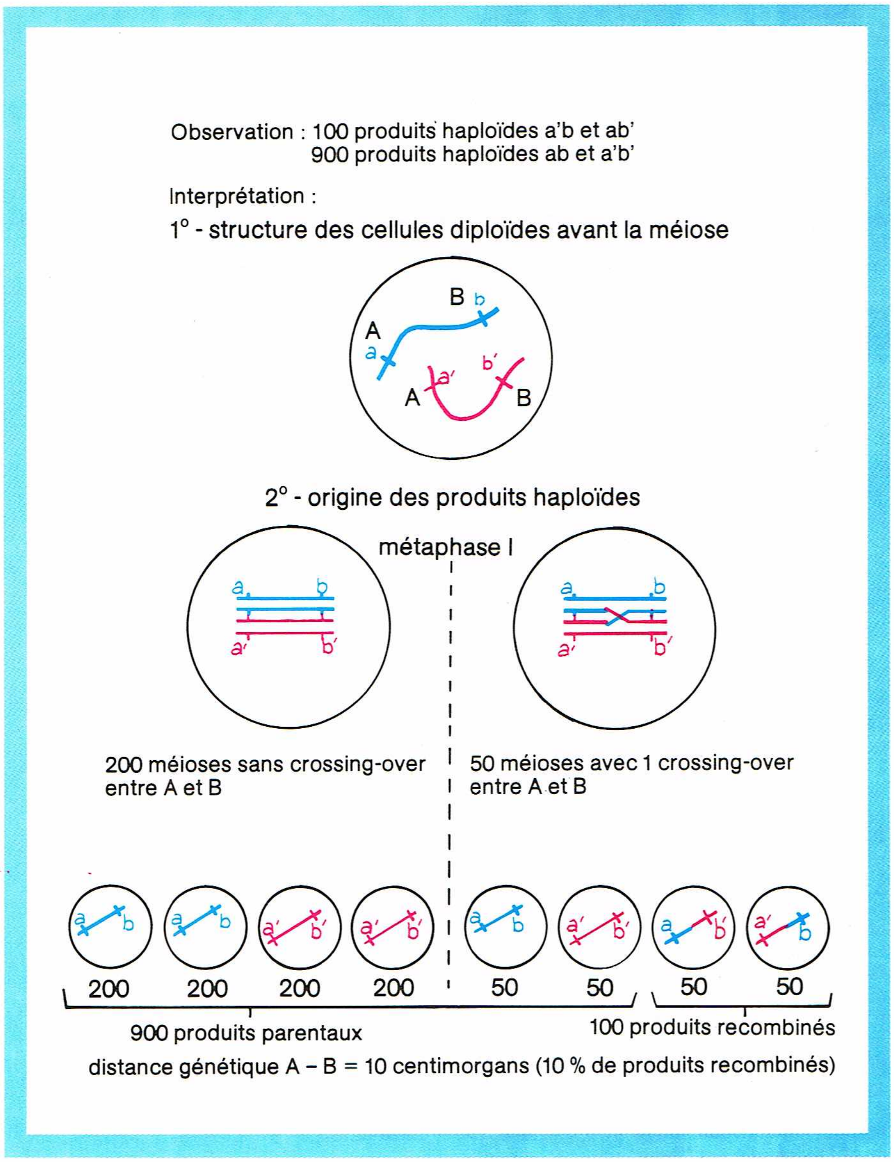

Richard Colin

▲ ***Mise en évidence d'une « liaison » entre deux marqueurs génétiques.***

Supposons, ainsi, que l'on analyse 1 000 produits de la méiose et que l'on trouve 900 produits *ab* ou *a'b'* et 100 produits *a'b* et *ab'*. De cette observation on peut déduire que, parmi les 250 méioses qui ont donné les 1 000 produits analysés, 50 ont fait l'objet d'un crossing-over entre A et B : ce sont elles qui sont à l'origine des 100 produits *a'b* et *ab'*. Les 100 produits *a'b* et *ab'* sont *recombinés* par rapport aux marqueurs A et B. Si, comme dans cet exemple, ils représentent 10 % des produits, on dit qu'il y a eu 10 % de *recombinants*.

Ce *pourcentage de recombinaison*, directement lié au pourcentage de crossing-over qui ont eu lieu entre les deux points, est une sorte de mesure de la distance génétique existant entre A et B. En effet, si A et B avaient été beaucoup plus proches l'un de l'autre (on dit aussi plus *liés* l'un à l'autre), la fréquence des crossing-over entre A et B aurait été plus faible, et la fréquence de recombinants que l'on aurait observée aurait été plus faible. Inversement, si, par exemple, on observe 20 % de recombinés entre C et D, on peut dire que la probabilité qu'un crossing-over ait lieu entre C et D est plus grande que celle qui pourrait se produire entre A et B, et donc que la *distance génétique* C-D est plus grande que la distance A-B. Par convention, la distance C-D est de 20 *unités* et celle de A-B est de 10 *unités*.

On peut ainsi établir la *carte des chromosomes* en localisant les uns par rapport aux autres les marqueurs que l'on possède. (Les différentes méthodes qui permettent l'établissement de telles cartes chez les différents organismes seront expliquées plus en détail dans le chapitre consacré à la génétique.)

Les crossing-over ont donc pour conséquence de fabriquer de nouveaux types de chromosomes : avant la méiose, nous avions une paire de chromosomes homologues, l'un rouge et l'autre bleu. Après la méiose, on se trouve en présence de chromosomes qui, par le jeu des crossing-over, sont sur leur longueur alternativement rouges et bleus.

A ce premier type de réorganisation intrachromosomique de l'information génétique se surajoute un deuxième type de réorganisation, qui est interchromosomique : c'est aussi une conséquence directe des mécanismes de la méiose.

Nous avons jusqu'ici envisagé les conséquences de la méiose sur une paire de chromosomes homologues. Envisageons maintenant deux paires de chromosomes ; la cellule diploïde envisagée comporte ainsi deux chromosomes bleus et leurs deux chromosomes homologues rouges. Faisons abstraction des remaniements dus aux crossing-over et considérons que, au cours de la méiose, les chromosomes restent soit entièrement bleus, soit entièrement rouges.

A la métaphase de la première division, les deux bivalents peuvent se disposer de deux façons, soit que les chromosomes rouges se placent d'un côté du plan équatorial et les chromosomes bleus de l'autre, soit que de chaque côté on trouve les chromosomes rouges d'un bivalent et les chromosomes bleus de l'autre bivalent. Dans le premier cas, 2 des 4 cellules auront 2 chromosomes rouges et les 2 autres auront 2 chromosomes bleus. Dans le deuxième cas, chacune des 4 cellules sera constituée de 2 chromosomes, l'un bleu et l'autre rouge.

Comme dans le cas de la recombinaison intrachromosomique, la distinction entre les deux possibilités de répartition des chromosomes peut se faire en utilisant des « marqueurs génétiques ». Par exemple, supposons que, d'une part, sur une des paires de chromosomes homologues, on connaisse au point A le marqueur *a* pour le chromosome bleu et le marqueur *a'* pour le chromosome rouge et que, d'autre part, sur l'autre paire de chromosomes, on connaisse au point C le marqueur *c* pour le chromosome bleu et le marqueur *c'* pour le chromosome rouge. Dans le cas de la première disposition décrite, d'un côté, on aura 2 cellules contenant chacune *a* et *c* et, de l'autre, on aura 2 cellules contenant chacune *a'* et *c'*. Dans le cas de la deuxième disposition, d'un côté, on aura 2 cellules contenant chacune *a* et *c'* et, de l'autre, 2 cellules contenant chacune *a'* et *c*.

Étant donné que ces deux dispositions sont également probables, si l'on considère un grand nombre de méioses, dans la moitié d'entre elles nous aurons la première disposition et dans l'autre moitié nous aurons la deuxième disposition. Inversement, si l'on observe 1 000 produits de la méiose et que dans 500 de ces produits on constate les associations *ac'* ou *a'c,* alors que dans les 500 autres se présentent les associations *a'c'* et *ac,* on peut en conclure que les sites A et C où sont localisés les marqueurs génétiques sont situés sur des chromosomes différents. On dit que les marqueurs ségrègent indépendamment l'un de l'autre. Dans le cas précédent, les marqueurs A et B étaient situés sur le même chromosome, et on observait beaucoup plus de produits correspondant à l'association de départ que de produits recombinés. Dans le cas où les marqueurs sont localisés sur des chromosomes différents, on observe autant d'associations recombinées que d'associations d'origine *(associations parentales)*.

Ce que nous venons de voir avec deux chromosomes peut s'étendre à tous les chromosomes les uns par rapport aux autres. Dans le cas de deux chromosomes, il n'y avait que 2 possibilités, donnant 4 types de produits haploïdes *(ac, a'c', a'c, ac')*. Dans le cas de $n = 3$ chromosomes, il y aura 4 possibilités qui donneront 8 types de produits haploïdes. Et ainsi, pour n chromosomes, il y aura 2^n types de produits haploïdes. Dans le cas de l'espèce humaine, en supposant que l'on possède sur chaque chromosome un marqueur génétique, il y a plus de huit millions de types de produits haploïdes différents les uns des autres. Cette estimation est cependant très en dessous de la réalité, car, d'une part, nos chromosomes homologues diffèrent les uns des autres par beaucoup plus d'un point, et, d'autre part, nous n'avons pas tenu compte de toutes les possibilités de remaniements effectués par les crossing-over.

Description de quelques cycles

Nous venons d'analyser les deux étapes clés d'un cycle sexuel : la *méiose* et la *fécondation*. De plus, nous avons vu l'importance qu'avaient ces deux mécanismes pour permettre un brassage des chromosomes et de l'information génétique, ces deux mécanismes pouvant intervenir à des moments différents.

Avant d'aborder la description détaillée d'un certain nombre de cycles haplobiontiques, haplodiplobiontiques et diplobiontiques, examinons comment un caractère génétique donné passe d'une génération à l'autre. Dans le cadre d'un *cycle diplobiontique*, prenons par exemple : les caractères roux et bruns dans l'espèce humaine. On a pu montrer que, si un individu est roux, c'est parce qu'il porte en un endroit précis, que nous appellerons A, d'un chromosome précis, que nous appellerons ch I, une mutation qui a pour conséquence d'empêcher la fabrication du pigment permettant la coloration brune des cheveux. Nos cellules, qui sont diploïdes, contiennent chacune 2 lots de chromosomes et donc 2 ch I. Le point A existe donc lui aussi en 2 exemplaires, 1 sur chaque chromosome ch I. Pour qu'un individu soit roux, il faut qu'en ces deux points la mutation soit présente : on schématise cet état de fait en écrivant que l'individu est A^-/A^- (le signe $^-$ signifie que le point A est occupé par la mutation).

Considérons maintenant un individu brun appartenant à une famille où tous les individus sont bruns. De même que précédemment, ses cellules diploïdes posséderont le point A en deux exemplaires mais, à l'inverse des individus roux, en ce point A il ne portera pas la mutation et, pour indiquer la différence avec l'individu roux, on schématisera le contenu des points A par A^+/A^+ (le signe $^+$ signifie que le point A n'est pas occupé par la mutation).

Considérons maintenant les gamètes produits par ces deux individus. Leurs gamètes haploïdes contiennent un seul lot de chromosomes et donc un seul chromosome ch I. Tous les gamètes de l'individu A^+/A^+ seront donc A^+ et les gamètes de l'individu A^-/A^- seront A^-.

Supposons maintenant que ces deux individus soient de sexe différent et qu'ils aient des enfants. Tous leurs enfants seront issus de la fécondation d'un gamète A^+ et d'un gamète A^- et seront donc A^+/A^-. Seront-ils roux ou bruns ? Dans le cas précis de cette mutation, ils seront bruns parce qu'il suffit d'un seul A^+ par cellule pour que ces cellules soient capables de fabriquer le pigment ; ils possèdent néanmoins la mutation A^-, même si on ne la voit pas. L'état diploïde permet ainsi de « cacher » l'effet de certaines mutations. Ces enfants A^+/A^- produiront eux-mêmes des gamètes qui pour moitié seront A^+ et pour moitié seront A^-.

Si nous étions dans le cadre d'un *cycle haplodiplobiontique* et que les produits haploïdes donnés par les individus A^+/A^- eussent des cheveux, la moitié des produits aurait les cheveux roux et l'autre moitié des cheveux bruns, car dans ces produits haploïdes la mutation A^- est seule et ne peut donc pas se « cacher » derrière un éventuel A^+. La possibilité de « cacher » certaines mutations, qui existe dans la phase diploïde, n'existe pas dans la phase haploïde. Un individu diploïde peut ainsi transporter des mutations très néfastes qui restent « cachées », à cause de la présence dans les cellules diploïdes d'un deuxième chromosome ne portant pas la mutation. L'effet de la mutation n'apparaîtra que si un nouvel individu A^-/A^- est fabriqué à l'issue de la fécondation de deux gamètes portant chacun A^-. Ainsi, la consanguinité augmente la probabilité pour que *la même mutation néfaste* soit présente dans les deux gamètes qui participent à la fécondation.

Cycles diplobiontiques

Ce type de cycle caractérise essentiellement l'ensemble des Métazoaires, des Spongiaires aux Mammifères, en passant par les Insectes, les Poissons, les Reptiles et les Oiseaux. On l'observe aussi chez quelques animaux unicellulaires parmi les plus évolués, comme les paramécies. Chez les végétaux, le nombre d'espèces à cycle strictement diplobiontique est réduit, mais, chez les végétaux supérieurs, la durée de la phase haploïde est si réduite que nous décrirons ces derniers comme ayant un cycle diplobiontique et non pas haplodiplobiontique.

Observation : 500 produits haploïdes a'c et ac'
500 produits haploïdes ac et a'c'

Interprétation :
1° - structure des cellules diploïdes avant la méiose

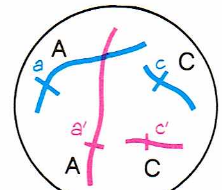

2° - origine des produits haploïdes
deux dispositions sont possibles au cours de la métaphase I

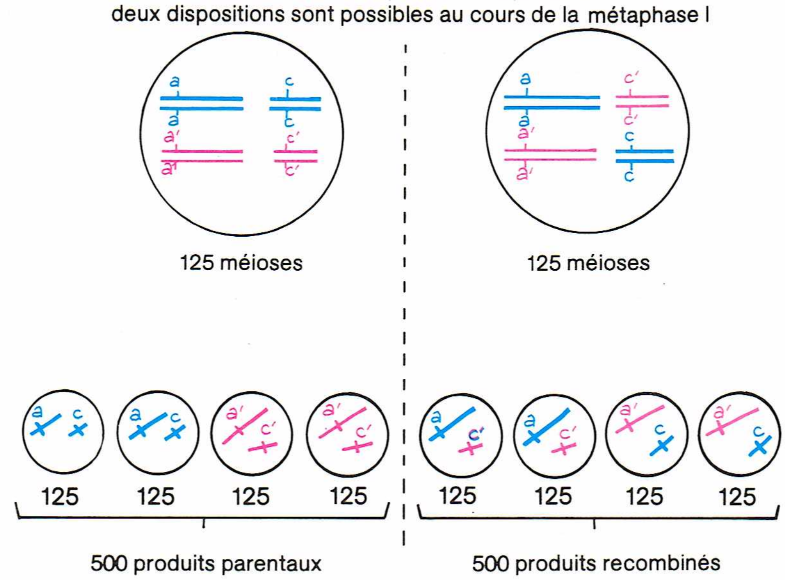

Richard Colin

▲ ***Mise en évidence d'une « indépendance » entre deux marqueurs génétiques ; dans le cas de l'espèce humaine, en supposant que l'on possède un marqueur génétique sur chaque chromosome, il y a plus de huit millions de types de produits haploïdes différents les uns des autres.***

Cycle, gamétogenèse et fécondation chez les animaux supérieurs

Examinons, par exemple, le cas de l'espèce humaine. La vie en tant qu'organisme diploïde commence à la fécondation, lorsque les deux gamètes, l'ovule et le spermatozoïde s'unissent pour former l'œuf. Cet œuf, diploïde, subit un très grand nombre de mitoses, et ainsi se forme un embryon dont les différentes cellules, au cours du développement embryonnaire, se différencient en telle ou telle cellule « spécialisée ». Cet embryon grandira et deviendra soit un homme, soit une femme. L'individu est ainsi constitué de milliards de cellules, quasiment toutes diploïdes, comme le zygote dont elles proviennent. Seules quelques-unes, localisées dans les organes génitaux, sont redevenues haploïdes après avoir subi la méiose : ce sont les cellules sexuelles : spermatozoïdes ou ovules. Ces gamètes, du moins quelques très rares d'entre eux, participeront à la constitution de nouveaux zygotes, et le cycle reprendra. Nous allons examiner plus en détail les mécanismes de formation des gamètes *(gamétogenèse)* chez les mâles *(spermatogenèse)* et chez les femelles *(ovogenèse)*.

Les *gamètes mâles,* ou *spermatozoïdes,* sont formés dans les gonades mâles, ou *testicules*. Les cellules (diploïdes) de la lignée germinale, qui vont donner naissance aux spermatozoïdes, ont été appelées *spermatogonies*. Ce sont des cellules arrondies d'aspect assez banal. Dans une première phase, les spermatogonies se divisent activement par mitose et donnent naissance à des cellules nommées *spermatocytes de premier ordre,*

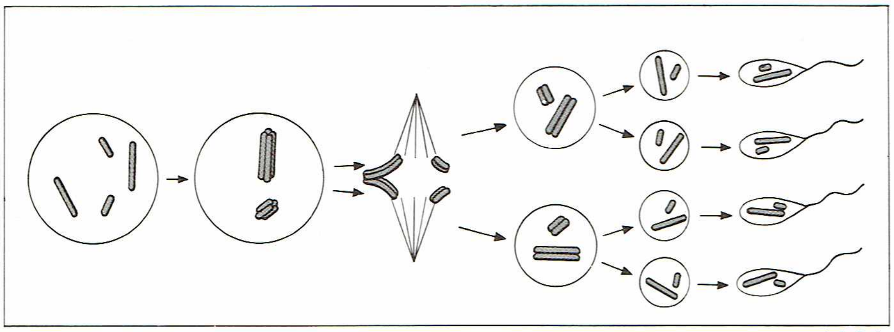

I.G.D.A.

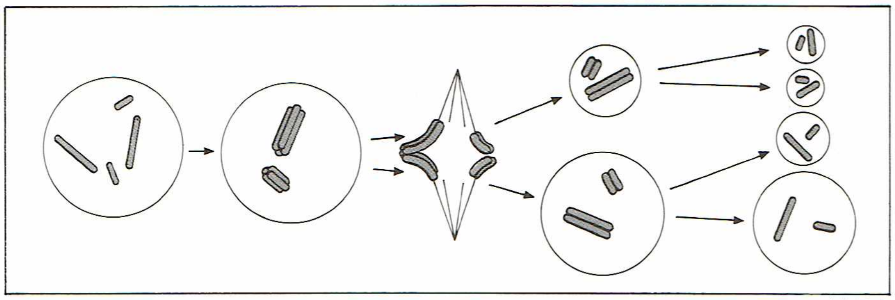

I.G.D.A.

▲ *Mode de* formation *des gamètes mâles, ou* spermatozoïdes *(en haut), et des gamètes femelles, ou* ovules *(en bas); à la fin de la méiose, dans le premier cas, chaque spermatocyte (diploïde) va donner 4 spermatozoïdes (haploïdes); dans le deuxième cas, chaque ovocyte (diploïde) va donner 4 cellules haploïdes : l'ovule fonctionnel et 3 globules polaires.*

▶ *Page ci-contre, en bas à gauche, schéma de la* gamétogenèse *et de la* fécondation *chez une Angiosperme : A-F, phases de formation du sac embryonnaire; np, noyaux polaires; oo, oosphère; sy, synergides; nm, noyaux mâles apportés par le tube pollinique : un des deux noyaux féconde l'oosphère tandis que l'autre féconde le noyau central (nc) obtenu par fusion des deux noyaux polaires; ca, cellules antipodes. En D, E, F, on note le contact du tube pollinique. G, H, I et L, grain de pollen, sa germination et la formation du tube pollinique (tp), et origine des noyaux mâles (nm). M, section d'un pistil : st, stigmates; cs, canal stylaire; tp, tube pollinique; nu, nucelle; mi, micropyle.*

qui vont subir une légère augmentation de taille avant de subir la méiose. Chaque spermatocyte, en subissant la méiose, donne d'abord naissance à 2 cellules, appelées *spermatocytes de deuxième ordre*, puis à 4 cellules haploïdes : les *spermatides*. Ces spermatides ne vont plus subir de division, mais un remodelage complexe va les transformer en gamètes mâles fonctionnels, ou spermatozoïdes.

Dans le spermatozoïde, on distingue trois parties : la *tête*, qui comprend le noyau coiffé par l'*acrosome* (dont nous verrons le rôle au cours de la fécondation), la *pièce intermédiaire*, qui renferme un manchon de mitochondries dont le principal rôle est de fournir l'énergie nécessaire aux battements du *flagelle*, lequel constitue la troisième partie. On voit donc que, par sa structure même, le spermatozoïde apparaît comme une cellule parfaitement adaptée à son rôle majeur de transporteur des chromosomes paternels.

Les *gamètes femelles*, ou *ovules*, sont formés dans les gonades femelles, ou *ovaires*. Si les mécanismes cytologiques de formation des ovules (ovogenèse) sont très différents de ceux qui régissent la formation des spermatozoïdes, le but en est cependant le même : produire des gamètes haploïdes. De plus, l'ovogenèse doit assurer la production d'une cellule assez grosse, contenant donc assez de réserves pour assurer les premières étapes de l'embryogenèse.

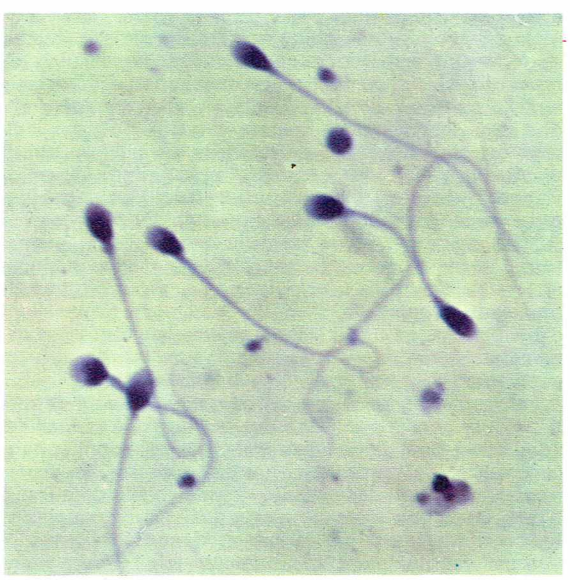

P. Castano

▶ *Quelques* spermatozoïdes *humains (× 750 × 1,3).*

L'ovogenèse commence par une phase de multiplication des *ovogonies*, qui se transforment en *ovocytes de premier ordre* (ovocyte I). Ces ovocytes vont connaître une phase d'accroissement, laquelle sera beaucoup plus importante que celle observée chez les spermatocytes. Ces ovocytes subissent ensuite la méiose. A la différence du spermatocyte, qui, à chacune des deux divisions de la méiose, donne naissance à deux cellules de taille identique, l'ovocyte, au cours de la première division de la méiose, donne naissance à deux cellules très inégales : l'une a pratiquement conservé tout le cytoplasme de l'ovocyte, alors que l'autre n'en n'a récupéré qu'une infime partie (cette petite cellule est appelée *globule polaire*). A la deuxième division de la méiose, le même phénomène se reproduit, tandis que le premier globule polaire émis se divise à son tour.

Chaque ovocyte, à la fin de sa méiose, a donc donné naissance à 4 cellules haploïdes, dont l'une est l'*ovule*, les 3 autres étant les *globules polaires*. Ces globules polaires, sauf dans quelques situations très particulières, ne joueront plus aucun rôle. Chez la plupart des espèces, ce n'est pas l'ovule ayant fini sa méiose qui est pondu, mais un stade plus précoce, tel que l'ovocyte I ou l'ovocyte II. C'est la fécondation qui entraînera la fin du processus de maturation de l'ovule.

Que la *fécondation* ait lieu à l'intérieur de la femelle, après accouplement des conjoints, ou dans l'eau, ses modalités restent les mêmes. La rencontre du spermatozoïde et de l'ovule n'est pas le résultat du hasard : les *gamones*, substances chimiques sécrétées par les deux gamètes, orientent la rencontre. Généralement, la tête du spermatozoïde entre en contact avec un point quelconque de la surface de l'ovule. La membrane de l'acrosome se rompt et libère des enzymes qui provoquent l'hydrolyse des membranes de l'ovule, permettant ainsi à la tête du spermatozoïde de pénétrer plus avant. A ce contact, l'ovule réagit de telle sorte qu'aucun autre spermatozoïde ne pourra plus rentrer; d'autre part, il termine sa méiose si celle-ci n'est pas finie. Le noyau du spermatozoïde se fusionne ensuite au noyau de l'ovule : c'est la *caryogamie*.

Le rôle du spermatozoïde est donc double; d'une part, apporter un lot de chromosomes et, d'autre part, « réveiller » l'ovule, qui peut être en dormance depuis de longues années. Les deux rôles ayant été bien dissociés, on a pu lever la dormance sans qu'il y ait fécondation et ainsi réaliser expérimentalement la parthénogenèse; des Amphibiens haploïdes ont été obtenus qui se sont développés uniquement à partir du noyau de l'ovule.

Cycle, gamétogenèse et fécondation chez une plante Angiosperme

Examinons, par exemple, le cas du maïs. Cette plante comprend une tige, des racines et des feuilles, dont l'ensemble correspond à la phase diploïde de son cycle. Les gamètes mâles et femelles sont produits respectivement par les étamines de la fleur mâle et par les ovaires de la fleur femelle.

Dans les étamines, se différencient des cellules qui vont donner naissance aux *grains de pollen*. Ces cellules sont les homologues des spermatocytes de premier ordre des animaux et représentent donc la dernière étape de la phase diploïde. Elles entrent en méiose et donnent naissance à 4 cellules haploïdes, qui vont chacune évoluer en un grain de pollen. Au cours de cette évolution, le noyau haploïde subit ensuite une mitose. D'autre part, le grain de pollen différencie une épaisse couche de cuticule qui lui permettra de résister à la sécheresse.

Quand le grain de pollen germe, il émet un long tube dans lequel s'engagent les deux noyaux haploïdes. Un de ces deux noyaux est appelé *noyau végétatif* et l'autre *noyau reproducteur*. Le noyau reproducteur subit une mitose supplémentaire, et ce sont les deux noyaux issus de cette division qui participeront aux fécondations qui ont lieu dans l'ovule. On peut donc considérer, par analogie avec ce que l'on a vu chez les organismes précédents, que seuls ces noyaux reproducteurs ont valeur de gamètes mâles. Le grain de pollen constitue donc l'une des parties haploïdes du cycle des plantes et, par analogie avec ce que nous verrons chez les Mousses ou les Fougères, constitue le *gamétophyte mâle*.

Dans l'ovaire, il existe aussi une phase haploïde réduite. A l'intérieur de chaque ovule, une seule cellule subit la

méiose. Il faut noter que le terme d'ovule n'a pas le même sens chez les botanistes et chez les zoologistes. Nous avons vu que chez les animaux ce terme est employé pour désigner la cellule ayant subi la méiose et qui va être fécondée ; chez les plantes, l'ovule désigne un organe complexe comprenant le nucelle et le sac embryonnaire. Des 4 produits de cette méiose, seule 1 cellule produira des noyaux ayant valeur de gamètes femelles. Cette situation est à rapprocher de celle que nous avons observée chez les Métazoaires, où chaque méiose femelle ne produit qu'un gamète femelle fonctionnel.

Après la méiose, le noyau haploïde de cette cellule subit 3 mitoses successives, donnant ainsi 8 noyaux haploïdes qui se répartissent dans le cytoplasme et que vont isoler les membranes cytoplasmiques. Cet ensemble est appelé *sac embryonnaire*. D'un côté se groupent 3 cellules, les *antipodes ;* 3 autres se groupent près du micropyle ; les 2 noyaux restants occupent la région centrale du sac. Le gamète femelle, appelé oosphère, est représenté par une des trois cellules localisées près du micropyle. Le sac embryonnaire constitue ainsi l'autre partie haploïde du cycle des plantes supérieures : c'est le *gamétophyte femelle*.

Nous avons vu que, lors de sa germination, le grain de pollen émet un long tube au bout duquel se trouvent deux noyaux haploïdes issus de la division du noyau reproducteur. Ce tube s'insinue entre les cellules du pistil, se dirige vers le sac embryonnaire et entre en contact avec lui. Les deux noyaux du tube pénètrent alors dans le sac et participent à deux fécondations. L'une s'effectue avec l'oosphère et donne un noyau diploïde qui, en se divisant, donnera naissance à un embryon, puis à une plante. L'autre a lieu entre un des noyaux amenés par le tube pollinique et les deux noyaux du centre du sac embryonnaire ; le noyau formé au cours de cette seconde fécondation est donc *triploïde ;* il donnera naissance à une sorte d'embryon abortif qui sera utilisé comme tissu de réserve de la graine et permettra le début du développement de l'embryon diploïde.

Le maïs, dont nous venons de voir certains aspects du cycle, est une plante hermaphrodite mais à fleurs mâles et femelles séparées. Chez beaucoup de plantes à fleurs, c'est chaque fleur qui est hermaphrodite. Comme nous

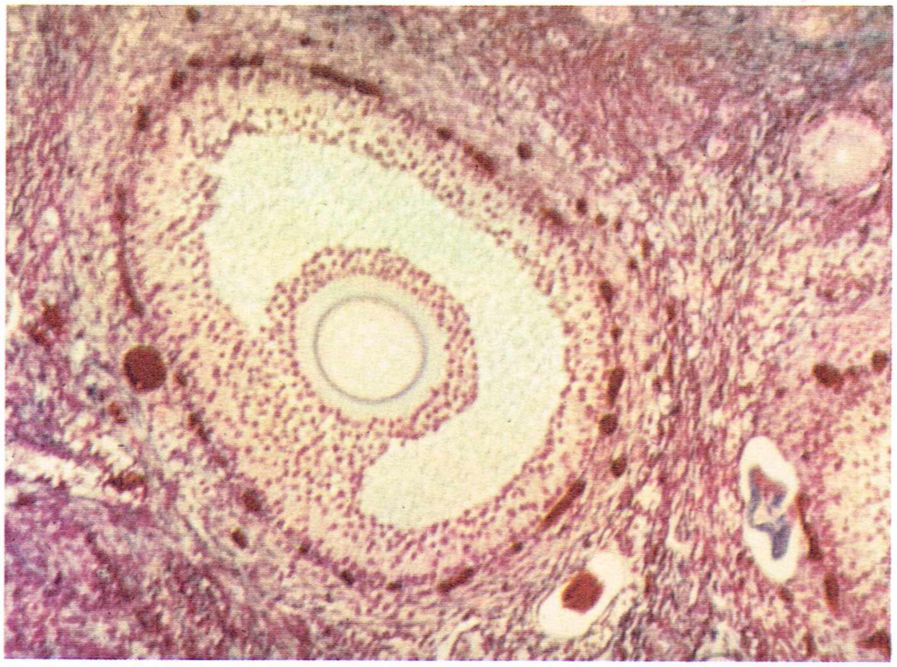

P. Castano

▲ ***Coupe d'un*** **follicule ovarien** ***(× 150 × 3).***

▼ ***Cycle vital d'une Graminée, le maïs*** **(Zea mays)** ***: A, plante (sporophyte) adulte ; B, panicule (inflorescence mâle) ; C, épi (inflorescence femelle) ; D, microsporocyte (2 n chromosomes). E, méiose ; F, chaque cellule issue de la méiose (n chromosomes). G, grain de pollen (microspore) ; H, germination du grain de pollen ; I, noyaux reproducteurs du tube pollinique ; L, mégasporocyte (2 n chromosomes) ; M, méiose ; N, mégaspores ; O, une seule mégaspore survit. P, sac embryonnaire mature avec noyau de l'oosphère (oo), noyaux des synergides (sy), noyaux polaires (np) et noyaux des antipodes (an) ; Q, fécondation ; R, graine mure avec l'embryon (em) diploïde et l'albumen (al) triploïde : la graine germe et donne naissance à une nouvelle plante.***

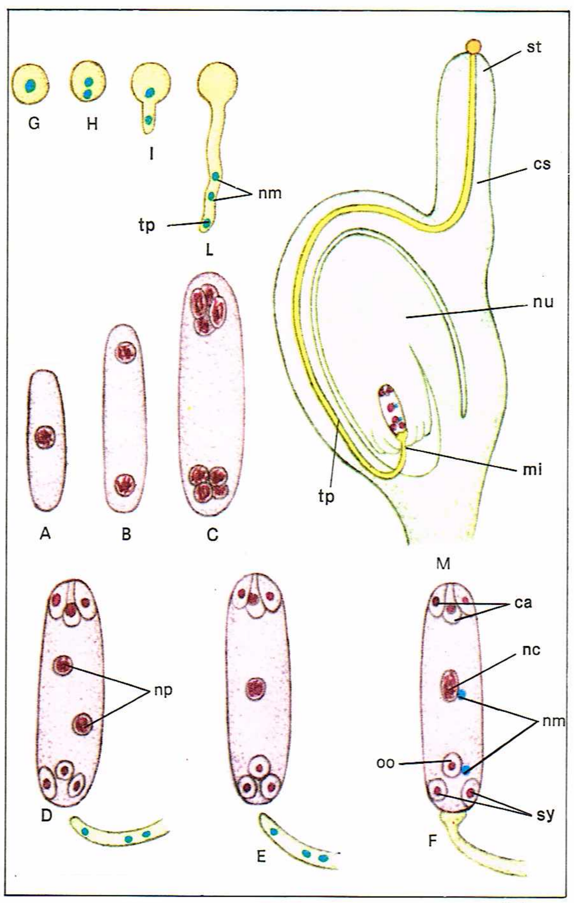

I.G.D.A.

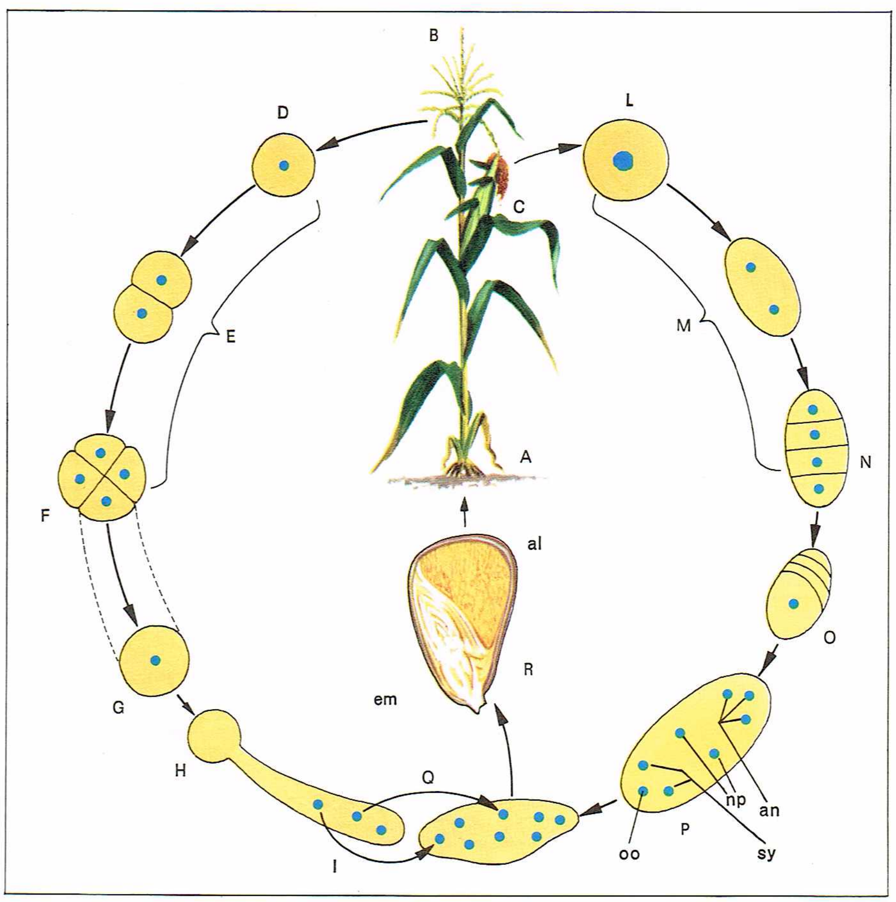

I.G.D.A.

▶ ***Phénomène de conjugaison** chez un **Infusoire** : quand les conditions extérieures changent, les cellules peuvent devenir sexuellement réactives et aptes à ce type de phénomène qui commence quand deux organismes de signes sexuels opposés se rencontrent.*

J.B. Crumeyrolle - Pitch

C. Nardin - Jacana

▲ ***Le cycle*** **haplodiplobiontique** ***caractérise surtout les plantes; ici des polytrics communs*** **(Polytrychum commune)** *[Mousses]*.

le verrons plus tard, l'autofécondation n'est cependant pas la règle ; suivant les espèces, la pollinisation s'effectue soit grâce au vent *(pollinisation anémophile)*, soit grâce aux Insectes *(pollinisation entomophile)*. Chez certains végétaux, la pollinisation par les Insectes peut être si spécialisée qu'elle ne s'effectue que par l'intermédiaire d'une espèce bien précise d'Insectes.

Le cycle d'un Protozoaire Cilié: la paramécie

Prenons pour exemple *Paramecium aurelia*. Dans chaque cellule de paramécie, il existe deux types de noyaux. Le plus gros, appelé *macronucléus*, est celui qui préside à la vie physiologique de la cellule. Par analogie avec les Métazoaires, ce macronucléus peut être considéré comme étant à lui seul la *lignée somatique*. Il est très hautement polyploïde (800 *n*). Les autres noyaux, beaucoup plus petits, appelés *micronucléus*, sont au nombre de 2 et sont diploïdes. Ils ne jouent probablement qu'un rôle très réduit dans le fonctionnement de la cellule. Par contre, ils sont les seuls à remplir une fonction dans les phénomènes de sexualité : la *conjugaison* et l'*autogamie*. Ces micronucléus peuvent être considérés comme étant la *lignée germinale* de la paramécie.

Quand les conditions sont favorables, la paramécie se multiplie par simple bipartition, les micronucléus subissant des mitoses normales et le macronucléus une division dont les modalités ne sont pas bien connues. S'il semble que celle-ci soit moins précise que celle qui a lieu au cours de la mitose classique, chaque cellule fille est néanmoins constituée à l'issue d'une division de deux micronucléus et d'un macronucléus. Cette période de multiplication constitue la phase diploïde du cycle.

Lorsque les conditions extérieures changent, en particulier lorsque la nourriture commence à manquer, les cellules deviennent sexuellement réactives et aptes à la *conjugaison*. La conjugaison commence quand deux paramécies de signes sexuels opposés se rencontrent. Elles s'accolent très fortement l'une à l'autre et forment ainsi un couple. A l'intérieur de chacune des deux cellules du couple, les noyaux sont alors l'objet de profondes modifications, qui sont identiques dans les deux cellules. Le macronucléus se morcelle et commence à dégénérer. Les micronucléus subissent la méiose, à la suite de quoi chaque cellule contient 8 noyaux haploïdes provenant des deux micronucléus diploïdes. 7 de ces 8 noyaux dégénèrent, et le noyau restant subit alors une mitose. Un des deux noyaux issus de cette mitose va alors migrer dans la cellule partenaire. A l'issue de cet échange réciproque de noyaux, chacune des deux cellules accolées contient 2 noyaux haploïdes : l'un provient de la méiose des micronucléus qu'elle possédait avant la conjugaison, et l'autre provient de la méiose des micronucléus de son partenaire.

La fécondation a lieu à ce moment par fusion de ces deux noyaux, qui forment ainsi un nouveau noyau diploïde. On peut considérer que le noyau qui est resté en place constitue le gamète femelle, alors que le noyau migrateur qui vient du partenaire constitue le gamète mâle. La phase haploïde du cycle de la paramécie est ainsi très réduite ; elle se cantonne à la division postméiotique, laquelle donne naissance aux noyaux qui vont ensuite participer à la fécondation. Les deux cellules ayant participé à la conjugaison se séparent alors.

Nous avons donc vu comment le noyau diploïde subissait la méiose et comment s'effectue la fabrication du nouveau noyau diploïde. Il faut, en outre, étudier le déroulement de la fin de la conjugaison pour observer comment se forme le nouveau macronucléus. A la suite de la fusion des deux cellules haploïdes, le noyau diploïde subit 2 mitoses, qui donnent 4 noyaux. Deux de ces noyaux resteront diploïdes et seront les micronucléus, alors que les deux autres vont se polyploïdiser et devenir des macronucléus. Les deux cellules ayant participé à cette conju-

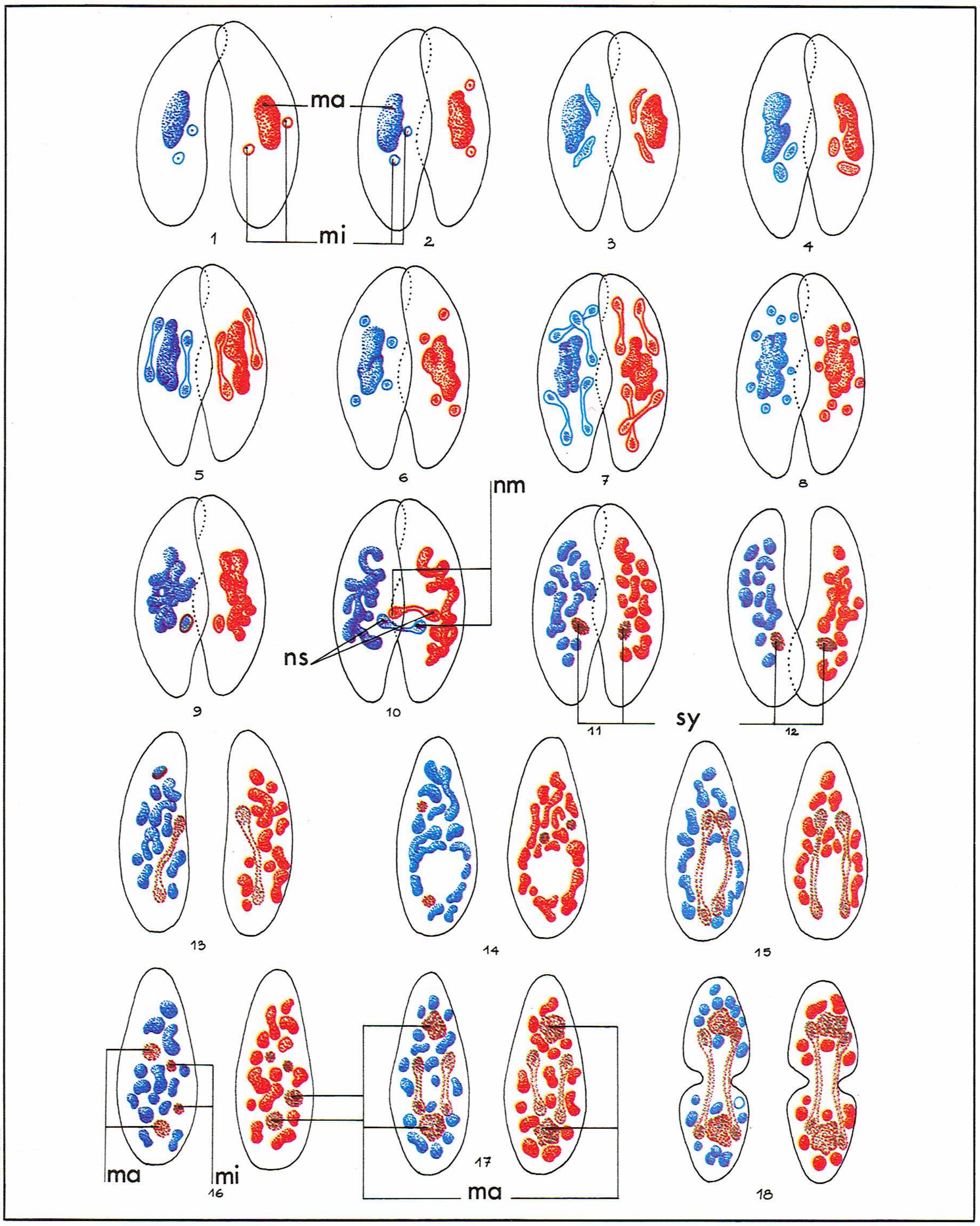

◀ ***Représentation schématique de la*** **conjugaison** ***chez*** **Paramecium aurelia :** ***nm, noyau migrateur (équivalent du gamète mâle); ns, noyau stationnaire (équivalent du gamète femelle); mi, micronucléus; ma, macronucléus; sy, syncaryon.***

Richard Colin

gaison contiennent donc chacune 2 micronucléus et 2 macronucléus en formation. Chacune de ces deux cellules se divise de sorte que seuls les micronucléus subissent une mitose, et les deux macronucléus se répartiront dans les cellules filles. A la suite de cette division postconjugale, il y a donc 4 cellules, contenant chacune 2 micronucléus et 1 macronucléus. Les divisions suivantes de chacune de ces 4 cellules se feront, comme on l'a vu au début du cycle, avec mitose des micronucléus et division du macronucléus.

Un autre type d'événement nucléaire a lieu quand une cellule ne trouve pas de partenaire ayant un signe sexuel opposé au sien : c'est l'*autogamie*. Les événements nucléaires qui se déroulent au cours de l'autogamie sont très semblables à ceux qui ont lieu lors de la conjugaison. La seule différence est que les deux noyaux haploïdes qui fusionnent pour donner naissance au nouveau noyau diploïde ne sont pas, comme dans la conjugaison, deux noyaux haploïdes différents provenant de chacun des deux partenaires, mais sont les deux noyaux haploïdes issus de la mitose du seul noyau rescapé après la méiose. Ces deux noyaux sont donc absolument identiques en tout point, et le noyau diploïde qui est ainsi constitué est *homozygote pour tous ses gènes :* les deux lots de chromosomes contiennent chacun exactement la même information.

Cycles haplodiplobiontiques

Chez les organismes à cycle haplodiplobiontique, la multiplication cellulaire s'effectue, d'une part, au cours de la phase haploïde et, d'autre part, au cours de la phase diploïde : il y a *alternance des générations*. Ce type de cycle existe surtout chez les plantes. L'importance relative des deux cycles varie d'un groupe à l'autre : ainsi, chez les Mousses, la phase prépondérante est la phase

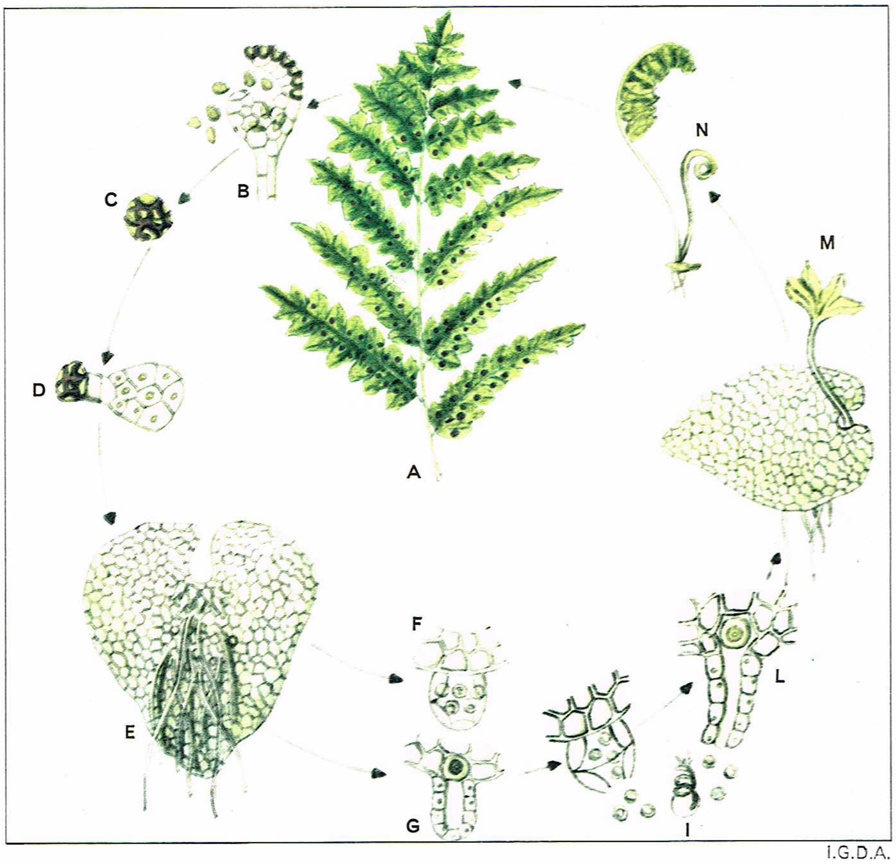

I.G.D.A.

▲ **Alternance de générations** *chez une* **Fougère** ***(Ptéridophyte)****; la fronde (A) constitue la partie diploïde (sporophyte) du cycle de la Fougère. Dans les sporanges (B) a lieu la réduction chromatique; les spores haploïdes (C) libérées par le sporange germent (D) et donnent naissance à des prothalles (E) [gamétophytes] où se différencient les organes reproducteurs mâles ou anthéridies (F) et femelles ou archégones (G). Les gamètes mâles ou anthérozoïdes (I), libérés, entrent dans l'archégone où a lieu la fécondation du gamète femelle ou oosphère (L). De la cellule diploïde issue de la fécondation se développe un embryon qui donnera naissance à un nouveau plant de Fougère (M) qui se développe (N) et donne naissance à de nouvelles frondes sporifères (A).*

haploïde, alors que chez les Fougères, c'est la phase diploïde. Les plantes supérieures ont une phase haploïde si réduite que nous les avons considérées comme des organismes à cycle diplobiontique.

Le cycle d'une Mousse

La tige feuillue d'une Mousse constitue la phase haploïde. C'est sur ces tiges que se différencient les gamètes mâles et les gamètes femelles. Les gamètes

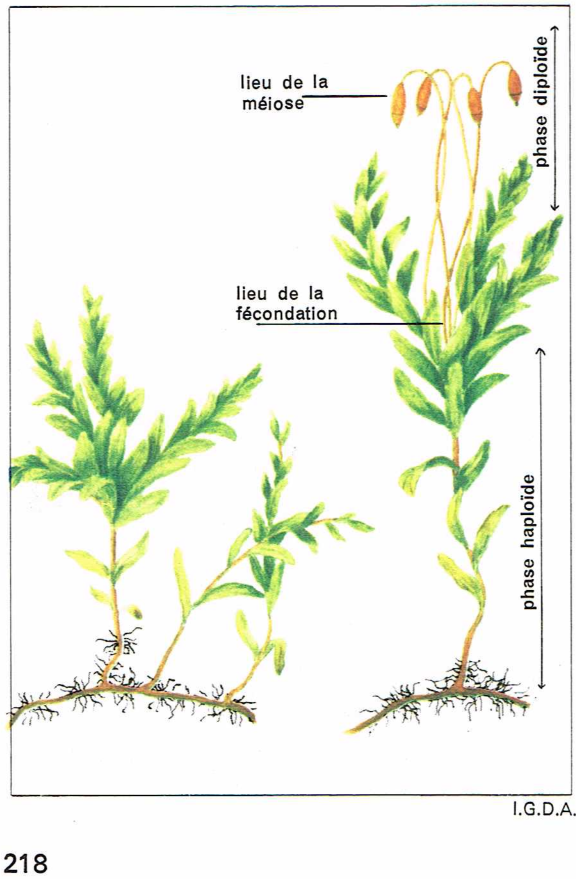

I.G.D.A.

mâles, ou *anthérozoïdes*, sont produits par les *anthéridies*. Ce sont des cellules flagellées qui peuvent se déplacer dans l'eau. L'organe reproducteur femelle, ou *archégone*, ne contient qu'un seul gamète femelle : l'*oosphère*. L'oosphère, non mobile, est située dans la partie renflée de l'archégone. Celui-ci possède, d'autre part, un long col rempli d'une gelée qui laisse diffuser dans l'eau une substance attirant, par son action chimiotactique, les gamètes mâles.

La fécondation de l'oosphère par un gamète mâle donne naissance à un organisme diploïde qui restera fixé sur la partie feuillue haploïde. Cette phase diploïde se compose d'un hampe filiforme à l'extrémité de laquelle se développe une capsule, appelée *sporange*. C'est dans cette capsule qu'a lieu la réduction chromatique : certaines cellules effectuent leur méiose et donnent naissance à des cellules haploïdes appelées *spores*, par l'intermédiaire desquelles se réalise la dissémination de l'espèce; les spores sont, en effet, protégées de la sécheresse par une membrane très résistante. En présence d'eau, elles germent et donnent naissance à de fins filaments appelés *protonéma*, sur lesquels se forment des pousses feuillées.

Le cycle des Mousses fait donc alterner une phase haploïde prédominante et une phase diploïde qui vit en parasite sur la partie haploïde. La partie haploïde, sur laquelle se différencient les gamètes, est appelée aussi *gamétophyte*. La partie diploïde qui, après réduction chromatique, donne naissance aux spores est appelée aussi *sporophyte*.

Le cycle d'une Fougère

Ce que l'on appelle couramment une Fougère correspond à la phase diploïde du cycle qui, par analogie au cycle des Mousses, correspond au sporophyte. A l'inverse de celui des Mousses, le sporophyte des Fougères est de grande taille, et sa vie est totalement indépendante de celle du gamétophyte. La réduction chromatique a lieu dans les *sporanges*, lesquels sont répartis en petits groupes à la face inférieure des frondes. Les produits haploïdes, ou *spores*, en germant, donnent naissance à de minuscules lames vertes, appelées *prothalles*. Sur un prothalle se différencient alors les organes sexuels mâles et femelles qui produisent des gamètes mâles et femelles. De même que chez les Mousses, la fécondation a lieu dans l'*archégone*. L'organisme diploïde issu de la fécondation ne vit que peu de temps aux dépens du prothalle. Très vite, la petite Fougère continue indépendamment son développement alors que le prothalle périt.

Cycles haplobiontiques

Une espèce est à cycle haplobiontique quand sa multiplication ou sa croissance se font à l'état haploïde et que, dans l'ensemble du cycle de développement, seul le *zygote* correspond à la phase diploïde. La méiose suit alors immédiatement la fécondation. Ce type de cycle est la règle chez les Sporozoaires (coccidies, grégarines), chez certains Protozoaires, chez les Champignons inférieurs et chez les Bactéries. Il se rencontre aussi chez diverses Algues vertes, soit unicellulaires comme *Chlamydomonas*, soit pluricellulaires comme *Spirogyra*.

Le cycle d'une Algue verte : Chlamydomonas

Chlamydomonas est une Algue verte unicellulaire qui possède un énorme chloroplaste en forme de fer à cheval, et dont le noyau est haploïde. La multiplication végétative s'opère soit par simple bipartition, soit par un processus différent qui donne naissance à plusieurs cellules à l'intérieur de la membrane de la cellule même. Sous l'influence des conditions externes, certaines cellules morphologiquement normales jouent le rôle de gamètes et s'unissent pour former une cellule diploïde, le *zygote*.

Bien que les gamètes soient apparemment identiques, ils diffèrent par leur *type conjugal*. Les uns sont de type conjugal + et les autres de type conjugal — ; la fécondation se fait entre une cellule + et une cellule — . Le caractère + ou — est comme le caractère A, défini dans le paragraphe précédent, c'est-à-dire qu'une cellule haploïde ne peut être que + ou — . Le zygote diploïde formé à l'issu de l'union d'un + et d'un — est donc +/—. Ce zygote s'entoure d'une membrane de protection et entre dans une phase de repos végétatif et de résistance aux agents extérieurs. C'est sous cette forme qu'a lieu

C. Bevilacqua

◀ *Fronde d'une Fougère* **(Athyrium distantifolium)** *[sporophyte]. A noter la* **différence de taille** *entre le* **sporophyte** *et le* **gamétophyte** *chez la Fougère. Chez les Mousses (Bryophytes), plantes plus primitives, c'est le gamétophyte qui constitue la partie la plus importante du cycle.*

la dissémination de l'espèce. Le zygote ne se multiplie jamais à l'état diploïde mais subit directement la méiose et donne naissance à 4 cellules haploïdes, qui recommencent le cycle.

Le cycle d'un Champignon Basidiomycète

Le « chapeau » d'un Champignon Basidiomycète comme le coprin est formé d'un ensemble très dense de filaments mycéliens enchevêtrés. Ces filaments sont constitués d'articles dont chacun renferme 2 noyaux haploïdes. La division de ces noyaux est synchrone, de sorte que chaque nouvel article contiendra toujours un fils de chaque noyau. Ce type de mycélium est appelé *mycélium secondaire*, ou *dicaryon*. Sous le chapeau, sur les lamelles, sont produites des cellules particulières, appelées *basides,* à l'intérieur desquelles s'effectue la fusion des deux noyaux.

Le noyau obtenu, diploïde, subit immédiatement la méiose et donne naissance à 4 spores haploïdes. De la germination de chacune de ces spores haploïdes naissent des myceliums, appelés *myceliums primaires,* qui, seuls, ne peuvent pas donner naissance à des chapeaux, car il faut que se constitue un *dicaryon*. Lorsque deux mycéliums primaires compatibles entrent en contact, une fusion cytoplasmique s'opère : un article contenant un noyau de chacun des deux myceliums sera à l'origine du mycélium dicaryotique qui donnera naissance au chapeau où s'effectuera, dans les basides, la fusion de deux noyaux.

Il est important de remarquer que le dicaryon se comporte physiologiquement comme une cellule diploïde : on peut y observer des phénomènes de dominance et de « masquage ». Les myceliums dicaryotiques sont, en fait, l'équivalent d'une diplophase, et le cycle des Champignons supérieurs peut donc être rattaché, du point de vue de la physiologie cellulaire, au type haplodiplobiontique avec prédominance de la phase diploïde sur la phase haploïde.

Le cycle des Champignons Ascomycètes

Le cycle des Ascomycètes, plus particulièrement celui des Ascomycètes supérieurs, n'est pas fondamentalement très différent de celui d'un Champignon Basidiomycète. De la même manière, la fusion des cytoplasmes précède la fusion des noyaux. Étant donné l'intérêt que représentent les Ascomycètes pour l'étude de la méiose, celle-ci sera décrite plus en détail.

Le noyau diploïde qui va subir la méiose se trouve dans une cellule appelée *asque*. A la suite de la méiose, chaque produit haploïde subit une division supplémentaire. L'asque contient donc 8 noyaux haploïdes autour desquels se forment des membranes, qui définissent ainsi 8 spores. L'intérêt présenté par ce type d'organisme est que les différents produits de chaque méiose restent groupés : il est donc possible d'analyser de façon très précise ce qui s'est passé dans chaque méiose prise

◀ *Page ci-contre, en bas,* **alternance de générations** *chez une* **Mousse** *(Bryophyte) : la plante de gauche constitue la phase haploïde (gamétophyte) ; sur la plante de droite, on observe le sporophyte (phase diploïde) vivant aux dépens du gamétophyte.*

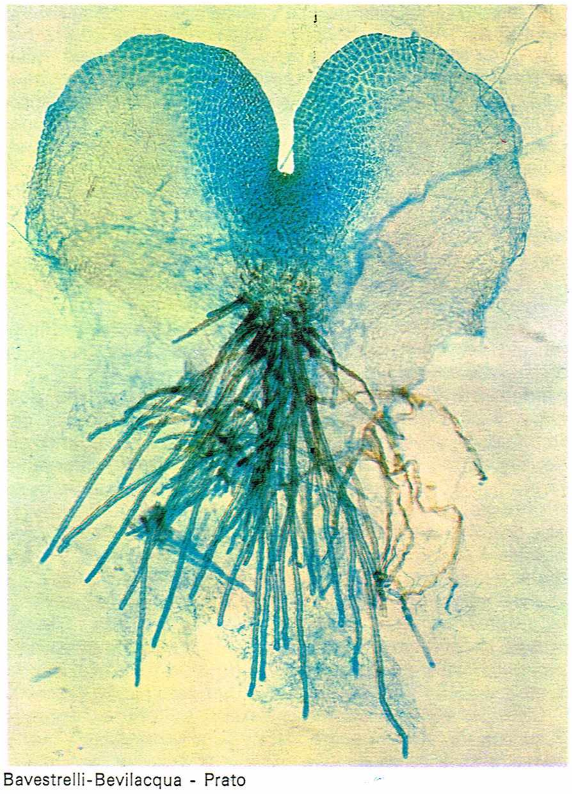

Bavestrelli-Bevilacqua - Prato

◀ **Prothalle** *de Fougère, constituant le gamétophyte, avec des rhizoïdes (× 30).*

▶ *A gauche, chez* **Chlamydomonas sinowiae,** *la fécondation, union et fusion des deux gamètes, se produit entre deux cellules de même taille (isogamie) : A et A_1 et B et B_1. L'ultime phase est un zygote diploïde (st, stigma; pi, pyrénoïde). A droite, le « chapeau » d'un Champignon Basidiomycète comme le coprin* **(Coprinus comatus)** *est formé d'un ensemble très dense de filaments mycéliens enchevêtrés.*

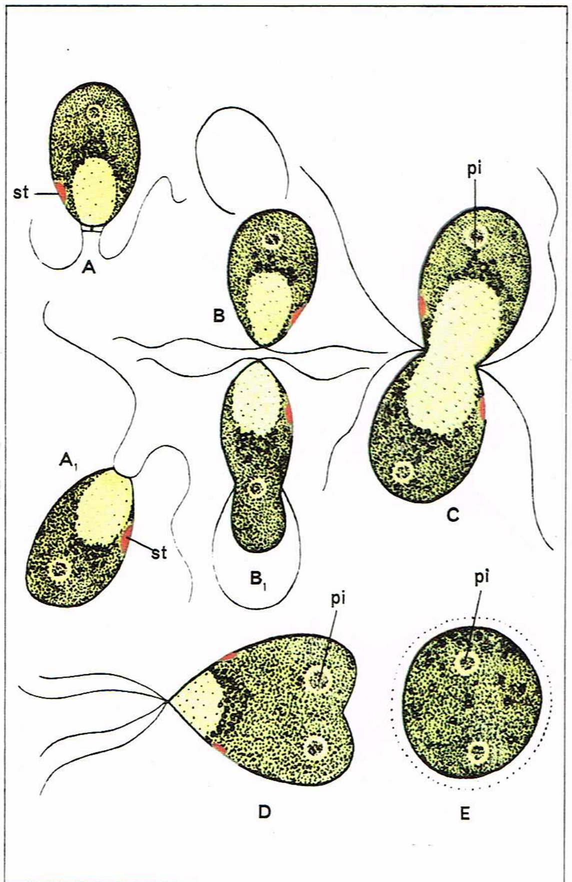

I.G.D.A.

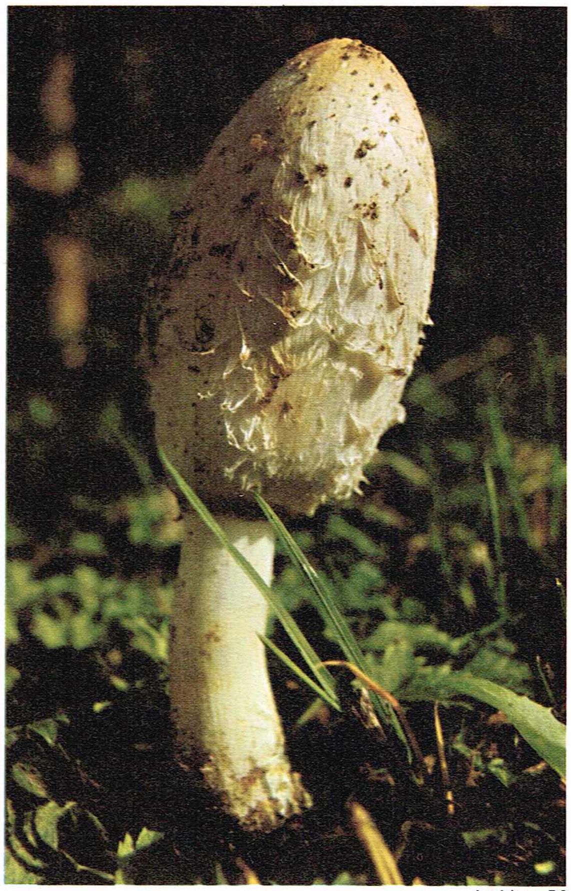

Archives P2

individuellement. Chez certains organismes, tel *Sordaria,* la disposition des spores dans l'asque est telle que l'on peut déterminer immédiatement, d'une part, les spores sœurs issues de la dernière division postméiotique et, d'autre part, celles issues de la deuxième division de la méiose : les asques sont dits *ordonnés.*

Le déterminisme du sexe

Chez certaines espèces, les sexes sont séparés, c'est-à-dire que certains individus produisent des gamètes mâles et d'autres produisent des gamètes femelles. Cette situation, appelée *gonochorisme,* est pratiquement la règle chez tous les animaux; elle se retrouve chez certaines plantes, dites *dioïques,* comme le frêne, le chanvre, le palmier dattier. Chez d'autres espèces, par contre, chaque individu fabrique aussi bien les gamètes mâles que les gamètes femelles : ces espèces sont dites *hermaphrodites.* L'hermaphrodisme est pratiquement la règle chez les végétaux supérieurs, que l'on qualifie dans ce cas de *monoïques.* Il se rencontre aussi chez certains groupes d'animaux comme les limaces.

Chez la plupart des espèces gonochoriques, Vertébrés aussi bien qu'Invertébrés, la garniture chromosomique diffère selon le sexe. Prenons, par exemple, le cas de la mouche du vinaigre, *Drosophila melanogaster,* qui possède 8 chromosomes. Dans les cellules diploïdes des femelles, on observe que les 8 chromosomes se ressemblent deux à deux : il y a donc bien 4 paires de chromosomes homologues. Chez le mâle, par contre, on observe aussi 8 chromosomes, mais seulement 6 d'entre eux peuvent être constitués en paires; ces 3 paires sont d'ailleurs semblables à 3 des 4 paires observables chez la femelle. Les deux autres chromosomes ne se ressemblent pas. L'un, appelé *chromosome X,* ressemble aux chromosomes de la quatrième paire existant chez la femelle. L'autre, appelé *chromosome Y,* ne ressemble à aucun autre chromosome; on a pu montrer qu'une partie du chromosome Y était, en fait l'homologue d'une partie du chromosome X.

Dans les cellules diploïdes de la femelle, il existe donc 3 paires de chromosomes appelés *chromosomes autosomaux* et 1 paire de *chromosomes sexuels* symbolisés par XX. Chez le mâle, en plus des 3 paires de chromosomes autosomaux, il existe 1 chromosome X et 1 chromosome Y; le mâle est donc symbolisé par XY.

La même observation peut être faite dans l'espèce humaine, chez qui la femme possède 22 paires de chromosomes autosomaux et 1 paire de chromosomes X, l'homme possédant 22 paires de chromosomes autosomaux et 1 X et 1 Y. Chez certaines espèces, comme l'Insecte Hémiptère *Protenor,* le chromosome Y est inexistant : la femelle est symbolisée alors par XX et le mâle par XO.

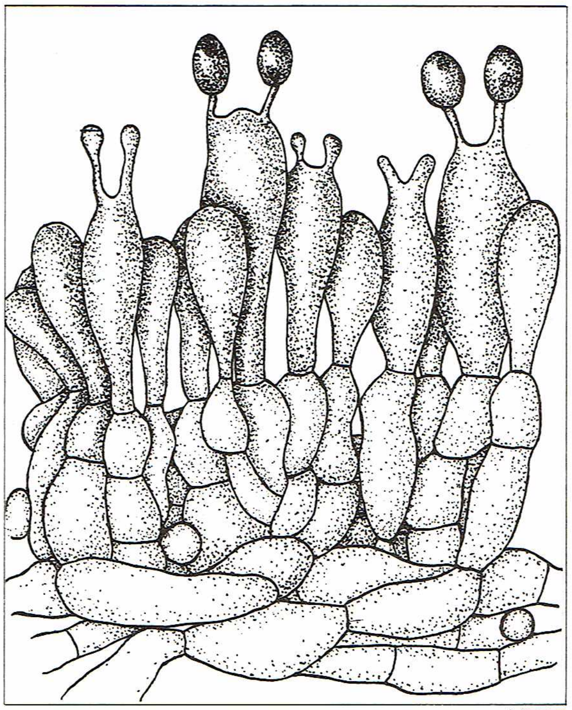

I.G.D.A.

▶ *Représentation schématique de l'hyménium d'un Basidiomycète. On remarquera les* **basides** *à différents stades de développement et les* **paraphyses** *; deux basides présentent des spores matures.*

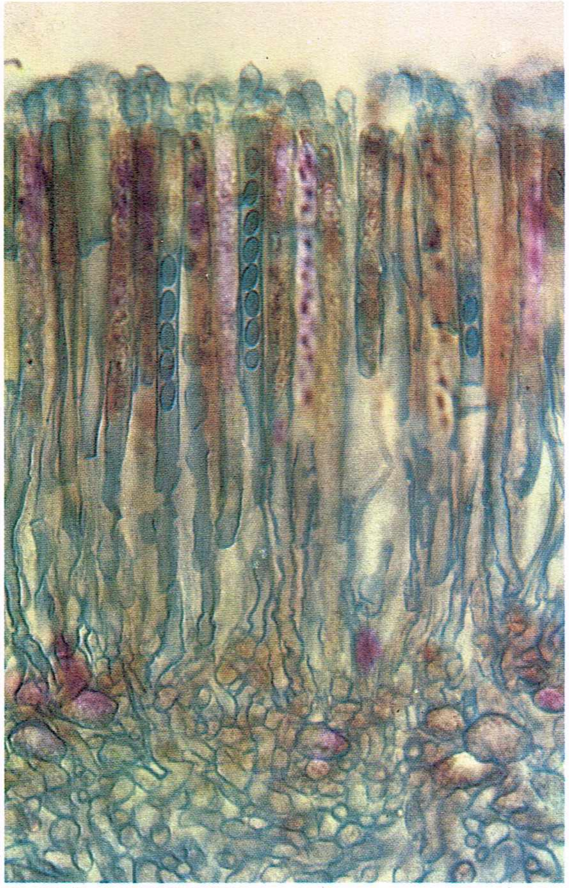

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ ***Aspects au microscope d'une portion d'hyménium de* Peziza *(Champignon Ascomycète) : on observera quelques asques dont les ascospores sont bien visibles.***

Dans les cas que nous venons de voir, c'est le mâle qui possède les deux chromosomes sexuels différents. Cette situation est valable pour l'ensemble des Mammifères et chez des Insectes, tels les Diptères et les Hémiptères. Par contre, chez les Oiseaux, c'est le mâle qui possède les deux X : ainsi, chez la poule domestique, le mâle est XX et la femelle est XO.

Du fait de cette différence de garniture chromosomique, les deux sexes se comportent différemment lors de la formation des gamètes. Par exemple, chez la drosophile femelle, dont les cellules diploïdes possèdent une paire de chromosomes X, à l'issue de la méiose tous les gamètes seront identiques quant à leur composition chromosomique et contiendront chacun 1 lot de 3 chromosomes autosomaux et 1 chromosome X. Par contre, chez la drosophile mâle, les spermatozoïdes contiendront chacun 1 lot de chromosomes autosomaux mais ils posséderont soit 1 chromosome X, soit 1 chromosome Y. Le mâle produit donc deux types de gamètes : ceux qui portent le chromosome X et ceux qui portent le chromosome Y. Le mâle est appelé de ce fait *sexe hétérogamétique*, alors que la femelle, qui ne produit qu'un seul type de gamète, est appelée *sexe homogamétique*. Sont donc homogamétiques tous les individus ayant une constitution XX et sont hétérogamétiques tous les individus ayant une constitution XY ou XO. Chez les Mammifères, c'est toujours le mâle qui est hétérogamétique et, chez les Oiseaux, c'est la femelle.

D. Giussani

◀ ***L'hermaphrodisme caractérise notamment les Gastéropodes, tels ces deux spécimens de* Retinella olivetorum *en train de s'accoupler.***

A la fécondation, deux cas sont alors possibles. Par exemple, toujours chez la drosophile, le gamète femelle sera fécondé par un gamète mâle contenant soit un chromosome X, soit un chromosome Y. Si le gamète femelle est fécondé par un gamète mâle contenant un chromosome X, la cellule diploïde issue de la fécondation contiendra alors 2 lots de chromosomes autosomaux et 2 chromosomes X, l'un apporté par le gamète femelle et l'autre apporté par le gamète mâle. Cette cellule diploïde contenant 2 chromosomes X donnera naissance à une femelle. Si le gamète femelle est fécondé par un gamète

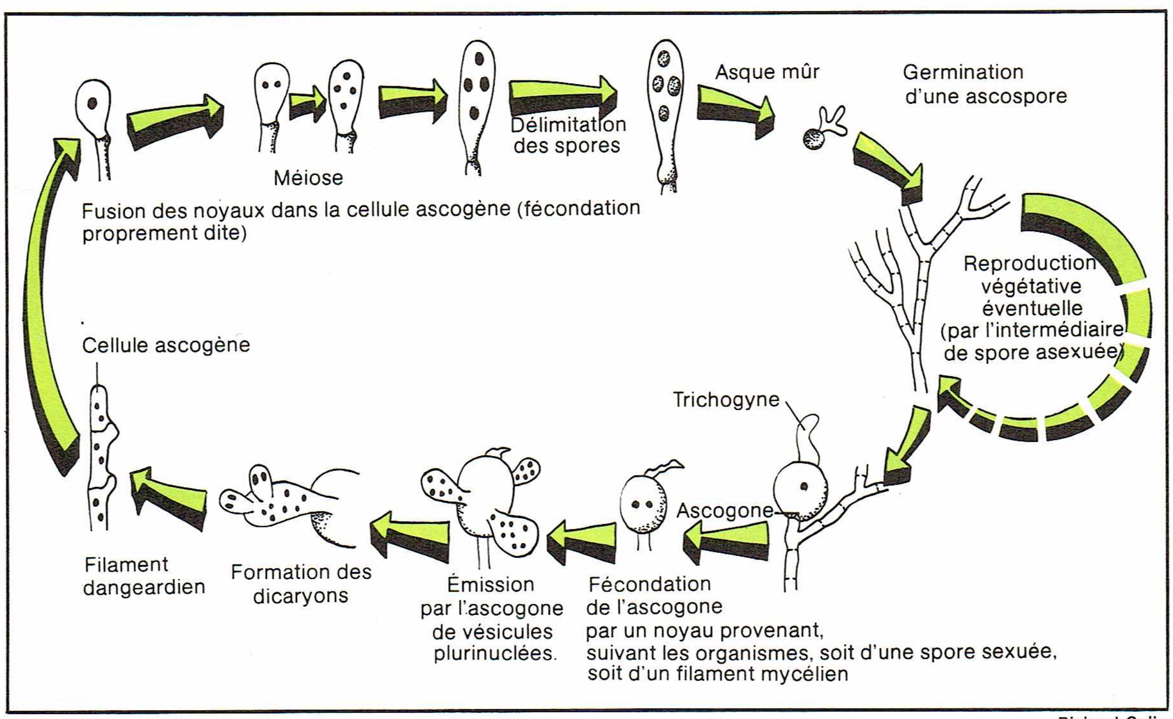

Richard Colin

◀ ***Cycle général d'un Ascomycète.***

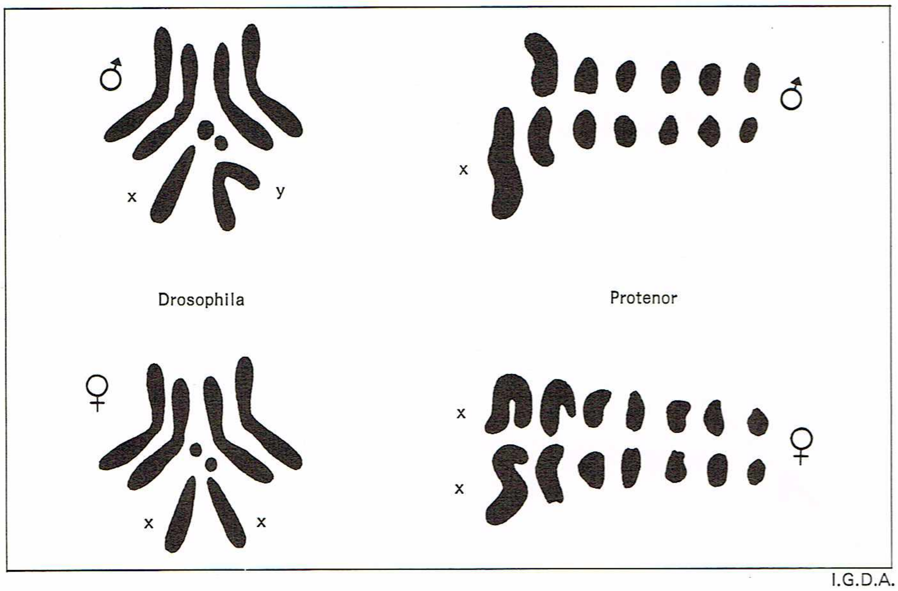

I.G.D.A.

▲ *Représentation schématique des* autosomes *et des* hétérochromosomes *de* Drosophila *et de* Protenor*; pour la première, il existe donc chez la femelle 3 paires de chromosomes autosomaux et une paire de chromosomes sexuels (XX), et chez le mâle 3 paires d'autosomes, 1 chromosome X et 1 chromosome Y (XY); chez le second la femelle est symbolisée par XX et le mâle par XO (Y étant inexistant).*

mâle contenant un chromosome Y, la cellule diploïde contiendra alors un chromosome X et un chromosome Y et donnera naissance à un mâle. Le sexe est donc déterminé dès la fécondation par la constitution du gamète mâle, qui participe à la formation de l'œuf. Dans les cas où c'est la femelle qui est le sexe hétérogamétique, c'est donc la constitution du gamète femelle qui détermine le sexe de l'individu qui sera issu de l'œuf.

Une cellule diploïde XY, qui fournira 4 spermatozoïdes, en donnera 2 contenant un chromosome X et 2 contenant un chromosome Y; il y aura donc autant de gamètes contenant un X que de gamètes contenant un Y. Si les gamètes portant le X et les gamètes portant le Y sont aussi viables, aussi mobiles, et aussi « efficaces » les uns que les autres, il y aura autant d'œufs XY que d'œufs XX. Si la viabilité des différents œufs n'est pas affectée par leur constitution génétique, ils donneront naissance à autant de mâles que de femelles. On a estimé que, dans l'espèce humaine, il y avait à la conception à peu près 120 œufs XY (devant donner des mâles) pour 100 œufs XX (devant donner des femelles). La véritable raison de cette disproportion n'est pas parfaitement établie : les gamètes contenant un Y sont-ils plus mobiles que ceux qui contiennent un X? Les ovules sont-ils plus « sensibles » aux gamètes contenant un Y qu'aux gamètes portant un X? Du fait d'une plus grande fragilité des individus XY, cette disproportion diminue avec l'âge : alors qu'à la naissance il n'y a plus que 105 garçons pour 100 filles, à la maturité sexuelle il y a à peu près autant d'hommes que de femmes, et cette proportion, le *sex-ratio*, s'inverse plus tard puisqu'à 85 ans il y a 200 femmes pour 100 hommes.

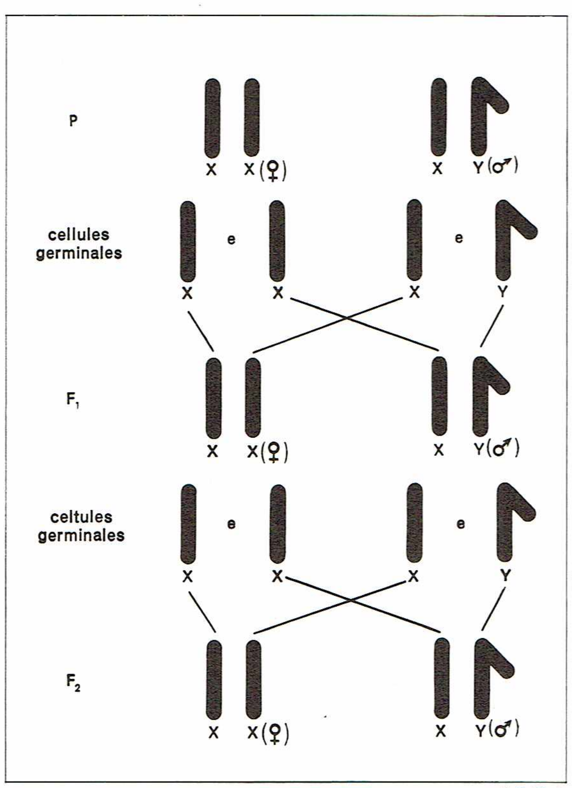

I.G.D.A.

▶ *Modalités de* transmission *des chromosomes X et Y d'une génération à l'autre : P, parents; F1, première génération; F2, seconde génération.*

Quel est le rôle des différents chromosomes sur la détermination du sexe? Pour l'étudier, examinons certains cas d'*anomalies chromosomiques* chez l'homme. Dans le cas du *syndrome de Turner*, les individus ne possèdent qu'un seul chromosome sexuel X. Ces sujets, de petite taille, présentent des caractères sexuels secondaires féminins, avec des glandes mammaires bien développées, mais les gonades sont rudimentaires ou mêmes absentes. Dans le cas du *syndrome de Klinefelter*, au contraire, les sujets sont très grands, ont des caractères sexuels secondaires masculins mais présentent une atrophie des testicules; de plus, leur niveau mental est très bas. Leur formule chromosomique, normale quant aux autosomes, se caractérise par l'existence de 2 chromosomes X et d'1 chromosome Y.

En comparant ces formules anormales aux formules XX et XY, on constate donc que chez l'homme c'est la présence du chromosome Y qui oriente l'individu vers le sexe masculin. On remarque d'autre part que le nombre relatif des chromosomes, la *balance génique*, joue un rôle important puisque l'absence d'un chromosome X ou la présence d'un chromosome X en plus entraîne des anomalies physiologiques graves. Chez la drosophile, le chromosome Y ne joue pas ce rôle masculinisant, puisque les individus ayant la constitution XXY sont des femelles qui, d'ailleurs,

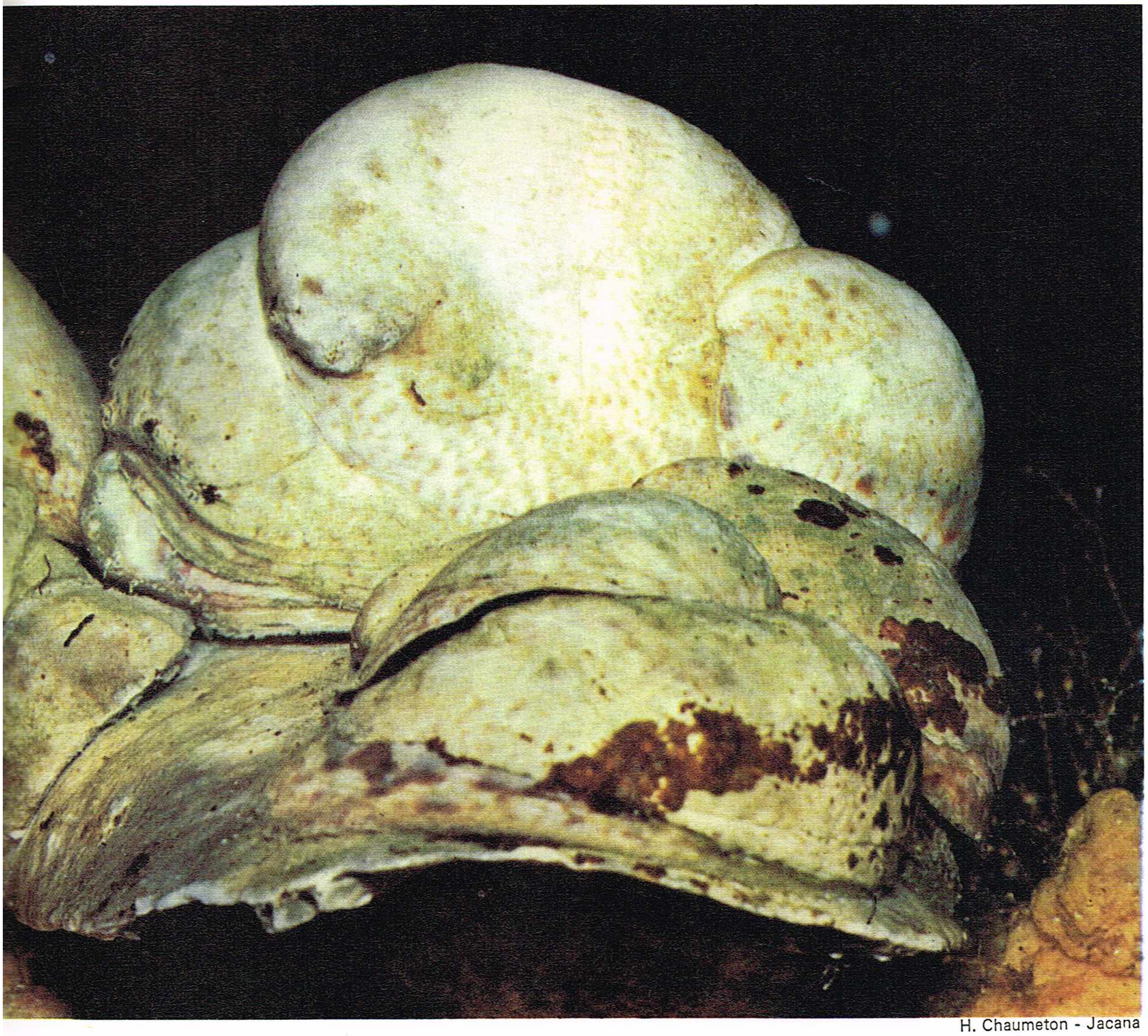

H. Chaumeton - Jacana

◀ *Chez des Mollusques Gastéropodes comme ceux du genre* **Crepidula**, *les organismes présentent le phénomène d'***hermaphrodisme successif** *: on trouve plusieurs individus empilés les uns sur les autres ; les plus petits, placés en haut, sont du sexe mâle, et les plus grands, qui sont à la base, sont du sexe femelle.*

sont parfaitement fertiles. Chez la drosophile, le sexe est en fait déterminé par le rapport entre les nombres de chromosomes X et de lots d'autosomes.

Dans les cas qui viennent d'être cités, le sexe des individus semble déterminé de façon irréversible dès la fécondation. Il faut néanmoins remarquer que le *sexe génital*, c'est-à-dire le sexe apparent de l'individu avec toutes ses caractéristiques morphologiques et physiologiques, est l'aboutissement de longues transformations qui ont lieu au cours de l'embryogenèse puis de la vie postnatale. Le sexe se réalise lentement sous l'influence des hormones sexuelles. C'est probablement la synthèse de ces hormones qui est sous le contrôle direct des chromosomes. Ainsi, ces hormones « façonnent » l'organisme tout au long de son développement, pour en faire soit un mâle, soit une femelle. Il est remarquable de constater que l'injection d'hormones, surtout lorsqu'elle est pratiquée durant l'embryogenèse, peut modifier non seulement les caractères sexuels secondaires, mais également les gonades elles-mêmes et, dans les cas extrêmes, le type de gamètes auxquels elles donnent naissance.

Une expérience naturelle d'inversion du sexe nous est fournie par le cas des *free-martins* chez les Bovidés. Un free-martin est une génisse stérile d'un couple de jumeaux de sexes différents. Il s'agit en fait d'un veau intersexué qui possède des testicules plus ou moins développés, associés à des organes femelles rudimentaires. Cette intersexualité est due au fait que les circulations sanguines placentaires des deux embryons jumeaux sont en communication. Ces jumeaux de sexe différent peuvent donc s'influencer mutuellement par voie sanguine : les hormones sécrétées par les gonades d'un des fœtus agissent sur la différenciation sexuelle de l'autre, entraînant une masculinisation sexuelle du jumeau femelle.

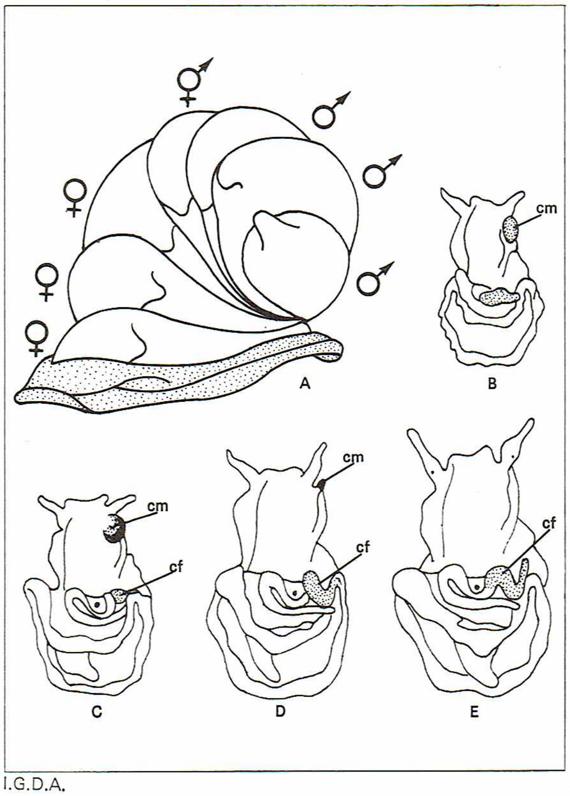

I.G.D.A.

◀ *Représentation schématique des phases sexuelles de* **Crepidula fornicata** *: A, groupe de sept individus de différents âges fixés sur une coquille d'huître ; B-E, passage de la phase mâle à la phase femelle avec réduction progressive de l'organe copulateur mâle (cm) et développement correspondant du conduit génital femelle (cf).*

▶ *A gauche, les différents stades de la différenciation sexuelle chez un Échiuride marin* (Bonellia viridis) *: on observera la petite larve (la) attachée à la longue trompe d'une femelle adulte (ut, utérus). A droite, femelle de* Bonellia fuliginosa.

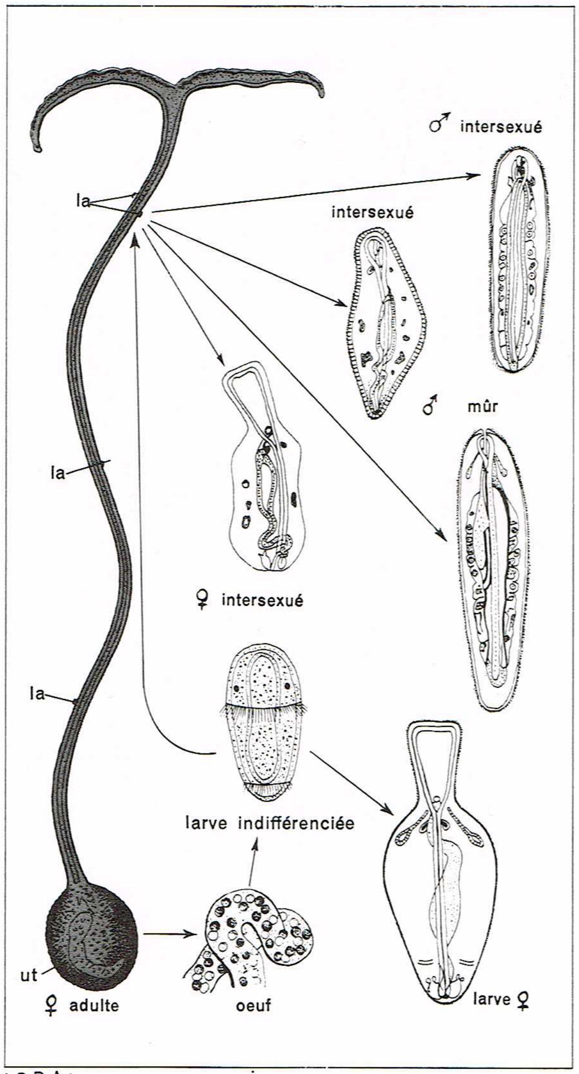

I.G.D.A.

G.S. Giacomelli

Des expériences d'injection d'hormones ont été réalisées en grand nombre sur des espèces diverses : des souris, des rats, des poules, des grenouilles, et ont conduit à la production d'une gamme étendue d'états intersexués et, dans les cas extrêmes, à une inversion complète du sexe génétique. Par exemple, chez la grenouille sud-africaine, *Xenopus*, on a pu transformer des mâles génétiques en femelles productrices d'ovules et réaliser ensuite le croisement entre de vrais mâles et des mâles féminisés. Chez le *Xenopus*, c'est le mâle qui est le sexe homogamétique : il ne produit donc qu'un seul type de spermatozoïdes contenant chacun 1 chromosome sexuel X. Les mâles féminisés vont produire eux aussi 1 seul type d'ovules contenant chacun 1 chromosome X. L'observation a confirmé que tous les œufs issus de ces croisements entre vrai mâle et mâle féminisé ont la même constitution chromosomique XX et sont des mâles.

Chez certaines espèces, le *phénotype sexuel* d'un individu ne découle pas de manière rigide de la constitution du zygote. Il peut soit varier spontanément au cours du vieillissement de l'individu, soit être influencé par les circonstances de sa vie. Une telle variabilité n'exclut pas nécessairement l'existence de facteurs génétiques de détermination du sexe, mais ces facteurs n'exercent plus d'action décisive sur le phénotype. Dans une première catégorie d'organismes, tous les individus évoluent de la même façon : ils sont d'abord de sexe mâle, puis de sexe femelle. Ces espèces sont hermaphrodites si on considère l'ensemble de leur existence, mais, à un instant donné, chaque individu possède un seul sexe : c'est un *hermaphrodisme successif*. Cette situation se rencontre chez des Crustacés et chez des Mollusques Gastéropodes comme ceux du genre *Crepidula*. Les crépidules qui arrivent à maturité sexuelle sont toujours des mâles, lesquels se fixent tôt ou tard sur des individus femelles, puis, après une phase stérile, deviennent eux-mêmes femelles. On peut ainsi trouver plusieurs individus empilés les uns sur les autres : les individus placés en haut, les plus petits, sont du sexe mâle, alors que ceux qui sont à la base, plus grands et plus âgés, sont du sexe femelle. Entre les deux types d'individus, on peut en trouver certains en train d'effectuer leur inversion sexuelle. Il semble que cette transformation des mâles en femelles soit influencée par les conditions de milieu telles que la température, la concentration d'iode et que, d'autre part, les femelles sécrètent des hormones masculinisantes qui ont pour rôle de retarder la transformation des mâles en femelles.

Ce type de sécrétion masculinisante se retrouve chez un Échiuride marin, la bonellie *(Bonellia viridis)*, qui vit dans les anfractuosités des roches méditerranéennes. Chez cette espèce, le dimorphisme sexuel est particulièrement accentué : la femelle, qui possède une trompe rétractile, peut atteindre une longueur de 70 à 80 cm et le mâle ne dépasse jamais la taille de 3 mm. Le mâle vit en parasite, d'abord sur la trompe, puis dans l'intestin et, enfin, à l'intérieur de l'utérus de la femelle. La larve nageuse qui sort de l'œuf est sexuellement indifférenciée. Si elle se fixe sur la trompe d'une femelle adulte, dans la majorité des cas elle se transforme en mâle sous l'action des hormones masculinisantes sécrétées par la femelle. Si elle se fixe sur le fond, elle se transforme alors en femelle.

Ce type de transformation d'un sexe vers l'autre s'observe aussi chez des Vertébrés : les vieilles poules, par exemple, acquièrent très souvent des caractères sexuels secondaires mâles comme la présence d'une crête et un comportement de mâle. Cette transformation peut aller jusqu'à l'inversion complète : ainsi, chez le Poisson d'ornement *Xiphophorus*, bien connu des aquariophiles, les femelles en vieillissant peuvent se masculiniser complètement.

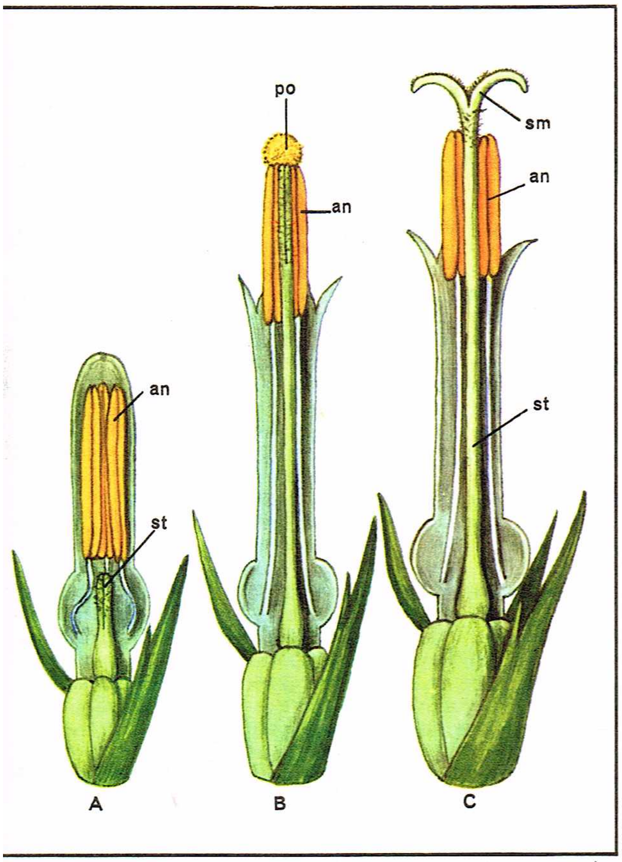

I.G.D.A.

C. Bevilacqua

▲ *Le tournesol (à droite),* Helianthus annuus, *est une espèce dont les fleurs sont hermaphrodites protérandriques : à gauche, représentation schématique du développement montrant (A) que les anthères (an) arrivent à maturation avant les organes femelles (st ; style) à peine ébauchés ; B, les anthères font jaillir hors du tube floral la masse pollinique, laquelle sera transportée par un Insecte sur une autre fleur (C) présentant déjà un style développé et un stigmate (sm) ouvert à l'extérieur.*

▼ *Les facteurs d'incompatibilité sont très fréquents chez les Champignons, tel le coprin : on voit ici que les mycéliums a et b forment des dicaryons avec le mycélium A_1B_2 et sont donc A_2B_1. De même, les mycéliums c et d sont A_1B_2 (ils forment des dicaryons avec A_2B_1).*

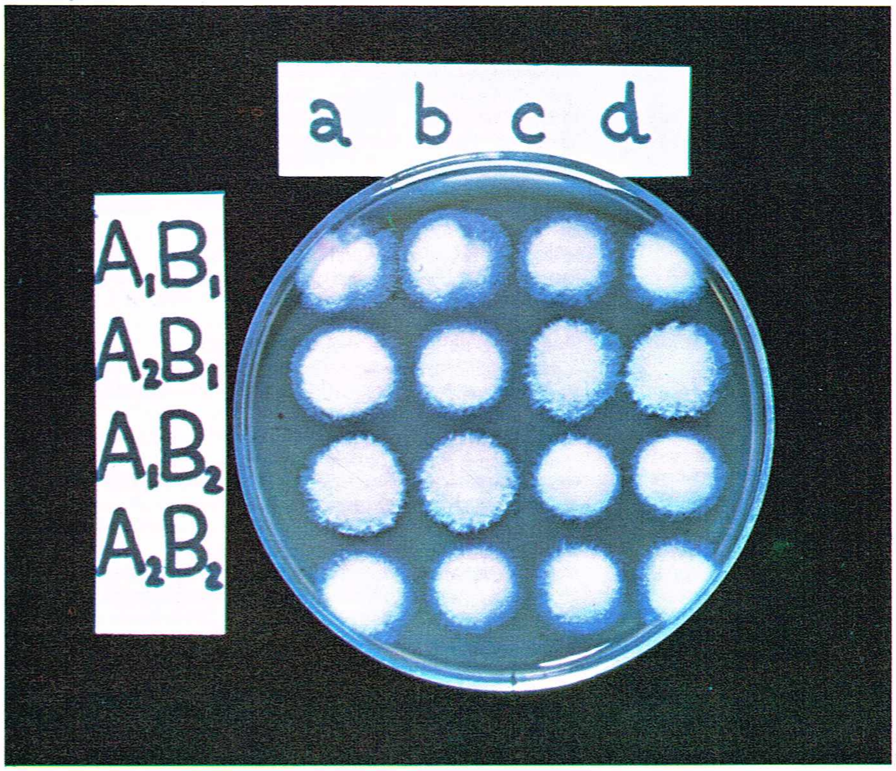

Y. Brygoo

Systèmes d'incompatibilité

Dans tous les cas que nous venons d'envisager, qu'il s'agisse du gonochorisme ou de l'hermaphrodisme successif, on observe que la fécondation n'est jamais réalisable sans l'intervention de deux individus, l'un mâle et l'autre femelle. Chez les espèces à *hermaphrodisme simultané*, c'est-à-dire chez les espèces dont chaque individu possède à la fois des gonades mâles et des gonades femelles, on remarque que l'*autofécondation* (la fécondation des gamètes femelles par les gamètes mâles du même individu) est rare. Chez la limace, par exemple, c'est une fécondation réciproque qui a lieu au cours de l'accouplement. De même, chez les végétaux, hermaphrodites pour la plupart, on observe que, souvent, à cause de mécanismes variés, l'autofécondation est difficile ou même impossible : les anthères et le pistil d'une même plante peuvent ne pas arriver à maturité en même temps ; la disposition des pétales peut rendre l'autofécondation difficile ; il existe même certains mécanismes génétiques qui excluent complètement l'autofécondation.

Examinons plus en détail ce dernier type de mécanisme. L'autofécondation est rendue impossible par l'existence de *facteurs d'incompatibilité* (gènes) localisés sur les chromosomes. Par exemple, une plante diploïde portant le facteur S_1 sur un chromosome et le facteur S_2 sur le chromosome homologue produira des grains de pollen qui porteront soit S_1, soit S_2. L'incompatibilité se caractérise par le fait que cette plante S_1S_2 ne permettra pas aux grains de pollen portant S_1 ou S_2 de germer sur ses stigmates, alors que des grains de pollen portant des facteurs S_3 ou S_4 différents de S_1 ou S_2 pourront germer sur les stigmates S_1S_2. Une plante S_2S_3 produira les deux types de grains de pollen S_2 et S_3, et c'est seulement les grains de pollen S_3 qui pourront germer sur les stigmates de la plante S_1S_2.

Ces facteurs d'incompatibilité sont très fréquents chez les végétaux inférieurs comme les Champignons. Chez le coprin, par exemple, deux mycéliums primaires ne pourront former un dicaryon puis des fructifications que s'ils diffèrent au niveau de deux facteurs A et B. Un mycélium A_1B_1 pourra former un dicaryon avec un mycélium A_2B_2, mais ne pourra pas former de dicaryon avec les mycéliums A_1B_2, A_2B_1 et A_1B_1.

G. Mazza

▲ ***Chez les espèces parthénogénétiques d'*****Artemia salina*****, le nombre des chromosomes est conservé, par suite de la fusion, après la formation de l'ovule, de deux produits de la méiose : l'ovule et un globule polaire.***

La parthénogenèse

La parthénogenèse est une forme de reproduction sans fécondation qui peut néanmoins être considérée comme un cas particulier de la reproduction sexuée. En effet, chez les espèces où cette forme de reproduction existe, le nouvel organisme provient d'une cellule sexuelle typique : un *ovule*. Ce mode de reproduction a été adopté par des organismes divers appartenant à de nombreux groupes du règne animal (Échinodermes, Nématodes, Trématodes, Annélides, Mollusques, Crustacés, Myriapodes, Acariens et Insectes) ou végétal. Cependant, aucun groupe important ne se reproduit parthénogénétiquement dans sa totalité ; les diverses espèces qui ont adopté ce mode de reproduction l'ont fait de façon indépendante, et celle-ci a pris des formes très différentes d'un groupe à l'autre : elle peut être *obligatoire*, c'est-à-dire constituer le système de reproduction exclusif, ou *facultative*, c'est-à-dire ne pas exclure la reproduction biparentale, ou encore *cyclique*, c'est-à-dire alterner avec un mode de reproduction sexuée classique. Elle peut être productrice de femelles *(thélytoque)* ou de mâles *(arrhénotoque)*.

Les modalités très variées de la parthénogenèse et sa présence, ici et là, dans divers groupes montrent qu'en fait la parthénogenèse n'est qu'une modification secondaire des processus normaux de la reproduction sexuelle. L'absence de fécondation devrait théoriquement donner naissance à des organismes ayant un nombre de chromosomes égal à la moitié de celui des parents. Or, cela n'est pas le cas car, comme on le verra, des mécanismes variés permettent d'obtenir des individus diploïdes à partir de l'ovule haploïde non fécondé.

La **parthénogenèse thélytoque** obligatoire se rencontre de façon sporadique dans de nombreux groupes, en particulier chez les Arthropodes. Elle peut concerner soit l'ensemble d'une espèce, toujours apparentée alors à une espèce bisexuée normale, soit seulement certaines races d'une même espèce, où on trouve alors des populations à reproduction sexuée classique et des populations ne comprenant que des femelles à développement parthénogénétique.

L'exemple le plus classique est celui d'un Crustacé Branchiopode, *Artemia salina*, chez lequel on connaît 4 races. Une de ces races, diploïde ($2n = 42$), est normalement bisexuée ; les trois autres sont parthénogénétiques et sont respectivement diploïde, tétraploïde et octoploïde. Chez ces races parthénogénétiques, le nombre de chromosomes est conservé par suite de la fusion, après la formation de l'ovule, de deux produits de la méiose : l'ovule proprement dit et un globule polaire.

Chez d'autres espèces, par exemple chez le papillon *Selebonia*, les modalités du maintien du nombre de chromosomes s'effectuent plus tardivement (alors que le développement embryonnaire commence), par fusion des deux premiers noyaux de la segmentation. Chez d'autres espèces, par exemple chez la sauterelle *Saga pedo*, il y a un escamotage complet de la méiose.

La **parthénogenèse arrhénotoque** est une parthénogenèse facultative : l'œuf, qu'il soit ou non fécondé, peut se développer. L'œuf fécondé donnera naissance à une femelle, alors que l'œuf non fécondé donnera naissance à un mâle. Ce type de parthénogenèse se rencontre dans la quasi-totalité des espèces d'Hyménoptères.

Nous prendrons pour exemple l'abeille domestique, *Apis mellifica*. Les colonies que forme cette espèce sont constituées de trois sortes d'individus : une *femelle fertile*, ou *reine*, des *femelles stériles*, ou *ouvrières*, et enfin des *mâles*, ou *faux-bourdons*. Au cours de son vol nuptial, la reine s'accouple à un ou plusieurs faux-bourdons et reçoit alors une provision de spermatozoïdes qui, emmagasinés dans un petit réceptacle *(spermathèque)*, conserveront leur activité pendant les trois ou quatre ans que dure la vie reproductrice de l'Insecte. La spermathèque est une ampoule à parois musculeuses et contractiles qui communique avec le conduit par où passent les œufs : suivant qu'elle s'ouvre ou se ferme lors du passage de l'œuf, celui-ci sera fécondé ou non. Selon la loge qu'il occupera et l'alimentation qui lui sera accordée pendant son développement, l'œuf fécondé, donc diploïde, donnera une reine ou une ouvrière.

L'œuf non fécondé, donc haploïde, se développe parthénogénétiquement et donne un mâle ; c'est ainsi que les reines non fécondées ne donnent naissance qu'à des mâles (ruches bourdonneuses). Le mâle commence donc son développement à l'état haploïde. Les tissus somatiques cependant ne restent pas haploïdes et deviennent rapidement hautement polyploïdes. Par contre, la lignée germinale reste haploïde et, de ce fait, le mécanisme de formation des spermatozoïdes est tout à fait différent de celui existant chez un mâle diploïde ; en particulier, aucune méiose n'a lieu ; seule subsiste la phase de maturation qui transforme les cellules haploïdes immobiles en spermatozoïdes mobiles. Il est à remarquer que les spermatozoïdes d'un mâle donné auront tous la même constitution chromosomique, c'est-à-dire celle de l'œuf haploïde dont celui-ci est issu. Chez la reine diploïde, par contre, l'ovogenèse est normale.

Ce type de parthénogenèse correspond en fait à un cas extrême du déterminisme XO du sexe. Les mâles, au lieu d'avoir un chromosome X et un double lot de chromosomes autosomaux, ne possèdent qu'un lot de chromosomes.

Chez les espèces à *parthénogenèse cyclique*, des générations représentées exclusivement par des femelles parthénogénétiques alternent avec des générations où coexistent les deux sexes, qui, par reproduction sexuée, donneront naissance uniquement à des femelles. Ce type de parthénogenèse se retrouve, outre chez les daphnies et les Rotifères, chez deux groupes importants d'Insectes, les Cynipides (Hyménoptères) et les pucerons. Durant la belle saison, aussi bien chez les pucerons que chez les daphnies et les Rotifères, on ne rencontre que des femelles, lesquelles, par parthénogenèse, engendrent d'autres femelles. Ce type de reproduction parthénogénétique est thélytoque.

Chez les pucerons et les daphnies, ces femelles sont de plus vivipares, c'est-à-dire qu'elles mettent au monde leurs jeunes tout formés. Au bout de plusieurs générations, quand les conditions deviennent défavorables, certaines femelles, les *sexupares*, donnent naissance à des individus sexués : mâles et femelles. Les femelles proviennent d'un ovule n'ayant pas subi la méiose et qui est donc resté diploïde. Les mâles, eux, proviennent d'un ovule dont seuls les chromosomes sexuels ont subi la méiose. Les femelles

ont ainsi une garniture complète de chromosomes autosomaux et 2 chromosomes X, alors que les mâles, avec le même nombre d'autosomes, n'ont qu'1 chromosome X. Cette parthénogenèse qui donne naissance à des individus des deux sexes est appelée *parthénogenèse deutérotoque*. Chez ces mâles et ces femelles, la gamétogenèse est normale. Après l'accouplement, les femelles déposent des œufs, qui écloront au printemps suivant pour produire des femelles parthénogénétiques, à partir desquelles repartira un nouveau cycle.

Chez les Cynipides, Insectes responsables des tumeurs (ou galles) qu'ils déterminent dans les feuilles ou dans les bourgeons des arbres, il n'existe que deux générations par an : l'une est unisexuée *(femelles parthénogénétiques)* au printemps et l'autre est bisexuée en automne. Au printemps, les œufs d'hiver éclosent et donnent naissance à des femelles parthénogénétiques. Ces femelles déposent leurs œufs sur les feuilles ou les chatons de chêne. Autour de ces œufs, se forment de petites galles en forme de groseilles, à l'intérieur desquelles se développent les larves. Ces larves donneront naissance à des mâles et des femelles. Ces dernières, à l'inverse de leur mère, sont incapables d'enfanter sans fécondation. Leur aspect est d'ailleurs très différent de celui des premières, ce qui a fait longtemps croire qu'elles appartenaient à une autre espèce, qui avait été baptisée *Neuroterus baccarum*. Après avoir été fécondées, elles déposent leurs œufs sur la face inférieure des jeunes feuilles de chêne, où elles suscitent la formation de galles lenticulaires. Ces galles tomberont avec les feuilles mortes à terre et y passeront l'hiver. Au printemps, naîtront les femelles parthénogénétiques et le cycle recommencera.

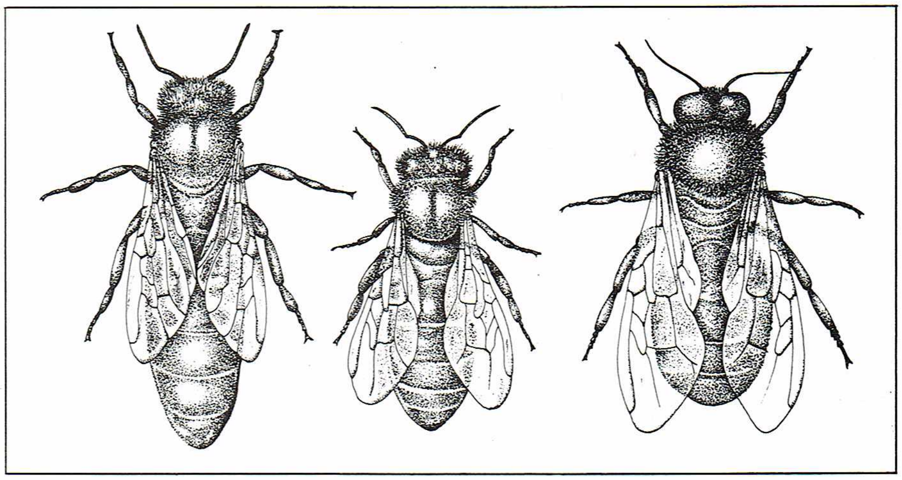

▲ *Chez les abeilles, la* **parthénogenèse arrhénotoque** *est classique. Ici, chez* **Apis mellifica,** *on reconnaît la reine (à gauche), une ouvrière ou femelle stérile (au centre) et un mâle ou faux-bourdon (à droite).*

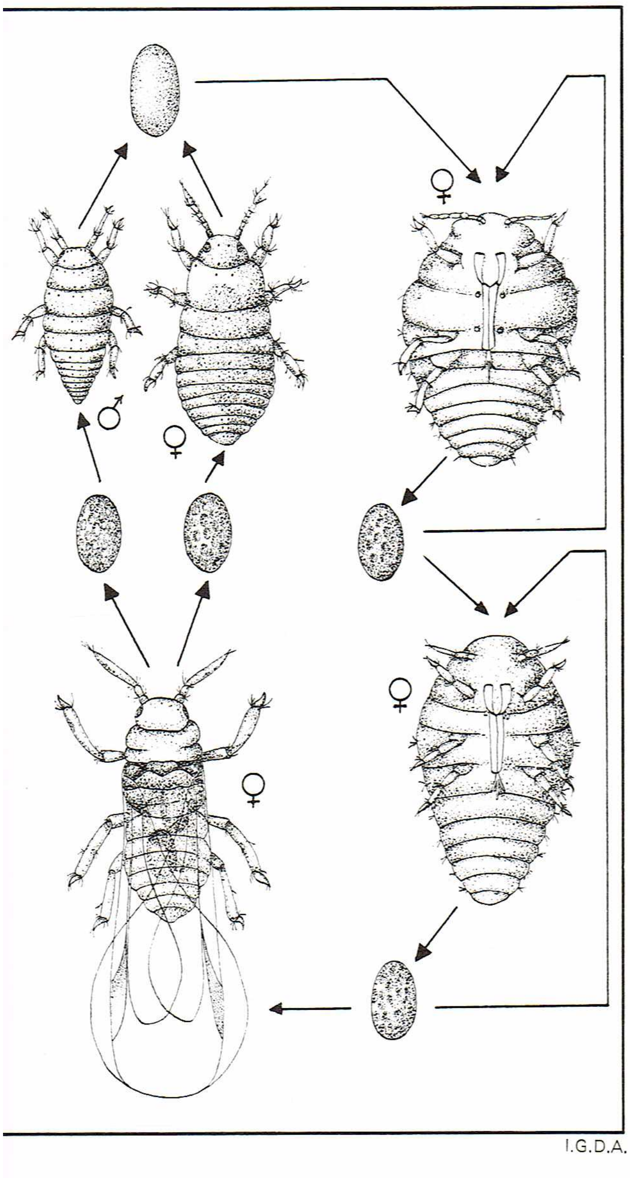

◀ *Représentation schématique du cycle de reproduction des pucerons; il s'agit d'une* **parthénogenèse cyclique** *de type thélytoque : des générations représentées exclusivement par des femelles parthénogénétiques alternent avec des générations où coexistent les deux sexes, qui, par reproduction sexuée, donnent uniquement naissance à des femelles.*

Conclusion

Reproduction sexuée et reproduction asexuée

Si la recombinaison génétique est connue même chez les organismes les plus simples et les moins évolués, la reproduction asexuée est très répandue chez différents organismes dont les degrés de complexité peuvent être plus ou moins grands. Cette constatation pose le problème de savoir quels sont pour les différentes espèces les avantages et les inconvénients respectifs des deux modes de reproduction, sexuée et asexuée. Si l'on suppose que la reproduction asexuée est le mode de reproduction le plus primitif, la reproduction sexuée serait apparue plus tard dans l'histoire des êtres vivants et probablement plusieurs fois, de façon indépendante. Au contraire, si l'on suppose que c'est la reproduction sexuée qui est le mode le plus primitif, c'est la reproduction asexuée qui serait apparue plusieurs fois, de façon indépendante. Au cours des dernières années, ces deux hypothèses ont été soutenues, avec peut-être un certain avantage pour la seconde, depuis la découverte de la recombinaison génétique chez les Bactéries et les virus.

Il est donc intéressant de voir quelle est la signification de la reproduction asexuée dans l'évolution.

Le mode de *reproduction asexuée* suppose l'existence d'un moyen rapide de multiplication d'un génotype particulier. Si ce génotype est bien adapté à une condition donnée de milieu, la reproduction asexuée est une méthode plus efficace que la reproduction sexuée pour coloniser rapidement ce milieu et pour y maintenir une population bien adaptée. Par l'intermédiaire de la recombinaison génétique, la reproduction sexuée est, en effet, productrice d'une grande variété de génotypes différents, dont beaucoup peuvent être faiblement adaptés à cette condition définie de milieu. De plus, la reproduction asexuée offre l'avantage, parce qu'elle ne nécessite pas l'intervention d'un autre partenaire, de permettre une reproduction même lorsque la population est peu nombreuse et les probabilités de rencontre de deux individus très faibles. Cependant, la reproduction asexuée ne permet pas une adaptation rapide à des changements des conditions d'environnement, la seule possibilité alors offerte étant l'apparition de mutations favorables. Chez les Bactéries, qui existent en très grand nombre et qui se reproduisent très rapidement, cette méthode d'adaptation peut être suffisante pour empêcher l'extinction des espèces. Mais, pour les autres groupes, cette possibilité n'est pas suffisante.

La *reproduction sexuée*, du fait des remaniements entre gènes qui ont lieu à chaque génération, permet la fabrication de nouveaux génotypes qui seront ensuite sélectionnés selon leur adaptation au milieu. Bien qu'à un moment et dans un endroit donnés, une population bien adaptée, à reproduction sexuée, ne donne naissance qu'à un faible pourcentage d'individus bien adaptés au milieu, une telle population est susceptible de bien supporter des changements dans les conditions de milieu et d'envahir de nouvelles niches écologiques. Il n'est donc pas étonnant que chez les organismes complexes et appelés supérieurs, il semble que la reproduction sexuée a été le mécanisme qui a permis le développement de cette complexité.

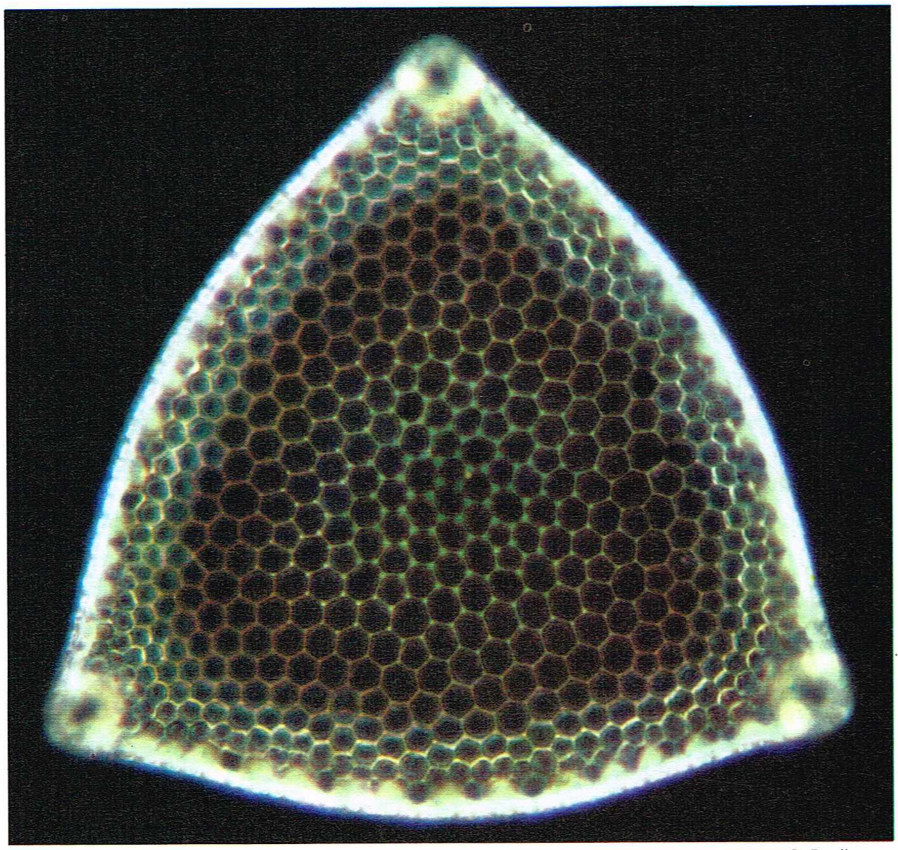

C. Bevilacqua

▲ *Une Diatomée :* **Triceratium secedens ;** *chez ces végétaux, la phase haploïde est réduite aux gamètes.*

Si le mode de reproduction sexuée était effectivement le mode le plus primitif, la reproduction asexuée en dériverait, et les états asexués de beaucoup de Bactéries, de Protozoaires ou d'autres groupes de micro-organismes pourraient s'interpréter comme une adaptation. Beaucoup de ces organismes vivent d'ailleurs dans des milieux où les conditions sont relativement stables et où la reproduction asexuée rapide est, de fait, avantageuse. Les autres organismes asexués, qui vivent dans des conditions instables, ne sont pas capables de se multiplier aussi rapidement mais peuvent s'adapter brutalement, par de simples mutations, alors que les organismes à reproduction sexuée ne peuvent développer des génotypes favorables qu'à travers la recombinaison génétique.

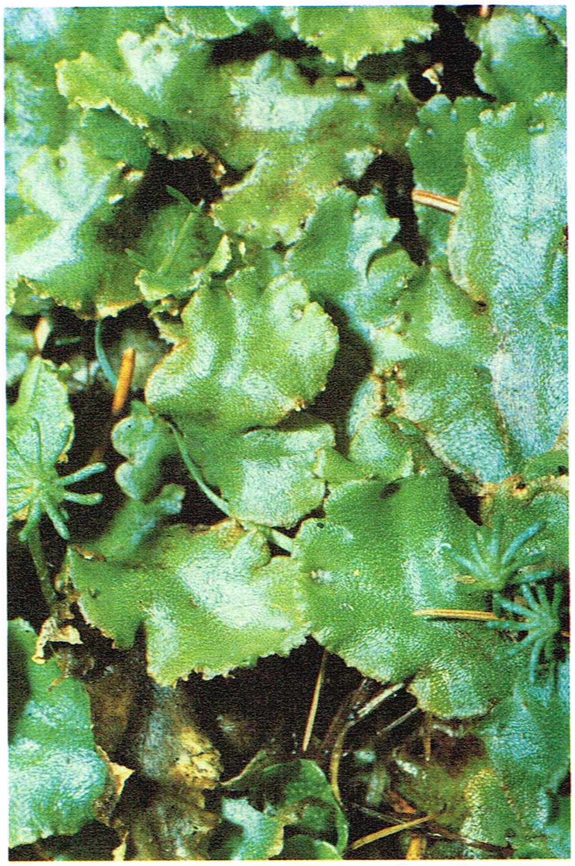

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ *Une* **Hépatique** *à thalle, commune dans les lieux humides :* **Marchantia polymorpha ;** *son cycle est presque exclusivement* **haploïde.**

Haploïdie et diploïdie

Bien que l'on puisse avoir des doutes sur les premières étapes des phénomènes sexuels, il semble assez clair que l'haploïdie est l'étape primitive à partir de laquelle la diploïdie est apparue chez un certain nombre de groupes différents non apparentés. Dès que le niveau d'organisation d'un organisme est tel que le matériel génétique est agencé en chromosomes, on y observe la mitose et la méiose.

Les Flagellés et les Algues vertes les plus primitifs sont haploïdes. La seule cellule diploïde de leurs cycles respectifs est représentée par le zygote, qui subit immédiatement la méiose sans connaître de mitose. Au contraire, au cours de l'évolution des plantes et des animaux, on observe que la tendance a été à la réduction de la phase haploïde et à l'augmentation de l'importance de la phase diploïde, ce qui laisse supposer que l'état diploïde a représenté un avantage adaptatif.

Les Métazoaires et certains groupes de Protozoaires sont entièrement diploïdes à l'exception de leurs gamètes : la méiose donne directement naissance aux gamètes. Chez les végétaux, on observe la même situation chez les Diatomées, les Levures, ainsi que chez certaines Algues vertes et Algues brunes. Chez certaines Algues, où alternent une phase haploïde et une phase diploïde, on remarque que les représentants de chacune de ces phases sont très semblables morphologiquement. Il semble que c'est de ce type de cycle que sont issus les deux autres types : celui à phase diploïde prépondérante et celui à phase haploïde plus importante.

Sont à cycle presque uniquement diploïde toutes les plantes vasculaires et certaines Algues brunes. Sont à cycle presque exclusivement haploïde les Mousses, les Hépatiques et quelques groupes d'Algues. L'évolution des végétaux étant dans le sens de la conquête de la terre ferme et de l'abandon de l'élément liquide, on pourrait croire que la diploïdie n'est pas une acquisition postérieure à l'haploïdie, puisque les Algues brunes sont diploïdes et que sur terre les Champignons ont une phase haploïde très importante. De plus, les Mousses, qui sont considérées comme des intermédiaires entre les Algues haploïdes et les plantes vasculaires, sont apparemment plus récentes que les plus vieilles plantes vasculaires et représentent une fin de phylum plus qu'une forme de transition. Il apparaît ainsi qu'il ne faut pas rechercher les avantages adaptatifs de la diploïdie en relation avec la conquête de la terre ferme.

Chez un organisme haploïde, le génotype est directement exprimé ; ainsi, tous les génotypes d'une population sont à tout moment exposés à la sélection, et seule une faible variabilité sera possible puisque tous les mutants défavorables seront éliminés. Par contre, chez un organisme diploïde, une très grande variabilité sera présente sous forme de gènes récessifs à l'état hétérozygote. Une partie de cette variabilité sera mise en circulation et soumise à la sélection à chaque génération. De cette façon, une population conserve la possibilité de s'adapter aux changements des conditions environnementales tout en restant parfaitement adaptée aux conditions existantes. Cette plasticité n'est pas due uniquement à l'existence des gènes récessifs, mais aussi aux effets d'épistasie et à l'hétérozygotie.

BIBLIOGRAPHIE

LAMOTTE M. et L'HÉRITIER Ph., *Biologie générale,* t. 1 et 2, Éd. Doin, 1968. - ROSTAND J., *Esquisse d'une histoire de la biologie,* Éd. Gallimard, 1945. - ROSTAND J. et TÉTRY A., *la Vie,* Éd. Larousse, 1962. - THÉODORIDES J., *Histoire de la biologie,* P.U.F., 1965. - MERREL D. J., *Evolution and Genetics,* Holt, Rinehost and Winston, New York, 1962. - SRB A. M., OWEN R. D., EDGAR R.S., *General Genetics,* Freeman and Co, San Francisco, London, 2e éd., 1965.

Y. Le Chapelain - Pitch

▲ ***Le* phénotype *est l'ensemble* des caractères *(la pigmentation différente des cheveux, par exemple) d'une cellule ou d'un individu. Il correspond à l'*expression du génotype *de la cellule ou de l'individu, dans un contexte donné.***

GÉNÉTIQUE ET HÉRÉDITÉ

La génétique fait son apparition vers le milieu du XIXe siècle. C'est une période clé dans l'histoire de la biologie. La théorie de l'évolution est proposée par Charles Darwin dans *l'Origine des espèces* en 1859. Cette théorie voit dans l'adaptation au milieu l'agent principal de l'évolution organique. C'est l'espèce tout entière qui répond aux modifications de l'environnement : la sélection des plus aptes, mesurée en termes de capacité reproductrice, est le moteur de l'évolution. La reproduction est donc un processus essentiel à celle-ci : elle est responsable à la fois de la stabilité des formes et de leur variabilité.

La théorie cellulaire, selon laquelle les plantes et les animaux sont constitués « d'unités fondamentales » auxquelles les microscopistes Schleiden et Schwann, en 1839, et, avant eux, des embryologistes (von Baer, en 1827) donnent le nom de *cellules,* s'établit définitivement. Ainsi étaient détruites les idées préformistes selon lesquelles toute semence contenait en format réduit la forme même de l'être auquel elle donnait naissance. Ni les gamètes ni l'embryon à ses débuts ne ressemblent à un adulte en miniature. Le développement est « épigénétique » : une série de transformations se produisent au cours des divisions cellulaires, dont l'adulte constitue la dernière forme. Ainsi, d'une génération à la suivante, l'élément persistant qui se transmet, c'est la cellule. Les spermes sont des cellules vivantes, c'est-à-dire « une goutte de protoplasme enfermée dans son enveloppe » (F. Jacob).

Parallèlement à l'établissement des théories qui sont à la base de la biologie contemporaine, la méthode expérimentale est introduite en biologie par Claude Bernard. Désormais, l'expérimentateur intervient dans les processus biologiques, modifie les conditions de leur déroulement, mesure et analyse les résultats de ces modifications.

C'est en Gregor Mendel que vont se rencontrer la connaissance théorique des problèmes posés par la biologie contemporaine et le talent de l'expérimentateur rompu aux techniques de l'horticulture.

La découverte du gène : l'œuvre de Mendel

C'est à Brno en Moravie (région de l'actuelle Tchécoslovaquie) que l'Autrichien Mendel conduisit ses expériences. En choisissant le pois *(Pisum),* il utilisait un matériel particulièrement favorable. En effet, dans ce genre, les fleurs sont pratiquement toujours fécondées par leur propre pollen (autofécondation) ; l'autofécondation tend à établir des races pures, c'est-à-dire qu'au cours des générations chacune des plantes donne des descendants tous semblables et constants.

Contrairement à tous ceux qui, antérieurement, avaient accumulé les observations concernant les caractéristiques des hybrides, Mendel est le premier à avoir défini et établi un protocole d'expérimentation. Tout d'abord, les caractères étudiés sont dès le départ parfaitement bien définis. « Quelques formes bien déterminées du genre *Pisum* ont des caractères différentiels constants et faciles à reconnaître avec certitude. » Les caractères mis en expérience se rapportent, par exemple, à la forme des graines mûres (pois rond ou ridé), aux différences de coloration des cotylédons, aux différences de forme de la gousse mûre. Ensuite, les caractères étudiés qui différencient les deux plantes à croiser sont en nombre restreint. Mendel étudie une, deux, puis trois différences simples. Enfin, il analyse de nombreux descendants, sur plusieurs générations successives, de façon à épuiser tous les types d'associations de caractères susceptibles de se produire.

La discontinuité introduite délibérément dans le choix des caractères permet un dénombrement simple et rigoureux à chaque génération et, par conséquent, l'application élémentaire du calcul des probabilités.

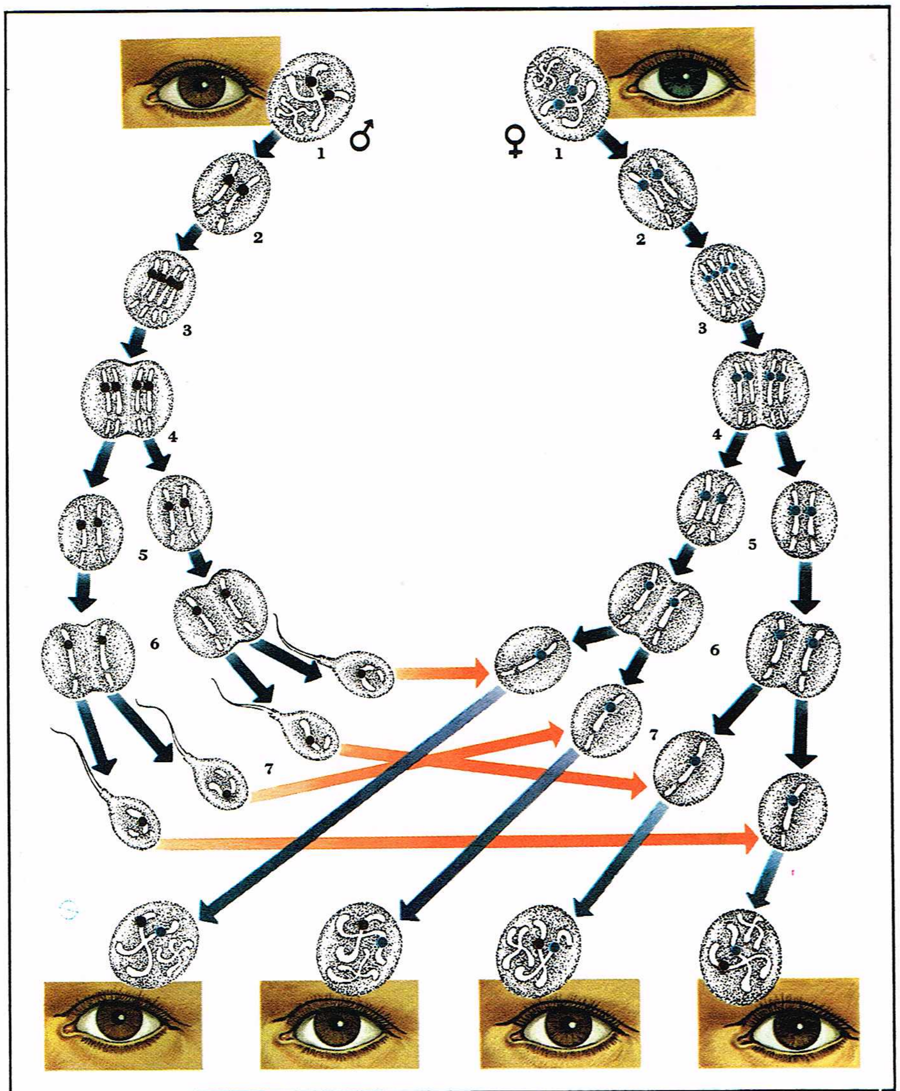

I.G.D.A.

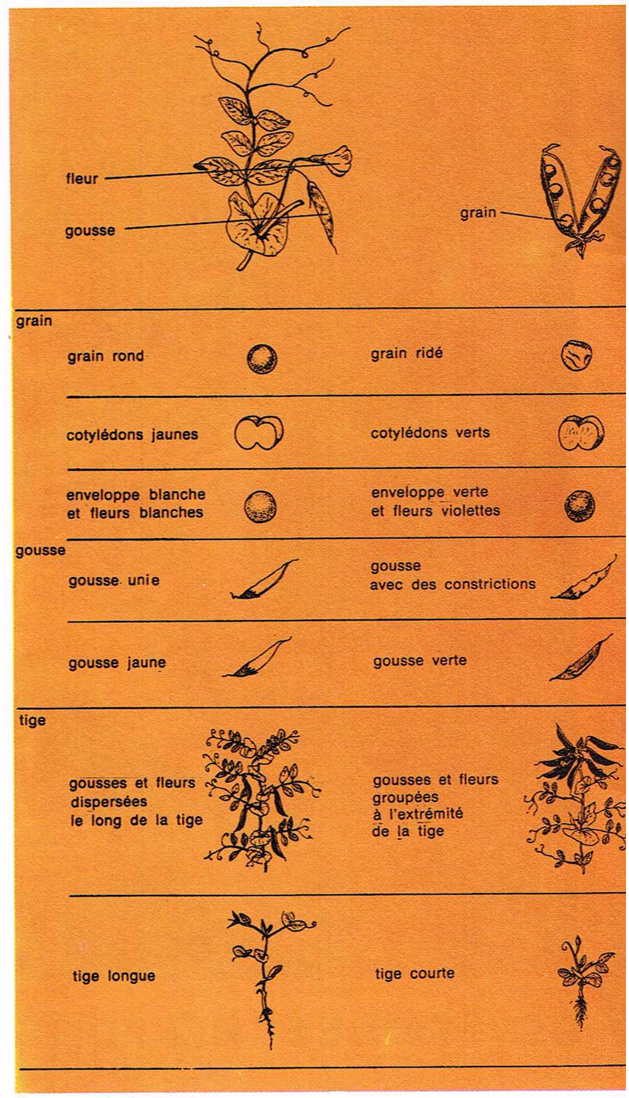

Document la Recherche

▲ *A gauche, représentation schématique montrant que l'union et la combinaison chromosomiques entre un homme (homozygote) à yeux marron et une femme (homozygote) à yeux bleus donnent une descendance à yeux marron; le gène présidant à la couleur marron étant dominant sur l'autre, récessif. A droite, l'étude simultanée du mode de transmission de ces différents caractères permit à Mendel d'établir que chacun d'entre eux était hérité indépendamment de tous les autres et donc d'énoncer la loi de la ségrégation indépendante des caractères héréditaires.*

▶ *Représentation schématique montrant qu'à la F_2 (descendance de l'hybride), les deux formes, récessive et dominante, apparaissent dans un rapport de 1 à 3.*

Ainsi, à la suite de croisements entre variétés différant par un seul caractère (par exemple, graine ronde et ridée), les hybrides de 1re génération, qui constituent la F_1, ressemblent exclusivement à l'un des deux parents (graine ronde). Comme le caractère de l'autre parent (graine ridée) réapparaît dans la descendance de l'hybride, cela signifie qu'il est toujours présent à l'état latent dans la combinaison hybride. Ce caractère est appelé *« récessif »*; par contre, celui qui s'exprime dans l'hybride est dit *« dominant »*. Il est, par ailleurs, indifférent que le caractère dominant appartienne à la plante utilisée comme femelle ou à la plante mâle.

A la génération suivante, qui constitue la F_2 (descendance de l'hybride), les deux formes, récessive et dominante, apparaissent dans un rapport voisin de 1 à 3. Par exemple, dans une expérience portant sur la forme des grains, 253 hybrides ont donné 7 324 graines, parmi lesquelles 5 474 étaient rondes et 1 850 ridées (le rapport est ici 2,96/1). Les formes qui, en F_2, possèdent le caractère récessif ne varient plus lorsqu'on étudie leur descendance par autofécondation. Il en est autrement de celles qui possèdent le caractère dominant. Les 2/3 se comportent comme les hybrides, c'est-à-dire qu'elles donnent des descendants dont les 3/4 portent le caractère dominant et 1/4 le caractère récessif; le caractère dominant ne reste constant que dans 1/3 des cas.

Les descendants des hybrides se subdivisent donc, à chaque génération, en formes hybrides et en formes constantes dans le rapport 2 ; 1 ; 1. Si *A* désigne l'un des deux caractères constants, le dominant par exemple, *a* le caractère récessif et *Aa* la forme hybride dans laquelle ils sont réunis tous deux, l'expression *A* + 2 *Aa* + *a* donne la série des formes pour les descendants des hybrides de chaque couple de caractères différentiels.

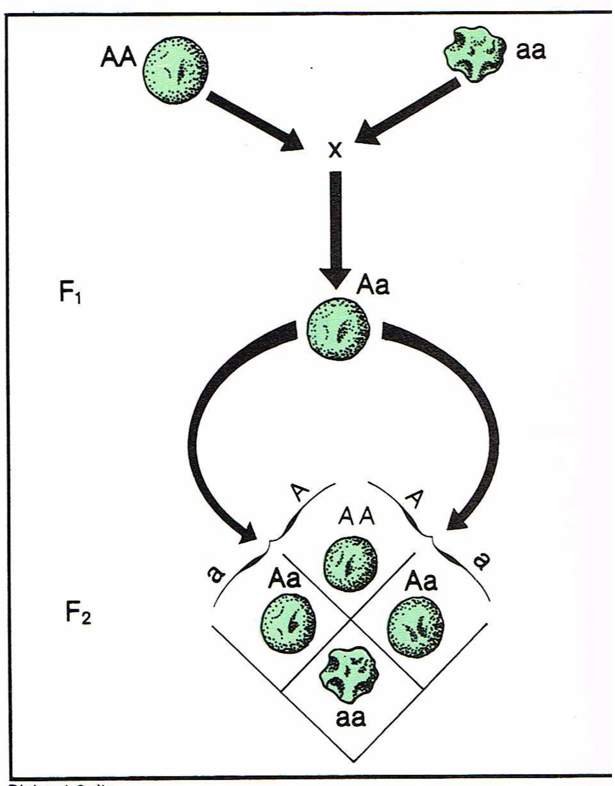

Richard Colin

L'utilisation de symboles permet l'élaboration d'hypothèses simples pour expliquer les données : comme l'hybride est capable de former en nombre égal les deux types de formes constantes, *A* et *a*, on peut conclure que les cellules sexuelles des hybrides sont chargées pour moitié du type *A* et pour moitié du type *a*. « Le hasard seul désignera donc celle des deux sortes de pollen qui se lie avec chacune des cellules ovulaires. » Cependant, d'après le calcul des probabilités, il doit toujours arriver, sur un grand nombre de cas, que chacune des formes de pollen *A* et *a* se conjugue un même nombre de fois avec chacune des formes de cellules ovulaires *A* et *a*. Par conséquent, une des deux cellules polliniques *A* rencontrera dans la fécondation une cellule ovulaire *A*, l'autre une cellule ovulaire *a* ; de même, l'une des cellules polliniques *a* sera réunie à une cellule germinative *A*, et l'autre à une cellule germinative *a*.

Le résultat de la fécondation peut donc se représenter sous forme d'une fraction qui rassemble les caractéristiques des cellules ovulaires et polliniques accouplées. Dans la descendance de l'hybride *A/a*, quatre combinaisons sont formées en quantité égale : *A/A, A/a, a/A* et *a/a*. La première et la dernière correspondent aux parents de race pure. Du fait de la dominance des caractères étudiés, les trois premières apparaissent identiques en ce qui concerne le caractère observable, mais se distinguent par leur descendance.

Le résultat fondamental de ces expériences est que les deux *« facteurs » A* et *a* ne se mélangent pas ; ils restent indépendants et inaltérés, et vont se séparer au moment de la reproduction. Chaque gamète mâle ou femelle en porte un seul, l'un ou l'autre avec une chance égale. Transposé à l'homme, ce résultat signifie que l'hérédité d'un enfant n'est pas un mélange, un amalgame des « sangs » de ses parents. L'hérédité des parents ne fusionne pas dans leurs descendants ; au moment de la formation des gamètes, les facteurs responsables de leurs caractères se dissocient sans avoir été en aucune façon mutuellement influencés par ce séjour d'une génération dans un corps commun.

Les règles simples que nous avons énoncées se retrouvent lorsque les variétés utilisées diffèrent par deux caractères. Les hybrides obtenus en F_1 sont à nouveau tous identiques. Si l'une des plantes parentales ne présente que des caractères dominants, l'hybride ne peut alors en être distingué. Par exemple, dans une expérience de croisement entre un parent présentant des graines de forme ronde à albumen jaune et un parent présentant des graines de forme ridée à albumen vert, on observe la formation de graines toutes rondes et jaunes (en effet, les caractères rond et jaune sont respectivement dominants sur les caractères ridé et vert). Dans une telle expérience, 556 graines ont été obtenues en F_2, parmi lesquelles 315 rondes et jaunes, 101 ridées et jaunes, 108 rondes et vertes, et 32 ridées et vertes (soit un rapport : 9;3;3;1). L'étude des générations suivantes permet d'établir pour chacun des deux caractères l'état pur ou hybride de chacune des graines. Neuf catégories de graines sont ainsi produites dans des proportions telles que les deux caractères se transmettent indépendamment.

L'hérédité est donc *particulaire*. Dans les gamètes, les facteurs héréditaires sont disposés par unités ou par groupes d'unités qui évoluent indépendamment. En 1909, Johannsen suggérera le mot *gène* pour désigner ces unités.

La redécouverte des lois de Mendel

Comme nous l'avons vu dans l'introduction à la biologie, les découvertes de Mendel n'ont suscité en son temps aucune réaction d'intérêt évident. La raison principale en fut vraisemblablement l'absence de connaissances solides sur les mécanismes de la méiose et de la mitose.

Par contre, ces mécanismes et par conséquent le devenir des chromosomes étaient parfaitement bien connus lorsque, en 1900, les botanistes De Vries, Correns, von Tschermak « redécouvrent » les lois de Mendel. En effet, depuis 1879, le processus de scission des chromosomes en deux chromosomes identiques au précédent était observé.

L'analogie qui existe entre le comportement des gènes et celui des chromosomes frappe l'Américain Sutton. Ainsi, en 1903, il postule que les gènes sont localisés sur les chromosomes. Si les gènes déterminant la couleur jaune ou verte des graines du pois sont portés par une paire de chromosomes et si les gènes déterminant leur forme ronde ou ridée sont localisés sur une autre paire de chromosomes, on explique immédiatement la proportion 9 : 3 : 3 : 1 observée dans la descendance des hybrides.

La démonstration de ce qui deviendra la *théorie chromosomique de l'hérédité* sera faite par une équipe de biologistes américains, dont le chef de file sera T. H. Morgan.

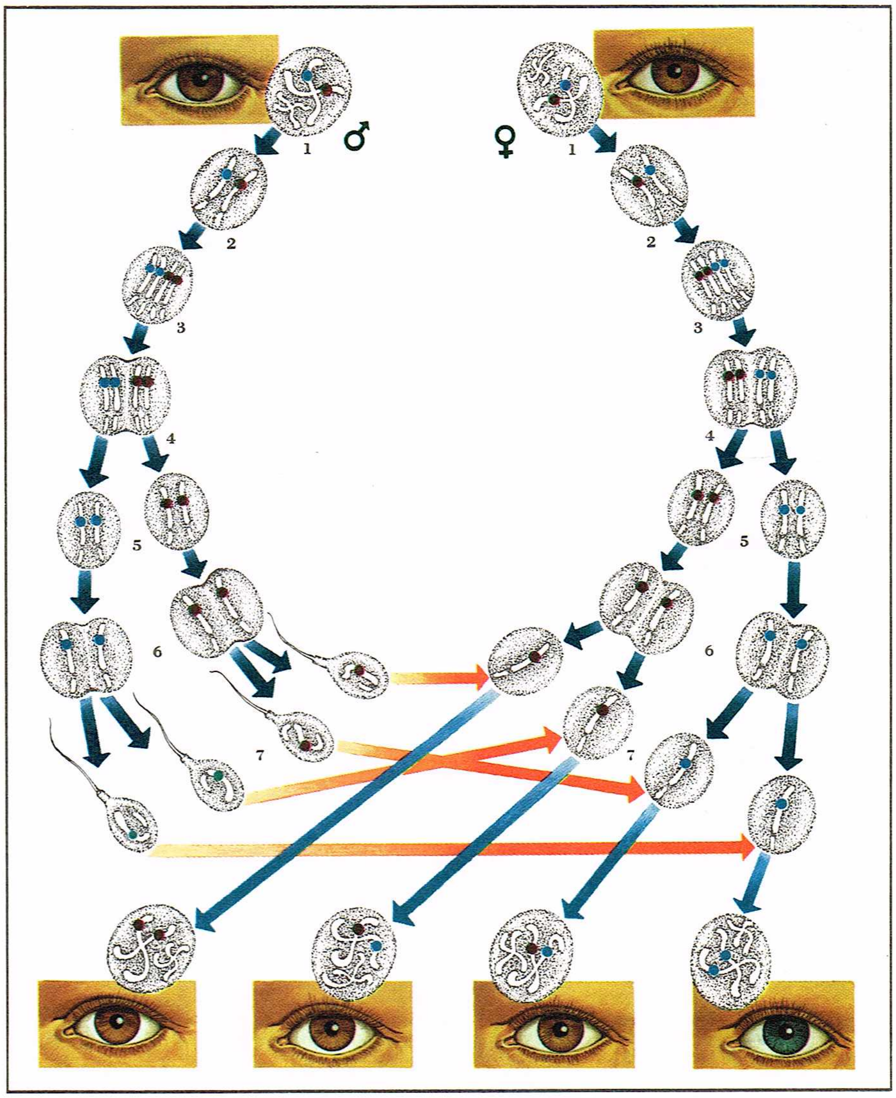

I.G.D.A.

▲ ***Représentation schématique montrant que l'union et la combinaison chromosomiques entre parents* (hétérozygotes) *à yeux marron donnent naissance à une descendance ayant, dans un rapport de* 1 *à* 3, *des yeux bleus et des yeux marron (la succession des phases méiotiques est indiquée par les chiffres). Ce phénomène de répartition est dû à la présence chez les deux parents d'un gène (bleu) récessif, qui, ayant rencontré son homologue au niveau des gamètes, a pu se manifester.***

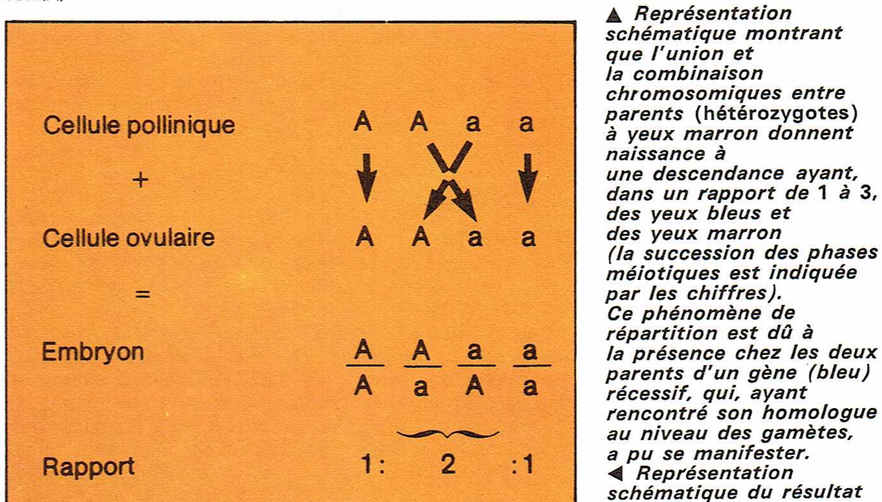

Richard Colin

◀ ***Représentation schématique du résultat de la fécondation entre cellules ovulaires et polliniques.***

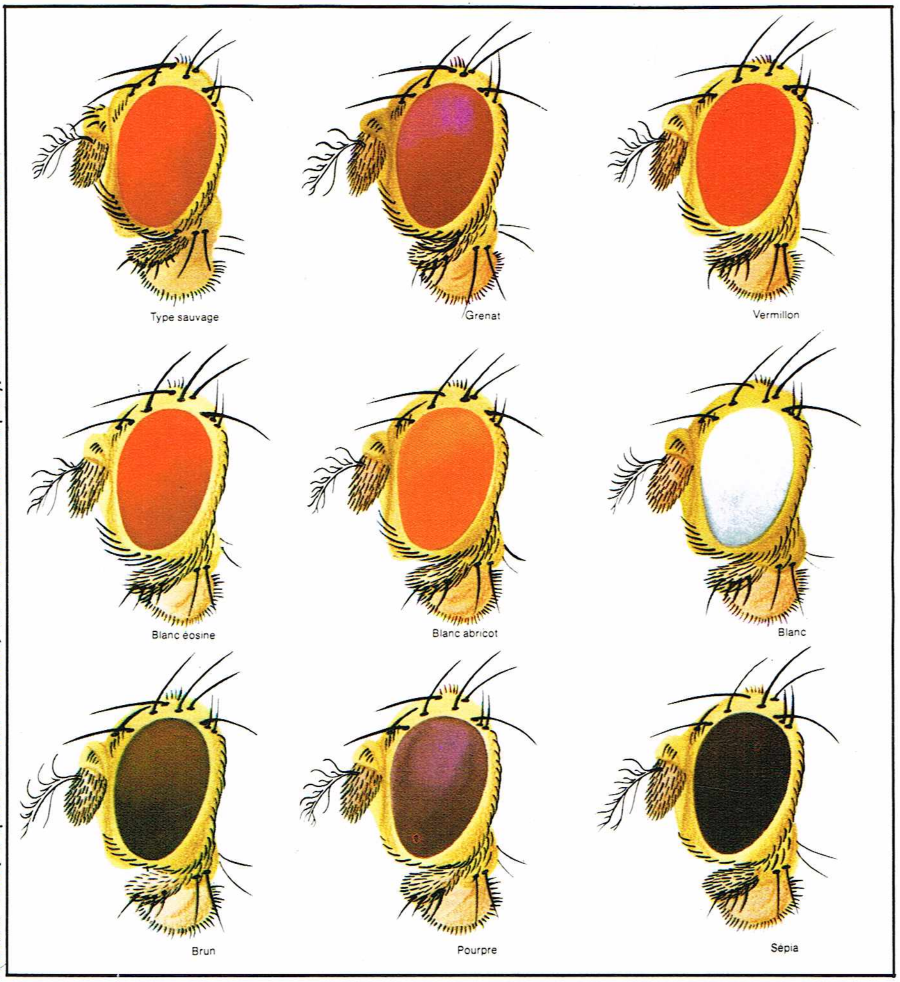

Richard Colin, d'après General Genetics, W. H. Freeman and company, San Francisco et Londres.

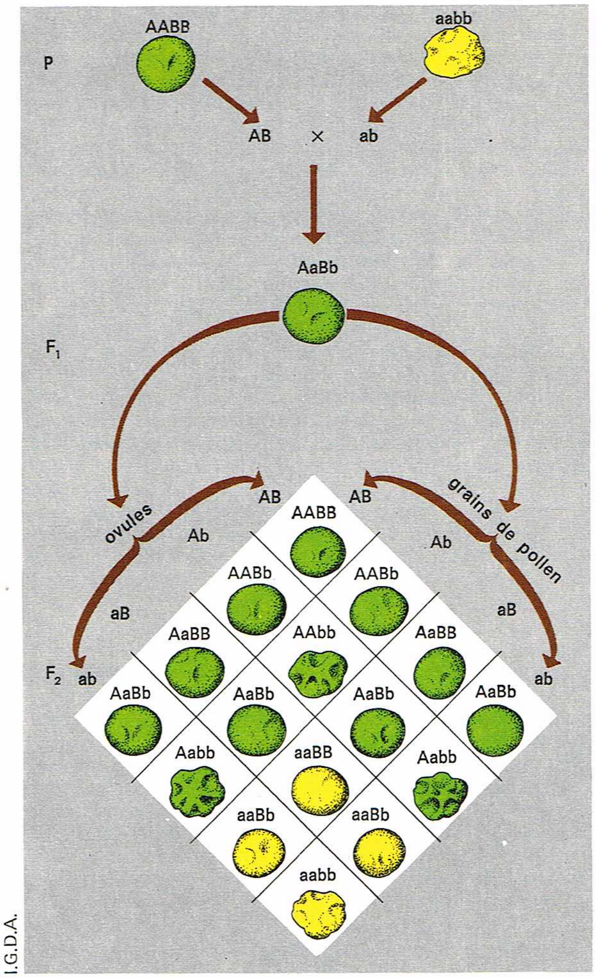

I.G.D.A.

▲ ***A gauche, différentes couleurs d'yeux de* Drosophila melanogaster *: ces diverses formes qui apparaissent brutalement se produisent par* mutation. *A droite, exemple de ségrégation* mendélienne *: le croisement est effectué entre deux grains de pois différant par* deux couples de caractères *: A, vert, a, jaune, B, rond, b, ridé.***

La mutation

Le début du XX^{e} siècle marque une révolution dans la conception de la variation des caractères. Jusqu'à la fin du XIX^{e} siècle, l'idée de variations graduelles des caractères était la seule admise : *« Natura non facit saltus. »* (La nature ne fait pas de saut.) Or, l'observation de populations d'effectif important et descendant de souches pures (Mendel choisissait arbitrairement des variétés de pois achetées chez les sélectionneurs) révèle, au début du XX^{e} siècle, l'apparition d'individus présentant d'emblée et subitement toutes les caractéristiques d'un nouveau type. Ce nouveau type produit ensuite une descendance stable. De Vries écrit : « Les espèces ne se transforment pas graduellement mais restent inaltérées pendant toutes les générations successives. Subitement, elles produisent de nouvelles formes qui diffèrent nettement de leurs parents et qui de suite sont aussi parfaites, aussi constantes, aussi bien définies et aussi pures qu'on peut l'attendre d'une espèce quelconque. »

Ces nouvelles formes qui apparaissent d'un coup se produisent par *mutation*. On peut d'ailleurs provoquer leur apparition. Muller, en 1926, induit des mutations chez la drosophile en irradiant le sperme aux rayons X. Qu'elles soient spontanées ou provoquées, les mutations possèdent les mêmes caractéristiques. Elles sont rares, apparaissent brutalement, et se produisent au hasard, sans « souci » de l'utile et de l'inutile, de ce qu'elles apportent ou de ce qu'elles ôtent à l'organisme qui les exprimera. Il n'y a pas de relation entre leur production et les conditions externes. Les mutations ne sont pas dirigées.

La théorie chromosomique de l'hérédité

Dans l'élevage de drosophiles, Morgan observa l'apparition de centaines de variations héréditaires, affectant la couleur de l'œil, la forme des ailes, etc. C'est l'étude systématique de ces mutations qui amena l'élaboration de la théorie chromosomique de l'hérédité. Le choix de la « mouche du vinaigre » fut particulièrement fructueux : son temps de génération est très court (14 jours), ce qui permet de travailler 25 fois plus vite qu'avec le pois ; sa taille est suffisamment petite pour qu'on manipule des populations dans un espace réduit ; sa fertilité est importante (d'un couple de mouches, plusieurs centaines de descendants peuvent être obtenus en moins de 2 semaines) ; les caractères sont aisés à observer ; enfin, la drosophile ne possède que 4 paires de chromosomes, ce qui permet de les distinguer aisément à l'examen microscopique.

La première observation qui surprit l'équipe de Morgan fut que certains groupes de caractères ont tendance à rester associés dans leur combinaison parentale à travers les générations successives ; ainsi, les individus descendant d'un croisement où les deux parents diffèrent par deux caractères (*Ab* × *aB*) [et sont donc de type *Ab*/*aB*] ne fournissent pas en égale proportion les quatre types de gamètes *Ab*, *aB*, *AB* et *ab* ; les catégories parentales *Ab* et *aB* sont majoritaires. Morgan et son équipe définissent ainsi quatre « groupes de liaison ». Or, la drosophile possède quatre chromosomes à l'état haploïde ; l'un des groupes de liaison est d'ailleurs associé au sexe de l'animal. Morgan proposa l'hypothèse que les gènes compris dans un même groupe de liaison étaient portés par la même paire de chromosomes. A l'intérieur d'un groupe, la liaison n'est par ailleurs jamais totale. En déterminant les fréquences avec lesquelles les caractères restent associés ou non dans les descendants, on peut disposer les gènes en ordre linéaire comme les perles d'un collier. Le chromosome n'est donc pas un sac de gènes mais plutôt, comme le suggère sa forme filamenteuse, une fibre le long de laquelle les gènes sont disposés linéairement.

La séparation des chromosomes d'une paire au cours de la méiose suffit à expliquer la formation des gamètes recombinés pour des gènes localisés sur des chromosomes différents. Pour des gènes appartenant à un même groupe de liaison, cette formation implique qu'il peut se produire de nouveaux chromosomes dont les différents segments sont d'origine parentale différente. Le

mécanisme qui permet l'échange de gènes entre chromosomes homologues, c'est-à-dire d'une même paire, a été appelé *crossing-over*. Le Danois Janssen en fixa la base cytologique. Au début de la méiose, les chromosomes homologues s'apparient sur toute leur longueur; chaque chromosome est alors clivé en deux chromatides. Si le mécanisme du crossing-over n'est pas encore élucidé aujourd'hui, il est établi qu'un échange se produit entre deux chromatides non sœurs par cassure, puis réunion. C'est par ce processus que sont produites des associations recombinées entre gènes appartenant à un même groupe de liaison. Il a pour conséquence que des gènes situés l'un près de l'autre sur un même chromosome se recombineront beaucoup moins souvent que des gènes éloignés. Ainsi, vers 1920, les généticiens établissent dans des organismes variés l'arrangement spatial des gènes sur les chromosomes, en établissant des *cartes factorielles*.

Le travail de Morgan a donc eu pour effet de concrétiser la notion mendélienne abstraite du gène, qu'il définit ainsi : « Le gène est une certaine quantité de matière dans le chromosome; celle-ci peut se séparer du chromosome dans lequel elle repose et y être remplacée par la partie correspondante (et nulle autre) du chromosome homologue. » En d'autres termes, le gène est un segment de chromosome.

Un gène-une enzyme

La nature de la liaison existant entre le gène et le caractère sera établie grâce à la rencontre de deux sciences, au développement parallèle et jusque-là indépendant : la génétique et la biochimie.

Les réactions chimiques impliquées dans la transformation des molécules décomposant les aliments en éléments essentiels de la construction cellulaire constituent ce qu'on appelle le *métabolisme intermédiaire*. Chaque réaction ne s'accomplit à une vitesse appréciable que grâce à la présence d'une enzyme spécifique qui catalyse la réaction. Les enzymes sont des protéines. Comme nous l'avons vu lors de l'étude de la cellule, l'enzyme est l'unité d'exécution des réactions chimiques de la cellule, le bâtisseur de la structure des êtres vivants. La constitution d'un métabolite essentiel passe par une suite de réactions chimiques, par une chaîne de réactions, dont chaque maillon est sous la dépendance d'une enzyme particulière.

C'est dans des systèmes où la chaîne de réactions qui conduit à l'établissement d'un caractère observable était particulièrement simple que l'idée de la relation « un gène-une enzyme » fut émise et en partie vérifiée. Dès 1909, Garrod émet l'hypothèse qu'une maladie héréditaire altérant le métabolisme d'un amino-acide, la phénylcétonurie, est due à un déficit enzymatique. Cette proposition fut à l'origine de travaux effectués sur les pigments des fleurs, et ceux des yeux des Insectes. Mais les organismes supérieurs se prêtent mal à l'étude biochimique, et il fallut trouver un matériel d'étude plus approprié. Les moisissures et les Levures tout d'abord, puis les Bactéries et les virus furent utilisés.

Les Champignons dont la sexualité était parfaitement connue, tel *Neurospora*, ont ainsi remplacé la drosophile dans de nombreux laboratoires vers les années 1940. *Neurospora*, comme la plupart des micro-organismes, est capable de synthétiser la quasi-totalité des petites molécules organiques, tels les amino-acides, nécessaires à l'édification des macromolécules et, par là, des structures cellulaires. Il est donc possible de les faire croître sur un milieu synthétique ne contenant que quelques éléments simples, appelé *milieu minimal*. Un tel milieu contient une source de carbone comme le glucose qui sert en particulier d'aliment énergétique, une source d'azote, des sels minéraux et parfois aussi quelques vitamines.

Les généticiens isolèrent des *mutants incapables* de pousser sur un milieu minimal qu'ils appelèrent *mutants biochimiques*. La plupart du temps, ces mutants sont *conditionnels :* il suffit d'ajouter au milieu minimal un facteur de croissance, tel un amino-acide, pour qu'ils poussent normalement. Ainsi, on a pu isoler, par exemple, une quinzaine de mutants exigeants en arginine. Les mutants se répartissent en trois classes : ceux qui ne poussent qu'en présence d'arginine, ceux qui poussent en présence d'arginine ou de citrulline, et ceux qui se développent en présence d'arginine, de citrulline ou

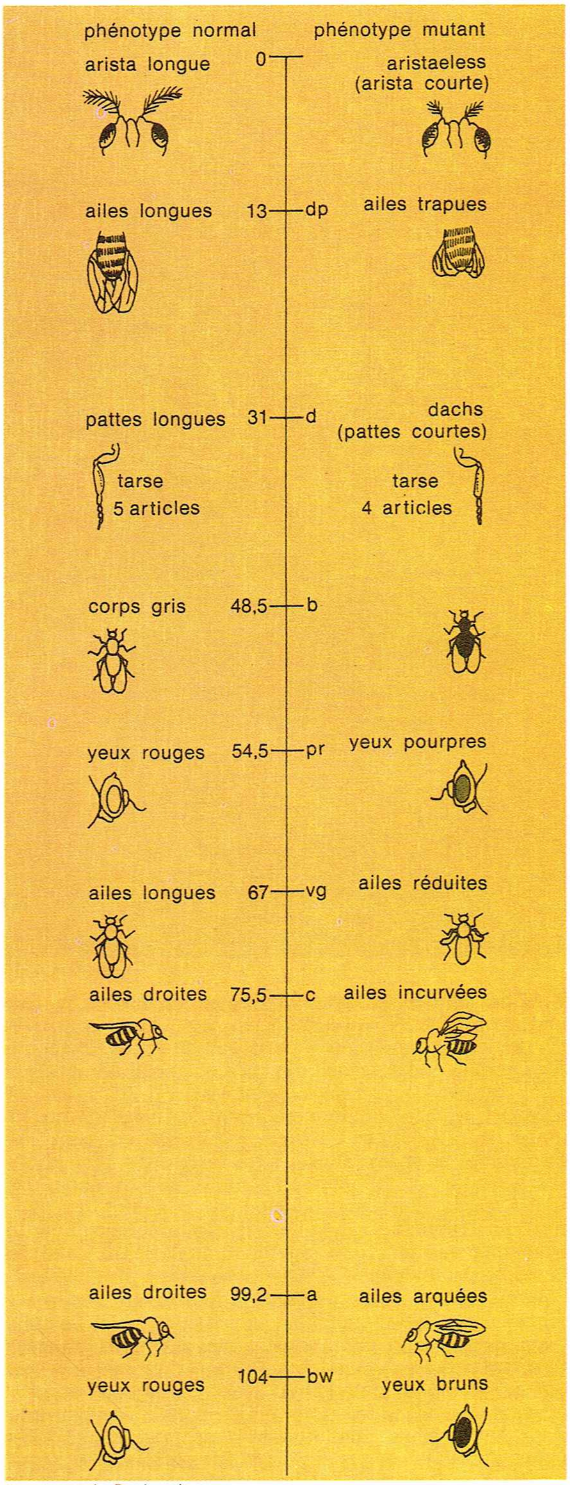

Document la Recherche

◀ **Carte « factorielle »** ***des chromosomes de la drosophile (ici un extrait de la carte génétique du chromosome 2, d'après Watson). L'étude des groupes de liaison et le calcul des probabilités de recombinaison ont permis de situer les différents gènes sur leurs chromosomes respectifs.***

d'ornithine (voir schéma p. 234 à gauche). Par ailleurs, chez les mutants appartenant à un groupe donné, le même gène a subi la mutation. Une relation bi-univoque apparaît donc entre le gène et l'étape de biosynthèse. De plus, il est souvent possible d'isoler dans les cellules mutantes la protéine qui ne présente plus l'activité enzymatique, et d'étudier l'altération qui s'y est produite.

Un gène gouverne une réaction chimique parce qu'il détermine les propriétés de la protéine enzyme qui catalyse cette réaction. Le rôle des gènes n'est donc pas limité au simple mécanisme mendélien. C'est toute la chimie de la cellule qui est régie par son hérédité.

Les gènes sont constitués d'ADN

En 1944, lorsque se produisit l'éclatante découverte d'Avery, Mac Leod et Mc Carthy, on connaissait l'existence de deux types de substances dans le noyau des cellules : des protéines et des acides, qualifiés par

▶ *Dès 1947, Chargaff montra que les quatre nucléotides constituant l'ADN n'étaient pas présents en quantités égales et que leur proportion relative variait d'une espèce à l'autre.*

Origine de l'ADN	$\frac{A+T}{G+C}$	Origine de l'ADN	$\frac{A+T}{G+C}$
Bactéries :		**Échinodermes :**	
Pseudomonas aeruginosa	0,51	Paracentrotus lividus	1,86
Escherichia coli	0,97	**Insectes :**	
Bacillus megaterium	1,66	Locusta migratoria	1,41
Champignons Ascomycètes :		**Poissons :**	
Saccharomyces cerevisiae	1,80	Truite	1,34
Aspergillus niger	1,00	**Oiseaux :**	
Algues :		Poulet	1,36
Scenedesmus quadricauda	0,57	**Mammifères :**	
Rhabdonema adriaticum	1,71	Homme	1,40
Graminées :		**Virus :**	
		phage T_2	1,84
Blé	1,22	phage λ	1,06

Richard Colin

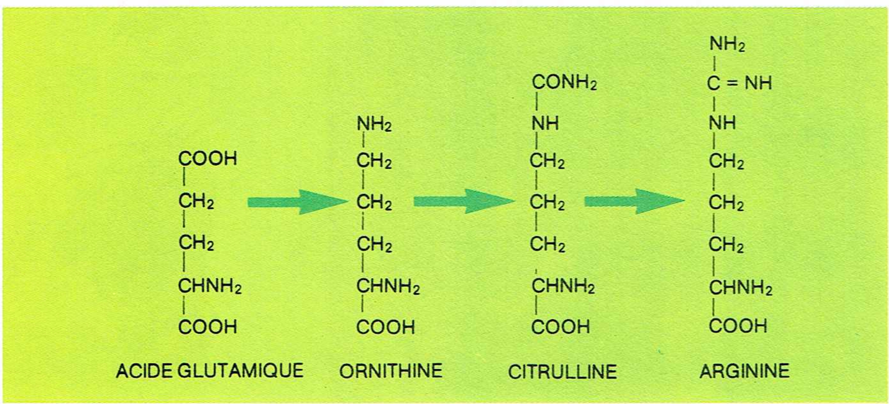

Richard Colin

▲ *Étapes de la biosynthèse de l'arginine. L'une ou l'autre de ces étapes ne peut être effectuée par les mutants exigeants en arginine.*

Miescher au siècle précédent de « nucléiques ». Ces acides sont l'ADN et l'ARN. Bien que l'ADN se trouvât exclusivement dans le noyau et que sa structure fût encore mal connue, on ne pensait pas qu'il pût s'agir d'une substance douée de propriétés génétiques. L'ADN est un polymère de haut poids moléculaire composé de quatre sortes de nucléotides : chaque nucléotide est constitué d'un sucre, le désoxyribose, lié à un groupement phosphate, et, selon la nature du nucléotide, à l'une des quatre bases puriques (adénine ou guanine) ou pyrimidiques (thymine ou cytosine). Cette composition lui promettait une structure répétitive, analogue à celle de l'amidon par exemple.

Avery répéta, en les poussant à leur terme, des expériences réalisées en 1926 chez le pneumocoque, Bactérie responsable de la pneumonie : des Bactéries vivantes mais inoffensives, inoculées à une souris en même temps que des Bactéries pathogènes tuées par la chaleur, provoquent une infection mortelle. Le même chercheur remplaça les Bactéries pathogènes tuées par des extraits de leur ADN : les souris ainsi inoculées meurent de pneumonie. Les Bactéries vivantes inoffensives ont acquis la pathogénicité ; elles ont été *transformées*. Si on traite l'ADN extrait par une enzyme qui dégrade spécifiquement l'ADN en nucléotides sans modifier ni l'ARN ni les protéines, on supprime l'activité transformante. Par contre, si on traite l'extrait par des enzymes qui dégradent spécifiquement l'ARN ou les protéines, on ne supprime pas l'activité transformante. Les Bactéries ont donc absorbé des fragments d'ADN qui sont capables de substituer leur activité à celle de l'ADN correspondant présent dans le chromosome bactérien. L'ADN est donc responsable de la continuité génétique de la Bactérie.

Cette découverte stimula l'étude chimique des acides nucléiques et, très vite, l'idée qu'il y a un arrangement précis des nucléotides à l'intérieur de la molécule et que cet arrangement est en relation avec sa spécificité génétique allait s'imposer. Ainsi, dès 1947, Chargaff montra que les quatre nucléotides constituant l'ADN n'étaient pas présents en quantités égales et que leur proportion relative variait d'une espèce à l'autre. La formidable découverte d'Avery fut confirmée par des expériences de Hershey réalisées, en 1950, sur le bactériophage T_2. Les particules infectieuses de ce virion contiennent de l'ADN recouvert d'une enveloppe protéique protectrice. Après infection de la Bactérie, celle-ci se lyse et libère une centaine de virions. Utilisant les isotopes radio-actifs, Hershey réalisa un marquage différentiel du virion. Après infection puis lyse de la Bactérie, seule la radio-activité des acides nucléiques se retrouva dans les phages descendants.

Ainsi, comme dans le cas de la transformation bactérienne, l'ADN est le seul responsable de la continuité génétique du virus. Il constitue le *matériel génétique*.

La double hélice

La structure tridimensionnelle de la molécule d'ADN fut découverte, en 1953, par Watson et Crik à partir de l'analyse des diagrammes de diffraction par les rayons X. Ces auteurs s'efforcèrent de trouver la structure stéréochimique la plus compatible avec les données de la diffraction. C'est ainsi que la *structure en double hélice* fut proposée.

La double hélice est constituée de deux chaînes enroulées. Chaque chaîne est un polymère de nucléotides dans lequel les sucres des nucléotides sont liés par des groupements phosphates. Les chaînes constituent le « squelette » de la molécule. Sur ce squelette sont accrochées les bases puriques et pyrimidiques, lesquelles sont disposées dans un ordre très irrégulier et variant d'une molécule à l'autre. Les bases, qui sont des molécules plates et hydrophobes, s'empilent les unes sur les autres à l'intérieur de la molécule, perpendiculairement à l'axe de

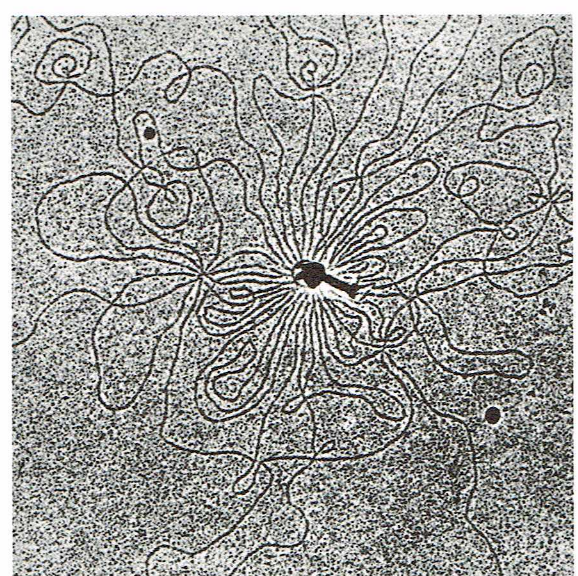

M. Pitzurra

▶ *Microphotographie électronique de l'ADN d'un phage T_2.*

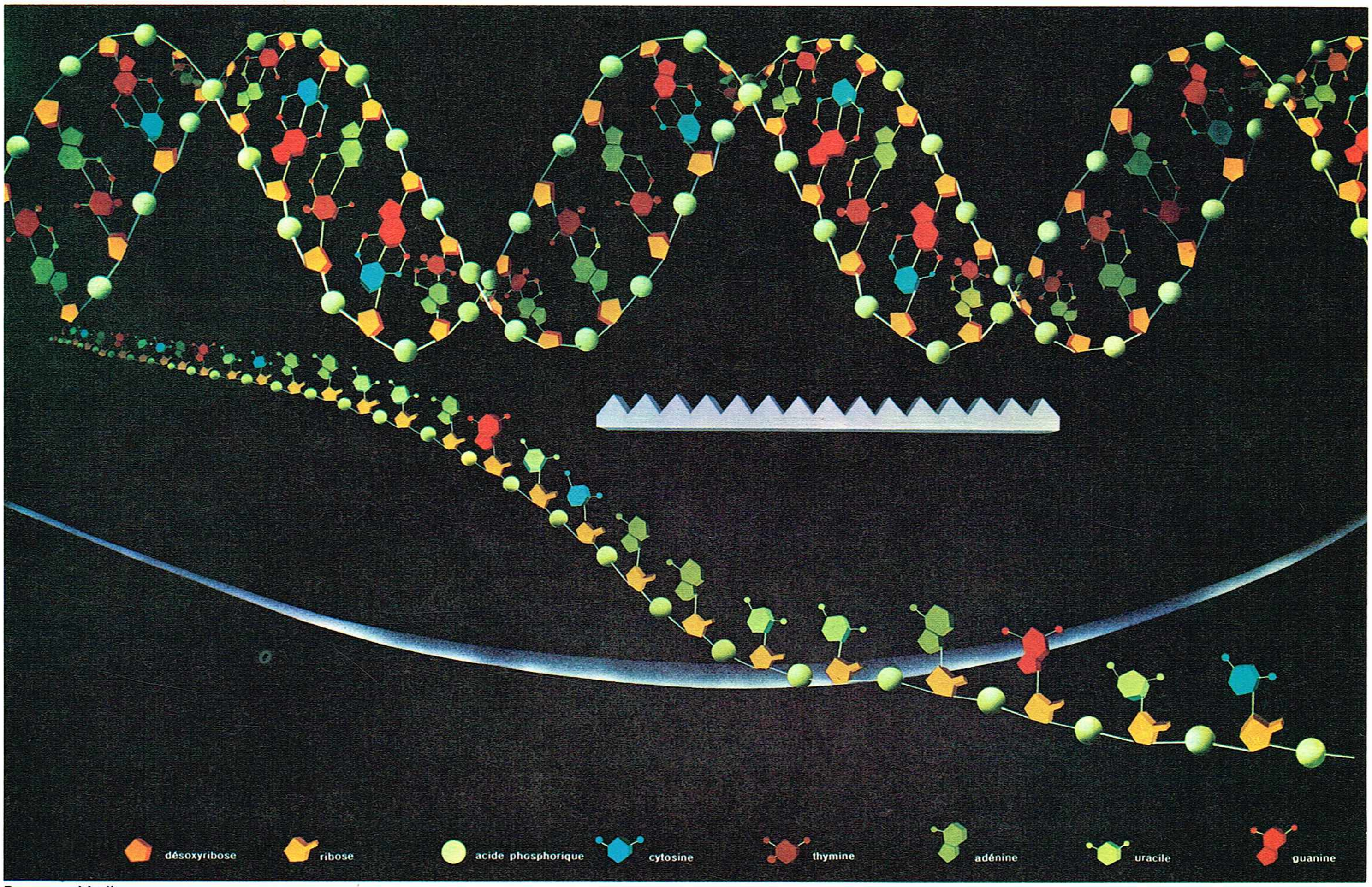

Rassegna Medica

▲ ***Structure d'une molécule d'*ADN *(en haut) et d'*ARN *(en bas).***

l'hélice. Les deux chaînes sont maintenues accolées sur toute leur longueur par des liaisons hydrogène entre les paires de bases. Les bases possèdent entre elles des propriétés d'appariement spécifique : l'adénine s'associe toujours à la thymine et la guanine à la cytosine. Cela entraîne une complémentarité entre les séquences de bases des deux chaînes de la molécule.

La découverte de cette structure fut une révélation. Elle apportait la réponse à la question de l'autoreproduction des gènes. En effet, la nature complémentaire des deux chaînes suggère immédiatement que l'un des brins peut servir de modèle à la constitution de l'autre.

Ainsi, après un siècle de recherches, les bases scientifiques d'une réponse au problème essentiel de la reproduction conforme, qu'avaient tenté de résoudre, de façon naïve, les préformistes, étaient enfin établies. Sur ces bases, allait pouvoir se développer une science neuve, la *génétique moléculaire,* dont nous allons maintenant exposer les développements récents. Ils concernent, d'une part, le processus de transfert de l'information contenue dans les macromolécules et, d'autre part, les mécanismes de régulation de ces transferts.

La génétique des virus et des Bactéries

Gènes et mutations

L'existence de facteurs héréditaires a été postulée depuis longtemps. C'est Mendel qui, on l'a vu précédemment, a commencé le premier à donner une réalité à cette hypothèse. La désignation de ces facteurs par les termes de *gènes,* ou *pangènes,* date des années 1900. Mais, à mesure que les découvertes se succédaient, l'idée de gènes se modifiait dans l'esprit des chercheurs, ainsi que le contenu des concepts afférents à cette notion. Il est donc important d'énoncer clairement les définitions modernes de mots tels que *gène, mutation, allèle, recombinaison,* etc.

Le gène est un segment d'ADN

Sa définition actuelle est une définition fonctionnelle : le gène est un segment d'ADN qui porte l'information nécessaire pour la synthèse d'une chaîne polypeptidique. On voit que cette définition n'a pu être énoncée que récemment, car elle repose sur la connaissance du fonctionnement des mécanismes de transcription et de traduction qui permettent de passer de la structure de l'ADN à celle des protéines. Les gènes sont disposés linéairement sur les chromosomes. L'ensemble des gènes d'une cellule constitue son *génome.*

Les gènes peuvent muter

Une *mutation* est un changement irréversible de la structure du segment d'ADN constituant un gène. La mutation apparaît brusquement et est immédiatement stable. Elle peut consister en la perte d'un fragment d'ADN *(délétion),* en l'acquisition d'un morceau supplémentaire *(addition),* ou encore en un remplacement d'une partie de l'ADN par une autre contenant une information génétique différente *(substitution).* La plus petite modification possible est la délétion, l'addition ou la substitution d'une seule base dans la séquence nucléotidique de l'ADN. A l'inverse, la taille d'une mutation peut être très grande. Une délétion, par exemple, peut être plus grande qu'un gène.

On le voit, un gène peut exister sous de nombreuses formes différentes dérivant les unes des autres par le jeu des mutations. Ces différents états constituent des *formes alléliques* du gène ou, plus simplement, des *allèles.* Dans le langage du généticien, on pourra distinguer le ou les *allèles sauvages,* qui sont les formes d'un gène dont le fonctionnement est normal, et les *allèles mutants,* dont le fonctionnement est plus ou moins altéré.

Les enzymes sont « codées » par les gènes

Une fonction cellulaire est très généralement une réaction chimique plus ou moins compliquée qui, pour se dérouler dans des conditions compatibles avec la vie,

▶ ***Représentation schématique des différents types possibles de* mutations *au niveau d'une paire de* nucléotides.**

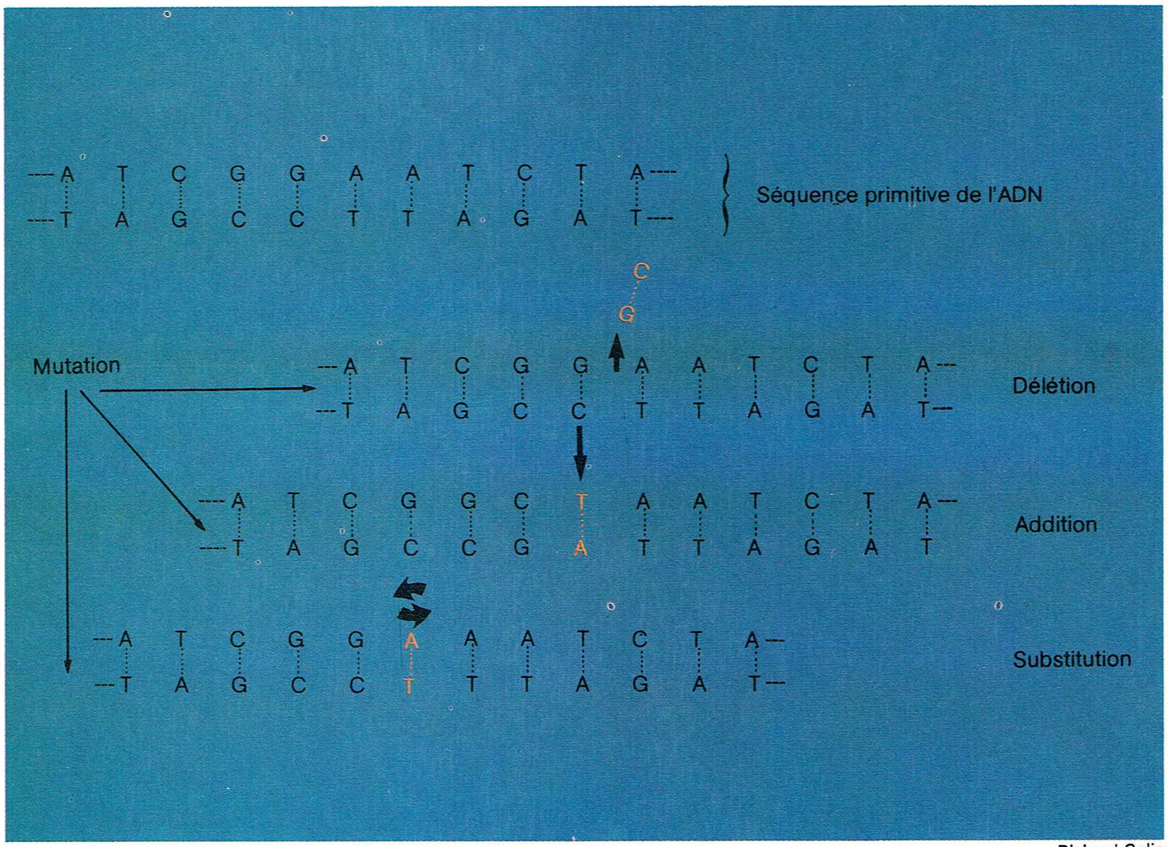

Richard Colin

nécessite la présence d'une ou de plusieurs enzymes. Ces enzymes sont de nature protéique et leur synthèse est effectuée par les cellules grâce à l'information contenue dans l'ADN, c'est-à-dire dans les gènes. Si l'on désire savoir en quoi une fonction cellulaire est indispensable à la cellule, une méthode que l'on peut employer consiste à supprimer cette fonction ou à l'altérer gravement ; le plus simple est d'utiliser une souche de cellules dont le gène « codant » pour l'enzyme responsable de la fonction que l'on étudie est présent sous une forme allélique mutante inactive.

▼ ***Culture de Bactéries en présence d'*antibiotique *;* *on observe des* clones *de Bactéries résistantes.***

P. Starosta

Les mutations sont rares

Le *taux de mutation* d'une souche pour un gène donné est la fréquence d'apparition d'individus porteurs d'allèles mutants de ce gène par génération. Cette fréquence est très faible : variant selon les organismes et les gènes, elle est généralement comprise entre 10^{-6} (1 pour 1 million) et 10^{-8} (1 pour 100 millions) par génération. Il est presque toujours impossible de tester plusieurs millions ou centaines de millions d'individus pour savoir s'ils sont ou non capables d'effectuer normalement une réaction chimique donnée. Il est donc nécessaire d'employer une méthode expérimentale dans laquelle le rendement est meilleur. Pour cela, on peut jouer principalement sur deux paramètres : la fréquence des mutations et le crible de sélection.

Les agents mutagènes

On sait, depuis les travaux de Muller, en 1926, que l'irradiation par les rayons X provoque l'apparition de mutants avec une haute fréquence. Cela est également vrai pour les rayons ultraviolets et pour les rayons gamma. D'autre part, de nombreuses substances chimiques possèdent aussi la propriété d'augmenter énormément la fréquence des mutations. De tels agents ou substances sont appelés *mutagènes*. Une expérimentation effectuée dans le dessein d'obtenir de nombreux mutants par l'action d'agents mutagènes constitue une *mutagenèse*. En employant des agents mutagènes très actifs et par conséquent très dangereux à manipuler, on peut obtenir une augmentation de la fréquence des mutations d'un facteur 100 ou même 1 000.

Il est très important de noter que, ce faisant, on augmente *globalement* les mutations et non seulement les mutations dans un gène donné. Il reste donc à sélectionner efficacement les mutations que l'on souhaite provoquer.

La sélection des souches mutantes

Cette opération consiste à repérer et à isoler les souches qui effectuent mal ou qui sont incapables d'effectuer une fonction cellulaire donnée. La méthode employée constitue le *crible de sélection*. Notons tout de suite qu'il est indispensable de se placer expérimentalement dans des conditions telles que le mauvais fonctionnement cellulaire des mutants n'entraîne pas la mort de la cellule

ou de l'organisme. Il reste à distinguer les souches mutantes à isoler des souches « sauvages » majoritaires. En effet, à ce stade, on obtient souvent, au mieux, 1 pour 1 000 ou 1 pour 10 000 mutant intéressant. Chaque fois que l'on peut, on tente alors d'enrichir la population de cellules en mutants.

Une des méthodes d'enrichissement les plus efficaces, quand on peut l'employer, consiste à faire agir des antibiotiques comme la pénicilline. Ce type de manipulation marche très bien sur des organismes comme la Bactérie *Escherichia coli*. La pénicilline ne tue les Bactéries que quand elles sont en croissance, alors que celles qui sont au repos ne sont pas affectées. Il suffit donc de placer la population de Bactéries contenant des mutants dans des conditions où les mutants ne peuvent pas se développer et où les Bactéries « sauvages » vont pousser. Le résultat est que seuls les mutants restent vivants, alors que les autres sont tués par l'antibiotique. Il suffit ensuite de transférer la population de Bactéries dans des conditions où les mutants peuvent se développer et en l'absence d'antibiotique, par exemple, dans un milieu de culture où l'on a ajouté la substance que les mutants sont incapables de synthétiser.

L'expérimentation terminée, il ne reste plus, théoriquement, que les souches mutantes recherchées. Pratiquement, les méthodes d'enrichissement ne sont jamais efficaces à 100 % : on obtient, en général, un enrichissement relatif. Les cribles de sélection ne sont malheureusement pas tous aussi simples et sont parfois beaucoup moins efficaces. On est même souvent réduit à s'en passer purement et simplement et à s'armer de patience.

Le génome

Il est constitué par l'ensemble des gènes d'une cellule ou, par extension, d'un individu.

Le génotype

C'est l'ensemble de l'information génétique d'une cellule, c'est-à-dire de ses gènes, compte tenu de la forme allélique sous laquelle ils se présentent. Usuellement, cette définition est trop large et le *génotype* désigne couramment l'inventaire des gènes *impliqués* dans un croisement ou une expérience, en tenant toujours compte de leur forme allélique.

Le phénotype

C'est l'ensemble des *caractères* d'une cellule ou d'un individu. Il correspond à l'*expression* du génotype de la cellule ou de l'individu, dans un contexte donné.

Pendant la phase haploïde du cycle d'un organisme, chaque gène est présent à un seul exemplaire par cellule. La présence d'un allèle mutant dans son stock génétique se traduit alors par la perte ou l'altération d'une fonction au niveau cellulaire. Cet organisme présente alors un aspect (pigmentation, taille, etc.) ou un comportement (vitesse de croissance, etc.) différent de celui de la souche portant l'allèle « sauvage ». Il y a une correspondance entre le génotype et le phénotype. On aura un phénotype « sauvage », que l'on symbolise fréquemment par [+], et un ou des phénotypes mutants.

Si le phénotype d'un organisme haploïde est en relation directe avec son génotype (schématiquement : génotype mutant → phénotype mutant), cela n'est plus vrai dans une cellule diploïde, où chaque gène est présent en deux exemplaires. Considérons un gène donné appelé arbitrairement gène A. Il peut se présenter sous la forme « sauvage » a^+ ou sous une forme allélique mutante a^-. Pour un organisme haploïde, au génotype a^+ correspond le phénotype [a+], et au génotype a^- correspond le phénotype [a−]. Le cas d'un organisme diploïde est moins simple car, pour un gène pouvant être présent sous deux formes alléliques, il existe trois combinaisons génotypiques possibles : a^+/a^+, a^-/a^- et a^+/a^-. Dans une cellule diploïde, il est en effet possible d'avoir deux allèles différents d'un même gène dans la même cellule. Cet état est appelé *hétérozygotie*. A l'inverse, la cellule peut être *homozygote*, c'est-à-dire que les deux gènes A qu'elle contient sont tous les deux soit a^+, soit a^-. Le phénotype d'un individu hétérozygote a^+/a^- dépend des relations qui s'établissent entre les deux allèles en présence dans un contexte donné. La figure ci-après schématise les relations entre phénotype et génotype dans une cellule diploïde. Le point d'interrogation de la figure signifie que pour une cellule de génotype a^+/a^- il existe plusieurs phénotypes possibles :

— phénotype [a+] : on dit alors que l'allèle a^+ s'exprime, alors que l'allèle a^- ne s'exprime pas, ou encore que a^+ est dominant sur a^-, et que a^- est récessif par rapport à a^+;

— phénotype [a−] : c'est le cas inverse : l'allèle a^- est dominant et l'allèle a^+ est récessif.

— phénotype autre que [a+] ou [a−] : il peut être intermédiaire entre les deux phénotypes, présentant des caractères dus à l'allèle a^+ et d'autres dus à a^-. Dans ce cas, on dit que les deux allèles en présence sont *semi-dominants*.

Le cas rencontré le plus fréquemment est celui où l'allèle « sauvage » [+] est dominant et les allèles mutants sont récessifs; cependant, la situation inverse se produit aussi.

Génotype	Phénotype	
$\frac{A}{A}$	[A]	Homozygote A
$\frac{a}{a}$	[a]	Homozygote a
$\frac{A}{a}$	[?]	Hétérozygote

Richard Colin

◀ ***Représentation schématique des relations entre le* génotype *et le* phénotype *dans un organisme* diploïde.**

La relation entre le génotype et le phénotype n'est pas bi-univoque

On a vu que cette relation est simple dans une cellule ou un organisme haploïde. Elle est souvent ambiguë dans les cellules diploïdes hétérozygotes. Il y a un autre facteur qui rend cette relation encore moins claire : c'est le fait que des mutations se produisant dans des gènes différents (non allèles) peuvent aboutir à des phénotypes analogues.

Prenons l'exemple de la synthèse d'un acide aminé, le tryptophane, par la souche [+] de la Bactérie *Escherichia coli*. Cette synthèse est complexe et s'effectue en plusieurs étapes successives que l'on peut schématiser comme suit : A → B → C → D → tryptophane. Chaque transformation (A → B, B → C, C → D, D → tryptophane) est une réaction chimique catalysée par une enzyme et, par conséquent, contrôlée par le gène qui permet la synthèse de cette enzyme. Ces gènes portent l'information qui code pour la structure de l'enzyme et sont souvent appelés, par contraction, *gènes de structure* des enzymes. La figure en marge schématise le contrôle génétique de la chaîne de biosynthèse du tryptophane. La Bactérie *E. coli* est haploïde; son génome comporte donc un seul exemplaire de chacun des gènes de structure des enzymes nécessaires à la synthèse du tryptophane. Si l'un d'eux, le gène x par exemple, est présent sous une forme mutante inactive x^-, la Bactérie ne possédera pas l'enzyme E_1, ou la possédera sous une forme gravement altérée, de telle sorte que la cellule ne sera pas capable d'effectuer la réaction A → B. S'il en est ainsi, le produit intermédiaire de la synthèse B sera absent et ne pourra être transformé en C, bien que l'enzyme responsable de cette réaction soit présente, et ainsi de suite. Le résultat final sera une Bactérie incapable de synthétiser le tryptophane et dont le phénotype sera écrit [*tryp*−]. Ce raisonnement est valable pour toute mutation se produisant dans un quelconque des gènes x, y, z ou t. En effet toutes ces mutations aboutissent au même phénotype, c'est-à-dire à des souches mutantes incapables de synthétiser le tryptophane. Comme cet acide aminé est indispensable, car il entre dans la composition de très nombreuses protéines, les Bactéries [tryp−] sont incapables de pousser, sauf dans un cas : si on leur fournit du tryptophane tout fait dans le milieu de culture (les souches [tryp−] sont aussi appelées *tryptophane-exigeantes*).

▼ ***Représentation schématique du contrôle génétique d'une chaîne de biosynthèse.***

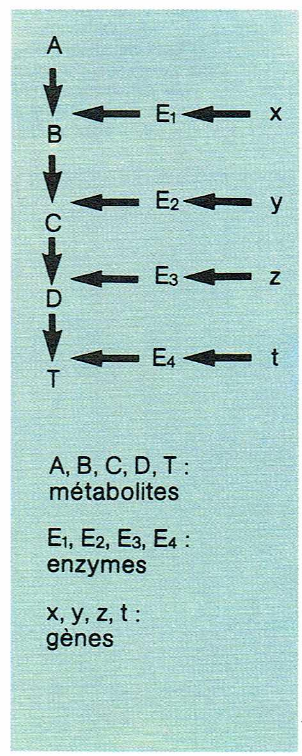

Richard Colin

▶ *A gauche,* **bactériophage T_4 :** *virus à symétrie binaire; à droite, sa représentation schématique (d'après W. Hayes).*

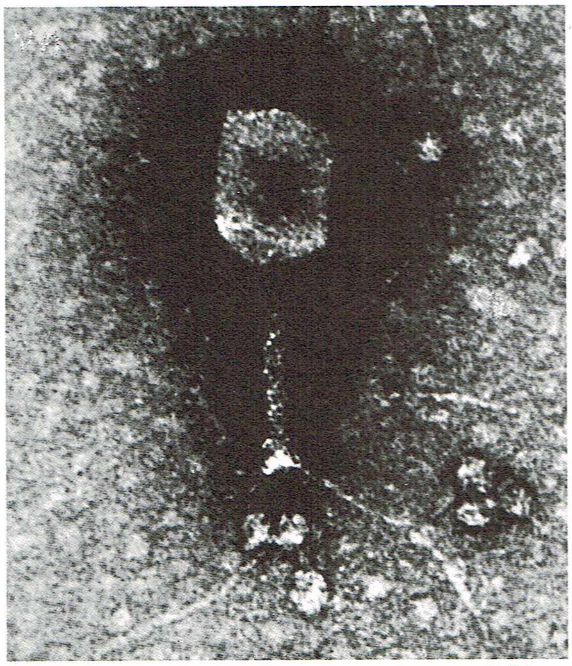

M. Pitzurra

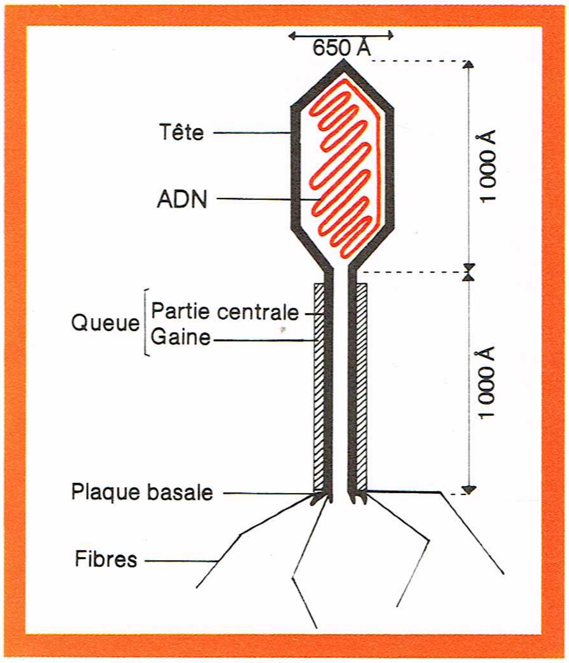

Richard Colin

Les ambiguïtés de ce type qui existent dans les relations entre génotype et phénotype peuvent être levées par une analyse génétique plus poussée. Il faut faire appel à l'étude des relations de *complémentation* et de *recombinaison* entre les différentes souches mutantes du même phénotype. Pour cela, il faut pouvoir croiser entre elles les différentes souches et étudier les résultats du croisement.

Les modalités du cycle de reproduction et le mode de croisement variant avec les organismes, il est nécessaire d'étudier comment se pratique une analyse génétique et quelles sont les modalités de la reproduction sexuée dans les différents grands groupes systématiques du règne vivant.

La génétique des virus

Les virus sont les organismes vivants les plus simples que l'on connaisse. En schématisant un peu, on dira qu'ils sont constitués de deux parties : d'une part, une enveloppe de nature protéique et, d'autre part, un chromosome constitué d'un acide nucléique, ADN ou ARN, selon les cas. Le tableau page 239 symbolise l'infection d'*E. coli* par un virus, le **bactériophage T_4** (ou **phage T_4**). La capsule (enveloppe) protéique de ce virus renferme le chromosome. Le génome du phage T_4 est une double hélice d'ADN refermée sur elle-même en un cercle. Le virus à l'état libre n'est constitué que de celle-ci. Sous cette forme, il n'a rien de vivant : on n'observe ni activité métabolique (pas de respiration, pas de synthèses), ni multiplication, ni reproduction. Mais cette particule inerte peut infecter la Bactérie *E. coli,* en se fixant à la surface de la cellule bactérienne et en lui injectant son chromosome. Cela détermine, à l'intérieur de la Bactérie, la multiplication et la maturation de plusieurs centaines de nouveaux phages qui, à la fin du cycle de multiplication, sont libérés dans le milieu extérieur par la lyse de la Bactérie.

▼ *Microscopie électronique de* **phages T_2** *adsorbés à la surface* **d'Escherichia coli ;** *on remarquera que le phage central a déjà inoculé son ADN.*

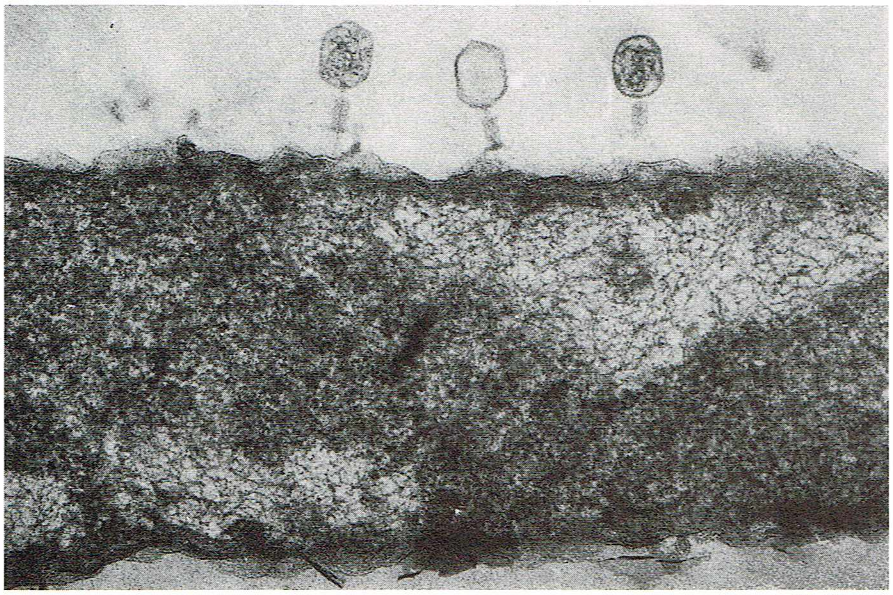

Institut Pasteur

Pour manipuler ces minuscules organismes, visibles seulement au microscope électronique, on opère souvent avec des boîtes de Pétri contenant un milieu nutritif solidifié par l'addition d'agar-agar. Ce milieu est ensemencé avec une suspension de Bactéries dont la concentration est telle qu'au bout de quelques générations cellulaires il se forme un « tapis » bactérien, très reconnaissable car il opacifie superficiellement le milieu de culture. On étale sur cette culture une suspension virale. Les virus vont infecter les Bactéries et s'y multiplier pour donner des centaines de descendants, qui seront libérés par la lyse des Bactéries en un temps très court (de 15 à 60 minutes). Chaque nouveau virus peut infecter une Bactérie et s'y multiplier à son tour. Après un certain nombre de cycles infectieux, toutes les Bactéries proches du virus initial sont lysées. Il y a donc formation de zones de lyse qui apparaissent comme des trous dans le tapis bactérien opaque (plages de lyse).

On peut se servir de cette méthode pour connaître la concentration en phages d'une suspension; il est nécessaire de pouvoir compter le nombre de plages de lyse qui résultent de l'étalement d'un volume connu de la suspension sur un tapis bactérien. Pour ce faire, on est obligé d'immobiliser les phages et les Bactéries sur la boîte ou, du moins, de freiner fortement leur diffusion. A cette fin, on n'ensemense pas directement la ou les boîtes par les Bactéries d'une part et par une suspension virale d'autre part. Mais, on prépare un mélange d'un grand nombre de Bactéries sensibles au phage et d'un petit nombre de particules virales, dans un petit volume de gélose (agar-agar) maintenu en surfusion (46 °C). On répand ensuite ce mélange sur les boîtes de culture, que l'on met à incuber à la température normale de culture (37 °C). A cette température, la gélose se solidifie et freine la diffusion des phages et des Bactéries, ce qui permet d'obtenir des plages de lyse bien délimitées et rend possible une interprétation quantitative des résultats. Si les concentrations respectives en virus et en Bactéries ont été bien choisies, on peut alors déterminer le nombre de particules formant plage qui existaient à l'origine dans la suspension virale.

Les virus peuvent muter

Il existe des mutants, dits [rII], dont le phénotype est un cycle de lyse plus rapide que celui du type « sauvage » ; c'est-à-dire qu'au bout d'un même temps, les plages dues à un mutant [rII] sont plus grandes que celles dues à un phage [rII+]. Les virus *rII* et *rII*+ sont tous deux capables d'infecter des Bactéries *E. coli* de la souche B. Par contre, seuls les phages *rII*+ peuvent se multiplier sur les Bactéries de la souche K_{12}. Notons, pour la suite, le génotype de la souche « sauvage » *rII*+ et les génotypes des différentes souches mutantes rII_1, rII_2, rII_3, ..., rII_x.

On possède plusieurs milliers de souches mutantes [rII], obtenues indépendamment, soit spontanément, soit au cours de mutagenèses. La première chose à faire est d'observer la descendance d'un virus mutant nouvellement isolé et dont on ne sait qu'une chose : il présente le phénotype rII. Le principe de cette expérience peut se résumer de la façon suivante : on prépare un tube à essais contenant du milieu nutritif liquide où l'on a mis à incuber des Bactéries sensibles (*E. coli* B). On ajoute alors un petit volume d'une suspension contenant les phages à étudier. Les virus infectent les Bactéries et s'y multiplient. Après un court laps de temps (de 15 à 60 mn, selon les conditions expérimentales), les Bactéries infectées se lysent et libèrent les virus descendants. Pour disposer d'une suspension qui ne contienne que des phages, on ajoute quelques gouttes de chloroforme (corps qui a la propriété de lyser les Bactéries et d'être sans action sur les particules virales libres). On peut alors tester la récolte de phages en l'étalant sur des boîtes de Pétri avec des Bactéries indicatrices des souches B et K_{12}. L'absence de plages de lyse sur Bactéries K_{12} montre que les phages sont bien mutants (seuls les virus *rII*+ s'y multiplient). Les plages formées sur Bactéries B permettent de quantifier la récolte et de vérifier qu'il s'agit bien de mutants [*rII*] (grandes plages).

On observe donc ce que l'on s'attendait à trouver : la descendance d'un mutant [rII_x] est constituée de virus du même type. Mais on remarque en outre que, dans la plupart des cas, il apparaît aussi des phages capables de se multiplier sur Bactéries de souche K_{12}, c'est-à-dire des virus ayant le phénotype [rII+]. Le nouveau type se révèle stable et héréditaire, et on peut dire que le processus qui a conduit à l'apparition d'un individu de phénotype « sauvage » à partir d'une population de mutants correspond à la définition qu'on a donnée précédemment d'une mutation. On désigne les mutations qui permettent la restauration du phénotype « sauvage » à partir d'une souche mutante par le terme général de *réversions*.

Les réversions

Il existe, en fait, plusieurs types de mutations qui peuvent permettre l'apparition de souches *révertantes*. En effet, l'analyse de nombreux révertants a montré qu'une partie seulement d'entre eux avaient un *génotype* « sauvage ».

P. Starosta

▲ ***Culture de Bactéries en présence de bactériophages; on observe des plages de lyse.***

Souche d'E. coli \ Souche de T_4	rII+ ("sauvage")	rII_1 ...... rII_x (mutants)
B	+ (pp)	+ (Gp)
K	+ (pp)	–

Richard Colin

◀ ***Infection des souches B et K d'E. coli par le virus T_4. Le signe + symbolise une récolte de virus, le signe — représente une absence de récolte; pp, petites plages de lyse; Gp, grandes plages de lyse.***

— La réversion peut rétablir, au niveau de l'ADN, la séquence nucléotidique du type « sauvage ». Le révertant possède alors un génotype « sauvage ». Ce type de réversion est appelé *mutation réverse (back-mutation)*.

— Il peut aussi s'agir d'une seconde mutation, qui laisse intacte la première mais qui, par le jeu du métabolisme cellulaire, rétablit le phénotype « sauvage », alors que le génotype reste mutant, et même doublement

Institut Pasteur

◀ **Lecteur de culture** ***permettant d'interpréter quantitativement l'obtention des plages de lyse.***

mutant. On dit que la deuxième mutation *supprime* l'effet de la première et, de ce fait, on la désigne par le terme de *suppresseur*.

En règle générale, les fréquences de réversion sont très faibles, du même ordre que les fréquences de mutation ou plus petites. D'autre part, en comparant les fréquences de réversion d'un certain nombre de mutations, on a pu établir que certaines réversaient relativement plus fréquemment que d'autres. Il est possible d'expliquer ce phénomène en postulant que plus la taille d'une mutation est petite, plus la mutation réverse est facile à obtenir. En effet, on conçoit bien que, si une mutation consiste en un changement au niveau d'un seul nucléotide de l'ADN, il est facile de rétablir la séquence de bases primitive. Par contre, si la mutation de départ consiste en une grande délétion impliquant plusieurs dizaines ou centaines de nucléotides, il est évident que la restauration de la séquence complète de l'ADN est un événement hautement improbable.

Les virus peuvent se croiser

Il est possible de faire varier les conditions de telle sorte qu'une même Bactérie soit infectée en moyenne *par un seul* ou *par plusieurs virus;* il suffit de jouer sur les concentrations relatives des Bactéries et des virus *(multiplicité d'infection)*. Il est donc possible de réaliser des *infections mixtes*, dans lesquelles une Bactérie est infectée par deux phages provenant de deux souches différentes, et d'observer la récolte ainsi obtenue. Il s'agit, on le voit, d'un système expérimental très simple et très facile à utiliser.

D'un point de vue génétique, une infection mixte d'une Bactérie par deux virus de souches différentes constitue bien ce qu'on peut appeler un *croisement*, par analogie avec le phénomène désigné par ce terme chez les organismes supérieurs. En effet, il y a réunion dans un même cytoplasme (celui de la Bactérie infectée) du matériel génétique provenant de deux parents distincts (qui peuvent être de génotype différent), puis génération de descendants chez lesquels on peut observer la transmission des caractères des parents. L'infection mixte d'une Bactérie par deux mutants du système rII peut être symbolisée comme un croisement : $rII_x \times rII_y$.

L'analyse génétique chez les virus

Faisons le point de la situation. Nous sommes en présence d'un grand nombre de souches mutantes rII_1, rII_2, etc., présentant des phénotypes analogues. On vient de voir qu'il était possible de réaliser des croisements entre les différentes souches. Il est donc possible d'analyser génétiquement le système rII; cette analyse doit permettre de répondre clairement à plusieurs questions.

— De combien de gènes se compose le système rII?

— Comment sont-ils disposés les uns par rapport aux autres?

— Combien y a-t-il de sites mutants?

— Comment sont-ils disposés à l'intérieur des gènes?

La méthodologie génétique est du type analytique : elle tend à « disséquer » un problème pour le séparer en ses composants les plus petits possibles, à résoudre séparément chacune des parties, puis à effectuer la synthèse de toutes les données pour expliquer l'ensemble, dans tous ces aspects.

Dans le cas des mutants rII, comment procéder pour répondre à la première question, c'est-à-dire comment déterminer le nombre de gènes dont se compose le système rII? La méthode va consister à prendre les différents mutants *deux à deux* et, pour chaque couple de souches, à effectuer une expérience destinée à montrer si les deux mutations sont dans le même gène ou dans des gènes différents. Cela revient à savoir si les deux gènes mutants que l'on met en présence sont allèles ou non. Ce type d'expérience s'appelle un *test fonctionnel d'allélisme* ou encore *test de complémentation*.

Allélisme et complémentation

Le principe du test de complémentation consiste à réunir *dans un même cytoplasme* les génomes de deux mutants différents. Si chacune des deux souches ne possède qu'un seul gène mutant, il n'y a que deux situations possibles :

— *Les mutations sont situées dans des gènes différents.*

Une Bactérie est infectée par deux virus; le génome du premier contient le gène C sous une forme mutante, et le génome du second contient le gène A sous une forme mutante. En d'autres termes, le premier génome ne pourra pas assurer la fonction cellulaire contrôlée par le gène C, et le deuxième celle contrôlée par le gène A. Cependant, si les deux génomes sont dans le même cytoplasme, ce qui est le cas lors d'une infection mixte, le gène A, intact, du premier virus peut suppléer à la déficience du second et le gène C, intact, du deuxième peut suppléer à la déficience du premier. Le stock enzymatique contenu dans le cytoplasme de la Bactérie est complet : il contient aussi bien l'enzyme E_1 (qui dépend du gène A) que l'enzyme E_3 (qui dépend du gène C). Le résultat final est que l'ensemble des fonctions cellulaires est assuré. On dit alors que les deux souches mutantes se *complémentent*. S'il s'agit de mutants [rII], on effectue des infections mixtes sur des Bactéries de la souche K_{12}, sur lesquelles aucun des mutants n'est capable de se développer. Si les mutants présentent de la complémentation, une infection mixte donnera lieu à une récolte. Il est possible de vérifier que cette récolte résulte bien d'une complémentation (et non d'une réversion). Pour cela, on prend les phages de la récolte et on regarde s'ils sont toujours mutants en s'en servant pour infecter des Bactéries K_{12}. On effectue l'infection avec une multiplicité d'infection telle qu'une Bactérie soit infectée par un seul phage, pour éviter des récoltes dues à la complémentation. On observe alors que les phages sont toujours mutants car ils ne sont pas virulents vis-à-vis des Bactéries K_{12}. On constate cependant, avec une très faible fréquence, l'apparition de quelques phages [rII+]. Nous verrons plus loin l'explication de ce phénomène.

— *Les mutations sont situées dans le même gène.*

Dans une Bactérie infectée par deux virus, tous deux mutants pour le gène C, la fonction cellulaire contrôlée par ce gène ne peut être assurée par aucun des deux génomes en présence. Il n'y aura pas de complémentation. En règle générale, on peut dire qu'il n'y a pas de complémentation entre deux gènes allèles. S'il s'agit de mutants [rII] du même gène, on n'obtiendra pas de récolte de virus lors d'infections mixtes de Bactéries K_{12}.

Les raisonnements ci-dessus sont réversibles : il suffit, dans la plupart des cas, d'observer de la complémentation entre deux mutants pour conclure qu'ils sont situés dans deux gènes différents. De même, une absence de complémentation entre deux mutants est un bon argument en faveur de leur allélisme.

▼ ***Principe du test de complémentation :** à gauche, les mutations 1 et 2 sont situées dans des gènes différents (il y a complémentation); à droite, les mutations 1 et 2 sont situées dans le même gène (il n'y aura pas de complémentation).*

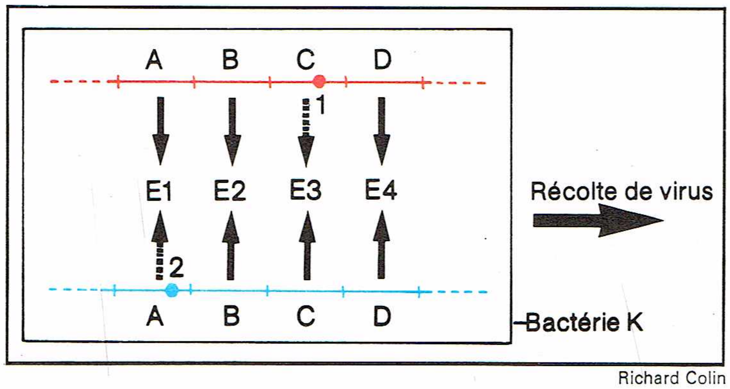

Richard Colin

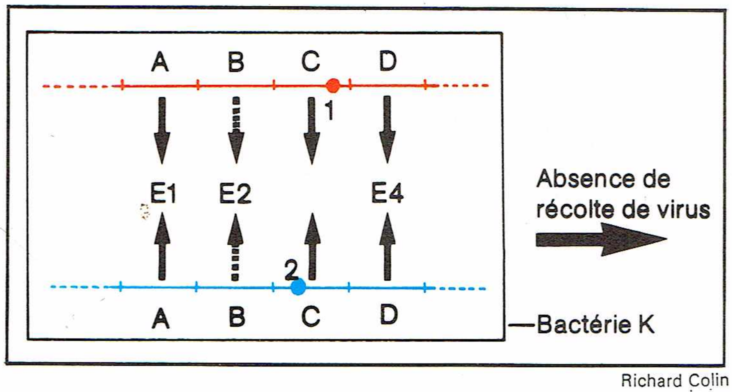

Richard Colin

Gènes et groupes de complémentation

Si l'on effectue les tests de complémentation en prenant tous les mutants rII deux à deux, on va définir des *groupes de complémentation*. Ce sont des ensembles de mutants qui, premièrement, ne complémentent pas entre eux, et, deuxièmement, complémentent avec tous les autres. Le nombre de groupes de complémentation que l'on peut caractériser de cette manière correspond au nombre de fonctions cellulaires que contrôle le système, c'est-à-dire au nombre de gènes dont il se compose.

Dans le cas du système rII, on montre qu'il se compose de deux groupes de complémentation. Ceux-ci correspondent à deux gènes que l'on appelle rIIA et rIIB.

La recombinaison

Nous avons vu que, lors de l'infection mixte d'une Bactérie par deux mutants différents, rII_1 et rII_2, on récoltait une grande majorité de virus mutants identiques aux virus parentaux, mais nous avons signalé qu'il apparaissait aussi, avec une faible fréquence, des phages rII^+. On peut imaginer que ceux-ci proviennent de réversions. Toutefois, on constate aussi que la fréquence d'apparition de virus rII^+ au cours d'une infection mixte (croisement) $rII_1 \times rII_2$ est bien supérieure aux fréquences de réversion de rII_1 ou de rII_2. La figure ci-dessus montre que pour obtenir un génome « sauvage » à partir de deux génomes mutants rII_1 (mutant pour le gène rIIA) et rII_2 (mutant pour le gène rIIB), il faut un réarrangement des gènes apportés par chacun des parents. Le résultat à obtenir est un chromosome portant, sur la même molécule d'ADN, le gène rIIA du mutant rII_2 et le gène rIIB du mutant rII_1, c'est-à-dire un génotype rII^+. Le phénomène qui aboutit à l'apparition, dans la descendance d'un croisement, de combinaisons génotypiques différentes de celles des parents s'appelle une *recombinaison*. Le mécanisme responsable d'échanges entre chromosomes aboutissant à la formation de génomes *recombinés* est appelé *crossing-over*.

On remarquera que, par recombinaison, il est possible d'obtenir autre chose qu'un génome rII^+ ; c'est un virus dont le chromosome portera deux mutations : le gène rIIA du mutant rII_1 et le gène rIIB du mutant rII_2. On aura alors un phage recombinant *double-mutant* : $rII_{1,2}$. Il est possible de vérifier que l'on obtient effectivement de tels recombinants : les doubles mutants $rII_{1,2}$ ne peuvent se complémenter avec aucun des deux parents rII_1 ou rII_2.

Lorsqu'on effectue des croisements du type $rII_y \times rII_z$, on trouve dans la descendance les deux *types parentaux* (rII_y et rII_z) et les deux *types recombinés*.

On peut donc mettre en évidence chez le bactériophage T_4 un phénomène de *recombinaison génétique*. Cela signifie que l'on peut parler de croisement génétique et de sexualité, par analogie avec les phénomènes que l'on connaît chez les organismes supérieurs. On peut considérer, en effet, que lors d'une infection mixte il y a des parents et des descendants, et qu'il s'agit bien d'un cycle de reproduction.

La recombinaison intragénique

Que va-t-il se passer si l'on effectue un croisement entre deux mutants d'un même gène ? D'abord, comme ces mutants ne se complémentent pas, pour obtenir une descendance, l'infection mixte doit être pratiquée sur des Bactéries de la souche B (sensibles aux mutants rII). La détection des phages recombinés rII^+ s'effectue simplement en étalant la récolte sur des Bactéries de la souche K_{12}, sur lesquelles seuls les virus rII^+ sont capables de se multiplier. Ce type d'expérience est appelé *croisement intragénique* ou *croisement interallélique*. Ces deux expressions sont synonymes car on peut considérer que les deux mutations sont dans le même gène ou que les deux gènes mutants sont allèles.

Dans un grand nombre de croisements de ce type, on observe effectivement l'apparition de virus recombinés. Leur fréquence est, en général, beaucoup plus faible que dans un croisement *intergénique* (entre mutants situés dans des gènes différents). Cependant, dans un certain nombre de croisements, on n'observe pas de recombinaison. Ces deux situations doivent être examinées successivement.

— On observe l'apparition de recombinés. La première conclusion est évidente : la recombinaison peut avoir lieu *à l'intérieur d'un gène*. La seconde est que ce phénomène permet de distinguer deux allèles différents d'un même gène.

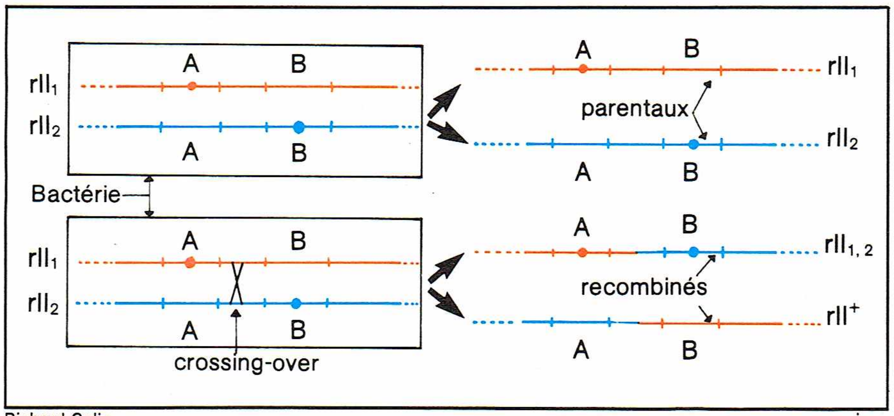

Richard Colin

▲ ***Phénomène de* recombinaison *génétique chez le bactériophage* T_4.**

En effet, si deux génomes mutants, par le jeu de la recombinaison, permettent de reconstituer un génome « sauvage », c'est qu'ils ne sont pas identiques.

— Si l'on n'observe pas l'apparition de descendants, alors que l'on sait que la recombinaison intragénique est possible, quelle interprétation peut-on fournir ?

La première interprétation est que les sites des mutations des deux virus sont situés au même endroit du gène.

Ainsi, le schéma ci-dessous (A) montre que, si les mutations sont localisées en des sites différents du gène, il est possible qu'il se produise une *recombinaison entre les sites mutants*. Cela permet la formation de recombinants.

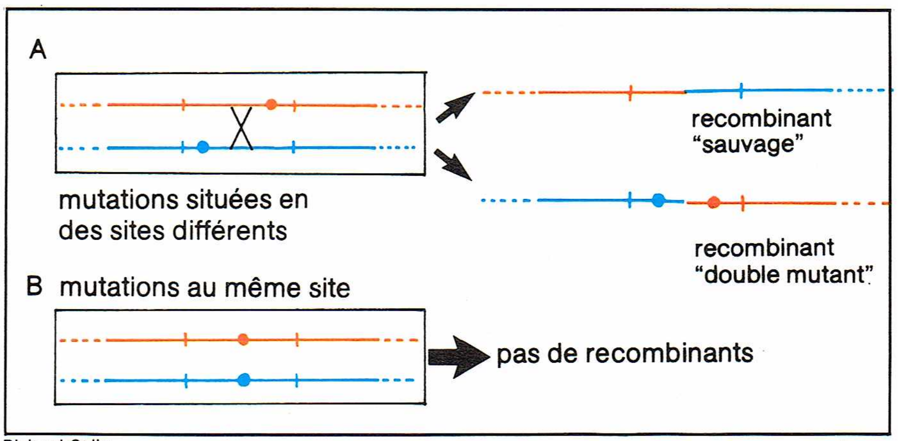

Richard Colin

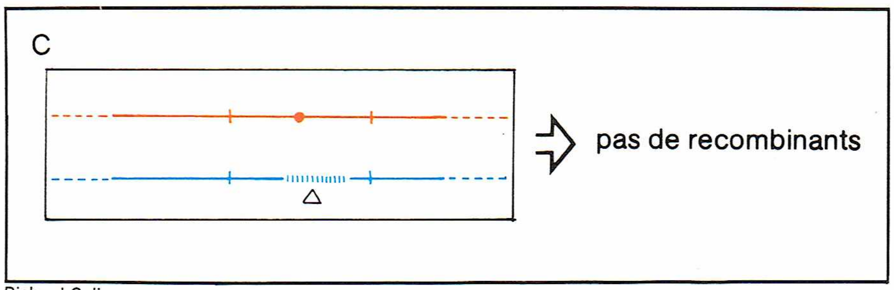

Richard Colin

Par contre, si les deux mutations sont localisées au même site (schéma ci-dessus [B]), il est impossible qu'il y ait une recombinaison entre eux. Cela exclut la possibilité de formation de recombinants.

La deuxième interprétation est que l'une des mutations est une délétion qui chevauche le site de la deuxième mutation. On conçoit que le résultat soit identique à celui de la situation précédente : il y a impossibilité de produire des types recombinés (schéma ci-dessus [C]).

Comment peut-on choisir entre les deux interprétations ?

▲ ***La* recombinaison génétique *n'est possible que si les mutations sont situées en des sites différents (A) ; elle n'est pas possible si les mutations sont localisées au même site (B) ; enfin, une délétion* △ *entraîne l'absence de recombinaison (C).***

Localisation et cartes génétiques

Il faut d'abord faire remarquer que plus une délétion sera grande, plus le nombre de sites mutants ponctuels qu'elle chevauchera sera grand. Expérimentalement, cela se traduira par le fait que la délétion sera incapable de

recombiner avec un grand nombre de sites mutants qui se recombinent entre eux. Ce phénomène est intéressant à plusieurs points de vue. Premièrement, il procure un moyen de reconnaître les délétions de taille importante ; deuxièmement, il permet d'établir déjà une localisation des sites mutants. En effet, on peut penser que tous les sites mutants qui ne se recombinent pas avec une délétion sont localisés dans le même segment chromosomique, et que celui-ci manque dans la souche qui porte la délétion.

D'autre part, deux délétions qui se chevauchent, complètement ou partiellement, ne peuvent restaurer un gène sauvage par recombinaison. Il est possible d'ordonner linéairement les délétions (schéma ci-dessous).

▼ *Si deux délétions (Δ_1 et Δ_2) se chevauchent, la recombinaison ne peut avoir lieu.*

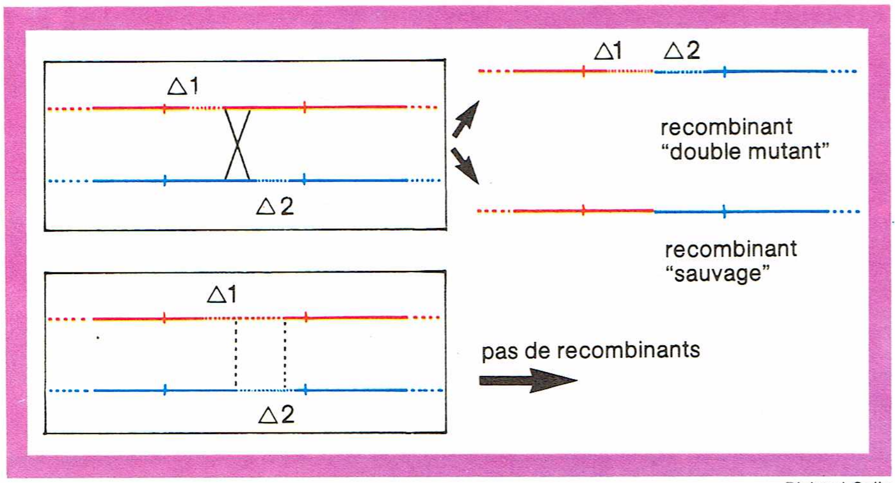

Richard Colin

On voit (schéma ci-dessous) que les délétions Δ_1 et Δ_2 ont une partie commune. Si l'on possède une troisième délétion Δ_3 qui ne se recombine pas avec Δ_2 mais qui se recombine avec Δ_1, il existe une seule façon de la placer linéairement sur le chromosome. Les délétions ont été utilisées pour faire la carte d'un gène chaque fois que cela a été possible car c'est une méthode non ambiguë.

▶ **Escherichia coli = Bacillus coli** *(coloration de contraste).*

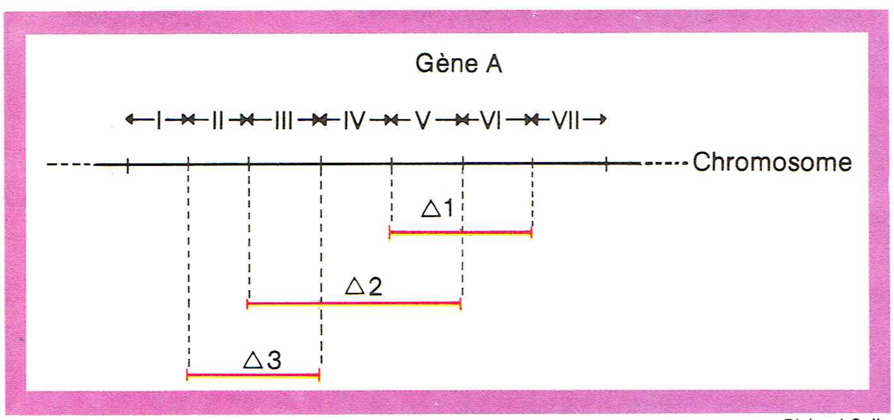

Richard Colin

▲ ***Établissement d'une* carte chromosomique *grâce aux délétions.***

Par exemple, pour localiser une mutation ponctuelle rIIA$_1$ par rapport aux trois délétions Δ_1, Δ_2 et Δ_3, on va croiser les souches rIIA$_1$ × rIIΔ_1, rIIA$_1$ × rIIΔ_2 et rIIA$_1$ × rIIΔ_3. Selon les résultats, on pourra localiser la mutation rIIA$_1$ dans une des 7 régions délimitées par les délétions dans le gène rIIA. Si rIIA$_1$ se recombine avec Δ_1, Δ_3, mais pas avec Δ_2, le site mutant se trouve dans la région IV ; si rIIA$_1$ ne se recombine ni avec Δ_1, ni avec Δ_2, mais avec Δ_3, il se trouve dans la région V, etc. Cette méthode, appliquée à tous les sites mutants ponctuels, donne des résultats clairs et permet d'*ordonner linéairement* les sites mutants qui font partie d'un même gène.

Dans le cas du système rII du virus T$_4$, cette méthode a même permis de localiser les deux gènes A et B l'un par rapport à l'autre : en effet, on a trouvé des délétions chevauchant à la fois une partie du gène rIIA et une partie du gène rIIB. L'hypothèse la plus simple pour expliquer cette observation est que les gènes rIIA et rIIB sont contigus sur le chromosome du virus et que les parties de rIIA et rIIB chevauchées par la délétion sont adjacentes.

Pour conclure, on voit qu'une analyse génétique fondée sur les tests de complémentation et de recombinaison permet, par des moyens indirects (production ou non d'une descendance, obtention ou non de recombinants), de caractériser sans ambiguïté un système complexe de gènes et d'en établir la carte sur le chromosome.

De cette analyse, il ressort aussi qu'on peut définir un gène comme une région du chromosome responsable d'une fonction cellulaire et constituée d'un assemblage linéaire d'unités susceptibles de muter, entre lesquelles peuvent se produire des recombinaisons et qui peuvent exister sous plusieurs états (allèles) mutuellement exclusifs.

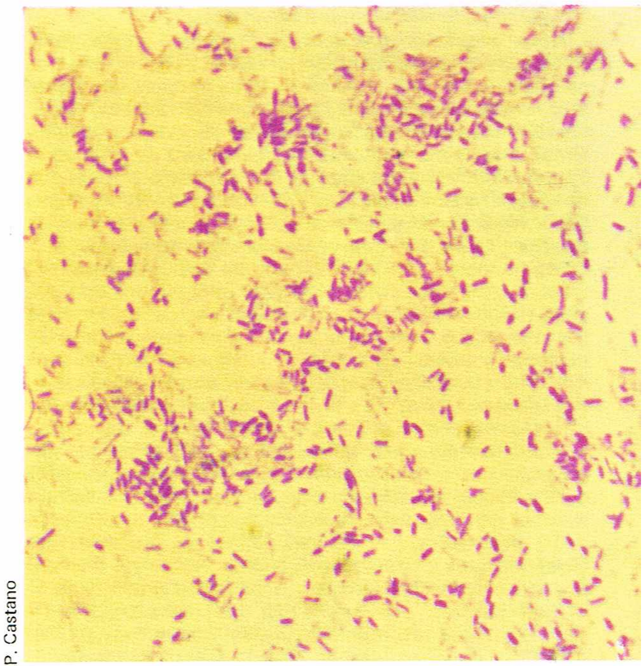

P. Castano

La génétique des Bactéries

Parmi les organismes les plus utilisés à l'heure actuelle pour l'étude de la nature et du mode d'action des gènes, beaucoup sont des Bactéries.

Ces organismes sont souvent qualifiés de *Procaryotes* car, au contraire des *Eucaryotes* (tous les organismes supérieurs), ils ne possèdent pas de noyau différencié entouré d'une membrane nucléaire. Ils présentent à la place une zone centrale, appelée par les cytologistes *région nucléaire,* où se trouve l'ADN du chromosome.

Une Bactérie comme *Escherichia coli (E. coli)* est environ 500 fois plus petite qu'une cellule animale ou végétale. Cet organisme est incapable d'effectuer la photosynthèse. Il faut donc lui fournir dans le milieu de culture une source de carbone assimilable ; le plus souvent, il s'agit de glucose. Dans un milieu à la température de 37 °C et contenant du glucose, le temps de génération est d'environ 60 minutes. On peut rendre le milieu plus riche en fournissant, par exemple, des vitamines, des acides aminés et des bases puriques et pyrimidiques. Dans ce cas, le temps de génération peut descendre à 20 minutes seulement.

Le nombre et la taille des cellules bactériennes d'une culture peuvent être évalués à l'aide du microscope. Cependant, cet instrument est incapable de révéler si les cellules sont vivantes ou mortes. Le seul test non ambigu est d'examiner la capacité des cellules à se diviser. Pour cela, on étale une suspension de faible concentration en cellules bactériennes sur un milieu nutritif solidifié (par adjonction d'agar-agar). Les cellules vivantes vont donner naissance à deux cellules filles qui, elles-mêmes, vont se diviser, et ainsi de suite.

Après plusieurs heures d'incubation à 37 °C, on voit apparaître des groupes isolés de cellules bactériennes : les colonies. Si, au départ, la concentration initiale de la suspension étalée est telle que, lorsqu'elles apparaissent, les colonies ne se chevauchent pas, chacune de celles-ci

provenant d'une unique cellule, on peut connaître la concentration de la suspension originelle. Cette origine commune de toutes les cellules constituant, à un moment donné, une colonie explique qu'elles soient identiques; elles constituent une *clone*.

La conjugaison

La sexualité d'une Bactérie comme *E. coli* dépend d'un facteur particulier, le *facteur F*, qui impose des modalités particulières au cycle de reproduction de cet organisme. Le facteur F est un petit segment d'ADN qui peut se présenter sous deux formes : il est soit libre dans le cytoplasme de la Bactérie (il se présente alors comme un petit chromosome circulaire), soit intégré dans la continuité du chromosome bactérien.

Les Bactéries qui ne possèdent pas le facteur F sont appelées F^-. Elles se comportent comme réceptrices (ou femelles, par analogie avec les organismes supérieurs). Les Bactéries qui possèdent le facteur F sont donneuses (ou mâles). Si le facteur F est libre dans le cytoplasme, les Bactéries sont appelées F^+. Celles-ci ne peuvent pas transmettre leurs gènes aux Bactéries F^-, et sont seulement capables de leur transférer le facteur F. Les Bactéries réceptrices F^- sont alors transformées en F^+. Si le facteur F est intégré dans le chromosome bactérien, la Bactérie est alors une Bactérie Hfr qui transmet aux Bactéries F^- non seulement le facteur F, mais aussi le chromosome bactérien qui est en continuité avec lui. Ce phénomène s'appelle la *conjugaison*. Le facteur F ainsi que les autres particules analogues : morceaux d'ADN susceptibles d'exister à l'état libre dans le cytoplasme ou intégrés dans le chromosome, sont appelés des *épisomes*. Le facteur F est souvent qualifié d'*épisome sexuel*.

Pour toutes les Bactéries d'une souche Hfr donnée, l'épisome sexuel F est intégré au même endroit dans le chromosome bactérien. En effet, lors de la conjugaison avec un tel Hfr, celui-ci transfère le chromosome bactérien dans la cellule F^- en partant toujours du même point et transfère les gènes bactériens toujours dans le même ordre. Ces propriétés ont été utilisées pour réaliser la carte du chromosome d'*E. coli*.

En général, le transfert du chromosome bactérien est incomplet, et une partie seulement du chromosome

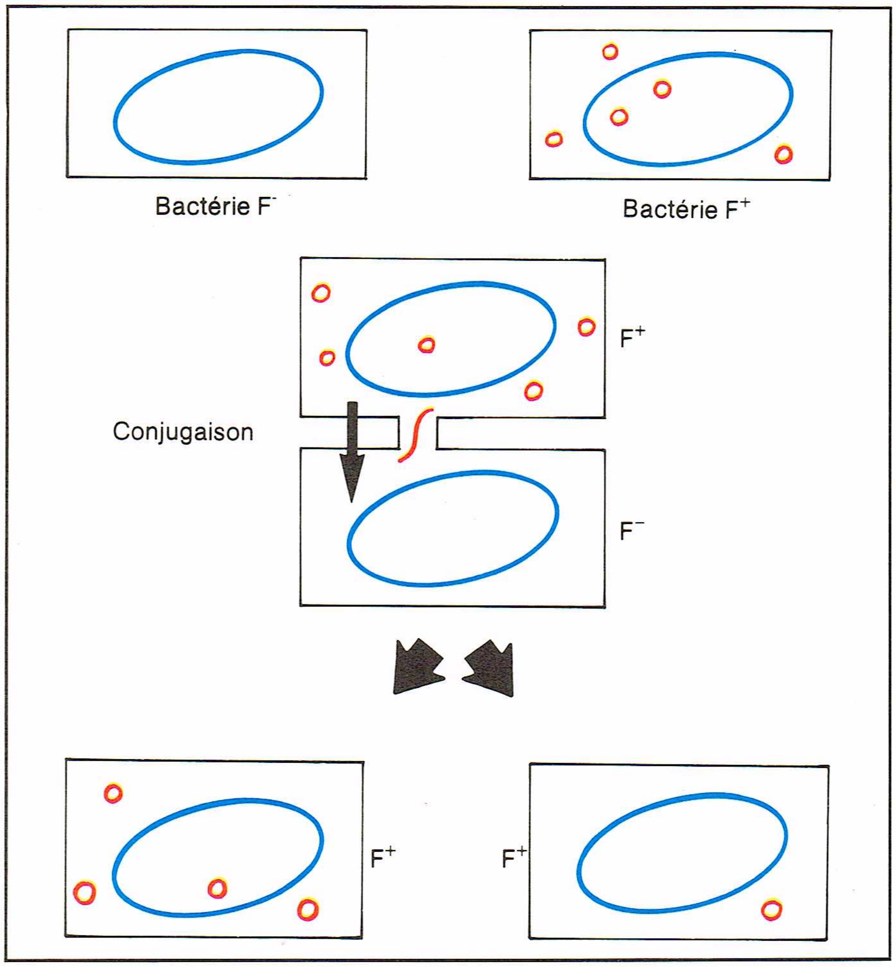

Richard Colin

▲ ***Représentation schématique de la conjugaison, chez* Escherichia coli*, entre une Bactérie* F^- *et une Bactérie* Hfr.**

▼ ***A gauche, microphotographie électronique du phénomène de la conjugaison chez* Escherichia coli*; le facteur F ainsi que les autres particules analogues sont appelés des* épisomes *: le facteur* F *est souvent qualifié d'*épisome sexuel. *A droite, conjugaison chez* Escherichia coli *entre une Bactérie* F^+ *et une Bactérie* F^-.**

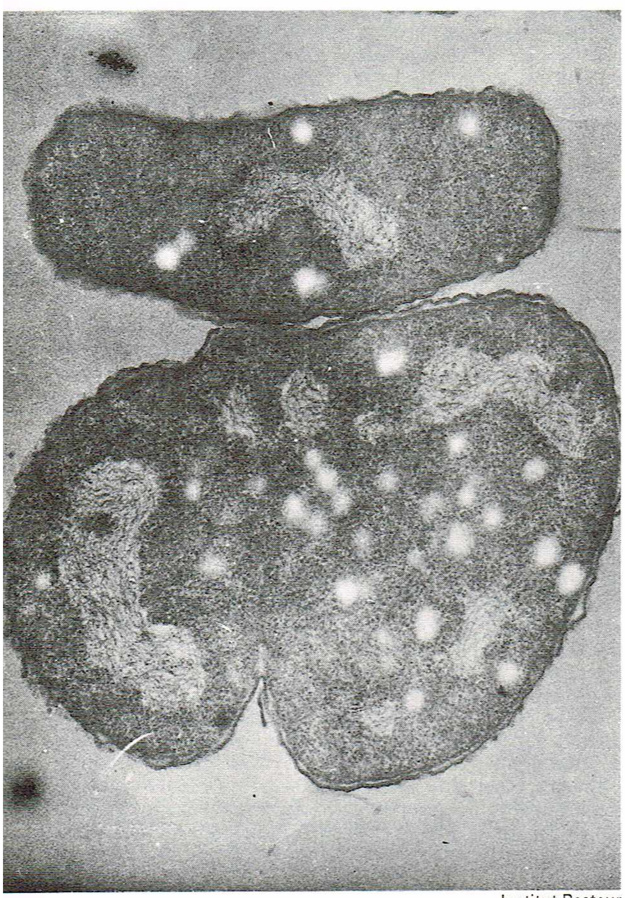

Institut Pasteur

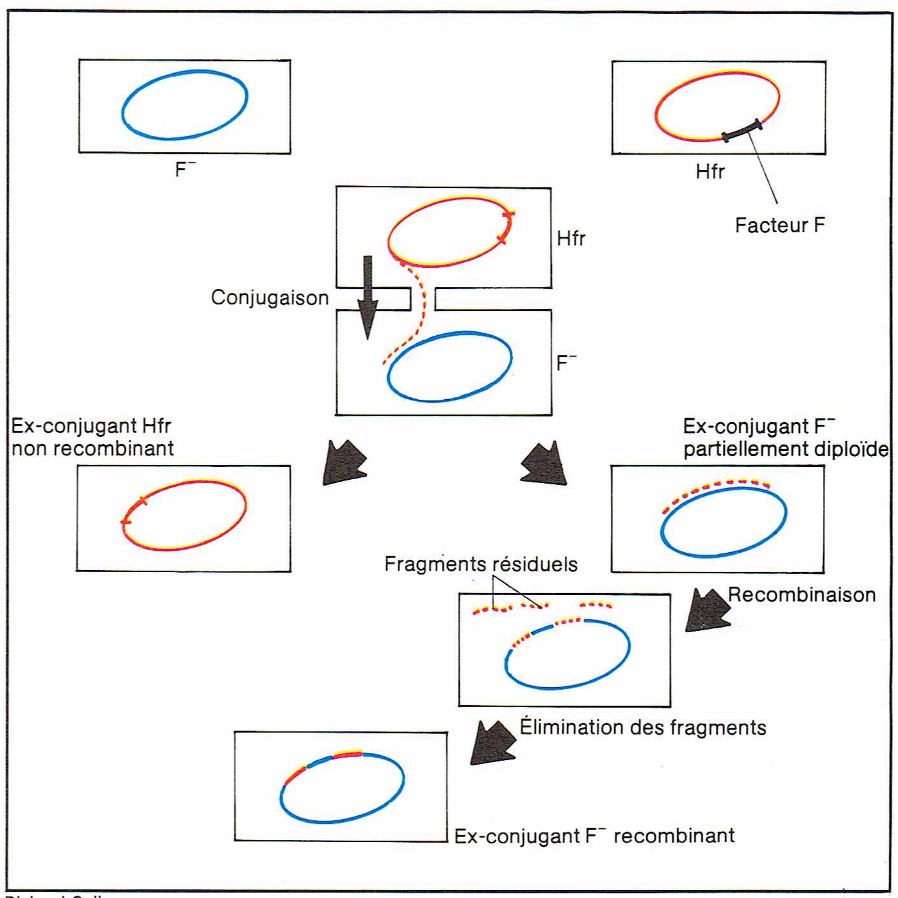

Richard Colin

▶ *Circularité du chromosome d'*E. coli.

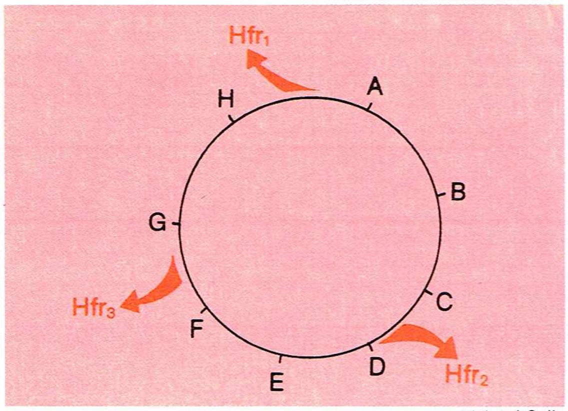

Richard Colin

pénètre dans la Bactérie F⁻ avant que les conjugants se séparent. Les cellules totalement diploïdes sont donc très rares, le cas le plus fréquent étant la formation de diploïdes partiels. Entre le chromosome de la bactérie F⁻ et le fragment de chromosome provenant du Hfr, peuvent se produire des crossing-over qui ont pour résultat l'apparition d'associations génétiques recombinées. Il reste dans le cytoplasme de l'ex-conjugant recombinant des fragments de chromosomes résiduels qui sont éliminés rapidement lors des divisions suivantes. Les cellules résultantes sont donc haploïdes.

Conjugaison et localisation des gènes

Expérimentalement, on peut interrompre à volonté la conjugaison à un moment donné, simplement en séparant les conjugants par une agitation violente du milieu. Si la séparation a lieu peu de temps après le début de la conjugaison, seuls les gènes très proches de l'extrémité antérieure du chromosome ont pu pénétrer dans la Bactérie réceptrice. Il est alors possible de repérer la position des gènes sur le chromosome d'*E. coli*, en déterminant le moment auquel un allèle d'un gène donné pénètre dans les cellules F⁻ lors d'une conjugaison avec un Hfr donné. On peut localiser les gènes les uns par rapport aux autres : lors d'une conjugaison, si un gène B pénètre en un temps t, qu'un gène C pénètre en un temps $t_1 > t$, c'est que celui-ci est situé plus loin de l'extrémité antérieure du chromosome transféré que celui-là. Inversement, si un gène A est transféré en un temps $t_2 < t$, c'est que A est plus près que B de cette extrémité. On peut symboliser ces rapports par un schéma figurant l'ordre dans lequel sont transférés les marqueurs chromosomiques :

←A—B—C—.

On a noté plus haut que le chromosome bactérien n'était pratiquement jamais transféré en entier. Cela a pour conséquence qu'avec une souche Hfr donnée il est impossible d'établir complètement la carte, car les gènes très distants de l'extrémité antérieure du chromosome ne seront pratiquement jamais transférés à la Bactérie F⁻.

Heureusement, on possède de nombreux Hfr qui diffèrent entre eux par l'endroit où s'est intégré l'épisome sexuel F dans le chromosome et, par conséquent, dans lesquels l'origine du chromosome, lors du transfert à la conjugaison, a changé.

Si une souche Hfr_1 transfère dans l'ordre les gènes A, B, C, D :

Hfr_1 ←A—B—C—D—,

on aura une souche Hfr_2 qui transférera les gènes D, E, F, G :

Hfr_2 ←D—E—F—G—,

puis une troisième Hfr_3 qui transférera les gènes G, H, A, B :

Hfr_3 ←G—H—A—B—.

On voit que le dernier Hfr transfère à la suite les derniers gènes et les premiers. La seule solution que l'on ait pour arranger les gènes linéairement, c'est d'imaginer que le chromosome d'*E. coli* est circulaire.

De nombreuses données supplémentaires permettent de vérifier cette hypothèse (y compris la vision directe au microscope électronique) et d'établir que la circularité de la carte génétique d'*E. coli* correspond bien à la circularité du chromosome. Cela suppose que, lors de la conjugaison, le chromosome de la cellule Hfr doit se rompre et qu'une extrémité, toujours la même, pénètre dans la cellule F⁻. En fait, tout se passe comme si la rupture coïncidait avec un cycle de réplication du chromosome et que seul un des brins fils, nouvellement synthétisés, pénétrât dans la Bactérie réceptrice. Dans les conditions optimales, on peut estimer que le passage du chromosome entier s'effectue en 90 minutes.

Cette méthode de localisation est très sûre mais ne permet de localiser les uns par rapport aux autres que des gènes relativement éloignés. En effet, des gènes proches ou même des sites mutants d'un même gène seront transférés par un Hfr en des temps tellement proches qu'on ne pourra pas distinguer lequel passe en premier. Pour la localisation *fine*, on est donc obligé de procéder différemment. Il est possible de localiser les gènes en prenant comme critère la *recombinaison*.

Nous avons vu plus haut que, lors de la conjugaison, il se formait un diploïde partiel. Au niveau de la partie du chromosome présente en double exemplaire, il peut se produire des échanges (crossing-over) entre le chromosome de la bactérie F⁻ et le fragment de chromosome provenant du Hfr. Ces échanges aboutissent à l'apparition de recombinants parmi les ex-conjugants F⁻. C'est l'étude de ces recombinants et de leur fréquence d'apparition qui permet, comme chez les organismes supérieurs (Eucaryotes), d'établir la carte des gènes. Nous verrons ultérieurement comment on utilise précisément ce principe.

La lysogénie

Certains virus bactériophages n'effectuent pas toujours un cycle de multiplication dès qu'ils ont pénétré dans la Bactérie. En effet, dans certains cas, comme pour le phage λ, leur chromosome peut s'insérer dans la continuité du chromosome bactérien à un endroit donné et se répliquer avec lui de façon synchrone à chaque génération cellulaire. Quand le virus est présent sous cette forme, il est appelé *prophage* (prophage λ par exemple). Les Bactéries hôtes contenant un prophage sont dites *Bactéries lysogènes*. Les virus susceptibles de donner des prophages sont des virus *lysogéniques*.

On ne peut être certain qu'une Bactérie est lysogène que lorsque le prophage se détache du chromosome bactérien et entame un processus lytique, qui aboutit à la lyse de la Bactérie, donc à la récolte d'une descendance virale à partir d'une population de Bactéries supposées lysogènes. On pense actuellement que l'intégration du chromosome viral dans le chromosome bactérien se fait par un crossing-over.

▼ *Intégration du chromosome du virus λ dans la continuité du chromosome de la Bactérie* E. coli, *par crossing-over.*

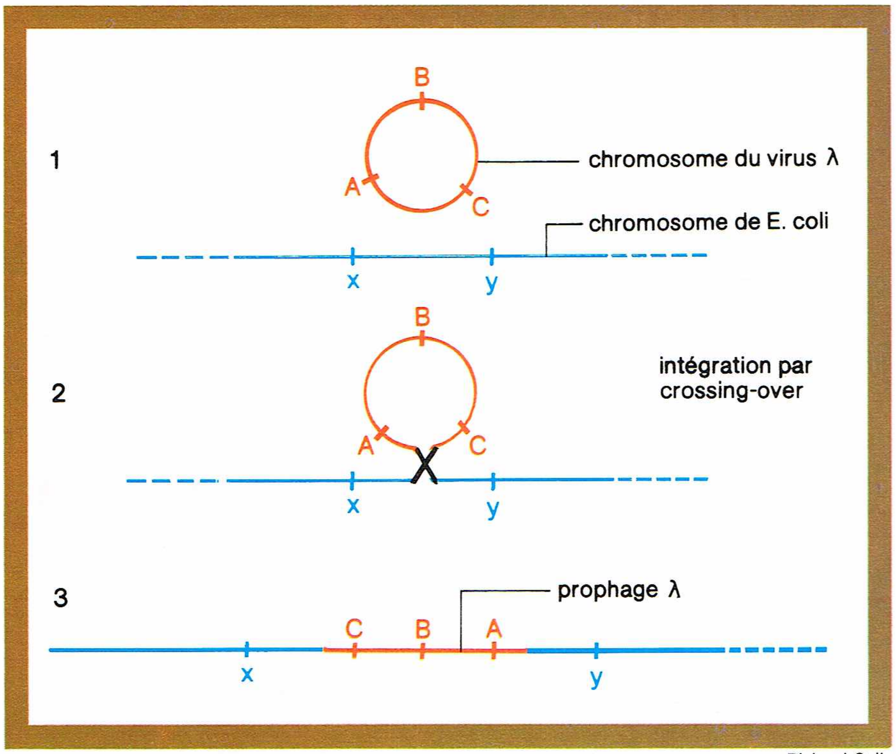

Richard Colin

La transduction

On a vu plus haut que les gènes bactériens peuvent être transmis lors de la conjugaison. Il arrive aussi qu'ils soient transmis passivement d'une Bactérie à une autre par des particules virales. C'est le phénomène de la *transduction* ; celui-ci se produit lors de l'infection des Bactéries par certains virus, dits *phages transducteurs*, qui, après le cycle de multiplication du virus et lors de la formation des particules, incorporent une faible partie du chromosome bactérien (de l'ordre de 1 % ou moins du chromosome). Mais, dans ce cas, le chromosome viral est amputé d'une partie à peu près équivalente d'ADN (1 % du chromosome bactérien, c'est-à-dire presque la totalité du chromosome du virus) ; il est, dans la plupart des cas, sans activité biologique (inoffensif). Un tel virus est cependant capable d'injecter son chromosome à une nouvelle Bactérie. Il peut alors se produire des crossing-over et des recombinaisons entre gènes du chromosome bactérien et gènes transduits.

Ce phénomène est d'utilisation très commode pour indiquer si deux gènes sont très proches l'un de l'autre ou éloignés. En effet, le nombre de gènes bactériens transduits dans la même particule virale est très petit. Si l'on observe que deux gènes sont souvent transduits en même temps *(co-transduits)*, c'est qu'ils sont proches l'un de l'autre sur le chromosome bactérien.

La transformation

Le transfert génétique le plus simple de tous est un troisième phénomène : celui de la *transformation*. Il a été mis en évidence très tôt (Griffith, 1928) sur le pneumocoque *Diplococcus pneumoniae*. Il consiste en ceci : des cellules de génotype a^- sont cultivées dans certaines conditions et mises en contact avec de l'ADN extrait à partir de cellules de génotype a^+. Dans la descendance des cellules ainsi traitées, il peut apparaître jusqu'à 10 % de cellules *transformées*, c'est-à-dire de génotype a^+. Schématiquement, le phénomène est très simple :

cellules a^- + ADN (de cellules a^+) $\rightarrow$ cellules a^+.

Si l'on entre dans le détail, les choses sont un peu plus compliquées. La première étape doit consister en un passage de l'ADN du milieu à l'intérieur des cellules. On a pu montrer que seuls des morceaux d'ADN de petite taille pouvaient pénétrer dans les Bactéries. L'utilisation de la transformation permet alors, comme pour la transduction, de savoir si deux gènes sont proches l'un de l'autre (gènes souvent transférés ensemble). Si le mauvais rendement de la transformation chez la plupart des Bactéries en a limité les applications, elle est cependant très utilisée pour localiser les gènes de Bactéries pour lesquels on ne dispose pas de phage transducteur commode (*Bacillus subtilis* par exemple).

On voit que les Bactéries, comme les virus, possèdent une véritable sexualité. On peut effectuer des croisements où l'on distingue parents et descendants et au cours desquels se produisent des recombinaisons génétiques. Il apparaît quelque chose de plus que chez les virus : il y a deux sortes de parents : les parents donneurs (lors de la conjugaison, ce sont des Hfr) et les parents receveurs (F^-). Est-ce le premier pas vers une différenciation sexuelle ?

La génétique des Eucaryotes

Alors que les organismes Procaryotes peuvent paraître une classe homogène (unicellulaires sans noyau différencié), les organismes Eucaryotes, qui regroupent tous les autres êtres vivants (à l'exception des virus, qui forment un groupe à part), présentent une extraordinaire variété de formes. En effet, ils regroupent des organismes aussi différents que les Protozoaires ciliés comme la paramécie, les animaux, les végétaux supérieurs et les Algues unicellulaires, comme *Chlamydomonas*. Qu'ont-ils en commun ?

D'un point de vue cytologique, la cellule d'un organisme eucaryotique présente une différenciation très poussée : le noyau est individualisé, limité par une double membrane. Le cytoplasme contient de nombreux organites, dont il est établi maintenant que chacun remplit des fonctions spécialisées : assimilation chlorophyllienne dans les chloroplastes, respiration dans les mitochondries, synthèses au niveau du réticulum endoplasmique, etc. Cette structure cellulaire très différenciée est constante

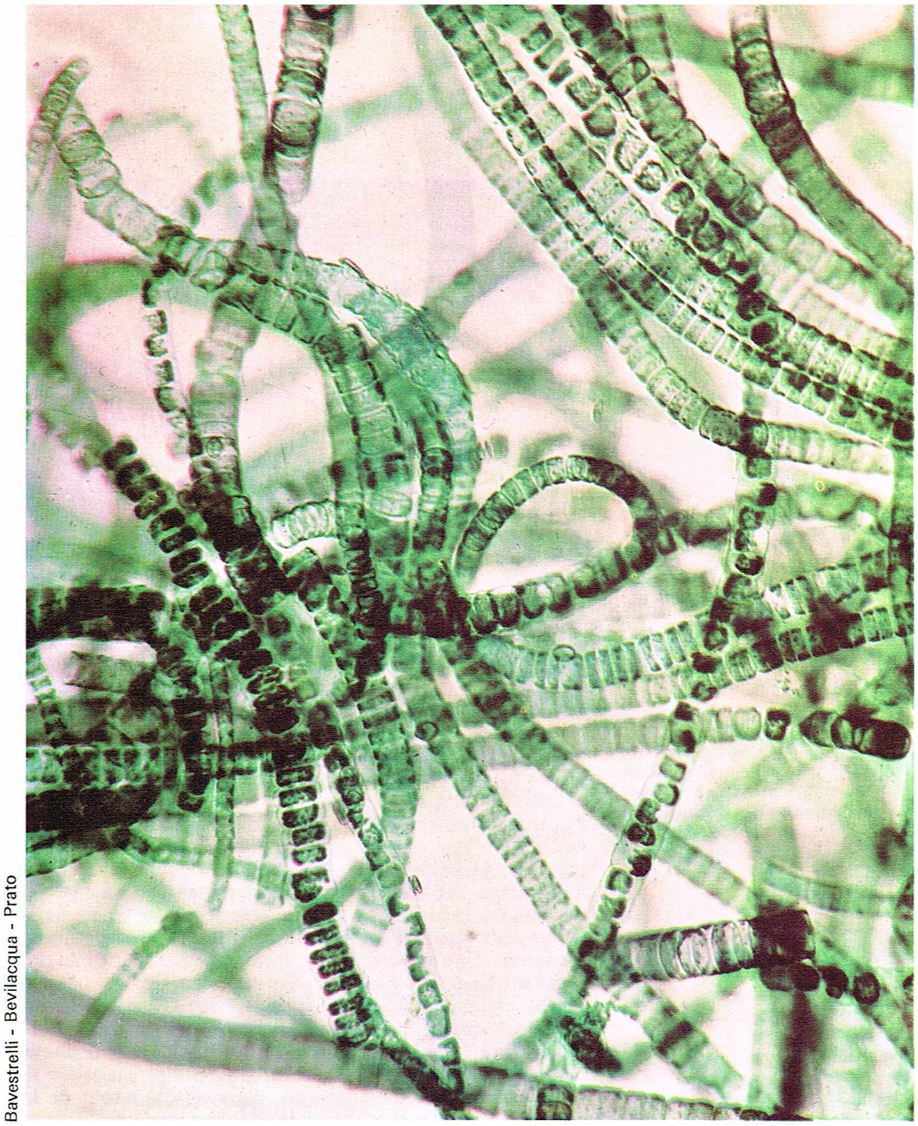

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▼▲ ***Les organismes* Eucaryotes *présentent une extraordinaire variété de formes ; en haut, des Algues vertes filamenteuses, à filaments non ramifiés,* Ulothrix zonata *; en bas, une grosse et belle tortue,* Testudo elegans*, aux dessins de la carapace si caractéristiques. Cependant, au niveau cellulaire, ils forment un groupe homogène et cela est vrai aussi du point de vue génétique ; les Eucaryotes présentent un cycle de* reproduction sexuée*, caractérisé par une alternance des phases* haploïde *et* diploïde.**

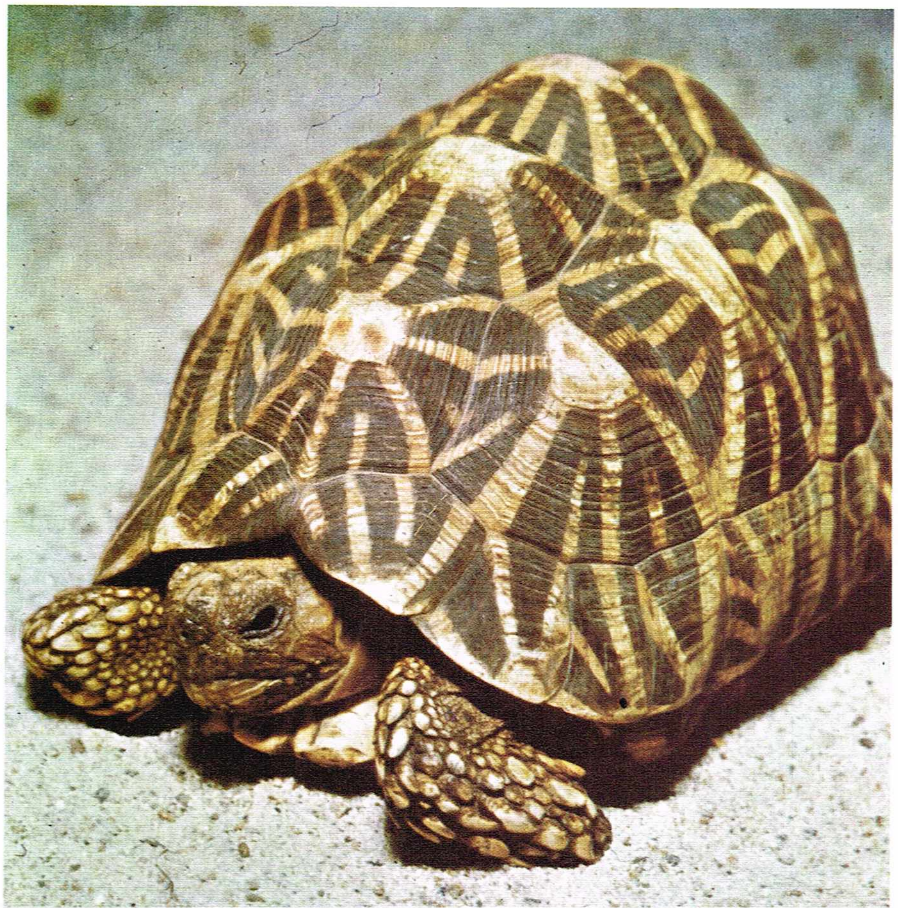

J.H. Tashjian

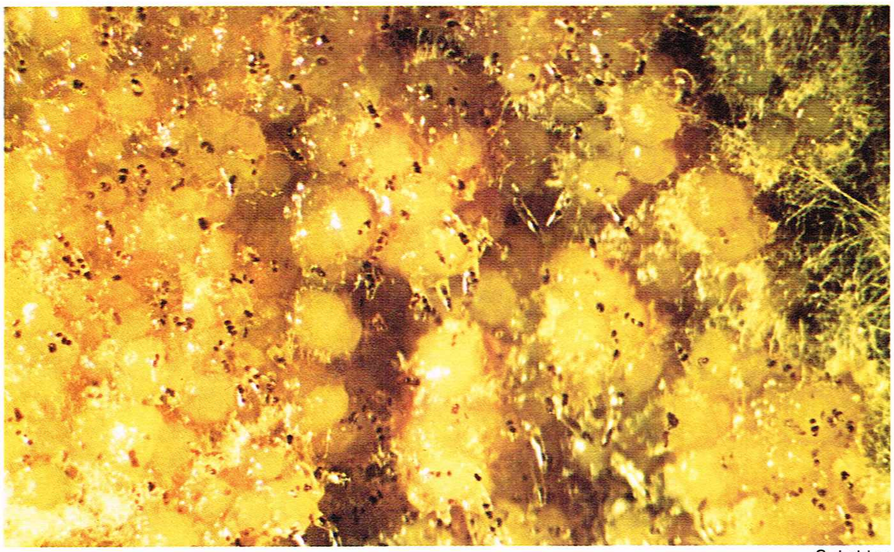

G. Leblon

▲ ***Organes de fructification (apothécies)*** **d'Ascobolus immersus,** ***montrant les asques enfermant les spores.***

chez tous les Eucaryotes. Au niveau cellulaire, les Eucaryotes forment donc un groupe homogène.

Cela est vrai aussi d'un point de vue génétique. Les Eucaryotes présentent un cycle de reproduction sexuée caractérisé par une alternance des phases haploïde et diploïde. Au cours de la phase haploïde, représentée chez les plantes supérieures et les animaux uniquement par les cellules germinales et par leurs précurseurs immédiats, les noyaux des cellules contiennent un seul jeu de chromosomes (n chromosomes). Pendant la phase diploïde, représentée chez les organismes supérieurs par toutes les autres cellules de l'organisme, les noyaux contiennent chacun deux chromosomes de chaque sorte ($2n$ chromosomes). La transition de la phase haploïde à la phase diploïde s'effectue par la fusion des cellules sexuelles et de leurs noyaux (fécondation), alors que, le retour de la phase diploïde à la phase haploïde est accompli par le biais de deux divisions nucléaires successives au cours desquelles le lot de chromosomes ne se divise qu'une seule fois. Ces deux divisions spéciales constituent ensemble la *méiose*. Les produits d'une méiose individuelle, au nombre de quatre, forment une *tétrade* de noyaux haploïdes. Cependant, il se peut, comme au cours de la formation de l'ovule chez les animaux ou les plantes supérieures, qu'un seul des membres d'une tétrade soit utilisé pour la suite du développement.

Les phénomènes de la fécondation et de la méiose sont caractéristiques de la quasi-totalité des organismes Eucaryotes. L'importance biologique de la méiose réside dans le fait qu'il s'y produit la *recombinaison génétique*. Les membres des différentes paires de chromosomes se distribuent *(ségrègent)* indépendamment les uns des autres dans les produits haploïdes, de telle sorte qu'il se produit des réassociations de facteurs génétiques portés par des chromosomes différents. De plus, au cours de la prophase de la première division de la méiose (prophase I), ont lieu des échanges entre parties homologues d'une même paire chromosomique (crossing-over). Cela entraîne qu'il peut même y avoir recombinaison entre des gènes portés par un même chromosome.

Au niveau d'une population, c'est là un phénomène extrêmement important, qui se traduit par un *brassage* génétique. Quand on passe d'une génération à la suivante, les recombinaisons méiotiques font apparaître des réassortiments dans les génotypes, ce qui aboutit, dans une population, à une très forte hétérogénéité des génotypes. Ces génotypes auront des valeurs adaptatives variées vis-à-vis de l'environnement notamment, et c'est cette variabilité qui permet au mécanisme de la sélection naturelle de sélectionner les génotypes les plus compétitifs d'une population. Le brassage génétique dû à la recombinaison génétique est, comme nous le verrons plus loin, un des éléments essentiels aux mécanismes de la sélection et de l'évolution.

Un des buts importants de la génétique est donc de comprendre le processus de la méiose et, en particulier, le mécanisme de l'échange entre chromosomes homologues.

La génétique des Ascomycètes

A l'heure actuelle, les Champignons Ascomycètes sont les organismes qui se prêtent le mieux à l'expérimentation. Ils présentent des morphologies très variées, qui vont de la moisissure (type *Penicillium*), des formes unicellulaires (types Levures) à la truffe bien connue des gourmets, en passant par les Ascomycètes à chapeau comme la morille.

Deux types d'Ascomycètes sont très utilisés en génétique ; les moisissures filamenteuses (*Penicillium, Neurospora, Sordaria, Ascobolus, Podospora*, etc.) et les Levures (*Saccharomyces, Schizosaccharomyces,* etc.). Le caractère qui permet de regrouper tous les Ascomycètes tient aux modalités de la reproduction : la méiose se produit dans une cellule appelée *asque,* et les produits de cette méiose restent, à la fin, enfermés *ensemble* dans la paroi de l'asque.

Le cycle d'un Ascomycète typique (les Levures étant la seule exception importante) est à *prédominance haploïde* ; la fusion des noyaux (caryogamie) se produit juste au moment de la formation de l'asque. Le noyau diploïde ainsi constitué ne subit aucune mitose, mais entame immédiatement le processus de la méiose. La phase diploïde est donc réduite à l'extrême, c'est-à-dire à la seule existence du noyau diploïde préméiotique, ou *zygote*. Il est nécessaire de garder cette caractéristique du cycle présente à l'esprit pour comprendre la génétique des Ascomycètes.

Sans entrer dans les détails de la fécondation ou de la fructification, il est important de noter que les noyaux qui fusionnent peuvent ou doivent, selon les espèces, provenir de souches différentes, et sont ainsi susceptibles de constituer un croisement génétique.

Après la méiose, les 4 noyaux résultants sont enfermés chacun dans une ascospore où, le plus souvent, ils se divisent encore une fois, après quoi, les 8 noyaux sont enclos dans 8 ascospores. Dans la plupart des cas, les ascospores restent enfermées dans la paroi de l'asque avant d'être libérées.

Chez les Ascomycètes supérieurs, comme *Sordaria* ou *Ascobolus,* une seule fructification produit de nombreux asques. A maturité, les spores sont violemment projetées en groupes cohérents de 8 ascospores d'un même asque.

La transmission des gènes à travers la méiose

On a vu précédemment comment se déroulait la méiose et, en particulier, quel était le comportement des chromosomes au cours des deux divisions successives qui la constituent. On sait, d'autre part, que le support matériel des caractères héréditaires est l'ADN et que celui-ci se trouve dans les chromosomes. Il doit donc exister une relation étroite entre le devenir des chromosomes à la méiose et la transmission d'un caractère génétique. Il est possible de préciser cette hypothèse, qui, on le verra, est vérifiée expérimentalement.

Nous savons que, chez les organismes Procaryotes (principalement, les virus et les Bactéries), l'ADN est divisé en unités fonctionnelles : les gènes, disposés linéairement le long du chromosome. On va supposer qu'un gène donné A occupe une place déterminée, ou *locus,* sur un chromosome donné.

Au cours de la méiose, le noyau qui la subit est diploïde, c'est-à-dire que chaque chromosome existe en double exemplaire : pour chaque chromosome existe un *homologue*. Si la première proposition est vraie, son corollaire est que le chromosome homologue porte, au locus correspondant à celui du gène A sur le premier chromosome, un autre gène A. Ces deux gènes homologues sont des allèles ; ils peuvent être identiques ou être des formes alléliques différentes du même gène.

La ségrégation des allèles

La figure (p. ci-contre en haut) schématise le devenir, au cours de la méiose, d'une paire de chromosomes homologues portant des allèles différents a et a^+ d'un gène donné A. On notera que chez les Ascomycètes le doublement du stock d'ADN se produit *avant* la caryogamie. Dès le début de la méiose, on peut considérer que les chromosomes sont déjà dédoublés sur toute leur longueur *excepté au niveau du centromère :* on dit alors que les chromosomes sont constitués de deux chromatides. Chacune des chromatides porte, au locus du gène A, un allèle

(soit *a,* soit a^+). Au cours de la première division de la méiose, *les chromosomes homologues se séparent,* et, lors de la deuxième division, *les centromères se divisent.* Les quatre produits de la méiose possèdent un chromosome qui porte soit l'allèle *a,* soit l'allèle a^+. On dit qu'il y a eu *ségrégation* (séparation) des allèles qui étaient réunis dans le *zygote.* On a deux produits qui possèdent l'allèle *a,* et deux produits qui possèdent l'allèle a^+. C'est une *ségrégation 1:1.* Les gènes se comportent donc comme les chromosomes qui les portent, et ils présentent la même ségrégation au niveau des produits de la méiose.

Sur la figure ci-contre, on voit que, chez un Ascomycète comme *Ascobolus,* il se produit après la méiose, mais à l'intérieur de l'asque, une mitose supplémentaire, dite *mitose postméiotique.* On aboutit, après formation des spores (chaque spore contient un noyau) à des asques contenant 8 ascospores. On constate aussi que la ségrégation des allèles n'a pas changé : on a 4 ascospores a^+ et 4 ascospores *a,* c'est-à-dire toujours une ségrégation 1:1.

Lorsqu'on effectue un croisement, il arrive que l'on ne puisse pas récolter les asques individuellement. Il est alors impossible de connaître la ségrégation d'un caractère dans les produits d'une même méiose. On peut cependant observer quelle est la ségrégation au niveau de la population d'ascospores en *vrac.* Les spores en vrac constituent une population de produits de méiose. Si la ségrégation d'un couple d'allèles a/a^+ est 1:1 au niveau d'un asque, tous les asques provenant d'un même croisement montreront la même ségrégation 1:1. C'est-à-dire que dans *tous* les asques provenant d'une cellule diploïde a^+/a, il y aura 4 spores a^+ et 4 spores *a.* Au niveau de la population des spores prises en vrac, on aboutit à 50 % de spores *a* et 50 % de spores a^+, c'est-à-dire une ségrégation 1:1.

On voit que, *dans tous les cas,* lorsqu'on l'observe au niveau des produits de la méiose, *la ségrégation d'un couple d'allèles est une ségrégation 1:1.*

Avec le Champignon *Ascobolus,* il est possible de voir la ségrégation directement en observant les spores. Dans l'espèce *Ascobolus immersus,* fréquemment utilisée en génétique, plusieurs gènes interviennent dans la pigmentation des spores. Les spores dont les noyaux ont des génotypes entièrement « sauvages » sont brun foncé. Si un des gènes intervenant dans la pigmentation, par exemple le gène B, est présent sous une forme allélique mutante *b,* les spores ne seront pas colorées (blanches). Si l'allèle présent est b^+, les spores seront brunes. Si l'on effectue un croisement entre les deux souches $b \times b^+$, comment vont être les spores de la descendance? La caryogamie va se faire entre un noyau *b* et un noyau b^+. La cellule diploïde (cellule mère de l'asque) va donc être *hétérozygote* au niveau du gène B : l'un des chromosomes de la paire concernée (celle qui porte le *locus* B) va porter l'allèle *b* (en double exemplaire, puisque à ce stade les chromosomes sont composés de deux chromatides réunies au niveau du centromère), et son homologue porte l'allèle b^+ (même remarque). La méiose va se dérouler et aboutir à une tétrade de 4 noyaux, 2 portant l'allèle *b,* 2 portant l'allèle b^+. Chacun d'entre eux va se diviser en deux à la mitose postméiotique, et les 8 ascospores formées dans l'asque contiendront chacune un de

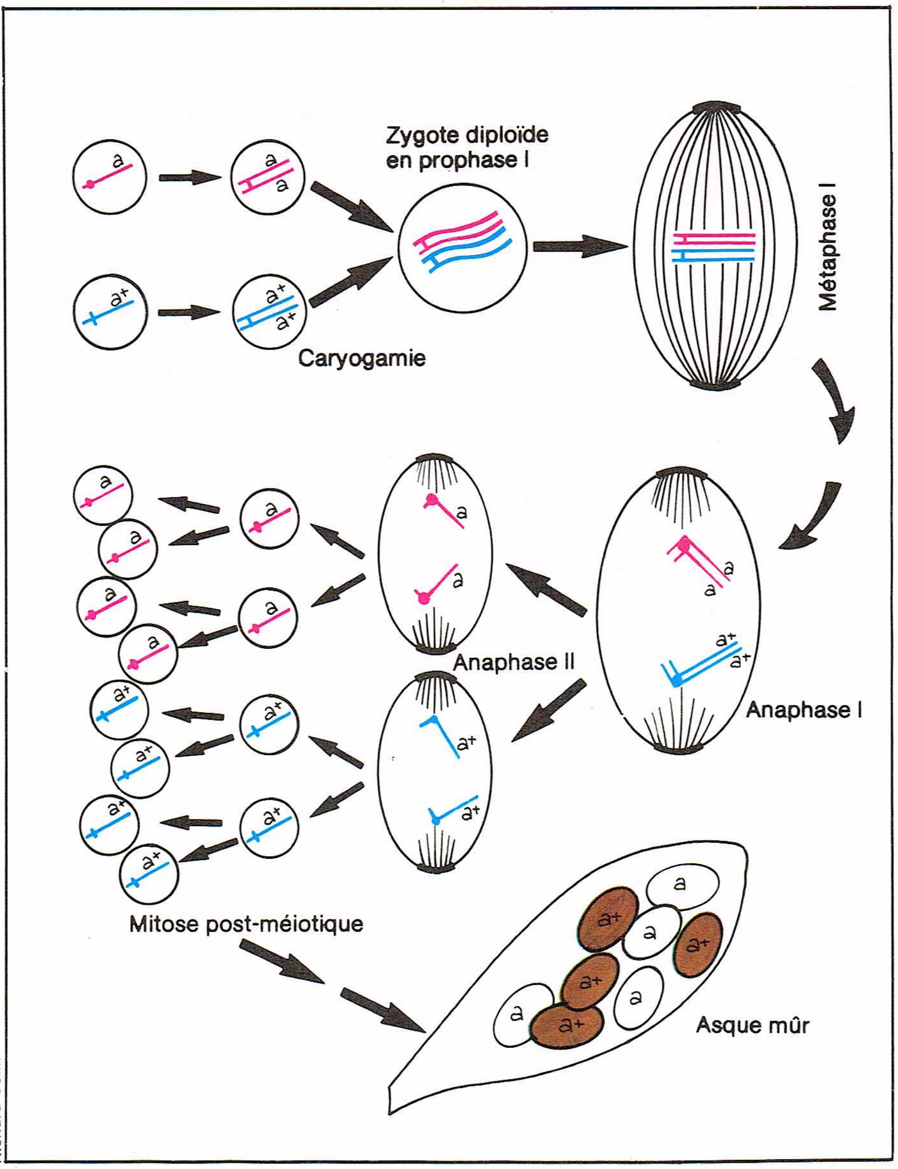

Richard Colin

▲ *Représentation schématique de la ségrégation d'un couple d'allèles* a/a+ *au cours de la méiose chez l'Ascomycète* Ascobolus immersus.

▼ *A gauche, asques mûrs d'*Ascobolus *montrant 8 spores sauvages brun foncé.*
A droite, asques mûrs contenant 4 spores sauvages brun foncé et 4 spores mutantes blanches. Ce Champignon est fréquemment utilisé en génétique, car il permet de voir la ségrégation directement en observant les spores.

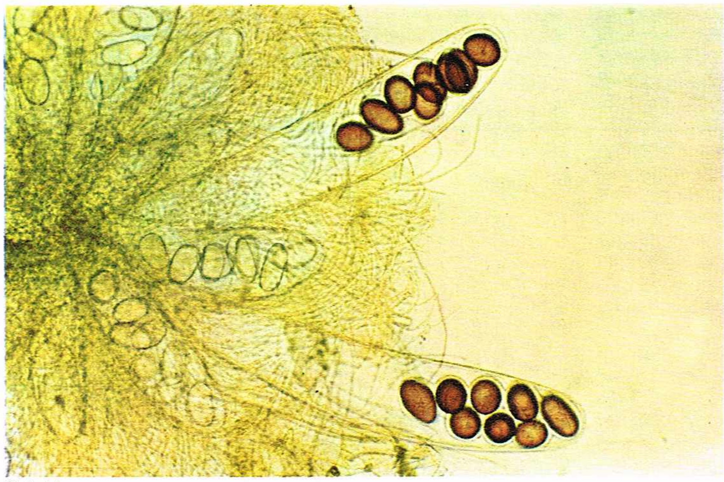
G. Leblon

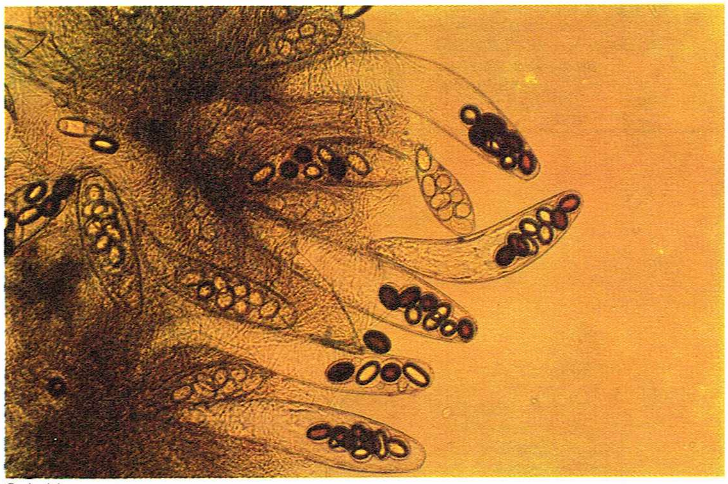
G. Leblon

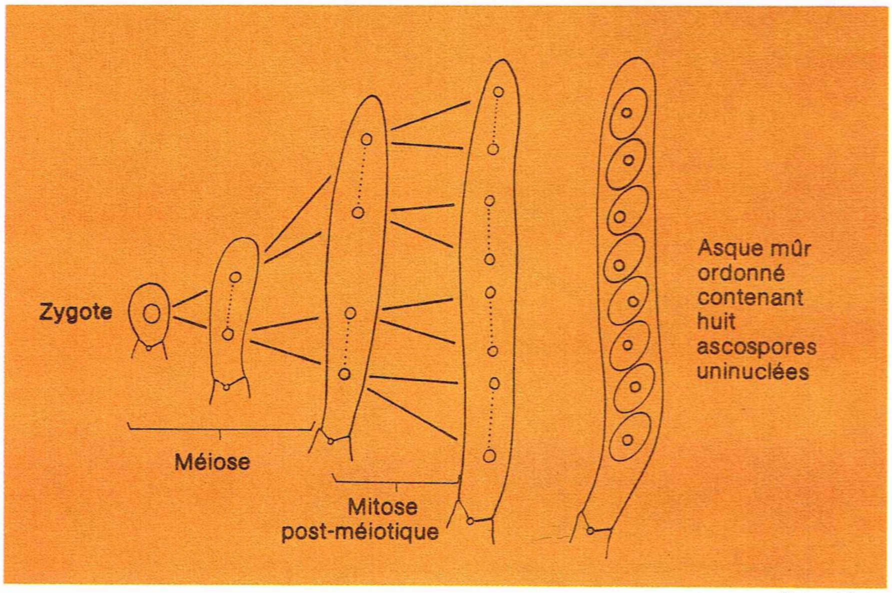

Richard Colin

▲ ***Représentation schématique de la méiose, de la mitose postméiotique et de la formation des spores dans le cas d'asques ordonnés chez* Neurospora crassa.**

ces 8 noyaux (4 noyaux *b*, 4 noyaux b^+). Si, à l'aide d'un stéréomicroscope, on observe les asques à ce stade, on constate que chacun est composé de 4 spores blanches (*b*) et de 4 spores brunes (b^+). Dans ce cas, il est possible de visualiser directement la ségrégation d'un couple d'allèles.

On voit que les Ascomycètes présentent, du point de vue expérimental, plusieurs avantages. D'abord, on observe le phénotype sur les cellules haploïdes. (On a vu précédemment qu'il y avait dans ce cas une relation directe entre le génotype et le phénotype, et que cette relation présentait peu d'ambiguïté, ce qui n'est pas le cas dans une cellule diploïde, qui peut être hétérozygote.) Ensuite, on observe ensemble les quatre produits d'une méiose individuelle. Ce croisement est, en même temps, la vérification d'une des lois de Mendel qui, en langage moderne, peut s'énoncer ainsi : deux gènes allèles s'excluent mutuellement dans une cellule haploïde. En effet, d'après ce qu'on a vu, il est impossible qu'une ascospore haploïde porte *à la fois* l'allèle *b* et l'allèle b^+. Elle ne peut contenir que l'un *ou* l'autre. Les caractères parentaux sont transmis *inchangés* et *séparément*.

Les asques « ordonnés »

Chez certains Ascomycètes (*Neurospora* ou *Sordaria*), non seulement les quatre produits de la méiose sont contenus dans l'asque, mais de plus, ils y sont disposés *dans l'ordre*. Cela provient de ce que l'asque est une cellule très allongée et étroite. Les noyaux formés y restent à leur place et, quand ils se divisent, les fuseaux de division ne se chevauchent pas.

Quand on effectue un croisement entre un mutant à spores blanches (*b*) et la souche sauvage à spores brunes (b^+) chez *Sordaria*, on observe l'apparition dans la descendance non pas d'un, mais de *six* types d'asques différents. Ceux-ci ne diffèrent que par l'ordre des spores. Dans tous les cas, il faut remarquer qu'ils contiennent toujours 4 spores blanches et 4 spores noires : on retrouve la ségrégation 1:1, caractéristique d'un couple d'allèles.

Quant aux différences qui apparaissent entre les types d'asques, on peut les ranger en deux groupes. Dans les types 1 et 2, on voit que les moitiés d'asques sont homogènes (schéma ci-dessous) : elles contiennent soit exclusivement des spores noires, soit exclusivement des spores blanches. Si l'on regarde les types 3 à 6, on voit que les demi-asques contiennent *à la fois* des spores blanches et des spores noires. En tenant compte du déroulement de la méiose, on peut interpréter ces deux types de répartition des spores dans les asques. Dans les types d'asques 1 et 2, les deux allèles du couple b/b^+ se sont séparés dès la première division de méiose : un des noyaux fils de la division I ne contenait que l'allèle *b*, et l'autre noyau fils ne contenait que b^+. On appelle cela une *ségrégation à la première division*, ou encore une *préréduction*. Dans les types d'asques 3, 4, 5 et 6 les deux noyaux fils issus de la première division de méiose contenaient encore chacun les deux allèles *b* et b^+. Ces deux allèles se sont séparés à la division suivante. Cela s'appelle une *ségrégation à la deuxième division* de méiose ou encore une *postréduction*.

Ségrégation à la première ou à la deuxième division

Nous avons vu qu'à la division I de la méiose les chromosomes homologues se séparent, mais que leurs centromères ne se divisent qu'à la division II. Cela est parfaitement compatible avec l'existence d'asques provenant de préréductions. En effet, dans le cas de préréductions, comme les demi-asques sont homogènes soit pour *b*, soit pour b^+, cela signifie que les noyaux issus de la division I étaient homogènes *b* ou b^+, et donc que les deux chromatides constituant un chromosome portaient le même allèle. En ce qui concerne les asques provenant de postréductions, le même raisonnement conduit à l'idée que, dans ce cas, les deux chromatides d'un même chromosome devaient porter chacune un allèle différent, l'une portant *b*, l'autre portant b^+.

Comment expliquer la postréduction d'un couple d'allèles ? Celle-ci est schématisée dans la figure page ci-contre, en bas. On admet qu'il peut se produire des crossing-over entre chromatides appartenant à des chromosomes homologues lors de la prophase de la division I de la méiose. Comme on l'a vu précédemment, au cours de la prophase de division I, au stade pachytène, les chromosomes d'une paire s'apparient, régions homologues contre régions homologues. Cet appariement, ou *synapsis*, est physiquement matérialisé par des structures différenciées que l'on voit au microscope électronique : les *complexes synaptinémaux*. Les données les plus récentes semblent montrer qu'il en existe un par paire de chromosomes. Cet appariement rigoureux est la première condition pour que puissent s'effectuer des crossing-over entre chromatides de chromosomes homologues. Les chiasmas que l'on peut observer au stade diplotène ou à la diacinèse ne sont sans doute que les conséquences des crossing-over.

Quoi qu'il en soit, on voit que l'explication du phénomène de postréduction fait intervenir l'hypothèse de crossing-over. La postréduction d'un couple d'allèles b/b^+ est déterminée par un crossing-over se produisant entre le centromère et le locus des allèles. Si le crossing-over se produit ailleurs que dans cet intervalle, on n'observera pas la postréduction du *locus* B, et donc l'échange ne sera pas détecté.

En observant, au cours de nombreuses expériences, les pourcentages de postréductions de couples d'allèles situés

▼ ***Représentation schématique de la* préréduction *(ségrégation à la première division) et de la* postréduction *(ségrégation à la deuxième division) dans les* asques ordonnés.**

Richard Colin

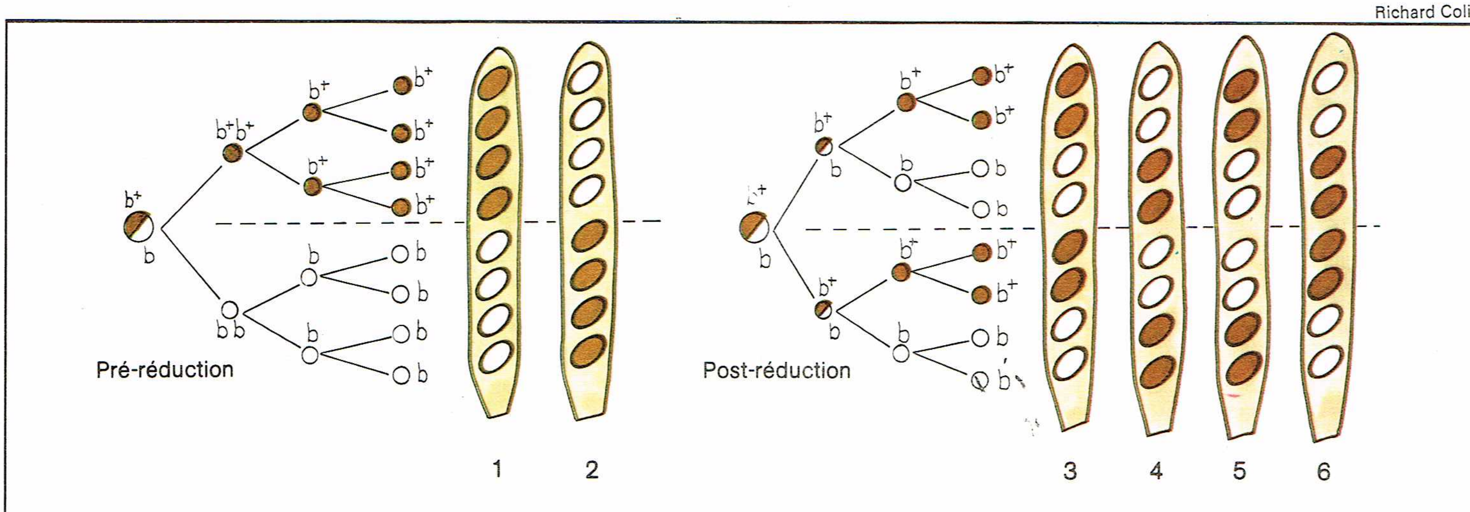

dans différents *loci*, on s'est aperçu qu'ils varient dans d'énormes proportions : de 0 % à plus de 60 %; d'autre part, ces pourcentages sont déterminés pour un locus donné. Cela signifie que la probabilité qu'il se produise un crossing-over dans un segment de chromosome compris entre le centromère et le locus du gène considéré est fixe, mais qu'elle varie selon les segments chromosomiques. L'hypothèse la plus simple est d'envisager que c'est la taille du segment chromosomique qui est la cause des variations : dans un petit segment la fréquence des crossing-over sera petite, et dans un grand segment cette fréquence sera élevée. Si l'on admet cette hypothèse, la mesure des fréquences de crossing-over nous donne un moyen de mesurer les distances qui séparent les gènes des centromères.

Le centimorgan, unité de mesure

Qui dit mesure dit aussi unité. L'unité de longueur des cartes génétiques est nécessairement arbitraire, comme toutes les unités de mesure : c'est le *centimorgan* (de Morgan, qui a découvert le crossing-over), ou encore l'unité de recombinaison :

$$1 \text{ centimorgan} = 1 \text{ U. rec.} = \frac{\text{nombre de remaniements chromatidiques}}{\text{nombre total de chromatides}} \times 100.$$

Prenons un exemple d'application. Chez *Neurospora*, on a effectué un croisement entre une souche b (spores blanches) et une souche b^+ (spores brunes) : $b \times b^+$. Dans la descendance on a observé les six types d'asques décrits en haut, à droite. On peut regrouper les résultats en disant qu'on a obtenu 1 004 asques, dont 806 montrent une préréduction du couple d'allèles b/b^+ (ou du locus B) et 198 montrent une postréduction. Le pourcentage de postréductions du locus B, c'est-à-dire le pourcentage d'asques postréduits apparaissant dans un croisement $b \times b^+$ est de 19,7 %. Cela signifie que, dans l'intervalle considéré, il se produit un crossing-over dans environ un cas sur cinq.

Dans chaque asque, il y avait à l'origine, dans le noyau qui a subi la méiose, quatre chromatides portant un allèle du gène B. Le nombre total de chromatides est donc : 1 004 × 4 = 4 016 (car chaque asque est le produit d'une méiose). Dans les asques préréduits, il n'y a pas eu de crossing-over entre le centromère et le locus B, donc aucun remaniement de chromatides. Dans les asques postréduits, il y a eu un crossing-over dans le segment chromosomique considéré, et donc *deux* remaniements chromatidiques (le crossing-over se fait entre deux chromatides sur les quatre en présence, et toutes deux sont remaniées). Le nombre de remaniements de chromatides est donc :

$$198 \times 2 = 396.$$

On peut maintenant exprimer la distance d qui sépare le locus B de son centromère :

$$d = \frac{396}{4016} \times 100 = 9{,}86 \text{ centimorgans},$$

ou 9,86 unités de recombinaison.

Ségrégations indépendantes

Qu'observe-t-on lorsque l'on croise deux souches qui diffèrent non plus par un seul, mais par deux couples de caractères alternatifs? Comment les couples d'allèles vont-ils ségréger l'un par rapport à l'autre? D'après ce qu'on a vu du devenir des chromosomes au cours de la méiose, on doit s'attendre que les ségrégations de deux couples d'allèles localisés sur des paires chromosomiques se comportent comme les chromosomes qui les portent, c'est-à-dire comme deux événements indépendants.

Prenons un exemple concret pour vérifier expérimentalement cette hypothèse. Chez l'Ascomycète *Ascobolus immersus*, les asques ne sont pas ordonnés. Ils contiennent huit ascospores ovales et brun foncé. On connaît des souches mutantes dont les spores sont blanches [b], et d'autres dont les spores sont rondes [r]. Nous allons effectuer un croisement entre une souche à spores blanches et une souche à spores rondes : [b] × [r].

— Considérons, dans un premier temps, les couples de caractères alternatifs séparément.

D'abord la *couleur* des spores : une spore peut être soit brune [b+], soit blanche [b], mais pas les deux, ni de phénotype intermédiaire : il s'agit bien de caractères qui s'excluent mutuellement dans un produit haploïde. Quelle est la ségrégation de ce couple de caractères? Dans *tous* les asques issus de croisement, on observe 4 spores [b] et 4 spores [b+], quelle que soit la forme des spores. On obtient donc, pour la coloration des spores, la ségrégation 1:1, caractéristique d'un couple d'allèles. Nous allons, par conséquent, considérer que, dans ce croisement, la couleur des spores dépend d'un couple d'allèles b et b^+. Et cela, jusqu'à preuve du contraire. Si l'on envisage ensuite la question de la forme des spores, le même raisonnement que ci-dessus permet de constater que, chaque asque étant composé de 4 spores rondes [r] et de 4 spores ovales [r+], ce caractère présente une ségrégation 1:1. On peut donc considérer qu'il dépend, lui aussi, d'un couple d'allèles r et r^+.

Nous pouvons dès maintenant écrire le génotype des deux souches parentales : la souche à spores blanches [b] et ovales [r+] devait porter les allèles b, r^+, et la souche à spores brunes [b+] et rondes [r] devait porter les allèles b^+, r. Les deux parents diffèrent donc par deux couples d'allèles. C'est ce que Mendel appelait le *dihybridisme*.

Si l'on considère maintenant les phénotypes des descendants de ce croisement, on constate qu'ils sont au nombre de *quatre*. On trouve des spores ovales et blanches [b, r+] comme un des parents, des spores brunes et rondes [b+, r] comme l'autre parent. On observe aussi deux nouveaux types : des spores brunes et ovales [b+, r+] et des spores blanches et rondes [b, r]. Les génotypes correspondants sont respectivement b, r^+; b^+, r; b^+, r^+ et b, r. Les deux premiers, identiques à ceux des parents, sont appelés *parentaux*. Les derniers, qui sont nécessairement issus de réassociations entre les caractères, sont appelés *recombinés*.

En observant maintenant comment ces différents types de spores sont groupés dans les asques, nous pouvons grouper les asques en trois classes. Il y a d'abord des asques qui contiennent quatre spores blanches et ovales et quatre spores brunes et rondes; ces asques, qui contiennent quatre spores identiques à l'un des parents et quatre spores identiques à l'autre parent, sont appelés *ditypes parentaux* (DP). Il y a, ensuite, d'autres asques, qui contiennent quatre spores brunes et ovales et quatre spores blanches et rondes; les deux types de spores qu'ils contiennent sont recombinés. Ces asques sont appelés *ditypes recombinés* (DR). Enfin, le dernier type d'asque contient les quatre types de spores : deux spores [b, r+], deux spores [b+, r], deux spores [b+, r+] et deux spores [b, r]. De tels asques sont dits *tétratypes* (T) [voir schéma p. 250 en haut].

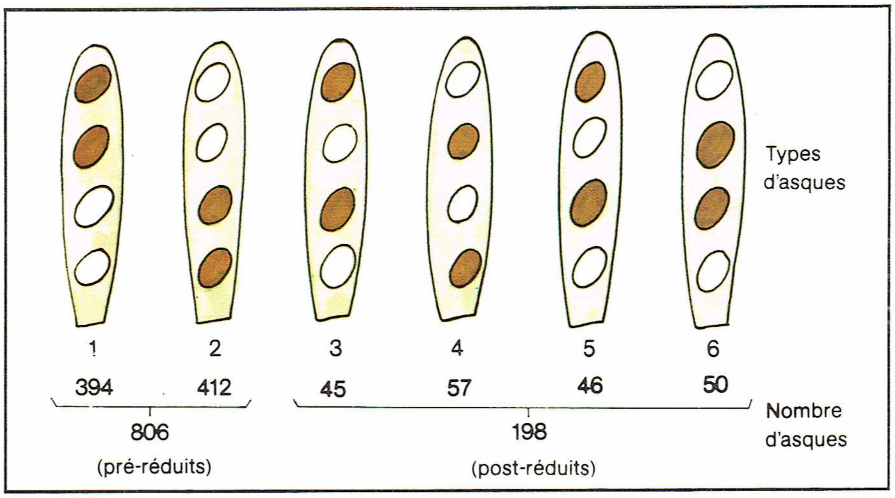

Richard Colin

▲ ***Types d'asques obtenus dans un croisement* b × b+ : *bien que les asques contiennent 8 spores, on n'en a représenté que 4. La représentation des 8 spores n'apporte pas d'informations supplémentaires en ce qui concerne la ségrégation des allèles* b *et* b+*, car la mitose postméiotique n'a pour effet que de donner deux exemplaires de chacun des produits de la méiose.***

Richard Colin

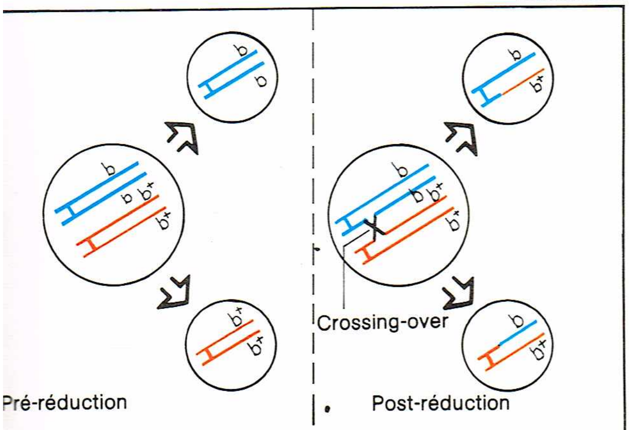

◀ ***Représentation schématique de l'explication du phénomène de* postréduction *par un* crossing-over.**

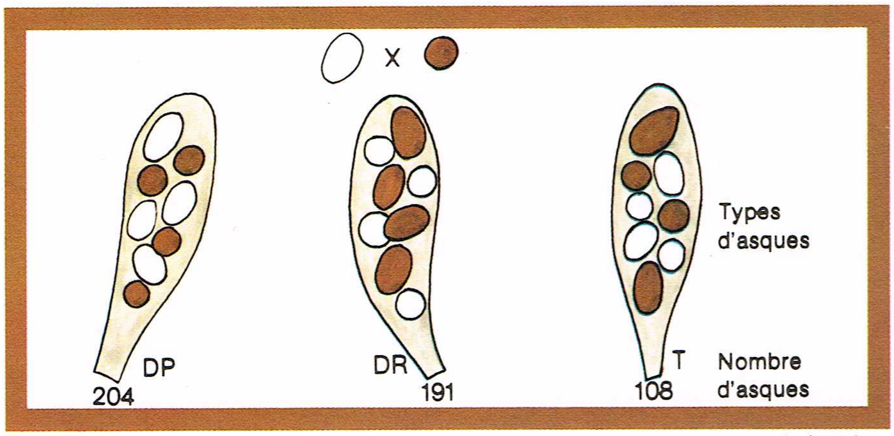

Richard Colin

▲ *Types d'asques obtenus dans un croisement* [*b*] × [*r*] *chez* Ascobolus immersus : DP, *ditype parental ;* DR, *ditype recombiné ;* T, *tétratype.*

▼▶ *Ci-contre, tableau récapitulatif des résultats d'un croisement de spores* [*b*] × [*r*]. *En bas, schéma explicatif de la formation des asques* DP *et* DR *lors d'un croisement* [*b*] × [*r*].

Types d'ascospores	Phénotypes	Génotypes	Effectifs	Pourcentages
Parental	$[br^+]$	$b\ r^+$	1032	25,6 %
Parental	$[b^+r]$	b^+r	1032	25,6 %
Recombiné	$[b^+r^+]$	b^+r^+	980	24,4 %
Recombiné	$[br]$	$b\ r$	980	24,4 %
		Totaux	4024	100 %

Richard Colin

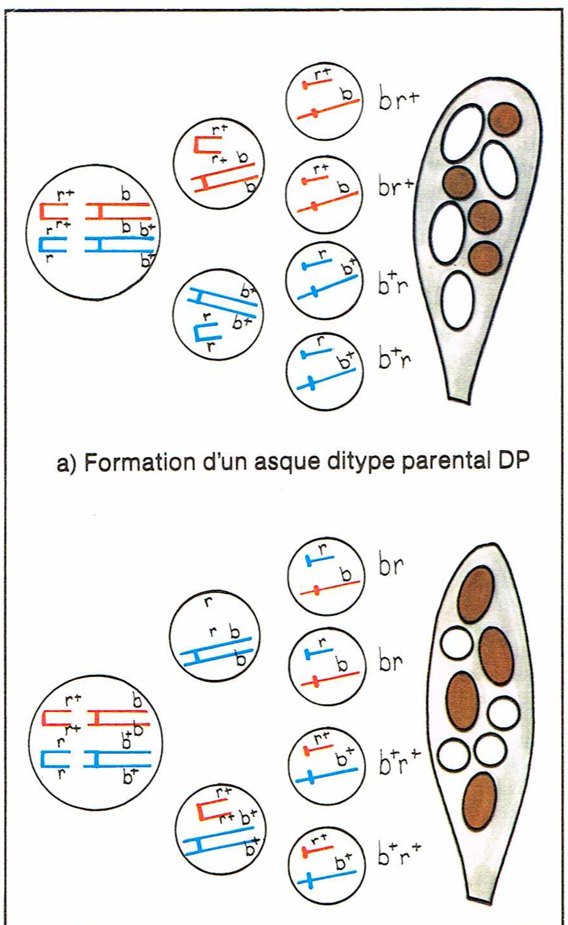

a) Formation d'un asque ditype parental DP

b) Formation d'un asque ditype recombiné DR

Richard Colin

Nous pouvons à présent déterminer comment deux couples d'allèles ségrègent l'un par rapport à l'autre, en calculant la fréquence des différentes associations génotypiques qui apparaissent dans le croisement (tableau à gauche, au centre). Les effectifs des différents cas sont obtenus en totalisant toutes les spores présentant un génotype donné, sans tenir compte du type d'asque d'origine. Par exemple, pour le type parental à spores blanches et ovales $[b, r^+]$, il y en a 4 dans chaque asque DP (soit $204 \times 4 = 816$) et 2 dans chaque asque T (soit $108 \times 2 = 216$), c'est-à-dire en tout $816 + 216 = 1\,032$, ce qui représente la proportion suivante :

$$\frac{1\,032}{4\,024} \times 100 = 25{,}6\ \%.$$

Compte tenu des fluctuations aléatoires, un test statistique permet de dire que les proportions observées ne sont pas significativement différentes de 1/4 (25 %). On peut aussi dire qu'on a autant de produits parentaux que de produits recombinés (P = R), ou encore que le pourcentage de recombinaison est de

$$100 \times \frac{R}{P + R} = 50\ \%.$$

On peut donc dire soit que chacun des types de spores est également fréquent, soit que la formation de l'un ou l'autre des types de spores est également probable ($p = 0{,}25$). Cela revient à dire qu'un allèle donné du gène B, par exemple *b*, a autant de chances d'être associé à un allèle donné de R (par exemple, *r*) qu'à l'autre allèle (dans ce cas, r^+) : il y a donc autant de *b*, *r* que de b^+, r^+. Comme la ségrégation de b/b^+ est 1:1, on a l'égalité suivante :

$$\text{fr. } b, r = \text{fr. } b, r^+ = \text{fr. } b^+, r = \text{fr. } b^+, r^+ = 0{,}25.$$

Ce résultat confirme la loi de probabilité de deux événements indépendants : si l'on considère une spore, on a une chance sur deux ($p = 0{,}5$) qu'elle soit blanche et une chance sur deux qu'elle soit brune. De même, il y a une chance sur deux qu'elle soit ronde et une chance sur deux qu'elle soit ovale. Si les événements sont indépendants, la probabilité qu'une spore soit à la fois brune et ronde est $p = 0{,}5 \times 0{,}5 = 0{,}25$, c'est-à-dire le *produit* des probabilités des deux événements.

En résumé, on peut dire que si au cours d'un croisement on observe un pourcentage de recombinaison de 50 %, c'est que les ségrégations des deux couples d'allèles sont indépendantes. Dans le langage génétique, on dira plus simplement que *les gènes sont indépendants.*

Ditypes et tétratypes

Maintenant que nous avons étudié les fréquences des différentes spores considérées *en vrac,* nous allons essayer d'expliquer les différents types d'asques. En effet, si les spores étaient réunies au hasard par groupes de huit dans les asques, on obtiendrait un nombre très grand de possibilités, équivalent au nombre de combinaisons que peuvent présenter les quatre types de spores prises au hasard, huit à huit. Or, on n'observe que trois combinaisons possibles (asques DP, DR et T). Les contraintes qui aboutissent à cette limitation des possibilités sont le déroulement de la méiose et de la mitose postméiotique d'une part et la ségrégation 1:1 de chaque couple d'allèles d'autre part. Le premier paramètre est invariable et ne permet donc pas d'expliquer les *différences* entre les trois catégories d'asques. Elles proviennent donc forcément des différentes modalités possibles de la ségrégation : soit à la division I (préréduction), soit à la division II (postréduction). On a vu plus haut que les ségrégations des deux couples d'allèles sont indépendantes.

— *Premier cas :* les couples d'allèles b/b^+ et r/r^+ sont préréduits. Dans cette éventualité, un demi-asque est homogène pour un couple d'allèles donné : soit uniquement *b*, soit uniquement b^+, ou encore, soit uniquement *r*, soit uniquement r^+. Par conséquent, les quatre spores d'un demi-asque seront identiques, ce qui conduit à la formation d'asques ditypes et exclut totalement les asques tétratypes. Le schéma ci-contre montre que, si les deux couples d'allèles sont préréduits, on ne peut obtenir que des asques DP et des asques DR. Comme les ségrégations sont indépendantes, chacun des deux types est également probable.

— *Deuxième cas :* un des couples d'allèles est préréduit, l'autre postréduit. Il existe deux possibilités : ou b/b^+ est préréduit et r/r^+ postréduit, ou l'inverse. Les schémas (figure ci-contre) montrent que le résultat est identique, et que ce résultat consiste en la formation d'un asque tétratype T. Comme on l'a vu précédemment, la postréduction d'un couple d'allèles résulte d'un crossing-over entre le locus du gène et le centromère du chromosome qui le porte.

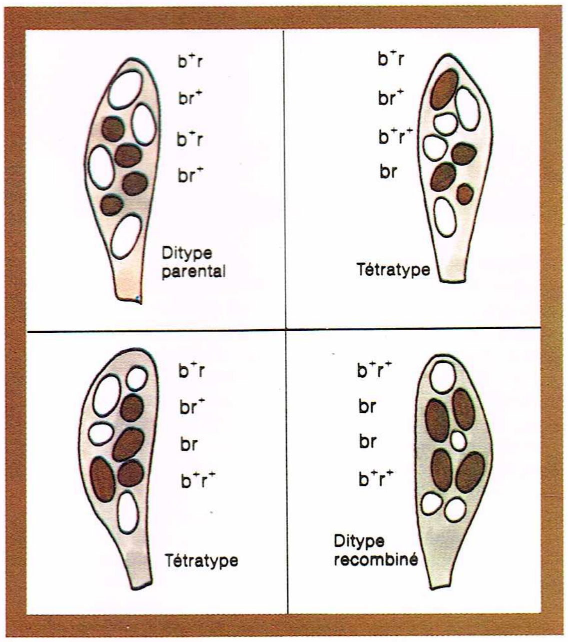

Richard Colin

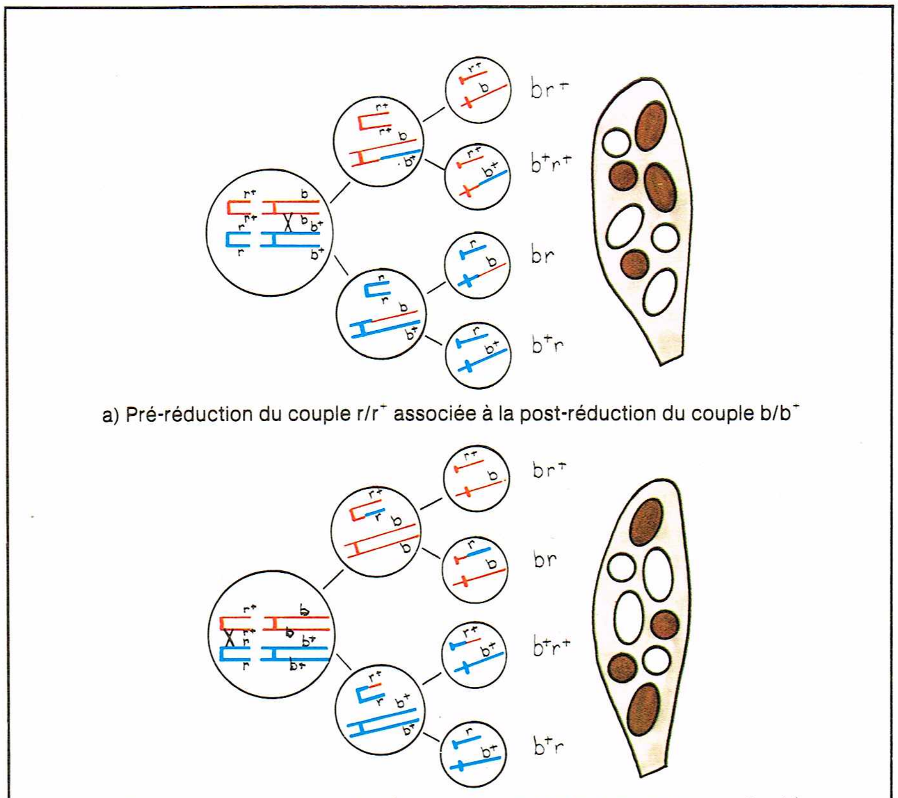

a) Pré-réduction du couple r/r⁺ associée à la post-réduction du couple b/b⁺

b) Pré-réduction du couple b/b⁺ associée à la post-réduction du couple r/r⁺

Richard Colin

▲ ***A gauche, types d'asques obtenus à la suite de doubles postréductions ; on obtient : 1/4 de DP ; 1/4 de DR et 1/2 de T. A droite, représentation schématique de la formation des asques tétratypes.***

— *Troisième cas :* les deux couples d'allèles sont postréduits. Les schémas ci-dessus montrent qu'il en résulte finalement trois types d'asques : des DP, des DR et des T, ces derniers pouvant être produits de deux façons. Les fréquences relatives seront donc 1/4 de DP, 1/4 de DR, 1/2 de T.

Il est possible, en appelant x la fréquence de postréduction du couple d'allèles b/b^+ et $(1 - x)$ sa fréquence de préréduction, et en désignant par y la fréquence de postréduction du couple d'allèles r/r^+ et par $(1 - y)$ sa fréquence de préréduction, de donner une formulation mathématique du problème. On n'oubliera pas que les ségrégations des couples d'allèles sont des événements indépendants et qu'il est possible de traiter leurs fréquences comme des probabilités.

Dans le premier cas (préréduction de b/b^+ et de r/r^+), la fréquence est $(1 - x)\ (1 - y)$. Il se forme alors 1/2 de DP et 1/2 de DR. La fréquence du deuxième cas est $x\ (1 - y) + y\ (1 - x)$ (préréduction d'un des couples associée à la postréduction de l'autre et inversement) ; il se forme des tétratypes T. La fréquence du troisième cas (deux postréductions) est xy, et il se forme 1/2 de T, 1/4 de DP et 1/4 de DR.

Nous pouvons maintenant exprimer la fréquence des ditypes parentaux :

$$\text{fr. (DP)} = 1/2\ (1 - x)(1 - y) + 1/4\ xy\,;$$

la fréquence des ditypes recombinés est identique :

$$\text{fr. (DR)} = 1/2\ (1 - x)(1 - y) + 1/4\ xy,$$

et, enfin, la fréquence des tétratypes est :

$$\text{fr. (T)} = x(1 - y) + y\ (1 - x) + 1/2\ xy.$$

On vérifie facilement que la somme de ces trois fréquences est :

$$\text{fr. (DP)} + \text{fr. (DR)} + \text{fr. (T)} = 1.$$

Comme on connaît les valeurs numériques (fréquences observées) de fr. (DP) (0,40) et de fr. (T) (0,20), on peut tirer d'un tel croisement une expression de x en fonction de y telle que si :

$$x = 0,\ y = \text{fr. (T)} = 0{,}20$$

et si :

$$y = 0,\ x = \text{fr. (T)} = 0{,}20.$$

La liaison

Si l'on effectue de nombreux croisements entre souches différant par d'autres caractères, on s'aperçoit que, en ce qui concerne le nombre relatif de spores parentales et de spores recombinées, les résultats varient selon les couples de caractères qui sont en jeu, et peuvent se ranger en deux catégories : d'abord fr. (P) = fr. (R) (c'est la situation qui a été exposée précédemment ; elle permet de conclure à *l'indépendance* des deux gènes) ; on rencontre aussi, fréquemment, fr. (P) > fr. (R), (dans ce cas la fréquence de recombinaison $\frac{R}{P + R}$ est inférieure à 50 %). Tout se passe comme s'il existait une force contraignant les allèles à conserver préférentiellement les associations qu'ils avaient dans les souches parentales. On dit alors que les couples d'allèles sont *liés*, par opposition avec l'état d'indépendance, et on parle de *liaison* (en anglais *linkage*).

La liaison de deux caractères a été observée par les Anglais Bateson et Punett, dès 1906, c'est-à-dire très peu de temps après la redécouverte des lois de Mendel. Morgan, en 1910, pour expliquer ces résultats apparemment anormaux, a postulé que les paires d'allèles qui ne ségrègent pas indépendamment sont physiquement *liées* grâce à leur localisation *sur le même chromosome*. Il a imaginé aussi que des produits recombinés pouvaient cependant apparaître grâce au crossing-over.

Pour permettre une bonne compréhension du phénomène, nous allons décrire un exemple de croisement. Reprenons l'Ascomycète *Ascobolus immersus*. Chez cet organisme, il existe des souches mutantes à spores granuleuses [g]. Ce phénotype provient du fait que le pigment ne se dépose pas uniformément sur la paroi des spores, mais sous forme de granules, alors que dans la souche « sauvage » les spores sont brun uni [g⁺]. On effectue un croisement avec la souche à spores rondes précédemment utilisée : [g] × [r], et les résultats sont regroupés dans la figure ci-après à droite. On remarque que chaque couple de caractères montre une ségrégation 1:1. Dans tous les asques, on a quatre spores granuleuses [g] et quatre spores lisses [g⁺] d'une part, et quatre spores rondes [r] et quatre spores [r⁺] pour l'autre couple de caractères. On peut considérer que chaque

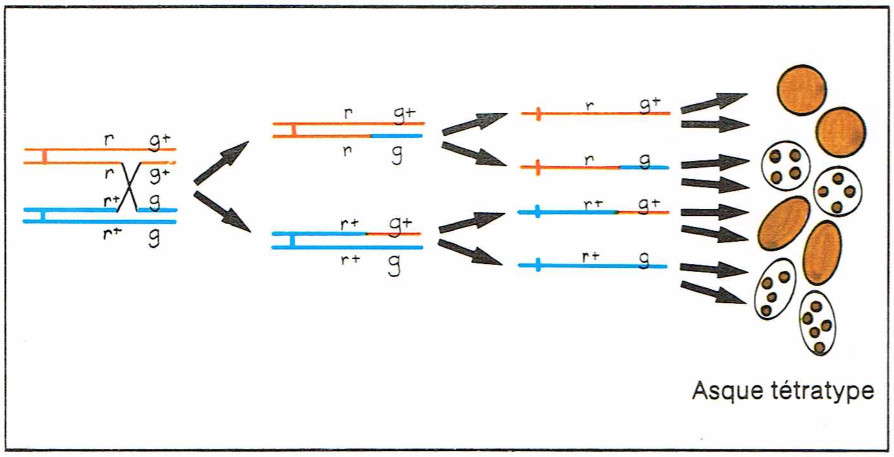

Richard Colin

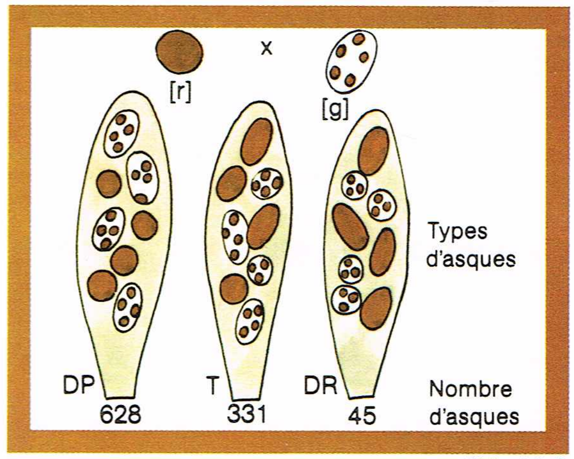

Richard Colin

▲ *A gauche, formation d'asques* **tétratypes** *lors d'un croisement entre* **gènes liés.** *A droite, croisement bifactoriel chez* **Ascobolus immersus :** *les gènes* **r** *et* **g** *sont liés (DP > DR).*

caractère dépend d'un couple d'allèles : g/g^+ et r/r^+. Le génotype du parent [g] est g, r^+; celui du parent [r] est g^+, r.

On voit aussi qu'on a quatre types de spores, deux types parentaux : spores granuleuses ovales et lisses rondes, et deux types recombinés : spores lisses ovales et granuleuses rondes. Si l'on calcule le pourcentage de produits recombinés $\left(\frac{R}{P + R} \times 100\right)$,

on obtient $\frac{331 \times 4 + 45 \times 8}{1\,004 \times 8} \times 100 \simeq 21$ %.

Comme on peut le constater, ce résultat est loin des 50 % qu'on observe dans le cas de l'indépendance. Reprenons à notre compte l'hypothèse de Morgan et plaçons les deux gènes concernés sur le même chromosome. Dans ce cadre, comment expliquer les trois types d'asques DP, T et DR? Les parents du croisement ont comme génotype : g, r^+ et g^+, r.

Dans un asque DP, on trouve quatre spores g, r^+ et quatre spores g^+, r : les associations parentales sont intégralement conservées, et il n'est pas nécessaire de faire intervenir des remaniements chromosomiques pour expliquer ces asques; ceux-ci sont les plus nombreux, puisque la liaison est définie par la tendance des associations génotypiques parentales à se conserver.

▼ *Types d'asques obtenus après* **deux crossing-over** *se produisant* **entre gènes liés :** *on obtient : 1/4 DP; 1/4 DR; 1/2 T.*

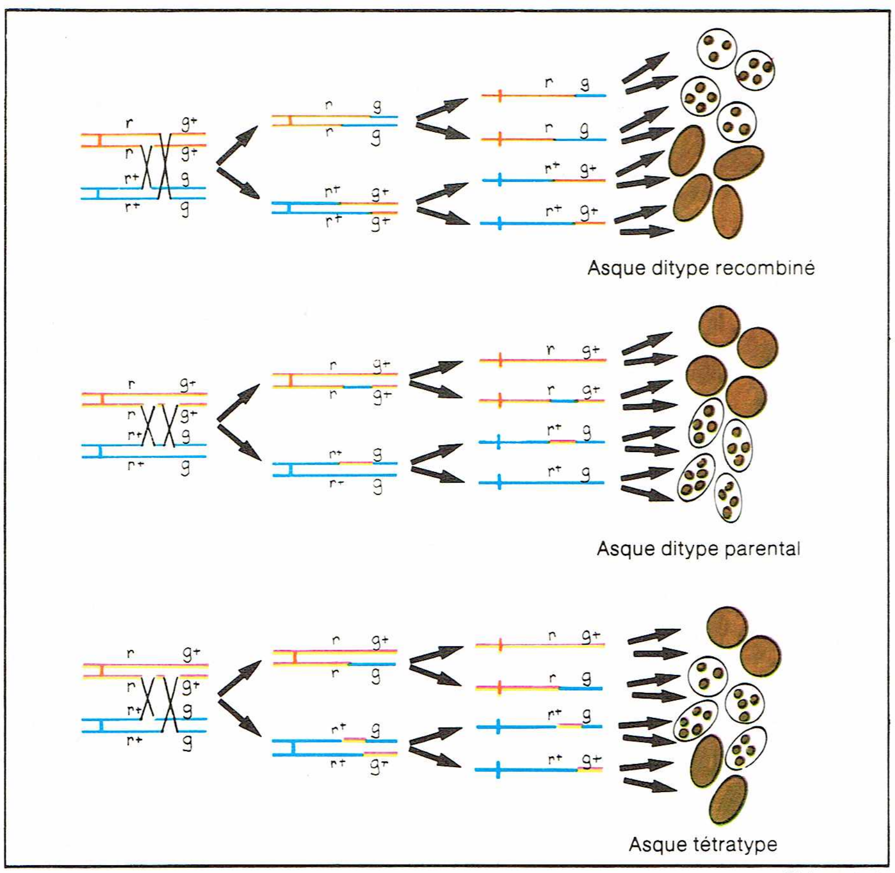

Richard Colin

Dans un asque tétratype T, il y a deux produits parentaux et deux produits recombinés. Pour expliquer la formation de ces derniers, il faut imaginer un remaniement chromatidique entre les *loci* des deux couples d'allèles. Ainsi, la façon la plus simple d'expliquer l'apparition de produits recombinés est d'imaginer qu'il se produit un crossing-over entre une chromatide d'un chromosome et une chromatide de son homologue. Remarquons aussi qu'un crossing-over qui se produirait en dehors du segment chromosomique compris entre le locus des allèles r et r^+ et le locus des allèles g et g^+ ne conduirait en aucune façon à l'apparition de produits recombinés.

Dans un asque ditype recombiné DR, tous les produits sont recombinés : cela signifie que les *quatre chromatides* présentes en prophase de division I ont subi un remaniement. Cela suppose au moins deux crossing-over. Il faut, de plus, que le deuxième crossing-over touche les deux chromatides laissées intactes par le premier, ainsi que le montre la figure ci-contre. Dans ce même schéma, on peut voir que si les deux crossing-over n'intéressent que trois chromatides (une chromatide reste intacte), l'asque produit est un tétratype ; si les deux crossing-over intéressent deux chromatides seulement (deux chromatides demeurent intactes), l'asque résultant est un ditype parental DP. Si les deux crossing-over sont des événements indépendants, ils produiront 1/2 de T, 1/4 de DP et 1/4 de DR. D'autre part, si x est la probabilité de l'événement « un crossing-over entre les *loci* R et G », la fréquence des doubles crossing-over sera x^2.

Nous sommes à présent en possession de tous les éléments qui vont nous permettre de calculer la distance entre les loci R et G.

Le nombre total de chromatides (4 à l'origine de chaque asque) est de $4 \times 1\,004 = 4\,016$. Le nombre de remaniements chromatidiques est de 4 à l'origine de chaque asque DR, soit $45 \times 4 = 180$. Cependant, les asques DR ne représentent que 1/4 des cas de doubles crossing-over. On peut estimer au même nombre (45) les asques DP, au double (90) les asques T qui proviennent du même événement. Le nombre estimé de remaniements dus à deux crossing-over est donc de $180 \times 4 = 720$. Il reste $331 - 90 = 241$ asques T qui proviennent d'un unique crossing-over, et ceux-ci représentent $241 \times 2 = 482$ remaniements chromatidiques.

Le nombre total estimé de ces remaniements est donc : $482 + 720 = 1\,202$. Par conséquent, la distance est $\frac{1\,202}{4\,016} \times 100 = 29{,}7$ centimorgans. Notons que si l'on avait négligé d'effectuer une correction en tenant compte du nombre estimé de doubles crossing-over, on aurait gravement sous-estimé la distance. Le calcul aurait alors donné, pour les remaniements :

$$(331 \times 2) + (45 \times 4) = 842,$$

et la distance aurait été de :

$$\frac{842}{4\,016} \times 100 = 20{,}9 \text{ unités.}$$

La sous-estimation aurait été de 9 centimorgans, ce qui aurait représenté presque 30 % d'erreur !

Les groupes de liaison

La constance de la fréquence de postréduction pour chaque couple d'allèles et la constance de la fréquence de recombinaison entre deux gènes liés montrent que chaque gène occupe, sur le chromosome, une place fixe, son locus. Ce fait permet, comme chez les Bactéries, d'ordonner les gènes les uns par rapport aux autres et de dresser des *cartes génétiques*. Nous avons vu aussi qu'il peut se produire des crossing-over entre points homologues d'une paire de chromosomes. Le crossing-over a une probabilité déterminée de se produire entre le centromère et un locus donné du chromosome, ou entre les loci de deux gènes portés par le même chromosome. En d'autres termes, à chaque segment de chromosome correspond une certaine fréquence de crossing-over. Cela permet de déduire une *fréquence de recombinaison qui mesure les distances sur la carte génétique*.

On définit un *groupe de liaison* comme un ensemble de gènes qui apparaissent liés entre eux et indépendants de tous les autres gènes. Le support matériel d'un groupe de liaison est un chromosome. Chez les organismes qui sont très étudiés et chez lesquels on connaît beaucoup de gènes, le nombre de groupes de liaison qu'on peut mettre en évidence est égal au nombre de chromosomes caractéristiques de l'espèce. Chez l'Ascomycète *Neurospora crassa*, par exemple, on constate l'existence de sept groupes de liaison, et l'examen cytologique permet de voir, à la méiose, sept paires de chromosomes.

Comment établit-on une carte génétique ? Nous avons vu qu'il est facile de calculer la distance d'un locus à son centromère chez un organisme où les asques sont ordonnés. Mais nous savons maintenant que l'on n'a pas tenu compte de crossing-over multiples (doubles, triples, ou plus encore). C'est pourquoi les distances ainsi calculées sont erronées : elles sont d'autant plus sous-estimées que la distance est grande. Cela signifie que seules les très petites distances (telles que des crossing-over multiples ont une probabilité négligeable de se produire) sont mesurées exactement. D'autre part, ce critère ne permet pas d'ordonner l'un par rapport à l'autre deux loci très proches, qui auront des pourcentages de postréduction très voisins, compte tenu du caractère aléatoire de l'événement de recombinaison, ainsi que des fluctuations statistiques de la fréquence observée.

Supposons que dans un croisement deux gènes A et B sont liés et que la distance entre A et B est de 5 unités de recombinaison : A←5→B ; un deuxième croisement montre que le gène A et un troisième gène C sont liés, et distants de 7 unités : A←7→C. Il y a deux possibilités pour arranger les gènes linéairement :

(1) ←···· 12 ····→ C←7→A←5→B et (2) ←—— 7 ——→ A←5→B C ←··2··→

si un croisement impliquant à la fois les gènes C et B donne une distance de 12 unités, c'est l'ordre (1) qui est le bon, mais si le croisement donne une distance de 2 unités, c'est l'ordre (2) qui est exact. Cette méthode simple permet d'ordonner linéairement les gènes le long des cartes génétiques. Elle permet, en outre, de voir que *les distances sont additives*. Mais cela n'est vrai que si les gènes sont relativement proches les uns des autres, ce qui élimine les effets de la sous-estimation mentionnée plus haut. En effet, plus une distance est grande, plus sa mesure par cette méthode est inférieure à la réalité, et la somme observée de deux distances tend à devenir nettement inférieure à la somme calculée. D'autre part, si deux des gènes sont très proches, cette méthode ne permettra pas de les ordonner.

De tout ce qui vient d'être dit il ressort que les croisements monofactoriels (où un seul couple d'allèles est en ségrégation) et bifactoriels (impliquant deux couples d'allèles) sont insuffisants pour établir sans ambiguïté l'ordre des gènes le long du chromosome.

Le test à trois points

La méthode qui permet d'établir les ordres respectifs des loci est un croisement à trois facteurs (trois couples d'allèles), ou *test à trois points*. Nous allons prendre un exemple abstrait pour le raisonnement. Il est possible, en effet, de considérer les couples d'allèles non comme responsables d'une indispensable fonction cellulaire, mais seulement comme des *marqueurs génétiques*, c'est-à-dire comme des points sur les cartes génétiques.

▼ **Chromosomes géants** ***observés dans des cellules de glandes salivaires de larve de chironome (Diptère). Ce type de matériel est fréquemment utilisé en laboratoire car il permet d'établir facilement des concordances entre les cartes génétiques et les chromosomes.***

Nuridsany - Reichert

Soit trois gènes liés A, B, C, qui peuvent se présenter chacun sous deux formes alléliques *a* et a^+, *b* et b^+ et *c* et c^+. Un croisement à trois facteurs sera un croisement du type *a, b, c* × a^+, b^+, c^+, ou encore $a, b^+, c \times a^+, b, c^+$, ou toute autre combinaison génotypique. Il suffit que la cellule diploïde qui subit la méiose soit hétérozygote pour les trois couples d'allèles. Dans la descendance de tels croisements, il existe huit génotypes possibles, dont six sont des associations recombinées. Si le croisement est *a, b, c,* × a^+, b^+, c^+, on pourra trouver, outre les deux associations parentales, les génotypes recombinés suivants : a, b, c^+ ; a^+, b^+, c ; a, b^+, c ; a^+, b, c^+ ; a^+, b, c, et a, b^+, c^+. Le principe du test est le suivant : l'association recombinée qui sera présente avec la plus faible fréquence est celle qui nécessite au moins deux crossing-over pour se réaliser. C'est-à-dire que *l'allèle différant de l'association parentale est celui du gène qui est entre les deux autres.*

Il existe trois ordres possibles : A au milieu de B et C, B au milieu de A et C, et C au milieu de A et B. Si l'ordre est A-B-C, aucun crossing-over n'est nécessaire pour obtenir les associations parentales, et celles-ci seront majoritaires puisque les gènes sont liés. Pour obtenir les recombinés, a, b^+, c^+ et a^+, b, c, il suffit d'un crossing-over dans la région II (entre B et C). Mais pour obtenir les recombinés a, b^+, c et a^+, b, c^+, il faut au moins deux crossing-over, l'un dans la région I et l'autre dans la région II. C'est évidemment ces dernières associations qui seront les moins fréquentes. Si l'ordre des gènes est A-C-B, ce sont les recombinés a, b, c^+ et a^+, b^+, c qui seront les moins fréquents, et si l'ordre est C-A-B, les recombinés minoritaires seront a, b^+, c^+ et a^+, b, c. On voit qu'au cours d'un test à trois points entre gènes liés il suffit de noter quelles associations recombinées sont les moins fréquentes pour en déduire avec certitude l'ordre des marqueurs génétiques utilisés. Cette méthode est très sûre et parfaitement universelle : on peut l'utiliser aussi bien chez les virus, les Bactéries, les plantes et les animaux supérieurs.

Des gènes indépendants sur le même chromosome

Il peut arriver que des gènes soient disposés de telle façon sur un chromosome que la distance qui les sépare soit de 50 unités de recombinaison. Cela signifie qu'au cours d'un croisement il va apparaître autant de produits recombinés que de produits parentaux. Si c'est la seule information dont on dispose, on conclura à leur indépendance, et on sera alors tenté de les placer sur des chromosomes différents. Cette situation se produit fréquemment. Heureusement, la plupart du temps, on dispose d'autres marqueurs génétiques, qui permettent de localiser des gènes génétiquement indépendants sur le même support matériel (chromosome) si ces deux gènes sont liés tous les deux à un troisième gène :

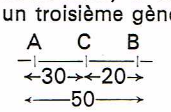

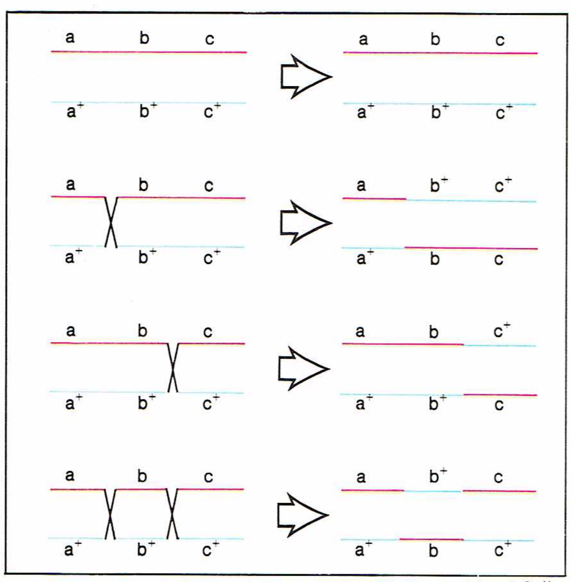

Richard Colin

▶ ***Représentation schématique du test à trois points :** on n'a représenté ici que deux chromatides sur les quatre : celles qui subissent le crossing-over.*

On voit qu'il est possible qu'une distance génétique soit supérieure à 50 unités de recombinaison. Par exemple, si la distance A-B est de 35 unités, la distance B-C de 30 unités, et si l'on est certain que B est entre A et C, la distance calculée doit être de 65 unités de recombinaison. Or, si l'on effectue un croisement impliquant les gènes A et C, on observe un pourcentage de recombinés

$$\frac{R}{P + R} \times 100 = 50\ \%.$$

Pour comprendre ce fait apparemment paradoxal, il faut se souvenir de l'existence de crossing-over multiples, d'autant plus nombreux que les distances sont grandes ; les distances génétiques sont d'autant plus sous-estimées qu'elles sont plus grandes. Cela fait qu'il existe une limite au pourcentage de recombinaisons *observées* ; cette limite est de 50 %. On peut l'expliquer d'une façon plus imagée qu'une formule mathématique : lorsque la distance est très grande, il se produit beaucoup de crossing over qui se distribuent au hasard, de telle sorte que les extrémités du très long segment chromosomique considéré ségrègent indépendamment l'une de l'autre. Si l'une des bornes du segment est marquée par un couple d'allèles a/a^+, et l'autre par b/b^+, on peut dire que l'allèle *a* aura autant de chances d'être associé à *b* qu'à b^+ dans les produits de méiose. Cela correspond bien à 50 % de produits recombinés et 50 % de produits parentaux.

Il est naturellement possible d'effectuer des corrections pour calculer, à partir du pourcentage observé, une distance estimée qui représentera mieux la distance réelle. Et cela, d'autant mieux qu'il sera possible d'effectuer des croisements impliquant des allèles de loci situés entre les deux loci extrêmes. Ce type de calculs a permis d'estimer la longueur totale de groupes de liaison.

Par exemple, la longueur du premier groupe de liaison de *Neurospora crassa* est environ de 150 unités. On ne peut pas cependant se servir de distances calculées en unités de recombinaison pour effectuer des comparaisons entre organismes différents, car cela supposerait que la probabilité d'un crossing-over soit exactement la même chez toutes les espèces. Or, on possède un certain nombre d'arguments qui démontrent le contraire, et qui semblent même indiquer que cette probabilité varie à l'intérieur d'une espèce donnée, d'un sexe à l'autre, d'un chromosome à l'autre, voire entre deux segments du même chromosome. Ces phénomènes seront envisagés dans le chapitre qui traitera de la *régulation* de la méiose et du crossing-over.

L'interférence

Lorsque nous avons étudié le mode de calcul des distances génétiques, nous avons introduit des corrections destinées à compenser la sous-estimation des distances due à la présence de crossing-over multiples. Nous avons alors admis que la probabilité d'un double crossing-over était le carré de la probabilité d'un simple crossing-over. L'idée qui est à la base de ce calcul est que les crossing-over sont des événements indépendants les uns des autres.

Il est possible d'effectuer des expériences destinées à vérifier ou infirmer cette hypothèse. Le principe en est d'avoir, le long d'un segment chromosomique sur lequel on va observer la fréquence des crossing-over, le plus grand nombre de marqueurs génétiques le plus rapprochés possible. De cette façon, on « découpe » le chromosome en segments suffisamment petits pour que la fréquence des doubles crossing-over y soit négligeable, alors qu'elle est grande entre les marqueurs extrêmes du segment envisagé. Ces expériences ont pu être effectuées sur de nombreux organismes. Elles ont en général montré que le nombre observé de crossing-over était significativement différent de celui qu'on attendrait s'ils se produisaient indépendamment les uns des autres. On dit que les crossing-over *interfèrent* entre eux, ou qu'il y a *interférence chromosomique* (en anglais *chiasma interference*). L'interférence est définie par le fait que l'existence d'un crossing-over affecte la probabilité d'existence d'autres crossing-over. En l'absence d'interférence, la probabilité qu'il se produise *n* échanges dans un intervalle donné est fournie par un des termes de la distribution de Poisson (du nom du mathématicien français qui établit cette loi de probabilité) $\frac{m^n}{n!} \cdot e^{-m}$, où *m* est le nombre moyen d'échanges dans cet intervalle. Le tableau ci-après

Nombre de crossing-over	0	1	2	3	⩾ 4
Pourcentage observé	8	44	40	7	1
Pourcentage calculé	23	34	24	12	7

Richard Colin

◀ *Tableau montrant que les pourcentages calculés d'après la loi de Poisson et ceux qui sont observés ne concordent pas : il y a* **interférence.**

montre les différences qui existent entre les crossing-over observés et ceux prévus par le calcul de probabilité, au cours d'un croisement impliquant six marqueurs du premier groupe de liaison chez *Neurospora crassa*.

On voit clairement que la formation d'un crossing-over diminue la probabilité d'en trouver un autre. Cela favorise la présence de crossing-over simples (en augmentation par rapport à la loi théorique) aux dépens des crossing-over multiples (en diminution) : il y a donc interférence. Cette interférence est mesurée par un *coefficient de coïncidence,* qui exprime le rapport entre la fréquence observée de crossing-over simultanés et la fréquence prévue par le calcul dans l'hypothèse où l'interférence serait nulle.

Les explications proposées habituellement sur l'interférence sont de deux ordres. On peut tout d'abord dire que le crossing-over est un événement qui a une dimension, et qu'il provoque des déformations des chromatides appariées en prophase de division I, empêchant ainsi qu'un deuxième échange puisse se produire dans le voisinage du premier, simplement du fait de la configuration de l'appariement entre les chromatides, qui est un des éléments indispensables aux échanges. Le deuxième type d'arguments est d'ordre physiologique. Il faut supposer que le crossing-over, événement compliqué, requiert la présence d'un certain nombre de systèmes enzymatiques pour s'accomplir. La quantité relativement faible de ces enzymes et le fait qu'elles agissent seulement pendant un temps limité (fin du stade zygotène et début du stade pachytène) seraient peut-être responsables du petit nombre d'événements multiples qui se produisent.

De plus, il faut noter que, si l'interférence chromosomique est un phénomène fréquent, il existe de nombreuses exceptions. Il faut aussi souligner que les valeurs du coefficient de coïncidence sont très variables d'un organisme à l'autre, d'un chromosome à l'autre au sein d'une même espèce, et même d'une région à l'autre d'un chromosome.

Les anomalies de liaison

Il se produit de temps à autre des accidents soit au cours de la méiose, soit pendant la multiplication végétative, qui conduisent à des échanges de segments chromosomiques entre chromosomes non homologues, ou à l'intérieur d'un même chromosome. Il s'ensuit que dans les souches résultantes de tels événements on constate un *réarrangement de l'ordre des marqueurs génétiques*. Ces réarrangements sont principalement de deux types : les *inversions* et les *translocations*.

Les inversions sont des arrangements *intrachromosomiques*. Il n'y a pas de perte de matériel héréditaire, mais un segment chromosomique (porteur de marqueurs C, D et E) est inversé dans une souche par rapport à l'autre. La souche portant l'inversion est parfaitement viable, et rien ne la distingue de la souche d'origine jusqu'au moment où l'on effectue un croisement entre ces deux souches. S'il se produit un crossing-over dans la « boucle d'inversion » qui se forme pour permettre un appariement entre régions homologues, il aboutit à des chromatides non viables : l'une porte deux centromères et l'autre n'en a aucun. Les produits de méiose correspondants seront aussi non viables. Un croisement hétérozygote pour une inversion conduira à une forte létalité au niveau des produits de la méiose. Cette létalité sera d'autant plus fréquente que le nombre de crossing-over sera grand, c'est-à-dire qu'elle augmentera avec la taille de l'inversion.

Les translocations sont des réarrangements *interchromosomiques*. La translocation est *simple* quand un segment chromosomique est transféré d'un chromosome à un autre qui n'est pas son homologue. Là non plus, il n'y a pas de perte de matériel héréditaire et la souche est viable. La translocation est dite *réciproque* quand il y a eu *échange* de segments chromosomiques entre chromosomes non homologues. Les souches portant des translocations réciproques sont aussi viables. De même que pour les inversions, à la suite de croisements hétérozygotes entre les souches transloquées et les souches d'origine, il apparaît une létalité des produits de la méiose.

Accidents chromosomiques et spéciation

Les inversions et les translocations forment ce qu'on appelle des *accidents chromosomiques*. Ceux-ci sont héréditaires, mais ne constituent cependant pas des mutations à proprement parler. Dans une souche portant un accident chromosomique, il n'y a pas de différence génotypique par rapport à la souche d'origine : les gènes sont tous présents ; ils ont simplement changé de place. Les groupes de liaison sont modifés d'une souche à l'autre : des gènes sont devenus indépendants et d'autres, indépendants auparavant, sont liés. De plus, ces souches montrent une notable diminution de production de spores quand on les croise avec les souches d'origine, à cause

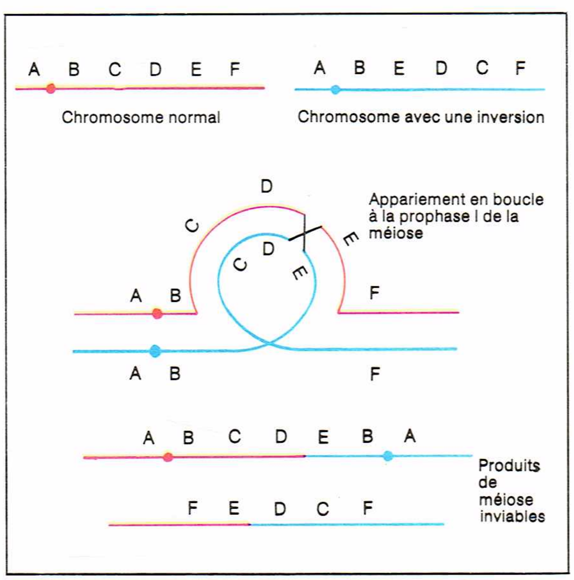

Richard Colin

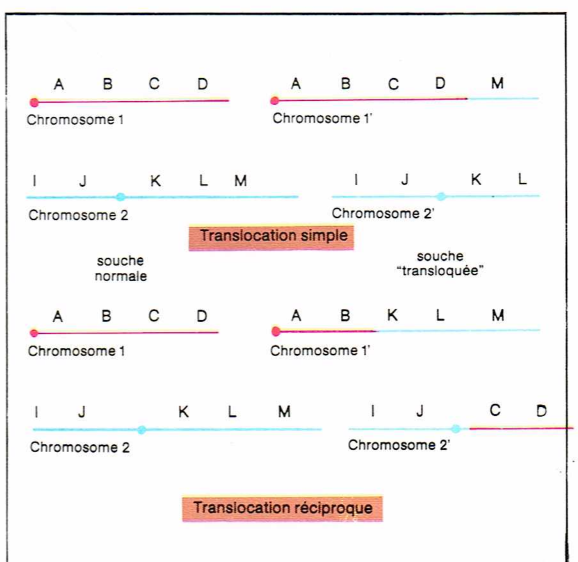

Richard Colin

◀ *A gauche,* **appariements en boucle,** *lors d'un croisement entre une* **souche normale** *(chromosome rouge) et une* **souche portant** *une* **inversion** *(chromosome bleu). A droite, représentation schématique d'un accident chromosomique :* **la translocation ;** *celle-ci peut être* **simple** *ou* **réciproque.**

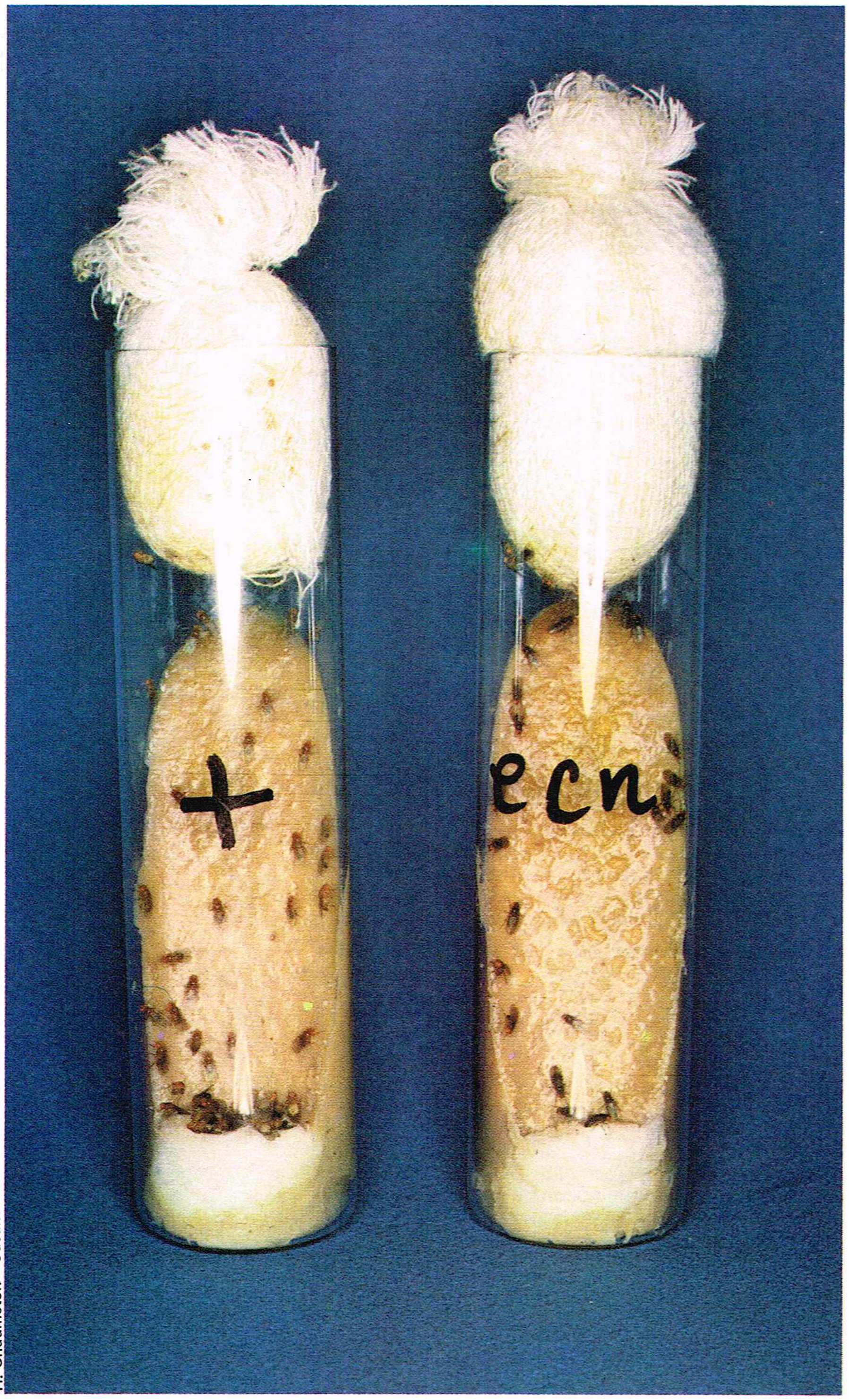

H. Chaumeton - Jacana

▲ ***L'élevage de* Drosophila melanogaster *en laboratoire s'effectue dans des petites bouteilles de verre, dans lesquelles on dispose un milieu simple à préparer.***

d'une mortalité de produits de la méiose. Cela conduit à l'*isolement sexuel* de souches. Plus les souches vont accumuler des accidents chromosomiques, plus les croisements entre elles vont être difficiles, car les descendants seront presque tous non viables. Or, le phénomène de l'isolement sexuel est un des facteurs importants des mécanismes de la spéciation et de l'évolution. Cet isolement peut être géographique (îles, vallées très encaissées, etc.) ou dû à des réactions d'incompatibilité entre souches, ou encore, comme nous venons de le voir, provoqué par les accidents chromosomiques.

La génétique de la drosophile

Avec la génétique des plantes supérieures et des animaux, est posé le problème de l'hérédité dans les espèces où la phase du cycle qui se prête à l'observation est *diploïde*. Nous avons déjà noté que la relation entre le phénotype et le génotype était moins évidente que chez les espèces à prédominance de la phase haploïde. Historiquement, c'est cependant chez ces organismes-là que le problème a été tout d'abord résolu, au moins dans ses grandes lignes. Grâce aux travaux des botanistes, c'est le monde végétal qui a livré aux savants les premiers secrets de l'hérédité. Cependant, ce type d'organisme est loin d'être l'organisme idéal pour l'étude en laboratoire. Celle-ci est définie par F. Jacob de la façon suivante : « L'expérimentation demande un matériel aux vertus exceptionnelles. Elle réclame un organisme suffisamment peu exigeant pour qu'on l'élève sans difficulté au laboratoire, suffisamment petit pour qu'on en manipule des populations importantes dans un espace réduit, suffisamment rapide à la reproduction pour qu'on en observe les générations successives dans un délai restreint. Les caractères doivent être aisés à observer, les amours fréquentes et la fertilité élevée. Ses cellules doivent se prêter à l'examen microscopique et le nombre de ses chromosomes être suffisamment peu élevé pour qu'on en repère les particularités. Cet oiseau rare existe : c'est la mouche. »

Cette mouche, comme on l'a vu dans les chapitres précédents, est un Diptère : *Drosophila melanogaster*, ou mouche du vinaigre (*fruit-fly* en anglais). On l'élève en laboratoire dans de petites bouteilles de verre, dans lesquelles on dispose un milieu simple à préparer. La drosophile ne mesure que quelques millimètres, se reproduit en une quinzaine de jours et une femelle pond plus de 100 œufs. Les caractères portant sur la couleur des yeux, la forme des ailes, le nombre et la forme des soies thoraciques sont très aisés à observer. Le nombre de chromosomes est de 8 dans les cellules diploïdes (n = 4). En outre, dans les glandes salivaires des larves, existent des chromosomes géants (chromosomes polytènes) qui peuvent permettre d'établir facilement des concordances entre les cartes génétiques et les chromosomes. Enfin, on peut distinguer les drosophiles mâles et femelles à l'œil nu. La drosophile est étudiée intensivement d'un point de vue génétique depuis plus d'un demi-siècle (Morgan) et continue à l'être.

Les chromosomes de la drosophile

Chez tous les animaux supérieurs, la garniture chromosomique présente une différence selon le sexe. Les mâles et les femelles diploïdes de la drosophile ont le même nombre de chromosomes (2 n = 8), mais l'un d'entre eux a une forme différente selon le sexe. La forme spéciale, que l'on ne rencontre que chez le mâle, est appelée chromosome Y, le chromosome homologue étant appelé X. La femelle possède deux paires de chromosomes en forme de V, une paire de chromosomes en forme de point, et une paire de chromosomes en bâtonnet. Les trois premières paires ont leurs homologues chez le mâle. Cependant, chez ce dernier, la dernière paire de chromosomes est remplacée par une paire hétérogène : un bâtonnet et un chromosome en crochet. Les chromosomes des paires représentées de façon identique chez les mâles et les femelles sont appelés *autosomes*, et les chromosomes des paires qui ne sont pas semblables dans les deux sexes sont appelés *hétérochromosomes*, ou *chromosomes sexuels*. Chez la drosophile, mâles et femelles possèdent 6 autosomes et 2 chromosomes sexuels. Chez la femelle, les deux chromosomes en bâtonnet sont appelés chromosomes X; chez le mâle, le chromosome en bâtonnet est appelé X et le chromosome en crochet est appelé Y. Les formules chromosomiques peuvent être écrites simplement :

$$♂ : 2 \times (3\ A) + XY, \text{ et } ♀ : 2 \times (3\ A) + XX.$$

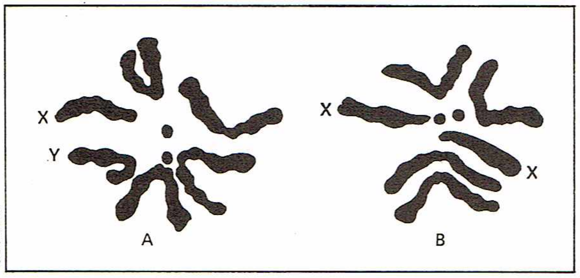

I.G.D.A.

▶ ***Représentation schématique de la* garniture chromosomique *de la drosophile : A, chez le mâle ; B, chez la femelle.***

P. Starosta

▲ *Chromosome géant, ou* chromosome polytène, *localisé dans la glande salivaire de* Drosophila pseudoobscura.

Lignées pures

Chaque mouche reçoit un chromosome paternel et un chromosome maternel pour chacune des paires. Si les parents portent des allèles différents pour un gène donné, tous les descendants seront hétérozygotes. On conçoit aisément que des drosophiles d'une population naturelle soient fortement hétérozygotes (c'est-à-dire hétérozygotes pour un grand nombre de loci). Si l'on veut effectuer des croisements dont les résultats soient reproductibles, il faut pouvoir disposer de souches qui gardent d'une génération à l'autre le même génotype, ce qui n'est pas le cas de mouches hétérozygotes. Il faut donc des souches qui soient homozygotes pour les gènes qui nous intéressent. De telles souches sont appelées *lignées pures*. Les souches « sauvages » que l'on utilise sont des lignées pures qui portent des allèles « sauvages » et les souches mutantes sont des lignées pures qui sont homozygotes pour les allèles mutants.

Ségrégation d'un couple d'allèles

Effectuons un croisement entre une souche à yeux bruns, constituant le phénotype *brown* [bw] et une souche « sauvage » [bw$^+$], dont les individus ont les yeux rouges, en prenant soin de choisir des mouches de lignées pures, c'est-à-dire homozygotes pour les gènes concernés. On sait que les caractères alternatifs [bw] et [bw$^+$] dépendent d'un couple d'allèles *bw* et *bw*$^+$ situés sur le chromosome II. Le croisement s'écrit :

$$♀ \frac{\text{bw}}{\text{bw}} \times ♂ \frac{\text{bw}^+}{\text{bw}^+}.$$

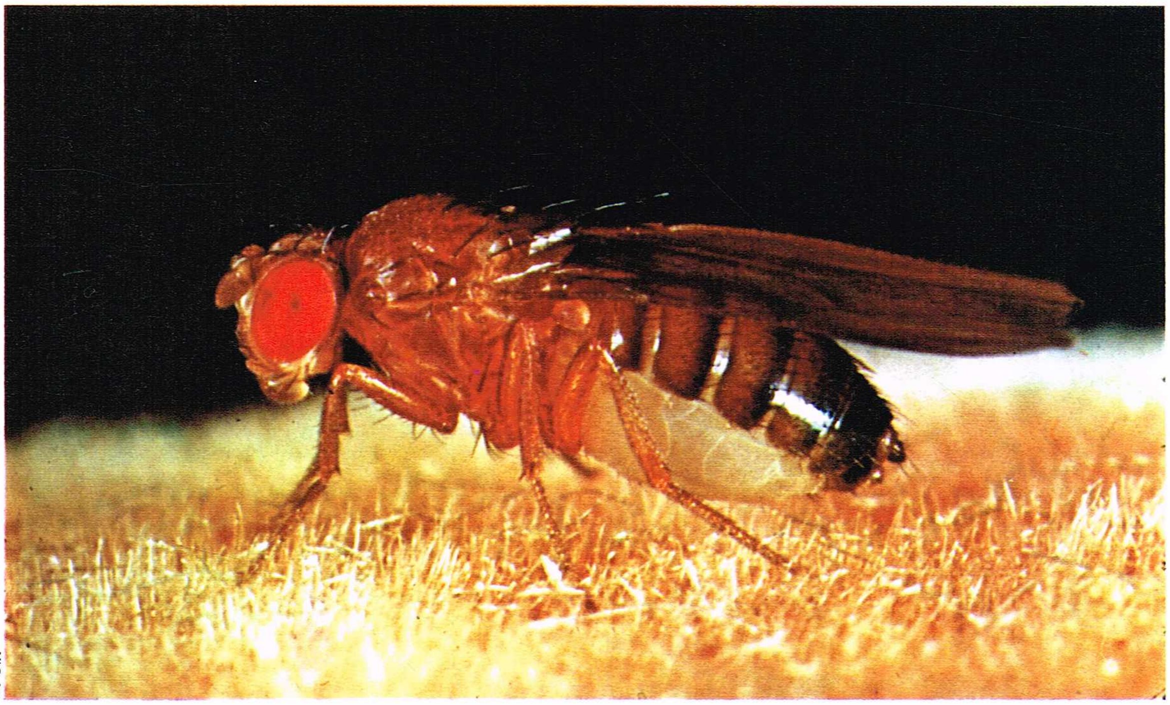

J. Six

◀ *Femelle de drosophile ; il s'agit ici d'une souche « sauvage » à yeux rouges.*

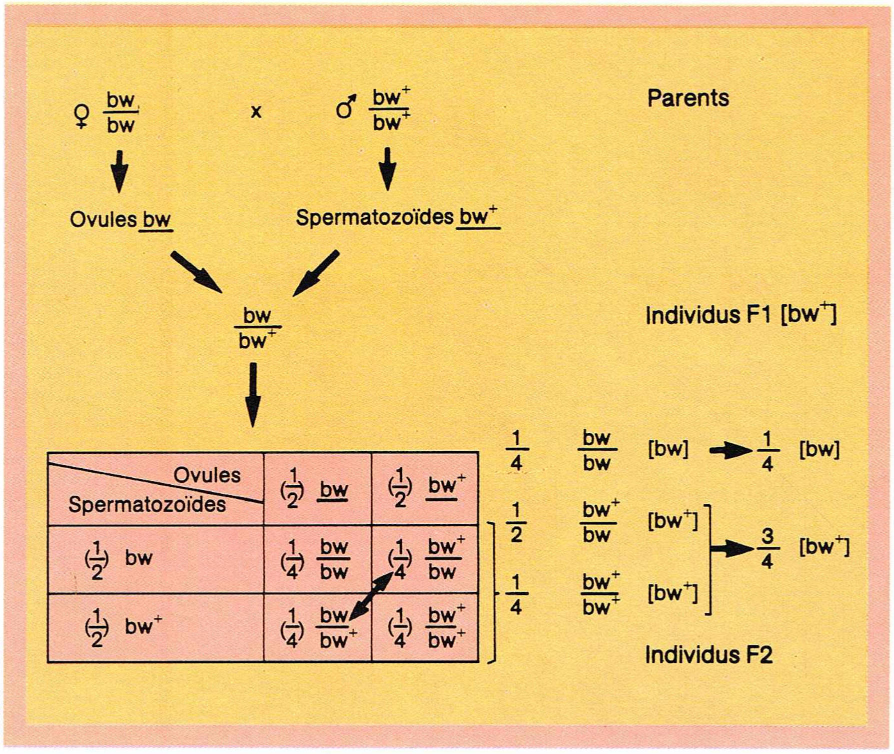

Richard Colin

▲ ***Croisement entre une mouche femelle à yeux bruns [bw] et une mouche mâle sauvage à yeux rouges [bw+].***

▼ ***Le test-cross : il révèle la fréquence des gamètes produits par un individu hétérozygote que l'on croise avec une souche homozygote pour l'allèle récessif que l'on veut tester.***

Les parents vont produire des gamètes haploïdes. La femelle produit des ovules *bw* et le mâle des spermatozoïdes *bw+*. Les individus de la première génération (les parents, quant à eux, représentent, conventionnellement, la génération zéro) vont résulter de la fécondation entre un ovule et un spermatozoïde; leur génotype sera donc nécessairement $\frac{bw}{bw^+}$. *Ils sont tous identiques.* L'observation montre bien que les individus F1 (de première génération) ont tous le même phénotype à yeux rouges [bw+]. Cela signifie que l'allèle mutant *bw* ne s'exprime pas et que c'est l'allèle « sauvage » *bw+* qui impose le phénotype. On dit que *bw+* est *dominant* sur *bw*. On peut obtenir une génération F2 (deuxième génération) en laissant les individus F1 se croiser entre eux au hasard ; on écrit F2 (F1 × F1). Les individus F1 vont donner deux sortes de gamètes, aussi bien les mâles que les femelles. Les cellules mères des ovules, chez les femelles, et les cellules mères des spermatozoïdes, chez les mâles, sont hétérozygotes $\frac{bw}{bw^+}$. Elles subissent la méiose,

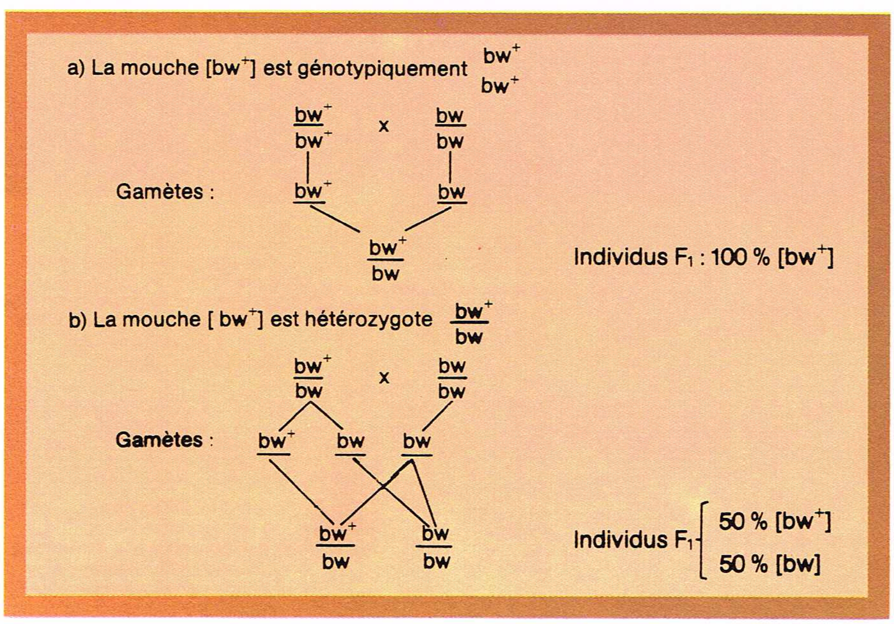

Richard Colin

et les allèles vont ségréger dans les produits de la méiose, lesquels, après maturation, deviennent les gamètes. Nous avons vu que la ségrégation d'un couple d'allèles dans les produits de méiose était une ségrégation 1:1 (on va avoir 50 % de gamètes *bw* et 50 % de gamètes *bw+*, ovules et spermatozoïdes confondus). Les associations entre gamètes mâles et femelles se font au hasard : un ovule *bw* a autant de chances d'être fécondé par un spermatozoïde *bw* que par un *bw+*. De même, un ovule *bw+* sera fécondé soit par un spermatozoïde *bw*, soit par un *bw+*, avec une égale probabilité. Ces différentes combinaisons de gamètes donnent finalement trois génotypes possibles pour les individus F2 : $\frac{bw^+}{bw^+}$, $\frac{bw}{bw^+}$ et $\frac{bw}{bw}$, avec les probabilités respectives de $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ et $\frac{1}{4}$. Les phénotypes sont au nombre de deux : soit [bw], soit [bw+] dont les proportions sont, respectivement, 3/4:1/4 (ou encore 3:1).

On voit que la ségrégation mendélienne 3/4:1/4, au niveau des phénotypes, recouvre strictement la même réalité que la ségrégation 1:1 au niveau des produits haploïdes de la méiose que nous avons constatée chez les Ascomycètes.

Le test-cross

Il ressort de cette étude que les individus F2 de phénotype [bw+] ne forment pas une classe homogène, mais sont constitués pour les deux tiers d'hétérozygotes $\frac{bw^+}{bw}$ et d'un tiers d'homozygotes $\frac{bw^+}{bw^+}$. Pour s'en assurer, il faut effectuer un croisement supplémentaire qu'on appelle un *test-cross* (croisement-test). On croise les individus [bw+] (dont on ne connaît pas le génotype) par une souche homozygote pour l'allèle récessif dont on veut tester la présence. Ici, cette souche est le parent [bw], qui est bien homozygote $\frac{bw}{bw}$. La figure ci-dessous, à gauche, résume les résultats si la souche testée est homozygote $\frac{bw^+}{bw^+}$ ou hétérozygote. Il est intéressant de noter que la fréquence des phénotypes dans la F1 de ce type de croisement représente la fréquence des gamètes produits par l'individu testé. L'homozygote produit 100 % de gamètes *bw+* et la F1 comporte 100 % de mouches [bw+]. L'hétérozygote produit 50 % de gamètes *bw+* et 50 % de gamètes *bw* (ségrégation 1:1) et la F1 est constituée de 50 % de mouches [bw+] et de 50 % de mouches [bw].

Le test-cross est, on le voit, une technique extrêmement précieuse, car elle permet de connaître sans aucune ambiguïté le génotype d'un individu.

L'indépendance

Nous avons établi qu'une ségrégation 1:1 au niveau des produits de la méiose se traduisait par une ségrégation 3:1 pour les individus diploïdes en F2. Comment va se traduire une proportion de 50 % de produits parentaux et de 50 % de produits recombinés dont on a vu qu'elle caractérisait la ségrégation de deux couples d'allèles indépendants chez les Ascomycètes ?

Gardons le couple d'allèles que nous avons utilisé précédemment : *bw/bw+*. Il existe un autre couple d'allèles *e/e+*, qui contrôle la couleur du corps. Les individus [e+] ont un corps jaune avec des anneaux plus foncés. Les individus [e] ont le phénotype *ebony* (corps entièrement sombre). Nous allons effectuer un croisement entre une lignée pure *ebony* et une lignée pure *brown* soit $\frac{e\ bw^+}{e\ bw^+} \times \frac{e^+\ bw}{e^+\ bw}$. La F1 est homogène et toutes les mouches ont un phénotype « sauvage » [e+ bw+]. Comme elles sont hétérozygotes $\frac{e}{e^+}\frac{bw}{bw^+}$, cela signifie que *bw+* est dominant sur *bw* (comme cela a déjà été mis en évidence) et que *e+* est dominant sur *e*. Plutôt que de fabriquer une génération F2 en croisant les mouches F1 entre elles, il est intéressant d'effectuer avec ces drosophiles doublement hétérozygotes un test-cross : pour cela, il faut croiser les individus constituant la F1 par une souche homozygote pour les deux allèles récessifs que l'on veut déceler, soit *e* et *bw*, ce qui

s'écrit : F1 $[e^+\ bw^+] \times \frac{e\ bw}{e\ bw}$.

Le parent testeur va produire un seul type de gamètes : *e bw*. La mouche hétérozygote va fournir quatre types de gamètes : *e bw*, e^+ bw^+, e^+ *bw* et *e* bw^+. Les fréquences de ces gamètes sont données par les fréquences des phénotypes correspondants dans la descendance du test-cross. On observe quatre phénotypes également fréquents : 1/4 [e bw], 1/4 $[e^+\ bw^+]$, 1/4 $[e^+\ bw]$ et 1/4 $[e\ bw^+]$. Quelles sont les associations parentales et recombinées ? Les gamètes produits par les parents étaient *e* bw^+ et e^+ *bw*. On voit clairement qu'il y a 50 % de produits de méiose parentaux et 50 % de produits recombinés.

Si, au lieu de faire un test-cross, on laisse s'effectuer des croisements entre mouches de la F1, quelle va être la constitution de la génération F2 ainsi obtenue ? Chacun des parents va fournir 4 types de gamètes avec des fréquences égales. Pour les combiner deux à deux, il faut construire un tableau à 16 cases, chaque case étant également probable.

Le nombre de combinaisons de gènes (génotypes) ainsi obtenues est de 9. L'une d'entre elles est obtenue 4 fois : $\frac{e\ bw}{e^+\ bw^+}$; 4 sont obtenues 2 fois :

$$\frac{e^+\ bw}{e^+\ bw^+},\ \frac{e\ bw^+}{e^+\ bw^+},\ \frac{e\ bw}{e^+\ bw}\ \text{et}\ \frac{e\ bw}{e\ bw^+};$$

et enfin 4 sont obtenues 1 fois, il s'agit des 4 suivantes : $\frac{e^+\ bw^+}{e^+\ bw^+},\ \frac{e^+\ bw}{e^+\ bw},\ \frac{e\ bw^+}{e\ bw^+}$ et $\frac{e\ bw}{e\ bw}$. On retrouve 4 phénotypes, avec les fréquences suivantes : 9/16 $[e^+\ bw^+]$, 3/16 $[e^+ bw]$, 3/16 $[e\ bw^+]$ et 1/16 [e bw]. On peut établir la ségrégation pour chaque couple d'allèles : pour le couple e/e^+, on a :
9/16 + 3/16 = 3/4 de $[e^+]$, et 3/16 + 1/16 = 1/4 de [e]; pour le couple bw/bw^+, on a aussi 3/4 $[bw^+]$ et 1/4 [bw]. On vérifie ainsi la ségrégation 3:1 pour chaque couple d'allèles. Remarquons aussi que la fréquence des mouches $[e^+\ bw^+]$ (9/16) est le produit de la fréquence des mouches $[e^+]$ (3/4) par la fréquence des mouches $[bw^+]$ (3/4). Il est en effet normal que la probabilité de la réalisation simultanée de deux événements indépendants soit le produit de la probabilité de réalisation de chacun d'eux pris isolément.

Les proportions 9:3:3:1 sont les proportions mendéliennes classiques que l'on observe lorsqu'on a affaire à la ségrégation de deux couples d'allèles indépendants.

La liaison

Comme nous l'avons montré, l'emploi du test-cross permet de connaître facilement les fréquences avec lesquelles apparaissent les différents génotypes dans les produits de la méiose. Il s'agit donc d'un artifice extrêmement simple qui permet de se replacer dans les conditions où l'on peut analyser directement les produits de méiose. Nous avons, en outre, constaté que la liaison est la tendance que montrent ces associations génotypiques parentales à se maintenir préférentiellement. On pourra donc très facilement mettre une liaison en évidence grâce au test-cross.

Si, par exemple, on effectue un croisement entre la lignée pure *ebony* (déjà étudiée) et la lignée pure *scarlet*

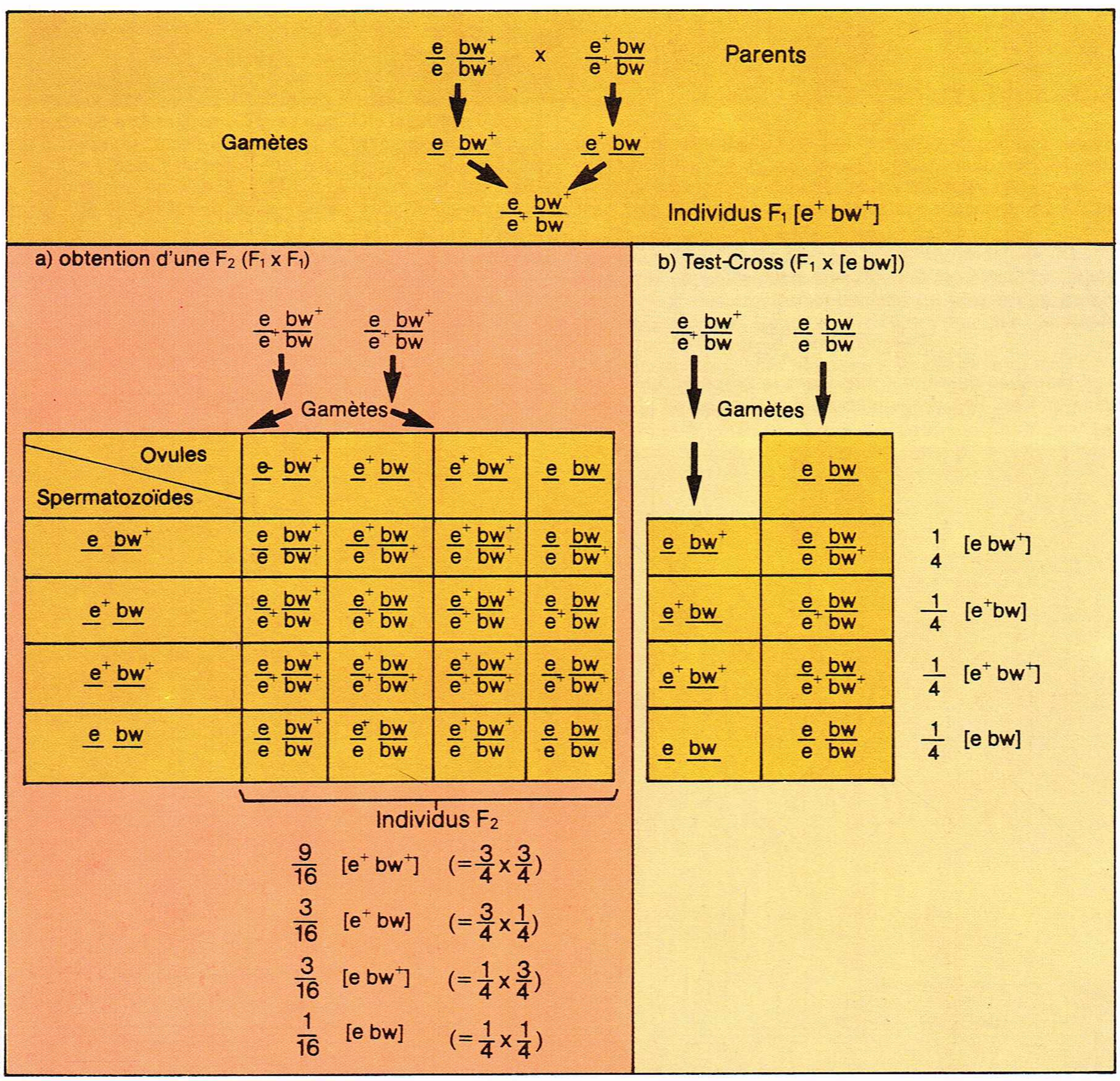

Richard Colin

◀ ***Tableau récapitulatif des résultats observés démontrant le phénomène d'indépendance.***

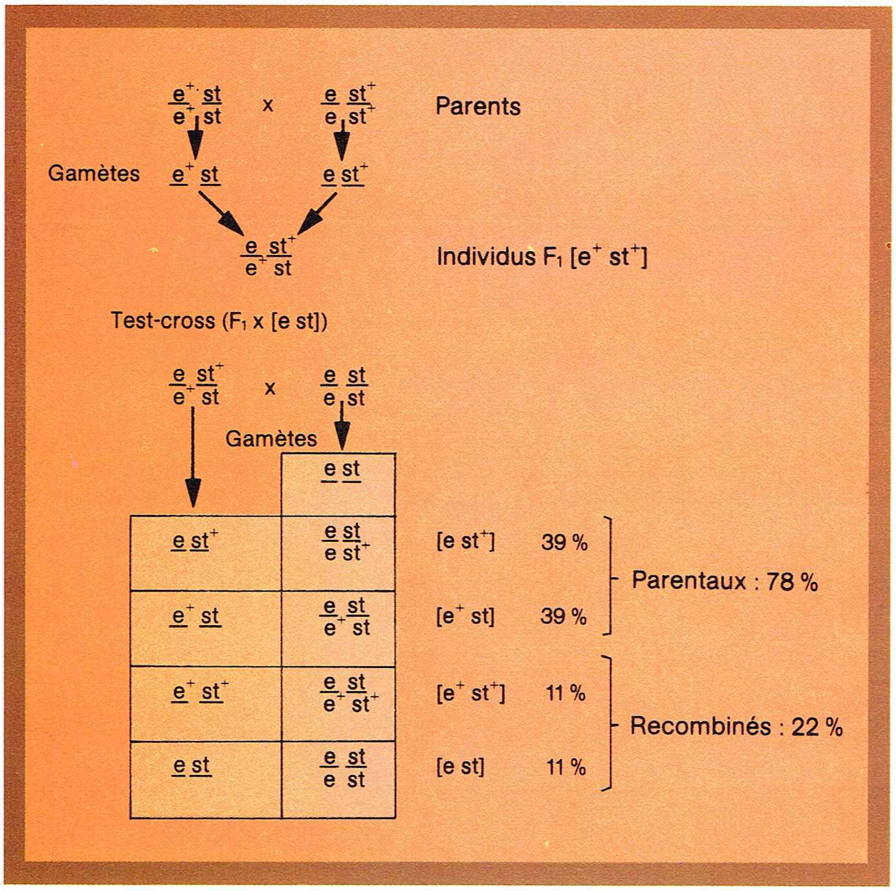

Richard Colin

▲ ***Croisement entre mouche à corps noir (ebony) et mouche à yeux écarlates (scarlet).***

(yeux écarlates), qu'observe-t-on ? D'abord, on obtient une F1 homogène « sauvage » [e^+ st^+]. Ceci nous renseigne sur les relations de dominance entre les caractères : e^+ est dominant sur *e* ; st^+ est dominant sur *st*. Le génotype des mouches F1 doit être $\frac{e}{e^+}\,\frac{st}{st^+}$. Si l'on fait le test-cross, on croise ces individus hétérozygotes par la souche homozygote pour les allèles récessifs :

$$\frac{e}{e^+}\,\frac{st}{st^+}\ (F1) \times \frac{e}{e}\,\frac{st}{st}.$$

Les mouches de cette souche ont le corps *ebony* et les yeux *scarlet*. Les descendants du test-cross se répartissent entre quatre phénotypes, ce qui dénote la production de quatre sortes de gamètes par les hétérozygotes de la F1. Les associations parentales sont *ebony* [e st^+] et *scarlet* [e^+ st], et les recombinés sont donc « sauvages » [e^+ st^+] et doubles mutants [e st]. Si les couples d'allèles e/e^+ et st/st^+ ségrégeaient indépendamment, on observerait 25 % de chacun des types, soit 50 % de parentaux et 50 % de recombinés. Or, en réalité, on obtient 22 % de recombinés pour 78 % de parentaux : il y a donc liaison.

L'estimation de la distance séparant les deux loci peut se faire : on observe 22 % de recombinaisons. Contrairement à ce qui se passe chez les Ascomycètes, on ne dispose pas des quatre produits d'une même méiose ensemble, mais seulement d'un mélange de produits de méiose en vrac. L'absence d'asques ditypes recombinés rend impossible une estimation du nombre de doubles crossing-over et, par là même, de la possibilité d'effectuer une correction pour avoir une meilleure estimation de la distance. Il faut se contenter d'estimer la distance qui sépare les gènes *scarlet* et *ebony* à 22 unités de recombinaison tout en étant conscient du fait que cette distance est sans doute sous-estimée.

L'hérédité liée au sexe

On a vu qu'il existait, chez la drosophile, entre mâles et femelles, une différence dans la morphologie d'une paire de chromosomes : les femelles possèdent deux chromosomes X et les mâles possèdent un X et un Y. En ce qui concerne les hétérochromosomes, les femelles produisent une seule sorte de gamètes, qui portent tous un chromosome X. Quant aux mâles, ils produisent deux sortes de spermatozoïdes : la moitié d'entre eux porte un X et l'autre moitié un Y. La fécondation d'un ovule par un spermatozoïde de la première espèce donnera un individu XX, donc femelle, et l'union d'un ovule avec un spermatozoïde du deuxième genre produira un mâle XY. De cette manière, il est clair que le chromosome X d'un mâle lui vient de sa mère, et le chromosome Y de son père. Il est aussi clair que ce mâle transmettra ce chromosome X uniquement à ses filles. Si la transmission d'une génération à l'autre des chromosomes sexuels X et Y obéit à des lois particulières à ces chromosomes, le comportement des gènes qu'ils portent doit être particulier.

C'est ce qui constitue *l'hérédité liée au sexe*.

C'est encore Morgan qui, en 1910, signala le premier cas d'un caractère ségrégeant différemment selon que le parent qui le portait était mâle ou femelle. Il s'agit du phénotype *white* [w] (les mouches [w] ont les yeux blancs). Morgan effectua un croisement entre un mâle [w] et une femelle [w^+]. La génération F1 fut homogène : toutes les mouches avaient les yeux rouges

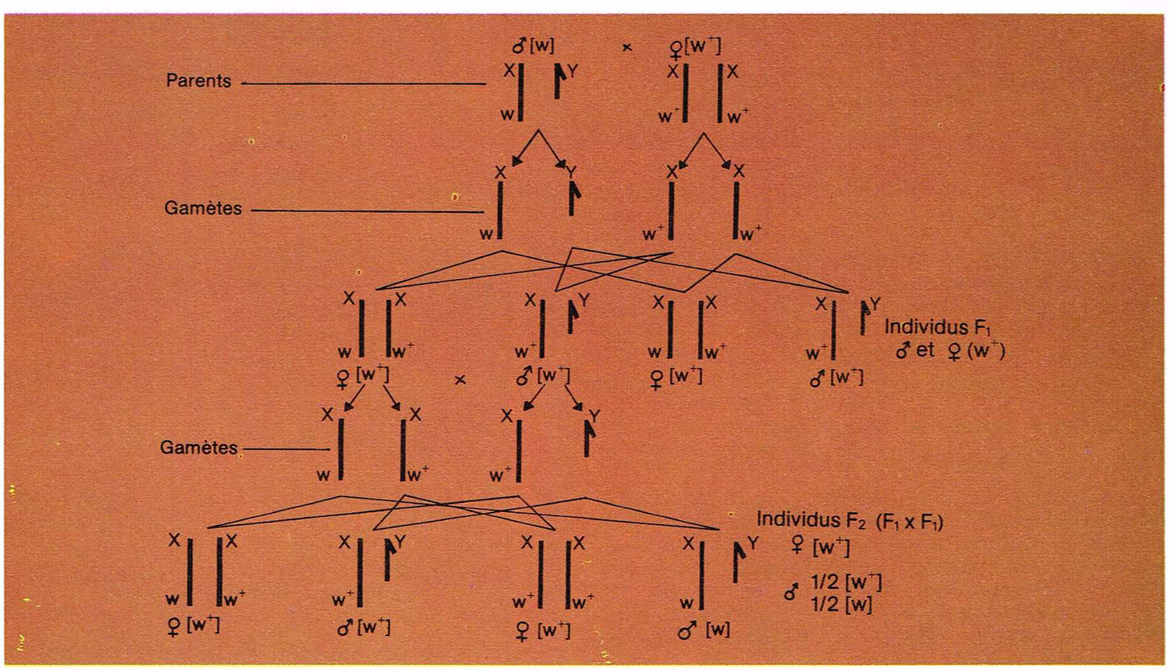

Richard Colin

▶ **L'hérédité liée au sexe :** ***on observe clairement la ségrégation du caractère « yeux blancs » (white).***

Ph. Chaumeton - Jacana

◀ ***Lors de la mise en évidence de l'hérédité liée au sexe, Morgan nota un fait surprenant : toutes les mouches à yeux blancs [w] étaient des mâles.***

[w$^+$] (le caractère *white* était évidemment récessif). Il obtint, en croisant entre elles les mouches F1, une F2 constituée de 25 % de mouches [w] et de 75 % de mouches [w$^+$]. La concordance avec une ségrégation mendélienne classique 3:1 était bonne. Mais Morgan nota un fait surprenant : *toutes les mouches à yeux blancs* [w] *étaient des mâles*. La composition de la F2 était donc la suivante : les femelles étaient toutes à yeux rouges [w$^+$], la moitié des mâles était à yeux rouges et l'autre moitié à yeux blancs (1/2 ♂ [w$^+$], 1/2 ♂ [w]).

Supposons que le gène responsable du couple de caractères alternatifs [w$^+$]/[w] soit localisé sur le chromosome X et qu'*il ne soit pas représenté sur le chromosome Y*. Nous avons vu que l'allèle *w* est récessif (F1 homogène [w$^+$]). Le mâle d'origine à yeux blancs devait porter l'allèle récessif *w* sur son unique chromosome X. Il a été croisé par une femelle portant l'allèle dominant w^+ sur ses deux chromosomes X. La figure ci-contre montre que cela suffit à expliquer aussi bien les résultats observés en F1 que ceux observés en F2. On peut remarquer que les croisements F1 × F1, destinés à obtenir une F2, sont analogues à un test-cross si l'on n'observe que les mâles de la F2. Ces derniers, en ce qui concerne les gènes portés par le chromosome X, sont finalement une population de chromosomes X provenant des femelles de la F1. Le fait que l'on ait 50 % de mâles [w] et 50 % de mâles [w$^+$] signifie simplement que le couple d'allèles w/w^+ présente une ségrégation 1:1.

Que se serait-il passé si Morgan avait effectué le croisement en intervertissant les sexes des parents, c'est-à-dire en croisant des mâles à yeux rouges [w$^+$] par des femelles à yeux blancs [w]? Nous avons vu plus haut que les ♂ reçoivent leur chromosome X de leur mère. Tous les mâles de la génération F1 auraient été [w], alors que les femelles recevant un X de leur père et un X de leur mère auraient été hétérozygotes [w$^+$]. En effectuant le croisement dans ce sens, les *résultats auraient été différents*, puisque la ségrégation liée au sexe aurait été *visible dès la génération F1*.

Pour résumer, l'hérédité liée au sexe se définit par une ségrégation des caractères différente selon le sexe des descendants du croisement. Elle se caractérise aussi par le fait que, selon le sens du croisement, les résultats diffèrent. Au niveau d'une population, on le verra en détail plus tard, cela se traduit par le fait que les mâles présentent plus souvent que les femelles les caractères récessifs liés au sexe. Ceci est simplement dû au fait qu'ils ne peuvent jamais être hétérozygotes pour ce caractère (ils possèdent un seul chromosome X). Par exemple, dans l'espèce humaine, les hommes sont beaucoup plus fréquemment daltoniens ou hémophiles que les femmes, car les gènes qui déterminent ces caractères sont localisés sur le chromosome X.

D'un point de vue historique, la découverte de l'hérédité liée au sexe a été, avant toute preuve fondée sur une analyse biochimique, un des arguments importants en faveur de la théorie chromosomique de l'hérédité. Dès le début de notre siècle, avec la redécouverte des lois de Mendel, ont été émises de nombreuses hypothèses concernant le support matériel des facteurs héréditaires. Il n'était pas évident, à l'époque, qu'il s'agît des chromosomes; bien d'autres structures cellulaires étaient candidates à cette importante fonction. Ce n'est que dans les dernières années du XIX^e siècle que le comportement des chromosomes à la mitose et à la méiose fut à peu près connu. La première preuve de la théorie chromosomique fut fournie par le parallèle évident entre la ségrégation d'un couple d'allèles et la séparation des chromosomes homologues à l'anaphase de la première division de méiose. Le second argument consista en l'observation que la disposition de différentes paires de chromosomes, puis leur séparation à l'anaphase de division I se font indépendamment d'une paire à l'autre, ce qui se traduit par les ségrégations indépendantes de couples d'allèles situés sur des chromosomes différents. La troisième preuve fut donnée par le fait que *certains caractères se transmettent, comme le chromosome X*. Dès lors, une corrélation directe entre la transmission d'un gène particulier et celle d'un chromosome déterminé était clairement établie.

La génétique sans croisements

Il existe un certain nombre de cas particuliers dans lesquels il est impossible de procéder en effectuant des croisements. Cela est dû principalement à deux sortes

▶ *Certaines espèces sont bien capables d'avoir un cycle de reproduction sexuée, mais sont pratiquement inutilisables pour une analyse génétique, notamment lorsque le temps entre deux générations est trop long; c'est le cas des gros Mammifères, tels les éléphants.*

de causes. La première est que certaines espèces ne présentent pas de reproduction sexuée connue, mais seulement des formes variées de reproduction végétative. Il est alors évidemment impossible d'observer comme d'ordinaire des ségrégations de caractères ou des recombinaisons. Dans certains cas, il est cependant possible d'effectuer une analyse génétique par le biais de ce qu'on appelle la *recombinaison mitotique*. La deuxième cause essentielle de l'impossibilité d'utiliser des croisements est d'une autre nature. Certaines espèces sont bien capables d'avoir un cycle de reproduction sexuée, mais on ne peut pas, pratiquement, utiliser celui-ci pour une analyse génétique; soit parce que le temps entre deux générations est trop long (c'est le cas de nombreux arbres ou de gros Mammifères), soit que des principes moraux ou sociaux interdisent d'y avoir recours (c'est le cas de l'espèce humaine).

Il est cependant possible de recueillir de nombreuses données par l'étude de *généalogies* ou de *pedigrees*. La seule condition requise est de disposer de données dignes de confiance qui s'étendent sur un temps très long; c'est le cas pour des espèces qui ont depuis longtemps intéressé les sélectionneurs et les éleveurs. Pour l'homme, on dispose, dans certaines familles, notamment des familles royales des siècles passés, de généalogies assorties d'une bonne description physique des individus qui les composent. On peut alors suivre la transmission d'une génération à l'autre de tel ou tel caractère marquant,

Tiofoto

et étudier son hérédité : la lèvre des Habsbourg, le nez des Bourbons, l'hémophilie dans la descendance de la reine Victoria, etc.

L'analyse génétique fondée sur la mitose

Cette méthode a surtout été utilisée chez les Champignons, et l'exemple dont nous nous servirons est *Aspergillus nidulans,* un Ascomycète. Ce Champignon se présente sous forme de filaments dont les noyaux sont haploïdes. L'étape essentielle pour cette étude est l'obtention et la sélection de noyaux diploïdes. La méthode la plus efficace consiste à fabriquer un *hétérocaryon*, c'est-à-dire un filament dont les articles contiennent deux sortes de noyaux; les uns provenant d'une souche et les autres d'une deuxième souche. Alors seulement ces deux types de noyaux haploïdes pourront fusionner et donner naissance à des noyaux diploïdes hybrides, qui seront analogues aux zygotes obtenus par fécondation.

Pratiquement, il est nécessaire que les deux souches que l'on souhaite croiser de cette manière présentent des déficiences nutritionnelles. Une souche auxotrophique est incapable de se développer si on ne lui fournit pas le métabolite qu'elle est devenue inapte, à la suite d'une mutation, à synthétiser. Par exemple, une souche mutante [ad$^-$] n'est plus capable de fabriquer l'adénine, et une souche [pro$^-$] n'est plus capable de synthétiser la proline. Pour que la première souche se développe, il faut obligatoirement fournir de l'adénine dans le milieu de culture, et, pour la deuxième, de la proline. La seule façon qu'aient deux mutants, l'un [ad$^-$] (mais [pro$^+$]) et l'autre [pro$^-$] (mais [ad$^+$]), de croître sur un milieu dépourvu de ces substances est de se *complémenter :* c'est-à-dire que l'un va fabriquer ce qui manque à l'autre, et inversement. Pour cela, il est nécessaire que les gènes des deux mutants, donc leurs noyaux, se trouvent réunis dans le même cytoplasme. Cette structure est appelée *hétérocaryon* (parce qu'elle contient deux types différents de noyaux).

▼ ***Représentation schématique de l'analyse génétique par la* recombinaison *mitotique chez* Aspergillus nidulans *: l'étape essentielle pour cette étude est l'obtention et la sélection de* noyaux diploïdes.**

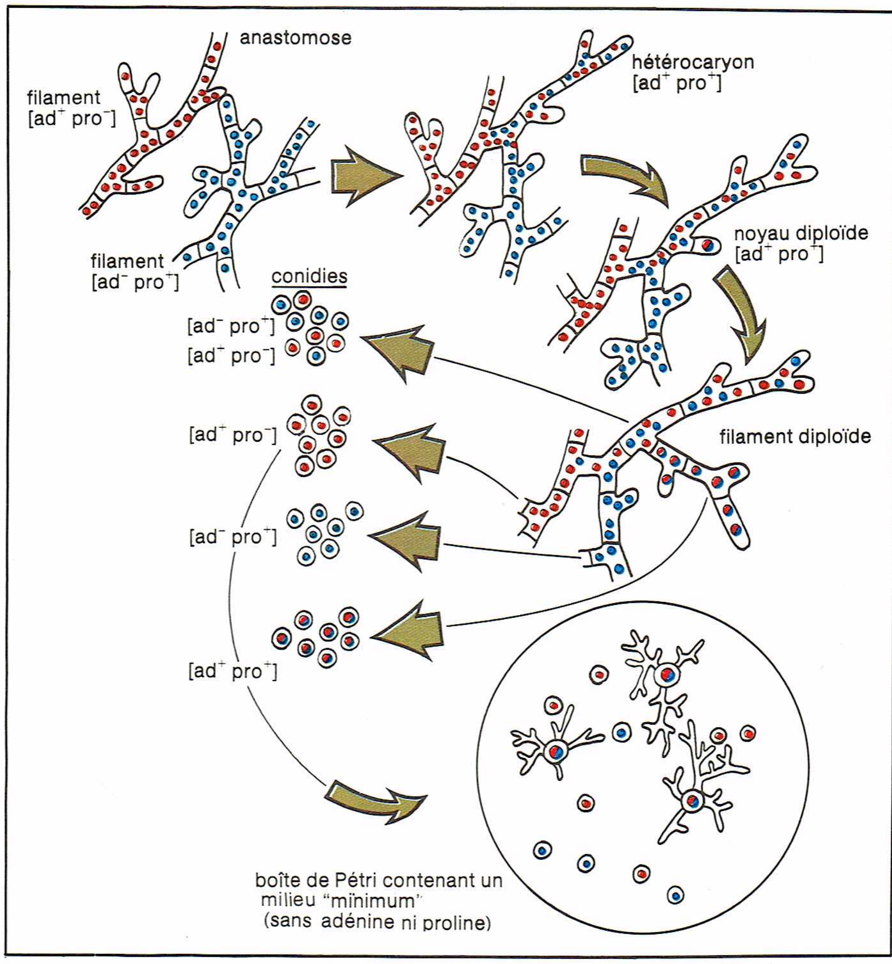

Richard Colin

Dans un hétérocaryon, il se produit aléatoirement, et avec une faible fréquence, des fusions entre les deux types de noyaux, ce qui a pour résultat l'apparition de noyaux diploïdes hétérozygotes $\frac{ad^- \; pro^-}{ad^+ \; pro^+}$. Comment peut-on les sélectionner, c'est-à-dire les distinguer des autres, puis les en séparer? Les Ascomycètes du genre *Aspergillus,* comme *A. nidulans,* présentent un mode de reproduction végétative par *conidies.* Ces organes sont des cellules, en majeure partie uninucléées, qui peuvent se détacher des filaments du mycélium. Les conidies peuvent germer sur un milieu approprié et redonner un nouveau mycélium filamenteux. Leur utilisation permet donc d'obtenir une population de cellules isolées, qui

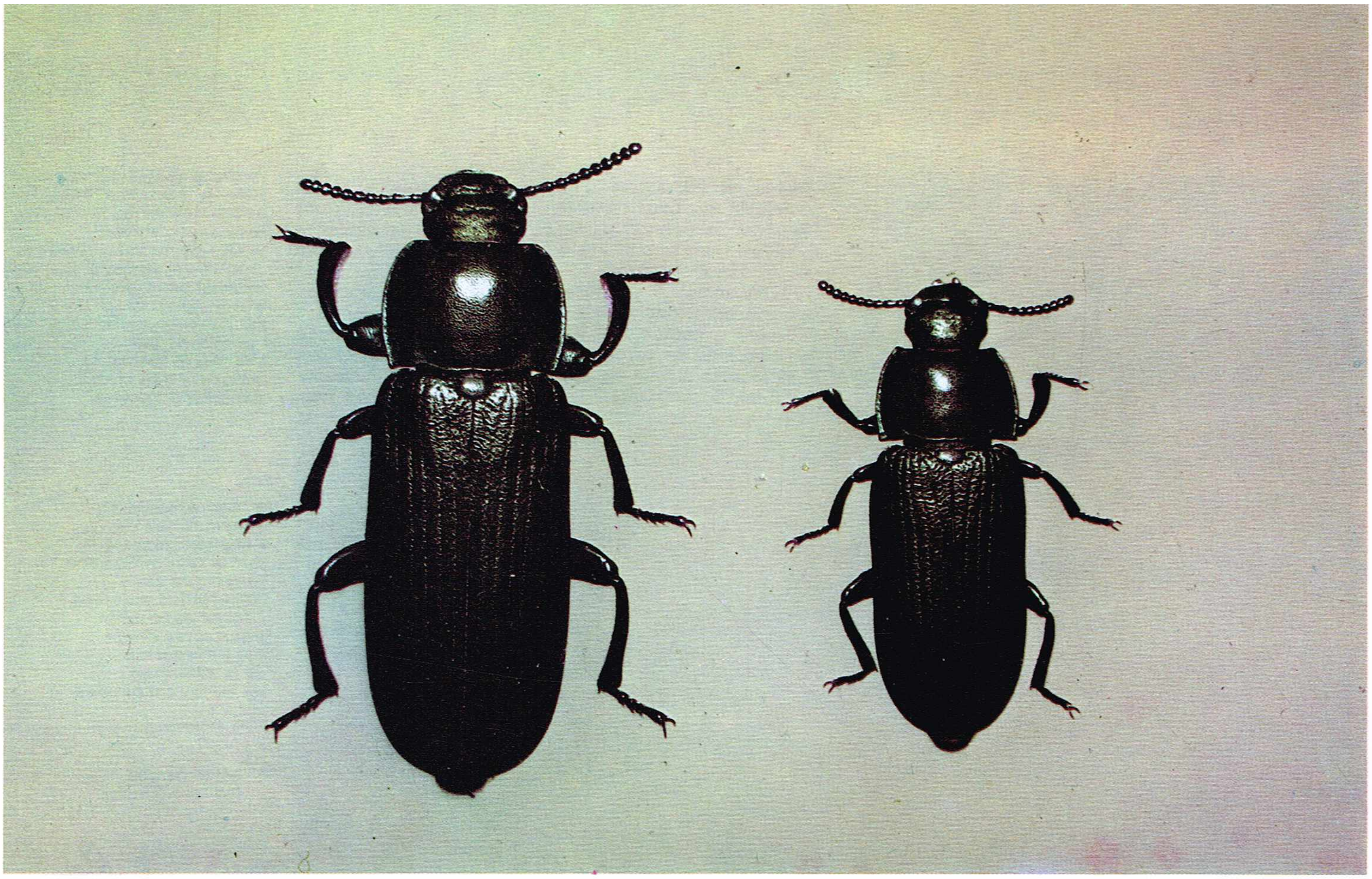

P. Starosta

▲ *Des expériences permettant d'obtenir la fusion entre des noyaux de cellules maintenues en culture ont permis de commencer à établir la carte génétique des chromosomes humains. Ici, on observera, chez* Tenebrio molitor, *à gauche, un individu* polyploïde, *à droite, un individu normal.*

▼ *Conidiophores d'*Aspergillus niger, *portant les conidies.*

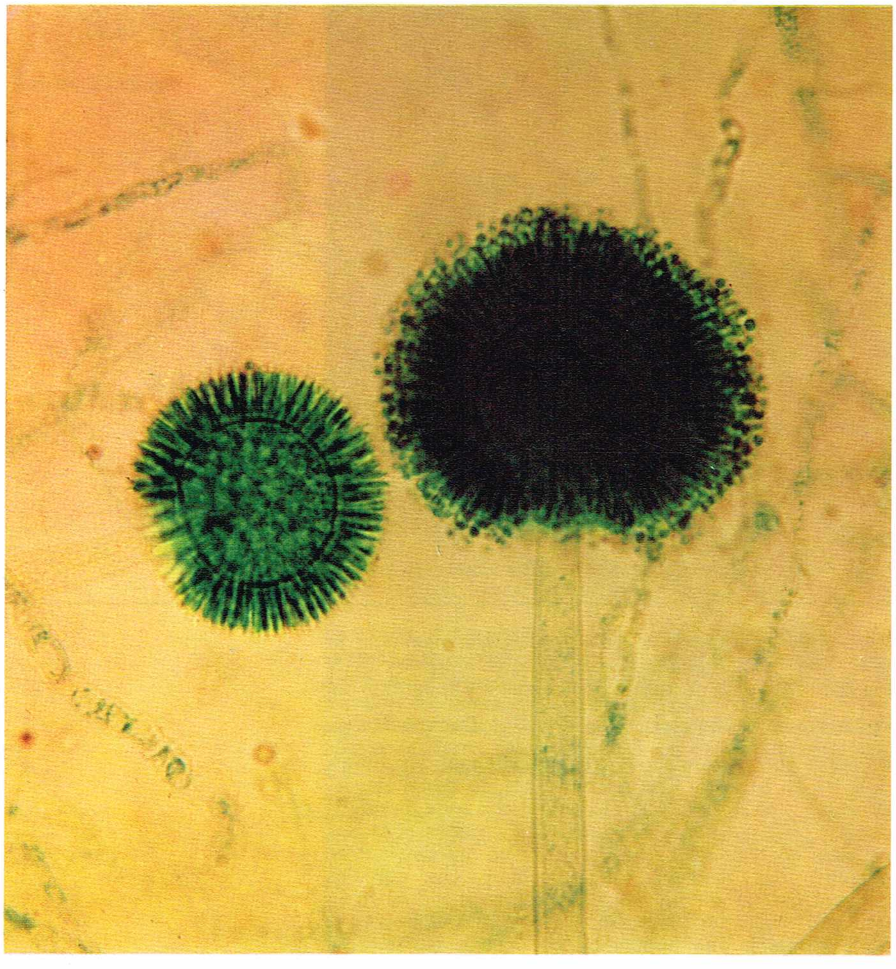

C. Bevilacqua

seront susceptibles d'avoir un phénotype déterminé par un unique noyau, ce qui n'est pas le cas dans un filament.

Si l'on recueille les conidies provenant d'un hétérocaryon, on va en obtenir principalement deux types : des cellules uninucléées portant l'un des deux noyaux parentaux [ad^+ pro^-] ou [ad^- pro^+]. De plus, il s'est produit des noyaux diploïdes hybrides par fusion entre les deux types nucléaires parentaux, on recueillera aussi des conidies diploïdes $\frac{ad^-}{ad^+}\frac{pro^-}{pro^+}$. On étale une suspension de conidies sur un *milieu minimal* (qui ne contient ni adénine, ni proline). Les cellules [ad^- pro^+] ne germeront pas, car elles ne disposent pas d'adénine, et les cellules [ad^+ pro^-] ne se développeront pas, du fait de l'absence de proline. Seules les conidies diploïdes $\frac{ad^-}{ad^+}\frac{pro^-}{pro^+}$ pourront germer grâce à la complémentation. Leur phénotype est donc [ad^+ pro^+]. On voit que si l'on prend les conidies uninucléées d'un hétérocaryon et qu'on les étale sur un milieu minimal, seules les cellules diploïdes vont se développer. Il est donc extrêmement simple de les sélectionner.

Nous avons réalisé une opération analogue à la fécondation qui a lieu lors de la reproduction sexuée. Il reste à obtenir quelque chose ressemblant à la ségrégation qui a lieu à la méiose. Cela se produit naturellement. On s'aperçoit, en effet, qu'un mycélium diploïde hétérozygote $\frac{ad^+}{ad^-}\frac{pro^+}{pro^-}$ produit en fait quatre types de conidies. La grande majorité est [ad^+ pro^+], mais il en apparaît d'autres : [ad^+ pro^-], [ad^- pro^+] et [ad^- pro^-]. Puisque les deux allèles de chaque couple se séparent, il y a bien *ségrégation* des allèles.

Sans entrer dans le détail, nous dirons que cette ségrégation peut avoir principalement deux origines. D'abord, elle peut être due à la perte de l'état diploïde, c'est-à-dire à un retour à l'état haploïde. On voit facilement que lors d'un processus de ce type un noyau hétérozygote $\frac{ad^-}{ad^+}$, s'il devient haploïde, peut devenir soit [ad^-], soit [ad^+], ce qui provoque la ségrégation.

La séparation des allèles peut aussi provenir, quand l'état diploïde est conservé, de crossing-over entre chromosomes homologues.

L'analyse génétique effectuée pendant la phase végétative permet donc, par des moyens détournés, de mettre en évidence les deux phénomènes principaux qui se

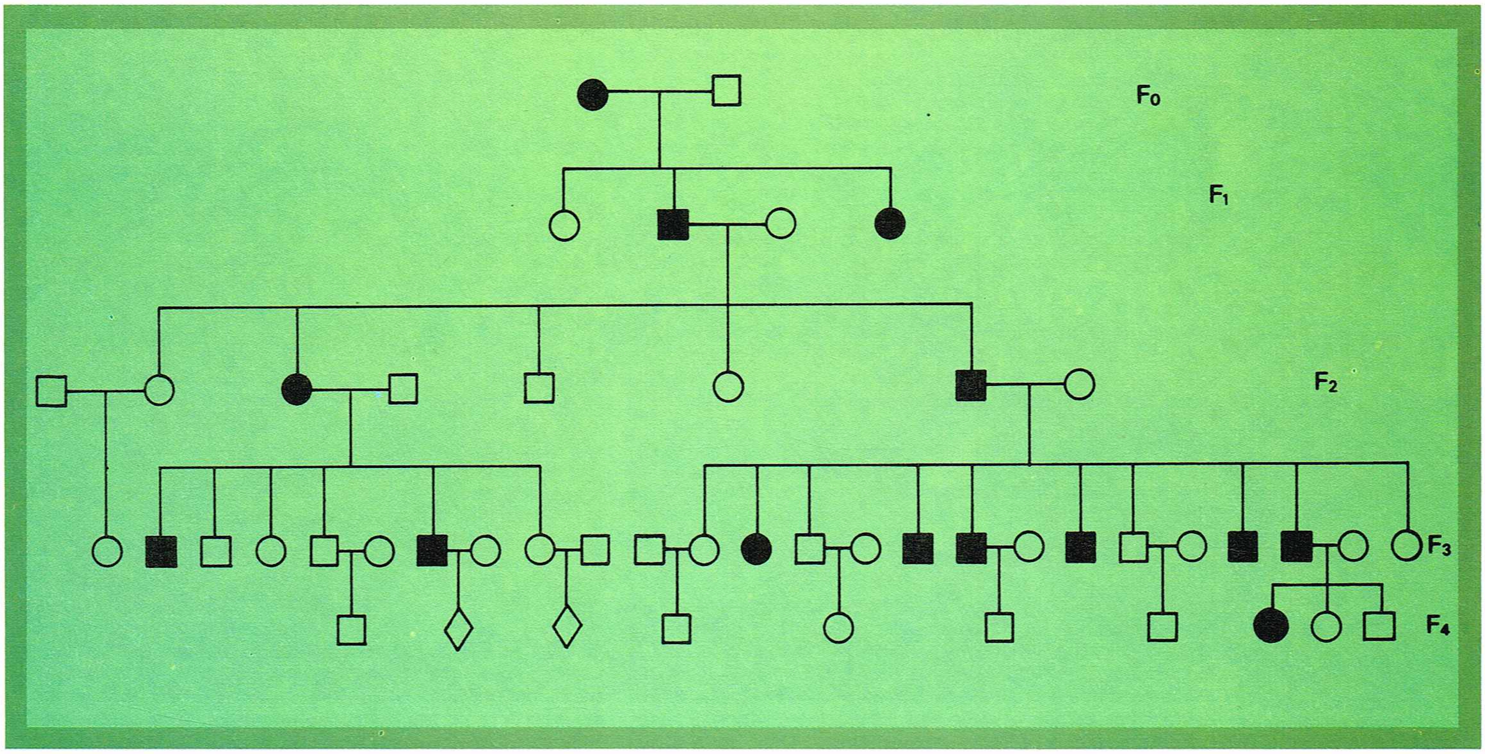

Richard Colin

▲ *Représentation schématique du* **pedigree de la brachydactylie** *chez l'homme (les individus brachydactyles sont représentés en noir).*

produisent habituellement pendant la méiose : la ségrégation des allèles et la recombinaison. A l'heure actuelle, ces données sont d'une extrême importance. En effet, elles ont récemment permis de mettre en œuvre des expériences de génétique chez les animaux, en particulier chez de nombreux Mammifères, dont l'homme.

Depuis quelques années, il est devenu possible, en travaillant dans des conditions expérimentales très précises, d'obtenir la fusion entre des noyaux de cellules maintenues en culture. La différence avec ce qu'on vient de voir est que les noyaux de départ ne sont pas haploïdes mais diploïdes. D'une part, les noyaux hybrides résultant de la fusion ne sont donc pas diploïdes mais *tétraploïdes* (4 *n*). D'autre part, l'état tétraploïde de noyaux qui sont normalement diploïdes est, la plupart du temps, très instable. Ces deux difficultés compliquent singulièrement la tâche des chercheurs ; mais ces expériences, pour aussi difficiles qu'elles soient, donnent des résultats d'un grand intérêt. Ainsi, elles ont permis de commencer à établir la carte génétique des chromosomes humains. Quand on sait quelle importance ont les anomalies du nombre de chromosomes dans l'espèce humaine, on comprend qu'il est important de savoir quels sont les gènes qui sont portés par ces chromosomes. Les méthodes d'hybridation cellulaire ont permis d'obtenir des fusions cellulaires entre des cellules d'espèces et de genres différents : cellules hybrides rat-souris et même homme-souris.

Les généalogies

C'est dans l'étude des pedigrees de l'espèce humaine que la méthode d'étude a été le plus poussée. Dès le début du XXe siècle, en 1905, Farabee démontrait que le principe de la ségrégation des caractères héréditaires se manifestait aussi dans l'espèce humaine.

Un exemple classique est celui de la *brachydactylie* (anomalie du squelette qui se traduit par des doigts très courts).

Les conventions veulent que l'on représente une femme par un cercle et un homme par un carré. Lorsqu'on ne connaît pas le sexe d'un individu, on le symbolise par un losange. Un mariage est indiqué par un trait horizontal reliant un homme et une femme. Les individus exprimant le trait phénotypique en question sont généralement désignés par un symbole noir, au contraire des individus normaux.

On peut expliquer la généalogie de la brachydactylie en admettant qu'il s'agit d'un *caractère dominant*, qui se manifeste à la fois chez les homozygotes et chez les hétérozygotes, le type normal étant récessif. Tous les individus ayant un phénotype normal sont donc homozygotes pour les caractères récessifs, et tout mariage entre un brachydactyle et un individu normal constitue un *test-cross*. Le pedigree montre qu'à chaque génération, la moitié environ des individus est normale, et que l'autre moitié est touchée par l'anomalie ; les deux phénotypes apparaissent chez les enfants en proportion 1:1. Cela signifie que les facteurs héréditaires responsables de la brachydactylie se comportent comme un simple couple d'allèles.

Il est intéressant d'étudier également la généalogie d'une autre anomalie héréditaire : l'*hémophilie*. Chez les hémophiles, qui présentent un défaut de coagulation du sang, n'importe quelle blessure, aussi bénigne soit-elle, risque de se transformer en hémorragie très grave. Cette maladie est absente de la très grande majorité des familles, alors que certaines familles présentent des cas d'hémophilie au cours de plusieurs générations successives : l'hémophilie est héréditaire.

Le caractère est certainement récessif, puisque des enfants hémophiles naissent de mariages entre parents normaux. Les conséquences des croisements consanguins sur la fréquence des anomalies héréditaires seront examinées en détail par la suite, on peut cependant voir dès à présent que les enfants et petits-enfants issus de ce mariage sont en très forte proportion hémophiles.

L'hérédité extra-chromosomique

Les généticiens ont pris beaucoup de peine pour accumuler les preuves de la théorie chromosomique de l'hérédité. Si les preuves génétiques, bien qu'indirectes, sont convaincantes, les preuves biochimiques récentes sont directes et irréfutables. Cependant, certains caractères individuels ou cellulaires ne suivent pas les règles de l'hérédité chromosomique. Cela ne signifie pas que la théorie chromosomique soit fausse, mais cela conduit à se demander si les chromosomes sont les seuls supports de l'hérédité. La question peut se formuler comme suit : « Existe-t-il du matériel héréditaire en dehors des gènes portés par les chromosomes ? S'il en est ainsi, quelle est son importance, et à quelles lois obéit-il ?... »

Avant de chercher à répondre directement à ces questions, il est nécessaire de déterminer en quoi certaines observations peuvent suggérer une hérédité non chromosomique.

— *Différences entre les résultats de croisements réciproques.* Ordinairement, les résultats de croisements réciproques sont identiques quand on suit l'hérédité de

▲ *L'existence d'*ADN, *en dehors de sa localisation dans les chromosomes, a été mise en évidence, notamment dans les* mitochondries *(microphotographie électronique).*

▶ *Représentation schématique du croisement entre une cellule* petite *et une cellule* normale *chez la levure : les cellules diploïdes de la levure peuvent se diviser avant d'effectuer la méiose; il est alors possible d'observer le phénotype des colonies (normales au cours de ce croisement); les quatre spores sont* normales. *Les caractères ad⁺/ad⁻ dépendent d'un couple d'allèles chromosomiques; on vérifie qu'ils présentent une ségrégation mendélienne 1:1 dans chaque asque. Les hachures symbolisent le cytoplasme de cellules* normales *: leur absence caractérise le cytoplasme des cellules* petites.

marqueurs chromosomiques. Nous avons déjà vu qu'il existe une exception notable, celle des caractères liés au sexe. Dans ce cas, on peut cependant démontrer que ces caractères s'héritent comme le chromosome X chez la drosophile.

— *Hérédité maternelle.* C'est une forme caractéristique de différence entre croisements réciproques. L'hérédité maternelle est définie par la constatation que la progéniture exprime les mêmes caractéristiques que le parent femelle. Si l'on peut éliminer des différences chromosomiques, l'hérédité maternelle implique une transmission héréditaire par le cytoplasme ; cela, généralement parce que le gamète femelle contient beaucoup plus de cytoplasme que le gamète mâle. Le zygote résultant de la fécondation a donc un cytoplasme d'origine presque exclusivement maternelle.

— *Caractères non localisables.* Chez des organismes comme *Neurospora* ou la drosophile, où les groupes de liaison sont parfaitement connus, un caractère à hérédité chromosomique doit pouvoir être lié à d'autres marqueurs chromosomiques connus. Le seul fait qu'on ne puisse localiser le facteur responsable d'un caractère héréditaire ne signifie pas nécessairement que celui-ci suit une hérédité extrachromosomique. Il peut simplement s'agir d'un gène chromosomique localisé dans une partie non encore marquée d'un groupe de liaison.

— *Absence de ségrégation.* Ce critère est d'une grande importance, car la ségrégation des allèles à la méiose ou dans d'autres conditions appropriées (ségrégation mitotique par exemple) est une caractéristique de l'hérédité chromosomique. Son absence peut indiquer une hérédité de type extra-chromosomique.

— *Ségrégation non mendélienne.* Si l'on observe une ségrégation qui suit des lois incompatibles avec le comportement des chromosomes, cela suggère que les déterminants des phénotypes concernés sont extrachromosomiques.

— *Indifférence du phénotype au type nucléaire.* C'est le cas quand une caractéristique héréditaire persiste en présence de noyaux connus pour avoir été associés avec un caractère alternatif. La question se pose de savoir si le matériel héréditaire du noyau exerce un contrôle quelconque sur ces caractères.

— *Transmission infectieuse.* Si un phénotype héréditaire est transmis d'une souche à une autre sans qu'il y ait eu transfert de noyaux, il paraît invraisemblable que ce soient les gènes chromosomiques qui déterminent ce phénotype. Il faut cependant être prudent, car la *transformation*, connue de façon sûre chez les Bactéries, prouve qu'il peut y avoir transmission de fragments de chromosomes en l'absence d'une migration de noyaux.

Les mitochondries contiennent de l'ADN

Sans entrer dans le détail de toutes les situations connues, on peut dire que l'existence de facteurs héréditaires localisés en dehors des chromosomes paraît remettre en cause un fait pourtant établi de façon irréfutable : le support moléculaire de l'hérédité est l'acide désoxyribonucléique, ou ADN. Il n'en est sans doute rien, car

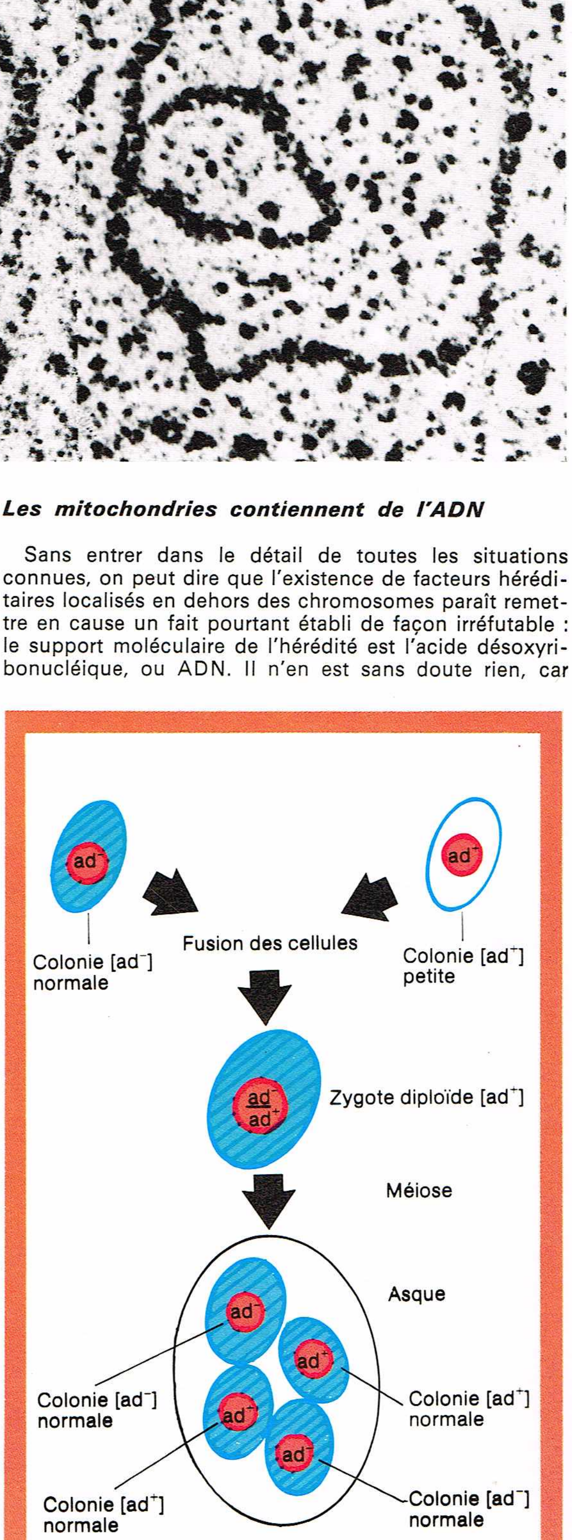

Richard Colin

des analyses biochimiques raffinées ont montré que l'ADN n'est pas absent du cytoplasme. On a pu fournir des preuves convaincantes de sa présence dans de nombreux organites cellulaires et, notamment, dans les chloroplastes des végétaux et dans les mitochondries : par exemple, l'ADN extrait de mitochondries purifiées a un poids moléculaire plus faible et une densité légèrement différente de celle de l'ADN chromosomique des mêmes cellules, ce qui semble exclure totalement une contamination accidentelle des mitochondries par de l'ADN nucléaire lors de l'extraction. Les techniques d'autoradiographie et le microscope électronique ont permis de voir cet ADN. Il se présente, comme chez les Bactéries, sous la forme d'un chromosome circulaire.

Les petites colonies de la levure

La levure *Saccharomyces cerevisiae* est un Ascomycète unicellulaire. Ce Champignon peut donc se manipuler comme une Bactérie. Une suspension de cellules de levure, étalée sur une boîte de Pétri contenant un milieu nutritif solide, forme des colonies. Les cultures de levure font apparaître régulièrement de 1 à 5 % de colonies qui sont plus petites que les autres. Elles sont appelées *petites* pour les distinguer des grandes colonies normales. Il est bien connu que la levure est capable d'effectuer la *fermentation*, voie métabolique qui permet la dégradation des sources de carbone en l'absence d'oxygène. Les cellules normales peuvent utiliser le milieu habituel des levures de deux façons : par la respiration et par la fermentation. Les cellules *petites*, par contre, ont perdu la capacité de respirer ; elles ne peuvent utiliser le milieu que grâce à la fermentation ; elles ont une vitesse de croissance plus faible que les cellules normales, lesquelles disposent des deux voies simultanées de dégradation. Cela est prouvé par le fait que les cellules *petites* sont incapables de se développer sur un milieu où la source de carbone, par exemple le glycérol ou le lactate, n'est pas utilisable par fermentation.

L'analyse biochimique montre que les cellules *petites* ne contiennent pas certaines enzymes respiratoires présentes dans les cellules normales. Il leur manque aussi les *cytochromes a* et *b*. De plus, le fort taux d'apparition spontanée des colonies *petites* (de 1 à 5 %) peut être augmenté jusqu'à pratiquement 100 % en présence de corps chimiques comme l'acriflavine ou le bromure d'éthidium (BET). Par contre, les cellules *petites* sont stables et ne réversent pas. Ces faits suggèrent que le caractère *petite* résulte de la perte d'une information génétique plutôt que d'une altération ponctuelle de l'ADN.

Le caractère *petite* présente une hérédité de type cytoplasmique. Il est possible d'effectuer des croisements chez la levure : deux cellules haploïdes fusionnent pour en donner une diploïde qui, sur un milieu approprié (dit de *sporulation*), subit la méiose et donne un asque contenant quatre spores haploïdes, qu'il est possible de séparer et d'analyser individuellement. Les cellules diploïdes obtenues par fusion de deux cellules *petites* sont incapables de former des asques, mais les cellules diploïdes hybrides formées par la fusion de cellules normales et de cellules *petites* peuvent former des spores.

L'analyse montre que, dans tous les cas, aucune des spores de la progéniture n'est *petite :* toutes les colonies issues d'un croisement *petite* × *normale* sont normales. L'addition de marqueurs classiques met en évidence, au cours du même croisement, une ségrégation habituelle 1:1 pour les gènes portés par les chromosomes. Les cellules descendantes du croisement ne redonnent pas non plus des cellules *petites*, même si on les croise avec le parent *petite*. Tout se passe comme si, à la suite de la fusion avec une cellule normale, le caractère *petite* était définitivement perdu. Les cellules *petites* qui manifestent ce comportement sont appelées *petites neutres*.

La première étape du croisement est la fusion des cellules, au cours de laquelle le cytoplasme des cellules normales se mélange à l'autre. Celui-ci est répliqué et devient un composant de chaque ascospore. Si un déterminant héréditaire est cytoplasmique, on voit qu'il n'y a aucune raison qu'il montre une ségrégation au niveau des quatre spores de l'asque, qui sont homogènes de

▼ En croisant des levures haploïdes (rouges) exigeantes en adénine avec des levures haploïdes (blanches) non exigeantes, on obtient autant de levures blanches que de rouges ; cette expérience met en évidence la ségrégation d'un gène pour la couleur rouge.

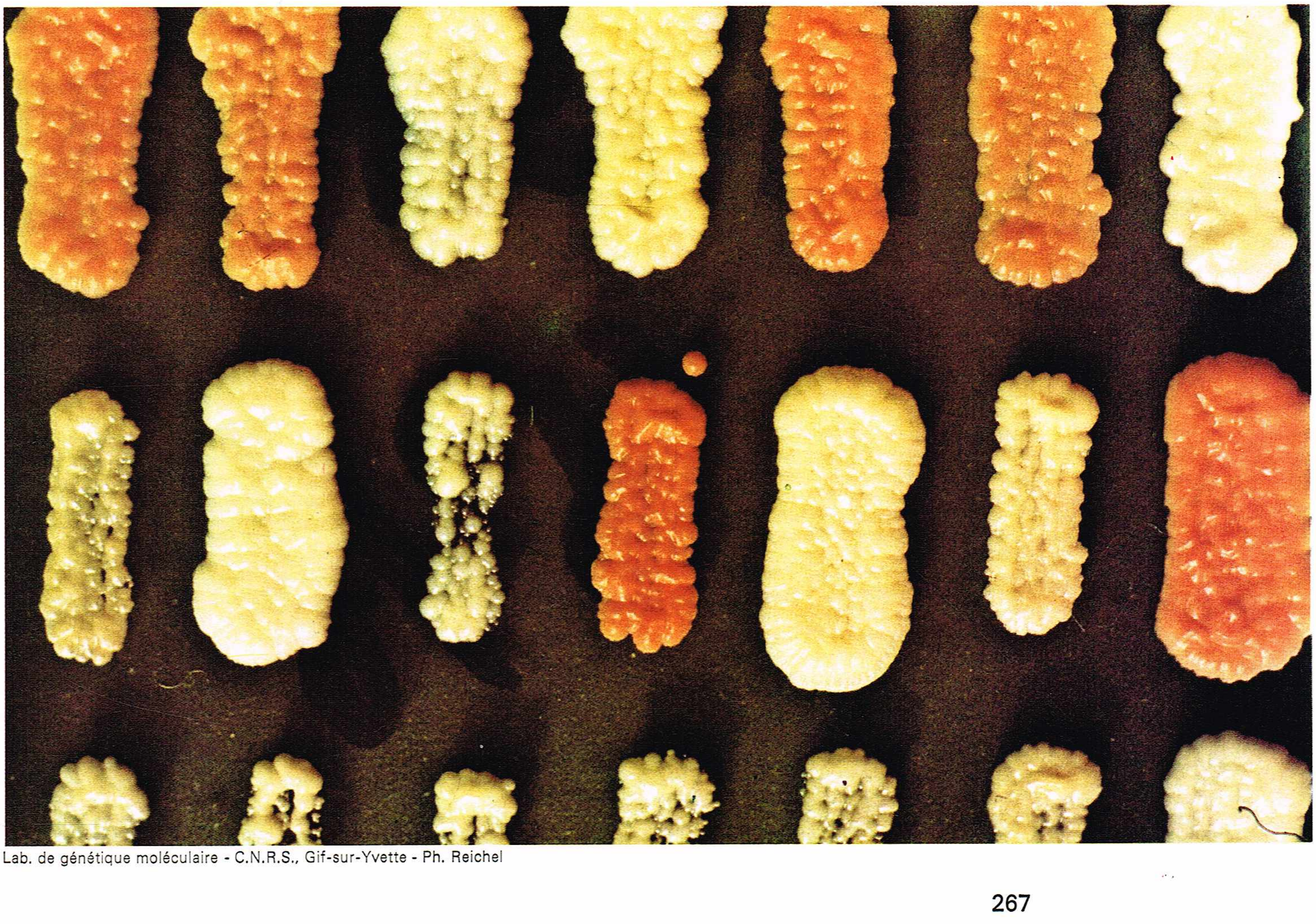

Lab. de génétique moléculaire - C.N.R.S., Gif-sur-Yvette - Ph. Reichel

ce point de vue. L'hypothèse qui a été émise est la suivante : il existerait dans le cytoplasme des particules nécessaires à la respiration, en particulier à la synthèse des enzymes respiratoires. Ces particules ont été appelées particules ρ. Les cellules normales ρ^+ contiennent ces particules, alors que les cellules *petites* ρ^- ne les contiennent plus. Dans une telle hypothèse, on comprend facilement que, lors de la fusion d'une cellule ρ^+ avec une cellule ρ^-, le diploïde soit ρ^+, car il contient ces particules ρ. De même, les particules se multiplient et se répartissent dans les quatre produits de la méiose, qui sont tous alors ρ^+, c'est-à-dire qu'ils forment des colonies normales, capables de respirer.

Les particules ρ et les mitochondries

Pour résumer, le caractère *petite* est provoqué par l'absence de certaines *enzymes respiratoires* et des *cytochromes a* et *b*, ce qui enlève aux cellules la faculté de respirer; or, la respiration cellulaire est un phénomène qui a lieu dans les mitochondries. Le caractère *petite* présente une hérédité d'un type tel que son support doit être une particule contenue dans le cytoplasme; or, les mitochondries sont des organites cytoplasmiques. Les particules doivent contenir du matériel héréditaire; or, les mitochondries contiennent de l'ADN. On le voit, il est très tentant d'affirmer l'identité entre les particules ρ et les mitochondries.

Quand on regarde au microscope électronique les cellules *petites*, on constate qu'elles contiennent des mitochondries, mais que celles-ci ont une structure anormale. Si l'on analyse l'ADN mitochondrial de cellules *petites*, on découvre qu'il est soit sensiblement plus petit que celui des cellules normales, soit totalement absent. L'identité hypothétique : $\rho \equiv$ mitochondrie est donc fausse; elle doit être transformée en $\rho \equiv$ ADN mitochondrial.

Un certain nombre de faits conduisent à considérer cette idée comme encore hypothétique, sans toutefois la remettre en question. Et cela, essentiellement, parce qu'aucune preuve vraiment directe n'a été apportée.

Les gènes mitochondriaux

Si l'ADN mitochondrial porte une information héréditaire, on peut lui donner le nom de gène. Ces gènes sont appelés *gènes mitochondriaux* pour les différencier des gènes portés par les chromosomes du noyau.

Chez la levure, comme chez beaucoup d'organismes, on a cherché des souches résistantes à un grand nombre de drogues et d'antibiotiques. Outre l'intérêt que ces souches présentent pour comprendre le mécanisme de la résistance, et donc de la sensibilité à un antibiotique, les facteurs génétiques responsables d'une résistance sont faciles à manier, car ils sont du type dit « crible positif ». Cela signifie que pour les sélectionner, il suffit de placer les cellules en présence de la drogue : seuls les résistants se développent.

Parmi les antibiotiques utilisés, on compte, en particulier, la puromycine (P), la spiromycine (S), l'érythromycine (E) et le chloramphénicol (C). En présence de ces antibiotiques, les levures normales prennent l'aspect de *petites :* elles ne respirent plus; cependant, l'effet est réversible. On pense que ces antibiotiques sont des inhibiteurs des synthèses protéiques mitochondriales. L'inhibition de ces synthèses conduit à l'absence des enzymes fabriquées normalement à ce niveau. Chez la levure, on a trouvé des souches mutantes résistantes à l'un ou l'autre de ces antibiotiques : une bonne partie de ces souches était devenue porteuse d'une résistance à hérédité cytoplasmique.

La lettre symbole de l'antibiotique, affectée d'un exposant ^{S}, désigne une souche sensible à cet antibiotique; si la souche y est résistante, l'exposant est un ^{R}. Par exemple, un mutant E^R est résistant à l'érythromycine, alors qu'une souche E^S y est sensible.

Des croisements entre mutants cytoplasmiques E^R et la souche normale E^S ont été faits. L'analyse des descendants a permis de montrer que les caractères E^R/E^S présentaient une ségrégation irrégulière non mendélienne. Dans les conditions non sélectives (en l'absence d'érythromycine), les deux types de facteurs cytoplasmiques sont réunis dans le zygote diploïde et sont distribués au hasard dans les cellules filles. Celles-ci sont de trois sortes; pures E^R, pures E^S, et hétérozygotes E^R/E^S.

Les mutants résistants, obtenus par mutation à partir de cellules normales ρ^+ (capables de respirer), sont toujours ρ^+. Si on les croise avec des cellules *petites* ρ^-, la résistance est transférée en même temps que la particule ρ : tous les descendants d'un croisement $\rho^+ E^R \times \rho^- E^S$ sont $\rho^+ E^R$.

On a cherché à fabriquer des cellules *petites* ρ^- à partir de souches résistantes $\rho^+ E^R$ (il suffit, on l'a vu, de traiter par l'acriflavine et l'on obtient 100 % de ρ^-). La question à laquelle on devait répondre était la suivante : les ρ^- obtenues à partir de $\rho^+ E^R$ sont-elles E^R ou E^S? Or, il n'est pas possible de tester directement la résistance de cellules *petites* ρ^-, car sur un milieu où les levures peuvent provoquer une fermentation, l'érythromycine empêche simplement la respiration, et, de toute façon, les ρ^- ne peuvent pas respirer. D'autre part, sur un milieu non fermentescible, les ρ^- ne peuvent pas se développer, qu'elles soient E^S ou E^R. Il faut donc procéder d'une manière détournée : on croise les ρ^- avec des $\rho^+ E^S$ normales. Toute la descendance est ρ^+, comme dans tous les croisements de ce type, et aucun descendant n'est résistant E^R. Cela signifie qu'une cellule de levure $\rho^+ E^R$ qui devient ρ^- (qui perd la particule ρ) perd *simultanément* le facteur cytoplasmique de résistance.

Les facteurs cytoplasmiques de résistance aux antibiotiques du groupe considéré paraissent portés par les mitochondries, et associés à ρ, c'est-à-dire l'ADN mitochondrial. On peut considérer qu'il s'agit d'allèles de gènes mitochondriaux.

La carte du chromosome mitochondrial

L'hypothèse de l'existence du chromosome mitochondrial et de gènes mitochondriaux pouvant lui être associés par l'intermédiaire de la particule ρ a incité un certain nombre de chercheurs à penser que l'on devrait pouvoir localiser ces gènes les uns par rapport aux autres sur le chromosome. Dans le cadre de la méthodologie génétique, cela supposait qu'on pût mettre en évidence des recombinaisons entre les gènes mitochondriaux, de façon à démontrer qu'ils sont liés, c'est-à-dire portés par la même structure physique. S'il est possible de les ordonner les uns par rapport aux autres, on doit s'attendre que leur ordre fasse ressortir une structure linéaire et circulaire, car le microscope électronique montre que c'est la structure de l'ADN des mitochondries.

Il paraît simple d'obtenir des cellules recombinées doubles résistantes en croisant des cellules simples résistantes pour deux drogues différentes. Il suffit, théoriquement, de tester la descendance d'un croisement de ce type sur un milieu contenant les deux antibiotiques. De cette manière, seuls les doubles résistants peuvent se développer. Les difficultés qui apparaissent quand on met cette idée en pratique ont été surmontées, et le résultat de l'expérience confirme qu'on peut obtenir des recombinaisons entre gènes mitochondriaux.

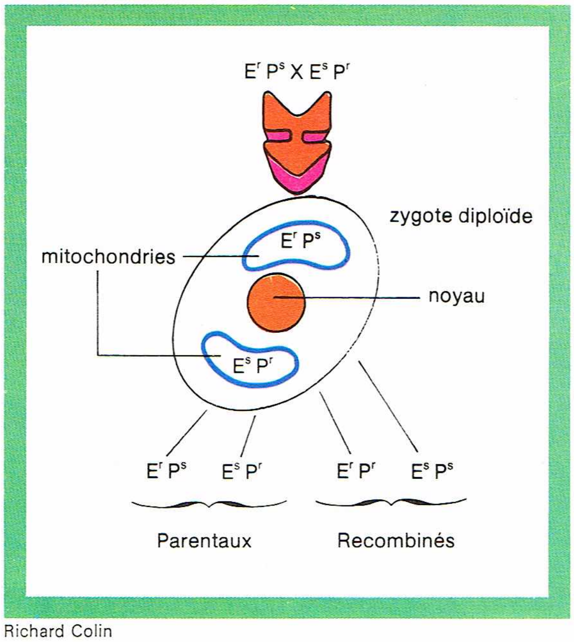

Richard Colin

▶ ***Représentation schématique d'un croisement entre mutants mitochondriaux.***

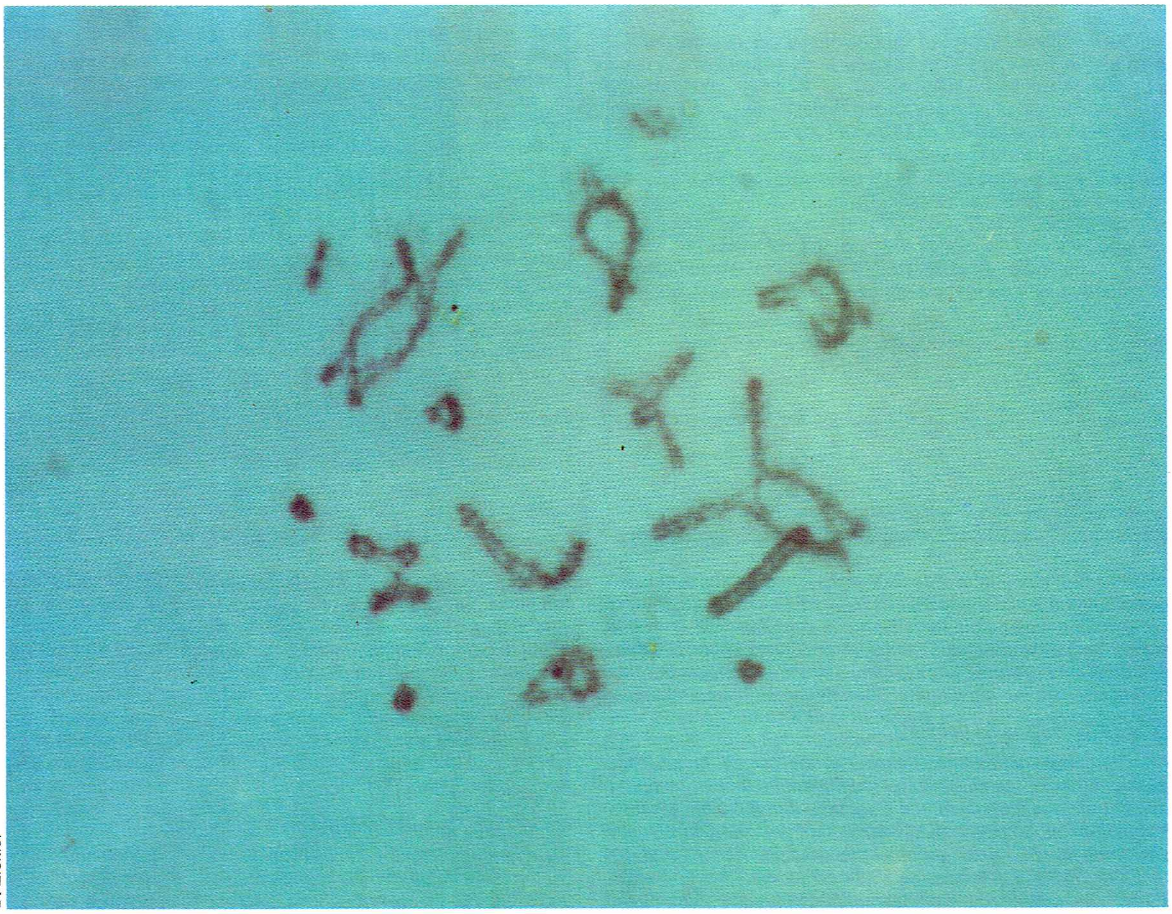

D. Zickler

◀ *La* recombinaison génétique *se produit entre des points homologues de deux chromatides appartenant chacune à un chromosome d'une même paire. Le mécanisme n'est pas exceptionnel, il est un processus fondamental sur le plan de la vie cellulaire. Ici, chromosomes de criquet mâle formant des* chiasmas *au stade* diplotène *de la prophase I de la méiose.*

Ces travaux ont permis de montrer qu'il était possible de retrouver non seulement le recombinant double résistant E^R P^R et les types parentaux E^R P^S et E^S P^R, mais aussi le deuxième type de recombinant, le double sensible E^S P^S.

En effectuant de nombreux croisements, en particulier avec des mutants résistants au chloramphénicol (C^R), qui se répartissent en plusieurs gènes, on a pu démontrer des cas de *liaison*. De plus, la carte que l'on peut établir actuellement avec tous les gènes mitochondriaux connus est *linéaire*.

La dernière donnée est la découverte récente du fait que la recombinaison mitochondriale est polarisée. Cela confirmerait un certain nombre de chercheurs dans l'idée qu'il existe une forte convergence de structures et de comportements entre les mitochondries et les Bactéries.

Autres systèmes d'hérédité extrachromosomique

Il existe bien d'autres systèmes d'hérédité extrachromosomique en dehors de celui que l'on peut attribuer au chromosome des mitochondries. Il y a, notamment, celui du *chromosome du chloroplaste*. Les investigations en cours à l'heure actuelle sur ce sujet montrent les très fortes analogies qui existent entre le chloroplaste et la mitochondrie. Il existe des facteurs à hérédité extrachromosomique que l'on peut attribuer à d'autres particules cytoplasmiques; c'est le cas, par exemple, du *caractère killer* localisé dans les particules *kappa* de la paramécie *Paramecium aurelia*. On a observé, enfin, des cas d'hérédité cytoplasmique que l'on ne peut attribuer ni à une particule, ni à une structure extranucléaire.

Le mécanisme de la recombinaison génétique

Ce que nous avons vu jusqu'à présent montre qu'une partie importante de la génétique est fondée sur l'existence des crossing-over, terme anglo-saxon qui recouvre une réalité assez difficile à cerner. En fait, l'échange de matériel héréditaire est un concept que l'on a été obligé d'utiliser dès que la liaison a été découverte. En effet, si l'on suppose que des gènes liés sont sur le même chromosome, on ne peut expliquer l'apparition de produits recombinés que par un mécanisme d'échange, réciproque ou non.

Le développement de la génétique des Ascomycètes et la possibilité de faire l'analyse des quatre produits d'une même méiose ont permis de préciser les modalités du crossing-over : il est apparu que celui-ci se produisait entre des points homologues de deux chromatides appartenant chacune à un chromosome d'une même paire. Avec l'étude de la génétique des Bactéries et des virus, le fait de la recombinaison génétique a été reconnu comme général. Il s'agit donc d'un processus extrêmement répandu dans le monde vivant, à tel point qu'on le trouve pratiquement toujours associé avec les phénomènes de reproduction. On a vu qu'il se produisait aussi pendant la phase végétative de certains organismes (recombinaison mitotique). Chez les organismes à méiose (Eucaryotes), les figures caractéristiques de la prophase de division I, appariements entre chromosomes et chiasmas, paraissent liées au crossing-over génétique. Il ressort de tout cela que le crossing-over n'est pas un mécanisme d'exception; c'est, en réalité, un processus fondamental sur le plan de la vie cellulaire. Il est aussi extrêmement important sur le plan de la structure des populations. Ce point sera explicité dans la partie concernant la génétique des populations.

L'échange génétique

Jusqu'à une date récente, la recombinaison entre gènes liés était attribuée entièrement à un crossing-over exactement réciproque. Il se produisait quelque chose entre deux points homologues des deux chromatides affectées. Dans un premier temps, il fallait imaginer des cassures simultanées des deux chromatides en ces points; puis il fallait que les chromatides se recollassent de façon à former des recombinés. La formation des chiasmas et leur structure, visibles au microscope au cours de la prophase de la première division de la méiose, paraissaient confirmer cette hypothèse.

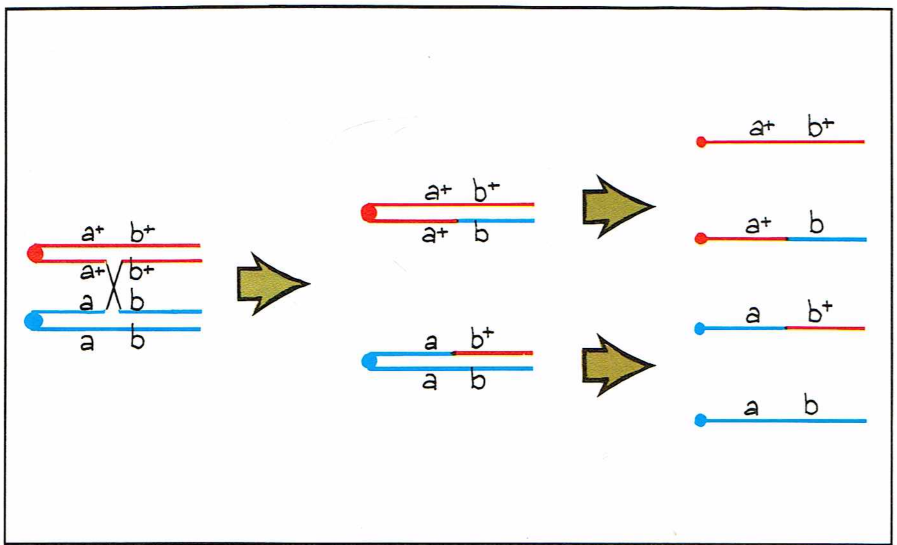

Richard Colin

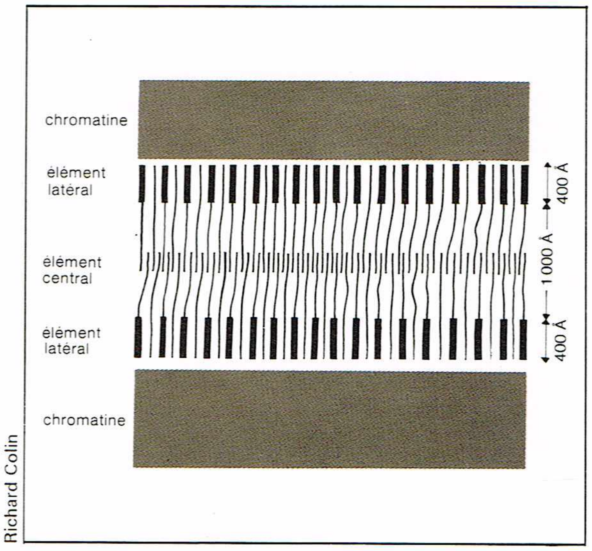

Richard Colin

▲ A gauche, représentation schématique d'un* crossing-over *réciproque, phénomène auquel, jusqu'à présent, était particulièrement attribuée la recombinaison entre gènes liés. A droite, interprétation de la structure des* complexes synaptinémaux, *structures cellulaires spécifiques de l'appariement des chromosomes au stade* pachytène *(d'après Westgaard et von Wettsein).

▼ Schéma de la* réplication semi-conservative *de l'*ADN *; il est valable pour tous les organismes, aussi bien dans le cas de la méiose que dans celui de la mitose.

On sait maintenant que cette vision du processus est beaucoup trop simplifiée. L'explication du mécanisme du crossing-over doit tenir compte de faits nombreux et variés, tant biochimiques que cytologiques ou génétiques ; elle doit en expliquer le plus grand nombre et n'en contredire aucun. Il est nécessaire d'en donner un bref résumé.

Données biochimiques

La première donnée concerne la *nature chimique des gènes*. Depuis les expériences de transformation chez le pneumocoque, on sait qu'il s'agit de l'ADN (Avery, MacLeod et MacCarty, 1944). On sait aussi que la structure de l'ADN est celle d'une double hélice (Watson et Crick, 1953), et que la réplication de l'ADN se fait selon un mode semi-conservatif (Meselson et Stahl, 1958) : cela signifie que les deux brins de chaque molécule d'ADN *duplex* sont séparés pendant la réplication, et que les nouveaux brins sont synthétisés le long des anciens. Chaque nouvelle molécule duplex comprend alors un brin ancien et un brin nouveau. Il est établi, à l'heure actuelle, que ce schéma est parfaitement valable pour tous les organismes, aussi bien dans le cas de la méiose que dans celui de la mitose.

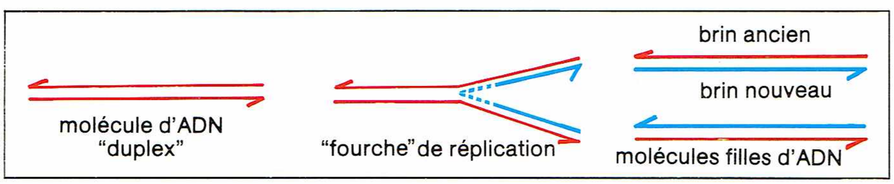

Richard Colin

La deuxième donnée est le *moment* auquel se fait la duplication de l'ADN. La synthèse de l'ADN des chromosomes s'effectue *avant* que la méiose commence, c'est-à-dire avant que le crossing-over se produise. On a néanmoins pu mettre en évidence une petite synthèse d'ADN, dite *synthèse résiduelle*, qui se produit au *stade zygotène*. Cela est très important, car ce stade est peut-être celui auquel se déroulent les crossing-over.

La troisième donnée est fournie par l'étude des *enzymes* qui apparaissent spécifiquement dans les cellules qui subissent ou vont subir la méiose. On a mis en évidence des enzymes capables de provoquer des cassures au niveau d'un des brins de l'ADN duplex, et d'autres capables de recoller, par une petite synthèse, les deux extrémités d'un brin cassé.

Effet des radiations

On sait depuis assez longtemps que l'irradiation par les rayons ultraviolets de cellules susceptibles de recombiner entraîne une augmentation sensible des recombinaisons, qu'il s'agisse de recombinaisons méiotiques ou mitotiques. Or, il est possible de faire agir les rayons UV pendant des temps très courts, et si l'on dispose de cellules dont la méiose est synchronisée, il est possible de les irradier à des stades très précis du déroulement de la méiose. On constate alors que l'augmentation de la recombinaison se produit si l'irradiation a été effectuée au *stade zygotène*, ou au début du *stade pachytène*. D'autre part, on sait qu'une des conséquences de l'action des rayons UV est l'apparition de cassures au niveau de l'un ou l'autre des brins d'une molécule d'ADN duplex. On peut exprimer ce phénomène en disant que, si on provoque des cassures au niveau de l'ADN pendant le stade zygotène, cela entraîne une augmentation des recombinaisons.

Observations cytologiques

La compréhension du comportement des chromosomes au moment de la méiose a d'abord été l'œuvre des cytologistes. C'est l'observation au micrococscope qui a montré le phénomène de l'appariement des chromosomes d'une même paire. Cet appariement est très strict; il se fait entre régions homologues des chromosomes. Si l'on pense que les chromosomes sont un enchaînement de gènes, cela signifie que, lors de l'appariement, les deux allèles d'un même gène sont face à face. La cytologie a aussi montré que dès le début du stade pachytène les chromosomes sont constitués de deux chromatides. Ce sont des chercheurs penchés sur leur microscope qui ont décrit et interprété les chiasmas comme la visualisation d'un échange entre deux des quatre chromatides appariées. Si le pouvoir séparateur des objectifs du microscope ordinaire (photonique) est limité, le microscope électronique permet, grâce à son énorme grossissement, de distinguer des détails extrêmement petits.

Le microscope électronique n'a pas encore montré le détail de la structure des chromosomes, lesquels se présentent comme des masses uniformément colorées. Mais l'observation de chromosomes appariés au stade pachytène a fait apparaître des structures cellulaires spécifiques de cet appariement : les *complexes synaptinémaux*. Ces complexes ont été observés dans de très nombreuses espèces végétales et animales. Ils se présentent comme des structures allongées reliant les chromosomes appariés et parallèles à ceux-ci. Une analyse très précise montre qu'il existe un complexe synaptinémal par paire de chromosome. Le complexe a une structure en trois parties : un axe central, et deux éléments latéraux. Ce sont les éléments latéraux qui sont en contact étroit avec les chromatides appariées.

Il est évident qu'un contact étroit entre les chromosomes est un facteur indispensable pour que des recombinaisons puissent se produire. La découverte au stade pachytène de cette structure qu'est le complexe synaptinémal ne fait que renforcer cette idée.

La conversion génique

Les données génétiques qui ont conduit, dans les années 1950, à faire douter de la simplicité apparente du crossing-over proviennent de l'étude des Ascomycètes. Il s'agit de l'existence de ségrégations, apparemment non mendéliennes, de gènes portés par les chromosomes. Le phénomène aboutissant de ces ségrégations extraor-

dinaires a été appelé *conversion génique*. L'existence même de ces ségrégations et, à plus forte raison, leur interprétation ont été envisagées pendant des années avec scepticisme. Mais l'existence de la conversion génique a depuis été confirmée par de nombreux chercheurs, et le phénomène a été détecté chez de nombreux Ascomycètes. La difficulté du sujet rend nécessaire son exposition à partir d'un exemple concret.

Chez l'Ascomycète *Ascobolus immersus*, la conversion génique a été très étudiée. Nous allons reprendre l'exemple du croisement d'une souche mutante à spores blanches [b] par une souche « sauvage » à spores brunes [b+]. Les asques d'*Ascobolus* contiennent huit spores uninucléées. Les asques du croisement [b] × [b+] contiennent tous quatre spores [b] et quatre spores [b+]. C'est la ségrégation mendélienne classique 1:1. Si l'on ramène cette ségrégation à l'asque pris comme unité, c'est une ségrégation 4:4, ce qui signifie la même chose; cela dénote la ségrégation d'un couple d'allèles b^+/b. Nous avons dit précédemment que *tous les asques* présentaient une ségrégation 4:4; cela n'est pas tout à fait vrai. Il apparaît, en effet, quelques asques présentant des ségrégations différentes, le plus souvent 6:2 (six [b+]:deux [b]) ou 2:6 (deux [b+]:six [b]).

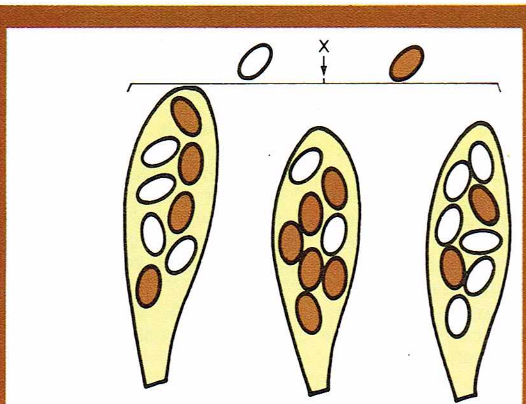

type d'asques	4 : 4	6 : 2	2 : 6
nombre	1787	26	35
pourcentage	96,7 %	1,5 %	1,8 %

Richard Colin

◀ **La conversion génique** ***a été très bien étudiée chez l'Ascomycète*** **Ascobolus immersus;** ***c'est l'organisme où le phénomène est le plus fréquent.***

Il est clair que le crossing-over, compris comme un *échange* réciproque, ne peut rendre compte des ségrégations de ces quelques asques. Ils ne peuvent pas provenir non plus de *réversions* de *b* vers b^+, car la fréquence du phénomène est beaucoup plus élevée que celle des réversions. Chez *Ascobolus*, qui est sans doute l'organisme où les conversions géniques sont les plus fréquentes, leur fréquence est de l'ordre de 1 % à 10 %. On peut décrire le phénomène en disant qu'une chromatide a été *changée* (et non *échangée*), perdant son identité au profit de celle de ses homologues, avec celles des allèles qu'elle porte : *b* est devenu b^+, ou inversement. On dit que l'allèle *b* est converti en b^+, ou inversement.

Le copy-choice

L'hypothèse du *copy-choice* est une des premières qui aient été avancées pour expliquer la conversion génique. On pourrait traduire le terme par l'équivalent français « erreur de copie ». Cette théorie propose que la conversion s'est effectuée lors de la synthèse aboutissant au dédoublement des chromosomes en deux chromatides. Autrement dit, lorsqu'une paire de chromosomes homologues est en cours de duplication, le processus de copie pourrait se produire partiellement sur un chromosome homologue, et partiellement sur un autre. Si ce changement de modèle pour la copie est bilatéral, cela aboutirait à un crossing-over, et s'il est unilatéral, à une conversion.

▼ ***Représentation schématique de l'obtention des crossing-over et de conversions géniques dans l'hypothèse du « copy-choice ».***

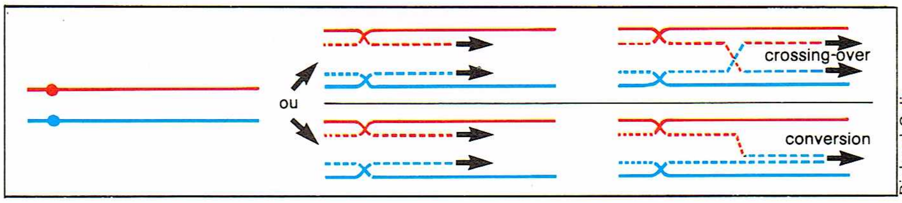

Richard Colin

Cette hypothèse, pour séduisante et simple qu'elle soit, est à rejeter absolument, car elle contredit de nombreux faits fondamentaux.

— Si elle peut expliquer aussi bien les conversions et les crossing-over, elle ne peut rendre compte des doubles crossing-over qui impliquent trois ou quatre chromatides;

— Elle suppose que la réplication de l'ADN est conservative, alors qu'il est maintenant clairement démontré que cette synthèse suit un schéma semi-conservatif;

— Chez les Ascomycètes, c'est-à-dire les organismes où l'on démontre l'existence de la conversion, la réplication de l'ADN s'effectue *avant la formation du zygote :* les chromosomes homologues qui, dans l'hypothèse du copy-choice, devraient être en présence, sont encore dans des noyaux séparés; c'est cette dernière observation qui a définitivement écarté la théorie du copy-choice.

Les ségrégations postméiotiques

Au cours de croisements $b \times b^+$ chez *Ascobolus*, il apparaît des asques où la ségrégation des allèles n'est pas 4:4. Nous avons vu qu'il existait des asques 6:2 (six [b^+]:deux [b]) et des asques 2:6 (deux [b^+]:six [b]). Dans certains croisements, il en apparaît d'autres sortes encore : on trouve occasionnellement des asques montrant des ségrégations 5:3 ou 3:5.

▼ ***En haut,*** **ségrégation postméiotique,** ***ou conversion de la moitié de la chromatide chez*** **Ascobolus immersus.** ***En bas, une forme de représentation schématique du*** **crossing-over** ***(ségrégation 4:4)*** **et de la conversion génique** ***(ségrégations 2:6 et 6:2).***

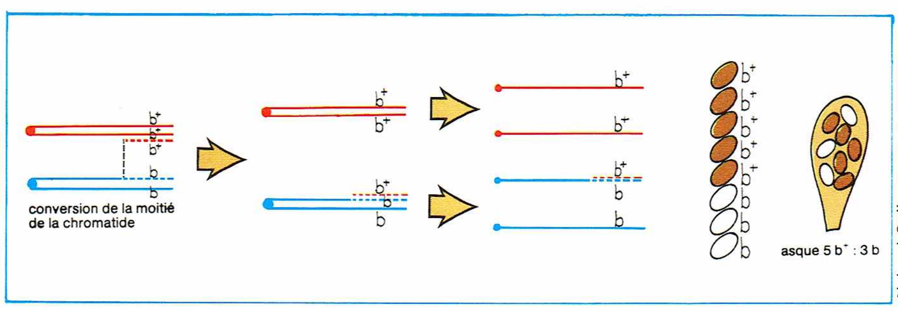

Richard Colin

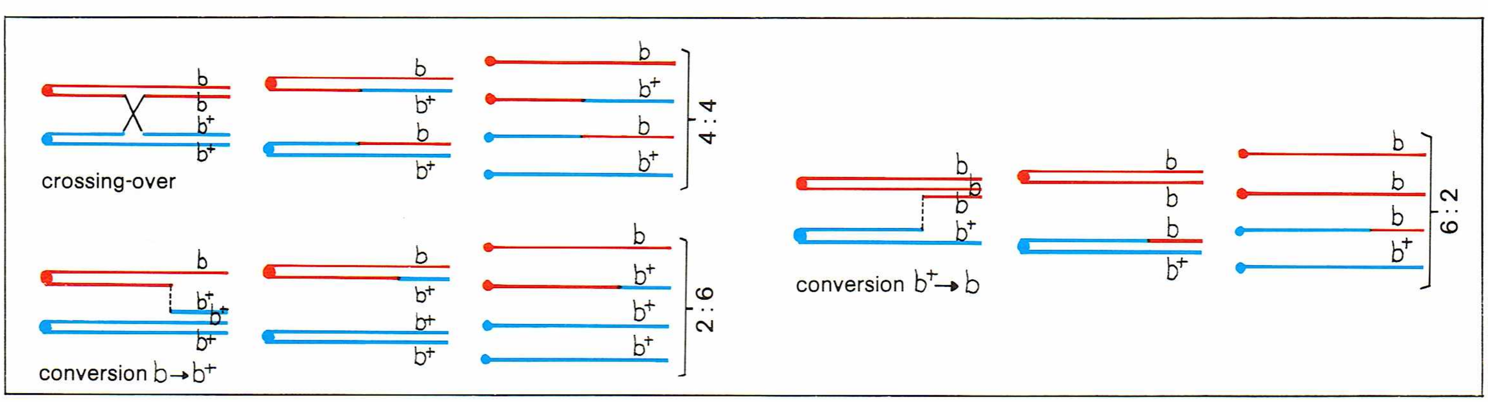

Richard Colin

Comme le montre le schéma (page 271), cela signifie nécessairement qu'un des produits de la méiose était hétérozygote b/b^+, et que les deux allèles se sont séparés *après la méiose,* à l'occasion de la mitose postméiotique. C'est pourquoi les ségrégations impaires sont appelées *ségrégations postméiotiques*. Cela signifie aussi que la conversion qui est à l'origine de tels asques n'a affecté que *la moitié* d'une chromatide. Le phénomène de conversion de la moitié de la chromatide suggère fortement que celle-ci est formée de deux sous-unités, douées d'une autonomie relative. Il est possible d'obtenir des chromatides « hétérozygotes » pour un couple d'allèles.

L'ADN hybride

Au cours de la conversion génique, un segment d'information génétique d'une chromatide est remplacé par un segment homologue, copié à partir d'une chromatide du chromosome homologue. Au niveau des produits de la méiose, on constate la présence d'une copie supplémentaire et la perte d'une copie de l'homologue. D'autre part, l'existence de conversions affectant une moitié de la chromatide fait postuler que la chromatide peut être « hétérozygote ». Depuis que les expériences d'autoradiographie ont montré que les chromatides avaient le même mode de réplication semi-conservatif que la molécule d'ADN, il est admis que le matériel héréditaire d'une chromatide est constitué d'une seule molécule d'ADN duplex (double hélice). Si la chromatide peut être hétérozygote, c'est que la molécule d'ADN elle-même peut être hybride.

Une molécule hybride d'ADN est « hétérozygote » pour les marqueurs génétiques compris dans la longueur de cette molécule. L'existence des ségrégations postméiotiques suggère que cette molécule, appelée *hétéroduplex,* est formée d'un brin provenant d'un chromosome et d'un brin provenant de son homologue.

Une fois l'idée d'un ADN hybride ou hétéroduplex considérée comme possible, différentes hypothèses ont été émises pour expliquer la formation d'une telle structure, et surtout pour expliquer comment elle peut donner naissance à des conversions et des crossing-over. Étant donné que le simple énoncé des arguments avancés par les partisans de tel ou tel « modèle » de la recombinaison excéderait largement la taille du présent volume, nous nous bornerons à insister sur les points d'accord qui existent entre les différentes écoles. Ces points sont relativement nombreux, car un certain nombre de faits incontestables n'admettent qu'un nombre limité d'interprétations. En fait, les désaccords proviennent de particularités dans les hypothèses qui n'ont pas encore été vérifiées ou infirmées par des expériences.

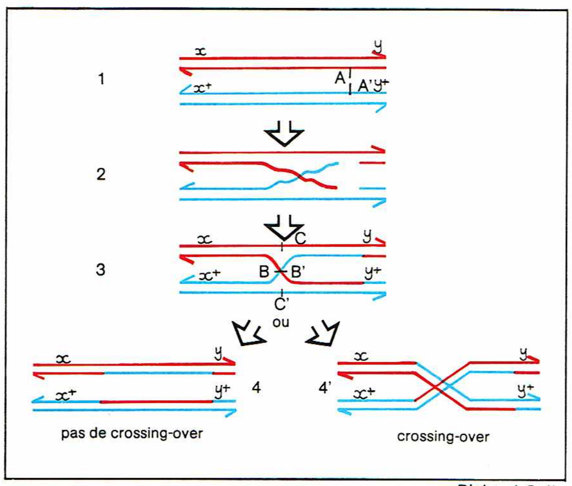

▶ ***Formation de l'ADN « hybride » : deux régions d'ADN hétéroduplex se forment à la suite d'un processus de cassure, puis de recollement (2) aboutissant à la constitution du demi-chiasma (3). Celui-ci peut se résoudre de deux façons (4 et 4').***

Richard Colin

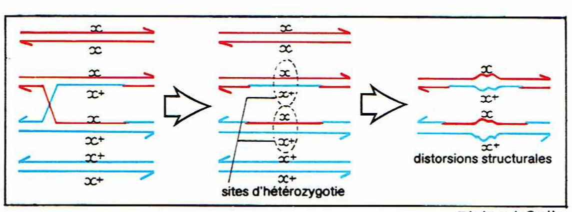

Richard Colin

▶ ***A gauche, formation de mauvais appariements dans la zone d'ADN hybride si elle contient un site mutant x à l'état hétérozygote. A droite, correction des distorsions provoquées par les sites d'hétérozygotie grâce à des mécanismes d'excision, puis de synthèse.***

Un des deux archétypes de modèles est celui proposé, en 1964, par Holliday. Il a subi, depuis cette date, de nombreux rajouts et variations à mesure que des expériences nouvelles venaient apporter des précisions ou des contradictions. D'après Holliday, le processus commencerait par des cassures affectant un des deux brins de chaque molécule d'ADN duplex *en des points homologues* (A et A'). Il s'ensuivrait une dénaturation partielle (étape 2), suivie d'un recollement des brins affectés. Si la renaturation s'effectue normalement, rien ne sera changé et les ADN duplex seront identiques aux molécules d'origine. Cependant, la reconstitution peut s'effectuer par une renaturation illégitime, auquel cas le résultat est la formation de deux ADN *hétéroduplex hybrides* (étape 3). Mais la structure de l'ADN ainsi reconstitué ne peut pas persister (un duplex est en fait une chromatide), car l'anaphase de la méiose va séparer les chromosomes homologues (voir schéma, à gauche, en haut).

Les deux ADN hybrides qui sont reliés par chacun de leurs brins ne peuvent pas se séparer sans cassures. Les points où les deux molécules hétéroduplex sont retenues ensemble sont appelés *demi-chiasmas* (car ils n'affectent que la moitié de la chromatide). Lorsque les chromatides tendent à se séparer, le demi-chiasma doit être éliminé. La résolution du demi-chiasma se fait par des cassures suivies de recollement en des points homologues des brins constituant l'ADN. Il y a deux solutions : soit des cassures en *B* et *B'*, soit des cassures en *C* et *C'*. Si la résolution du demi-chiasma se fait par des cassures en B et B', on aboutit à la situation (4), où il subsiste deux segments d'ADN hybrides, mais où les associations des marqueurs extérieurs (x/x^+ et y/y^+) à ce segment restent celles d'origine. Si la résolution du demi-chiasma se fait par des cassures en C et C', le résultat schématisé en (4') montre qu'il s'agit d'un *crossing-over :* les marqueurs latéraux au segment d'ADN hybrides sont maintenant en association *recombinée* par rapport à l'association du début (parentale).

C'est ainsi que Holliday explique le crossing-over. Mais comment rendre compte de la conversion et de la ségrégation postméiotique ?

Plaçons un marqueur génétique *dans* la zone d'ADN hybride. Si un des chromosomes porte un allèle x et son homologue un allèle x^+, cela signifie que l'information contenue dans l'ADN des chromatides homologues n'est pas *identique*. Il existe donc des différences dans la séquence des bases nucléotidiques des ADN homologues. Au niveau des séquences de bases différentes d'un ADN hybride, même si la différence est petite, cela va se traduire par des mauvais appariements entre les deux brins qui ne sont plus strictement complémentaires. Au niveau de la structure de l'ADN hybride, il va se produire des distorsions. On dit qu'un *site d'hétérozygotie* modifie *localement* la structure de l'ADN hybride.

On sait maintenant qu'au niveau cellulaire il existe des systèmes enzymatiques capables de *réparer des lésions* existant au niveau de l'ADN, ainsi que certaines anomalies de structures. Il est donc possible de supposer que de tels systèmes enzymatiques pourraient *réparer les mauvais appariements* qui existent dans un ADN hybride au niveau des sites d'hétérozygotie. Cette « réparation » pourrait se faire de telle manière qu'elle rétablirait l'homozygotie, et donc des brins parfaitement complémentaires dans l'ADN hybride, entraînant ainsi la disparition des distorsions structurales. Cela suppose que ce *mécanisme de correction* agisse en deux étapes. Premièrement, une *excision* de l'un des deux brins au niveau du mauvais appariement, puis une resynthèse destinée à reformer, *par copie sur le brin restant*, un ADN duplex. Cette synthèse se faisant par complémentarité, l'ADN duplex est *ipso facto* doté d'une structure parfaite : le mauvais appariement a disparu. En même temps, l'ADN est redevenu « homozygote » et la chromatide « pure ».

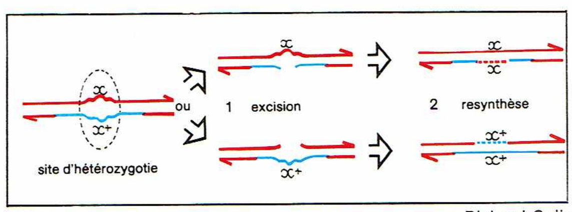

Richard Colin

On suppose que les sites d'hétérozygotie x/x^+ peuvent être *corrigés* dans les deux sens $x \rightarrow x^+$ ou $x^+ \rightarrow x$. Comment cela va-t-il se traduire au niveau de la ségrégation dans un asque des allèles x et x^+ ? La figure ci-dessous schématise les différents cas qui peuvent se présenter.

— Les deux sites d'hétérozygotie sont *corrigés :* cela peut aboutir à des asques $6x^+:2x$ (a), $2x^+:6x$ (b) ou encore $4x:4x^+$ (c) (conversions géniques).

— Un seul des sites d'hétérozygotie est corrigé : on peut obtenir alors des asques $5x:3x^+$ (d) ou $3x:5x^+$ (e), soit des ségrégations postméiotiques ou des conversions de la moitié de la chromatide.

— Aucun des sites n'est corrigé : on obtient alors un asque $4x:4x^+$ (non représenté sur le schéma).

On mesure maintenant toute l'ingéniosité du modèle hypothétique proposé pour expliquer des ségrégations qui paraissaient aberrantes au premier abord. Outre ce premier intérêt, ce type d'hypothèse a le mérite d'être une tentative de clarification synthétique qui explique, plus ou moins bien, une grande partie des faits connus à ce jour. Elle présente, enfin, l'immense avantage d'être accessible à l'expérimentation et suscite, de ce fait, un effort de recherche grandissant dans une voie nouvelle.

L'exemple que nous avons choisi, l'*échange génétique,* montre quelle est la force de la méthode d'analyse génétique. Dans ce cas précis, elle permet de passer d'une observation apparemment marginale (l'apparition avec une très faible fréquence d'asques qui ne présentent pas la ségrégation mendélienne classique 4:4) à une hypothèse explicative raisonnable au niveau de la molécule d'ADN. Et cela à l'aide seulement de quelques croisements et d'une bonne connaissance de la méiose, tant sur le plan de la génétique que sur ceux de la biochimie et de la cytologie. Cette méthode extrêmement précieuse peut s'appliquer à un très grand nombre de problèmes. L'ensemble du monde scientifique a pris conscience de sa valeur, et son application se répand.

La régulation de la recombinaison

Jusqu'à présent, nous avons peu parlé de la manière dont agissent les gènes. Ils ont été considérés comme véhicules de l'information héréditaire, nécessaire à la réalisation d'un caractère phénotypique. Comment s'opère la transformation de cette information présente sous la forme de séquences de nucléotides dans l'ADN en un caractère donné, par exemple la couleur des spores de l'Ascomycète *Ascobolus ?* Bien que le mécanisme précis de ce processus ait déjà été décrit, il est bon d'en rappeler les grandes étapes.

Un gène-une enzyme

C'est au cours des années 1940 qu'a été formulée la théorie : « un gène-une enzyme ». Cette expression signifie qu'un gène contrôle l'activité d'une enzyme. Si

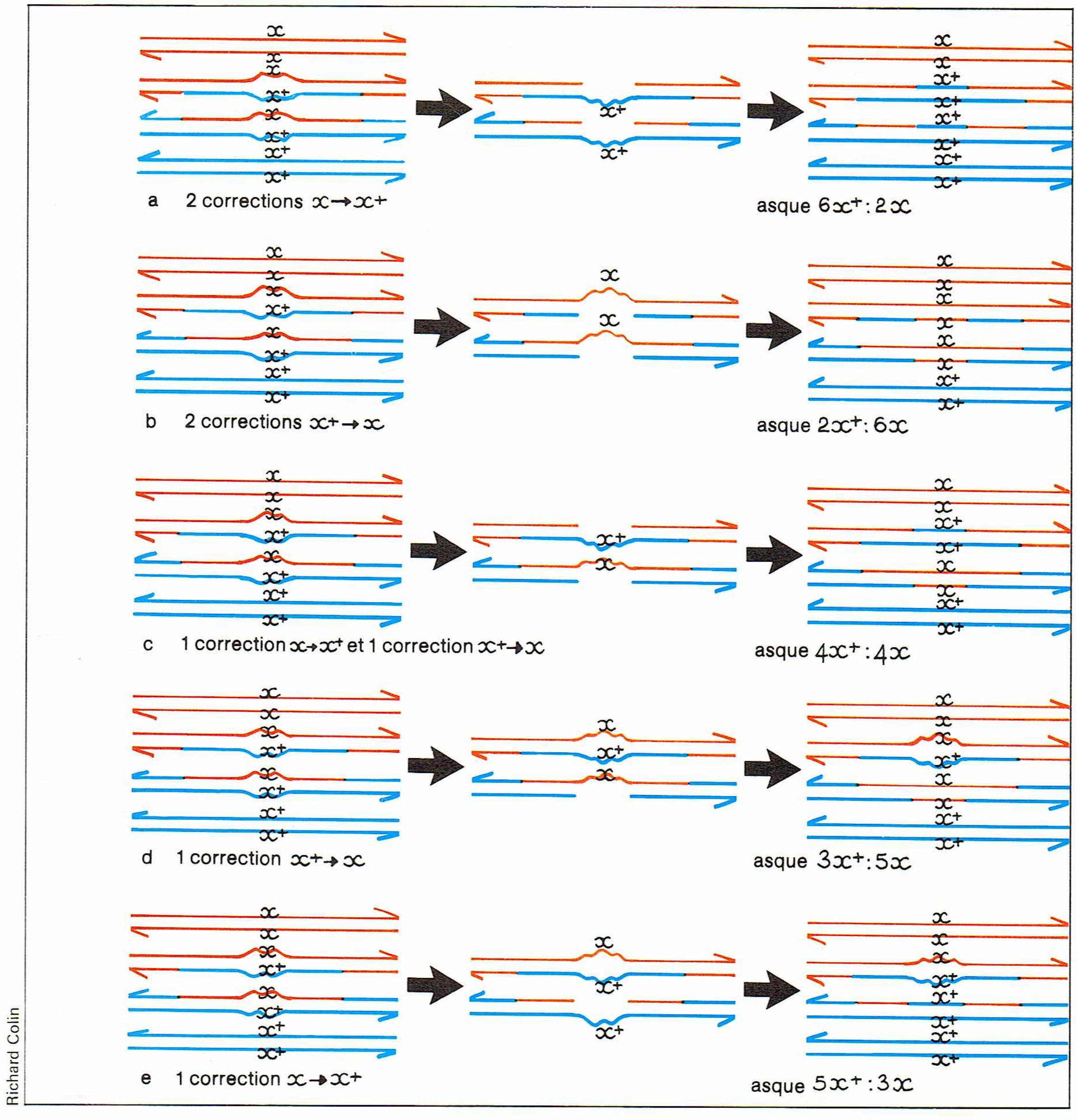

◀ *Explication de tous les types de ségrégation grâce à la combinaison de deux hypothèses : la formation d'ADN hybride et la correction de mauvais appariements.*

le gène est présent sous une forme allélique, par exemple a^+, l'enzyme est présente et active. La mutation du gène en une forme allélique mutante a^- entraîne la disparition de l'enzyme ou son inactivation. La réaction chimique catalysée par cette enzyme est alors bloquée et la chaîne de biosynthèse s'arrête en un point précis. Cette théorie a été vérifiée depuis sous tous les aspects.

Le code génétique

L'information génétique présente dans l'ADN sous forme de séquences de nucléotides est donc traduite en une enzyme constituée d'une séquence d'acides aminés. Ces derniers étant au nombre de vingt, et les nucléotides au nombre de quatre seulement, il faut admettre que chaque gène communique son information par l'intermédiaire d'un *code* grâce auquel un groupement défini de nucléotides désigne un acide aminé spécifique. Il faut prendre les nucléotides par trois au moins pour avoir plus de vingt combinaisons possibles.

	U	C	A	G	
U	UUU Phe.	UCU Ser.	UAU Tyr.	UGU Cys	U
	UUC Phe.	UCC Ser.	UAC Tyr.	UGC Cys	C
	UUA Leu.	UCA Ser.	UAA *	UGA *	A
	UUG Leu.	UCG Ser.	UAG *	UGG Tyr.	G
C	CUU Leu.	CCU Pro.	CAU His.	CGU Arg.	U
	CUC Leu.	CCC Pro.	CAC His.	CGC Arg.	C
	CUA Leu.	CCA Pro.	CAA Gln.	CGA Arg.	A
	CUG Leu.	CCG Pro.	CAG Gln.	CGG Arg.	G
A	AUU leu.	ACU Thr.	AAU Asp.	AGU Ser.	U
	AUC leu.	ACC Thr.	AAC Asp.	AGC Ser.	C
	AUA leu.	ACA Thr.	AAA Lys.	AGA Arg.	A
	AUG Met.	ACG Thr.	AAG Lys.	AGG Arg.	G
G	GUU val.	GCU Ala	GAU Asp.	GGU Gly	U
	GUC val.	GCC Ala	GAC Asp.	GGC Gly	C
	GUA val.	GCA Ala	GAA Glu	GGA Gly	A
	GUG val.	GCG Ala	GAG Glu	GGG Gly	G

I.G.D.A.

Dès que le problème fut posé en ces termes, de nombreux chercheurs mirent en œuvre conjointement patience, ténacité, génétique et biochimie, et déchiffrèrent le code. Ils ont ainsi pu vérifier que celui-ci consistait bien en *triplets de nucléotides contigus* et établir de façon complète la correspondance entre les différents triplets possibles et les acides aminés. Ils ont, en outre, démontré l'existence d'un intermédiaire : l'ARN messager, ou simplement messager. Une constatation, d'un autre ordre mais de première importance, est sortie de ces études : *le code est universel*. Les triplets de nucléotides ont la même signification chez un virus, chez une souris, l'homme ou un Champignon. Il s'agit là d'une preuve de l'unité du monde vivant, et d'un argument extrêmement puissant en faveur de l'idée d'une origine commune à tous les êtres vivants, c'est-à-dire en faveur de l'idée d'*évolution* à partir d'un ancêtre commun.

La régulation de l'activité des gènes

J. Beisson écrit : « Une cellule apparaît un peu comme un sac plein d'enzymes, renfermant un autre sac plus petit, plein de gènes. Mais ce sac est hautement structuré, et, à tous les niveaux d'organisation, l'ordre y règne. » De fait, la vie cellulaire est un équilibre, sans cesse remis en question, entre l'immobilisme et l'emballement. La cellule est capable de s'adapter à des conditions variées de son environnement, ce qui implique qu'elle est capable de modifier son métabolisme en fonction des conditions extérieures. Le flux du métabolisme présente un fonctionnement intégré, cohérent. Il est soumis à de nombreuses interactions contrôlant l'activité de la matière vivante. (Ces procédés de régulation commencent à être connus.)

Alors que toutes les cellules d'un même organisme contiennent la même information génétique, elles ne sont pas identiques, du point de vue de la forme, de la composition chimique, ou de l'activité. Cela est dû au fait que ces différentes cellules n'expriment pas la même information. A un moment donné, dans un type cellulaire donné, certains gènes sont traduits alors que d'autres sont inactifs. Un gène peut être présent soit dans un contexte sous une forme telle qu'il peut être traduit, soit dans un état tel qu'il est « muet ». Nous allons envisager deux mécanismes qui permettent de passer de l'une à l'autre : l'*induction* et la *répression*.

L'induction

Il existe des systèmes enzymatiques dits *inductibles*. Les enzymes n'y sont synthétisées que dans certaines conditions précises; en présence d'un corps appelé *inducteur*. La situation la plus simple est réalisée quand l'inducteur est le substrat de l'enzyme, c'est-à-dire le corps destiné à être transformé par la réaction.

On a pu démontrer que la synthèse d'une enzyme de *E. coli*, la β-galactosidase, est inductible, c'est-à-dire qu'elle est synthétisée par la cellule quand le milieu nutritif contient du lactose. L'enzyme coupe la molécule de ce sucre, qui donne alors du glucose et du galactose. Si le milieu ne contient pas de lactose, la β-galactosidase n'est plus synthétisée par la cellule (voir ci-dessous).

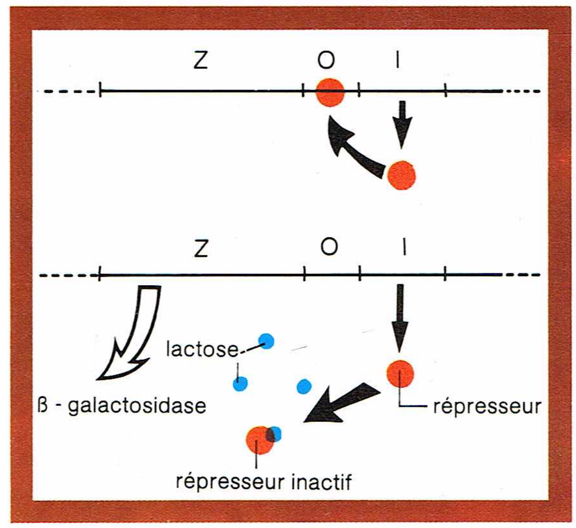

Richard Colin

▶ *A gauche, les 64 triplets du code génétique; les codons marqués renvoient à des triplets « non-sens » qui ne correspondent à aucun acide aminé. A droite, représentation schématique du système de régulation inductible : cas d'une enzyme d'E. coli : la β-galactosidase.*

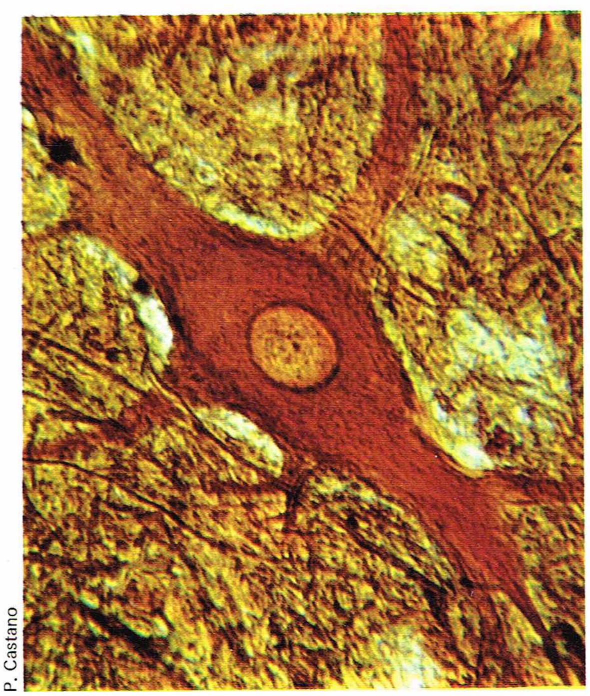

P. Castano

▶ *Si toutes les cellules d'un même organisme contiennent la même information génétique, elles ne sont pas identiques du point de vue de la forme, de la composition chimique ou de l'activité : ici, cellule motrice de la corne antérieure de la moelle épinière (coloration de contraste).*

Le mécanisme précis de l'induction a été analysé par une approche génétique. Un modèle fonctionnel a été proposé, en 1961, par Jacob et Monod. Le gène *z* contient l'information qui code pour la structure de la β-galactosidase : c'est le *gène de structure* de l'enzyme. Le locus *o*, appelé *opérateur*, permet ou non que le gène de structure soit transcrit. Si le *répresseur*, produit du gène *i*, est fixé au locus *o*, le gène de structure *z* n'est

pas transcrit. Si le locus *o* est libre, l'information de *z* est utilisée pour fabriquer la β-galactosidase. C'est la présence de lactose qui détermine si le répresseur se fixe au locus opérateur. Si le lactose est présent, il forme avec le répresseur un complexe incapable de se fixer au locus *o :* le gène *z* est transcrit. Par contre, si le lactose est absent, le répresseur retrouve son affinité pour *o,* s'y fixe, et le fonctionnement de *z* est bloqué. Le répresseur, qui est une protéine, a maintenant été isolé.

La répression

La répression est un système de régulation qui fonctionne à l'inverse de l'induction. Toujours chez *E. coli,* on connaît des enzymes (par exemple, l'enzyme qui contrôle la dernière étape de la chaîne de biosynthèse d'un acide aminé, la méthionine, qui n'est plus synthétisée quand on ajoute la méthionine au milieu nutritif). L'activité du gène de structure de l'enzyme n'est plus réglée par le substrat de l'enzyme, mais par le produit final de la réaction. Un répresseur est toujours nécessaire, mais il ne présente aucune tendance à se fixer au locus opérateur, et l'enzyme est synthétisée. Si la méthionine est présente, elle forme avec le répresseur un complexe qui a une activité répressive. Il se fixe au locus *o* et l'activité du gène de structure est bloquée (voir ci-dessus).

Autres mécanismes

Ces deux mécanismes de régulation sont parmi les plus simples. Il existe bien d'autres exemples de régulation, qui paraissent plus compliqués. Il faut souligner qu'une cellule qui ne synthétise pas des enzymes, inutiles dans les conditions où elles ne sont pas nécessaires, possède sans aucun doute un très net avantage sélectif sur d'autres cellules qui ne seraient pas capables d'une telle économie d'énergie. Chez les organismes Eucaryotes, les recherches sont loin d'avoir atteint le niveau de celles qui ont été effectuées sur le métabolisme des Bactéries; il n'y a même pas encore de *preuves directes* que de tels mécanismes existent. Leur existence est cependant hautement probable. Ainsi, on a pu récemment étudier chez les Champignons plusieurs systèmes présentant de très fortes analogies avec ceux décrits chez les Bactéries.

La méiose et la recombinaison

Le déroulement de la méiose, s'il est bien décrit du point de vue cytologique, reste très mal compris en tant que fonction cellulaire. Le niveau de complexité du processus est bien supérieur à celui d'une chaîne de biosynthèse. Or, plus un système est complexe, plus les divers éléments qui le composent interagissent les uns sur les autres, et plus les « pannes » risquent d'être nombreuses. C'est là, plus que partout ailleurs, que des régulations strictes sont nécessaires parce que c'est là que l'ordre est le plus vital. L'existence de ces régulations est imposée par la nécessité d'une coexistence harmonieuse entre des processus aussi différents que la duplication de l'ADN, le comportement des chromosomes, la formation et le fonctionnement de l'appareil cinétique, la formation et la disparition des membranes nucléaires et, enfin, la recombinaison génétique elle-même.

En général, lorsque le généticien est confronté avec le problème d'une fonction cellulaire que l'on comprend mal, il isole des souches mutantes incapables d'accomplir cette fonction : si les mutants sont obtenus, il s'agit alors d'essayer d'identifier l'étape biochimique primaire dont le fonctionnement est perturbé ou bloqué.

Cette approche a porté ses fruits dans l'étude de la recombinaison génétique des Bactéries. Chez ces organismes, on a trouvé que certaines classes de mutants, isolées sur le critère de leur exceptionnelle sensibilité aux effets létaux des rayons UV ou à ceux des rayons X, étaient aussi déficientes pour la recombinaison. Ces radiations provoquent des lésions dans la structure de l'ADN : apparition de bases anormales, liaisons chimiques covalentes entre bases adjacentes, ce qui provoque de mauvais appariements, des distorsions structurales et des erreurs de réplication. Les rayons UV ou X provoquent aussi des cassures des brins d'ADN. Les mutants exceptionnellement sensibles sont simplement *des souches devenues incapables de réparer ces lésions.* Le fait que des mutants incapables de réparer des lésions de l'ADN soient simultanément déficients pour la recombinaison indique qu'il existe sans doute des étapes enzymatiques communes aux deux phénomènes, ce qui était une des suppositions émises dans le cadre de l'hypothèse de l'ADN hybride, lors de la recombinaison.

Quelques-unes des enzymes impliquées dans ces mécanismes ont été identifiées. Il s'agit bien d'enzymes dont le substrat est l'ADN.

Signalons, enfin, que la relation qui existerait entre les mécanismes de réparation de l'ADN et la recombinaison est en passe d'être confirmée chez les Bactéries.

Le cas du mâle de la drosophile

S'il en était besoin, il est un fait qui, à lui seul, prouverait qu'il y a une régulation de la recombinaison génétique : il s'agit de l'existence même du mâle de la drosophile. En effet, *il n'y a pas de crossing-over chez les drosophiles mâles.*

L'absence complète de recombinaison entre gènes liés chez les mâles, alors qu'elle existe chez les femelles, implique obligatoirement la régulation de l'activité des gènes qui gouvernent cette fonction. De cette observation, on peut tirer une autre conclusion : il est possible de dissocier les deux phénomènes de la recombinaison et de la méiose, car cette dernière se déroule normalement. De plus, cela permet d'avancer l'idée que leur habituelle association est, en fait, une régulation.

D'autre part, il existe chez ce même organisme des souches mutantes qui présentent la même anomalie que les mâles. Ce sont les mutants *c*(3) de Gowen. Dans les souches mutantes, il n'y a jamais de recombinaisons entre les gènes liés, aussi bien chez les mâles (où c'est la situation normale) que chez les femelles. Dans ce cas, le microscope électronique montre que les complexes synaptinémaux, qui existent chez les individus normaux, sont absents. Cela permet d'établir une corrélation directe entre l'existence du crossing-over et celle des complexes synaptinémaux. Le rôle probable de ces structures lors

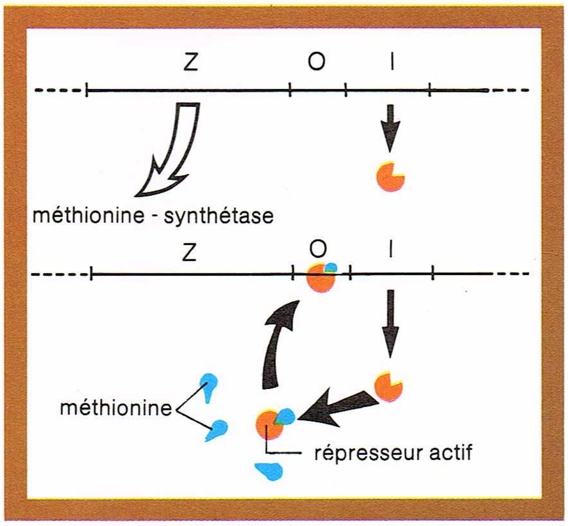

Richard Colin

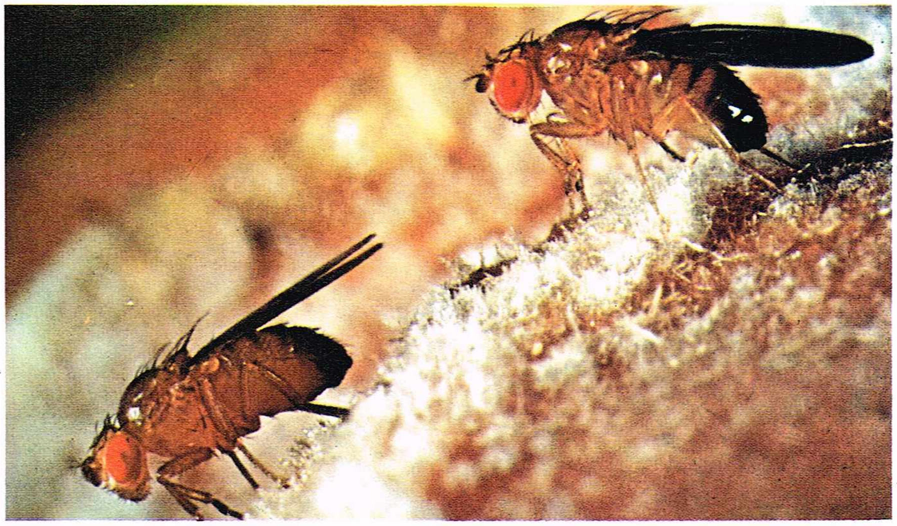

J. Six

▲ *A gauche,* **système de régulation répressible.** *A droite, l'existence même du mâle de drosophile prouverait* **qu'il y a régulation de la recombinaison génétique :** *en effet, il n'y a pas de crossing-over chez les drosophiles mâles.*

▶ *Un champ de maïs : on note que la hauteur des cimes varie graduellement en fonction des petites variations du milieu qui existent d'un pied à l'autre et non du génotype qui est le même pour toutes les graines.*

Marka

de l'appariement des chromosomes homologues se trouve confirmé et précisé : en effet, ces structures paraissent liées non seulement aux appariements, mais aussi aux crossing-over.

Le contrôle des fréquences de recombinaison

Les cas de régulation que l'on vient de voir sont des régulations par le « tout ou rien ». En fait, il s'agit d'un contrôle relativement grossier du phénomène. On a découvert chez les Ascomycètes une autre sorte de régulation, qui agit de façon beaucoup plus subtile. Chez *Neurospora crassa,* il existe des gènes appelés gènes *rec,* qui exercent *un contrôle de la fréquence des recombinaisons* dans une région déterminée d'un chromosome. Selon la forme allélique de ces gènes *rec* présente dans une souche, la fréquence de recombinaison dans une petite région d'un chromosome peut varier, selon les cas, d'un facteur 3 à 10.

On n'a pas observé de corrélation évidente entre l'activité du ou des gènes localisés dans une région d'un chromosome et la fréquence des recombinaisons qui s'y produisent. Le fait qu'un segment de chromosome participe ou non à une recombinaison avec son homologue dépend certainement de l'état structural exact du chromosome (spiralisation, etc.). Il est facile d'imaginer qu'il peut être affecté, dans le détail, par de nombreuses causes.

L'existence de nombreuses différences alléliques affecte la recombinaison dans plusieurs souches, et il serait surprenant que cela n'eût pas des conséquences graves pour l'espèce et sa structure génétique. On peut penser que, au moins à long terme, des contrôles spécifiques de la recombinaison ont une signification adaptative considérable.

Hérédité quantitative

Jusqu'à maintenant, nous n'avons considéré que des caractères à variabilité discontinue, comme la présence ou l'absence d'une caractéristique donnée, ou l'opposition entre deux formes ou deux couleurs. C'est ainsi que les pois étudiés par Mendel étaient lisses ou rugueux, jaunes ou verts, sans que, dans ses expériences, soient apparus de caractères intermédiaires tels que toute la gamme de couleurs qui peut exister entre le jaune et le vert. En fait, dans tous les exemples des chapitres précédents, les indi-

vidus ne différaient entre eux que par un nombre limité de gènes (dans la plupart des cas par un seul gène) responsables de l'aspect pris par le caractère étudié.

La génétique quantitative s'intéresse aux caractères qui ne peuvent pas être classés en deux ou trois catégories bien définies, et qui, entre les deux extrêmes qu'ils peuvent atteindre, existent sous toutes les formes intermédiaires et peuvent ainsi être évalués quantitativement. La variation continue que l'on observe ainsi dans une population naturelle, pour un caractère donné, est due au fait que le caractère est gouverné par un *grand nombre de gènes* et qu'au niveau de chacun de ces gènes il existe dans la population *plusieurs allèles*. D'autre part, ces gènes inter-agissent souvent les uns sur les autres, et même dans les cas où ils n'ont, les uns par rapport aux autres, que des effets cumulatifs il n'est pas possible de discerner les différences existant entre les effets respectifs des allèles d'un gène donné ; ces différences sont le plus souvent trop petites et ne sont pas distinguables des effets du milieu.

Par exemple, dans un champ de maïs où les conditions ambiantes sont à peu près uniformes, on note que la hauteur des cimes varie graduellement entre certaines limites extrêmes. Ces différences sont dues aux petites variations de milieu qui existent d'un pied à l'autre, car les graines de maïs qui sont fournies actuellement aux cultivateurs ont, pour une variété donnée, toutes le même génotype. La différence la plus nette que l'on observe est la différence de longueur entre les pieds de la bordure du champ et ceux du milieu du champ. On peut ainsi définir, pour une variété donnée et dans des conditions données, une certaine longueur moyenne. Pour une autre variété, cette longueur moyenne sera différente : cette différence entre les longueurs moyennes est due au fait que les génotypes des variétés utilisées sont différents, c'est-à-dire qu'ils ne possèdent pas les mêmes allèles au niveau d'un certain nombre de gènes.

Emerson et East étudièrent un autre caractère quantitatif du maïs : la longueur de l'épi. Ils croisèrent deux variétés sélectionnées : l'une avait des épis dont la longueur moyenne était de 6,63 cm, et l'autre avait des épis dont la longueur moyenne était de 16,80 cm. Les descendants de ce croisement présentaient une longueur moyenne de l'épi égale à 12,50 cm, ce qui correspond presque à la moyenne arithmétique des tailles des épis des deux parents.

Les hybrides obtenus étaient hétérozygotes pour toute une série de gènes et, en particulier, pour ceux qui étaient responsables de la différence entre les longueurs des épis des deux parents. La variabilité par rapport à cette valeur moyenne que l'on peut observer chez les individus hybrides de première génération (F1) est due uniquement aux différences de conditions de culture de chaque pied de maïs. Par contre, en autofécondant ces hybrides F1, on obtenait des hybrides F2 dont la longueur moyenne était peu différente de la longueur moyenne des individus F1, mais dont la variabilité observée d'un épi à l'autre par rapport à cette valeur moyenne était beaucoup plus grande que dans le cas des hybrides F1, car elle n'était plus due uniquement aux conditions de milieu. En effet, alors que les hybrides F1 ont tous le même génotype, c'est-à-dire sont hétérozygotes pour un grand nombre de gènes, dans les hybrides F2 on retrouve toutes les combinaisons possibles entre les différents allèles des différents gènes responsables de la longueur de l'épi.

Si l'on fait abstraction des facteurs externes tels que l'alimentation, la taille de l'homme constitue un autre exemple d'hérédité quantitative, ou multifactorielle. Pour étudier le mécanisme d'action de l'ensemble des facteurs qui sont responsables de ce caractère, supposons qu'il n'existe que deux gènes responsables de cette taille. Cela sous-entend qu'au niveau de chaque gène on peut trouver dans la population deux sortes d'allèles. On suppose donc que c'est l'existence de ces allèles différents qui est responsable des différences de taille. Soit *a* et *A* les deux allèles d'un des gènes et *b* et *B* les allèles de l'autre gène. Supposons, d'autre part, qu'aussi bien *a* que *b* contribuent pour 40 cm de la taille totale et que *A* et *B* contribuent chacun pour 50 cm. L'espèce humaine étant diploïde, chacune de ces cellules contient deux exemplaires de chacun des deux loci, et il existe de ce fait neuf génotypes possibles. Ces neuf génotypes et leur taille correspondante sont schématisés comme suit :

L. Pellegrini

▲ ***Si l'on fait abstraction des facteurs externes, la taille de l'homme constitue un exemple d'hérédité quantitative ou multifactorielle : on en voit ici la mise en évidence en comparant un individu de taille normale et un « géant ».***

$\frac{AB}{AB}$	$\frac{aB}{AB}$ $\frac{Ab}{AB}$	$\frac{ab}{AB}$ $\frac{aB}{aB}$ $\frac{Ab}{Ab}$	$\frac{ab}{aB}$ $\frac{ab}{Ab}$	$\frac{ab}{ab}$
2,00 m	1,90 m	1,80 m	1,70 m	1,60 m

En fait, le nombre de gènes qui conditionnent la taille est bien supérieur à deux, et on se rend compte, de ce fait, que la série possible de tailles est continue et non pas discontinue (avec cinq classes comme dans la simplification ci-dessus où seulement deux gènes intervenaient).

De la même façon, toujours dans l'espèce humaine, il est possible de décrire l'hérédité du caractère « couleur de la peau » en termes de doses. L'intensité de ce caractère qui varie du « noir » au « blanc » est attribuée à la quantité plus ou moins abondante de mélanine, un pigment noir qui s'accumule au niveau de la peau. Si nous faisons abstraction de l'influence du milieu (rayons UV), la différence de ton entre le noir intense de la peau des « Noirs » et la couleur pâle des populations « blanches » peut s'interpréter suivant le modèle de Curt Stern par l'existence d'au moins quatre couples d'allèles localisés sur des chromosomes différents : les individus à la peau blanche seraient homozygotes pour les allèles « inactifs », c'est-

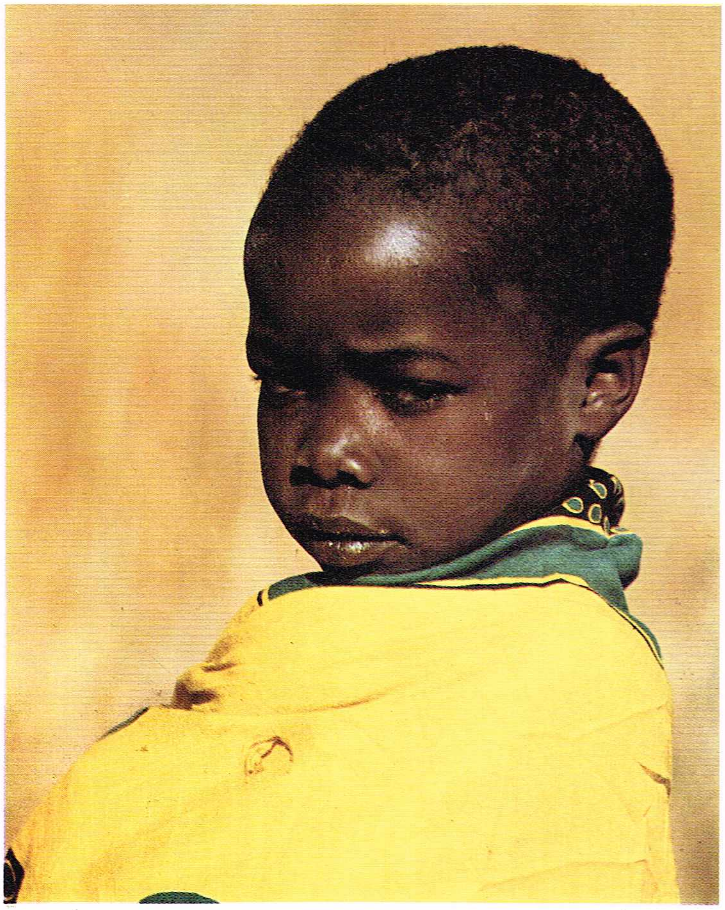

N. Cirani

I.C.P. - J. Mechling

▲ ***Ces deux illustrations montrent que, dans l'espèce humaine, il est possible de décrire l'hérédité du caractère « couleur de la peau » en termes de doses : l'intensité de ce caractère qui varie du « noir » au « blanc » est attribuée à une plus ou moins grande quantité de mélanine accumulée au niveau de la peau ; à gauche, un jeune garçon de race noire, à droite une fillette de race blanche.***

à-dire ceux qui entraînent l'incapacité d'accumuler la mélanine, et auraient donc le génotype $\frac{a}{a}\frac{b}{b}\frac{c}{c}\frac{d}{d}$, alors que les individus à la peau noire seraient homozygotes pour les allèles « actifs » et auraient donc le génotype $\frac{A}{A}\frac{B}{B}\frac{C}{C}\frac{D}{D}$. Les mulâtres, issus de mariages entre « Noirs » et « Blancs », seraient hétérozygotes pour tous ces gènes et auraient le génotype $\frac{a}{A}\frac{b}{B}\frac{c}{C}\frac{d}{D}$. Dans le cadre de cette hypothèse, le mariage entre mulâtres donnerait toute une gamme de couleurs, et chaque ton extrême ne serait atteint qu'une fois sur 81 naissances.

La base génétique de la sélection artificielle

Quand l'homme intervient dans la reproduction d'une population animale ou végétale et lui impose des règles afin d'en retirer certaines combinaisons qui lui sont favorables, il opère une *sélection artificielle*.

Cette pratique est très largement employée dans l'amélioration du cheptel, des animaux domestiques et des plantes. Les problèmes rencontrés au cours d'une sélection sont relativement aisés à résoudre si le caractère à conserver ou à éliminer est sous la dépendance d'un nombre très réduit de gènes. Mais, dans la plupart des cas, les caractères à sélectionner sont des caractères quantitatifs, tels que le poids de viande, la vitesse de croissance, la quantité d'œufs pondus par an, la production journalière de lait, etc. Ces caractères sont sous la dépendance d'un grand nombre de gènes.

Un autre écueil attend le sélectionneur : la sélection pour un caractère donné peut entraîner d'autres modifications, antagonistes avec l'effet recherché. C'est ainsi qu'une sélection prolongée (à des fins commerciales) de poules aux œufs plus lourds peut, à la longue, réduire les premiers effets obtenus à cause de la diminution de leur production, de la baisse de vitalité des productrices ou de l'augmentation de la fragilité des œufs.

Au début de ce siècle, Johannsen démontra dans quelles conditions la sélection pouvait être efficace. Il fit une série d'expériences sur le haricot de la variété « princesse » et s'intéressa à un caractère quantitatif de la semence : le *poids*. Des expériences préliminaires lui ayant indiqué que les plantes provenant des pois les plus lourds avaient des graines plus lourdes que celles des plantes issues des pois les plus légers, il tenta une sélection pondérale à partir des graines d'une même gousse. Ces plantes ayant été reproduites par autofécondation, des plantes issues de ces graines il ne conserva pour les générations suivantes que les graines les plus lourdes et les graines les plus légères.

A chaque génération, en opérant la même sélection, il effectua une mesure du poids moyen des graines produites respectivement par les plantes de la « lignée lourde » et les plantes de la « lignée légère ». Il constata que, quelle que fût la lignée, le poids moyen des graines restait égal à 0,37 g et donc que sa sélection avait été inefficace.

Cela s'explique aisément si l'on suppose que les plantes qu'il avait utilisées étaient homozygotes pour tous les gènes responsables du poids de la graine. La variabilité observée au niveau du poids des graines n'avait pas une base génétique ; elle était due aux conditions extérieures (variabilité phénotypique). En effet, la sélection ne peut avoir un effet que si elle s'opère sur une population à l'intérieur de laquelle le caractère sélectionné varie pour des raisons génétiques. L'échec de la sélection opérée par Johannsen est donc dû au fait que, dans la gousse à partir de laquelle il a constitué ses différentes lignées, les différentes graines d'une part avaient les mêmes génotypes et d'autre part étaient homozygotes pour tous les gènes responsables du poids de la graine.

Cette homozygotie s'explique par le mode de reproduction utilisé avant l'expérience de sélection : l'autofécondation. L'autofécondation chez les plantes, comme les croisements consanguins chez les animaux, entraîne inévitablement une augmentation du nombre de gènes homozygotes, ce qui se comprend aisément si l'on envisage, par exemple, l'effet de tels types de croisement sur un couple d'allèles. Considérons une plante hétérozygote *Aa*. Si elle se reproduit par autofécondation, 1/4 de sa

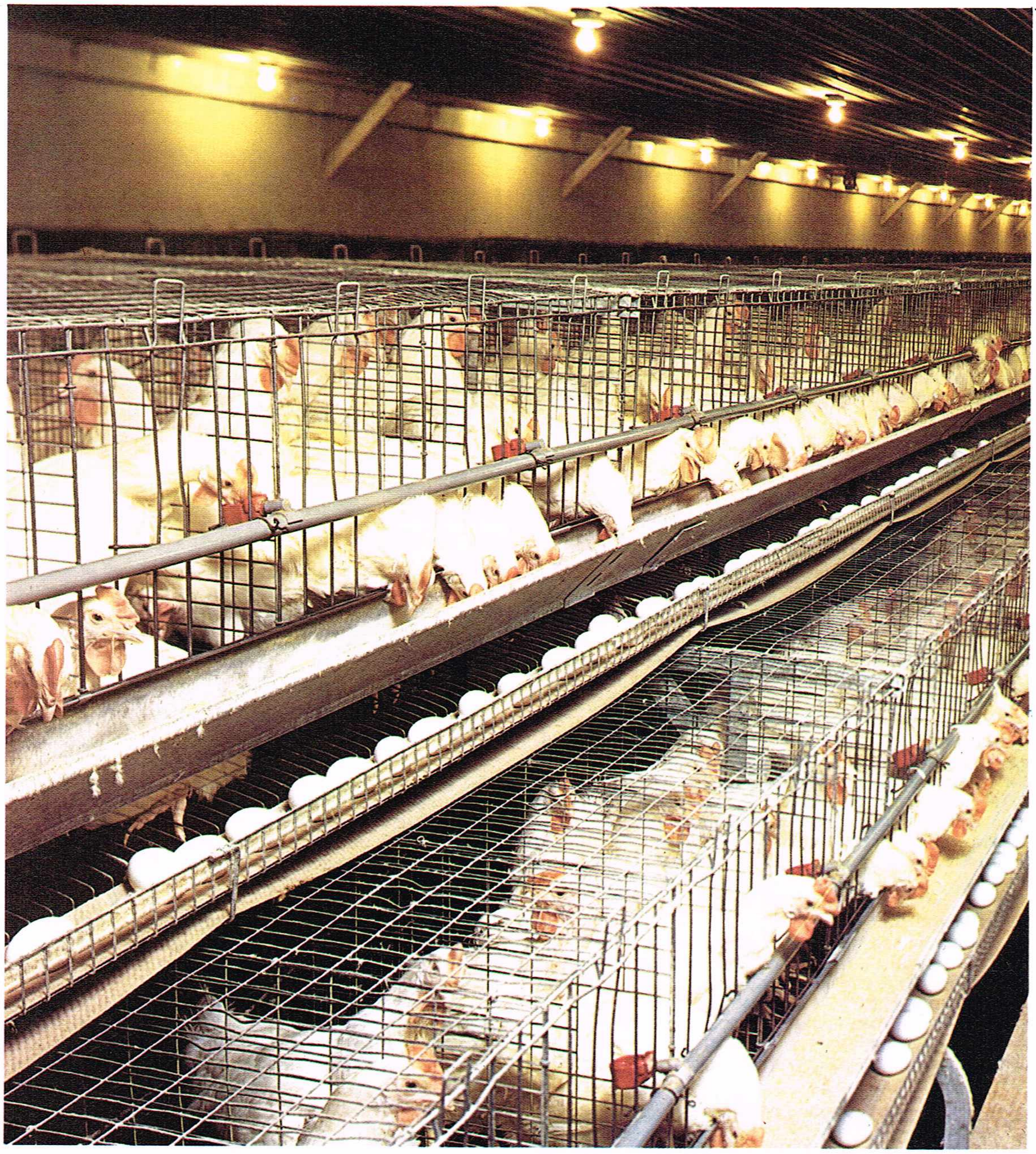

Marka

◀ Un élevage moderne de poules pondeuses : la sélection artificielle, qui impose des règles à la reproduction d'une population animale ou végétale, est une pratique très largement employée.

descendance sera constitué d'individus homozygotes *aa*, 1/4 d'individus homozygotes *AA* et 1/2 d'individus hétérozygotes *Aa*. Les individus homozygotes *AA* et *aa* ne peuvent donner par autofécondation que des individus *AA* et *aa*. Les individus *Aa* donneront, comme la plante de départ, 1/2 d'individus homozygotes *AA* ou *aa* et 1/2 d'individus hétérozygotes *Aa*. A cette seconde génération, il n'y a donc déjà plus qu'un quart (1/2 × 1/2) de la population qui est hétérozygote. A chaque génération suivante, le nombre d'hétérozygotes diminue de moitié.

Le schéma ci-contre symbolise cet état de fait; on suppose que la population comprend en permanence 800 individus et qu'au départ tous les individus sont hétérozygotes.

Après un nombre suffisant de générations, il n'y aura donc plus aucun individu hétérozygote *Aa*, une partie de la population sera *AA* et l'autre sera *aa*.

Cela montre comment l'homme, en favorisant l'autofécondation et les croisements consanguins pour obtenir des lignées pures économiquement intéressantes, entraîne une augmentation du degré d'homozygotie, laquelle peut provoquer des effets néfastes car alors les gènes récessifs défavorables, silencieux (quand ils sont à l'état hétérozygote en face de l'allèle dominant favorable), peuvent s'exprimer et entraîner l'expression de toutes sortes de tares. Cette augmentation du degré d'homozygotie peut provoquer aussi une baisse de la vigueur, indépendamment de la présence de tel ou tel gène néfaste. Cette baisse de vigueur des lignées ayant un degré trop élevé d'homozygotie est encore mal comprise, de même que l'augmentation de la vigueur (vigueur hybride) que l'on observe quand on augmente le degré d'hétérozygotie.

C'est ainsi que souvent, en particulier en agriculture, ce ne sont pas les lignées sélectionnées qui sont utilisées à des fins commerciales mais des hybrides de première génération, obtenus en croisant les lignées sélectionnées.

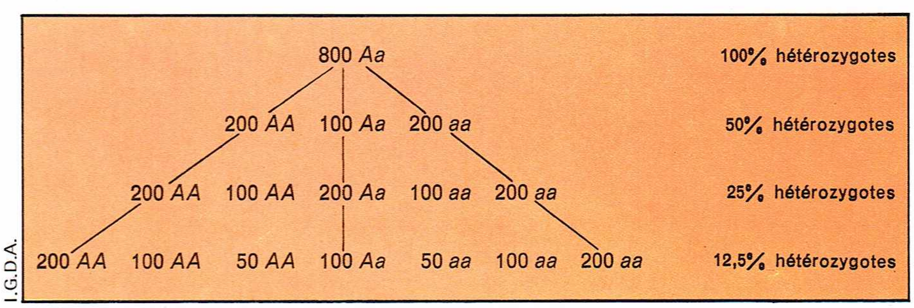

I.G.D.A.

***▲ Tableau montrant qu'après un nombre suffisant de générations, il n'y aura plus aucun individu hétérozygote* Aa.**

▶ ***Quelques exemples des fréquences des différents allèles dans différentes populations humaines.***

Populations	Pourcentage des différents allèles O	A	B
Méditerranée			
Basques	76	22	2
Berbères	72	27	7
Caucase	67	27	6
Afrique du Sud			
Boschimans	75	20	5
Malaisie	63	17	20
Amérique du Nord			
Amérindiens : Navahos	83	17	0
Polynésie	63	37	0
Aborigènes australiens	62	38	0

Richard Colin

Les propriétés de l'hybride dépendent évidemment des propriétés particulières de chacune des lignées parentales.

L'utilisation des hybrides est courante dans les cas du maïs, de l'oignon, du concombre et du pin. La descendance de ces hybrides ne pourra pas être utilisée puisqu'elle sera très hétérogène génétiquement et qu'il y aura ségrégation de tous les couples d'allèles qui différenciaient les lignées pures parentales. Chaque année, il faut donc, à partir des lignées pures, reconstituer les hybrides.

Parmi les animaux d'élevage, l'hybridation est aussi très largement pratiquée pour obtenir des animaux qui correspondent mieux aux exigences de l'industrialisation. C'est ainsi que le croisement entre la race de bovins blancs « Shorthorn » et la race de bovins noirs « Angers » donne naissance à l'hybride gris « Roani », qui se caractérise par une vigueur, une croissance et une qualité de viande supérieures à celles de chacun des deux parents. Les « Roani », hautement hétérozygotes, ne peuvent pas être utilisés pour la reproduction.

Le polymorphisme

Comme nous venons de le voir pour la sélection artificielle, la sélection ne peut avoir une prise que si la population est génétiquement hétérogène. Cette hétérogénéité existe dans toutes les populations ayant une reproduction sexuée. C'est ainsi que même l'espèce humaine est polymorphe pour beaucoup de caractères. Un aspect de ce polymorphisme est visible au niveau des groupes sanguins ABO, MN et Rh, gouvernés respectivement par un seul gène. Les fréquences relatives de chaque allèle au niveau de chaque gène varient d'une population à l'autre.

Par exemple, sur la seule base de la présence d'une substance à la surface des globules rouges (agglutinogène A et B) et d'une autre dans le sérum (agglutinine anti-A et anti-B), on peut subdiviser l'espèce humaine en quatre classes distinctes : la classe A, qui possède l'agglutinogène A et l'agglutinine anti-B ; la classe B, possédant l'agglutinogène B et l'agglutinine anti-A ; la classe AB, qui possède les deux agglutinogènes A et B mais aucune agglutinine ; et enfin la classe O, ne possédant pas d'agglutinogènes mais les deux agglutinines anti-A et anti-B.

Les agglutinines anti-A et anti-B sont capables d'agglutiner les globules rouges portant respectivement les agglutinogènes A et B. C'est pour cela qu'il est important, au cours d'une transfusion sanguine, que le sang du donneur ne soit pas agglutiné par le sérum du sang du receveur : les agglutinines du sang du donneur étant diluées rapidement sont peu efficaces pour agglutiner les globules du sang du receveur. Le tableau ci-dessous résume les possibilités qu'a chaque type de groupe sanguin d'être *donneur* ou *receveur*.

Donneur →	Receveur possible O	A	B	AB
O	oui	oui	oui	oui
A	non	oui	non	oui
B	non	non	oui	oui
AB	non	non	non	oui

Le groupe O est donc, par l'absence d'agglutinogènes sur les globules rouges, un « donneur universel », aucun sang n'étant capable d'en agglutiner les globules rouges. Par contre, étant capable d'agglutiner lui-même aussi bien les globules rouges portant l'agglutinogène A que les globules portant l'agglutinogène B, il ne peut recevoir que du sang provenant d'un donneur O. Le groupe AB, du fait qu'il ne contient pas d'agglutinine, n'est capable d'agglutiner aucun sang : il est « receveur universel », et ne peut par contre donner son sang qu'aux représentants du même groupe.

Le groupe sanguin ABO est déterminé par *un seul locus,* où il peut y avoir trois types d'allèles différents : *A, B* ou *O.* Les allèles *A* et *B* sont dominants par rapport à l'allèle *O* et sont co-dominants l'un par rapport à l'autre. Le tableau ci-dessous donne les génotypes possibles des individus ayant l'un ou l'autre des groupes sanguins.

Groupe sanguin	Génotype
O	*OO*
A	*AA* ou *AO*
B	*BB* ou *BO*
AB	*AB*

L'étude de la population humaine a permis d'établir que les fréquences des différents allèles varient d'un groupe ethnique à l'autre. Ces différences sont probablement dues aux effets de la *dérive génétique* dont nous parlerons un peu plus loin. Le tableau, en haut de colonne, donne quelques exemples des fréquences des divers allèles dans différentes populations humaines.

D'autres exemples du polymorphisme existant dans la population humaine nous sont fournis par les différentes couleurs de la peau, des cheveux et des yeux, les différentes formes des crânes, des nez, des oreilles, des mentons, etc.

Un exemple de polymorphisme plus biochimique qui pose un problème à tous les chirurgiens quand ils pratiquent des greffes est celui qui existe au niveau des gènes d'histo-incompatibilités. Le nombre d'allèles existant au niveau de ces différents gènes dans la population humaine est si grand que chaque individu est presque unique ; on s'est rendu compte au cours des dernières tentatives de greffe du cœur de la difficulté qu'avaient les chirurgiens pour trouver des donneurs ayant le minimum d'incompatibilités avec le receveur.

▼ ***Tableau montrant les diverses réactions entre les différents types de groupes sanguins O, A, B et AB, et les anticorps « anti-A » et « anti-B ».***

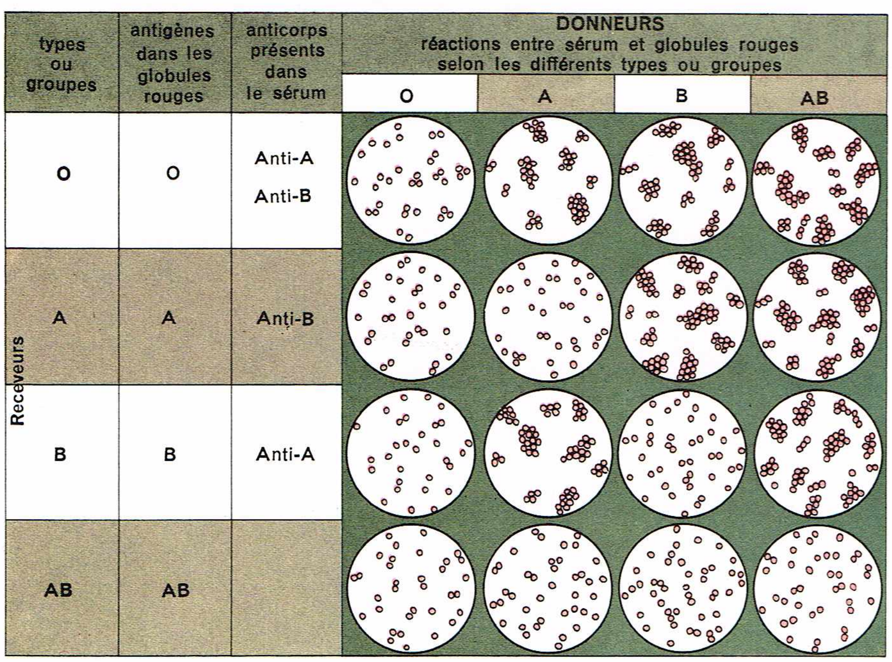

I.G.D.A.

N. Myers

▲ *La génétique des populations considère comme* **individus** *les organismes issus d'une reproduction sexuée et qui sont par conséquent* **génétiquement distincts**; *ici, une population de flamants roses* **(Phoenicopterus ruber)**.

Génétique des populations

Pour comprendre le métabolisme cellulaire, le biochimiste étudie des populations de molécules et les interactions qui se produisent entre ces molécules. Pour saisir le fonctionnement d'un organisme, le physiologiste étudie des populations de cellules constituantes des organes et les interactions intercellulaires et interorganiques. Au plus haut niveau de l'organisation biologique, le biologiste des populations étudie des populations d'organismes, les relations des individus à l'intérieur de ces populations et les interactions entre populations différentes. Le terme *population* sera utilisé dans cette étude pour désigner des groupes d'organismes individuels.

La notion d'*organisme individuel* n'est pas aussi évidente qu'il y paraît de prime abord; dans le cas des plantes se reproduisant d'une manière végétative, le descendant resté attaché au parent présente toutes les caractéristiques d'un organisme mais ne peut être considéré comme un individu isolé. La notion s'applique également mal aux symbiotes comme les Lichens, qui, en un même individu, associent deux organismes : une Algue et un Champignon. Enfin, une colonie d'Insectes sociaux présente des analogies avec un organisme, du fait de la différenciation qui existe dans les rôles joués par les divers individus. D'un point de vue opérationnel, nous utiliserons une définition génétique de l'individu. La génétique des populations considère comme *individus les organismes issus d'une reproduction sexuée* et qui sont par conséquent *génétiquement distincts*.

On appelle *population mendélienne* une population d'individus se reproduisant de manière sexuée. La génétique des populations étudie le devenir des gènes portés par l'ensemble des individus d'une population mendélienne au cours des générations successives. Contrairement à la génétique classique, qui s'intéresse à la descendance de deux individus, elle doit tenir compte des propriétés spécifiques de la population, en particulier de la distribution spatiale des individus : cette dernière sera fonction de données géographiques (les accidents du terrain, les limites des océans, etc.) et de données écologiques (les relations avec d'autres espèces...) La connaissance des facteurs qui gouvernent la rencontre des gamètes est de première importance pour le généticien, l'ensemble de ces facteurs constituant ce qu'on appelle la *structure de la population*. Le comportement pourra modifier la structure de la population, particulièrement chez les animaux supérieurs; le généticien devra donc tenir compte également de données éthologiques.

Une connaissance des idées de base de la génétique des populations est absolument essentielle pour comprendre comment passe, de génération en génération, la masse d'informations génétiques que possède une population. Nous envisageons donc les aspects théoriques de la génétique des populations en ne considérant que des situations extrêmement simples, que nous illustrerons à l'aide de quelques exemples pris chez les populations naturelles.

La panmixie

Définition

Une population est dite *panmictique* si la rencontre des gamètes s'y produit au hasard. Cette situation, qui est la plus simple que l'on puisse envisager, se trouve de fait réalisée dans un grand nombre de cas : par exemple, des plantes, qui libèrent leurs grains de pollen dans l'air, ont une fécondation assurée par le vent; des animaux marins, comme les huîtres, libèrent leurs gamètes dans l'eau de mer. Cette situation est également réalisée lorsque chaque individu présente une probabilité égale de s'accoupler avec les différents individus du sexe opposé, à l'intérieur de la population. La probabilité de formation de chaque type de couple est alors égale au produit de la fréquence des individus mâles et femelles du type considéré.

Envisageons l'hypothèse d'une population composée d'animaux pouvant présenter deux couleurs différentes du pelage : blanc ou noir. Supposons que sur 100 mâles prélevés de cette population on en dénombre en moyenne

▶ ***Une population est dite panmictique si la rencontre des gamètes s'y produit au hasard; cette situation est réalisée, notamment, chez le noisetier, dont la diffusion du pollen est typiquement anémophile.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

60 à poils noirs et 40 à poils blancs; admettons encore que sur 100 femelles, on en dénombre 70 à poils noirs et 30 à poils blancs. On peut, dans une hypothèse panmictique, calculer les fréquences de couples de types différents qui doivent théoriquement se former :

Croisement ♂ ♀	Produit	Fréquences théoriques
blanc x blanc	0,40 x 0,30	0,12
noir x noir	0,60 x 0,70	0,42
blanc x noir	0,40 x 0,70	0,28
noir x blanc	0,60 x 0,30	0,18

Richard Colin

Si la comparaison entre les effectifs théoriques et les effectifs réellement observés dans un échantillon d'animaux montre d'éventuelles déviations par rapport à l'hypothèse de panmixie, cela prouve qu'il n'y a pas panmixie, au moins en ce qui concerne la couleur du pelage.

Pool et fréquence géniques

Toute l'information génétique que possède une population, c'est-à-dire l'ensemble des gènes portés par les individus qui la composent, peut être désignée par le terme de *pool génique*. Si l'on pouvait décrire complètement le pool génique d'une population, on connaîtrait pour chaque gène non seulement les différents types d'allèles rencontrés dans cette population, mais également les fréquences respectives de ces différents allèles dans la population.

Envisageons le cas d'une population où un caractère est déterminé par un couple d'allèles *A/a* situé sur un autosome. Cette population est constituée de N individus diploïdes, parmi lesquels D sont homozygotes pour l'un des allèles *(AA)*, H sont hétérozygotes *(Aa)* et R homozygotes pour l'autre allèle *(aa)*. On peut écrire que $D + H + R = N$: il existe donc trois types d'individus. Dans la population totale, qui est diploïde, il y a donc $2 \times N$ gènes déterminant le caractère considéré. Puisque chaque individu *AA* possède deux allèles *A* et que chaque individu *Aa* possède un allèle *A*, le nombre total des allèles *A* dans la population est : $2 \times D + 1 \times H$. La fréquence p des allèles *A* dans la population est donc : $p = \frac{2 \times D + 1 \times H}{2 \times N}$; c'est la *fréquence génique de* l'allèle *A*. La fréquence génique de l'allèle *a* sera donc égale à $1 - p = q$, puisqu'il n'y a que 2 allèles déterminant le caractère considéré.

Application

Les caractères antigéniques portés par les globules rouges du sang et identifiés au moyen de tests utilisant la réaction anticorps-antigène sont à hérédité simple chez les animaux et chez l'homme.

Lorsque des globules rouges humains sont injectés dans le lapin, celui-ci répond en produisant des anticorps, formant un antisérum, qui réagit contre ces globules rouges et les agglutine, même lorsqu'il est fortement dilué. Un tel sérum réagit à peu près également sur tous les globules rouges humains, quel que soit l'individu qui les a produits. Cependant, par une technique d'adsorption, le sérum peut être fractionné de telle sorte qu'il distingue des différences individuelles dans le sang humain. Ainsi, en mélangeant le sérum avec les globules rouges d'un homme puis en centrifugeant ces globules, on élimine tous les anticorps qui réagissent avec cet individu (ils sont adsorbés par les globules). Il restera dans le surnageant des anticorps qui, à leur tour, pourront réagir avec d'autres individus.

A côté des antigènes caractéristiques des groupes A-B-O, deux antigènes (appelés M et N) sont présents à la surface des globules rouges. En mélangeant l'antisérum de lapin avec des globules qui ne portent que l'antigène M puis en centrifugeant les cellules, on récupère dans le surnageant des anticorps anti-N spécifiques. Et, de la même façon, des anticorps anti-M peuvent être préparés à partir de globules ne portant que l'antigène N. Ce deux anticorps peuvent théoriquement identifier dans les populations humaines quatre situations différentes : les globules sans antigène, les globules portant M, les globules portant N, ou ceux qui portent les deux. Il se trouve que tous les sangs humains actuellement répertoriés possèdent au moins l'un des deux antigènes.

La caractéristique antigénique vis-à-vis des antigènes M, N est déterminée par un couple autosomique de gènes allèles *(A/a)*. Les individus qui ne possèdent que l'antigène M sont homozygotes *AA*; les individus qui ne possèdent que l'antigène N sont homozygotes *aa*; les individus qui possèdent simultanément les deux sont hétérozygotes *Aa*.

On peut calculer la fréquence génique de l'allèle *A* dans une population.

Par exemple, on dispose d'une statistique de la population de Brooklyn (États-Unis) portant sur 1 849 individus; cette statistique indique que 541 individus portent seulement l'antigène M, 903 les antigènes M et N, et que 405 ne portent que l'antigène N.

Appliquons la formule $p = \frac{2 \times D + 1 \times H}{2 \times N}$.

D = 541; H = 903 et N = 1 849. D'où, la fréquence

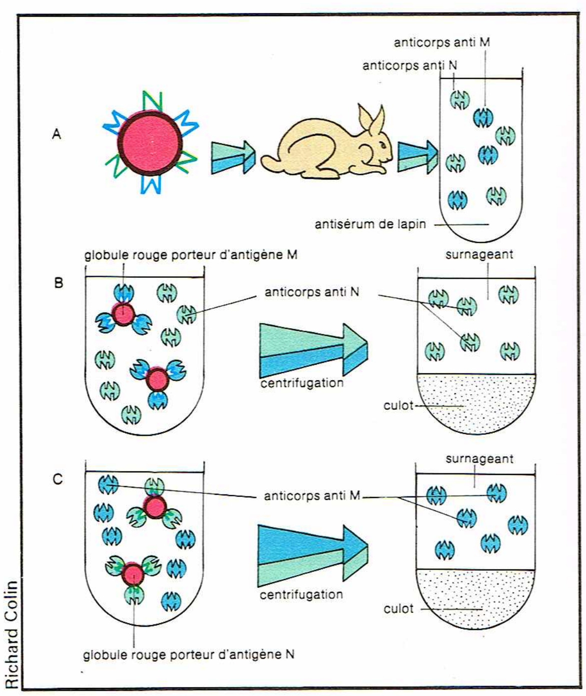

Richard Colin

▶ ***Technique d'adsorption permettant de montrer que le sérum de lapin peut être fractionné de telle sorte qu'il distingue des différences individuelles dans le sang humain : A, fabrication de l'anti-sérum de lapin; B, préparation des anticorps anti-N; C, préparation d'anticorps anti-M.***

génique de l'allèle A sera : $p = \frac{1\,082 + 903}{3\,698} = 0{,}537$.

La fréquence génique de l'allèle a sera égale à $q = 1 - p = 0{,}463$.

Loi de Hardy-Weinberg

Considérons une population panmictique où existent deux allèles *A et a* déterminant un caractère donné avec des fréquences géniques respectives p et q égales dans les deux sexes. Les diverses combinaisons des divers types de gamètes mâles et femelles sont représentées dans le tableau ci-dessous.

gamète femelle \ gamète mâle	A (p)	a (q)
A (p)	AA (p^2)	Aa (pq)
a (q)	aA (pq)	aa (q^2)

Richard Colin

Puisque chacun des gamètes ne porte qu'un seul allèle, les fréquences dans la population des deux types de gamètes (celui qui porte A et celui qui porte a) sont égales aux fréquences géniques. Comme les gamètes se fécondent au hasard (hypothèse panmictique), la probabilité de chaque cas est égale au produit des probabilités de chacun des deux types de gamètes qui lui correspond. Les probabilités des trois génotypes sont donc : $AA = p^2$, $Aa = 2\,pq$ et $aa = q^2$. La somme de ces trois probabilités est évidemment égale à 1 :

$$p^2 + 2\,pq + q^2 = (p + q)^2 = 1.$$

On peut calculer la fréquence génique de l'allèle A à la génération suivante : elle est égale à

$$p^2 + 1/2\,(2\,pq) = p\,(p + q) = p.$$

Les fréquences géniques ne changent donc pas d'une génération à la suivante; la population est en *condition d'équilibre*. Cet équilibre est traduit par la *loi de Hardy-Weinberg,* qui peut être exprimée de la façon suivante : si des formes alléliques d'un gène autosomal sont présentes dans une population panmictique d'effectif important, en l'absence de mutation, de sélection ou de migration différentielle, les fréquences géniques de ces allèles (p_1, p_2, p_3,..., p_n) restent constantes dans les générations successives.

Les *fréquences des différents génotypes* à chaque génération chez un organisme diploïde sont données par les termes du développement de $(p_1 + p_2 + p_3 + ... + p_n)^2$.

Application.

Nous avons calculé précédemment la fréquence génique de l'allèle A responsable de la présence de l'antigène M dans la population de la ville de Brooklyn. Cette fréquence est une estimation de la probabilité pour le gène étudié d'être sous la forme allélique A ; c'est également la probabilité pour un gamète particulier de porter l'allèle A. La loi de Hardy-Weinberg indique que si la population est panmictique, les probabilités des trois génotypes sont : $AA = p^2 = (0{,}537)^2$; $Aa = 2\,pq = 2 \times 0{,}537 \times 0{,}463$; et $aa = q^2 = (0{,}463)^2$.

Dans cette hypothèse, on s'attend à trouver en moyenne parmi 1 849 individus pris au hasard dans la ville de Brooklyn : $N \times p^2 = 536$ *AA*, $N \times 2\,pq = 925$ *Aa*, et $N \times q^2 = 388$ *aa*. Les chiffres observés (respectivement : 541, 903 et 405) sont suffisamment proches des valeurs théoriques pour que l'on puisse considérer que les habitants de Brooklyn constituent une population panmictique en ce qui concerne le caractère antigénique M/N. Un test statistique approprié le montrerait.

Le fait que dans une population panmictique il n'y ait pas de changement, au cours des générations successives, des fréquences géniques constitue ce que l'on appelle une *inertie génétique*. A moins que n'intervienne, comme nous allons le voir maintenant, une diminution importante dans l'importance numérique de la population ou un changement dans les mécanismes de choix des partenaires sexuels, à moins que ne se produisent des mutations, des migrations différentielles, à moins enfin que ne joue la sélection, l'équilibre traduit par la loi de Hardy-Weinberg ne sera pas modifié. C'est la destruction de cet équilibre qui entraîne l'*évolution* de la population. En d'autres termes, la condition d'équilibre peut constituer un point de repère dans l'histoire d'une population, un point d'évolution zéro.

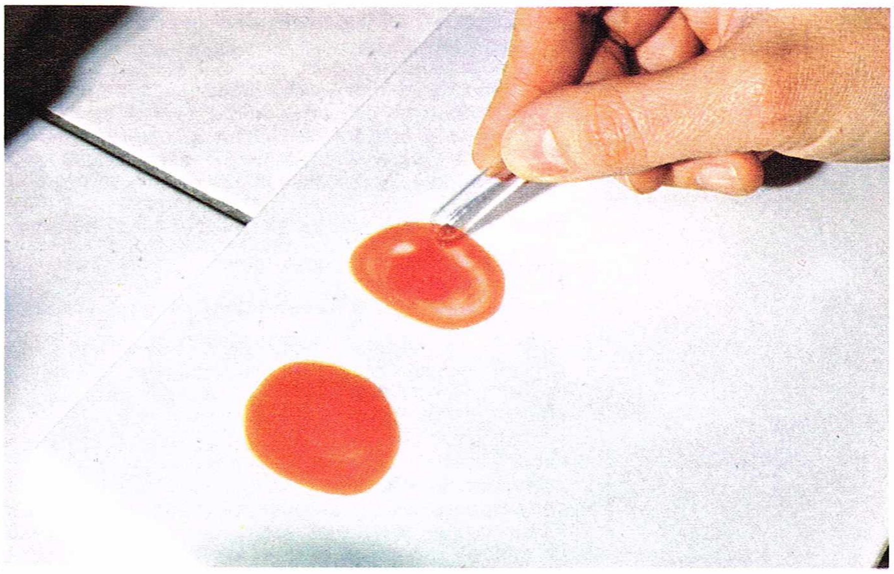

Dr Lubrano

Dr Lubrano

▲ ***En haut, les caractères antigéniques portés par les globules rouges du sang sont identifiés au moyen de tests utilisant la réaction anticorps-antigène ; ici, l'étalement d'une goutte de sang et sa mise en présence avec un sérum témoin. En bas, mise en évidence des 3 principaux groupes sanguins ; de haut en bas, A Rh⁺, B Rh⁻, O Rh⁻.***

Rôle de l'importance numérique de la population

Nous avons étudié jusqu'ici la relation d'équilibre traduite par la loi de Hardy-Weinberg sur des populations dont le nombre d'individus était élevé. Cela permettait de négliger les problèmes d'échantillonnage que pose le tirage au sort des gamètes dans la population. Il en est tout autrement lorsque l'importance numérique de la population est faible.

La dérive génétique

Soit un couple d'allèles A et a dont les fréquences parmi les adultes qui composent une génération sont :

$$p \text{ et } q = 1 - p.$$

Les gamètes utiles, ceux qui constituent la génération suivante, sont tirés au hasard parmi les gamètes produits en nombre infini par les adultes de la génération précédente.

Si l'effectif de la population des adultes est constant au cours des générations et égal à N, le tirage s'effectuera parmi $2 \times N$ gamètes. Dans l'échantillon ainsi extrait, la fréquence p_1 de l'allèle A ne sera pas nécessairement égale à p (fréquence, dans la population parentale, de ce

même allèle), puisque chaque tirage d'un gamète peut entraîner l'apparition soit d'un allèle *A*, soit d'un allèle *a*, et cela au hasard. Néanmoins, elle ne sera pas très différente de la fréquence p, puisque rien ne favorise particulièrement le choix de l'un des deux allèles *A* ou *a* : en effet, les gamètes se fécondent au hasard en ce qui concerne le caractère déterminé par ces allèles.

La théorie des probabilités nous enseigne que p_1 n'est pas éloigné de p de plus de $2 \times \sqrt{\frac{p\,(1-p)}{2 \times N}}$. On peut, en effet, parier que p_1 sera compris dans l'intervalle $\left[p - 2 \times \sqrt{\frac{p\,(1-p)}{2 \times N}}\,;\ p + 2 \times \sqrt{\frac{p\,(1-p)}{2 \times N}}\right]$; cet intervalle est appelé pour cette raison « intervalle de pari ». On voit intervenir dans la formule précédente (qui mesure l'écart maximal entre p et p_1), au dénominateur, le nombre d'individus N ; cela signifie que plus l'effectif de la population est grand, plus l'écart entre p et p_1 sera faible, autrement dit, plus p_1 sera proche de p.

Prenons un exemple numérique : soit une population dans laquelle la fréquence de l'allèle *A* est égale à la fréquence de l'allèle *a* et, par conséquent, égale à 0,5. Le tableau ci-dessous indique, en fonction du nombre d'individus qui constituent cette population, les valeurs de la quantité $p\,\frac{(1-p)}{2\,N}$.

Effectif N	*Variance* $\frac{p\,(1-p)}{2\,N}$	*Intervalle de pari de* p_1
50	$25 \cdot 10^{-4}$	[0,400 ; 0,600]
5 000	$25 \cdot 10^{-6}$	[0,490 ; 0,510]
500 000	$25 \cdot 10^{-8}$	[0,499 ; 0,501]

Connaissant ces valeurs, on peut calculer l'*intervalle de pari de* p_1. Les valeurs de l'intervalle de pari sont reportées dans le tableau ci-dessus en fonction de l'effectif de la population.

Il apparaît que cet intervalle est d'autant plus grand que l'effectif est faible. Autrement dit, si l'effectif est faible, la fréquence de l'allèle *A* dans l'échantillon des gamètes peut, fortuitement, s'éloigner très sensiblement de sa valeur dans la population parentale. Ce qui est important, c'est que *cette variation est acquise*, puisque c'est la fréquence p_1 qui sera la probabilité du gène *A* dans la population suivante. Par conséquent, nous nous trouvons en présence d'une *réaction aléatoire en chaîne*, due à une suite de tirages au sort s'effectuant au cours du passage entre deux générations. Cette fluctuation, due au hasard, de la fréquence de l'allèle *A* au cours des générations successives a reçu le nom de *dérive génétique*.

Des expériences de dérive génétique ont été effectuées en laboratoire. Des populations de *Drosophila melanogaster*, constituées chacune de façon constante par 16 individus, ont été suivies au cours de 19 générations. La fréquence génique de deux allèles bw^{75} et *bw*, initialement égale à 0,5, a été mesurée dans chaque population et à chaque génération. Le gène étudié détermine la couleur des yeux. La distribution des fréquences géniques est reportée dans la figure ci-dessous.

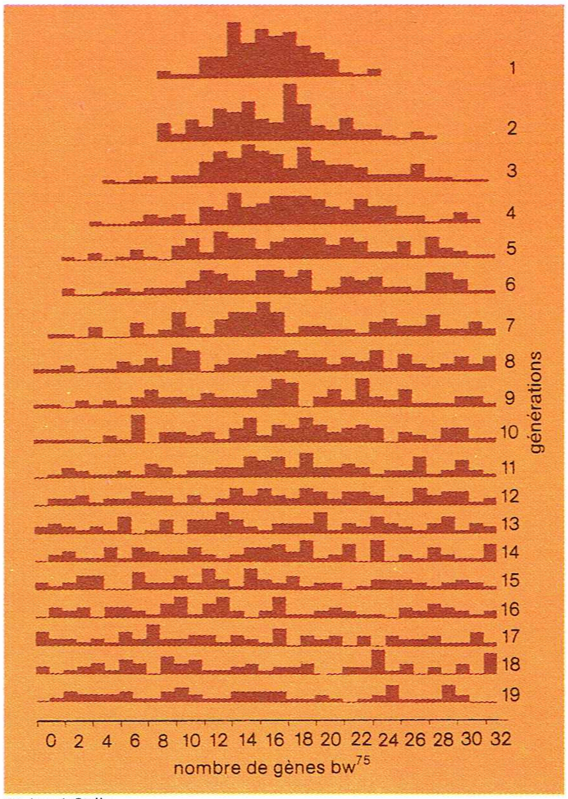

Richard Colin

▼ *L'effectif des adultes des deux sexes peut être très différent chez certains groupes polygames tels que les bovins sauvages ; ici, un troupeau de bisons américains* **(Bison bison).**

C. E. Ostman - J. R. Simon

La hauteur de chaque colonne montre le nombre de populations ayant la fréquence génique dont la valeur est donnée sur l'axe des abscisses. La fréquence génique de chacun des deux allèles, égale dans la population initiale à 0,5, a dérivé au cours des 19 générations de façon constante, à tel point qu'à la 19e génération elle prend n'importe quelle valeur, sans préférence particulière, sans « souvenir » de la valeur initiale.

La fixation d'un allèle comme conséquence de la dérive génétique

La conséquence possible de la dérive génétique dans les populations d'effectif limité est représentée schématiquement dans la figure ci-dessous.

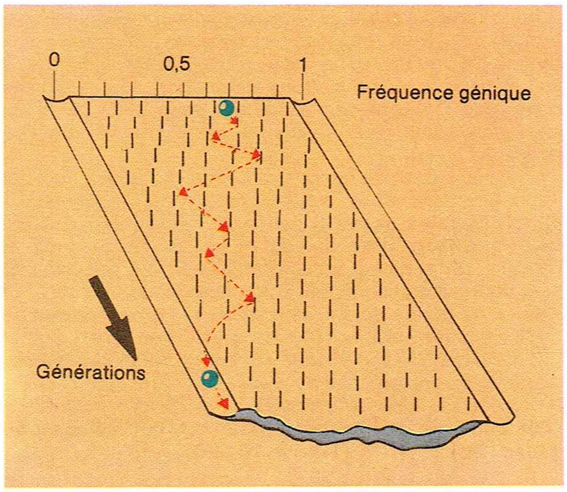

Richard Colin

La fréquence génique est représentée par une bille qui descend une table en pente. A chaque génération, cette bille heurte un obstacle, et ricoche d'obstacle en obstacle tant qu'elle reste sur la table; ces obstacles sont disposés perpendiculairement à la pente sur une ligne qui représente la fréquence génique. Chaque heurt avec un obstacle représente un tirage au sort. Si la bille sort de la table (fréquence génique égale à 0 ou à 1), elle suit alors une gouttière et ne peut revenir sur la table; l'un des allèles a alors *disparu* de la population, et l'autre est fixé irréversiblement. Sewal Wright a démontré que, dans ces conditions, le *taux de fixation* à chaque génération est constant et égal à 1/2 N.

Cette tendance constante à la fixation irréversible d'un allèle peut être, dans les populations d'effectif limité, un facteur important d'évolution.

La notion d'effectif efficace

Une population idéale est une population de taille constante, dans laquelle les deux sexes sont représentés de façon égale et se croisent au hasard. En fait de telles populations n'existent pas dans la nature. En effet, comme l'a remarqué Wright, le tirage au sort qui décide si un descendant parviendra ou non à l'âge adulte et comptera dans la génération suivante n'est pas indépendant pour les descendants d'un même individu. Les descendants nés d'une même reproduction subissent très souvent le même sort favorable ou défavorable. De plus, il peut exister plusieurs générations d'effectif différent au cours d'un même cycle annuel; c'est, par exemple, le cas d'un certain nombre d'espèces d'Insectes dont seul un petit nombre d'adultes passe l'hiver. Enfin, l'effectif des adultes des deux sexes peut être très différent, par exemple chez certains groupes polygames, tels les bovins sauvages.

Dans tous ces cas, l'effectif des individus qui participent réellement à la génération suivante peut être considérablement réduit. Cet *effectif efficace* est bien inférieur à l'effectif d'une population idéale. La limitation de l'effectif des reproducteurs peut entrainer la fixation accidentelle d'allèles par dérive génétique et par conséquent appauvrir le pool génique. Cette limitation favorise, d'autre part, les croisements consanguins qui conduisent à l'homozygotie, c'est-à-dire à l'élimination des hétérozygotes.

Influence du choix entre les conjoints sur la structure génétique des populations

Pour les espèces où se forment des couples, la panmixie est une situation limite qui n'est que rarement réalisée. Un organisme choisit habituellement son partenaire sexuel sur des critères plus ou moins bien définis selon les espèces, mais rarement comme s'il s'agissait d'un tirage au hasard rigoureux.

Quels sont les facteurs qui, dans la nature, peuvent diriger le choix des conjoints? On en distingue deux sortes.

La recherche d'un semblable ou d'un dissemblable

Dans le cas de la recherche d'un semblable on parle d'*homogamie;* et dans le cas contraire, d'*homogamie inverse*. Ainsi, on a mis en évidence chez l'homme une corrélation des caractères physiques entre conjoints. L'homogamie a pour conséquence l'élimination des hétérozygotes correspondant aux caractères déterminants dans le choix des conjoints.

La recherche d'un conjoint apparenté

On parle de consanguinité; celle-ci influence très fortement la structure des populations. Envisageons deux systèmes de croisements consanguins.

L'autofécondation

Dans l'autofécondation, la fécondation a lieu entre gamètes d'un même individu, ce qui a pour effet d'augmenter de génération en génération le nombre de gènes présents à l'état homozygote.

Imaginons le cas extrême d'une population constituée à l'origine d'individus diploïdes hétérozygotes pour tous les gènes. Dans ce cas, un individu contiendra les deux exemplaires de chaque gène sous deux formes alléliques différentes. Les deux gamètes qui fusionneront pour donner naissance à un individu de la génération suivante contiendront pour un gène donné une fois sur deux un exemplaire d'une même forme allélique et une fois sur deux un exemplaire d'une forme allélique différente. Les descendants de la première génération seront donc homozygotes pour la moitié des gènes en moyenne. Et la fréquence des hétérozygotes sera divisée par deux en moyenne à chaque génération. Elle tendra donc très rapidement vers zéro.

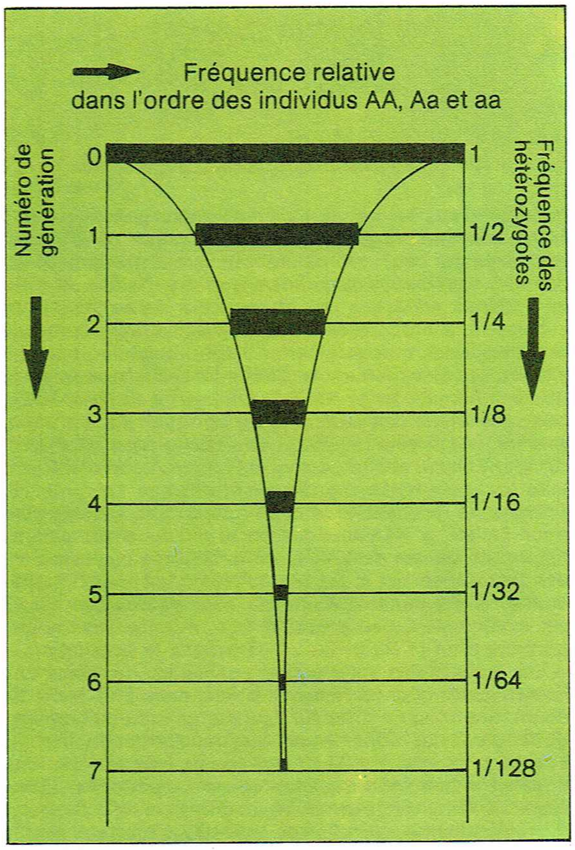

Richard Colin

◀ Dans l'autofécondation, la fréquence des hétérozygotes est divisée par deux à chaque génération.

▶ ***Les espèces chez lesquelles* l'autofécondation est systématique *sont composées d'un assemblage de lignées parallèles homozygotes pour la totalité du patrimoine héréditaire; c'est le cas du* blé *notamment.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Les espèces chez lesquelles l'autofécondation est systématique sont donc composées d'un assemblage de lignées parallèles homozygotes pour la totalité du patrimoine héréditaire. C'est le cas du blé, ou des pois étudiés par Mendel. Chaque *variété* est une lignée homozygote. Si l'on croise deux variétés de blé et si l'on abandonne ensuite la descendance à l'autofécondation naturelle, on obtiendra des lignées nouvelles où les caractères, différents dans les deux lignées originelles, seront réassortis au hasard. Le sélectionneur pourra alors faire son choix.

Le mariage entre cousins germains

Si des croisements consanguins entre proches parents sont tabous dans les sociétés humaines, certains, au contraire, peuvent être favorisés par des causes sociales; c'est le cas des croisements entre cousins germains.

Si deux personnes, que nous appellerons François et Marie, ne sont pas apparentées, leurs enfants auront deux parents, quatre grands-parents et huit arrière-grands-parents différents. Par contre si François et Marie sont cousins germains leurs enfants auront seulement six arrière-grands-parents.

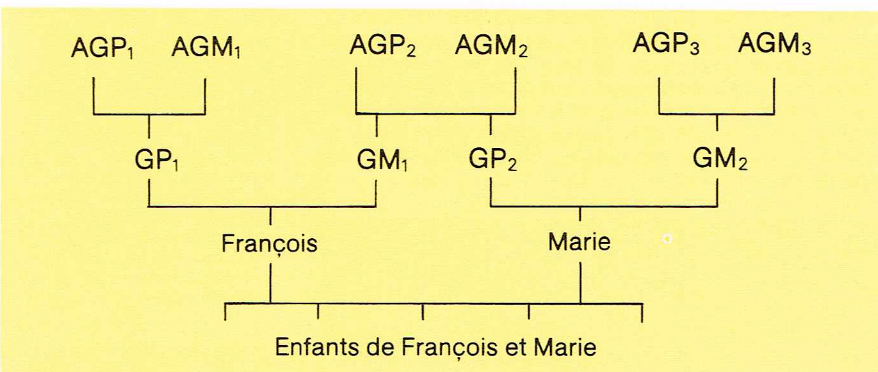

Richard Colin

▲ ***Schéma du pedigree d'un couple formé entre deux cousins germains (AGM, arrière-grand-mère; AGP, arrière-grand-père; GM, grand-mère, etc.).***

Considérons le cas où l'un des arrière-grands-parents communs, l'arrière-grand-père par exemple (AGP_2), est hétérozygote pour un gène dont un allèle *a* récessif détermine un caractère pathologique rare. Sa fille, la mère de François (GM_1), a une chance sur deux d'hériter de cet allèle *a*, et François une chance sur quatre (une chance sur deux pour que sa mère en hérite multipliée par une chance sur deux pour que, dans le cas où sa mère le possède, François en hérite). De même, la probabilité pour que Marie soit hétérozygote pour ce même allèle *a*, présent à l'origine chez l'arrière-grand-père AGP_2, est de 1/4. La probabilité pour que François et Marie soient tous les deux hétérozygotes est de $1/4 \times 1/4 = 1/16$. Puisque la probabilité d'avoir un enfant homozygote pour l'allèle *a* dans la descendance de deux parents hétérozygotes est de 1/4, la probabilité pour qu'ils aient un enfant taré est donc de $1/16 \times 1/4 = 1/64$. Par contre, si François et Marie ne sont pas apparentés, il est extrêmement peu probable que tous les deux soient porteurs d'un allèle *a* qui est rare dans la population.

Les croisements entre cousins germains, de même que les croisements entre frères et sœurs, mais à un moindre degré, ont donc un effet sur l'augmentation de l'homozygotie générale, dans la population. En particulier, ils augmentent très sensiblement la probabilité de faire apparaître des individus homozygotes pour les allèles récessifs, lesquels déterminent un grand nombre de maladies héréditaires. Ainsi, une statistique portant sur la fréquence des individus atteints d'albinisme dans la population européenne (1 individu sur 20 000) a montré que 15 % environ des albinos recensés étaient cousins germains. Ce pourcentage est très supérieur au pourcentage de cousins germains dans la population.

Les effets de la mutation sur les fréquences géniques dans les populations de grand effectif

Les *mutations* sont des changements dans l'information génétique. L'un des gènes, sous l'effet de la mutation, passe brutalement d'un état allélique à un autre état allélique. Les mutations affectent donc directement les fréquences géniques.

Il est indispensable de bien connaître la fréquence des mutations. Nous appellerons *taux de mutation* u la probabilité qu'un gène issu d'une lignée génique *A* soit devenu *a* au bout d'une génération de l'organisme considéré. On considérera donc comme unité de temps *une génération,* c'est-à-dire un cycle complet de l'organisme.

Une estimation du taux de mutation des gènes humains a pu être faite dans certains cas. Ainsi, le généticien danois Morch a trouvé 8 achondroplases parmi quelque 94 000 enfants dont ni l'un ni l'autre des parents ne l'étaient (le nanisme achondroplasique est une maladie héréditaire à transmission autosomique dominante). Ce résultat ne donne qu'une estimation très grossière du taux de la mutation : $4{,}2 \times 10^{-5}$ par génération; sur 1 million de gamètes émis par une personne normale, environ 42 gamètes ont un gène nouvellement muté pour l'achondroplasie. La majorité des *taux de mutations calculés* se situe entre 10^{-5} (1 mutation pour 100 000 gamètes par génération) et 10^{-4} (1 pour 10 000).

▶ ***Tableau représentatif des estimations du taux de mutations des gènes de l'homme (d'après Neel et Schull, 1954).***

Estimation du taux de mutation des gènes de l'homme

	Nombre de mutations par million de gamètes
Allèles dominants	
Achondroplasie	42 à 70
Aniridie	5
Anomalie de Pelger	80
Epiloia	8 à 12
Rétinoblastome	14 à 23
Syndrome de Waardenburg	3,7
Allèles récessifs	
Achromatopsie	28
Albinisme	28
Amyotonie congénitale	20
Epidermolyse bulleuse	50
Idiotie amaurotique infantile	11
Microcéphalie	30
Microphtalmie et anophtalmie	10 à 20
Sauriasis	11
Gènes liés au sexe	
Hémophilie	32
Dystrophie musculaire pseudo-hypertrophique	100

Richard Colin

Nous savons que la mutation qui produit le changement d'un allèle *A* vers un allèle *a* est en général réversible. Par conséquent si u représente le taux de mutation de $A \rightarrow a$, nous appellerons v le *taux de mutation réverse* de $a \rightarrow A$. Le taux de mutation réverse est habituellement plus faible que le taux de mutation initial. Nous pourrons symboliser cette relation de la façon suivante :

$$A \underset{v}{\overset{u}{\rightleftarrows}} a$$

Dans ces conditions, si p est la fréquence génique de l'allèle *A*, et 1 — p celle de l'allèle *a*, le changement apporté par la mutation dans la fréquence de *A* à la génération suivante sera :

— *l'apport d'allèles A :* cet apport est proportionnel, d'une part, au taux de mutation de $a \rightarrow A$, c'est-à-dire à v, et, d'autre part, à la fréquence de l'allèle *a* dans la population parentale, c'est-à-dire à 1 — p; il est donc proportionnel à v (1 — p);

— *la perte d'allèles A :* cette perte est proportionnelle, d'une part, au taux de mutation de $A \rightarrow a$, c'est-à-dire à u, et, d'autre part, à la fréquence de l'allèle *A* dans la population parentale, c'est-à-dire à p; cette perte est donc proportionnelle à up.

Un *équilibre* sera atteint lorsque l'apport contrebalancera la perte, c'est-à-dire lorsque v (1 — p) = up, équation d'où l'on tire *la valeur de la fréquence de l'allèle A à l'équilibre :* $p = \frac{v}{u + v}$.

Si on suppose, par exemple, que *A* mute vers *a* trois fois plus fréquemment que *a* ne mute vers *A*, u = 3 v. La valeur de la fréquence génique de l'allèle *a*, à l'équilibre, lorsque n'existent que les pressions de mutation, sera donc : $p = \frac{v}{u + v} = 1/4$.

La population sera par conséquent *stable* en ce qui concerne les fréquences géniques lorsque la fréquence de *A* atteindra la valeur 0,25 et la fréquence de *a* la valeur 0,75.

L'équilibre dans les fréquences relatives des allèles sous l'effet des pressions de mutations ne doit pas être confondu avec l'équilibre décrit par la loi de Hardy-Weinberg, qui concerne les fréquences des génotypes dans les générations successives, une fois les fréquences géniques bien définies.

La sélection, ou l'influence de l'environnement sur les fréquences géniques

La *sélection* peut se définir comme la reproduction différentielle des génotypes. Si une population est génétiquement hétérogène, la probabilité de succès de certains génotypes pourra être plus forte que celle d'autres génotypes. Il en découlera une accumulation de l'information correspondant à ces génotypes dans le pool génique de la population. Les fréquences géniques changeront dans les générations successives. L'équilibre traduit par la loi de Hardy-Weinberg sera modifié.

Nous allons étudier la sélection par rapport à l'évolution adaptative, et tout d'abord comme une protection contre les allèles désavantageux. La sélection artificielle par l'homme des espèces végétales et animales ne sera pas considérée ici.

Protection contre les allèles désavantageux

Un exemple de reproduction différentielle chez l'homme : le nanisme achondroplasique

C'est une maladie héréditaire à transmission dominante, déterminée par un couple d'allèles *A/a*. Appelons *A* l'allèle responsable de l'état pathologique; les individus *Aa* sont atteints de nanisme; on ignore le phénotype des individus *AA*.

Le Danois Morch a découvert que, si les enfants atteints d'achondroplasie sont victimes d'une mortalité assez élevée, les adultes jouissent d'une santé relativement normale. Or, les 108 nains adultes étudiés ont eu seulement 27 enfants alors que leurs 457 frères et sœurs normaux ont eu 582 enfants. Cette différence importante peut s'expliquer de la façon suivante : chez les achondroplases, la parturition exige fréquemment une césarienne

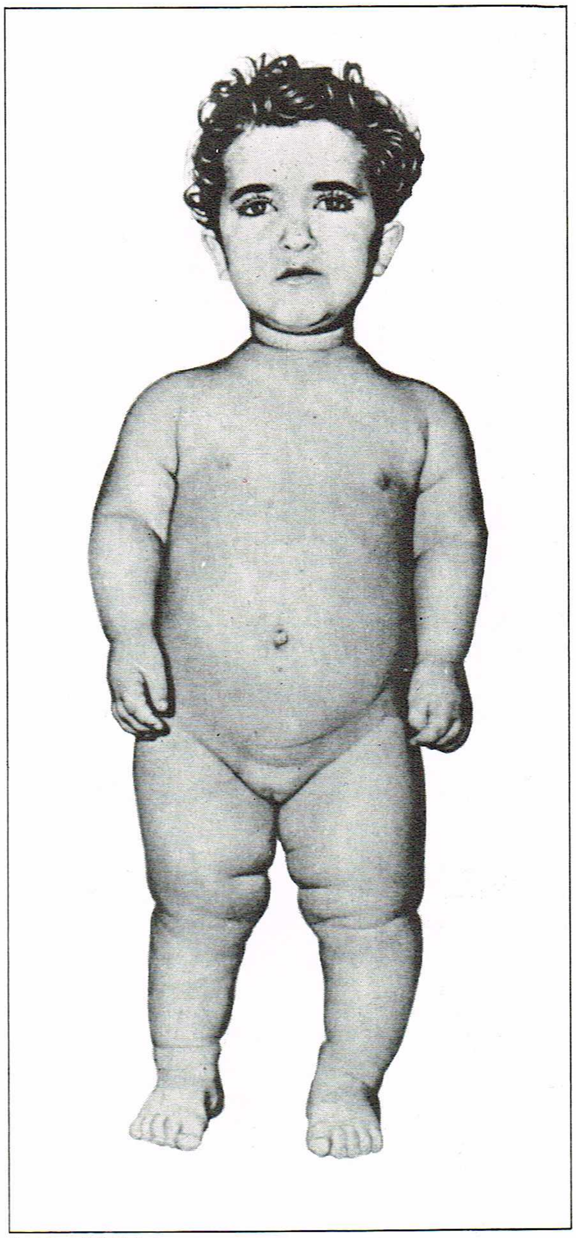

Archives I.G.D.A.

▲ ***Enfant atteint de nanisme achondroplasique; c'est une maladie déterminée par un couple d'allèles* A/a.**

(intervention qui n'a cessé d'être dangereuse que récemment); en outre, beaucoup d'achondroplases restent célibataires, sans doute parce que leur apparence est éloignée de l'idéal de beauté qui prévaut dans nos civilisations; enfin, certains de ces nains ne désirent pas avoir d'enfants susceptibles d'hériter de leur tare.

Le nombre d'enfants par parent achondroplasique *(Aa)* est de 27/108 = 0,25, alors que par parent normal *(aa)*, il est de 582/457 = 1,27; cela signifie que les nains transmettent leurs gènes à la génération suivante avec une fréquence relative de 0,25/1,27 = 0,2 ,soit à raison de 20 % environ de l'efficacité des normaux. Cette efficacité est appelée *aptitude darwinienne*, ou *valeur adaptative*, ou encore *valeur sélective* d'un génotype et est représentée par le symbole W.

La valeur adaptative du génotype *aa* (individus normaux) étant par convention égale à 1, celle du génotype *Aa* sera égale à W = 0,2. L'état achondroplasique est donc combattu par une sélection naturelle

$$s = 1 - 0{,}2 = 0{,}8.$$

La valeur s est appelée *coefficient de sélection*.

Modification des fréquences géniques par la sélection

Pour illustrer comment la sélection peut affecter les fréquences géniques, nous prendrons un exemple extrême : supposons une population panmictique pour un caractère récessif déterminé par un couple d'allèles *A/a*. Dans une telle population la fréquence génique de l'allèle

▶ *Deux enfants bantous de Zambie orientale : l'un a conservé les caractères propres du groupe ethnique (peau et cheveux noirs), l'autre est porteur d'une tare récessive bénigne, l'*albinisme.

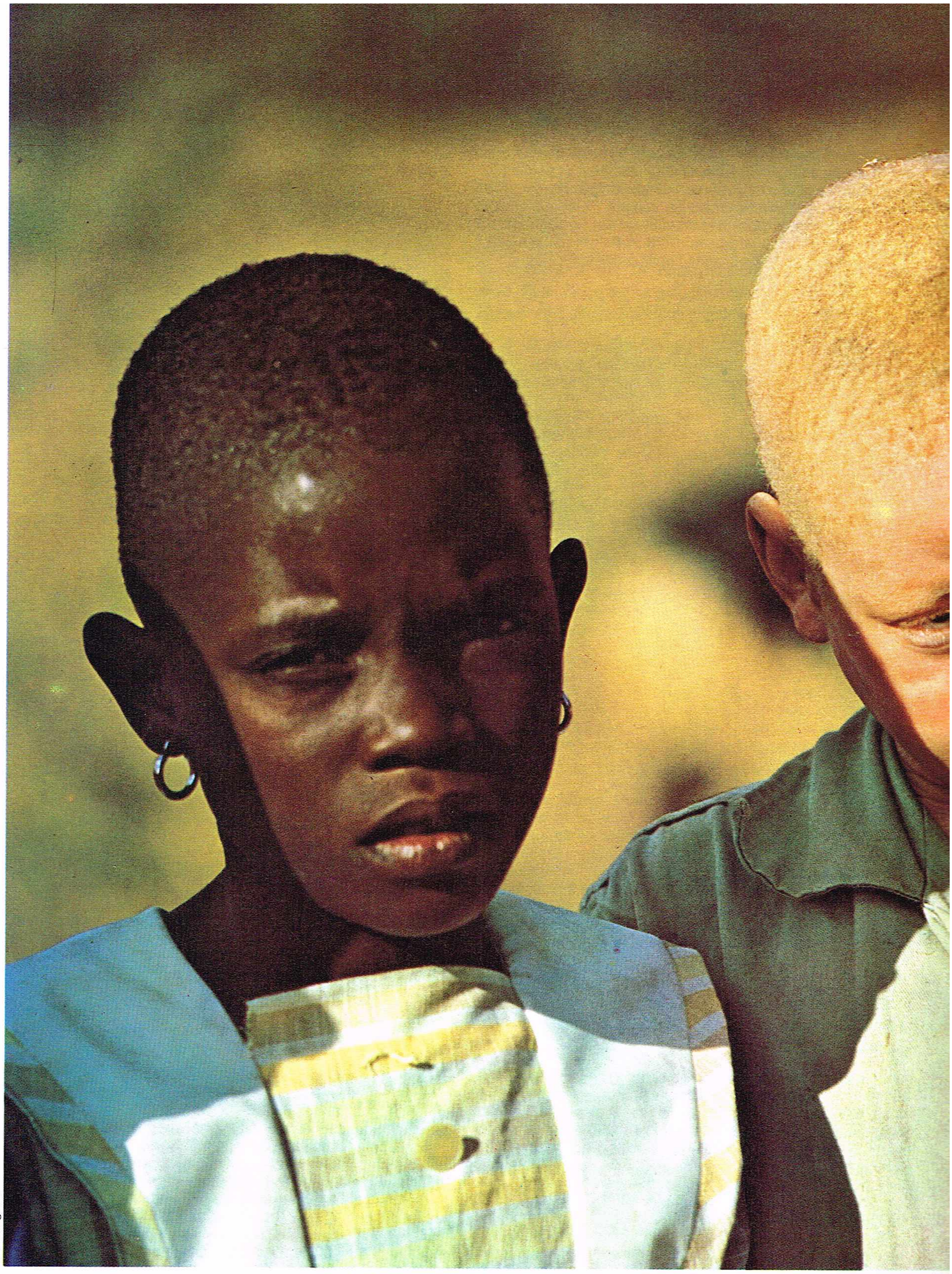

L. Pellegrini

A est égale à 0,3 et celle de l'allèle *a* est égale à 0,7. Les fréquences des trois génotypes (hypothèse panmictique) seront donc respectivement : *AA* = 0,09, *Aa* = 0,42 et *aa* = 0,49. Supposons que, du fait d'une modification brutale des conditions de vie extérieures, les individus de génotype *aa* ne puissent plus donner naissance à des descendants (s = 1). L'effectif efficace de la population sera alors réduit aux individus qui présentent soit le génotype *AA*, soit le génotype *Aa*. Ces génotypes représentent respectivement 18 % (0,09/0,09 + 0,42) et 82 % (0,42/0,09 + 0,42) de l'effectif efficace.

Si ces individus se croisent au hasard (ils présentent de fait le même phénotype), les fréquences des trois génotypes dans la descendance seront : *AA* = 0,35, *Aa* = 0,49, et *aa* = 0,17. La fréquence génique de l'allèle *a* sera égale à 0,17 + (1/2 × 0 49), soit à peu près 0,4. Elle aura diminué de 0,7 à 0,4. La sélection aura donc modifié la fréquence génique (tableau ci-contre).

Fréquence des génotypes dans les descendants d'une population où s'exerce une sélection qui empêche la reproduction des individus « *aa* » :

Croisement	*Fréquence*	*Fréquence des génotypes*		
		AA	Aa	aa
AA × AA	$(0{,}18)^2 = 0{,}03$	0,03		
AA × Aa	(0,18) (0,82) = 0,15	0,075	0,075	
Aa × AA	(0,82) (0,18) = 0,15	0,075	0,075	
Aa × Aa	$(0{,}82)^2 = 0{,}67$	0,17	0,34	0,17
Total		0,35	0,49	0,17
Génération précédente		**0,09**	**0,42**	**0,49**

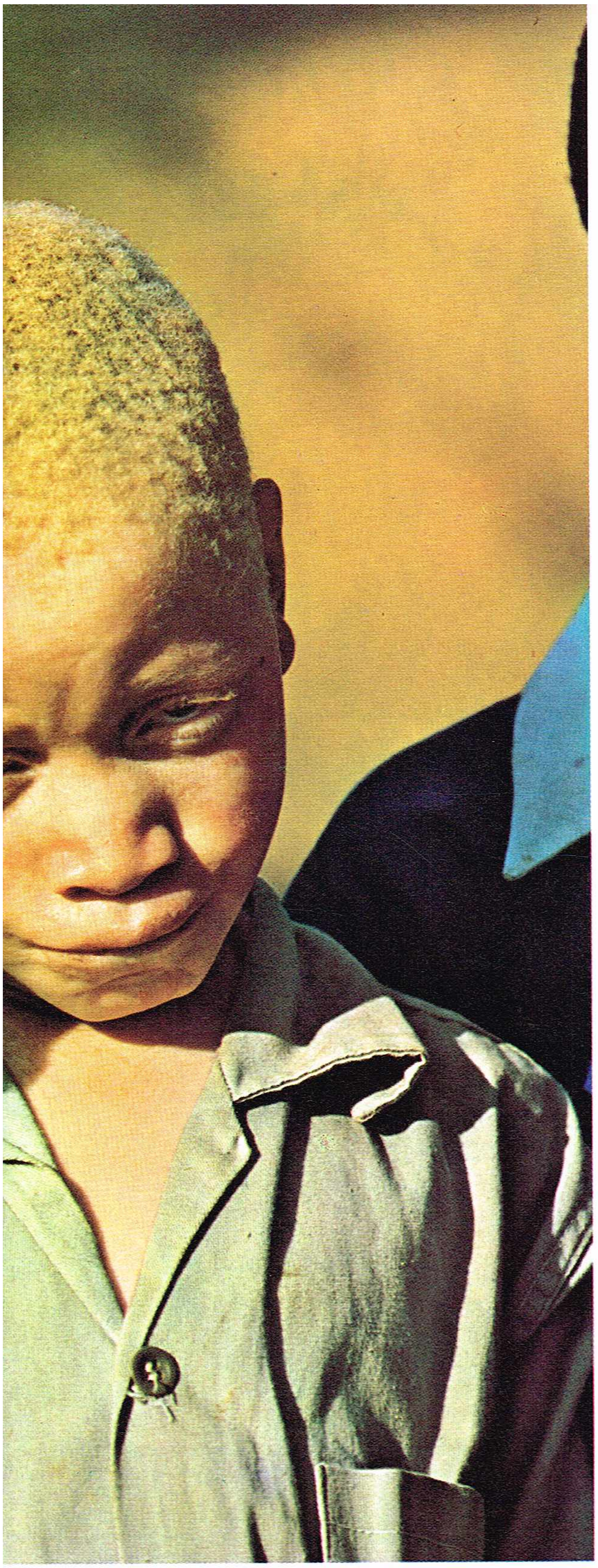

Un point intéressant à remarquer est que dans une population où les couples se forment au hasard, la proportion des individus hétérozygotes *Aa* pour un allèle récessif par rapport aux homozygotes pour ce même allèle augmente d'autant plus que la fréquence génique de cet allèle diminue (tableau ci-dessous).

Corrélation négative entre le rapport des génotypes *Aa*/*aa* et la fréquence génique de l'allèle *a* :

Fréquence de l'allèle a	*Fréquence des génotypes* AA	Aa	aa	*Rapport* Aa/aa
0,9	0,01	0,18	0,81	**0,22**
0,1	0,81	0,18	0,01	**18**
0,01	0,980 1	0,019 8	0,000 1	**198**

Si un allèle indésirable *a* présente une fréquence génique $q = 0{,}01$ dans la population humaine, de telle sorte que q^2 individus (0,000 1) expriment le caractère correspondant (1 sujet pour 10 000), il faudrait stériliser pendant 100 générations (à peu près 2 500 ans) les individus qui expriment le caractère pour réduire leur nombre à 1 pour 40 000. On comprend la relative inutilité d'un tel programme, surtout si l'on se souvient que de nouvelles mutations de $A \to a$ ne manqueraient pas de se produire.

Au contraire, la sélection qui opère contre un trait dominant est beaucoup plus efficace, puisque, toujours en l'absence des mutations, il suffirait évidemment d'une génération pour éliminer ce trait de la population s'il conférait à l'individu porteur l'incapacité de se reproduire.

Équilibre entre la mutation et la sélection

— *Cas de sélection contre la mutation désavantageuse dominante.*

Reprenons l'exemple du nanisme achondroplasique. Supposons que la population ne comprenne aucun achondroplase à l'origine. Comme il est hautement improbable que la mutation soit présente à la fois dans les deux gamètes maternel et paternel, lesquels sont à l'origine de l'individu, les nains seront tous des hétérozygotes *Aa*. A la génération suivante, la population contiendra deux catégories d'allèles *A* : ceux nouvellement apparus par mutation (qui constitueront dans le pool génique une fraction u) et ceux transmis par les parents achondroplasiques de la génération précédente; ceux-ci constitueront dans le pool génique une fraction 0,2 u (nous avons vu, en effet, que les achondroplases sont combattus par la sélection naturelle et que leur valeur adaptative W est égale à 0,2).

Au total, la fréquence génique p de l'allèle *A* sera égale à $u + 0{,}2\,u = 1{,}2\,u$. A la troisième génération, il y aura u nouveaux allèles *A* plus $0{,}2 \times 1{,}2\,u$ allèles transmis, soit au total : $p = 1{,}24\,u$. Et ainsi de suite... Les allèles *A* transmis constituant une fraction $0{,}2 \times p$, les allèles *A* éliminés par la sélection à chaque génération constituent une fraction $(1 - 0{,}2) \times p$. Un équilibre sera atteint lorsque la perte en allèles *A* due à la faible valeur adaptative de leur porteur sera exactement compensée par les mutations nouvelles, c'est-à-dire lorsqu'on aura $(1 - 0{,}2)\,p = u$. Or $u = 4{,}2 \times 10^{-5}$, la fréquence génique de l'allèle *A* sera donc, à l'équilibre :

$$p = \frac{u}{1 - 0{,}2} = \frac{4{,}2 \times 10^{-5}}{1 - 0{,}2} = 5{,}25 \times 10^{-5},$$

soit 525 allèles *A* pour 10 millions de gamètes.

La loi de Hardy-Weinberg nous permet de calculer les fréquences des différents génotypes dans la population en équilibre :

Phénotype	Normal	Achondroplase	Non viable?
Génotype	*aa*	*Aa*	*AA*
Fréquence	$q^2 = 0{,}999\,895$	$2\,pq = 0{,}000\,105$	$p^2 = 0{,}000\,000\,003$
Valeur adaptative	$W = 1$	$W = 0{,}2$	$W = 0?$

On observera donc 1 individu achondroplase pour environ 10 000 personnes, ce qui représente un peu plus du double du taux de mutation. Cela signifie que l'allèle *A* ne saurait s'accumuler dans la population de façon appréciable. Si la valeur adaptative du génotype *Aa* était proche de la normale, par exemple si W était égal à 0,9, la fréquence à l'équilibre de l'allèle *A* serait alors : $\bar{p} = \frac{u}{0{,}1} = 10\,u$, soit l'équivalent de seulement dix fois le taux de mutation. Par conséquent, les allèles dominants désavantageux ne s'accumulent pas dans le pool génique des populations. (Cela n'est pas le cas lorsque l'on considère les allèles récessifs désavantageux.)

— *Cas de sélection contre la mutation désavantageuse récessive.*

Si les individus porteurs de l'allèle désavantageux sous la forme hétérozygote *Aa* ne sont pas phénotypiquement différents des individus homozygotes normaux *AA*, la valeur adaptative de ces deux génotypes est donc la même et égale à 1. Par contre, les individus de génotype *aa* expriment la mutation et présentent une valeur adaptative plus faible et égale à $1 - s$ (s est le coefficient de sélection).

La fréquence génique q de l'allèle *a* atteint un équilibre dans la population lorsque les nouvelles mutations de *A* vers *a* sont contrebalancées par l'élimination dds allèles *a* par sélection. Puisque d'apès la loi de Hardy-Weinberg, la fréquence du génotype *aa* est égale à q^2, les allèles *a* éliminés constitueront donc dans le pool génique une fraction sq^2 : et, à l'équilibre, $u = sq^2$, d'où l'on tire l'équation : $\bar{q} = \sqrt{u/s}$.

A titre d'illustration, supposons qu'une tare récessive relativement bénigne, comme l'*albinisme* qui survient par mutation avec une fréquence $u = 28 \times 10^{-6}$, affaiblisse la valeur adaptative de ses victimes de 20 % seulement ($s = 0{,}20$) ; la fréquence génique de l'allèle responsable de l'albinisme sera à l'équilibre :

$$\bar{q} = \sqrt{\frac{u}{s}} = \sqrt{\frac{28 \times 10^{-6}}{0{,}2}} = 0{,}011\ 8.$$

Ce qui signifie qu'environ 1 gamète sur 100 sera possesseur de l'allèle responsable de l'albinisme, alors que seulement $\bar{q}^2 = 14/100\ 000$ individus de la population seront albinos.

La loi de Hardy-Weinberg nous permet de calculer les fréquences des différents génotypes dans la population en équilibre :

Phénotype	Normal	Normal	Albinos
Génotype	*AA*	*Aa*	*aa*
Fréquence	$p^2 = 0{,}976\ 5$	$2\ pq = 0{,}023\ 3$	$q^2 = 0{,}000\ 14$
Valeur adaptative	$W = 1$	$W = 1$	$W = 0{,}8$

L'allèle *a* s'accumule donc de façon sensible dans le pool génique, puisque les porteurs hétérozygotes où il se trouve à l'abri de la sélection naturelle sont environ 166 fois plus fréquents que les homozygotes qui donnent directement prise à l'influence du milieu.

Un cas intéressant est celui où la valeur adaptative de l'homozygote récessif est nulle (W = 0). C'est le cas des gènes létaux qui, à double dose, tuent leur porteur avant qu'il atteigne l'âge adulte; chez l'homme, il s'agit de maladies héréditaires fatales, comme l'*idiotie amaurotique infantile*. Le coefficient de sélection est alors égal à 1, et la fréquence génique de l'allèle *a* correspond à l'équilibre $\bar{q} = \sqrt{u}$. Le taux de mutation de l'idiotie amaurotique infantile a été estimé à 11×10^{-6}. La fréquence génique de *a* à l'équilibre sera $q = 0{,}003\ 3$. Cela signifie que 33 cellules reproductrices sur 10 000 auront cet allèle et que la fréquence génique sera 300 fois plus grande que le taux de mutation. La proportion des porteurs hétérozygotes sera :

$$2 \times p \times q = 2 \times 0{,}996\ 7 \times 0{,}003\ 3 = 0{,}006\ 6,$$

soit 0,6 %.

L'accumulation des allèles récessifs reste donc très importante, même si les individus atteints sont éliminés en totalité par la sélection naturelle.

Contribution des mutations à la charge génétique des populations

Si l'on admet comme taux de mutation moyen chez l'homme le chiffre de 10^{-5} par gène et par génération, cela signifie que 1 cellule reproductrice sur environ 100 000 possède, pour un gène donné, un nouvel allèle apparu par mutation. Or, le gamète humain ne compte pas moins de 10 000 gènes (10^4), et un œuf humain fécondé au moins 20 000. Par conséquent, à chaque génération, $2 \times 10^4 \times 10^{-5} = 20$ % des individus portent en eux au moins un gène nouvellement muté. La très grande majorité de ces nouveaux allèles est nuisible et est, par conséquent, contrecarrée par la sélection naturelle. Un équilibre s'établit entre la sélection et la mutation, et les allèles nuisibles persistent plus ou moins selon leur degré de nocivité ou selon qu'ils s'expriment à l'état homo- ou hétérozygote. On dit alors qu'ils contribuent à la *charge génétique,* ou *fardeau génétique* de la population.

La charge génétique a pu être mise en évidence dans les populations naturelles de drosophiles. Le principe est d'obtenir, par des croisements appropriés d'individus qui constituent la population sauvage, des descendants homozygotes qui révéleront les effets des allèles à expression récessive portés par ces individus. Les résultats concernant les divers effets nuisibles déterminés par l'un des cinq chromosomes de *Drosophila pseudoobscura* (le chromosome II) sont reportés dans le tableau ci-dessous et exprimés en pourcentage des chromosomes II qui les produisent dans des populations de Californie et du Texas :

Létaux	17 %
Semi-létaux	7 %
Sub-vitaux	78 %
Stérilité femelle	11 %
Stérilité mâle	8 %

Les chromosomes létaux en double dose tuent leur porteur avant qu'il atteigne l'âge adulte. Les semi-létaux entraînent la mort de moins de 100 % mais de plus de 50 %, et les sub-vitaux de moins de 50 % des individus. En ce qui concerne la stérilité, seule la stérilité complète a été notée dans l'expérience, mais non une fertilité réduite.

Il existe quelques indications qui tendent à montrer que la charge génétique de l'espèce humaine est également importante. Ces indications sont fournies par l'observation de la descendance des croisements consanguins qui, comme nous l'avons montré précédemment, augmentent l'homozygotie dans la population. Des relevés soigneux ont été faits parmi les enfants d'apparentés.

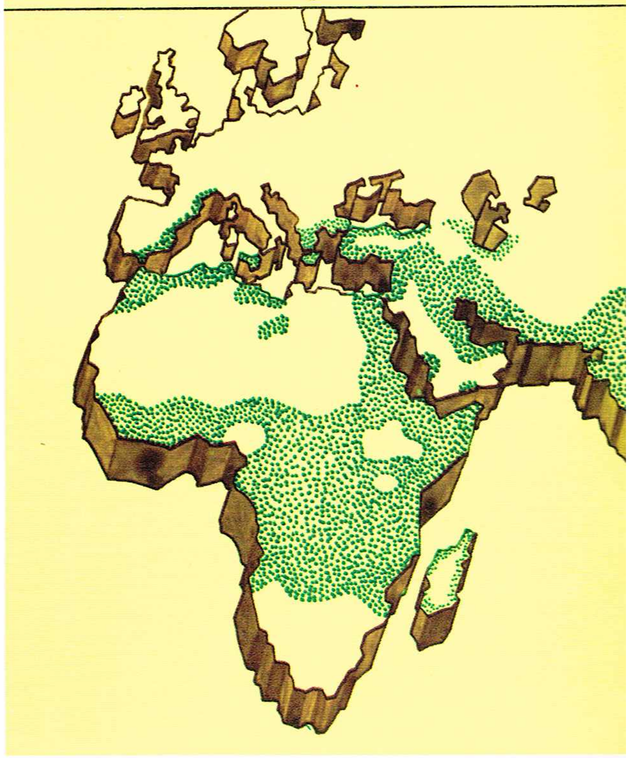

Richard Colin

Une partie de ces décès n'est pas due directement à des causes génétiques mais, même dans ces cas, tout se passe comme si les enfants de père et mère apparentés résistaient moins bien aux facteurs extérieurs.

La sélection que nous venons d'étudier s'oppose donc à la propagation d'allèles désavantageux : elle protège les caractéristiques moyennes de la population; pour cette raison, elle est appelée *sélection normalisatrice*. Nous allons étudier maintenant d'autres formes de sélection.

Formes équilibrante et diversificatrice de la sélection naturelle

La situation dans laquelle deux ou plus de deux allèles persistent dans la population avec une fréquence trop élevée pour être due uniquement à l'effet de la mutation est appelée *polymorphisme*. Le polymorphisme est d'un intérêt évident pour l'évolution adaptative puisqu'il maintient une certaine quantité de variabilité dans la population. Cela signifie que la population sera capable de réagir très rapidement à des changements dans l'environnement et évitera, de ce fait, l'extinction.

Un exemple de polymorphisme ayant trait aux groupes sanguins a déjà été étudié dans le chapitre précédent. Prenons à présent l'exemple d'un système dans lequel les individus hétérozygotes présentent une valeur adaptative supérieure à celle de chacun des deux homozygotes (hétérosis) : une maladie hémolytique : l'*anémie falciforme*.

Cette anémie grave de l'homme, appelée aussi drépanocytose, est produite par la synthèse d'une hémoglobine anormale, l'hémoglobine S. La synthèse ou la non-synthèse de la forme anormale de l'hémoglobine est déterminée par un couple d'allèles *A*/*a*. Les individus de génotype *AA* synthétisent une hémoglobine normale, alors que les individus de génotype *aa* synthétisent uniquement l'hémoglobine S; ces derniers, de ce fait, sont atteints de cette maladie hémolytique et thrombosante, d'évolution mortelle. Enfin, les individus de génotype *Aa* synthétisent les deux types d'hémoglobine et jouissent d'une santé à peu près correcte; l'examen de leurs globules rouges ou l'examen électrophorétique de l'hémoglobine permet de les reconnaître.

L'allèle *a* est assez fréquent en Afrique; sa fréquence génique y atteint 20 % dans certaines populations. Sa présence n'est pas un caractère racial, puisque des populations d'origines différentes vivant dans la même zone ont des fréquences également élevées; au contraire, des populations de même origine vivant l'une dans une zone basse, l'autre sur des plateaux présentent des fréquences respectivement forte pour la première et faible pour l'autre. La fréquence élevée de cet allèle est en corrélation très étroite avec l'existence à l'état endémique d'une forme grave de la malaria (forme de fièvre paludéenne à *Plasmodium falciparum*). Un faisceau de preuves montre que l'hétérozygote *Aa* présente une résistance à la malaria supérieure à celle de l'homozygote normal *AA*. Ainsi,

◀ ***Distribution de l'anémie falciforme (barres rouges) et de la malaria (pointillé vert) en Eurasie et en Afrique. On remarquera que la fréquence élevée de l'allèle responsable de la maladie hémolytique est en corrélation étroite avec l'existence, à l'état endémique, de la fièvre paludéenne (d'après Motulsky).***

▼ ***A gauche, tableau représentatif de trois départements français montrant les dangers encourus par la descendance, lors de croisements consanguins (d'après Sutter, 1958). A droite, mise en évidence d'hématies falciformes chez un malade atteint de drépanocytose (anémie falciforme).***

Taux de mortalité pour 1000 enfants de parents connus pour être apparentés ou non					
Département	Parents	Mort-nés	Nouveau-nés	de 2 à 12 mois	de 1 an ou plus
Morbihan	Apparentés Non apparentés	50 21	41 23	38 29	96 55
Finistère	Apparentés Non apparentés	28 21	31 13	50 25	96 70
Loir-et-Cher	Apparentés Non apparentés	26 19	30 21	24 19	56 39

Richard Colin

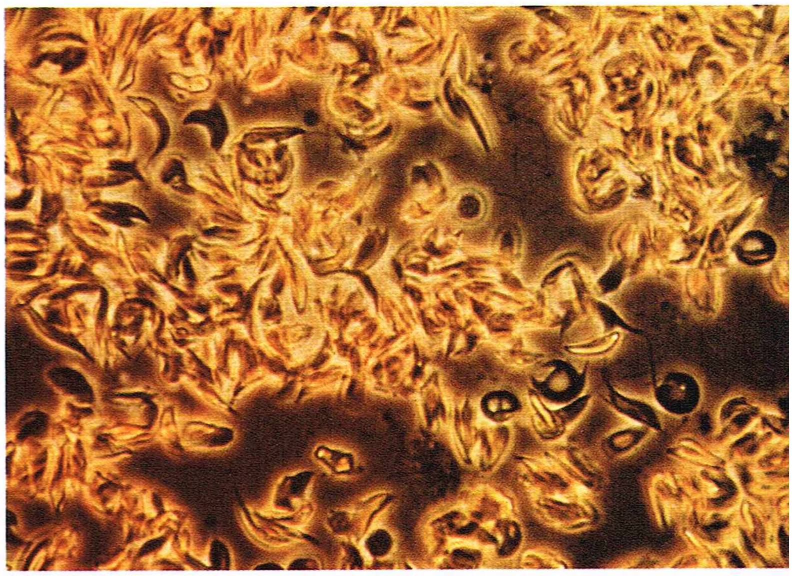

Institut Pasteur

par exemple, on ne trouve pas d'infection élevée susceptible d'entraîner la mort chez les jeunes enfants hétérozygotes. Par ailleurs, la fréquence des hétérozygotes est plus grande chez les jeunes adultes que chez les enfants en bas âge.

La malaria semble être un facteur sélectif important pour le maintien d'autres allèles responsables d'anémies hémolytiques, comme la *thalassémie* ou le déficit en enzyme glucose-6-phosphate-déshydrogénase (G-6-P-D). La résistance à la malaria conférée par l'absence de G-6-P-D s'ajoute à celle qui est conférée par l'allèle responsable de l'anémie falciforme.

On peut représenter la valeur adaptative des trois génotypes de l'anémie falciforme de la façon suivante :

Phénotype	Non anémique Sujet à la malaria	Non anémique Non sujet à la malaria	Anémique Mort précoce
Génotype	*AA*	*Aa*	*aa*
Fréquence	p^2	2 pq	q^2
Valeur adaptative	$W = 1 - s_1$	$W = 1$	$W = 1 - s_2$

s_1 et s_2 sont les coefficients de sélection respectifs des individus homozygotes; ils donnent la mesure du défaut d'adaptation de ces derniers comparativement aux hétérozygotes. Comme les anémiques meurent en général avant de pouvoir se reproduire, on peut considérer que $s_2 = 1$. La valeur de s_1, désavantage des homozygotes normaux, dépendra du milieu : elle sera égale à 0 là où il n'y a pas de paludisme, mais sera plus grande que 0 là où cette maladie est présente.

On peut procéder à une estimation de la valeur de s_1 là où la plus forte fréquence génique de l'allèle *a* ($q = 0{,}20$) a été mesurée, en supposant que la population est en état d'équilibre. La proportion d'allèles *A* éliminés par la sélection peut être calculée de la façon suivante : les individus homozygotes *AA* éliminés constituent une fraction s_1p^2 de l'ensemble des génotypes et, pour chaque individu homozygote *AA*, deux allèles *A* sont éliminés, soit $2 \times s_1p^2$. D'autre part, les individus participant à la constitution de la descendance et portant au moins un allèle *A* sont soit des homozygotes *AA* — il y en a $(1 - s_1)$ p^2 — soit des hétérozygotes *Aa* — il y en a 2 pq —; les allèles *A* transmis seront au nombre de $2(1 - s_1)p^2$, (contribution des homozygotes), plus 2 pq (contribution des hétérozygotes). $2 s_1p^2$ allèles *A* sont donc éliminés, $2(1 - s_1)p^2 + 2pq$ transmis. Par conséquent, la proportion d'allèles *A* éliminés par la sélection à chaque génération est :

$$2 s_1p^2/2 s_1p^2 + 2(1 - s_1)p^2 + 2pq =$$
$$s_1p^2/s_1p^2 + (1 - s_1)p^2 + pq =$$
$$s_1p^2/p^2 + pq = s_1p^2/p(p + q) =$$
$$s_1p^2/p = s_1p$$

De la même façon, la proportion d'allèles *a* éliminés à chaque génération par la sélection est :

$$s_2q_2/s_2q_2 + (1 - s_2)q^2 + pq = s_2q^2/q = s^2q = q$$

puisque $s_2 = 1$.

Comme on suppose la population en état d'équilibre, ces deux proportions sont égales : $s_1 \times p = q$, d'où $s_1 = q/1 - q = 0{,}2/0{,}8 = 0{,}25$.

Ainsi, en l'absence de malaria ($s_1 = 0$), l'allèle *a* sera combattu par la sélection comme un allèle récessif désavantageux; mais, en présence de malaria, là où l'hétérozygote aura un avantage sélectif ($s_1 = 0{,}25$), la sélection établira un équilibre entre les deux allèles *A* et *a*, qui persisteront avec une fréquence du même ordre de grandeur dans la population.

Cette adaptation de la population à l'effet nocif de la malaria se paie par la mort par anémie, à chaque génération, de $q^2 = 0{,}04$, soit 4 % d'enfants. Ce tribut est dû à la maintenance dans le pool génique d'allèles non favorables à l'état homozygote; il s'agit donc également d'une contribution à la charge génétique de la population.

La sélection directionnelle

La sélection normalisatrice s'oppose à la propagation des allèles désavantageux dans la population; les formes équilibrante et diversificatrice de la sélection naturelle maintiennent l'état d'adaptation de la population à son milieu; pour sa part, la forme directionnelle de la sélection modifie la composition génique d'une population en réponse aux transformations du milieu. Elle peut aussi

H. Chaumeton - Jacana

se manifester sans que le milieu ne change, si des mutations ou des combinaisons de gènes, nouvelles ou favorables, surviennent ou sont introduites dans la population.

L'exemple le plus spectaculaire de transformations d'une population naturelle est sans doute celui de l'expansion des mutants mélaniques (forme sombre) au sein de plusieurs espèces de phalènes (papillons de nuit) durant le siècle qui a suivi la révolution industrielle en Angleterre. Ainsi, pour l'espèce *Biston betularia*, on comptait, en 1848, dans la région de Manchester 1 % de formes sombres; dans la même région, en 1898, ces formes constituaient 99 % de la population. Ce phénomène a reçu le nom de *mélanisme industriel des Lépidoptères*. Le mélanisme, dans la plupart des cas, est dû à la présence d'un gène dominant.

L'existence des formes mélaniques dans les régions industrielles est intimement en corrélation avec la pollution des arbres par la suie qui s'y dépose. Dans les régions non polluées, les formes sombres sont éliminées par les Oiseaux prédateurs qui chassent à vue; les formes sombres, contrairement aux formes claires, se distinguent parfaitement sur le tronc des arbres lorsque ceux-ci sont couverts de Lichens. Ce désavantage n'est pas compensé par l'avantage sélectif des larves qui donnent naissance aux formes mélaniques et qui semblent physiologiquement supérieures. Dans les régions polluées, la situation se renverse. Les formes claires, qui sont presque invisibles sur les troncs couverts de Lichens, se voient parfaitement sur les troncs couverts de suie, là où la pollution a tué les Lichens : ainsi, les formes mélaniques sont camouflées dans les régions polluées. On voit que la sélection favorise les formes mélaniques dans les régions industrielles et les formes claires dans les régions non polluées. Dans les régions polluées, une sélection directionnelle a déplacé la fréquence des individus mélaniques vers une fréquence proche de 1 dans un temps relativement très court (50 ans).

Il est important de connaître les paramètres qui jouent sur la vitesse du processus sélectif directionnel. Admettons l'existence d'un caractère déterminé par un couple d'allèles *A*/*a* (l'allèle *A* dominant sur l'allèle *a*), et tel que l'individu de génotype *aa* présente une valeur adaptative $W = 1 - s$ plus faible que les deux autres génotypes; ce cas est exactement ce qui se produit dans le mélanisme industriel. On démontre que la fréquence génique q de l'allèle *a* diminue dans ce cas à un taux Δq par génération tel que : $\Delta q = - spq^2/(1 - sq^2)$.

Cette formule est intéressante puisqu'elle permet de déduire plusieurs résultats : premièrement, un changement dans les fréquences géniques n'est possible que si

H. Chaumeton - Jacana

s est différent de 0 ; deuxièmement, quelle que soit la valeur de s appartenant à l'intervalle]0,1], Δ q sera négatif, et l'allèle *a* sera éliminé de la population ; ainsi, même une faible différence de valeur adaptative rendra la sélection effective ; troisièmement, la vitesse de sélection, mesurée par l'importance du taux de diminution de la fréquence génique de *a* (Δ q), dépend non seulement de la valeur du coefficient de sélection s mais aussi des fréquences p et q des allèles qui sont soumis à la sélection.

q	s = 0,5	s = 0,2	s = 0,1	s = 0,01
0,99	0,00960	0,00240	0,00110	0,000099
0,90	0,06640	0,01930	0,00880	0,000818
0,50	0,07140	0,02630	0,01280	0,001266
0,10	0,00450	0,00180	0,00090	0,000091
0,01	0,00005	0,00002	0,00001	0,000001

q : fréquence relative de l'allèle récessif défavorisé
s : coefficient de sélection

Richard Colin

◀ *Accroissement du changement des fréquences géniques par génération, quand la sélection élimine un gène récessif au profit de son allèle dominant dans la génération qui est soumise à la sélection.*

La sélection est extrêmement efficace lorsque l'allèle récessif est fréquent (entre 50 et 90 %) : le taux de diminution de *a* peut atteindre 7 % par génération pour un coefficient de sélection égal à 0,5. Par contre, elle est très peu efficace lorsque l'allèle récessif est très fréquent ou très rare. Le maintien de plusieurs allèles à fréquences géniques voisines (polymorphisme), dont nous avons déjà donné quelques exemples, permet donc à la population de réagir rapidement aux variations des conditions de milieu et d'éviter, de ce fait, son extinction.

Les migrations

Les espèces qui contiennent un nombre important d'individus ont tendance à se subdiviser en sous-unités pour des raisons géographiques, écologiques, physiologiques ou sociales (c'était le cas par exemple des différentes castes de l'Inde, groupes endogames où les individus étaient également répartis). Dans chacune de ces sous-unités, les processus évolutifs que nous avons décrits (la pression de mutation, la dérive génétique, l'évolution adaptative à travers la sélection naturelle) s'effectuent indépendamment.

Des variétés différentes se développent à l'intérieur d'une espèce et peuvent représenter la première étape dans la formation de nouvelles espèces. Mais, le plus souvent, ces sous-unités, même lorsqu'elles sont bien délimitées, ne sont pas complètement isolées les unes des autres. Chez les espèces animales, par exemple, certains individus migrent occasionnellement. L'incorporation d'immigrants qui, en tant que groupe, présentent des fréquences géniques différentes de celles qui caractérisent la population réceptrice, apportera à cette population des modifications dans son pool génique. Ainsi, dans l'espèce humaine, les migrations ont toujours été très développées. Il semble qu'elles soient responsables, en dépit de la dispersion de l'homme sur la planète et de sa haute faculté d'adaptation à des environnements variés, du maintien d'une espèce unique.

Les changements dans les fréquences géniques sous l'effet des migrations s'expriment par des équations similaires à celles qui ont été présentées dans le chapitre consacré aux effets de la mutation sur les fréquences géniques dans les populations à grand effectif ; c'est pourquoi il est inutile de les présenter ici. Néanmoins, le type et la quantité de mouvement dans l'information génétique à l'intérieur des sous-unités qui composent une population peuvent être différents. On distingue, par exemple, les situations dans lesquelles les migrations entre les sous-unités s'effectuent au hasard dans une région donnée de celles où les migrations s'effectuent selon une direction unique créant un flux génétique linéaire.

◀ *Ces deux illustrations, forme claire, page ci-contre, et forme mélanique, ci-contre, de* **Biston betularia,** *sont un des exemples les plus spectaculaires de la* **sélection directionnelle,** *à laquelle on a donné le nom de mélanisme industriel.*

Conclusion

Par souci de simplicité, nous avons envisagé les mécanismes susceptibles de modifier les fréquences géniques des populations, en considérant des situations extrêmes : seules des forces évolutives uniques (mutation, sélection ou dérive, etc.) ont été considérées comme agissant sur les fréquences géniques d'un gène ne comportant que deux allèles. En fait, dans les populations naturelles, il y a presque toujours deux ou plus de deux facteurs agissant conjointement. De plus, les fréquences géniques de gènes différents ne sont pas indépendantes entre elles.

Les maladies héréditaires

La génétique a pris une grande importance dans la médecine contemporaine. Cela est dû non seulement au développement de la génétique fondamentale, mais également à l'augmentation de la part jouée par les maladies héréditaires dans la morbidité générale, puisque les infections virales et surtout bactériennes sont en très grande partie contrôlées.

Les maladies héréditaires les mieux connues sont celles qui sont déterminées par un couple de gènes allèles, l'un des allèles étant responsable du caractère pathologique. Cependant, même dans ce cas, l'étude de la transmission est parfois difficile, car la maladie ne se manifeste pas toujours, même en présence de la constitution génétique appropriée : on parle alors de gène à *pénétrance variable*. De plus, le degré avec lequel les effets apparaissent varie souvent selon les individus ; dans ce cas, le gène est dit à *expressivité variable*.

Dans une première partie, nous considérerons des exemples typiques d'hérédité monofactorielle. Ensuite sera abordée l'étude des aberrations chromosomiques constitutionnelles : dans certains cas, il a été possible d'associer à un syndrome particulier des anomalies dans le nombre ou dans l'intégrité des chromosomes. Ces anomalies sont dues la plupart du temps à des erreurs dans la disjonction des chromosomes au cours de divisions cellulaires. Lorsque ces erreurs se produisent très tôt (gamétogenèse, premières divisions de l'œuf), toutes ou la plupart des cellules présentent une garniture chromosomique anormale : les maladies qui en découlent sont dites *constitutionnelles*.

Les maladies héréditaires ne doivent pas être confondues avec les agressions qui se produisent *in utero* (embryopathies et fœtopathies) ; toutes sont *congénitales* en ce sens qu'elles existent à la naissance, mais les embryopathies (telles que la rubéole, qui présente une activité tératogène principalement lorsque la mère est atteinte pendant les huit premières semaines de la grossesse) et les fœtopathies (telles que la syphilis congénitale) sont

TABLEAU N° 1 Maladies à transmission dominante autosomique	
Système osseux et enchondral	
Achondroplasie	Maladie de Lobstein
Système cutané	
Pemphibus bénin Pityriasis Rubra Pilaire Maladie de Book Maladie de Rendu-Osler	Maladie de Thost-Unna Lentiginose neurodysraphique Acanthosis Nigricans Elastorrhexie systématisée
Système neuro-musculaire	
Maladie de Dejerine Landouzy Myotonie hypertrophique de Thomsen Sclérose tubéreuse de Bourneville Chorée de Huntington	Myotonie de Steinert Maladie de Recklinghausen Maladie de Dejerine-Sottas Acropathie ulcéro-mutilante familiale de Thevenard
Métabolisme	
Diabète rénal	Maladie de Gamstorp
Système hématopoïétique	
Elliptocytose Anomalie de May-Hegglin Maladie de Willebrand	Drépanocytose Maladie de Glanzmann Maladie de Rendu-Osler
Organes de la vue	
Syndrome de Marfan Ptosis palpébral Distichiasis	Hétérochromie Epicanthus
Autres maladies héréditaires	
Prognathisme Maladie de Capdepont Maladie de Hirschprung Hémochromatose idiopathique	Bec-de-lièvre Syndrome de Franceschetti Polyposes intestinales

Richard Colin

acquises et non héréditaires. Ainsi, dans le cas de la syphilis congénitale, c'est le tréponème qui, traversant le placenta à partir du cinquième mois et lésant ensuite tous les viscères, est responsable de la maladie.

L'hérédité des caractères pathologiques

Un exemple de transmission dominante : l'achondroplasie

Rappelons que l'achondroplasie, que nous avons déjà vue lors de l'étude de la génétique des populations, est une maladie héréditaire caractérisée par un trouble de la croissance du cartilage qui précède la plupart des os. La croissance en longueur des os étant électivement touchée, il en découle un raccourcissement des membres (nanisme).

La maladie est transmise par un gène autosomal dominant. La présence d'un seul allèle responsable du caractère pathologique suffit à provoquer la maladie (transmission dominante). Les individus malades sont donc hétérozygotes. Comme dans la plupart des maladies héréditaires à transmission dominante, on ignore ce que donnerait le phénotype de l'homozygote correspondant ; il est fort probable qu'il est non viable (létal). Lorsque, comme c'est le cas général, un individu atteint épouse une personne saine, il produit deux types de gamètes : l'un porteur de l'allèle responsable du caractère pathogène, l'autre porteur de l'allèle normal. Seuls les premiers donnent naissance à des individus tarés. La descendance d'un tel couple sera donc constituée pour moitié d'individus sains et pour moitié d'individus malades. Puisque le gène est situé sur un autosome, les deux sexes sont également affectés. La maladie ne saute jamais une génération, car l'allèle responsable du caractère pathologique est dominant et sa pénétrance est complète ; les malades naissent toujours d'un parent taré.

Les maladies à transmission dominante les mieux connues sont répertoriées dans le tableau 1. Le menton proéminent (prognathisme) des Habsbourg d'Espagne en est un exemple historique.

Un exemple de transmission récessive autosomique : la phénylcétonurie

Un sujet atteint de phénylcétonurie ne peut transformer un acide aminé (la phénylalanine) en un autre acide aminé (la tyrosine) par suite d'un déficit en une enzyme (l'hydroxylase).

L'accumulation dans l'organisme de la phénylalanine et de ses dérivés est toxique pour le système nerveux. Les sujets tarés deviennent, s'ils ne sont pas traités, des débiles mentaux profonds.

Cette maladie est transmise par un gène autosomal récessif. Seuls les individus possédant deux exemplaires de l'allèle responsable du caractère pathologique manifestent la maladie (transmission récessive). Les sujets atteints naissent donc de parents sains hétérozygotes pour le caractère. Chaque parent hétérozygote produit deux types de gamètes, dont la moitié porte l'allèle normal. Par conséquent, 1/4 des enfants seront tarés, et 3/4 seront sains. Parmi ceux-ci, les 2/3 pourront transmettre, éventuellement, la maladie à leur descendance. Puisque le gène responsable de la maladie est situé sur un autosome, les deux sexes sont également affectés.

La consanguinité augmente de manière importante la probabilité d'avoir un enfant taré, puisque, dans ce cas, les apparentés risquent d'avoir hérité d'un ancêtre

▼ A gauche, étapes enzymatiques bloquées dans le cas de maladies héréditaires du métabolisme des acides aminés aromatiques. A droite, en haut, schéma de transmission d'un caractère pathologique dominant ; en bas, schéma de transmission d'un caractère pathologique récessif.

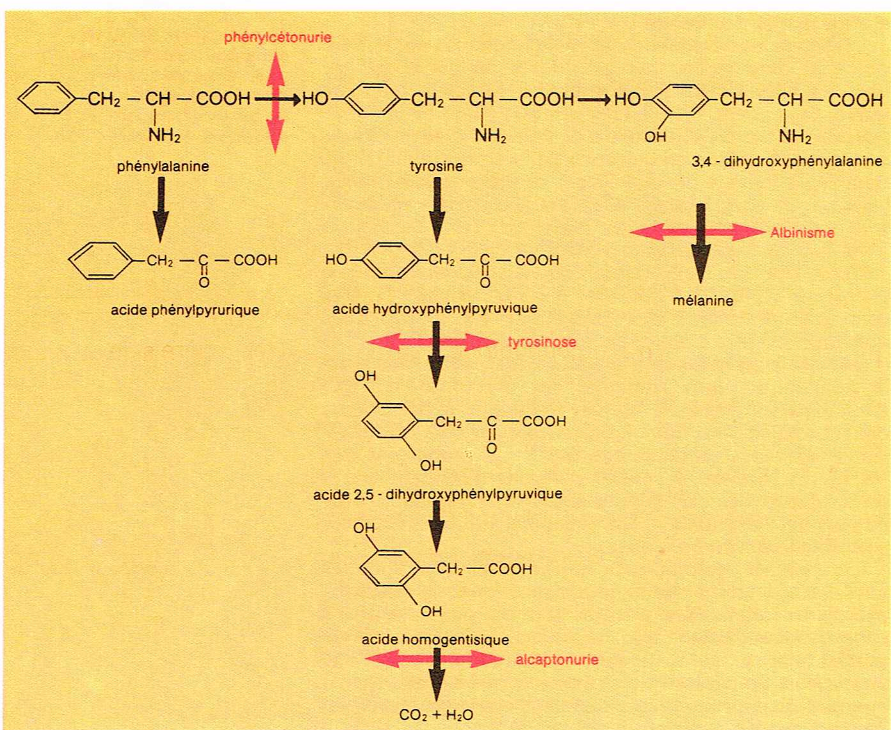

Richard Colin

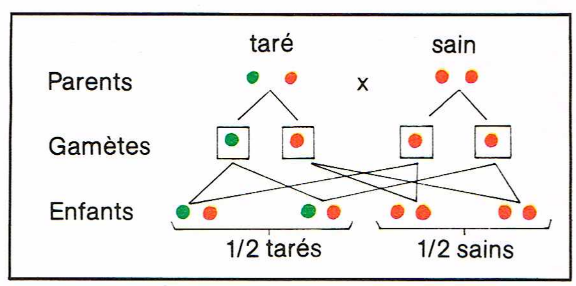

Richard Colin

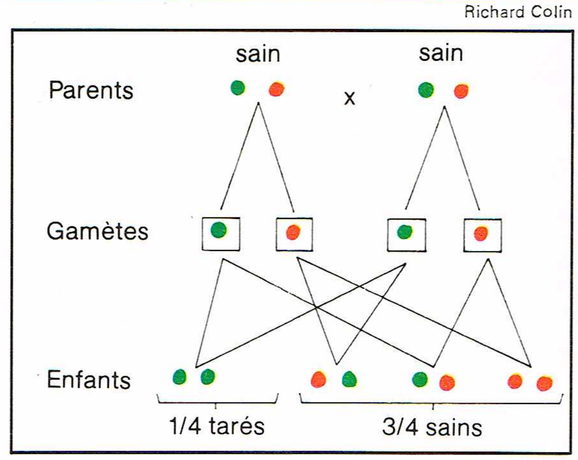

Richard Colin

commun un exemplaire répliqué d'un allèle présent chez un ascendant (voir génétique des populations).

La détection des hétérozygotes qui peuvent transmettre éventuellement la maladie est d'un intérêt évident. Dans le cas de la phénylcétonurie, elle est parfaitement possible par l'épreuve de charge en phénylalanine. Par contre, dans d'autres maladies à transmission récessive, elle n'est pas encore possible.

Un grand nombre de maladies héréditaires, affectant en particulier le métabolisme, sont à transmission récessive autosomique (tableau 2). Parmi elles, citons la *galactosémie congénitale du nouveau-né;* dès l'ingestion de galactose (sucre présent dans le lait) le nouveau-né présente des troubles digestifs. Ultérieurement apparaissent une arriération mentale, un retard statural, etc. L'intérêt du diagnostic précoce est ici évident.

Un exemple de transmission récessive liée au sexe : l'hémophilie

L'hémophilie est une anomalie de la coagulation du sang. Elle fit des ravages dans les familles royales d'Europe, après avoir été introduite par les filles de la reine Victoria et leurs descendants. Cette maladie, qui détermine des hémorragies soit spontanées, soit provoquées, apparaît habituellement dans l'enfance ou l'adolescence. Elle est due à l'absence de globuline antihémophilique A ou B. Que ce soit la forme A ou B, elle est contrôlée par un gène localisé sur le chromosome X. Comme il n'y a pas de gène équivalent sur le chromosome Y, sa transmission est liée au sexe. Les femmes porteurs de l'allèle responsable de la maladie ne sont jamais affectées à moins qu'elles ne soient homozygotes pour cet allèle (transmission récessive). Les hommes, au contraire, présentent toujours la maladie s'ils possèdent cet allèle (les hommes ne possèdent qu'un seul chromosome X).

Les malades naissent la plupart du temps de l'union d'une femme hétérozygote, donc saine mais *conductrice,* et d'un homme sain. Ce couple a une chance égale d'avoir : un garçon taré ; un garçon sain ; une fille conductrice ; une fille saine non conductrice.

L'hémophilie est absolument exceptionnelle chez les femmes puisqu'elle suppose l'union d'un homme taré et d'une femme conductrice. Enfin, un homme taré uni avec une femme saine non conductrice donnera naissance à des filles toutes conductrices et à des garçons tous sains.

D'autres maladies héréditaires se transmettent à la manière de l'hémophilie. Elles sont répertoriées dans le tableau 3.

Autres modes de transmission

Les maladies à transmission dominante liée au sexe sont très rares ; c'est le cas des *nystagmus* héréditaires isolés, qui se caractérisent par des anomalies des muscles de l'œil.

Il est aisé de comprendre que le déterminisme des maladies contrôlées par plusieurs gènes ne sera pas aussi facilement analysable que celui des maladies à hérédité monofactorielle ; et cela d'autant plus que peuvent se surajouter divers effets de l'environnement. Par exemple, *l'ulcère gastro-duodénal* et la *sténose hypertrophique du pylore* affectent de façon prédominante le sexe masculin. De même, il existe des maladies

TABLEAU N° 3

Maladies à transmission récessive liée au sexe

Système osseux et enchondral	
Dysplasie spondylo-épiphysaire tardive	
Système cutané	
Dysplasie ectodermique anidrotique avec anodontie	
Système neuro-musculaire	
Maladie de Duchenne	
Système hématopoïétique	
Déficit en glucose-6-phosphate déshydrogénase	Maladie d'Aldrich ; Hémophilie A et B
Organes de la vue	
Daltonisme	Mégalocornée

Richard Colin

TABLEAU N° 2

Maladies à transmission récessive autosomique

Système osseux et enchondral	
Maladie de Morquio	Maladie de Porak et Durante
Maladie d'Albers-Schonberg	
Système cutané	
Maladie de Meleda	Albinisme
Xeroderma pigmentosum	Syndrome de Rothmund
Syndrome de Werner	
Système neuro-musculaire	
Myopathies des ceintures	Microcéphalie
Maladie de Werdnig-Hoffmann	Epilepsie myoclonique familiale
Leuco dystrophies familiales progressives	
Métabolisme des hydrates de carbone	
Galactosémie	Intolérance pour le fructose
Glycogénoses	Fructosurie essentielle
Pentosurie essentielle	
Métabolisme des lipides	
Hyperlipémie essentielle	Maladie de Niemann Pick
Maladie de Gaucher (forme neurologique)	Idioties amaurotiques
Métabolisme des protéines	
Phénylcétonurie	Albinisme
Alcaptonurie	Leucinose
Maladie de Hartnup	Cystinose
Cystinurie-lysinurie	
Autres métabolismes	
Maladie de Crigler-Najjar	Maladie de Wilson
Système hématopoiétique	
Maladie de Chediak	Maladie de J. Bernard et Soulier
Maladie de Fanconi	Déficit en facteur V, VII et X
Endocrinologie	
Hyperplasies congénitales des surrénales	Troubles de l'hormonosynthèse thyroïdienne
Organes de la vue	
Acromatopsie	Maladie de Behr
Rétinites pigmentaires	Syndrome de Marfan
Hydrophtalmie	Anophtalmie
Autres maladies héréditaires	
Syndrome de Kartagener	Mucoviscidose
Néphrophtisie	Lithiase cystinique
Acatalasie	

Richard Colin

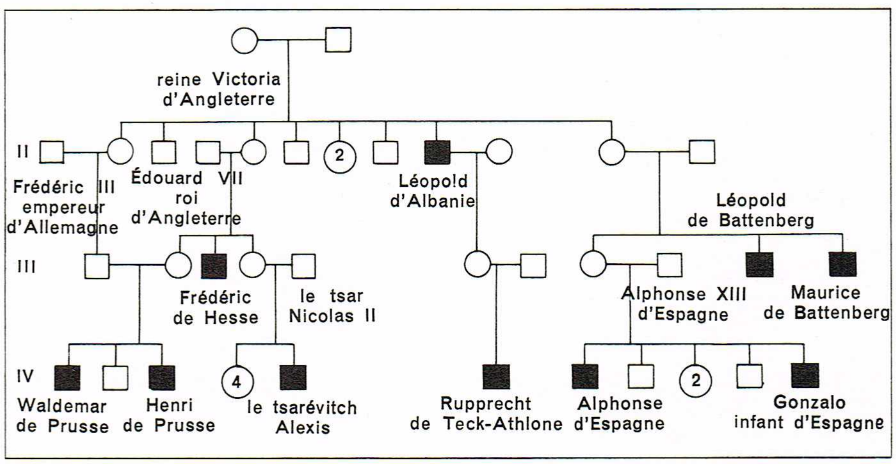

I.G.D.A.

▲ ***Arbre généalogique de l'hémophilie dans les familles royales d'Europe après qu'elle eut été introduite par les filles de la reine Victoria : les femmes sont indiquées par un cercle, les hommes par un carré blanc ; les individus affectés de la maladie sont indiqués par un carré noir.***

▼ ***A droite, schéma de transmission d'un caractère pathologique récessif lié au sexe.***

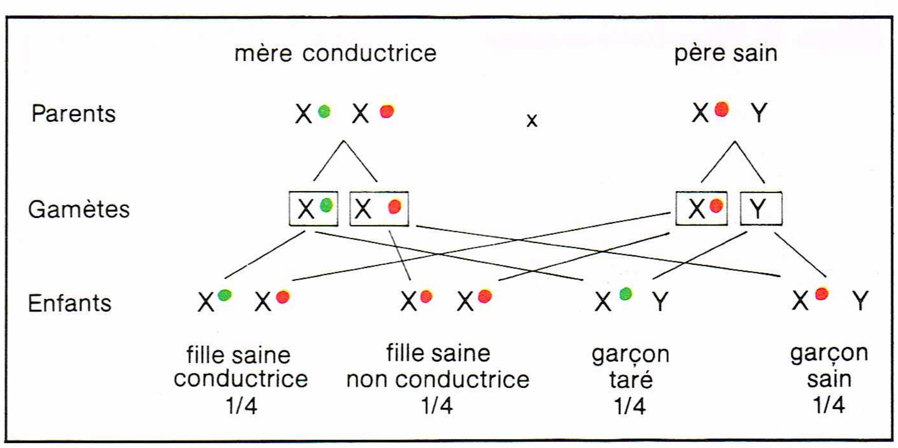

Richard Colin

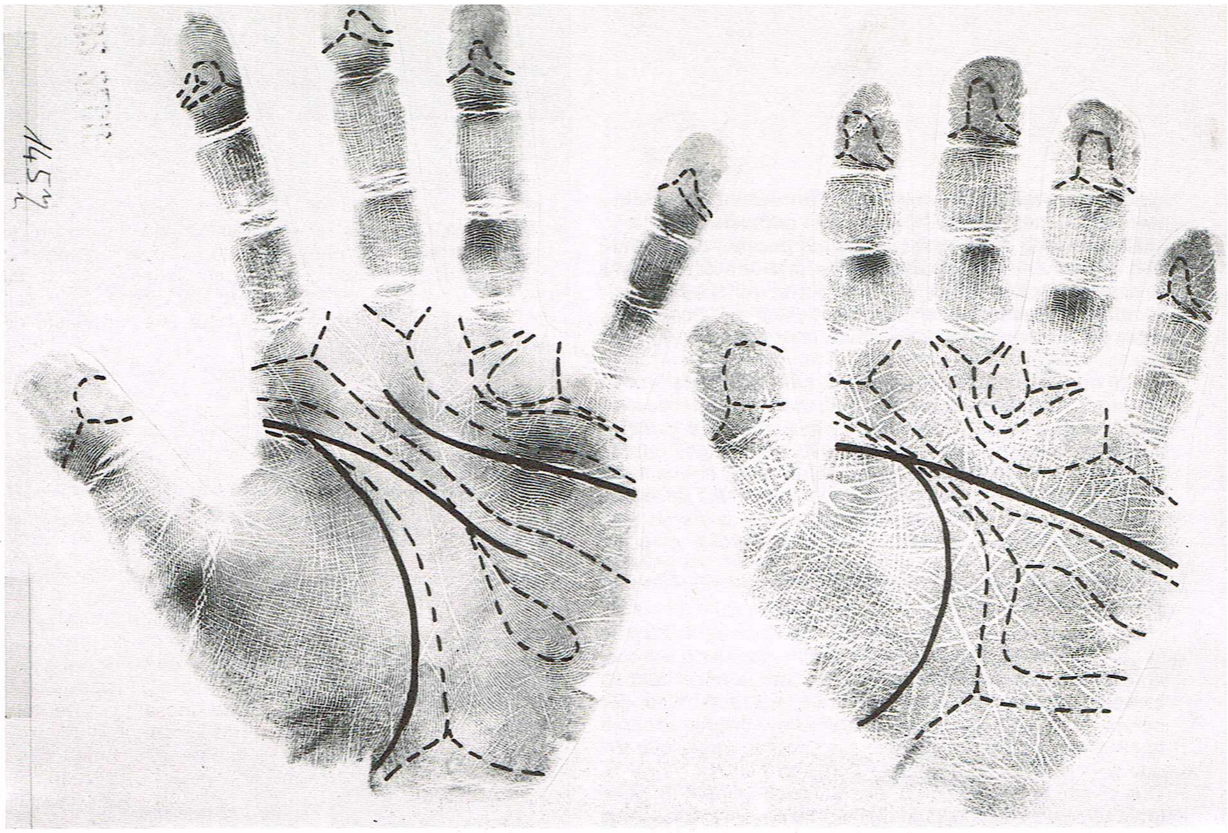

▶ *Côte à côte sont représentées, à gauche, les empreintes palmaires d'une femme normale, à droite, celles d'un garçon trisomique. Chez ce dernier, on remarquera la fusion de deux plis de flexion (traits pleins) en un pli unique et l'orientation trop horizontale des crêtes (tireté); on note également la forme générale de la main, trapue, avec des phalanges très courtes.*

B. Dutrillaux - Institut de progenèse, Paris

▼ *Les grains de chromatine sexuelle ou corps de Barr sont absents dans les cellules (A) et dans les granulocytes (B) des individus mâles; ils sont présents dans les cellules des individus femelles (C) accolés à la membrane nucléaire (gcs) et sous forme d'appendice nucléaire (an) dans leurs granulocytes (D).*

héréditaires qui touchent particulièrement certaines ethnies; il en est ainsi de la *maladie de Tay-Sachs*, affection neuro-musculaire qui s'observe essentiellement chez les Juifs d'Europe centrale.

Remarques

Considérée isolément, chacune des maladies héréditaires est extrêmement rare. Cependant, étant donné leur nombre, elles constituent, dans leur ensemble, un fardeau important; on estime qu'un enfant sur cent est atteint d'une affection génétique.

Les maladies héréditaires, qui restent encore incurables dans leur très grande majorité, peuvent, au moins dans certains cas, être traitées de façon satisfaisante; cela d'autant mieux que le diagnostic est précoce. Un dépistage systématique doit être entrepris lorsque cela est possible. Par exemple, en France, le test de Guthrie permet de déceler la phénylcétonurie à la naissance.

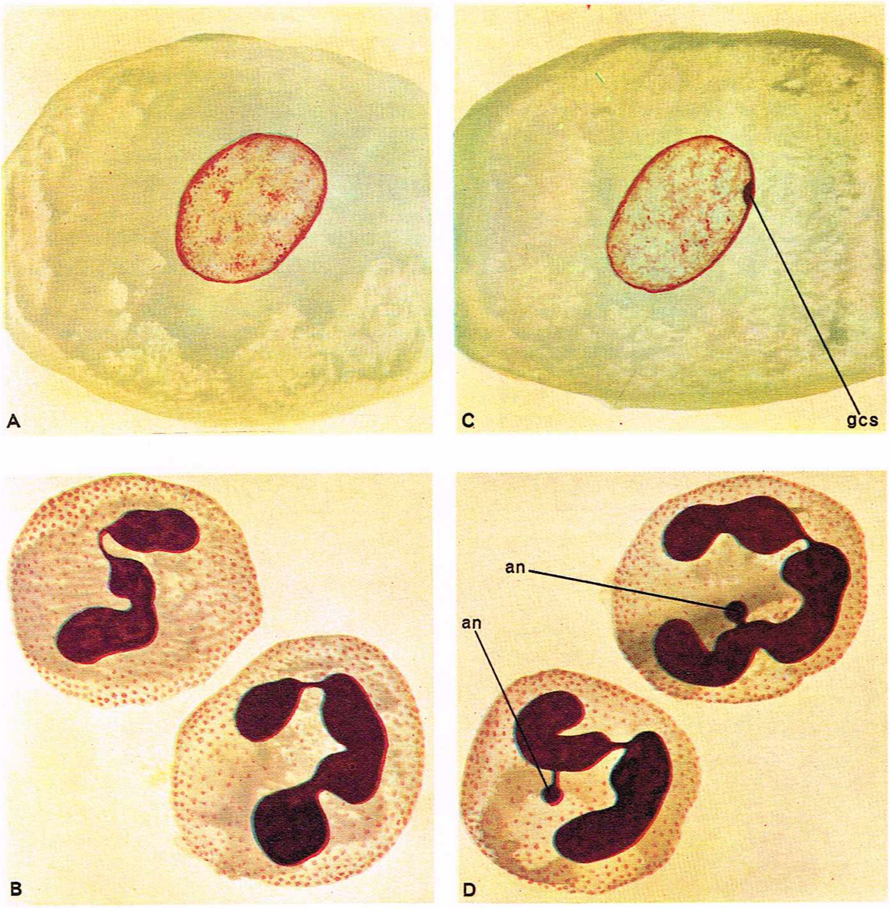

I.G.D.A.

Les aberrations chromosomiques constitutionnelles

On estime qu'une conception sur vingt est anormale sur le plan chromosomique. Toutefois, comme la plupart des anomalies chromosomiques n'arrivent pas à terme, seulement un enfant sur deux cents présente ces anomalies. Les maladies qui en résultent sont diversement graves selon qu'elles affectent ou non les chromosomes sexuels.

Nous en étudierons quelques cas après avoir énuméré les techniques de détection.

Techniques de détection

Détermination du caryotype

La reconnaissance précise des anomalies chromosomiques ne peut s'effectuer que dans la mesure où l'on dispose de techniques d'analyse permettant d'identifier tous les chromosomes. L'ensemble des chromosomes, une fois identifiés, constitue la garniture chromosomique de l'individu, son caryotype.

Les chromosomes s'individualisent en prophase de mitose. On distingue alors les deux chromatides qui ne sont plus attachées que par leur centromère. Il est donc nécessaire d'isoler des cellules se divisant activement, puis de les mettre en culture.

Les premières techniques ont utilisé les cultures de fibroblastes, avec prélèvement d'un fragment de tissu, de peau ou d'aponévrose. Actuellement, on sait induire *in vitro* la multiplication des lymphocytes prélevés dans le sang périphérique grâce à la phytohémagglutinine extraite du haricot. Cette technique est plus rapide et évite la biopsie tissulaire. Les mitoses des cellules en culture sont alors synchronisées et bloquées en début de métaphase par un traitement à la colchicine. Les noyaux sont ensuite soumis à un choc osmotique qui disperse les chromosomes. On fixe ces derniers par l'acide acétique; on fait éclater les cellules sur une lame, puis on les colore. Les chromosomes sont photographiés et, après agrandissement des clichés, découpés et appariés.

Des techniques récentes de fluorescence (utilisant les dérivés de la quinacrine) et de dénaturation ont montré l'existence de bandes situées tout au long des chromosomes. Elles devraient permettre de dépister des maladies provoquées par l'excès ou la déficience d'une ou de quelques bandes chromosomiques, ce qui correspond à peu près à une centaine de gènes.

Examen des dermatoglyphes

La disposition des plis et des crêtes dermiques est souvent anormale chez les sujets porteurs d'anomalies chromosomiques constitutionnelles. L'étude se décompose en deux examens : tout d'abord, l'examen des plis de flexion palmaires (chez l'individu normal, ils sont au nombre de trois) et des plis de flexion des doigts; ensuite l'examen des dermatoglyphes proprement dits, c'est-à-dire des dispositions des crêtes dermiques.

Détection du sexe chromatinien

Chez la femme normale, on observe dans un frottis buccal la présence d'une condensation de chromatine à l'intérieur du noyau des cellules, accolée à la membrane nucléaire : c'est le corpuscule de Barr, qui n'existe pas chez l'homme. On admet qu'il correspond à l'un

TABLEAU N° 4

Liaison entre la fréquence du mongolisme et l'âge maternel

Age de la mère (en années)	20-30	30-35	35-40	40-45	>45
Risque d'avoir un premier enfant mongolien	1/1500	1/750	1/600	1/300	1/60

Richard Colin

des chromosomes X de la femme; chez la femme normale, l'un des chromosomes X serait génétiquement inactif, soit le X d'origine paternelle, soit le X d'origine maternelle (au hasard selon les cellules). L'absence ou la présence d'un ou de plusieurs corpuscules de Barr est donc un moyen de déceler d'éventuelles anomalies dans le nombre des chromosomes X chez un individu.

Les maladies autosomiques

Un exemple de trisomie : le mongolisme

Le nombre de chromosomes de l'espèce humaine a été définitivement connu en 1956. Trois ans plus tard, Lejeune et ses collaborateurs découvraient la première maladie par aberration chromosomique en montrant que le mongolisme était dû à la présence d'un chromosome 21 surnuméraire, c'est-à-dire à une trisomie 21.

Les signes cliniques de la maladie ont été décrits pour la première fois en 1866 par Langdon-Down : microcéphalie (tête plus petite); fentes palpébrales obliques en haut et en dehors, et repli cutané à l'angle interne de l'œil (seuls points communs avec la race mongole); oreilles plus petites; langue fissurée, dépapillée et souvent sortie; plis de flexion de la paume et crêtes dermiques mal disposés; écart exagéré entre les deux premiers orteils. La fréquence de la maladie est de l'ordre de 1/600 naissance; cependant, comme le montre le tableau 4, il existe une liaison entre la fréquence de ce syndrome et l'âge de la mère.

Habituellement, les trisomies comme la trisomie 21 sont produites par différents types d'erreurs dans la disjonction des chromosomes au cours de la méiose; une paire de chromosomes ne se sépare pas à l'anaphase de la première division, ce qui conduit à la formation de gamètes qui contiennent l'un des chromosomes en deux exemplaires et de gamètes sans exemplaire de ce même chromosome.

Si un gamète avec deux exemplaires d'un même chromosome fertilise un gamète normal, l'enfant résultant possédera trois exemplaires d'un même chromosome au lieu de deux : il sera dit *trisomique pour ce chromosome* (en tout, il aura 47 chromosomes). Si, par ailleurs, le gamète sans exemplaire de ce chromosome fertilise un gamète normal, l'individu résultant ne possédera qu'un seul exemplaire de ce chromosome : il sera dit *monosomique* (au total, il possédera 45 chromosomes). Les monosomies autosomiques sont habituellement non viables. On pense enfin que la méiose maternelle est plus souvent en cause que la méiose paternelle.

Plus rarement, le mongolisme peut être dû à une *translocation* entre le chromosome 21 et un autre chromosome (le plus souvent un grand télocentrique 13-15). Ce type de mongolisme est héréditaire.

La figure ci-contre, en haut, montre la transmission à partir de l'union d'un individu chez qui une translocation s'est produite (fusion d'un chromosome 21 et d'un chromosome 14) avec un individu normal. La fusion de deux chromosomes n'affecte pas nécessairement le phénotype de l'individu, puisque ce dernier n'a pas de matériel chromosomique en défaut ou en excès. Du fait que l'individu monosomique qui peut être formé par ce couple n'est pas viable, il existe une chance sur trois pour que ce couple enfante un individu mongolien. D'autre part, parmi les enfants normaux, la moitié sera porteuse de la translocation.

Il est donc important, lorsque des parents ont déjà enfanté un mongolien, de savoir si cette maladie est due à une translocation puisque, dans ce cas, la probabilité pour que ce couple enfante un deuxième enfant mongolien est égale non pas à 1/600 mais à 1/3.

Parfois, une *non-disjonction* intervient après que le zygote a été formé. Cette non-disjonction est, par conséquent, d'origine mitotique et peut se produire à n'importe quelle division, de telle sorte que deux ou plus de deux lignées cellulaires distinctes peuvent être établies. On parle alors de *mosaïque chromosomique*. La sévérité du symptôme est directement liée à la proportion de cellules trisomiques dans l'individu mosaïque. De tels individus peuvent apparaître normaux ou presque normaux mais produire deux types de gamètes selon le type cellulaire qui est à leur origine. Dans ces conditions, le risque d'avoir des enfants mongoliens est considérablement augmenté.

D'autres trisomies ont été mises en évidence dans l'espèce humaine, notamment la trisomie 18 ou la trisomie 13-15. Dans ces deux cas, le décès intervient dans les premières années sinon dans les premiers mois.

▼ ***En haut, transmission héréditaire du mongolisme dans le cas de translocation entre les chromosomes 21 et 14. En bas, formation des mosaïques chromosomiques par non-disjonction au cours de la mitose.***

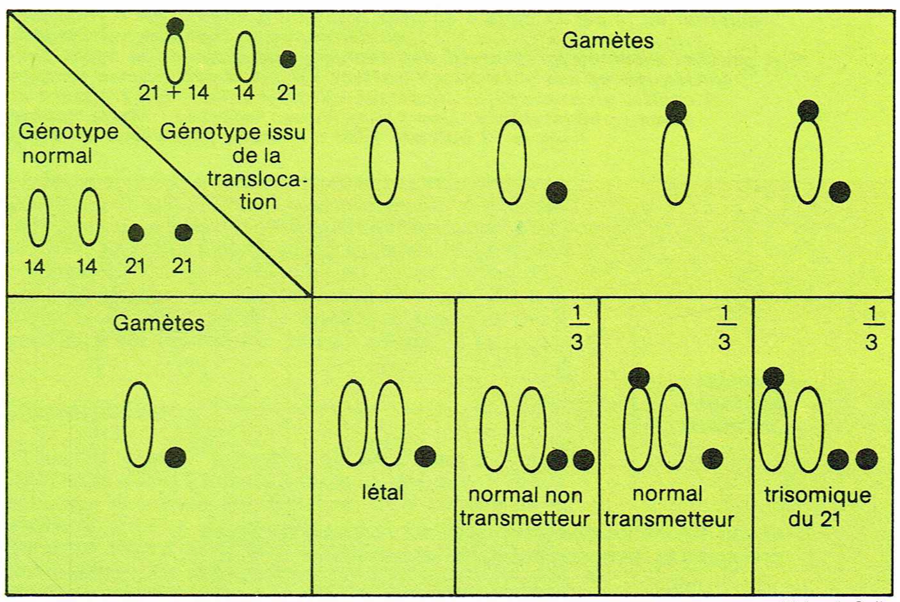

Richard Colin

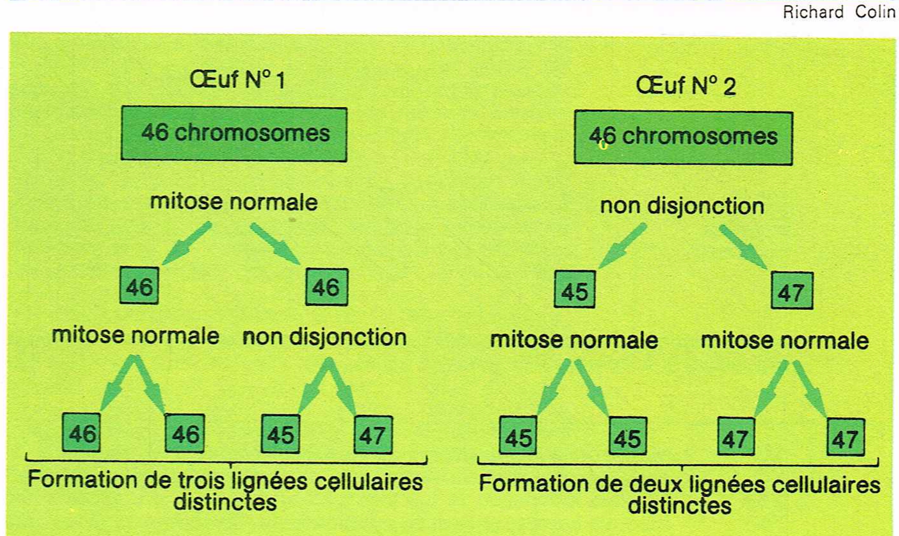

Richard Colin

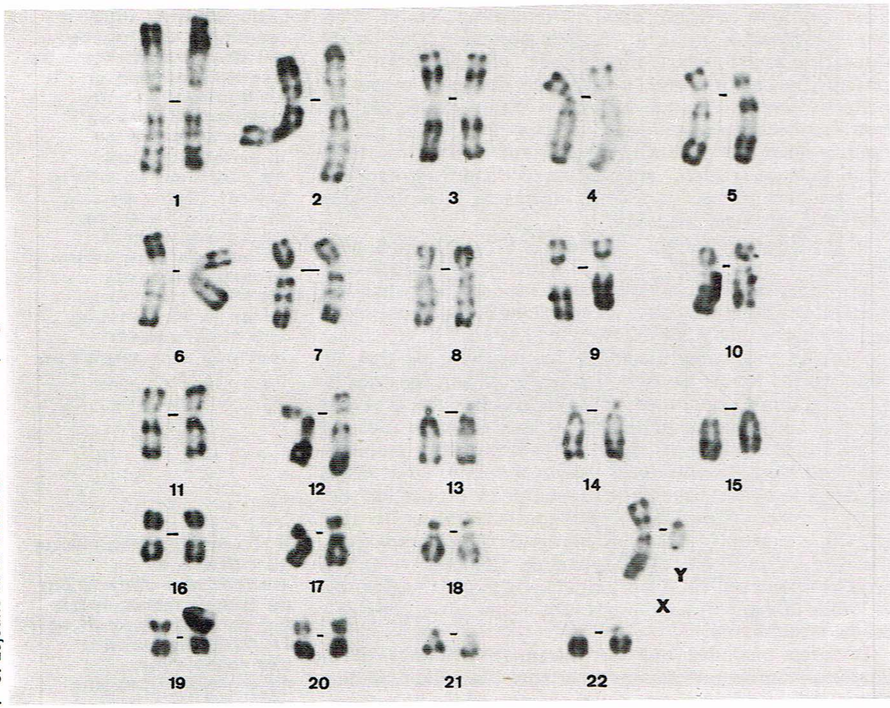

Pr J. Lejeune et B. Dutrillaux - Institut de progenèse, Paris

▲ **Maladie du cri du chat** *chez un garçon (formule 46, XY, 5p) : il y a délétion de la partie distale du bras court du chromosome 5 (méthode de dénaturation thermique ménagée).*

▼ *A gauche, schéma représentatif des anomalies de disjonction ayant pour conséquences des* **aberrations** *portant sur les* **chromosomes sexuels.** *A droite, un exemple de* **mosaïque chromosomique** *apparaissant au niveau phénotypique. Une petite Noire, tachetée : Maria Sabina, née le 12 octobre 1736 à Matuna (Amérique du Sud).*

Un exemple de déficience chromosomique : le syndrome du cri du chat

La maladie du cri du chat, due à la perte d'un segment du bras court du chromosome 5, paraît la plus fréquente des déficiences autosomiques compatibles avec la vie (0,1 à 0,2 malade pour 1 000 naissances). Parmi les différents signes cliniques, le cri si particulier (tonalité plaintive et aiguë) est lié à l'étroitesse du larynx. Des anomalies se produisent dans les dermatoglyphes, et le retard psychomoteur est considérable. L'évolution de la maladie semble dépendre en partie des malformations cardio-vasculaires. En leur absence, les enfants peuvent survivre jusqu'à l'âge adulte.

Autres aberrations

D'autres aberrations sont connues. Ainsi, le chromosome 18 peut se présenter en anneau ; des mosaïques avec triploïdie peuvent se produire. Ces cas sont rares et pratiquement toujours associés à une arriération mentale et des malformations multiples.

Anomalies des chromosomes sexuels

Les conséquences d'aberrations portant sur les chromosomes sexuels sont toujours moins graves que celles qui portent sur les autosomes, ce qui justifie qu'on les traite séparément. D'autre part, le nombre des mosaïques est beaucoup plus grand dans ces dernières anomalies.

Le syndrome de Turner

Sous sa forme typique, cette maladie associe une petite taille, un infantilisme génital, une dysménorrhée et des malformations comme l'atrophie des ovaires. Sa fréquence est voisine de 0,4/1 000.

L'anomalie chromosomique la plus habituelle est la monosomie X (caryotype à 45 chromosomes). Dans ce cas, la chromatine sexuelle est de type masculin sans corpuscule de Barr visible. L'un des chromosomes sexuels est donc absent du fait d'une non-disjonction à la méiose précédant la formation des gamètes.

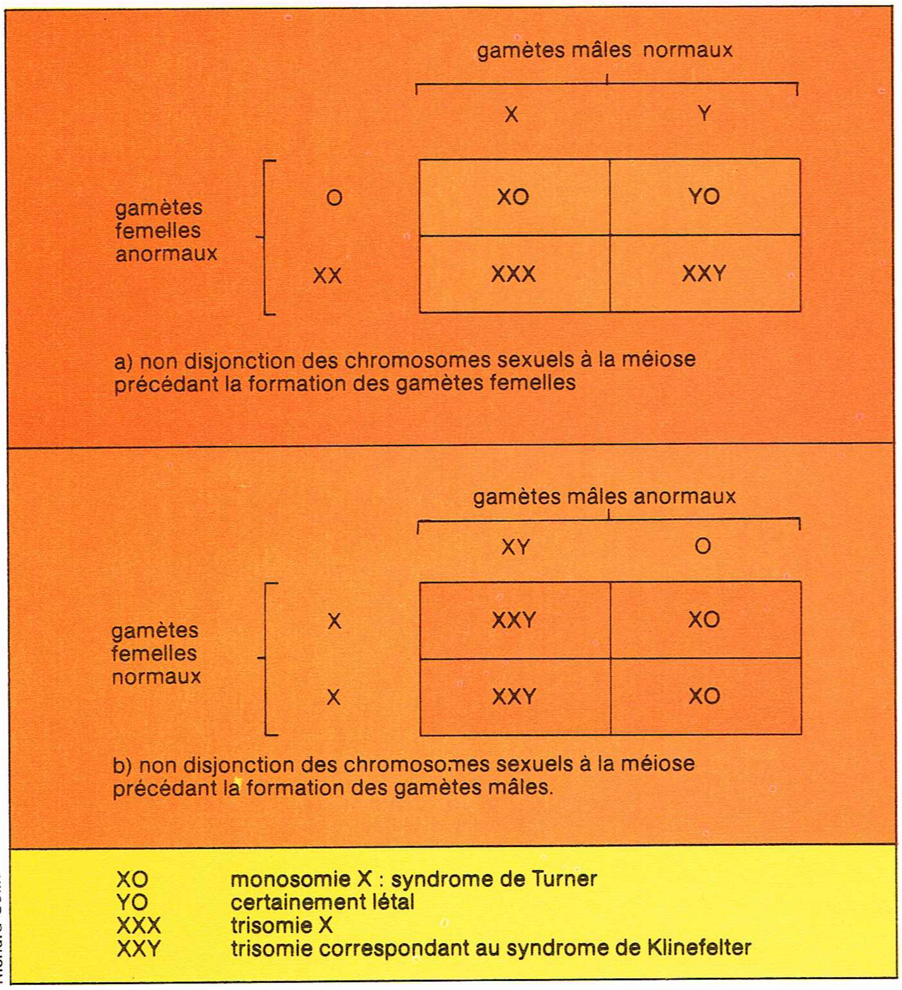

Richard Colin

Archives I.G.D.A.

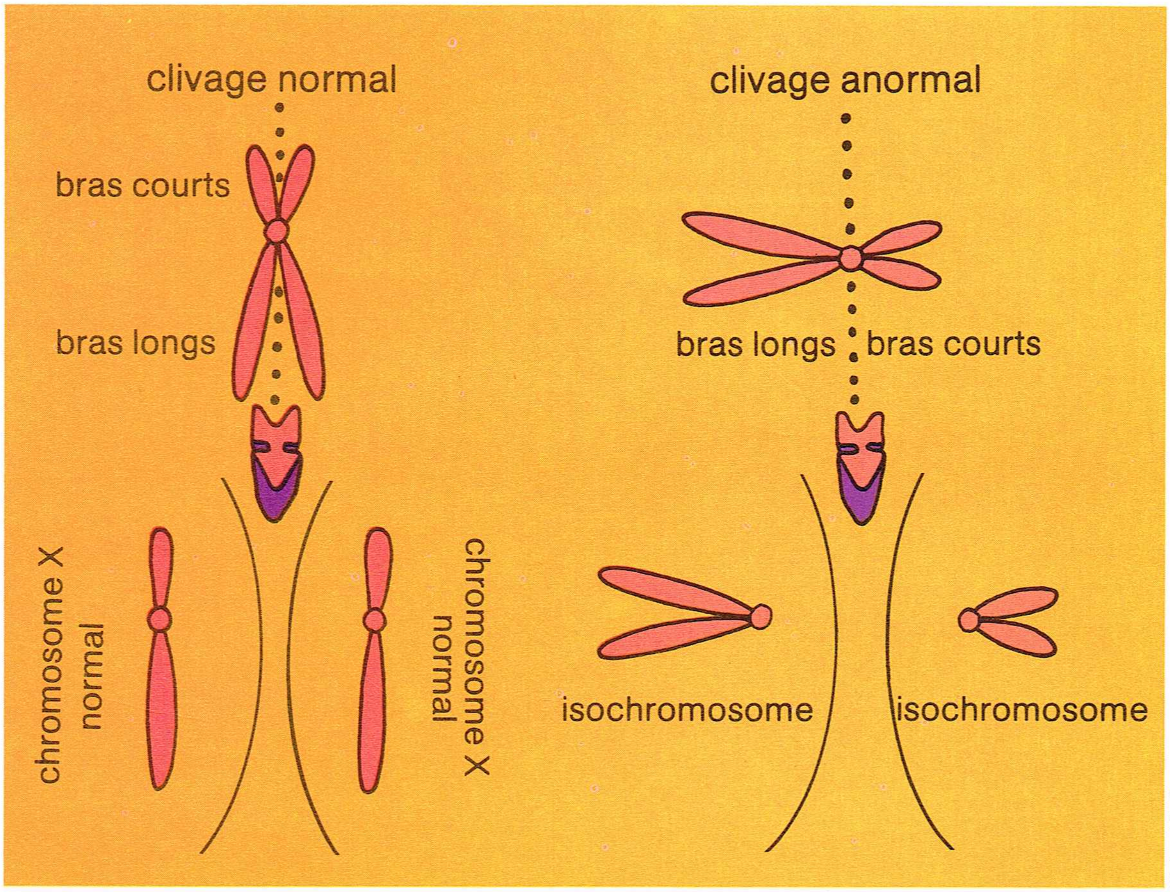

◀ ***Représentation schématique de l'origine des* isochromosomes *par clivage anormal du centromère des chromosomes X au cours de la mitose.***

On observe également des caryotypes mosaïques de type 45 X/46 XX ou 45 X/46 XX/47 XXX ou 45 X/46 XY..., ce qui explique que dans certains cas (1/5 du total), on trouve des corpuscules de Barr. L'existence de corpuscules de Barr s'explique également, dans d'autres cas, par la présence simultanée d'un chromosome X normal et d'un chromosome X anormal, lequel est un *isochromosome*. L'isochromosome est constitué soit de deux bras courts, soit de deux bras longs; il semblerait que les gènes présents sur les bras long et court des deux chromosomes X soient nécessaires pour le développement d'ovaires fonctionnels.

L'anomalie triplo X

C'est la plus fréquente des anomalies des chromosomes sexuels chez la femme : sa fréquence d'apparition est voisine de 1/1 000. Elle correspond à des phénotypes variés : malformations diverses, troubles gynécologiques, débilité mentale inconstante. Le caryotype comprend 47 chromosomes dont 3 X, et la chromatine sexuelle est double (deux corpuscules).

Le syndrome de Klinefelter

C'est la plus fréquente des anomalies des chromosomes sexuels chez l'homme (1/500 naissance). C'est souvent à la période pubertaire ou postpubertaire que le diagnostic est porté : on constate principalement une atrophie testiculaire avec stérilité; d'autres troubles, plus ou moins constants, lui sont associés : un aspect gynoïde, un développement mammaire, une absence de barbe, etc. Le caryotype est habituellement à 47 chromosomes (XXY). L'un des chromosomes surnuméraires provient d'une erreur de disjonction à la méiose qui précède la gamétogenèse. La chromatine sexuelle est de type féminin. On observe également des caryotypes mosaïques; les individus possédant la mosaïque 46 XY/47 XXY présentent la possibilité de procréation.

Autres anomalies

La presse s'est faite l'écho d'une statistique portant sur des sujets agressifs et délinquants montrant une forte fréquence de caryotype XYY. En fait, cette anomalie est très fréquente dans la population en général (1/1 000).

L'hermaphrodisme vrai est caractérisé par la présence simultanée de tissus testiculaire et ovarien. De nombreuses variétés de caryotype ont été rapportées : 46 XX/47 XXY; 46 XX/47 XXY/48 XXYY/46 XY/45 X, parfois 46 XX et, plus rarement, 46 XY. La constitution 46 XY/46 XX est d'un intérêt particulier : on a pu montrer qu'elle était due à la double fécondation, par deux spermatozoïdes, d'un ovule qui n'avait pas expulsé son globule polaire.

Conclusion

Une des grandes questions qui se posent à l'heure actuelle, et dont la réponse peut avoir des répercussions immenses dans tous les domaines, qu'il s'agisse de la psychologie, de la sociologie ou de la politique, est de savoir ce qui est héréditaire et ce qui ne l'est pas. Ce qu'on appelle l' « intelligence » est-il déterminé par des gènes, comme le sont la vision des couleurs ou les groupes sanguins ? On dit volontiers que certaines personnes sont plus « sociables » que d'autres : leur attitude serait-elle le résultat d'une nouvelle combinaison des gènes de leurs parents? Ce type de problèmes est rendu presque inextricable du fait de l'existence du langage humain, qui permet de transmettre une information (extérieure à l'ADN) d'une génération à l'autre. Cette « hérédité orale », qui assure la relative permanence de la culture d'une société donnée, risque de masquer ce qui participe de l'hérédité proprement génétique. Certains penseurs de l'une ou l'autre des écoles philosophiques ont cru pouvoir se débarrasser de l'héritage génétique que les hommes ont accumulé tout au long de leur évolution.

E. Morin pose ainsi le problème : « Nous admettons, depuis Darwin, que nous sommes fils de Primates, mais non que nous sommes nous-mêmes des Primates. Nous sommes convaincus que, descendus de l'arbre généalogique tropical où vivait notre ancêtre, nous nous en sommes échappés à jamais, pour nous construire, hors de la nature, le royaume indépendant de la culture. » Cette séparation rigide entre nature et culture est en passe d'être sapée à la base par les concepts qui se dégagent des conquêtes de la nouvelle biologie. Les premiers acquis ont été destructeurs : ainsi, le passage du niveau

M. Pedone

▲ *Les caractères dits quantitatifs dépendent de facteurs génétiques nombreux et sont d'une grande importance pratique en ce qui concerne la sélection d'espèces animales et végétales d'intérêt économique. C'est le cas notamment de la production de lait de vache.*

▶ *Cultivar de citrons siciliens; la plante, hybride de citron et de cédrat, est très vigoureuse et peut atteindre 6 m de haut.*

M. Pedone

cellulaire au niveau moléculaire a démontré qu'il n'y a pas une matière vivante, mais des systèmes vivants. D'un point de vue chimique, les mêmes atomes sont présents dans la sphère minérale et dans la mince pellicule de vie qui l'entoure, mais ils y sont organisés d'une *manière particulière*.

Après la découverte des molécules, est venue celle de leur organisation dans la cellule. La description de l'organisation particulière des systèmes vivants a requis l'utilisation de principes et de termes nouveaux, tant en biologie qu'en chimie, concepts empruntés à l'informatique et à la cybernétique : information, code, message, traduction, répression, régulation, expression, contrôle. C'était appliquer à la cellule la notion de machine : l'unité fondamentale de la vie était considérée comme « une totalité organisée, non réductible à des éléments constitutifs, lesquels ne sauraient être correctement décrits isolément à partir de leurs propriétés particulières ; l'unité supérieure (la machine) ne peut se dissoudre dans les unités élémentaires, mais au contraire apporte l'intelligibilité des propriétés qu'elles manifestent » (Morin).

Il y a, dans les descriptions des mécanismes vivants, non seulement des références à l'idée de machine, mais aussi l'emploi de termes extraits de l'expérience des relations humaines : message, inhibition, traduction, etc. S'il semble possible d'employer les mêmes termes quand on étudie la cellule et la société, si les interactions nées de l'organisation suivent des principes identiques tant au niveau des molécules dans la cellule qu'au niveau des hommes dans une société, c'est que l'homme est aussi une totalité organisée. Il n'est pas constitué de deux couches superposées, l'une naturelle, l'autre culturelle. L'évolution, dont l'homme est le produit, ne l'a pas fait sortir du règne naturel : il ne descend pas du singe, il *est* un singe.

Ainsi la nouvelle biologie a réglé son compte à la vieille querelle des vitalistes et des réductionnistes, en renvoyant les adversaires dos à dos. Elle a aussi détruit l'idée qu'il pouvait exister des sciences de l'homme séparées des sciences de la nature. Le processus d'intégration est encore l'œuvre de pionniers, mais leur démarche intellectuelle est tellement fructueuse que le mouvement amorcé ne peut plus s'arrêter.

Ainsi donc, tous les aspects de l'homme sont susceptibles d'être étudiés avec l'aide des sciences naturelles. L'approche génétique du phénomène humain est parfaitement justifiée et utile, non seulement quand son objet est l'anatomie ou la physiologie, mais aussi quand il s'agit de la psychologie ou de la vie sociale.

Si tous les caractères manifestés par un individu sont *susceptibles* d'être *héréditaires*, en fait, seuls les caractères *innés*, c'est-à-dire ceux qu'il tient de ses parents, le sont en réalité. Les caractères acquis, c'est-à-dire ceux qui résultent du modelage que le milieu a exercé sur lui au cours de sa vie, ne le sont pas. Il ne s'agit pas là d'un dogme, mais d'une hypothèse qui est très vraisemblable, car aucune expérience n'a jamais pu l'infirmer : on n'a jamais pu montrer que le patrimoine héréditaire des gènes pouvait être modifié par les conditions de milieu auxquelles l'organisme est soumis.

Si la situation est très claire en ce qui concerne nombre de caractères présentant une hérédité très simple, que l'on peut attribuer à la ségrégation d'un couple d'allèles, il en est beaucoup d'autres, en particulier les *caractères* dits *quantitatifs* (comme la taille ou le poids d'un organisme), dont les fluctuations dans une population montrent qu'ils dépendent de facteurs génétiques nombreux. On parle alors d'une *hérédité polygénique*. Il ne s'agit plus de caractères alternatifs bien contrastés, mais de différences de degrés le long d'échelles de mesures continues, et qui s'expriment en longueur, poids, volume, etc. Ce sont des variations de nature *quantitative*. Ces variations dépendent de l'action ou de l'interaction de nombreux gènes. C'est le cas de la taille des individus, de la ponte des poules, du rendement d'une variété de blé, de la production de lait des vaches, etc. On voit que les caractères quantitatifs sont d'une grande importance pratique ; leur étude débouche sur les applications les plus immédiates de la génétique, en particulier en ce qui concerne la sélection d'espèces animales et végétales d'intérêt économique.

Il existe de nombreux modes de croisements entre individus d'une même espèce. On a vu, lors de l'étude des cycles et de la reproduction sexuée, que, dans certaines espèces végétales, la plus grande partie des plantes était *autogame*, c'est-à-dire s'autofécondait. Une des conséquences de l'*autogamie* est que ces plantes deviennent rapidement homozygotes. Il existe des plantes où, au contraire, l'*allogamie* (croisement entre individus différents) est le mode de croisement préférentiel, ce qui maintient un état hétérozygote très poussé. Quand on réussit à obliger deux plantes d'une espèce naturellement autogame à se croiser, on constate un phénomène très important dans les individus de la génération F1 : l'*hétérosis*, ou *vigueur hybride*. Par exemple, si l'on croise deux variétés très homozygotes de maïs, la descendance hybride est constituée de plantes beaucoup plus vigoureuses que leurs parents, et cela uniformément. L'hétérosis est un phénomène très important pratiquement et très intéressant pour le chercheur.

On peut expliquer l'hétérosis par des interactions entre allèles : en croisant deux plantes homozygotes pour un couple d'allèles $a_1a_1 \times a_2a_2$, on obtient en génération F1 des hétérozygotes a_1a_2. Les hybrides auraient une vigueur supérieure à chacun des parents, car ils exprimeraient la *somme* des produits des allèles a_1 et a_2. Cette interaction entre allèles est appelée par les sélectionneurs la *surdominance*. Notons cependant que certains généticiens pensent qu'il n'est pas nécessaire de faire appel à la notion de surdominance pour expliquer la vigueur hybride.

L'hétérosis peut être expliqué par l'interaction entre allèles dominants de gènes différents : les allèles dominants seraient favorables à la vigueur, et les récessifs seraient défavorables. Dans une population de plantes autogames, il n'y a pas de passage de gènes d'une lignée à l'autre, car le mode de croisement est l'autofécondation. L'homozygotie qui en résulte atteint tous les gènes. Dans une lignée donnée, certains *loci* vont être occupés par des allèles plus ou moins favorables à la vigueur des plantes. Si, comme on l'a supposé, les allèles favorables à la vigueur sont dominants, la fabrication d'une plante hybride va permettre d'avoir des allèles dominants (favorables à la vigueur) dans un nombre de *loci* plus grand que dans chaque parent. La plante hybride exprimera donc une vigueur plus grande : c'est l'hétérosis.

On pense, à l'heure actuelle, que les deux types d'explications sont sans doute valables l'un et l'autre, à des degrés différents selon les cas.

La nature de l'action des gènes dans les systèmes polygéniques reste encore un peu obscure. Il est clair cependant qu'ils n'opèrent pas entièrement par des effets simplement additifs.

La compréhension du fondement génétique des espèces vivantes et des mécanismes qui entrent en jeu est loin d'être complète, mais elle est substantielle. Le progrès de la génétique est un facteur permettant une meilleure compréhension de nous-mêmes et, peut-être, un des moyens d'influer sur notre avenir.

Les progrès de la génétique sont liés à l'avancement des autres branches scientifiques. Certains domaines, autrefois très éloignés des préoccupations des généticiens, comme la théorie de l'information, la psychologie ou l'étude du comportement, deviennent des sujets d'études et d'inspiration pour les chercheurs. En effet, la connaissance par l'homme de lui-même et du monde vivant nécessite le déploiement et l'intégration de tous les aspects des disciplines scientifiques, parmi lesquelles la génétique est une des fondamentales.

BIBLIOGRAPHIE

BEISSON J., *la Génétique,* P.U.F., 1971. - FINCHAM J.R.S. et DAY P.R., *Fungal Genetics,* Blackwell Scientific Publications, 3e éd., 1971. - HAYES W., *The Genetic of Bacteria and their Viruses,* Blackwell Scientific Publications, 2e éd., 1968. - JACOB F., *la Logique du vivant,* P.U.F., 1971. - LÉVINE R.P., *Génétique,* Édiscience, 1969. - MacKUSICK V.A., *Human Genetics,* Prentice Hall, 1969. - MacKUSICK V.A., *Mendelian Inheritance in Man: Catalogs of Autosomal Dominant, Autosomal Recessif and X Linked Phenotypes,* The John Hopkis Press, Baltimore, 1970. - MORIN E., *le Paradigme perdu ; la Nature humaine,* Seuil, 1973. - TURPIN R. et LEJEUNE J., *les Chromosomes humains,* Gauthier-Villars, Paris, 1965. - WATSON J. D., *Biologie moléculaire du gène,* Inter European Éd., 2e éd., 1973.

G. Frezzato

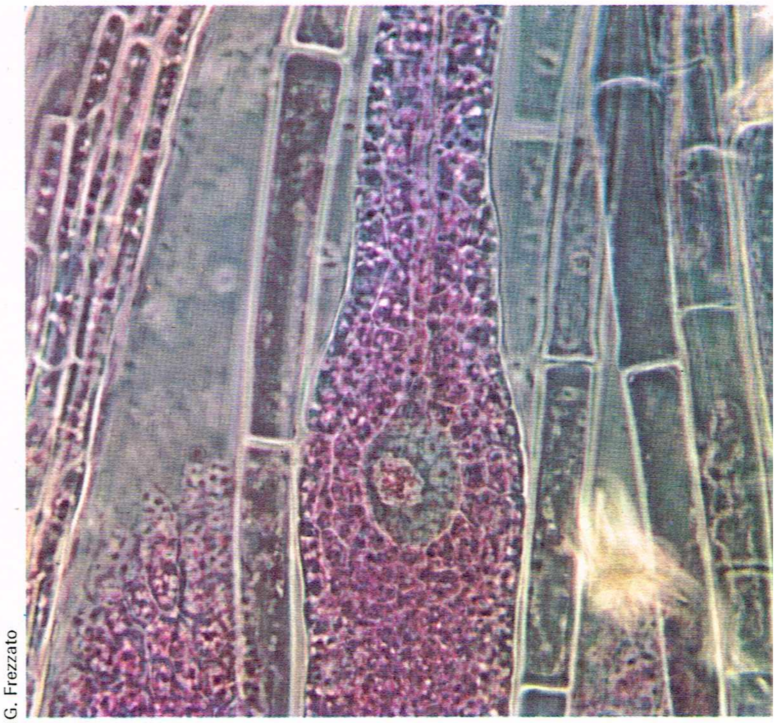

G. Frezzato

▲ *A gauche,* **anthéridies** *d'un* Mnium *(Mousse) en section longitudinale montrant les anthérozoïdes ou gamètes mâles. A droite,* **archégone** *dans lequel on observe, au centre, la cellule œuf (oosphère) [observation en contraste de phase].*

EMBRYOLOGIE ET MORPHOLOGIE VÉGÉTALES

L'**embryologie** est l'étude du mode de réalisation de l'organisation d'un être vivant à partir du ou des germes grâce auxquels chaque individu se reproduit. Ces germes sont uni- ou pluricellulaires. Il s'agit avant tout de l'œuf formé lors de la reproduction sexuée.

L'embryologie est *descriptive* lorsqu'elle se contente de décrire les structures embryonnaires et les transformations qu'elles subissent pour donner celles de l'état adulte. Elle est alors *organographique*. Elle est *morphologique* si elle interprète les formations qu'elle trouve. Parfois, la simple observation des structures embryonnaires permet de comprendre leur signification morphologique, et par là celle des structures adultes qu'elles produisent. Mais cela est loin d'être général, et souvent les formes embryonnaires posent les mêmes problèmes morphologiques que les structures adultes.

L'embryologie est *physiologique* ou *causale* lorsqu'elle recherche, jusqu'au niveau moléculaire et submoléculaire, les causes des modifications qui interviennent lors du développement. Quand il s'agit de stades avancés du développement, elle prend souvent le nom de *morphogenèse*. Chez les plantes supérieures, cette dernière s'adresse le plus souvent au mode de réalisation des organes au niveau de la pousse formée après la germination plutôt qu'à celui de la plantule issue de l'œuf; toutefois, puisque à ce stade la plante n'a pas encore fleuri ou est en train de le faire, il s'agit bien encore d'embryologie (l'organisme, en effet, n'est complet que lors de la mise en place des organes reproducteurs).

La **morphologie** est, comme son nom l'indique, l'étude de la *forme* (morphê) de l'individu. Le terme est dû à Gœthe, qui expliquait bien pourtant que la forme dont il s'agit n'est pas simplement l'aspect statique qu'on peut constater en observant les végétaux (ou les animaux) isolés, mais la notion qui résulte de l'étude comparative de structures dont les aspects souvent divers ne doivent pas masquer la parenté. Une grappe de raisin, par exemple, est parfois appauvrie, « dégénérée » en vrille de vigne, et l'existence de ces intermédiaires montre que du point de vue de la morphologie pure, il y a une parenté entre les deux organes, alors que du point de vue descriptif, ou *organographique,* on les différencie radicalement.

La classification des plantes est encore fondée surtout sur l'organographie : on ne cherche pas à *comprendre* les formations qu'on *décrit*. Mais on voit que la morphologie pure est en fait très utile à la systématique car une certaine parenté entre taxons se révèle par la possession de structures *morphologiquement* comparables malgré leur diversité éventuelle d'aspect, tandis que l'identité physionomique, si elle ne se révèle pas morphologiquement fondée, ne marque qu'une convergence de peu d'intérêt pour l'établissement de la classification naturelle, et donc pour la reconstitution de la phylogénie.

Malheureusement, la morphologie est encore fort mal connue, et de plus, fort délaissée. Son étude au sens large impliquerait celle de l'*anatomie,* de l'*histologie* et de la *cytologie,* qui en sont séparées du fait d'une indispensable spécialisation, mais c'est l'ensemble de ces disciplines qui conduit à la connaissance de l'organisation et des rapports des éléments du corps, dont la *physiologie* (y compris la *biochimie dynamique,* la *biophysique,* l'*écologie,* etc.) précise le fonctionnement.

Embryologie végétale

Au sens large, l'embryologie est donc l'étude de la réalisation du germe, surtout de la cellule-œuf, puis du mode de formation du nouvel individu à partir de ce germe ou de cette cellule. Dans le cas d'une pousse de plante à fleur, l'embryologie traite du développement jusqu'à la floraison, qui marque la maturité sexuelle de la pousse : c'est cet allongement du développement qu'on exprime avec exagération en parlant d'*embryogenèse indéfinie* du végétal.

Dans la reproduction végétative, une plante provient d'une ou de plusieurs cellules végétatives de la plante mère, sans intervention d'aucun phénomène sexuel. Il s'agit de l'apparition de bourgeons adventifs qui se forment constamment, de façon accidentelle, ou encore expérimentale. Ceux-ci engendrent à leur tour des racines adventives, qui peuvent aussi apparaître parallèlement à eux, au même endroit, et même avant eux. La plante fille se développe parfois de manière très analogue à un embryon issu de l'œuf, mais elle est largement continue avec le tissu générateur par son pôle inférieur et ne présente ni radicule embryonnaire vraie ni suspenseur. Les *embryoïdes* obtenus expérimentalement à partir de nombreux tissus et organes sont de ce type (Haccius).

L'embryon vrai provient d'un œuf formé par fécondation. Il y a néanmoins des exceptions : il existe des cas où le gamète femelle n'a pas besoin de fécondation pour se développer *(parthénogenèse)*. Des cellules ovulaires diploïdes, du nucelle surtout, peuvent aussi donner des

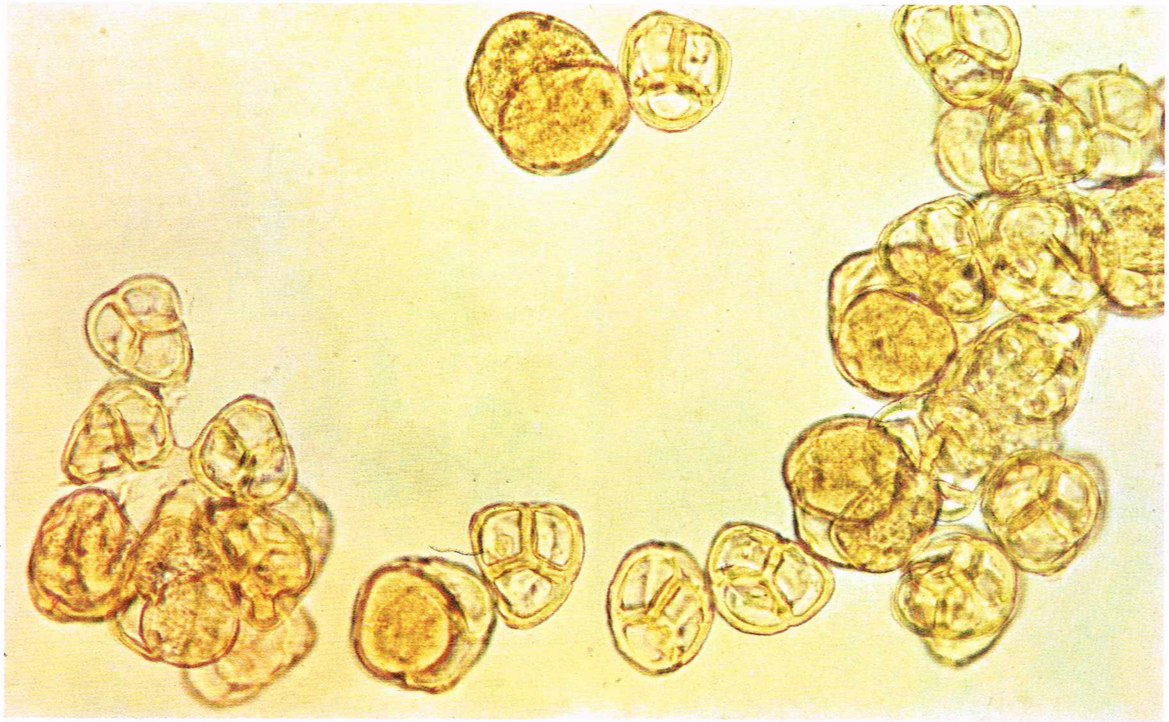

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ **Tétrades polliniques** ***d'un rhododendron.***

embryoïdes *(Citrus)*. Dans ces cas, la reproduction se fait sans recombinaison génique (le second cas appartient en fait à la reproduction végétative).

Depuis quelques années, on sait obtenir des plantes entières (sporophytes) à partir de jeunes grains de pollen, contenus dans les anthères ou même isolés. Comme ces grains n'ont pas encore formé leurs gamètes au moment où ils peuvent se développer, il ne semble pas qu'il s'agisse d'*androgenèse* (développement comme un œuf du gamète mâle ou du moins d'une cellule dont il fournit le noyau), mais plutôt d'*apogamie*, c'est-à-dire de la formation d'un sporophyte à partir d'une cellule non gamétique du gamétophyte, ici mâle.

Formation des gamètes

Le **gamète mâle** des Angiospermes, auxquelles nous nous limitons, se forme à partir d'un gamétophyte extrêmement réduit, qui demeure enclos dans la spore qui le produit. Les spores sont les grains de pollen qui sont formés dans les quatre bandes marginales des deux limbes de l'étamine diplophylle; ces bandes se creusent en sacs polliniques remplis de pollen à la fin du processus.

A partir de cellules sous-épidermiques de la jeune anthère se forme une assise qui restera sous-épidermique et dont les cellules se garniront d'épaississements lignifiés, quelques assises intermédiaires, dont la plus interne est le *tapis* formé de cellules modifiées qui nourriront les spores en formation, et enfin, les cellules mères de ces spores. Du côté central, des cellules profondes du tissu de l'anthère forment des couches correspondantes, de sorte qu'on obtient quatre masses de cellules mères encloses d'une paroi différenciée. Il ne s'agit pas, comme on le dit souvent, de microsporanges, mais de *synanges :* plusieurs sporanges successifs sont unis en un seul sac pollinique, comme le révèle le fait qu'à partir de celui-ci, de nombreux ovules peuvent se développer dans les cas tératologiques (Molliard, Guédès). Or, chaque ovule est lui-même un sporange.

Les cellules mères subissent toutes ensembles la réduction chromatique. Elles forment alors des tétrades entourées d'épaisses membranes de callose, et communiquent entre elles par de larges orifices, ce qui aide peut-être à leur synchronisation. Dans l'ensemble, il y a chez les Monocotylédones formation d'une paroi dès la fin de la première mitose de la méiose, tandis que chez les Dicotylédones la première division n'est pas suivie de la formation de paroi, et c'est seulement après la seconde division que les quatre éléments de la tétrade se séparent. Dans le premier cas, la formation du pollen est *successive*, dans le second elle est *simultanée*. On a constaté au microscope électronique que dans la formation simultanée la première division s'accompagne d'une tentative de formation de membrane, laquelle n'aboutit pas (Dietrich). Peut-être cela indique-t-il que le mode successif est primitif.

Les tétrades demeurent rarement formées; en général, les cellules haploïdes, qui sont des spores, se séparent les unes des autres et forment des grains de pollen libres dans le sac pollinique. Les deux sacs polliniques d'une moitié d'anthère confluent par disparition de leur cloison de séparation en une *loge pollinique*, ou thèque, qui s'ouvre par une fente longitudinale au niveau de l'ancien contact de la cloison disparue avec la paroi externe. Les épaississements lignifiés de l'assise sous-épidermique *(endothecium)* jouent un rôle mécanique dans l'ouverture de cette fente. Celle-ci peut ne se faire qu'en haut ou en bas, sous forme de pore, disposition plus évoluée.

Pendant qu'ils étaient encore unis en tétrade et entourés de callose, les grains de pollen ont formé une paroi très résistante, ou *exine*, faite de sporopollénine. En dessous de celle-ci, ils formeront leur paroi cellulosique banale, ou *intine*. L'exine se constitue autour de lamelles analogues à la membrane cytoplasmique et délaminées à son niveau (Rowley, Heslop-Harrison). Sur ces lamelles,

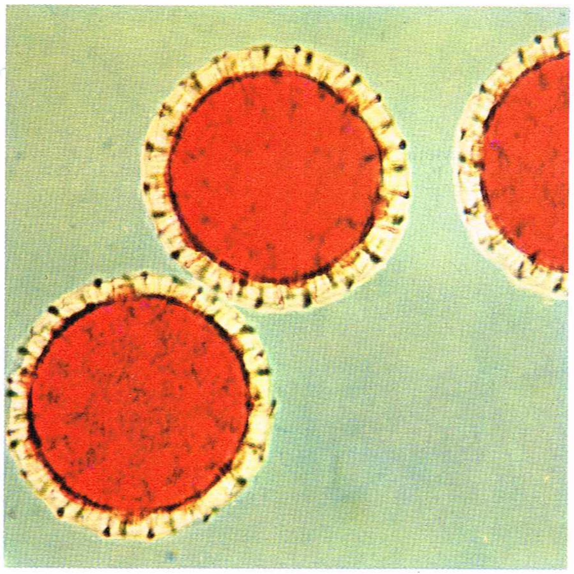

C. Bevilacqua.

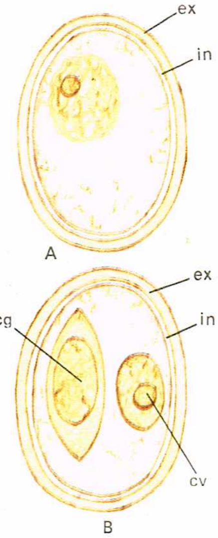

I.G.D.A.

▼ ***A gauche,*** **grains de pollen** ***d'une Dicotylédone*** **(Cobaea scandens).** ***A droite, exemple de grains de pollen de lis martagon*** **(Lilium martagon),** ***en section longitudinale : A, grain non mûr (microspore); B, le même, mûr, après avoir subi la division en cellule générative (cg) et en cellule végétative (cv); ex, exine; in, intine.***

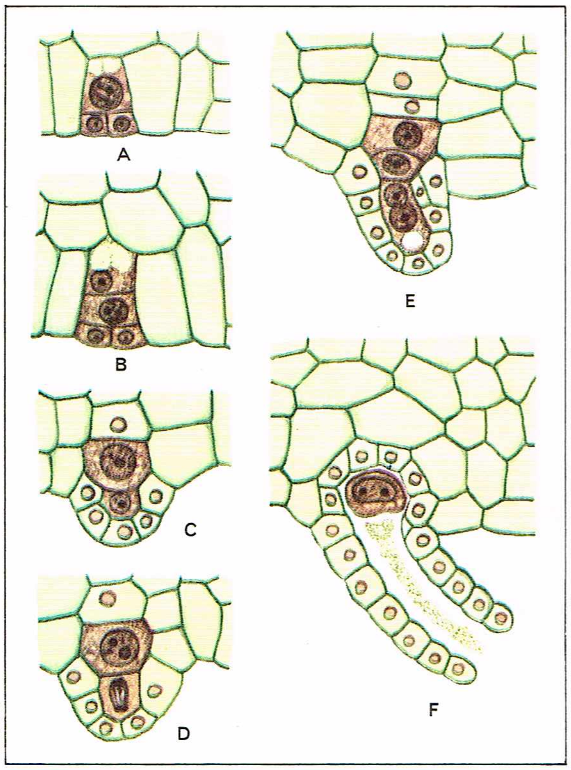

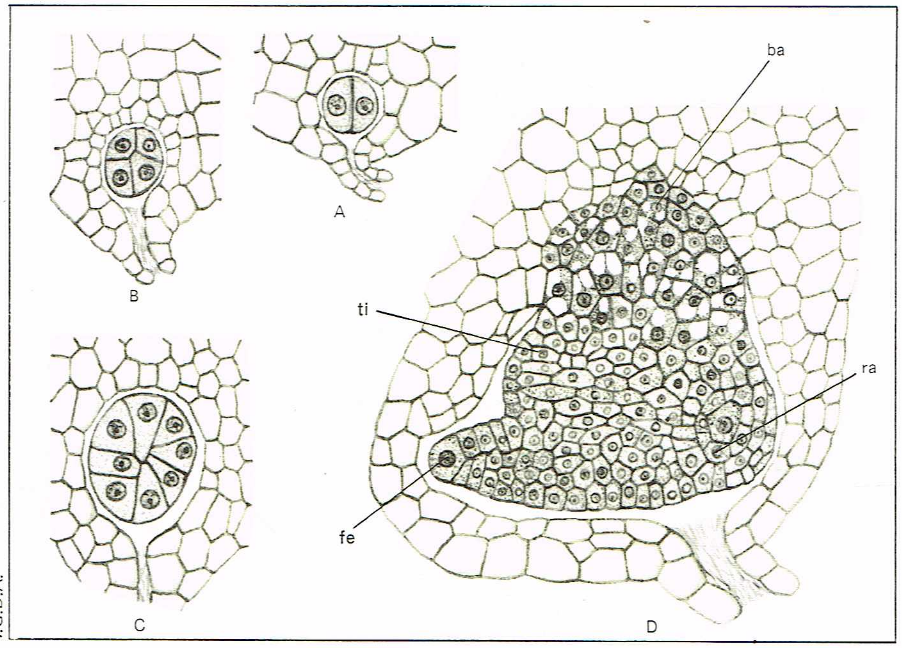

Ci-dessus, stade de développement de l'embryon d'une Fougère (Polypodiacées) : A, stade bicellulaire, la première division est longitudinale; B, stade à quatre cellules; C, stade ultérieur plus développé; D, embryon dans lequel on note déjà la différenciation des organes; ba, portion basale ou pied; ra, racines; ti, tige; fe, feuille et sa cellule initiale.

▲ *Ci-dessus, formation d'un archégone de* Dryopteris sp. *A, division initiale d'une cellule externe en deux autres cellules; la cellule externe se divise à son tour pour former les cellules du col; B, formation des cellules centrale et basale par division de la cellule interne; C, division des cellules de la paroi du col; D, division du noyau de la cellule centrale, non suivie de la formation d'une membrane → la cellule reste binucléée (cellule de canal du col); E, archégone presque mûr : la cellule basale s'est divisée en oosphère (cellule œuf) et cellule du canal du ventre; F, archégone avec la cellule œuf, ou oosphère, prête à être fécondée.*

▼ *En bas, à gauche, développement du grain de pollen (gamétophyte mâle) de* Pinus nigra; *A, jeune microspore; B-E, formation du grain de pollen et développement du tube pollinique (tp); B-C, formation des 2 cellules prothalliennes (cp) à partir de la cellule de la microspore dont le noyau est noté (n); D, formation de la cellule générative (cg), par division du noyau de la microspore. L'autre noyau fils (no) sera celui du tube pollinique (noyau végétatif); E, la cellule générative se divise en cellule basale (cell. socle) [cb] et cellule spermatogène (cellule du corps) [cc]. Cette dernière se divisera elle-même en deux gamètes mâles.*
A droite, début du développement de l'embryon chez Pinus monophylla; *A, proembryon binucléé; B, stade à 4 noyaux; C, 2 des 4 noyaux sont à la base de l'œuf; D, proembryon à 8 cellules (4 sont visibles, début de clivage); E et F, stades encore plus avancés (clivage en cellules, sauf pour l'étage supérieur); G, les cellules formant le suspenseur (su) s'allongent vers le bas; H, stade de développement plus avancé (chez* Pinus banksiana) *: les 4 rangées longitudinales de cellules (1-4) se séparent et forment chacune un embryon (polyembryonnie). Noter qu'un second « étage » de suspenseur s'est formé par allongement de 4 cellules parallèles.*

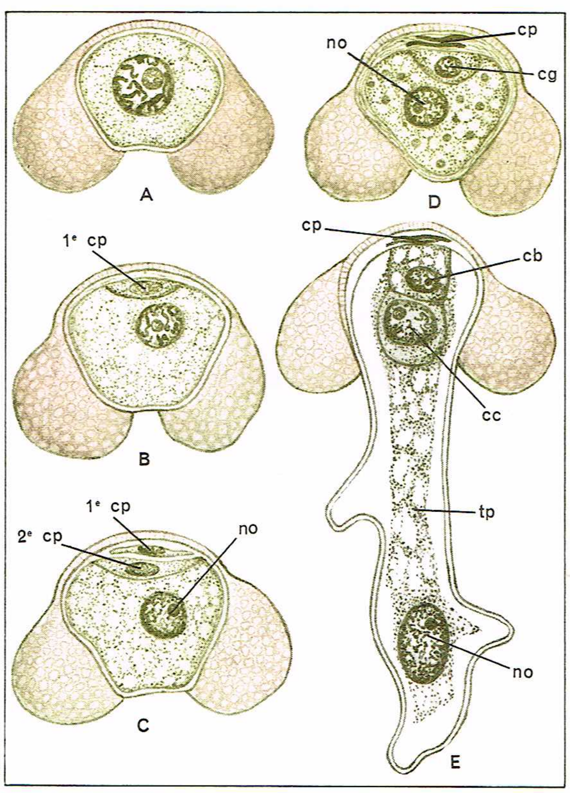

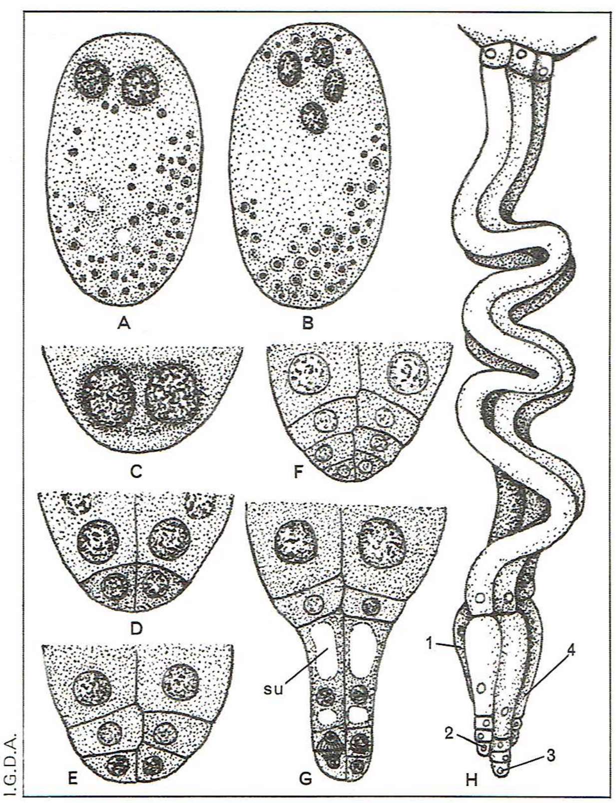

se dépose la sporopollénine, qui provient probablement du cytoplasme du grain, avec intervention possible des mitochondries. Les cellules du tapis peuvent aussi former de la sporopollénine. La disposition en lamelles disparaît le plus souvent dans le grain de pollen achevé, mais peut subsister dans la région inférieure de l'exine (Aracées, Annonacées [Le Thomas]) et au voisinage des dépressions, ou *apertures,* par où sortira le tube pollinique. La sporopollénine peut être déposée de façon continue sur les lamelles ou bien sous forme de grains, encore visibles à l'état définitif (Van Campo). Dans la disposition finale, l'exine comporte en général une couche inférieure porteuse de colonnettes rayonnantes dont les extrémités, renflées, sont souvent unies en un toit diversement ornementé. Cette structure est curieusement comparable à celles de l'exine de certaines basidiospores, elle aussi faite de sporopollénine.

Le noyau haploïde de la spore se divise au moins une fois avant la libération du grain. Il y a formation de deux cellules, munies de leur paroi squelettique, dont l'une est la mère des gamètes mâles. La division de cette dernière en deux cellules gamétiques se fait aussi chez beaucoup de plantes avant la libération du grain, et cet état trinucléé semble plus évolué. Le gamétophyte mâle est réduit à la cellule stérile du grain et aux deux gamètes ou à leur cellule mère. Il est renfermé dans la paroi de la spore, comme l'était déjà chez les Ptéridophytes le gamétophyte mâle des *Isoetes* et sélaginelles, qui possède une seule cellule prothallienne, mais forme cependant une anthéridie productrice de nombreux anthérozoïdes. La cellule stérile du grain de pollen correspond peut-être en fait à la paroi d'une anthéridie (Favre-Duchartre).

L'exine possède des zones amincies et simplifiées *(apertures)* par où pourra se faire la germination du grain. Dans les cas les plus primitifs, il s'agit d'un sillon situé du côté distal du grain, supposé lié à ses trois frères dans la tétrade, tandis que des fentes correspondantes sont situées du côté proximal chez les Ptéridophytes. Il semble qu'au cours de l'évolution, sont apparus ensuite des grains à trois fentes ovoïdes *(colpus),* puis à trois pores, puis à apertures plus nombreuses encore. Une seule aperture est fonctionnelle. L'étude du pollen est la *palynologie.*

Le **gamète femelle** des Angiospermes est membre d'un ensemble très problématique de cellules haploïdes abritées par le nucelle de l'ovule. Lorsque celui-ci a un volumineux nucelle, il est dit *crassinucellé;* lorsqu'il a un nucelle réduit, il est dit *ténuinucellé* (ce qui représente une disposition plus évoluée).

Le nucelle est diploïde. Une cellule sous-épidermique particulière, ou archéspore, va subir la réduction chromatique soit immédiatement, si l'ovule est ténuinucellé, soit après avoir produit des cellules filles formant un *tissu pariétal,* ou *calotte,* qui la sépare de l'épiderme, si l'ovule est crassinucellé.

Il arrive aussi qu'il y ait plusieurs archéspores dont souvent une seule est fonctionnelle (mais parfois aussi plusieurs).

La cellule qui subit la réduction chromatique donne quatre spores haploïdes femelles (mégaspores) dont l'une, en général la plus éloignée de l'épiderme, va poursuivre sur place son évolution pour donner le gamétophyte femelle, ou *sac embryonnaire,* qui est dit alors *monosporique*. Mais il arrive que deux noyaux haploïdes demeurent dans la même cellule issue de la première division méiotique et forment un sac embryonnaire *bisporique* (issu de deux mégaspores), ou bien que les quatre noyaux haploïdes formés demeurent dans une même cellule, qui est à l'origine d'un sac *tétrasporique*.

Pendant que se produit la méiose, il peut apparaître de la callose autour de la cellule mère puis de la tétrade, et entre les mégaspores, comme dans le cas du pollen (Rodkiewicz, Jalouzot). Cela est sans doute une réminiscence d'un état ancien où les mégaspores formaient elles aussi une paroi de sporopollénine à l'abri d'une coque callosique. Effectivement, chez les Gymnospermes, il se forme encore une épaisse paroi autour de la mégaspore puis de l'endosperme haploïde qu'elle forme sur place. Cette paroi comporte une exine fort comparable à celle d'un grain de pollen (von Lürzer, De Sloover).

Le sac embryonnaire n'est pas un véritable sac : il n'a pas de paroi propre, sauf peut-être quelques restes de celle de la mégaspore, et n'est pas limité par une

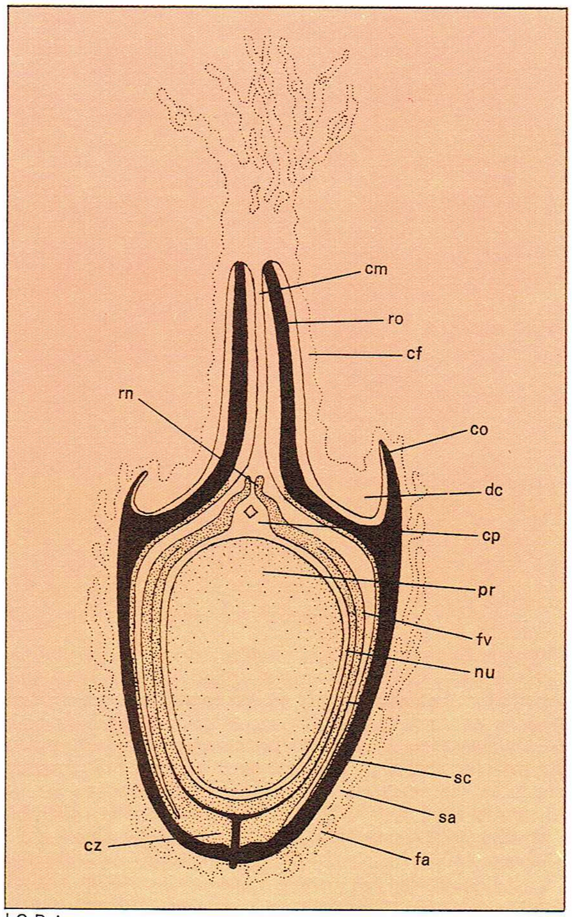

I.G.D.A.

◀ *Section longitudinale d'un ovule de* **Stephanospernum elongatum** *(Ptéridospermée fossile); cm, canal micropylaire; ro, rostre; cf, couche fibreuse externe; co, coronule; dc, dépression circulaire; cp, chambre pollinique; pr, prothalle femelle (endosperme); fv, faisceau vasculaire; nu, nucelle; sc, sclérotesta; sa, sarcotesta; fa, faisceau vasculaire du sarcotesta; cz, chalaze; rn, rostre nucellaire.*

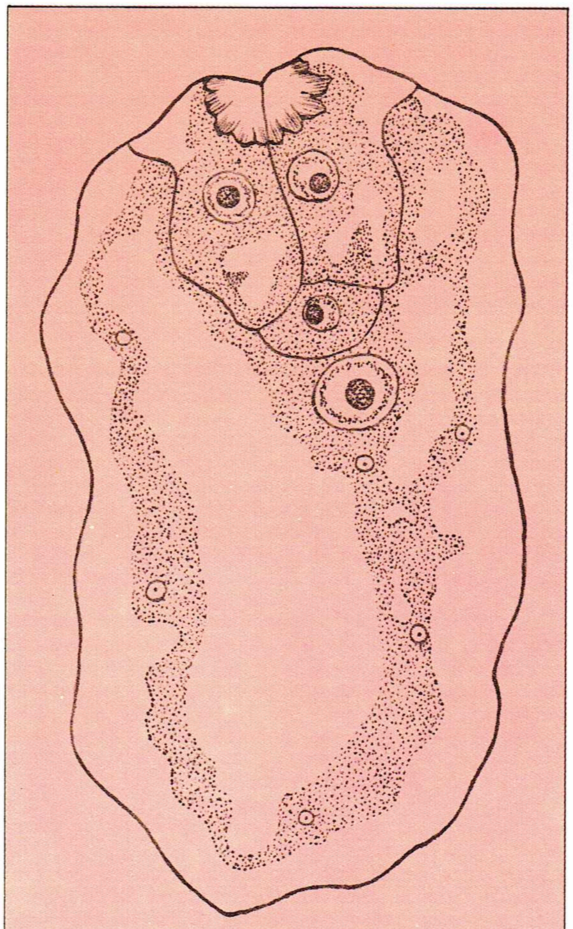

I.G.D.A.

◀ *Sac embryonnaire mûr d'***Oenothera nutans**, *à 4 cellules, montrant les synergides avec l'appareil filiforme. On observe que les synergides possèdent une vacuole près de l'extrémité inférieure. Le sac est monosporique mais ne comporte ici que 4 cellules.*

▶ *A gauche, représentation schématique d'un ovule de type anatrope d'Angiosperme Monocotylédone en section longitudinale : cz, chalaze; nu, nucelle; an, antipodes; se, sac embryonnaire; oo, oosphère; sy, synergides; sc, secondine; pr, primine; tp, tubes polliniques; fu, funicule; ff, funicule du faisceau. A droite, section longitudinale médiane dans un ovule de* **Lilium sp.** *Formation du sac embryonnaire. Première division nucléaire de la méiose de la cellule mère (archéspore). Le sac embryonnaire est tétrasporique.*

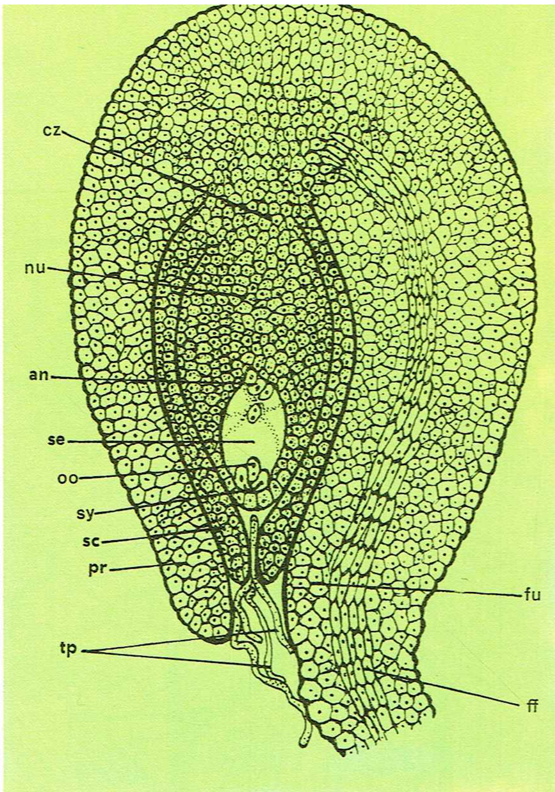

I.G.D.A.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

membrane cytoplasmique unique. En effet, la mégaspore fonctionnelle se divise en deux cellules, lesquelles se divisent à leur tour en quatre, dont trois se divisent encore pour en former six, tandis que la quatrième, la cellule centrale, grandit et divise seulement son noyau. Il apparaît ainsi sept cellules, avec au total huit noyaux, séparées les unes des autres mais rapprochées en un ensemble logé dans une cavité du nucelle. Cet ensemble constitue le sac embryonnaire. Les modalités de sa réalisation sont variées dans le cas des sacs bi- ou tétrasporiques; le résultat final peut alors être le même, mais il peut aussi y avoir seize noyaux, ou, au contraire, seulement quatre.

La cellule centrale, ovoïde, est la plus volumineuse; sa paroi constitue en pratique celle du sac. C'est dans les invaginations de cette cellule centrale que sont logées les autres cellules. Trois sont situées du côté micropylaire : l'une d'elles est le gamète femelle, ou *oosphère,* et les deux autres sont les *synergides*. Trois autres sont localisées du côté chalazien : ce sont les *antipodes,* qui prolifèrent parfois, mais dégénèrent en général. Les deux noyaux de la cellule centrale fusionnent en un *noyau polaire,* diploïde. Les cellules du nucelle sont parfois différenciées de façon particulière autour du sac.

Ce sac embryonnaire correspond à l'endosperme haploïde des Gymnospermes, mais il est très difficile d'y reconnaître des archégones.

La fécondation

Chez les Angiospermes, comme chez la grande majorité des Gymnospermes actuelles, il y a *siphonogamie*. Le grain de pollen apporté sur le stigmate du pistil y « germe » : en présence de sécrétion sucrée, il allonge localement sa paroi cellulosique en un *tube pollinique* qui fait protrusion par une des apertures de l'exine, et, guidé et nourri par le *tissu conducteur* du style puis des placentas de l'ovaire, il atteint les ovules. La production de ce tube nécessite un anabolisme intense, et la pénétration dans le tube de glucides du stigmate et du tissu conducteur a été mise en évidence par l'emploi d'isotopes radioactifs. Des phénomènes chimiotactiques sont probablement en cause dans l'attraction du tube vers les ovules. Il arrive, d'ailleurs, si le style est creux, que le pollen y pénètre. On peut aussi déposer le pollen au niveau des ovules et l'y faire germer. On évite ainsi l'inhibition de la germination du pollen par le stigmate, qui a lieu dans certaines espèces *auto-incompatibles,* c'est-à-dire où un individu ne peut se féconder lui-même, ou entre espèces voisines.

Les cellules gamétiques mâles sont alors formées, si elles ne l'étaient déjà, et la pointe du tube pénètre en général par le micropyle de l'ovule *(porogamie),* mais parfois aussi par le pôle opposé du nucelle après avoir cheminé dans le tissu des téguments et de ce nucelle, c'est la *chalazogamie* (la chalaze de l'ovule est l'extrémité opposée au micropyle, par où les téguments, le nucelle, et le funicule ou le raphé sont en continuité). Dans le cas de la chalazogamie, le tube remonte d'ailleurs encore au niveau micropylaire avant d'effectuer la fécondation. Les détails de celle-ci sont encore à l'étude. L'un des noyaux des gamètes mâles fusionne avec celui de l'oosphère, l'autre avec le noyau devenu diploïde de la cellule centrale. D'après Jensen, qui a étudié particulièrement la capselle et le cotonnier, le tube pollinique se décharge par un pore subapical à l'intérieur de l'une des synergides qui a commencé à dégénérer et où il a pénétré à travers sa paroi micropylaire, particulièrement tourmentée et épaissie par la production d'hémicelluloses *(appareil filiforme)*. Les deux gamètes mâles baignent dans le cytoplasme de la synergide, de même que le noyau végétatif du grain, arrivé lui aussi jusque-là et qui dégénère. La synergide voit sa membrane cytoplasmique dégénérer aussi, et celles des gamètes fusionnent alors respectivement avec celles de l'oosphère et de la cellule centrale. Les noyaux mâles peuvent maintenant s'unir à leurs partenaires.

▶ **Gamétophyte femelle adulte de Lilium martagon** *et sa fécondation; A, sac embryonnaire avant sa fécondation; B, durant la fécondation : un des noyaux reproducteurs, appartenant à l'un des gamètes mâles s'unit à l'oosphère, et le second aux deux noyaux polaires; C, D, deux stades de la fusion du noyau reproducteur avec les noyaux polaires; sy, synergides; no, noyau de l'oosphère; po, noyaux polaires; an, antipodes;* ng_1 *et* ng_2, *noyaux du 1er et du 2e gamète mâle (noyaux reproducteurs).*

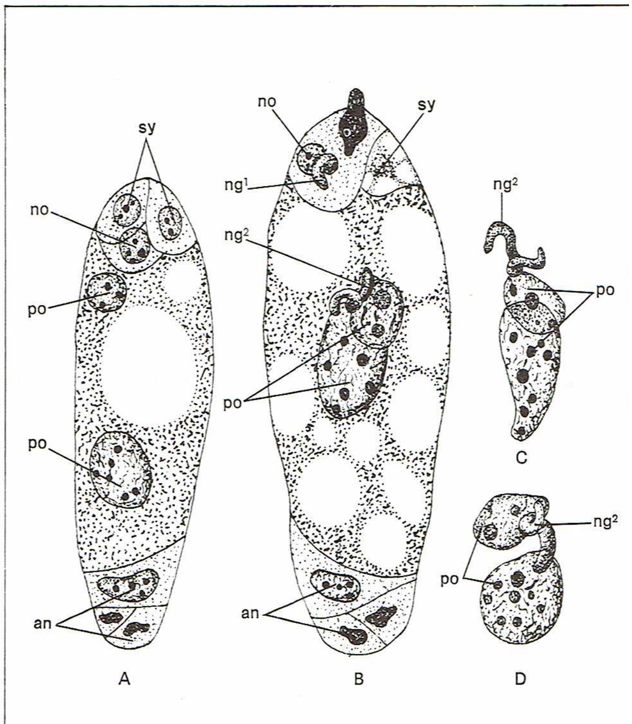

I.G.D.A.

L'œuf résulte de l'union de l'oosphère et de l'un des gamètes mâles. Son noyau est diploïde. La cellule centrale acquiert par fécondation un noyau triploïde; elle sera à l'origine de l'*albumen,* tissu triploïde qui sera plus ou moins digéré par l'embryon au cours de sa formation. Des cultures *in vitro* d'albumen sont pourtant possibles et peuvent donner des bourgeons qui deviennent des pousses triploïdes. L'albumen, tissu nourricier de la graine, se développe ici après la fécondation, tandis que l'endosperme haploïde des Gymnospermes, qui lui correspond physiologiquement, apparaît avant celle-ci.

L'activation de l'ovaire et la formation de la graine

Après la pollinisation, mais déjà avant la fécondation (ou indépendamment s'il y a parthénogenèse ou parthénocarpie), l'ovaire entame un nouveau développement, souvent très important, et devient un fruit, tandis que les ovules donnent des graines (dans le cas général). Des remaniements histologiques importants accompagnent les deux processus. La paroi de l'ovaire peut différencier des assises sclérifiées qui, lorsqu'elles auront un rôle mécanique, permettront la déhiscence du fruit suivant des lignes de moindre résistance déjà préparées dans l'ovaire. Dans certaines capsules loculicides, une telle ligne coupe en deux le faisceau médian des carpelles, dont le métaxylème a la forme de deux ailes : c'est entre celles-ci que se fera la déhiscence (tulipe). Le noyau et les couches pulpeuses des drupes apparaissent alors, le noyau étant déjà préparé dans l'ovaire. Les téguments de l'ovule forment en général deux téguments à la graine, mais leur origine est variable et tous les deux peuvent provenir du même tégument ovulaire. Ce sont souvent des restes de parois épaissies et des cuticules. En général, le tégument externe de la graine est épais et résistant, au point de rendre parfois la germination très difficile. Il peut être extérieurement mucilagineux.

Si la pollinisation détermine déjà, dans le cas du pétunia étudié par Linskens, une augmentation du contenu relatif en ARN et en protéines, celui-ci baisse ensuite pour s'élever brusquement quelques heures après la fécondation laquelle intervient un jour et demi plus tard, durée de la progression des tubes polliniques jusqu'aux ovules. Puis ce contenu baisse de nouveau pendant encore un jour et demi pour s'élever assez lentement, dans les dix jours qui suivent, sans atteindre toutefois le niveau de l'ovaire vierge. C'est après la fécondation que commence le grand afflux d'eau dans l'ovaire. Il est général; dans certains cas, on voit des plantes mal alimentées en eau se flétrir pour pourvoir aux besoins de leurs fruits (cotonnier). Il y a aussi fourniture d'autres métabolites. Chez les pétunias, la synthèse protéique semble s'accélérer dès avant la fécondation, comme on peut le voir en mesurant l'incorporation d'acides aminés radioactifs. Elle commence à baisser au moment de la fécondation, et, une semaine après la pollinisation, elle est revenue à l'état où elle se trouvait dans l'ovaire non pollinisé. Mais cette dépression n'a pas lieu dans le placenta et les ovules, où l'augmentation se poursuit alors à ce moment.

Plus précisément, Linskens a trouvé que les polysomes (groupes de ribosomes attachés à l'ARN messager qu'ils sont en train d'utiliser) augmentent de nombre et de taille dans les placentas deux à trois jours après la pollinisation, donc un peu après le moment de l'accroissement de la quantité relative d'ARN. Cette augmentation n'est déjà plus manifeste un jour plus tard, le moment de l'activation étant passé.

Ces modifications biochimiques sont elles-mêmes dues à des stimuli hormonaux. Le pollen apporte des auxines, ce qui explique sans doute qu'il produise son effet avant même la fécondation. Ainsi, une application de pollen étranger non fécondant peut parfois entraîner un début de maturation de l'ovaire. De même l'administration d'auxines ou de gibbérellines induit la *parthénocarpie,* ou développement du fruit sans fécondation et sans formation de graines vraies. Dans des variétés spontanément parthénocarpiques, on constate que le contenu en auxines de l'ovaire est augmenté, indépendamment de toute pollinisation ou fécondation, et sans qu'il se forme de graines par parthénogenèse. L'albumen des graines en développement produit à son tour des auxines, puis l'embryon prend le relais. La croissance des fruits nécessite, au moins au début, la présence des graines, et l'avortement ou l'ablation de celles-ci dans une partie du fruit conduit à un développement dissymétrique (Luckwill, Rosper). Les akènes du fraisier sont aussi responsables de la croissance du réceptacle, et leur absence sur une partie de celui-ci conduit à la non-accrescence de la zone correspondante (Nitsch).

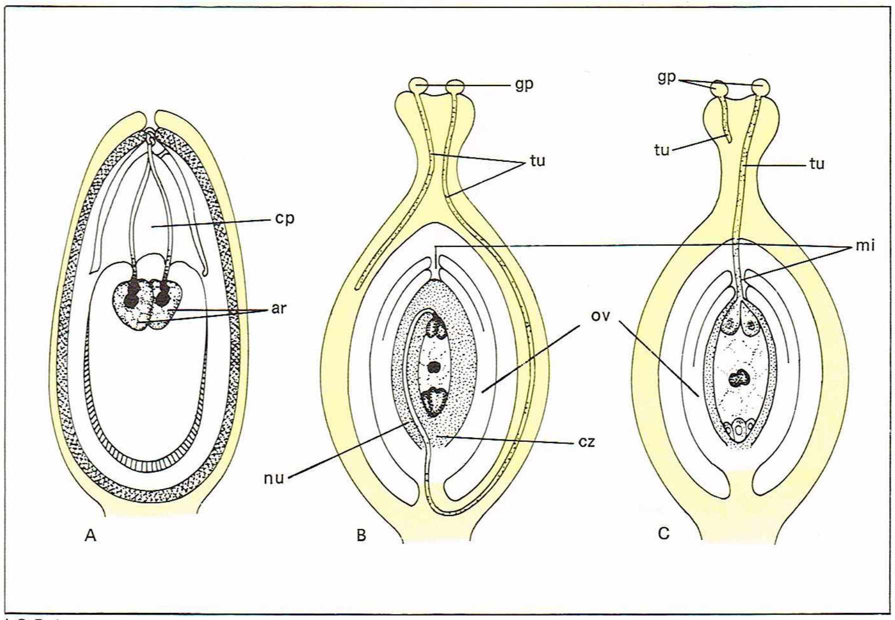

I.G.D.A.

▲ *Représentation schématique du parcours du tube pollinique dans le processus de fécondation; A, de Conifère; B, d'une Angiosperme avec chalazogamie; C, d'une Angiosperme avec porogamie; cp, chambre pollinique; ar, deux archégones; gp, grains de pollen; tu, tube pollinique; mi, micropyle; ov, ovule orthotrope; cz, chalaze; nu, nucelle. Dans la chalozogamie (B), la pointe du tube pollinique pénètre par la chalaze, précisément; dans la porogamie, le tube pénètre par le micropyle de l'ovule.*

Le développement de l'embryon

Ce développement est connu, chez les Angiospermes, grâce surtout aux travaux de R. Souèges. La première division de l'œuf, transversale, donne une cellule apicale, du côté du micropyle, et une cellule basale. Ensuite, chaque cellule se divise en deux transversalement, longitudinalement ou obliquement. Bien que le mode de leur division soit le plus souvent constant, il peut être variable dans une espèce donnée; il en est de même de l'orientation des divisions suivantes, au point que chez *Datura stramonium,* il n'est possible de prévoir le mode de division d'aucune cellule du jeune embryon de huit cellules. Pourtant, la forme de l'embryon est toujours définie. En effet, malgré le caractère anarchique de leurs divisions, les cellules gardent entre elles des corrélations morphogénétiques précises qui permettent le développement de la radicule, des cotylédons et du point végétatif. Dans ces conditions, il est légitime de s'attacher avant tout à préciser l'intensité et la localisation des zones de croissance qui permettent la réalisation de l'embryon, sans décrire le devenir des cellules individuelles (Bugnon, Vallade).

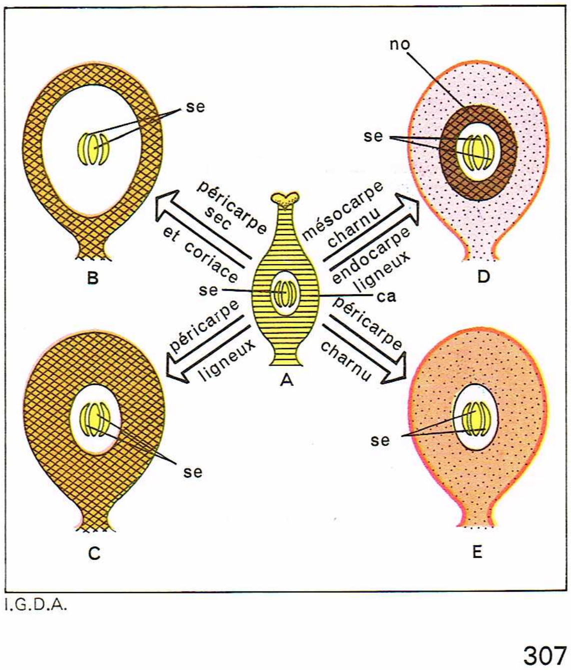

I.G.D.A.

◀ *Représentation schématique des diverses possibilités de transformation de l'ovaire en fruit; A, ovaire après la fécondation; les flèches indiquent les transformations possibles des parois carpellaires (ca) en fruits de structure et de consistance particulières. Ainsi, s'il y a lignification (en beige), on obtient en B un fruit sec, coriace : akène s'il est indéhiscent, follicule ou capsule s'il est déhiscent; en C, une noix; si le parenchyme périphérique devient, seul, juteux et charnu (en rosé pointillé), on obtient en D la drupe à noyaux ligneux (no); si tout le parenchyme devient charnu comme en E, il se forme une baie. Les graines sont notées (se).*

▲ *Derniers stades du développement de l'embryon de* Capsella bursa-pastoris. *Noter la volumineuse cellule supérieure du suspenseur; l'embryon se courbe durant sa formation : sa radicule est appuyée sur la surface d'un des cotylédons; il est* incombant.

Cependant, dans la grande majorité des cas, le mode de division des cellules embryonnaires ou blastomères, même variable, n'est pas anarchique. Mestre a fait remarquer, à ce sujet, que de toute manière, dans une espèce donnée, l'origine des points végétatifs de la tige et de la racine se fait constamment à partir de la cellule apicale ou basale, quelle que soit la variabilité du cloisonnement de celle-ci. De cette manière, on peut distinguer des plantes où la cellule basale ne prend pas part à la formation de l'embryon proprement dit. Cette cellule ne forme que le *suspenseur* filamenteux, qui dégénérera, après avoir servi peut-être à nourrir l'embryon. On voit que chez les plantes, comme chez les animaux, l'œuf peut produire des formations extra-embryonnaires. Ce type est celui de certaines Papavéracées, des Solanacées, des Rubiacées, des Cypéracées et, en général, des familles évoluées.

Chez les Crucifères, mais aussi les Labiées et les Scrofulariacées, la cellule apicale donne le point végétatif de la tige, et la cellule basale fournit, en plus du suspenseur, l'apex de la racine. Plus précisément, la cellule apicale forme, dans ces cas, tout l'hypocotyle, tandis que dans d'autres elles n'en donne qu'une partie plus ou moins importante, comme chez les Composées, les Polygonacées les Chénopodiacées ou les Graminées. De plus, il arrive souvent que la cellule basale ne forme que le suspenseur et que la cellule apicale se comporte comme un œuf et se divise transversalement en deux cellules descendantes. Leur développement obéit alors aux lois précédentes : la cellule « basale secondaire » prend part ou non à la formation de l'embryon. C'est ce qui se voit chez les Campanulacées, les Caryophyllacées et les Primulacées, ainsi que chez certaines Papavéracées et Fumariacées. Le cas des Papavéracées montre qu'il peut exister, dans la même famille, identité entre le développement de l'œuf et celui de la cellule apicale qui en résulte. Ce phénomène rappelle la correspondance qui existe souvent entre une foliole et une feuille entière. Les mêmes gènes doivent être mis en cause pour les former, mais à des moments et en des endroits différents. C'est le phénomène d'*homéose* (Leavitt, Gavaudan).

D'ailleurs, il se peut que les types précédents s'appliquent non plus à une cellule fille de l'œuf, mais à une petite-fille, et même à une arrière-petite-fille (Fumariacées, Papavéracées, Papilionacées). La masse extra-embryonnaire issue de l'œuf est ainsi plus importante. Des phénomènes du même genre peuvent être observés chez les Gymnospermes.

Après avoir subi le début de son développement, l'embryon entre le plus souvent en vie latente et se déshydrate. Chez les Dicotylédones, l'embryon possède alors en général ses deux cotylédons seulement, mais il peut avoir formé quelques feuilles (haricot). L'albumen a été ou non épuisé pendant cette première phase, et la graine est devenue *exalbuminée* ou est restée *albuminée*. Cette graine peut demeurer latente très longtemps, jusqu'à 1 700 ans pour un chénopode et une espargoutte (Ødum) ; mais des durées de quelques décennies, quelques années ou même quelques mois sont plus fréquentes. Le développement peut aussi se poursuivre immédiatement, pendant que la graine est encore dans le fruit (c'est la *viviparie,* qu'on observe chez les palétuviers). En général, l'état latent de l'embryon protégé par les téguments de sa graine lui procure une résistance aux agressions externes pendant la dissémination de la graine, du noyau ou du fruit sec. Lorsqu'elle rencontre des conditions favorables, la graine germe, mais la protection physique (téguments) et chimique (inhibiteurs de croissance) dont bénéficiait l'embryon constitue souvent un obstacle à la germination qui doit être levé par l'action du froid, de la lumière ou, dans le cas d'un tégument qui empêche la respiration et l'expansion de la plantule, par l'atteinte mécanique ou physico-chimique.

La germination marque la reprise du développement embryonnaire et manifeste la métamérie du végétal par la réalisation de la pousse feuillée, que nous décrirons maintenant.

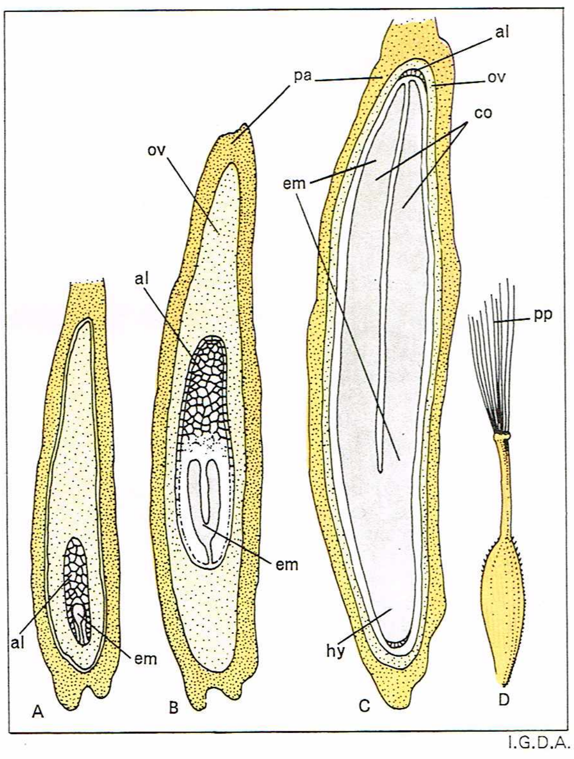

▶ *Représentation schématique du développement de l'embryon et du fruit chez* Lactuca sativa *(section longitudinale); A, ovule avec l'embryon (em) en voie de développement et l'albumen (al); B, C, phases ultérieures de l'évolution de l'embryon et de l'albumen ainsi que du tégument ovulaire (ov) devenant tégument séminal. Apparition des cotylédons (co); pa, parois du fruit. En C, on observe la réduction progressive de l'albumen à la région antipodale et la différenciation de l'hypocotyle (hy); en D, l'akène mûr présente un pappus (pp) qui en facilitera la dissémination.*

BIBLIOGRAPHIE

ERDTMAN G., *Handbook of Palynology,* Copenhague, 1969. - FAVRE-DUCHARTRE M., *Des ovules aux graines,* Paris, 1970. - *From Ovule to Seed* [Symposium], *Caryologia,* 25, suppl., 1973. - JENSEN W.A., *The Embryo Sac and Fertilization in Angiosperms,* Honolulu, 1972. - MAHESHWARI P., *An Introduction to the Embryology of Angiosperms,* New York, 1950. - ID., éd., *Recent Advances in the Embryology of Angiosperms,* Delhi, 1963. - MESTRE J.C., *la Signification phylogénétique de l'embryogénie, Rev. Gén. Bot.,* t. 74, p. 273-324, 1967. - NITSCH J., éd., *la Naissance de la forme chez l'embryon,* in *Bull. Soc. Bot. Fr. Mém.,* 1973.

ENCYCLOPÉDIE DES SCIENCES

BIOLOGIE II

GRANGE BATELIÈRE

GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

BIOLOGIE

II

GRANGE BATELIÈRE, PARIS - ÉDITIONS KISTER, GENÈVE - ÉRASME, BRUXELLES-ANVERS

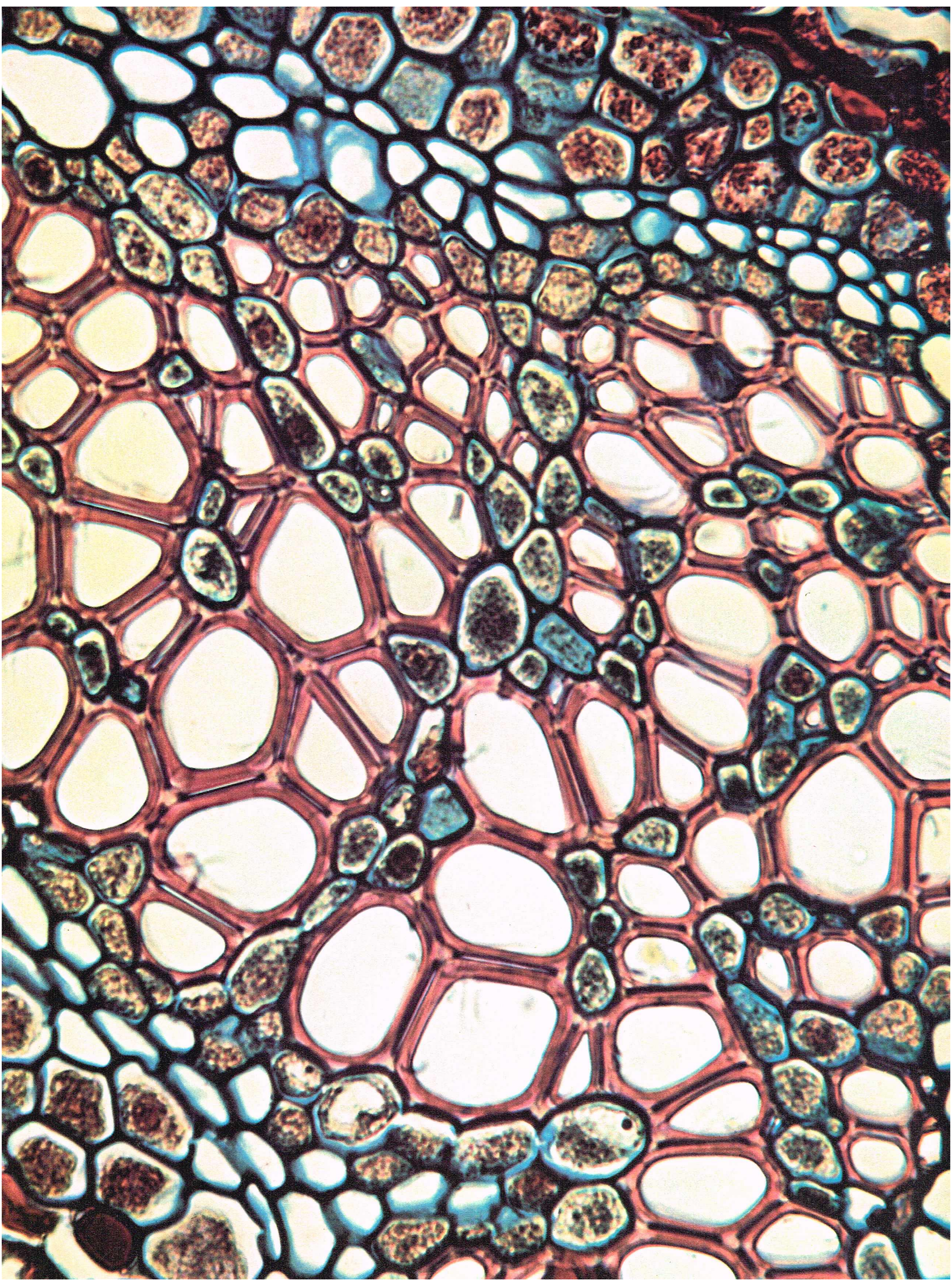

Publiée sous le haut patronage de :
Messieurs les professeurs :
Jean DORST, membre de l'Institut,
Charles FEHRENBACH, membre de l'Institut,
Roger HEIM, membre de l'Institut,
Monsieur l'amiral André JUBELIN,
Messieurs les professeurs :
Pierre LÉPINE, membre de l'Institut,
Louis LEPRINCE-RINGUET, de l'Académie française,
Jean-François LEROY, professeur au Muséum national d'histoire naturelle,
Henri NORMANT, membre de l'Institut,
Monsieur Jacques PICCARD, docteur ès sciences h.c.

Réalisation IDÉES ET ÉDITIONS
16, avenue de Friedland, 75008 Paris

Comité de direction Cristobal de ACEVEDO,
Simone DEVAUX,
Uberto TOSCO.

Rédaction Patrick PHLIPONEAU, Françoise MENU,
Marie-Noëlle RENARD, Vanina DORÉ.

Recherche de l'illustration Mathilde RIEUSSEC.

Mise en pages Tito TOPIN et Serge BROCHE.

Illustrations techniques Richard COLIN.

Coordinateur des dessins Mario LOGLI.

Fabrication Sylvie MARCHAND, Jocelyne DUCHESNE,
Jocelyne TÉPÉNIER.

Directeur de la publication J.-P. BRÉVOST.

Archives B.

Ont collaboré à ce volume :

J.-P. ALLAIS, pour : Physiologie des Invertébrés.

A. BEAUMONT, pour :

1. La mort cellulaire.
2. Distribution géographique des animaux.

S. BLAISE et C. SASTRE, pour : Anatomie végétale.

C. BOUCHARD, pour : La régénération et la multiplication asexuée.

J. BOUCHARD, pour :

1. Notions de tissus.
2. Tégument des Vertébrés supérieurs (Oiseaux et Mammifères).
3. Évolution tumorale des organes animaux.

R. BOURDU, pour : Physiologie végétale.

M. GUÉDÈS, pour : Morphologie végétale.

E. GUILLÉ, pour : Les tumeurs végétales.

D. HUCHON, pour : Embryologie animale.

J.-P. LARPENT, pour : Biologie et physiologie des Bactéries.

P. LÉPINE, pour : Virologie.

J. RIVIÈRE, pour : Utilisation industrielle des micro-organismes.

M.-J. THILLARD, pour :

1. Squelette et musculature des Vertébrés.
2. Système nerveux des Vertébrés.

J.-M. VERNIER, pour :

1. Tégument (généralités) et tégument des Vertébrés (Agnathes, Poissons, Amphibiens, Reptiles).
2. Tube digestif des Vertébrés et ses dérivés, digestion.
3. Appareil respiratoire et respiration chez les Vertébrés.
4. Appareil circulatoire et circulation chez les Vertébrés.
5. Appareil urinaire et excrétion chez les Vertébrés.
6. Appareil génital chez les Vertébrés.

Morphologie végétale

Malgré de nombreuses tentatives disparates et contradictoires de la révolutionner hâtivement, la morphologie des plantes à fleurs (et spécialement des Angiospermes, auxquelles nous nous limitons pratiquement) doit toujours être considérée suivant le schéma dû essentiellement à Linné, Gœthe et Candolle et que l'on appelle communément *théorie de la métamorphose*.

Le corps de la plante est formé d'une *racine,* qui en principe recherche le sol et s'y enfonce *(géotropisme positif)*, et d'une *pousse* fuyant ce sol et croissant dans l'air *(géotropisme négatif)*. Cette dernière est constituée d'une *tige* allongée, terminée par un *point végétatif,* ou *méristème terminal,* qui assure la mise en place du matériel cellulaire destiné à subir la croissance, par mitoses *(mérêsis)* et allongement cellulaire *(auxêsis)*.

Sur cette tige se forment successivement des *phyllomes,* grâce à des divisions cellulaires superficielles dans une zone très généralement sous-apicale. Ces appendices marquent la *métamérisation* de la pousse (qui fait penser aux anneaux d'un ver de terre) et sont d'abord *végétatifs*. Les premiers sont le ou les *cotylédons,* qui ne naissent pas de la même manière que les suivants, mais parallèlement au point végétatif lui-même, qui formera les autres. Suivent les *feuilles végétatives* qui assurent la fonction chlorophyllienne. Les premières formées sont souvent de petite taille et plus simples que les suivantes : ce sont les *feuilles primordiales,* ou « primefeuilles ». Les suivantes atteignent leur développement maximal. Les feuilles sont disposées sur la tige isolément ou par groupes au niveau de *nœuds* séparés par des *entre-nœuds*. Si plusieurs feuilles s'attachent à un seul nœud, elles forment un *verticille*.

Au moment de la période de reproduction, la tige forme des phyllomes bractéaux : ces *bractées,* ou *hypsophylles,* ont une forme simple. La pousse peut se terminer par une seule fleur ou par un groupe de fleurs *(inflorescence)*. En effet, à ce niveau, la tige se ramifie souvent abondamment même si elle ne l'était guère en bas.

La fleur est constituée extérieurement de phyllomes sépalaires, ou *sépales*. Comme à ce niveau les entre-nœuds sont très courts, il y a tassement de ces phyllomes en une coupe, ou *calice,* de la fleur. Immédiatement au-dessus, l'apex forme des phyllomes pétalaires colorés, ou *pétales,* dont l'ensemble constitue la *corolle*. Viennent ensuite des phyllomes staminaux, ou *étamines,* puis des phyllomes carpellaires, ou *carpelles*. Étamines et carpelles sont les organes reproducteurs, respectivement mâles et femelles, de la plante. Les éléments mâles sont les *grains de pollen* émis par les premiers; les éléments femelles sont contenus dans les *ovules* formés par les seconds. La formation d'une fleur (qui n'est qu'un bourgeon sexué), et même de l'inflorescence dans son ensemble, implique en principe la mort de l'apex de la pousse, voire de toute celle-ci. La plante survivra si elle a formé latéralement des apex qui, eux, ne fleurissent pas, du moins pas immédiatement.

Il y a presque toujours *ramification* de la tige, mais les rameaux peuvent ne pas se développer. Les rameaux résultent de l'apparition, aux *aisselles* des cotylédons, des feuilles végétatives ou des bractées, mais non des phyllomes floraux, d'un nouvel apex identique à celui de la pousse principale, et cela à partir de cellules superficielles de la tige, peu après la naissance de la *feuille axillante*. Au niveau morphologique comme au niveau anatomique, on remarque une grande analogie entre le rameau et la pousse qui le porte. Son ou ses deux premiers phyllomes, les *préfeuilles,* simples, presque verticillés, même si les feuilles suivantes ne le sont pas, sont comparables à des cotylédons (« cotylédons de rameau »). Suivent des primefeuilles, des feuilles végétatives et des bractées.

Dans l'inflorescence, la fleur fait souvent suite directement aux préfeuilles du rameau qui la porte, lesquelles, dans ce cas, sont appelées *bractéoles*. Des bractées peuvent pourtant se trouver entre les bractéoles et la fleur et, éventuellement, abriter à leur aisselle des rameaux floraux, très fréquents, ainsi qu'aux aisselles des préfeuilles. Certains rameaux croissent horizontalement : ils sont dits *plagiotropes*. Ils peuvent de plus ramper sur le sol *(stolons épigés)* ou dans le sol *(stolons hypogés)*.

L'identité morphologique des phyllomes est prouvée par la simple comparaison entre leurs formes d'apparences très diverses, mais qui révèlent beaucoup d'intermédiaires, et par l'étude tératologique. Des monstruosités, accidentelles mais de forme définie et reproductible expérimentalement, fournissent les intermédiaires manquants à l état normal, comme ceux qui apparaissent entre l'étamine et le carpelle *(stamino-carpelles)*. Il n'est pas douteux qu'une ressemblance dans les portions du code génétique mises en œuvre pour la production de tous les phyllomes est à la base de leur identité.

En général, la racine se ramifie abondamment, mais elle ne comporte pas d'appendices. Ses rameaux naissent loin de son apex et à partir de cellules profondes de son endoderme ou, surtout, de son péricycle (« membres endogènes »). Une zone sous-apicale de cellules de la couche externe forme des *poils absorbants*. L'apex de la racine cesse souvent de fonctionner, mais comme le montre la culture des racines *in vitro*, il semble potentiellement immortel, à la différence de celui de la pousse, qui disparaît avec la floraison à laquelle il semble fondamentalement destiné.

On considérera brièvement les diverses parties du végétal.

La tige

La tige se raccorde souvent à la racine par un *axe hypocotylé* ou *hypocotyle*, allongé, dont les caractères anatomiques sont intermédiaires entre ceux de la tige et ceux de la racine. La présence de cet hypocotyle révèle la parenté entre la tige et la racine, qui sont peut-être constituées de *télomes* (éléments simples des plus anciens végétaux vasculaires) fusionnés en faisceaux dans les deux cas. L'hypocotyle n'a évidemment pas

S. Prato

▲ *Les Orchidées sont, parmi les Monocotylédones, sans doute les fleurs les plus précieuses, comme on peut en juger sur cette* **Laelia** *des forêts équatoriales d'Amérique.*

Frédéric - Jacana

▲ *La tige porte d'abord les deux* **cotylédons** *dont la forme est plus simple que celle des feuilles qui suivent.*

d'appendices, puisqu'il est situé en dessous des cotylédons. Pourtant, il forme parfois des bourgeons qui sont *adventifs* (situés hors des aisselles foliaires) ; ces bourgeons peuvent jouer un grand rôle dans le développement de la plante (c'est le cas de bien des linaires et euphorbes par exemple). La jonction de la racine avec l'hypocotyle est marquée par un *collet* plus ou moins nettement renflé en anneau. Si l'hypocotyle manque, le passage de la tige à la racine se fait dans la région supérieure de la racine.

La tige porte d'abord le ou les deux *cotylédons* dont la forme est plus simple que celle des feuilles qui les suivent; ils sont très généralement entiers et, exceptionnellement, lobés (cas du tilleul). Ils abritent très souvent chacun un bourgeon axillaire *(bourgeon cotylédonaire)*. Tandis que les deux cotylédons des Dicotylédones se forment latéralement sur l'embryon de part et d'autre du futur point végétatif, celui de nombreuses Monocotylédones naît en apparence au sommet, comme chez les Graminées, de sorte que certains l'ont pris pour la tige elle-même. L'étude comparative de divers embryons montre que ce cotylédon est, en fait, fondamentalement latéral, mais l'importance très grande qu'il prend déplace latéralement l'apex de la plantule, comme des feuilles végétatives peuvent le faire pour l'apex de la tige (joncs, Broméliacées). Chez certaines Graminées (avoine), le nœud d'insertion du cotylédon est parfois allongé en un *mésocotyle* à allure d'entre-nœud qui sépare le cotylédon de son coléoptile (sorte de stipule complexe).

La tige est formée d'entre-nœuds, ou *mérithalles*, séparant des nœuds au niveau desquels se forment les feuilles. Les entre-nœuds atteignent leur longueur maximale au niveau des feuilles végétatives; ils sont le plus souvent de section arrondie, mais parfois carrée (Labiées), polygonale, ou encore aplatie. Si les entre-nœuds ne s'allongent pas, les feuilles restent « tassées », et la plante est en *rosette*. En général, la tige de la rosette s'allongera au moment de fleurir, à moins que seuls des rameaux axillaires des feuilles de cette rosette ne donnent des fleurs. Il peut arriver que seulement un entre-nœud sur deux s'allonge *(Potamogeton pectinatus)*.

Les bourgeons axillaires

Au niveau de chaque nœud, et juste au-dessus de l'insertion de la feuille, la tige porte un bourgeon axillaire abrité par l'aisselle de la feuille. Il peut manquer (l'aisselle est alors vide) ou être situé à une certaine distance au-dessus de l'aisselle, et cela pour deux raisons.

Ou bien, il est encore inséré à l'aisselle, mais déjà allongé, et sa partie inférieure est unie congénitalement à l'axe porteur; on peut alors espérer voir sur ce dernier la trace du rameau axillaire soudé; il y a *concaulescence* (Troll). Ou bien, une portion de tige comparable à un entre-nœud s'est intercalée entre le nœud et l'axillaire qui y était inséré; cet entre-nœud secondaire est un *hypomérithalle* (Bugnon).

▼ *Si les entre-nœuds ne s'allongent pas, les feuilles restent « tassées » en une rosette; ici,* **Taraxacum officinale.**

Frédéric - Jacana

Il peut se faire que la concaulescence aille si loin que le bourgeon axillaire, alors inflorescentiel, soit uni non seulement à l'entre-nœud situé au-dessus, mais également à la face inférieure de la feuille située au-dessus de celle à l'aisselle de laquelle il se trouve en fait. L'inflorescence, qui *semble* alors insérée sous une feuille, est dite *hypophylle*.

L'axillaire peut aussi être uni à la *face ventrale* (située du côté de l'axillaire) de sa feuille axillante. Il y a *recaulescence* (Troll). L'inflorescence qu'il forme éventuellement est *épiphylle* (en apparence). D'autres interprétations en sont d'ailleurs possibles.

Chez les plantes herbacées, un rameau se développe très souvent à partir de l'axillaire de beaucoup de feuilles *dès l'année de formation de la tige mère*. Mais chez les végétaux ligneux, les bourgeons végétatifs sont généralement inhibés l'année de leur formation : la pousse annuelle ne se ramifie pas en apparence. Elle le fera l'année suivante : s'il s'agit d'un *arbre*, les bourgeons supérieurs de la pousse de l'année précédente se développeront le plus fortement *(acrotonie)*, alors que s'il s'agit d'un *arbuste*, ce seront les inférieurs *(basitonie)*.

Bourgeon terminal et bourgeons axillaires

La tige d'un végétal s'allonge (en relation avec la formation de feuilles) grâce à des cellules produites à sa pointe, et qui grandissent après leur mise en place. Des cellules se multiplient et s'allongent ainsi entre deux jeunes feuilles et sont à l'origine de l'entre-nœud. Certaines peuvent rester longtemps méristématiques à la base de celui-ci (Graminées).

L'ensemble des jeunes feuilles apicales non encore séparées par des entre-nœuds constitue le *bourgeon terminal*. Celui-ci est petit chez les plantes volubiles car la formation des entre-nœuds y est très précoce. Si la pousse se développe pendant plusieurs années, en particulier chez un végétal ligneux, ce bourgeon entre en repos à la fin de chaque poussée de croissance. Il faut pourtant bien le distinguer des bourgeons axillaires, car il assure la poursuite de la croissance *de la même tige*, alors que les axillaires déterminent la production de rameaux d'ordre supérieur à ceux qui les portent. Le bourgeon terminal est un « bourgeon de continuité » (Turpin).

Même chez les plantes des zones intertropicales ne subissant pas d'alternances climatiques, les bourgeons terminaux des pousses connaissent des phases de repos, ce qui montre que leur activité est gouvernée par un *rythme endogène*, ou *endorythme* (Leroy).

La floraison est le but naturel des plantes. Certaines, dites *hapaxanthes* (Wydler), ne fleurissent qu'une fois. Elles peuvent vivre une seule année *(plantes annuelles)*, mais aussi parfois deux ans *(plantes bisannuelles)* ou plusieurs années *(plantes pluriannuelles)*; dans ces deux derniers cas, la floraison a lieu respectivement la deuxième ou la dernière année. Beaucoup d'autres plantes fleurissent de nombreuses fois, en général une fois par an sous nos climats : elles sont dites *vivaces* ou *pollacanthes*. Dans ce dernier cas, il peut s'agir de végétaux ligneux (arbres et arbustes), qui sont pérennants (ou pérennes), ou encore de végétaux herbacés, qui survivent à la mauvaise saison grâce à des portions de leur corps abritées dans le sol.

Monopode et sympode

Si le bourgeon terminal poursuit son activité pendant toute la phase de croissance d'une plante hapaxanthe, ou pendant les phases successives d'une plante pollacanthe, il forme un *monopode*. Les inflorescences ou les fleurs sont, dans le second cas, formées, en principe, par des bourgeons axillaires de ce monopode, car une pousse qui s'est transformée en inflorescence, ou *a fortiori* en fleur solitaire, n'est plus susceptible de reprendre sa croissance végétative.

Le bourgeon terminal peut aussi cesser sa croissance sans que la plante meure, la survie de celle-ci étant assurée par le développement d'un ou de plusieurs axillaires : il y a formation d'un *sympode*. Si la plante ou la pousse aérienne sont annuelles, le bourgeon terminal devient une fleur ou une inflorescence (cas des Solanacées et des *Phytolacca*). L'axillaire d'une feuille située en dessous de l'inflorescence connaît un grand développement et vient à prolonger le segment de tige, ou *article*, qui l'a produit; il s'agit d'un *rameau usurpateur*. La succession des *usurpations* donne l'impression d'une tige continue, mais

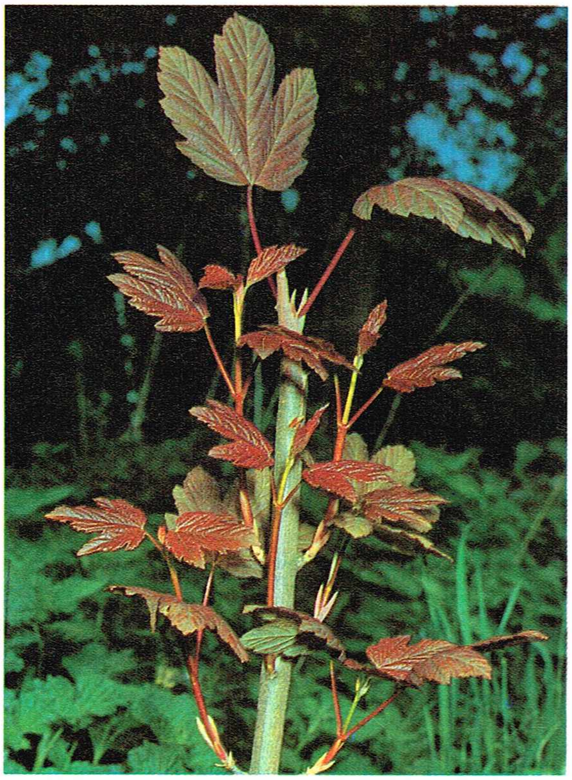

P. Pilloud - Jacana

G.P. Mondino

◀ *A gauche, sur cet érable (Acéracées), on distingue les bourgeons axillaires qui déterminent la production de rameaux d'ordre supérieur à ceux qui les portent.*
A droite, beaucoup de végétaux vivaces, herbacés, sont **sympodiaux**, *et forment un article chaque année : c'est le cas du* **sceau de Salomon.**

les fleurs ou inflorescences qui terminent chaque article ne sont pas situées à l'aisselle d'une feuille; au contraire, elles semblent opposées à la feuille dont l'axillaire est usurpateur (inflorescences ou fleurs *oppositifoliées*). Dans ces cas, une seule poussée de croissance est marquée par des usurpations, plus ou moins nombreuses.

Beaucoup de végétaux vivaces herbacés sont sympodiaux, mais chaque article dure une année (comme chez le sceau de Salomon). Chez les végétaux pérennes, la ramification sympodiale se manifeste par une cessation de l'activité du bourgeon apical après chaque phase de croissance. Elle n'est pas forcément liée à la floraison. Chez l'orme ou le tilleul par exemple, les bourgeons terminaux cessent leur activité sans fleurir, et le tronc de l'arbre est le produit non d'un seul bourgeon, mais d'un empilement d'articles correspondant à des usurpations successives par un seul bourgeon à chaque fois; c'est un *monochasium*. Chez les lilas, le bourgeon apical cesse également son activité sans fleurir. Comme les feuilles sont opposées, les deux feuilles situées en dessous du bourgeon apical forment deux gros bourgeons axillaires; ceux-ci peuvent être tous deux végétatifs et former l'année suivante une fourche *(dichasium* ou *dichopode)*; on dit qu'il y a *pseudo-dichotomie;* ou bien tous deux sont reproducteurs et, après la floraison de l'année suivante, il faut qu'un axillaire plus inférieur poursuive la ramification végétative; ou bien encore l'un est végétatif et, au printemps suivant, forme un rameau, tandis que l'autre devient une inflorescence.

Lorsque, dans les végétaux ligneux, la formation du sympode accompagne la floraison, elle est liée sous nos climats à l'existence de rameaux normalement anticipés. Le bourgeon terminal achève sa phase de développement par une inflorescence, et, en même temps, deux axillaires (ou parfois plus) des feuilles ou bractées situées sous celle-ci se développent en pousses végétatives.

Rameaux longs et rameaux courts

Lorsque le bourgeon terminal d'un rameau qui s'était allongé jusque-là forme une inflorescence, il peut avoir des entre-nœuds très courts en dessous de celle-ci; il est devenu une *pousse courte*. Si celle-ci est axillaire, chez les érables par exemple, c'est un *rameau court* inflorescentiel, dont des axillaires pourront se développer et rester des rameaux courts, ou bien devenir de longs rameaux végétatifs à entre-nœuds marqués *(rameaux longs)*. Les cotonéasters, les groseilliers, etc., forment ainsi un rameau long usurpateur d'un rameau court inflorescentiel latéral.

En l'absence même de toute floraison, beaucoup d'arbres forment des rameaux longs et des rameaux courts, à feuilles peu nombreuses, « tassées », et souvent disposées différemment sur la tige (hêtre, ginkgo). La transformation du rameau court en rameau long ou la production d'une pousse courte par le bourgeon terminal d'un rameau long ne sont pas rares.

La phyllotaxie

On ne peut dissocier le mode de formation de la tige au niveau de son bourgeon terminal de la formation des feuilles et de leur disposition, ou *phyllotaxie*. La tige se termine par une pointe en forme de dôme parfois effilé, parfois surbaissé. Les feuilles se forment *à une certaine distance au-dessous* de la pointe et apparaissent en des points très précis, ce qui détermine leur disposition dans la tige allongée.

Il arrive souvent qu'une seule feuille se forme à la fois : les feuilles sont alors dites *alternes*. Schimper et Braun, vers 1830, ont décrit leur phyllotaxie en les imaginant disposées sur une *spirale* dite *génétique* parce qu'elle joint les feuilles dans l'ordre où elles sont engendrées par l'apex et où, par conséquent, elles se trouvent superposées sur la tige.

Dans le cas le plus fréquent, pour joindre le plus rapidement (par la *voie courte*) une feuille à celle située au

▼ *Représentation schématique de divers types d'inflorescences; A, grappe définie (noter la fleur terminale) de grappes également définies; I_1-I_5, rameaux de premier ordre; II_1-II_2, rameaux de deuxième ordre; B-E, inflorescences sympodiales; B, C, cyme unipare hélicoïdale, celle schématisée en C simule une grappe; D, cyme bipare; E, cyme unipare scorpioïde (les chiffres romains indiquent l'ordre dans lequel naissent les uns sur les autres les axes de degrés successifs).*

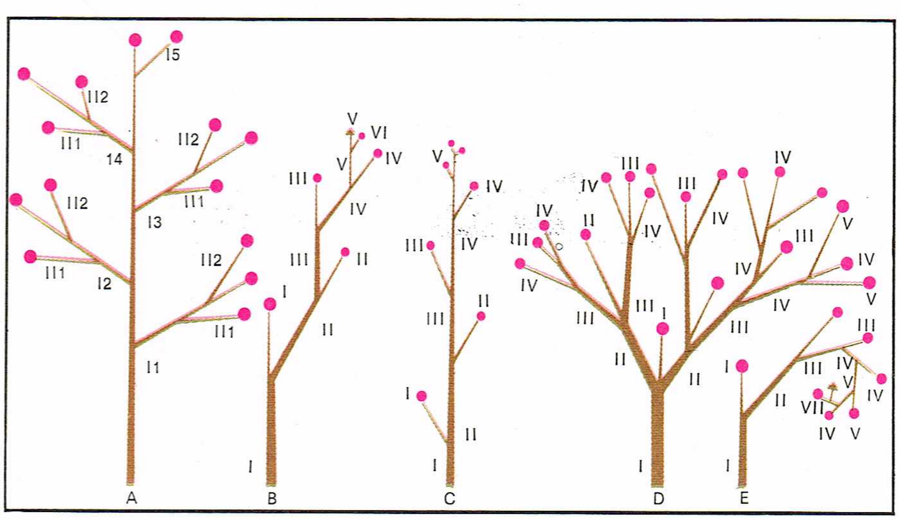

I.G.D.A.

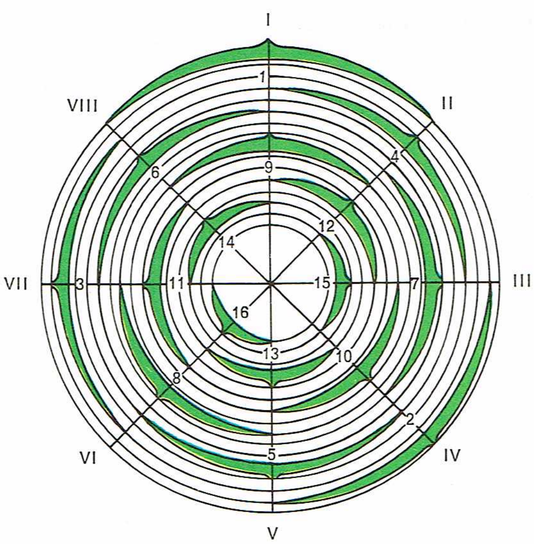

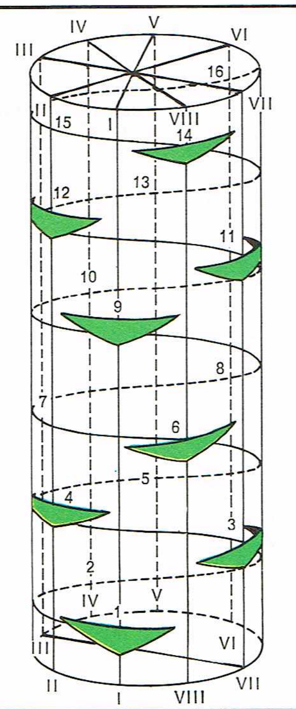

I.G.D.A.

M. et S. Prato

▲ ***A gauche, diagramme de la phyllotaxie à feuilles alternes de divergence 3/8 (les orthostiques sont au nombre de 8 : I-VIII); au milieu, schéma dans l'espace de cette même phyllotaxie; les chiffres indiquent la position des feuilles successives; seules celles situées du côté de l'observateur ont été figurées.***
A droite,* Vaccinium myrtillus *(Éricacées) est un arbuste nain peu ramifié, dont les feuilles sont* alternes*; finement dentées, elles rougissent en automne.

nœud immédiatement supérieur, il faut parcourir les 2/5 de la circonférence de la tige, qui représentent l'angle de divergence, ou *la divergence* des deux feuilles. En poursuivant ainsi l'observation de feuille en feuille, on passe juste au-dessus de celle dont on est parti lorsqu'on atteint la sixième, après avoir parcouru deux tours de tige. C'est la disposition *quinconciale*. Il existe des dispositions plus compliquées, dans lesquelles il faut faire de plus ou moins nombreuses fois le tour de la tige et rencontrer plus ou moins de feuilles avant d'en trouver une qui soit superposée à celle dont on est parti, c'est-à-dire située sur la même *orthostique,* ou *génératrice,* du cylindre de la tige.

On peut aussi joindre les feuilles successives par une seule spirale tournant en sens inverse : c'est la *voie longue* de la phyllotaxie. Si *a* représente la divergence par la voie courte, la divergence par la voie longue sera de 360° — *a*. On peut surtout joindre les feuilles par plusieurs hélices en en « sautant » une, deux ou plus, à chaque fois le long de chaque hélice. La spirale génétique joint ainsi les feuilles 1, 2, 3, 4, 5, etc., dans cet ordre. En « sautant » une feuille, deux hélices joindront les feuilles 1, 3, 5 d'une part, 2, 4 d'autre part, en tournant dans le sens de la voie longue. Ce sont deux *parastiques*. Les parastiques construites en sautant deux feuilles joindront les feuilles 1, 4, 7; 2, 5, 8 et 3, 6, 9. Il faudra alors trois hélices pour passer par toutes les feuilles, et elles tourneront dans le sens de la voie courte. On peut encore construire un groupe de parastiques tournant dans le sens de la voie longue et joignant les feuilles 1, 5; 2, 6; 3, 7 et 4, 8; en sautant 5 feuilles, on obtient les 5 orthostiques, qui ne sont que des parastiques particulières.

Certaines parastiques ont été distinguées sous le nom d'*hélices foliaires;* on leur a attribué une signification physiologique spéciale, laquelle ne semble pas établie.

Il arrive que les feuilles soient disposées sur deux rangs opposés sur la tige, une seule au niveau de chaque nœud : elles sont alors *alternes-distiques*. Dans ce cas, il y a deux orthostiques, et les deux voies de la spirale génétique sont d'égale « longueur ». Mais, en général, la voie courte de la spirale permet de préciser un sens de « rotation », et le plus souvent celui des rameaux axillaires est inversé par rapport à celui de l'axe porteur : il y a *hétérodromie,* alors que les axillaires sont *homodromes* entre eux. En cas de phyllotaxie alterne-distique, les feuilles définissent un plan, celui des axillaires étant confondu ou perpendiculaire à celui de l'axe père (les préfeuilles sont toutefois le plus souvent latérales dans les deux cas.)

Si plusieurs feuilles apparaissent simultanément au niveau d'un nœud, elles forment un *verticille*. Cette disposition est plus évoluée et plus récente du point de vue paléontologique. Il est probable que le moment de l'apparition de ces feuilles sur l'apex est parfois un peu différent de l'une à l'autre. Il peut, accidentellement, le devenir franchement, auquel cas la disposition verticillée est perdue, avec apparition d'entre-nœuds entre les feuilles du verticille. Beaucoup de ces verticilles ont deux feuilles opposées *(verticilles dimères),* d'autres ont trois feuilles *(verticilles trimères)* ou plus. Les verticilles sont séparés les uns des autres par des entre-nœuds, et les feuilles d'un verticille dominent l'espace laissé libre par celles du verticille sous-jacent. S'il s'agit de verticilles dimères, on obtient des « paires croisées » : la phyllotaxie est *opposée-décussée*. Toute phyllotaxie opposée est décussée; c'est seulement à la suite d'un non-développement d'un entre-nœud sur deux qu'apparaît, très rarement, une phyllotaxie *opposée distique*. Les feuilles sont alors alternes au niveau du bourgeon *(Potamogeton pectinatus)*.

Dans la disposition opposée-décussée, la spirale génétique doit joindre une feuille à la feuille voisine du même verticille, avec une divergence de 180°, alors qu'en passant à la première feuille du verticille suivant, la divergence n'est que de 90°. On peut tracer deux couples de parastiques dans un sens ou dans l'autre. Si les verticilles sont trimères, la spirale doit s'arrêter au niveau de chacun d'entre eux pour « prendre en charge » ses trois feuilles, ou bien on peut tracer un système de trois parastiques dans un sens ou dans l'autre.

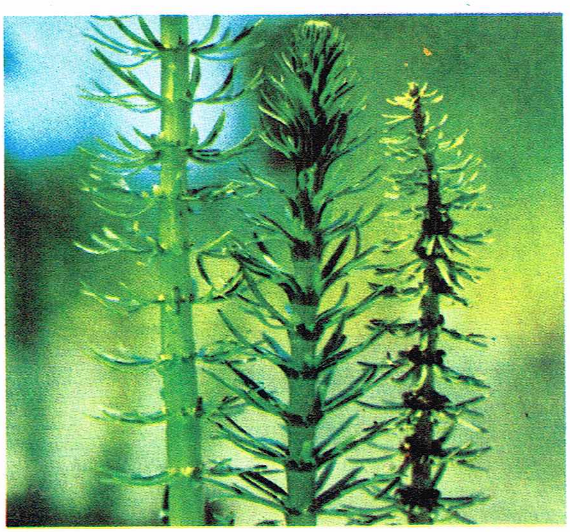

M. et S. Prato

▶ **Hippuris vulgaris *(Hippuridacées) est une plante pérenne, aquatique, dont la tige porte de nombreux* verticilles *de feuilles linéaires.***

H. Veiller - Jacana

Parfois, dans la phyllotaxie opposée-décussée, l'un des couples de parastiques semble privilégié parce que, dans ce couple, l'une des parastiques joint des feuilles à gros bourgeons et l'autre des feuilles à petits bourgeons ou à aisselles vides (Caryophyllacées, Acanthacées) : c'est l'*anisocladie* (inégalité des bourgeons) *hélicoïdale*. Mais cela ne peut servir d'argument pour attribuer à ces parastiques une valeur spéciale d'hélices foliaires, parce que d'un niveau à l'autre de la tige, le sens de ces deux hélices s'inverse souvent, c'est-à-dire qu'il faut choisir l'autre couple. D'ailleurs, d'autres phénomènes, en particulier l'anisocladie, peuvent ne pas être hélicoïdaux, mais sectoriaux, et affecter certaines orthostiques privilégiées. De la même façon, se rencontrent des différences sectoriales de morphologie des feuilles. Les feuilles semblent en fait « empilées » par l'apex selon un angle régulier et l'ensemble se comporte comme un réseau dont on peut joindre les points de diverses façons.

L'explication la plus probable de cette disposition reste encore la *règle d'Hofmeister*, qui a été un peu modernisée par Priestley et Scott : une feuille (4) apparaît dans le plus grand espace laissé disponible sur l'apex par les deux plus jeunes formées auparavant (2 et 3), mais rapprochée de l'avant-dernière par la répulsion qu'exerce encore la précédente (1), et finalement à égale distance entre 1 et 2.

La plus ou moins grande complexité du système dépend du nombre de primordiums présents à la fois sur l'apex à l'état méristématique et susceptibles d'entrer ainsi en compétition. Ce nombre est aussi celui des orthostiques.

Les auteurs qui, comme Plantefol et Loiseau, accordent une prépondérance à certaines parastiques notent évidemment que l'apex forme régulièrement une feuille sur chacune d'elles, et voient à l'extrémité de chacune un *centre générateur* de feuilles. Mais ce « centre » n'est nulle part. Il se déplace à l'apparition de chaque nouvelle feuille; pratiquement, la difficulté est la même pour expliquer le fonctionnement d'une hélice ou de la spirale : elle se trouve multipliée par le nombre d'hélices qu'on admet. On a bien fait remarquer qu'il y a une *continuité méristématique* entre deux feuilles successives d'une hélice, c'est-à-dire que le méristème formant le primordium d'une feuille est continu avec celui qui avait formé l'avant-dernière feuille (s'il y a deux hélices) et qui est encore actif. Mais cette continuité s'observe sur toutes les parastiques, en particulier sur les orthostiques, et ne permet donc d'en privilégier aucune.

On appelle *plastochrone* le temps qui sépare l'initiation de deux feuilles successives (sur la spirale) ou de deux verticilles superposés.

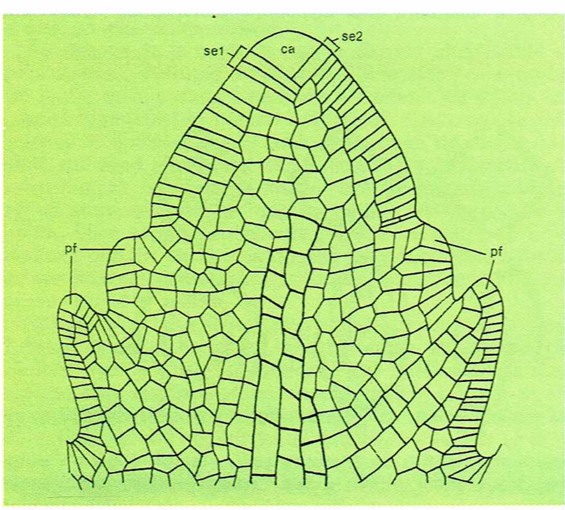

I.G.D.A.

Le méristème apical

On a cherché à mieux comprendre la naissance des feuilles en examinant le fonctionnement du méristème apical d'une manière aussi détaillée que possible. Puisque les feuilles naissent latéralement, il n'est pas surprenant que les divisions cellulaires soient plus nombreuses au niveau d'un *anneau initial,* ou *méristème de flanc,* responsable de la production de ces feuilles, qu'à celui de la pointe elle-même, dont les cellules paraissent moins méristématiques. Cette différence est plus ou moins grande, parfois nulle.

La méthode des marques colorées a été appliquée avec succès à l'étude de cette question : des marques placées sur la pointe de la tige se retrouvent assez vite dans les feuilles (Loiseau, Ball, Bugnon) : les cellules apicales se divisent donc, et leurs descendants alimentent l'anneau initial. Lyndon a trouvé que, chez le pois, les divisions de l'anneau initial ne sont pas suffisantes pour rendre compte de la croissance de la portion correspondante de la tige : il faut qu'il y ait fourniture de cellules à partir de la pointe. D'ailleurs, si le cycle mitotique des cellules de la pointe est plus long que celui des autres cellules, on a montré que toutes les cellules de l'apex finissent par absorber de la thymidine radioactive : elles synthétisent donc de l'ADN, ce qui montre bien leur préparation à la mitose, puisqu'elles ne deviennent pas polyploïdes. La longueur de ce cycle semble due à la lenteur de toutes ses phases, alors que les cellules au repos mitotique (que nous retrouverons à la pointe de la racine) ou celles des bourgeons latents présentent seulement un allongement de la phase G_1 (précédant la synthèse d'ADN) de leur cycle. Souvent, les cellules de la pointe possèdent peu d'ARN et n'en synthétisent guère; toutefois, chez l'ivraie, la moutarde ou le pois, elles en synthétisent autant que les cellules de l'anneau initial, mais le dégradent bien plus. Ceci est l'indication d'une activité particulière qui reste à expliquer.

Chez les Ptéridophytes, il y a une grande initiale tétraédrique apicale, disposée pointe en bas, au sommet de la tige. Ses divisions sont rares mais n'en produisent pas moins des cellules (segments) qui se recloisonnent fortement lorsqu'elles sont devenues subapicales et sont la source des feuilles et de la tige. Parfois, dans l'ordre des Marratiales par exemple, il semble y avoir un *groupe d'initiales apicales*. On doit se demander si de telles initiales n'existent pas chez les Phanérogames. Les cellules de la pointe, à divisions peu fréquentes, peuvent être considérées comme un ensemble d'initiales, mais si une marque rigoureusement apicale se retrouve latéralement, cela indique qu'il n'y en a pas seulement une ou même quelques-unes immuables, mais qu'elles sont susceptibles de se renouveler à partir de cellules sous-jacentes. Pourtant, chez un épilobe, Bartels a pu *voir* quatre initiales apicales, lesquelles seraient la source de tous les tissus de la pousse. L'existence de telles initiales relativement stables est probablement assez générale.

On trouve souvent des plantes dont une portion longitudinale en secteur est décolorée, le reste étant chlorophyllien. Il est clair que la mutation qui a privé une cellule de la capacité de synthétiser la chlorophylle ne s'est produite qu'une ou quelques fois. Pour que toute une moitié

◄ *L'œillet de poète,* **Dianthus barbatus** *(Caryophyllacées), présente une* **phyllotaxie opposée-décussée.**

◄▼ *A gauche, représentation schématique d'un apex végétatif (bourgeon* **d'Equisetum sp.)** *en section longitudinale; la cellule initiale (ca) se divise selon trois plans pour donner des cellules ou segments (se_1 et se_2); les protubérances foliaires (pf) présentent une cellule apicale unique qui se divise selon deux plans seulement. Ci-dessous, en haut, apex végétatifs de tiges montrant la succession des feuilles (A, de pois chiche :* **Cicer arietinum;** *B, de vesce :* **Vicia varia**); *ap, apex végétatif de la tige; st, stipule; les chiffres 1 à 4 indiquent les feuilles de plus en plus jeunes (chez* **Vicia varia,** *les segments foliaires supérieurs se transforment en vrille). Il s'agit d'une* **phyllotaxie alterne-distique.** *En bas, structure* **d'un bourgeon foliaire;** *A, bourgeon entier de lilas* **(Syringa vulgaris);** *B, le même en coupe longitudinale.*

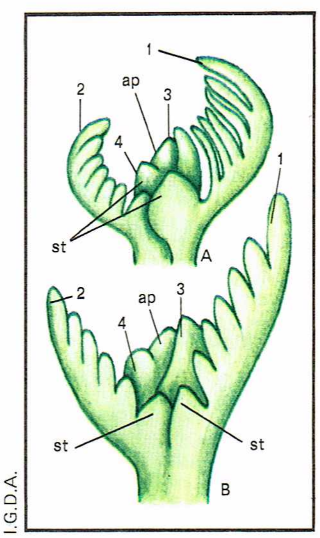

I.G.D.A.

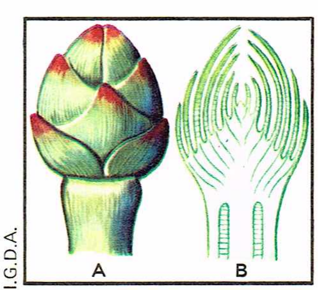

I.G.D.A.

C. de Klemm - Jacana

▲ *Les* **inflorescences polytèles** *caractérisent généralement les familles évoluées; c'est le cas de* **Centaurium umbellatum** *de la famille des Gentianacées.*

▶ *Page ci-contre, à gauche, portion de chaume de maïs* **(Zea mays)**, *avec les feuilles, montrant la gaine, base foliaire plate de la feuille, qui embrasse la tige. A droite, représentation schématique de l'architecture des principaux types de* **phyllomes végétatifs** *et de l'étamine.*

ou un quart de la pousse soit blanc, il faudrait, s'il y avait de très nombreuses initiales apicales, que toutes celles situées d'un côté eussent subi la mutation (et cela *sans exception,* sinon il y aurait des inclusions vertes dans la zone blanche), ce qui est inconcevable : l'interprétation qui s'impose est que la moitié ou le quart qui sont blancs proviennent d'une seule cellule initiale qui a muté et, par conséquent, dont toute la descendance est blanche. Il semble ainsi y avoir deux, trois ou quatre initiales chez diverses plantes (maïs, troène, épilobe).

Cette méthode d'approche des apex, utilisée en particulier par Dermen, est finalement plus fructueuse que l'étude directe, qu'elle doit en tout cas compléter. Parfois, une plante à secteur blanc redevient toute verte; il peut s'agir d'une mutation « réverse » d'une initiale, mais aussi d'une inactivation de celle-ci et de son remplacement par la descendante d'une cellule voisine, verte. C'est le cas chez l'œillet (Bugnon et Dulieu).

Lorsque le méristème apical approche de l'état reproducteur, il change souvent de structure, même en continuant à produire des feuilles (Nougarède) : sa région tout à fait apicale, si elle était inactive, subit maintenant de nombreuses mitoses, et c'est la constitution qu'il garde pendant le développement de beaucoup d'inflorescences et de fleurs. Pourtant, il existe des apex inflorescentiels à pointe peu active du point de vue mitotique, donc à structure « végétative », et Rohweder et Simon ont montré que certains apex floraux eux-mêmes sont dans ce cas (pervenche de Madagascar, balsamine, Commélinacées).

Il n'est donc plus question d'admettre, comme on avait pu le faire assez récemment, que la floraison se marque obligatoirement par un réveil de la zone de la pointe, qui serait un « méristème d'attente », ni surtout que les pièces florales ne sont pas des phyllomes parce que l'apex qui les forme fonctionne un peu différemment. Des feuilles parfaites peuvent naître d'un méristème « reproducteur » et des phyllomes reproducteurs d'un méristème « végétatif ».

Les inflorescences

Aux distinctions classiques utilisées dans l'étude descriptive (voir la botanique), on ajoutera les notions d'inflorescences *monotèles* et *polytèles,* dues à Troll.

Les *inflorescences monotèles* ne sont pas des inflorescences parfaites : l'axe se termine le plus souvent par une fleur, et ses dernières feuilles forment à leur aisselle des axes pareillement définis, ou *paraclades,* qui peuvent se ramifier à leur tour de la même façon. On passe insensiblement de la zone végétative à la zone sexuée productrice de paraclades. Un *entre-nœud de base* sépare la dernière feuille axillante d'un paraclade de la fleur terminale. L'axe primaire ne forme pas lui-même d'inflorescence nette : c'est avec ses paraclades qu'il en constitue une, qui est encore primitive. Lorsque la tige forme des fleurs isolées à l'aisselle de feuilles végétatives ou passant très progressivement aux bractées, il n'y a pas non plus d'entre-nœud de base, et chaque fleur correspond à un paraclade non ramifié.

Dans les *inflorescences polytèles,* un entre-nœud de base sépare une zone inférieure d'une zone supérieure proprement inflorescentielle, dont l'axe ne se termine généralement pas par une fleur, et produit des bractées et non plus des feuilles. Aux aisselles de ces bractées, peuvent se trouver des fleurs isolées ou de petites *inflorescences partielles.* Au-dessous de cette inflorescence terminale simple ou composée, les feuilles végétatives supérieures abritent encore des paraclades, qui constituent des *coflorescences,* organisées de la même façon que l'inflorescence principale. Cette dernière correspond, en somme, à la sexualisation intense des paraclades d'une inflorescence monotèle qui garde inférieurement d'autres paraclades normaux. D'un point de vue très général, on peut remarquer une analogie entre ce processus et celui de la naissance du néocrâne, qui, chez les Vertébrés, englobe plusieurs métamères et leurs arcs céphaliques en arrière du paléocrâne. Dans l'ensemble, les inflorescences polytèles, plus évoluées que les autres, se trouvent dans des familles plus évoluées; toutefois, il faut signaler que, parmi ces dernières, les Rubiacées par exemple montrent aussi des dispositions inflorescentielles primitives (Leroy).

Les phyllomes végétatifs

Les appendices que produit l'axe, depuis les cotylédons jusqu'aux bractées, sont homologues entre eux et des pièces florales. Ce sont des *phyllomes.* Ils sont stériles, ne formant pas de cellules sexuelles, mais peuvent être le siège d'une reproduction végétative. Ils sont toujours caducs, à de très rares exceptions près *(Welwitschia),* mais vivent plusieurs années chez les plantes à feuilles dites persistantes.

Les cotylédons sont généralement simples. Leur anatomie est intéressante parce que l'évolution vasculaire y est souvent moins poussée que dans les feuilles, et on y détecte aisément des convergents typiques. S'ils sont

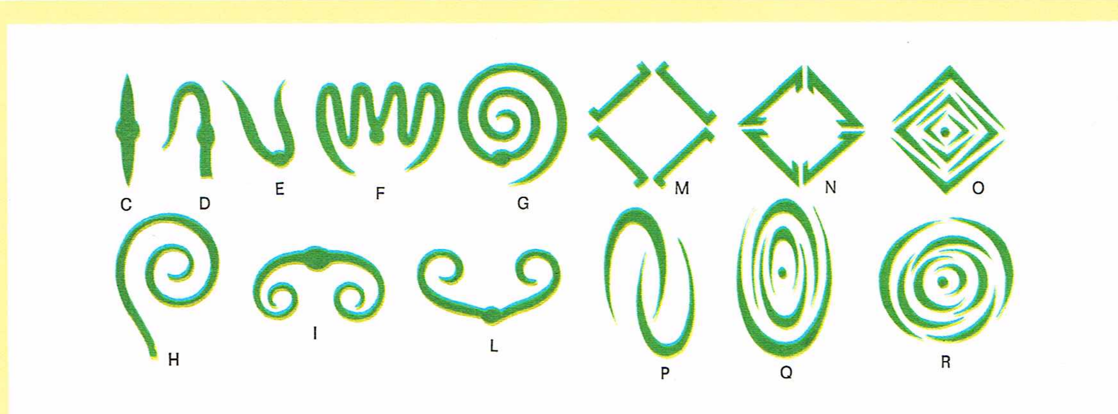

I.G.D.A.

▶ *Représentation schématique de* **préfoliation** *ou* **disposition des jeunes feuilles dans le bourgeon.** *La préfoliation peut être, en C, plane; en D, réclinée; en E, condupliquée; en F, flabellée; en G, convolutée; en H, circinée; en I, révolutée; en L, involutée; en M, redupliquée; en N, indupliquée; en O, valvaire; en P, semi-équitante; en Q, équitante; en R, imbriquée. La face ventrale (adaxiale) des feuilles est dirigée vers le haut en E, F, G, I et L, et à droite en C et D; la feuille H est vue de profil, sa face adaxiale à droite; M-R représentent des coupes de bourgeons.*

Archives P2

en principe non chlorophylliens dans la graine, il arrive pourtant qu'ils y soient verts (chez le fusain ou certains *Citrus*). Ils verdissent souvent après la germination si celle-ci est *épigée ;* ils sont alors soulevés vers la lumière par le développement de l'hypocotyle.

Ils sont pétiolés ou non, et leur limbe peut s'allonger fortement par un méristème situé à sa base, comme chez les Onagracées (celui-ci se retrouve dans beaucoup de feuilles). Au contraire, ils peuvent demeurer massifs, gorgés de réserves et plus ou moins engagés dans le sol (germination *hypogée*). Ils peuvent même rester dans la graine et servir de suçoir pour l'utilisation des réserves de l'albumen (Palmiers, Cypéracées, Graminées surtout).

Au cotylédon unique des Monocotylédones succèdent en général des feuilles disposées de façon alterne-distique, dont le cotylédon n'est que la première. Chez les Dicotylédones les cotylédons sont opposés et la phyllotaxie s'établit progressivement au-dessus, parmi les feuilles primordiales, dont la forme, simple, aide fréquemment à comprendre la morphologie modifiée des feuilles supérieures.

Assez souvent, la feuille comprend une *base foliaire* élargie et plate, par laquelle elle s'insère sur la tige et qui peut embrasser totalement celle-ci, et même être fermée autour d'elle (Cypéracées, Graminées). Les faisceaux libéro-ligneux courent parallèlement dans la base foliaire, même chez les Dicotylédones. Il n'est pas rare que cette base manque, ou soit mal définie et tardivement différenciée au cours de l'ontogénie de la feuille. Lorsqu'elle est bien développée, elle devient une *gaine*. Les régions supérieures s'interprètent aisément à partir d'une pareille *lame foliaire*.

Au-dessus, la lame de la feuille devient plus étroite et plus épaisse, et forme un *pétiole,* qui facilite l'orientation du limbe qu'il porte de manière à recevoir au mieux les rayons lumineux ; le pétiole conférerait aussi, par sa fréquente flexibilité en tous sens, un moyen de résister au vent, qui tend à arracher les feuilles. S'il y a simplement resserrement de la lame foliaire pour former le pétiole, on va souvent suivre le long du pétiole les marges de la gaine. Elles sépareront encore la face ventrale, du côté de l'axe porteur, de la face dorsale : le pétiole sera *bifacial* et ses faisceaux formeront en coupe transversale un arc ouvert du côté ventral.

Souvent, on observe de plus un plissement de la lame foliaire selon des lignes longitudinales au niveau du pétiole, avec soudure congénitale des différents plis. Les marges sont encore visibles, mais le pétiole est plus épais et sa vascularisation est tourmentée ; la *chaîne foliaire* se complique avec l'apparition de *faisceaux inversés* (à bois situé du côté dorsal). Très souvent ce plissement intervient déjà dans la gaine, qui possède alors aussi des faisceaux inversés (Guédès).

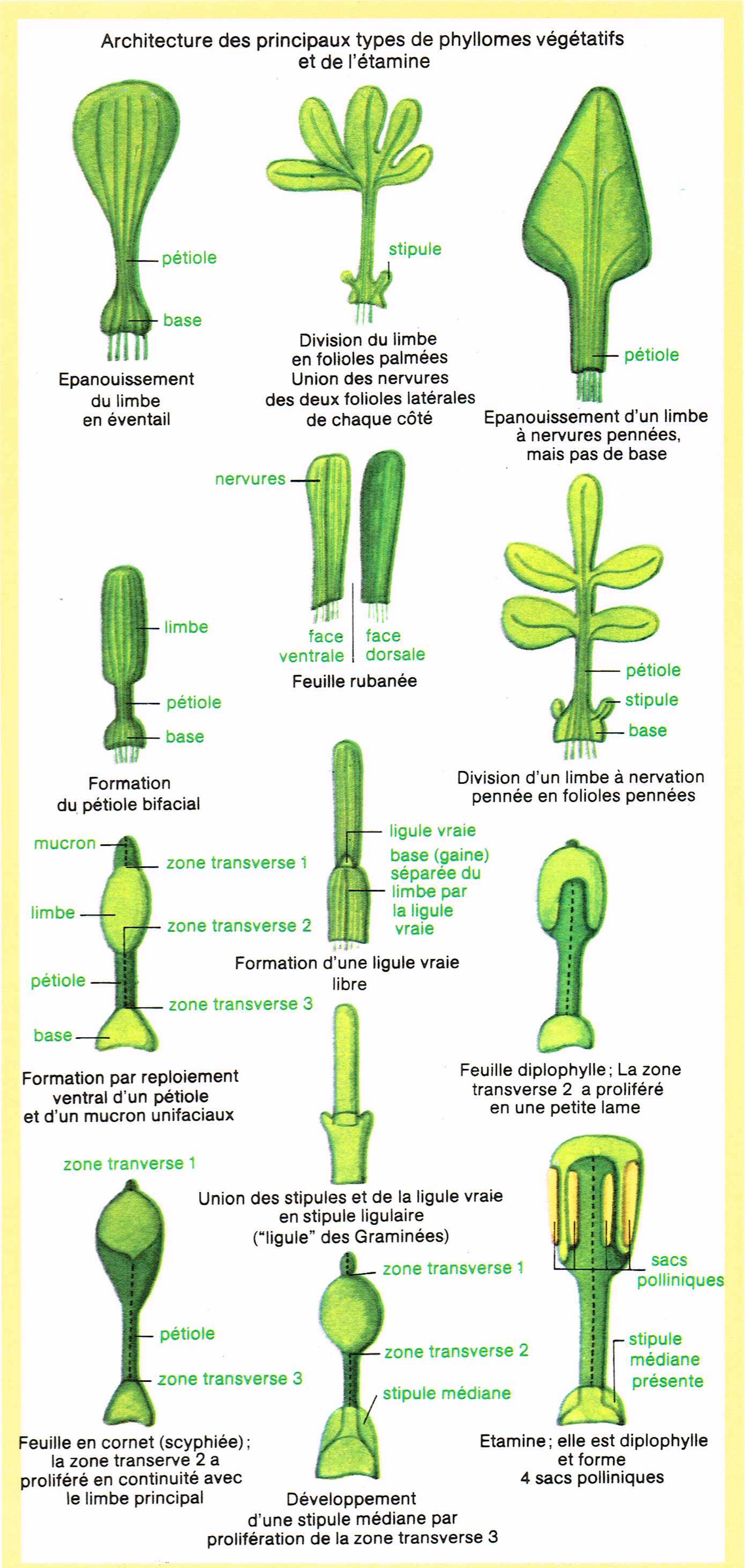

Richard Colin

M. et S. Prato

▲ **Nelumbium speciosum,** *le lotus d'Orient (Nymphéacées), est une des plus belles plantes aquatiques à feuilles peltées, arrondies, portées par de longs pétioles.*

▶ *Page ci-contre, en bas,* **bourgeon foliaire** *de marronnier* **(Aesculus hippocastanum)** *au début de son développement; on voit nettement les écailles ou cataphylles qui le protègent.*

Au niveau du passage de la gaine au pétiole, on peut aussi observer le rapprochement et l'union des marges de la gaine; il y a formation d'une *zone transverse* (Troll), et les deux marges ne se voient plus sur le pétiole : elles sont fusionnées longitudinalement et ventralement. Dans ces conditions, le pétiole ne montre plus de face ventrale : il est *unifacial,* et ses faisceaux sont en général disposés en cercle, ceux du côté ventral étant plus petits. Si les deux faisceaux les plus ventraux sont unis en un seul, c'est le *ventro-médian,* par opposition au *dorso-médian,* qui est le faisceau principal, dorsal, du pétiole.

Au-dessus du pétiole, la lame foliaire s'épanouit largement en un *limbe*. Si le pétiole est bifacial, elle n'a qu'à s'étendre et éventuellement se déplisser, mais elle reste plissée au moins au niveau de la nervure médiane, qui présente donc encore des faisceaux inversés. Les marges du limbe poursuivent celles du pétiole bifacial. Si, au contraire, le pétiole est unifacial, les marges qui y étaient unies doivent se libérer pour se continuer par celles du limbe : il y a formation d'une nouvelle zone transverse.

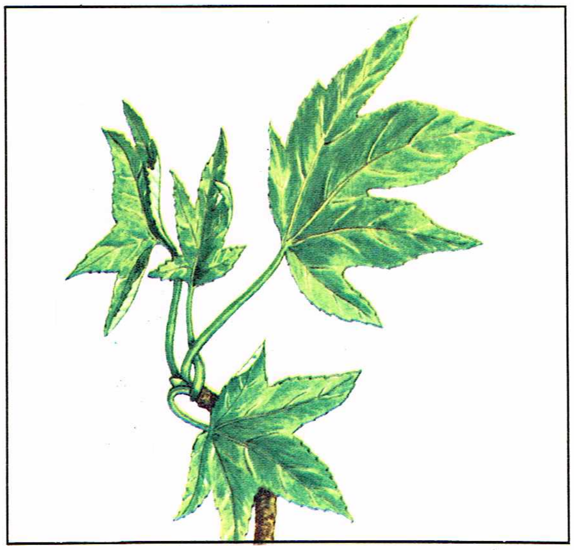

L. Biagini

▶ *Le liquidambar forme des rameaux courts à feuilles alternes.*

Celle-ci se manifeste souvent par un simple bourrelet, mais il peut s'y former une foliole, dite transverse (Troll), ou bien une portion de limbe continue avec le limbe dorsal usuel. La feuille est alors *peltée* et son pétiole semble inséré sur le dos et non sur le bord du limbe (capucine). Dans ce cas, si le limbe est en cornet au lieu d'être plat, la feuille est *ascidiée.* Seules les feuilles dont le pétiole est unifacial peuvent être peltées ou ascidiées. Parfois aussi un élément de limbe en forme de foliole transverse formé par la zone du même nom est soudé suivant sa région longitudinale médiane à la région opposée du limbe principal : la feuille est alors *diplophylle*. Cette disposition, très rare à l'état végétatif, est celle de toutes les *étamines*.

La zone transverse inférieure, au bas du pétiole, peut également former une lame foliacée, ou *stipule médiane*. Si le pétiole est bifacial, la face ventrale, apparente à ce même niveau, peut aussi produire une ou plusieurs petites écailles, lesquelles constituent une *ligule vraie* (Troll), comme chez des Apocynacées ou Asclépiadacées (Guédès). Si cette ligule s'unit à des stipules portées par la marge voisine, il y a formation d'une *stipule ligulaire,* par exemple, la « ligule » des Graminées.

Les *stipules* ne sont en effet que de petites folioles qui, au lieu d'être formées en haut du pétiole, le sont en bas, sur les marges de la base. Elles prennent parfois la forme de vraies folioles, voire de petites feuilles (pensée, gaillets). En général, elles se développent fortement quand le primordium foliaire est encore tout jeune, et protègent sa partie supérieure (développement *proleptique*). Elles cessent ensuite de croître, et peuvent être relativement très petites à l'état adulte. Les stipules donnent souvent l'impression de s'insérer sur la tige si la base est réduite; cependant, l'étude de leur anatomie, qui montre qu'elles sont irriguées par les faisceaux latéraux du pétiole, et l'étude de celle des primefeuilles des rameaux, où la base est plus nette, permettent de saisir leur signification.

Il existe, en général, deux stipules, une de chaque côté, mais il peut y en avoir deux ou plus de part et d'autre (sureau, Rubiacées Rubioïdées). Si les feuilles sont opposées, leurs deux stipules adjacentes peuvent s'unir en une seule, qui prend souvent tout à fait la forme d'une stipule simple, mais tend pourtant à se diviser en deux à certains nœuds (stipule *interpétiolaire*). Les stipules peuvent être représentées par des épines (robinier) ou de simples glandes (Crucifères).

Le *limbe* de la feuille est simple ou divisé en folioles. Dans une plante donnée, on trouve très souvent des intermédiaires entre des feuilles simples et des feuilles composées de folioles : ces dernières s'unissent, ou bien le limbe se découpe. Il n'y a aucune différence fondamentale entre les deux dispositions.

Les nervures de la feuille simple sont disposées de façon *palmée* lorsqu'elles divergent à partir du sommet du pétiole, et de façon *pennée* lorsqu'elles sont insérées latéralement de part et d'autre de la *nervure médiane* qui prolonge le pétiole. Là encore, il n'y a pas de différence fondamentale entre les deux organisations. L'étude de la vascularisation montre que les nervures pennées se continuent longitudinalement dans la nervure médiane. Elles s'en écartent d'autant plus haut qu'elles sont plus proches de sa ligne médiane, au lieu de s'écarter toutes en même temps au sommet du pétiole, comme dans l'autre cas (Guédès). La nervure médiane devient donc de plus en plus frêle en allant vers la pointe. L'examen de feuilles dont un secteur est blanc par mutation d'une des initiales du primordium foliaire (qui sont en petit nombre) révèle la même architecture (Bugnon et Dulieu).

Chez les Monocotylédones, la nervation du limbe est souvent parallèle : c'est que les nervures ne sont ni épanouies, comme dans la nervation palmée, ni rapprochées partiellement en nervure médiane, comme dans la nervation pennée. La feuille est *rubanée,* mais elle n'est pas essentiellement différente de celle des Dicotylédones.

Il arrive que les marges du limbe convergent ventralement vers la pointe en une nouvelle zone transverse. Un petit mucron unifacial se forme alors (tulipe, jacinthe). Parfois, chez les Monocotylédones, toute la portion située au-dessus de la base est unifaciale, avec évidemment interposition d'une zone transverse. C'est alors l'ensemble du pétiole et du limbe qui prend l'aspect d'un pétiole unifacial (divers *Allium* et joncs). Un mucron *bifacial* correspondant à celui des feuilles de tulipe ou de jacinthe

D. Lecourt - Jacana

peut aussi exister chez des Dicotylédones (Cucurbitacées) ; dans les deux cas, il se forme le premier au cours de l'ontogénie du limbe dont le reste apparaît en dessous, par croissance intercalaire.

Les feuilles *composées* ont un limbe divisé en folioles, qui en sont des portions irriguées par les nervures maîtresses : elles seront donc soit pennées, soit palmées. Dans le premier cas, un prolongement du pétiole correspondant à la nervure médiane prend le nom de *rachis*. Celui-ci peut être unifacial, au moins en partie, si le pétiole l'est (Troll, Guédès).

Il arrive que des feuilles composées soient réduites à leur pétiole ou à leur pétiole et leur rachis : ce sont des *phyllodes*. Dans ce cas, d'autres feuilles de la même plante ou de plantes d'espèces voisines (acacia, Ombellifères) montrent ces folioles et permettent donc de prouver l'hypothèse d'une réduction.

Le long d'un rameau, la succession des feuilles rappelle celle de la pousse principale issue de la graine. La ou les deux premières feuilles, presque verticillées, sont les préfeuilles. Elles sont séparées le plus souvent de la zone d'insertion, par une sorte d' « entre-nœud », ou *hypoprophylle*. Si celui-ci manque, la ou les préfeuilles « bloquées » dans l'aisselle peuvent émettre un fort rameau axillaire (vigne). La préfeuille unique des Monocotylédones correspond très généralement à un seul phyllome, dont la nervure médiane et une des deux nervures latérales principales sont les seules développées et occupent deux carènes (préfeuille bicarénée). Cette préfeuille est adossée à la tige par l'espace compris entre les carènes. Celles-ci sont parfois occupées par deux nervures latérales, la médiane manquant. Chez les Dicotylédones, il y a deux préfeuilles, en principe disposées à droite et à gauche. Il arrive qu'elles soient unies en une seule pièce adossée en apparence (lierre), ou qu'il y ait véritablement une seule préfeuille (vigne).

La phyllotaxie du rameau s'établit progressivement au-dessus des préfeuilles comme au-dessus des cotylédons. Dans certains cas, des préfeuilles ont la forme de petites feuilles entières, mais elles sont souvent réduites à des bases. Les premiers phyllomes qui les suivent sont fréquemment de morphologie plus simple que les suivants, qu'ils permettent d'interpréter.

Chez les arbres en particulier, le bourgeon axillaire est dormant la première année, et ses premiers phyllomes sont représentés par des écailles épaisses, ou *cataphylles*, séparées par des entre-nœuds extrêmement courts qui protègent le point végétatif pendant l'hiver. Les deux inférieures sont les préfeuilles. Lorsqu'au printemps le bourgeon *débourre*, les écailles s'écartent et tombent, tandis que le point végétatif reprend son activité ; mais les premiers phyllomes qu'il forme sont souvent de morphologie intermédiaire entre celles des écailles et des feuilles. Toujours chez les arbres, les préfeuilles et écailles peuvent correspondre à la base foliaire (groseillier), au pétiole (érable), à l'ensemble de la feuille (troène), à la pointe du limbe (quelques fusains), mais aussi aux stipules (hêtre, chêne) ; il y a, dans le dernier cas, deux fois plus d'écailles que de phyllomes.

Le bourgeon terminal des arbres est particulier. Puisqu'il domine un axe qui a formé auparavant des feuilles parfaites, et n'en représente pas une ramification, ses cataphylles inférieures ne sont pas des préfeuilles, mais s'intègrent à la phyllotaxie de l'ensemble de la tige qu'il

▲ *Les* **feuilles composées,** *ici de* **Gleditsia triacanthos,** *ont un limbe divisé en folioles, qui en sont des portions irriguées par les nervures maîtresses.*

Archives P2

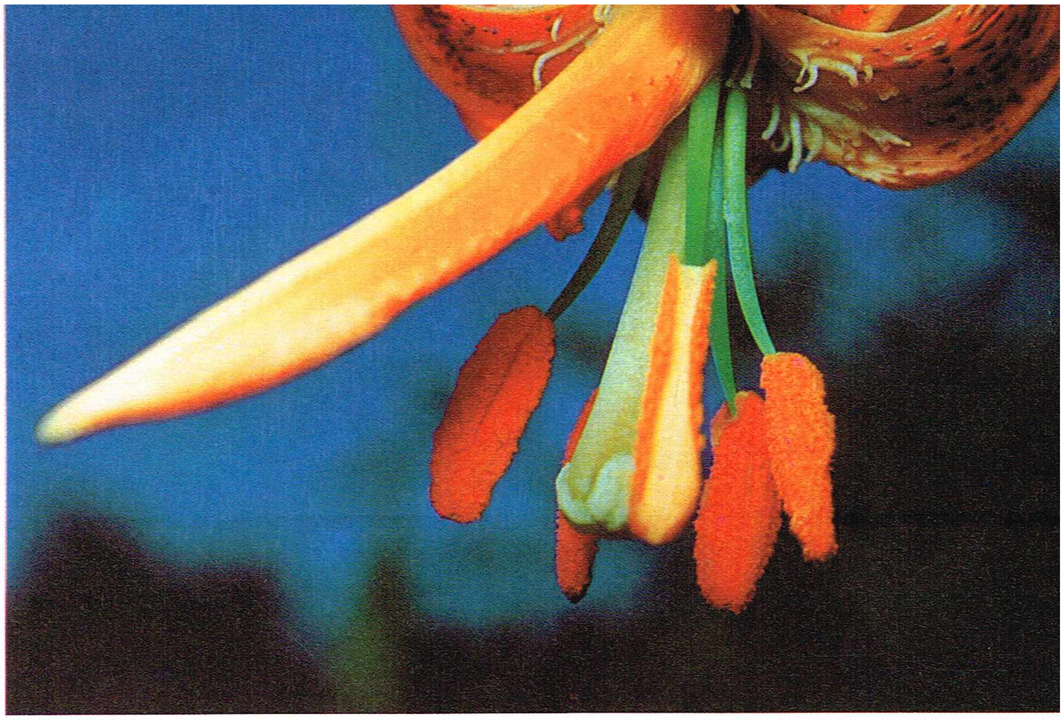

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato Ermie - Jacana

▲ *A gauche,* **fleurs et bractées** *de bougainvillées.* *A droite,* **Lilium martagon,** *le lis martagon; il se trouve en France dans les prairies et les bois de montagne; au sommet de la haute tige, trois à huit fleurs pendent en grappe; les tépales, rose violacé, sont recourbés et dressés à partir du milieu.*

domine. Après avoir formé des feuilles, celle-ci produit souvent des phyllomes intermédiaires entre les feuilles et les cataphylles avant les cataphylles vraies.

Les phyllomes bractéaux et floraux

Lorsqu'une pousse fleurit, elle forme au-dessus des feuilles végétatives proprement dites des feuilles plus réduites, puis des phyllomes spéciaux rassemblés en une sorte de bourgeon terminal, qui est une fleur : c'est le cas de la fleur isolée de tulipe.

Si les fleurs sont groupées en inflorescence, les rameaux de celle-ci sont à l'aisselle de bractées, lesquelles sont plus ou moins distinctes des feuilles et correspondent, suivant les cas, à leurs diverses parties comme les cataphylles auxquelles elles font parfois directement suite (Rosacées arborescentes).

Une fleur terminale correspond à un bourgeon terminal et n'a pas de préfeuilles. Une fleur d'inflorescence située à l'aisselle d'une bractée est un bourgeon axillaire, et l'axe de celui-ci porte très normalement une préfeuille (Monocotylédones) ou deux préfeuilles, nommées *bractéoles*. Celles-ci peuvent être situées à divers niveaux du pédoncule floral; elles manquent parfois, et les sépales inférieurs sont alors disposés latéralement comme l'auraient été les bractéoles : ce sont eux qui sont en fait les bractéoles (Eichler). Ailleurs, elles sont simplement avortées et les sépales placés comme si elles existaient.

En général, le pédoncule floral forme les phyllomes floraux immédiatement après les bractéoles, mais il peut produire des bractées intermédiaires à aisselles vides (Éricacées). Les bractéoles (ou l'une d'elles) forment à leur aisselle des rameaux inflorescentiels dans les dispositions cymeuses. Le rameau axillaire de premier ordre de l'inflorescence peut évidemment aussi être un axe allongé avec, au-dessus de ses préfeuilles, de nombreuses bractées abritant chacune un rameau de second ordre avant d'être ou non terminé par une fleur.

La fleur, comme la tige, est généralement à symétrie axiale : elle est alors *actinomorphe*. Elle acquiert souvent une symétrie bilatérale, et devient *zygomorphe*, ce qui implique qu'elle soit située latéralement. Il n'existe pas de fleurs zygomorphes terminales; celles qui deviennent terminales acquièrent aussi l'actinomorphie : elles deviennent *pélorіées* (Labiées, Scrofulariacées). La zygomorphie semble liée à l'adaptation à la pollinisation par des Insectes volants à longue trompe.

La fleur comporte d'abord, fondamentalement, un ensemble de pièces vertes en phyllotaxie le plus souvent quinconciale (chez les Dicotylédones); ce sont les *sépales* qui forment le calice. Les sépales naissent successivement, comme des feuilles. Ils sont parfois soudés en un tube et naissent ainsi; leur union est congénitale. Il n'y a que trois sépales chez les Monocotylédones; comme ils sont souvent peu différents des pétales, on les appelle alors, comme ces derniers, des *tépales* (Candolle). Les pétales se trouvent au-dessus des sépales, donc à l'intérieur de la coupe formée par ces derniers. Ils forment la *corolle*. Les sépales ne constituent pas un vrai verticille, si leur naissance est successive et si les entre-nœuds qui les séparent ne sont pas tout à fait nuls; les pétales alternent avec eux. La fleur semble adaptée à la mise en évidence des pétales, qui attirent des Insectes pollinisateurs. Les pétales naissent simultanément et sont souvent soudés congénitalement en tube au moins vers le bas *(corolle gamopétale)*, disposition plus évoluée que l'état libre. Il est exceptionnel que leur soudure soit postgénitale. Sépales et pétales, qui peuvent manquer ensemble ou isolément, sont stériles et constituent le *périanthe*.

Au-dessus des pétales, se trouve l'*androcée*, formé de phyllomes mâles, ou *étamines*. Il s'agit de pièces diplophylles (Baum, Leinfellner), dont les marges du limbe principal et celles de l'élément antérieur porté par la zone transverse se creusent de quatre *sacs polliniques*, où s'isolent les cellules mâles. Le limbe diplophylle, qui prend ici le nom d'*anthère*, peut ne pas être tout à fait homologue du limbe de la feuille et ne correspondre qu'à

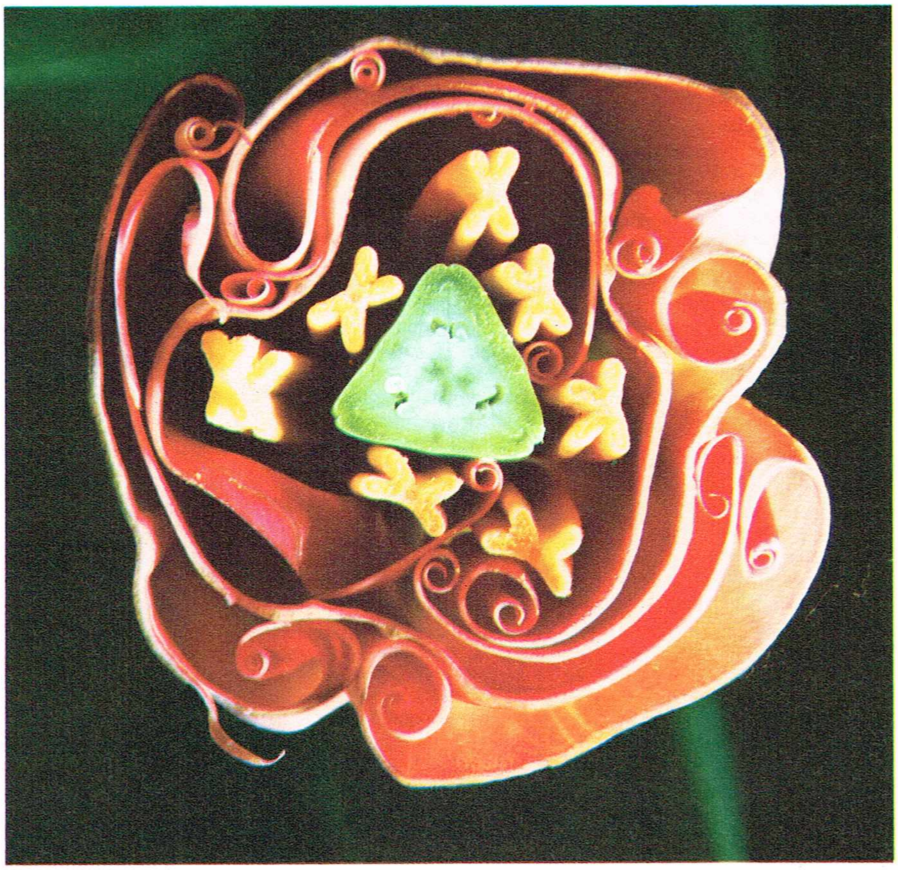

Archives P2

une portion supérieure ou moyenne de celui-ci. Le pétiole, ou filet, peut dominer une base, et, comme il est nécessairement unifacial, il n'est pas surprenant que puisse exister une stipule médiane (chez certaines Crucifères).

Il y a, dans beaucoup de cas, deux verticilles d'étamines, dont les pièces alternent entre elles. Si les pièces du premier verticille alternent avec les pétales, il y a *diplostémonie*. Lorsque le premier verticille a des pièces opposées aux pétales, il y a *obdiplostémonie :* en fait, il s'agit alors du second verticille, qui se trouve déplacé vers l'extérieur par une déformation sectoriale régulière de l'axe floral (Stroebl, Leins, Gelius). Par contre, lorsqu'il n'y a qu'un seul verticille d'étamines, il peut être véritablement opposé aux sépales si ces derniers existent seuls. S'il est opposé aux pétales, alors présents, il faut envisager la possibilité qu'un premier verticille soit manquant; un tel phénomène est établi chez les Primulacées, où le verticille manquant peut être représenté par des staminodes, étamines stériles et écailleuses. La zygomorphie s'accompagne d'une réduction plus ou moins importante de l'androcée.

Il est possible que, dans certains cas, les pétales proviennent d'étamines stérilisées, avec lesquelles ils présentent de nombreux intermédiaires. Beaucoup de pétales sont en particulier diplophylles. L'écaille nectarifère de ceux de nombreuses renoncules est ainsi le limbe surnuméraire de la zone transverse. Cependant, les pétales et les étamines semblent provenir de phyllomes sexués ancestraux de morphologie intermédiaire (Hiepko).

Dans les familles primitives, les étamines sont nombreuses et disposées en spirale, comme les feuilles végétatives; on peut tracer de nombreuses parastiques dans leur ensemble : l'androcée est *polystémone* (Magnoliacées, Renonculacées). Ce cas est à distinguer soigneusement de la multiplication secondaire d'étamines en nombre fondamentalement limité et représentant un ou deux verticilles, ce qui correspond à une disposition très spécialisée (Pæoniacées, Hypéricacées); il y a alors formation de faisceaux d'étamines à la place d'une seule, et il est préférable de parler d'androcée *méristémone* (à étamines divisées) que polyadelphe (à étamines soudées en faisceaux). On a montré récemment, dans des plantes à étamines simples (tabac), que la section d'un jeune primordium staminal conduit à l'apparition de deux étamines (Hicks). Dans l'androcée méristémone, la multiplication est spontanée et bien plus intense, mais le phénomène est le même. Les étamines peuvent avoir leurs filets unis entre eux en tube, ou surtout unis à la corolle lorsque les pétales sont unis en tube.

Au-dessus de l'androcée, on trouve le *gynécée,* formé de phyllomes femelles, ou carpelles, isolés ou, plus souvent, unis soit postgénitalement (Apocynacées, Asclépiadacées), soit (le plus souvent) congénitalement, au moins en bas. Ils peuvent être nombreux et spiralés s'ils sont libres; ils sont parfois disposés en deux verticilles, mais en général en un seul, de position variable par rapport à l'androcée, et sont souvent en nombre inférieur à celui des sépales ou pétales. Il n'y a parfois qu'un seul carpelle par fleur.

Les carpelles sont repliés longitudinalement et leurs marges forment les *ovules,* qui sont des folioles particulières (Celakovsky, Guédès). Ceux-ci se trouvent enclos dans la cavité constituée par le carpelle solitaire ou uni à ses voisins (placentation *axile*), ou bien dans la cavité commune formée par les carpelles unis les uns aux autres mais non repliés (placentation *pariétale*).

Les ovules disposés en une seule rangée sont fondamentalement *marginaux,* mais la prolifération de la région dorsale du carpelle près de leur insertion fait apparaître de fausses marges, qui ont fait croire qu'ils étaient insérés sur la surface ventrale. Ils peuvent être multipliés sur les bords et portés par des placentas massifs, dont la signification n'est pas bien claire. Les cas de placentation réellement *laminale,* où les ovules nombreux sont, en apparence au moins, portés par la face ventrale du carpelle *(Butomus, Papaver),* restent aussi à interpréter.

Deux placentas voisins appartenant à deux marges adjacentes de carpelles différents peuvent s'unir en un seul, mais les ovules, s'ils sont anatropes, sont alors courbés à gauche et à droite, c'est-à-dire vers la nervure médiane du carpelle auquel ils appartiennent.

Le carpelle correspond à diverses portions de la feuille, mais ses homologies restent à préciser dans chaque cas. Il est très généralement ascidié, et montre effectivement un pétiole unifacial, mais qui ne correspond pas forcément à celui de la feuille ou au filet de l'étamine. Quand les carpelles sont unis, ces pétioles le sont très généralement, mais peuvent souvent être reconnus grâce à l'anatomie et

◀ ***Page ci-contre, en bas, section transversale d'une jeune fleur de tulipe légèrement double*** **(Tulipa gesneriana)*;*** ***on voit très nettement de l'extérieur vers l'intérieur les*** **tépales,** ***les*** **étamines** ***(androcée) et le*** **pistil** ***(gynécée). Ce dernier est normal, mais il y a sept étamines, dont une anormale, et sept tépales.***

▼ ***Représentation schématique des différentes structures de*** **carpelle.**

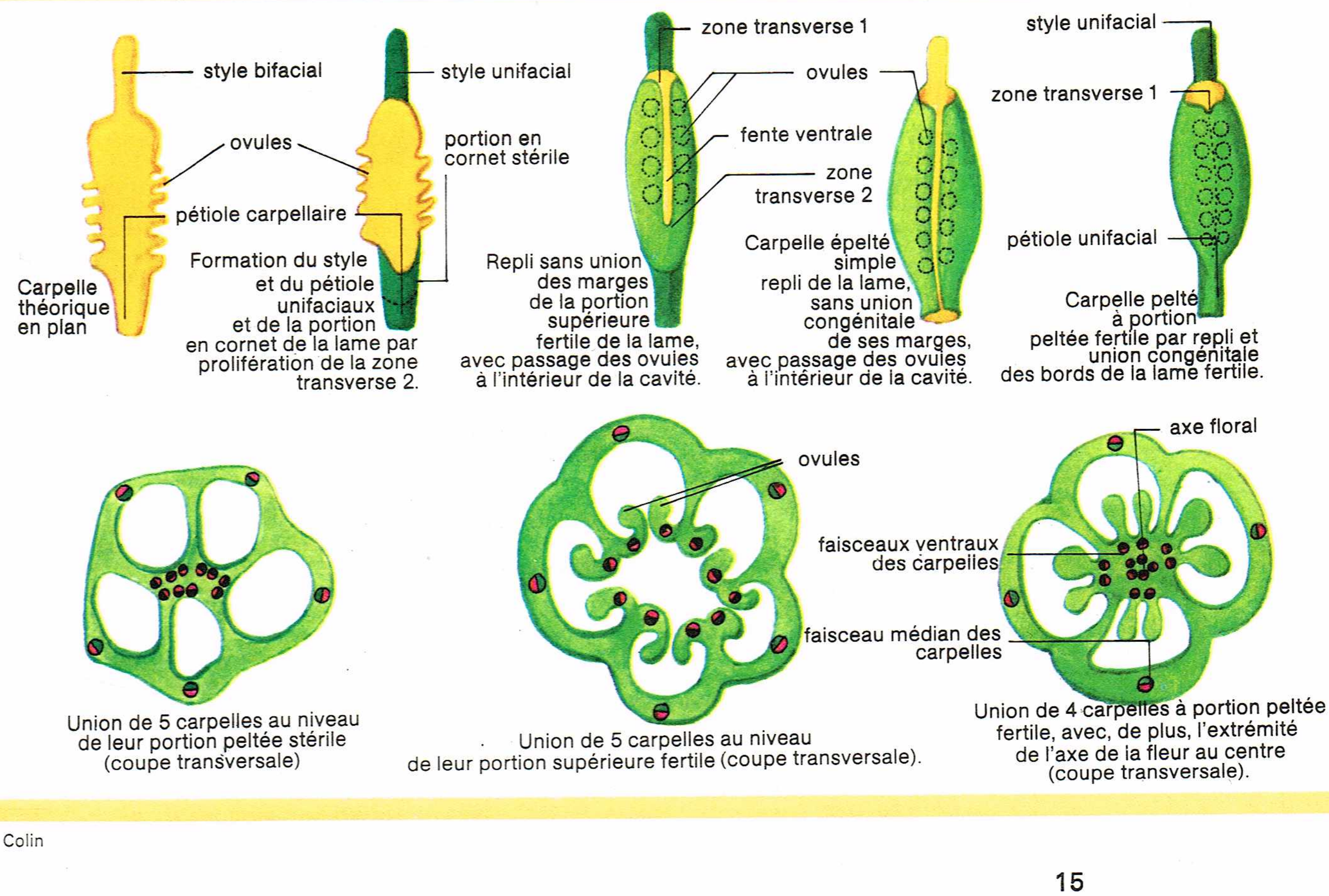

Richard Colin

▶ ***Caryopse de blé en germination.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

la tératologie. Souvent, la région ascidiée est stérile, les marges unies congénitalement n'ayant pas formé de folioles ovulaires.

L'état ascidié des carpelles est souvent masqué parce que, au-dessus de la zone transverse qui domine la région ascidiée, les marges sont soudées postgénitalement. Il est donc d'un grand intérêt d'étudier le carpelle jeune pour en comprendre la structure.

Les carpelles ne sont vraiment unis en un gynécée *syncarpe* que si cette union est congénitale, au moins en bas; sinon, il y a encore *apocarpie,* comme lorsqu'ils sont libres.

Les ovules sont des folioles elles-mêmes ascidiées et ligulées de façon complexe (Guédès). Ils ont le plus souvent deux téguments, enveloppant leur pointe (apex de la nervure médiane de la foliole), qui est le *nucelle* et où se différencie la cellule femelle. Certains ovules sont *unitegminés* (munis d'un seul tégument) par soudure, souvent imparfaite au sommet de leurs deux téguments (Rosacées, Renonculacées). Chez la plupart des Gamopétales au contraire, l'ovule est réellement unitegminé, et son tégument unique correspond au tégument *interne* des ovules bitegminés.

Le pétiolule de la foliole ovulaire est le *funicule*. Les téguments laissent ouvert, à l'extrémité opposée à son insertion, un orifice ou *micropyle*. Mais, le plus souvent, l'ovule est replié sur son funicule et soudé à lui le long d'un *raphé :* il est *anatrope,* alors qu'il était auparavant *orthotrope*. Cette dernière disposition, d'apparence plus simple, semble plus évoluée, au moins chez les Monocotylédones (Sporne). L'ovule *campylotrope* est intermédiaire. Le nucelle peut aussi proliférer du côté du raphé et déterminer une courbure supplémentaire : l'ovule devient alors *amphitrope*.

La région supérieure des carpelles s'allonge en style terminé par le stigmate qui reçoit le pollen. Le style est sans doute le plus souvent unifacial (Baum. Guédès). Style et stigmates des carpelles d'un même gynécée sont souvent unis.

En apparence l'*ovaire,* formé par les portions inférieures ovulifères des carpelles, est souvent situé sous la fleur; il est *infère*. On ne sait pas encore si dans ce cas les régions inférieures des pièces du périanthe et de l'androcée se sont unies à lui, ou si une coupe formée par l'axe de la fleur a déplacé vers le haut l'insertion de ces pièces et s'est soudée à l'ovaire.

Les différents verticilles floraux sont en général rapprochés les uns des autres, mais l'axe peut s'allonger entre certains d'entre eux. En dessous de l'androcée, l'entrenœud sera un *androgynophore;* en dessous du gynécée il sera un *gynophore*. L'axe s'épuise en produisant les carpelles, mais souvent il en subsiste au milieu de ceux-ci un moignon, qui sert à la cohésion centrale du gynécée. Tératologiquement, il peut poursuivre sa croissance et former soit une fleur emboîtée dans le gynécée de la première *(surfleur)* et qui peut montrer à son tour le même phénomène, soit un rameau inflorescentiel ou végétatif. La fleur est alors *prolifère*.

Les hypothèses d'après lesquelles tous les ovules sont portés par l'axe floral chez certaines Angiospermes sont dénuées de fondement. Tout au plus a-t-on vu que, chez un millepertuis, en plus des très nombreux ovules normaux, quelques-uns peuvent effectivement être formés par la pointe de l'axe floral, entre les placentas ordinaires (Dupuy et Guédès).

Beaucoup de fleurs sont *unisexuées*. Ou bien alors il manque l'un des deux appareils sexués, qui peut réapparaître occasionnellement; c'est l'*unisexualité par avortement,* qui est évoluée. Ou bien, semble-t-il, le verticille mâle ou femelle n'existe véritablement pas, et l'apparition de l'autre sexe ne peut se faire que par transformation du seul verticille présent (chanvre, houblon). Cette unisexualité vraie est peut-être primitive.

Les phyllomes floraux n'abritent pas de bourgeons axillaires, mais ceux-ci peuvent apparaître tératologiquement et être floraux ou végétatifs, même à l'aisselle des étamines et des carpelles. On voit que cet accident est très aisé à comprendre et ne doit en aucun cas conduire à admettre que les fleurs où on le constate, et qui sont très variées (Convolvulacées, Malvacées, Crucifères, Solanacées), sont des inflorescences contractées, ce qu'on a malheureusement fait, dans le cas des Crucifères en particulier !

La racine

Opposée à la plumule, ou bourgeon terminal de l'embryon, se trouve la *radicule,* qui, lors de la germination, se développe en une racine, bientôt ramifiée. Celle-ci naît profondément chez les Graminées, mais aussi chez la capucine, et les tissus périphériques qu'elle perfore pour sortir demeurent autour de sa base sous forme d'un étui, ou *coléorhize*.

La racine est, en principe, à géotropisme positif et, sauf exception, dépourvue de chlorophylle. Elle s'allonge, chez les Angiospermes, grâce à des cellules initiales disposées en trois couches, qui ne sont pas toujours distinctes. La région sous-jacente à celles-ci, du côté du collet, est peu active mitotiquement. C'est le *centre quiescent* (Clowes); mais, à la différence des cellules de la pointe de l'apex de la tige, les siennes souffrent seulement d'un allongement de la phase G_1 de leur cycle mitotique. Elles se « réveillent » si la région plus proche du collet, mitotiquement active, a été détruite par irradiation, à laquelle, n'étant pas occupées à synthétiser leur ADN, elles sont bien moins sensibles.

Vers la pointe, des initiales communes peuvent donner le *rhizoderme* (épiderme de la racine) et la *coiffe,* formation apicale conique coiffant la racine (Dicotylédones), ou bien les initiales les plus apicales ne donnent que la coiffe (Monocotylédones). Cette coiffe aide à la progression de la racine dans le sol en protégeant le méristème terminal et parce que ses cellules s'entourent d'un mucilage lubrifiant produit par leur appareil de Golgi. Elle a, par ailleurs, un rôle inhibiteur de la croissance de la racine et semble commander son orientation en direction du sol *(géotropisme)*.

La racine progresse rapidement dans le sol, à la recherche de nouvelles régions humides. A une certaine distance de la pointe, les cellules de son assise externe (rhizoderme), qui ne correspond pas tout à fait à l'épiderme de la tige parce que cette assise n'est pas continue autour de la pointe chez les Monocotylédones et y est hypertrophiée en coiffe chez les Dicotylédones, forment par protrusion des *poils absorbants,* par où pénètrent l'eau et les substances que celle-ci contient en solution. Au-dessus, les poils disparaissent, quoique l'absorption puisse encore avoir lieu.

Les tiges souterraines (rhizomes) des Dicotylédones forment des racines adventives, de même que les stolons,

Archives P2

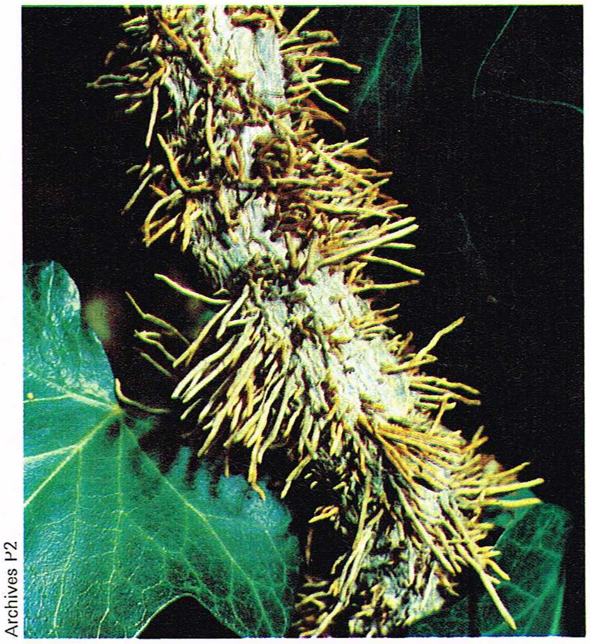

Archives P2

◀ *A gauche, partie basale de la tige de maïs* (Zea mays) *montrant les* racines adventives. *A droite,* racines adventives, *pointues, de lierre ; elles permettent aux longues tiges de la plante de s'agripper aux écorces et aux pierres.*

et elles sont souvent en relation précise avec les insertions foliaires, comme chez les Labiées.

Adventives ou non, les racines ne forment pas d'appendices autres que leurs poils absorbants. Si elles se ramifient souvent très abondamment, la ramification n'est évidemment pas axillaire ; elle est de plus endogène. Ce sont des cellules profondes de l'endoderme (Ptéridophytes) ou du péricycle (Spermaphytes) qui se divisent pour produire un rameau, lequel doit faire effraction à travers l'écorce. Cette ramification se produit assez loin de l'apex. Elle semble aussi contrôlée par des corrélations de croissance mettant en cause la pointe de la racine porteuse (la mort ou le ralentissement de celle-ci cause la ramification). Elle ne se localise pas au hasard, mais les rameaux naissent en face, ou de part et d'autre, des faisceaux ligneux, et l'on peut parler de *rhizotaxie,* comme on parle de phyllotaxie.

Comme les tiges, les racines sont souvent tubérisées et servent d'organe de survie pendant la période de repos. A la reprise de la végétation, ou bien la même tige, demeurée à l'état de rosette, commence son allongement (betterave), ou bien des rameaux axillaires de la base des pousses annuelles précédentes assurent la formation de nouvelles pousses tandis que la racine continue à s'épaissir (bryone, *Phytolacca*).

Il arrive fréquemment chez les arbres que les racines forment des bourgeons adventifs, qui sont à l'origine de drageons. Les racines des arbres s'anastomosent souvent entre elles, formant des sortes d'individus secondaires de la même espèce. Très exceptionnellement, le méristème apical de la racine peut former lui-même, d'une manière encore mal connue, un bourgeon adventif (*Neottia* et quelques autres Orchidées). Il arrive même, chez des Orchidées, qu'une sorte de racine très particulière forme un manchon autour d'un stolon (Kumazawa).

Conclusion sur la métamérie du végétal

Le végétal est formé de pousses dont la première est née de la plantule, et dont les autres sont nées de bourgeons axillaires, ou parfois adventifs, de la première et des suivantes. Bourgeons adventifs et axillaires sont localisés de façon précise sur le corps de la plante. Un végétal est, de ce point de vue, une colonie de pousses toutes potentiellement capables de former un bourgeon floral ou inflorescentiel terminal. Il s'agit déjà d'une sorte de métamérie, ou répétition ordonnée dans le corps d'un organisme d'une sorte de monomère biologique.

De plus, chaque pousse est elle-même constituée par la répétition de métamères, dont l'existence est signalée par les phyllomes cotylédonaires ou préfoliaires, végétatifs, puis bractéaux et floraux. Cette métamérie se manifeste aussi dans l'anatomie de la tige. La stèle primaire est en effet constituée de faisceaux en relation avec les feuilles. Les faisceaux proprement caulinaires sont très rares. Les faisceaux correspondant à une feuille descendent en général bien en dessous du nœud qui la porte. Aussi la stèle est-elle divisée en éléments intriqués en rapport avec les feuilles (Majumdar, Priestley, Duchaigne). La moelle échappe à cette métamérisation, de même que la pointe de l'apex, siège des cellules initiales.

BIBLIOGRAPHIE

BIERHORST D.W., *Morphology of Vascular Plants,* New York, 1971. - CLOWES F.A.L., *Apical Meristems,* Oxford, 1961. - DORMER K.J., *Shoot Organization in Vascular Plants,* Londres, 1972. - EAMES A.J., *Morphology of Vascular Plants. Lower Groups,* New York, 1936. - ID., *Morphology of the Angiosperms,* New York, 1961. - EICHLER A.W., *Blüthendiagramme,* Leipzig, 1875-78 ; réimpr. Eppenheim, 1954. - EMBERGER L., *Éléments de morphologie florale,* Paris, 1931. - FOSTER A.S. et GIFFORD E.M., *Comparative Morphology of Vascular Plants,* San Francisco, 1959. - GIFFORD E.M. et CORSON G.E., *The Shoot Apex in Seed Plants,* in *Bot. Rev.,* vol. 37, 143-229, 1971. - GUÉDÈS M., *Contribution à la morphologie du phyllome,* in *Mém. Mus. Hist. Nat.,* B, 21, 1972. - GUTTENBERG H. von, *Grundzüge der Histogenese höheren Pflanzen,* 2 vol., Berlin, 1960-1961. - ID., *Histogenese der Pteridophyten,* Berlin, 1966. - LOISEAU J.-E., *la Phyllotaxie,* Paris, 1969. - LORENZEN H., *Physiologische Morphologie der höheren Pflanzen,* Stuttgart, 1972. - MANGENOT G., *Données élémentaires sur l'angiospermie* in *Ann. Univ. Abidjan E,* 6 (1), 1973. - MAKSYMOWYCH R., *Analysis of Leaf Development,* Cambridge, 1973. - NOZERAN R. et al., *Intervention of Internal Correlations in the Morphogenesis of Higher Plants,* in *Adv. Morph.,* vol. 9, p. 1-66, 1971. - RAUH W., *Morphologie der Nutzpflanzen,* Heidelberg, 1952. - SINNOTT E.W., *Plant Morphogenesis,* New York, 1960. - SPORNE K.R., *The Morphology of Pteridophytes,* 2e éd., Londres, 1966. - ID., *The Morphology of Gymnosperms,* Londres, 1965. - STEEVES T.A. et SUSSEX I.M., *Patterns in Plant Development,* Englewood Cliffs 1972. - TORREY J.G., *Development in Flowering Plants,* New York, 1967. - TROLL W., *Vergleichende Morphologie der höheren Pflanzen, I, Vegetations Organe,* 3 vol., Berlin, 1937-42 ; réimpr. Koenigstein, 1967-1971. - ID., *Praktische Einführung in die Pflanzenmorphologie,* 2 vol., Iéna, 1954-1957. - ID., *Die Infloreszenzen,* 2 vol. (en cours), Stuttgart, 1964-1969. - WEBER H., *Gestalt und Organisation der höheren Pflanzen,* Fribourg, 1949. - ID., *Die Bewurzelungsverhältnisse der Pflanzen,* Fribourg, 1953. - WEBERLING F., *Typology of Inflorescences, J. Linn. Soc. (Bot.),* 59, 215-221, 1965. - ZIMMERMANN W., *Die Telomtheorie,* Stuttgart ,1965.

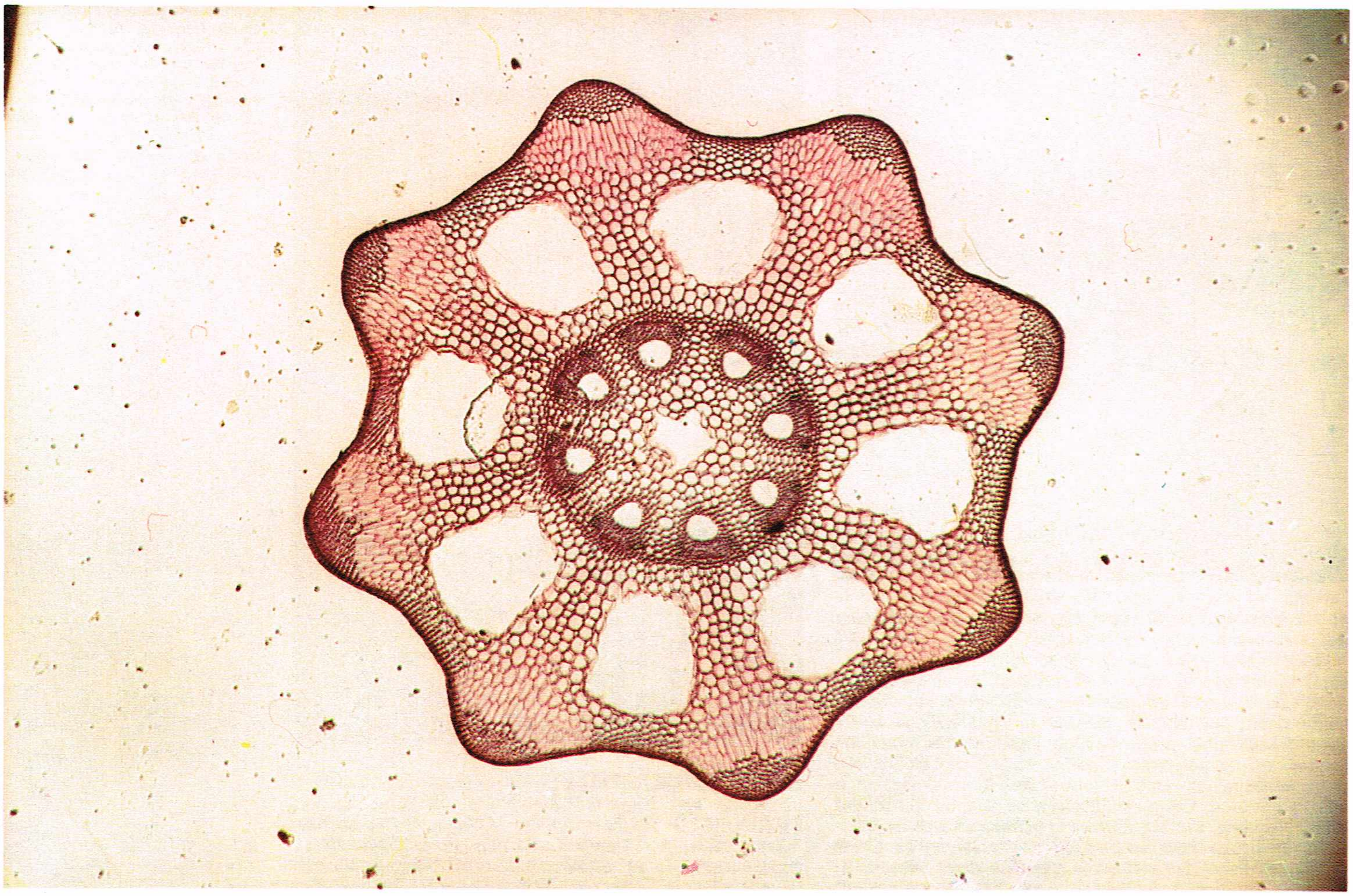

H. Chaumeton - Jacana

▲ *L'étude de la disposition relative des tissus dans un organisme végétal s'appelle l'***anatomie végétale**; *pour effectuer cette étude, on utilise des coupes : ici une coupe transversale de tige de Ptéridophyte* **(Equisetum arvense).**

ANATOMIE VÉGÉTALE

Nous avons étudié précédemment la cellule, élément fondamental de tout être vivant (cytologie). Dans l'organisme des végétaux (comme des animaux) pluricellulaires, les cellules semblables et de même fonction se trouvent souvent regroupées en ensembles qui constituent les *tissus*. L'étude des tissus proprement dite est l'*histologie ;* celle de leur disposition relative dans l'organisme est l'*anatomie*. Toutefois, souvent en botanique (contrairement à la zoologie), le terme d'anatomie est également synonyme d'histologie.

Les tissus se subdivisent en plusieurs groupes suivant leur fonction principale :

— tissus de croissance : les méristèmes ;
— tissus de comblement : les parenchymes ;
— tissus de conduction : le xylème, le phloème ;
— tissus de soutien : le collenchyme, le sclérenchyme ;
— tissus de recouvrement : l'épiderme et ses annexes ;
— tissus sécréteurs.

Le tissu primordial, déjà mis en place dans l'embryon, est le *méristème primaire,* qui est à l'origine de tous les autres tissus. Ses cellules, isodiamétriques, sont vivantes et en division active. En s'éloignant peu à peu des zones méristématiques, elles perdent la faculté de se diviser et subissent des modifications variables suivant les individus cellulaires, l'ensemble de ces modifications constituant la *différenciation cellulaire*.

Pour observer différents tissus, nous prendrons comme exemple la tige de bryone *(Bryonia dioica),* dans laquelle on effectue des coupes transversales et longitudinales.

Techniques de coupe. Pour effectuer l'étude anatomique des organes végétaux, il faut faire des coupes fines soit au microtome, soit plus simplement au rasoir à main, voire à la lame de rasoir, méthode simple souvent utilisée. On met 3 à 4 cm de l'échantillon à couper (frais ou conservé dans l'alcool) dans de la moelle de sureau préalablement fendue longitudinalement et légèrement évidée. Ensuite, on coupe transversalement en lames fines cette moelle contenant l'échantillon. Les rondelles de l'organe à étudier ainsi obtenues sont placées dans un petit panier métallique spécial — voire une capsule de plastique préalablement percée de trous — immergé dans l'eau contenue dans un verre de montre.

A ce stade, il est possible d'utiliser une méthode simple de double coloration au carmin vert d'iode. Il faut disposer de six verres de montre. Le 1er verre contient de l'hypochlorite de soude ou de l'eau de Javel, les 2e et 3e de l'eau, le 4e de l'acide acétique, le 5e du carmin vert d'iode et le 6e de l'eau. Après avoir effectué une vingtaine de coupes, on trempe le panier dans le 1er verre de montre (contenant l'hypochlorite) durant 20 mn afin de vider les cellules de leur contenu. Ensuite, pour éliminer l'hypochlorite, on met le panier et son contenu à rincer dans le 2e puis dans le 3e verre de montre, et ensuite à tremper dans le 4e durant 5 mn. L'acide acétique neutralise l'hypochlorite restant. Cette opération doit être effectuée avec soin, car l'hypochlorite détruirait le colorant. Enfin, on met le panier dans le colorant durant 3 mn, puis on le rince dans le 6e verre de montre afin de retirer l'excès de colorant.

Il ne reste plus qu'à monter les coupes entre lame et lamelle dans de l'eau pure ou glycérinée (ou dans la gomme au chloral si on désire conserver les préparations), en prenant soin de ne pas laisser les échantillons se dessécher. Si la coloration est bien faite, les éléments cellulosiques (parenchyme, collenchyme, tubes criblés) se colorent en rose et les éléments lignifiés (vaisseaux, sclérenchyme) en vert. Pour obtenir et traiter en grand nombre des coupes les plus fines possibles, il convient d'utiliser la technique dite d'inclusion dans la paraffine. Elle consiste à déshydrater par passage dans des alcools successifs à degré de plus en plus élevé (jusqu'à l'alcool absolu) puis dans du toluène (ou dans du xylol) l'organe à étudier, avant de le plonger dans un godet de paraffine fondue.

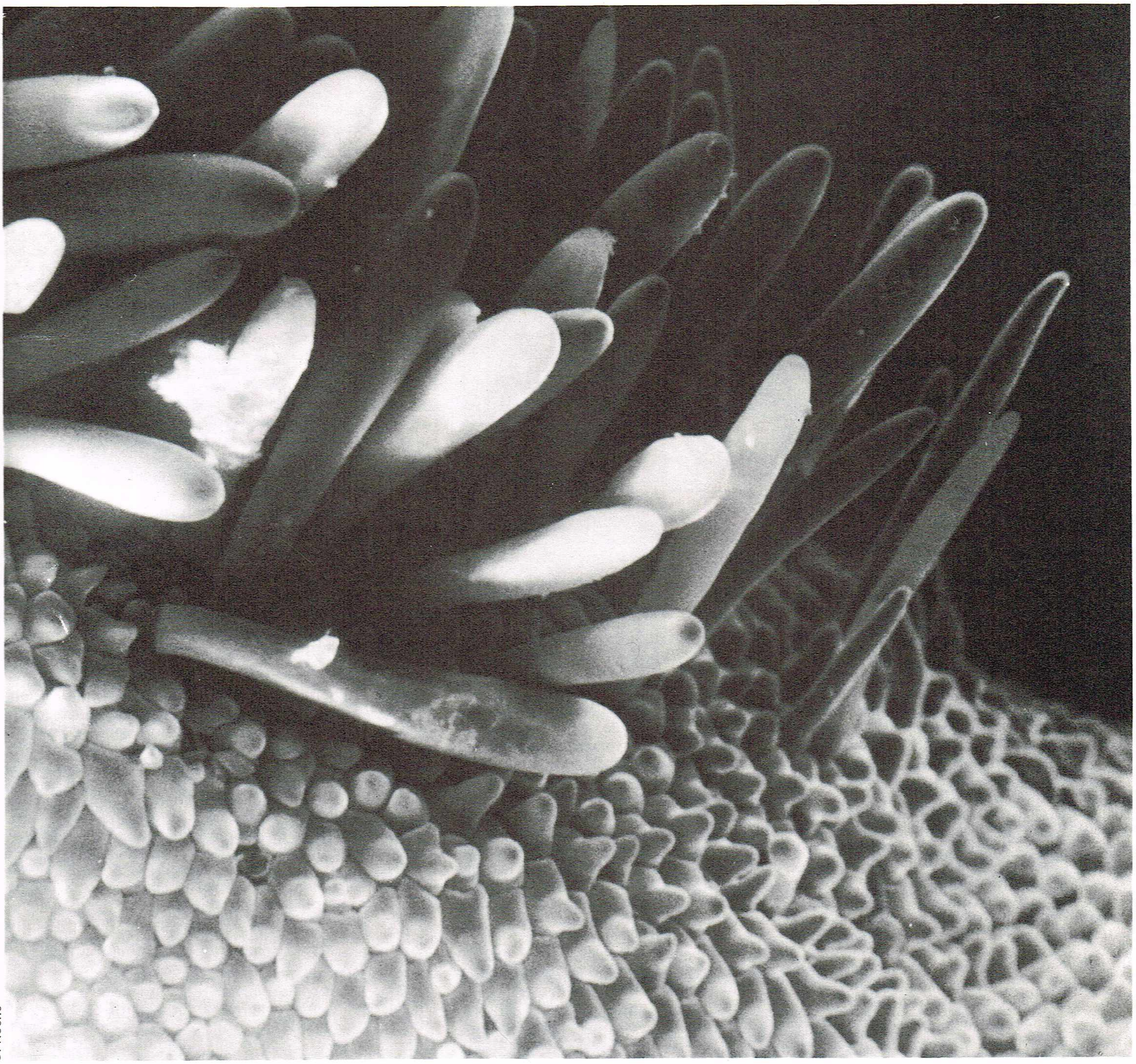

O. Roche

▲ ***Les cellules épidermiques des pétales de nombreuses espèces s'allongent en papilles gonflées par une vacuole à anthocyane responsable de la couleur et de l'aspect velouté des pétales : parfois, elles sont très allongées et donnent naissance à de longs poils en massue.***

Après refroidissement, le bloc est coupé au microtome. Les coupes (d'une vingtaine de μ d'épaisseur) ainsi obtenues sont collées avec de l'albumine sur une lame, débarrassées de la paraffine par des bains de toluène, réhydratées par passage dans des bains successifs d'alcool à degré de moins en moins élevé, puis colorées et montées comme les coupes faites à la main. Les coupes peuvent également de nouveau être déshydratées pour être montées dans le baume du Canada ; cette dernière méthode assure une plus longue conservation des préparations anatomiques.

Étude histologique de la tige de bryone

En coupe transversale, de l'extérieur vers l'intérieur, nous pouvons observer :

— Un *épiderme* rose (tissu de recouvrement), constitué de cellules isodiamétriques, vivantes, recouvertes extérieurement par une cuticule (enduit cireux protecteur imperméable). Cette assise est interrompue par quelques ouvertures : les *stomates*. L'épiderme porte ici des poils tecteurs. Chez d'autres espèces, on retrouve soit le même type de poils, soit des poils sécréteurs donnant à certaines plantes (thym, menthe) leur odeur caractéristique. Les cellules épidermiques des pétales de nombreuses espèces s'allongent en papilles gonflées par une vacuole à anthocyane ; celles-ci sont responsables de l'aspect velouté et de la couleur des pétales. Ces papilles, encore plus allongées, donnent parfois naissance à de longs poils en massue (par exemple, celles qui sont visibles à l'œil nu dans l'entrée de la gorge des fleurs de pensée).

— Un *collenchyme* rose (tissu de soutien), dont les parois primaires, uniquement cellulosiques et fortement épaissies, ne laissent que de petites lumières cellulaires, donnant à l'ensemble l'aspect d'un morceau de gruyère. Les cellules, vivantes, fortement allongées, présentent des extrémités rectangulaires ou aiguës.

— Un *parenchyme* rose, à parois minces. Les cellules isodiamétriques laissent entre elles des méats.

— Un *sclérenchyme* vert, autre tissu de soutien, présentant des cellules à parois secondaires lignifiées et épaisses. Ces cellules sont souvent allongées et terminées

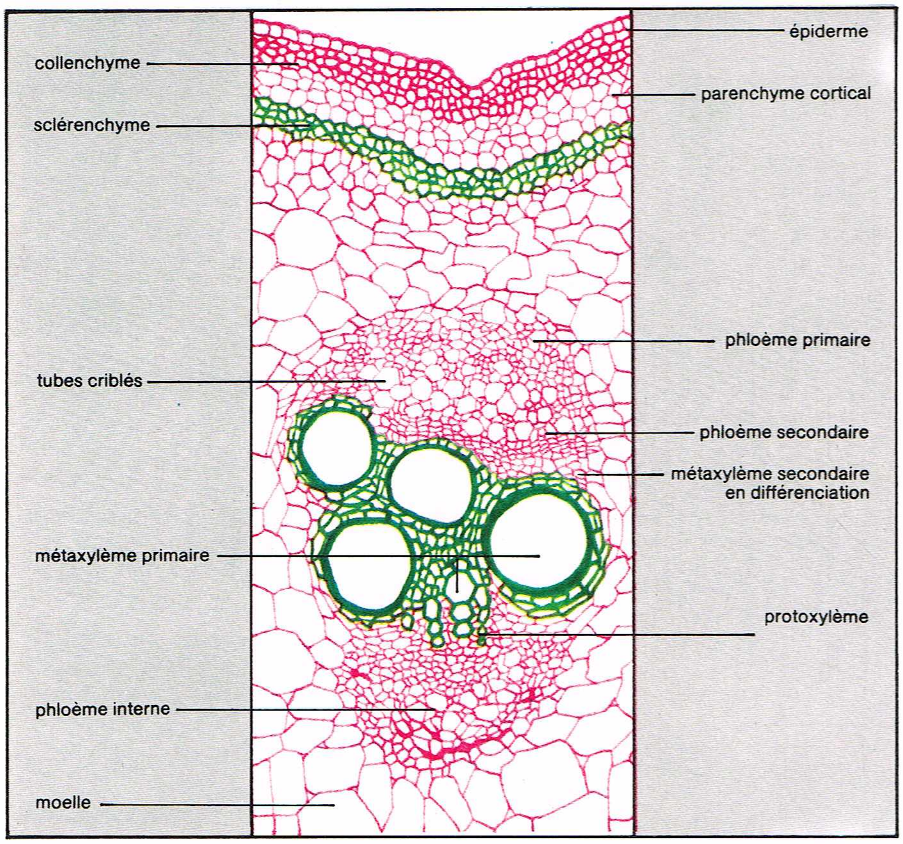

Richard Colin

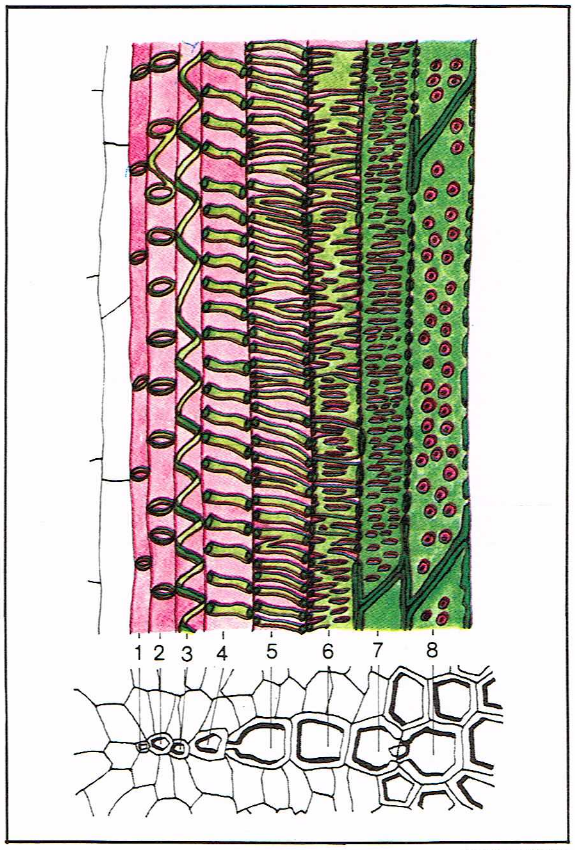

Richard Colin

▲ *A gauche,* *représentation schématique d'une coupe* de tige de bryone *montrant le détail* d'un faisceau libéro-ligneux *ainsi que la disposition des différents tissus. A droite, coupe longitudinale (en haut)* de protoxylème *(1-4)* *et de* métaxylème *(5-8), et transversale (en bas) : 1-2, vaisseaux annelés; 3-4, spiralés; 5-6, rayés; 7, réticulé; 8, ponctué.*

▼ *Représentation schématique de la formation d'une poche* schizogène *(A)* *et d'une poche* schizolysigène *(B); ces poches se forment à partir de méats*

en pointe, d'où le nom de fibre qu'on leur donne parfois. Lorsqu'elles sont plus courtes et de forme irrégulière, elles prennent le nom de sclérites, lesquelles sont souvent isolées dans d'autres tissus (camélia, par exemple). Il n'y a ni méats, ni lacunes dans ce tissu, pas plus que dans le suber, ou liège, formé de cellules mortes dont les parois minces sont imprégnées de subérine.

— Au centre, une masse importante de parenchyme dans laquelle se trouvent des faisceaux cribro-vasculaires constitués essentiellement de tissus conducteurs : le *phloème* (rose) et le *xylème* (vert). A noter, chez la bryone, la présence d'un massif de phloème interne surnuméraire. Nous verrons plus loin, en étudiant le sureau, que la majorité des faisceaux cribro-vasculaires caulinaires est constituée uniquement par un massif de phloème externe et un massif de xylème interne.

L'élément le plus marquant du phloème est la *cellule criblée,* allongée, encore vivante mais dépourvue de noyaux; ses parois transversales présentent des plages perforées, ou cribles. Plusieurs cellules criblées situées bout à bout constituent un *tube criblé.* Ce dernier est accompagné de cellules compagnes, vivantes, susceptibles de se transformer en cellules criblées. Le phloème comporte, de plus, des cellules parenchymateuses et parfois des fibres.

Les éléments les plus caractéristiques du xylème sont les *trachéides,* à parois transversales intactes, et les *vaisseaux,* à parois transversales plus ou moins perforées (voir les définitions complètes dans le bois).

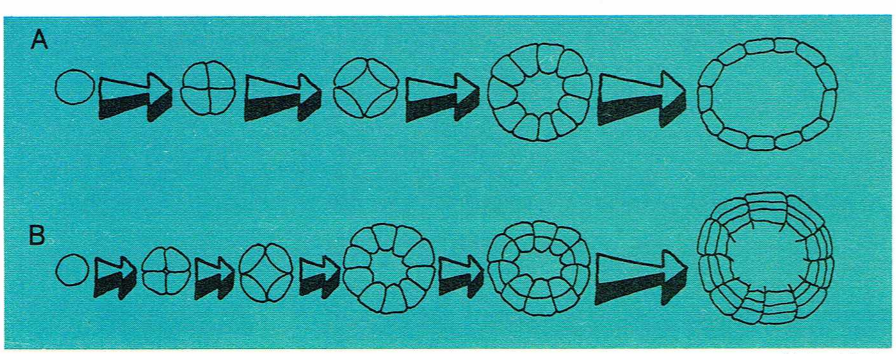

Richard Colin

En coupe transversale, on remarque simplement des variations importantes dans le diamètre des *pores* (nom donné aux lumières des vaisseaux vues en coupe transversale) en rapport avec leur position dans le faisceau vasculaire. Les éléments les plus proches de la pointe sont les premiers formés et ont les diamètres les plus petits.

En coupe longitudinale, les éléments de vaisseaux sont allongés et leur ornementation change suivant la place qu'ils occupent dans le faisceau. Les éléments les premiers formés ont une paroi cellulosique mince à épaississements ligneux réduits à quelques anneaux (verts); ces vaisseaux sont dits *annelés.* Ensuite, vers l'intérieur du faisceau, on trouve des vaisseaux spiralés où la lignine s'est déposée suivant une spirale, le long de la paroi primaire de l'élément de vaisseau. Cette ornementation lâche permet aux éléments de vaisseaux de s'allonger avec la tige de bryone. Ces deux types de vaisseaux ont souvent conservé leurs parois transversales et sont appelés *vaisseaux imparfaits.* Ils peuvent être assimilés à des trachéides. Les éléments suivants possèdent une ornementation plus importante, soit en barres très épaisses *(vaisseaux rayés),* soit occupant pratiquement toute la surface du vaisseau, la lignine ne laissant que quelques plages cellulosiques visibles *(vaisseaux ponctués).* Ces vaisseaux sont les derniers formés et ont les plus gros calibres. Le xylème renferme aussi des cellules parenchymateuses et souvent des fibres.

De nombreuses espèces végétales possèdent des *tissus sécréteurs.* Généralement, ceux-ci sont constitués de cellules sécrétrices groupées autour d'un méat dans lequel elles déversent leurs sécrétions. Lorsque de nombreux méats se trouvent bout à bout, il se forme alors soit une poche, soit un canal. Les poches sécrétrices des oranges sont formées de plusieurs épaisseurs de cellules; les plus internes se désagrègent tandis que les plus jeunes (les plus externes) continuent à se diviser. Les *faux laticifères* sont des canaux sécréteurs semblables à ceux que nous avons décrits; ils peuvent s'anastomoser. Les vrais laticifères naissent d'une cellule initiale de l'embryon qui s'allonge indéfiniment tant que la plante croît. Son noyau se divise de nombreuses fois; le vrai laticifère est donc un plasmodesme, c'est-à-dire une cellule contenant plusieurs noyaux. Vrais et faux laticifères contiennent du latex, suspension de protides et de glucides auxquels s'ajoutent des alcaloïdes.

Étude de la racine jeune

Afin d'étudier les structures anatomiques des différentes parties d'un végétal, on peut, pour commencer, observer un organe à structure simple ; par exemple, une racine de sceau de Salomon (*Polygonatum officinale*, Monocotylédone).

Au centre d'une coupe colorée au carmin vert d'iode, on voit une étoile verte de 5 à 7 branches, inscrite dans un cercle de cellules roses, ou *péricycle*, doublé extérieurement d'un second cercle de cellules à épaississements verts en « U » ouvert vers l'extérieur : l'*endoderme*. Il faut signaler que l'endoderme à épaississements en U ou en O est caractéristique des Monocotylédones. Ces deux assises séparent la racine en deux zones, l'une externe : l'*écorce*, l'autre interne : le *cylindre central*. Si la coupe est effectuée dans une racine suffisamment jeune, celle-ci apparaît limitée, à l'extérieur, par une assise pilifère constituée de poils absorbants, ou *rhizoderme*. Ensuite, vers l'intérieur, nous observons quelques assises de cellules subérifiées constituant la *zone subéroïde*, à laquelle font suite un *parenchyme cortical* externe puis interne, à cellules beaucoup plus grosses, et l'endoderme.

La première assise du cylindre central est le péricycle. Ensuite, on observe facilement l'étoile constituée de grosses cellules à grande lumière et à membranes épaisses vertes (donc ligneuses) : ce sont les vaisseaux qui conduisent la sève brute. Ils forment le *xylème* et sont disposés en 5 à 7 massifs dont les éléments les plus internes sont les plus gros. Il existe souvent un gros vaisseau central. Une observation attentive permet de distinguer, en alternance avec les faisceaux de xylème des amas de 4 à 6 cellules colorées plus fortement en rose que celles du parenchyme environnant : il s'agit de tubes criblés dont le rôle est de conduire la sève élaborée et qui constituent le *phloème*. Les premiers éléments des différents massifs de tubes criblés et de vaisseaux encore appelés respectivement *protophloème* et *protoxylème* se différencient à partir de cellules situées contre le péricycle. Ensuite, de proche en proche, des cellules suivantes, situées vers l'intérieur de la racine, se différencient en éléments conducteurs : le *métaphloème* et le *métaxylème*. Cette *différenciation* est dite *centripète*. Les massifs de phloème alternent avec ceux de xylème ; dans ce cas, le *xylème* est *alterne centripète*. C'est cette structure des éléments conducteurs qui se retrouve dans la majorité des racines jeunes.

Coupe longitudinale des méristèmes terminaux. Les différents éléments conducteurs que nous avons rencontrés dans la racine ne se sont pas mis en place d'emblée ; ils ont leur origine à partir de méristèmes terminaux.

Les *méristèmes terminaux* sont des zones à divisions cellulaires actives, situées aux extrémités des racines et des tiges, permettant leur croissance en longueur.

Certaines cellules méristématiques vont s'allonger suivant l'axe longitudinal de la plante pour constituer le *procambium*, à partir duquel se différencieront les éléments conducteurs. Le procambium apparaît très tôt chez l'embryon et subsiste durant toute la vie de la plante. Il occupe toute la partie centrale de la racine, alors que dans la tige, il forme un manchon délimitant dans sa partie intérieure une zone qui donnera la moelle. Il est situé pratiquement contre les méristèmes terminaux, vers la partie basale des organes. Dans le procambium prennent naissance des foyers de différenciation constituant les *pôles ligneux* et *libériens* (qui correspondent aux protophloèmes et protoxylèmes observés dans la racine du sceau de Salomon). Ces pôles sont situés sur la périphérie du procambium ; on dit qu'ils sont *exarches*. Les éléments conducteurs suivants se différencient progressivement vers l'intérieur *(différenciation centripète)*. Dans le cas de la tige (que nous verrons plus loin), les pôles ligneux se trouvent sur le bord interne du procambium ; ils sont alors *endarches*. Les éléments vasculaires suivants (métaxylème) se différencient, contrairement au cas précédent, vers l'extérieur *(différenciation centrifuge)*. Enfin, il existe un cas intermédiaire, dit *mésarche*, où les pôles sont à l'intérieur du procambium ; la différenciation vasculaire se fait vers diverses directions. Dans la racine et la tige, les premiers éléments formés sont ceux du protophloème, qui est toujours exarche. A noter, enfin, que toutes les cellules procambiales ont la potentialité de se

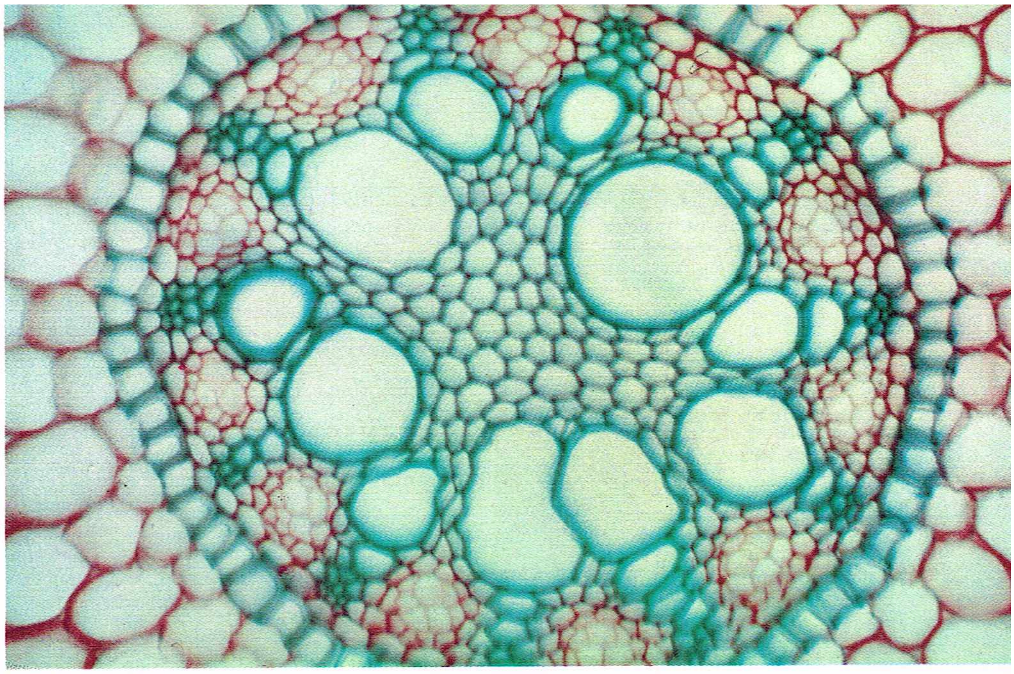

S. Blaise et C. Sastre

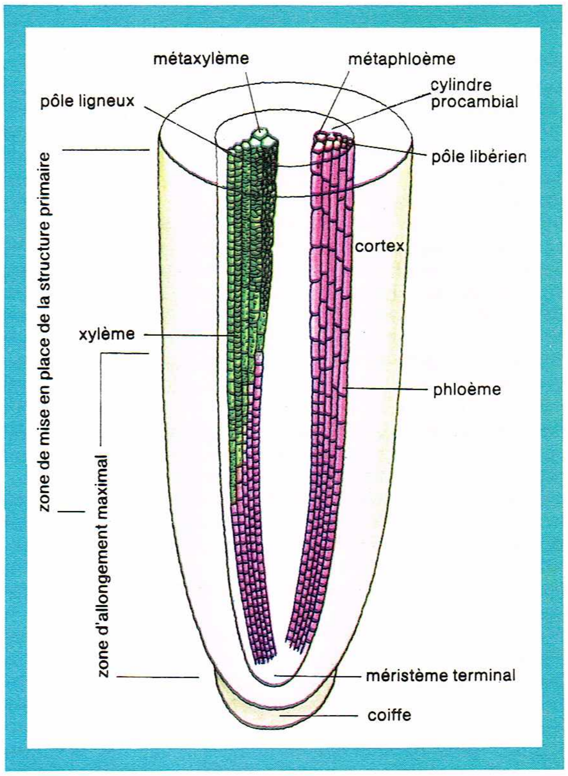

Richard Colin

S. Blaise et C. Sastre

▲ ***En haut, coupe transversale dans la racine d'iris; les pôles ligneux et criblés sont plus nombreux que chez le Polygonatum. En bas, coupe transversale dans une racine d'iris dans laquelle on observe la naissance d'une radicelle montrant l'origine endogène des racines secondaires (à noter le faible diamètre du cylindre central).***

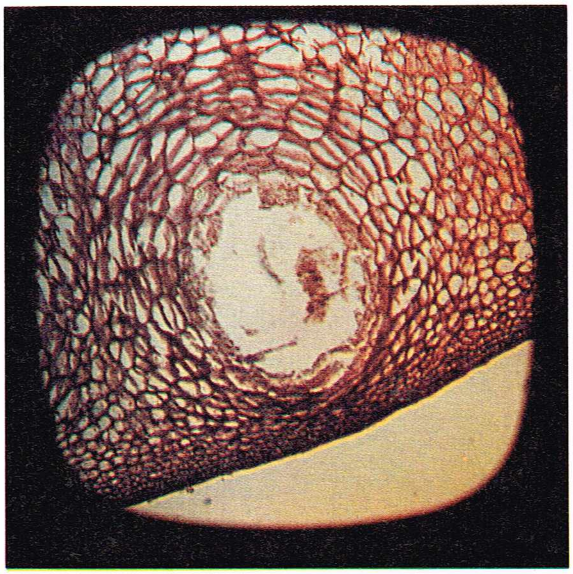

R. Gorenflot

◀ ***En haut, représentation schématique de la portion terminale d'une racine; on observe la mise en place des différents éléments conducteurs. En bas, poche sécrétrice de Citrus (Rutacée); elle est formée de plusieurs épaisseurs de cellules.***

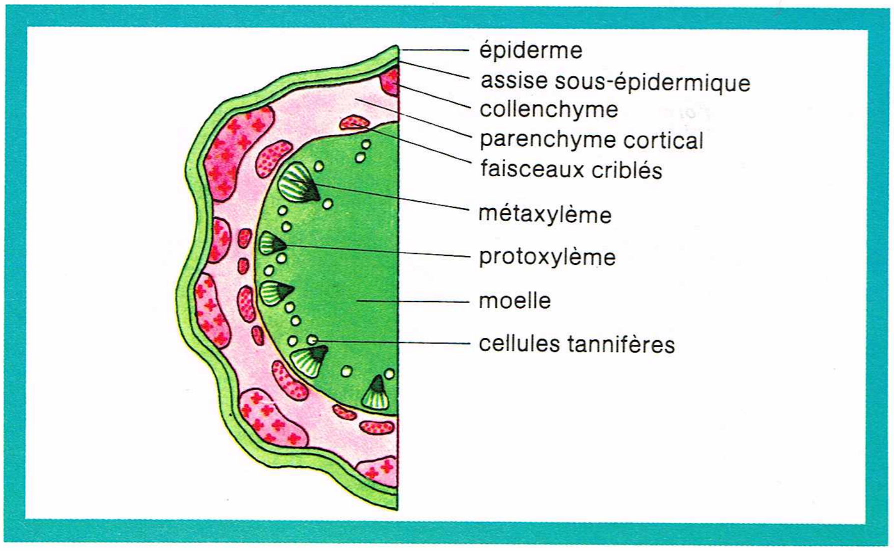

Richard Colin

▲ *Schéma d'une coupe transversale, de tige jeune de sureau.*

différencier en éléments conducteurs; cependant, certaines d'entre elles ne donneront naissance qu'à du parenchyme.

Ensuite, on effectue une coupe longitudinale d'une pointe de racine, en utilisant un végétal qui se bouture bien, par exemple, l'aucuba, arbuste décoratif de nos jardins. L'extrémité méristématique des racines est très fragile et, lors de l'arrachage d'un végétal, il est très difficile d'avoir des racines intactes; aussi est-il préférable de mettre des rameaux coupés dans de l'eau et d'attendre l'apparition de racines (un mois chez l'aucuba). Cependant, il est possible d'obtenir plus rapidement des racines en trempant l'extrémité inférieure d'un bulbe (oignon ou jacinthe) dans l'eau. Une autre solution consiste à effectuer des semis sur des boîtes de Pétri ou sur de l'ouate maintenue constamment humide, ce qui peut être fait facilement avec des graines de haricot, avec lesquelles on obtient en une semaine des jeunes racines suffisamment grandes pour être coupées et observées.

En coupe longitudinale, dans la zone subapicale d'une racine, on observe une région de petites cellules à parois très minces et faiblement colorées : c'est la *zone méristématique*. Elle donne naissance vers l'extérieur à la *coiffe*, qui est un organe de protection en continuel renouvellement par usure.

Au-dessus de l'apex radiculaire, se trouve une *zone d'élongation cellulaire* où les divisions ne se font pratiquement plus. C'est dans cette partie que se trouve le procambium, qui occupe l'emplacement du futur cylindre central.

Enfin, plus haut, il est possible de voir les premiers éléments vasculaires à ornementations vertes de lignine.

▼ *Coupe de tige de sureau montrant l'assise subéro-phellodermique qui a donné les tissus secondaires (cellules superposées) encadrés de tissus primaires : l'épiderme vers l'extérieur.*

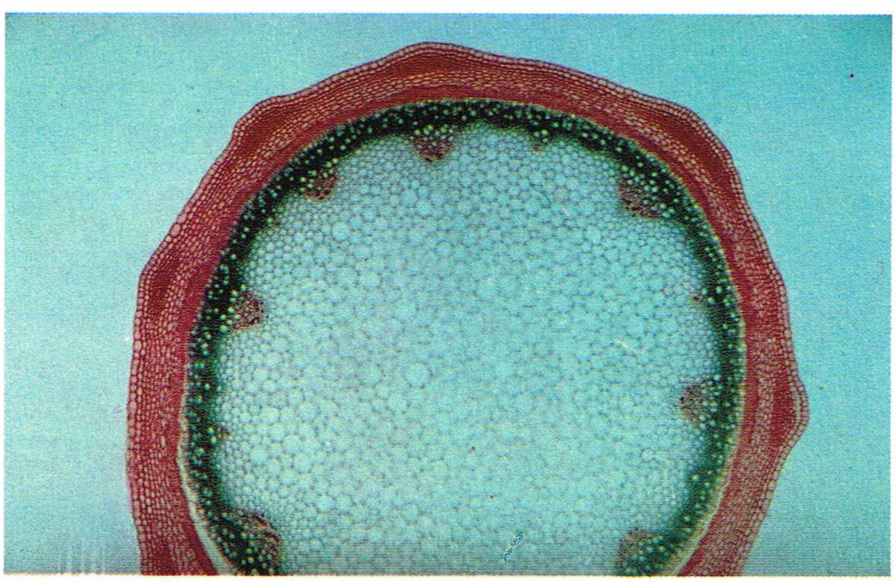

S. Blaise

L'apex des tiges, ou apex caulinaire, se présente différemment. Il ne donne pas de coiffe. A partir du méristème caulinaire se forment des protubérances qui vont donner naissance aux feuilles. A la base de chaque ébauche foliaire *(primordium foliaire)*, prend naissance un faisceau cambial qui se développe vers l'apex du primordium, en direction acropète. Celui-ci se raccorde vers la base, en direction basipète, avec l'ébauche du procambium d'une feuille inférieure. Il semblerait donc que les différents procambiums foliaires soient à l'origine du procambium caulinaire, lequel n'aurait pas d'existence propre. Cependant, certains auteurs contestent cette interprétation.

Étude de la tige jeune

Pour étudier la structure d'un organe plus complexe, on peut prendre comme exemple la tige très jeune du sureau de moins d'un an : *Sambucus nigra* (Dicotylédone). Dans cette tige, contrairement à la racine observée précédemment, il est difficile de faire une séparation nette entre écorce et cylindre central. La coupe présente une périphérie bosselée, dont chaque bosse est appelée *carène*.

De l'extérieur vers l'intérieur, on peut observer : un épiderme avec cuticule, une dizaine de massifs roses de collenchyme à parois cellulaires épaisses situés à chaque carène, puis, généralement dans leur prolongement, des massifs ovalo-triangulaires, roses vers l'extérieur et verts à l'intérieur : les *massifs cribro-vasculaires*. Ils sont constitués des mêmes éléments conducteurs que ceux que nous avons observés dans la racine, mais disposés différemment. Le phloème, ou liber (en rose), est situé vers l'extérieur; il lui est superposé le xylème, ou bois (triangles verts), qui est appelé *xylème superposé centrifuge* car les premiers vaisseaux se sont différenciés à la pointe du faisceau (protoxylème).

Parfois, il est possible d'observer entre le phloème et le xylème des cellules en division; il s'agit d'un méristème qui donne naissance vers l'extérieur à des éléments libériens et vers l'intérieur à des éléments du bois; ces éléments nouveaux viennent s'ajouter à ceux déjà existants. Ce méristème, appelé *zone génératrice libéro-ligneuse*, est un *méristème secondaire*, ou *cambium*, permettant l'accroissement en épaisseur de la tige. Il n'existe généralement pas chez les Monocotylédones, dont la tige s'accroît en épaisseur par adjonction vers l'extérieur de nouveaux faisceaux cribro-vasculaires issus des feuilles nouvelles. Cette zone génératrice donne naissance à du phloème et à du xylème secondaires, tandis que les éléments conducteurs du faisceau cribro-vasculaire qui ne se sont pas formés à partir de cette assise constituent le phloème et le xylème primaires. Alors que la disposition des éléments primaires est le plus souvent quinconciale, celle des éléments secondaires est en files superposées. Cela résulte du fonctionnement des cellules de l'assise génératrice, qui, par divisions successives, se cloisonnent surtout tangentiellement, donnant ainsi naissance à des files cellulaires.

Les faisceaux cribro-vasculaires sont inclus dans un ensemble rose de parenchyme, dont la partie centrale constitue la moelle qui contient des cellules jaunâtres à brunâtres : les *cellules tannifères*.

Passage vasculaire tige-racine. Nous avons vu que les éléments conducteurs primaires de la racine et de la tige sont disposés différemment. Le problème est donc de savoir comment se fait le raccord entre eux.

De nombreuses théories ont été proposées. Nous nous limiterons ici aux observations faites par G. Chauveaud sur l'axe hypocotylé du lupin blanc : *Lupinus albus* (Dicotylédone). Celui-ci possède une germination épigée, c'est-à-dire qu'il existe un petit axe entre, d'une part, le collet qui sépare tige et racine et, d'autre part, les cotylédons. Ce petit axe est dit *hypocotylé* par opposition à celui situé au-dessus des cotylédons, qui est appelé axe *épicotylé*.

En effectuant une série de coupes dans l'axe hypocotylé d'un jeune lupin en germination dont les cotylédons commencent à se séparer, il est possible de suivre l'évolution dans l'espace des éléments conducteurs.

Lorsqu'on observe une coupe située près de la racine (niveau 1), il est possible de séparer l'écorce et le cylindre central grâce à la présence d'un endoderme. Les cellules

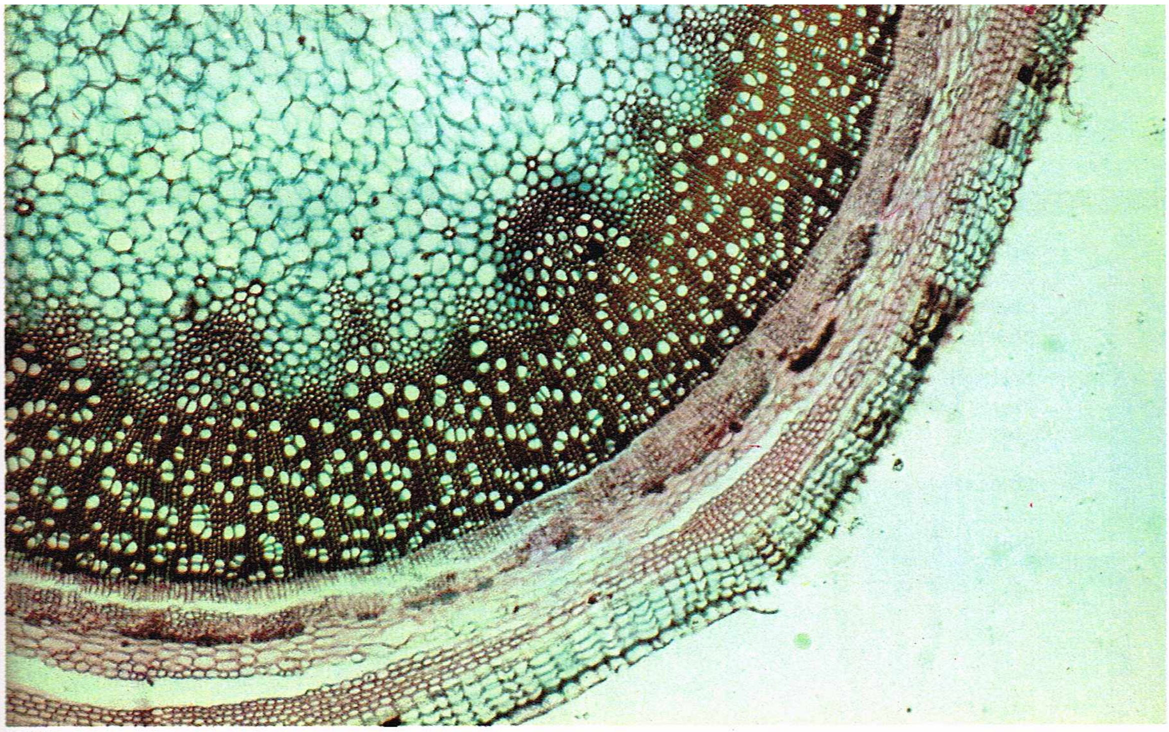

S. Blaise

◀ ***Coupe transversale dans la tige de sureau âgée d'un an; l'épiderme est encore en place.***

de ce dernier sont pourvues sur leurs parois radiales et transversales d'un cadre de nature subéreuse (verte), appelé *bande de Caspary*. Chez la majorité des Monocotylédones, s'ajoutent des épaississements secondaires intéressant soit toutes les parois (endoderme en O), soit les seules parois radiales et internes (endoderme en U, ou en fer à cheval, déjà observé dans la racine du sceau de Salomon). Le cylindre central a une forme ovale et, dans les deux parties les moins courbées, nous pouvons observer deux gros massifs roses de phloème alternant avec deux massifs verts de xylème centripète ; nous avons donc une structure de racine.

Si l'on observe une coupe de la partie médiane de l'axe hypocotylé (niveau 2), il y a toujours deux massifs de phloème et deux massifs de xylème, mais ces derniers se présentent différemment. En plus des vaisseaux alternes centripètes, on note la présence de vaisseaux qui se sont différenciés tangentiellement par rapport aux massifs de phloème et qui donnent aux deux massifs de xylème l'aspect de Y ouverts vers l'intérieur. Ces *vaisseaux* sont dits *intermédiaires tangentiels ;* leur position est en effet intermédiaire entre celles observées respectivement dans la racine et dans la tige.

Si l'on observe une coupe située près des cotylédons (niveau 3), il y a quatre massifs de phloème. Ils correspondent deux à deux à ceux observés aux niveaux inférieurs. Deux paires de massifs de xylème superposé centrifuge leur font face, intérieurement. Chaque élément d'une paire est relié à l'autre par quelques vaisseaux intermédiaires tangentiels, voire alternes centripètes ; nous avons presque une structure de tige. L'appareil conducteur apparaît formé de deux unités, appelées *convergents ;* chacune de ces unités est composée d'un double faisceau ligneux flanqué de deux plages libériennes. Chacun des convergents est en relation directe avec un cotylédon.

Ensuite, en effectuant des coupes dans un axe hypocotylé plus âgé (par exemple, lorsque les cotylédons sont bien ouverts), on peut suivre l'évolution des éléments conducteurs non seulement dans l'espace mais aussi dans le temps (schéma ci-contre au milieu).

— Au niveau 1, en plus du xylème alterne centripète, s'est différencié un xylème intermédiaire tangentiel.

— Au niveau 2, le xylème alterne centripète a disparu, laissant place à des lacunes de résorption, et des éléments récemment différenciés de xylème superposé centrifuge viennent s'ajouter au xylème intermédiaire tangentiel.

— Le niveau 3, quant à lui, ne possède que du xylème superposé centrifuge avec apparition d'un méristème secondaire libéro-ligneux entre les massifs de phloème et de xylème. A ce stade, nous avons donc une structure-tige tout à fait comparable à celle que nous avons observée dans un rameau jeune de sureau (équivalant à un axe épicotylé).

Nous voyons ainsi que les diverses dispositions du xylème (alterne, intermédiaire et superposé) ne sont pas des états premiers de structure mais correspondent à des aspects successifs d'un même plan structural en voie d'évolution. Le niveau 3 possède d'emblée une structure proche de celle de la tige, alors que le niveau 1 a, chez le jeune axe hypocotylé, une structure-racine. Durant le vieillissement de cet axe, le niveau 3 acquiert rapidement une structure-tige, tandis que le niveau 1 y arrive beaucoup plus lentement. Ce processus s'observe aussi d'une façon beaucoup moins développée dans la racine qui tend ainsi peu à peu à développer une structure-tige. Il faut remarquer que chez de nombreuses espèces, l'évolution vasculaire de la racine est bloquée à la phase alterne.

L'étude de l'appareil conducteur de l'axe hypocotylé montre l'unité organique du végétal, et les coupures en racine, tige et feuille paraissent parfois entachées d'arbitraire. Dans la tige, le xylème primaire apparaît tout de suite au stade superposé centrifuge ; pour cette raison, on dit qu'il connaît une *évolution accélérée.*

Étude de la tige âgée de Dicotylédone

On peut suivre l'évolution dans le temps de l'axe épicotylé en effectuant, par exemple, des coupes dans un rameau de sureau âgé de plus d'un an.

Dans la tige jeune, on avait noté l'apparition de méristèmes secondaires dans chaque faisceau cribro-vasculaire ; ces méristèmes, par différenciation de proche en proche du parenchyme, finissent par se rejoindre et former un anneau méristématique continu, séparant ainsi la tige en deux parties : l'écorce et le cylindre central au sens commun du terme. A signaler que ces deux parties ainsi définies n'ont pas tout à fait la même signification que dans la racine, où, comme nous l'avons vu, elles sont séparées par un endoderme et un péricycle incluant le phloème dans le cylindre central.

▼ ***En haut, représentation schématique de l'évolution des éléments conducteurs dans des coupes d'axe hypocotylé ; à gauche, plantule âgée. à droite, plantule jeune ; En bas, représentation schématique d'une coupe transversale dans une tige âgée de sureau : l'ensemble épiderme, suber, phelloderme constitue le périderme ou écorce au sens anatomique du terme.***

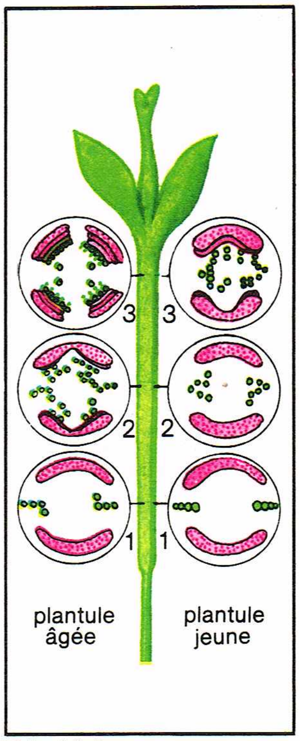

Richard Colin

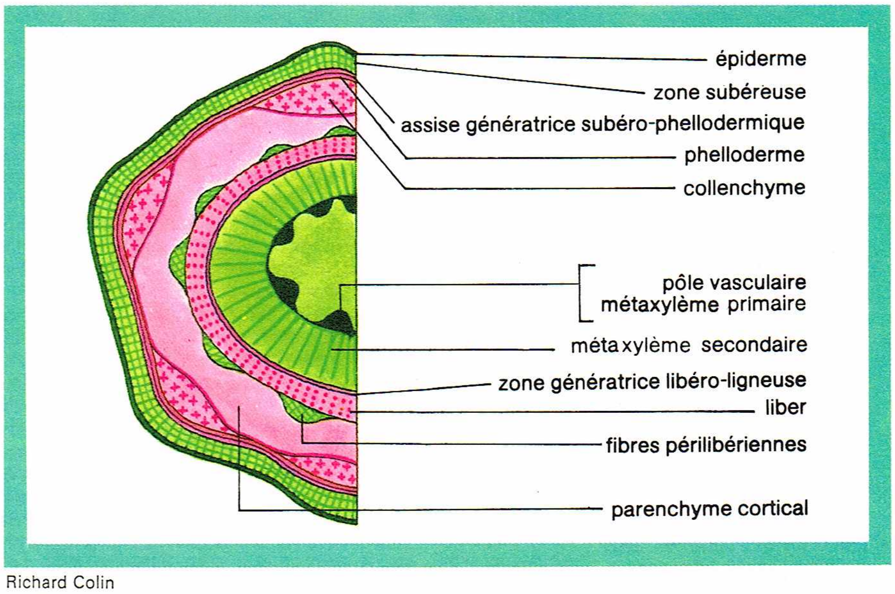

Richard Colin

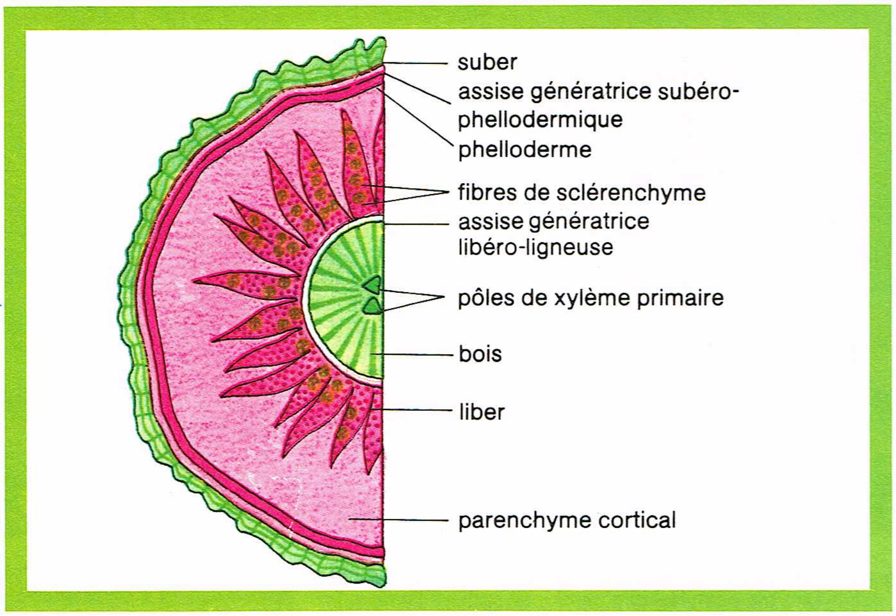

Richard Colin

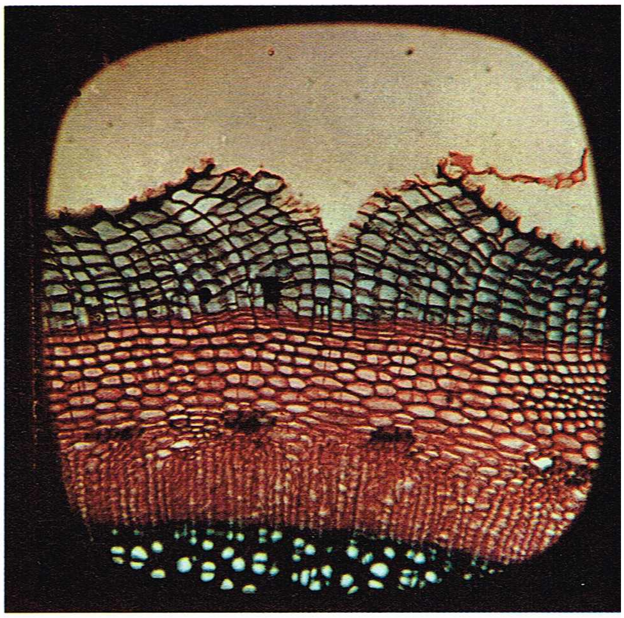

R. Gorenflot

▲ *A gauche, représentation schématique détaillée d'une coupe transversale de* racine de sureau (Sambucus nigra). *On notera que, dans le cas de la racine, l'écorce est relativement plus importante que le cylindre central. A droite, coupe de* lenticelle jeune *de sureau; constituée de cellules mortes, arrondies, à parois minces, appelées cellules comblantes, séparées par de larges méats, elle permet à l'air de circuler.*

Dans la tige âgée de sureau, de l'extérieur vers l'intérieur nous observons : des lambeaux d'épiderme, un *suber,* ou *liège,* issu d'une assise génératrice *subéro-phellodermique* (ou assise péridermique, ou phellogène) qui donne en plus naissance, vers l'intérieur, à un parenchyme secondaire : le *phelloderme* (toutes ces cellules paraissent empilées les unes sur les autres en rangées bien distinctes). L'ensemble — épiderme, suber, phelloderme — constitue le *périderme,* ou écorce au sens anatomique du terme.

Dans le liège, il est possible d'observer des interruptions dues à la présence de *lenticelles* mises en place sous d'anciens stomates. Elles sont constituées de cellules mortes arrondies à parois minces, appelées *cellules comblantes,* laissant entre elles des méats permettant à l'air de circuler. Comme les cellules du liège, elles sont issues du méristème subéro-phellodermique. Chez d'autres espèces végétales, il existe un autre type de lenticelles. Chez le cerisier, par exemple, les cellules sont de deux types : les unes sont semblables aux cellules comblantes rencontrées chez le sureau, et les autres sont aplaties, subérisées, sans méats entre elles. Ces dernières forment les couches de fermeture qui se rompent pendant la phase active de végétation sous la poussée de cellules nouvelles plus profondes. Le chêne-liège à liège particulièrement développé produit d'une manière continue des cellules comblantes lâches. Celles-ci forment des petits cylindres plus sombres qui s'étendent jusqu'à la surface du liège. Sur les bouchons, ces cylindres constituent des petites stries facilement observables. Ces dernières, pour des raisons d'étanchéité, sont perpendiculaires à l'axe des bouchons.

Après le phelloderme, vers l'intérieur de la tige de sureau, on retrouve : les massifs de collenchyme déjà observés dans la tige jeune, du parenchyme, puis des petits massifs verts de fibres sclérifiées périlibériennes. Ces derniers se sont différenciés à partir d'un parenchyme de comblement qui s'est développé dans les lacunes formées à la suite de la résorption des éléments du protophloème. Ces massifs de fibres se situent contre ce qui reste des massifs de phloème primaire, lesquels sont en périphérie d'un anneau de phloème secondaire issu du fonctionnement de l'assise génératrice libéro-ligneuse.

Ce méristème donne aussi naissance vers l'intérieur à un *anneau de xylème secondaire,* ou *bois,* constitué de différents éléments que nous traiterons plus loin. Dans ce bois, nous pouvons reconnaître des vaisseaux à large lumière (ou pores), des cellules parenchymateuses et des files cellulaires longitudinales, appelées *rayons.*

Au centre, la moelle, qui occupe une place importante, est constituée par du parenchyme. On peut y observer, accolés au xylème secondaire, des petits massifs de xylème primaire qui sont les restes des éléments primaires des faisceaux cribro-vasculaires observés dans la tige jeune.

Étude de la racine âgée de sureau

Si des coupes faites dans la racine jeune de sureau révèlent une organisation anatomique très différente de celle de la tige jeune (mais proche de celle de la racine de sceau de Salomon), il n'en est pas de même lorsque la comparaison se fait entre organes âgés. Le fonctionnement de l'assise génératrice libéro-ligneuse donne aussi bien dans la racine de Dicotylédone que dans la tige du phloème à différenciation centripète vers l'extérieur et du xylème à différenciation centrifuge vers l'intérieur. Lors de son apparition dans la racine, cette assise contourne les massifs de phloème primaire par l'intérieur et ceux de xylème primaire par l'extérieur. En coupe transversale, elle apparaît sinueuse au départ pour devenir ensuite circulaire dans une racine plus âgée.

La présence de formations secondaires dans la tige et la racine des Dicotylédones et des Gymnospermes peut donner aux organes âgés un aspect semblable en coupe transversale. Cependant, la proportion entre écorce et cylindre central permet de distinguer une tige âgée d'une racine âgée. Dans cette dernière, l'écorce est relativement plus importante que le cylindre central, contrairement à ce que l'on a pu observer dans la tige de sureau.

S. Blaise

▶ *Coupe dans une* racine âgée de tilleul; *à noter dans le métaxylème secondaire les cernes correspondant aux différentes années; c'est un exemple de bois* hétéroxylé homogène.

De l'extérieur vers l'intérieur d'une coupe transversale de racine de sureau, on observe : une assise de cellules brunes, l'assise subéroïde (il s'agissait d'une zone chez les Monocotylédones), un parenchyme cortical, un endoderme, une assise subéro-phellodermique et ses dérivés. Ensuite, nous trouvons le cylindre central, de faible diamètre par rapport à celui de la coupe et presque entièrement occupé par deux anneaux concentriques de phloème et de xylème secondaires. Le massif parenchymateux central est très réduit; on peut encore y observer des restes des faisceaux ligneux primaires.

Les radicelles prennent naissance au niveau du péricycle; elles ont une *origine endogène,* contrairement aux ramifications de la tige, d'origine exogène (zone corticale). Chez les Ptéridophytes, à la différence des Angiospermes et des Gymnospermes, les radicelles prennent naissance dans l'endoderme.

Les formations secondaires apparaissent d'abord dans la tige avant de gagner les parties basses de la plante; la différenciation est dite *basipète*. En termes plus simples, nous dirons que la racine est en retard sur la tige; un tel retard concerne non seulement les formations secondaires, mais aussi les formations primaires dont l'organisation structurale est phylogénétiquement moins évoluée dans la racine que dans la tige. Pour ce qui est des Angiospermes et des Gymnospermes, l'explication classique est que la structure alterne de la racine est moins évoluée que la structure superposée de la tige.

Les racines tubérisées

Parfois, dans les racines, les formations secondaires sont très développées, avec apparition d'assises génératrices libéro-ligneuses surnuméraires. Cela s'observe chez de nombreuses espèces de Dicotylédones à racines tubérisées. Chez la betterave, par exemple, les différents xylèmes secondaires possèdent de nombreuses cellules parenchymateuses contenant des réserves. Chez la carotte *(Daucus carota),* la tubérisation se fait d'une manière différente. Les coupes transversales effectuées dans une racine jeune montrent une structure radiculaire normale; les faisceaux ligneux alternent avec les massifs criblés.

A partir de cette structure, les cellules du péricycle se divisent pour constituer une zone péricyclique assez épaisse, dans laquelle commence à se différencier une zone génératrice péridermique. Le fonctionnement de cette dernière va faire tomber l'écorce, endoderme compris, et la remplacer par une zone péridermique subérisée superficielle d'origine secondaire. Vers l'intérieur, cette assise va donner un important parenchyme péridermique à cellules bourrées de chromoplastes, voire de grains d'amidon. La zone péridermique subérifiée constitue la peau, que

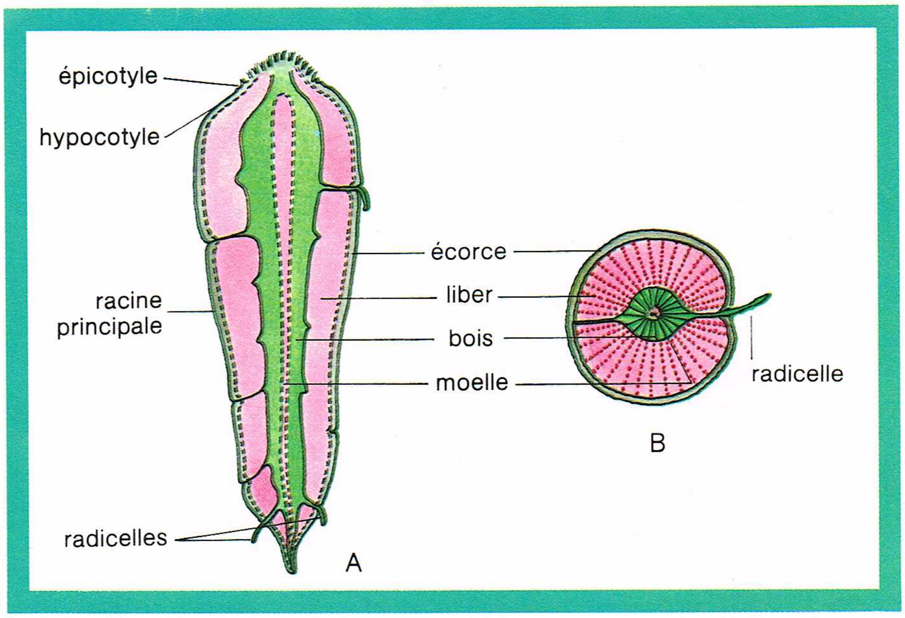

▲ ***Représentation schématique d'une* racine *de carotte, en coupe longitudinale (A) et transversale (B).***

l'on retire en grattant la carotte; le parenchyme péridermique ainsi que le phloème secondaire qui s'y trouve inclus constituent la partie la plus succulente de la carotte.

Le cœur est constitué par du xylème secondaire comprenant des vaisseaux faiblement lignifiés, entourés par des cellules parenchymateuses. La faible lignification du bois explique que le cœur de la carotte se consomme si facilement.

Le cambium présente une ligne de moindre résistance, au niveau de laquelle le manchon de phloème et le parenchyme péridermique se séparent parfois à la cuisson du cœur, plus orangé. De ce dernier partent des pointes plus claires : les *rayons rhizogènes,* qui pénètrent dans la chair périphérique; il s'agit des radicelles qui vont percer les formations péridermiques et apparaître en quatre rangées à la surface de la racine tubérisée.

Chez le radis, contrairement à la carotte, c'est le xylème secondaire qui forme la partie succulente de la racine. Chez d'autres plantes, les modalités de tubérisation sont plus complexes. Ainsi, le céleri-rave n'est pas, à proprement parler, une racine tubérisée; sa partie supérieure qui porte les feuilles hors de terre est de nature caulinaire, sa partie moyenne de nature hypocotylaire et sa partie inférieure d'où partent les racines secondaires, elles-mêmes tubérisées, de nature radiculaire.

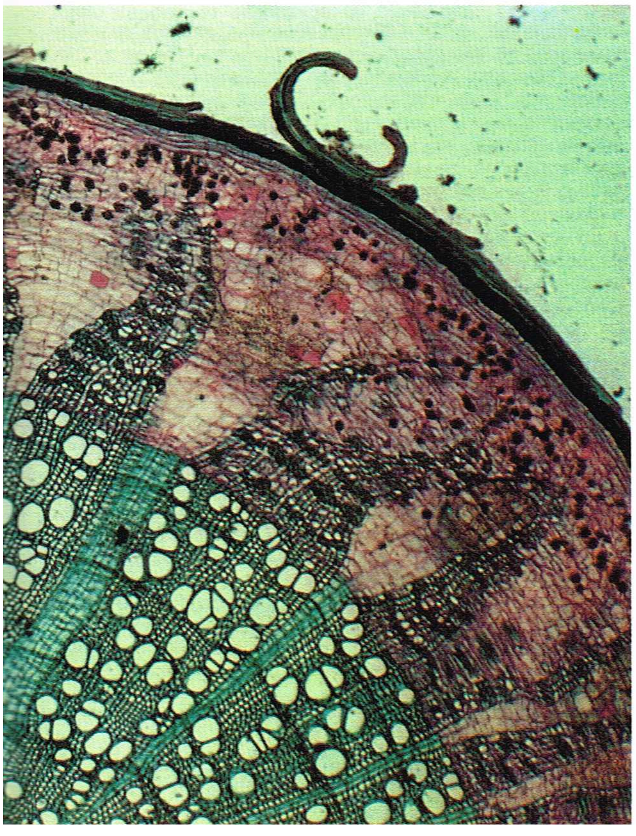

Structure du tronc d'un arbre

Chez les Dicotylédones herbacées annuelles, l'appareil végétatif disparaît d'une année à l'autre. L'assise génératrice libéro-ligneuse et l'assise subéro-phellodermique (lorsqu'elle apparaît) n'auront fonctionné que très peu de temps : quelques mois au maximum.

Il n'en est pas de même chez les végétaux pérennants ligneux, dont l'appareil végétatif (à l'exclusion des feuilles) non seulement persiste, mais encore continue bien souvent à croître en épaisseur durant de nombreuses années grâce au fonctionnement de ces deux assises génératrices. Leurs cellules subissent de temps en temps des divisions latérales permettant aux méristèmes de s'adapter aux augmentations constantes de diamètre, dues à l'apparition de nouveaux tissus qu'ils produisent. Le nombre total de cellules d'une assise augmente donc au fur et à mesure que le végétal croît en épaisseur.

Dans la tige âgée de sureau, nous avons étudié l'évolution des tissus après un an de végétation; chez l'arbre adulte, nous allons à présent voir les conséquences du fonctionnement des deux assises génératrices pendant de nombreuses années consécutives.

Sur une coupe transversale d'un tronc d'arbre, deux parties fondamentales se distinguent : l'écorce et le bois.

Chez le chêne, arbre de régions tempérées, le bois forme des zones concentriques, ou *cernes,* coupées perpendiculairement par les rayons (voir la tige âgée de sureau). Le bois apparaît plus dur et plus foncé dans la région

▶ ***Lorsque les assises sont nombreuses, superficielles et discontinues, chacune fabrique un petit bout d'écorce donnant au rhytidome un aspect écailleux; chez le platane, ces écailles se desquament peu à peu.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

centrale : c'est le *bois de cœur,* ou *duramen* du bûcheron. La zone périphérique, plus tendre et plus pâle, constitue l'*aubier,* lui-même entouré par l'écorce.

Sur une rondelle de tronc d'arbre soumise à dessiccation, apparaît une fissure circulaire séparant l'écorce du bois proprement dit. Un examen cytologique démontre que cette fente se produit, comme chez la carotte, au niveau du cambium à cellules indifférenciées et en cours de division; en effet, ces cellules possèdent des parois minces et en conséquence fragiles.

L'écorce de l'arbre comporte non seulement l'écorce au sens anatomique du terme (ou périderme défini plus haut), mais aussi le parenchyme cortical et l'ensemble du phloème.

Un examen histologique comparé du cœur et de l'aubier montre que si le premier est exclusivement constitué de cellules mortes et vides, par contre les cellules parenchymateuses du second sont encore vivantes. Après leur mort, transformant ainsi une nouvelle tranche d'aubier en cœur, les tanins, les résines et les sels d'acides organiques vont s'y déposer, provoquant un durcissement et un changement de teinte.

Les cernes observables dans tout le bois correspondent aux alternances de saisons. Chaque cerne est composé, de l'intérieur vers l'extérieur, d'un *bois initial* de printemps, clair à gros vaisseaux et à fibres peu abondantes, et d'un *bois final* d'automne, plus sombre, pauvre en vaisseaux et riche en fibres. La limite entre deux cernes successifs correspond à une interruption du fonctionnement du cambium pendant l'hiver. Donc, théoriquement, pour connaître l'âge d'un arbre abattu, il suffit de compter les cernes. Dans les pays tropicaux à saisons sèches bien définies, la succession bois initial-bois final est provoquée par l'alternance entre les saisons sèches et les saisons humides. Dans les pays équatoriaux où la végétation est continue toute l'année, de nombreux bois ne possèdent pas de cernes.

Enfin, les nœuds enfouis dans le bois correspondent aux *traces raméales,* c'est-à-dire aux cordons vasculaires des ramifications secondaires.

Le rhytidome

Sur un arbre en place, seule l'écorce au sens vulgaire du terme est visible; l'aspect en est très variable mais caractéristique pour une essence donnée. L'écorce du hêtre ainsi que celle du charme sont très lisses; par contre, celles de l'orme et du chêne sont profondément craquelées, à crevasses verticales et horizontales délimitant d'épaisses écailles. En général, la vieille écorce s'exfolie peu à peu, chassée par une plus jeune, formée en profondeur; ce processus s'effectue de façon plus ou moins spectaculaire suivant les essences. Ainsi, l'écorce du bouleau et celle du merisier partent en lambeaux horizontaux, celle du platane par morceaux en jeu de patience, celles du poirier et du pommier par petits fragments. Une étude histologique permet d'interpréter les différents cas.

Il convient tout d'abord de donner quelques précisions concernant les différentes acceptions du mot *écorce* et les synonymies correspondantes. Les tissus situés à l'extérieur du phellogène et des couches de liège les plus profondes meurent rapidement, et sont isolés du reste du végétal par l'imperméabilité même du liège. Cet ensemble de tissus morts s'appelle le *rhytidome,* ou écorce au sens commun. L'écorce du botaniste inclut, en plus du rhytidome, tous les tissus d'origine péridermique. Enfin, l'écorce du bûcheron s'arrête, elle, à l'assise génératrice libéro-ligneuse, incluant en plus du périderme le parenchyme cortical avec d'éventuels faisceaux corticaux, et le phloème avec ses fibres libériennes dont la structure est semblable à celle qui a été vue chez le sureau.

Le premier rhytidome formé est plus ou moins épais suivant que l'assise subéro-phellodermique se forme plus ou moins profondément. Celle-ci apparaît au niveau de l'épiderme chez le laurier-rose *(Nerium oleander),* sous l'épiderme chez le sureau (comme nous l'avons vu précédemment) et chez le noisetier *(Corylus avellana),* dans le parenchyme cortical chez le robinier *(Robinia pseudoacacia),* ou plus profondément, à la limite du protophloème, chez le peuplier noir *(Populus nigra).*

L'assise peut soit fonctionner durant toute la vie de l'arbre, soit être remplacée par un nombre variable d'assises. Ces dernières apparaissent alors plus profondément, parfois jusque dans le phloème. Plusieurs assises peuvent fonctionner soit successivement, soit simultanément. Elles peuvent être continues et faire le tour du cylindre central ou être discontinues et présenter, en coupe transversale, l'aspect d'arcs à concavité tournée vers l'extérieur.

L'éventail varié des aspects morphologiques du rhytidome s'explique en partie par la complexité d'apparition et de fonctionnement des phellogènes. Chez le charme et le hêtre, l'assise génératrice, très superficielle, fonctionne toute la vie de l'arbre, lui donnant une écorce lisse et mince. Chez le tilleul et le sapin, la première assise formée finit par être supplantée par des assises surnuméraires, ce qui donne un aspect crevassé au rhytidome.

Lorsque les assises sont nombreuses, superficielles et discontinues, chacune fabrique un petit bout d'écorce donnant au rhytidome un aspect écailleux. Par exemple, chez l'orme, les « écailles » de plus en plus épaisses persistent toute la vie de l'arbre; par contre, chez le platane, elles se desquament peu à peu. Enfin, lorsque les assises sont nombreuses, mais continues et profondes, le rhytidome est dit *annulaire;* il est persistant mais se fendille sous la poussée des tissus sous-jacents. Les lenticelles disparaissent avec le rhytidome qui s'exfolie, et il en apparaît d'autres sur les nouvelles écorces.

Étude détaillée du bois

Après avoir décrit l'écorce sous ses aspects macroscopiques et microscopiques, nous allons faire le même type d'observations sur le bois proprement dit. L'observation que nous avons faite d'une coupe transversale de tronc suivie d'interprétations histologiques est tout à fait insuffisante, en raison de la complexité du bois. Il convient donc de la compléter par l'analyse macroscopique (aspect du bois sur planches, meubles, etc.) et microscopique de coupes anatomiques.

En plus des coupes transversales, il est nécessaire d'envisager deux types de coupes longitudinales : les unes passant exactement par l'axe de la branche ou du tronc à étudier, dites *longitudinales radiales,* les autres ne passant pas par l'axe, dites *longitudinales tangentielles.* Dans ce second cas, pour obtenir des renseignements différents, il convient d'effectuer les coupes le plus loin possible de l'axe.

L'étude histologique de ces coupes révèle l'existence de deux types d'initiales cambiales. Les unes, dites *initiales cambiales fusiformes,* sont plus ou moins comprimées dans le sens radial et allongées parallèlement à l'axe du rameau; elles sont à l'origine des éléments du système longitudinal ou vertical : vaisseaux, fibres, parenchyme ligneux. Les autres, beaucoup plus petites, et approximativement isodiamétriques, sont en coupe transversale, isolées ou groupées par paquets intercalés parmi les précédentes, et donnent les éléments du système radial ou horizontal : les rayons ligneux, encore appelés *parenchyme horizontal.* Les coupes transversales sont perpen-

diculaires aux éléments verticaux; les coupes longitudinales leur sont parallèles.

Décrivons tout d'abord le *système longitudinal* Pour transporter la sève dans le bois, il existe deux éléments fondamentaux : les trachéides et les vaisseaux.

Les **trachéides** sont uniquement ponctuées. Les *ponctuations* sont des lieux de passage de la sève située sur les faces latérales des éléments conducteurs. Au niveau de la perforation, la paroi perd sa partie lignifiée imperméable et seule reste la partie non lignifiée.

Les **vaisseaux** sont ponctués et perforés. Les *perforations* sont des ouvertures situées aux extrémités des éléments conducteurs permettant un passage longitudinal de la sève. A leur niveau, la paroi a complètement disparu et est remplacée par un trou.

Un bois qui ne possède que des trachéides est dit *homoxylé;* c'est le cas des Gymnospermes (le pin). Un bois possédant à la fois des trachéides et des vaisseaux est dit *hétéroxylé;* c'est le cas des Dicotylédones (le chêne). Par ailleurs, en coupe transversale, chez le chêne par exemple, le bois initial présente des pores énormes (300 à 500 μ de diamètre), placés sur deux à quatre rangs; il s'agit de vaisseaux à gros diamètre. Dans le bois final, les vaisseaux ont un tout petit diamètre (20 μ) et sont placés en rangées radiales. Un tel *bois* est *hétérogène :* chaque cerne présente une zone poreuse très marquée et une zone pratiquement sans pores. Par contre, un *bois homogène* présente des pores tous de même diamètre répartis dans tout le cerne (le sureau). Sur des planches de chêne, les gros vaisseaux coupés longitudinalement se présentent comme des rainures; les zones de rainures sombres alternent avec les zones lisses plus claires.

En plus des éléments conducteurs, le système longitudinal possède des **fibres,** éléments de soutien souvent très longs, terminés en biseau et sclérifiés. Parfois, les fibres ont pour origine des trachéides transformées; elles s'appellent alors *fibres-trachéides.* Leurs ponctuations sont *aréolées* avec des orifices lenticulaires ou en fente. Une seconde catégorie de fibres, les fibres *libriformes,* à ponctuations simples, sont considérées comme plus évoluées que les fibres-trachéides. Les fibres libriformes, très abondantes chez le chêne rouvre, forment la masse des tissus fibreux entre les plages des petits vaisseaux dans le bois final. Par contre, chez le chêne-liège, espèce à feuilles persistantes, ce sont les fibres-trachéides qui constituent l'essentiel du tissu fibreux.

Enfin, toujours dans le système longitudinal, on trouve un **parenchyme vertical,** souvent en position circumvasculaire; il s'agit essentiellement d'un tissu de réserve.

Les **rayons** forment le *système radial.* En coupe longitudinale radiale, ils sont allongés horizontalement. Leur grand axe est perpendiculaire à celui des autres éléments. Les endroits où les rayons croisent les autres éléments du bois s'appellent les *champs de croisement.* Les parois de leurs cellules étant souvent lignifiées, les rayons constituent un important élément de soutien du bois, et, dans bien des cas, la solidité de ce dernier en dépend.

Chez le chêne, les *rayons* sont *homogènes,* c'est-à-dire que toutes les cellules qui les constituent sont plus ou moins allongées radialement : elles sont dites *couchées.* Par contre, le tilleul possède des *rayons hétérogènes :* en plus des cellules couchées, existent des cellules dressées généralement en position marginale.

Les rayons du chêne sont de deux types. Les uns, petits, unisériés (de 5 à 10 cellules de hauteur), apparaissent en coupe tangentiellement comme un empilement lenticulaire de petites cellules carrées. Ils ne sont bien entendu pas visibles à l'œil nu, sauf en coupe radiale, où ils apparaissent comme de très fines mouchetures. Les autres, plurisériés, très larges (20 cellules), peuvent atteindre 6 cm et forment des maillures caractéristiques, c'est-à-dire des plages très lisses et claires en forme de croissant fin sur les faces radiales. Ils sont très faciles à repérer sur un meuble en chêne. Les champs de croisement, qui sont toujours pourvus de ponctuations, ont une signification diagnostique particulièrement importante. Chez le chêne rouvre, les ponctuations rayon-vaisseau sont grandes et elliptiques, alors qu'elles sont circulaires chez le noyer.

Pour conclure cette étude, dont le bois de chêne rouvre a été un exemple de base, on peut résumer les caractéristiques d'identification de cette essence fournies par le Centre technique du bois.

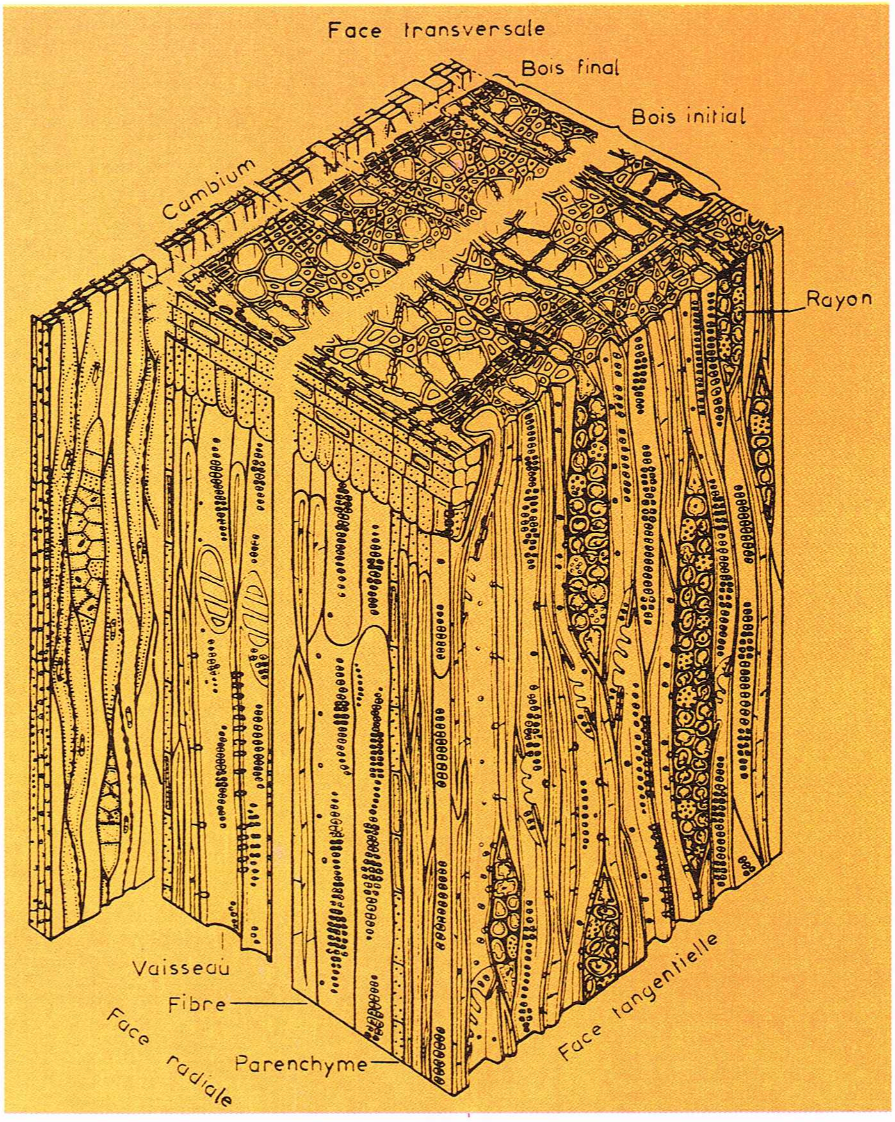

▲ ***Un bois possédant à la fois des* trachéides *et des* vaisseaux *est dit* hétéroxylé*; c'est le cas des Dicotylédones (le chêne); ici, représentation schématique en perspective d'un cube de bois secondaire hétéroxylé.* (M. Guinochet, Notions de botanique générale - *1965 - Masson et C^ie^, Paris.*)**

Caractères macroscopiques :
— structure hétérogène : zone poreuse très marquée;
— cernes visibles à l'œil nu;
— vaisseaux de printemps visibles à l'œil nu, vaisseaux d'été visibles à la loupe;
— rayons plurisériés nettement visibles à l'œil nu (maillures).

Caractères microscopiques :
— rayons homogènes uni- et plurisériés;
— fibres à parois très épaisses;
— parenchyme abondant.

Pour donner une idée des variations possibles chez les seules Dicotylédones, voici résumées les caractéristiques du bois de peuplier.

Caractères macroscopiques :
— structure homogène sans zone poreuse;
— cernes visibles à l'œil nu;
— vaisseaux, même les plus gros, invisibles à l'œil nu;
— rayons très fins, invisibles à l'œil nu.

Caractères microscopiques :
— rayons homogènes unisériés;
— parenchyme rare.

L'amplitude des variations est encore plus grande entre les Angiospermes et les Gymnospermes, chez lesquelles, rappelons-le, le bois est homoxylé, donc sans pores en coupe transversale. Les différents éléments ont approximativement le même diamètre. Le bois final se distingue du bois initial par une teinte plus foncée et une texture plus serrée. Les rayons sont en général unisériés et les ponctuations des champs de croisement présentent quatre types : les *pinoïdes* (pin), les *taxodioïdes* (if), les *cupressoïdes* (cyprès) et les *picéoïdes* (sapin). Toutes ces variations d'ordre systématique ont pour corollaire le

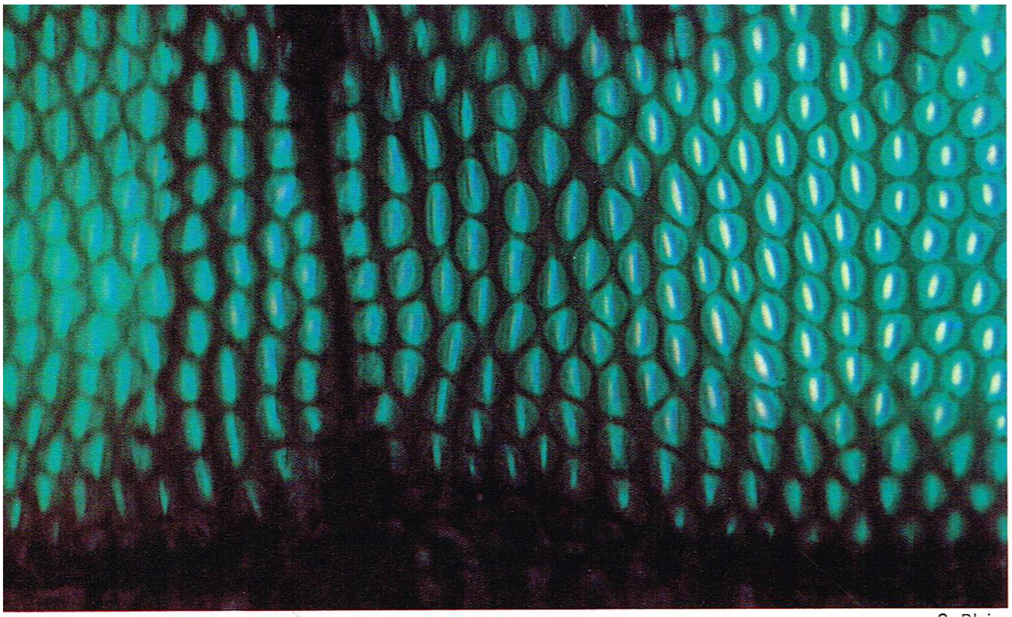

S. Blaise

▲ *Coupe longitudinale* **de vaisseau ponctué.**

fait que le bois fournit d'excellents critères de détermination aussi bien pour le botaniste que pour l'ébéniste.

Les variations portant sur la taille des rayons, le nombre des fibres, la taille des pores entraînent des variations dans les caractéristiques techniques des bois et partant dans les utilisations possibles des différentes essences considérées. Ainsi, tel arbre sera recherché pour la souplesse de son bois (cintrage), tel autre pour sa dureté, tel autre pour sa teinte, etc. Il existe des variations écologiques. Par exemple, un épicéa originaire du haut Jura ou de Savoie fournira un bois plus robuste, parce que de texture plus serrée, qu'un spécimen de la même espèce ayant poussé en plaine. Les cernes du premier sont plus étroits (1 à 3 mm), le bois initial lâche y est peu développé, tandis que celui de plaine présente des cernes deux à trois fois plus larges, dans lesquels le bois initial plus mou sera très développé. L'ébéniste appréciera donc le premier bois, car il présente des caractéristiques mécaniques meilleures.

Les principales variations histologiques et anatomiques du bois permettent de tirer des conclusions phylogénétiques et donc systématiques.

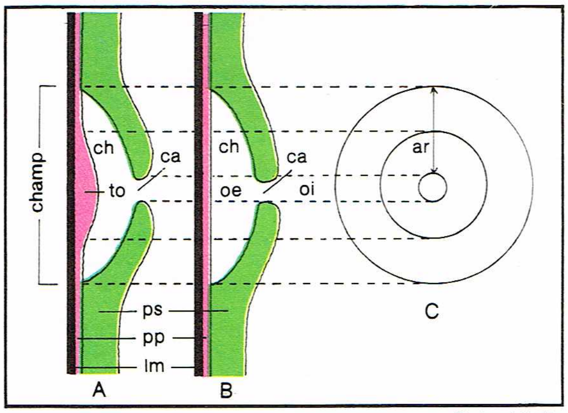

Richard Colin

▶ *Représentation* **schématique** *d'une* **ponctuation aréolée :** *ar, aréole; ca, canal; ch, chambre; lm, lamelle moyenne; pp, paroi primaire de la membrane; ps, paroi secondaire de la membrane; oe, ouverture externe; oi, ouverture interne; to, torus; A et B, coupes longitudinales; C, vue de face.*

▼ *Représentation* **schématique** *de* **l'évolution des ponctuations aréolées :** *on observe la diminution du champ et l'étirement de l'ouverture interne.*

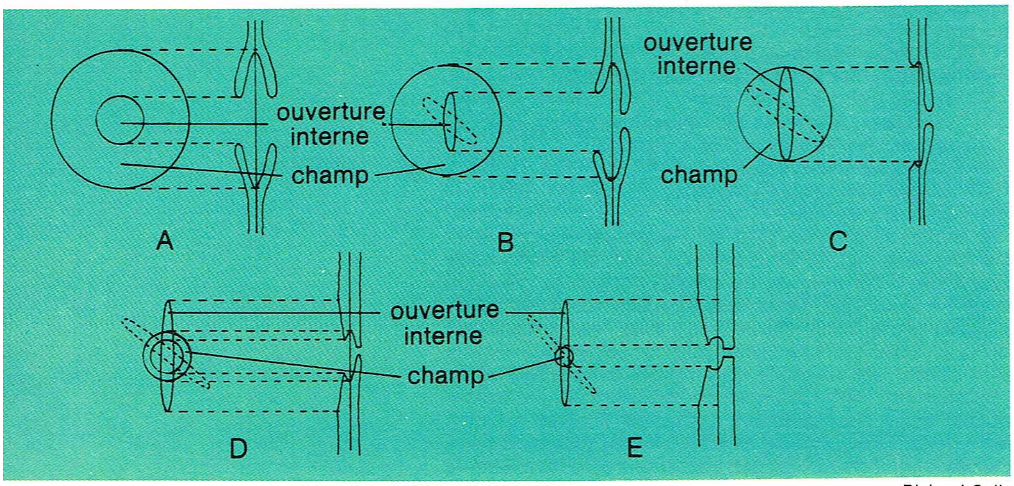

Richard Colin

— Comme premier exemple de cet intérêt, on peut citer les **ponctuations** des trachéides des Abiétinées (*Abies,* ou sapin) et des Araucarioïdés *(Araucaria).*

Avant de traiter des ponctuations proprement dites, il faut faire un rappel sur la structure de la paroi, cadre rigide qui entoure la cellule végétale. A la fin de la mitose, des composés pectiques se déposent sur les substances protidiques initiales du fuseau achromatique. L'ensemble de ces éléments va constituer la *lamelle moyenne.* De part et d'autre de cette lamelle moyenne apparaissent très rapidement des dépôts pecto-cellulosiques, qui vont constituer la *paroi primaire* des deux cellules filles. Ensuite, dans de nombreuses cellules en cours de différenciation, se dépose vers l'intérieur une nouvelle couche, appelée *paroi secondaire,* constituée principalement d'éléments cellulosiques. Enfin, la paroi cellulaire peut subir des modifications chimiques totales ou partielles telles que la lignification, la subérisation, la minéralisation, etc. En certains endroits, la paroi secondaire présente des interruptions : ce sont les *ponctuations.*

Sur les trachéides des sapins et des araucarias, les ponctuations sont *aréolées.* Un décollement de la paroi secondaire forme voûte au-dessus du champ de la ponctuation, c'est-à-dire au-dessus de la surface qu'elle occupe. La partie située entre la paroi primaire et cette voûte s'appelle la *chambre,* et le trou de la paroi secondaire se nomme le *canal;* celui-ci fait communiquer la chambre avec la cellule. Vue de face, la voûte forme une bordure, ou *aréole* (d'où le nom de ce type de ponctuation). Dans le prolongement du canal, la paroi primaire montre une boursouflure : le *torus.*

Les contours externe et interne de l'aréole limitent, respectivement, le champ de la ponctuation et l'ouverture du canal, donnant (dans le cas le plus primitif, où les ouvertures sont circulaires) l'aspect de deux cercles concentriques. Au fur et à mesure que l'on considère des végétaux de plus en plus évolués, les ouvertures s'étirent et deviennent ellipsoïdales, pour donner finalement une fente en boutonnière. Chez le sapin et l'araucaria, elles sont circulaires.

Sur les trachéides des Gymnospermes, les ponctuations sont généralement **plurisériées.** Elles se font face d'une série à l'autre chez les sapins (on les dit opposées), alors qu'elles sont alternées chez les araucarias. Actuellement, chacune de ces deux espèces présente un seul type d'ornementation des trachéides. Cependant, il n'en a pas toujours été ainsi; par exemple, le *Protocarpoxylon,* Gymnosperme fossile de l'ère secondaire, possède des trachéides à ponctuations soit alternées, soit opposées, et parfois mixtes. Ce caractère, entre autres, a conduit à admettre l'existence d'un groupe ancien : les Protopinacées, qui seraient l'ancêtre des Conifères actuels.

On le voit, dans le cas particulier des Gymnospermes, l'étude des ponctuations fournit des renseignements d'ordre systématique, évolutif et paléobotanique.

— Deuxième exemple : citons les éléments de vaisseau des Dicotylédones. Un vaisseau est formé de cellules mortes mises bout à bout et communiquant entre elles par les perforations; chacune de ces cellules est appelée **élément de vaisseau.**

Suivant les groupes considérés, ces éléments sont plus ou moins longs; parfois deux groupes systématiquement proches peuvent montrer des variations importantes. Ainsi, chez les Magnoliacées, les éléments de vaisseaux mesurent 800 à 1 000 μ, tandis que chez les Renonculacées, ils n'ont que 400 à 500 μ de longueur. On admet que les espèces à petits éléments de vaisseaux sont plus évoluées que celles à grands éléments; d'autre part, les Renonculacées sont des espèces herbacées ou lianescentes (clématite), donc considérées comme plus évoluées.

Il est aussi intéressant d'étudier la perforation. Elle peut être simple si la paroi a disparu totalement, ne laissant qu'un vestige annulaire, réticulée, si elle est formée d'une multitude de petits trous en ordre quelconque, scalariformes, si les petites ouvertures sont parallèles entre elles et perpendiculaires au grand axe de l'élément de vaisseau. Par exemple, il est souvent difficile de séparer les bois de bouleau et d'érable. Les éléments de vaisseau du bouleau possèdent des perforations scalariformes, alors que l'érable a des perforations simples. En règle générale, les espèces dont les vaisseaux présentent des perforations simples sont les plus évoluées; c'est le cas des Légumineuses.

S. Blaise et C. Sastre

◄ ***Coupe transversale de tige de Monocotylédone : ici une tige d'asperge (Asparagus officinalis) ; sous l'écorce (en rose), on peut noter la présence de sclérenchyme (en vert foncé) et de nombreux faisceaux libéro-ligneux avec de gros vaisseaux de métaxylème en position périphérique.***

Les tiges de Monocotylédones

Il n'est pas possible de généraliser tout ce qui vient d'être dit sur la tige et le bois à l'ensemble des Angiospermes. Les Monocotylédones font exception : elles ne réalisent généralement que le développement et la différenciation des éléments vasculaires primaires. Comme nous l'avons vu à propos du sceau de Salomon, si la racine limite en général des différenciations vasculaires à la phase alterne et centripète, la tige par contre dépasse presque toujours la troisième phase superposée centrifuge et atteint une quatrième phase évolutive : la *phase périphérique* propre aux Monocotylédones.

On peut observer cette phase sur la tige florifère du sceau de Salomon. D'une tige souterraine, ou rhizome, croissant parallèlement à la surface du sol, partent chaque année des pousses aériennes semblables à des pieds de muguet ; chaque pousse comporte une tige portant quelques feuilles pennées et se terminant par une hampe florale. Sur des coupes transversales de la tige florifère, colorées au carmin vert d'iode, un anneau vert clair, épais, marque approximativement la limite entre une écorce et un cylindre central (sans réelle signification anatomique) ; il s'agit d'une gaine de plusieurs assises de cellules à épaississements ligneux, englobant de minuscules faisceaux libéro-ligneux. Dans le « cylindre central », les autres faisceaux libéro-ligneux, nombreux, sont disposés en plusieurs cercles, les plus internes étant les plus jeunes. Chacun d'eux présente un massif circulaire de phloème entouré partiellement par le xylème, qui dessine un V ; le protoxylème occupe la pointe du V, dirigée vers l'intérieur ; les éléments du métaxylème, de plus en plus gros vers l'extérieur, en occupent les deux branches. Chaque faisceau est lui-même entouré d'une gaine de cellules sclérenchymateuses. Un parenchyme à peine cellulosique, limité par l'épiderme, constitue l'écorce.

Dans l'évolution du cylindre central, ou stèle, telle qu'elle sera décrite plus loin, la tige des Monocotylédones présente une structure finale dite *atactostélique*.

En principe, les Monocotylédones ne possèdent pas de formations secondaires ; il n'est cependant pas rare d'en observer chez de nombreuses Liliacées vivaces : yuccas, *Aloes,* dragonnier *(Dracaena),* où l'accroissement en diamètre de la tige est assuré par le fonctionnement d'un cambium. Ce dernier n'apparaît pas, comme chez les Dicotylédones, entre le phloème et le xylème (cambium intrafasciculaire) mais à la périphérie de la zone des faisceaux libéro-ligneux. Il donne vers l'extérieur quelques rangées de petites cellules et vers l'intérieur un important parenchyme secondaire dans lequel se différencient des faisceaux cribro-vasculaires. Ce parenchyme se sclérifie souvent dans la tige âgée. A la périphérie de la tige se constitue un suber, lequel est issu non pas du fonctionnement d'un cambium mais du cloisonnement tangentiel des couches superficielles du parenchyme cortical.

Le *chaume,* ou tige des Graminées, s'il ne présente pas de formations originales, n'en est pas moins intéressant à analyser en raison même de l'existence de structures particulières ; celles-ci assurent la rigidité des tiges, parfois très hautes pour un faible diamètre et souvent terminées par un épi très lourd à maturité. Une coupe transversale faite dans un chaume au niveau d'un entre-nœud montre que la tige est réduite à un anneau périphérique de tissus entourant une lacune centrale : la tige est creuse, sauf au niveau des nœuds. La lacune centrale est limitée par deux zones concentriques de tissus : une zone interne verte sclérifiée, englobant deux cercles de faisceaux libéro-ligneux, et une zone externe rose de cellules parenchymateuses cellulosiques. Cette dernière est traversée par une

▼ ***Coupe de chaume de Graminée (Monocotylédones) ; sur cette coupe réalisée au niveau d'un entre-nœud, on peut observer la lacune centrale très importante et deux couronnes de faisceaux libéro-ligneux.***

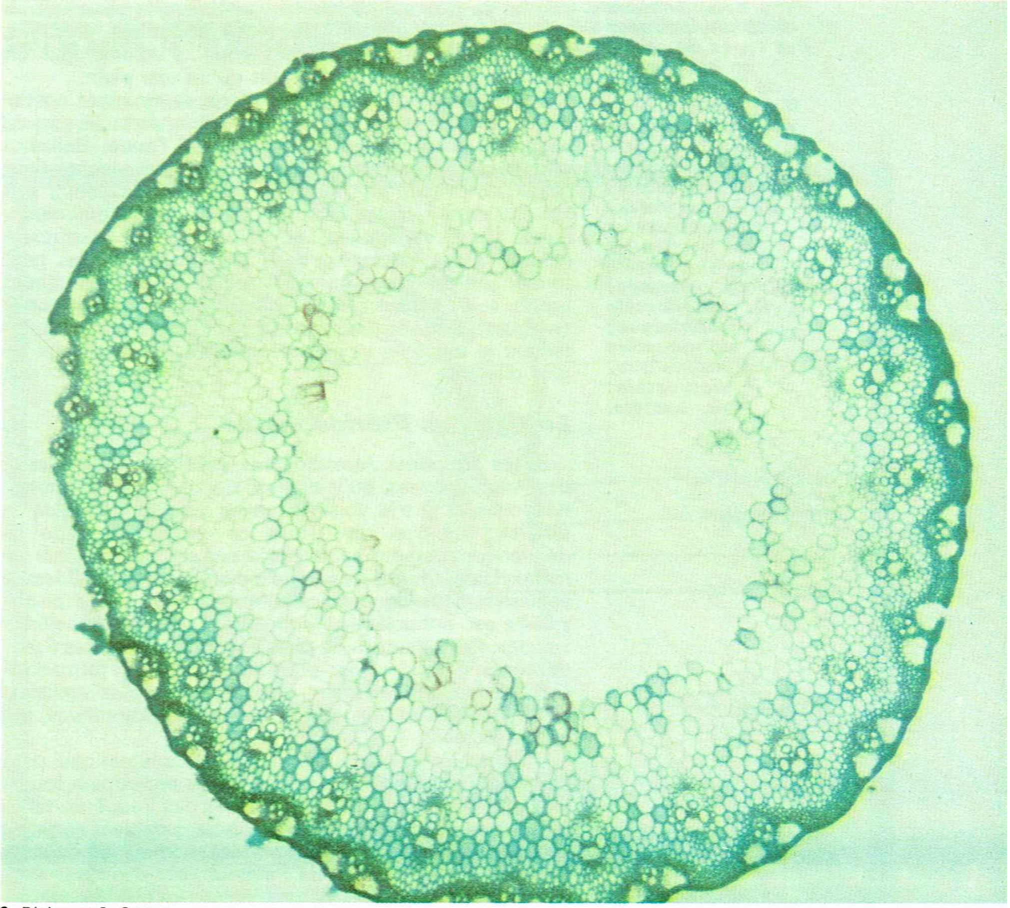

S. Blaise et C. Sastre

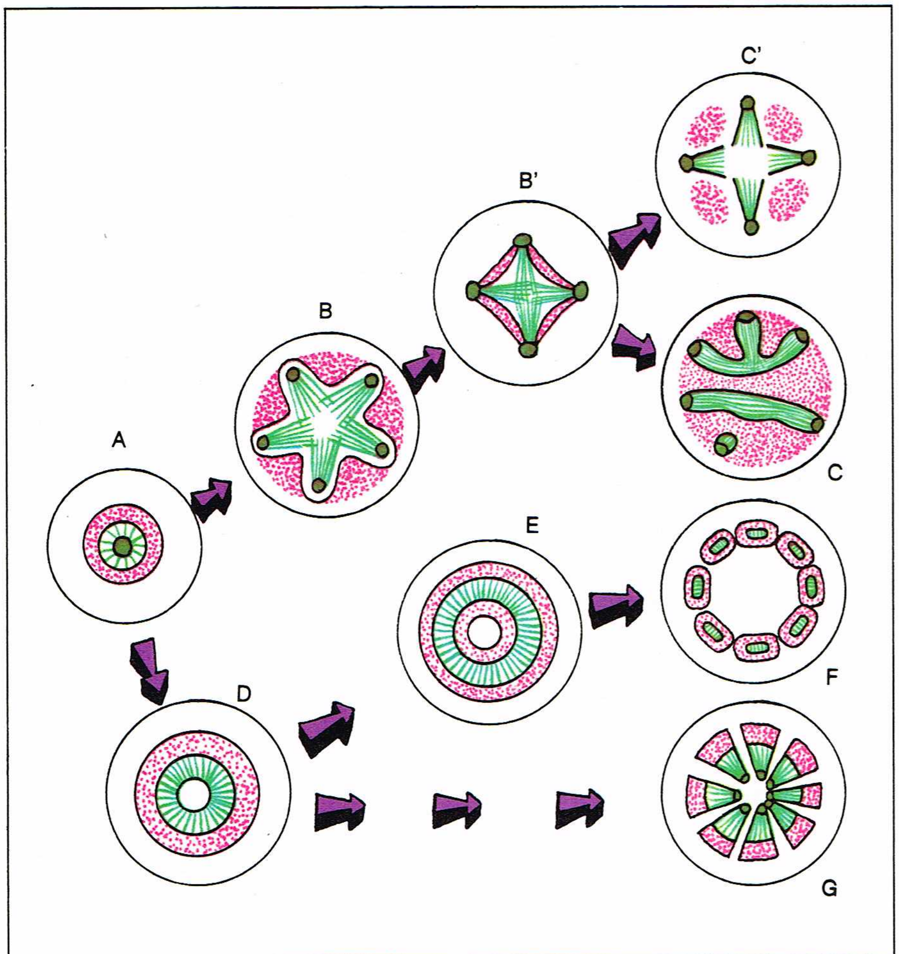

Richard Colin

▲ *Schéma de la phylogenèse des types de stèle; en haut, série de l'actinostèle; au milieu, série de la dictyostèle; en bas, série de l'eustèle; A, protostèle; B et B', actinostèles; C, plectostèle; C', cas particulier de plectostèle (racine d'Angiosperme); D, siphonostèle ectophloïque; E, siphonostèle amphiphloïque; F, dictyostèle; G, eustèle.*

dizaine de piliers de sclérenchyme reliant la zone interne sclérifiée à l'épiderme. De telles structures illustrent, notamment, le principe suivant lequel, à volume égal, un cylindre creux est plus résistant qu'un axe plein.

En dehors de quelques exceptions, la structure anatomique fondamentale des Monocotylédones subit peu de variations d'un groupe systématique à l'autre. Celles-ci portent, d'une part, sur la disposition générale des faisceaux, se plaçant soit sur deux rangs (Graminées), soit sur plusieurs cercles (sceau de Salomon et nombreuses autres Monocotylédones), et, d'autre part, sur la structure même de ces faisceaux, dans lesquels le xylème peut former soit un massif compact accolé au phloème (petit houx), soit un massif en V (sceau de Salomon) ou en O (muguet). Dans ce dernier cas, le xylème entoure complètement le phloème et ne présente plus de vaisseaux de gros diamètre.

La tige des Ptéridophytes

Si les structures histologiques des Gymnospermes et des Angiospermes, qu'il s'agisse de Di- ou de Monocotylédones, sont très voisines, celles des Ptéridophytes en diffèrent quelque peu. Tous les représentants de ce dernier groupe sont caractérisés par un type original de métaxylème, formé essentiellement de trachéides à épaississements ligneux scalariformes, alors que le protoxylème est, normalement, constitué d'éléments annelés et spiralés. Par ailleurs, à de rares exceptions près, les Ptéridophytes actuelles ne présentent pas de formations secondaires, contrairement à leurs ancêtres, les sigillaires et les lépidodendrons, arbres des forêts carbonifères, qui en possédaient.

Un premier exemple d'organisation anatomique peut être fourni par les Filicinées, lesquelles regroupent toutes les Fougères. Les feuilles, ou frondes des Fougères, telles qu'elles se rencontrent dans nos bois, semblent sortir du sol; elles sont effectivement portées, comme les pousses de muguet ou de sceau de Salomon, par des tiges souterraines horizontales : les rhizomes.

Si l'on colore des coupes transversales effectuées dans un rhizome de polypode, *Polypodium vulgare,* Fougère très commune à feuilles découpées une seule fois, on observe, limité extérieurement par un épiderme, un parenchyme bourré d'amyloplastes, englobant des cordons vasculaires disposés sur une circonférence assez régulière. Ces cordons ressemblent beaucoup à des faisceaux libéro-ligneux, mais chacun d'entre eux est nettement délimité par un péricycle, un endoderme et une gaine très marquée de cellules sclérenchymateuses; chacun d'eux ressemble donc à un petit cylindre central. A l'intérieur de l'assise dédoublée du péricycle, on observe une bande diamétrale de xylème à gros vaisseaux centraux et à vaisseaux de petit calibre aux deux extrémités. Ces derniers indiquent l'existence de deux pôles de protoxylème et permettent de penser que deux faisceaux libéro-ligneux, ayant secondairement conflué, sont à l'origine de cet unique massif de xylème. De part et d'autre, c'est-à-dire en alternance avec les deux faisceaux ligneux composant le massif, se distinguent deux faisceaux de phloème séparés des vaisseaux du xylème par quelques rangées de parenchyme amylifère. Le système vasculaire de chaque cylindre central est à la phase alterne centripète. Deux de ces cylindres peuvent s'anastomoser; le péricycle et l'endoderme deviennent alors communs, mais les différents pôles ligneux et criblés restent distincts. Dans un même rhizome, il peut y avoir sept ou huit de ces petits « cylindres centraux », encore appelés méristèles.

L'organisation apparemment polystélique du rhizome des Fougères se rapproche de celle des Monocotylédones. En fait, le terme « polystèle », impliquant l'existence de plusieurs stèles dans un même organe : tige, rhizome, racine, etc., n'est plus retenu actuellement. La stèle représente l'ensemble du système conducteur primaire axial occupant tige et racine. Si, en coupe transversale, elle apparaît souvent morcelée en éléments distincts (méristèles), en coupe longitudinale, ces unités indépendantes se révèlent en fait reliées les unes aux autres à différents niveaux. D'ailleurs, en raison même de la fonction de conduction de l'appareil libéro-ligneux, ce dernier ne peut être que continu. Il faut donc toujours, après avoir observé le système conducteur en coupe transversale, l'envisager dans l'espace. C'est dans cette optique que l'on peut aborder son évolution à travers les végétaux vasculaires. De cette évolution nous n'avons vu jusqu'ici que les étapes finales : par exemple, l'*eustèle* des tiges de Dicotylédones, l'*atactostèle* des tiges de Monocotylédones, la *dictyostèle* des Filicinées, etc. Nous emprunterons des exemples illustrant les premières étapes de cette évolution aux différents groupes de Ptéridophytes actuels et fossiles.

Évolution de la stèle

La vraie stèle, la plus simple, est la **protostèle** : le xylème y forme l'axe plein, le phloème, un manchon périphérique; le xylème peut n'y présenter qu'un seul pôle central : la protostèle est alors *monarche endarche* (tel est le cas des *Rhynia,* Ptéridophytes fossiles parmi les plus anciennes plantes vasculaires connues; c'est encore le cas actuellement des toutes jeunes tiges de sélaginelles et de *Botrychium*). Le pôle de protoxylème peut être accolé au péricycle : la protostèle est alors *monarche exarche* (c'est le cas, entre autres, des racines et des rhizophores de certaines sélaginelles). Le xylème peut aussi y présenter deux pôles de protoxylème : la protostèle est alors *diarche* (c'est le cas de la racine de polypode où la stèle a la même structure que chaque méristèle du rhizome). Le xylème peut enfin y présenter de nombreux pôles adossés au péricycle : on a alors une protostèle *polyarche exarche* (tige des lépidodendrons).

Le cylindre de xylème arrive ainsi, peu à peu, à être sinueux sur ses bords, voire plus ou moins régulièrement lobé, les pôles de protoxylème se situant à l'extrémité de chacun de ces lobes. La masse ligneuse apparaît donc plus ou moins étoilée en section transversale, d'où le nom d'*actinostèle* donné à ce type de stèle. Le phloème forme des plages entre les lobes du xylème.

Dans la tige de *Lycopodium clavatum* par exemple, en coupe transversale, le xylème ne forme plus une étoile à branches multiples mais des rubans plongés dans le phloème; il s'agit alors d'une **plectostèle.** La structure primaire alterne de la racine des Gymnospermes et Angiospermes représente également une actinostèle fragmentée, ou plectostèle.

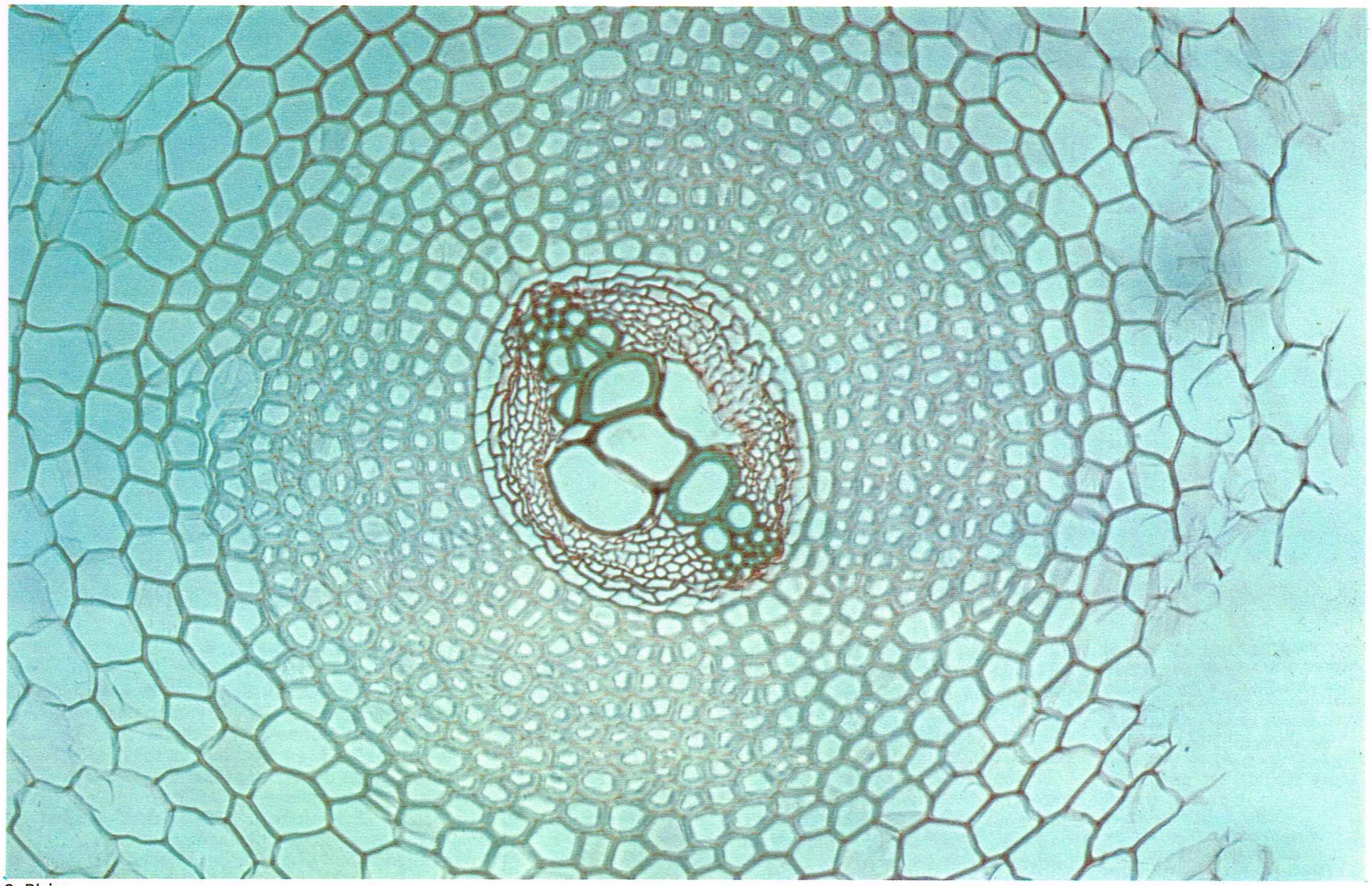

S. Blaise

▲ ***Coupe transversale de racine de Fougère (Ptéridophytes) montrant une structure simple de stèle comprenant deux pôles de protoxylème orientés vers le péricycle : il s'agit d'une protostèle diarche exarche.***

La **siphonostèle** dérive de la protostèle par apparition d'une moelle centrale, autour de laquelle xylème et phloème forment deux manchons successifs emboîtés. Elle est *ectophloïque* lorsqu'il n'y a qu'une couche externe de phloème, et *amphiphloïque* lorsqu'il y a deux couches de phloème, l'une extérieure, l'autre intérieure au xylème.

Dans les tiges siphonostéliques, le cylindre vasculaire peut être percé de trous, ou fenêtres, ou encore *brèches foliaires,* situées juste au-dessus de l'arrivée des cordons vasculaires des différentes feuilles (traces foliaires) ou des différents rameaux (traces raméales). Lorsque les feuilles sont petites et espacées, le cylindre vasculaire, bien que percé de trous, garde son intégrité; on parle alors de **solénostèle.** Dans ce cas, en coupe transversale, la stèle n'est interrompue qu'en un seul endroit (la tige de *Marsilea* offre un exemple de ce type).

Cependant, lorsque la structure du cylindre vasculaire devient réticulaire par augmentation du nombre et de la taille des brèches foliaires, on observe, en coupe transversale, non plus un anneau mais des fragments vasculaires de l'ancienne siphonostèle, appelés, par exemple, méristèles dans le rhizome de polypode. Une stèle présentant ces caractères est une **dictyostèle.** Lorsque la dictyostèle dérive d'une siphonostèle ectophloïque, il existe un seul péricycle externe, en général continu. Lorsqu'elle dérive d'une siphonostèle amphiphloïque, les péricycles externes et internes se rejoignent aux deux extrémités, et chaque méristèle est alors entourée d'un péricycle propre (méristèles du polypode).

Au terme de cette évolution, les brèches foliaires sont si grandes que le cylindre de la siphonostèle a totalement disparu; seules subsistent les traces foliaires ou cordons vasculaires provenant des feuilles. Il s'agit cette fois d'une **eustèle** (cas de la structure primaire de la tige des Dicotylédones et de quelques Monocotylédones).

Ces traces foliaires courent dans la tige suivant des trajets plus ou moins longs (jusqu'à plusieurs entrenœuds chez de nombreuses Dicotylédones) et plus ou moins compliqués. Parfois, les cordons s'anastomosent; parfois aussi, pendant le trajet, leur nombre augmente

▼ ***Représentation schématique de la structure méristélique du rhizome de polypode* (Polypodium vulgare — *Ptéridophytes*).**

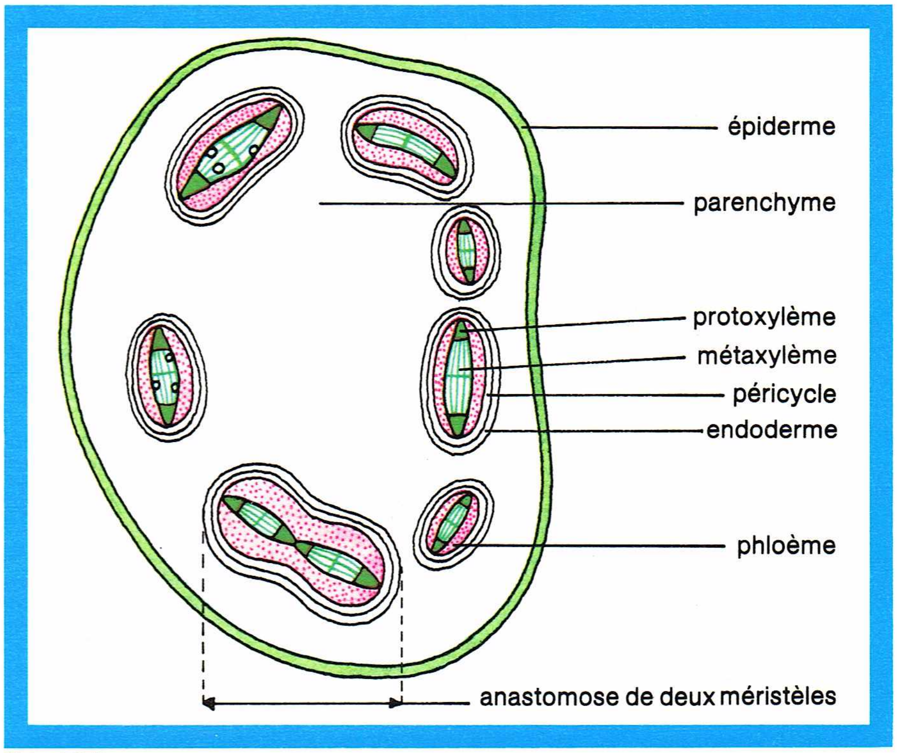

Richard Colin

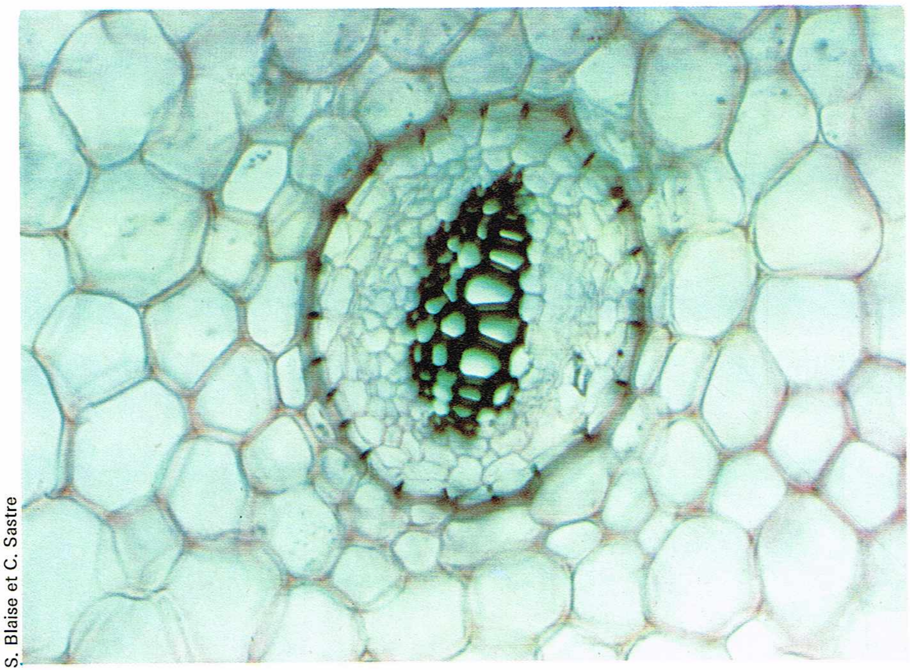

S. Blaise et C. Sastre

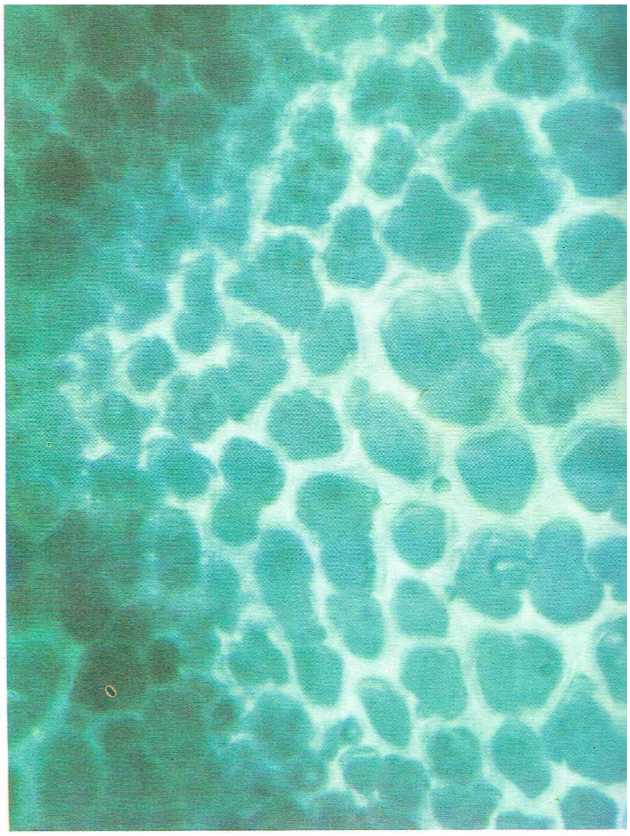

S. Blaise et C. Sastre

▲ ***A gauche, détail d'une méristèle de rhizome de polypode; au centre, on observe une bande diamétrale de vaisseaux de xylème avec, de part et d'autre, deux massifs de phloème. A droite, détail du faisceau axial d'hydroïdes d'une tige de polytric commun*** **(Polytrichum commune** — ***Bryophytes*)**.

par rapport à celui des traces foliaires de départ. Lorsque les traces foliaires suivent des trajets très particuliers, elles peuvent, en coupe transversale, apparaître sur plusieurs cercles successifs. On a alors une **atactostèle** (un exemple typique est celui de la tige florifère du sceau de Salomon).

En conclusion, à partir de la protostèle monarche endarche des *Rhynia,* se dégagent deux grands types de directions évolutives; l'une aboutit à la structure primaire de la racine des Angiospermes (actinostèle), l'autre à la structure primaire de la tige des Dicotylédones (eustèle) et des Monocotylédones (atactostèle). Au cours de cette évolution, les structures foliaires jouent un rôle de plus en plus important; jusqu'à éliminer la vascularisation primitive de la tige, laquelle, pour certains auteurs, n'aurait plus d'existence propre (théorie de la phyllorhize).

Théorie de la phyllorhize

Pour G. Chauveaud, l'unité de structure élémentaire serait une plantule, ou *phyllorhize,* formée d'une partie inférieure présentant l'aspect radiculaire, la *rhize,* et d'une partie supérieure présentant l'aspect foliaire, la *phylle,* dont la base est la *caule*. Les différentes phyllorhizes seraient reliées l'une à l'autre par leur caule; ces dernières, ainsi mises bout à bout, constitueraient la tige, qui n'aurait pas d'existence propre et, par conséquent, pas de vascularisation autonome. Entre autres arguments fondés sur des observations morphologiques et d'anatomie comparée et infirmant cette théorie, un seul fait, expérimental, sera retenu et décrit ici.

La tige adulte des Fougères présente habituellement une structure dictyostélique. Le point végétatif d'une d'entre elles, défeuillé, va continuer à s'allonger en donnant une tige à structure siphonostélique et même protostélique. Cette expérience met en évidence l'existence d'une vascularisation caulinaire propre, subsistant même en l'absence de feuilles; ces dernières modifient simplement la structure initiale de la tige.

Pour M. Guinochet, « l'unité morphologique fondamentale et primitive du corps végétatif des plantes vasculaires est l'axe caulinaire à structure protostélique monarche endarche ». Les différentes organisations anatomiques en dériveraient par creusement axial et fragmentation de la protostèle, et les organisations morphologiques par suppressions et concrescences graduelles. La phylogenèse de la feuille se serait effectuée par acquisition progressive de la symétrie bilatérale des rameaux latéraux de certains végétaux primitifs; ces mêmes ramifications ébaucheraient le limbe apparaissant secondairement.

Ces deux hypothèses contradictoires reposent en fait toutes deux sur la notion fondamentale de l'unité anatomique du végétal. Elles en diffèrent par le choix de l'élément primordial, qui est soit la phyllorhize, soit la tige.

La tige des Bryophytes

Les Ptéridophytes, qui présentent une vascularisation poussée, sont encore appelées Cryptogames vasculaires, par opposition aux autres Cryptogames, chez lesquelles ces éléments ne sont en général pas bien caractérisés. Cependant, d'après des études récentes, certaines de ces Cryptogames dites cellulaires, appartenant au groupe le plus évolué (Bryophytes), possèdent elles aussi une organisation vasculaire relativement complexe.

On peut prendre l'exemple des rameaux dressés du polytric commun *(Polytrichum commune),* Mousse à aspect de petit sapin, abondante dans nos sous-bois. Si l'on effectue des coupes transversales, qu'on monte directement dans l'eau entre lame et lamelle (il n'est pas nécessaire de colorer), on observe, du centre vers la périphérie de la coupe :

— Une masse claire de cellules à contours irréguliers : ce sont les *hydroïdes*. Elles sont l'homologue des trachéides des Fougères et jouent le même rôle; elles s'en différencient principalement par leurs membranes sans épaississements lignifiés. Elles constituent un tissu appelé l'*hadrome*.

— Autour de cette zone centrale, des cellules plus sombres, à parois plus minces, forment le *leptome,* qui est l'équivalent du phloème des végétaux vasculaires. Comme ce dernier, le leptome possède des éléments conducteurs, les *leptoïdes,* à structure semblable à celle des tubes criblés et entourés, comme eux, par des cellules parenchymateuses. Hébant a particulièrement étudié les éléments vasculaires des Mousses. Il pense que le terme de phloème pourrait être utilisé pour désigner le leptome.

— Enfin, en périphérie, une écorce interne à larges cellules puis une écorce externe dont les cellules à membranes épaissies jouent un rôle de soutien. Dans la zone corticale, il est souvent possible d'observer des traces foliaires.

La disposition des éléments vasculaires peut évoquer une protostèle, et certains auteurs soulignent la ressemblance particulièrement frappante entre la structure de la tige feuillée de *Funaria hygrometrica* (Mousse courante sur les murs) et *Rhynia gwynne-vaughani* (Ptéridophyte primitive fossile de l'ère primaire). Dans la soie de *Meesea longiseta,* l'ensemble des tissus conducteurs centraux est entouré par deux couches cellulaires à membrane épaissie. Chadefaud n'hésite pas à parler d'endoderme et de péricycle (ce dernier limitant ainsi un cylindre central).

Si certaines Mousses possèdent des éléments conducteurs bien développés, d'autres par contre n'en ont pas. Or les premières possèdent de nombreux caractères morphologiques primitifs. C'est pourquoi beaucoup d'auteurs pensent que, dans l'évolution des Mousses, on

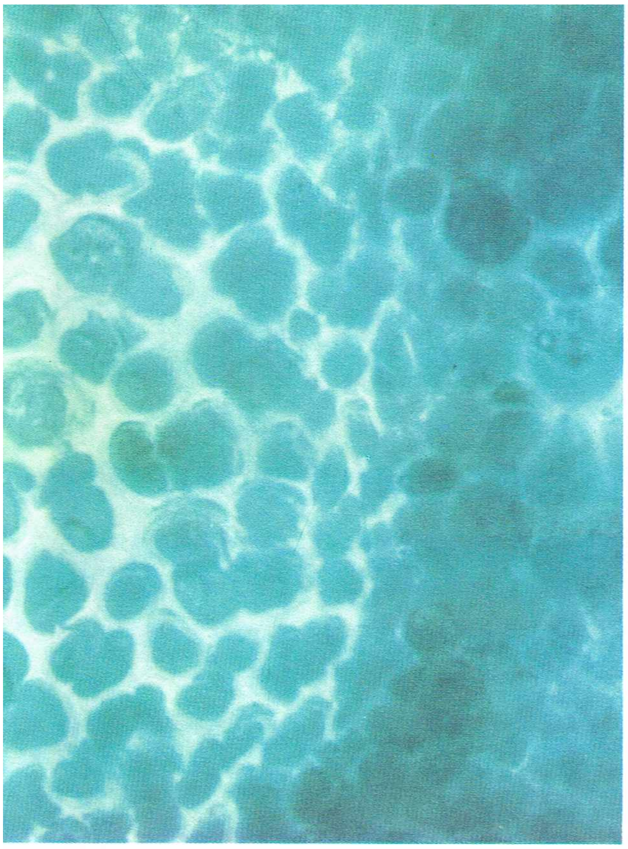

C. Bevilacqua

▲ *Poils étoilés munis d'un pédicelle recouvrant la face inférieure des feuilles d'*Elaeagnus pungens *(Dicotylédones); ces poils protègent les stomates, évitant ainsi la dessiccation.*

assiste à une régression des éléments conducteurs, liée à une adaptation écologique à des milieux humides entraînant une réduction de la taille de l'appareil végétatif. D'où l'idée d'une origine commune des Mousses et des Cryptogames vasculaires. L'hydroïde serait alors interprétée comme étant une forme ancestrale des trachéides (Hébant).

Le limbe foliaire

Dans l'évolution de la stèle, la feuille joue un rôle dont l'importance vient d'être montrée. Il convient d'en étudier avec plus d'attention l'organisation vasculaire.

Pour réussir de bonnes coupes transversales, il est préférable de choisir des feuilles épaisses et coriaces; les feuilles persistantes de houx, de camélia, d'eucalyptus conviennent parfaitement. La coupe transversale doit être effectuée perpendiculairement à la nervure principale et passer par cette dernière, car c'est à son niveau que se font les observations les plus intéressantes.

● **La feuille des Dicotylédones.** Observons, par exemple, des coupes effectuées dans le limbe foliaire du houx *(Ilex aquifolium)*. La nervure principale est occupée par un important faisceau libéro-ligneux en éventail élargi au niveau du phloème, et entouré par des tissus de soutien. Dans une coupe intéressant tout le limbe, on peut aussi voir les faisceaux libéro-ligneux des différentes nervures latérales. Ils sont plus petits et sectionnés obliquement.

Les différents faisceaux observés dans la feuille de houx sont orientés de la même façon. Les massifs de phloème se situent du côté de la face inférieure (face tournée vers le sol), appelée aussi face externe de la feuille (elle est tournée vers l'extérieur par rapport à la tige).

Les massifs de xylème se superposent aux massifs de phloème et se trouvent donc vers la face supérieure, ou interne, de la feuille. Cette disposition du tissu criblé par rapport au tissu ligneux est identique à celle observée au niveau des faisceaux cribro-vasculaires de la tige. En effet, les cordons conducteurs de la feuille sont en continuité avec les faisceaux libéro-ligneux de la tige et, à moins de torsions secondaires, il ne peut pas y avoir de modifications des dispositions relatives du phloème et du xylème. Cependant, si dans la tige les faisceaux sont disposés en cercle autour de l'axe, conférant à cette dernière une symétrie axiale, dans la feuille, ils sont dans un plan, celui du limbe. La symétrie du système vasculaire y est bilatérale, le plan de symétrie passant par l'axe de la nervure.

En plus de sa symétrie particulière, la feuille présente d'autres caractéristiques propres, surtout histologiques, qui apparaissent peu à peu au cours d'une étude plus détaillée.

De l'extérieur vers l'intérieur du limbe foliaire du houx, on observe : deux épidermes (supérieur et inférieur) auxquels sont accolés au niveau des nervures deux massifs de collenchyme rose (supérieur et inférieur). Celui de la face inférieure fait même saillie à la surface de la feuille, marquant par une côte le tracé de la nervure principale. Intérieurement aux collenchymes, apparaissent deux massifs de sclérenchyme, colorés en vert par le carmin vert d'iode. Celui de la face supérieure, coloré en vert foncé, très développé, est séparé du métaxylème par le protoxylème à vaisseaux résorbés noirs. Celui de la face inférieure, coloré en vert clair, plus étroit, se superpose en un arc au large massif de phloème. L'important faisceau libéro-ligneux de la nervure principale doit sa forme en éventail à la juxtaposition de plusieurs petits faisceaux libéro-ligneux originaires pour la plupart des nervures latérales. L'essentiel du tissu vasculaire est d'origine secondaire, et les différents faisceaux composants sont séparés entre eux par des rayons médullaires sombres, divergeant à partir du protoxylème (primaire). Dans le xylème secondaire, les gros vaisseaux se trouvent vers les pôles ligneux; ils se sont différenciés au printemps, lorsque la feuille s'est développée. Les petits vaisseaux sont situés vers la zone génératrice; ils se sont formés en automne. Cette hétérogénéité dans le calibre des vaisseaux et leur disposition en deux types rappellent les observations faites chez le chêne sur le bois de printemps et le bois d'été. Mais, contrairement aux tiges, les feuilles ne poursuivent pas leur croissance au-delà d'une année; la zone génératrice cesse donc rapidement de fonctionner et se sclérifie.

Les faisceaux foliaires circulent dans un parenchyme, ou *mésophylle*, qui présente quelques caractères originaux. Dans les deux tiers inférieurs du limbe, il est très lâche parce que composé de cellules laissant entre elles des méats de grande taille : les *lacunes;* cette partie du mésophylle constitue le *parenchyme lacuneux*. Les lacunes les plus externes communiquent avec l'extérieur par des petits trous, les *ostioles*. Elles sont bordées par deux cellules épidermiques spécialisées à parois très épaisses :

▼ *Coupe transversale de feuille de houx (*Ilex aquifolium *— Dicotylédones) passant au niveau de la nervure principale occupée par un important faisceau libéro-ligneux en éventail entouré de tissus de soutien; de part et d'autre, on peut observer l'importance du parenchyme lacuneux.*

S. Blaise et C. Sastre

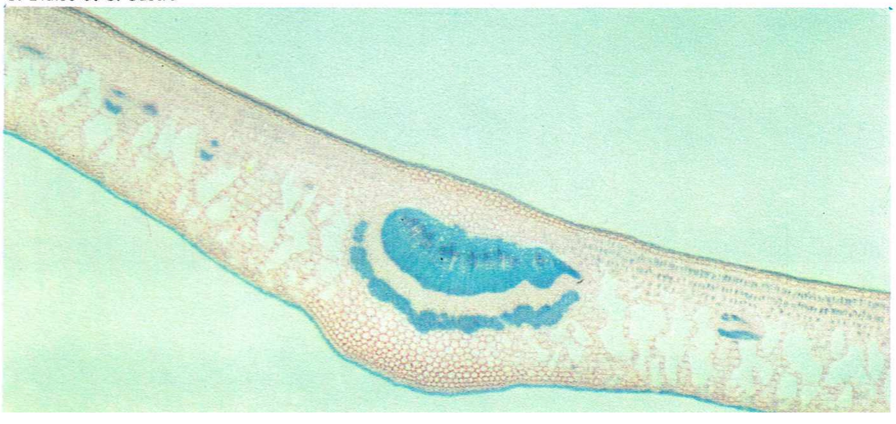

les cellules *stomatiques,* qui commandent l'ouverture de l'ostiole. Celles-ci constituent, avec d'autres cellules qui leur sont parfois associées, le *stomate,* qui joue pour la feuille le rôle d'un poumon. La lacune située sous l'ostiole est généralement de grande taille; elle forme la *chambre sous-stomatique.*

Dans le tiers supérieur du limbe, le parenchyme, dense, sans méats, est constitué de cellules chlorophylliennes allongées parallèlement les unes aux autres et perpendiculairement à l'épiderme : le *parenchyme* est dit *palissadique.* Il joue un rôle important dans l'assimilation chlorophyllienne, tant par sa richesse en chloroplastes que par sa situation à la partie supérieure de la feuille, exposée directement aux rayons du soleil. Il est protégé par un épiderme recouvert d'une épaisse cuticule protectrice, laquelle donne son aspect vernissé à la feuille de houx. Cet épiderme est doublé intérieurement d'un *hypoderme* à parois cellulosiques fortement épaissies.

L'épaisseur de la cuticule, la répartition des tissus de soutien et la localisation des stomates à la face inférieure, en réduisant la transpiration, confèrent à la feuille de houx un caractère xérophile.

L'étude anatomique des feuilles d'autres Dicotylédones révélerait l'existence de variations portant non seulement sur les particularités énoncées ci-dessus, mais encore sur la disposition du parenchyme palissadique. En effet, il peut n'exister qu'à la face supérieure (houx), ou bien entourer complètement le parenchyme lacuneux (chardon béni), ou encore occuper à lui seul le limbe (eucalyptus).

● **La feuille des Monocotylédones.** Chez de nombreuses Monocotylédones, les nervures foliaires sont parallèles entre elles, et le limbe se situe en position verticale, ce qui introduit quelques modifications dans l'anatomie foliaire de ce groupe.

Par exemple, une coupe transversale faite dans une feuille de muguet montre qu'un parenchyme uniquement lacuneux entoure des faisceaux cribro-vasculaires d'origine primaire tous sectionnés transversalement. Rares sont les feuilles de Dicotylédones ne possédant qu'un parenchyme lacuneux (euphorbe), alors que cette particularité est très commune chez les Monocotylédones. Les feuilles de ces dernières présentent en outre un tissu caractéristique : le *tissu bulliforme.* Il s'agit de cellules généralement d'origine épidermique, plus rarement sous-épidermiques ou parenchymateuses, qui se distinguent des cellules voisines par une taille beaucoup plus grande. Leurs variations de turgescence provoquent des mouvements d'ouverture ou de fermeture du limbe. On rencontre le tissu bulliforme surtout chez les Graminées dont les feuilles se replient (oyats) ou s'enroulent sur elles-mêmes (roseau du Midi), limitant ainsi la transpiration par temps sec et chaud.

▼ *Coupe transversale de feuille d'oyat* (**Psamma arenaria —** *Monocotylédones); ces feuilles se replient, limitant ainsi la transpiration.*

K. Ross - Jacana

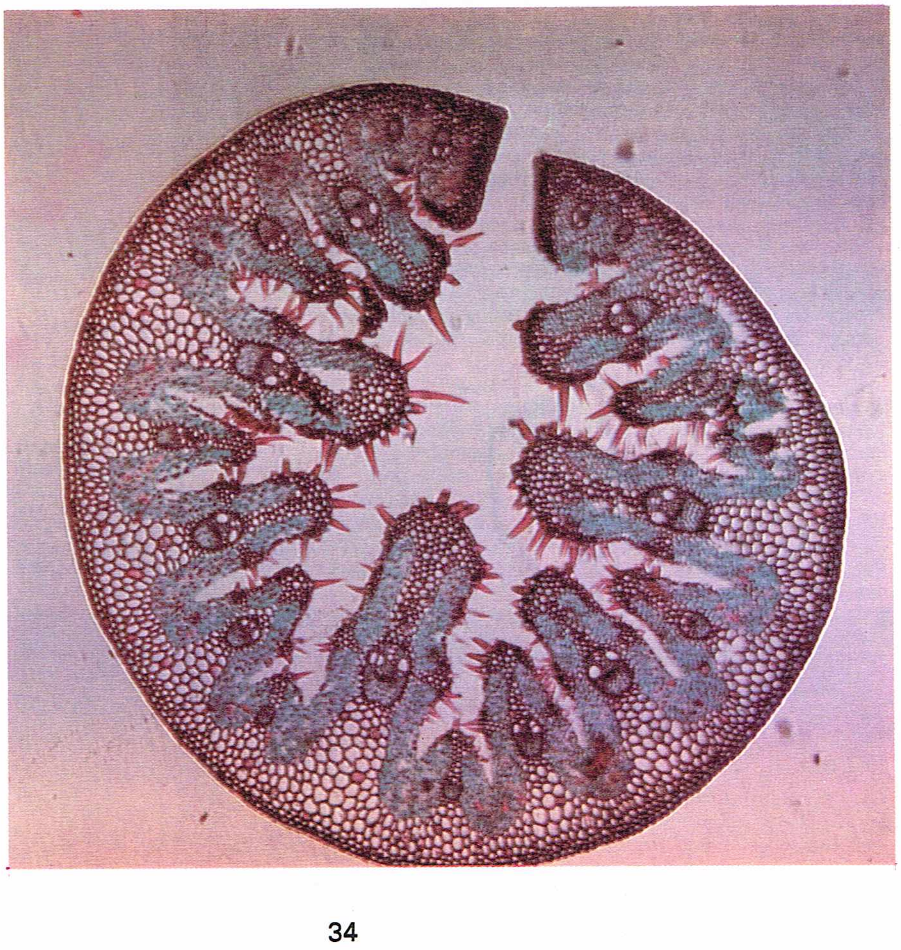

● **La feuille des Gymnospermes.** La feuille des Gymnospermes ne diffère pas profondément de celle des Angiospermes, mais présente cependant quelques particularités histologiques.

Si, par exemple, on effectue une coupe transversale dans l'aiguille de pin sylvestre (Abiétinées), on observe que les aiguilles sont groupées par deux sur des rameaux nains, qui, par définition, ont terminé leur croissance. Les aiguilles sont en fait des feuilles qui vont passer trois ou quatre ans sur l'arbre avant de tomber avec le rameau nain.

C'est une cuticule très épaisse qui donne son aspect vernissé à la feuille. Sur ses deux faces, les stomates sont disposés en rangées longitudinales, parallèles au grand axe et bien visibles à l'œil nu.

Sous l'épiderme, plusieurs assises de cellules constituent la zone hypodermique. Les cellules du parenchyme sont toutes chlorophylliennes et isodiamétriques. Leurs parois cellulosiques forment de nombreux replis en doigt de gant tournés vers l'intérieur des cellules et ne laissant que peu de place à des lacunes en petit nombre.

Dans ce parenchyme, un certain nombre de canaux sécréteurs parcourent tout ou partie de l'aiguille; ils sont limités par un manchon de cellules sécrétrices doublé extérieurement par une gaine de cellules à parois sclérifiées. Dans le genre *Pinus,* le nombre et la disposition des canaux sécréteurs sont constants pour une espèce donnée. En cas de litige entre deux espèces, il suffit souvent d'effectuer à la lame de rasoir des coupes transversales dans une aiguille, de préférence sèche (ramassée par terre). En montant les coupes dans l'eau, sans coloration ni vidage (la dessiccation ayant agi comme l'hypochlorite en détruisant le cytoplasme), il est possible de compter les canaux. Ainsi, Bui (1972) a pu établir une clef dichotomique de détermination des espèces de *Pinus* et de *Keteleeria* d'Indochine.

Les faisceaux libéro-ligneux, en grande partie d'origine secondaire et au nombre de deux, sont enveloppés dans un *tissu de transfusion* propre aux Gymnospermes. Celui-ci est constitué de deux catégories de cellules étroitement intriquées : les unes, vivantes, à parois minces, sont parenchymateuses; les autres, mortes, à parois plus épaisses pourvues de ponctuations aréolées, sont des trachéides assez semblables à celles du xylème. L'ensemble, tissu de transfusion et tissu vasculaire, est limité par un endoderme.

L'analyse de ces exemples montre qu'en dehors de certains traits communs de grande importance qui caractérisent la feuille en général, à savoir : une symétrie bilatérale et certains types de parenchyme spécialisé, les variations anatomiques et morphologiques sont importantes. Elles portent, du seul point de vue anatomique, non seulement sur les parenchymes, les épidermes et l'appareil sécréteur, mais encore sur le nombre des faisceaux, ainsi que sur la forme et la répartition des tissus de soutien. Ces éléments, variables d'un groupe végétal à l'autre, peuvent être constants pour une famille, un genre, une espèce donnés; ce sont, dans ce cas, de bons caractères de détermination. Ainsi, en 1973, on a montré que chez les *Sauvagesia* (genre tropical proche des violettes), chaque espèce possède une structure différente au niveau de la nervure médiane du limbe. De plus, certaines espèces jugées primitives ont des faisceaux cribro-vasculaires en position supérieure. Leurs éléments conducteurs sont à disposition inversée par rapport à celle des faisceaux normaux d'une feuille (houx). Ils viennent s'ajouter à ces derniers, donnant ainsi aux éléments conducteurs de certaines espèces de ce genre un début de symétrie axiale.

Des observations semblables pourraient être faites chez les Graminées. Dans cette famille, le nombre des cordons vasculaires et les modalités de répartition des tissus de soutien peuvent souvent fournir de bons critères de classification systématique. Dans bien des cas, les déterminations spécifiques sont rendues difficiles par

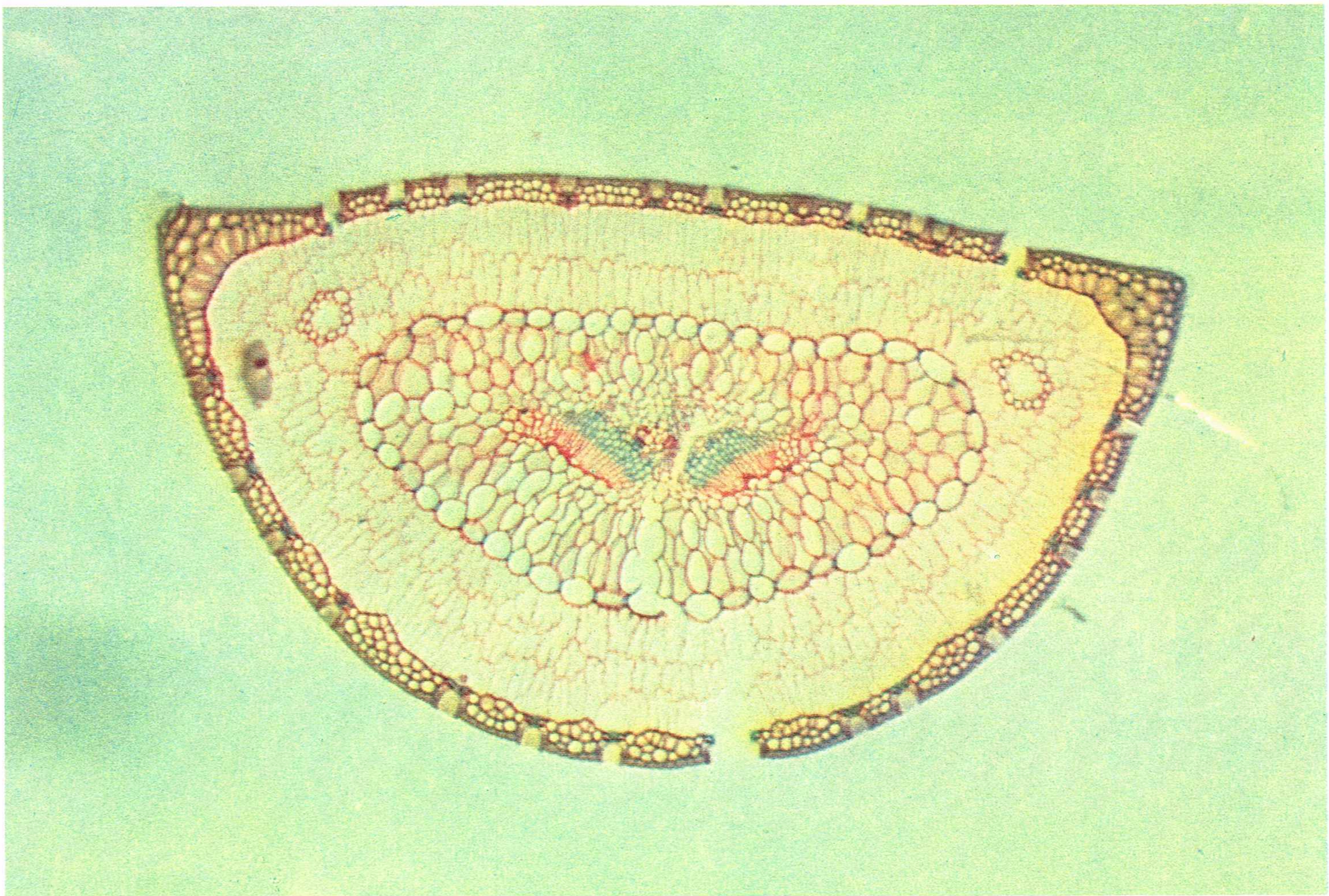

S. Blaise

▲ *Coupe transversale d'aiguille de pin* (Pinus — *Gymnospermes*) *montrant, en dehors du cylindre central, deux canaux sécréteurs de résine; dans le genre* Pinus, *le nombre et la position de ces canaux sont caractéristiques d'une espèce donnée.*

l'absence de caractères morphologiques macroscopiques. Ainsi en est-il du genre *Festuca,* dont les espèces sont aussi nombreuses que difficiles à caractériser. Une coupe transversale, sans coloration, faite dans la partie médiane de la plus jeune feuille d'une pousse latérale (encore appelée innovation) fournit de précieuses indications. Par exemple, *Festuca eskia*, le gispet, espèce piquante de certains pâturages pyrénéens de 1 500 à 2 000 m, se reconnaît anatomiquement par un sclérenchyme tapissant l'épiderme inférieur de la feuille et par les neuf cordons vasculaires de cette dernière. *Festuca rubra*, la fétuque rouge, commune dans le gazon des chemins et des champs, montre sept faisceaux foliaires accompagnés de sept petits massifs de sclérenchyme.

Les stomates

Les stomates existent en plus ou moins grand nombre sur les divers organes aériens des végétaux, mais ils sont particulièrement bien observables sur les feuilles. S'ils se situent généralement à la face inférieure de celles-ci, de nombreuses espèces en possèdent sur les deux faces. Les stomates peuvent être d'intéressants éléments de détermination, et même fournir des renseignements phylogénétiques.

Il existe diverses méthodes d'observation. Par exemple, il est possible d'arracher, avec une paire de pinces, des lambeaux d'épiderme, que l'on éclaircira en les plongeant dans un bain d'hypochlorite de soude afin de vider les cellules de leur contenu. Après lavage et neutralisation de l'hypochlorite restant par l'acide acétique, on colore au rouge de ruthénium. Une autre méthode, utilisée de préférence pour des épidermes foliaires glabres, consiste à faire des duplications avec de l'acétate de cellulose dissoute dans de l'acétone. A l'aide d'un pinceau, on dépose une fine couche de cette solution sur l'épiderme foliaire à étudier. L'acétone s'évapore, laissant un fin voile d'acétate de cellulose sur lequel s'imprime le modelé de l'épiderme. Lorsque toute l'acétone est évaporée, on peut récupérer cette « copie » de l'épiderme, avec une paire de pinces, et la monter entre lame et lamelle; un morceau de papier gommé suffit pour fixer la lamelle sur la lame. Il est alors possible d'étudier la structure des stomates.

Fondamentalement, un stomate est formé de deux cellules de garde, nées par division d'une cellule épidermique spéciale appelée *cellule mère de stomate*. Ces deux cellules, chlorophylliennes, limitent l'ostiole, comme nous l'avons déjà vu chez le houx. Cet orifice permet les échanges gazeux entre les tissus foliaires et l'extérieur. Le degré d'ouverture de l'ostiole est déterminé par les variations de turgescence des cellules de garde, lesquelles peuvent être entourées par une ou plusieurs cellules appelées *cellules annexes*. La présence ou l'absence de ces dernières, leur origine (cellule mère du stomate ou cellules épidermiques voisines) et leur nombre permettent de distinguer différents types stomatiques.

● Chez les Dicotylédones, par exemple, toutes les cellules du complexe stomatique ont pour origine la cellule mère. Le type le plus simple, sans cellules annexes, est dit **anomocytique** (par exemple, chez la renoncule). Il est la phase obligatoire de passage vers les autres types, plus compliqués, et se rencontre chez presque tous les primordiums foliaires, c'est-à-dire les très jeunes feuilles situées dans les bourgeons en phase active de développement. C'est pourquoi, pour faire des comparaisons entre espèces différentes, il est nécessaire d'observer des feuilles adultes. C'est d'ailleurs en partie pour cette raison que les espèces qui présentent ce type stomatique sur les feuilles adultes sont considérées comme primitives. Il est fort intéressant de remarquer que de nombreuses espèces de Ranales, groupe de Dicotylédones jugé primitif pour de nombreux autres caractères, possèdent des stomates anomocytiques.

La giroflée a des stomates du type **anisocytique,** c'est-à-dire qu'il y a trois cellules annexes, dont l'une est nettement plus petite que les autres.

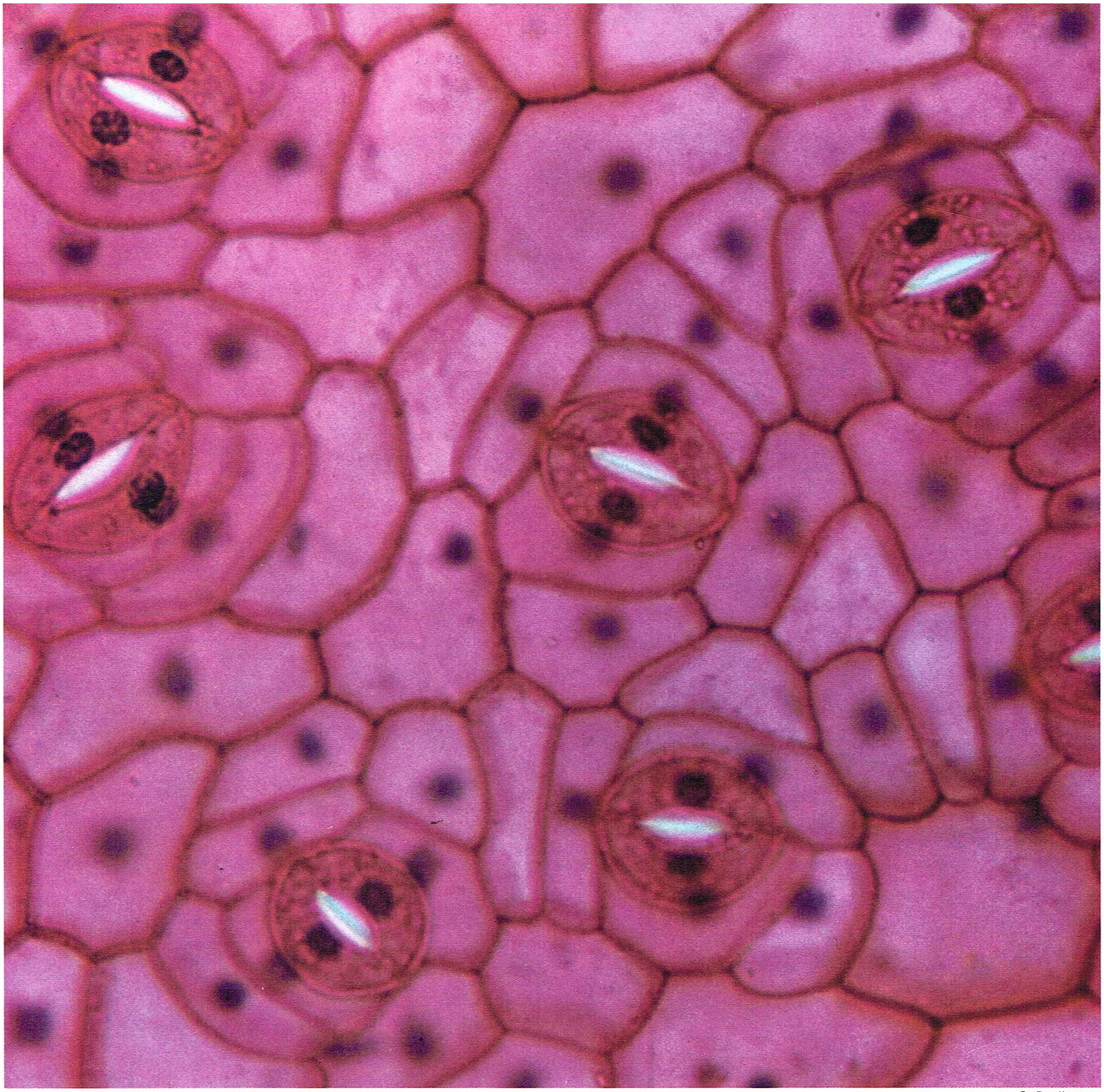

C. Bevilacqua

▲ ***Épiderme de calla* (Zantedeschia aethiopica) *montrant de nombreux stomates ouverts, lesquels permettent les échanges gazeux entre le milieu extérieur et la plante; les taches foncées sont des chloroplastes (coloration histologique de contraste).***

Dans le type **diacytique,** les cellules de garde sont entourées par une paire de cellules annexes dont la paroi, commune, est perpendiculaire au grand axe du stomate. C'est ce type qui se rencontre chez les Caryophyllacées (par exemple, l'œillet).

Enfin, le dernier type important qui se rencontre chez les Dicotylédones est le stomate **paracytique,** à deux cellules annexes parallèles au grand axe du stomate (par exemple, certaines espèces de millepertuis, genre *Hypericum*). Il présente des variantes : *hémiparacytique,* à une seule cellule annexe, et *parallélocytique,* à trois cellules annexes (ou davantage).

L'étude comparée des types stomatiques rencontrés dans certains groupes taxonomiques peut donner des renseignements phylogéniques, voire parfois biogéographiques. Ainsi, C. Rodriguez, en 1973, a pu montrer l'origine géographique d'une section américaine de millepertuis. Les espèces les plus primitives possèdent des stomates anomocytiques. Elles occupent une aire située à la frontière du Mexique et des États-Unis, alors que les espèces plus évoluées, à stomates anisocytiques et paracytiques, se trouvent au nord des États-Unis et en Amérique du Sud.

● Chez les Gymnospermes, deux types principaux de stomates ont été décrits :

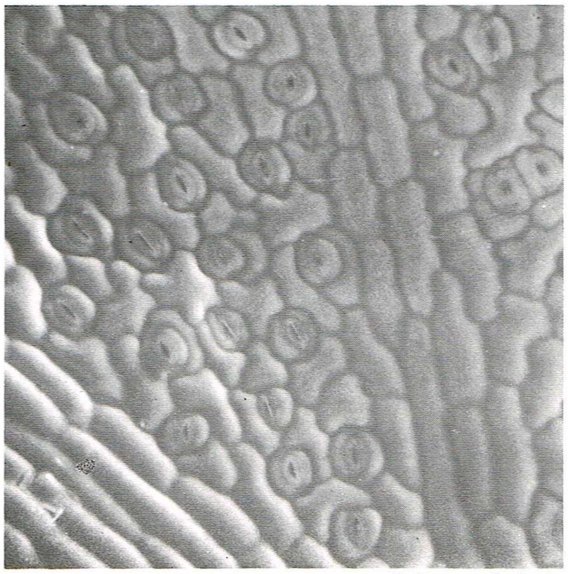

C. Sastre et O. Roche

▶ ***Stomates observés au microscope à balayage.***

— le type *haplochéile,* chez lequel les cellules annexes proviennent de cellules épidermiques voisines et forment soit une couronne *(Ephedra),* soit deux couronnes (le sapin);
— le type *syndétochéile,* où la cellule mère se divise en trois cellules; les deux latérales vont constituer les cellules annexes, tandis que la cellule centrale se divise à son tour pour donner les cellules de garde *(Gnetum).*
Outre les stomates aérifères traités jusqu'à présent, il existe des *stomates aquifères,* ou *hydathodes,* dont le rôle est d'excréter de l'eau. Ils participent à l'équilibre hydrique du végétal. Ces stomates, à ostiole toujours ouvert, sont parfois tout à fait dégénérés à l'état adulte; ils ont alors perdu leur structure stomatique. Chez certaines espèces par contre, vus de face, ils ne se distinguent pratiquement pas des stomates aérifères. Ils sont généralement situés à l'extrémité de la feuille, à la marge du limbe ou sur sa face supérieure, non loin de la marge. Dans les stomates aérifères, les cellules bordant la chambre sous-stomatique sont chlorophylliennes. Par contre, dans les hydathodes, ces cellules sont dépourvues de chloroplastes et appartiennent à un tissu spécialisé : l'*épithème.* Ce dernier est en relation avec l'extrémité libre d'une petite nervure. De nombreux auteurs pensent que le stomate aquifère dérive du stomate aérifère, principalement par perte des chloroplastes. Un état intermédiaire entre ces deux sortes de stomates a été décrit récemment chez *Sauvagesia erecta;* cette espèce possède des stomates aquifères à épithème chlorophyllien.

Le pétiole de la feuille

Chez beaucoup d'Angiospermes, de Gymnospermes et de Ptéridophytes, la feuille se rattache à la tige par un pétiole. Nous avons décrit la disposition et la structure des cordons vasculaires dans la tige et dans le limbe. Ainsi pouvons-nous espérer trouver dans le pétiole une disposition et une structure intermédiaires assurant le passage entre les structures vasculaires à symétrie bilatérale de la feuille et celles à symétrie axiale de la tige.

Si l'on examine, par exemple, le pétiole de lierre (*Hedera helix,* Dicotylédones), dont la grande taille et la rigidité permettent des coupes faciles, on constate que la section en est presque circulaire; cependant, anatomiquement, l'ensemble du tissu vasculaire est disposé symétriquement par rapport à un plan. Les faisceaux conducteurs sont soit soudés, soit nettement séparés les uns des autres, d'autant plus que la coupe est effectuée près du limbe. Ils sont disposés sur un arc et regroupés en une sorte de cylindre central à peine ouvert à sa partie supérieure. Les deux faisceaux, voire les quatre faisceaux les plus externes, sont isolés et correspondent aux nervures marginales du limbe. Par contre, le faisceau médian (le plus large) prolongeant la nervure principale et les nervures secondaires les plus importantes est un faisceau composé sur lequel se distinguent aisément plusieurs pôles de protoxylème. Dans le pétiole, l'arc vasculaire étant presque fermé, la disposition relative du phloème et du xylème dans les deux faisceaux les plus externes est inversée, et le phloème se trouve alors en position supérieure. D'autre part, il faut noter la présence d'un collenchyme (rose) périphérique et d'un parenchyme à cellules contenant des cristaux jaunâtres d'oxalate de calcium maclés en oursin. De plus, accolés ou remplaçant le protoxylème et le protophloème, on remarque des massifs de fibres sclérifiées (verts). Dans le phloème, et dans le parenchyme situé dorsalement aux faisceaux cribro-vasculaires, il y a des canaux sécréteurs, caractéristiques, propres au genre ou à la famille.

Il est intéressant de noter que, chez certaines espèces, s'ajoute un arc supérieur à faisceaux inversés à l'arc vasculaire inférieur. Parfois, ces deux arcs se soudent par leurs bords, donnant au pétiole une structure vasculaire comparable à celle de la tige (*ex.* chez le ricin).

Les pièces florales

La morphologie même des pièces florales les plus voyantes, calice et corolle, et leur disposition spiralée chez certains groupes primitifs d'Angiospermes plaident en faveur de leur origine foliaire. Une étude anatomique ne fait que confirmer cette hypothèse en cours depuis Goethe. Les traces vasculaires des sépales et pétales circulent d'une façon complexe dans le réceptacle floral. Des coupes transversales effectuées dans cet axe contracté révèlent parfois, par le biais de cette complexité, la solution à certains problèmes d'interprétation de structures florales aberrantes (Guédès, 1972).

Les faits sont moins évidents en ce qui concerne les autres pièces florales, à savoir les étamines et les carpelles, dont nous allons à présent analyser la structure anatomique.

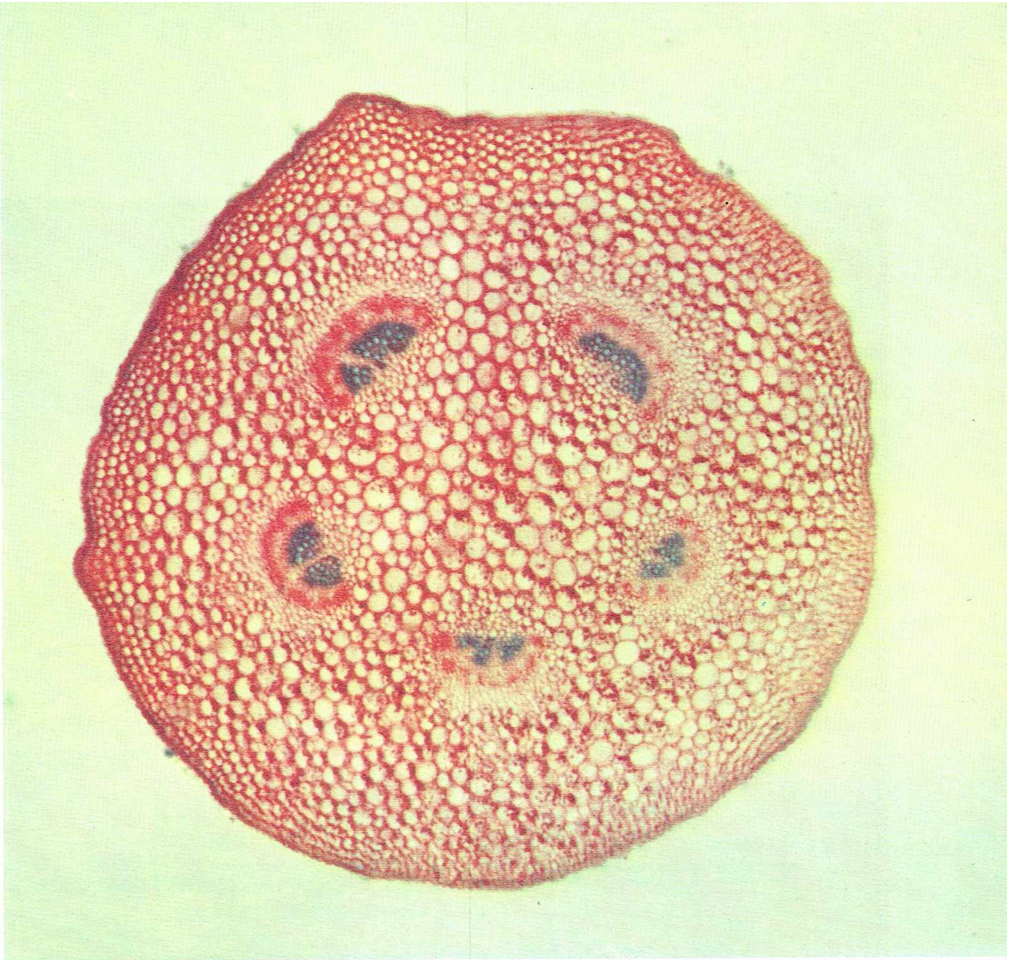
S. Blaise et C. Sastre

▲ ***Coupe transversale de pétiole de lierre (Hedera helix — Dicotylédones) montrant les cinq faisceaux libéro-ligneux qui correspondent aux faisceaux des nervures du limbe.***

L'étamine

L'ensemble des étamines forme l'*androcée,* appareil mâle de la fleur. Chaque étamine montre une partie renflée bourrée de grains de pollen, l'*anthère,* portée par un fin pédicelle, le *filet.* L'anthère est constituée généralement de quatre sacs polliniques, distribués en deux paires latérales réunies par un *connectif* médian qui se trouve dans le prolongement du filet. A maturité, la paroi qui sépare les deux sacs d'une même paire se rompt; il n'y a alors plus qu'une loge pollinique de chaque côté du connectif.

Chez le lis par exemple, l'anthère est *extrorse,* c'est-à-dire que le débordement de ses parties latérales se fait vers l'extérieur. L'insertion du filet se situant environ au tiers inférieur du connectif, les coupes transversales doivent être effectuées au-dessus de cette insertion.

Une coupe dans une anthère jeune révèle, de l'intérieur vers l'extérieur, quatre tissus différents :
— Au centre de chaque sac, un massif de cellules à gros noyaux (sur matériel frais), les *cellules mères de pollen;*
— En périphérie, un anneau de cellules riches en réserves qui vont servir à la nourriture des grains de pollen, les *cellules nourricières;*
— Puis une assise de cellules allongées perpendiculairement à la surface, à membranes ornées de bandelettes lignifiées, simples ou fourchues, l'*assise mécanique;* celle-ci, très développée sur la face supérieure et les bords des sacs, est inexistante entre deux sacs d'une même paire; grâce à ses ornementations, l'assise est résistante aux variations hygrométriques;
— Enfin, à l'extérieur, un épiderme mince sauf entre les deux sacs d'une même paire où les cellules épidermiques sont très grandes.

A la déhiscence, l'épiderme, très sensible aux variations hygrométriques, se rétracte, surtout entre les sacs de chaque paire, endroit où n'existe justement pas d'assise mécanique. Il s'y forme une fente, dite *fente de déhiscence,* par où vont sortir les grains de pollen. Un cordon vasculaire à xylème interne parcourt le filet et le connectif.

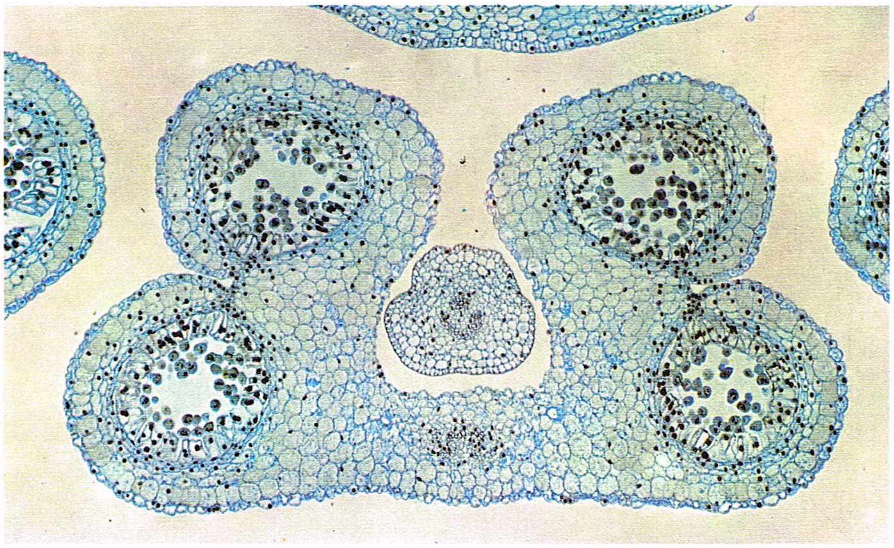

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

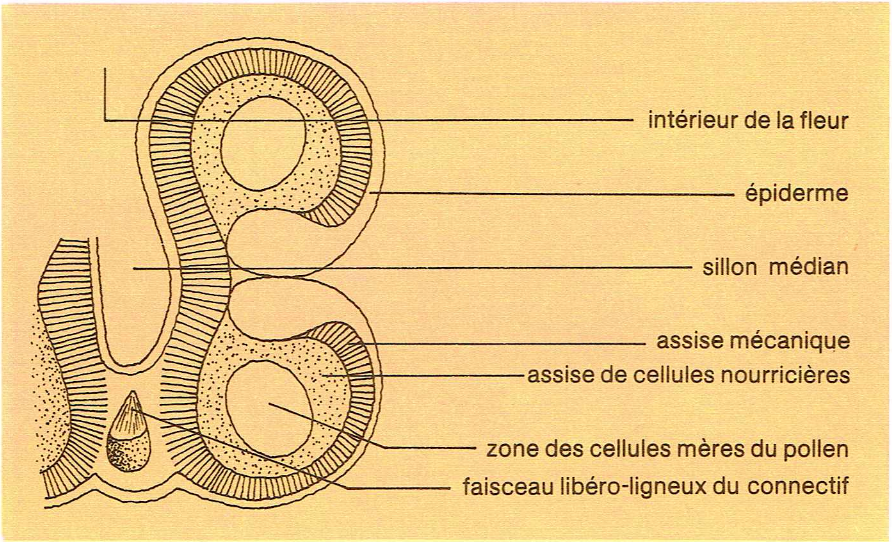

Richard Colin

▲ *Les pièces mâles de la fleur sont constituées par les étamines qui montrent une partie renflée, l'anthère, comprenant généralement quatre sacs polliniques remplis de grains de pollen. En haut, coupe transversale d'une jeune anthère de lis; en bas, représentation schématique d'une coupe d'anthère.*

La disposition relative des tissus conducteurs rappelle celle de la feuille; comme chez cette dernière, la symétrie bilatérale est très marquée, l'anthère apparaissant donc comme une feuille modifiée à des fins de reproduction. A noter qu'il n'y a pas de formations secondaires, le lis étant une Monocotylédone.

Le carpelle

L'ensemble des carpelles constitue le *gynécée,* partie femelle de la fleur. Ils peuvent être isolés et libres, ou regroupés en un pistil. Dans tous les cas, la partie renflée du ou des carpelles, renfermant les ovules, constitue l'*ovaire*. Ce dernier est surmonté d'une partie plus mince, le style, qui s'épanouit au sommet en une masse collante, le stigmate, sur lequel viennent s'agglutiner les grains de pollen. Trois carpelles soudés composent l'ovaire de lis. Les bords de chacun d'entre eux se replient vers l'intérieur et limitent ainsi une loge dans laquelle se développent les ovules. Ceux-ci sont insérés de chaque côté de la soudure sur une *zone* dite *placentaire*.

Une coupe transversale faite au tiers supérieur de l'ovaire révèle l'existence de deux épidermes, l'un externe et l'autre interne, entre lesquels se développe un parenchyme à cellules grandes et rondes. Un gros cordon vasculaire circule dans la partie médiane de chaque carpelle. Un autre gros faisceau occupe la zone de juxtaposition commune à deux carpelles; il résulte de la fusion de faisceaux carpellaires appartenant à chacun de ces deux carpelles. Ainsi, la paroi de cet ovaire tricarpellé montre-t-elle six faisceaux : trois médians par rapport aux carpelles, et trois latéraux.

Chaque bord carpellaire possède, au niveau de la zone placentaire, deux ou trois petits faisceaux placentaires orientés à l'inverse des autres (c'est-à-dire avec xylème externe). De ces faisceaux partent différents cordons vasculaires qui vont nourrir les ovules, et qui présentent chacun un cambium dont le fonctionnement donne uniquement du parenchyme secondaire. Au niveau des deux bords d'un même carpelle mis en contact, les cellules épidermiques s'allongent perpendiculairement à la surface en arrondissant leur paroi externe jusqu'à prendre un aspect papilleux. Les cellules de l'un et l'autre bord s'emboîtent en quinconce, réalisant une sorte de tissu lâche appelé *tissu papilleux*. Le tube pollinique peut ainsi cheminer jusqu'à l'ovule en écartant quelque peu les parois cellulaires du tissu papilleux.

Les ovules se forment à partir de petites boursouflures du placenta, les *bourgeons ovulaires.* Deux téguments les recouvrent, l'un interne, la *secondine,* l'autre externe, la *primine*. Ils ménagent, à l'extrémité libre de l'ovule, un canal conduisant au nucelle : le *micropyle.* Durant sa croissance, l'ovule s'écarte du placenta; il y reste attaché par un pédicelle, appelé *funicule,* par où passe un cordon vasculaire émis par un des faisceaux placentaires. Ce cordon se divise, au niveau de la *chalaze,* en deux branches s'engageant chacune d'un des côtés de la primine. Enfin, chez le lis, l'ovule bascule de 180°, tournant ainsi son micropyle vers le placenta.

Le carpelle du lis, reconsidéré à la lumière des données anatomiques, paraît facilement assimilable à une feuille dont les bords se seraient repliés vers la face interne. Le cordon médian du carpelle présente la même disposition que celui de la nervure principale d'une feuille; les faisceaux latéraux et placentaires peuvent être considérés comme les homologues des nervures latérales et marginales. La disposition inverse des faisceaux placentaires s'explique par le fait que le limbe s'est replié sur lui-même sur les deux bords; ce qui était interne est devenu externe et *vice versa*. Par un raisonnement analogue, on pourrait démontrer que le tissu papilleux est issu d'une partie de l'épiderme externe.

Pour certains auteurs, les étamines et les carpelles n'auraient acquis une structure bilatérale que secondairement. Dans cette hypothèse, les pièces florales n'auraient donc pas une origine foliaire.

Conclusions

Si l'anatomie, considérée comme seule science descriptive, présente un intérêt limité, par contre, elle prend toute sa signification par les renseignements qu'elle est susceptible de fournir à d'autres disciplines.

Au cours de cette analyse, nous avons montré, à partir d'expériences récentes, le parti qu'il est possible de tirer des études anatomiques pour aboutir à des conclusions phylogénétiques et systématiques. Nous avons volontairement omis de décrire certaines structures anatomiques particulières (lianes, plantes aquatiques); le lecteur intéressé par ces structures peut se reporter aux ouvrages de base cités en référence.

C. Bevilacqua

▶ *Coupe transversale réalisée dans un ovaire de tulipe* (Tulipa gesneriana — *Monocotylédones*)*; dans ce cas, l'ovaire à trois loges résulte de la soudure de trois carpelles, six ovules à placentation axile sont bien visibles.*

TABLEAU RÉCAPITULATIF				
	CARACTÈRES GÉNÉRAUX DES GROUPES TAXONOMIQUES	RACINE	TIGE	FEUILLE
CARACTÈRES GÉNÉRAUX DES ORGANES		Symétrie axiale Écorce épaisse Cylindre central sans moelle	Symétrie axiale Écorce relativement peu épaisse Cylindre central avec moelle	Symétrie bilatérale *Limbe*: Aspect aplati; Présence de parenchyme palissadique *Pétiole*: Aspect non aplati; Absence de parenchyme palissadique
MONOCOTYLÉDONES	Pas de formations secondaires intrafasciculaires Pas de xylème et phloème secondaires	Actinostèle Xylème à phase alterne centripète toujours présent Faisceaux ligneux nombreux (+ de 8) disposés en un cycle Épaississements de Caspary en O ou en U	Atactostèle Xylème avec une 4e phase dite périphérique Faisceaux nombreux disposés en plusieurs cycles	Nervures parallèles plus ou moins de même importance
DICOTYLÉDONES	Cambium secondaire Xylème et phloème secondaires présents Bois hétéroxylé	Actinostèle Xylème à phase alterne centripète toujours présent Faisceaux ligneux peu nombreux (— de 8)	Eustèle Xylème superposé Faisceaux libéro-ligneux en 1 cycle, exceptionnellement 2	Présence d'une nervure principale plus importante que les autres nervures
GYMNOSPERMES	Cambium secondaire Bois homoxylé Présence de canaux résinifères Ponctuations aréolées	Actinostèle Xylème à phase alterne centripète toujours présent Faisceaux ligneux peu nombreux (— de 8)	Eustèle Xylème superposé Faisceaux libéro-ligneux en 1 cycle	Présence de tissu de transfusion
PTÉRIDOPHYTES	Actuellement, pas de cambium Bois fossile homoxylé Trachéides scalariformes	Protostèle à actinostèle	Siphonostèle à dictyostèle	*Pétiole :* actinostèle

▲ ***Tableau récapitulatif des caractères anatomiques des Monocotylédones, Dicotylédones, Gymnospermes et Ptéridophytes.***

De même, les relations de l'anatomie avec la morphologie ont été seulement esquissées. Elles sont pourtant importantes; certaines structures morphologiques apparemment aberrantes trouvent leur explication dans une étude anatomique fine. Par exemple, outre le problème de l'interprétation des organes floraux que nous avons traités, il faut citer ceux des phyllodes (feuilles ayant l'apparence de tiges), des cladodes (tiges ayant l'apparence de feuilles) et du cas particulier de l'écaille de pin, rameau florifère contracté. Dans ces trois exemples, c'est grâce à l'anatomie que les homologies ont pu être établies.

Nous avons traité l'anatomie des seuls végétaux vasculaires et, plus particulièrement, celle des tissus conducteurs.

On a, au passage, souligné l'intérêt du cas particulier des Mousses, intermédiaires entre les végétaux supérieurs et les Cryptogames cellulaires. Effectivement, les cellules des Algues et Champignons pluricellulaires, des Lichens et de bon nombre de Bryophytes subissent beaucoup moins de différenciations divergentes que celles des plantes vasculaires. Elles constituent des filaments soit organisés en cladomes, comme chez les Rhodophycées par exemple, soit associés en masses compactes, comme dans un thalle de Champignon.

Au cours des âges, certains groupes végétaux ont acquis progressivement une structure anatomique de plus en plus complexe. La première étape de cette évolution se rencontre actuellement chez les Ptéridophytes et les Gymnospermes à trachéides vraies. Ensuite, chez les Angiospermes, s'est effectuée la mise en place des vaisseaux du métaxylème, avec apparition de bois hétéroxylé chez les Dicotylédones. Quant aux Monocotylédones, sans bois véritable, elles sembleraient avoir subi une évolution régressive de l'appareil végétatif.

Par ailleurs, si la distinction : racine, tige, feuille, se justifie en général physiologiquement et morphologiquement, elle est moins évidente pour l'anatomie, où existent de nombreuses phases intermédiaires. Il nous a cependant paru important de donner, dans le tableau ci-dessus, quelques éléments généraux permettant de distinguer ces différents organes dans les principaux grands groupes de végétaux vasculaires.

BIBLIOGRAPHIE

BOUREAU E., *Anatomie végétale,* 3 vol., 752 p., 370 fig., Presses universitaires, Paris, 1954-1957. - DEYSSON G., *Éléments d'anatomie des plantes vasculaires,* 266 p., 222 fig., Soc. Éd. Enseign. Sup., Paris, 1954. - EAMES A.J. et Mc DANIELS L.H., *An Introduction to Plant Anatomy,* 427 p., 186 fig., Mc Graw-Hill, New York and London, éd. 1947. - ESAU K., *Plant Anatomy,* 734 p., 85 fig., John Wiley, New York, 1953. - GAYRAL P. et VINDT J., *Anatomie des végétaux vasculaires,* 2 vol., 141 p., 234 fig., Doin, Paris, 1961. - GUINOCHET M., *Notions fondamentales de botanique générale,* 446 p., 372 fig., Masson, Paris, 1965. - HEYWOOD V.H., *Scanning Electron Microscopy,* 323 pl., Acad. Press, London and New York, 1971. - Mc LEAN R.C. et IVIMEY-COOK W.R., *Textbook of Theorical Botany,* 2 vol., 2 201 p., 2 067 fig., Longmans, Green & C°, London, 1951. - METCALFE C.R. et CHALK L., *Anatomy of the Dicotyledons,* 2 vol., 1 500 p., 317 fig., Oxford Univers. Press, Oxford, 1957. - MEYLAN B.A. and BUTTERFIELD B.G., *Three-Dimensional Structure of Wood,* 80 p., 61 fig., Chapman and Hall, London, 1972. - TROUGHTON J. and DONALDSON L.A., *Probing Plant Structure,* 116 p., 105 pl., Chapman and Hall, London, 1972.

N. Cirani

▲ *La physiologie végétale a pour objet l'étude des différentes fonctions qui permettent aux plantes de croître, d'acquérir une forme spécifique, de réagir aux conditions de l'environnement et de se reproduire. Ici, une forêt tropicale, lieu d'une intense synthèse biochimique.*

PHYSIOLOGIE VÉGÉTALE

Diversité et vie des végétaux

Les végétaux ont des formes si variées que l'on hésite bien souvent avant de les reconnaître. Cette moisissure qui recouvre le pot de confiture, ce feutrage blanc qui se développe sur le sol humide du sous-bois, cette couche verte qui enduit le tronc des arbres, cette croûte sèche et grise qui s'incruste dans la pierre sont tous des végétaux, au même titre que l'arbre de la forêt, la plante d'ornement ou le légume et l'arbre fruitier de nos cultures.

Les Champignons et les Algues, comme les Mousses, les Fougères, les arbres ou les fleurs des champs possèdent en commun un nombre réduit de propriétés qui en font des êtres vivants. La physiologie végétale a pour objet l'étude des manifestations vitales, c'est-à-dire des diverses *fonctions* qui permettent aux plantes de croître en se nourrissant, d'acquérir une forme spécifique en se différenciant, de réagir aux conditions de l'environnement et de se reproduire.

Les fonctions physiologiques des végétaux

L'expérience courante permet de constater qu'une plante n'est pas indifférente à son entourage : elle a besoin de soins, d'eau et d'engrais, de lumière... Elle reçoit des informations venant de l'extérieur, les traite, les transcrit et les utilise. Elle rejette à son tour dans son environnement les produits de son activité. Toute cette activité correspond aux fonctions d'*échange* et de *métabolisme*.

La croissance et le développement des plantes impliquent la synthèse de matière nouvelle, le maintien des structures et la création de formes spécifiques. Ce sont les fonctions de *morphogenèse* et de *différenciation*.

Toute plante est capable de se reproduire soit par l'intermédiaire d'une organisation sexuée (la fleur et la graine par exemple), soit par la régénération d'un nouvel individu à partir d'une de ses parties végétatives (une bouture par exemple). L'ensemble de ces phénomènes met en jeu des réactions métaboliques et hormonales qui constituent les fonctions de *reproduction*.

Quelle que soit leur complexité, qu'ils soient pluricellulaires ou unicellulaires, qu'ils possèdent une structure très diversifiée comme les plantes dites « supérieures » ou une organisation rudimentaire comme les Algues ou les Champignons, les végétaux sont tous sensibles aux paramètres du milieu dans lequel ils vivent : la température, la lumière, la composition gazeuse... Cette sensibilité, qui est une manifestation vitale parmi les autres, constitue une fonction particulière. Elle est souvent traitée comme une variable des fonctions d'échange, de croissance et de développement ou de reproduction.

Fonctions et structures

Toutes les manifestations vitales qui viennent d'être évoquées supposent la création et le maintien d'une organisation spatiale. La vie n'existe que dans un ensemble structuré où les réactions se développent suivant des normes topographiques rigoureuses. Les *structures* peuvent être décrites à tous les niveaux de complexité d'une unité végétale vivante.

— Une *association végétale,* c'est-à-dire un groupement d'individus et d'espèces, constitue une unité dont on peut étudier le fonctionnement, comme on le ferait pour un être isolé; les phytosociologues parlent d'*individu d'association,* dans la mesure où cette structure est reproductive. Quant aux écologistes, ils décrivent des *écosystèmes* (une forêt, une prairie, un lac...) dont les fonctions sont rigoureusement contrôlées par leur composition. Le rapport des espèces entre elles, la répartition des groupes trophiques constituent la description d'une structure.

— Une plante est elle-même constituée d'*organes :* racines, tiges, feuilles. Ceux-ci renferment à leur tour des *tissus,* assemblages de cellules identiques. Chaque organe, chaque tissu joue un rôle bien précis dans la réalisation d'une fonction.

— Au sein de chaque *cellule,* des membranes limitent des compartiments métaboliques dont les formes, le nombre et les dispositions réciproques sont rigoureusement établis.

— Au *niveau plurimoléculaire* et *moléculaire,* la forme, la structure ou la conformation sont des caractères qui contrôlent les activités métaboliques (structure membranaire, enzymatique...).

Si la physiologie végétale s'attache tout particulièrement à la connaissance des activités ou fonctions, elle ne se désintéresse pas des structures, sans lesquelles les fonctions perdraient leur signification et l'entité étudiée la vie.

Chimie et biochimie, physique et biophysique des végétaux

L'analyse chimique de la matière végétale montre qu'une plante est constituée pour partie de corps minéraux et pour partie de corps organiques. Ces derniers sont des molécules généralement de masse élevée et constituées principalement d'atomes de carbone, d'oxygène, d'hydrogène et d'azote.

L'*eau* représente la part la plus importante de la masse végétale. Si l'on dessèche une feuille, un fruit ou un Champignon, on perd de 70 à 90 % du poids initial (appelé poids de matière fraîche). Si certains tissus, comme le bois, ou organes, comme le noyau d'un fruit ou la graine, sont moins riches en eau, tous en sont imbibés. L'eau est indispensable au maintien de la vie.

La matière végétale renferme des *sels minéraux :* chlorures, sulfates, phosphates et nitrates de sodium, de calcium, de potassium, de magnésium ou de fer. Ils sont en solution dans l'eau qui imbibe les cellules ou circule dans les tissus. Ils se présentent souvent sous une forme ionisée, et les ions métalliques peuvent neutraliser les groupements polaires des molécules organiques solubles ou celles des structures. Les sels minéraux forment parfois des masses cristallines qui se localisent dans les vacuoles ou sur les parois des cellules. Ils constituent un réservoir d'éléments pour la synthèse des substances organiques lorsque celles-ci possèdent dans leur molécule un ou plusieurs atomes métalliques (cas des chlorophylles, des cytochromes, etc.). Les sels minéraux jouent également un rôle dans l'équilibre osmotique des cellules et participent comme cofacteurs à de nombreuses réactions enzymatiques. Leur rôle est donc extrêmement varié, ce qui explique la diversité des manifestations des carences minérales.

Les *corps organiques* sont ainsi appelés car on les rencontre essentiellement dans la « matière organisée », c'est-à-dire chez les êtres vivants. Leur synthèse y est facilitée par la grande diversité des catalyseurs et elle est caractérisée par une grande finesse de régulation. Toutefois, notons que quelques corps organiques ont pu être formés hors de toute structure biologique, par les méthodes classiques de la chimie de synthèse. Les corps organiques sont globalement regroupés en trois familles : les *glucides,* les *lipides* et les *protides,* que nous avons étudiés précédemment. Notons l'importance des *nucléotides* (ATP, ADP, NADP, etc.) et des *acides nucléiques* (ARN et ADN), des *pigments* (chlorophylles, caroténoïdes, phytochrome, anthocyanes) et des *auxines, gibbérellines* et *cytokinines,* qui sont des *hormones végétales* et des *régulateurs de croissance.* Les acides nucléiques jouent chez les végétaux le même rôle que celui qu'on leur reconnaît chez tous les êtres vivants : établissement du code génétique et transcription de ce code, qui assure la différenciation cellulaire par la synthèse hautement contrôlée (activation, répression) des protéines actives, spécifiques d'un génome donné.

Toute cette chimie de la matière végétale est une partie de la chimie des êtres vivants (appelée la *biochimie*).

Les lois de la physique s'appliquent toutes aux êtres vivants, et aux végétaux en particulier. Pendant un certain temps on a cru que le monde animé possédait certaines lois physiques spéciales; cette croyance a pu intriguer les physiciens, mais rien, à l'heure actuelle, ne permet de penser que cela soit vrai. Cependant, dans la mesure où la vie n'est possible que dans des limites étroites des paramètres physiques, et du fait de la complexité des structures et des réactions se développant à une échelle de taille très réduite (μm, nm), on est contraint d'accorder une attention particulière à des domaines très spécialisés de la physique. Ce sont

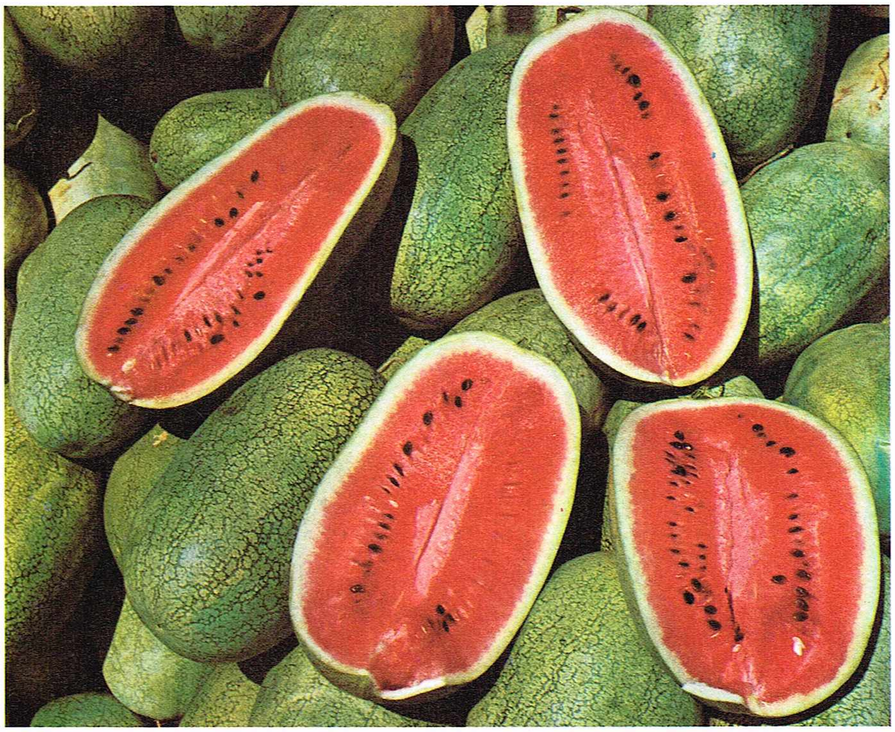

E.P.S.

▲ ***L'eau représente une part importante de la matière fraîche végétale, particulièrement chez les fruits comme la pastèque.***

ces restrictions que l'on sous-entend quand on traite de *biophysique.*

L'aspect incontestablement le plus original de la biophysique est l'*énergétique (bioénergétique).* Un système isolé est régi par le principe général qui veut qu'on observe une dégradation de sa structure et de ce fait une perte de capacité de réaliser un travail (augmentation d'*entropie*). Or, si le végétal vivant ne suit pas, à l'évidence, ce principe (il crée des structures en grandissant et augmente sa capacité de fournir du travail) c'est qu'il n'est pas un système clos. Il est ouvert, énergétiquement parlant, capable de fixer de l'énergie qu'il traite à son profit, par exemple, en la transformant en énergie chimique. La thermodynamique appliquée aux végétaux permet de prédire le sens et l'intensité des réactions du métabolisme avec toute la rigueur des mesures thermodynamiques classiques.

Un autre aspect physique extrêmement important pour la compréhension des fonctions végétales est la *diffusion* des gaz et des solutés. Les substances ne sont réactives qu'en solution, c'est-à-dire qu'elles peuvent se déplacer dans le système du solvant hydrique qui couvre toutes les parties. Les variations de température, de pression ou de concentration, affectant inévitablement les différents points de l'unité végétale, déterminent des gradients qui assurent la diffusion des substances réactives; cette diffusion est libre dans un système hydrique homogène, ou contrôlée par la traversée des membranes. Celles-ci, n'étant pratiquement jamais inertes, concourent à l'établissement d'un réseau complexe d'échanges ou de barrières qui constitue l'essentiel de la compartimentation métabolique.

Marka

▲ ***Résultats d'une expérience facile à réaliser, montrant l'importance de la lumière sur la croissance d'une plante; la jeune plante de gauche qui a poussé à la lumière est vigoureuse avec des feuilles bien vertes; celle de droite qui a poussé à l'obscurité est étiolée, allongée et peu pigmentée.***

La matière végétale renferme une quantité très grande d'eau servant, en particulier, de solvant mobile aux molécules actives. Les réactions enzymatiques se déroulent dans un système aqueux où les problèmes physiques d'interfaces solide-liquide ou liquide-gaz sont soulevés à tout moment de la description d'une fonction métabolique. Les forces d'attraction entre solides, d'adsorption ou de polarisation de surface sont des problèmes qui se posent en permanence lorsqu'on étudie la vie d'une cellule ou d'une plante entière.

Les connaissances biophysiques comme celles de la biochimie constituent les bases indispensables à la compréhension des mécanismes par lesquels s'expriment les fonctions physiologiques. Mais la physiologie ne se borne pas à l'application chimique et physique, elle tente d'intégrer ces données dans le cadre plus complexe et donc d'appréhension moins aisée que réalise l'extraordinaire édifice structuré d'une cellule, d'un tissu, d'un organe ou d'une plante.

LES FONCTIONS D'ÉCHANGE

Une plante privée d'eau se fane, se dessèche et meurt rapidement. Pour survivre, elle a besoin d'en absorber. L'eau circule des sites d'absorption (les racines) vers les sites d'évaporation (les feuilles). Il y a donc échange permanent d'eau entre le sol et la plante, entre la plante et l'atmosphère et, enfin, entre les différents points du végétal.

Si l'on place une plante à l'obscurité (à la cave par exemple), elle s'étiole rapidement; sa croissance par augmentation de poids s'arrête, même si, au début, ses organes tendent à s'allonger. Si elle n'est pas pourvue de réserves importantes, elle meurt. Il y a donc échange d'énergie entre l'environnement, la lumière, et la plante.

On pourrait multiplier les expériences qui démontrent le passage d'un certain nombre d'éléments de l'extérieur vers l'intérieur des végétaux et *vice versa*. On peut observer également des échanges nombreux d'un organe à un autre, d'une cellule à une autre, ou d'un compartiment métabolique à un autre au sein même de la cellule. Les éléments qui pénètrent dans la plante sont l'eau et les sels minéraux (plus les substances organiques chez les Champignons), le gaz carbonique et l'énergie lumineuse dans le cas des plantes vertes. Les éléments qui quittent la plante sont l'eau, l'oxygène, le gaz carbonique et de la matière organique avec les organes caducs (feuilles, fleurs et fruits).

Les fonctions d'échange sont donc :

— les échanges d'eau : l'absorption, l'évaporation-transpiration et la circulation;

— la nutrition minérale : l'absorption des sels minéraux et leur transfert dans la plante;

— la fixation du gaz carbonique, l'utilisation de l'énergie lumineuse (la photosynthèse) et la répartition des substances synthétisées;

— le rejet du gaz carbonique (la respiration).

Absorption, évaporation et circulation de l'eau chez la plante

Expériences et observations courantes

Quelques expériences courantes permettent d'appréhender les principes qui régissent l'*équilibre hydrique* de la plante. Les expériences et observations qui vont être décrites seront numérotées; on pourra ainsi, dans l'exposé des mécanismes qui suivra, facilement s'y référer. Ajoutons que la connaissance précise des mécanismes nécessite des mesures et un appareillage impliquant un équipement de laboratoire; celui-ci ne sera évoqué qu'exceptionnellement et hors du cadre des observations suivantes qui ne constituent qu'une approche intuitive du problème.

Plaçons une plante entière dans un récipient, les racines plongeant dans l'eau. La plante se fane tout d'abord, puis reprend son port normal (1). Elle se développera cependant moins bien qu'une plante laissée en terre aérée et irriguée (2). Si on ajoute dans le récipient qui contient l'eau une grande quantité de sel, la plante se fane; bien qu'on n'ait en rien diminué la quantité d'eau, on l'a rendue moins disponible pour la plante (3).

Au lieu de mettre une plante entière, plaçons un rameau ou un bouquet dans un vase. Les branches, si elles étaient fanées, se redressent vite (4) et reprennent un port normal pendant quelque temps; au bout de quelques jours, elles se fanent inévitablement, et de façon irréversible cette fois (5). Cependant, en recoupant la base des rameaux, on recule le moment où le bouquet est définitivement fané (6).

Si on repique en pleine terre des jeunes plants (salade ou tomate par exemple), ceux-ci auront le lendemain un aspect peu réjouissant laissant craindre le dessèchement complet et la mort, et cela même avec un arrosage abondant au moment du repiquage. Mais si on arrose régulièrement, la reprise aura lieu, peu à peu; les plants reprendront vie et croissance (7).

Après une longue sécheresse et lorsque aucun arrosage n'a été pratiqué, les plantes d'un jardin n'ont pas toutes souffert de la sécheresse de la même façon. Par exemple, si le fusain et les buis sont restés bien verts, si les plantes grasses et de rocaille semblent encore en bonne santé, les lilas et les géraniums ont les feuilles fanées et le gazon, sec, jauni, semble mort (8). Lorsqu'on arrose, les feuilles des lilas et des géraniums se redressent vite, alors que le gazon reprend beaucoup plus lentement (9).

Si l'on place sur un grand papier, côte à côte et à l'air libre, les organes suivants : des feuilles, des morceaux de fruits, des rondelles de tubercule, le dessèchement de tous ces organes a lieu à des vitesses et des degrés différents; les feuilles deviendront totalement sèches et cassantes, alors que les morceaux de fruits ou de tubercules resteront souples et encore humides (10); en plaçant tous ces organes dans l'eau, seuls ces derniers se réhydrateront totalement (11).

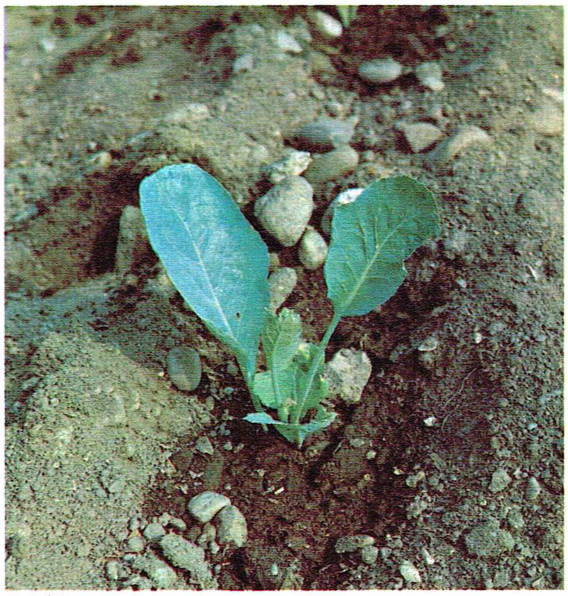
C. Bevilacqua

▶ ***Au moment du repiquage, une plante doit être arrosée régulièrement afin de rétablir son équilibre hydrique (ici un jeune plant de chou).***

Enfin, si l'on place des groseilles dans l'eau maintenue froide, elles ne se gonfleront pas. Si l'eau est un peu moins froide, elles prennent une allure nettement turgescente; en chauffant un peu plus, on n'augmenterait pas cette turgescence (12). Il faut chauffer nettement plus (jusqu'à une température de 50 °C à 70 °C) pour que les groseilles éclatent et libèrent leur jus (13).

Le potentiel hydrique et ses composants

Dans un système hétérogène (le sol, la plante, mais aussi une chute d'eau ou une pompe), l'eau n'est pas libre de se déplacer n'importe comment. Elle est liée à un certain nombre de contraintes : absorption et imbibition des substances colloïdales, liaisons avec les molécules en solution, pression exercée à sa surface, force gravitationnelle, etc. Le *potentiel hydrique* mesure cette liberté ou plutôt cette absence de liberté. Ainsi, dans l'expérience 10, on dira que le potentiel hydrique est différent dans une feuille et dans un fruit. Dans la feuille (peu riche en sucres solubles et en matières pectiques colloïdales) l'eau est plus libre de s'évaporer, alors que dans le fruit elle est retenue par imbibition et par les sucres en solution; elle s'évapore donc plus difficilement dans ce dernier.

Le potentiel hydrique est exprimé en unités de pression (1 bar = 0,987 atmosphère = 10^6 dynes/cm^2) : on peut imaginer que c'est la pression nécessaire pour libérer totalement l'eau d'un système hydraté. Par convention, à la pression atmosphérique l'eau pure a un potentiel hydrique égal à 0 et toutes les causes de contraintes donnent à ce potentiel des valeurs négatives. *L'eau se déplacera toujours des potentiels les plus élevés vers les potentiels les plus bas.* Par exemple, dans l'expérience 11, la réhydratation des tissus riches en sucres et en matières pectiques se fera plus vite que celle des tissus où l'eau est faiblement liée.

Les composants du potentiel hydrique sont les causes de contrainte de l'eau. Plus il y a de substances en solution dans l'eau, moins celle-ci est libre de se déplacer, de s'évaporer ou de traverser une membrane. Si deux compartiments sont séparés par une membrane qui ne laisse passer que les molécules d'eau et si les concentrations de part et d'autre de cette membrane sont différentes (ce qui est réalisé dans les appareils appelés *osmomètres*), les molécules d'eau iront du compartiment le moins concentré vers le compartiment le plus concentré. C'est cette situation qu'on a réalisée dans l'expérience 3. Cette sorte d'immobilisation de l'eau par un soluté est la composante osmotique, ou *potentiel osmotique*. Il peut être mesuré par un osmomètre qui, grâce à un manomètre, indique en unités de pression la force d'attraction d'une solution à mesurer vis-à-vis du solvant pur.

L'eau pure a un potentiel osmotique nul; une solution décimolaire de sel (chlorure de sodium NaCl) a un potentiel osmotique de — 4,8 bars; à la même concentration molaire, une solution de sucre (saccharose $C_{12}H_{22}O_{11}$) a un potentiel osmotique de — 2,4 bars. Ce potentiel est donc fonction de la taille des molécules en solution. Une concentration en sucre dix fois supérieure à la solution précédente a un potentiel osmotique de — 24,2 bars, soit dix fois plus faible. Pour un soluté, le potentiel osmotique (toutes les conditions étant égales par ailleurs) est donc directement proportionnel à sa concentration molaire.

Les potentiels osmotiques des organes ou des tissus végétaux sont très variables, comme le sont la nature et la concentration des corps qui s'y trouvent en solution. Les feuilles des plantes aquatiques d'eau douce (les nénuphars par exemple) ont un potentiel osmotique plus élevé (de — 1 à — 8 bars) que les plantes aquatiques qui vivent dans les eaux saumâtres, plantes halophytes aux tissus riches en sels (de — 100 à — 200 bars et parfois moins encore); une feuille de peuplier, de chêne ou d'érable a un potentiel osmotique d'environ — 20 bars; celui des herbes est situé entre — 10 et — 15 bars.

L'observation 8 montre que la déshydratation des plantes ne se fait pas à la même vitesse. Si les différences des potentiels osmotiques sont une des causes de cette diversité de réactions vis-à-vis de la sécheresse, elles ne sont pas la seule (les structures d'évaporation jouent aussi un rôle important). Plus le potentiel osmotique est

Archives B

F. Peuriot - Pitch

▲ Les feuilles des plantes aquatiques d'eau douce (ici en haut, des* Victoria regia*) ont un potentiel osmotique plus élevé que celles des plantes d'eau saumâtre (en bas, une salicorne,* Salicornia*), dont les tissus sont riches en sels.

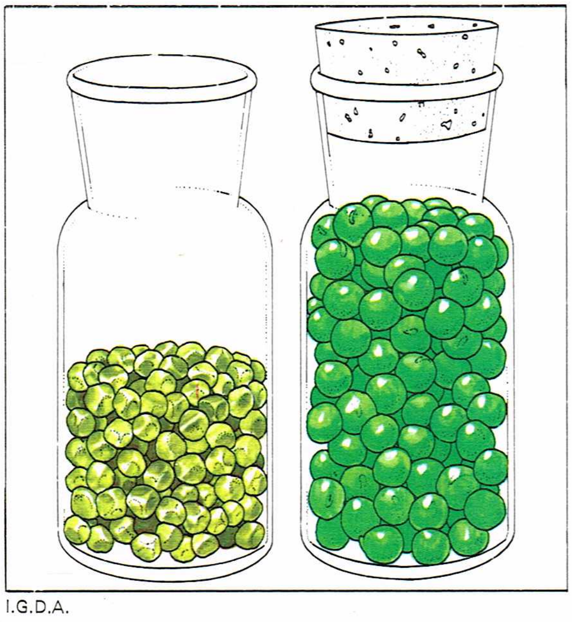

I.G.D.A.

◀ L'imbibition des graines sèches s'accompagne d'une augmentation de volume; ici deux bocaux contenant le même nombre de graines de pois: celles de gauche sont sèches et celles de droite sont humides.

C. Bevilacqua

▲ *Grâce à leur richesse en matières colloïdales qui fixent l'eau de leurs tissus, donc à leur faible potentiel matriciel, les plantes crassulescentes résistent bien à la déshydratation.*

▼ *A gauche, coupe transversale d'une aiguille de pin* (Pinus sp.) *passant au niveau d'un stomate, site de la plupart des échanges gazeux, notamment du passage de la vapeur d'eau. A droite, exemple de ramification de l'appareil radiculaire d'un plant adulte d'avoine* (Avena sativa)*; le côté de chacun des carrés correspond à 30,4 cm.*

bas (en valeurs algébriques), plus l'eau reste liée aux tissus.

L'eau est également fixée par toutes sortes de forces de surface qu'on peut réunir sous les termes de *forces d'hydratation*, ou d'*imbibition*. Ces forces se manifestent principalement au niveau des masses colloïdales, l'état colloïdal étant extrêmement répandu dans les tissus végétaux (sous la forme de matières pectiques et de masses protéiques). Cette liaison de l'eau avec les structures hydrophiles constitue la composante matricielle, ou *potentiel matriciel*. Chacun sait combien un colloïde sec est avide d'eau : par exemple, une colle à l'eau s'hydrate facilement. Certains colloïdes servent de desséchant. Leur potentiel matriciel est extrêmement bas (— 3 000 bars). C'est par leur richesse en matières colloïdales, donc par leur faible potentiel matriciel, que les plantes dites grasses résistent à la déshydratation. Pour un morceau de fruit, le potentiel osmotique bas (dû à la richesse en sucres) et le potentiel matriciel également très bas (dû à la richesse en matières pectiques) se conjuguent pour rendre sa déshydratation laborieuse et sa réhydratation facile (expériences 10 et 11).

En exerçant une pression sur le compartiment le plus concentré d'un appareil du type osmomètre, on limite la liberté de l'eau d'y pénétrer : c'est la composante de pression, ou *potentiel de pression* (potentiel pascalien). Dans l'expérience 12, la pénétration de l'eau dans la baie de groseille n'est pas seulement fonction de la vitesse de diffusion de l'eau en relation avec la température, elle est limitée par la résistance de l'enveloppe qui oppose une contre-pression à l'appel osmotique. Les deux pressions s'équilibrent pour établir l'état de turgescence, l'inverse étant l'état de plasmolyse qui est réalisé lorsque le potentiel de pression est rendu nul par le départ de l'eau de l'enceinte. Le potentiel de pression est parfois appelé *pression de turgescence*.

Chaque cellule végétale réalise ce système clos par un entourage rigide (les parois pecto-cellulosiques et les cellules adjacentes). Ainsi se trouvent limités l'expansion et le gonflement dus à l'appel osmotique et matriciel, et par là même le pouvoir d'absorption de la cellule.

Si les potentiels osmotiques et matriciels sont mesurables (il existe des appareils de type osmomètre qui peuvent mesurer la somme des deux), le potentiel de pression est plus difficile à estimer directement. On peut l'évaluer par une différence : en effet, le potentiel hydrique d'un tissu étant la somme de ses composantes (potentiel osmotique + potentiel matriciel + potentiel de pression), et sachant qu'on peut mesurer le potentiel hydrique (méthode d'équilibre avec des solutions synthétiques dont on connaît très précisément et la nature des solutés et leur molarité), on calcule le potentiel de pression par une différence : [potentiel hydrique — (potentiel osmotique + potentiel matriciel)].

Ce potentiel de pression est fonction de la rigidité des parois, qui peuvent être plus ou moins épaisses, et de la compacité des tissus. Un parenchyme spongieux ou une cellule isolée possèdent une liberté de gonflement plus grande qu'un tissu dense ou une cellule prisonnière dans des tissus rigides.

Étant donné le principe capital qui veut que l'eau se déplacera toujours vers les zones à potentiels hydriques les plus bas, son passage d'un tissu à un autre ou d'une cellule dans une autre sera d'autant plus facile et rapide que les composantes seront plus basses. C'est pourquoi la différence de potentiel hydrique entre deux tissus ou deux cellules est parfois appelée *« déficit de pression de diffusion »*. C'est cette valeur qui contrôle l'absorption de l'eau par la plante et son déplacement au sein des tissus.

Les sites d'absorption de l'eau

Dans une Algue filamenteuse ou une cellule isolée, l'eau peut pénétrer en n'importe quel point de l'organisme ; il n'y a pas de structure spécialisée pour cette fonction.

Si on réhumecte une poignée de Mousse desséchée, elle se réhydrate facilement. Lorsqu'elle est en place,

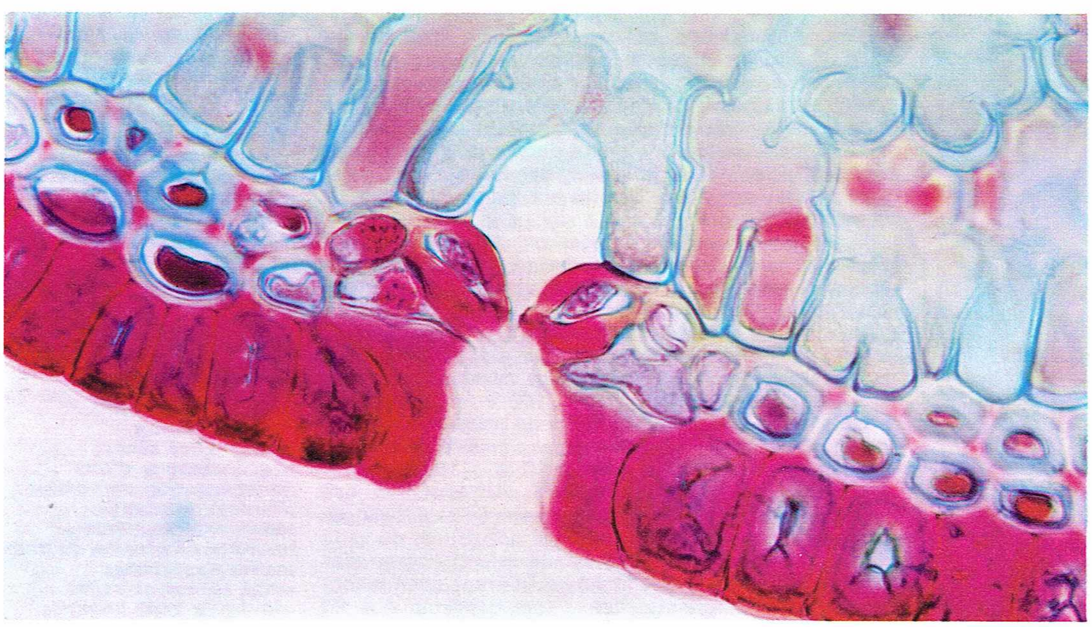

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

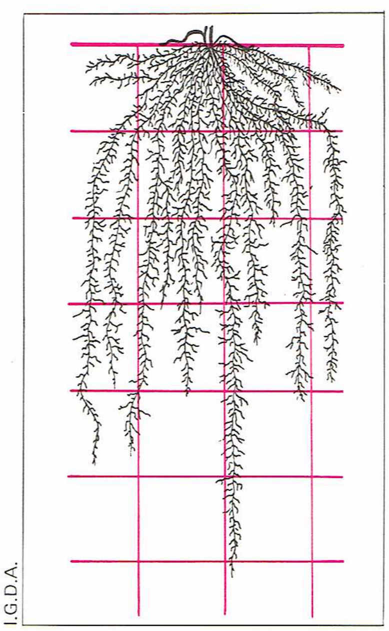

I.G.D.A.

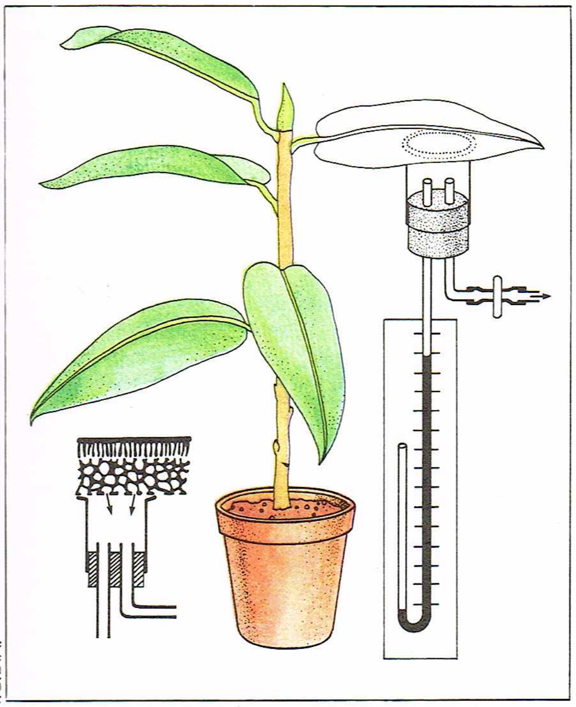

I.G.D.A.

son alimentation hydrique est assurée par les multiples poils longs et très fins (les rhizoïdes) qui plongent dans le substrat.

Chez les plantes supérieures, les racines sont les organes privilégiés de l'absorption de l'eau et, plus généralement, de toutes les substances puisées dans le sol. L'absorption par les feuilles ou les fruits n'est pas nulle (absorption des antiparasites) mais ne peut assurer que très exceptionnellement l'équilibre hydrique normal et total de la plante. L'absorption au niveau des racines se fait par l'extrémité des plus fines radicelles. Celles-ci sont terminées par une coiffe précédée d'une zone méristématique et d'une zone d'allongement. A quelques millimètres de la pointe, se développe une zone pileuse qui est considérée généralement comme la zone d'absorption. Les poils qui la recouvrent sont dits absorbants ; ils sont formés chacun d'une seule cellule allongée. La zone recouverte de poils absorbants, courte, n'a pas plus de quelques millimètres (1 cm au maximum) ; toutefois, étant donné l'extrême ramification du système radicellaire, cela représente un volume considérable. Cette zone du sol exploitée par le système absorbant des racines ne cesse de se déplacer, l'exploration étant due à la croissance racinaire apicale. Dans l'expérience de repiquage 7, si la reprise est lente, c'est parce que les radicelles des plants ont été détériorées lors de la transplantation. On conseille de couper l'extrémité des racines avant de repiquer pour supprimer les multiples déchirures et pour favoriser, par une taille franche, à la fois le pompage direct de l'eau du sol (même principe que dans l'expérience 6) et la cicatrisation qui s'accompagne de la formation d'un chevelu radicellaire abondant, indispensable à la reprise véritable et définitive.

Le *flux d'eau* qui passe du sol à l'intérieur des racines est fonction de la *différence de potentiel hydrique* entre ces deux compartiments. Les cellules absorbantes des racines ont un potentiel hydrique compris entre — 0,5 bar et — 15 bars. Ces valeurs sont tributaires du métabolisme cellulaire ; une bonne oxygénation a pour effet de maintenir le potentiel hydrique à des valeurs basses, en même temps qu'elle favorise la perméabilité des membranes. Certains sols très humides peuvent provoquer l'asphyxie des racines et ainsi, paradoxalement, abaisser l'absorption ; c'est ce qui se passe dans le cas extrême décrit à l'observation 2, lorsqu'on maintient les plantes dans un récipient contenant de l'eau non aérée.

Le potentiel hydrique d'un sol possède les composantes qui ont été déjà énoncées ; elles sont liées à sa composition saline et colloïdale. Mais deux composantes nouvelles y prennent une importance toute particulière : la *composante capillaire* et la *composante gravitationnelle*.

La première est, en fait, une variante de la composante matricielle puisqu'elle fait intervenir la structure capillaire du sol, c'est-à-dire les forces de cohésion de l'eau dans un système formé de canalicules de très faible diamètre. La deuxième fait intervenir la force de gravitation qui s'applique à la masse d'eau, provoquant l'infiltration jusqu'aux couches profondes. On distingue dans le sol : l'eau d'infiltration, l'eau retenue par les corps hydrophiles et l'eau disponible pour la plante. Dans un sable, l'eau d'irrigation a tendance à s'infiltrer rapidement (composante gravitationnelle dominante), alors que, dans une argile, l'eau est fortement retenue par la composante matricielle ou perdue par le ruissellement de surface.

Une même teneur en eau d'un sol peut être suffisante ou insuffisante pour une même plante ; tout dépend de la composition minérale, organique et colloïdale de ce sol, ou de sa structure. La teneur en eau d'un sol ne fournit donc qu'une indication imparfaite sur son aptitude à satisfaire les besoins hydriques des plantes qui y poussent. C'est pourquoi on préfère parler du « *point de fanaison permanente* », qui représente la teneur en eau d'un sol, valeur limite en deçà de laquelle la plante flétrit irréversiblement. Cette valeur peut être égale ou supérieure à 20 % pour un terrain argileux. Dans ce dernier cas, cela signifie que sur certains sols les plantes manifestent des signes de carence hydrique grave, même en présence d'une teneur en eau assez élevée.

Les sites d'évaporation de l'eau

Les deux bornes de la circulation de l'eau dans la plante sont le système radicellaire (entrée) et l'*épiderme foliaire* (sortie).

L'épiderme foliaire est constitué d'une assise cellulaire enduite à l'extérieur d'une couche imperméable, la *cuticule*, formée de cutine et souvent de cires, substances lipidiques. Suivant les espèces, l'âge des feuilles ou les réactions d'adaptation aux conditions ambiantes, la surface épidermique est tantôt lisse et plane, tantôt vallonnée ou gaufrée ; elle peut être creusée de cryptes ou de sillons. Pour les mêmes causes, elle possède souvent des poils dont l'abondance, la forme et la taille présentent de larges variations. L'épiderme, décrit jusqu'ici comme un revêtement protecteur et imperméable (cuticule et poils), possède des ouvertures : les stomates.

Un *stomate* est constitué par deux cellules stomatiques de forme très différente des cellules voisines. Ces deux cellules sont séparées par un espace, l'*ostiole*, qui varie de taille au cours de la journée. Sous l'ostiole, dans l'épaisseur de la feuille, une grande lacune constitue la *chambre sous-stomatique*. La forme des cellules stomatiques, la densité des stomates par unité de surface, leur localisation (sur l'épiderme supérieur, inférieur ou sur les deux, au fond de cryptes ou de sillons, ou encore dispersés au hasard sur la surface) sont des données extrêmement variables qui constituent des caractères peu modulables de l'espèce ou du génome ; la polyploïdie, par exemple, peut les modifier. C'est par ces ouvertures que se font 90 à 95 % des échanges gazeux de la plante, en particulier, le passage de la vapeur d'eau.

L'intensité de l'*évapo-transpiration* est le poids d'eau évaporé par unité de surface et par unité de temps. Cette valeur tient compte pour partie de la différence de potentiel hydrique entre l'air et les tissus foliaires, mais aussi de la structure des épidermes (observation 8). Si une feuille de lilas peut évaporer 4 à 5 g d'eau par dm^2 et par heure et une feuille de géranium 1 à 2 g, une feuille de buis ou de fusain, rapportée à la même surface foliaire et dans le même laps de temps, n'en évapore que 0,2 g. Ces variations interspécifiques sont dues aux différences de densité et de localisation des stomates sur l'épiderme. Mais ces différences doivent être évaluées lorsque toutes les conditions sont maintenues égales. En effet, pour une même espèce et pour une même feuille, on observe des variations considérables de l'intensité d'évapo-transpiration en fonction des conditions de l'environnement, conditions dont les variations parfois rapides entraînent une réponse quasi instantanée. Cela est dû à l'extraordinaire sensibilité réflexe des cellules stomatiques qui, en se gonflant, provoquent l'ouverture de l'ostiole, et inversement.

La fermeture de l'ostiole peut être due à trois causes, dont chacune est suffisante pour provoquer le phénomène : l'obscurité, la sécheresse, ou une teneur élevée

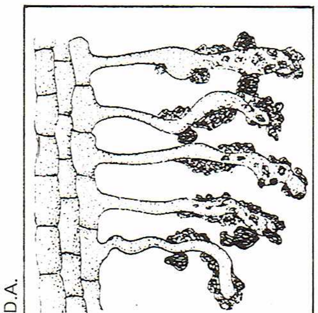

I.G.D.A.

▲ ***Les poils absorbants des racines sont constitués par une unique cellule allongée à laquelle adhèrent les particules de terre, permettant ainsi l'absorption de l'eau et des sels minéraux.***

◀ ***Représentation schématique d'une expérience de mesure du degré d'ouverture des stomates d'une feuille à l'aide d'un poromètre. Sur le schéma, en bas, à gauche, les flèches indiquent la direction du courant d'air.***

▶ *Courbes des variations, au cours de la journée, de la transpiration foliaire (en bleu), du degré d'ouverture des stomates (en vert), de la température de l'air (en rouge) et de l'humidité relative de l'air (en bleu clair).*

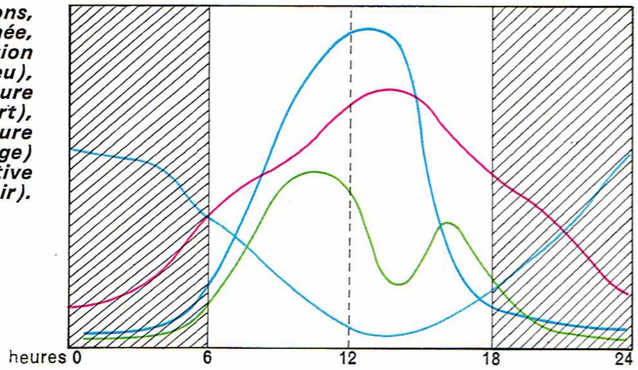

I.G.D.A.

en CO_2. L'ouverture est déterminée par les conditions inverses. D'autres causes peuvent être évoquées, mais elles sont secondaires et n'agissent qu'indirectement : un traumatisme (coupure, blessure ou agitation brutale), un vent puissant ou une température élevée induisent également la fermeture des ostioles.

Le mécanisme de fermeture ou d'ouverture des stomates fait intervenir les propriétés structurales et métaboliques des cellules stomatiques.

— *Propriétés structurales :* les cellules stomatiques possèdent une paroi plus épaisse sur la face qui borde l'ostiole que sur la face opposée. Si, pour une raison ou pour une autre, elles absorbent de l'eau et donc se gonflent, la déformation affecte principalement la face opposée à l'ostiole (comme un tuyau de caoutchouc qui, par suite d'amincissement accidentel d'une partie de sa surface, forme une hernie quand on le gonfle). Les deux faces à parois épaisses qui sont en contact s'écartent l'une de l'autre, ce qui provoque l'ouverture de l'ostiole. La fermeture et l'ouverture sont donc fonction de l'état de turgescence des cellules stomatiques.

— *Propriétés métaboliques :* conformément à tout ce qui a été dit concernant les mouvements de l'eau d'un compartiment dans un autre, l'entrée d'eau qui provoque le gonflement des cellules stomatiques est due à une diminution du potentiel hydrique de ces dernières. Plus généralement, les variations de volume de ces cellules sont liées à une augmentation de la différence de potentiel hydrique entre leur contenu et celui des cellules environnantes. Un air sec entraîne la déshydratation des tissus foliaires, ce qui provoque le départ d'eau des cellules stomatiques, la fermeture des ostioles, et réduit l'évaporation. La régulation est donc protectrice. Les mécanismes sont moins évidents en ce qui concerne les effets de la concentration en gaz carbonique et de la lumière. Cependant, les explications, à l'heure actuelle encore controversées, se fondent toutes sur l'effet des variations de pH (acidité ou basicité) du contenu cellulaire qui orientent le métabolisme vers la synthèse ou l'hydrolyse de glucides, modifiant ainsi la composante osmotique du potentiel hydrique.

▼ *En haut, représentation d'un stomate ouvert et d'un stomate fermé. En bas, schéma du parcours de l'eau dans une racine, depuis la zone pilifère jusqu'aux vaisseaux (A), et dans une feuille (B) : ap, assise pilifère; pa, poil absorbant; pc, parenchyme cortical; vl, vaisseaux ligneux; cs, chambre sous-stomatique; me, mésophylle; pl, parenchyme lacuneux; pp, parenchyme palissadique; st, stomate.*

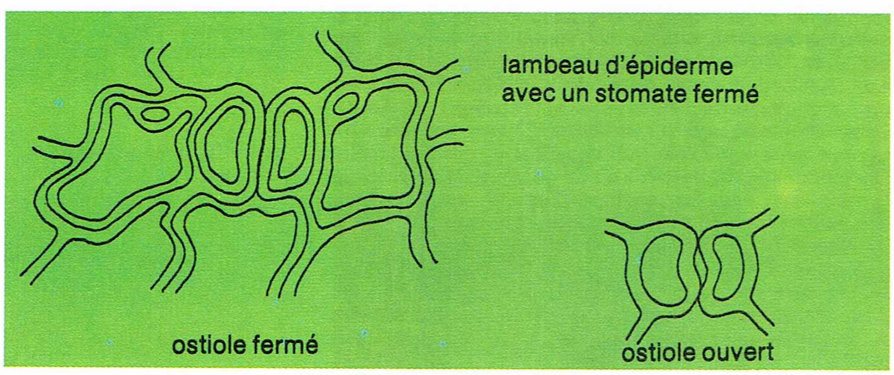

Richard Colin

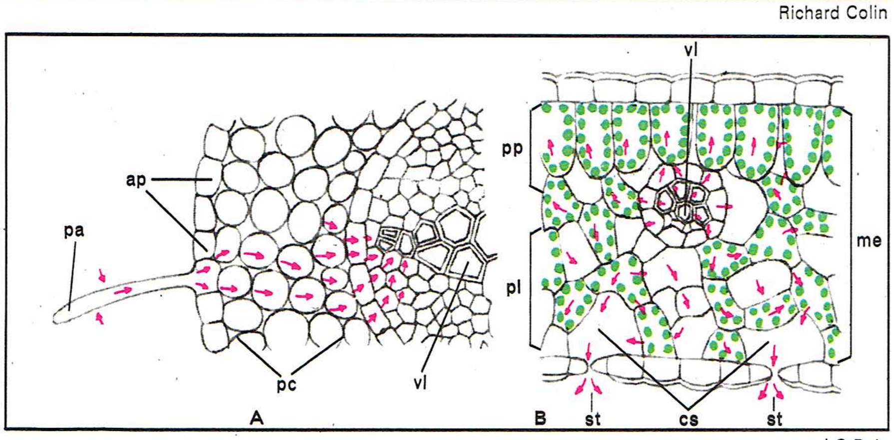

I.G.D.A.

La circulation de l'eau des lieux d'absorption aux lieux d'évaporation

On estime qu'en moyenne la différence de potentiel hydrique est de l'ordre de — 1,5 bar entre le sol et le parenchyme cortical des racines, de — 15 bars entre les racines et les feuilles, et de — 900 bars entre le parenchyme foliaire et l'air. Cette série de différences montre qu'un flux de molécules d'eau peut s'établir dans la plante.

On peut diviser le trajet de l'eau en trois parties selon l'orientation du courant : trajet horizontal depuis les poils absorbants jusqu'au centre des racines, où se trouvent les tissus conducteurs; trajet vertical dans les tissus conducteurs spécialisés; trajet multidirectionnel de diffusion dans les tissus et, en fin de parcours, dans les feuilles où la vapeur d'eau se concentre dans les chambres sous-stomatiques.

Les voies de transit de l'eau dans les parenchymes des racines ou des feuilles peuvent être de trois sortes : passage de vacuole à vacuole par le jeu des phénomènes osmotiques; transfert de l'eau qui imbibe les colloïdes cytoplasmiques et passage de cellule à cellule grâce aux travées cytoplasmiques reliant les cellules au niveau des plasmodesmes (perforations des parois pecto-cellulosiques) ; transfert de l'eau d'imbibition des colloïdes extracellulaires contenus dans les lacunes ou les méats. Cette dernière voie, qui n'implique aucune traversée de membrane, est celle de l'*espace libre* des tissus. On appelle espace libre le volume partiel d'un tissu qui peut échanger les molécules avec une solution qui l'entoure par une simple diffusion.

Ces trois voies peuvent se réaliser dans le trajet horizontal du cortex des racines. Cependant, lorsque l'eau doit pénétrer dans le cylindre central où se trouvent les tissus conducteurs, une barrière constituée par le *cadre de Caspari* interdit le transit par les espaces libres. Ce cadre est une imprégnation ligneuse qui affecte les parois radiales des cellules de l'endoderme (assise cellulaire limitant le cylindre central). L'eau, ne pouvant traverser ce cadre par imbibition, est donc contrainte de pénétrer dans les cellules par les parois tangentielles.

Une fois dans le cylindre central, la circulation est canalisée par les *vaisseaux ligneux du xylème*. Il s'agit de cellules très longues, situées bout à bout, et dont les parois longitudinales sont imprégnées d'ornementations de lignine (les vaisseaux sont dits annelés, spiralés, réticulés, etc.). Les parois transversales sont souvent absentes, de telle sorte que l'ensemble du tissu est comparable à un faisceau de tuyaux capillaires. Dans le bois on retrouve aussi cette structure, associée à des parenchymes ligneux qui assurent la rigidité et la résistance de ce matériel.

Les forces motrices de l'ascension de l'eau et des corps en solution sont essentiellement constituées par le *gradient de potentiel hydrique* entre le sol et l'air (en passant par la plante) : cette pénétration de l'eau dans la racine cause la poussée radiculaire et l'évaporation de l'eau au niveau des feuilles cause une aspiration ascendante. La force de cohésion de la colonne d'eau ainsi que les forces capillaires dans les vaisseaux et dans les canalicules méatiques qui sillonnent les parenchymes forment un moteur supplémentaire de la circulation de cette sève qui vient du sol, ou « sève brute ».

Absorption et circulation des sels minéraux dans les plantes : nutrition minérale

Un terrain normalement irrigué et exploité, c'est-à-dire sur lequel on fait pousser des plantes que l'on récolte ensuite, est un terrain qui s'épuise si l'on n'y maintient

pas, par un apport d'engrais ou d'amendements de toutes sortes, une composition satisfaisante pour la croissance des plantes. En effet, l'eau qui ruisselle à la surface ou qui traverse le sol en le lessivant se charge de substances solubles; ces substances sont perdues pour l'aire considérée. En outre, en récoltant les plantes chargées de substances puisées dans ce sol et en les exploitant hors des limites du champ, on épuise celui-ci. Les engrais purement organiques ne suffisent généralement pas, et il faut y joindre des sels minéraux : nitrates, phosphates, sulfates, etc.

Si l'on essaie de cultiver une plante sur de l'eau pure, on peut satisfaire au bilan hydrique, mais rapidement la plante présente des signes de *carence*. L'addition de sels minéraux en justes proportions rétablit la santé de la plante par la *levée de la carence*.

La recherche des éléments nécessaires

Quand on calcine un végétal, on perd le carbone, l'hydrogène et l'oxygène qu'il contenait (perte sous forme de CO_2 et de vapeur d'eau). Les cendres qui restent renferment des éléments métalliques ou les métalloïdes : leur analyse donne une idée de l'alimentation minérale dont a besoin la plante. On peut aussi se rendre compte que les plantes ont une composition en éléments très différente de celle du sol sur lequel elles ont poussé. Les éléments principaux du sol sont l'oxygène, le silicium et l'aluminium. Si l'on met à part l'oxygène perdu lors de la calcination, on constate qu'en plus de cet élément c'est l'azote, le potassium, le magnésium et le phosphore qui constituent les éléments les plus abondants dans les cendres. L'aluminium et le silicium, en si grandes quantités dans le sol, ne se retrouvent qu'à

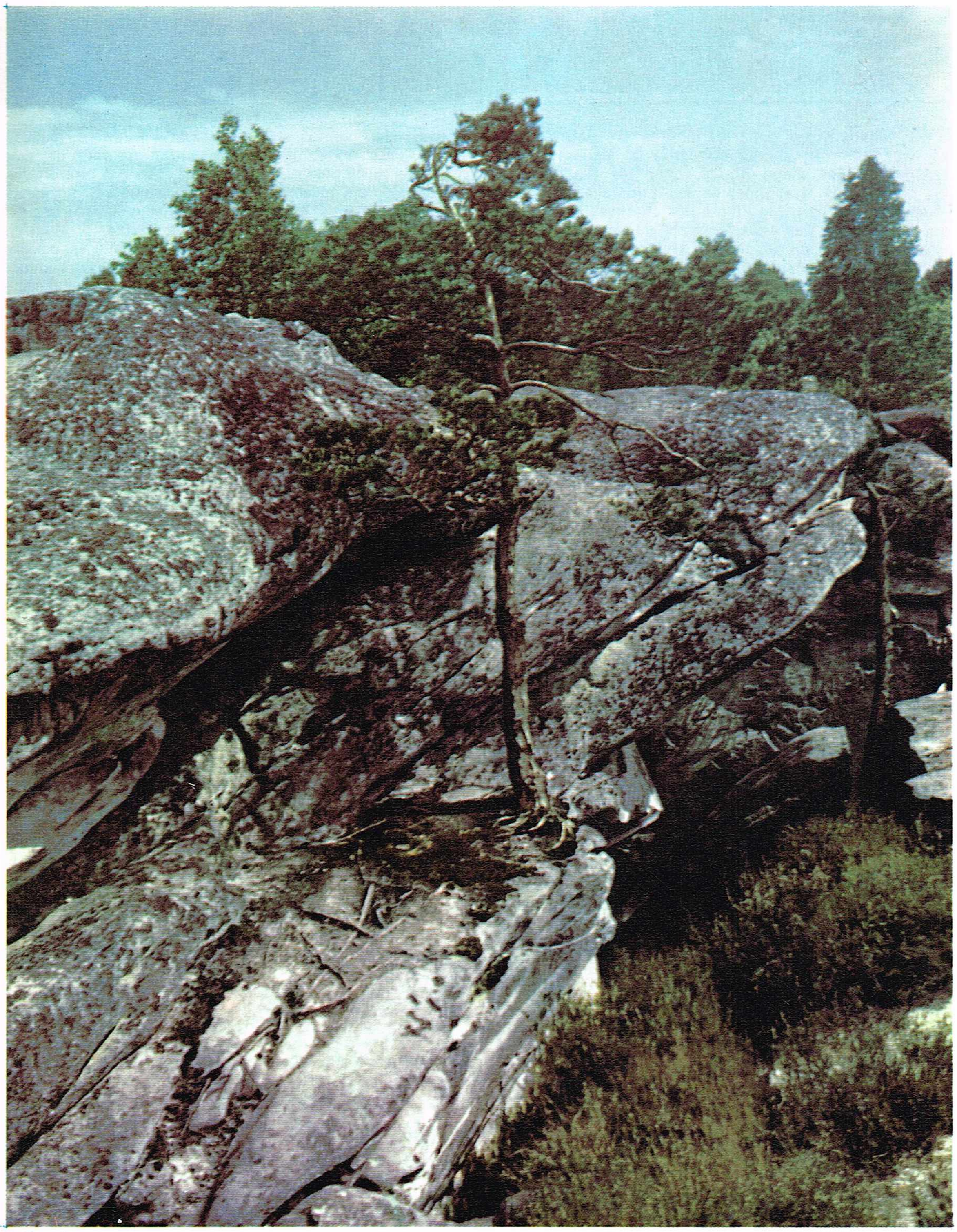

R. Bourdu

◀ Pour assurer leur croissance, les plantes ont besoin d'absorber de l'eau et des sels minéraux en quantité suffisante; dans le cas de cet arbre qui pousse dans de mauvaises conditions (sur un rocher), le système racinaire très développé assure l'ancrage et la recherche des éléments nutritifs et de l'eau, loin dans le sol.

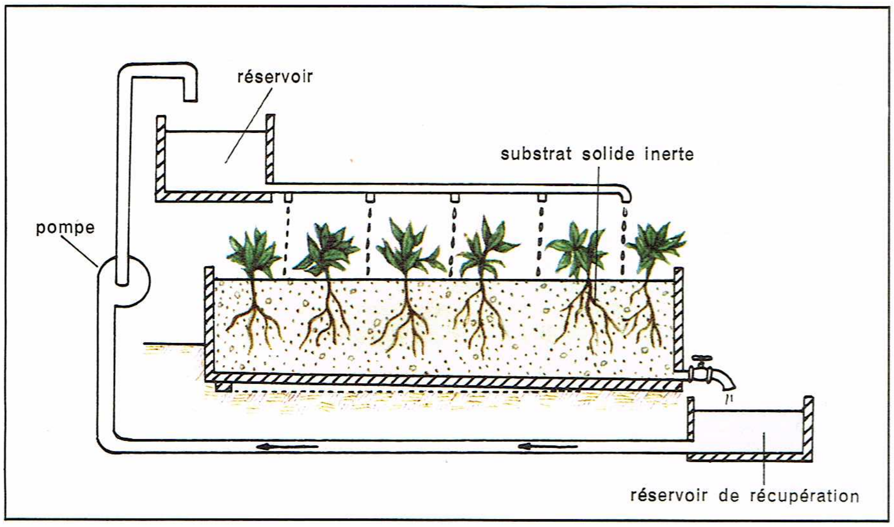

I.G.D.A.

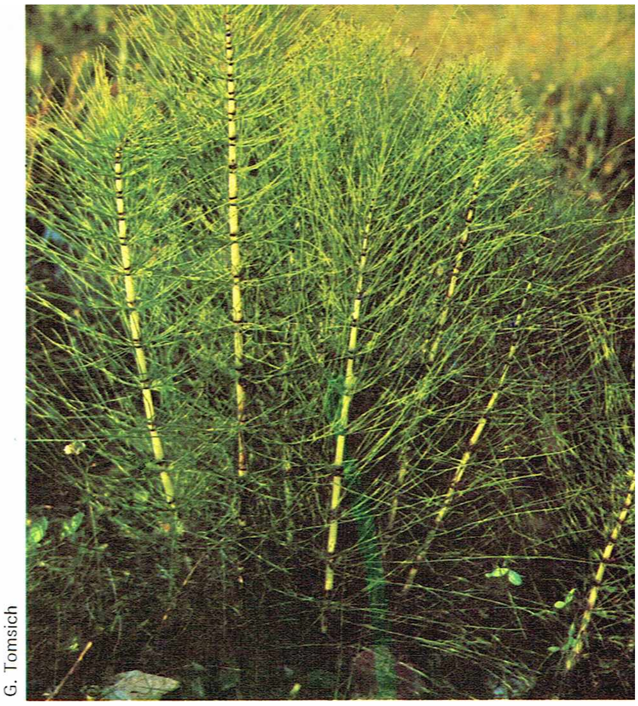
G. Tomsich

▲ *A gauche, un exemple de technique utilisée pour la culture sans sol dite* culture hydroponique. *Cette méthode culturale mise au point pour l'étude des éléments minéraux nécessaires aux plantes est maintenant utilisée en vue d'une production commercialisable. A droite, des frondes de prêles* (Equisetum maximum), *plantes particulièrement riches en* silicium, *contrairement à la plupart des végétaux qui contiennent de faibles quantités de cet élément.*

de très faibles doses dans les plantes. On doit signaler des exceptions en ce qui concerne le silicium : chez certaines Algues d'eau douce, chez les Équisétacées (les prêles), les Graminées et les Cypéracées, il peut représenter une part importante des cendres; mais ce ne sont là que des cas exceptionnels de végétaux vivant dans des eaux ou sur des terrains souvent riches en silice.

Une première constatation s'impose donc : les plantes sélectionnent les sels minéraux nutritifs. Cette sélection porte non seulement sur les proportions des différents éléments, mais aussi sur leur présence même : sur les quelque 92 éléments naturels connus, la plante n'en renferme que 60.

L'analyse des tissus secs ou des cendres permet également de constater que les éléments se répartissent suivant leurs quantités en deux groupes : les *macro-éléments* (de 1 000 à 15 000 ppm des tissus secs) et les *oligo-éléments,* ou *micro-éléments* (de 0,1 à 100 ppm des tissus secs). Dans la première catégorie on trouve, par ordre d'importance, dans les cendres : l'azote, le potassium, le calcium, le magnésium, le phosphore et le soufre (l'hydrogène, le carbone et l'oxygène, de loin les plus importants, étant perdus par déshydratation ou calcination). Pour les oligo-éléments, et toujours par ordre d'importance, on trouve le chlore, le bore, le fer, le manganèse, le zinc, le cuivre et le molybdène. Il ne faut pas confondre cette importance quantitative des éléments avec leur importance qualitative, c'est-à-dire le rôle de chacun des éléments cités. Mais l'analyse des cendres ne peut donner que le type d'information quantitatif. Elle ne permet donc ni une juste connaissance des rôles réels respectifs des différents éléments, ni de déterminer sous quelles formes ils se trouvent dans la plante et sous quelles formes ils sont absorbés.

Le complément d'information ne peut être donné que par l'expérience avec des plantes vivantes : il s'agit de faire pousser des plantes sur une solution nutritive, réalisée par la mise en solution d'un certain nombre de sels minéraux aussi purs que possible et dans des proportions rigoureusement mesurées. Ce type de culture, qui sert à la recherche des éléments minéraux nécessaires, est aussi réalisé actuellement en vue d'une production commercialisable; c'est ce que l'on appelle la *culture hydroponique,* ou *culture sans sol.* Le substrat est souvent du sable lavé ou du gravier plus ou moins fin ne renfermant aucun élément soluble. Lorsque le dispositif de la culture hydroponique est réalisé, on décèle la juste composition du milieu nutritif en faisant varier les quantités de sels mis en solution et leur nature. Étant donné l'extraordinaire sensibilité de la plante aux oligo-éléments, on comprend qu'il soit nécessaire de s'entourer de nombreuses précautions pour que les résultats expérimentaux reflètent bien les variations connues et contrôlées du milieu nutritif : pureté de l'eau, pureté des sels introduits, inertie des récipients vis-à-vis de la solubilisation dans l'eau...

Les résultats de ces laborieuses recherches fournissent une gamme de solutions nutritives propres à la croissance et au développement de chaque plante. Il existe maintenant une longue liste de solutions éprouvées. En fait, celles-ci ne sont que des variantes autour de trois ou quatre types : pour les plantes calcifuges, pour les plantes des terrains acides, pour les plantes à croissance rapide, etc. On étudiera à part les types de solutions qui renferment obligatoirement des corps organiques et qui ne sont adaptées qu'aux plantes hétérotrophes.

Cependant, quel que soit le type de solution proposée pour une plante verte, on retrouve la distinction quantitative entre les macro-éléments et les oligo-éléments. On peut, de plus, introduire une nouvelle distinction en deux groupes : les éléments essentiels ou indispensables, et les éléments accessoires. On dit qu'un *élément* est *essentiel* lorsqu'en son absence la plante est incapable de croître et de se reproduire; un tel élément ne peut être remplacé par aucun autre. On en connaît seize : ce sont ceux énumérés plus haut dans la liste des macro- et micro-éléments. Parmi les *éléments non essentiels,* on trouve le sodium et l'iode, si abondants dans les terrains saumâtres, le silicium et l'aluminium, qui sont les éléments les plus abondants de tous les sols, le cobalt, le vanadium, le sélénium, etc. S'il existe donc seize éléments essentiels pour toutes les plantes, parmi les éléments non essentiels certains le sont pour telle ou telle plante présentant une exigence spécifique (silicium, cobalt...).

ÉLÉMENTS ESSENTIELS ET LEUR TENEUR MOYENNE DANS LES TISSUS SECS DES PLANTES (valeurs en ppm)

ÉLÉMENTS CONSIDÉRÉS COMME MACRO-ÉLÉMENTS		ÉLÉMENTS CONSIDÉRÉS COMME MICRO-ÉLÉMENTS	
Carbone	450000	Chlore	100
Oxygène	450000	Fer	100
Hydrogène	60000	Manganèse	50
Azote	15000	Bore	20
Potassium	10000	Zinc	20
Calcium	5000	Cuivre	6
Magnésium	2000	Molybdène	0,1
Phosphore	2000		
Soufre	1000		

Le rôle des principaux éléments

Les expériences de culture hydroponique permettent ainsi de déceler le rôle de chacun des éléments parce que chacun d'eux participe à un mécanisme fonctionnel ou s'intègre dans les molécules organiques actives. Les carences se manifestent soit par des perturbations métaboliques ou de développement, soit par des déséquilibres dans la composition biochimique (pigmentaire par exemple).

Bringe - Jacana

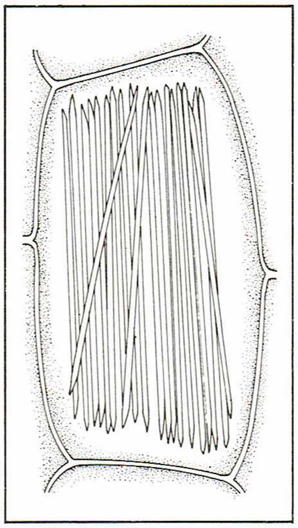

I.G.D.A.

▲ *A gauche, un plant de melon présentant une feuille peu pigmentée, signe d'une carence en magnésium. A droite, une cellule de parenchyme de scille* **(Urginea maritima)** *contenant des aiguilles d'oxalate de calcium.*

Rôle des macro-éléments

— L'*azote* est un constituant capital de la matière végétale : il est constitutif des molécules protéiques. En carence azotée, la plante pousse mal, les feuilles restent petites, peu pigmentées, vieillissent très vite et tombent, ce qui donne à la plante un aspect caractéristique avec des tiges pauvrement feuillées. Si on lève la carence par un épandage de nitrates, les plantes redeviennent très rapidement vertes. A l'opposé, si la nutrition azotée est très abondante, les plantes présentent un développement végétatif luxuriant, mais on risque de voir l'intensité de leur floraison et, de ce fait, leur production fruitière diminuer. C'est sous forme de nitrates et de sels d'ammonium que la plante puise l'azote qu'elle assimile. Or, si le sol en est naturellement pauvre, par contre l'azote (N_2) est le gaz de loin le plus abondant de l'air. La nutrition azotée pose donc un problème qui sera évoqué à part.

— Le *phosphore* forme avec les molécules organiques des liaisons riches en énergie qui constituent un des procédés de stockage et de transfert de l'énergie nécessaire aux métabolismes de la synthèse et de la respiration. Les glucides phosphorylés, l'adénosine tri- ou diphosphate (ATP ou ADP), la nicotinamide adénine dinucléotide phosphate (NADP) et les acides nucléiques sont les principaux corps organiques contenant du phosphore ; ce sont aussi les corps qui participent aux principales voies métaboliques. Les phospholipides sont parmi les constituants principaux des membranes. La carence en phosphore se manifeste par un développement très lent et limité, sans que l'équilibre pigmentaire soit pour autant perturbé. C'est sous forme d'ions phosphate que la plante puise cet élément dans le sol.

— Le *potassium,* contrairement à l'azote et au phosphore, ne participe pas à la constitution des molécules organiques. Son rôle est de permettre ou de favoriser de nombreuses réactions enzymatiques : il est *cofacteur,* ou *activateur ;* c'est le cas, par exemple, pour la *pyruvate kinase,* enzyme de phosphorylation des chaînes métaboliques respiratoires. Le potassium est indispensable à la synthèse des protéines ; sa carence se manifeste donc un peu comme celle de l'azote.

L'équilibre : azote, phosphore, potassium (N, P, K) est bien connu des agronomes. On établit pour chaque plante cultivée un graphique à coordonnées triangulaires. Chaque côté du triangle indique la gamme des concentrations relatives de ces trois éléments. Par expérimentation, on définit ainsi une zone de concentrations optimales pour chaque type de culture. Cet exemple montre, et c'est un fait très général, qu'un élément n'agit pas seul, sa concentration optimale pour une plante étant fonction de la concentration des autres éléments. Un bon amendement implique donc un juste équilibre entre ses différents composants.

— Le *soufre* entre dans la composition moléculaire d'un bon nombre d'acides aminés, dans le coenzyme A qui participe au métabolisme respiratoire, dans plusieurs vitamines, et dans les sulfolipides qui sont des constituants membranaires. Les ponts disulfure maintiennent la conformation des molécules protéiques et participent sans doute aux liaisons entre les membranes. La carence en soufre est assez rare, car cet élément ne manque pas dans le sol ; elle se manifeste par une chlorose des feuilles.

— Un atome de *magnésium* est fixé à la structure porphyrique de la molécule de chlorophylle, d'où le rôle essentiel de cet élément pour les plantes vertes. Chez tous les végétaux, le magnésium est activateur d'enzymes et protège l'intégrité des ensembles ribosomiques.

— Le *calcium* forme, avec l'acide oxalique, un sel qui se dépose souvent en précipités cristallins dans les vacuoles ; ces cristallisations présentent des formes variées : oursins, aiguilles, sable, macles... Les pectates de calcium se trouvent dans la lamelle moyenne des parois cellulaires, qu'ils stabilisent. Une carence en calcium peut produire des malformations lors de la synthèse de nouvelles parois, à la fin des divisions cellulaires ; elle se manifeste donc plus particulièrement au niveau des méristèmes. Le calcium est également indispensable à l'activité d'hydrolyse enzymatique de l'amidon.

Rôle des oligo-éléments

Les oligo-éléments ont des rôles tout aussi importants que les macro-éléments, seules les quantités exigées par les plantes les distinguent. Ainsi, le *fer,* par sa possibilité de se présenter sous la forme ferrique ou ferreuse,

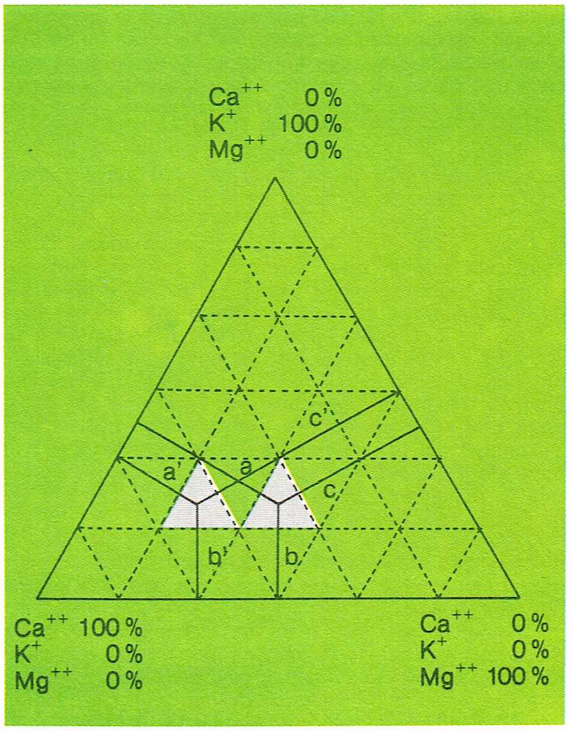

Richard Colin

◀ *Graphique triangulaire de Homes, établi pour la recherche de la composition optimale d'un mélange ionique dans la nutrition des végétaux ; aux angles, un seul élément ; sur les côtés, proportions relatives de deux éléments seulement ; chaque point de la surface est à une distance des côtés du triangle qui représente la proportion relative des trois éléments ; les surfaces colorées représentent les zones de productivité maximale pour des concentrations relatives en* Mg^{++}, K^{+}, Ca^{++} *de* $a + b + c = 100$ *ou de* $a' + b' + c' = 100$.

participe (dans les cytochromes ou la ferredoxine) au transport d'électrons dans les réactions photosynthétiques ou respiratoires. D'autre part, il est indispensable à la synthèse de la chlorophylle. Le *chlore* et le *manganèse,* dont les carences se manifestent par des déformations foliaires et des nécroses, participent comme cofacteurs à la réaction première de l'utilisation de l'eau lors de la photosynthèse. Les carences en bore, en zinc, en cuivre et en molybdène induisent des malformations très prononcées des plantes et de leurs feuilles, telles que des nanismes, des chloroses, des nécroses, des gaufrages ou des épaississements des mésophylles. Ces malformations montrent l'importance de la présence de ces éléments nécessaires, même à l'état de traces : le *bore* est indispensable au transport et à la répartition des glucides, le *zinc* et le *molybdène* comme participants à la constitution d'enzymes de premier intérêt (plusieurs déshydrogénases et les systèmes de fixation de l'azote), le *cuivre* comme constituant d'un transporteur d'électron, la *plastocyanine.*

L'absorption des ions

Si l'on place deux solutions de concentrations différentes de part et d'autre d'une membrane inerte qui laisse passer librement les ions et les molécules de petite taille, un équilibre tend à s'établir, équilibre qui est régi par les lois de la diffusion et de la répartition des charges. La diffusion est le déplacement d'une substance d'un point à potentiel chimique élevé vers un point à potentiel chimique plus bas; ainsi, la différence de potentiel chimique tend à s'annuler. Le potentiel chimique peut être considéré comme une généralisation du potentiel hydrique. Il exprime l'*énergie libre* des molécules.

L'énergie libre est une propriété thermodynamique des corps, qui mesure leur capacité à réaliser un travail. La connaissance de l'énergie libre permet de prédire le sens et les implications énergétiques d'une réaction. Si dans l'état final d'un système réactionnel l'énergie libre est plus faible que dans l'état initial, la différence d'énergie libre est négative et la réaction est spontanée *(réaction exergonique).* A l'inverse, si la différence d'énergie libre est positive, la réaction, pour se produire, a besoin d'un apport extérieur d'énergie *(réaction endergonique).* La diffusion libre a pour effet d'abaisser le potentiel chimique dans un compartiment ou une région et de l'élever ailleurs, pour atteindre une différence d'énergie libre entre tous les points du système égale à zéro. Toutefois, si dans les solutions séparées par une membrane inerte et neutre se trouvent des ions, les forces de déplacement ne sont pas seulement tributaires du gradient de potentiel chimique, mais aussi du gradient de potentiel électrochimique. Cette valeur tient compte de la charge et de la concentration des ions de part et d'autre de la membrane.

Or, si l'on compare les potentiels chimiques ou électrochimiques entre l'intérieur d'un tissu et son environnement, entre une plante et la solution dans laquelle elle plonge, voire entre deux compartiments adjacents dans une cellule, on est bien obligé de constater que l'équilibre (différence de potentiels nulle) n'est jamais ou très exceptionnellement réalisé. Nous avons vu que la concentration en éléments minéraux de la plante ne reproduisait pas la composition du sol. Telle Algue marine concentre le chlore, telle autre le sodium, presque toutes l'iode. Tout cela signifie que l'absorption des sels minéraux ne peut être entièrement expliquée par les simples lois de la diffusion ou de l'équilibre électrostatique des ions.

Dans les cas, assez rares, où l'état final aboutit à un équilibre s'expliquant par les lois physiques simples des différences de potentiels, on dit qu'il s'agit d'*absorption passive.* Cependant, généralement, l'état final fait apparaître une sélection ou une concentration qui ne peut s'expliquer par la diffusion moléculaire ou ionique : on parle alors d'*absorption active;* cette expression signifie que la membrane prend une part active, grâce à ses propriétés structurales et enzymatiques.

A l'heure actuelle, les mécanismes de la perméabilité membranaire sont loin d'être entièrement élucidés. Cependant, toute explication des mécanismes doit tenir compte des faits suivants.

L'absorption est *sélective.* Par exemple, dans le cas d'une racine de pois, si la concentration en ions potassium est sensiblement celle que l'on peut prédire par l'application des formules de l'électrodiffusion, pour l'ion sodium par contre elle s'en écarte d'un facteur 10 (dix fois moins).

L'absorption est *spécifique.* Pour reprendre l'exemple du potassium, cet ion est deux fois plus concentré dans les racines d'orge qu'il ne le serait par une simple absorption passive. L'absorption peut donc aller à *contre-courant du gradient de potentiel* et, dans certains cas, provoquer des accumulations intratissulaires toxiques.

A l'inverse d'une carence, les ions en trop grande abondance sont susceptibles de provoquer des *symptômes de toxicité.* Or, le transport actif à travers une membrane peut établir un flux permanent unidirectionnel qui aboutit à une si forte accumulation que la concentration interne atteint le seuil de toxicité. On sait, par exemple, qu'il existe des *plantes calcicoles* et des *plantes calcifuges* qui sont sensibles à la richesse en calcaire du sol. Si les plantes calcifuges se développent mal en terrain calcaire, c'est qu'elles sont capables d'absorber en abondance cet élément au point d'en être intoxiquées.

De même, on comprend que les phénomènes d'accumulation puissent entraîner des *carences,* si certaines cellules ou certains tissus monopolisent à leur seul « profit » les ions minéraux disponibles. C'est le cas des cellules des racines de Graminées pour ce qui concerne le sodium. Le manque de sodium ne se manifeste pas par une carence évidente au niveau des organes aériens, car ceux-ci n'en ont pas un grand besoin; mais le manque se fait sentir chez les herbivores qui se nourrissent de ces plantes, d'où la nécessité d'un apport de sodium dans leur alimentation.

La vitesse ou la capacité d'absorption d'un ion ne sont pas indifférentes à la présence ou l'absence d'un autre ion. Il peut y avoir *antagonisme* ou, au contraire, *synergie.* Le calcium peut éviter la toxicité du potassium et le sodium celle du calcium. Des traces de l'élément antagoniste peuvent suffire à provoquer l'effet.

Enfin, l'absorption active est sensible aux facteurs qui influent sur l'activité métabolique, en particulier les facteurs énergétiques comme l'élévation de température ou l'activité photosynthétique. L'aération, qui favorise la respiration, modifie la perméabilité membranaire.

Tous ces faits ont conduit à formuler l'hypothèse suivante : la membrane contiendrait un système de *transporteurs moléculaires,* mobiles dans la matrice lipidique. Ces corps pourraient établir des liaisons spécifiques avec les ions, liaisons qui se créeraient ou se déferaient au gré des forces ou des conformations modifiées par la proximité d'autres accepteurs. La membrane posséderait tout un système comparable à un mécanisme d'engrenages et de tapis roulants qui puiseraient, transporteraient et déverseraient des matériaux suivant les tailles, les poids et les affinités.

Le transport des sels minéraux dans la plante

C'est par les racines que les sels minéraux pénètrent, avec l'eau, dans les plantes. Le problème de l'absorption active se situe donc en premier lieu à ce niveau. La circulation et la distribution des solutions minérales emprunte ensuite les mêmes voies que celles de l'eau, c'est-à-dire les vaisseaux ligneux du xylème. La solution qui parcourt ces tissus de conduction est appelée *sève brute;* elle ne contient en principe que les éléments simplement puisés dans le sol, par opposition à la *sève élaborée,* qui contient des corps synthétisés et qui circule dans les tubes du phloème, autre tissu de conduction du cylindre central des tiges et des racines. En fait, la distinction n'est sans doute pas aussi nette; la sève brute contient un peu de substances organiques (glucides et acides aminés) élaborées par l'activité de synthèse ou d'hydrolyse des tissus de la plante. En outre, les sels minéraux ne sont pas exclusivement canalisés dans les vaisseaux ligneux. Ils se déplacent, s'échangent de tissu à tissu et se répartissent de cellules en cellules par le jeu des forces créées suivant les gradients de potentiels électrochimiques et par l'activité spécifique des membranes. Celles-ci contrôlent les échanges et, selon les tissus et l'activité métabolique des cellules, elles possèdent la propriété de sélectionner, d'accumuler ou d'excréter les ions disponibles, pouvoir qui s'exerce non seulement au moment de l'absorption, comme nous l'avons vu, mais en permanence et en tout point du végétal.

Le flux de sève brute qui passe par les vaisseaux du xylème assure cependant la majeure partie des besoins de la plante, comme le montrent les anciennes expériences de décortication annulaire. Ces expériences

consistent à enlever sur quelques centimètres d'une tige un anneau d'écorce contenant le parenchyme cortical et le phloème, qui, dans cet organe, est en position périphérique par rapport au xylème. La nutrition minérale de la partie de la plante située au-dessus de la zone décortiquée ne semble pas modifiée par l'opération.

La *vitesse d'ascension* de la sève brute est fonction de la différence de potentiel hydrique entre les deux extrémités du parcours et de l'efficacité des structures (diamètre et nombre des canaux). Elle peut être de 0,5 m à 50 m/h.

La nutrition azotée

Le problème de la nutrition azotée pour les plantes se pose de la façon suivante. L'azote est un des éléments les plus abondants dans les plantes (quantitativement, il est situé immédiatement après le carbone, l'oxygène et l'hydrogène) et il y joue un rôle de première importance, comme constituant des protéines, des acides nucléiques et des pigments. L'azote sous forme de nitrates ou de sels d'ammonium est en quantité souvent faible, toujours très variable dans le sol. Sous forme de N_2 gazeux, il représente 78 % de l'atmosphère. Or, si la très grande majorité des plantes ne possède pas l'équipement enzymatique nécessaire à la fixation directe de cette énorme réserve d'azote de l'air, par contre, elles assimilent toutes fort bien l'azote sous forme de nitrates ou de sels d'ammonium en solution dans le sol. On peut signaler, en outre, que les nitrates du sol, naturellement en faibles quantités, y sont éminemment labiles, soit décomposés par des Bactéries, soit emportés par les eaux de ruissellement ou de lessivage. On comprend donc toute l'importance des amendements azotés.

Mais dans le cas le plus fréquent, celui d'un peuplement naturel sans apport d'engrais, la clef du problème réside dans le fait qu'un certain nombre de Bactéries du sol et de végétaux inférieurs sont capables de fixer l'azote atmosphérique et de le transformer en une forme assimilable. N_2 est réduit en ions ammonium qui servent immédiatement à la synthèse de composés organiques, principalement l'acide glutamique.

La réaction de fixation exige de l'énergie. Dans le cas des Bactéries fixatrices hétérotrophes, celle-ci est fournie par l'oxydation de matières organiques (cas des Bactéries des genres *Clostridium* et *Azotobacter*) ; dans les cas des Bactéries autotrophes *(Rhodospirillium)* et de quelques Algues bleues qui vivent dans les eaux douces ou qui sont associées à un Champignon pour former des Lichens, l'énergie est fournie par la lumière.

Les Bactéries fixatrices peuvent recevoir des plantes vertes, dans lesquelles elles vivent en symbiose, l'énergie nécessaire à leur activité. C'est le cas des Bactéries du genre *Rhizobium* qui vivent dans les nodules des racines des trèfles, des luzernes, des haricots, des pois et autres plantes de la famille des Légumineuses. Cela explique que depuis des millénaires on sache que les plantes possédant sur leur système racinaire de tels nodules jouissent de précieuses propriétés fertilisantes.

Richard Colin

◀ *Résultats de la décortication annulaire d'une tige; le bourrelet de cicatrisation plus épais vers le haut est dû à l'accumulation de la sève élaborée; les flèches indiquent la direction du flux principal de sève élaborée.*

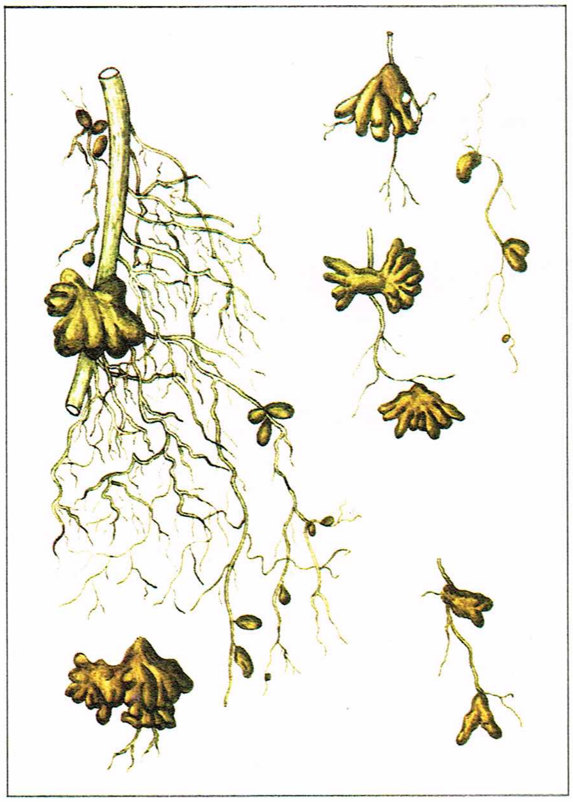

I.G.D.A.

◀ *Quelques exemples de nodosités sur de jeunes racines de sensitive* **(Mimosa pudica)**, *dues à la symbiose entre la plante et des Bactéries fixatrices de l'azote atmosphérique* **(Rhizobium leguminosarum** *var.* **mimosa pudicae).**

C'est aussi par l'activité bactérienne des sols que l'équilibre nitrique est maintenu et que l'azote organique contenu dans les déchets et les cadavres animaux et végétaux est, par une série d'oxydations minéralisantes, transformé en nitrates absorbables par les plantes.

L'absorption des sels nitriques se fait, comme pour les autres sels minéraux, par les racines. C'est principalement là, dès leur entrée dans la plante, que les ions nitriques sont réduits en matière organique, grâce à l'activité inductible d'une enzyme, la *nitrate réductase*. Les nitrites sont transformés en ions ammonium, immédiatement utilisés pour la synthèse des acides aminés.

La fixation du gaz carbonique et l'utilisation de l'énergie lumineuse : la photosynthèse

Importance et origine du carbone; la nutrition carbonée

Le carbone et l'oxygène sont les deux éléments les plus abondants, non seulement chez les végétaux, mais aussi chez les animaux. A eux deux, ils représentent 90 % du poids d'une plante sèche (chacun 45 %). L'hydrogène et l'azote, qui viennent ensuite dans l'ordre des concentrations, ne participent respectivement que pour 6 % et 1,5 % au poids de la matière sèche. Tous les autres éléments représentent les 2,5 % qui restent.

La réponse à la question concernant la source du carbone pour les végétaux n'est pas évidente. Quand on se promène dans un sous-bois, on rencontre toute une variété de végétaux : Champignons, Lichens, Mousses, Fougères, herbes, arbustes et arbres. Tous ont pour substrat l'humus du sol, où plongent leurs racines. Or, ce sol et son humus semblent bien formés de matières organiques en décomposition, lesquelles, logiquement, peuvent être tenues comme sources de carbone. Certes, on sait que l'on ne trouvera pas de Champignon sur du sable ou sur un rocher, où l'on pourra cependant observer des Lichens, quelques Mousses et peut-être aussi quelques plantes rases.

Chacun sait également qu'une moisissure, c'est-à-dire un Champignon, peut se développer sur un pot de confiture, un fruit ou un morceau de pain humide, mais jamais dans un verre d'eau propre. Par contre, on peut faire germer des lentilles ou des haricots sur un peu de coton imbibé seulement d'eau pure, et les jeunes plantes

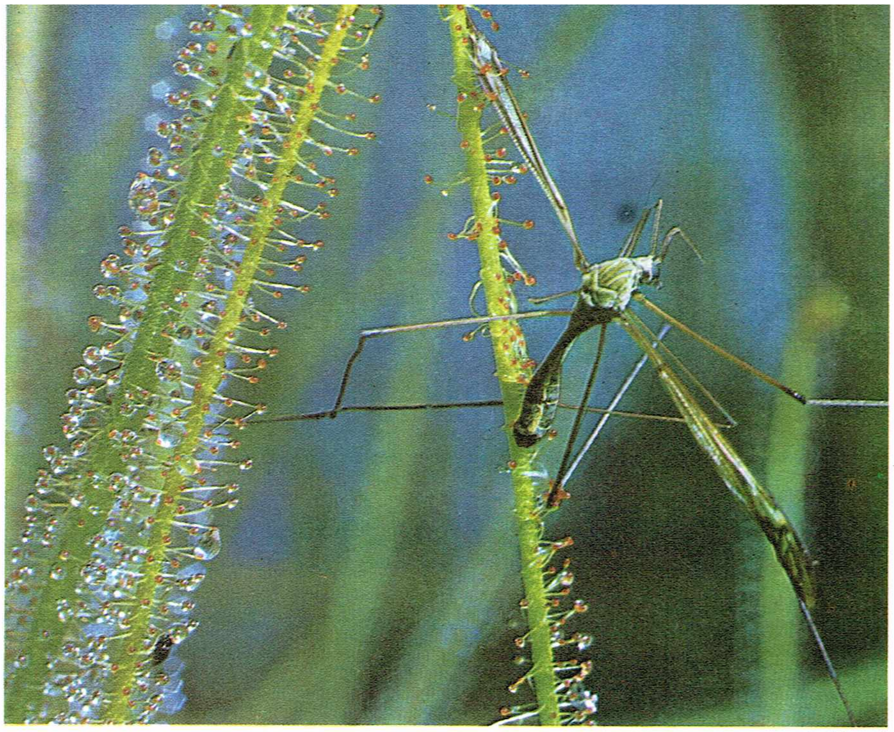

Archives B

▲ *Un exemple d'assimilation directe de la matière organique (un Insecte) par une plante (Drosera tracii) grâce à un complexe enzymatique particulier.*

▶ *Page ci-contre, quelques aspects d'infrastructures des chloroplastes.*

▼ *L'éclairement des grottes entraîne fréquemment l'apparition d'Algues vertes et de Cyanophycées dans les eaux.*

se développeront fort bien sur ce substrat simple. Enfin, on devine que si une plante verte peut prendre des proportions imposantes avec pour toute nourriture un peu de terre et quelques engrais minéraux ajoutés de temps à autre, c'est qu'elle doit puiser son carbone hors du substrat, qui ne semble pas s'épuiser.

Ces expériences de tous les jours donnent des indications plus précises que l'observation simple de la nature. Il faut cependant réaliser des expériences rigoureuses pour se rendre compte qu'il existe deux catégories de végétaux du point de vue de l'origine de leur carbone. Des expériences de cultures sur milieu synthétique, comme celles qui ont été utilisées pour l'étude de la nutrition minérale, montrent que les Champignons ne pourront croître sur un tel milieu nutritif que si celui-ci renferme en solution des molécules organiques, du glucose ou du saccharose par exemple, tandis que des plantes vertes se contentent de molécules minérales non carbonées. Pour ces dernières, la source du carbone n'est donc pas dans le sol mais dans l'air. Des expériences complémentaires et de réalisation plus délicate montrent que c'est en privant l'air de gaz carbonique que l'on carence ces plantes en carbone.

S. Ferri - Ricchi

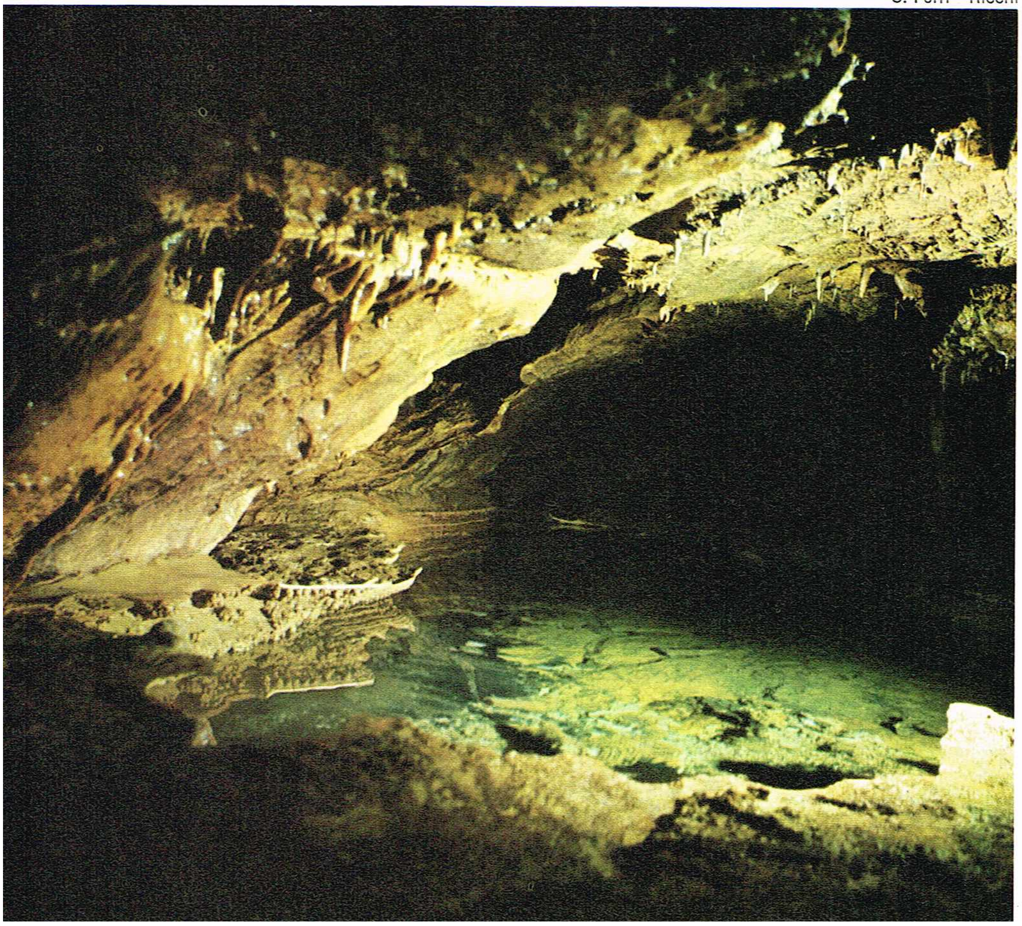

Le rôle de la lumière

Il suffit de posséder une cave bien obscure pour se rendre compte que les plantes ne poussent pas ou très mal et fort peu longtemps à l'obscurité. Là encore, on trouve la même différence entre les Champignons et les plantes vertes. Les moisissures se développent fort bien dans les caves humides et les Champignons de Paris se cultivent dans les grottes. Mais qu'un peu de lumière filtre, et immédiatement on voit se développer une couche verte formée d'Algues microscopiques et parfois aussi de quelques Mousses. Ainsi, les grottes préhistoriques ornées des dessins polychromes de nos ancêtres sont menacées par l'envahissement de ces végétaux verts, qui apparaissent à la faveur de l'éclairage artificiel nécessaire aux visiteurs et dont la croissance est stimulée par l'élévation de la teneur de l'air en gaz carbonique, due à une trop grande fréquentation par l'homme. Ces observations montrent que, pour les plantes qui se nourrissent du gaz carbonique de l'air, la lumière est indispensable.

En soulevant une pierre plate ou en faisant germer des plantes dans une cave, ou encore en protégeant des salades de la pleine lumière, on constate que l'obscurité provoque l'étiolement. Une plante étiolée présente les caractéristiques suivantes : elle est privée de pigment vert (la chlorophylle), elle s'allonge rapidement et ses organes, étirés, sont gorgés d'eau mais ne s'enrichissent pas en matière organique; inévitablement, la croissance s'arrête au bout d'un certain temps et la plante meurt. La lumière a donc un double rôle : elle est nécessaire d'une part à la synthèse de la chlorophylle, d'autre part à la fixation du gaz carbonique.

La *photosynthèse* est la fonction des plantes vertes qui a pour effet de synthétiser de la matière organique à partir du gaz carbonique, et cela grâce à l'énergie lumineuse.

Les sites de fixation du gaz carbonique

Chez les Algues, qui ne possèdent pas d'organes bien différenciés, chaque cellule peut, pour son propre compte, fixer le gaz carbonique en solution dans l'eau. Mais chez les plantes qui présentent une organisation répartie en racines, tiges et feuilles, le lieu privilégié de la photosynthèse se trouve dans le *système foliaire*.

Nous avons déjà vu que la feuille était le site principal de l'évapo-transpiration, c'est-à-dire des échanges d'eau entre la plante et l'air; c'est aussi l'organe de la photosynthèse. Son rôle ne s'arrête pas là comme nous le verrons plus loin.

La feuille présente une structure bien adaptée à la circulation des gaz : vapeur d'eau, gaz carbonique et oxygène. Les cellules des parenchymes chlorophylliens, celles des tissus palissadiques ainsi que celles des tissus lacuneux ont la propriété commune de posséder dans leur cytoplasme des plastes chargés de chlorophylle : les *chloroplastes*. Ces petits organites sont les sites de la réaction photochimique de carboxylation et de synthèse à la lumière.

Les chloroplastes ont, chez les plantes supérieures, une forme assez homogène; ce sont de petites lentilles biconvexes de 5 à 10 μm de grand axe et de 2 à 5 μm de petit axe. Leur nombre dans chaque cellule est très variable : il va de 10 à 50 dans la plupart des cas, et atteint parfois 200 ou 300. Chez les Algues, leur forme et leur taille sont très différentes et éminemment variables suivant les genres, voire les espèces : coupes, rubans, lames, étoiles, etc. Chaque cellule n'en renferme souvent qu'un ou deux.

La structure interne des chloroplastes est assez compliquée. A l'intérieur de leur enveloppe, qui est constituée de deux membranes, on observe, grâce à la microscopie électronique, deux parties : le *stroma* et le *système membranaire*.

Le *stroma* n'a pas de structure; c'est une solution colloïdale qui renferme, comme éléments visibles, des ribosomes, des inclusions d'amidon et des gouttelettes lipidiques.

Le *système membranaire* forme comme un feuilletage de sacs empilés, les *lamelles*, étalées dans tout le volume du chloroplaste. Quelques rares types de chloroplastes ne possèdent que ce système de membranes, mais généralement, tout au moins chez les plantes supérieures, ils possèdent en outre des empilements de petits sacs

Clichés R. Bourdu, C. Delay, J. Darmanade et S. Halpern

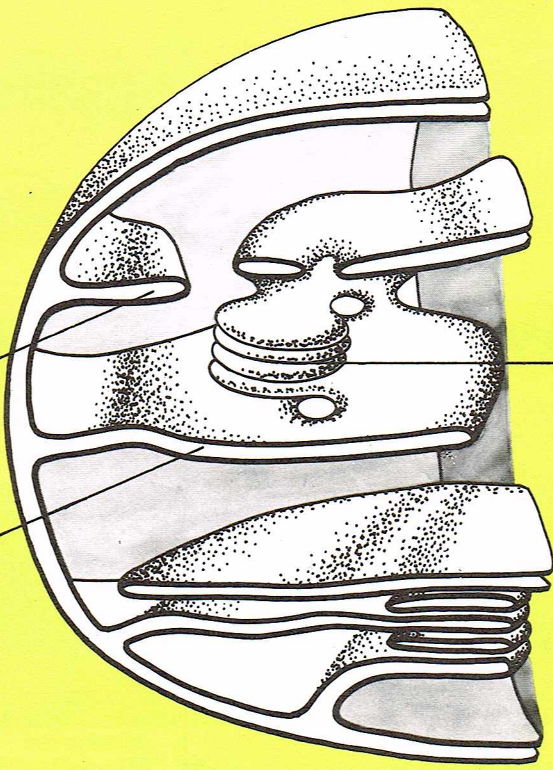

lamelles en relation
avec le feuillet interne
de la membrane

évaginations latérales
des lamelles
formant des empilements
de saccules

jeune chloroplaste

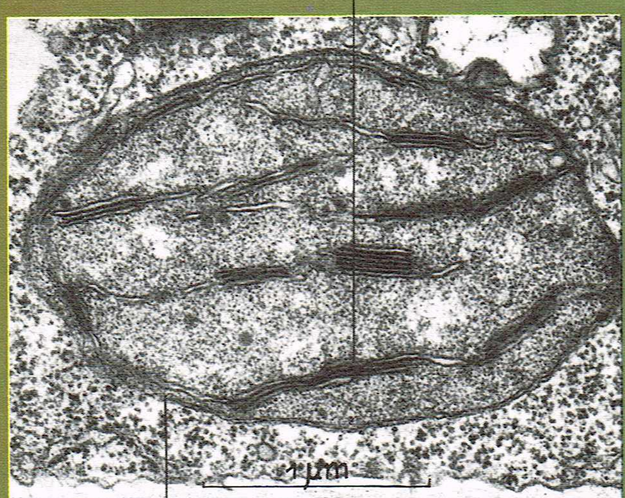

membrane à deux feuillets

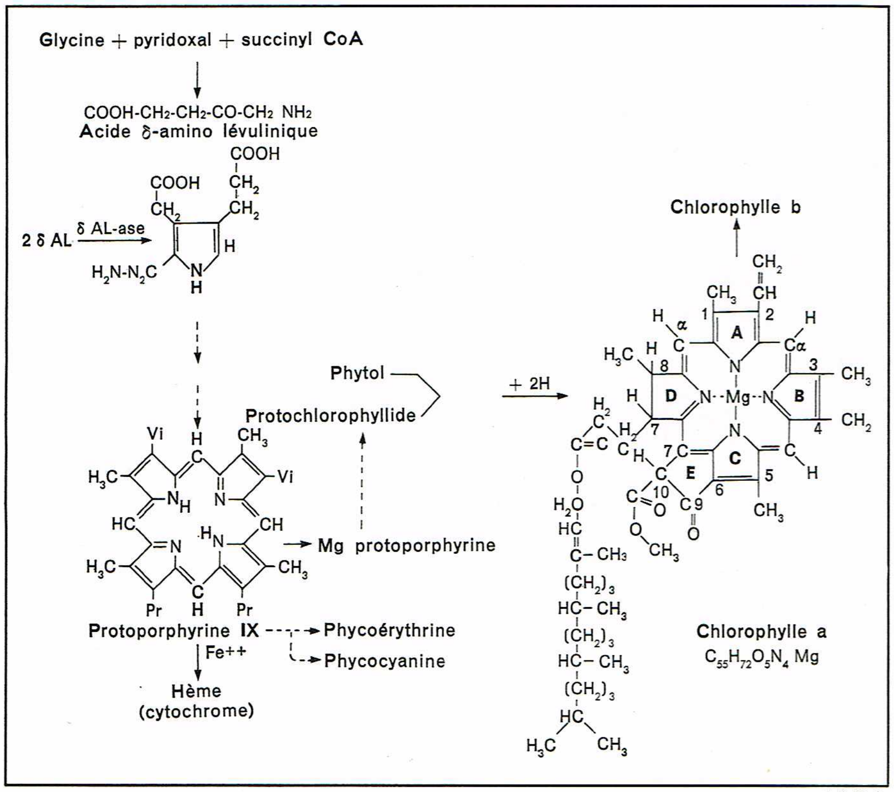

▲ *Schéma de la biosynthèse de la chlorophylle.*

plats qui, en microscopie ordinaire, forment comme des granulations dans la masse chloroplastique, d'où le nom de *granum* qu'on leur attribue. Le système membranaire est donc généralement formé du *système intergranaire* et du *système granaire*.

Les molécules de chlorophylle qui possèdent une forte affinité pour les lipides mais aussi un pôle hydrophile sont incluses exclusivement dans ces deux ensembles membranaires. Le stroma renferme en solution les enzymes nécessaires à la fixation du gaz carbonique et aux synthèses qui en découlent. On peut donc affirmer que les sites ultimes des carboxylations réalisées à l'aide de l'énergie lumineuse captée par les pigments chlorophylliens se trouvent à la surface des membranes.

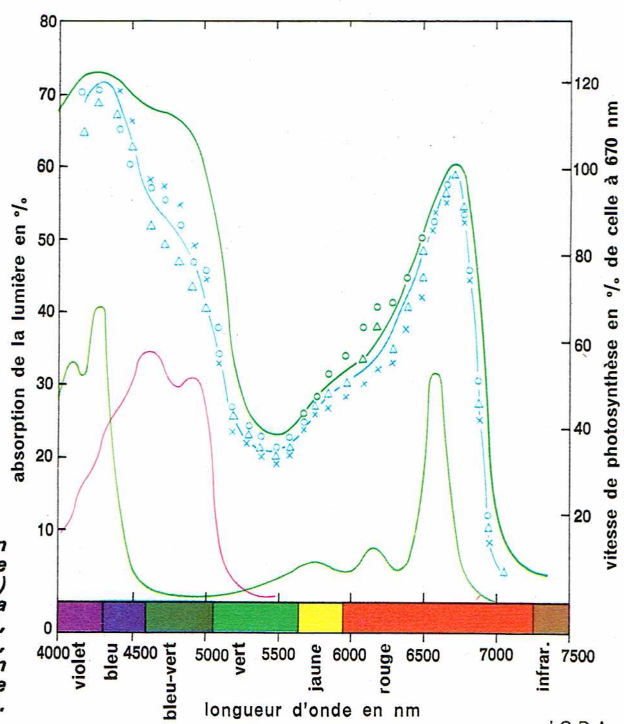

▶ *Spectre d'absorption d'une feuille entière (en vert foncé) de la chlorophylle a (en vert clair), du β-carotène (en rouge), et spectre d'action de la photosynthèse chez l'élodée (en bleu).*

L'équipement moléculaire

Les molécules actives sont de trois catégories, suivant les rôles tenus : les *photorécepteurs*, les *transporteurs* sous-traitants de l'énergie captée et, enfin, les *enzymes* et les cofacteurs.

Les photorécepteurs

Les photorécepteurs sont des pigments, c'est-à-dire qu'ils absorbent la lumière, et cela dans des zones bien précises du spectre des longueurs d'onde de la propagation des photons. Les régions du spectre de la lumière blanche qui sont absorbées par chaque photorécepteur en constituent le spectre d'absorption caractéristique. La représentation spatiale d'une molécule telle que la décrivent les chimistes est une configuration statistique et instantanée d'une position et d'une forme; en fait, il y a des vibrations continues soit de la molécule entière, soit des atomes les uns par rapport aux autres, soit enfin du nuage d'électrons qui entoure chaque noyau des atomes constitutifs.

Dire qu'une molécule absorbe la lumière d'une longueur d'onde donnée signifie qu'elle entre en résonance avec la fréquence des photons incidents. Cette énergie photonique excite la molécule, qui acquiert ainsi un niveau énergétique interne supérieur. Cet état excité n'est pas stable, et la molécule revient très rapidement à l'état stable en transmettant de l'énergie qui peut être sous forme lumineuse : c'est le phénomène de luminescence, fluorescence ou phosphorescence. Les photorécepteurs impliqués dans la fonction photosynthétique sont de trois catégories : les *chlorophylles*, les *phycobilines* et les *caroténoïdes*.

— *Les chlorophylles*. La molécule de chlorophylle est constituée d'une structure porphyrine formée de quatre cycles pyrrole dont les atomes d'azote sont reliés à un atome de magnésium. Une longue chaîne phytol comprenant 20 atomes de carbone et 39 d'hydrogène est fixée au cycle tétrapyrrolique. La molécule entière présente donc une première dualité : en effet, la porphyrine, très insaturée, a de nombreuses doubles liaisons conjuguées, et la chaîne phytol est saturée. Autre dualité de la molécule : la porphyrine a peu d'affinité pour les lipides, alors que le phytol est fortement lipophile, ceci explique la localisation de ces molécules dans les membranes lipoprotéiques.

Il existe quatre formes de chlorophylle *(a, b, c* et *d)*. La chlorophylle *b* se distingue de la chlorophylle *a* en ce qu'elle possède sur sa porphyrine un groupe aldéhyde à la place d'un groupe méthyl. Les chlorophylles *a* et *b* se rencontrent dans les chloroplastes des plantes supérieures dans un rapport qui est généralement compris entre 2 et 3. Dans la chlorophylle *d*, c'est un groupe éthylène qui est remplacé par le groupe aldéhyde. La chlorophylle *c* ne possède pas de chaîne phytol. Les chlorophylles *c* et *d* se rencontrent avec la chlorophylle *a* chez les Algues.

Chaque type de chlorophylle possède son spectre d'absorption propre avec des pics caractéristiques. Par exemple, la chlorophylle *a*, de couleur vert bleuté, a un pic d'absorption à 430 nm (bleu-violet) et un autre à 660 nm (rouge); la chlorophylle *b*, de couleur vert jaunâtre, absorbe à 455 nm (bleu) et à 640 nm (rouge-orangé). Il s'agit là des pics principaux et correspondant à des molécules de chlorophylle en solution. Les spectres sont sensiblement déplacés lorsque les molécules sont *in situ*. Il est alors possible de déceler toute une variété de formes chlorophylliennes, qui se distinguent par des pics d'absorption plus ou moins déplacés (par exemple P_{700}). On peut constater en regardant une solution de chlorophylle qu'elle a une fluorescence rouge. Cette propriété des pigments photorécepteurs est très importante : elle permet un transfert d'énergie de pigment à pigment qui augmente le rendement de la photosynthèse.

La synthèse de la chlorophylle s'effectue sous le contrôle génétique, les plantes albinos ou panachées étant totalement ou partiellement incapables de la réaliser. La lumière est généralement indispensable à cette synthèse; elle ne l'est cependant pas pour les Algues, les Mousses, les Fougères et les Conifères, qui peuvent former de la chlorophylle à l'obscurité. De nombreuses carences minérales provoquent la chlorose (carences en fer, magnésium, manganèse, potassium, zinc et cuivre).

— *Les phycobilines*. Les Algues rouges et les Algues bleues possèdent des pigments photorécepteurs, les

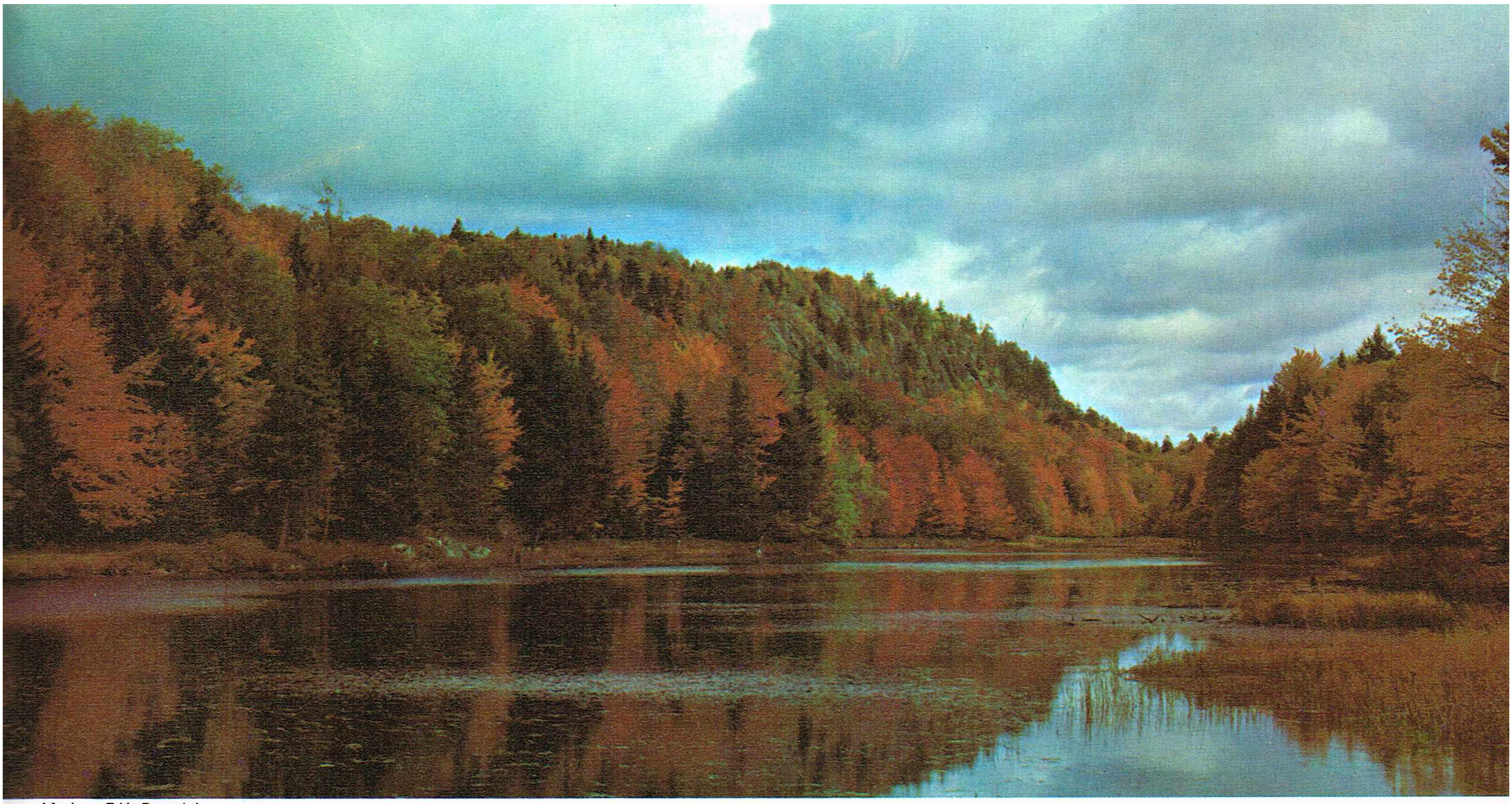

Marka - F.H. Ragsdale

phycobilines, qui sont constitués comme la chlorophylle de quatre cycles pyrrole mais ne réalisant pas une structure fermée. Ils ne possèdent pas d'atome de magnésium ni de chaîne phytol. Les phycobilines sont de deux types : les *phycoérythrines,* que l'on trouve dans les Algues rouges (absorption du vert au jaune entre 500 et 570 nm) et les *phycocyanines* des Algues bleues (absorption du jaune au rouge-orangé entre 560 et 660 nm). Par fluorescence, ces pigments émettent une lumière excitatrice pour la chlorophylle *a*. Ils recueillent donc pour le compte de cette dernière l'énergie des photons qui sans eux serait perdue. Cela explique le rôle important de ces pigments « accessoires » dans le maintien à un niveau élevé du rendement photosynthétique.

— *Les caroténoïdes.* Les caroténoïdes sont les pigments rouges, orangés, jaunes ou bruns qui donnent la couleur automnale caractéristique du feuillage quand la chlorophylle a disparu. Ils existent tout autant dans les feuilles vertes mais ils y sont masqués par les chlorophylles. Ce sont également eux qui donnent leur couleur aux racines de carotte ou aux fruits de tomate. Leur molécule est constituée d'une chaîne hydrocarbonée de 40 atomes de carbone, plus ou moins insaturée, et qui se termine en ses deux extrémités par un cycle possédant parfois un atome d'oxygène (du radical OH). Cette structure fortement lipophile assure aux caroténoïdes une place dans la phase lipidique des systèmes membranaires des chloroplastes, au voisinage des queues phytol des chlorophylles. Les carotènes, dont le principal est le β *carotène,* et les *xanthophylles,* dont les principales sont la *lutéine* et la *zéaxanthine,* absorbent entre 430 et 490 nm, c'est-à-dire du violet au vert. Leur fonction peut donc être comparable à celle des pigments accessoires à phycobiline. Ils jouent également un rôle important de protection des chlorophylles, celles-ci étant très fragiles en présence d'oxygène et de lumière.

Les transporteurs

Les réactions primaires de la photosynthèse sont caractérisées par une longue chaîne d'oxydoréductions établie entre les molécules qui échangent des électrons. Les transporteurs d'électrons qui participent à ces réactions sont de natures très diverses : les *cytochromes* (f, b_6, b_{559}) dont l'oxydation ou la réduction est due à la transformation possible de l'atome de fer qu'ils contiennent $\left(Fe^{3+} \underset{-1e}{\overset{+1e}{\rightleftharpoons}} Fe^{2+} \right)$; les *plastoquinones* ; la *plastocyanine,* qui est une protéine bleue contenant deux atomes de cuivre $\left(Cu^{2+} \underset{-1e}{\overset{+1e}{\rightleftharpoons}} Cu^{+} \right)$; la *ferrédoxine,* qui est une protéine contenant un atome de fer mais non hémique comme dans le cas des cytochromes ; le *nicotinamide dinucléotide phosphate (NADP),* qui joue le rôle de transporteur final pour les réductions qui sont liées à la carboxylation. L'énergie libérée par les réactions exergoniques du transport d'électrons est récupérée par la réalisation de liaisons phosphate riches en énergie de l'*adénosine triphosphate (ATP).*

Les enzymes

L'équipement moléculaire nécessaire à la réaction globale photosynthétique comprend toute une série d'enzymes qui catalysent les réactions intermédiaires entre la carboxylation et la synthèse des glucides : les *carboxylases* (au nombre de deux suivant la nature du substrat, une seule sans doute dans les chloroplastes), les *kinases, isomérases* et *transférases.* Toutes ces enzymes, contrairement aux molécules précédentes, sont en solution dans le stroma chloroplastique.

Les mécanismes

La réaction globale de la photosynthèse peut se résumer en ceci : d'une part, des molécules d'eau et de gaz carbonique constituent la matière première ; d'autre part, des molécules glucidiques sont les produits finis et l'oxygène est un sous-produit. L'énergie nécessaire à cette réaction est fournie par la lumière reçue, traitée et transmise par les molécules de chlorophylle et toute une chaîne de transporteurs.

Les mécanismes sont donc complexes. On distinguera les étapes suivantes : le transport du gaz carbonique (le transport de l'eau a été évoqué plus haut), la décomposition de l'eau, l'excitation des pigments photorécepteurs et le transfert des produits de la décomposition de l'eau, la réduction du gaz carbonique par la carboxylation d'un substrat et, enfin, les synthèses et la distribution des corps organiques formés.

La source principale du gaz carbonique se trouve hors de la feuille. Sa pénétration et son transport jusqu'à l'intérieur des cellules chlorophylliennes suivent un chemin sensiblement inverse de celui des molécules d'eau : pénétration par les stomates, circulation dans les lacunes et méats des tissus du mésophylle, et traversée des membranes cellulaires. La vitesse de diffusion du gaz carbonique est fonction d'un rapport qui a pour numérateur le gradient de concentration qui s'établit entre l'extérieur et les sites d'utilisation (intérieur des chloroplastes) et pour dénominateur la somme des nombreuses résistances qui freinent ce mouvement. On peut regrouper, de façon un peu arbitraire, toutes ces résistances en quatre catégories : la barrière constituée par la *couche laminaire d'air,* qui couvre la feuille et qui, comme pour la vapeur d'eau, fait obstacle aux transferts ; la barrière

▲ ***Les couleurs du feuillage en automne sont dues à la présence de caroténoïdes dans les feuilles ; ces pigments existent aussi dans les feuilles vertes mais sont alors masqués par la chlorophylle.***

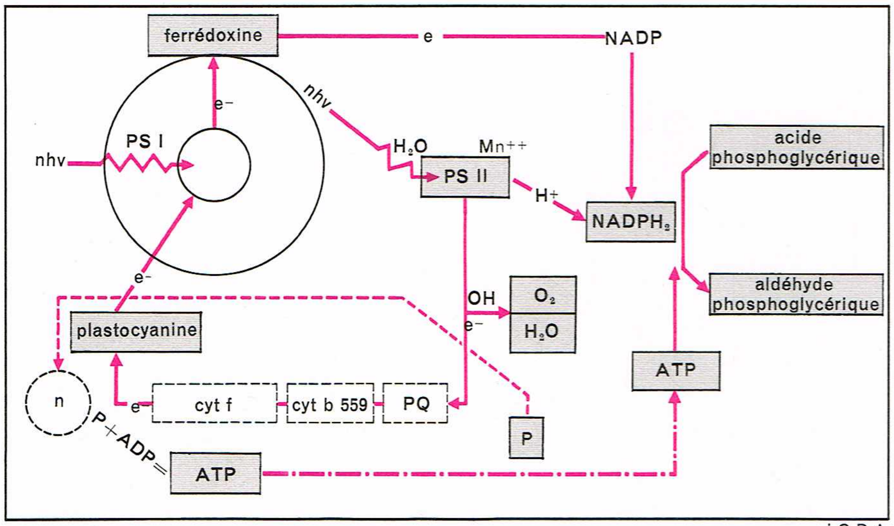

I.G.D.A.

▲ ***Réactions primaires de la photosynthèse conduisant à la synthèse de $NADPH_2$, à la formation d'ATP et à la libération d'oxygène; sous le terme PQ sont indiquées des plastoquinones.***

constituée par l'*épiderme,* qui peut être très puissante si les stomates sont fermés; les difficultés de circulation du gaz dans les *espaces capillaires,* qui séparent les cellules dans les tissus; enfin, les difficultés de mise en solution dans l'eau d'imbibition des cellules (puisque c'est sous cette forme que le gaz carbonique circulera dans la cellule et dans les chloroplastes). On comprend aisément que toutes ces résistances sont plus ou moins élevées suivant la structure de la feuille et son état d'hydratation. La différence de potentiel chimique qui affecte les ions carbonate est également à prendre en compte; ce potentiel est fonction de la capacité enzymatique d'utiliser ces ions en fin de parcours.

Sous l'effet de la lumière, les chloroplastes, même isolés de la cellule, sont capables de décomposer les molécules d'eau en donnant de l'oxygène comme produit immédiatement décelable. Cette oxydation libère un pouvoir réducteur et un électron. Cette réaction, appelée *réaction de Hill,* se complète tout naturellement par une réduction. *In vitro,* la réduction du ferricyanure en ferrocyanure montre bien la disponibilité d'un pouvoir réducteur consécutif à la décomposition de l'eau. Ce réactif (appelé réactif de Hill) est, *in vivo,* c'est-à-dire dans les conditions normales de la réaction, le NADP qui se transforme en $NADPH_2$.

Les photons de longueur d'onde correspondant aux zones spectrales d'absorption des chlorophylles provoquent l'excitation de ces molécules, qui perdent ainsi un électron. Le retour à l'état stable peut être réalisé par la restitution des électrons qui sont produits lors de la décomposition de l'eau. Ainsi se réalise un *transfert d'électrons* qui a pour source la décomposition de l'eau et pour aboutissement la réduction du NADP. Mais, entre les deux, les différences de potentiel d'oxydoréduction sont telles qu'il faut un apport d'énergie externe : l'énergie photonique. On sait maintenant que le centre photosensible n'est pas unique et que les transferts d'électrons nécessitent la participation d'une chaîne très longue de transporteurs. Grâce à des excitations par des longueurs d'onde très précises, on a pu mettre en évidence l'existence de deux centres photochimiques : le *photosystème I* (λ = 680, 700 nm) et le *photosystème II* (λ = 660, 670 nm). Ces ensembles pigmentaires renferment en proportions différentes les deux chlorophylles (*a* et *b*). L'excitation du photosystème I produit plus ou moins directement la réduction de la ferrédoxine, transporteur qui réduit à son tour le NADP. Le photosystème I récupère l'électron qui provient de l'excitation du photosystème II. Entre les deux, se situe toute une chaîne de transporteurs : plastoquinone, cytochrome b_6, cytochrome b_{559}, plastocyanine et cytochrome f. Les différences de potentiels d'oxydoréduction entre ces transporteurs permettent la libération d'énergie, laquelle est utilisée pour la synthèse de molécules d'ATP. Enfin, le photosystème II retourne à l'état stable grâce à l'apport d'électrons provenant de la décomposition de l'eau.

Dans l'énumération de toutes ces réactions se déroulant dans les membranes chloroplastiques, il n'a toujours pas été question du gaz carbonique. En effet, ces réactions primaires, qui nécessitent l'apport d'énergie lumineuse, n'ont pour effet que la synthèse de $NADPH_2$, la formation d'ATP et la libération d'oxygène.

La fixation du gaz carbonique constitue une seconde phase, qui peut se dérouler dans l'obscurité. Elle exige seulement la présence de l'enzyme de carboxylation et d'un substrat. Les étapes de ces réactions, dites « sombres », ont été reconnues en réalisant des carboxylations courtes mais de durées variables (cinétiques), avec comme source de gaz carbonique des molécules contenant un isotope du carbone, le ^{14}C. Après la fixation du matériel et l'analyse par chromatographie des produits formés au cours de la cinétique, on a pu décrire tout un cycle de réactions *(cycle de Calvin)* qui comprend les phases essentielles suivantes : carboxylation (sur un glucide en C_5, donc formation de deux trioses en C_3), réductions (grâce au $NADPH_2$), synthèse d'hexose phosphorylé (grâce à l'ATP) et régénération du pentose accepteur (en passant par des glucides en C_4 et en C_7). Tout cet engrenage métabolique est très rapide; il est catalysé par un équipement enzymatique se trouvant en solution dans le stroma des chloroplastes. Le bilan global en est la synthèse de fructose-phosphate (hexose) qui est à l'origine de la formation d'autres glucides : saccharose, amidon, etc.

Les corps organiques formés sortent des chloroplastes et sont distribués dans toutes les parties de la plante. Cette redistribution n'est pas un phénomène simple et nécessite la participation d'un tissu spécial constitué de longues cellules disposées bout à bout et dont les parois transversales sont perforées comme des cribles, d'où leur nom de *tubes criblés.* Ces tubes sont bordés de cellules compagnes qui assurent le transfert des molécules lorsque celles-ci ne peuvent passer à travers les cribles. Rappelons que ce tissu, le phloème, jouxte le xylème dans les nervures des feuilles, dans les pétioles et au centre des tiges et des racines. La solution qui véhicule dans le phloème les molécules organiques synthétisées par la plante, porte le nom de *sève élaborée.* Dans la tige, le phloème, ou liber, est en position périphérique par rapport au xylème, ou bois; si on décortique sur une courte distance ou si on pince et qu'on écrase la partie périphérique, on bloque la circulation de la sève élaborée, laquelle s'accumule donc en amont, c'est-à-dire du côté des feuilles. Si des fruits se trouvent dans cette portion du courant, ils profiteront au maximum de cette sève. C'est là un procédé utilisé pour les rendre plus gros et plus riches en sucres.

On peut donc schématiser le processus de synthèse de la façon suivante : d'abord, convergence de l'eau (par la sève brute) et du gaz carbonique vers les chloroplastes des feuilles; là, déroulement des mécanismes complexes de synthèse, sous l'effet énergétique de la lumière; ensuite, distribution à toute la plante des corps organiques formés, véhiculés par la sève élaborée.

▼ ***Deuxième phase de la photosynthèse : le cycle de Calvin-Benson; fixation du gaz carbonique et synthèse de sucres.***

Richard Colin

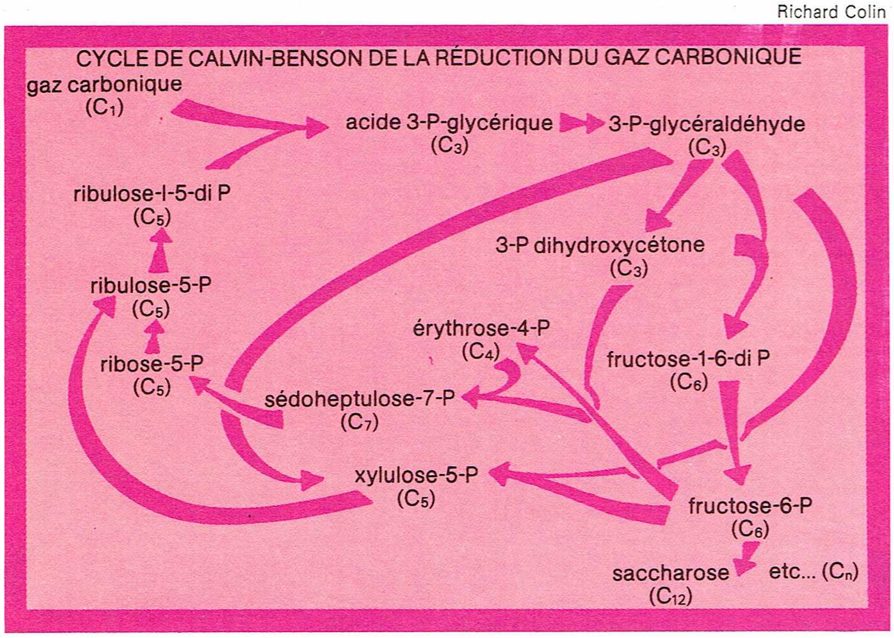

Marka

▲ *Système d'irrigation par infiltrations latérales. L'alimentation hydrique est une cause puissante de variations d'intensité de la photosynthèse; son action est essentielle sur les stomates qui commandent la voie d'entrée du gaz carbonique dans la feuille.*

L'intensité et le rendement de la photosynthèse; leurs variations

L'intensité de la photosynthèse

L'intensité de la photosynthèse est la quantité de gaz carbonique fixé ou d'oxygène dégagé ou, enfin, de matière organique synthétisée dans l'unité de temps et par une quantité unitaire de matière végétale. Le mode d'expression dépend souvent de la méthode de mesure. Lorsque l'on exprime l'intensité de photosynthèse d'une feuille, l'unité biologique de référence la plus employée est l'unité de surface foliaire. Par exemple, une feuille de Graminée fixe $500 \cdot 10^{-9}$ kg de gaz carbonique par m^2 de surface foliaire et par seconde. Mais la feuille respire, c'est-à-dire qu'elle est le siège d'échanges gazeux qui sont exactement l'inverse des échanges photosynthétiques. Par sa respiration elle absorbe de l'oxygène et rejette du gaz carbonique.

La valeur donnée en exemple est donc un bilan des échanges : on l'appelle *intensité de photosynthèse nette* ou, mieux, *assimilation nette*. La *photosynthèse brute* est égale à la photosynthèse nette (bilan mesuré) à laquelle on ajoute la valeur des échanges respiratoires. En fait, la différence n'est pas très importante : la respiration représente, à la lumière et dans des conditions normales, environ 1/10 des échanges photosynthétiques.

— L'intensité de la photosynthèse est extrêmement *variable d'une espèce à l'autre*. L'expérience courante nous montre que certaines espèces, les plantes des sous-bois par exemple, sont incapables de vivre en pleine lumière; d'autres au contraire, telles les plantes des prairies, exigent la pleine lumière. Les plantes d'ombre ont une intensité photosynthétique très inférieure à celle des plantes de lumière, dans un rapport qui peut être de 1 à 4.

— L'intensité de la photosynthèse varie pour une même espèce en fonction de l'*âge des feuilles*. Pour une même feuille, elle dépend des conditions de l'environnement. Une de ces conditions est, bien entendu, l'intensité de la lumière incidente à un moment donné. Cependant, de façon courante, en pleine lumière cela n'est pas un facteur limitant. Cela ne le devient en général que lorsque, pour une raison ou pour une autre, un ombrage passager ou encore le matin ou le soir, l'intensité d'éclairement est égale ou inférieure à un dixième de sa valeur de plein jour.

— Un facteur limitant beaucoup plus constant est la *teneur de l'air en gaz carbonique*. Le gaz carbonique dans l'air est à la concentration moyenne de 0,03 % en volume. Or, l'intensité photosynthétique de presque toutes les plantes est maximale pour une concentration en gaz carbonique de 0,1 %. C'est pourquoi, dans une serre ou une enceinte quelconque de culture, un apport de gaz carbonique améliore considérablement la productivité végétale. C'est également pourquoi, dans les cultures artificielles d'Algues, on fait barboter du gaz carbonique dans la solution nutritive.

— L'*alimentation hydrique* est également une cause puissante de variations de l'intensité de la photosynthèse. Son action est essentielle sur la fermeture ou l'ouverture des stomates, lesquels représentent la seule voie d'entrée du gaz carbonique dans la feuille. Des variations de teneur en eau peuvent également jouer sur la vitesse des réactions primaires et de transport des produits formés. Ainsi, une bonne hydratation des tissus est favorable à une intensité de photosynthèse élevée; les agriculteurs l'ont bien reconnu qui pratiquent un arrosage artificiel permanent en champ à grande échelle.

— Il existe d'autres causes de variations, qui constituent les paramètres climatiques de l'environnement

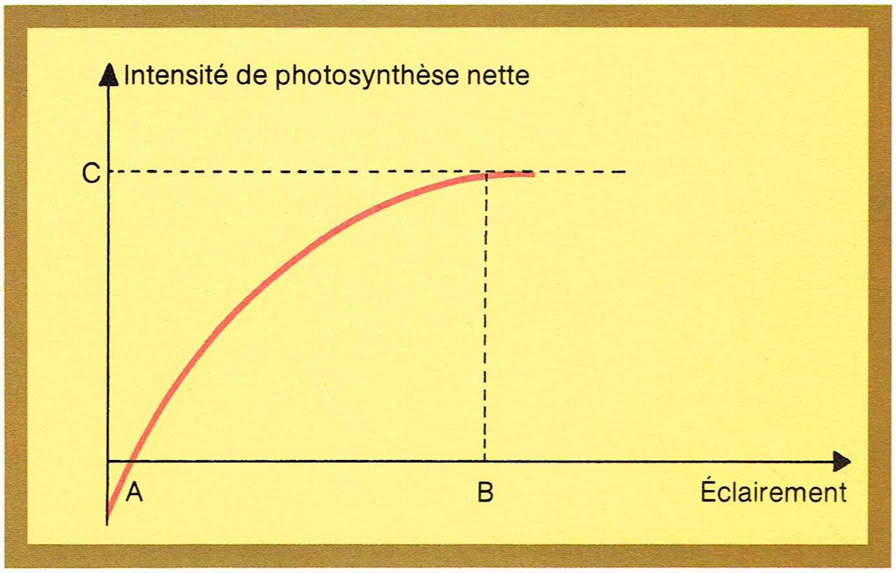

Richard Colin

▲ *Courbe de l'***intensité de photosynthèse** *nette en fonction de l'***éclairement** *:*
A, point de compensation lumineux, c'est-à-dire valeur pour laquelle la photosynthèse est compensée par le rejet respiratoire de CO_2*;*
B, point de saturation lumineux;
C, plateau de saturation ou photosynthèse maximale.

photosynthétique; on peut citer la *longueur d'onde de la lumière incidente* (voir ce qui a été dit précédemment concernant l'effet des longueurs d'onde sur les pigments photorécepteurs), la température, et la nutrition minérale, qui affecte les processus de synthèse des molécules impliquées dans la réaction.

Le rendement photosynthétique

Le rendement photosynthétique est le rapport qu'on peut établir entre la quantité d'énergie reçue et la quantité d'énergie fixée. Cette définition est donc très exactement la même que celle du rendement d'une machine énergétique. Si l'on se place dans les meilleures conditions, sans aucun facteur limitant, le rendement de la machine photosynthétique est de l'ordre de 20 %. On peut calculer que la fixation d'une molécule de gaz carbonique exige de 8 à 10 quanta d'énergie photonique. Dans la nature, le rendement est beaucoup plus faible, de l'ordre de 0,1 à 1 %. Par des méthodes culturales appropriées, on peut améliorer ce rendement grâce à une utilisation convenable de la lumière.

La production de matière organique dans un système écologique et dans le monde

La fonction végétale que nous venons de décrire constitue la clef de voûte de tout le système biologique sur la terre. En effet, c'est par la photosynthèse et par elle seule que de la matière organique est synthétisée à partir de molécules minérales. Cette matière organique peut être ensuite absorbée, transformée ou dégradée par d'autres êtres vivants. Elle leur apporte l'énergie nécessaire et les éléments moléculaires utiles pour leur croissance et leur entretien, c'est-à-dire la nourriture qu'exige tout être vivant pour survivre.

Imaginons une étendue sans vie, un désert, une succession de dalles rocheuses, un lac qui se forme en amont d'un barrage, etc. Il ne s'y développera une vie animale que si, en « pionniers », s'y développent d'abord des végétaux; en effet, seuls ces derniers seront à même d'accumuler de la nourriture organique. C'est pourquoi, dans un système écologique, on les appelle des *producteurs*. Un système écologique ou *écosystème* est un ensemble d'êtres vivants, animaux, végétaux et Bactéries, qui vivent dans un territoire donné, défini par des paramètres physico-chimiques compris entre des limites précises. Un étang, une forêt, une prairie ou un estuaire sont des écosystèmes. Tous les êtres vivants qui s'y développent sont exigeants vis-à-vis de ces paramètres : que la température ou la composition minérale (la salinité) changent, que la composition de l'air ou la quantité de lumière soient modifiées, et c'est tout l'écosystème qui se transforme. Mais il y a plus dans la définition d'un écosystème : entre tous ces êtres vivants il existe un

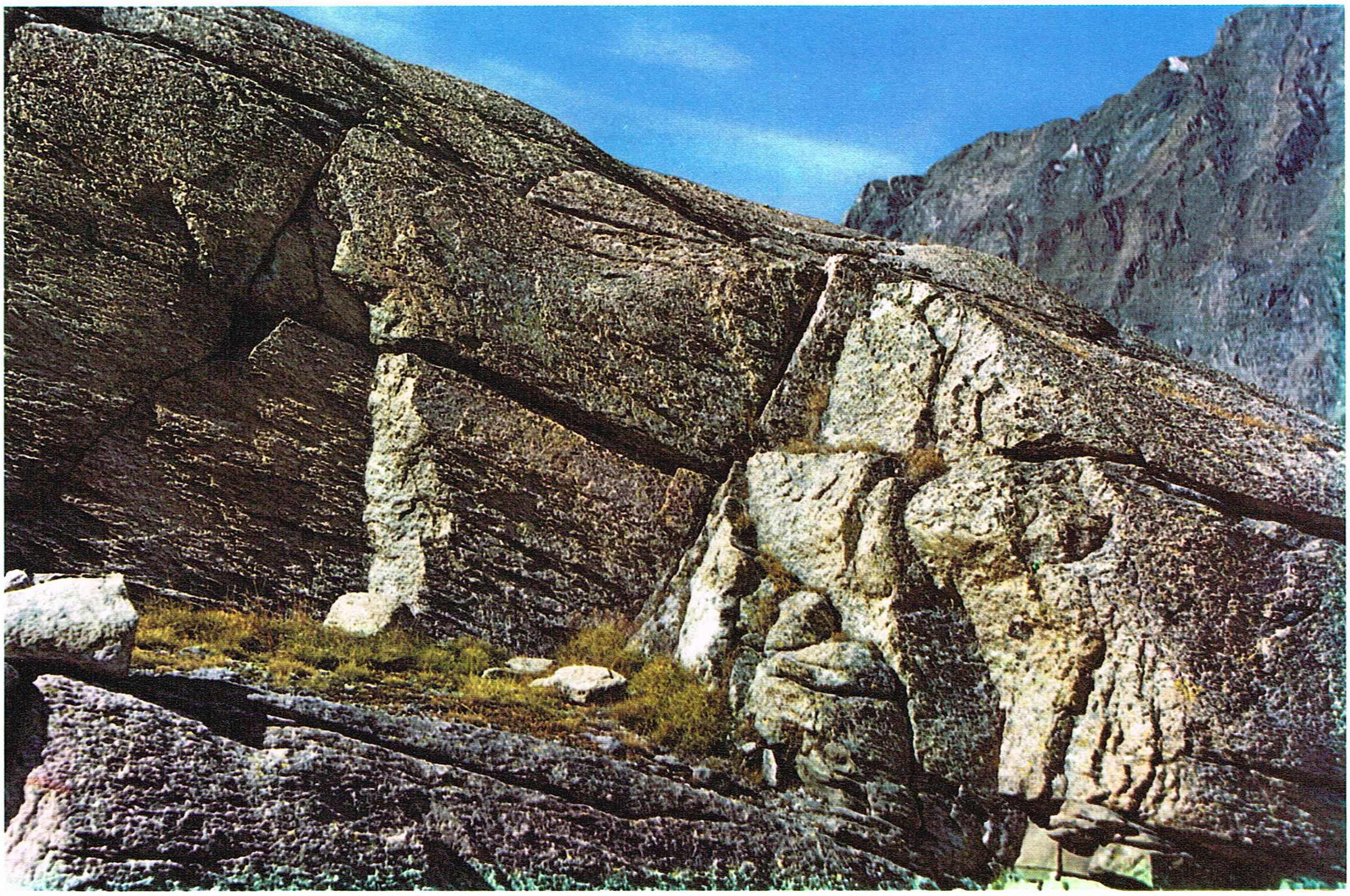

C. Bevilacqua

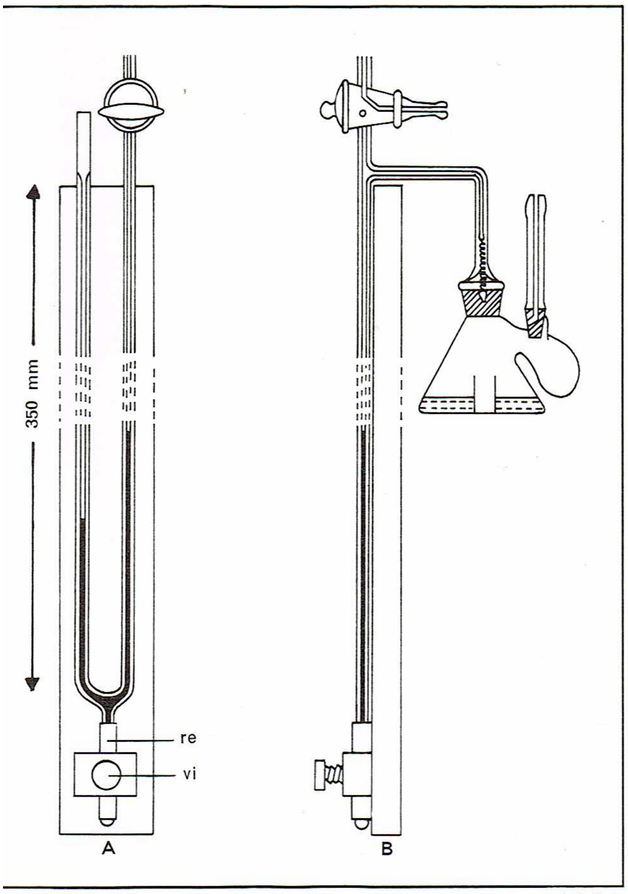

I.G.D.A.

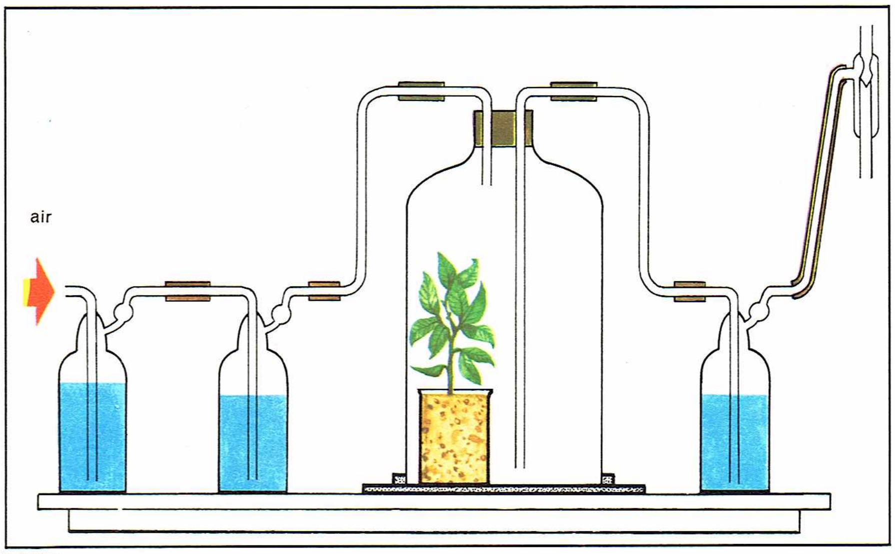

I.G.D.A.

▲ *A gauche, représentation schématique du système manométrique de* **Warburg** *qui permet de mesurer le volume des gaz échangés : A, manomètre; B, l'ensemble manomètre et flacon; re, réservoir du fluide du manomètre; vi, vis de régulation. A droite, appareillage utilisé pour mettre en évidence la* **respiration** *des plantes vertes.*

réseau complexe de transferts de substances; des relations très précises se créent entre eux, relations qui sont pour une part importante des relations de nutrition. A la base donc de l'écosystème se trouvent immanquablement les *producteurs,* c'est-à-dire les végétaux verts, qui, grâce à leur fonction photosynthétique, fournissent aux *consommateurs* que sont les animaux les aliments organiques indispensables.

A l'échelle du monde entier, le raisonnement est le même. Il faut que les producteurs, généralement cultivés, soient en quantité telle que les consommateurs (dont les hommes font partie) trouvent une nourriture suffisante. A cette échelle, les estimations sont bien difficiles et les valeurs proposées éloignées les unes des autres. Cependant, on peut raisonnablement estimer qu'environ 40 milliards de tonnes de carbone sous forme organique sont synthétisés annuellement par les végétaux du globe, soit environ 100 milliards de tonnes de matière organique sèche. Cette production est sensiblement égale sur les terres (prairies, steppes, forêts, cultures diverses...) et dans les océans (phytoplancton et Algues fixées). Signalons que les besoins des hommes sont, sur la base d'une ration alimentaire minimale, de 300 à 400 millions de tonnes de carbone organique par an. L'activité productrice des végétaux serait donc très excédentaire; il faut souligner que l'homme ne peut ou ne sait utiliser qu'une infime partie de la masse produite pour sa nourriture et que, de plus, il ne la répartit pas également.

La respiration

Généralité du phénomène et mise en évidence

Il serait faux de dire que la respiration est la réaction inverse de celle que nous venons de décrire. Elle met en jeu des processus métaboliques tout différents et se déroule en des lieux cellulaires distincts. Cependant, on peut résumer la fonction respiratoire en inversant pratiquement le sens de la flèche utilisée pour résumer la photosynthèse. En effet, globalement, la respiration est la destruction, par un apport d'oxygène, d'une molécule organique, un sucre par exemple, et le résultat en est la production de molécules de gaz carbonique et d'eau avec libération d'énergie.

Cette réaction, qui est bien évidente chez les animaux, existe tout autant chez les végétaux. La seule différence est que, chez la plupart des animaux, des organes spéciaux assurent par des mécanismes rythmés l'aspiration de l'oxygène et l'expiration du gaz carbonique et de la vapeur d'eau, alors que, chez les plantes, de tels organes n'existent pas. Une pointe de racine, une feuille, un fragment de tige, une fleur ou une germination respirent; les échanges gazeux se font régulièrement par les épidermes et préférentiellement par les stomates quand ceux-ci existent.

Étant donné que la respiration se déroule également à la lumière et à l'obscurité (on abordera plus loin la photorespiration), on a tout intérêt à se placer à l'obscurité pour la mettre en évidence : on élimine ainsi les échanges photosynthétiques. Si l'on place des plantes dans une enceinte obscure où l'on fait passer un courant d'air privé de gaz carbonique, on constate, à la sortie de l'enceinte, que l'air s'est enrichi en gaz carbonique. Un animal placé avec la plante manifesterait des symptômes d'asphyxie par manque d'oxygène. Ainsi, il n'est pas bon de dormir la nuit dans une pièce mal aérée et contenant une grande quantité de plantes (par contre, les plantes grasses, qui sont capables de fixer du gaz carbonique à l'obscurité, assainissent la pièce). Il faut signaler cependant, à ce sujet, que le malaise que l'on risque de ressentir est souvent dû plus aux émanations aromatiques des fleurs qu'à un véritable manque d'oxygène.

S'il est donc facile de mettre en évidence les échanges gazeux respiratoires, on peut également déceler le phénomène respiratoire végétal par deux autres aspects de la réaction : la perte de matière organique et la libération d'énergie. Si on maintient pendant plusieurs jours une plante à l'obscurité, on constate que non seulement elle s'étiole, mais qu'elle perd également de son poids. Son allongement (elle file) ne correspond pas à une prise de poids exprimé en matière sèche, bien au contraire. L'énergie libérée par la respiration peut être utilisée par la plante pour réaliser diverses synthèses, mais une partie de cette énergie est perdue sous forme de chaleur. Cette production de chaleur est facile à déceler. Ainsi, si on place un thermomètre au sein d'organes qui respirent activement, comme un tas de graines en germination, ou dans le cœur d'une fleur qui s'épanouit, on constate que la température y est supérieure à la température ambiante.

Toutes ces observations mettent en évidence le phénomène respiratoire. Il suffit de perfectionner les dispositifs et de rendre les mesures plus fines et plus rigoureuses pour estimer l'intensité de la respiration. C'est ce que l'on réalise avec un appareil manométrique, qui, dans un tube capillaire, mesure très exactement le volume des gaz échangés.

L'intensité respiratoire et ses variations

L'intensité respiratoire est définie en utilisant les mêmes références que celles qui ont servi à définir l'intensité de photosynthèse; il suffit de prendre soin d'inverser les

◀ *Page ci-contre, en bas, colonisation de roches siliceuses par des Lichens, des Mousses et quelques touffes de végétaux supérieurs. Cette vie végétale conditionne, en y accumulant de la nourriture organique, le développement animal ultérieur.*

▶ ***L'intensité respiratoire est extrêmement variable suivant les organes et les différentes régions d'un même organe; ainsi, des grains de blé sec (à gauche) n'absorbent que des quantités infimes d'oxygène par rapport à des grains en germination (à droite) qui en utilisent 4 000 à 5 000 fois plus pour le même poids de matière et dans le même temps.***

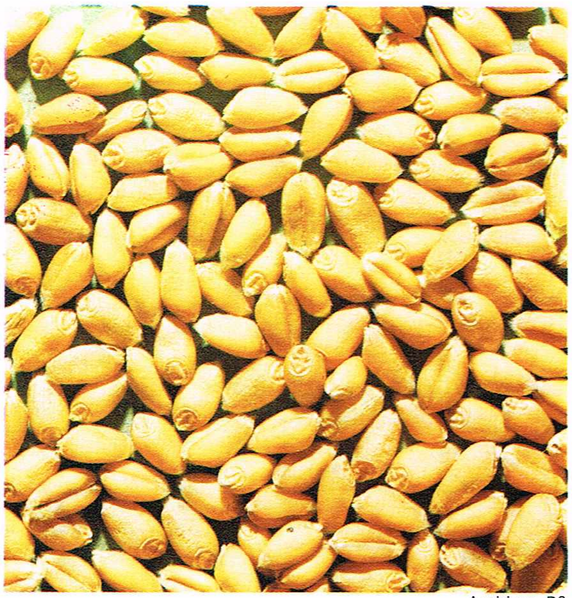

Archives P2

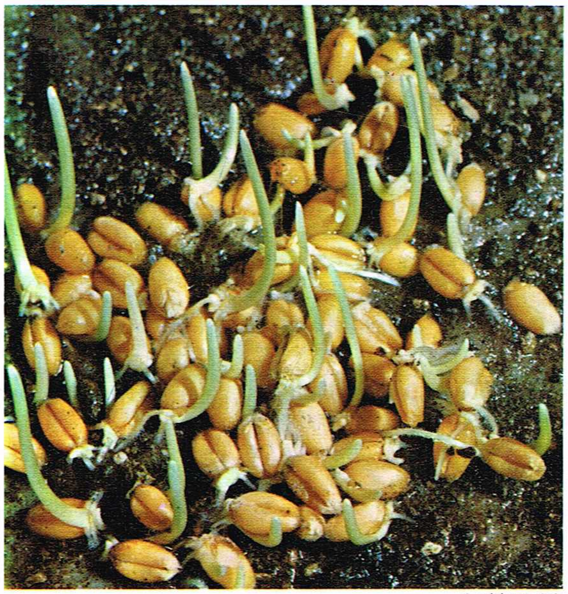

Archives P2

termes des échanges gazeux. Ainsi, l'intensité respiratoire équivaut à la quantité de gaz carbonique rejeté ou d'oxygène absorbé par unité de matériel biologique et par unité de temps. Pour étudier la respiration d'une feuille, on peut, comme pour la photosynthèse, utiliser l'unité de surface foliaire; mais si l'on veut mesurer la respiration d'autres organes (racines, graines, etc.), on prend pour référence l'unité de masse de matière sèche ou fraîche, voire même l'unité de masse de protéines contenues dans l'organe analysé.

— L'intensité respiratoire est extrêmement variable suivant les organes et les différentes régions d'un même organe. Une pointe de racine peut absorber de 5 000 à 10 000 μl d'oxygène par gramme de matière sèche et par heure, alors qu'une tranche de racine de carotte n'en absorbe que 500 μl pour les mêmes unités de référence. Un grain de blé sec (comme toute graine sèche) n'absorbe que des quantités infimes d'oxygène (0,05 μl par gramme de matière sèche par heure); quatre heures seulement après sa mise en contact avec de l'eau, avant même que la germination se manifeste extérieurement, il en absorbe 1 000 à 2 000 fois plus; au bout de 24 heures de germination, l'intensité respiratoire peut s'élever à 4 000 ou 5 000 μl d'oxygène absorbé par le même poids de matière et pendant le même temps. Si les différentes parties d'une fleur respirent activement, les étamines et le pistil respirent plus que les pétales ou les sépales.

— L'intensité respiratoire est sensible à toute une série de facteurs qui peuvent atteindre la plante : la composition gazeuse de l'atmosphère ambiante (tout particulièrement, la teneur en oxygène), la température, les causes pathologiques, maladies ou blessures, et la lumière elle-même.

La disponibilité de l'oxygène aux sites cellulaires de la respiration pose un problème sérieux, car la diffusion de ce corps se fait à une vitesse très faible dans les tissus serrés et hydratés, sa solubilité dans l'eau étant faible. Cette difficulté de circulation peut causer des fermentations locales. Dans ces conditions, le dégagement de gaz carbonique n'est donc pas lié à la diminution de l'oxygène disponible, et on note même souvent, lorsque la teneur en oxygène diminue, une augmentation paradoxale de la consommation des substrats glucidiques. C'est ce que l'on appelle l'*effet Pasteur*. Le mécanisme de cet effet n'est pas entièrement élucidé. Cependant, son incidence pratique est importante lorsque, au cours de la conservation d'organes végétaux frais, riches en glucides comme les fruits, on établit la composition de l'atmosphère de l'enceinte de stockage : une concentration en oxygène trop grande provoque une respiration préjudiciable au maintien des réserves sucrées, une concentration trop faible provoque l'effet Pasteur et donc un effet identique sur la perte en sucres; une concentration optimale est donc à établir pour chaque cas.

Le Q_{10} est un coefficient souvent utilisé pour caractériser l'importance de la variation d'un processus physiologique en fonction de la température. C'est le rapport des vitesses d'une réaction lorsque celle-ci a lieu à deux températures qui diffèrent de 10 °C. Entre 5 °C et 25 °C, le Q_{10} pour la respiration d'organes végétaux est compris entre 2 et 2,5. Au-delà de ces températures, le Q_{10} diminue; pour la plupart des plantes des régions tempérées, l'intensité de la respiration décroît rapidement à partir de 35 °C ou 40 °C, comme presque toutes les autres fonctions métaboliques, et on atteint la température limite supérieure compatible avec le maintien en vie des organismes. Du reste, les limites inférieures et supérieures sont fort variables avec les espèces. Les Conifères des pays froids ou les Bactéries qui se développent dans les crèmes glacées ont une respiration notable à — 10 °C ou — 20 °C. Les Algues des eaux thermales et les Bactéries qui vivent dans les sources chaudes supportent des températures normalement abiotiques de 60 °C et même 90 °C.

— Les infections par des Champignons pathogènes augmentent l'intensité respiratoire des feuilles parasitées. Les blessures et les lésions qui affectent les organes végétaux augmentent localement, parfois de façon considérable, cette intensité. Ce phénomène est à prendre en compte quand, pour une analyse donnée, on prélève une feuille ou que l'on en découpe une rondelle : il se peut que les résultats obtenus ne reproduisent pas fidèlement les intensités fonctionnelles de l'organe en place. L'accélération de la respiration due à des infections ou des blessures n'est pas étrangère au développement rapide des boutons floraux et à la fanaison des fleurs coupées.

Les mécanismes respiratoires n'exigent pas l'apport d'énergie lumineuse. Ils ne sont cependant pas insensibles à la lumière, et cela pour plusieurs raisons. L'intensité respiratoire d'un organe donné est liée à la quantité de substrat disponible. Or, celui-ci provient de l'activité photosynthétique; il est donc prévisible que le métabolisme à la lumière influera sur le métabolisme respiratoire. Mais une action plus directe de la lumière a été reconnue depuis quelques années. A la lumière, certaines voies du métabolisme cellulaire sont ouvertes ou accélérées, et aboutissent à la formation d'acide glycolique rapidement oxydé et décomposé en gaz carbonique. Cette *photorespiration* peut être suffisante pour abaisser de façon importante la productivité de certaines plantes. Les physiologistes qui recherchent des moyens d'augmentation de la production végétale étudient ce phénomène et tentent de sélectionner des plantes à photorespiration faible, donc à productivité plus élevée.

Le quotient respiratoire et ses variations

Le quotient respiratoire (QR) est le rapport entre la quantité de gaz carbonique dégagée et la quantité d'oxygène absorbée. Il renseigne théoriquement sur le type de substrat qui est principalement consommé par la respiration d'un tissu. En effet, si une réaction exige

6 molécules d'oxygène pour décomposer un glucide à 6 atomes de carbone en produisant 6 molécules de gaz carbonique, le QR est égal à 1. Lorsque, par la mesure des échanges gazeux, on arrive à cette valeur, on peut affirmer que l'organe analysé utilise préférentiellement ses glucides. C'est ce que l'on constate dans les premiers temps de la germination d'une graine amylacée (un grain de blé ou de haricot). Les lipides, qui renferment dans leur molécule beaucoup moins d'oxygène que les glucides, en exigent plus pour libérer la même quantité de gaz carbonique; le QR d'un organe qui consomme principalement des lipides sera inférieur à 1 (en moyenne voisin de 0,7). C'est ce que l'on peut constater lors de la germination des graines oléagineuses. A l'inverse, la dégradation des acides organiques, très riches en oxygène, élève le QR à des valeurs très supérieures à 1. Pour les protides, un calcul identique fait apparaître un QR compris entre 0,8 et 0,9.

La valeur du QR indique donc en principe la nature du substrat. Ce renseignement n'a toutefois pas une valeur absolue, car un organe qui respire n'est pas un appareil à combustion qui brûle un seul type de carburant. De plus, dans un organe, toute une série d'autres réactions peuvent se développer, faisant intervenir des fixations d'oxygène ou des rejets de gaz carbonique qui ne concernent pas la respiration : par exemple, la transformation des glucides en lipides, qui est très intense lors de la maturation des graines oléagineuses, produit de l'oxygène réutilisé pour l'oxydation des glucides; ainsi, les tissus puisent moins de ce gaz à l'extérieur, et le bilan global des échanges fera donc apparaître un QR supérieur à 1 (1,5 environ). Une graine oléagineuse aura donc un QR de maturation supérieur à 1 (transformation glucides-lipides) et, au cours de sa germination, un QR inférieur à 1 (oxydation des lipides). Il peut même être inférieur à la valeur théorique de 0,7 si, en plus de l'oxydation des lipides, interviennent des transformations de lipides en glucides, comme c'est très souvent le cas dans ces germinations.

On peut citer d'autres métabolismes qui modifient la valeur du QR apparent : la conversion des glucides en acides organiques (QR $\leqslant$ 0,3), la réduction des nitrates (QR $\simeq$ 1,5), la carboxylation non photosynthétique (QR très bas), les fermentations des tissus asphyxiés (QR très élevé).

Les crises respiratoires des plantes

Au cours de la vie d'une plante, l'intensité de la respiration connaît à certains moments des valeurs particulièrement élevées. Les exigences en substrats sont alors très fortes, et si, avant ces crises, les mécanismes de synthèse n'ont pu assurer une réserve suffisante, le développement s'en trouve perturbé, ce qui peut provoquer la mort de la plante ou de l'organe. Ces crises apparaissent, normalement, à trois moments de la vie d'une plante : lors de la germination, lors de la floraison (plus particulièrement, à l'épanouissement des fleurs) et en fin de maturation des fruits. Cette dernière période, appelée *crise climatérique,* correspond à des transformations profondes des constituants du fruit qui lui font acquérir sa saveur définitive et sa qualité. Au-delà de cette crise, le fruit entre en sénescence.

Les mécanismes cellulaires

A l'échelle cellulaire, il n'existe pas de différences importantes entre les mécanismes respiratoires des animaux et ceux que l'on décèle dans les cellules végétales. Ces mécanismes peuvent se diviser en quatre groupes de réactions : les dégradations des grosses molécules organiques en molécules plus petites, les déshydrogénations et les décarboxylations, les transferts d'hydrogène et d'électrons et, enfin, la libération d'énergie et sa mise en réserve.

La dégradation des molécules débute par des hydrolyses qui libèrent les molécules unitaires (oses, acides gras ou acides aminés), qui sont ensuite complètement oxydées en produisant du gaz carbonique et de l'eau. Cette étape, la *desmolyse,* se réalise par une longue série de réactions qui constituent les voies propres à chaque type de substrat mais qui toutes convergent vers la formation d'acides organiques, dont le plus fréquent est un acide à trois atomes de carbone : l'acide pyruvique ou son produit de déshydrogénation, l'acétyl coenzyme A. A partir de ces corps, un cycle de réactions entre les acides organiques aboutit à la destruction de l'acide pyruvique par l'intermédiaire d'une succession de trois décarboxylations et de cinq déshydrogénations.

Ce cycle a été proposé, en 1937, par le biochimiste anglais H. A. Krebs. Il débute par la condensation d'un dérivé de l'acide pyruvique en un acide à trois groupes carboxyle (COOH), l'acide citrique. C'est pour cette raison que cette véritable plaque tournante du métabolisme respiratoire est appelée soit le *cycle de l'acide citrique,* soit le *cycle des acides tricarboxyliques,* soit enfin le *cycle de Krebs.* Il s'agit d'une boucle de réactions, c'est-à-dire d'une série réactionnelle qui aboutit à la formation d'un substrat-accepteur propre à une synthèse permettant l'introduction d'une molécule extérieure qui alimente le cycle. Cet accepteur final est un acide dicar-

C. Nardin - Jacana

◀ ***Les* infections *par des Champignons pathogènes, ici une feuille de* Betula pubescens *parasitée, augmentent l'intensité respiratoire des organes atteints.***

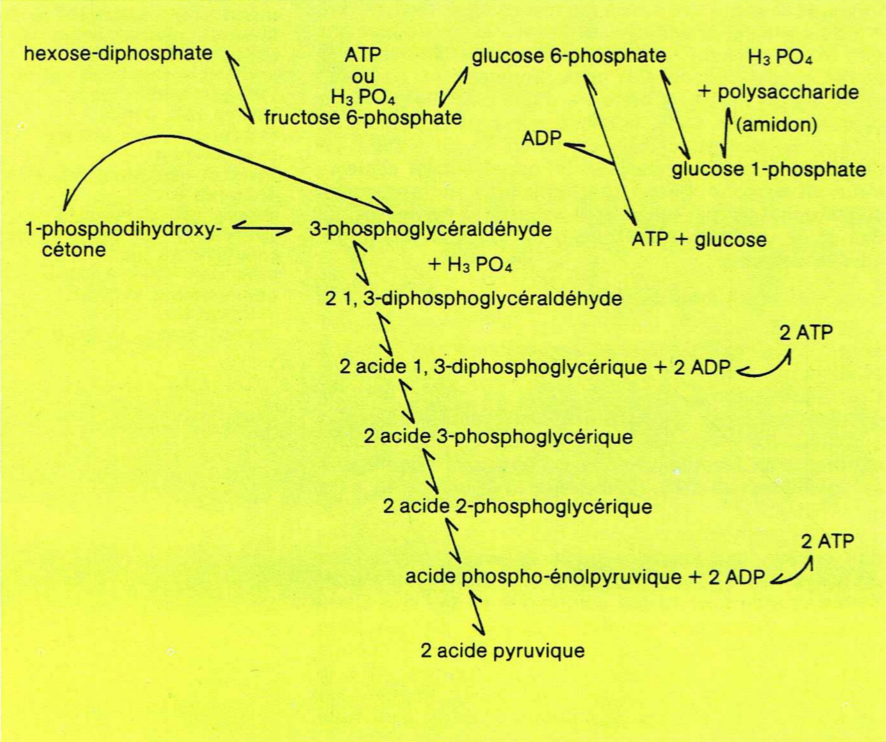

Richard Colin

▲ ***Représentation schématique de la glycolyse d'après Embden-Meyerhof.***

boxylique, l'acide oxaloacétique, qui se combine à l'acide pyruvique *via* l'acétyl coenzyme A pour fermer la boucle et l'alimenter.

Les décarboxylations qui interviennent à différents points de cette série de réactions constituent la source du gaz carbonique respiratoire. Les déshydrogénases fournissent un pouvoir réducteur qui sera transmis, par étapes et par des transporteurs successifs, à l'oxygène pour former des molécules d'eau. C'est donc là, et là seulement, que l'on voit intervenir l'*oxygène respiratoire,* lequel fonctionne comme accepteur d'hydrogène et jamais comme oxydant direct des molécules organiques. Si la formule globale de la respiration peut s'écrire comme une combustion, le mécanisme des réactions successives ne correspond pas à une telle simplification, qui confine à l'erreur.

Le bilan de l'oxydation complète de l'acide pyruvique fait apparaître de l'*énergie,* qui est un des produits de la respiration. Cette énergie est partiellement perdue en chaleur mais, lorsque les transferts se font normalement, l'énergie est fixée sous forme de liaisons riches, essentiellement les liaisons phosphate de l'ATP. Cette mise en réserve de l'énergie peut servir à des synthèses de molécules organiques à partir des intermédiaires de la desmolyse. C'est pourquoi il serait erroné de considérer les mécanismes cellulaires de la respiration comme des destructions pures et simples du matériel organique, même si le bilan global quantitatif est déficitaire. La redistribution qualitative des squelettes carbonés et de l'énergie constitue un aspect important et positif du métabolisme respiratoire.

Les premières étapes de la desmolyse se réalisent dans des sites dispersés de la géographie cellulaire, mais les étapes finales (cycles principaux), les transports d'hydrogène et les synthèses d'ATP sont localisés dans une classe d'organites cellulaires : les *mitochondries,* inclusions cytoplasmiques de 1 μm de diamètre. On a pu montrer qu'à l'intérieur même du système membranaire de ces dernières, fait de crêtes et de replis internes, les différentes chaînes respiratoires ont des localisations fort précises.

Les fermentations

C'est par la fermentation que l'on produit de l'alcool ou des acides, l'acide acétique et l'acide lactique par exemple. Ce processus s'accompagne d'un dégagement de gaz carbonique et de la transformation des substrats glucidiques. Chacun peut se rendre compte de la fermentation d'un jus sucré : une conserve mal stérilisée produit un dégagement gazeux et une acidification ou une alcoolisation du milieu. Mais, si la stérilisation est bonne, cette dégradation ne se produit pas. En effet, les fermentations sont l'œuvre principalement de micro-organismes, les Bactéries. Cependant, dans des conditions particulières mais non exceptionnelles, les tissus des plantes supérieures présentent également des manifestations fermentaires.

La condition essentielle pour qu'un tissu fermente, c'est que la pression partielle en oxygène descende à des valeurs basses, inférieures à 10 %. Ces conditions se réalisent facilement au sein d'un organe compact et sucré, un fruit par exemple. On peut également les observer au sein d'une graine humidifiée où l'embryon, formé de cellules richement pourvues en équipement respiratoire, pompe activement l'oxygène disponible dans les quelques espaces voisins : si les téguments restent imperméables, en particulier à l'oxygène, on observe dans ces toutes premières phases de la germination des fermentations locales. Un phénomène identique peut apparaître, pour des raisons similaires, au centre d'un bourgeon présentant des écailles imperméables. Mais dans tous ces cas, qui n'ont rien de pathologique, rapidement, l'éclatement des barrières permettra l'apport d'oxygène nécessaire à la complète destruction des intermédiaires formés, alcools ou acides organiques.

Les mécanismes de la fermentation débutent comme ceux de la respiration, par la *desmolyse,* qui aboutit à la formation de cet acide organique dont nous avons vu le rôle capital dans le métabolisme respiratoire : l'acide pyruvique. Sa décarboxylation donne naissance à de l'aldéhyde acétique en même temps qu'elle est la source du gaz carbonique. La réduction de l'aldéhyde produit l'alcool éthylique. Si la réduction porte directement sur l'acide pyruvique, on a la formation d'acide lactique.

L'anaérobiose, qui provoque la fermentation dans les tissus des plantes supérieures, ne peut se maintenir longtemps car son rendement énergétique est très bas : la destruction d'une quantité considérable de sucre est nécessaire pour produire une quantité d'énergie très faible. Alors qu'une molécule de glucose produit par respiration 673 calories, par fermentation et production d'alcool elle n'en produit que 33. De plus, les produits intermédiaires formés par fermentation s'accumulent dans les tissus et produisent de véritables intoxications.

LES FONCTIONS LIÉES AU DÉVELOPPEMENT DES PLANTES

Les fonctions d'échange qui viennent d'être décrites peuvent être réunies sous le terme global de *métabolisme*. Elles concernent les modifications ou les déplacements de molécules liés à la vie des plantes. Elles se réalisent à tous les instants et accompagnent les transformations morphologiques et cytologiques. C'est parce que le métabolisme est le commun dénominateur de toutes les manifestations vitales que nous lui avons attribué la première place et lui avons consacré un développement plus long qu'aux fonctions qui se concrétisent par des modifications évidentes de la plante, telles que la *germination,* la *floraison* ou la *croissance*.

Mais la description du métabolisme ne suffit en aucun cas à décrire la physiologie complète d'un organisme. S'il est vrai que la description de la germination ne peut se faire sans se référer au métabolisme qui la caractérise, elle serait incomplète sans la description des transformations de formes et de volumes qu'elle implique. Il en va de même de toutes les fonctions qui sont liées au développement de la plante et en constituent les modalités. De plus, chaque type de transformation morphologique est sous le contrôle de substances hormonales, dont la nature, le rôle et le mode d'action constituent des aspects capitaux indispensables à la connaissance du développement.

Avant que la graine germe ou que le bourgeon s'épanouisse, il existe toute une *vie ralentie,* ou *dormance,* qui présente ses propres particularités. Nous suivrons dans la série des fonctions de développement l'ordre chronologique de la vie d'une plante supérieure ou de l'un de ses organes.

La vie ralentie, les dormances

Le développement par étapes

Si l'on suit la vie d'une plante, on constate que son développement n'est pas linéaire en fonction du temps. La croissance d'une tige et l'apparition des feuilles présentent des « temps morts ». Un bourgeon floral se forme, grandit, puis cesse de se transformer et une attente parfois longue est nécessaire avant qu'il ne s'épanouisse. Une graine mûrit, se détache du fruit et ne germe qu'après une phase stationnaire qui ne semble se distinguer de la mort que par la conservation des structures et de l'équipement moléculaire. On pourrait prendre des exemples à des échelles plus fines : ainsi, quand une tige se développe, son apex est le siège d'une suite continue d'activités de différenciation de territoires cellulaires successifs; quand un massif cellulaire se différencie pour donner une ébauche foliaire, le reste de l'apex est dormant.

Certains des rythmes évoqués ci-dessus ne paraissent pas, à première vue, surprenants car ils correspondent souvent au cycle des saisons ou des alternances de jour et de nuit. L'arbre entrerait en dormance au début de l'hiver, comme l'animal se terre dans l'attente de jours plus cléments. Cette analogie, apparemment évidente, ne résiste pas à l'observation du développement de plantes en conditions constantes. Bien que l'entrée en vie ralentie d'un organe ou d'un organisme ne soit pas sans rapport avec les conditions ambiantes, elle semble suivre un rythme indépendant, que certains appellent *interne*. Ce phénomène est général, tenter de le supprimer n'aboutit qu'à des échecs et parfois à la mort de la plante.

La dormance n'est pas seulement l'arrêt de développement. On peut obtenir un simple arrêt par une action répressive sur les facteurs qui favorisent le développement, la température ou l'humidité par exemple. Dès que l'on restaure les conditions favorables, le développement reprend sans retard. Mais la dormance est plus que cela; lorsqu'un organe ou une plante entière est en dormance véritable, toute modification de l'ambiance dans le sens favorable au développement sera sans effet. Des conditions internes, encore incomplètement élucidées, imposent et maintiennent l'état dormant.

Le cas des graines ou celui des organes souterrains sont clairs à ce sujet. L'industriel qui souhaite conserver les semences provoque des conditions thermiques, hydriques et de concentration en gaz défavorables au développement. Mais le stockage n'est pas une dormance, c'est une attente de conditions externes favorables.

E.P.S.

▲ *La condition essentielle pour qu'un tissu fermente, c'est que la pression partielle en oxygène descende à des valeurs inférieures à 10 %; cette condition se réalise facilement au sein d'un organe compact et sucré comme le fruit. Ici, fruits du framboisier noir* **(Rubus occidentalis).**

Archives B

◀ *Le développement d'une plante n'est pas linéaire, il subit des périodes* **de vie ralentie, de dormance,** *au cours desquelles il prépare la reprise. Ici des semences de laitue « de printemps verte frisée » dont les semis ont lieu de février à mars pour les cultures de printemps.*

Ainsi, le cultivateur qui récolte des graines, des bulbes ou des tubercules sait bien que s'il veut une bonne germination de ces organes la saison suivante, il doit les placer dans des conditions favorables non seulement au stockage mais à cette vie ralentie, qui, secrètement (c'est-à-dire sans manifestation apparente), prépare la reprise. Ce sont ces conditions favorables à la dormance que nous étudierons maintenant.

Dormance et levée de dormance des semences

Une graine est une plante en miniature possédant une racine, une tige et des feuilles à l'état embryonnaire, le tout entouré de tissus chargés de substances d'accumulation ou de réserve : amidon, lipides ou protéines. L'ensemble constitué par l'embryon et les tissus de réserve est complètement, ou presque, enfermé dans des téguments. Ces trois parties : l'axe embryonnaire, les réserves et les téguments, proviennent de la transformation lente et régulière des ovules fécondés contenus dans les carpelles de la fleur. Arrivé à un certain stade de maturation, le développement cesse. La graine est apparemment mûre; elle est bien sèche, sa taille et son poids ne varient plus. Elle se détache souvent du fruit et tombe sur le sol. Deux cas se présentent.

— Certaines semences, lorsqu'elles sont sur le sol humide (la température est encore clémente : on est au début de l'automne), germent immédiatement. Ces semences n'exigent pas de dormance. Si l'on veut les conserver, il faut dès la récolte les préserver de l'humidité, les maintenir en température froide et, si possible, dans une atmosphère pauvre en oxygène. Ce sont là des conditions qui sont inverses de celles favorables à la germination.

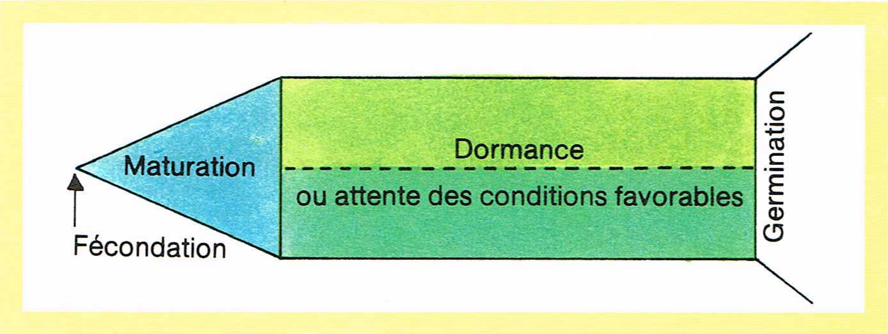

Richard Colin

▲ *Représentation schématique de la vie d'une semence.*

— Cependant, généralement, les semences qui ont atteint leur complète maturation apparente ne sont pas capables de germer immédiatement, même si les conditions de l'environnement sont requises. Elles ont absolument besoin d'une période, plus ou moins longue, au cours de laquelle s'opèrent des transformations internes que l'on groupe sous le terme de *postmaturation*. Ces semences entrent en dormance. Pour qu'elles en sortent, c'est-à-dire pour qu'elles puissent germer dans des conditions favorables, il faut qu'elles subissent divers traitements, qui sont souvent assurés par les conditions naturelles du climat mais qui peuvent être reproduits artificiellement. C'est par cette dernière méthode que l'on détermine expérimentalement les conditions favorables à la dormance et que l'on en contrôle la levée.

La dormance peut être due simplement à la dureté et à l'imperméabilité des téguments. Dans ce cas, si on décortique la graine ou si on pratique une cassure ou une abrasion, la germination s'effectue. Une telle dormance n'est donc pas réelle : il s'agit d'une *dormance tégumentaire,* ou *superficielle,* qui peut être levée facilement. Dans la nature, certains phénomènes, comme la corrosion, l'attaque par les Bactéries du sol, ou le passage dans le tube digestif des Oiseaux, sont capables de modifier les téguments, de telle sorte qu'ils ne représentent plus une barrière d'imperméabilité. Mais il arrive parfois que leur résistance soit si grande que des moyens artificiels doivent être employés. C'est souvent cette résistance des téguments qui assure la survie des graines pendant des temps très longs. Des graines de *Canna* ont pu germer après une conservation que l'analyse archéologique nous permet d'estimer à cinq siècles. Les exemples ne sont pas rares de graines conservées un ou deux siècles. Il faut cependant se méfier de certaines estimations de conservation d'une durée spectaculaire (par exemple, le blé des pharaons), qui ne résistent pas à des expertises sérieuses.

Supposons maintenant qu'une graine soit décortiquée, que l'embryon soit mis dans des conditions devant normalement favoriser sa croissance et que, cependant, il reste dormant; on a alors affaire à une *dormance réelle*. Pour lever cet état, il existe deux facteurs bien connus : la température et la lumière.

— C'est souvent par une *température froide* appliquée à des semences humides qu'on déclenche ce réveil. C'est ce que l'on pratique par la stratification, c'est-à-dire la conservation de semences (des graines ou des noyaux, noix, cerises, pêches par exemple) dans du sable humide, durant tout un hiver.

— Les *graines photosensibles* ne réagissent qu'à certaines longueurs d'onde. Le rouge clair ($\lambda = 660$ nm environ) provoque la germination de semences de laitue; mais si on les éclaire avec une lumière de longueur d'onde voisine, dans le rouge sombre ($\lambda = 730$ nm), on inhibe leur germination. Ce phénomène est réversible. On a extrait de ces graines photosensibles un pigment, le *phytochrome,* qui se présente sous deux formes, caractérisées par leur spectre d'absorption : un type moléculaire qui absorbe à 660 nm et qui, éclairé à cette longueur d'onde, se transforme de façon rapide en une forme moléculaire instable qui absorbe plus spécifiquement les radiations de $\lambda = 730$ nm. On a de sérieuses raisons de penser que c'est ce pigment photorécepteur qui, sous sa forme P_{730}, déclenche les réactions métaboliques de la croissance et de l'expansion de l'embryon. Cette forme est active mais aussi labile; elle se transforme en P_{660} à la suite d'un éclairement en rouge sombre ou à l'obscurité en présence d'une température douce. La forme P_{660} est inactive et beaucoup plus stable.

Une graine en dormance ou au repos respire très peu. Mais dès qu'apparaissent les premières manifestations germinatives, telles que le pointement de la radicule hors des téguments, l'allongement des axes et la différenciation d'organes, on assiste à une augmentation très rapide de l'intensité respiratoire. Ce métabolisme est préparé bien avant les manifestations extérieures de la germination. Dès que l'eau imbibe les téguments, les traverse et atteint l'embryon, une hormone, la *gibbérelline,* induit la synthèse d'enzymes qui hydrolysent les grosses molécules des tissus de réserve, mettant ainsi à la disposition des tissus actifs de l'axe des substrats respiratoires et les matériaux moléculaires nécessaires aux nouvelles synthèses.

Dormance et levée de dormance des bourgeons

Situés à l'extrémité des tiges ou à l'aisselle des feuilles, les bourgeons sont constitués d'une série d'écailles plus ou moins étroitement imbriquées les unes dans les autres et qui recouvrent et protègent une petite masse méristématique fragile; celle-ci renferme toutes les potentialités d'expression morphogénétique des feuilles et de l'axe. Cette partie profonde du bourgeon s'appelle l'*apex*. Les écailles jouent un rôle comparable aux téguments de la graine. La croissance de la tige ne peut avoir lieu que si les écailles s'écartent et tombent, libérant ainsi l'apex, qui produit, à un rythme qui lui est spécifique, les

▼ *La levée de dormance d'un bourgeon peut être photosensible mais le facteur le plus déterminant semble être la température; ainsi les bourgeons de pommier (à gauche, avant l'épanouissement; à droite, au début de l'épanouissement) doivent être soumis à une température inférieure à 7 °C pendant 1 000 à 2 000 heures.*

H. Veiller - Jacana

H. Veiller - Jacana

feuilles et les tissus de la jeune tige. Après un temps de développement plus ou moins long, si la plante ne meurt pas à la suite de sa première et unique floraison, de nouveaux bourgeons se forment et la croissance cesse : les bourgeons entrent alors en dormance.

Pour les plantes des pays tempérés, l'entrée en dormance ne correspond pas toujours à la chute des feuilles. C'est le plus souvent au cours de l'été que les bourgeons se forment et que débute leur repos. Des conditions internes règlent ce phénomène, mais on pense que la diminution de la longueur du jour et le froid nocturne peuvent être des éléments favorables à cette mise en état de dormance. Il est important de souligner que la vigueur d'un bourgeon foliaire et parfois celle d'un bourgeon à fleur sont, pour partie, tributaires de ce qui a pu se passer au cours de l'année qui précède leur épanouissement. Au cours d'une année, la luminosité du ciel, la température élevée ou basse, la pluviosité abondante ou réduite du printemps ou de l'été préparent la qualité et la vigueur du débourrement de l'année suivante.

Si l'on suit le développement d'un rameau qui porte un bourgeon apical et de nombreux bourgeons axillaires, on constate que la levée de dormance n'affecte pas tous les bourgeons, ou du moins ne les affecte pas tous avec la même intensité. C'est parfois le bourgeon terminal qui s'ouvre, et alors ceux qui se trouvent en dessous restent dormants : dans ce cas, la *dominance* est dite *apicale*. Si l'on coupe la tige sous le bourgeon terminal, un ou plusieurs des bourgeons situés immédiatement en dessous le remplacent. Il existe donc une corrélation entre bourgeons, les uns inhibant le développement des autres. Tous les jardiniers qui taillent connaissent bien ce phénomène qui leur permet de donner forme et vigueur aux arbres fruitiers ou aux arbustes à fleurs. Dans certaines espèces, c'est le bourgeon apical qui reste dormant alors que les bourgeons de la base se développent. On comprend que le type de corrélation, bien particulier et fixe pour chaque espèce, détermine l'aspect de la ramification ainsi que le port général de la plante.

La levée de dormance d'un bourgeon, comme celle d'une graine, peut être photosensible ; le phytochrome joue là également un rôle important. Le facteur le plus déterminant de la levée de dormance semble toutefois être la température. Avant de s'épanouir et de donner une tige robuste, un bourgeon, tout au moins chez la majorité des plantes de nos régions, a besoin d'être soumis à une période de froid. La durée de cette période varie beaucoup selon les espèces et même avec les individus d'une espèce donnée (par exemple, les variétés du pommier). Un bourgeon de pommier doit être soumis à une température inférieure à 7 °C pendant 1 000 à 2 000 heures suivant la variété. Les horticulteurs connaissent avec grande précision les exigences de chacune de leurs productions, et les sélectionneurs entreprennent de créer des variétés répondant le mieux possible au climat local ainsi qu'aux contraintes économiques.

Lorsque l'exigence en froid est remplie, la levée de dormance peut avoir lieu, soit naturellement par l'élévation de la température saisonnière, soit par une élévation de température artificielle ; mais il existe tout un arsenal de produits hormonaux naturels ou de synthèse qui, appliqués sur les bourgeons, accélèrent la levée de dormance.

L'épanouissement d'un bourgeon est préparé, comme la germination, par un métabolisme dont l'essentiel est la destruction ou l'élimination d'un ou de plusieurs *régulateurs hormonaux,* dont un, particulièrement mieux connu, a une formule moléculaire voisine de celle de la vitamine A : c'est l'*acide abscissique*. Ce régulateur puissant provoque non seulement la dormance mais aussi la sénescence et la chute des feuilles.

La croissance et la différenciation

Définition de la croissance et ses différentes phases

De tous les phénomènes physiologiques, la croissance des plantes est bien celui qui est le plus évident. Cette croissance peut être lente et à peine sensible à l'échelle d'une journée, mais des prises de vues cinématographiques espacées puis projetées à vitesse normale reconstituent de façon très spectaculaire les mouvements de la croissance d'une tige, du feuillage ou des pièces florales.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲▼ *La croissance d'un végétal (augmentation de la longueur des branches ou de l'épaisseur du tronc — ci-dessous, tronc de mélèze — pour un arbre) est facilement mesurable ; c'est un phénomène intimement lié à celui de la* **différenciation** *: l'ensemble est désigné par le terme de* **développement.**

Croître, grandir, se développer sont des expressions courantes lorsque l'on parle d'un être vivant, qu'il s'agisse d'un enfant, d'un animal ou d'une plante. Il existe un autre terme beaucoup moins employé et qui cependant recouvre un phénomène tout aussi important et général, c'est celui de la différenciation. Tous ces termes recouvrent des phénomènes qui, en toute rigueur, ne sont pas identiques. Il est donc nécessaire de tenter de les cerner par des définitions empiriques. Ils ont tous en commun de se référer au temps et de décrire une variation.

La *croissance* est une variation quantitative d'un caractère ou d'un critère dans le sens d'une augmentation irréversible. Il ne viendrait à l'esprit de personne de parler

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

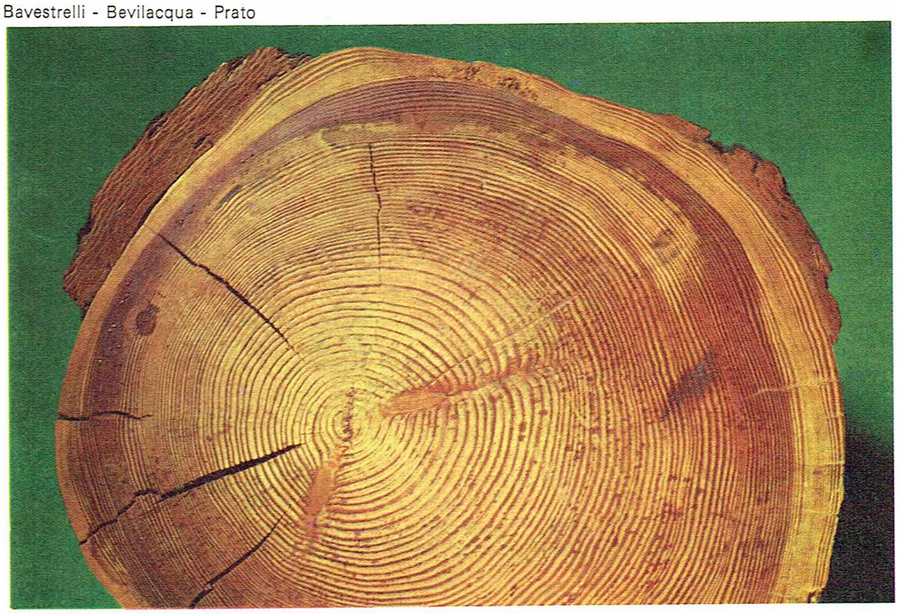

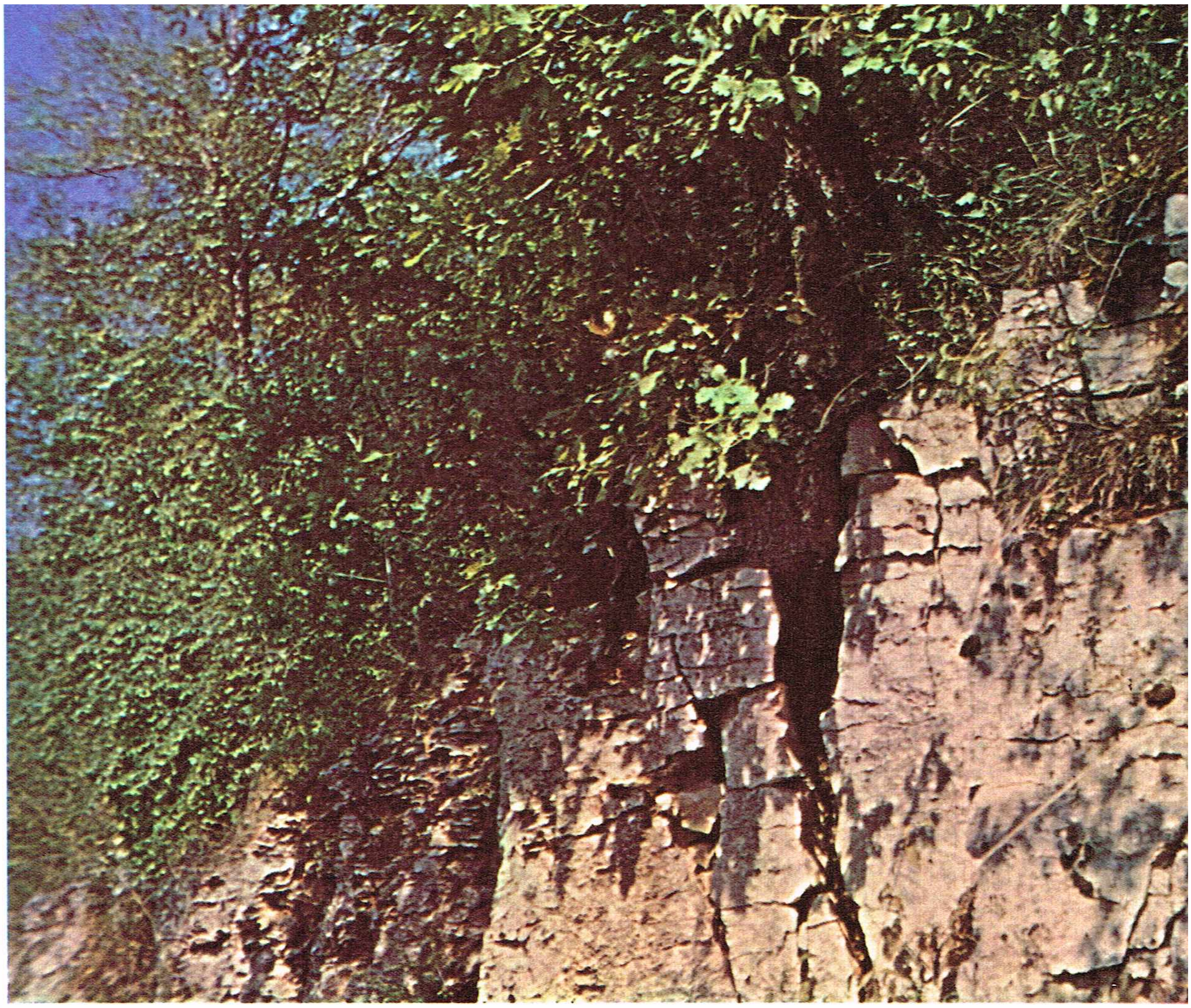

R. Bourdu

▶ *La force de* croissance des racines *désagrège les roches au sein desquelles elles croissent.*

de croissance pour une personne qui prend de l'embonpoint, car on sait que cette augmentation de poids peut être réversible. Une feuille fanée peut augmenter son poids si on la réhydrate, elle ne grandit pas pour autant. Un allongement n'est pas forcément une croissance car il peut être réversible, bien que la croissance d'une plante ne puisse se manifester ou se réaliser que par l'allongement de chacune de ses cellules (la variation de longueur est, dans ce dernier cas, irréversible).

La *différenciation,* qui est aussi évidente que la croissance, est un tout autre phénomène. L'apparition de nouvelles ramifications, de nouvelles feuilles ou de fleurs manifeste la propriété de la plante de créer des organes et des tissus nouveaux à spécialisation bien précise. Ce phénomène se réalise à tous les niveaux de structure : les cellules se différencient, comme à l'intérieur des cellules les organites qui les remplissent; à l'échelle moléculaire, la différenciation se manifeste par l'apparition de substances nouvelles, jouant un rôle très spécifique (les enzymes par exemple). La différenciation est donc bien une augmentation dans le temps de critères qui sont maintenant qualitatifs. La différenciation apporte plus de qualités nouvelles (fonctions nouvelles) que de quantités mesurables avec un mètre ou une balance.

Contrairement à la croissance, la différenciation peut être réversible. Les phénomènes de dédifférenciation ne sont pas rares. Pour nous limiter à un exemple, considérons ce qui se passe lorsque l'on réalise une bouture de tige. Ce morceau d'organe est parfaitement différencié et, au niveau de la coupure, on peut observer des tissus formés de cellules à caractères bien spécifiques. Au bout d'un certain temps, ces cellules ou tout au moins certaines d'entre elles régressent dans leur spécialisation et retrouvent leur jeunesse; elles ont alors la puissance de se multiplier et de former un *cal de cicatrisation* d'où naîtront de nouveaux organes : les racines, qui ne ressemblent en rien au morceau de tige dont elles proviennent. Cela signifie que chaque cellule possède l'information nécessaire à toutes les différenciations possibles mais qu'en état de fonctionnement normal une régulation répressive s'exerce sur une partie de ses potentialités.

La différenciation ne peut avoir lieu sans croissance. L'apparition d'une feuille est un phénomène de différenciation, qui ne peut se réaliser sans la croissance d'un massif cellulaire. Les deux phénomènes sont si intimement liés que leur ensemble est désigné par un terme particulier : le *développement*.

La croissance d'un organe végétal, d'une plante ou d'une population doit se référer à un critère dont l'augmentation au cours du temps est facilement mesurable. Ce peut être la taille (longueur, surface ou volume), le poids (de matière hydratée, c'est-à-dire fraîche, ou de matière organique et minérale, eau non comprise, ou enfin seulement de protéines) ou un nombre (d'individus dans une population ou de cellules dans un tissu). Chacun de ces critères présente des avantages et des inconvénients pour exprimer la croissance, et c'est à l'observateur de choisir le mieux adapté au type d'information qu'il souhaite obtenir.

Le critère de croissance étant choisi, il est possible de reporter sur un graphique les mesures prises au cours du temps, celui-ci étant porté en abscisse. Dans tous les cas, la courbe reliant les points est voisine d'une courbe du type sigmoïde. En d'autres termes, on peut distinguer quatre phases : une phase qui prolonge la dormance et qui peut être appelée *phase de latence;* une *phase de démarrage et d'accélération* de la croissance; une *phase où cette accélération cesse* et où la croissance se poursuit à vitesse régulière (phase qui peut être linéaire, ou se réduire à un point d'inflexion); enfin, une dernière *phase de ralentissement* et d'arrêt de la croissance.

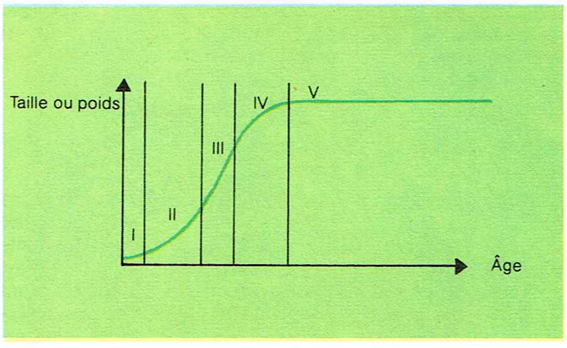

Richard Colin

▶ *Représentation graphique des phases d'une* courbe de croissance.

Quatre paramètres principaux sont à considérer : la *croissance absolue,* qui est simplement la différence entre deux mesures du critère retenu à deux moments différents ; la *vitesse de croissance,* qui est cette différence rapportée à l'unité de temps ; le *taux de croissance absolue,* qui est la dérivée de la fonction à un moment donné ; enfin, le *taux de croissance relative,* qui rapporte le taux de croissance à la valeur du critère au temps initial (cette mesure pouvant être prise à tout moment de la courbe de croissance). Le taux de croissance relative est constant dans la phase d'accélération, qui, pour cette raison mathématique, prend souvent le nom de *phase exponentielle.* Il diminue ensuite et, bien entendu, garde une valeur nulle lorsque la croissance est finie.

Les zones de croissance et les zones de différenciation

Une plante entière croît et se différencie, mais ces fonctions sont assurées par des régions très limitées : la pointe de la racine et les parties subapicales de la tige assurent la croissance en longueur. C'est par leur pointe, leur base ou leurs marges que les feuilles croissent : cela dépend des espèces et détermine la forme finale. Ainsi, une feuille allongée d'herbe (Graminée) croît par sa base et sa pointe se nécrose rapidement, tandis qu'une feuille large d'un autre type de plante croît par ses marges latérales ou apicales. La croissance en épaisseur des tiges et des racines est assurée par l'activité de multiplication centripète et centrifuge d'un ou deux manchons de cellules situés l'un dans l'écorce et l'autre plus en profondeur.

La *différenciation des cellules,* qui est à l'origine de l'édification des tissus, suit immédiatement leur multiplication ou leur allongement. Elle se manifeste par la spécialisation de l'équipement enzymatique et infrastructural du contenu ainsi que par l'épaississement des parois et leur incrustation par des substances nouvelles (la *subérine* pour le liège, la *lignine* pour le bois, etc.).

La *différenciation des organes* est beaucoup plus localisée. Ainsi, les feuilles se forment à partir de petites masses *méristématiques* (ensemble de cellules non différenciées) situées dans un anneau qui entoure l'extrême pointe de la tige. Les radicelles ou racines secondaires prennent naissance dans un manchon cellulaire se trouvant à la frontière entre l'écorce et la partie centrale (cylindre central) des racines.

Cette rapide évocation des zones fonctionnelles montre que le développement d'une plante (croissance + différenciation), qui se manifeste par sa morphogenèse et aboutit à la création de sa forme spécifique, ne se fait pas au hasard et n'affecte pas toutes ses parties indifféremment. Il existe donc nécessairement une relation de corrélation entre les zones actives. Cette fonction de régulation est assurée par la circulation et la distribution de toute une famille de corps qui sera évoquée plus loin, sous la dénomination de *régulateurs de croissance*.

Croissance par allongement ou par multiplication des cellules

Une cellule méristématique, donc indifférenciée, est grossièrement isodiamétrique. Elle peut soit se multiplier en donnant deux cellules filles atteignant rapidement la taille de la cellule mère, soit s'allonger suivant une direction préférentielle. Dans ce dernier cas, c'est son contenu en eau qui augmente et par voie de conséquence ses infrastructures spécifiquement riches en eau, c'est-à-dire ses vacuoles. Très rapidement, celles-ci confluent en une seule et même grande vacuole qui occupe pratiquement les 9/10 du volume cellulaire total.

La multiplication ou l'allongement individuel des cellules d'un tissu provoquent la croissance en taille de l'organe, et, si des synthèses accompagnent ces phénomènes, on observe une croissance en poids. Le mode de croissance par multiplication des cellules *(mérésis)* est très limité et ne provoque chez les plantes supérieures qu'un faible grandissement. C'est l'allongement des cellules *(auxésis)* qui est la cause majeure de la croissance de l'organe et de la plante entière.

Les régulateurs de croissance

Le contrôle du développement d'une plante prend naissance aux sites d'expression de son patrimoine génétique, c'est-à-dire au niveau de ses gènes qui, pour la plupart, sont nucléaires. Par un jeu complexe d'activations et d'inhibitions, par des mécanismes de stimulations d'enzymes ou de rétroactions *(feed-back),* des groupes d'acides nucléiques conditionnent l'expression morphogénétique. Cet ensemble de réactions a fait l'objet depuis quelques décennies de très nombreuses et importantes découvertes qui constituent les plus riches acquisitions de la biologie dans le domaine moléculaire. L'essentiel des résultats a été obtenu grâce à l'étude des Bactéries ou des virus. On a tout lieu de penser que les principales conclusions et les grands schémas qui ont été proposés à l'échelle cellulaire peuvent être généralisés aux grands ensembles de cellules que sont les plantes supérieures. Cependant la biologie moléculaire constitue actuellement un domaine si complet que la description sommaire de ses différents aspects justifierait un développement comparable à celui que nous consacrons ici à l'ensemble de la physiologie végétale. Nous ne retiendrons donc que l'étape finale du processus et, plus particulièrement, celui qui concerne la régulation de croissance des plantes.

Un point important de l'activité d'expression génique est la possibilité ou l'incapacité pour un groupe de cellules de réaliser la synthèse d'un nombre limité de types moléculaires, qui sont les régulateurs de croissance, ou hormones de croissance. Ces corps ont la double propriété de déclencher les processus de multiplication ou d'allongement cellulaires et de se déplacer d'un organe vers un autre. Il en existe toute une série, qu'on peut regrouper autour des *auxines,* des *gibbérellines* et des *cytokinines*.

C'est en analysant le processus de courbure d'une jeune tige vers la lumière que l'on a découvert l'existence d'une substance diffusible, capable d'induire l'allongement des cellules. On l'a nommée **auxine,** mais on s'est rapidement rendu compte que ce terme recouvrait plusieurs corps, de composition moléculaire sensiblement différente. Parmi eux, le plus important est l'*acide indole acétique (AIA),* dont la structure est voisine de celle d'un acide aminé, le tryptophane, lequel semble bien en être le précurseur. La synthèse de l'AIA par décarboxylation et désamination du tryptophane s'opère dans les très jeunes tissus et nécessite la présence de zinc. Une carence en zinc provoque un nanisme par absence de l'auxine. Une enzyme, l'*acide indole acétique oxydase,*

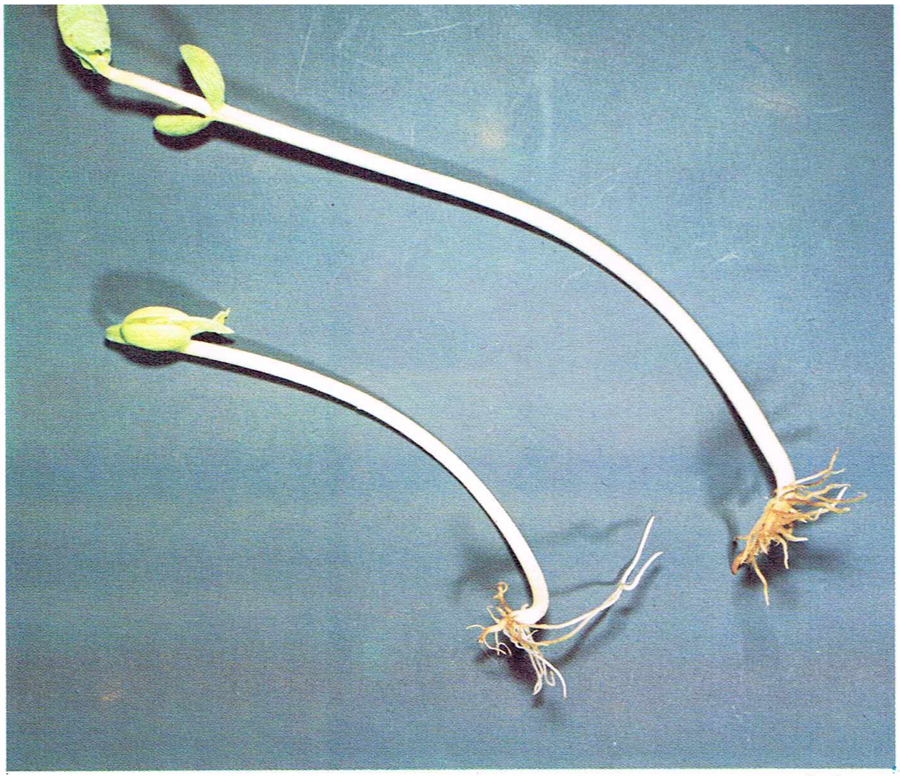

P. Castano

▲ *L'action des* **gibbérellines** *induit le grandissement des cellules et des organes végétaux. Sur cette illustration, deux plantules de haricot montrant, pour une même période, les résultats obtenus, sur la plus grande, après traitement à la gibbérelline.*

▼ *L'apparition des toutes premières ébauches de* pièces *florales* est un phénomène *à la fois de* différenciation *et de* levée de dormance ; *on sait également que toutes les espèces ne fleurissent pas aux mêmes périodes. À gauche, fleurs de pêcher* (**Prunus persica**) ; *à droite, fleurs de griottier* (**Prunus cerasus**).

C. Bevilacqua

régularise la teneur en auxine dans les tissus. De la même famille de corps et ayant une action similaire, on peut citer l'*aldéhyde indole acétique* et l'*indole acétonitrile*. L'*acide naphtalène acétique (NAA)* et l'*acide dichlorophénoxyacétique*, plus connu sous le nom de *2,4-D*, sont des substances de synthèse dont l'action est comparable à celle des auxines. Cette action va plus loin puisqu'elles sont employées comme herbicides sélectifs.

Les **gibbérellines** forment un autre groupe d'hormones induisant le grandissement des cellules et des organes végétaux. Leur découverte et leur nom proviennent d'observations relatives à la croissance anormale de plants de riz parasités par un Champignon, *Gibberella fujikuroi*. On sait maintenant que les gibbérellines existent normalement dans toutes les plantes. Ce sont toutes des acides organiques possédant trois hétérocycles avec des substitutions nombreuses ; on en connaît plus de dix formes différentes. L'action de ces substances ne se limite pas à la croissance ; elles sont à l'origine des levées de dormance et peuvent remplacer divers facteurs thermiques ou lumineux favorables à la floraison.

Les **kinétines, phytokinines** ou **cytokinines** sont des régulateurs de la division cellulaire. Ces substances sont fréquentes dans les tissus de réserve qui entourent l'embryon des graines. Leur structure est celle d'une purine. Nombre d'entre elles sont actuellement synthétisées en laboratoire.

A la liste des hormones végétales qui contrôlent le développement, il faut ajouter l'**acide abscissique** dont il a déjà été fait état. Plusieurs autres régulateurs pourraient être cités, car la multiplicité des réactions de type hormonal ou la possibilité de provoquer telle ou telle morphogenèse (racines, fleurs) par l'application d'un corps exogène ont poussé certains chercheurs à postuler l'existence de nombreuses autres hormones. Mais il n'a pas été possible dans tous les cas d'isoler et de caractériser avec certitude des corps chimiques précis.

La mise à fleur et la floraison

La naissance d'une fleur

L'apparition des toutes premières ébauches de pièces florales est un phénomène à la fois de différenciation et de levée de dormance, le tout se réalisant à l'extrême pointe de la tige ou de ses ramifications, dans un massif cellulaire très petit, l'*apex*, situé au cœur du bourgeon.

— *Phénomène de différenciation* car, tout au long du développement végétatif, l'apex forme régulièrement et à un rythme bien constant des feuilles à structure et à propriétés caractéristiques. Puis cette morphogenèse cesse brusquement, laissant la place à l'édification, à un rythme nouveau, d'une autre série d'organes : les sépales, les pétales, les étamines et les carpelles, qui ne ressemblent pas à première vue aux feuilles, même si une observation plus poussée nous démontre que ces pièces florales sont construites sur un plan anatomique peu différent des pièces foliaires.

— *Phénomène de levée de dormance,* car la naissance de la fleur a lieu en un site de l'apex qui, jusque-là, restait improductif. Les ébauches foliaires sont formées non à l'extrême pointe de l'apex, mais un peu en dessous de la calotte ou du plateau apical. Quand cet anneau subterminal cesse de fonctionner, c'est l'extrémité de l'apex qui se transforme et donne les ébauches florales. On peut remarquer que cette levée de dormance d'un territoire apical inhibe le fonctionnement du territoire immédiatement voisin et qu'il ne se forme plus de feuilles.

L'apex ainsi transformé en bouton floral ne va pas immédiatement s'épanouir en fleur. Comme le bourgeon végétatif, il peut entrer en dormance secondaire. Dans un arbre fruitier, on reconnaît fort bien les bourgeons à fleur des bourgeons à bois.

L'aptitude à fleurir

L'expérience courante nous montre que, dans le cas très général, la floraison d'une plante n'intervient pas dès les premiers temps de sa vie. Une plante ne devient apte à fleurir qu'après une durée de vie végétative, plus ou moins longue suivant les espèces. On sait également que toutes les espèces ne fleurissent pas aux mêmes périodes de l'année. Il y a dans la nature un étalement de la floraison, et, à moins d'utiliser des moyens puissants de climatisation, on n'arrivera pas à faire fleurir une plante hors de sa saison caractéristique. Tout cela montre que la transformation de l'apex est sous la dépendance de facteurs internes, liés à l'âge, et de facteurs externes, qui sont des paramètres du climat (température et lumière).

Le froid hivernal joue un rôle dans l'acquisition par certaines plantes de l'aptitude à fleurir. Ainsi, les céréales de printemps, semées au début de la belle saison, donneront une floraison normale et donc une fructification satisfaisante, alors que les céréales d'hiver, semées à la même époque, fleuriront beaucoup plus tardivement et plus mal ; ces dernières se comporteront de façon tout autre si elles sont semées avant les premiers grands froids, dès l'automne. Elles présenteront alors un début de germination avant que le froid hivernal s'installe, puis entreront en dormance ; dès les premiers beaux jours, elles reprendront leur croissance et fleuriront en abondance à une époque normale. Dans le premier cas, l'exigence du froid pour fleurir est nulle ; dans le second cas, elle est relative, puisque le froid ne fait qu'améliorer l'aptitude à la floraison.

Certaines plantes ont un besoin absolu du froid pour fleurir. C'est le cas de beaucoup de plantes bisannuelles qui, semées au printemps, forment des feuilles en quantité, les perdent ou les conservent à l'automne sans jamais avoir fleuri. Elles ne meurent pas, leurs racines pérennantes étant alors gorgées de réserves (tel est le cas de la

C. Bevilacqua

betterave à sucre, de la carotte...). Elles passent ainsi l'hiver et ce n'est qu'après la période froide qu'elles peuvent fleurir.

Ce traitement par le froid, qui est soit naturel, soit produit par une conservation en salle froide, est appelé *vernalisation*. Entre les plantes à vernalisation obligatoire, à vernalisation facultative ou à vernalisation inutile il n'existe aucun lien systématique évident. Dans une même espèce, des variétés voisines peuvent se trouver dans l'une ou l'autre de ces catégories. De plus, toutes les plantes exigeantes n'ont pas les mêmes besoins en ce qui concerne le niveau de la température ou sa durée d'application. Certaines sont plus sensibles que d'autres au rythme thermique journalier.

On constate donc tout un éventail de possibilités, que le sélectionneur comme le producteur doivent connaître. Ainsi, il existe pour certaines plantes à bulbe un calendrier très précis des températures exigées pendant la période froide. Cela montre qu'on peut accélérer ou contrôler le processus de mise à fleur, lorsque telle plante est exigeante vis-à-vis du froid. On peut parfois remplacer la température basse par des traitements hormonaux, mais cela ne modifie pas le caractère exigeant de certaines plantes quant à leur aptitude à fleurir.

L'aptitude à fleurir est sous la dépendance d'un autre facteur saisonnier du climat : la *longueur du jour (héméropériode)* ou, ce qui n'est pas tout à fait la même chose, la *longueur de la nuit (nyctipériode)*. Comme pour le froid, on distingue les plantes exigeantes, préférentes et indifférentes. L'exigence ou la préférence permettent de déterminer une longueur du jour ou de la nuit en deçà ou au-delà de laquelle la plante ne fleurit pas. Cette durée minimale ou maximale pour réaliser un processus, ici la floraison, est appelée *période critique*. Les plantes de jours longs ne fleurissent que si l'héméropériode est supérieure à une durée de jour critique (12 h). Les plantes de jours courts au contraire ne fleurissent que si elles se trouvent dans des conditions de rythme journalier inférieur à l'héméropériode critique. Enfin, les plantes *amphipériodiques* ne fleurissent que si l'héméropériode est comprise entre deux limites critiques.

Les régulateurs de floraison

Les sites préférentiels de perception des stimuli, qu'ils soient thermiques ou photopériodiques, sont les feuilles. Cela laisse à penser que l'induction apicale peut être sous le contrôle d'un facteur hormonal provenant des feuilles. Cette hypothèse se trouve renforcée par les *expériences de greffe*. Un porte-greffe ayant subi l'influence inductrice de floraison provoquera la floraison du greffon, même si celui-ci ne l'a pas subie. Cependant, les tentatives d'isolement et de purification d'une substance spécifiquement florigène n'ont pas été convaincantes. On peut penser que le stimulus perçu par les feuilles provoque de profondes modifications du métabolisme foliaire. Le flux nutritif qui alimente l'apex est alors transformé qualitativement et quantitativement. Il ne s'agit pas seulement des aliments énergétiques ; le flux nourricier qui part des feuilles peut se charger d'éléments catalytiques produits sous le contrôle de photorécepteurs. Le phytochrome dont on a parlé au sujet de la levée de dormance des graines et des bourgeons joue également un rôle régulateur sur la floraison.

Toutes les substances de croissance déjà citées jouent un rôle tantôt de simple activateur, tantôt de remplacement d'une induction thermique ou photopériodique, parfois enfin comme inhibiteur de floraison. On peut donc penser que la régulation de la floraison, qui prend sa source essentiellement au niveau du métabolisme foliaire pour s'exprimer dans l'apex des tiges, peut être la conjugaison d'effets trophiques et catalytiques d'une sève profondément modifiée par les paramètres thermiques et lumineux du milieu de croissance. Que certaines plantes soient insensibles à ces modifications signifie seulement que les variations moléculaires observées ne sont pas pour elles un facteur limitant pour la réalisation de la fonction florale.

L'initiation florale est un moment important dans l'histoire métabolique d'une plante. Non seulement le contenu moléculaire de l'apex se transforme, mais toute la plante est concernée : les réserves s'épuisent, la respiration cellulaire s'intensifie, la transpiration augmente, la photosynthèse faiblit. Cette secousse générale coïncide avec

E.P.S.

▲ **L'aptitude à fleurir** *est également sous la dépendance de la* **longueur du jour et de la nuit** ; *ainsi les chrysanthèmes (ici des chrysanthèmes de Corée et du Japon) sont des plantes à jours courts et fleurissent de préférence en automne et au début de l'hiver.*

▼ *Exemple de greffes en fente sur un arbre étêté ; un porte-greffe ayant subi l'influence inductrice de floraison provoquera la floraison du greffon, même si celui-ci ne l'a pas subie.*

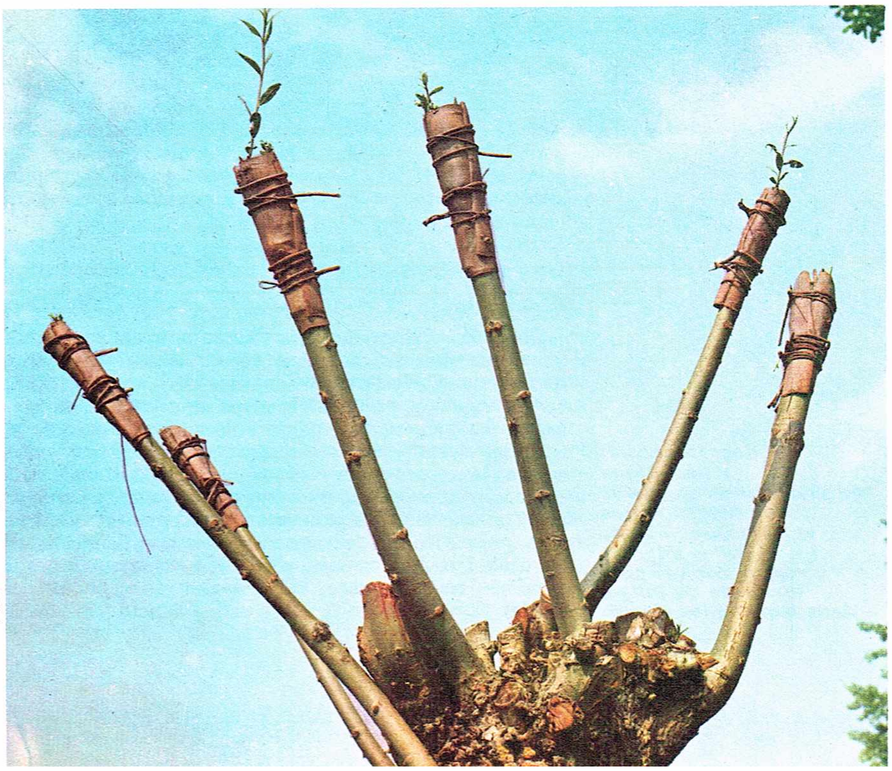

Archives Longo

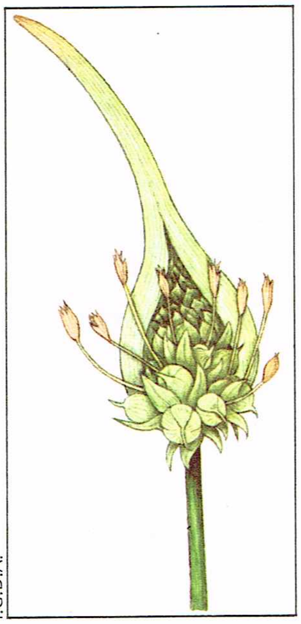

I.G.D.A.

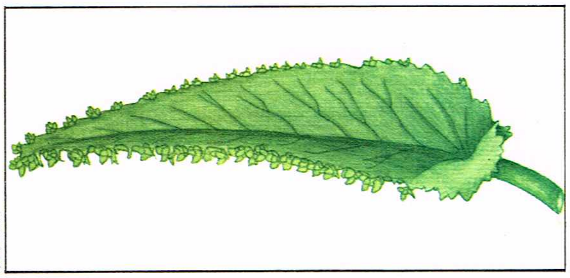

I.G.D.A.

▲ *Deux types de* **reproduction végétative;** *ci-dessus, production, chez l'ail, de* **bulbilles** *aptes à produire une nouvelle plante; à droite, feuille de* **Bryophyllum sp.** *portant des* **bourgeons adventifs** *sur son bord.*

la mort de la plante lorsqu'elle est annuelle ou bisannuelle : elle ne fleurit qu'une fois. Seules les plantes vivaces résistent à cette crise : elles reconstituent leurs réserves après la maturation et la chute des graines et des fruits. Mais chacun sait qu'il n'est pas bon de tailler ou de transplanter des plantes quand elles fleurissent, car elles sont alors particulièrement fragiles.

Reproductions sexuées et végétatives

Une étape importante de la morphogenèse florale se réalise lorsque, dans les anthères ou dans le sac embryonnaire des ovules, certaines cellules particulières se divisent avec réduction par moitié de leur stock chromosomique. Les cellules filles qui proviennent de cette sorte de division vont ensuite se multiplier pour donner des ensembles limités de cellules contenant ou portant celles qui ont un rôle spécifiquement reproducteur. Ces dernières, par fusion croisée, reconstitueront le stock chromosomique, toujours pair, des cellules d'une nouvelle plante. Ce processus connaît des modalités sensiblement différentes dans les végétaux qui ne possèdent pas de fleurs (Algues, Mousses, Champignons...), mais le principe reste le même : en un site donné et à un moment donné, il y a division par deux du nombre chromosomique et ensuite, parfois immédiatement après, parfois après une longue période, se produit la fusion des deux demi-stocks. Dans tous les cas, il est possible de définir une dualité ou une différence entre les lignées cellulaires porteuses des demi-stocks chromosomiques. C'est cette dualité qui constitue la sexualisation.

Les plantes qui proviennent de telles fusions, par l'intermédiaire des graines et de leur germination, constituent des individus originaux dont les caractères sont le résultat des recombinaisons chromosomiques, dont la génétique nous enseigne les lois.

Il n'en est pas de même lorsqu'un individu provient du développement d'une partie non sexuée, dite végétative, d'une plante mère. Un filament d'Algue qui se fragmente redonnera des individus identiques au filament initial. Un rameau, une racine ou une feuille peuvent être fragmentés en un grand nombre de boutures qui, si elles possèdent la possibilité de reformer les organes manquants, redonneront autant d'individus parfaitement identiques à la plante mère, la variété étant alors conservée. Si des différences apparaissent dans cette sorte de descendance, elles sont dues à des variations de l'environnement qui peut modifier l'aspect *(phénotype)* mais ne touche pas au patrimoine héréditaire *(génotype)*. Ces modes de reproduction végétative, qui sont extrêmement fréquents dans la nature et faciles à réaliser, sont commodes pour la conservation des *clones*. On les réalise dans la pratique courante par toutes les sortes de bouturages, de marcottages ou de greffes.

Les mouvements des végétaux

Mouvements et déplacements chez les végétaux

Chez les végétaux comme chez tous les êtres vivants, il est possible de décrire des mouvements, voire des déplacements, de l'individu complet. A l'intérieur d'une cellule végétale, le cytoplasme est en perpétuel mouvement, les membranes qui le sillonnent se déforment, les organites s'éloignent et se rapprochent les uns des autres, la masse protoplasmique s'écoule tout autour de la cellule en un courant régulier, et cette circulation entraîne tous les organites en un mouvement de *cyclose*. L'image que l'on se fait des structures intracellulaires est le résultat d'une fixation; c'est un instantané figé, qui ne doit pas faire oublier le continuel remaniement des formes.

A l'échelle des organismes entiers, on doit distinguer les *mouvements* des *déplacements*. Dans les deux cas, la position par rapport à un point fixe change continuellement; mais dans le premier cas le point fixe est situé dans l'organisme, alors que dans le deuxième cas le point fixe est hors de l'organisme. Ainsi, le sommet d'une tige peut être en mouvement par modification de sa position par rapport à un point fixe situé sur son axe; une Algue unicellulaire se déplacera dans l'eau en s'éloignant ou en se rapprochant d'un point fixe arbitrairement choisi mais toujours hors de cet organisme. Dans ce dernier cas, il s'agit d'un comportement parfaitement comparable à celui d'un petit animal cilié unicellulaire.

Si l'on observe une goutte d'eau puisée dans une mare renfermant des Protozoaires et des Algues unicellulaires, on constate que tous ces organismes se déplacent, et cela avec des vitesses très variables. Le déplacement des Algues serait plutôt lent en comparaison du déplacement « nerveux » des Protozoaires Ciliés; mais les premières possèdent, comme les seconds, des flagelles ou des cils qui, par un mouvement ondulant ou vibratoire, assurent le déplacement. La forme des cils ou des flagelles ainsi que leur longueur et leur nombre sont différents suivant les espèces. Certaines Algues, comme les Diatomées, se déplacent sans l'aide de ces organes moteurs; leur lent déplacement est dû simplement au mouvement interne du cytoplasme qui crée en certains points de leur surface des frottements avec l'eau externe. Les masses plurinucléées des Champignons inférieurs se déplacent grâce à l'émission fugace de prolongements cytoplasmiques, ou *pseudopodes,* lesquels adhèrent au substrat et entraînent le reste de la masse.

Tous ces déplacements s'effectuent de façon apparemment désordonnée dans un milieu isotrope. Mais si, naturellement ou expérimentalement, il se crée dans le milieu une dissymétrie d'un paramètre physique ou chimique, on constate que les micro-organismes végétaux doués de mouvements se déplacent en suivant une direction déterminée par la source de dissymétrie. Ce phénomène de déplacement orienté est appelé *tactisme*. Les divers tactismes correspondent à la nature de la source inductrice : le *phototactisme* pour les Algues pourvues d'un pigment photorécepteur (caroténoïde localisé dans une inclusion, le *stigma*), le *thermotactisme* ou le *chimiotactisme* si important dans les phénomènes de fécondation. L'existence d'un tactisme implique qu'il y a une orientation du déplacement mais ne dit rien sur son sens. Si le déplacement se fait vers la source lumineuse, thermique ou chimique, le tactisme est dit positif; dans le cas contraire, il est négatif.

Mouvements liés à la croissance

La simple croissance d'un organe est un mouvement; tout point de l'organe change de position en référence à la base. Mais chez les plantes, en aucun cas, ce changement de position n'est rectiligne. Il suffit d'observer la croissance de l'extrémité de la tige, qui semble monter bien droit au-dessus du sol. Si l'on réalise des photographies successives ou une projection accélérée de prises de vues ralenties, on constate que la pointe de la tige s'élève en décrivant un mouvement de spirale autour d'un axe imaginaire qui prolonge l'orientation verticale de la base. Le sens et le pas de cette spirale ainsi que sa

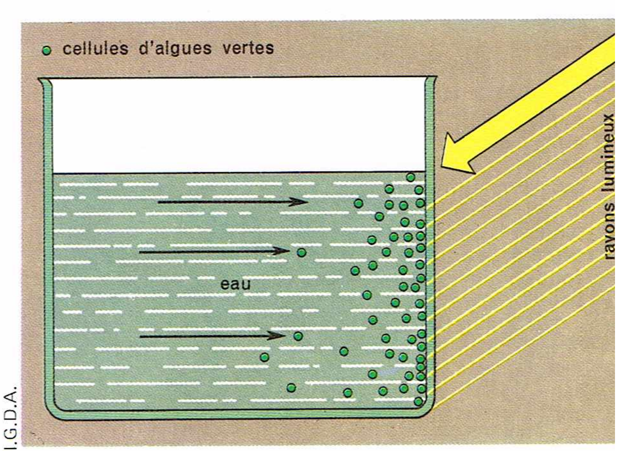

I.G.D.A.

▶ *Représentation schématique du* **phototactisme positif** *des Algues vertes unicellulaires libres; elles migrent vers la zone la plus illuminée du milieu dans lequel elles vivent.*

R. Bourdu

◀▼ ***Les aiguilles de pin, ci-contre, et les rameaux, ci-dessous, présentent le phénomène de géotropisme négatif, alors que la racine de l'arbre présente un géotropisme positif ; ces deux réponses liées aux corrélations entre organes sont des éléments importants qui déterminent le port de la plante.***

distance à l'axe sont des caractères spécifiques mais pouvant varier, soit en fonction de l'âge, soit en fonction de facteurs externes (la température par exemple). Ce mouvement de l'extrémité des tiges en croissance est le phénomène de *nutation*. Quand la distance à l'axe est très grande et que la croissance est rapide, l'extrémité de la tige peut atteindre un obstacle et s'y enrouler ; c'est le cas des plantes volubiles.

La nutation se produit en milieu isotrope. Mais il faut beaucoup de précautions pour réaliser un tel milieu ; dans la nature, dans une pièce ou dans une serre, les conditions ne sont jamais isotropes, ne serait-ce que par l'effet de la pesanteur qu'on ne peut éliminer facilement. L'orientation variable de la lumière, le contact avec des obstacles, un gradient thermique ou d'humidité sont les conditions normales dans lesquelles les plantes poussent. Ce sont toutes des causes de mouvements particuliers des organes en croissance ; elles déterminent des *tropismes*.

Le *géotropisme* est très général, étant donné les difficultés rencontrées pour réaliser l'apesanteur. Lors de la germination d'une graine, quelle que soit la position de celle-ci, la tigelle s'élèvera au-dessus du substrat, alors que la radicule s'y enfoncera, verticalement si elle le peut. La tige présente donc un *géotropisme négatif*, la racine un *géotropisme positif*. On peut démontrer que c'est bien la pesanteur qui provoque ces orientations de croissance, en plaçant les organes sur une roue horizontale qui tourne à une vitesse telle que la force centrifuge vient en composante des forces appliquées à l'organe. La croissance se fera alors suivant la direction de la résultante entre la force centrifuge et la pesanteur. Une autre expérience, qui consiste à placer une tige ou une racine ou une plante entière horizontalement et à lui imposer une rotation lente et régulière autour de son axe, permet d'obtenir une croissance prolongée à l'horizontale. Cela s'explique parce que, bien que l'organe tende à s'orienter en fonction de la pesanteur, son temps de réponse est tel que le géotropisme ne peut se manifester avant que cette même force s'applique suivant une autre direction : chaque portion de l'organe, par suite de la rotation, présente à tout moment une position différente en regard de l'orientation de la force de pesanteur. Un organe peut ne pas manifester de géotropisme (c'est le cas des arbres pleureurs) ou s'orienter de façon oblique par rapport à la verticale *(diagéotropisme)* ou, encore, inverser son sens de croissance au cours de sa vie (géotropisme négatif puis positif de nombreux pédoncules floraux). Les réponses géotropiques liées aux corrélations entre organes sont des éléments importants qui déterminent le port d'une plante.

Le *phototropisme* est un phénomène également très répandu. Dans une pièce éclairée d'un seul côté par une fenêtre, les plantes auront tendance à se courber en direction de la lumière. Pour éviter cette croissance inesthétique, on conseille de tourner fréquemment le pot qui contient la plante. On réalise alors très exactement l'expérience décrite pour le géotropisme, où on annulait l'effet de la pesanteur en faisant tourner, à l'horizontale, une plante autour de son axe. La plupart des organes aériens ont un phototropisme positif, mais il arrive qu'on observe des inversions ; c'est le cas de ces petites scrofulaires qui vivent enracinées dans les interstices des vieux murs. Leurs fleurs, qui ont la forme de « gueules de loup », s'orientent vers la lumière, mais le pédoncule présente dès la fécondation un phototropisme négatif qui a pour effet de le faire croître vers les fentes du mur, à l'obscurité, et ainsi d'y déposer les graines.

De nombreuses plantes s'orientent ou orientent certains de leurs organes (inflorescences) vers la source lumineuse la plus évidente, le soleil. C'est de l'*héliotropisme* (cas des tournesols, héliotropes, etc.).

R. Bourdu

C'est par l'étude du phototropisme que l'on a mis en évidence et analysé le rôle des auxines. La courbure vers la lumière est due à un allongement préférentiel des cellules qui sont dans l'ombre. Sur des extrémités de coléoptiles d'avoine, on a montré que la teneur en auxine était différente entre les deux moitiés séparées par un plan vertical perpendiculaire à la direction des rayons lumineux. Les auxines sont photosensibles, et la partie protégée de la lumière conserve un taux auxinique tel qu'il assure l'allongement cellulaire dans cette moitié, d'où la courbure. Toutes les courbures dues à des tropismes s'expliquent de la même façon, ce qui conduit à se demander pourquoi il existe des tropismes positifs et des tropismes négatifs. La raison en est que l'effet auxinique sur l'allongement n'a lieu que dans des limites étroites de concentration ; au-delà de ces limites, l'auxine inhibe l'allongement. Or la dose critique est variable suivant les tissus et les organes.

Les autres tropismes, dus au contact *(haptotropisme)* ou au gradient hydrique *(hydrotropisme)*, affectent

▶ *Le moindre frôlement de ce petit mimosa appelé « sensitive »* (Mimosa pudica) *provoque l'abaissement de toutes ses folioles (à gauche) qui se redressent ensuite lentement (à droite); ces mouvements sont appelés des* nasties.

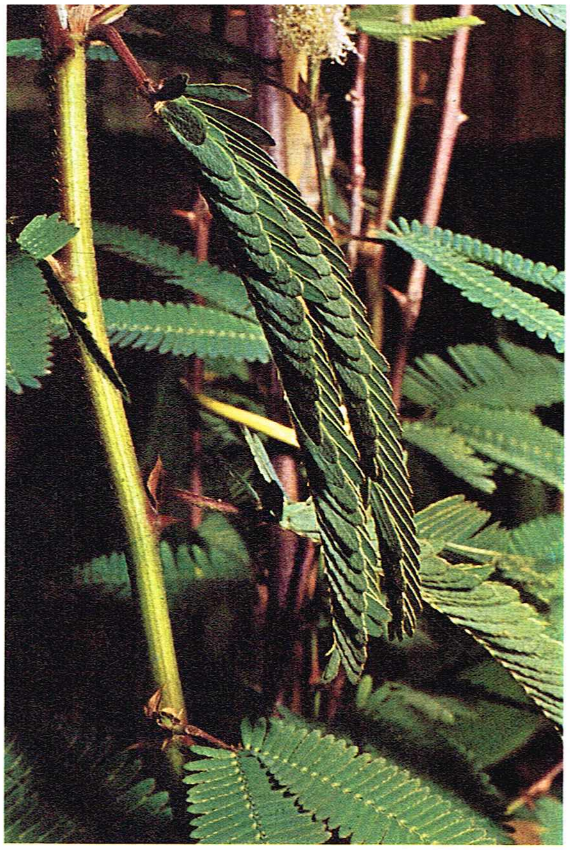

Archives Longo

Archives Longo

surtout les racines. C'est aussi par haptotropisme que les tiges volubiles entourent le tuteur naturel ou artificiel placé à leur portée.

Les mouvements indépendants de la croissance

Un champ de trèfle semble fané le soir, mais les feuilles se redressent le lendemain. Les fleurs d'un bouquet se ferment aussi le soir pour s'épanouir le matin suivant. Le moindre frôlement de ce petit mimosa appelé « sensitive » *(Mimosa pudica)* provoque l'abaissement pudique de toutes ses folioles, qui se redresseront lentement. Tous ces mouvements affectent des organes adultes et sont parfaitement réversibles : ainsi la feuille de sensitive reprend lentement son port érigé. Ces mouvements sont appelés des *nasties*.

On est parfois frappé par la finalité apparente de certaines nasties. C'est le cas du mouvement très spectaculaire des filets des étamines. Si on touche la base des étamines de l'épine-vinette avec une aiguille très fine, celles-ci se courbent et l'ouverture de leurs anthères vient s'appliquer sur le stigmate du pistil en y déposant, sans erreur ni perte, une grande quantité de grains de pollen. Une pollinisation efficace est également obtenue par la nastie des étamines du bleuet. Dans ce cas, ces étamines forment un véritable manchon autour du style et du stigmate. Lorsqu'on touche la base des filets, ceux-ci se courbent, provoquant le déplacement des anthères contre le stigmate, qui joue le rôle de goupillon se chargeant de pollen au passage. Un autre cas de nastie est le mouvement des feuilles carnivores qui se referment sur leurs proies; une fois celles-ci digérées, la feuille s'ouvre à nouveau.

On pourrait multiplier les exemples. Dans tous les cas, le moteur de ces mouvements est un changement de teneur en eau de tissus spécialisés et très localisés, lesquels, entrant en plasmolyse, entraînent l'affaissement de l'organe; son redressement est assuré par un retour à la turgescence des mêmes tissus. Les causes profondes de ces variations de teneur en eau sont, dans bien des cas, mal connues.

▼ *De nombreuses plantes s'orientent ou orientent leurs inflorescences vers le soleil; c'est l'*héliotropisme, *qui caractérise notamment les fleurs de tournesol.*

P. Poggio

Conclusion

Comprendre la vie des plantes est le plus sûr moyen de les soigner, de les améliorer et de les conserver par respect de la nature mais aussi pour le profit des hommes. L'écologie, l'agriculture, la phytopathologie sont des sciences qui ne peuvent se développer sans faire appel aux connaissances fondamentales de la physiologie végétale. Pourtant, au-delà de ce rôle utilitaire indispensable, il est important de souligner que la connaissance de la vie végétale, comme toute connaissance, fait partie du besoin commun à tous les hommes de comprendre le monde qui les entoure. En connaissant mieux la nature, ils peuvent mieux l'aimer, la servir, l'utiliser ou s'en défendre, mais avec une plus grande rigueur et sans dommage, pour le profit de tous.

BIBLIOGRAPHIE

BINET P. et BRUNEL J.-P., *Physiologie végétale,* Doin, Paris, 1968. - GIESE A. C., *Cell Physiology,* W. B. Saunders Company, London, 1969. - HALL J. L., FLOWERS T. J. et ROBERTS R. M., *Plant Cell Structure and Metabolism,* Longman, London, 1974. - HALLAIRE M., PERRIN de BRICHAMBAUT Ch. et GOILLOT Ch., *Techniques d'étude des facteurs physiques de la biosphère* (ouvrage collectif), I.N.R.A., Paris, 1970. - HELLER R., *Biologie végétale,* Masson, 1969. - MAZLIAK P., *Physiologie végétale, Nutrition et Métabolisme,* Hermann, Paris, 1974. - SALISBURY F. B. et ROSS C., *Plant Physiology,* Wadsworth Publishing Company, Belmont, California, 1969.

ÉLÉMENTS D'EMBRYOLOGIE ANIMALE

L'objet de l'embryologie est l'étude des processus à partir desquels un œuf, cellule diploïde, se transforme en un *individu libre* plus ou moins complexe dans son organisation. Le terme *embryon* désigne des stades juvéniles des animaux, encore contenus dans les membranes de l'œuf ou à l'intérieur du corps maternel. Il est évident cependant qu'à l'éclosion ou à la naissance, le développement n'est pas achevé; des transformations radicales peuvent encore s'opérer (par exemple, la métamorphose de la chenille en papillon, du têtard en grenouille). En outre, à sa naissance, le jeune n'est jamais apte à se reproduire. Il ne deviendra adulte que lorsque ses organes sexuels se seront différenciés et seront devenus fonctionnels.

L'embryogenèse d'un individu correspond au déroulement continu de changements amenant des structures de plus en plus complexes à se différencier. On peut cependant distinguer des étapes dans la vie embryonnaire.

La première phase du développement consiste dans le passage de l'état unicellulaire à l'état pluricellulaire, qui est celui de la plupart des animaux *(Métazoaires)*. A ce stade, aucun accroissement en volume du germe n'est décelable. La masse globale de l'œuf se cellularise par le jeu de mitoses répétées. C'est la phase de **segmentation**. Le germe pluricellulaire ainsi obtenu est encore une ébauche qui n'évoque en rien le futur organisme.

Il existe, entre un oursin, un ver de terre et une souris, trois types d'animaux très éloignés d'un point de vue systématique, des caractères communs. Ils sont formés de trois structures emboîtées : un tube digestif séparé de la paroi du corps par une cavité *(cavité générale,* ou *cœlome)* ayant une paroi propre. Cette cavité générale peut être unique (oursin) ou subdivisée en plusieurs compartiments (ver de terre, souris). C'est au cours de la phase de **gastrulation** que le germe acquiert cette organisation. Il devient une *gastrula,* formée des trois feuillets fondamentaux :

— l'*ectoderme,* ou *ectoblaste ;*
— le *mésoderme,* ou *mésoblaste ;*
— l'*endoderme,* ou *entoblaste.*

Le feuillet externe (ectoderme) est destiné à donner l'épithélium de revêtement et le système nerveux; le feuillet moyen (mésoderme) donnera les tissus de soutien et les éléments du système circulatoire; quant au feuillet interne (endoderme), il est à l'origine de l'épithélium du tube digestif, de ses glandes annexes et de l'appareil respiratoire.

Après la gastrulation, les organes s'ébauchent (phase d'**organogenèse**). Le développement se spécialise suivant les groupes zoologiques; cependant, des traits communs vont subsister longtemps encore chez les embryons des animaux des mêmes grands embranchements. De ce fait, l'embryologie descriptive, tout autant que l'anatomie comparée et la paléontologie, confirme les théories de l'évolution.

Avant que l'embryogenèse soit comprise comme une construction progressive *(épigenèse)* allant d'une cellule à un être dont les diverses parties sont différenciées en organes, les auteurs anciens supposaient que les éléments constitutifs de l'être ne se façonnaient pas progressivement mais étaient présents dans l'œuf (concept de *préformation*). L'embryogenèse, dans cette optique, se réduisait à un simple phénomène de croissance. Une conséquence de cette théorie était le concept d'*emboîtement des germes :* par exemple, puisqu'il y avait dans l'œuf humain un petit homme ou une petite femme, il fallait que dans les futurs spermatozoïdes ou ovules il y eût également un petit homme ou une petite femme. Malgré les observations d'un pionnier (Wolff) sur l'embryon de poulet, la théorie de la préformation a dominé la pensée des scientifiques jusqu'au début du XIX[e] siècle. A ce moment, le principe d'épigenèse énoncé par Wolff voit le nombre de ses partisans s'accroître sans que ceux-ci soient toutefois capables d'en expliquer les mécanismes. Il fallait, pour aborder la compréhension des processus de l'embryogenèse, que naquît l'embryologie expérimentale, à la fin du XIX[e] siècle. Actuellement, la confrontation des résultats obtenus dans différents secteurs de la biologie : l'embryologie moléculaire, la biologie moléculaire et la génétique, permet de considérer l'œuf non comme une coquille contenant un jeune tout formé, mais comme une structure très organisée contenant dans son noyau et dans son cytoplasme les plans qui permettront l'édification progressive de l'embryon.

Les grandes étapes du développement

L'embryogenèse de l'Amphibien *Pleurodeles waltlii* fournit un bon exemple pour définir les grandes étapes du développement de l'embryon ; en effet, le pleurodèle, gros triton originaire d'Afrique du Nord et de la péninsule Ibérique, se reproduit facilement en captivité. Une parade nuptiale de quelques heures aboutit à l'émission par le mâle de un à six *spermatophores* (formations gélifiées contenant des spermatozoïdes), qu'il colle sur le fond de l'aquarium. Il amène la femelle à recueillir avec les lèvres de son cloaque un spermatophore. 12 à 24 heures plus tard, la femelle pond des chapelets d'une vingtaine d'œufs, chaque œuf recevant à son

L. Gallien - J. Desrosiers

◄ *Chez* **Pleurodeles waltlii,** *une parade nuptiale de quelques heures aboutit à l'émission par le mâle de un à six spermatophores, contenant les spermatozoïdes ; la femelle en recueille un dans son cloaque et pond, 12 à 24 heures après, des œufs qui sont fécondés à leur passage par les spermatozoïdes.*

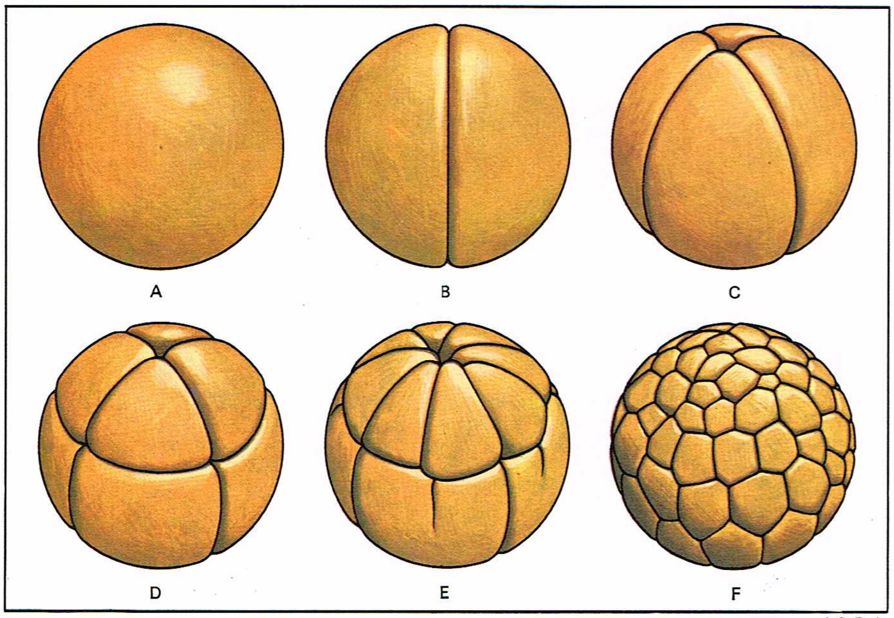

I.G.D.A.

▲ ***Représentation schématique*** **de la segmentation totale** ***d'un œuf de grenouille; les plans de clivage successifs (A à F) aboutissent, dix à quinze heures après la ponte, à la formation d'une*** **morula.**

passage dans le cloaque des spermatozoïdes. Ces œufs, enrobés dans une gangue muqueuse collante, sont de petites sphères de 1,8 mm de diamètre. Ils présentent une polarité marquée par la coloration brune d'un hémisphère et la dépigmentation de l'autre, qui est vert clair. Au centre de la calotte brune, on observe une petite tache claire, *la tache de maturation*. Elle correspond au *pôle animal* de l'œuf. Sous celle-ci, légèrement en profondeur, se trouve le matériel chromosomique de l'œuf. En 10 minutes, les spermatozoïdes traversent la gangue et parviennent à la surface de l'œuf. Un ou plusieurs d'entre eux piquent ce dernier. La piqûre détermine d'une part une *rotation d'orientation* des œufs, qui se disposent tous le pôle clair et lourd vers le bas, et d'autre part un *remaniement pigmentaire* aboutissant à la formation d'un *croissant* sous-équatorial *dépigmenté*. A ce stade, l'œuf présente donc une symétrie bilatérale et son plan de symétrie correspond à celui du futur organisme.

L'amphimixie, c'est-à-dire l'union des noyaux haploïdes mâle et femelle, s'effectue cinq heures après la ponte.

Segmentation

Six heures après la ponte, un premier plan de clivage méridien scinde l'œuf en débutant au niveau du pôle animal. Dans 50 % des cas, ce plan correspond au plan de symétrie du futur embryon et est perpendiculaire au croissant dépigmenté. Une heure et demie plus tard, un second plan de clivage méridien, perpendiculaire au premier, découpe le germe en 4 cellules, ou *blastomères*. Le troisième plan est latitudinal et sus-équatorial : 4 micromères et 4 macromères sont ainsi définis. L'inégalité de taille des blastomères résulte de l'hétérogénéité de l'œuf du point de vue de sa surcharge en plaquettes vitellines. Au cours des cycles mitotiques suivants, le rythme des divisions sera plus rapide dans la calotte animale du germe qui contient des petites plaquettes que dans l'hémisphère végétatif, surchargé en grosses inclusions vitellines. Les plans de clivage sont alternativement méridiens et latitudinaux. Dix à quinze heures après la ponte, le germe est formé de quelques dizaines de cellules arrondies dont la disposition évoque le fruit de la ronce : c'est la *morula*. Vingt-quatre heures après le début du développement, plusieurs milliers de cellules, de taille très inégale suivant que l'on considère un hémisphère ou l'autre, se sont formées : le germe est devenu une *blastula*. Dès le stade 8 blastomères, la *cavité de segmentation,* ou *blastocèle,* s'organise par écartement des micromères dans la zone axiale.

Au cours de la segmentation, le germe conserve son volume primitif et l'arrangement des diverses inclusions n'est pas modifié par le dépôt des nombreuses cloisons.

La gastrulation et la morphogenèse primaire

La gastrulation

Par suite *de mouvements actifs orientés et coordonnés,* les blastomères vont modifier leurs positions respectives. Ces mouvements, fondamentaux pour l'acquisition de la forme et de la structure de l'embryon, sont dits *morphogénétiques*.

Déroulement de la gastrulation

Trente et une heures après la ponte, alors que les divisions cellulaires se poursuivent à rythme ralenti, apparaît la première manifestation du phénomène de gastrulation. Il s'agit d'un court sillon en forme d'arc, situé au niveau de l'ex-croissant dépigmenté, et dont le plan de symétrie coïncide avec celui du germe; son rebord externe est la *lèvre dorsale du blastopore*. Dans les heures qui suivent, l'arc grandit, prend la forme d'une faucille puis d'un fer à cheval et, finalement, ses deux extrémités libres se rejoignent pour former la lèvre ventrale du blastopore. La masse des blastomères englobés par la fente blastoporale constitue le *bouchon vitellin*. Quarante-six heures après la ponte, le bouchon vitellin ainsi défini présente sa taille maximale et, progressivement, son diamètre diminue, par suite de son enfoncement à l'intérieur de la *gastrula*. Le blastopore, qui se referme à la manière d'un diaphragme, devient ponctuel puis se réduit à l'état de fente.

La blastula âgée est caractérisée par la présence d'un vaste blastocèle qui occupe la majeure partie de l'hémisphère animal. Au cours de la gastrulation, son importance diminue peu à peu et il fait place à une large cavité : l'*archentéron*. C'est un intestin primitif renflé à son extrémité antérieure aveugle et communiquant avec l'extérieur par un orifice postérieur, le *blastopore*. Il est délimité par un plancher ventral endodermique, épais,

▼ **Segmentation** ***de l'œuf de triton (vues du pôle animal); de gauche à droite : stade 2 blastomères; stade 8 blastomères;*** **morula.**

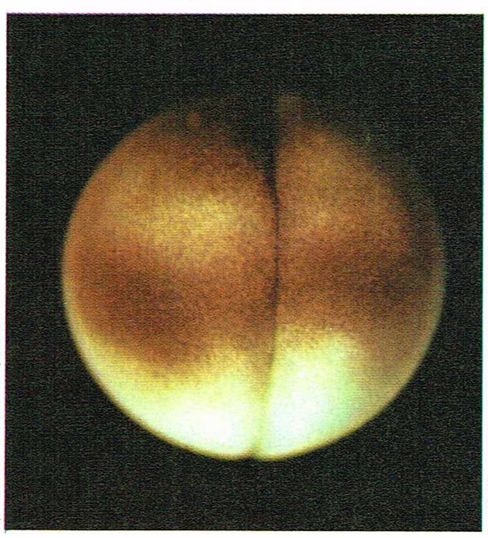

L. Gallien - J. Desrosiers

L. Gallien - J. Desrosiers

L. Gallien - J. Desrosiers

L. Gallien - J. Desrosiers

L. Gallien - J. Desrosiers

◀ **Gastrulation** *(vues de l'hémisphère végétatif) ; à gauche, stade de la* **lèvre blastoporale** *en forme de faucille ; à droite, stade du petit* **bouchon vitellin.**

et un toit mésodermique, mince. Le plancher et le toit se rejoignent et se superposent étroitement sur les côtés pour fermer le tube.

Analyse expérimentale des mouvements morphogénétiques

L'étude morphologique à différents stades est insuffisante pour comprendre les mouvements de la gastrulation. Il est nécessaire de procéder à une analyse expérimentale et de suivre les déformations et les déplacements de groupes cellulaires en les tatouant très précisément par des colorants vitaux. Vogt, en 1925-1929, a développé cette technique pour le triton (fig. 1).

Une blastula âgée est déposée dans une coupelle à fond garni de pâte à modeler et remplie d'eau. La pâte à modeler est creusée d'une logette de diamètre légèrement supérieur à celui de la blastula. Celle-ci est installée dans la logette. Dans l'espace compris entre le germe et la pâte à modeler, on dispose de petits fragments de gélose imprégnés de bleu de Nil ou de rouge neutre. Le contact entre la blastula et les fragments de gélose est maintenu un quart d'heure à une demi-heure afin que le colorant diffuse dans les cellules. Puis la blastula est remise en

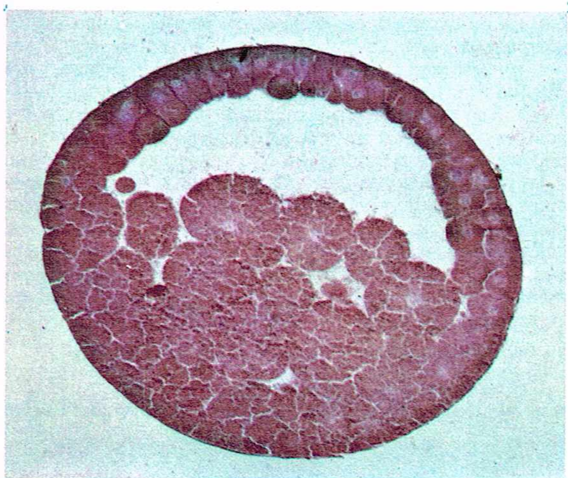

D. Huchon

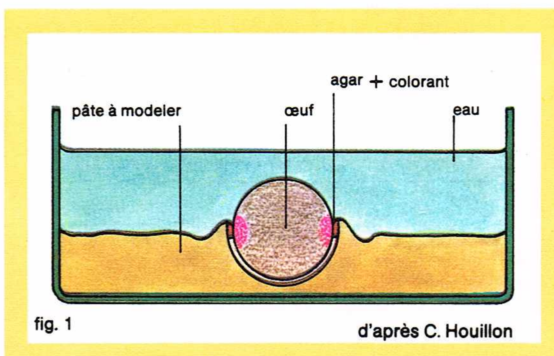

Richard Colin

◀ *A gauche, coupe méridienne de* **blastula** ; *le blastocèle est bien visible ; on observe les* **micromères** *de l'hémisphère animal et les* **macromères** *végétatifs. A droite, principe de la pose* **des marques colorées** *sur un œuf d'Amphibien.*

▼ *Coupe sagittale du* **germe** *pendant la* **gastrulation** ; *à gauche, stade de la lèvre blastoporale en forme de faucille ; à droite, stade du bouchon vitellin : 1, archentéron ; 2, blastocèle ; 3, bouchon vitellin ; 4, ectoderme ; 5, endoderme, 6, lèvre dorsale ; 7, lèvre ventrale du blastopore ; 8, mésoderme cordal.*

J. C. Boucaut

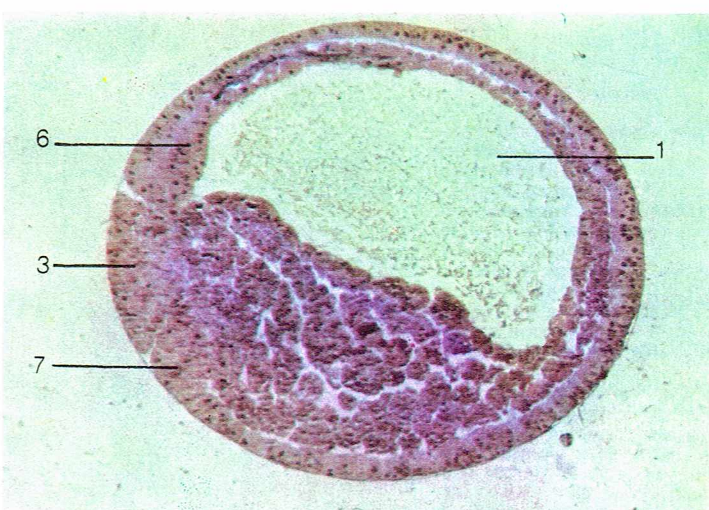

J. C. Boucaut

▶ *Carte des territoires présomptifs établie pour le triton au début de la gastrulation. A, vue de profil; B, vue du pôle végétatif marqué +; l.d., lèvre dorsale du blastopore; r.b., région branchiale; l.v., lèvre ventrale du blastopore; m.c., mésoderme caudal; c.d., corde dorsale; en, endoderme; ec, ectoderme; a.n., aire nerveuse (neuroblaste); pr, pronéphros; PA, pôle animal; PV, pôle végétatif; pl, plaque précordale; so, somites; l.i., limite d'invagination.*

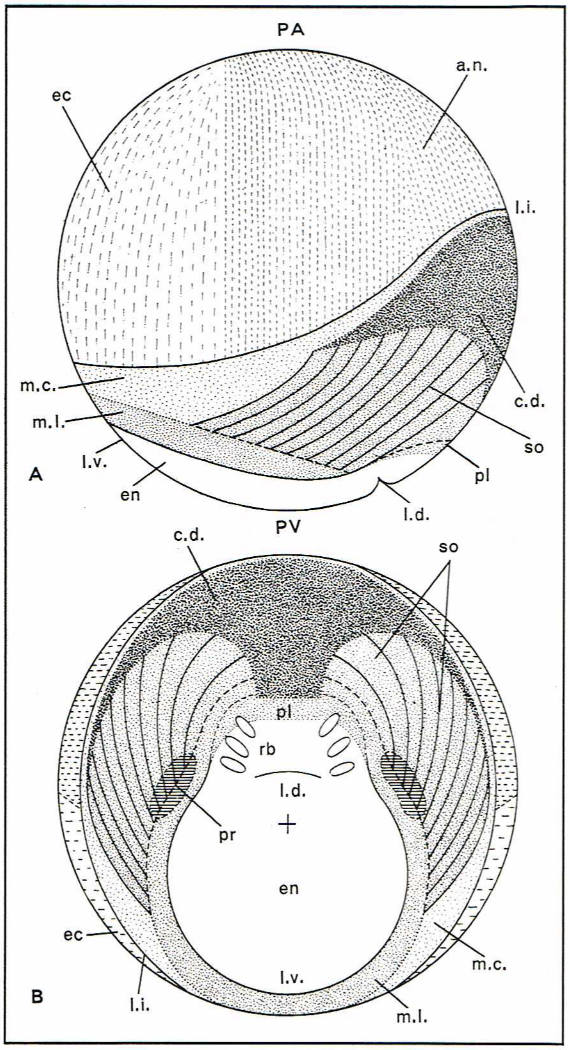

I.G.D.A.

élevage. Deux sortes de renseignements peuvent être recueillis par l'observation des taches plus ou moins longtemps après l'intervention :

— la déformation des tatouages matérialise la *direction* et le *sens* des déformations et des déplacements cellulaires;

— en disséquant les embryons deux ou trois jours plus tard, on peut repérer, dans les organes alors ébauchés, les emplacements occupés par des marques définies.

La seconde catégorie d'observations permet d'affirmer qu'un organe donné de l'embryon s'est édifié à partir d'un ensemble cellulaire précis de la blastula. Une cartographie des différents *territoires présomptifs* de la blastula a été établie pour le genre *Triturus,* en 1929, par Vogt. Le qualificatif « présomptif » indique que les filiations établies n'ont de valeur que dans le cas où rien ne vient troubler le développement embryonnaire; la blastula âgée ne doit pas être considérée comme un ensemble de groupes cellulaires dont le devenir est fixé d'une manière absolue. Trois régions, correspondant aux trois feuillets, peuvent être reconnues. La limite entre le territoire ectodermique présomptif et le territoire mésodermique présomptif est la *limite d'invagination.* La déformation et le déplacement des tatouages permettent de définir les mouvements élémentaires de la gastrulation : l'invagination, l'épibolie, la convergence, la divergence et l'élongation.

L'*invagination* concerne les territoires situés sous la limite d'invagination; elle se fait, d'une part, par enroulement des tissus malléables au niveau du rebord externe de la fente blastoporale (marques 7 à 4 dans le plan sagittal) et, d'autre part, par basculement des gros blastomères végétatifs (marques 8 à 11) [fig. 2]. Après leur entrée à l'intérieur du germe, les territoires endodermiques et mésodermiques *se séparent,* sauf en deux points (le pharynx et la zone du futur anus) : l'endoderme s'enfonce à la façon d'un bouchon, le mésoderme épouse étroitement l'intérieur de la sphère par un mouvement de *divergence,* le mésoderme cordal progressant vers l'avant dans le plan de symétrie, par un mouvement d'*élongation.* L'*épibolie* intéresse l'aire d'ectoderme présomptif; il s'agit d'un mouvement d'étalement (par multiplication cellulaire et aplatissement des cellules) qui réalise un enveloppement du mésoderme et de l'endoderme et contribue à leur passage en profondeur.

Le résultat final de cette étape capitale du développement est un embryon sphérique constitué par trois feuillets réalisant deux sphères grossièrement concentriques. Les calottes endodermique et mésodermique sont temporairement accolées étroitement l'une à l'autre latéralement et délimitent la sphère interne creuse, qui est un intestin primitif transitoire : l'archentéron.

La morphogenèse primaire : la neurulation

Les mouvements, encore de grande envergure, coopèrent à la réalisation des ébauches du tractus digestif et du

▶ *Coupes transversales du germe pendant la neurulation. De gauche à droite : stade de la plaque neurale; stade des bourrelets neuraux soulevés; page ci-contre, en bas à droite, stade des bourrelets neuraux soudés (fin de neurulation); 1, corde; 2, bourrelets neuraux; 3, ectoderme; 4, endoderme; 5, gononéphrotome; 6, lame latérale; 7, somite; 8, tube digestif; 9, tube neural.*

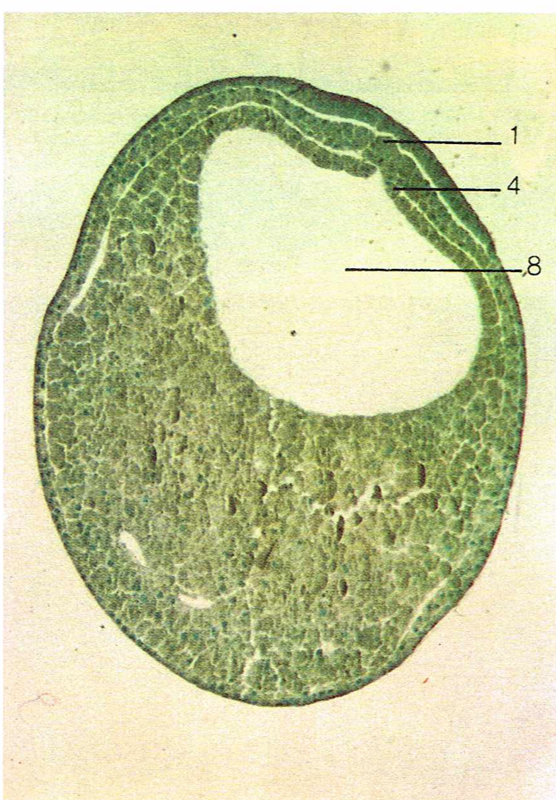

D. Huchon

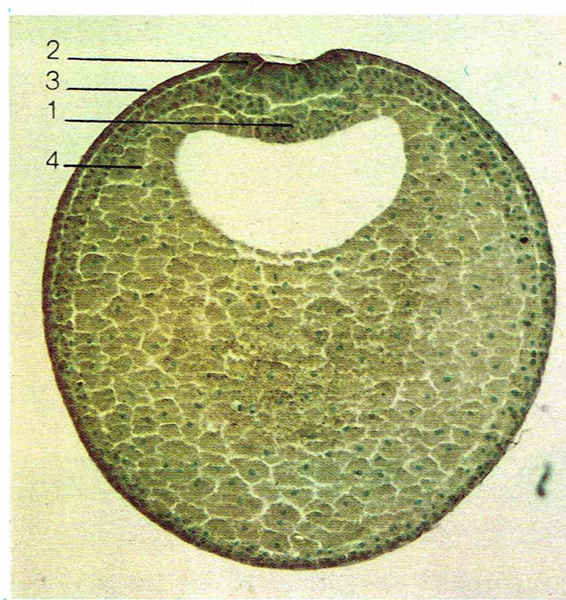

D. Huchon

L. Gallien - J. Desrosiers

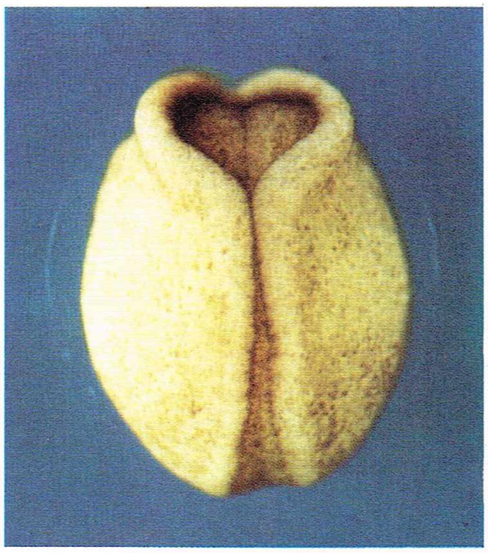

L. Gallien - J. Desrosiers

L. Gallien - J. Desrosiers

▲ ***La neurulation (vues dorsales).***
De gauche à droite : stade de la plaque neurale ; stade des bourrelets neuraux jointifs dans la région médullaire (l'encéphale est encore ouvert) ; stade des bourrelets neuraux entièrement jointifs.

système nerveux. La formation de ce dernier étant très spectaculaire, cette phase est dite de *neurulation*. Elle se déroule de la 58e à la 80e heure après la ponte à 18 °C. La description précise des embryons, la technique des marques colorées et l'histologie sont les moyens nécessaires à l'étude du phénomène.

Dès la fermeture du blastopore, le germe s'allonge antéro-postérieurement ; sa face dorsale s'aplatit et s'épaissit. Des traînées de pigment dessinent une raquette dorsale : la *plaque neurale*. Elle se forme par un mouvement d'épibolie qui a pu être mis en évidence par la pose de marques colorées. Les bords de la raquette se soulèvent en *bourrelets neuraux*. Ces plis s'élèvent peu à peu, convergent vers le plan de symétrie bilatérale et transforment la plaque en une *gouttière neurale*. La convergence des bourrelets débute dans la région moyenne et progresse ensuite vers les extrémités du germe. Leur soudure ultérieure au niveau de l'axe de l'embryon fait de la gouttière un *tube neural*. La région antérieure de l'ébauche nerveuse, large et dilatée, est le futur encéphale ; le reste de l'ébauche donnera la moelle.

L'examen de coupes histologiques transversales et sagittales à différentes étapes de la neurulation permet de comprendre les processus d'individualisation du système nerveux, de la corde, et la fermeture du tube digestif.

Individualisation du système nerveux

Lorsque le tube nerveux se ferme, puis s'isole de l'ectoderme qui rétablit sa continuité en surface, les bords externes des bourrelets neuraux s'épaississent en *crêtes neurales,* cordons cellulaires qui se segmenteront et seront à l'origine de diverses formations : les ganglions crâniens, spinaux et sympathiques, les cellules de la surrénale, etc.

Individualisation de la corde

Les cellules axiales du cordo-mésoderme se détachent en une tigelle longitudinale, premier axe squelettique de l'embryon : la *corde,* ou *notocorde*. Le reste du mésoderme s'insinue entre l'ectoderme et l'endoderme et recouvre complètement la face ventrale de ce dernier.

Fermeture du tube digestif

Les cornes latérales du plancher endodermique tendent à se rejoindre dorsalement sous la ligne médiane de la calotte mésodermique, ce qui a pour effet de clore le tube digestif par une voûte endodermique. Il n'y a donc plus d'archentéron mais un vrai tube digestif.

En fin de neurulation, la disposition concentrique des trois feuillets fondamentaux est donc réalisée.

L'organogenèse : les stades du bourgeon caudal

A la phase de morphogenèse primitive succède la *période d'organogenèse,* qui correspond à l'édification des organes. Deux processus principaux y sont à l'œuvre :

— des mouvements et des proliférations cellulaires de même nature que ceux analysés pendant la gastrulation mais d'une amplitude moindre et plus localisés ;

— la *différenciation cellulaire,* c'est-à-dire l'acquisition par les différentes catégories cellulaires de leurs propriétés spécifiques.

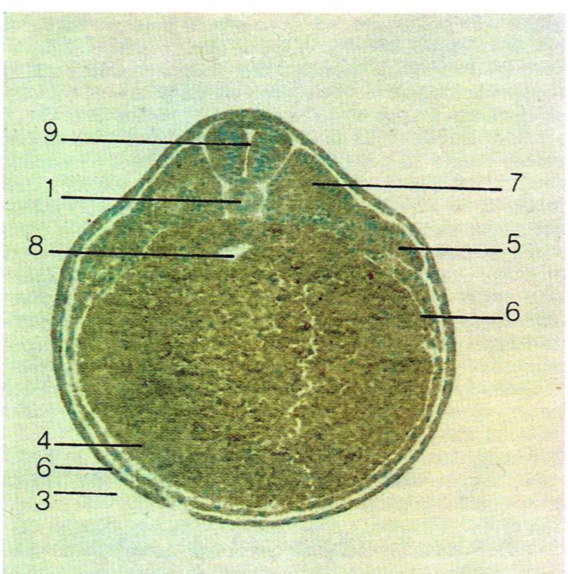

D. Huchon

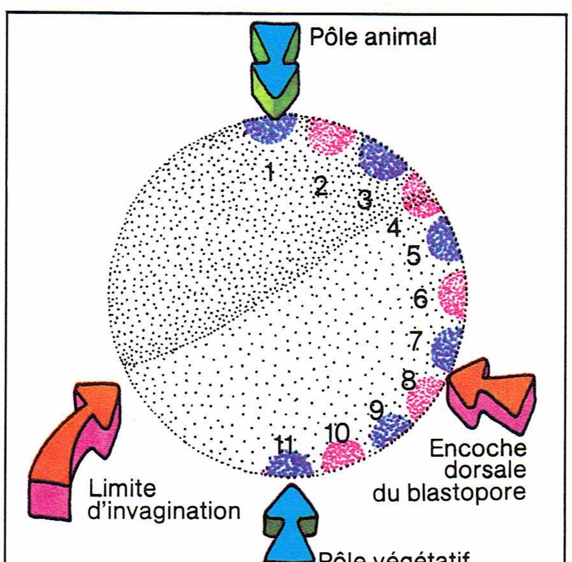

fig. 2

Richard Colin

◀ ***Représentation de onze marques colorées placées dans le plan de symétrie bilatérale chez une blastula âgée de triton.***

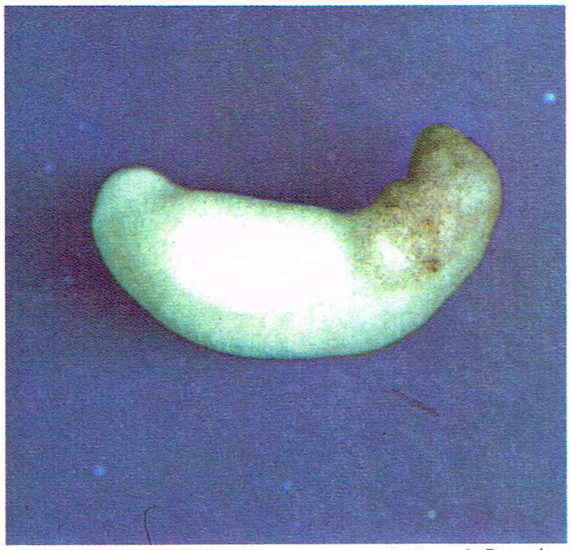

L. Gallien - J. Desrosiers

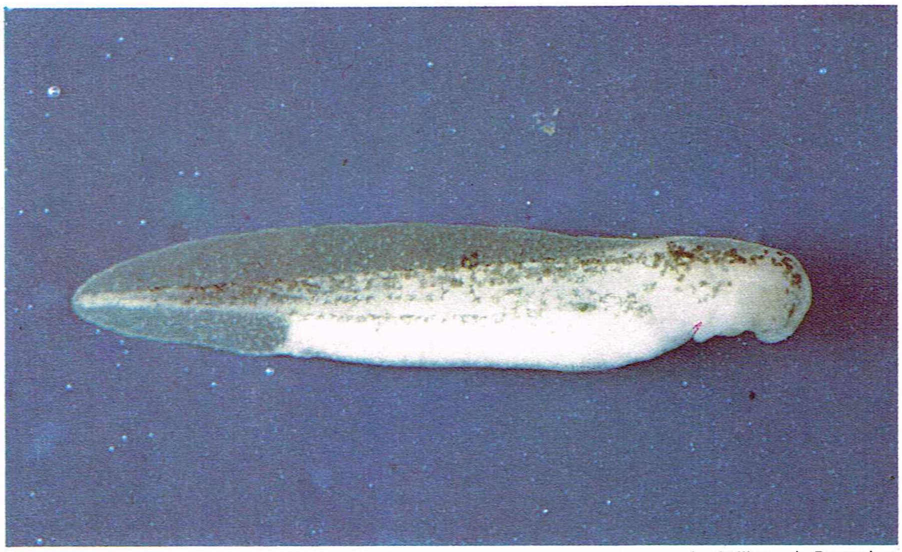

L. Gallien - J. Desrosiers

▲▶ *Stades* **du bourgeon caudal.** *A gauche, embryon de quatre jours environ (les vésicules optiques et otiques sont visibles, ainsi que les ébauches branchiales, somitiques et rénales); à droite, en haut, embryon âgé d'une semaine. Ci-contre, larve au stade de la prise de nourriture (18 jours; 12,5 mm); les nageoires dorsales et caudales sont bien développées.*

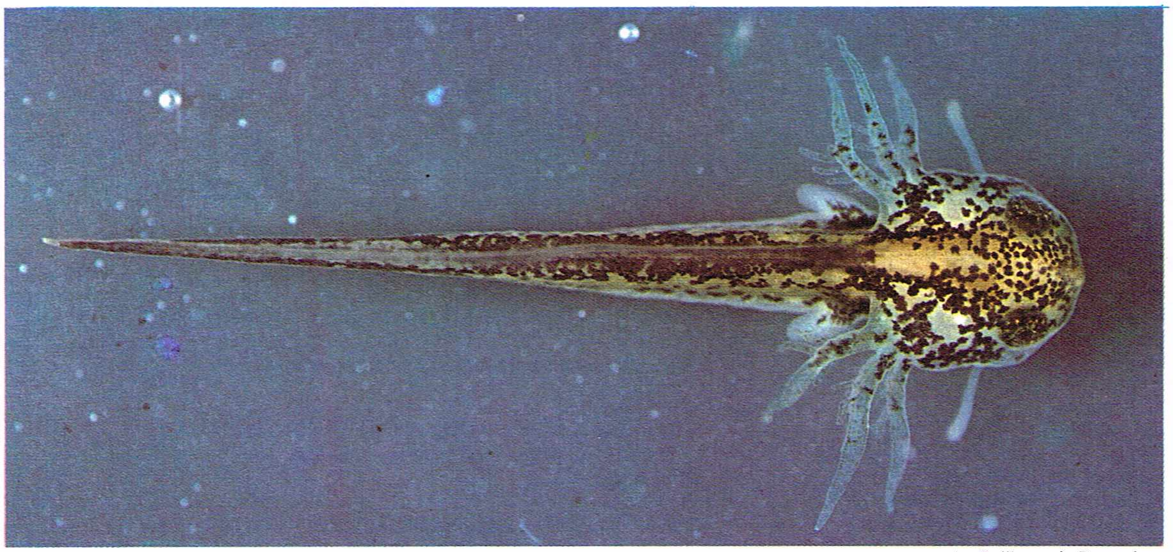

L. Gallien - J. Desrosiers

La diminution d'amplitude des mouvements morphogénétiques et leur localisation de plus en plus précise conduisent à un modelage de l'embryon. A la fin de la période d'organogenèse, la phase préfonctionnelle du développement s'achève : l'embryon devient une larve autonome. Les stades de la vie embryonnaire pendant lesquels les systèmes nerveux, circulatoire, digestif, etc., se différencient sont appelés stades du *bourgeon caudal* en raison de l'apparition et de l'accroissement de l'ébauche de queue de l'embryon. Cette étape de la vie embryonnaire est la plus longue : elle dure de la 87^{e} heure au 12^{e} jour après la ponte à 18 °C.

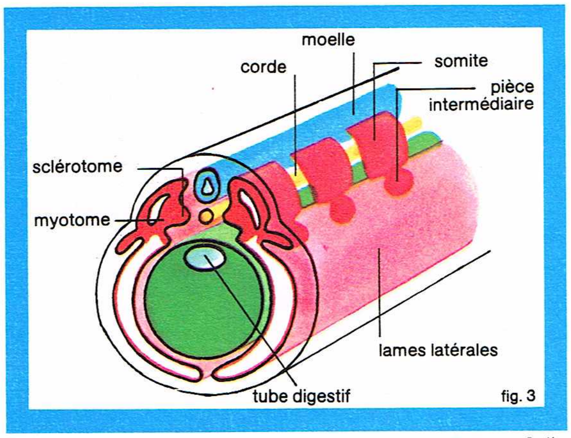

Richard Colin

▶ *Représentation schématique de la* **métamérisation du feuillet mésodermique** *d'un Vertébré.*

Évolution des formes extérieures de l'embryon

La neurulation achevée, on assiste à l'allongement et à l'individualisation des diverses parties du corps : la tête, le tronc, la queue. Les organes axiaux, qui étaient moulés sur la convexité de la masse des grosses cellules vitellines, se redressent du fait de la différenciation histologique très précoce de la corde, que la turgescence de ses cellules transforme en une tigelle rigide. Progressivement, la tête se modèle. Les ébauches des organes sensoriels deviennent visibles, en particulier *l'ébauche oculaire,* qui apparaît très en relief. En arrière de la *vésicule otique,* trois *bourrelets branchiaux* forment une grosse masse où des branchies externes se différencient sous forme de filaments progressivement ramifiés. Sur le tronc, le *blastème rénal* provoque une petite saillie des tissus sus-jacents dans la zone dorsale. Cinq jours après la ponte, le cœur, tube visible à travers la paroi du corps transparente à ce niveau, commence à battre. Une nageoire dorsale et une nageoire caudale se développent; au moment de l'éclosion, la larve sera capable de nager. Pendant les derniers jours de la vie embryonnaire, les bourgeons des membres antérieurs émergent; le vitellus se résorbe; la bouche ne se percera que dans les premiers jours de la vie larvaire : c'est alors que la *prise de nourriture* pourra se faire.

Évolution du manteau mésodermique

De part et d'autre de la corde, le revêtement mésodermique est le siège de phénomènes réguliers de cavitation et de segmentation qui conduisent à la *métamérisation* du mésoderme. Seules les zones dorsales épaissies du manteau sont scindées en amas symétriques : les *somites.* Cette segmentation a pour point de départ la

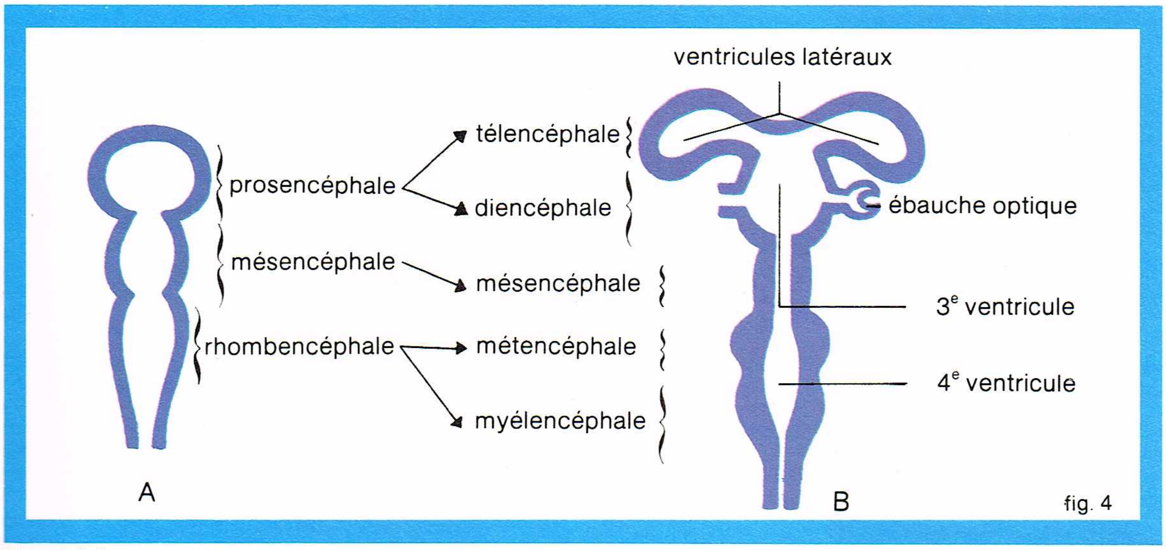

fig. 4

◀ ***Représentation schématique de la différenciation du tube neural; A, stade des trois vésicules cérébrales primaires; B, organisation en cinq vésicules cérébrales.***

Richard Colin

région postérieure de la tête et progresse ensuite vers l'arrière et vers l'avant (fig. 3). Latéralement et ventralement, le mésoderme se clive en deux feuillets, les *lames latérales,* que le processus de métamérisation n'affecte pas. Ces lames délimitent entre elles une cavité : le *cœlome.* La lame qui s'applique contre l'endoderme est la *splanchnopleure;* celle qui s'applique contre la face interne de l'ectoderme est la *somatopleure.*

Les cellules de la zone interne des somites *(sclérotome)* vont s'amasser autour de la corde pour constituer les vertèbres. Celles de la zone la plus externe évoluent en muscles dorsaux et derme de la peau. La splanchnopleure des lames latérales est à l'origine des tuniques musculaires et conjonctives du tube digestif, des arcs branchiaux, du cœur, du feuillet viscéral, du péritoine et du péricarde. Les feuillets pariétaux des séreuses sont formés par la somatopleure. Celle-ci se différencie également en éléments squelettiques (ceintures, membres). Le cœlome est subdivisé en cavités péritonéale et péricardique.

Au niveau de certains somites troncaux, la métamérisation s'étend latéralement, découpant dans le mésoderme intermédiaire des *gononéphrotomes.* Ces blastèmes sont à l'origine de l'appareil rénal (reins, uretères), des oviductes et des ébauches somatiques des gonades.

Les cellules sexuelles, isolées très tôt au cours de la segmentation et localisées dans l'endoderme jusqu'au stade neurula, viendront coloniser les ébauches somatiques des gonades.

Évolution de l'ectoderme

Le tube neural se différencie en cerveau et moelle épinière. Le cerveau passe tout d'abord par un stade à trois vésicules : cerveaux antérieur, moyen et postérieur. Puis, s'organisent les cinq cavités caractéristiques (fig. 4). La deuxième cavité *(diencéphale)* émet des évaginations dorsalement (épiphyse), latéralement (vésicules optiques) et ventralement (hypophyse postérieure). En regard de chaque somite, des axones issus de la partie ventrale de la moelle constituent la racine ventrale motrice des nerfs mixtes. La crête neurale, primitivement continue, se scinde en amas cellulaires, qui sont à l'origine des ganglions rachidiens. Les prolongements des neurones ganglionnaires se dirigent d'une part vers la face dorsale de la moelle et d'autre part vers la racine ventrale des nerfs mixtes. Certaines cellules de la crête neurale émigrent loin du névraxe. Leur devenir est varié : elles donnent des ganglions, le squelette cartilagineux branchial, les mélanophores. Elles sont également à l'origine des cellules de la glande interrénale, qui est l'équivalent de la moelle des glandes surrénales de l'homme.

L'ectoderme banal donne l'épiderme et les glandes à mucus de la peau. Il revêt les balanciers (organes adhésifs transitoires) et les branchies externes. L'épithélium de la muqueuse buccale est d'origine ectodermique, de même que le lobe antérieur de l'hypophyse. En certains points de la tête, l'épiderme présente des épaississements lenticulaires : les *placodes sensorielles* (olfactives, cristalliniennes, otiques).

Évolution de l'endoderme

L'endoderme forme l'épithélium de tout le tube digestif à l'exception de la bouche. Des évaginations de l'endoderme sont à l'origine des glandes annexes : le foie et le pancréas. Très tôt, dès le stade neurula, le diverticule hépatique peut être reconnu. Le tissu conjonctif des glandes annexes a pour origine la splanchnopleure. L'endoderme de la région pharyngienne tapisse les fentes branchiales; il est également à l'origine de la glande thyroïde et du thymus.

La segmentation

La structure de l'œuf et les modalités de la segmentation

Suivant leur surcharge en vitellus, on peut reconnaître différents types d'œufs.

— *Les œufs alécithiques* sont complètement ou quasiment dépourvus de vitellus. L'œuf des Plathelminthes, très petit (20 à 30 μ de diamètre), est entouré de cellules nourricières. L'œuf des Mammifères, beaucoup plus gros (chez l'homme 120 à 140 μ de diamètre), se développera en parasite dans l'organisme maternel.

— *Les œufs oligolécithiques* ne renferment qu'une faible quantité de vitellus; leur diamètre varie de 1/10 à 3/10 mm. On les trouve, par exemple, chez les Échinodermes et les Procordés.

— *Les œufs hétérolécithiques* présentent une teneur moyenne en vitellus réparti dans tout l'œuf mais de façon inégale. Leur taille varie de 1 à 2 mm. Certains Échinodermes, la lamproie, les Poissons Chondrostéens (esturgeon) et les Amphibiens ont des œufs de ce type.

— *Les œufs télolécithiques,* ou *discoblastiques,* sont chargés d'un vitellus très dense dans l'hémisphère végétatif. Le cytoplasme contenant le noyau est rejeté au pôle animal sous forme d'un petit disque. Ce sont les œufs des Céphalopodes, Sélaciens, Téléostéens, Sauropsidés, Protothériens Monotrèmes. Leur diamètre varie de 1 mm à quelques centimètres (par exemple, 1 mm chez la perche et 8 cm chez l'autruche).

— *Les œufs centrolécithiques,* qu'on observe chez de nombreux Arthropodes, ont un vitellus parfois abondant, au milieu duquel se tient le noyau, enrobé dans une gouttelette de cytoplasme à situation centrale. La périphérie de ces œufs est constituée par une couche de cytoplasme pur.

Les modalités de la segmentation dépendent de deux facteurs : l'orientation des fuseaux mitotiques et la surcharge en vitellus. Dans tous les cas, les deux premiers fuseaux sont perpendiculaires entre eux et perpendiculaires à l'axe PA-PV (PA = pôle animal [lieu d'émission des globules polaires]; PV = pôle végétatif, opposé au pôle animal). Par contre, ultérieurement, deux modalités peuvent être observées :

— L'axe du troisième fuseau est parallèle à l'axe PA-PV. Lors des divisions suivantes, les fuseaux

▼▶ *Ci-contre, segmentation de l'œuf d'oursin (vue du pôle végétatif). Ci-dessous, en haut, segmentation de l'œuf de* Crepidula sp. (Spiralia) *[vue de profil]; on distingue aisément les micromères des macromères chargés de vitellus; au pôle animal, les globules polaires sont encore visibles.*

D. Huchon

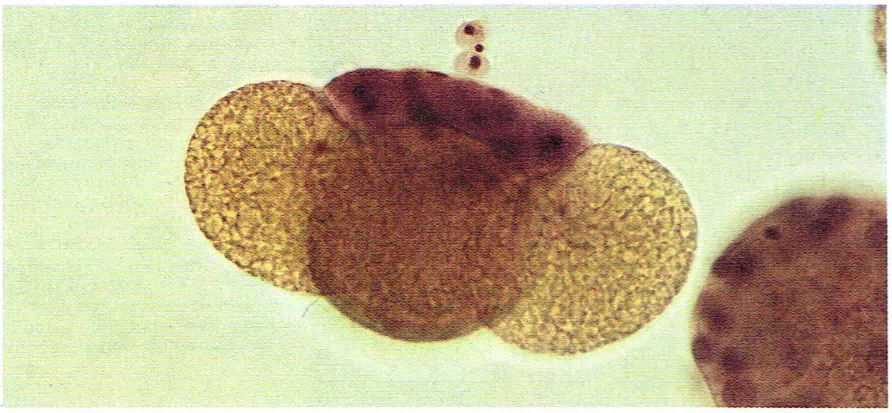

D. Huchon

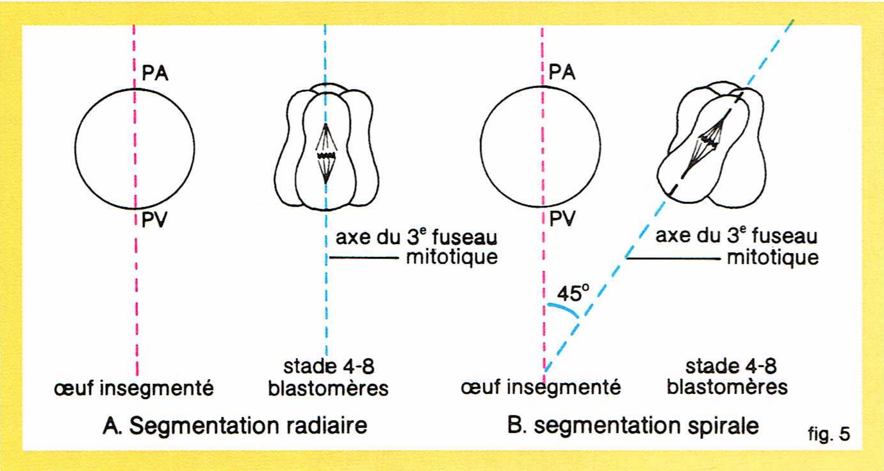

Richard Colin

▲ *Représentation schématique des deux modes de segmentation : radiaire (A) et spirale (B).*

sont alternativement perpendiculaires ou parallèles à cet axe. C'est le type de *segmentation radiaire* (le plus répandu) [fig. 5].

— L'axe du troisième fuseau fait un angle de 45° avec l'axe PA-PV. De plus, à partir de ce moment, le sens de cette inclinaison par rapport à PA-PV s'inverse à chaque cycle mitotique pour chaque couronne de blastomères. C'est le type de *segmentation spirale* (fig.5).

Au cours du déroulement de la segmentation, la surcharge localisée du germe en vitellus (plaquettes ou gouttelettes) ralentit le dépôt des cloisons. Quand cette surcharge est très importante en une région déterminée de l'œuf, les sillons de segmentation ne pénètrent pas la masse de vitellus qui reste indivise; la segmentation est alors dite *partielle,* par opposition à la segmentation *totale,* qui intéresse toutes les parties du germe.

La segmentation totale

Elle caractérise les œufs alécithiques, oligolécithiques et hétérolécithiques. Selon la taille relative des cellules formées au cours des mitoses successives, on distingue le *mode de segmentation totale égale* (rare) et le *mode de segmentation totale inégale.* On observe, dans le seul groupe des Échinodermes, les deux types de segmentation.

● La *segmentation totale égale* peut être étudiée chez l'holothurie *Synapta digitata.* C'est un type de segmentation *radiaire :* le premier sillon de clivage méridien sépare l'œuf en deux blastomères, le deuxième étant méridien et perpendiculaire au premier. Le troisième plan, équatorial, découpe le germe en huit blastomères : quatre blastomères végétatifs, quatre blastomères animaux. Le processus se poursuit, les nouveaux plans de clivage étant perpendiculaires à ceux de la division précédente. Les cellules obtenues sont égales et de plus en plus petites. Le stade ultime atteint est une *blastula régulière* à *cavité de segmentation centrale.* A ce stade, atteint en 24 heures, l'embryon se couvre de cils, devient mobile et nage.

● La *segmentation totale inégale* est observable chez l'oursin *Paracentrotus lividus.* Les œufs de cette espèce sont très utilisés par les expérimentateurs, car ils sont facilement élevés en laboratoire après fécondation artificielle. Les œufs, insegmentés, sont caractérisés par la présence d'une couronne sous-équatoriale de pigment orangé. Le type de segmentation est *radiaire.* Au cours du quatrième cycle de clivage, les cellules de l'hémisphère animal sont divisées par deux plans méridiens perpendiculaires et donnent huit blastomères animaux, tandis que les cellules de l'hémisphère végétatif sont divisées très inégalement par un plan latitudinal sous-équatorial; ainsi se trouvent individualisés 4 *macromères,* qui contiennent tout le matériel pigmentaire, et 4 petites cellules localisées au PV, les *micromères.* Ce stade compte donc 16 cellules. Au cours des deux divisions suivantes, selon l'hémisphère considéré, les plans de clivage sont méridiens ou latitudinaux. Au stade 64 blastomères (morula), le germe est constitué par cinq étages de cellules (an_1, an_2, $vég_1$, $vég_2$ et micromères), ménageant au cœur de celui-ci le blastocèle. La blastula sphérique se couvre de cils et nage.

La segmentation de l'œuf d'Amphibien que nous avons décrite précédemment est du type radiaire, totale et inégale. Bien que l'œuf de Mammifère, dont la segmentation sera décrite plus loin, soit très pauvre en vitellus, il présente une segmentation totale devenant très rapidement inégale. Une ségrégation précoce de groupes cellulaires s'opère : un groupe apical est à l'origine de l'embryon, tandis qu'une sphère creuse de cellules plates (le *trophoblaste*) joue essentiellement un rôle dans l'élaboration d'annexes embryonnaires adaptées à la nutrition de l'embryon. Une cavité apparaît entre le disque embryonnaire et le trophoblaste. Elle équivaut à un blastocèle.

On peut remarquer que cette blastula ressemble beaucoup à celle des Oiseaux. L'ancêtre des Mammifères devait présenter des œufs télolécithiques, comme on en observe d'ailleurs actuellement chez l'ornithorynque.

● La *segmentation totale inégale et spirale* est commune à plusieurs classes d'Invertébrés ayant un même plan fondamental d'organisation, plus ou moins masqué à l'état adulte. L'ensemble de ces classes : Annélides, Plathelminthes, Mollusques, est désigné sous le nom de *Spiralia*. Dans ce type de segmentation, les généalogies cellulaires peuvent être établies avec précision, même à des stades avancés du développement. Une nomenclature déterminée a été choisie qui permet de suivre le devenir d'une cellule donnée. Les lettres A, B, C, D désignent les quatre premiers blastomères, point de départ de quatre *quadrants* de cellules. Le troisième cycle de division donne naissance à une couronne de macromères (1A, 1B, 1C, 1D) et à un *quartette* de micromères (1a, 1b, 1c, 1d). Le chiffre désigne le numéro d'ordre du quartette de micromères détachés, les lettres minuscules indiquant l'origine des micromères (par exemple, a fils de A). Au cours des divisions successives, des quartettes de micromères de rang 2, 3, ..., continuent à se détacher de la couronne de macromères. Les micromères préexistants se scindent en cellules égales. Au stade 64 cellules, l'hémisphère animal présente une structure bien définie. Au pôle animal quatre petites cellules forment une rosette. Leurs cellules sœurs s'intercalent entre elles et forment une *croix*, dont la présence est un trait caractéristique du développement des *Spiralia*. Une couronne équatoriale ceinture le germe. La calotte végétative est occupée par les macromères 4A, 4B, 4C, 4D.

La segmentation partielle

● La *segmentation discoïdale* caractérise l'œuf de poule (fig.6). Pour observer l'œuf fécondé insegmenté, il faut le prélever dans la partie supérieure de l'oviducte. Le cytoplasme pur est limité au *disque germinatif*, ou *cicatricule ;* il contient la vésicule germinative. Le vitellus sous-jacent est formé de couches concentriques alternativement jaunes et blanches. Une colonne de vitellus blanc s'étend du disque au centre de l'œuf.

L'œuf fécondé s'engage dans l'oviducte. Le segment antérieur de celui-ci *(magnum)* sécrète l'*albumen,* qui se dépose en couches concentriques autour de l'œuf. L'albumen déposé dans la région supérieure est plus dense que celui qui est sécrété dans la région inférieure. Comme l'œuf parcourt l'oviducte en décrivant une hélice, les couches d'albumen épais forment en se tordant les *chalazes*. La masse d'albumen est ensuite enveloppée par la *membrane coquillière* (formée de deux feuillets), sécrétée par le segment d'oviducte appelé *isthme*. Finalement, l' « œuf » parvient dans la dernière région de l'oviducte *(utérus),* absorbe beaucoup d'eau, son volume total double et la coque se constitue.

La segmentation se fait à l'intérieur des voies génitales. Elle débute trois heures après la fécondation. Les deux premiers plans de clivage sont méridiens; toutefois, s'ils découpent l'aire germinative, il n'y a pas formation de véritables blastomères. Contrairement aux exemples étudiés jusqu'à présent, le troisième fuseau mitotique et les suivants restent méridiens, et c'est assez tardivement qu'un sillon latitudinal isole une couche superficielle de blastomères d'un *syncytium vitellin* profond. L'aire germinative ainsi segmentée, ou *blastoderme,* est l'équivalent d'une blastula. Une cavité de segmentation sépare la couche cellulaire du syncytium.

● La *segmentation superficielle* caractérise les œufs centrolécithiques (par exemple, le doryphore de la pomme

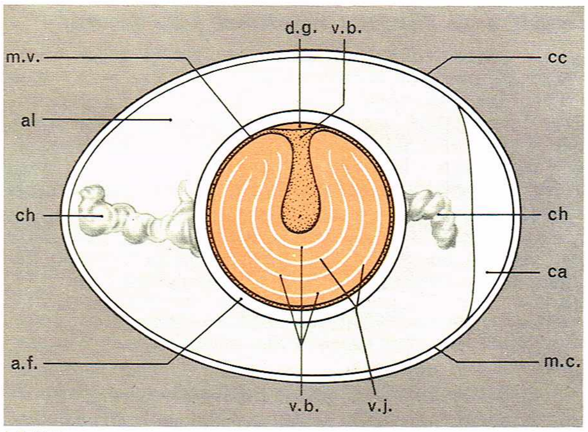

I.G.D.A.

◄ ***Coupe schématique d'un œuf de poule : d.g., disque germinatif; v.b., vitellus blanc; cc, coquille calcaire; ch, chalaze; ca, chambre d'air; m.c., membrane coquillière délimitant, par séparation de ses deux feuillets, la chambre d'air; v.j., vitellus jaune; a.f., couches d'albumen très fluide; al, albumen dense; m.v., membrane vitelline.***

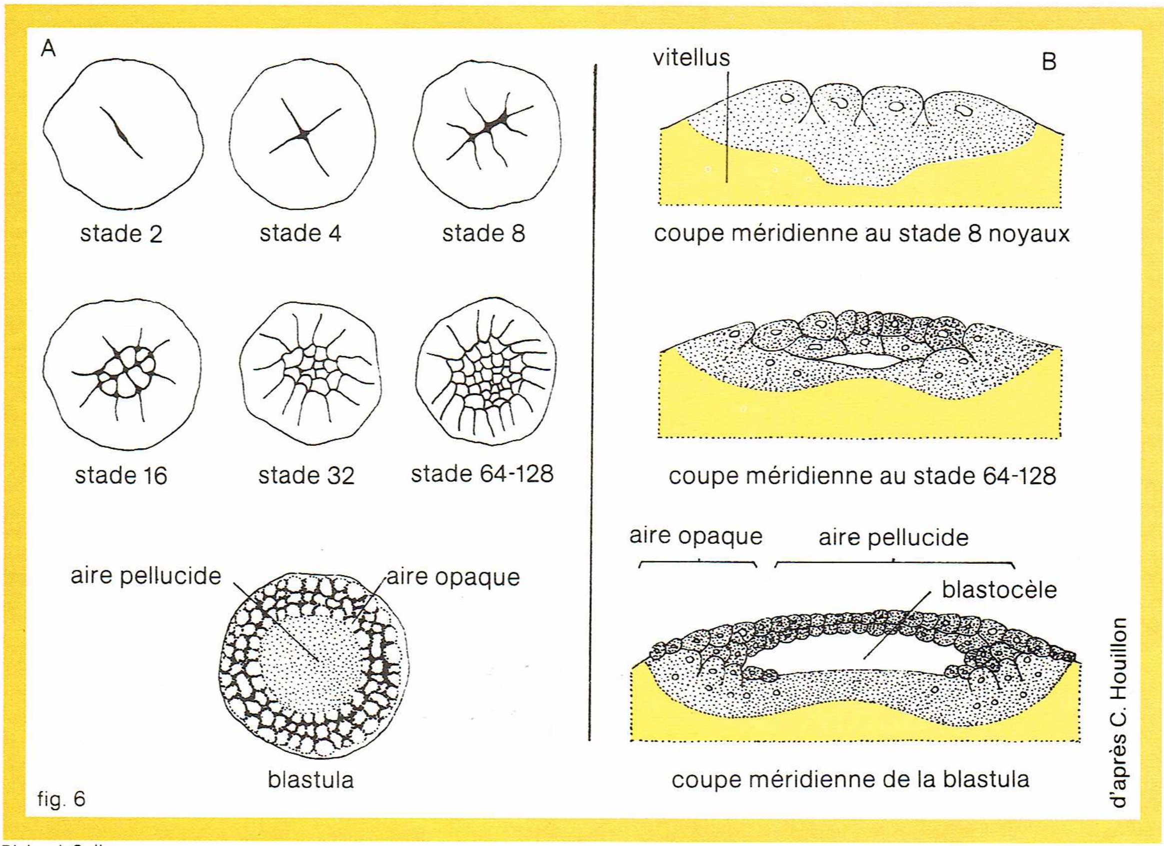

Richard Colin

◄ ***Représentation schématique de la segmentation de l'œuf de poule; A, vues polaires; B, coupes méridiennes.***

de terre, *Leptinotarsa decemlineata*). L'œuf inséminé de couleur jaune-orangé qui vient d'être pondu est collé au support par son pôle postérieur ; il y a alors émission des deux globules polaires (les globules sont expulsés sur la face dorsale de l'œuf). La caryogamie a lieu une heure trois quarts à deux heures plus tard, au centre de l'œuf.

Le noyau de fécondation entre très vite en division (stade 2 au temps $t_0 + 2$ heures). A partir de ce moment une division cellulaire se fait toutes les heures. Au stade 32, les noyaux se disposent en un ellipsoïde. Ultérieurement, celui-ci grandit en se rapprochant de la périphérie du germe par migration. Finalement, les noyaux atteignent le cortex (temps $t_0 + 12$ heures à 24 °C). Des cloisons radiales puis tangentielles se déposent, déterminant la formation de cellules qui constituent le blastoderme superficiel. A la période de multiplication nucléaire intravitelline intensive succède une période de multiplication moins accélérée des cellules superficielles du blastoderme. Quelques *énergides* (noyaux entourés d'une gouttelette de cytoplasme) restent au sein du vitellus : ce sont les *vitellophages*.

L'activité métabolique du noyau et du cytoplasme des blastomères

Reprise de l'activité respiratoire du germe

La consommation d'oxygène augmente progressivement au cours de la segmentation. Si on prive le milieu d'élevage d'oxygène ou si on lui ajoute du cyanure, la segmentation est presque immédiatement bloquée chez l'oursin. L'effet est moindre dans le cas des œufs de grenouille : le stade blastula peut être atteint avec un retard notable. En début de segmentation, la consommation d'oxygène est cyclique. Ces cycles respiratoires correspondent aux cycles mitotiques : la consommation d'oxygène, maximale pendant l'interphase, présente un minimum pendant la métaphase et l'anaphase.

Utilisation en début de segmentation de l'information maternelle stockée dans le cytoplasme

La segmentation est un phénomène marquant par la rapidité et la monotonie de son déroulement ; elle consiste essentiellement en duplications de chromosomes et dépôts de cloisons. Les matières premières requises sont peu nombreuses, mais elles doivent être présentes en grandes quantités. Chez la plupart des animaux, l'embryon ne reçoit de l'extérieur aucune substance nutritive en dehors de l'eau et de l'oxygène ; on est donc amené à penser que toutes les grosses molécules qui s'édifient dans la blastula : l'ADN, les lipoprotéines membranaires, les polymères ou dimères de tubuline (protéine soufrée, constituant majeur des tubules de l'appareil mitotique), le font à partir de matériaux préexistants de l'ovocyte par *réarrangement moléculaire*. Ce réarrangement implique la présence dans le germe d'une part des *matières premières* et d'autre part de l'*information*.

Tout au long de l'ovogenèse, se sont accumulées des réserves de matières premières (vitellus lipoprotéique et lipidique, inclusions glucidiques, ADN et ARN vitellins), des réserves d'enzymes (ADN polymérase, ARN polymérase, ARN réductase), des réserves d'ARN ribosomique, d'ARN de transfert et *des réserves à caractère informationnel :* ARN messagers à vie longue.

Pendant la segmentation et même ultérieurement, les matières premières accumulées dans l'œuf sont utilisées par le germe. Il reste à déterminer pendant quelle période de l'embryogenèse l'information maternelle (ARN messagers) stockée dans l'ovocyte sert de matrice pour les synthèses protéiques, et à quel moment le génome propre de l'embryon prend le relais pour diriger ces synthèses.

Les preuves de l'utilisation par la blastula des ARN messagers maternels sont fondées soit sur des observations, soit sur des expériences effectuées dans divers groupes de Vertébrés et d'Invertébrés.

Expériences d'énucléation. De telles expériences peuvent être réalisées mécaniquement (par centrifugation ou par extirpation manuelle) ou chimiquement (par l'injection à l'œuf fécondé d'un poison : l'actinomycine, qui empêche la transcription de l'ADN en ARN$_m$ et, par conséquent, l'expression de l'information contenue dans le noyau de fécondation).

— *Énucléation mécanique*. Dès 1936, Harvey a obtenu par centrifugation des œufs d'oursin anucléés, capables de se développer en une sorte de blastula avec cloisons et sans noyaux. Chez la grenouille, l'énucléation par extirpation manuelle a été réalisée en 1951 (Briggs et King) ; des pseudo-blastulas sont également obtenues. Reprise par Malincinski, en 1972, cette technique, corrélativement à une analyse des protéines solubles de la blastula, a permis de préciser que l'énucléation ne perturbe pas les synthèses protéiques jusqu'au stade blastula moyenne.

— *Énucléation chimique*. Le matériel le plus favorable est encore l'œuf d'oursin *(Paracentrotus lividus)*. L'actinomycine D est administrée à des moments et pendant des durées variables. Les œufs traités sont toujours capables de se développer en blastulas en l'absence des ARN messagers propres à l'embryon, et cela même si la drogue est donnée dès le début de la segmentation (fig. 7).

Mode d'action du gène senestre chez la limnée (Gastéropode d'eau douce). Dans cette espèce, un gène conditionne le déroulement de la segmentation. L'allèle senestre (se) détermine une inclinaison vers la gauche des fuseaux mitotiques du troisième cycle de division, et l'allèle dextre (de) détermine leur inclinaison vers la droite. Corrélativement, les coquilles des adultes sont des hélices enroulées vers la gauche ou vers la droite. L'allèle (de) est dominant par rapport à l'allèle (se). Cependant, on a pu observer que le phénotype d'un individu ne dépend pas de son propre génotype mais de celui de sa mère. Ce phénomène remarquable peut s'expliquer si l'on considère que le gène codant pour l'orientation du fuseau est transcrit en ARN messager pendant l'ovogenèse. Seul cet ARN messager maternel est traduit dans la jeune blastula, le génome propre à l'embryon restant muet.

Synthèses protéiques effectuées à partir des ARN messagers maternels stockés. Si la segmentation est possible quand on traite le germe à l'actinomycine D, elle s'arrête presque immédiatement quand on le traite à la puromycine (inhibiteur de la phase de traduction des synthèses protéiques). En général, une seule division cellulaire est possible. Ces deux types d'expériences prouvent que des protéines sont synthétisées dès le début de la segmentation. Pendant les premières heures du développement, la *tubuline* et les *histones* sont ainsi élaborées grâce aux ARN messagers maternels.

La mise en œuvre du génome propre de la blastula au cours de la segmentation

Les expériences d'énucléation permettent seulement d'obtenir des blastulas léthales ; la mise en place des feuillets ne peut se faire. Les expériences d'énucléation chimique permettent de préciser qu'il existe une *période sensible* de la segmentation pendant laquelle le germe ne peut recevoir impunément la drogue. Il apparaît donc que l'étape de transcription devient nécessaire aux synthèses de la blastula ; celle-ci se met à fonctionner suivant ses propres plans. Les preuves du déclenchement de l'activité de synthèse hétérocatalytique de l'ADN des noyaux blastuléens sont les mises en évidence des *synthèses d'ARN* et des *synthèses des nouvelles protéines*.

Les synthèses d'ARN

Dès le début du développement chez l'oursin, il doit se produire une synthèse d'histones et de tubuline, étant donné le rythme accéléré des cycles mitotiques. Les réserves d'ARN messagers correspondantes, élaborées pendant l'ovogenèse, sont insuffisantes pour couvrir les besoins du germe. Aussi y a-t-il, dès les premières heures, synthèse des ARN messagers d'histones et de tubuline.

Chez le xénope, la synthèse d'ARN messager, presque nulle pendant les premières heures du développement, s'accroît brusquement au stade blastula. L'ARN synthétisé est spécifique de cette phase du développement. En effet, d'une part les séquences nucléotidiques de cet ARN ne sont pas identiques à celles des ARN messagers de l'œuf et, d'autre part, une partie de ces molécules néoformées ont déjà disparu quand débutent les mouvements de la gastrulation. Ces ARN nouvellement syn-

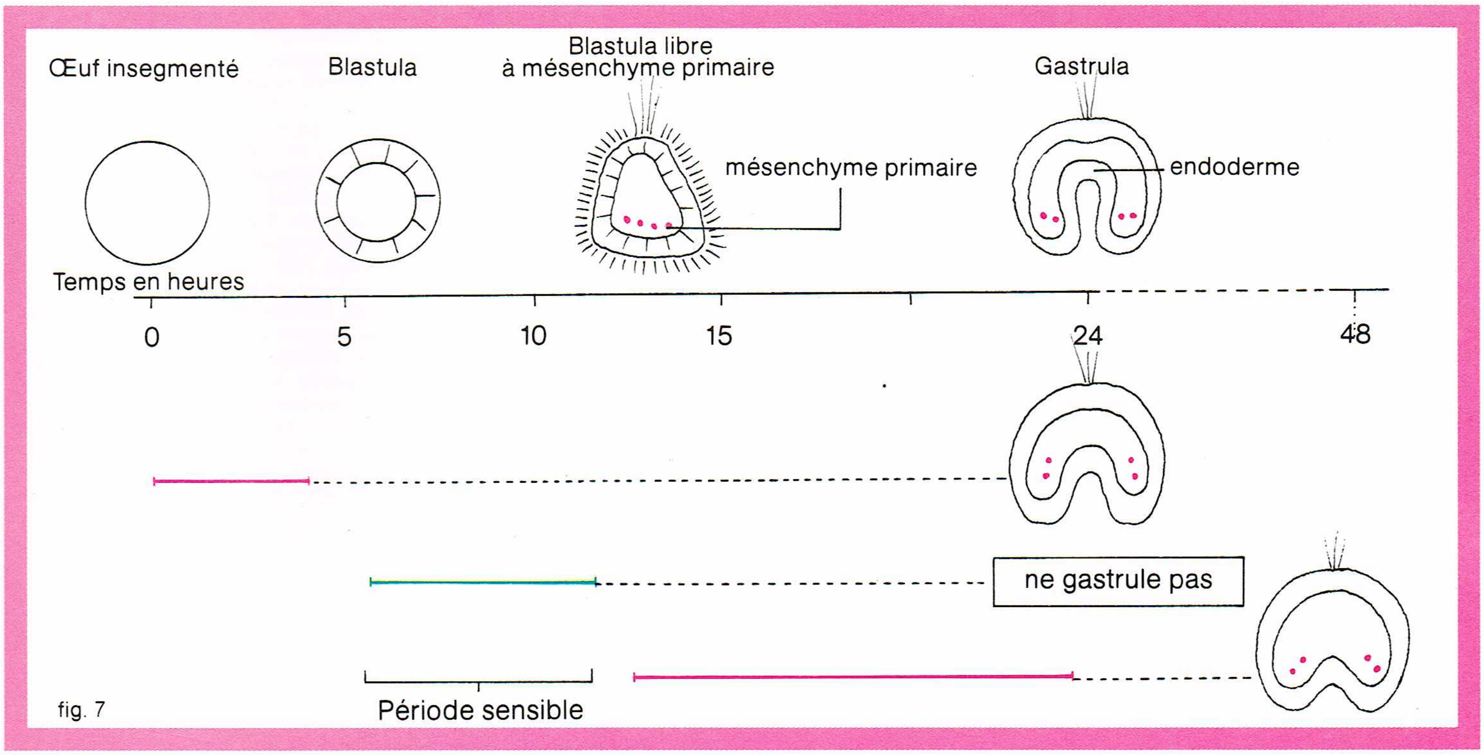

fig. 7

Richard Colin

thétisés présentent des séquences différentes suivant que l'on considère un hémisphère ou l'autre de la blastula.

La synthèse de l'ARN de transfert chez l'Amphibien commence au stade blastula, tandis que chez l'oursin elle ne débute que pendant la gastrulation.

Chez les Amphibiens, la synthèse de l'ARN ribosomique (28 S + 18 S) est quasiment nulle pendant la segmentation. Cette observation est en accord avec le fait que les nucléoles ne réapparaissent dans les embryons qu'au stade gastrula. Chez la plupart des Vertébrés et chez les Échinodermes, la synthèse d'ARN ribosomique commence pendant la gastrulation. Les Mammifères font exception : les gènes ribosomiques se mettent à fonctionner dès les premiers stades de segmentation (ce fait est probablement en rapport avec les faibles réserves de l'œuf).

Les synthèses de nouvelles protéines

Chez les Échinodermes, dès l'éclosion (blastula à mésenchyme primaire), apparaissent des protéines différentes de celles de l'œuf et qui semblent essentielles pour le déroulement de la gastrulation (travaux de Westin et coll. et de Ranzi et coll.). Le début de ces synthèses correspond à la période de sensibilité du germe vis-à-vis de l'actinomycine D. Cela implique que ces synthèses protéiques se font à partir d'ARN messagers néoformés. Des observations similaires ont été faites chez les Amphibiens.

En résumé, pendant les premières heures de la segmentation (chez les Amphibiens en particulier), certains ARN messagers définis, accumulés pendant l'ovogenèse, dirigent des synthèses protéiques directement en rapport avec les phénomènes de la division cellulaire. Cependant, l'essentiel des besoins protéiques liés aux duplications d'ADN, à l'agencement des fuseaux mitotiques et au dépôt de membranes est couvert par les réserves de l'œuf.

Pendant la phase tardive de la segmentation, les molécules nécessaires au déclenchement des phénomènes de gastrulation et de morphogenèse primaire s'accumulent. On peut penser qu'un certain nombre de gènes de structure du germe se mettent à fonctionner pour donner des ARN messagers propres à l'embryon. Si ceux-ci sont en présence, dans la cellule, d'un appareil de traduction immédiatement utilisable, des protéines nouvelles apparaissent.

En outre, certains des ARN messagers formés peuvent ne pas être traduits immédiatement; ils le seront à l'étape suivante, quand les synthèses d'ARN ribosomique auront largement repris.

Localisations cytoplasmiques de l'œuf

Les localisations cytoplasmiques de l'œuf en relation avec des ségrégations cellulaires pendant la segmentation

L'embryogenèse est une construction progressive. Peu à peu, chaque partie acquiert son originalité et devient complémentaire du reste, ceci à différents niveaux : le germe entier, les feuillets, les organes.

Le premier indice d'organisation observé est l'axe de polarité PA-PV. Le pôle animal marquera la région antérieure et le pôle végétatif la région postérieure de la future larve. Dans les ovocytes cette polarité se traduit dans les cas les plus simples par l'émission au PA des globules polaires. En passant en revue les modalités de la segmentation, nous avons signalé des inégalités dans la taille des blastomères. Ceci apparaît comme un indice d'organisation que nous avons rapporté à la distribution des inclusions vitellines dans l'œuf. Peu à peu, au cours de l'embryogenèse, des structures se dessinent. Ainsi apparaît en un point de la blastula d'Amphibien une encoche, lieu où débutent les mouvements d'invagination. Il est tentant de rechercher, quand se dessine une structure, si le lieu où elle apparaît correspond à un territoire donné du germe en segmentation ou même de l'œuf. Ces recherches de localisation ont été réalisées par les techniques suivantes : culture *in vitro* de territoires excisés de blastulas, sections pratiquées dans des morulas, séparation des blastomères de très jeunes stades de segmentation (stade 2, 4 blastomères), ablation de plages cytoplasmiques.

Culture *in vitro* de territoires excisés de blastulas

Ces travaux ont été réalisés chez les Amphibiens par Holtfreter (1938-1939). L'hémisphère végétatif d'une blastula âgée (stade encoche dorsale du blastopore) est découpé en petits fragments. Ceux-ci sont cultivés *in vitro*. Les explants se différencient en épithélium intestinal, foie, pancréas, suivant le lieu exact de prélèvement. La calotte végétative apparaît donc comme une mosaïque de territoires dont le devenir est fixé. Pendant les premières heures de la culture, les explants prélevés au niveau de la lèvre dorsale de l'encoche sont affectés de mouvements cellulaires similaires à ceux observés sur le germe entier.

Des explants prélevés au niveau cordal se différencient en corde. Dans ce cas, le devenir du territoire est fixé d'une manière moins rigoureuse que dans le cas de l'endoderme ; en effet, des associations chimériques tissulaires (corde, somite) peuvent être observées.

▲ Représentation schématique des effets du traitement à l'actinomycine D sur le développement de l'œuf d'oursin; en rose, temps d'administration de la drogue.

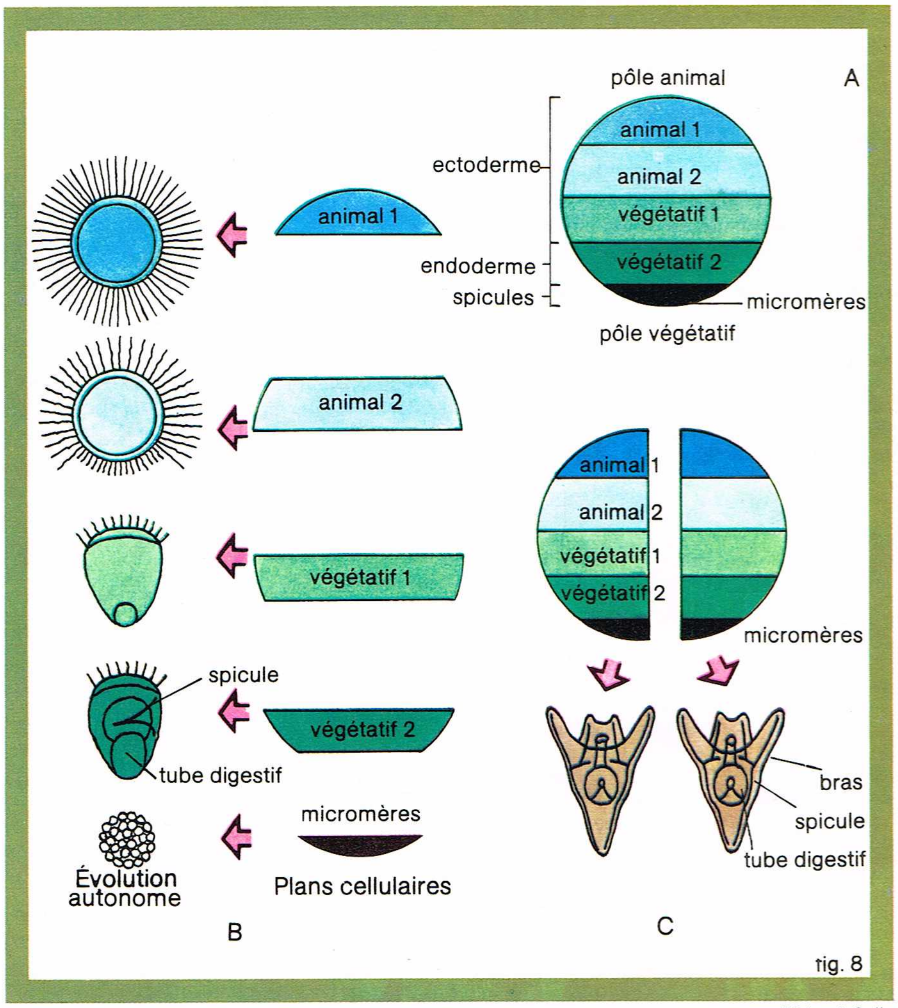

Richard Colin

▲ ***Sections pratiquées dans une morula d'oursin; A, les 5 plans latitudinaux de blastomères de la morula; B, évolution de chacun des plans isolés expérimentalement; C, clivage méridien de la blastula; évolution de chaque moitié méridienne.***
▼ ***Séparation des deux premiers blastomères chez le triton.***

Sections pratiquées dans une morula

Une morula d'oursin de 64 cellules comporte cinq plans latitudinaux de blastomères. Chacun d'eux peut être isolé et mis en élevage (Horstadius, 1949-1950).

Le plan an_1 donne une blastula qui ne peut dépasser ce stade d'organisation. Les longs cils caractéristiques de la touffe apicale s'étendent sur toute sa surface.

Le plan $vég_2$ se développe en une blastula très peu ciliée (cils courts). Les mouvements de la gastrulation se déroulent. Un archentéron monstrueusement développé se forme.

L'élevage des fragments intermédiaires permet d'obtenir toute une gamme de monstruosités.

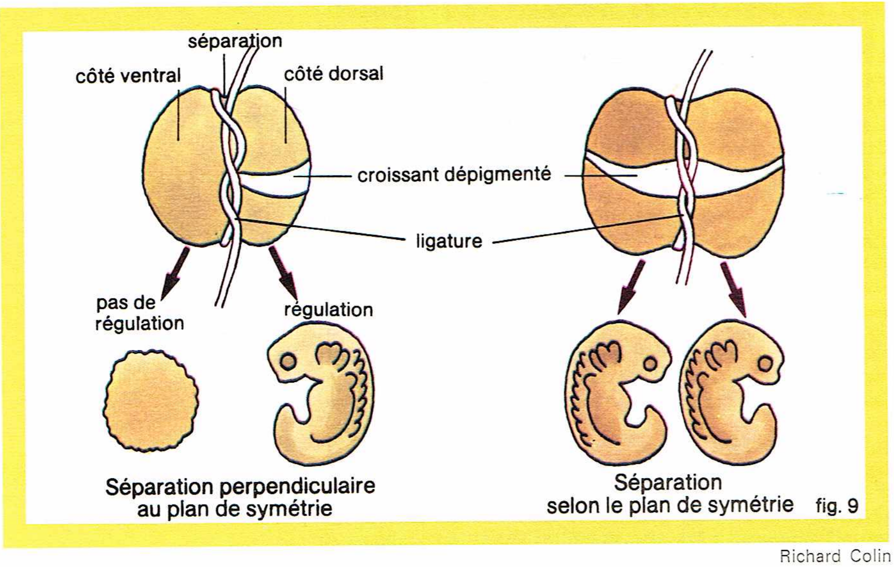

Richard Colin

Au stade 64 blastomères, les différents plans du germe ne sont donc pas équivalents (fig. 8).

Séparation de blastomères

L'expérience de séparation des deux premiers blastomères par étranglement a été analysée chez le triton, *Triturus toeniatus* (Spemann, 1900-1903). Une boucle de cheveu fin est glissée au niveau du premier sillon de segmentation et progressivement serrée (fig. 9). Si le premier sillon de segmentation est perpendiculaire au plan de symétrie bilatérale, c'est-à-dire si le croissant dépigmenté est tout entier contenu dans un blastomère, les deux cellules isolées évoluent différemment. Seul le blastomère contenant le croissant dépigmenté donne un embryon normalement constitué. Le blastomère ventral se développe en une blastula léthale.

Chez le ver *Tubifex rivulorum (Spiralia)* la segmentation est fortement inégale. Au stade 4 blastomères, le germe présente 3 blastomères à peu près égaux (A-B-C) et un volumineux blastomère D. Ils peuvent être isolés et élevés. Seul D évolue en un embryon de taille réduite mais normal. Une relation entre l'excédent de cytoplasme de D et sa capacité organisatrice a été prouvée. Grâce à des artifices (température élevée, déficience en oxygène), le premier sillon de segmentation peut être méridien. On peut admettre que, dans ces conditions, l'excédent de cytoplasme est également réparti entre les blastomères AB et CD. L'embryon issu d'un tel germe est un monstre présentant deux massifs mésodermiques. Cette expérience met en valeur le rôle éminent d'un composant cytoplasmique dans l'organisation du germe.

Ablation de plages cytoplasmiques

Chez le dentale (Mollusque), la segmentation spirale présente une particularité. Quand le premier clivage va se produire, une partie du cytoplasme de la région végétative fait extrusion et s'isole partiellement de l'œuf pour former un *lobe polaire*. Quand la première division s'achève, le matériel du lobe polaire se rétracte dans le blastomère CD. Il est possible de sectionner le lobe polaire (Wilson, 1904), et l'œuf poursuit son développement malgré cette ablation. Toutefois, la larve obtenue présente de graves déficiences des organes dérivés du mésoderme. Le lobe polaire constitue donc une initiale rigoureusement fixée du mésoderme.

Chez le xénope (Amphibien Anoure), de petits fragments de cortex peuvent être prélevés soit sur un œuf insegmenté, soit sur un très jeune stade de segmentation (Curtis, 1962). Si le cortex du croissant gris d'un œuf fécondé insegmenté est excisé, celui-ci se segmentera mais donnera une blastula léthale incapable de gastruler. Si un fragment de croissant gris prélevé sur un stade 8 blastomères est greffé sur la face ventrale d'un œuf insegmenté, le germe évolue et deux encoches blastoporales se formeront. Donc le cortex du croissant gris représente une plage qui donnera de façon irrévocable un territoire cellularisé, capable de s'invaginer le moment venu.

Dans tous les exemples qui viennent d'être cités, les territoires cellularisés ou bien les fragments cytoplasmiques de blastomères ou d'œuf ont un devenir qui est irrévocablement fixé. On dit qu'ils sont *déterminés*. Il est plausible de rapporter cette *détermination* à la présence dans le cytoplasme de l'œuf de diverses molécules « morphogénétiques » réparties de manière précise selon les régions. Au cours de la segmentation, ces molécules seraient incorporées, *in situ*, dans les noyaux du germe. Là, elles seraient capables d'activer des portions spécifiques du génome, portions transcrites en ARN messagers également spécifiques. Les substances « morphogénétiques » seraient mises en place dans l'ovocyte maternel par l'activité du génome propre à l'ovocyte et accessoirement par l'activité synthétique du génome d'autres cellules de l'organisme maternel.

Les germes de certains Invertébrés et Procordés sont caractérisés par la précocité de la détermination de tous leurs territoires. Au contraire, chez d'autres organismes, en particulier chez les Vertébrés, seuls quelques territoires privilégiés se déterminent pendant la segmentation : l'endoderme, la lèvre dorsale du blastopore. Dans ce dernier cas, au cours des étapes suivantes du développement, l'embryon deviendra également un ensemble de territoires déterminés. Ces déterminations se feront par le jeu de stimulations issues des massifs cellulaires précocement déterminés.

La régulation

Chez l'oursin, le premier plan de segmentation est méridien. Au stade 2 blastomères, si les germes sont secoués (Driesch, 1891), les blastomères se séparent, s'arrondissent et chacun donne en fin de développement une larve morphologiquement normale mais naine. *Chaque moitié méridienne a fourni plus que sa prestation normale : on dit qu'il y a eu régulation.* En d'autres termes, la régulation est le processus par lequel un système embryonnaire partiel tend à réaliser les capacités morphogénétiques du germe entier.

La régulation telle que nous venons de la définir est dite des *déficiences.*

Inversement, deux systèmes embryonnaires complets peuvent être fusionnés en un système unitaire : on parlera dans ce cas de *régulation des excédents.* Chez l'oursin, en respectant la polarité PA-PV des deux œufs, deux germes ont pu être fusionnés. Une larve géante est alors obtenue (Driesch, 1900).

Ces phénomènes se rapportent à des œufs à organisation simple, *clivés parallèlement à leur axe PA-PV.* Si la section est réalisée perpendiculairement à cet axe, il n'y a plus régulation.

Les phénomènes de régulation chez les Vertébrés

A condition de respecter certaines orientations, les expériences de régulation peuvent être reproduites chez les Vertébrés.

Les Amphibiens

Dans le cas où le premier sillon de segmentation correspond au plan de symétrie bilatérale de l'œuf (autrement dit, passe par le milieu du croissant dépigmenté), la séparation des deux premiers blastomères du triton *Triturus toeniatus* est suivie de la formation de deux gastrulas, puis de deux larves normales mais naines. La fusion de deux germes au stade 2 blastomères est rendue possible par la forme en haltère que prend l'œuf dépourvu de sa gangue et de son chorion au moment du premier clivage. Les deux germes sont disposés en croix et comprimés légèrement (fig. 1') [Mangold et Seidel, 1927]. Plusieurs dispositions des croissants dépigmentés sont possibles. Quand ceux-ci sont disposés en continuité, une seule encoche du blastopore se forme, un seul embryon géant s'organise.

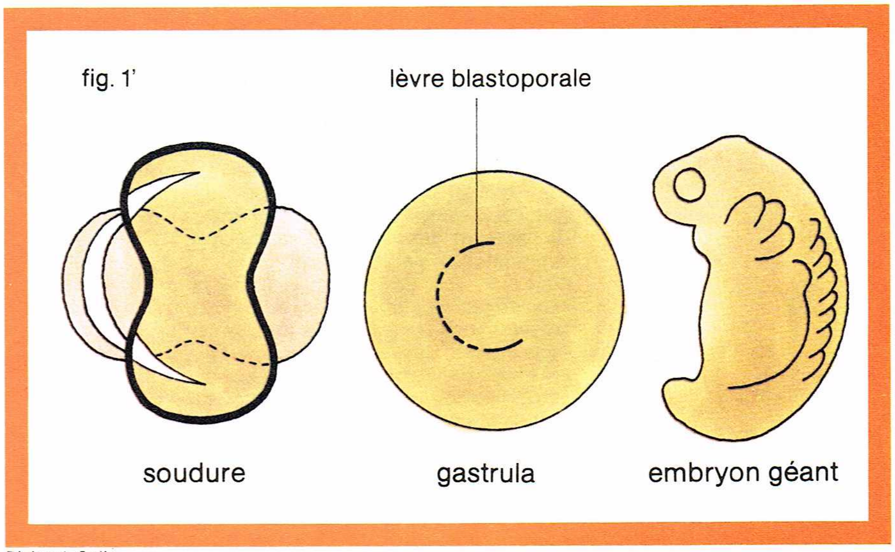

Richard Colin

▲ *Représentation schématique de la fusion de deux germes chez le triton, au stade 2 blastomères ; quand les croissants dépigmentés des deux germes sont en continuité, il y a formation d'un seul embryon géant.*

Ces expériences de régulation correspondent à un remaniement fondamental des structures du croissant gris. Dans une expérience de ligature, Dalcq et Dollander (1948) ont tatoué le milieu du croissant gris par un colorant vital. Pour chacune des blastulas sœurs, l'encoche dorsale du blastopore ne se dessine pas au niveau de la marque colorée, mais en un point correspondant au centre de la moitié de croissant dépigmenté dont chaque fragment a hérité.

Les Oiseaux

L'ampleur des phénomènes de régulation est considérable. Les germes peuvent en principe être clivés pendant toute la période de segmentation. Si les sections sont opérées très tardivement, les cas de monstruosités deviennent fréquents, la régulation étant alors incomplète.

La fissuration du blastoderme (Lutz) est très simple à réaliser sur l'œuf non incubé. Le germe est mis à nu par

▼ *Un exemple de régulation chez la cane : des fissurations multiples ont entraîné la formation d'un embryon présentant seulement une atrophie céphalique (à droite sur la photo) et d'un monstre double à deux troncs (à gauche sur la photo).*

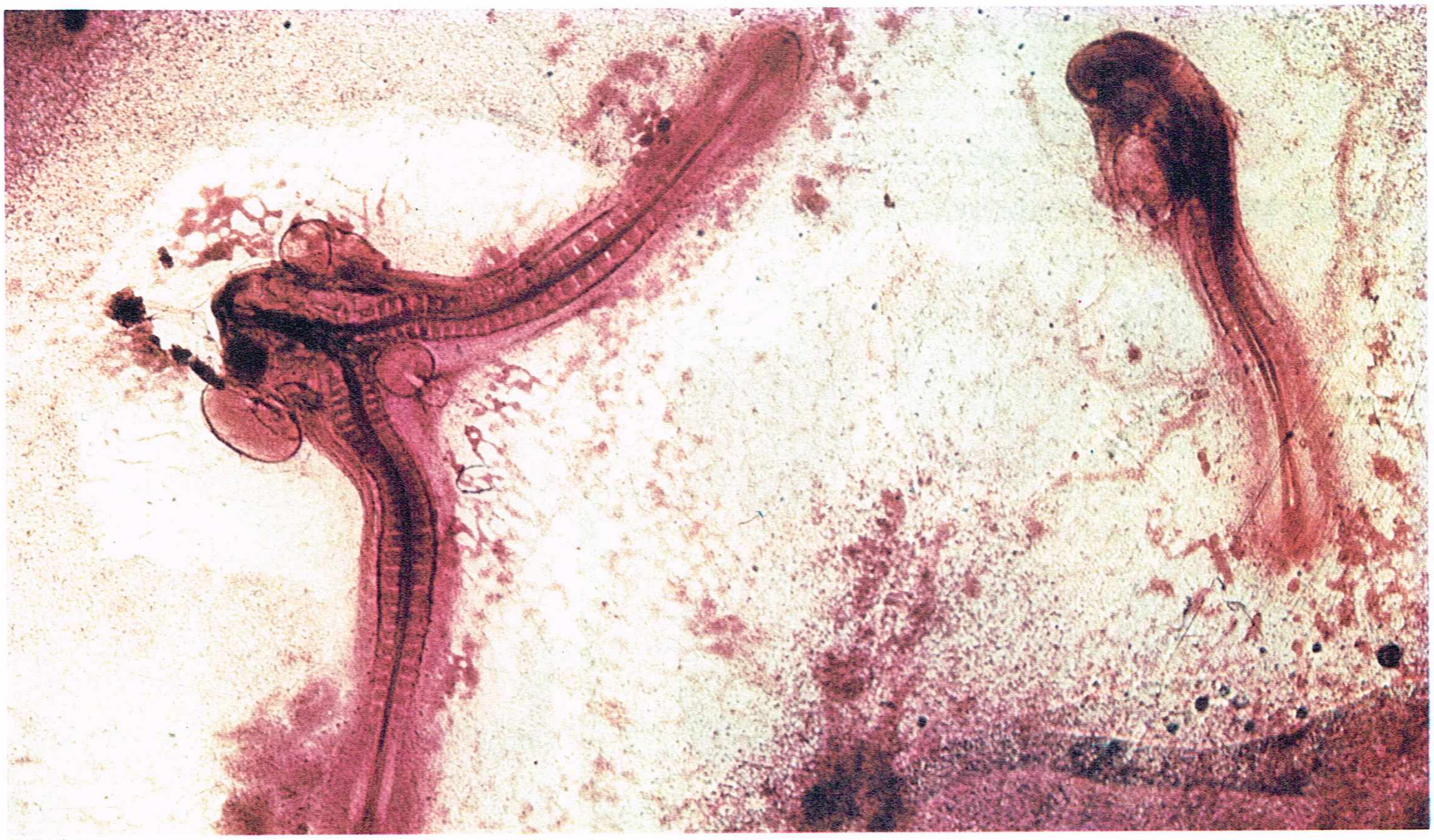

D. Huchon

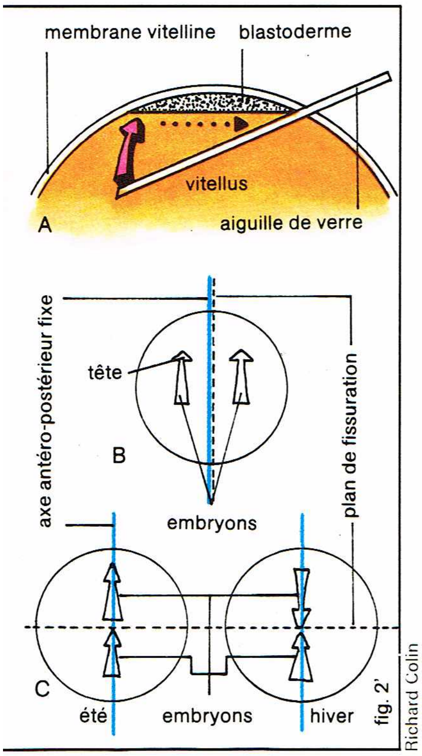

▲ *A gauche, expérience de fissuration du blastoderme chez l'œuf de poule non incubé : A, schéma de l'opération; B, fissuration parallèle à l'axe; C, fissuration perpendiculaire à l'axe. A droite, gastrulation chez l'oursin : l'archentéron est visible.*

ouverture d'une fenêtre dans la coquille. Une aiguille de verre noir est enfoncée dans le jaune sous le blastoderme, puis relevée pour entrer en contact avec la membrane vitelline et retirée. Le frottement de l'aiguille sous la membrane vitelline coupe le blastoderme en deux fragments. L'œuf est refermé à l'aide d'un morceau de ruban adhésif et mis à incuber. Au stade auquel l'opération est pratiquée, la direction de l'axe antéro-postérieur est fixée. Si la fissuration est pratiquée parallèlement à celui-ci, les embryons obtenus sont disposés l'un à côté de l'autre et dans le même sens (fig. 2'). Si la fissuration est pratiquée perpendiculairement à cet axe, deux cas sont observés. Quand l'opération est pratiquée en été, le sens céphalo-caudal est fixé au moment de la fissuration : les embryons sont disposés dans le prolongement l'un de l'autre tête contre queue. Mais si l'opération est réalisée en hiver, les embryons sont disposés dans le prolongement l'un de l'autre tête contre tête; c'est l'embryon issu de la portion postérieure du blastoderme qui présente une orientation normale. Cette disposition particulière peut être rapportée au fait que le développement du blastoderme est alors peu avancé; l'*entophylle* n'est pas mis en place et, de ce fait, la polarité céphalo-caudale n'est pas fixée tout au long de l'axe antéro-postérieur.

Par fissurations multiples, Lutz a pu obtenir jusqu'à six embryons. Dans tous les cas, le développement ne peut être mené au-delà de quatre à cinq jours d'incubation. Des fissurations incomplètes déterminent la formation de monstres doubles : soit à deux têtes, c'est-à-dire en y, soit à deux troncs, c'est-à-dire en λ.

Les Mammifères

Les phénomènes de polyembryonnie spontanée sont une preuve du pouvoir régulateur étendu de l'œuf. Dans le cas des tatous, la polyembryonnie est la règle. Chaque œuf donne toujours quatre ou huit jeunes par fissuration du disque embryonnaire. Chez l'homme, les jumeaux vrais (de même sexe et se ressemblant parfaitement) proviennent d'un seul œuf fécondé. Ce ne sont pas les deux premiers blastomères qui se séparent. La fissuration se produit plus tardivement, comme le suggèrent les faits suivants. Les vrais jumeaux ont fréquemment une annexe embryonnaire en commun, l'*amnios;* celle-ci s'était donc organisée avant la section. Certains jumeaux présentent une disposition de leurs traits en miroir car la fissuration s'est produite après que le plan de symétrie bilatérale fut fixé. Le dédoublement peut parfois être incomplet. Il se forme alors des monstres doubles (jumeaux siamois) unis par la région fessière, le thorax, la tête, etc.

Expérimentalement, la destruction d'un des deux premiers blastomères a été réalisée par piqûre chez la ratte (Nicholas et Hall, 1942). Les germes au stade 2 blastomères sont recueillis par lavage de la trompe utérine avec

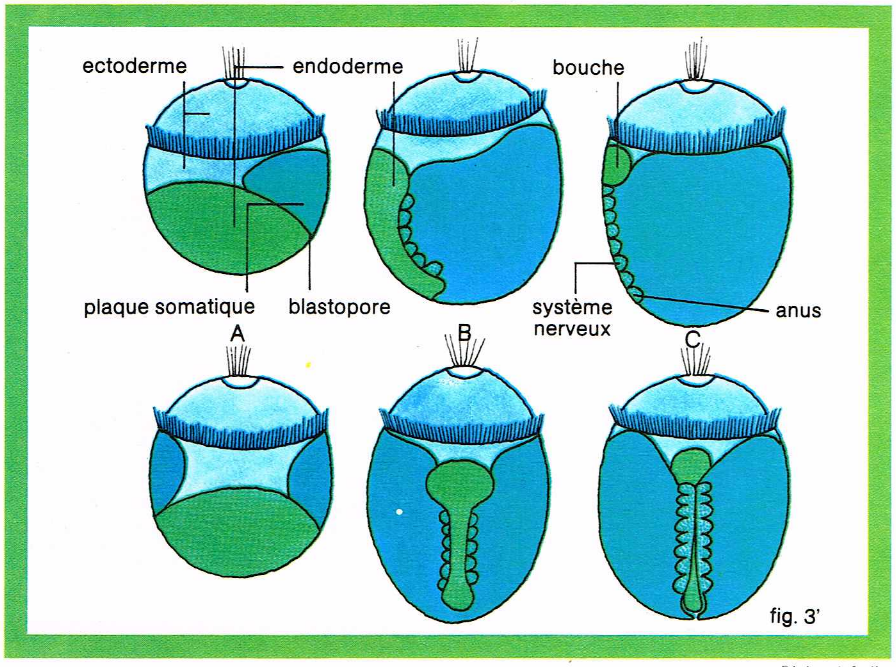

Richard Colin

C. Bevilacqua - S. Prato

du liquide physiologique stérile. L'opération est réalisée *in vitro*. Le blastomère intact est réimplanté dans la trompe utérine d'une femelle receveuse préparée à la gestation par traitement hormonal. Dans les meilleurs cas, le germe peut se développer et donner un individu viable normal. A partir d'un seul des quatre premiers blastomères, on n'obtient qu'un blastocyste léthal.

Des expériences similaires ont été effectuées chez la lapine et la souris. La fusion de deux germes peut être réalisée soit au stade 2 blastomères, soit à des stades plus âgés (jusqu'au stade 32 blastomères). Des morulas de souris, débarrassées de toutes membranes, sont comprimées l'une contre l'autre et fusionnent en une morula géante (Tarkowski, Mintz). Le germe est introduit dans l'utérus d'une souris receveuse préparée à cet effet. De tels germes sont des chimères. En effet, les cellules assemblées présentent des constitutions génétiques différentes. Par cette technique, des centaines de souris chimères viables ont été obtenues. Les auteurs ont utilisé comme marqueur génétique la coloration du pelage; le chimérisme se traduit alors par l'aspect tigré de la livrée. Quelques cas d'hermaphrodisme ont été relevés qui correspondent à des associations hétérosexuées. On admet que des fusions d'œufs peuvent très exceptionnellement se produire spontanément dans l'espèce humaine.

Les phénomènes de régulation que nous venons de décrire se situent à l'échelle du germe entier. Nous avons précisé que certaines conditions doivent être respectées pour qu'il y ait régulation. Dans le cas d'œufs d'oursin, les sections doivent être méridiennes, dans celui des œufs d'Amphibien il faut, de plus, que la localisation cytoplasmique du croissant gris soit intéressée par la section. Chez les Amphibiens, au stade de la blastula âgée (stade de l'encoche dorsale du blastopore), le territoire endodermique et la lèvre dorsale du blastopore sont déterminés, bien que le germe tout entier soit capable de régulation. Ce fait est prouvé par une expérience de Spemann (1918). Une blastula âgée de triton est sectionnée selon le plan de symétrie bilatérale. On inverse l'une des moitiés par rotation de 180° par rapport à l'autre, ensuite on accole ces deux demi-blastulas. La cicatrisation se fait, et deux embryons soudés dos à dos s'organisent.

A plusieurs reprises, il a été mentionné que le pouvoir régulateur du germe diminuait au fur et à mesure de son vieillissement. Pendant les phases suivantes de l'embryogenèse les phénomènes de régulation seront nuls à l'échelle de l'embryon entier, mais ils joueront encore un rôle important à l'échelle des ébauches d'organes.

Gastrulation et morphogenèse primaire

Modalités

Nous avons mentionné un certain nombre de mouvements à propos de la gastrulation du pleurodèle : invagination, épibolie, élongation, convergence, divergence, qui concourent à la mise en place des feuillets. L'importance relative de ces mouvements dans les phénomènes de gastrulation et morphogenèse primaire varie selon les groupes zoologiques.

Les Échinodermes (oursin)

Gastrulation. La blastula d'oursin est caractérisée par un vaste blastocèle. La gastrulation se réalise par un mouvement essentiel d'*invagination*. La blastula, constituée d'environ un millier de cellules, s'aplatit dans la région du pôle végétatif. Un certain nombre de petites cellules (40 à 60) dérivant des micromères migrent dans le blastocèle et constituent le mésenchyme primaire. Immédiatement après se produit l'invagination d'une grande partie de l'hémisphère végétatif (les cellules dérivées du plan $vég_2$). Le cul-de-sac ainsi obtenu est l'archentéron. Il s'ouvre à l'extérieur par le blastopore.

Formation des vésicules cœlomiques. La gastrula s'aplatit d'un côté et acquiert une symétrie bilatérale. Quand la phase d'invagination s'achève, l'extrémité antérieure de l'archentéron bourgeonne deux évaginations, ébauches des vésicules cœlomiques. L'ensemble, mésenchyme primaire-vésicules cœlomiques (mésenchyme secondaire), constitue le feuillet moyen. Les vésicules se détachent; l'extrémité antérieure de l'archentéron se recourbe vers la face aplatie jusqu'à entrer en contact avec le feuillet ectodermique. C'est à ce niveau que la bouche se perce. En même temps, le tube digestif se subdivise par des étranglements circulaires en trois secteurs : l'œsophage, l'estomac et l'intestin. La larve acquiert des prolongements membranaires ciliés et des bras soutenus par un squelette calcaire édifié à partir du mésenchyme primaire. C'est la larve *pluteus*, typique des oursins, que l'on observe 48 h après la ponte à la température ordinaire.

Les Annélides (Spiralia)

La blastula est, dans la majorité des cas, pratiquement dépourvue de blastocèle. La mise en place des trois feuillets est obtenue par le processus d'*épibolie*. Nous avons déjà parlé de l'intérêt présenté par ce groupe à propos de la notion de détermination. Les différentes parties de la blastula ont un devenir *fixé*, et on peut établir une carte des *ébauches embryonnaires*. La rosette donnera naissance à une plaque cellulaire épaissie portant une touffe de cils. La croix est à l'origine du système nerveux. Les blastomères situés entre les branches de la croix donneront l'ectoderme céphalique. Les cellules de la zone équatoriale donneront la couronne ciliée (organe locomoteur de la larve). Le blastomère 2d a un rôle tout à fait spécial. Ses divisions ne sont pas spirales mais bilatérales et donnent un groupe cellulaire appelé *plaque somatique*. Celle-ci est à l'origine de l'ectoderme du tronc de l'adulte. Le blastomère 4d est à l'origine du mésoderme. Les micromères 4a, 4b, 4c ainsi que les quatre macromères 4A, 4B, 4C, 4D forment un ensemble de sept grosses cellules qui représentent l'ébauche de l'endoderme.

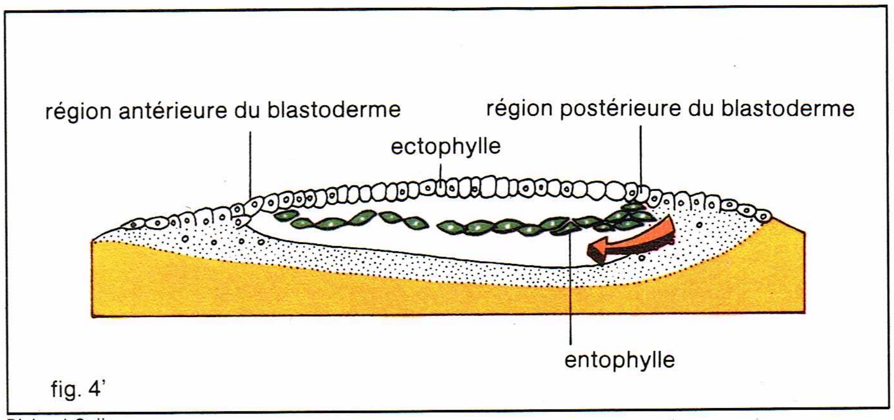

Richard Colin

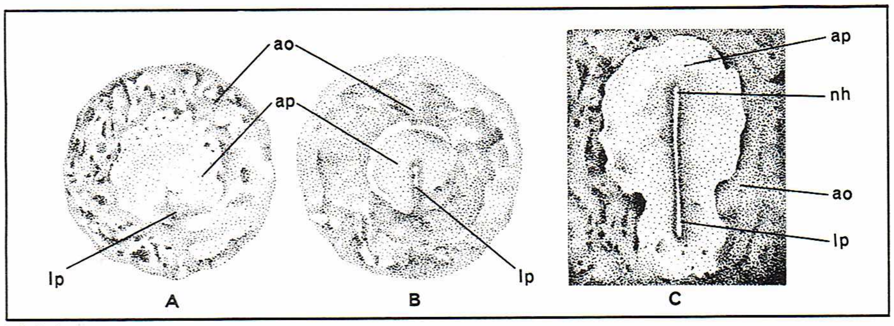

I.G.D.A.

▲ *En haut, formation du germe diblastique de poulet. En bas, trois stades de la formation de la ligne primitive à partir de l'ectophylle, chez le poulet : ao, aire opaque; ap, aire pellucide; lp, ligne primitive; nh, nœud de Hensen.*

Les éléments de la plaque somatique s'étendent et recouvrent peu à peu les cellules endodermiques (phénomène d'épibolie). Le bord libre de la plaque constitue le blastopore. Il se rétrécit et se réduit à une fente longitudinale dont les bords se soudent dans la région médiane. L'extrémité antérieure de cette fente devient la bouche, l'extrémité postérieure l'anus. Plus tard, la masse endodermique compacte se creuse d'une cavité digestive. La larve typique des Annélides est la larve *trochophore*. En forme de toupie, elle porte un appareil ciliaire caractéristique : bandelette orale et touffe apicale.

Les Oiseaux (poulet)

Mise en place des trois feuillets. Peu avant la ponte, le blastoderme se transforme en un germe diblastique. La couche cellulaire superficielle est appelée *ectophylle*, la couche interne *entophylle*. Ces deux termes ont été choisis afin de ne pas anticiper sur le devenir de ces feuillets. L'entophylle provient essentiellement d'une croissance centripète de la face interne de la zone marginale du blastoderme. Cette prolifération est plus active dans la région postérieure.

A la ponte, l'œuf de poule doit être mis à incuber pour poursuivre son développement. Les phases de la gastrulation peuvent être suivies en examinant le blastoderme par la face supérieure dorsale. Dès les premières heures d'incubation, un épaississement de l'ectophylle dans la zone postérieure se dessine, puis s'allonge vers l'avant et enfin se creuse d'un sillon longitudinal : la *ligne primitive*. L'extrémité antérieure compacte du sillon est le *nœud de Hensen*. Après 16 à 20 heures d'incubation, si les blastodermes sont observés par transparence, on distingue sous l'ectophylle : l'ébauche de la corde dorsale *(prolongement céphalique)*, amas cellulaire dense, axial, situé en avant de la ligne primitive, et une nappe cellulaire mince (mésoderme), de part et d'autre du prolongement céphalique et de la ligne primitive.

L'analyse de la gastrulation a été rendue possible par l'interprétation de coupes transversales et longitudinales de blastoderme et par la réalisation d'une carte des territoires présomptifs. Cette carte a été établie par Pasteels. Pour cet auteur, l'entophylle représente la source de tout l'endoderme. Des travaux récents ont montré que l'entophylle est seulement à l'origine de l'endoderme extra-embryonnaire. Chez les Oiseaux, en effet, une grande partie du blastoderme est à l'origine d'organes transitoires extérieurs à l'embryon, permettant à celui-ci de réaliser au sein du système clos que constitue « l'œuf » un milieu aquatique où l'embryon est logé et d'utiliser

◀ *Page ci-contre, en bas, schéma montrant l'extension de la plaque somatique, l'évolution du blastopore, la formation de la bouche, de l'anus et du système nerveux, chez les Annélides Polychètes. En haut, les embryons sont représentés de profil, et en bas, en vue orale.*

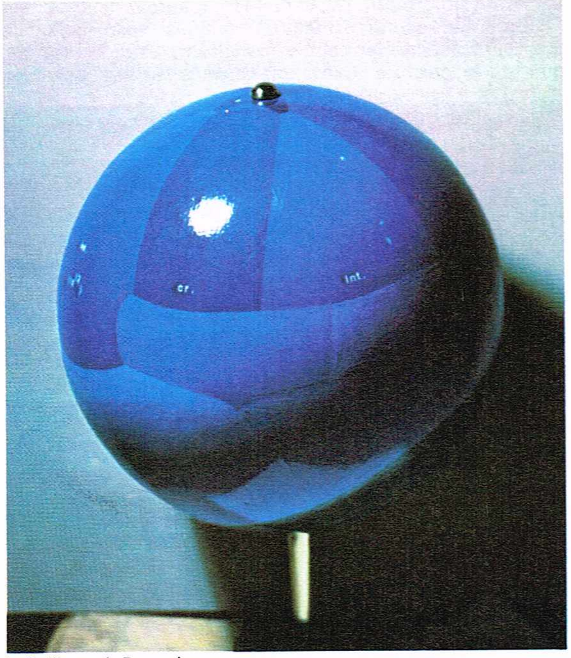

L. Gallien - J. Desrosiers

◀ *Carte des ébauches embryonnaires d'un germe de* **Spiralia** *(Annélides) vue de profil. Le territoire ectodermique est représenté en bleu. On peut y reconnaître la croix (cr), dont les bras sont séparés par les cellules intermédiaires (int), et en bas à gauche, la plaque somatique. Le territoire endodermique est coloré en vert.*

▶ *Gastrulation chez un embryon de poulet ayant 18 heures d'incubation : 1, aire opaque ; 2, aire pellucide ; 3, ligne primitive ; 4, nœud de Hensen ; 5, prolongement céphalique.*

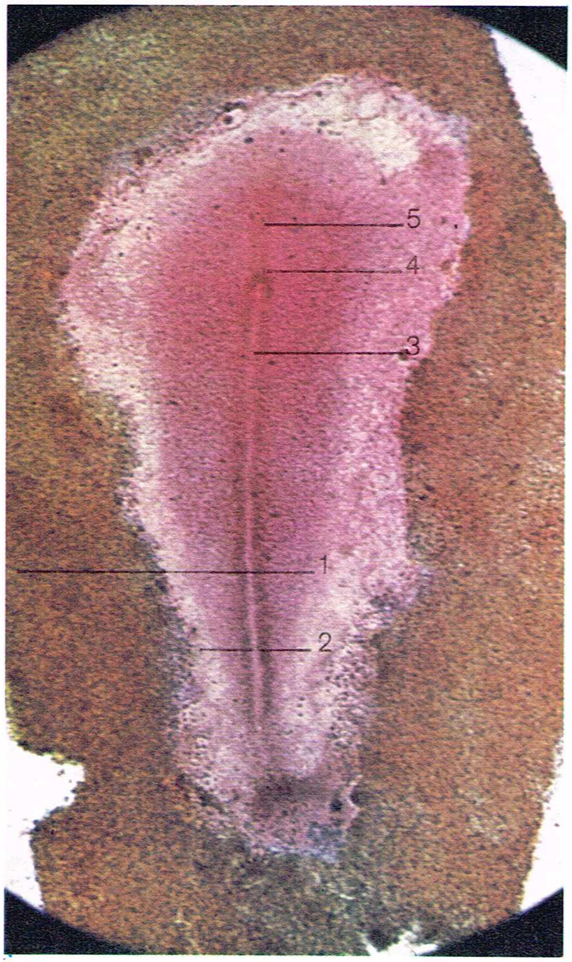

D. Huchon

▶ *Page ci-contre, au milieu, gastrulation chez l'Amphibien : A, section de gastrula âgée, montrant les cellules en forme de bouteille, bordant le blastopore ; B, aspect ultrastructural de la zone apicale des cellules en bouteille.*

▶ *Page ci-contre en bas, neurulation chez l'Amphibien : A, coupe transversale au stade de la plaque neurale ; B, coupe transversale au stade de la gouttière neurale.*

les réserves vitellines non incluses dans les cellules de l'appareil digestif. L'endoderme embryonnaire provient de cellules de l'ectophylle, mais le territoire présomptif n'est pas délimité avec précision.

Les mouvements principaux mis en œuvre pendant la gastrulation sont, pour le feuillet superficiel, la convergence en direction de la ligne primitive et, au niveau de celle-ci, une *immigration* en profondeur *cellule à cellule* ; pour les feuillets profonds, une élongation et une divergence. La ligne primitive est l'équivalent du blastopore des Amphibiens. Les cellules de l'endoderme embryonnaire migrent au niveau de sa partie antérieure (Nicolet, 1970), et, après leur arrivée en profondeur, refoulent sur les côtés les cellules de l'entophylle en prenant leur place. Les cellules mésodermiques passent en profondeur tout au long de la ligne primitive, puis le feuillet mésodermique se glisse entre l'endoderme et l'ectoderme. De l'avant vers l'arrière migrent : les cellules du mésoderme cordal, somitique, latéral et extra-embryonnaire. En avant du nœud de Hensen, le germe est typiquement tridermique. Bien qu'aplati et dépourvu de cavité archentérique, il représente une gastrula.

Neurulation. Elle s'amorce en avant de la ligne primitive avant même que tout le territoire de mésoderme extra-embryonnaire soit mis en place. En effet, après 20-21 heures d'incubation, les plis neuraux se dessinent. Dans les heures qui suivent, ils convergent, puis se soudent en débutant par la région du cerveau moyen. Le cerveau antérieur est encore ouvert. De même, vers l'arrière, la plaque neurale est ouverte à partir du niveau des premières somites.

Les Mammifères

Les phénomènes de gastrulation et de neurulation présentent de grandes analogies avec ceux que nous venons de décrire à propos des Oiseaux. Mais ils sont relativement tardifs dans l'embryogenèse et interviennent quand les annexes embryonnaires ont déjà commencé à s'organiser. Pour cette raison nous les décrirons dans le dernier chapitre, à propos du développement de l'homme.

Mécanisme des mouvements morphogénétiques

Les mouvements morphogénétiques se réalisent par des modifications de la forme des cellules. Il s'agit de changements de forme ressemblant aux mouvements amiboïdes, mais coordonnés du fait que les cellules sont reliées entre elles par une membrane basale. Les moyens de l'analyse expérimentale sont l'altération chimique de la membrane basale des cellules, la culture de fragments isolés ou associés de diverses manières et la microscopie électronique. Quelques exemples permettront de mieux comprendre ces mécanismes.

Les mouvements de la gastrulation chez l'oursin

Les forces de la gastrulation sont confinées dans la zone du pôle végétatif. Le mouvement essentiel est une invagination des cellules de la calotte végétative. Ce mouvement est préparé par l'activité des cellules dérivant des micromères.

Au cours de la phase initiale préparatoire, les micromères deviennent actifs ; leur cytoplasme est agité de pulsations. Ils se détachent de la membrane basale du germe et se meuvent vers le blastocèle. Pendant cette période, les grosses cellules de la calotte végétative ne manifestent pas le moindre signe d'invagination. Quand la migration des micromères est achevée, les cellules issues de l'étage vég$_2$ et localisées au pôle prennent une forme en poire. Des pulsations internes les agitent, elles s'arrondissent, et, de ce fait, leur cohésion diminue. Cette plage de cellules arrondies est entourée d'un anneau de blastomères fortement liés à la membrane basale. Cette disposition crée des tensions mécaniques propres à provoquer l'invagination (Gustafson, 1967). Une petite ampoule plus ou moins sphérique se forme ainsi à l'intérieur du germe au niveau du pôle végétatif. La formation de l'ampoule est liée à la présence des micromères à l'intérieur du blastocèle. En effet, si quelques micromères sont transplantés dans la moitié animale d'une jeune blastula, une invagination supplémentaire apparaît au site de la greffe. En plus de leur rôle de cellules mères des spicules, ils contiennent donc un agent activant entraînant le processus d'invagination.

Les mouvements requis au cours de la dernière étape de la gastrulation sont d'un type très différent. Les cellules apicales de l'ampoule archentérique émettent des pseudopodes qui s'attachent à la paroi externe antérieure de la gastrula, là où la bouche se percera ultérieurement. Leur contraction tire l'extrémité du tube archentérique et fait progresser le processus d'invagination.

Mécanisme de la gastrulation chez les Amphibiens

L'essentiel des travaux réalisés à ce sujet est déjà ancien (Holtfreter, 1939-1944). L'auteur insiste sur l'importance d'une formation gélifiée extra-cellulaire qui rend solidaires les cellules périphériques de la blastula, puis de la gastrula. Cette formation a pu être observée

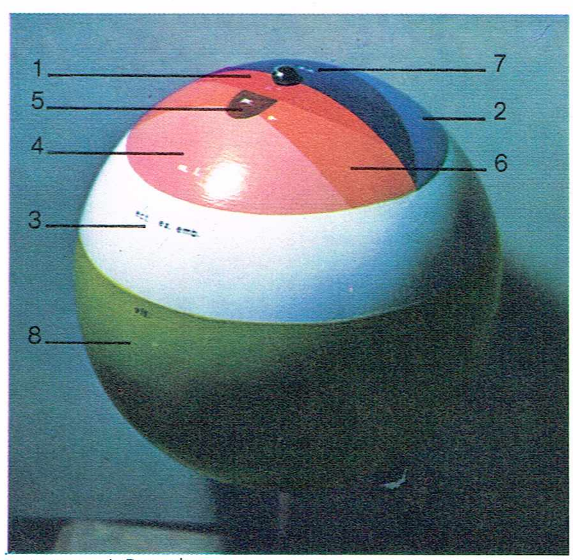

L. Gallien - J. Desrosiers

▶ *Carte des territoires présomptifs du germe de poulet : 1, corde ; 2, ectoderme ; 3, ectoderme extra-embryonnaire ; 4, mésoderme latéral ; 5, mésoderme précordal ; 6, mésoderme somitique ; 7, système nerveux ; 8, vitellus.*

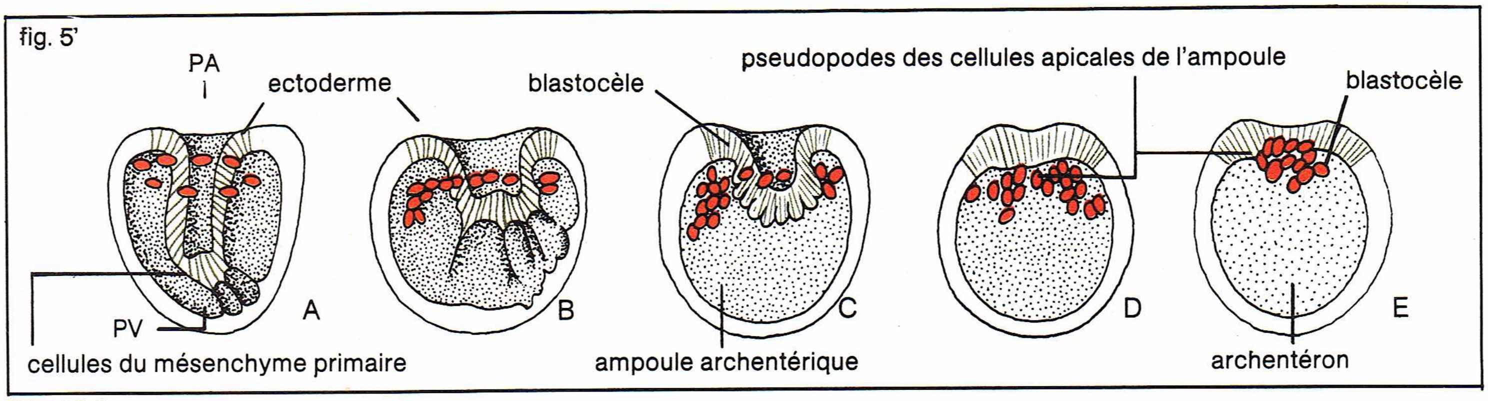

Richard Colin

beaucoup plus tard en microscopie électronique d'une part sur des œufs de xénope (Gingell, 1970), et d'autre part à l'extrémité effilée des cellules en bouteille de l'encoche dorsale du blastopore de la blastula de triton (Perry et Waddington, 1966). Les cellules internes des germes sont peu liées entre elles.

Juste avant le début de l'invagination, certaines cellules endodermiques de la lèvre dorsale du blastopore prennent une forme en poire, puis en bouteille. Le goulot des cellules en bouteille s'allonge et s'amincit jusqu'à ce que tout le corps cellulaire passe à l'intérieur du germe. Cependant, ces cellules ne perdent pas le contact avec la surface, une longue microvillosité servant de lien. La présence de microtubules contractiles dans le goulot des cellules en bouteille (Perry et Waddington) explique vraisemblablement le déplacement du corps cellulaire à l'intérieur du germe. Là où un bouquet de cellules en bouteille se forme, la surface du germe se déprime légèrement. Pour que l'invagination se produise, il est indispensable que les cellules en bouteille soient entourées de cellules superficielles douées d'une grande adhésivité. Ceci est démontré par des expériences de greffes. Un greffon provenant d'une lèvre dorsale de blastopore est posé sur un substrat de cellules endodermiques superficielles en culture. Le greffon adhère immédiatement, puis pénètre dans la nappe cellulaire en provoquant un début d'invagination de cette dernière. Si le greffon est posé sur une nappe de cellules endodermiques profondes peu liées entre elles, les cellules du greffon adhèrent puis pénètrent dans la nappe cellulaire et s'y perdent. Il n'y a pas ébauche de sillon.

La poursuite du phénomène d'invagination est due à l'activité autonome des cellules du territoire mésodermique. En effet, si l'ectoderme est complètement ôté, l'invagination se poursuit, les cellules marginales mésodermiques ayant spontanément tendance à s'allonger dans le sens antéro-postérieur et à s'invaginer. Le mouvement d'épibolie de l'ectoderme est aussi dû à la propriété intrinsèque des cellules ectodermiques de s'étendre, mais cette fois dans diverses directions.

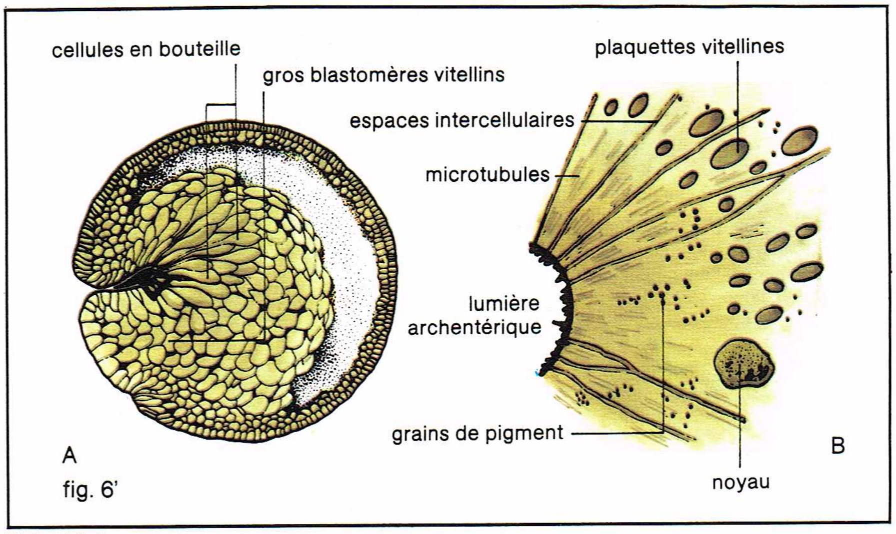

Richard Colin

Mécanisme de la neurulation chez les Amphibiens

L'analyse de la neurulation chez l'embryon de xénope (Schroeder, 1970) est menée par examen en microscopie optique et électronique de coupes transversales d'embryons choisis à des stades définis. Pour les besoins de l'analyse, l'ectoderme est subdivisé en plusieurs zones. Notre attention se portera sur deux catégories cellulaires seulement : les cellules de la zone médiane superficielle, les cellules de la zone profonde intermédiaire. Les premières, cubiques en début de neurulation, se transforment en cellules en bouteille. Pendant cette période, deux structures essentielles se différencient dans leur cytoplasme : des microfilaments d'actine parallèles à la face apicale des cellules, des microtubules (jusqu'à 150) de

▲ En haut, phases de la gastrulation chez l'oursin; migration des micromères (A et B); invagination de l'endoderme : formation de l'ampoule archentérique (C) et élongation de l'archentéron (D et E).

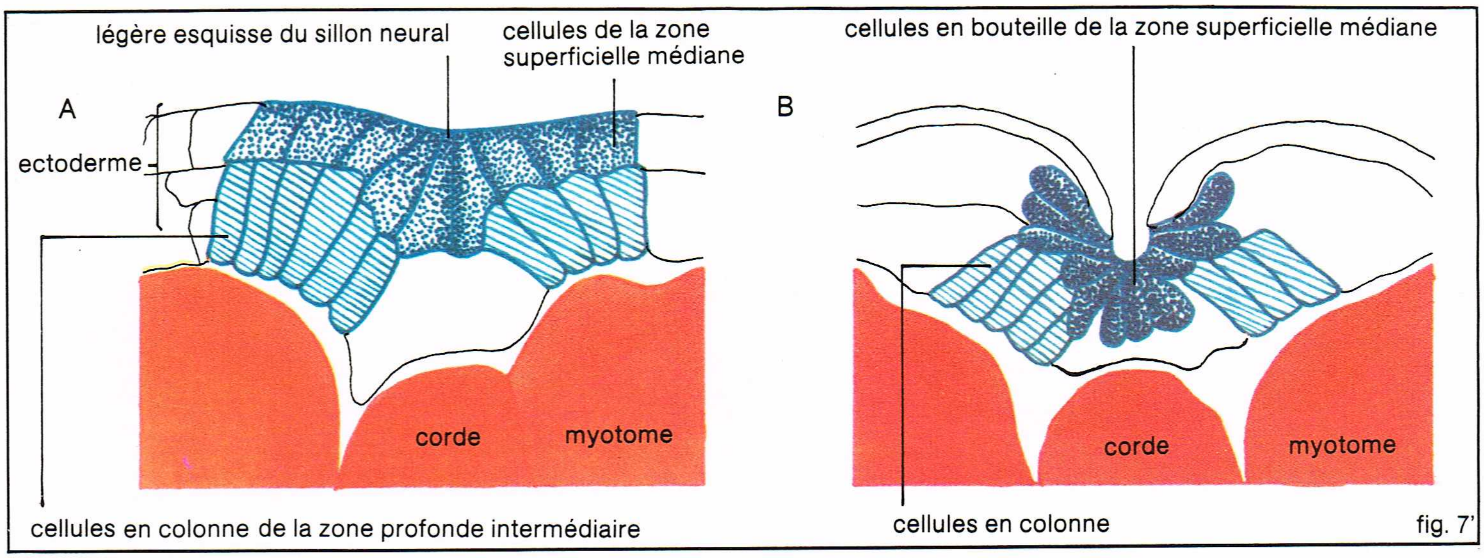

Richard Colin

▶ *Schéma de l'aspect ultrastructural de l'extrémité apicale des cellules en poire de la neurula d'Amphibien.*

tubuline parallèles à leur grand axe. En outre, ces cellules deviennent fortement adhésives entre elles au niveau de leur apex (présence de *desmosomes*). Les cellules intermédiaires profondes en forme de colonne sont disposées régulièrement en palissade. Leur cytoplasme renferme quelques microtubules parallèles à leur grand axe.

Le modèle de neurulation proposé par l'auteur est le suivant : les cellules de la zone médiane effectuent leur propre déformation (cellules cubiques → cellules en bouteille) par les effets combinés des microtubules et des microfilaments contractiles. De telles déformations entraînent la formation du sillon. Les cellules palissadiques de la zone intermédiaire profonde s'allongent et de ce fait contribuent au soulèvement des bourrelets neuraux. L'élongation de ces cellules est provoquée par l'étirement de leurs microtubules. L'ectoderme latéral migre vers l'axe de l'embryon par un mécanisme d'extension cellulaire apparenté au mouvement amiboïde.

Détermination des ébauches d'organes Induction

Pendant la période de morphogenèse primordiale, toutes les ébauches des différents organes acquièrent peu à peu leur autonomie, et ceci dans tous les exemples de développement embryonnaire. Quand les feuillets sont mis en place, le germe apparaît comme une mosaïque de territoires dont le devenir est irréversiblement orienté. Tous ces territoires sont donc déterminés. Cependant, aucun signe de différenciation n'est décelable à ce stade.

Certains germes deviennent très tôt une mosaïque de territoires déterminés (par exemple, les *Spiralia*), tandis que dans d'autres cas (par exemple, le germe d'Amphibien), seules quelques aires privilégiées ont leur devenir fixé quand débute la gastrulation. La détermination des territoires restants, au cours de la période de morphogenèse primaire, se produit sous l'influence de stimulations émanant de massifs cellulaires situés dans leur voisinage. Ce type d'influence morphogénétique est une *induction*.

▶ *Page ci-contre, en haut, embryon composite de pleurodèle résultant d'une expérience d'induction primaire, au stade du bourgeon caudal; on peut reconnaître l'embryon primaire mieux développé dans sa région céphalique que l'embryon secondaire induit.*

▼ *Schéma de l'expérience fondamentale d'induction de Spemann. A, greffe de la lèvre dorsale du blastopore d'une gastrula sur la face ventrale d'une autre gastrula de même âge. B aspect, au stade neurula, du porte-greffe.*

L'induction

C'est à Spemann et à son école que l'on doit les principaux travaux sur l'induction. Les premières expériences de mise en évidence du phénomène remontent aux années 1901-1912. L'ébauche nerveuse de l'œil (appelée *vésicule optique*) d'un embryon de triton au stade du bourgeon caudal est extirpée et transplantée sous l'ectoderme ventral. Quelques heures plus tard, au niveau de la greffe, l'ectoderme se différencie en cristallin. La vésicule optique a donc modifié le devenir d'une portion d'ectoderme ventral de l'embryon.

A propos de l'induction du système nerveux chez les Vertébrés, nous tenterons de préciser le mécanisme du phénomène.

Analyse des expériences fondamentales

— *L'expérience de Spemann*. Une série d'expériences, dont la portée fut considérable pour la compréhension de l'organogenèse primordiale des Vertébrés, fut menée entre 1921 et 1924. L'expérience principale fut réalisée entre deux espèces de tritons, l'une caractérisée par des œufs très pigmentés *(Triturus toeniatus)*, l'autre par des

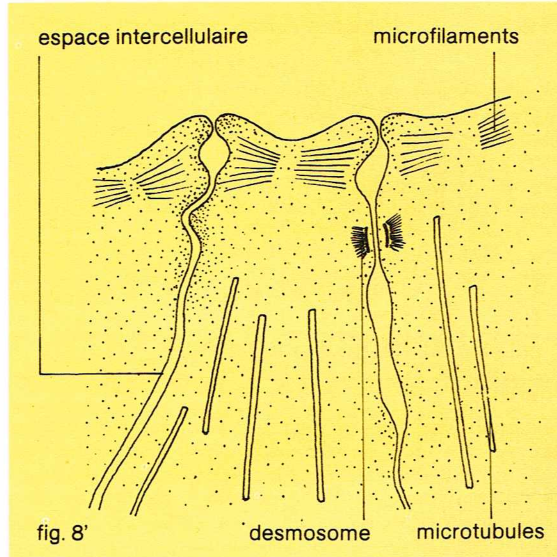

Richard Colin

œufs dépigmentés *(Triturus cristatus)*. La lèvre dorsale du blastopore d'une jeune gastrula de *Triturus toeniatus* est transplantée sur la face ventrale d'une gastrula de *Triturus cristatus* de même âge, à la place d'un volet d'ectoderme présomptif préalablement excisé. La cicatrisation s'effectue en un quart d'heure. On laisse le germe se développer. Une deuxième encoche blastoporale se creuse au niveau de la greffe et une double gastrulation se produit. Deux plaques neurales se dessinent et on obtient un *monstre double*. L'embryon organisé à partir de la lèvre dorsale propre au porte-greffe est dit *embryon primaire*, celui organisé à partir du greffon est dit *embryon secondaire*. Dans les meilleurs cas, ils se développent d'une façon similaire.

L'analyse histologique des monstres doubles au stade du bourgeon caudal permet de préciser l'origine des organes de l'embryon secondaire, étant donné les différences de pigmentation des germes utilisés. Le greffon donne naissance à la corde et à une partie des somites. Le névraxe, une petite fraction du mésoderme somitique, les néphrotomes, le mésoderme des lames latérales et l'endoderme sont édifiés à partir des cellules du porte-greffe.

En résumé : l'hôte a poursuivi ses mouvements de gastrulation et édifié les organes axiaux de l'embryon primaire. Le greffon transplanté a suivi le cours normal de son développement. Il s'est invaginé par enroulement et a donné du mésoderme cordal et du mésoderme somitique. Il s'est comporté comme un territoire déterminé.

L'ectoderme présomptif ventral du porte-greffe a vu le cours de son développement modifié par la présence voisine d'un massif cellulaire déterminé. Il a été *induit* à former du névraxe; c'est l'*induction neurogène*, dite aussi *induction primaire*, car c'est elle qui engage le germe dans une suite d'*inductions en chaîne* qui auront pour effet l'édification et le modelage progressif des organes de l'embryon. Le mésoderme présomptif des lames latérales du porte-greffe a donné du mésoderme somitique et du néphrotome. Il a donc également subi une induction. Le territoire endodermique n'a pas été affecté dans sa différenciation par la présence du greffon. Il s'agit d'un territoire également très précocement déterminé.

Les organes induits ne sont pas des formations chaotiques. L'embryon secondaire est harmonieusement constitué; c'est pourquoi Spemann fut amené à considérer la lèvre dorsale du blastopore comme un territoire dirigeant l'organisation de l'individu : un *centre organisateur*.

En nous référant à la carte des ébauches présomptives des Amphibiens, nous constatons que le centre organisateur coïncide avec les territoires de l'endoderme céphalique, du mésoderme cordal et d'une partie du mésoderme somitique. Il correspond à la zone du croissant gris de l'œuf fécondé. Cette zone est très précocement déterminée et présente des capacités de régulation.

La capacité inductrice du centre organisateur varie en qualité suivant la direction antéro-postérieure de ce terri-

fig. 9'

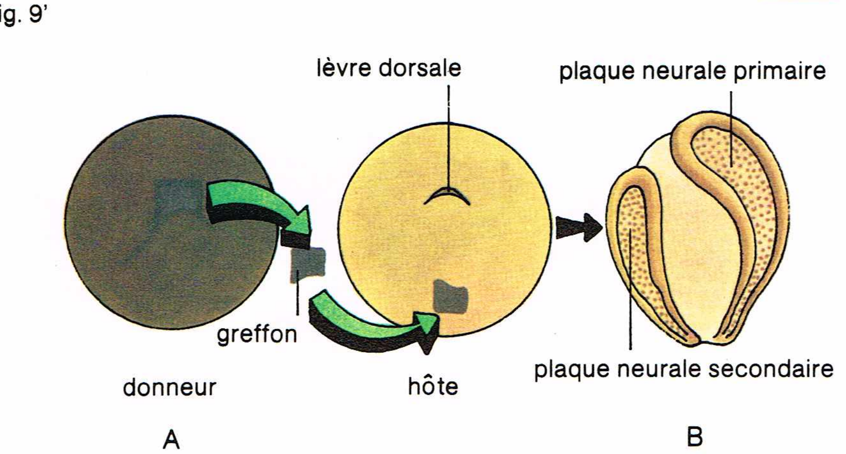

Richard Colin

toire. Pour éprouver ces différences de qualité, l'expérience de Spemann est réalisée en prélevant la lèvre dorsale du blastopore sur des gastrulas de plus en plus âgées : ainsi on ne prélève que les régions non encore invaginées. La portion *précordale* du centre organisateur induit la différenciation de formations presque exclusivement céphaliques (cerveau, vésicules olfactives, vésicules optiques). Au contraire, la portion de matériel cordal prélevée au stade du bouchon vitellin induit la différenciation de la moelle épinière. Ces expériences tendent à prouver qu'il existe deux inducteurs neurogènes, un inducteur céphalique et un inducteur troncal.

Quand l'embryogenèse se déroule normalement, le territoire cordo-mésodermique passe en profondeur par invagination, puis il exerce une induction neurogène sur le territoire présomptif neuro-ectodermique sus-jacent. Celui-ci se détermine et se différencie en tissu nerveux. Le cordo-mésoderme chez tous les Cordés induit la formation du système nerveux. Pour le démontrer, des expériences variées ont été menées entre 1939 et 1962 chez des Poissons, des Oiseaux, des Mammifères et chez l'*Amphioxus*.

— *Expériences d'exogastrulation*

Si la démonstration de l'induction neurogène du territoire cordo-mésodermique sur le territoire sus-jacent est acquise par les expériences de Spemann et de ses collaborateurs, les expériences d'*exogastrulation* de Holtfreter prouvent qu'il ne peut y avoir différenciation du système nerveux sans induction préalable émanant du cordo-mésoderme.

Des blastulas d'axolotl débarrassées de leurs membranes sont plongées dans une solution saline (NaCl 0,35 %). Les mouvements d'invagination ne se produisent pas, et les territoires endodermiques et mésodermiques situés au-dessous de la limite d'invagination s'étirent en un appendice rattaché à la calotte ectodermique creuse par un fin pédoncule. Il y a exogastrulation. Un tel germe anormal peut être conservé plusieurs jours. A partir de la masse endo-mésodermique se différencient une corde, des fragments de somites, tubes rénaux, cœlomes, une zone pharyngienne branchiale. Par contre, les cellules de la calotte d'ectoderme présomptif restent indifférenciées et inorganisées. Jamais un ectoderme neural épais ne s'édifie.

Compétence du territoire réactionnel

En analysant le processus de l'induction, nous nous sommes attachés jusqu'alors aux caractéristiques de l'inducteur. Il reste à considérer les conditions dans lesquelles le tissu réactionnel doit se trouver pour répondre au stimulus émanant de l'inducteur. On donne le nom de *compétence* (Waddington, 1932) à l'état physiologique d'un tissu lui permettant de réagir spécifiquement à un stimulus donné. Ainsi, on peut induire l'ectoderme ventral aussi bien que le neuro-ectoderme présomptif d'une jeune gastrula d'Amphibien à former du tissu nerveux. Ils sont tous deux compétents. Par contre, l'endoderme précocement déterminé n'est pas compétent. La compétence est un état temporaire. Elle apparaît au stade de la jeune gastrula. Pendant toute la gastrulation, l'ectoderme présomptif répond à l'induction neurale. L'aptitude à donner du tissu neural décroît à partir du stade neurula jeune.

L. Gallien - J. Desrosiers

C'est le vieillissement autonome du feuillet ectodermique qui est cause de la perte de compétence. En effet, si avant d'être greffés dans la zone dorsale d'une jeune neurula de triton, des fragments d'ectoderme présomptif de gastrula sont cultivés 54 h dans un milieu physiologique standard, toute induction est impossible (Holtfreter, 1938). La perte de compétence, au cours du vieillissement, serait liée à la synthèse de protéines résultant d'une auto-différenciation de l'ectoderme. L'ectoderme présomptif d'une jeune gastrula ne montre pas de différences

▼ Résultat d'une expérience d'exogastrulation chez l'axolotl (Amphibiens) A, aspect extérieur de l'exogastrula; B, coupe sagittale de l'exogastrula.

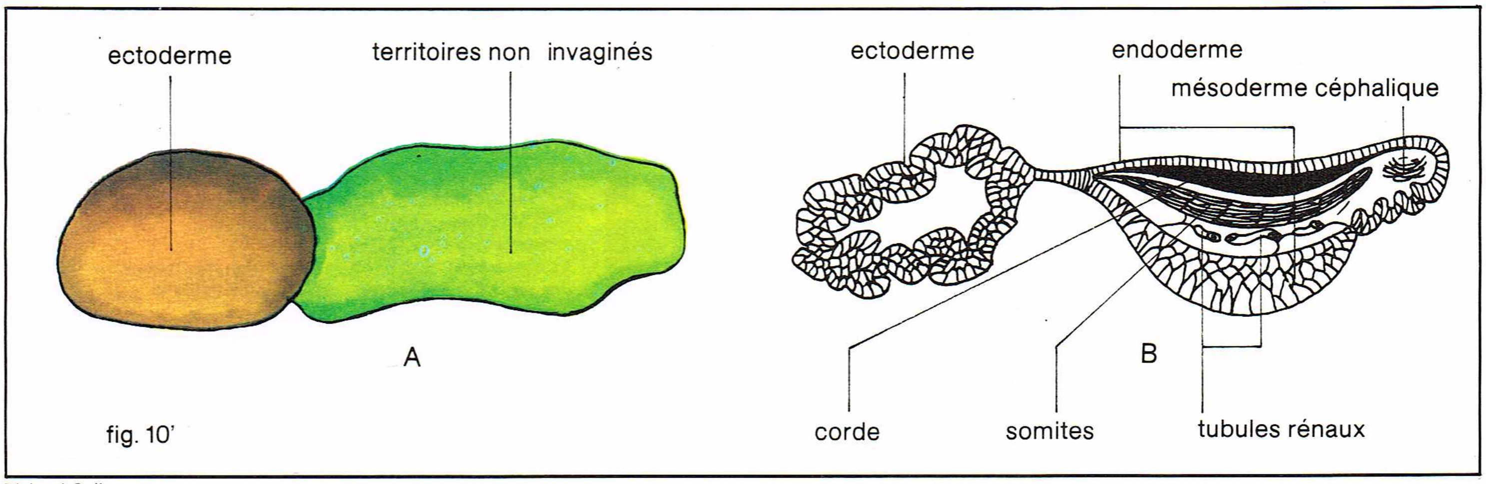

fig. 10'

Richard Colin

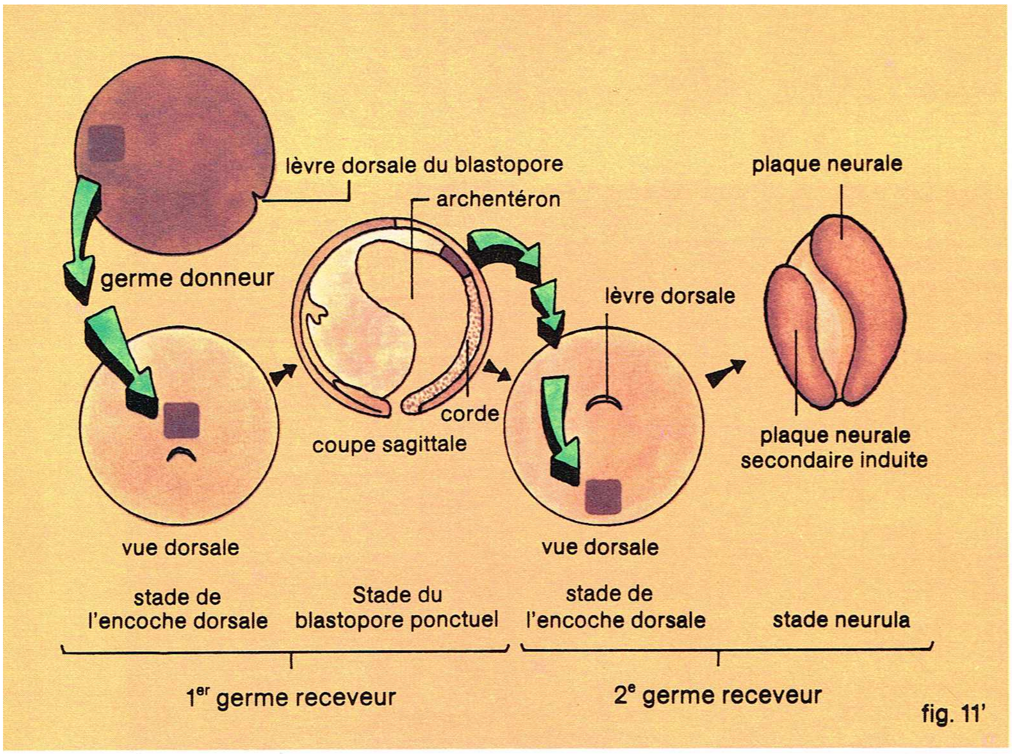

Richard Colin

▲ *Schéma de l'expérience de transmission du pouvoir inducteur à un tissu primitivement inactif chez l'Amphibien.*

réactionnelles régionales : il est compétent dans son ensemble.

Analyse de la nature des substances inductrices

Les auteurs ont rapidement été amenés à penser que le stimulus inducteur est de nature chimique, une ou plusieurs substances cédées par l'inducteur entraînant des différenciations dans l'ectoderme.

Une série de constatations a fait progresser le problème. L'effet inducteur peut se produire si on associe des éléments de germes appartenant à des groupes zoologiques plus ou moins éloignés. Ainsi, on obtient des résultats positifs en associant une lèvre dorsale de gastrula de crapaud et un porte-greffe gastrula de triton, une ligne primitive de poulet et l'ectophylle d'un blastoderme de canard, une ligne primitive de poulet et l'ectophylle d'un blastoderme de lapin, etc.

La capacité inductrice est transmissible à un tissu primitivement inactif. Chez *Triturus cristatus,* un fragment d'ectoderme présomptif est prélevé sur une blastula âgée (de couleur claire). Il est greffé à la place de la lèvre dorsale du blastopore d'une jeune gastrula (de couleur sombre) de *Triturus alpestris*. Le greffon cicatrise, s'intègre au porte-greffe et participe aux mouvements d'invagination. Au stade du bouchon vitellin, on le retrouve au toit de l'archentéron, sa couleur claire le rendant facilement repérable. Prélevé à nouveau, puis implanté une deuxième fois en position ventrale sur une jeune gastrula de couleur sombre, il se comporte comme un centre organisateur et induit la formation d'une plaque neurale secondaire. Il a donc acquis en quelques heures la capacité inductrice par contact avec l'inducteur primaire.

Les tissus inducteurs naturels sont capables de céder les substances inductrices dans le milieu environnant.

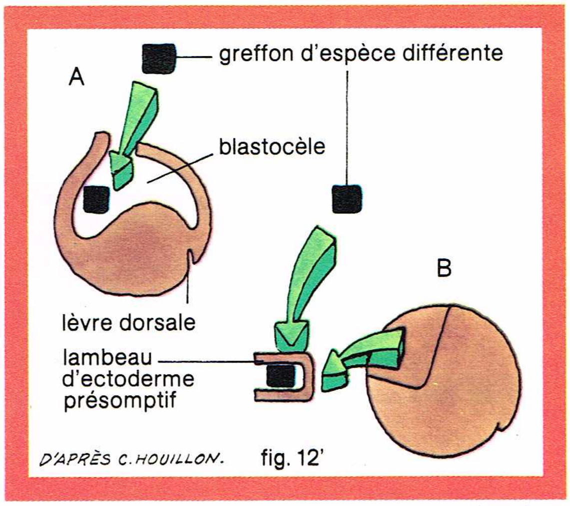

Richard Colin

▶ *Chez l'Amphibien, schéma des techniques d'étude des inducteurs étrangers : A, implantation d'un greffon dans le blastocèle ; B, technique du sandwich.*

Des fragments de lèvre dorsale de blastopore d'Amphibien sont mis en culture dans une solution physiologique pendant un délai d'une semaine à dix jours. Les fragments tissulaires sont ôtés et remplacés par des explants très petits (15 à 20 cellules) d'ectoderme présomptif de jeune gastrula d'Amphibien. La culture est poursuivie une ou deux semaines. Dans les cas les plus favorables, les explants se différencient en cellules nerveuses ou en *mélanophores* (Niu et Twitty, 1953).

Dès 1931, Spemann constate que les propriétés inductrices de la lèvre dorsale du blastopore de triton ne sont pas liées à l'intégrité de ses cellules. Broyée, traitée par la chaleur, le froid, la dessiccation, elle reste capable d'induire des formations neurales. Les techniques utilisées pour éprouver le pouvoir inducteur de greffons tués ou de greffons d'espèces différentes sont l'implantation de ceux-ci dans le blastocèle d'une jeune gastrula d'Amphibien, ou leur insertion dans un lambeau (replié sur lui-même) d'ectoderme présomptif de jeune gastrula d'Amphibien (technique du sandwich de Holtfreter). Ce dernier, en 1934, a montré qu'un fragment d'ectoderme présomptif acquiert la propriété inductrice s'il est tué. De même, toute une série de tissus de Vertébrés adultes (foie, rein...) se révèlent inducteurs quand ils sont tués et même parfois quand ils sont intacts ! On parle alors d'*inductions hétérogènes*. Des formations neurales ont pu être obtenues à partir de substances très diverses et très inattendues : savon, quartz, kaolin... Mais il faut spécifier que les formations obtenues ne sont jamais de belles plaques neurales.

Depuis 1940, l'analyse chimique des substances inductrices a été menée à partir des « *inducteurs hétérogènes* » : fragments d'organes d'adultes (foie, moelle osseuse de cobaye), d'embryons entiers de poulet. En effet, la petite taille des centres organisateurs n'a pas permis d'aborder sur eux cette étude. Ces travaux ont été menés au Japon par l'équipe de Yamada et en Allemagne par celle de Tiedemann. Les substances inductrices isolées sont éprouvées par diverses techniques. Elles peuvent être ajoutées directement à des milieux physiologiques où sont cultivés des fragments d'ectoderme présomptif. Elles peuvent être incorporées dans des petits blocs d'agar et ceux-ci ont ensuite été éprouvés par les mêmes techniques que les inducteurs tués ou les inducteurs hétérogènes.

Les substances inductrices sont toutes de nature protéique car toujours inactivées par la trypsine. Deux groupes d'inducteurs furent isolés : un *inducteur* spécifiquement *neural,* protéine associée à de l'acide ribonucléique, un *inducteur mésoblastogène,* purement protéique. Ces deux inducteurs seraient répartis de façon graduée selon l'axe antéro-postérieur du territoire cordal et endodermique céphalique. Ceci se traduirait dans les effets par la régionalisation du névraxe.

Passage des substances inductrices de l'inducteur aux cellules réactionnelles

La réalité de ce passage a été mise en évidence par les techniques de fluorescence et de microscopie électronique. Deux observations peuvent être citées.

Chez le *triton,* une induction hétérogène de tissu neural est réalisée, au stade gastrula jeune, à partir de moelle osseuse de cobaye. Un immunsérum anti-moelle osseuse de cobaye est préparé et associé à une substance fluorescente ; de cette manière, la plus légère précipitation moelle de cobaye-immunsérum est rendue « visible ». L'ectoderme neural induit est fixé et des coupes histologiques sont réalisées. Elles sont traitées avec l'immunsérum fluorescent. En microscopie optique une fluorescence de l'ectoderme induit est observée, prouvant que des molécules antigéniques issues de l'inducteur moelle osseuse ont pénétré dans le tissu réactionnel (Yamada, 1962).

Tarin et Scott (1970) ont observé au microscope électronique dans l'espace intercellulaire, entre le mésoderme dorsal et l'ectoderme neural d'une gastrula âgée de xénope, des granules disparaissant après traitement à l'ARNase. La pénétration de grosses molécules de ribonucléoprotéines ne semble possible que par le phénomène de *pinocytose*. Des vésicules de pinocytose sont d'ailleurs visibles dans l'ectoderme neural de jeunes neurulas de xénope (Kelley, 1969). Quand elles ont atteint le tissu réactionnel, les molécules inductrices sont retrouvées dans les plaquettes vitellines puis dans les noyaux.

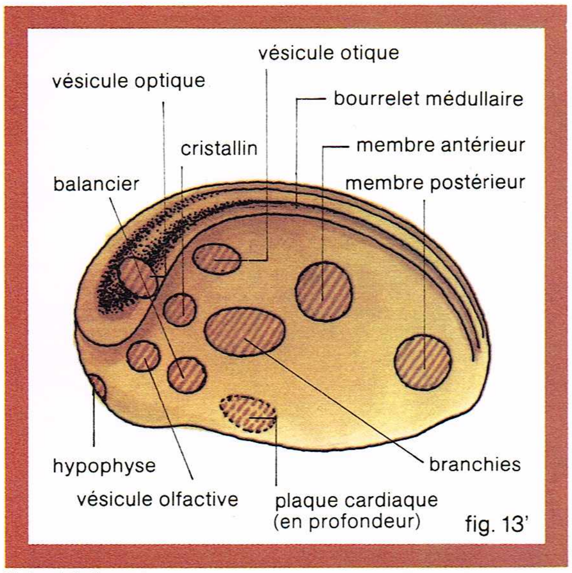

Richard Colin

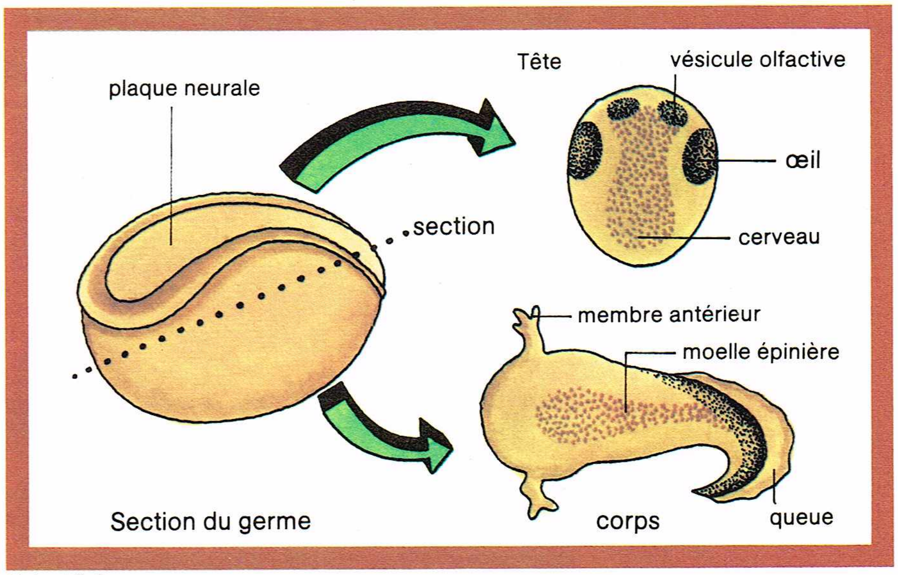

Richard Colin

▲ *A gauche, carte des champs morphogénétiques locaux de la neurula âgée de triton.*
A droite, expérience de section d'une neurula de triton, montrant que les territoires sont déterminés à ce stade. La partie supérieure comprenant la plaque neurale se différenciera en cerveau, vésicules optique et olfactive. La partie inférieure donnera une larve dépourvue de tête, mais munie d'un tronc, d'une queue et de membres.

Mode d'action des substances inductrices
Il reste encore très largement hypothétique. Les substances inductrices sont des protéines synthétisées par des gènes qui, dans l'inducteur, ont été déréprессés en fin de segmentation. Excrétées par l'inducteur puis parvenues dans les cellules réactionnelles, les protéines inductrices agiraient en déréprеssant certains gènes de structure et en permettant leur transcription. Cette hypothèse se trouve étayée par des expériences d'inhibition de la compétence du territoire réactionnel (Denis, 1964). Chez le pleurodèle, des explants de lèvre dorsale du blastopore de gastrula jeune sont placés entre deux lambeaux d'ectoderme présomptif (technique du sandwich), traités préalablement deux à trois minutes par une solution d'actinomycine D. Les lambeaux d'ectoderme peuvent survivre deux à trois jours en culture, mais ne présentent aucun signe de neuralisation. En d'autres termes, l'actinomycine supprime la compétence de l'ectoderme présomptif. Il est possible que l'agent inducteur, comme les hormones stéroïdes, se lie à un récepteur cytoplasmique et que le complexe inducteur-récepteur pénètre dans le noyau où il déréprimerait certains gènes.

La parcellation du germe

Que la détermination soit spontanée ou bien provoquée par un stimulus inducteur, l'embryon apparaît rapidement comme un ensemble de territoires globalement déterminés :

— Une jeune neurula de triton est sectionnée de façon à isoler une partie antérieure et dorsale d'une partie postérieure et ventrale (fig. 14'). Les deux fragments sont mis en culture. La partie supérieure, dans les cas les plus favorables, se différencie en cerveau avec vésicules olfactives, optiques et otiques. La portion inférieure donne une larve dépourvue de tête mais munie d'un tronc, d'une queue, et de membres.

— Chez le triton, au stade neurula, on prélève un greffon de plaque neurale. Greffé en position ventrale sur une neurula ou un jeune stade du bourgeon caudal, il se différencie en tissu neural, conformément à son lieu d'origine et indépendamment des tissus environnants.

— Un fragment d'ectoderme présomptif ventral est prélevé sur une jeune gastrula de triton, puis greffé sur le flanc d'une neurula. Il se développe au lieu d'implantation des formations surnuméraires (Holtfreter). Il existe une corrélation entre la nature de ces formations et le lieu d'implantation. Par exemple, si la greffe est faite dans la zone latérale de la tête, on obtiendra surtout des yeux. Les territoires de la neurula où l'on peut déceler par ces expériences de transplantation une détermination, sont appelés *champs morphogénétiques locaux.*

De tels champs ne présentent aucune différenciation, ni morphologique, ni histologique, à l'exception du tube neural organisé très précocement. Toujours plus étendus que les organes correspondants, les champs présentent des limites floues. Ils subissent une évolution au cours du temps :

— spatialement, ils rétrécissent et finissent par ne plus occuper que l'emplacement de l'organe correspondant ;

— tout d'abord globalement déterminés en tant qu'ébauches d'organes spécifiques, ils acquièrent des déterminations progressives : les axes se fixent, puis les champs se subdivisent en champs plus précis correspondant à des composants des organes. Ainsi, dans le champ du membre antérieur, se déterminent successivement les axes antéro-postérieur, dorso-ventral puis les champs particuliers du bras, de l'avant-bras, de la main.

Des capacités régulatrices peuvent se manifester au sein des champs locaux. Par exemple, si le champ d'un membre est partiellement excisé, la partie restante peut édifier un membre normal. Peu à peu, au cours du temps, lorsque le champ d'un organe devient parcellé en champs plus étroits, les capacités régulatrices ne s'appliquent plus qu'aux composantes locales de l'organe. A l'échelle des champs régionaux, nous retrouvons les mêmes processus de fixation progressive des éléments morphogénétiques que nous avons observés au niveau du germe entier.

Activité métabolique

Activité respiratoire
La consommation d'oxygène augmente davantage au cours de la gastrulation qu'elle ne l'a fait pendant la segmentation. L'intensité respiratoire varie suivant les régions du germe : maximale dans l'ectoderme neural présomptif de la blastula au stade de l'encoche dorsale du blastopore, elle décroît suivant que l'on considère des fragments d'ectoderme présomptif banal, de corde, de mésoderme et d'endoderme.

La dégradation des glucides (glycogène, glucose) devient importante très tôt au niveau de la lèvre dorsale du blastopore. Sans doute, faut-il rapporter ce fait à la dépense d'énergie que nécessitent les mouvements cellulaires précoces d'invagination.

Synthèse d'acides nucléiques
Les expériences de traitement de blastulas d'oursin à l'actinomycine D, les mesures de synthèses d'ARN et de protéines pendant la segmentation permettent d'affirmer que des gènes importants pour le contrôle des mouvements de la gastrulation fonctionnent avant le début de celle-ci. Le problème majeur qui se pose à propos de ce fonctionnement mais reste sans réponse, est de savoir par quels mécanismes les messages nécessaires au déclenchement de la gastrulation sont stockés puis activés au moment où les premiers mouvements se dessinent. Toutefois la période de gastrulation et de morphogenèse précoce correspond à une grande activité de synthèse des cellules.

★ Synthèse d'ADN
Chez les Amphibiens l'induction neurale provoquée par un organisateur vivant ou par la substance organisatrice isolée par Tiedemann s'accompagne d'un accroissement de synthèse d'ADN. Ceci se traduit par une recru-

▶ *A droite et page ci-contre en haut, stades de la neurulation et de l'organogenèse précoce chez l'embryon de poulet (vues dorsales) : de gauche à droite respectivement, embryon à 21 heures, 26 heures et 33 heures d'incubation. 1, aire opaque; 2, aire pellucide; 3, bourrelets neuraux; 4, cœur; 5, corde; 6, encéphale; 7, ligne primitive; 8, limite antérieure du tube digestif; 9, neuropore antérieur; 10, nœud de Hensen; 11, pharynx; 12, repli céphalique; 13, reste de la ligne primitive; 14, somites; 15, veines omphalo-mésentériques.*

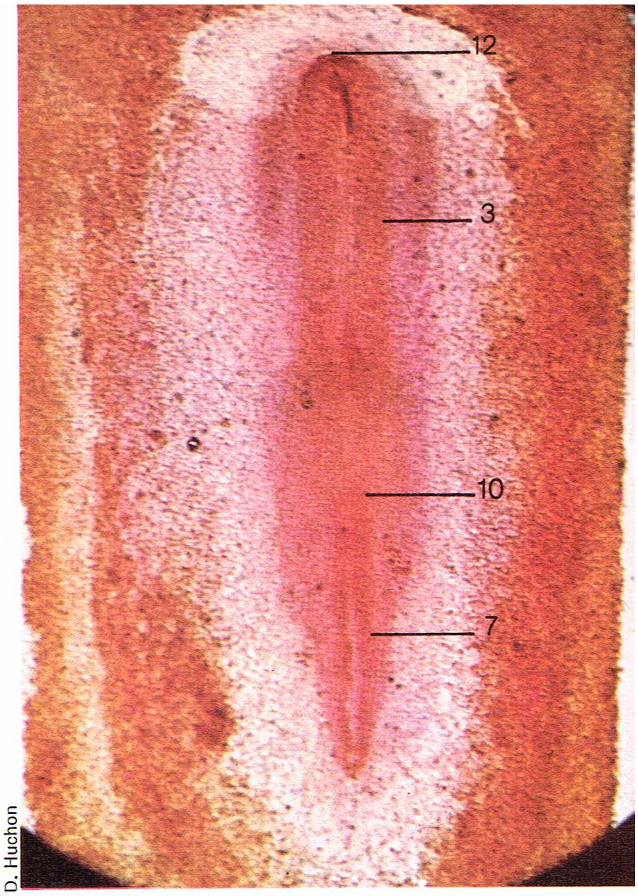

descence de mitoses dans l'ectoderme soumis à l'inducteur. Certaines données cytophotométriques indiquent que la teneur en ADN augmenterait dans chaque noyau des cellules de l'ectoderme induit en fin de gastrulation et pendant la neurulation. Un tel accroissement laisse supposer que certaines portions du génome seraient amplifiées. Il serait souhaitable de vérifier ce fait par d'autres techniques.

★ **Synthèse d'ARN**

— *ARN ribosomique*

Chez les Amphibiens, quand débute la gastrulation, la production d'ARN ribosomique devient détectable, mais les effets de cette synthèse sur la teneur en ARN de l'embryon ne se font sentir qu'au stade de la neurula car l'œuf était très riche en ARN ribosomique d'origine maternelle.

L'importance du stock d'ARN maternel est illustrée par le comportement du *mutant anucléolaire* léthal du xénope. Les individus homozygotes dépourvus d'organisateurs nucléolaires ne peuvent synthétiser d'ARN ribosomique. Ils sont léthaux mais cependant capables de survivre jusqu'à l'éclosion, car ils effectuent leurs synthèses protéiques aux dépens des ribosomes d'origine maternelle, ce qui masque pendant quelques jours leur déficience.

La synthèse des trois sortes d'ARN ribosomiques et de leur précurseur macromoléculaire débute un peu plus tôt dans l'hémisphère animal (stade de la blastula âgée) qu'elle ne le fait dans l'hémisphère végétatif (début de gastrulation).

— *ARN de transfert*

Leur synthèse débute chez les Amphibiens au stade blastula et chez les oursins au stade gastrula. Les ARN de transfert s'accumulent dans l'embryon plus vite que l'ARN ribosomique. A un ribosome correspondent dix molécules d'ARN de transfert. De plus toutes les espèces d'ARN de transfert sont représentées dans les différentes ébauches d'organes de l'embryon.

— *ARN messagers*

Les données concernent les Amphibiens. Les techniques d'hybridation moléculaire ADN-ARN montrent que pendant la gastrulation des *espèces nouvelles* d'ARN messagers sont synthétisées. Leur synthèse est plus importante dans la moitié végétative que dans la moitié animale. On suppose que ces ARN messagers jouent un rôle prépondérant dans l'induction neurale. Par la technique d'autoradiographie et par les méthodes biochimiques, on a pu prouver la réalité d'une synthèse d'ARN messager dans un ectoderme soumis à l'agent inducteur. En outre des expériences d'injection, dans le blastocèle d'une jeune gastrula, d'histones (qui se fixent sur l'ADN et le rendent inopérant) se traduisent par un arrêt des synthèses d'ARN messagers qui affecte surtout la différenciation du système nerveux et des somites.

Pendant la neurulation, également, de *nouvelles espèces* d'ARN messagers décelables par hybridation moléculaire sont synthétisées. Elles ont une vie brève, comme celles élaborées en début d'organogenèse avant que la différenciation cellulaire ne débute.

Synthèse de protéines

Le traitement de germes à l'actinomycine se révèle un moyen d'étude global des synthèses protéiques dirigées par le génome embryonnaire.

L'action de l'actinomycine sur la synthèse protéique a été suivie à plusieurs époques du développement chez le pleurodèle.

L'imperméabilité à l'actinomycine des jeunes stades oblige à travailler sur des explants. Ceux-ci sont prélevés dans une même région du germe afin que la comparaison soit valable. Conjointement un acide aminé marqué et de l'actinomycine D sont ajoutés au milieu de culture des explants. La radioactivité de ces derniers est ensuite mesurée. L'actinomycine inhibe lentement les synthèses protéiques (25 à 35 % de réduction en 24 heures) dans les cellules d'explants de blastula et de jeune gastrula (stade avec encoche dorsale du blastopore). L'inhibition est plus rapide ultérieurement et atteint 75 % en 24 heures pour des explants de jeune neurula. Donc au cours du déroulement de la gastrulation le germe synthétise un certain nombre de protéines.

La question majeure qui se pose à propos des synthèses protéiques pendant la gastrulation est de savoir si elles jouent un rôle dans le phénomène d'induction. Nous avons déjà précisé que les inducteurs neural et mésoblastogène sont synthétisés en fin de segmentation. Nous savons aussi que les inhibiteurs de la transcription (actinomycine) abolissent la compétence des territoires réactionnels. Il reste donc à préciser le rôle éventuel des protéines au niveau de ces territoires effecteurs :

— Des explants d'ectoderme présomptif de jeune gastrula d'Amphibiens sont cultivés *in vitro* 24 heures. Confrontés ensuite à l'inducteur (méthode du sandwich), ils ont perdu leur compétence par vieillissement.

— Des explants identiques cultivés 24 heures en présence de cycloheximide (inhibiteur de la synthèse protéique) sont soigneusement lavés puis éprouvés par contact avec l'inducteur. Ces explants ont conservé leur compétence (Grunz; 1970). L'auteur suggère que la *perte de compétence* de l'ectoderme est normalement due à une synthèse de protéines, *résultat* d'une *autodifférenciation*. Cette interprétation est étayée par l'observation d'explants d'ectoderme présomptif de jeune gastrula de triton, cultivés 14 jours; leurs cellules sont ciliées et présentent une ultrastructure comparable à celle de cellules d'épiderme d'embryon normal.

Organogenèse

Les processus responsables de l'organogenèse sont variés.

Des mouvements morphogénétiques du même type que ceux intervenant au cours de la gastrulation et de la morphogenèse primaire : migration, déformation des cellules, reploiement, évagination de nappes cellulaires, concourent à l'édification des organes. Ceux-ci s'individualisent le plus souvent grâce à des *ségrégations* de groupes cellulaires, dans certains cas cependant on assiste à des *fusions d'ébauches* (cœur) ou à des *processus de dégénérescence* (bourgeon de queue, corde, conduits génitaux selon le sexe). Un phénomène nouveau, *la différenciation cellulaire,* donne à cette période de l'embryogenèse son originalité. La croissance du germe est considérable et due à des facteurs divers : multiplications cellulaires, augmentation de taille des cellules, dépôt entre elles de substance interstitielle plus ou moins abondante. Cette *croissance* est *différentielle,* en particulier l'importance de la région céphalique va diminuant. La croissance différentielle constitue en outre un facteur de modelage au sein des organes eux-mêmes.

Ces divers processus sont régis par des phénomènes *d'inductions* et parfois par des *stimulations hormonales*. Nous limiterons notre analyse aux phénomènes d'organogenèse chez les Vertébrés.

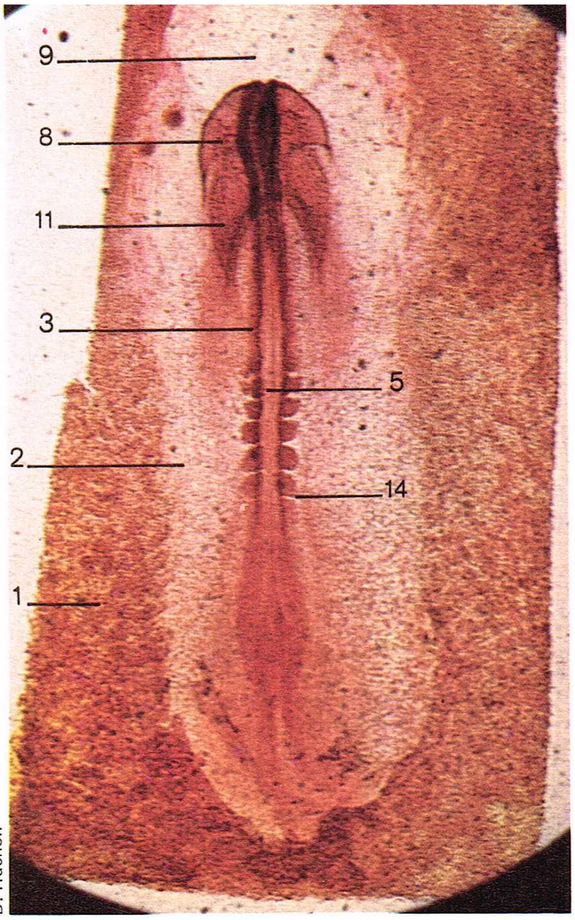

D. Huchon

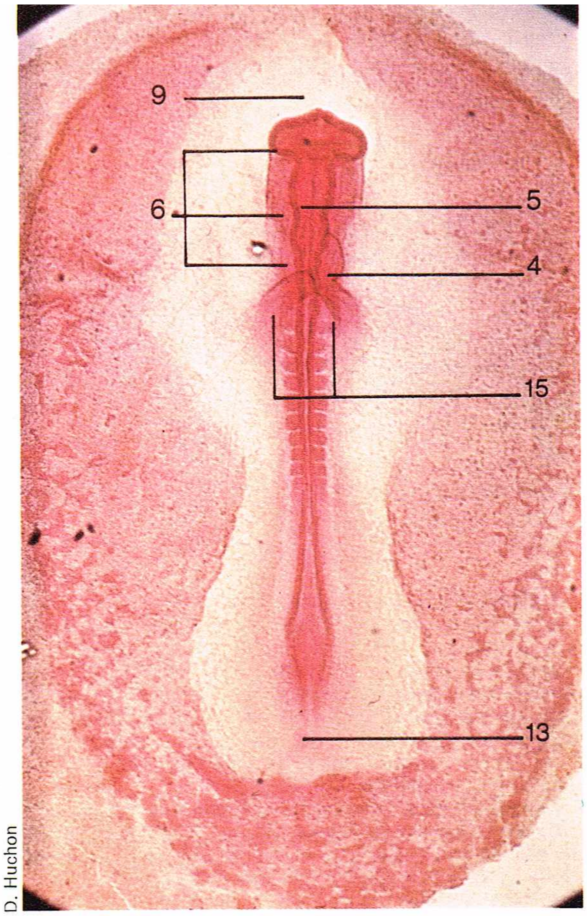

D. Huchon

▼ Schéma de la formation du cœur chez l'embryon de poulet : embryon à 25 heures (A), 26-27 heures (B), 27-28 heures (C), 29 heures (D).

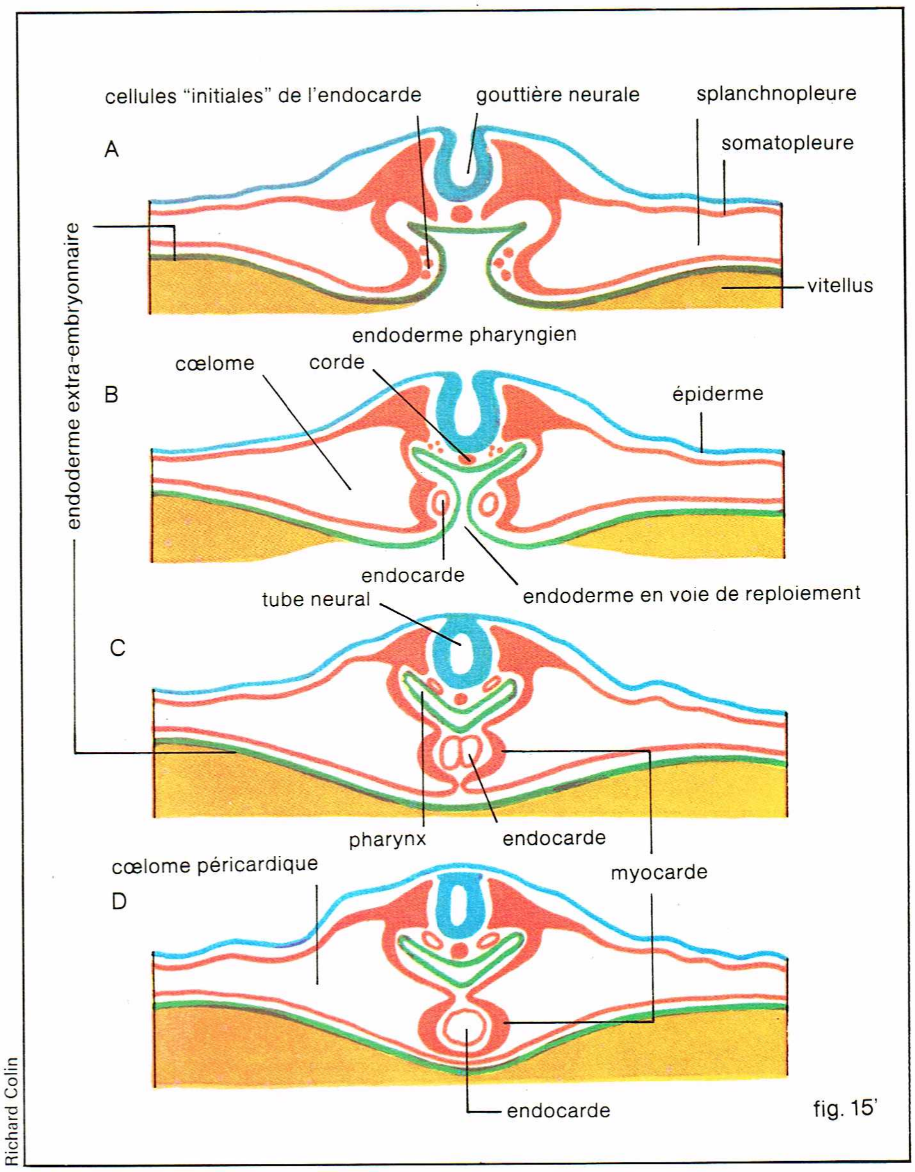

Richard Colin

Modalités de formation des ébauches d'organes

Quelques exemples nous permettront de concrétiser les processus mis en œuvre pour qu'une ébauche d'organe s'individualise.

Reploiement de nappes cellulaires : formation du tube digestif de l'embryon de poulet

Après la mise en place des feuillets le germe est un disque étalé sur la masse du vitellus. Les limites du corps sont floues. L'endoderme n'est pas refermé en un tube digestif. Dès les premiers jours de la période d'organogenèse, les formes de l'embryon vont se préciser. A 20-21 heures d'incubation la région antérieure de l'ectoderme embryonnaire se soulève en un *repli céphalique*. A ce niveau l'embryon se trouve ainsi délimité et surélevé par rapport au blastoderme qui l'entoure. Ce mouvement entraîne le reploiement de la nappe d'endoderme en avant et sur les côtés ; une formation en doigt de gant se trouve ainsi isolée de la masse du jaune. Le processus se poursuit en direction postérieure et ainsi les régions céphalique puis branchiale se soulèvent. Un pincement analogue se produit vers 45 heures dans la région postérieure de l'embryon. Les ébauches digestives antérieures et postérieures progressent en sens inverse jusqu'au niveau de la région moyenne de l'embryon. A quatre jours d'incubation, l'ouverture du tube digestif sur le jaune sera réduite au *pédicule vitellin*.

Fusion d'ébauches et croissance différentielle : formation du cœur de l'embryon de poulet

Le cœur se développe précocement avant que le corps ne soit soulevé du vitellus sous-jacent.

Au stade 5 somites, c'est-à-dire après 25 heures d'incubation puisqu'il se différencie un somite par heure à partir de la 21ᵉ heure, s'organisent dans la splanchnopleure de part et d'autre de la gouttière digestive les *ébauches cardiaques paires* (endothélium, myocarde, cavité péricardique). Au fur et à mesure que la gouttière digestive se referme par pincement, les ébauches cardiaques se rapprochent.

Au stade 12 à 13 somites, soit à 33 heures d'incubation, le tube digestif est bien individualisé dans la région antérieure et les ébauches tubulaires cardiaques, ventrales par rapport au pharynx, s'accolent et se *soudent* en un tube unique, tandis qu'en avant et en arrière de ce cœur primitif les tubes restent séparés. Ce cœur n'est pas encore fonctionnel.

A partir de 30 heures d'incubation le tube cardiaque *croît plus vite* que les tissus environnants. Il se coude, forme un U ouvert à gauche. Puis la branche antérieure du U s'allonge encore et vient se placer dorsalement

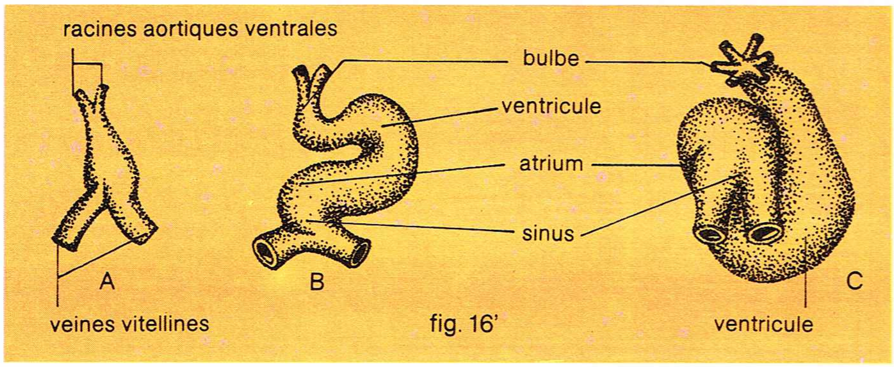

Richard Colin

▲ ***Trois étapes de la courbure du cœur chez l'embryon de poulet (vues dorsales). A, à 29 heures, stade 9 somites; B, à 40 heures, stade 18 somites; C, à 53 heures, stade 29 somites.***

par rapport à la branche postérieure. En même temps que ces mouvements s'effectuent, certaines parties du tube se dilatent.

A 48 heures d'incubation on peut distinguer quatre ampoules séparées par des étranglements. Ces ampoules sont, de l'arrière vers l'avant : le *sinus* (confluent des grosses veines vitellines), puis *l'atrium*, le *ventricule* et le *bulbe*. Cette première phase de morphogenèse est valable pour tous les Vertébrés.

Le sang a pour origine des îlots cellulaires du *mésoderme extra-embryonnaire* périphérique. Au début de l'embryogenèse *les îlots sanguins* sont des amas compacts de cellules. Ils se transforment en cavités renfermant à l'intérieur des cellules libres. Ces dernières se chargent d'hémoglobine, tandis que les cellules périphériques évoluent en cellules endothéliales. Ces formations s'anastomosent en donnant un réseau de capillaires contenant des cellules sanguines. Plus tard les capillaires s'emplissent de plasma, véhicule des *éléments figurés* du sang.

Au stade 13 somites les vaisseaux extra-embryonnaires rejoignent la partie postérieure du cœur par les *veines vitellines*. Les deux vaisseaux efférents du cœur, à son extrémité antérieure, sont *les aortes ventrales*. Elles croissent en direction céphalique puis se reploient (arcs aortiques) vers l'arrière pour former les deux aortes dorsales. Ultérieurement celles-ci *fusionneront* en une aorte unique. La circulation ne s'établit pas encore, le système circulatoire étant encore trop incomplet.

A 44 heures d'incubation le cœur commence à battre rythmiquement. A 48 heures il a acquis sa fonction de pompe. Étant donné qu'aucun système de valvules n'est développé, le sang est propulsé par ondes péristaltiques.

Processus de migration cellulaire : les cellules pigmentaires du poulet

En 1910, Harrison, constatant la différenciation de cellules pigmentaires dans des cultures *in vitro* de moelle épinière de grenouille, soupçonna leur origine neurale. Cette constatation impliquait, pour certaines de ces cellules, la nécessité d'une longue migration à travers le corps de l'embryon. Avant leur différenciation et la synthèse de mélanine, les cellules pigmentaires ne présentent pas de caractères histologiques particuliers. C'est pourquoi le marquage spécifique des cellules neurales constitue la meilleure technique pour étudier ces migrations. En 1969, Le Douarin a découvert chez la caille japonaise un marqueur cellulaire naturel. Le noyau interphasique des cellules de caille présente une répartition particulière de la chromatine, condensée en un ou plusieurs amas associés à l'ARN nucléolaire. Cette caractéristique permet de reconnaître sur des coupes histologiques les cellules de caille et les cellules de poulet.

Un fragment de tube neural d'embryons de poulet de 7 à 30 somites est remplacé par le fragment homologue d'un embryon de caille au même stade. Les germes opérés sont remis à incuber pendant des temps variables. Les embryons greffés sont étudiés sur coupes histologiques quand il s'agit de stades jeunes. Le plumage est seulement observé dans le cas d'embryons âgés (13 jours d'incubation).

Les cellules migrent vers l'épiderme en empruntant la voie du mésoderme sous-épidermique. Elles atteignent l épiderme au quatrième jour d'incubation, mais le passage massif ne se fait qu'au cinquième jour. La migration s'effectue dans toutes les directions : dorsale, latérale, ventrale, antérieure et postérieure. Quel que soit le niveau d'implantation du greffon, la bande plumaire de type caille est toujours plus large que la zone vertébrale impliquée.

▶ ***Page ci-contre, tableau récapitulatif de la destinée des feuillets (ectoderme-mésoderme-endoderme) chez les Vertébrés.***

Destinée des feuillets

Ce qui a été précisé à propos de l'embryogenèse du pleurodèle reste valable pour tous les Vertébrés. Quelques formations sont spécifiques aux Vertébrés supérieurs. Aussi un tableau récapitulatif de la destinée des feuillets est-il proposé ci-contre.

Inductions complexes dans l'organogenèse

Les différents types reconnus seront illustrés chacun par un exemple.

Inductions complémentaires

Les inductions complémentaires peuvent être étudiées à partir du cas de l'organogenèse de l'oreille interne des Amphibiens. L'oreille est un organe mixte récoltant les sensations auditives et les sensations propres à l'équilibration. La partie fondamentale de l'organe est *l'oreille interne*, ou *labyrinthe membraneux*, formé de deux poches : *l'utricule*, correspondant à la fonction d'équilibration, et le *saccule*, correspondant à la fonction auditive et renfermant un liquide, *l'endolymphe*. Le labyrinthe membraneux provient d'un épaississement ectodermique : la *placode auditive* qui s'invagine et se sépare de l'ectoderme pour former la *vésicule auditive primaire*. Ultérieurement, cette vésicule primaire s'allonge et les deux chambres, utricule et saccule, s'individualisent. La vésicule auditive est entourée d'une capsule cartilagineuse qui se moule sur ses contours.

Les travaux relatifs aux mécanismes inducteurs mis en œuvre pour la formation de la vésicule primaire ont été réalisés chez le discoglosse (Dalcq, 1934) puis chez l'axolotl (Yntema, 1939 et 1950). A la suite d'expériences de greffes, il a été démontré que la formation et l'invagination de la placode dépendent d'une *induction émanant du mésoderme* dorsal aux stades de la gastrula âgée et de la très jeune neurula. A la fin du stade neurula, une deuxième *influence inductrice*, ayant pour origine les cellules du *cerveau postérieur*, concourt au modelage de la vésicule primaire.

Inductions réciproques

L'élaboration d'un organe peut impliquer des inductions réciproques : nous retiendrons le cas de la détermination des diverses parties du membre chez le poulet. Le champ mésodermique global du membre peut être localisé dès le stade 2 somites. Au stade 14 somites, l'ébauche du membre émerge sous forme d'un petit bourgeon. Ce bourgeon comporte un *composant mésodermique* et un composant ectodermique, *la cape apicale*. L'édification harmonieuse du membre n'est possible que si les deux composants sont présents.

Les expérimentateurs sont parvenus à séparer la cape apicale du bourgeon mésodermique. Les bourgeons mésodermiques ainsi dénudés peuvent être recouverts d'ectoderme banal ou de cape apicale de provenances diverses, puis greffés dans les tissus extra-embryonnaires d'un embryon receveur. Des combinaisons entre composants ecto- et mésodermiques de membres antérieurs et postérieurs d'individus normaux et mutants (mutation aptère, mutation polydactyle) ont permis de comprendre comment le squelette terminal du membre (la main, le pied) s'édifie à partir de la région apicale du composant mésodermique. La différenciation du squelette terminal est possible si le mésoderme a reçu une *induction émanant de la cape apicale*, cette dernière n'étant devenue et ne demeurant inductrice que sous l'influence d'un facteur émanant du mésoderme sous-jacent.

Inductions en chaîne

Pour étudier ce type d'inductions, nous traiterons du cas de l'organogenèse de l'œil des Amphibiens. Au stade du très jeune bourgeon caudal, deux évaginations, les *vésicules optiques*, se dessinent latéralement de part et d'autre du cerveau antérieur. Elles se rapprochent de l'ectoderme superficiel tandis que leur base s'étrangle en un pédicule, qui évoluera en nerf optique. La face externe de la vésicule se déprime en cupule. Le fond de la cupule s'applique contre l'ectoderme qui, à ce contact, s'épaissit en une *placode*, ébauche du cristallin. Cette placode

- Blastula
  - lignée somatique
    - ectoderme
      - ectoderme banal
        - épiderme
          - épiderme
          - glandes de la peau
            - à mucus
            - à venin
            - sudoripares
            - sébacées
            - mammaires
          - phanères
            - écailles
            - plumes
            - poils
            - ongles, griffes
            - cornes
            - émail des dents
          - épithélium de la muqueuse buccale, nasale
          - lobe antérieur de l'hypophyse
        - placodes sensorielles
          - épithélium sensoriel nasal
          - cristallin
          - oreille
          - ligne latérale
      - plaque neurale
        - prosencéphale
          - télencéphale
          - diencéphale
            - rétine
            - épiphyse
            - lobe postérieur de l'hypophyse
        - mésencéphale → mésencéphale
        - rhombencéphale
          - métencéphale (cervelet)
          - myélencéphale (bulbe)
        - moelle → moelle épinière
        - crêtes neurales
          - ganglions crâniaux, spinaux, sympathiques
          - cartilages bronchiaux
          - médullo-surrénale
          - cellules pigmentaires
    - mésoderme
      - corde → corde → corde (régresse)
      - manteau mésodermique
        - somite
          - vertèbres
          - musculature axiale
          - musculature des membres
          - derme de la peau
        - gononéphrotome
          - rein
          - médullo des gonades
          - cortico-surrénale
          - uretère, voies génitales
        - somatopleure
          - musculature de la face et de la mâchoire
          - squelette des membres, des ceintures
          - musculature des membres
          - feuillet pariétal des cavités péricardique et péritonéale
          - cortex des gonades
        - splanchnopleure
          - feuillet viscéral des cavités péricardique et péritonéale
          - muscles viscéraux
          - endocarde, myocarde
          - endothéliums
          - cellules sanguines
    - endoderme
      - endoderme → endoderme
        - épithélium, bronches, trachée, poumons
        - épithélum du tube digestif (œsophage, estomac, intestin)
        - foie, pancréas
        - vessie
  - lignée germinale → gonies primordiales
    - spermatogonies
    - orogonies

s'invagine puis se détache de l'ectoderme pour constituer une *vésicule cristalline* logée dans la cupule. La vésicule évolue en un organe lenticulaire, le *cristallin.* L'aire ectodermique située au-dessus du cristallin s'amincit et se transforme en cornée transparente. Les phénomènes d'inductions découverts par Spemann en 1901 à propos de cette organogenèse constituent l'un des exemples les plus spectaculaires des *inductions de deuxième ordre et de troisième ordre.*

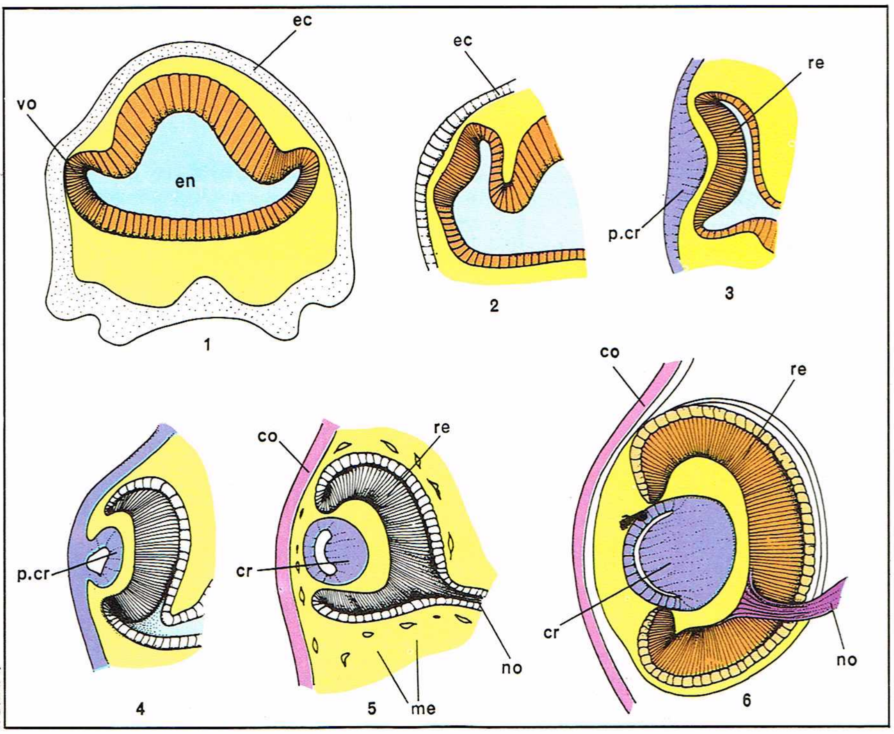

▲ ***Étapes successives de l'organogenèse de l'œil chez l'Amphibien (schémas de coupes transversales pratiquées sur des embryons à différents stades du bourgeon caudal); co, cornée; cr, cristallin; ec, ectoderme; en, encéphale; me, mésenchyme; no, nerf optique; p. cr, placode cristalline; re, rétine; vo, vésicule optique.***

Chez le pleurodèle ou chez diverses grenouilles, si on pratique au stade du bourgeon caudal l'ablation des vésicules optiques sans léser l'ectoderme sus-jacent, l'animal sera aveugle et ne présentera pas de cristallin. La contre-épreuve est concluante : si on implante une vésicule optique sous l'ectoderme du flanc, un cristallin se différencie. Un facteur émanant de la vésicule optique est donc nécessaire pour que l'ectoderme sus-jacent se détermine en tant qu'ectoderme de cristallin. Cette induction est dite secondaire puisqu'elle provient d'un organe lui-même déterminé par l'inducteur primaire.

Des fragments de cristallin transplantés sous l'ectoderme du flanc induisent la formation d'une cornée locale. Il s'agit d'une induction du troisième degré. Si on ôte le fragment de cristallin quelques jours après l'opération, la cornée s'opacifie. Dans ce cas, il est donc nécessaire que l'inducteur agisse constamment.

L'exemple décrit permet de saisir que l'organogenèse se réalise progressivement par une chaîne d'inductions.

Différenciation cellulaire

La différenciation cellulaire est un processus de spécialisation structurale et fonctionnelle des cellules. Elle aboutit toujours à la transformation d'une cellule parentale en une multitude de cellules filles de morphologie différente. Cette évolution peut être observée également au niveau moléculaire. Il est fortement probable qu'elle peut être rapportée à un fonctionnement sélectif du génome des embryons.

Les différenciations morphologique, structurale et moléculaire (sécrétion d'enzymes et d'hormones) peuvent être mises en évidence dans la morphogenèse du pancréas de souris. Quant au rôle du noyau dans la différenciation cellulaire, il peut être analysé par des expériences de greffe nucléaire chez les Amphibiens.

Différenciation structurale et moléculaire

Le pancréas est une glande mixte, *exocrine* et *endocrine.* Les deux fonctions correspondent à des ensembles cellulaires distincts.

A l'état adulte, la portion exocrine du pancréas, qui est de beaucoup la plus volumineuse, est une glande en grappe localisée dans l'anse duodénale. L'unité structurale est l'*acinus pancréatique.* Parmi les acini exocrines sont disséminés de petits massifs sphériques, formés par des cellules disposées en cordons, délimitant entre eux des espaces occupés par des capillaires. L'ensemble de ces formations constitue la glande endocrine qui sécrète l'insuline et le glucagon.

L'organogenèse du pancréas débute au neuvième jour de la gestation (soit environ à la moitié de celle-ci) par une évagination de la paroi dorsale du tube digestif (au niveau du *cordon ombilical*) ; elle s'enfonce dans le manchon mésodermique du tube digestif. Ultérieurement, l'épithélium endodermique pancréatique se ramifie dans le mésoderme ; ainsi se trouvent formés les îlots endocrines et les acini exocrines. Au cours des derniers jours de la gestation, des grains de sécrétion attestent l'état différencié de la glande.

Tous les organes présentent trois types de protéines : les *protéines constitutives,* appelées de façon imagée *protéines de ménage,* qui sont reconnues dans toutes les cellules et correspondent à la machinerie métabolique commune ; les *protéines semi-spécifiques,* qui existent dans un nombre restreint de tissus ; les *protéines spécifiques* d'organes *(protéines de luxe),* qui ne sont décelées que dans une catégorie cellulaire.

Pendant l'organogenèse, de très petites quantités de protéines spécifiques peuvent être détectées dans le mélange de toutes les protéines cellulaires au moyen de diverses techniques chimiques et biologiques. Huit enzymes digestives et l'insuline sont étudiées quantitativement pendant cette période.

Trois étapes peuvent être reconnues (fig. 18') :

— La phase I, de *protodifférenciation,* pendant laquelle les produits de sécrétion sont présents dans les cellules du bourgeon d'organe mais à très faible concentration.

— La phase II, de *différenciation,* au cours de laquelle les concentrations en produits de sécrétion sont multipliées par 10^3 ou plus.

— L'étape III, de *modulation,* où les concentrations de toutes les enzymes et hormones sont ajustées par rapport aux concentrations normales de l'adulte.

Rôle du noyau dans la différenciation cellulaire

On conçoit généralement que la différenciation s'engage pour un groupe donné de cellules quand de nouveaux gènes bien définis de celles-ci sont activés et transcrits. La réalité de la transcription d'une partie nouvelle et spécifique du génome est étayée par des expériences d'inhibition de la transcription.

Si de l'actinomycine D est administrée à faible dose à des cultures de bourgeons pancréatiques prélevés sur des embryons au stade de la protodifférenciation, la synthèse des protéines totales est inhibée de 70 %. Les cellules de la culture restent saines et les protéines constitutives continuent à être sécrétées. Les protéines correspondant aux grains de sécrétions ne sont pas synthétisées. Cela prouve que les ARN messagers codant pour ces dernières sont transcrits seulement au stade de la protodifférenciation. Si le tissu est traité plus tard, il y a accumulation plus ou moins normale des grains de sécrétion. La traduction des ARN messagers transcrits pendant le stade de la protodifférenciation s'effectue.

Dans quelle mesure la mise en activité et la mise en sommeil de certains sites du génome sont-elles réversibles ou irréversibles ? Pour tenter de répondre à cette question, la technique utilisée est la greffe nucléaire. En 1952, Briggs et King l'ont mise au point chez *Rana pipiens.* Ultérieurement, cette technique fut étendue à d'autres espèces d'Amphibiens par les écoles de Gurdon et de Gallien.

Un œuf vierge est activé, son pronucleus détruit par piqûre ou par irradiation aux rayons ultraviolets ; ainsi se trouve préparé un cytoplasme récepteur. Le noyau à implanter est prélevé dans des cellules embryonnaires, des cellules de tissus différenciés, des cellules en culture de la même espèce que l'œuf receveur anucléé. A l'aide d'une micropipette, un noyau est injecté dans le cytoplasme préparé.

— Quand les noyaux sont prélevés dans une blastula, une forte proportion des œufs greffés sont capables de se développer et de donner une larve normale.

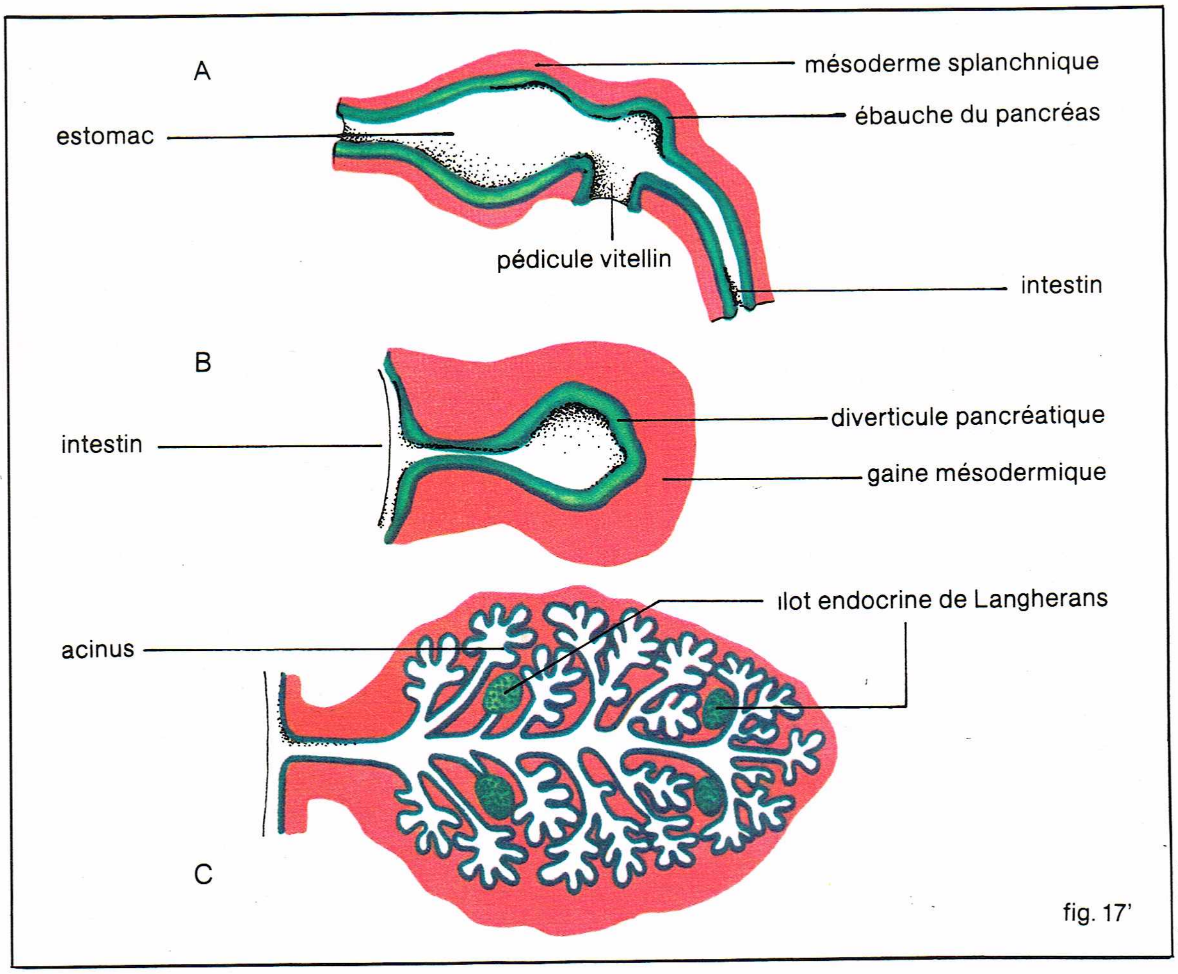

Richard Colin

◀ ***Schéma de la formation du pancréas chez l'embryon de souris; bourgeon pancréatique au 9e jour de la gestation (A), au 11e jour (B) et au 15e jour (C).***

— Quand les noyaux sont prélevés dans des germes au stade de la gastrula âgée, de la neurula ou du bourgeon caudal, on peut encore obtenir une segmentation des œufs implantés, mais par la suite presque tous les embryons dégénèrent. Le pourcentage de réussite est variable selon les espèces; il est particulièrement élevé chez le xénope.

Ces expériences semblent donc établir que, au cours du développement, les noyaux acquièrent une différenciation et perdent leur capacité à diriger un développement embryonnaire complet.

Chez le xénope, Gurdon et ses collaborateurs ont pu obtenir le développement harmonieux de germes en greffant des noyaux provenant de tissus différenciés (épithélium intestinal de larves à l'éclosion). Il faut souligner, que dans ce cas, le pourcentage de réussite est très faible : sur 726 œufs opérés, seulement 2 adultes se sont développés. Une controverse s'est d'ailleurs engagée à propos de ce résultat entre les différentes écoles, certaines soulignant qu'à ce stade des *gonocytes* peuvent se trouver encore dans l'épithélium intestinal.

D'autres expériences ont été reprises par Gurdon et ses collaborateurs. Ils ont utilisé comme tissus donneurs du poumon, du rein, du cœur, de la peau d'adulte. Le noyau à implanter est prélevé sur des cellules en culture obtenues à partir de ces tissus. Les œufs se segmentent plus ou moins irrégulièrement dans un tiers des cas. Les noyaux des cellules des blastulas obtenues sont capables, après une seconde transplantation dans un œuf anucléé, de donner des têtards à l'éclosion dans moins de 10 % des cas.

Que peut-on conclure de ces résultats contradictoires?

— Dans un pourcentage élevé de cas, il y a une restriction certaine de la capacité organisatrice des noyaux transférés quand ceux-ci sont prélevés dans des germes de plus en plus âgés.

— Dans de rares cas, chez le xénope, la capacité organisatrice du noyau est conservée même quand celui-ci a vieilli. En termes plus précis, un noyau qui a fonctionné dans un individu adulte en présidant à la synthèse spécifique de kératine (exemple d'un noyau de peau) peut donner naissance par mitoses (pendant la phase de culture, puis pendant la phase de segmentation de la première transplantation) à des noyaux capables de synthétiser des ARN messagers propres à la gastrulation, puis à l'organisation générale d'un embryon.

A partir de ces résultats, il est possible d'envisager les phénomènes de différenciation au cours du développement de la façon suivante.

L'œuf fécondé dispose d'un noyau dont l'information est très largement réprimée. Il possède dans son cytoplasme une grande partie du matériel (ARNm, ARNr et

▼ ***Courbe d'accumulation de l'insuline dans le pancréas de l'embryon de souris, en fonction de l'âge : 3 phases sont discernables.***

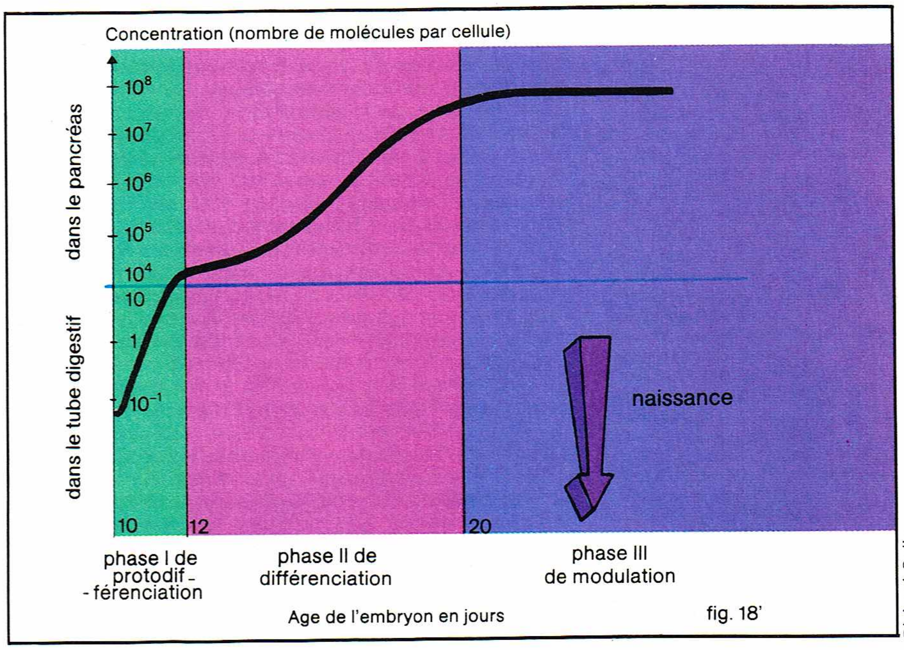

Richard Colin

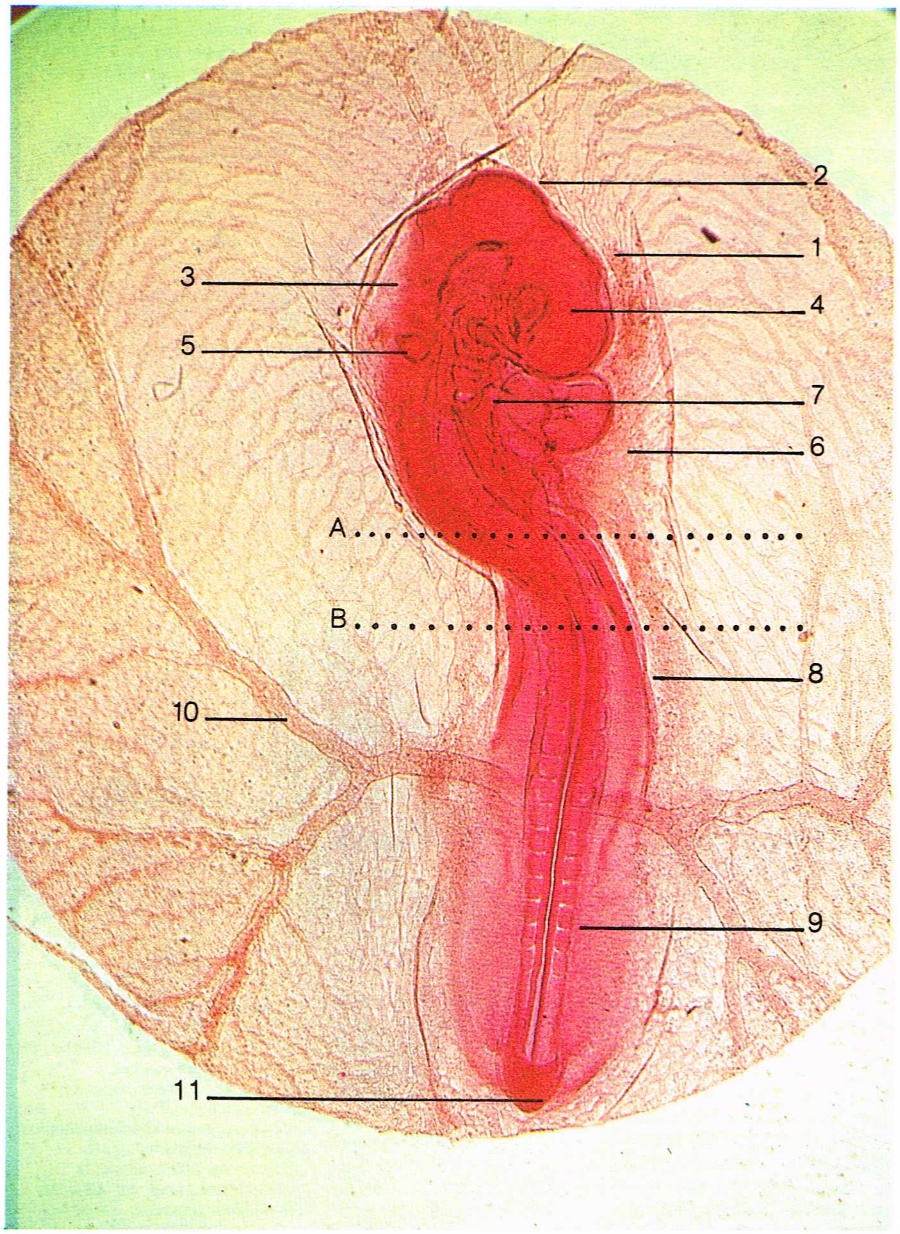

D. Huchon

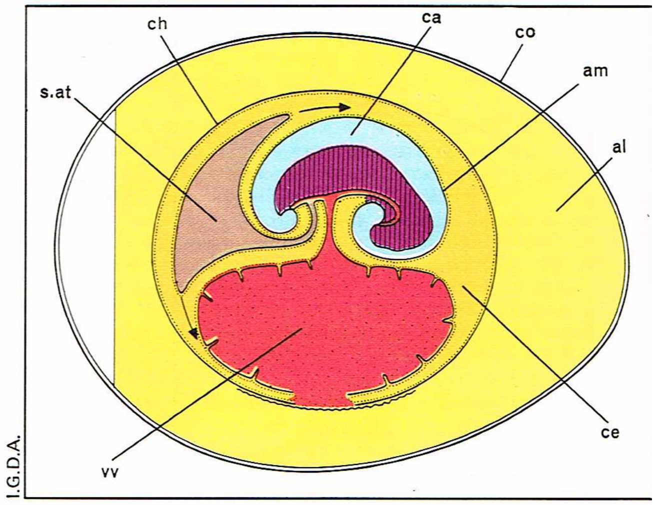

▲ A gauche, embryon de poulet à 48 heures d'incubation (stade du bourgeon caudal) : A et B, niveaux des coupes transversales correspondant aux photos de la page ci-contre en haut. 1, diencéphale ; 2, mésencéphale ; 3, rhombencéphale ; 4, vésicule optique ; 5, vésicule otique ; 6, cœur ; 7, fentes branchiales ; 8, limites du capuchon amniotique ; 9, somites ; 10, vaisseaux vitellins ; 11, bourgeon caudal. A droite, schéma des annexes embryonnaires du poulet : s. at, sac allantoïdien ; ch, chorion ; ca, cavité amniotique ; co, coquille de l'œuf ; am, amnios ; al, albumen ; ce, cœlome ; vv, vésicule vitelline.

protéines) nécessaire pour assurer le début du développement. Pendant la segmentation, l'essentiel de l'activité du noyau consiste en reproduction de l'ADN, les mitoses se succédant rapidement.

Dès le début de la gastrulation, des secteurs définis du génome embryonnaire sont transcrits en ARN messagers. A partir de ces ARN messagers sont synthétisées de nouvelles protéines, en particulier celles nécessaires au processus d'induction primaire. Ces secteurs sont à nouveau rapidement mis en sommeil. D'autres secteurs correspondant aux protéines spécifiques des organes sont différentiellement déréprimés suivant la localisation des groupes de cellules dans l'embryon. Il faut garder présente à l'esprit la part importante laissée aux hypothèses dans cette conclusion.

Annexes embryonnaires

Dans certains groupes zoologiques, le développement de l'embryon s'accompagne de la formation de *structures transitoires :* les *annexes embryonnaires.* Ce sont des expansions situées hors du corps de l'embryon et qui assurent soit la protection de celui-ci vis-à-vis des variations du milieu extérieur, soit les échanges métaboliques entre l'embryon et le milieu. Chez les animaux vivipares, les échanges métaboliques se font avec l'organisme maternel.

Particulièrement bien développées chez les Vertébrés terrestres et aériens (Reptiles, Oiseaux, Mammifères), les différentes annexes sont : le *sac vitellin,* ou *vésicule ombilicale,* le *cœlome extra-embryonnaire,* la *cavité amniotique* et le *diverticule allantoïdien.*

Annexes de l'œuf de poule

Le cœlome extra-embryonnaire

Dès le début de la morphogenèse, l'ectoderme et l'endoderme tendent à déborder l'aire embryonnaire proprement dite et à s'étaler sur le jaune. Entre ces deux feuillets se glisse le mésoderme. Il y a donc croissance des trois feuillets, au-delà des limites de l'embryon. Aucune discontinuité ne s'établit entre les zones embryonnaires et extra-embryonnaires de ces feuillets.

Dans la zone embryonnaire, tout d'abord, le feuillet mésodermique se clive en deux *lames latérales :* la *splanchnopleure,* qui recouvre l'endoderme, et la *somatopleure,* qui double l'ectoderme. Ces lames délimitent entre elles une cavité, le *cœlome embryonnaire.* Le clivage s'effectue aussi dans le mésoderme extra-embryonnaire. Ainsi un cœlome extra-embryonnaire prolonge le cœlome embryonnaire. Tous deux renferment un liquide séreux.

La vésicule vitelline

Le feuillet endodermique extra-embryonnaire tend à recouvrir le jaune. Ses cellules sécrètent des enzymes digestives capables de dégrader le vitellus en métabolites plus simples. La splanchnopleure extra-embryonnaire tapisse la face externe de l'endoderme. Des îlots sanguins, puis un réseau vasculaire s'y développent, permettant le transit des substances nutritives vers l'embryon.

Le tube digestif de l'embryon s'individualise par pincement de l'endoderme, d'abord au niveau de la région céphalique, puis au niveau de la région caudale. Quand le tube a pris nettement forme, celui-ci et la vésicule vitelline sont reliés dans la région moyenne par le *pédicule vitellin,* ou *canal ombilical.* Un peu avant l'éclosion (vers 19 jours), la vésicule vitelline se rétracte et s'incorpore à l'intestin de l'embryon. Il reste alors à peu près 1/3 du jaune. Ces réserves seront utilisées par le poussin durant les deux premières journées de sa vie, pendant lesquelles il ne s'alimente pas.

La cavité amniotique

La cavité amniotique commence à se former à partir de la trentième heure. En avant de la tête, l'ectoderme extra-embryonnaire et la somatopleure qui le double se soulèvent en un *repli amniotique* en forme de croissant qui encapuchonne progressivement la région antérieure de l'embryon. On peut saisir deux étapes successives de la progression latéro-dorsale et antéro-postérieure du capuchon amniotique céphalique par l'examen de coupes transversales pratiquées dans l'embryon et ses annexes. Vers 48 heures d'incubation, un *repli amniotique* caudal se dessine.

A quatre jours d'incubation, il se crée, par soudure des bords des deux capuchons, une chambre remplie d'un liquide séreux et dans laquelle baigne l'embryon : c'est la *cavité amniotique.* Le liquide de la cavité amniotique se forme aux dépens de l'albumen. On réserve le nom

d'*amnios* à la paroi interne du repli qui limite directement la cavité amniotique. L'amnios est donc composé de deux feuillets : l'ectoderme extra-embryonnaire, doublé d'une mince lame de somatopleure extra-embryonnaire. La paroi externe du repli amniotique (ectoderme extra-embryonnaire et somatopleure extra-embryonnaire) est la *séreuse,* ou *chorion;* elle s'appliquera contre la *membrane coquillière* de l' « œuf ». Entre la séreuse et l'amnios, s'étend donc une cavité entièrement tapissée par la somatopleure; il s'agit d'un diverticule du cœlome extra-embryonnaire.

La constitution de la cavité amniotique permet à l'embryon d'Oiseau de se développer dans un milieu aquatique. Ce milieu est constamment brassé par le jeu des fibres musculaires lisses différenciées dans la somatopleure. Ainsi sont évitées des adhérences néfastes à la croissance harmonieuse de l'embryon. La réserve d'eau que constitue le liquide amniotique est utilisée en fin d'incubation par l'embryon.

Le sac allantoïdien

A 60 heures d'incubation, en arrière du pédicule vitellin, apparaît une évagination de la paroi endodermique ventrale du tube digestif. Elle croît et repousse devant elle la splanchnopleure qui double extérieurement le tube digestif. C'est l'ébauche du *sac allantoïdien.* Ce diverticule se développe considérablement et envahit le cœlome extra-embryonnaire. Il est tapissé extérieurement par la lame mésodermique splanchnique, très vascularisée. La paroi du sac (endoderme et mésoderme) est l'*allantoïde.* Le sac allantoïdien s'applique localement contre le chorion, avec lequel il fusionne, constituant une membrane épaisse très vascularisée, l'*allanto-chorion.*

L'*allanto-chorion,* plaqué contre la membrane coquillière, assure les échanges respiratoires; il permet également à l'embryon d'absorber une partie des sels de calcium de la coquille. L'*allantoïde* joue un rôle dans l'absorption progressive de l'albumen. Enfin, c'est dans le sac allantoïdien que s'accumulent les déchets du métabolisme de l'embryon. A la fin de l'incubation, les résidus secs de l'excrétion sont éliminés avec l'allantoïde.

A l'éclosion, soit après 21 jours d'incubation, la coquille, devenue mince par suite de l'absorption d'une partie de ses sels minéraux par l'embryon, est cassée à coups de bec par le poussin. Celui-ci se dégage de ses annexes : l'amnios, l'allantoïde et le chorion restent accolés à l'intérieur de la coquille. Toute l'eau disponible de « l'œuf » a été utilisée pour le développement et le poussin éclôt à sec.

Annexes des Mammifères Placentaires

Les annexes embryonnaires des Mammifères sont organisées selon les mêmes plans généraux que celles des Oiseaux. La similitude est très grande chez l'ornithorynque (sous-classe des Protothériens). Ce petit Mammifère, de la taille d'un lapin, pond de un à trois œufs. Après une incubation d'une dizaine de jours, pendant laquelle la femelle reste sur son nid, les petits éclosent. Une semaine plus tard, ils sucent le lait maternel.

Chez les Mammifères vivipares, les variations que présentent les annexes embryonnaires sont plus ou moins importantes. L'œuf de ces animaux ne renferme pas de réserves vitellines et n'est pas entouré d'albumen. Le jeune se développe en parasite dans l'organisme maternel; des relations histologiques plus ou moins intimes s'établissent entre le chorion et la muqueuse utérine.

La vésicule vitelline

En dépit de l'absence de vitellus, il se forme une vésicule ombilicale, annexe qui apparaît en premier au cours du développement. C'est un sac rempli d'une sérosité. Cette annexe n'a aucun rôle nutritif. Au début de la vie embryonnaire, elle constitue le lieu où s'élaborent les hématies. Ultérieurement, au cours de la gestation, le foie prendra le relais pour cette fonction et la vésicule régressera.

La cavité amniotique

L'amniogenèse débute très tôt et se réalise selon deux modes principaux.

– L'*amniogenèse par plissement* (lapin, porc, Ruminants, Carnivores). Cette modalité se déduit facilement de ce que l'on observe chez les Oiseaux. La couche extra-embryonnaire enveloppant le *lécithocèle* se soulève en un repli circulaire qui entoure le bouton embryonnaire. La

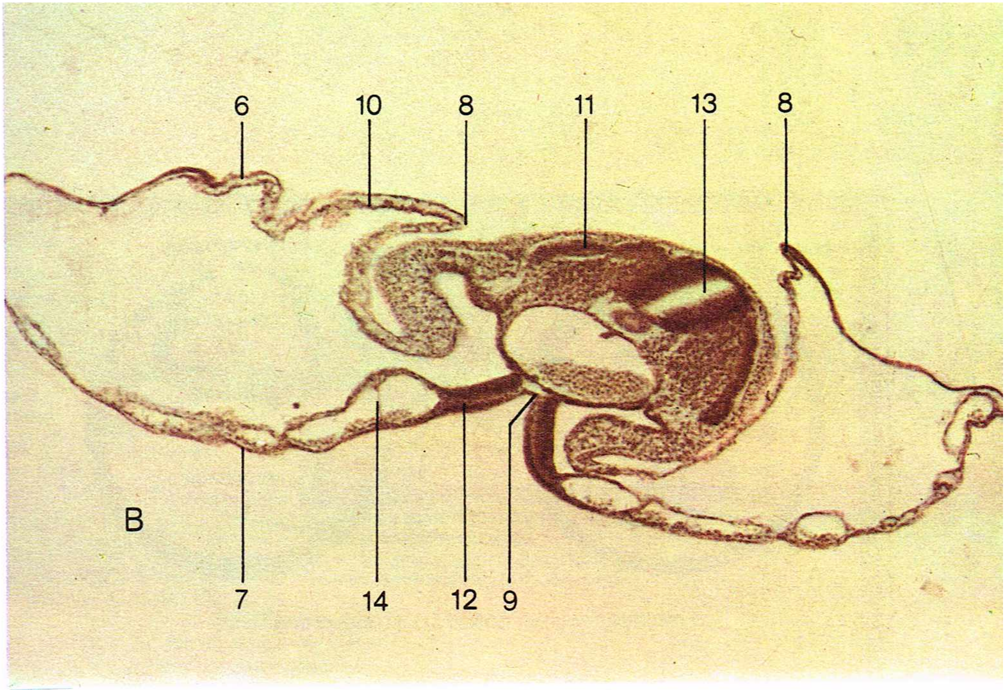

D. Huchon

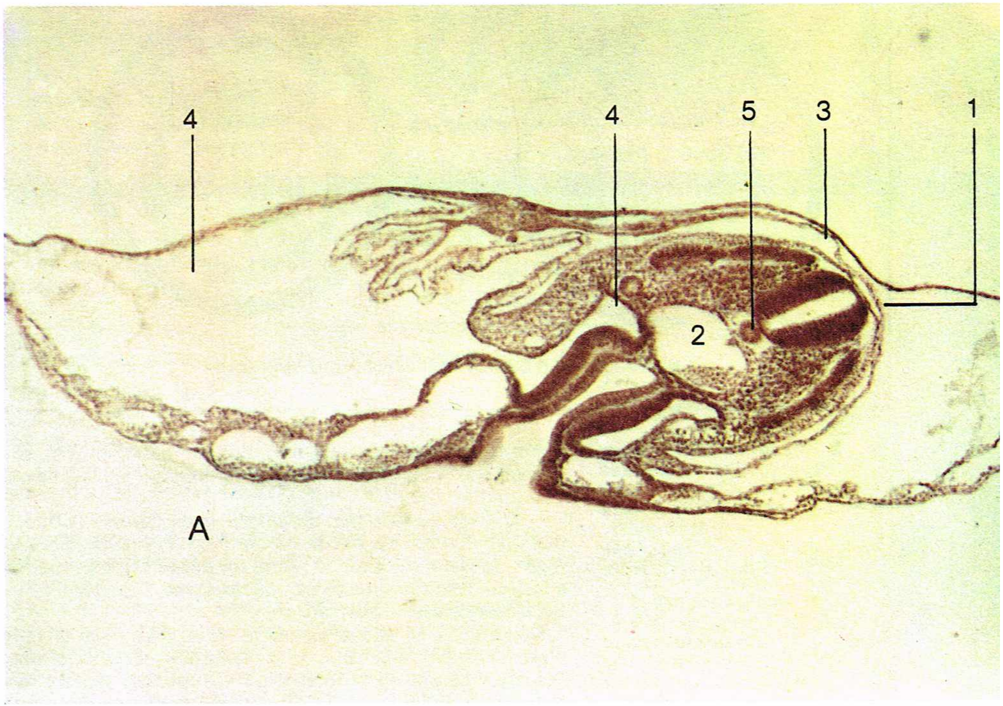

D. Huchon

▲ ***Coupes transversales (aux niveaux A et B de la photo de la page ci-contre) d'embryon de poulet mettant en évidence le mécanisme d'amniogenèse.***
1, amnios; 2, aorte; 3, cavité amniotique; 4, cœlome; 5, corde; 6, ectoderme; 7, endoderme; 8, repli amniotique; 9, repli endodermique du tube digestif; 10, somatopleure; 11, somite; 12, splanchnopleure; 13, tube neural; 14, vaisseaux vitellins.

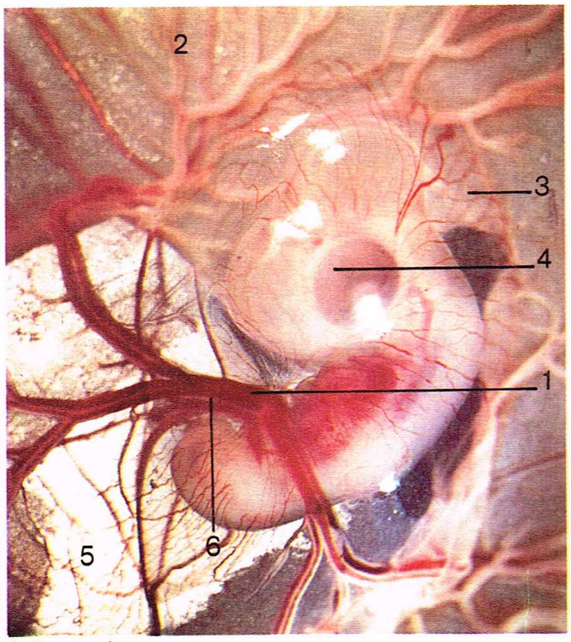

P. Summ - Jacana

◀ ***Vue ventrale d'embryon de poulet photographié vivant (4-5 jours d'incubation).***
1, départ des vaisseaux vitellins; 2, lame d'endoderme extra-embryonnaire; 3, limite de la cavité amniotique; 4, œil; 5 et 6, sac et vaisseau allantoïdiens.

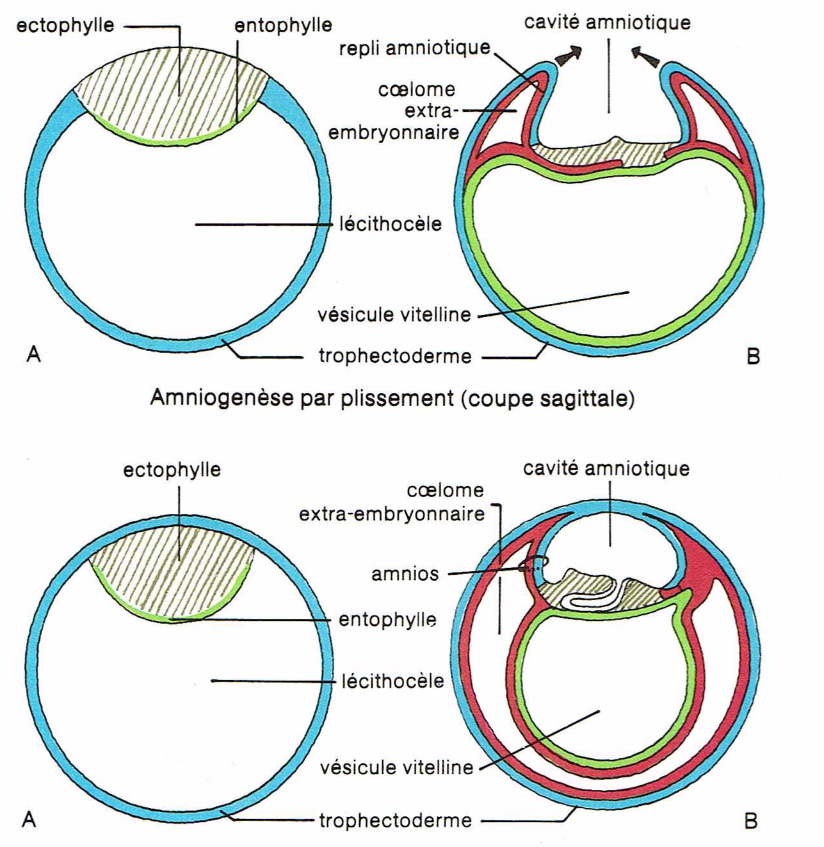

fig. 19'

Richard Colin

▲ ***Les deux principaux modes d'amniogenèse chez les Mammifères; en haut, amniogenèse par plissement; en bas, amniogenèse par cavitation.***

circonférence de ce repli se réduit progressivement au-dessus de l'embryon jusqu'à fermeture de la cavité amniotique (fig. 19').

— L'*amniogenèse par cavitation* (Insectivores, Chiroptères, Primates). La cavité amniotique se creuse directement au sein du bouton embryonnaire. Le mésoderme s'insinue très tôt sous le *trophectoderme* (fig. 19').

Le diverticule allantoïdien

Aux stades 14 somites chez le lapin, 6 somites chez le porc, avant l'apparition des somites chez l'homme, l'ébauche allantoïdienne émerge et repousse devant elle la splanchnopleure, qui, au cours de la gestation, jouera un rôle capital dans la nutrition de l'embryon. L'extension du sac allantoïdien est variable suivant les espèces : très développé chez les Carnivores, d'importance égale à la cavité amniotique chez les Ruminants, il est particulièrement réduit chez l'homme (fig. 20').

Le placenta

Le placenta est un *organe mixte embryonnaire et maternel* qui assure les fonctions de nutrition, de respiration et d'excrétion de l'embryon. Les échanges entre la mère et le fœtus qui se produisent au niveau du placenta sont intenses et *sélectifs* (ce qui assure la protection de l'embryon).

— Les Marsupiaux établissent la liaison entre les Mammifères Monotrèmes et les Mammifères Placentaires vrais. Dans ce groupe, le sac vitellin est encore très développé bien que ne renfermant pas de réserves nutritives. Il s'accroît jusqu'à venir en contact avec le chorion, contrairement au sac allantoïdien, lequel n'y parvient pas. L'ensemble formé par la paroi du sac vitellin plus le chorion s'accole à la muqueuse utérine pour former une zone d'échanges nutritifs. La muqueuse utérine sécrète un « lait » dont les constituants sont absorbés par le fœtus au niveau des vaisseaux qui irriguent le sac vitellin. La gestation dure peu de temps et le développement fœtal s'achève dans la poche marsupiale. Le grand kangourou roux a une gestation de cinq à six semaines. La larve ne mesure que 6 à 7 cm quand elle naît; à côté d'organes à peine ébauchés, elle présente des formations temporaires adaptées à sa naissance « prématurée » et au curieux voyage qu'elle doit effectuer pour gagner la poche marsupiale, où elle s'accrochera solidement à la tétine de la mamelle.

— Chez les Mammifères Placentaires vrais, le mésoderme allantoïdien, très irrigué, est toujours un élément essentiel du placenta. Les constituants fœtaux de ce dernier sont : l'*allantoïde externe* (feuillet endodermique + splanchnopleure) et le *chorion* (ancien trophectoderme + somatopleure). Le constituant maternel du placenta est la *muqueuse utérine,* ou *endomètre* (épithélium doublé de tissu conjonctif). Dans tous les cas le chorion se soulève en villosités plus ou moins engrenées dans les tissus maternels. Sa couche la plus externe prend un aspect syncytial.

Le contact entre les formations fœtales et maternelles est plus ou moins étroit selon les espèces. En effet, la muqueuse utérine peut se trouver érodée au contact des villosités du chorion : ainsi, les barrières séparant les capillaires embryonnaires et le sang maternel deviennent moins nombreuses.

● Chez la jument et la truie, il y a simplement juxtaposition des formations fœtales et maternelles intactes (fig. 21'). Entre les villosités choriales et les villosités maternelles s'accumule du *« lait utérin »* absorbé par le chorion. C'est là un type de placenta primitif (1).

● La couche externe du chorion provoque localement, au niveau des villosités, l'érosion de l'*épithélium* de la muqueuse utérine (fig. 21'). Ce type de placenta est observé chez les Ruminants (2).

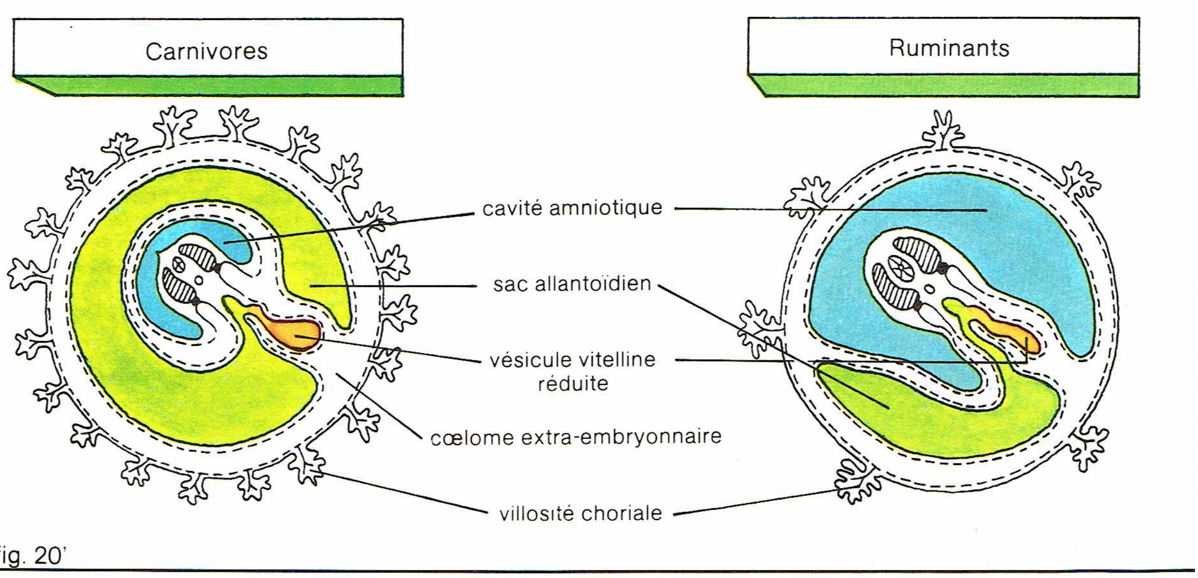

fig. 20'

▶ ***Divers degrés d'extension du sac allantoïdien chez les Mammifères; très développé chez les Carnivores, il l'est beaucoup moins chez les Ruminants et est très réduit chez l'homme.***

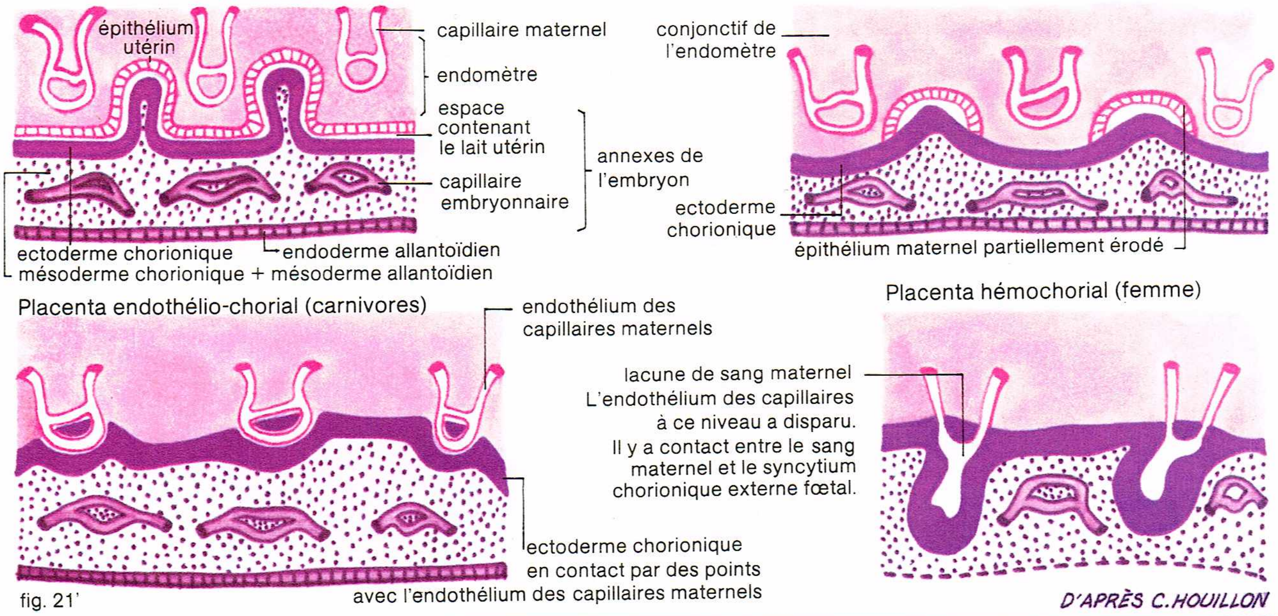

fig. 21'

Richard Colin

▲ Types de placentas chez les Mammifères vrais.

● L'érosion locale de la muqueuse utérine concerne l'épithélium et le tissu conjonctif ; c'est ainsi qu'en certains points s'établit un contact entre le chorion et la paroi des vaisseaux sanguins maternels (chez les Carnivores) [fig. 21'] (3).

● Enfin, il peut y avoir destruction de la paroi de certains vaisseaux de l'endomètre. Dans ce cas, le chorion se trouve en contact direct avec le sang maternel (fig. 21'). Tel est le type de placenta de la femme (4).

Pour les types 1 et 2, les plus primitifs, il n'y a pas d'hémorragie à la mise bas. Dans les deux derniers cas (types 3 et 4), l'expulsion du placenta s'accompagne d'une hémorragie.

Parallèlement à cette évolution structurale, on assiste à une réduction spatiale de la zone de placentation à l'intérieur de l'utérus.

● Chez la truie, la placentation est *diffuse*. Les villosités sont réparties uniformément sur toute la surface du sac chorionique.

● Chez les Ruminants, les villosités sont localisées sur des plages, appelées *cotylédons*.

● Enfin, la zone de placentation peut être réduite à un *anneau* chez la chienne ou à un *disque* chez la femme.

Quelques notions de la physiologie du placenta seront évoquées à propos du développement embryonnaire de l'homme.

Développement embryonnaire de l'homme

La segmentation

Après la fécondation, l'œuf se segmente tout en poursuivant sa migration dans l'oviducte (trompe de Fallope) en direction de la cavité utérine. Cette migration est due essentiellement à un flux de liquide péritonéal, entretenu par les mouvements péristaltiques de la musculature de l'oviducte.

L'œuf pauvre en vitellus présente une segmentation totale, mais dès le premier clivage on observe souvent un blastomère plus gros que l'autre. Il est difficile de préciser si le premier plan de clivage est méridien, les globules polaires étant très mobiles sous les enveloppes de l'œuf. La suite des segmentations est assez irrégulière.

▼ Descente dans l'oviducte de la femme de l'œuf fécondé et des premiers stades de segmentation : 1-2, fécondation ; 3-4-5, stades 2-3-4 blastomères ; 6-7, morula ; 8, arrivée dans l'utérus du blastocyste ; 9, début de la nidation du blastocyste.

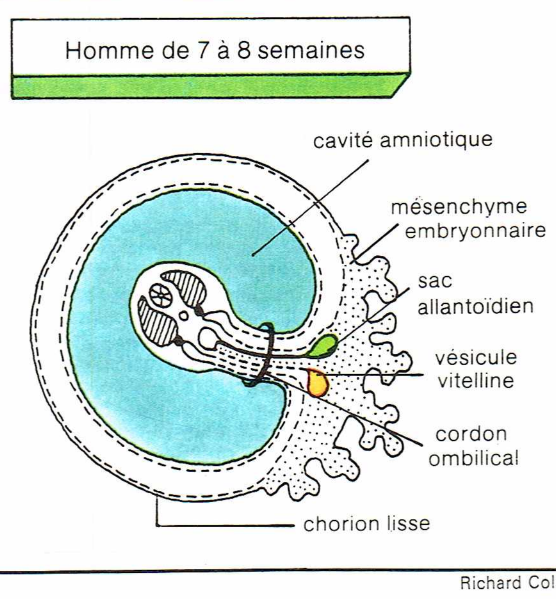

Richard Colin

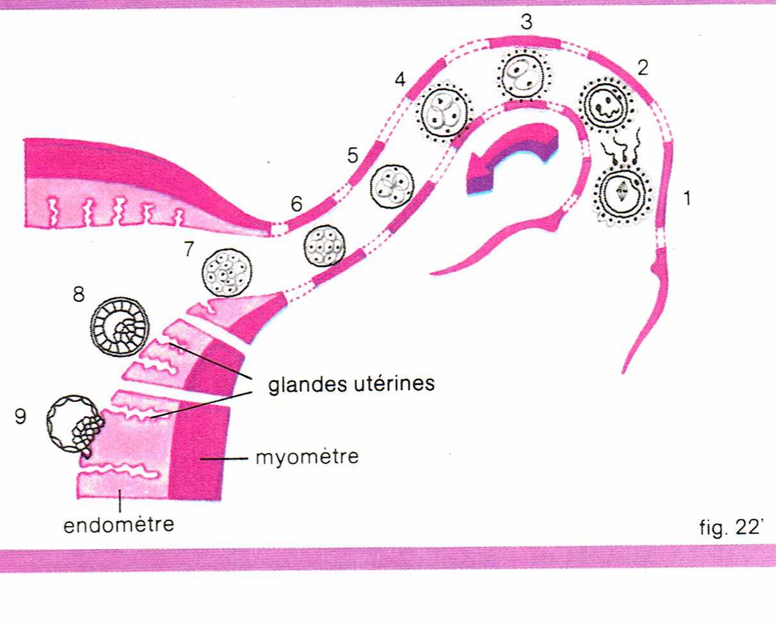

fig. 22'

Richard Colin

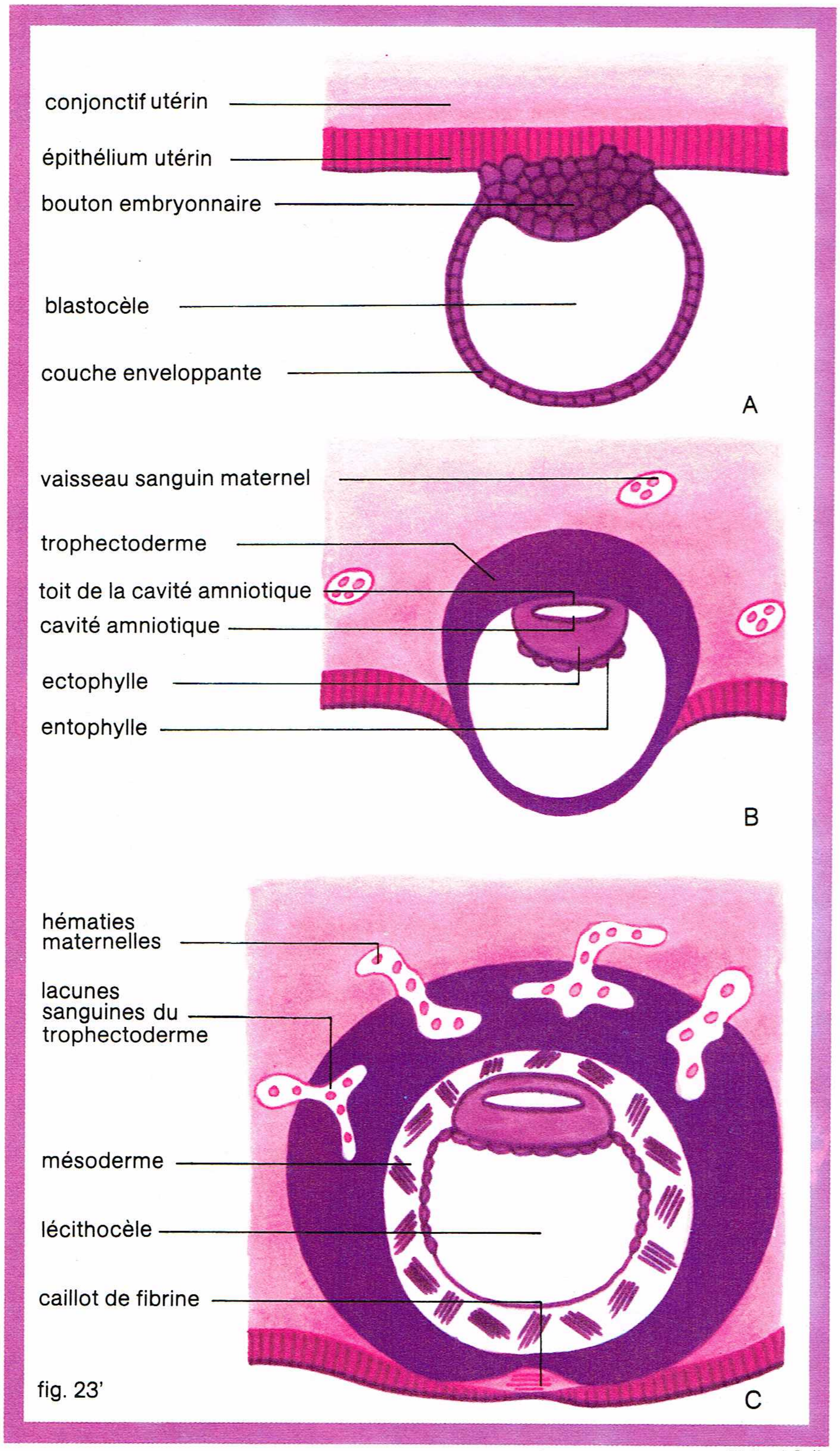

Richard Colin

▲ Étapes de la nidation du blastocyste humain; A, blastocyste humain au 6e jour après la fécondation; B, germe au 8e jour; C, germe au 13e jour.

Quatre jours après la fécondation, la morula (stade 16 cellules) pénètre dans l'utérus. Pendant deux jours, elle y mènera encore une vie libre. A partir du stade 32 blastomères, le germe présente deux formations cellulaires distinctes : d'une part, une masse de grosses cellules qui formeront le *bouton embryonnaire* et, d'autre part, une *couche enveloppante* de cellules aplaties. Cette morula baigne dans les sécrétions utérines. Du liquide est absorbé par le germe en plus grande quantité qu'il n'est nécessaire pour l'élaboration de nouvelles cellules. L'excès de liquide se rassemble à un pôle du germe, décollant ainsi le bouton embryonnaire de la couche enveloppante sous-jacente. Cette blastula est dénommée *blastocyste*.

C. Bevilacqua

La nidation

Six jours après la fécondation, le blastocyste entre en contact avec l'épithélium de revêtement de l'endomètre, dans la moitié supérieure de la cavité utérine. C'est au niveau du bouton embryonnaire que se produit l'accolement, et les cellules de la couche enveloppante s'insinuent entre les cellules de l'épithélium de l'utérus. Sous l'influence de sécrétions du blastocyste et d'enzymes du tissu utérin, le conjonctif de l'endomètre se dissocie; ainsi se crée une cavité où le blastocyste peut se loger. Les cellules de la couche enveloppante, que l'on appelle dès lors *trophoblaste* ou *trophectoderme,* prolifèrent. Elles se disposent en deux couches; l'interne est formée de cellules cubiques, l'externe, syncytiale, est très épaisse. Cette différenciation se produit à mesure que le matériel intéressé pénètre en profondeur dans la muqueuse. Dix à douze jours après la fécondation, le germe est situé tout entier dans le conjonctif de l'endomètre et l'épithélium s'est refermé au-dessus de lui (fig. 23').

Pendant la période de nidation, le diamètre du blastocyste s'accroît rapidement (0,4 mm à 10 jours; 2 mm à 14 jours).

La gastrulation

Constitution du germe diblastique

Entre le 7e et le 8e jour du développement se met en place, sur la face inférieure du bouton embryonnaire, une couche de petites cellules, dont l'origine exacte est mal définie. Elles constituent l'*entophylle.* Celui-ci recouvre la surface libre du bouton embryonnaire, puis s'étale progressivement sur la face interne du trophoblaste. Le bouton embryonnaire formé d'une couche de cellules plus hautes que larges constitue l'*ectophylle.*

On admet classiquement que l'entophylle est à l'origine de la plus grande partie de l'endoderme et que l'ectophylle est à l'origine de l'ectoderme ainsi que du mésoderme embryonnaires.

La formation des annexes embryonnaires est un phénomène si précoce dans l'espèce humaine qu'avant d'aborder les phases de la gastrulation, il paraît nécessaire de décrire brièvement l'amniogenèse. Il s'agit d'une *amniogenèse par cavitation.* La cavité amniotique apparaît au 8e jour du développement. Son toit est constitué par l'assise interne cellulaire du trophoblaste et son plancher par l'ectophylle de l'embryon. A ce stade, le *germe* est tout à fait comparable à un blastoderme diblastique de poulet. Il s'agit en effet d'un disque qui coiffe une ampoule remplie de sérosité, le *lécithocèle.*

Mise en place du mésoderme extra-embryonnaire

L'origine du mésoderme extra-embryonnaire est mal connue (entophylle ou trophoblaste). Il apparaît, au 10e jour, des cellules étoilées, anastomosées, lesquelles s'organisent en une nappe mince. Elles tapissent intérieu-

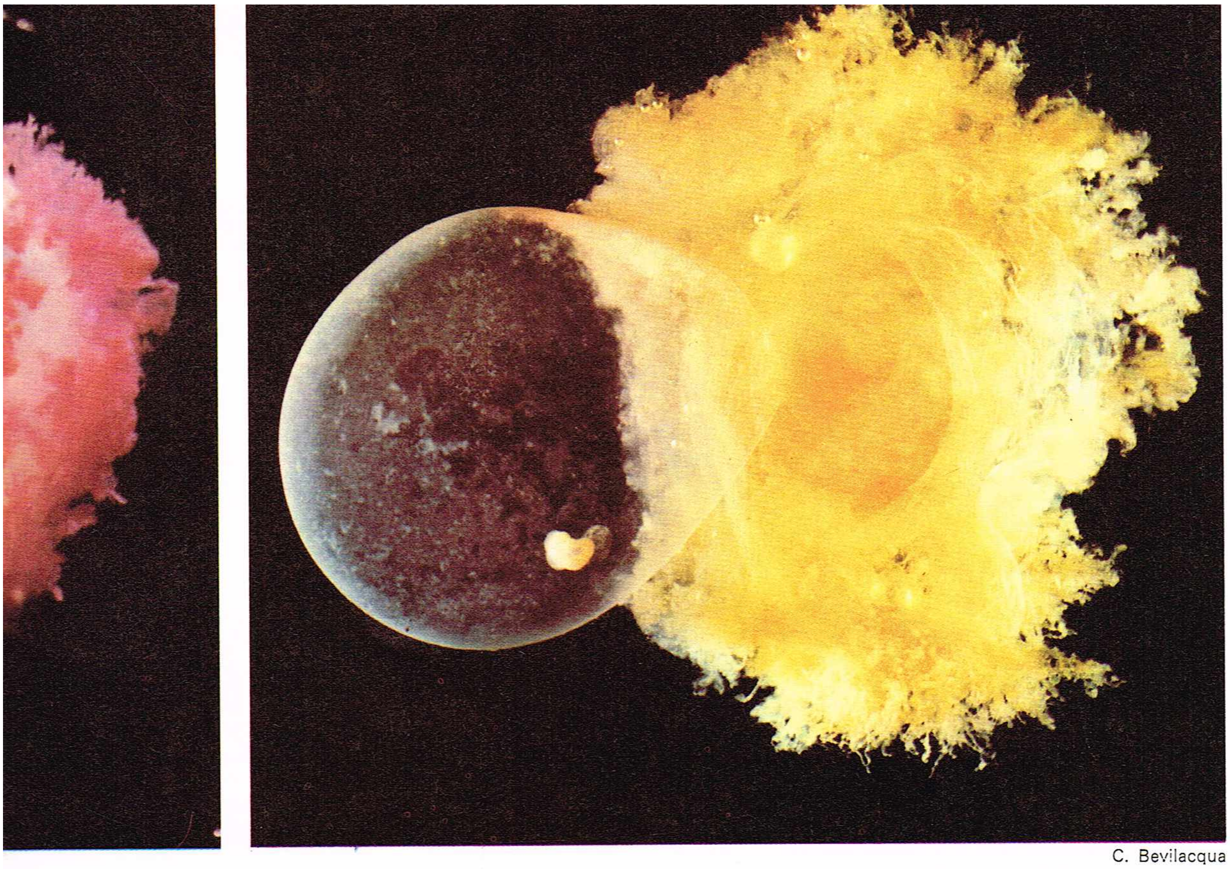

C. Bevilacqua

◀ *Sac embryonnaire (à gauche) et embryon (à droite) à la seconde semaine de vie intra-utérine.*

rement le trophoblaste et s'insinuent entre les cellules de la couche trophoblastique interne, au-dessus de la cavité amniotique. Ainsi, le toit de cette dernière se trouve délaminé en deux feuillets qui sont séparés par du mésoderme.

Gastrulation proprement dite, formation du germe à trois feuillets

Elle s'effectue entre le 16ᵉ et le 20ᵉ jour. Les données dont on dispose à ce sujet sont encore fragmentaires, la carte des territoires présomptifs n'ayant pu être établie avec précision.

La ligne primitive se forme dans la région caudale du blastoderme et croît en direction antérieure. A ce stade, l'observation d'une coupe transversale pratiquée dans le germe au niveau de la ligne primitive permet de constater que du matériel de l'ectophylle converge vers celle-ci et s'insinue en profondeur pour se glisser entre l'ectophylle et l'entophylle. Ce matériel correspond au mésoderme embryonnaire (somites, lames latérales). Le nœud de Hensen a une structure différente de celle rencontrée chez le poulet. Il correspond à l'orifice d'une petite poche, au niveau de laquelle s'invagine le matériel cordal.

Aux 18ᵉ et 19ᵉ jours, corrélativement à l'extension générale du germe, le mouvement d'invagination du matériel cordal est cause de l'allongement en direction antérieure de cette petite poche, qui devient le *canal cordal*. Il y a donc homologie entre le canal cordal et le prolongement céphalique des Oiseaux. La paroi ventrale du canal cordal se soude à l'entophylle. Des fissures longitudinales de cette même paroi mettent le canal en communication, par endroits, avec le lécithocèle.

Au 20ᵉ jour, la ligne primitive régresse. La fissuration du canal s'est étendue à toute sa longueur. De ce fait, le tube s'est transformé en gouttière puis, par aplatissement de celle-ci, en une *bandelette cordale axiale*, bandelette en continuité latéralement avec l'endoderme embryonnaire.

Des cellules mésodermiques, initiales du système circulatoire, passées en profondeur au niveau de la ligne primitive, migrent au-delà du germe. Les unes, en arrière, se rendent auprès du diverticule allantoïdien (formé le 17ᵉ jour) et constituent des initiales de cellules sanguines. Les autres migrent en avant de l'aire embryonnaire et sont destinées à donner le cœur.

fig. 25'

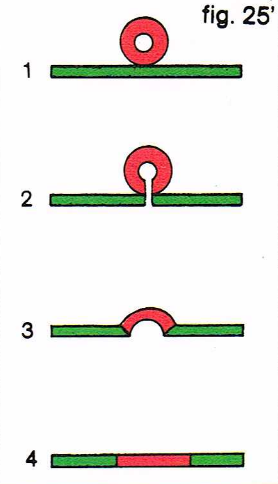

Richard Colin

▲ *Transformation du canal cordal en plaque cordale chez l'embryon humain (18ᵉ, 19ᵉ, 20ᵉ jour).*

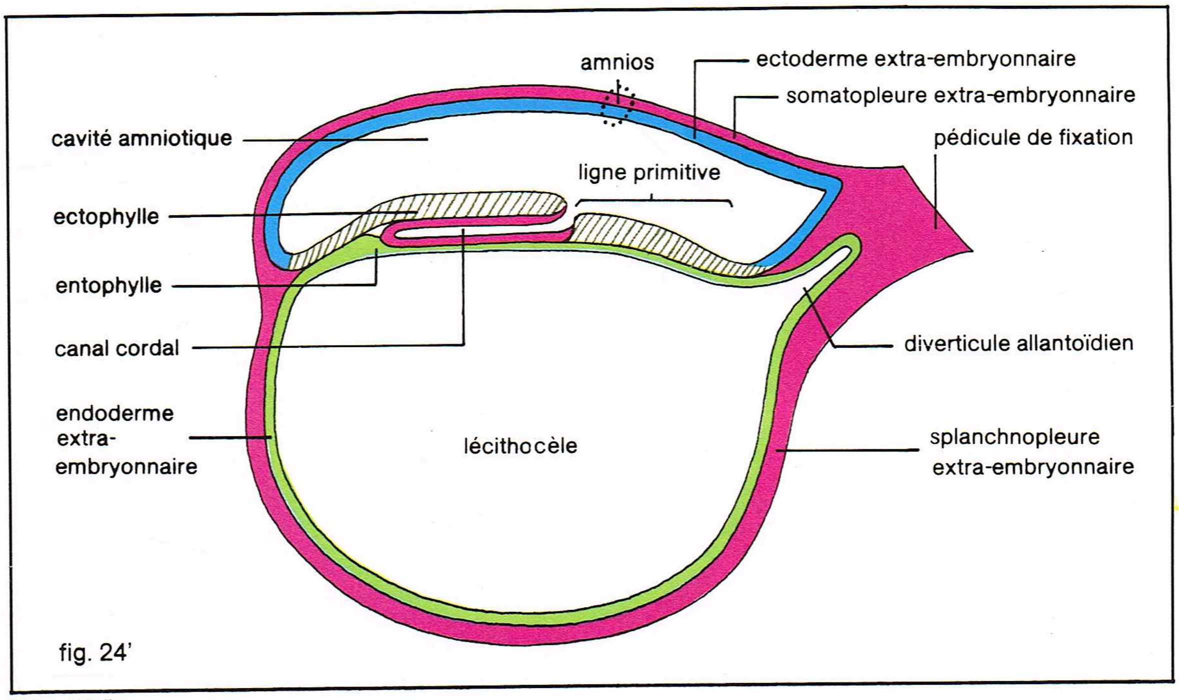

fig. 24'

Richard Colin

◀ *Coupe sagittale d'un embryon humain au 17ᵉ jour.*

▶ *A gauche, vue dorsale d'un embryon humain au 21e jour après la fécondation. A droite, vue ventrale d'un embryon humain au 25e jour après la fécondation (stade 14 somites).*

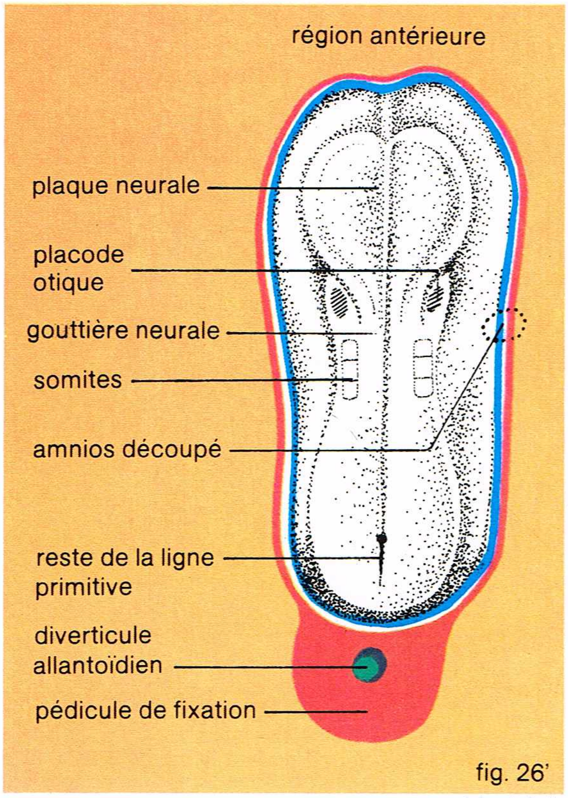

Richard Colin

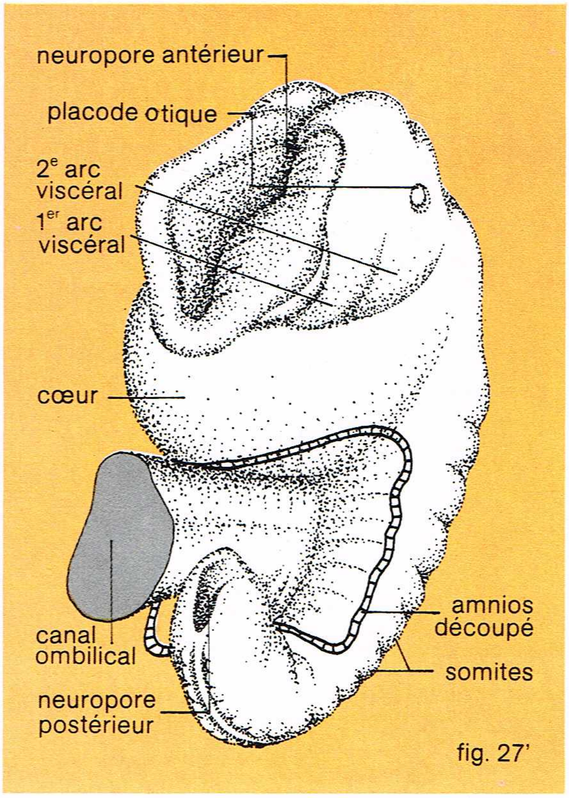

Richard Colin

La gastrulation est achevée, les trois feuillets ecto-, méso-, et endodermique sont mis en place. Cependant, le matériel cordal ne se séparera définitivement de l'endoderme qu'ultérieurement.

Morphogenèse primaire et neurulation

La succession des phases morphogénétiques étant encore moins nette que dans le cas du développement de l'Oiseau, on constate des manifestations d'organogenèse proprement dite (l'évagination de l'ébauche thyroïdienne par exemple) bien avant que le tube neural soit complètement refermé.

Formation du tube neural

La plaque neurale apparaît au 18e jour sous forme d'un épaississement de l'ectoderme en avant de la ligne primitive. Ses bords se soulèvent pour former les bourre-

▶ *Embryon humain âgé de 28 jours (stade de bourgeon caudal); à gauche, vue de profil; à droite, coupe sagittale.*

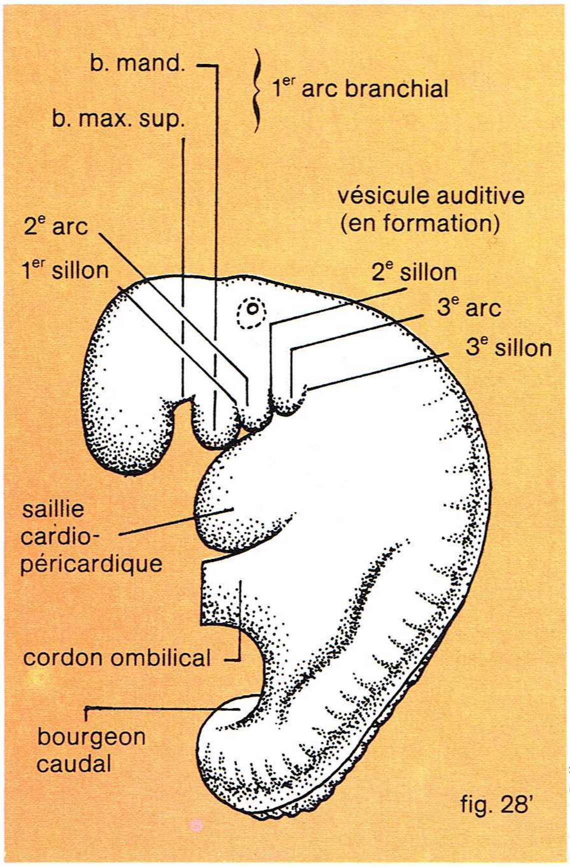

Richard Colin

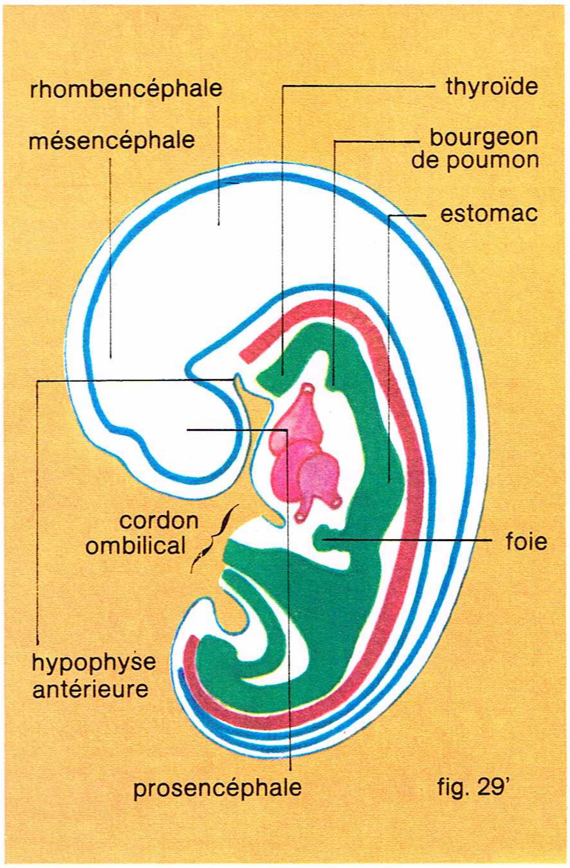

Richard Colin

lets neuraux. Le processus de convergence de ceux-ci entraîne la formation de la gouttière neurale, très large et à bords très relevés dans la région céphalique. La soudure axiale des bourrelets neuraux débute au 21ᵉ jour dans la zone moyenne. L'embryon mesure à ce moment 2,4 mm. La progression de la fermeture du tube neural est plus rapide vers l'extrémité céphalique que vers l'extrémité caudale. Le neuropore antérieur est fermé au 26ᵉ jour, le neuropore postérieur au 28ᵉ jour (embryon à 24 somites). Quand le tube neural se ferme, les crêtes neurales se détachent de l'ectoderme et forment des amas cellulaires de part et d'autre du tube.

Ségrégation des ébauches du manteau mésodermique

Tandis que les bourrelets neuraux se soulèvent, le mésoderme latéro-dorsal s'épaissit et se métamérise. Le premier somite se dessine au niveau du cerveau postérieur, 20 à 21 jours après la fécondation. La segmentation progresse ensuite vers la région caudale. A la partie inférieure des somites, se détachent les *gononéphrotomes*. Le mésoderme latéral se clive en lames latérales qui s'étendent au-delà de la zone embryonnaire. La splanchnopleure double l'endoderme et se prolonge par la splanchnopleure extra-embryonnaire recouvrant le lécithocèle. La somatopleure double l'ectoderme embryonnaire et se met en continuité avec le mésoderme extra-embryonnaire amniotique. Un cœlome intra-embryonnaire se différencie.

Individualisation de la corde

Dans la région moyenne du germe, entre le 20ᵉ et le 23ᵉ jour, la corde dorsale s'isole de l'endoderme : elle se soulève du toit du lécithocèle en devenant plus étroite et plus dense, puis se détache de l'endoderme qui rétablit sa continuité sur la ligne médiane. Elle devient une tigelle pleine dont les cellules ont un aspect vacuolaire. Dans la région céphalique, la ségrégation du matériel cordal est plus tardive (22ᵉ au 27ᵉ jour).

Formation du tube digestif

Très tôt, l'endoderme antérieur, contenant encore le matériel cordal, se replie en une formation en doigt de gant : le *pharynx*. Ce reploiement est corrélatif d'un mouvement de bascule, en direction ventrale, des matériels ectodermique et mésodermique cardiaque situés en avant de l'embryon. Le pharynx, dès le 25ᵉ jour, émet ventralement l'*évagination thyroïdienne*. Dans la région moyenne de l'embryon, tandis que la corde s'isole, la lame endodermique se replie en gouttière, tout en restant en continuité avec le reste de l'endoderme extra-embryonnaire. Ainsi se forme l'ébauche de l'intestin. Les ébauches du pharynx et de l'intestin se joignent au niveau du futur œsophage. Là, l'*évagination pulmonaire* dorsale se dessine au 27ᵉ jour. Pendant la gastrulation (au 17ᵉ jour), l'endoderme émet le *diverticule allantoïdien* à la partie postérieure du germe.

Prise de forme de l'embryon, stades du bourgeon caudal

Évolution de la région céphalique

Pendant la fermeture du tube neural, les trois vésicules (prosencéphale, mésencéphale et rhombencéphale) s'individualisent. Le tube neural s'allonge plus vite que le cul-de-sac pharyngien; il en résulte une courbure très accentuée de la région encéphalique : la partie antérieure du cerveau se dispose perpendiculairement au grand axe de l'embryon. L'extrémité pharyngienne du tube digestif suit le mouvement de courbure.

Le grand développement du cœur, parvenu à ce stade en position ventrale, contribue à l'étranglement du cordon ombilical. Une lame de mésoderme, située en arrière du cœur, se dispose perpendiculairement au tube digestif : c'est l'ébauche du *diaphragme*. Le 25ᵉ jour, une évagination du tube digestif, le *diverticule hépatique*, pénètre dans cet amas de mésoderme.

L'appareil branchial s'édifie entre le 22ᵉ et le 32ᵉ jour. Ses éléments apparaissent successivement en débutant par les plus crâniaux. Quand l'appareil est complet, il compte *cinq poches endodermiques*. En regard des trois premières l'épiderme se déprime en quatre *sillons branchiaux. Six arcs mésodermiques* se développent. Ils sont séparés les uns des autres par un pincement du mésoderme au niveau des sillons branchiaux. Ces arcs comportent un élément squelettique, un élément musculaire et un circulatoire *(arc aortique)*.

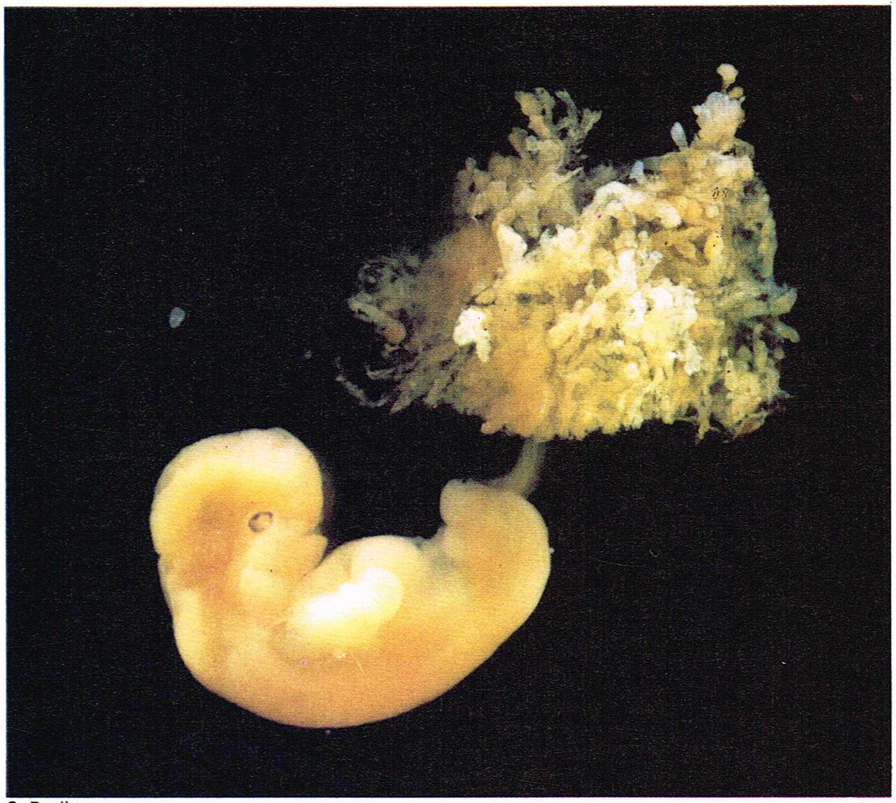

C. Bevilacqua

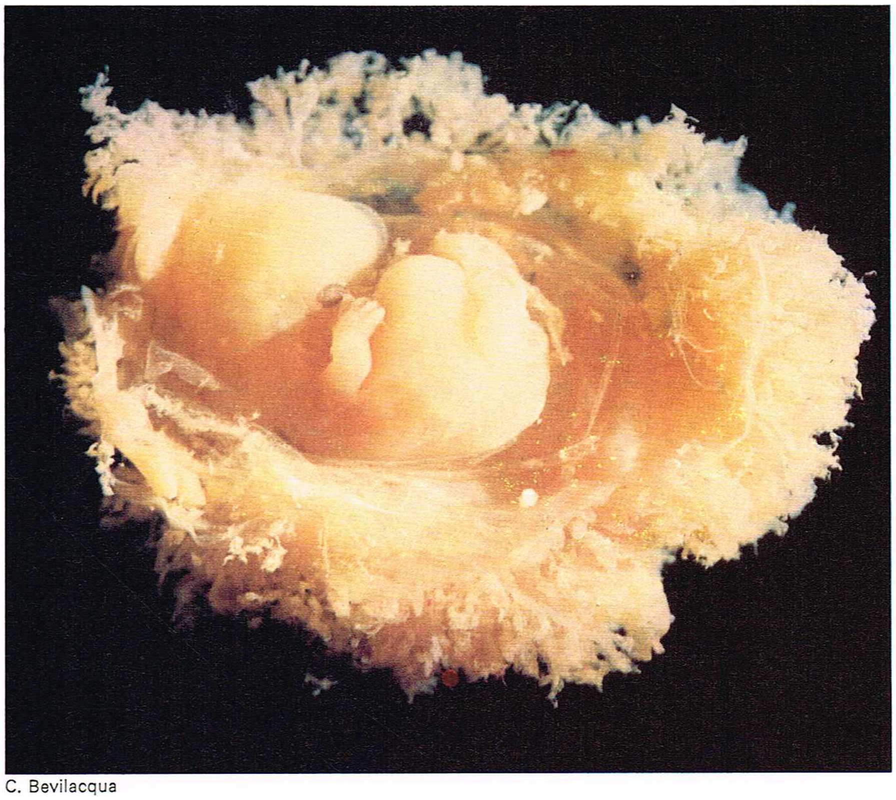

C. Bevilacqua

▲ ***Deux embryons humains âgés environ de 5 semaines (en haut) et de 6 semaines (en bas).***

Évolution de la région caudale

Une croissance beaucoup plus rapide du tube neural par rapport à l'ectoderme situé en arrière des vestiges de la ligne primitive amène ce dernier en position ventrale. Ce mouvement s'accompagne d'un reploiement de l'endoderme embryonnaire en une formation en doigt de gant. De ce fait, le diverticule allantoïdien s'allonge et sa partie proximale se trouve incorporée au corps de l'embryon : c'est la future vessie. A partir du matériel résiduel de la ligne primitive s'organise le *blastème de queue ;* l'embryon, alors âgé de 29 jours, mesure 3,8 mm et présente 24 somites. Par mode de croissance diffé-

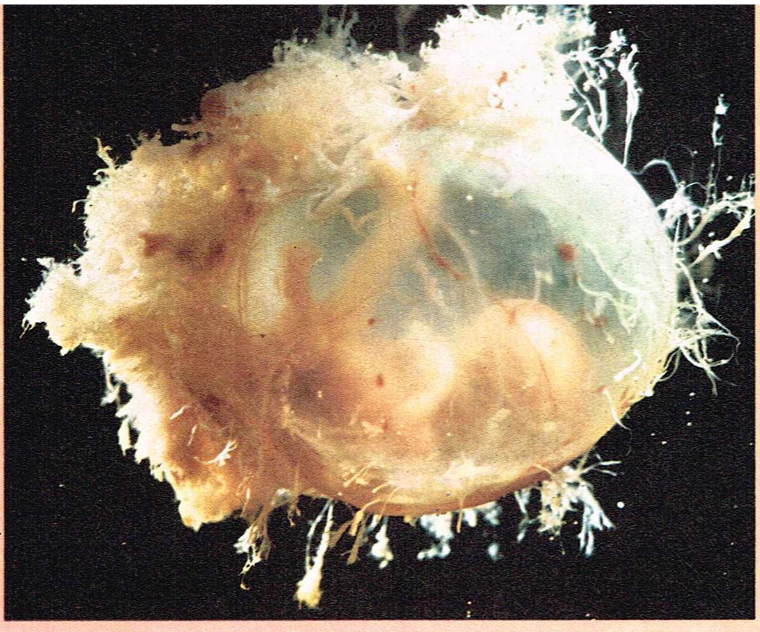

C. Bevilacqua

C. Bevilacqua

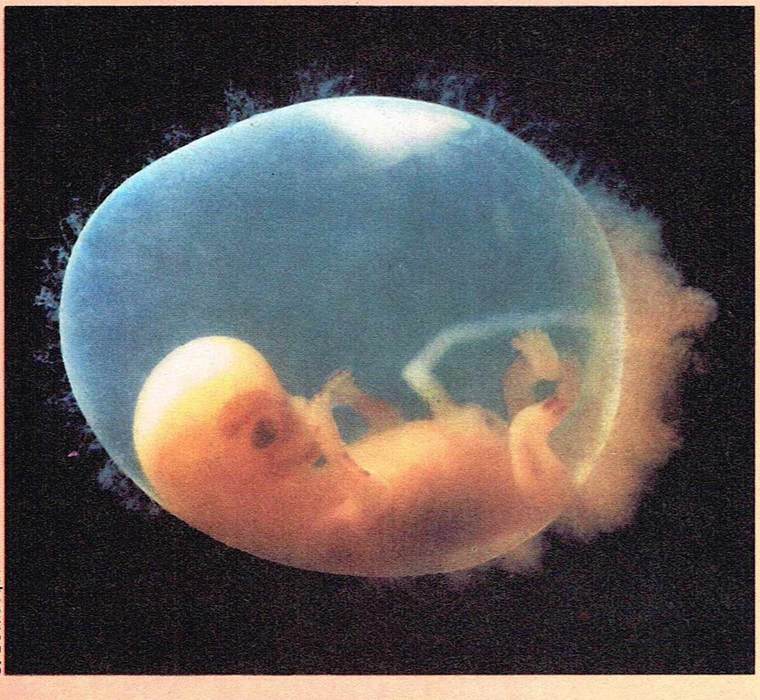

C. Bevilacqua

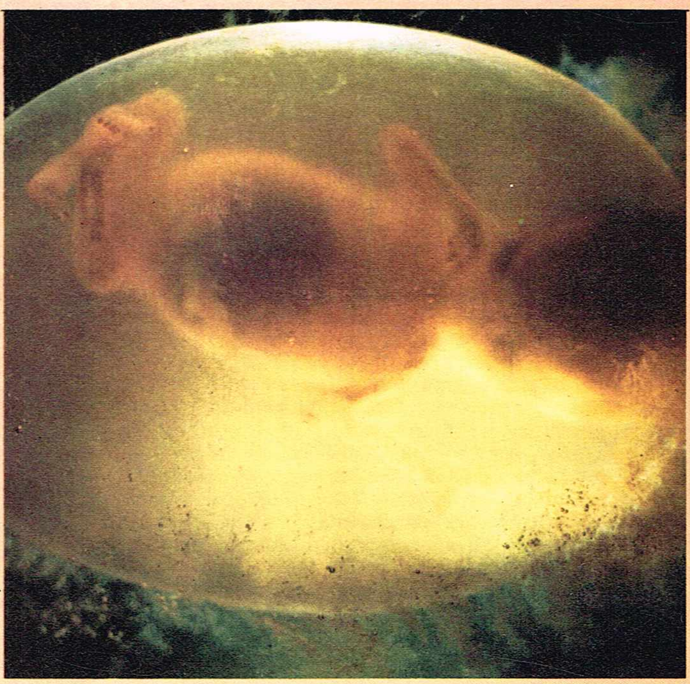

C. Bevilacqua

▲ ***Fœtus humains : en haut, à gauche, au début de la 9e semaine ; à droite, sans les enveloppes. En bas, à gauche, à la fin de la 9e semaine ; à droite, à la 10e semaine.***

rentielle, la queue s'allonge en décrivant une spire. Les bourgeons de membres postérieurs font saillie au 29e jour.

Évolution de la région moyenne

C'est la région du *canal ombilical*. On y observe deux tubes endodermiques qui relient l'intestin respectivement à la vésicule vitelline et au sac allantoïdien. Différents vaisseaux sanguins y sont localisés et assurent la liaison organisme maternel-embryon.

Un mois après la fécondation, l'embryon de l'homme est tout à fait comparable aux embryons des autres Vertébrés. A ce stade du bourgeon caudal, le germe présente des poches branchiales comme un embryon d'Amphibien.

« Métamorphose » de l'embryon en fœtus

Au cours du deuxième mois de la vie (38e ou 56e jour), l'embryon effectue une « métamorphose » comparable à celle que subit un têtard quand il se transforme en grenouille et passe de la vie aquatique à la vie terrestre.

La construction de la face est le processus le plus spectaculaire de cette période. Cette partie s'édifie à partir du matériel des deux premiers arcs branchiaux. Le premier arc (mandibulaire) est affecté à la mastication. Ses éléments squelettiques donnent les os maxillaires supérieurs et inférieurs, ses éléments musculaires les muscles masticateurs ; son nerf est le trijumeau (no V). Le deuxième arc branchial (hyoïdien) fournit la musculature superficielle de la face ; son nerf est le facial (no VII). Les deux premiers arcs contribuent également à l'édification de l'oreille moyenne et de l'oreille externe.

Par ailleurs, le tronc s'allonge légèrement, les membres se développent, le bourgeon de queue régresse. Le modelage des formes extérieures s'achève à la fin du deuxième mois ; l'embryon est devenu un fœtus.

Pendant cette période de métamorphose, l'appareil circulatoire subit de profonds remaniements. Le cœur se cloisonne, incomplètement d'ailleurs (trou de Botal). Le quatrième arc aortique gauche se transforme en crosse aortique, le droit en tronc brachiocéphalique. Les arcs no 6 donnent les artères pulmonaires. Une communication entre l'artère pulmonaire gauche et l'aorte subsiste ; cette anastomose fonctionne pendant la vie fœtale. Dans le système veineux se produisent des remaniements importants concernant le réseau des veines vitellines et ombilicales au niveau du foie. La veine ombilicale gauche conduit au cœur le sang hématosé venant du placenta. Les ébauches des gonades se différencient en ovaires ou en testicules (50e-53e jour).

Par conséquent, deux mois après la fécondation, l'essentiel de la morphologie du fœtus est fixé. Pendant les mois suivants, il va s'accroître, et ses proportions vont se modifier, l'importance de la région céphalique allant diminuant.

Différenciation des annexes embryonnaires, formation du placenta

La cavité amniotique et le cœlome extra-embryonnaire

Nous avons déjà évoqué la formation de la cavité amniotique au 8e jour du développement. A la fin de la deuxième semaine, le mésoderme extra-embryonnaire se

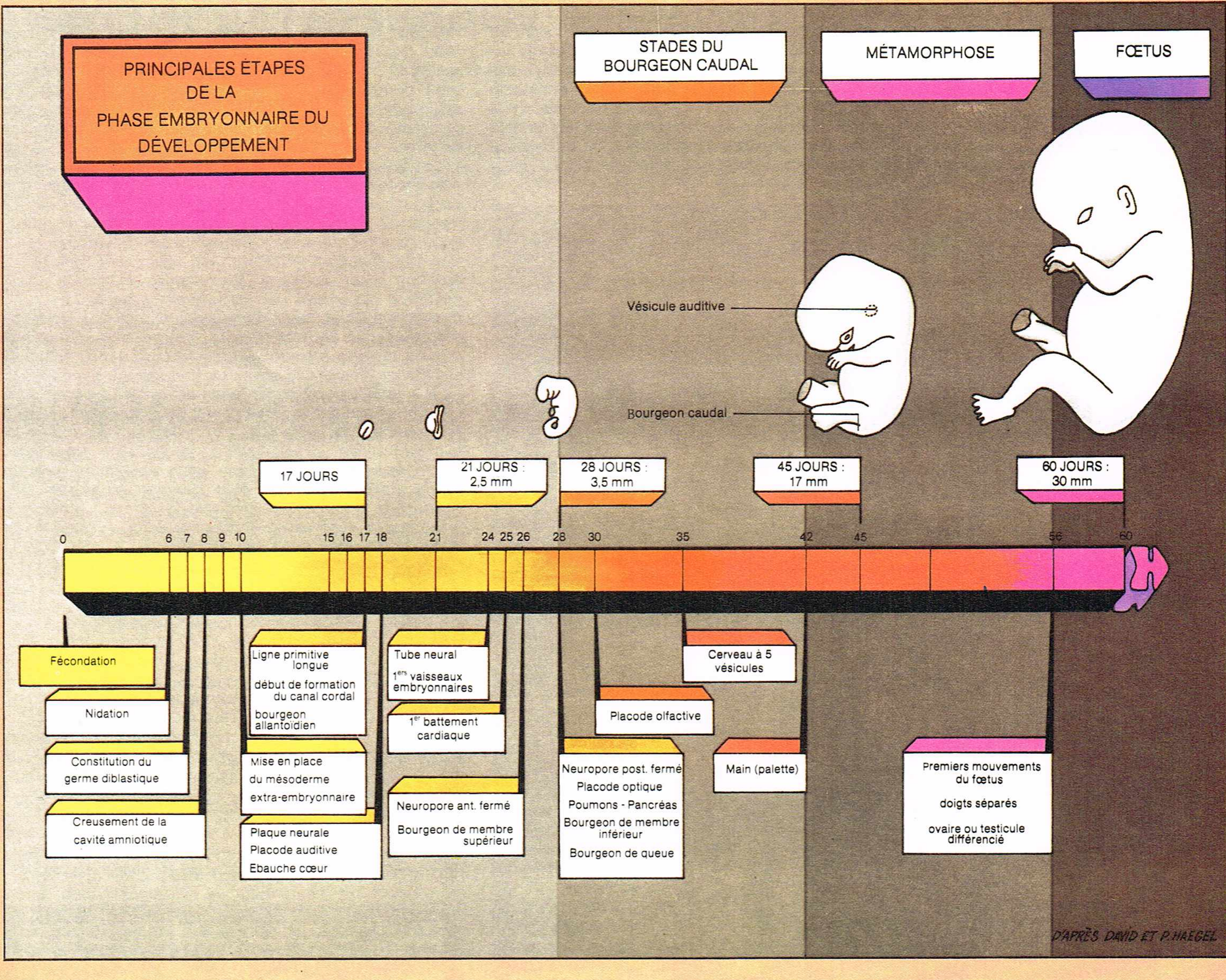

Richard Colin

▲ ***Tableau récapitulatif des principales étapes de la phase embryonnaire du développement dans l'espèce humaine.***

creuse d'un cœlome. La somatopleure s'applique contre le trophoblaste, l'ensemble constituant le chorion. Au niveau du bouton embryonnaire, elle tapisse extérieurement le toit de la cavité amniotique; ainsi se forme l'amnios. Un tractus de mésoderme suspend l'embryon au trophoblaste : c'est le *pédicule de fixation*. A la fin de la deuxième semaine, le cœlome extra-embryonnaire est la plus vaste cavité du germe. Son importance décroît ensuite au profit de la cavité amniotique, en expansion.

La vésicule vitelline

Entre le 13e et le 15e jour, la paroi du lécithocèle se trouve tapissée intérieurement par l'endoderme et extérieurement par la splanchnopleure extra-embryonnaire. Ce sac à triple paroi est une vésicule vitelline. Dans sa paroi mésodermique se différencient les ébauches de l'appareil circulatoire : les vaisseaux et les hématies.

Le diverticule allantoïdien

Pendant la gastrulation, en arrière de la ligne primitive, l'endoderme embryonnaire émet le *diverticule allantoïdien* qui s'engage dans le mésoderme du pédicule de fixation. Il progresse en direction du chorion mais ne parvient jamais à l'atteindre.

Le placenta

Le placenta humain se forme à la fin de la 2e semaine de la grossesse. Au 13e jour, la couche syncytiale du trophectoderme est en contact direct avec le sang maternel, car la paroi des capillaires de l'endomètre a été érodée localement. Dès le 15e jour, la surface de contact entre les formations embryonnaires et les lacunes sanguines du conjonctif utérin s'est accrue par le développement de villosités (fig. 31'), particulièrement développées dans la région située au-dessus de l'embryon. La nutrition du germe se fait par diffusion à travers le chorion de ce jeune placenta. En effet, la circulation embryonnaire n'est pas encore établie. Au cours de la 4e semaine, les vaisseaux allantoïdiens se développent dans la gaine mésodermique du diverticule allantoïdien. Ils se ramifient dans les villosités du chorion. Ainsi, les échanges sont facilités entre la mère et l'embryon.

A partir du 2e mois, commence le processus de réduction spatiale de la zone de placentation. Les villosités se développent beaucoup dans la zone du pédicule de fixation, tandis qu'ailleurs elles régressent. A la fin du 2e mois de la grossesse, le placenta est devenu discoïdal.

Le placenta humain, à terme, est un disque de 16 à 20 cm de diamètre; son épaisseur est de 3 cm. Sa face fœtale est lisse et c'est en son centre qu'est inséré le cordon ombilical. Sa face maternelle, examinée après rejet, est bosselée du fait de la présence de 15 à 30 chambres correspondant aux *arbres villositaires* (fig. 31'). En effet, chaque arbre flotte dans une chambre partiellement séparée des chambres voisines par des cloisons incomplètes. Ces chambres sont emplies de sang maternel. Le sang oxygéné pénètre dans cette lacune au niveau de l'extrémité distale de l'arbre villositaire. Il se glisse entre les ramifications de ce dernier, puis, devenu du sang non hématosé, il gagne la zone périphérique de la chambre et en sort par des branches de la veine utérine.

C'est au niveau du placenta que s'effectuent les échanges entre la mère et le fœtus. En outre, par sa fonction endocrine, le placenta joue un rôle actif dans le maintien de la gestation.

▼ *Schéma de l'évolution du placenta humain : 1, au 13e jour; 2, au 15e jour; 3, au 21e jour; 4, à terme. Les flèches indiquent le sens du flux de sang maternel.*

— La *perméabilité placentaire*. La « membrane » placentaire séparant le sang maternel et le sang fœtal est constituée par le trophectoderme doublé de tissu conjonctif (mésoderme chorial et mésoderme allantoïdien) ainsi que par l'endothélium des capillaires fœtaux. A terme, son épaisseur peut être très réduite (2 μ), et sa surface est considérable du fait des arborisations des villosités et de la formation de microvillosités dans la couche externe du trophectoderme. Ainsi, les échanges sont facilités.

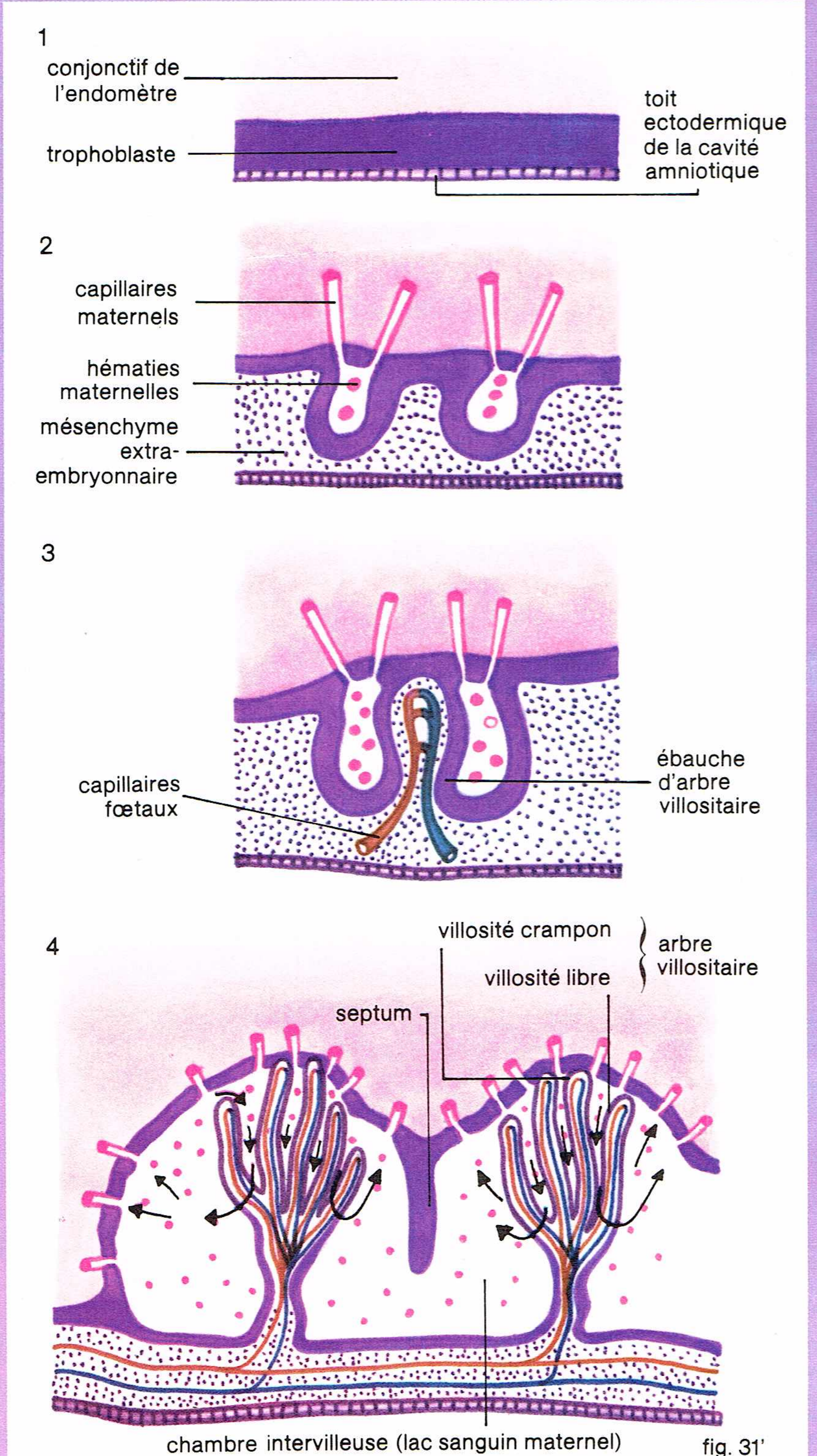

fig. 31'

Richard Colin

Les éléments nutritifs transitent, à ce niveau, en direction du fœtus. Les déchets du métabolisme azoté fœtal et le gaz carbonique sont rejetés dans le sang maternel (fig. 32'). Les processus requis pour ces échanges sont complexes : phénomènes de diffusion, transport enzymatique, pinocytose. Certaines substances toxiques (toxines microbiennes, alcool, médicaments, etc.) et certaines hormones (œstrogènes en particulier) ne sont pas arrêtées par la barrière placentaire (fig. 32') et peuvent agir sur le fœtus. Par contre, le passage de certains anticorps de la mère au fœtus peut être bénéfique pour ce dernier. Ils lui permettent d'acquérir une immunité passive qu'il conserve dans les jours suivant la naissance.

— La *fonction endocrine du placenta*. Dès que la nidation s'est achevée, le contrôle hormonal de la gestation est assuré par les hormones hypophysaires et ovariennes de la mère d'une part, et par des hormones sécrétées par le trophoblaste d'autre part. Ce dernier produit la *gonadotrophine chorionique*, dont l'action est semblable à celle de l'hormone lutéinisante hypophysaire (L.H.) [maintien du corps jaune ovarien]. La sécrétion de cette hormone par le placenta est décelable peu de temps après la nidation ; elle atteint un maximum 60 jours après la fécondation puis devient rapidement très faible. *Œstrogènes* et *progestérone* sont également produits par le trophoblaste. Leur taux s'accroît progressivement pendant la grossesse. A partir du 3e mois, les stéroïdes placentaires sont assez abondants pour assurer, à eux seuls, le maintien de la gestation.

BIBLIOGRAPHIE

BALINSKY B.I., *An Introduction to Embryology,* W.B. Saunders Company, Philadelphie - Londres, 3e éd., 1970. - BEETSCHEN J.C., *l'Embryologie,* Que sais-je ?, P.U.F., 1974. - BERILL N.J., *Developmental Biology,* Mc Graw-Hill Book Co., New York, Dusseldorf, Londres, 1971. - DAVIDSON E.H., *Gene Activity in Early Development,* Academic Press Inc., New York, 3e éd., 1970. - DENIS H., *Précis d'embryologie moléculaire,* P.U.F., 1974. - DOLLANDER A. et FENART R., *Éléments d'embryologie, in Embryologie générale I,* Flammarion, Paris, 2e éd., 1973. - GALLIEN L., *Problèmes et concepts de l'embryologie expérimentale,* Gallimard, Paris, 1958. - HOUILLON C., *Embryologie,* Collection Méthodes, Hermann, Paris, 1967.

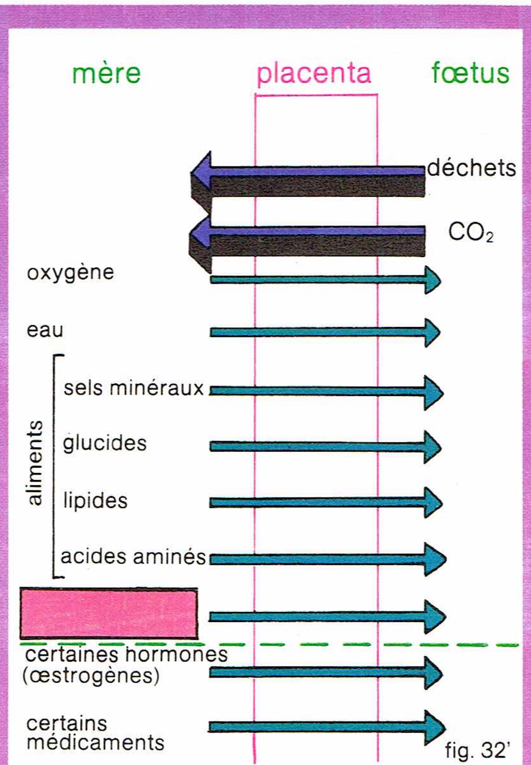

fig. 32'

Richard Colin

ANATOMIE ET PHYSIOLOGIE ANIMALES

NOTION DE TISSUS

Nous présenterons brièvement ici les différents tissus animaux dont l'étude détaillée sera reprise dans chaque chapitre.

Tous les organes sont constitués par un assemblage de tissus de nature diverse. Selon la définition de Beaumont, « Un tissu est constitué par un ensemble de cellules différenciées de la même façon et assurant une même fonction. » On a l'habitude de classer les tissus selon leur fonction principale. On définit ainsi les tissus épithéliaux, conjonctifs, musculaires et nerveux.

Tissus épithéliaux

Initialement, chez l'embryon, tous les tissus épithéliaux ont une fonction de *revêtement :* ils recouvrent le corps ou tapissent la lumière des divers conduits digestifs, urinaires, etc., ainsi que les cavités cœlomiques. Ils sont donc d'origine *ectoblastique, endoblastique* ou *mésoblastique*. Secondairement, ces tissus de revêtement peuvent acquérir une *fonction glandulaire*.

On classe les *épithéliums de revêtement* en fonction de leur structure. Il existe des *épithéliums pavimenteux simples,* où les cellules forment une seule couche et sont plus ou moins aplaties. C'est le cas de l'épiderme de certains Invertébrés (méduses, ascidies, etc.). L'épithélium cœlomique, ou mésothélium, est de ce type, comme on peut s'en rendre compte au niveau de la cavité abdominale et de ses dérivés, tapissés par le péritoine, par le péricarde ou la plèvre du poumon. Dans les vaisseaux sanguins, on ne parle pas d'un mésothélium, mais d'un endothélium, terme assez mal choisi puisqu'il n'est pas endoblastique. A la surface du tégument des Invertébrés ou au contact de la lumière de la trachée des Mammifères, on trouve un *épithélium prismatique simple,* à cellules plus hautes.

L'épiderme de tous les Vertébrés est un *épithélium pavimenteux stratifié;* il en est de même pour l'épithélium digestif.

Les cellules épithéliales peuvent être d'aspect très simple (c'est le cas de l'épithélium péritonéal); ou bien elles peuvent, durant leur maturation, acquérir des éléments très spécialisés qui donnent naissance, par exemple, à la kératine de la peau des Mammifères ou de l'œsophage des Rongeurs; un épithélium de revêtement peut aussi contenir des *cellules de type glandulaire,* telles que les cellules à mucus de la peau des Poissons ou celles du côlon des Mammifères. Durant le développement de l'embryon, divers épithéliums de revêtement donnent totalement naissance à des *bourgeons glandulaires*. Les massifs épithéliaux qui en résultent présentent des morphologies très différentes, puisque les cellules glandulaires peuvent être groupées pour former des glandes simples, subsphériques ou digitiformes, ou encore des glandes plus ou moins ramifiées ou lobulées.

La *nature du produit de sécrétion* est éminemment variable : la sécrétion est essentiellement *lipidique* dans le cas des glandes sébacées; elle est *muqueuse* dans les glandes de la peau des Amphibiens mais elle est aussi *protéique*. Chez les Mammifères, certaines glandes sont mixtes (glande salivaire parotide : muqueuse-séreuse).

Tissus conjonctifs

Les tissus conjonctifs ont, dans l'ensemble, une *fonction de soutien*. Le *conjonctif sensu stricto* est un tissu d'emballage qui tapisse, protège, nourrit et, tout compte fait, soutient les tissus épithéliaux, musculaires et nerveux. Le *conjonctif squelettique* remplit une fonction de soutien prééminente. Cependant, le *tissu hématopoïétique* ne soutient rien du tout, pas plus que le sang dont il élabore les éléments... Ces tissus ont un point commun : on trouve, entre les cellules qui les constituent, des *éléments fibrillaires* plus ou moins développés; les fibres (collagène, élastine ou réticuline) sont extrêmement abondantes dans le derme de la peau d'une vache, par exemple, et on en trouve certaines au sein de la moelle osseuse qui fabrique les cellules sanguines. Dans tous les cas, on trouve aussi entre les cellules une *substance fondamentale* plus ou moins dense qui contient des mucopolysaccharides et des protéines en proportions variables. En extrapolant, on peut estimer que le sang lui-même est un tissu conjonctif.

Le conjonctif *sensu stricto* contient essentiellement des fibres; le tissu cartilagineux, initialement fibreux, comporte une substance fondamentale glycoprotéique abondante; le tissu osseux, initialement fibreux lui aussi, s'imprègne rapidement de sels minéraux; le tissu sanguin comporte une substance fondamentale exclusivement liquide : le *plasma,* dont la constitution est extrêmement complexe.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Épithélium de revêtement de type pavimenteux stratifié (œsophage humain) [coloration topographique].***

Les cellules du conjonctif (mésoblastiques ou mésenchymateuses) ont une parenté commune ou, du moins, très voisine, qui se manifeste souvent dans leur comportement. Nombre d'entre elles peuvent migrer au sein du tissu dont elles sont les éléments normaux, ou des autres tissus conjonctifs qui sont à leur voisinage. On trouve dans le conjonctif « banal » des cellules migratrices d'origine sanguine ou même médullaire; dans certains cas, leur accumulation peut être considérable : les *lymphocytes* et les *polynucléaires* s'accumulent au niveau des foyers d'irritation; il en est de même pour les *mastocytes* ou les *plasmocytes*. Le cartilage et l'os se forment puis se trouvent remaniés chez l'embryon, grâce à l'apposition de fibroblastes du conjonctif banal qui migrent pour venir au contact du squelette.

Tissus musculaires

Les cellules musculaires sont contractiles. Elles contiennent des myofibrilles, dont la structure peut être homogène ou bien striée; on parle de *musculature lisse* et de *musculature striée*. Dans le premier cas, il s'agit des fibres musculaires qui permettent les mouvements de l'intestin et de l'appareil respiratoire ainsi que les contractions des vaisseaux sanguins ou de l'appareil urogénital; il s'agit alors de contractions réflexes involontaires. Les muscles striés sont à contraction volontaire, sauf dans le cas du myocarde, tissu musculaire cardiaque. La musculature striée permet les mouvements du corps et, en particulier, des membres : c'est pourquoi, chez les Vertébrés, on utilise le terme de musculature squelettique. Notons que la musculature squelettique se contracte aussi de manière involontaire : il existe des réflexes dits de posture dont l'arc ne parvient pas au cerveau; ce sont, par exemple, les mouvements automatiques, tels ceux de la marche.

◀ ***Page ci-contre à droite, échanges au niveau placentaire entre la mère et le fœtus.***

▶ *Tégument d'embryon de poulet au 13e jour d'incubation. L'épiderme* (épithélium) *recouvre le derme, dont la couche superficielle est formée d'éléments* conjonctifs *très serrés, la couche profonde étant lâche et vascularisée (on voit ici des sections transversales de capillaires).*

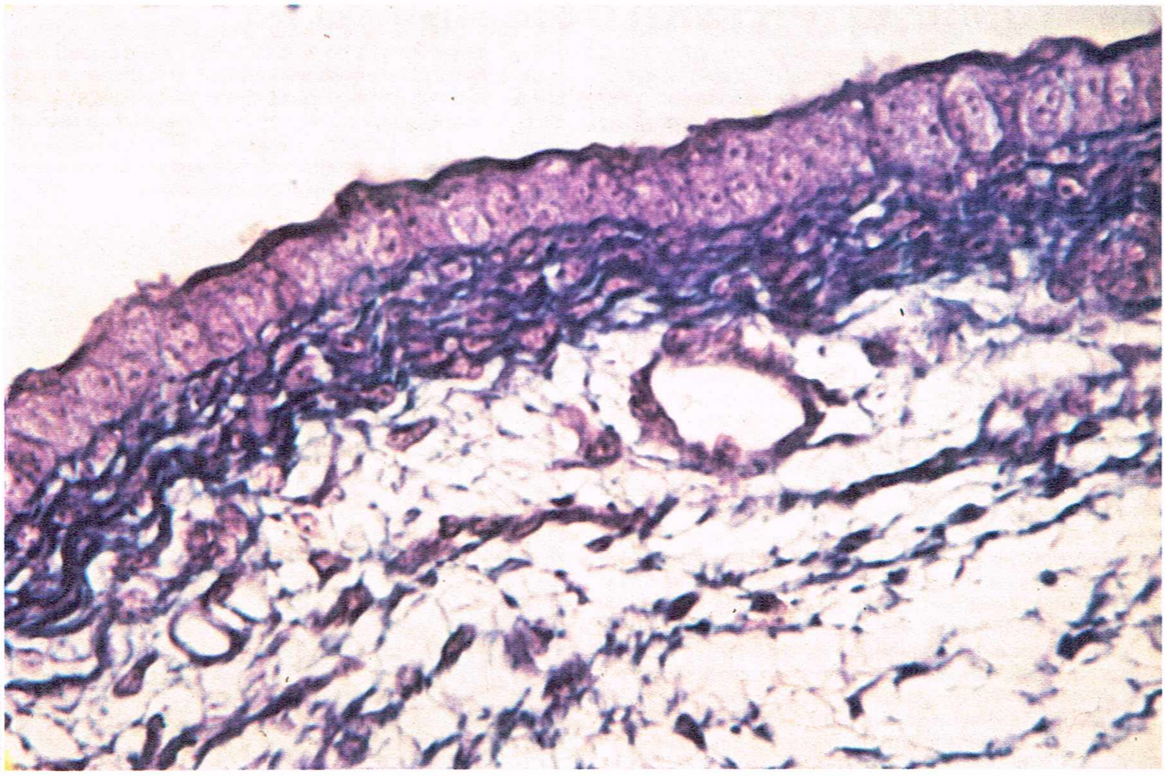

J. Bouchard

Dans un muscle, les fibres, plus ou moins groupées en faisceaux, sont emballées dans un tissu conjonctif richement vascularisé.

Tissus nerveux

Ils dérivent de l'ectoblaste et sont formés de cellules d'aspect très variable, ou *neurones,* qui comportent un nombre plus ou moins grand de prolongements, ou *fibres nerveuses;* les prolongements qui drainent l'influx nerveux vers le neurone sont des *dendrites;* le prolongement qui conduit l'influx vers d'autres cellules est un *axone.* L'extrémité des fibres forme des *synapses* avec les cellules fonctionnellement associées au neurone. Les tissus nerveux sont généralement bien vascularisés.

LE TÉGUMENT DES VERTÉBRÉS

Le tégument, ou peau des Vertébrés, recouvre toutes les surfaces exposées du corps, y compris la partie visible de l'œil (conjonctive transparente) et la membrane tympanique de l'oreille moyenne des Tétrapodes. Il est en continuité directe avec les muqueuses au niveau des lèvres, des narines, de l'anus, des orifices génitaux et urinaires. Il est toujours formé de l'association de deux tissus, l'un, superficiel, d'origine épiblastique : l'épiderme, l'autre, profond, d'origine mésoblastique : le derme. Différentes structures spécialisées peuvent se développer aux dépens de l'épiderme (phanères cornés et glandes cutanées) ou du derme (formations squelettiques diverses).

L'énorme surface de contact direct de la peau avec le milieu extérieur (1,5 à 2 m² chez l'homme) lui permet de remplir de multiples fonctions. Les récepteurs sensoriels dispersés au niveau de la peau informent l'organisme sur les conditions du milieu (sensibilité extéroceptive générale). La peau joue un rôle protecteur éminent : elle constitue une ligne de défense ininterrompue contre l'invasion bactérienne ou celle d'autres micro-organismes; elle protège les structures internes contre les agressions physiques ou chimiques de l'extérieur; elle participe à l'équilibre hydrique du corps, en prévenant une trop grande perte d'eau (Vertébrés marins ou terrestres) ou une trop grande entrée d'eau (Vertébrés d'eau douce). A ces fonctions principales s'ajoutent d'autres rôles importants : dans la régulation thermique, en particulier chez les homéothermes (évaporation de la sueur chez les Mammifères, vasoconstriction ou vasodilatation des capillaires dermiques, écran thermique formé par les plumes ou les poils), dans les échanges respiratoires (respiration cutanée des Amphibiens), dans l'excrétion (glandes sudoripares des Mammifères), la nutrition (glandes mammaires des Mammifères), voire même dans la reconnaissance individuelle (glandes odoriférantes de nombreux Reptiles et Mammifères).

L'épiderme

C'est un épithélium pluristratifié que l'on peut opposer à l'épiderme unistratifié de tous les Invertébrés. Il est différencié en deux couches cellulaires, nourries par la lymphe issue des vaisseaux du derme : une couche germinative profonde, qui conserve la faculté de se multiplier indéfiniment et engendre ainsi les assises cellulaires situées au-dessus d'elle, formant la *couche de Malpighi.*

L'évolution de la couche de Malpighi est très différente selon qu'il s'agit de Vertébrés inférieurs aquatiques ou de Tétrapodes terrestres. Chez les Cyclostomes, les Poissons et les larves d'Amphibiens, les cellules épidermiques sont éliminées sans subir de transformation particulière, et il n'y a pas de couche cornée donc pas de formation annexe de type phanère. L'épiderme par contre donne naissance à des formations internes glandulaires; il reste peu épais (5 à 9 assises cellulaires), perméable et permet des échanges osmotiques et ioniques avec le milieu extérieur. Au contraire, chez les Tétrapodes, les cellules superficielles s'imprègnent de protéines caractéristiques, les *kératines,* puis dégénèrent et meurent. La couche superficielle, formée par les cadavres kératinisés des cellules, constitue un écran qui limite les pertes d'eau par évaporation et représente donc une adaptation à la vie aérienne.

Le derme

Tissu conjonctif supportant et nourrissant l'épiderme, le derme est formé par un feutrage de fibres collagènes enchevêtrées, superposé à un réseau de fibres élastiques. Cette structure lui confère une grande résistance mécanique (industrie du cuir). Il renferme des terminaisons nerveuses sensorielles, des chromatophores, des capillaires sanguins et lymphatiques. Il est susceptible de s'ossifier (os dermiques, écailles).

A l'exception des Cyclostomes et des Poissons, la peau est séparée des muscles et des os sous-jacents par un tissu conjonctif lâche, l'hypoderme, creusé de longs sinus lymphatiques chez les Amphibiens, transformé en pannicule adipeux isolant chez les Mammifères aquatiques ou à poils rares (il représente jusqu'à 50 % du poids du corps chez les Cétacés).

La peau des Cyclostomes et des Poissons

Les nombreuses cellules glandulaires différenciées à partir de la couche germinative peuvent, par l'activité mitotique continue de cette dernière, être refoulées intactes à la surface de l'épiderme où elles déversent leur contenu. La plupart d'entre elles élaborent du mucus qui forme un film protecteur vis-à-vis des micro-organismes parasites.

La peau des Cyclostomes

La peau de la larve et de l'adulte de la lamproie, décrite par Downing et Novalès, peut servir d'exemple. En dehors des cellules épidermiques banales, trois catégories cellulaires sont toujours représentées.

— Des *cellules muqueuses,* qui sont les plus nombreuses ; bien qu'elles possèdent des caractéristiques morphologiques particulières permettant de les distinguer des cellules équivalentes de l'épiderme des Téléostéens, elles synthétisent le mucus selon un processus très voisin. Le réticulum endoplasmique granulaire participe à la formation de la partie protéique, et l'appareil de Golgi ajoute des mucopolysaccharides et des glycoprotéines. Les cellules muqueuses et leur sécrétion sont particulièrement abondantes chez la larve, ou ammocète, qui vit dans les bancs de sable des fleuves et des rivières. Dans ce cas, le rôle de ces cellules dans la lubrification nécessaire de l'épiderme est évident.

— De grandes *cellules granuleuses* (séreuses) dont le cytoplasme, très riche en granules, différencie des faisceaux très épais de filaments de 150 Å de diamètre. Ces faisceaux rigides faciliteraient l'expulsion du mucus des cellules muqueuses lorsque l'animal, la larve en particulier, pénètre dans un banc de sable.

— Des *cellules « claviformes »,* très grandes, binucléées, à deux compartiments cytologiques distincts, filamenteux et cytoplasmique. Dans le compartiment filamenteux, très important, les filaments (qui ont 70 Å de diamètre et sont composés de nombreux protofilaments) sont disposés en hélice, de la périphérie cellulaire jusqu'au centre de la cellule. La fonction de ces cellules reste inconnue. Certains auteurs pensent qu'elles représentent les précurseurs des cellules granuleuses qui, chez la lamproie, pourraient jouer le même rôle (réaction d'alarme) que les cellules claviformes des Téléostéens. D'autres auteurs suggèrent que ces cellules sont des cellules myoépithéliales modifiées, dont les mouvements permettent au matériel sécrétoire accumulé dans les cellules muqueuses et granuleuses de gagner la surface. De nombreux arguments cytologiques s'accumulent en faveur de cette hypothèse, par exemple, la très grande abondance des mitochondries dans le cytoplasme. Cette abondance suggère une activité métabolique importante, en relation avec un phénomène de contractilité.

La peau des Poissons

L'absence de couche cornée, la présence de cellules glandulaires mais aussi d'écailles dermiques caractérisent la peau des Poissons.

Les glandes cutanées des Poissons osseux (Ostéichthyens)

La description, faite par Merrilees en 1974, de l'épiderme du brochet américain permet de caractériser les *cellules épithéliales « banales »* par la présence dans leur cytoplasme de nombreux filaments de 75 Å de diamètre. Des cellules muqueuses sont dispersées sur cette trame de cellules à contenu filamenteux. Dans certains groupes, les sécrétions muqueuses externes correspondent à des fonctions spécialisées : la sécrétion du cocon muqueux à la saison sèche par le protoptère, la sécrétion servant à la nourriture des jeunes chez certains Cichlidés *(Tilapia),* sécrétion stimulée par la prolactine. On sait comparativement peu de chose sur la distribution et la fonction des *cellules granuleuses* (séreuses, « poison-cells ») fréquentes, par exemple, chez les Cyprinidés et les Anguillidés. Leur sécrétion pourrait être toxique. Les « glandes » à venin, associées par exemple aux épines operculaires chez la vive, seraient formées par des amas compacts de ces cellules dont la sécrétion se fait selon le mode holocrine. Les glandes de l'éclosion, transitoires, qui permettent à l'embryon de perforer la coque ovulaire, seraient formées d'amas de cellules granuleuses.

Chez certaines espèces, des *cellules claviformes* (« club-cells ») ont été décrites. Ces cellules, de grande taille, sont caractérisées par la présence de filaments cytoplasmiques très abondants, différents de ceux des cellules épidermiques banales chez les mêmes espèces. Le rôle de ces cellules reste énigmatique. Certains auteurs pensent qu'elles sont à l'origine de la substance qui, chez de nombreuses espèces, provoque, par la voie olfactive, la réaction d'alarme. Cependant, des stimuli visuels ou mécaniques provoquent des réponses semblables.

Beaucoup d'espèces, en particulier abyssales, possèdent des organes bio-luminescents : les *photophores.* Chez *Porichthys notatus* par exemple, plus de 800 photophores dermiques sont répartis selon des lignes précises

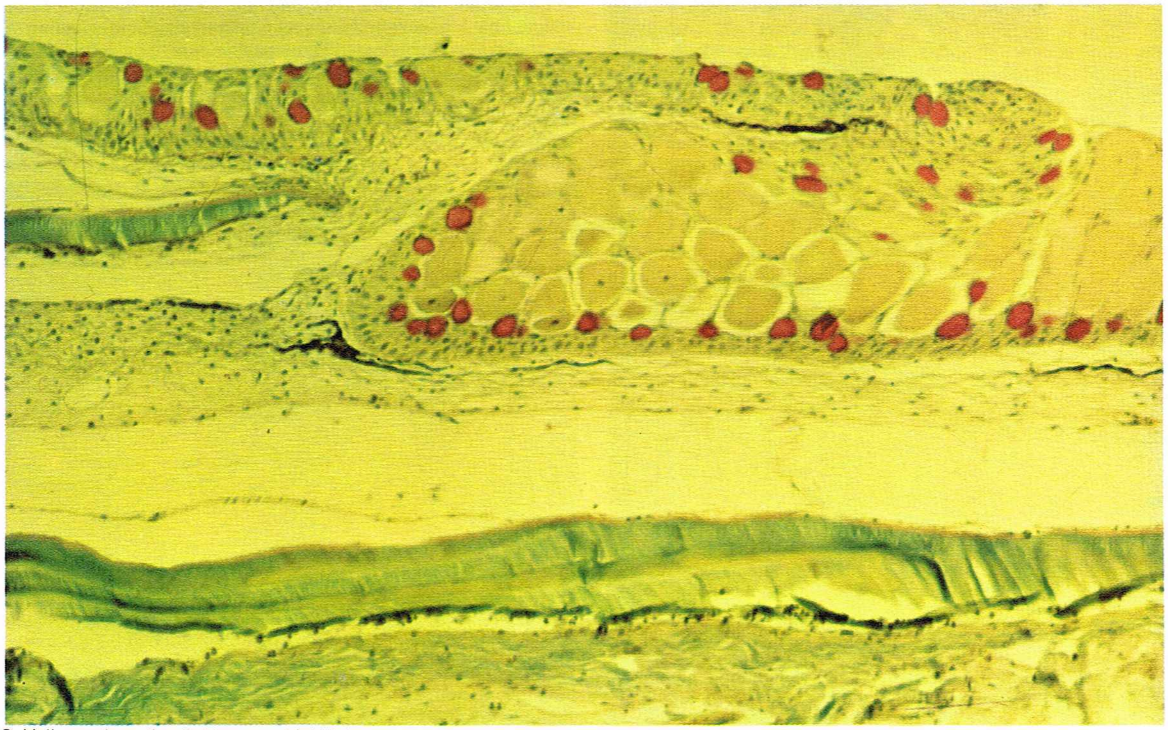

G. Volle - préparation S. Busson - Mabillot

◀ **Épiderme** *de jeune tanche (Téléostéen) caractérisé par ses nombreuses cellules glandulaires :* **muqueuses** *(colorées en rouge) et* **séreuses** *(grandes cellules claires) ; le derme porte* **des écailles élasmoïdes.**

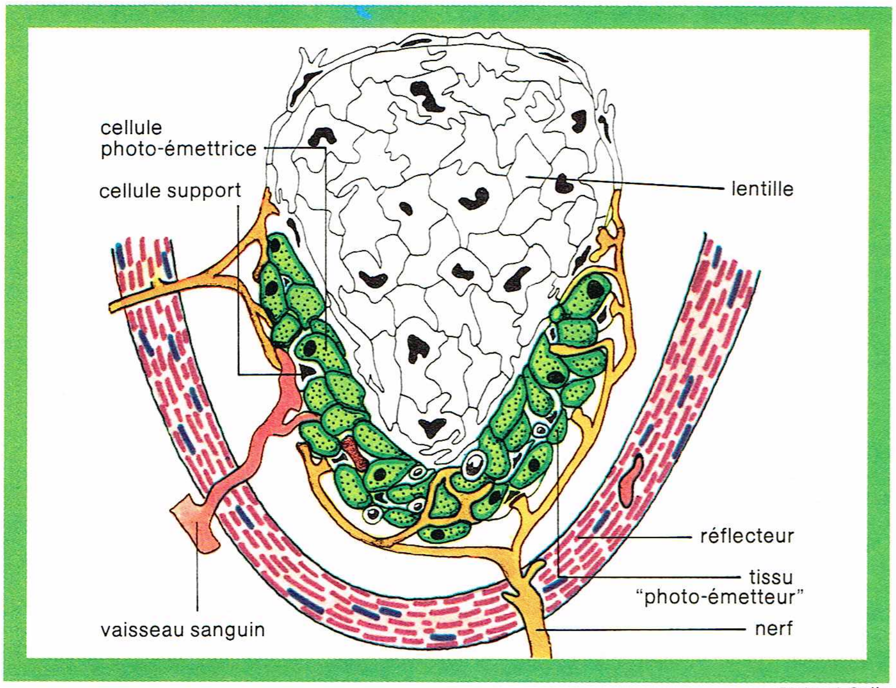

Richard Colin

▲ ***Structure d'un*** **photophore,** ***organe bio-luminescent (d'après Strum).***

▼ ***Bloc diagramme schématique d'une*** **cellule « photo-émettrice »** ***et d'une*** **cellule support** ***du tissu émetteur d'un*** **photophore** ***(d'après Strum).***

le long de la tête et du corps. De 0,7 mm de diamètre environ, situé dans la profondeur du derme, chaque photophore est constitué d'une lentille à structure cellulaire, enveloppée par un tissu « photo-émetteur », lui-même entouré d'un « réflecteur ».

Les cellules de la lentille, à structure filamenteuse dense, sont fortement liées entre elles (interdigitations, desmosomes). Le tissu photo-émetteur, richement vascularisé, se compose de cellules photo-émettrices et de cellules supports.

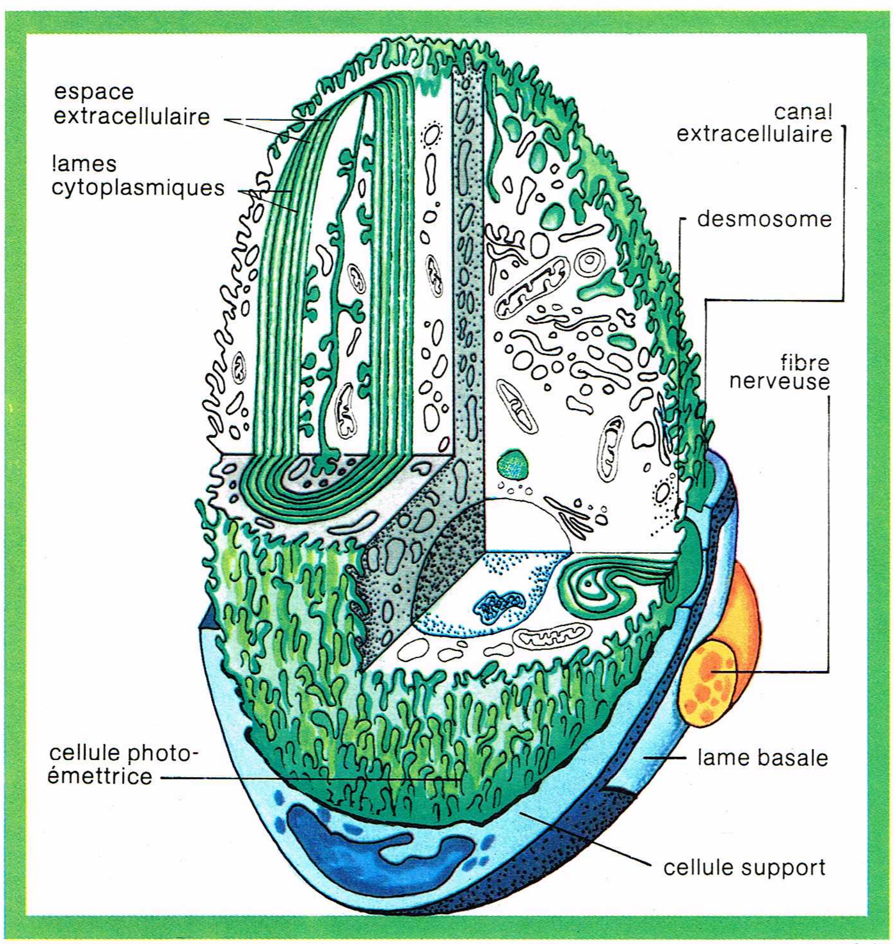

Richard Colin

La cellule photo-émettrice, à cytoplasme très vésiculeux et à microvillosités périphériques, est séparée de la cellule support par un espace extracellulaire. Des structures lamellaires, dues à des replis successifs de la membrane plasmique, augmentent le volume de cet espace et entourent une région cytoplasmique très riche en vésicules qui communiquent avec lui. Les cellules supports, séparées du conjonctif environnant par une membrane basale très nette, émettent des digitations enveloppant les cellules photo-émettrices. Seuls quelques desmosomes entre les deux types cellulaires interrompent de place en place le canal extracellulaire.

Le réflecteur, fortement biréfringent, est composé de cellules contenant des cristaux de guanine disposés en faisceaux parallèles. Ces photophores sont innervés et contrôlés par le système nerveux sympathique. Une injection intrapéritonéale d'adrénaline est suivie de la bioluminescence des photophores.

Deux constituants, la *luciférine* et la *luciférase,* ont été isolés des tissus de ce Poisson, la première surtout au niveau des photophores, la seconde exclusivement à ce niveau. Certaines des vésicules des cellules photo-émettrices contiennent la luciférine, tandis que la luciférase est un composé structural des membranes associées à ces vésicules. La bioluminescence pourrait provenir d'un changement de potentiel de membrane de ces cellules, provoqué par un influx nerveux ou une arrivée d'adrénaline *via* le système circulatoire. L'excitation entraînerait une interaction entre luciférine et luciférase aboutissant à une émission de lumière. Les vésicules déchargent leur contenu dans le canal extracellulaire; l'excès de luciférine diffuse alors dans les vaisseaux sanguins avoisinants et est transféré à l'ensemble des tissus. Ces hypothèses demandent confirmation. Quoi qu'il en soit, les rayons lumineux émis aboutissent au réflecteur, qui se comporte comme un miroir parabolique et renvoie un faisceau de rayons parallèles vers la lentille.

Les glandes cutanées des Poissons cartilagineux (Chondrichthyens)

Comme chez les Ostéichthyens, on retrouve les cellules glandulaires de type muqueux, dispersées à travers l'épiderme, les masses multi-cellulaires formant des « glandes » à venin associées aux épines dermiques de certains requins ou raies (l'aiguillon caudal de la pastenague par exemple), ainsi que des photophores. Ces formations, qui, au moins structurellement et superficiellement, semblent proches de celles des Poissons osseux, sont en fait mal connues, en particulier en ce qui concerne la nature chimique de leur sécrétion.

Les écailles des Poissons

Le derme des Vertébrés peut se minéraliser et donner naissance à des formations squelettiques. Selon le degré de minéralisation de ce tissu squelettique, on distinguera : le tissu osseux (60 à 70 % d'éléments minéraux), les dentines (70 à 75 %) et la ganoïne (90 à 95 %). Les Vertébrés housepisciformes du Silurien et du Dévonien (Ostracodermes et Placodermes) étaient recouverts d'une cuirasse faite d'épaisses écailles articulées (Poissons cuirassés). Ces écailles étaient formées d'une couche profonde d'os lamelleux, d'une couche moyenne d'os spongieux et d'une couche externe faite de tubercules de dentine recouverts d'une mince couche évoquant l'émail. Chez les Vertébrés actuels, cet « exosquelette » n'est plus représenté que par les écailles des Poissons et par des os qui participent au squelette céphalique et à la ceinture pectorale des Gnathostomes.

— *Les écailles des Poissons osseux*

Deux grands types d'écailles caractérisent ces Poissons; elles correspondent à leurs deux grandes lignées évolutives.

● *Les écailles cosmoïdes.* Sous leur forme typique, ces écailles présentaient une composition peu différente de celle que nous venons de décrire. La couche de dentine a une structure particulière et prend le nom de *cosmine.* Les grosses écailles du cœlacanthe (seul Crossoptérygien actuel) couvrent tout le corps et conservent encore quelques tubercules de cosmine recouverts d'une sorte de vernis. Ces tubercules ont disparu chez les Dipneustes actuels dont les écailles sont réduites aux deux couches d'os.

● *Les écailles ganoïdes.* Elles sont caractérisées par l'absence d'os spongieux et le remplacement de la

E. Regard - préparation S. Busson - Mabillot

G. Volle - préparation S. Busson - Mabillot

◀ *Coupes de peau de jeune roussette* **(Scyliorhinus canicula)** *;* *à gauche, un* **bourgeon épidermique** *et une* **papille dermique** *différencient respectivement l'émail et la dentine de l'écaille en formation (en noir au centre de la coupe);* *à droite, les* **écailles placoïdes** *percent l'épiderme riche en cellules glandulaires.*

fine couche superficielle de type émail par plusieurs couches superposées de ganoïne. De véritables écailles ganoïdes ne persistent que chez les Brachioptérygiens (polyptère). Chez les Holostéens, à l'exception du lépisostée, la dentine et la ganoïne disparaissent. Les écailles, réduites à l'os lamelleux, deviennent minces. Chez les Chondrostéens, l'écaillure est très réduite et les esturgeons, par exemple, ne possèdent plus que cinq rangées longitudinales d'écailles.

Enfin, chez les Téléostéens, les écailles deviennent des lamelles transparentes, les écailles élasmoïdes, recouvertes d'une fine pellicule dure, souvent interprétée comme un reste de ganoïne. Circulaires, elles présentent une surface soulevée par des crêtes radiaires partant du foyer de l'écaille et par des crêtes concentriques liées à la croissance de celle-ci. Les écailles dites *cycloïdes* des Téléostéens les moins évolués (harengs, truites, etc.) correspondent à cette description. Les écailles dites *cténoïdes* des Téléostéens les plus évolués (perches, rascasses, etc.) portent, en outre, des denticules sur la face postérieure découverte.

— *Les écailles des Poissons cartilagineux*

Elles diffèrent de celles des Poissons osseux par leur remplacement continu et illimité, leur éruption par percement de l'épiderme, leur cavité pulpaire et leur soudure à un socle osseux. Elles correspondent donc à des dents cutanées, formées par un cône de dentine recouvert par une mince couche d'émail. Cet émail est d'origine épidermique; les écailles placoïdes sont donc en fait d'origine mixte dermo-épidermique.

La peau des Amphibiens

Les jeunes larves d'Amphibiens, inféodées au milieu aquatique, possèdent, comme les Cyclostomes et les Poissons, un épiderme non kératinisé, à nombreuses cellules glandulaires muqueuses isolées. Au cours de la métamorphose, de très nombreuses glandes cutanées d'origine épidermique vont se développer. Des bourgeons indifférenciés apparaissent; ainsi, chez le crapaud accoucheur *(Alytes obstetricans)*, les premiers bourgeons apparus vont fonctionner d'emblée comme éléments granuleux (séreux). Les membranes cellulaires disparaissent, l'ensemble de la glande formant une sorte de syncytium qui se charge de grains (sécrétion holocrine). La glande constitue alors une sorte de réservoir qui ne se décharge qu'exceptionnellement. Si la nature chimique de cette sécrétion est difficile à préciser, il est établi que les glucides en sont toujours absents. Des bourgeons plus tardifs conserveront en s'accroissant leur structure cellulaire. Ces éléments glandulaires élaborent une substance muqueuse excrétée périodiquement dans la lumière selon un mode mérocrine.

▼ *A gauche,* **photophores** *d'***Argyropelecus hemigymnus.** *A droite, coupe de peau de têtard de crapaud accoucheur en cours de métamorphose : l'épiderme a différencié deux types de glandes, séreuses holocrines (à gauche, à droite), muqueuses mérocrines (au centre, à deux stades de leur cycle sécrétoire); par suite de leur développement, le derme se présente sous forme d'un derme spongieux riche en chromatophores (cellules sombres) et d'un derme compact sous-jacent.*

A. Margiocco

M. Gillois - Chevalier

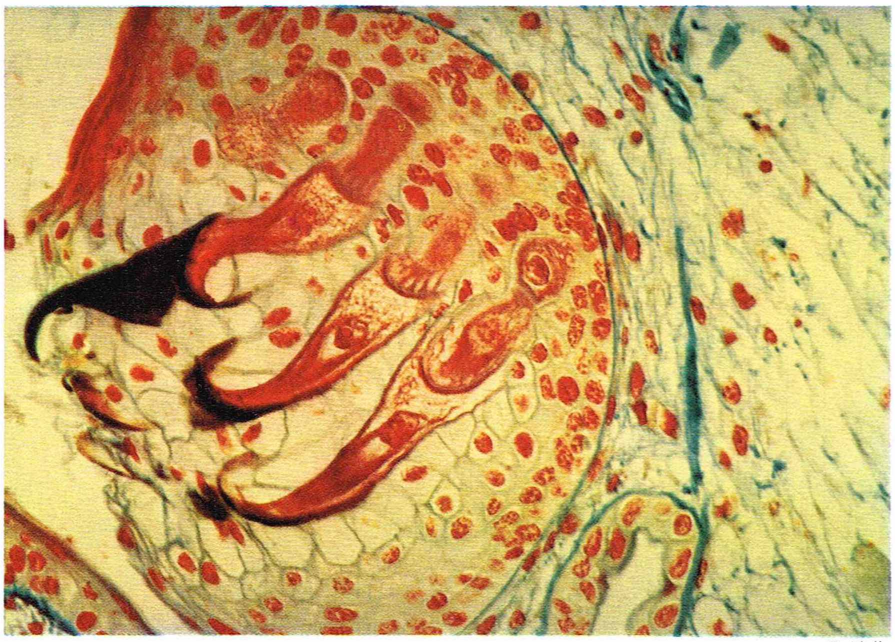

G. Volle

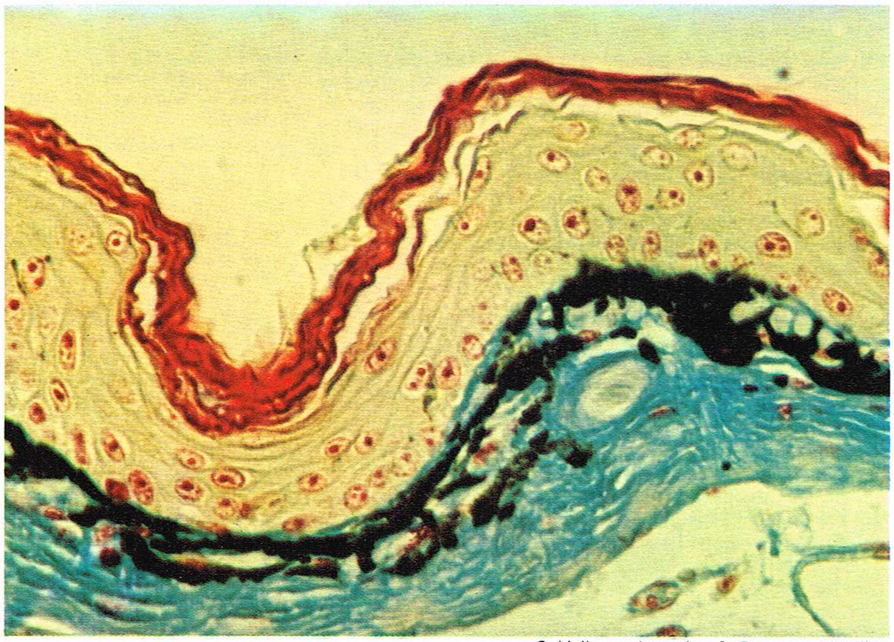

G. Volle - préparation S. Busson - Mabillot

▲ *En haut, coupe sagittale d'un* **bourrelet labial** *de* **têtard** *d'Alytes* **obstetricans,** *montrant l'évolution de 3 colonnes dentaires. En bas, coupe de peau de lézard : les cellules les plus externes dégénèrent en se chargeant de kératine et constituent une épaisse couche cornée dont la partie superficielle donne l'écaille. Noter la présence de nombreux chromatophores dans le derme superficiel.*

▶ *Mue de caméléon.*

Bruce Coleman - J. Burton

Ces glandes muqueuses et les glandes séreuses appartiennent à deux lignées indépendantes, sans autre lien que celui de leur origine. La sécrétion muqueuse permet de maintenir la peau humide et donc la respiration cutanée. Les glandes séreuses sécréteraient un venin qui joue un rôle défensif vis-à-vis des prédateurs. Elles sont très développées en arrière des tympans, où elles constituent les glandes parotoïdes des crapauds et des salamandres.

Cet épiderme, relativement mince, possède une couche cornée limitée à une seule assise de cellules kératinisées, éliminée périodiquement (mues). L'épiderme demeure perméable.

Les phanères des Anamniotes

Chez les Anamniotes, les phanères restent extrêmement discrets. Chez les Cyclostomes, notamment, ils se limitent aux dents cornées, différenciées chez l'adulte sur le disque péribuccal. Elles remplacent les dents vraies absentes et sont utilisées pour attaquer les Poissons sur lesquels l'animal se fixe (lamproies) ou à l'intérieur desquels il pénètre (myxines). Chez les Poissons, les phanères ne sont connus que chez quelques Cyprinidés d'eau douce (carpe, tanche...), où ils se présentent sous forme de petits tubercules cornés, les *organes perliformes,* différenciés sur la tête, le dos et les nageoires du mâle au moment de la reproduction.

Les larves d'Amphibiens Anoures (grenouilles, crapauds...) possèdent un bec corné, utilisé pour dilacérer la nourriture végétale, ainsi que des « dents » cornées sur les bourrelets dentaires du vestibule buccal. Chaque dent cornée et chaque lamelle du bec résulte de la transformation progressive d'une seule cellule de très grande taille au sommet d'une colonne épidermique, où elle subit la dégénérescence cornée. Ces phanères disparaissent à la métamorphose et d'autres se développent chez l'adulte, par exemple la gaine cornée de l'extrémité des doigts et des orteils de divers Anoures (crapaud) et Urodèles (necture), l'éperon plantaire développé sur le métatarse de certains Anoures fouisseurs (pélobate). A ces phanères permanents peuvent s'ajouter des différenciations de caractère sexuel secondaire, comme les coussinets développés sur certains doigts du membre antérieur, notamment chez les grenouilles et les crapauds.

La peau des Reptiles

Comme chez tous les Tétrapodes terrestres, et contrairement aux Vertébrés inférieurs aquatiques, les cellules les plus externes de l'épiderme des Reptiles dégénèrent et meurent; c'est la dégénérescence cornée, qui se traduit par une déshydratation cytoplasmique et surtout par une imprégnation de kératine. Les kératines sont des protéines fibrillaires formées de faisceaux de microfibrilles unis par une matrice amorphe. On distingue la kératine α, très élastique, présente chez tous les Tétrapodes (microfibrilles de 80 Å de diamètre, composées de 11 protofibrilles) et la kératine β, non élastique, présente seulement chez les Reptiles et les Oiseaux (microfibrilles de 30 Å de diamètre, composées de deux protofibrilles enroulées en hélice).

Chez les Reptiles, apparaissent donc des phanères sous forme d'écailles, simples épaississements de la couche cornée, délimités par des replis de l'épiderme. Ces écailles recouvrent toute la surface du corps, faces palmaire et plantaire comprises. Chez les tortues, elles forment des plaques cornées épaisses qui doublent la carapace d'os dermiques.

Chez les Sauriens (lézards *sensu lato*), la desquamation se fait par larges lambeaux. Au contraire, la mue des Ophidiens (serpents) s'opère en une seule fois. L'exuvie se décolle en entier et sans déchirure. Les serpents muent plusieurs fois par an. Cette mue des Squamates (Sauriens et Ophidiens) s'effectue sous l'influence d'actions hormonales, surtout thyroïdiennes. Chez les Crocodiliens et les Chéloniens, la couche cornée s'élimine par usure superficielle. Chez les tortues, les mâchoires sont recouvertes d'une épaisse gaine cornée qui forme un bec à bords tranchants. Chez tous les Reptiles, l'extrémité

de la phalange terminale des doigts est enveloppée par une griffe. Dorsalement et latéralement, se forme la corne dure et fibreuse de la lame (enchâssée dans un repli de l'épiderme, le mur), et, ventralement, celle plus souple de la sole.

Les glandes cutanées sont très peu développées et très localisées. Nous citerons les glandes anales des serpents, les glandes cloacales de certains Sauriens et Crocodiliens et les glandes fémorales de la face interne de la cuisse de nombreux Sauriens. Chez le lézard, la sécrétion des glandes fémorales forme une pustule au niveau de chaque pore ; elle jouerait un rôle dans le marquage du territoire.

La coloration de la peau chez les Poïkilothermes

La pigmentation des Poïkilothermes repose sur la présence de cellules dermiques spécialisées, les *chromatophores*. Ceux-ci peuvent être classés en mélanophores, iridophores, xanthophores et érythrophores.

Les *mélanophores* contiennent des granules chargés de mélanine (produits d'oxydation de dérivés phénoliques) : les mélanosomes, responsables des colorations noires ou brunes. Les *iridophores* possèdent de très nombreux cristaux de guanine, par eux-mêmes incolores. Des phénomènes d'interférence de la lumière entre les faces parallèles de ces microcristaux donnent une coloration irisée au tégument, puisqu'elle varie selon l'incidence de la lumière. Les *xanthophores* contiennent à la fois des pigments caroténoïdes dissous dans des gouttelettes lipidiques et des petits granules de moins de 1 μ de diamètre, les ptérinosomes formés de ptérines (hétérocycles azotés). Les caroténoïdes et les ptérines sont responsables de certaines colorations jaunes ou rouges. Quant aux *érythrophores,* ils ne contiennent que des ptérinosomes.

La combinaison des différents chromatophores permet de comprendre pourquoi de nombreux Vertébrés poïkilothermes sont capables de modifier leur coloration, souvent de façon rapide et spectaculaire, comme le carrelet ou le caméléon. En fait, ces changements de coloration sont liés à la morphologie et à la physiologie des mélanophores. Les mélanophores sont des cellules aplaties, à prolongements radiaires, qui peuvent occuper une grande surface du tégument et, en particulier, s'insinuer jusqu'à l'épiderme en enveloppant les cellules situées au-dessus d'elles, c'est-à-dire les iridophores et les xanthophores. Quand les grains de mélanine sont concentrés dans le corps cellulaire profond, les sources de coloration, jaunes ou rouges, sont démasquées. Au contraire, quand le pigment mélanique migre dans les prolongements cellulaires, la coloration est progressivement remplacée par une coloration brune. Les changements dans la répartition des grains de mélanine ont pour point de départ des informations visuelles

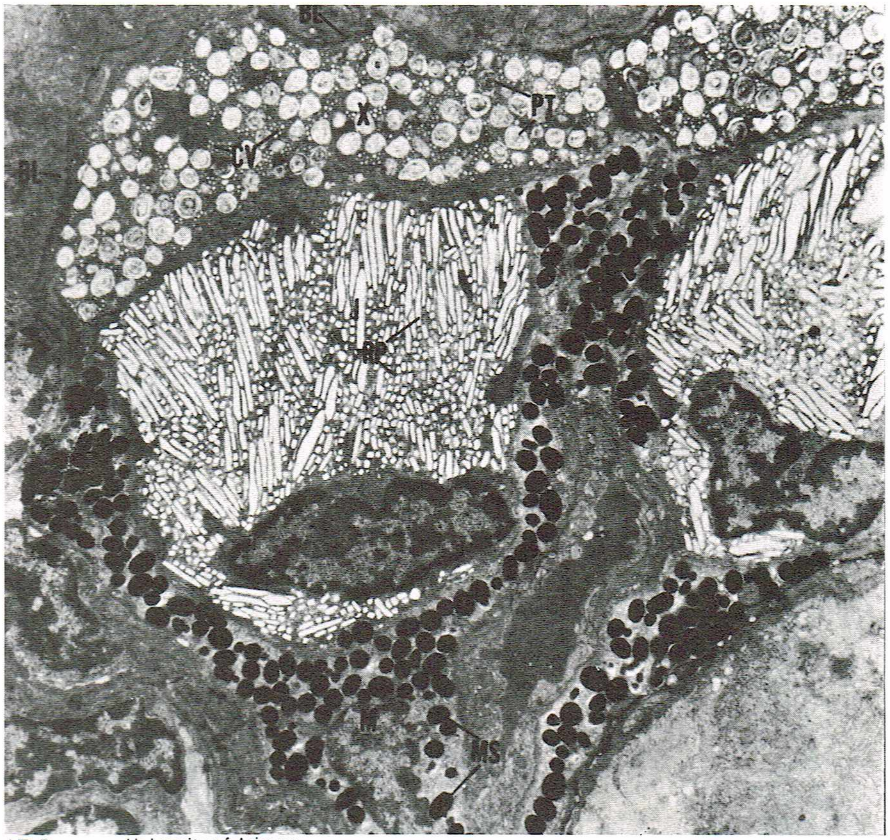

J.T. Bagnara - University of Arizona

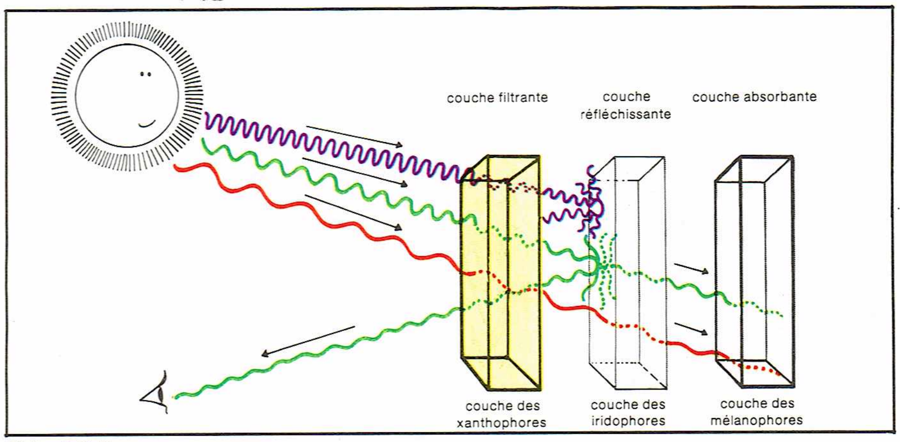

Richard Colin

G. Volle - préparation S. Busson - Mabillot

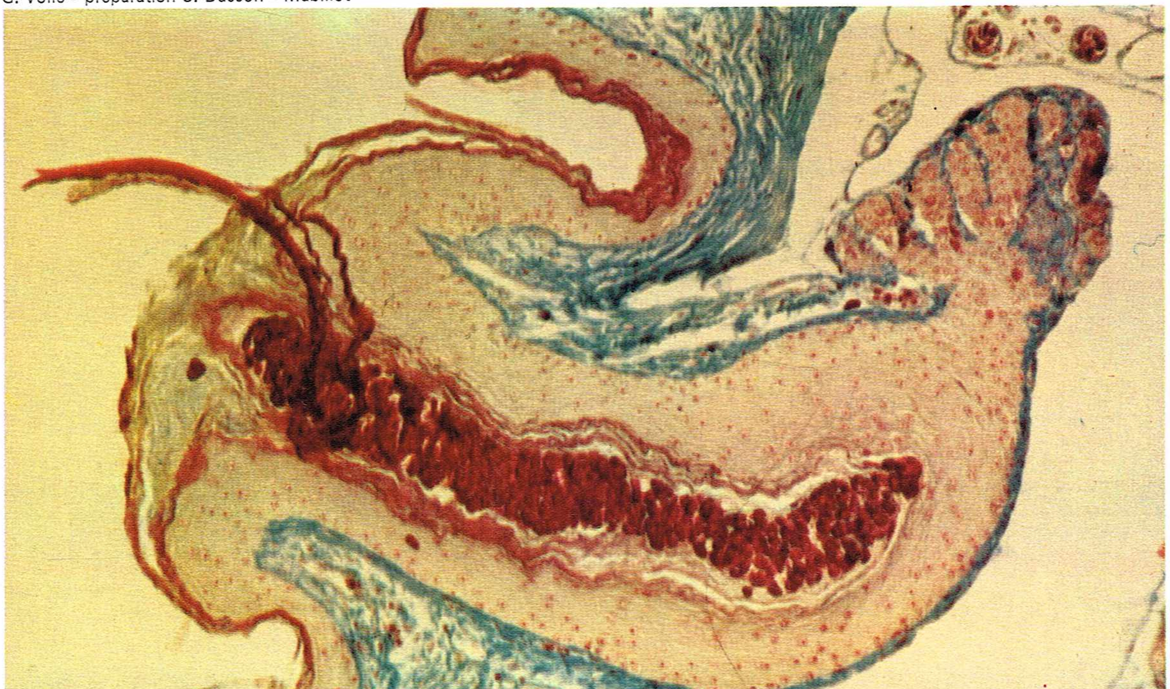

▲ *En haut, coupe transversale du derme de la peau du dos de* Hyla cinerea *(Amphibien) ; des prolongements de mélanophores (M) remplis de mélanosomes (MS) enveloppent les iridophores (I) qui contiennent de nombreuses plaquettes réfléchissantes (RP) ; entre la membrane basale de l'épiderme (BL) et les iridophores, des xanthophores (X) contenant des ptérinosomes (PT) et des vésicules à caroténoïdes (CV) [microscopie électronique]. En bas, schéma du mécanisme d'obtention de la couleur verte chez les Poïkilothermes (d'après Taylor et Bagnara).*

◀ *Coupe longitudinale d'une glande fémorale de lézard.*

▶ *Développement des plumes chez l'embryon de poulet : pe, périderme ; ep, épiderme proprement dit ; dd, derme dense ; dl, derme lâche ; dd_2, couche dermique dense profonde ; épa, ébauche de la papille dermique ; pav, papille vascularisée ; édu, ébauche de duvet ; épd, ébauche de plume définitive ; vs, vaisseau sanguin. Schémas effectués à deux stades et deux grossissements différents.*

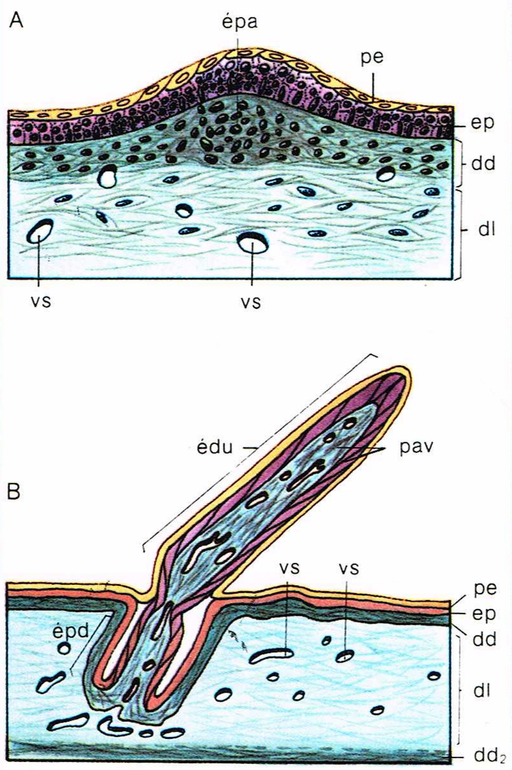

Richard Colin

▼ *Développement du follicule pileux chez la souris : pe, périderme ; ep, épiderme proprement dit ; de, derme ; hd, hypoderme à cellules adipeuses ; vs, vaisseau sanguin ; pa, papille dermique ; b, bulbe du follicule pileux ; k, kératine en cours d'élimination ; p, poil ; ge, gaine externe du poil ; gi, gaine interne du poil ; gs, glande sébacée. Schémas effectués à deux stades et deux grossissements différents.*

transmises à l'encéphale par le nerf optique. Ces informations sont alors transmises aux mélanophores par voie nerveuse (caméléon), par voie hormonale (Amphibiens) ou encore par les deux (anguille).

Trois groupes d'hormones peuvent intervenir : les hormones mélanophoro-stimulantes de l'hypophyse, qui, en dispersant les mélanosomes, assombrissent le tégument, l'adrénaline surrénalienne, et la mélatonine épiphysaire. Ces deux dernières substances permettent la concentration des mélanosomes et donc l'éclaircissement du tégument ou le démasquage des autres sources de coloration.

Ces changements de coloration permettent une homochromie avec le milieu dissimulant l'animal aux yeux de ses prédateurs. Ils peuvent également protéger l'organisme contre un éclairement excessif et jouer un grand rôle dans la thermorégulation (Reptiles).

La peau des Vertébrés supérieurs : Oiseaux et Mammifères

L'étude comparative du tégument des Oiseaux et des Mammifères montre que, s'il existe des caractères communs aux deux groupes, les caractères distinctifs sont beaucoup plus nombreux.

Les caractères distinctifs

Les couches profondes du tégument : l'hypoderme et le derme

La couche *hypodermique* adipeuse peut être plus ou moins épaisse. Chez les Mammifères, elle se double, vers l'intérieur, d'une *couche musculaire* qui peut être *fort importante* (hérisson, cheval, etc.), permettant alors des mouvements brusques de tout le tégument.

Quant au *derme,* il est aussi plus ou moins dense. Chez les Oiseaux, le derme comporte deux niveaux : le niveau externe, constitué de fibres conjonctives serrées, et le niveau profond, plus lâche, très richement vascularisé et pénétré par un lacis de petits vaisseaux sanguins. Chez les Mammifères, le derme est toujours plus épais et de structure plus homogène ; de plus, il comporte de nombreuses fibres élastiques. L'origine embryologique du derme est complexe. Chez les Oiseaux, il se forme à partir des myotomes, voire des lames latérales, et, chez les Mammifères, les sclérotomes participent aussi à son élaboration.

L'épiderme

Comme chez tous les Vertébrés, il comporte plusieurs couches de cellules. Au début du développement embryonnaire, il est cependant unistratifié ; ensuite, il se constitue un *périderme,* pigmenté, qui double extérieurement une *assise germinative*. Dans le cas des Mammifères, le périderme forme un *épitrichium* recouvrant longtemps les poils en formation. La couche de *kératine* qui se développe chez le jeune et l'adulte est toujours importante, voire très importante chez les Mammifères.

Les phanères (plumes, poils, ongles, cornes, etc.)

Le mode de croissance des *plumes* et des *poils* est bien différent.

Chez les Oiseaux, il se forme d'abord un *bourgeon dermique* très dense et vascularisé ; c'est le point de

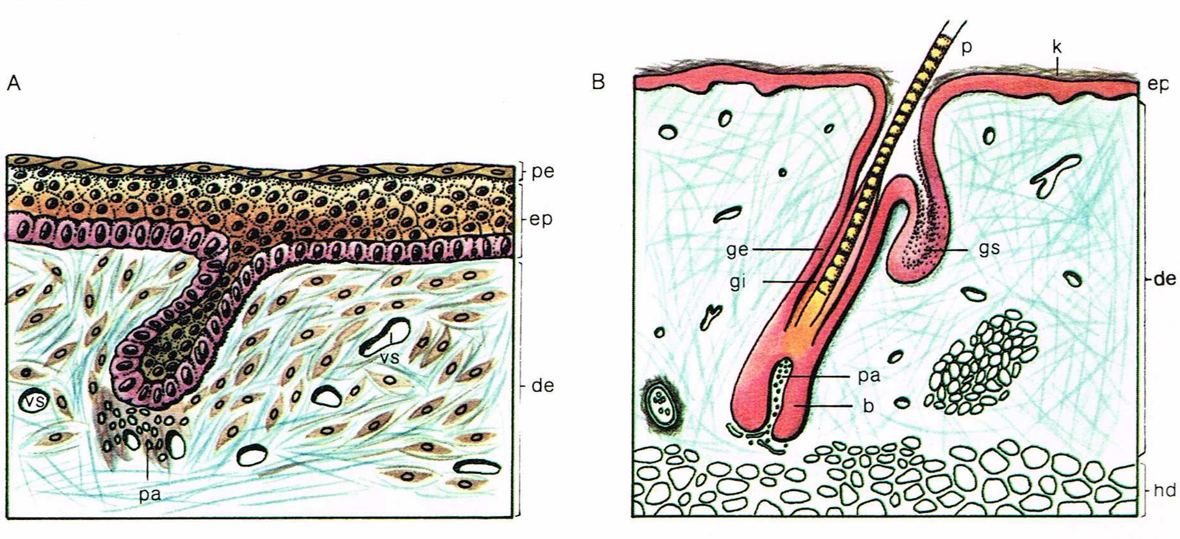

Richard Colin

départ d'une *excroissance* limitée par l'épiderme qui, progressivement, s'épaissit puis change de structure; chez l'embryon de poulet, dès le 11e jour d'incubation, les cellules épithéliales s'organisent en faisceaux parallèles, lesquels sont autant d'*ébauches des barbes du duvet;* ensuite, dès 14 jours, on observe l'invagination progressive de cette excroissance, dont l'extrémité distale se différencie en duvet juste avant le 17e jour. Dès ce stade, les plumes définitives se préparent mais demeurent gainées par une assise de cellules kératinisées; la succession duvet-plume définitive est un processus continu (Nelsen). Après la naissance, la gaine craque et les barbes s'étalent.

Chez les Mammifères, à la fin du développement embryonnaire (16e jour chez la souris), il se forme de nombreuses *invaginations* épidermiques. Celles-ci s'allongent rapidement à l'intérieur du derme et, à leur extrémité, un petit groupe de cellules mésenchymateuses forment ce que l'on appelle la *papille*. A la fin du développement embryonnaire, le follicule pileux commence à se structurer; son degré de développement dépend des espèces. A l'extrémité, les cellules épithéliales forment une sorte de cloche, ou *bulbe,* dans laquelle viennent se loger les cellules de la papille et un minuscule réseau vasculaire. Au sein de l'invagination épithéliale, on distingue deux couches de cellules, qui formeront les *gaines externe et interne* du poil en croissance. Dans les jours qui suivent la naissance, ou peu de temps auparavant, les poils font saillie à la surface de l'épiderme; ils sont fabriqués dans le bulbe, à peu de distance de la papille.

Durant la vie de l'adulte, les poils tombent puis repoussent un grand nombre de fois. Il s'agit d'un *cycle* de fonctionnement des follicules pileux : ils se raccourcissent, rejettent le poil et, aussitôt après, le bulbe reconstitue un poil nouveau, pendant que le follicule s'allonge et peut atteindre l'hypoderme; ce cycle dure 21 jours chez la souris.

La densité ainsi que la structure des phanères sont extrêmement variables suivant les espèces : les Cétacés et les Siréniens sont totalement dépourvus de poils; le pangolin a des poils aplatis en écailles et le porc-épic des poils piquants et de fort diamètre, etc.

Les poils ne sont pas les seuls phanères : les *ongles,* les *griffes,* les *sabots* et la *corne* du rhinocéros sont des formations purement épithéliales; les *bois* des Cervidés sont essentiellement dermiques mais demeurent longtemps recouverts par l'épiderme (velours); les *cornes* des Bovidés, qui sont pérennantes, comportent un étui kératinisé très développé.

Les glandes

Les glandes d'origine épidermique sont très peu notables chez les Oiseaux; on ne peut guère citer que les *glandes uropygiennes,* qui se forment au niveau du « croupion » et dont la sécrétion est utilisée par l'animal pour lisser ses plumes; on trouve aussi quelques glandes au voisinage de l'oreille de certains Gallinacés.

Par contre, chez les Mammifères, la variété des glandes est très considérable. Les *glandes sébacées* sont développées dans la plupart des groupes; elles sont généralement associées aux poils, sauf au niveau de la paupière supérieure, des narines, des organes génitaux externes et de l'anus; on sait que le sébum, mélange complexe de lipides, contient beaucoup de cholestérol (Montagna); cette sécrétion est indispensable pour maintenir en bon état la surface de l'épiderme. Les *glandes sudoripares,* qui n'ont pas toutes la même constitution, permettent une certaine excrétion de l'eau et des déchets; elles sont peu abondantes chez les Carnivores et les Rongeurs. Les *glandes mammaires,* dont le nombre varie suivant les espèces, ont une localisation également très variable; mais, dans tous les cas, elles sont placées sur deux lignes parallèles, de chaque côté du plan sagittal.

Les caractères communs

Les caractères communs des téguments des Oiseaux et des Mammifères sont essentiellement physiologiques. La structure du tégument est très complexe et assure une excellente *protection* vis-à-vis des facteurs extérieurs.

Ainsi, la peau de ces Vertébrés comporte dans sa région profonde un matelas de tissu conjonctif adipeux, ou *pannicule adipeux,* qui constitue un excellent *isolant thermique;* cela permet l'adaptation de nombreuses espèces à des conditions de température extrêmes; de plus, le développement des *phanères* (plumes et poils) améliore très considérablement cette isolation.

Deux exemples suffiront à illustrer cette fonction; le pannicule adipeux est exceptionnellement développé chez les Balénoptères et chez les Pinnipèdes, qui fréquentent des eaux dont la température peut être inférieure à 0 °C. La protection constituée par le plumage est extraordinairement efficace dans le cas des Oiseaux tels que les manchots de l'hémisphère Sud ou de leurs homologues de l'hémisphère Nord, les pingouins (très éloignés sur le plan systématique); le revêtement est fort dense et les plumes ne sont absolument *pas mouillables.*

Imperméable à l'eau, la couche cornée de l'épiderme peut être plus ou moins épaisse; dans tous les cas, elle limite considérablement la déshydratation de l'organisme. D'autre part, elle permet à nombre d'Oiseaux et de Mammifères de vivre en eau douce ou en eau de mer sans que cela implique des adaptations particulières du système excréteur. Ce caractère existe déjà chez les Reptiles, mais ici l'abondance des phanères, également de nature cornée, est un facteur notable.

Ces fonctions de protection dévolues à la peau sont d'autant plus importantes que les Oiseaux et les Mammifères sont des animaux à température constante et dont le milieu intérieur doit être très strictement régulé sur le plan ionique.

▼ Coupe de cuir chevelu humain; on observe notamment un cheveu émergeant de son follicule pileux, des glandes sébacées à cellules claires et des glandes sudoripares dont le conduit fin, flexueux et très colorable est ici plusieurs fois recoupé (coloration topographique).

C. Bevilacqua

J. Bouchard

◀ Ébauche de duvet d'un embryon de poulet au 13e jour d'incubation; l'évagination épidermique est bien nette et recouvre un axe conjonctif riche en cellules et en vaisseaux; à ce stade, la gaine épithéliale de l'ébauche commence à se structurer : les cellules s'organisent en files parallèles dans la moitié supérieure (coloration topographique).

BIBLIOGRAPHIE

ALEXANDER N.J., *Comparison of α and β Keratin in Reptiles,* in *Z. Zollforsch,* 110, 153-165, 1970. — DOWNING S.W., NOVALES R.R., *The Fine Structure of Lamprey Epidermis, I. Introduction and Mucous Cells,* in *J. Ultr. Res.* 35, 282-294, 1971, *II. Club Cells,* in *J. Ultr. Res.* 35, 295-303, 1971, *III. Granular Cells,* in *J. Ultr. Res.,* 35, 304-313, 1971. — HADLEY M.E., *Functional Significance of Vertebrate Integumental Pigmentation,* in *Am. Zool.,* 12, 63-76, 1972. — HAWKES J.W., *The Structure of Fish Skin, I. General Organization,* in *Cell. Tiss. Res.,* 149, 147-158, 1974. — LAVKER R.M., *Fine Structure of the Newt Epidermis,* in *Tissue and Cell,* 4, 663-675, 1972. — MERRILEES M.J., *Epidermal Fine Structure of the Teleost Esox Americanus (Esocidae, Salmoniformes),* in *J. Ultr. Res.,* 47, 272-283, 1974. — NELSEN O.E., *Comparative Embryology of the Vertebrates,* The Blakiston Cie éd., New York, Toronto. — STRUM J.M., *Fine Structure of the Dermal Luminescent Organs, Photophores, in the Fish, Porichthys notatus,* in *Anat. Rec.* 164, 433-462, 1969. — STRUM J.M., *Photophores of Porichthys notatus : Ultrastructure of Innervation,* in *Anat. Rec.,* 164, 463-478, 1969. — TAYLOR J.O., BAGNARA J.T., *Dermal Chromatophores,* in *Am. Zool.* 12, 43-62, 1972.

SQUELETTE ET MUSCULATURE DES VERTÉBRÉS

Le *squelette* est la charpente qui soutient les parties molles du corps des Vertébrés : il est constitué par de nombreuses pièces, denses, articulées entre elles : les os. Le squelette, parfaitement adapté aux fonctions qu'il doit remplir, conditionne la forme et la taille du corps; les os fournissent des surfaces d'insertion aux muscles et sont capables de s'adapter aux forces mécaniques qui s'exercent sur eux.

Malgré leur apparence, les os sont des structures vivantes et en perpétuel remaniement; de plus ils jouent un rôle important dans le métabolisme des sels minéraux, principalement du calcium et du phosphore puisqu'ils tiennent en réserve 99 % du calcium du corps et qu'ils réagissent aux variations du milieu intérieur.

Si le squelette des Vertébrés adultes est généralement osseux, il faut noter, d'une part, que les pièces osseuses sont le plus souvent précédées par un « modèle » cartilagineux, et, d'autre part, que certains Poissons, les Chondrichthyens, ont un squelette fait de cartilage calcifié. L'os et le cartilage, tissus de soutien caractéristiques des Vertébrés, sont deux variétés spécialisées de tissu conjonctif qui, par leur structure, sont à la fois résistantes et plastiques.

Le *système musculaire* des Vertébrés est très important par son poids relatif et par sa fonction. Il représente sous forme de chair près de la moitié du poids du corps et est chargé d'assurer tous les mouvements. Les muscles modèlent les os et sont développés en fonction du travail qu'ils accomplissent.

Étude histologique

Structure et forme des os

Selon leur forme, les os peuvent être grossièrement répartis en trois types : longs, courts et plats.

Les os longs comportent une *diaphyse* aux extrémités de laquelle se soudent deux *épiphyses*. Pendant la croissance, diaphyse et épiphyses restent séparées par une plaque épiphysaire cartilagineuse, ou cartilage de conjugaison, unie à la diaphyse par des colonnes d'os spongieux, région de transition appelée *métaphyse;* cet ensemble constitue la zone de croissance en longueur de l'os. Chez l'adulte, il n'y a pas de limite nette entre épiphyse et diaphyse et les cavités médullaires communiquent. Les os courts, tels les vertèbres, ont la même structure. Les os plats, tels ceux qui constituent la voûte du crâne, comportent deux couches d'os compact, ou tables, séparant une couche généralement peu épaisse d'os spongieux : la *diploë*.

Les os sont entourés de conjonctif fibreux spécial doué de potentialités ostéogéniques, le *périoste*, responsable de la croissance en épaisseur des os. La cavité médullaire est limitée par un liséré conjonctif, l'*endoste*, également ostéogène.

Structure microscopique des tissus de soutien

Tissu cartilagineux

Les cellules, ou *chondrocytes*, sont isolées dans de petites cavités ou lacunes de la matrice, elle-même constituée d'une substance fondamentale renfermant des fibrilles.

Le tissu cartilagineux est caractérisé par sa croissance rapide et par sa résistance qui lui est conférée principalement par les propriétés colloïdales de la matrice; contrairement aux autres conjonctifs, il ne renferme pas de vaisseaux sanguins ou de nerfs et les cellules sont nourries par imbibition et diffusion des substances à travers la matrice. Le cartilage est entouré d'un conjonctif fibreux dense : le *périchondre*.

Suivant l'abondance et la nature des fibres contenues dans la substance fondamentale, on distingue trois variétés de cartilage : hyalin, fibreux, élastique. Le cartilage hyalin, typique et le plus commun, constitue les modèles cartilagineux des pièces squelettiques; il est donc susceptible de s'ossifier et subit alors une série de transformations qui seront décrites dans l'ostéogenèse. Chez l'adulte, du cartilage hyalin persiste, constituant par exemple le larynx, les anneaux de la trachée et les surfaces articulaires des os.

Les *chondrocytes* sont des cellules de forme elliptique ou semi-circulaire comme les lacunes dans lesquelles elles sont logées. Elles n'ont pas de processus visibles au microscope optique mais les photographies d'électronique révèlent que leur surface est irrégulière. Le noyau est arrondi ou ovale et il y a un centre juxtaglomérulaire avec un appareil de Golgi bien développé et une paire de centrioles.

La *matrice cartilagineuse* est d'aspect homogène, mais constituée d'une substance fondamentale qui contient de très fines fibrilles de collagène orientées en tous sens. La substance fondamentale est amorphe, basophile et métachromatique. Son principal constituant est la chondromucoprotéine, copolymère d'une mucoprotéine et de

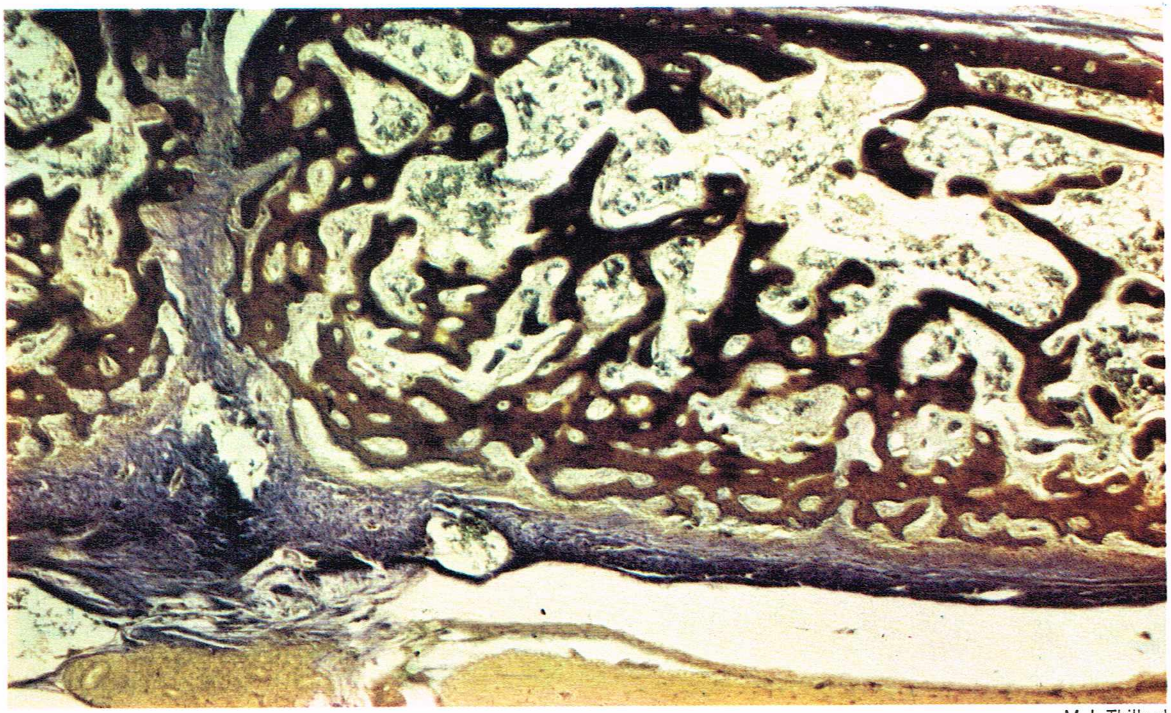

▶ ***Le squelette est constitué par de nombreuses pièces denses, articulées entre elles : les os; selon leur forme, ils peuvent être répartis en trois types : longs, courts et plats. Ici, une coupe d'os plat, d'origine dermique, de crâne de poulet.***

M.J. Thillard

mucopolysaccharides, les chondroïtine-sulfates, responsables de la basophilie et de la métachromasie. Autour des cellules ou des groupes isogéniques, la substance fondamentale forme une enveloppe plus colorable appelée *capsule*.

Histogenèse et croissance

Dans les centres où apparaît la chondrification, les cellules mésenchymateuses perdent leurs processus et se rassemblent en groupes denses; puis les cellules s'agrandissent et sécrètent autour d'elles une matrice hyaline métachromatique ainsi que du tropocollagène; le développement de cette matrice sépare les cellules les unes des autres; elles acquièrent les caractères des chondrocytes et se trouvent isolées dans des lacunes bien délimitées. Le rôle des chondrocytes dans la sécrétion du collagène et de la substance fondamentale a été établi : lorsque la nouvelle matrice doit se former, le cytoplasme devient plus basophile, et la région golgienne s'agrandit. Dans ces conditions le réticulum endoplasmique granulaire est bien développé avec des *cisternae* modérément distendues; les saccules du complexe de Golgi tendent à se dilater et de nombreuses vacuoles y sont associées; des vacuoles semblables existent aussi à la surface cellulaire et paraissent décharger leur contenu dans la matrice environnante.

La croissance ultérieure du cartilage a lieu selon deux modes : dans le processus de *croissance interstitielle,* les cellules se divisent par mitose pendant un temps assez long; toutes les cellules issues d'un même chondrocyte se rassemblent en un groupe isogénique. Dans le processus de *croissance appositionnelle,* les cellules conjonctives de la couche interne du périchondre se différencient en chondrocytes.

Le *cartilage calcifié* possède une matrice dure dont la substance fondamentale est imprégnée d'un complexe de phosphate de calcium, similaire et peut-être identique à celui de l'os, mais dans le cartilage les sels de calcium se présentent sous forme de gros granules.

Tissu osseux

Le tissu osseux possède les trois constituants de tout tissu conjonctif, mais il est particulièrement dur et résistant; la substance fondamentale chargée de sels minéraux, surtout calciques, et associée à un feutrage de fibres collagènes forme la substance ou matrice osseuse; elle emprisonne des cellules relativement peu nombreuses par rapport à la masse de l'os.

La *substance osseuse* est disposée en *lamelles* de 3 à 7 μ d'épaisseur qui s'entassent pour constituer des *travées* ou *trabécules,* d'épaisseur et de forme variables. Les cellules sont des *ostéocytes,* de forme étoilée, aplatie, possédant de nombreux prolongements cytoplasmiques très fins. Elles sont logées dans de petites cavités de la substance osseuse, les *lacunes* ou *ostéoplastes,* prolongées par de fins canalicules anastomosés dans lesquels s'insinuent les prolongements cellulaires.

C. Bevilacqua

▲ ***Section à travers un anneau cartilagineux** de la **trachée; c'est un cartilage hyalin typique.***

Suivant l'architecture des constituants histologiques on distingue deux variétés de tissus osseux : l'os spongieux et l'os compact ou haversien. Dans l'os spongieux les trabécules d'épaisseur assez faible ont une disposition et une orientation variables; entre eux, les espaces irréguliers sont occupés par de la moelle osseuse. L'os haversien, caractéristique, est constitué de systèmes cylindriques parallèles au grand axe de la diaphyse des os longs, les *ostéones* ou *systèmes de Havers;* les lamelles osseuses sont disposées concentriquement autour d'un canal central ou de Havers qui contient des vaisseaux sanguins. Irradiant à partir des lacunes où se logent les ostéocytes, les canalicules traversent les lamelles et s'anastomosent. La nutrition des cellules est assurée grâce à ce réseau par des vaisseaux sanguins issus de l'endoste ou du périoste qui entrent en relation avec ceux des canaux de Havers par les canaux de Volkmann creusés dans l'épaisseur des ostéones.

Le périoste, conjonctif qui entoure les os, comporte une couche interne riche en cellules et une couche externe fibreuse d'où partent les faisceaux de fibres de Sharpey servant à ancrer le périoste à l'os sous-jacent.

Ultrastructure et composition chimique des os

La matrice osseuse. Elle comporte une partie organique et des sels minéraux.

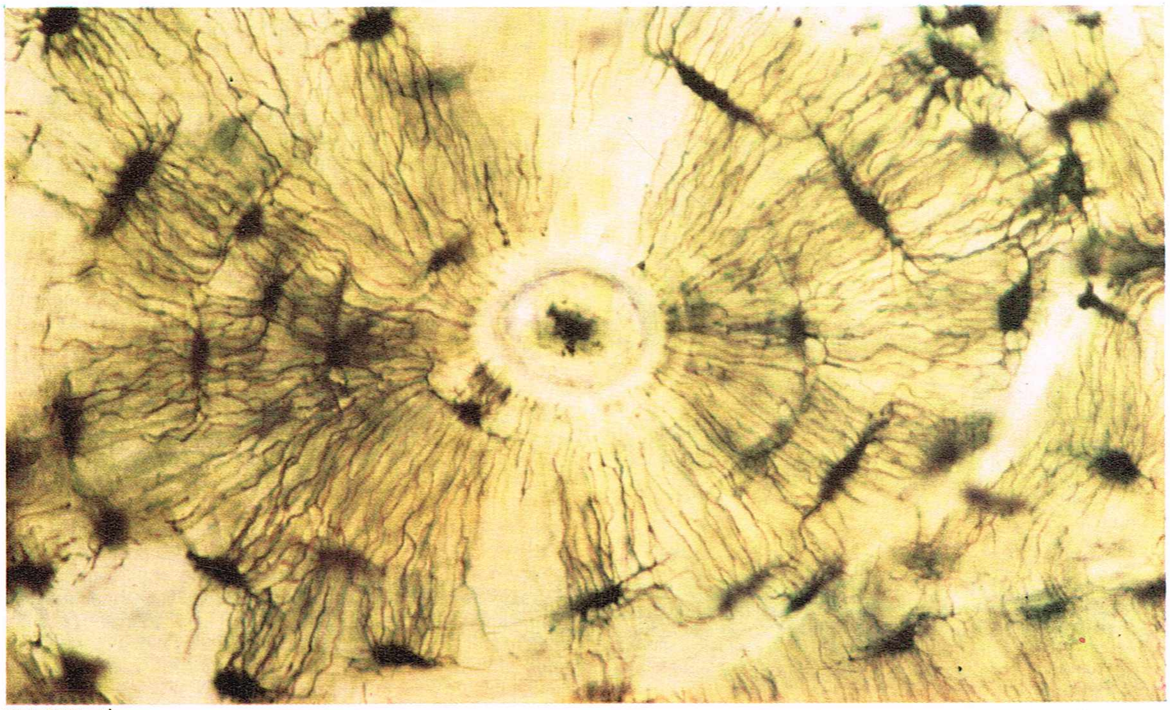

M.J. Thillard

◀ ***Structure caractéristique** de l'os compact **ou** haversien : **une** ostéone **ou système de Havers.***

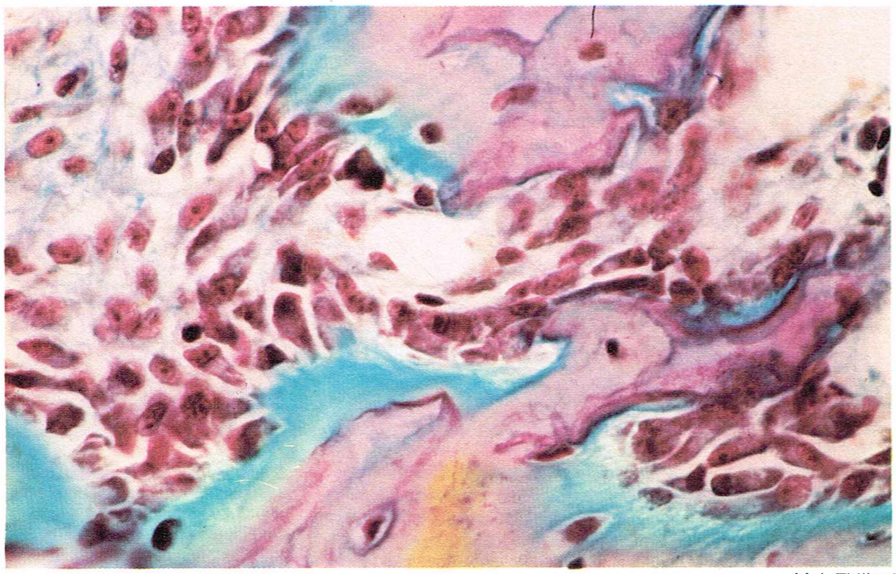

M.J. Thillard

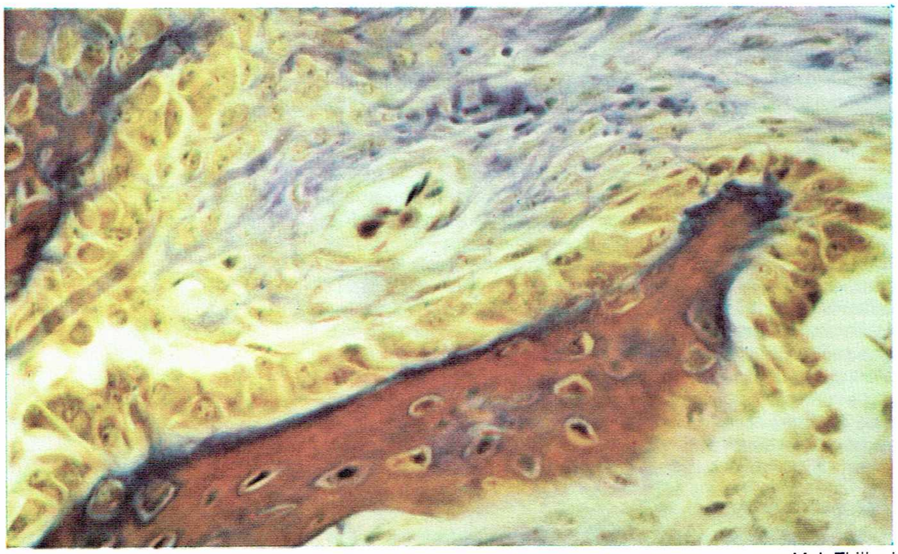

M.J. Thillard

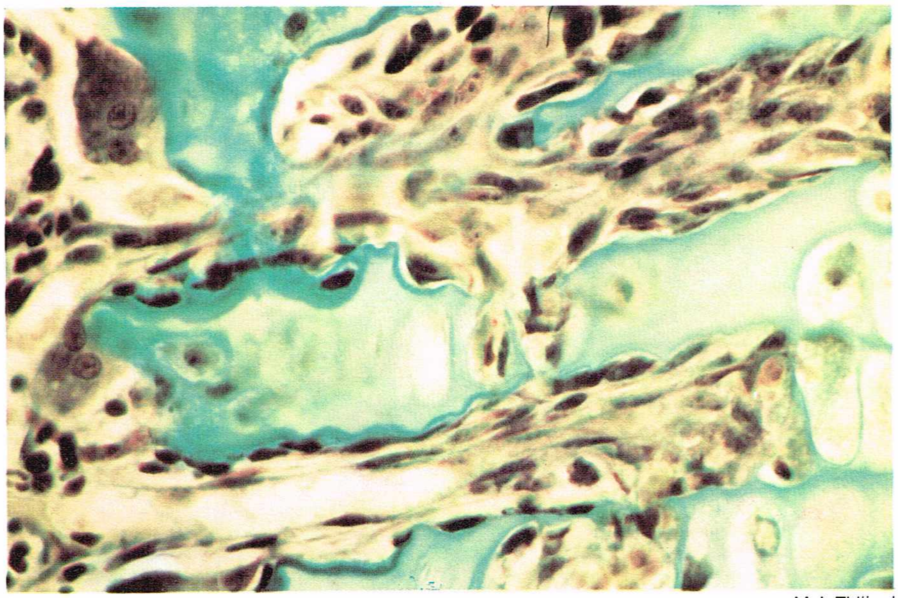

M.J. Thillard

▲ ***Les cellules osseuses sont de trois types, représentant trois états fonctionnels : des* ostéoblastes *(cellules brunes), disposés à la surface des travées osseuses en formation ; des* ostéocytes, *cellules typiques de l'os achevé (ici os de crâne de poulet de 4 semaines) ; des* ostéoclastes, *cellules géantes, plurinucléées, jouant un rôle dans la destruction et le remaniement de l'os.***

La *partie organique* est constituée par des fibres collagènes incluses dans une substance fondamentale dont on ne peut les séparer. La substance fondamentale, amorphe, a sensiblement la même composition que celle du cartilage mais son contenu en mucopolysaccharides est plus faible, de sorte qu'elle est peu basophile. Les fibres montrent au microscope électronique la striation transversale typique du collagène, de période 640 Å. Dans les systèmes de Havers, l'orientation des fibres collagènes varie d'une lamelle à l'autre de sorte que l'examen d'une coupe transversale en lumière polarisée entre nicols croisés fait apparaître des alternances de lamelles lumineuses biréfringentes et de lamelles sombres.

La *portion minérale* représente 50 % du poids frais de l'os (contre 25 % de substance organique et 25 % d'eau). Les minéraux les plus importants sont d'abord le *calcium* (le squelette de l'homme contient 99 % du calcium total de l'organisme) puis le *phosphore* (90 % du poids total). Les sels minéraux se présentent sous forme de microcristaux en aiguilles, constitués d'un mélange de phosphate tricalcique et d'hydroxyde de calcium. Ces microaiguilles longues de 200 à 400 Å s'orientent le long des fibres collagènes et peuvent même selon certains auteurs se déposer dans la substance de ces fibres.

Les cellules. On en distingue trois types d'aspect bien différent, les ostéoblastes, les ostéocytes, et les ostéoclastes, mais ils représentent en réalité trois états fonctionnels de la même cellule et il peut y avoir transformation réversible d'un type en un autre. Nous verrons plus loin avec l'ostéogenèse comment se forment et se transforment ces cellules.

— Les *ostéoblastes* se rencontrent toujours à la surface du tissu osseux en développement, formant des rangées de cellules plus ou moins prismatiques munies de fins prolongements qui s'anastomosent entre eux. L'ultrastructure de l'ostéoblaste témoigne de son activité dans la synthèse des protéines.

— Les *ostéocytes* sont les cellules typiques de l'os achevé. Par rapport aux ostéoblastes, leur cytoplasme est peu basophile et diminue d'importance. L'ultrastructure est celle d'une cellule qui, sans être inactive, n'a plus les caractères d'une cellule sécrétrice.

— Les *ostéoclastes* sont en rapport avec la destruction de l'os et on les observe souvent dans des cavités creusées à la surface de l'os (lacunes de Howship). Les ostéoclastes semblent se former par coalescence d'ostéoblastes ou d'ostéocytes libérés au cours de l'érosion de travées osseuses, ou par fusion de cellules errantes (histiocytes).

Formation des os ou ostéogenèse

Le tissu osseux s'édifie par transformation d'un tissu conjonctif préexistant. On distingue deux modes d'ossification : lorsque l'os apparaît par transformation directe du conjonctif, l'ossification est *intramembraneuse ;* lorsque la formation d'os est précédée d'un modèle cartilagineux, l'ossification est *enchondrale*.

Ces deux modes peuvent parfaitement se compléter dans la construction d'un os long car le phénomène fondamental reste le même. Certaines cellules mésenchymateuses, à potentialité ostéogénique, acquièrent progressivement, sous l'effet d'une stimulation appropriée, les caractères des ostéoblastes et se déposent le long d'une trame ; elles sécrètent alors une substance préosseuse ou ostéoïde (macromolécules de tropocollagène, précurseur des fibres collagènes, et de protéine polysaccharide) ; cette substance devient calcifiable (propriété qui lui est conférée par les ostéoblastes eux-mêmes) et des cristaux de phosphate de calcium s'y déposent ; les ostéoblastes se trouvent bientôt emprisonnés dans la substance qu'ils ont sécrétée et deviennent peu à peu des ostéocytes. Les dépôts successifs d'ostéoblastes et de matrice constituent de nouvelles lamelles accroissant l'épaisseur des trabécules. Les jeunes ostéocytes restent reliés aux ostéoblastes par de fins processus ; le dépôt de matrice osseuse autour de ces prolongements détermine la formation des canalicules du tissu osseux.

Ossification intramembraneuse. Le mésenchyme commence par se condenser en une bande de tissu conjonctif richement vascularisé dans laquelle les cellules entrent en contact les unes avec les autres par des processus ; puis apparaissent de fines travées de matrice

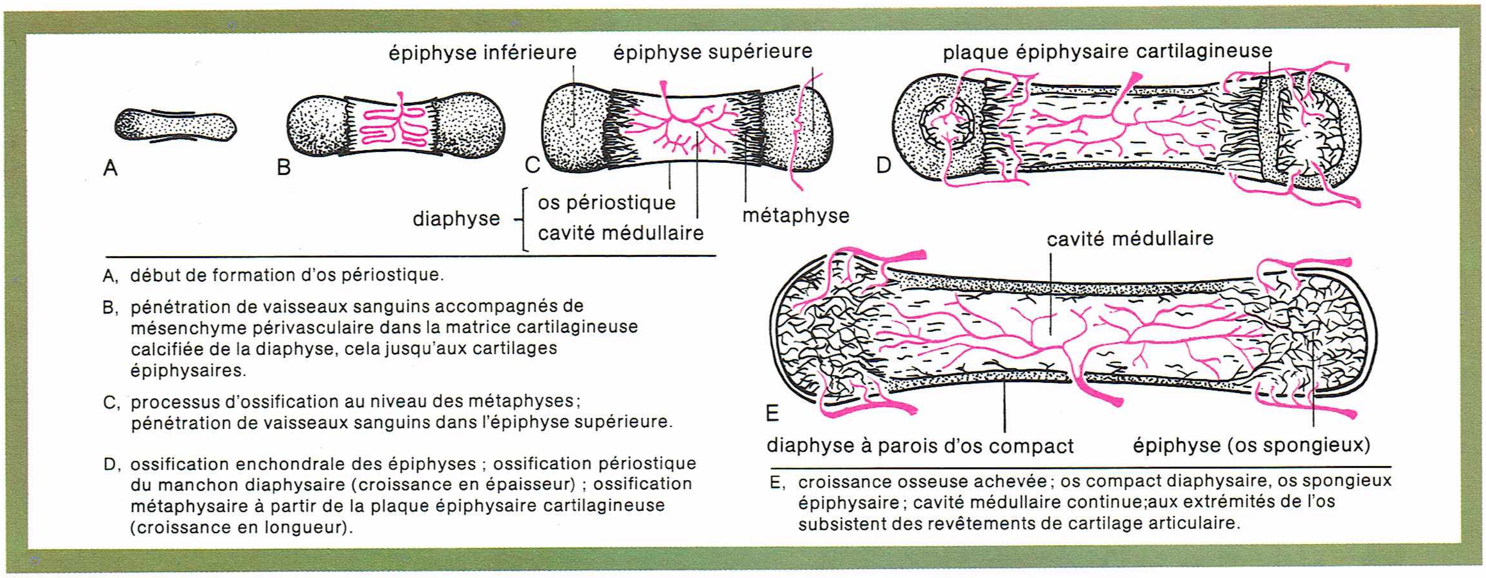

Richard Colin

▲ ***Représentation schématique de l'histogenèse d'un os long.***

conjonctive plus dense, à la surface desquelles se rassemblent les cellules anastomosées qui engagent le processus d'ossification. Les travées ainsi édifiées forment de l'os spongieux primaire qui peut continuer à épaissir jusqu'à former un os dense, ménageant seulement des espaces libres autour des vaisseaux sanguins; les lamelles qui se forment alors ont une disposition irrégulièrement concentrique. Les os qui constituent l'exosquelette, tels les os plats du crâne, sont d'origine membraneuse.

Le conjonctif qui entoure l'os nouvellement formé se condense et devient le périoste; les cellules les plus proches de l'os conservent la potentialité de se transformer en ostéoblastes : l'*ossification* dite *périostique* n'est donc qu'une modalité particulière d'ossification membraneuse. Le tissu osseux compact ainsi formé évoque les systèmes haversiens.

— La croissance en épaisseur des os longs, endosquelettiques, a lieu par ce procédé. Des lamelles osseuses se déposent à l'extérieur d'un manchon diaphysaire membraneux pendant qu'une certaine résorption a lieu à l'intérieur, de sorte que la cavité médullaire s'agrandit tandis que l'épaisseur de sa paroi s'accroît lentement. La construction du tissu osseux compact formant la diaphyse des os est presque entièrement le résultat d'une ossification périostique.

Ossification enchondrale. L'os remplace un modèle cartilagineux. Au centre de la diaphyse cartilagineuse, des chondrocytes dégénèrent et disparaissent; des vaisseaux sanguins venant du conjonctif périostique pénètrent alors dans la diaphyse, se ramifient et s'étendent. Tandis que la cavité médullaire s'agrandit, les cellules cartilagineuses, vers les deux extrémités de la diaphyse, au niveau de la zone de transition avec l'épiphyse, subissent un mode spécial de transformation : elles se multiplient et se disposent en rangées longitudinales séparées par des travées de matrice cartilagineuse; c'est la zone de prolifération ou de cartilage sérié. Puis les chondrocytes s'agrandissent, se chargent de glycogène, se vacuolisent et se désagrègent; c'est la zone de cartilage hypertrophié. Entre les cellules hypertrophiées, les travées de matrice, réduites, se calcifient.

Les capillaires sanguins issus des espaces médullaires de la diaphyse forment des anses qui s'insinuent dans les lacunes élargies des chondrocytes désagrégés; le tissu conjonctif périvasculaire apporte des cellules mésenchymateuses qui se différencient, soit en cellules hématopoïétiques de la moelle osseuse, soit en ostéoblastes; ceux-ci se rassemblent le long des travées de matrice cartilagineuse calcifiée et engagent le processus d'ossification. Ainsi, s'édifie sur toute la largeur de la diaphyse une série de travées osseuses formant une zone transitionnelle d'os spongieux, la *métaphyse*.

— La *croissance en longueur* de l'os est due au fait que des trabécules osseux métaphysaires continuent à se construire sur les travées cartilagineuses du cartilage hypertrophié, les chondrocytes épiphysaires continuant à se mutiplier; du côté diaphysaire, les extrémités des travées s'érodent et se résorbent sous l'action des ostéoclastes, de sorte que la métaphyse reste d'une longueur à peu près constante. Plus tard (généralement après la naissance) les épiphyses sont le siège d'une ossification de même type mais moins ordonnée qui, peu à peu, construit de l'os spongieux. Entre l'épiphyse ossifiée et la métaphyse subsiste cependant une zone cartilagineuse, la plaque épiphysaire ou cartilage de conjugaison, qui contient un contingent de chondrocytes alignés en colonnes, encore susceptibles de se multiplier puis de donner lieu au processus d'ossification et qui sont par conséquent responsables de toute la croissance en longueur des os chez les jeunes. Vers la fin de la période de croissance la prolifération de ces cellules cartilagineuses ralentit, la plaque épiphysaire s'amincit et finalement disparaît; à partir de ce moment aucune croissance en longueur de l'os n'est plus possible; l'os spongieux de l'épiphyse et celui de la métaphyse viennent en contact l'un de l'autre.

Ce processus d'allongement au niveau de la plaque épiphysaire cartilagineuse est typique des Mammifères. Chez presque tous les non-mammaliens, l'ossification enchondrale partie de la diaphyse se propage vers les

▼ ***Tissu en voie d'ossification;* croissance en longueur *de l'os (queue de souris de 11 jours).***

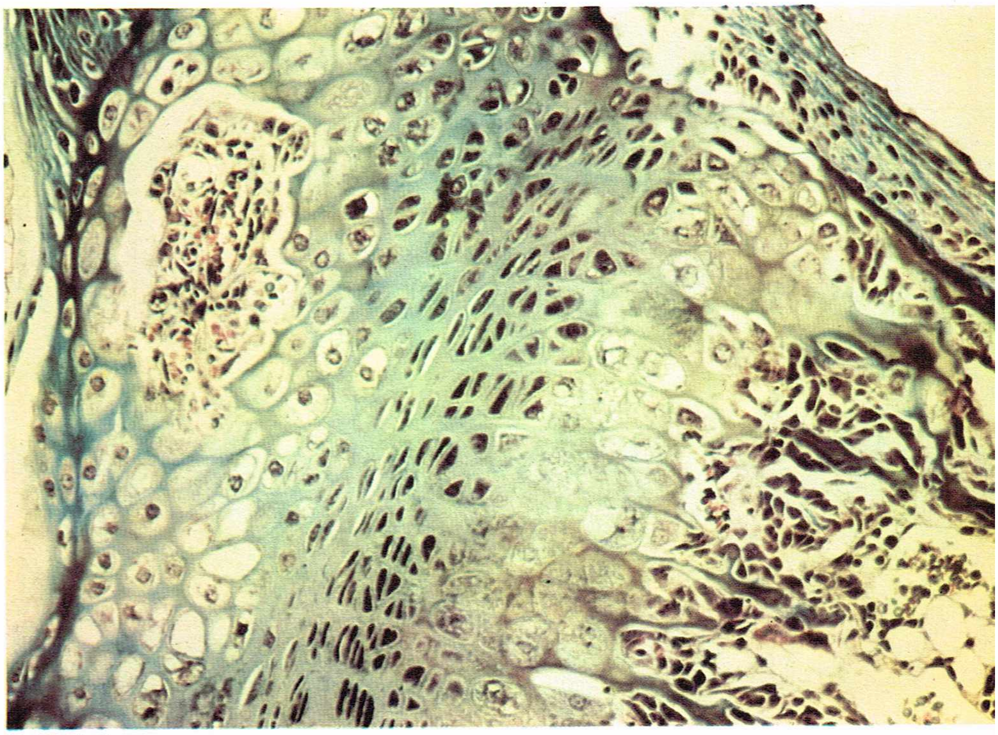

M.J. Thillard

▶ *A gauche, type de diarthrose : articulation du coude vue en coupe sagittale ; hu, humérus ; tr, trochlée de l'humérus ; ul, ulna ; ca, cavité articulaire ; car, cartilage articulaire ; mb, biceps ; mc, muscle brachial ; mt, triceps ; ab, artère brachiale ; vm, veine médiane du coude.*
A droite, radiographie de l'articulation du genou d'un enfant de 13 ans ; on voit nettement le cartilage de conjugaison qui apparaît ici comme une ligne sinueuse au niveau des épiphyses du fémur, du tibia et du péroné.

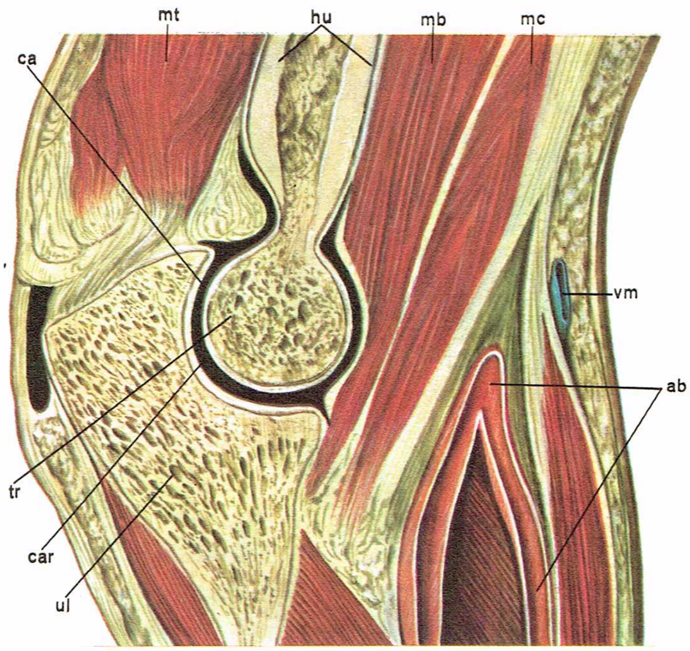

I.G.D.A.

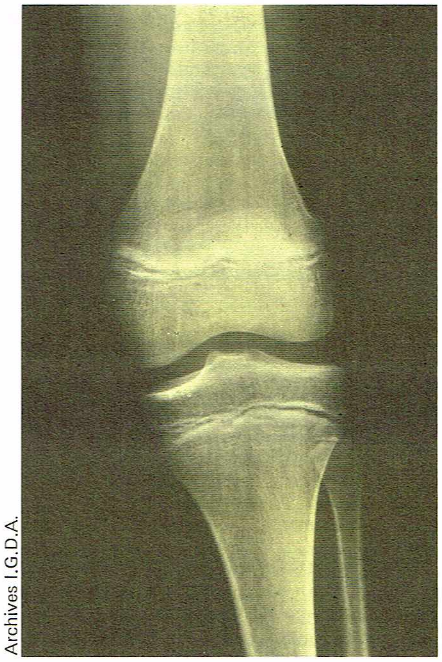

Archives I.G.D.A.

épiphyses où le cartilage subsiste toute la vie, prolifère et assure théoriquement un allongement permanent.

Remaniement interne de l'os. Le renouvellement du tissu osseux est un phénomène d'importance générale dans la biologie du squelette et se manifeste durant toute la vie ; il permet le modelage des os et leur développement harmonieux en fonction des conditions mécaniques à remplir ; d'autre part il assure la mobilité des constituants inorganiques de l'os, lui permettant de jouer son rôle dans le métabolisme minéral de l'organisme.

Dans l'os spongieux, la résorption et la reconstruction successives sont toujours intenses. Cet os spongieux peut : soit persister, étant le siège de remaniements constants mais peu spectaculaires (cas des épiphyses, d'origine enchondrale), soit s'épaissir en os dense (c'est généralement le cas pour les os d'origine membraneuse) ; il fournit alors de l'os compact sans systèmes réguliers (os plats du crâne ou tissu osseux des Téléostéens qui ne demandent que peu de résistance à la flexion) ou bien il subit une réorganisation interne édifiant l'os haversien, typique de la diaphyse des os longs. Sous l'action érosive des ostéoclastes, des cavités apparaissent dans la masse osseuse et deviennent de larges canaux cylindriques orientés longitudinalement où circulent des vaisseaux sanguins ; les ostéoblastes font alors leur apparition et des lamelles osseuses concentriques sont disposées le long des parois de façon centripète ; ainsi s'édifient les ostéones typiques ou systèmes haversiens. Les ostéones ne sont jamais définitifs ; soumis à l'action d'ostéoclastes, ils sont remplacés par de nouvelles générations d'ostéones, plus ou moins décalés par rapport aux précédents ; les générations anciennes constituent les systèmes interstitiels.

▼ *Type de synarthrose au niveau des os frontaux d'un crâne de poussin.*

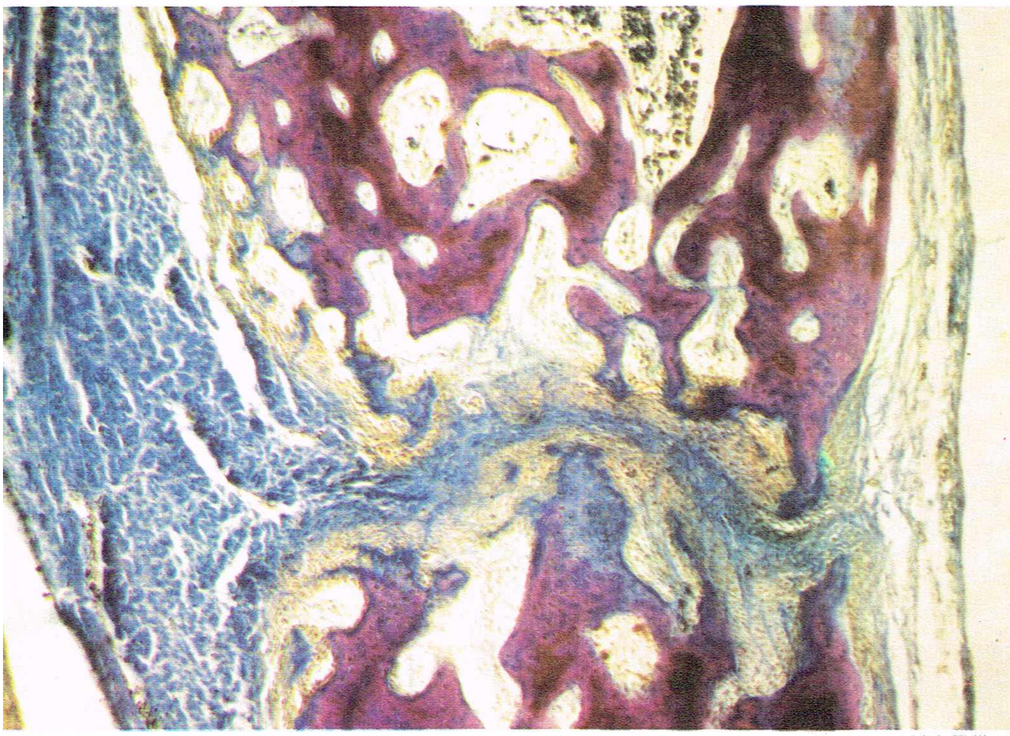

M.J. Thillard

Le dépôt d'os nouveau et la minéralisation peuvent être suivis par différentes méthodes :

— l'administration d'antibiotiques de la série des tétracyclines qui s'incorporent dans la matrice de l'os en train de se déposer confère une fluorescence en lumière ultraviolette à l'os nouvellement formé ;

— l'examen aux rayons X révèle une opacité plus grande des régions fortement minéralisées, c'est-à-dire des zones de dépôts les plus anciennes ;

— l'autoradiographie après injections d'isotopes radioactifs, ^{45}Ca ou ^{32}P, met par contre en évidence les zones en cours de minéralisation. On utilise également maintenant comme marqueurs des cations étrangers comme ^{226}Ra qui se substitue au calcium ou même le plutonium ^{259}Pu (émettant des particules α) qui a une affinité spéciale pour les constituants organiques de l'os.

Rappelons que l'os a un rôle histophysiologique important. Il constitue un réservoir pour le calcium et le phosphore et il a la charge de maintenir un taux normal de ces éléments dans le sang et d'équilibrer les besoins minéraux des autres tissus. Il y a donc un échange constant de calcium entre l'os et le sang, dont le mécanisme est encore mal connu. Rappelons enfin que les hormones et les vitamines influencent la croissance et le métabolisme du tissu osseux (cf. Biologie, volume I).

Les articulations

Les articulations entre les os sont plus ou moins perfectionnées et complexes selon la mobilité entre les deux os ainsi unis. Lorsque les deux os sont immobilisés l'un sur l'autre, il y a synarthrose, lorsqu'ils sont mobiles l'un par rapport à l'autre, il y a diarthrose.

La *synarthrose* présente plusieurs degrés : dans les synchondroses, les os sont unis par du cartilage (cas de la symphyse pubienne) ; dans les synostoses, le tissu intermédiaire disparaît, les deux os sont immobilisés au niveau de sutures, comme les os du crâne, ou bien se soudent ; dans les syndermoses, la liaison est réalisée par du tissu conjonctif et peut présenter une

certaine souplesse par le développement de ligaments; on parle alors d'amphiarthrose, comme dans le cas des disques intervertébraux.

Dans les *diarthroses,* il y a une cavité articulaire; les extrémités des deux os sont revêtues de cartilage hyalin articulaire, dense, et sont reliées par une capsule qui est en continuité avec le périoste; la couche externe, fibreuse, de la capsule recouvre les ligaments interarticulaires et les tendons; la couche interne, ou synoviale, dont on pense qu'elle sécrète le liquide synovial qui se trouve en petite quantité dans la cavité articulaire, a une structure variable suivant les surfaces qu'elle revêt.

Les muscles squelettiques

Les muscles squelettiques sont faits de tissu musculaire strié à contraction volontaire. Embryologiquement ces muscles dérivent, dans la plupart des cas, des myotomes qui fournissent la musculature somatique fondamentalement métamérisée en myomères. Initialement latérodorsaux, les myotomes s'allongent en direction ventrale parallèlement à l'axe du corps et se transforment en fibres musculaires striées qui s'étendent entre deux myoseptes successifs. A la musculature somatique, assez typique dans le tronc, peuvent s'ajouter, particulièrement dans la tête, des muscles d'origine viscérale dérivés du mésenchyme des lames latérales; l'origine de la musculature appendiculaire est complexe.

Structure générale

Les muscles s'attachent au périoste par des fibres collagènes solides se présentant soit sous forme de cordons, les tendons, soit sous forme de lames, les aponévroses. D'après leur forme et leurs attaches on distingue des *muscles fusiformes* avec des fibres parallèles à la direction de l'effet et deux extrémités tendineuses, des *muscles pennés* dont les fibres prennent une direction oblique par rapport à leur attache qui se fait par des aponévroses. Les différentes parties d'un muscle sont le corps ou ventre et les extrémités (ou chefs), parmi lesquelles on peut en principe distinguer une extrémité fixe, l'origine (proximale), et une extrémité mobile, l'insertion (distale); mais ces points peuvent s'inverser selon les mouvements; il peut y avoir pour un même muscle plusieurs origines et une insertion, et d'autre part plusieurs muscles peuvent s'insérer sur un même tendon. Lorsqu'un tendon frotte sur une protubérance osseuse, il peut se former dans ce tendon des os dits sésamoïdes : ainsi la rotule s'intercale dans le tendon des muscles antérieurs de la cuisse à leur point de réflexion sur le genou; l'attache sur l'os se fait alors selon un angle plus ouvert qui diminue l'effort musculaire.

Les *mouvements.* Suivant les mouvements qu'ils déterminent les muscles peuvent être répartis en différentes catégories, qui ne sont d'ailleurs qu'approximatives car les mouvements sont souvent complexes : muscles extenseurs, dont la contraction ouvre l'angle entre deux os d'un membre, fléchisseurs qui le ferment; adducteurs qui rapprochent le membre vers le plan médian du corps, abducteurs qui l'écartent; protracteurs qui tirent vers l'avant, rétracteurs vers l'arrière, rotateurs qui font tourner un segment, élévateurs et dépresseurs qui élèvent et abaissent une pièce. En réalité, les muscles agissent en groupes, en synergie, pour produire un mouvement; pratiquement, pour une région squelettique donnée, l'action de deux muscles antagonistes s'équilibre.

Tissu musculaire strié

Les tissus musculaires sont spécialement adaptés à la fonction de contractilité grâce aux myofibrilles que renferment leurs cellules. Le tissu musculaire squelettique, strié, est caractérisé par des cellules très différenciées, les fibres musculaires striées, disposées parallèlement les unes aux autres, groupées en faisceaux, eux-mêmes rassemblés en muscles. Ce muscle est entouré d'une enveloppe conjonctive, ou épimysium, qui envoie entre les faisceaux des septes constituant le périmysium, accompagné d'un riche réseau capillaire et nerveux. Les fibres sont allongées en cylindres de longueur exceptionnelle (jusqu'à plusieurs centimètres); elles sont entourées par une membrane, le sarcolemme; elles sont plurinucléées et leur cytoplasme, ou sarcoplasme, se différencie en myofibrilles. Les myofibrilles, aussi longues que la fibre, sont hétérogènes, présentant une alternance régulière de zones ayant une composition et des propriétés différentes : des bandes sombres, biréfringentes ou anisotropes : A; des bandes claires, isotropes : I. Chacune de celles-ci est partagée en deux par une membrane très mince, le disque Z, qui est en continuité avec les autres disques Z situés au même niveau dans les myofibrilles voisines, formant ainsi une membrane qui traverse le sarcoplasme de la fibre et s'attache au sarcolemme. Comme les bandes des myofibrilles d'une fibre sont situées au même niveau, la fibre elle-même paraît striée transversalement. On appelle *sarcomère* les portions de myofibrilles allant d'un disque Z au suivant.

L'ultrastructure des myofibrilles a été précisée par la microscopie électronique.

Les myofibrilles sont constituées par des protéines contractiles disposées en *myofilaments.* Il y en a deux sortes différant par les dimensions et la composition chimique. L'arrangement en bandes transversales du muscle strié reflète l'arrangement de ces deux séries de filaments submicroscopiques : les filaments de *myosine* épais (100 Å de diamètre et 1,5 μ de long) et les filaments d'*actine,* plus fins (50 Å de diamètre).

Les filaments fins d'actine montrent à très fort grossissement une disposition en chapelet et semblent constitués de deux subunités (55 Å) formant deux cordons enroulés en hélice. Autour de chaque myofibrille, le réticulum sarcoplasmique forme un système de sarcotubules ou réseau continu de canalicules. Les mitochondries sont abondantes là où les éléments contractiles travaillent, fournissant une source d'énergie chimique (adénosine triphosphatase).

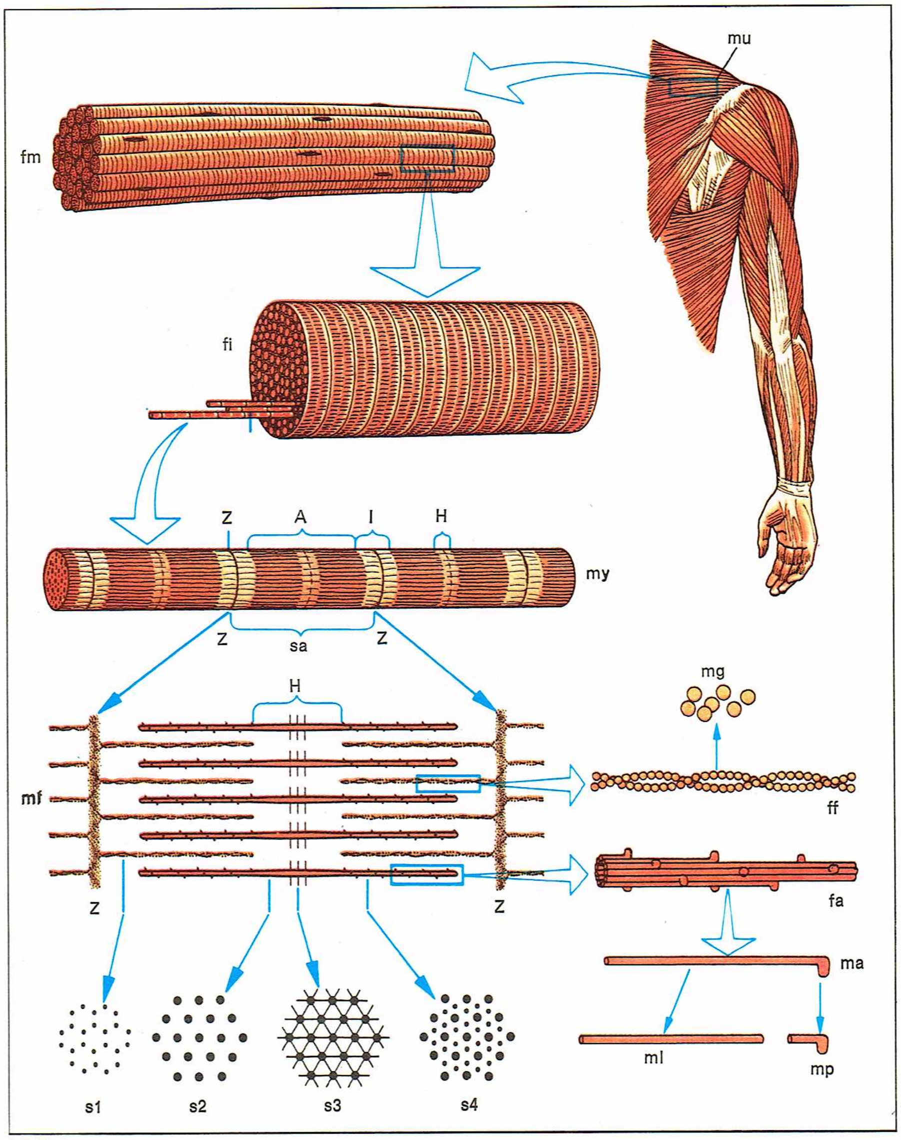

I.G.D.A.

▲ ***Organisation d'un* muscle squelettique *depuis son aspect macroscopique jusqu'à sa structure submicroscopique; mu, muscle; fm, faisceau musculaire; fi, fibre; my, myofibrille avec disque Z, bande A (sombre), bande I (claire), bande H et le sarcomère, sa (segment Z-Z); mf, myofilaments (détail segment Z-Z); avec la zone H et les sections s_1, s_2, s_3, s_4 de la myofibrille; mg, molécules d'actine; ff, filament d'actine; fa, filament de myosine; ma, molécule de myosine; ml, méromyosine légère; mp, méromyosine lourde.***

▶ *Représentation schématique d'une fibre musculaire striée de muscle squelettique de grenouille, montrant la disposition du réticulum sarcoplasmique (re) autour des myofibrilles (mf). Les sarcotubules (st) orientés longitudinalement fusionnent en éléments transversaux appelés cisternae terminaux (ct); de fins tubules transversaux (tt) s'insinuent dans le sarcoplasme à partir du sarcolemme (sl) qui entoure les myofibrilles et forment avec les deux cisternae terminaux qui les flanquent les trois éléments des triades du réticulum (tr) dont la disposition varie d'une espèce à l'autre (ici ils sont situés au niveau de la ligne Z, LZ). Sont également indiquées les bandes A (BA), I (BI) et les mitochondries (mi).*

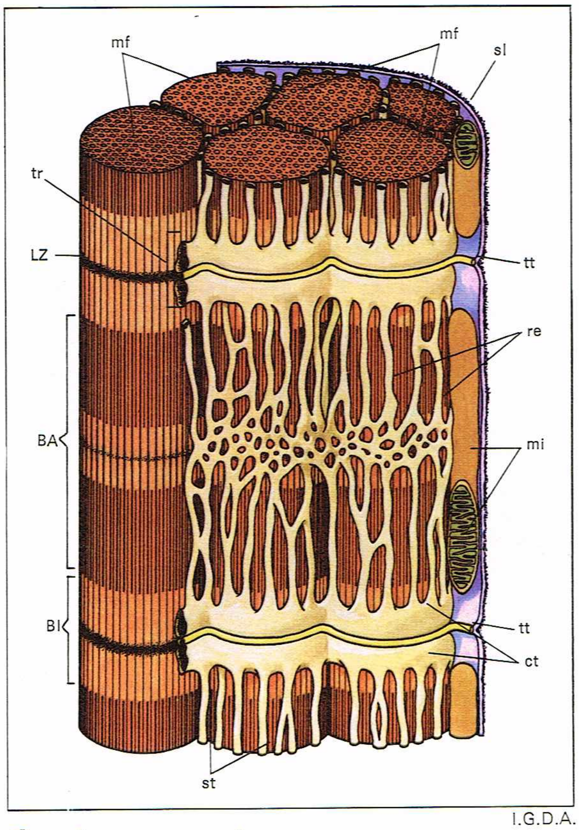

I.G.D.A.

Étude anatomique

Au point de vue histologique, on distingue des os d'origine membraneuse, formés directement dans le derme, qui édifient l'exosquelette, et des os enchondraux, dont la formation est précédée d'un modèle cartilagineux, qui édifient l'endosquelette. En fait, certaines parties du squelette sont d'origine mixte, associant des pièces exosquelettiques à des pièces endosquelettiques.

Au point de vue anatomique le squelette peut être divisé en trois groupes de constituants : le squelette zonal (colonne vertébrale, côtes, sternum); le squelette zonal et appendiculaire (ceintures et membres); le squelette crânien (neurocrâne et splanchnocrâne).

Squelette axial

La première manifestation d'un squelette axial est l'apparition de la corde dorsale. Rappelons à ce sujet que le phylum des Cordés groupe deux embranchements : celui des Procordés, dont le squelette axial se limite à la corde dorsale, et celui des Vertébrés dont la corde dorsale, toujours présente chez l'embryon, disparaît plus ou moins complètement tandis que se développent les vertèbres.

La **corde dorsale.** Elle dérive des cellules du mésoblaste qui se condensent sur la ligne médio-dorsale, juste sous le tube neural, formant une mince tigelle. Les cellules se vacuolisent et deviennent alors turgescentes, donnant à la corde sa rigidité. La corde sécrète la double gaine qui l'entoure : gaine fibreuse interne, assez épaisse, gaine élastique externe, moins épaisse mais plus dense.

La **colonne vertébrale.** Squelette axial typique des Vertébrés, la colonne vertébrale est formée d'une série de pièces squelettiques métamérisées, les vertèbres, cartilagineuses ou ossifiées, qui se forment autour de la corde à partir des sclérotomes et qui protègent la moelle épinière.

● *Structure des vertèbres :* une vertèbre typique comporte trois constituants : — un centre ou corps édifié autour de la corde, de forme variable; — un arc neural dorsal qui délimite le canal rachidien dans lequel est logée la moelle épinière; — un arc neural, ventral, inconstant. Chaque vertèbre porte un certain nombre d'apophyses, dépendant principalement de l'arc neural (voir schéma ci-dessous à gauche).

● *Origine des vertèbres :* le mésenchyme squelettogène issu des sclérotomes forme un revêtement continu autour de la corde dorsale, de la moelle épinière et de l'aorte. A partir de ce mésenchyme péricordal la formation des vertèbres est plus ou moins complexe.

Chez les Sélaciens, les centres vertébraux résultent de la fusion de plusieurs constituants : arcocentre, autocentre, cordacentre.

Chez les Amniotes, les sclérotomes sont partiellement divisés en une portion crâniale et une portion caudale. Le mésenchyme péricordal issu de ces sclérotomes se segmente pour édifier les vertèbres de façon telle que l'ébauche du centre vertébral se forme à partir du mésenchyme de deux demi-sclérotomes successifs; les vertèbres seront donc à cheval sur deux métamères, ceci étant bien marqué par la position des artères segmentaires. Le centre, par son origine péricordale, est un autocentre.

Les **côtes.** Éléments squelettiques segmentaires, les côtes sont articulées ou soudées sur les vertèbres à leur extrémité proximale, l'autre extrémité étant libre ou venant se souder ventralement au sternum; elles sont situées dans les myoseptes, cloisons conjonctives de la musculature pariétale.

On distingue : des côtes dorsales, articulées sur les apophyses transverses des vertèbres, situées aux intersections des myoseptes avec le septum horizontal; des côtes ventrales, insérées sur les basapophyses, qui occupent les lignes d'attache des septes transverses sur la paroi cœlomique. En fait, la distinction est incertaine et les homologies entre les côtes des Poissons et celles des Tétrapodes est difficile à établir.

Le **sternum.** C'est une pièce endosquelettique impaire qui existe seulement chez les Tétrapodes et qui se développe de façon indépendante dans la paroi ventrale antérieure du tronc. Il se relie généralement à la ceinture pectorale et aux côtes thoraciques. Son apparition au cours de l'évolution est obscure.

Évolution du squelette axial et de sa musculature chez les Vertébrés.

— *Les Cyclostomes.* La corde persiste intégralement, constituant le principal élément du squelette axial. Les vertèbres ne sont qu'ébauchées, et se réduisent à des plaques cartilagineuses formant des arcs rudimentaires.

— *Les Poissons.* Certains Poissons, primitifs à cet égard (Holocéphales, Dipneustes, Chondrostéens), ne sont

▶ *Une vertèbre thoracique de Mammifère vue par la face supérieure (à gauche) et de profil (à droite) : asp, apophyse épineuse dorsale; lao, lame de l'arc vertébral; atr, apophyse transverse; fcp, facette costale du processus transverse pour l'articulation du tuberculum de la côte; aat, zygaphophyse antérieure ou apophyse articulaire de la vertèbre pour la vertèbre précédente; tv, trou vertébral; cv, corps vertébral; fct, facette costale du corps vertébral.*

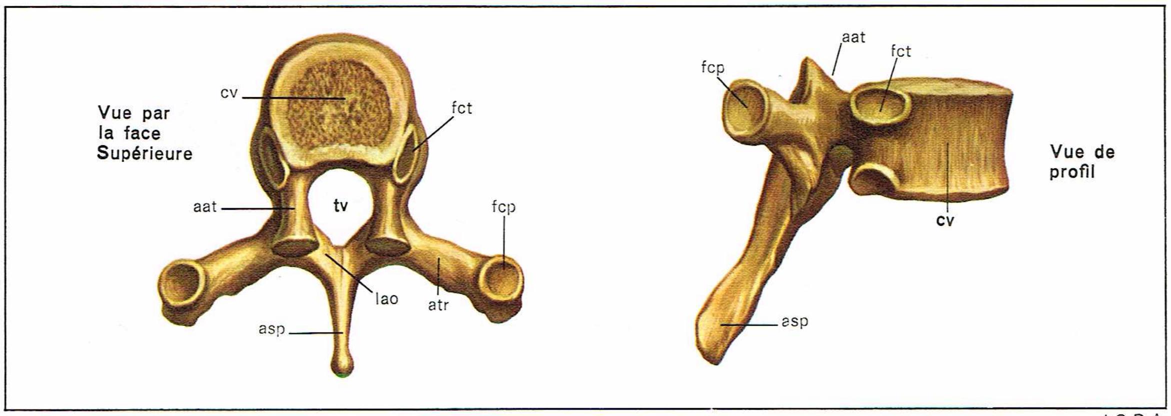

I.G.D.A.

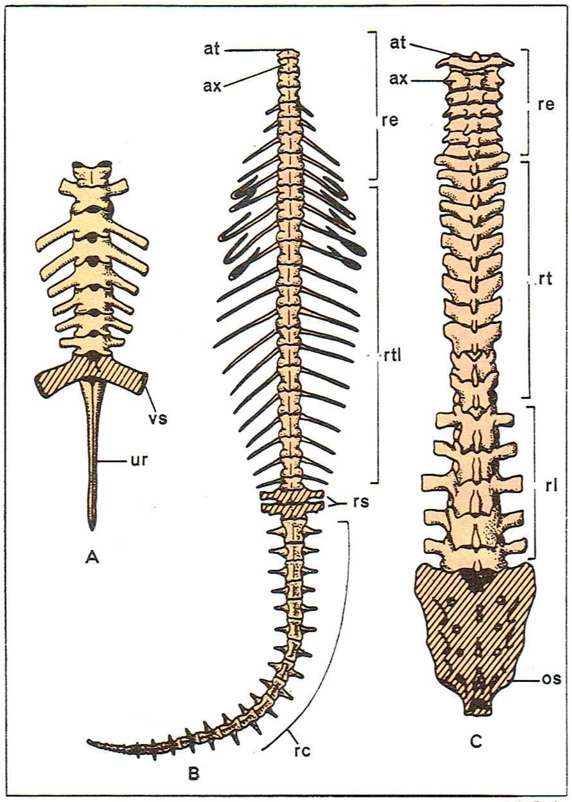

I.G.D.A.

◀ ***Schéma comparatif de trois* colonnes vertébrales; *A, d'un Anoure* (Bufo sp.); *B, d'un Reptile* (Uromastix sp.); *C, de l'homme; at, atlas; ax, axis; re, région cervicale; rtl, région thoraco-lombaire; rt, région thoracique (ou dorsale); rl, région lombaire; rs, région sacrée; rc, région caudale; ur, urostyle; vs, vertèbre sacrée; os, os sacré (ou sacrum).***

guère différents des Cyclostomes : corde persistante et vertèbres réduites aux arcs. Chez les Sélaciens, la corde persiste entre les vertèbres, mais elle est fortement comprimée et réduite au centre des vertèbres; il en est de même, avec une dégénérescence accentuée, pour les Téléostéens.

La colonne vertébrale se divise en deux régions sans limite tranchée : la région antérieure, ou troncale, où les vertèbres portent des côtes ventrales sur les basapophyses, et la région postérieure ou caudale, où les vertèbres portent des arcs hémaux entourant artère et veine caudales. Les centres vertébraux sont amphicœles, biconcaves.

Chez les Sélaciens, les vertèbres sont cartilagineuses calcifiées; les arcs neuraux et les arcs hémaux sont formés chacun par deux paires de plaques. Chez les Téléostéens, les vertèbres sont ossifiées; les arcs neuraux se prolongent par une épine neurale, ils portent des pré- et postzygapophyses plus ou moins rudimentaires. Certains Téléostéens (Clupéiformes, Cypriniformes) ont des côtes dorsales, en plus des ventrales, et possèdent des ossifications dermiques intermusculaires, les arêtes.

Chez les Poissons, la première vertèbre est immobilisée sur le crâne, et il n'y a aucune souplesse de la tête sur le tronc.

Dans le tronc, la *musculature* pariétale, somatique, est, chez les Poissons, régulièrement métamérisée en myomères séparés par des myoseptes de forme plus ou moins compliquée. Un septum horizontal tendu entre la gaine cordale et la paroi du corps sépare la musculature en deux portions, épiaxiale et hypoaxiale. Cette musculature joue le rôle principal dans la propulsion par création d'ondes alternées de contraction dans les myomères.

— *Les Tétrapodes.* La corde disparaît au cours de l'organogenèse, à quelques exceptions près; chez les Mammifères le tissu vacuolaire qui occupe le centre des disques intervertébraux est interprété comme un reliquat de la corde.

Avec le passage de la vie aquatique à la vie terrestre et le développement des membres de nouvelles différenciations régionales apparaissent dans la colonne vertébrale des Tétrapodes et seront plus accentuées chez les Amniotes. Le crâne devient mobile sur la première vertèbre; chez les Amniotes des vertèbres cervicales se différencient avec l'apparition du cou. Les vertèbres dorsales portent des côtes, du moins les plus antérieures. La ou les dernières vertèbres troncales sur lesquelles vient s'appuyer la ceinture pelvienne deviennent vertèbres sacrées; les caudales sont plus ou moins modifiées. Les zygapophyses des vertèbres sont bien développées et portent des facettes articulaires permettant une articulation efficace entre les vertèbres.

Les côtes typiques sont bicipitales, c'est-à-dire possédant deux têtes articulaires : le capitulum s'articule sur une parapophyse du centre vertébral, le tuberculum s'appuie sur la diapophyse de l'arc neural (mais les deux têtes peuvent fusionner, ou l'une des deux disparaître, la côte devenant monocéphale, ce qui est fréquent pour les dernières côtes). Le sternum apparaît, relié ou non aux côtes.

● *Les Amphibiens.* Les centres vertébraux sont généralement procœles (face antérieure concave, face postérieure convexe) chez les Anoures, opisthocœles chez les Urodèles. La première vertèbre est encore peu modifiée mais présente deux dépressions pour l'articulation des condyles du crâne. Les suivantes ne portent pas de côtes, ou alors très réduites. Il n'y a qu'une vertèbre sacrée munie de forts processus transverses. Chez les Anoures, les vertèbres caudales sont soudées en un urostyle. Le sternum n'est pas relié au squelette axial.

● *Les Reptiles.* Avec les Reptiles apparaît un cou et donc la différenciation de vertèbres cervicales. La première, très modifiée dans sa structure, devient l'atlas qui peut pivoter autour d'une apophyse odontoïde portée par la 2e vertèbre, l'axis.

La région sacrée comporte deux vertèbres. Les vertèbres caudales portent des arcs neuraux et des arcs hémaux (ou os en chevrons), mais les dernières se simplifient. Les centres vertébraux sont généralement procœles.

Les côtes, en général bien développées, rejoignent le sternum; excepté chez les crocodiles, elles sont monocéphales, s'appuyant sur le corps vertébral par le capitulum. Le sphénodon et les crocodiles possèdent une série de côtes ventrales dans la musculature abdominale, les gastralia.

L'allure de la colonne vertébrale est aussi diverse que le sont les Reptiles eux-mêmes. Ainsi les serpents ont un nombre de vertèbres qui varie de 100 à 400 et leur

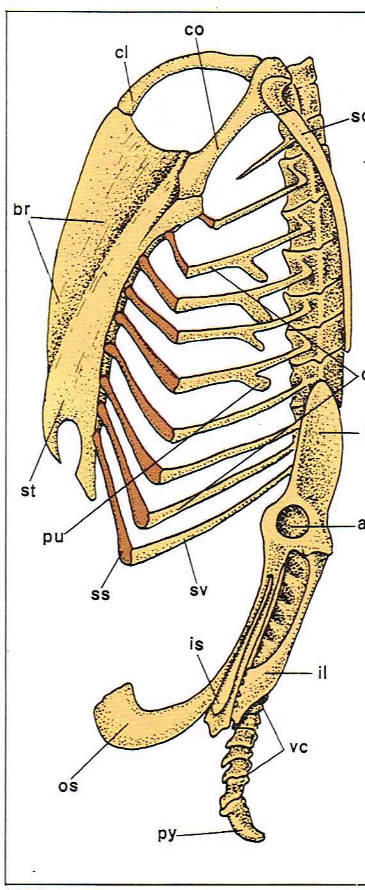

I.G.D.A.

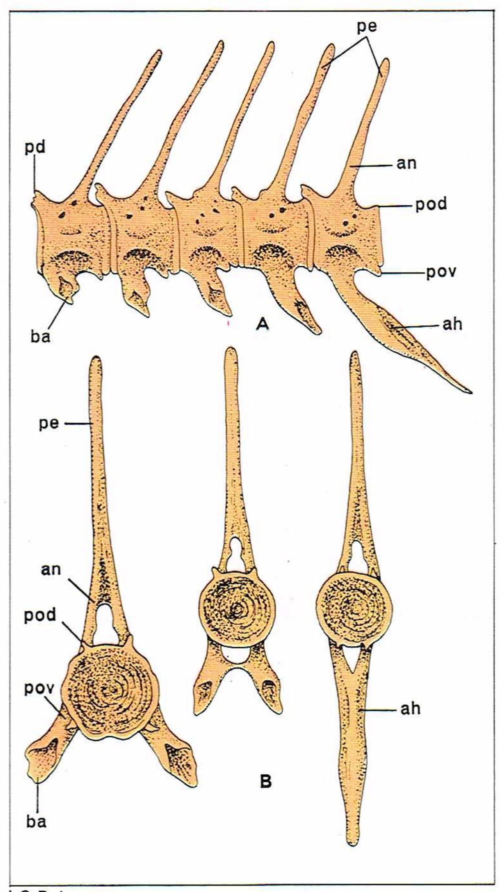

I.G.D.A.

▼ ***A gauche,* squelette du tronc *d'un Oiseau* (Cygnus sp.); *cl, clavicule; sc, scapula; co, coracoïde; br, bréchet; st, sternum; il, ilion; ac, acétabulum; is, ischion; vc, vertèbres caudales; py, pygostyle; os, os pubien; cs, côtes; pu, processus (apophyse) unciné; ss, segment sternal; sv, segment vertébral d'une côte. A droite, portion de la colonne vertébrale (au niveau de la transition entre le tronc et la queue), A, et vertèbres correspondantes, B, vues par la face caudale, d'un Poisson (le denté commun) : pd, prézygapophyse dorsale; ba, basapophyse; pe, processus (apophyse) épineux; an, arc neural; pod, postzygapophyse dorsale; pov, postzygapophyse ventrale; ah, arc hémal.***

articulation est perfectionnée par la présence d'un système articulaire supplémentaire spécial, impair, ce dispositif facilitant les ondulations et l'enroulement du corps. Toutes les vertèbres portent des côtes (impliquées dans la reptation) ; il n'y a pas de sternum, ni de différenciation de vertèbres sacrées. Par contre les tortues ont un nombre réduit de vertèbres dorsales dont les arcs neuraux sont soudés à la carapace ; les côtes s'associent aux plaques osseuses dermiques pour former la carapace.

● *Les Oiseaux*. Le squelette axial est très spécialisé, adapté aux efforts auxquels il est soumis pendant le vol : la forme des centres vertébraux est originale, hétérocœle ou en forme de selle (la surface antérieure est concave vue de face et convexe vue de profil, la surface postérieure présentant le phénomène inverse). Les vertèbres cervicales, souvent nombreuses, permettent une remarquable souplesse du cou.

L'ensemble vertèbres thoraciques, côtes, sternum, réalise une cage thoracique qui joue un rôle essentiel dans la ventilation pulmonaire. Les dernières vertèbres thoraciques, les lombaires, les sacrées et les premières caudales se soudent en une masse osseuse, le synsacrum : les apophyses transverses y conservent plus ou moins leur individualité mais sont soudées au bassin ; les dernières vertèbres caudales, fusionnées en un pygostyle, portent les plumes rectrices.

● *Les Mammifères*. Le squelette axial des Mammifères supporte tout le poids des viscères ; la colonne vertébrale doit être résistante et donner appui à des muscles, mais garder sa souplesse, ce qui explique le développement et le perfectionnement des apophyses.

Les centres vertébraux sont biplans ou acœles, articulés souplement entre eux par les disques intervertébraux.

Les vertèbres cervicales, quelle que soit la longueur du cou, sont au nombre de 7 (à part quelques rares exceptions, chez les Xénarthres). L'axis porte une apophyse odontoïde bien développée très mobile sur l'atlas (la rotation de la tête a principalement lieu à ce niveau). Les vertèbres thoraciques, en nombre variable, ont des apophyses saillantes ; elles portent des côtes bicéphales (le capitulum est articulé sur deux demi-facettes de centres vertébraux successifs). Les côtes antérieures sont rattachées au sternum par un segment cartilagineux ; les suivantes, ou fausses côtes, s'appuient sur la partie sternale de la dernière vraie côte ; les dernières, flottantes, se terminent librement.

Le sternum se caractérise par une subdivision en sternèbres articulées entre elles, constituant la portion principale en avant de laquelle un manubrium donne appui aux clavicules ; le nombre de sternèbres varie comme celui des côtes rejoignant le sternum.

Les vertèbres lombaires (4 à 7) sont souvent plus longues que les autres et leurs apophyses transverses, développées, sont dirigées vers l'avant. Elles peuvent porter des apophyses supplémentaires d'articulation entre elles, les métapophyses, dorso-latérales. Les vertèbres sacrées (3 à 5) se soudent en une pièce unique, le sacrum ; la première de ces vertèbres, élargie, porte les surfaces articulaires pour l'ilion de la ceinture pelvienne. Le nombre des vertèbres caudales, toujours plus réduites que les précédentes, est extrêmement variable : jusqu'à 50 chez le pangolin, 4 rudimentaires soudées en un coccyx chez l'homme.

La musculature pariétale des Tétrapodes perd son rôle locomoteur ; elle subit une réduction et se transforme ; le septum horizontal régresse mais la division dorso-ventrale reste marquée par les apophyses transverses des vertèbres ; la portion épiaxiale maintient la rigidité de la colonne vertébrale en même temps qu'elle lui assure des mouvements variés ; la portion hypoaxiale soutient les viscères, formant des feuillets le long du ventre et des flancs : muscles obliques, transverse, grand droit de l'abdomen.

Squelette zonal et appendiculaire

Il existe deux types d'appendices chez les Vertébrés : les nageoires des Poissons et les membres marcheurs ou chiridiens des Tétrapodes. Ces appendices se répartissent en deux catégories : les membres impairs, situés dans le plan sagittal, soutenus par un squelette en liaison avec la colonne vertébrale, qui sont toujours de type nageoire et en nombre variable ; les membres pairs, de type nageoire ou de type chiridien, qui sont articulés sur deux ceintures (une paire par ceinture) logées dans la musculature pariétale, la ceinture pectorale antérieure et la ceinture pelvienne postérieure.

Le squelette des nageoires et des membres peut rester cartilagineux ou s'ossifier. Les nageoires paires et impaires ainsi que la ceinture pectorale sont généralement constituées par l'association de pièces endo- et exosquelettiques, tandis que le membre chiridien et la ceinture pelvienne sont exclusivement endosquelettiques.

Les nageoires impaires

Les nageoires impaires se répartissent ainsi : une à trois dorsales, une ou deux anales et une caudale. Elles sont peu distinctes chez les Agnathes, qui possèdent uniquement des nageoires impaires dont le squelette se réduit à des simples baguettes cartilagineuses.

Nageoires dorsales et anales

— Chez les Chondrichthyens, l'endosquelette est constitué par un petit nombre de radiaux pluriarticulés qui pénètrent dans la base du repli natatoire ; ils peuvent rester indépendants ou bien leur base peut fusionner en une ou plusieurs pièces basales, reliées secondairement aux arcs neuraux et hémaux des vertèbres. La muscula-

▼ ***Trois types de nageoires caudales de Poissons ; A, nageoire caudale* hétérocerque *de* Lamna *(Galéiforme) typique des Chondrichthyens actuels ; B, nageoire caudale* homocerque*, typique des Téléostéens : d'apparence externe symétrique, elle a une structure squelettique asymétrique, bien visible chez une jeune carpe. C, nageoire caudale* diphycerque *symétrique de cœlacanthe (Crossoptérygien actuel)***

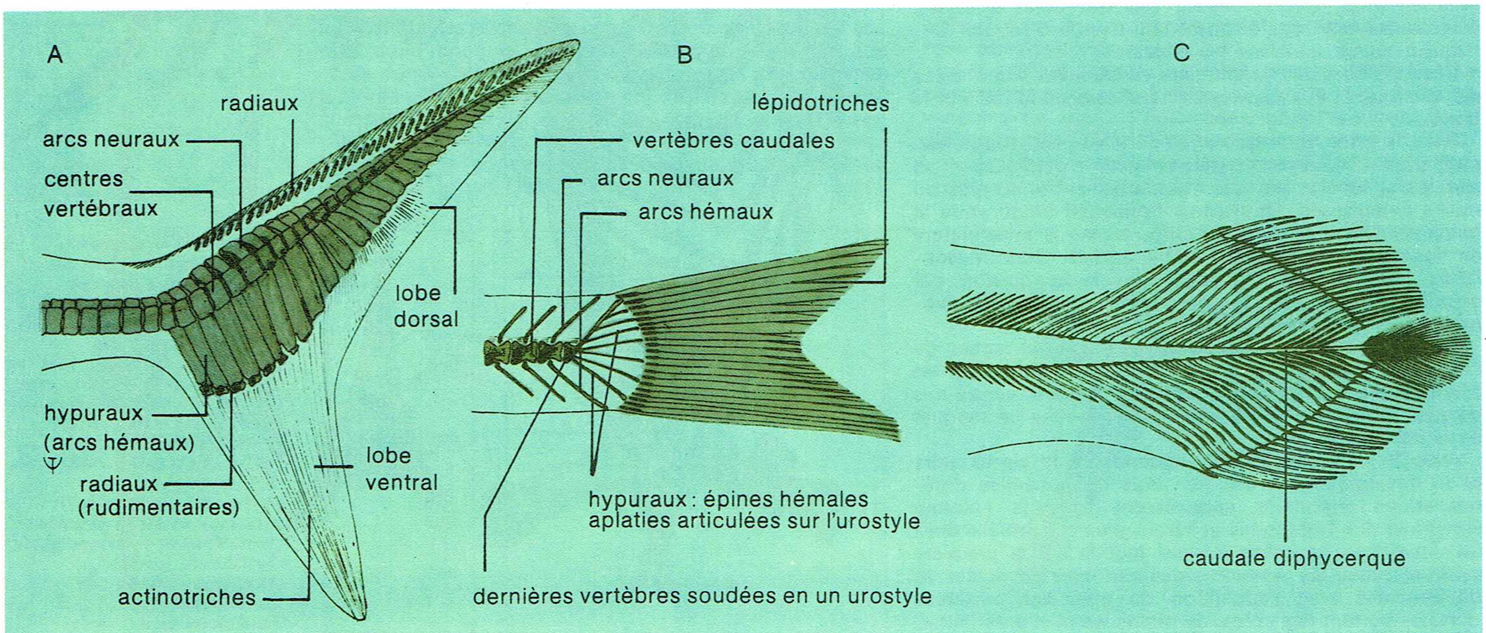

Richard Colin

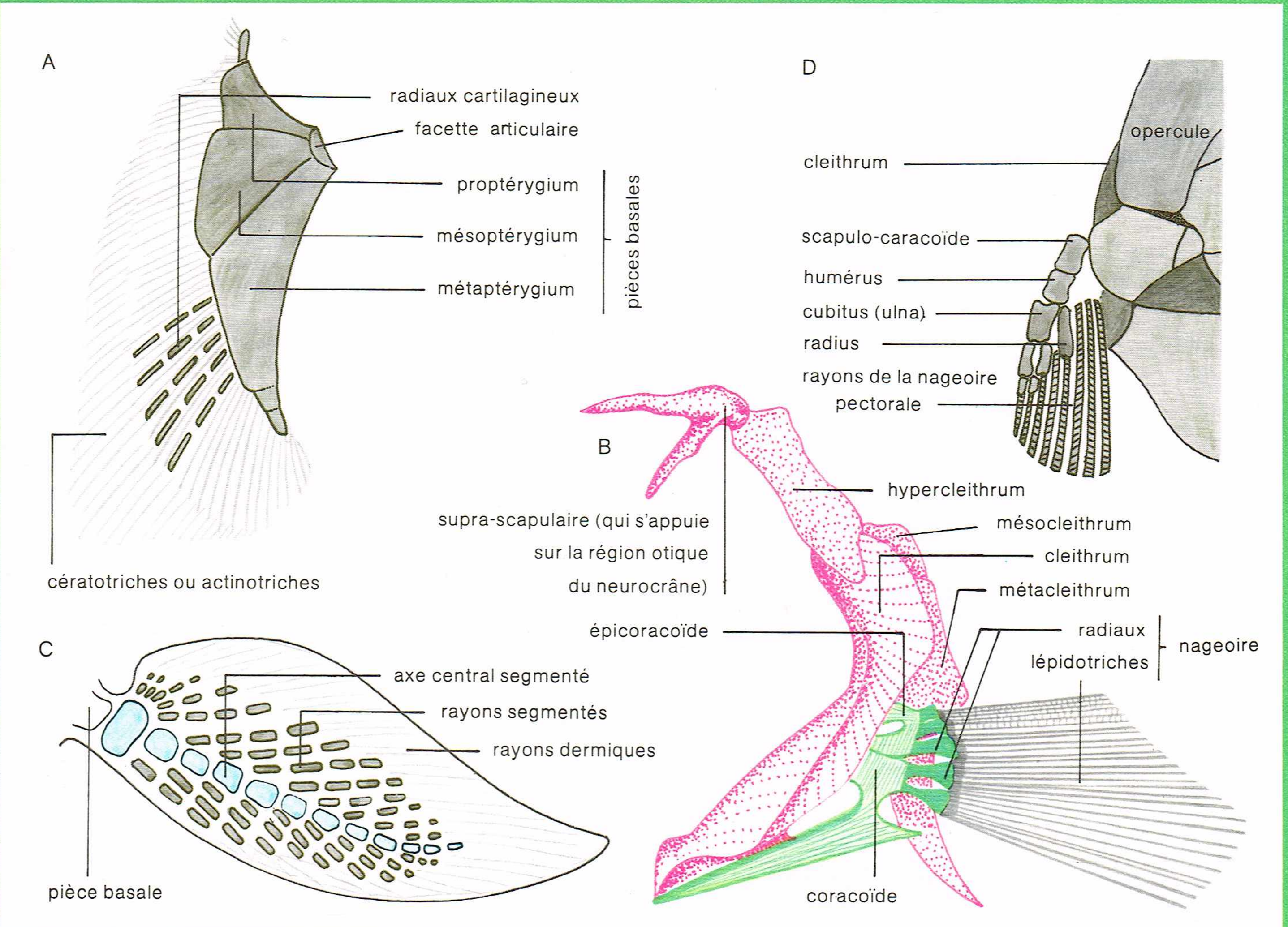

Richard Colin

ture s'attache sur l'endosquelette. L'exosquelette est formé par des rayons faits d'une scléroprotéine fibreuse de consistance cornée : les *actinotriches* (appelés aussi *cératotriches*), disposés en deux nappes parallèles dont la base recouvre les extrémités distales des radiaux ; ils soutiennent la partie périphérique de la nageoire.

— Chez les Ostéichthyens, les radiaux sont situés dans le septum dorsal médian qui sépare les deux masses musculaires pariétales et comportent deux parties : l'axonoste basal, ossifié, et le baséoste, très court (cartilagineux ou osseux) ; ils sont surmontés par les rayons exosquelettiques, lesquels supportent seuls la nageoire proprement dite. Ces rayons sont de deux types : des rayons segmentés, flexibles, généralement ramifiés, les *lépidotriches,* d'origine paire mais fusionnés en une seule rangée (ce sont les seuls rayons qui existent chez les Téléostéens dits Malacoptérygiens, même s'ils durcissent et se transforment en aiguillons) ; des rayons simples, non segmentés, d'origine impaire, qui se trouvent à la partie antérieure des nageoires dorsales et anales des Téléostéens dits Acanthoptérygiens ; parfois, des actinotriches (refoulés par la croissance des rayons osseux) existent à la périphérie des lépidotriches.

Quelques modifications des nageoires impaires sont à signaler. Chez le rémora, la nageoire dorsale devient un appareil de fixation (disque céphalique). Chez le xiphophore, certains rayons de la nageoire anale sont très allongés chez le mâle, formant un gonopode, ou organe copulateur (les Poissons de cette famille sont vivipares).

Nageoire caudale

La nageoire caudale joue un rôle dans la propulsion en amplifiant les ondulations du corps. La nageoire caudale des Poissons peut revêtir trois formes : hétérocerque, homocerque et diphycerque (voir schémas ci-contre).

La nageoire caudale des Mammifères aquatiques, Cétacés et Siréniens, est dépourvue d'un véritable support squelettique ; elle s'étale dans un plan horizontal de part et d'autre de l'extrémité de la colonne vertébrale.

Les membres pairs et les ceintures

Nageoires paires et ceintures des Poissons

La ceinture pectorale des Chondrichthyens est simple. Elle se compose de deux demi-arcs cartilagineux soudés ventralement, situés dans la paroi du corps juste en arrière de la région branchiale, sans liaison avec le squelette axial (sauf chez les raies, où la partie supérieure rejoint de chaque côté la colonne vertébrale) ; à la limite des portions ventrale et latéro-dorsale, se situe un condyle articulaire pour la nageoire.

Chez les Ostéichthyens, la ceinture endosquelettique est réduite à deux pièces, le coracoïde et l'épicoracoïde, sur lesquelles s'appuie la nageoire. La partie la plus importante de la ceinture est exosquelettique : les os dermiques forment deux demi-arcs limitant le bord postérieur de la chambre branchiale ; le principal est le *cleithrum,* sur lequel s'appuient les pièces endosquelettiques, qui rejoint son symétrique sur la ligne médio-ventrale ; dorsalement, de petits os dermiques unissent le cleithrum à la région otique du crâne.

Les nageoires pectorales sont construites suivant quatre types principaux : le type tribasal des Chondrichthyens ; le type pluribasal des Actinoptérygiens ; le type monobasal bisérié des Dipneustes ; le type monobasal des Crossoptérygiens Rhipidistiens (fossiles) [voir schémas ci-dessus].

La ceinture pelvienne est toujours une structure très simple, libre dans la musculature abdominale ; elle est constituée par une plaque cartilagineuse ou deux petits

▲ ***Représentation schématique des quatre types principaux de* nageoires pectorales :**
***A, nageoire* tribasale *d'un Chondrichthyen* (Squatina) ; *B, ceinture pectorale et nageoire* pluribasale *d'un Actinoptérygien (mérou) ; en vert, la ceinture primaire endosquelettique, en rouge, la ceinture secondaire exosquelettique ; C, nageoire* monobasale bisériée, *typique chez le Dipneuste* Neoceratodus ; *D, nageoire* monobasale *de Crossoptérygien Rhipidistien* (Eustenopteron).**

▶ *La structure des nageoires paires des Téléostéens est souvent modifiée; ainsi l'atrophie des nageoires est généralement liée à l'allongement du corps comme chez les Syngnathiformes, tel cet hippocampe.*

G. Mazza

os reliés entre eux. Les nageoires pelviennes sont généralement plus réduites que les pectorales. Chez les Sélaciens mâles, des éléments cartilagineux disposés dans le prolongement du métaptérygium constituent un organe copulateur ou ptérygopode.

Bien que la classification des Actinoptérygiens ne puisse pas scientifiquement être fondée sur la disposition et la structure des nageoires, on peut suivre au cours de l'évolution de ces animaux un déplacement des nageoires pelviennes en direction crâniale, passant d'une position abdominale à une position pectorale ou jugulaire, qui, dans les grandes lignes, va de pair avec le passage d'un état Malacoptérygien à un état Acanthoptérygien (voir les rayons des nageoires).

Des modifications apparaissent souvent dans la structure des nageoires paires des Téléostéens, en relation avec le mode de vie ou de déplacement.

Les nageoires peuvent se transformer en appareil de fixation chez des Poissons littoraux vivant dans des courants. Ainsi, chez les gobies, les deux os pelviens situés en position thoracique se soudent en une plaque pelvienne articulée sur la ceinture pectorale et donnant insertion à des muscles. Le lépadogaster (Gobiésocidé) se fixe aux rochers ou aux galets par une double ventouse de fixation : l'organe antérieur ressemble à celui des gobies, et l'organe postérieur a une armature composée de trois plaques osseuses dont les homologies sont douteuses; ces plaques sont entourées par un bourrelet musculaire et rattachées à la plaque pelvienne par des muscles protracteurs. Citons encore les périophthalmes, des Poissons très curieux qui vivent dans les marécages littoraux tropicaux et peuvent rester hors de l'eau, sautillant sur la vase et grimpant sur des racines; ils possèdent à la fois des pectorales pédiculées et musclées, qui leur servent de pattes, et des pelviennes modifiées en ventouse, comme les gobies.

Un mode de locomotion très différent est celui des Poissons volants, les Exocétidés; leurs nageoires pectorales sont extrêmement développées, plus longues que la moitié du corps, et le lobe inférieur de la caudale est hypertrophié; cette nageoire leur sert à prendre de la vitesse, la tête et le tronc sortant déjà hors de l'eau, tandis que la queue, encore immergée, continue à vibrer; en même temps, les pectorales se déploient. Ce Poisson peut effectuer des vols planés de plus de dix secondes et atteignant parfois une centaine de mètres.

Membres chiridiens et ceintures des Tétrapodes

Le passage de la vie aquatique à la vie terrestre est marqué par une série de transformations considérables, dont l'une des plus complexes est l'apparition des membres locomoteurs pentadactyles, ou membres chiridiens. Les nageoires ne jouent qu'un faible rôle dans le soutien du corps et la locomotion et leur musculature est réduite, tandis que le membre chiridien soulève le corps et le déplace; ce rôle implique l'existence d'articulations entre ses segments et le développement d'une musculature importante.

Dès son origine, le membre chiridien n'a existé que sous une seule forme, et, à part quelques adaptations particulières, la structure des ceintures et des membres est remarquablement constante dans la série des Tétrapodes. Le plan fondamental qui sera retrouvé chez tous les Vertébrés terrestres est donné dans le tableau ci-contre.

● *L'origine du membre chiridien*

Bien que la question soit encore discutée et que de nombreuses théories soient proposées, il est admis généralement que l'origine du membre chiridien pentadactyle est à rechercher chez les Crossoptérygiens Rhipidistiens; les mieux connus de ces fossiles du Dévonien sont *Eusthenopteron* et *Sauripterus*. Les éléments du stylopode et du zeugopode de ces Crossoptérygiens et des Tétrapodes montrent une similitude d'organisation. L'élément proximal de la nageoire pectorale, qui s'articule sur la ceinture par un condyle, peut être homologué au stylopode (humérus). L'organisation générale des éléments zeugo-autopodiens est comparable; ils se branchent en deux systèmes indépendants sur le stylopode : le premier comporte un os homologue du radius prolongé par une seule série de pièces; le second système, plus important, comprend un os homologue de l'ulna qui porte toutes les autres pièces. Il est cependant difficile d'homologuer les éléments de l'autopode des Vertébrés terrestres avec ceux de l'extrémité distale de la nageoire crossoptérygienne. Plusieurs théories s'opposent à ce sujet.

Quoi qu'il en soit, le passage de la nageoire au chiridium fait intervenir d'importants changements d'orientation des différents segments.

● *Aspect et fonctionnement des membres des Tétrapodes primitifs*

On reconnaît pour le membre chiridien un type ancestral de structure réalisé chez les premiers Tétrapodes. Les

▶ *Les blennies* (**Blennius ocellaris**), *qui restent souvent dans les flaques d'eau à marée basse, se posent sur des nageoires pelviennes, en position jugulaire, réduites à trois rayons séparés.*

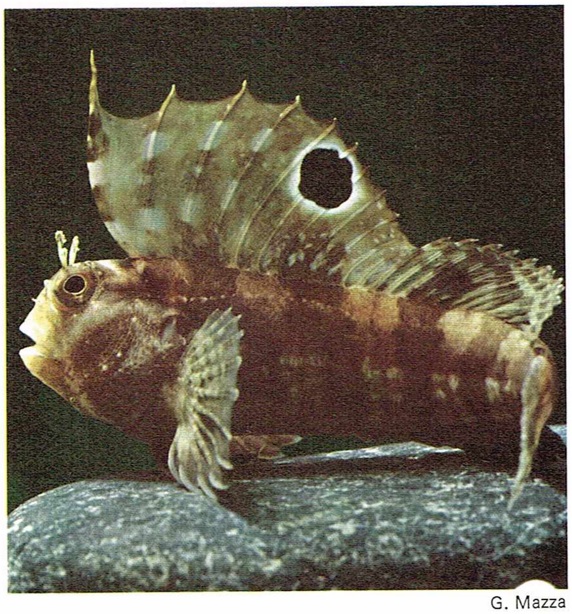

G. Mazza

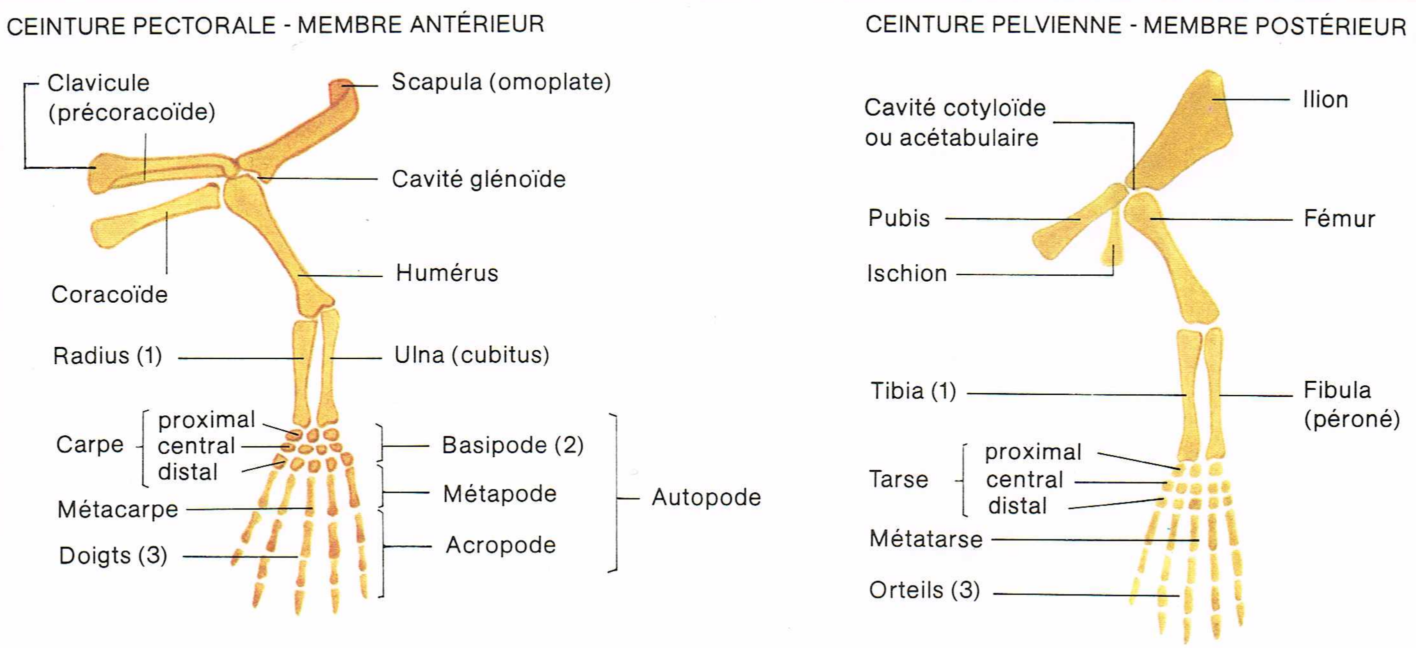

(1) Radius et tibia sont en position antérieure ou interne.

(2) Le BASIPODE est le segment le plus complexe. Il comporte en principe :
3 séries d'osselets
- série proximale : radial - intermédiaire - ulnaire (membre antérieur) ; tibial - intermédiaire - fibulaire (membre postérieur)
- série centrale : centraux
- série distale : carpiens - tarsiens

Sa structure est très variable et assez caractéristique d'un groupe à l'autre, par disparition et fusion de certains os.

(3) Le nombre de phalanges des doigts et orteils est variable et assez caractéristique des groupes.

Richard Colin

▲ ***Diagramme de la structure squelettique des* ceintures *et* membres *chez les* Tétrapodes.**

plus anciens, les Ichthyostégidés du Dévonien supérieur (trouvés dans les dépôts lacustres du Groenland), possédaient déjà des membres à cinq doigts de Tétrapodes, bien que ceux-ci fussent associés à une nageoire caudale semblable à celle des Poissons. Les autres Labyrinthodontes avaient tous les caractères des Vertébrés terrestres. Pourtant, le membre chiridien primitif était imparfait au point de vue fonctionnel et n'a acquis que progressivement les perfectionnements lui permettant d'assurer une propulsion efficace.

La ceinture pectorale, qui supporte le poids du corps, donne appui à des muscles puissants et devient plus mobile pour permettre les mouvements des membres antérieurs. La ceinture pelvienne, déjà esquissée chez les Crossoptérygiens, se développe ; elle doit supporter les membres postérieurs, plus impliqués dans la propulsion, et acquiert une attache rigide sur le squelette axial ; chez les Labyrinthodontes, des relations fermes s'établissent entre l'ilion et les côtes sacrées, qui se soudent aux apophyses transverses. Les membres forment des systèmes de leviers, constitués par plusieurs segments liés entre eux par des articulations perfectionnées (diarthroses).

Chez les Tétrapodes primitifs, les membres étaient *transversaux :* stylopode horizontal (avec une tête articulaire en position terminale), zeugopode vertical, autopode reposant sur le sol. Dans cette position, le stylopode se plaçait dans des conditions de travail défavorables qui exigeaient un grand effort pour soulever le corps ; de puissants muscles devaient donc s'insérer d'une part sur les ceintures, d'autre part sur le stylopode. C'est ce qui explique les crêtes et apophyses qui donnent à ces os massifs (surtout l'humérus) un relief tourmenté.

Avec les Reptiles, le stylopode commence à se placer dans un plan oblique, par suite du déplacement de la tête articulaire. Dans l'évolution ultérieure, chez les Mammifères, il se placera dans un plan parasagittal. L'articulation zeugopode-autopode ne se faisait pas entre les deux segments mais à l'intérieur de l'autopode, entre le basi- et le métapode ; ainsi, le basipode, dressé, faisait partie fonctionnellement du zeugopode. L'examen des empreintes de pas montre que la partie de l'autopode qui reposait sur le sol était orientée vers l'avant et non sur le côté, ce qui prouve que dès le début les torsions d'orientation étaient accomplies. On peut analyser le mode de fonctionnement de ces membres en observant le déplacement des Urodèles actuels. La démarche des premiers Tétrapodes devait être lente et pénible et accompagnée d'ondulations du corps.

● *Structure et adaptations des ceintures et membres des Tétrapodes*

La ceinture pectorale endosquelettique comporte typiquement un élément dorsal, la scapula, et deux éléments ventraux, le précoracoïde antérieur et le coracoïde postérieur. La cavité glénoïde d'articulation de l'humérus est située sur une de ces pièces ; la portion exosquelettique se réduit aux clavicules (unies parfois par une interclavicule). Cette ceinture, qui peut être libre ou reliée à la cage thoracique, montre d'importantes variations adaptatives.

La ceinture pelvienne par contre est très constante. Elle est toujours fixée sur la région sacrée de la colonne vertébrale ; elle comporte trois pièces endosquelettiques : l'ilion, dorsal, le pubis, antéro-ventral, et l'ischion, postéro-ventral ; les deux demi-ceintures sont généralement unies par des symphyses pelvienne et ischienne. Les trois pièces convergent vers la cavité acétabulaire ou cotyloïde d'articulation du fémur.

Les membres comportent toujours trois segments : le stylopode (un seul os), le zeugopode (2 os), l'autopode (avec 3 portions, basipode, métapode, acropode). Les modifications du plan fondamental dues aux adaptations

CORRESPONDANCE DES OS DU BASIPODE

	CARPE	TARSE
Proximaux	RADIAL = Scaphoïde (Naviculaire) INTERMÉDIAIRE = Lunatum (Lunaire, Semi-lunaire) ULNAIRE = Triquetrum (Pyramidal, Cunéiforme)	TIBIAL, INTERMÉDIAIRE = Astragale (ou : Intermédiaire + 1 central) FIBULAIRE = Calcaneum
Élément sésamoïde : Pisiforme		
Centraux	0-3 CENTRAL	0-3 = Naviculaire (Scaphoïde)
Distaux	CARPIENS 1 = Trapezium (Trapèze) CARPIENS 2 = Trapezoidum (Trapèzoïde) CARPIENS 3 = Capitatum (Grand os Magnum) CARPIENS 4, 5 = Hamatum (Os crochu Unciforme)	TARSIENS 1, 2, 3 = Cunéiformes TARSIENS 4, 5 = Cuboïde

▲ ***Tableau de la correspondance des os du basipode.***

concernent principalement l'autopode et, en particulier, le basipode, plus complexe, avec trois séries d'osselets dont certains tendent à fusionner ou à disparaître. La nomenclature des os du basipode est rendue confuse par les différents noms attribués aux os en anatomie humaine; le tableau ci-dessus en donne la correspondance.

La musculature appendiculaire

Peu importante chez les Poissons, la musculature appendiculaire se développe considérablement chez les Tétrapodes; la répartition des muscles varie avec le travail à accomplir et les homologies sont difficiles à établir. Indiquons seulement les principaux éléments de la musculature pectorale dont les variations fonctionnelles seront facilement compréhensibles.

— Les *muscles de l'épaule* peuvent être divisés en deux groupes. Le groupe dorsal comprend essentiellement : le grand dorsal, étendu des vertèbres dorsales à l'humérus; le teres, entre la scapula et l'humérus; le trapèze (d'origine viscérale), qui s'étale de la région occipitale du crâne et des vertèbres cervicales et thoraciques à la scapula; le deltoïde enveloppant l'épaule, entre les pièces de la ceinture et l'humérus. Le groupe ventral comprend principalement : le pectoral, avec une origine en éventail sur le sternum et la clavicule et une insertion sur la tête de l'humérus; le supra-coracoïde, qui relie le coracoïde et la clavicule à la tête de l'humérus; enfin, le coraco-brachial, entre le coracoïde et la face interne de l'humérus. Le jeu complexe de tous ces muscles permet tous les mouvements du membre par rapport au corps.

— Les *muscles du bras* sont essentiellement les deux antagonistes : le triceps, extenseur, dorsal, dont les trois origines, ou chefs, sont sur la ceinture et l'humérus, et l'insertion sur l'olécrane de l'ulna; le biceps et le brachial, fléchisseurs, ventraux, situés entre le coracoïde et la tête de l'humérus, et la partie proximale du radius et de l'ulna.

— Les *mouvements de la main* sont assurés par des séries d'extenseurs et de fléchisseurs longs et courts, accompagnés de rotateurs, partant de l'extrémité distale de l'humérus ou de l'extrémité proximale du zeugopode et insérés de façon très complexe sur le carpe, le métacarpe et les phalanges.

Principales adaptations

Examinons maintenant, dans les quatre classes de Tétrapodes, quelques-unes des principales adaptations du squelette en rapport avec les fonctions à remplir.

Les Amphibiens. La ceinture pectorale est libre puisqu'il n'y a pas de cage thoracique. La principale modification est celle des membres postérieurs des Anoures, adaptés au saut : les os du zeugopode fusionnent, l'autopode s'allonge par allongement des os proximaux du tarse, tandis que les os distaux sont réduits; les métatarsiens sont assez allongés et il y a 5 doigts. La ceinture pelvienne est également modifiée : l'ilion s'allonge et pivote vers l'arrière autour de son attache sacrée, jusqu'à devenir parallèle à l'axe du corps; les deux demi-ceintures ventrales, l'ischion et le pubis, s'appliquent l'une contre l'autre, formant un épais disque vertical.

Les Reptiles. La structure des membres présente des variations importantes suivant les groupes. Chez les Sauriens à pattes bien développées, la ceinture pectorale, reliée à la cage thoracique, est assez complète et les membres sont assez conformes au modèle primitif; signalons que dans le basipode certains os ont déjà fusionné ou disparu; dans le tarse, il ne subsiste que deux éléments proximaux : le fibulaire devient le calcanéum et c'est probablement la fusion de l'intermédiaire et d'un central qui devient l'astragale; le nombre des tarsiens est réduit. L'articulation est intratarsienne entre l'astragale-calcanéum et les tarsiens. La formule phalangienne est typiquement 2-3-4-5-3 pour la main, 2-3-4-5-4 pour le pied. Chez les Lacertiliens dont les membres ont disparu, l'orvet par exemple, des rudiments de ceintures persistent. Parmi les serpents, seuls les Boïdés ont des vestiges de ceinture pelvienne sous forme de petits ergots visibles de chaque côté du cloaque.

Les tortues ont une ceinture pectorale modifiée : la scapula s'applique contre la carapace, le coracoïde et le précoracoïde s'appuient sur le plastron; la croissance de la carapace modifie aussi l'orientation du membre antérieur, qui pose sur le sol par l'extrémité dorsale de ses griffes. Chez les tortues marines, les membres deviennent des palettes natatoires.

Les Oiseaux. La structure des ceintures et des membres est parfaitement conformée pour le vol, du moins chez les Carinates. Ces modifications font partie d'un ensemble d'adaptations structurales et fonctionnelles de tout l'organisme. La ceinture pectorale est caractérisée par la

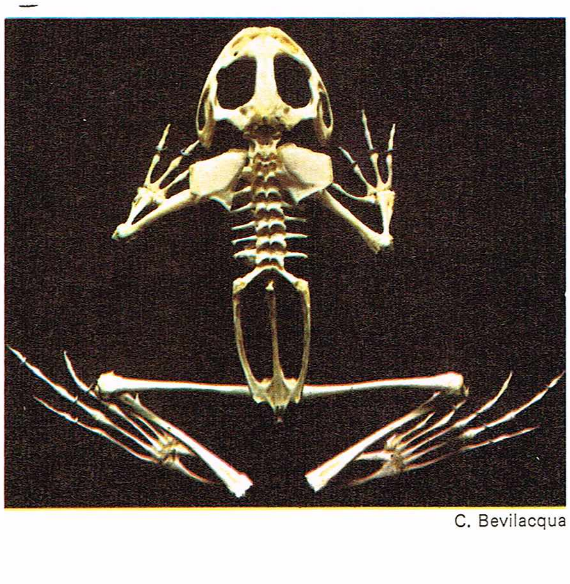

C. Bevilacqua

▶ ***Squelette de grenouille (Rana esculenta) : chez les Anoures, la principale modification du squelette appendiculaire est celle des membres postérieurs adaptés au saut.***

prépondérance du coracoïde, formant un pilier qui, bien appuyé sur le sternum, supporte presque toutes les contraintes mécaniques pendant le vol; les clavicules se soudent distalement, formant la fourchette qui maintient l'écartement des deux demi-ceintures. Le membre antérieur est transformé en aile; il est allongé, les trois segments étant à peu près de même longueur.

La musculature est façonnée en fonction du vol; les muscles pectoraux sont extrêmement développés, en particulier le grand pectoral, qui, solidement inséré sur le bréchet, abaisse l'aile et la porte en avant; le moyen pectoral (supra-coracoïde), dont l'insertion se fait par un long tendon sur la face dorsale de la tête de l'humérus, élève l'aile. Par contre, les muscles dorsaux sont relativement peu développés.

La ceinture pelvienne présente des particularités en relation avec l'allure bipède des Oiseaux. Le bassin est très allongé et dessine une voûte largement ouverte ventralement; la pièce principale est l'ilion, très étendu vers l'avant et vers l'arrière, qui se soude à son symétrique et au synsacrum; l'ischion se soude à l'ilion, et le pubis forme une longue baguette. Dans les pattes, la fibula est réduite et le tarse n'a plus d'individualité chez l'adulte : les deux os tarsiens proximaux se soudent au tibia, qui devient un tibio-tarse, et l'os tarsien distal se soude au métatarse, qui devient un tarso-métatarse; l'articulation zeugo-autopodienne est donc intratarsienne; les métatarsiens sont allongés et soudés entre eux; le nombre de doigts n'est jamais supérieur à 4.

Un dispositif des muscles de la jambe est intéressant à signaler : les muscles fléchisseurs des doigts, dont l'origine est sur la face dorsale du fémur distal et du tibia proximal, sont insérés sur les phalanges par de longs tendons qui passent dans une poulie tendineuse de l'articulation tarsienne; ainsi, les doigts se ferment automatiquement lorsque cette articulation se plie.

Les Impennes, représentés par les manchots, sont adaptés à la vie aquatique : tous les os de l'aile sont aplatis et élargis de façon à former une pale rigide; les pattes postérieures palmées servent de rames ou de gouvernail. A terre, les pattes, insérées très en arrière sur le bassin, permettent une attitude verticale; elles reposent non seulement sur les quatre doigts mais aussi sur le tarso-métatarse, ce qui donne à ces Oiseaux une démarche dandinante.

Les Ratites sont incapables de voler mais adaptés à la course : le sternum n'a pas de bréchet. Les ailes sont atrophiées; par contre, le bassin et les pattes sont forts.

Les Mammifères. Le squelette appendiculaire des Mammifères se caractérise par la position dressée et parasagittale des membres, disposition permettant un allégement des ceintures et une locomotion plus aisée. Cette structure s'est réalisée par des modifications progressives du squelette des Reptiles de la lignée synapside.

La ceinture pectorale se simplifie. La scapula, ou omoplate, en est la pièce principale; elle porte sur sa face externe une épine qui la partage en 2 fosses sus- et sous-épineuse et se prolonge jusqu'au niveau de la cavité glénoïde par l'acromion; sur la scapula s'insère la majorité des muscles de l'épaule et du bras : le coracoïde n'est plus représenté que par une apophyse coracoïde qui fait saillie au bord antérieur de la cavité glénoïde; celle-ci est orientée ventralement. La clavicule, appuyée sur l'acromion et sur le sternum, disparaît chez de nombreux Mammifères lorsque les mouvements du membre se limitent à un plan sagittal; elle se maintient quand les membres sont soumis à un écartement. L'importance relative des muscles de l'épaule varie de même suivant ces mouvements, mais en général les muscles dorsaux se développent, formant la sangle dorsale complétée par l'extension du trapèze, et les muscles ventraux envahissent la lame scapulaire.

La ceinture pelvienne est solidement rattachée aux vertèbres sacrées et les trois os sont soudés en un os coxal; elle a pivoté autour de la cavité cotyloïde par rapport à la ceinture reptilienne, de sorte que l'ischion et le pubis sont orientés vers l'arrière; ainsi repoussée, l'articulation du fémur donne au membre une plus grande efficacité dans la propulsion.

Des rotations ont été nécessaires pour amener les membres de la position transversale reptilienne à la position parasagittale. Pour le membre postérieur, une rotation de 90° vers l'avant a suffi; la tête du fémur est reportée au sommet d'un col pour s'articuler dans la cavité latérale de la ceinture. Pour le membre antérieur, il faut concevoir d'abord une rotation de 90° vers l'arrière puis une rotation de 180° du zeugopode et de l'autopode vers l'avant. Ainsi, l'angle du genou est ouvert vers l'arrière et l'angle du coude vers l'avant; le radius, externe

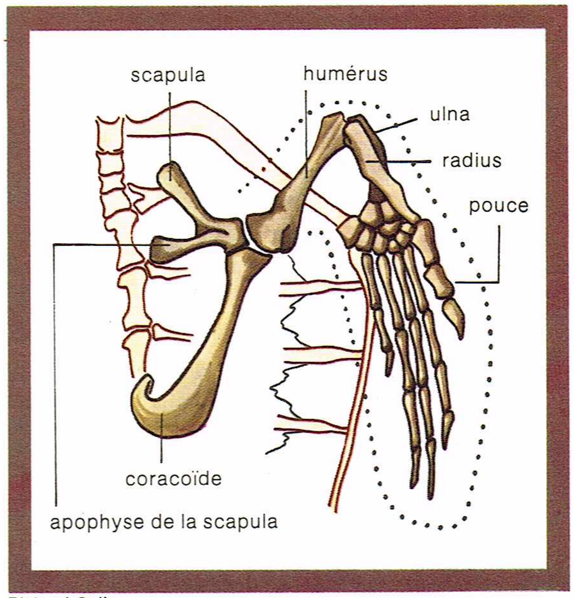

Richard Colin

◀ ***Squelette du membre antérieur de tortue marine (face ventrale); la main est transformée en palette natatoire (d'après L. Vialleton).***

▼ ***Squelette et principaux muscles du membre antérieur d'un Oiseau (pigeon).***

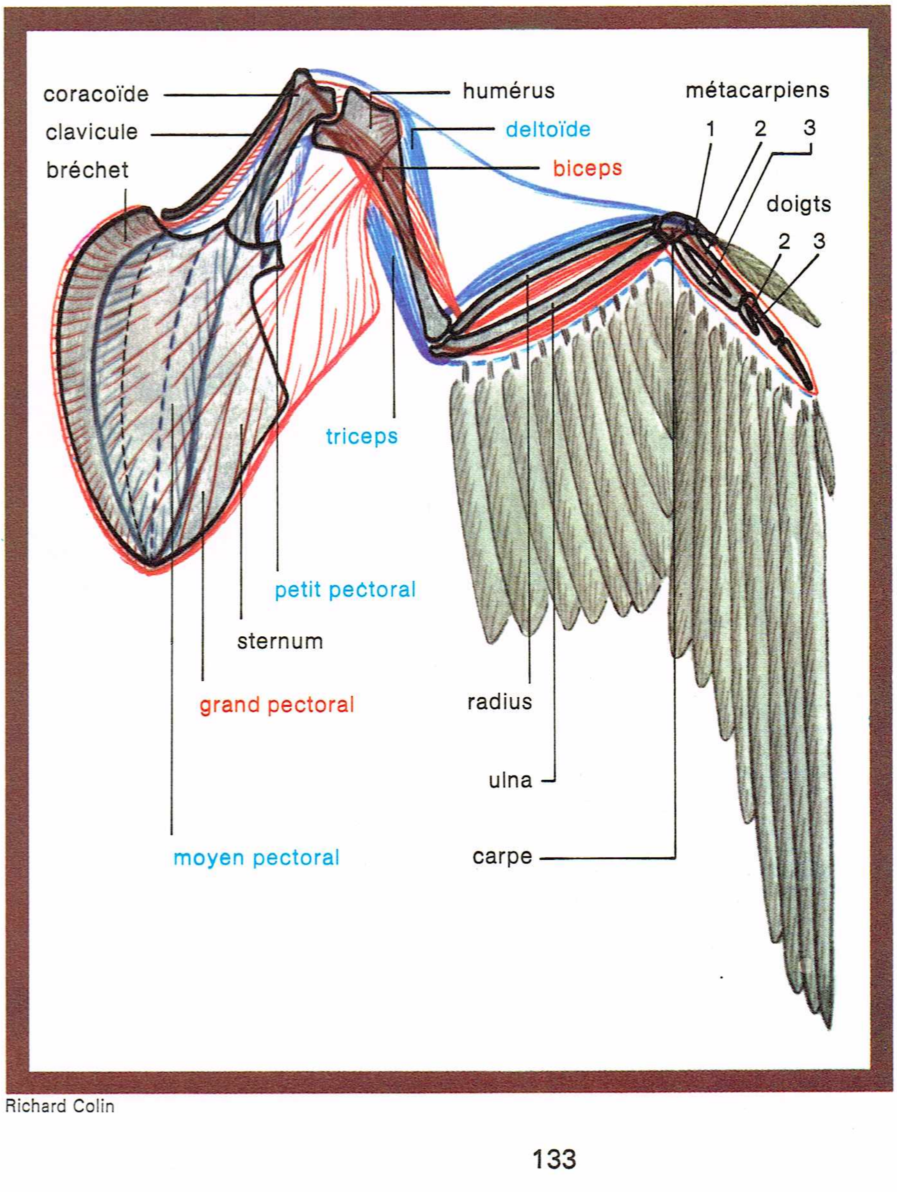

Richard Colin

au niveau du coude, croise antérieurement l'ulna et devient interne dans sa portion distale, en position de pronation amenant la paume vers le sol. Les Primates peuvent faire pivoter et décroiser le radius et l'ulna, amenant la paume vers le ciel, en position de supination. Le radius et le tibia deviennent prépondérants, ayant plus particulièrement à supporter le poids du corps; la partie proximale de l'ulna se prolonge par l'olécrane, creusé d'une cavité sigmoïde où s'articule l'humérus.

Le tarse des Mammifères s'écarte généralement plus que le carpe du schéma primitif; le calcanéum, prolongé par une tubérosité postérieure, glisse sous l'astragale. L'articulation du pied sur la jambe, qui passe entre le zeugopode et le basipode, se fait principalement entre le tibia et l'astragale.

Le nombre de doigts, typiquement 5 à chaque membre, est souvent réduit; en règle générale, le nombre de doigts des pattes postérieures, qui jouent un rôle prépondérant dans la propulsion, se réduit avant celui des pattes antérieures. La formule phalangienne est typiquement 2-3-3-3-3.

Chez les Mammifères, très diversifiés, les adaptations des membres en fonction du mode de vie sont fréquentes. Lorsque les animaux ne sortent pas de leur milieu terrestre, les adaptations sont relativement minimes et leurs étapes évolutives sont connues. Mais lorsque les Mammifères occupent des milieux inhabituels, aérien ou aquatique, les transformations sont plus spectaculaires et profondes et leur origine quasiment inconnue.

Évolutivement, les membres tendent à s'allonger et à se spécialiser. L'allongement, qui permet une allure plus rapide, se réalise par un relèvement de l'autopode. On distingue ainsi trois types de démarches : chez les Mammifères plantigrades, les ours et certains Insectivores, les doigts et les métapodiens reposent sur le sol; chez les digitigrades, les Carnivores Fissipèdes et de nombreux Rongeurs, les membres reposent sur les doigts, qui sont plus courts; chez les Onguligrades, typiquement les Ongulés, seules les dernières phalanges des doigts touchent le sol et s'entourent d'un sabot.

● *Adaptation à la course des membres des Ongulés*

La classification des Ongulés repose précisément sur la structure des pattes.

Chez les Artiodactyles, ou Paraxoniens, l'axe des membres passe entre les 3e et 4e doigts, et le nombre des doigts est pair. Les Suiformes (porc) conservent 4 doigts munis de sabots, les 2e et 5e, moins forts et rejetés en arrière, ne touchant le sol qu'en terrains marécageux. Il y a 4 métapodiens et l'ulna conserve son importance. Chez les Cervidés, les métapodiens III et IV sont soudés, des vestiges des métapodiens latéraux sont conservés ainsi que des 2e et 5e doigts, munis de petits sabots. Les Bovidés n'ont plus que deux doigts : les 3e et 4e et une trace des 2e et 5e; les 2 métapodiens sont soudés en un os canon; l'ulna et la fibula ont régressé et sont soudées respectivement au radius et au tibia. Chez les Giraffidés et les Camélidés, les doigts latéraux ont complètement disparu.

Chez les Périssodactyles, ou Mésaxoniens, l'axe des membres passe par le 3e doigt, qui devient prépondérant; la régression conduit généralement à un nombre impair de doigts (mais le tapir a 4 doigts à la patte antérieure). Les Équidés actuels ne conservent que le 3e doigt et un métapodien flanqué de 2 stylets, vestiges des métapodiens II et IV. L'ulna et la fibula ont disparu, tandis que le radius et le tibia sont forts et allongés. Concurremment, les condyles articulaires se transforment en trochlées, en forme de poulies, qui ne permettent que des mouvements dans le sens sagittal.

L'histoire des ancêtres des Périssodactyles, bien reconstituée par les paléontologistes depuis l'Éocène, illustre la régression évolutive des doigts latéraux.

● *Adaptation au saut*

Elle est marquée par un allongement du membre postérieur. Celui-ci peut se réaliser de plusieurs façons et dans des groupes très éloignés systématiquement les uns des autres. Chez les Marsupiaux de la famille du kangourou, il se produit un allongement des métatarsiens et un développement du 4e doigt, qui se termine par une griffe puissante. L'adaptation de la gerboise (Rongeur Myomorphe) est un peu plus poussée : le tibia et le péroné sont très allongés et soudés distalement; on observe un allongement du métatarse; les 3 métatarsiens centraux sont soudés en un os canon; seuls les 3 doigts médians sont fonctionnels. Les lapins ont des pattes postérieures longues et puissantes, avec des métatarsiens allongés qui, au repos, posent à plat sur le sol. Notons que cette conformation peut aussi être considérée comme une adaptation à la course, puisque ces animaux utilisent le saut comme moyen de propulsion rapide. Il en est de même, à un moindre degré, pour les Carnivores Fissipèdes qui, comme le guépard, peuvent atteindre la vitesse de 100 km/h en se déplaçant par bonds successifs.

● *Adaptation à la vie arboricole*

Les adaptations à ce type de vie peuvent être minimes, comme chez les écureuils et les sarigues, ou le paresseux qui vit suspendu aux branches la tête en bas grâce à ses doigts allongés terminés par des griffes très puissantes. Des modifications anatomiques plus poussées s'observent chez le galago (lémurien d'Afrique Noire) ainsi que chez les tarsiers (Primates primitifs des îles Indo-Malaises) dont le membre postérieur, utilisé pour grimper, se développe par allongement considérable du tarse (calcanéum et central). Chez les singes, dont les membres antérieurs servent à grimper, les clavicules sont développées en relation avec la possibilité d'extension des bras, lesquels sont longs et munis de 5 doigts avec pouce opposable.

Différentes structures de l'extrémité de la patte antérieure des Mammifères Ongulés

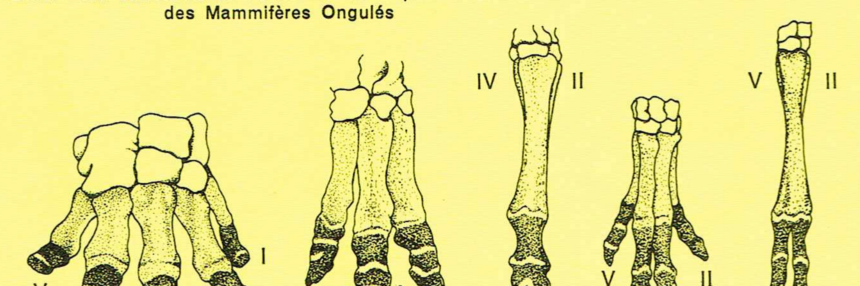

I.G.D.A.

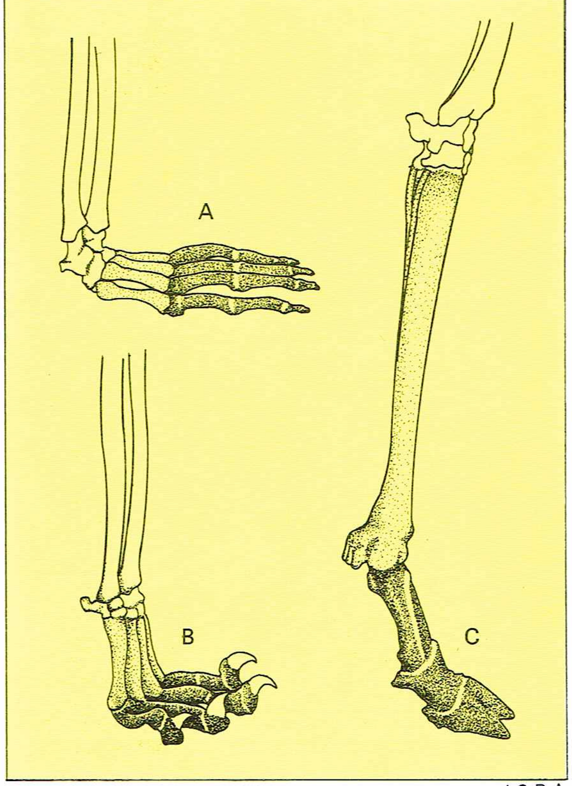

I.G.D.A.

Ci-dessus, extrémités A, pentadactyle; B, tridactyle; C, monodactyle; D, tétradactyle; E, bidactyle; les chiffres romains indiquent l'ordre des doigts ou les rudiments de métacarpiens. Ci-contre, trois positions d'appui au sol déterminant trois types de démarches; A, Mammifère plantigrade; B, digitigrade; C, onguligrade (doigts représentés en sombre).

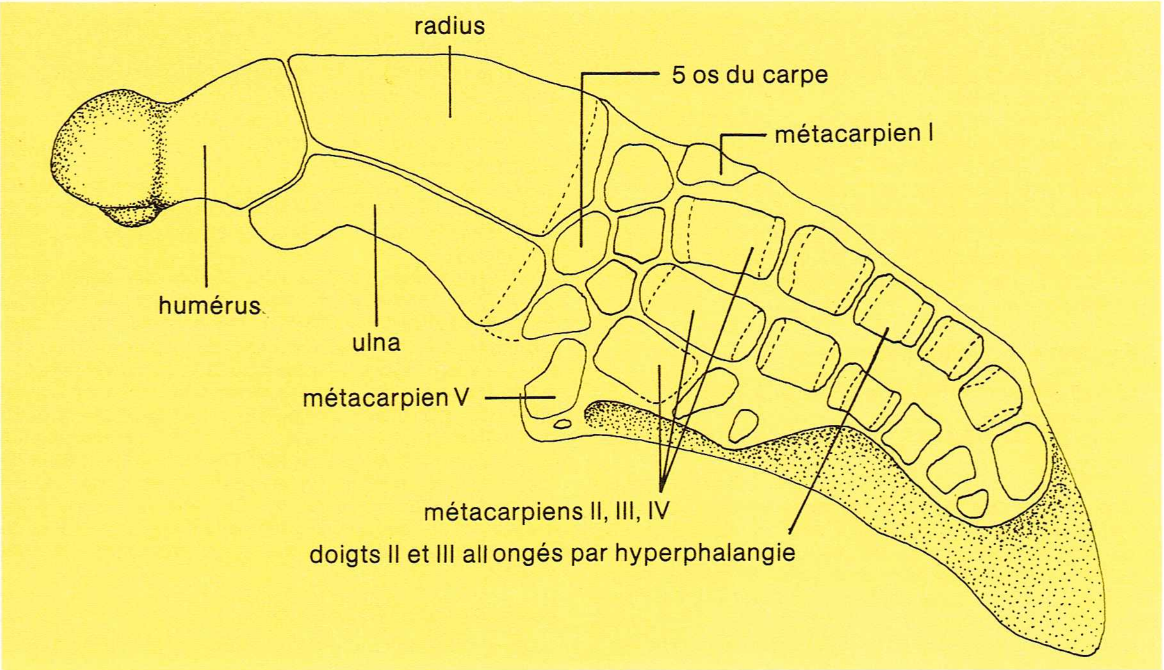

Richard Colin

◀ *Patte antérieure gauche de dauphin (Cétacé) vue par sa face externe.*

● *Adaptation à la bipédie*

On pourrait à nouveau citer la gerboise et les kangourous adaptés à la bipédie de forme sauteuse. Les vrais bipèdes, marcheurs, sont les singes anthropomorphes, mais surtout l'homme, chez lequel la position dressée est naturelle ; le bassin change d'orientation, les membres postérieurs deviennent rectilignes, la plantigradie est parfaite, les os du tarse, bien articulés, donnent une grande mobilité à la cheville ; en même temps, les mains, libérées de toute fonction locomotrice, sont disponibles pour de nombreuses activités nouvelles et perfectionnent leurs articulations.

● *Adaptation au fouissage*

Certains Mammifères mènent une vie entièrement souterraine et, creusant des galeries, font du fouissage un véritable mode de locomotion. L'exemple le mieux connu est la taupe, dont les modifications de la ceinture et du membre antérieur sont très orientées.

● *Adaptation au vol*

Plusieurs espèces de Mammifères peuvent accomplir des vols planés de courte durée à l'aide d'une membrane-parachute qui élargit les côtés du corps, mais sans entraîner de modifications importantes du squelette : le phalanger (Marsupial), l'écureuil volant (Rongeur), le galéopithèque (Dermoptère). Toutefois, seules les chauves-souris peuvent effectuer un vol battu, actif, leur permettant de tenir l'air pendant longtemps ; les modifications anatomiques sont alors fondamentales, le membre antérieur étant transformé en aile. Cette adaptation du squelette est à rapprocher de celle des Ptérosauriens, Reptiles fossiles du Secondaire dont le membre antérieur était aussi transformé en aile, mais par un processus différent.

● *Adaptation à la nage*

De nombreux Mammifères sont bons nageurs mais restent inféodés à la vie terrestre et ne présentent pas de modifications squelettiques. Les Pinnipèdes (phoques, otaries...), excellents nageurs, conservent encore la faculté de se mouvoir sur le sol ; leurs membres présentent une spécialisation avancée mais non exclusive. L'omoplate est grande, la clavicule absente, l'humérus court, le radius et le cubitus aplatis, serrés l'un contre l'autre sans croisement possible ; la main est transformée en palette pentadactyle, plus longue que les autres segments, peu mobile mais flexible ; le 1^er^ doigt est plus long, et les dernières phalanges sont prolongées par des ongles ou des tigelles cartilagineuses. Le bassin est étroit, le fémur, très court, est dirigé vers l'arrière ainsi que le zeugopode ; ces segments à peu près immobiles sont cachés dans le tronc ; le pied, long, en palette, présente la face plantaire en dehors et a les 1^er^ et 5^e^ orteils plus longs. Ce sont principalement ces palettes postérieures qui assurent la propulsion des phoques.

Par contre, les Siréniens et les Cétacés mènent une vie entièrement aquatique et sont incapables de vivre à terre. L'ensemble de leur squelette, très spécialisé, participe à cette adaptation ; en fait, les membres servent surtout à l'équilibration et à la direction et participent généralement peu à la propulsion. Chez les Cétacés, la spécialisation est poussée à l'extrême. Au membre antérieur, l'omoplate est très aplatie ; la seule articulation fonctionnelle est celle de l'épaule ; l'humérus, le radius et le cubitus sont très courts et paraissent annexés à la palette ; celle-ci est constituée par les os du carpe, les métacarpiens et les phalanges, tous courts, disposés en mosaïque, surtout chez les Mysticètes comme le dauphin, et immobilisés dans un même plan par des liaisons cartilagineuses ; la main est allongée par hyperphalangie et réduction fré-

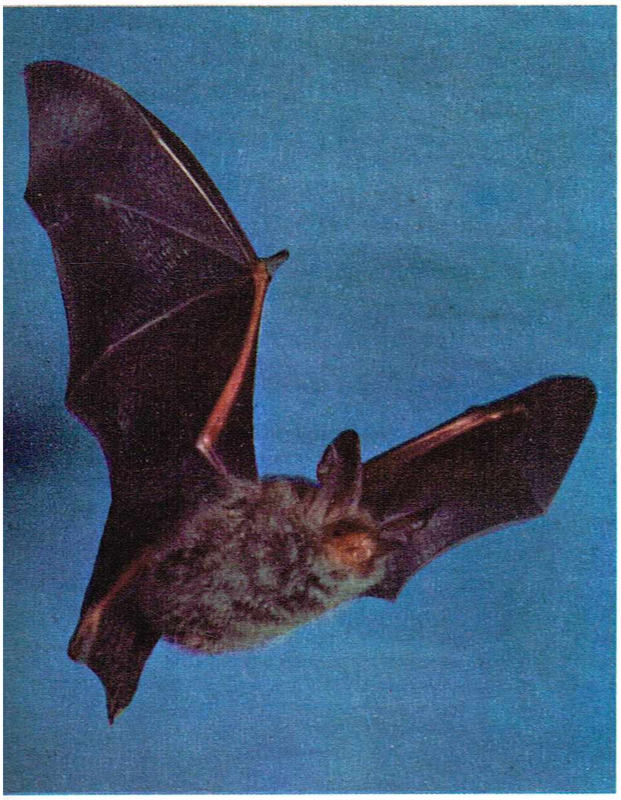

E. Hosking

◀ *Un* **Myotis bechsteini** *en vol ; chez les Mammifères, seules les chauves-souris peuvent effectuer un vol battu, actif, leur permettant de tenir l'air longtemps.*

quente des doigts latéraux ; le second doigt, le plus long, peut compter jusqu'à 13 ou 14 phalanges chez les baleines. Les membres postérieurs ont disparu, et un rudiment de ceinture pelvienne peut subsister ; c'est la queue qui assure la propulsion.

Si la convergence de forme est manifeste entre ces Mammifères marins et les Poissons pélagiques, comme le requin et le thon, c'est avec les Reptiles du Secondaire adaptés à la vie aquatique qu'on peut observer une convergence de structure des membres : 5 doigts allongés par multiplication des phalanges chez les plésiosaures, hyperphalangie (jusqu'à 30 phalanges par doigt) et hyperdactylie (1 ou 2 doigts surnuméraires) chez les ichtyosaures.

Squelette céphalique

Le squelette céphalique se divise anatomiquement en deux constituants :
— le *neurocrâne,* édifié autour du cerveau et des vésicules sensorielles ;
— le *splanchnocrâne,* ou squelette viscéral organisé autour des cavités buccale et pharyngienne, constitué à l'origine par plusieurs paires d'arcs développés contre la paroi du pharynx, entre les poches viscérales.

Le neurocrâne et le splanchnocrâne ne sont distincts que chez les Cyclostomes et les Sélaciens. Pour les autres Poissons, les relations se compliquent déjà, et chez les Tétrapodes les deux constituants anatomiques tendent à s'associer, des pièces du splanchnocrâne s'intégrant au neurocrâne. D'autre part, le splanchnocrâne régresse au cours de l'évolution des Vertébrés, en particulier lorsque le système branchial disparaît.

Au point de vue histologique, le crâne a une constitution complexe : l'organogenèse débute par un stade membraneux ; la chondrification du mésenchyme édifie le chondrocrâne (crâne cartilagineux), qui est complet et définitif chez les Chondrichthyens et toujours incomplet chez les autres Vertébrés. L'étape suivante, qui aboutit à la construction du crâne osseux, se fait par deux voies : l'une est l'ossification enchondrale plus ou moins complète du modèle cartilagineux, qui édifie l'ostéocrâne enchondral (le neurocrâne enchondral ou endocrâne, et le splanchnocrâne enchondral) ; l'autre est une ossification dermique édifiant des éléments exosquelettiques (l'ostéocrâne dermique) qui se soudent ou se superposent aux os d'origine enchondrale.

On constate, en suivant l'évolution des Vertébrés, que l'ostéocrâne enchondral occupe une place de moins en moins importante ; par contre, les os dermiques s'agrandissent, se soudent aux os enchondraux ou les remplacent et constituent une part très importante du crâne.

Structure du chondrocrâne chez les Sélaciens

Les seuls Vertébrés à posséder un chondrocrâne complet et définitif sont les Chondrichthyens ; celui des Sélaciens peut servir de point de départ à l'étude des autres crânes.

— Le *neurocrâne* des Sélaciens est une boîte cartilagineuse calcifiée, percée en arrière du foramen magnum (pour le passage de la moelle épinière) et de foramens (pour le passage des nerfs et vaisseaux sanguins). On y distingue quatre régions d'avant en arrière : ethmoïdienne, orbito-temporale, otique et occipitale, ces deux dernières étant confondues en une région otico-occipitale. La région ethmoïdienne est prolongée en avant par un rostre.

— Le *splanchnocrâne* est constitué par 7 arcs viscéraux qui entourent les cavités buccale et pharyngienne et encadrent les fentes viscérales. Les deux premiers arcs sont modifiés.

Le 1er arc viscéral, l'arc mandibulaire, est transformé en mâchoires ; il se partage en cartilage ptérygo (palato)-carré, ou mâchoire supérieure, et cartilage de Meckel, ou mâchoire inférieure articulée sur la supérieure dans la région du carré. Chaque ptérygo-carré est relié à la région orbito-temporale du neurocrâne par un processus orbitaire et à la région otique par la portion dorsale du 2e arc. Le 2e arc viscéral, l'arc hyoïdien, se partage en deux segments : le segment dorsal, l'hyomandibulaire, suspenseur de la mâchoire, est attaché par des ligaments d'une part à la capsule otique, d'autre part au ptérygo-carré près de l'articulation du cartilage Meckel ; le segment ventral, le cérato-hyal, est uni à son symétrique par un basihyal impair. Entre l'arc mandibulaire et l'arc hyoïdien s'ouvre une première fente viscérale réduite : le spiracle, ou évent.

Les arcs viscéraux III à VII constituent les arcs branchiaux, sans liaison avec le crâne, supports des septes branchiaux, situés en arrière des fentes branchiales correspondantes. Un arc typique se compose de quatre segments dessinant un Σ : un pharyngo-, un épi- un cérato-, et un hypobranchial ; des basibranchiaux impairs et moins nombreux que les arcs unissent les moitiés droite et gauche ; le dernier arc est réduit à un épi- et à un cératobranchial.

Les mâchoires des Sélaciens portent des dents toutes semblables ; celles-ci ne sont pas fixées au squelette mais ancrées dans le derme par une plaque basale ; leur formation est semblable à celle des écailles placoïdes. La forme des dents, très variable d'une espèce à l'autre, est en rapport avec le régime alimentaire. Ainsi, on trouve : des dents triangulaires et pointues avec des bords denticulés chez les requins vrais, prédateurs carnivores ; des dents aplaties, petites, disposées comme un pavage chez certaines raies benthiques qui broient les Échinodermes ou les Mollusques ; quelle que soit leur forme, elles sont disposées en rangées parallèles qui se substituent les unes aux autres au fur et à mesure que les rangées externes s'usent.

Évolution du chondrocrâne

Chez tous les autres Vertébrés, le chondrocrâne ne représente qu'un stade de développement du crâne.

— Le *neurocrâne* se réduit à une cage largement fenestrée, surtout dans sa partie dorsale ; la base comporte toujours les paracordaux et les trabécules ; les éléments essentiels de la paroi sont le cartilage orbitaire et la capsule otique ; enfin, vers l'arrière, la plaque basale s'allonge par intégration d'un nombre variable de segments vertébraux.

— Le *splanchnocrâne* a une histoire évolutive intéressante. Au stade Agnathe primitif (Agnathes fossiles cuirassés, ou Ostracodermes, de l'ère primaire), les arcs viscéraux étaient tous semblables, soutenant les poches branchiales. La correspondance entre ces arcs non spécialisés et les arcs modifiés de la série Gnathostome peut être établie par la détermination des nerfs affectés à chacun de ces derniers. C'est ainsi que des études approfondies du bouclier céphalique de certains Ostracodermes, les Céphalaspides Ostéostracés du Silurien (travaux de Stensio), montrent qu'il devait exister, en avant du premier arc mandibulaire des Gnathostomes, un arc dit « prémandibulaire » séparé du mandibulaire par une poche branchiale préspiraculaire. Les Cyclostomes actuels ont, en arrière d'un neurocrâne rudimentaire, un squelette branchial développé en « corbeille branchiale » ; celle-ci est faite généralement de 7 arcs en zigzag unis par des commissures externes par rapport aux branchies et difficiles à homologuer avec les arcs des Gnathostomes.

Au stade Gnathostome, le premier arc se transforme en mâchoires ; on connaît un stade primitif avec les Acanthodiens, Poissons fossiles archaïques du Dévonien, où le 2e arc viscéral demeure indépendant de l'arc mandibulaire et semblable aux arcs branchiaux (disposition aphétohyoïdienne). L'arc mandibulaire s'accroche au neurocrâne par deux processus, orbitaire et otique, du ptérygo-carré, réalisant un type de suspension autodiastylique.

Puis, chez les Sélaciens, le 2e arc, hyoïdien, se modifie, sa portion supérieure hyomandibulaire servant de support aux mâchoires. Chez les Sélaciens primitifs, la suspension hyoïdienne ne joue qu'un rôle secondaire, et l'accrochage du ptérygo-carré au crâne se fait aussi par les deux processus : c'est le type de *suspension amphistylique.* Chez les Sélaciens évolués, le processus otique disparaît, l'hyomandibulaire devenant l'élément essentiel : c'est le type de *suspension hyostylique* des mâchoires.

Chez les Holocéphales, l'arc hyoïdien est modifié, mais indépendant de l'arc mandibulaire ; le ptérygo-carré est soudé au crâne : c'est le type de *suspension autosystylique.*

Chez les Poissons Ostéichthyens et chez les Tétrapodes, l'arc mandibulaire ne constitue plus la mâchoire fonctionnelle. Le palato-ptérygo-carré est lié au crâne de façon hyostylique chez les Téléostéens, autosystylique chez les embryons d'Amphibiens, autodiastylique chez

		SÉLACIENS	TÉLÉOSTÉENS	REPTILES	MAMMIFÈRES
NEUROCRANE		boîte cartilagineuse	ENDOCRANE: ethmoïdes pleurosphénoïde otiques occipitaux	ENDOCRANE: (pleurosphénoïde) otiques occipitaux basisphénoïde	ENDOCRANE: présphénoïde (mésethmoïde) périotique occipitaux basisphénoïde orbito-sphénoïdes
			OS DERMIQUES nasal, lacrymal, frontal orbitaires, pariétal vomer, parasphénoïde, basisphénoïde	TOIT DERMIQUE: nasal, lacrymal, frontaux orbitaires, pariétal squamosal, jugal, quadrato-jugal, prémaxillaire, maxillaire	TOIT CRANIEN: nasal, lacrymal, frontal pariétal, jugal, squamosal
			mâchoire supérieure secondaire (prémaxillaire, maxillaire)		
SPLANCHNOCRANE	ARC I mandibulaire	palato-ptérygo-carré (mâchoire supérieure)	carré, métaptérygoïde autopalatin dermopalatin ptérygoïdes PALAIS	épiptérygoïde carré PALAIS PRIMAIRE: vomer parasphénoïde palatin / ptérygoïdes: PALAIS SECONDAIRE	alisphénoïde enclume vomer: PALAIS PRIMAIRE prémaxillaire maxillaire palatin: PALAIS SECONDAIRE
		cartilage de Meckel (mâchoire inférieure)	articulaire dentaire angulaire MANDIBULE	MANDIBULE: articulaire angulaire dentaire coronoïde, splénial	marteau ectotympanique dentaire MANDIBULE
	ARC II hyoïde	hyomandibulaire cérato-hypo-basihyal	hyomandibulaire symplectique cérato-hypo-basihyal	columelle tympanique	étrier
	ARCS III à VII branchiaux	pharyngo-épibranchiaux cérato-hypo-basibranchiaux	pharyngo-épibranchiaux cérato-hypo-basibranchiaux	appareil hyoïdien	hyoïde, cartilages du larynx

Os enchondraux
Os dermiques
Structures mixtes
Oreille moyenne

▲ ***Tableau récapitulatif de l'évolution du squelette céphalique.***

les embryons d'Amniotes. Il régresse et quelques éléments s'intégreront à un complexe palatin, mais sa portion postérieure, le *carré,* servira longtemps à l'articulation de la mâchoire inférieure. Chez les Poissons osseux, les autres arcs viscéraux conservent leur fonction. Par contre, chez les Tétrapodes, l'hyomandibulaire change complètement de rôle, s'intégrant dans l'oreille moyenne; les arcs branchiaux régressent; le pharynx perd son importance.

Structure et évolution de l'ostéocrâne

L'ostéocrâne représente le crâne définitif des Gnathostomes autres que les Chondrichthyens; il est formé en partie par ossification enchondrale plus ou moins complète du chondrocrâne transitoire et incomplet, en partie par ossification directe du derme. Souvent complexe, son étude est difficile.

Les Téléostéens

Les os dermiques peuvent soit s'encastrer dans les os enchondraux, soit se superposer à eux ou au cartilage, soit encore rester noyés dans le derme. Les articulations entre différents os se font souvent par l'intermédiaire de membranes conjonctives et de muscles (ce qui explique qu'ils se détachent facilement lorsque l'on fait cuire la tête d'un Poisson). Certains os dermiques, les os à canaux, abritent les diverses sections du système sensoriel latéral céphalique; les relations, très constantes, entre le tracé des canaux sensoriels et les os traversés permettent l'identification des os. Le neurocrâne et le splanchnocrâne restent encore distincts.

— Dans le *neurocrâne,* la portion antérieure ethmoïdienne, une partie de la paroi orbitaire, la région otique et la région occipitale sont d'origine enchondrale et constituent l'endocrâne; une grande partie du plancher et du toit est d'origine dermique.

— Dans le *splanchnocrâne,* les arcs hyoïdien et branchiaux sont d'origine enchondrale et conservent, pour l'essentiel, les mêmes caractéristiques que chez les Sélaciens; signalons seulement que l'hyomandibulaire, outre son rôle dans la suspension de l'arc mandibulaire, supporte les os operculaires, dermiques, qui protègent la chambre branchiale.

Le 1er arc viscéral par contre est modifié en ce qui concerne sa portion supérieure : des ossifications du palato-ptérygo-carré s'associent avec des os dermiques formés dans la peau du plafond buccal pour constituer une ébauche de palais. Cependant, le carré conserve son caractère mandibulaire puisque d'une part il s'articule sur l'hyomandibulaire et que, d'autre part, l'extrémité postérieure ossifiée du cartilage de Meckel (articulaire) s'articule sur lui. La mâchoire supérieure fonctionnelle est constituée par deux os dermiques (prémaxillaire et maxillaire) reliés seulement par des ligaments à la région ethmoïdienne du neurocrâne. La portion inférieure de l'arc mandibulaire, recouverte ou partiellement remplacée par des os dermiques, constitue la mâchoire inférieure.

Les dents des Téléostéens sont généralement soudées au squelette buccal; elles sont situées non seulement sur les mâchoires mais aussi, chez certains Poissons, sur des os du complexe palatin, de la base du neurocrâne ou sur

OS DU SQUELETTE CÉPHALIQUE DES TÉTRAPODES

NEUROCRANE ENCHONDRAL	région ethmoïdienne : SPHÉNETHMOIDE (ou PRÉSPHÉNOIDE) région orbito-temporale : BASIPHÉNOIDE (base du crâne) région otique : PROOTIQUES, OPISTHOTIQUES (entourant l'oreille interne) région occipitale : SUPRA-OCCIPITAL, OCCIPITAUX LATÉRAUX, BASI-OCCIPITAL (autour du foramen magnum)
TOIT DERMIQUE	rangée supérieure : NASAL, FRONTAL, PARIÉTAL rangée moyenne : LACRYMAL, PRÉ et POST-FRONTAL, POST-ORBITAIRE, SQUAMOSAL rangée inférieure : PRÉMAXILLAIRE, MAXILLAIRE, JUGAL, QUADRATO-JUGAL
COMPLEXE PALATIN	ossification enchondrale du palato-ptérygo-carré : CARRÉ, ÉPIPTÉRYGOIDE ossification dermique du palais : PARASPHÉNOIDE (impair) VOMER, PALATIN, PTÉRYGOIDE, ECTOPTÉRYGOIDE
MANDIBULE	ossification du cartilage de Meckel : ARTICULAIRE ossification dermique : DENTAIRE, CORONOIDE, SPÉNIAL, ANGULAIRE, SUPRA-ANGULAIRE
TRANSFORMATION DES ARCS HYOIDIEN ET BRANCHIAUX	portion dorsale de l'arc hyoïdien : COLUMELLE appareil hyo-branchial — portion ventrale de l'arc hyoïdien et 1er arc branchial → support de la langue — arcs branchiaux postérieurs → cartilages du larynx.

▲ ***Tableau récapitulatif des os du squelette céphalique des Tétrapodes.***

des os branchiaux (dents pharyngiennes) ; leur nombre et leur forme, variés, sont adaptés au régime alimentaire. Parmi les nombreuses spécialisations, citons la dentition hétérodonte des Sparidés, telle la daurade, mangeurs d'oursins et de coquillages, avec, à l'avant, des dents incisiformes coupantes et, latéralement, plusieurs rangées de « molaires » arrondies.

Le passage des Poissons aux Tétrapodes

Les Téléostéens ne représentent pas une étape évolutive vers les Tétrapodes. Les termes de passage entre Poissons et Tétrapodes sont à rechercher pour le crâne, comme pour les autres parties du squelette, chez les Crossoptérygiens Rhipidistiens, seuls Poissons qui possédassent des choanes ou narines internes. Cependant, les intermédiaires entre ces Crossoptérygiens et les Stégocéphales, ancêtres des Tétrapodes, ne sont pas connus.

L'évolution du crâne chez les Stégocéphales fossiles est extrêmement difficile à suivre. Les principaux traits à noter sont la régression de l'endosquelette, compensée par l'agrandissement et l'épaississement du crâne dermique, et l'immobilisation progressive du palais et de la mâchoire supérieure sur le neurocrâne. On peut constater la tendance évolutive de certaines formes, les Labyrinthodontes, vers les Amphibiens, par aplatissement général du crâne et fenestration du revêtement palatin, tandis que d'autres formes, les Cotylosauriens, manifestent des caractères reptiliens : le crâne élevé, le museau bien dégagé.

Structure et évolution du crâne chez les Tétrapodes actuels

▶ ***Page ci-contre, en bas, crâne d'un Amphibien* (Rana sp.) *: pm, prémaxillaire; vo, vomer; na, nasal; ma, maxillaire; pt, ptérygoïde; sq, squamosal; po, prootique; fp, fronto-pariétal; sp, sphenethmoïde; en bas, la mandibule.***

L'évolution du crâne des Tétrapodes peut s'expliquer en grande partie par deux processus : son adaptation aux changements qu'implique la vie aérienne (la transformation de l'appareil respiratoire, le développement des organes sensoriels, olfaction et audition étant appelées à jouer un rôle très important) et l'augmentation de volume de l'encéphale.

— Le *neurocrâne :* sa portion d'origine enchondrale, constituant l'*endocrâne,* est réduite mais forme toujours la base, la paroi postérieure et une partie des parois latérales de la portion du crâne qui entoure l'encéphale, ainsi que sa cloison antérieure, plus ou moins complexe et qui peut participer au septum nasal. La portion dermique du neurocrâne prend beaucoup d'importance : d'une part, elle constitue la paroi dorsale du crâne au-dessus de l'encéphale en se soudant aux pièces de l'endocrâne ; d'autre part, elle s'allonge en avant pour abriter les fosses nasales, dont le développement peut être considérable. Tous ces os dermiques, plus ou moins nombreux, se soudent entre eux et avec la mâchoire supérieure secondaire dermique pour former le *toit dermique.*

— Le *splanchnocrâne* perd son individualité et sa portion enchondrale est très réduite. Sa régression et sa transformation, dont les dispositions nouvelles seront examinées plus loin, s'accentueront chez les Mammifères. Les caractères décrits ci-dessous sont valables pour les Tétrapodes non mammaliens.

Du premier arc viscéral primitif ne subsistent que le carré et un épiptérygoïde (tige reposant à l'origine sur le ptérygoïde) pour la portion supérieure, et l'articulaire (ossification de l'extrémité postérieure du cartilage de Meckel) pour la portion inférieure. Le carré conserve son importance : il établit la jonction entre le toit dermique et le palais et supporte l'articulation de la mâchoire inférieure. La mâchoire supérieure, dermique, est soudée au crâne. La mâchoire inférieure, ou *mandibule,* est aussi presque entièrement dermique ; l'articulation se fait entre le carré et l'articulaire.

Les os dermiques formés dans le plafond buccal s'unissent pour former un *palais primaire,* qui se soude en arrière au carré (éventuellement à l'épiptérygoïde) et à la base de l'endocrâne, en avant au prémaxillaire et au maxillaire. Le palais sert de plancher aux cavités nasales ; il est perforé par les choanes, ou narines internes, qui font communiquer les cavités nasale et buccale permettant la respiration aérienne.

La transformation des arcs postmandibulaires est en relation directe avec la disparition des branchies et avec l'apparition de l'oreille moyenne. L'arc hyoïdien n'a plus à supporter les mâchoires ; sa moitié dorsale (hyomandibulaire des Poissons) devient la columelle, ou stapes ; celle-ci est destinée à transmettre les vibrations sonores dans l'oreille moyenne, appuyée sur la région otique du crâne d'un côté, sur le tympan de l'autre. Sa moitié

ventrale ainsi qu'une partie des arcs branchiaux forment l'*appareil hyoïdien,* ou hyobranchial, qui soutient la langue et le larynx.

Le tableau ci-contre indique les noms des principaux os pour chacun des constituants du crâne des Tétrapodes.

Les Amphibiens. Le squelette céphalique est très régressé par rapport aux formes fossiles (Labyrinthodontes), surtout par réduction du nombre des os dermiques. L'appareil hyobranchial est développé chez les larves : il existe 3 ou 4 arcs branchiaux réduits à leur portion ventrale, en plus de la partie inférieure de l'arc hyoïdien, lequel régresse à la métamorphose en une plaque (corps de l'hyoïde), support de la langue et du plancher buccal.

Les Reptiles. La portion du crâne qui abrite l'encéphale est très réduite par rapport à l'ensemble du crâne. Le toit dermique est, par contre, très développé; il recouvre l'endocrâne mais lui est nettement extérieur latéralement, et sa portion préorbitaire s'allonge souvent considérablement (par exemple, chez les crocodiles). A l'origine, les os de la région temporale sont jointifs et forment une paroi qui est séparée de l'endocrâne par la cavité temporale occupée par les muscles masticateurs. L'étude de la paroi temporale est intéressante car c'est sur sa structure qu'est fondée la classification des Reptiles : l'écartement ou la disparition de certains os détermine la formation de fenêtres, ou fosses temporales, qui livrent passage aux muscles, la paroi se réduisant à des arcs, ou barres (cf. classification des Reptiles).

Au palais primaire peut s'ajouter ventralement un palais secondaire, par reploiement des os de la mâchoire et de certains os du palais primaire; ce phénomène, ébauché chez les Chéloniens, est poussé à l'extrême chez les Crocodiliens.

Le carré, soudé au neurocrâne chez les Chéloniens, devient mobile chez les Lacertiliens et surtout chez les Ophidiens, où ses liaisons avec le crâne et les os du palais sont allégées. Cette disposition prend toute son importance chez les vipères : lorsque leur bouche s'ouvre, les maxillaires munis de crochets se redressent sous la poussée du carré, des ptérygoïdes et du palatin, actionnés par des muscles puissants.

La mandibule comporte un maximum d'os dermiques. La columelle est ossifiée en une seule pièce et l'appareil hyoïdien réduit.

Les dents des Reptiles sont de différents types au point de vue de leur implantation : elles sont soudées à la mâchoire sur le bord de l'os (dents acrodontes) ou sur sa face interne (dents pleurodontes) chez les Lacertiliens, implantées dans des alvéoles (dents thécodontes) chez les crocodiles. Les tortues n'ont pas de dents, mais leurs mâchoires ont un bord tranchant et sont recouvertes d'un bec corné.

Les Oiseaux. La cavité crânienne s'agrandit en rapport avec le développement de l'encéphale; les os étant minces et spongieux, le crâne est allégé. L'endocrâne, réduit, est refoulé ventralement par la croissance du toit dermique en forme de voûte, et le foramen magnum se trouve déplacé vers la face ventrale, ce qui facilite la station bipède.

Les Mammifères. Les Mammifères dérivent de la lignée reptilienne à crâne de type synapside, caractérisé par la présence d'une seule fenêtre temporale en position inférieure. Au cours de l'évolution, cette fosse temporale s'agrandit, s'ouvre vers le haut et communique avec l'orbite par disparition de l'arc postorbitaire. Le développement de l'encéphale entraîne un agrandissement de la partie du crâne qui l'entoure et celle-ci devient, par fusion d'os de différentes origines, une boîte crânienne totalement ossifiée et fermée; il y a disparition de certains os reptiliens mais apparition d'os nouveaux. L'encéphale occupe tout le volume de la boîte, y laissant son empreinte. La partie antérieure du crâne, qui abrite les cavités nasales, constitue la face.

L'endocrâne est quelque peu modifié : les occipitaux forment une plaque à peu près verticale; ils encadrent un foramen magnum en position basse et portent deux condyles.

Le toit et les parois de la boîte crânienne ainsi que la face sont constitués par les os du toit dermique (moins nombreux que chez les Reptiles), auxquels s'annexent des os de différentes origines. Ce toit crânien est caractérisé : par sa fosse temporale limitée extérieurement par l'arcade zygomatique (jugal et prolongement du squamosal); la relation entre fosse temporale et orbite varie avec l'évolution; par des crêtes sagittale et occipitale, plus ou moins développées, servant à l'attache des muscles masticateurs.

La face est plus ou moins allongée; les prémaxillaires et maxillaires qui constituent la mâchoire supérieure portent des dents; les narines externes s'ouvrent ensemble à l'avant. La cavité glénoïde d'articulation de la mandibule, creusée à la partie ventrale du squamosal, a des formes diverses en rapport avec la façon de mâcher des animaux : elle est en forme de gouttière transversale permettant seulement les mouvements verticaux chez les Carnivores, en rainure allongée permettant seulement un déplacement

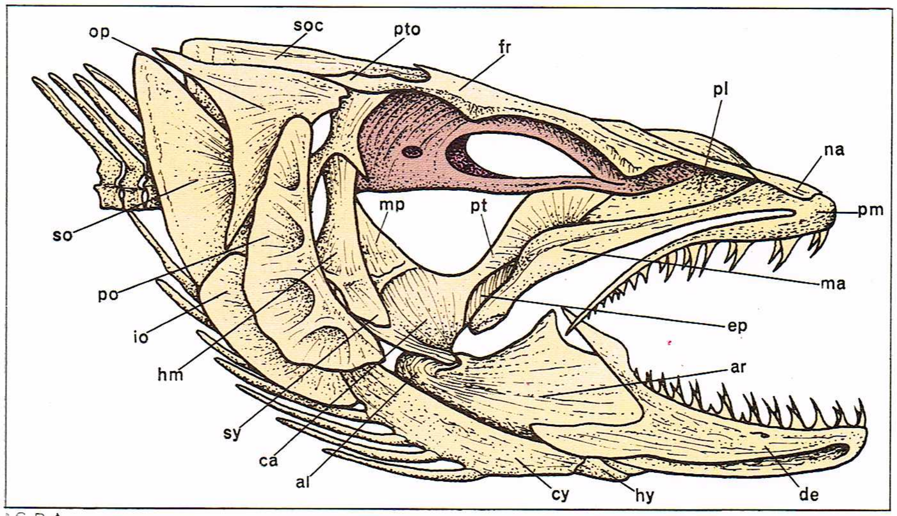

I.G.D.A.

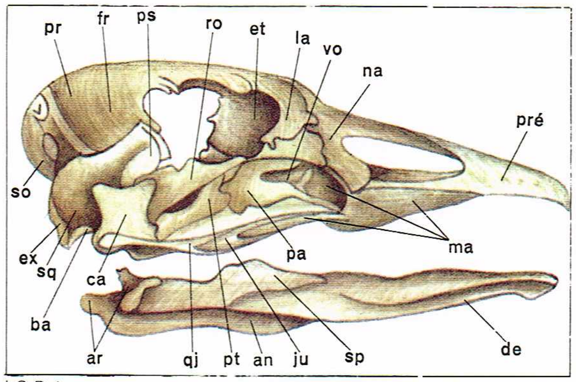

I.G.D.A.

◄▲ *Ci-dessus, squelette céphalique d'un Téléostéen* (Merluccius sp.) [*les os orbitaires ont été enlevés*] : *op, operculaire; soc, supra-occipital; pto, ptérotique; fr, frontal; pl, palatin; na, nasal; pm, prémaxillaire; ma, maxillaire; ep, ectoptérygoïde; ar, articulaire; de, dentaire; pt, entoptérygoïde; mp, métaptérygoïde; hy, hypohyal; cy, cératohyal; al, angulaire; ca, carré; sy, symplectique; hm, hyomandibulaire; io, interoperculaire; po, préoperculaire; so, sous-operculaire. Ci-contre, squelette céphalique d'un Oiseau; pr, pariétal; fr, frontal; ps, pleurosphénoïde; ro, rostre du basisphénoïde; et, ethmoïde; la, lacrymal; vo, vomer; na, nasal; pré, prémaxillaire; so, supraoccipital; ex, exoccipital; sq, squamosal; ba, basisphénoïde; ca, carré; ar, articulaire; qj, quadratojugal; pt, ptérygoïde; an, angulaire; ju, jugal; sp, supra-angulaire; de, dentaire; pa, palatin; ma, maxillaire.*

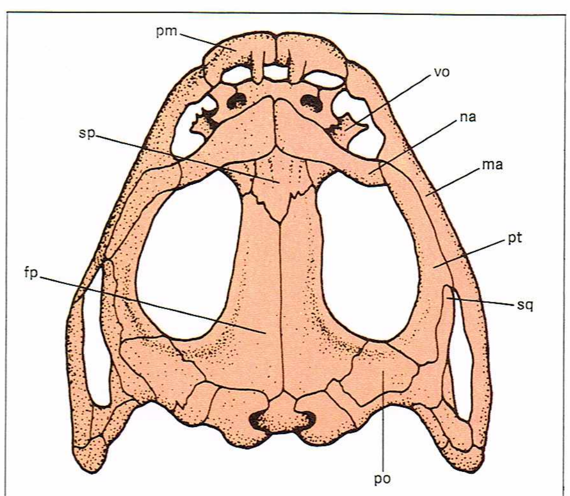

I.G.D.A.

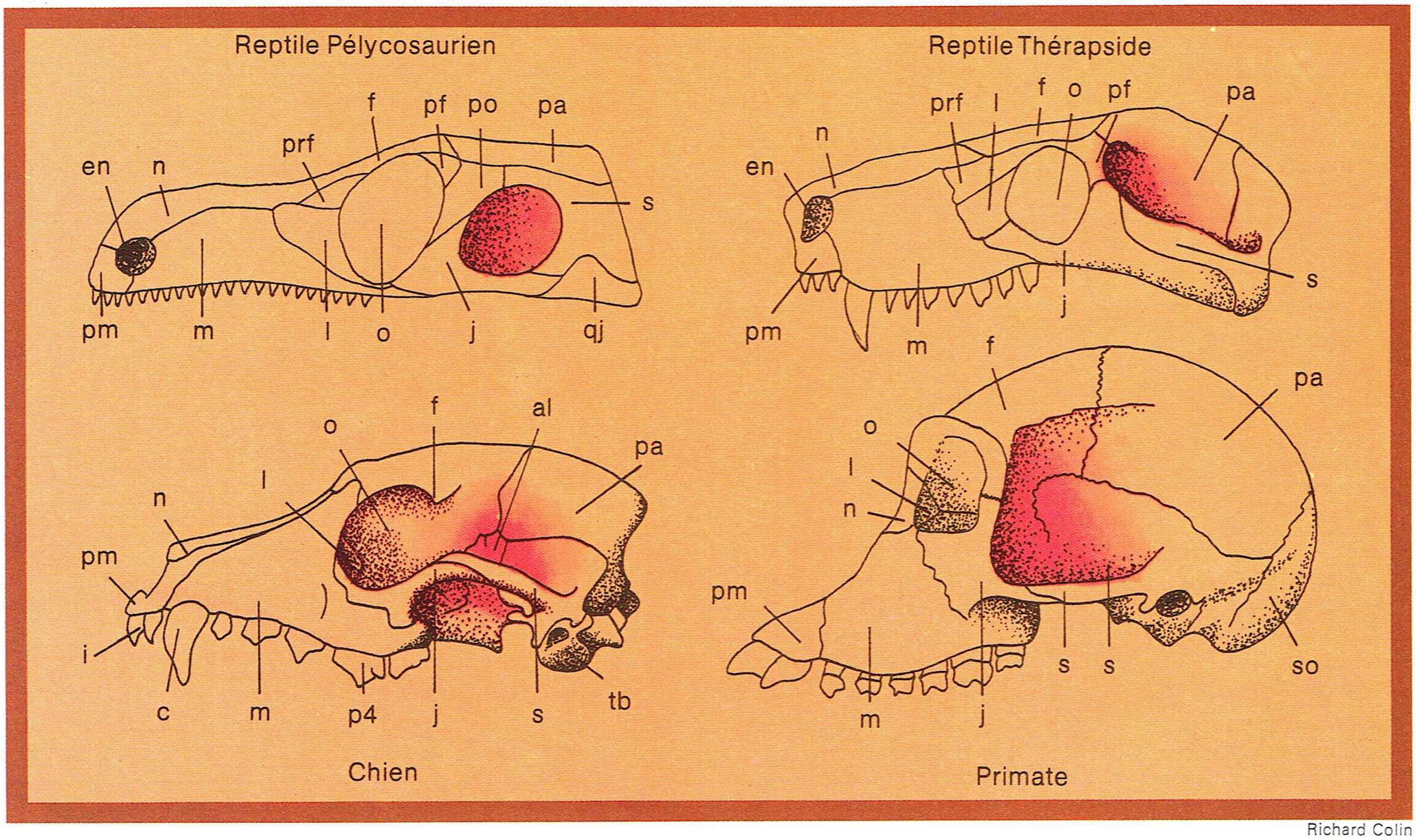

Richard Colin

▲ *Représentation schématique de la disposition synapside; pm, prémaxillaire; ma, maxillaire; na, nasal; l, lacrymal, prf, préfrontal; f, frontal; pf, postfrontal; po, postorbitaire; pa, pariétal; s, squamosal; j, jugal; qj, quadratojugal; en, narine externe; o, orbite; so, supraoccipital; al, alisphénoïde; tb, bulle tympanique; p_4, 4e prémolaire; à noter les différentes positions de la fosse temporale.*

▶ *Chaîne des osselets de l'oreille interne; ma, marteau : plma, processus antérieur latéral du marteau; pama, processus antérieur du marteau; mna, manubrium du marteau; art, articulation marteau-enclume; en, enclume; pcen, processus court de l'enclume; plen, processus long de l'enclume; aee, articulations enclume-étrier; et, étrier; ppet, processus postérieur de l'étrier; paet, processus antérieur de l'étrier; bet, vase de l'étrier.*

▶ *Crâne de Naran (Reptile Lacertilien); vue de profil.*

antéro-postérieur chez les Rongeurs, assez plate chez les Ruminants qui déplacent leur mandibule transversalement.

Le palais primaire est réduit au vomer, qui sépare les deux cavités nasales, à une partie des palatins et à des ptérygoïdes régressés. Un palais secondaire (véritable plafond buccal) s'est formé à partir des prémaxillaires, maxillaires et palatins; ce palais osseux est prolongé en arrière par un palais membraneux; la mastication peut donc s'effectuer sans gêner la respiration. Dans les fosses nasales, des os turbinaux ou cornets du nez se développent : ce sont des lamelles osseuses enroulées recouvertes d'épithélium respiratoire.

La mandibule est formée d'un seul os dermique, le dentaire, qui émet des processus et s'articule par un condyle dans la cavité glénoïde du squamosal. L'évolution de la mâchoire peut être suivie sur les formes fossiles, des Reptiles aux Mammifères : l'articulation reptilienne, entre le carré et l'articulaire, fait place progressivement à l'articulation mammalienne entre le squamosal et le dentaire; certains Reptiles mammaliens *(Diarthrognathus)* possédaient la double articulation. Une partie des os ainsi disparus de la mâchoire passent au service de l'oreille moyenne.

Cette dernière, perfectionnée, représente un aboutissement évolutif. Elle est constituée par une chaîne de trois osselets : le marteau, l'enclume, l'étrier. L'étrier correspond à la columelle des Reptiles; les autres os peuvent être homologués, selon la théorie de Reichert-Gaupp, à des os de la mâchoire des Reptiles : l'enclume au carré et le marteau à l'articulaire. (Il est à remarquer d'ailleurs que la position relative des osselets correspond à la position hyomandibulaire — carré — articulaire des Poissons.) Les osselets sont englobés dans la cavité tympanique (dérivée de la première poche viscérale); celle-ci est limitée par une enveloppe osseuse complexe à laquelle participent : le périotique, situé au fond (percé de la fenêtre ovale sur laquelle s'appuie l'étrier), le squamosal et l'ectotympanique; ces deux derniers constituent le tympanique *sensu stricto,* homologué à l'angulaire de la mandibule reptilienne, en forme d'anneau (chez les Mammifères primitifs) ou en forme de bulle tympanique, à la construction de laquelle peut s'adjoindre un ectotympanique (→ bulle auditive); le tympan est tendu sur le tympanique et donne appui au marteau.

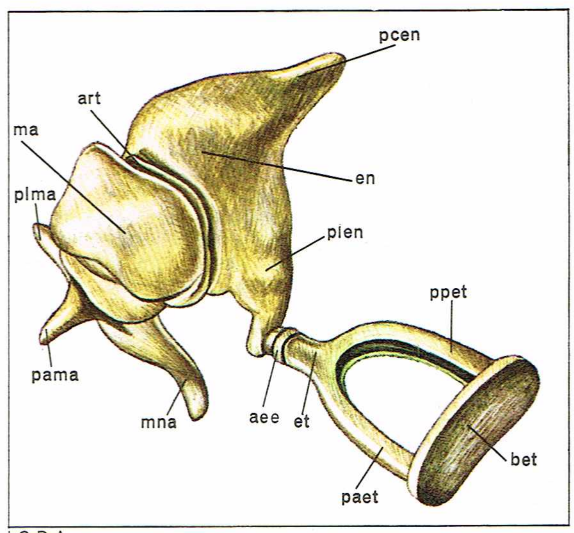

I.G.D.A.

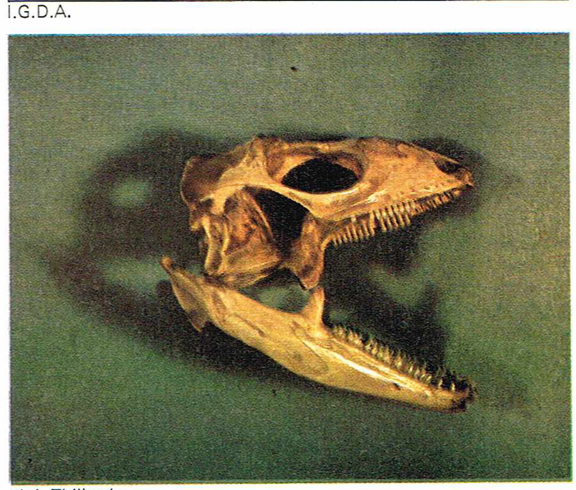

M.J. Thillard

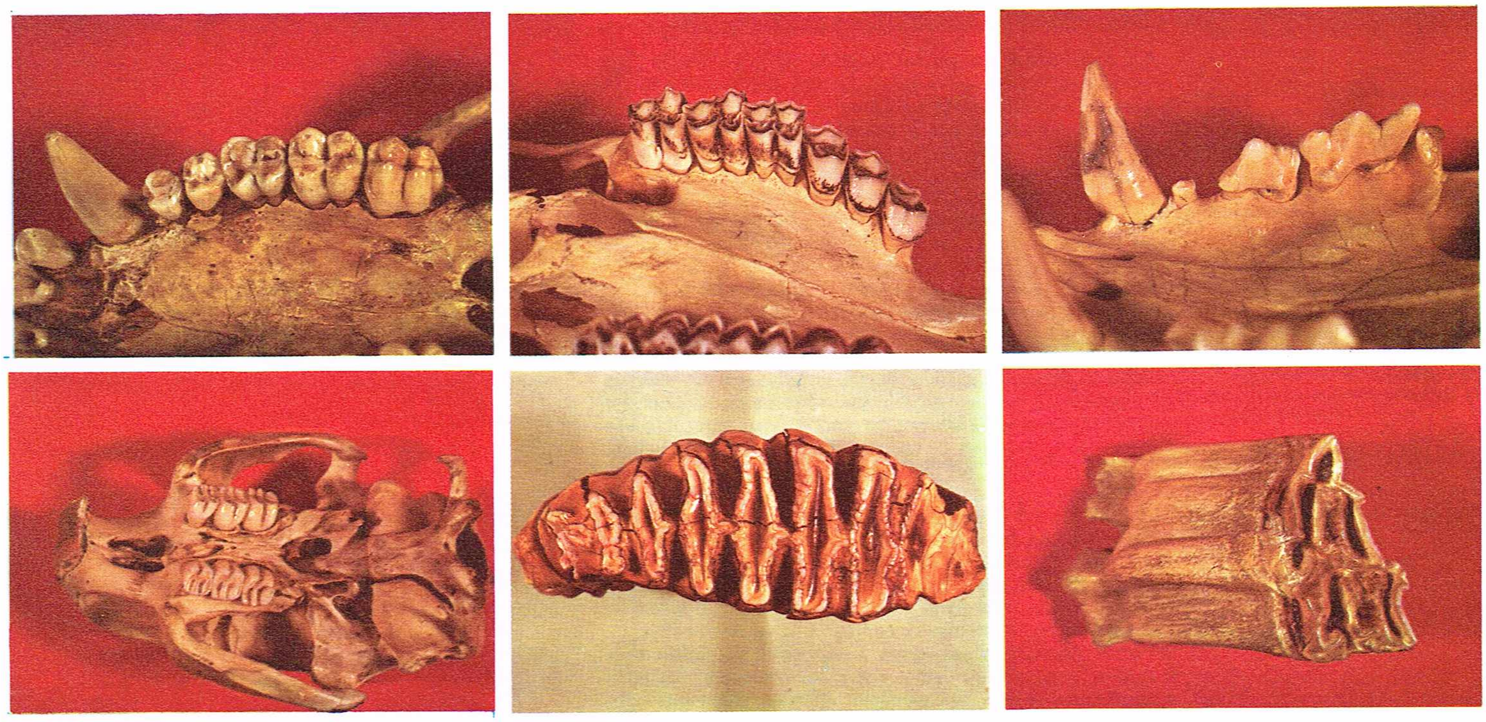

M. J. Thillard

▲ ***De gauche à droite et de haut en bas :*** **dents bunodontes** ***de Primate (singe) ;*** **dents sélénodontes** ***de Ruminant (chevreuil) ;*** **dents sécodontes** ***de Carnivore (panthère) ;*** **dents lophodontes** ***de Rongeur ;*** **dent polylophodonte** ***d'éléphant d'Afrique ;*** **dent hypsodonte** ***de cheval, table d'usure.***

Les dents des Mammifères. La connaissance des dents est importante, car leur observation peut permettre à elle seule d'identifier un animal, son régime et son âge.

— *Structure*. La dent comporte une couronne, partie fonctionnelle, et une racine enfoncée dans un alvéole de la mâchoire, à laquelle elle est reliée par des ligaments (dent thécodonte). Elle est constituée par la dentine, ou ivoire (variété de tissu osseux), revêtue d'émail (de structure prismatique) sur la couronne ; la racine se recouvre de cément (tissu paradentaire) qui peut aussi envahir la couronne ; au centre, la cavité pulpaire (contenant la pulpe) se prolonge dans la racine par un canal où pénètrent le nerf et les vaisseaux.

— *Forme*. La denture des Mammifères est hétérodonte. La forme de la couronne varie suivant l'emplacement des dents : elle peut être simple (dent haplodonte), avec une seule racine, comme pour les incisives et les canines, ou compliquée par poussée de nombreuses pointes, ou cuspides, ou tubercules (dents plexodontes), avec plusieurs racines, comme pour les dents jugales : les prémolaires et molaires. La forme des dents est en relation avec leur rôle : préhension pour les dents antérieures, mastication pour les postérieures ; en outre, elle varie suivant le régime alimentaire. Le nombre des cuspides, leur forme, leur union par des crêtes déterminent différents aspects de la couronne, que l'on peut grouper en quatre types principaux : le type bunodonte des Primates et Suidés ; le type sécodonte des Carnivores ; le type lophodonte qu'on trouve chez le tapir et le rhinocéros (les dents des éléphants à nombreuses crêtes sont polylophodontes, les dents des Rongeurs ont souvent des lamelles transversales mais d'origine complexe) ; enfin, le type sélénodonte des Ruminants.

— *Croissance*. Les Mammifères sont généralement diphyodontes, avec deux dentitions (ou générations dentaires) : une lactéale et une permanente. La dent de remplacement apparaît latéralement, du côté lingual, mais se développe ensuite sous la dent en place, dont la racine se résorbe.

Le mode de croissance détermine deux types principaux de dents, avec des intermédiaires : les dents brachyodontes, à croissance limitée, ont une couronne basse dont la croissance s'arrête juste à la fin de leur éruption, l'orifice de la racine se réduisant à un petit foramen et l'usure étant faible ; les dents hypsodontes ont une couronne élevée, une racine longue, du cément sur la couronne, et leur croissance se poursuit longtemps, la cavité pulpaire restant largement ouverte, et la couronne s'usant généralement en compensation. Dans certains cas, la racine ne se ferme jamais, la croissance continue toute la vie.

— *Disposition*. Chaque demi-mâchoire porte généralement trois catégories de dents. Celles-ci sont définies par leur position sur les os de la mâchoire supérieure : les incisives sont implantées sur la partie antérieure du prémaxillaire et sont souvent tranchantes ; la canine, toujours unique, est fixée sur le prémaxillaire contre la suture avec le maxillaire ; la canine inférieure se situe juste en avant de la supérieure quand la mâchoire se ferme ; les dents jugales sont insérées dans le maxillaire ; enfin, on distingue les prémolaires, antérieures, précédées par des dents lactéales, et les molaires, postérieures, à couronne généralement plus complexe que les précédentes, qui ne sont pas remplacées (elles appartiendraient à la dentition lactéale). Certaines dents peuvent manquer, déterminant ainsi des diastèmes.

Le nombre et la répartition des dents, fixe pour chaque espèce, définit la formule dentaire de l'animal, qui s'exprime par demi-mâchoire supérieure et inférieure. On admet pour les Mammifères une formule dentaire primitive à 44 dents, réparties comme suit :

$$I\,\frac{3}{3};\ C\,\frac{1}{1};\ P\,\frac{4}{4};\ M\,\frac{3}{3};$$

celle-ci se retrouve chez le porc. Ce nombre, rarement dépassé sauf par les Cétacés Odontocètes, tend à diminuer chez les Mammifères actuels.

La musculature céphalique. Dans la tête, la musculature somatique est peu développée : la métamérisation est très perturbée et une grande partie du mésoblaste se dissocie. Elle ne fournit que les muscles oculomoteurs et, par migration, des muscles hypobranchiaux. La musculature des arcs viscéraux des Poissons et celle de la mâchoire des Tétrapodes sont d'origine viscérale, dérivées du mésenchyme des lames latérales, exceptionnellement striées.

Nous nous intéresserons seulement à la musculature masticatrice des Mammifères. En effet, le mode de nutrition, faisant intervenir une véritable mastication, s'accompagne chez les Mammifères d'un développement de cette musculature en rapport avec le régime alimentaire.

En conclusion, l'étude du squelette présente un intérêt multiple. Histologiquement, il est à la base du métabolisme des sels minéraux, en particulier calciques. Anatomiquement, il est le support du corps, et l'observation de son modelage, de la structure des membres et des caractères du crâne, jointe à l'examen des dents, fournit de nombreux renseignements sur le mode de vie et le régime alimentaire des animaux. Enfin, la connaissance approfondie du squelette est nécessaire à la compréhension des données paléontologiques, qui permettent de reconstituer les principales étapes évolutives de l'histoire des Vertébrés.

▶ *Page ci-contre, à gauche, test de* Sphaerechinus granularis. *A droite, représentation schématique du squelette hydrostatique des Vers; A, antagonisme entre les muscles circulaires et longitudinaux : toute contraction des muscles circulaires entraîne une extension du Ver, son diamètre diminue; le retour aux dimensions originales ne peut se faire que par la contraction des muscles longitudinaux; B, conséquences possibles de la contraction des muscles circulaires : les changements observés dépendent du comportement des muscles longitudinaux (ou circulaires) qui ne sont pas en contraction.*

TÉGUMENT, SQUELETTE ET MUSCULATURE CHEZ LES INVERTÉBRÉS

Le squelette d'un animal peut se définir comme une structure solide assurant la protection de certains tissus fragiles et servant de support aux organes mous ainsi que de points d'attache aux muscles, dont les contractions permettent les mouvements de l'animal.

Chez les Vertébrés, le squelette (os et cartilage) est interne; s'il supporte les différents organes, son principal rôle est de servir de points d'attache aux muscles. Ceux-ci sont placés de façon qu'à tout muscle ayant une action précise corresponde un muscle ayant une action antagoniste : par exemple, au muscle fléchisseur de la jambe correspond le muscle extenseur de la jambe. Un muscle en se rétractant annule les tensions qui existent dans celui qui est antagoniste.

Chez la plupart des Invertébrés, le squelette est externe et correspond à une production tégumentaire plus ou moins rigide qui assure une protection complète de l'animal et le maintien de ses organes. Chez les Hydraires, les Plathelminthes, les Némathelminthes, les Annélides, ce squelette est mou, élastique et, de ce fait, ne peut servir de points d'ancrage à des muscles antagonistes. L'activité musculaire est assurée par des muscles disposés autour de l'animal; leurs contractions s'opposent à la pression des liquides internes (liquide cœlomique, hémolymphe) et à l'élasticité de la cuticule tégumentaire; l'ensemble du système constitue un squelette hydrostatique. Chez les Mollusques, le squelette est rigide mais il n'y a pas antagonisme entre les muscles; ceux-ci s'opposent soit aux pressions internes exercées par l'hémolymphe (muscles rétracteurs du pied), soit à l'élasticité des ligaments (muscles adducteurs des valves des Lamellibranches). Enfin chez les Arthropodes, le squelette est dur et sert de points d'ancrage à des muscles antagonistes.

Différents types de squelettes

Squelettes internes

Chez les Éponges, le squelette interne est formé de spicules calcaires ou siliceux ou de fibres de spongine (scléroprotéine). Ces spicules sont sécrétés par des cellules provenant de l'épiderme : les *scléroblastes*. Quand un scléroblaste sécrète un spicule monaxone (petite tige de calcaire ou de silice), son noyau commence par se diviser en deux, la cellule devenant ainsi un ensemble binucléé. Une matrice organique apparaît petit à petit entre les deux noyaux et se charge au fur et à mesure de calcaire (s'il s'agit d'une Éponge calcaire). Au bout d'un certain temps, l'aiguille formée est assez longue pour que le scléroblaste se sépare en deux cellules filles; la plus interne, la fondatrice, migre vers la cavité gastrique tout en continuant la sécrétion du spicule, qu'elle allonge ainsi vers l'intérieur. Pendant ce temps, la deuxième cellule fille dépose des couches de calcaire le long du spicule qui s'élargit graduellement. La sécrétion des spicules à plusieurs branches se fait suivant le même schéma, mais plusieurs scléroblastes interviennent (trois pour les spicules tétraxones).

Le squelette chitineux, calcaire ou corné, des Cnidaires Octocoralliaires a une origine identique. Il peut cependant être plus rigide que celui des Éponges, car les spicules sont le plus souvent emballés dans une scléroprotéine (la gorgonine) et même, parfois, dans du carbonate de calcium (corail rouge).

Les Échinodermes ont aussi un squelette interne, mais celui-ci est d'origine mésodermique. Il est sécrété sous forme de spicules calcaires (calcite) qui s'élargissent en plaques plus ou moins spongieuses. Celles-ci viennent se placer en dessous de l'ectoderme.

Squelettes externes mous

Les Trématodes, les Cestodes, les Nématodes et les Annélides n'ont pas à proprement parler de squelette. Cependant, la cuticule élastique qui les recouvre et la pression exercée par les liquides internes confèrent à leurs téguments une certaine rigidité (squelette hydrostatique). L'architecture générale du tégument est la même dans tous ces groupes : une cuticule externe sécrétée par une assise de cellules ectodermiques (ou cellules hypodermiques), le tout reposant sur une ou plusieurs couches musculaires.

En fait, si l'on se penche sur les différents tissus, l'un après l'autre, on observe de nombreuses différences. Elles portent :

— sur la nature de la cuticule : mucoprotéines et collagène chez les Trématodes et les Cestodes, kératine et collagène chez les Nématodes, collagène chez les Annélides;

— sur sa formation : production extracellulaire chez les Nématodes et les Annélides, production intracellulaire chez les Trématodes et les Cestodes (hypoderme syncytial); ce caractère explique peut-être le rôle actif de cette cuticule dans l'absorption des aliments;

— sur la structure et la disposition des muscles : cellules myoépithéliales chez les Nématodes (fibrilles suivant l'axe longitudinal), cellules musculaires à fibres striées obliques chez les autres, formant une couche externe de muscles circulaires et une couche interne de muscles longitudinaux.

Chez *Arenicola marina,* la pression interne, antagoniste de l'action musculaire, est de 14 cm d'eau; quand l'animal fournit un effort, en creusant son trou, cette pression augmente jusqu'à 30 cm d'eau; par contre, si l'animal est endormi, elle tombe à 3 cm d'eau. Toute ponction du liquide interne fait diminuer l'activité de l'animal et va jusqu'à le paralyser. En effet, le liquide cœlomique interne joue le rôle d'intermédiaire entre les différents muscles; si une série de muscles circulaires se contractent, la

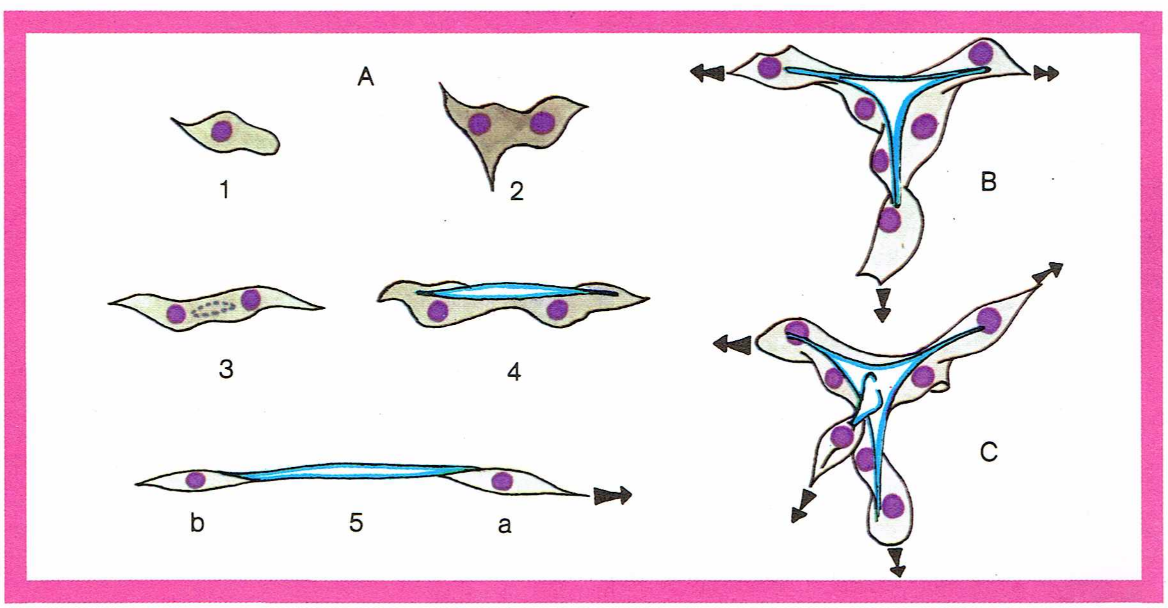

▶ *Formations de spicules d'Éponge; A,* spicule monactine : *1, scléroblaste; 2, scléroblaste binucléé; 3, scléroblaste binucléé contenant la matrice organique du futur spicule; 4, élongation du scléroblaste; 5, division du scléroblaste en deux cellules filles (a, cellule fondatrice; b, cellule épaississante); B,* spicule triactine; *C,* spicule tétractine; *la flèche indique la direction suivant laquelle se fait l'élongation des spicules.*

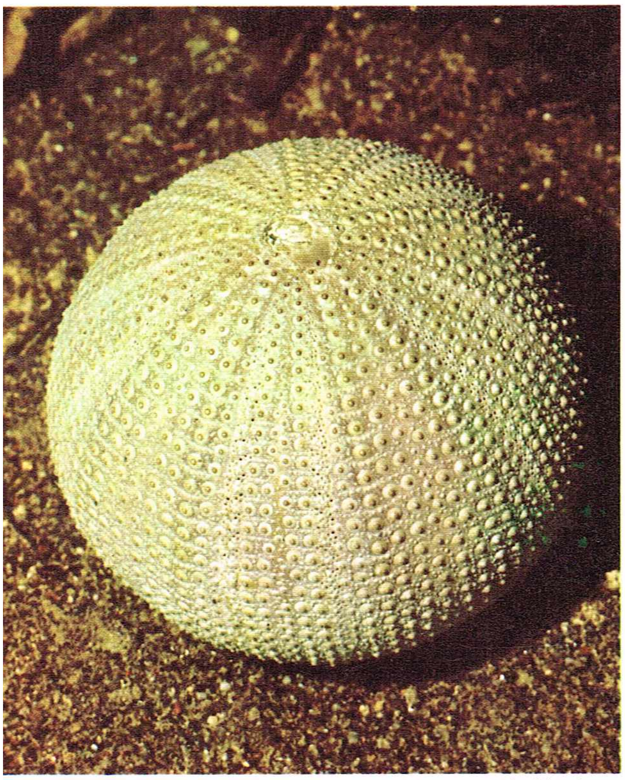

A. Margiocco

pression du liquide cœlomique augmente à l'intérieur de l'animal et a tendance à détendre les muscles qui ne sont pas en contraction. Ce système permet de créer un antagonisme entre les muscles circulaires et longitudinaux.

Squelettes externes durs

Un tel type de squelette se trouve chez les Mollusques et les Arthropodes.

L'exosquelette des Mollusques, la *coquille,* a une forme très variable, mais elle est toujours sécrétée par l'épithélium du manteau. Sa composition de base correspond à une scléroprotéine, la conchioline, qui est plus ou moins chargée en carbonate de calcium. Celui-ci peut être remplacé, en partie, par du carbonate de magnésium et même par du carbonate de strontium (les Mollusques peuvent donc être des indicateurs de pollutions atomiques).

La coquille est formée : d'une couche interne de nacre (cristaux de carbonate de calcium disposés parallèlement à la surface et entourés de conchioline) ; d'une couche intermédiaire de cristaux de calcite (ou d'aragonite) disposés perpendiculairement à la surface ; enfin, d'une couche externe, le périostracum, formée de conchioline. La structure chimique exacte de cette dernière couche caractérise les conditions de vie de l'animal : chez les Gastéropodes marins, le périostracum présente un taux de glycine inférieur à celui qui est trouvé chez les Gastéropodes d'eau douce ; des variations dans la salinité font varier la teneur relative des différents amino-acides qui constituent la conchioline.

La sécrétion de la coquille demande la mobilisation du *calcium*. Chez les Mollusques aquatiques, le calcium provient du milieu ambiant ; il pénètre dans le manteau soit directement, soit indirectement après avoir été récupéré par l'hémolymphe dans les autres tissus (les branchies par exemple). La vitesse de pénétration du calcium dans le manteau est dix fois plus grande que celle du sodium. Chez les Gastéropodes terrestres, il est fourni par la nourriture ; quand il n'est pas utilisé immédiatement, il est stocké dans certaines cellules de la glande digestive. Les rapports étroits entre la teneur en calcium du milieu et leur sécrétion expliquent la finesse des coquilles des Mollusques d'eau douce et terrestres.

Le deuxième composé à mobiliser est le CO_2. Celui-ci provient de trois sources principales : le milieu ambiant, l'urée par action de l'uréase, la décarboxylation de certains composés du cycle de Krebs (acide oxaloacétique par exemple). Il est transformé, par la suite, en bicarbonate et carbonate sous l'action de l'anhydrase carbonique.

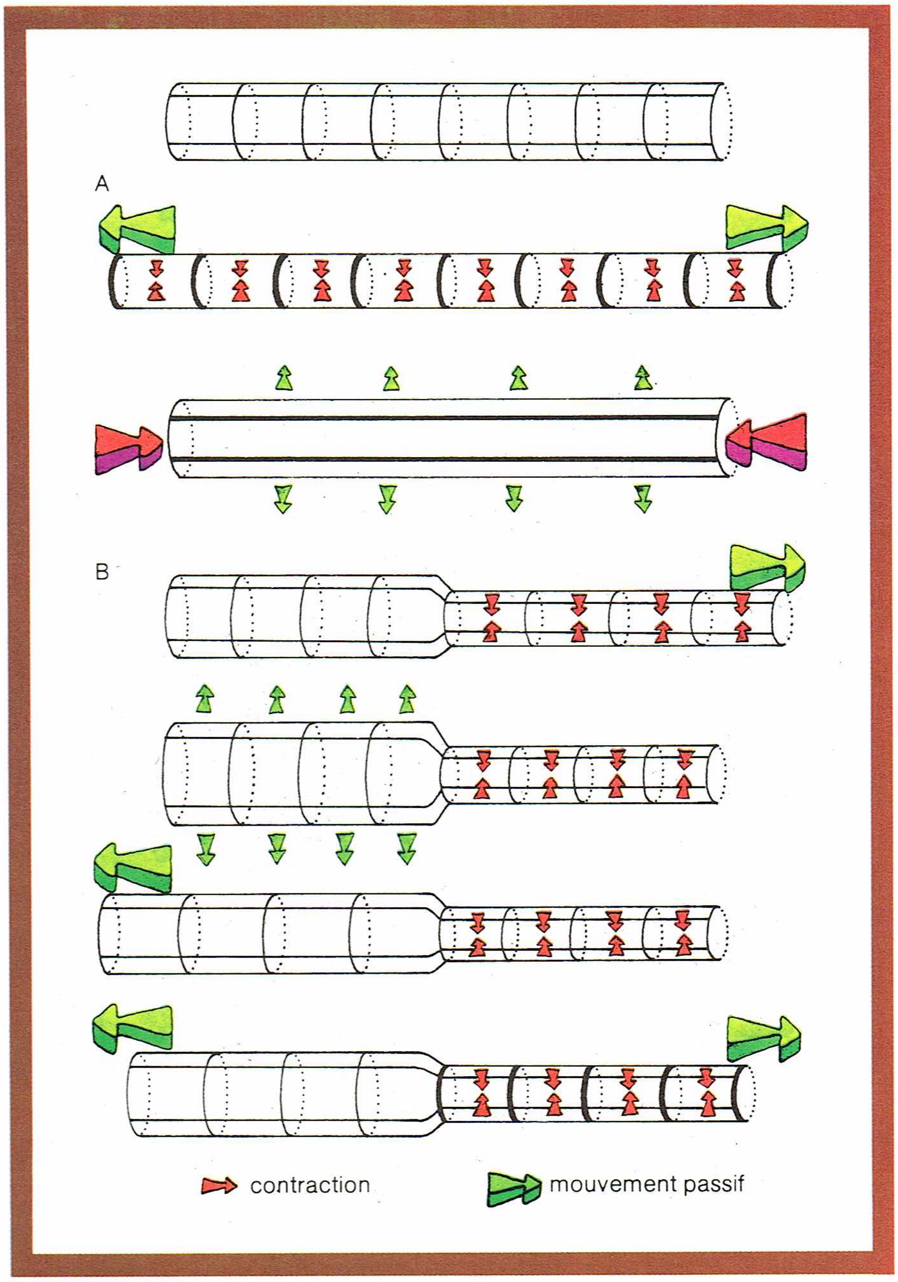

Richard Colin

E. Robba

◀ *Coupe transversale du tégument d'Ascaris (Nématode) : on observe la cuticule, une assise de cellules ectodermiques et les fibres musculaires disposées suivant l'axe longitudinal (coloration de contraste)*

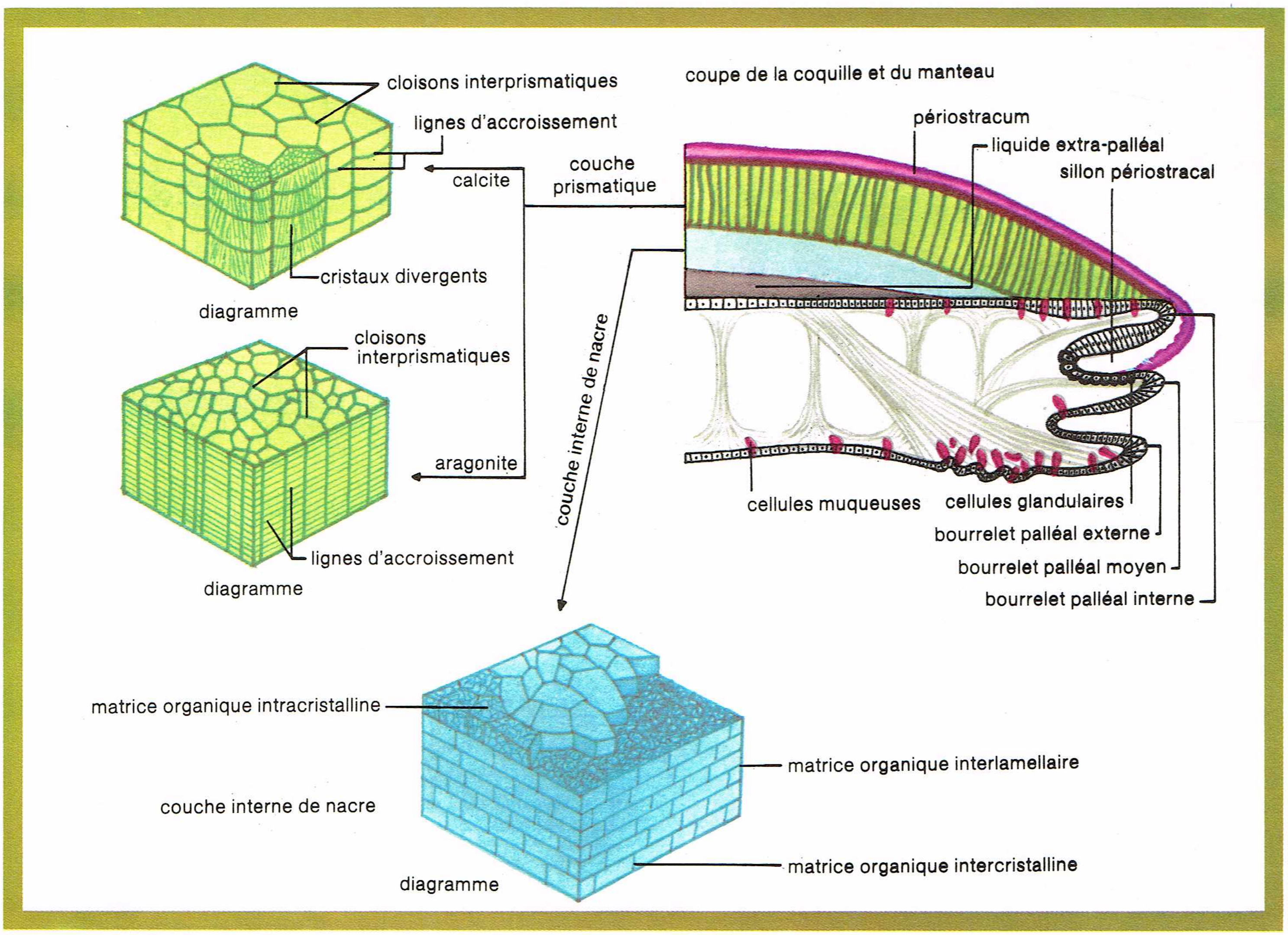

Richard Colin

▲ ***Représentation schématique d'un*** **squelette externe dur :** ***la coquille des Mollusques Lamellibranches.***

Tout inhibiteur de cette enzyme inhibe la formation de la coquille.

La formation des cristaux se fait au contact de la matrice organique constituée par la conchioline; il paraît à peu près certain maintenant que c'est la structure chimique de cette matrice qui oriente les dépôts de CO_3Ca vers l'aragonite ou la calcite.

Chez les Lamellibranches, les valves des coquilles sont maintenues ouvertes par des ligaments élastiques. Leur fermeture est commandée par la contraction des muscles adducteurs; les fibres musculaires qui les constituent sont de deux sortes : les unes, striées (transversalement ou en oblique), assurent une fermeture rapide de la coquille, les autres, lisses, maintiennent les valves fermées. Chez certains de ces animaux *(Pecten, Ostrea)*, il est possible de distinguer à l'œil nu les deux types de fibres, car celles-ci sont groupées en deux muscles distincts plus ou moins accolés; chez les autres *(Mya, Mytilus)*, elles sont mélangées.

L'exosquelette des Arthropodes est constitué par leur cuticule. Celle-ci, sécrétée par les cellules de l'épiderme, est constituée de chitine. Elle est organisée en trois feuillets superposés : l'*endocuticule*, l'*exocuticule* et l'*épicuticule*. Les deux premiers feuillets contiennent des molécules de chitine qui sont liées à une protéine, l'arthropodine; l'épicuticule, elle, est formée, chez les Insectes, par quatre couches de produits différents, qui sont sécrétées successivement (des canalicules traversent l'endo- et l'exocuticule). La première, la plus interne, est la *couche de cuticuline;* elle est sécrétée juste au début de la mue. Puis viennent une *couche polyphénolique,* une *couche cireuse* (la seule qui soit imperméable), une *couche cémentaire* qui est sécrétée très tardivement. Endo- et exocuticules se chargent de sels de calcium chez les Crustacés et les Diplopodes. L'endocuticule correspond plus ou moins à la partie de la cuticule qui est digérée au moment de la mue.

La cuticule s'invagine à de nombreux endroits formant des apodèmes qui servent de points d'attache aux différents muscles. Ceux-ci sont striés et forment, comme chez les Vertébrés, des systèmes antagonistes.

Croissance du squelette

Squelettes internes

La croissance des squelettes internes est continue.

Chez les Hydraires Octocoralliaires, les spicules se forment dans la mésoglée au fur et à mesure que les polypes se développent. Les spicules, isolés au début, sont par la suite agglomérés en masse grâce aux scléroprotéines (gorgonines) qui les entourent. Chez certains (corail rouge), le squelette ainsi formé est rendu encore plus dur par des dépôts de carbonate de calcium qui bouchent les trous entre les spicules.

Chez les Échinodermes, il y a une croissance continue des spicules et des plaques spongieuses. Le dépôt de calcite se fait à leur périphérie, où se maintiennent toujours des tissus organiques. Chez les Échinides, on a observé en outre l'apparition de nouvelles plaques au voisinage de la région aborale.

Squelettes externes

La sécrétion de la coquille des Mollusques est continue. Le périostracum et la couche prismatique sont sécrétés par les rebords du manteau. La couche de nacre, produite par toute la surface du manteau, se forme secondairement.

Les Nématodes ont une croissance irrégulière, car leur cuticule n'est pas indéfiniment extensible et ils doivent muer. Il faut souligner que leur taille augmente pendant les intermues et que leur croissance s'arrête au moment

P. Summ - Jacana

▲ *La croissance des Arthropodes s'effectue par mues successives; chez les Insectes, ici deux spécimens d'*Aeschna cyanea *(Odonates), elle s'arrête quand l'animal est devenu adulte (sexuellement mûr).*

de la mue. La croissance pendant les intermues est possible grâce à l'élasticité que présente la cuticule. Le déterminisme de la mue n'est pas connu. On a toutefois pu montrer que le taux de leucine-aminopeptidase présent dans le liquide de mue (qui se trouve, au début de celle-ci, entre la vieille cuticule et la nouvelle) est directement influencé par les neurosécrétions qui apparaissent dans les ganglions céphaliques. Cette enzyme joue un rôle important dans la digestion de la vieille cuticule.

La croissance des Arthropodes s'effectue par mues successives. Chez les Insectes, elle s'arrête quand l'animal est devenu adulte (sexuellement mûr), alors que chez les Crustacés, elle continue après la maturité sexuelle; il est possible d'observer des mues chez les adultes.

Chez les Crustacés, la mue se déroule en plusieurs étapes :

— *Proecdysis :* l'épiderme se sépare de la cuticule; un liquide (liquide de mue) riche en protéases et en chitinases (enzymes protéolytiques) apparaît dans l'espace ainsi créé; il dissout progressivement toute la partie de la vieille cuticule qui correspond à l'endocuticule, remettant ainsi en solution les sels de calcium qui l'imprègnent (le taux sanguin de calcium augmente chez l'animal). Pendant ce temps, les cellules épidermiques se sont divisées, tout en commençant à sécréter la nouvelle cuticule (la première couche qui apparaît est celle de cuticuline, laquelle, plus tard, se trouvera à la base de l'épicuticule). A la fin de ce stade, l'épithélium est tout plissé et la nouvelle cuticule est à peu près synthétisée.

— *Ecdysis :* l'animal se gonfle d'eau de façon à tendre l'épithélium qui supporte la nouvelle cuticule. la vieille carapace casse suivant des lignes de ruptures prédéterminées (séparation entre le thorax et l'abdomen chez les crabes). L'animal sort de son exuvie par l'arrière.

— *Metecdysis :* le Crustacé est toujours mou et continue à se gonfler d'eau. La carapace s'imprègne de calcaire.

L'animal ne se nourrit pas pendant tout le temps que dure la mue; il se terre dans des anfractuosités de rocher pour échapper aux prédateurs.

Le phénomène de mue est sous la dépendance de facteurs endocriniens. L'organe X des Crustacés produit une neurohormone qui est stockée dans la glande du sinus. Pendant les intermues, cette neurohormone est libérée dans la cavité générale et inhibe l'organe Y responsable de la production de l'hormone de mue *(crustecdysone)*. A la mue, le taux de neurohormone libérée diminue et l'organe Y retrouve son activité.

Chez les Insectes les mues répondent aux mêmes caractéristiques. Il faut noter cependant que ces animaux se gonflent d'air au moment de l'ecdysis et que le durcissement de leur cuticule n'est pas causé par une imprégnation de sels calcaires mais par le tannage des protéines. Il existe aussi un contrôle endocrine de la mue, un peu différent de celui qui existe chez les Crustacés. La neurohormone libérée par les *corpora cardiaca* n'inhibe pas la glande de mue (glande prothoracique qui fournit l'ecdysone) mais l'excite au moment de la mue.

Les développements des Crustacés et des Insectes, bien que très semblables dans les grandes lignes, sont très différents. Chez les premiers, les mues ont toujours la même valeur, alors que chez les seconds, il existe des mues larvaires, des mues nymphales et des mues imaginales. L'apparition de telle ou telle mue est sous la dépendance d'une deuxième hormone, l'hormone juvénile, sécrétée par les *corpara allata*. La présence de celle-ci dans la cavité générale conditionne l'apparition des mues larvaires; la diminution de son taux fait apparaître la mue imaginale.

LE TUBE DIGESTIF ET SES DÉRIVÉS CHEZ LES VERTÉBRÉS

Le tube digestif, long tube plus ou moins contourné, s'étend de la bouche à l'anus. Il comprend cinq segments spécialisés : la bouche, le pharynx, l'œsophage, l'estomac et l'intestin. A ce tube sont annexées différentes glandes qui se développent à l'extérieur de sa paroi mais déversent leur sécrétion dans la lumière par des canaux excréteurs : ce sont les glandes salivaires, le foie et le pancréas. L'appareil digestif, formé du tube digestif et de ces glandes, assure la digestion des aliments.

Les besoins de l'organisme chez l'homme sont d'environ 3 000 kcal/24 h. La dépense d'énergie est continue et ne tombe jamais en dessous de 70 kcal/h, même pendant le sommeil nocturne. Ainsi, il apparaît que si l'homme fait trois repas par 24 heures, de 1 000 kcal chacun et d'une durée moyenne de 20 minutes, le jeûne dure 23 heures sur 24. En fait, le tube digestif dispose d'un mécanisme réglant le temps d'écoulement des ingesta ; l'élément régulateur essentiel de ce débit est l'estomac qui ne se vide, chez l'homme, qu'en quatre à six heures selon la nature des ingesta. Le jeûne est donc réduit à moins de douze heures. Les Oiseaux disposent du jabot, les Ruminants du rumen, véritables réservoirs qui assurent un apport énergétique presque continu, en dépit d'une alimentation de courte durée. Les ingesta progressent le long du tube digestif grâce à son péristaltisme.

Au cours de la digestion, les aliments perdent leurs caractères de spécificité ; ils sont ramenés à leurs éléments constitutifs simples par une hydrolyse enzymatique de leurs molécules complexes. D'aliments ils deviennent des *nutriments* (oses, monoglycérides, acides gras, glycérol, acides aminés, nucléosides...), qui sont absorbables. Cette absorption se fait au niveau de l'intestin grêle, grâce à une énorme surface de contact avec la paroi intestinale (40 m^2 chez l'homme). Pour donner une idée de l'importance du courant de liquide traversant la muqueuse intestinale de la lumière vers le milieu intérieur, observons que, si environ 11 litres d'eau (aliments, salive, bile, « sucs ») transitent dans la lumière, 100 ml seulement sont éliminés par les fèces.

Les sécrétions digestives et les mouvements du tube digestif sont coordonnés et forment un tout. Un mécanisme de régulation très complexe réalise l'intégration de ces deux activités.

Embryologie et développement

Sur presque toute son étendue, le tube digestif s'ébauche à partir de l'entoblaste. Aux extrémités de cet intestin primitif, ou *archentéron,* s'associent des invaginations épiblastiques en continuité avec l'épiderme de la peau : le *stomodéum* en avant et le *proctodéum* en arrière. Très vite, les limites entre les deux types d'épithélium s'effacent dans la bouche et le cloaque. Un manchon mésoblastique donne ensuite naissance aux deux tuniques concentriques qui entourent l'épithélium entoblastique : la première, conjonctive, forme avec l'épithélium la *muqueuse ;* la seconde constitue la *musculeuse*.

▼ *A. Coupe sagittale schématique d'un embryon de grenouille (Amphibiens) en fin de neurulation (d'après Beaumont modifié d'Huettner). B. Coupe sagittale d'un embryon de poulet montrant la formation de l'intestin (d'après Beaumont).*

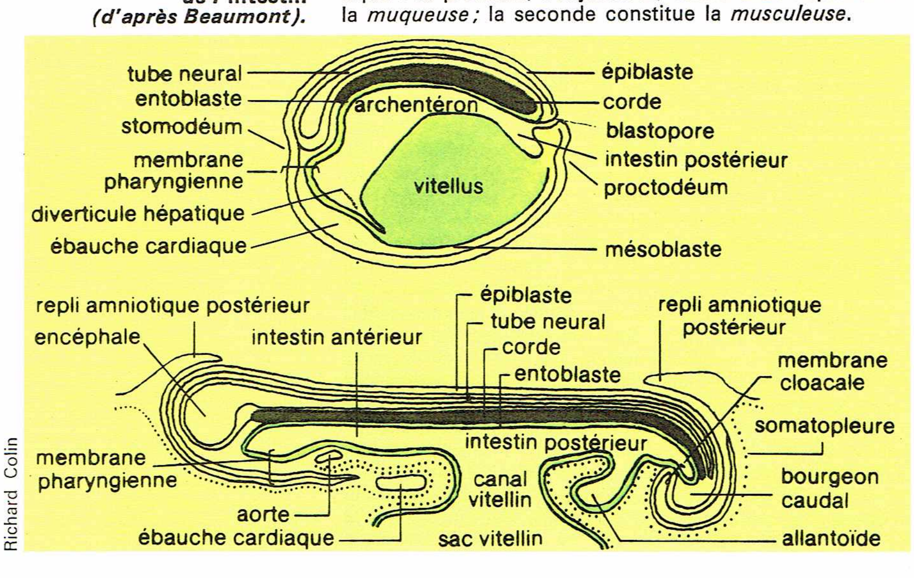

Richard Colin

Formation de l'archentéron

La formation de l'archentéron diffère selon le mode de segmentation de l'œuf.

Pour les **œufs hétérolécithes,** à segmentation totale (lamproies, Chondrostéens, Holostéens, Dipneustes, Amphibiens), l'intestin primitif est mis en place par invagination d'un territoire externe à l'origine. L'entoblaste, qui entoure la cavité formée, ouverte à l'arrière au niveau du blastopore (futur anus), vient s'accoler à l'avant à l'épiblaste du stomodéum pour constituer avec lui la membrane pharyngienne, laquelle se résorbera ensuite. Les réserves vitellines utilisées au cours du développement sont donc internes aux cellules entoblastiques ventrales.

Dans les **œufs télolécithes,** à segmentation partielle, (myxines, Chondrichthyens, Téléostéens, Reptiles, Oiseaux, Mammifères Monotrèmes), la gastrulation met en place l'entoblaste, sous forme d'une lame qui repose sur le vitellus indivis. Le feuillet entoblastique recouvre progressivement tout le vitellus. L'embryon, qui se soulève et s'isole peu à peu du sac vitellin ainsi formé, entraîne l'entoblaste dorsal. L'archentéron ainsi ouvert sur le sac vitellin est fermé aux deux extrémités. L'extrémité antérieure accolée à l'épiblaste stomodéal donne la membrane pharyngienne ; l'extrémité postérieure accolée à l'épithélium proctodéal donne la membrane cloacale. Les réserves vitellines extracellulaires sont utilisées progressivement, le sac vitellin disparaît, l'intestin se ferme ventralement.

On observe le même type de développement pour les **œufs alécithes** à segmentation totale (Mammifères Marsupiaux et Euthériens). L'absence de vitellus est secondaire et l'entoblaste entoure une cavité dépourvue de réserves, le *lécithocœle*.

Formation de la bouche et du cloaque

Le stomodéum correspond à l'invagination épiblastique, au fond de laquelle se trouve la membrane pharyngienne. Sauf chez les Cyclostomes et les Dipneustes, il est trop peu profond pour constituer la cavité buccale, qui s'agrandit alors grâce à la poussée, puis à la fusion de bourgeons faciaux, lesquels bordent le stomodéum et formeront également les lèvres et le nez. On trouve très généralement deux bourgeons maxillaires, deux bourgeons mandibulaires dans lesquels se développent les mâchoires secondaires, un bourgeon frontal, médian, flanqué de deux bourgeons nasaux médians et latéraux. Après disparition de la membrane pharyngienne, il est difficile de préciser ce qui, dans la bouche, revient à l'épi- ou à l'entoblaste ; il est alors préférable de parler de *cavité bucco-pharyngée*.

L'invagination épiblastique postérieure, ou proctodéum, au fond de laquelle se situe la membrane cloacale, ou orifice blastoporal, participe à la formation du cloaque.

Structure histologique du tube digestif

— La *tunique muqueuse* est constituée de l'épithélium entoblastique, doublé du chorion conjonctif.

● L'*épithélium* différencie des cellules glandulaires muqueuses ou séreuses et des cellules absorbantes. Les cellules muqueuses, réparties sur toute la longueur du tube digestif, sécrètent du mucus qui protège la muqueuse et facilite le transport des aliments. Les cellules séreuses, qui sécrètent des enzymes responsables de l'hydrolyse des molécules complexes d'origine alimentaire, sont surtout localisées au niveau gastrique et intestinal. Les cellules glandulaires sont situées également au niveau d'invaginations de l'épithélium, qui peuvent s'enfoncer dans le chorion pour y former des glandes particulières ou même se différencier à l'extérieur de la paroi en glandes volumineuses (glandes salivaires, foie, pancréas). Les cellules absorbantes, limitées à l'épithélium intestinal, différencient un « plateau strié » ; celui-ci consiste en fait en d'innombrables microvillosités qui augmentent la surface de contact avec les nutriments.

● Le *chorion conjonctif* de la muqueuse, qui contient des vaisseaux sanguins et lymphatiques et les glandes provenant des invaginations de l'épithélium, développe deux ou trois fines couches de fibres lisses (musculaire de la muqueuse) qui enveloppent les glandes. La contrac-

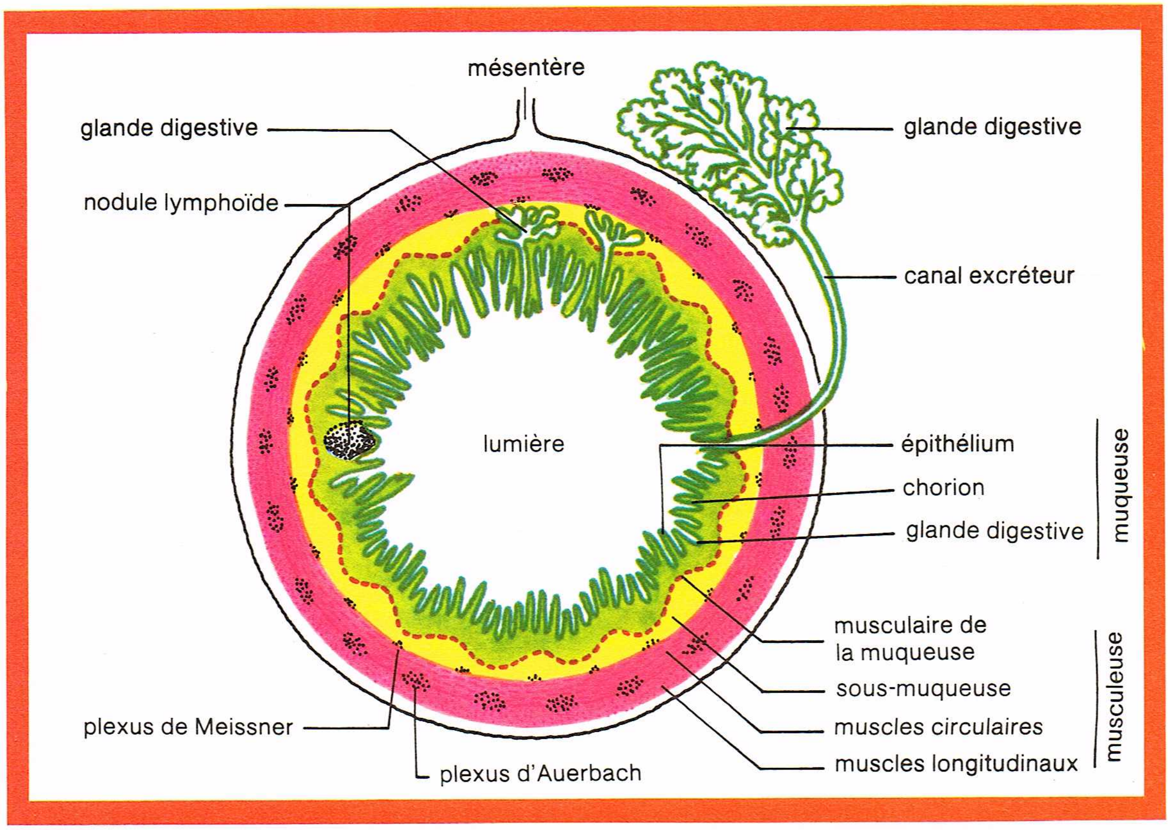

◀ ***Structure histologique du tube digestif d'après une coupe transversale (d'après Romer).***

Richard Colin

tion de ces fibres assure l'excrétion des glandes. Des amas lymphoïdes peuvent infiltrer la muqueuse à certains niveaux particuliers (follicules clos des Mammifères, bourse de Fabricius des Oiseaux...).

— La *tunique musculeuse* est constituée de fibres lisses disposées en deux manchons : une couche circulaire, interne, et une couche longitudinale, externe. Leur contraction, ou *péristaltisme*, assure la progression des aliments.

— Entre la muqueuse et la tunique musculeuse, une *sous-muqueuse,* formée de tissu conjonctif lâche, permet le jeu des deux plans. Des plexus nerveux peuvent se développer au niveau de cette sous-muqueuse (plexus de Meissner) mais aussi dans la musculeuse (plexus d'Auerbach).

Sur son trajet intracœlomique, c'est-à-dire de l'estomac au rectum, le tube digestif est entouré par la splanchnopleure sous forme d'une tunique séreuse.

La cavité buccale

Chez les Agnathes (Cyclostomes), la bouche, qui se présente comme un entonnoir ouvert à l'extérieur, est la voie d'entrée, passive, du courant d'eau respiratoire et alimentaire. Chez les Gnathostomes, la différenciation des mâchoires mobiles dentées permet la fermeture de la cavité et lui confère un rôle actif dans la préhension des aliments. Chez les Mammifères, la bouche participe au processus digestif par la mastication et éventuellement par l'attaque enzymatique de l'amylase salivaire. Chez tous les Vertébrés, la bouche demeure la voie de passage du courant respiratoire ; chez les Amphibiens et les Reptiles, elle participe même activement à la respiration (respiration bucco-pharyngée). Avec l'apparition du palais osseux secondaire, qui repousse le débouché des narines internes, ou choanes, vers l'arrière, s'opère une séparation des voies alimentaire et respiratoire. Chez les Mammifères, cette séparation, presque totale, est en rapport avec le perfectionnement de la mastication.

Les lèvres

Des replis cutanés, les *lèvres,* limitent la cavité buccale, sauf chez les Chéloniens, les Crocodiliens, les Oiseaux, les Monotrèmes. Les lèvres sont séparées de la mâchoire par un sillon, le *vestibule buccal.* Immobiles chez les non-mammaliens, elles se mobilisent chez les Mammifères par pénétration d'une musculature dérivée des muscles faciaux (rôle dans la tétée). Elles enferment de nombreuses terminaisons tactiles. Chez les Mammifères, les lèvres recouvrent l'articulation mandibulaire ; les joues se développent.

Associée aux bourgeons nasaux, la lèvre supérieure participe à l'édification de la trompe chez le tapir et l'éléphant. Le vestibule de certains Marsupiaux, Rongeurs (hamster) et Primates émet des évaginations, les bajoues, qui peuvent se fermer par un sphincter et où sont collectés les aliments. repris et mastiqués par la suite.

La voûte palatine

Le plafond buccal, ou palais, des Poissons est une voûte complète bordée par la mâchoire supérieure et recouvrant le palais osseux primaire. A partir des Crossoptérygiens (ancêtres des Tétrapodes et représentés actuellement par le cœlacanthe), la voûte palatine se perce des choanes qui permettent le passage de l'air indépendamment de l'orifice buccal. La choane, dite primaire, d'un Amphibien s'ouvre directement dans la bouche sous l'organe olfactif. Chez les Tétrapodes donc, le courant d'air entre par la narine externe, traverse le sac olfactif et passe dans la cavité buccale par la narine interne, ou choane. Ce courant d'air assume un double rôle, olfactif et respiratoire. Chez l'*Hatteria* (Reptile Rhynchocéphale), des bourrelets de la muqueuse encadrent l'orifice choanal et le prolongent en gouttière vers l'arrière. Chez les Sauriens, la gouttière ainsi formée s'oblitère dans sa portion antérieure, entraînant le recul du débouché choanal ; une séparation s'établit entre la choane primaire, percée au plancher du sac nasal, et la choane secondaire, qui débouche plus en arrière dans la cavité buccale. Chez certains Sauriens, comme le varan, une lame squelettique double le bourrelet externe de la gouttière, qui se referme en partie ventralement, formant un conduit naso-palatin vecteur de l'air inspiré. Le palais osseux secondaire qui se forme est plus étendu chez certaines tortues et atteint son développement maximal chez les Crocodiliens. Chez les Oiseaux, l'organisation rappelle celle du varan.

Chez les Mammifères, la formation du canal naso-palatin est la règle. Le palais osseux secondaire se trouve prolongé par un palais membraneux pourvu de muscles, le voile du palais, qui rejette les choanes secondaires au-dessus de la glotte. La muqueuse palatine se hérisse de crêtes transversales, très bien développées chez les

Ongulés et les Carnivores. Elles sont à l'origine des fanons des Cétacés sans dents, ou Mysticètes (baleines) ; les fanons sont des lames kératinisées, disposées en deux rangées longitudinales séparées par une crête palatine médiane. Chaque rangée compte plusieurs milliers de fanons, chacun pouvant atteindre 3 mètres. Leur bord externe est lisse, leur bord interne effiloché en filaments qui s'entremêlent et réalisent, contre la langue en saillie sur le plancher buccal, un filtre alimentaire. Pour se nourrir, la baleine remplit d'eau sa cavité buccale, puis, bouche fermée, se servant de sa langue comme d'un piston, elle expulse l'eau à travers ses fanons, qui retiennent le plancton.

L'organe olfactif buccal de Jacobson (qui a pour fonction la perception des stimuli olfactifs issus des aliments), absent chez les Poissons et les Oiseaux, reste chez les Amphibiens en relation avec l'organe olfactif dont il est issu. Il s'en isole totalement chez les Squamates et chez quelques Mammifères. Il s'ouvre au plafond buccal par une fente en continuité avec la choane chez les Amphibiens, par deux orifices en avant des choanes chez les Squamates et les Mammifères (Ruminants, Rongeurs).

Chez les Mammifères, une aire muqueuse, infiltrée de lymphocytes, bourrée de nodules lymphoïdes saillants, se différencie entre deux replis de la membrane buccale (la ligne d'insertion de la langue et la ligne d'insertion du voile du palais) : c'est l'*amygdale palatine paire*. Dans les autres classes, les amygdales sont plus simples et plus postérieures (amygdales pharyngiennes).

La langue

Sur la région des copules hyoïdienne et branchiales des Poissons, la muqueuse et le tissu sous-cutané s'épaississent en une pseudo-langue sans mobilité autonome. Chez les Tétrapodes, cette portion copulaire ne formera que la racine de la langue définitive. En avant de l'ébauche de cette racine, et séparés d'elle par l'invagination thyroïdienne, des bourgeons linguaux central et latéraux se développent et donnent la portion la plus importante de la langue, la portion précopulaire. Cette portion est envahie par la musculature hypobranchiale, issue des premiers somites du tronc incorporés au neurocrâne. La partie inférieure de l'arc hyoïde et des arcs branchiaux, après la disparition des branchies, constitue l'appareil hyoïdien, ou squelette lingual. L'innervation sensitive de la muqueuse linguale est assurée par le nerf facial (VII) et le glossopharyngien (IX), c'est-à-dire par les nerfs segmentaires en place. L'innervation motrice de la musculature est assurée par l'hypoglosse (XII), ce qui est normal puisqu'elle provient des segments occipitaux et envahit secondairement le plancher buccal.

L'organe musculaire que constitue la langue permet la préhension et le brassage des aliments dans la bouche. Chez les Tétrapodes à régime insectivore, elle devient protractile et aide à la capture des proies à distance. Chez les grenouilles et les crapauds, la langue, insérée en avant, se rabat sur la proie grâce au remplissage d'un sac lymphatique basal. Chez les caméléons, les pics, les échidnés, chez certains tatous, certaines chauves-souris, pangolins et fourmiliers, des dispositifs musculaires variés assurent la protrusion.

La langue peut, en outre, se transformer en organe sensoriel gustatif (chez les Mammifères), tactile (chez les crocodiles, les pics, les fourmiliers). Chez les Sauriens et les Ophidiens, la langue bifide, qui se rétracte dans une gaine, sert d'organe collecteur de particules odorantes, par ses mouvements de va-et-vient rapides et incessants : ces particules sont amenées au contact de l'épithélium sensoriel des organes de Jacobson.

Les dents

Les dents sont des formations dures servant à la préhension, à la rétention et à la mastication des aliments. En fait, cette définition est également valable pour les odontoïdes, simples formations cornées au sommet de papilles dermiques jouant le rôle des dents à l'entrée du tube digestif (notamment chez la lamproie). Seul le mode de formation des dents, caractéristique, permet de les distinguer.

L'ébauche de toutes les dents de Vertébrés a la forme d'une cloche comportant l'*organe adamantin épithélial,* à l'origine de l'émail (qui peut faire défaut), et une *papille dermique,* à l'origine de la dentine (ivoire).

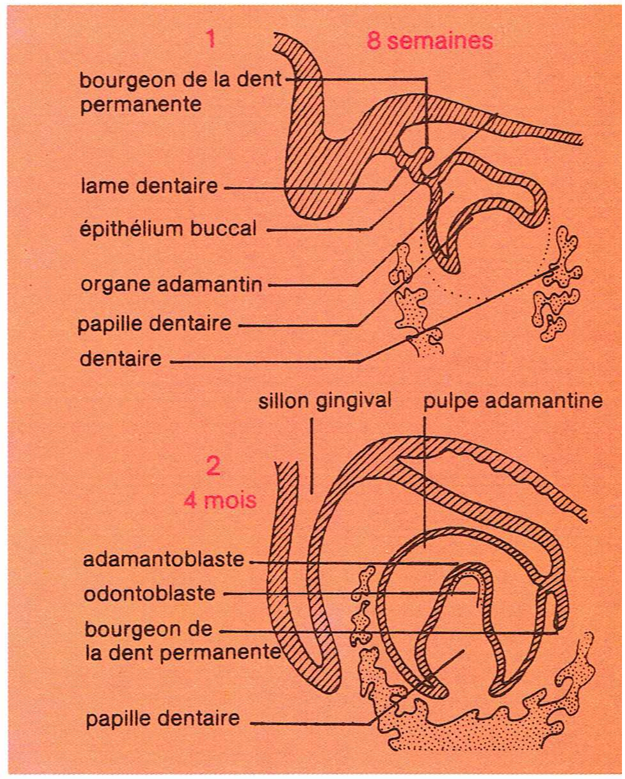

Sauf chez les Sélaciens et les Téléostéens, les organes adamantins se différencient à partir de bourgeons épithéliaux apparus sur le bord interne des lames dentaires, simples épaississements de l'épithélium buccal qui s'enfoncent obliquement dans le mésenchyme des futures mâchoires. L'organe adamantin, d'abord homogène et plein, s'accroît et sa région centrale se dissocie pour donner la pulpe adamantine à cellules étoilées. Si l'émail ne se développe pas, la pulpe manque. Chaque lame dentaire prolifère et forme une lame dentaire de remplacement, différenciant de nouveaux bourgeons épithéliaux. Ceux-ci ne se différencieront que beaucoup plus tard (dents de remplacement). Dès que ces nouveaux bourgeons sont formés, la lame dentaire se morcèle et le mésenchyme s'organise au contact de l'organe adamantin en un sac fibreux, le sac dentaire. Au contact de l'épithélium interne de l'organe adamantin, les cellules superficielles de la papille dermique se différencient en *odontoblastes,* qui, le plus souvent, se disposent en une couche épithéliale. Chaque odontoblaste émet un prolongement vers l'épithélium adamantin et sécrète de la *prédentine,* qui se calcifie en *dentine* (75 % de sels minéraux). L'accroissement en épaisseur de la dentine s'accompagne de l'allongement corrélatif des prolongements des odontoblastes. Pendant ce temps, l'épithélium interne de l'organe adamantin a donné des cellules prismatiques, les *adamantoblastes,* ou *améloblastes,* lesquels, dès que la prédentine se calcifie, sécrètent par leur apex une fine couche d'*émail* (95 % de sels minéraux). Cela correspond à la formation de la couronne de la dent.

La formation de la racine détermine son éruption. Les cellules épithéliales de la base de l'organe adamantin prolifèrent, provoquant la différenciation à leur contact de nouveaux odontoblastes, qui édifient un anneau de dentine à l'origine de la racine. L'allongement de l'anneau provoque le soulèvement de la dent, puis son éruption.

La dent achevée est essentiellement constituée par la dentine, souvent revêtue d'émail sur sa couronne. Chez certains Reptiles (Crocodiliens) et chez tous les Mammifères, la ou les racines se recouvrent de cément. Celui-ci couvre également la couronne chez certains Mammifères. De composition voisine du tissu osseux (65 % de sels minéraux), il provient de la sécrétion de cellules mésenchymateuses de la partie profonde du sac dentaire, cellules différenciées en cémentocytes au contact de la dentine. Comme les ostéoblastes, les cémentocytes restent inclus dans la substance qu'ils ont déposée. Ce qui reste de la papille dermique embryonnaire se trans-

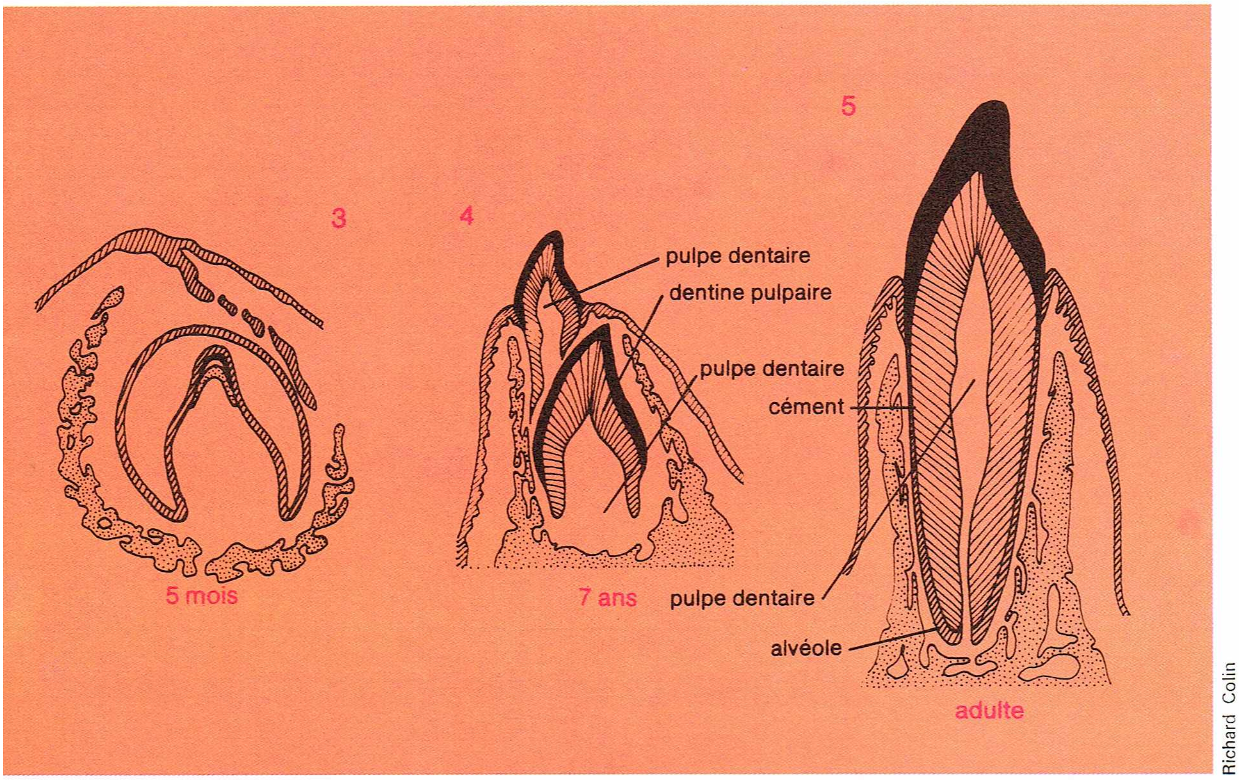

◀ ***Genèse d'une incisive inférieure de lait et de l'incisive définitive chez l'homme (d'après Beaumont et Ham).***

forme en pulpe, enfermée dans la cavité pulpaire; des nerfs et des vaisseaux la pénètrent en passant par l'orifice inférieur de la racine. Inactive pour les dents à croissance limitée, la pulpe sécrète dans les dents à croissance prolongée de la dentine secondaire qui comble peu à peu la cavité pulpaire.

Si, comme chez les non-mammaliens, il y a plusieurs arcades dentaires concentriques, chacune d'elles possède en continuité avec l'épithélium buccal sa lame dentaire propre, qui développe une lame dentaire de remplacement pour la génération dentaire suivante et ainsi de suite. Une génération dentaire chasse l'autre, les ostéoclastes assurant la résorption des racines des dents remplacées. Pour la croissance, le remplacement, le nombre et la forme des dents, se reporter au chapitre sur le squelette.

Les glandes buccales

L'épithélium buccal des Vertébrés inférieurs aquatiques contient de nombreuses cellules muqueuses, mais aussi séreuses. La lamproie adulte, carnassière, vivant en ectoparasite d'Ostéichthyens, possède en plus une paire de glandes anticoagulantes qui s'ouvrent dans la cavité buccale. Leur sécrétion, en s'opposant à la coagulation du sang, assure l'écoulement en un flot continu du sang de la victime. Quelques raies, comme la pastenague, possèdent également des glandes pluricellulaires.

L'existence de glandes buccales devient constante chez les Tétrapodes, ce qui n'exclut par la persistance de cellules isolées chez les Amphibiens et les Reptiles. Des cellules se concentrent dans des cryptes, elles-mêmes groupées en un champ. Le fond des cryptes devient exclusivement glandulaire; le champ entier se libère de l'épithélium, s'enfonce dans le chorion et devient une glande à plusieurs ouvertures *(polystomatique)* ou à canal excréteur unique *(monostomatique)*. La plupart de ces glandes sont muqueuses; toutefois, chez les Reptiles, se développent des glandes séreuses sécrétrices d'enzymes qui en font des glandes à venin, tandis que chez quelques Oiseaux granivores et chez les Mammifères elles peuvent sécréter une enzyme digestive, l'amylase.

Les glandes venimeuses des Reptiles

La bouche des Reptiles est très riche en glandes muqueuses, séreuses et mixtes. Les glandes séreuses du pourtour de la bouche, les glandes labiales, peuvent se différencier en glandes à venin.

Les hélodermes, seuls Sauriens venimeux (ils vivent dans l'Arizona, au Nouveau-Mexique, et au Mexique occidental), expulsent par cinq ou six canaux évacuateurs la sécrétion de deux glandes venimeuses, situées de chaque côté de la mandibule. Le venin s'écoule le long des dents mandibulaires, qui ne présentent aucune particularité en rapport avec l'inoculation du venin. Les hélodermes mordent avec une extrême virulence et ne desserrent plus les mâchoires. La morsure, souvent mortelle pour l'homme, provoque des accidents d'ordre cardiaque, respiratoire et hémorragique.

Les glandes venimeuses des Ophidiens sont considérées comme des glandes supérieures labiales modifiées. Selon l'appareil inoculateur du venin, on a divisé ces animaux en quatre groupes :

— Les *aglyphes,* dont les glandes ne se mettent pas en rapport avec les dents spécialisées; le venin se mêle aux autres sécrétions, et la proie ne peut en subir l'action qu'après avoir été mâchée et déchirée; les couleuvres, les boas, les anacondas et les pythons sont considérés comme non venimeux, tout au moins pour l'homme.

— Les *opisthoglyphes,* qui portent leurs dents venimeuses sur l'arrière du maxillaire supérieur; l'inoculation du venin ne peut se faire que sur une proie déjà fortement engagée dans la gueule; ils sont donc peu dangereux pour l'homme; la couleuvre de Montpellier, commune dans la zone de l'olivier, en est le seul représentant européen.

— Les *protéroglyphes,* qui portent des dents venimeuses canaliculées sur l'avant du maxillaire supérieur, dont la position ne change pas durant la morsure; la compression de la glande venimeuse par le muscle temporal permet l'expulsion d'un venin extrêmement toxique; la morsure des najas, des cobras, des mambas, etc., est le plus souvent mortelle.

— Les *solénoglyphes,* ou *Vipéridés,* qui ne possèdent plus qu'un seul crochet venimeux canaliculé par maxillaire; celui-ci pivote vers l'avant lors de l'attaque; toute une partie du muscle temporal passe au service de la glande et en assure l'évacuation lors de la morsure (« compresseur »).

Les venins sont des mélanges de substances dont chacune possède sa toxicité propre. Ces substances sont soit des enzymes, soit des toxines. On distingue : des neurotoxines, lésant les centres nerveux (perturbations cardiaques et respiratoires, paralysies) ; des hémorragines, altérant l'endothélium des vaisseaux sanguins; des hémolysines, qui font éclater les globules rouges (accidents respiratoires et allergiques) ; diverses enzymes, dont une coaguline, qui complètent l'action des toxines. La composition des venins des différentes espèces est encore

▼ ***Représentation schématique de la jonction émail-dentine dans une dent en formation (d'après Beaumont).***

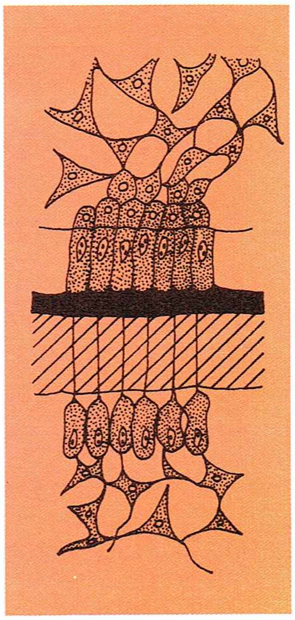

mal connue ; l'extrême gravité de la morsure des Vipéridés semble due surtout à la grande abondance des hémorragines.

Les glandes salivaires des Mammifères

De très nombreuses petites glandes débouchent dans la cavité buccale des Mammifères ; les formations les plus caractéristiques sont cependant les grosses glandes salivaires, généralement monostomatiques, muqueuses, séreuses ou mixtes, dont les caractéristiques varient beaucoup d'une espèce à l'autre. Chez l'homme, on distingue :

— Les *glandes parotides séreuses,* dont le canal excréteur de Sténon débouche au niveau de la deuxième molaire supérieure.

— Les *glandes sous-maxillaires et sublinguales mixtes ;* les sous-maxillaires (canal de Wharton), surtout séreuses, les sublinguales (canal de Bartholin), surtout muqueuses ; certains acini sont alors mixtes et les cellules séreuses se regroupent en petits amas (les croissants de Gianuzzi).

Les acini et les canaux de ces glandes sont plongés dans un stroma conjonctivo-vasculaire qui donne support à de riches plexus nerveux. Les cellules ganglionnaires sympathiques de ces plexus donnent des fibres vasomotrices ou excito-sécrétoires en rapport avec les cellules glandulaires.

La salive est un liquide incolore, mélange des sécrétions des trois glandes plus ou moins visqueux selon les conditions de sa formation. Elle a un pH voisin de la neutralité et contient plus de 99 % d'eau, des sels minéraux, de la mucine et une enzyme amylolytique, l'*amylase salivaire,* dont la présence est inconstante chez les Mammifères. La quantité sécrétée en 24 heures atteint 0,8 à 1,5 l chez l'homme, 40 à 45 l chez le cheval, plus de 50 l chez les bovins. L'arrivée de salive dans la bouche est continue, mais varie beaucoup en fonction de la prise de nourriture. L'activité sécrétoire est adaptée aux caractères physiques des aliments : chez un cheval, 500 g de fourrage vert reçoivent 350 g de salive, alors que 500 g de foin en reçoivent 2 500 g.

La sécrétion salivaire est soumise à l'hégémonie nerveuse : l'énervation des glandes abolit leur activité. La sécrétion est réflexe : les mouvements des mâchoires, la mobilisation de corps étrangers dans la bouche, la mastication, le contact des muqueuses buccale et linguale avec des produits pulvérulents insipides, des aliments sapides, des produits acides ou amers déclenchent une salivation qui s'adapte qualitativement et quantitativement aux circonstances de sa provocation. Les voies afférentes du réflexe salivaire sont les nerfs du goût (nerfs lingual, glossopharyngien, corde du tympan) ou diverses branches du trijumeau (nerf maxillaire...). Le réflexe conditionné salivaire fut mis en évidence par Pavlov dès 1897 (sécrétion psychique). La vue ou l'odeur de la viande ou du pain suscitent la sécrétion salivaire chez un sujet à jeun ; la représentation mentale, le souvenir d'un mets agréable font venir « l'eau à la bouche ».

La salive facilite la mastication et la déglutition, solubilise les matières alimentaires et les met au contact des bourgeons du goût, exerce une action digestive sur les glucides lorsqu'elle contient l'amylase salivaire, lubrifie les muqueuses buccale et linguale, facilitant ainsi l'élocution.

Le pharynx

Du point de vue embryologique, le pharynx est le segment antérieur du tube digestif dont l'épithélium est d'origine entoblastique. Cet épithélium, chez tous les embryons de Vertébrés, s'évagine entre les arcs viscéraux du splanchnocrâne en poches viscérales. Celles-ci peuvent s'ouvrir à l'extérieur et se recouvrir de branchies. Le pharynx peut alors, comme c'est le cas chez les Agnathes, créer un courant d'eau à double fonction, respiratoire et nutritive (nutrition microphagique). Avec l'acquisition de mâchoires préhensiles, (chez les Gnathostomes), la fonction nutritive disparaît, et, chez les Poissons et les larves d'Amphibiens, la fonction respiratoire s'accommode d'un volume pharyngien plus réduit. Cette seconde fonction disparaît à son tour chez les Vertébrés terrestres, où le pharynx devient vestigial, bourgeonne l'appareil pulmonaire et sert de voie de transit à l'air inspiré et expiré. Cette régression anatomique s'accompagne du développement de dérivés, détachés de l'épithélium pharyngien et différenciés en glandes endocrines : les parathyroïdes, le thymus et le corps ultimobranchial à partir de l'épithélium des poches viscérales, la thyroïde à partir de celui du plancher ventral.

Le pharynx des Agnathes

Le développement du pharynx est maximal chez les Agnathes fossiles ; certains Ostracodermes possèdent jusqu'à quinze paires de poches viscérales. Chez ces formes microphages et limicoles, le pharynx est utilisé comme un énorme filtre alimentaire.

Ces caractères se retrouvent chez les larves des lamproies actuelles (ammocètes) qui vivent dans la vase des rivières ou des ruisseaux ; elles se nourrissent des Bactéries, des Algues microscopiques et des Protozoaires qu'elles amènent dans la cavité buccale en provoquant un courant d'eau par des mouvements rythmiques de la corbeille branchiale et des battements rapides du velum (repli transverse du pharynx, en avant de la première poche). Les particules alimentaires sont enrobées de mucus sécrété par l'épithélium pharyngien, en particulier par le sac hypobranchial, et dirigées vers l'œsophage par le jeu des cellules ciliées (gouttière épipharyngienne). A la métamorphose, le pharynx se coupe de l'intestin qui lui fait suite et devient un cul-de-sac, l'*aqueduc*. Un bourgeon pharyngien antérieur et dorsal se développe en œsophage, lequel s'abouche à l'intestin. Chez l'adulte carnassier et hématophage, les poches branchiales aspirent et refoulent l'eau, qui entre et ressort par les orifices externes. L'aqueduc n'a plus qu'un rôle respiratoire.

Chez les myxines, à développement direct et mœurs carnassières, les poches branchiales, au nombre de six à treize paires, n'ont qu'un rôle respiratoire. Le courant d'eau créé par les battements du velum entre par l'orifice naso-hypophysaire ; les poches restent passives.

Le pharynx des Poissons

Le pharynx des Poissons n'a plus qu'un rôle respiratoire mais peut, dans quelques cas isolés, retrouver une fonction alimentaire.

Chez certains Téléostéens, l'épithélium pharyngien développe des dents, dites pharyngiennes, qui se soudent aux formations squelettiques des arcs branchiaux correspondants. Celles-ci forment alors les os pharyngiens supérieurs (pharyngo-branchiaux du 4ᵉ arc) ou inférieurs (cérato-branchiaux du 5ᵉ arc), qui peuvent porter chacun de quatre à dix dents sur une à trois rangées. Un système musculaire complexe assure la mobilité de ces os et le broyage des aliments. Les dents pharyngiennes sont très développées chez les Cyprinoïdes herbivores (la carpe, la tanche, le gardon...) et les Labroïdes, herbivores (labres) ou brouteurs de récifs coralliens (perroquets de mer), chez lesquels les os pharyngiens inférieurs se soudent en une puissante plaque dentée.

Les requins-pèlerins, planctonophages, réutilisent leur pharynx comme filtre alimentaire grâce aux branchitecnies très développées que portent les arcs branchiaux.

Le pharynx des Tétrapodes

Chez les larves d'Amphibiens, trois paires de fentes branchiales se percent (chez les Urodèles), quatre (chez les Anoures). Ces fentes n'ont de fonction respiratoire que chez les Anoures. A la métamorphose, elles se ferment et le pharynx régresse.

Si chez tous les embryons d'Amniotes les poches branchiales se forment, chez les Reptiles et les Oiseaux seules les deux ou trois premières se percent temporairement. Elles ne portent jamais de branchies. Un bourgeon impair médian de l'épithélium donne l'appareil pulmonaire, qui reste en communication avec le pharynx par la glotte. La poche spiraculaire (hyoïdienne) est annexée par les formations de l'oreille moyenne, dont elle constitue la cavité. Celle-ci conserve sa communication avec le pharynx par la trompe d'Eustache. Chez les Mammifères, au maximum de sa régression, le pharynx n'est donc plus que le carrefour des voies digestive et respiratoire.

Les dérivés pharyngiens

La thyroïde

Il semble démontré que la thyroïde est l'homologue de l'endostyle des Procordés et du sac hypobranchial des Ammocètes. Chez ces derniers, le sac hypobranchial est

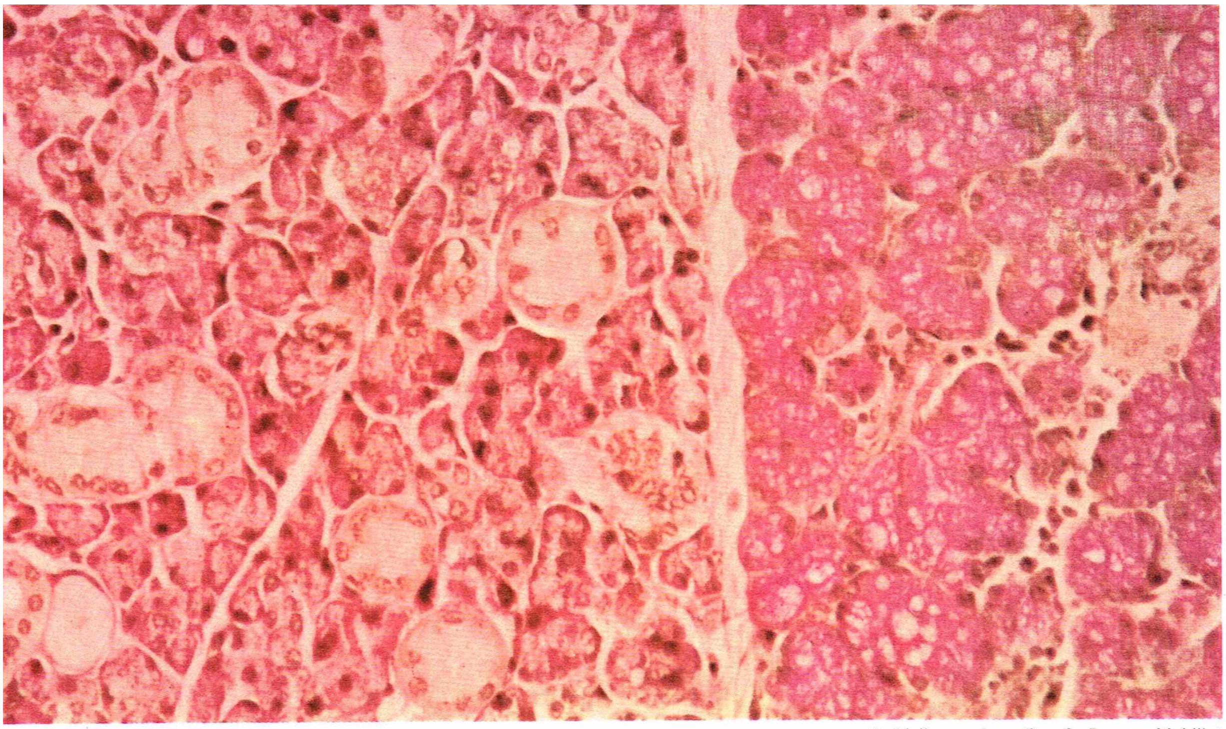

G. Volle - préparation S. Busson-Mabillot

◀ *Coupe de* glandes salivaires *de Rongeur : à gauche, une section de glande sous-maxillaire met en évidence les acini muqueux et les tubes sécréteurs séreux de cette glande mixte ; à droite, la glande rétrolinguale (sublinguale majeure) exclusivement muqueuse. Entre les acini muqueux, une section de canal excréteur.*

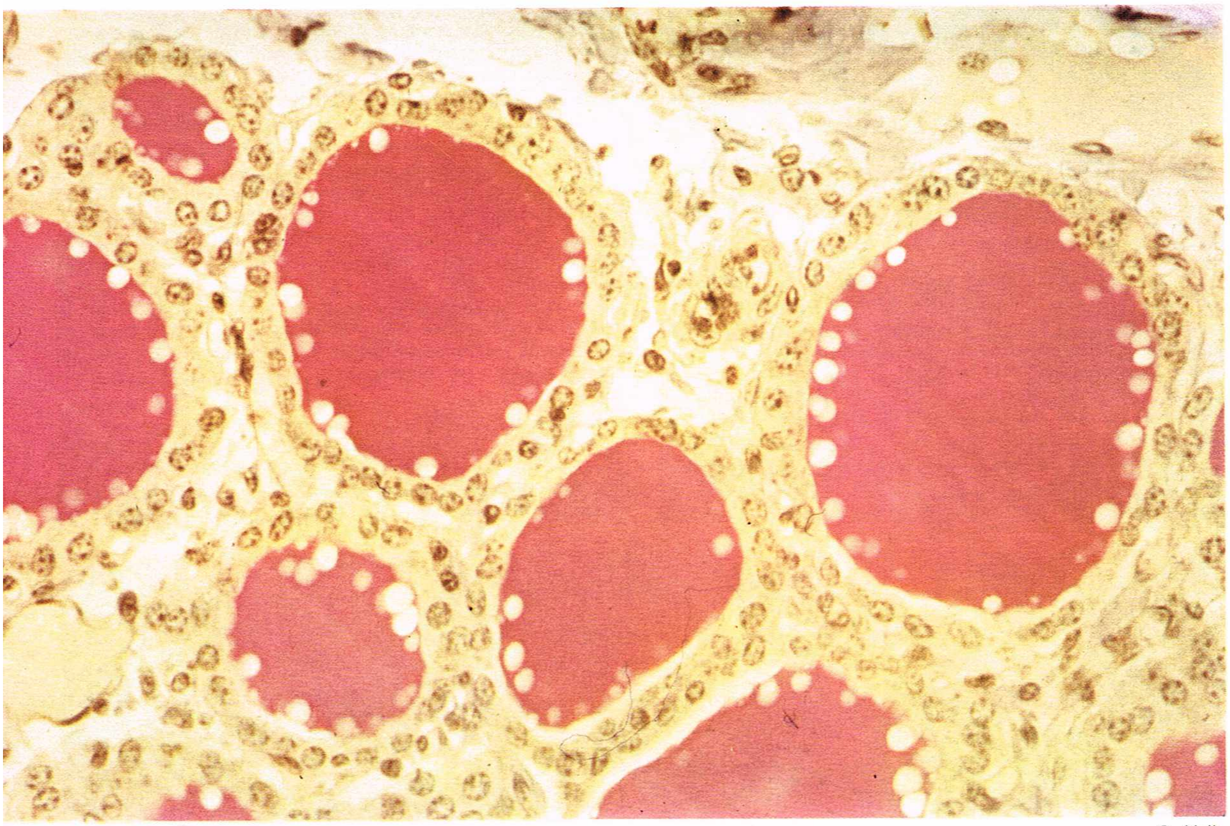

G. Volle

◀ *Coupe de* thyroïde *de Mammifère (cobaye) montrant l'organisation en follicules.*

une gouttière pharyngienne ventrale ciliée qui participe au processus de capture des particules alimentaires (sécrétion de mucus, cellules ciliées). Certaines portions de cette gouttière absorbent l'iode, l'incorporant à une mucoprotéine qui gagne le pharynx avec la sécrétion normale du sac. La protéine iodée est sans doute hydrolysée dans l'intestin et les hormones thyroïdiennes ainsi libérées réabsorbées par l'épithélium. A la métamorphose, le sac hypobranchial dégénère mais quelques cellules glandulaires s'organisent en follicules thyroïdiens typiques.

Chez tous les autres Vertébrés, la thyroïde provient d'un bourgeon de l'entoblaste pharyngien ventral antérieur. Ce bourgeon s'isole et ses cellules s'organisent en unités structurales et fonctionnelles, les follicules thyroïdiens. Chaque follicule est limité par un épithélium glandulaire simple entourant une cavité.

Par leur pôle basal, les cellules de l'épithélium fixent l'iodure sanguin qui transite vers le pôle apical où il est oxydé. Dans le même temps, le réticulum endoplasmique et l'appareil de Golgi assurent la synthèse d'une glycoprotéine spécifique, la *thyroglobuline*. Au pôle apical, s'effectue l'iodation de cette globuline sur les radicaux tyrosyl et thyronyl. La thyroglobuline iodée, accumulée dans la cavité centrale du follicule, constitue alors une réserve d'hormones thyroïdiennes (triiodothyronine, tétra-iodothyronine ou thyroxine). Les cellules peuvent mobiliser la globuline iodée et en assurer l'hydrolyse enzymatique, libérant les hormones, qui passent alors dans le sang. L'ensemble de ce processus est sous le contrôle d'une hormone hypophysaire, l'hormone thyréostimulante (TSH). L'ablation de l'hypophyse provoque la mise au repos de la thyroïde. Le mécanisme inverse, par lequel le taux d'hormones thyroïdiennes circulantes règle la sécrétion hypophysaire de TSH, demeure très complexe et non résolu.

Chez les homéothermes (Oiseaux, Mammifères), l'action la plus caractéristique des hormones thyroïdiennes réside dans l'élévation de la production d'énergie sous forme thermique et de la consommation d'oxygène des tissus. Ce phénomène serait lié à une action au niveau des mitochondries entraînant une diminution du rendement en ATP, des phosphorylations oxydatives. L'action

▶ Coupe de thymus *de Mammifère ; les lobules thymiques sont différenciés en zone corticale, dense, riche en lymphocytes, et en zone médullaire claire, où l'on peut noter des corps de Hassall caractéristiques du thymus.*

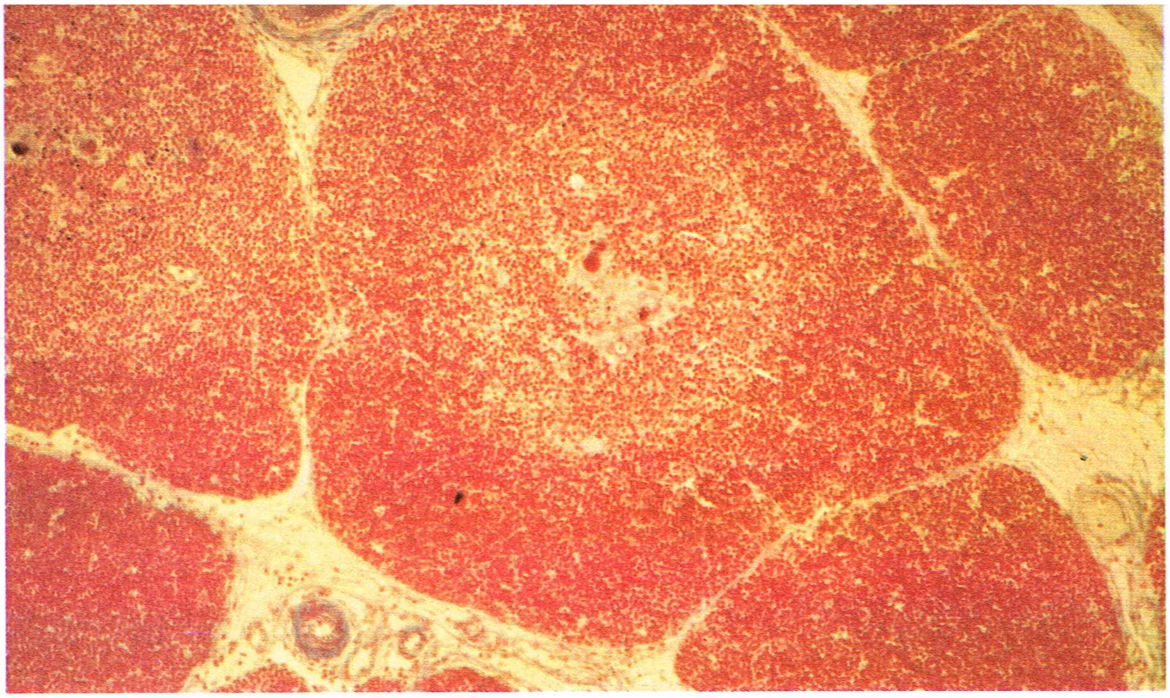

G. Volle - préparation S. Busson-Mabillot

calorigène des hormones chez les poïkilothermes reste difficile à démontrer. Chez ceux-ci, la mieux connue des fonctions de la thyroïde reste la régulation de la métamorphose des Amphibiens, découverte dès 1912 par Gudernatsch.

Chez les Agnathes et les Téléostéens, les follicules thyroïdiens sont dispersés le long de l'aorte ventrale et des artères branchiales afférentes. Chez les autres Vertébrés, ils restent rassemblés en un organe massif encapsulé, impair (chez les Chondrichthyens et les Reptiles) ou pair (chez les Amphibiens, les Oiseaux et les Mammifères).

Le thymus

Le thymus est constitué par un réseau de cellules épithéliales dont les mailles sont infiltrées de lymphocytes. Ceux-ci sont nombreux au niveau du cortex, où ils se multiplient très activement et pénètrent dans les vaisseaux sanguins et lymphatiques.

Il provient de bourgeons de l'épithélium dorsal de toutes les poches viscérales chez les Poissons, des poches viscérales 2 chez les Anoures, 3, 4 et 5 chez les Urodèles, 2 et 3 chez les Sauriens, 3 chez les Chéloniens, 4 et 5 chez les Ophidiens, 3 et 4 chez les Oiseaux. Chez les Mammifères, les ébauches proviennent de l'épithélium ventral des poches 3 et 4 ; l'ébauche 3 est prépondérante et existe seule chez les Rongeurs.

Si chez les Poissons le thymus garde des traces de son origine segmentaire, dans les autres groupes les bourgeons fusionnent en un organe pair ; celui-ci reste dorsal chez les Amphibiens et devient ventral chez les Reptiles et les Oiseaux, à la hauteur du cou, de chaque côté de la trachée. Chez les Mammifères, il pénètre dans la cage thoracique et coiffe le cœur.

Le thymus, qui croît pendant la vie embryonnaire et joue un rôle capital dans la formation des lymphocytes, atteint son développement maximal peu après la naissance (ris de veau) ; il involue ensuite. Il pourrait sécréter une hormone stimulant la formation des lymphocytes à partir des cellules souches dans la moelle osseuse, la rate et les ganglions lymphatiques. Cette hormone serait également responsable de la différenciation à partir de lymphocytes des plasmocytes du conjonctif (producteurs d'anticorps).

Les parathyroïdes

Les parathyroïdes n'existent que chez les Tétrapodes et proviennent de l'épithélium ventral ou dorsal (chez les Mammifères) des 3e et 4e paires de poches viscérales. Toujours situées au voisinage de la thyroïde (chez les

▶ Coupe de parathyroïde *de Mammifère (cobaye) ; la glande, constituée d'un massif compact de cellules glandulaires, est située sur le bord externe du lobe thyroïdien.*

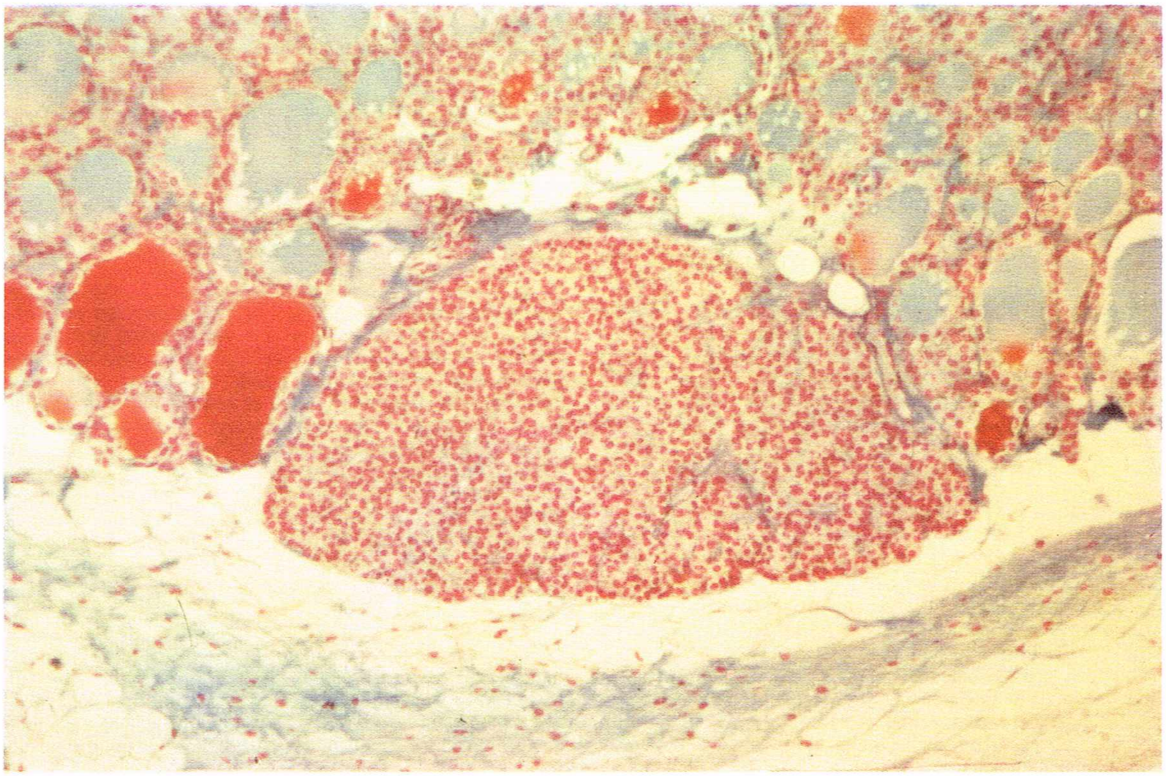

G. Volle

Mammifères, une paire peut même être incluse dans celle-ci), elles sécrètent la parathormone hypercalcémiante. La sécrétion de cette hormone semble directement régulée par la calcémie; un taux sérique important supprime l'activité de la glande, un taux sérique bas la stimule. Cette régulation fondamentale (excitabilité nerveuse), bien démontrée chez certaines espèces, semble totalement absente chez des espèces voisines, et cela aussi bien chez les Mammifères que chez les Oiseaux et les Amphibiens.

Les corps ultimobranchiaux

Ils proviennent toujours de la dernière paire de poches viscérales. Chez tous les non-mammaliens, ils sont indépendants de la thyroïde. Chez les Mammifères, ils sont incorporés au tissu thyroïdien pour donner sans doute les *cellules claires,* ou *cellules C,* ou encore *cellules parafolliculaires.* En 1962, on a démontré qu'une hormone, la *calcitonine,* avait des effets antagonistes de ceux de la parathormone. Après avoir pensé que les parathyroïdes en étaient la source, les chercheurs semblent maintenant admettre que ce sont les cellules claires de la thyroïde, appelées ainsi *cellules à calcitonine*. On a montré la présence de cellules à calcitonine dans les corps ultimobranchiaux des Oiseaux (poulet). Ces cellules pourraient provenir des crêtes neurales, les corps ultimobranchiaux ne servant que de support. L'origine extrapharyngienne de ces cellules est vigoureusement contestée.

L'œsophage

Simple conduit, l'œsophage reste droit à de rares exceptions près. Il est revêtu d'un épithélium pluristratifié, cilié chez les Cyclostomes et chez certains Téléostéens. Des cellules ciliées persistent encore chez les Chondrichthyens, les Amphibiens et quelques Reptiles. Elles représentent des restes de l'épithélium embryonnaire. L'œsophage de quelques tortues, de certains Oiseaux (canards) et de nombreux Mammifères se kératinise; chez les Rongeurs et les Cétacés, il existe même une couche desquamante.

Les Vertébrés inférieurs possèdent des cellules muqueuses; les Oiseaux et les Mammifères différencient des glandes œsophagiennes muqueuses ou séro-muqueuses, qui s'enfoncent dans la muqueuse (Oiseaux) ou la sous-muqueuse (Mammifères). De telles glandes se rencontrent exceptionnellement chez les Amphibiens et les Reptiles (Crocodiliens, Chéloniens).

Si le pharynx ne possède pas d'enveloppe musculaire continue, l'œsophage différencie une musculeuse, formée antérieurement de fibres striées qui se poursuivent plus ou moins loin chez les Chondrichthyens, les Téléostéens et les Mammifères. Dans ce dernier groupe, elles peuvent occuper toute la longueur (porc, Ruminants). Les Amphibiens, les Reptiles et l'ornithorynque n'ont que des fibres lisses.

L'œsophage des lamproies montre une modification en accord avec la succion exercée par la bouche, grâce à la rétraction du piston que constitue la langue. Il est pourvu de plis ou valves qui permettent à l'animal d'aspirer le sang, en évitant de le refouler vers l'avant et de l'envoyer dans l'appareil branchial.

Chez de nombreuses espèces d'Oiseaux, mais non chez toutes, l'œsophage présente une ample dilatation, le *jabot,* qui sert de réservoir alimentaire. Il est développé surtout chez les Rapaces, les Gallinacés et les Columbiformes. Les pigeons *sensu lato* nourrissent leurs petits avec le « lait » que sécrètent deux volumineuses aires glandulaires de la paroi. La prolifération de l'épithélium à leur niveau et la production du lait, très riche en lipides, sont sous le contrôle de la prolactine hypophysaire qui, chez les Mammifères, contrôle la sécrétion lactée. Le mâle comme la femelle régurgitent ce lait, que le jeune va chercher dans la bouche. Après le 16e jour, les parents régurgitent des graines prédigérées.

La *vessie gazeuse* (vessie natatoire), organe caractéristique des Actinoptérygiens, naît d'un diverticule impair et dorsal de l'œsophage, qui se développe vers l'avant et vers l'arrière, s'insinuant dans le mésentère puis sous la colonne vertébrale, au plafond de la cavité générale. Cette vessie reste en communication avec l'œsophage par un canal pneumatique chez les formes les moins évoluées (les Chondrostéens, les Holostéens, les Téléostéens primitifs comme le hareng, la carpe, la truite). Cette disposition *physostome* s'oppose à la disposition *physocliste* des Téléostéens les plus évolués (perche...), chez lesquels le canal s'oblitère et disparaît.

La paroi de la vessie est constituée d'une muqueuse à épithélium simple, doublée d'une musculeuse à fibres lisses. La vessie peut être simple (chez la truite) ou divisée en deux chambres séparées par un diaphragme musculaire (chez la tanche).

Le rôle de la vessie gazeuse n'est pas élucidé. Organe important mais non indispensable (dans un même genre, *Scomber,* l'espèce *colias* a une vessie, alors que l'espèce *scombrus* en est dépourvue), elle interviendrait comme

G. Volle

◀ ***Coupe transversale d'œsophage de Rongeur (cobaye) [vue d'ensemble]; l'épithélium, pluristratifié, desquame. Noter les* glandes muqueuses de Schaffer *dans la sous-muqueuse; la présence de ces glandes, la section d'un lobe thyroïdien et du cartilage cricoïde montrent qu'il s'agit de la région antérieure de l'œsophage.***

▶ *Représentation schématique du tube digestif de quelques* Vertébrés : *1, œsophage ; 2, estomac ; 3, intestin ; 4, « duodénum » ; 5, intestin grêle ; 6, gros intestin ; 7, côlon, 8, rectum (d'après Romer et Kent).*

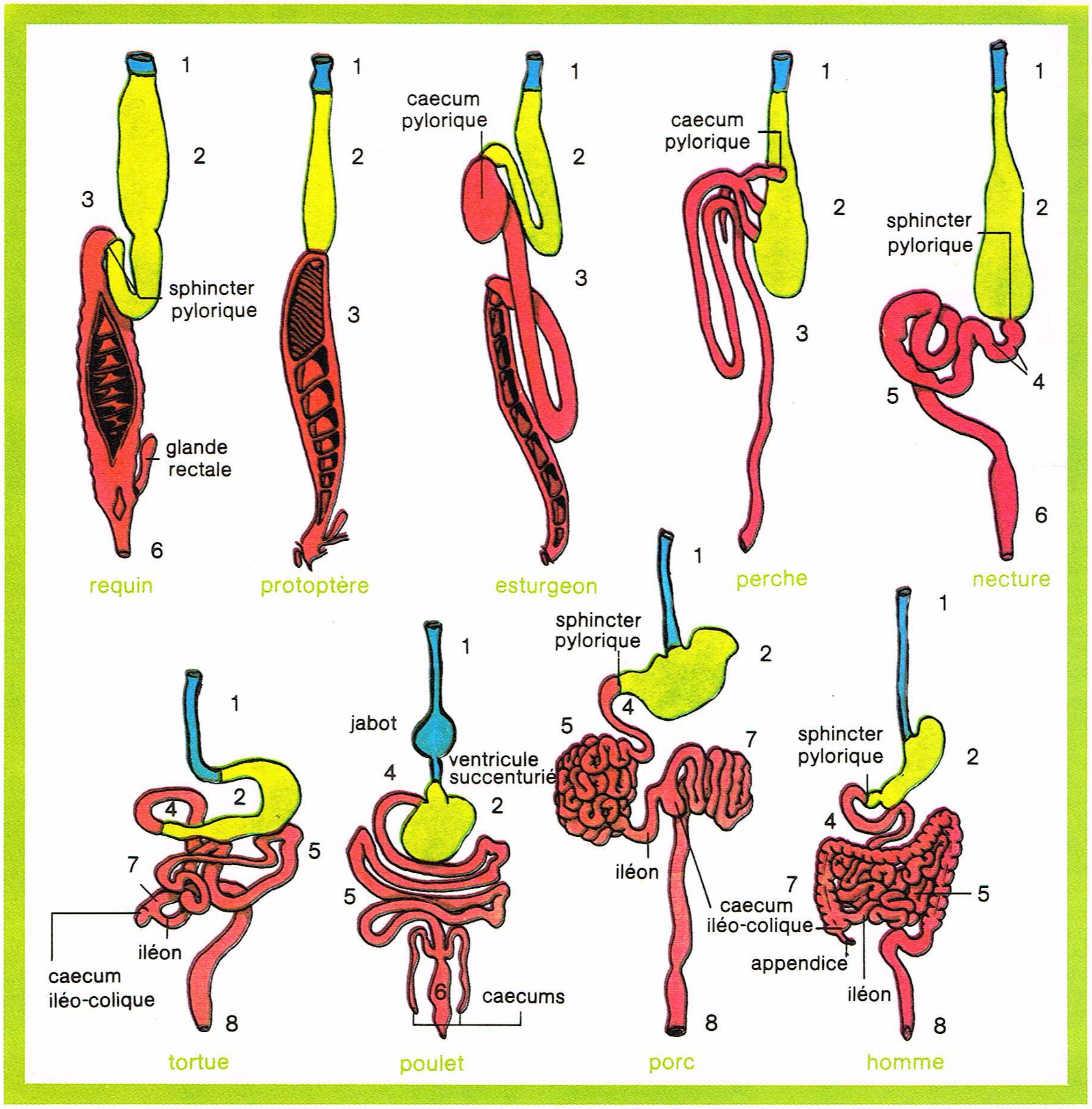

dispositif hydrostatique. Par le jeu de la sécrétion (niveau des *corps rouges*) et de l'absorption gazeuse (niveau de l'*ovale*), l'animal ajuste la pression gazeuse à la valeur convenable pour le niveau auquel le Poisson se maintient. Elle peut remplir d'autres fonctions : fonction auditive par ses relations avec l'oreille interne *(diverticules antérieurs* chez les Clupéiformes, chaîne des *osselets de Weber* chez les Cypriniformes), fonction respiratoire lorsque sa paroi interne s'alvéolise en rapport avec un accroissement de la vascularisation (gymnarque), fonction de production de sons (trigles).

L'estomac

L'estomac, qui n'existe que chez les Vertébrés, se caractérise essentiellement par ses sécrétions et non par sa forme ou sa position. Simple renflement chez certains Poissons, il peut se dilater en énormes culs-de-sac chez certains Mammifères herbivores.

La limite œsophage-estomac est marquée par le brusque remplacement de l'épithélium pluristratifié par un épithélium simple, muqueux (cellules à pôle muqueux fermé). Ces caractéristiques histologiques permettent non seulement de préciser l'absence d'estomac chez les Cyclostomes, les Holocéphales (chimères), les Dipneustes et beaucoup de Téléostéens (disparition secondaire), mais aussi de montrer qu'une partie très importante de l'estomac anatomique des Mammifères herbivores et même l'estomac tout entier des Monotrèmes ne constituent que de simples dilatations œsophagiennes.

▶ *Page ci-contre, en bas, deux schémas montrant la répartition des épithéliums œsophagien (bleu), cardiaque (rose), fundique (vert), pylorique (jaune) et intestinal (orange) dans la région gastrique de divers Vertébrés : A, squale ; B, anguille ; C, triton ; D, lézard ; E, paon ; F, ornithorynque (gb, glandes de Brünner) ; G, lapin ; H, cheval ; I, bœuf (p, panse ; b, bonnet ; f, feuillet ; c, caillette) ; J, porc ; K, homme.*

L'épithélium gastrique s'invagine dans le chorion en une multitude de glandes tubuleuses dont les cellules sécrètent à la fois une enzyme protéolytique, la pepsine, et de l'HCl. Chez les Mammifères, deux types cellulaires distincts assurent la sécrétion de l'enzyme et de l'HCl : respectivement, les *cellules principales* et les *cellules bordantes*. La présence de ces glandes gastriques, ou fundiques, permet de caractériser la *région fundique,* fondamentale, de l'estomac. A celle-ci il faut ajouter la *région pylorique,* à glandes muqueuses, et, chez certains Mammifères seulement, une *région cardiaque,* également à sécrétion muqueuse. Il est admis que les glandes cardiaques et pyloriques forment une faible quantité d'enzyme mais pas d'HCl.

Le premier rôle de l'estomac, celui de régulateur de l'écoulement des ingesta, est lié à ses capacités de stockage. L'acide chlorhydrique permet la conservation des aliments durant celui-ci, contribue à leur liquéfaction et chez les animaux qui ingèrent des proies vivantes aide à les tuer.

Le second rôle de l'estomac est mécanique. Si la musculature présente une disposition typique, elle est cependant particulièrement développée, et les vigoureuses contractions qui suivent la prise de nourriture, combinées aux effets de l'HCl et de la pepsine, réduisent les ingesta en une suspension semi-fluide, laquelle peut alors franchir la valvule pylorique.

La troisième fonction est digestive. La pepsine, en solution acide à pH exceptionnellement bas (pH 1), hydrolyse des liaisons peptidiques spécifiques et fragmente les

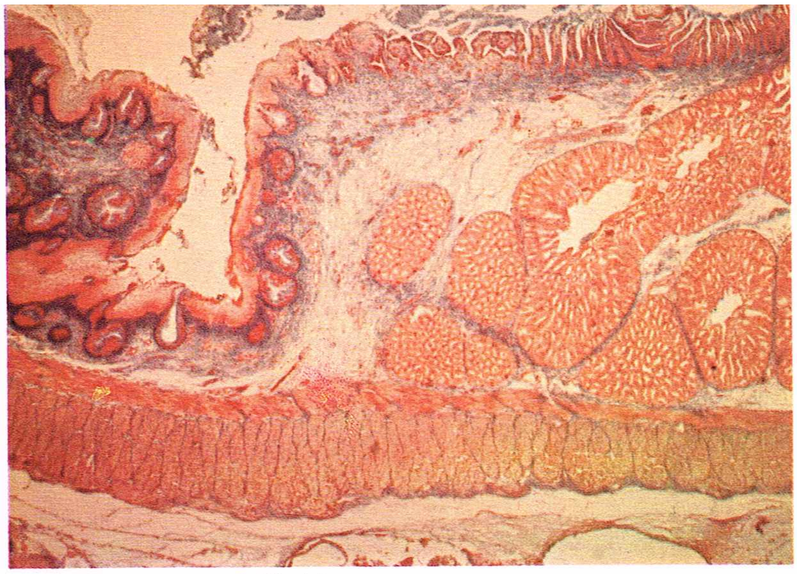

G. Volle - préparation M. F. Winckel

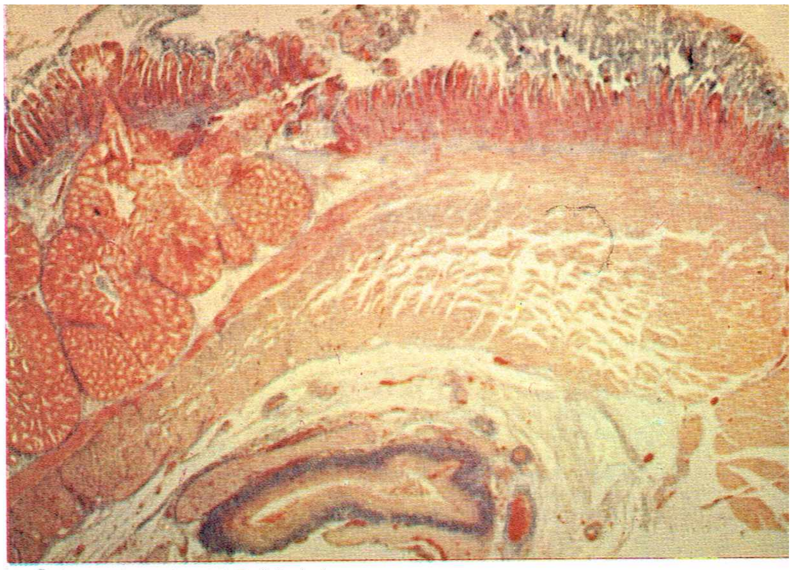

G. Volle - préparation M. F. Winckel

▲ ***Coupes longitudinales d'estomac d'Oiseau (poulet); à gauche, dans la région de passage œsophage-ventricule succenturié : l'épithélium œsophagien, pluristratifié, se kératinise et différencie des glandes muqueuses; le ventricule succenturié possède un épithélium unistratifié et des glandes acineuses composées séreuses qui sont localisées, selon les auteurs, dans le chorion ou la sous-muqueuse; deux couches de fibres, l'une sous l'épithélium, l'autre sous les glandes, peuvent en effet être assimilées à la musculaire de la muqueuse; à droite, région de passage ventricule succenturié-gésier : au niveau du gésier, les glandes séreuses disparaissent, la musculeuse devient très importante et l'épithélium sécrète une « cuticule » protectrice.***

grosses molécules protéiques. Elle hydrolyse les liaisons peptidiques situées entre un acide aminé aromatique, comme la tyrosine et la phénylalanine, et un acide aminé dicarboxylique, comme l'acide glutamique ou l'acide aspartique. D'autres enzymes protéolytiques présentent la même spécificité, mais aucune n'agit à un optimum de pH aussi bas.

La régulation de la sécrétion gastrique a été largement étudiée chez les Mammifères. Chez l'homme, réduite à quelques millilitres par heure dans les périodes non digestives, la sécrétion gastrique devient très abondante à chaque prise de nourriture; sa production est de 2 à 3 litres par 24 heures.

Chez un chien, on peut établir une fistule gastrique et une fistule œsophagienne abouchant à la peau la portion supérieure de l'œsophage sectionné : les aliments déglutis sont rejetés à l'extérieur et le repas devient fictif (expérience de Pavlov, 1895); un repas constitué de viande fait apparaître une abondante sécrétion, qui dure 1 à 2 heures. Cette sécrétion ne se produit pas lorsque les deux nerfs pneumo-gastriques sont sectionnés. Son mécanisme est donc nerveux. A l'inverse de ce qui se passe pour la salivation, ni la mastication, ni la déglutition ne sont en cause, puisque, si celles-ci portent sur des matières non alimentaires, la sécrétion ne s'installe pas. En fait, c'est la nature de l'aliment qui intervient. Dès 1868, Longet notait que l'odeur ou la vue des aliments déclenchent une sécrétion gastrique abondante chez le chien porteur d'une fistule. L'élément psychique tiendrait le premier rang dans cette première phase de la sécrétion, ou *phase céphalique*.

A celle-ci succède une *phase gastrique*, bien mise en évidence chez un chien porteur d'un petit estomac de Pavlov. Un repas ingéré normalement chez un tel animal fait apparaître une sécrétion qui persiste pendant 8 à 10 heures. L'énervation du petit estomac ne l'empêche pas de se produire. La transfusion à un chien à jeun du sang d'un autre chien en pleine digestion détermine la sécrétion de l'estomac de l'animal transfusé. Cela prouve la réalité d'un mécanisme humoral de cette sécrétion. L'agent sécréteur, ou *gastrine*, est produit par la muqueuse pylorique.

L'*arrivée du chyle dans le duodénum* ajoute son effet à celui des deux phases précédentes. Cette phase est semblable à la phase gastrique; on admet que c'est la même gastrine, sécrétée par la muqueuse duodénale, qui contrôle la sécrétion.

Deux types d'estomacs méritent une description particulière.

— L'*estomac des Oiseaux*. Chez tous les Oiseaux l'estomac est partagé en un ventricule succenturié et un gésier.

● Le *ventricule succenturié*, qui succède à l'œsophage, est glandulaire. Les glandes sécrètent du mucus ainsi que de la pepsine et de l'acide chlorhydrique, c'est-à-dire du suc gastrique susceptible, chez certains Oiseaux carnivores, de dissoudre de gros os.

● Le *gésier*, postérieur, pallie l'absence de dents et assure un broyage très énergique des aliments, qui y subissent l'action du suc gastrique. La paroi du gésier développe deux plaques musculaires latérales, extrêmement puissantes chez les Oiseaux granivores. La muqueuse sécrète une sorte de cuticule qui la protège contre les aspérités des petits cailloux avalés par l'Oiseau; ceux-ci demeurent dans le gésier et aident au broyage. Le gésier se contracte rythmiquement (2 ou 3 fois par minute chez la poule). La pression atteint des valeurs élevées : 280 mm de Hg par mm² chez l'oie. Cet organe sert de

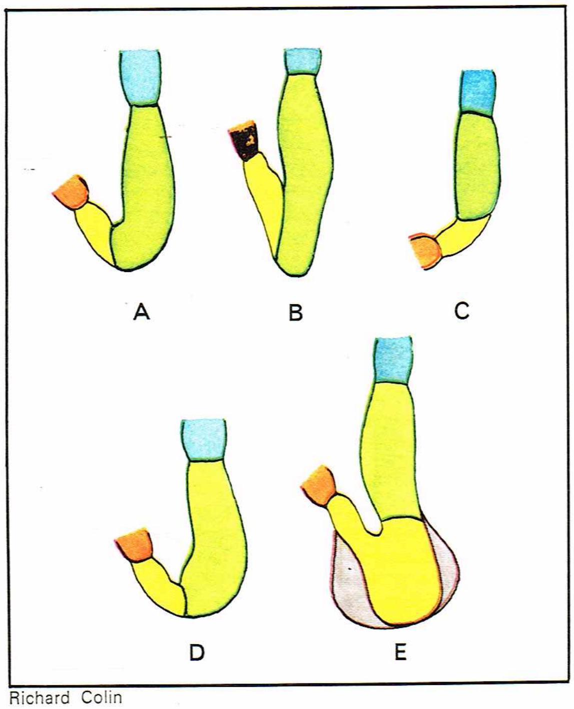

Richard Colin

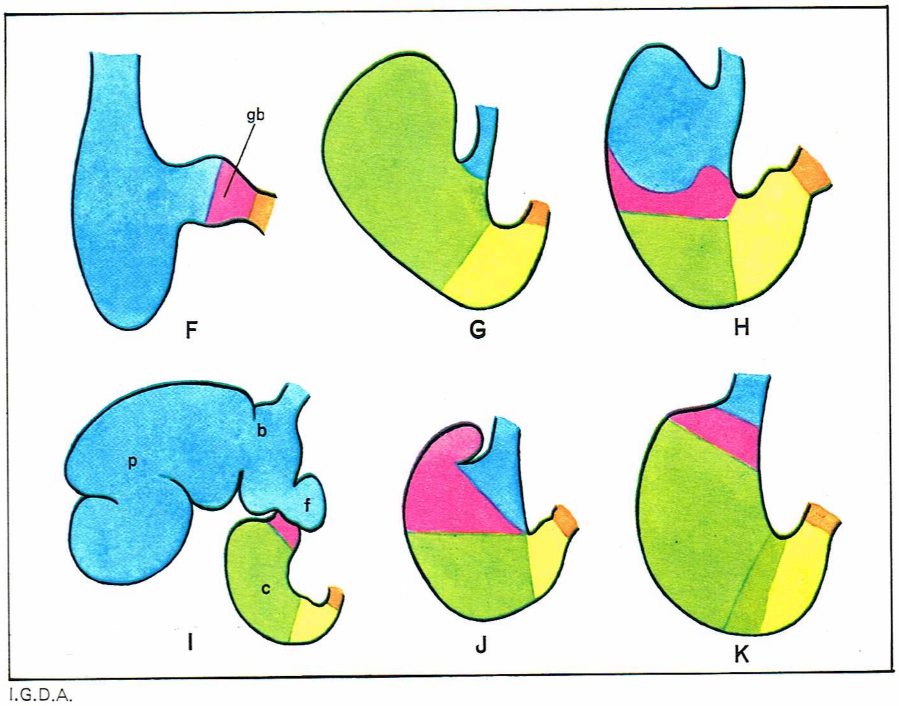

I.G.D.A.

▶ *Représentation schématique du transport des lipides à travers la muqueuse intestinale : AG, acides gras; TG, triglycérides (d'après Isselmacher). A droite, coupe transversale d'intestin d'Amphibien (triton) : épithélium unistratifié à cellules absorbantes à bordure en brosse (liséré rouge) et cellules muqueuses calciformes (gouttelettes de mucus en rouge); chorion et sous-muqueuse confondus, musculeuse mince.*

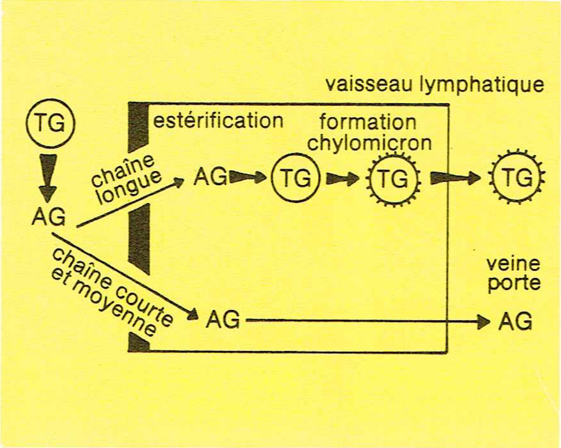

Richard Colin

G. Volle

barrage aux poils, plumes, os, coquilles, carapaces chez les Rapaces diurnes et nocturnes, qui les expulsent régulièrement sous forme de pelotes de régurgitation.

— L'*estomac des Mammifères Ruminants*. Uniloculaire chez la plupart des Mammifères herbivores, l'estomac devient énorme et se subdivise chez l'hippopotame et les Ruminants (moutons, chèvres, cerfs, antilopes, chameaux, girafes, bœufs).

L'*estomac antérieur* des Ruminants est partagé en trois loges :

● La *panse*, ou *rumen*, qui représente 80 % du volume total (250 l chez la vache), peut accumuler une énorme quantité de nourriture; sa muqueuse est lisse.

● Le *bonnet*, ou *réseau*, possède une muqueuse soulevée de replis à disposition pentagonale ou hexagonale; il représente 5 % du volume total (15 l chez la vache).

● Le *feuillet*, ou *psaltérium*, représente 7 % du volume total (20 l chez la vache) ; sa muqueuse est soulevée par une centaine de replis lamellaires.

Chez le veau en période d'allaitement, une « gouttière œsophagienne » permet de court-circuiter la panse et le bonnet. Le lait passerait alors directement de l'œsophage au feuillet.

L'estomac *postérieur*, ou *caillette*, représente 13 % du volume total. La partie antérieure, à replis internes spiralés, correspond à la région fundique, la partie postérieure à la région pylorique. Des glandes cardiales existent au passage feuillet-caillette.

La panse et le bonnet sont le siège de fermentations bactériennes intenses aux dépens de la cellulose. Ces fermentations sont favorisées par une salivation importante (60 l par 24 h) et riche en bicarbonate qui neutralise les acides gras libérés. Le CO_2 formé au cours de cette neutralisation et le méthane libéré par la fermentation sont éliminés par éructation. Les acides gras sont absorbés par la muqueuse. La rumination permet une nouvelle mastication des fibres végétales grossières, non encore attaquées par les Bactéries.

L'intestin

Durant la digestion gastrique, le chyme est maintenu dans la cavité stomacale par la valvule pylorique. Lorsqu'il a atteint un état semi-fluide, celle-ci commence à s'ouvrir à chaque arrivée d'une onde péristaltique. Le contenu stomacal est ainsi périodiquement éjecté dans l'intestin. Là, il subit d'abord l'action des sécrétions du pancréas et du foie.

Le pancréas sécrète tout un jeu d'enzymes en milieu alcalin, en particulier deux **peptidases** (la *trypsine* et la *chymotrypsine*), une **amylase** et une **lipase**. Les peptidases sont sécrétées sous forme inactive et sont activées par une enzyme intestinale, l'*entérokinase*, puis par la trypsine elle-même lorsqu'elle est formée. La trypsine agit sur les liaisons peptidiques pour lesquelles des acides aminés dibasiques comme l'arginine ou la lysine portent le groupement CO, tandis que la chymotrypsine agit sur des liaisons où ce sont des acides aminés aromatiques tels que la tyrosine ou la phénylalanine qui portent ce groupement. Ces deux enzymes opèrent en solutions légèrement alcalines (pH 7 à 9). Leur action, comme celle de la pepsine, permet la fragmentation des grosses molécules protéiques. Ces trois enzymes, qui s'attaquent à des liaisons internes aux molécules protéiques, sont qualifiées d'*endopeptidases*.

Un mécanisme humoral contrôle la sécrétion pancréatique. L'hormone en cause, la *sécrétine*, fut la première hormone mise en évidence expérimentalement. En 1902, Bayliss et Starling montrèrent que le pancréas du chien, privé de son innervation, sécrète lorsque du suc gastrique ou une solution acide sont introduits dans le duodénum; un extrait acide de muqueuse duodénale injecté dans le sang provoque la sécrétion pancréatique alors qu'il n'y a aucune relation autre que circulatoire entre pancréas et intestin.

La bile, sécrétée par le foie, émulsionne les lipides et active la lipase pancréatique.

Structure de la muqueuse intestinale

L'épithélium intestinal simple est constitué de cellules caliciformes à mucus, de cellules séreuses et de cellules absorbantes à plateau strié (microvillosités). Sauf chez les Cyclostomes et les Poissons, l'épithélium s'invagine en *glandes de Lieberkühn*, au fond desquelles se différencient les cellules séreuses qui sont à l'origine des enzymes du suc intestinal (*cellules de Paneth* des Mammifères). La région antérieure de l'intestin des Mammifères, ou duodénum, possède des *glandes de Brünner*, tubuleuses, muqueuses à sécrétion alcaline. Celle-ci protégerait la muqueuse duodénale des effets corrosifs du chyme au sortir de l'estomac. Le chorion est souvent infiltré d'amas lymphoïdes, disséminés sous forme de « follicules clos » ou groupés en amas, très développés chez les Mammifères *(plaques de Peyer)*.

Rôle du suc intestinal

Les cellules séreuses de l'épithélium sécrètent une série d'enzymes, en particulier, deux exopeptidases, des dipeptidases, l'entérokinase, une amylase, des disaccharidases et une lipase. Les grands fragments protéiques laissés intacts par les endopeptidases sont repris par les exopeptidases. Une carboxypeptidase agit sur les liaisons peptidiques terminales lorsque l'acide aminé de bout de chaîne porte le groupement carboxyle (COOH) libre, tandis qu'une aminopeptidase agit de même lorsque le dernier acide aminé possède un groupement amine (NH_2) libre. La chaîne polypeptidique est ainsi attaquée par ses deux extrémités et libère des acides aminés. Des dipeptidases agissent sur les dipeptides restants. L'amylase, les disaccharidases et la lipase intestinales ajoutent leur action à celle du suc pancréatique.

L'absorption intestinale

Processus actif qui a lieu dans la portion distale de l'intestin, l'absorption est facilitée par différents dispositifs qui permettent d'augmenter la surface de contact entre l'épithélium et le chyle.

Les Cyclostomes et les Poissons, à l'exception des Téléostéens, ont un intestin gros et court, dont la lumière est occupée par un repli longitudinal spiral, la *valvule spirale*. Celle-ci ralentit considérablement le cheminement

▶ *Page ci-contre, ultrastructure du foie : 1, l'hépatocyte met en réserve du glycogène (gl) mis en évidence par la technique au protéinate d'Ag (foie d'alevin de truite; × 10 000); 2, canalicule biliaire : espace tubulaire villeux sans paroi propre; ici, entre 3 hépatocytes (foie de têtard d'Amphibien; × 8 500); 3, sinusoïde (S) dans le foie d'alevin de truite (× 10 000) : noter le revêtement endothélial mince et discontinu (flèches) et l'espace péricapillaire de Disse (ED); en encart, des granules de lipoprotéines de très basse densité (flèche), rejetés dans l'espace de Disse par les hépatocytes, gagnent la lumière du sinusoïde (× 20 000); G, golgi; L, lysosome; m, mitochondrie; N, noyau.*

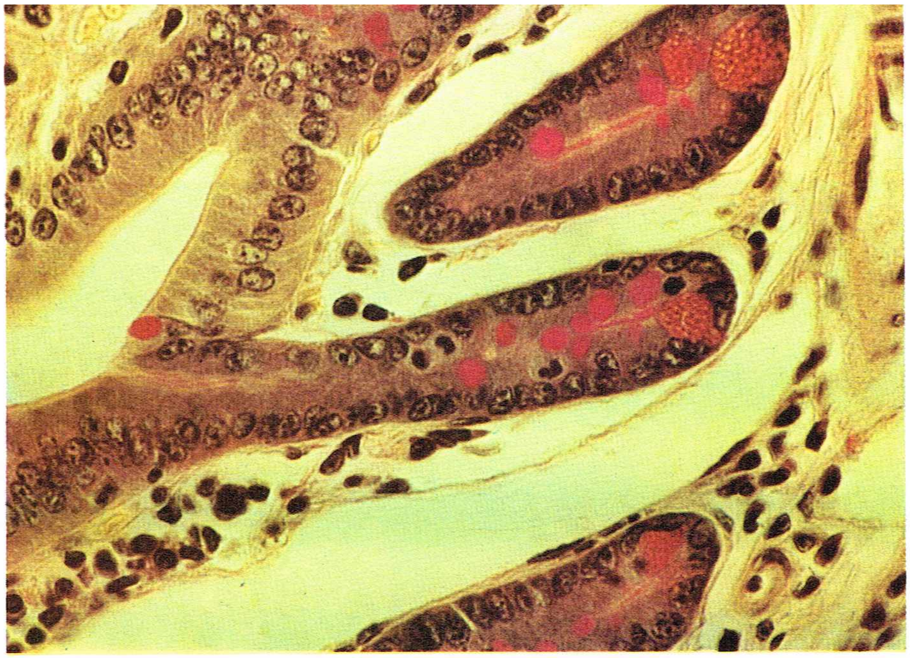

◀ *Coupe transversale de duodénum de souris : détail de glandes de Lieberkühn avec cellules de Paneth en fond de cryptes, caractérisées par leurs grains de secrétion colorés en orangé.*

G. Volle

du chyle en augmentant son trajet. Cette disposition, très développée chez les requins, est plus discrète chez les Chondrostéens, les Holostéens et les Dipneustes. Elle disparaît chez les Téléostéens.

Chez les Téléostéens et les Tétrapodes, l'intestin reste grêle, mais s'allonge, formant de nombreuses circonvolutions. Chez les Oiseaux et les Mammifères, l'épithélium se soulève en une multitude d'évaginations microscopiques en doigt de gant, les *villosités intestinales*. Chez les Mammifères, des replis transversaux, à support musculaire, les *valvules conniventes*, augmentent encore la surface épithéliale, qui peut atteindre 40 m² chez l'homme. N'oublions pas que le pôle apical des cellules absorbantes est formé d'une multitude de microvillosités (plateau strié).

Les deux cæca des Oiseaux et le cæcum unique des Mammifères, qui marquent la limite entre l'intestin grêle et le gros intestin sans villosités, ne semblent pas avoir de rôle essentiel. Les cæca pyloriques de nombreux Actinoptérygiens (Téléostéens, Chondrostéens, Holostéens) constituent, par contre, des dispositifs absorbants supplémentaires.

Les substances absorbées par l'intestin sont mises à la disposition de l'organisme par deux voies différentes. Une partie de l'eau, les sels minéraux, les oses, les acides aminés, les acides gras à chaîne courte ou moyenne (en dessous de 10 carbones) empruntent la voie sanguine et atteignent donc, par la veine porte, le foie. L'autre partie de l'eau et les acides gras à longue chaîne empruntent la voie lymphatique. Ces acides gras sont au préalable réestérifiés en triglycérides à l'intérieur même des cellules épithéliales. Ceux-ci sont entourés d'une enveloppe composée de phospholipides, d'esters du cholestérol et de protéines pour former des lipoprotéines, les *chylomicrons*, qui passent dans la lymphe.

Le foie et le pancréas

Le foie et le pancréas proviennent du bourgeonnement de l'épithélium intestinal en arrière du pylore. Ils fonctionnent tous deux comme glandes exocrines et comme glandes endocrines.

Développement embryonnaire

Quatre bourgeons épithéliaux se développent : le bourgeon ventral est hépatique, les deux bourgeons latéraux et le bourgeon dorsal sont pancréatiques.

Les cordons épithéliaux hépatiques viennent au contact des veines vitellines, qui ramènent le sang au sinus veineux. Ils les entourent et les fragmentent en capillaires irréguliers : les sinusoïdes, qui constituent le système porte-hépatique sur le trajet des veines vitellines. Leur partie préhépatique devient la veine porte-hépatique, et la partie posthépatique devient les veines sus-hépatiques.

Chaque ébauche pancréatique est formée de cordons épithéliaux pleins, qui se creusent et se ramifient. Leurs extrémités se différencient en culs-de-sac dilatés, les acini exocrines. Leurs parois bourgeonnent des massifs cellulaires pleins qui s'isolent en *îlots endocrines de Langerhans*. Les trois ébauches fusionnent, mais trois canaux excréteurs s'individualisent.

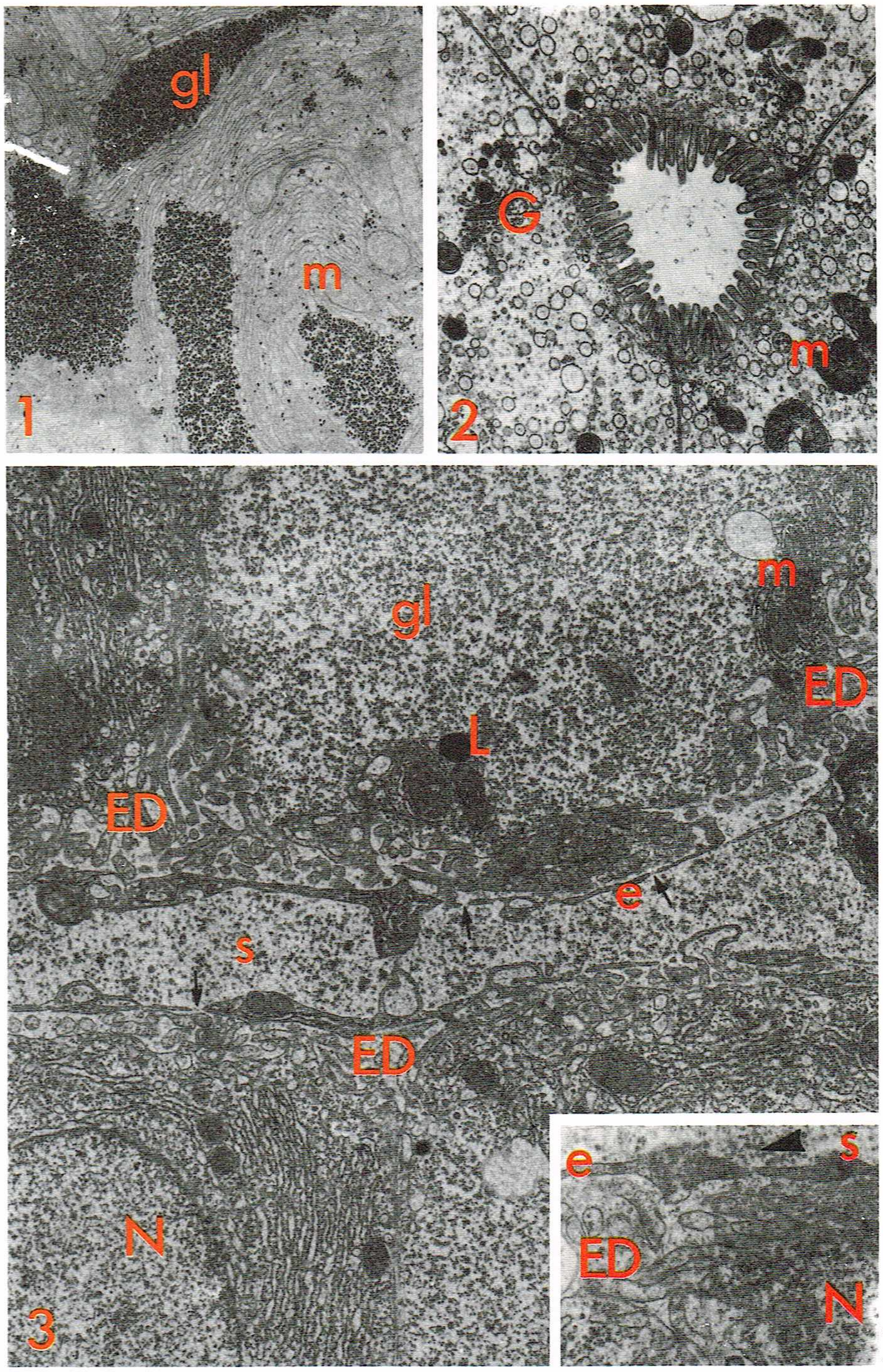

A. Beaumont

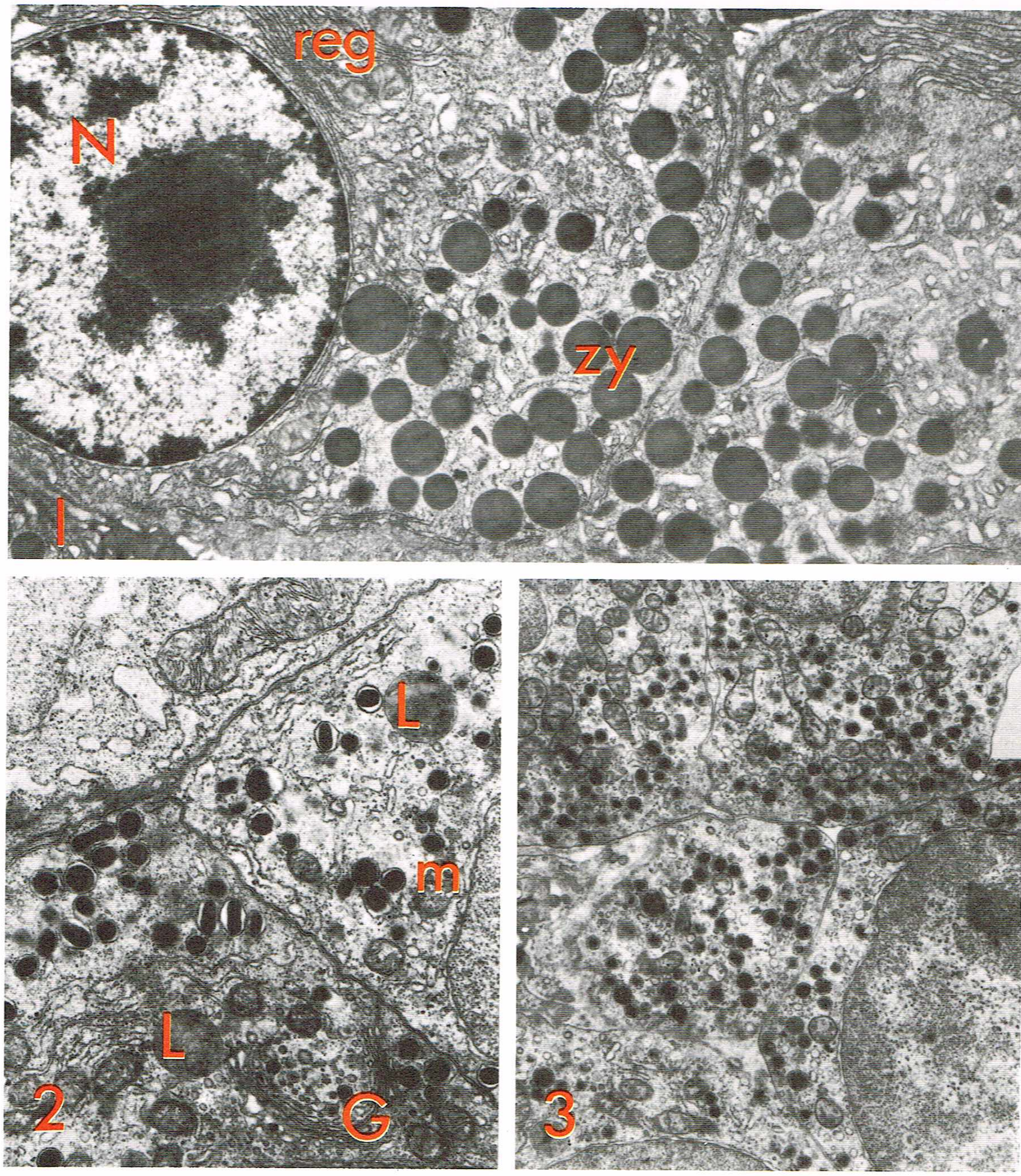

▶ ***Ultrastructure du pancréas d'un têtard d'Amphibien*** (Alytes) : ***1, détail de deux cellules exocrines : réticulum endoplasmique granulaire développé (reg), nombreux grains de zymogène (zy)*** [× ***18 000***]; ***2, détail de deux cellules A à grains α; noter leur formation à partir de l'appareil de Golgi (G)*** [× ***10 000***]; ***3, détail de 3 cellules B à grains β; les grains ont un contenu à contour irrégulier, souvent d'aspect pseudo-cristallin*** [× ***10 000***]; ***L, lysosome; m, mitochondrie; N, noyau.***

Le foie

Sa sécrétion externe produit la *bile ;* celle-ci, en plus de son rôle dans la digestion, permet l'élimination, sous forme de pigments biliaires, des produits de la dégradation de l'hémoglobine après la destruction des hématies.

Le foie reçoit tous les matériaux absorbés au niveau de l'épithélium intestinal. Ces matériaux sont stockés et transformés dans le foie puis retournent au sang, sous leur forme initiale ou non. Le foie restitue en particulier le glucose après l'avoir polymérisé sous forme de glycogène ; il effectue la synthèse de la majeure partie des lipoprotéines plasmatiques, dont le rôle est d'assurer la stabilité de la concentration lipidique du plasma ; il effectue également la synthèse des protéines plasmatiques (globulines...). Son équipement enzymatique est donc exceptionnel.

La cellule hépatique, polyédrique, présente deux types de faces : celles qui sont au contact d'une autre cellule hépatique ménagent entre elles des espaces tubulaires villeux, les *canalicules biliaires,* où la bile est sécrétée ; celles qui sont au contact des capillaires sanguins sont séparées de la paroi de ceux-ci par les *espaces de Disse.* Ces capillaires, ou *sinusoïdes,* à calibre irrégulier, et à paroi endothéliale discontinue, permettent le passage du plasma dans l'espace de Disse, et donc son contact direct avec l'hépatocyte. Certaines cellules endothéliales, les *cellules de Kupffer,* peuvent se transformer en cellules phagocytaires. Les canalicules biliaires, sans parois propres, débouchent dans des canaux biliaires intra-hépatiques, à paroi mince, qui se réunissent en un ou plusieurs canaux extra-hépatiques.

Le pancréas

Le tissu exocrine pancréatique, qui forme presque la totalité du pancréas, se présente comme une volumineuse glande acineuse composée. Sa sécrétion, le suc pancréatique, est déversée dans l'intestin antérieur sous l'influence de la sécrétine. Les canaux excréteurs débouchent au voisinage du canal cholédoque. Normalement massif, le pancréas est diffus chez la plupart des Actinoptérygiens.

Le tissu endocrine se présente sous forme d'îlots de Langerhans dispersés dans le tissu exocrine. Plusieurs catégories cellulaires ont été décrites. Nous retiendrons les cellules dont la sécrétion agit sur la régulation de la glycémie : les cellules A sécrètent le glucagon, hyperglycémiant ; les cellules B sécrètent l'insuline, hypoglycémiante.

La nutrition des Invertébrés

Les Invertébrés ont des régimes alimentaires très divers.

— *Les macrophages* peuvent se nourrir de matière organique vivante : végétaux pour les *herbivores,* animaux pour les *carnivores;* ils peuvent aussi se contenter de matière organique morte : charognes pour les *nécrophages,* déjections d'animaux pour les *coprophages,* matières organiques en décomposition pour les *saprophages.*

— *Les microphages* sont aquatiques et se nourrissent des particules en suspension dans l'eau et de plancton; ils peuvent aussi récupérer les débris organiques déposés sur les fonds ou enfouis dans la vase. Dans les deux cas, ils profitent des Bactéries qui se multiplient à la surface des matières organiques.

— *Les osmotrophes,* moins difficiles, se contentent des molécules organiques dissoutes dans le milieu ambiant.

La capture et l'ingestion de la nourriture

L'osmotrophie

Nutrition à l'échelle moléculaire, l'osmotrophie ne fait intervenir aucun organe spécialisé; les molécules organiques sont transférées directement du milieu ambiant à l'animal à travers ses parois. Ce type de nutrition caractérise les parasites (Cestodes, Acanthocéphales) qui n'ont pas de tube digestif et intervient secondairement dans la nutrition des Éponges, Annélides, Mollusques, etc.

La microphagie

La microphagie caractérise des animaux aquatiques peu actifs, souvent fixés.

Régimes à base de plancton et de particules organiques en suspension dans l'eau

Les Invertébrés qui ont ces régimes possèdent, le plus souvent, des organes spécialisés qui leur permettent de créer des courants d'eau, de filtrer celle-ci et de retenir les particules organiques, enfin d'agglomérer ces particules et de les transférer vers la bouche. Il n'existe pas un type unique de « filtre » mais plusieurs modèles, qui reposent sur des unités anatomiques différentes : *cils, soies, cellules à mucus.*

— *Les cils* sont portés, le plus souvent, par des filaments : pectinés et disposés en couronne autour de la bouche chez les Polychètes Sabellidés *(Sabella pavonina),* accolés les uns aux autres en feuillets repliés en W chez les Mollusques Lamellibranches (moule). Ils créent par leurs battements des courants d'eau qui entraînent les particules en suspension à travers les mailles des filets ainsi formés. Les particules sont retenues par les sécrétions muqueuses des filaments. Enrobées de mucus, elles sont ensuite véhiculées à l'intérieur de gouttières ciliées jusqu'à la bouche, au voisinage de laquelle un système complexe de sillons ciliés (portés par les palpes chez les Lamellibranches) trie les éléments organiques en fonction de leur masse. Seules les particules les plus fines atteignent la bouche.

— *Les soies* sont portées par des appendices mobiles. Ceux-ci forment ainsi de véritables râteaux avec lesquels les Invertébrés (Crustacés, Insectes aquatiques) rabattent les matières organiques en suspension vers leur bouche. Chez les petites espèces (Crustacés Branchiopodes, Ostracodes, Cirripèdes) tous les appendices en portent; de ce fait, elles interviennent aussi bien dans la locomotion que dans la nutrition. Chez les individus de grande taille, elles sont portées par des appendices spécialisés dans la nutrition (par exemple, les premières pattes locomotrices d'*Upogebia,* un Thalassinidé fouisseur).

— *Les cellules muqueuses* sont disposées de façons diverses. Dispersées chez certains Invertébrés (*Antedon,* un Crinoïde; *Ophiocomina,* un Ophiuride) sur tout le corps, elles les recouvrent de mucus, les transformant ainsi en « attrape-mouches » capables de piéger toutes les particules organiques venant à leur contact; ces particules sont, par la suite, entraînées vers la bouche par des gouttières ciliées. Groupées chez certains Polychètes *(Nereis, Chaetopterus),* elles fabriquent des voiles de mucus, lesquels, après avoir été déformés en nasse, sont placés en travers du tube habité par l'animal, qui y maintient avec ses parapodes un courant d'eau. Le ver se nourrit en avalant périodiquement le culot de particules organiques aggloméré au fond de la nasse.

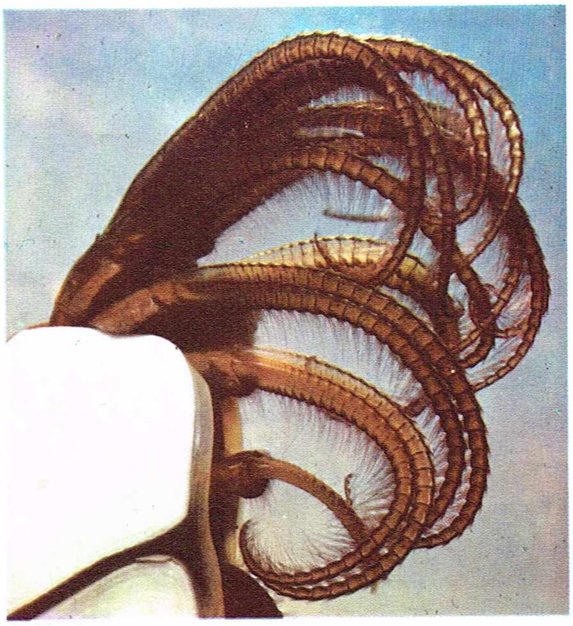

A. Margiocco

◄ *Panache de cirres de* Lepas anatifera *dont les mouvements rythmiques amènent les proies au niveau de la bouche de l'animal.*

R. Bluzat

▼ *Un* Stylifer *fixé sur un Échinoderme* (Psammechinus) *; c'est un exemple de Gastéropode parasite ayant perdu sa radula et qui se nourrit du liquide intérieur des oursins.*

Cedri - C. Rives

◄ *Chez les Polychètes Sabellidés* (Sabella penicillus), *les cils sont portés par des filaments pectinés, disposés en couronne autour de la bouche.*

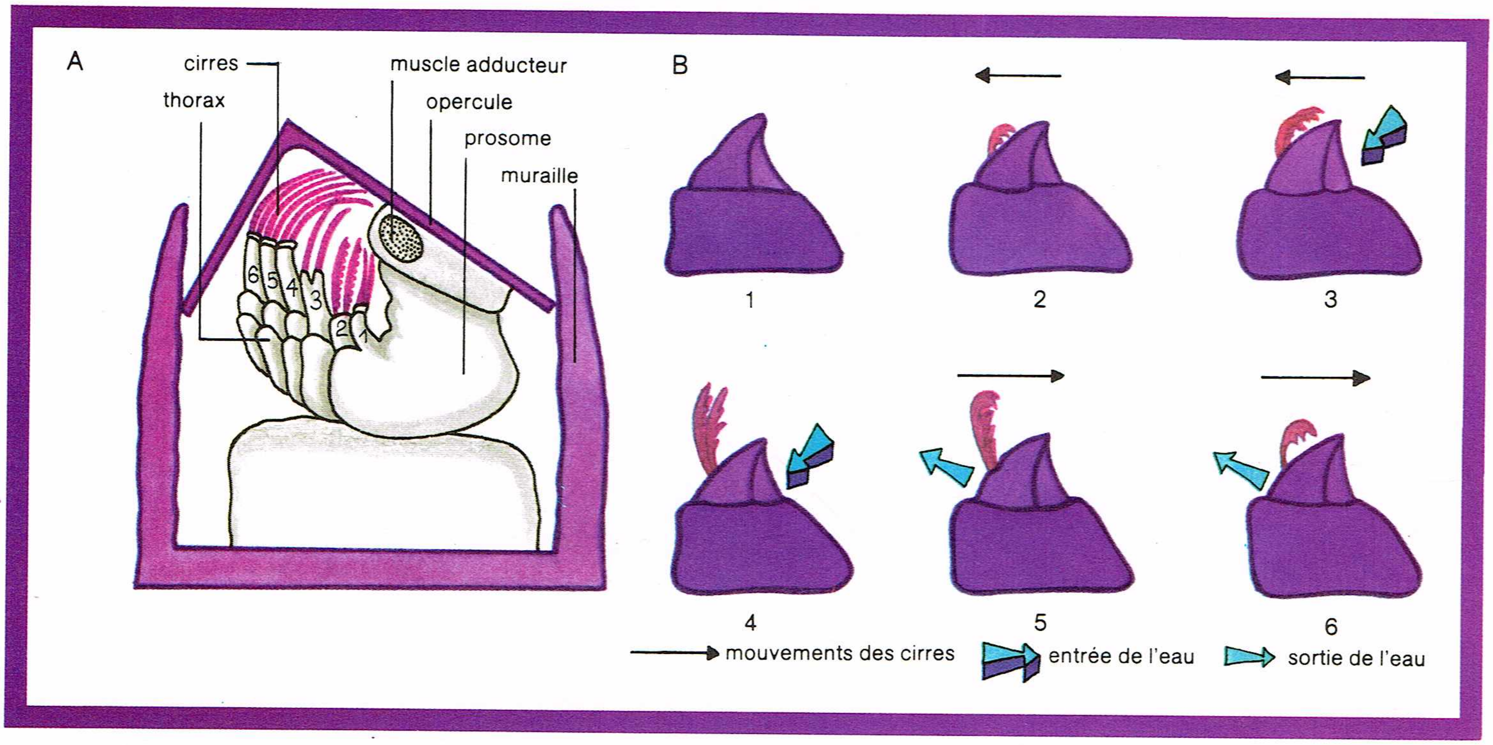

Richard Colin

▲ *La nutrition des balanes : A, schéma d'une balane dont on remarquera les tailles différentes des appendices thoraciques (cirres) qui portent de longues soies (les 3 premières paires [1 à 3], courtes, servent à recueillir les fines particules, les 3 dernières [4 à 6], longues, servent à recueillir les grosses particules) ; B, schéma montrant le fonctionnement des cirres.*

▼ *Nutrition microphage chez* **Sabella pavonina** *(Annélide, Polychète).*

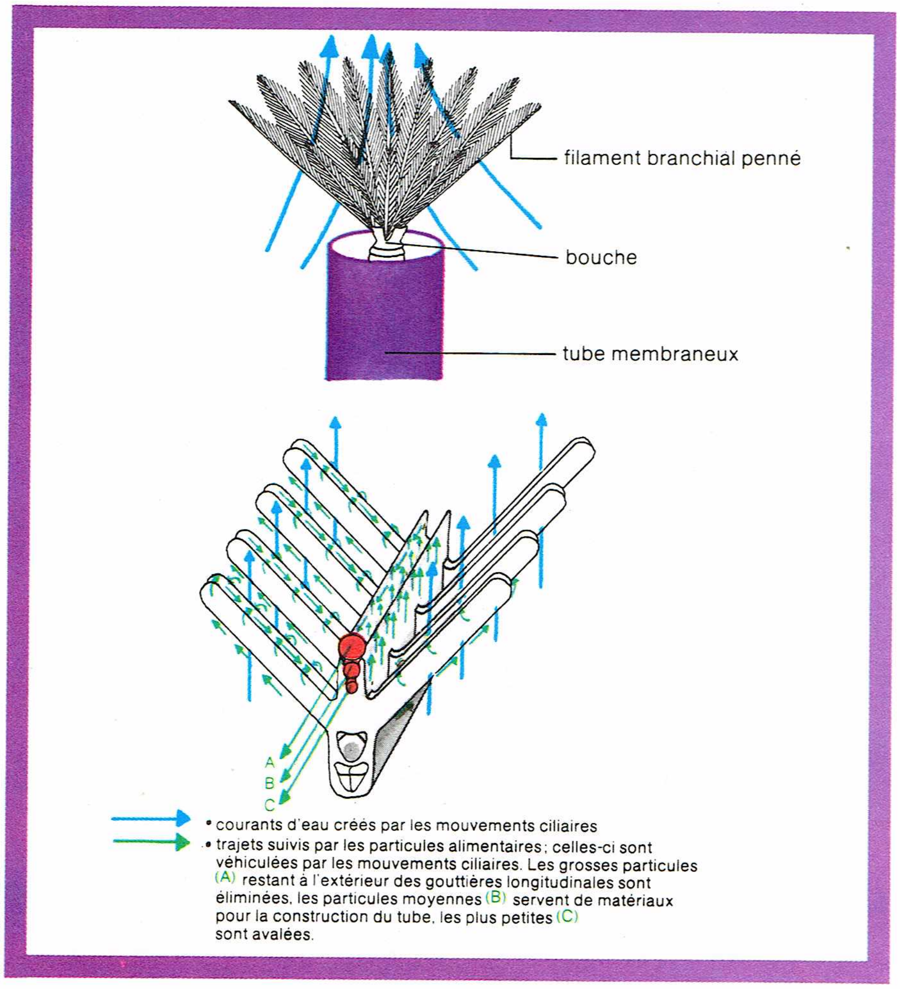

Richard Colin

Régimes à base de débris organiques sédimentés

De tels régimes caractérisent les Invertébrés dits « sédimenteurs ». Certains, comme l'amphitrite (Polychète Térébellidé) et le dentale (Mollusque Scaphopode), possèdent autour de leur bouche des filaments pêcheurs qui leur permettent d'explorer le milieu solide environnant, de choisir les particules organiques et de les transporter à la bouche (transfert ciliaire pour les petites particules, transfert par contractions musculaires des filaments pour les grosses).

D'autres, comme les scrobiculaires (Lamellibranches) ou les *Corophium* (Crustacés Amphipodes), remettent en suspension les dépôts organiques en grattant les fonds avec leurs siphons ou leurs antennes ; ils récupèrent les particules comme le feraient les animaux « filtrants » appartenant aux mêmes groupes.

D'autres, enfin, moins délicats, avalent les sédiments et la matière organique, en creusant dans le sol ou la vase (ver de terre, arénicole).

La macrophagie

La macrophagie est le fait d'Invertébrés aquatiques ou terrestres contraints de rechercher, de capturer et de broyer leur nourriture d'origine végétale ou animale.

Les **foreurs**, vivant dans leur milieu nutritif, ont une activité qui se réduit au broyage. Celui-ci leur permet de se nourrir et de se loger dans des bois : bois flottant pour les tarets, les *Limnoria* (Isopodes) et les *Chelura* (Amphipodes), bois mort pour les larves des Cérambycidés, bois sur pieds pour les larves de Scolytidés.

Les **brouteurs** s'attaquent à des organismes passifs : des plantes s'ils sont phytophages, des animaux fixés (Hydraires, Bryozoaires) s'ils sont carnivores. Dès qu'ils ont trouvé l'emplacement de leur nourriture, leur activité se réduit à la trituration des aliments ; celle-ci est effectuée par des organes buccaux ou des appendices spécialisés : mâchoires des Euniciens (Polychètes), radula des Mollusques Gastéropodes, lanterne d'Aristote des Échinodermes, mâchoires des Crustacés, des Myriapodes et des Insectes.

Enfin, les **prédateurs** s'attaquent à des animaux actifs. De ce fait, ils ont des comportements très élaborés pour tendre des pièges à leurs victimes (toiles d'Araignées, entonnoirs creusés dans le sable par les larves de fourmilions), pour chasser à l'affût (la crevette *Alpheus*, les larves de libellules), pour chasser à la course, à la nage, en vol (Diptères Asilidés). Les prédateurs sont dotés d'organes préhenseurs spéciaux : par exemple, les bras pêcheurs des seiches, les tentacules des pieuvres, les pinces des Crustacés, les pattes ravisseuses des Insectes.

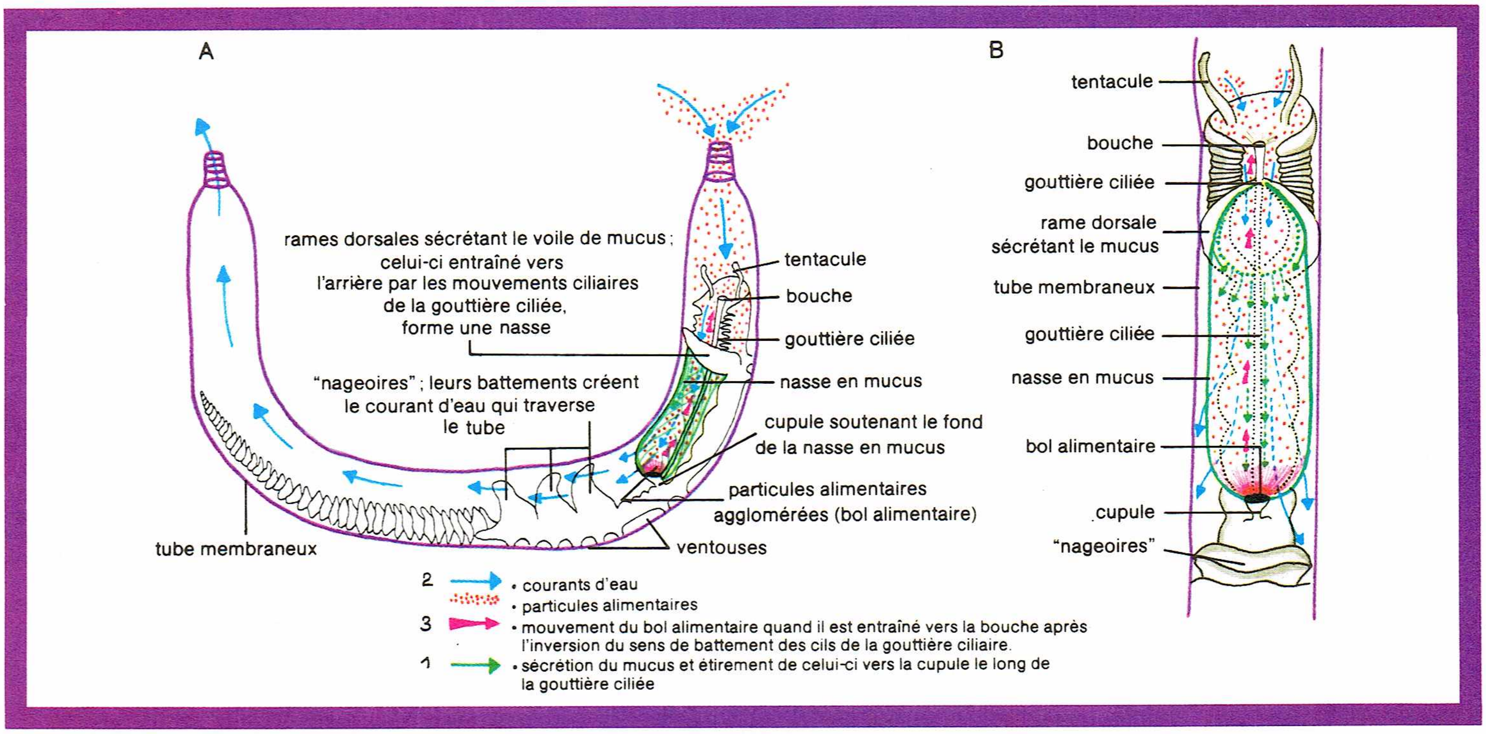

Ils possèdent des organes de mastication : par exemple, les mâchoires des Crustacés et des Insectes, les becs de perroquet des Céphalopodes. Chez certaines espèces, des glandes à venin viennent s'ajouter à tout cet arsenal : citons les aiguillons des Hyménoptères (abeille), la glande caudale des scorpions, les chélicères venimeux de certaines Araignées, les glandes salivaires des Céphalopodes.

Les régimes à base de liquides

Les liquides peuvent être obtenus directement. Ainsi, le Nématode endoparasite *Ancylostoma caninum* se nourrit des exsudats qu'il fait sourdre en pressant les microvilli de l'épithélium intestinal du chien. Certains Insectes (Diptères, Hyménoptères, Lépidoptères) ont différencié séparément des pièces buccales leur permettant de sucer, d'éponger et de pomper les exsudats produits par les animaux (sueur) ou par les végétaux (nectar).

Les liquides peuvent également être obtenus après effraction du milieu qui les contient. Le sang, la sève, le jus des fruits sont la nourriture habituelle de certains Invertébrés : les ectoparasites, les moustiques (Diptères), les punaises (Hémiptères) qui prélèvent ces liquides après une action perforante de leurs pièces buccales.

Ils peuvent, enfin, être obtenus à la suite d'une digestion extra-orale (Chélicérates, larves de la mouche à viande *Lucilia sericata*).

Facteurs intervenant sur la prise de nourriture

La nutrition non sélective

Les Invertébrés microphages ne montrent aucune sélectivité de type qualitatif vis-à-vis des particules qui leur sont présentées.

Chez les **microphages « filtrants »**, la quantité de nourriture avalée dépend de plusieurs facteurs.

— *L'efficacité du piège;* celle-ci est inversement proportionnelle à la grandeur des mailles : ainsi, le mucus (mailles de 0,04 μ chez *Chaetopterus*) est plus efficace que les cils (mailles de 3 μ chez l'huître), et ceux-ci sont plus efficaces que les soies (mailles de 4 à 6 μ chez le Copépode *Calanus*).

— *Le volume d'eau filtré;* celui-ci varie selon : l'espèce (le sycon, Éponge calcaire, filtre 170 ml/mg N, la moule 110 ml/mg N, le chætoptère 37 ml/mg N); la taille de l'animal (le volume est d'autant plus fort que l'animal est petit : par exemple, une moule de 45 g filtre 20 ml/g/h, alors qu'une moule de 5 g en filtre 120 ml/g/h);

▲ Nutrition d'un chætoptère (Annélide, Polychète) : A, vue latérale; B, vue dorsale. L'activité nutritive compte 3 phases successives : 1, sécrétion de la nasse en mucus; 2, prise au piège des particules et construction du bol alimentaire; 3, véhiculation du bol alimentaire vers la bouche.

▼ Nutrition d'un Annélide Polychète, Térébellidé.

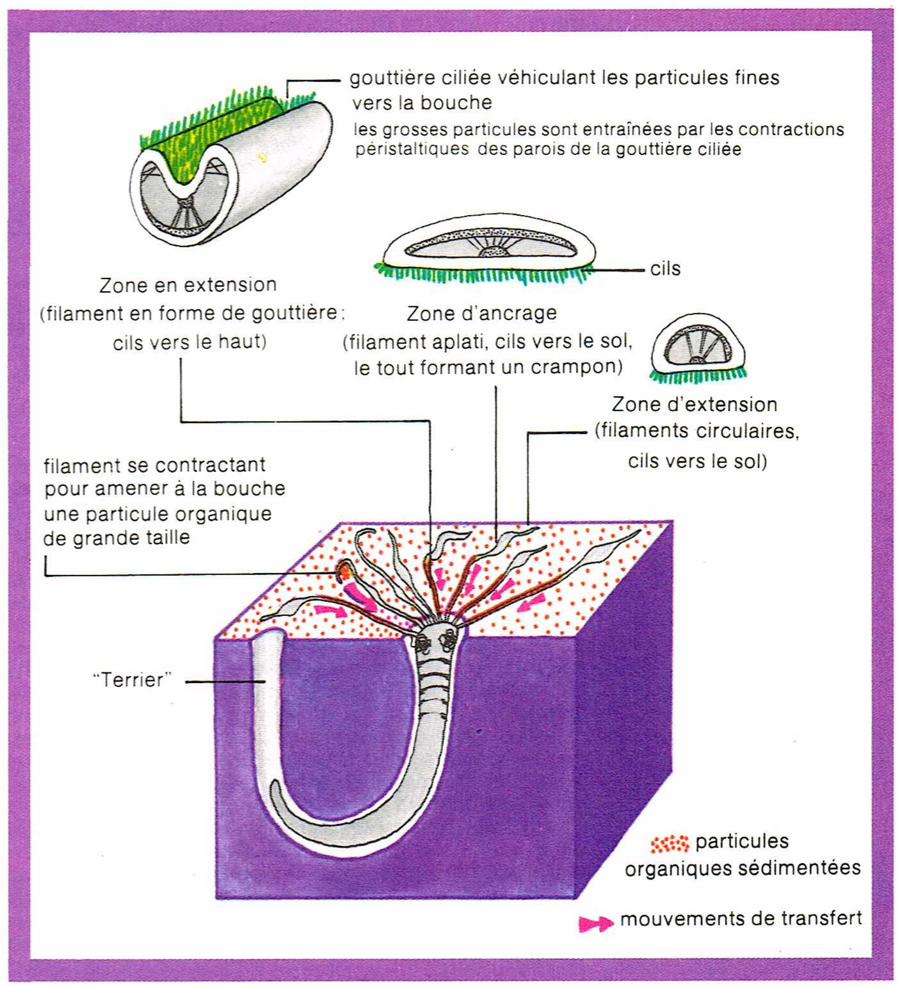

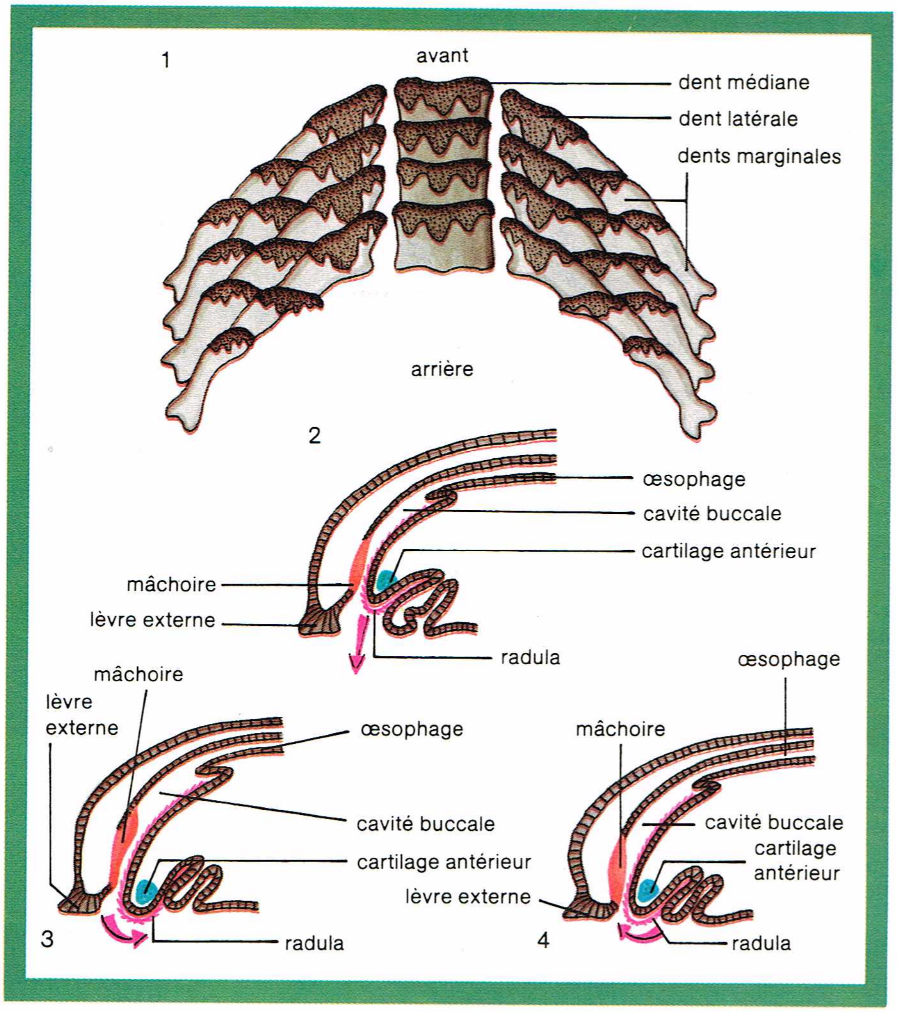

Richard Colin

▲ ***Représentation schématique d'une radula, 1, de* Littorina littorea, *et son fonctionnement; 2, saillie de la radula à l'extérieur; 3 et 4, mouvements de va-et-vient de la radula permettant l'usure des substrats nutritifs.***

la température, qui agit positivement entre 0 °C et 30 °C sur l'activité ciliaire (les cils de la moule passent de 30 à 120 battements par minute entre 0 °C et 30 °C).

— *La durée des périodes* pendant lesquelles ils peuvent être exondés.

— *La richesse en particules organiques* du milieu ambiant.

Chez les **microphages « sédimenteurs »,** la quantité de nourriture ingérée dépend directement de la richesse des sédiments en produits organiques. Celle-ci est d'autant plus grande que la granulométrie du fond est petite; les sédimenteurs s'installent donc aux endroits où les sables vaseux sont fins.

La nutrition sélective

Tous les Invertébrés macrophages ainsi qu'un certain nombre de ceux qui se nourrissent de liquide ont une nutrition sélective. Certains, *monophages,* sont inféodés à un animal ou une plante précise; ainsi, la mouche *Drosophila pachea* (Diptère) ne peut se développer que sur les cactus; tous les parasites ont un hôte déterminé. D'autres, *oligophages,* moins difficiles, admettent une certaine variation dans leur régime alimentaire : à défaut de feuilles de pommes de terre, le doryphore peut vivre sur les feuilles de tomate; les littorines vivent sur les fucus. D'autres, enfin, *polyphages,* acceptent une nourriture variée (lépismes, blattes).

La survie de ces animaux est liée à la possibilité qu'ils ont de rencontrer leur nourriture. Une telle rencontre peut être le fait du hasard; toutefois, dans ce cas, il faut souligner que l'activité locomotrice du prédateur est d'autant plus grande que celui-ci jeûne depuis longtemps : ainsi, la longueur des parcours effectués par une coccinelle sur une feuille envahie par des pucerons est directement liée à son état de jeûne et inversement proportionnelle à la densité de la population d'Aphidiens. La rencontre peut être le résultat de stimuli d'ordre chimique : par exemple, l'héxanol et l'héxanal contenus dans les feuilles du mûrier attirent les vers à soie; l'acide acétique contenu dans les fruits ou le vinaigre attire la mouche *Drosophila melanogaster,* les extraits de fucus attirent les littorines. Elle peut être le résultat de stimuli d'ordre visuel ou vibratoire : ainsi, la crevette *Alpheus* a un réflexe d'attaque quand une proie possible passe dans son voisinage. Enfin, la rencontre peut être le résultat d'un comportement social élaboré : les abeilles indiquent à d'autres ouvrières, par le moyen de danses, l'endroit où se trouvent des fleurs riches en nectar; les fourmis montrent à des équipes d'ouvrières le chemin pour récupérer une proie intéressante.

La rencontre entre les macrophages et leur nourriture n'est pas suffisante : il faut que cette dernière leur convienne. L'hydre d'eau douce réagit à toute excitation par une décharge de ses nématocystes, mais elle n'ouvre sa bouche que si l'excitation est produite par un animal vivant (il semble que le facteur responsable de cette réaction soit le glutathion). Les papillons déroulent leur trompe à tout attouchement de leur tarse avec de l'eau sucrée, mais la prise de nourriture n'est complète que si le liquide leur plaît. L'Hémiptère *Rhodnius prolixus* peut piquer une membrane recouvrant un liquide tiède, mais il ne pompe celui-ci que dans le cas où il lui convient (des composés chimiques comme les di- et tri-phosphates d'adénosine et de guanine ont un effet stimulant).

La digestion

La digestion englobe tous les phénomènes qui permettent la dégradation des aliments par des enzymes et l'absorption des produits formés par les organes du système digestif.

Les enzymes peuvent être déchargées à l'intérieur même des cellules qui les produisent et, de ce fait, avoir une action intracellulaire, ou être déversées à l'extérieur et avoir une action extracellulaire. Dans ce dernier cas, émises dans la lumière du tube digestif ou de ses annexes, elles peuvent agir sur place ou être régurgitées à l'extérieur de l'animal pour être mélangées à la nourriture; cette digestion préorale est fréquente chez les Insectes et commune chez les Arachnides.

La digestion est *intracellulaire* lorsque les aliments sont phagocytés par les cellules des organes digestifs avant d'avoir été complètement dégradés; elle est *extracellulaire* lorsque la nourriture est réduite à l'état moléculaire avant d'être absorbée. La distinction entre ces deux types est difficile à faire car ils coexistent souvent chez le même animal.

Chez certains Invertébrés (Cœlentérés, Plathelminthes), l'appareil digestif est réduit à un sac plus ou moins lobé dont l'ouverture sert à la fois de bouche et d'anus. Chez tous les autres, il a la forme d'un tube divisé anatomiquement en trois régions : une région antérieure, le *stomodéum,* recouvert de cuticule, d'origine ectodermique; une région moyenne, le *mésentéron,* d'origine endodermique; une région postérieure, le *proctodéum,* recouvert de cuticule, d'origine ectodermique.

Chez les microphages (Annélides, Lamellibranches), le tube digestif garde cette structure simple. Le stomodéum s'ouvre en avant par la bouche, organe qui réceptionne la nourriture; il se continue par l'œsophage, organe de transit. Le mésentéron, qui suit, est un tube plus ou moins long, élargi en estomac dans sa partie antérieure; cet organe est le site principal de la digestion; chez les Lamellibranches, il reçoit les sécrétions des glandes digestives. Enfin, le proctodéum est un simple tube qui sert à la formation des fèces.

Chez les macrophages, le tube digestif se subdivise en cinq régions fonctionnelles : la bouche et le pharynx, l'œsophage et le jabot, le gésier, qui font partie du stomodéum; l'estomac et l'intestin moyen, qui constituent le mésentéron; enfin, le proctodéum. La *bouche* et les appendices qui l'entourent réceptionnent la nourriture, la broient et la mélangent avec les sécrétions provenant des glandes salivaires. C'est un organe riche en terminaisons sensorielles, qui participe à la sélection de la nourriture. L'*œsophage* est un simple tube qui permet le transit des aliments vers l'estomac; chez certaines espèces, il se différencie dans sa région postérieure en *jabot,* poche plus ou moins large qui permet de stocker un certain temps les aliments; ceux-ci y macèrent en présence des enzymes provenant des glandes salivaires et des glandes

▶ ***Page ci-contre, la plupart des Mollusques Gastéropodes macrophages ont une digestion extracellulaire; ici une* Natica josephina *étalant son pied pour saisir ses proies.***

digestives. Le *gésier,* ou *cardia,* placé entre l'œsophage et l'estomac est un organe dont la lumière interne est armée de dents; il permet une trituration secondaire des aliments. Le *mésentéron* est le plus souvent élargi en *estomac* dans sa partie antérieure; celui-ci reçoit les canaux qui proviennent des glandes digestives. C'est le site privilégié de la digestion. Comme les cellules de l'épithélium intestinal sont fragiles, elles sont protégées des aliments par un film de mucus (Gastéropodes, holothuries) ou par une membrane, la *membrane péritrophique* (Insectes, Polychètes, Mollusques). Cette membrane est formée d'un filet de fibrilles de chitine formant entre elles des angles de 60°; les mailles ainsi formées sont obturées par une protéine amorphe. Elle peut être sécrétée par toutes les cellules de l'épithélium intestinal (s'en séparant par délamination), ou par des cellules spécialisées de la partie antérieure du mésentéron. Elle est sécrétée soit de manière continue, soit seulement au moment des repas. Elle est perméable aux molécules organiques. La formation des fèces est assurée par l'intestin postérieur.

Chez les animaux qui se nourrissent de liquides, le pharynx a, en général, des muscles puissants et intervient dans la prise de nourriture comme une pompe aspirante; le jabot est souvent très développé et peu :devenir une poche aveugle, placée en dérivation sur l'œsophage (chez le moustique); il n'y a pas de gésier.

La migration des aliments à travers le système digestif est effectuée par des mouvements ciliaires ou grâce aux contractions péristaltiques du tube digestif.

Digestion intracellulaire

La digestion intracellulaire est générale chez les Protozoaires et les Éponges. Chez les Éponges, les choanocytes qui tapissent la paroi de la cavité gastrique phagocytent les particules organiques qui viennent à leur contact, mais ils ne les digèrent pas complètement. Les particules sont reprises par des cellules mobiles présentes dans la mésoglée, les *amibocytes,* qui terminent la digestion. Le caractère incomplet de la dégradation effectuée dans les choanocytes s'explique plus par un manque de temps que par une déficience en enzymes : en effet, les choanocytes ont des activités enzymatiques huit à quinze fois plus fortes que celles des amibocytes.

Digestion intracellulaire couplée à une digestion extracellulaire

Les digestions intra- et extracellulaire coexistent chez tous les Cnidaires et Cténaires et fréquemment chez les Plathelminthes, les Némertes, les Kamptozoaires, les Brachiopodes, les Mollusques Lamellibranches et Gastéropodes.

Chez les Cnidaires et les Plathelminthes, la digestion extracellulaire est le fait d'enzymes protéolytiques qui sont libérées dans la cavité gastrique par les cellules digestives; les lipases et les amylases restent intracellulaires. Cela explique la rapidité avec laquelle ces animaux peuvent désorganiser leurs proies (en 4 heures une hydre réduit en morceaux une daphnie), alors qu'ils sont incapables de dégrader le glycogène et les lipides; ceux-ci doivent être phagocytés pour être digérés. La digestion extracellulaire des protéines n'est cependant pas complète : il a été impossible de mettre en évidence des acides aminés dans la cavité gastrique; en outre, une activité « phosphatase acide » importante (signe de digestion intense) apparaît dans les cellules digestives peu de temps après un repas.

Chez les Lamellibranches, la digestion extracellulaire est le fait des enzymes libérées par la *tige cristalline,* baguette formée de mucoprotéines et d'enzymes, sécrétée par les tissus du cæcum dérivé de l'estomac. Cette tige dépasse dans la lumière de celui-ci et tourne sur elle-même (à une vitesse de 60 à 70 tours/minute chez les larves d'huître) sous l'action des cils qui tapissent le cæcum. Elle a plusieurs fonctions : par son mouvement de rotation, elle accélère la pénétration dans l'estomac du cordon muqueux contenant les particules alimentaires (celui-ci a tendance à s'enrouler comme le ferait une corde autour d'un treuil); elle écrase avec son extrémité libre certaines particules contre le bouclier gastrique (partie de l'estomac cuticularisée); elle agite avec son extrémité libre le liquide gastrique, remettant en suspension les particules organiques (le pH acide de la baguette cristalline et de l'estomac favorise cette action en rendant le mucus fluide); enfin, elle libère des enzymes (amylases, cellulases, lipases) en dissolvant son extrémité dans le liquide gastrique. La digestion intracellulaire est assurée par les glandes digestives et les amibocytes. Les particules sont guidées vers les canaux des glandes par des mouvements ciliaires. Des mouvements analogues les entraînent jusqu'aux cellules, qui les phagocytent. Des amibocytes, cellules mobiles, pénètrent dans la lumière du tube digestif et phagocytent les particules organiques, que leur grande taille empêche de pénétrer dans les canaux des glandes digestives.

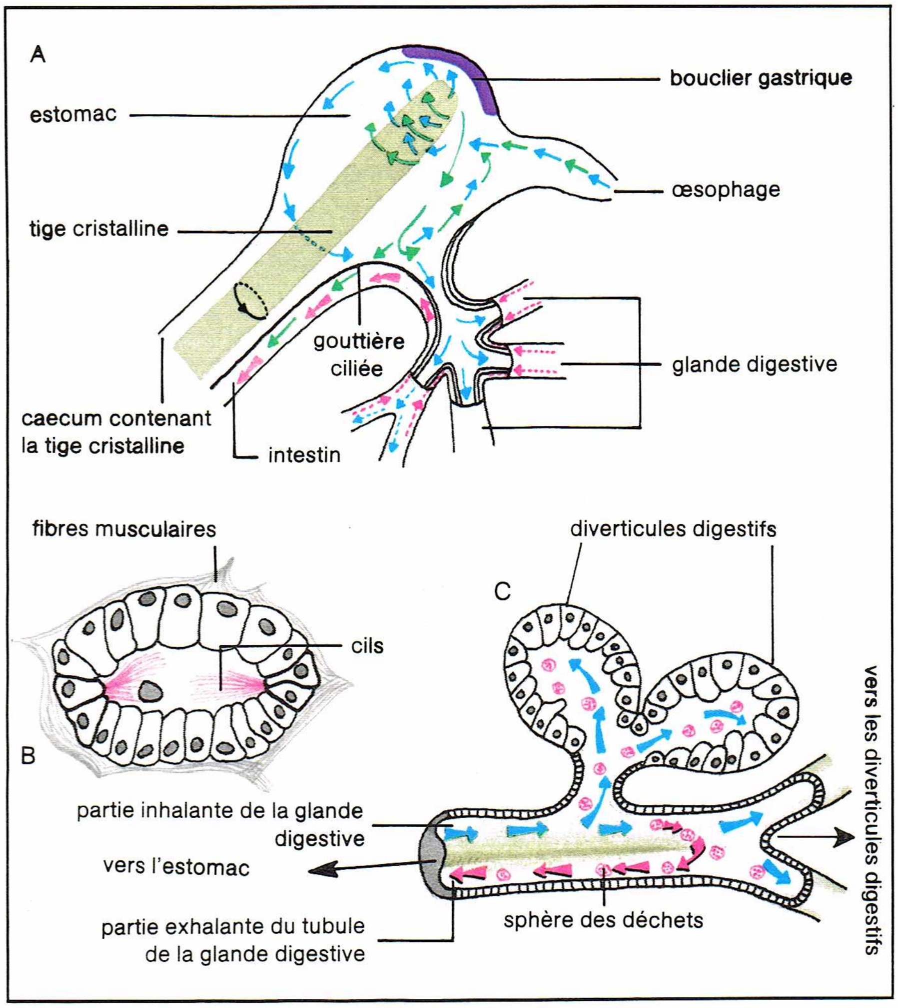

▲ ***Appareil digestif de Lamellibranche; A, schéma de la circulation probable des particules alimentaires dans l'estomac et les diverticules digestifs; B, coupe transversale d'un tubule de la glande digestive; C, schéma de la circulation probable des fluides et des particules alimentaires dans les diverticules digestifs.***

Digestion extracellulaire

La digestion extracellulaire se rencontre chez les Annélides, les Nématodes, certains Mollusques et la plupart des Arthropodes.

Les Annélides ne possèdent pas de glandes annexes; les enzymes sont produites par l'épithélium intestinal.

La plupart des Mollusques Gastéropodes macrophages ont une digestion extracellulaire. La nourriture est broyée une première fois par la radula et une deuxième fois par le gésier. La digestion commence dès le jabot, sous l'action des enzymes provenant des glandes salivaires et de la glande digestive, et se continue dans le gésier puis dans l'estomac. La fin de la digestion et l'absorption se font dans la glande digestive. Les déchets sont agglomérés au niveau de l'estomac par les sécrétions muqueuses qui proviennent du cæcum (tube aveugle débouchant dans l'estomac) et évacués par l'intestin.

Chez les Mollusques Céphalopodes, les aliments sont broyés une première fois par les mâchoires, puis à nouveau dans l'estomac grâce aux contractions violentes des parois. Les enzymes sont produites par les glandes digestives « pancréatiques » et « hépatiques ». Le suc « pancréatique » participe à la digestion primaire, qui s'effectue dans l'estomac, alors que le suc « hépatique » participe à la digestion secondaire, qui a lieu dans le cæcum

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

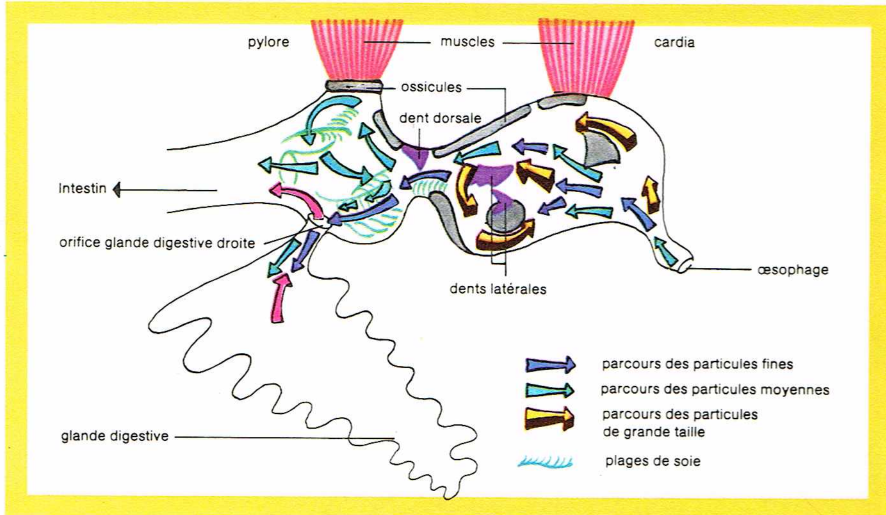

▲ ***Représentation schématique du « moulin gastrique » d'un Crustacé Décapode.***

spiral. L'absorption se fait dans la partie distale de cet organe. Les déchets sont enrobés dans du mucus produit par la partie proximale du même organe, extraînés vers l'intestin par des mouvements ciliaires et évacués au dehors par l'anus.

Chez les Crustacés supérieurs, l'estomac est transformé en organe complexe : le *moulin gastrique*. Celui-ci est formé de deux chambres : une chambre antérieure — le *cardia* — qui contient des dents et assure un broyage secondaire de la nourriture, le broyage primaire étant effectué par les pièces buccales; une chambre postérieure — le *pylore* — organe tapissé de soies et de cils. Les particules organiques qui pénètrent dans le pylore (les grosses particules ne passent pas car des soies placées entre le cardia et le pylore les en empêchent) sont triées en fonction de leur taille; les plus fines sont aspirées dans les tubules des glandes digestives (elles sont en communication avec le pylore), alors que celles qui ont une taille moyenne sont broyées entre des rangées de soies ou entraînées dans l'intestin qui fait suite au pylore. L'absorption se fait dans la glande digestive.

Chez les Insectes, les glandes digestives sont réduites aux seules glandes salivaires. La digestion commence le plus souvent dès le jabot (quand il existe), où la nourriture macère un certain temps en présence des enzymes des glandes salivaires; elle se continue dans l'intestin moyen, parfois après un broyage secondaire des aliments dans un gésier (fréquent chez les macrophages). Les enzymes sont produites par les glandes salivaires et par l'épithélium du mésentéron et des cæcums qui se trouvent dans sa région antérieure. Il n'y a pas d'estomac. L'absorption a lieu dans l'intestin moyen; elle peut se faire par zones spécialisées *(Dysdercus koenigii, Lucilia sericata)*.

Les enzymes digestives

La digestion extracellulaire n'est possible que dans le cas où le tube digestif tout entier ou certains organes (glandes « hépatiques » et « pancréatiques » des Céphalopodes, glandes salivaires) libèrent des enzymes dans leur lumière. La sécrétion et la libération de ces composés peut être continue ou commandée par la prise de nourriture. Ainsi, chez le calmar, si la sécrétion des enzymes est continue, il n'en est pas de même pour leur libération : le suc « pancréatique » (stocké dans le cæcum spiral) n'est déversé dans l'estomac qu'au moment où l'animal ingurgite une proie, et le suc « hépatique » (stocké dans la glande hépatique) ne s'écoule dans le cæcum spiral qu'au moment où les aliments (en provenance de l'estomac) y arrivent.

La régulation des sécrétions enzymatiques est un phénomène encore mal connu chez les Invertébrés. Il semble que la nourriture puisse déclencher directement un cycle de sécrétions chez les cellules de l'épithélium intestinal; le système nerveux intervient aussi : chez les calmars, les déversements respectifs des sucs « pancréatiques » et « hépatiques » dans l'estomac et le cæcum spiral sont sous la dépendance du ganglion gastrique.

L'émission d'enzymes dans la lumière intestinale ne permet pas à elle seule une digestion extracellulaire; il faut, en plus, que le pH soit ajusté à des niveaux qui permettent aux enzymes d'agir. En général, le tube digestif antérieur a un pH interne voisin de la neutralité, le tube digestif moyen un pH plus acide, et l'intestin postérieur un pH plus basique. Chez *Mya arenaria* (Lamellibranche) on observe les taux de pH suivants : œsophage, 6,6; estomac et glandes digestives, 5,7-5,8; tige cristalline, 4 4; intestin moyen, 6,2; rectum, 6,9.

Enzymes permettant la dégradation des hydrates de carbone (sucres)

Toutes les enzymes qui dégradent les sucres chez les Vertébrés ont été retrouvées chez les Invertébrés. Ces derniers cependant possèdent une panoplie enzymatique beaucoup plus complète, qui permet, entre autres, la dégradation des parois cellulaires végétales. Les enzymes responsables de ces digestions particulières sont distribuées au hasard des groupes et des espèces.

Cellulases

Les cellulases permettent la dégradation de la cellulose en molécules de β glucose. On les trouve chez le taret (Lamellibranches) et *Limnoria* (Isopodes), animaux qui vivent dans les bois flottants, ainsi que chez *Ctenolepisma,* Insecte Thysanoure qui se nourrit de détritus. Dans certains cas, la digestion n'est pas effectuée par l'Insecte lui-même mais par les micro-organismes qu'il abrite (c'est le cas chez les termites, les blattes et les Coléoptères Lamellicornes).

Alginases

Les alginases permettent la dégradation des polysaccharides qui entrent dans la constitution des parois cellulaires des Algues. On les trouve chez des Mollusques marins. Elles sont toujours très spécifiques.

Pectinases

On les observe chez les Hémiptères Aphididés et Pentatomidés (pucerons et punaises des bois).

Chitinases

Les chitinases permettent la dégradation de la chitine en molécules d'acétyl D-glucosamine. Elles sont caractéristiques du liquide de mue des Arthropodes; il est possible de les trouver dans l'intestin de l'escargot et du ver de terre.

Enzymes protéolytiques permettant la dégradation des protéines

Les Invertébrés possèdent deux types d'**endopeptidases** (enzymes s'attaquant aux liaisons intramoléculaires des protéines). Les unes ont une activité optimale en milieu basique (pH : 7-9) et s'apparentent à la *trypsine;* les autres l'ont en milieu légèrement acide (pH : 4-6,5) et s'apparentent aux *cathepsines* (endopeptidases intracellulaires des Vertébrés).

Les Invertébrés ne possèdent aucune endopeptidase ayant une action comparable à la *pepsine*. Ils possèdent, en plus, des **peptidases** (enzymes qui agissent sur l'extrémité des chaînes polypeptidiques) : des *carboxy-peptidases,* des *amino-peptidases* et des *dipeptidases.* Elles agissent à des pH très variables. Les dipeptidases et les amino-peptidases semblent être sécrétées par les

A. Kerneis - Jacana

▶ ***Région moyenne de la radula d'un Mollusque Gastéropode Pulmoné.***

mêmes tissus, alors que les carboxypeptidases le sont séparément.

Certains Insectes possèdent des enzymes qui leur permettent de s'attaquer à des scléroprotéines : des **kératinases** chez les Dermestidés et *Tinolea,* des **collagénases** chez le Nématode parasite *Strongyloides* et chez la mouche *Lucilia sericata.*

Enzymes permettant la dégradation des lipides

Les Invertébrés possèdent les enzymes habituelles : **lipases** qui hydrolysent les esters d'acide gras à longue chaîne, **estérases** qui hydrolysent les esters d'acide de faible poids moléculaire. Certains Insectes, comme *Galleria melonella,* possèdent des systèmes enzymatiques leur permettant de dégrader la cire d'abeille.

Besoins nutritionnels des Invertébrés

Les besoins nutritionnels des Invertébrés n'ont pu être définis avec précision que chez certains Insectes. En effet, toute étude à ce sujet demande la réalisation de milieux nutritionnels définis qui doivent être acceptés par les animaux étudiés. De tels milieux, réalisables pour les animaux terrestres, le sont beaucoup moins pour les animaux aquatiques; c'est pourquoi, dans de nombreux cas, il a fallu se contenter d'étudier les liens trophiques entre les animaux et leurs milieux de vie.

Besoins communs à tous les Invertébrés

Ces besoins sont les suivants :

— des *éléments minéraux :* P, Mg, S, Ce, Fe, K, Na, etc.;

— de l'*oxygène ;*

— du *carbone,* qui provient avant tout des sucres; les Insectes présentent de grandes variations quant à l'utilisation des sucres simples;

— de l'*azote,* qui provient des protéines, des polypeptides et des acides aminés; dix de ces derniers sont essentiels : l'arginine, l'histidine, l'isoleucine, la leucine, la lysine, la méthionine, la phénylalanine, la thréonine, le tryptophane et la valine;

— des *vitamines du groupe B,* qui se montrent toutes plus ou moins essentielles, à l'exception de l'acide ascorbique (il semble que ce composé ne soit indispensable qu'au criquet *Schistocerca gregaria*).

Besoins particuliers à certains Invertébrés

Il s'agit des éléments suivants :

— des *sels minéraux :* le fer (Invertébrés contenant de l'hémoglobine), le cuivre (Invertébrés contenant de l'hémocyanine), le calcium (Invertébrés à squelette calcaire : Éponges, Coraux, Mollusques, Crustacés) et le silicium (animaux à squelette siliceux : Protozoaires, Éponges);

— des *acides aminés :* la cystine *(Aedes aegypti),* la glycine (Diptères), la proline *(Blattella germanica* et *Phormia regina) ;*

— les *vitamines A* et le *β carotène,* qui conditionnent la pigmentation de nombreux Crustacés et Insectes;

— les *vitamines E* ou l'*α tocophérol,* permettant le développement du Crustacé *Daphnia magna* et la reproduction des Insectes *Acheta domestica* et *Agria affinis ;*

— l'*inositol,* nécessaire au seul Insecte *Ephestia ;*

— la *choline,* composé important qui entre dans la constitution des phospholipides (lécithines); il semble que tous les Insectes sur lesquels elle a été testée en absence de phospholipides ne puissent pas s'en passer; cette dépendance est à rattacher à l'inaptitude que montrent ces animaux à la fabriquer à partir de la méthionine;

— la *carnitine,* indispensable à tous les Insectes granivores de la famille des Ténébrionidés;

— des *acides gras :* seul l'acide linoléique semble indispensable à la croissance de certains Insectes;

— des *stérols :* les besoins en stérols des Invertébrés n'ont été étudiés que dans le groupe des Insectes; ceux-ci ne synthétisent pas le cholestérol, molécule indispensable comme constituant des membranes et comme précurseur de l'ecdysone; ils le reçoivent de leur nourriture. Celle-ci cependant ne contient pas toujours une quantité suffisante de ce stérol (cas des plantes pour les Insectes phytophages); il peut alors être remplacé, dans une certaine mesure, par des « phytostérols », stérols en C_{28} ou C_{29}, dont la molécule a une structure comparable à celle du cholestérol : OH en 3, molécule plane, insaturation en 5-6. L'utilisation de ces stérols est liée à la particularité qu'ont ces animaux de les transformer en cholestérol.

Alors que certains Insectes *(Drosophila melanogaster, Tenebrio molitor, Bombyx mori)* ont un spectre large d'utilisation des stérols, d'autres *(Dermestes vulpinus)* présentent des besoins stricts en cholestérol. Cependant, chez ces derniers, l'apport de phytostérols exogènes fait baisser de 95 % leurs besoins en cholestérol. Ce phénomène, appelé *sparing effect* (effet d'épargne), joue un rôle important dans la nutrition des Insectes phytophages (les plantes contiennent, le plus souvent, des traces de cholestérol).

L'intervention des stérols dans la nutrition des autres Invertébrés n'a pas encore été étudiée, mais il est possible de prévoir un certain nombre de réponses puisque leurs aptitudes à synthétiser le cholestérol à partir de l'acétate ou des phytostérols sont plus ou moins bien connues.

Tous les Arthropodes devraient se retrouver dans la même situation que les Insectes puisqu'ils sont incapables de synthétiser le cholestérol à partir de l'acétate et aptes à transformer les phytostérols en cholestérol. La situation dans les autres groupes d'Invertébrés est beaucoup plus confuse car coexistent dans les mêmes groupes des animaux réalisant la biosynthèse du cholestérol et d'autres ne l'effectuant pas. Il existe même des Invertébrés qui biosynthétisent le cholestérol à partir de l'acétate et à partir des phytostérols *(Patella vulgata).* Tout cela nous amène à penser que les Annélides, les Mollusques, les Échinodermes, etc., ont des besoins moins stricts en cholestérol.

Composés inutiles aux Invertébrés

Ce sont la *vitamine D* et la *vitamine K.*

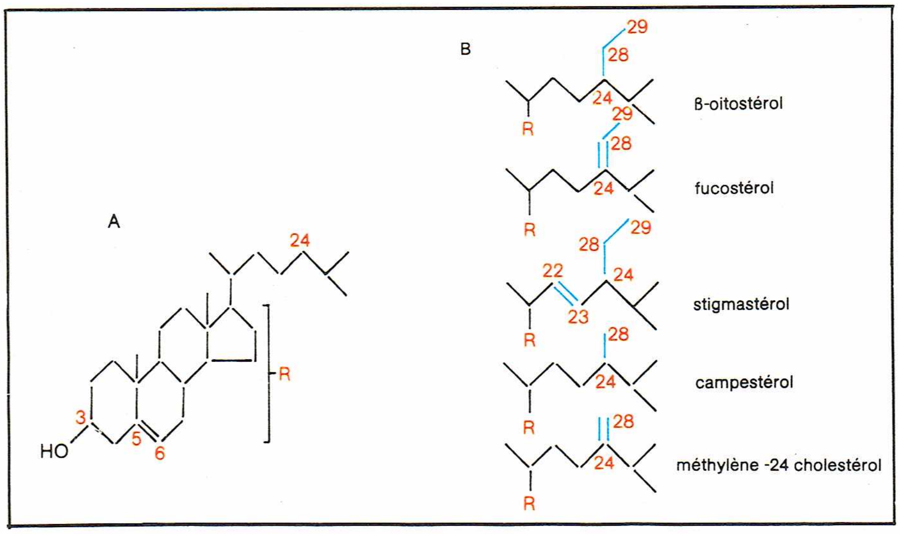

Richard Colin

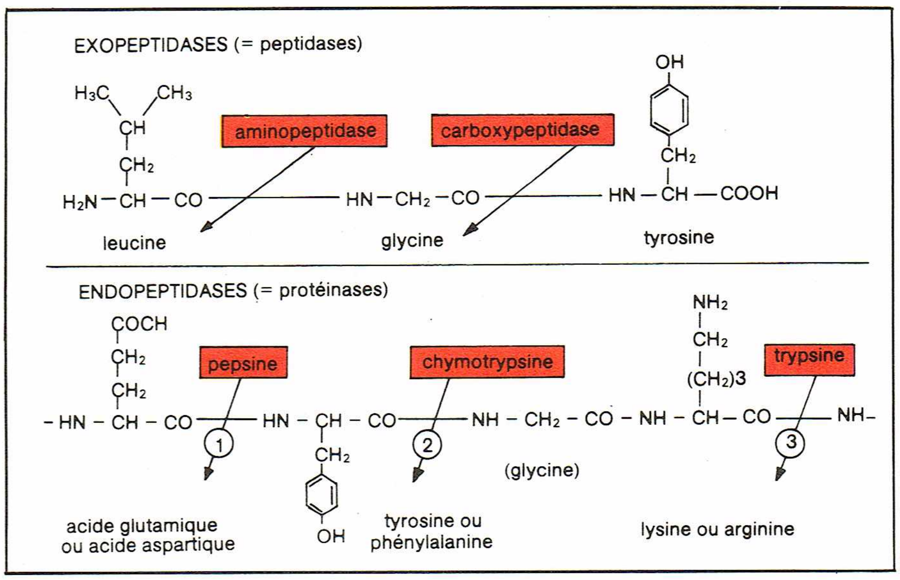

Richard Colin

▲ En haut, schéma de l'utilisation des stérols par les Insectes : les numéros en rouge indiquent les détails de structure importants; les liaisons en bleu indiquent les éléments qui doivent être dégradés ou modifiés par les Insectes pour l'obtention de cholestérol; A, cholestérol; B, principaux « phytostérols » permettant la croissance des Insectes. En bas,* enzymes protéolytiques extracellulaires *présentes chez les animaux; les enzymes encadrées sont présentes chez les Invertébrés.

Appareil respiratoire et respiration chez les Vertébrés

La respiration est l'ensemble des mécanismes qui permettent à l'organisme de prélever, dans le milieu extérieur, l'oxygène dont il a besoin et d'éliminer le gaz carbonique résultant de son métabolisme. Le sang transporte ces gaz entre les organes et la surface d'échange avec le milieu extérieur.

C'est toujours à travers une solution aqueuse que se fait la diffusion gazeuse. Les échanges avec le milieu ne peuvent donc s'effectuer qu'à travers une membrane fine, humide et, bien entendu, richement vascularisée. L'énorme surface de contact direct de la peau avec le milieu extérieur peut lui permettre de jouer un tel rôle, à la condition que l'épiderme demeure mince et que ses cellules superficielles ne s'altèrent pas : c'est le cas chez les Cyclostomes, les Poissons et les Amphibiens, chez lesquels la respiration cutanée peut être importante ; ce phénomène est bien connu chez l'anguille, mais l'exemple le plus net est fourni par les Amphibiens.

Avec l'augmentation de la taille d'un organisme, la surface externe ne s'accroît pas dans les proportions de son volume, c'est-à-dire de la masse tissulaire consommatrice d'O_2, et les risques de destruction deviennent importants. Ce sont alors des régions spécialisées de la surface du corps qui possèdent cette structure membranaire fine et vascularisée permettant les échanges. Ces surfaces spécialisées forment l'appareil respiratoire, qui se présente sous deux grands types structuraux : les *branchies* et les *poumons*, respectivement adaptés à la respiration dans les milieux aquatique et aérien. Tous deux dérivent du pharynx.

▼ **Branchies externes larvaires :** *1, larve de polyptère (d'après Dean) ; 2, larve de protoptère (d'après Budgett) ; 3, larve d'ambystome* **(axolotl)** *[d'après Witschi] ; 4 et 5, larves de grenouille rousse (4, début de recouvrement par le repli operculaire ; 5, recouvrement achevé) [d'après Beaumont].*

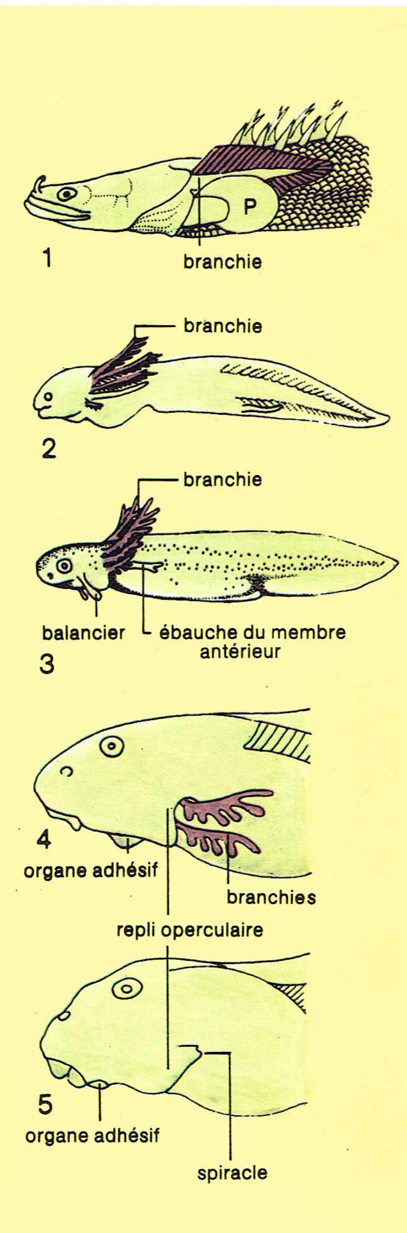

Richard Colin

Sources d'oxygène

Air atmosphérique

La composition de l'air atmosphérique, constante, est la suivante : O_2, 21 % ; CO_2, 0,003 % ; N_2, 78 % ; gaz rares, 1 %. Au niveau de la mer, la pression partielle d'oxygène (pO_2) est de 159 mm Hg pour un air sec $\frac{(760 \times 21)}{100}$. En fait, en tenant compte de la teneur de l'air en vapeur d'eau, on admet une valeur moyenne de 155 mm Hg.

Si en altitude la composition de l'air reste la même, par contre la pO_2 diminue : par exemple, à 5 000 m, elle n'est plus que de 88 mm Hg.

Oxygène des eaux douces et marines

La solubilité d'un gaz dans un liquide dépend de leurs natures respectives. Elle s'exprime par un coefficient de solubilité (pourcentage du volume du liquide, température déterminée et pression de 760 mm Hg). A 15 °C, le coefficient de solubilité de l'O_2 dans l'eau pure est de 3,5 % (soit 35 ml d'O_2 dans un litre d'eau). Ce coefficient varie en sens inverse de la température : les eaux froides sont plus riches en oxygène que les eaux chaudes. La quantité de gaz dissoute est proportionnelle à la pression partielle de ce gaz.

Dans les milieux aquatiques, l'O_2 provient essentiellement de l'atmosphère.

Eaux douces

A leur surface, au contact de l'atmosphère et donc en équilibre avec lui, la pO_2 est de 155 mm Hg. A 15 °C, cela correspond à 0,72 % d'O_2 dissous $\frac{(3,5 \times 155)}{760}$, soit environ 30 fois moins que dans un même volume d'air. L'O_2 gagne la profondeur par une diffusion très lente mais surtout par les brassages que réalisent les mouvements d'une eau courante ou, pour une étendue d'eau stagnante, les courants verticaux provoqués par les vents ou les différences de température entre les couches superposées.

Eaux marines

Leur salinité entraîne une diminution de la solubilité de l'O_2, qui, à 15 °C, n'est plus que de 0,58 %. Par comparaison avec celles que l'on trouve dans l'air, les quantités d'O_2 disponibles en milieu aquatique sont faibles. A besoins en O_2 égaux à ceux des animaux terrestres, les animaux aquatiques doivent brasser à travers leur appareil respiratoire des volumes beaucoup plus grands d'un fluide plus lourd et plus visqueux que l'air.

Respiration et organes respiratoires des embryons

Avant la différenciation des organes respiratoires de la larve ou de l'adulte, la respiration est assurée de façon variée. Une respiration par simple diffusion entre le milieu environnant et les blastomères est la règle pour les premiers stades embryonnaires de tous les Métazoaires.

Ultérieurement, ce sont les vaisseaux vitellins, apparus les premiers à la face ventrale de l'archentéron (œufs hétérolécithes des Amphibiens) ou dans le feuillet mésoblastique de la paroi du sac vitellin (œufs télolécithes des Poissons et des Amniotes), qui sont utilisés pour les échanges respiratoires. Chez les Amniotes, une « respiration allantoïdienne » prend rapidement le relais et persiste jusqu'à la naissance. Les vaisseaux allantoïdiens colonisent le chorion, accolé à la coquille poreuse chez les Reptiles et les Oiseaux ou à la muqueuse utérine chez les Mammifères Euthériens.

Respiration cutanée

Chez certains organismes adultes à dispositifs respiratoires spécialisés (branchies ou poumons), la respiration cutanée peut cependant jouer un rôle fondamental. En 1973, Shield et Bentley en ont fait la démonstration chez les Amphibiens. Leur expérimentation a porté sur cinq espèces :

— deux Urodèles aquatiques néoténiques ; l'un, *Necturus maculosus*, possède des branchies externes très développées et des poumons discrets, dont l'importance physiologique semble négligeable ; l'autre, *Siren lacertina*, à branchies externes discrètes, remonte périodiquement en surface pour respirer ;

— trois Anoures ; l'un aquatique, *Xenopus laevis*, l'autre amphibie, *Rana pipiens*, et le troisième, terrestre de grande taille, *Bufo marinus*.

Une première série d'expériences consiste à immerger les animaux dans de l'eau à 20 °C, dont on peut faire varier la pO_2 externe. Pour une pO_2 normale (140 à 156 mm Hg) aucune modification de la consommation d'oxygène n'est observée chez *Necturus* et *Rana*, alors qu'elle est diminuée de moitié par rapport à la normale chez *Siren*, *Bufo* et *Xenopus*. Pour faire la part de la respiration cutanée chez *Siren* et *Necturus*, on effectue la ligature de leurs branchies : chez *Siren*, aucune modification ne s'ensuit, alors que la consommation chute de 40 % chez *Necturus*. Toutes ces espèces, excepté *Bufo*, peuvent survivre plus de 24 heures dans de telles conditions. La respiration cutanée permet donc à de nombreuses espèces une survie immédiate dans des conditions où l'immersion est temporairement imposée. Si la pO_2 externe diminue, la consommation d'oxygène diminue presque linéairement chez toutes les espèces ; toutefois, chez *Necturus*, cela se produit uniquement après la ligature des branchies. Chez l'animal à branchies intactes, la consommation décroît lentement jusqu'à une pO_2 voisine de 60 mm Hg, plus brutalement ensuite. Ce phénomène évoque la régulation de la consommation d'O_2, dans les mêmes conditions, chez les Poissons. Une exception se rencontre dans ce groupe chez *Opsanus tau*, chez lequel la consommation d'oxygène décroît linéairement avec la pO_2 externe. Or, ce Poisson possède, exceptionnellement, une surface branchiale très réduite.

Si, après une période d'anoxie, on réoxygène l'eau, aucune modification de la vitesse d'absorption de l'oxygène ne se produit chez *Siren*, *Rana* et *Xenopus*. Chez *Necturus*, au contraire, un effet compensateur est immédiatement observé ; l'absorption est alors très supérieure à la normale. Cet effet disparaît avec la ligature des branchies.

L'ensemble de ces observations suggère que, si la respiration cutanée est fondamentale, sa régulation, contrairement à celle de la respiration branchiale, est de peu d'amplitude. Chez *Siren* et *Necturus*, genres à branchies ligaturées, une diminution de 50 % de la pO_2 provoque une diminution de 40 % de l'absorption d'oxygène. Cette faible régulation pourrait être liée à la vasodilatation des vaisseaux cutanés.

Une deuxième série d'expériences consiste à maintenir les animaux en milieu aérien et, ensuite, à bloquer leurs

mouvements respiratoires par injection de gallanine dans un sac lymphatique dorsal. Placé en milieu aérien, *Necturus* réduit sa consommation d'O_2 de 40 % par rapport à la normale en milieu aquatique ; le traitement à la gallanine n'apporte aucune modification. Les poumons n'ont donc pas d'importance physiologique appréciable, et la réduction de l'absorption correspond au non-fonctionnement des branchies. Grâce à sa respiration cutanée, l'animal peut survivre plusieurs jours en milieu aérien humide. Ainsi, *Siren* voit sa consommation d'oxygène doubler par rapport à l'immersion ; le blocage de la ventilation pulmonaire la réduit à nouveau de 50 %. Chez cette espèce néoténique aquatique, les poumons ont donc une grande importance physiologique. L'animal peut survivre plusieurs jours hors de l'eau et semble capable, comme l'anguille, de changer de domaine aquatique en passant par la terre ferme. Chez *Rana,* la consommation est la même que chez l'animal immergé et n'est pas modifiée par la gallanine. Chez *Bufo* et *Xenopus,* la consommation double par rapport à l'immersion et n'est pas modifiée par le blocage de la ventilation.

Chez toutes les espèces, en milieu aérien, l'absorption cutanée permet d'assurer au moins le métabolisme basal. En milieu aérien comme en milieu aquatique, la respiration cutanée permet la survie de l'animal. Toutefois, sa faible capacité de régulation, liée à la vaso-dilatation cutanée et à la surface relative de la peau (les espèces de petite taille comme *Rana pipiens* étant plus favorisées), ne permet pas de faire face aux besoins requis pour mener une activité normale ou intense. Selon l'espèce, c'est la respiration branchiale ou la respiration pulmonaire (aux mécanismes régulateurs amples mais mal connus) qui permet une telle activité.

La possession d'une peau fine et perméable est une des particularités des Amphibiens. Ces animaux ont permis le passage de la vie aquatique à la vie aérienne ; la base de leur réussite évolutive semble être l'utilisation de la peau comme surface d'échanges respiratoires. Les potentialités d'un tel système sont démontrées chez un groupe d'Urodèles terrestres actuels, apneumones, les Pléthodontidés.

Respiration branchiale

Les organes typiques de la respiration en milieu aquatique sont les branchies.

Branchies externes

Les plus simples des branchies sont externes ; elles ne sont présentes chez les Vertébrés que chez les larves d'Amphibiens et de certains Poissons.

Elles se développent, chez l'embryon, avant le percement des fentes branchiales à partir de bourgeons épiblastiques, au niveau des arcs squelettiques viscéraux. Chaque branchie, généralement pennée, est vascularisée par des rameaux des arcs aortiques correspondants. Le renouvellement de l'eau peut être assuré par les battements d'une ciliature dense qui recouvre l'épithélium et par les mouvements propres des branchies, dus au développement de fibres musculaires dans l'axe branchial mésenchymateux.

Chez les Poissons, ces branchies se rencontrent sous forme d'une paire hyoïdienne chez les Brachioptérygiens (polyptère), de quatre paires hyoïdienne et branchiales chez les Dipneustes *Lepidosiren* et *Protopterus*.

Des branchies externes, bipennées, se développent sur les trois premiers arcs branchiaux des larves d'Urodèles et d'Anoures. Chez ces derniers, un repli operculaire se soulève peu après l'éclosion, à partir de l'épiderme ventral de l'arc hyoïdien ; il s'étend vers l'arrière et recouvre les branchies externes ; il se soude à la paroi du corps, ne laissant qu'une ouverture ventrale ou latérale gauche, improprement appelée « spiracle ». Ce repli operculaire délimite deux sacs branchiaux, qui communiquent alors avec le pharynx par les quatre paires de fentes branchiales qui se sont percées. Les branchies externes régressent et sont remplacées par une deuxième génération de branchies formées à partir d'épaississements épiblastiques ventraux des arcs, les plaques branchiales. Cette origine permet de les définir comme de véritables branchies externes qui persisteront durant toute la vie larvaire. A la métamorphose, les fentes branchiales s'oblitèrent, les branchies dégénèrent et les poumons s'accroissent. Comme nous l'avons vu, certains Urodèles peuvent conserver toute leur vie les fentes branchiales et les branchies externes (Pérennibranches), tout en ayant la capacité de se reproduire sexuellement (néoténie).

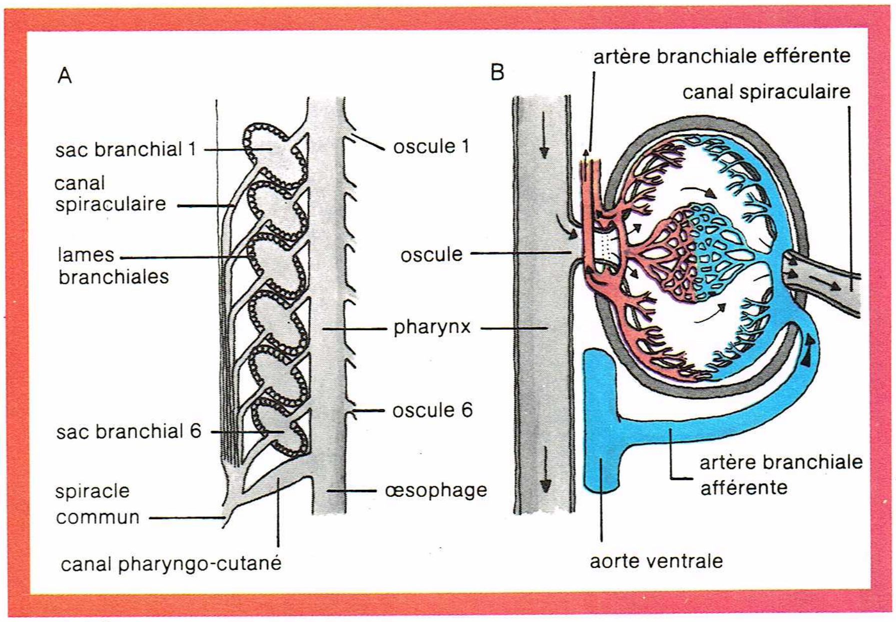

Richard Colin

▲ **Branchies *(internes)* en bourses *des Agnathes ; A, coupe frontale du pharynx d'une myxine ; B, sac branchial et sa vascularisation, principe du contre-courant (d'après Jensen).***

Branchies internes

Le pharynx embryonnaire s'évagine en poches viscérales entoblastiques entre les arcs viscéraux du splanchnocrâne. Ces poches s'ouvrent à l'extérieur par des fentes viscérales et développent, chez les Vertébrés inférieurs aquatiques, des replis lamellaires irrigués par les arcs aortiques.

La structure de ces branchies internes consiste en une série de lames superposées d'où partent deux rangées de lamelles épithéliales vascularisées. Un courant d'eau du pharynx vers l'extérieur renouvelle continuellement l'oxygène à leur niveau. En ce qui concerne l'oxygénation du sang, le système fonctionne sur le principe du contre-courant : le sang, à l'intérieur de la bourse branchiale elle-même chez les Agnathes, à l'intérieur des lamelles branchiales chez les Poissons, circule en sens inverse du courant d'eau. Le sang branchial s'équilibre du point de vue gazeux avec l'eau qui arrive aux branchies et non avec l'eau qui les quitte. Chez la truite par exemple, l'appareil branchial arrive à retenir jusqu'à 80 % de l'oxygène contenu dans l'eau inspirée.

Branchies en bourses des Agnathes

Les poches pharyngiennes deviennent sphériques et s'ouvrent chacune dans le pharynx, par un orifice interne, ou *oscule,* et à l'extérieur, par un orifice externe, ou *spiracule.* Les parois se soulèvent en une vingtaine de lames branchiales, qui développent à leur tour des replis secondaires, les lamelles branchiales où s'effectue l'hématose. Dans le genre *Myxine,* les spiracules s'étirent en canaux qui confluent vers l'arrière en un spiracule commun, ouvert à l'extérieur, en arrière de la dernière poche branchiale. Le fonctionnement du pharynx des Agnathes a été décrit avec le tube digestif.

Branchies septales des Sélaciens

Les cloisons ou barres branchiales, qui séparent les poches branchiales embryonnaires, s'accroissent vers l'extérieur par le développement d'une cloison externe, ou *septum.* Ce dernier est soutenu par des rayons branchiaux articulés sur l'arc branchial du squelette viscéral. Il se rabat à l'extérieur en un clapet, qui peut fermer la fente branchiale suivante. Du côté pharyngien, l'épithélium se soulève en deux rangées de *branchicténies,* soutenues par du cartilage, qui filtrent l'eau. Des muscles striés se différencient et s'insèrent sur l'arc branchial. De part et d'autre du septum, l'épithélium entoblastique bourgeonne une série de lames branchiales perpendiculaires à l'arc squelettique. Ces lames bourgeonnent à leur tour des lamelles, où courent les capillaires sanguins issus d'une artère branchiale afférente venant de l'aorte ventrale. Le sang rejoint l'aorte dorsale par deux artères branchiales efférentes.

▼ **Lame branchiale de Sélacien *(embryon de roussette) portant des lamelles formées de cellules en pilastre, séparant les lacunes sanguines (érythrocytes) recouvertes par un mince épithélium branchial.***

G. Volle - préparation S. Busson-Mabillot

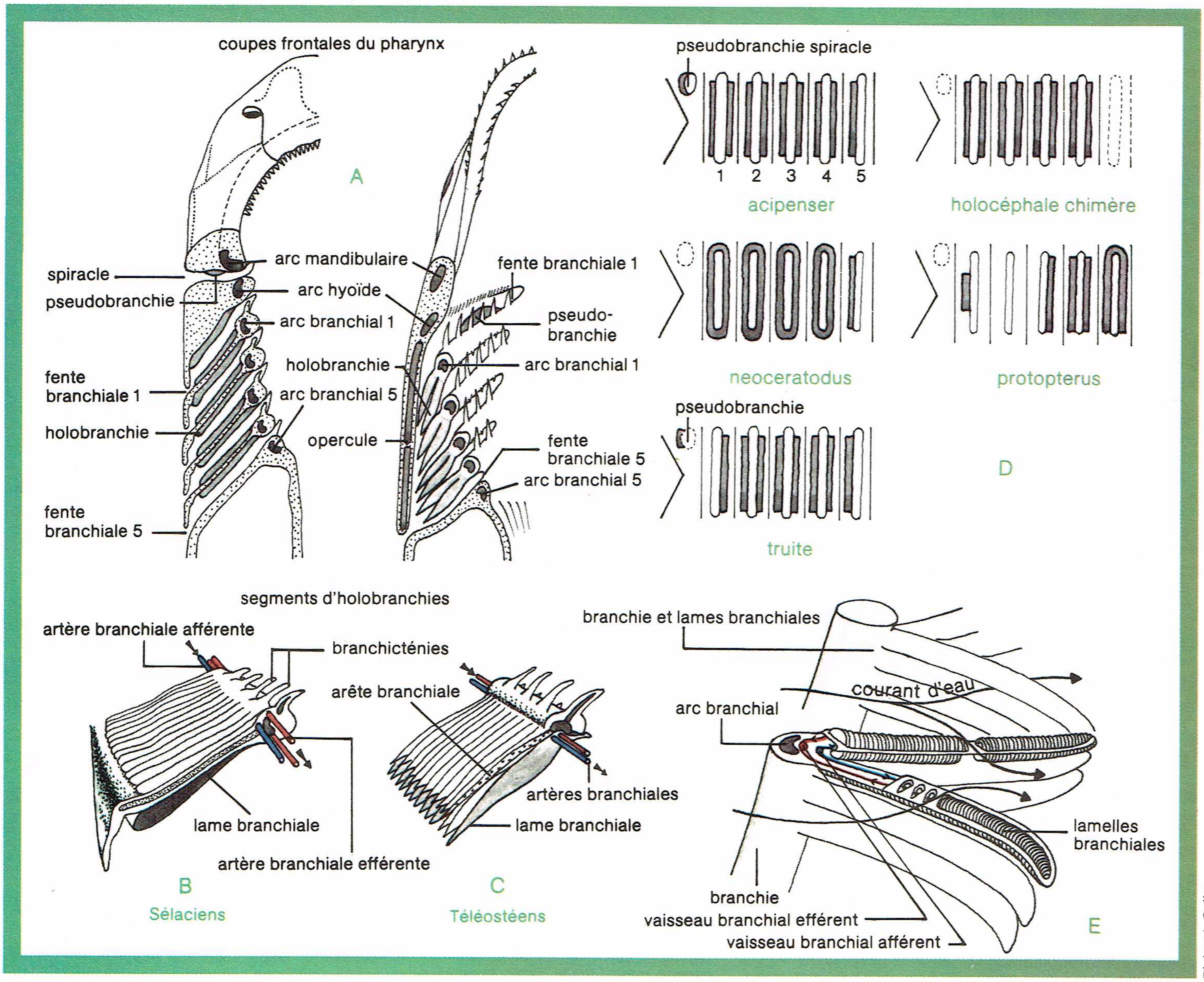

Richard Colin

▲ *Représentation schématique : A, coupes frontales du pharynx; B, branchies internes septales de Sélaciens; C, branchies internes operculées de Téléostéens; D, disposition schématique des branchies dans les principaux groupes de Poissons (d'après Romer); E, oxygénation du sang, principe du contre-courant chez un Téléostéen (d'après Echalier et Van Dam).*

L'ensemble des lames branchiales situées du même côté d'un septum constitue une *hémibranchie ;* les deux hémibranchies d'un septum forment une *holobranchie.*

Les fentes viscérales s'ouvrent en avant des arcs viscéraux correspondants. L'arc mandibulaire porte une hémibranchie à rôle respiratoire réduit. Cette *pseudobranchie* couvre la paroi antérieure de la fente hyoïdienne réduite au spiracle. L'appareil branchial proprement dit consiste en une hémibranchie hyoïdienne et quatre holobranchies branchiales. Signalons que *Hexanchus* (le griset) et *Heptranchias* (le perlon) possèdent respectivement six et sept arcs branchiaux, séparant autant de fentes branchiales.

Le redressement des arcs branchiaux, par contraction de leurs muscles, provoque, avec l'agrandissement de la cavité pharyngienne, un appel d'eau (par la bouche chez les requins, par le spiracle chez les raies). Dans le même temps, les clapets branchiaux obturent les fentes. La contraction de la cavité bucco-pharyngienne fait passer l'eau au travers des hémibranchies ; c'est alors que les clapets s'ouvrent.

Les Holocéphales ne possèdent que quatre fentes branchiales, très rapprochées et recouvertes par un repli cutané, le *faux opercule,* que soutiennent des rayons cartilagineux de l'arc hyoïde. Le septum branchial, réduit, n'est pas soutenu.

Branchies operculées des Ostéichthyens

Les lames branchiales, libres sur leur longueur, ne sont plus attachées à l'arc branchial que par leur base. Les lames sont soutenues par des arêtes branchiales cartilagineuses ou osseuses, tandis qu'un repli cutané, l'*opercule,* soutenu par des os operculaires en rapport avec l'arc hyoïde, délimite une chambre branchiale ouverte en arrière par la *fente operculaire,* ou *ouïe.* L'opercule joue le même rôle que les clapets branchiaux des branchies septales dans l'obturation des fentes branchiales. Comme dans une branchie septale, chaque arc squelettique est accompagné d'un nerf branchial (VII, IX et X), d'un arc aortique sous forme d'une artère branchiale afférente et d'une artère branchiale efférente, de muscles branchiaux striés et d'une ou deux rangées de branchicténies.

La répartition des branchies est très variable, mais les quatre holobranchies branchiales sont toujours développées et fonctionnelles, sauf chez les Dipneustes. Chez ceux-ci, le développement d'une respiration aérienne entraîne leur régression : si *Neoceratodus* a encore quatre holobranchies, *Lepidosiren* n'en a plus que trois et *Protopterus* deux.

L'analyse des mouvements respiratoires est délicate. Généralement, chez les Téléostéens par exemple, on admet l'existence d'un cycle en deux temps. Dans le premier temps, les fentes operculaires étant fermées, la cavité bucco-pharyngienne et les cavités branchiales se dilatent ; l'eau entre par la bouche et passe à travers les branchies. Dans le second temps, la contraction des cavités et l'ouverture des fentes operculaires permettent l'expulsion de l'eau.

Respiration pulmonaire

Comme nous l'avons vu, chez tous les Vertébrés, les poumons proviennent du développement d'un bourgeon ventral de l'entoblaste pharyngien, en arrière de la dernière paire de poches pharyngiennes. Au cours de ce développement, ce bourgeon bifurque très tôt et les deux ébauches s'allongent dans la cavité générale en refoulant la splanchnopleure. Celle-ci constituera la plèvre viscérale, accolée à la paroi externe du poumon. L'épithélium entoblastique va s'associer étroitement avec le mésenchyme splanchnique, détaché de la splanchnopleure, qui apporte avec lui des vaisseaux. L'épithélium bourgeonne dans ce mésenchyme des générations successives de culs-de-sac, dont les dernières forment les alvéoles à épithélium plat au travers duquel s'effectuent les échanges gazeux. Ce tissu d'origine complexe, ou *parenchyme,* reste mince chez les Dipneustes, les Amphibiens et beaucoup de Reptiles. Chez les Chéloniens, les Crocodiliens et les Mammifères, une prolifération tissulaire et alvéolaire engendre un poumon massif à surface respiratoire considérable. Le sang est amené au mésenchyme par une paire d'artères pulmonaires issue de la 6e paire d'arcs aortiques. Après hématose, il est repris par les veines pulmonaires qui débouchent dans la partie gauche de l'atrium, devenu oreillette gauche chez les Tétrapodes.

Les deux poumons peuvent déboucher directement dans l'œsophage antérieur par une fente commune, la *glotte,* pourvue d'un sphincter. Chez quelques Amphibiens, puis chez les Sauropsidés et les Mammifères, un système conducteur de l'air se différencie sous la forme d'une *trachée* impaire et de deux *bronches* plus ou moins ramifiées. Autour de la glotte, s'organise un *larynx,* dilatation trachéenne pourvue de soutiens squelettiques et de muscles.

Les poumons des Poissons

Six genres de Poissons actuels possèdent un appareil pulmonaire coexistant avec un appareil branchial. Ces Poissons appartiennent à des groupes anciens d'Ostéichthyens : les Dipneustes, les Brachioptérygiens et les Crossoptérygiens.

Les Dipneustes doivent leur nom à leurs poumons, longs sacs dont le droit s'ouvre dans l'œsophage par une courte « trachée » (le poumon gauche de *Neoceratodus* ne se développe pas). Deux ou trois générations de culs-de-sac alvéolaires se succèdent, comme dans le poumon des Tétrapodes inférieurs. Les artères pulmonaires sont issues des artères branchiales efférentes des arcs aortiques VI (exceptionnellement du V chez *Lepidosiren*). Le sang est ramené au cœur par une veine pulmonaire qui s'ouvre dans la moitié gauche de l'atrium cloisonné. Les Dipneustes vivent dans les marécages de régions où alternent saison sèche et saison des pluies. En saison des pluies, 80 % des besoins en oxygène seraient assurés par les poumons chez *Protopterus* et *Lepidosiren*. Chez *Neoceratodus,* qui ne sort jamais de l'eau des rivières australiennes, la respiration pulmonaire n'intervient que lors de la saison sèche, du fait de la pollution de l'eau par les matières organiques. Au cours de cette saison, la respiration pulmonaire assure seule la survie de *Protopterus* et *Lepidosiren;* les animaux creusent un terrier dans la boue et passent en léthargie.

Les Brachioptérygiens, *Polypterus* et *Calamoichthys,* des eaux douces d'Afrique équatoriale, ne quittent jamais le milieu aquatique. Leurs poumons, simples sacs à paroi interne lisse, ne sont utilisés qu'en eaux stagnantes appauvries en oxygène.

Le cœlacanthe de l'océan Indien, seul Crossoptérygien actuel, possède un poumon dégénéré, de grande taille et à cavité réduite. Il s'agit probablement de la relique du poumon fonctionnel des formes du Dévonien, ancêtres des Tétrapodes.

Les poumons des Tétrapodes

Nous envisagerons en dernier lieu le poumon des Oiseaux, tout à fait particulier.

Le poumon des Amphibiens

C'est un sac à paroi plus ou moins épaisse enfermant une vaste cavité centrale autour de laquelle s'ordonnent les alvéoles. Sur la face interne de la paroi s'élèvent des replis de premier ordre, hauts, à bord central épaissi en

G. Volle - préparation S. Busson - Mabillot

▲ ***Coupe de cloison de 1er ordre d'un poumon d'Amphibien (grenouille); noter l'épithélium respiratoire richement vascularisé.***

bourrelet par une musculature lisse. Ces replis délimitent de grandes chambres recoupées en petits alvéoles par des replis de 2e et 3e ordre.

Comme nous l'avons vu, l'importance physiologique de la respiration pulmonaire est extrêmement variable. Chez un Urodèle aquatique néoténique comme *Siren lacertina,* elle semble assurer 50 % des besoins en oxygène; chez *Bufo marinus,* espèce terrestre, son importance paraît grande, alors que chez *Rana pipiens,* espèce amphibie de petite taille, elle semble décliner au profit de la respiration cutanée. Enfin, chez certains Urodèles comme le necture, néoténique aquatique à paroi pulmonaire lisse, ou les Pléthodontidés terrestres apneumones, elle devient nulle. Les poumons s'ouvrent dans l'arrière-pharynx par une trachée, soutenue par du cartilage chez les Amphibiens serpentiformes (Apodes, quelques Urodèles).

Le poumon des Reptiles

La trachée est toujours présente; les surfaces respiratoires et les voies conductrices commencent à se séparer.

Chez *Hatteria* (Rhynchocéphale), la paroi interne des poumons ne présente que des replis simples et bas, respectant une grande cavité centrale qui s'ouvre directement dans la trachée.

A partir des Squamates, le poumon se perfectionne. Dans la disposition la plus primitive des Sauriens, la trachée ne débouche plus dans un vestibule commun, mais se partage en deux bronches qui pénètrent un peu dans le poumon (bronches extra- et intrapulmonaire). Celui-ci se divise en un segment postérieur sans alvéole, un segment moyen de type Anoure et un segment antérieur à tissu plus compact, riche en alvéoles.

L'alvéolisation se développe encore davantage dans la partie antérieure du poumon des Ophidiens; l'élongation du corps entraîne la réduction du poumon gauche, qui peut disparaître totalement, comme chez les Vipéridés. Avec les Sauriens plus évolués (Varanidés), le système bronchique s'améliore : la bronche intrapulmonaire s'allonge par soudure des bourrelets centraux libres des cloisons, la chambre centrale disparaît, tandis que des chambres alvéolaires s'individualisent. Les parois de ces chambres forment un épais parenchyme creusé de nombreux alvéoles, sauf dans la région postérieure. Chez les Crocodiliens, à poumons massifs, la bronche intrapulmonaire est à son tour soutenue par des anneaux cartilagineux. Enfin, chez les tortues marines, cette bronche se subdivise en de nombreuses bronches secondaires et tertiaires.

Le poumon des Mammifères

Le développement du système conducteur intrapulmonaire atteint une grande complexité. Le bourgeon pulmonaire initial se divise, donnant les deux bourgeons, ébauches des deux bronches principales. Ces bourgeons s'allongent et émettent, chez l'homme, deux bronches secondaires latérales à gauche, deux latérales et une dorsale à droite; ces ramifications correspondent aux

▼ ***Coupe transversale de poumon d'Amphibien (grenouille).***

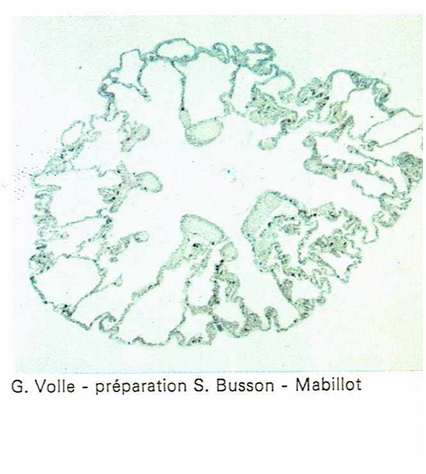

G. Volle - préparation S. Busson - Mabillot

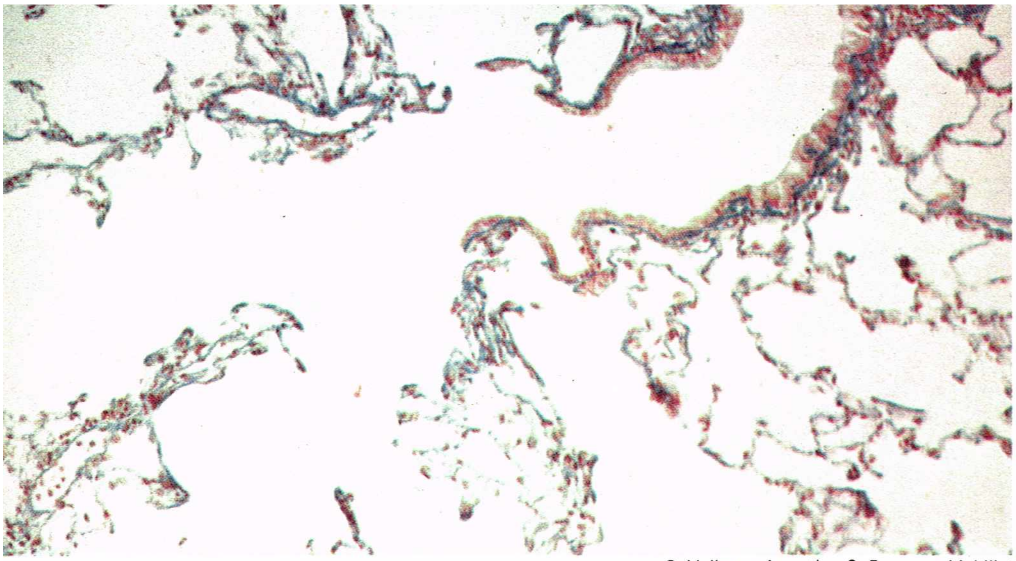

G. Volle - préparation S. Busson - Mabillot

▲ ***Coupe de poumon de Mammifère (souris); détail montrant l'extrémité d'une bronchiole intralobulaire se prolongeant par une bronchiole terminale (épithélium cubique mince), puis une bronchiole respiratoire à épithélium discontinu donnant accès aux canaux alvéolaires puis aux alvéoles.***

lobes du poumon adulte. Ces bronches secondaires émettent, à leur tour, des bourgeons simples d'abord *(bronchioles primaires)*, puis doubles *(bronchioles de divers ordres)*. Cette dichotomisation, qui porte sur une vingtaine de générations successives, aboutit à la formation des bronchioles terminales, prolongées par des bronchioles respiratoires (leurs parois bourgeonnent quelques alvéoles) ; celles-ci se divisent en deux à quatre canaux alvéolaires (leurs parois portent les alvéoles), terminés par des sacs alvéolaires cloisonnés à leur tour en deux à quatre alvéoles. Le mésenchyme associé se développe et se vascularise. Les échanges gazeux s'effectuent entre le sang de ces capillaires interalvéolaires et l'air alvéolaire. L'épithélium alvéolaire continu est composé de petites cellules alvéolaires aplaties (de 0,1 à 0,2 μ d'épaisseur en dehors du noyau) et de grandes cellules alvéolaires intercalées sécrétant des surfactifs qui se répandent à la surface de l'alvéole. L'air alvéolaire et le sang ne sont donc séparés que par quelques dixièmes de micron sur une surface de 70 à 90 m^2, traitée par des surfactifs. Les échanges gazeux sont donc extrêmement rapides. On ne sait pas encore si l'épithélium alvéolaire est d'origine entoblastique, comme le système conducteur, ou s'il résulte de la cavitation du mésenchyme avec raccordement aux extrémités du système tubulaire.

Le poumon des Oiseaux

Le poumon des Oiseaux est tout à fait particulier. Contrairement au cas de tous les autres Vertébrés, sa partie respiratoire est exclusivement tubulaire, sans alvéoles. La trachée se bifurque en bronches primaires. Chacune pénètre le poumon par sa face ventrale, le traverse et se renfle à son extrémité caudale en un sac aérien abdominal. De cette bronche axiale se détachent des bronches secondaires ventrales, dorsales et latérales. De chaque bronche secondaire se détachent de nombreuses bronches tertiaires anastomosées, qui, dans les régions crâniale et dorsale, constituent un système de 150 à 200 bronches parallèles, occupant les deux tiers du poumon *(parabronches)*. Ces parabronches, qui, chez la poule par exemple, peuvent atteindre 4 à 5 cm pour un diamètre de 1 à 2 mm, communiquent par des « bronchioles » sphériques mesurant 1/10 mm de diamètre environ avec des « capillaires » aériens de 3 à 15 μ de diamètre. L'épithélium de ceux-ci, très mince, est en contact direct avec l'endothélium des capillaires sanguins.

▼ ***Représentation schématique de la disposition des poumons et des sacs aériens chez le canard (vue latérale gauche) [d'après Schmidt-Nielsen].***

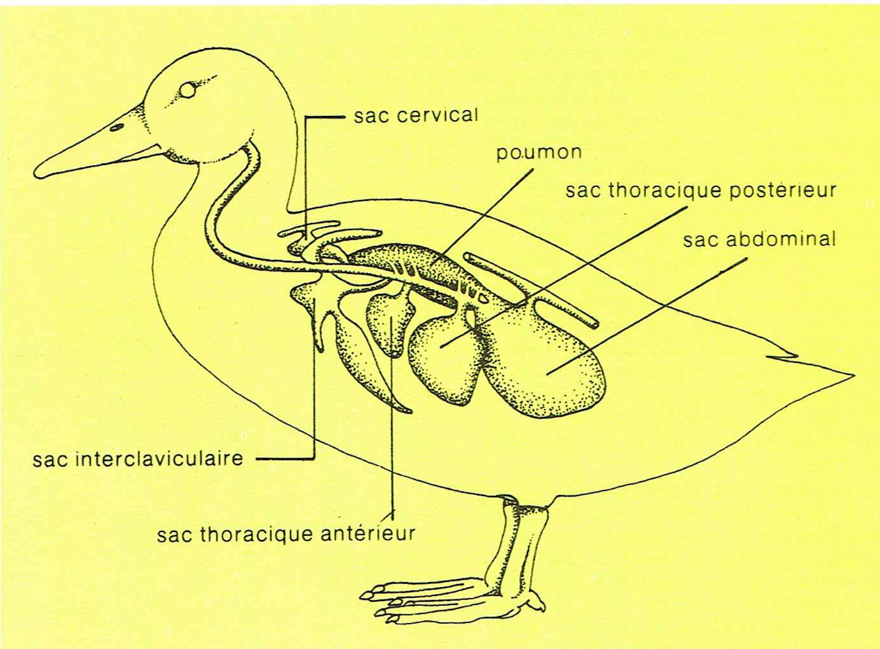

Richard Colin

Chaque poumon communique avec les sacs aériens très développés, situés en dehors de la cavité pleurale et résultant du bourgeonnement terminal de la bronche primaire ou du bourgeonnement latéral des bronches secondaires. On distingue généralement une paire de sacs cervicaux, un sac claviculaire, deux paires de sacs thoraciques et une paire de sacs abdominaux. Ces sacs s'insinuent entre les viscères et pénètrent dans certains os (des os pneumatisés comme l'humérus par exemple), où ils occupent la place de la moelle. Ils sont reliés aux bronches secondaires ou tertiaires par des bronches récurrentes. Leur paroi lisse possède un épithélium simple, doublé d'un conjonctif riche en fibres élastiques; elle n'est le siège d'aucun échange gazeux.

Les poumons, inextensibles, ne peuvent assurer la circulation de l'air. Celle-ci se fait en continu grâce aux sacs aériens, qui jouent le rôle de soufflets. Le remplissage et la vidange des sacs thoraciques ainsi que de la portion intracœlomique des sacs claviculaire et cervicaux sont liés aux mouvements de la cage thoracique. La sangle abdominale, solidaire des mouvements du sternum, permettrait le jeu capital du sac abdominal.

La ventilation pulmonaire et sa régulation

Chez les Amphibiens, la pénétration de l'air se fait par déglutition (ce serait également le cas chez les Dipneustes). Le plancher buccal s'abaisse grâce à la musculature hyoïdienne, les narines s'ouvrent et l'air entre dans la cavité buccale : c'est l'*aspiration*. Les narines se ferment, le plancher buccal se soulève, l'air passe dans les poumons : c'est l'*inspiration*. Les narines s'ouvrent de nouveau, les poumons reviennent sur eux-mêmes, le plancher buccal se soulève, l'air est rejeté au-dehors : c'est l'*expiration*.

Les Lacertiliens et les Chéloniens conservent la déglutition, mais chez les premiers s'y ajoutent des mouvements de la cage thoracique. Seul, ce dernier mécanisme existe chez les Crocodiliens. Chez les Sauriens, les mouvements costaux se limitent à la partie antérieure de la cage thoracique, partie à laquelle correspond la portion alvéolaire du poumon. Le mécanisme très particulier de la ventilation chez les Oiseaux a été décrit précédemment.

Chez les Mammifères, à cette contraction des muscles thoraciques qui soulève les côtes s'ajoute l'abaissement du diaphragme. Le volume de la cavité thoracique augmente; un vide relatif tend à s'établir, mais les poumons, en relation avec le milieu extérieur, vont alors se dilater pour occuper l'espace laissé libre et donc se remplir d'air. L'expiration est passive et un volume d'air égal à celui qui avait été inspiré se trouve chassé. Chez l'homme au repos, ce volume est d'environ un demi-litre. A raison de 10 à 14 inspirations par minute, ce sont donc 5 à 7 litres d'air frais qui pénètrent dans les alvéoles. Dans le même temps, toujours chez le sujet au repos, une quantité équivalente de sang traverse les poumons.

La succession de ces mouvements d'inspiration et d'expiration est assurée par l'activité réflexe de centres respiratoires bulbaires. Ces centres peuvent répondre à divers stimuli et modifier le rythme ainsi que l'amplitude des mouvements respiratoires. Ils sont spécifiquement sensibles à la pression partielle du CO_2 dans le sang artériel. Cette tension agit directement au niveau du bulbe mais aussi sur les chimio-récepteurs de la crosse aortique et de la bifurcation des artères carotides. Avec l'augmentation de l'activité de l'organisme, le CO_2 et donc sa pression partielle augmentent dans le sang; les centres bulbaires sont stimulés; les mouvements respiratoires s'amplifient et s'accélèrent. Nous verrons que cette même élévation de la pCO_2 stimule les centres bulbaires cardio-régulateurs et vaso-moteurs. L'appareil circulatoire est également mobilisé : le cœur bat plus vite, la pression artérielle augmente. Un nouvel équilibre s'établit, qui permet de faire face aux besoins accrus de l'organisme.

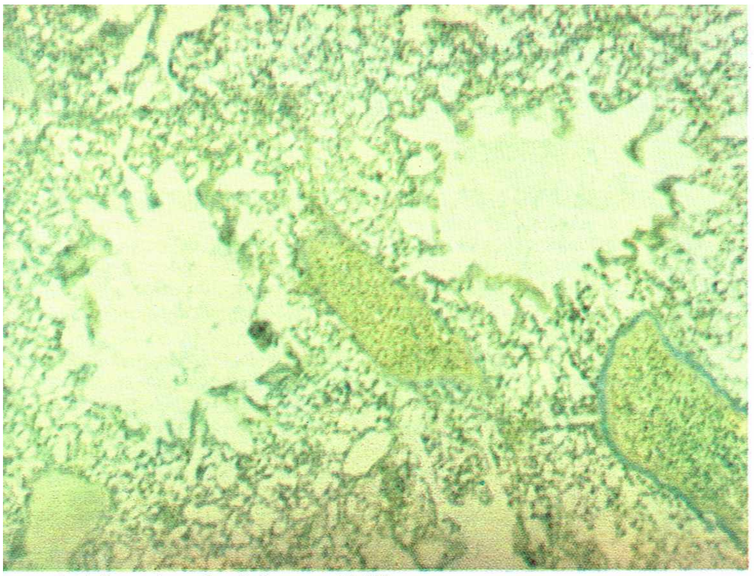

G. Volle - préparation S. Busson - Mabillot

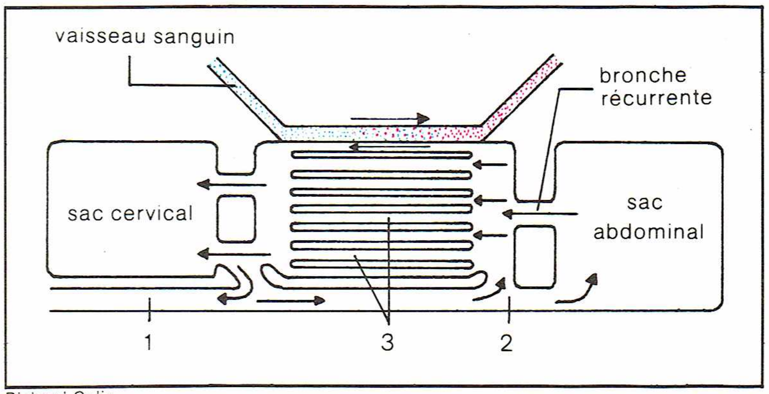

Richard Colin

▲ *A gauche, coupe de poumon d'Oiseau (poulet). les parabronches communiquent par des « bronchioles » sphériques avec les « capillaires » aériens dont l'épithélium mince est en contact direct avec l'endothélium des capillaires sanguins (érythrocytes).*
A droite, principe de la **ventilation pulmonaire** *chez un Oiseau : l'oxygénation du sang se fait par échange à contre-courant; 1, 2, 3, bronches primaire, secondaire et tertiaire (d'après Schmidt-Nielsen).*

Rôle du sang dans le transport de l'oxygène et du gaz carbonique

Transport de l'oxygène

Le sang va établir la liaison entre les organes respiratoires (peau, branchies, poumons) et les tissus utilisateurs d'O_2. En l'absence de pigment respiratoire, les quantités d'O_2 que pourrait transporter un milieu aqueux comme le sang seraient minimes. La présence des sels plasmatiques réduit encore la solubilité de l'O_2, déjà faible dans l'eau. 0,33 ml d'O_2 au plus se dissout dans 100 ml de plasma, alors que la capacité totale en O_2 du sang humain normal est de 20 ml pour 100 ml de sang. Sans hémoglobine et pour les mêmes besoins en O_2, le volume du sang devrait être soixante fois plus important.

L'hémoglobine (Hb), qui colore en rouge les érythrocytes des Vertébrés, est, comme tous les pigments respiratoires, une protéine comportant un métal lourd, fixé au centre d'un complexe organique, le groupement prosthétique. Un globule rouge humain contient environ 280 millions de molécules d'Hb. Chaque espèce animale possède sa propre Hb.

La molécule d'Hb humaine de poids moléculaire 64 500 est formée de quatre sub-unités, comprenant chacune une chaîne polypeptidique (les quatre chaînes forment la globine) associée à un groupement prosthétique, l'hème, centré sur un atome de fer ferreux (Fe^{++}).

L'hème est une ferro-porphyrine, assemblage de quatre noyaux pyrroliques, avec au centre Fe^{++}. La propriété que présente le fer de fixer transitoirement une molécule d'O_2 dépend des conditions d'environnement déterminées par la globine. Chaque hème est, en effet, situé dans une logette ménagée dans la chaîne polypeptidique, sur un résidu histidine de laquelle il est attaché. Les quatre chaînes polypeptidiques de la globine sont semblables deux à deux et disposées de manière symétrique. La séquence caractéristique des acides aminés pour chaque type de chaîne est spécifique. Chez l'homme, les chaînes α sont composées chacune de 141 acides aminés, les chaînes β de 146. Chez le fœtus humain, les deux chaînes β seraient remplacées par deux chaînes γ, qui conféreraient à cette Hb fœtale une affinité supérieure pour l'O_2 et permettraient donc les échanges gazeux au niveau du placenta. On a déjà reconnu plus de 20 hémoglobines humaines anormales. Par exemple, dans l'anémie à hématies falciformes, un résidu valine remplace un résidu acide glutamique en position 6 des chaînes β. C'est l'exemple type d'une maladie moléculaire.

Le fer de chaque hème peut fixer une molécule d'O_2, soit 4 molécules pour une hémoglobine. Cette réaction est réversible et dépend de la pO_2.

La courbe de dissociation de l'Hb avec O_2 exprime les degrés de saturation de celle-ci en fonction des valeurs croissantes de la pression partielle d'O_2 à laquelle elle est soumise. Cette courbe est en S, comme le montre celle correspondant au sang humain total à 37 °C. Au-delà d'une pO_2 de 80 mm Hg, on atteint un plateau voisin de la valeur maximale de 20 volumes pour cent d'O_2. La pO_2 de l'air alvéolaire s'établissant autour de 100 mm Hg, le sang artériel sort des poumons saturé en O_2. La pente forte de la courbe entre 20 et 60 mm Hg d'O_2 montre qu'au niveau des tissus (pO_2 inférieur à 30 mm Hg) le sang abandonne une part importante de son oxygène. Le sang veineux ne renferme plus que 15 volumes d'O_2 sous une pO_2 de 40 mm Hg.

En fait, toute élévation de la concentration en CO_2 du sang entraîne un décalage de la courbe vers la droite. Pour une même valeur de la pO_2, l'Hb se dissocie plus facilement. La production de CO_2 par les tissus favorise la libération à leur niveau de l'O_2 sanguin.

Transport du gaz carbonique

Le sang humain ne peut contenir que 2,5 volumes pour cent de CO_2, sous forme dissoute, au sortir des poumons ($pCO_2 = 40$ mm Hg). Or, le sang artériel renferme de 45 à 50 volumes pour cent de CO_2 et le sang veineux de 55 à 60 volumes pour cent ($pCO_2 = 46$ mm Hg). La plus grande partie du CO_2 est en fait transportée sous forme de bicarbonates :

$$CO_2 + H_2O \underset{\text{(anhydrase carbonique)}}{\rightleftharpoons} H_2CO_3 \rightleftharpoons H^+ + \underset{\text{ion bicarbonate}}{HCO_3^-}.$$

L'anhydrase carbonique des globules rouges accélère l'hydratation du CO_2. Les ions bicarbonates HCO_3^-, qui résultent de la dissociation de H_2CO_3, passent dans le plasma (remplacés dans les globules par Cl^-) et sont équilibrés par des ions Na^+.

La pCO_2 au niveau tissulaire est supérieure ou égale à 50 mm Hg. La pCO_2 du sang artériel n'étant que de 40 mm Hg, le CO_2 diffuse à travers la paroi des capillaires en direction du sang. Ce CO_2 se dissout dans le plasma ou forme, pour la plus grande part, des ions bicarbonates. Le sang veineux se charge ainsi de 10 volumes de CO_2. Dans les poumons, le gradient de pression de CO_2 est inverse et 10 volumes pour cent de CO_2 sont déchargés dans les alvéoles et expulsés à l'extérieur.

L'oxy-hémoglobine se comporte comme un acide fort, facilitant la dissociation des bicarbonates au niveau du poumon. Le transport d'O_2 et le transport de CO_2 sont étroitement liés.

▼ *Représentation graphique du contenu du sang en oxygène en fonction de sa pression partielle (d'après Echalier).*

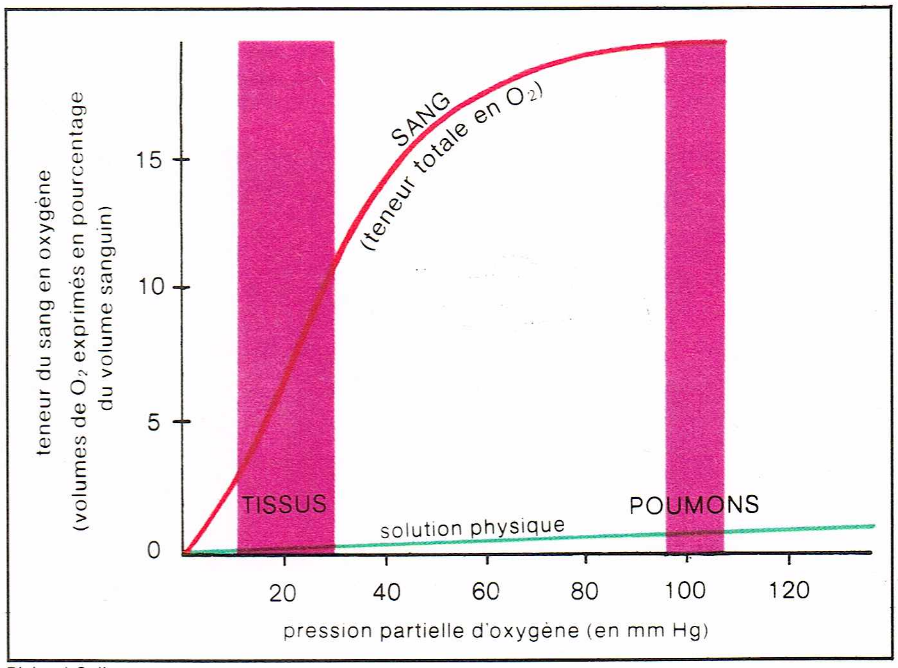

Richard Colin

▶ *Page ci-contre en haut, à gauche, un frottis de sang humain montrant des hématies, quatre polynucléaires et un monocyte; à droite, un frottis de sang (cas d'une leucémie lymphatique aiguë) montrant de nombreux lymphocytes entre les globules rouges.*

APPAREIL CIRCULATOIRE ET CIRCULATION CHEZ LES VERTÉBRÉS

Le fonctionnement d'un organisme à degré d'organisation élevé, où les cellules se groupent en organes complexes, implique l'existence d'un système de transport assurant l'apport d'oxygène et de métabolites énergétiques, l'élimination du CO_2 et des déchets du métabolisme ainsi que la distribution des hormones. Chez les Vertébrés, ces fonctions sont assurées par un milieu intérieur liquide circulant, séparé en sang et en lymphe. Le sang coule à grande vitesse dans un appareil circulatoire entièrement clos. La lymphe diffuse à travers les parois des vaisseaux sanguins du plus petit calibre (capillaires) et vient au contact direct des cellules au niveau des tissus. Cette lymphe interstitielle est drainée par un système de vaisseaux en culs-de-sac, les vaisseaux lymphatiques, qui la déversent dans l'appareil circulatoire sanguin.

L'appareil circulatoire sanguin comprend des vaisseaux dans lesquels le sang circule sous l'action d'un organe contractile, le cœur. Les artères partent du cœur et amènent le sang aux organes. Les veines ramènent le sang des organes au cœur. Au niveau des organes, un réseau de capillaires relie les artères et les veines et permet la transsudation de la lymphe interstitielle.

Le tissu sanguin

Le tissu sanguin est un tissu mésenchymateux dont la substance interstitielle liquide, le *plasma,* tient en suspension des cellules, ou éléments figurés, ou *globules.* La quantité de sang représente de 0,5 à 3 % du poids du corps chez les Poissons; elle peut atteindre de 5 à 10 % chez les Tétrapodes.

Le plasma

Liquide incolore, le plasma, formé de 95 % d'eau, contient en solution ou en suspension des sels minéraux et des substances organiques (glucose, acides gras, lipoprotéines, protéines). Les protéines plasmatiques (albumines, globulines, fibrinogène), surtout élaborées au niveau du foie, sont des constituants propres du plasma. La transformation du fibrinogène plasmatique soluble en fibrine insoluble au niveau d'une lésion permet la coagulation du sang et l'arrêt de l'hémorragie. Les autres substances organiques ne sont que des substances nutritives que le plasma véhicule vers les tissus.

La composition du plasma, différente d'une espèce à l'autre, varie dans des limites étroites, grâce aux mécanismes de l'homéostasie, dans lesquels interviennent les glandes endocrines (foie, hypophyse, surrénales, parathyroïdes) et exocrines (reins).

Les globules

Tous les globules dérivent des hémocytoblastes indifférenciés; ils se répartissent en trois catégories.

Les leucocytes, ou globules blancs

Ces cellules nucléées, qui peuvent se déplacer par des mouvements amiboïdes, n'empruntent le sang et la lymphe que pour se rendre vers les lieux de leur activité, c'est-à-dire les tissus conjonctifs. On les sépare en deux groupes, d'après leurs caractères morphologiques : mononucléaires, ou agranulocytes, et polynucléaires, ou granulocytes.

— Les *mononucléaires,* à noyau non lobé et à cytoplasme sans granulations, peuvent être séparés, chez les Amniotes, en *lymphocytes,* à noyau sphérique et à petit diamètre (6 à 8 µ chez l'homme), et *monocytes* à noyau déprimé et à plus grand diamètre (9 à 12 µ chez l'homme).

— Les *polynucléaires,* à noyau lobé et à cytoplasme riche en granules spécifiques, sont classés en fonction des affinités tinctoriales de ces granules. On distingue les *éosinophiles* (acidophiles), les *basophiles* et les *hétérophiles* (neutrophiles). Si les proportions de ces éléments sont très variables d'une espèce à l'autre, les hétérophiles sont toujours les plus abondants (96 % chez l'homme). Le rôle des polynucléaires hétérophiles dans la capture et la digestion des agents infectieux est bien connu; celui des autres leucocytes dans la défense, en particulier immunitaire, de l'organisme reste encore obscur. Il va de soi que le nombre des leucocytes dans le sang varie en fonction de multiples facteurs (agressions diverses, digestion...). Ils sont toujours beaucoup moins nombreux que les érythrocytes.

Les érythrocytes, ou globules rouges

Ces cellules chargées d'hémoglobine et incapables de mouvements propres sont extrêmement déformables. Leur forme d'équilibre est celle de disques aplatis ovalaires ou circulaires (Agnathes et Mammifères sauf les Camélidés). Au cours de leur différenciation ils perdent leur chondriome, leur appareil de Golgi, leur centrosome, leur ARN et, chez les Mammifères, leur noyau (hématies). Le nombre et la taille des globules rouges sont pratiquement constants pour une même espèce : l'homme en compte 5 000 000/mm³, de 8 µ de diamètre; la chèvre 18 000 000/mm³ de 4 µ de diamètre; la grenouille 600 000/mm³, de 22 × 16 µ; l'amphiume 30 000/mm³, de 65 × 35 µ.

Les thrombocytes

Ce sont des éléments impliqués dans la formation de la thrombine, protéine plasmatique intervenant dans la coagulation du sang. Chez les non-mammaliens, ces cellules se distinguent difficilement des lymphocytes; chez les Mammifères, ce sont des disques biconvexes, anucléés, provenant de la fragmentation des mégacaryocytes de la moelle osseuse. Chez l'homme, ces éléments, appelés *plaquettes* ou *globulins,* sont au nombre de 250 000/mm³ environ et ont un diamètre de 3 µ.

La genèse des globules

La durée de vie de ces éléments, très courte (110 jours pour les globules rouges, de quelques heures à quelques jours pour les globules blancs chez l'homme), impose leur renouvellement permanent. Chez l'embryon, les premiers vaisseaux et les premiers globules se différencient très tôt, à partir de cellules mésenchymateuses issues de la splanchnopleure et situées entre celle-ci et l'entoblaste (angioblastème). Ces cellules sont regroupées en îlots

▼ *Trois illustrations de leucocytes, ou globules blancs : à gauche, on observe de gauche à droite un monocyte, un lymphocyte et deux granulocytes; au centre, un granulocyte éosinophile; à droite, un granulocyte basophile.*

G. Frezzato

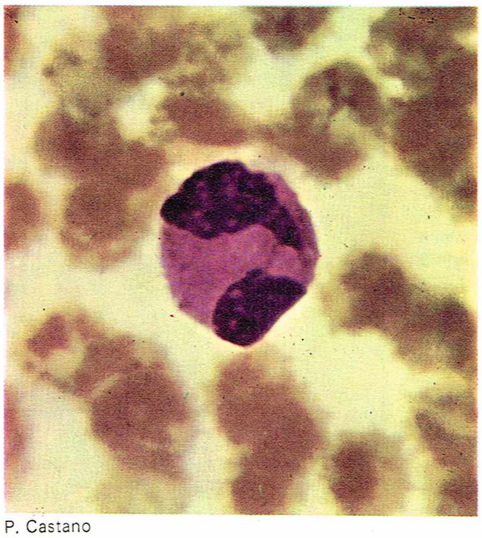

P. Castano

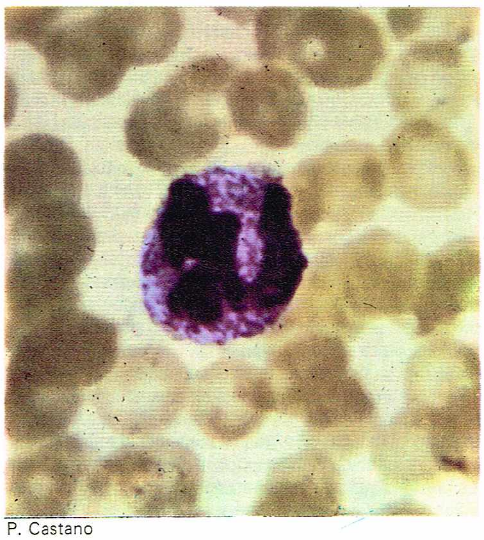

P. Castano

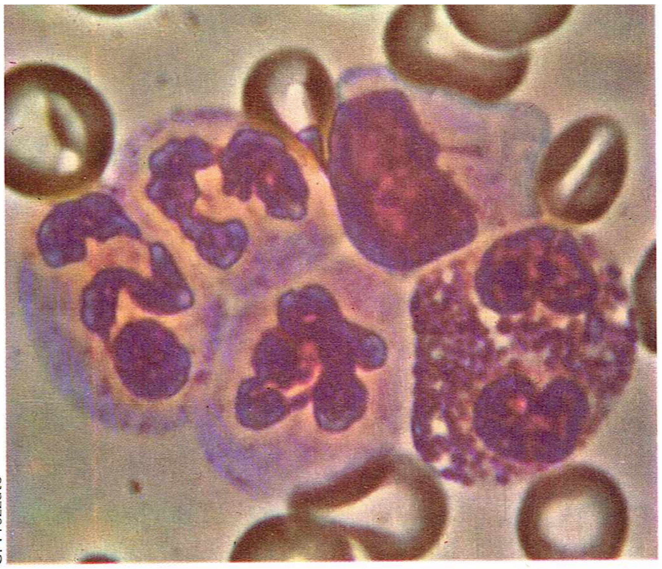

G. Frezzato

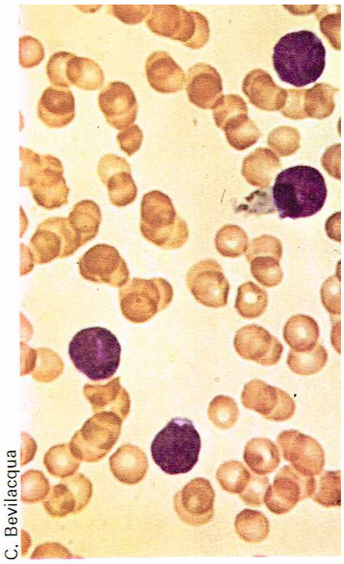

C. Bevilacqua

de Pander-Wolff chez les Poissons et les Amniotes à segmentation partielle, dans une « aire vasculaire » extra-embryonnaire qui repose sur le sac vitellin. Chez les Amphibiens, elles sont concentrées en deux îlots : l'un, vasculaire, au contact de l'entoblaste ventral, l'autre, vasculo-sanguin, entre la région hépatique et le blastopore. Dans chaque îlot vasculo-sanguin, les cellules périphériques donnent l'endothélium vasculaire, tandis que les cellules centrales s'isolent et forment les hémocytoblastes, cellules souches des cellules sanguines. Ces îlots ont une période d'activité brève, et de nouveaux foyers apparaissent dans divers organes sous forme de tissu hématopoïétique. Ce tissu infiltre de nombreux organes embryonnaires, comme le foie, le thymus, le rein (sauf chez les Mammifères), la moelle osseuse des Tétrapodes. Cette activité se maintient chez l'adulte dans le foie des Téléostéens, des Urodèles et des Chéloniens, dans le thymus des Oiseaux et des Mammifères, dans le rein des Anamniotes et dans la moelle osseuse des Tétrapodes. Le tissu hématopoïétique peut se concentrer en organes hématopoïétiques stricts, comme la rate et les ganglions lymphatiques. La rate (absente chez les Agnathes) forme des globules sanguins chez l'embryon mais aussi chez l'adulte (sauf chez les Mammifères, où elle devient un organe de stockage et de destruction des globules rouges). Les ganglions lymphatiques, qui caractérisent les Oiseaux et les Mammifères adultes, situés sur le trajet des vaisseaux lymphatiques, se spécialisent dans la production des lymphocytes.

Origine et développement des vaisseaux sanguins et du cœur

Les vaisseaux sanguins

Les vaisseaux sanguins se différencient, comme les globules, à partir du mésenchyme embryonnaire.

Les premiers se différencient, comme nous l'avons vu, à partir des îlots vasculo-sanguins de l'angioblastème, au niveau des réserves vitellines. Ils forment des cavités indépendantes dans lesquelles les hémocytoblastes se divisent activement.

La splanchnopleure libère d'autres cellules mésenchymateuses, qui se regroupent en îlots vasculaires, intra-embryonnaires et forment l'endothélioblastème. A partir de ces îlots se développent des cavités à parois endothéliales, ébauches du cœur, des artères et veines principales. Les vaisseaux issus de l'angioblastème et de l'endothélioblastème se raccordent et une circulation, d'abord liée à l'utilisation des réserves vitellines, s'établit.

Le circuit sanguin s'étend ensuite par bourgeonnement de la paroi endothéliale de ces vaisseaux. Celle-ci est bientôt doublée par une couche mésenchymateuse, plus ou moins épaisse, qui différencie des fibres élastiques et des fibres musculaires lisses. Les artères, soumises à une forte pression, possèdent un revêtement musculo-élastique très développé. Les veines, qui supportent une pression faible, ont une paroi mince, plus pauvre en éléments musculo-élastiques. Chez les Oiseaux et les Mammifères, les veines qui travaillent contre la pesanteur (celles des membres par exemple) possèdent des valvules « en nid de pigeon », riches en fibres élastiques, qui empêchent le reflux du sang.

Les capillaires, où s'effectuent les échanges avec les tissus, sont constitués par un simple endothélium doublé d'une basale. Quelques cellules conjonctives, les péricytes, peuvent être plaquées de place en place contre les cellules endothéliales. On distingue des capillaires à revêtement endothélial continu (poumons...), des capillaires fenestrés (reins des Mammifères, villosités intestinales...) et les sinusoïdes, où les cellules endothéliales fenestrées sont, de plus, non jointives.

Le cœur

Ventralement par rapport au pharynx, dans un espace encadré par les lames latérales, les cellules mésenchymateuses de l'endothélioblastème s'organisent en deux tubes endothéliaux parallèles : les *tubes endocardiques*. Ces deux ébauches fusionnent en un tube cardiaque impair qui donnera la paroi interne du cœur adulte, ou *endocarde*. Les deux épaississements des splanchnopleures qui se sont formés dans le même temps, s'affrontent et enveloppent le tube cardiaque d'un large manchon : l'*épimyocarde*. Autour, les deux cavités cœlomiques ont fusionné en une *cavité péricardique*. Les cellules de l'épimyocarde prolifèrent et emplissent l'espace séparant celui-ci du tube endocardique. Elles se différencient en cellules musculaires striées particulières et constituent le *myocarde*. Les cellules périphériques restent endothéliales et donnent l'*épicarde,* ou feuillet viscéral du péricarde.

Chez tous les embryons de Vertébrés le cœur est donc un tube rectiligne où confluent les veines vitellines prolongé en avant par l'aorte ventrale. Sa croissance très rapide dans la chambre péricardique l'oblige à s'incurver en S majuscule et à se coucher légèrement sur le côté. Des constrictions transversales le partagent en quatre chambres successives. Ce sont, d'arrière en avant :

— le *sinus veineux,* à parois minces et extensibles, qui collecte le sang veineux ;

— l'*atrium,* vaste chambre à parois moins extensibles, séparé du sinus par des valvules sino-atriales ;

— le *ventricule,* aux parois épaissies, qui constitue la partie contractile du cœur ; il est séparé de l'atrium par des valvules atrio-ventriculaires ;

— le *bulbe cardiaque,* dont les parois épaissies portent plusieurs rangées de valvules ; il est prolongé par l'aorte ventrale.

Les premières contractions apparaissent au cours de la différenciation de ces chambres, au début de la 4[e] semaine de gestation chez l'homme.

Le système artériel

Chez l'embryon de tous les Vertébrés, le sang passe du cœur dans l'aorte ventrale. Celle-ci émet, contre chaque arc viscéral, un arc aortique. Tous les arcs d'un même côté rejoignent une racine aortique qui court sous le neurocrâne et s'unit à sa symétrique, en arrière de la région pharyngienne, pour former l'aorte dorsale, qui distribue le sang aux différents organes. Chaque racine se poursuit en avant dans une carotide interne irriguant le cerveau.

A l'origine, chaque arc viscéral squelettique est accompagné d'un arc aortique. Chez les Ostracodermes du Primaire, il en existait de 10 à 12 paires, mais chez la

G. Volle - préparation S. Busson - Mabillot

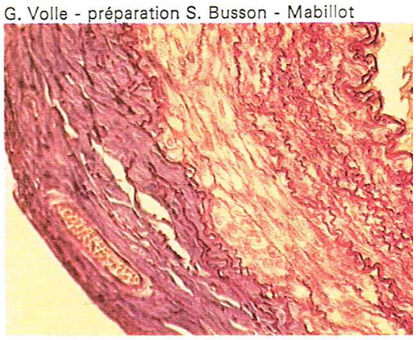

▲ ***Ci-dessus, coupe transversale d'une* artère *moyenne de Mammifère ; en partant de la lumière : intima avec sa limitante élastique interne ;* média *avec fibres musculaires lisses et nombreuses fibres élastiques circulaires (en rouge) ; adventice (en bleu) avec un vaisseau nourricier.***

▼ ***Frottis de sang de poulet.***

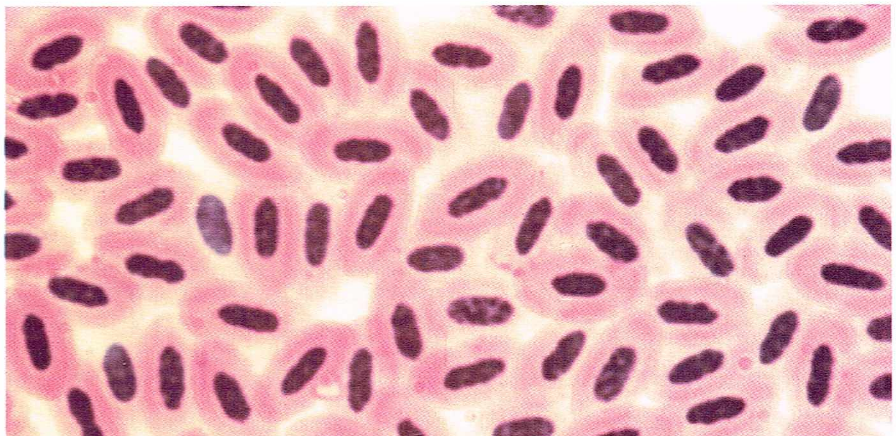

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

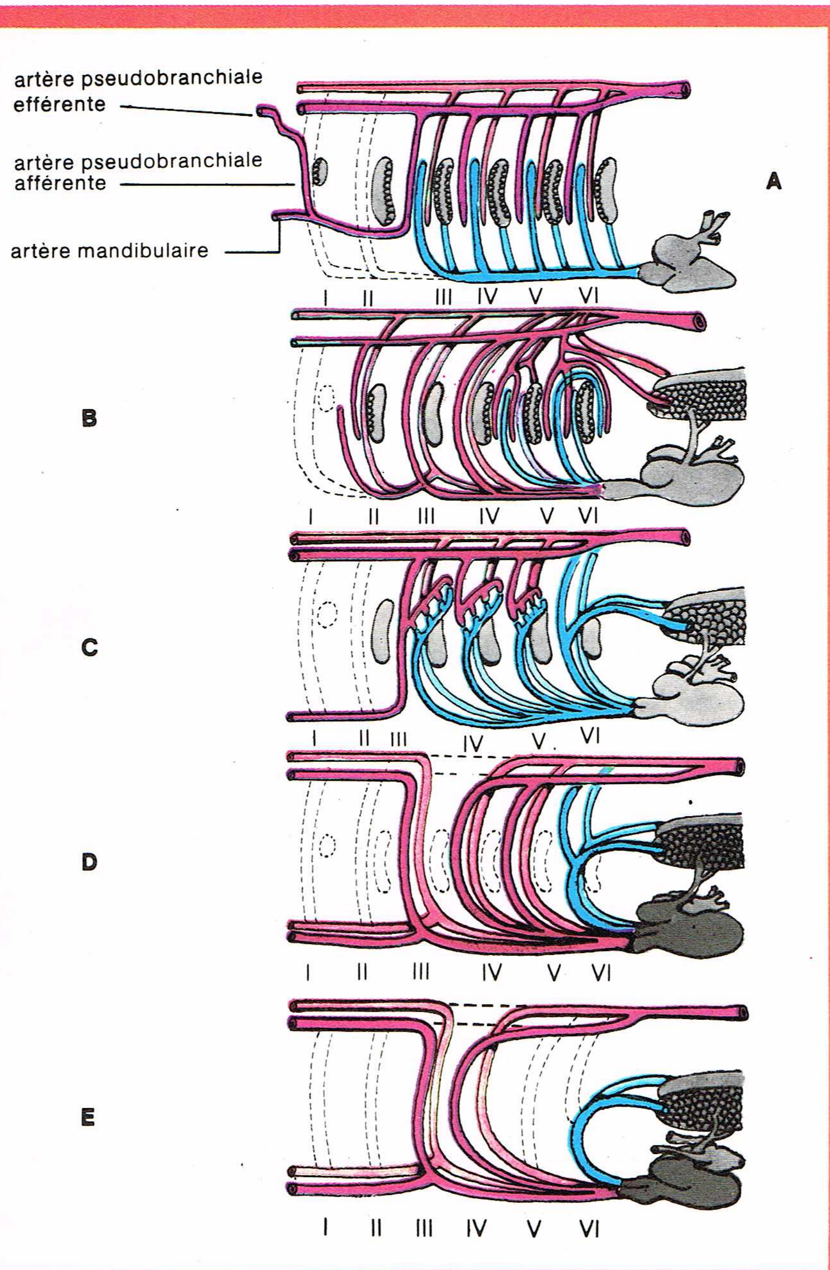

Richard Colin

▲ ***Représentation schématique** des arcs **aortiques des** Anamniotes : A, Téléostéen à pseudobranchie; B, protoptère (Dipneuste); C, larve d'Urodèle à branchies externes; D, Urodèle adulte; E, Anoure adulte (d'après Beaumont).*

quasi-totalité des embryons de Vertébrés ce nombre est réduit à 6 : mandibulaire (I) hyoïdien (II) et branchiaux (III, IV, V et VI), ou plus pour *Hexanchus* et *Heptranchias*. Cette disposition primitive ne subsiste chez aucun Vertébré adulte.

L'évolution des arcs aortiques se manifeste par :

— la disparition à peu près constante des arcs I et II, sauf chez les Sélaciens et quelques Téléostéens à pseudobranchie spiraculaire (par exemple, la truite);

— à partir des Amphibiens, la spécialisation de l'arc III (carotidien) pour l'irrigation céphalique, par l'intermédiaire des racines aortiques antérieures préexistantes (carotides internes);

— la prolongation céphalique du rameau efférent de l'arc III (carotides externes);

— chez les Tétrapodes, à l'exception de la plupart des Urodèles, la disparition de l'arc V;

— chez les Vertébrés à respiration pulmonaire, l'apparition de la double circulation; une « petite circulation » s'établit aux dépens de l'arc VI (pulmonaire), d'abord conjointement à la circulation branchiale chez les Dipneustes (protoptère), puis, lorsque l'appareil branchial n'existe plus, à la métamorphose chez les Amphibiens, ou d'emblée chez les autres Tétrapodes, de manière totalement indépendante de la circulation générale, ou « grande circulation »;

— la spécialisation de l'arc IV (systémique) dans l'irrigation du tronc et des membres; c'est cet arc qui fournit l'aorte des Vertébrés à respiration pulmonaire. Au départ du cœur existent soit deux crosses aortiques (chez les Amphibiens et les Reptiles) correspondant au schéma initial, soit une seule (chez les Oiseaux et les Mammifères). Chez les Oiseaux, l'aorte n'est plus alimentée que par la crosse droite qui porte l'arc carotidien; la partie proximale de la crosse gauche persiste, donnant un fragment de l'artère sous-clavière gauche. Chez les Mammifères, c'est la crosse aortique gauche qui subsiste; la partie proximale de la crosse droite donne un fragment de l'artère sous-clavière droite. La disposition du tronc carotidien par rapport à la crosse aortique est très variable. Chez les Tétrapodes adultes, où ne subsistent que les arcs III, IV et VI (plus le V, systémique accessoire chez les Urodèles), la double circulation correspond à un double passage du sang dans le cœur au cours d'un cycle circulatoire complet. La séparation du sang oxygéné venant des poumons (petite circulation) et du sang désoxygéné venant de la circulation générale (grande circulation) implique le cloisonnement du cœur.

Le cœur

Le cœur veineux des Vertébrés inférieurs aquatiques

Chez les Cyclostomes, les Poissons et les larves d'Amphibiens, le tube cardiaque, plié en S, prend la disposition dite en baïonnette : le sinus veineux et l'atrium deviennent dorsaux par rapport au ventricule et au bulbe cardiaque;

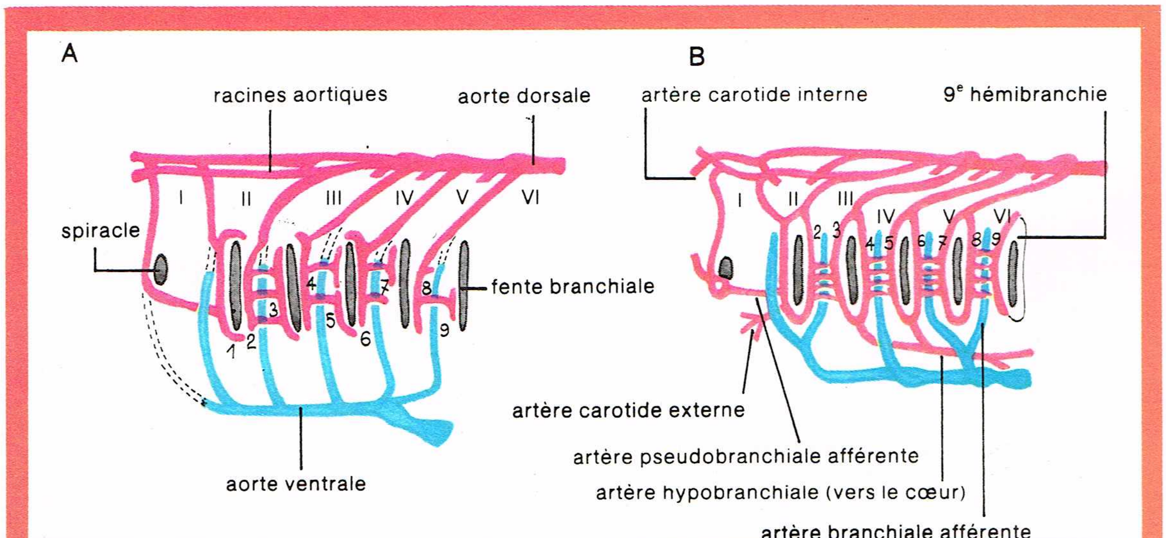

Richard Colin

▶ ***Modifications des arcs aortiques** durant le **développement** embryonnaire **d'un Sélacien** (Squalus) : 1, 3, 5, 7, 9, artères prétrématiques; 2, 4, 6, 8, artères post-trématiques; I, artère pseudobranchiale efférente; II, artère hyoïdienne; III à VI, artères branchiales efférentes → arcs aortiques (d'après Kent Jr.).*

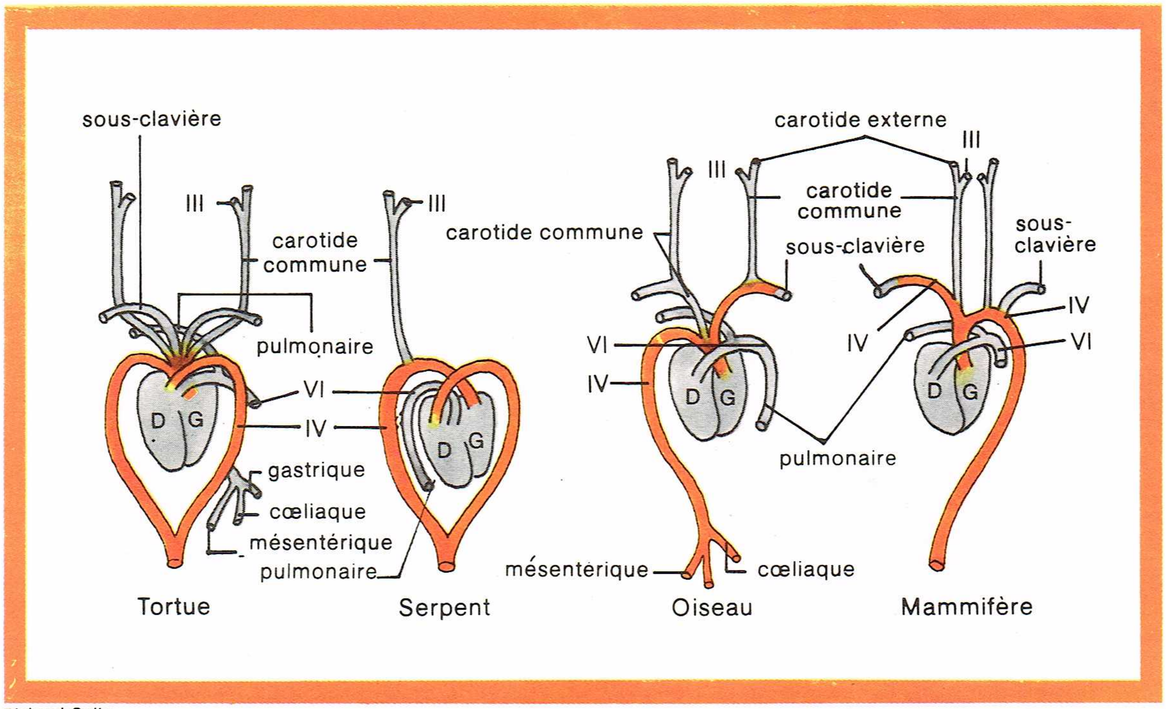

Richard Colin

◀ *Les arcs aortiques des Amniotes : III, arc carotidien; IV, arc systémique; VI, arc pulmonaire (d'après Kent Jr.).*

l'orifice atrio-ventriculaire se rapproche de l'orifice bulbo-ventriculaire.

Le bulbe cardiaque des Chondrichthyens, des Chondrostéens (esturgeon) et des Holostéens *(Amia)*, très développé, est tapissé de quatre rangées longitudinales de valvules en nid de pigeon. Chez les Téléostéens, où il est réduit à un anneau musculaire portant deux valvules opposées, son atrophie est compensée par le développement d'un puissant bulbe artériel au départ de l'aorte ventrale.

Le cœur n'est alimenté que par du sang veineux : l'hématose se réalise au niveau des capillaires branchiaux développés, sur le trajet des arcs aortiques.

Le cloisonnement du cœur chez les Vertébrés terrestres à double circulation

Parallèlement à l'évolution du réseau artériel, le cœur subit des modifications consécutives à l'établissement des deux circulations chez les Tétrapodes. Si le cloisonnement longitudinal du cœur apparaît dès les Poissons pulmonés (Dipneustes), la séparation ne devient totale que chez les Oiseaux et les Mammifères après leur naissance.

Le cœur des Dipneustes

Chez le protoptère par exemple, le sang des poumons est ramené au cœur par une veine pulmonaire qui s'ouvre au plafond du sinus veineux. Une gouttière du sinus, bientôt transformée en tube, la prolonge en fait jusqu'à la moitié gauche de l'atrium. Celui-ci est divisé en deux oreillettes par une cloison médiane incomplète. Le sinus veineux, qui reçoit le sang désoxygéné, débouche dans l'oreillette droite. Le ventricule est divisé en ventricules gauche et droit par une cloison interventriculaire incomplète. La séparation des sangs est donc assez bonne.

Une lame, résultant sans doute de la transformation d'une des rangées de valvules, divise le bulbe cardiaque en deux rampes parallèles. Cette lame, verticale à la sortie du ventricule, devient horizontale à son extrémité aortique et se prolonge dans l'aorte ventrale. Du fait de cette cloison, le sang oxygéné s'engage dans les arcs aortiques II, III et IV, tandis que le sang veineux, désoxygéné, provenant des sinus veineux, s'écoule dans les deux arcs aortiques postérieurs (V et VI), donc vers les deux paires d'holobranchies et les poumons. Ce cloisonnement du cœur est donc tout à fait original.

Le cœur des Amphibiens

La cloison interauriculaire devient complète, mais le ventricule reste indivis. Classiquement, on admettait une absence de mélange du sang désoxygéné, arrivant à l'oreillette droite par le sinus veineux, et du sang oxygéné, arrivant par la veine pulmonaire qui débouche dans

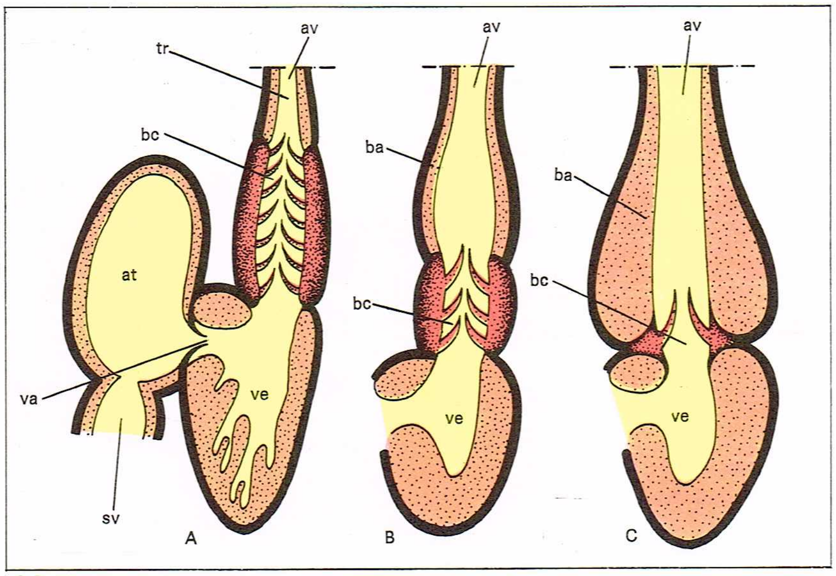

I.G.D.A.

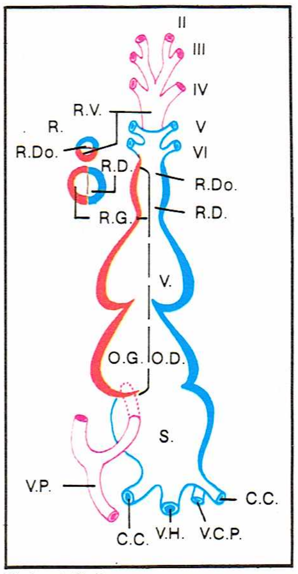

Richard Colin

◀ *A gauche, représentation schématique du cœur et de l'aorte ventrale des Poissons; A, Sélacien; B, Holostéen; C, Téléostéen : bc, bulbe cardiaque; at, atrium; va, valvule atrioventriculaire; sv, sinus veineux; tr, tronc artériel; av, aorte ventrale; ba, bulbe artériel; ve, ventricule. A droite, cœur, aorte et départ des arcs aortiques chez le protoptère (Dipneuste) : CC, canal de Cuvier; OD, oreillette droite; OG, oreillette gauche; R.D., rampe droite; R. Do., rampe dorsale; R.G., rampe gauche; R.V., rampe ventrale; S, sinus veineux; V, ventricule; V.C.P., veine cave postérieure; V.H., veine sus-hépatique; V.P., veine pulmonaire; II à VI, arcs aortiques (d'après Beaumont).*

▶ *Cœur de grenouille en section longitudinale : se, septum du bulbe cardiaque ; ce, carotide externe ; ci, carotide interne ; ao, aorte ; ap, artère pulmo-cutanée ; od, oreillette droite ; va, valvule atrio-ventriculaire ; ve, ventricule ; ra, rampe aortique ; rc, rampe carotidienne ; rp, rampe pulmo-cutanée ; og, oreillette gauche.*

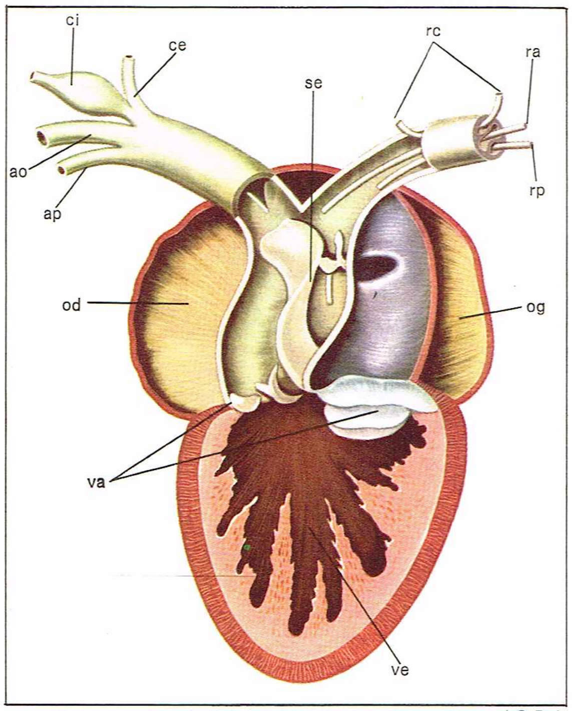

I.G.D.A.

▶ *Page ci-contre, en haut, schéma du développement du cœur de Mammifère (en haut) : ba, bulbe aortique qui, par un septum (stt), se divise en une rampe aortique et une rampe pulmonaire ; ve, ventricule qui est cloisonné par un septum ventriculaire (se) ; at, atrium qui se divise en oreillette droite (od) et oreillette gauche (og) ; sv, sinus veineux. En bas, cœur de chien : ao, aorte ; lb, ligament de Botal ; od, oreillette droite ; vd, ventricule droit ; ap, artère pulmonaire ; vp, veines pulmonaires ; og, oreillette gauche ; vg, ventricule gauche.*

▶ *A gauche, diagramme du flux sanguin à travers le cœur des Squamates : A, interprétation classique ; B, interprétation de Webb. A droite, sections transversales du ventricule des Squamates ; A, niveau postérieur aux valvules atrio-ventriculaires ; B, niveau antérieur à A, montrant la position de l'ouverture de l'aorte en relation avec le « Muskelleiste ».*

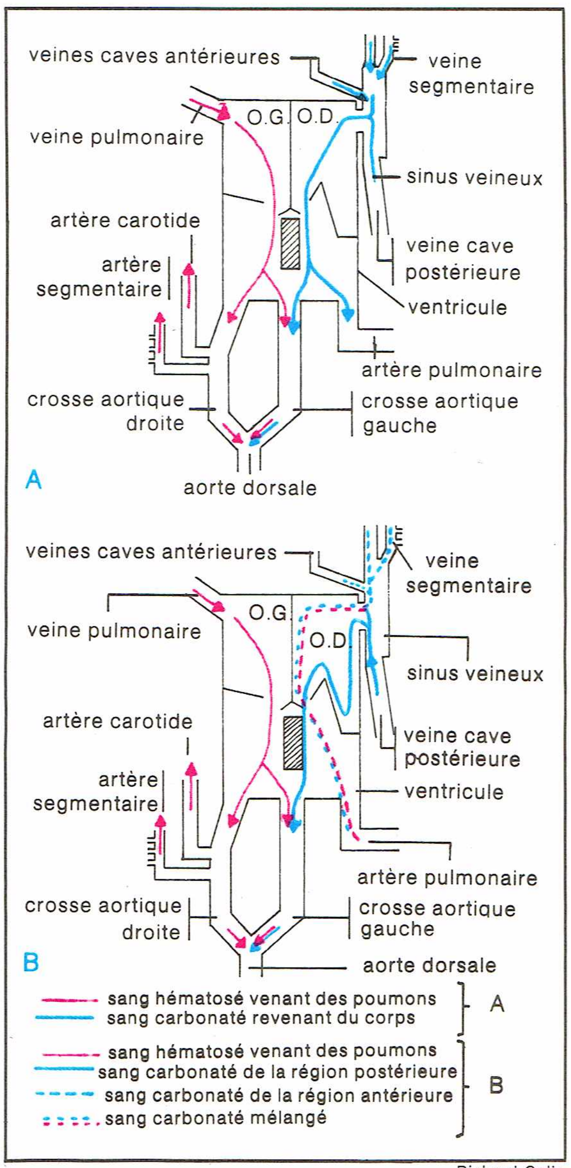

Richard Colin

l'oreillette gauche. Cette hypothèse reposait sur un certain nombre de faits, comme la contraction asynchrone des deux oreillettes, la structure spongieuse de la cavité ventriculaire et, surtout, le cloisonnement du bulbe par une « valvule spirale », séparant une rampe pulmonaire qui alimente l'arc VI pulmonaire (éventuellement l'arc V chez les Urodèles) d'une rampe carotido-systémique, d'où se détachent les arcs III et IV.

Il semble bien, en fait, que le sang se distribue presque également et simultanément dans les trois arcs ; la valvule spirale est d'ailleurs rudimentaire ou absente dans de nombreux genres. N'oublions pas que l'hématose du sang se fait souvent, pour une part importante, au niveau de la peau. Le sang hématosé des veines cutanées revient au cœur par le sinus veineux. Des mesures de l'oxygène transporté par chacun des trois arcs montrent de très faibles variations.

Le cœur des Reptiles

Les oreillettes sont totalement séparées, et un cloisonnement ventriculaire apparaît chez les Reptiles non Crocodiliens.

Chez les Squamates, par exemple, le ventricule varie beaucoup d'une famille à l'autre. Il possède trois chambres séparées par deux cloisons incomplètes. La cloison la plus volumineuse, le « Muskelleiste », sépare le *cavum pulmonale* des deux autres chambres, le *cavum venosum* et le *cavum arteriosum*. Ces deux dernières chambres sont elles-mêmes séparées par une deuxième cloison, le septum vertical, situé dans le même plan que les valvules atrio-ventriculaires.

Durant la systole auriculaire, le sang de l'oreillette gauche passe dans le *cavum arteriosum*. La valvule atrio-ventriculaire gauche, appuyée sur le septum vertical, isole cette chambre et empêche le sang de passer dans le *cavum venosum*. Le sang de l'oreillette droite est dirigé par la valvule atrio-ventriculaire droite, par-dessus le bord libre du « Muskelleiste », dans le *cavum pulmonale*. Une fraction de ce sang passe dans le *cavum venosum*.

Dès le début de la systole ventriculaire, la paroi ventriculaire appuie contre le bord libre du Muskelleiste, séparant *cavum pulmonale* et *cavum venosum*. Le premier sang qui quitte le ventricule est le sang désoxygéné du *cavum pulmonale ;* il passe dans l'artère pulmonaire, dont l'ouverture est située dans la partie antérieure du cavum. Le sang oxygéné du *cavum arteriosum* remonte vers l'orifice atrio-ventriculaire gauche, arrêté par la valvule atrio-ventriculaire gauche. Celle-ci n'est plus appuyée contre le septum vertical, et le sang passe dans le canal interventriculaire ouvert entre le septum et les valves ; puis, dirigé par la face inférieure de la valve atrio-ventriculaire droite, il gagne la crosse aortique droite. Une partie de ce sang ainsi que le sang du *cavum venosum* passent par la crosse aortique gauche.

L'artère pulmonaire transporte du sang désoxygéné, la crosse aortique gauche du sang mélangé et la crosse aortique droite du sang oxygéné. Rappelons que le tronc carotidien est porté par cette crosse.

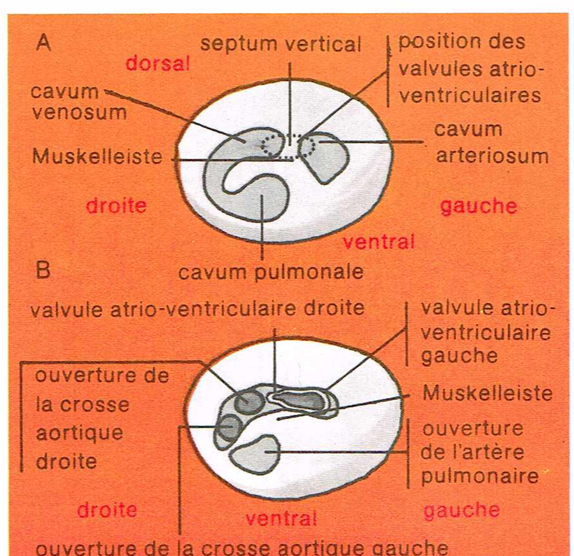

Richard Colin

En 1972, Webb a montré que ce schéma, classique, n'était que partiellement exact. En implantant chirurgicalement des thermocouples dans les arcs aortiques de pythons, il a constaté que la température est toujours plus faible dans la crosse aortique gauche que dans la droite ; la température de l'artère pulmonaire est soit intermédiaire, soit plus forte que dans les deux autres troncs. L'interprétation classique ne peut rendre compte de ces faits. En réalité, selon Webb, il y aurait séparation plus ou moins complète du sang veineux des veines caves antérieures et de la veine cave postérieure. Une gouttière de la valvule sino-auriculaire fait passer une grande partie du sang de la veine cave postérieure dans une extension latérale de l'oreillette droite (très développée chez les Ophidiens). Ce sang serait expulsé en dernier, lors de la systole auriculaire, et occuperait seul le *cavum venosum* ventriculaire. C'est donc lui qui passerait par la crosse aortique gauche. Si l'on tient compte du fait que la tête et le cou des Reptiles se réchauffent plus rapidement que les autres régions du corps, cette interprétation est cohérente. La régulation thermique chez les Reptiles se ferait en grande partie par le système circulatoire ; de ce point de vue, le shuntage du sang froid postérieur permettrait de maintenir le gradient de température (très souvent observé) entre la tête et le corps.

Chez les Crocodiliens, apparaît pour la première fois une cloison interventriculaire. La séparation des sangs est donc totale au niveau cardiaque, mais les deux crosses aortiques se réunissent et un mélange se fait obligatoirement dans l'aorte dorsale. En fait, une communication secondaire des deux crosses à leur départ du cœur *(foramen de Pannizza)* entraîne déjà un certain mélange à ce niveau.

Le cœur des Oiseaux et des Mammifères

La double circulation est effective : la disparition de l'une des crosses aortiques permet à la cloison interventriculaire complète de séparer réellement les deux courants circulatoires. Mais cette séparation ne s'établit qu'au moment même de la naissance. Le sang de l'embryon (Oiseaux) ou du fœtus (Mammifères) passe de l'extrémité caudale de l'aorte dorsale dans les artères allantoïdiennes (ombilicales). Il gagne alors l'allantoïde (Oiseaux) ou le placenta (Mammifères) et s'hématose. De l'allantoïde ou du placenta, le sang revient à l'embryon ou au fœtus par les veines allantoïdiennes (ombilicales ; il n'en existe qu'une seule chez l'homme) ; la droite se jette dans la gauche à son entrée dans le corps. La veine gauche, qui initialement participe au système porte hépatique, se prolonge peu à peu à l'intérieur du foie par élargissement de certains capillaires en un *canal d'Arantius (ductus venosus)*. Celui-ci aboutit à la veine cave postérieure et permet à une grande partie du sang de court-circuiter le système porte hépatique. Des mesures réalisées chez un fœtus de mouton peu avant la naissance ont montré que le sang passe dans l'oreillette droite dans la proportion de 69 % du sang total transitant dans le cœur. Une partie gagne alors l'oreillette gauche (27 %), par un foramen interatrial, le *trou de Botal (foramen ovale)*. L'autre partie (42 %), le sang de retour de la tête par la (Mammifères) ou les (Oiseaux) veines caves supérieures (21 %) et le sang coronarien (3 %) entrent dans le ventricule droit et sont poussés dans le tronc pulmonaire. La plus grande partie de ce sang (59 %) est shuntée dans l'aorte dorsale par le *canal artériel de Botal (ductus arteriosus)*. Le sang qui irriguera le cerveau

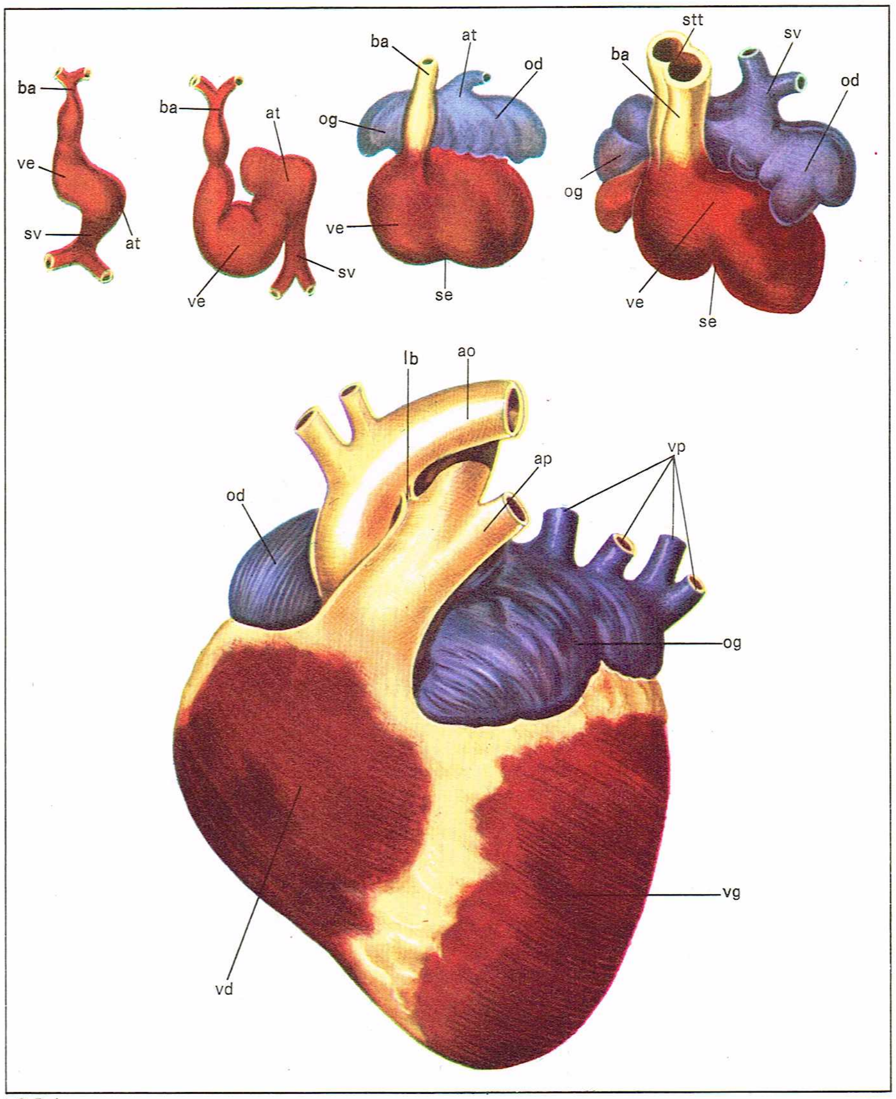

I.G.D.A.

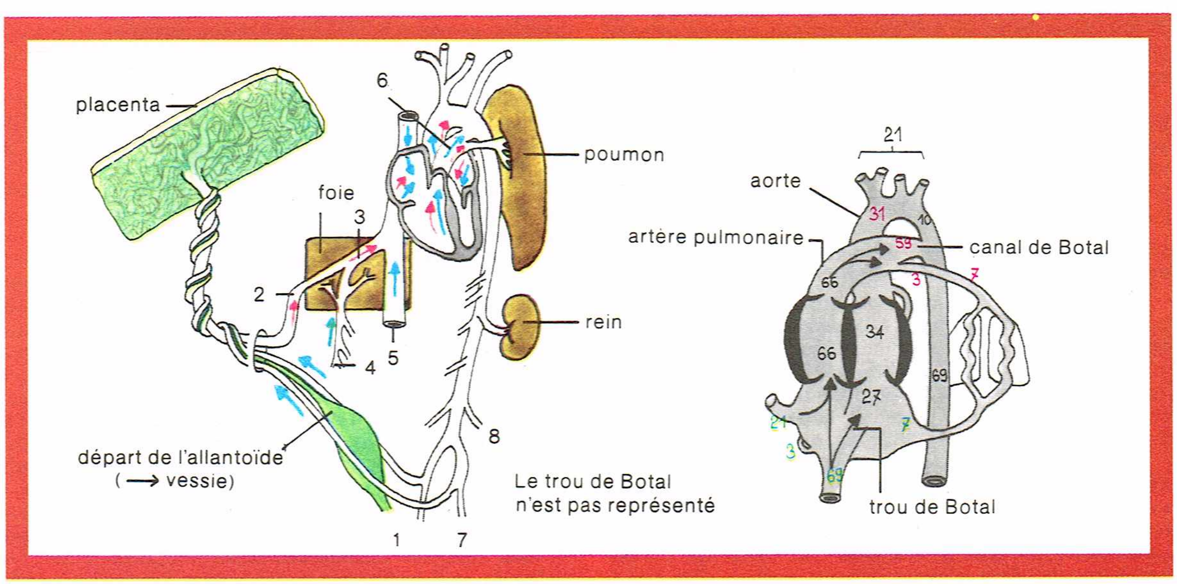

Richard Colin

◀ ***Circulation et répartition du sang transitant dans le cœur d'un fœtus de Mammifère ; A, circulation chez l'homme (d'après Kent Jr.) : 1, artère ombilicale ; 2, veine ombilicale ; 3, canal d'Arantius ; 4, veine porte hépatique ; 5, veine cave postérieure ; 6, canal de Botal ; 7, artère iliaque interne ; 8, artère iliaque externe (→ membre) ; B, répartition du sang chez le mouton peu avant la naissance (d'après Rudolph et Heymann).***

est formé du sang oxygéné qui a transité à travers le trou de Botal mélangé à la petite quantité (7 %) revenant des poumons. Ce sang est donc mieux oxygéné que celui qui gagne le reste du corps. Le trou de Botal et le canal artériel permettent donc la mise en court-circuit de la circulation pulmonaire.

A la naissance ou peu avant l'éclosion, l'occlusion réflexe (déclenchée par la pénétration de l'air dans les poumons) du canal artériel, par constriction des fibres musculaires de sa paroi, permet à tout le sang qui emprunte le tronc pulmonaire de gagner les poumons. Le sang pulmonaire afflue brutalement à l'oreillette gauche, et la surpression créée déclenche la fermeture d'un clapet au niveau du trou de Botal. La circulation est alors double.

Dans les semaines qui suivent la naissance, le canal artériel se résorbe (ligament artériel) et des adhérences cicatricielles font disparaître le trou de Botal *(fossa ovalis)*. Un défaut d'occlusion du canal artériel ou d'obturation du trou de Botal provoque une cyanose du nouveau-né, connue sous le nom de maladie bleue.

L'automatisme cardiaque

Le myocarde des Vertébrés est fait de fibres musculaires striées particulières, dont les contractions sont spontanées, rythmiques, indépendantes de la volonté. Celles-ci sont déclenchées par des stimuli naissant au niveau de la membrane de cellules musculaires spécialisées formant le tissu nodal.

Chez les embryons de Vertébrés, le *pace-maker,* centre de l'automatisme cardiaque où naissent les ondes de contraction, est situé dans la paroi du sinus veineux, sous la forme d'un amas de cellules nodales : le *nœud sino-atrial.* Les stimuli gagnent l'extrémité antérieure du cœur par une traînée de tissu nodal, d'où les ondes diffusent à l'ensemble du muscle. Cette disposition subsiste chez les adultes des Poissons, des Amphibiens et peut-être des Reptiles.

Chez les Oiseaux et les Mammifères adultes, le nœud sino-atrial de Keith et Flack de l'oreillette droite (au voisinage du débouché des veines caves) constitue le pace-maker principal, qui impose son rythme à l'ensemble du cœur. On peut, par des changements locaux de température, des excitations électriques, des manipulations chirurgicales, etc., prouver qu'il est bien le point de départ de l'excitation cardiaque. L'onde de contraction se propage aux oreillettes et gagne un deuxième *nœud,* dit d'*Aschoff-Tawara,* situé dans la partie postérieure du septum interauriculaire. Ce nœud transmet l'excitation aux ventricules par le tissu nodal du *faisceau de His,* ramifié en un *réseau,* dit *de Purkinje*. Ce réseau, plus développé chez les Oiseaux, s'étend même aux oreillettes.

Le système veineux

Au début de la vie embryonnaire de tous les Vertébrés, la circulation veineuse, relativement simple, peut être ramenée à un modèle commun de base. Avec la poursuite du développement, l'organisation des troncs veineux est progressivement modifiée par la disparition ou l'addition de nouveaux éléments. Les modifications, peu importantes chez les Sélaciens, sont beaucoup plus nombreuses chez les formes plus évoluées.

Les principaux troncs veineux peuvent être ramenés à trois composants : le système des veines cardinales, le système des veines latérales et le système des veines vitellines. Chez les Dipneustes et les Tétrapodes, la respiration pulmonaire implique le développement des veines pulmonaires.

▶ Page ci-contre, en bas, à gauche, représentation schématique du système veineux chez les Anamniotes : en pointillé, vaisseaux embryonnaires oblitérés (d'après Kent Jr.). A droite, origine de la veine cave postérieure chez une tortue **(Chrysemys sp.)** *: en pointillé, le mésonéphros; CP, veine cave postérieure; Card. P, veine cardinale postérieure; PR, veine porte rénale; S.C., veine sous-clavière (d'après Ryke).*

Les principaux troncs veineux et leurs modifications chez les Sélaciens

L'embryon de squale (de roussette par exemple) possède des troncs veineux qui peuvent servir de modèle commun de base. Les modifications au cours du développement y sont peu importantes; l'étude du système veineux des squales est un point de départ excellent pour comprendre celui des Vertébrés supérieurs.

Système des veines cardinales, système porte rénal

Deux veines cardinales antérieures collectent le sang de la tête; deux veines cardinales postérieures, latérales aux reins, drainent le sang du tronc. Les cardinales antérieure et postérieure d'un même côté s'unissent en une cardinale commune transversale, ou *canal de Cuvier,* qui débouche dans le sinus veineux. Au tout début de la morphogenèse, le sang de la queue passe sous l'intestin dans une veine sous-intestinale. La veine caudale entre en relation avec les cardinales postérieures puis rompt sa connexion avec la sous-intestinale. Le sang de retour par la queue longe les reins. Des veines rénales afférentes se forment à l'extrémité caudale des cardinales postérieures et envoient des capillaires vers les tubules du mésonéphros (jamais vers les glomérules). De plus en plus de sang venant de la queue transite par les reins pour revenir dans les cardinales. Un réseau de veines sous-cardinales se forment alors sur le bord interne des reins, au voisinage de l'aorte. Ces veines rejoignent les veines cardinales postérieures, en avant des reins. Celles-ci vont alors s'interrompre à ce niveau. Tout le sang de la queue passe par les reins; l'ancienne veine cardinale postérieure devient la veine porte rénale de Jacobson. Ce système porte rénal présente de grandes variations chez les Poissons osseux. Il est absent chez les Cyclostomes, où les cardinales postérieures ne font que recevoir le sang des veines rénales efférentes, issues du rein.

Système des veines latérales

Chaque veine latérale prend naissance au niveau d'une nageoire pelvienne, dont elle recueille le sang, et remonte vers les canaux de Cuvier. Au niveau de la nageoire pectorale, elle reçoit une veine brachiale. La partie de la veine latérale comprise entre la veine brachiale et le canal de Cuvier devient la veine sous-clavière. Les Poissons osseux, sauf les Dipneustes et les Crossoptérygiens, ne possèdent pas de veines latérales.

Système des veines vitellines, système porte hépatique

Les premiers vaisseaux différenciés chez tous les embryons de Vertébrés sont les deux veines vitellines, ou omphalo-mésentériques, qui courent sur le sac vitellin ou sous l'archentéron (Amphibiens) et gagnent le sinus veineux en formation. Une de ces veines, généralement la gauche, entre en connexion avec une veine sous-intestinale qui se prolonge par une veine caudale. Le foie, en se différenciant, incorpore les parties antérieures des veines vitellines, lesquelles s'interrompent et donnent les capillaires veineux du système porte hépatique. Les veines vitellines s'unissent et, avec la veine sous-intestinale, qui n'est plus en continuité avec la caudale, forment la veine porte hépatique. Entre le foie et le sinus veineux, la portion antérieure des veines vitellines donne les deux veines sus-hépatiques.

Les principaux troncs veineux des Tétrapodes

Le système veineux de l'embryon des Tétrapodes est très proche de celui de l'embryon des Sélaciens.

Système des veines cardinales, veines caves

Chez les Tétrapodes, les canaux de Cuvier sont devenus les veines caves antérieures et les veines cardinales antérieures sont dénommées veines jugulaires internes. Si de nombreux Mammifères possèdent les deux veines caves antérieures, d'autres, comme l'homme, perdent la veine cave antérieure gauche durant leur vie embryonnaire. Un vaisseau néoformé, le tronc brachiocéphalique gauche, permet à la veine cave droite de collecter le sang des veines sous-clavière, jugulaire externe et jugulaire interne gauches. Chez ces Mammifères, le tronc brachiocéphalique droit (autrefois veine innominée) n'est qu'une portion du canal de Cuvier droit. La portion tout à fait proximale de la veine cave gauche subsiste et devient la veine coronarienne.

Le développement d'un nouveau vaisseau, la veine cave postérieure, affecte la destinée des veines cardinales postérieures. Chez les Urodèles, celles-ci subsistent et conservent même leur relation avec la caudale. Mais à partir du réseau des veines sous-cardinales se développe un gros tronc veineux médian, la veine cave postérieure, qui les remplacera fonctionnellement dans la collecte du sang des rénales efférentes. Le foie qui se développe entoure cette veine cave mais n'en provoque pas la capillarisation; elle capture par contre les veines sus-hépatiques avant de rejoindre le sinus veineux. Chez les autres Tétrapodes non mammaliens, les cardinales disparaissent en avant des reins, et la veine cave subsiste seule.

Le système porte rénal disparaît après s'être formé chez le fœtus des Mammifères. Le sang de la queue et des membres postérieurs passe directement dans la veine cave. Des fragments des veines cardinales posté-

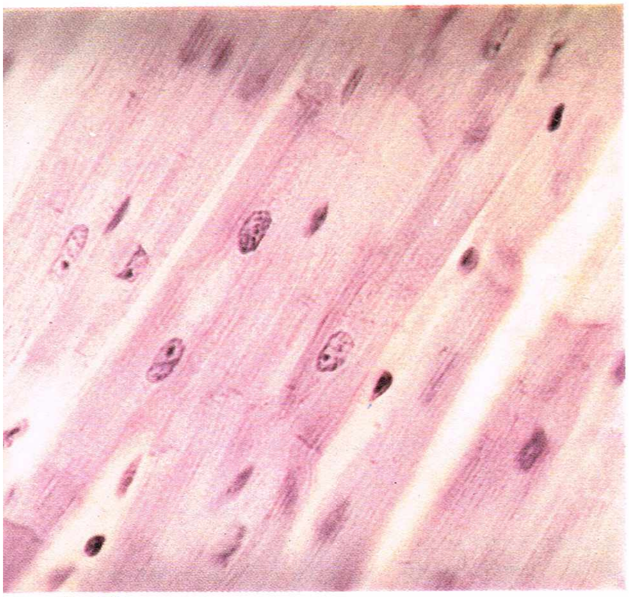

G. Volle

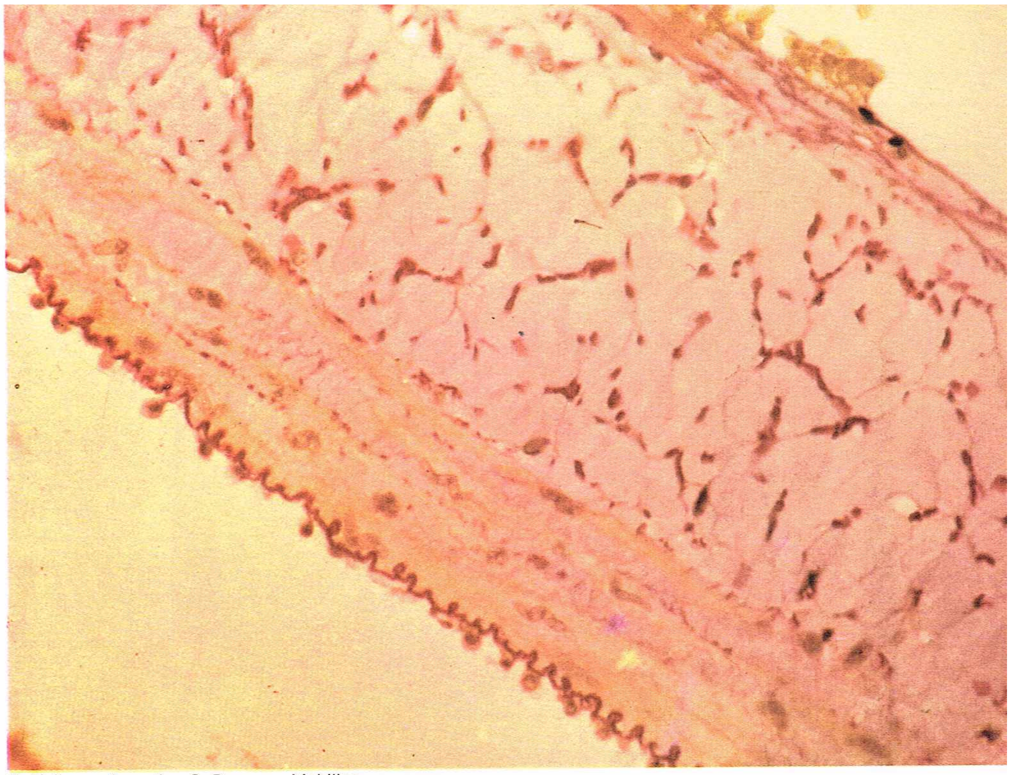

G. Volle - préparation S. Busson - Mabillot

rieures peuvent subsister, comme les veines azygos et hémiazygos, unies par une anastomose transverse. Elles irriguent les espaces intercostaux ainsi que la colonne vertébrale.

Système des veines latérales, veines allantoïdiennes

Chez les Tétrapodes, les veines latérales sont englobées dans le foie, qui les capture. Le sang qu'elles transportent participe au système porte hépatique ; elles perdent donc leur communication avec le sinus veineux et ne participent plus au drainage du sang des membres antérieurs. En outre, elles perdront progressivement leur rôle dans la collecte du sang des membres postérieurs ; le processus de désengagement s'amorce avec l'apparition d'une veine iliaque externe, faisant communiquer veine fémorale et veine porte rénale. Chez les Amphibiens, les veines latérales fusionnent en une veine abdominale impaire, alors qu'elles restent doubles chez les Reptiles. Chez les Amniotes, elles donnent, durant la vie embryonnaire, les veines allantoïdiennes (ombilicales). Chez l'adulte des Oiseaux et des Mammifères, elles disparaissent.

Système des veines vitellines, système porte hépatique

Le système porte hépatique est le même chez tous les Vertébrés. Il collecte le sang veineux issu du tube digestif. Chez les Tétrapodes, le système des veines latérales y participe.

Les veines pulmonaires des Vertébrés

Les veines pulmonaires des Vertébrés drainent le sang des poumons et aboutissent dans la partie gauche de l'atrium ou dans l'oreillette gauche. Chez les Dipneustes et les Amphibiens, les veines pulmonaires gauche et droite s'unissent avant de déboucher dans le cœur. Lorsqu'un poumon manque, la veine correspondante ne se développe pas.

La circulation sanguine et sa régulation

Le fonctionnement de la pompe cardiaque imprime au sang une certaine pression et permet sa circulation dans le circuit fermé que constituent les artères, les capillaires et les veines.

La circulation sanguine

La pompe cardiaque

Chez les Vertébrés à sang froid, la fréquence est basse ; elle s'élève lorsque la température extérieure croît (40 à 50 cycles par minute chez la grenouille à 20 °C). Chez les Mammifères, la fréquence est d'autant plus grande que la taille de l'espèce est plus petite : chez la souris elle est de 520 à 800, chez le lapin de 120 à 150, chez le cheval de 35 à 40. Elle décroît avec l'âge : chez l'homme elle est

▲ A gauche, coupe longitudinale de muscle cardiaque de Mammifère : il est constitué de fibres striées, uninucléées, de 100 à 200 µ de longueur. Ces fibres, aux extrémités bifurquées, s'unissent aux fibres voisines par des surfaces spécialisées, les disques intercalaires. A droite, coupe transversale de veine moyenne de Mammifère ; en partant de la lumière : intima avec endothélium et limitante élastique ; média réduite avec fibres musculaires et rares fibres élastiques ; adventice épaisse avec réseau de fibres élastiques.

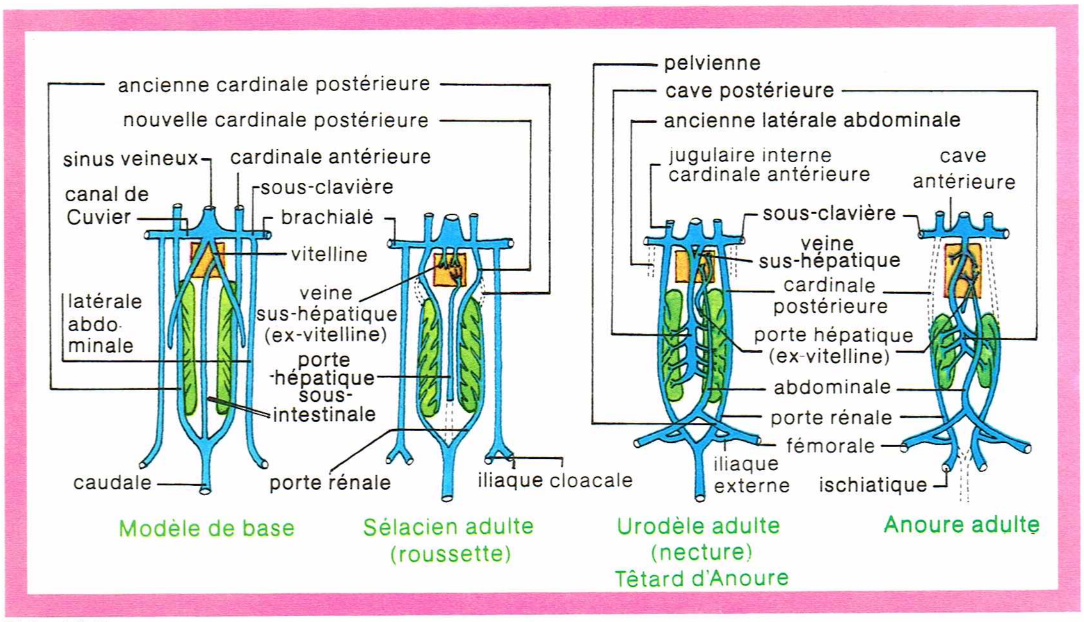

Richard Colin

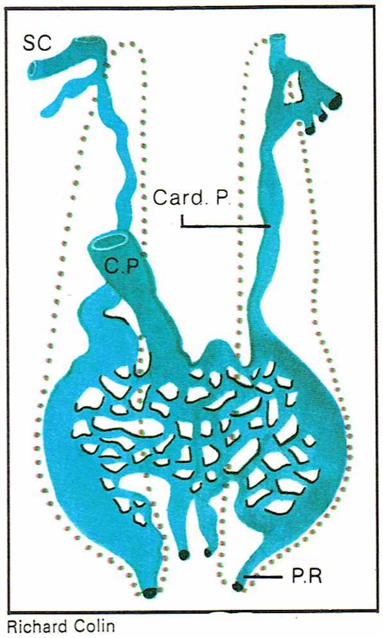

Richard Colin

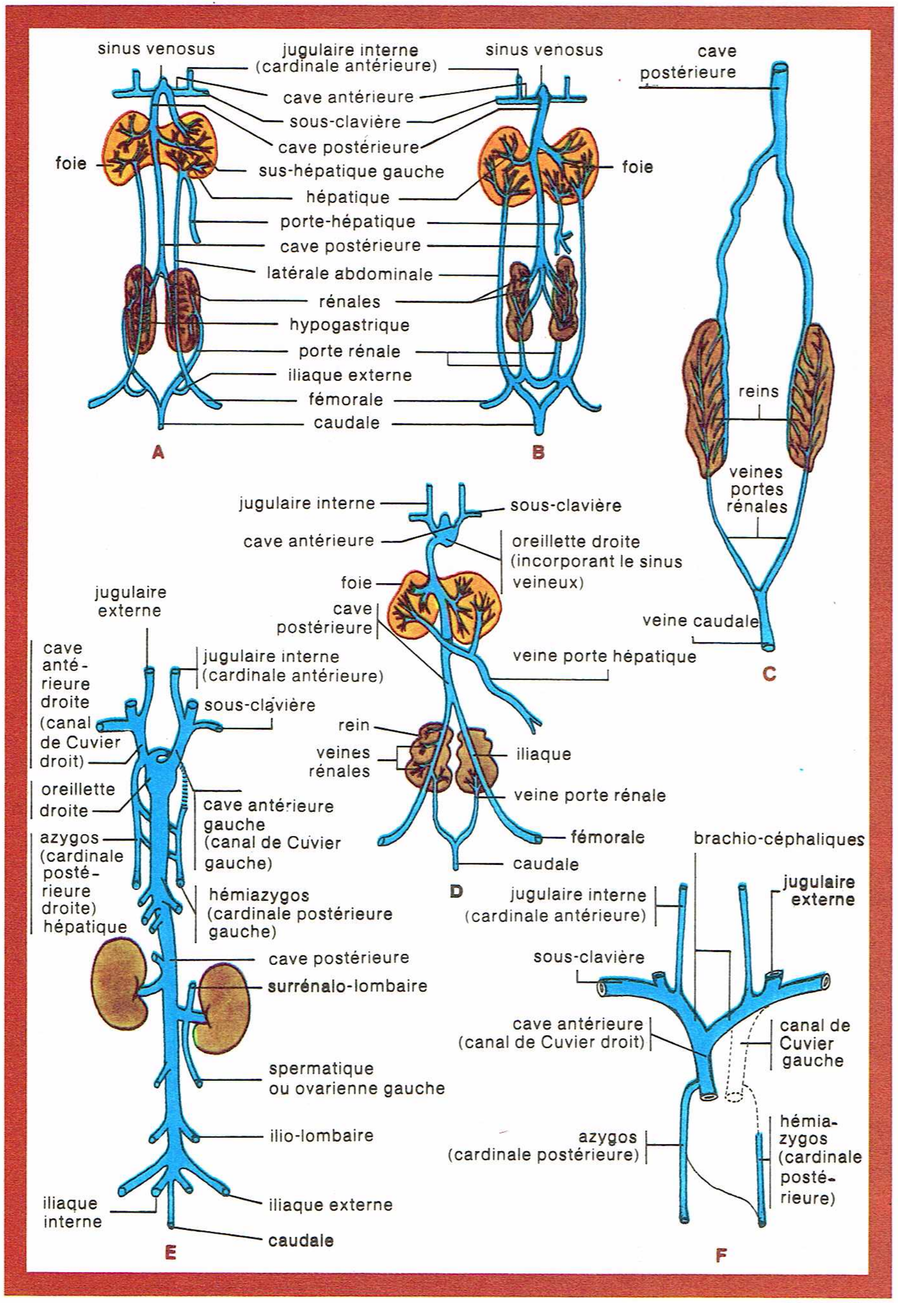

Richard Colin

▲ *A gauche,* **système veineux** *des* **Amniotes** *: A, tortue; B, alligator; C, serpent; D, Oiseau; E, lapin; F, chat et homme. A droite, représentation schématique du contrôle* **du rythme cardiaque** *chez un Mammifère (d'après Hoar).*

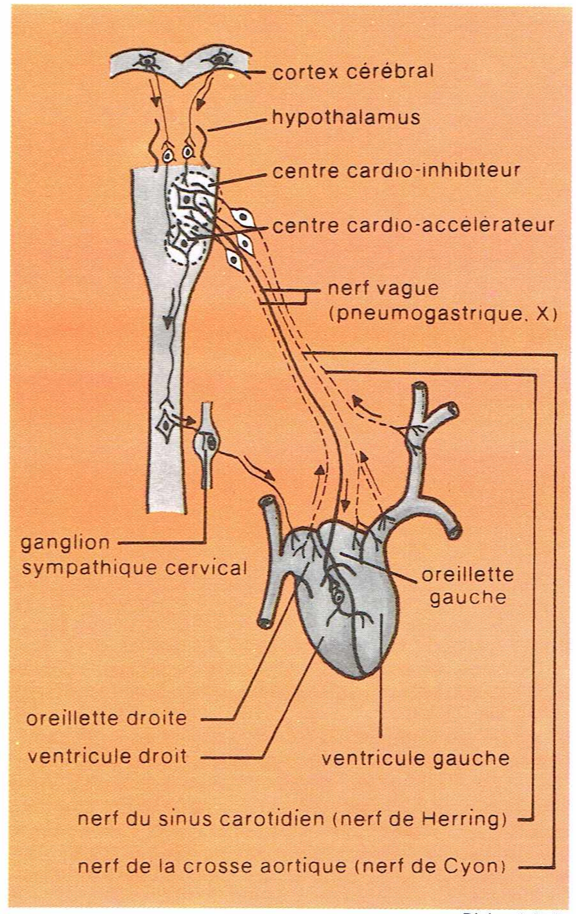

Richard Colin

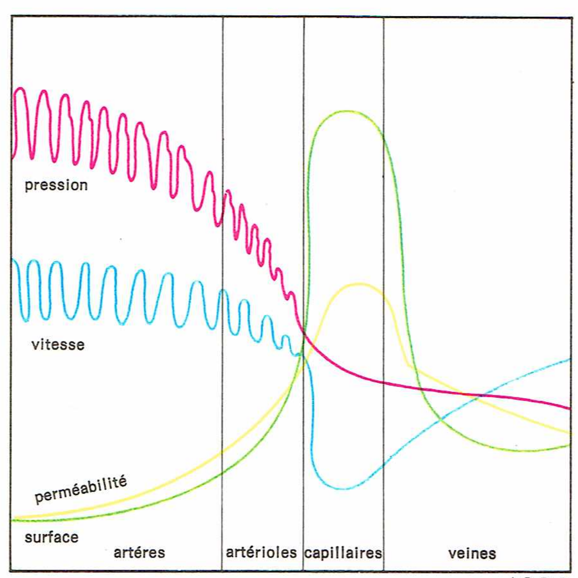

I.G.D.A.

▶ *Représentation graphique de la* **circulation vasculaire** *montrant l'évolution* **de la perméabilité.**

de 130 à 140 chez le fœtus et se fixe à 75-80 vers l'âge de 20 ans.

Chez l'homme au repos, le volume de l'ondée systolique est de 70 ml environ ; le débit par minute est donc de 5 à 6 litres, soit à peu près le volume sanguin total, 1/13 du poids du corps. Ce débit présente des variations physiologiques liées, entre autres, aux variations du milieu extérieur, à l'importance du travail musculaire. Pour satisfaire aux besoins métaboliques des tissus (O_2, glucose...), il peut atteindre 20 à 30 litres par minute. Un tel débit est obtenu par l'accélération cardiaque et l'accroissement du volume de l'ondée systolique. Cette dernière correspond à une évacuation plus complète des ventricules, liée à une contraction plus puissante. Le système nerveux contrôle l'énergie des contractions et le rythme du cœur, permettant ainsi d'adapter le débit cardiaque aux besoins de l'organisme.

Les artères et la pression artérielle

Grâce à leur élasticité, l'aorte et les gros troncs artériels se distendent sous l'afflux brutal de sang au moment de la systole ventriculaire (pouls). Leurs parois reviennent progressivement sur elles-mêmes, le reflux étant empêché par les valvules sigmoïdes au départ des troncs aortique et pulmonaire. Le flot sanguin intermittent se trouve transformé en un écoulement continu. La pression artérielle dépend du débit cardiaque et de la « résistance » opposée par les artérioles situées en aval. Cette pression oscille entre une valeur maximale (120 mm Hg) au moment de la systole et une valeur minimale (80 mm Hg) en fin de diastole. Cette pression décroît à travers les segments successifs de l'appareil circulatoire. Ce « gradient » assure la circulation.

Les artérioles et la répartition du sang aux organes

La paroi des artérioles est surtout musculaire. Leur calibre peut être modifié par le jeu de cette musculature placée sous le contrôle du système nerveux. Des fibres antagonistes se distribuent à leur tunique musculaire en fibres vaso-constrictrices sympathiques, vaso-dilatatrices sympathiques et parasympathiques. Ces fibres sont sous la dépendance des centres vaso-constricteur et vaso-dilatateur bulbaires.

Les artérioles freinent l'écoulement du sang et maintiennent en amont une pression artérielle élevée. La chute de pression à leur niveau va donc être importante (55 %). Les artérioles vont régler la distribution du sang en favorisant l'écoulement vers les organes en pleine activité.

Les veines et la mise en réserve du sang

Les veines, grâce à la structure de leurs parois (minces et relativement pauvres en dispositifs musculo-cutanés), peuvent servir de réservoir, à volume variable, en fonction du jeu des artérioles et de la mise en service de circuits capillaires plus ou moins nombreux. Le gradient de pression le long des veines est faible : de 10 à 15 mm Hg à l'extrémité veineuse des capillaires, voisine de 0 au débouché des veines dans le cœur. Le retour est facilité par les contractions musculaires, les valvules en nids de pigeon dans les segments travaillant contre la pesanteur (dans les membres inférieurs) ainsi que par le vide relatif au niveau du thorax lors de l'inspiration...

La régulation de la circulation sanguine

Elle est bien connue chez les Mammifères.

Les centres cardio-vasculaires bulbaires et leur mise en jeu

L'ajustement fonctionnel de l'appareil circulatoire est garanti par l'activité réflexe de deux centres coordinateurs bulbaires :

— un *centre cardio-régulateur* (décomposé en centres cardio-modérateur et cardio-accélérateur), d'où partent des fibres parasympathiques (nerf pneumogastrique X) cardio-modératrices et des fibres sympathiques cardio-accélératrices. Ces fibres sont distribuées dans la région du nœud sinusal (pace-maker) ;

— un *centre vaso-moteur* (décomposé en centres vaso-constricteur et vaso-dilatateur), d'où partent des fibres vers les vaisseaux, en particulier les artérioles, dont elles règlent le calibre en fonction des besoins de la circulation.

Ces centres sont informés par des afférences sensitives en provenance du cœur et des vaisseaux. Des barorécepteurs disposés dans la tunique moyenne de tous les gros vaisseaux de la région du cœur « informent » les centres sur le niveau de la pression sanguine : une augmentation de pression dans les veines caves se traduit par une augmentation du débit cardiaque ; une pression aortique élevée déclenche des réflexes cardio-modérateurs et vaso-dilatateurs.

Trois organes spécialisés, placés aux points de bifurcation des carotides et dans la concavité de la crosse aortique, informent les centres (par les nerfs de Hering et de Cyon) sur la pCO_2 du sang artériel : toute augmentation de la tension du CO_2 dans le sang provoque une cardio-accélération et une vaso-constriction, et toute diminution déclenche les phénomènes inverses.

L'importance physiologique de ces mécanismes est considérable. La constance du rythme cardiaque suppose un équilibre entre les actions antagonistes permanentes des systèmes para- et orthosympathiques. Chez un individu normal, le tonus parasympathique prédomine, exerçant une action modératrice permanente. La marge de variation concerne donc surtout les augmentations d'activité, les demandes se faisant toujours dans ce sens (émotion, travail musculaire...).

La régulation de la circulation capillaire

Le fonctionnement de la pompe cardiaque, la circulation du sang dans les artères et les artérioles, la circulation de retour par les veines sont seulement au service de la circulation capillaire puisque c'est elle qui assure les échanges nutritifs tissulaires et l'hématose au niveau des poumons. Ce dernier point ayant déjà été étudié, nous nous intéresserons plus particulièrement à la circulation capillaire au niveau des tissus.

Le nombre des capillaires en service varie énormément avec le degré d'activité tissulaire. Certains capillaires ont un trajet direct, alors que d'autres, en dérivation, forment des réseaux latéraux d'irrigation dans lesquels le sang peut être admis ou non suivant les besoins tissulaires. Des microsphincters disposés au départ de ces circuits « secondaires » en contrôlent l'accès. Ce contrôle se ferait par des mécanismes humoraux où l'adrénaline, certains métabolites (O_2) ou des substances plus spécifiques amèneraient l'ouverture des sphincters. L'irrigation de chaque territoire s'adapterait ainsi aux besoins tissulaires du moment.

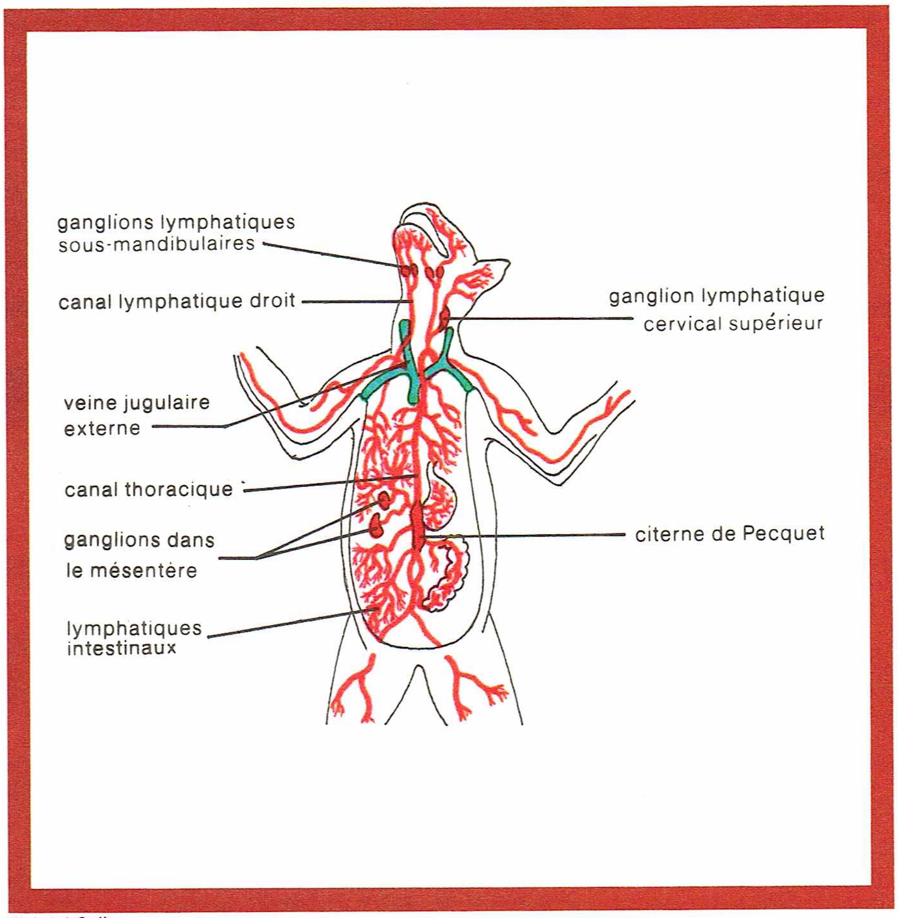

Richard Colin

▲ ***Représentation schématique du* système lymphatique *d'un Mammifère (d'après Kent Jr.).***

La pression, qui a encore diminué de 25 % au niveau des artérioles, est basse ; le volume total du compartiment capillaire peut être très grand et le courant sanguin devient lent. Les membranes, souvent fenestrées, des capillaires représentent alors une énorme surface d'échanges. La plupart des constituants du sang diffusent librement à travers la membrane des capillaires. Le flux net de liquide passant dans les espaces tissulaires est faible. Ce flux est régulé par la différence entre la pression hydrostatique dans les capillaires et la pression osmotique due aux protéines plasmatiques (pression oncotique). Les protéines, ne traversant pas la paroi des capillaires, créent une pression faible, du fait de la taille des molécules, mais appréciable. L'eau aurait donc tendance à diffuser de la lymphe vers le sang. La pression hydrostatique décroissante permet un flux sortant à l'extrémité artériolaire du capillaire et un flux entrant à l'extrémité veineuse. L'effet global correspond à un faible passage vers les tissus. Le liquide exsudé devient la lymphe. Celle-ci est réabsorbée par les capillaires lymphatiques en doigts de gant et, par les vaisseaux lymphatiques, regagne le système veineux et la circulation générale.

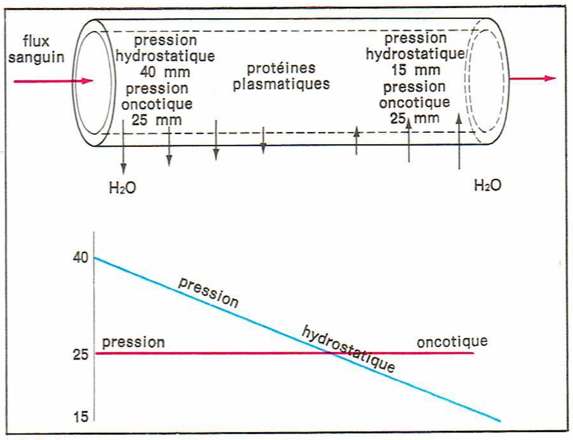

I.G.D.A.

◀ ***Représentation schématique du mécanisme de la* filtration capillaire.**

LE MILIEU INTÉRIEUR ET LA CIRCULATION CHEZ LES INVERTÉBRÉS

Si les échanges entre le milieu interne et leur milieu ambiant sont faciles chez les Protozoaires, il n'en est pas de même chez les Métazoaires. Le liquide interstitiel, ou *lymphe,* qui occupe l'espace extracellulaire, y est l'intermédiaire qui véhicule les composés organiques et minéraux d'une cellule à l'autre, d'un organe à l'autre, du milieu externe au milieu interne. Tant que l'animal est petit, la circulation de la lymphe entre les cellules est assurée par les mouvements de l'animal lui-même. Dès qu'il atteint une grande taille ou un degré d'organisation complexe, il se développe un appareil circulatoire formé de vaisseaux qui enferme plus ou moins le liquide intérieur. Ce système circulatoire peut être de deux types : lorsqu'il est ouvert, les liquides circulant et interstitiel ne font qu'un et constituent l'*hémolymphe ;* lorsqu'il est fermé, le liquide circulant, le *sang,* est différent du liquide extracellulaire, la *lymphe*. L'hémolymphe et le sang sont propulsés dans les vaisseaux par des organes contractiles (vaisseaux, cœur).

Le milieu intérieur

Il est constitué par un liquide salin qui occupe plus ou moins de place. Chez les Invertébrés à système circulatoire fermé, deux données permettent de caractériser son importance : le *volume sanguin* et le *volume extracellulaire* (respectivement 5,8 % et 28 % du poids frais de la pieuvre). Chez ceux qui présentent un système circulatoire ouvert, le volume sanguin (plus important) correspond au volume extracellulaire (chez les moules et les chitons, respectivement 51 % et 90 % du poids frais). Ce volume varie en fonction de l'état physiologique de l'animal : ainsi chez l'araignée de mer il représente 29 % après la mue et 8 % pendant l'intermue.

Composition en sels

Tous les ions présents dans la mer se retrouvent dans l'hémolymphe des Invertébrés. Chez les animaux marins, la composition saline du liquide intérieur est voisine de celle de l'eau de mer. Chez les animaux d'eau douce, la teneur en sel est de 5 à 10 fois plus faible ; elle est cependant de 10 à 100 fois plus élevée que celle du milieu ambiant. Chez les animaux terrestres (Insectes), les résultats sont très variables d'un animal à l'autre ; il y a, en général, beaucoup de potassium.

Composition en protéines

Le liquide intérieur des Invertébrés contient de nombreuses protéines. Certaines ont été caractérisées par leurs activités enzymatiques (anhydrase carbonique des Sipunculiens et de l'arénicole) ; d'autres, moins connues (les plus nombreuses), n'ont pu être caractérisées que par leur distance de migration en électrophorèse (leur nombre et leur vitesse de migration sont caractéristiques de l'espèce et de l'état physiologique de l'animal étudié) ; d'autres enfin, les plus connues, sont des métallo-protéines qui se combinent réversiblement avec l'oxygène (pigments respiratoires). Elles sont de quatre types.

▼ ***Structure comparée des porphyrines des hémoglobines (A) et des chlorocruorines (B).***

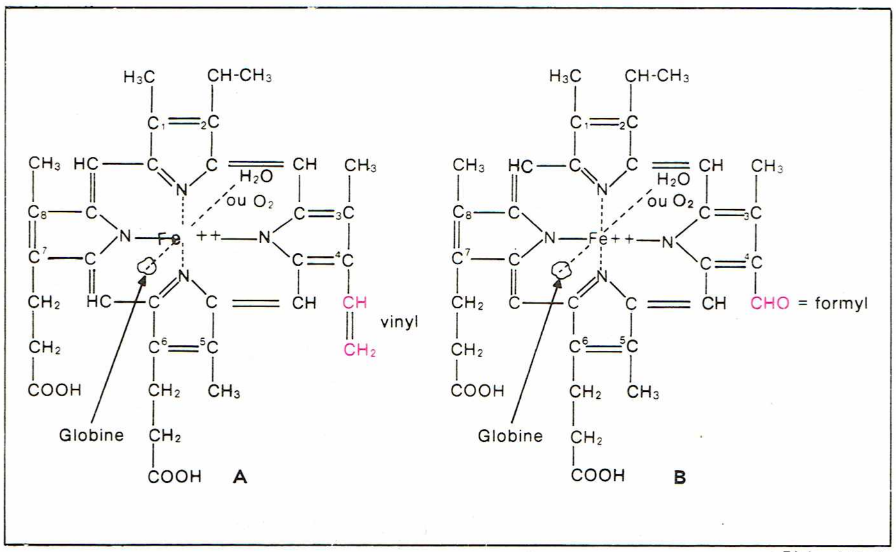

Richard Colin

— *Les hémoglobines*. Elles sont constituées d'une protéine, la *globine* (de poids moléculaire variant de 23 600 à 3 000 000 en fonction de l'animal), attachée à un atome de fer qui est lui-même lié à une porphyrine. Les hémoglobines se rencontrent chez certains Nématodes, tous les Némertes, certains Annélides, certains Crustacés (Branchiopodes, Ostracodes, Copépodes) et chez certains Insectes (chironomes). Elles peuvent être en solution, ou associées à des cellules. Elles peuvent être l'unique pigment respiratoire de l'animal ou être en compagnie d'un autre pigment, tel que la chlorocruorine (chez les Serpuliens). Les Invertébrés semblent aptes à synthétiser la porphyrine ; chez l'arénicole, cette synthèse se ferait dans des cellules voisines du vaisseau dorsal antérieur. Toute déficience du milieu externe en oxygène entraîne pour l'animal qui y vit une augmentation de la synthèse d'hémoglobine ; ainsi, les daphnies deviennent rouges en milieu pauvre en oxygène.

— *Les chlorocruorines*. Elles ne diffèrent des hémoglobines que par la porphyrine qui porte un formyl à la place d'un vinyl. On les trouve dans quatre familles d'Annélides : les Serpulidés, les Sabellidés, les Chlorhémidés et les Ampharétidés.

— *Les hémérythrines*. Elles sont constituées par une protéine liée à un métal : le fer. Associées à des cellules ou à des corpuscules, elles ont été trouvées chez les Sipunculiens, chez la lingule (Brachiopode) et chez *Magelona* (Annélides).

— *Les hémocyanines*. Elles sont constituées par une protéine liée à du cuivre. Les protéines ont un poids moléculaire allant de 50 000 à 74 000 ; toutefois, comme elles ont tendance à s'agglomérer entre elles, le poids moléculaire du pigment est beaucoup plus grand (397 000 pour l'hémocyanine de la crevette *Pandalus borealis ;* 6 680 000 pour celle de l'escargot). Quand le pigment est oxygéné, une partie du cuivre est à l'état cuivrique, ce qui lui donne une couleur bleue. Ce pigment caractérise les Mollusques Gastéropodes et Céphalopodes ; il existe aussi, dans l'hémolymphe des limules, des Arachnides et des Malacostracés.

Composition en acides aminés libres

Le taux d'acides aminés libres est toujours très élevé chez les Invertébrés : 64 mg/100 ml chez le homard, 80 mg/100 ml chez l'écrevisse, 350 à 450 mg/100 ml chez *Nephtys* (Polychètes) et de 290 à 2 430 mg/ 100 ml chez les Insectes. Les acides aminés les plus courants sont : la *glycine,* l'*acide glutamique,* l'*alanine*. Leur teneur varie d'une espèce à l'autre et en fonction de l'état physiologique.

Composition en hydrates de carbone

Le liquide extracellulaire des Invertébrés contient différents sucres, dont le taux est directement lié à l'état de jeûne des animaux. Chez les Insectes, on observe un taux assez élevé de *tréhalose,* taux variable en fonction de l'état physiologique : chez *Hyalophora cecropia* par exemple, la larve en contient 2 000 mg/100 ml d'hémolymphe, la chrysalide 600 mg/ml, et la chrysalide en diapause de 150 à 300 mg/100 ml.

Composition en pigments

Plusieurs pigments ont été couramment trouvés dans l'hémolymphe des Invertébrés ; ce sont : le *β-carotène* chez le doryphore, la *biliverdine* chez les Orthoptères et certains Lépidoptères, les *aphines* chez les pucerons.

Les éléments figurés

Le liquide extracellulaire des Invertébrés contient un grand nombre de cellules en suspension. Leur nombre varie en fonction de plusieurs facteurs : l'espèce, l'âge de l'animal (chez *Galleria melonella,* le nombre varie de 4 000 à 1 500/mm^3), l'état physiologique (*Cancer pagurus :* 30 000/mm^3 avant la mue, 6 000 après la mue). Ces cellules peuvent être classées en deux groupes : les *cellules hyalines,* ou *agranulocytes,* ont un noyau volumineux dans un cytoplasme incolore ; les *granulocytes* ont un petit noyau dans un cytoplasme bourré d'inclusions.

Alors que les premières n'ont été trouvées que chez quelques animaux (Éponges, Cnidaires, Trématodes, Nématodes, Lamellibranches, Crustacés, Insectes) et ont un rôle peu connu (dans la phagocytose et le colmatage des blessures), les secondes ont été trouvées chez tous les Invertébrés et semblent, outre le rôle qu'elles jouent

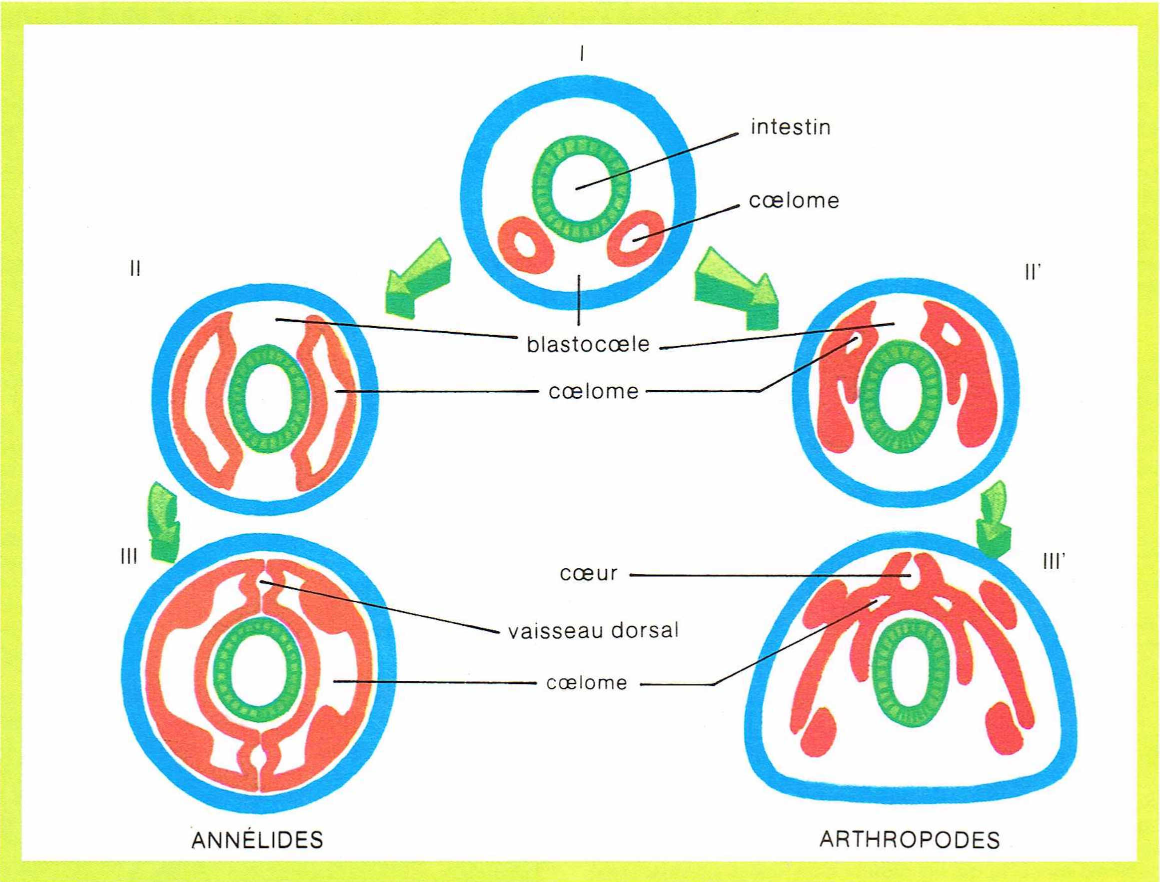

Richard Colin

◀ *Évolution de la* **cavité générale primaire** *(reste du blastocœle) et des* **cœlomes** *chez les* **Annélides** *et les* **Arthropodes** : *I, conditions primitives; II et III, chez les Annélides, la cavité générale primaire est réduite peu à peu au système circulatoire et les cœlomes forment une cavité générale secondaire qui est plus ou moins cloisonnée; II' et III', chez les Arthropodes, les cœlomes restent très petits et la cavité générale correspond au blastocœle.*

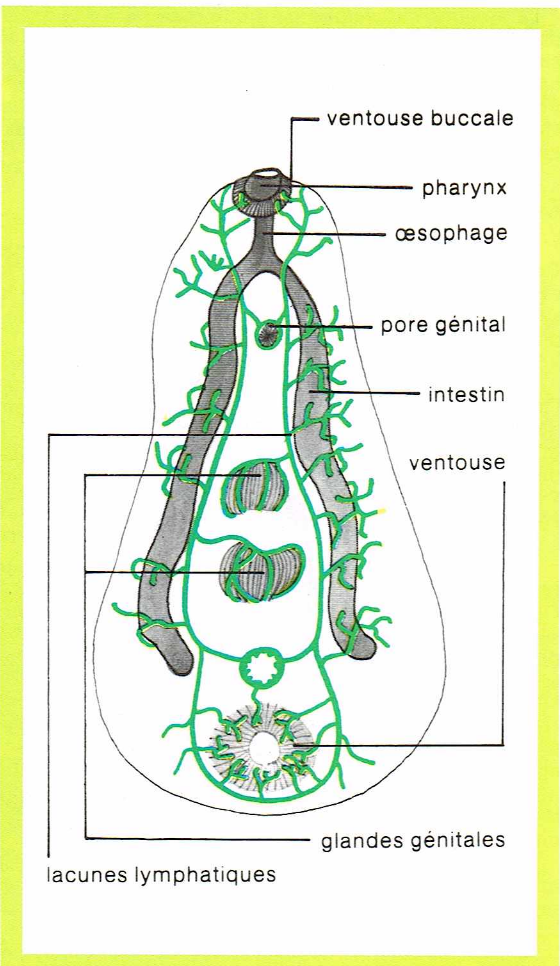

Richard Colin

dans la phagocytose de certains composés, avoir une importance prépondérante dans la synthèse des produits suivants : l'hémérythrine (chez les Sipunculiens), l'hémoglobine (chez les Annélides), les échinochromes (chez les oursins), les protéines (chez les Insectes); elles peuvent jouer un rôle important dans la synthèse de la cuticule (chez les Araignées et les Crustacés); elles interviennent aussi dans le colmatage des blessures.

Les systèmes circulatoires

Invertébrés acœlomates

Chez certains Trématodes, l'espace intercellulaire s'organise en lacunes qui s'anastomosent pour former des canaux longitudinaux latéraux; ceux-ci envoient des tubules aveugles vers les *cæcums* gastriques, l'appareil reproducteur et les ventouses. La circulation de la lymphe se fait grâce aux mouvements propres de l'animal.

◀▼ *Ci-contre, représentation schématique du* **système lymphatique** *chez un Trématode* **(Cotylophoron)** *; ci-dessous, la* **circulation** *chez les Annélides.*

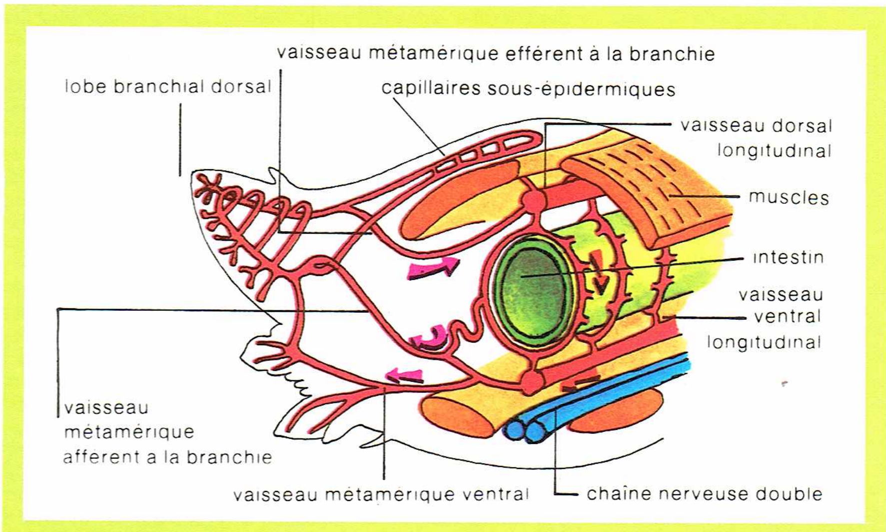

Richard Colin

▶ **Système circulatoire *d'un Mollusque Lamellibranche (les flèches indiquent la direction du flux).***

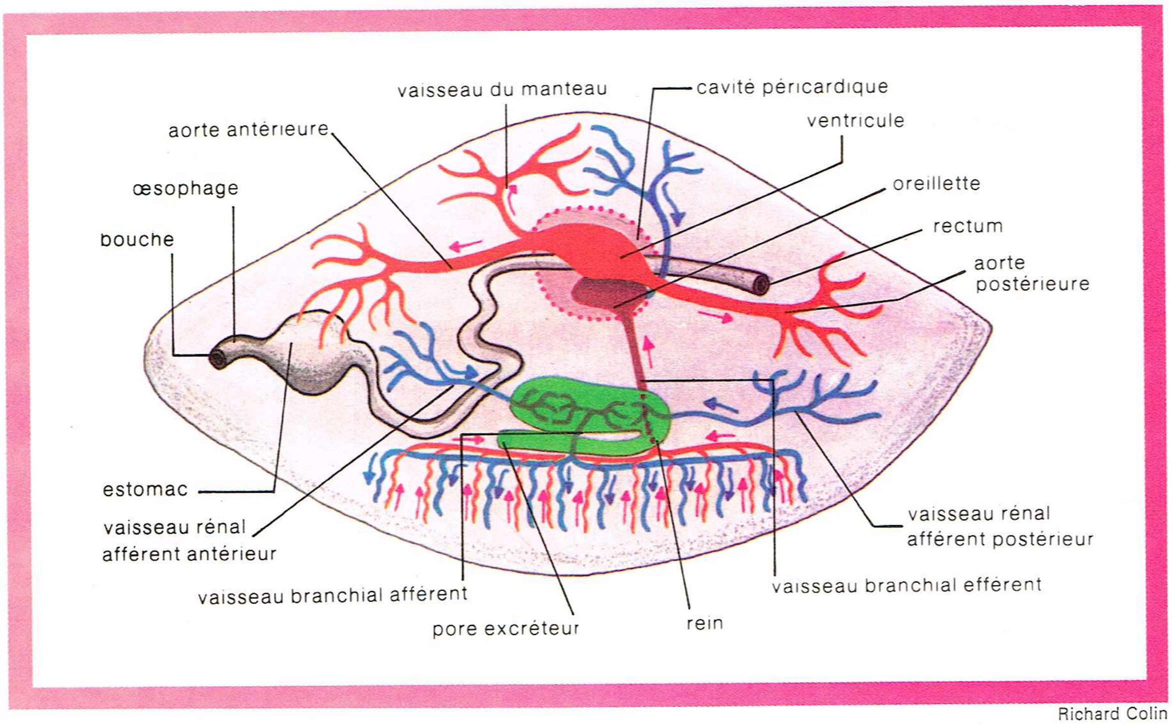

Richard Colin

Invertébrés cœlomates

Il existe chez ces animaux deux types de cavités, d'importances variables : une *cavité générale primaire,* qui est un reste de blastocœle, et un *cœlome*. Chez les Annélides, le cœlome prédomine et finit par envahir toute la cavité générale primaire, qui est réduite à un réseau de vaisseaux principaux joints entre eux par des capillaires (système circulatoire fermé). Chez les Arthropodes, la cavité générale primaire prédomine et correspond à tout l'espace périviscéral; celui-ci se transforme en sinus sanguin. Chez ces animaux, le cœlome est réduit aux gonades et aux néphridies.

Les cœlomes

Ils sont importants chez les Annélides, qui ont un système circulatoire fermé, et chez les Échinodermes, où il n'y a pas de vaisseaux. Les cavités cœlomiques forment des « squelettes hydrostatiques ». Toute contraction des parois du corps d'un ver le rend rigide, ce qui lui permet de creuser le sol, de dévaginer sa trompe. L'activité de ces animaux se traduit par une augmentation de leur pression interne; elle passe de 12 cm à 27 cm d'H_2O chez l'arénicole et de 2,8 à 108 cm chez *Golfingia* (Sipunculiens) quand ces animaux creusent leurs galeries.

Les systèmes vasculaires

— *Systèmes circulatoires fermés.*

Ce type de système se trouve chez les Némertes et les Annélides. En général, les vaisseaux longitudinaux bordent le tube digestif, ventralement et dorsalement chez les Annélides, dorsalement et latéralement chez les Némertes; il en part des vaisseaux transversaux (qui ont une disposition métamérique chez les Annélides). Tous ces vaisseaux se capillarisent quand ils atteignent les tissus.

Chez les Némertes, la circulation est sous la dépendance des contractions péristaltiques des gros vaisseaux; elle ne se fait dans aucun sens précis. Chez les Annélides, les contractions péristaltiques du vaisseau dorsal poussent le sang de l'arrière vers l'avant; il revient de l'avant par le vaisseau ventral, non contractile; les vaisseaux transversaux peuvent être contractiles.

— *Systèmes circulatoires ouverts.*

● *Cœurs formés de plusieurs chambres.* Il en existe chez les Mollusques. Le cœur, placé à l'intérieur d'une cavité cœlomique, la *cavité péricardique,* est formé d'un ventricule aux parois épaisses et d'une ou plusieurs oreillettes aux parois fines qui réceptionnent l'hémolymphe. Celle-ci quitte le ventricule par un ou deux vaisseaux, qui se dirigent vers les sinus entourant les organes. Elle passe ensuite de ces sinus aux canaux afférents qui aboutissent aux branchies. Une fois oxygénée, elle ressort des branchies par un vaisseau efférent qui la ramène à l'oreillette.

● *Cœurs tubulaires.* Ils caractérisent les systèmes circulatoires de tous les Arthropodes. Le cœur, allongé, est placé dans une cavité dorsale, qui ne correspond pas à un cœlome mais à une partie de la cavité hémocœlienne. Il pompe le liquide de cette cavité grâce aux perforations, les *ostioles,* pratiquées dans ses parois. L'hémolymphe est ensuite chassée vers l'avant et l'arrière par les contractions péristaltiques du cœur.

Le système circulatoire peut être réduit à un vaisseau dorsal différencié en cœur (chez les Insectes) ou, au contraire, être bien développé avec des vaisseaux longitudinaux dorsaux et ventraux ainsi que des vaisseaux transversaux, en disposition plus ou moins métamérique, allant aux appendices et aux organes (chez les Crustacés).

La régulation de la circulation

La circulation est régulée par l'activité du cœur. Celle-ci se traduit par l'existence d'une pression dans le système vasculaire. Elle est beaucoup plus forte quand le système est fermé (dans l'artère céphalique des Céphalopodes, $p = 48$ à 60 mm Hg) que lorsqu'il est ouvert ($p = 12$ à 17 cm d'H_2O chez la langouste au moment de la systole).

La fréquence des battements du cœur augmente quand l'animal est actif : chez le sphinx, les battements passent de 40 à 140/mn, chez la pieuvre, ils passent de 40 à 80/mn. Cette fréquence est plus grande chez les animaux de petite taille; elle atteint 250 à 450/mn chez la daphnie, 180 à 200/mn chez *Asellus* (Isopode), 30 à 60/mn chez l'écrevisse. Elle augmente avec la température.

Il existe deux types de cœurs chez les Invertébrés.

— Les uns présentent des battements dus à l'activité propre des fibres musculaires *(cœurs myogéniques)*. On les rencontre chez les Mollusques. Leurs battements sont inhibés par l'acétylcholine. Leur électrocardiogramme présente des ondes longues (1/10 s), qui peuvent se décomposer en une onde rapide (début de la contraction) et une onde lente (durée de la contraction).

— Les autres présentent des battements commandés par un ganglion ou des filaments nerveux. On les rencontre, entre autres, chez les Crustacés. L'extirpation du ganglion nerveux arrête les contractions; l'acétylcholine accélère les battements. Leur électrocardiogramme présente des ondes rapides (1/10 ms) et des ondes plus lentes.

La régulation des battements s'effectue par des nerfs qui les inhibent ou les accélèrent. Il semble que les organes péricardiques jouent un rôle important chez les Arthropodes : des extraits de ces organes font augmenter l'amplitude des battements, mais accroissent ou diminuent leurs fréquences.

LA RESPIRATION CHEZ LES INVERTÉBRÉS

La quantité d'oxygène qui pénètre dans un organisme ne dépend pas seulement de l'activité de celui-ci, mais aussi de la concentration en oxygène du milieu ambiant, de sa vitesse de diffusion à travers les parois de l'animal et de son affinité avec les pigments respiratoires qui le transportent d'un tissu à l'autre.

Les échanges gazeux

Échanges tégumentaires directs

De tels échanges existent chez les animaux aquatiques et terrestres. Les échanges se font par diffusion ; il faut que le tégument soit humide et qu'il n'y ait pas plus de 1 mm de distance entre le milieu externe et le liquide extracellulaire qui contient les pigments respiratoires.

Ces échanges existent chez la plupart des animaux aquatiques et sont obligatoires (par défaut d'appareil respiratoire) chez les Éponges, les Plathelminthes, les Némathelminthes et les Mollusques Nudibranches.

Échanges par les branchies

Ces échanges ont lieu chez les animaux aquatiques. Les branchies ont des structures très diverses : simples évaginations du tégument chez les étoiles de mer, filaments plus ou moins pectinés, languettes parapodiales et panaches branchiaux chez les Annélides, cténidies chez les Mollusques, branchies plus ou moins globuleuses chez les Crustacés.

L'eau ambiante est constamment renouvelée grâce aux mouvements de convection créés par des cils ou des appendices ; dans certains cas (Crustacés), il existe une véritable circulation d'eau.

Échanges par les poumons

Ces poumons sont aquatiques chez les holothuries ; ils correspondent à deux organes arborescents qui sont en communication avec l'extérieur par le rectum. Ils sont aériens chez les Pulmonés, les Crustacés Anomoures, où ils correspondent à des cavités branchiales modifiées, et chez les Scorpions et les Araignées, où ils correspondent à des évaginations tégumentaires feuilletées situées au fond de poches formées par des invaginations des parois de l'animal.

Échanges par les trachées

On trouve des trachées chez les Onychophores, les Opilions, les Acariens, les Diplopodes et, surtout, chez les Insectes. Elles permettent d'amener l'air directement aux cellules sans qu'il y ait intervention de l'hémolymphe.

Le transport des gaz

Transport de l'oxygène

La quantité d'oxygène transportée est liée directement à celle susceptible d'être fixée par les pigments respiratoires : hémoglobines, chlorocruorines, hémérythrines et hémocyanines.

Le taux d'oxygène absorbé par l'hémolymphe d'un animal dépend de la quantité de pigment présent et de la capacité plus ou moins grande que celui-ci a de fixer ce gaz ; cette capacité varie en fonction du pigment et de la pression partielle d'oxygène. Il est ainsi possible de caractériser le pigment respiratoire d'un animal par la courbe d'équilibre, qui donne la quantité d'oxygène fixée en fonction de sa pression partielle.

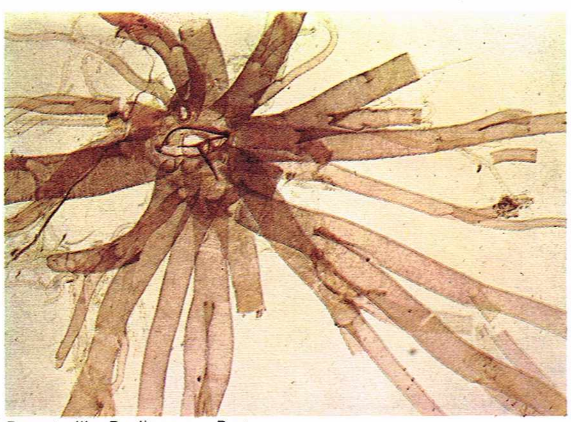

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Toute augmentation des sels (calcium entre autres) et du gaz carbonique dans l'hémolymphe, toute acidification de celle-ci et toute augmentation de température décalent vers la droite la courbe précédemment définie ; cela indique que ces facteurs font diminuer l'affinité du pigment vis-à-vis de l'oxygène. Alors que les pigments des Vertébrés y sont très sensibles, ceux des Invertébrés présentent un large spectre de réactivité. Ainsi, le pH n'a aucun effet sur les taux de dissociation de l'oxyhémérythrine des Sipunculiens ou sur ceux de l'oxyhémoglobine de l'arénicole. Tous ces pigments sont plus ou moins sensibles à l'oxyde de carbone.

Transport du gaz carbonique

Le CO_2 en circulation dépend du pouvoir « tampon » du sang, de la pression partielle en CO_2 des tissus, et du milieu externe. Une partie du CO_2 est transportée sous forme de bicarbonate, une autre partie étant combinée aux groupes aminés des protéines. Alors que l'anhydrase carbonique joue un rôle important dans le transport du CO_2 chez les Vertébrés, son activité est discutable chez les Invertébrés.

Capacité d'absorption en oxygène de différents liquides intérieurs chez les Invertébrés

Pigment	Couleur	Site	Animaux	Oxygène absorbé en Vol/cent
Hémoglobine	Rouge	Corpuscules	Mammifères Oiseaux Reptiles Amphibiens Poissons	15-30 20-25 7-12 3-10 4-20
		Liquides intérieurs	Annélides Mollusques	1-10 1- 6
Hémocyanine	Bleu	Liquides intérieurs	Mollusques : – Gastéropodes – Céphalopodes Crustacés	 1- 3 3- 5 1- 4
Chlorocruocrine	Vert	Liquides intérieurs	Annélides	9
Hémérythrine	Rouge	Corpuscules	Annélides	2

▲ ***Tableau récapitulatif du transport de l'oxygène chez les animaux.***

La régulation de la consommation d'oxygène

La consommation d'oxygène varie d'un animal à l'autre, mais aussi chez un même individu en fonction des facteurs suivants : l'*état d'activité* (un papillon au repos consomme de 0,4 à 0,7 ml d'O_2/g/h, alors qu'en activité il consomme de 40 à 100 ml/g/h), la *taille* (les grands individus consomment globalement plus d'oxygène, mais relativement moins si l'on rapporte la consommation au poids), l'*état de développement* (les animaux âgés ont en général une consommation moins forte), l'*activité hormonale* (l'excision de la glande du sinus augmente la consommation d'oxygène chez les Crustacés).

Des facteurs externes peuvent intervenir : la *température,* la *salinité* (la moule consomme plus d'oxygène quand elle est en milieu saumâtre), la *photopériode* (le crabe *Pachygrapsus* consomme 55 % de plus d'O_2 quand il passe de 16 h d'éclairement à 8 h).

Certains Invertébrés (vers de terre, huîtres, moules, écrevisses, chironomes...) sont capables de diminuer leur consommation quand ils sont dans un milieu appauvri en O_2. En général, toute diminution de la teneur en O_2 du milieu ambiant se traduit par une augmentation de l'irrigation ou de la ventilation des zones d'échange (poumons, branchies, trachées). Une augmentation de la concentration en CO_2 a le même effet.

◀ ***Trachée s'ouvrant par un stigmate chez une larve de* Bombyx mori *(ver à soie).***

L'EXCRÉTION ET LA RÉGULATION OSMOTIQUE DES INVERTÉBRÉS

▶ *Page ci-contre à gauche, représentation schématique des* **tubes de Malpighi** *chez les Insectes : le sodium, Na^+, et l'eau sont réabsorbés; le potassium, K^+, est excrété; les flèches indiquent les mouvements de l'eau.*

L'excrétion

Organes excréteurs

Chez les Invertébrés aquatiques, une partie de l'élimination des déchets ainsi que le transfert des sels et de l'eau entre les milieux interne et externe peuvent s'effectuer directement à travers les parois. Cependant, la plus grande partie de ces transferts, presque la totalité chez les Invertébrés terrestres, se fait par des organes excréteurs. On distingue :

— des *vacuoles pulsatiles* chez les Protozoaires et les Éponges;

— des *protonéphridies* (cellules à flamme vibratile, ou néphridies à solénocytes) chez les Plathelminthes, les Rotifères, les Kamptozoaires et certaines Annélides;

— des *métanéphridies* chez les Sipunculiens, les Échiurides, les Brachiopodes et les Annélides;

— des *reins* (cavités cœlomiques réduites) chez les Mollusques et les Crustacés;

— des *tubes de Malpighi* chez la plupart des Insectes, les Myriapodes et les Arachnides;

— des *« rénettes »* et des canaux excréteurs chez les Nématodes.

Il existe en plus, surtout chez les Invertébrés terrestres, des cellules qui fixent les déchets (l'acide urique principalement), servant ainsi de rein d'accumulation.

Les Invertébrés à métanéphridies et ceux qui ont des reins forment leur urine de façon similaire : les produits pénètrent dans la lumière de la glande excrétrice par filtration (sous l'action de la pression hydrostatique interne de l'animal) ou par excrétion ; alors que les déchets plus ou moins en solution dans l'eau sont entraînés vers l'extérieur, une partie de l'eau et les composés intéressants (sels, sucres...) sont réabsorbés.

Chez les Insectes, la formation de l'urine est un peu différente : la filtration n'est pas sous la dépendance de la pression hydrostatique interne, et la réabsorption des composés intéressants a lieu dans l'intestin postérieur.

Produits d'excrétion

Il existe trois principaux produits d'excrétion azotée :

— l'*ammoniac* (NH_3), qui semble provenir de la désamination de la glutamine;

— l'*urée*, qui provient de la transformation de l'arginine en ornithine, sous l'action d'une enzyme, l'arginase;

— l'*acide urique*, qui a deux origines : il peut provenir des bases puriques (adénine et guanine) par l'intermédiaire de la xanthine, ou provenir d'éléments très divers : CO_2, formates, glycine pour les carbones, glycine, aspartate, glutamine pour les azotes.

Ces trois composés ne sont pas également représentés dans les produits d'excrétion des différents Invertébrés. Le remplacement de NH_3 par l'urée puis par l'acide urique indique une vie de plus en plus terrestre.

— *Animaux excrétant de l'ammoniac*. Les Invertébrés sont nettement plus tolérants que les Vertébrés vis-à-vis de NH_3 : on en observe de 0,4 à 2,4 mg/100 ml d'hémolymphe chez l'araignée de mer (pour 0,001 mg/100 ml de sang chez les Mammifères). De ce fait, NH_3 peut être la principale forme d'excrétion azotée chez les Invertébrés aquatiques (il est très soluble dans l'eau et diffuse rapidement à travers les tissus) : 90 % de l'azote est excrété sous cette forme chez les larves aquatiques de l'Insecte *Sialis*, 87 % chez le Crustacé Amphipode *Gammarus* et 53 % chez les Cnidaires.

— *Animaux excrétant de l'urée*. Alors que l'urée est le principal produit d'excrétion azoté des Vertébrés, elle n'est produite que très secondairement chez les Invertébrés; elle représente 12 % de l'azote excrété chez les étoiles de mer et 11 % chez l'écrevisse.

— *Animaux excrétant de l'acide urique*. L'acide urique est le principal déchet azoté des Invertébrés terrestres (notamment des Insectes) : il représente 90 % de l'azote excrété chez *Rhodnius* (Insecte Hémiptère) et 47 % chez les moustiques. Il est aussi stocké dans les reins d'accumulation.

— *Animaux excrétant d'autres produits*. A côté de ces principaux produits, certains Invertébrés excrètent d'autres composés azotés : la *guanine* chez les Arachnides; les *acides aminés* chez les Nématodes marins ($\simeq$ 35 % de N excrété), chez les Échinodermes (10 % de N excrété) et chez certains Crustacés (10 % chez les gammares).

Il est possible d'observer d'assez grandes variations des taux d'excrétion de ces produits en fonction de l'état physiologique de l'animal, de son état de jeûne, de son âge, de son régime alimentaire et selon qu'il est terrestre ou aquatique.

La régulation de l'équilibre osmotique et ionique

L'hémolymphe ou le sang des Invertébrés sont des solutions salines; leur composition ionique varie largement d'une espèce à l'autre et très peu au sein de la même espèce. Les variations observées portent sur la nature des ions présents et sur leur concentration (qui

▼ *A gauche, représentation schématique* **de la métanéphridie** *d'un ver de terre. A droite, différents types d'organes excréteurs chez les Nématodes.*

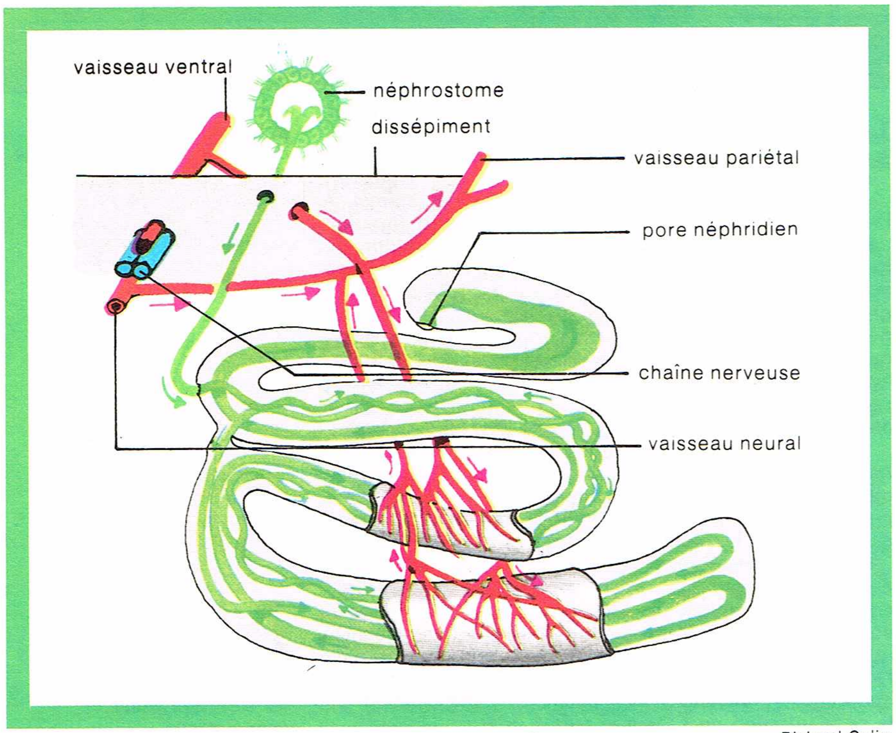

Richard Colin

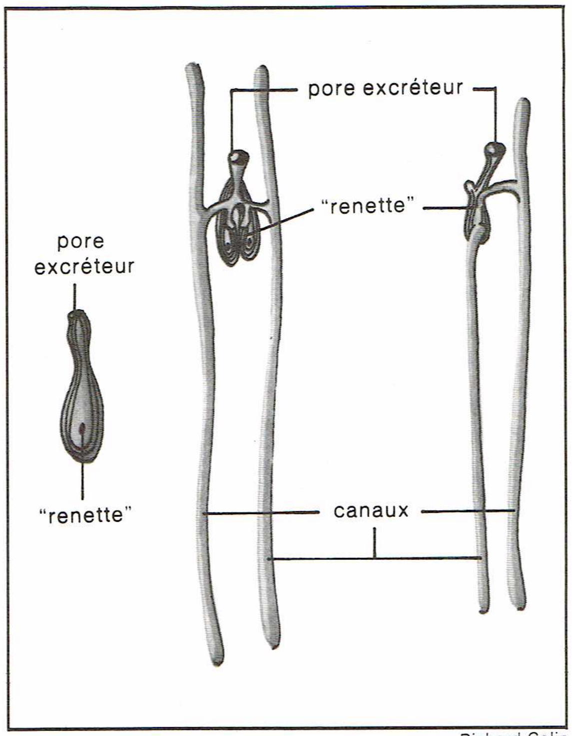

Richard Colin

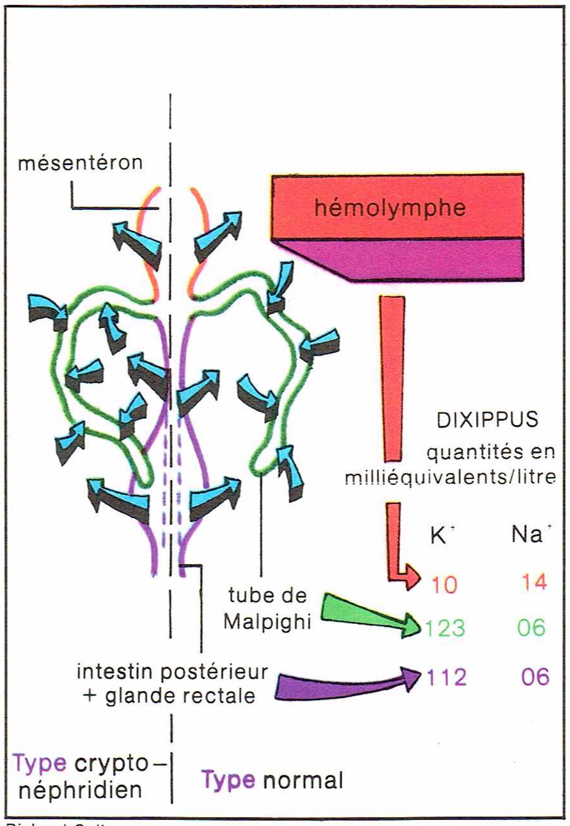

Richard Colin

se traduit par une certaine pression osmotique). Plusieurs cas sont envisageables, selon le milieu.

Milieu ambiant iso-osmotique

La pression osmotique du milieu interne est égale à la pression osmotique du milieu externe. Beaucoup d'Invertébrés marins sont dans ce cas. Il n'y a pas de mouvements préférentiels pour l'eau. Par contre, la nature des ions présents dans l'hémolymphe n'est pas la même que celle de l'eau de mer : le liquide intérieur est en général plus riche en Na^+, K^+, Ca^{++} et plus pauvre en Mg^{++} et SO_4^{--}, mais la concentration en Cl^- est égale dans les deux compartiments. Au cours de l'excrétion, on assiste à une résorption des ions Na^+, K^+, Ca^{++} de l'urine et à une sécrétion active de Mg^{++} et de SO_4^{--} ; Cl^- est simplement filtré.

Milieu ambiant hypo-osmotique

Tous les animaux d'eau douce et de nombreux animaux marins *euryhalins* qui peuvent s'adapter à des eaux saumâtres vivent dans un milieu hypo-osmotique.

Les nombreux Invertébrés marins que l'on trouve en bordure des côtes et dans les estuaires peuvent vivre dans des milieux à salinité variable. Certains, dits *osmoconformes,* ne régulent pas l'entrée de l'eau, et leur corps se gonfle quand ils sont mis dans de l'eau moins salée : c'est le cas de *Noctiluca, Sipunculus, Aplysia* et *Mytilus.* D'autres, dits *osmorégulateurs,* luttent contre les apports possibles d'eau en sécrétant activement des sels ; tel est le cas de *Nereis* et *Procerodes.*

Les Invertébrés d'eau douce ont en général un tégument moins perméable aux sels ; ils excrètent des urines hypotoniques (les sels entraînés avec les urines sont réabsorbés par les organes excréteurs avant l'émission de ces dernières à l'extérieur) et possèdent des cellules spéciales qui récupèrent les ions du milieu ambiant : ainsi, le crabe *Eriocheir* récupère par ses branchies le sodium du milieu ambiant.

Milieu ambiant hyper-osmotique

Dans ce cas, l'animal a tendance à perdre de l'eau. *Artemia salina,* petit Crustacé Branchiopode qui vit aussi bien dans les marais salants que dans l'eau de mer, lutte contre la sursalure en avalant constamment de l'eau (chargée de NaCl) et en excrétant activement les ions Na^+ par les lobes foliacés des dix premiers appendices.

Milieu terrestre

Ici, les Invertébrés luttent contre l'évaporation de l'eau en rendant leurs téguments imperméables (par exemple, chez les Insectes, grâce à la couche de cire de la cuticule). Sels et eaux sont avalés avec la nourriture ; de plus, certains animaux vivant dans des milieux très secs sont capables d'absorber une partie de l'humidité atmosphérique (*Tenebrio* quand l'air a une humidité relative supérieure à 50 %, *Armadillidium* [Isopode terrestre] quand ce taux est supérieur à 98 %). Sels et eaux sont en partie réabsorbés avant que les urines soient émises à l'extérieur.

Contrôle hormonal de la diurèse

La diurèse des Insectes est activée par des neurohormones produites soit par les ganglions cérébroïdes (chez *Dysdercus, Shistocerca, Locusta*), soit par les ganglions mésothoraciques *(Rhodnius).* Chez les Crustacés, le contrôle est effectué par une seule hormone, provenant de la glande du sinus *(Carcinus maenas),* ou par deux hormones antagonistes (chez *Geocarcinus*) ; l'une, produite par l'organe Y, serait antidiurétique ; l'autre, produite par la glande du sinus ou la chaîne nerveuse thoracique, serait diurétique.

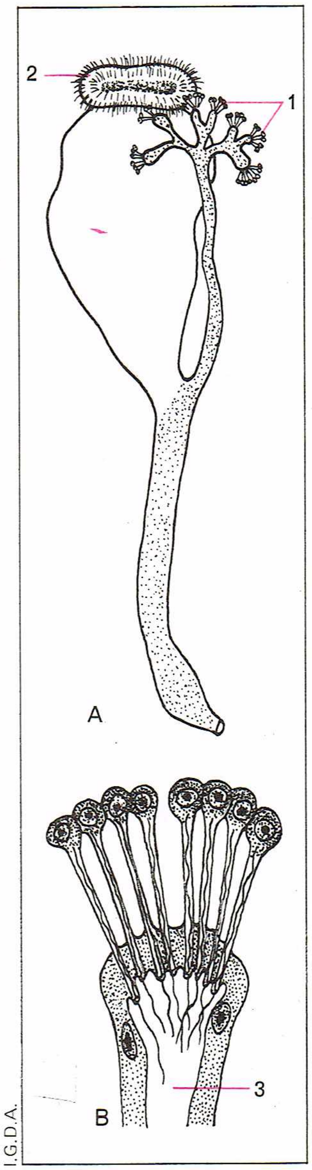

I.G.D.A.

▲ ***Protonéphridie (A) à « solénocytes » (1) d'un Annélide Phyllodocien (2, pavillon cilié s'ouvrant dans le cœlome) ; chaque solénocyte (B) est une cellule flagellée dont l'extrémité est évidée en canal ; les canaux de tous les solénocytes se jettent dans un canal néphridien commun (3).***

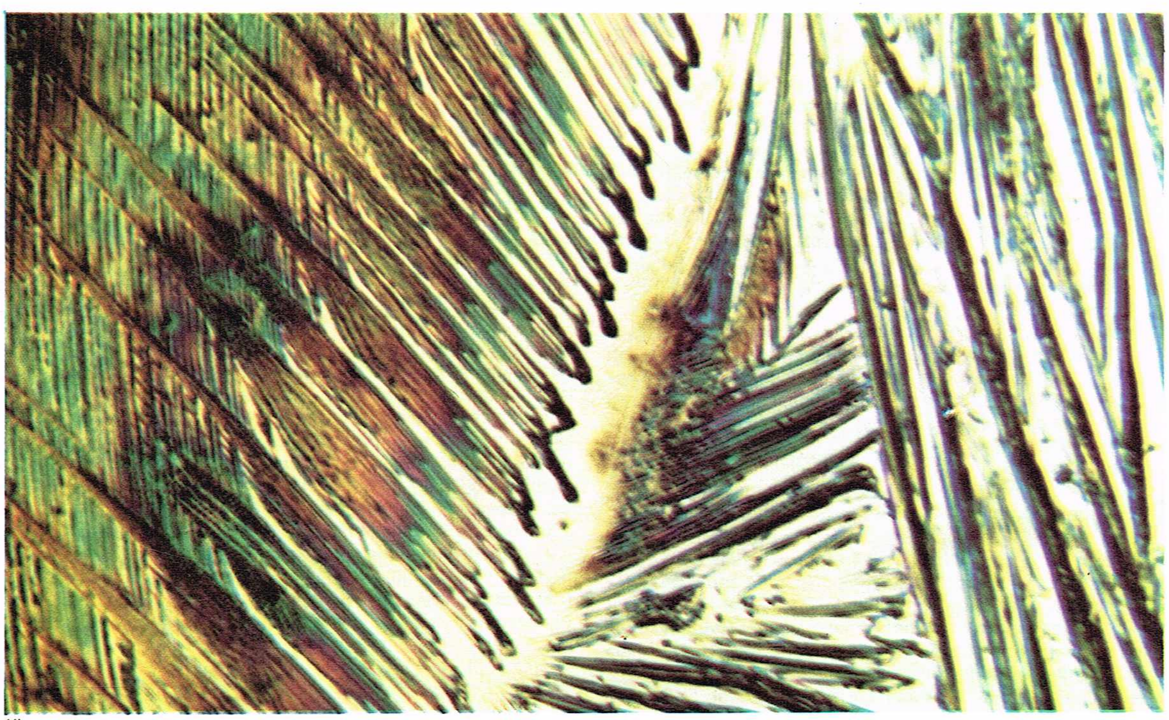

Kitrosser

◀ ***L'urée, principal produit d'excrétion azoté des Vertébrés, n'est produite que très secondairement chez les Invertébrés ; ici, cristaux d'urée vus en lumière polarisée.***

L'APPAREIL URINAIRE ET L'EXCRÉTION CHEZ LES VERTÉBRÉS

▶ *Page ci-contre, en haut, le* **pronéphros** *est constitué de néphrons ouverts à glomérule intracœlomique ; à gauche,* **pronéphros** *d'***Ammocète** *; deux de ces glomérules et quelques sections de tubules urinaires au sein d'un tissu lacunaire ; à droite,* **pronéphros** *de* **jeune têtard** *d'Amphibien Anoure : sur le bord interne du rein, un néphrostome cilié ouvert sur la cavité cœlomique et prolongé par le canal néphrostomial cilié.*

Chez les Vertébrés, l'appareil urinaire et l'appareil génital présentent très généralement des rapports étroits du fait de leur développement à partir d'ébauches mésodermiques voisines et de l'utilisation de voies d'évacuation communes chez le mâle. Cependant, du point de vue embryologique et du point de vue fonctionnel, nous avons séparé les deux systèmes.

L'appareil urinaire joue un rôle fondamental dans le maintien de l'homéostasie en excrétant une partie de l'eau et des sels introduits dans l'organisme. Si, chez les Mammifères, ce rôle est presque exclusivement joué par les reins, chez les Vertébrés aquatiques notamment, d'autres structures (branchies, tégument) doivent y participer.

L'appareil urinaire est constitué par deux reins, sécrétant un liquide aqueux, l'*urine,* que deux canaux excréteurs, les *uretères,* déversent dans le cloaque.

La néphrogenèse et le développement de l'appareil urinaire

Le rein, agglomérat de tubules urinaires, ou *néphrons,* mêlés de tissu conjonctif, se développe sur toute la longueur du tronc à partir d'une ébauche mésoblastique, métamérisée, la pièce intermédiaire, interposée entre les somites et les lames latérales.

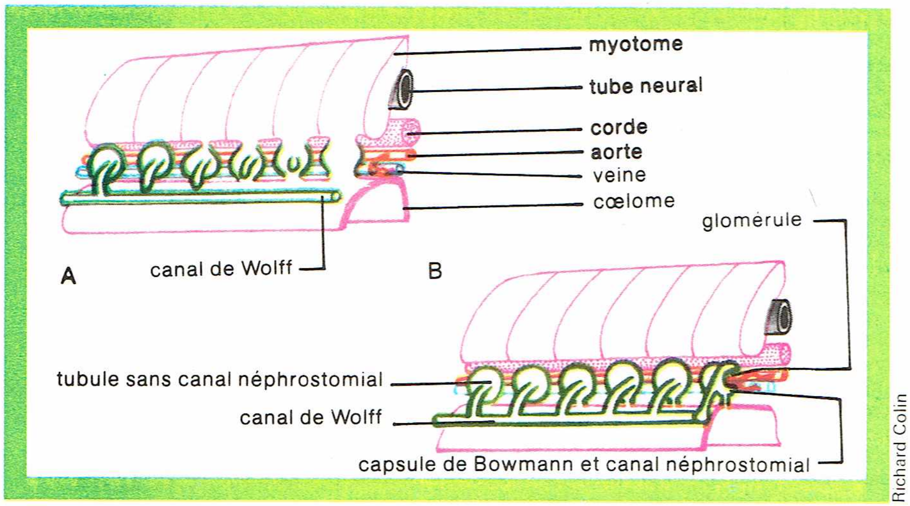

▲ ***Développement*** *des corpuscules et des tubules rénaux au niveau du* **mésonéphros** *: stade B plus âgé que A ; les néphrons définitifs fermés seront à glomérules intranéphroniques (d'après Eaton).*

La néphrogenèse commence au niveau des pièces intermédiaires antérieures et se poursuit vers l'arrière. La pièce intermédiaire se dilate en une vésicule, le *néphrotome* (creusé d'un néphrocœle) ; celui-ci est relié par un canal péritonéal au cœlome des lames latérales, dans lequel il s'ouvre par un *néphrostome* cilié. Chaque néphrotome se sépare du somite correspondant et bourgeonne, en direction périphérique, un tubule urinifère. Ces tubules, borgnes, successifs, se jettent les uns dans les autres et édifient un canal collecteur commun, pair, l'*uretère primaire,* ou *canal de Wolff,* qui débouche dans le cloaque. Une artériole segmentaire se pulvérise en un réseau de capillaires et soulève l'épithélium cœlomique en face de chaque néphrostome. L'ultrafiltrat, qui traverse la paroi des capillaires, passe dans le cœlome avant d'être repris par le néphrostome.

Cette différenciation tubulaire pourrait se poursuivre vers l'arrière au niveau de chaque segment. En fait, un tel rein ne se réalise chez aucun Vertébré actuel. La néphrogenèse ne se réalise pas de manière continue de l'avant vers l'arrière : elle se réalise par étapes successives dans le temps et l'espace.

Le pronéphros

Dans la première étape, les néphrons antérieurs se différencient comme nous venons de l'indiquer et constituent le pronéphros, rein primaire éphémère, dont le canal collecteur est le canal de Wolff. Dans toutes les classes, le pronéphros est l'ébauche excrétrice la plus précoce et la plus crâniale, à la hauteur du péricarde. Il n'est fonctionnel que chez les embryons et les larves des Cyclostomes, Ostéichthyens et Amphibiens, non fonctionnel chez les embryons des Chondrichthyens et des Amniotes. Son rôle essentiel semble être d'édifier l'uretère primaire.

Le mésonéphros

Après une certaine pause, la néphrogenèse reprend plus en arrière. Sous l'action inductrice du canal de Wolff, qui longe les néphrotomes indifférenciés situés en arrière du pronéphros, ceux-ci évoluent en néphrons qui s'abouchent dans ce canal. Au cours du développement de ces néphrons, une artériole vient au contact de la vésicule néphrotomienne et se pulvérise en un réseau admirable, le *flocculus,* ou *glomérule de Malpighi.* Celui-ci déprime la surface de la vésicule et la transforme en une capsule à double paroi, la *capsule de Bowmann,* enfermant le glomérule. L'ensemble forme le *corpuscule rénal de Malpighi.*

Chez les Anamniotes, les néphrotomes sont bien individualisés sur toute la longueur du tronc. Ils se différencient en néphrons primaires, lesquels bourgeonneront ensuite un petit nombre de bourgeons secondaires.

Chez les Amniotes, le mésoblaste des pièces intermédiaires constitue un *blastème* au sein duquel se différencient des néphrons primaires non segmentaires (2 ou 3 par segment). Chacun des néphrons les plus postérieurs s'associe à 2 à 5 néphrons secondaires, qui se différencient à leur tour. Cette évolution n'intéresse pas les derniers segments troncaux.

Un deuxième rein, dont le canal collecteur est le canal de Wolff, s'est ainsi formé. Au cours de son développement, la métamérie primitive tend à s'effacer de l'avant vers l'arrière et certains néphrotomes se dissocient en mésenchyme. Des régions dianéphrétiques sans néphrons se constituent entre le pronéphros et le mésonéphros et en arrière du mésonéphros.

La néphrogenèse est achevée chez les Anamniotes, pour lesquels le mésonéphros constitue le rein fonctionnel définitif. Chez les Amniotes, elle reprendra au niveau des derniers segments troncaux et permettra l'édification d'un métanéphros.

Le mésonéphros des Anamniotes s'étend sur une zone qui englobe le territoire du métanéphros des Amniotes. On l'appelle souvent l'*opisthonéphros,* réservant le terme de mésonéphros au rein transitoire des Amniotes.

Le métanéphros

Le métanéphros ne se différencie donc que chez les Amniotes, où il constitue le rein fonctionnel de l'adulte. Il se forme aux dépens d'un blastème développé au niveau d'un petit nombre de segments troncaux postérieurs (un ou deux chez l'homme). Ce blastème n'édifie que la partie sécrétrice des néphrons. Le système collecteur provient d'un bourgeon né à l'extrémité postérieure de chaque canal de Wolff, au voisinage de leurs débouchés dans le cloaque. Ce bourgeon s'allonge en direction du blastème et forme un uretère secondaire qui pénètre dans le blastème et, par dichotomisations successives, forme les canaux collecteurs. Au contact de l'extrémité borgne de chaque canal collecteur, le blastème s'organise en une cape. Celle-ci différencie un tubule rénal plié en S, dont une des extrémités forme la capsule de Bowmann au contact d'un glomérule, tandis que l'autre extrémité s'ouvre dans le tube collecteur.

La structure générale du néphron ; les principaux types de néphrons

Le néphron constitue l'unité fonctionnelle élémentaire du rein des Vertébrés.

Structure générale du néphron

Un néphron comprend un glomérule et un tubule.

— Le *glomérule* est formé par une touffe de capillaires artériels développés sur le trajet d'une artériole rénale (« réseau admirable »). Il laisse filtrer un liquide aqueux dont la composition est proche de celle du plasma. Seuls sont arrêtés les globules et la grande majorité des protéines plasmatiques. Les principaux ions, le glucose, les acides aminés et l'urée passent librement et se retrouvent dans la lumière du néphron, à des concentrations identiques à celle du plasma. Cette composition de l'ultrafiltrat glomérulaire a pu être déterminée sur des microponctions.

Les techniques de *« clearance »* permettent de mesurer le débit de cette filtration. La « clearance » exprime le travail d'épuration sanguine du rein vis-à-vis d'une substance, par le nombre de millilitres de plasma épuré de la substance, par minute : $\left[C = \frac{UV}{P}\right]$, où U représente la concentration de la substance dans l'urine, V le débit urinaire en ml/mn

G. Volle

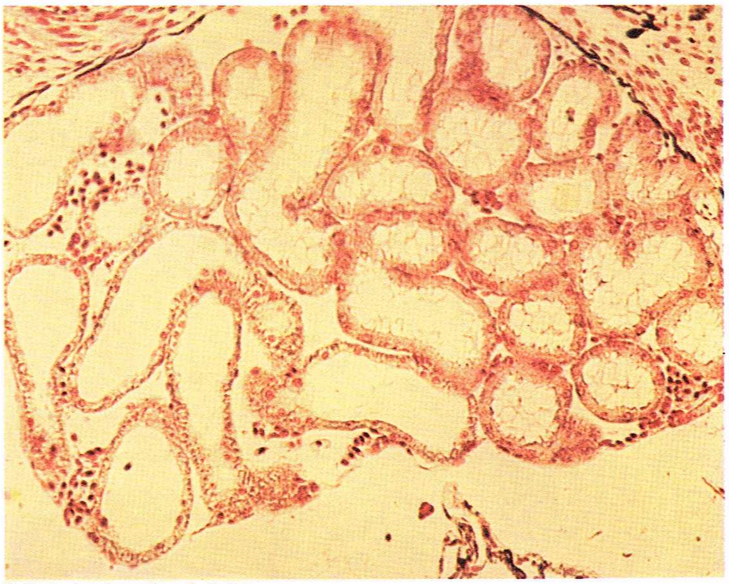

G. Volle - préparation F. Hulot

et P la concentration de la substance dans le plasma. Si une substance filtrée par le glomérule n'est ni réabsorbée ni sécrétée par le tubule, sa clearance constitue une mesure de la filtration glomérulaire; l'inuline permet cette mesure. Chez l'homme, la filtration totale est en moyenne de 120 ml/mn. Le diamètre du glomérule est en rapport étroit avec l'importance de la filtration.

— Le *tubule* conduit l'ultrafiltrat en modifiant sa composition par une diffusion passive, une sécrétion active et une réabsorption sélective. Ces différentes actions dépendent étroitement de la structure du tubule.

Le tubule débute par un étroit collet, auquel fait suite le segment proximal (segment principal, segment à bordure en brosse), contourné, élément le plus constant du tubule des Vertébrés. Il est caractérisé par la présence de microvillosités au pôle apical de ses cellules. C'est à son niveau que s'effectue la réabsorption d'une grande partie de l'eau et des sels minéraux ainsi que de la totalité du glucose de l'ultrafiltrat.

Le segment distal (segment moyen, segment à bâtonnets), contourné lui aussi, reste indifférencié chez les lamproies, les Ostéichthyens et la plupart des Chondrichthyens; il se différencie chez les Tétrapodes. Le cytoplasme basal de ses cellules contient de nombreuses mitochondries orientées verticalement entre les replis internes de la membrane plasmique. Normalement imperméable à l'eau, il y devient perméable sous l'action d'une hormone posthypophysaire, l'hormone antidiurétique, ou adiurétine. Le segment distal se raccorde au canal collecteur directement ou par l'intermédiaire d'une pièce d'union née du tubule collecteur. Chez les Dipneustes et les Tétrapodes,

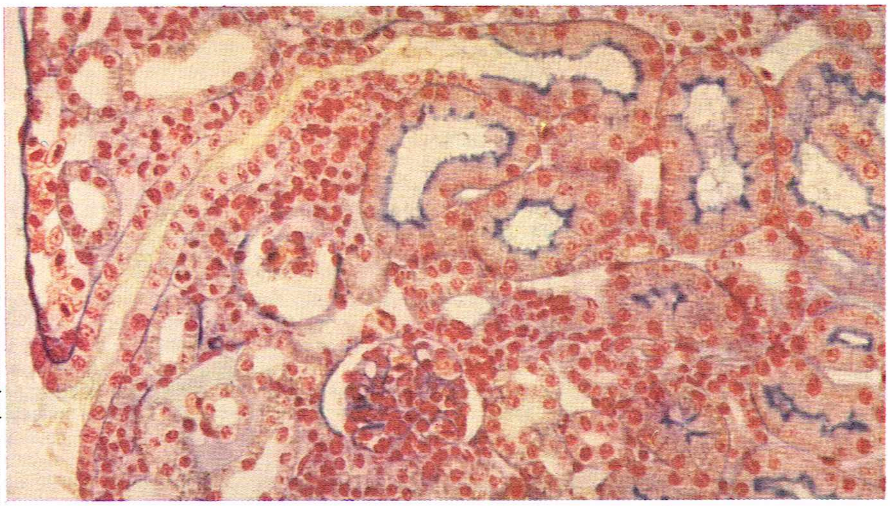

G. Volle - préparation F. Hulot

▲ *Ci-dessus,* **mésonéphros** *de têtard d'Amphibien Anoure* **(Alytes)** *; la coupe montre un néphron ouvert (néphrostome et canal néphrostomial ciliés communiquant avec le segment contourné proximal à bordure en brosse [bleu]) à glomérule intranéphronique; en haut, section du segment contourné distal.*

▼ *Développement de l'appareil urinaire : A, chez les Anamniotes; B, chez les Amniotes (d'après Beaumont); C, trois étapes du développement chez les Amniotes (d'après D. Webster et M. Webster).*

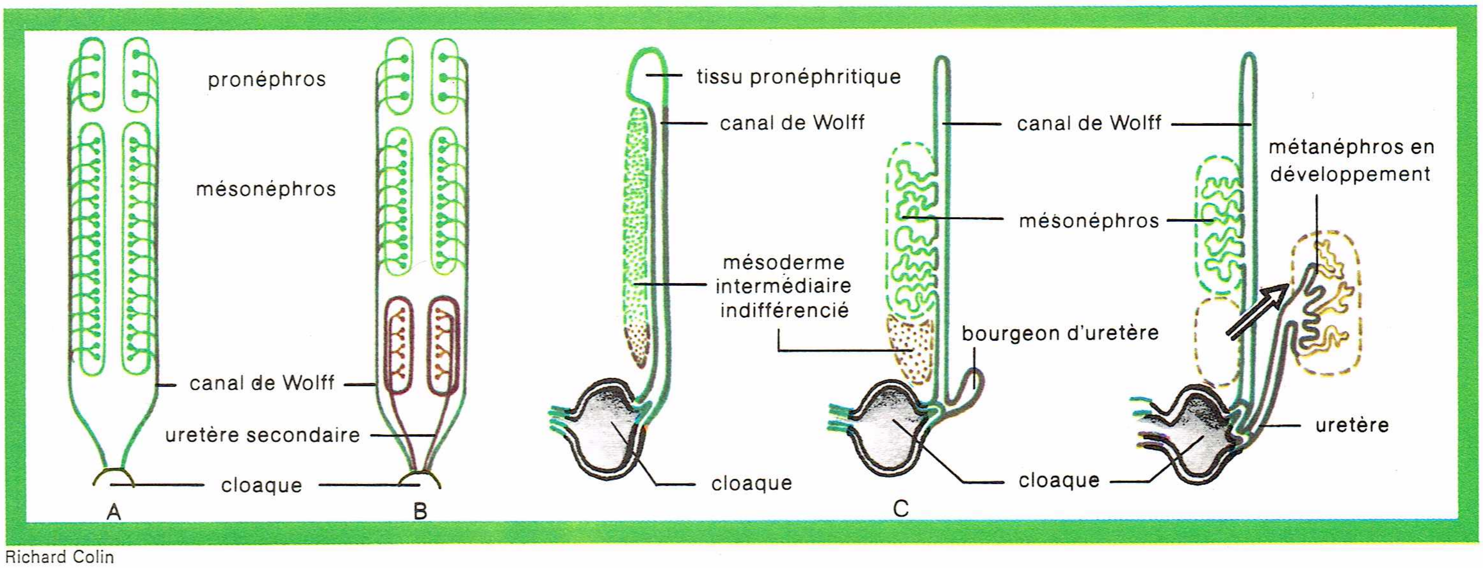

Richard Colin

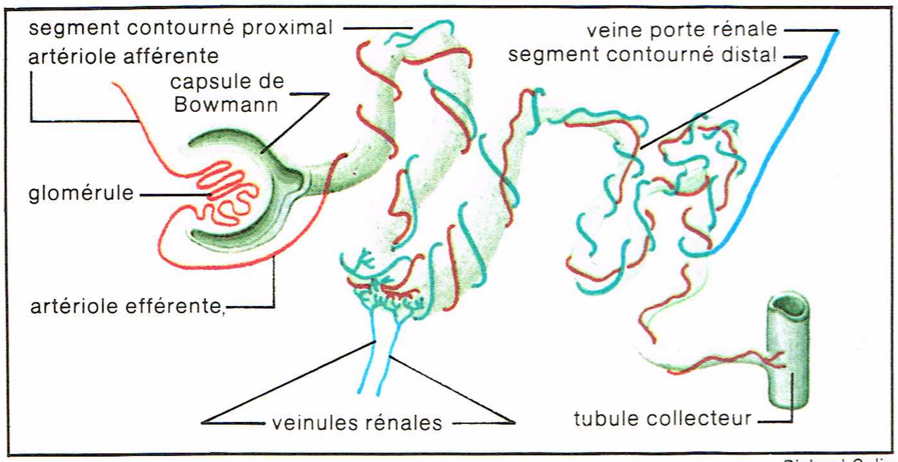

Richard Colin

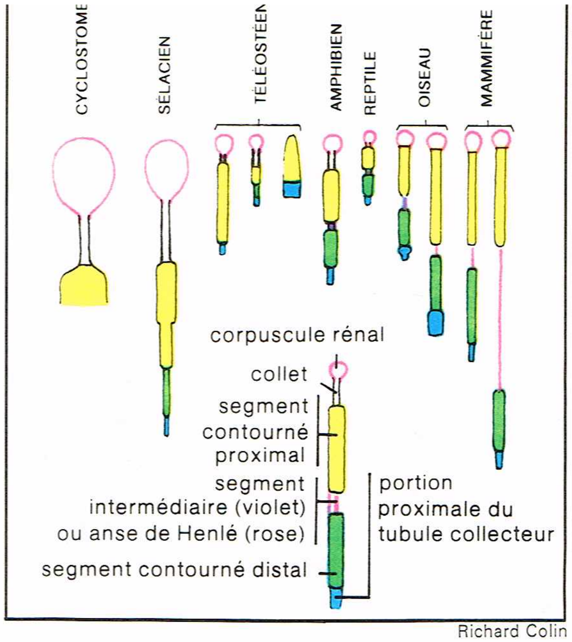

Richard Colin

▲ *A gauche,* ***vascularisation d'un tubule de mésonéphros (opisthonéphros) d'un Anamniote (d'après D. Webster et M. Webster).*** *A droite,* ***diagramme des néphrons de quelques Vertébrés, ramenés à la même échelle et montrant l'importance relative de leurs différents composants (d'après Romer).***

▼ *En haut,* ***détail du cortex d'un rein de cobaye montrant des tubules urinaires et quatre corpuscules de Malpighi.*** *En bas,* ***métanéphrogenèse chez un fœtus de Mammifère (d'après Beaumont, tiré de Vouyovitich et Kampmeier).***

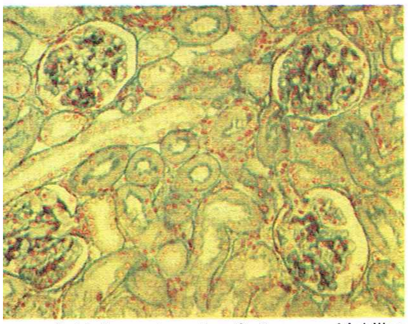

G. Volle - préparation S. Busson - Mabillot

un segment grêle intermédiaire, court et droit, s'intercale entre les deux segments proximal et distal. Chez les Oiseaux, il s'allonge et parfois, comme chez tous les Mammifères, il s'incurve en s'allongeant pour former l'*anse de Henlé*.

Principaux types de néphrons

On distingue des *néphrons ouverts,* qui communiquent avec le cœlome par un canal néphrostomial cilié, et des *néphrons fermés,* pour lesquels le canal néphrostomial n'apparaît pas ou, s'il apparaît, régresse ou disparaît.

Les néphrons ouverts peuvent être à glomérule intracœlomique (néphrons du pronéphros) ou à glomérule intranéphronique (le tubule incorpore le glomérule au niveau de la capsule de Bowmann). Les néphrons fermés sont glomérulés (à glomérule intranéphronique) ou perdent secondairement le glomérule. Réduits alors au segment proximal, ils sont dits aglomérulés.

Vascularisation et architecture rénale

Le sang arrive au rein par des artères rénales issues de l'aorte. Nombreuses chez les Poissons, leur nombre diminue chez les Tétrapodes (on en dénombre 5 à 7 chez la grenouille, 3 chez les Oiseaux, 1 chez les Mammifères). Cette artère se ramifie et donne, au contact de la vésicule néphrotomienne, le glomérule, dont le sang est collecté par une artériole efférente. Celle-ci forme ensuite un réseau capillaire autour du tubule. Le sang gagne la ou les veines rénales efférentes qui se jettent dans la veine cardinale postérieure ou la veine cave postérieure. La veine porte rénale donne des réseaux de capillaires au niveau du tubule. Comme on l'a indiqué dans l'étude de l'appareil circulatoire, ce système manque aux Agnathes et Mammifères.

A partir des Tétrapodes, les néphrons occupent des sites précis du réseau vasculaire; l'architecture du rein devient très précise.

Le rein et son fonctionnement dans la série des Vertébrés

Tout Vertébré, quel que soit son habitat, est placé devant le problème de l'eau et des sels, que ceux-ci soient en excès ou en déficit. Dans les eaux douces, les premiers Vertébrés devaient lutter contre une hydratation excessive provoquée par l'absorption de nourriture (microphagie). C'est ce qui expliquerait le développement de l'appareil filtrant constitué par les corpuscules de Malpighi et le segment proximal, qui, en réabsorbant la majeure partie des sels, rétablit l'équilibre intérieur.

Le rein des Agnathes

Le rein des myxines est le plus schématique de tous; les néphrons, un par métamère, s'alignent le long de l'uretère; ils possèdent un glomérule de grande taille, un collet et un segment proximal.

Chez les lamproies, la métamérie s'efface; des néphrons secondaires glomérulés, fermés, naissent à partir des néphrons primaires, primitivement ouverts; le système porte fait défaut.

Le rein des Chondrichthyens

La région antérieure du mésonéphros est peu développée *(pars sexualis)*. Chez le mâle, elle perd son caractère urinaire en se connectant au testicule par les canalicules du *rete;* elle sert pour l'évacuation du sperme. Seule la région postérieure reste fonctionnelle *(pars renalis)*. Les canaux collecteurs s'allongent et s'ouvrent très près les uns des autres, dans la partie terminale du canal de Wolff. Le néphron présente un volumineux glomérule (300 à 600 μ) qui débouche dans un long collet contourné. Le segment distal est souvent discret.

Les Chondrichthyens éliminent le problème osmotique grâce à la rétention de l'urée dans leur milieu intérieur (5 à 25 g/l). L'uréogenèse serait très active et la perméabilité des branchies à l'urée réduite; cette substance serait même réabsorbée par le rein.

Le rein des Téléostéens

Les Poissons actuels des eaux douces se trouvent dans la situation décrite pour les Vertébrés primitifs. Le glomérule, bien développé, assure une filtration importante, le segment proximal réabsorbe les sels et le segment distal participe à la dilution de l'urine (400 ml/kg/jour).

A l'inverse, les formes marines « économisent » l'eau et rejettent activement les sels par les branchies. Le glomérule est souvent de petite taille ou même absent

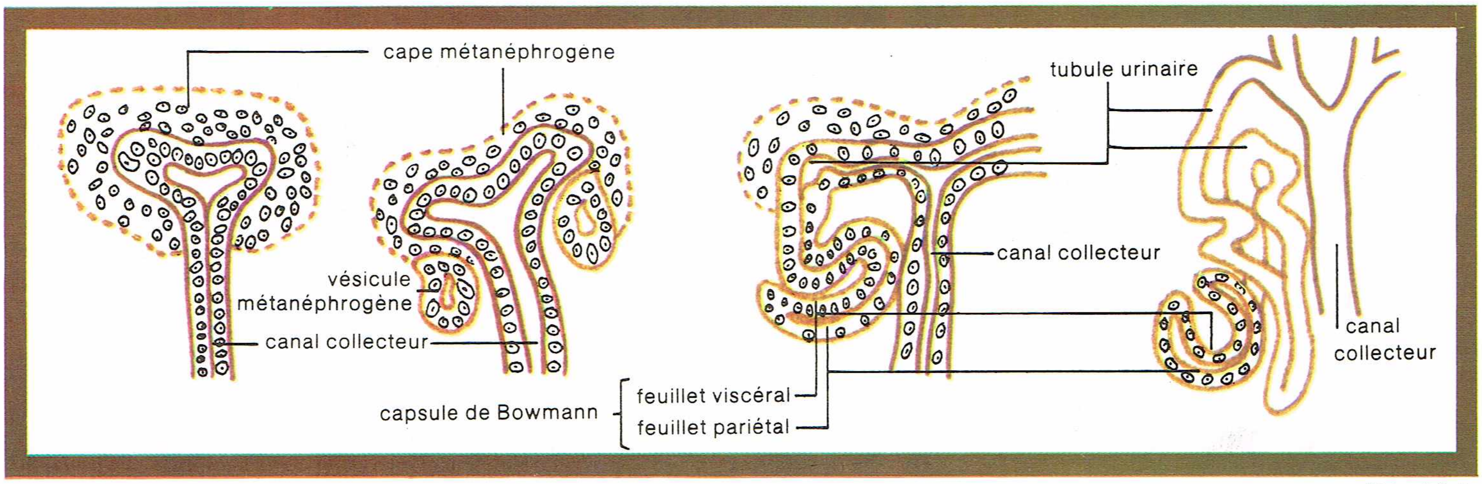

Richard Colin

(chez les syngnathes, les baudroies). Le segment proximal, souvent réduit, se branche le plus souvent directement sur le canal collecteur.

Le rein des Amphibiens

Le rein des Urodèles correspond à celui décrit pour les Chondrichthyens ; plusieurs générations de néphrons se succèdent et le rein définitif conserve des néphrostomes ouverts de néphrons des anciennes générations. Très long chez les Apodes et les Urodèles, il devient massif chez les Anoures, où la totalité du mésonéphros reste fonctionnelle. Le sperme du mâle passe dans certains tubes collecteurs. Premiers conquérants du milieu aérien, les Amphibiens s'aventurent sur le milieu terrestre avec un néphron de Poisson d'eau douce (filtration glomérulaire importante). Des mécanismes, telles l'absorption d'eau par la peau et la réabsorption par la vessie, compensent partiellement cette mauvaise adaptation.

Le rein des Sauropsidés

Chez les Sauropsidés, l'adaptation à la vie terrestre est achevée. La filtration est ralentie par la réduction du glomérule (35 à 45 μ). Le glomérule permet l'excrétion des sels. L'urine est rejetée sous forme d'une pâte riche en cristaux d'acide urique, peu soluble. Une anse de Henlé apparaît au niveau des néphrons profonds ; le tissu rénal peut alors être décomposé en *cortex* et *médulla*.

Le rein des Mammifères

Le néphron des Mammifères conserve un volumineux glomérule et, par élongation du segment grêle, une anse de Henlé caractéristique.

— *Architecture et vascularisation du rein.* Le rein présente la forme d'un haricot et comporte un ou plusieurs lobes, plus ou moins fusionnés (reins uni- ou pluripyramidaires). Il est entouré d'une mince capsule fibreuse. Si l'on observe une coupe d'un rein unipyramidaire de Rongeur, on distingue un *cortex* granuleux périphérique et une *médulla,* ou *pyramide de Malpighi,* interne, à striation radiaire. Cette structure caractéristique correspond à la répartition topographique des néphrons et à la différenciation de l'uretère. Au niveau de la concavité du hile, le rein est creusé d'une cavité, le *calice,* dans lequel saille la *papille* et où débouchent les *canaux papillaires,* réunion de plusieurs tubes collecteurs ; du calice part l'*uretère.* Les artères, les veines rénales et les nerfs, entourés de tissu adipeux et de conjonctif lâche, aboutissent également au niveau du hile.

La circulation rénale est très active. L'artère rénale issue de l'aorte adopte un trajet arqué à la limite des zones médullaire et corticale, constituant l'artère arciforme d'où partent des branches radiaires, ou artères interlobulaires, lesquelles délimitent dans le cortex des lobules non cloisonnés. De ces artères partent les artérioles afférentes, qui se capillarisent en un réseau glomérulaire. Les artérioles efférentes issues des glomérules de la partie externe du cortex fournissent un réseau capillaire artério-veineux entre les tubes contournés ; les artérioles efférentes issues des glomérules les plus profondément situés fournissent des faisceaux de larges capillaires, qui circulent entre les tubules de la médulla, puis un réseau artério-veineux. Les veines du cortex et de la médulla rejoignent la veine arciforme, qui se poursuit au hile par la veine rénale. Il n'y a pas de système porte rénal.

— *Fonctionnement du rein.* Le glomérule volumineux (de 150 à 200 μ chez l'homme) laisse filtrer une quantité considérable d'eau (7,5 l/h pour les deux reins chez l'homme). 99 % de cette eau sera réabsorbée au niveau du tubule (1,5 l d'urine pour 24 h chez l'homme). Pour la première fois chez les Vertébrés, s'élabore une urine hypertonique par rapport au milieu intérieur.

80 à 85 % des constituants de l'ultrafiltrat sont activement réabsorbés au niveau du segment proximal. Cette réabsorption porte sur le sodium ; avec lui passent Cl^- et la moitié de tous les ions bicarbonate (CO_3H^-) destinés à être réabsorbés. La totalité du glucose et des acides aminés ainsi que la moitié de l'urée regagnent également le sang. Des quantités correspondantes d'eau accompagnent obligatoirement et passivement le mouvement de ces éléments. L'urine proximale reste donc isotonique au plasma. Les deux branches de l'anse de Henlé traversent des zones successives dont la concentration osmotique s'élève des régions externes aux régions profondes. L'aldostérone (hormone stéroïde de la corticosurrénale) stimule la réabsorption active de Na par le segment large de l'anse de Henlé (et l'élimination corrélative du K). Le gradient de concentration serait créé et entretenu par cette sortie active des ions Na^+ et par la disposition en contre-courant des deux branches de l'anse avec les anses capillaires qui les accompagnent. Le fluide, isotonique au plasma à la sortie du segment proximal, perd de l'eau dans la branche descendante de l'anse avant de se rediluer dans la branche ascendante et de devenir hypotonique (on observe une importante sortie de Na dans la branche large). Le segment distal est normalement imperméable ; toutefois, une hormone posthypophysaire, l'adiurétine, peut le rendre plus ou moins perméable. La concentration osmotique du fluide intratubulaire tend à s'équilibrer avec celle du milieu environnant, isotonique au plasma. Le long du canal collecteur, également contrôlé par l'adiurétine, l'urine continue à se concentrer par sortie passive d'eau en descendant vers les couches hypertoniques de la médulla. Décelant des écarts minimes de la composition du milieu interne, des systèmes régulateurs endocrines contrôlent l'activité des néphrons pour l'adapter aux nécessités du moment.

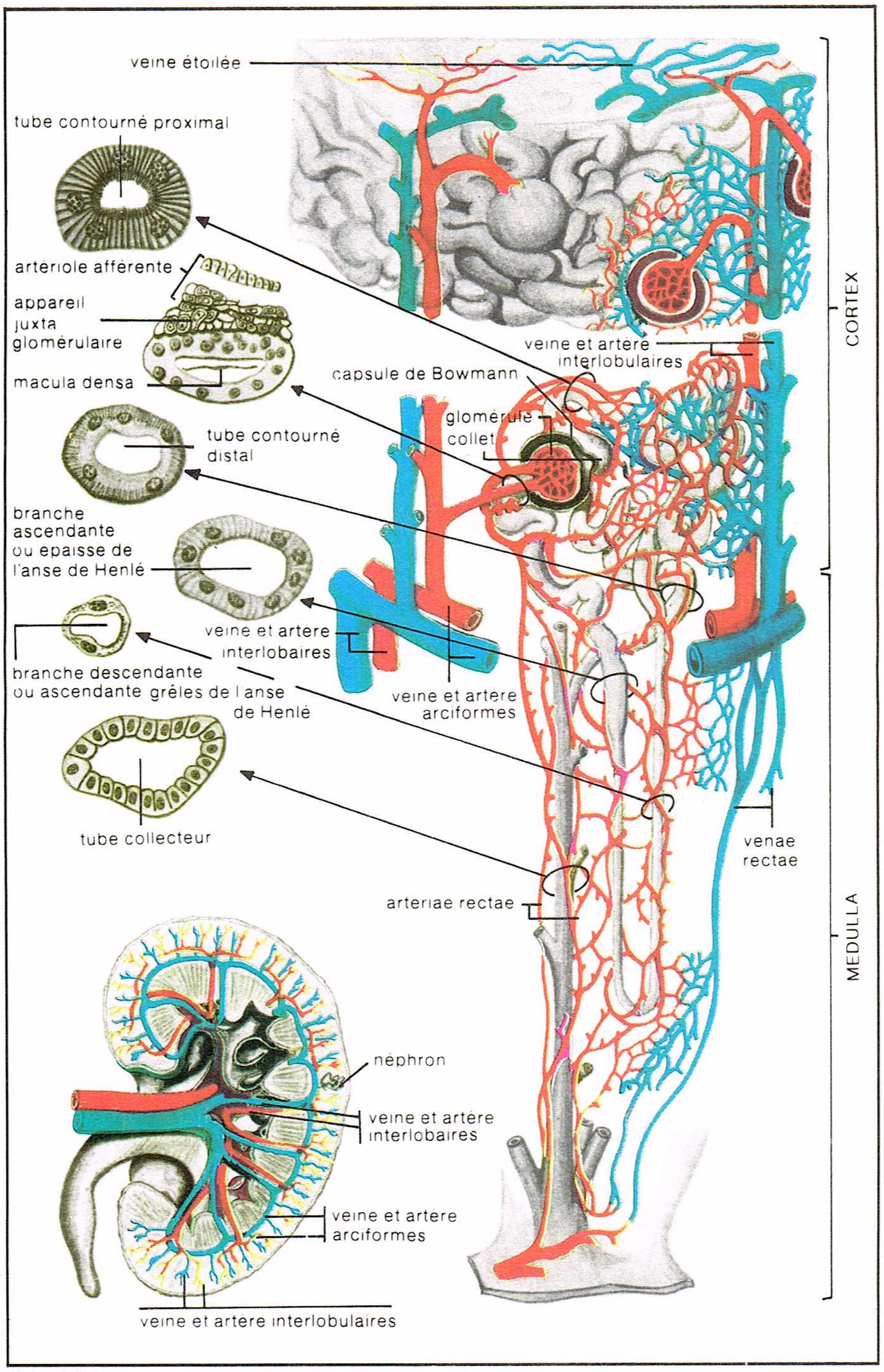

Richard Colin

▲ ***Diagramme d'une portion de* lobule rénal *montrant un néphron, des sections typiques des différentes parties du néphron, et la disposition des vaisseaux rénaux d'un rein de Mammifère (d'après* Gray's Anatomy — *Finerby et Courshy).***

▶ *Page ci-contre, de gauche à droite et de haut en bas,* **ovaire de lapine vierge** *: la partie externe de la zone corticale présente une abondante réserve de follicules primordiaux, la partie profonde des follicules à divers stades d'évolution. Au centre la médulla réduite, occupée par des sections de gros vaisseaux;* **follicules** *primordiaux, primaire, primaire à 2 ovocytes et cavitaire jeune;* **follicule cavitaire** *: au centre, l'ovocyte et son noyau entouré par la membrane pellucide (bleue). Les cellules folliculeuses de la granulosa creusée de l'antrum et limitée par la membrane de Slavjansky (bleue); autour du follicule, une thèque interne glandulaire et une thèque externe fibreuse.* **Ovaire de lapine gravide** *montrant un fragment de corps jaune entouré par la thèque fibreuse.*

APPAREIL GÉNITAL DES VERTÉBRÉS

Les Vertébrés se reproduisent par voie sexuée. Les cellules reproductrices, ou gamètes, sont produites par une paire de gonades (testicules ou ovaires). Leur transport est assuré par une paire de voies génitales. L'ensemble des gonades, des voies génitales et de l'appareil copulateur, si la fécondation est interne, constitue l'appareil génital.

L'origine et le développement des gonades

Les cellules germinales

Les cellules germinales primordiales apparaissent à des stades très précoces du développement, localisées au niveau de territoires entoblastiques précis plus ou moins éloignés des ébauches gonadiques somatiques. Elles migrent vers ces ébauches tout en se multipliant. Cette migration s'effectue par des mouvements amiboïdes lorsque les ébauches sont proches (chez les Poissons, les Amphibiens, certains Reptiles et les Mammifères) ; lorsque celles-ci sont plus éloignées (chez les Ophidiens et les Oiseaux), les cellules germinales empruntent d'abord passivement la voie sanguine jusqu'aux ébauches et, là, sortent du réseau vasculaire par des mouvements amiboïdes. Dans les deux cas, un chimiotactisme spécifique des ébauches détermine la migration amiboïde.

Chez l'embryon humain, dès la 4^{e} semaine, 30 à 50 cellules germinales occupent la paroi endodermique du sac vitellin au voisinage du départ de l'allantoïde. Elles migrent par amiboïsme en se multipliant : un millier de cellules colonisent ainsi les ébauches.

Les ébauches des gonades

Les premières ébauches gonadiques se forment à partir des crêtes génitales, allongées sur toute la longueur de la cavité cœlomique, de part et d'autre de la racine du mésentère dorsal, sur la face interne de l'ébauche mésonéphritique. L'épithélium cœlomique de ces crêtes est partiellement colonisé par les cellules germinales primordiales au terme de leur migration. La partie restante des crêtes, stérile, disparaît ou persiste comme organe lymphoïde (corps adipeux des Amphibiens Anoures).

L'épithélium s'épaissit et fait saillie au plafond de la cavité abdominale. Le premier constituant de la gonade, le *cortex,* est formé. Des cellules, issues du blastème mésonéphritique, pénètrent dans le pédicule de la crête et viennent au contact du cortex, dont elles ne sont séparées que par une mince couche de mésenchyme. Ces cellules constituent la *médulla* gonadique. La gonade indifférenciée comprend : un cortex, où sont localisées les cellules germinales, un stroma mésenchymateux, contenant les vaisseaux sanguins, et une médulla centrale, stérile, d'origine mésonéphritique.

La différenciation des gonades

La *médulla* peut attirer les cellules germinales du cortex et proliférer. Le cortex stérile se réduit à un épithélium péritonéal recouvrant le mésenchyme, où se développe la vascularisation. Les cellules germinales se multiplient lentement pour donner les spermatogonies primaires. Un testicule est alors différencié.

Le *cortex* s'épaissit par multiplication rapide des cellules germinales, qui se différencient en ovogonies primaires. La différenciation de l'ovaire se fait par poussées successives de *cordons corticaux,* lesquels refoulent la médulla et les cordons de première poussée dont les éléments involuent. Les cordons corticaux se fragmentent en follicules ovariens composés d'une cellule germinale, qui entre en préméiose (ovocyte I), entourée de cellules somatiques nourricières, les cellules folliculeuses. La médulla stérile se creuse en sacs ovariens ou se dispose en thèques autour des follicules.

Cette différenciation de la gonade peut laisser subsister un *territoire hétérologue* rudimentaire. Celui-ci, dans certaines conditions, peut se développer et former un organe : par exemple, l'organe de Bidder qui coiffe le testicule du crapaud, le testicule gauche des Oiseaux, l'ovaire droit des embryons d'Oiseaux. La différenciation peut ne pas se produire ; l'adulte est alors hermaphrodite (hermaphrodisme fonctionnel successif de certains Poissons, hermaphrodisme accidentel non fonctionnel chez divers Mammifères, dont l'homme).

La structure des gonades

Structure de l'ovaire

Pendant la maturation du follicule, l'ovogonie devient un ovocyte de premier ordre (ovocyte I) et reste bloquée dans son évolution en métaphase de 1re division de méiose.

Chez les non-mammaliens et les Monotrèmes, les cordons médullaires se creusent en un ou plusieurs sacs ovariens plus ou moins développés. L'ovaire devient creux. Une très importante vitellogenèse permet à la cellule germinale de s'accroître considérablement (2 mm chez la grenouille, quelques centimètres chez la poule), tandis que les cellules folliculeuses restent discrètes.

Chez les Marsupiaux et les Euthériens, les cordons médullaires constituent des enveloppes, ou thèques, autour des follicules. L'ovaire reste plein. La maturation des follicules intéresse essentiellement les cellules folliculeuses qui se multiplient activement pour former la masse énorme de la *granulosa*. Celle-ci se creuse d'une cavité folliculaire, l'*antrum,* dans laquelle l'ovocyte, pratiquement alécithe, fait saillie. Le follicule à maturité (follicule cavitaire de De Graaf) fait saillie à la surface de l'ovaire. L'ovocyte I est alors expulsé : c'est la ponte ovarienne, ou ovulation. Il termine sa première division méiotique et donne l'ovocyte II ainsi que le 1er globule polaire. L'ovocyte II descend le long des voies génitales. S'il y a fécondation, la pénétration du spermatozoïde provoque la transformation de l'ovocyte II en ovotide avec émission du 2^{e} globule polaire (2^{e} division de la méiose).

L'ovulation, qui est spontanée chez la plupart des Mammifères, peut être provoquée par l'accouplement (par exemple, l'ovulation réflexe, qui a lieu 6 à 8 h après le coït chez la lapine). Après la ponte ovarienne, les cellules folliculeuses et les cellules thécales envahissent l'antrum. Les vaisseaux sanguins pénètrent en disposition radiaire entre les cellules. Celles-ci, hypertrophiées, se chargent de gouttelettes de phospholipides et d'un pigment qui leur donne une teinte jaune. Le follicule se transforme en corps jaune à sécrétion endocrine (progestérone). Si l'ovule n'est pas fécondé, le corps jaune, menstruel, ne dure que quelques jours. S'il est fécondé, il se développe en un corps jaune gravidique, ou de grossesse, qui se

▼ *A gauche,* **organe de Bidder** *coiffant un testicule de crapaud. Chez le mâle, la partie antérieure de la crête génitale fertile, à composants médullaires déficients, s'est développée en ovaire qui reste vestigial du fait de l'inhibition exercée par le testicule. A droite, coupe d'ovaire creux d'Amphibien de type classique : on observe des ovocytes à différents stades de la vitellogenèse; celui de droite, âgé, possède un cytoplasme riche en plaquettes vitellines (hétérolécithe).*

G. Volle

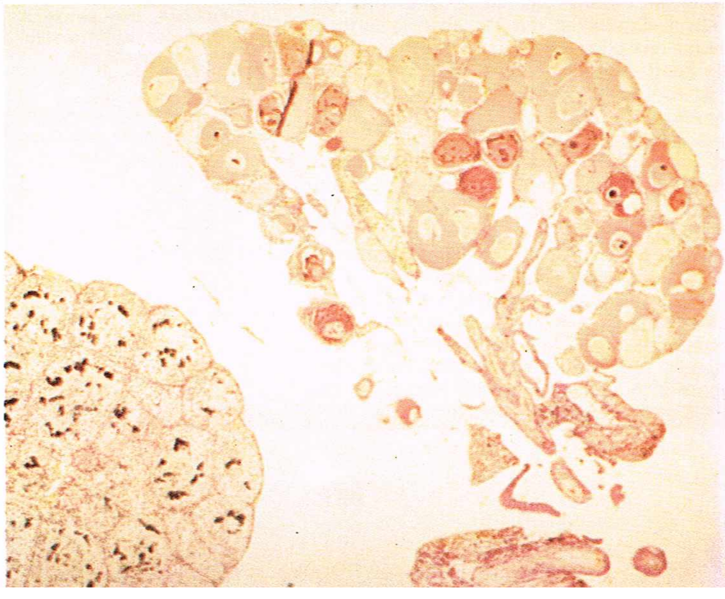

G. Volle

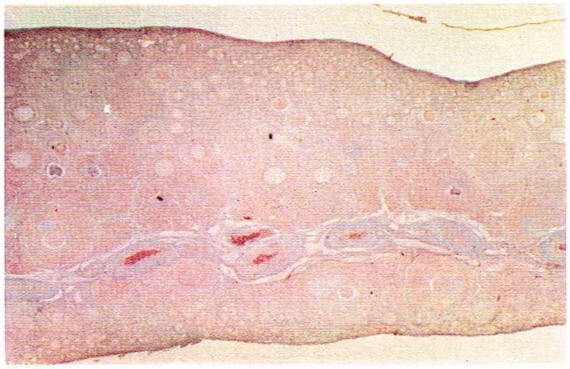

G. Volle

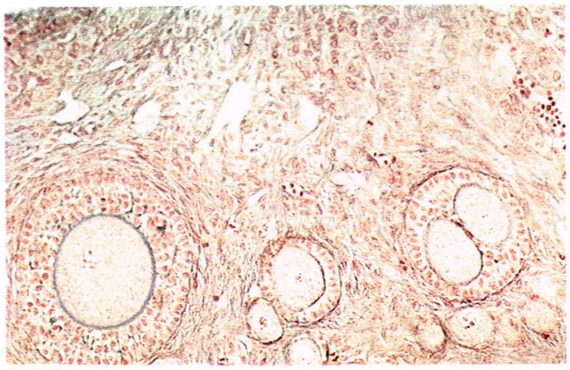

G. Volle

G. Volle

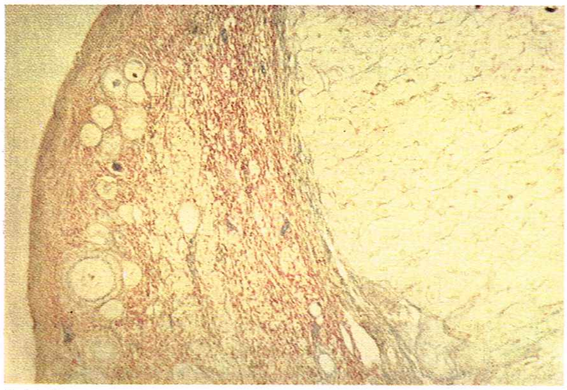

G. Volle

▼ *De gauche à droite et de haut en bas,* **testicule** *de Sélacien (roussette). Cystes se formant dans la zone germinative externe (à gauche) et évoluant vers la zone interne; la zone sombre à droite représente le nodule glandulaire.* **Détail** *de la* **zone germinative** : *2 cystes en formation.* **Région centrale** : *à gauche, 3 cystes à spermatogonies secondaires; à droite, cystes à spermatocytes 1 au stade leptotène.* **Bord interne du testicule** : *cyste à maturité s'ouvrant dans un diverticule du canal longitudinal du testicule* **(système du rete)** ; *à droite, cyste en voie de résorption.*

maintient tout au long de celle-ci. Les corps jaunes peuvent se rencontrer chez des Sélaciens ovipares, des Téléostéens, des Reptiles ainsi que chez tous les Mammifères y compris les Monotrèmes, pourtant ovipares.

Structure du testicule

Les cordons médullaires se développent en tubes séminifères permanents ou se fragmentent en cystes caducs.

Les *cystes* du testicule des Anamniotes se forment dans une zone germinale externe du testicule, où les cellules somatiques et germinales se divisent activement. Une spermatogonie s'entoure de quelques cellules folliculeuses; le cyste ainsi formé évolue lentement en se déplaçant vers le bord interne du testicule. Au cours de cette évolution, la cellule germinale donne de nombreux spermatozoïdes et la cellule folliculeuse est à l'origine de la paroi du cyste. Les cystes viennent alors s'ouvrir dans les canalicules permanents du *rete testis*. Les spermatozoïdes sont libérés et les cellules folliculeuses dégénèrent ou se transforment en cellules glandulaires. Chez les Anoures, les cystes évoluent sur place, accolés à la paroi d'un système de cavités sans doute homologues aux canaux du *rete*.

Les testicules tubulaires des Amniotes sont composés d'un système de *tubes séminifères permanents,* en continuité avec les canaux du *rete*. Pendant la différenciation testiculaire, les cordons médullaires forment une série d'arches qui débouchent par leurs deux extrémités dans le *rete testis*. Ces arches se coudent (90 coudes par arche chez le rat), puis les parties droites s'allongent. La longueur totale des tubes séminifères, formés à partir de ces arches emboîtées, devient considérable (3 000 m chez le taureau).

L'épithélium séminal est constitué de cellules somatiques, les *cellules de Sertoli*. Les cellules germinales évoluent dans l'épaisseur de cet épithélium, de la base vers la lumière du tube, entre les cellules de Sertoli. Dans une section de tube séminifère de Mammifère, on observe toujours l'évolution de quatre générations de cellules, provenant de la division de spermatogonies souches. Ces quatre générations de cellules sont groupées suivant des associations cellulaires définies, que l'on a classées en stades; l'ensemble de ces stades constitue un *cycle de l'épithélium séminifère*. En allant le long du tube (à l'aide de coupes sériées), on retrouve périodiquement les mêmes associations cellulaires aux mêmes stades, résultat qui met en évidence l'existence d'une *onde spermatogénétique*. Cette onde prend naissance à intervalles réguliers au milieu du tube séminifère et se propage jusqu'à chaque extrémité du tube, d'un mouvement hélicoïdal, lent et continu (0,05 à 0,06 mm/h chez le rat). Elle déclenche sur son passage l'évolution des spermatogonies souches, qui vont donner naissance à une lignée séminale nouvelle.

Chez la plupart des Mammifères, les testicules subissent une migration les amenant dans la partie postérieure de la cavité abdominale ou dans deux diverticules ventraux

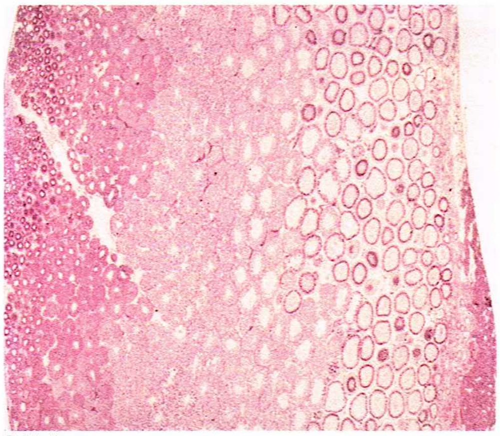

G. Volle

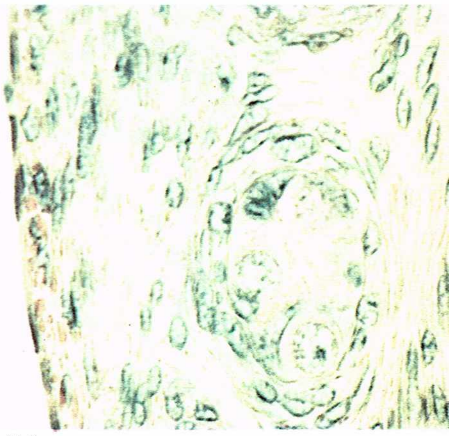

G. Volle

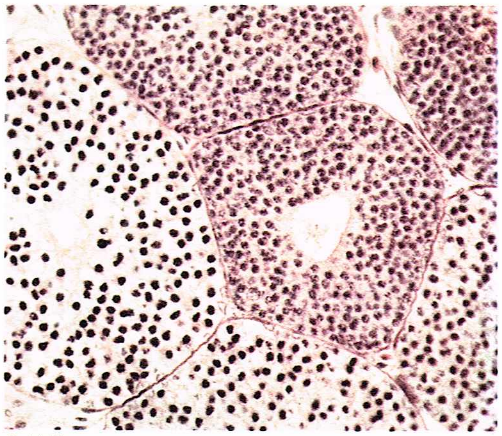

G. Volle

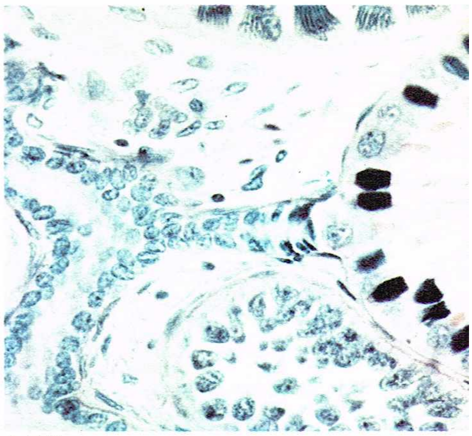

G. Volle

G. Volle

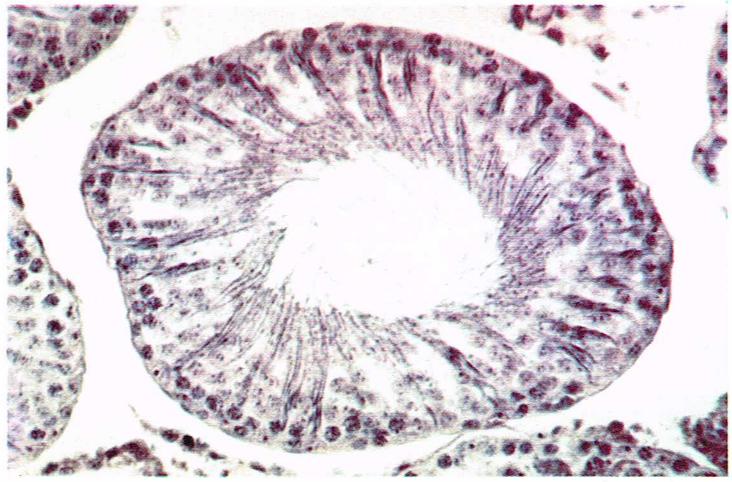

G. Volle

▲ ***Coupes de** testicules **de cobaye :** à gauche, testicule avec de nombreuses sections de tubes séminifères surmonté par la tête de l'épididyme dont les sections du canal accumulent les spermatozoïdes ; à droite, **section de tube séminifère** à un stade (IV') de fin de cycle de son épithélium ; les noyaux basaux clairs, à gros nucléole, sont ceux des cellules de Sertoli.*

de celle-ci (les processus vaginaux). Ils refoulent la musculature abdominale (sacs crémastériens) ainsi que, souvent, la peau, qui se soulève en sacs scrotaux (bourses). Cette descente serait liée à la contraction du *gubernaculum testis* ligamentaire, inséré sur le testicule. Le canal déférent et les vaisseaux testiculaires accompagnent le testicule dans sa migration. Les testicules peuvent donc rester intra-abdominaux (Cétacés, Proboscidiens, etc.), quitter la cavité abdominale et s'engager dans des sacs crémastériens, et cela soit sans formation de scrotum (Pinnipèdes, rhinocéros, etc.), soit avec scrotum (Carnivores, Primates, etc.). Cette migration peut être définitive ou temporaire (Rongeurs par exemple). Dans ce dernier cas, le canal inguinal, qui fait communiquer le processus inguinal et la cavité abdominale, reste ouvert et le testicule peut remonter dans la cavité abdominale en dehors des périodes d'activité sexuelle. La cryptorchidie s'accompagne toujours de stérilité ; la migration est probablement en rapport avec la nécessité d'une température plus basse que la température corporelle, compatible avec la spermatogenèse.

Dans le testicule à cystes comme dans le testicule à tubes, le cortex involue et se réduit à un épithélium péritonéal doublé par l'albuginée mésenchymateuse qui contient les vaisseaux sanguins. Entre les cystes ou les tubes, ce mésenchyme se différencie en tissu interstitiel endocrine (testostérone).

Les voies génitales

Voies génitales particulières des Cyclostomes et des Téléostéens

Chez les Cyclostomes (où les gonades sont fusionnées en une masse impaire), les produits génitaux tombent dans le cœlome et sont évacués à l'extérieur par deux pores abdominaux, qui ne s'ouvrent qu'au moment de la reproduction au voisinage des canaux de Wolff. Ceux-ci ont donc uniquement une fonction urinaire.

Chez les Téléostéens, la cavité centrale de la gonade se prolonge vers l'arrière par un canal issu de la crête génitale. Ce canal s'ouvre au niveau d'une papille impaire située entre l'anus et l'orifice urinaire. Le canal de Wolff est donc purement urinifère. Chez les Salmonidés, Anguil-

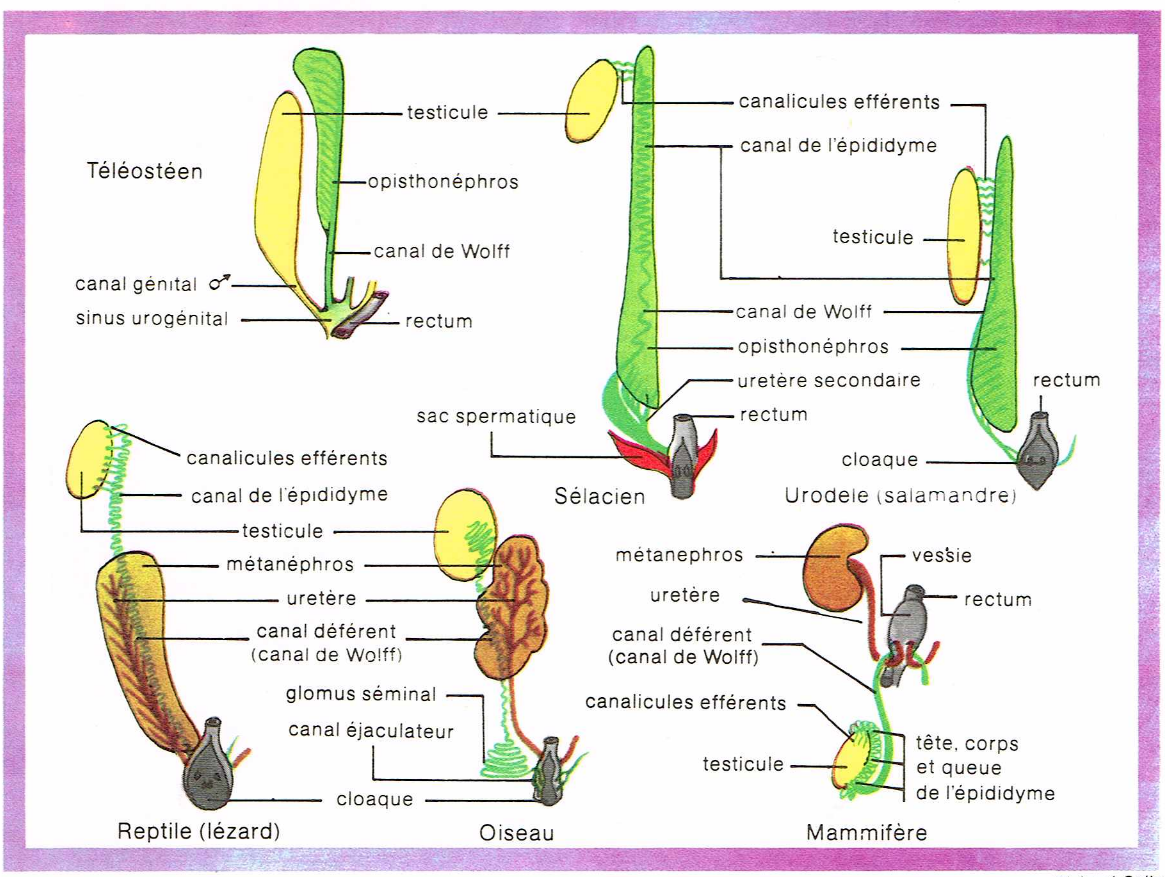

Richard Colin

▶ ***Gonades** et voies génitales **mâles** chez divers Vertébrés (vues ventrales).*

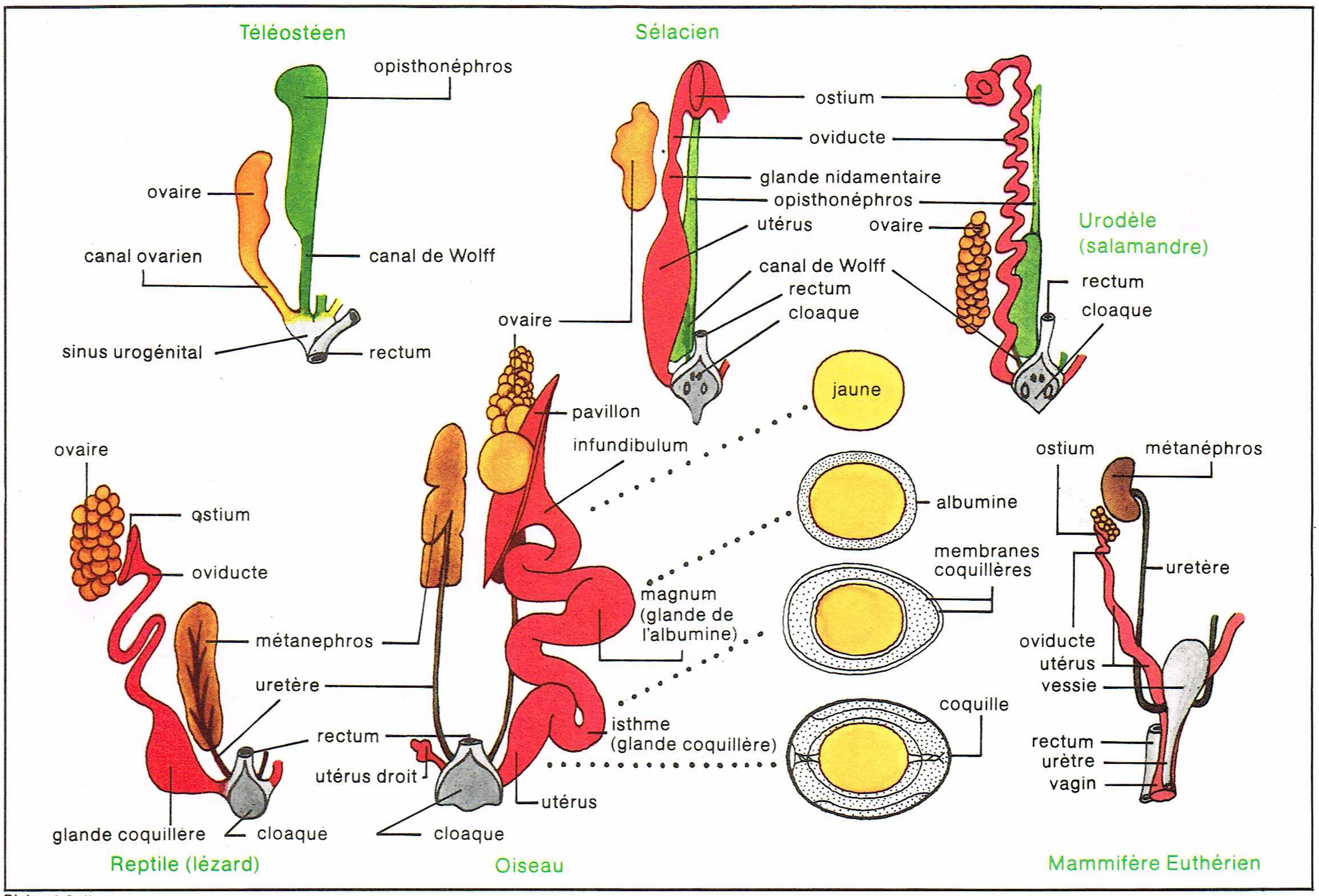

Richard Colin

▲ ***Gonades et voies génitales*** **femelles** ***chez divers Vertébrés (vues ventrales) [pour l'Oiseau, d'après Beaumont].***

lidés et Murénidés femelles, ces voies génitales n'existent pas ; les gamètes passent du cœlome à l'extérieur par des entonnoirs péritonéaux provenant d'un cloisonnement secondaire du cœlome et s'ouvrant à l'extérieur entre l'anus et l'orifice urinaire.

Voies génitales mâles

Tous les autres Gnathostomes mâles ont conservé les connexions entre les testicules, les reins et les uretères primaires. Chez les Anamniotes, le mésonéphros étant le rein fonctionnel, le canal de Wolff assure à la fois l'évacuation de l'urine et celle des gamètes mâles. Cependant, chez les Chondrichthyens et les Urodèles, les voies urinaires tendent à se séparer du canal de Wolff, qui devient, fonctionnellement, un véritable spermiducte (comme chez les Amniotes). Cette connexion des canalicules du *rete* avec les néphrons du mésonéphros peut ou non faire perdre à ce dernier ses fonctions urinaires.

Chez les Amniotes, le mésonéphros n'est plus fonctionnel chez l'adulte. Quelques tubules connectés au *rete* forment les canaux efférents du testicule. Le canal de Wolff s'hypertrophie ; sa partie antérieure se contourne et devient glandulaire, formant l'épididyme, alors que sa partie postérieure constitue le canal déférent.

Voies génitales femelles

Dès leur arrivée dans la cavité abdominale, les ovules passent dans le canal de Müller, ou oviducte, qui s'ouvre par un pavillon cilié (ostium) au voisinage immédiat de la gonade. Sur le trajet des deux oviductes, dont l'extension est variable selon les espèces et selon l'état physiologique des femelles, on distingue des portions différenciées, qui n'ont pas la même fonction chez tous les Gnathostomes et qui sont appelées « utérus » et « vagin » par simple analogie avec les Mammifères.

Les canaux de Müller sont donc parallèles aux canaux de Wolff, lesquels disparaissent chez les Amniotes puisqu'ils n'y ont plus de fonction urinaire. L'origine de ces canaux est encore mal connue ; ils dérivent peut-être des canaux de Wolff, en particulier chez les Sélaciens. Leur débouché se fait soit directement au-dehors (chez les Poissons), soit dans un cloaque, carrefour des voies digestives, urinaires et génitales.

— Chez les *Chondrichthyens,* le canal de Müller différencie une *glande nidamentaire* en deux parties, sécrétant respectivement l'albumine et la coque qui entoure l'œuf.

— Chez les *Amphibiens,* il devient très long et contourné chez la femelle mûre. Le « tube » sécrète la gangue muqueuse qui entoure les œufs ; l' « utérus », court et large, permet leur stockage temporaire.

— Chez les *Oiseaux,* seul le canal gauche est développé ; il se différencie en *magnum glandulaire* qui sécrète l'albumine, *isthme* qui élabore la membrane coquillière en deux feuillets et *utérus* qui sécrète une solution saline doublant le volume de l'albumine et dépose la coquille calcaire. Celle-ci durcira à l'air libre.

— Chez les *Mammifères,* il se différencie en : une *trompe de Fallope,* qui recueille les gamètes, un utérus, qui assure l'implantation de l'embryon, et un vagin, ouvert dans le sinus urogénital et qui permet l'intromission du pénis.

- Chez les *Monotrèmes,* les canaux de Müller restent indépendants et débouchent séparément dans le sinus urogénital, qui joue le rôle de vagin lors de l'accouplement.
- Chez les *Marsupiaux,* ils entrent en contact dans le plan sagittal par une partie de leurs portions vaginales, qui peuvent fusionner. Les vagins très développés forment chacun un cul-de-sac vaginal (ces culs-de-sac s'affrontent et donnent le cul-de-sac vaginal médian, dont la cloison médiane peut ou non disparaître) et un vagin latéral étroit, débouchant dans le sinus urogénital. Chez la plupart des Marsupiaux, le fœtus passe directement du cul-de-sac médian au sinus urogénital, selon un processus complexe (résorption de la paroi).
- Chez les *Euthériens,* les portions vaginales fusionnent en un vagin impair ; selon les variations dans la fusion des portions utérines, on distingue : utérus duplex

▶ *Voies génitales de Mammifères : A, vue dorsale chez un Monotrème, un Marsupial et un Euthérien (d'après D. Webster et M. Webster); B, vue ventrale des différents types d'utérus chez les Euthériens (d'après Raynaud).*

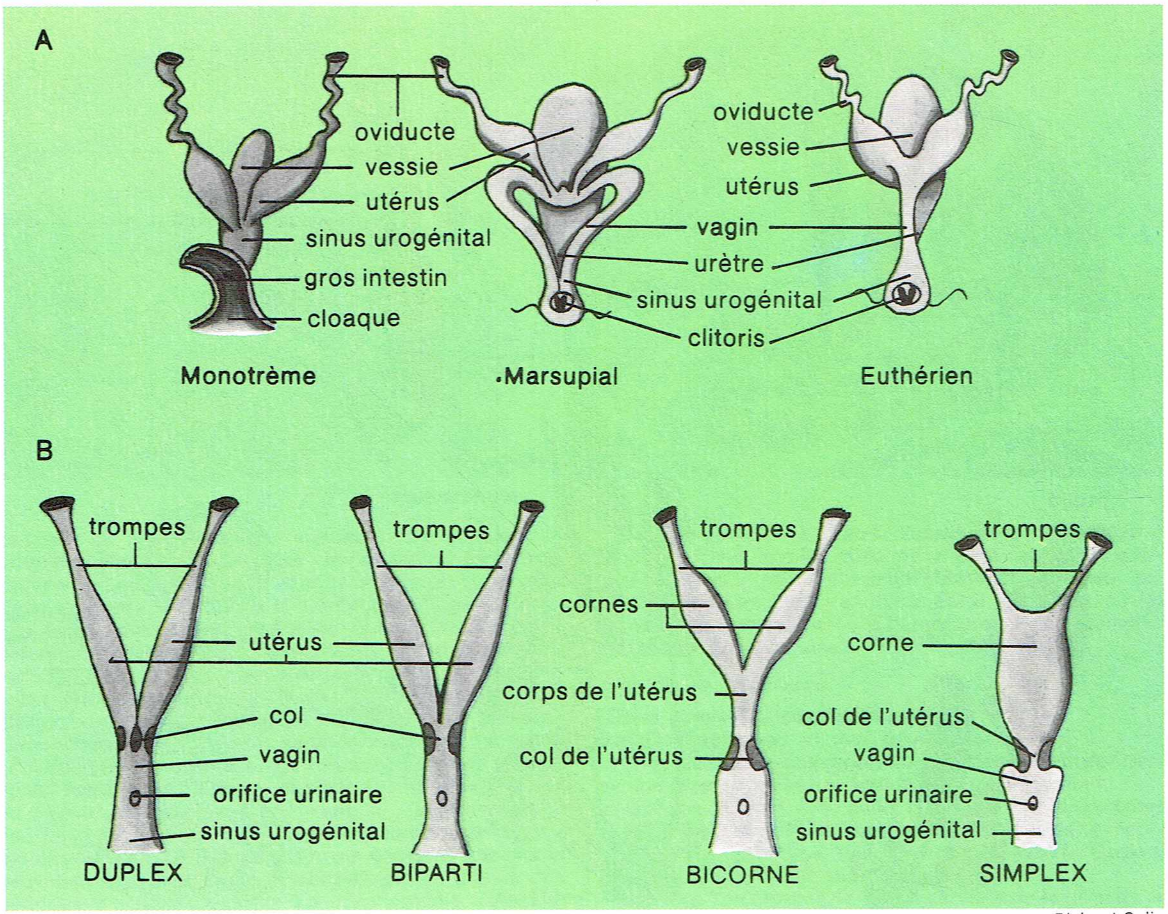

Richard Colin

▼ *Coupe transversale d'utérus de lapine en phase lutéinique : la musculeuse est puissante et la muqueuse est transformée en dentelle utérine par l'énorme prolifération de l'épithélium doublé d'un chorion très vascularisé.*

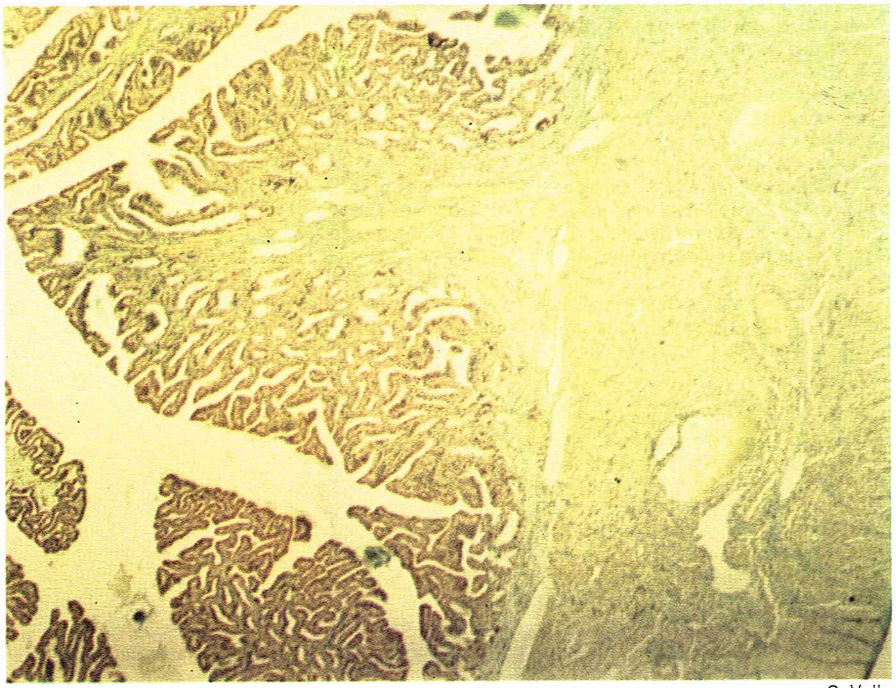

G. Volle

(lapine, rate), utérus biparti (hamster, porc), utérus bicorne (Artiodactyles, Périssodactyles, Carnivores, Cétacés) et utérus simplex (Primates, dont la femme).

Le cycle menstruel de la femme et sa régulation neuro-endocrine

Chez la femme, le cycle menstruel est de 28 jours. Il ne cesse que pendant la grossesse et la lactation. Au début du cycle, une hormone hypophysaire follico-stimulante (FSH) provoque le développement d'un follicule ovarien dont les cellules folliculeuses, et les cellules thécales qui l'entourent, produisent l'œstradiol (œstrogène). Celui-ci stimule alors l'hypothalamus, qui sécrète une hormone, le LF-RF (LH et FSH releasing factor), lequel déclenche la sécrétion de la FSH et d'une autre hormone hypophysaire, l'hormone lutéinisante (LH). Ces hormones provoquent la ponte ovarienne. Le corps jaune qui se développe alors, au cours de la phase lutéale, sécrète à son tour de l'œstradiol mais aussi de la progestérone. Ces deux hormones permettent la transformation profonde de la muqueuse utérine (prolifération de l'épithélium utérin et de ses glandes, développement considérable de la vascularisation), prête alors à recevoir l'œuf éventuellement fécondé.

Si l'œuf est fécondé, il va produire une hormone chorionique gonadotrope qui stimule le corps jaune et sa sécrétion de progestérone, permettant le développement de l'embryon et du placenta. Au cours de la grossesse, la plus grande partie des œstrogènes est d'origine placentaire. Ils proviennent de la transformation d'une préhormone, synthétisée par les glandes surrénales de la mère et du fœtus. Cette molécule et son produit de transformation au niveau du foie sont transférés dans le placenta, où ils sont transformés en œstradiol et œstriol (autre œstrogène), qui sont alors sécrétés par le placenta.

Si la fécondation n'a pas lieu, la progestérone et l'œstradiol de la phase lutéale freinent la production de LF-RF, déclenchant ainsi la régression du corps jaune. Privé d'hormone, l'endomètre utérin va bientôt se délabrer (menstrues, ou règles).

Il existe donc deux types d'hormones sexuelles. Certaines, sécrétées par les ovaires, sont des stéroïdes (œstradiol, œstriol, progestérone) agissant sur toutes les structures du système, dont elles contrôlent le développement et le fonctionnement; elles sont responsables de la différenciation des caractères sexuels secondaires et du comportement sexuel. D'autres protéines, sécrétées par l'hypophyse, permettent le développement des gamètes et la synthèse des hormones stéroïdes. Leur sécrétion est contrôlée par l'hypothalamus (situé à la base du cerveau). C'est sur lui que s'exerce le rétro-contrôle *(feed-back)* des hormones stéroïdes, dont l'activité est donc intégrée au niveau le plus élevé de l'individu.

B. Graf

◀ **Cellules de Purkinje** *du cervelet de souris : on observe la cellule nerveuse, bipolaire, avec un axone peu visible et un dendrite très richement arborisé dans un plan (méthode de Cox-Molinov, dérivée de la méthode de Golgi).*

▼ *Schématisation* **d'un neurone multipolaire :** *CC, corps cellulaire et dendrites; SC, portion de l'axone située dans le système nerveux central; NP, portion située dans le nerf périphérique; dn, dendrites; cn, corps de Nissl; nu, nucléole du noyau; co, cône d'implantation; gm, gaine de myéline; cl, collatérales; ax, axone; gs, gaine de Schwann; sr, étranglement ou nœud de Ranvier; pm, plaque motrice; fm, fibre musculaire.*

SYSTÈME NERVEUX DES VERTÉBRÉS

Le système nerveux est un immense réseau de communications formé par des millions (plusieurs billions chez l'homme) de cellules spécialisées; ce réseau comporte ses récepteurs, son appareil de transmission, ses relais, ses centres et ses effecteurs. Son organisation et son fonctionnement sont extrêmement complexes et nous ne pourrons ici en donner qu'une idée et suivre les grandes lignes de son évolution à travers les Vertébrés qui conduit à un réseau plus centralisé par télencéphalisation chez les Mammifères.

L'unité structurale et fonctionnelle du tissu nerveux est le *neurone,* c'est-à-dire la cellule nerveuse et ses prolongements : l'axone et les dendrites. Les neurones sont enchevêtrés, mais cependant individualisés ainsi que le pensait Cajal; d'innombrables jonctions s'établissent entre eux au niveau des synapses, mais seulement par contiguïté, les espaces intercellulaires au niveau des zones de jonction étant de l'ordre de 200 Å. Les neurones entrent ainsi en relation non seulement entre eux, mais aussi avec des cellules sensorielles réceptrices, des fibres musculaires et des cellules glandulaires. Entre les neurones, un feutrage de cellules de soutien de plusieurs types, assurant la nutrition, constitue la *névroglie.*

Le neurone

Embryologie du tissu nerveux

Nous n'en donnerons qu'un bref aperçu. Les cellules épithéliales du tube neural se multiplient et donnent origine aux cellules nerveuses ainsi qu'aux cellules de la névroglie. Les cellules des crêtes neurales donnent naissance aux cellules ganglionnaires.

Le neuroblaste indifférencié, apolaire, se transforme en neuroblaste bipolaire, puis unipolaire (lequel donne l'axone), qui devient multipolaire par poussée de dendrites; il constituera le neurone, dont l'axone s'allonge, s'enveloppe d'une gaine de myéline et, souvent, quitte les centres nerveux.

Le contingent total de cellules nerveuses se constitue pendant la vie fœtale. Ces cellules ne se divisent pas, mais le corps cellulaire exerce un rôle trophique (synthèse de protéines) sur les prolongements, qui peuvent ainsi régénérer.

Structure du neurone

Le **corps cellulaire,** ou **soma,** présente des formes variables; il est souvent de grande taille et possède un noyau arrondi, avec un gros nucléole et un péricaryon, cytoplasme qui renferme des formations particulières :

— Les *neurofibrilles,* plus ou moins enchevêtrées, sont des agrégations de neurofilaments qui se poursuivent dans les prolongements cellulaires;

— Les *corps de Nissl* ont, au microscope optique, l'aspect de granulations ou d'amas plus ou moins denses qui se modifient suivant l'état physiologique des cellules. Le microscope électronique montre qu'il s'agit de *cisternae* de réticulum endoplasmique, parallèles, et de particules de ribonucléoprotéines. Au niveau du réticulum a lieu une synthèse de protéines, lesquelles sont envoyées ensuite progressivement dans l'axone.

Les **prolongements** sont de deux types :

— Les *dendrites,* plus ou moins nombreux, sont des ramifications généralement courtes et buissonnantes, souvent épineuses, et qui, au total, occupent une aire considérable. Ils contiennent, outre des corps de Nissl et des mitochondries, de longs microtubules parallèles, ou neurotubules, ainsi que quelques neurofilaments.

— L'*axone,* toujours unique, est généralement plus long et plus fin que les dendrites; il naît par un cône d'implantation, prolongement conique du péricaryon dépourvu de corps de Nissl; il peut émettre des collatérales, elles-mêmes ramifiées. Les axones de la plupart des cellules nerveuses peuvent être identifiés par la présence de la myéline qui les entoure.

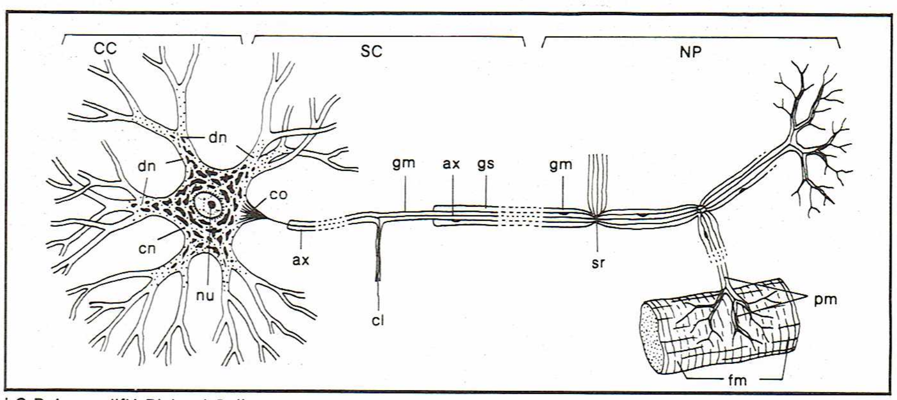

I.G.D.A., modifié Richard Colin

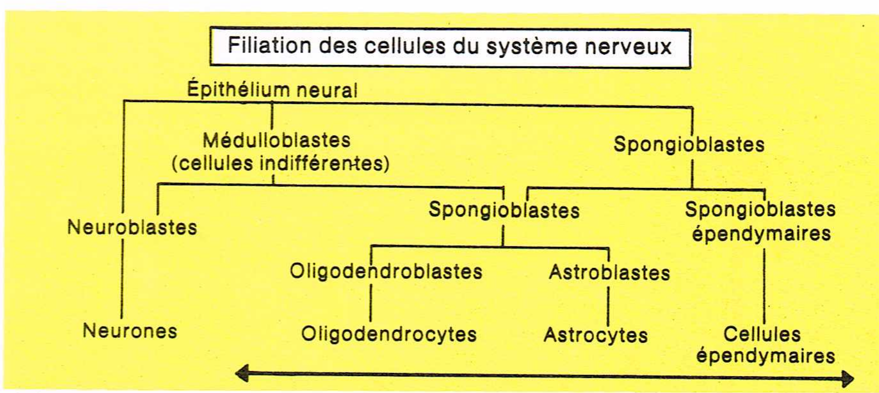

▲ *Tableau de l'embryologie des cellules nerveuses.*

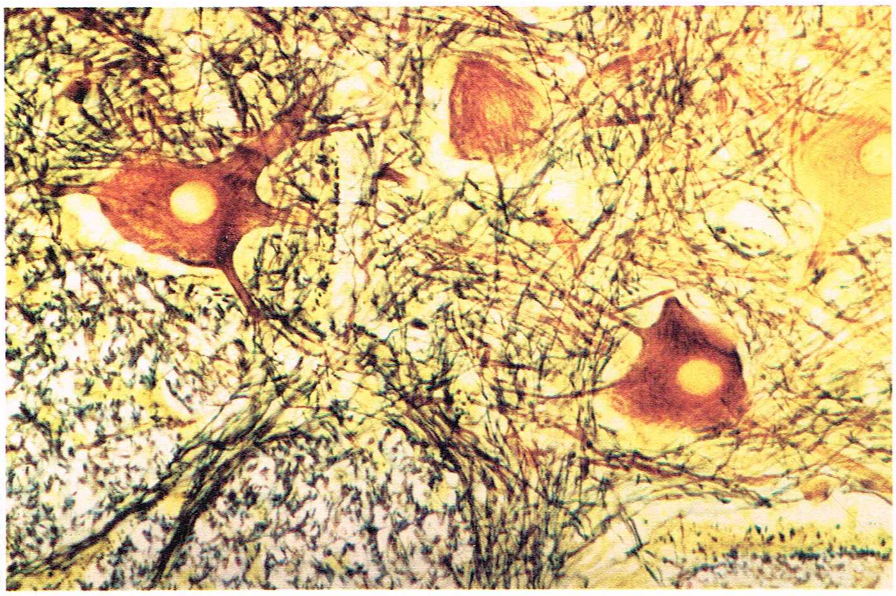

M.-J. Thillard

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *A gauche,* **cellules nerveuses multipolaires** *(un axone, plusieurs dendrites) de la corne ventrale de la moelle épinière de chat; l'imprégnation argentique par la méthode de Cajal met en évidence les neurofibrilles enchevêtrées que renferme le cytoplasme. A droite,* **cellules pyramidales,** *typiques du cortex.*

Diversité des neurones

L'aspect des neurones, la forme du soma et l'importance des dendrites varient selon les régions du système nerveux ; certains sont très typiques : les cellules pyramidales du cortex, les cellules de Purkinje du cervelet, les cellules multipolaires ou cellules étoilées de la moelle épinière, les cellules pseudo-unipolaires des ganglions.

Au point de vue physiologique, on distingue des neurones *périphériques,* sensibles ou moteurs, et des neurones *centraux,* ou *interneurones.* Les prolongements sont donc en rapport soit avec des cellules réceptrices pour les dendrites périphériques, soit avec des cellules effectrices pour les axones périphériques, soit encore avec d'autres neurones, l'axone d'un neurone s'articulant sur le corps cellulaire ou sur les dendrites d'un ou de plusieurs autres neurones. Dans la mesure où un axone peut émettre de nombreuses collatérales, on comprend que les relations interneuronales soient extrêmement touffues et complexes.

Les terminaisons nerveuses périphériques sont arborisées et peuvent être différenciées en pinceaux, boutons terminaux et réseaux.

Fibres nerveuses et gaines

Bien que désignant théoriquement l'axone entouré de ses gaines, le terme *fibre nerveuse* tend à se confondre avec celui de prolongement axonique ou dendritique, que celui-ci soit muni ou non de gaines. En effet, dans la substance grise des centres, les fibres ne sont pas entourées de gaines et, d'autre part, les portions des dendrites périphériques proches de la cellule d'origine ont les mêmes propriétés histologiques que les fibres axoniques.

▼ *Faisceaux de fibres nerveuses, coupés transversalement ou longitudinalement et groupés en un nerf, dans un cou de souris; dans chaque faisceau, entouré d'un périnèvre conjonctif (en bleu), on distingue des fibres et les noyaux des cellules de la gaine de Schwann.*

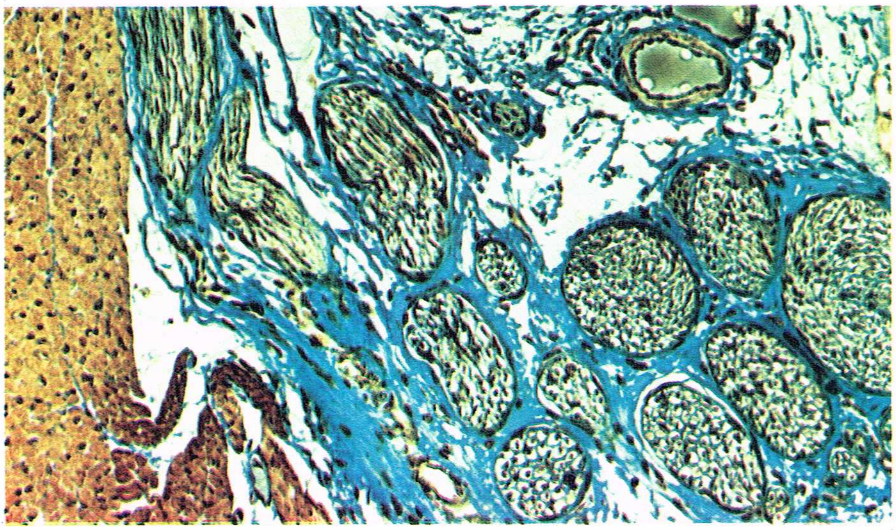

M.-J. Thillard

Si l'on examine la structure d'une fibre typique du système périphérique cérébro-spinal, elle apparaît constituée d'un axone entouré, dès son origine et presque jusqu'à son extrémité, d'une *gaine de myéline* et d'une enveloppe, ou *gaine de Schwann.*

Ces gaines sont discontinues ou interrompues par des étranglements ou *nœuds de Ranvier,* qui déterminent des segments successifs. En effet, la gaine de Schwann est formée de cellules aplaties équivalentes de cellules névrologiques, les *cellules de Schwann,* recouvrant chacune un segment. Au niveau des étranglements, l'axone n'est recouvert que par des prolongements de ces cellules.

La gaine de myéline, située entre l'axone et la gaine de Schwann, n'apparaît généralement sur les coupes histologiques que comme un espace vide ; elle est en effet de nature lipidique et se dissout par les procédés ordinaires de déshydratation utilisés pour les observations en microscopie optique, sauf après fixation au tétroxyde d'osmium. La microscopie électronique a révélé sa structure et montré qu'elle dérive de la cellule de Schwann.

On peut partir pour la comprendre d'une fibre non myélinisée, comme celle des neurones sympathiques : la cellule de Schwann encercle l'axone, formant un revêtement autour de lui ; le contact bord à bord de sa double membrane, réfléchie autour de l'axolemme, s'appelle le *mésaxone.* Dans les fibres myélinisées du système périphérique, à partir du mésaxone, la membrane plasmique de la cellule schwannienne s'enroule en spirale autour de l'axone et constitue une série de lamelles lipoprotéiques.

Par endroits, la gaine de myéline semble interrompue par des fentes obliques, les *incisures de Schmidt-Lantermann.* Il s'agit en réalité de zones où les lamelles de myéline sont écartées les unes des autres, les espaces étant occupés par du cytoplasme schwannien.

La myéline est responsable de la couleur blanche des faisceaux de fibres.

Dans la substance blanche des centres, les fibres ont une gaine de myéline, mais les cellules de Schwann sont remplacées par certaines cellules névrogliques, les *oligodendrocytes.*

Les fibres s'unissent en faisceaux qui sont entourés d'une gaine conjonctive, le *périnèvre,* et qui peuvent se grouper en nerfs.

Synapses

Les terminaisons axoniques entrent en relation :

— soit avec d'autres neurones ; les jonctions sont des synapses *interneuronales, axosomatiques* (entre l'axone et le soma) ou *axodendritiques* (entre l'axone et les dendrites) ;

— soit avec des fibres musculaires ou tendineuses, par des synapses *neuromusculaires* ou *neurotendineuses.* Les jonctions sensorineurales entre cellules réceptrices sensorielles et terminaisons dendritiques sont mal connues.

Une synapse interneuronale comporte :

— la région présynaptique, terminaison de l'axone, renflée en un bouton terminal dans lequel, outre les mitochondries, se trouvent de nombreuses vésicules synaptiques de 300 à 600 Å de diamètre ;

— la région postsynaptique, sur le soma d'un neurone ou sur un dendrite.

Ces deux parties sont séparées par un espace d'environ 200 Å, riche en glycoprotéines et occupé par des structures inconstantes, probablement responsables de l'adhérence des deux membranes synaptiques.

A certains endroits, la membrane postsynaptique est épaissie, et, en regard, des sortes de cônes de substance dense aux électrons sont attachés par leur base à la membrane présynaptique et associés à certaines vésicules synaptiques : ce sont les zones actives.

Les synapses neuromusculaires ont une disposition un peu plus compliquée, car la fibre musculaire reçoit l'ensemble de l'arborisation terminale d'un rameau d'axone ; chez les Mammifères, ces terminaisons sont logées dans des gouttières déprimant la surface de la fibre musculaire, l'ensemble formant la plaque motrice.

Fonctionnement du neurone

La propriété capitale des synapses est qu'elles ne peuvent transmettre l'excitation que dans le sens région présynaptique-région postsynaptique d'un autre neurone ou d'un muscle. Il y a donc une polarisation dynamique des prolongements nerveux, et l'influx est conduit toujours dans le même sens. C'est ainsi que, physiologiquement, se distinguent les deux types de prolongements du neurone : les dendrites reçoivent l'excitation et la répercutent vers le corps du neurone, dans le sens cellulipète, alors que l'axone a une conduction cellulifuge et conduit l'excitation vers une autre cellule.

Des expériences consistant à exciter un axone après section montrent que la fibre elle-même est capable de conduire l'influx dans les deux sens ; sa polarisation dynamique tient donc uniquement au sens dans lequel fonctionnent les synapses ; ceux-ci sont ainsi responsables du fonctionnement cohérent du système nerveux.

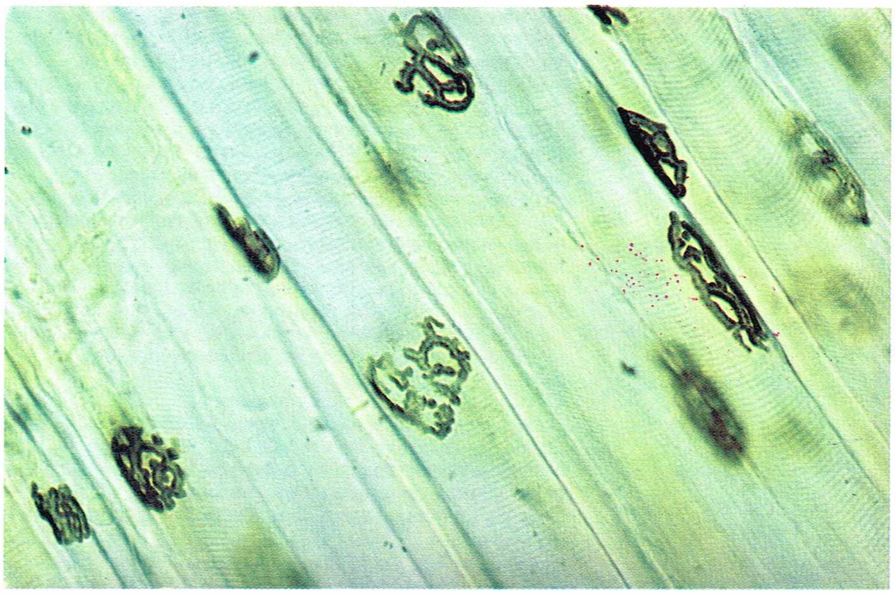

M.-J. Thillard

Formation de l'influx nerveux

La formation de l'influx nerveux repose sur le fait qu'il existe dans le neurone (comme dans toutes les cellules vivantes) une différence de potentiel entre les faces interne et externe de la membrane plasmique, due aux différences de concentrations ioniques (notamment en ions Na^+ et K^+) entre le cytoplasme et le milieu extracellulaire. Ce *potentiel de membrane,* ou *potentiel de repos,* est négatif, compris entre —60 et —90 millivolts, ce qui signifie que l'intérieur de la cellule est négatif par rapport à l'extérieur. La membrane elle-même, ravitaillée en énergie à partir des organites du cytoplasme du neurone, contrôle la diffusion des ions dont dépend le potentiel.

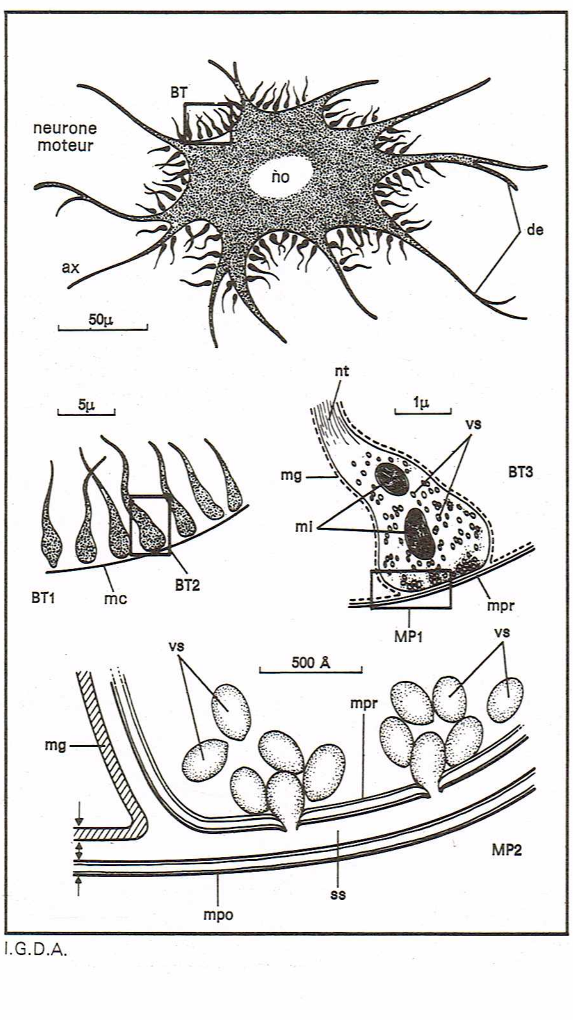

I.G.D.A.

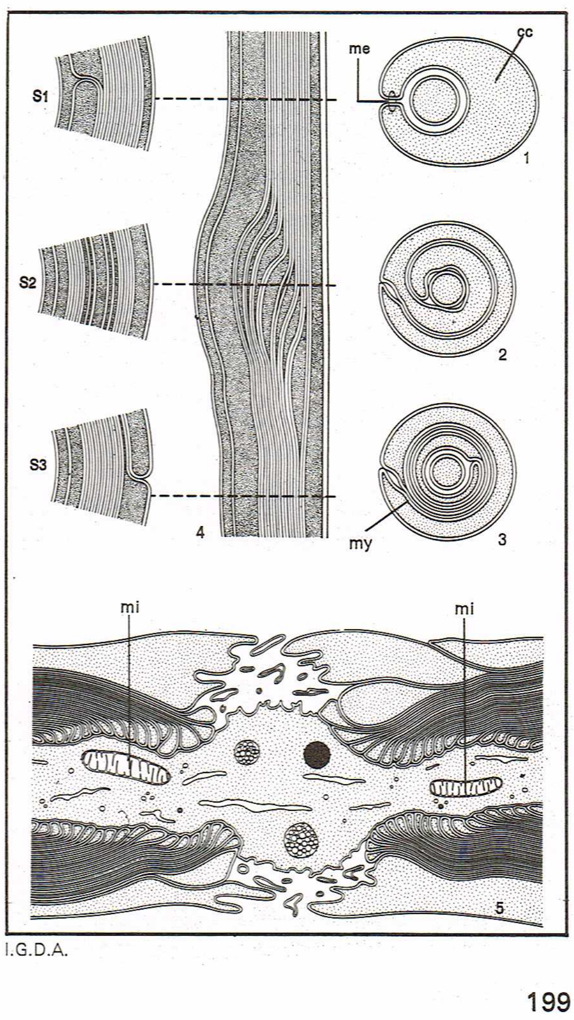

I.G.D.A.

▲ Localisations histochimiques de l'acétylcholinestérase (méthode de Koelle) au niveau des plaques motrices sur un muscle strié de rat.

◄ A gauche, schéma de la jonction synaptique interneuronale ; no, noyau ; ax, axone ; de, dendrites ; de nombreux boutons terminaux (BT) établissent des synapses avec le corps cellulaire ou soma du neurone, et avec ses dendrites ; BT_1, grossissement × 10 de BT (mc, membrane cytoplasmique du neurone) ; BT_3, grossissement d'un bouton terminal (BT_2 × 6) : on observe les mitochondries (mi), les neurotubules (nt) de l'axone, les vésicules synaptiques (vs) qui s'accumulent au niveau de la membrane présynaptique (mpr) et la membrane gliale (mg) : MP_2, grossissement de MP_1 : on observe les vésicules synaptiques (vs) prêtes à s'ouvrir dans l'espace synaptique (ss) et les membranes présynaptique (mpr) et postsynaptique (mpo). A droite : 1, 2, 3, schémas illustrant la formation de la gaine de myéline ; cc, cytoplasme de la cellule de Schwann ; me, mésaxone ; my, myéline ; 4, gaine de myéline au niveau d'une incisure de Schmidt-Lanterman, en coupe longitudinale ; S_1, S_2, S_3, coupes transversales correspondant à différents niveaux ; 5, schéma d'un axone et de ses gaines au niveau d'un étranglement de Ranvier : on observe les prolongements des cellules de Schwann au-dessus de la partie non myélinisée de l'axone ; mi, mitochondries.

Lorsque la fibre est soumise à une excitation électrique suffisamment intense pour faire tomber le potentiel de membrane au-dessous d'un seuil de l'ordre de —40 à —20 mV, on observe une inversion brutale du potentiel de membrane (ce qui est conforme à la loi du tout ou rien), qui prend alors une valeur positive de +40 mV, puis revient à sa valeur initiale : c'est le *potentiel d'action;* ce phénomène dure quelques millisecondes.

La variation du potentiel de membrane est due au fait que l'excitation, en dépolarisant la membrane cellulaire, entraîne une augmentation de sa perméabilité aux ions, lesquels peuvent ainsi pénétrer dans la cellule; leur entrée elle-même, en diminuant le potentiel de membrane, favorise la pénétration de nouveaux ions, d'où l'inversion du potentiel; le retour à la normale se fait par une sortie massive d'autres ions, et les équilibres ioniques se rétablissent progressivement.

Conduction de l'influx nerveux

Le potentiel d'action qui s'est manifesté en un point donné se propage très rapidement le long de la fibre, à une vitesse de plusieurs dizaines de mètres par seconde; cette vitesse de propagation, variable, est plus grande chez les animaux à sang chaud et dans les fibres de plus gros diamètre.

Transmission de l'influx nerveux

L'influx nerveux ainsi propagé parvient à l'extrémité de la fibre; son passage dans une cellule voisine a lieu grâce au mécanisme des synapses, qui a d'abord été étudié au niveau des synapses neuromusculaires, plus accessibles. Il s'avère que la dépolarisation engendrée dans la fibre musculaire par l'arrivée d'un influx dans l'arborisation terminale de l'axone est insuffisante pour déclencher le potentiel d'action musculaire et que, d'autre part, celui-ci n'apparaît qu'après un certain délai. La transmission de l'influx nerveux entre le neurone et la fibre musculaire nécessite donc la mise en jeu d'un *médiateur chimique :* c'est l'*acétylcholine*. Libérée par l'extrémité du neurone, celle-ci dépolarise la membrane postsynaptique au niveau de la plaque motrice, y provoquant un *potentiel de plaque;* lorsque le potentiel de plaque atteint une certaine valeur, il déclenche le *potentiel d'action musculaire,* qui se propage à toute la fibre musculaire et détermine la contraction. Mais étant donné la rapidité du fonctionnement, le médiateur doit donc très vite être inactivé pour éviter sa diffusion et la tétanisation du muscle qui rendraient toute transmission ultérieure impossible. C'est ici qu'intervient l'*acétylcholinestérase,* enzyme localisée à la face externe de la membrane postsynaptique.

L'acétylcholine est stockée principalement dans les vésicules synaptiques; les mesures électrophysiologiques ont montré qu'elle était libérée de façon quantique. Il est donc logique de penser que chaque vésicule correspond à un quantum d'acétylcholine, mais le mécanisme de la libération de celle-ci n'est pas définitivement établi; elle doit avoir lieu au niveau des zones actives de la membrane présynaptique.

L'acétylcholine n'est pas le seul médiateur de transmission de l'influx. La *noradrénaline* est connue dans le système nerveux autonome sympathique; son rôle est antagoniste de celui de l'acétylcholine, mais son mode d'inactivation est différent, une grande partie des molécules inemployées étant capturée et stockée dans les fibres adrénergiques. Elle entre aussi très probablement en jeu dans certaines synapses du système nerveux central, avec un certain nombre d'autres substances actuellement à l'étude.

Dans le système nerveux central, le monde des synapses interneuronales est extrêmement divers et complexe. En effet, la dépolarisation de la membrane est faible et la stimulation d'un neurone ne peut être obtenue que par le jeu simultané d'un nombre suffisant de synapses pour obtenir une dépolarisation supérieure au seuil d'excitation; or, dans ce jeu, interviennent à la fois les effets excitateurs et inhibiteurs que reçoit le neurone, lancés par deux types de synapses, excitatrices et inhibitrices, qu'on ne sait actuellement pas distinguer les unes des autres. Excitation et inhibition sont liées aux propriétés spéciales de perméabilité de certaines régions de la membrane du neurone; la nature des médiateurs pourrait être très variée.

Le mécanisme d'inhibition a été bien étudié pour les muscles antagonistes (par exemple, le biceps et le triceps) : la contraction d'un muscle entraînant automatiquement l'inhibition de l'autre. Il y a stimulation d'un récepteur de tension dans le muscle qui se contracte; cela entraîne l'excitation d'un neurone inhibiteur, qui bloque un neurone moteur du muscle antagoniste par hyperpolarisation de sa membrane postsynaptique.

Structure générale du système nerveux

Si les neurones constituent des unités structurales et fonctionnelles, ils sont cependant intégrés au sein d'un système organisé, fondé sur des structures anatomiques. Les corps cellulaires sont groupés dans des centres nerveux hiérarchisés; leurs prolongements peuvent soit rester dans ces centres et se grouper en faisceaux, soit sortir des centres et se grouper en nerfs conducteurs.

L'organisation anatomique et fonctionnelle du système nerveux comporte des *récepteurs,* des *centres* (névraxe et ganglions), des *conducteurs* et des *effecteurs*. Elle se répartit en deux ensembles complémentaires : le *système cérébro-spinal,* chargé des fonctions de relation avec le monde extérieur, et le *système autonome,* qui régit la vie végétative.

RÉCEPTEURS
- Terminaisons dendritiques libres ou encapsulées
- Cellules sensorielles isolées ou groupées en organes des sens

CENTRES
* Développés à partir du tube neural embryonnaire = névraxe
- Moelle épinière
- Encéphale
  - Myélencéphale } Rhombencéphale
  - Métencéphale } Rhombencéphale
  - Mésencéphale
  - Diencéphale
  - Télencéphale

* Développés à partir de cellules des crêtes neurales et de placodes ectodermiques
- Ganglions spinaux
- Ganglions crâniens
- Ganglions autonomes

CONDUCTEURS
- Nerfs spinaux
- Nerfs crâniens
- Fibres autonomes

EFFECTEURS
- Muscles striés ou lisses } innervés par des terminaisons axoniques
- Tissus glandulaires } innervés par des terminaisons axoniques

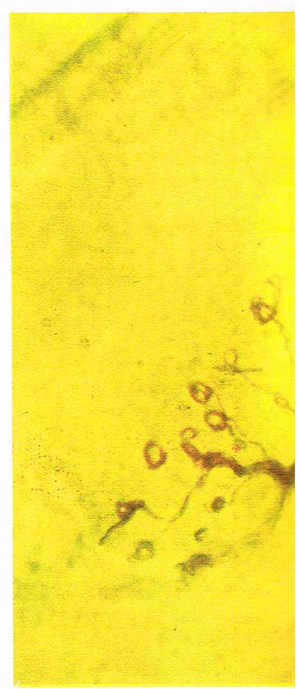

▶ *A gauche, tableau de l'organisation anatomique et fonctionnelle du système nerveux. A droite, les terminaisons nerveuses périphériques motrices sont arborisées et se différencient souvent en boutons terminaux; une fibre musculaire striée reçoit l'ensemble de l'arborisation d'un rameau et la zone de jonction constitue une plaque motrice (ici de Sélacien).*

Le névraxe est entouré par les méninges, qui le nourrissent. On distingue une ectoméninge, la *dure-mère,* contre la face profonde du crâne ou du canal rachidien, et une endoméninge, contre le névraxe, subdivisée chez les Mammifères en *pie-mère,* adhérant au système nerveux, et *arachnoïde,* réseau irrégulier conjonctif et vasculaire. Le névraxe est creusé de cavités qui communiquent : les ventricules cérébraux et le canal épendymaire de la moelle, emplis de liquide céphalo-rachidien.

Organisation des centres

Examinons d'abord la disposition primitive dans le tube neural embryonnaire, constitué autour du canal neural par deux parois épaisses, un plancher mince et un toit résultant de la soudure des deux bourrelets de la gouttière nerveuse ; les parois sont subdivisées en deux moitiés par un sillon longitudinal, ou *sillon limitant.*

Les cellules nerveuses se groupent en colonnes vers le centre, formant la *substance grise ;* les axones se rassemblent en faisceaux, vers l'extérieur, formant la *substance blanche* (sauf les voies courtes qui connectent entre elles les cellules ou les groupes de cellules). Les groupements de cellules forment des associations fonctionnelles. Dans la moitié ventrale par rapport au sillon, ou *lame basale,* les cellules sont motrices ; on y trouve, en particulier, les centres primaires groupant les corps des motoneurones. Dans la moitié dorsale ou *lame alaire,* les cellules ont une destinée sensorielle, mais le névraxe ne contient que des centres d'association, les cellules des neurones sensitifs primaires étant rassemblées dans des ganglions extérieurs au névraxe.

Ces éléments se répartissent dans les différents étages du névraxe de la façon suivante :

— Dans la *moelle épinière,* les cellules des lames alaires et basales de la substance grise conservent à peu près l'arrangement primitif dorso-ventral, mais forment des colonnes discontinues, dans lesquelles on peut distinguer des centres primaires et des centres d'association affectés à des fonctions déterminées. Les faisceaux associatifs sont longitudinaux, formant les cordons de la substance blanche.

— Dans le *tronc cérébral* (l'ensemble du cerveau moins le cervelet et les hémisphères cérébraux), le toit et le plancher sont plus ou moins épaissis, chacune des lames prenant un développement variable ; les faisceaux se disposent dans toutes les directions et coupent la substance grise en une quantité de centres (groupements assez importants) ou de noyaux (groupements plus restreints de cellules), origines des nerfs crâniens moteurs et surtout noyaux d'association. Au niveau du rhombencéphale, la disposition des lames est encore nette ; dans le mésencéphale les deux lames sont bien développées, tandis que dans le diencéphale les dérivés alaires sont plus importants que ceux des lames basales.

— Les *hémisphères cérébraux,* qui constituent la majeure partie du télencéphale, ainsi que le *cervelet* se développent à partir des lames alaires seules. Le cortex, couche de substance grise externe, peut être considéré comme surajouté ; il ne présente pas un développement en stricte continuité avec celui des lames ; les faisceaux de fibres formant la substance blanche unissent ses centres aux centres sous-jacents.

Dans la substance grise, on peut établir une hiérarchie des centres et les ordonner selon leurs fonctions :

▼ ***Tableau de la hiérarchie des centres.***

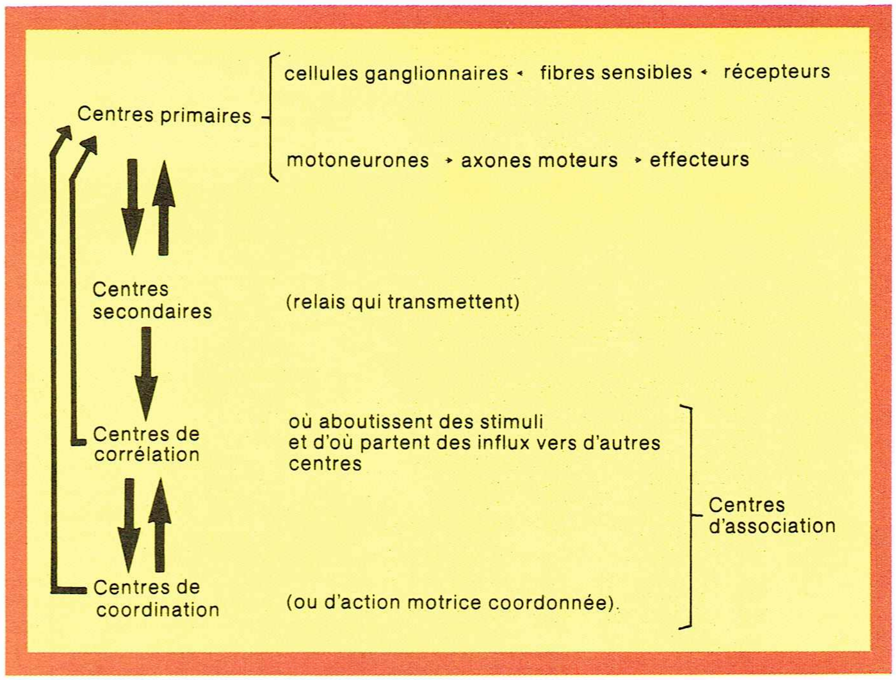

M.-J. Thillard

Les faisceaux de fibres sont fonctionnellement de trois types : *ascendants,* ils conduisent l'influx vers les centres supérieurs ; *descendants,* ils le transmettent des centres supérieurs vers les centres symétriques primaires d'origine ; *transversaux,* ils unissent deux centres ; si les deux centres (d'origine et terminal) sont différents, le faisceau accomplit une décussation.

Les faisceaux de fibres en dehors du système nerveux central s'unissent en *nerfs,* le plus souvent mixtes, groupant des fibres motrices et des fibres sensibles.

Composants fonctionnels

La notion de composants fonctionnels est fondamentale pour la compréhension de l'organisation du système nerveux ; elle désigne un ensemble d'éléments nerveux affectés à une fonction.

Il faut distinguer :

— les composants sensoriels : récepteur - fibres afférentes - centres conducteurs ;

— les composants moteurs : centre - fibres efférentes - effecteur ;

et pour chacun d'eux considérer :

— les systèmes somatiques contrôlant les organes qui permettent de connaître le milieu extérieur ;

— les systèmes viscéraux, contrôlant l'activité des viscères et des dérivés viscéraux.

Il y a donc quatre types de composants fonctionnels : somato-efférents, viscéro-efférents, somato-sensibles, viscéro-sensibles.

Au point de vue de la qualité de la sensibilité, on distingue une *sensibilité protopathique,* diffuse, sans appréciation de la nature de l'excitant, et une *sensibilité épicritique,* consciente.

Du point de vue de l'origine de la sensibilité, on distingue les *sensibilités extéroceptive,* concernant les sensations recueillies au niveau de la peau, *intéroceptive,* provenant des viscères, et *proprioceptive* pour les muscles et tendons.

Dans les centres, les noyaux gris représentent des associations fonctionnelles, sensibles ou motrices. Les nerfs

périphériques, le plus souvent mixtes, groupent des fibres sensibles et motrices appartenant à des composants différents; d'autre part, des fibres affectées à une même fonction peuvent se répartir sur plusieurs nerfs.

Récepteurs

Les récepteurs sensoriels sont chargés d'enregistrer à chaque instant les conditions variables des milieux extérieur ou intérieur. Ils sont capables de répondre à divers stimuli en établissant des influx qui sont transmis par les fibres nerveuses au système nerveux central, où ils sont interprétés comme sensation.

Les récepteurs sont soit des terminaisons de fibres nerveuses, libres ou encapsulées, soit des cellules sensorielles de différents types, accompagnées de cellules de soutien, groupées dans des organes plus ou moins complexes, les organes des sens; les cellules réceptrices sensorielles sont généralement *secondaires,* c'est-à-dire des cellules épithéliales différenciées autour desquelles s'arborisent les terminaisons dendritiques d'un neurone ganglionnaire, sauf dans le cas des cellules olfactives et des cellules visuelles.

Suivant la nature des stimuli que sont capables de percevoir les cellules sensorielles, on distingue différents types de récepteurs : les *mécanorécepteurs,* sensibles à la pression ou aux vibrations de l'air; les *chimiorécepteurs,* sensibles à des substances dissoutes; les *photorécepteurs,* qui transforment la lumière en énergie chimique; les *thermorécepteurs,* sensibles à des variations de température.

Quelle que soit la nature du stimulus, les récepteurs ont la propriété de convertir la forme d'énergie à laquelle ils sont sensibles en énergie électrique déclenchant l'influx nerveux.

Sensibilité viscérale

Sensibilité viscérale générale

Cette sensibilité, intéroceptive, est très mal connue. Les récepteurs ainsi que les voies afférentes pourraient être associés au système nerveux autonome. Ces récepteurs seraient le plus souvent des terminaisons libres (dans les glandes, elles ne peuvent pas se différencier des terminaisons motrices), mais il existe, notamment dans le mésentère, des terminaisons encapsulées.

Sensibilité spéciale gustative

Les sensations gustatives sont recueillies par des *bourgeons du goût.* Ce sont des organes en forme de bulbes d'oignons, enclavés dans un épithélium; dispersés chez les Poissons dans la muqueuse pharyngienne, les barbillons et, parfois, tout le long du corps, ils sont concentrés en papilles gustatives sur la langue chez les Mammifères. Chaque bourgeon gustatif comporte des cellules sensorielles, chimioréceptrices, entourées par des cellules de soutien; les cellules gustatives se terminent par un cil qui se projette dans une petite fossette de l'épithélium s'ouvrant à l'extérieur par un pore très fin.

Les cellules gustatives sont stimulées par un certain nombre de corps solubles dans l'eau venant au contact de la langue et assurent leur discrimination; celle-ci est limitée à quatre modalités qualitatives : sucré, salé, acide, amer.

Sensibilité somatique générale

Récepteurs cutanés

Ils recueillent au niveau de la peau les sensations tactiles, thermiques et douloureuses (sensibilité extéroceptive) et sont de différents types.

Les *récepteurs tactiles,* activés par la déformation mécanique de la peau, sont soit des terminaisons libres, parfois nombreuses (par exemple, dans la cornée), soit des terminaisons annexées aux poils (chez les Mammifères), soit encore des terminaisons encapsulées, enveloppées de lames conjonctives, les corpuscules tactiles.

Les corpuscules de Meissner sont nombreux dans les régions où la sensibilité tactile est forte, en particulier dans les papilles dermiques des doigts; les corpuscules de Pacini, volumineux, sont situés dans les couches profondes de la peau plantaire (mains et pieds) : la terminaison nerveuse s'épanouit au milieu de noyaux d'origine névroglique, disposés en une massue centrale entourée de plusieurs couches fibreuses, concentriques, superposées formant une coque périphérique; des corpuscules de même structure existent dans la peau du bec des Oiseaux aquatiques et dans la langue du pic, et jouent un rôle dans la recherche de la nourriture.

Les *récepteurs thermiques* sont de deux ordres : les uns sont sensibles au froid, les autres au chaud; ce sont souvent des terminaisons libres; ainsi, on distingue dans la paume de la main des points de chaud et des points de froid, ces derniers étant beaucoup plus nombreux; les corpuscules de Krause, terminaisons encapsulées, sont considérés comme des récepteurs sensibles au froid parce qu'on les trouve au niveau des points de froid.

Certains serpents, comme le crotale, ou serpent à sonnette, ont de chaque côté du museau une fossette faciale constituée de deux chambres séparées par une mince membrane dans laquelle s'épanouissent des fibres nerveuses (provenant du trijumeau); ces fossettes sont considérées comme des organes thermosensibles permettant au serpent de détecter l'approche d'un Mammifère ou d'un Oiseau par l'appréciation d'une très légère différence de température.

La sensibilité douloureuse cutanée n'est pas excitée par des stimuli spécifiques; des stimuli de natures très différentes sont capables de provoquer une douleur s'ils sont suffisamment intenses; la douleur peut cependant être indépendante des autres formes de sensibilité.

Propriorécepteurs

Ils sont chargés de recueillir les sensations au niveau des muscles, des tendons et des articulations.

Dans les muscles, les terminaisons, nombreuses, sont simples ou complexes. Certaines forment des spirales autour de la fibre, par exemple dans les muscles oculaires; d'autres, situées principalement près de la jonction des muscles avec les tendons, forment avec quelques fibres musculaires une structure complexe, le fuseau *neuromusculaire :* celui-ci est constitué de fibres musculaires

▼ *A gauche,* corpuscule de Pacini *dans un pancréas de chat : on distingue une terminaison nerveuse dendritique entourée d'une massue centrale névroglique et des lamelles fibreuses concentriques formant une coque périphérique. A droite, représentation schématique d'un* bourgeon du goût : *cse, cellules sensorielles; cso, cellules de soutien.*

M.-J. Thillard

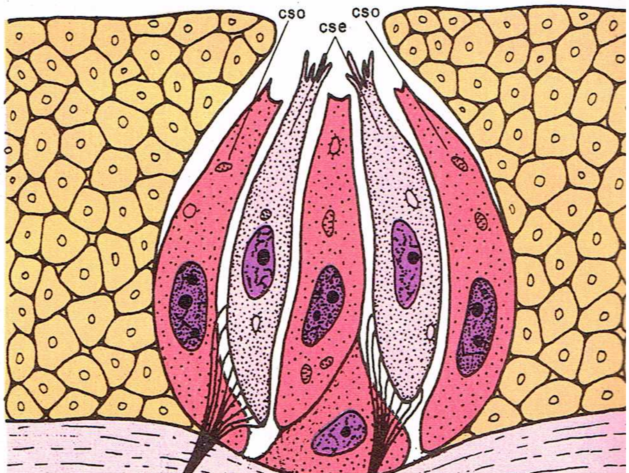

I.G.D.A.

M.-J. Thillard

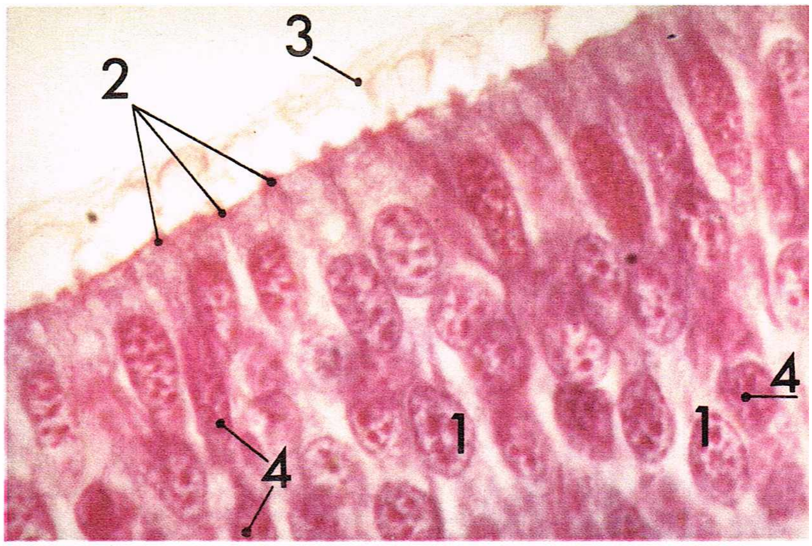

M.-J. Thillard

▲ *A gauche,* **corpuscule de Meissner** *dans la peau de l'extrémité d'un doigt humain. Ces corpuscules sont situés dans les papilles dermiques juste sous l'épiderme; une terminaison nerveuse dendritique spiralée s'insinue entre des cellules névrogliques aplaties entourées d'une capsule conjonctive. A droite, structure histologique de* **l'épithélium olfactif** *dans la cavité nasale d'un Amphibien : on observe des cellules olfactives (1), cellules sensorielles bipolaires munies de prolongements apicaux qui se terminent en surface par des vésicules olfactives (2) et des cils englués dans un mucus (3); entre elles, des cellules de soutien (4).*

modifiées, perdant leur striation et munies de nombreux noyaux, entourées de terminaisons nerveuses annulaires spiralées ou en inflorescence; leur excitation déclenche une activité réflexe; d'autres fibres, très fines, ont pour rôle de réguler la sensibilité du fuseau.

Dans les tendons, existent des terminaisons simples, arborescentes, qui donnent probablement naissance aux sensations douloureuses, et des terminaisons complexes, près de la jonction avec les muscles, les *fuseaux neuro-tendineux,* qui ressemblent aux fuseaux neuromusculaires; en réponse à une augmentation de la tension, leur activité exerce un effet inhibiteur sur les neurones moteurs du même muscle.

Les terminaisons sensibles dans les muscles et les tendons participent à l'activité posturale par répartition du tonus dans la musculature.

Dans les articulations, se trouvent aussi des terminaisons libres et des récepteurs encapsulés.

Le fonctionnement des mécano-récepteurs, tels que les fuseaux neuromusculaires et les corpuscules tactiles, qui transforment un stimulus mécanique, tension ou pression, en courant électrique, a été bien étudié, en particulier sur les corpuscules de Pacini, que l'on peut facilement isoler du mésentère (ils mesurent plusieurs millimètres d'épaisseur).

Si l'on envoie, à l'aide d'un cristal piézo-électrique, un stimulus mécanique mesurable sur un corpuscule de Pacini, entier ou débarrassé de sa coque fibreuse, la réponse est la même; on peut en déduire que c'est bien la terminaison nerveuse elle-même qui est l'élément de transduction, c'est-à-dire capable de transformer la stimulation mécanique (la pression) en courant électrique. Cette terminaison nerveuse sensible, non myélinisée, fonctionne comme les autres tissus excitables, nerfs et muscles. En effet, au repos, il y a un potentiel de membrane négatif dû à une inégale concentration en ions des deux côtés de la membrane. La déformation de cette membrane terminale sous l'effet d'une pression produit une diminution de sa résistance, qui permet le passage des ions et, par conséquent, un renversement du potentiel de repos produisant un courant générateur; celui-ci excite la fibre nerveuse et y déclenche un influx nerveux à partir de l'endroit où elle s'entoure de myéline (c'est-à-dire encore à l'intérieur des corpuscules). Un accroissement de la pression provoque une augmentation de l'intensité du courant générateur, probablement par l'addition des courants produits à différents endroits de déformation. Cette augmentation de l'*intensité* du courant générateur se traduit par l'augmentation de la *fréquence* des influx nerveux propagés le long de la fibre. D'autre part, plus le stimulus est important, plus le nombre de récepteurs excités est grand; ces récepteurs étant généralement groupés et les fibres possédant plusieurs terminaisons, un fort stimulus peut accroître considérablement la fréquence de l'influx transmis aux centres nerveux.

Sensibilité somatique spéciale

Organe olfactif

Les cellules réceptrices sont des cellules nerveuses bipolaires logées au sein d'un neuro-épithélium qui tapisse partiellement les cavités nasales. La portion olfactive ne représente en effet chez les Vertébrés supérieurs à respiration aérienne qu'une petite région au plafond postérieur des fosses nasales, recouvertes par ailleurs d'épithélium respiratoire.

Les cellules sensorielles ont un prolongement apical de nature dendritique qui atteint la surface de l'épithélium et se termine par une vésicule. Celle-ci est munie de longs cils dont l'ultrastructure est atypique et qui, englués dans du mucus, forment un feutrage dense. Les axones qui partent de la base des cellules constituent les fibres amyéliniques du nerf olfactif; elles atteignent directement le bulbe olfactif. Les cellules sensorielles olfactives sont donc d'un type primaire.

Les cellules de soutien, allongées, présentent des caractères sécrétoires. A la base de l'épithélium, se situent des cellules basales, en continuité avec les cellules schwanniennes des fibres olfactives, et des glandes muqueuses dont le conduit atteint la surface; leur produit de sécrétion recouvre l'épithélium d'une couche semi-liquide qui englue les cils.

L'olfaction est une sensibilité moléculaire permettant l'identification de molécules dites odorantes qui stimulent les cellules olfactives. Elle est à même de compléter les sensations gustatives.

Organe stato-acoustique : l'oreille

L'oreille est un ensemble complexe intéressant par son évolution chez les Vertébrés; son fonctionnement pose encore de nombreux problèmes.

L'oreille interne est constituée de sacs et de canaux membraneux remplis d'un fluide visqueux, l'endolymphe, et protégée par la capsule otique, osseuse; l'espace entre les parois osseuses et les parois membraneuses, en partie cloisonné par des travées fibreuses, contient un liquide de composition différente, la périlymphe.

L'oreille interne renferme des récepteurs sensibles aux vibrations, groupés en dispositifs complexes responsables de l'équilibration et de l'audition. Elle comporte donc une portion statique, ou vestibulaire, de structure constante chez tous les Vertébrés, et une portion acoustique, sensible aux vibrations de fréquence élevée, qui n'apparaît réellement que chez les Tétrapodes, en relation avec

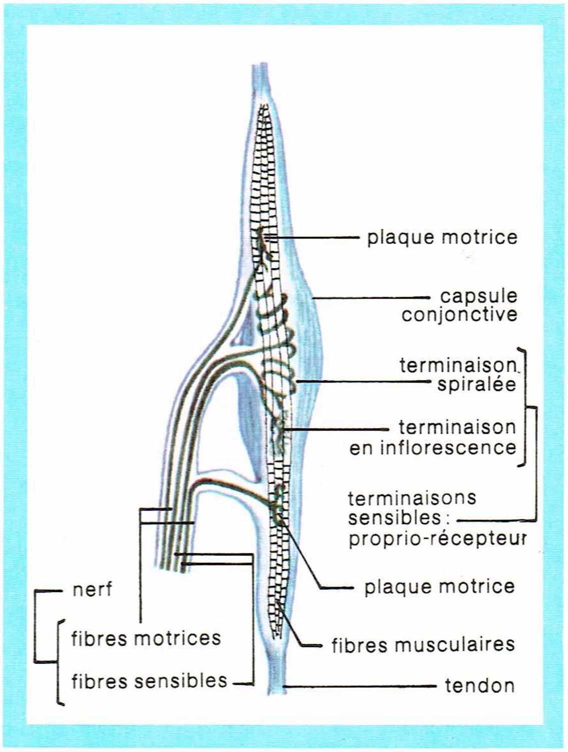

Richard Colin

◀ *Représentation schématique d'un* **fuseau neuromusculaire.**

M.-J. Thillard

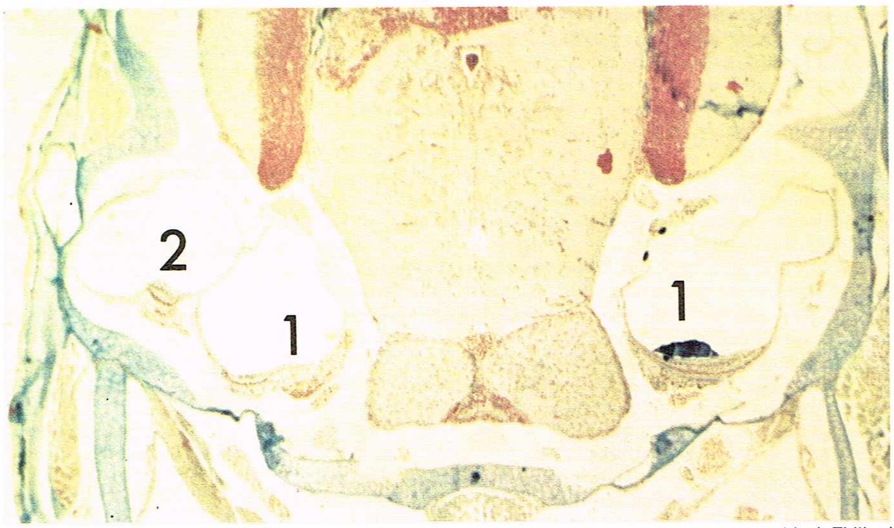

M.-J. Thillard

▲ ***En haut, coupe longitudinale de la cochlée d'un jeune chat montrant l'enroulement en spirale du canal cochléaire (1) et de ses rampes périlymphatiques vestibulaire (2) et tympanique (3) autour de la columelle (4) qui contient le nerf acoustique. En bas, coupe transversale de la tête d'un Poisson Téléostéen au niveau otique ; on observe la situation et la structure de l'utricule (1) avec sa macule et son otolithe, et le départ d'un canal semi-circulaire (2) avec sa crête sensorielle.***

l'habitat terrestre (bien que les Poissons semblent avoir une assez bonne audition). Cette dernière portion se développe chez les Amniotes et présente un maximum de complication chez les Mammifères. Le perfectionnement de l'oreille interne s'accompagne du développement de l'oreille moyenne : columelle tympanique des Tétrapodes non mammaliens, chaîne de trois osselets des Mammifères, chargés de transmettre les vibrations à travers la cavité tympanique.

— La *portion statique* est constituée par un vestibule divisé en deux parties : l'utricule dorsal, d'où partent les trois canaux semi-circulaires (dans trois plans perpendiculaires), et le saccule, ventral, avec un diverticule, la lagena. Un canal endolymphatique, chargé d'équilibrer la pression de l'endolymphe, part à la jonction saccule-utricule. L'utricule, le saccule et la lagena possèdent chacun une plage sensorielle, la macule, qui comporte des cellules ciliées sensibles et des cellules de soutien. Les macules sont surmontées de fins granules calcaires, inclus dans une gelée mucopolysaccharidique (chez les Téléostéens, les granules sont remplacés par une volumineuse concrétion, l'otolithe). Une des extrémités de chaque canal semi-circulaire est renflée en ampoule qui renferme une crête sensorielle coiffée d'une capsule mucogélatineuse. Ces différentes structures sensorielles mécanoréceptrices sont des dispositifs d'équilibration et de stabilisation ; elles sont innervées par la branche vestibulaire du nerf VIII.

— La *portion acoustique* est un diverticule du saccule :

● Chez les *Amphibiens,* apparaît un récessus basilaire proche de la lagena (ou évagination de celle-ci), porteur d'une papille acoustique basilaire. Les papilles sensorielles acoustiques sont caractérisées par leur situation et leur structure : elles sont au contact d'une région périlymphatique où le cloisonnement fibreux habituel a complètement disparu, disposition qui facilite la transmission des pressions exercées par les ondes sonores dans la périlymphe ; à ce niveau, la paroi du labyrinthe membraneux est amincie ; les plages sensorielles sont recouvertes par une membrane tectrice qui s'insère sur des cellules voisines et vient s'appuyer sur les cils des cellules sensorielles, elles-mêmes supportées par des cellules de soutien. Les Amphibiens possèdent, en plus de la papille basilaire, une papille spéciale, dite *papille amphibienne,* logée dans un récessus amphibien du saccule. Les deux papilles sont surmontées d'une structure tectoriale complexe, à laquelle s'ajoute une membrane annexe souple. Ces deux récepteurs atteindraient leur maximum de sensibilité à des fréquences différentes : basses fréquences pour la papille amphibienne, fréquences plus hautes pour la basilaire.

● Chez les *Reptiles* et les *Oiseaux,* les récessus lagénaire et basilaire s'unissent et s'allongent en un canal cochléaire rectiligne. La papille basilaire s'allonge également et devient un organe de Corti, tandis que la macule lagénaire est refoulée tout au fond de la cochlée.

● Chez les *Mammifères,* le canal cochléaire ainsi que son enveloppe osseuse s'enroulent en spirale, formant la cochlée, ou limaçon ; la papille sensorielle devient l'organe de Corti, perfectionné et enroulé en spirale comme la cochlée, tandis que la macule lagénaire disparaît. La columelle, axe autour duquel s'enroule la cochlée, contient la branche cochléaire acoustique du nerf VIII ainsi que le ganglion spiral de Corti, engagé dans la lame spirale émanée de la columelle et qui divise partiellement la cochlée dans toute sa longueur. Les espaces périlymphatiques suivent le mouvement et deviennent la rampe vestibulaire et la rampe tympanique, qui communiquent au sommet de la cochlée.

La rampe vestibulaire commence à la fenêtre ovale, de l'autre côté de laquelle s'appuie l'étrier ; la rampe tympanique se termine à la fenêtre ronde ; ces fenêtres, percées dans la capsule otique et fermées par des membranes, sont situées entre la cavité tympanique de l'oreille moyenne et l'oreille interne.

La coupe transversale d'un tour de spire du limaçon montre un canal central à peu près triangulaire, le canal cochléaire, inséré comme un coin entre la rampe vestibulaire, dont il est séparé par la membrane de Reissner, et la rampe tympanique, dont il est séparé par la membrane basilaire qui fait suite à la lame spirale. Dans l'angle interne du canal cochléaire, bombe le limbe spiral (conjonctif périostique de la lame spirale).

Différentes structures épithéliales tapissent le canal cochléaire. La structure fondamentale est l'*organe de Corti,* qui comporte des cellules très spécialisées : les cellules sensorielles ciliées, responsables de l'audition, sont disposées en trois ou quatre rangées externes et une rangée interne, séparées par les piliers de Corti encadrant le tunnel de Corti. Elles sont supportées par l'apex de cellules de soutien qui reposent, comme les piliers de Corti, sur la *membrane basilaire.* Les cellules sensorielles sont recouvertes par la *membrane tectoriale,* sécrétée par les cellules de la surface du limbe spiral et composée principalement d'une protéine ressemblant à la kératine ; l'extrémité des cils s'inclut dans la membrane.

Le fonctionnement de l'oreille chez les Mammifères est extraordinairement complexe.

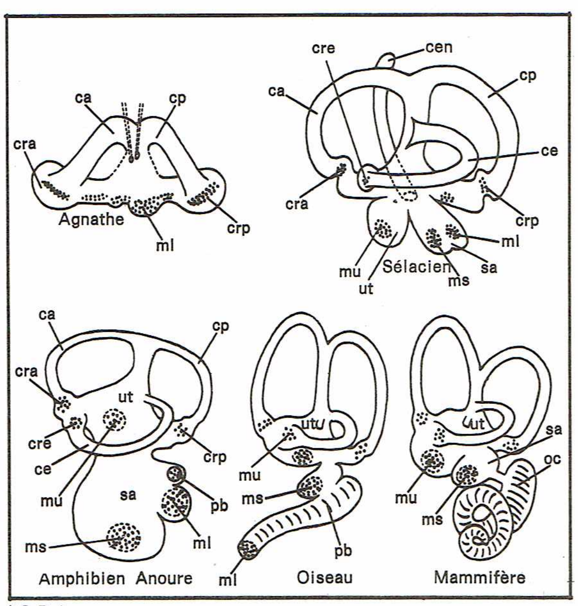

I.G.D.A.

▶ ***Structure de l'oreille interne de divers Vertébrés : cra, crête du canal semi-circulaire antérieur ; ca, canal semi-circulaire antérieur ; cp, canal semi-circulaire postérieur, crp, crête du canal semi-circulaire postérieur ; ml, macule de la lagena ; cen, canal endolymphatique ; ce, canal semi-circulaire horizontal externe ; cre, crête du canal semi-circulaire horizontal ; mu, macule de l'utricule ; ut, utricule ; sa, saccule ; ms, macule du saccule ; pb, papille basilaire ; oc, organe de Corti.***

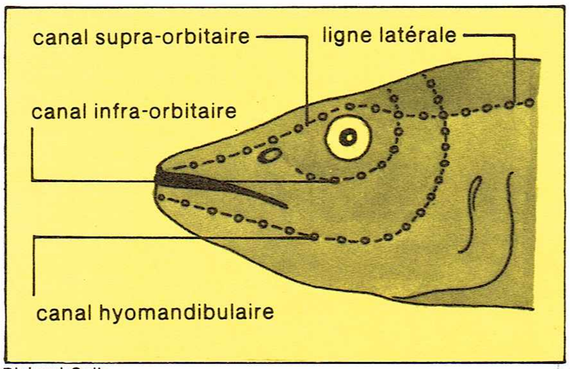

Richard Colin

◀ *Topographie du* **système latéral céphalique** *chez un* ***Poisson Téléostéen (brochet).***

L'oreille externe n'est pas indispensable à l'audition; son rôle est de protéger l'oreille moyenne et de permettre une meilleure localisation des sons. Dans l'oreille moyenne, les vibrations imprimées à la membrane tympanique par l'arrivée des ondes entraînent le déplacement de l'air remplissant la caisse du tympan et celui des osselets : marteau appuyé sur le tympan, enclume, étrier appliqués sur la membrane élastique qui ferme la fenêtre ovale.

Le rôle des osselets est primordial. L'étrier transmet les vibrations à la périlymphe de la rampe vestibulaire qui repousse le canal cochléaire dans la rampe tympanique déformant la membrane basilaire; la périlymphe tympanique, refoulée à son tour, fait incurver la paroi élastique de la fenêtre ronde dans la cavité de l'oreille moyenne; un déplacement en sens inverse se produit pendant la phase suivante de l'onde sonore.

Le fonctionnement des cellules réceptrices de l'organe de Corti dépend dans une large mesure des propriétés de la membrane basilaire, qui constitue leur véritable stimulus.

L'oreille apprécie l'intensité des vibrations sonores, mais aussi leur fréquence, ou hauteur du son (mouvement vibratoire de 16 à 20 000 cycles par seconde).

La perception de l'intensité du son est due à l'amplitude et à la fréquence des déplacements de la membrane basilaire; c'est de celles-ci que dépendent le nombre de fibres nerveuses activées au niveau des cellules ciliées et, comme pour les autres mécanorécepteurs, la fréquence des influx nerveux propagés le long de chaque fibre. La capacité d'appréciation de la hauteur du son est due à la localisation des déplacements de la membrane basilaire. En effet, les sons de très basse fréquence (jusqu'à 60 cycles/seconde) la mettent en mouvement dans son ensemble; par contre, aux fréquences plus élevées, la membrane basilaire vibre inégalement au long de sa surface spiralée; chaque ton produit un mouvement d'amplitude maximale en une étroite zone transversale différente, zone d'autant plus proche de l'étrier que la fréquence est plus grande. Les influx produits par ce mouvement naissent ainsi dans des régions de la membrane qui varient suivant la fréquence des sons.

Le mécanisme par lequel l'énergie mécanique (le stimulus) est transformée en énergie électrique, ou phénomène de transduction, encore mal connu, serait dû au changement d'inclinaison des cils des cellules sensorielles. La complexité de structure de l'oreille interne ne facilite pas la solution du problème.

Système latéral

C'est un système sensoriel spécial, propre aux Poissons et aux larves d'Amphibiens, qui remplit une fonction de renseignement comparable à celle de l'audition chez les Tétrapodes; les centres récepteurs sont d'ailleurs situés dans la même zone, acoustico-latérale, du rhombencéphale. Il permet aux Poissons d'apprécier des variations de pression ou des changements dans le sens du courant de l'eau, leur indiquant la présence de corps en mouvement. Les récepteurs, ou *neuromastes,* sont des mécanorécepteurs comportant des cellules ciliées et des cellules de soutien et sont généralement groupés dans des canaux épidermiques répartis suivant un réseau caractéristique : système latéral céphalique et ligne latérale.

La structure des cellules sensorielles est comparable à celle des cellules ciliées vestibulaires, qui possèdent en plus des stéréocils un cil véritable. La courbure des stéréocils vers ce dernier provoque une dépolarisation de la cellule, alors que la courbure dans le sens opposé est suivie d'hyperpolarisation.

L'innervation des canaux du système latéral se fait par des fibres cheminant avec des rameaux du nerf VII et du nerf X.

Organe de la vision : l'œil

La structure de l'œil et celle de la rétine sont très constantes chez les Vertébrés. La particularité de l'organe de la vision réside dans le fait que la rétine représente un centre nerveux, diverticule invaginé du diencéphale, dont l'origine explique la double couche : rétine pigmentaire externe (qui reste simple), rétine optique interne, dans laquelle les cellules se sont multipliées et différenciées; elle est construite suivant un type inversé puisque le stimulus (rayon lumineux) traverse des cellules conductrices avant d'atteindre les récepteurs.

La structure des photorécepteurs, ou cellules visuelles, cônes et bâtonnets (cellules nerveuses très différenciées), est maintenant bien connue grâce au microscope électronique. On y distingue :

— un *segment externe,* ou *segment photorécepteur,* formé d'un empilement de disques constitués par des replis de la membrane plasmique; dans les bâtonnets, les disques les plus externes, libres, se détachent et disparaissent, « phagocytés » au niveau de la couche pigmentaire de la rétine, tandis que de nouveaux replis se forment à la partie proximale du segment; dans les cônes, les disques ne sont pas sujets à ce renouvellement;

— un *segment intermédiaire,* réduit à une région étroite ayant une structure semblable à celle d'un cil muni d'un corps basal;

— un *segment interne,* qui contient le noyau et dont la portion distale renferme de nombreuses mitochondries, sources d'énergie; l'extrémité proximale, ou région synaptique, entre en relation de façon complexe avec les neurones bipolaires.

▼ *Représentation schématique de l'***organe de Corti** *chez un singe* **(Cercopithecus sp.)***; si, sillon spiral interne; mt, membrane tectoriale; ca, cellules acoustiques; te, tunnel externe; ch, cellules de Hensen; so, lame spirale osseuse; pi et pe, piliers interne et externe de Corti; tc, tunnel de Corti; sn, espace de Nuëll; cd, cellules de Deiters (de soutien).*

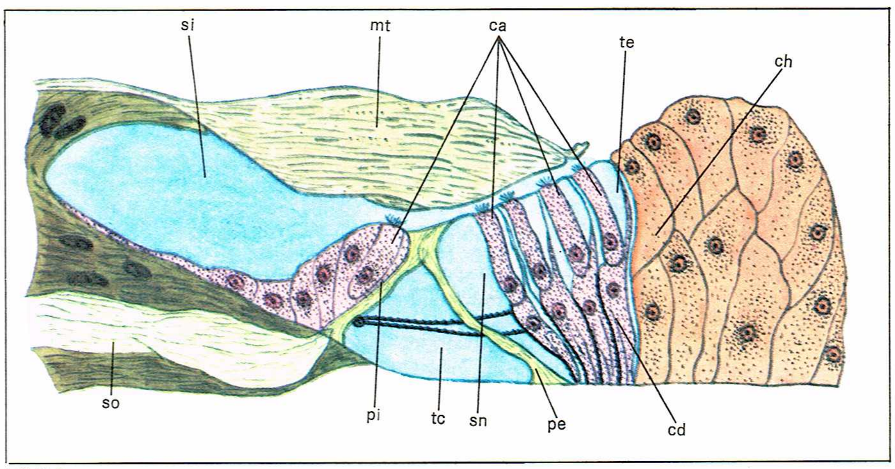

I.G.D.A.

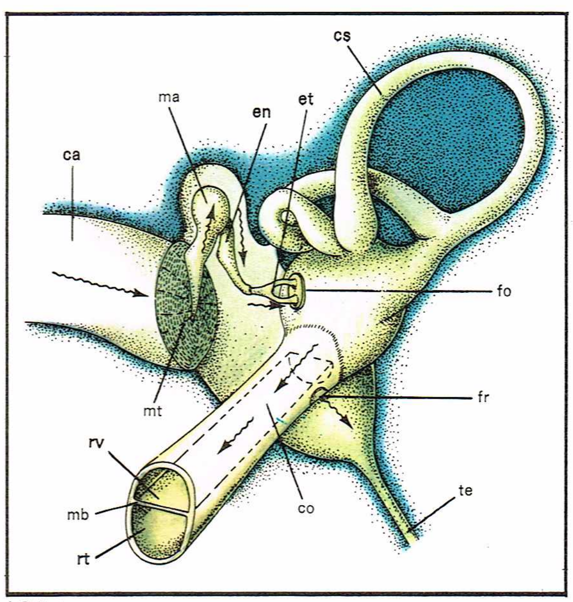

I.G.D.A.

◀ *Schéma du parcours des ondes sonores dans l'oreille de Mammifère : ca, conduit auditif externe; mt, membrane tympanique; ma, marteau; en, enclume; et, étrier; fo, fenêtre ovale; cs, canal semi-circulaire; fr, fenêtre ronde; co, cochlée; te, trompe d'Eustache; mb, membrane basilaire; rv, rampe vestibulaire; rt, rampe tympanique.*

Les bâtonnets sont sensibles à de faibles intensités lumineuses, alors que les cônes sont sensibles aux couleurs et aux forts éclairements; la répartition entre cônes et bâtonnets sera donc différente chez les animaux diurnes et les animaux nocturnes.

Dans l'aire centrale de la rétine, qui reçoit directement la lumière, il existe une plus grande densité de photorécepteurs. Mais la zone d'acuité visuelle maximale est la fovéa, zone où l'aire centrale est déprimée : les neurones bipolaires et multipolaires sont rejetés à la périphérie de la dépression, de sorte qu'ils ne masquent plus les photorécepteurs; ceux-ci, uniquement des cônes allongés, sont en relation chacun avec un neurone bipolaire et un neurone multipolaire.

Le fonctionnement des photorécepteurs. L'image réelle d'un objet se forme sur la rétine comme dans un appareil photographique avec ses lentilles, en l'occurrence la cornée et le cristallin.

La lumière qui vient frapper la rétine doit être absorbée par les récepteurs; ceux-ci contiennent des pigments, substances chimiques capables d'absorber sélectivement la lumière, qui elle-même servira à libérer une énergie. Cela implique que le pigment soit photolabile, mais cependant stable à l'obscurité, et que sa décomposition soit réversible. Le processus de transduction commence donc par une absorption photochimique : un quantum de lumière absorbé par un pigment visuel provoque un changement réversible dans la configuration de la molécule absorbante.

Les pigments visuels sont bien connus : il s'agit de la **rhodopsine** dans les bâtonnets, de l'**iodopsine** dans les cônes. Ces molécules sont contenues dans les membranes formant les disques transversaux des segments externes. Quand la rétine reçoit la lumière, la rhodopsine est décomposée, mais constamment régénérée tant que les relations entre les bâtonnets et l'épithélium pigmentaire sont intactes.

La rhodopsine et l'iodopsine sont constituées par un aldéhyde de la vitamine A, le *rétinène,* combiné à une protéine spécifique, l'*opsine* (celle des cônes est différente de celle des bâtonnets). Or, le rétinène peut exister sous plusieurs formes isomères : des formes *cis* et une forme *trans.* A l'obscurité, c'est un isomère cis qui est associé à l'opsine, c'est-à-dire probablement la forme qui permet au rétinène de bien s'ajuster sur la molécule de protéine et constitue donc une rhodopsine stable. Lors d'une exposition à la lumière, la rhodopsine est convertie en une association rétinène trans + opsine. La libération d'énergie consiste donc en une isomérisation cis-trans; celle-ci est réversible. Le potentiel d'action créé est ensuite propagé de façon complexe à travers les neurones bipolaires et multipolaires de la rétine, puis par le nerf optique, qui groupe les axones des cellules multipolaires jusqu'aux centres supérieurs.

▼ Section horizontale d'un œil de Vertébré : PA, pôle antérieur; PP, pôle postérieur; A-V, axe de meilleure acuité visuelle passant par la fovea (fo) et ne coïncidant pas avec l'axe de symétrie antéro-postérieur (A-O); co, cornée; ct, conjonctive; mc, muscle ciliaire; re, rétine; cr, choroïde; sc, sclérotique; fo, fovea; ca, chambre antérieure; cri, cristallin; vi, corps vitré; cc, corps ciliaire; no, nerf optique; ir, iris.

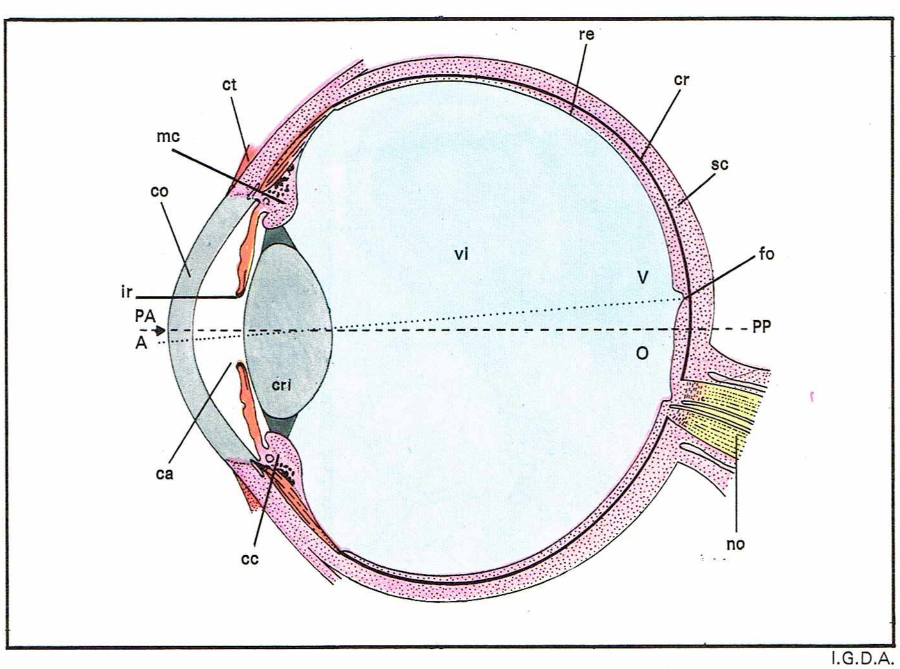

I.G.D.A.

La rétine, par la variété des neurones et des synapses qui la composent, se comporte non seulement comme un photorécepteur, mais aussi comme un véritable centre nerveux. Ce seront cependant les aires corticales visuelles qui interpréteront comme couleur, forme, position, etc., les influx produits par les objets vus.

Il est intéressant de signaler que chez les Anamniotes et certains lézards l'organe pinéal et l'organe parapinéal sont photorécepteurs, possédant des cellules dont l'ultrastructure est semblable à celle des bâtonnets, avec un segment externe lamellaire; ces organes ne sont pas de véritables yeux, mais seulement des détecteurs de lumière, car ils ne forment pas d'image.

Les influx nés au niveau des photorécepteurs que nous venons d'étudier sont propagés le long de fibres sensitives de nature dendritique, cellulipètes, jusqu'aux centres nerveux, dont nous examinerons la structure et, dans les très grandes lignes, le fonctionnement.

Centres

Ganglions cérébro-spinaux

Ces ganglions sont des centres primaires sensoriels. Excepté les deux cas spéciaux de la rétine et de l'épithélium olfactif, les corps cellulaires des neurones qui reçoivent l'influx des récepteurs sont situés dans les ganglions crâniens et spinaux, lesquels ne diffèrent que par leur position.

Les cellules ganglionnaires sont dites unipolaires, car le dendrite et l'axone ont un trajet commun à proximité du corps cellulaire et l'influx pourrait même être transmis directement du dendrite à l'axone.

Moelle épinière

La moelle épinière est un cordon d'où émergent les nerfs spinaux ou rachidiens. Sa longueur et son calibre sont en rapport avec le développement variable du tronc et des membres. Les axones des cellules ganglionnaires pénètrent dans la moelle par les racines dorsales. Les noyaux-relais, centres secondaires des voies sensorielles, sont situés dans des zones précises, ou colonnes, des cornes dorsales, suivant les afférences qu'ils reçoivent. Ces différents centres contiennent :

— les *neurones d'origine des fibres ascendantes longues* qui entrent en relation avec des centres supérieurs et constituent des faisceaux latéro-ventraux, principalement spinothalamiques. Seules les voies de la sensibilité épicritique chez les Mammifères ne font pas relais dans la moelle : les faisceaux ascendants situés dans les cordons dorsaux constituent le système lemniscal;

— des *neurones cordonnaux,* établissant des liaisons courtes entre différents niveaux de la moelle;

— des *neurones intercalaires,* en relation avec des cellules motrices de la moelle, intervenant dans les arcs réflexes.

Les faisceaux descendants passent généralement dans les cordons ventraux. Les centres somato-moteurs primaires des nerfs rachidiens sont situés dans les cornes ventrales; les motoneurones sont des cellules multipolaires typiques, dont les axones quittent la moelle par les racines ventrales. Enfin, les cellules d'origine des neurones viscéro-moteurs préganglionnaires sont situées dans une région latérale des cornes ventrales.

La moelle est un centre autonome de réflexes et met en connexion les récepteurs de la sensibilité générale avec les centres supérieurs et ceux-ci avec les effecteurs de la motricité générale.

Encéphale

L'importance des différents étages de l'encéphale varie suivant les Vertébrés; il y a, au fur et à mesure de l'évolution, réduction de certaines parties mais surtout développement et complication de certaines structures. La première manifestation de cette évolution est l'hypertrophie de la paroi dorsale par rapport à la ventrale, par développement des cortex cérébral et cérébelleux, surajoutés à la partie primitive du tronc cérébral, de telle façon que la voûte du cerveau arrive à surplomber la région buccale.

Rhombencéphale

Le rhombencéphale prolonge la moelle épinière, mais à cause de l'écartement des plaques alaires, le toit du 4^{e} ventricule est réduit à une formation choroïdienne.

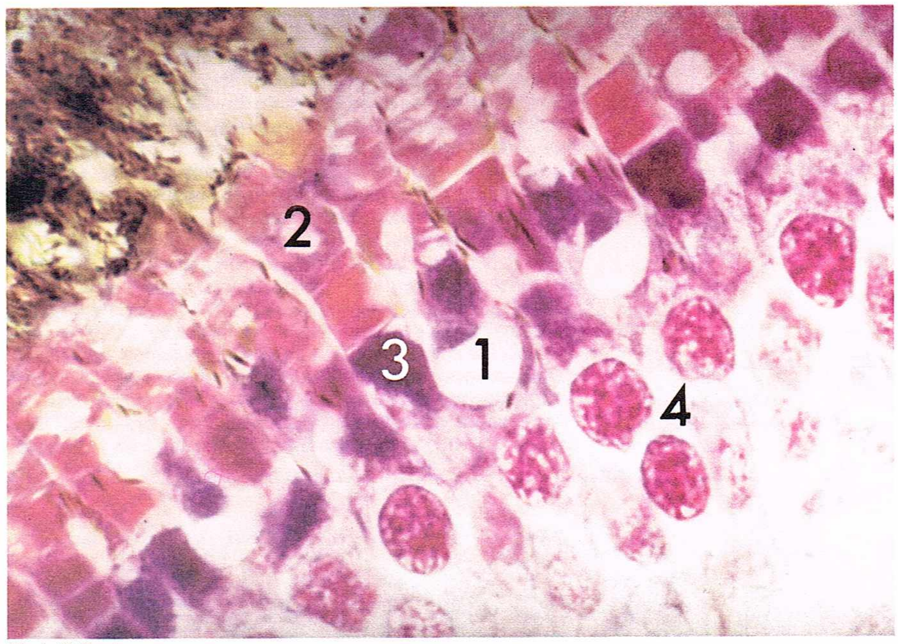

M.-J. Thillard

▲ ***Structure histologique des couches externes de la rétine visuelle d'un œil de grenouille ; la lumière traverse les cellules conductrices avant d'atteindre les cellules visuelles réceptrices. On observe les cellules visuelles : cônes (1) et bâtonnets (segment externe [2] et segment interne [3]) ainsi que leurs noyaux (4).***

La subdivision du rhombencéphale en *myélencéphale* et *métencéphale* est valable pour les structures dorsales : la partie rostrale se développe en cervelet ; par contre, en ce qui concerne le plancher et les parois, qui sont continus et auxquels fait directement suite le tegmentum du mésencéphale, la division est arbitraire, sauf chez les Mammifères, où le métencéphale est marqué par la protubérance annulaire, ou pont, qui relie les deux hémisphères cérébelleux. Le bulbe est la portion située en arrière de ce pont.

Le rhombencéphale comporte une structure fondamentale constante chez tous les Vertébrés, à laquelle s'ajoute, chez les Mammifères, un *néorhombencéphale* ventral, comprenant des formations en rapport avec le développement du cervelet (protubérance annulaire et olives bulbaires) et les voies pyramidales de la motricité volontaire (pyramide bulbaire). Dans la partie fondamentale du rhombencéphale, les colonnes de substance grise faisant suite à celles de la moelle se fragmentent en différents noyaux : d'une part, les centres de relais des neurones ganglionnaires crâniens, transmettant les influx sensoriels en provenance des récepteurs viscéraux, gustatifs, cutanés, acoustiques, vestibulaires et latéraux ; d'autre part, les origines des nerfs crâniens affectés aux muscles céphaliques et viscéraux ; enfin, des relais dans les voies ascendantes ou descendantes et des systèmes de coordination. Les faisceaux de fibres unissant ces centres, ou noyaux, seront donc ascendants, descendants ou de coordination.

Tous ces systèmes sont groupés en zones, ou régions, longitudinales correspondant aux divers composants fonctionnels. La position des noyaux d'origine des fibres ou leur lieu d'arrivée indiquent la nature de leur fonction, et on peut constater que la plupart des nerfs crâniens groupent des fibres de différentes origines.

— La *zone médio-ventrale* est somato-motrice ou efférente : on y trouve le noyau du nerf VI, qui innerve un des muscles oculaires, et le noyau du nerf XII, origine des fibres motrices de la langue chez les Mammifères.

— La *zone ventro-latérale* est viscéro-motrice : on y trouve les noyaux des fibres innervant la musculature striée viscérale, dite branchiomérique (musculatures mandibulaire, hyoïdienne, branchiale) et des cellules préganglionnaires du parasympathique crânien (voir système autonome).

— La *zone dorso-latérale* est viscéro-sensible ou afférente ; elle reçoit des fibres ganglionnaires de la sensibilité générale, venant des muscles lisses, et des fibres de la sensibilité spéciale gustative.

— La *zone dorsale,* somato-sensible, comporte deux régions : l'une reçoit les fibres de la sensibilité générale cutanée, l'autre, somato-sensible spéciale, ou aire acoustico-latérale, reçoit les fibres en provenance de l'oreille interne (axones des cellules bipolaires du ganglion de Corti, acoustique, et du ganglion de Scarpa, vestibulaire ou statique) et, chez les Poissons, les fibres du système latéral.

On peut observer une hypertrophie de l'une des zones, en rapport avec un développement exceptionnel du système périphérique correspondant. En voici plusieurs exemples :

— La raie-torpille possède de chaque côté de la région branchiale des organes électrogènes, empilements d'électroplaques dérivées des muscles hyoïdiens et branchiaux, qui sont innervés par des branches motrices des nerfs crâniens VII, IX et X. En conséquence de ce surcroît d'efférences, la zone viscéro-motrice (zone d'origine de ces fibres) du rhombencéphale est hypertrophiée.

— La carpe ainsi que les autres Téléostéens Cypriniformes ont un appareil gustatif développé (comprenant un organe gustatif palatin et des bourgeons gustatifs dans la peau du corps), innervé par des rameaux viscéro-sensibles des nerfs VII, IX et X ; en conséquence, la zone viscéro-sensible du rhombencéphale, zone d'afférence de ces fibres, est extrêmement développée en lobes gustatifs.

— Certaines espèces d'Oiseaux aquatiques, comme les canards, ont des corpuscules tactiles groupés sur le

▼ ***A gauche, représentation schématique des cellules de la rétine de l'œil : ba, bâtonnets ; co, cônes ; cb, cellules bipolaires ; cg, cellules ganglionnaires. A droite, coupe transversale schématique de la moelle épinière chez l'homme.***

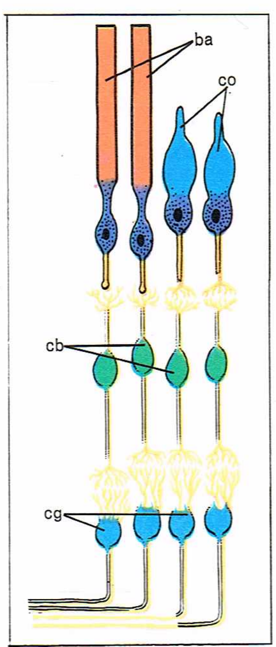

I.G.D.A.

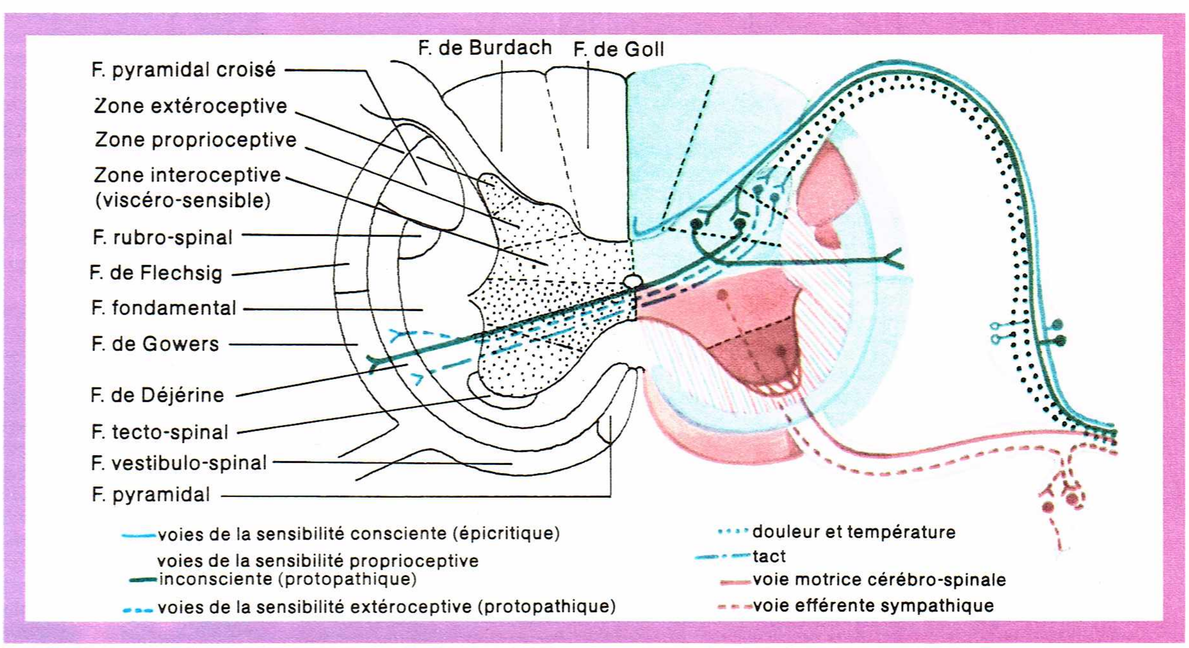

Richard Colin

bec et innervés par des rameaux du nerf V, qui jouent un rôle important dans la recherche des aliments ; chez ces animaux, les noyaux situés dans l'aire somato-sensible présentent un grand développement.

— Enfin, le mormyre est un Poisson Téléostéen dont le système latéral périphérique est particulièrement développé ; on assiste, en conséquence, à une hyperplasie de l'aire acoustico-latérale dans la zone somato-sensible spéciale et, de plus, à une extraordinaire hypertrophie du cervelet, que l'on doit en effet considérer comme un dérivé de cette aire.

En plus de ces zones, il existe dans le rhombencéphale un système réticulaire constitué de quelques groupements de cellules, généralement de grande taille, à prolongements enchevêtrés, les *cellules réticulaires,* qui ne sont dominées par aucun système particulier. Leurs dendrites reçoivent des influx de natures diverses, venant de groupements sensoriels secondaires mais aussi de centres supérieurs. Leurs axones, qui rejoignent des neurones moteurs rhombencéphaliques et spinaux, peuvent être très longs, atteignant des niveaux situés très caudalement ; ils cheminent fréquemment dans un faisceau situé de part et d'autre de la ligne médiane. Ce système réticulaire, associatif, a un rôle de coordination motrice.

Dans certaines classes de Vertébrés, ces cellules réticulaires atteignent des dimensions considérables : ainsi, les *cellules de Müller* des Cyclostomes envoient dans la moelle des fibres géantes. La *cellule de Mauthner* des Téléostéens, Dipneustes et Urodèles possède un axone géant qui, après croisement, descend dans le cordon ventral de la moelle et envoie des collatérales vers les noyaux moteurs spinaux. Le cône d'émergence de l'axone ainsi que les dendrites longs et ramifiés sont le siège de nombreuses synapses ; on comprend que des influx captés à partir de différents centres et s'écoulant comme un stimulus unique par l'axone géant déclenchent des réactions motrices du corps permettant des mouvements coordonnés.

▼ *Représentation schématique de la position des zones du rhombencéphale et leurs fonctions.*

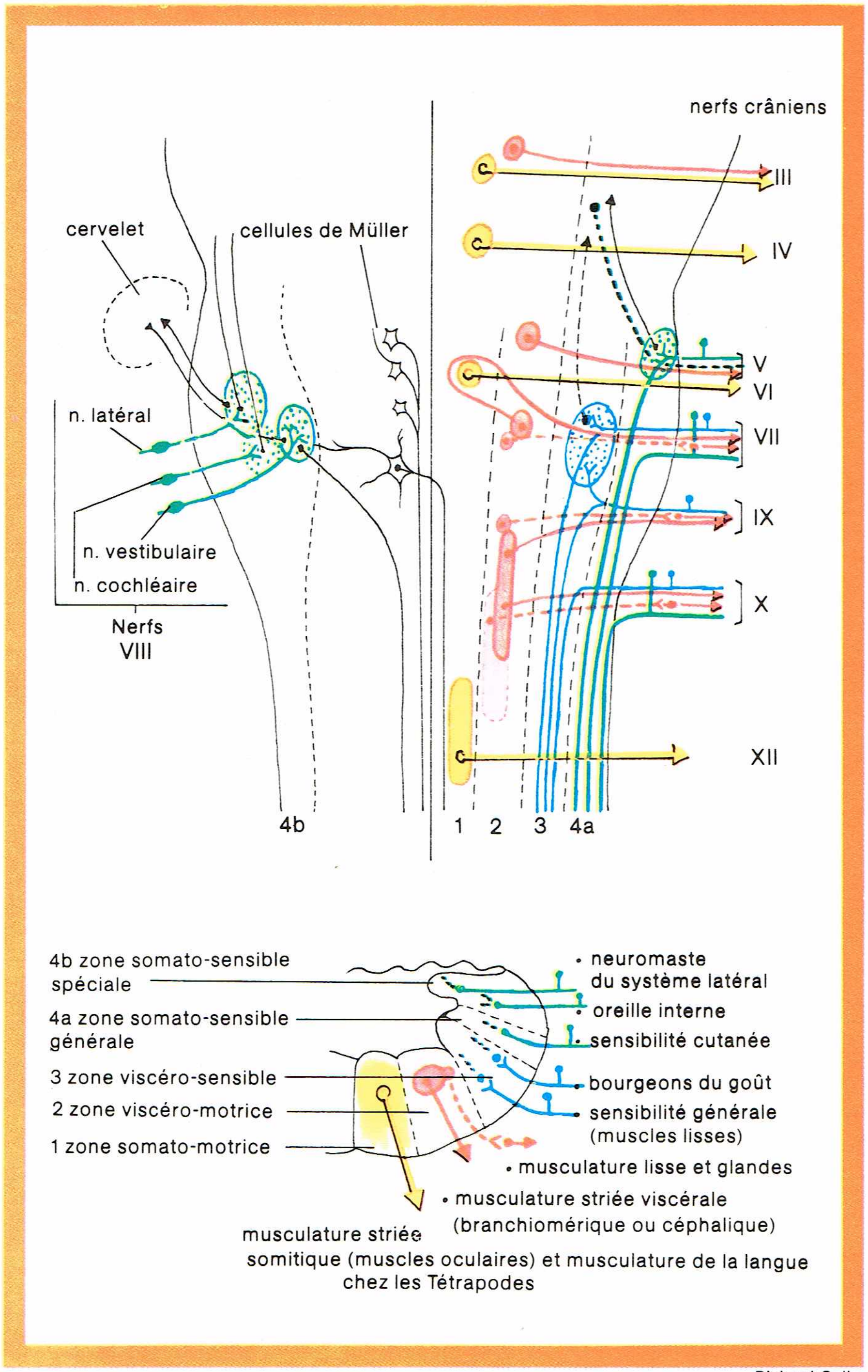

Richard Colin

Cervelet

Le cervelet se forme à la partie rostrale du rhombencéphale, par fusion des plaques alaires sur la ligne médiane. Sa structure et son développement sont variables suivant les classes de Vertébrés ; réduit chez les Amphibiens, très inégal chez les Reptiles, il est bien développé dans les autres groupes. On y distingue :

— un étage fondamental, l'*archicérébellum* (auricules des Sélaciens, valvule des Téléostéens, floccules des Oiseaux et des Mammifères), recevant des apports labyrinthiques et vestibulaires ;

— un étage provenant du développement de la partie médiane, ou corps du cervelet, le *paléocérébellum,* recevant des apports spinaux et mésencéphaliques ;

— de plus, chez les Mammifères, un étage se développe par accroissement des parties latérales du corps en hémisphères cérébelleux ou *néocérébellum,* et reçoit des apports télencéphaliques ; les hémisphères sont reliés par un système de fibres transversales ventrales qui forment un pont sous lequel passent les cordons longitudinaux du tronc cérébral : le pont de Varole, ou protubérance annulaire.

Le cervelet est un centre de contrôle de l'équilibre et de coordination motrice, mais aussi un modulateur de toute l'activité nerveuse.

Mésencéphale

L'architecture fondamentale du mésencéphale est semblable chez tous les Vertébrés, mais son volume relatif et ses fonctions sont variables, plus importantes chez les Vertébrés inférieurs.

— Le *tectum,* dérivé des lames alaires, est généralement divisé en deux moitiés symétriques, les lobes optiques, ou tubercules bijumeaux, chez les Vertébrés non mammaliens. Ces lobes, très écartés l'un de l'autre, sont refoulés latéralement chez les Oiseaux. Sous le tectum se développent deux saillies nerveuses qui bombent dans le ventricule : les *tores semi-circulaires ;* ceux-ci deviennent importants chez les Reptiles, où ils peuvent affleurer à la surface postérieurement (corps bijumeaux postérieurs) ; cette disposition s'accentue chez les Mammifères, où le tectum constitue les *tubercules quadrijumeaux,* les tubercules postérieurs correspondant aux tores semi-circulaires. Ainsi, le ventricule mésencéphalique, ou optique, primitivement large, se réduit et devient chez les Mammifères un canal : l'*aqueduc de Sylvius.*

Chez les Vertébrés inférieurs, le tectum est le centre de relais principal des fibres visuelles ; il reçoit aussi des apports transmis par le nerf trijumeau et par des faisceaux médullaires.

Chez les Mammifères, il ne reçoit qu'un petit contingent de fibres optiques à signification réflexe, le plus grand nombre atteignant un noyau du thalamus, le corps genouillé externe.

Les voies efférentes descendent, chez les Vertébrés inférieurs, vers les noyaux moteurs du rhombencéphale et de la moelle et constituent leurs voies motrices principales.

Les tores semi-circulaires ou tubercules quadrijumeaux postérieurs reçoivent des influx provenant de l'aire acoustico-latérale du rhombencéphale. Les fibres provenant des noyaux-relais acoustiques et vestibulaires forment une voie ascendante importante : le lemnisque latéral. Chez les Mammifères, un contingent de ces fibres atteint le corps genouillé interne, placé sur les flancs des tubercules quadrijumeaux postérieurs mais rattaché au thalamus et

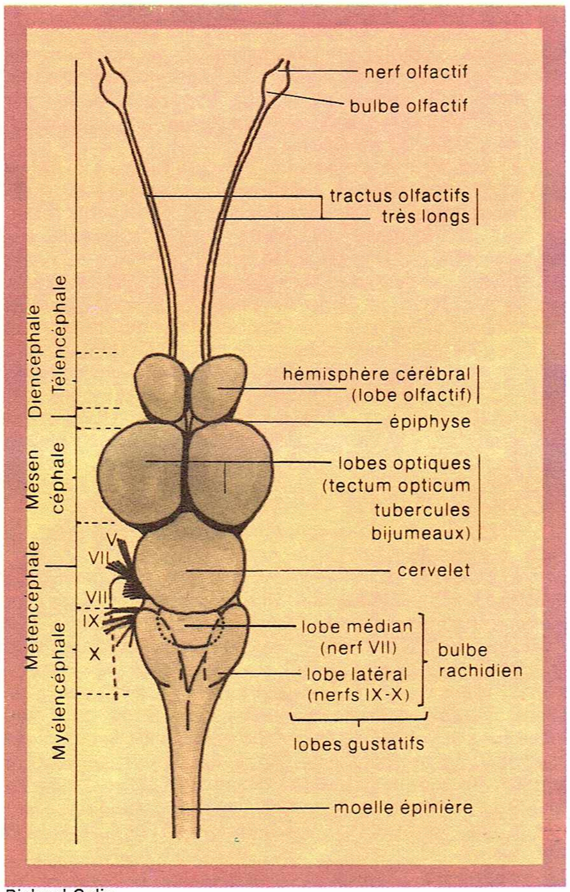

Richard Colin

◀ *Représentation schématique de l'encéphale d'une tanche (Cypriniforme) en vue dorsale; on observe le développement considérable de l'aire viscéro-afférente (lobes gustatifs correspondant aux nerfs VII, IX et X).*

qui sépare les deux moitiés du thalamus, est aplati sagittalement et fermé dorsalement par la région pariétale, non nerveuse.

— *Le thalamus*

Le thalamus est divisé par un sillon en thalamus dorsal (caudal) et thalamus ventral (rostral); ce dernier est assez important chez les Vertébrés inférieurs. Il reçoit des apports issus du striatum, centre moteur télencéphalique. Le thalamus dorsal constitue par contre la portion la plus importante chez les Vertébrés supérieurs, particulièrement chez les Mammifères. Les deux moitiés droite et gauche sont unies par une importante commissure grise.

Le thalamus est un ensemble très complexe de centres gris dont la nomenclature est encore incertaine. Les noyaux principaux sont soit des noyaux-relais qui reçoivent leurs afférences directement des grandes voies ascendantes sensibles, soit des noyaux d'association dont les afférences proviennent des noyaux thalamiques précédents et de l'hypothalamus. Tous ces noyaux projettent les influx reçus en des aires bien déterminées du télencéphale; ils forment un ensemble appelé *système thalamique de projection spécifique*.

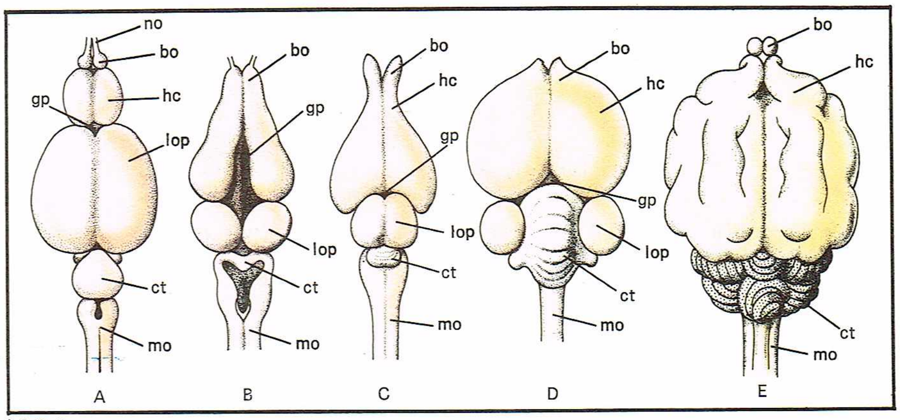

I.G.D.A.

▲ *Schéma comparatif d'encéphale de Vertébrés; A, Poisson Téléostéen; B, Amphibien; C, Reptile; D, Oiseau; E, Mammifère; no, nerf olfactif; bo, bulbe olfactif; hc, hémisphères cérébraux; gp, glande pinéale ou épiphyse; lop, lobe optique; ct, cervelet; mo, moelle épinière.*

qui constitue un relais à prédominance auditive. Le tectum et les tores sont aussi en rapport avec le cervelet.

— Le *tegmentum*, ou *calotte*, ventral, dérivé des lames basales, prolonge la zone somato-efférente du rhombencéphale; on y trouve les noyaux d'origine des nerfs crâniens somato-moteurs III et IV (innervant des muscles oculaires) et un noyau, le ganglion de l'isthme, qui constitue un centre de corrélation où aboutissent des influx acoustiques, statiques, et aussi visuels (par le tectum); ce noyau aurait pour homologue chez les Mammifères le corps genouillé interne. Enfin, un système réticulaire existe au niveau du mésencéphale; il se développe chez les Mammifères, constituant le noyau rouge, origine d'une voie descendante vers la moelle épinière.

L'examen de ces voies afférentes et efférentes montre que le mésencéphale est essentiellement un centre de corrélation de sensations diverses. Les influx d'origines visuelle, statique, acoustique, mais aussi trigéminale et spinale sont élaborés dans diverses régions du mésencéphale et suivis de stimuli descendants, atteignant les noyaux moteurs du rhombencéphale et de la moelle. Le mésencéphale est donc un centre important de la régulation motrice, dominant chez les Vertébrés inférieurs. Cependant, chez les Mammifères, le mésencéphale ne garde guère qu'un rôle de régulation des réflexes acoustiques et visuels, comme les mouvements coordonnés des yeux; les fonctions principales seront exercées par les centres supérieurs.

Enfin, toujours chez les Mammifères, des formations nouvelles s'ajoutent à la face ventrale du mésencéphale : les *pédoncules cérébraux*, voies descendantes provenant du cortex cérébral.

Diencéphale

Le diencéphale n'est bien apparent que sur la face ventrale, ses faces dorsale et latérale étant plus ou moins recouvertes par le télencéphale. Le sillon qui limite les plaques alaires et basales s'incurve ventralement vers l'avant, se terminant au fond du récessus préoptique, au plancher du 3e ventricule : la portion située au-dessous du sillon limitant dérive des plaques basales et correspond à l'hypothalamus; la zone située au-dessus du sillon forme les parois du thalamus ainsi que les ganglions de l'habénula constituant l'épithalamus. Le 3e ventricule,

Parmi les principaux noyaux citons : le *corps genouillé externe*, relais des voies visuelles, le *corps genouillé interne*, relais des voies auditives qui sont situées à la partie postérieure du thalamus, et le *noyau arqué*, relais des voies gustatives; tous projettent sur les territoires correspondants du néopallium. Mais ces noyaux principaux sont séparés par d'autres formations moins individualisées, constituant le *système thalamique réticulaire de projection diffuse*, qui ont une influence sur de vastes territoires télencéphaliques (ces formations n'auraient pas de connexion directe avec le néopallium mais seraient en relation avec lui par des polysynapses).

En conclusion, chez les Mammifères, toutes les formes de sensibilité convergent vers le thalamus; les influx y sont élaborés pour être ensuite transmis à des centres télencéphaliques. On dit que le thalamus est une zone de corrélation en liaison ascendante avec le télencéphale.

— *L'épithalamus*

L'épithalamus est constitué par deux masses ovoïdes : les *ganglions de l'habénula*, qui prolongent dorsalement le thalamus et qui appartiennent au système olfactif. La région pariétale se subdivise en deux parties, séparées par l'habénula.

La région pariétale antérieure comporte principalement une toile choroïdienne (pie-mère + épithélium épendymaire), avec des différenciations variables suivant les groupes (développées surtout chez les Téléostéens et chez les Reptiles) : plexus choroïdiens, sac dorsal, velum transverse (qui marque la limite avec le télencéphale); plus en avant, la paraphyse des Amphibiens appartient théoriquement au télencéphale.

La région pariétale postérieure porte presque toujours une évagination dorsale, impaire, l'*organe pinéal*, différencié en organe photorécepteur, plus ou moins rudimentaire chez les Anamniotes et qui devient glande pinéale ou épiphyse, chez les Vertébrés supérieurs; sa fonction est mal connue. De plus, quelques Poissons et quelques Reptiles possèdent, en avant de l'organe pinéal, une autre évagination, ou *organe parapinéal*, présentant la structure d'un œil.

HORMONES HYPOPHYSAIRES	
Hormones du lobe antérieur - Hormone de croissance ou somatotrope STH	joue un rôle important dans la croissance du corps assure la régulation du métabolisme (glucides, lipides, protides)
- Gonadostimulines FSH	permet la croissance et la maturation des follicules ovariens stimule les tubules séminifères du testicule
LH	active les cellules interstitielles de l'ovaire ou du testicule permet la formation des corps jaunes (lutéinisation des follicules)
LTH ou prolactine	favorise la sécrétion de progestérone par le corps jaune excite la sécrétion lactée
- Thyréostimuline TSH	stimule la sécrétion des cellules thyroïdiennes
- Corticostimuline ACTH	stimule la production d'hormones stéroïdes par la cortico-surrénale
Hormones du lobe intermédiaire - Intermédine MSH	agit sur la pigmentation de la peau (synthèse de mélatonine)
Hormones de la neurohypophyse - Vasopressine ADH	antidiurétique - élève la pression artérielle
- Ocytocine	provoque des contractions de l'utérus stimule l'excrétion du lait

▲ *Tableau récapitulatif des* **hormones hypophysaires :** *origine et fonctions.*

— *L'hypothalamus*

L'hypothalamus représente, fonctionnellement, une région extrêmement importante et inséparable de l'hypophyse. On y distingue trois régions : les deux premières sont des centres végétatifs, appartenant au système autonome; leur position juste au-dessous du sillon limitant est en accord avec leur caractère viscéro-moteur; la troisième, postérieure, est olfactive.

● *Hypothalamus antéieur, ou chiasmatique.* Sa partie tout à fait antérieure se termine au récessus pré-optique du 3e ventricule, qui marque la limite avec le télencéphale; ensuite, se situe le chiasma optique, entrecroisement des fibres optiques, lesquelles ne pénètrent pas dans le diencéphale mais atteignent le tectum mésencéphalique. Dans cette région, le plancher hypothalamique renferme deux noyaux importants : un noyau supra-optique et un paraventriculaire (un noyau pré-optique chez les Poissons).

● *Hypothalamus moyen, ou infundibulo-tubérien.* Le 3e ventricule y forme le récessus infundibulaire autour duquel les parois épaissies, surtout vers l'avant, constituent le tuber contenant plusieurs groupes de noyaux en relation avec ceux de la région chiasmatique. Les parois s'étirent pour former la tige hypophysaire, différenciée à son extrémité en lobe nerveux de l'hypophyse et dont la partie proximale, renflée chez les Mammifères, forme l'éminence médiane.

● *Hypothalamus postérieur, ou olfactif.* Il comporte essentiellement les tubercules mamillaires (chez les Poissons, cette région postérieure est plus développée, avec les lobes inférieurs et le sac vasculaire plus ou moins importants). En tant que centres olfactifs, les tubercules mamillaires reçoivent des afférences provenant du rhinencéphale, ou partie primitive du télencéphale, ainsi que du striatum; les faisceaux efférents vont vers la moelle et vers le néopallium après un relais dans le thalamus dorsal.

— *Le complexe hypothalamo-hypophysaire*

● *Hypophyse.* Au lobe nerveux postérieur, ou neurohypophyse, s'adjoint un lobe antérieur, ou adéno-hypophyse, glandulaire, d'origine épithéliale pharyngienne, qui différencie autour de la tige hypophysaire la *pars tuberalis;* entre le lobe nerveux et le lobe antérieur, apparaît le lobe intermédiaire.

● *Relations hypothalamo-hypophysaires.* Les fibres provenant des noyaux supra-optique et paraventriculaire, auxquelles se joignent des fibres venant du tuber, forment un faisceau hypothalamo-neurohypophysaire, dont certaines fibres se terminent dans l'éminence médiane, région très vascularisée, au contact de la *pars tuberalis.* Les noyaux sont le siège de neurosécrétions, granules contenant des substances hormonales, qui atteignent l'hypophyse par deux voies, nerveuse et sanguine. D'une part, en cheminant le long des axones du faisceau hypothalamo-hypophysaire, elles sont déposées dans les terminaisons nerveuses de la neurohypophyse étroitement accolées à des capillaires. D'autre part, libérées au niveau de l'éminence médiane, elles passent par un système porte artériel à la *pars tuberalis* et, de là, à l'adénohypophyse.

● *Hormones.* Elles sont très nombreuses et agissent dans tous les domaines.

● *Contrôle de l'hypophyse par l'hypothalamus.* Ce contrôle s'effectue par des mécanismes hormonaux et nerveux fort complexes. D'une part, on sait que des hormones sécrétées par l'hypothalamus contrôlent la libération de la corticostimuline et les sécrétions gonadotropes; d'autre part, le contrôle nerveux de l'hypophyse, exercé fondamentalement par l'hypothalamus, peut être influencé par le système nerveux central; enfin le complexe hypothalamo-hypophysaire forme un couple végétatif à actions réciproques. L'hypothalamus contrôle ainsi les fonctions végétatives, le métabolisme, la régulation thermique, la reproduction et même certaines fonctions psychiques.

Télencéphale

De structure relativement simple chez les Vertébrés inférieurs, le télencéphale devient de plus en plus complexe et subit un énorme accroissement de volume chez les Mammifères.

Le télencéphale primaire représente la portion rostrale du tube neural, avec un ventricule impair, limité en avant

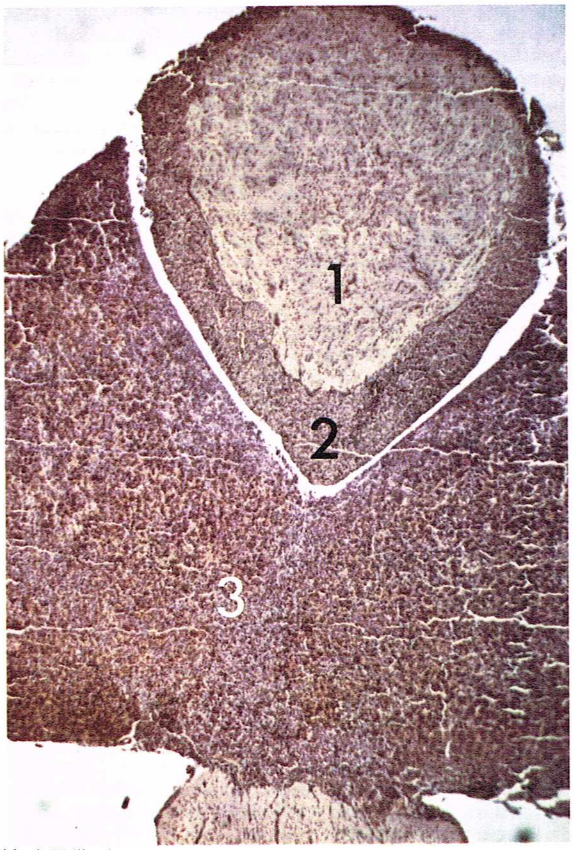

M.-J. Thillard

▶ *Coupe transversale de l'hypophyse de cobaye : 1, la* **pars nervosa** *ou lobe nerveux; 2, la* **pars intermedia** *; l'ensemble constitue le lobe postérieur; 3, la* **pars distalis** *ou lobe antérieur.*

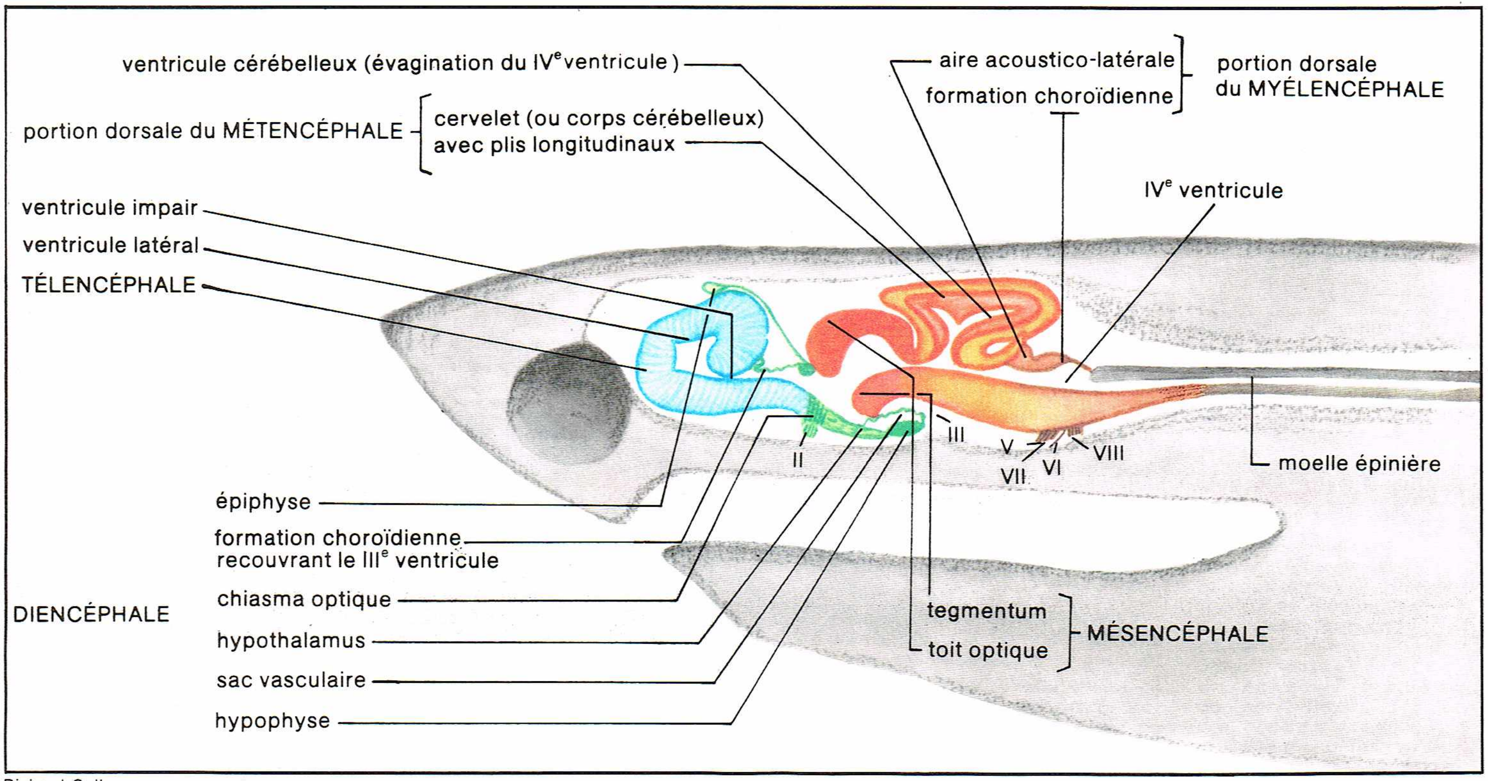

Richard Colin

▲ ***Coupe sagittale de l'encéphale de Sélacien (roussette).***

par une lame dorsale qui continue le plafond du ventricule diencéphalique, et une lame ventrale, ou terminale, qui s'étend jusqu'au récessus préoptique.

En fait, ce télencéphale primaire est pratiquement inexistant et se confond avec la région antérieure du diencéphale; un télencéphale secondaire se développe par évagination latérale de ses parois qui s'étendent en direction rostrale puis caudale, formant les hémisphères cérébraux, de plus en plus volumineux, unis par des commissures.

Les ventricules latéraux I et II, d'abord largement ouverts sur le ventricule impair, se réduisent à de longues fentes, par suite de la croissance vers l'intérieur des parois dorsales et ventrales (télencéphale inversé), de sorte qu'ils ne communiquent plus avec le 3e ventricule que par de petits orifices, les *trous de Monro*.

Évolution du télencéphale. Les hémisphères cérébraux primitifs sont des centres exclusivement olfactifs qui ne reçoivent que des fibres en provenance de leur portion antérieure bulbaire, elle-même en rapport direct avec l'épithélium olfactif. Mais des stimuli non olfactifs de plus en plus nombreux vont atteindre le télencéphale et retentir sur sa structure (développement d'un striatum, d'un néopallium) ainsi que sur l'abondance et la complexité des connexions qui doivent le relier aux centres inférieurs et unir les deux hémisphères.

— Chez les *Amphibiens*, la structure est relativement simple : la coupe transversale des hémisphères montre des cellules nerveuses groupées au voisinage de la cavité ventriculaire et que l'on peut répartir en quatre régions : le *paléopallium*, l'*archipallium*, le *striatum*, ou *noyau basal*, et le *septum*. Les connexions afférentes sont presque toutes olfactives; les efférentes vont au thalamus ventral, à l'hypothalamus et aux ganglions habénulaires.

L'évolution est marquée histologiquement par la migration des cellules vers la surface, aboutissant chez les Vertébrés supérieurs à la stratification cellulaire.

— Chez les *Reptiles* les hémisphères cérébraux deviennent volumineux, surtout par développement du striatum, qui fait saillie dans le ventricule latéral. De nouvelles connexions apparaissent, nées dans le thalamus et aboutissant à une partie nouvelle du striatum, le *néostriatum*, et à une portion interne du paléopallium, qui peut ainsi être interprétée comme un néopallium.

— Chez les *Oiseaux*, le pallium est réduit, principalement en ce qui concerne les centres olfactifs (l'épithélium olfactif est peu important), et le septum est très mince. Par contre, le striatum est extrêmement développé (*paléo-, archi-, néo-, hyperstriatum*) en rapport avec la coordination motrice nécessaire au vol, de sorte que la masse télencéphalique devient très volumineuse et rejette latéralement les lobes optiques.

— Chez les *Mammifères*, le télencéphale atteint un maximum de développement et arrive à représenter la majeure partie de la masse de l'encéphale grâce à l'extension d'un nouveau constituant, le *néopallium*, ou *néocortex*. Il apparaît à la face dorsale du cortex primitif, entre le paléopallium et l'archipallium qui constituent

▼ ***Coupe sagittale de l'encéphale d'un Téléostéen Perciforme (serran).***

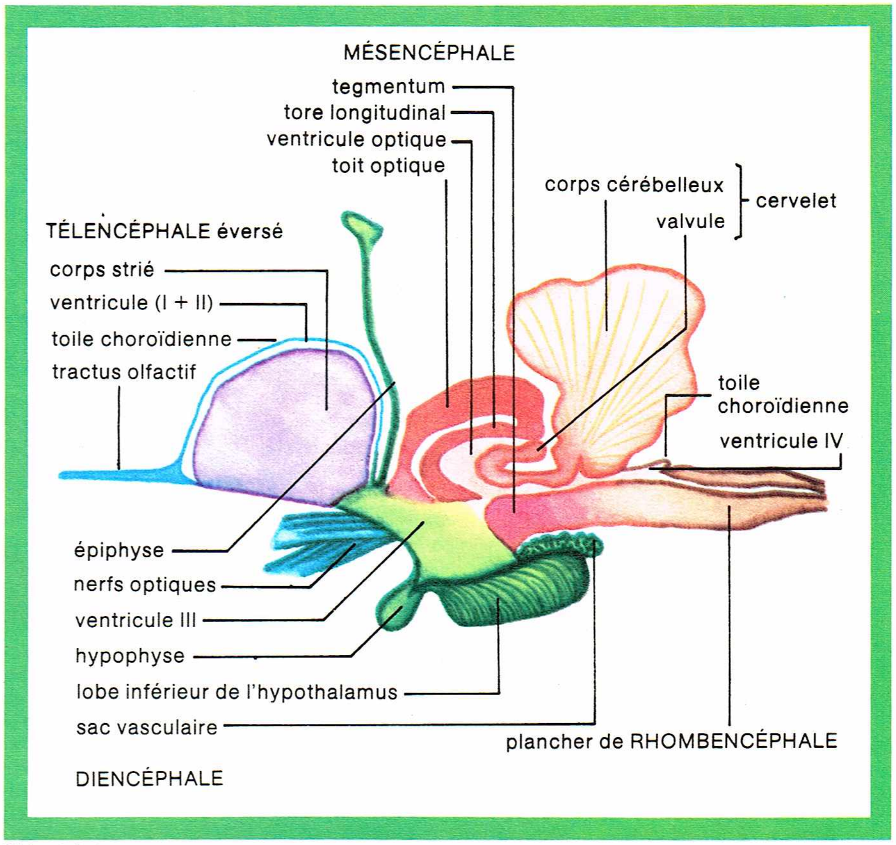

Richard Colin

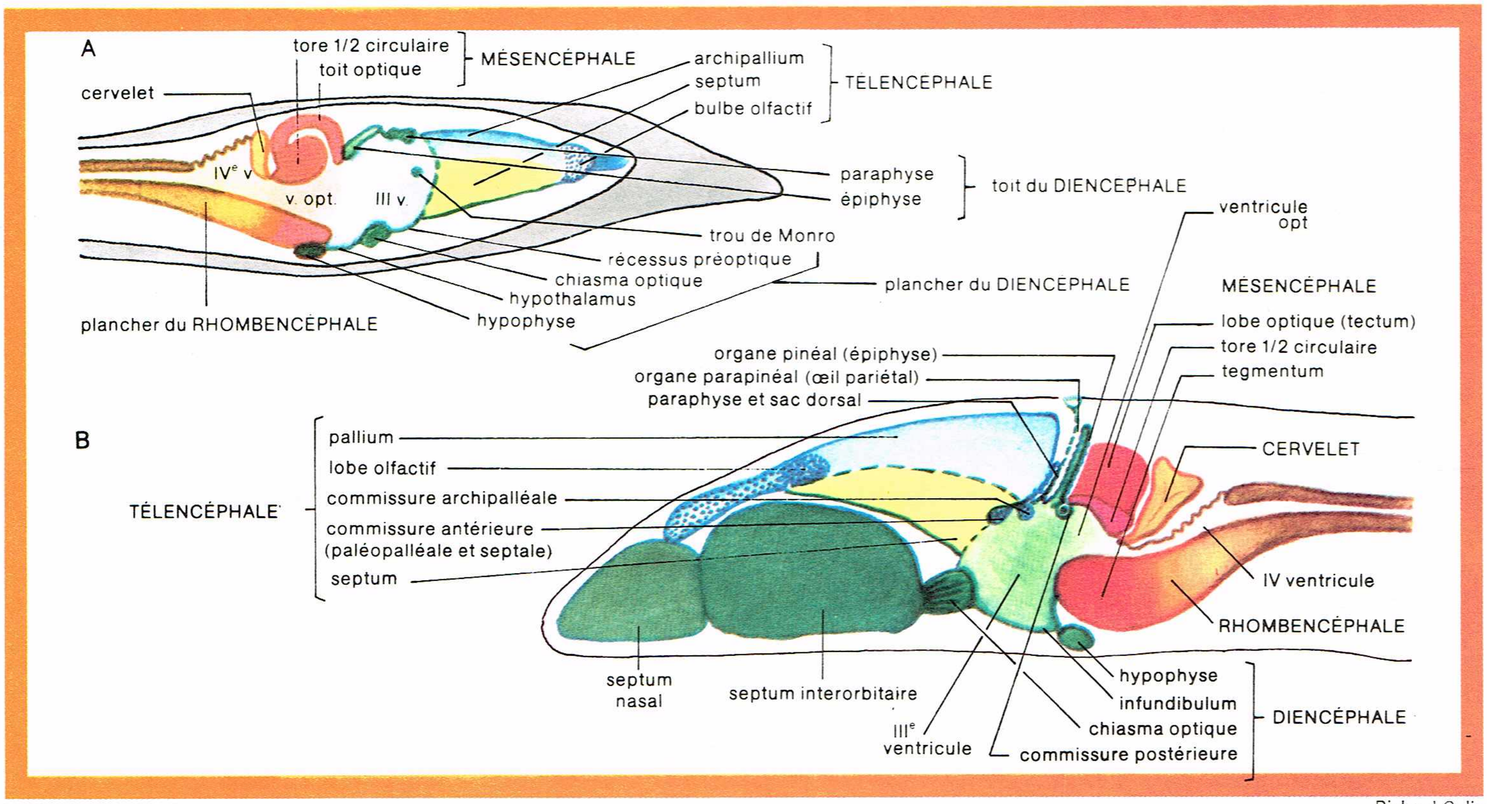

Richard Colin

▲ ***Coupe sagittale d'un encéphale d'Amphibien (A) : on observe que les flexures encéphaliques se sont effacées dans le cerveau achevé qui redevient rectiligne ; le cervelet est réduit ; le ventricule mésencéphalique (ou ventricule optique) est en grande partie occupé par les tores semi-circulaires qui ne laissent entre eux qu'un canal assez étroit. En B, coupe sagittale d'un encéphale de Reptile (lézard).***

le rhinencéphale (à prédominance olfactive, bien qu'il comprenne des formations non olfactives).

● *Paléopallium.* Refoulé ventralement, le paléopallium est séparé du néopallium par la fissure rhinale, de plus en plus ventrale au fur et à mesure de l'évolution. Il est divisé en bulbes, tubercules et lobes olfactifs qui sont bien développés chez les Mammifères macrosmatiques (tel le chien), plus ou moins réduits chez les microsmatiques, en particulier les Primates, et dont il ne reste qu'une partie, probablement non olfactive, chez les Cétacés anosmatiques. Ses connexions sont à peu près semblables à celles décrites chez les Amphibiens. La commissure antérieure groupe les fibres paléopalléales et archistriales.

● *Archipallium.* La croissance du néopallium repousse l'archipallium de plus en plus vers la face mésiale et le contraint à se reployer sur lui-même. Le repli est la fissure hippocampienne, autour de laquelle on distingue une zone interne, le *gyrus dentatus*, et une zone externe, le cortex hippocampien, ou corne d'Ammon. De plus, le développement du corps calleux en direction caudale allonge vers l'arrière le complexe hippocampien ; comme le télencéphale se courbe en s'agrandissant, la portion caudale de l'hippocampe, seule bien développée et typique, se trouve refoulée à un niveau beaucoup plus ventral que sa portion rostrale. Les fonctions de l'archipallium sont mal connues ; il existe de nombreuses connexions olfactives mais aussi des relations avec le

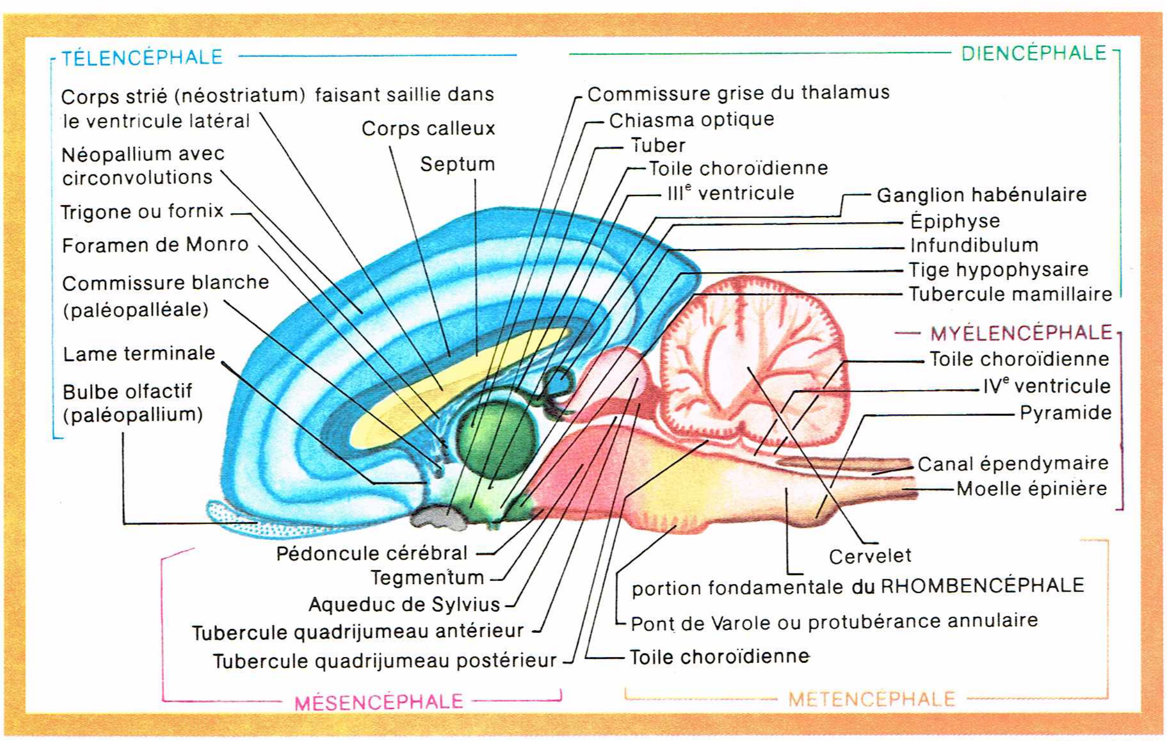

Richard Colin

▶ ***Coupe sagittale de l'encéphale d'un Mammifère (mouton).***

thalamus et l'hypothalamus. Le trigone, ou fornix, est un ensemble complexe de fibres, étiré par le déplacement de l'hippocampe, qui forme une voûte triangulaire au-dessus du 3e ventricule. Les fibres partant de l'hippocampe, appelées à ce niveau fimbria, ou piliers postérieurs, se divisent en un faisceau hippocampo-hypothalamique (pilier antérieur), qui rejoint les corps mamillaires de l'hypothalamus, et en fibres commissurales archipalléales (constituant le psaltérium), unissant les deux faisceaux droit et gauche.

● *Septum*. Il se réduit au cours de l'évolution à une mince cloison, qui, accolée à sa symétrique, forme le *septum lucidum* séparant les deux ventricules latéraux.

● *Striatum*. Repoussé vers l'intérieur des hémisphères, le complexe strié (paléostriatum, ou pallidum, plus néostriatum) va s'appliquer contre le diencéphale et fusionner avec le thalamus (aussi appelé couche optique) pour former les corps opto-striés qui bombent dans les ventricules latéraux. Des faisceaux de fibres pyramidales, descendant du néopallium, se fraient un passage à travers la substance blanche des formations striaires, appelée capsule interne, et coupent le néostriatum en deux portions : l'une, dorsale et interne, le noyau caudé (de forme arquée), l'autre, ventrale et externe, le putamen, qui s'associe au pallidum pour former le noyau lenticulaire. Un archistriatum est représenté par le noyau amygdalien refoulé à l'extrémité du noyau caudé. Les connexions du striatum sont très touffues et complexes; ses différents noyaux, reliés entre eux et avec le thalamus, reçoivent des fibres afférentes du néopallium et envoient des fibres efférentes à l'hypothalamus végétatif et au système réticulaire mésencéphalique. On comprend donc que les corps striés soient des centres effecteurs et qu'ils jouent un rôle important dans la coordination motrice et dans la posture; toutefois, leur physiologie reste confuse. Leur atteinte dans la maladie de Parkinson provoque un tremblement de repos joint à de la rigidité et à une difficulté de mouvement.

● *Néopallium*. Le développement du néopallium se fait transversalement, mais aussi rostralement et surtout caudalement, de telle sorte que le pôle postérieur du néocortex finit par atteindre le rhombencéphale, recouvrant le diencéphale et le mésencéphale. En même temps, une courbure antéro-postérieure, ou flexion télencéphalique, s'accentue et les ventricules se prolongent. Le néopallium devient l'aboutissement des voies sensitives et le lieu d'origine des principales voies effectrices; en même temps, des voies associatives se développent dans et entre les hémisphères.

Le néopallium conditionne l'activité consciente, volontaire. Son développement est en rapport avec le degré de psychisme : comme chacun le sait, le néocortex de l'homme est considérablement plus développé que celui de tous les autres Mammifères. Chez les Mammifères primitifs, dits lissencéphales, comme les Insectivores, il est lisse mais chez les Mammifères supérieurs, dits gyrencéphales (Ongulés, Carnivores, certains Cétacés et surtout Primates), il se plisse, dessinant des circonvolutions plus ou moins compliquées, séparées par des sillons ou des scissures.

Chez l'homme, les circonvolutions sont groupées en lobes frontal, pariétal, temporal et occipital. En même temps, la structure histologique du cortex se complique, avec six couches de cellules et de fibres. Les deux hémisphères corticaux sont unis par des fibres commissurales qui permettent de transmettre les informations d'un côté à l'autre et forment le corps calleux, dont le développement est en rapport avec l'expansion du néopallium. La croissance du néocortex s'accompagne de l'apparition de puissants systèmes afférents et efférents qui ont leurs points d'arrivée et de départ dans différentes zones, dites territoires corticaux de projection; leurs lésions se traduisent par des phénomènes sensitivo-sensoriels ou moteurs, immédiatement et facilement apparents. D'autres zones, dites d'association, ont des localisations plus floues et ne répondent à l'expérimentation que par des manifestations psychiques.

★ *Voies afférentes*. Les voies afférentes sont d'importants contingents de fibres venant des noyaux du thalamus; comme nous l'avons vu, ils apportent à l'écorce cérébrale des stimuli visuels, auditifs, statiques, tactiles et proprioceptifs. Les stimuli olfactifs sont transmis par le paléopallium (aire prépiriforme).

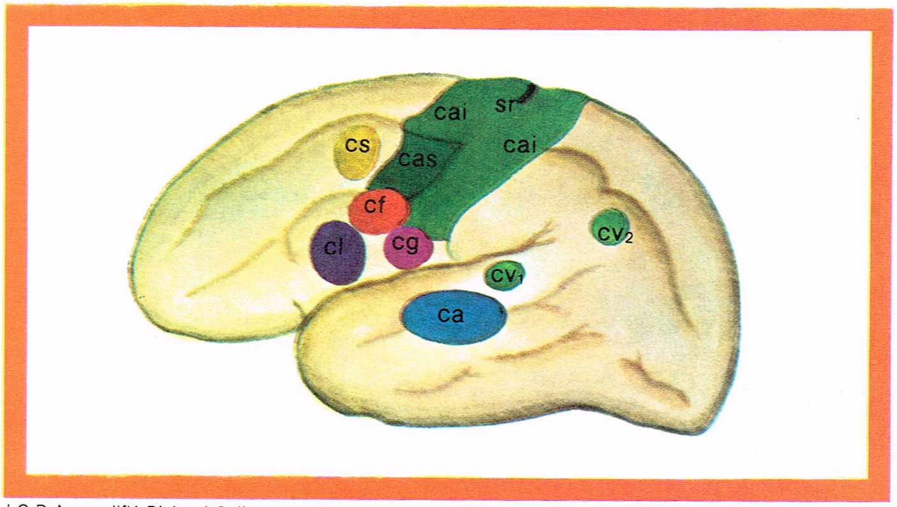

I.G.D.A., modifié Richard Colin

▲ *Représentation schématique de la localisation de quelques territoires corticaux du cerveau humain; cf, centre des mouvements de la face; cs, centre de l'écriture et de l'agraphie; cas, centre d'activité motrice des membres supérieurs; cai, centre de l'activité motrice des membres inférieurs; sr, sillon de Rolando; cv₁, centre de la surdité verbale; cv₂, centre de la cécité verbale; cl, centre du langage articulé et de l'aphasie; cg, centre de la phonation; ca, aire auditive.*

I.G.D.A., modifié Richard Colin

★ *Centres afférents*. Ces systèmes atteignent des territoires spécifiques corticaux : les centres récepteurs des sensations élémentaires; ceux-ci doivent être complétés par un étage de perception, phénomène psychologique complexe permettant l'interprétation de l'objet qui a provoqué les sensations. Les physiologistes étudient avec beaucoup de précision les localisations corticales des sensations et des perceptions en plaçant deux électrodes, l'une sur l'aire étudiée, l'autre en un point du crâne électriquement inactif; elles permettent de recueillir des fluctuations du potentiel, évoqué à partir d'une stimulation appropriée. Enfin, au-dessus de la sensation et de la perception, se situe, du moins chez l'homme, la reconnaissance de l'objet qui permet d'en saisir la signification symbolique : c'est ce que l'on appelle la *gnosie*.

On connaît bien la localisation des territoires corticaux. Ainsi, l'aire de la sensibilité générale, ou aire somato-sensitive, occupe la circonvolution pariétale ascendante, en arrière du sillon de Rolando; elle peut être subdivisée en sous-centres étagés correspondant aux différentes régions du corps et dont l'étendue relative dépend de la densité des récepteurs tactiles. L'aire de perception somato-psychique occupe la moitié postérieure de la pariétale ascendante.

L'aire auditive et les aires vestibulaires sont situées dans la partie supérieure de la première circonvolution temporale, autour de laquelle existe aussi une aire de perception et de reconnaissance.

L'aire visuelle est située dans la région occipitale; chaque point de la rétine se projette sur un point précis de l'écorce; on parle ainsi d'une rétine corticale. Autour de la zone sensorio-visuelle, se trouve une zone d'association où se réalise une synthèse des sensations élémentaires, qui permet d'abord de percevoir les objets puis de les reconnaître. La destruction de cette zone entraîne la cécité verbale : le sujet voit les mots écrits mais n'a plus la faculté d'en comprendre le sens.

Enfin, chez l'homme, il existe des territoires corticaux en rapport avec les activités propres à la personnalité : schéma corporel, émotion, mémoire, langage, etc., aires très larges puisque ces fonctions résultent du rassemblement d'informations issues de provenances diverses.

Des voies associatives complexes entrent en jeu pour transmettre les influx des centres récepteurs aux centres effecteurs à l'origine des courants descendants.

★ *Centres efférents*. La répartition de l'origine des voies efférentes est plus complexe qu'on ne l'a pensé pendant longtemps. Ainsi, on tend à abandonner la division entre système pyramidal et extrapyramidal pour une systématisation plus fonctionnelle. Les centres les mieux connus constituent l'aire pyramidale somato-motrice et commandent les neurones moteurs situés dans les noyaux somato-moteurs des cornes ventrales de la moelle épinière ainsi que dans les noyaux moteurs des nerfs crâniens. Ces centres moteurs se trouvent dans la circonvolution frontale ascendante, ou aire préfrontale, en avant du sillon de Rolando, et chacun correspond à un segment du corps. Leur destruction d'un côté entraîne des phénomènes d'hémiparalysie dans le segment correspondant de l'autre côté du corps, mais pour les seuls

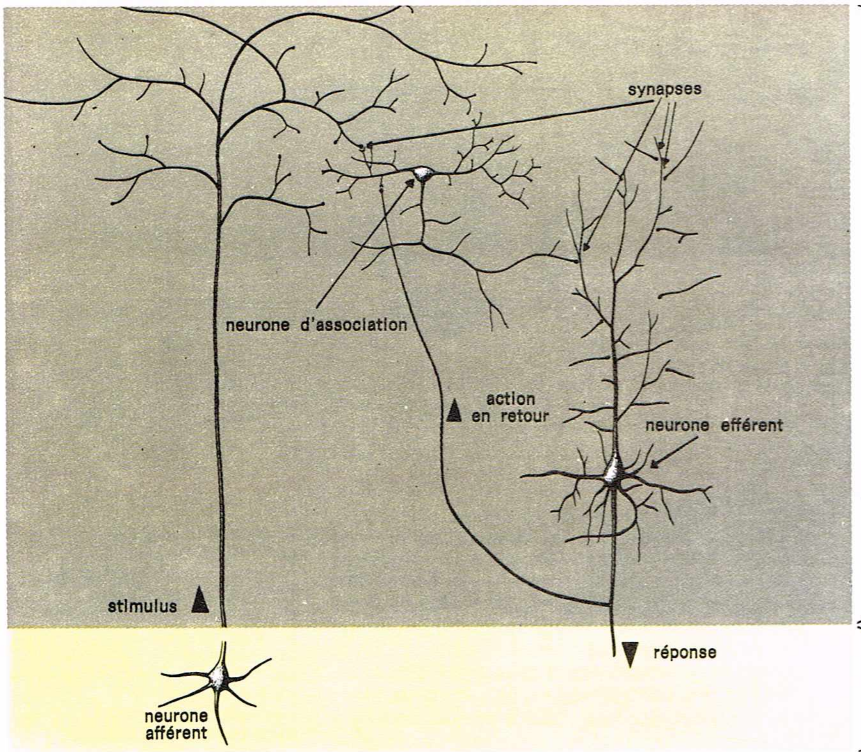

▲ *Représentation schématique de la propagation d'une impulsion dans le cortex cérébral.*

mouvements volontaires délicats. De plus on connaît, dans le cortex, des aires oculo-motrices et d'autres aires motrices de localisation moins précise, qui commandent des mouvements combinés ou même la suspension des mouvements. Enfin, des aires associatives répondent en de nombreux points à des stimulations.

★ *Voies efférentes.* Dans la voie cortico-spinale ou pyramidale, les fibres les plus grosses sont issues des grandes cellules pyramidales des centres de l'aire préfrontale, d'autres viennent des aires voisines. Notons, pour donner une idée de son importance, que les faisceaux pyramidaux de l'homme groupent environ 2 millions de fibres. La voie pyramidale descend du cortex par la capsule interne, puis dans les pédoncules cérébraux mésencéphaliques, puis à travers les fibres du pont de Varole ; dans les pyramides bulbaires, un contingent de fibres croise et fournit le faisceau latéro-dorsal des cordons de la moelle épinière ; un autre contingent forme le faisceau ventral, dont les fibres croisent dans les segments successifs de la moelle. Le développement de ces voies cortico-spinales va de pair avec le perfectionnement des commandes corticales. Elles ne sont ni l'instrument unique de la motricité volontaire, ni l'apanage de la seule aire motrice rolandique mais représentent un système moteur « de luxe » au service de la dextérité manuelle.

La voie cortico-rhombencéphalique (ou géniculée), partiellement associée à la voie pyramidale cortico-spinale, rejoint les noyaux somato-moteurs des nerfs crâniens. Ses fibres ont pour origine également l'aire précentrale et les aires voisines du cortex et se groupent en un faisceau dit géniculé (il fait un coude dans la capsule interne), qui passe ensuite dans la partie médio-ventrale des pédoncules cérébraux. Puis elles abandonnent la voie cortico-spinale à divers niveaux pour se distribuer de manière directe ou croisée sur les noyaux moteurs des nerfs crâniens, assurant le contrôle volontaire du mouvement de rotation des yeux (nerfs III, IV, VI) et de la tête (nerf IX), le contrôle de la motricité buccale et, surtout chez l'homme, de la motricité phonatoire (voix).

Les voies cortico-réticulaires émanent aussi des régions frontales et se projettent principalement au niveau du système réticulaire du rhombencéphale, à l'origine des deux voies réticulo-spinales antagonistes : les voies facilitatrice et inhibitrice de la motricité.

Les voies cortico-striaires sont extrêmement nombreuses mais confuses : elles sont souvent polysynaptiques et faites de fibres fines ; on les groupait sous le nom de voies extrapyramidales. Leurs fonctions, pourtant fort importantes dans la coordination motrice, sont donc très difficiles à mettre en évidence.

Les voies cortico-cérébelleuses sont très abondantes ; elles interviennent dans la régulation nerveuse.

Les voies cortico-colliculaires sont des fibres ayant leur origine dans les aires visuelles du cortex et aboutissant aux tubercules quadrijumeaux antérieurs ; elles assurent un contrôle automatique des mouvements conjugués des yeux et de la tête. Chez l'homme, ce faisceau prend une grande importance, alors que les voies de projection directe des afférences visuelles au niveau des tubercules mésencéphaliques s'appauvrissent (il s'agit de fibres à signification réflexe, ainsi que nous l'avons indiqué lors de l'étude du mésencéphale).

La coordination motrice est un acte central, intégré. Un mouvement met en jeu à la fois des activités réflexes, des activités coordonnées et des activités volontaires.

En réalité, la physiologie du cortex cérébral ne peut pas se réduire au schéma : voies sensorielles — centres localisés à fonction spécifique, sensoriels, associatifs et moteurs — voies motrices. En effet, ces dernières années, les neurophysiologistes ont mis en lumière les projections diffuses (transmises par le système réticulaire ascendant du tronc cérébral et par le système thalamique à projections corticales diffuses) qui envahissent tout le cortex et s'articulent avec des éléments situés dans toutes ses couches. Ces projections non spécifiques ont pour rôle de faciliter ou d'inhiber simultanément l'activité de plusieurs secteurs du cortex ou même de son ensemble. Elles exercent un effet sur l'activité électrique corticale globale, enregistrée dans les électro-encéphalogrammes.

En résumé, l'encéphale des Mammifères est caractérisé par le processus de télencéphalisation. L'afflux de systèmes afférents et efférents dans le néopallium entraîne le développement des systèmes associatifs et la transformation des étages sous-jacents, avec apparition de nouvelles structures. Alors que les différents étages du cerveau d'un non-mammalien peuvent posséder une large autonomie fonctionnelle, chez les Mammifères la majeure partie des activités est contrôlée par le néocortex télencéphalique. La centralisation des activités du névraxe s'affirme au fur et à mesure que l'on s'élève dans l'échelle des Mammifères et atteint son apogée chez l'homme.

Conducteurs

Nous avons vu que les fibres sensibles et motrices cheminaient dans des nerfs ; nous avons également indiqué l'origine et la destination des fibres. Il ne reste

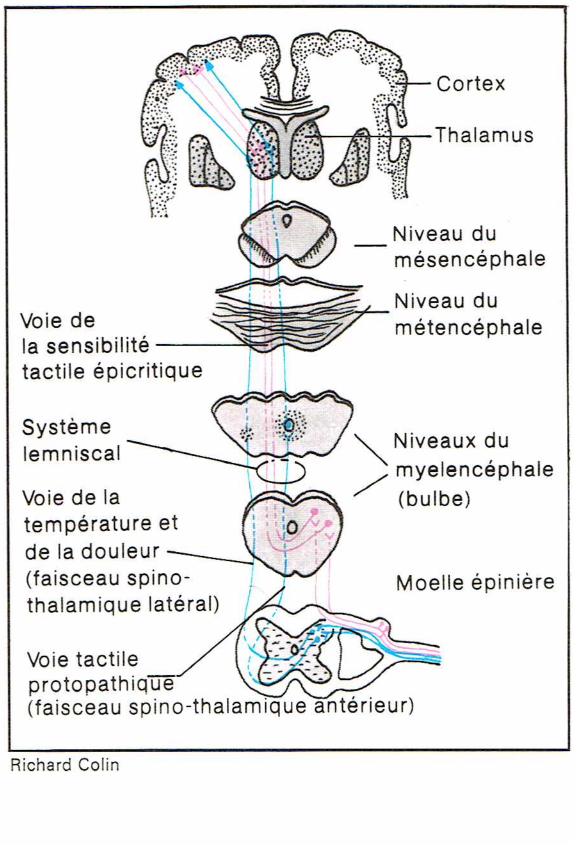

Richard Colin

▶ *Représentation schématique des voies extéroceptives.*

donc qu'à systématiser leur disposition. Suivant leur niveau par rapport au système nerveux central, on distingue les *nerfs spinaux*, ou *rachidiens*, et les *nerfs crâniens*.

Nerfs spinaux

Les nerfs spinaux partent de la moelle épinière de façon symétrique et métamérique, émergeant du canal rachidien entre les vertèbres; chacun correspond en principe à un myotome; leur nombre est en rapport avec la longueur de la moelle.

Ils naissent par deux racines : une racine ventrale, constituée de fibres somato-motrices (et viscéro-motrices préganglionnaires chez les Mammifères), une racine dorsale, ganglionnée, somato- et viscéro-sensible (et viscéro-motrice chez les Vertébrés non mammaliens). Ces deux racines s'unissent en un nerf mixte, qui bientôt se divise en un rameau dorsal pour les muscles et la peau du dos, et un rameau ventral, plus important; de cette branche, dérivent, chez les Tétrapodes, les nerfs destinés aux membres ainsi que le rameau communicant, par lequel les fibres préganglionnaires rejoignent la chaîne sympathique.

Nerfs crâniens

Les nerfs crâniens partent de différents étages de l'encéphale, principalement du rhombencéphale. Leur disposition présente de nombreuses particularités dues, notamment, à la perturbation de la segmentation au niveau céphalique. Chez les Poissons, les segments céphaliques restent encore bien marqués par la présence des arcs mandibulaires hyoïdiens et branchiaux, séparés par des fentes viscérales. Chez les Tétrapodes, chaque nerf peut encore être attribué à un segment originel; cependant, comme chaque segment a évolué de façon très différente, la disposition et la constitution des nerfs (composants fonctionnels) sont elles aussi très variables.

D'autre part, les racines nerveuses dorsales et ventrales ne s'unissent pas, comme c'est le cas pour les nerfs rachidiens, de sorte que pour un même segment le nerf dorsal et le nerf ventral sont indépendants et portent deux numéros et deux noms différents; l'un des deux peut ne pas se former.

— Les *racines dorsales,* mixtes, contiennent :

● des *fibres somato- et viscéro-afférentes, sensibles,* dont les cellules d'origine sont dans un ganglion crânien;

● des *fibres viscéro-efférentes,* dont les cellules d'origine sont centrales; on y distingue des fibres viscéro-motrices (spéciales), destinées à l'innervation de

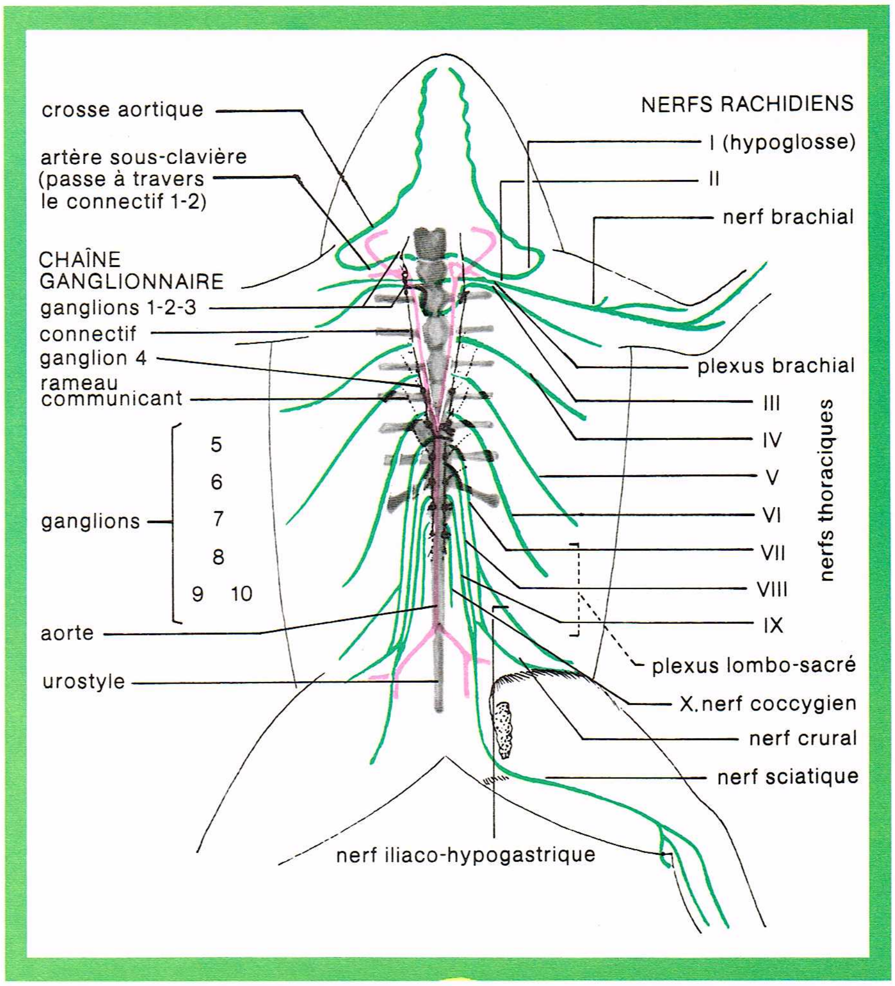

Richard Colin

▲ *Représentation schématique des nerfs rachidiens et de la chaîne sympathique d'un Amphibien (grenouille).*

▼ *Représentation schématique de la disposition des nerfs crâniens chez une grenouille.*

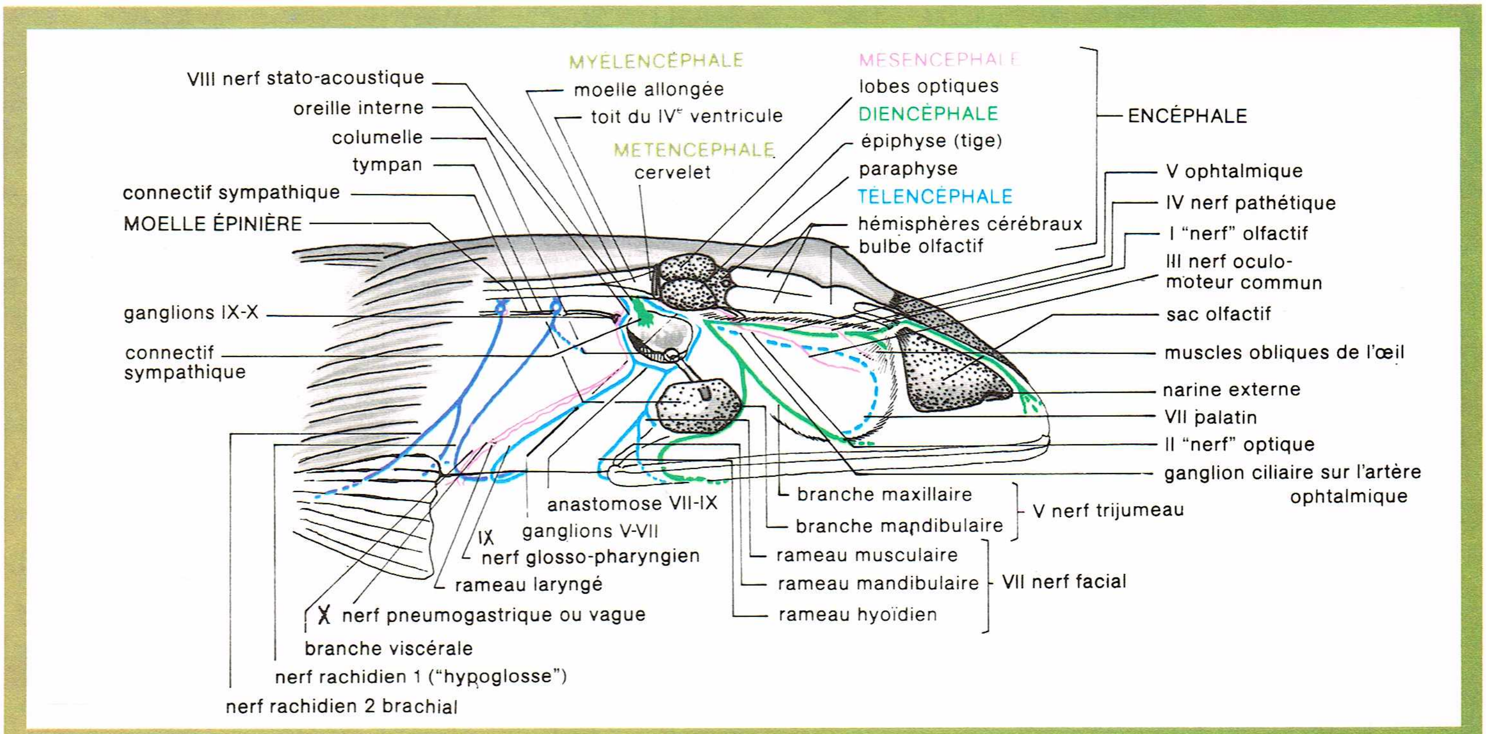

Richard Colin

SEGMENTS	NIVEAU D'ÉMERGENCE	NERFS et BRANCHES	TERRITOIRE INNERVE et COMPOSANTS FONCTIONNELS			
			POISSON SÉLACIEN		MAMMIFÈRE	
— — **Prémandibulaire**	Bulbe olfactif Diencéphale Mésencéphale	I olfactif II optique III oculo-moteur commun V_1 profond	épithélium nasal rétine muscles oculo-moteurs + fibres préganglionnaires (œil) région oculaire	SS SS SM VM SS	épithélium nasal rétine muscles oculo-moteurs + fibres préganglionnaires (œil) soudés à l'ophtalmique superficiel	SS SS SM VM
Mandibulaire ou viscéral I		IV pathétique V_2 opht superficiel-maxillaire V_3 mandibulaire trijumeau (ganglion semi-lunaire)	muscle oblique supérieur peau du museau peau mâchoire sup. musculature mandibulaire peau mâchoire inf.	SM SS SS VM* SS	oblique supérieur peau du museau et région oculaire + muqueuse de la voute buccale musculature masticatrice + muqueuse plancher buccal (→ n. lingual)	SM SS SS VM* SS
Hyoïdien ou viscéral II	Rhombencéphale	VI oculo-moteur externe VII facial (ggl. géniculé): opht. superficiel; prétrématique; post. trématique	muscle droit externe bourgeons gustatifs + n. latéral → n. palatin bourgeons gustatifs + n. latéral hyoïdien : muscles + n. latéral-mandib. interne bourgeons gustatifs	SM VS SS VS SS VM* SS VS	droit externe → grand n. pétreux → fibres ganglionnaires (gl. lacrymales) musculature faciale corde du tympan → fibres gustatives du nerf lingual → fibres préganglionnaires (gl. salivaires)	SM VM VM* VS VM
		VIII stato-acoustique (ganglions)	oreille interne	SS	vestibule cochlée	SS SS
Branchial 1 ou viscéral III		IX glosso-pharyngien (ganglions): prétrém pharyngien; post-trém	bourgeons gustatifs 1ᵉ arc branchial muqueuse pharynx	VS VS VM* VS	— cavité tympanique musc. larynx papilles gustatives langue postérieure → fibres prégangl. (parotide)	VM* VS VM
Branchiaux 2-3-4-5 ou viscéraux IV, V, VI, VII		X vague (ganglions): 1-2-3-4 prétrém, post-trém; viscéral; latéral	musculature branchiale → fibres préganglionnaires (viscères) ligne latérale	VS VM* VS VM VS SS	muscles laryngés et hyoïdiens → fibres préggl. (viscères)	VM* VM VS
Post-branchiaux	moelle épinière	XI (origine spinale et individualisé du X) spinal	—		muscles du cou	VM*
		XII hypoglosse	nerfs spinaux occipitaux - muscles hypobranchiaux	SM	musculature linguale	SM

en noir : faux nerf (sensibles)
en vert : nerfs sensibles correspondant à des racines dorsales
en bleu : nerfs mixtes correspondant à des racines dorsales
en rouge : nerfs moteurs correspondant à des racines ventrales

SS : somato-sensible } *afférents*
VS : viscéro-sensible
VM : viscéro-moteur (système parasympathique
VM : viscéro-moteur spécial (musculature d'origine viscérale, mais striée)*
SM : somato-moteur

muscles branchiaux ou mandibulaires (d'origine viscérale mais striés), et des fibres viscéro-efférentes préganglionnaires du système parasympathique (voir le système autonome), qui vont se relayer dans un ganglion autonome.

Les racines dorsales se divisent en plusieurs rameaux : un rameau typiquement prétrématique, c'est-à-dire passant en avant de la fente viscérale correspondante, un post-trématique et un pharyngien.

— Les *racines ventrales* comportent uniquement des fibres somato-motrices destinées aux muscles oculomoteurs qui sont, avec la musculature de la langue des Vertébrés supérieurs, les seuls muscles d'origine somitique.

De plus, il faut remarquer qu'avec le passage de la vie aquatique à la vie terrestre, certains nerfs spéciaux aux Poissons disparaissent (les nerfs du système latéral), tandis que d'autres se développent. Avec l'agrandissement du crâne chez les Vertébrés supérieurs, la première paire de nerfs spinaux devient crânienne. Enfin, les deux premiers nerfs crâniens, qui sont en réalité des prolongements encéphaliques et non pas des nerfs véritables, ne correspondent pas à un segment.

En résumé, les nerfs crâniens sont tous différents les uns des autres. Il y en a dix paires chez les Poissons et douze paires chez les Mammifères. Leur numérotation n'a qu'une valeur pratique; leur dénomination est copiée sur celle de l'anatomie humaine.

Le tableau ci-contre donne une idée de la répartition des fibres dans les nerfs crâniens et de leurs destinations. Il n'est pas possible ici de décrire en détail leurs trajets; cependant, tout en observant que l'organisation fondamentale des nerfs crâniens est constante chez les Vertébrés il faut faire quelques remarques à propos de certains aménagements fonctionnels des nerfs VII et X.

La branche du nerf VII qui innerve la musculature de l'arc hyoïdien chez les Poissons prend une importance différente chez les Mammifères : cette musculature a envahi la face (muscles de la mimique), ce qui vaut au nerf VII l'appellation de facial.

Les rameaux sensibles du nerf VII des Poissons se réduisent chez les Mammifères, à cause de la disparition du système latéral et de la concentration des bourgeons gustatifs sur la langue : la branche palatine devient le grand nerf pétreux qui contient des fibres préganglionnaires du système parasympathique destinées à l'innervation des glandes de la face, en particulier des glandes lacrymales.

La branche mandibulaire interne, qui prend le nom de corde du tympan parce qu'elle traverse la cavité tympanique, va, chez les Mammifères, rejoindre la branche linguale du nerf mandibulaire V, apportant des fibres viscéro-sensibles pour les papilles gustatives de la région antérieure de la langue, ainsi que des fibres préganglionnaires destinées à l'innervation des glandes salivaires. Chez les Tétrapodes, avec la disparition de l'appareil branchial, les rameaux branchiaux du vague se réduisent considérablement. Les fibres viscéro-motrices et quelques fibres viscéro-sensibles vont innerver la musculature du larynx (région dérivée des arcs branchiaux). Le rameau viscéral devient prépondérant avec des fibres viscéro-motrices préganglionnaires et des fibres viscéro-sensibles destinées aux viscères : cœur, poumons, organes digestifs.

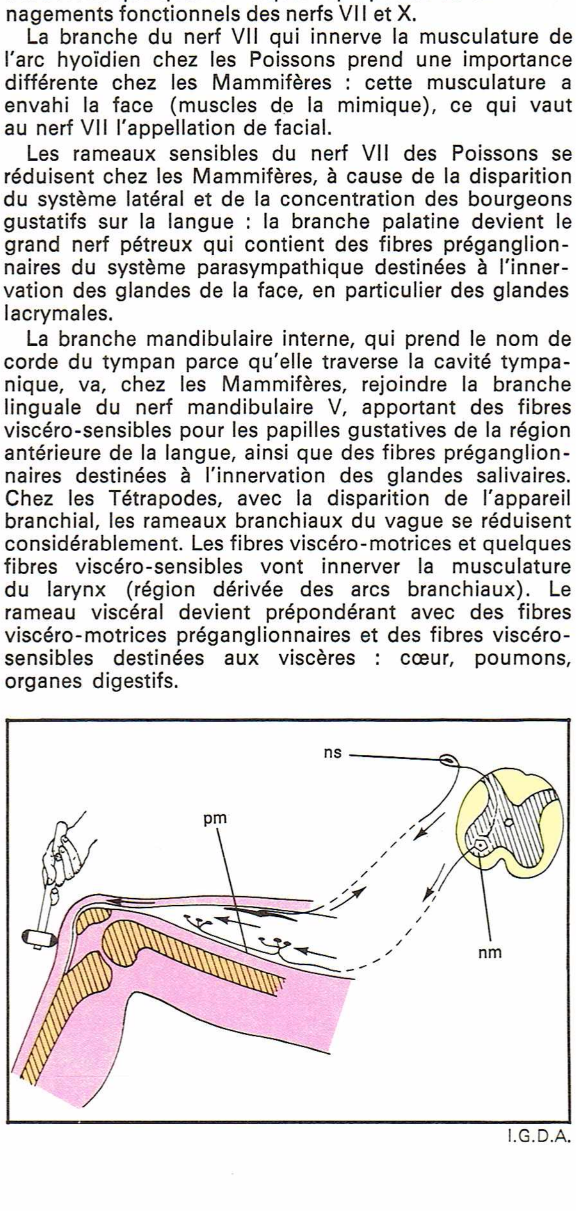

I.G.D.A.

Répartition des nerfs crâniens d'après leur nature et leur fonction	
"FAUX NERFS"	I. Olfactif II. Optique — purement somato-sensibles
NERFS MOTEURS	III. Oculo-moteur commun IV. Trochléaire ou pathétique VI. Oculo-moteur externe XI. Spinal ou accessoire XII. Hypoglosse
NERFS MIXTES	V. Trijumeau VII. Facial IX. Glossopharyngien X. Pneumogastrique ou vague
NERFS SENSIBLES	VIII. Stato-acoustique Latéral (fibres avec VII et X chez les Poissons).

▲ ***Répartition des nerfs crâniens.***

◀ ***Page ci-contre, tableau de la répartition des nerfs crâniens chez les Sélaciens et chez les Mammifères.***

◀ ***Représentation schématique du mécanisme du réflexe patellaire ; ns, neurone sensitif ; nm, neurone moteur ; pm, plaque motrice.***

Système nerveux autonome

Système régulateur de la vie végétative, le système nerveux autonome est un ensemble complexe qui innerve la musculature lisse non volontaire des viscères, des vaisseaux et du tissu sécrétoire des glandes. Il assure la régulation des fonctions dites végétatives : fonctions circulatoire, respiratoire, digestive, de reproduction, endocrinienne, métabolique, etc., et prend part au comportement de l'individu. Il atteint son maximum de développement chez les Mammifères. Ce système n'est en fait pas autonome, car il est intimement lié au système cérébro-spinal; les connexions centrales peuvent être telles que les deux systèmes sont associés au déroulement de certains actes physiologiques.

Le système nerveux autonome est essentiellement un système efférent, viscéro-moteur. Cependant, on reconnaît maintenant l'existence de fibres afférentes autonomes dont le trajet est mal connu, mais qui semblent nécessaires pour constituer des arcs réflexes végétatifs complets.

Organisation du système nerveux autonome

Des considérations anatomiques et fonctionnelles, qui seront précisées plus loin, permettent de distinguer deux systèmes autonomes : le *sympathique* (ou *orthosympathique*) et le *parasympathique*. Chacun d'eux comporte une série de centres axiaux et une partie périphérique efférente.

Partie périphérique

La caractéristique essentielle du système autonome périphérique est la présence, à chaque niveau, de *deux neurones* placés bout à bout et articulés entre eux par une synapse siégeant dans un ganglion : le premier, le neurone préganglionnaire, prend naissance dans le névraxe; le second, le neurone postganglionnaire, ou sympathique, prend naissance dans un ganglion situé

▼ ***Schématisation du système nerveux autonome d'un Mammifère et de ses relations avec les organes viscéraux; en bleu, les neurones cholinergiques; en rouge, les neurones adrénergiques; en vert, les neurones afférents; les lignes continues représentent les fibres préganglionnaires, les pointillés les fibres postganglionnaires; noc, nerf oculo-moteur commun; nfc, nerf facial; ngl, nerf glosso-pharyngien; nva, nerf vague; ic, iris et muscles ciliaires; gc, ganglion ciliaire; ntb, niveaux mésencéphalique et rhombencéphaliques; gl, glandes lacrymales; gsf, ganglion sphénopalatin; gsl, glande sub-linguale; gsm, glande sous-maxillaire; gpa, glande parotide; go, ganglion otique; cu, cœur; tr, trachée; fe, foie, voies biliaires et pancréas; mi, rate; gce, ganglion cœliaque; ngs, nerf splanchnique antérieur; st, estomac; re, rein et uretère; mids, médullo-surrénale; nps, nerf splanchnique postérieur; co, côlon distal; ve, vessie urinaire; gms, ganglion mésentérique supérieur : ret, rectum; gmi, ganglion mésentérique inférieur; gee, organes génitaux externes; fpa, rameaux destinés aux vaisseaux sanguins, aux follicules des membres inférieurs et aux viscères; ggc, ganglion géniculé; orm, oreille moyenne; gpt, ganglion pétreux; lu, luette; tpn, amygdale palatine; lin, langue; gan, ganglion jugulaire; po, poumon; nfr, nerf phrénique; dia, diaphragme; int, intestin grêle; ut, utérus; sfu, sphincter urinaire; ov, ovaire; affv, afférences viscérales et fibres segmentaires adrénergiques et cholinergiques allant vers les vaisseaux sanguins, les glandes sudoripares et les follicules pileux; mid, mit, mil, mis, régions cervicale, thoracique, lombaire et sacrée de la moelle épinière.***

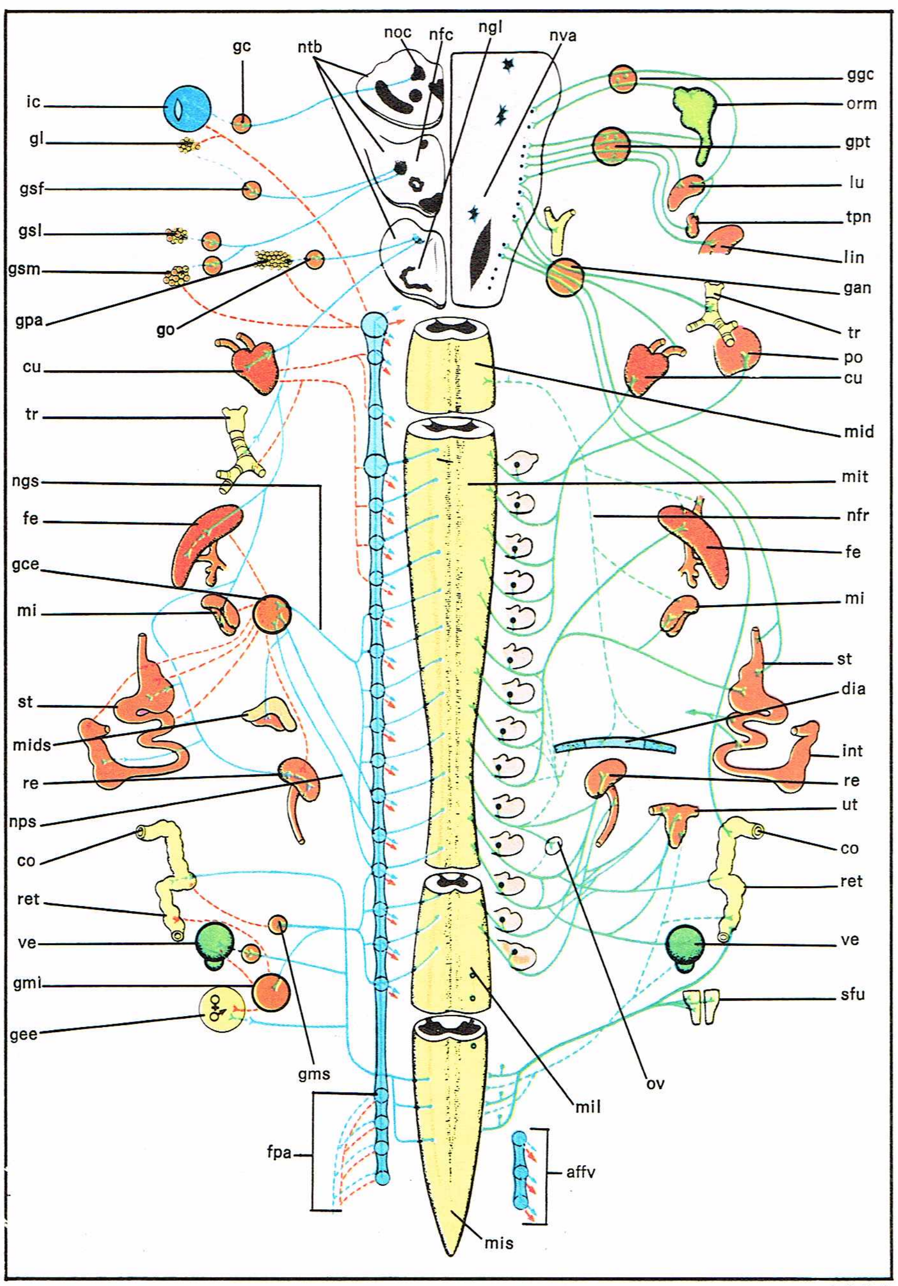

I.G.D.A.

hors du névraxe. La fibre préganglionnaire est myélinisée (blanche) ; la fibre sympathique n'a qu'une mince lame de myéline (grise).

— *Le système sympathique*

Les neurones préganglionnaires prennent naissance dans les régions thoracique et lombaire de la moelle. Leurs cellules sont situées dans la région latéro-dorsale des cornes ventrales. Les axones s'engagent dans les racines spinales (ventrales chez les Mammifères) puis rejoignent, par les rameaux communicants blancs, des amas ganglionnaires situés de part et d'autre de la moelle, les *ganglions sympathiques paravertébraux,* qui sont généralement disposés en files et unis entre eux par des connectifs, formant une chaîne ganglionnaire paravertébrale.

Au niveau de ces ganglions, plusieurs possibilités se présentent :

● Les fibres préganglionnaires peuvent faire synapse ; les neurones sympathiques prennent naissance et leurs axones, passant par le rameau communicant gris, rejoignent le rameau ventral du nerf rachidien. Ces fibres vont innerver les muscles lisses des capillaires de la peau (rôle vasomoteur), les glandes cutanées, en particulier sudoripares, et les muscles érecteurs des poils.

● Les fibres ganglionnaires traversent le ganglion sans se relayer et poursuivent leur course, soit par les connectifs pour relayer à des étages différents de la chaîne, soit jusqu'à des *ganglions préviscéraux,* où prennent naissance les neurones postganglionnaires qui vont innerver les muscles lisses des organes viscéraux et les glandes; dans ce dernier cas, la complication vient du fait que de nombreuses fibres issues de niveaux différents se rejoignent, constituent des nerfs sympathiques, splanchniques, et forment des plexus dans les mailles desquels sont logés les ganglions (cœliaque et mésentériques).

Les cellules de la médullo-surrénale représentent un cas particulier de cellules ganglionnaires qui ont migré et se sont transformées; elles sont caractérisées par la présence de granulations protéiques qui fixent les sels de chrome, d'où leur nom de *cellules chromaffines ;* elles reçoivent leur innervation de fibres préganglionnaires faisant partie du nerf splanchnique et sécrètent de l'adrénaline ou de la noradrénaline (précurseur de l'adrénaline). On trouve aussi, en dehors de la surrénale, des amas chromaffines, ou paraganglions, également sécréteurs d'adrénaline.

Dans la région cervicale de la moelle, il n'y a pas d'émergences préganglionnaires; toutefois, les ganglions sympathiques cervicaux groupés reçoivent des fibres des premiers segments thoraciques, et leurs fibres postganglionnaires rejoignent d'autres fibres sympathiques ou parasympathiques. De même, dans les derniers segments lombaires, les ganglions sympathiques reçoivent leurs afférences de neurones préganglionnaires précédents, et leurs fibres sympathiques s'entremêlent avec les fibres du parasympathique pelvien. Cela donne une idée de l'enchevêtrement des fibres pré- et postganglionnaires du système autonome.

— *Le système parasympathique*

Il se divise en deux régions : crânienne et pelvienne.

● Dans le *parasympathique crânien,* les neurones préganglionnaires prennent naissance dans le mésencéphale et le rhombencéphale; leurs fibres empruntent les nerfs crâniens III, VII, IX et surtout X (nerf vague). Les ganglions-relais sont situés au contact des organes innervés ou dans leur paroi (ganglions viscéraux), parfois très loin des centres; les fibres préganglionnaires peuvent donc être très longues et les fibres postganglionnaires très courtes.

Ainsi, les fibres préganglionnaires du nerf vague, très importantes chez les Tétrapodes, vont se relayer sur des cellules ganglionnaires dispersées dans des plexus, cardiaque, pulmonaire, et des parois des viscères.

● Dans *le parasympathique pelvien,* les neurones préganglionnaires prennent naissance dans la région sacrée de la moelle; leurs fibres s'unissent en un nerf pelvien, et les neurones postganglionnaires situés dans des plexus atteignent le rectum, la vessie, l'utérus et les organes génitaux externes.

Centres axiaux

Le système nerveux autonome est commandé par des centres qui ne sont pas toujours bien individualisés.

Dans la moelle épinière, se situent des centres mettant en jeu la vasomotricité, l'érection des poils, la sudation, ainsi que des centres cardio-accélérateurs et génito-urinaires; dans le rhombencéphale, il existe des centres respiratoire, vasomoteur, cardiaque.

Mais les centres coordinateurs des fonctions autonomes assurant une bonne régulation du milieu intérieur se situent spécialement dans l'hypothalamus : ce sont les noyaux végétatifs et tout le complexe hypothalamo-hypophysaire, que l'on ne peut pratiquement pas séparer de l'ensemble du névraxe, puisque cette région représente un carrefour anatomique et fonctionnel muni de nombreuses afférences et efférences. C'est par l'intermédiaire de cette région que s'établissent les relations entre les systèmes nerveux et endocrinien. Enfin, la représentation du système autonome dans le cortex cérébral constitue un problème complexe, encore loin d'être résolu.

Physiologie

L'étude de l'organisation du système autonome laisse présager la complexité de son fonctionnement et de son rôle.

Médiateurs chimiques

Tout d'abord, la transmission de l'influx entre les terminaisons des fibres postganglionnaires et les effecteurs nécessite, comme au niveau des synapses neuromusculaires somatiques, un médiateur chimique. Or, en ce qui concerne le système autonome, il y a deux médiateurs : l'acétylcholine pour le système parasympathique et la noradrénaline pour le système sympathique, à quelques exceptions près. On distingue donc fonctionnellement, suivant la nature du médiateur, des fibres *cholinergiques* et des fibres *adrénergiques* et on appelle *sympathico-* ou *parasympathicomimétiques* les substances dont l'administration est suivie de réactions analogues à celles de l'excitation des fibres de l'un ou l'autre système.

La transmission synaptique entre les neurones pré- et postganglionnaires, au niveau des ganglions, a pour médiateur l'acétylcholine. Au niveau de la médullo-surrénale et des amas chromaffines, on retrouve ce médiateur, ce qui prouve bien que les cellules chromaffines sont équivalentes de cellules ganglionnaires; c'est l'acétylcholine libérée par les fibres du nerf splanchnique qui est responsable de leur sécrétion d'adrénaline : l'action de la médullo-surrénale est sympathicomimétique.

Fonctions du système autonome

La répartition des fonctions entre le sympathique et le parasympathique est difficile à établir. On pensait que les organes étaient innervés par chacun des deux systèmes, agissant de façon antagoniste : on supposait, par exemple, que l'accélération du rythme cardiaque s'effectuait par le sympathique, la modération par le parasympathique. En fait, cette conception doit être très nuancée : certains organes ne reçoivent qu'une innervation et un même système peut agir tantôt comme accélérateur, tantôt comme inhibiteur. D'autre part, suivant les circonstances, l'un ou l'autre système peut être sollicité, suivant la cause, pour une même action. C'est ainsi que la fermeture de la pupille qui se produit lorsque l'œil reçoit de la lumière et sa dilatation à l'obscurité sont contrôlées par le seul parasympathique. Par contre, c'est une stimulation du sympathique qui provoque la dilatation de la pupille sous l'effet d'une émotion ou de la colère.

— Les *fonctions du parasympathique* consistent dans l'ensemble à « conserver les ressources de l'organisme ». Le parasympathique stimule les sécrétions salivaires et gastro-intestinales et les réflexes conditionnés. L'adaptation de la fréquence cardiaque aux besoins de la circulation se fait pratiquement par son intermédiaire (des ganglions du parasympathique sont étroitement associés au tissu nodal du muscle cardiaque). Enfin, le parasympathique pelvien contrôle les phénomènes d'évacuation de la vessie et du rectum.

— Les *fonctions du sympathique* sont moins localisées. Sa stimulation entraîne essentiellement la hausse de tension, la sudation, l'horripilation; il joue donc un rôle important dans la régulation de la pression artérielle (vasoconstriction, et vasodilatation par inhibition du tonus constricteur) et dans la lutte contre la chaleur; l'éjaculation est sous la dépendance du sympathique lombaire. Ce qui caractérise l'action du sympathique est sa tendance à entrer en activité comme un tout, conduisant à des décharges sympathiques généralisées, auxquelles participe la médullo-surrénale, qui surviennent principalement au cours de circonstances critiques, telles que la douleur, le froid, la colère, les émotions, etc.

Ainsi, plutôt qu'un antagonisme, c'est un état d'équilibre complémentaire qui s'établit entre les deux systèmes.

En conclusion, on doit reconnaître que, malgré les connaissances approfondies que nous avons maintenant des divers aspects du système nerveux et les nombreux travaux qu'il suscite, bien des mécanismes nous échappent encore. Plus une fonction nerveuse est perfectionnée, plus elle est réglée par une série de mécanismes en cascade, eux-mêmes soumis à des influences nerveuses et hormonales différentes. Des fonctions telles que le sommeil et, plus encore, la mémoire sont extrêmement difficiles à localiser. Rappelons que le fonctionnement cohérent du système nerveux est dû à l'incroyable activité des synapses. Si des mouvements réflexes nécessitent des processus complexes, que dire de la pensée et de l'intelligence ?

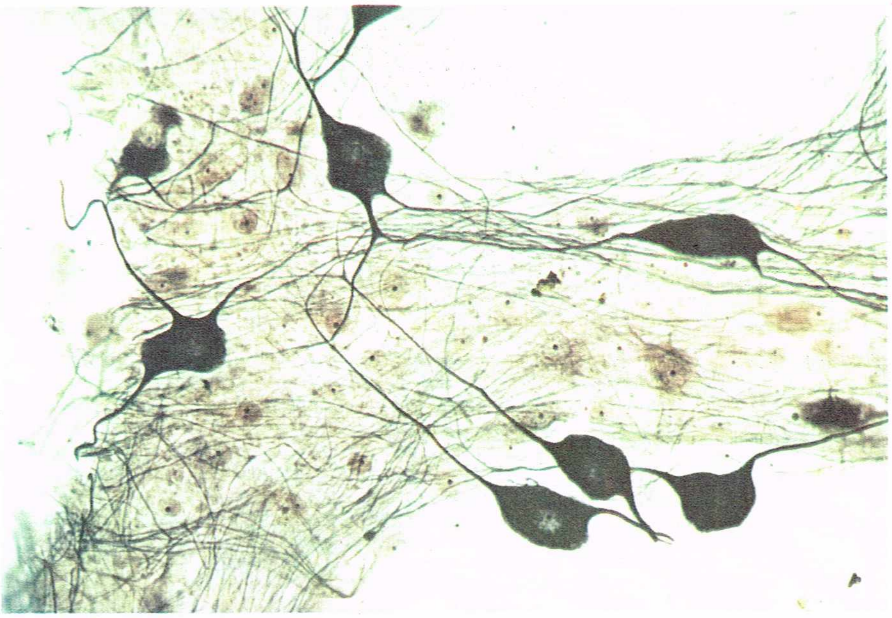

B. Graf

▲ ***Plexus mésentérique de chat : des fibres appartenant aux systèmes sympathique et parasympathique forment des plexus dans les mailles desquels se logent les cellules ganglionnaires dont les fibres innervent la paroi de l'intestin.***

▼ ***Tableau des composants du système*** **parasympathique crânien.**

PARASYMPATHIQUE CRÂNIEN		
Nerfs crâniens avec lesquels cheminent les fibres préganglionnaires	Relais ganglionnaires	Territoires innervés
III	ganglion ciliaire	muscles constricteurs de l'iris muscles ciliaires accommodateurs
VII	ganglion sphéno-palatin ganglion sous-maxillaire ganglion sublingual	glande lacrymale glande sous-maxillaire glande sublinguale
IX	ganglion otique	glande parotide
X	cellules ganglionnaires dispersées dans les plexus : laryngé cardiaque pulmonaire solaire de Meissner et d'Auerbach	 muscles du larynx muscles cardiaques muscle du poumon musculature de l'estomac musculature de l'intestin

ENDOCRINOLOGIE DES INVERTÉBRÉS

Il semble que tous les Invertébrés possèdent des glandes endocrines, mais celles-ci peuvent être réduites à de simples cellules neurosécrétrices ; elles régulent (par inhibition ou activation) la croissance, la reproduction, l'équilibre hydrominéral et, parfois, la coloration de ces animaux. Il est difficile, dans l'état actuel de nos connaissances, de donner un aperçu global et synthétique du problème, car il est impossible de faire correspondre entre elles les glandes endocrines des animaux appartenant à des embranchements différents. Il faut cependant souligner que de nombreuses hormones ont des actions antagonistes sur la croissance et la reproduction.

Cœlentérés

L'hydre d'eau douce a des cellules neurosécrétrices, situées autour de la bouche et à la base des tentacules. En activité, ces cellules favorisent la multiplication asexuée (par bourgeonnement) et inhibent la reproduction sexuée. Tous les facteurs externes qui commandent l'apparition de la reproduction sexuée (basse température, photopériode courte, jeûne, taux de CO_2 élevé) rendent les cellules neurosécrétrices inactives. La strobilisation chez les Scyphozoaires serait aussi commandée par des neurosécrétions.

Plathelminthes

Les Plathelminthes possèdent des cellules neurosécrétrices situées dans la partie postérieure des ganglions cérébroïdes et dans la partie antérieure des nerfs longitudinaux. L'activité de ces cellules est nécessaire à la régénération de ces animaux (Turbellariés). Elles interviendraient aussi dans leur reproduction : en effet, certains auteurs ont noté une concordance entre l'apparition des grains de neurosécrétion et les cycles de reproduction. Elles sont indispensables à la formation des proglottis à partir du scolex chez *Hymenolepis diminuta* (Cestodes).

▼ *En haut, système nerveux antérieur du Nématode* **Ascaris lumbricoides.** *Les cellules neurosécrétrices sont situées dans les ganglions latéraux (les cellules sensorielles se colorent comme des cellules neurosécrétrices).* **En bas,** *organes cérébraux chez les Némertes : A, l'organe cérébral est à la surface de l'épithélium ; il communique avec le ganglion dorsal par un nerf ; B, l'organe cérébral est interne et accolé au ganglion dorsal ; C, l'organe cérébral et le ganglion dorsal ne font qu'un.*

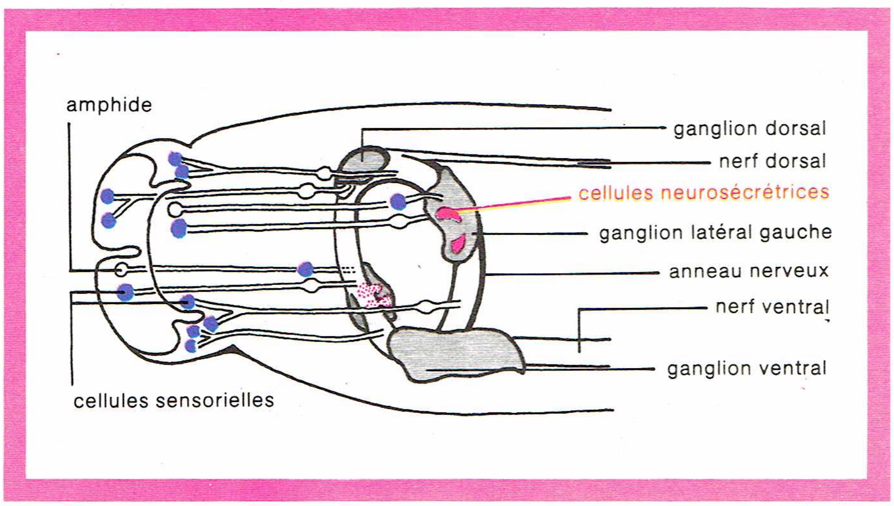

Richard Colin

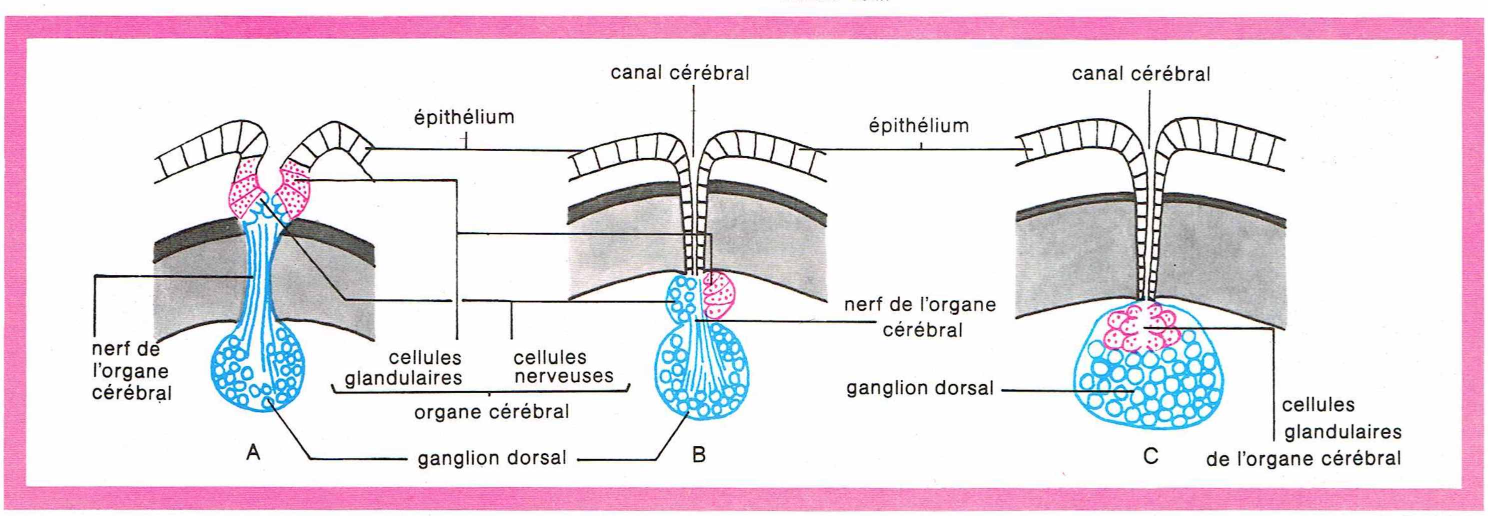

Richard Colin

Némertes

Les Némertes possèdent un organe cérébral composé d'éléments nerveux et glandulaires, plus ou moins étroitement associés. En activité, les cellules neurosécrétrices inhibent la maturation des gonades et le développement des caractères sexuels secondaires. L'organe cérébral sécréterait, en plus, une hormone réglant l'équilibre hydrominéral de ces animaux.

Les mâles possèdent, associée aux testicules, une glande « androgène » qui, implantée chez une femelle non mature, est capable de la masculiniser ; cette glande jouerait un rôle important dans la différenciation des sexes.

Nématodes

Des éléments neurosécréteurs sont situés dans l'anneau périœsophagien et dans les ganglions qui y sont associés. Il y a concordance entre le cycle de mue et l'apparition des grains de sécrétion dans les cellules neurosécrétrices. Leur activité est nécessaire à l'apparition du liquide de mue et à l'ecdysis, mais non au dépôt de la cuticule.

Annélides

Les Annélides possèdent des cellules neurosécrétrices situées dans les ganglions cérébroïdes et dans certains ganglions de la chaîne nerveuse ventrale.

— *Polychètes*

Une neurohormone provenant des ganglions cérébroïdes inhibe la maturation des gamètes et active la croissance de ces animaux (elle permet parfois leur régénération, dans le cas où ils ont été amputés). L'arrêt de l'activité des cellules neurosécrétrices à la maturité sexuelle se traduit, chez certains Vers (Néréidiens), par l'apparition de formes épitoques et, dans tous les cas, par la croissance rapide des ovocytes présents dans le cœlome.

— *Oligochètes*

A l'inverse de ce qui se passe chez les Polychètes, les neurosécrétions sont nécessaires à l'activité des gonades et à la différenciation des caractères sexuels secondaires. Certaines des neurosécrétions empêcheraient ces Vers d'entrer en diapause et seraient nécessaires pour toute régénération. Certaines interviendraient dans leur équilibre hydrominéral, en diminuant la perméabilité des parois et en influençant les mécanismes de transfert des ions. Enfin, il semble que les ganglions cérébroïdes sécrètent un facteur hyperglycémique.

— *Hirudinés*

Les cellules neurosécrétrices produisent une hormone gonadotrophique, indispensable à la division réductionnelle des gonies.

Mollusques

— *Gastéropodes*

Les Gastéropodes possèdent des cellules neurosécrétrices dans toutes leurs masses ganglionnaires, dans les organes glandulaires situés à la surface dorsale de leur ganglions cérébroïdes et dans leurs tentacules optiques. Les neurosécrétions sont très diverses ; elles contrôlent le développement des tractus reproducteurs et l'activité des gonades. Ainsi, trois hormones ont pu être mises

en évidence chez *Patella vulgata :* l'une, provenant des tentacules oculaires, a une action inhibitrice sur le développement des testicules; une autre, provenant des ganglions cérébroïdes, est nécessaire à la spermatogenèse; la troisième permet la vitellogenèse. Les cycles reproducteurs successifs de l'appareil génital (hermaphrodisme) sont commandés par les taux variables de ces trois hormones.

Il est impossible de résumer de façon générale le fonctionnement endocrine des Gastéropodes. Le même organe peut produire des hormones différentes quand on passe d'une espèce à l'autre : ainsi, les tentacules oculaires de *Patella vulgata* inhibent la spermatogenèse, alors que ceux d'*Arion* ou de *Limax* l'activent. Des cellules neurosécrétrices situées dans les ganglions viscéraux commandent la ponte chez *Aplysia california*. D'autres neurosécrétions (originaires des ganglions pleuraux) interviendraient dans l'équilibre hydrominéral de ces animaux.

— *Céphalopodes*

Des cellules neurosécrétrices sont situées dans les glandes optiques; elles produisent une hormone gonadotrophique.

Échinodermes

Les nerfs radiaux des étoiles de mer produisent une hormone (polypeptide de faible poids moléculaire : 2 100 à 4 800), qui, libérée dans le milieu ambiant, induit la production de méthyl-1-adénine par les cellules folliculaires des gonades; ce composé stimule la maturation des ovocytes et déclenche la libération des gamètes mâles et femelles.

Arthropodes

— *Insectes*

Les Insectes ont un système endocrine très complet, composé de quatre glandes principales : des cellules neurosécrétrices situées dans la région médiane (la *pars intercerebralis*) des ganglions cérébroïdes, les *corpora cardiaca* (qui sécrètent leurs propres hormones mais servent aussi à stocker les neurosécrétions provenant des ganglions cérébroïdes), les *corpora allata* et la *glande prothoracique*. Il existe, en plus de ces principaux organes, des cellules neurosécrétrices dans tous les ganglions de la chaîne nerveuse ventrale; associées à des glandes neurohémales, elles forment des *organes périsympathétiques*.

Les glandes interviennent dans la croissance et la mue : la *pars intercerebralis* sécrète une hormone *(hormone thoracotrope)* qui, après avoir été stockée dans les *corpora cardiaca,* est libérée dans l'hémolymphe. Celle-ci stimule la glande prothoracique qui sécrète de l'ecdysone, hormone commandant la mue. Le caractère larvaire ou imaginal de la mue est sous la dépendance de l'hormone juvénile sécrétée par les *corpora allata ;* la métamorphose est causée par un arrêt de fonctionnement de ces glandes.

Les sécrétions des *corpora allata* commandent, chez les adultes, la différenciation des glandes annexes (que ce soit chez le mâle ou la femelle); elles interviennent aussi dans la vitellogenèse, réglant la mobilisation des métabolites qui vont être stockés dans les œufs. Elles interviendraient aussi dans les phénomènes de diapause.

Les cellules neurosécrétrices des ganglions mésothoraciques et, parfois, des ganglions cérébroïdes produisent une hormone qui régule l'équilibre hydrominéral des Insectes.

Les *corpora cardiaca* sécrètent une hormone qui augmente la fréquence et l'amplitude des battements du cœur; ils produisent aussi un facteur qui tend à faire augmenter la concentration de l'hémolymphe en sucre (facteur hyperglycémique).

Les ganglions cérébroïdes et, parfois, le premier ganglion abdominal contiennent des cellules neurosécrétrices produisant la *bursicon,* hormone qui intervient dans le tannage de la cuticule.

— *Crustacés*

Les Crustacés ont un système endocrine complexe comprenant : une paire d'organes Y (glandes de mue) situés dans la tête et une paire de glandes androgènes situées sur les canaux déférents; des cellules neurosécrétrices dans les pédoncules oculaires (organes X), dans les ganglions cérébroïdes et dans les ganglions thoraciques; des organes neurohémaux correspondant aux principaux centres neurosécréteurs précédents : des glandes du sinus (dans les pédoncules oculaires), des

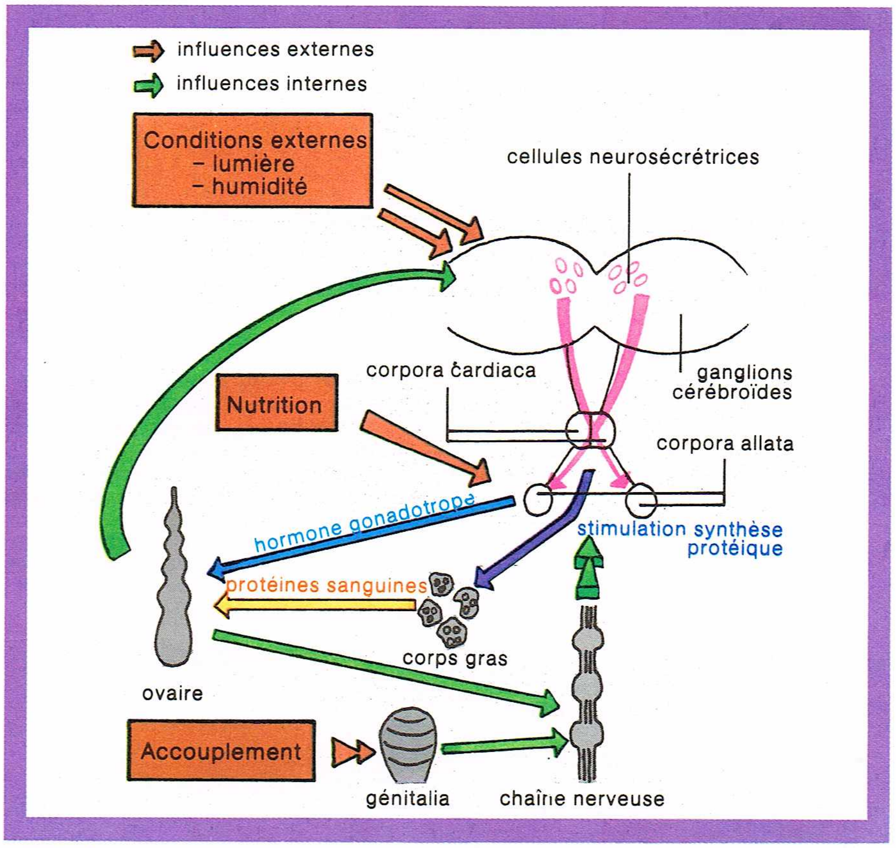

Richard Colin

▲ *Représentation schématique du* contrôle endocrinien *de la reproduction chez un Insecte femelle.*

▼ *Représentation schématique du* système endocrine *d'un Crustacé Décapode mâle.*

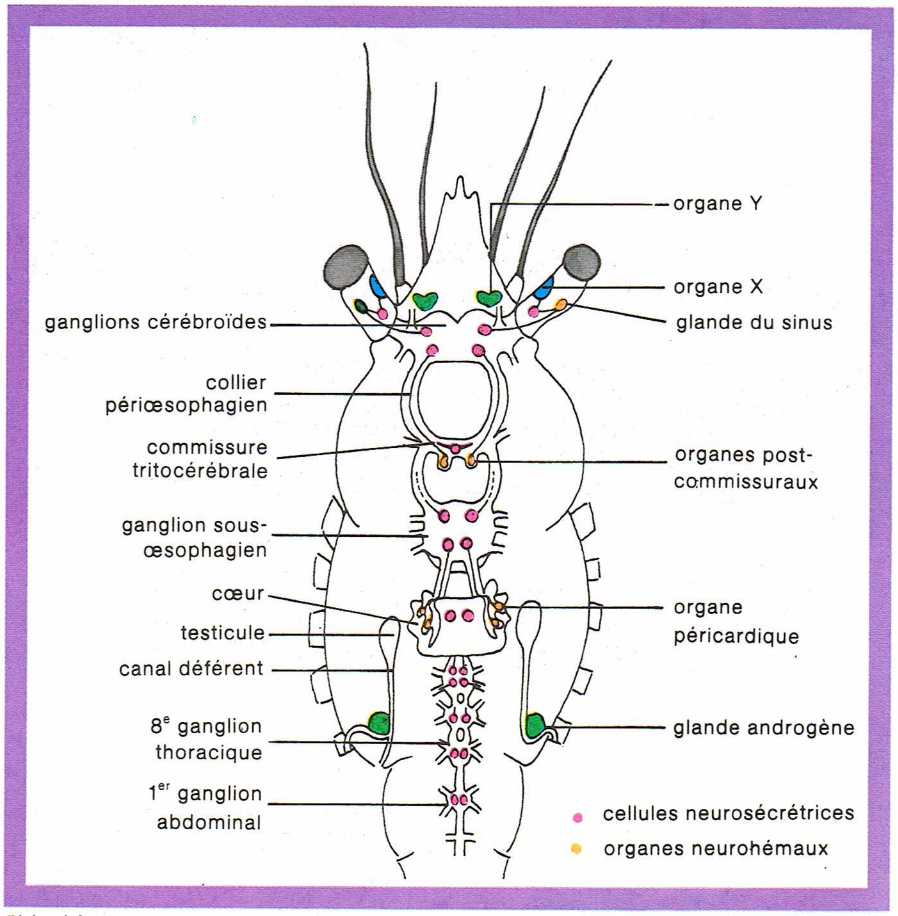

Richard Colin

▶ *Page ci-contre, en haut, coupe de la paroi du* **corps d'une hydre,** *colorée au picro-indigo-carmin. On peut observer :* **un feuillet interne ou** *endoderme (en haut) comportant de grandes cellules à cytoplasme clair entre lesquelles sont intercalées les cellules basales à noyau arrondi nucléolé et à cytoplasme très coloré ;* **un feuillet** *externe ou ectoderme séparé du premier par la mésoglée, membrane anhiste mince et colorée. Ce feuillet comprend des cellules épithéliales, des cnidoblastes et des cellules de type indifférencié, les cellules interstitielles (on voit quelques cnidocystes dévaginés).*

organes postcommissuraux, en arrière de la commissure tritocérébrale, et des organes péricardiques.

La croissance (y compris la régénération des appendices) ainsi que les mues sont sous la dépendance des *glandes de mue :* toute extirpation de celles-ci arrête ces processus. Le fonctionnement des glandes de mue est sous la dépendance des sécrétions des organes X, lesquelles sont libérées par l'intermédiaire des glandes du sinus ; les neurohormones ainsi produites inhibent le fonctionnement de ces glandes. Comme la croissance et la reproduction sont, chez ces animaux (comme chez les Annélides), des phénomènes antagonistes, les organes X sécrètent, en plus, une substance inhibant la vitellogenèse chez les femelles ; en général, on observe une alternance entre les mues et les cycles de reproduction.

Les variations dans la livrée chromatique des Crustacés sont sous la dépendance de ces mêmes organes X, qui sécrètent des hormones permettant l'extension des chromatophores. Il semble que les organes postcommissuraux aient le même pouvoir.

Quant aux organes péricardiques, ils produisent des substances qui font augmenter la fréquence et l'amplitude des battements du cœur.

Enfin, la différenciation des caractères sexuels secondaires mâles est sous la dépendance des glandes androgènes, dont le développement est commandé par des neurosécrétions cérébrales.

H. Chaumeton - Jacana

▲ *Le fonctionnement des glandes de mue est sous la dépendance des sécrétions des organes X ; ici un Crustacé,* **Cancer pagurus,** *et sa mue.*

BIBLIOGRAPHIE

Vertébrés

Appareils respiratoire et circulatoire

ANTHONY J., ROBINEAU D., *Branchies et artères branchiales de Latimeria chalumnae,* C.R. Acad. Sci., 266, 375-378, 1968. — BENTLEY P.J., SHIELD J.W., *Respiration of Some Urodele and Anuran Amphibia, II, In Air, Role of the Skin and Lungs,* Comp. Biochem. Physiol., 46, 29-38, 1973. — BERG T., STEEN J.B., *Physiological Mechanisms for Aerial Respiration in the Eel,* Comp. Biochem. Physiol., 15, 469-484, 1965. — DE GRAAF A.R., *Investigations into the Distribution of Blood in the Heart and Aortic Arches of Xenopus laevis,* Exp. Biol., 34, 143-172, 1957. — KING A.S., *Structural and Functional Aspects of the Avian Lungs and Air Sacs,* Int. Rev. Gen. Exper. Zool., 2, 171-267, 1966. — KJELL J., HOL R., *A Radiological Study of the Central Circulation in the Lungfish, Protopterus Aethiopicus,* J. Morphol., 126, 333-348, 1968. — MOTAIS R., GARCIA-ROMEU F., *Transport Mechanisms in the Teleostean Gill and Amphibian Skin,* Ann. Rev. Physiol., 34, 141-176, 1972. — RUDOLPH A.M., HEYMANN M.A., *Fetal and Neonatal Circulation and Respiration,* Ann. Rev. Physiol., 36, 187-207, 1974. — SHIELD J.W., BENTLEY P.J., *Respiration of Some Urodele and Anuran Amphibia, I. In Water, Role of the Skin and Gills,* Comp. Biochem. Physiol., 46, 17-28, 1973. — SIMONS J.R., *The Distribution of the Blood from the Heart in Some Amphibia,* Proc. Zool. Soc. Lond., Simons, 132, 51-65, 1968. — WEBB G.J.W., *A New Hypothesis on the Pattern of Blood-flow through the Squamate Heart,* Res. Com. 3, 138-140, 1972.

Appareil digestif

DIACONESCU N., *On the Liver Visceralization in the Vertebrate Series* in *Acta anat.,* 78, 74-83, 1971. — FARNER D.S., *Digestion and the Digestive System* in *« Biology and Comparative Physiology of Birds » ;* A.J. MARSHALL Éd., vol. 1, 411-468, *Ac. Press.* (New York) 1960. — GRASSÉ P.P., DEVILLERS C., *Zoologie, II, Vertébrés,* Masson et Cie, Paris, 1965. — RIVA A., ZACCHEO D., *Ultrastructural Studies on Human Duodenal Glands,* in *Lo Sperimentale,* 118, 281-312, 1968. — SCHEER B.T., *Animal Physiology,* J. Wiley & Sons (New York & London) 1963.

Appareils urinaire et génital

BAULIEU E.E., *les Hormones sexuelles stéroïdes,* in *La Recherche,* 24, 524-535, 1972. — BEAUMONT A., CASSIER P., *Biologie animale, les Cordés, Anatomie comparée des Vertébrés,* Dunod, Paris, 1972. — EATON T.H., *Comparative Anatomy of the Vertebrates,* Harper & Brothers, New York, 1960. — FRASER E.A., *The Development of the Vertebrate Excretory System,* in *Biol. Rev.,* 25, 159-187, 1950 — KENT G.C. jr., *Comparative Anatomy of the Vertebrates,* C.V. Mosby Cy, Saint-Louis, 1969. — MOREL F., *les Fonctions d'excrétion* in *Physiologie,* vol. 1, KAYSER Éd., 309-363, Flammarion, Paris, 1970. — PERRY J.S., ROWLAND I.W., *Biology of Reproduction* in *Mammals,* Blackwell, Oxford, 1969. — ROMER A.S., *The Vertebrate Body,* W.B. Saunders Cy, Philadelphia, London, 1962. — VAN TIENHOVEN A., *Reproductive Physiology of Vertebrates,* W.B. Saunders, Philadelphia, 1968. — WEBSTER D., WEBSTER M., *Comparative Vertebrate Morphology,* Ac. Press., New York, 1974.

Système nerveux

CORDIER R., *le Système nerveux central et les Nerfs cérébro-spinaux,* in *Traité de zoologie : Vertébrés : Généralités,* t. XII, Masson et Cie, 1954. - DELMAS J. et DELMAS A., *Voies et Centres nerveux,* Masson et Cie, 1965. - GLEES P., *Morphologie et Physiologie du système nerveux,* trad. CHATAGNON P.A. et CASTAGNOL E.M., Doin, 1960. - KAYSER C.H., *Physiologie,* Flammarion, 1963. - RYBAK R., *Cours de physiologie,* Gauthiers-Villars, 1963. - TAXI J., *Comment fonctionne le système nerveux,* La Recherche, J. 1971.

Squelette et musculature

BEAUMONT A. et CASSIER P., Biologie animale : les Cordés, *Anatomie comparée des Vertébrés,* Dunod, 1972. - BLOOM W., et FAWCETT D.W., *A Textbook of Histology,* Saunders, 1968. - GRASSÉ P., DEVILLERS Ch., *Zoologie : II Vertébrés,* Masson et Cie, 1965. - WEBSTER D. et WEBSTER M., *Comparative Vertebrate Morphology,* Acad. Press, 1974. - WEICHERT C.K., *Anatomy of the Chordates,* Mc Graw-Hill, 1965.

Invertébrés

GARDINER M.S., *The Biology of Invertebrates,* Mc Graw Hill Book Company, 954 p., 1972. — HOAR W.S., *General and Comparative Physiology,* Prentice-Hall Inc., Englewood Cliff, New Jersey, 815 p., 1966. — JENKIN, *Control of Growth and Metamorphosis,* Pergamon Press. — PROSSER G. Ladd, FA. BROWN J.R., *Comparative Animal Physiology,* W.B. Saunders Company, 688 p., 1961. — RICHARDS A.G., *The Integument of Arthropods,* University of Minesota Press, Minneapolis, 411 p., 1951.

LA RÉGÉNÉRATION

La régénération est le processus qui permet à certains animaux de reformer une partie de leur organisme enlevée ou détruite par un traumatisme.

Dès l'Antiquité, on s'est intéressé à ce phénomène : Pline l'Ancien a décrit la régénération de la queue du lézard. Vers 1712, Réaumur nota que les étoiles de mer reconstituaient leurs bras et les Crustacés leurs appendices amputés. En 1740, Trembley, qui étudiait les hydres et se demandait s'il avait affaire à des plantes ou à des animaux, découvrit que, sectionnés, ces organismes étaient capables de régénérer. Plus tard, l'abbé Spallanzani fit des expériences de régénération sur les Oligochètes et les Amphibiens. Cependant, ce n'est qu'à la fin du XIXe siècle qu'une étude plus approfondie du problème a été entreprise par de nombreux chercheurs. Vers 1930, Abeloos ainsi que Wolff ont surtout effectué des observations morphologiques et histologiques, tandis que Child abordait la régénération sous l'angle de la biochimie. Depuis, les techniques modernes ont encore permis de progresser sensiblement.

Il existe deux sortes de régénération :

— la *régénération traumatique* provoquée par une blessure; la plupart des Invertébrés peuvent régénérer, en particulier ceux qui ont une organisation simple et possèdent une reproduction asexuée; cette capacité est beaucoup plus faible chez les Vertébrés et tend même à disparaître chez les Mammifères, ce qui a fait dire à R.G. Goss que l'évolution a fait une sélection contre la régénération et non pour elle;

— la *régénération physiologique*, processus naturel qui se déroule dans tout le règne animal.

La régénération traumatique

La régénération traumatique peut se faire de deux façons : soit par *épigenèse*, à partir d'un bourgeon de régénération formé de cellules indifférenciées, sans l'intervention des tissus situés à proximité de la blessure, soit par *morphollaxie*, à partir des tissus différenciés qui se trouvent en arrière de la zone d'amputation et qui se réorganisent. Souvent, ces deux mécanismes interfèrent, avec dominance de l'un ou de l'autre. Dans chaque groupe animal, le mode de régénération a été l'objet de nombreuses controverses.

Cas des Cœlentérés

La classe la plus primitive est celle des Hydraires, qui ont un grand pouvoir de régénération. C'est le cas de l'hydre d'eau douce, dont la structure est très simple. Le corps comprend une colonne gastrique surmontée par une couronne de tentacules entourant la bouche; la région postérieure se termine par une sole pédieuse, qui permet à l'animal de se fixer au substrat.

Après une section transversale de l'hydre, le fragment distal ou proximal du corps reconstitue une hydre entière. Un individu coupé en deux dans le sens longitudinal donnera deux hydres, ou un individu à double couronne de tentacules si la section est incomplète. Après l'ablation du pôle antérieur (tentaculaire), le fragment basal se contracte et les bords de la plaie tendent à se rejoindre; les cellules ectodermiques glissent sur la blessure de façon à l'isoler de l'extérieur; les cellules endodermiques se soudent également; ces deux feuillets ne sont pas séparés par de la mésoglée; il n'y a pas de bourgeon de régénération visible.

Pour certains auteurs, ce sont les *cellules interstitielles* qui reforment tous les tissus de l'hydre. Dès 1887, Nussbaum considérait que celles-ci étaient totipotentes. La régénération par épigenèse serait donc le mécanisme dominant. Pour d'autres chercheurs par contre, c'est la morphollaxie : ils pensent que ce sont les tissus anciens situés en arrière de la section qui se réorganisent pour reformer les tissus enlevés, bien qu'il y ait une multiplication des cellules interstitielles (elles ne seraient pas indispensables). A l'appui de cette hypothèse, en 1955, Brien a montré que des hydres irradiées aux rayons X (qui détruisent les cellules interstitielles) sont capables de régénérer. Cependant, elles ne peuvent plus se nourrir car elles ne possèdent plus de nématocystes; les cellules interstitielles seraient donc à l'origine de ceux-ci. Cette question sera à nouveau abordée dans l'étude de la régénération physiologique.

J.-J. Ménieux

En 1954, Tardent a montré qu'il y avait cependant une corrélation entre la richesse de l'organisme en cellules interstitielles et la régénération. Ainsi, la région gastrale, riche en cellules interstitielles, régénère mieux que la sole pédieuse, qui en possède très peu : 1/100 du volume de la colonne gastrique peut régénérer un animal entier.

La régénération rétablit l'intégrité de l'individu et sa polarité; en effet, la région distale va régénérer une couronne de tentacules et la bouche, tandis que le fragment proximal va reconstituer une sole pédieuse. Il y aurait, dans la zone sous-tentaculaire, un centre organisateur qui sécréterait une substance stimulante et une substance inhibitrice contrôlant la croissance de chaque région de l'hydre.

La vitesse de reconstitution d'un individu dépend de facteurs externes tels que la température et l'oxygénation. A 26 °C, la reconstitution d'un organisme se fait en 48 h et à 12 °C en 96 h. L'optimum de température se rapproche de l'optimum thermique nécessaire pour la croissance normale d'un organisme.

On peut obtenir une inversion de la polarité en plaçant les fragments dans une substance toxique. Hamett a obtenu, chez une méduse d'*Obelia*, une augmentation de la vitesse de régénération en ajoutant au milieu des acides aminés.

Cas des Plathelminthes

Les planaires ont attiré depuis longtemps l'attention des zoologistes par leur grande capacité de régénération. Il s'agit de Vers plats dont la structure est beaucoup plus complexe que celles des hydres. Entre l'épiderme, riche en cellules glandulaires, et le tube digestif, on trouve un mésenchyme contenant des muscles et de nombreuses cellules libres; parmi celles-ci se trouvent des cellules possédant des caractères de cellules indifférenciées, les *néoblastes*. En 1967, Lemoigne et Sauzin ont montré, grâce au microscope électronique, que ces cellules avaient un rapport nucléoplasmique élevé et des organites cytoplasmiques peu différenciés. Leur cytoplasme est, de plus, très riche en ribosomes libres. En utilisant la coloration au vert de méthyl-pyronine, Gabriel a montré, en 1965, que le cytoplasme des néoblastes est très riche en ARN.

Certains chercheurs, en particulier l'équipe de Lender, ont montré que si l'on décapite une planaire, il se forme d'abord un épiderme cicatriciel qui ferme la blessure; ensuite, des néoblastes migrent sous cet épiderme pour former un blastème de régénération. Ils se multiplient, puis se différencient pour reconstituer le cerveau, les yeux, les muscles ainsi que les cellules libres du parenchyme. Pour d'autres auteurs, la régénération se ferait aux dépens des tissus anciens, qui se réorganiseraient après s'être dédifférenciés. A l'heure actuelle il semble difficile de dégager des conclusions définitives sur le ou les

▼ En haut, coupe longitudinale d'une planaire en régénération, 96 heures après la décapitation (coloration hémalun-picro-indigo-carmin). Le blastème est à droite, recouvert par un épiderme cicatriciel. A la face dorsale (en haut) l'épiderme est beaucoup plus épais qu'à la face ventrale et, de plus, il est pigmenté sauf au niveau du blastème. Au centre de la coupe, on observe un tissu diffus, peu coloré, le tube digestif qui est entouré par le parenchyme. En bas, principe de la régénération normale d'une planaire (à gauche) : en ocre et en gris les fragments originaux, en blanc les parties régénérées; à droite, hétéromorphose : si le fragment est très petit, on obtient la régénération de deux têtes opposées.

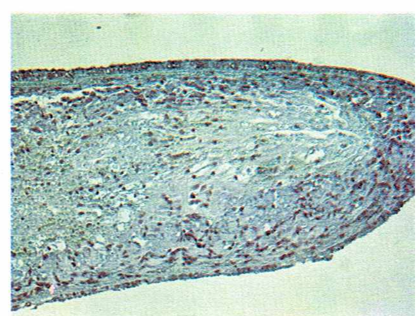

Laboratoire de biologie animale - Orsay

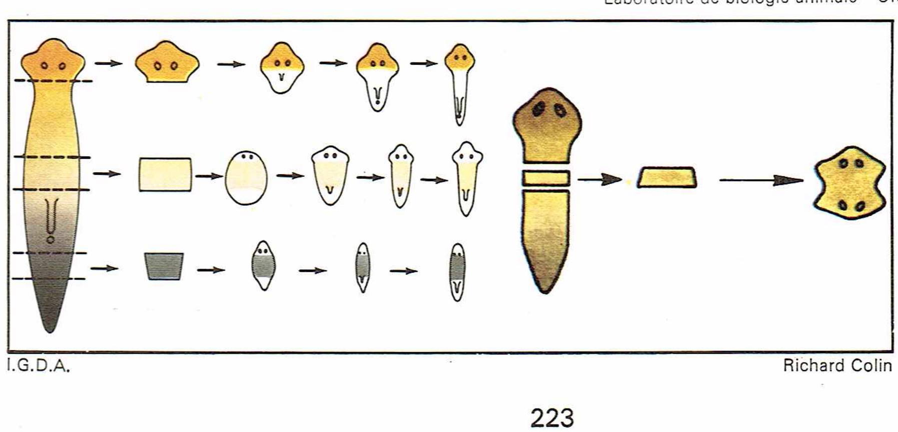

I.G.D.A. Richard Colin

▶ *Lorsque l'on fait une section entre le dernier métamère thoracique et le premier métamère abdominal, la région céphalique et les branchies régénèrent seules et les premiers segments abdominaux se transforment en segments thoraciques par inversion des soies qui deviennent dorsales et des uncini qui deviennent ventraux.*
▼ *Chez* **Eisenia foetida,** *A, répartition des territoires tête-queue (d'après Gates); B, suppression de la chaîne nerveuse dans quelques métamères (d'après Avel).*

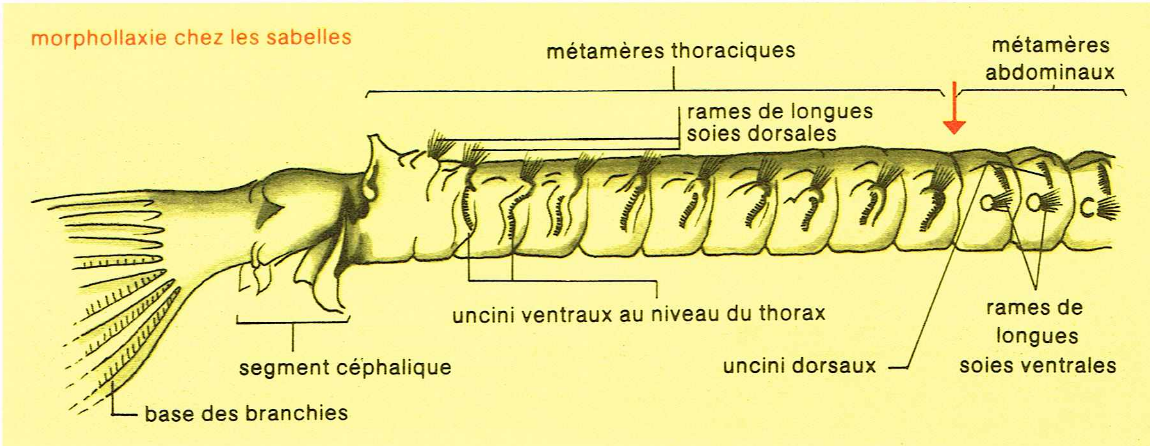

Richard Colin

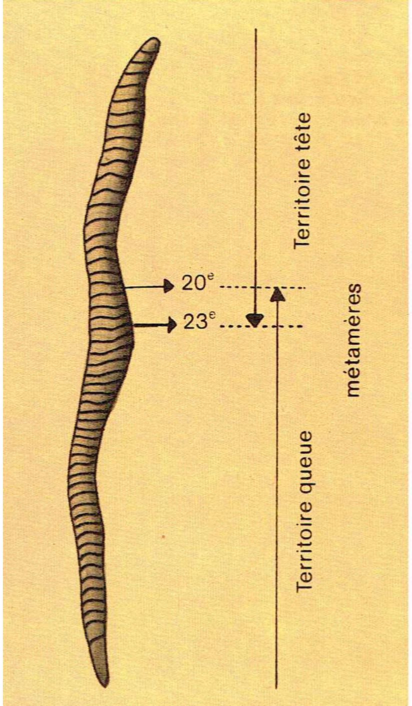

Si l'on fait une section dans la région dénervée on n'observe pas de régénération mais une simple cicatrisation.

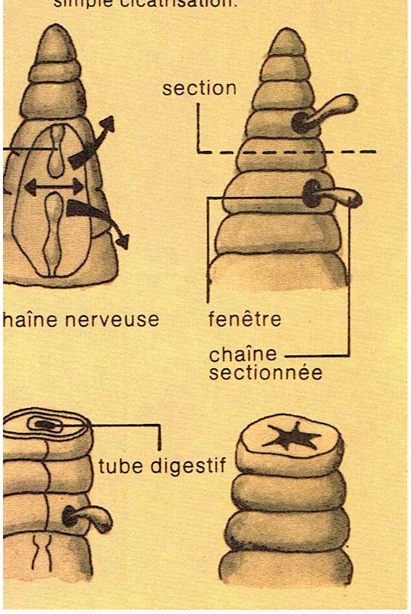

Richard Colin

modes de régénération des planaires, matériel complexe et cependant fondamental.

La région antérieure régénère mieux que la région postérieure, car elle est douée d'un métabolisme plus intense; de plus, la présence du cerveau doit faciliter la régénération. Ainsi, Lender a montré, en 1950, que l'absence du cerveau inhibe la régénération des yeux chez *Polycelis nigra*. Certains neurones sécrètent des *granules de neurosécrétion* qui s'écoulent le long des troncs nerveux. Lender et Klein, en 1962, Listi et Ros, en 1970, ont montré que la neurosécrétion favorise la régénération. Certaines substances chimiques, telles que le chlorure de cobalt, accélèrent à la fois la neurosécrétion et la régénération; d'autres, l'amphétamine par exemple, les inhibent. Comme dans le cas de l'hydre, la polarité de l'individu est respectée. Cependant, elle peut être inversée dans le cas où le segment amputé est si mince qu'il n'y a pas de *gradient antéro-postérieur*. Dans ce cas, le fragment peut régénérer deux têtes. Des substances telles que la colcémide, de même que des extraits d'embryons de poulet, peuvent également perturber cette polarité.

En 1974, Sperry a montré le rôle des *troncs nerveux* dans la polarité de l'animal. Des fragments pharyngiens privés de troncs nerveux régénèrent des têtes latérales, perpendiculaires à l'axe antéro-postérieur.

Cas des Annélides

Les Annélides, qui sont des Cœlomates, ont une organisation plus complexe que celle des Cœlentérés et des Plathelminthes. Certaines formes peu évoluées, telles que les Archiannélides, régénèrent mal, alors que d'autres, plus évoluées, régénèrent bien. C'est le cas des Oligochètes et des Polychètes, qui ont été très bien étudiés. Ainsi, chez *Lumbriculus variegatus,* un seul segment peut reconstituer un individu entier.

La régénération se fait toujours en trois phases : fermeture de la blessure et cicatrisation; formation du blastème de régénération; croissance et différenciation de ce blastème.

Certains chercheurs, notamment Stéphan-Dubois, pensent que ce sont des cellules indifférenciées, des néoblastes, qui forment un blastème et se différencient pour reconstituer les tissus manquants. Pour d'autres, tels que Weissmann, les néoblastes ne seraient capables de redonner que les tissus mésodermiques. Ce seraient les tissus situés en arrière de la blessure qui se réorganiseraient mais qui redonneraient les tissus de même nature qu'eux. Les muscles par exemple se dédifférencieraient, mais ils se transformeraient uniquement pour donner des cellules musculaires.

En 1973, Lechenault et Gontcharoff ont étudié le métabolisme des acides nucléiques et des protéines pendant les premiers jours qui suivent l'amputation chez *Eisenia foetida* (Polychètes). Une augmentation transitoire du taux d'ADN a été observée.

La synthèse des ARN se fait en deux étapes. La première synthèse a lieu au moment de la dédifférenciation cellulaire : elle a un rôle dans la formation des enzymes ou des protéines associées aux ribosomes ou des protéines acides, qui feraient régresser les histones, libérant ainsi l'ADN. La deuxième synthèse a lieu au moment de la différenciation cellulaire.

Fontes et Thouveny ont inhibé la régénération chez une Annélide, en utilisant l'actinomycine D, empêchant la transcription, et le thiophénicol, empêchant la traduction.

Comme chez les planaires, le système nerveux joue un rôle important chez les Annélides : si la chaîne nerveuse affleure à la surface de section, la régénération est normale, sinon elle est faible; de même, des fragments de chaîne nerveuse greffés près d'une tête provoquent la formation de têtes supplémentaires. La chaîne nerveuse est constituée de ganglions qui possèdent des cellules neurosécrétrices. En 1962, Herlant-Meewis a observé que chez *Nereis diversicolor,* la neurosécrétion est importante après une amputation.

Dans le cas d'une régénération normale, la polarité est respectée. Chez *Eisenia foetida,* si l'on sectionne les vingt premiers segments antérieurs, le régénérat se différencie en tête; par contre, si l'on enlève plus de vingt segments, le régénérat se différencie en queue. Cette inversion de la polarité est une *hétéromorphose*.

Cas des Arthropodes

La complexité de l'organisation des Arthropodes est peut-être une des causes de leur faible pouvoir de régénération. En effet, ils ne peuvent reconstituer que leurs appendices, leurs yeux et leurs antennes.

On s'est aperçu depuis fort longtemps que les Arthropodes peuvent régénérer : ils sont capables *d'autotomie,* c'est-à-dire de provoquer l'amputation spontanée d'un appendice. L'autotomie, due à un réflexe nerveux, peut être favorisée par l'acétylcholine et inhibée par l'atropine et l'adrénaline, médiateurs du système nerveux. Si chez les Crustacés l'autotomie d'une patte est toujours suivie d'une régénération, ce n'est pas le cas chez les Insectes : les ailes des termites sexués ou la patte antérieure des Orthoptères adultes ne régénèrent pas.

La régénération est sous le contrôle des mues : les Crustacés qui muent toute leur vie, conservent le pouvoir de régénérer, que perd à la métamorphose la majorité des Insectes.

Si l'on observe la régénération chez la crevette *Palaemon,* on constate que la section de la patte doit se faire pendant les deux premiers tiers de l'intermue, et pas plus tard, pour que la reconstitution de la patte ait lieu à la mue suivante. La mue et la régénération sont sous le contrôle d'une même glande, l'*organe Y*. La reconstitution d'un appendice se fait, là encore, en trois étapes : cicatrisation, formation d'un blastème puis différenciation. Dans certains cas, l'appendice en régénération est caché dans un étui chitineux, d'où il ne sort qu'à la mue suivante; dans d'autres cas le régénérat est libre. La nature des cellules du blastème n'est pas claire; elles proviendraient des hémocytes et des fibres musculaires (histolyse).

Les Insectes capables de régénérer reconstituent leur patte de la même manière que les Crustacés. En 1971, Bublière a émis l'hypothèse qu'il n'y a pas de cellules migratrices et que la régénération est un phénomène local. La régénération se trouve sous le contrôle des glandes prothoraciques, des *corpora allata* qui conditionnent la mue, ainsi que du système nerveux; en effet, la section d'un nerf peut arrêter la reconstitution d'un appendice. De même, chez un phasme, si l'on enlève le ganglion optique en même temps qu'un œil, une antenne peut régénérer à la place de celui-ci.

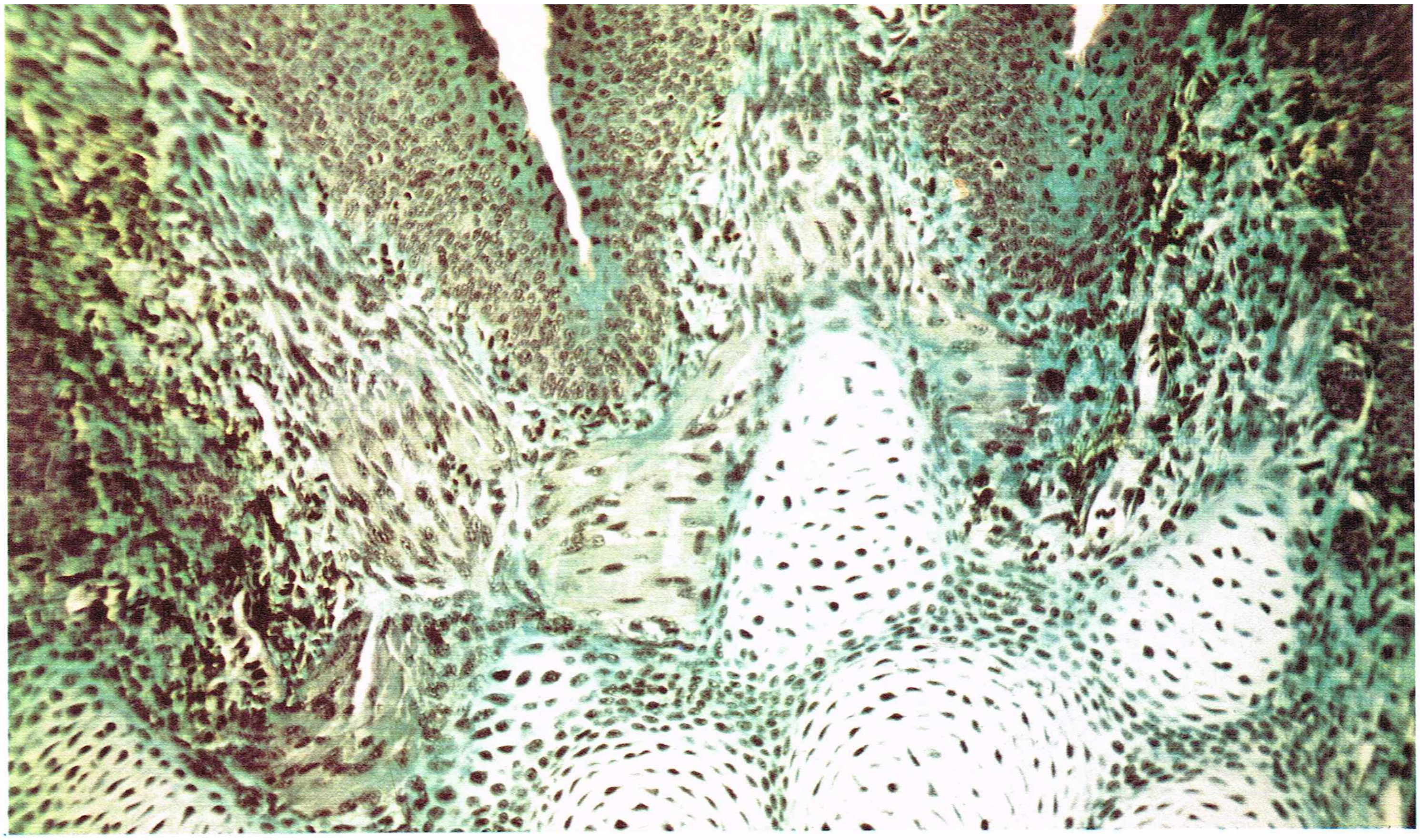

Laboratoire de biologie animale - Orsay

▲ **Fin** ***de la*** **régénération** ***d'une patte d'Amphibien : les doigts se sont reconstitués ; les tissus cartilagineux, musculaires, conjonctifs sont complètement différenciés.***

Cas des Vertébrés inférieurs

Les Vertébrés inférieurs sont encore capables d'une régénération locale : ainsi, les Poissons reconstituent leurs nageoires, leurs écailles, leurs barbillons, et les Amphibiens leurs pattes et leur queue.

Chez les Amphibiens, la capacité de régénérer diffère d'un groupe à l'autre. Ainsi, les Urodèles conservent toute leur vie le pouvoir de reconstituer leur patte, leur queue ou leur cristallin, alors que les Anoures le perdent à la métamorphose.

— *Régénération chez les Urodèles.*

Chez un Urodèle, le triton par exemple, la régénération d'une patte sectionnée se fait toujours en trois étapes :

● *Cicatrisation :* il se forme au niveau d'amputation un bouchon cicatriciel ; l'épiderme s'étale et ferme la blessure, sous laquelle les débris cellulaires sont

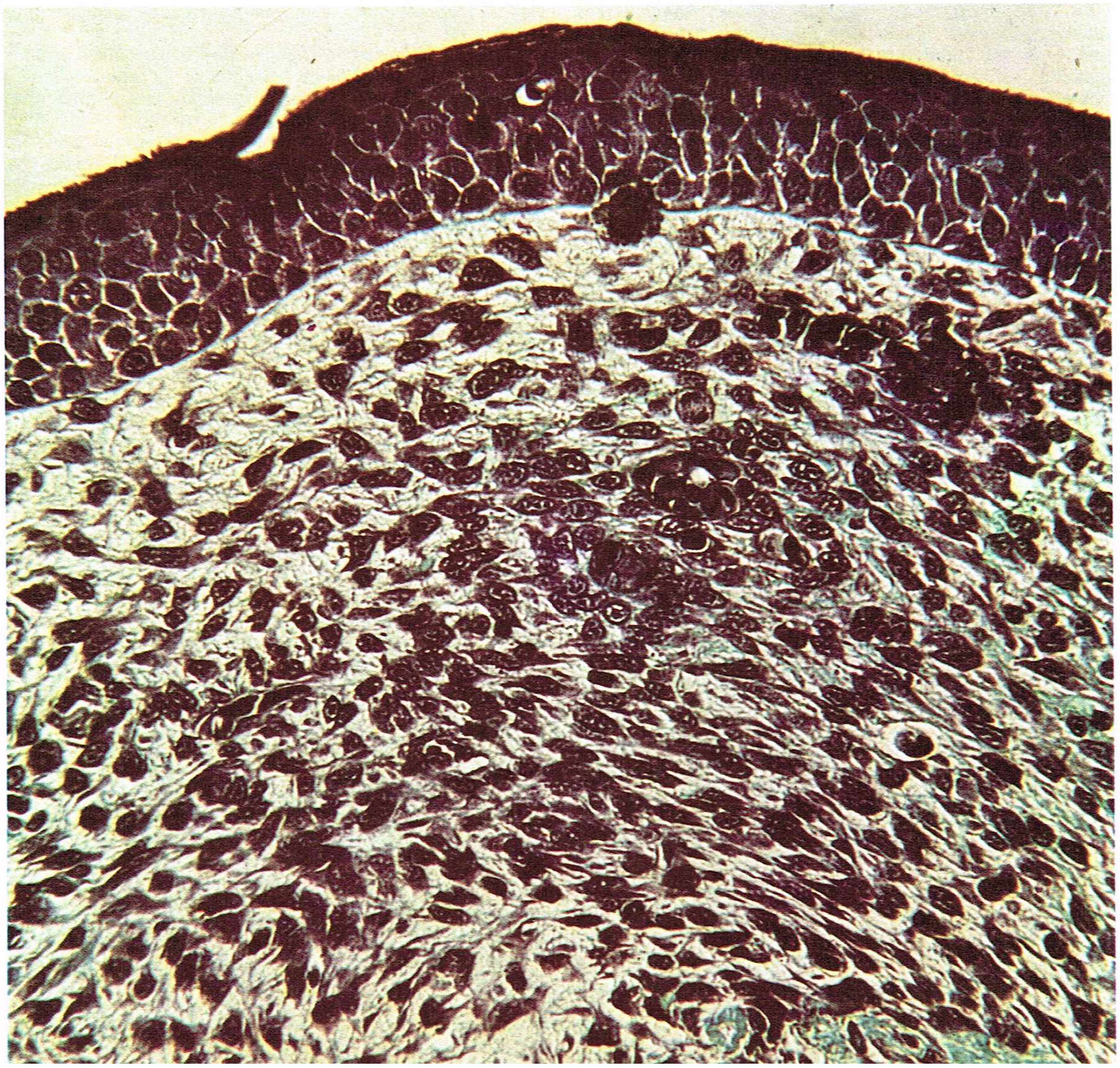

Laboratoire de biologie animale - Orsay

◀ **Régénérat** ***de patte d'Amphibien ; cette photo de détail permet d'observer les cellules du blastème et leur orientation.***

phagocytés; des enzymes protéolytiques interviennent et libèrent des acides aminés; des tissus se dédifférencient : cellules épithéliales, conjonctives et musculaires.

● Organisation d'*un blastème mésodermique :* l'épiderme s'épaissit pour former une cape apicale; à ce stade, on n'observe pas de différenciation cellulaire mais seulement des modifications physiologiques : une diminution du pH, du potentiel d'oxydo-réduction et une augmentation de l'activité enzymatique. En 1973, Kelly et Tassava ont constaté, à l'aide d'éléments marqués, que pendant les six premiers jours il y avait une augmentation globale des ARN. Les ARN 18S et 28S ont un rôle dans la synthèse des protéines fusoriales, de certaines histones, de l'ADN polymérase et dans la formation des enzymes protéolytiques; ils interviendraient également dans la différenciation.

● *Croissance du blastème :* les cellules du blastème s'organisent selon un plan différent de l'axe de la patte; le moignon prend la forme d'un cône : il se développe au-dessus de l'os un cal cartilagineux qui va reconstituer les deux os du bras; ensuite, le régénérat prend la forme d'une palette : le radius, l'ulna se différencient et les doigts se forment en dernier. Au moment de l'organogenèse, on observe une augmentation des phosphatases acides et des ARN qui synthétisent de nouvelles protéines.

Le blastème de régénération serait constitué par les cellules des tissus situés à proximité de la blessure et qui subissent des « transformations ».

En 1974, Bryant a montré que lorsque le blastème est jeune, si on le sectionne en deux, la moitié laissée en place est capable de reconstituer un blastème entier. Plus le blastème évolue, plus cette régulation s'effectue mal. En 1948, Surger avait étudié l'influence du nerf sur la régénération de la patte. Si le nerf est sectionné au moment de la croissance du blastème, on observe une diminution des activités de synthèse.

En 1965, Lebowitz et Singer avaient émis l'hypothèse qu'une substance trophique pût être émise par le nerf et véhiculée le long des fibres nerveuses sous forme de grains de sécrétion.

En 1973, pour montrer le rôle du nerf, Reyer et ses collaborateurs ont réalisé une expérience assez spectaculaire. Il est établi que lorsque l'on fait l'ablation du cristallin, celui-ci régénère par *métaplasie* de l'iris sous l'induction nerveuse de la rétine; or, ces chercheurs ont implanté un iris dans un blastème de régénération de patte; le cristallin a régénéré et des fibres nerveuses ont été retrouvées à son niveau. Ils ont constaté que si le membre est dénervé au moment où l'on implante l'iris, il n'y a pas de formation de cristallin. Cette expérience nous montre également que *chaque tissu a une potentialité propre :* l'iris implanté dans une patte a régénéré un cristallin et non une patte. Il existe donc différents territoires qui ne régénèrent que l'organe correspondant : il y a les territoires des pattes antérieures, des pattes postérieures et de la queue. Ainsi, Locatelli, en déviant le nerf de la patte postérieure vers la queue, a observé la formation d'une deuxième queue et non d'une patte.

— *Régénération chez les Anoures.*

Chez les Anoures, le pouvoir de régénération est perdu à la métamorphose. Quand on sectionne la patte d'une grenouille adulte, la blessure est seulement recouverte d'un caillot de fibrine, sous lequel se forme un tissu granuleux qui s'épithélialise, comme chez un Mammifère.

Rose a transplanté une peau de grenouille sur un régénérat de triton, animal qui régénère bien; cette opération inhibe la régénération de la patte. S'étant aperçu que la peau greffée avait une épaisse membrane de collagène empêchant la différenciation des tissus sous-jacents, il a empêché la formation du collagène en plongeant une patte de grenouille amputée dans une solution de chlorure de sodium, et a ainsi obtenu la reconstitution de la patte.

En 1967, Smith a provoqué la formation d'un bourgeon de membre par stimulation galvanique.

En 1972, Becker a soulevé l'hypothèse que la section provoque un *« courant de blessure »,* naturel, différent chez les Urodèles et les Anoures.

Cas des Mammifères

Comme dans le cas des Oiseaux, Becker pense que si le pouvoir de régénération est très faible chez les Mammifères, c'est que le « courant de blessure » est nul. Il a obtenu, à l'aide de courants électriques, la régénération partielle d'un membre de rat. Un faible courant n'a aucun effet, mais un courant de 3 à 6 nA peut induire la formation d'un blastème ou d'ébauches cartilagineuses. Chez un embryon de lapin, la régénération d'une patte a été obtenue en lui injectant des broyats de cellules nerveuses.

De nombreuses causes peuvent empêcher la régénération. Citons tout d'abord le *défaut d'innervation;* ainsi, chez le xénope, qui régénère bien, si les fibres nerveuses sont moins nombreuses que chez la souris, elles sont plus grosses et leur surface est également plus grande. Signalons également le développement du *système immunologique;* les animaux qui régénèrent bien rejettent *lentement* les hétérogreffes; ainsi, quand on injecte des anticorps anti-tritons à des tritons amputés, on peut bloquer la régénération.

Lorsque l'on effectue chez un Mammifère l'ablation partielle du foie ou l'ablation totale d'un rein, on observe : dans le cas du foie, une augmentation de l'index mitotique, sans reconstitution du lobe enlevé, dans le cas du rein demeuré en place, un accroissement des glomérules et des tubules néphrétiques provoqué par les nombreuses mitoses. Ce phénomène est appelé *hyperplasie compensatrice;* il ne faut pas le confondre avec l'hypertrophie compensatrice, que l'on peut observer dans le cas des fibres cardiaques s'hypertrophiant lorsque le cœur est surmené sans qu'il y ait de divisions cellulaires.

Les Mammifères sont surtout capables de réaliser de la régénération physiologique.

La régénération physiologique

La régénération physiologique est un mécanisme normal qui permet le renouvellement des tissus. Il comprend une phase de destruction cellulaire et une phase de régénération.

Chez les Mammifères, certains tissus régénèrent continuellement. C'est le cas de l'épiderme humain : la couche superficielle devient cornée, desquame, tandis qu'une assise génératrice plus profonde fournit de nouvelles cellules qui se différencient progressivement. Les éléments sanguins se renouvellent constamment : les hématies se forment dans la moelle osseuse et sont détruites dans la rate.

Dans d'autres cas, la régénération est cyclique et sous la dépendance de facteurs hormonaux : le renouvellement des bois des Cervidés, le remplacement des plumes chez les Oiseaux sont des processus de ce type.

Il y a également regénération physiologique chez les Invertébrés. Brien a montré que les cellules de l'hydre se renouvellent constamment : sous les tentacules, se trouve une zone riche en cellules interstitielles; en les marquant à l'aide d'un colorant vital, on observe qu'elles se déplacent vers la sole pédieuse et vers les tentacules, où elles se transforment en nématocystes. En 1973, Trenkner a injecté des radio-éléments à des hydres : il a pu observer la différenciation en nématocystes des cellules interstitielles. Une hydre, donc, privée de ses cellules interstitielles, ne peut se nourrir : ses nématocystes ne sont pas remplacés.

Le contrôle hormonal de la régénération physiologique est également possible chez des Invertébrés. C'est le cas de la mue des Crustacés, qui se débarrassent de leur carapace devenue trop petite; les cellules épidermiques en sécrètent une nouvelle.

La régénération et la cancérisation

La cancérisation s'obtient difficilement chez les animaux qui ont un pouvoir de régénération élevé. C'est le cas des planaires. En 1960, Seilern-Aspang a implanté des substances cancérigènes dans une planaire appartenant à une espèce dont seule la région antérieure régénère bien. Dans la région antérieure, il a obtenu une régénération normale; par contre, dans la région postérieure, il a observé la formation d'une tumeur. En 1938, Pfluckfelder, en supprimant les *corpora allata* chez un Insecte, a fait perdre à l'animal sa capacité de régénérer et a obtenu une cancérisation expérimentale. Chez le triton, qui a encore un bon pouvoir de régénération, il est très difficile d'obtenir une cancérisation : en 1952 Breedis a appliqué une substance cancérigène à 326 tritons et a obtenu seulement 2 sarcomes.

La régénération se trouve sous le contrôle d'un système de régulation fondé sur des phénomènes d'induction et d'inhibition. Les tumeurs seraient des régénérations anarchiques dues à la perturbation des mécanismes de contrôle,

▶ *Page ci-contre, à gauche, en haut, un individu de* Myrianida pinnigera *(Annélides Polychètes) se reproduisant par prolifération pygidiale. En bas, multiplication asexuée sans séparation des bourgeons : les Éponges forment des colonies dont la forme et le volume sont très variables suivant les espèces et les conditions du milieu; ici une Éponge* Halicondrine *fixée sur des rochers ou des moules (côte atlantique, étage infralittoral).*

LA REPRODUCTION ASEXUÉE

La reproduction asexuée est le processus qui permet la formation d'un ou de plusieurs organismes à partir d'un individu souche. Elle implique la destruction d'anciennes structures et la formation de nouvelles. Il s'agit d'un phénomène naturel permettant à une espèce de se reproduire sans l'intervention de cellules germinales, et qui est en relation avec les conditions de température et de milieu.

La reproduction asexuée peut se faire par *fission,* par *bourgeonnement,* ou par *fragmentation.*

Reproduction asexuée par fission

Chez l'hydre, ce mode est assez exceptionnel. Lorsqu'il se produit, la reproduction peut s'effectuer par divisions transversales ou longitudinales : les anémones peuvent se scinder en deux dans le sens longitudinal pour reconstituer deux individus; certaines planaires peuvent se diviser transversalement, les deux moitiés se séparant après reconstitution des pôles manquants *(scissiparité).* Chez les Oligochètes, des segments se séparent de l'individu parental pour reconstituer un ver complet. Les Polychètes se fragmentent au niveau de segments bien déterminés; les segments restent d'abord associés, formant des chaînes d'individus (zoïdes) : c'est la *stolonisation.*

Reproduction asexuée par bourgeonnement

— *Bourgeonnement externe.*

● *Sur l'organisme parental :* chez l'Éponge *Tethya,* par exemple, il se forme à la surface du corps des bourgeons qui se détachent alors qu'ils ne sont pas organisés; chaque bourgeon isolé redonne ensuite une Éponge. L'hydre possède une zone de bourgeonnement à la base de la colonne gastrique. Les bourgeons se différencient sur place en hydres filles, dont les cavités digestives sont en relation avec celle de l'organisme souche. Ces hydres filles se déplacent ensuite vers la sole pédieuse, avant de se détacher.

● *Sur des stolons :* c'est le cas d'Hydraires coloniaux, tels que *Clava.*

— *Bourgeonnement interne.*

Chez les Éponges marines, les bourgeons sont constitués d'une capsule externe épaisse, contenant des cellules arrondies, riches en réserves. Ces bourgeons *(gemmules)* sont émis par le micropyle de l'Éponge. Ils résistent au froid et à la dessiccation.

Reproduction asexuée par fragmentation

Une partie du disque basal d'une actinie *(Aiptasia)* se détache, croît, se différencie pour donner un nouvel organisme.

Remarques

Dans le cas de la reproduction asexuée, on obtient plusieurs individus nouveaux à partir d'un seul organisme, alors que dans le cas de la régénération, il se reconstitue un seul individu à partir d'un fragment. Dans le premier cas il n'y a pas de traumatisme; celui-ci est par contre indispensable dans le second.

A quelques exceptions près, ce sont les Invertébrés les moins évolués qui régénèrent le mieux et qui possèdent une reproduction asexuée. C'est à partir des Échinodermes que la reproduction asexuée disparaît et que le pouvoir de régénération diminue; seuls les Procordés sont encore capables de se reproduire par voie asexuée. Cette évolution est peut-être liée à l'augmentation du nombre des organes et à leur spécialisation, ainsi qu'à la complexité du système hormonal.

I.G.D.A.

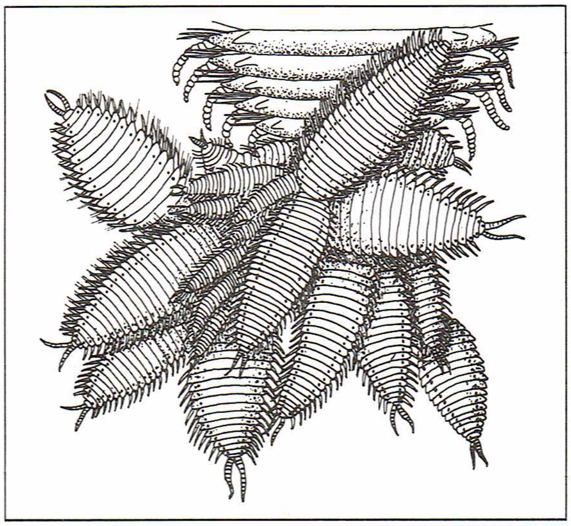

◀ *Extrémité postérieure de* **Trypanosyllys** *(Polychètes), chez lequel se constituent, par blastogenèse, de nombreux individus nouveaux.*

G.S. Giacomelli

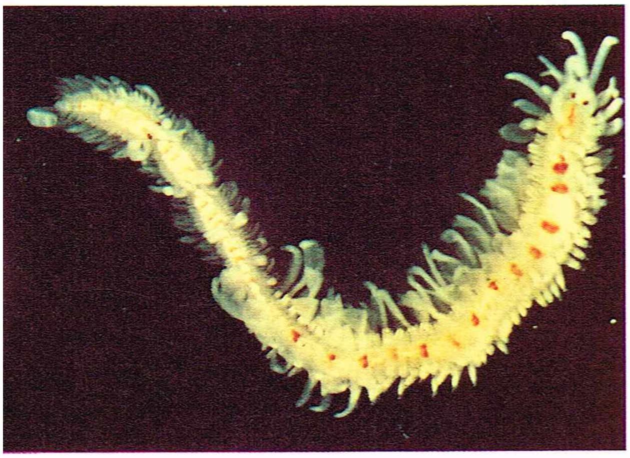

C. Bouchard

J.-J. Ménieux

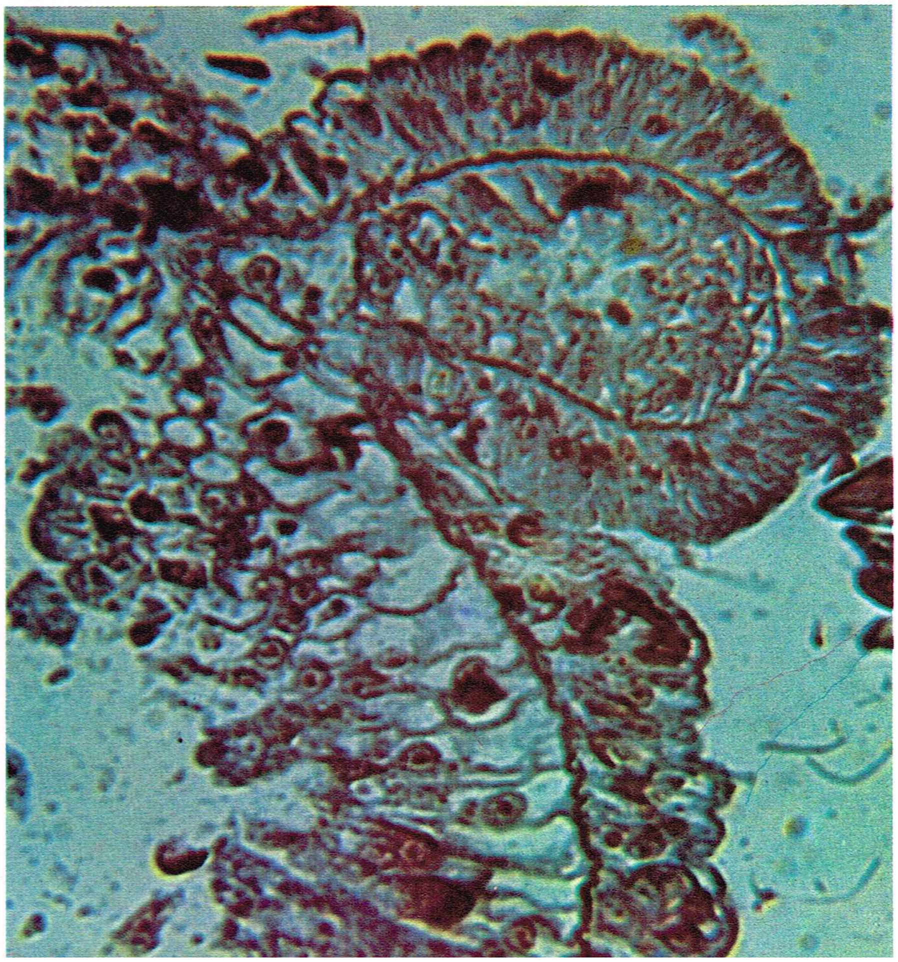

▼ *Coupe d'un* **bourgeon** *se formant sur la paroi de l'hydre (zone de bourgeonnement située entre la colonne gastrique et les tentacules). Le bourgeon est constitué des deux feuillets qui forment la paroi du corps de l'hydre mère; il possède même une cavité gastrique en relation avec celle de l'hydre.*

LA TUMORIGENÈSE

L'évolution tumorale des organes animaux

Des tumeurs peuvent se former à partir de n'importe quel organe. Elles sont le résultat d'une multiplication cellulaire excessive; cette *hyperplasie* n'a aucun but décelable, contrairement au cas des *proliférations cicatricielles* réparatrices, ou des *proliférations cycliques* (par exemple, la croissance de l'épithélium utérin durant le cycle œstrien).

Il existe des *tumeurs bénignes* et des *tumeurs malignes*. Les premières n'entraînent pas de dégradations organiques profondes, bien que certaines puissent être fort néfastes par le volume qu'elles sont susceptibles d'atteindre. Les tumeurs malignes (non traitées) entraînent théoriquement la mort à plus ou moins longue échéance; elles provoquent d'abord des *lésions locales,* puis des *lésions multiples,* qui se généralisent, ainsi qu'une *intoxication* de l'organisme. Il existe des cas où la malignité clinique n'est pas évidente.

Le nom qui est donné à une tumeur dérive généralement du nom de l'organe ou du tissu d'origine (voir tableau ci-contre).

▼ Radiographie d'un ostéosarcome se développant chez un jeune homme de 18 ans; il s'est formé au voisinage du genou et gagne progressivement l'épiphyse et la diaphyse du fémur; de plus, ayant détruit la gaine périostique, il envahit les parties molles de la cuisse. 1, rotule; 2, tibia; 3, péroné; 4, fémur; 5, masse cancéreuse envahissant les tissus; 6, invasion de la diaphyse osseuse.

Document Dr Kaufmann - Clinique de Chevreuse

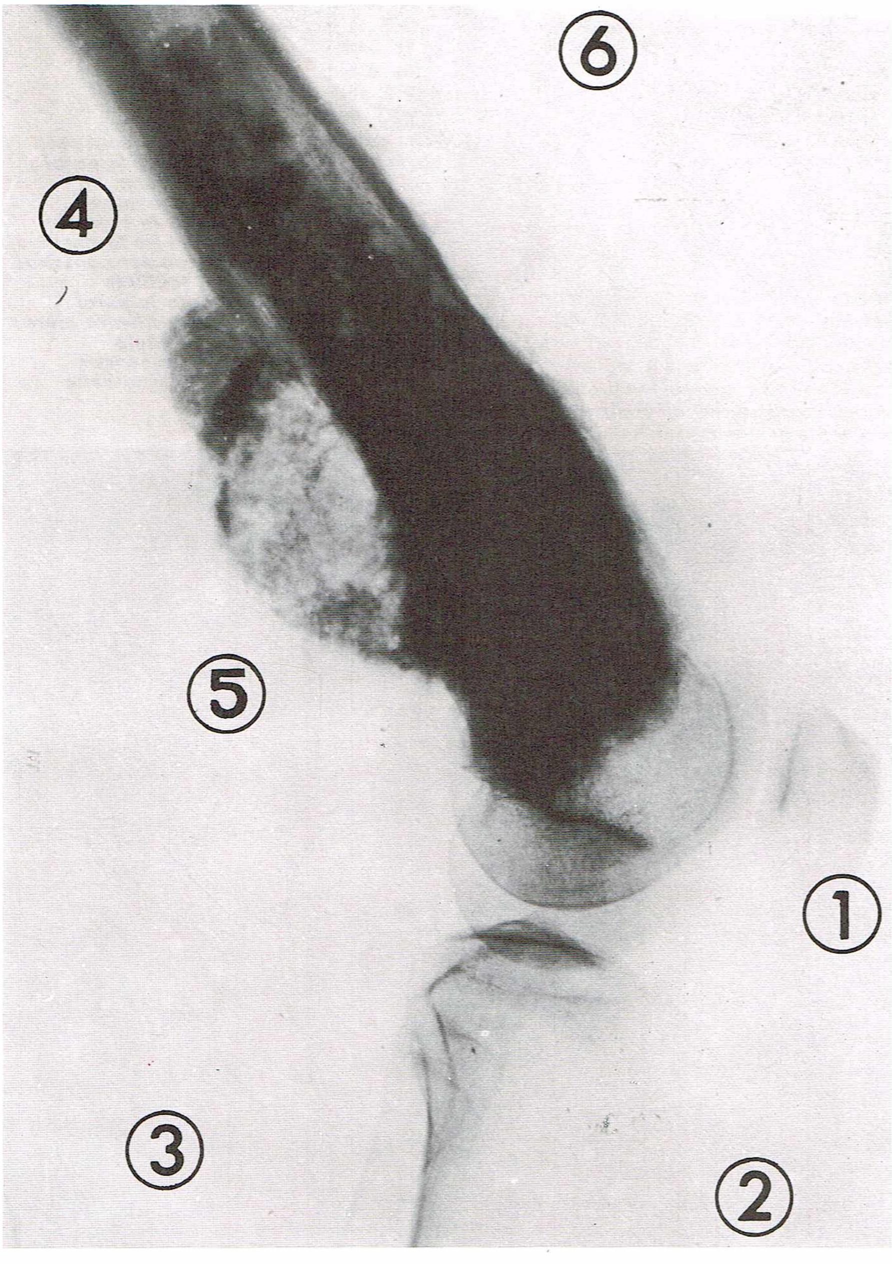

La répartition des tumeurs dans le règne animal; leur fréquence

Il semble que la plupart des groupes zoologiques ne soient pas prémunis contre les tumeurs. Des statistiques montrent cependant que *certains groupes* sont particulièrement susceptibles : c'est le cas des Mammifères, des Oiseaux, mais aussi des Insectes. L'inventaire n'est certainement pas complet. De toute évidence, les tumeurs sont particulièrement fréquentes chez les *animaux domestiques*. Trousseau et Leblanc furent, en 1828, les premiers à s'en apercevoir; depuis, Dobberstein ainsi que Lombard ont pu le démontrer. Remarquons que dans chacun des groupes étudiés il y a cependant des *espèces résistantes* (par exemple, le hamster). Les types de tumeurs malignes varient suivant les espèces : les carcinomes (épithéliaux) sont plus fréquents que les sarcomes chez le chien; c'est l'inverse pour divers animaux domestiques, en particulier le cheval; les Poissons sont surtout victimes de sarcomes.

La fréquence des tumeurs varie selon le *sexe :* pour une espèce donnée, on n'observe pas les mêmes fréquences de tumeurs chez les mâles et chez les femelles. Outre les tumeurs liées au sexe (mammaires, testiculaires, etc.), on note, par exemple, que les épithéliomas mélaniques sont plus fréquents chez les chèvres que chez les boucs; les tumeurs rénales sont deux fois plus nombreuses chez les truies que chez les verrats; les tumeurs thyroïdiennes et hypophysaires sont moins fréquentes chez le rat que chez sa femelle (Lombard, 1962). Par ailleurs, les tumeurs de la sphère génitale sont particulièrement fréquentes chez les femelles.

Pour une espèce donnée, la *race* est un facteur fondamental (naturellement, les statistiques dont on dispose à cet égard portent sur les animaux domestiques ou de laboratoire et sur l'homme). Enfin, 80 % des souris femelles brunes de la race C_3H développent des cancers mammaires. Chez l'homme, il apparaît que certaines leucémies sont relativement plus fréquentes chez les Blancs, tandis que les cancers des segments antérieurs du tube digestif se manifestent plus souvent chez les Asiatiques.

L'*âge* joue souvent un rôle essentiel. En principe, à partir d'un âge donné (par exemple, 6-7 ans chez le chien, 8 mois chez la souris C_3H), la fréquence suit une progression géométrique. On sait ce qu'il en est chez l'homme. Signalons qu'il existe toutefois des tumeurs qui atteignent plus spécialement les jeunes : tumeurs osseuses et thymomes du chien, ostéosarcomes des membres inférieurs chez les enfants, etc.

Remarquons, enfin, que les tumeurs d'un *organe* donné sont plus ou moins fréquentes selon les espèces. Ainsi, les tumeurs hypophysaires, assez fréquentes chez le rat, sont exceptionnelles chez la souris.

Les problèmes posés par la croissance tumorale

Les tumeurs sont étudiées depuis des temps immémoriaux. On peut discerner approximativement trois grandes périodes : on a d'abord tenté de *traiter* les malades, tout en essayant de comprendre ce que représentait une tumeur; ensuite, on a recherché des *agents* responsables tout en élaborant les premières *théories;* enfin, et nous en sommes là, on a tenté de *mettre ces théories à l'épreuve des faits* expérimentaux. La masse des documents accumulés est énorme mais encore insuffisante. Les problèmes fondamentaux posés par la tumorigenèse sont extrêmement nombreux. On peut estimer qu'ils doivent être étudiés conjointement par les médecins et par les biologistes, dont l'expérience est nécessairement complémentaire.

Essais thérapeutiques et analyse fondamentale des tumeurs spontanées

Le traitement chirurgical a sans doute toujours été pratiqué, au moins quand il s'agissait de tumeurs d'accès commode. Mais, durant des siècles, on a totalement ignoré l'existence de nombre de tumeurs profondes; bien des gens mouraient « emportés par un flux de ventre », qui n'était qu'une conséquence du développement de

PRINCIPE DE CLASSIFICATION DES TUMEURS
(selon Masson)

TUMEURS HYPERPLASIQUES

Provoquées par une *irritation ; elles disparaissent quand l'irritation disparaît.*

Tumeurs monodermiques (mésenchymateuses ou épithéliales)
— unitissulaires
Exemple : fibrome hyperplasique (conjonctif),
angiome hyperplasique (vaisseaux),
— pluritissulaires (conjonctif banal + autres tissus conjonctifs)
Exemple : lymphome (lignée de cellules lymphoïdes),
myélome (lignée des polynucléaires),
ecchondrome (cartilage),
hyperostose (os).

Tumeurs didermiques (mixtes : un tissu épithélial + un tissu conjonctif)
— des revêtements épithéliaux pavimenteux stratifiés :
papillome hyperplasique (croissance parallèle de l'épiderme et du derme) ;
— des revêtements épithéliaux prismatiques simples :
papillome et adénome hyperplasiques ;
— des organes glandulaires :
végétations papillaires, kystes végétants.

NÉOPLASMES

Quelle que soit leur origine, ils sont généralement durables.
Croissance indéfinie et tendance marquée au parasitisme.

Néoplasmes bénins

Tumeurs locales, non envahissantes (pouvant atteindre cependant un volume considérable).
L'ensemble forme un *complexe organoïde* stable et indéfiniment accru.
— Néoplasmes bénins monodermiques :
fibromes (multiplication des fibroblastes induit celle des vaisseaux),
lipomes (multiplication des cellules adipeuses et des vaisseaux),
chondromes (cartilage).
— Néoplasmes bénins didermiques :
papillomes (épiderme + derme),
adénomes (glande + conjonctif),
papillo-adénomes.

} Tumeurs végétantes.

Néoplasmes malins ou cancers

Croissance extensive, agressive ; infiltration et destruction.
Tendance à la formation de *métastases* (colonies tumorales secondaires).
— Quelle que soit l'origine tissulaire de la tumeur, celle-ci utilise le conjonctif et les vaisseaux à son profit (soutien, nourriture).
Par contre : détruit les épithéliums, le tissu adipeux, les muscles et les nerfs.
— Tumeurs d'origine épithéliale ; *carcinomes.*
Exemple : carcinomes épidermique, bronchique, hépathique, etc. Termes fréquents : broncho-carcinome, hépato-carcinome, etc., pour l'épiderme : épithélioma.
— Tumeurs d'origine non épithéliale : *sarcomes.*
Exemple : myosarcome (muscle),
fibrosarcome (conjonctif s. s.),
chonchosarcome (cartilage),
ostéosarcome (os), etc.
— Les tumeurs des tissus non solides sont des *hémosarcomes* ou *leucémies.*

TUMEURS DYSGÉNÉTIQUES

Elles sont la conséquence d'une différenciation anormale durant l'embryogenèse.
— Hétérotopies fertiles.
Une masse de cellules inemployées se développe et se différencie tardivement → surplus tissulaire plus ou moins complexe ; croissance limitée.
— Tératomes.
Mélange chaotique de tissus. Types divers suivant localisation.
Croissance limitée ; pourtant, cancérisation possible.

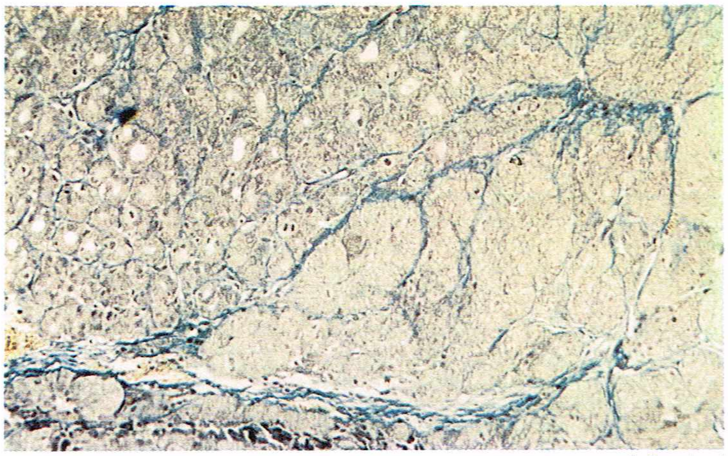

J. Bouchard

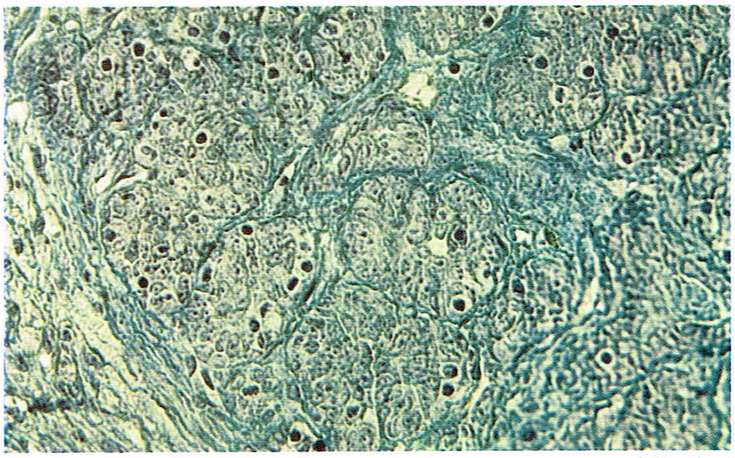

J. Bouchard

▲ ***A gauche, hétérogénéité de la*** **structure des tumeurs mammaires** ***de souris C_3H : on observe, en haut, une masse de tissu tumoral dont les cellules sont groupées en éléments d'aspect sécréteur : remarquer la lumière des acini glandulaires; par contre, en bas et à droite, le tissu tumoral est d'aspect anaplasique : aucune lumière n'est visible et l'activité glandulaire est apparemment nulle. L'ensemble porte le nom d'***adéno-carcinome ***(coloration topographique). A droite, l'***adéno-carcinome mammaire ***tue les souris en un ou deux mois : il n'a pas de pouvoir métastasique (d'essaimage) considérable, mais sa vitesse de croissance est impressionnante; en conséquence, les tumeurs finissent par faire craquer le tégument et entraînent la mort de l'animal par épuisement et infection.***

▶ ***Page ci-contre, localisation des métabolites fluorescents du 3,4-benzopyrène (BaP) non éliminés après un ou plusieurs badigeonnages de la peau par la solution cancérigène.***

▶ ***Souris C_3H porteuses*** **de cancers mammaires.** ***Les tumeurs, qui ont envahi différentes régions du corps, forment sous le tégument des masses, parfois très volumineuses, constituées de nodules plus ou moins distincts; certains, nettement hémorragiques, peuvent dégénérer (remarquer la petite masse brunâtre de la souris de droite).***

cancers digestifs. La connaissance de nombreuses variétés de tumeurs humaines est relativement récente. Trousseau, Leblanc puis Broca, entre 1828 et 1857, comprirent tout le parti que l'on pouvait tirer de l'étude comparée des tumeurs animales. Parallèlement, l'utilisation du microscope fut un progrès décisif. A la fin du XIXe siècle, on avait ainsi dressé un *inventaire* des types de tumeurs bénignes et malignes les plus fréquentes.

Tumorigenèse expérimentale

L'étude précise de la croissance tumorale implique que l'on dispose d'un matériel biologique abondant. Il est possible de provoquer systématiquement des tumeurs chez les animaux de laboratoire. On peut ainsi *greffer* sur un nombre élevé de receveurs les fragments d'une tumeur spontanée; par ailleurs, divers *agents physiques* ou *chimiques* ainsi que certains *virus* sont plus ou moins fortement *cancérigènes*.

La greffe de cancer humain fut tentée, dès 1774, par Peyrilhe : le chien porte-greffe élimina rapidement le tissu transplanté *(hétérogreffe)*. C'est seulement en 1912 que Murphy parvint à faire vivre dans l'*embryon* de poulet des cellules d'un sarcome du rat. Mais des *allogreffes* effectuées sur des individus d'une même espèce ont

J. Bouchard

beaucoup plus de chances de réussir (Hanan, 1889; Mora, 1891; Hegner, 1913, etc.). Entre 1940 et 1960, de très nombreux travaux ont permis d'établir une liste des tumeurs les plus adéquates pour la greffe, donc pour l'expérimentation ultérieure. Il s'est avéré que diverses tumeurs sont difficilement greffables, sauf si l'on utilise comme porteurs des animaux appartenant à la même lignée pure que l'animal donneur. Cependant, dans l'ensemble, il apparaît que les cellules tumorales sont moins facilement « reconnues », donc rejetées, que les cellules normales. La greffe permet ainsi d'utiliser un grand nombre d'animaux tumoraux, ce qui est indispensable pour l'expérimentation. Pourtant, il faut souligner le fait que les cancers greffés ne réagissent pas toujours comme le cancer initial; il semble que le terrain de l'individu porteur joue un rôle essentiel dans le comportement des greffons, qui, en fait, ne sont pas profondément incorporés à l'hôte, mais seulement supportés, un peu comme de simples parasites internes; c'est pourquoi nombre de résultats enthousiasmants, notamment sur le plan thérapeutique, perdent beaucoup de leur intérêt quand on constate qu'il est difficile de parvenir à des résultats semblables avec des tumeurs *spontanées* de même nature mais beaucoup moins sensibles à la plupart des agents expérimentaux.

On peut provoquer l'apparition de tumeurs chez des animaux très variés. Les agents sont très nombreux et leur liste s'allonge d'année en année. Il faut en distinguer deux types : ceux qui provoquent l'apparition d'un pourcentage élevé de tumeurs et qui sont donc susceptibles d'une utilisation expérimentale, et ceux qui n'entraînent cette réaction que de manière exceptionnelle, chez 1 animal sur 400-500 et même plus.

Ainsi, les **agents mécaniques,** les traumatismes de toute origine ne sont guère efficaces (ce qui est fort heureux). Il apparaît qu'en général l'irritation ne suffit pas à déterminer la tumorisation et jouerait seulement un rôle complémentaire.

Par contre, divers **agents physiques** peuvent être beaucoup plus efficaces. Si l'on ne peut rien dire de très précis au sujet des *brûlures*, par contre, on dispose de nombreux résultats concernant les *irradiations*.

— Ainsi, le *rayonnement ultraviolet* provoque des cancers de la peau. C'est en 1928 que Findley a pu montrer cet effet, en irradiant des souris préalablement tondues. Les UV provoquent d'abord une actino-dermatite, irritation qui s'étend au derme et à sa vascularisation, puis il se forme secondairement un épithélioma (Lacassagne et Latarget, 1943). Chez l'homme, dont l'épiderme est relativement épais, il ne peut apparaître que des épithéliomas, fréquents chez les personnes qui travaillent au soleil; mais chez le rat ou la souris, on obtient aussi des sarcomes car les UV peuvent atteindre facilement le derme. Le volume des tumeurs dépend très directement de la dose de rayonnement absorbée par le tissu sensible. Selon Heller, les longueurs d'onde les plus efficaces sont comprises entre 3 300 et 2 800 Å. Selon Blum, les UV entraîneraient immédiatement la transformation des cellules : les effets sont proportionnels au logarithme du temps qui suit l'irradiation. Chaque tumeur serait constituée par de nombreux « clones » produits immédiatement après le traitement.

— Les *rayons X* ont une activité cancérigène marquée ; celle-ci dépend des conditions d'irradiation. Dès 1910, Marie avait obtenu des sarcomes chez le rat après un traitement local. Divers chercheurs sont parvenus depuis à des résultats de même nature, provoquant, suivant la technique utilisée, des épithéliomas (Bloch, 1923), des carcinomes thyroïdiens (Frantz, 1957), etc. Dès 1933, Lacassagne a souligné le fait que la cancérisation est favorisée par une inflammation chronique de l'organe irradié. En outre, on estime que les radiations ionisantes peuvent avoir une action à distance : perturbant localement les équilibres biochimiques, elles entraînent la dissémination dans l'organisme de substances qui peuvent être fort nocives sinon cancérigènes. Chez l'animal, l'irradiation totale de l'individu provoque des tumeurs de nature très diverse suivant la dose et l'espèce utilisées. Néanmoins, dans l'ensemble, il faut retenir deux faits principaux : les rayons X provoquent un déséquilibre endocrinien considérable, dont les conséquences sont mal connues (Maisin) ; la fréquence des leucémies provoquées est remarquable, et certaines souches de souris (AK) sont particulièrement sensibles. En 1953-54, Lorenz puis Kaplan sont parvenus à montrer que les taux de leucémies sont considérablement réduits si, durant l'irradiation totale, on protège un organe hématopoïétique (plaque de plomb). Ces travaux sont à la base d'un très grand nombre d'expériences (par exemple, les travaux de Mathé et ses collaborateurs, qui sont parvenus à compenser une partie des effets des RX par des injections de moelle osseuse). La tumorigenèse par les RX est également possible chez les Insectes, en particulier la drosophile (Ghélélovitch, 1950-1960). Il faut remarquer que les Invertébrés peuvent supporter des doses de plusieurs milliers de röntgens alors que dans un lot de Mammifères, plus de la moitié des animaux sont tués avec des doses de 600 à 800 R (DL 50).

— Les *autres radiations ionisantes* sont également cancérigènes. Dès 1944, Lacassagne et Joliot ont montré que les neutrons provoquent très fréquemment des carcinomes chez le lapin ou chez les Rongeurs. Le pouvoir des radiations dépend du mode d'utilisation ; il est très variable dans le cas des radio-isotopes.

Un très grand nombre de travaux ont été effectués dans le domaine des radiations ; ces expériences sont très intéressantes car l'agent tumorigène, parfaitement connu, peut être administré d'une manière très précise, facilement mesurable ; mais, le mécanisme intime de la tumorisation n'a pas été découvert, même dans ces conditions, pourtant exceptionnellement favorables. On a cependant observé que la formation des tumeurs se produit tardivement dans la plupart des cas, longtemps après l'apparition, très précoce, des radiolésions (Lacassagne).

Un très grand nombre d'**agents chimiques** peuvent être cancérigènes. L'ère de la tumorisation par les produits chimiques a débuté, en 1915, après le travail de Yamagiwa et Ichikawa ; ces chercheurs furent des premiers à constater que les goudrons de houille provoquent l'apparition de cancers cutanés chez le lapin. En 1929, Kennaway put déterminer le composant actif, un hydrocarbure polycyclique, le 1,2-5,6-dibenzanthracène. On entreprit alors, dans le monde entier, une étude systématique des hydrocarbures et de leurs effets sur le tégument ; puis, très rapidement, on en vint à suspecter d'autres corps chimiques, et des essais avec des matériels biologiques très divers se multiplièrent. On sait maintenant qu'il existe des substances cancérigènes dans la plupart des familles chimiques.

— Les *hydrocarbures polycycliques,* abondants à notre époque fortement industrialisée, existent dans des proportions notables dans une multitude de déchets, en particulier à chaque fois qu'un matériel subit une pyrolyse : combustion de la houille, du pétrole, du mazout, de l'essence ou du tabac ; la condensation des fumées produites donne des goudrons, plus ou moins puissamment cancérigènes quand on les expérimente sur la peau de la souris ; de plus, on estime que des hydrocarbures entraînés par les fumées (phase gazeuse) peuvent être cancérigènes au niveau des voies respiratoires (travaux initiaux d'Andervont et de Roffo). Outre le 1,2-5,6-dibenzanthracène, le 3 et le 20-méthyl-cholanthrène (3 et 20 MC) et le 3,4-benzopyrène (BaP) sont des cancérigènes très puissants. On a pu suivre leur mode de pénétration dans le tégument (Doniach, Mottram et Weigert, 1943) ;

Localisation des métabolites fluorescents du 3,4 benzopyrène non éliminés 1 semaine après traitement externe de la peau de souris.

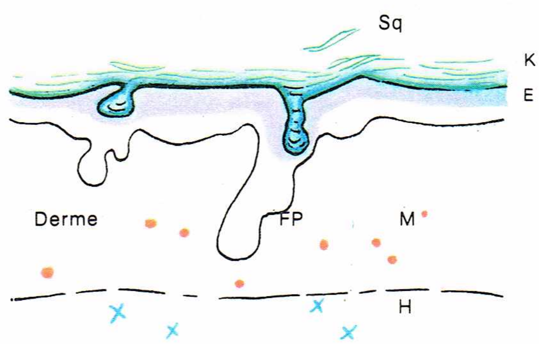

K. kératine et squames (Sq) détachées de l'épiderme ; fluorescence blanc-bleu
E. épiderme hypertrophié peu fluorescent, sauf dans la partie superficielle bleue pâle.
F.P. follicule pileux ayant perdu son poil et sa glande sébacée.
M. mastocytes.
H. hypoderme à lipides pouvant contenir des carbures (X).

Localisation 1 semaine après le 3^{e} traitement hebdomadaire

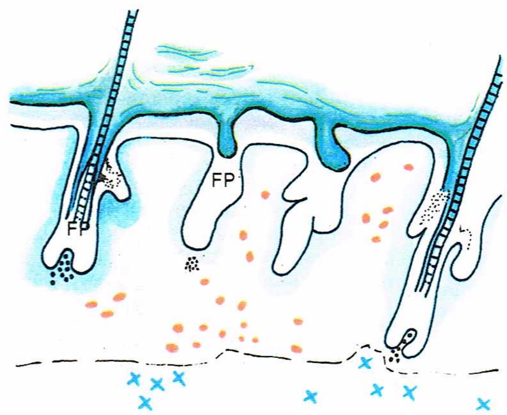

- kératine plus abondante
- épiderme un peu moins épais que dans le cas précédent
- follicules retrouvant une structure subnormale
- fluorescence bleue dans le derme, autour des follicules

Localisation 1 semaine après le 12^{e} ou le 14^{e} traitement hebdomadaire

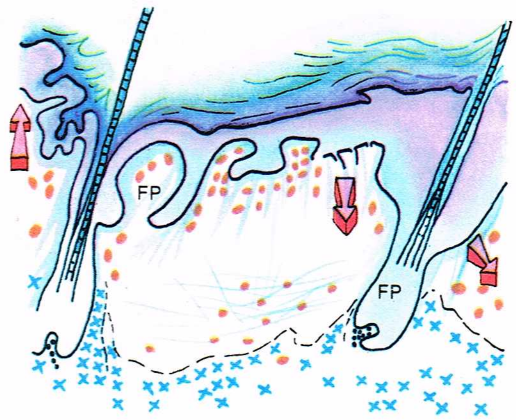

- hyperkératinisation
- hyperplasie épidermique localement forte • hypertrophie
- fluorescence violette labile dans les couches superficielles de l'épiderme et dans une partie de la kératine (cf. BaP intact)
- mastocytes surabondants ; surtout au contact de l'épiderme
- lipides de l'hypoderme saturés d'hydrocarbures (bleus)

Flèches rouges : direction dans laquelle vont se développer les tumeurs.

Richard Colin

▶ *Page ci-contre, en haut à gauche, aspect de l'épiderme et des follicules pileux du tégument de souris traité au 3,4-benzopyrène (BaP). Une semaine après badigeonnage, l'épiderme est épaissi, tandis que les follicules ont rejeté leur poil. La « régénération » épidermique est commencée. Cette coupe, effectuée à congélation, puis colorée à l'orange d'acridine, montre, en lumière UV, que le cytoplasme de la plupart des cellules possède une fluorescence orangée, preuve d'une intense activité; remarquer le massif circulaire des cellules de la papille dermique; leur fluorescence générale est jaunâtre. Quelques mastocytes sont visibles dans le conjonctif. A droite, ébauche tumorale dans le tégument d'une souris traitée par le 3,4-benzopyrène (13 badigeonnages hebdomadaires); coupe à congélation observée en lumière UV après coloration par l'orange d'acridine. Profondément enfoncés dans le derme, certains follicules pileux se désorganisent et leurs cellules commencent l'invasion du tissu conjonctif.*

en effet, le BaP, par exemple, est fortement fluorescent, ce qui permet une étude microscopique de sa répartition dans les tissus observés en lumière UV. En 1941, Graffi et Bielka sont parvenus à établir que les carbures se fixent essentiellement sur les mitochondries des cellules épithéliales. La résorption de ces corps est assez lente et demande toujours de 5 à 8 jours suivant l'animal et les concentrations utilisés (Simpson et Cramer, 1943; Graffi et Bielka, 1963; obs. pers.); durant cette période, le cancérigène subit des transformations plus ou moins importantes au niveau de l'épithélium, et il est partiellement éliminé avec la kératine et le sébum; la transformation métabolique de ce qui reste s'achève dans le foie, après drainage par les vaisseaux sanguins (Boyland, 1964). Si le traitement de la peau est répété durant plusieurs semaines, il semble que, passé un certain stade, l'épiderme n'est plus capable d'assurer le début de transformation précédemment évoqué (obs. pers.).

Divers travaux montrent que la tumorisation et la cancérisation se font par *étapes;* le processus s'étend sur plusieurs mois. Ainsi, les hydrocarbures provoquent initialement une *intoxication,* voire une nécrose plus ou moins intense de l'épiderme (Iversen et coll.; 1961-1964); ensuite, vient une phase de *régénération,* avec une forte augmentation de l'activité mitotique *(hyperplasie);* puis un équilibre s'établit temporairement *(aplasie)* et l'épiderme paraît abandonner toute activité proliférative; c'est vers cette époque (5e semaine) que l'épiderme perd une partie de son pouvoir de dégradation du BaP; ensuite, et cela jusqu'à la formation des tumeurs, la prolifération reprend vigoureusement; des épithéliomas peuvent se former d'emblée (Rous et Kidd, 1941), mais, plus généralement, des *papillomes* (bénins) se développent d'abord; ces petites tumeurs végétantes peuvent évoluer rapidement vers le cancer puis devenir secondairement infiltrantes (J. Bouchard, 1971) : les tumeurs qui envahissent le derme puis l'hypoderme sont depuis « longtemps » des cancers; leur base prend un aspect radiculaire extrêmement caractéristique de toutes les tumeurs très malignes, expérimentales ou non.

Compte tenu du fait qu'un seul badigeonnage de la peau peut entraîner la formation de tumeurs (après plusieurs mois), les deux étapes principales de la tumorisation seraient l'*initiation* (due au cancérigène) et la *promotion,* c'est-à-dire la transformation effectivement visible et qui précède l'apparition des tumeurs (Berenblum, 1941). La promotion, qui s'accompagne toujours d'une nette hyperplasie, peut être produite par divers agents, physiques ou chimiques; ceux-ci ont donc un rôle adjuvant, ou *cocarcinogène;* par exemple, nombre de substances contenues dans la *fumée de tabac* sont des cocarcinogènes; on a beaucoup utilisé en laboratoire l'*huile de croton,* dont les effets sont très spectaculaires (Hieger, 1961); selon Setala et ses collaborateurs (1962), certains *tensio-actifs* ont les mêmes propriétés. A noter que si l'on n'utilise aucun cocarcinogène après le traitement par l'hydrocarbure, la promotion se déclenche « seule », mais beaucoup plus tard. Enfin, s'il est admis que l'initiation est irréversible, certains auteurs sont cependant parvenus à montrer qu'il n'en est pas toujours ainsi, du moins dans certaines conditions d'observation (Roe et coll., 1972).

Il faut insister sur le fait que les hydrocarbures polycycliques n'agissent pas de façon aussi néfaste sur tous les tissus expérimentés; certaines espèces sont réfractaires. Chez la souris elle-même, on constate que l'épiderme paraît être plus sensible que les follicules pileux durant les premières phases du traitement au BaP (obs. pers.); ensuite, il semble pourtant que la cancérisation se produise à partir du moment où les follicules s'incorporent aux tumeurs d'aspect bénin; on n'observe toutefois aucune tumorisation des autres organes et, en particulier, du foie, vers lequel sont drainées de grandes quantités d'hydrocarbures. Au niveau biochimique, il est évident que l'étude des troubles qui précèdent la cancérisation atteint un haut degré de complexité.

Il ressort d'une multitude d'expériences faites avec les hydrocarbures que le pouvoir cancérigène semble dépendre d'une zone particulière de la molécule, dite *zone K,* dont la configuration électronique est remarquable (Pullmann et Pullmann, 1965).

Certains hydrocarbures, faiblement cancérigènes ou non cancérigènes, peuvent être antagonistes des autres (travaux de Lacassagne, Buu Hoï et coll.).

— Les *amines aromatiques.* Plusieurs d'entre elles sont cancérigènes. Certaines sont responsables du cancer de la vessie qui sévissait parmi les ouvriers travaillant dans l'industrie des colorants : l'aniline ($C_6H_5NH_2$), les naphthylamines et la benzidine. Dès 1938, Hueper et ses collaborateurs parvinrent à montrer le danger que représentait la β naphthylamine : l'absorption de ce produit avec la nourriture ou son injection sous-cutanée provoquent des carcinomes de la vessie chez le chien; le temps de latence est de 20 à 32 mois avec une dose

▶ *A gauche,* **tumeurs épidermiques** *observées après traitement de la peau de souris par le* **BaP***; ce résultat a été obtenu après 15 badigeonnages hebdomadaires. Sur la peau traitée, plus ou moins dépilée,* **bourgeonnement** *de nombreuses tumeurs d'aspect papillomateux; on repère facilement* **un petit épithélioma** *(surface brun rougeâtre et croûtelleuse), ses bords, relevés, forment un bourrelet à croissance très active. A droite, coupe histologique au niveau du* **bourrelet de croissance** *d'un épithélioma type. On voit que les cellules épithéliales cancéreuses ne sont pas profondément dédifférenciées : leur kératinisation est possible (globes cornés). Noter le polymorphisme et la colorabilité variable de ces cellules. Les travées épithéliales ne sont pas bordées par une basale distincte : le processus d'invasion est déjà très avancé (coloration topographique).*

J. Bouchard

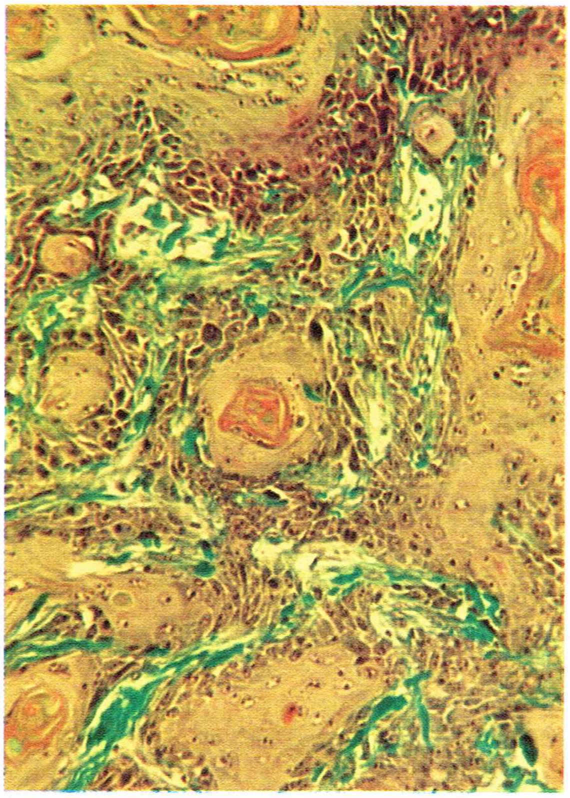

J. Bouchard

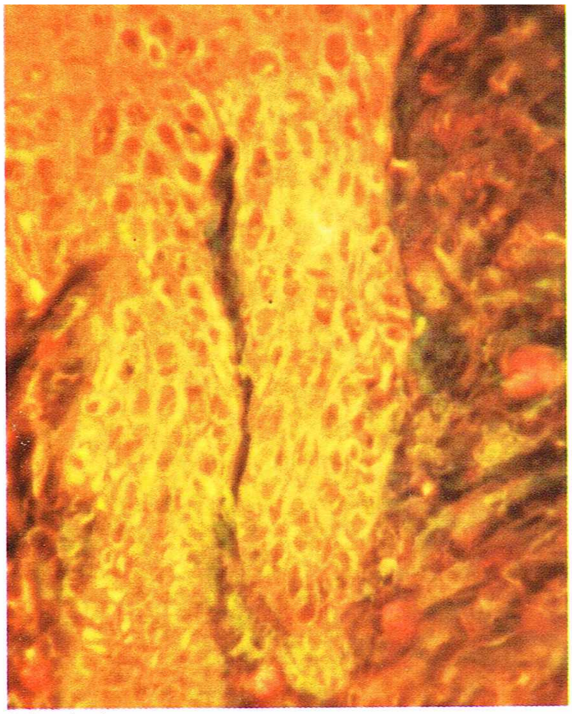

J. Bouchard

J. Bouchard

quotidienne d'environ 400 mg. Certains colorants, tels que l'auramine et le magenta, sont considérés comme très dangereux pour l'homme.

Certaines amines polyaromatiques sont également des carcinogènes puissants : par exemple, le 2-acétylamino-fluorène, le 4'-amino-2 : 3'-azotoluène (AAT) et le p-diméthylaminoazobenzène (DMAB). En 1941, Wilson et ses collaborateurs ont obtenu, avec le premier produit, un grand nombre de tumeurs chez le rat; celles-ci se localisent essentiellement sur le tractus urinaire. Les deux autres substances provoquent l'apparition de cancers du foie chez les Rongeurs; le DMAB (ou jaune de beurre, autrefois utilisé comme colorant alimentaire) est un agent extrêmement puissant; la formation des tumeurs s'effectue par *étapes* relativement distinctes, comme dans le cas des tumeurs épidermiques déjà évoquées (Farber, 1956); la cancérisation se produit au sein de nodules contenant des cellules qui ont perdu certains caractères de différenciation et qui sont devenues plus résistantes à l'agent toxique (Lacassagne, 1966). Divers auteurs ont constaté que les hydrocarbures polycycliques pouvaient inhiber l'action des hépatocarcinogènes (Richardson et Cuningham, 1951 ; Miller et coll., 1952 ; Miyaji et coll., 1953, etc.) ; cet effet peut être obtenu grâce à des carbures cancérigènes ou non cancérigènes.

— Les *agents alkylants* possèdent souvent, en plus de leur pouvoir mutagène, un pouvoir carcinogène très notable ainsi que l'ont constaté Boyland et Horning dès 1949; les types de tumeurs peuvent être très variés avec la NN-di(2-chloroéthyl) méthylamine ou la tri (2-chloroéthyl) amine qui sont des « moutardes » radiomimétiques. Il en est de même des époxydes tels que le diépoxybutane. On sait que les composés N alky-N nitroso sont cancérigènes : l'un d'eux, la diéthylnitrosamine, est connu depuis 1956 comme étant un hépatocarcinogène.

— Enfin, citons à part le cas de l'*uréthane*

$(NH_2—COO—C_2H_5)$;

c'est un agent qui augmente considérablement le taux des adéno-carcinomes pulmonaires de la souris; certaines souches sont particulièrement sensibles; le taux de tumorisation peut avoisiner 100 % chez la souris blanche Swiss.

D'après ce qui précède on voit qu'il est possible de provoquer divers types de tumeurs dans des conditions qui permettent l'expérimentation ultérieure.

▼ Lésions produites par le tabac chez l'embryon d'Oiseau (poule) : au 5ᵉ jour d'incubation, on injecte au centre du jaune 0,25 ml d'une solution, très diluée, contenant des condensats de fumée. Les résultats au 10ᵉ jour montrent : à gauche, un embryon de taille normale mais présentant un œdème important et une hémorragie au niveau mandibulaire ; au centre, un animal de petite taille, présentant un érythème intense ; vaisseaux tégumentaires surabondants et quelques petites hémorragies ; à droite, un animal de petite taille et monstrueux dont les yeux et la mâchoire supérieure sont atrophiés ; il présente un érythème discret, mais noter la cavité viscérale très largement ouverte ; la plupart des viscères font saillie hors de l'animal (cœlosomie).

J. Bouchard

J. Bouchard

J. Bouchard

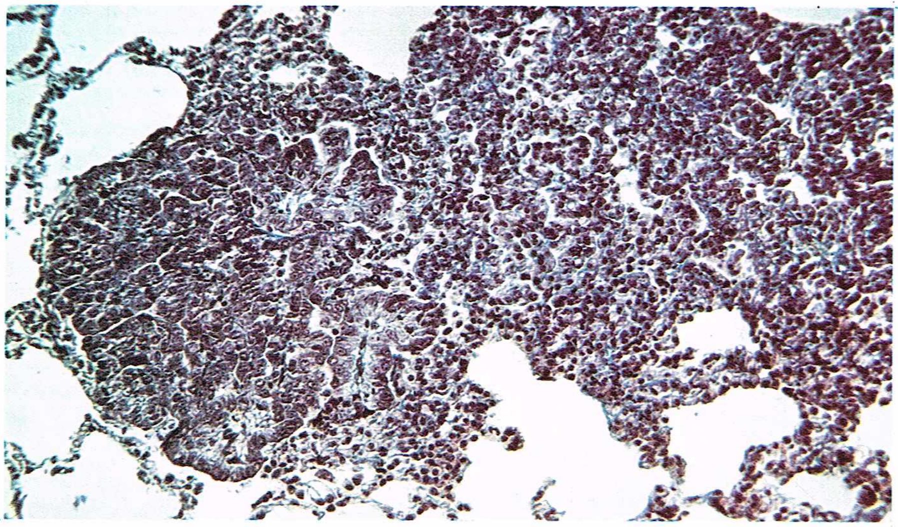

J. Bouchard

▲ « **Adénome** » **pulmonaire** *chez une souris de race Swiss ayant absorbé de l'uréthane. Les cellules tumorales ont une allure qui rappelle celle du revêtement des bronchioles; elles s'organisent en travées complexes, mais peuvent se détacher et envahir de proche en proche les alvéoles pulmonaires (à droite).*

Insistons, pour finir, sur le fait qu'il existe divers **carcinogènes dont l'origine est endogène**; l'animal fabrique ces substances.

— Le cas du *cholestérol* est typique; en 1937, Shabad fut le premier à l'incriminer dans la formation de carcinomes hépatiques de l'homme. Les confirmations expérimentales sont multiples. L'injection de cholestérol entraîne la formation de sarcomes (Hieger, 1961).

— Les *œstrogènes,* fabriqués ou administrés à doses excessives, provoquent des tumeurs diverses; en particulier au niveau de la glande mammaire (Lacassagne); l'expérimentation a été faite surtout chez les Rongeurs, mais aussi chez le singe rhésus par exemple (elle a provoqué des tumeurs utérines). En fait, la liste des carcinogènes chimiques serait extrêmement longue.

C'est en 1903 que Borrel envisagea la participation des **virus** dans les processus tumoraux. L'idée se trouva renforcée dès 1908 par un travail d'Ellermann et Bang : ils réussirent la transmission d'une leucémie de la poule, grâce à des *filtrats acellulaires*. En 1910, Rous parvint à transmettre de la même manière un sarcome se développant également chez la poule. Les expériences de cette nature se multiplièrent, donnant des résultats positifs avec les matériels les plus divers.

Les théories sur la nature des processus de cancérisation

Ce chapitre sera seulement une brève évocation des problèmes.

Théorie du déséquilibre épithélium conjonctif (Thiersch et Waldeyer)

Cette ancienne théorie implique un « vieillissement » prématuré du conjonctif et, en conséquence, une hyperactivité pathologique de l'épithélium. On n'y croit guère, bien que l'on puisse noter effectivement une lésion du conjonctif avant l'apparition des tumeurs « chimiques ».

Théorie de l'irritation initiale (Virchow)

En fait, les irritations, les traumatismes d'origine mécanique ne seraient pas déterminants.

Théorie de l'origine embryonnaire (Lobstein et Récamier)

Des cellules embryonnaires n'ayant pas suivi les voies de différenciation normales pourraient, après une latence plus ou moins longue, évoluer dans le sens de la tumorisation. De fait, les dysembryoplasies existent bien; les tératomes représentent des cas troublants. Mais il a été prouvé que l'individu comporte de nombreux restes embryonnaires qui, en général, ne se transforment pas en tumeurs (Lombard).

Théories mutationnistes

Il est apparu très rapidement que l'aspect des cellules tumorales est généralement très particulier; on dit qu'elles sont *anaplasiques;* ne sont-elles pas alors de nouvelles races cellulaires? Au début du siècle, Hauser puis Boveri envisagèrent que la « défectuosité cellulaire » pût être initialement celle de la chromatine. L'idée se trouva renforcée aux alentours de 1920 après la découverte du processus des mutations. Depuis la première mise au point cohérente de Bauer (1928), la théorie de la *mutation somatique* a fait son chemin; en effet, il est évident qu'il existe dans les cellules tumorales un nombre élevé d'anomalies nucléaires et chromosomiques visibles, ce qui laisse supposer qu'il en est de même au niveau génétique.

Cependant, il faut souligner le fait que la mutation est bien loin d'entraîner automatiquement la tumorisation; ainsi Orgel, en 1963, notait-il que lors de chaque réplication de l'ADN, un certain nombre d'erreurs se glissent normalement dans le génome (facteur d'erreur 10^{-8}); si l'on évalue à 10^{13} le nombre de mitoses par jour chez l'homme, on voit que les modifications du génome sont considérables; mais il faut souligner qu'il existe chez l'individu normal des mécanismes de *régulation*. Ainsi, les cellules modifiées seraient détectées et éliminées par l'organisme. On a pu envisager que les cellules mutantes cancéreuses ne soient pas reconnues par l'organisme, donc pas détruites; en effet, il a été prouvé que de telles cellules ont perdu une partie de leur antigénicité (Zilber, 1958).

Mais on a vu, depuis, que les choses sont souvent plus complexes : certaines tumeurs possèdent des antigènes supplémentaires, hétérogènes ou non (Burnet, 1964). De plus les travaux de Fauve, Jacob et leurs collaborateurs (1974) tendent à prouver que les cellules tumorales peuvent déprimer les réactions immunologiques de l'hôte.

Une mutation viable conduirait à la formation d'une tumeur, à partir d'une *cellule transformée* dont la descendance constituerait un *clone*. Existe-t-il de tels clones de cellules possédant un équipement génétique sensiblement identique? C'est le cas d'une leucémie myéloïde chronique de la souris, où l'on dispose d'un critère de reconnaissance, d'un marqueur, le « chromosome Philadelphie »; on a trouvé des aberrations de certains chromosomes dans diverses tumeurs : c'est le cas pour le sarcome de Rous de la poule, de lymphosarcomes humains (Gariepy et Cadotte, 1970) et de tumeurs gastriques (Simons, 1966); les travaux expérimentaux de Boué, Vigier et Montagnier permettent de penser que ces exemples ne sont pas limitatifs.

Mais il faut souligner le fait que la très grande majorité des « petites anomalies » à l'échelle moléculaire demeure en général totalement *cachée*. On a cru pouvoir noter un certain parallélisme entre le pouvoir mutagène de substances chimiques diverses et leur pouvoir d'induire la formation de tumeurs. Il y a là matière à controverse (Burdette, 1955). Les corps les plus cancérigènes sont loin d'être les mutagènes les plus efficaces (Demerec). Seul cas vraiment très troublant, celui des « moutardes à l'azote »; ces substances ont les mêmes effets que les RX eux-mêmes. Quoi qu'il en soit, divers auteurs ont montré que les cancérigènes se lient aux protéines et en particulier aux *protéines nucléaires* (Price et les Miller); les hépatocarcinogènes se fixent aussi sur les *acides nucléiques* (Marroquin et Faber, 1962; Williard et Irving, 1964); en conséquence les cancérigènes entraîneraient, selon Kidson et Kirby (1965), des erreurs de transcription qui deviendraient permanentes.

En 1936, Plate émit l'hypothèse d'une *mutation cytoplasmique*. Nombre de chercheurs ont été séduits par cette idée; de nombreux faits expérimentaux paraissent en effet la confirmer. Selon Graffi et Bielka (1963) une telle mutation serait possible au moins au niveau des mitochondries; or nous savons maintenant que ces organites, où s'accumulent par exemple les hydrocarbures cancérigènes, contiennent de l'ADN. Notons que, parallèlement, diverses tumeurs paraissent être constituées de cellules qui, appauvries en enzymes (Pitot, 1959), peuvent manifester des déviations de leur métabolisme. On rejoignait là une théorie de la cancérisation, la *théorie métabolique* émise dès 1926 par Warburg; selon lui, la formation des tumeurs était la conséquence d'une réduction de l'activité respiratoire et d'une augmentation de la glycolyse anaérobie; divers cancérigènes réduisent ainsi les phénomènes respiratoires : uréthane, thiourée, RX, hydrocarbures, etc. (travaux de Dianzani, 1953; Emmelot et Bos, 1957). Par contre, il semble que certaines tumeurs possèdent encore une activité respiratoire proche de la normale.

Nucléaires ou cytoplasmiques, une, ou plutôt des mutations somatiques successives, se traduisant par la perte de certaines enzymes, respiratoires ou autres, entraîneraient la conversion de la cellule normale en cellule cancéreuse.

Si l'on accepte l'hypothèse de *« feedback-deletion »* de Potter (1958), « la perte fonctionnelle d'un ou de plusieurs chaînons des mécanismes de rétroaction, qui règlent normalement la croissance de la cellule, pourrait entraîner un rythme accéléré des divisions » (Lacassagne, 1966).

Dans le cas du foie, les hépatocarcinogènes empêchent la formation de diverses enzymes mitochondriales impliquées dans la *phosphorylation oxydative;* d'autre part ils bloquent la synthèse d'*enzymes de « détoxication »* fabriquées dans le réticulum endoplasmique, ce qui détruit l'une des fonctions essentielles de la cellule hépatique : ne pouvant « désamorcer » les agents toxiques qui l'envahissent, elle devient alors cancérisable; cet effet des carcinogènes est inhibé par diverses substances qui, elles, favorisent la formation de telles enzymes (Cooney et Miller, 1956).

La nature des effets produits par les carcinogènes sur les acides nucléiques n'est pas encore bien connue. Nous avons déjà vu, en parlant de la différenciation cellulaire, que Guillé et Quétier (1973) concevaient la transformation prétumorale comme une transformation de l'hétérochromatine, particulièrement sensible à divers agents; de fait, la nature des acides nucléiques est profondément modifiée lors de la formation des tumeurs (voir chapitre des tumeurs végétales). Il ressort de travaux récents que les lésions de l'ADN provoquées par les UV ou les carcinogènes sont importantes et concernent l'ensemble de la molécule; mais ces lésions seraient très rapidement réparées par la cellule (Regan et Setlow, 1974), sauf aux niveaux qui correspondent à l'accumulation d'hétérochromatine (Harris et coll., 1974); on a donc là un argument en faveur du rôle essentiel que peut jouer cet ADN « particulier ».

Théorie virale

L'action cancérigène de virus est un fait incontestable. Les virus carcinogènes entraînent *rapidement* la transformation maligne des cellules infestées; leur voie d'action est donc plus directe que celle des autres facteurs cancérigènes : les virus du sarcome de Rous ou des leucoses aviaires produisent cette transformation en quelques heures ou quelques jours (revue de Graffi et Bielka, 1963). De plus, et c'est un point fondamental, le « noyau » des particules virales est constitué par des *acides nucléiques.* On trouve des virus à ADN, en particulier dans le cas du papillome de Shope du lapin, dans le cas du polyome et de tumeurs adénomateuses; le sarcome de Rous et les leucémies aviaires ou de la souris contiennent des virus à ARN. Le nombre des virus mis en évidence chez les animaux s'est considérablement accru depuis une dizaine d'années. Rien de vraiment convainquant n'a été observé dans le cas des tumeurs humaines (selon Mathé, 1973). Cependant, il faut remarquer que certains virus parasites d'animaux peuvent infester des cellules humaines; c'est le cas du virus d'une tumeur rénale du singe rhésus, ou SV 40 (simian virus) : en culture de tissus il contamine généralement le rein de singe mais aussi le hamster et provoque la transformation tumorale de cellules humaines (Koprowski et coll., 1962; Block et coll., 1963); ici, la période de *latence* est longue et durant ce temps les particules virales ne sont pas visibles dans la cellule. En 1963, Sabin et Koch ont greffé quelques-unes de ces cellules à des animaux; ils ont obtenu la formation de tumeurs dont les cellules contenaient des virus visibles; on en déduisit que les cellules cultivées contenaient bien le *virus sous une forme latente.* En 1963, Graffi et Bielka considéraient cet état masqué comme « un état organisé non corpusculaire des éléments viraux », impliquant « une liaison étroite de la substance virale avec les substrats génétiques de la cellule ».

Faut-il considérer les virus carcinogènes comme les facteurs étiologiques proprement dits de tous les cancers? On peut l'admettre; on doit alors considérer comme de simples adjuvants les carcinogènes chimiques ou physiques dont il a été question précédemment. Dans le cas des tumeurs humaines le microscope électronique ne permet pas de déceler la présence de virus cancérigènes, alors qu'on peut en observer dans de nombreuses tumeurs animales (Fawcett, 1956; Bernhard 1957; Gross, 1956; Dmochowski, 1957; Graffi et coll., 1963; Finkel, 1966). Les techniques immunologiques ont apporté des résultats expérimentaux qui tendent à confirmer l'hypothèse du virus latent (Stocker, 1964.). Chez l'homme, il

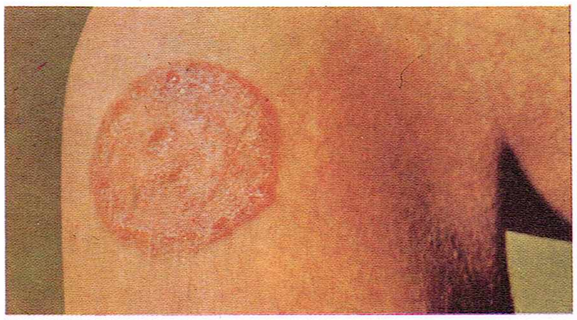

Strumillo

◀ ***Lésion épidermique due à un virus, celui de l'herpès.***

apparaît que certaines tumeurs contiennent un antigène spécifique dont l'origine pourrait être virale (Jasmin et Mathé, 1972); ces résultats ne sont pas encore décisifs. Les techniques d'hybridation moléculaire sont maintenant particulièrement prometteuses.

Il semble que le cancer ne soit pas une maladie héréditaire; est-ce une maladie transmissible par contact entre individus? Ce n'est pas prouvé (Mathé, 1973); il faut souligner ici l'exemple des adéno-carcinomes mammaires de la souris : on sait depuis longtemps qu'ils sont transmis de la mère aux petits par un facteur contenu dans le lait (Korteweg, 1936; Bittner, 1936); le virus a été observé pour la première fois par Bernhard, Oberling et ses collaborateurs (1955-1957).

Un dernier point, particulièrement important : en 1970, Burhitt est parvenu à montrer qu'une tumeur proche des leucémies peut être transmise par un moustique africain; or on pense maintenant qu'elle est due à une infestation virale; le virus serait *proche de celui de l'herpès* et il agirait comme cofacteur d'un *oncornavirus* « normalement » contenu dans les cellules et dont la nature est proche de celle des virus des tumeurs animales; selon J. Bernard (1973) et Latarget (1972), le *concept d'association* est de portée générale; dès 1963, Hanafusa et ses collaborateurs avaient constaté l'existence de virus « imparfaits » chez l'animal; le virus du sarcome de Rous (VSR) n'est oncogène (cancérigène) que s'il est « soutenu » par un facteur viral associé (VAR) découvert par Rubin et Vogt en 1962.

Quoi qu'il en soit, la nature du « terrain » individuel est un des éléments déterminants de la tumorigenèse; les facteurs qui caractérisent ce terrain sont, somme toute, assez mal connus; pourtant les spécialistes s'accordent à penser qu'une « fragilité biochimique », générale ou non, peut être un élément prédisposant (par exemple c'est le cas pour les *agammaglobulinémies*).

Les tumeurs végétales

De nombreux travaux ont été effectués sur les tumeurs végétales. Deux raisons principales peuvent expliquer cette abondance d'expériences. Les tumeurs végétales sont comparables sous de multiples aspects aux tumeurs animales, et il est possible, grâce aux cultures de tissus, de faire une étude systématique des processus de transformation de la cellule saine en cellule tumorale. Nous insisterons particulièrement sur le *crown-gall,* qui est une tumeur végétale provoquée par une Bactérie, *Agrobacterium tumefaciens;* la Bactérie virulente, introduite dans un tissu de plante susceptible préalablement conditionné par une lésion, détermine la transformation de cellules sensibles en cellules tumorales. Le terme *tumeur* sera attribué uniquement aux néoplasmes à croissance illimitée se développant en l'absence de l'agent inducteur.

Les tumeurs provoquées par le virus *Aureogenus magnivena,* les tumeurs génétiques et les tissus anergiés (ou habitués) seront brièvement décrits dans un souci de généralisation.

Tumeurs de crown-gall

Description et mode de formation

Les tumeurs de crown-gall, ou « galle du collet », ont été découvertes en 1906 par Smith sur les tiges de chrysanthèmes infectés par la Bactérie *Agrobacterium tumefaciens.* La méthode la plus courante pour obtenir des tumeurs de crown-gall est de pratiquer une *lésion,* à

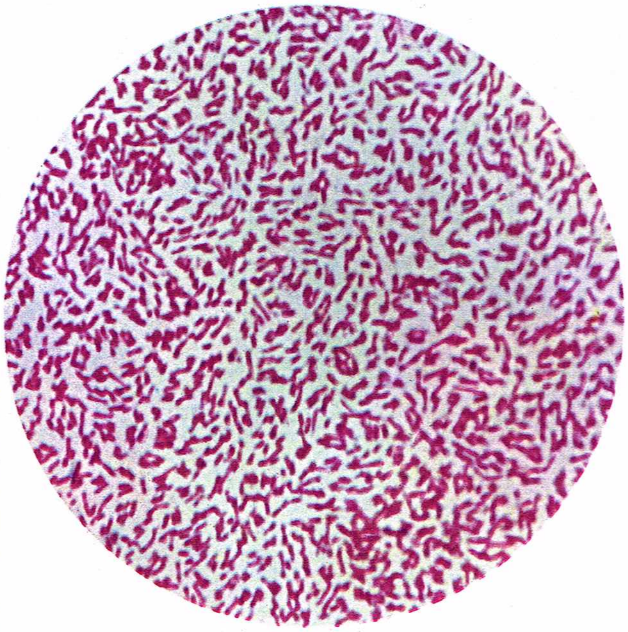

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

M. Weinbaum - Laboratoire de biologie moléculaire végétale, Orsay

▲ *A gauche, culture d'***Agrobacterium tumefaciens***, Bactérie qui provoque diverses tumeurs sur une grande variété de plantes. A droite, tumeurs primaires âgées de 4 semaines, provoquées sur un plan de* **Bryophyllum daigremontianum** *par la Bactérie* **Agrobacterium tumefaciens** *(souche B_6); il est possible de voir des racines se développant à la surface d'une feuille tumorisée.*

l'aide d'une aiguille stérile, sur un entre-nœud de plante susceptible. La plaie est recouverte d'un coton humide pour réduire au minimum la contamination et éviter le dessèchement des tissus entourant la plaie. 48 heures plus tard, une inoculation est faite avec une souche virulente d'*A. tumefaciens* prélevée en phase logarithmique de croissance. De petites tumeurs sont détectables au bout de deux semaines.

Les cultures de tissus tumoraux peuvent être obtenues sans contamination par la Bactérie virulente, en utilisant les trois méthodes suivantes : le prélèvement de tumeurs secondaires (métastases) qui se forment sur certaines plantes (soleil, chrysanthème) ; le prélèvement des zones stériles des tumeurs primaires (soleil, artichaut, tabac) ; le chauffage des tissus transformés à 46-47 °C, ce qui provoque la mort des Bactéries sans influencer le développement des tumeurs.

Cette description rapide de l'induction tumorale fait apparaître l'influence de trois facteurs primordiaux dans le déterminisme du crown-gall : la Bactérie, l'hôte et les processus de lésion de l'hôte. Nous allons examiner quelles sont les caractéristiques et les variations possibles de ces trois facteurs.

Virulence de la Bactérie

La Bactérie *Agrobacterium tumefaciens* appartient à l'ordre des *Rhizobiaceae*. C'est une Bactérie anaérobie facultative, Gram négative, couramment rencontrée dans le sol ; elle possède de un à six flagelles. La nature des tumeurs obtenues dépend à la fois de la souche d'*A. tumefaciens* utilisée et de la nature de l'hôte susceptible. Par exemple, la souche B_6 induit de grosses tumeurs indifférenciées sur une grande variété de plantes. Par contre, la souche T_{37} est modérément virulente : elle provoque soit des tumeurs se développant lentement, soit des tumeurs très complexes se redifférenciant, appelées *tératomes*. Ces dernières se forment d'ailleurs sur des plantes connues pour leurs grandes capacités de régénération, telles que *Nicotiana tabacum* et *Bryophyllum daigremontianum*.

La Bactérie *A. radiobacter,* espèce très proche d'*A. tumefaciens,* n'est pas tumorigène ; c'est pourquoi elle est souvent choisie comme contrôle bactérien au cours des expériences d'induction tumorale.

Nature de l'hôte

Les tumeurs de crown-gall peuvent être induites sur un grand nombre d'espèces de plantes supérieures (142 genres au moins ont été dénombrés, appartenant à 61 familles) comprenant de nombreuses Dicotylédones et quelques Gymnospermes. Par contre, très peu de Monocotylédones semblent susceptibles et les rares résultats positifs décrits sont controversés.

Si l'âge de l'hôte ne paraît pas critique, on utilise toutefois généralement des germinations bien développées ou des boutures à tiges épaisses (5 mm de diamètre). Les tumeurs sont souvent induites sur les tiges, mais il est facile d'en obtenir sur les feuilles et sur les racines.

Rôle de l'hôte dans les processus de lésion

Les cellules hôtes dans le voisinage de l'infection doivent être conditionnées par une lésion de type mécanique. C'est une obligation absolue pour obtenir des tumeurs : jusqu'à maintenant, aucune transformation n'a été décrite en l'absence de lésion naturelle ou provoquée. Dans le cas des tissus de *Vinca rosea,* Braun a montré que la vitesse de développement des tumeurs est dépendante de la durée de la période qui sépare le moment de la lésion de celui de l'infection. Cette vitesse atteint un maximum 48 h après la lésion, et décroît au-delà de cette durée. Les Bactéries doivent être viables pour réussir la transformation, mais elles restent strictement localisées dans les espaces intercellulaires et dans les tissus blessés : elles ne pénètrent pas dans les cellules intactes au voisinage de la plaie ou du moins pas sous une forme reconnaissable par les procédés cytologiques classiques.

Quels sont les supports biochimiques de la virulence bactérienne et de la susceptibilité de l'hôte ? Quelles sont, au cours de la phase de conditionnement, les modifications subies par celui-là, qui permettent l'induction tumorale ? La comparaison à différents niveaux des propriétés des tissus sains et des tissus tumoraux correspondants fournit quelques renseignements à ce sujet.

Comparaison des propriétés des tissus sains, des cultures de tissus sains et de tissus tumoraux

Niveau cytologique

Pendant les quatre jours qui suivent l'inoculation, les cellules tumorales potentielles sont caractérisées par l'accroissement des volumes nucléaires et nucléolaires, accompagné de l'augmentation des quantités respectives d'ADN, d'ARN et de protéines de type non histonique dans le nucléole et le cytoplasme. Des changements semblables sont observés dans les tissus sains de contrôle, blessés et non infectés, mais ils sont généralement transitoires et moins prononcés que dans les tissus infectés. De plus, un retour aux conditions initiales est observé lorsque les processus de cicatrisation sont terminés. Donc, à ce niveau cytologique, l'état tumoral pourrait être comparé à un état de lésion dont les caractéristiques se maintiendraient au lieu d'être transitoires.

L'examen histologique des tumeurs intactes ou des cultures de tissus tumoraux montre des masses très désorganisées de petites cellules, se divisant très rapidement, et de très larges cellules géantes mono- ou multinucléées, mélangées à des groupes peu organisés d'éléments vasculaires. La polyploïdie et la polyténie sont des caractéristiques de nombreux tissus tumoraux ; cependant, ceux de soleil restent souvent diploïdes. Ces faits cytologiques et histologiques anormaux décrits dans les tissus tumo-

raux sont comparables à ceux qui existent dans les cultures de tissus sains : il semblerait donc qu'ils ne soient pas liés au mécanisme même de la transformation tumorale.

Niveau physiologique

Trois critères physiologiques ont été initialement retenus pour qualifier une excroissance tumorale, qu'elle soit naturelle ou expérimentale :

— elle prolifère indéfiniment, d'une manière anarchique, sur l'hôte où elle a pris naissance ;

— elle est reproductible par greffe sur un tissu sain ;

— elle est susceptible d'être mise en culture *in vitro* sur des milieux stériles ne permettant pas la prolifération du tissu sain correspondant.

Ce dernier critère paraît le plus intéressant ; il a été découvert par White et Braun en 1942. Ces chercheurs montrèrent que des cultures de tissus de crown-gall stériles de soleil se développent rapidement sur un milieu simple contenant des sels minéraux, trois vitamines et du saccharose, alors que les cultures de tissus sains correspondants nécessitent la présence de facteurs de croissance tels que l'auxine. Ces observations ont été, par la suite, confirmées et appliquées à d'autres tissus végétaux.

Il est maintenant bien établi que l'un des critères fondamentaux de la transformation tumorale est la simplification des exigences nutritionnelles des cellules hôtes. Il faut cependant noter que, comme ces exigences varient suivant le tissu sain considéré, le degré de simplification varie aussi. Ainsi, les tissus de crown-gall de *Vinca rosea* peuvent se développer sur un milieu ne contenant pas les composés suivants : auxine, cytokinines, mésoïnositol, glutamine, asparagine, acide guanylique et acide cytidylique, alors que les tissus de crown-gall de soleil sont seulement autonomes à l'auxine. D'une manière générale, les tissus tumoraux contiennent plus d'auxines que les tissus sains correspondants.

Cette autonomie des tissus tumoraux par rapport aux facteurs de croissance exogènes correspond-elle à une régulation différente existant dans les cellules tumorales ou à une absence de régulation de la production des facteurs de croissance, entraînant une croissance anarchique ? Il est très difficile de répondre à cette question : en effet, les séquences de synthèse des facteurs de croissance sont encore mal connues, et les gènes de structure qui contiennent l'information pour la synthèse de ces enzymes sont totalement inconnus.

Niveau biochimique

Depuis quelques années, de nombreuses équipes se sont efforcées de définir des critères biochimiques, qui semblent souvent plus faciles à mesurer et à reproduire que certains critères physiologiques. L'idée fondamentale est de trouver *un* ou *n* éléments biochimiques caractéristiques de l'état tumoral : le ou les éléments doivent être *présents dans le tissu tumoral* et *absents dans le tissu sain* correspondant ; s'il y a transfert de l'agent oncogène à l'hôte, il est nécessaire de montrer que le ou les éléments sont effectivement transférés intacts ou plus ou moins modifiés de la Bactérie à la cellule saine. Deux groupes de substances ont particulièrement retenu l'attention des chercheurs : les acides nucléiques (ADN et ARN) et les protéines et acides aminés présents uniquement dans les tissus tumoraux.

— *Les acides nucléiques*

Les ADN extraits de tissus sains, de cultures de tissus sains et de cultures de tissus tumoraux ont la même densité de flottation et pratiquement la même composition nucléotidique moyenne.

La présence de tout ou d'une partie de l'ADN bactérien intégré dans le génome des cellules de l'hôte ainsi que l'expression de cet ADN dans les cellules tumorales semblent bien établies. En utilisant des techniques d'hybridation moléculaire (ADN/ADN et ADN/ARN), il est possible de montrer que l'ADN de cultures de tissu tumoral possède plus de séquences communes avec l'ADN de la Bactérie oncogène que l'ADN isolé des tissus de la plante saine correspondante. De même, des ARN s'hybridant avec l'ADN de la Bactérie oncogène existent dans le tissu tumoral et sont indétectables dans le tissu sain. A ce stade de l'analyse, il est facile d'imaginer qu'une partie au moins de l'ADN bactérien est transférée à la cellule hôte au cours de l'induction tumorale.

En fait, le problème se complique lorsque l'on affine les techniques d'hybridation moléculaire, en les appliquant à l'étude comparative des cultures de tissus sains et de tissus tumoraux issus de la même plante saine. L'ADN de la Bactérie *A. radiobacter*, non oncogène, a autant de séquences communes avec l'ADN isolé de cultures de tissu tumoral que celui provenant de la Bactérie oncogène. L'ADN isolé de cultures de tissu sain et l'ADN isolé de cultures de tissu tumoral correspondant ne peuvent être différenciés par leurs capacités d'hybridation avec l'ADN isolé de la Bactérie oncogène. Dans ce dernier cas, nous constatons que le passage de l'état *tissu de plante saine* à l'état *culture de tissu* entraîne une augmentation de la quantité de séquences communes avec l'ADN de la Bactérie inductrice du crown-gall.

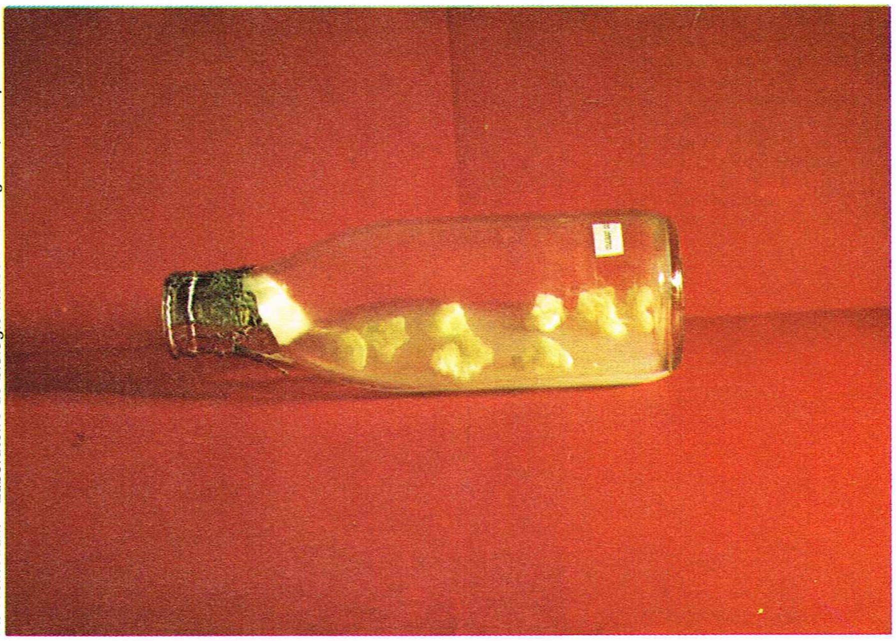

M. Weinbaum - Laboratoire de biologie moléculaire végétale, Orsay

▲ *Cultures de tissus tumoraux de tabac* (Nicotiana tabacum *var.* Wisconsin) *sur milieu gélosé. Ces tissus tumoraux sont âgés de trois semaines.*

M. Weinbaum - Laboratoire de biologie moléculaire végétale, Orsay

◀ Tératomes, *âgés de deux mois, provoqués sur une tige de* Bryophyllum daigremontianum *par la Bactérie* Agrobacterium tumefaciens *(souche T_{37}).*

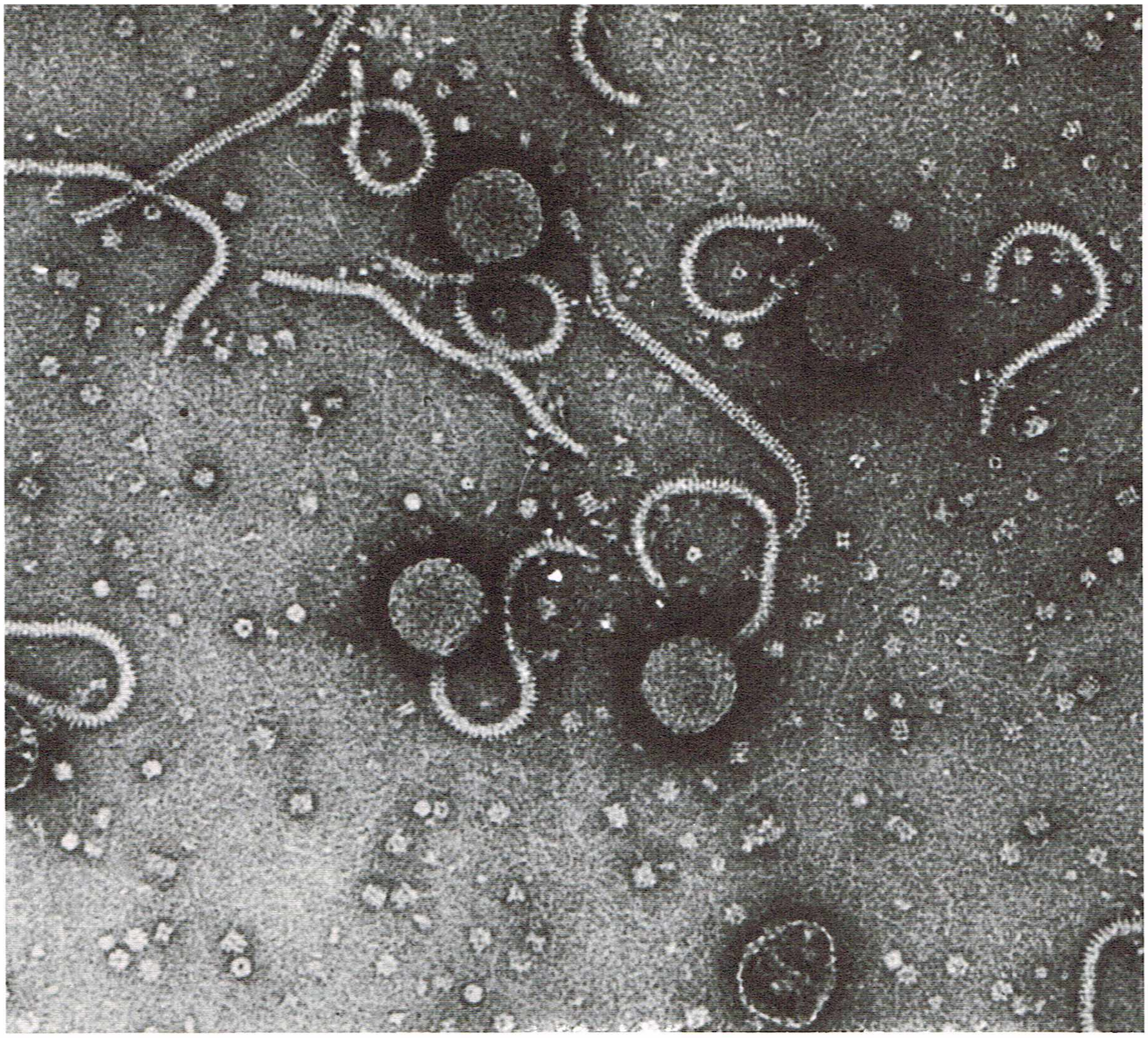

▶ *Microphotographie électronique de phages isolés de tissus tumoraux* **d'Opuntia vulgaris** *provenant d'une tumeur produite par* **Agrobacterium tumefaciens** *(souche* **« Anthemis »** *mise en culture en 1946)* [× *160 000*].

D'après Vieu, Tourneur et Daugnet, 1974 - Institut Pasteur, Service des virus

Ce résultat peut paraître très surprenant, si l'on écarte l'hypothèse d'une contamination antérieure par la Bactérie *A. tumefaciens* sans qu'il y ait transformation.

— *Les protéines et les acides aminés*

Si l'ADN bactérien est présent dans les cellules transformées, il est intéressant de vérifier s'il est fonctionnel ou non. Nous avons vu qu'il était transcrit ; est-il traduit en protéines de type bactérien dans les cellules tumorales ? Différents auteurs ont montré qu'il existait dans les cultures stériles de divers tissus tumoraux des antigènes spécifiques de la Bactérie inductrice, alors que ceux-ci ne sont pas détectables dans les cultures de tissus sains correspondants. Ces antigènes spécifiques des tissus tumoraux représenteraient donc une partie de l'expression des gènes d'origine bactérienne, dans les tissus de crown-gall.

L'étude du métabolisme azoté des cultures de tissus tumoraux a permis de découvrir des acides aminés, dits anormaux, spécifiques de la souche inductrice de la tumeur considérée. Ces acides aminés ont été baptisés octopine, nopaline et lysopine. Ils proviennent soit de l'arginine (pour les deux premiers), soit de la lysine, mais ils n'ont jamais été mis en évidence dans des protéines cellulaires.

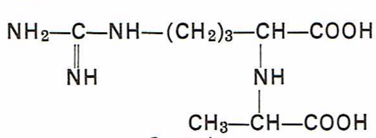

Octopine

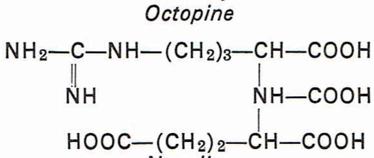

Nopaline

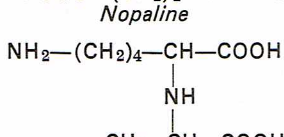

Lysopine

Ainsi, les souches A_6 et B_6 induisent des tissus tumoraux qui contiennent de l'octopine, et elles possèdent de l'octopine déshydrogénase (enzyme permettant de dégrader l'octopine), tandis que les souches T_{37}, qui induisent des tissus tumoraux contenant de la nopaline, ont une autre enzyme, la nopaline-déshydrogénase. De même, les souches bactériennes contenant de la lysopine-déshydrogénase induisent des tissus tumoraux qui contiennent de la lysopine. Puisque des enzymes octopine- et lysopine-déshydrogénase existent dans les tissus tumoraux correspondant à chacune de ces souches, il semble qu'il s'agisse bien là des marqueurs génétiques caractéristiques de la transformation tumorale. Ce sont évidemment les gènes bactériens qui codent pour la synthèse de ces déshydrogénases. Cependant, dans ce domaine, des contradictions apparaissent : les déshydrogénases présentes dans les tissus tumoraux ne seraient pas identiques aux enzymes isolées des Bactéries inductrices de ces mêmes tissus tumoraux. De plus, de faibles quantités de lysopine et d'octopine existeraient dans les tissus sains.

Critères caractéristiques de l'état tumoral

Il paraît très significatif qu'à de rares exceptions près tous les critères qui semblaient définir l'état tumoral aient été remis en question, soit parce que les expériences publiées n'ont pu être reproduites, soit parce qu'un composé caractéristique de l'état tumoral a été retrouvé dans le tissu sain correspondant, même si c'est en quantité relative beaucoup plus faible.

Actuellement, parmi les critères retenus pour caractériser le tissu tumoral, on peut citer : une plus ou moins grande indépendance vis-à-vis des facteurs de croissance, les antigènes d'origine bactérienne, les ARN tumoraux, s'hybridant avec l'ADN bactérien, et un accroissement très important des acides aminés anormaux. En fait, même dans ces derniers cas, l'idée qu'il peut exister plusieurs types de tissus tumoraux s'impose pour une plante déterminée et pour une Bactérie de virulence connue. Ainsi, il peut y avoir de multiples tumeurs, graduées dans leur indépendance vis-à-vis des facteurs de croissance ou dans leur quantité de séquences communes avec l'ADN bactérien. L'existence d'une possibilité de réversion des tératomes est un argument supplémentaire à l'appui de l'hypothèse que la transformation tumorale a

des composantes quantitatives. Cette situation n'est pas propre aux tissus tumoraux : nous avons vu que les tissus sains étaient aussi plus ou moins dépendants des facteurs de croissance. Il n'est pas possible de déduire simplement de ces résultats que l'induction tumorale est seulement due à une série d'événements quantitatifs. Par contre, il est établi que des variations quantitatives de différents facteurs accompagnent le passage de l'état sain à l'état tumoral, et il en résulte que le ou les événements qualitatifs peuvent être masqués par les événements quantitatifs, échappant ainsi à l'analyse.

Déterminisme du crown-gall

Possédons-nous suffisamment d'informations cohérentes sur les différentes étapes du crown-gall pour déterminer les grandes lignes du mécanisme de la transformation tumorale ? Les résultats décrits dans les paragraphes antérieurs, souvent contradictoires ou remis en question, laissent supposer qu'un tel projet est voué à l'échec. Cependant, deux domaines de recherche peuvent apporter d'utiles contributions à la compréhension de ce mécanisme : d'une part, la recherche de la ou des molécules directement impliquées dans le processus de transformation, souvent accompagnée de tentatives d'obtention de tissus de crown-gall à l'aide de ces molécules, considérées comme l'agent transformant; d'autre part, l'étude des modifications des tissus de l'hôte à la lésion.

Hypothèse du T.i.p. (Tumor inducing principle)

Lorsque l'induction tumorale est terminée, la prolifération des cellules tumorales devient indépendante de la présence de la Bactérie : en effet, aucune Bactérie n'est décelable au niveau intracellulaire dans les tissus de plantes qui ont été transformés ou dans les cultures de tissus tumoraux stériles.

Ces faits ont conduit Braun à introduire, en 1947, le concept de T.i.p., qui serait transféré de la Bactérie à la cellule de plante, produisant ainsi la transformation néoplasique. A l'époque, Braun ne se prononçait pas sur la nature biochimique de cette substance.

Nature biochimique du T.i.p.

Bien avant les résultats des expériences d'hybridation moléculaire, de nombreuses tentatives de transformation des plantes susceptibles par diverses molécules extraites des Bactéries oncogènes ont échoué. Depuis la mise en évidence de séquences communes entre l'ADN bactérien et l'ADN ou les ARN isolés de tissus tumoraux, d'autres tentatives de transformation ont été effectuées avec des molécules mieux caractérisées que les précédentes : elles ont aussi échoué. Quelle que soit la molécule utilisée, les chercheurs n'ont pu obtenir d'excroissances possédant tous les critères des tumeurs de crown-gall déjà définis, qu'ils soient physiologiques ou biochimiques. Il est cependant important d'analyser le contenu de ces expériences, car elles révèlent un progrès dans la connaissance et surtout dans la méthodologie d'étude du mécanisme de transformation. Un certain nombre de molécules ont été testées pour leurs éventuelles propriétés transformantes. *A priori,* le T.i.p. peut être un ADN, un ARN ou une protéine d'origine bactérienne, mais jusqu'à maintenant, les travaux ont surtout porté sur l'ADN chromosomal, les phages et les plasmides présents dans la Bactérie.

— *L'ADN chromosomal*

L'idée la plus simple est que le T.i.p. est un acide nucléique d'origine bactérienne, probablement l'ADN, puisqu'il y a des séquences communes entre l'ADN de la Bactérie inductrice et l'ADN isolé des cultures de tissus tumoraux (même si la nature exacte de ces séquences nous est actuellement inconnue). Toutes les expériences de transformation avec l'ADN bactérien permettent d'obtenir des excroissances se nécrosant au bout de trois semaines. Dans certains cas, le même type d'excroissance est obtenu avec l'ADN hydrolysé.

— *Les phages de la Bactérie* A. tumefaciens

En 1955, des phages tempérés ont été découverts dans la Bactérie virulente *A. tumefaciens.* Ces phages ont été impliqués dans l'induction du crown-gall pour deux raisons. Ils peuvent être isolés des tissus de crown-gall stériles et sont identiques à ceux de la Bactérie inductrice de cette tumeur; Leff et Beardsley ont obtenu des excroissances possédant des propriétés de tissus tumoraux, en injectant l'ADN de phage PS_8, isolé d'une tumeur, à des plants de pois ayant subi une lésion. Les « tumeurs » ne se forment pas si l'on inocule le phage à la place de l'ADN. Cette expérience n'a pu être reproduite par d'autres auteurs.

Si un phage est effectivement impliqué dans les processus d'induction tumorale, une Bactérie curée de ce phage ne doit plus être oncogène. Schell et ses collaborateurs ont montré que des souches bactériennes curées de leur phage PS_8 sont aussi oncogènes que les souches d'origine. Cependant, la possibilité demeure que les souches bactériennes prétendues curées contiennent en fait un prophage défectif ressemblant au phage PS_8. Actuellement, il n'existe aucune preuve d'une intervention effective d'un phage dans les processus de transformation tumorale.

— *Le plasmide de la Bactérie* A. tumefaciens

Très récemment, une nouvelle voie de recherche s'est ouverte avec la mise en évidence d'un *plasmide* dans la Bactérie inductrice du crown-gall. Toutes les souches oncogènes ont un plasmide, alors qu'aucune des souches avirulentes n'en possède. Une corrélation de 100 % existerait entre la perte du plasmide et l'impossibilité d'une souche à induire des tumeurs. L'étude du plasmide s'avère donc prometteuse : il reste cependant à tester s'il y a des séquences communes entre l'ADN du plasmide et l'ADN du tissu tumoral induit par la Bactérie oncogène contenant ce plasmide, et à vérifier si le plasmide lui-même, ou son ADN, est transformant.

La lésion de l'hôte : le déterminisme biochimique du conditionnement

Le conditionnement représente l'ensemble des événements métaboliques qui doivent se dérouler dans les cellules hôtes avant que la Bactérie puisse induire une transformation. Ainsi, une lésion des tissus est une condition nécessaire pour l'instauration de l'état de conditionnement.

Braun a montré que la taille des tumeurs est dépendante de la durée de la période qui sépare le moment de la lésion et celui de l'inoculation de la Bactérie oncogène. Le conditionnement des cellules hôtes s'établirait graduellement et atteindrait sa valeur maximale entre le deuxième et le troisième jour qui suivent la lésion. Pour rendre compte d'une telle cinétique, cet auteur a proposé qu'il se forme des « sites actifs », dont le nombre varierait au cours du temps pour s'annuler à la fin de la période de cicatrisation.

Quels sont les critères biochimiques susceptibles de subir des modifications au cours des processus de lésion ? Diverses hypothèses ont été émises pour tenter de relier les caractéristiques physiologiques du conditionnement aux variations d'un composant biochimique des cellules voisines de la lésion, soumises à l'influence du jus de blessure. Les seuls faits intéressants nous paraissent être l'augmentation transitoire de la quantité d'ADN à la fois dans les tissus sains blessés, non infectés, et dans les tissus transformés. Guillé et Quétier ont étudié cette synthèse d'ADN : un ADN riche en guanine et en cytosine se synthétise dans les premières heures qui suivent la lésion ; sa cinétique de formation est pratiquement superposable à celle de la variation du nombre des « sites actifs » imaginés par Braun ; il n'a pu être détecté dans les plantes blessées, réfractaires à la transformation par

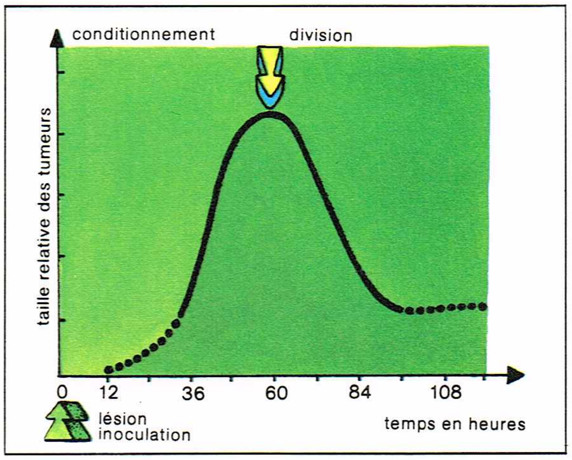

Richard Colin

◀ ***Représentation graphique de la corrélation entre la taille des tumeurs et la durée de la phase de conditionnement (d'après A.C. Braun, 1958).***

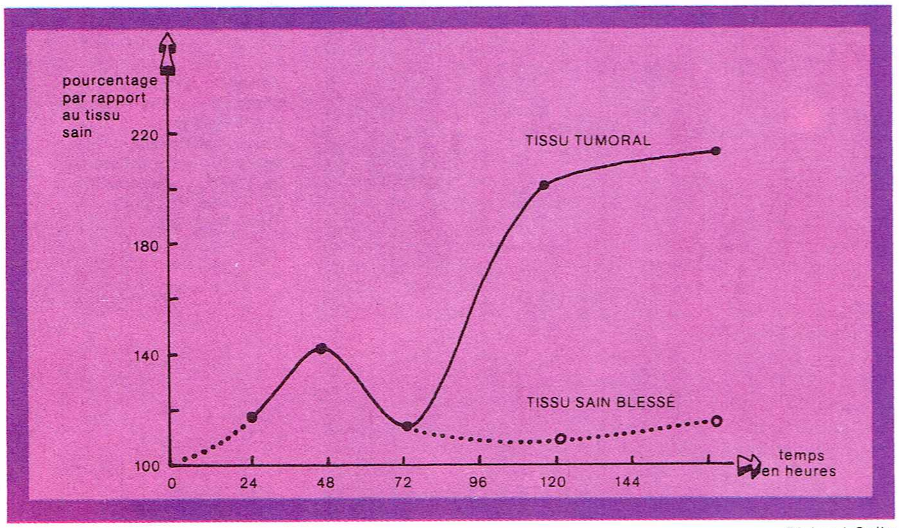

Richard Colin

▲ ***Représentation graphique des quantités relatives d'ADN dans les tissus sains, blessés et tumoraux de fève*** **(Vicia faba)** ***données en % par rapport au tissu sain, non blessé (d'après S. Kupila et H. Stern, 1961).***

A. t., telles que les Graminées; il possède des séquences communes avec l'ADN de la Bactérie oncogène. Le conditionnement serait lié à la présence, dans les cellules hôtes, de cet ADN amplifié transitoirement au cours des processus de lésion. Les cellules conditionnées des tissus de plantes supérieures peuvent, sous de multiples aspects, être comparées aux nodules hyperplasiques de tissus de foie, traités par divers carcinogènes chimiques.

Conclusions

L'ensemble des observations que nous venons de décrire soulève apparemment plus de questions qu'il ne permet d'en résoudre. Dans l'étude du crown-gall, de nombreuses expériences publiées n'ont pu être reproduites et beaucoup de résultats ont été controversés. Il est cependant possible d'utiliser les faits les plus probants pour élaborer une hypothèse aussi cohérente que possible du mécanisme du crown-gall.

On retrouve les trois étapes fondamentales décrites par Braun. La *phase de conditionnement* serait constituée par la synthèse transitoire de l'ADN riche en guanine et cytosine; la *phase d'induction proprement dite* serait liée à la rencontre de séquences communes entre cet ADN et l'ADN constituant le T.i.p. (ADN du plasmide, ou tout ou partie de l'ADN bactérien); la dernière phase, dite *de développement* ou *de prolifération*, serait due au fonctionnement des séquences nouvelles intégrées dans le génome de l'hôte au cours du processus de transformation. Ces séquences nouvelles pourraient être de deux types : celles qui proviennent de l'ADN amplifié à la lésion et que l'on retrouverait dans les cultures de tissus sains; celles qui sont vraiment spécifiques de la Bactérie et qui, pour l'instant, n'ont pu être analysées.

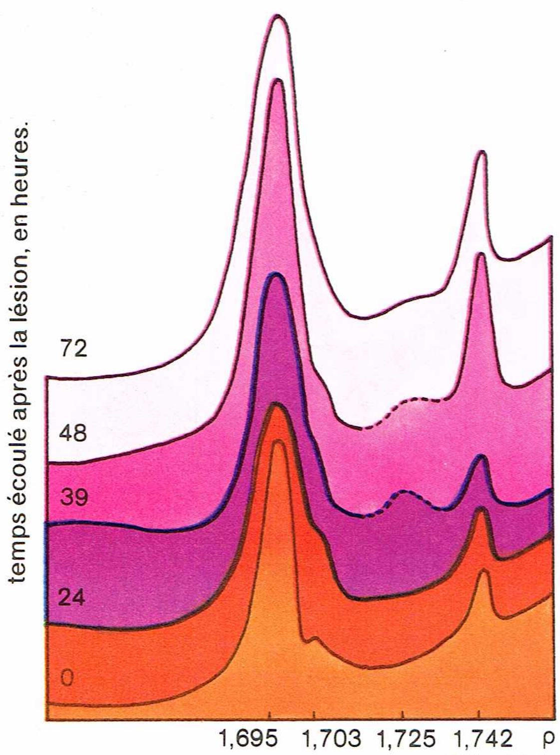

Richard Colin

▶ **Densités de flottation** ***des ADN extraits*** **de Datura** ***à des temps différents après la lésion. La surface du pic de densité de flottation 1,725 g/ml rend compte de l'évolution de la quantité relative de l'ADN satellite riche en guanine et cytosine, au cours des processus de lésion. L'ADN de densité 1,742 g/ml est l'ADN marqueur isolé du phage*** **Φ 2c de Bacillus subtilis** ***qui permet de déterminer la densité des autres ADN présents dans la préparation (d'après I. Sissoëff, 1970).***

Autres tumeurs végétales

Tumeurs à virus

Ces tumeurs sont provoquées par un virus, *Aureogenus magnivena* Black, qui est transmis par les Insectes *Agallia constricta* et *A. novella;* le virus est un polyèdre de 75 à 80 μm de diamètre qui contient un ARN double chaîne.

Les tumeurs à virus se forment sur une grande variété de plantes : sur 100 espèces testées, 43 espèces, appartenant à 20 familles différentes, répondent positivement. Les tumeurs sont généralement détectables au niveau des vaisseaux, mais elles peuvent également apparaître sur les tiges, les racines et les feuilles. Les tumeurs les plus vigoureuses ont été observées sur *Rumex acetosa* et *Melilotus alba*. Il semble que les réponses des différents hôtes soient strictement dépendantes de leurs tendances naturelles à former des tumeurs.

De même que les tumeurs de crown-gall, les tumeurs à virus se développent généralement au niveau de vaisseaux blessés, de points d'émergence de racines latérales et de zones d'abscission. Elles peuvent être greffées sur des tissus sains et cultivées sur un milieu ne permettant pas la croissance du tissu sain correspondant. Le virus disparaît après des cultures prolongées. La persistance des propriétés tumorales serait liée à la présence du génome viral dans les cellules transformées; toutefois, jusqu'à maintenant, aucun résultat d'hybridation moléculaire n'a été publié.

Tumeurs génétiques

Des tumeurs spontanées se développent couramment sur certaines espèces de plantes. Souvent, aucun agent externe tel que Bactérie, virus ou produit chimique n'en est responsable; la formation des tumeurs a alors une base génétique endogène. C'est le cas des tumeurs d'hybrides existant dans les genres *Nicotiana, Brassica, Bryophyllum, Lillium* et *Lycopersicum*.

Les tumeurs d'hybrides du genre *Nicotiana* ont été particulièrement étudiées. Quand les espèces appropriées de *Nicotiana* sont croisées, des tumeurs se forment sur les hybrides obtenus. Les tumeurs peuvent se former à n'importe quel stade du développement de la plante mais elles apparaissent généralement sur des plantes adultes, quand la croissance végétative est terminée; elles sont plus fréquentes sur les racines, mais certaines se développent sur les tiges et sur les feuilles. Elles sont souvent localisées dans des régions ayant subi des lésions, telles que des points d'émergence de racines, des zones de lésion et des sites d'abscission de feuilles. Les radiations ionisantes et certains produits chimiques provoquent un développement plus précoce de ces tumeurs d'hybrides. Un des hybrides les plus étudiés, *N. glauca* × *N. langsdorffii*, a une plus grande teneur en auxine que les deux parents. Ce tissu tumoral peut être cultivé sur un milieu dépourvu de facteurs de croissance, ne permettant pas la croissance des tissus des deux parents. Les propriétés tumorales sont conservées dans les cultures de tissus : des tissus cultivés depuis cinq ans produisent des tumeurs lorsqu'on les greffe sur des plantes saines. Par contre, les cals provenant des tissus parents ont besoin d'auxine pour croître et ne peuvent être greffés sur des plantes saines.

Les parents des hybrides tumoraux ont été divisés en deux groupes : plus (+) et minus (—). Les croisements entre les espèces d'un même groupe ne donnent pas de tumeurs, alors que celles-ci se forment entre les groupes (+) et (—). Les chromosomes sont responsables de la formation des tumeurs : le groupe (+) apporterait un *facteur génétique I*, relativement simple, nécessaire à l'*initiation* des tumeurs par son interaction avec de multiples facteurs (ee), localisés sur les chromosomes du

groupe (—) ; ces derniers facteurs contrôleraient l'*expression* de l'état tumoral. Les tumeurs d'hybrides sont comparables sous de multiples aspects aux tumeurs de crown-gall. L'établissement de l'état tumoral est déclenché par une lésion naturelle ou provoquée. Lorsqu'un fragment de moelle de *N. glauca* est prélevé sur la tige de la plante saine et mis en culture sur un milieu synthétique, des séquences d'ADN nucléaire, riches en guanine et en cytosine, s'amplifient transitoirement. On peut donc raisonnablement supposer qu'au cours de la transformation tumorale conduisant aux tumeurs d'hybrides, des séquences d'ADN amplifié se synthétisent dans le noyau de *N. glauca* (amplification des séquences [ee] ?) et jouent ainsi le rôle de l'ADN riche en guanine et en cytosine dans l'hôte blessé du crown-gall. L'autre parent, *N. langsdorffii*, posséderait le facteur génétique I, comparable à l'information génétique spécifique apportée par la Bactérie *A. t.* au cours de l'induction du crown-gall.

Cultures de tissu habitué

Les tissus habitués, ou anergiés, ont été découverts par Gautheret en 1946. Il a observé que des cals de *Scorzonera hispanica*, qui nécessitaient jusqu'alors l'auxine pour se développer en culture, devenaient capables de croître sans cette substance. Ce fait a été confirmé par d'autres chercheurs et découvert sur d'autres plantes. Divers degrés d'habituation, caractérisés par des dépendances variables à l'auxine, ont été décrits ; les tissus habitués peuvent être greffés sur des plantes saines.

A l'heure actuelle, il est impossible de définir le mécanisme de l'habituation : des arguments existent aussi bien pour soutenir l'hypothèse de l'adaptation enzymatique que pour appuyer celles de mutation somatique ou d'une série de sélections.

Conclusions générales

Des tumeurs végétales présentant des caractéristiques physiologiques très voisines peuvent être obtenues en utilisant des agents inducteurs, tels que la Bactérie *Agrobacterium tumefaciens* ou le virus *Aureogenus magnivena*, en croisant deux souches de diverses espèces de plantes, et même en employant des carcinogènes chimiques (divers amino-fluorènes). Deux raisons principales peuvent être invoquées pour tenter d'expliquer une aussi grande variété dans les causes apparentes de ces tumeurs : d'une part, un rôle primordial de l'hôte (plutôt que de l'agent inducteur) se traduisant, par exemple, par une tendance « spontanée » à former des tumeurs ; d'autre part, l'existence de processus de régulation suffisamment généraux pour être modifiables par une grande variété de signaux (la vitesse de division des cellules et leurs dépendances spécifiques de certains facteurs de croissance pourraient être soumises à de telles régulations). Il est actuellement impossible de choisir entre ces deux aspects complémentaires.

Pour conclure, deux faits nous paraissent intéressants à souligner : les synthèses d'ADN qui se déroulent à la lésion des plantes susceptibles, et l'existence de plusieurs étapes nécessaires à l'établissement de l'état tumoral final. Les processus d'amplification de type transitoire pourraient être communs aux étapes de différenciation et de tumorigenèse, l'induction tumorale court-circuitant la première étape d'amplification nécessaire à la différenciation programmée de la cellule considérée. L'état prétumoral qui en résulte est quantifiable dans sa composition et dans le temps : des variations comparables peuvent provenir de la nature de ce qui est transféré d'un génome à l'autre.

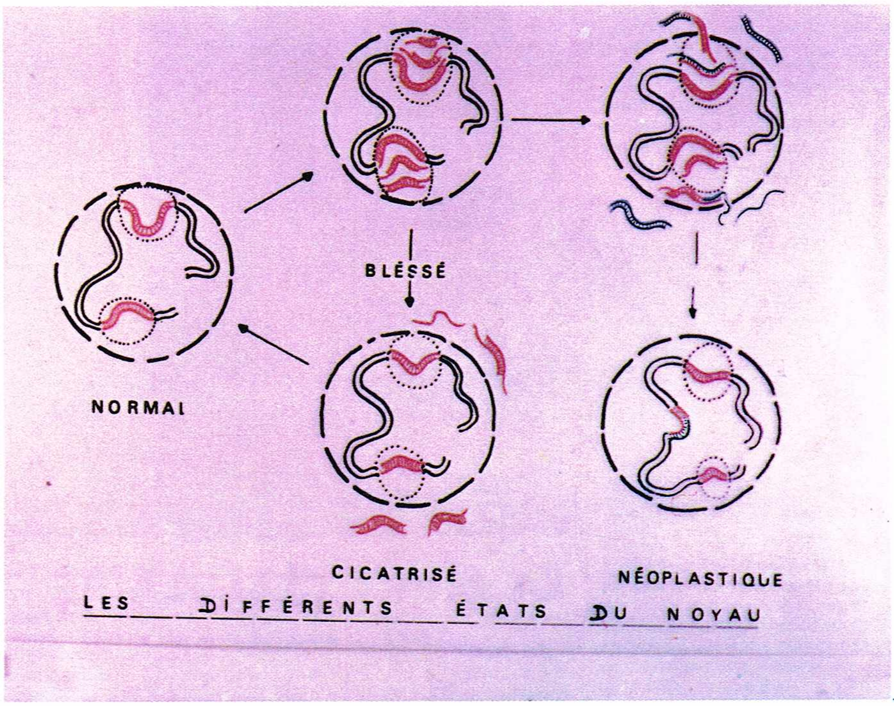

M. Weinbaum

▲ ***Les différents états du noyau : en rouge, ADN riche en guanine et cytosine ; en noir, ADN nucléaire majeur ; en vert, ADN bactérien*** **(Agrobacterium tumefaciens)** ***ou ADN du plasmide.***

BIBLIOGRAPHIE FONDAMENTALE

ALEXANDER P., *The Failure of Physiological Defence Reactions Directed against Malignant Cells as the Rate Determining Step in the Occurence of Cancer*, in *Control of Cellular Growth in Adult Organisms*, Acad. Press, Londres-New York, pp. 330-346, 1967. - BAIRD W. M., HARVEY R.G. et BROOKES P., *Comparison of the Cellular DNA Bound Products of Benzo(a)pyrene with the Products Formed by the Reaction of Benzo(a)pyrene* 4,5-*oxide with DNA* in *Cancer Res.*, 35, pp. 54-57, 1975. - BUSCH H., *Biochemistry of the Cancer Cell*, Acad. Press, Londres-New York, 1962. - DONIACH I., MOTTRAM J.C., et WEIGERT F., *The Fluorescence of 3,4-benzo-pyrene in vivo. I. The Distribution of Fluorescence at Various Sites, Especially the Skin of Mice*, in *The Brit* J. of Exper. Pathol., t. XXIV, n° 1, pp. 1-9, 1943. - GIOVANELLA B.C., LIEGEL J. et HEIDELBERGER C., *The Refractoriness of the Skin of Hairless Mice to Chemical Carcinogenesis*, in *Cancer Res*, 30, pp. 2590-2597, 1970. - GRAFFI A. et BIELKA H., *Problèmes de cancérologie expérimentale*, Gauthier-Villars Éd., Paris, 1963. - GUILLÉ E. et QUÉTIER F., *Heterochromatic, Redundant and Metabolic DNA ; a New Hypothesis about their Structure and Function* in *Progress in Biophys. and Molec. Biol.*, 27, pp. 121-142, 1973. - HARRIS C.C., CONNORS R.J., JACKSON F.E. et LIBERMANN M.W., *Intronuclear Distribution of DNA Repair Synthesis Induced by Chemical Carcinogens or UV Light in Human Diploid Fibroblasts* in *Cancer Res.*, 34, pp. 3461-3468, 1974. - HIEGER I., *Carcinogenesis*, Acad. Press, Londres-New York, p. 138, 1961. - IVERSEN O.H. et EVENSEN A., *Experimental Skin Carcinogenesis in Mice*, Norvegian Universities Press, Oslo-Bergen, 1962. - LACASSAGNE A., *Étude de la cancérisation par les substances chimiques exogènes*, Hermann et C^ie Éd., Paris, 1947. - LACASSAGNE A., *la Carcinogenèse chimique du foie de rat : Confrontation des points de vue biochimique et histopathologique*, in *Bull. Cancer*, 53, n° 1, pp. 7-26, 1966. - LATARJET R., *Sur l'étiologie virale de certains ostéosarcomes ostéogènes*, in *Pronostic et traitement des sarcomes ostéogéniques*, Masson et C^ie Éd., Paris, pp. 96-104, 1972. - LOMBARD C., *Cancérologie comparée*, Doin Éd., Paris, 1962. - MASSON P., *Tumeurs humaines*, Maloire Éd., Paris, 1956. - PULLMAN A. et PULLMAN B., *Cancérisation par les substances chimiques, et Structure moléculaire*, Masson et C^ie Éd., Paris, 1955. - SIMPSON W.L., et CRAMER W., *Fluorescence Studies of Carcinogens in Skin*, in *Cancer Res.*, 3, pp. 362-329, 1943. - THOMAS J.A., HOLLANDE E., HENRY M. et VILAIN Cl., *Conception de l'évolution morphologique et des mécanismes du virus des cancers mammaires : Essai de généralisation*, in *C. Rend, Acad. Sc.* 273, pp. 2390-2393, 1971. - TRUHAUT R., *Aperçu sur les agents chimiques cancérigènes et leurs dangers dans la vie moderne*, Lang-Blanchon Éd., Paris, 1955. - WHEELER R.H., BULL F.E. et RUDDON R.W., *The Effect of Heparin on the Cytotoxicity and Uptake of Antineoplastic Drugs in Burkitt Lymphoma Cells*, in *Cancer Res.*, 34, pp. 3215-3219, 1974. - ZIEGER R.S., SALOMON R., KINOSHITA N. et PEACOCK A.C., *The Binding of 9,10-diméthyl-1,2-benzanthracene to Mouse Epidermal Satellite DNA in vivo*, in *Cancer Res.* 32, n° 3, pp. 643-647, 1972.

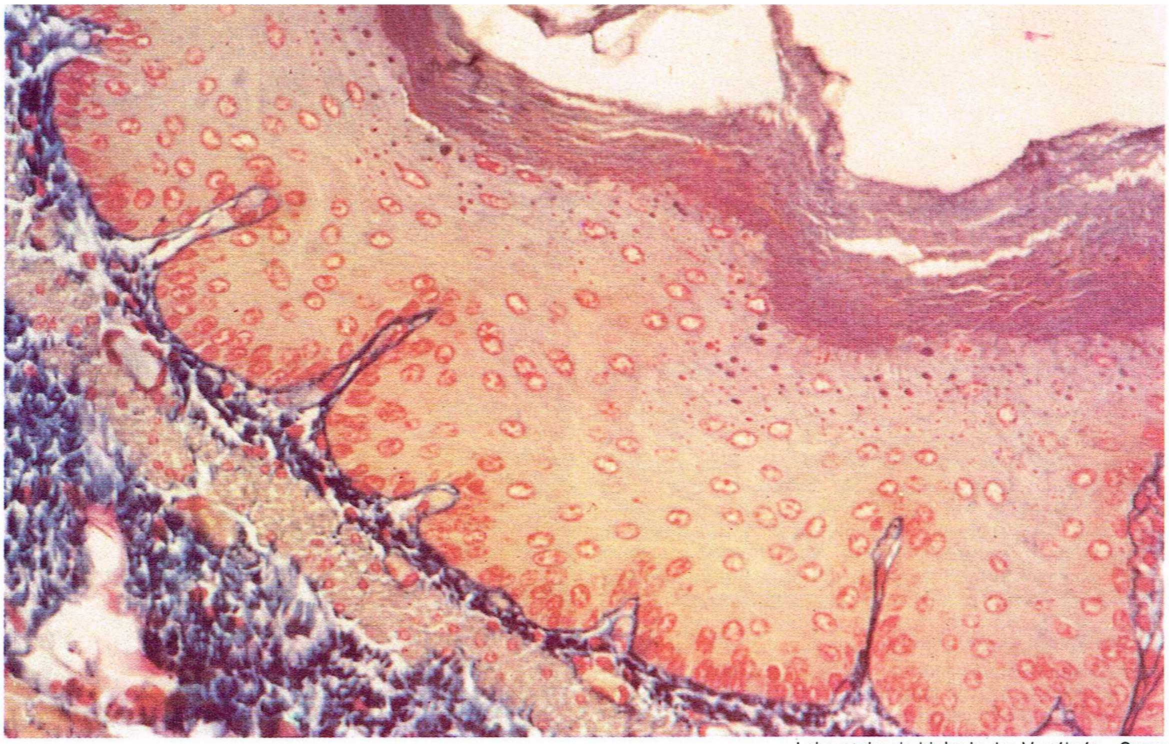

▶ *Coupe transversale d'œsophage de Mammifère Rongeur (cobaye) montrant l'épithélium pluristratifié, kératinisé, desquamant dans la lumière de la même façon que l'épiderme de la peau.*

Laboratoire de biologie des Vertébrés - Orsay

LA MORT CELLULAIRE

La mort d'un organisme animal à la suite d'un accident, d'une maladie ou, tout naturellement, du vieillissement entraîne évidemment la mort des cellules qui le constituaient. Cette mort cellulaire n'est toutefois pas immédiate ; l'arrêt de la respiration et de la circulation chez un organisme supérieur *(mort apparente)* n'est suivi que plus ou moins tardivement par la mort de toutes les cellules *(mort absolue)*.

Chez l'homme, par exemple, on sait que les poils de la barbe continuent de pousser et que les muscles lisses de l'intestin peuvent encore se contracter après que le cœur s'est arrêté de battre, les poumons de respirer et que les mouvements volontaires, la sensibilité et la conscience ont été abolis. Des fragments de tissus ou d'organes prélevés à un organisme mort depuis peu peuvent être cultivés *in vitro* : ils continuent à vivre et peuvent même présenter une croissance active. On sait également, à la suite des célèbres travaux d'A. Carrel, que des souches cellulaires provenant d'embryons de poulet, par exemple des cellules cardiaques, ont vécu *in vitro* pendant plus de 25 ans, c'est-à-dire bien au-delà de la durée de vie normale de l'organisme donneur ; il est actuellement démontré qu'on peut les entretenir ou les cultiver d'une façon pratiquement indéfinie. Ces observations conduisent à la notion d'*immortalité cellulaire potentielle,* dans des conditions de milieu adéquates assurant l'élimination fréquente des substances de déchet et l'apport de substances de croissance.

La mort cellulaire chez les organismes pluricellulaires

Inversement, chez les organismes pluricellulaires (Métazoaires), des cellules meurent à tout instant sans compromettre pour autant la vie de l'organisme lui-même. Ces morts cellulaires sont caractéristiques de tissus ou d'organes où l'activité mitotique permanente de cellules à caractères embryonnaires assure le remplacement des cellules mortes (épiderme de la peau, épithélium intestinal, globules sanguins, gamètes). Elles se manifestent également dans des tissus ou organes à activité cyclique ou temporaire qui régressent périodiquement (corps jaune menstruel, utérus après la naissance, glande mammaire après le sevrage, gonades) ou qui cessent définitivement leur activité et s'involuent (thymus, gonades des vieillards). Elles caractérisent enfin des structures en perpétuel remaniement, comme la substance osseuse.

Tissus ou organes à activité mitotique permanente.

● L'assise génératrice de l'*épiderme* des Vertébrés fonctionne pendant toute la vie et produit en permanence des cellules jeunes qui remplacent les cellules superficielles au fur et à mesure de leur élimination. Chez les Vertébrés Tétrapodes (Amphibiens, Reptiles, Oiseaux, Mammifères), ces cellules superficielles meurent en s'imprégnant d'une protéine caractéristique, la kératine ; la couche dite cornée de l'épiderme est constituée par l'empilement des cadavres de ces cellules kératinisées. Chez l'homme, la durée de vie d'une cellule épidermique est inversement proportionnelle à l'épaisseur de l'épiderme : elle est de l'ordre d'une trentaine de jours au niveau de la paume de la main, où la couche cornée est épaisse, alors qu'elle n'est que de dix-sept jours au niveau du bras, où la couche cornée est mince.

● L'épithélium du fond des cryptes de Lieberkühn de l'*intestin grêle* fonctionne comme une zone génératrice qui refoule vers le sommet des villosités intestinales les cellules épithéliales âgées ; celles-ci meurent et sont éliminées dans la lumière de l'intestin. Ces processus d'élimination sont très importants, et une partie des fécès est constituée par des cellules épithéliales mortes. Dans le jeûne, ces débris épithéliaux constituent, avec le mucus, la totalité des fécès ; les premières selles du nouveau-né (méconium) ont la même constitution. Ces faits rappellent étrangement le renouvellement des tissus d'un organisme inférieur, l'hydre d'eau douce. Les cellules interstitielles de l'hydre, situées à la base des tentacules, assurent, en se multipliant et en se différenciant, la croissance de l'animal. Mais, parallèlement, l'hydre se détruit continuellement par sa base, où les cellules mortes, enrobées de mucus, sont éliminées. Ces deux processus complémentaires (croissance et destruction) assurent un renouvellement constant des tissus, total au bout d'un ou deux mois selon les conditions du milieu.

● Le *tissu hématopoïétique* des Vertébrés infiltre des organes à activité propre comme le thymus, la muqueuse digestive, la moelle osseuse, ou se concentre pour former à lui seul des organes exclusivement hématopoïétiques, comme la rate et les ganglions lymphatiques. Il renferme dans ses mailles les cellules souches des globules sanguins, qui se divisent activement et se différencient en globules, rouges et blancs. Cette particularité est liée à la durée de vie très courte de ces cellules sanguines (quatre mois pour les globules rouges, quelques jours, voire quelques heures pour les globules blancs) qui rend nécessaire leur renouvellement permanent.

● La production des *gamètes* chez les Vertébrés est toujours très supérieure aux besoins, et nombre d'entre eux sont éliminés, parfois sans avoir atteint leur maturité. Ainsi, chez les Mammifères mâles à activité spermatogénétique continue, comme l'homme et le taureau, 95 % des spermatozoïdes produits par les testicules sont résorbés dans l'épididyme, probablement phagocytés par les cellules épithéliales des canaux épididymaires. Des 400 000 ovocytes que comptent les ovaires de la femme à sa naissance, 400 au plus atteindront la maturité et seront pondus (soit un par mois pendant environ 30 ans). Tous les autres, soit 99 % du stock initial, sont destinés à dégénérer et à disparaître, ainsi que les cellules folliculeuses qui les entourent, au cours du processus de l'*atrésie folliculaire*. Cette réduction considérable du stock d'ovocytes commence déjà chez le fœtus. Elle

devient importante de la naissance à la puberté puis se poursuit à une plus petite échelle pendant toute la vie sexuelle de la femme.

Tissus ou organes à activité cyclique ou temporaire

● *Corps jaune menstruel.* Après la ponte ovulaire, le follicule ovarien des Mammifères et de nombreux autres Vertébrés se transforme en un massif glandulaire endocrine, désigné sous le nom de corps jaune, ou corps progestatif. Cette structure transitoire est destinée à disparaître après une période d'activité plus ou moins longue selon que l'ovule qu'il contenait a été fécondé ou non. En l'absence de fécondation, le corps jaune, d'un diamètre de 1,5 à 2 cm chez la femme, ne persiste que 8 à 9 jours, puis les cellules se chargent de lipides pigmentés (d'où le nom de corps jaune), s'atrophient et dégénèrent progressivement en quelques semaines. S'il y a eu fécondation et grossesse, le corps jaune persiste pendant toute la première moitié de celle-ci et atteint 4 à 5 cm de diamètre. Cependant, dans la seconde moitié de la gestation, l'involution commence peu à peu et s'accélère après l'accouchement. Le corps jaune gestatif se réduit progressivement à un nodule blanchâtre, le *corpus albicans*, qui ne disparaît souvent qu'au bout de quelques années.

● *Utérus après la mise bas.* Au cours de la grossesse, le conjonctif de la muqueuse utérine se développe considérablement sous l'influence de la sécrétion de progestérone par le corps jaune ; son volume est multiplié par cinq chez la rate. Dans la semaine qui suit la mise bas, il est résorbé et phagocyté.

● *Glande mammaire après le sevrage.* Le sevrage brusque d'une femelle de Mammifère à laquelle on enlève ses petits en pleine lactation provoque une nécrose progressive des cellules glandulaires de la mamelle et leur élimination ultérieure dans la lumière des canaux galactophores.

● *Gonades à activité saisonnière.* Chez les Vertébrés mâles à activité sexuelle saisonnière, la spermatogenèse cesse après chaque période de reproduction ; des gonocytes engagés dans la spermatogenèse dégénèrent et sont éliminés, de telle sorte que le testicule ressemble à un testicule prépubère ; y persistent seulement quelques spermatogonies, qui entreront en activité au début du cycle sexuel suivant.

Organes cessant définitivement leur activité

● *Thymus.* Le thymus est un organe lymphoïde transitoire, très développé à la naissance mais qui commence à régresser après la deuxième année. Cette involution se poursuit lentement et aboutit finalement au thymus sénile, réduit à quelques nodules lymphoïdes épars dans le tissu adipeux précardiaque.

● *Gonades des vieillards.* Chez la femme, après la ménopause et une période de fonctionnement irrégulier, l'ovaire s'atrophie ; ses follicules cessent d'évoluer et s'atrésient progressivement. Chez l'homme, l'aptitude des tubes séminifères à produire des spermatozoïdes décline lentement ; dans le testicule du vieillard, la plupart des tubes sont vides.

Remaniement de la substance osseuse

Si un os garde approximativement la même forme pendant toute la vie d'un Vertébré, il est cependant le siège d'une perpétuelle réorganisation de sa structure interne : à peine formée en un point, la substance osseuse s'évanouit pour se reconstruire plus loin. Ces remaniements sont conditionnés par des facteurs mécaniques qui interviennent, en particulier, dans l'orientation de nouvelles travées osseuses suivant les tractions ou pressions auxquelles l'os est soumis. Cette adaptation de l'architecture de l'os à ses fonctions, ou *variation modelante*, résulte d'un double processus : d'une part, la destruction par des ostéoclastes de la substance fondamentale osseuse et des cellules osseuses qui l'ont engendrée ; d'autre part, la reconstruction d'une nouvelle substance osseuse par des cellules osseuses jeunes, issues de la différenciation de cellules conjonctives.

Apparemment stables, les os sont en réalité extrêmement labiles, et ces perpétuelles alternances de destruction et de reconstruction sont un des éléments les plus caractéristiques de leur physiologie.

La mort cellulaire dans la morphogenèse

Au cours du développement embryonnaire des Métazoaires, des cellules meurent, souvent en grand nombre, à des stades précis de l'ontogenèse et dans des localisations spécifiques.

Très schématiquement, ces morts cellulaires peuvent être classées en quatre groupes, selon les conditions dans lesquelles elles se réalisent et les résultats auxquels elles aboutissent.

Dégénérescence phylogénétique

Ce type de dégénérescence est lié à la régression et à la disparition d'organes vestigiaux ou larvaires. C'est ainsi que le rein primaire de tous les Vertébrés, ou *pronéphros*, présent chez l'embryon et souvent fonctionnel, régresse et disparaît, remplacé par le rein secondaire, ou *mésonéphros*. Ce dernier, qui représente le rein définitif des Vertébrés inférieurs Anamniotes, régressera et disparaîtra plus ou moins complètement chez les Vertébrés supérieurs Amniotes, remplacé par un rein tertiaire définitif, ou *métanéphros*. De la même façon, le *canal de Müller*, qui constitue le canal évacuateur des ovules chez toutes les femelles de Vertébrés, s'ébauche chez les embryons mâles puis régresse et disparaît plus ou moins complètement sous l'influence des hormones testiculaires.

Par leur ampleur et leur observation aisée, la régression et la disparition d'organes larvaires au cours du phénomène de métamorphose constituent les exemples les plus spectaculaires de mort cellulaire dans la morphogenèse. Chez les Insectes supérieurs, à métamorphoses complètes, la lyse affecte l'épithélium de l'intestin moyen, les glandes salivaires, les glandes séricigènes, les muscles intersegmentaires, des trachées, les glandes prothoraciques sécrétrices de l'hormone de mue, etc. La métamorphose des

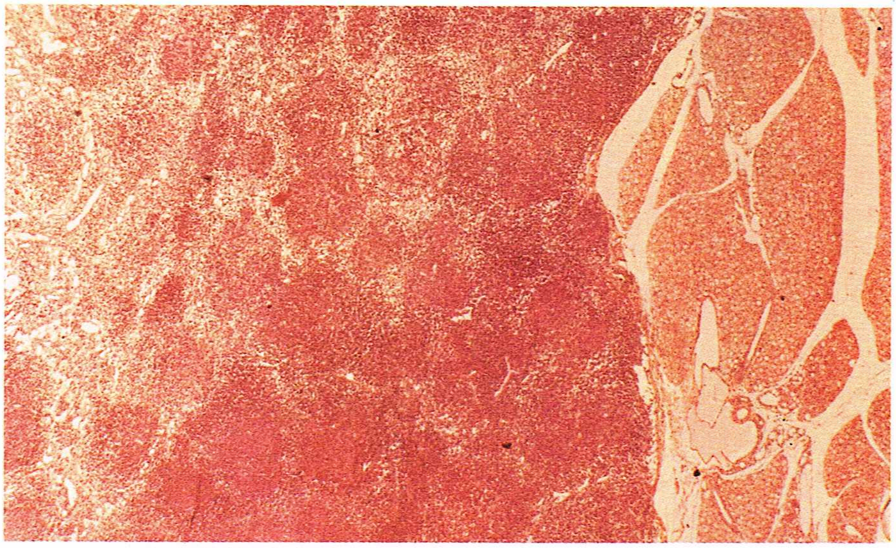

Laboratoire de biologie des Vertébrés - Orsay

▲ ***Coupe transversale de ganglion lymphatique de Mammifère montrant de nombreux follicules sombres au sein desquels se forment de nouveaux globules sanguins.***

Laboratoire de biologie des Vertébrés - Orsay

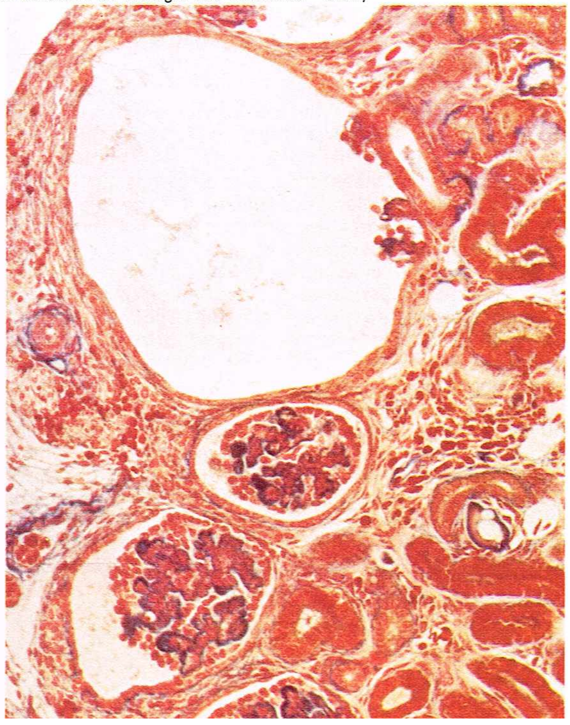

◀ ***Coupe transversale de mésonéphros d'embryon de poulet de 18 jours d'incubation montrant des aspects de dégénérescence au niveau de quatre glomérules urinaires (un dilaté et trois à conjonctif densifié).***

▶ ***Coupe longitudinale de la zone d'ossification enchondrale d'un os long de Mammifère montrant de haut en bas : le cartilage hypertrophié en début de dégénérescence; la ligne d'érosion et le dépôt d'os néoformé contre un reste de travée cartilagineuse.***

Amphibiens Anoures voit disparaître les branchies larvaires, une grande partie du pancréas exocrine, l'épithélium intestinal larvaire, qui sera remplacé par un épithélium définitif, et surtout la queue avec sa musculature, sa moelle épinière, ses nerfs rachidiens, sa corde dorsale, son tégument et son tissu conjonctif.

Dégénérescence morphogénétique

Elle est liée a des mouvements de territoires ou d'ébauches qui se mettent en place, à la confluence d'ébauches paires, au creusement de cavités dans des ébauches pleines, à l'acquisition de la forme définitive d'ébauches indifférenciées. Ainsi, les mouvements morphogénétiques qui caractérisent la gastrulation des Amphibiens et des Oiseaux sont facilités par des nécroses cellulaires, qui apparaissent généralement aux points de flexion ou d'enroulement de nappes cellulaires. De même, l'isolement et la fermeture du tube neural au cours de la neurulation, l'isolement de la placode cristallinienne qui précède sa transformation en vésicule creuse, l'invagination de la vésicule optique sont liés à des zones de lyse cellulaires permettant les plissements et les enroulements des territoires présomptifs. La fusion des deux canaux de Müller dans leur partie cervico-vaginale, qui deviendra le col utérin et le vagin müllerien, implique la dégénérescence et la disparition des zones d'affrontement. Le creusement des cavités articulaires résulte de l'extension d'une zone de nécrose au sein du cartilage séparant les deux ébauches des os longs adjacents. Enfin, l'individualisation des doigts de la main ou du pied chez l'embryon de poulet ou le fœtus de Mammifère se fait initialement par disparition du mésenchyme qui sépare ces ébauches, isolant ainsi les futurs doigts.

Dégénérescence histogénétique

Cette dégénérescence est liée à la différenciation histologique des tissus ou des organes, probablement à cause d'une incapacité de certaines cellules à répondre aux stimuli de la différenciation. Elle se rencontre pratiquement à tous les niveaux : dans l'épithélium digestif, le tissu conjonctif, en particulier au cours de l'ossification enchondrale qui fait disparaître le modèle cartilagineux du futur os, le cœur, le rein, le système nerveux, les cellules germinales.

L'importance des phénomènes de mort cellulaire au cours de l'histogenèse surprend par son ampleur. Ainsi, trois vagues de dégénérescence ont été décrites dans l'ovaire du fœtus et du nouveau-né de rat. Elles ont lieu au cours de la prophase de la méiose et aboutissent à réduire le nombre des cellules germinales de 64 000 au 17^{e} jour de la gestation à 19 000 au 3^{e} jour après la naissance. Encore plus spectaculaires sont les dégénérescences qui touchent à l'histogenèse du système nerveux. Chez la larve du crapaud *Xenopus* par exemple, les 3/4 des neuroblastes qui constituent les ébauches des ganglions rachidiens et les 9/10 des neuroblastes des cornes ventrales de la moelle épinière lombaire dégénèrent : seulement 1/4 se différencieront en neurones ganglionnaires et 1/10 en motoneurones. Des faits du même ordre ont été décrits dans la moelle cervicale de l'embryon de poulet, où les 2/3 au moins de la population

P. Starosta

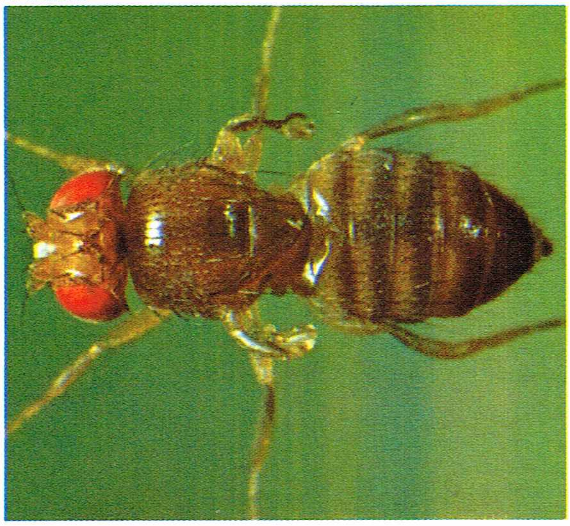

▶ ***Dans le cas des mutants « wingless » (ailes vestigiales) de la drosophile, les ébauches alaires dégénèrent.***

Laboratoire de biologie des Vertébrés - Orsay

neuronale de cette région sont détruits en 24 h, entre les 4^{e} et 5^{e} jours d'incubation.

Dégénérescence génétique

Elle se manifeste dans certains mutants où la dégénérescence de certaines ébauches est directement contrôlée par le génome. Dans le cas des mutants « wingless » de la drosophile ou de l'embryon de poulet, les ébauches alaires dégénèrent. Chez les souris sans queue ou à queue courte, les poulets sans croupion, le territoire caudal présomptif s'involue ou s'ébauche puis régresse. Les souris valseuses, ou trembleuses, doivent leur comportement singulier à une dégénérescence des plages sensorielles de l'oreille interne qui survient une dizaine de jours après la naissance.

Les mécanismes cytologiques de la mort cellulaire

Une cellule peut mourir de deux façons différentes : soit à la suite de l'intervention précoce d'enzymes endogènes synthétisées par la cellule elle-même et qui, libérées dans son cytoplasme, entraîneront sa propre destruction, ou autolyse, soit sans intervention d'enzymes endogènes, par un processus d'autolyse encore mal connu.

Autolyse avec intervention précoce d'enzymes endogènes synthétisées par la cellule elle-même

Il s'agit d'un processus extrêmement fréquent qui a été observé dans tous les tissus en lyse, à l'exception du tissu musculaire strié. Il met en jeu des organites cellulaires particuliers, les *lysosomes*, sortes de sacs sphériques, limités par une membrane et dont le contenu est essentiellement représenté par des enzymes du groupe des hydrolases, agissant généralement à un pH acide. Le rôle de ces enzymes est de fragmenter les complexes moléculaires de grande taille en molécules plus petites, en rompant, par hydrolyse, les liaisons esters des lipides (estérases), les liaisons osidiques des glucides (osidases) et les liaisons peptidiques des protéines (peptidases).

L'autolyse débute avec l'apparition précoce dans le cytoplasme de cellules saines de *lysosomes primaires*, ou d'accumulation enzymatique, de petite taille (inférieure ou égale à 1 μ), riches en hydrolases. Pour des raisons souvent inconnues, mais qui dans les cas de métamorphoses sont des modifications brusques du taux d'hormones circulantes (élévation du taux d'hormones thyroïdiennes chez les Amphibiens, abaissement du taux d'hormones juvéniles chez les Insectes), ces lysosomes primaires sont *activés*, c'est-à-dire qu'ils laissent diffuser leurs hydrolases dans le cytoplasme, soit par perméabi-

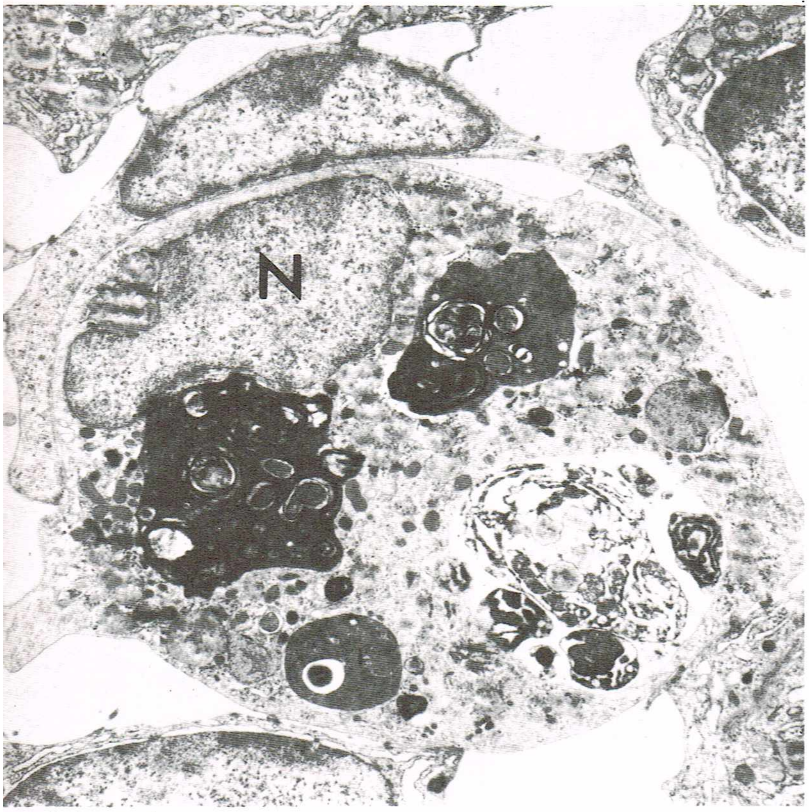

A. Beaumont

A. Beaumont

lisation de leur membrane, soit par rupture de cette membrane. Il en résulte une *altération localisée* du cytoplasme et des organites qu'il contient (mitochondries, réticulum, grains de sécrétion.)

La cellule réagit alors en *séquestrant* l'aire de lyse qui vient de se former dans une vacuole dite *vacuole autophagique*, ou vacuole *autolytique primaire*, ou encore *cytoségrésome ;* celle-ci atteint souvent 4 μ de diamètre. Il s'agit d'une sorte de réaction d'autodéfense de la cellule contre la généralisation de la lyse. L'origine de la vacuole est variée. Elle peut provenir d'une membrane simple de néo-formation qui se développe autour de l'aire de lyse et se referme sur elle-même ; mais le plus souvent, elle se forme à partir d'un sac du réticulum qui entoure l'aire de lyse d'une enveloppe à deux membranes, dont les bords se rapprochent puis se soudent, tandis que la membrane interne disparaît. A l'intérieur de la vacuole autophagique ainsi formée, la lyse du matériel séquestré se poursuit sous l'action des hydrolases initiales ou d'hydrolases apportées par de petits lysosomes primaires, qui viennent déverser leurs enzymes dans la vacuole autophagique. La vacuole se transforme progressivement en un *corps résiduel primaire,* à contenu difficilement identifiable, encore appelé *corps dense* si son aspect est homogène et opaque aux électrons, ou *corps myélinique* quand il renferme des systèmes membranaires concentriques rappelant la structure de la gaine de myéline enroulée autour d'une fibre nerveuse.

L'extension de la diffusion enzymatique à partir d'autres lysosomes primaires entraîne une deuxième série de réactions défensives de la part de la cellule avec formation de *vacuoles autolytiques secondaires*, englobant à la fois les nouveaux territoires en voie de lyse et des vacuoles autolytiques primaires ou leurs formes résiduelles. Leur taille dépasse souvent 6 μ et peut même atteindre une dizaine de μ. Les vacuoles autolytiques secondaires se transforment en *corps résiduels secondaires,* qui encombrent le cytoplasme de la cellule en autolyse.

A ce stade, la cellule fortement altérée, mais dont le noyau reste longtemps intact, est soit phagocytée, soit éliminée.

Autolyse sans intervention précoce d'enzymes lysosomiques endogènes

Ce mode de dégénérescence, tout à fait caractéristique des *fibres musculaires striées*, a été observé aussi bien chez les Insectes que chez les Amphibiens Anoures au cours de la métamorphose. Les mitochondries gonflent, perdent leur membrane limitante et leurs crêtes ; les myofibrilles perdent leur striation puis disparaissent ; les débris cellulaires sont alors phagocytés. Dans quelques cas, assez rares, des lysosomes interviendraient, mais toujours tardivement ; leur apparition pourrait être induite par l'accumulation des produits de dégradation. Il est possible également que des hydrolases lysosomiques exogènes, libérées à partir de cellules phagocytaires, puissent intervenir dans la dégradation des fibres musculaires striées.

Sort des cellules altérées

Les cellules en voie de lyse sont éliminées selon des modalités variées. Elles peuvent être rejetées dans le milieu extérieur ou dans la lumière de cavités naturelles en relation avec le milieu extérieur, évacuées dans le milieu intérieur, c'est-à-dire l'appareil circulatoire, où elles seront phagocytées, ou, encore, phagocytées sur place.

Rejet dans le milieu extérieur

Si l'on excepte le cas des cellules épidermiques de la queue des larves d'Amphibiens Anoures, qui sont éliminées directement à l'extérieur au cours de la métamorphose, ce mode d'élimination est caractéristique surtout des cellules épithéliales ou glandulaires de l'appareil digestif et des glandes annexes, qui sont évacuées dans la lumière du tube digestif ou des canaux excréteurs. Il en est ainsi de l'épithélium gastrique ou intestinal et des cellules pancréatiques exocrines des larves d'Amphibiens Anoures en métamorphose, de l'intestin moyen des larves d'Insectes en métamorphose, de l'épithélium de l'intestin grêle des Mammifères, de l'épithélium digestif de l'embryon de poulet, du fœtus et du nouveau-né de Mammifère au cours de son histogenèse.

Rejet dans le milieu intérieur

Chez les Insectes, au cours de la métamorphose, les cellules du corps gras de diverses chenilles de Lépidoptères, de la glande prothoracique de blattes ainsi que de la glande séricigène du ver à soie sont éliminées en cours d'autolyse dans l'hémolymphe, où elles seront phagocytées.

Ce mode d'élimination est plus rare chez les Vertébrés. Il a été décrit chez la souris femelle lactante, au cours de l'involution de la glande mammaire après le sevrage. Certaines cellules glandulaires subissent une autolyse massive ; leurs débris sont éliminés dans les espaces

▲ ***A gauche,* cellule pancréatique nécrosée *de larve de grenouille en métamorphose, au sein d'une zone conjonctive lâche ; le noyau (N) est peu altéré ; le cytoplasme contient de volumineuses vacuoles autophagiques (microscopie électronique × 6 000). A droite,* cellule pancréatique canaliculaire *(P) nécrosée, rejetée dans la lumière d'un canalicule pancréatique (can) [microscopie électronique × 12 000].***

intercellulaires, puis dans l'intervalle qui sépare les cellules glandulaires et les cellules myoépithéliales intactes et résorbées en dernier lieu par l'intermédiaire des capillaires. Au cours de l'involution du pancréas exocrine des larves d'Amphibiens Anoures en métamorphose, des cellules autolysées ont été vues franchissant la paroi endothéliale, par écartement de cellules endothéliales adjacentes, et observées dans la lumière des capillaires où elles sont phagocytées.

Phagocytose

Les cellules phagocytaires ont été classées par Metchnikoff (1892) en deux grands systèmes : les *microphages*, capables de phagocyter seulement des particules de petite taille telles que des Bactéries, et les *macrophages*, capables de phagocyter des cellules entières ou des débris cellulaires de grande taille. Les globules blancs polynucléaires sont des microphages typiques. Le système des macrophages réunit des catégories cellulaires très différentes, n'ayant guère en commun que leur fonction phagocytaire : cellules phagocytaires de la rate, des ganglions lymphatiques, de la moelle osseuse, macrophages du tissu conjonctif.

A ces cellules phagocytaires du système des macrophages, facilement identifiables grâce à leur propriété d'ingérer des colorants vitaux acides comme le bleu trypan, Aschoff (1924) a ajouté d'autres catégories cellulaires ayant les mêmes propriétés phagocytaires : les cellules endothéliales des capillaires sanguins, les cellules réticulo-endothéliales des sinus sanguins et lymphatiques, y compris les cellules de Kupffer du foie. Il les a englobées dans le nouveau concept de *système réticulo-endothélial*.

Ce concept a été vivement critiqué, en particulier par Maximov (1927), car il groupait des cellules très différentes par leur morphologie, leur structure, leur origine et leurs capacités de phagocytose. En 1969, une conférence internationale a proposé de réunir toutes les cellules hautement phagocytaires, mononucléaires, et leurs précurseurs dans un nouveau système : le *système des phagocytes mononucléaires*. Ces cellules sont liées par leur morphologie, leur structure, leurs fonctions, leur origine et constituent un système beaucoup plus homogène et cohérent que le système réticulo-endothélial d'Aschoff. Le terme de macrophage est réservé, dans ce système, à des cellules à grande activité phagocytaire, issues de promonocytes de la moelle osseuse par l'intermédiaire des monocytes du sang. Leur variété est indiquée dans le tableau ci-dessous.

Système des phygocytes mononucléaires

Promonocyte (moelle osseuse)
↓
Monocyte (sang)
↓
Macrophage (tissus)

Tissu conjonctif	→	histiocyte
Foie	→	cellules de Kupffer
Poumon	→	macrophages alvéolaires
Rate	→	macrophages libres et fixés
Ganglions lymphatiques	→	macrophages libres et fixés
Moelle osseuse	→	macrophages, cellules de revêtement des sinusoïdes
Cavités séreuses	→	macrophages péritonéaux
Tissu osseux	→	ostéoclastes
Système nerveux	→	microglie (?)

Indépendamment de ce système de cellules hautement spécialisées dans la fonction phagocytaire que constituent les macrophages, deux autres catégories de cellules peuvent devenir phagocytaires. Il s'agit, d'une part, de *cellules mésenchymateuses* morphologiquement *indifférenciées* mais souvent confondues avec les vrais macrophages, d'autre part, de *cellules épithéliales différenciées*, qui peuvent occasionnellement phagocyter des cellules sœurs voisines dégénérescentes.

● *Phagocytose par des macrophages*

Des macrophages interviennent dans les phagocytoses du mésonéphros, de cellules myocardiques et de motoneurones de la moelle épinière cervicale de l'embryon de poulet, ainsi que dans la phagocytose de cellules pancréatiques exocrines altérées de la larve des Amphibiens Anoures au cours de la métamorphose.

Chez les Insectes, les cellules phagocytaires de l'hémolymphe sont les équivalents des macrophages des Vertébrés. Elles interviennent au cours de la métamorphose et phagocytent les muscles intersegmentaires, les cellules épidermiques de l'abdomen, les trachéoblastes des larves de Diptères. Elles évoluent alors en « sphères de granules », du fait de l'abondance des débris cellulaires inclus dans des vacuoles digestives.

● *Phagocytose par des cellules mésenchymateuses*

Selon Weber (1963), au cours de la régression caudale des larves d'Amphibiens Anoures en métamorphose, des cellules mésenchymateuses se différencieraient en cellules phagocytaires et participeraient à l'élimination des débris des fibres musculaires striées altérées. Il en serait de même pour les cellules nerveuses de la moelle épinière, les cellules cordales et le tissu conjonctif dense sous-cutané (Fox 1972-1973). De la même façon, le mésenchyme interdigital des membres antérieurs et postérieurs de l'embryon de poulet ou de fœtus de Mammifère ainsi que les cellules épithéliales des canaux de Wolff du fœtus de souris femelle seraient éliminés par des cellules mésenchymateuses ayant acquis secondairement des propriétés phagocytaires. Cette différenciation de cellules mésenchymateuses banales en cellules phagocytaires pourrait être induite par la présence des cellules en voie de lyse.

● *Phagocytose par des cellules épithéliales différenciées*

Bien que normalement incapables de phagocytose, des cellules épithéliales banales de jeunes embryons ou de larves âgées peuvent acquérir cette propriété et phagocyter des cellules sœurs voisines dégénérescentes. Ce fait est particulièrement évident au cours de la métamorphose des Amphibiens Anoures, aussi bien au niveau de l'épithélium intestinal qu'à celui du pancréas exocrine. Dans ce dernier cas, ce sont des cellules canaliculaires qui incorporent dans leur cytoplasme des cellules exocrines entières ou les débris altérés de ces cellules. Indépendamment d'une digestion plus ou moins complète de ces éléments dans des phagosomes, il est possible que cette phagocytose se limite à une sorte de transport des cellules altérées vers la lumière des canaux excréteurs, dans laquelle ils seraient rejetés.

Signification de la mort cellulaire

La signification de la mort cellulaire est évidente lorsqu'elle correspond à ce que l'on peut appeler la mort naturelle d'une cellule usée (globules sanguins, cellules épithéliales intestinales) ou sclérosée (cellules épidermiques kératinisées), ou à la dégénérescence et à la résorption de structures transitoires (métamorphoses).

Elle est plus problématique quand elle survient au cours de l'histogenèse d'un tissu ou d'un organe et aboutit, comme dans le cas du système nerveux de la larve du crapaud *Xenopus*, à la dégénérescence et à la mort des 3/4 des neuroblastes des ébauches des ganglions rachidiens ou des 9/10 des neuroblastes des cornes ventrales de la moelle épinière lombaire. Deux interprétations différentes sont proposées pour tenter d'expliquer les raisons de ces morts cellulaires. L'une suppose qu'elles viennent compenser des surproductions cellulaires liées à des « erreurs » dans le nombre des divisions des cellules embryonnaires au cours de leur différenciation. L'autre fait intervenir la notion de mort « programmée », génétiquement déterminée, d'une certaine proportion des cellules embryonnaires indifférenciées. En d'autres termes, la mort cellulaire chez un embryon ne serait qu'un aspect morphogénétique particulier de différenciation cellulaire aboutissant, non à la production de cellules morphologiquement et fonctionnellement différenciées, mais à leur destruction.

Contrôle de la mort cellulaire

On connaît au moins deux facteurs exerçant un contrôle sur la mort cellulaire au cours de l'embryogenèse : l'environnement des cellules destinées à dégénérer et les hormones.

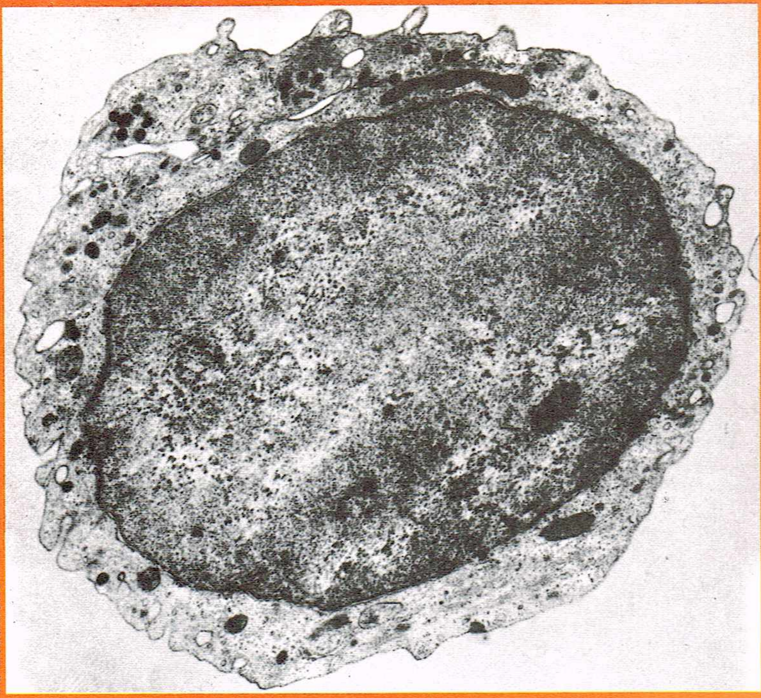

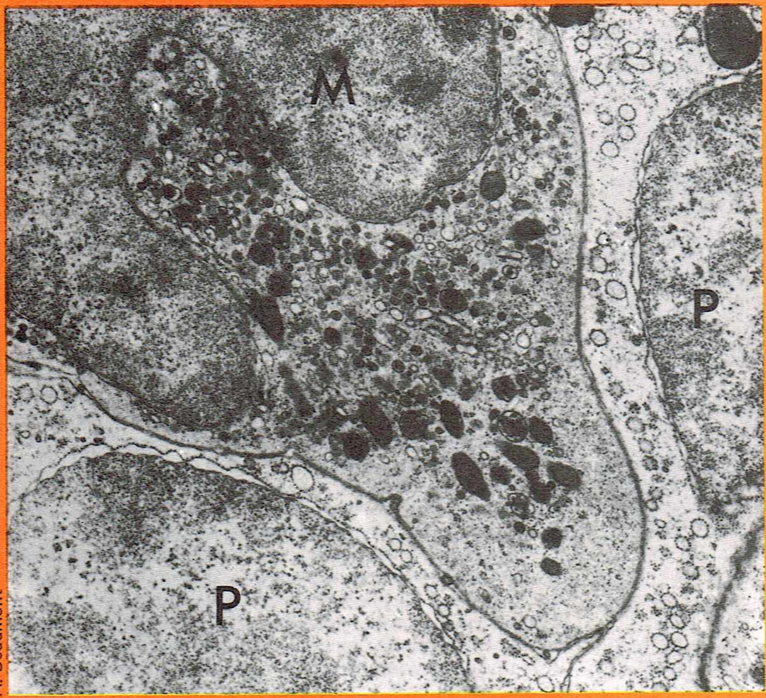

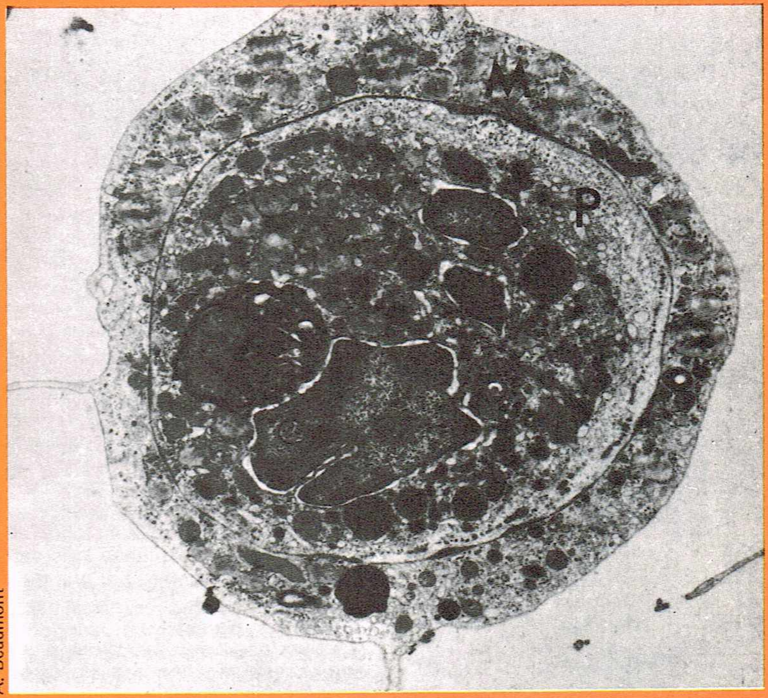

▲ *De gauche à droite et de haut en bas (chez stades de métamorphose d'Amphibien Anoure [grenouille]) :* **monocyte** *sanguin précurseur de macrophage (× 12 500) ;* **macrophage** *jeune, en migration dans le pancréas exocrine (× 12 500) ;* **macrophage** *typique (M) insinué entre deux cellules exocrines (P) [× 12 500] ;* **cellule** *pancréatique nécrosée (P) complètement entourée par une cellule phagocytaire de type macrophage (M) [× 9 000] ;* **macrophage** *contenant une énorme vacuole autophagique très dense (flèche) [× 7 500]. Ces cinq illustrations sont des microphotographies électroniques.*

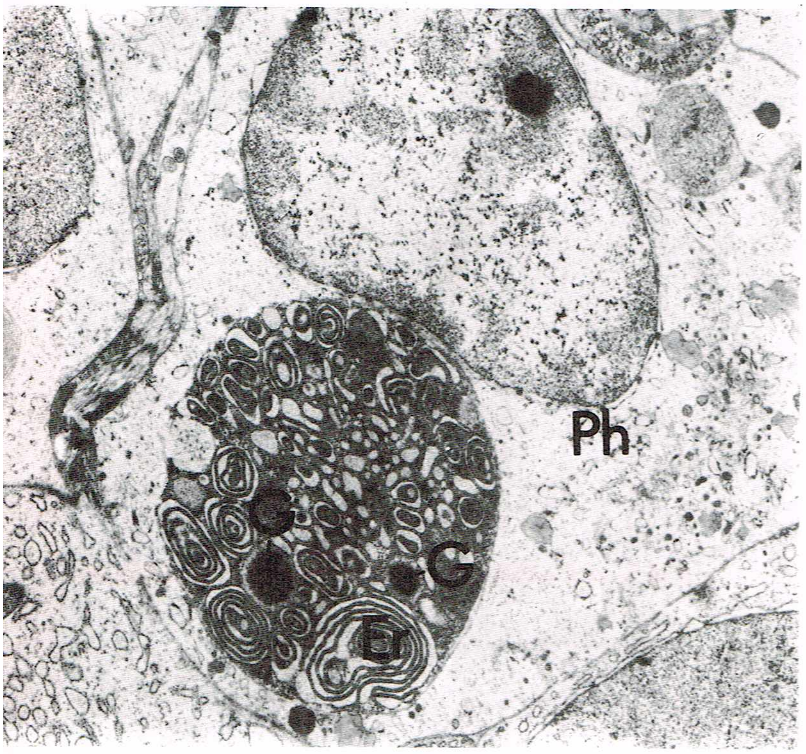

A. Beaumont

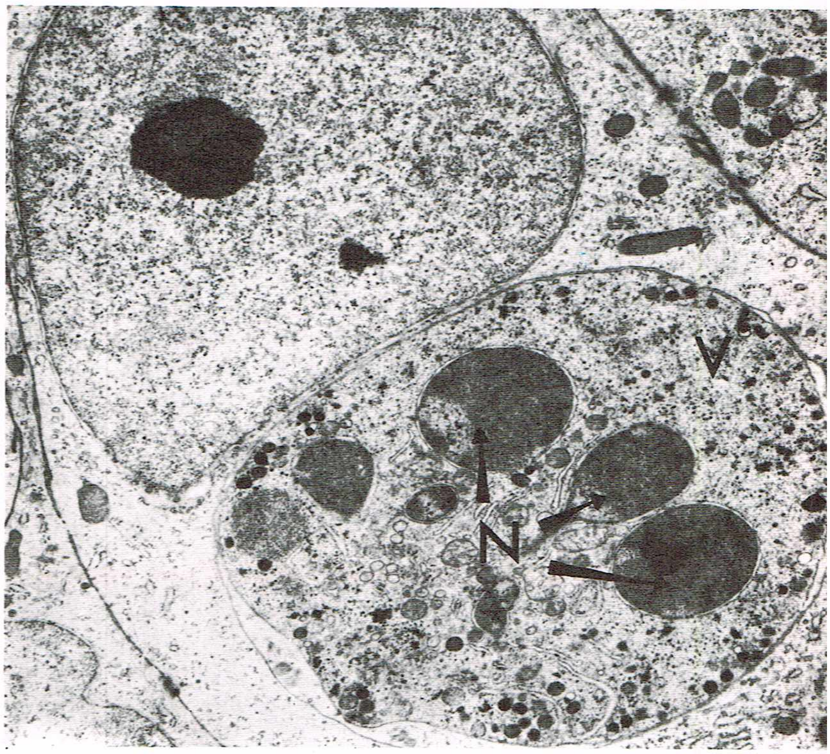

A. Beaumont

▲ *A gauche,* **vacuole hétérophagique** *(contenant de l'ergastoplasme [Er] et des grains de sécrétion [G] d'une cellule pancréatique) au sein d'une cellule phagocytaire saine de nature canaliculaire (Ph) [chez stade de métamorphose d'Amphibien Anoure] (microscopie électronique, × 8 000). A droite,* **vacuole hétérophagique** *(V) contenant les restes d'une cellule endocrine A (à glucagon) phagocytée par une cellule canaliculaire. Remarquer le noyau pycnotique (N) fragmenté en trois parties (microscopie électronique, × 8 500).*

Rôle de l'environnement cellulaire

Au cours du développement embryonnaire normal, la programmation d'une « cellule destinée à mourir » peut être annulée si l'environnement cellulaire est modifié. Les expériences menées par Saunders, en 1962, sur la zone de nécrose postérieure qui apparaît sur le bourgeon alaire de l'embryon de poulet ont bien précisé ce rôle de l'environnement. Normalement, cette zone de mésenchyme située à la jonction du bourgeon alaire et du tronc se nécrose et meurt au 4e jour. Si elle est transplantée dans la région des somites d'un embryon, quel que soit son âge, les cellules mésenchymateuses meurent quand l'embryon donneur atteint le 4e jour. Par contre, si cette zone est transplantée à la face dorsale du bourgeon alaire, les cellules mésenchymateuses se différencient en cartilage. Ainsi, la « sentence » de mort n'est pas irrévocable et peut être annulée par une modification de l'environnement cellulaire.

Rôle des hormones

Au cours de la métamorphose des Amphibiens et des Insectes, la dégénérescence de certaines structures ou organes larvaires est contrôlée par un mécanisme hormonal suivant les mêmes principes généraux que celui de la régulation hormonale de la croissance et de la différenciation. Les hormones qui déclenchent la mort cellulaire et celles qui stimulent la croissance et la différenciation sont les mêmes, la sélectivité de leur action étant la propriété de l'organe effecteur. Par exemple, chez les Amphibiens Anoures, les hormones thyroïdiennes stimulent la croissance des bourgeons des membres ainsi que le développement et la différenciation de l'encéphale, mais provoquent la dégénérescence de la queue, de l'épithélium intestinal, des branchies, de l'opercule, etc. Chez les chenilles d'Insectes Lépidoptères, l'ecdysone provoque toute une série de destructions d'organes larvaires au cours du stade nymphal mais laisse intacts les disques imaginaux. Après un temps de diapause, ceux-ci réagissent par une croissance et une différenciation spectaculaire à une nouvelle sécrétion d'ecdysone et édifient les appendices et les ailes du papillon.

La différenciation sexuelle des voies génitales est conditionnée par un mécanisme hormonal. Le canal de Müller, futur oviducte de la femelle, est présent chez tous les embryons de Vertébrés avant le stade de différenciation sexuelle, quel que soit le sexe génétique de l'embryon. Il dégénère et disparaît chez le futur mâle quand le jeune testicule commence à sécréter sa testostérone. En culture *in vitro,* les canaux de Müller de l'embryon de poulet mâle prélevés avant le stade de différenciation sexuelle continuent à vivre et croissent au-delà du stade de leur dégénérescence *in vivo* ; mais, en présence d'hormone mâle ajoutée au milieu de culture, ils régressent et dégénèrent très rapidement.

Réutilisation éventuelle des produits de la mort cellulaire

Dans toute cellule normale, non appelée à dégénérer prématurément, une activité autophagique limitée traduit une destruction permanente de certains organites cytoplasmiques usés, qui sont éliminés sans perte de constituants chimiques puisqu'ils peuvent être réutilisés dans l'économie cellulaire. Il en est probablement de même pour les cellules dégénérescentes, qu'elles soient éliminées dans la lumière du tube digestif ou phagocytées. Les produits de leur lyse (acides nucléiques, peptides, oses...) sont certainement récupérés par l'organisme et réutilisés dans l'édification de nouvelles structures. Il ne peut en être autrement dans la métamorphose des Insectes Holométaboles, chez lesquels le stade nymphal constitue un système totalement isolé à l'intérieur duquel des tissus larvaires sont lysés, tandis que les tissus imaginaux croissent et se différencient.

La mort cellulaire est un phénomène très normal qui survient à tout moment de la vie d'un organisme. Elle met en jeu un petit nombre de mécanismes, qui, dans le cas le plus fréquent de mort par autolyse lysosomique, ne sont que l'exagération d'un processus classique d'autophagie par lequel une cellule peut éliminer des organites usagés et réutiliser les constituants chimiques dans l'économie cellulaire.

BIBLIOGRAPHIE

CARR I., *The Macrophage : A Review of Ultrastructure and Function,* Academic Press, London, 1973. - DINGLE J.J., *Lysosomes in Biology and Pathology,* North Holland Publ., Amsterdam, 1973. - FORSBERG J.G., KALLEN B., *Cell Death During Embryogenesis,* Rev. roumaine d'embryologie et de cytologie, 5, 91-102, 1968. - GLUCKSMANN A., *Cell Death in Normal Vertebrate Ontogeny,* Biol. Rev., 26, 59-86, 1951. - SAUNDERS J.W.J., *Death in Embryonic Systems,* Science, 154, n° 3749, 604-612, 1966. - SCHWEICHEL J.-V., MERKER J.H., *The Morphology of Various Types of Cell Death in Prenatal Tissues,* Teratology, 7, 253-266, 1973. - VAN FURTH R., *Mononuclear Phagocytes,* Blackwell Scientific Publ., Oxford, 1970.

LA VIROLOGIE

La virologie est la discipline qui étudie les virus (du mot latin *virus*, venin). Ceux-ci sont, pour ce qui est de leur structure, les plus petits et les plus simples des micro-organismes.

Dernière branche spécialisée de la microbiologie du point de vue chronologique, elle a rapidement réalisé de grands progrès, permettant en même temps l'acquisition de connaissances qui, en dehors de son propre champ de recherches, sont devenues aujourd'hui fondamentales pour la biologie en général. Il convient cependant de préciser que, bien que la virologie soit une discipline nouvelle, la connaissance des maladies virales et leur étude datent de plusieurs siècles, certaines découvertes, toujours d'actualité, en témoignent : il suffit de citer la vaccine, ou vaccin contre la variole humaine, découverte par Jenner en 1794, et le vaccin contre la rage, mis au point par Pasteur en 1885.

Toutefois, ni Jenner ni Pasteur ne pensaient que la variole et la rage fussent provoquées par des agents fort différents de ceux qui causent des maladies comme le charbon ou la fièvre typhoïde : pour Pasteur, l'impossibilité de cultiver et de voir l'agent de la rage n'était due qu'à l'insuffisance des moyens techniques dont on disposait à l'époque.

En 1892, Dimitri Ivanovski, botaniste russe, constatait que le jus exprimé de feuilles de tabac atteintes de la maladie de la mosaïque pouvait transmettre l'infection à d'autres plants de tabac, même après filtration à travers des bougies en porcelaine poreuse (filtres Chamberland), qui retiennent toutes les Bactéries. Ivanovski attribua ce fait non à un micro-organisme, mais à un poison de nature chimique, c'est-à-dire à une toxine sécrétée par la plante malade.

Peu après, le savant hollandais Beijerink, en effectuant des recherches très soigneuses, démontra que l'agent pathogène lui-même n'était pas un hypothétique composé toxique, et qu'il était cependant capable de franchir la barrière représentée par les filtres, permettant ainsi de reproduire la maladie en série. C'était là un fait, étonnant pour l'époque, étant donné qu'on ne concevait pas que des substances différentes des liquides ou des sels en solution pussent passer à travers les pores des filtres les plus fins. C'est justement ce caractère, dit de *filtrabilité*, qui fut considéré pendant longtemps comme la principale caractéristique des virus.

Rapidement, d'autres découvertes d'agents filtrables pathogènes confirmèrent les travaux de Beijerink. Loeffler et Frosch, en 1898, démontrèrent la filtrabilité de l'agent causal de la fièvre aphteuse du bétail. La même année, Sanarelli, en Uruguay, identifiait la cause de la myxomatose du lapin comme étant un virus filtrable. En 1901, une commission composée d'Américains du Nord et de Cubains attribua la même caractéristique à l'agent responsable de la fièvre jaune. En 1909, Landsteiner et Levaditi arrivaient à des constatations analogues en ce qui concerne la poliomyélite antérieure aiguë, ou paralysie infantile, quarante ans avant la culture *in vitro* des virus de cette maladie.

Mais ce sont surtout les progrès des moyens techniques qui ouvrirent définitivement la voie à la recherche dans le domaine de la virologie. Des progrès décisifs purent être accomplis dans les années 1940, grâce à la mise au point de méthodes complexes et très fines, comme l'ultracentrifugation, la microscopie électronique, les cultures de cellules sensibles aux virus, l'historadiographie, le marquage par des isotopes radioactifs, etc. Pour donner une idée des grands pas accomplis, il suffit d'indiquer qu'il y a vingt ans encore, on ne connaissait qu'une vingtaine de virus pathogènes pour l'homme, alors qu'aujourd'hui on en a dénombré plus de 200, dont au moins 90 ont été isolés et caractérisés pendant ces dix dernières années.

Il n'existe pas d'être vivant qui n'ait ses virus spécifiques : beaucoup de ceux-ci sont responsables de graves maladies. La virologie n'est pas seulement importante dans le domaine médical, elle a en outre permis d'approfondir nos connaissances : en effet, les virus, qu'ils soient ou non des êtres vivants, sont réduits à une organisation extrêmement simplifiée, et peuvent apporter des informations du plus haut intérêt à la cytologie, la génétique, la biologie moléculaire et l'oncologie. La virologie est l'une des sciences biologiques les plus avancées; elle est l'objet de progrès incessants. Ainsi, certains points développés ici pourront se trouver rapidement caducs (surtout en ce qui concerne les virus oncogènes et les virus des animaux), tant sont rapides les découvertes qui s'accumulent chaque jour.

Archives P 2

▲ **Edward Jenner** *(1749-1823), médecin anglais à qui l'on doit l'application de la vaccination (inoculation de la variole bovine ou « cow pox ») pour protéger contre la variole.*

F. Arborio Mella

F. Arborio Mella

◀ *A gauche,* **Adolf Friedrich Loeffler** *(1852-1915), bactériologiste qui démontra le caractère filtrable de l'agent de la fièvre aphteuse du bétail. A droite,* **Constantin Levaditi** *(1874-1953) dont la carrière se déroula à l'Institut Pasteur à Paris. Célèbre pionnier de la virologie, on lui doit la découverte du caractère filtrable du virus de la poliomyélite antérieure aiguë, de la maladie de Nicolas et Favre, mais surtout la théorie des ectodermoses neurotropes.*

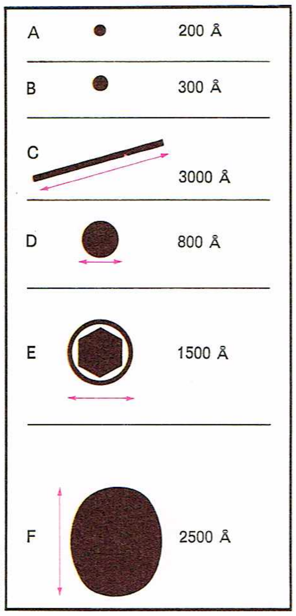

I.G.D.A.

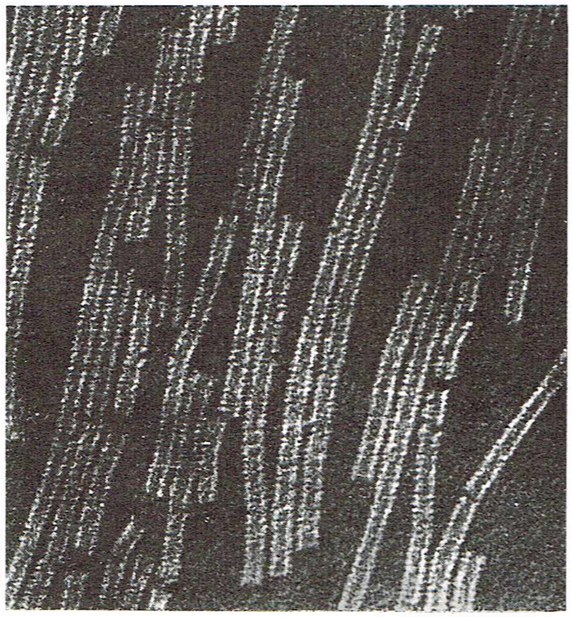

Pitzurra

▲ *A gauche, exemples de la variété des formes et des tailles de certains virus; A, bactériophage F_2 ou R_{17}; B, virus de la poliomyélite; C, virus de la mosaïque du tabac; D, virus de la grippe; E, virus de l'herpès; F, virus de la variole (les dimensions sont indiquées à côté des virus). A droite, préparation de fragments d'un* Myxovirus *des singes (SV_5), virus à symétrie hélicoïdale; la longueur de certains fragments hélicoïdaux dépasse 100 nm pour un diamètre d'environ 15 nm (grossissement × 150 000).*

Qu'est-ce qu'un virus?

Nous sommes depuis peu de temps seulement en mesure de donner une définition claire et assez précise de ce qu'est un virus.

Parmi les micro-organismes monocellulaires, c'est-à-dire les êtres vivants constitués par une unique cellule, les virus sont placés en bas de l'échelle, du fait de leur petite taille et du caractère incomplet de leur structure cellulaire; au-dessous, on atteint la matière inerte, les grosses molécules biologiques. Naguère, lorsque les moyens d'étude étaient moins perfectionnés que ceux d'aujourd'hui, on considérait les virus comme des êtres invisibles; ils étaient capables de traverser les filtres utilisés alors en microbiologie. Actuellement, ces critères sont dépassés : les virus sont devenus visibles et peuvent être photographiés dans leurs plus petits détails à l'aide du microscope électronique; en outre, on possède maintenant des membranes filtrantes qui permettent de les arrêter. Leur définition est fondée sur les caractéristiques biologiques et chimiques de la particule virale.

Pour préciser, nous dirons que l'on reconnaît aux virus les caractères fondamentaux suivants :

— la capacité de se multiplier à l'intérieur seulement d'une cellule vivante, avec une continuité génétique;

— la présence, parmi leurs composants chimiques, d'un seul type d'acide nucléique, soit de l'acide désoxyribonucléique (ADN), soit de l'acide ribonucléique (ARN);

— le passage par une phase d'éclipse, avant la multiplication intracellulaire, qui a lieu selon un mode particulier.

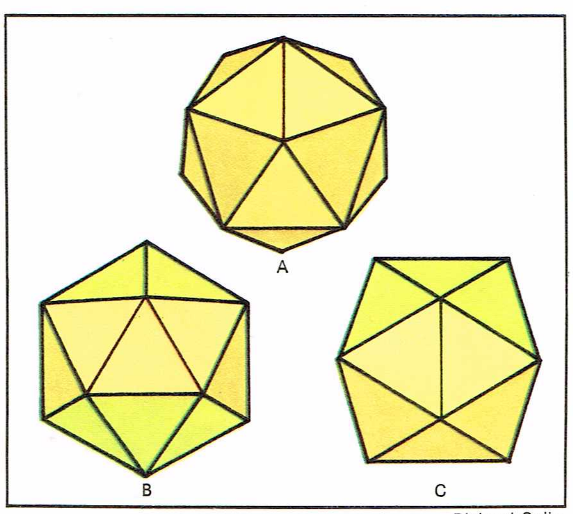

Richard Colin

▶ *Projection plane d'un icosaèdre régulier suivant ses axes d'ordre 5 (a : sommet), d'ordre 3 (b : face) et d'ordre 2 (c : arête).*

Le premier de ces trois caractères, c'est-à-dire la nécessité d'exploiter une cellule vivante pour pouvoir y effectuer ses processus de reproduction, est indubitablement le plus important aspect biologique des virus au sens propre : en d'autres termes, alors qu'il est possible de cultiver des Bactéries ou des Mycètes dans une éprouvette ou une boîte de Pétri, sur un milieu de culture inerte constitué d'eau, de glucides, de protéines, de sels, pour cultiver un virus, on doit avoir recours à des cellules vivantes, spécifiques, mettant à la disposition de l'hôte des structures cellulaires fondamentales. On sait, d'autre part, que dans les cellules complètes les deux acides nucléiques — l'ADN et l'ARN — sont tous deux présents et indispensables à la réalisation du cycle de Lipmann de synthèse des protéines. Chez les virus, au contraire, la présence d'un seul acide nucléique est la raison et la preuve de leur caractère de parasites obligatoires.

Pendant très longtemps, on a considéré comme virales, à cause de certains caractères de leur agent causal, des maladies que nous savons aujourd'hui relever d'agents non viraux. Ce fut d'abord le cas de toutes celles qui sont causées par des rickettsies : le typhus exanthématique, les maladies exanthématiques diverses (fièvre boutonneuse, typhus des broussailles, etc.), le trachome (dû à *Rickettsia trachomatis*), la conjonctivite et l'uréthrite à inclusions, ainsi que d'autres maladies du même groupe : les rickettsies, visibles au microscope ordinaire, se multiplient par division binaire et renferment de l'ADN et de l'ARN. A côté des rickettsies, que l'on peut sans hésitation exclure de la catégorie des virus, s'est posée la question des infections causées par ce que l'on appelait alors les « gros virus » : la psittacose, l'ornithose, la lymphogranulomatose inguinale subaiguë, ou maladie de Nicolas et Favre, et d'autres infections du même groupe dont l'agent est filtrable, ne peut être vu au microscope optique que grâce à des procédés de surcoloration, est parasite obligatoire et ne se multiplie que dans les cellules vivantes. L'ambiguïté est aujourd'hui levée : ces germes, considérés comme des pararickettsies, n'ont rien à voir avec les virus : ils renferment les deux acides nucléiques ADN et ARN, ne connaissent pas de phase d'éclipse au cours de leur multiplication, sont sensibles aux antibiotiques, qui sont sans effet sur les virus, et, enfin, leur multiplication a lieu très problablement par division binaire.

Il ressort de ces distinctions, établies après de nombreux travaux, que ce qui caractérise un virus, ce n'est en fin de compte ni l'invisibilité, ni le pouvoir de traverser des filtres, ni même le parasitisme obligatoire : le caractère dominant capital est le fait de ne posséder qu'un seul des deux acides nucléiques, de se multiplier aux dépens du métabolisme de l'hôte, et cela non par division binaire mais par duplication à partir d'un modèle introduit dans la cellule par le virus et selon des modalités que nous examinerons plus loin.

Il est également établi que les virus ne peuvent être des cellules complètes, toute cellule, si élémentaire soit-elle, renfermant les deux acides nucléiques ADN et ARN. Le fait de n'avoir qu'un seul acide nucléique (lequel n'intervient d'ailleurs que comme modèle ou comme moule dans le métabolisme de la cellule parasitée) enlève-t-il aux virus les qualités que nous reconnaissons à une cellule vivante? Les virus sont-ils vivants par eux-mêmes? De toute évidence, ils ne le sont qu'autant que vit la cellule qui les héberge et assure leur reproduction. Isolés de la cellule, ils ne sont pas plus vivants que d'autres composants biologiques, comme l'hémoglobine ou l'albumine; cependant, ils conservent la virtualité d'une action intracellulaire qui les associe indissolublement au cycle vital d'une cellule.

Dimensions et formes des virus

Les virus sont de taille extrêmement réduite, mais fort variable : leur petit axe, ou diamètre transversal, va de 13 nm (*) chez le virus du rat, ou rat virus (VR), à 250 nm chez le Poxvirus. Quant aux virus de l'homme et des animaux, leur grand axe, ou diamètre longitudinal, atteint

(*) L'unité de mesure de longueur des virus est le *nanomètre* (nm), autrefois dénommé millimicron (mμ), c'est-à-dire le milliardième de mètre, soit la millième partie du micron (μ), unité des microscopistes, et dix fois l'angström (Å), unité des physiciens. En résumé :
$1\ nm = 10\ Å = 1\ m\mu = 10^{-3}\ \mu = 10^{-6}\ mm = 10^{-9}\ m$.

parfois des valeurs nettement supérieures (formes filamenteuses), mais le diamètre transversal est alors réduit. L'emploi du microscope électronique, qui permet d'atteindre des grossissements de 100 000 fois pour des préparations à haute résolution, a permis de décrire les plus fines structures des virus.

Toute particule virale isolée, quelles que soient sa forme et sa taille, est toujours constituée par certains éléments fondamentaux. Selon la terminologie proposée en 1959 par Lwoff, Anderson et Jacob, et universellement adoptée depuis 1962, une unité virale complète est appelée *virion*. Au centre du virion, se trouve la molécule d'acide nucléique (ADN ou ARN), formant le *nucléoïde* et entourée d'une enveloppe protidique, la *capside*. Ces deux structures réunies constituent la *nucléocapside*.

Les capsides résultent de l'union d'éléments plus petits et identiques. Quand ces sous-unités, constituées par plusieurs protéines, sont groupées à la surface de la capside avec une distribution régulière, on les nomme *capsomères*. Lorsqu'elles sont formées par une seule molécule (c'est-à-dire lorsqu'elles sont monomères), on les appelle des *unités structurales*. Certains virus possèdent une autre enveloppe, externe, qui enveloppe la capside, de structure chimique plus complexe, appelée *membrane externe* limitante, ou *péplos;* les virus qui en sont dépourvus sont dits *nus*.

Si l'on compare la structure morphologique d'un virus, telle qu'elle a été exposée, à celle d'autres micro-organismes (Bactéries, Micromycètes, Protozoaires), une différence fondamentale apparaît immédiatement : les virions ne sont pas des cellules complètes : constitués par une structure uniquement nucléique, avec un revêtement protidique et une membrane externe qui n'est pas toujours présente, ils sont totalement dépourvus de systèmes propres dans leur cytoplasme (appareil de Golgi, appareil mitochondrial, appareil ribosomique, etc.).

Du point de vue morphologique, le caractère le plus remarquable des virions — mis en évidence à l'aide de techniques particulières de microscopie électronique (coloration négative avec un phosphotungstate) — est la disposition symétrique des protéines de la capside, selon trois types de formes :
- les formes à symétrie cubique;
- les formes à symétrie hélicoïdale ou torique;
- les formes à symétrie binaire ou complexe.

Les virus à symétrie cubique, les mieux étudiés de ce point de vue, présentent souvent les caractères de l'un des solides réguliers de la géométrie classique, l'icosaèdre. Ils sont habituellement sous forme d'un solide à 20 faces identiques, constituées par des triangles équilatéraux. Ils possèdent 3 axes de symétrie, considérés selon des sommets ou faces ou arêtes; l'icosaèdre peut tourner selon 3 axes de rotation présentant le même aspect symétrique, respectivement dans les positions 5, 3 et 2 (axes de symétrie d'ordres 5, 3 et 2, ou encore quinaire, tertiaire et binaire).

Certains virus à symétrie cubique, très petits, les Picornavirus, semblent posséder une structure triacontaédrique, c'est-à-dire qu'il s'agit de solides géométriques présentant 30 faces rhombiques. Enfin, certains bactériophages parmi les plus simples ont une structure tétraédrique. La structure cristalline des capsides a été prévue à l'avance par Watson et Crick : ces chercheurs, considérant que la capside est constituée par des molécules protéiques toutes égales, d'un type unique, en avaient supposé la disposition régulière selon un solide géométrique icosaédrique, le seul permettant la juxtaposition du plus grand nombre d'unités identiques dans le minimum d'espace (de fait, dans l'icosaèdre, le rapport de la surface par rapport au volume atteint ses valeurs les plus basses). L'hypothèse des deux auteurs s'est révélée vraie seulement pour les virus à symétrie cubique les plus petits; des recherches plus récentes ont montré que, dans certains cas, la capside est constituée par diverses protéines, associées parfois en plusieurs couches, pour donner des capsides doubles. Chez les plus gros virus, les structures cristallines de ce type ne sont plus observées, car les forces de Van der Waals, responsables de la cohésion de chacune des molécules, ne peuvent agir dans des structures dont le diamètre dépasse 100 nm. Les capsomères, chez les virus à symétrie cubique, ne sont pas distribués sur les faces de la capside en nombre constant pour chaque type de virus. Pour les virus de forme icosaédrique, il est possible de calculer le nombre total des capsomères du virion, en appliquant la formule :

$$N = 10 \times (n - 1)^2 + 2,$$

où N est le nombre total des capsomères, et n le nombre des capsomères compris dans l'un des côtés du triangle équilatéral de l'icosaèdre; ce dernier élément peut être déterminé par des photographies au microscope électronique. (Voir tableau 1.)

Les capsomères, qui font saillie sur la surface de la capside comme les piquants d'un oursin, ont également une structure géométrique. Le plus souvent, ils présentent la forme de prismes creux de section pentagonale (aux angles), ou hexagonale (sur les faces); parfois, leur section est cylindrique. On connaît également des exemples de capsomères de section circulaire, solides, sans cavité interne (chez les Picornavirus). Leur longueur est de 100 Å à 110 Å, et leur diamètre de 50 Å à 60 Å. A l'aide de photographies superposées et ayant subi une rotation selon divers angles, on a pu faire de remarquables découvertes sur les plus fines structures de la capside virale.

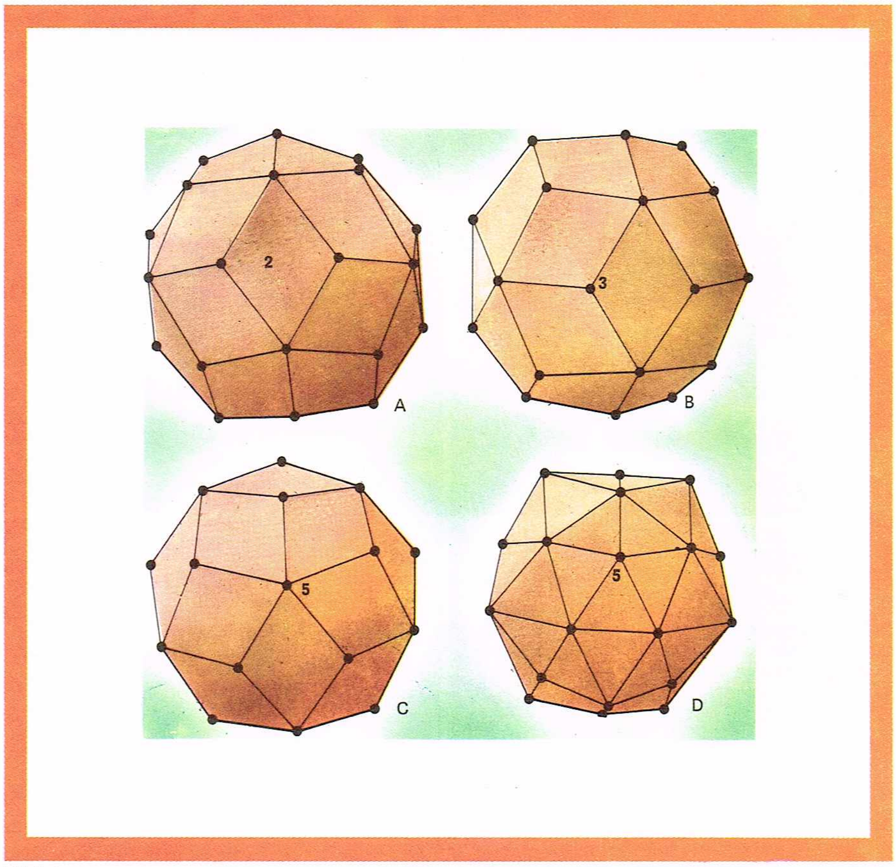

I.G.D.A.

▲ ***Exemples de diverses morphologies de virus;***
A, modèle de triacontaèdre rhombique vu selon son axe de symétrie 2;
B, modèle de triacontaèdre rhombique vu selon son axe de symétrie 3;
C, modèle de triacontaèdre rhombique vu selon son axe de symétrie 5;
D, modèle de dodécaèdre vu selon son axe de symétrie 5.
Les particules de virus Polio présentent une symétrie identique à celle que l'on peut voir en A, B et C.
On observe très souvent une figure rhombique centrale.

TABLEAU 1 - NOMBRE DES CAPSOMÈRES CHEZ CERTAINS VIRUS à structure géométrique rigide

Virus	Nombre de capsomères par côté	Nombre total de capsomères
Bactériophage Φ X 174	2	12
Papova Virus	3	42
Réovirus	4	92
Herpesvirus	5	162
Adénovirus	6	252
Tipula iridescens	10	812

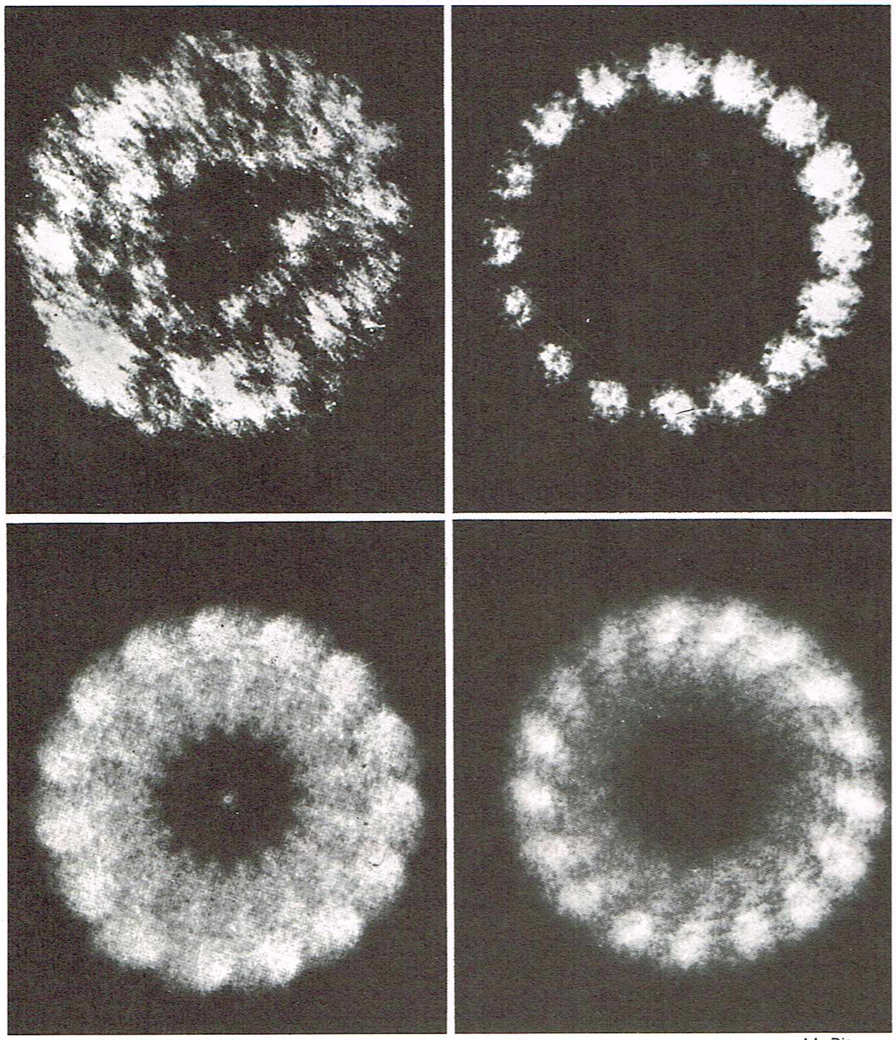

M. Pitzurra

▲ *A gauche, virus de la **mosaïque du tabac.** Images obtenues en fixant une photomicrographie du virus vu en coupe transversale sur un disque tournant, divisé en un nombre de fractions allant de 11 à 21. Le nombre des diviseurs étant* n, *on prend une photographie en faisant tourner à chaque fois le disque de 360°/*n, *pendant* n *fois : en haut à gauche, aspect originel; à droite, après rotation de* n = *16, en bas à gauche :* n = *15; à droite :* n = *17. A droite, le virus de la mosaïque du tabac.*

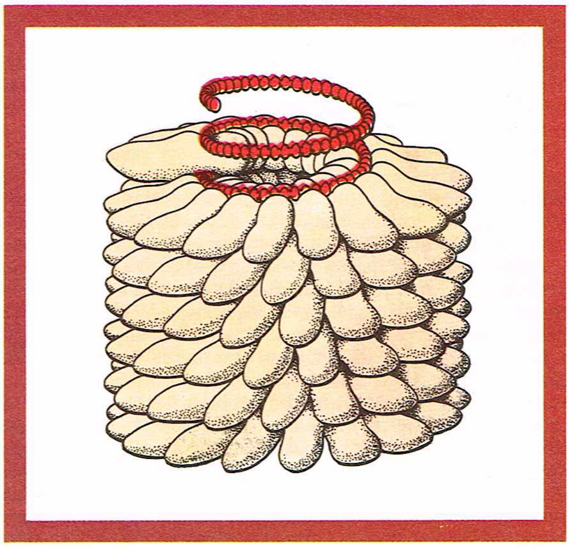

I.G.D.A.

Chez les *virus à symétrie hélicoïdale,* les unités structurales de la capside entourent l'acide nucléique central en se disposant selon un tore. La souplesse de ces nucléocapsides est très variable. Le virion, chez les virus végétaux comme le virus de la mosaïque du tabac, est assez rigide et présente l'aspect d'un bâtonnet, dont la longueur peut atteindre 300 nm. Les virus animaux à symétrie hélicoïdale sont plus flexibles et, dans de nombreux cas, sont entortillés sur eux-mêmes.

La détermination du nombre des unités structurales selon le tore de la capside est difficile : il n'est pas possible d'utiliser leur nombre comme critère de classification, contrairement aux virus à symétrie cubique; on préfère avoir recours à l'indication du diamètre transversal du cylindre torique. Les virus à symétrie hélicoïdale peuvent aussi posséder une membrane limitante ou être nus. (Voir tableau 2.)

Les bactériophages et certains virus des animaux ont des formes beaucoup plus complexes, qui n'entrent pas dans les groupes décrits jusqu'ici. Les bactériophages (virus des Bactéries) présentent une *symétrie binaire :* ils ont une tête à symétrie cubique, et une queue à symétrie hélicoïdale. Parmi les virus des animaux, les Poxvirus semblent, dans quelques cas, présenter une structure spiralée compliquée, alors que dans d'autres ils ressemblent à un petit peloton de laine; il n'est pas encore possible de se prononcer définitivement à ce sujet. Il existe aussi des types de virus sur lesquels on n'a pu encore recueillir aucun élément de description; c'est le cas des virus de la leucémie des souris.

TABLEAU 2 - FORME ET TAILLE DES CAPSOMÈRES DE CERTAINS VIRUS

Virus	Forme des capsomères	Diamètre des capsomères
Virus du papillome de Shope	Cylindre allongé	80 Å
Virus du papillome humain (verrues)	Cylindre allongé	30 Å
Virus Poliome et SV 40	Cylindre allongé	70 Å
Agent RV de Kilham (virus du Rat)	Polyèdres solides	20 Å
Virus de la fièvre aphteuse	Cylindres creux	80 Å
Réovirus	Prisme hexagonal creux	80 Å
Adénovirus	Cylindres creux	80 Å
Herpesvirus (virus de l'herpès)	Polyèdres hexagonaux creux	95 Å

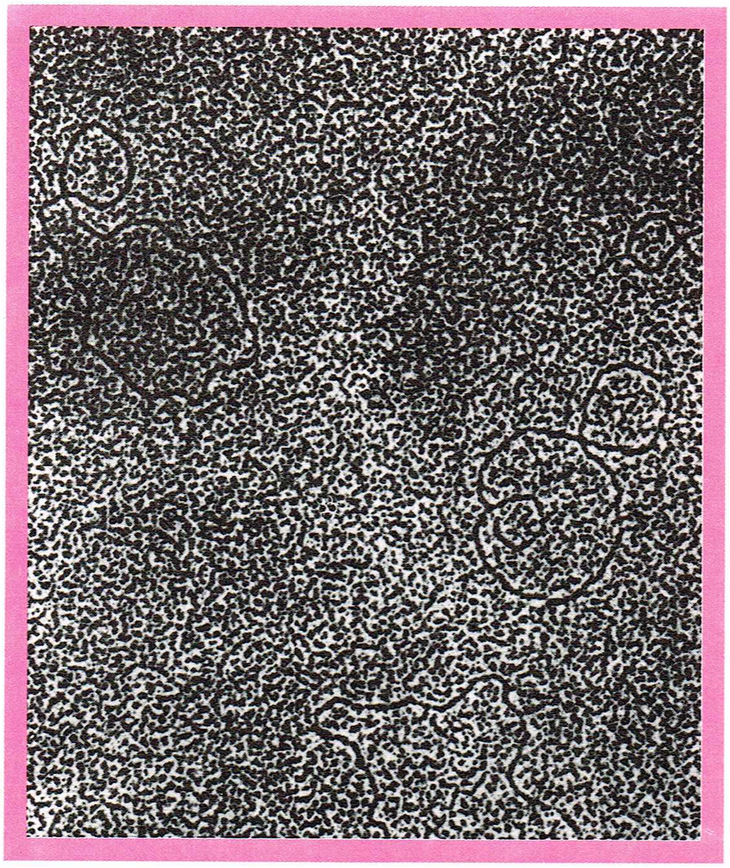

M. Pitzurra

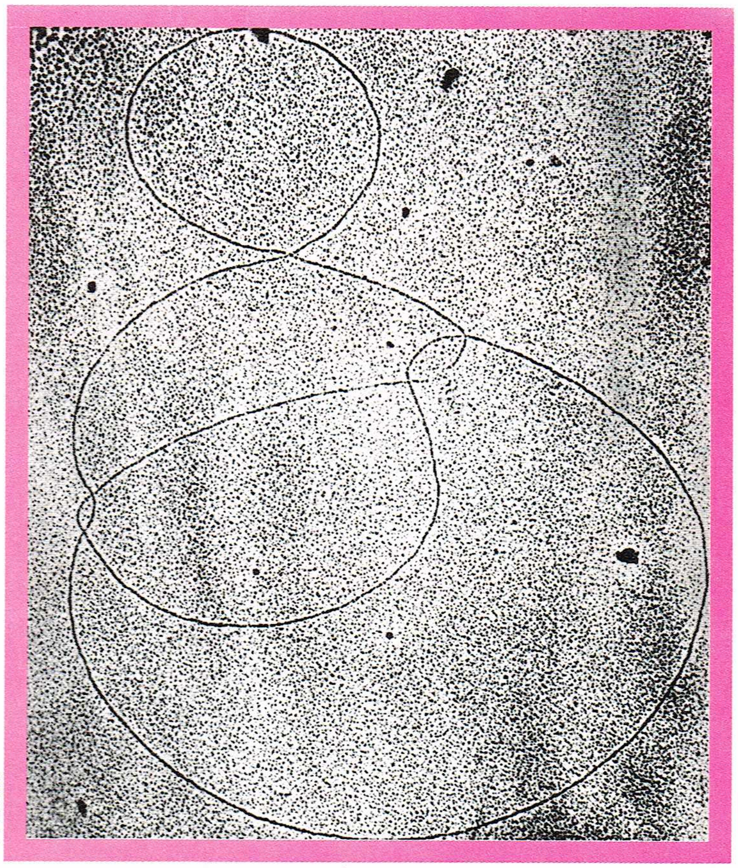

M. Pitzurra

▲ ***A gauche, photomicrographie électronique de molécules d'ADN*** du virus Poliome ***purifié ; toutes les molécules sont nettement circulaires, leur périmètre est de 1,6 µ et leur poids moléculaire de 3 × 10[6] daltons. A droite, photomicrographie électronique d'une molécule circulaire d'ADN*** du bactériophage lambda ; ***la ligne de référence (en haut, à droite) correspond à une longueur de 1 µ, la longueur de la circonférence est de 1,3 µ (d'après Watson).***

Composition chimique des virus

Les virus sont simples, non seulement par la forme, mais plus encore par leur constitution chimique, réduite à quelques grosses molécules indispensables pour la conservation de l'espèce au sens le plus simple du terme.

Le constituant chimique fondamental des virus est l'acide nucléique. Comme nous l'avons vu, contrairement à ce qui a lieu dans toutes les cellules, les virus possèdent une seule molécule d'acide nucléique, d'un type unique : soit de l'ADN, soit de l'ARN. La molécule d'acide nucléique, qui contient l'information génétique nécessaire pour la propagation de toute la particule virale, dotée d'un pouvoir pathogène, répète dans sa structure le schéma général établi par Watson et Crick. Toutefois, les deux types d'acides nucléiques existant chez les virus présentent quelques particularités. Dans la plupart des virus à ADN, l'acide nucléique est *bicaténaire* (en spirale double), alors que chez les virus à ARN, l'acide nucléique est *monocaténaire* (en spirale simple).

Il existe des exceptions à cette règle. Par exemple, certains bactériophages sont pourvus d'ARN monocaténaire, c'est le cas notamment pour Phi X 174, S 13, alors que les Réovirus animaux ont un ARN bicaténaire (tableau 3).

Tableau 3
Composition chimique de certains virus (en pourcentage)

Virus	ARN %	ADN %	Protéines %	Lipides %	Glucides %
Poliomyélite	26	–	74	–	–
Grippe	1	–	75	18	6
EMC (encéphalomyocardite des rongeurs)	30	–	70	–	–
Adénovirus	–	30	70	–	–
Variole, cow-pox, vaccine	–	6	89	4	–
Papillome de Shope	–	9	91	–	–
Bactériophage T_2	–	50	50	–	–
Mosaïque du tabac	5	–	95	–	–
Virus X de la pomme de terre	6	–	94	–	–
Virus de la nécrose du tabac	18	–	82	–	–

◀ ***Tableau 3 : composition chimique de quelques virus.***

Tableau 4 Détermination des acides nucléiques viraux par coloration par l'orangé d'acridine et par des enzymes spécifiques (désoxyribonucléases = ADNases et ribonucléases = ARNases)			
Préparation	Couleur observée avec l'orangé d'acridine à 0,1 % et au pH4	Sensibilité à l'ADNase	Sensibilité à l'ARNase
ADN de virus animaux en double spirale	jaune	+	−
ADN de bactériophages en double spirale	jaune	+	−
ADN de bactériophages en spirale simple	rouge	+	−
ARN viral en spirale simple	rouge	−	+

▲ ***Tableau 4 :** récapitulatif des techniques permettant de définir le type d'acide nucléique propre à chaque virus.*

Le tableau 4 signale certaines techniques qui, combinées les unes avec les autres, permettent de définir le type d'acide nucléique propre à chacun des virus.

Le plus important élément du point de vue pondéral est la fraction protidique de la capside. Nous avons déjà signalé l'hypothèse émise il y a quelques années que, tout au moins dans les virus de petite taille, la capside était composée d'un seul type de molécules protéiques, toutes égales, réunies selon une architecture régulière autour de l'acide nucléique. Cette supposition a été en grande partie confirmée. Cependant, en 1966, Maizel a démontré que, chez certains virus animaux, à symétrie cubique, la capside est certainement formée par plus d'une protéine (10 pour les Adénovirus, et au moins 4 pour les Poliovirus).

Les virus ne possèdent pas normalement de protéines douées d'activité enzymatique (les enzymes ne sont que des protéines dotées de capacités catalytiques pour des réactions spécifiques). De ce point de vue, les virus sont totalement soumis aux structures enzymatiques du noyau et du cytoplasme de la cellule qui les héberge.

Il existe toutefois des exceptions à cette règle générale. Par exemple, les virus parasites d'une entérobactérie (*Escherichia coli*, un des agents des colibacilloses et Bactérie normale du tube digestif) élaborent la lysozyme, protéine capable d'attaquer et de scinder l'épaisse paroi cellulaire de la cellule bactérienne hôte. Chez certains virus animaux, on connaît très bien des systèmes enzymatiques actifs vis-à-vis de certains substratums cellulaires spécifiques. En outre, le virus de la grippe sécrète une enzyme, la neuraminidase, qui catalyse la rupture de la liaison entre l'acide N-acétylneuraminique et les mucopeptides de la membrane cytoplasmique de certaines cellules et de certains globules rouges. On a découvert chez le virus de la variole d'autres enzymes (catalases, lipases, phosphatases). Il s'agit néanmoins de cas particuliers, qui ne modifient pas la conception générale de l'absence de structures enzymatiques essentielles chez les virions : il convient d'ajouter que, au moins dans certains cas, on n'exclut pas la possibilité que ces enzymes soient en réalité produites par la cellule dans laquelle le virus s'est développé, plutôt que par le virus lui-même.

Des lipides (matières grasses) ont été décrits uniquement chez les virus animaux possédant une membrane limitante péricapsidienne : ce sont des phospholipides, des glucolipides, des matières grasses neutres, des acides gras, et du cholestérol. Leur ensemble est comparable, par la complexité et la constitution, à la composition lipidique des membranes cellulaires, dont ces virus tirent leur manteau ; chez les virus qui en possèdent, ces matières grasses conditionnent la sensibilité à l'éther et au chloroforme, ces produits étant des solvants des matières grasses.

Enfin, on a observé chez un certain nombre de virus animaux une faible quantité d'hydrates de carbone ; en ce cas également, les données analytiques semblent indiquer une grande ressemblance avec les hydrates de carbone présents à la surface des cellules dans lesquelles le virus s'est développé.

Rapports entre le virus et la cellule hôte

D'une façon très schématique, on peut considérer les virus comme des amas de gènes (éléments des chromosomes ou groupes de séquences nucléotidiques de leur acide nucléique), renfermés dans une enveloppe protidique de protection ; ils sont totalement dépourvus des enzymes et des organites qui permettent à un micro-organisme ou à une cellule complète de se nourrir, de respirer, de faire la synthèse de nouvelles protéines et de se multiplier. Cependant, les virus se perpétuent, réussissant à reproduire rigoureusement à chaque nouvelle génération leur schéma d'organisation, codifié dans leur minuscule appareil nucléaire. Une particule du virus de la mosaïque du tabac aura une descendance de particules identiques, de la même façon que cela se produit pour toute espèce vivante.

Pour atteindre ce résultat, le virus n'a qu'un moyen à sa disposition : pénétrer dans une cellule et, tant qu'elle est vivante, exploiter les possibilités de son organisation interne (cytoplasmique et nucléaire), en dérivant à son profit l'activité de synthèse qui s'y déroule ; cela s'effectue de façons différentes selon les cas, mais toujours avec le même résultat final. C'est de la cellule envahie que naissent, pour ainsi dire, les nouvelles générations de virus, copies exactes par réplication du prototype envahisseur. C'est cette forme de parasitisme obligatoire qui représente le plus important caractère biologique des virus, et qui les différencie fondamentalement de tous les autres micro-organismes.

L'invasion de la cellule

Chaque être vivant, des Bactéries jusqu'à l'homme, est victime de virus parasites qui lui sont propres. Néanmoins, quelle que soit la complexité de l'organisme hôte, l'invasion se fait toujours au niveau cellulaire, avec des épisodes obligatoires se répétant selon un scénario général et de façon constante.

Les modes et les durées de ce parasitisme ainsi que les résultats auxquels celui-ci aboutit sont des plus variés. Cependant, le processus se déroule en passant par des phases qui se succèdent régulièrement.

Phase d'absorption. Le virus entre en contact avec la membrane cytoplasmique cellulaire et y adhère. Mis à part l'action de forces électrostatiques qui sont en cause dans tous les phénomènes d'adhésion, même dans le cas de composés inorganiques, il existe pour chaque type de virus, à la surface des membranes cytoplasmiques cellulaires, des récepteurs spécifiques, constitués par des groupements chimiques auxquels le virus se fixe de manière élective mais réversible.

Phase de pénétration. Celle-ci a lieu selon différents mécanismes. En certains cas, c'est seulement l'acide nucléique du virion adsorbé sur la membrane cytoplasmique qui pénètre à l'intérieur de la cellule, alors que la capside reste à l'extérieur, comme une coquille vide : c'est, en particulier, ce qui se passe chez les bactériophages. D'autres fois, la totalité du virion, par suite d'un processus actif de pinocytose (phagocytose) de la part de la cellule, traverse la membrane cytoplasmique.

Phase d'éclipse. Immédiatement après la pénétration le virus n'est plus visible dans la cellule infectée, ni par des méthodes biologiques, ni par des recherches au microscope électronique. C'est la *phase de latence*, pendant laquelle l'acide nucléique viral se libère de l'enveloppe protidique (si cela n'a pas déjà eu lieu lors de la phase de pénétration) et s'insère en tant qu'acide nucléique étranger dans le cycle de l'activité de synthèse de l'hôte, en modifiant profondément ce cycle. La phase d'éclipse dure généralement de quelques minutes à quelques heures. (Nous avons déjà souligné toute son importance dans la définition des virus vrais.)

Phase de maturation. Après la phase d'éclipse, on voit apparaître à l'intérieur de la cellule, et on peut y détecter au microscope électronique, des unités virales néoformées ; celles-ci apparaissent, selon différentes modalités, parfois dans le noyau, parfois dans le cytoplasme, parfois enfin dans l'un et l'autre (cela dépend des virus considérés). Il arrive également que les divers

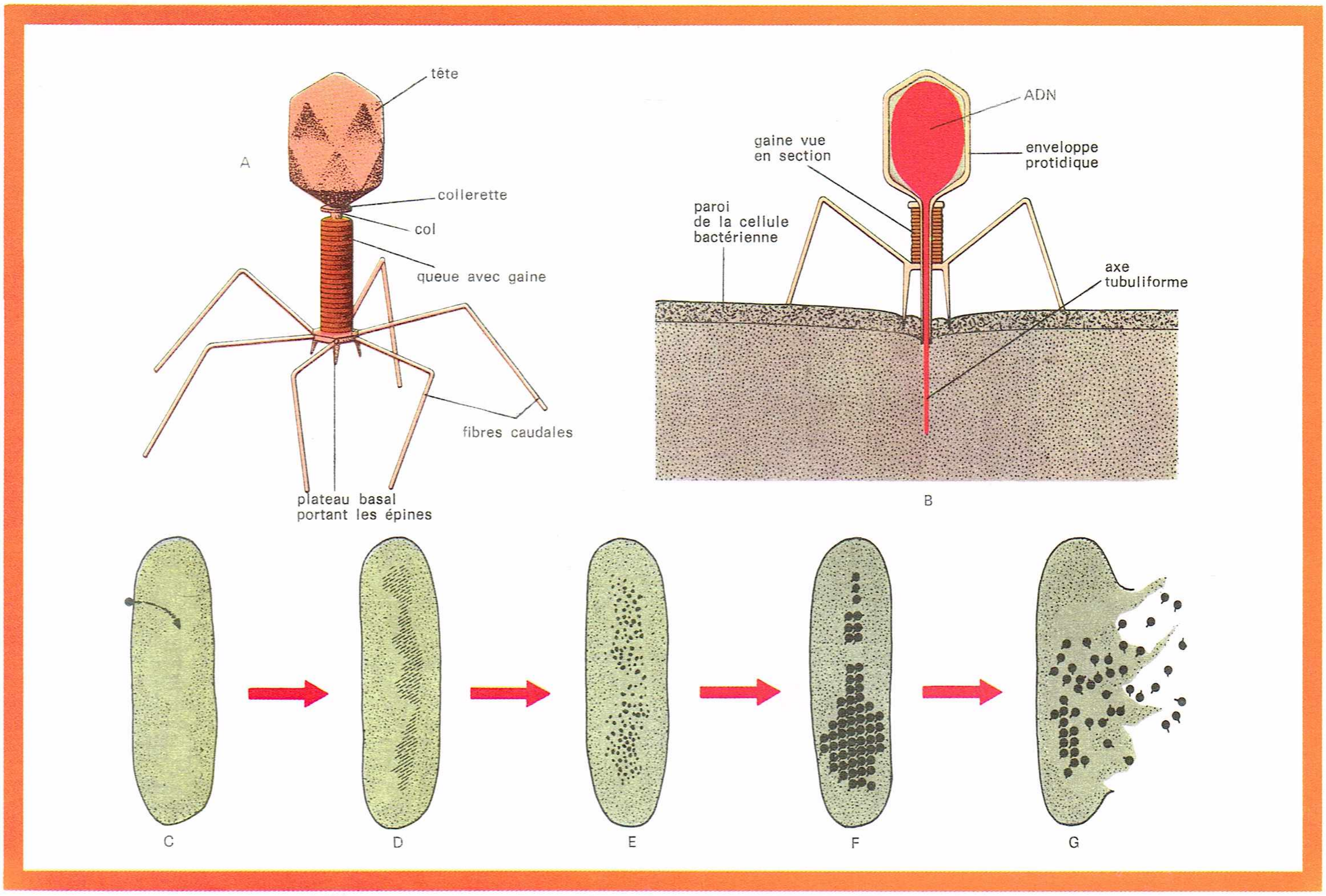

I.G.D.A.

▲ ***Un* bactériophage *est un ensemble d'éléments protidiques. La* tête *est un icosaèdre allongé, à 30 faces, rempli d'ADN (A); elle est reliée par un* col *à la* queue, *structure creuse et cylindrique, entourée par une* gaine *contractile et fixée à un* plateau basal, *à* 4 épines *et* 6 fibres caudales. *Les épines et les fibres servent à la fixation du bactériophage sur la paroi cellulaire de la Bactérie qu'il parasite. L'enveloppe se contracte, en inoculant l'acide nucléique (ADN) viral (B). L'infection commence alors (C); il y a d'abord duplication de l'ADN viral (D), puis synthèse des protéines structurales (E), leur réunion pour former le virus complet (F), et enfin la rupture de la Bactérie libérant les particules virales matures (G) [d'après Rapp et Melnick].***

constituants des virions (capside, nucléoïde) se forment en des points différents de la cellule, comme des pièces détachées d'une machine, pour être finalement réunis en virions mûrs, pathogènes, capables après libération de recommencer le cycle dans une autre cellule.

D'une façon générale, pour un virion ayant pénétré dans la cellule sensible, le nombre des virions néoformés, qui apparaissent tous à peu près simultanément, est de plusieurs centaines. Tous n'iront pas jusqu'à la maturation complète, et l'on peut considérer qu'une fraction seulement des virions néoformés sont capables de pouvoir pathogène pour d'autres cellules sensibles.

Phase de libération. Une fois achevée la maturation des virions, la cellule infectée libère les virions complets, généralement avec destruction de la cellule hôte qui, à la fin de la période de maturation, a été vidée de sa substance et ne renferme plus guère que des virions. Il arrive cependant que les virions mûrs, complets, ne soient pas libérés mais restent à l'intérieur de la cellule, y déterminant un état d'infection latent chronique qui, temporairement au moins, n'entraîne ni troubles ni destruction cellulaire.

Le plus souvent, le cycle de reproduction du virus s'accompagne de modifications plus ou moins profondes de l'activité physiologique et chimique ainsi que de la morphologie cytoplasmique et nucléaire de la cellule : leur déroulement et leurs effets sont souvent spécifiques de chaque type d'infection virale.

La synthèse protidique cellulaire

Le mécanisme par lequel sont réalisées les synthèses protidiques dans la cellule (qui est, au fond, le mécanisme par lequel une cellule croît, se multiplie et voit ses fonctions s'exercer) est bien connu grâce aux études effectuées pendant la dernière décennie. Nous ne pouvons ici que le rappeler brièvement, pour la bonne compréhension de la dynamique de l'infection virale.

Les acides nucléiques cellulaires (ADN et ARN) sont constitués par une chaîne d'éléments, qui, liés les uns aux autres selon un schéma précis, répété d'innombrables fois, forment d'énormes molécules, ayant les plus grands poids moléculaires connus. Les éléments constitutifs des acides nucléiques sont :

— le ribose (dans l'ARN), monosaccharide à 5 atomes de carbone;

— le désoxyribose (dans l'ADN), monosaccharide à 5 atomes de carbone, différant du précédent parce qu'il possède un groupe OH en moins;

— trois bases pyrimidiques, la cytosine (C) dans l'ADN et l'ARN, la thymine (T) dans l'ADN, et l'uracile (U) dans l'ARN;

— deux bases puriques, l'adénine (A) et la guanine (G), aussi bien dans l'ADN que dans l'ARN;

— l'acide orthophosphorique.

Certains ADN, même chez les virus, contiennent des bases puriques et pyrimidiques méthylées (avec un groupe CH_3).

Les éléments constitutifs des deux acides nucléiques sont liés selon un alignement vertical constitué par les nucléotides, chaque nucléotide étant composé par une molécule d'acide phosphorique, une molécule de monosaccharide (ribose ou désoxyribose, respectivement dans l'ARN et dans l'ADN), et une base (purique ou pyrimidique). Le monosaccharide de chaque nucléotide est lié par le groupe phosphorique au monosaccharide du nucléotide adjacent, selon une structure rigide et uniforme. Les bases, au contraire, à raison d'une pour chaque nucléotide, sont distribuées de façon variable le long de ce squelette. Cette suite variable de bases dans les acides nucléiques constitue, chez toutes les espèces vivantes (aussi bien les micro-organismes que les êtres les plus évolués), le code génétique renfermant l'information selon laquelle les protéines spécifiques de chaque cellule doivent être formées. On peut faire à ce sujet une comparaison avec l'alphabet morse : avec le trait et le point, soit deux symboles seulement, on peut composer toute phrase. Dans le code génétique, les symboles sont

au nombre de cinq (quatre pour chaque type d'acide nucléique) : adénine, guanine, cytosine, thymine et uracile.

Les protéines sont composées par des suites d'acides aminés, soit 21 au total. Dans les acides nucléiques, chacun des acides aminés est enregistré, en code, par les bases de 3 nucléotides adjacents, selon une formule à peu près complètement déchiffrée. Les trois bases nécessaires pour définir un acide aminé sont appelées un *codon*. Le codon pour la lysine, un acide aminé, est : AAG (c'est-à-dire une suite de 3 mononucléotides dont les bases sont dans l'ordre : adénine-adénine-guanine). Pour la leucine, le codon est un autre acide aminé : UUA (soit 3 mononucléotides d'ARN, dont les bases sont, dans l'ordre : uracile-uracile-adénine). Les acides aminés étant au nombre de 21, alors qu'il y a 64 codons possibles, il en résulte que chaque acide aminé peut être indiqué par plusieurs codons. Certains codons ne servent pas à indiquer des acides aminés mais remplissent d'autres fonctions (débuts et interruptions de synthèses).

Dans l'ADN, les nucléotides ne sont pas disposés en une seule rangée, mais en deux séries parallèles, opposées, réunies l'une à l'autre en spirale, par de faibles ponts hydrogène entre les bases. Pour des raisons chimiques (affinités) et spatiales (longueur de la chaîne), à chaque base purique de l'une des deux moitiés doit correspondre, de l'autre côté, une base pyrimidique. Il en découle que, à chaque fois qu'en un point de l'une des deux moitiés se trouve une molécule de thymine, une molécule d'adénine doit correspondre dans l'autre moitié; à l'inverse, à une molécule de guanine doit correspondre une molécule de cytosine. Dans l'ARN, à une molécule d'adénine correspond une molécule d'uracile, et réciproquement. Ces règles de correspondance ne supportent aucune exception, sous peine de graves perturbations de l'organisation de la cellule.

La suite des bases de l'ADN nucléaire contient en code les informations relatives à toutes les synthèses protidiques propres à l'espèce; les nucléotides conservent rigoureusement cette structure et la transmettent aux générations successives. Pour que cela ait lieu, il faut que chaque molécule d'ADN, pendant l'activité de multiplication, produise d'autres molécules d'ADN parfaitement identiques; il est donc nécessaire que, pendant la phase de vie végétative (en l'absence d'activité de reproduction), l'information génétique de l'ADN nucléaire se traduise continuellement par des synthèses protidiques spécifiques; c'est à celles-ci qu'est due la caractérisation de chaque cellule. Ces phénomènes se déroulent grâce au processus de répétition semi-conservative de l'ADN nucléaire (lors de la phase de multiplication) et au processus de transcription du message génétique au niveau des opérateurs cytoplasmiques, avec l'intervention de l'ARN (lors de la phase végétative).

Grâce au mécanisme de répétition, dans le noyau, la molécule d'ADN s'autoréplique en engendrant de nouvelles molécules selon la même séquence de codon. La double hélice d'ADN commence par se dérouler et s'ouvrir; puis, dans chacune des deux moitiés, tous les éléments constitutifs sont reconstitués, du fait de l'intervention de nombreuses enzymes spécifiques (les désoxyribonucléopolymérases, ou ADN polymérases), selon le schéma indiqué. A la fin du processus, une molécule d'ADN en a donné deux autres, identiques, avec une moitié préexistante, et une autre moitié de néoformation (autoréplication conservative). Les nouvelles molécules d'ADN seront ensuite réparties également entre les deux cellules filles, dont chacune conservera de façon précise les séquences nucléotidiques qui caractérisent son génome.

Pendant la phase de vie végétative, en l'absence de processus multiplicatifs en cours, l'ADN nucléaire sert aux processus de transcription, c'est-à-dire au processus d'envoi du message contenu dans son code génétique aux opérateurs cytoplasmiques. Les réactions sont réalisées dans une seule direction (du noyau au cytoplasme), selon une chaîne complexe qui se présente comme suit. Dans les séquences nucléotidiques d'une demi-hélice d'ADN (on ne sait pas encore exactement laquelle), de très petites molécules d'ARN se forment au niveau nucléaire, grâce à la fusion des composants dont nous avons parlé (acide phosphorique, ribose, thymine, uracile, adénine, guanine); à chaque base de l'ADN doit correspondre une base de l'ARN. Là aussi, la synthèse est possible grâce à l'intervention de nombreuses enzymes spécifiques (les ribonucléopolymérases, ou ARN polymérases). L'ARN se forme comme l'image spéculaire de l'ADN, en ce qui concerne les caractères correspondant au message, qui, à tout moment, doit être transmis au cytoplasme. La double hélice d'ADN se déroule et libère les bases nécessaires en des points du génome successivement concernés.

Dans l'une des deux moitiés de la double hélice d'ADN déroulée, l'ARN est constitué de façon complémentaire : à chaque molécule d'adénine correspond une molécule d'uracile, et à chaque molécule de guanine correspond une molécule de cytosine. Il en résulte une molécule d'ARN, de caractères exactement complémentaires à la séquence des bases de la portion d'ADN, dont le message doit être envoyé aux opérateurs cytoplasmiques.

L'ARN de néoformation est appelé messager (ARN*m*, ou ARN messager) : il abandonne le noyau lorsque la synthèse est réalisée et est transféré dans le cytoplasme au niveau des ribosomes, organites sphériques chargés de concrétiser le messager par une synthèse protidique. Parcourant tout l'ARN*m* d'une extrémité à l'autre, comme sur un monorail, ils en lisent la succession des bases à raison de trois à la fois, et, les interprétant (grâce à un autre type d'ARN, l'ARN de transfert, ou ARN*t*), ils prennent l'acide aminé correspondant. Au fur et à mesure qu'un ribosome avance le long de l'ARN*m*, la chaîne des acides aminés en formation s'allonge; elle est complète quand le dernier codon a été lu. Alors, la chaîne d'acides aminés, qui a désormais les dimensions d'une protéine complète, se libère; le ribosome est prêt à recommencer son travail, et la molécule d'ARN*m* se résout en ses composants. Une molécule protidique est née, portant en elle le message, lequel, partant du noyau, devait être réalisé à ce moment, de la façon voulue.

C'est dans ce processus complexe et bien ordonné ayant lieu dans la cellule que s'insère le virus avec son acide nucléique, imprimant un nouveau cours aux synthèses protidiques. Une fois connue la dynamique dont dépend la reproduction et la transcription des acides nucléiques nucléaires, il n'est pas difficile de comprendre la façon dont le virus est capable d'exercer son action de perturbation au niveau moléculaire, rendant pratiquement réalisable son propre code génétique aux dépens des structures nucléaires et cytoplasmatiques de la cellule envahie.

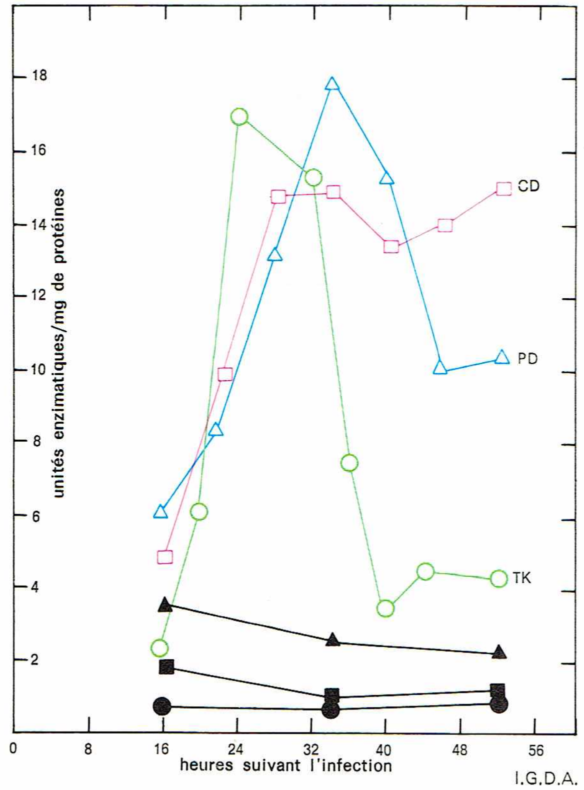

▶ ***Graphique du développement dans le temps de l'activité enzymatique dans des cultures cellulaires de reins de rat infectés par le* virus Poliome *(symboles en couleur) ou non infectés (symboles noirs); CD, désoxycytidyl désaminase; PD, ADN-polymérases ou désoxyribonucléo-polymérases; TK, thymidine-kinase (d'après Hartwell, M. Voght, Dulbecco).***

Reproduction des acides nucléiques viraux

L'étude de l'action des virus a apporté la confirmation la plus nette que la fonction génétique est liée aux acides nucléiques : en effet, inoculés dans des cellules réceptives, les acides nucléiques que l'on isole des virus provoquent la synthèse de protéines identiques à celles du virion dont elles proviennent. Puisque, comme nous l'avons vu, les virus possèdent un seul type d'acide nucléique, de l'ADN ou de l'ARN en simple ou en double hélice, la modalité d'interférence des processus de synthèse cellulaire sera différente en fonction de cette condition.

Les virus pourvus d'ADN bicaténaire, c'est-à-dire en double hélice, comme le virus de la variole humaine et celui du cow-pox, le virus du Poliome (oncogène), les bactériophages T_2, T_4, et T_6 d'*Escherichia coli,* et bien d'autres qui ont été étudiés en détail, commencent immédiatement après la pénétration dans la cellule hôte le processus d'autoréplication de leur ADN, selon des mécanismes assez proches de ceux que nous avons décrits pour les cellules entières. L'ADN viral se déroule, et, dans ses deux moitiés, selon un processus semi-conservatif qui utilise les désoxyribonucléopolymérases (ADN polymérases) de l'hôte lui-même sans que la formation de nouvelles enzymes soit nécessaire, la synthèse des nouvelles molécules d'ADN du virus spécifique commence. En certains cas, par exemple au cours d'infections par le virus Poliome, la production d'ADN et des enzymes nécessaires à sa formation augmente considérablement au cours des premières heures qui suivent l'infection : les caractères chimiques des enzymes produites lors de cette phase de l'infection ne diffèrent pas de ceux qui sont propres aux enzymes isolées à partir de ces cellules dans des conditions normales.

C'est seulement quand il existe dans l'ADN viral des bases méthylées, absentes chez l'hôte, qu'est nécessaire la synthèse d'enzymes virus-spécifiques. C'est le cas du bactériophage T_2, chez lequel l'ADN possède de l'hydroxométhyl-5-cytosine à la place de la cytosine. L'ADN viral doit porter aussi en lui-même l'information pour la synthèse de cet élément constitutif particulier.

Chez les virus à ADN en hélice monocaténaire, le processus ne semble guère différent de celui observé pour l'ADN bicaténaire. C'est le cas du bactériophage Phi X 174 (fin et long d'environ 8 000 Å) et des bactériophages F_1, Fd (minuscules, ne mesurant pas plus de 80 Å), tous parasites d'*Escherichia coli.* L'acide nucléique n'a pas besoin de se dérouler, et l'ADN viral lui-même sert de modèle pour s'autoreproduire et former une molécule traditionnelle, en double hélice, immédiatement après la pénétration.

Le filament d'ADN originel est considéré comme positif (+) : lié à l'hélice complémentaire négative (—), il donne la forme de répétition, qui continue ensuite à vivre sans avoir besoin d'enzymes virus-spécifiques. On comprend toutefois que, lorsque le cycle de reproduction est achevé, il faudra une enzyme en plus, de néoformation et spécifique, pour libérer les deux demi-hélices d'ADN et faire en sorte que seule la moitié positive (+) participe à la formation du virion mature.

Dans tous les cas, les ADN viraux, après l'autoreproduction, serviront de modèles aux molécules d'ARN*m* virus-spécifiques, pouvant reconnaître seulement l'acide nucléique viral. Leur message sera traduit en utilisant encore une fois des structures cellulaires, sans qu'il soit besoin d'autres informations particulières : ce seront les molécules d'ARN*t* et les ribosomes de la cellule elle-même qui seront mobilisés par l'ARN*m* viral, en vue de la synthèse protidique virus-spécifique.

On n'a, jusqu'à présent, pas observé d'autoreproduction d'ARN dans la cellule normale. Quelque fonction que cet acide nucléique doive assumer (ARN*m*, ARN*t* ou ARN ribosomique), il se forme toujours selon le modèle de l'ADN nucléaire. Mais il semble que le point de départ de ce dernier soit la présence d'une courte chaîne d'ARN qui sert d'amorceur. L'ARN viral, chez les virus qui en sont pourvus, présente une importante différence : pour permettre la formation de nouvelles particules virales, il doit non seulement servir d'ARN*m,* mais aussi de modèle pour la formation d'autres molécules d'ARN identiques ; c'est-à-dire qu'il doit réaliser une duplication semi-conservative. Pour atteindre ce résultat, il faut que soit créé un système d'enzymes, normalement absentes de la

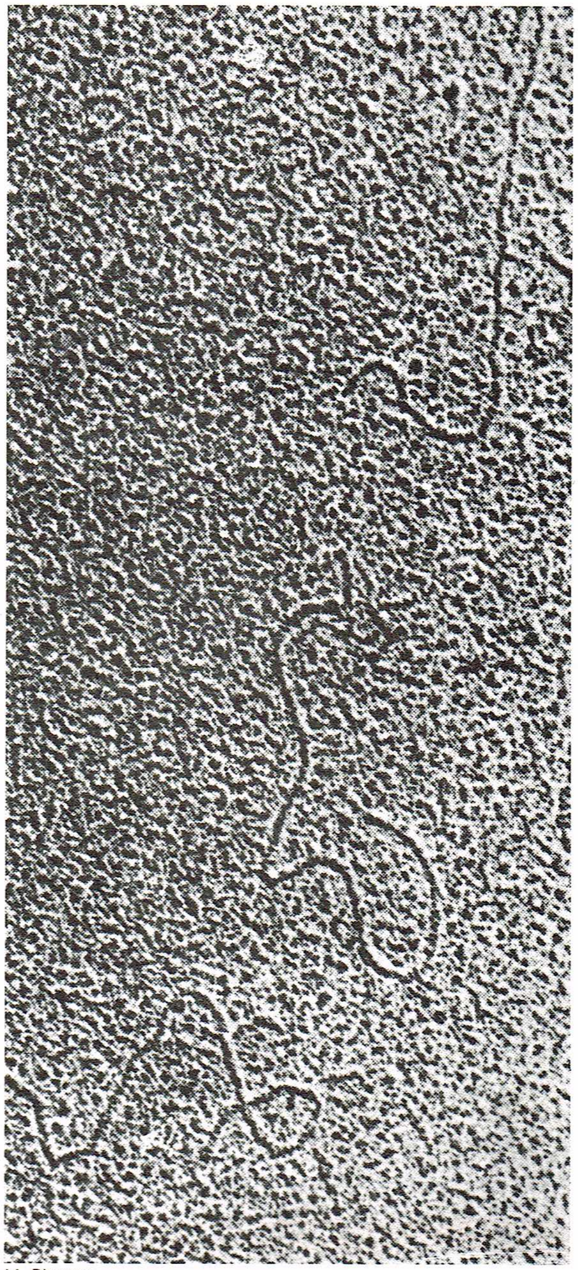

M. Pitzurra

◀ ***Photomicrographie électronique de trois formes de duplication en double hélice du virus M_{12} à ARN en filament monocaténaire. Chaque molécule est longue d'1 µ (d'après Watson).***

cellule, les ribonucléopolymérases ou ARN polymérases virus-spécifiques, indépendantes de l'ADN. Ces enzymes, dont la formation est stimulée immédiatement après la phase de pénétration, catalysent la création de filaments d'ARN complémentaires, selon le modèle fourni par le virus. L'accouplement des bases complémentaires (adénine-uracile, guanine-cytosine) sert, comme toujours, à obtenir la réplique précise des séquences nucléotidiques propres au virion pathogène. Immédiatement après s'être formées, les hélices complémentaires d'ARN viral sont également partiellement utilisées comme modèles pour d'autres molécules identiques, dont certaines feront partie des virions matures, alors que les autres serviront d'ARN*m* pour la création des protéines virus-spécifiques.

Le processus est différent selon que le virion contient de l'ARN en spirale simple ou en spirale double : cependant, dans les deux cas, un seul des deux filaments résultant des processus d'autoreproduction servira d'ARN*m,* dans lequel les ribosomes cellulaires synthétiseront les protéines indispensables au virus.

Chez les virus à ARN en filament simple, la partie servant de modèle est la même que celle que l'on retrouve dans le virion mature et est considérée comme positive (+).

Récemment, on a démontré, pour des virus oncogènes ou à ARN, qu'il y avait une synthèse virus induite d'une désoxyribonucléopolymérase, ou ADN polymérase ; c'est là une importante exception à la théorie de Crick. Dans

ce cas particulier, une information est transmise de l'ARN viral, dans le sens rétrograde, à l'ADN cellulaire, d'où naît la formation néoplasique de la cellule.

En conclusion, aussi bien pour les virus à ADN que pour les virus à ARN, les processus de reproduction et de transcription ont lieu avec une large utilisation des systèmes enzymatiques de l'hôte : toutefois, dans les deux cas, il faut absolument qu'ait lieu la formation *ex novo,* selon une information contenue dans le génome viral, d'ARN messager (ARN*m*) chargé de transmettre au système cellulaire polyribosomique le code des acides nucléiques viraux.

Synthèse des protéines virales

Immédiatement après la phase de pénétration, dès la phase d'éclipse, le virus doit commencer à effectuer, en même temps que les processus d'autoreproduction de ses propres acides nucléiques, son activité de synthèse protidique, en substituant les informations contenues dans son code génétique à celles qui sont contenues dans les chromosomes de la cellule hôte. Plus exactement, il doit réaliser la synthèse de quatre groupes de macromolécules protéiques.

● *Les protéines* dites *précoces* apparaissent avant la maturation du virus. Ce sont des protéines codifiées par l'acide nucléique du virus pathogène; elles ont probablement pour principale fonction de bloquer complètement les activités normales des synthèses macromoléculaires propres à la cellule envahie.

● *Les enzymes virus-spécifiques*, des groupes désoxyribonucléopolymérases (ADN polymérases) et ribonucléopolymérases (ARN polymérases) ont pour charge de réaliser respectivement les synthèses de l'ADN et de l'ARN sur le modèle de l'acide nucléique viral pathogène (processus de répétition).

● *Les protéines tardives* sont toutes codifiées par l'acide nucléique viral de néoformation. Elles correspondent aux protéines structurales de la capside virale et, en outre, à une série d'enzymes pouvant interrompre la synthèse des protéines précoces, qui ne sont désormais plus nécessaires. Les protéines tardives réalisent aussi l'union des composants du virion mature (acide nucléique + capside + membrane limitante quand il y en a une). Dans ce dernier groupe de protéines, par exemple, entre la synthèse de molécules de lysozyme, molécules qui permettent aux bactériophages de se libérer de l'intérieur de la cellule bactérienne parasitée.

● *Les protéines qui accompagnent l'infection virale* sont normalement absentes de la cellule normale; elles sont plus ou moins liées au virion, dont elles ne font certainement pas partie intégrante, et remplissent une fonction mal définie. Par exemple, dans les noyaux des cellules infectées par des Adénovirus apparaissent des cristaux protidiques prismatiques dont on ignore la signification, et qui sont distincts des agrégats cristallins des particules virales.

Il s'agit, dans l'ensemble, de quatre groupes de macromolécules, qui présentent souvent une activité enzymatique, indispensables au virus pour désorganiser la « chaîne de montage » des acides aminés de l'hôte et pour en utiliser les propriétés à son propre avantage. A chacune des protéines contenues dans les quatre groupes correspond, dans l'acide nucléique viral, un nombre restreint mais suffisant de gènes; variable selon les virus, ce nombre est toujours contenu dans des limites bien plus modestes que celles du nombre des gènes distribués le long des chromosomes d'une cellule. Ce nombre va de 5 ou 6 gènes pour le virus du Poliome à des maximums de 500 à 1 000 gènes pour les plus gros virus.

Une conséquence obligatoire de la limitation numérique des gènes dans l'acide nucléique des virus est l'utilisation d'un nombre limité de molécules protidiques identiques pour la construction des structures capsidiennes. Seul un nombre restreint d'acides aminés peuvent être codifiés dans le petit génome viral : d'où la nécessité d'une rigoureuse économie des espaces et des structures.

Le blocage de l'activité normale de la cellule, la reproduction des acides nucléiques viraux, la synthèse de protéines virus-spécifiques, la maturation et enfin la libération des virions de néoformation provoquent à l'intérieur de la cellule une série de lésions. Celles-ci se traduisent souvent par des aspects morphologiques caractéristiques, visibles au microscope (même sous faible grossissement) sur des préparations fraîches, ou fixées et colorées selon les techniques histologiques traditionnelles.

Les corps d'inclusion

En examinant au microscope, sur des préparations histologiques, des cellules envahies par certains virus, on observe dans le noyau et dans le cytoplasme des formations anormales de deux types : les *corpuscules élémentaires* et les *corps d'inclusion*.

Les corpuscules élémentaires sont de petites formations de 0,2 μ à 0,5 μ de diamètre, bien évidentes dans le cytoplasme des cellules épithéliales en cours d'infection par les gros virus de la variole ou de l'herpès. Colorés par la méthode de Paschen, ils apparaissent de couleur rouge pourpré. On les voit lors de la formation des virions de grosse taille, comme ceux des pox-virus.

Les corps d'inclusion atteignent une taille bien supérieure : le plus souvent arrondies, d'un diamètre atteignant 30 μ, ces formations présentent des affinités pour les

▼ *A gauche,* cornée de lapin : *cellule épithéliale à cytoplasme rempli de corpuscules élémentaires de* vaccine *(d'après Winkle). A droite, préparation histologique de* corne d'Ammon *d'un chien mort de la rage; 1, corpuscule de Negri dans une cellule ganglionnaire; 2, corpuscule de Negri libre; 3, résidus de corpuscules de Negri; 4, artère sectionnée (d'après Winkle).*

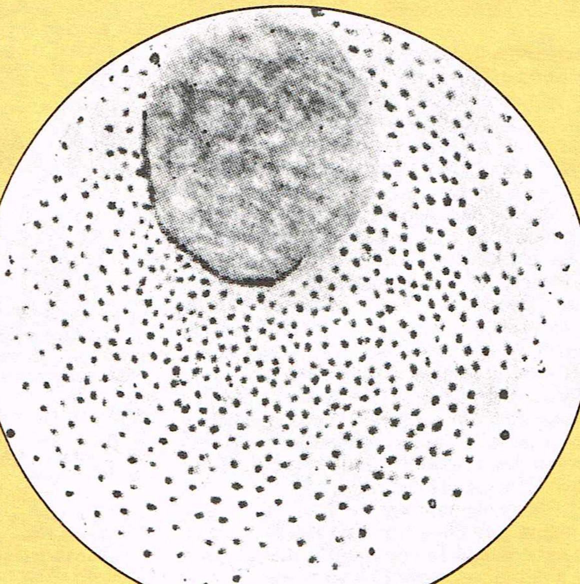

M. Pitzurra

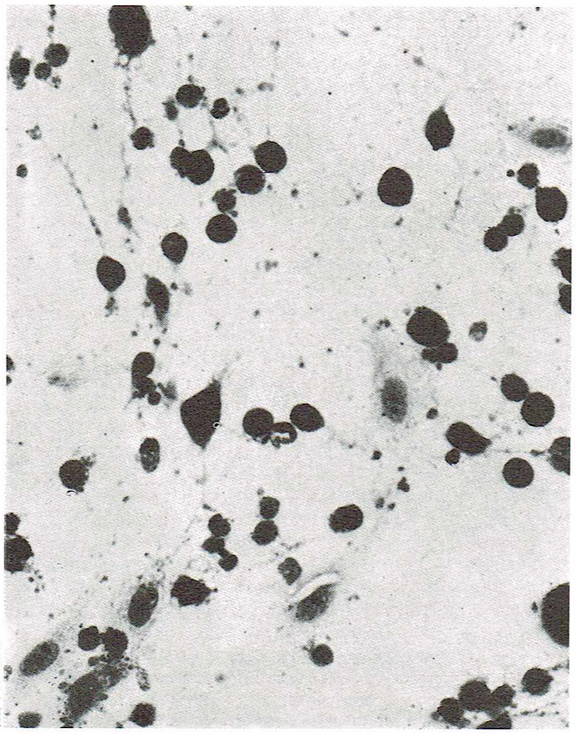
M. Pitzurra

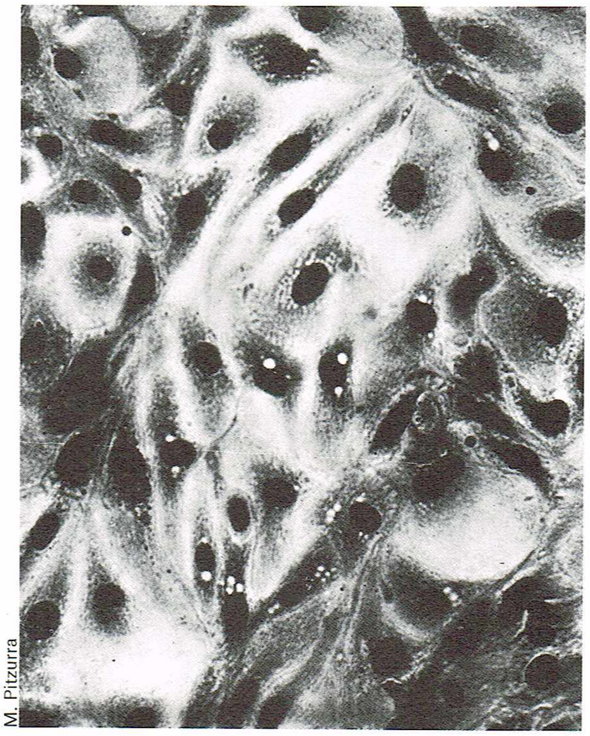
M. Pitzurra

◀ *A gauche, culture primaire de rein de singe, inoculée depuis 3 jours avec du virus Polio ; les cellules présentent l'effet cytopathique caractéristique des Entérovirus. A droite, culture* in vitro, *primaire, de cellules épithéliales de rein de singe, après 10 jours d'incubation (coloration à l'hémalun-éosine ; × 150) [d'après Lépine].*

colorants acides, comme la fuchsine et l'éosine. En utilisant pour la préparation des fixatifs légèrement alcalins (comme l'acide osmique), ils sont colorés très faiblement ; par contre, avec des fixatifs acides comme le liquide de Carnoy, les corps inclus se rétractent, se colorent très intensément et il apparaît autour d'eux un halo clair typique. Ils peuvent se trouver, selon les virus qui les causent, dans le cytoplasme ou dans le noyau de la cellule.

Des savants italiens ont apporté une contribution fondamentale, et toujours valable, à l'étude des corps d'inclusion intracytoplasmiques. En 1869, Rivolta observa ce type d'inclusions dans des cellules de poulets atteints du virus de l'exanthème (épithéliome contagieux) des Oiseaux ; en 1892, Guarnieri décrivit les inclusions cytoplasmiques typiques à la suite de l'infection par le virus du cow-pox et le virus de la variole humaine ; en 1903, Negri découvrit ces inclusions dans le cytoplasme des cellules du système nerveux central de chiens atteints du virus de la rage. Aujourd'hui encore, les corpuscules de Guarnieri et les corpuscules de Negri sont deux des signes pathognomoniques que l'on observe dans les cellules infectées lors du diagnostic histologique de la variole et de la rage. Borrel, en France, a longuement étudié ces inclusions au début du siècle.

D'autres virus provoquent l'apparition de corps d'inclusion dans le noyau : il s'agit notamment des virus herpétiques dans les épithéliums, du virus de la pseudo-rage, ou maladie d'Aujeszky, dans le système nerveux central, et du virus de la fièvre jaune dans le foie. L'interprétation exacte de ces formations n'a pas encore été donnée ; elle est particulièrement difficile du fait que leur comportement varie selon le virus en cause. En certains cas, elles sont directement en rapport avec le développement du virus : par exemple, dans les infections par le virus du *molluscum contagiosum,* ou acné varioliforme (chez l'homme), les corps d'Henderson-Patterson, intracytoplasmiques, sont constitués par des masses de particules virales complexes. Dans les infections par le virus de l'herpès, au contraire, la multiplication des particules virales dans le noyau est réalisée avant l'apparition des inclusions éosinophiles typiques, qui sont donc de véritables résidus de la maturation du virus, Les virus des Insectes du groupe des polyédroses et des granuloses ont un aspect particulier : ils sont totalement entourés par des inclusions protidiques, parfois de grandes dimensions, et de structure caractéristique ; on n'en connaît pas avec certitude la signification : il s'agit vraisemblablement d'une réaction à la cellule pour endiguer la multiplication des virions.

Action cytopathique

On appelle action cytopathique l'apparition d'un état pathologique cellulaire faisant suite à la multiplication d'un virus. Cette action se manifeste de différentes façons, plus ou moins rapidement et plus ou moins gravement, et aboutit à la mort de la cellule. Pour certains virus, elle a un aspect très caractéristique, qui en permet la reconnaissance et l'identification.

L'action cytopathique par des virus Polio est un exemple typique de lyse cellulaire complète à marche rapide. Deux heures après le début de la contagion, apparaît, dans la cellule sensible examinée *in vitro* en couche monocellulaire, une contraction initiale du noyau (pycnose), suivie par la fragmentation de celui-ci (caryorexie ou caryorrhexie) : toute la cellule se contracte en devenant sphérique. Au bout de 12 heures, on observe la rupture de la membrane cytoplasmique, la dissolution (lyse) complète de la cellule, et la libération des particules virales de néoformation. Ces phénomènes sont particulièrement évidents dans le cas de cellules sensibles en culture ayant été infectées *in vitro*.

L'action cytopathique n'aboutit pas toujours à une lyse cellulaire aussi complète et immédiate. Certains virus *(syncytiogènes)* provoquent la disparition des membranes cytoplasmiques de cellules adjacentes, en déterminant la formation de syncytiums (ensembles de nombreux noyaux dans une masse unique de cytoplasme).

Dans d'autres cas, il se forme, dans le cytoplasme, de nombreuses vacuoles, d'aspect écumant (virus *spumogènes*, ou vacuolants, des singes). Les virus *cytomégaliques* provoquent la production de grosses masses cytoplasmiques et nucléaires. De toute façon, la cellule finit par succomber. Les virus *tumorigènes* exercent leur action en stimulant une multiplication illimitée de la cellule. Rappelons, à ce sujet, un caractère tout à fait particulier de l'activité des virus sur des cellules spéciales, les globules rouges du sang. Certains virus animaux, au contact des hématies, en provoquent l'agglutination, c'est-à-dire qu'ils font coller les hématies les unes aux autres (virus hémagglutinants). Cela semble dû à des substances protidiques particulières de la capside virale (hémagglutinines). La présence de ces composés permet donc de reconnaître et d'étudier facilement certains virus.

Cependant, il n'est pas obligatoire que la cellule soit lésée ni qu'elle meure. Dans de très nombreux cas, l'infection par des virus passe morphologiquement inaperçue, et la cellule hôte ne manifeste d'aucune façon que ce soit la présence du parasite : c'est ce qu'on appelle l'*infection latente.* Parfois, le virus peut être mis en évidence,

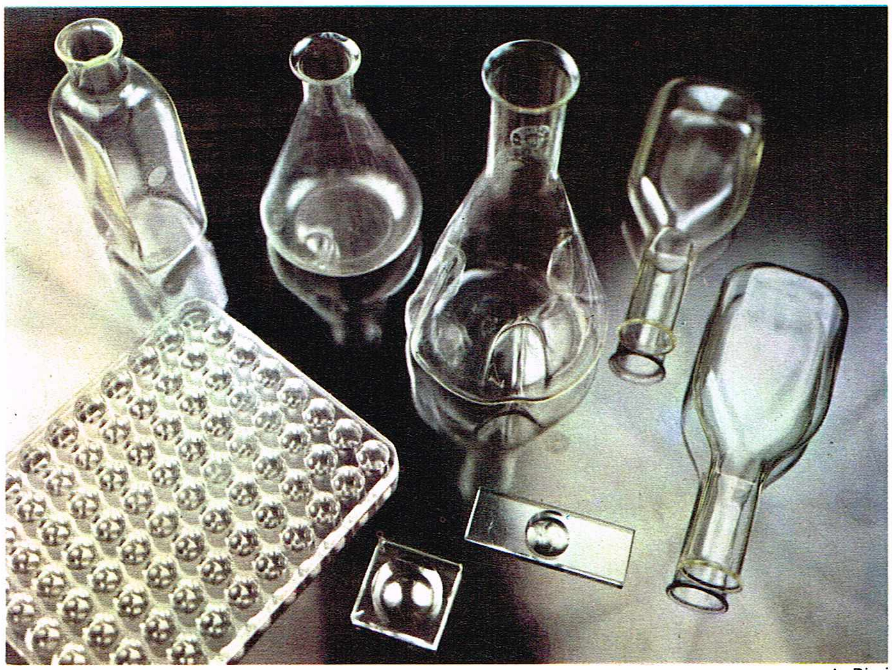

A. Rizzi

▲ ***Divers récipients et supports en verre utilisés pour les cultures de tissus : vitrines en goutte pendante, flacons en T, bouteilles d'Erlenmayer, etc.***

alors que d'autres fois, il n'est plus reconnaissable (virus occulto-provirus). La fusion entre le virus et la cellule peut avoir lieu lors de l'insertion du génome viral dans le génome cellulaire, avec apparition de véritables mutations chez l'hôte. Ces phénomènes sont fréquents pour les bactériophages et les virus oncogènes à ADN. L'infection virale latente est très répandue ; chez les Insectes, elle frappe des populations entières d'une même espèce.

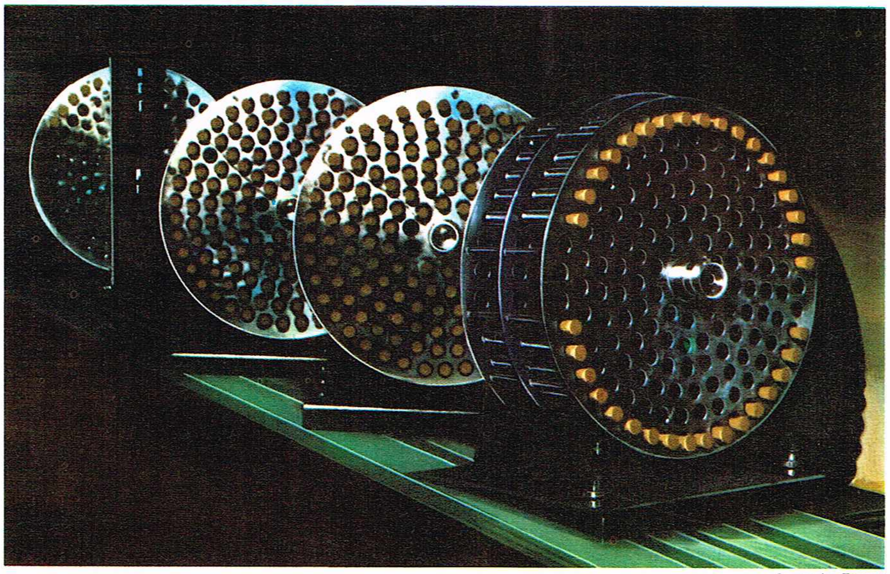

C. et A. Russo

▲▶ ***Ci-dessus,** appareil **à tubes tournants :** le liquide contenant des cellules en suspension est introduit dans les tubes de culture ; ceux-ci étant enfilés dans les tambours, la rotation assure les échanges nutritifs et gazeux des cellules. Un seul rein de singe peut fournir plusieurs milliers de tubes de culture (d'après Lépine). Ci-contre une des phases de préparation de culture de tissu : ici, **trypsination** d'un fragment d'organe prélevé.*

La culture des virus

L'une des conditions essentielles pour l'étude des micro-organismes est l'obtention de cultures pures d'où soit exclue la présence de tout microbe excepté celui que l'on étudie.

En virologie, on arrive à ce résultat en utilisant obligatoirement des organismes, des tissus ou encore des cellules vivants. Or, il s'agit là de substratums qu'il est difficile de contrôler totalement ; en outre, il faut que le système cellulaire choisi permette le développement du virus : il existe en effet une spécificité d'interaction entre les virus et les cellules, pour laquelle chaque particule virale se développe uniquement ou de préférence dans des cellules d'une espèce déterminée ou d'un tissu donné.

On a réussi à obtenir des cultures pures, dont le binôme virus-cellule est bien contrôlé, avec des résultats rigoureusement reproductibles, dans les domaines des bactériophages et des virus humains ou animaux. Nous traiterons en particulier des techniques spéciales de culture sur ces derniers, qui sont utilisées expérimentalement pour les virus des plantes et des Insectes.

Culture de virus in vitro *sur couches monocellullaires*

En 1949, Enders, Weller et Robins ont utilisé des cellules cultivées *in vitro* pour la multiplication du Poliovirus à l'aide de fragments de reins et de testicules, et en ayant recours à des procédés déjà mis au point par Alexis Carrel au début du siècle. Cette méthode ayant permis d'obtenir d'importants résultats, les techniques furent progressivement améliorées. En 1950, Morgan, Morton et Parker mettaient au point le premier milieu de culture liquide semi-synthétique (le milieu « 199 »). En 1952, Dulbecco utilisa la trypsination des tissus destinés à donner des cultures de cellules isolées. L'usage des antibiotiques a grandement facilité la réalisation de ce type de cultures, qui est utilisé depuis dans tous les laboratoires de virologie.

Le procédé de préparation des cultures de cellules destinées à recevoir des ensemencements de virus est assez simple, bien que délicat ; il est réalisé avec une asepsie totale. En hachant en morceaux d'une taille maximale de 1 mm des organes ou des tissus humains ou animaux, et en utilisant une enzyme protéolytique (la trypsine), on obtient la libération de paquets formés d'amas de cellules constitutives. Cette opération est réalisée en immergeant les fragments de tissu dans une solution de trypsine à 0,25 % tamponnée à pH 7,2, à la température de 37 °C, et continuellement agitée ; au bout d'une ou plusieurs heures, les cellules en suspension deviennent très concentrées. Le matériel est alors recueilli, centrifugé et décanté ; le sédiment, constitué par les cellules, est remis en suspension dans un milieu de culture, jusqu'à obtention d'une concentration d'environ 80 000 cellules par millilitre, et introduit dans des récipients de culture

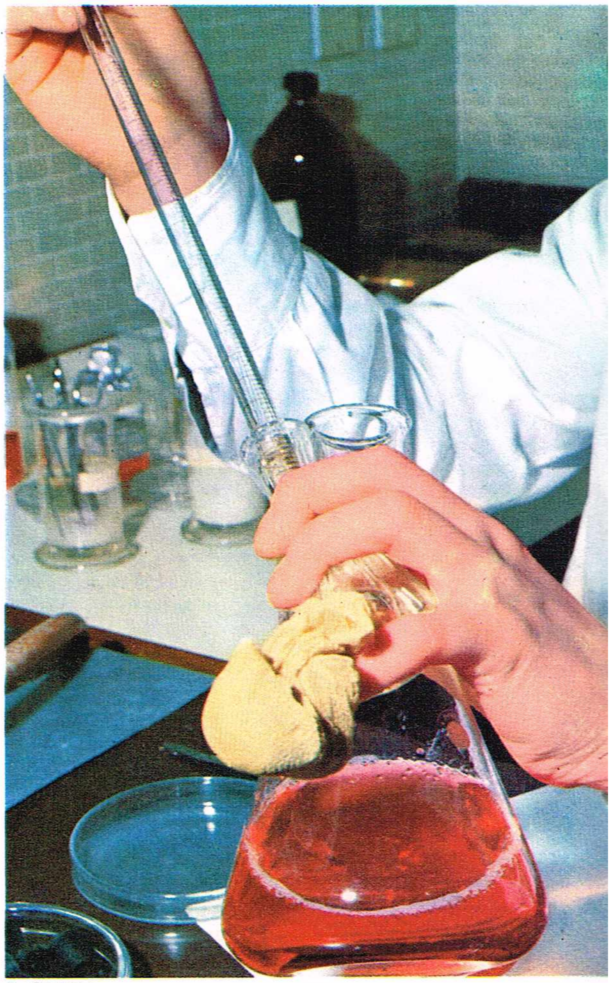

P. Castano

M. Pitzurra

M. Pitzurra

(en verre ou en matière plastique, et de différentes formes, fioles coniques, tubes ou boîtes de Pétri). Puis, les récipients remplis sont mis à l'étuve à 37 °C, en vue de la multiplication des cellules, avec ou sans agitation continuelle. Au bout de quelques minutes d'incubation, les éléments cellulaires en suspension se déposent et adhèrent fermement aux surfaces internes des récipients; 24 heures plus tard, l'activité de multiplication commence (il se produit en moyenne une caryocinèse par jour). Après 3 à 4 jours d'incubation, se forme un tapis cellulaire continu, sorte de voile très fin constitué par une unique couche de cellules, qui adhèrent les unes aux autres.

On obtient pratiquement des cultures de deux types cellulaires : des couches monocellulaires à cellules épithéliales d'une part, et à cellules fibroblastiques d'autre part, selon le tissu d'origine. L'aspect des cultures est très varié. Dans des conditions de stérilité absolue, celles-ci conservent de nombreux caractères de l'organe et de l'espèce animale d'origine. L'observation au microscope est possible, même sous faible grossissement : la paroi du récipient et le milieu de culture sont transparents et ne font pas obstacle à l'observation. Il est donc très facile de contrôler périodiquement l'état de la culture. Tous les deux ou trois jours, il convient de changer le milieu de culture, épuisé par suite de la consommation des substances nutritives qu'il contient ou rendu toxique par des déchets du métabolisme cellulaire. Au bout d'une ou deux semaines, le tapis cellulaire peut être détaché du récipient (en utilisant de la trypsine ou du versene) ; après centrifugation, les cellules, mises en suspension dans un nouveau milieu de culture, peuvent être placées dans d'autres récipients; le nombre des cellules augmente : en une semaine, un flacon donne quatre autres flacons, après encore une semaine, ceux-ci en donnent à leur tour seize, et ainsi de suite.

Les cultures faites directement à partir de cellules provenant d'un organe ou d'un tissu humain ou animal sont appelées des *cultures primaires;* les suivantes sont nommées *cultures secondaires* quand il y a passage d'un flacon à d'autres. Habituellement, les cultures primaires peuvent vivre jusqu'à un peu plus d'un mois; les cultures secondaires dépérissent au bout d'un à six mois, et la culture est perdue. Dans certains cas, les

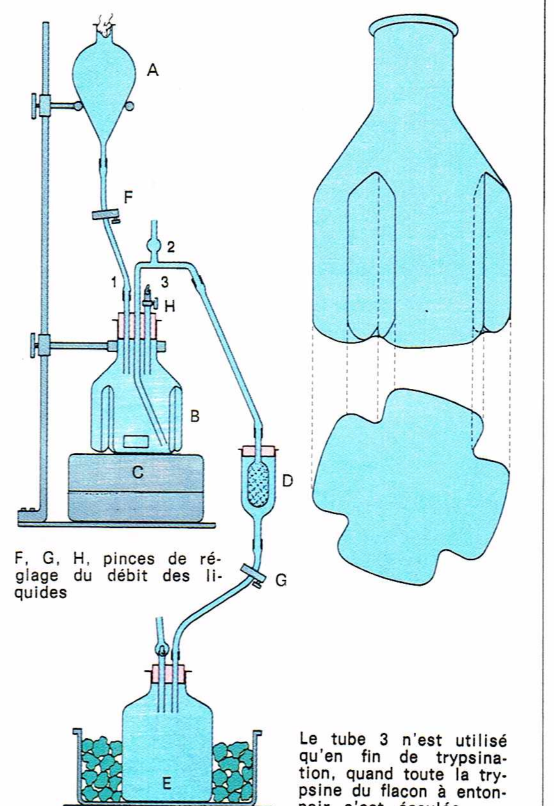

I.G.D.A.

▲ *A gauche, culture confluente de cellules épithéliales de rein de singe, en tapis* **monocellulaire.** *Aspect caractéristique du type de cellules les plus utilisées pour l'isolement de virus des animaux (× 80).*
A droite, aspect typique d'une **cellule fibroblastique :** *culture d'amygdale humaine, au 18e jour d'incubation; on observera l'abondante prolifération des fibroblastes (d'après Lépine).*

◀ *Schéma de* **l'appareil** *servant à la* **trypsination :** *la trypsine descend d'un flacon à entonnoir (A), par le tube 1, goutte à goutte, dans le vase à trypsination (B), dans lequel sont contenus les fragments de tissu; un agitateur magnétique (actionné par l'appareil C) mélange continuellement les fragments baignant dans la trypsine. Au fur et à mesure que les cellules se détachent, elles passent par le trop-plein, dans le tube 2 qui les amène au filtre D, lequel retient les plus gros morceaux. Les cellules isolées sont enfin recueillies dans le récipient, plongé dans la glace en fusion. A côté, détails du flacon de trypsination avec ses sillons verticaux favorisant la formation de tourbillons (d'après Lépine).*

▶ *Tableau 5 : liste de quelques systèmes cellulaires.*

Tableau 5 Liste de quelques lignées cellulaires stabilisées			
Indication de la souche	**Provenance**	**Auteur**	**Année d'isolement**
L	Fibroblastes de souris C_3H	Earle	1943
Hela	Carcinome humain	Gey	1951
Conjonctive de Chang	Conjonctive humaine	Chang	1954
KB	Carcinome humain	Eagle	1955
Detroit 6	Moelle osseuse humaine	Berman	1955
MCN	Moelle osseuse humaine	Mc-Culloch	1955
DMB	Moelle osseuse humaine	Jordan	1956

▶ **Cellules KB** *non infectées, en couche monocellulaire continue (coloration à l'éosine ; × 200) [d'après Lépine].*

▼ *Ci-dessous et page ci-contre, principes de culture dans un œuf embryonné de poule. A, coupe schématique d'un œuf embryonné de poule à 12 jours d'incubation : me, membrane chorio-allantoïdienne ; ca, chambre à air ou pneumatique ; cv, cavité allantoïdienne ; ct, cavité amniotique ; ja, jaune ; al, albumen. De B à D, inoculation dans des œufs embryonnés de poule : B, entaille dans la coquille pour l'inoculation dans la cavité allantoïdienne ; C, inoculation dans la cavité allantoïdienne ; D, inoculation dans le jaune. E à H, autres types d'inoculations : E, sur la membrane chorio-allantoïdienne ; F, entaille dans la coquille pour l'inoculation sur la membrane chorio-allantoïdienne ; G, entaille dans la coquille pour l'inoculation dans la cavité amniotique ; H, inoculation dans la cavité amniotique (d'après Winkle).*

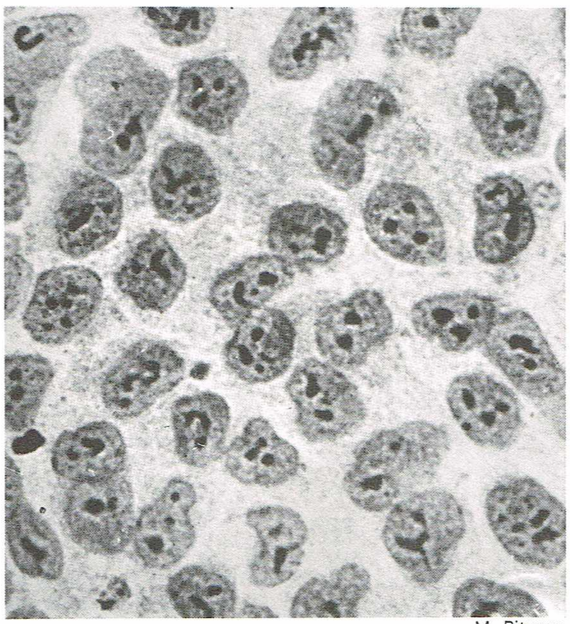

M. Pitzurra

cellules s'adaptent à la multiplication *in vitro* et peuvent être maintenues en vie indéfiniment par des transplantations hebdomadaires : on parle alors de *cultures stabilisées*. Le nombre de lignées cellulaires stabilisées, humaines et animales, à partir de reins, de moelle osseuse, d'épithéliums, est très grand. Les cellules Hela (des initiales d'une malade, Helen Lane), provenant d'un carcinome du col de l'utérus, stabilisées *in vitro* par Gey en 1953, sont encore utilisées aujourd'hui dans tous les laboratoires de virologie. Les cellules KB, provenant d'un carcinome épidermique humain, ont été stabilisées par Eagle en 1955.

La culture en couches monocellulaires constitue un milieu idéal pour la multiplication des virus. On peut y suivre les effets cytopathiques, les cellules pouvant être fixées et colorées par des artifices spéciaux. On peut même compter les unités virales et en suivre le comportement dans les conditions expérimentales les plus diverses. Le virus, en se multipliant dans les cellules, passe dans le liquide nutritif, et donne des suspensions assez concentrées, qui peuvent être ensuite purifiées par l'ultracentrifugation ou la séparation chromatographique. Naturellement, le tout est effectué de façon rigoureusement stérile. Malheureusement, tous les virus des animaux ne peuvent croître dans des cellules cultivées. Le virologue est alors obligé d'employer d'autres systèmes cellulaires (tableau 5).

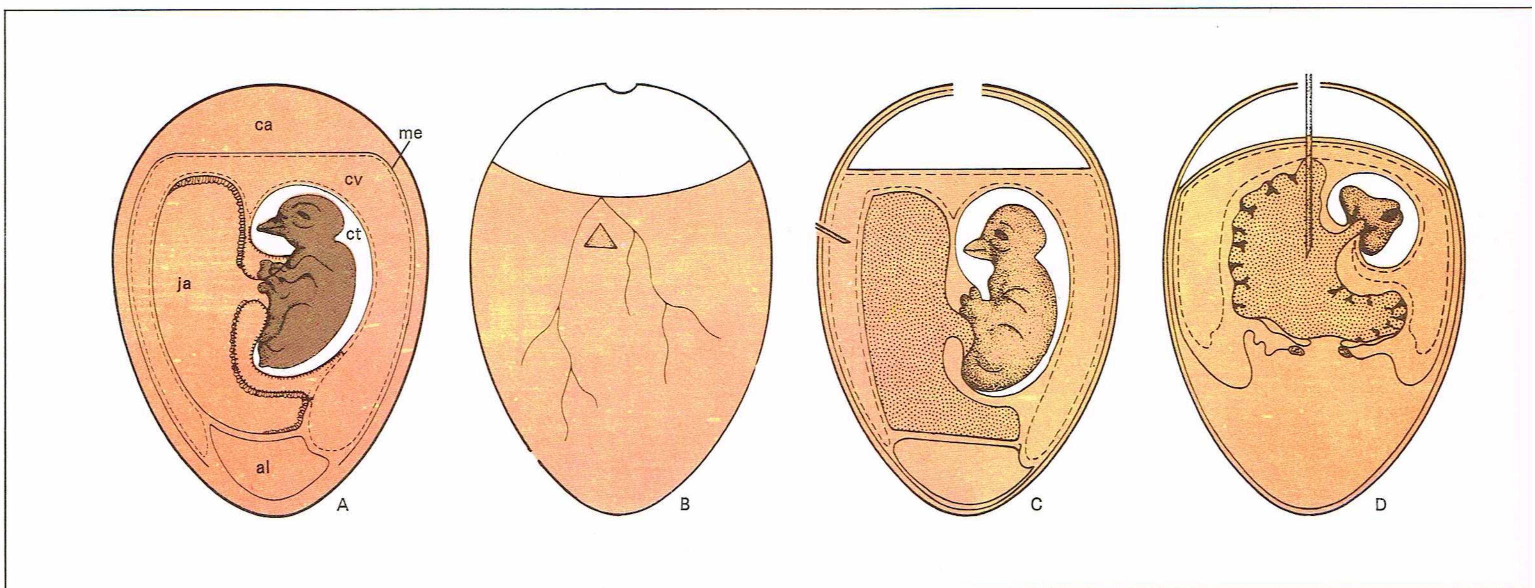

I.G.D.A.

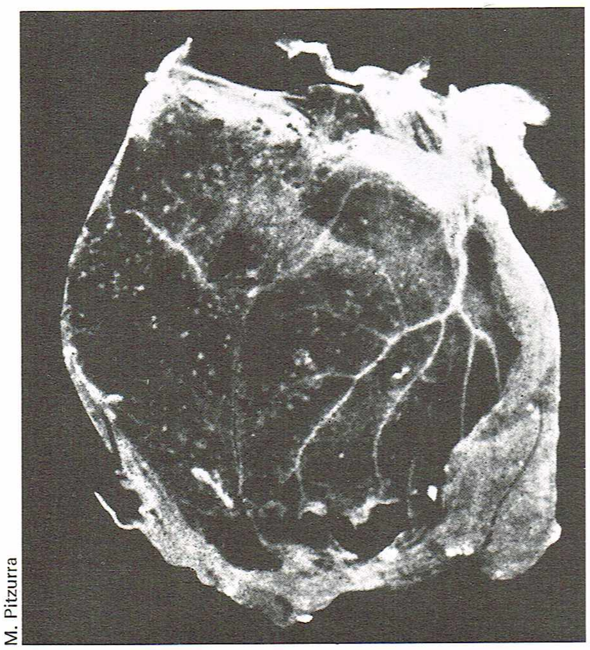

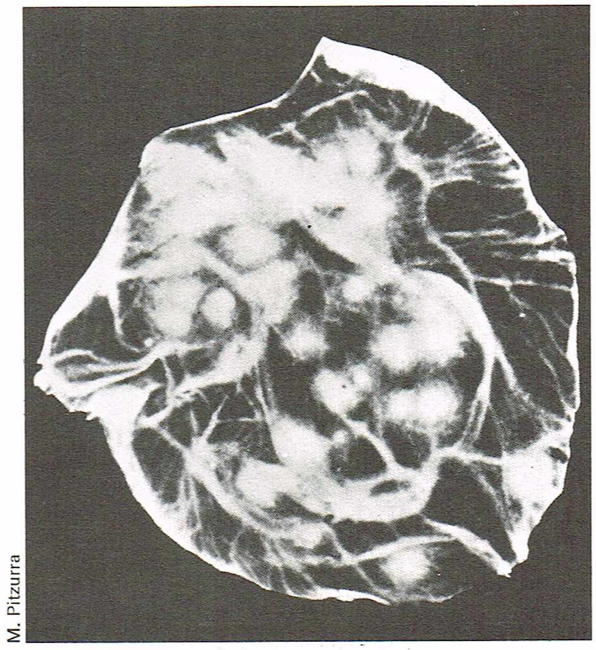

◀ *A gauche, aspect de la* **membrane chorio-allantoïdienne** *de poulet après inoculation du virus de la* **variole humaine**, *au 3e jour d'incubation; on observera les petites pustules, non confluentes, et l'absence d'œdème.*
A droite, **membrane chorio-allantoïdienne** *d'œuf embryonné de poule, après inoculation avec le virus de la* **vaccine** *au 3e jour d'incubation; on observera les grosses pustules, œdémateuses et confluentes (d'après Lépine).*

Cultures dans des œufs embryonnés de poule

Les œufs embryonnés de poule constituent un substrat cellulaire précieux pour l'isolement et l'étude de certains virus de l'homme et des animaux, et sont, de ce point de vue, aussi utiles que les cultures cellulaires : en effet, ils fournissent également des tissus vivants, de différentes natures (épithéliales ou fibroblastiques), inclus dans un récipient parfaitement étanche (la coquille), stériles, faciles à manipuler et de faible coût. Utilisés pour la première fois par Levaditi en microbiologie, pour des essais de culture de spirochètes, ils ont été employés en virologie par Woodruf et Goodpasture à partir de 1931, pour l'étude du virus de la variole aviaire et des pox-virus. Par la suite, Burnet étudia systématiquement les possibilités offertes par ce précieux instrument de travail et en généralisa l'emploi, notamment dans la culture et l'étude des myxovirus (grippe, oreillons).

D'utilisation plus simple que l'animal vivant, les œufs embryonnés offrent l'avantage de présenter les cellules dans un milieu bien mieux équilibré que celui des milieux artificiels de culture; les possibilités sont identiques à celles qu'offrent ces derniers. Le matériau contenant le virus peut être ensemencé de différentes façons : dans la membrane chorio-allantoïdienne, dans la cavité amniotique, dans la cavité allantoïdienne, dans le sac vitellin, dans le corps de l'embryon, et même par voie intraveineuse.

On se sert d'œufs fécondés à divers stades d'incubation, portant des embryons de 9 à 14 jours, selon les virus à multiplier. La multiplication des particules virales dans les annexes embryonnaires ou dans les tissus de l'embryon lui-même détermine diverses lésions, parfois caractéristiques : l'embryon devient malade et succombe. Les liquides tirés de la cavité amniotique et de la cavité allantoïdienne contiennent des unités virales néoformées à un titre élevé et constituent un précieux matériel de recherche. C'est surtout dans le domaine des virus de la grippe que les œufs embryonnés de poule sont le plus précieux.

Cultures in vivo

Dans de nombreux cas, le virologue est obligé de se servir de l'hôte naturel et habituel des virus pour étudier ceux-ci. Tel est le cas, pour des raisons évidentes, des bactériophages. Il en va de même pour les virus des végétaux et des Insectes (quoiqu'on ait réussi récemment à introduire les cultures *in vitro* tirées respectivement de plantes et d'Insectes). Pour les virus des Vertébrés, il est parfois impossible d'opérer autrement que sur l'animal vivant. C'est surtout le cas dans le domaine des virus tumorigènes, en particulier de ceux qui provoquent les leucémies des souris et qui sont réfractaires à la culture. Évidemment l'hôte habituel est totalement exclu dans le cas de l'expérimentation des virus humains. Toutefois, on

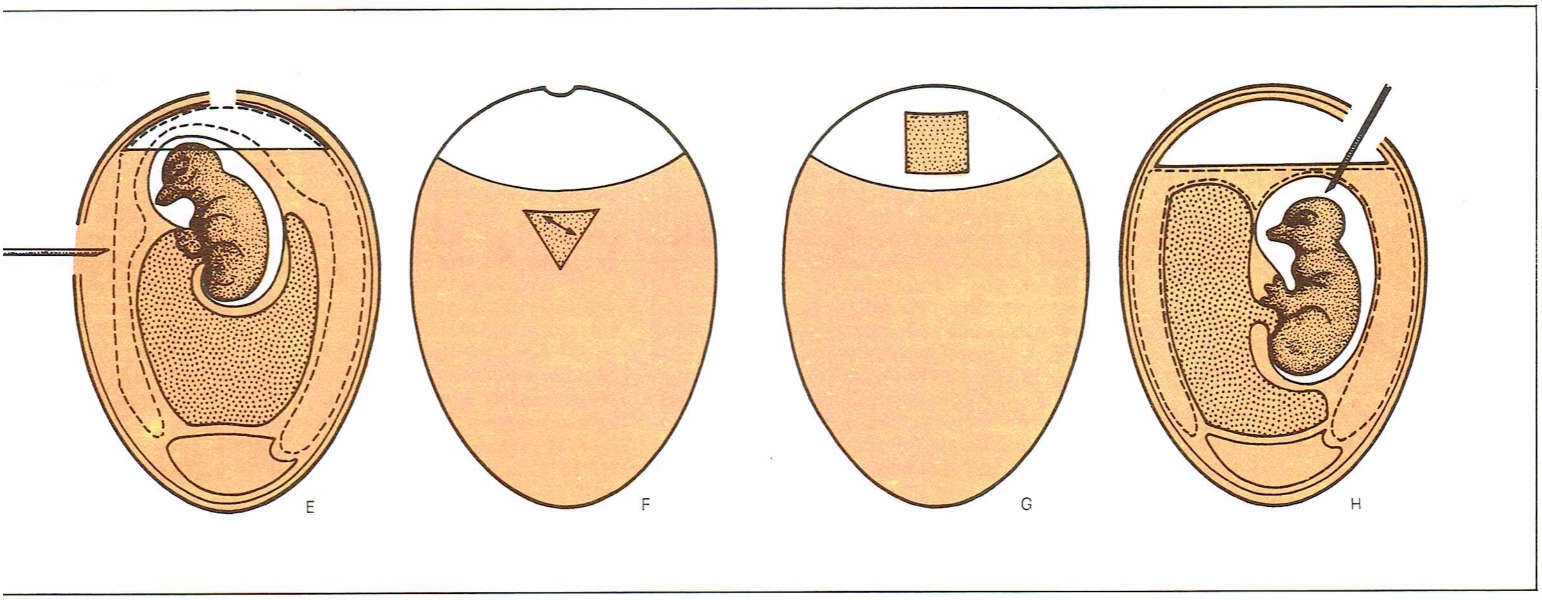

a pu, en se servant de l'homme comme support de propagation, obtenir quelques résultats, par exemple, pour le virus du rhume banal et les virus de l'hépatite virale : mais ces applications, déontologiquement délicates, sont des plus limitées.

Aujourd'hui encore, l'expérimentation *in vivo* chez les animaux est contrariée par toutes sortes d'inconvénients. Il est pratiquement très difficile, sinon impossible, d'obtenir des cultures pures : tout animal héberge effectivement une quantité considérable d'autres micro-organismes que celui que l'on étudie, et leur présence interfère de mille façons dans les expériences. Les comptages *in vivo* sont toujours entachés d'erreurs, fréquemment grossières. Le temps, l'espace, et les dépenses nécessaires (notamment dans les expériences sur des singes), même quand on se sert de petits animaux, ralentissent beaucoup les travaux. C'est pour cela que la virologie n'a accompli de progrès décisifs dans le domaine des virus des Vertébrés que lors de la mise au point de l'emploi de systèmes cellulaires certainement stériles et de maniement facile, à savoir les cultures *in vitro* et sur des œufs embryonnés de poule. On a recours à la croissance virale dans les divers systèmes cellulaires que nous avons décrits (*in vitro* chez l'embryon de poulet, et *in vivo*) pour des motifs spéculatifs, scientifiques et pratiques.

En résumé, l'utilisation de systèmes cellulaires réceptifs est indispensable pour les travaux suivants :

- l'isolement de virus provenant d'organismes malades, d'organismes sains et du milieu ambiant;
- le diagnostic de détermination des virus isolés, et certains examens sérologiques;
- le titrage des suspensions virales;
- l'évaluation du degré de virulence des souches de virus;
- l'étude des inhibiteurs viraux;
- l'étude des rapports entre les virus et les cellules, des points de vue les plus divers;
- l'étude des courbes de croissance et des caractères biologiques des virus;
- la préparation de vaccins.

Isolement et identification des virus

Isolement des virus

C'est surtout dans le domaine des virus des Vertébrés que l'emploi des cultures cellulaires en couches monocellulaires a facilité l'isolement en culture pure d'un grand nombre d'agents viraux, pathogènes ou non, dont le nombre augmente sans cesse. Les matériaux à partir desquels cet isolement est possible sont nombreux : excreta (fèces et urines), sécrétions (mucus, salive), autres liquides organiques (liquide céphalorachidien, sang), exsudats, tissus. Les recherches épidémiologiques sont également utiles pour les échantillons du milieu environnant (eaux de surface, eaux usées, sol).

Il faut tout d'abord sélectionner et préparer les cellules les plus favorables au développement du virus étudié. Les substrats cellulaires le mieux adaptés pour l'isolement des virus humains sont constitués par des cultures de cellules humaines (les primaires à partir d'annexes embryonnaires, continues à partir de cellules Hela ou KB), ou de cultures de cellules de reins de singes (en culture primaire).

L'inoculation du matériel étudié au système choisi suppose un traitement préliminaire de l'échantillon.

- Il est nécessaire d'obtenir une suspension du matériel en solution physiologique à un pH légèrement alcalin (ce point est important pour des substrats solides ou semi-solides). Les éventuelles cellules présentes doivent être brisées par des congélations et des décongélations rapides (passages de — 30 °C à + 30 °C) : les membranes cellulaires disparaissent alors, libérant les virus qu'elles renfermaient. La suspension doit être convenablement diluée, de manière que les caractéristiques du milieu de culture cellulaire ne soient pas altérées (par suite de modifications du pH ou de l'équilibre osmotique, ou encore du fait de l'adjonction de substances toxiques de différentes natures, qui sont aspécifiquement pathogènes pour les cellules).

Ensuite, il faut éliminer aussi complètement que possible tous les corpuscules non viraux (en particulier les Bactéries, les Micromycètes, les fragments de cellules et toutes les matières étrangères). On opère généralement par centrifugation à vitesse moyenne ou faible. Toutes les matières indésirables sédimentent; quant aux virus, beaucoup plus légers, ils sont recueillis dans la partie surnageante.

- Puis on procède à une bactériostatisation de la suspension par l'adjonction de pénicilline et de streptomycine (antibiotiques inactifs vis-à-vis des virus). La présence de cellules bactériennes actives, même en petit nombre (non sédimentées à la suite de la centrifugation), rendrait vain tout essai de culture des virus, étant donné que dans les milieux de cultures, très riches en substances nutritives, on observe une rapide multiplication microbienne qui détruit le tapis cellulaire.

Après ces opérations, on obtient un liquide limpide et débarrassé des Bactéries, qui est inoculé de façon stérile dans les récipients à couches monocellulaires, au volume approprié. Pour arrêter l'activité multiplicatrice dans les cellules, afin de ne pas gêner la croissance des virus, le milieu normal de croissance des cellules contenant du sérum à haute concentration (10 %) est remplacé par un milieu de culture d'entretien, à moindre concentration de sérum (2 à 3 %). Les cultures ensemencées sont mises en étuve à 37 °C, et l'on examine périodiquement au microscope l'état du tapis cellulaire. La multiplication virale est signalée par l'apparition de l'effet cytopathique. La lésion cellulaire peut, selon les cas, apparaître assez rapidement (au bout d'un ou deux jours d'incubation) ou bien après des semaines. Le développement des virus non cytopathogènes est suivi par des méthodes particulières (hémadsorption, résistance cellulaire à l'inoculation d'un virus connu). Lorsque la destruction cellulaire est totale, le liquide de culture (chargé de virions néoformés) est conservé à basse température (de — 30 °C à — 70 °C), jusqu'au moment de son utilisation ultérieure. Quand la période d'observation de la culture se prolonge, il faut périodiquement renouveler les liquides nutritifs, qui sont épuisés par l'activité vitale des cellules.

Les opérations sont à peu près les mêmes avec les différents substrats cellulaires : Bactéries, végétaux, Insectes, embryons ou animaux. Les nécessités de la recherche conditionnent, selon les cas, l'inoculation, la récolte et l'utilisation du matériel, dès que le virus, en se multipliant, a produit les manifestations attendues.

Identification des virus

Il ne suffit pas de constater que, dans un substrat donné, existe un micro-organisme présentant les caractères généraux des virus. Il est nécessaire de compléter l'observation par l'identification de l'agent isolé.

Certaines des observations effectuées au cours de l'isolement sur des cellules donnent déjà des indications à cet égard : le type de cellules ayant permis le développement du virus est un important élément diagnostic. Lors des essais sur des organismes entiers ou sur des embryons, les lésions provoquées dans les divers tissus et organes ont également beaucoup d'importance. D'autres éléments de diagnostic fondamentaux sont les lésions provoquées au niveau cellulaire : le siège et l'aspect des inclusions cellulaires, ainsi que l'action cytopathique (qu'on peut surtout observer sur les couches monocellulaires). Mentionnons encore la capacité éventuelle d'agglutiner les hématies de différentes espèces animales.

Cependant, la détermination des virus se fait essentiellement par des recherches immunologiques, assez semblables à celles qui sont effectuées dans les autres domaines de la microbiologie. Ces essais sont fondés sur le fait que les constituants protidiques de la capside et du péplos ont une composition chimique différente selon les virus. Il serait bien trop difficile de déterminer ces différences par la chimie analytique, même en ayant recours à ses méthodes les plus fines; il est également tout à fait exclu d'appliquer les analyses chimiques dans la pratique courante en laboratoire de virologie.

L'immunologie permet de surmonter les difficultés, grâce à des méthodes dont la mise en œuvre est parfois fort simple, et qui sont sensibles à de minimes variations de la structure protidique, quand les différences sont liées à des groupes chimiques de peu d'importance, comme un oxhydrile (— OH), un carboxyle (COOH) ou un groupement azoté (NO_2). La sensibilité des méthodes immunologiques est telle que l'on peut différencier et déterminer même les composés *stéréo-isomères* (c'est-à-

M. Pitzurra

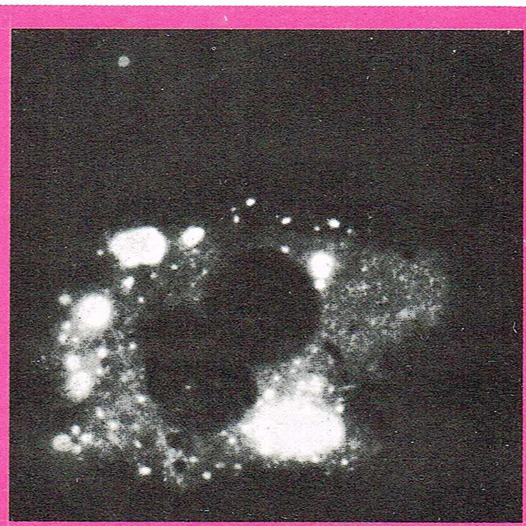

M. Pitzurra

◀ *A gauche,* virus de la rage, *fixe, isolé chez le rat, inoculé dans les cellules hyalines, fixées au 6e jour suivant l'infection : toutes les cellules présentent des antigènes spécifiques dans le cytoplasme (observation en immunofluorescence; fixation à l'acétone refroidi et coloration, après dessiccation par le cyanate de fluorescéine). On observe dans les cellules une fluorescence dans le cytoplasme, aux points de fixation des anticorps spécifiques sur le virus, anticorps marqués par le colorant fluorescent (× 300). A droite : détail (d'après Lépine).*

dire à structures chimiques identiques, mais à dispositions spatiales des atomes différentes). Chez un même groupe de virus, il est aussi possible de différencier des types viraux à caractères généraux identiques à ceux du groupe, mais présentant des caractères immunologiques particuliers (les *sérotypes*). Ainsi, parmi les Poliovirus, par exemple, on reconnaît trois sérotypes : les Polio I, Polio II, et Polio III. Le principe général sur lequel sont fondées les méthodes immunologiques est la reconnaissance des réactions entre un antigène et un anticorps; nous en donnons ici un bref rappel, nécessaire à la bonne compréhension de la suite.

Si l'on inocule par voie sous-cutanée, chez trois lapins, trois protéines différentes, hétérologues (c'est-à-dire provenant de trois animaux d'espèces différentes), à savoir des globulines de mouton, de rat et de cobaye, soit trois antigènes, les trois lapins réagiront en produisant des molécules protidiques antagonistes; celles-ci apparaîtront dans le sérum sanguin et seront capables de se fixer spécifiquement, pour le modifier ou le neutraliser, sur l'antigène correspondant qui en a provoqué l'apparition; ce sont les anticorps. Il s'agit là d'une des façons dont les organismes se défendent contre les substances étrangères et les infections : ces réactions sont à l'origine de l'immunité humorale. Il existe des cellules spécialisées pour la production des anticorps, dans la rate et dans les tissus lymphatiques (ganglions, amygdales, thymus) de tous les animaux (cellules plasmatiques). L'union de l'antigène et de l'anticorps, qui est spécifique à la manière de la correspondance d'une clé et d'une serrure, peut être reproduite *in vitro* en dehors de l'organisme qui a produit un anticorps. Elle peut être mise en évidence par diverses méthodes. L'une des réactions les plus marquées est celle de la précipitation : les deux molécules (celle de l'antigène et celle de l'anticorps) se combinent et provoquent l'apparition d'un précipité (floculat), visible à l'œil nu. Étant donné que la réaction est rigoureusement spécifique et que l'anticorps produit ne peut provoquer une floculation qu'en présence de son antigène, on peut en déduire qu'en présence d'une réaction positive, il est possible d'identifier le terme inconnu puisqu'on connaît l'un des termes de la réaction.

Dans l'exemple cité, si l'on met dans trois tubes différents les sérums des trois lapins traités par les trois types de globulines, et si l'on ajoute aux trois tubes une protéine dont on ignore la nature, on peut observer deux phénomènes :

— il n'y a de réaction de précipitation dans aucun des trois tubes; par conséquent, ou la protéine n'est pas une globuline, ou, si elle l'est, elle n'appartient à aucune des trois espèces animales dont on a tiré les anticorps;

— il y a floculation dans l'un des trois tubes; on sait automatiquement qu'il s'agit d'une globuline, provenant d'une espèce animale qui correspond à l'anticorps avec lequel elle a réagi.

Les sérums contenant des anticorps sont appelés *sérums immunisants* ou *immunsérums*. Les trois sérums immunisants de l'exemple que nous avons choisi sont, respectivement, des immunsérums antiglobulines de mouton, de rat et de cobaye. Pour déterminer les virus, on a recours à des réactions de ce type avec des immunsérums obtenus en inoculant des virus connus à des cobayes ou à des lapins, dont on tire du sérum sanguin. Chaque virus pourra être reconnu en fonction de sa capacité de réaction de façon spécifique avec des immunsérums connus : les anticorps antiviraux, en se fixant sur le virion, en altèrent de différentes façons les propriétés. Ces altérations sont étudiées pratiquement pour en identifier la réaction.

La fixation des anticorps sur les virus vivants, capables de provoquer un effet cytopathique *in vitro* et *in vivo*, entraîne la neutralisation de la capacité pathogène *(réaction de neutralisation)*. Pour les virus à capacité hémagglutinante, le contact avec un sérum immunisant spécifique provoque la perte de la capacité d'agglutination des hématies *(réaction d'inhibition de l'hémagglutination)*. Chez de nombreux virus, il existe des structures antigènes pouvant produire le type particulier de réactions dites *réactions de fixation du complément*. Le procédé utilisé est fondé sur le même principe que la réaction de Wassermann, bien connue pour le diagnostic de la syphilis, mais on opère avec des volumes de réactifs réduits à des fractions de millilitre.

La fixation des molécules d'anticorps sur le virus, à l'intérieur de la cellule infectée, peut être observée au microscope, la molécule d'anticorps ayant été marquée préalablement à l'aide d'une substance fluorescente (méthode de l'immunofluorescence). En utilisant comme source lumineuse une lampe à vapeur de mercure, et grâce à des procédés techniques spéciaux, on peut voir les points fluorescents (c'est-à-dire les molécules) là où se trouve l'antigène viral correspondant, dans le cytoplasme ou le noyau de la cellule infectée.

On peut aboutir au même résultat en marquant les anticorps avec des atomes d'un métal lourd (du fer contenu dans la ferritine). Dans ce cas, on voit au microscope électronique les points de rencontre entre l'antigène et l'anticorps correspondant, qui se présentent sous forme de points noirs, signalant les atomes de fer, et qui sont opaques vis-à-vis du faisceau d'électrons.

Parmi ces réactions, les plus faciles à réaliser sont celles de l'inhibition de l'hémagglutination et de la fixation du complément. Les essais de neutralisation doivent être réalisés sur des cellules vivantes, avec des virus actifs, ce qui nécessite un laboratoire de virologie bien équipé. L'exécution des réactions par la méthode de l'immunofluorescence ou avec la ferritine au microscope électronique est plus délicate.

Les mêmes critères permettent de détecter les infections virales, chez l'homme et les animaux, même sans procéder à des essais d'isolement du virus, en étudiant indirectement dans le sérum sanguin l'apparition d'anticorps spécifiques, pouvant être attribués au responsable supposé de la maladie *(sérodiagnostic)*. On recueille le sérum à examiner (on ignore quel est le binôme antigène-anticorps) et l'on effectue des essais sur une cellule

(neutralisation) ou dans un tube (inhibition de l'hémagglutination ou fixation du complément), en introduisant dans le système un ou plusieurs virus connus : la réaction positive indique quel est le virus essayé pour lequel les anticorps du sérum examiné présentent une spécificité. Pour que la recherche soit valable, il faut que les essais soient effectués sur deux échantillons de sérum, prélevés à un intervalle de dix jours. La réaction positive a une signification nette quand, dans le second échantillon, la quantité d'anticorps a été multipliée au moins quatre fois, ce qui démontre que les anticorps observés ne sont pas le reliquat d'une infection ancienne.

La détermination des virus par des méthodes immunologiques sert également pour les bactériophages, ainsi que pour les virus des végétaux et des Insectes, mais jusqu'à présent on l'a employée surtout dans le domaine des virus des Vertébrés.

Méthodes de détermination quantitative en virologie

Léonard de Vinci disait qu'il n'est pas de science qui ne doive passer par des démonstrations mathématiques. La virologie n'échappe pas à cette règle générale des sciences : elle a commencé à enregistrer des progrès dans le domaine spéculatif, lorsque les phénomènes qui accompagnent la multiplication des virus ont été étudiés d'un point de vue quantitatif et avec des méthodes assez précises, c'est-à-dire à partir du moment où la quantité de matériel viral présente dans une suspension a pu être déterminée à un moment donné et à des moments successifs, dans les conditions expérimentales les plus diverses. Naturellement, comme il s'agit d'organismes fort petits, les causes d'erreurs sont très nombreuses. Compter les Bactéries n'est déjà pas facile, mais compter les virus l'est encore moins.

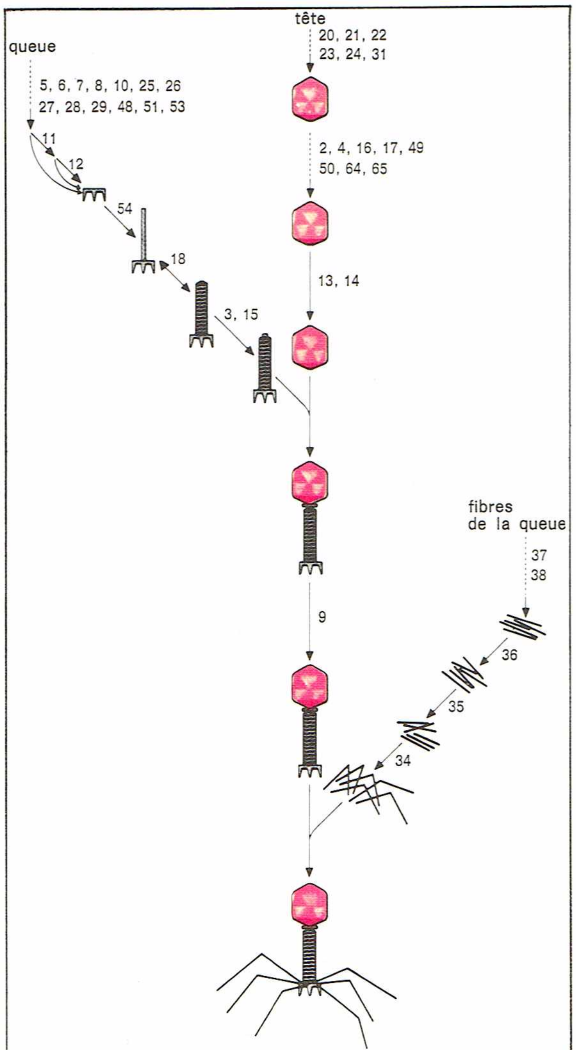

I.G.D.A.

▶ *Schéma de la morphogenèse du bactériophage T_4 : ce schéma présente 3 branches principales, aboutissant séparément à la formation de la tête, de la queue et des fibres, qui se combinent ensuite pour donner le virus complet. Les nombres indiqués se réfèrent aux gènes mis en œuvre à chaque stade (d'après Wood et Edgar).*

L'unité de mesure employée en virologie peut être de deux types, l'un physique et l'autre biologique. L'unité physique est le virion, élément bien défini du point de vue physique. La détermination quantitative faisant référence au nombre de virions présents dans l'unité de volume d'un substrat déterminé peut être effectuée seulement par comptage direct au microscope électronique, mais n'a pas d'importance pratique. On a par contre systématiquement recours à l'évaluation de l'unité biologique. Celle-ci correspond à la quantité minimale de matériel contenant le virus encore susceptible de produire un effet biologique déterminé. Les deux types d'unités sont de grandeur différente, une unité biologique étant habituellement constituée de plusieurs unités physiques dont le nombre varie selon les virus.

L'unité biologique la plus immédiate est l'unité pathogène, qui est la plus petite quantité de matériel viral pouvant déterminer l'infection *in vivo*. Le procédé d'évaluation de cette unité est assez simple. On inocule des volumes connus de dilutions régulières de la suspension virale à des organismes réceptifs, en observant soigneusement les résultats. On dit que, dans la suspension étudiée, le nombre des unités pathogènes correspond à l'inverse de la *dilution maximale efficace*. Par exemple, quand une suspension de virus de la grippe peut infecter la souris jusqu'à la dilution de 10^{-7}, pour un volume de 0,1 ml, alors que la dilution à 10^{-8} inoculée en même quantité est inactive, on peut affirmer que 0,1 ml de la suspension de départ contient 10^7 unités pathogènes de virus de la grippe ; il y en aura 10^8 dans 1 ml. Les résultats ainsi obtenus sont d'autant plus proches de la réalité que le nombre d'animaux utilisés pour les essais est plus grand. En outre, l'application de formules pour le calcul statistique permet de réduire les causes d'erreurs.

Comme toute expérimentation *in vivo*, ce type de détermination quantitative est difficile à mettre en œuvre. Le procédé qui consiste à appliquer les mêmes critères, mais en substituant à l'animal une culture cellulaire, permet d'obtenir des mesures plus précises : il faut cependant que le virus puisse produire un net effet cytopathique. L'unité pathogène déterminée d'après des cultures de cellules est nommée T.C.I.D. (de l'anglais « tissue culture infecting dosis », ou « dose pathogène en culture de tissu »).

La meilleure méthode pour l'évaluation des unités pathogènes sur des cellules en culture est celle qui est utilisée pour les bactériophages et qui a été adaptée par Dulbecco aux virus de l'homme et des animaux provoquant des effets cytopathiques. Il s'agit du *comptage par plages*, grâce auquel la teneur en virus d'une suspension est exprimée en P.F.U. (de l'anglais « plaque forming units », ou « unités formant plages »). Le principe en est assez simple. Si l'on distribue uniformément, sur un tapis de cellules sensibles, une suspension de virus convenablement diluée, et si ensuite l'ensemble est fixé de manière à ne pas permettre aux virus en voie de multiplication de se déplacer, le tapis cellulaire sera détruit, par effet cytopathique, seulement aux endroits où le virus s'est fixé, selon le hasard de la distribution lors de l'ensemencement. Après quelques jours, si l'on colore les cellules de la fiole, on peut compter à l'œil nu les vides, ou plages, provoquées dans la culture par les unités virales pouvant déterminer une infection accompagnée d'un effet cytopathique destructif. Chaque centre de destruction cellulaire correspond à un centre d'infection. En comptant les plages et en calculant le facteur de dilution ainsi que la quantité de l'inoculum, on peut trouver de façon précise le nombre de P.F.U. de la suspension virale initiale.

Outre ces méthodes de détermination quantitative fondamentales, le virologue a d'autres possibilités à sa disposition. Par exemple, pour les virus hémagglutinants, il peut être commode de définir la concentration du virus en *unités hémagglutinantes ;* celles-ci correspondent à la plus petite quantité de virus capable de provoquer l'hémagglutination (toujours établie par la méthode des dilutions régulièrement progressives et en recherchant la dilution la plus élevée encore efficace).

Grâce aux méthodes dont nous avons parlé, on peut établir la courbe de croissance des virus dans un substrat cellulaire ; c'est là une acquisition fondamentale de l'étude des rapports entre les virus et les cellules.

Les inhibiteurs viraux

Les virus ne présentant pas un métabolisme propre ne sont pas attaqués par les produits tirés des antibiotiques ou de la chimie thérapeutique qui sont actifs vis-à-vis des Bactéries. D'autre part, comme ils se multiplient à l'intérieur des cellules, il est très difficile de mettre au point un produit agissant sur un virus et ne lésant pas en même temps la cellule. C'est pour cela que la thérapeutique des infections à virus est encore loin d'être résolue.

Dans le domaine des virus de l'homme et des animaux, on a réalisé de nombreuses recherches sur des composés antiviraux, dans l'espoir de passer de l'expérimentation à l'utilisation pratique. Le phénomène le plus intéressant est celui de l'*interférence*. Une cellule dans laquelle un virus se multiplie ne peut être infectée par un autre virus interférent. Cela est dû au fait que le premier virus stimule la production d'une protéine cellulaire, l'*interféron*, dont l'action se montre protectrice. Celui-ci, qui se forme également par stimulation par des virus inactivés, a une activité protectrice spécifique pour l'espèce animale à laquelle appartient la cellule qui l'a produit, mais une activité relativement aspécifique envers les virus. L'interféron produit à la suite d'une infection par le virus de la grippe serait donc aussi actif contre d'autres virus. Il est possible de préparer, à partir de cultures cellulaires *in vitro*, d'importantes quantités d'interféron pur. Malheureusement, les espérances suscitées par ce corps chimique se sont en grande partie évanouies : son action, qui provoque un blocage des processus de production des acides nucléiques viraux, s'est révélée très faible et de brève durée.

On a recherché en chimiothérapie des composés pouvant inhiber les processus de synthèse des composants viraux sans déterminer de lésions de la cellule. On en a trouvé beaucoup, comme la purine et la pyrimidine, qui empêchent la synthèse des ADN et des ARN viraux. Certains de ces composés ont permis de mettre au point de remarquables méthodes d'étude pour la détermination des modalités de maturation intracellulaire des virus.

Les virus à ARN sont bloqués par la fluoro-5-désoxyuridine, alors que l'iodo-5 désoxyuridine, ou I.U.D.R., s'est révélée capable d'inhiber la maturation des virus à ADN. Quant à la guanidine, elle inhibe de façon spécifique les petits virus à ARN des animaux (Picornavirus). L'emploi de ces composés en thérapeutique est très limité, notamment à cause de leur toxicité. Pour l'instant les seules possibilités valables en ce domaine sont les pratiques prophylactiques, à l'aide de vaccins à virus atténués ou inactivés.

Notions sur la génétique des virus

Nous avons vu que les virus ne se multiplient pas selon un processus classique de croissance et de division mais d'une manière très particulière : leurs parties constituantes, indépendamment les unes des autres, sont « imprimées » à l'intérieur de la cellule hôte, selon des modèles fournis par le virus, en des endroits distincts (noyau, mitochondries, ribosomes, membrane cytoplasmique). C'est seulement lorsque chaque partie est ainsi « imprimée » que le processus de maturation les fait se rassembler en un virion complet. Tous les éléments nécessaires (produits ou non à l'avance) sont fournis par la cellule hôte, sauf le moule originel représenté par le génome viral (c'est-à-dire la grosse molécule d'acide nucléique), qui dicte, en code, les informations que doivent effectuer les structures réalisant les synthèses protéiques.

Les règles générales de l'hérédité n'en sont pas moins valables pour les virus, qui, à cet égard, présentent deux phénomènes fondamentaux :

— la stabilité des caractères spécifiques de chaque individu ;

— l'apparition de variations héréditaires (mutations).

Des analyses génétiques et cytologiques ainsi que des analyses de cellules animales ou végétales ont montré que le fondement physique de ces deux phénomènes est le gène : celui-ci est le déterminant génétique qui contrôle les propriétés des organismes. On connaît maintenant fort bien les gènes : il s'agit de séquences de nucléotides contenus dans l'ADN, pouvant codifier une séquence déterminée d'acides aminés dans des polypeptides spécifiques. C'est de cette propriété des gènes que dérive la capacité spécifique de chaque cellule d'opérer la synthèse de protéines particulières.

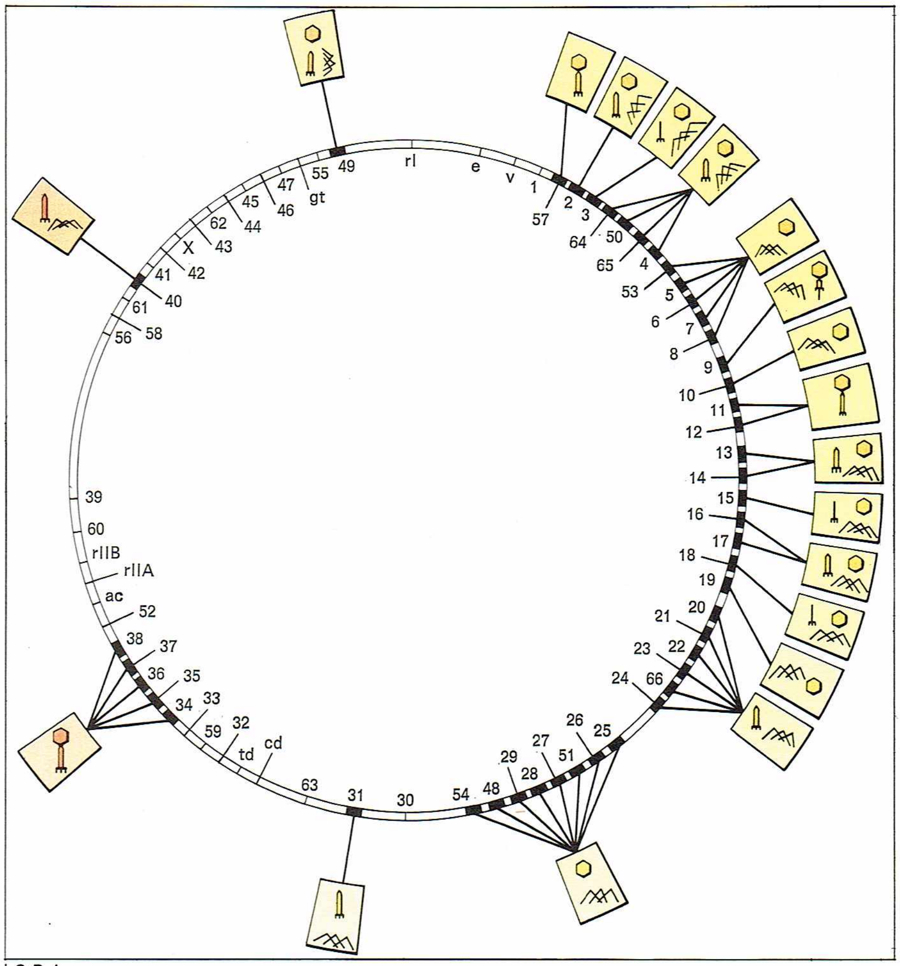

I.G.D.A.

▲ **Carte génétique du bactériophage** T_4. ***On peut voir les positions relatives de plus de 75 gènes identifiés jusqu'à présent, en fonction des mutations : les segments noirs du cercle indiquent les gènes ayant une fonction morphogénétique ; les rectangles indiquent quels composants viraux sont observés en microscopie électronique d'après les photographies d'extraits de cellules bactériennes infectées par des mutants ne possédant pas le gène morphogénétique. Par exemple, l'absence des gènes 11 ou 12 provoque l'apparition de bactériophages complets mais fragiles. En d'autres cas, il manque la tête, ou des parties de la queue, ou encore l'enveloppe contractile (d'après Rapp et Melnick).***

Le contrôle chromosomique de l'hérédité a également lieu chez les virus, qui peuvent être assimilés à de petits morceaux de matériel génétique (l'acide nucléique) renfermés dans une enveloppe protidique permettant le transport d'une cellule à une autre. Le matériel génétique des virus est aussi le siège des deux phénomènes que nous avons signalés : les particules virales néoformées sont identiques aux particules virales mères, car elles ont la même garniture chromosomique. Un virion d'*Herpes vulgaris* donnera toujours des virions de la même nature.

En outre, les virus subissent des mutations : c'est ce phénomène qui les distingue des composés chimiques enzymatiques autocatalytiques. Le premier exemple de mutation provoquée chez un virus a été donné par Pasteur, quand il a transformé pour la vaccination le virus des rues de la rage en un virus fixe. Un exemple naturel de mutation spontanée est celui du virus de la grippe, dont il apparaît périodiquement de nouvelles variantes. Enfin, on peut provoquer d'innombrables mutations en laboratoire, soit par adaptation des virus à des hôtes non habituels, soit par l'emploi d'agents mutagènes physiques et chimiques. Chez les bactériophages, la marche de l'apparition de mutations dans des conditions expérimentales contrôlées a permis d'établir des *cartes chromosomiques*, avec localisation dans la molécule circulaire de l'acide nucléique des *loci* responsables de chacune des synthèses destinées à la maturation du virus.

L'étude des virus a apporté une contribution fondamentale à la génétique. La démonstration selon laquelle les acides nucléiques sont les médiateurs de l'information génétique a été établie par les expériences de Fränkel-Conrat sur le virus de la mosaïque du tabac. Le matériel génétique le mieux étudié à l'heure actuelle est constitué par les bactériophages d'*Escherichia coli* (en particulier le bactériophage T_4). Cela est dû au fait que la simplicité

TABLEAU 6. CLASSIFICATION DES VIRUS					
ACIDE NUCLÉIQUE	SYMÉTRIE	ENVELOPPÉ OU NU	NOMBRE DE CAPSOMÈRES OU DIAMÈTRE DE L'HÉLICE	GROUPE	EXEMPLES
D	H	E	90-100 Å	POX	Vaccine - Variole - Nodule des trayeurs. Myxomatose - Fibrome de Shope.
	C	N	12	MICRO	Phage Phi. X. 174.
			32	PARVO	Virus K du rat.
			42		Virus des Insectes.
			72	PAPOVA	Polyome - SV 40 - Verrues humaines. Papillome de Shope.
			252	ADÉNO	Adénovirus de l'homme et des animaux.
		E	162	HERPÈS	Herpès simplex I et II - Varicelle - Zona - Virus EB du Burkitt - Virus B des singes.
	B	N		UROPHAGES	Série des Phages T - Phage Lambda.
R	H	N	100-130 Å 170-200 Å 250 Å	Virus des végétaux à symétrie H	Virus de la mosaïque du tabac.
		E	90 Å enveloppe sphérique	MYXO I	Grippe
			180 Å enveloppe sphérique	MYXO II	Parainfluenze - Oreillons - Rougeole.
			180 Å enveloppe en obus	RHABDO	Rage - Stomatite vésiculeuse. Virus Sigma de la drosophile.
	C	N	32	PICORNA	Polio - Écho - Coxsackie - Fièvre aphteuse - Mosaïque jaune du navet - Phages à ARN.
			92	RÉO	Réovirus des animaux. Virus de la tumeur des blessures (végétaux)
		E	32	TOGA	Fièvre jaune - Dengue. Encéphalites et principaux Arbovirus.

▲ ***Tableau 6 : classification des virus.***

de la structure des virus a fait abandonner par les généticiens les recherches sur les organismes qui ont rendu dans le passé de précieux services (comme la drosophile), mais qui ne peuvent soutenir la comparaison, en ce qui concerne la relative facilité d'étude des gènes, avec les virus, c'est-à-dire au niveau moléculaire. Une confirmation en est la première synthèse *in vitro* d'une molécule vivante, se multipliant par un processus semi-conservatif et capable de transmettre un message génétique concrétisé par des particules néoformées, réalisée par Kornberg et Goulian en 1967 : ces chercheurs ont utilisé pour leurs expériences l'ADN du bactériophage Phi X 174 d'*E. coli*. Cette nouvelle a fait sensation dans le monde entier par les perspectives qu'elle ouvre. On entrevoit la possibilité de modifier les ADN de virus différents des bactériophages grâce à l'approfondissement de leurs mécanismes d'action sur les cellules, perspective particulièrement intéressante dans le domaine des virus oncogènes.

Classification des virus

Le nombre croissant de virus reconnus et isolés, en particulier parmi les virus pathogènes pour l'homme et les animaux, devait bientôt entraîner un essai de classification logique. En effet, on constatait des analogies et des ressemblances parfois frappantes entre différents virus responsables de maladies analogues chez des espèces animales différentes ; on pouvait tout naturellement grouper ces virus en véritables familles : par exemple, les différentes varioles animales (cow-pox, variole du mouton, de la chèvre, etc.) sont causées par des virus différents mais déterminant des maladies ayant en commun une grande analogie de symptomatologie et de lésions.

En 1907, Prowazek tentait le premier essai de classification, en réunissant sous le nom de *Chlamidozoa* les différents agents viraux capables d'entraîner la formation de corps d'inclusion dans les cellules infectées. Cette idée fut reprise en 1927 par Cowdry, qui essaya de distinguer les virus selon les types morphologiques d'inclusions qu'ils causent dans les cellules infectées.

En 1922, Constantin Levaditi eut l'idée de grouper les virus selon leurs affinités pour les différents tissus, en fonction de l'origine embryonnaire de ceux-ci. Il était ainsi conduit à les classer en virus *dermotropes, mésodermotropes* et *endodermotropes*. Le système nerveux étant constitué chez l'embryon par une fraction invaginée de l'ectoderme, les virus qui s'y attaquent étaient qualifiés de virus *neurotropes,* et les maladies qu'ils causent de neuroectodermoses. Par sa logique et sa simplicité cette théorie devait connaître une grande vogue, mais il devint bientôt évident qu'elle réunissait dans de mêmes groupes des virus ayant des caractères assez disparates.

A partir de 1940, le développement de la microscopie électronique d'une part, les progrès de nos connaissances sur la biochimie des virus d'autre part, devaient ouvrir la voie à des classifications reposant sur des caractères morphologiques et biochimiques. La constatation que les virus renfermaient soit l'ADN, soit l'ARN, mais jamais les deux à la fois (Lépine et Sautter, 1946), confirmée par toutes les recherches, fournissait à P. P. Cooper (1961) la base de la première classification des virus reposant sur des caractères biochimiques : elle distinguait les *ribovirus* et les *désoxyvirus* selon que leur acide nucléique est l'ARN ou l'ADN. Dans chacun de ces grands groupes, une subdivision reposait sur la sensibilité ou la résistance à l'éther, impliquant la présence d'un constituant lipidique du virion. Enfin, les critères de taille permettaient les subdivisions ultérieures.

Cette classification fut accueillie avec faveur mais bientôt remplacée par une classification plus élaborée qui, en dehors de l'évidente distinction des virus à ARN et à ADN, reposait exclusivement sur des critères morphologiques. Cette classification proposée par A. Lwoff, R. W. Horne et P. Tournier, lors du IXe Congrès international de microbiologie, à Moscou en 1966, a servi de base aux discussions du Comité international de nomen-

clature de virologie qui décide des révisions périodiques en la matière. En voici les principes fondamentaux :

— On retrouve, comme dans le système de Cooper, les deux grandes catégories de virions, suivant que le matériel génétique est un acide ribonucléique (R) ou un acide désoxyribonucléique (D).

— Les virions R ou D sont subdivisés selon l'architecture de la capside, suivant les deux types reconnus de symétrie : hélicoïdale (H) ou cubique (C). La double symétrie des urophages, qui est comme nous l'avons vu à la fois cubique et hélicoïdale, est qualifiée de binaire (B).

— La capside virale de tous les virions, qu'ils soient R ou D, H ou C, peut être soit nue (N) soit enveloppée (E), ce qui correspond à une nouvelle subdivision.

— Dans une capside à symétrie cubique, le nombre des capsomères est, par définition, fini. Ce nombre constant est significatif pour les virus à symétrie cubique. Il suffit pour le déterminer de compter les capsomères figurant sur une arête du virion, de ce fait facilement identifiables.

Dans une nucléocapside à symétrie hélicoïdale, dont la mosaïque du tabac nous offre le modèle le plus étudié, le nombre des unités de structure (de nature protéique et qui sont l'équivalent des capsomères des virus à symétrie cubique) est déterminé par le poids moléculaire, par la structure tertiaire de la protéine virale et par le diamètre de la nucléocapside. De ce fait, le nombre de ces unités de structure assemblées en tore autour de l'acide nucléique pour former la nucléocapside n'a pas la même rigueur ni la même signification que les capsomères dans les virions à symétrie cubique. Les virus à symétrie hélicoïdale sont alors subdivisés selon leur diamètre (celui-ci est constant, alors que la longueur est sujette à des fluctuations), et dans le cas des virus B selon la structure de la tête (icosaèdre, prisme bi-pyramidal, etc.).

On arrive ainsi à établir un tableau général où les virus sont classés à partir des données fondamentales du système LHT, complétées selon le développement des connaissances. Ce tableau, qui est révisé périodiquement, a déjà subi un certain nombre de retouches; il est résumé dans le tableau 6.

Pour ce qui est des phages, les travaux de Bradley (1963, 1965) et de Kay (1963), partant de la classification de Bradley, distinguent six groupes de base, représentés dans le schéma ci-contre, où l'on remarque que les groupes D et E ne se différencient que par l'existence récemment reconnue de bactériophages à ARN.

Plus récemment encore, une étude détaillée de H. V. W. Ackerman (1969) conclut qu'il y a en réalité douze groupes de types morphologiques parmi les bactériophages; quatre ont une symétrie hélicoïdale ou cubique, les autres présentant une symétrie binaire correspondant aux phages caudés; il existe, enfin, des phages filiformes et des phages dotés d'une enveloppe. En outre, il faut tenir compte du fait que l'acide nucléique peut être soit monocaténaire (ADN 1), soit bicaténaire (ADN 2), et qu'il peut exister ou non un manchon autour de la queue du bactériophage. De plus, lorsque le bactériophage n'a pas une tête à symétrie cubique, celle-ci peut être soit isométrique, c'est-à-dire de forme régulière, géométriquement définissable, soit simplement géométrique. Enfin, on distingue, parmi les phages caudés, des phages à queue longue et des phages à queue courte, suivant que la longueur de la queue est supérieure ou inférieure au plus grand diamètre de la tête. Ces critères sont applicables aux 444 bactériophages actuellement connus.

On a reproché au système LHT, qui repose à peu près exclusivement sur des caractères morphologiques, de réunir dans les mêmes catégories des virus infectant des espèces appartenant à des règnes différents, des virus des végétaux et des virus des animaux par exemple. Cette objection ne mérite pas d'être retenue, car cette classification a, au contraire, l'avantage de faire apparaître entre les maladies affectant des espèces animales totalement différentes des analogies insoupçonnées au premier abord, que l'expérimentation et les recherches immunologiques sont venues confirmer de façon inattendue. Nous n'en voulons pour preuves, entre autres, que les analogies morphologiques apparues lors de l'examen au microscope électronique entre des virus aussi différents les uns des autres que le facteur sigma de la drosophile, le virus de la stomatite vésiculeuse des Bovidés et celui de la rage; les expériences d'adaptation à la drosophile, d'immunité croisée et d'infection croisée ont montré que les rapprochements qu'imposait la classification n'étaient pas l'effet du seul hasard. De la même manière, certains virus des Insectes se trouvent rapprochés soit de ceux des plantes, soit de ceux des Vertébrés, ce que confirment encore les résultats de l'expérimentation. Il est donc logique que la classification en définitive retenue pour les virus n'ait pas à tenir compte des espèces sensibles ni même des règnes auxquels appartiennent ces espèces.

L'existence d'un système de classification reposant sur des bases logiques et des critères indiscutables a permis de trancher la question, depuis longtemps en discussion, de la nomenclature des virus selon une dénomination de type linnéen. Il y avait longtemps que, parmi les virologistes, ceux des virus des plantes en particulier, s'était manifesté le désir de voir désignés les virus par un nom latin issu de la notion de genre et d'espèce, d'une façon conforme aux habitudes établies depuis Linné chez les botanistes et les zoologistes. Mais une telle question de nomenclature ne pouvait se poser qu'à la condition d'être associée à une classification traçant les cadres généraux dans lesquels prendraient place les ordres, sous-ordres, familles, genres et espèces.

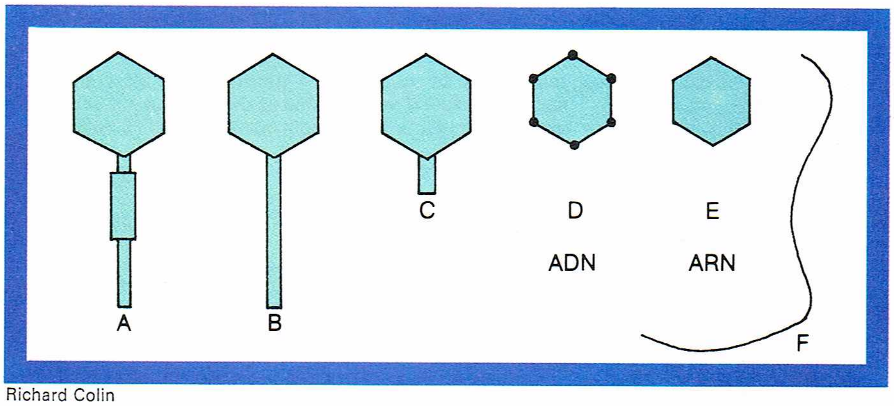

Richard Colin

▲ ***Représentation schématique de la classification des bactériophages** (d'après Bradley et Ackermann).*

Par exemple, il ne servirait à rien de dénommer la mosaïque du tabac *Marmor tabaci* si cette dénomination ne correspondait pas à l'établissement d'une relation ontologique avec d'autres virus du genre *Marmor,* et si l'on ne groupait pas en famille les genres et les espèces ainsi définis.

Classification et dénomination sont deux questions distinctes, quoique étroitement liées : ce sont cependant les noms proposés par l'auteur d'un manuel de détermination pour rebaptiser les virus actuellement connus, noms acceptés par quelques-uns et rejetés avec indignation par la plupart des autres, qui ont indirectement éveillé l'intérêt des milieux scientifiques et universitaires sur la classification des virus.

L'avantage du système LHT est précisément que les critères morphologiques deviennent accessibles aux virologistes comme le sont ceux des plantes aux botanistes, et que les dénominations vont de pair avec les étapes de la classification.

On trouvera dans le tableau 6 le système LHT, tel qu'il se présente actuellement.

Il nous reste à passer en revue brièvement les groupes principaux des virus des Bactéries, des Végétaux, des Insectes et des Vertébrés.

Virus des Bactéries

La première observation de lyse bactérienne, ou bactériolyse, par un virus a été tout à fait fortuite. En 1915, le microbiologiste F. W. Twort décrivait une maladie aiguë des staphylocoques, où se produisait un changement d'aspect des cultures, observée au cours de contrôles sur la teneur microbienne du vaccin antivariolique. Twort démontra que l'agent causal était filtrant et pouvait être transféré d'une culture à une autre. En 1921, Félix d'Hérelle décrivait, indépendamment des premières observations de Twort, le phénomène de la lyse bactériophagienne. Ajoutant des filtrats, dépourvus de cellules, provenant de fèces de sujets atteints de dysenterie bactérienne à des cultures de bacille de Shiga (agent causal de la maladie),

▶ *A gauche, photomicrographie électronique du* bactériophage Twort ; *le trait repère correspond à une longueur de 100 nm. A droite, quelques bactériophages importants pour la génétique :* le bactériophage λ *qui se multiplie dans les cellules d'*Escherichia coli *est le virus lysogène le mieux connu ;* les bactériophages T_2, T_4 et T_6, *morphologiquement identiques, sont génétiquement apparentés (ce sont actuellement les mieux connus de tous les éléments génétiques ; eux aussi se multiplient dans les cellules d'*E. coli*) ;* les bactériophages F_2, R_{17}, et MS_2 *forment le groupe des plus petits parasites d'*E. coli *(d'après Watson).*

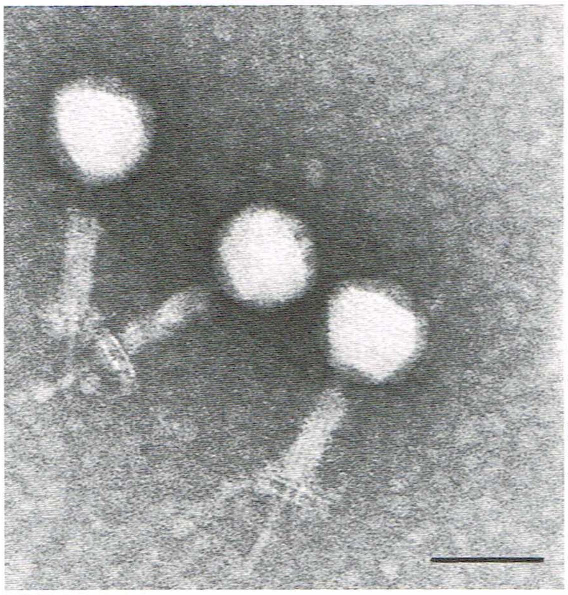

O. Croissant, J.-F. Vieu, Ch. Dauguet, Institut Pasteur, Service des virus

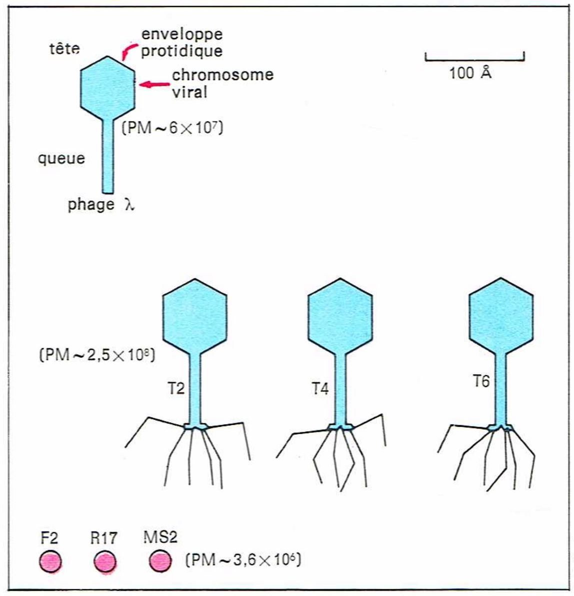

I.G.D.A.

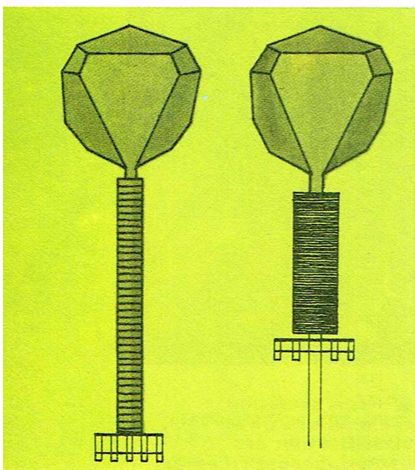

Richard Colin

▲ *Représentation schématique du* bactériophage Twort : *à gauche, appendice caudal à l'état détendu ; à droite, appendice caudal contracté (d'après J.F. Vieu, O. Croissant et Ch. Dauguet ; Institut Pasteur, Service des virus).*

il ne fut pas peu surpris, après une nuit de mise à l'étuve, de retrouver ces cultures parfaitement limpides et totalement dépourvues de germes. Cet effet se révéla transmissible à d'autres cultures du même type. Les observations furent immédiatement confirmées par d'autres laboratoires.

D'Hérelle créa alors le terme de *bactériophage* (des mots grecs *bakteria*, bâton, et *phagein*, manger), qui signifie « mangeur de bacilles ». Approfondissant les phénomènes de la lyse bactérophagienne, il démontra que, après la destruction des cultures, l'agent responsable s'était multiplié et qu'il pouvait être propagé indéfiniment. Il s'agissait donc d'un agent vivant du type de ceux que l'on connaissait déjà, capables de provoquer des maladies chez des plantes et des animaux.

Ce microbiologiste commit cependant quelques erreurs. Il pensait que les bactériophages pouvant détruire les cellules bactériennes de différentes espèces étaient tous identiques et qu'ils pouvaient permettre de guérir des maladies infectieuses bactériennes. Cela ne fut pas confirmé, et la thèse du rôle thérapeutique des bactériophages est à peu près abandonnée.

Les recherches furent toutefois reprises plus tard, sur un plan fondamental, dans de nouvelles directions et avec de nouveaux moyens techniques. Les résultats obtenus depuis les travaux d'A. Gratia, d'E. Wollman, de Luria et Delbrück sont des étapes fondamentales dans la connaissance des phénomènes vitaux au niveau moléculaire.

Les bactériophages sont des virus dotés d'une symétrie binaire, avec, généralement, une partie antérieure, à symétrie cubique, et une partie postérieure, à symétrie hélicoïdale ou torique : on en a réalisé d'innombrables et remarquables photographies au microscope électronique. Mais la forme et la taille des bactériophages sont très variables. Leur composition chimique diffère en ce que certains (par exemple, le T_2, un des parasites d'*Escherichia coli*) possèdent, au lieu de cytosine, de l'hydroxyméthyl-5 cytosine. Leur acide nucléique est le plus souvent l'ADN ou parfois l'ARN, ce qui conditionne des modalités différentes de développement dans la cellule bactérienne infectée. La fixation à la paroi cellulaire de l'hôte se fait par des appendices terminaux de la queue (épines, fibres) pouvant se fixer sur des substrats de différentes natures, qui sont dans certains cas des lipoprotéines, dans d'autres des lipopolysaccharides.

Lors de la phase de pénétration, l'acide nucléique du bactériophage est injecté à l'intérieur de l'hôte, alors que les capsides vides restent attachées extérieurement à la paroi bactérienne : on peut les en arracher sans pour cela interrompre le cycle du bactériophage, qui est assuré par l'acide nucléique exclusivement. Le cycle de reproduction dure tout au plus quelques minutes ; à la fin, les particules virales néoformées détruisent la paroi cellulaire bactérienne avec l'aide d'une enzyme (la lysozyme) et sont libérées.

Contrairement à ce que pensait d'Hérelle, le nombre des genres de bactériophages existants est très grand, chacun étant spécialisé envers une espèce bactérienne déterminée. On les définit aussi en fonction de l'hôte naturel (bactériophages de *Salmonella typhi*, de *Micrococcus pyogenes*, de *Corynebacterium diphteriae*, d'*Escherichia coli*, etc.). On désigne leurs types avec des symboles individuels (λ, T, P, etc.), qui servent à indiquer l'espèce elle-même et qui n'ont habituellement pas de signification précise. Le symbole indique, en outre, que le bactériophage provient d'une série déterminée : par exemple, les bactériophages de la série T (T_1, T_2, ..., T_7), qui ont été isolés par Démerec et Fano en 1945, sont des parasites d'*E. coli*.

Les mieux étudiés sont les parasites d'*E. coli* (ou colibacille), Bactérie existant normalement dans l'intestin de l'homme et des animaux ; *E. coli* constitue un matériel idéal pour les études fondamentales, non seulement du fait de la facilité de culture du système, mais aussi parce qu'elle est la Bactérie la mieux connue des points de vue chimique, génétique et biologique. On connaît de nombreux bactériophages d'*E. coli* : on a essayé d'en donner une classification sur des bases morphologiques, mais celle-ci est incomplète et partielle. La série s'est notablement enrichie ces dernières années. Les T_2, T_4 et T_6 sont pourvus d'ADN bicaténaire. Le F_2 contient de l'ARN monocaténaire. Les $\Phi\ X_{174}$, F_1, Fd et M_{13} possèdent eux aussi un ARN monocaténaire : ce sont les plus petits

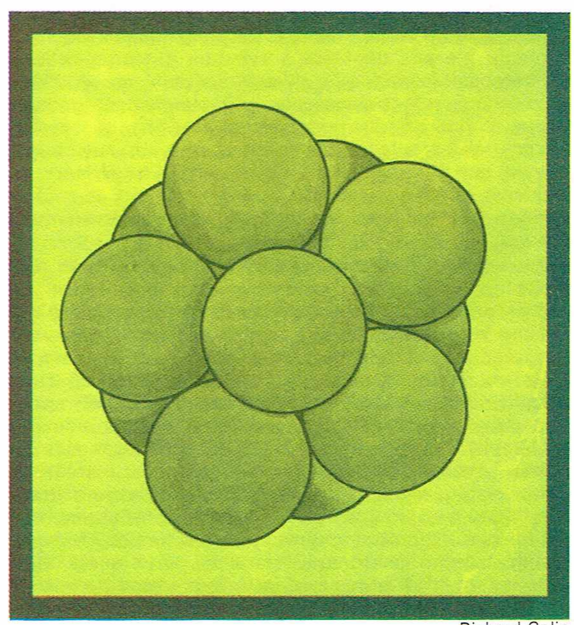

Richard Colin

▶ *Représentation schématique du bactériophage* $\Phi\ X_{174}$ *à 12 capsomères, où l'on retrouve la symétrie 5, 3, 2.*

bactériophages de ce type. Nous nous limiterons ici à donner les notions principales concernant les bactériophages.

Typage lysotypique des Bactéries

Du fait de la spécificité rigoureuse existant entre les souches bactériennes et les bactériophages, il est possible d'identifier des cultures bactériennes nouvellement isolées, en fonction de leur sensibilité vis-à-vis des bactériophages connus. Ce procédé, appelé le *typage lysotypique,* ou *bactériophagien,* des microbes, a donné d'intéressants résultats dans l'étude des épidémies de typhoïde, ainsi que dans les staphylococcies (à *Micrococcus pyogenes*), surtout en milieu hospitalier. On tend toutefois à abandonner cette méthode, remplacée par des techniques plus rapides.

Bactéries lysogènes

Un bactériophage peut exister sous deux formes : en tant que bactériophage actif, pathogène, et en tant que bactériophage atténué. Le premier, au contact de la cellule bactérienne spécifique, y pénètre, s'y multiplie, et en provoque la lyse. Le second pénètre également dans la Bactérie, mais ne la lyse pas : il se transforme en virus occulte, ou *prophage* (A. Lwoff, 1953). La cellule bactérienne, apparemment saine, continue à vivre, mais elle contient le parasite. Il suffit d'un phénomène externe (même la simple exposition à des rayons ultraviolets) pour que le prophage devienne actif, se multiplie et provoque la destruction de la cellule, avec libération de particules bactériophagiennes matures, néoformées, pathogènes. C'est le *phénomène de lysogénie :* la Bactérie portant son prophage est dite *lysogène,* c'est-à-dire capable de provoquer la lyse.

Pendant la phase lysogène, le virus est caché avec son acide nucléique dans la Bactérie, intégré au génome de l'hôte : il est latent, participe à tous les phénomènes de division, et est régulièrement transmis aux cellules filles, toujours dans les mêmes conditions. L'action des rayons ultraviolets (ou d'un autre mutagène) provoque l'activation du génome viral, en lui restituant son activité de synthèse protéique indépendante.

Les phénomènes décrits offrent au biologiste un exemple intéressant à étudier : ils démontrent la possibilité que, dans des cellules apparemment normales, il puisse y avoir en réalité un virus latent, intégré au niveau du patrimoine chromosomique cellulaire lui-même et pouvant, par ailleurs, se manifester sous l'action de différentes causes : la cellule acquiert alors de nouvelles propriétés, toujours anormales.

Étude génétique des bactériophages

Les généticiens ont trouvé dans les bactériophages un instrument de travail irremplaçable. La cellule eucaryotique intègre, qui compte plus d'un million de gènes contrôlant la synthèse de milliers de protéines, est un système où il est pratiquement impossible d'isoler et d'identifier un gène particulier, avec son ARNm correspondant et son produit protidique final. Les bactériophages permettent de résoudre ce problème bien plus facilement : il est possible d'introduire par leur intermédiaire un matériel génétique actif et connu dans une cellule vivante. Comme ils contiennent un nombre limité de gènes (de trois à quelques centaines), pouvant être isolés sous forme hautement purifiée, ils permettent d'analyser en détail la transcription génétique des molécules protéiques de la capside virale et les phases du processus de synthèse.

On considère que le bactériophage T_4 contient environ 100 gènes : au moins 75 de ceux-ci ont été identifiés. On

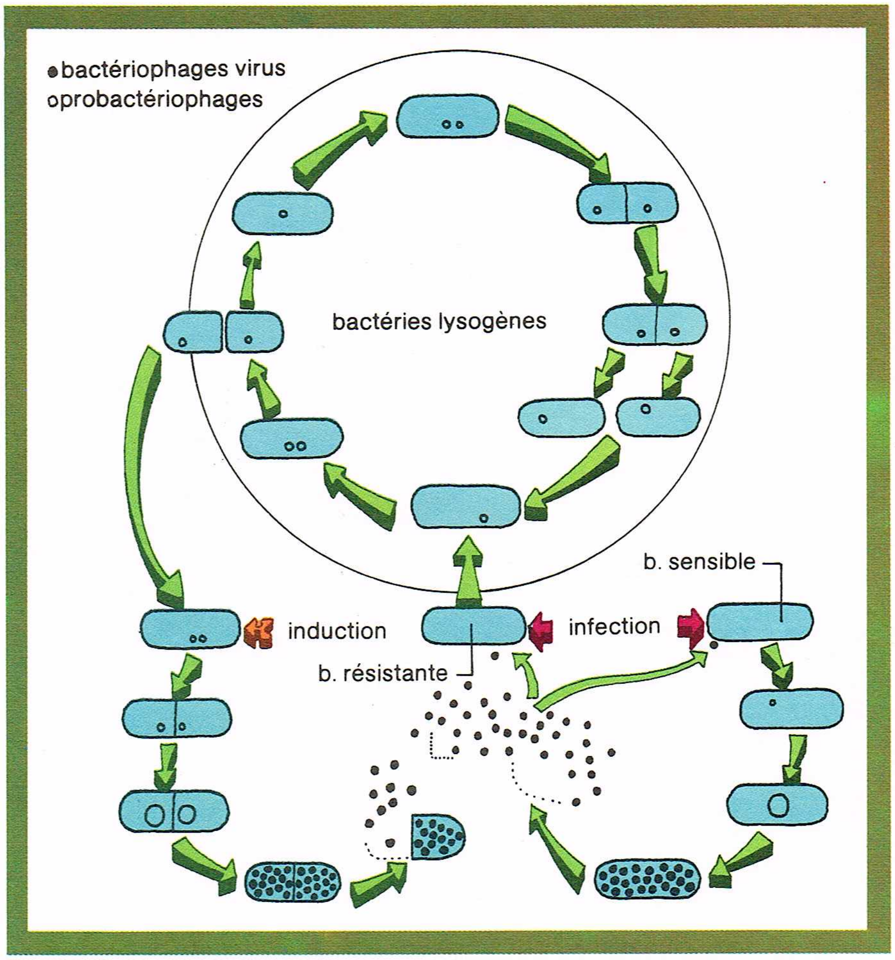

Richard Colin

▲ *Diagramme de l'évolution du bactériophage et du probactériophage ou prophage chez des* Bacillus megatherium *sensibles et lysogènes (d'après A. Lwoff, Ann. Inst. Pasteur, 1950, t. 78, p. 736).*

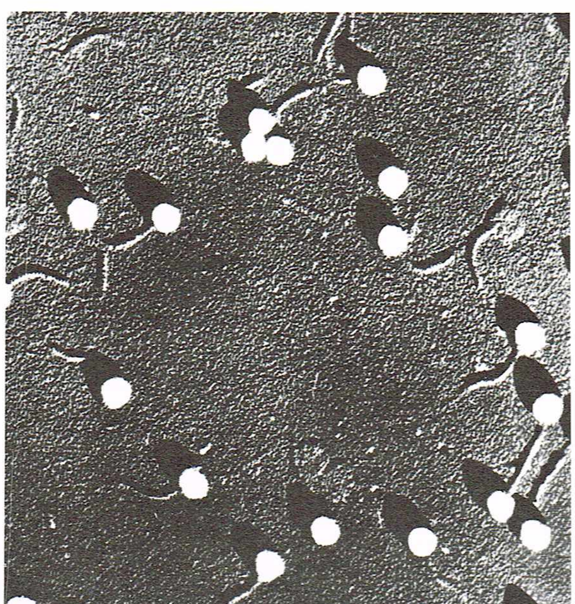

M. Pitzurra

M. Pitzurra

◄ *A gauche,* bactériophage T_5 *en préparation purifiée (× 60 000)* [*d'après Adams*]. *A droite, particules du* bactériophage T_2 *sur les parois cellulaires d'*Escherichia coli *(× 12 000)* [*d'après Burnet et Stanley*].

Université milanaise des hautes études - Institut de pathologie végétale

▲ *Pied de vigne atteint de flétrissures dues à un virus, parmi d'autres pieds sains ; on observera la couleur jaune intense (jaunisse ou mosaïque jaune) et le nanisme du plant.*

▶ *Page ci-contre, en haut, à gauche, plant de tomate dont les feuilles sont atteintes par un virus. A droite, corpuscules du virus de la mosaïque du tabac, vus au microscope électronique.*

a obtenu des informations encore peu précises avec les petits bactériophages à ARN d'*Escherichia coli*. Parmi ces derniers, le bactériophage F_2 possède, dans son ARN, une chaîne de 3 000 nucléotides seulement, pouvant coder 1 000 acides aminés. Une centaine de ceux-ci se trouvent dans la capside du virus. Il est probable qu'au moins un tiers des autres sont utilisés pour la formation de la ribonucléopolymérase, ou ARN polymérase, spécifique du bactériophage. Il reste 600 acides aminés libres pour la fabrication d'une à trois protéines supplémentaires, nécessaires en vue de la reproduction du F_2 : l'une d'entre elles peut être la lysozyme, nécessaire pour libérer les particules de la descendance.

C'est là un des exemples les plus remarquables des progrès de nos connaissances sur les bactériophages. Les résultats obtenus par Kornberg et Goulian sont encore plus étonnants : comme nous l'avons dit plus haut, ces auteurs ont réalisé la synthèse de molécules d'ARN du bactériophage $\Phi\ X_{174}$, pouvant infecter des cellules d'*E. coli* et en provoquer la lyse, avec libération de virions néoformés de $\Phi\ X_{174}$, complets. Il s'agit là de la première réalisation de molécules artificielles capables d'autoreproduction.

C. Bevilacqua

▶ *Feuille d'*Abutilon striatum *(famille des Malvacées) dont le caractère décoratif est dû aux marbrures, c'est-à-dire à une mosaïque d'origine virale.*

Virus des végétaux

En raison de la facilité avec laquelle on peut séparer les protéines des plantes et les manipuler à la température du laboratoire sans les dénaturer, les virus des végétaux ont été les premiers découverts, purifiés et cristallisés. Ils ont donné la première démonstration d'une composition nucléoprotidique et la première preuve indiscutable de la fonction génétique de l'acide nucléique. Bien que possédant les caractères généraux des virus pour ce qui est de la morphologie, de la composition chimique et des rapports avec la cellule hôte, ils présentent des particularités qui leur sont propres.

Ce sont tous des virus ARN. Ils se multiplient presque uniquement dans les tissus végétaux adultes, en particulier dans les feuilles. Leur transmission nécessite une lésion externe de l'épiderme foliaire, artificielle ou due à des Insectes jouant le rôle d'une seringue à inoculation. Les feuilles sont en effet revêtues d'une paroi continue de cellulose (cuticule), impénétrable, même aux plus petites molécules protidiques. En dessous de la cuticule, les cellules communiquent amplement, ce qui permet aux virus, une fois la barrière cuticulaire franchie, de passer librement d'une cellule à l'autre et de se propager dans la fine couche de protoplasme (d'une épaisseur de 10 μ) située à l'intérieur de la paroi cellulaire, mais jamais dans la vacuole qui occupe le centre de la cellule.

Un excellent exemple de la transmission des viroses végétales par l'intermédiaire des Insectes est celui de la marbrure d'*Abutilon striatum*, importée en 1868 d'Asie tropicale comme plante ornementale en Europe. On a observé que cette marbrure n'était pas transmise à des pieds sains, cultivés dans le même habitat, mais par greffe. On a récemment découvert que, en Amérique du Sud, ce type de marbrure foliaire était transmis naturellement à d'autres plantes par l'intermédiaire d'un Insecte, un Diptère de la famille des Aleurodidés inconnu en Europe. L'absence de ce vecteur obligatoire explique l'impossibilité de la diffusion spontanée de ces viroses sous nos climats.

La spécificité de l'hôte pour les virus des végétaux est bien moins rigoureuse que dans les autres domaines de la virologie : normalement, un virus végétal peut s'attaquer à une gamme étendue de plantes sensibles. Ces virus provoquent des lésions caractéristiques, reconnaissables à l'œil nu, et pouvant être divisées en plusieurs types :

— les *mosaïques :* tachetures des feuilles, de couleur vert jaunâtre ou jaune clair, bigarrures des tulipes ;

— les lésions *friselées :* bulles apparaissant à la partie supérieure des feuilles ;

— les *nécroses :* morts de groupes cellulaires, avec formation de taches brunes ;

— le *nanisme :* arrêt de la croissance en hauteur de la tige et des rameaux ;

— la *jaunisse,* ou *jaunissement :* jaunissement des feuilles ;

— les *tumeurs :* excroissances cylindriques ou coniques, lamellaires.

Certaines viroses sont bien tolérées par la plante et n'en altèrent pas le comportement (c'est le cas pour les panachures des tulipes) ; toutefois, il peut se produire des lésions localisées ou généralisées, provoquant la mort de toute la plante.

Les propriétés des virus des végétaux sont étudiées en inoculant les feuilles susceptibles : les expériences sont essentiellement effectuées sur le tabac, la tomate et le haricot, en frottant une feuille saine avec un chiffon de coton imbibé du suc tiré des tissus d'une plante malade. On a parfois recours à la greffe de parties d'une plante malade, ou encore à la transmission par des Insectes

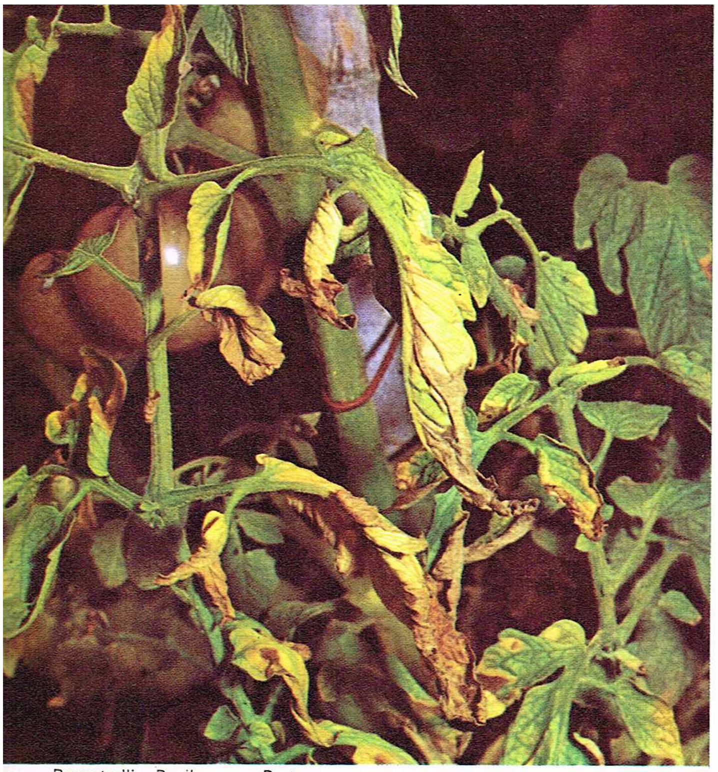

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Rassegna medica

(Aphidiens) nourris sur la plante malade puis transférés sur celle qui est saine. La détermination du virus est essentiellement fondée sur les lésions qu'il produit.

On connaît plus de 300 virus végétaux, qu'on nomme habituellement d'après le nom de la plante hôte et celui du type de lésion qu'ils provoquent. Leur détermination exacte et leur classification sont loin d'être parfaites ; on commence seulement à en réaliser une systématique, d'après des recherches immunologiques et morphologiques au microscope électronique. Nous donnerons ici quelques détails sur les plus importants des virus des végétaux.

Virus de la mosaïque du tabac (TMV)

Il s'agit d'un virus typique à structure hélicoïdale ; les virions sont longs de 3 000 Å environ et larges de 150 Å. Ils sont même visibles au microscope optique en lumière polarisée. Le premier virus identifié (Ivanovski) et cristallisé (Stanley) a été le TMV ; son ARN est aussi le premier à avoir été isolé (Bawden et Pirie), et il est le premier dont on ait démontré avec certitude le caractère pathogène (Fraenkel-Conrat). Cette primauté, si l'on peut dire, est due en grande partie à deux facteurs essentiels : d'abord l'importante quantité de virus que l'on obtient à partir du suc des feuilles des pieds malades (jusqu'à 70 mg par feuille), ensuite la facilité avec laquelle on peut isoler (par centrifugation ou simple précipitation par le sulfate d'ammonium) l'ARN des unités structurales, pour les voir ensuite se reconstituer en virions complets, en ramenant le pH à des valeurs plus acides.

Il existe autant de souches de virus de TMV que de chercheurs ayant tenté de les identifier : c'est dire qu'il y en a d'innombrables variétés. Ce virus semble avoir été importé des États-Unis par les premiers colons blancs, sous forme de parasite du plantain lancéolé *(Plantago lanceolata)*. Il se serait plus récemment adapté au tabac, chez qui on l'a découvert. Ce changement d'hôte n'est pas le seul : en Europe, la maladie a aussi envahi les plants de tomate, où on l'a décrit sous le nom de mosaïque de la tomate. Bawden et Pirie ont démontré que les virus n° 3 et n° 4 de la pastèque d'abord répandus en Europe, puis considérés comme une curiosité de laboratoire, ne sont en réalité que des formes de TMV.

Virus de la nécrose du tabac

Celui-ci est un petit virus, à symétrie cubique. Il a été isolé en 1935, à Cambridge, dans la serre où étaient effectuées des recherches sur d'autres virus des végétaux. Il provoque des lésions locales, nécrotiques, qui ont tendance à diffuser. Le nombre de plantes sensibles à ce virus

▼ A gauche, schéma montrant que l'ARN est le composant génétique du virus de la mosaïque du tabac : les particules en bâtonnets (A) peuvent être facilement séparées en leurs éléments, les protéines et l'ARN (B), dont il est possible de vérifier séparément la capacité de provoquer une infection virale (seules les molécules de l'ARN possèdent cette capacité). Les particules de virus produites en infectant les feuilles avec de l'ARN pur sont identiques à celles qui proviennent de l'infection par le virus entier (d'après Watson). A droite, plant de tabac atteint de mosaïque.

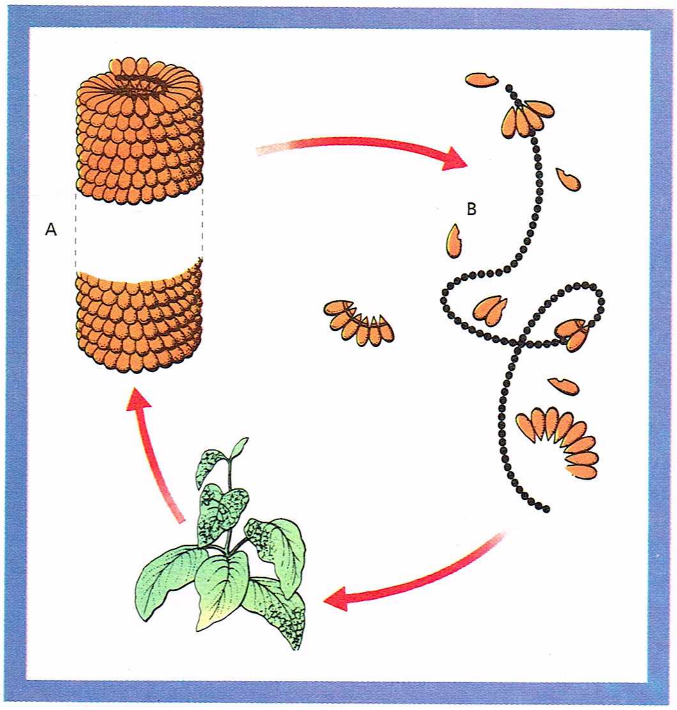

I.G.D.A.

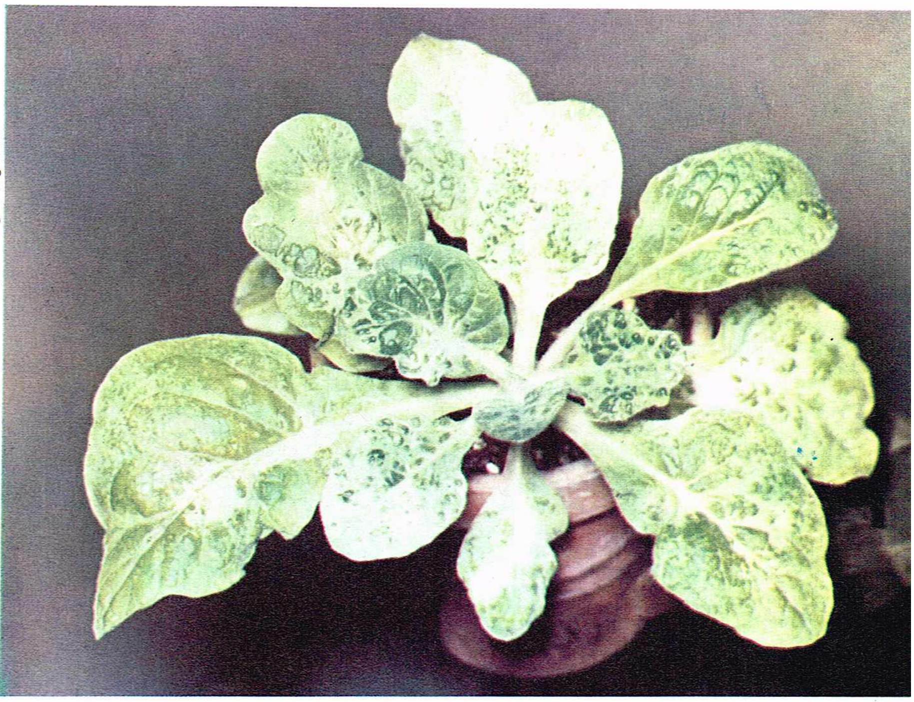

Université milanaise des hautes études - Institut de pathologie végétale

▶ *A gauche, plant de chou chinois infecté par le* **virus de la mosaïque jaune du navet**; *les lésions locales sont mieux visibles dans la feuille inoculée (en bas, à droite). A droite, cristaux de virus de la mosaïque jaune du navet.*

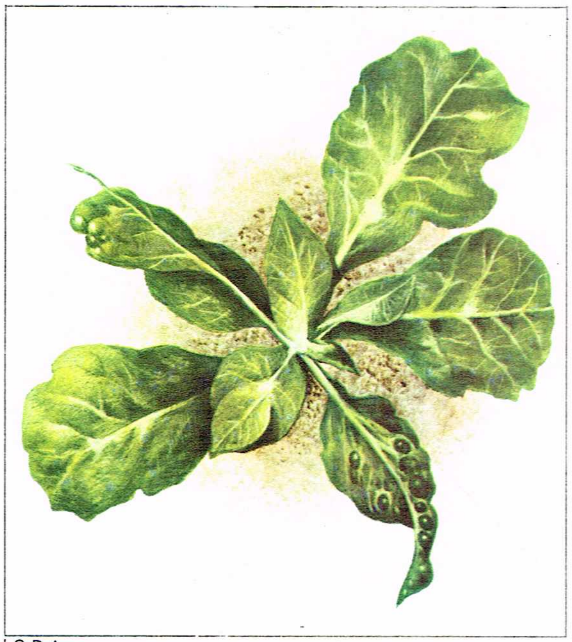

I.G.D.A.

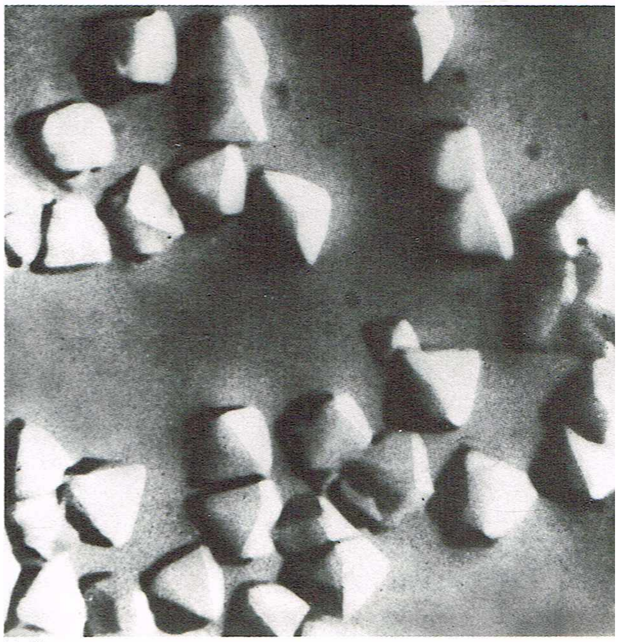

M. Pitzurra

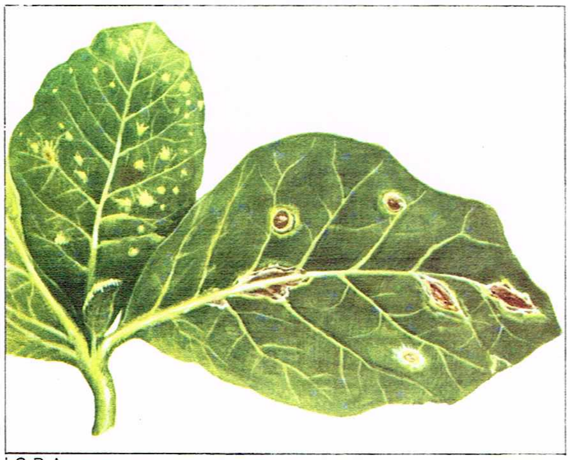

I.G.D.A.

▶ *Feuille de tabac atteinte du* **ring-spot**, *maladie virale.*

est énorme. On le considérait aussi comme une curiosité de laboratoire, mais en Hollande on s'est aperçu qu'il provoque de gros dégâts au haricot *(Phaseolus vulgaris)*, à la tulipe *(Tulipa gesneriana)* et à une primevère *(Primula obconica)*. Le virus, très résistant, se conserve longtemps dans le sol et donne lieu à des infections latentes, responsables de la transmission à distance de la maladie.

Virus des taches annulaires du tabac (« ring spot » du tabac)

Ce virus présente une symétrie cubique : c'est un polyèdre d'environ 260 Å de diamètre. Il a été isolé en 1939 par Stanley, à partir de feuilles de tabac portant des taches annulaires concentriques (maladie du « ring spot »). Il est possible d'en isoler de grandes quantités (jusqu'à 45 mg par litre de suc), y compris des autres plantes qu'il peut infecter, comme la courge *(Cucurbita pepo)*. C'est un bon matériel d'études en laboratoire.

Virus de la mosaïque jaune du navet

Il existe de nombreux virus qui provoquent la mosaïque jaune du navet. L'un d'eux est particulièrement répandu en Europe et provoque de grands dommages aux choux, navets, raves et à d'autres Crucifères importantes du point de vue horticole et industriel. On le trouve chez l'hôte en quantités importantes (jusqu'à 4 g par litre de suc). Dans des conditions naturelles, il est diffusé par un Insecte du genre *Phyllotreta*. Le cours de l'infection est lent : il faut en effet deux mois avant que le suc de la plante infectée contienne une concentration maximale de virus. Les virions présentent une symétrie cubique; leur capside a un diamètre externe de 280 Å.

Virus X de la pomme de terre

Il s'agit d'un des plus importants virus des végétaux. Il touche largement les cultures de pomme de terre, entraînant une perte annuelle de 2 millions de tonnes de tubercules. Son virion présente une structure hélicoïdale, avec des filaments d'une longueur allant jusqu'à 5 000 Å, qui ont tendance à former de longues mèches gélatineuses dans les tissus de la plante.

Virus des Insectes

Depuis une vingtaine d'années, les recherches sur les virus des Insectes ont connu un très grand développement, à la fois en raison de l'intérêt économique que présentent les maladies virales transmises par les Insectes et du fait que les viroses des Insectes présentent du point de vue fondamental un très grand intérêt. Partout se sont développés des laboratoires consacrés aux recherches fondamentales sur les virus des Insectes : en France, celui de C. Vago, successeur de Paillot à Saint-Christophe-lès-Alès, en Grande-Bretagne avec K. Smith, au Canada avec G. H. Bergold, aux États-Unis avec K. Maramorosch.

Les Insectes jouent un rôle fondamental dans la transmission des infections à virus des plantes. Chez les Vertébrés, ils sont responsables de la transmission de tout le grand groupe des *Arbovirus*, communs à l'homme et aux animaux. Ils sont ainsi directement ou indirectement responsables de graves maladies comme les encéphalites épidémiques, les fièvres hémorragiques ou le *louping ill* du mouton, transmissible aux humains.

La fonction de vecteur vivant dans la transmission des infections virales fut reconnue chez certains Insectes bien avant qu'on eût découvert les virus eux-mêmes : en effet, J. Nott (en 1848), Beauperthuy (en 1854) pensaient que le responsable de la propagation de la fièvre jaune était un moustique, ce qui fut confirmé par la suite. Les premières études systématiques en ce domaine furent réalisées plus tard, sur des larves de ver à soie. En 1856, Cornalia étudia pour la première fois la « jaunisse » de cet Insecte, à cause des importantes pertes économiques qu'elle provoquait. Il décrivit chez les larves les grosses tumeurs de la polyédrose, qu'on peut voir au microscope. En 1907, von Provazek démontra le pouvoir filtrant de l'agent pathogène contenu dans ces matrices protéiques. Dans la grande majorité des cas, le virus atteint seulement les larves; les imagos sont plus résistants. La transmission de l'infection est horizontale (par voie alimentaire) et verticale (par les cellules germinales).

Les moyens de recherche utilisés pour l'étude des virus des Vertébrés commencent seulement à être employés pour les virus des Invertébrés : les cultures de tissus d'Insectes *in vitro* et la détermination sérologique des souches virales isolées sont maintenant utilisées systématiquement en ce domaine. On se trouve néanmoins face à de nombreuses incertitudes pour la classification exacte des souches virales isolées, et l'on doit encore avoir recours au critère de la source d'isolement et à la description des lésions provoquées dans les tissus.

▶ *Page ci-contre, en haut, modèle structural d'un* **virus de la polyédrose cytoplasmique** : *à gauche, structures superficielles; à droite, structure interne. Les trois capsomères antérieurs de la figure de gauche ont été ôtés pour que l'on puisse voir l'implantation pentagonale; on observe sur la figure de droite la double enveloppe de la capside (d'après Smith).*

Les maladies des Insectes dues à des virus sont divisées en deux groupes : les maladies à inclusions (polyédroses nucléaires et cytoplasmiques, granuloses) et les maladies à virus sans inclusions.

Maladies à inclusions

— Les *polyédroses* sont caractérisées par le fait que les virions sont renfermés dans de gros cristaux protidiques (polyèdres). Une fois libéré de cette enveloppe, le virion ressemble, du point de vue morphologique, aux virions qu'on isole à partir d'autres organismes ; sa symétrie est cubique ou hélicoïdale.

Dans les *polyédroses nucléaires,* le virus se multiplie au sein du noyau cellulaire de plusieurs tissus : épiderme, corps gras, trachées, et, rarement, glandes séricigènes. La particule virale à ADN a toujours l'aspect d'un bâtonnet et mesure de 20 à 50 nm sur 200 à 400 nm. La plus grande variété des virus de la polyédrose nucléaire est observée chez les larves des Lépidoptères ; mais on a aussi observé des infections semblables chez les Hyménoptères. Chez les Diptères, on a décrit une seule forme de polyédrose nucléaire, qui frappe *Tipula paludosa,* la tipule des marais. Le diamètre du polyèdre qui renferme les virus, grosse inclusion protidique de forme rectangulaire ou hexagonale, varie de 0,5 μ à 15 μ. Contrairement à la plupart des polyédries nucléaires, le virus de la polyédrose nucléaire de *Tipula paludosa* présente une symétrie cubique.

Dans les *polyédroses cytoplasmiques,* le virus a toujours une symétrie cubique : les inclusions polyédriques sont localisées dans le cytoplasme des cellules de la muqueuse intestinale ; elles ont une taille très variable (de 0,2 μ à 2 μ) ; les particules virales qui y sont contenues ont une structure icosaédrique, présentent une double capside et ont un diamètre variant de 60 nm à 70 nm ; les capsomères sont distribués aux sommets de l'icosaèdre et ont une section pentagonale, avec une cavité centrale ; leur acide nucléique est un ARN. La première observation de polyédrose cytoplasmique a été faite par K. Smith et R. Wyckoff, en 1950, chez les larves d'*Arctia caja* (appelé vulgairement écaille martre, ou martrée) et d'*Arctia villica* (ou écaille velue). On en connaît aujourd'hui de nombreuses variétés, qui frappent surtout les larves des Lépidoptères et des Névroptères.

— La *granulose* a été décrite pour la première fois par Paillot, en 1926, chez un papillon, la piéride du chou *(Pieris brassicae)*. Le même auteur décrivit plus tard une maladie semblable chez *Agrotis segetum,* ou noctuelle des moissons. Cette affection atteint seulement les larves et rarement les chrysalides des Lépidoptères. La particule virale à ADN possède une structure complexe ;

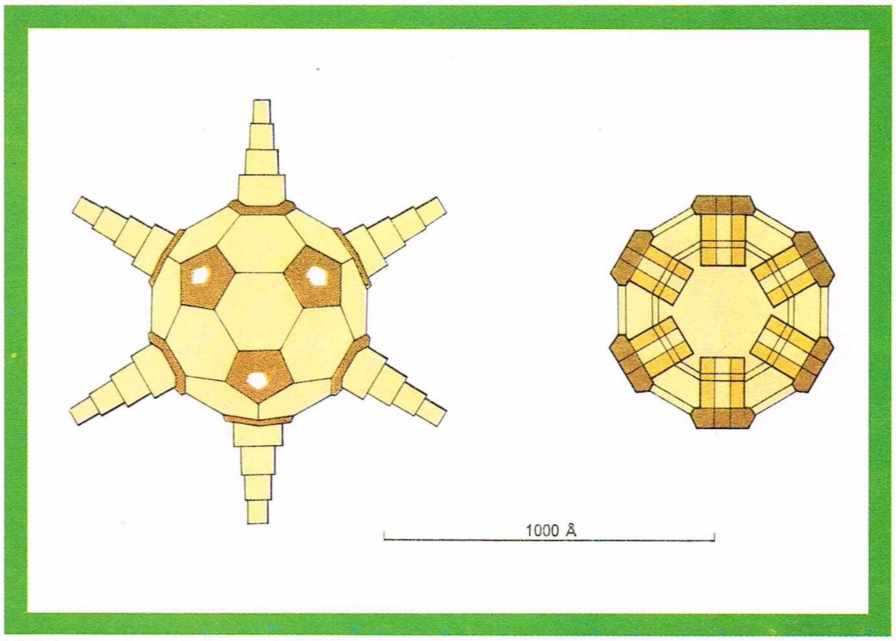

I.G.D.A.

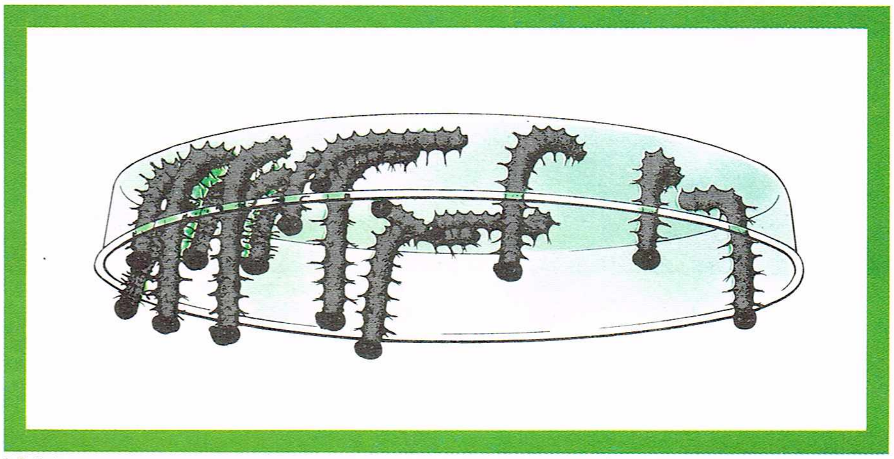

I.G.D.A.

▲ *Ci-dessus, larves de* Vanessa urticae, *ou vanesse de l'ortie, lors d'un stade tardif de* polyédrose nucléaire ; *on observera la façon caractéristique dont les larves pendent la tête en bas (d'après Smith).*

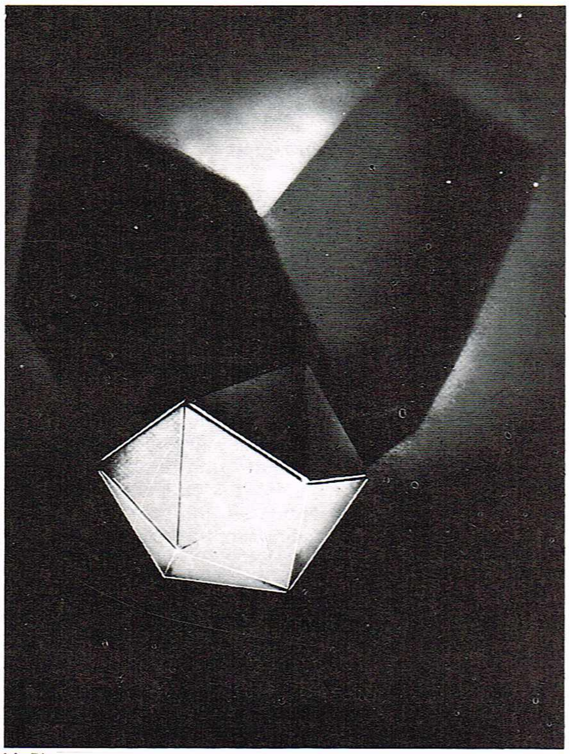

M. Pitzurra

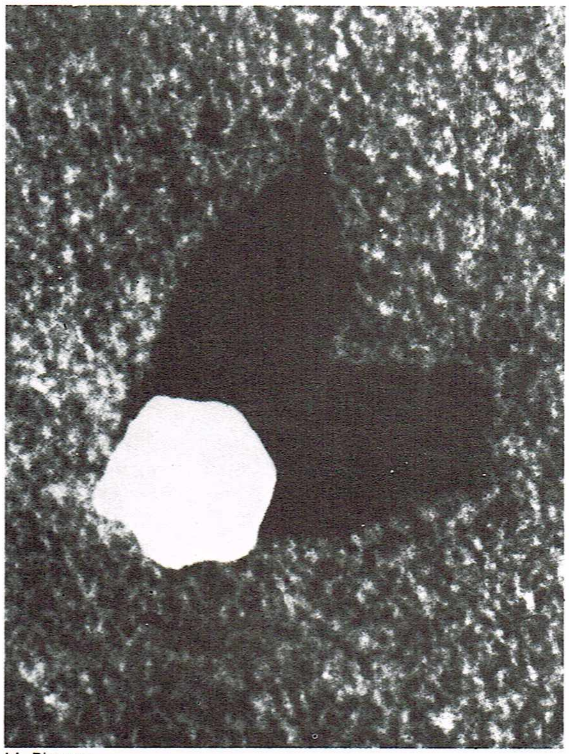

M. Pitzurra

◀ *A gauche, modèle d'icosaèdre ombré par deux sources lumineuses et orienté de manière que le sommet d'un hexagone soit dirigé vers les deux sources lumineuses à la fois. On obtient ainsi deux ombres : l'une à 4 côtés, en pointe, et l'autre à 5 côtés, à extrémité émoussée.*
A droite, particule virale du virus de Tipula iridescens *(Diptère), illuminé comme l'icosaèdre de gauche ; les ressemblances entre les deux ombres sont évidentes. Le virus lui-même a une forme icosaédrique.*

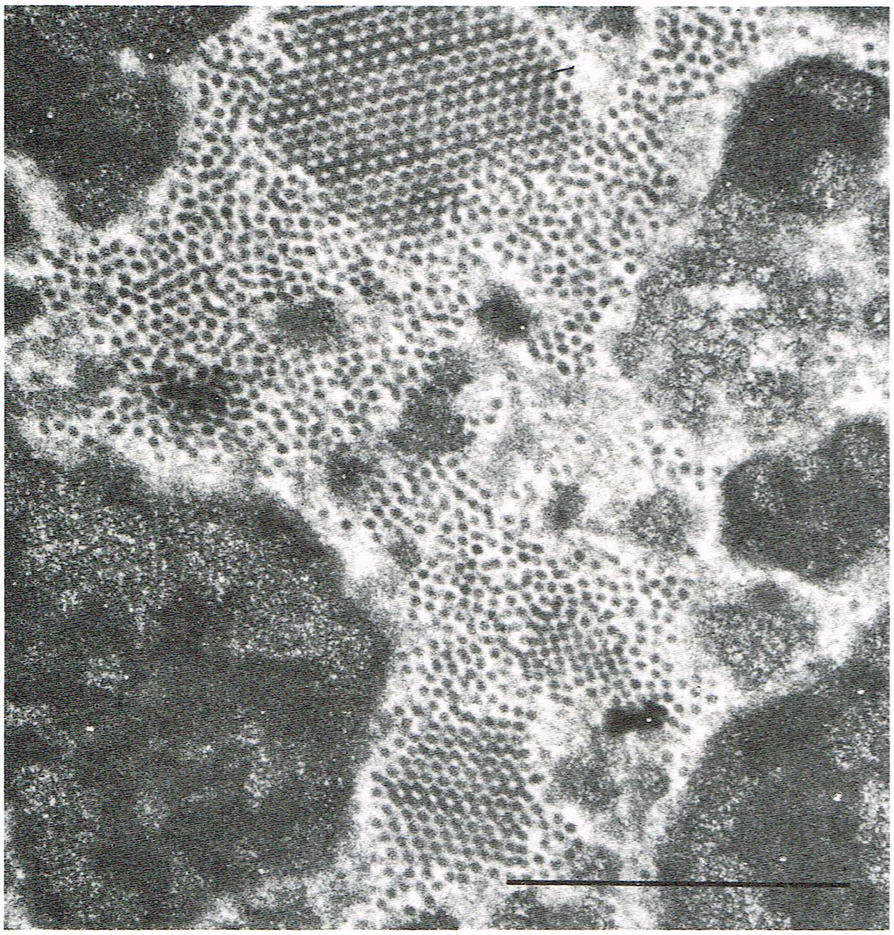

G. Orth et O. Croissant - Institut Pasteur, Service des virus

▲ *Photomicrographie électronique de l'inclusion intranucléaire du* virus du papillome de Shope *chez le lapin : le trait repère correspond à 1 000 nm.*
▼ *Photomicrographie électronique du* virus de verrues humaines *montrant l'aspect typique des virus* Papova ; *le trait repère correspond à 100 nm.*

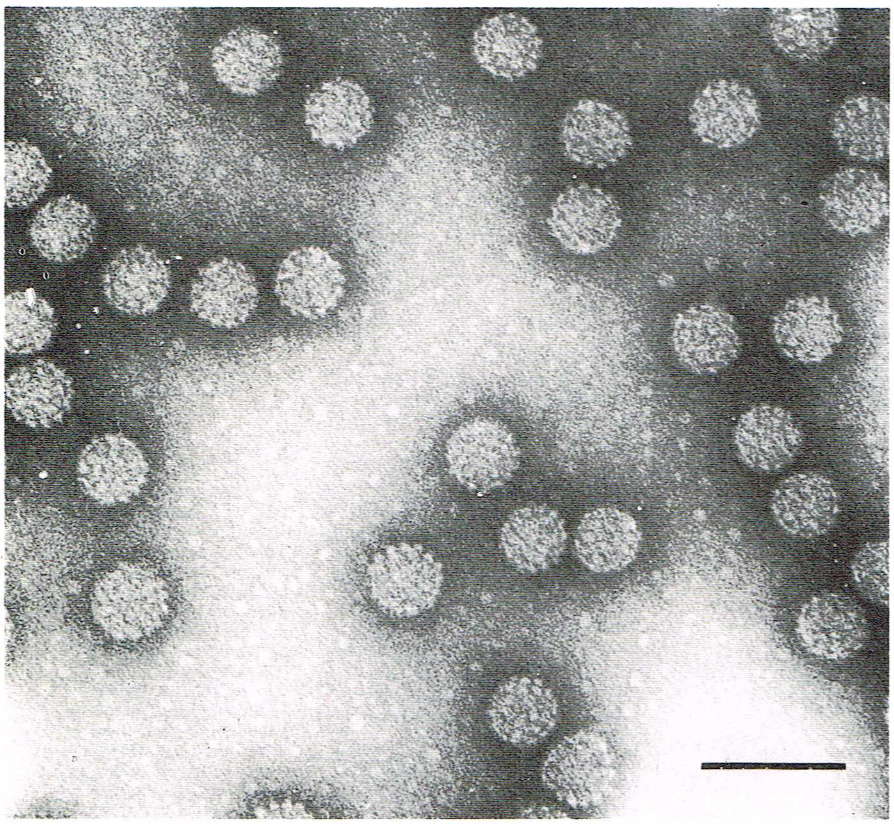

G. Orth et O. Croissant - Institut Pasteur, Service des virus

le virion, en forme de bâtonnet, est entouré par une membrane interne, une membrane externe, et un cristal protéique de forme ellipsoïdale. Il mesure de 400 nm à 500 nm de longueur, pour 200 nm à 300 nm de largeur. Chez la larve, le tissu le plus souvent touché par la granulose est le corps gras.

Maladies à virus sans inclusions

Les maladies à virus sans inclusions sont caractérisées par le fait que les virions, libres, forment des amas dans les tissus de l'hôte. Le représentant le plus important de ce groupe est le virus de *Tipula iridescens,* qui peut affecter non seulement son hôte habituel (la tipule), mais aussi d'autres espèces d'Insectes, faisant partie des Diptères, des Coléoptères et des Lépidoptères. Le nombre d'unités virales produit par les larves infectées est énorme, puisqu'il atteint jusqu'à 25 % de leur poids total. Cette proportion n'est égalée que par le rendement en virus des cellules d'*Escherichia coli* infectées par les bactériophages de la série T.

Virus des Vertébrés

On peut estimer que 60 % des maladies infectieuses qui frappent l'homme et les Vertébrés supérieurs sont dues à des virus. Les maladies à virus résistent au traitement par les antibiotiques, et elles posent dans nombre de cas des problèmes de prophylaxie et de traitement particulièrement difficiles à résoudre. Nous examinerons brièvement, en suivant le schéma de classification donné plus haut, un certain nombre de groupes de virus en fonction de la systématique qui leur a été attribuée.

● Virus ADN des Vertébrés

Microvirus et Parvovirus

La classification LHT dédouble en virus *micro* (12 capsomères) et *parvo* (32 capsomères) les plus petits des virus, qui, dans la classification de Melnick (1966), étaient réunis en un groupe des Picodnavirus (*pico :* petit, et DNA). Nous y rangeons le célèbre phage Φ X_{174} qui a servi à nombre d'études fondamentales sur les virus, et le virus du rat, ou virus RV, isolé à partir d'une tumeur du rat. Comme le phage, le RV présente une symétrie dodécaédrique pour un diamètre moyen de 14 nm. Il résiste à l'éther et peut être cultivé *in vitro* sur des cellules d'embryon de rat, chez lesquelles il produit un effet cytopathogène. Il est en outre hémagglutinant et provoque chez le hamster nouveau-né des troubles métaboliques créant un mongolisme expérimental.

Ce groupe comprend aussi le virus H et le virux X_{14}, isolés à partir de rats irradiés ou de tumeurs des Rongeurs, et les virus adéno-satellites, isolés au cours d'expériences d'hybridation entre un adénovirus et le virus SV_{40} du singe. Les virus adéno-satellites se sont montrés pathogènes pour les félins, chez qui ils provoquent de la leucopénie et des toubles cérébelleux. On ne connaît pas jusqu'à présent de virus appartenant à ce groupe restreint qui soient pathogènes pour l'homme.

Papova virus

Ce terme, proposé en 1962 par Melnick, est formé par la combinaison des initiales de trois types de virus déterminant des tumeurs chez les animaux et l'homme, dans l'ordre chronologique des découvertes : pa (papillome du lapin), po (polyome de la souris), et va (vacuolant du singe).

Dans ce groupe sont inclus nombre des virus tumorigènes des Vertébrés ; un seul d'entre eux suscite des tumeurs, bénignes, chez l'homme (papillomes de la peau et des muqueuses). Ce sont des virus à ADN bicaténaire, à symétrie icosaédrique, avec 72 capsomères ; ils sont souvent hémagglutinants. Dans les cultures *in vitro* de cellules sensibles, ils provoquent un effet cytopathique (avec destruction des cellules), parfois anarchisant (stimulation d'une multiplication désordonnée, propre aux cellules tumorales). Ils se multiplient tous dans le noyau de la cellule infectée.

Outre les trois types qui ont donné le nom au groupe, il existe d'autres virus pouvant provoquer l'apparition de papillomes chez de nombreux animaux (chien, cheval, âne, etc.).

Adénovirus

En 1953, Rowe observa, en cultivant *in vitro* des fragments d'amygdale humaine (provenant d'amygdalectomies), que, au bout de quelques semaines de développe-

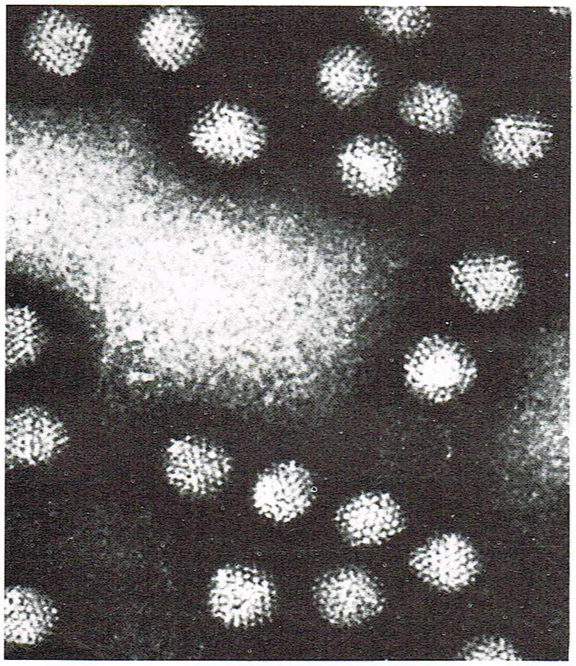

M. Pitzurra

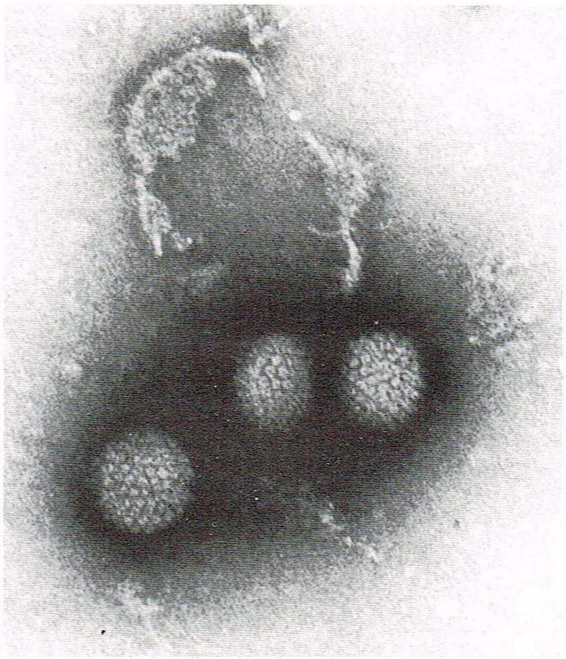

J. Sismon - Institut Pasteur, Service des virus

◄ *A gauche, exemples d'***Adénovirus***; ils ont un diamètre de 70 millimicrons et possèdent 252 capsomères; ils contiennent de l'ADN. Ils provoquent des tumeurs d'où on ne peut plus les isoler, contrairement aux virus oncogènes à ARN; cela rend difficile leur étude en tant qu'agent tumorigène (d'après Rapp et Melnick). A droite, photomicrographie de* **virus herpétique** *(virion recueilli par centrifugation, coloration négative à l'acide phosphotungstique; × 140 000). Trois virions apparaissent nus, expulsés de leur péplos (enveloppe externe) dont on aperçoit les débris. Aspect typique icosaédrique donnant une projection hexagonale d'un virion recouvert de 162 capsomères creux, de section hexagonale (sur les faces) et pentagonale (aux angles).*

ment des tissus, un effet cytopathique se manifestait, détruisant complètement les cultures. Des recherches ultérieures montrèrent que cet effet était dû à la présence d'un groupe de virus, qu'Enders baptisa Adénovirus, par référence aux tissus dont ils avaient été isolés en premier (les amygdales sont un tissu adénoïde). On en connaît actuellement 32 sérotypes humains et de nombreux sérotypes animaux (12 pour les singes, 2 pour les Bovidés, et d'autres chez les chiens, les rats, les Suidés et les Oiseaux). On peut aussi les isoler à partir des fèces. Les types d'origine humaine se multiplient bien dans des cellules humaines, en culture continue (en particulier dans la lignée cellulaire KB), en provoquant un effet cytopathique caractéristique. Ils se propagent dans le noyau de la cellule hôte, où ils déterminent l'apparition de formations cristallines. Leur morphologie a été très bien étudiée; ils présentent une symétrie icosaédrique, avec 252 capsomères prismatiques et creux. Ils sont pourvus d'ADN bicaténaire.

Chez l'homme, ils provoquent la conjonctivite des piscines et des irritations des voies respiratoires supérieures, parfois épidémiques; chez le chien, ils sont à l'origine d'une hépatite virale (maladie de Rubarth). Les types sérologiques humains 7, 12, 18 et 32, inoculés à des hamsters nouveau-nés, font apparaître des tumeurs aux points d'inoculation.

Herpèsvirus

Il s'agit de virus de grande taille, à virion icosaédrique, pourvu de 162 capsomères, et à ADN bicaténaire. Ils sont sensibles à l'éther. Ils sont souvent la cause d'infections latentes, qui persistent parfois durant toute la vie de l'hôte. Les types pathogènes pour l'homme comprennent le virus de l'*Herpes simplex* (dont on distingue deux types : I pour l'herpès cutané et II pour l'herpès génital), le virus de l'*Herpes zoster,* ou zona, et les virus cytomégaliques.

Le virus de l'*Herpes simplex,* qui peut être cultivé dans des œufs embryonnés de poule, est pathogène pour un grand nombre d'animaux. Il provoque des éruptions vésiculeuses, souvent récidivantes au même endroit, de courte durée clinique mais très tenaces par l'infection latente des tissus. Le virus de l'*Herpes zoster* est la cause d'une infection des ganglions spinaux, le zona, avec apparition d'éruptions vésiculeuses sur les surfaces cutanées qui en dépendent; le siège le plus fréquent se trouve le long du trajet des nerfs intercostaux (d'où le nom, du grec *zonê,* ceinture). Le virus du zona est identique au virus de la varicelle, maladie exanthématique de l'enfance : il y a immunité croisée entre ces deux maladies.

On a décrit, dans une tumeur humaine observée en Afrique tropicale, le lymphome de Burkitt, un virus qui présente les caractères de l'Herpèsvirus, et nommé virus EB, ou virus d'Epstein-Barr; il est très probablement l'agent causal de la tumeur.

Le virus cytomégalique est caractérisé, entre autres, par le gigantisme des cellules infectées, lesquelles contiennent de grosses inclusions cytoplasmiques et nucléaires. Ce virus est responsable d'une infection généralisée et congénitale, grave, causant chez le nouveau-né un retard mental et une paralysie cérébrale.

Parmi les souches pathogènes pour les animaux, nous citerons le virus B des singes *(virus Herpes simiae),* présentant des affinités avec le virus de l'*Herpes simplex* humain; il peut aussi infecter l'homme, provoquant chez lui une atteinte du système nerveux central (encéphalomyélite), mortelle. On a isolé chez le singe de l'espèce *Tamarinus nigricollis,* d'Amérique du Sud, un autre Herpèsvirus, également pathogène pour le rat.

Nombre d'autres *virus Herpes* sont pathogènes pour les animaux, notamment le virus de la pseudo-rage, ou maladie d'Aujeszky, le virus III du lapin, le virus de l'avortement du cheval, le virus de la laryngo-trachéite des poules et, enfin, les virus herpétiques du chien et des Oiseaux. Mais le trait le plus marquant de ce groupe est la relation sérologique récemment établie entre les Herpèsvirus et des tumeurs néoplasiques du rhino-pharynx et du col de l'utérus chez la femme.

Poxvirus

Ces virus déterminent l'apparition de pustules sur la peau de l'homme et d'un grand nombre d'animaux (en anglais, *pox* signifie pustule). Ils font partie des virus les plus grands, qui atteignent la limite du pouvoir résolutif du microscope optique (leur plus grande dimension va de 250 à 300 nm). Ils sont pourvus d'ADN et équipés d'un certain nombre d'enzymes. Leur capacité hémagglutinante se manifeste même quand ils se trouvent à l'intérieur de la cellule infectée. On peut les cultiver dans les

▼ **Virus de l'herpès,** *gros virus à ADN se multipliant dans les cellules humaines : à gauche, photomicrographie électronique à haute résolution de la capside; celle-ci contient 162 sous-unités (capsomères) disposées autour d'axes de symétrie binaires, ternaires et quinaires; à droite, photomicrographie électronique montrant la capside de 100 nm de diamètre, entourée par une enveloppe de 150 nm.*

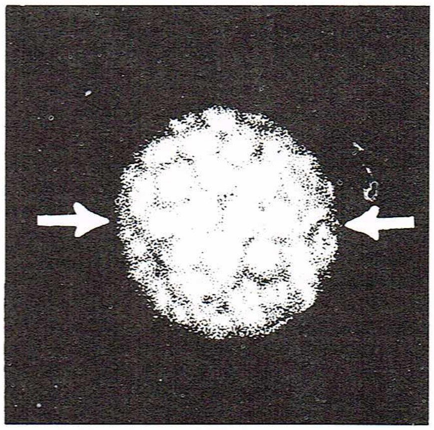

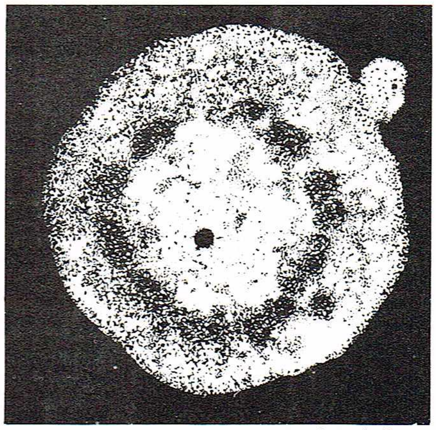

C. et A. Russo

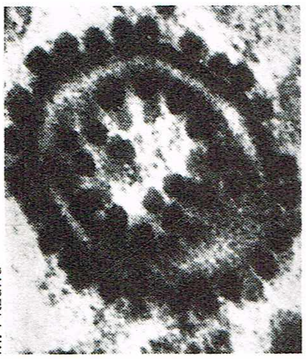

M. Pitzurra

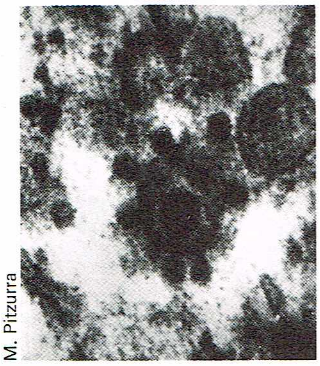

M. Pitzurra

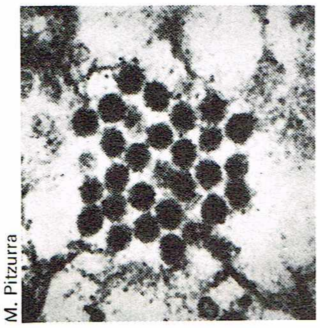

M. Pitzurra

▲ ***Détails très agrandis de particules virales du*** **virus Sindbis** ***(Arbovirus) dans une cellule cérébrale; ces trois photomicrographies électroniques (× 68 500) présentent des formes virales matures et immatures à disposition cristalline (d'après Rabin et Jenson).***

œufs embryonnés de poule, où ils produisent des lésions caractéristiques. Ils se multiplient dans le cytoplasme de la cellule hôte, provoquant l'apparition d'inclusions (corpuscules de Guarnieri pour le virus de la variole humaine, corps de Bollinger pour la variole aviaire), et de corpuscules élémentaires. Ils présentent une forme grossièrement parallélépipédique et une symétrie complexe.

Leur représentant le plus important est le virus de la variole humaine, qui fut naguère à l'origine de terribles épidémies. Aujourd'hui, la variole a pratiquement disparu de nos régions et régresse dans certaines régions d'Asie et d'Afrique), grâce à la vaccination systématique. Celle-ci est pratiquée à l'aide du virus vaccinal, dont l'application remonte à Jenner en 1794. Ce dernier mit à profit l'observation faite par les paysans anglais selon laquelle celui qui avait porté la pustule de la variole bovine *(cow-pox)* ne contractait pas la « petite vérole ». En effet, ces deux maladies sont dues à des Poxvirus, différents mais à immunité croisée : une fois la période infectieuse passée pour l'un des virus, il reste une immunité durable vis-à-vis de l'autre également. Alors que la variole humaine est toujours très grave chez l'homme et entraîne fréquemment une issue fatale, l'infection due au virus du cow-pox se limite à l'apparition d'une pustule à l'endroit de l'inoculation.

Le virus utilisé actuellement pour la vaccination antivariolique est appelé virus de la vaccine, et provient, à l'origine, d'une souche de variole bovine : c'est en réalité une mutation, par adaptation à l'homme, du virus du cow-pox. Il existe une trentaine de Poxvirus différents. Outre ceux qui ont été signalés, d'autres encore sont pathogènes pour l'homme, comme le virus de l'alastrim (sorte de variole bénigne, ou varioloïde), le virus du *Molluscum contagiosum,* ou acné varioliforme, et le virus du nodule ou des tubercules des trayeurs. On a isolé chez les animaux des virus de ce groupe, pouvant provoquer des éruptions pustuleuses chez les Bovidés, les Suidés, le lapin, le rat, les Oiseaux et les Poissons. Certains Poxvirus sont à l'origine de tumeurs bénignes chez l'homme (*Molluscum contagiosum,* déjà cité), le lapin, le lièvre, et les écureuils. On a récemment décrit le virus Yaba, agent de tumeurs bénignes chez les singes.

● Virus ARN des Vertébrés

Réovirus

Il s'agit de virus auxquels on a attribué un rôle pathogène sur les muqueuses respiratoires et oculaires (d'où le nom tiré des lettres ré- et o-). De taille moyenne, à symétrie cubique, les Réovirus ont un virion nu, avec 92 capsomères et un ARN bicaténaire; leur diamètre est de 70 à 77 nm. On en a isolé trois sérotypes chez l'homme ainsi que d'autres chez les animaux. Ils peuvent se développer dans des cultures de reins de singe, de cobaye et de porc. Ils ont tendance à s'accumuler dans le cytoplasme des cellules infectées, où ils produisent des inclusions caractéristiques. Ils sont hémagglutinants, et leur action pathogène n'est pas encore clairement définie. Le virus précédemment classé $ECHO_{10}$ est en réalité un Réovirus.

Arbovirus, ou virus Arbor

Le nom de ce groupe provient de l'expression anglaise *Arthropod-borne virus,* ou virus transmis par les Arthropodes. Étant donné que le critère de classification dans le groupe est la transmission par ces animaux, on y rencontre des virus à caractères fort divers. C'est pourquoi, récemment, ce groupe a été supprimé de la classification; toutefois, l'usage persiste de réunir sous ce nom la vaste famille des virus pathogènes transmis par des Arthropodes.

Les Arbovirus parasitent des moustiques et des tiques; ils sont transmis à l'homme et aux animaux par la piqûre de ces hématophages, après qu'ils ont été infectés en suçant le sang de sujets malades. Ces virus ne provoquent pas de troubles appréciables chez les Arthropodes-vecteurs. Le groupe comprend actuellement environ 150 types différents, divisés en 4 sous-groupes (A, B, C et Bunyamwera), qu'on détermine par des réactions d'inhibition de l'hémagglutination. Ils provoquent des infections, dont bon nombre sont parfois occultes; les virus des groupes A et B sont la cause d'encéphalites, alors que d'autres sont à l'origine de maladies fébriles, de complications nerveuses, rénales et hépatiques; ils sont les agents des redoutables fièvres hémorragiques qui sévissent en Extrême-Orient, en Sibérie et en Amérique du Sud.

Le virus de la fièvre jaune est le représentant le plus célèbre du groupe, à cause de la gravité de la maladie qu'il provoque chez l'homme et de son caractère endémique, qui a provoqué dans le passé de sévères épidémies. Le nom de fièvre jaune vient de ce que les malades ont parfois la peau teintée par un ictère grave. Ce virus est transmis par un moustique, *Aedes aegypti,* et sévit dans les zones tropicales de l'Afrique et de l'Amérique du Sud, où il persiste dans la jungle à partir de réservoirs Vertébrés (singes, lémuriens). On peut l'isoler du sang en l'inoculant dans le cerveau de la souris. La prophylaxie antiamarile consiste essentiellement en une lutte intensive contre l'*Aedes aegypti* et en l'emploi généralisé d'un vaccin actif (souche Rockefeller 17 D), mutation du virus vivant atténué cultivé dans l'œuf de poule.

Les *virus Arbor* provoquent aussi d'autres maladies chez l'homme, moins graves, comme la dengue (fièvre endémo-épidémique en Asie, en Inde et en Afrique équatoriale) et la fièvre à pappataci (maladie fébrile estivale, endémique dans le Bassin méditerranéen oriental), transmise par un Diptère, *Phlebotomus pappatasii.*

La plupart des Arbovirus sont pathogènes pour les animaux; ils sont désignés d'après la région dans laquelle on les observe et/ou d'après le nom de la maladie induite (encéphalite équine de l'Est ou de l'Ouest, encéphalite équine du Venezuela, encéphalite japonaise B, méningo-encéphalite du dindon, etc.). Dans les

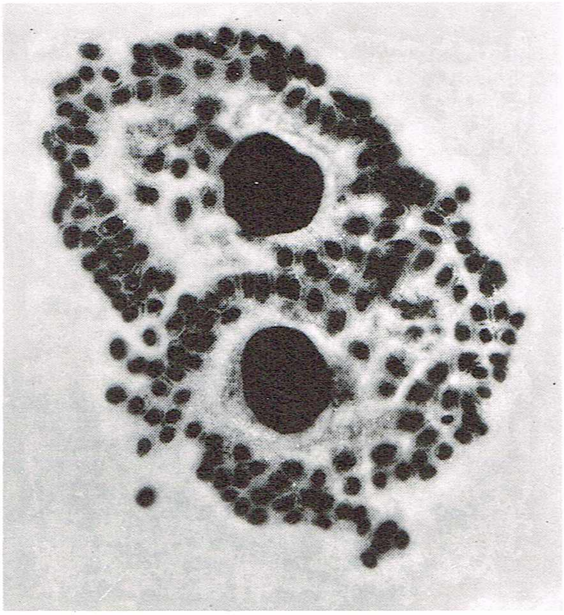

M. Pitzurra

M. Pitzurra

▶ ***A gauche, fixation d'hématies de poule sur des cellules infectées par le*** **virus de la variole*; les hématies forment une couronne autour de cellules apparemment saines (hémadsorption) [d'après Lépine]. A droite,*** **membrane chorio-allantoïdienne** ***de poulet infectée par le*** **virus de la variole,** ***observée en microscopie électronique (× 4 120) 48 heures après l'inoculation; les particules virales sont très nombreuses et sont réunies en amas (d'après Wyckoff).***

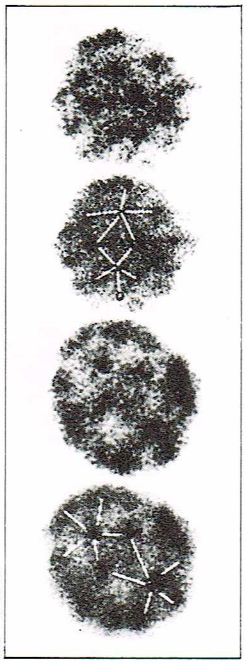

M. Pitzurra

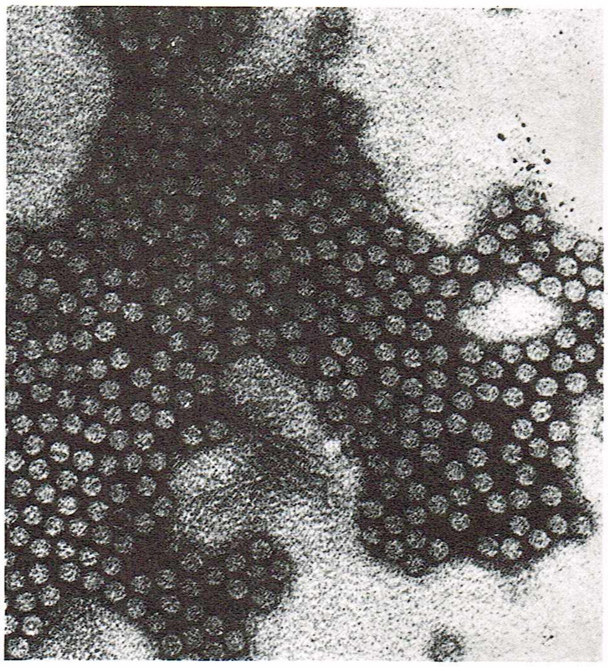

M. Pitzurra

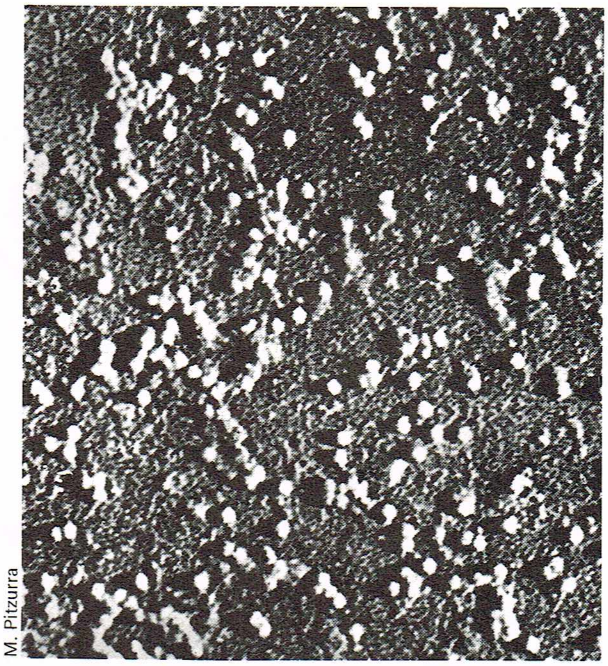

M. Pitzurra

▲ *A gauche, de haut en bas, photomicrographies électroniques d'une particule de* Poliovirus *fortement contrastée (× 600 000) ; la même particule avec indication du losange central et de deux axes nettement distincts de symétrie 5 ; une particule d'un virus* ECHO 24, *fortement contrastée (× 750 000) ; la même particule virale avec indication du losange central et de deux axes de symétrie (d'après Mayor et Jamison). Au centre, photomicrographie électronique d'une suspension purifiée de* virus Polio *(× 141 000). A droite,* virus de la poliomyélite, *vu au microscope électronique (× 50 000) dans la suspension utilisée pour la préparation du vaccin contre la susdite maladie (d'après Lépine).*

forêts des régions équatoriales et tropicales, la diffusion de ces virus, encore assez mal connue, est immense chez les Oiseaux et les Mammifères, cependant la déclaration des maladies qui leur sont liées est assez rare, l'attention des épidémiologistes n'étant attirée que par les foyers épidémiques occasionnels.

Picornavirus

Le nom du groupe a été composé à partir des racines *pico* (en grec, petit) et RNA. En effet ce sont les plus petits virus à ARN. Ils présentent une symétrie triacontaédrique et ont un diamètre de 15 à 30 nm ; le virion est nu et présente probablement 32 capsomères ; l'ARN est monocaténaire. Ce groupe comprend les *Entérovirus* (hôtes habituels de l'intestin de l'homme et des animaux) et les *Rhinovirus* (responsables du rhume).

Le plus important représentant des Entérovirus est le Poliovirus, qui provoque la poliomyélite antérieure aiguë, ou maladie de Heine-Medin (paralysie infantile). La gravité et la contagiosité de cette maladie ayant incité les chercheurs à découvrir des moyens efficaces de diagnostic et de prophylaxie, on a abouti à d'importantes découvertes dans tous les domaines de la virologie.

Il existe, du point de vue immunologique, trois types de Poliovirus (I, II, et III), identiques des points de vue morphologique et biologique, mais différents par le comportement épidémiologique. Le Poliovirus, comme tous les Entérovirus, vit habituellement dans la lumière de l'intestin ; c'est seulement exceptionnellement qu'il envahit le torrent circulatoire pour se fixer ensuite sur les racines des nerfs moteurs, provoquant la destruction des neurones moteurs, et par conséquent des paralysies. On peut le cultiver sur des cellules rénales de singes, en culture primaire, et sur des cellules humaines. Il a un effet cytopathique typique (arrondissement et lyse des cellules infectées). On l'identifie en culture par des réactions de neutralisation et de déviation du complément, ou à partir du sérum du sang des malades, par un séro-diagnostic reposant sur les mêmes principes.

La réalisation des vaccins antipoliomyélitiques a fait nettement régresser la maladie dans le monde entier. Le vaccin inactivé (Salk, 1954 ; Lépine, 1955 ; Gard, 1955) a été immédiatement appliqué sur une grande échelle avec des résultats spectaculaires, dont la généralisation a été facilitée lorsque l'on a adopté ensuite le vaccin atténué (Sabin) administré par voie orale et dont l'usage est aujourd'hui universel.

Au cours des très nombreuses recherches sur la poliomyélite, on a isolé un grand nombre de virus intestinaux, à caractères analogues à ceux des virus Polio, mais à propriétés immunologiques et biologiques différentes.

Les virus Coxsackie (du nom du village où Dalldorf a réalisé pour la première fois l'isolement) sont les agents de différentes maladies chez l'homme : des angines, des névralgies intercostales (myalgie épidémique) et des lésions du système nerveux central (encéphalomyélites). Certaines provoquent des paralysies chez la souris nouveau-née.

Les virus ECHO (des initiales de l'expression anglo-américaine « enteric cytopathogenic human orphan viruses », ou « virus orphelins humains cytopathogènes entériques »), isolés à partir d'excreta, doivent leur dénomination au fait qu'au début on n'avait trouvé aucune maladie dont on aurait pu avec certitude les rendre responsables. Mais on sait maintenant que certains d'entre eux provoquent des méningites, des grippes saisonnières et des maladies avec rash.

Les Rhinovirus, ou virus du rhume banal, présentent les caractères structuraux des Picornavirus ; on en connaît au moins 45 sérotypes. On peut les isoler des voies respiratoires supérieures ; ils ne se cultivent que dans des cellules humaines diploïdes.

On a également isolé d'innombrables Entérovirus et Rhinovirus chez les animaux. Le plus important d'entre eux est le virus de la fièvre aphteuse des Bovidés, responsable de graves épidémies épizootiques chez les bovins ; il est transmissible au mouton, au chien et au porc. D'autres Picornavirus pathogènes pour les animaux sont ceux du groupe Columbia SK (souches MM, EMC, Mengo, etc.), qui sont à l'origine de paralysies, d'encéphalites et de myocardites chez les Primates, le cobaye et le rat blanc. Il semble qu'ils soient rarement pathogènes pour l'homme.

Certains virus des végétaux, comme celui de la mosaïque du navet et celui du flétrissement de la tomate, ont des caractères structuraux qui semblent les rapprocher de ce groupe.

Rhabdovirus

Le groupe des Rhabdovirus est caractérisé par un aspect strié de la capside, hérissée de spicules irrégulièrement distribués, de forme conique ou tronconique, renfermant à l'intérieur d'une double enveloppe un tore d'ARN. Ils présentent donc une morphologie assez différente de celle des Myxovirus, auxquels ces virus avaient été primitivement rattachés en raison de leur ARN et de leur sensibilité à l'éther.

Le principal virus du groupe est évidemment celui de la rage, virus séculairement redouté qui n'épargne aucun Mammifère. Ce sont les chiens, les loups et les renards qui sont les principaux vecteurs de la maladie et qui, par la morsure d'autres animaux (Bovidés, chats, chiens), atteignent l'homme quand la rage les rend furieux ; la transmission se fait par la salive, très exceptionnellement par la voie pulmonaire (cas de la rage des chauves-souris). L'infection rabique est toujours mortelle ; elle se traduit par une encéphalite avec destruction des cellules nerveuses du névraxe.

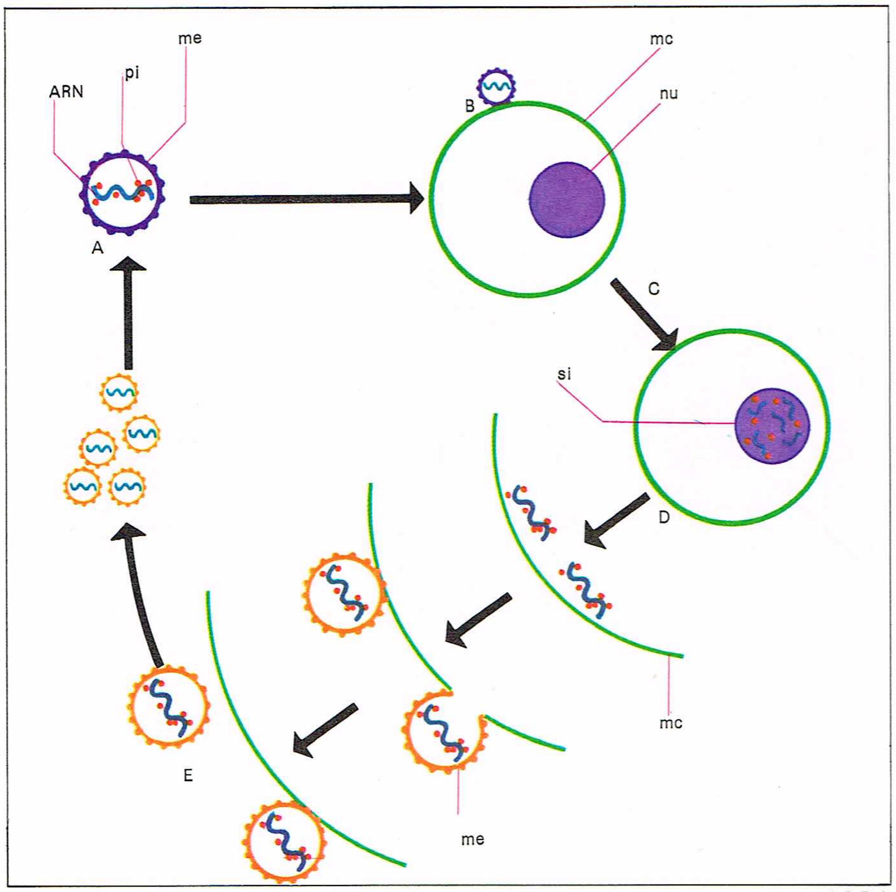

I.G.D.A.

▲ *Représentation schématique du cycle d'un Myxovirus typique (virus de la grippe); A, particule pathogène du virus de la grippe (me, membrane externe; pi, protéine interne); B, le virus se fixe à la cellule (mc, membrane cellulaire; nu, noyau; C, multiplication de l'ARN à l'intérieur du noyau cellulaire (si, synthèse de la protéine interne du noyau); D, migration de l'ensemble ARN-protéine interne vers la membrane cellulaire (mc, membrane cellulaire; me, membrane externe du virus); E, détachement de la particule virale complète (d'après Watson, modifié par Zanichelli).*

La relative longueur de la période d'incubation de la rage (sauf en cas de morsures multiples et à la tête) fut mise à profit par Pasteur pour protéger les sujets mordus, grâce au vaccin antirabique. Ce dernier a subi de très nombreux perfectionnements. La moelle de lapin a depuis longtemps été abandonnée au profit de l'encéphale d'animaux adultes (moutons, chèvres) puis de nouveau-nés (souris, rats). Enfin, plus récemment, des vaccins de culture, ne renfermant aucune trace de système nerveux, ont été mis au point.

Le virus rabique pousse lentement (en culture cellulaire) dans différents types de cellules (humaines diploïdes, d'embryon de veau, etc.) ainsi que, dans une certaine mesure, dans les œufs embryonnés de poule et de canard infectés à un stade précoce de leur évolution. Le virus rabique produit dans l'encéphale des animaux enragés des inclusions cytoplasmiques typiques (corps de Négri); toutefois, à un stade plus précoce, sa présence peut être déterminée par les méthodes d'immuno-fluorescence, grâce à la fixation sur les cellules infectées d'une immuno-globuline spécifique conjuguée avec un sel fluorescent.

Outre le virus de la rage, on rencontre dans le groupe des Rhabdovirus, qui ne cesse de croître, des virus assez différents, comme celui de la stomatite vésiculeuse des Bovidés, l'agent sigma responsable de la sensibilité de la drosophile au gaz carbonique, héréditairement transmise chez cette espèce, et l'agent de l'hépato-pancréatite hémorragique des truites. Les connaissances sur ce groupe de virus très particuliers sont en constante et rapide évolution.

Myxovirus

On nomme ainsi ces virus en raison des affinités qu'ils présentent pour les substances de nature muco-protidique qui sont attachées à la surface des cellules et des hématies. Ils sont caractérisés par une symétrie hélicoïdale et par un ARN monocaténaire. Ils présentent dans la cellule infectée un cycle complexe : ils sont synthétisés pour partie dans le noyau et pour partie dans le cytoplasme. Ces virus achèvent leur développement par la fusion de leurs divers composants au moment de leur libération. On en a décrit des formes filamenteuses et des formes sphériques.

Les virus de la grippe sont les plus importants du groupe. Leur étude systématique a commencé en 1933 avec les travaux de Smith, Andrews et Laidlow, qui ont instillé dans le nez du furet du mucus provenant de grippés, permettant ainsi la transmission en série du virus. On peut cultiver ces virus dans des œufs embryonnés de poule. Ils présentent deux particularités remarquables. D'abord, ils subissent des mutations spontanées périodiques; ainsi, les souches isolées à différents moments présentent des variations de leur structure antigénique, qu'on peut déceler par des tests de déviation du complément et d'inhibition de l'hémagglutination. Les mutants connus jusqu'à présent sont rassemblés dans les groupes A (sous-groupes : A', A_1, A_2), B et C. Le second caractère d'importance est la rapidité avec laquelle ils se répandent chaque année, donnant périodiquement des pandémies (épidémies étendues à de très importants groupements humains et occasionnellement au monde entier). La facilité de leurs mutations rend assez problématique la préparation d'un vaccin totalement efficace; on tente de surmonter cet obstacle par des vaccins polyvalents préparés à partir des mutants connus les plus récents.

Parmi les Myxovirus grippaux des animaux, nous citerons le virus de la grippe porcine, avec ses sous-types de la grippe équine, et les virus de la peste aviaire *(fowl plague)*.

Paramyxovirus

Ces virus sont proches des Myxovirus, dont ils présentent la symétrie hélicoïdale, la possession d'un péplos, la maturation dans le cytoplasme et la sensibilité à l'éther. Ils en diffèrent par une plus grande taille, un diamètre double de l'hélice d'ARN, et par leur structure antigénique. Ils ne provoquent pas de dégénérescence des cellules infectées, mais l'apparition de syncytiums et d'inclusions cytoplasmatiques. Ils sont hémagglutinants et hémadsorbants (c'est-à-dire que les hématies sont agglutinées par les unités virales libres et qu'elles sont fixées à la surface de cellules infectées).

Ce groupe comprend des agents d'importantes maladies humaines, comme le virus de la parotidite épidémique ou des oreillons, le virus de la rougeole, les virus paragrippaux (1, 2, 3, 4 et 5), et les virus respiratoires syncytiaux qui provoquent des bronchites et des broncho-pneumonies infantiles.

Parmi les Paramyxovirus des animaux, citons le NDV, ou virus de la pseudo-peste aviaire (maladie de Newcastle des volailles), le virus de la maladie de Carré des chiens (proche du virus humain de la rougeole), le virus de la peste bovine, le virus de la peste porcine africaine (qui a causé de grandes pertes en Europe vers 1957), le virus de la diarrhée bovine, ainsi que ceux de la maladie des muqueuses et de la peste porcine *(hog cholera virus)*.

M. Pitzurra

▶ **Virus de la grippe** *de type A, tiré d'une culture dans un œuf embryonné de poule (liquide amniotique); la présence de longs filaments indique qu'il s'agit d'une souche récemment isolée, ayant conservé une virulence élevée (d'après Lépine).*

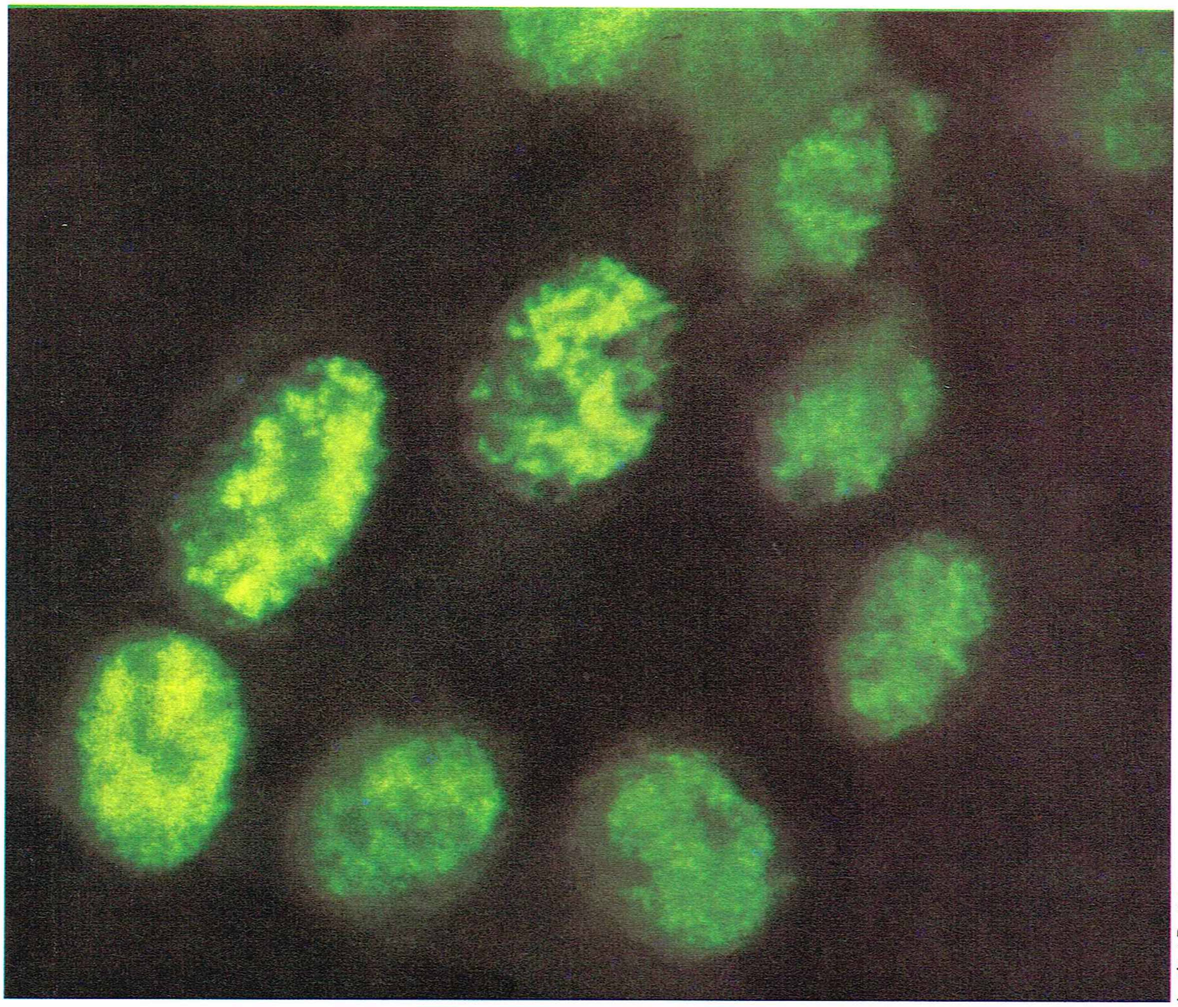

Institut Pasteur

◀ *Mise en évidence du* **virus SV_{40}** *dans le noyau; tumorigène chez le hamster et la souris, ce virus est bien toléré par les singes.*

Virus oncogènes, ou Oncornavirus, et virus leucémogènes

Une tumeur est une prolifération cellulaire, illimitée et incontrôlée par l'organisme. Les virus oncogènes (du grec *onkos,* masse) sont ceux qui induisent la formation de tumeurs. Nombre de virus, en particulier des Poxvirus et des Papovavirus, sont capables d'induire chez l'animal la formation de tumeurs localisées, temporaires, non extensives, qui ne sont pas des cancers. Quelques-uns de ces virus provoquent au contraire des tumeurs qui font preuve de malignité : ce sont des cancers. Rappelons que la malignité d'une tumeur est caractérisée par trois phénomènes :

— l'extension progressive sur place avec envahissement et propagation aux tissus voisins;

— la transformation des cellules normales, qui perdent leurs caractères de différenciation (épithéliale, glandulaire, etc.) et acquièrent un caractère anarchique et prolifératif, avec apparition de mitoses anormales dans les cellules cancérisées;

— la migration des cellules pathologiques par les voies lymphatiques et l'apparition, dans des organes n'ayant rien de commun avec l'organe où est apparue la tumeur originelle, de métastases à distance, où les tumeurs secondaires conservent le type histologique de la tumeur primitive.

Des mutations tumorales, bénignes ou malignes, peuvent être provoquées artificiellement chez les animaux, par différents moyens physiques (radiations ionisantes), chimiques (goudron et hydrocarbures cancérigènes) et biologiques (virus). Ces derniers sont les plus prometteurs du point de vue expérimental.

Le nombre des agents viraux connus responsables de tumeurs et de leucémies croît sans cesse, surtout en ce qui concerne les poules, les rats et les hamsters, chez qui la relation entre les tumeurs et les virus est certaine. Il semblerait logique qu'il en aille de même pour d'autres animaux et pour l'homme. Toutefois, jusqu'à présent, mis à part le virus du papillome (la verrue), du groupe des Papovavirus, et le virus du *molluscum contagiosum* (acné varioliforme) du groupe des Poxvirus, on n'a pu isoler aucun autre virus des processus néoplasiques humains. On a évoqué le virus EB d'Epstein-Barr, présent dans le lymphome de Burkitt; mais sa responsabilité dans le développement des tumeurs reste à

▼ *Virions de l'acné varioliforme ou* **molluscum contagiosum** *: ce virus appartient au groupe des Poxvirus.*

C.N.R.I.

démontrer. Cela ne signifie pas, loin de là, que l'étiologie virale soit à exclure. La raison de ces échecs est peut-être l'impossibilité de réaliser chez l'homme les expériences qui ont donné des résultats chez les animaux inférieurs : en effet, ces travaux ont été réalisés *in vivo*, à peu près uniquement sur des nouveau-nés, en observant des lignées animales au stock chromosomique identique, obtenues par des croisements répétés entre membres d'une même portée.

D'autre part, l'étude des virus est fort utile pour l'approche de la solution. En effet, la mutation d'une cellule normale en cellule anormale se fait par modification de la composition d'un ou de plusieurs gènes. On a calculé que, dans chaque cellule, le nombre des gènes distribués dans l'ensemble des chromosomes atteint le million. Les agents physiques et chimiques ne laissent pas de trace après leur intervention, et on ne voit pas comment trouver le gène sur lequel ils ont agi. Avec les virus, il n'en est pas de même : ce sont des agents de petite taille, dont la structure est de plus en plus connue ; le nombre de gènes dont ils sont pourvus est limité. Dans une cellule transformée par un virus oncogène, la possibilité d'explorer son génome est discernable ; d'où l'espoir que, dans les prochaines années, on pourra identifier d'après eux le point vulnérable de la cellule.

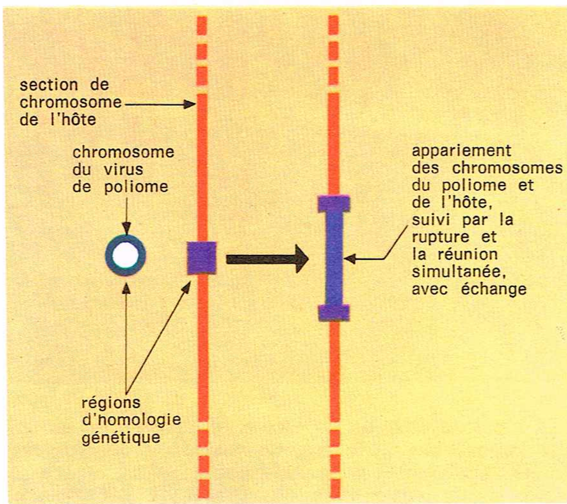

I.G.D.A.

▶ *Schéma du mode d'intégration d'un chromosome circulaire du virus Poliome à un chromosome de l'hôte (d'après Watson redessiné par Zanichelli).*

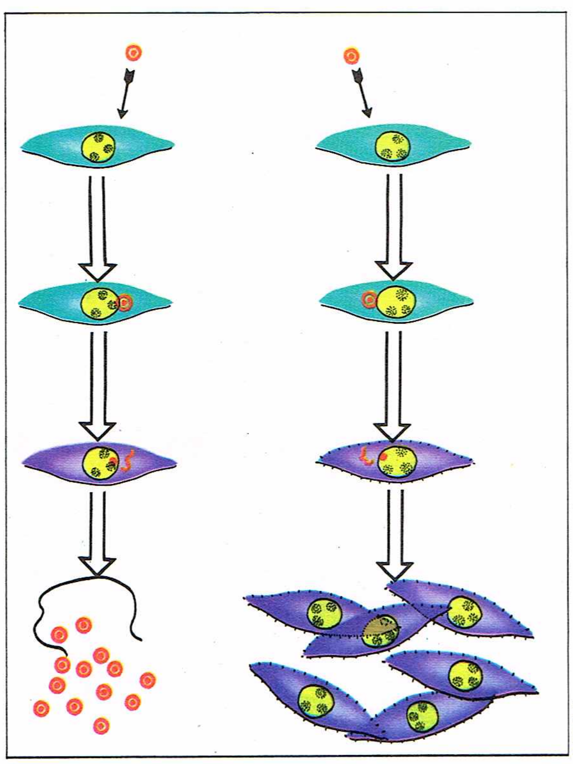

I.G.D.A.

▶ *L'invasion d'une cellule par un virus oncogène peut aboutir à deux résultats différents : une néo-formation tumorale ou l'apparition d'une cellule transformée. Dans le premier cas, les particules virales mobilisent les mécanismes de synthèse cellulaire, en induisant la multiplication de nouvelles particules : parfois la cellule meurt, en libérant les particules. Dans le second cas, la cellule se reproduit de manière illimitée : dans la cellule transformée, on observe de nouvelles propriétés (en violet) et l'apparition de nouveaux antigènes virus-spécifiques.*

Il s'agirait là d'un grand progrès dans la lutte contre les tumeurs. De plus, si l'on pouvait vérifier qu'il s'agit bien d'un virus provoquant une tumeur donnée, on aurait l'espoir de mettre en œuvre des méthodes immunologiques classiques. Chez les animaux, il a été possible, en plus d'un cas, de provoquer grâce à la vaccination une résistance envers des maladies néoplasiques d'origine virale. On en est encore loin chez l'homme.

Nous avons cité les plus importants virus tumorigènes des animaux supérieurs et de l'homme. Pour en donner une vue d'ensemble, rappelons qu'ils sont divisés en deux groupes : les virus à ADN et les virus à ARN. Les premiers se multiplient dans le noyau de la cellule, alors que les représentants du groupe des Poxvirus se multiplient dans le cytoplasme.

Habituellement, ils ne sont plus décelables ni isolables quand ils ont provoqué la mutation oncogène. Les virus tumorigènes à ARN se multiplient toujours dans le cytoplasme, et continuent à être produits abondamment par les cellules transformées (surtout dans le cas des virus leucémogènes aviaires). Dans les cellules modifiées se forment des antigènes nouveaux, spécifiques, différents de ceux de la capside virale : ils représentent la manifestation des changements intervenant dans la cellule ; leur détection est très utile pour l'étude de la tumeur. Il arrive que les virus tumorigènes se montrent tels expérimentalement, et non dans la nature : c'est le cas du virus des singes SV_{40}, découvert par hasard dans des cultures de reins de singes, au cours de la préparation des vaccins antipoliomyélitiques. Tumorigène chez le hamster et la souris, ce virus est bien toléré par les singes, et l'on ne connaît pas de tumeurs spontanées à virus SV_{40}.

Dans d'autres cas, le virus a été isolé chez des animaux déjà atteints de tumeurs : c'est le cas du virus du poliome (virus SE), isolé en 1957 par Stewart et Eddy chez des rats atteints d'une tumeur des glandes parotides. Le virus du poliome est lytique et modificateur des cellules d'embryons de rats. Il provoque, par ailleurs, des tumeurs chez diverses espèces animales. Parmi les virus à ARN, citons celui de la leucémie du rat, isolé par Gross chez un animal atteint de leucémie induite par les rayons X. Les centres de recherche sur le cancer concentrent aujourd'hui leurs efforts, entre autres, dans le domaine des tumeurs induites par les virus.

Parmi les recherches sur les virus qui provoquent des tumeurs cancéreuses, celles qui portent sur les virus induisant des leucémies, ou virus leucémogènes, présentent un intérêt particulier qui est dû, pour une partie, à l'étroite analogie existant entre les leucémies des Mammifères et celles que l'on observe chez l'homme : la possibilité d'expérimenter sur l'animal a ouvert dans ce domaine des perspectives nouvelles.

On a isolé, chez les Oiseaux et chez les Mammifères, de nombreux virus pouvant induire la prolifération anormale des cellules immatures qui se transforment en hématies et en globules blancs. Bien des caractères de ces virus, surtout de ceux qui sont responsables des leucémies murines, nous sont encore inconnus, bien que certaines caractéristiques, comme la présence d'un péplos, la possession d'ARN et la sensibilité à l'éther, les rapprochent des Myxovirus.

Le premier découvert a été le virus du sarcome de Rous des Gallinacés (1910) ; par greffe, il provoque des sarcomes chez les Oiseaux de tous âges, mais ne se transmet spontanément qu'aux jeunes poulets. Pour devenir pathogène, il a besoin de la présence d'autres virus (*helper virus* des Anglo-Saxons, ou virus adjuvant), dont il exploite le génome en vue des indispensables synthèses protéiques de sa capside.

Les leucémies des poules (et en général les leucémies, ou leucoses aviaires) présentent plusieurs variétés cliniques. La plus courante est la leuco-érythroblastose, dans laquelle toutes les cellules du sang sont atteintes (rappelons que chez les Oiseaux les hématies sont des cellules nucléées) ; on rencontre également des myéloblastoses et des lymphomatoses, où la multiplication pathologique atteint surtout les myéloblastes ou les cellules lymphatiques. L'inoculation du virus dans l'œuf en incubation ou à de très jeunes Oiseaux d'une espèce voisine (des canards par exemple) entraîne des modifications du type clinique observé (formes hémorragiques, formes hépatiques, tumeurs osseuses). Dans tous les cas, la concentration de virus est élevée dans le

sang, et tous les virus que l'on peut isoler dans ces différentes leucoses présentent une parenté évidente avec les virus du sarcome de Rous. On peut même, au cours d'expériences délicates, passer d'un type de virus à l'autre.

Après les virus des Oiseaux, certaines tumeurs des lapins ont donné lieu à d'intéressantes recherches. Les virus des lapins sont essentiellement constitués par deux types de virus : d'une part, le groupe du myxofibrome, apparenté aux varioles animales, avec une taille de 220 nm et dont l'acide nucléique est un ARN ; d'autre part, le groupe des papillomes (Papovavirus) dont le plus connu est le papillome de Shope, dont le virus mesure 27 à 30 nm de diamètre, avec un ADN pour acide nucléique. C'est sur ce dernier type de virus que les recherches les plus intéressantes ont été réalisées, car son comportement est très variable suivant qu'il infecte, spontanément ou expérimentalement, des lapins sauvages du continent américain du genre *Sylvilagus* (Shope, 1933) ou des lapins européens *(Oryctolagus)* : chez les premiers, le virus détermine un fibrome localisé, pigmenté, non adhérent aux plans profonds, indéfiniment transmissible et sans caractère malin ; par contre, si le même virus est inoculé à un lapin d'origine européenne, on voit se développer une tumeur en apparence semblable à celle du lapin sauvage mais non transmissible et ne renfermant pas de virus. Cette tumeur dégénère, se transforme en épithélioma, devient envahissante, donne des métastases et fait mourir le lapin d'un cancer. Ce cancer, comme toutes les tumeurs spontanées, n'est transmissible que par greffe, et non par filtrat ; cependant, malgré de nombreux passages de ce cancer de lapin domestique à d'autres lapins domestiques, les animaux chez qui il se développe voient apparaître dans leur sérum des anticorps qui neutralisent le virus du lapin sauvage américain ; cela montre qu'en s'intégrant au génome cellulaire du lapin domestique et en provoquant la mutation cancéreuse, un fragment spécifique de l'ADN du lapin sauvage reste accroché à l'appareil chromosomien du lapin et demeure capable d'induire la présence d'anticorps.

Après les tumeurs du lapin, le matériel de recherche le plus précieux pour les virologistes et pour les cancérologues a été constitué par les tumeurs de la souris. La première étudiée fut l'adénocarcinome mammaire de la souris, tumeur transmissible de la glande mammaire. On sait actuellement que l'agent est un virus, transmis lors de la naissance par l'allaitement maternel et qui, pour se développer beaucoup plus tard, a besoin d'un facteur hormonal (la tumeur n'apparaît pas chez les souris castrées, et on peut la faire apparaître chez les mâles en les traitant par la folliculine).

Outre l'adénocarcinome mammaire, les leucémies de la souris ont permis de faire de grands progrès dans l'étude des virus tumorigènes. Certaines souris sont spontanément atteintes de leucémie dont le type histologique et l'évolution sont identiques aux leucémies spontanées des autres animaux, y compris l'homme. La transmission de cette leucémie est facile à réaliser de souris à souris par injection de sang, à condition de s'adresser à des souris de même lignée génétique ; il s'agit alors d'une vulgaire transmission par greffe. En 1951, L. Gross a montré que si l'on utilise comme récepteur une souris d'une autre lignée génétique chez qui l'incidence spontanée de la leucémie ne dépasse pas 1 pour 6 000, on réussit la transmission de la leucémie à partir de la lignée AK spontanément atteinte, à condition d'injecter dès la naissance le sang de la souris leucémique à une souris d'une autre lignée. Mieux encore, si l'on prend des organes empruntés à des souris normales (non encore leucémiques) de la lignée à haute incidence de leucémie spontanée, en les broyant et en les filtrant, l'injection

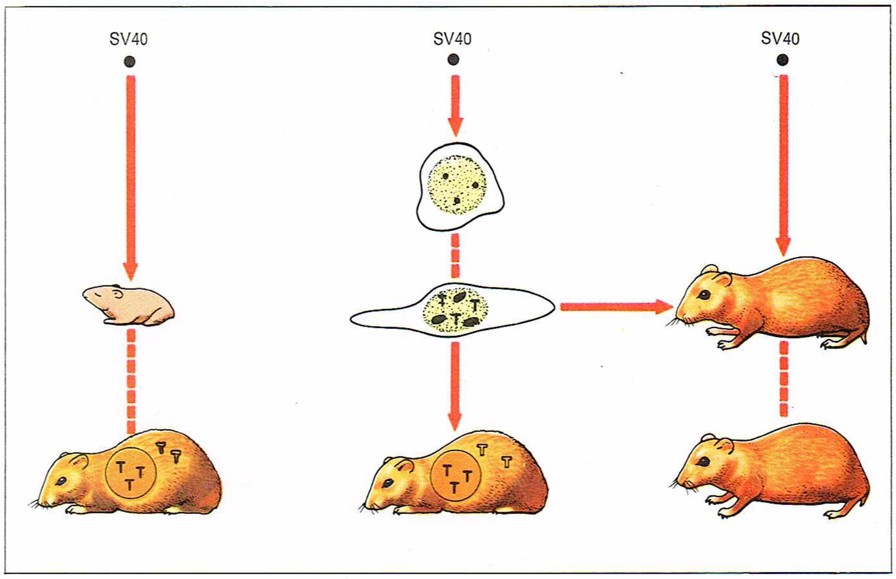

I.G.D.A.

▲ *Schéma des possibilités de vaccination contre les tumeurs à virus. Hamsters inoculés par le virus SV_{40} (à gauche) ; ceux-ci sont atteints d'une tumeur et possèdent un antigène spécifique (T). Au centre, des cellules de hamster, en culture, infectées par le SV_{40} et inoculées chez le hamster, provoquent une tumeur et la formation d'antigènes. A droite, hamsters traités préalablement par le virus SV_{40} ; ces animaux deviennent alors résistants à l'implantation de cellules transformées (d'après Rapp et Melnick).*

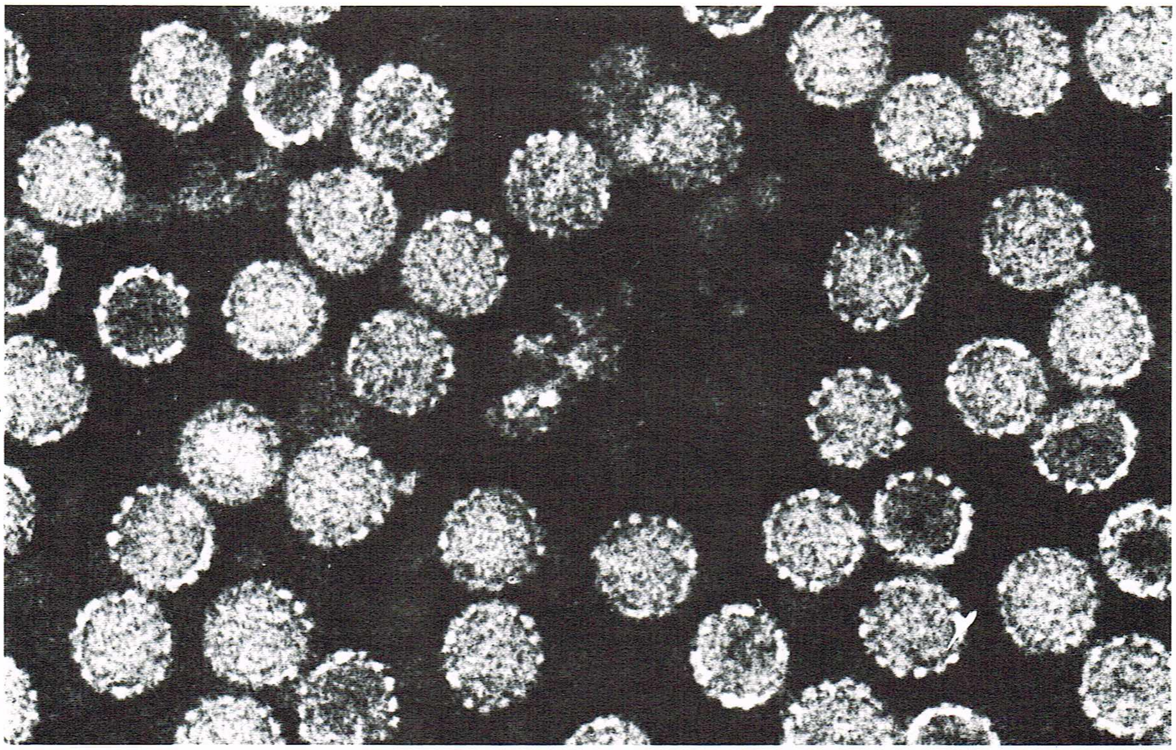

Institut de recherches sur le cancer - Villejuif

◀ *Photomicrographie électronique (× 40 000) de virus SV_{40}.*

du filtrat à des souris nouveau-nées d'une lignée normalement résistante détermine dans près de 80 % des cas une leucémie au bout de plusieurs mois; cette leucémie, contrairement aux leucémies greffées, devient spontanément transmissible dans la proportion de 50 % aux générations suivantes de la lignée ainsi artificiellement infectée.

C'est encore à partir de matériel provenant de la souris que Sarah Stewart a isolé, en 1965, le virus du polyome, fréquemment associé au virus de la leucémie; ce virus cause une prodigieuse variété de types de tumeur chez la souris, allant des sarcomes aux épithéliomas; il est également transmissible au hamster et au rat.

Toutes ces expériences montrent que la totalité des cancers transmissibles de l'animal qui ont pu être étudiés jusqu'ici est conditionnée par la présence d'un virus, agent principal de la mutation cancérogène. Mais la présence du virus n'est pas à elle seule déterminante; dans l'apparition de la tumeur, il faut tenir compte des facteurs de provocation génétiques, hormonaux ou extérieurs, tels que les irradiations ou les agents cancérogènes (dibenzantracène, benzopyrène), dont on connaît depuis longtemps l'action provocatrice sur l'apparition des cancers.

Une fois la mutation cellulaire obtenue, c'est-à-dire la cellule transformée, il n'est pas nécessaire que le virus persiste dans les tissus néoplasiques; sa détection y est de ce fait toujours très difficile, et l'on a recours, pour retrouver sa trace, à la recherche des antigènes tumoraux détectables par des réactions sérologiques.

Dans le cas où l'agent cancérogène est un virus à ADN, on comprend aisément que le virus transformant agit par intégration de l'ADN viral au génome cellulaire, ce qui peut rendre héréditaire la transformation cellulaire; c'est le cas du papillome de Shope.

Dans le cas de l'infection d'une cellule par un Oncornavirus à ARN, on peut démontrer la transmission par les chromosomes des cellules mères aux cellules filles de l'information introduite dans la cellule par l'ARN viral. Mais comment cet ARN peut-il être intégré à l'hélice bicaténaire du chromosome? En 1964, Howard Temin a démontré que l'ARN se transforme en ADN, intégré sous forme de Provirus à l'ADN nucléaire. On a pu démontrer *in vitro* que l'ARN viral est transcrit en retour à l'état d'ADN par une enzyme associée au virion : c'est ce que l'on nomme la *transcriptase inverse*. L'ADN ainsi transcrit peut être intégré au génome cellulaire, auquel il transmet l'information génétique virale, conditionnant ainsi l'apparition de la descendance des cellules transformées. On a même pu calculer, d'après le nombre de bases existant sur les molécules bicaténaires d'un Papovavirus, la quantité d'information nécessaire pour induire la modification cancéreuse : le nombre de ces bases, soit environ 5 000, permet de spécifier 1 500 amino-acides, parmi lesquels un tiers environ contribuent à la formation de l'enveloppe protidique, qui ne joue aucun rôle dans la transformation cancéreuse de la cellule; seuls environ 1 200 amino-acides sont disponibles dans l'ADN pour aboutir, selon leur taille, à la formation de 4 à 8 molécules protidiques, correspondant au maximum des fonctions génétiques virales qui peuvent être impliquées dans la transformation cancéreuse de la cellule. En résumé, c'est donc une très petite fraction du génome viral qui est finalement responsable de l'apparition du cancer.

Toutes ces recherches, passionnantes, permettent de mieux cerner le problème du cancer, et aboutiront peut-être à sa solution.

Conclusion

Notre rapide étude de la virologie montre l'importance rapidement conquise par cette science nouvelle. D'un point de vue pratique, elle a permis, par le développement de méthodes efficaces de protection vaccinale, de réduire l'incidence de graves maladies qui menaçaient l'humanité : la variole, la fièvre jaune, la poliomyélyte, et bien d'autres, sont aujourd'hui contenues grâce aux progrès de la virologie. Mais il s'en faut de beaucoup que toutes les maladies virales aient été complètement étudiées et soient vaincues.

Parmi les recherches que l'on peut envisager dans les prochaines années se posent le problème des hépatites infectieuses (hépatite épidémique et hépatite sérique), dont la fréquence et la gravité ne cessent d'augmenter, celui des maladies virales à évolution lente, dont l'origine virale a pu récemment être démontrée mais qui sont encore loin d'être maîtrisées; dans ce groupe, figurent des maladies graves et progressives comme la sclérose cérébrale multiloculaire, le Kuru humain et la maladie de Kreutzfeldt-Jacob, ainsi que très probablement aussi la sclérose en plaques. Les travaux en cours devraient conduire rapidement à des progrès sensibles.

D'autre part, nous avons vu que l'étude des virus a été la clé permettant d'ouvrir le mécanisme du fonctionnement cellulaire. A ce titre, elle a apporté les méthodes les plus riches en résultats pour l'exploration fonctionnelle des mécanismes intimes de la cellule.

Discipline nouvelle et originale, la virologie est en évolution rapide : aucune branche des sciences n'a accompli autant de progrès au cours de la dernière décennie. Certes, les nombreux problèmes soulevés par la virologie n'ont pas tous été résolus. Il n'en demeure pas moins que les résultats acquis ont entièrement rénové nos connaissances et bouleversé jusqu'aux fondements de la biologie.

BIBLIOGRAPHIE

ADAMS M.H., *Bacteriophages,* Interscience Publishers, New York, 1959. - BERGEY D.H., *Manual of Determinative Bacteriology,* Williams and Wilkins, Baltimore, 1957. - BURNET F.M., *Principles of Animal Virology,* Academic Press, New York, 1960. - BURNET F.M., STANLEY M.M., *The Viruses,* t. I, II, III, Academic Press, New York-Londres, 1959. - COLTER J.S., ELLEM K.A.O., *Structure of the Viruses,* in *Ann. Re?. Microb.,* v. 15, 219, 1961. - CUNNINGHAM H.C., *A Laboratory Guide in Virology,* Burgess Publishing Company, Minneapolis, Minnesota, 1960. - DULBECCO R., *The Induction of Cancer by Viruses,* in *Scientific American,* 216, 28, avril 1967. - FULTON R.W., *Plant Virology,* Éd. Corbett M.K. et Sisler H.D., University of Florida Press, Gainesville, 1964. - GROSS L., *Oncogenic Viruses,* 2e éd., Pergamon Press, Londres, 1966. - HEATHER D.M., RICHARD M., *Morphology of Small Viral Particles and Subviral Components,* in *Progr. Medic. Virol.,* 8, 183, 1966. - HORNE R.M., WILDY P., *Virus Structure Revealed by Negative Staining,* in *Advanc. Virus Res.,* 10, 101, 1963. - HUMPHREY J.H., WHITE R.G., *Principi di immunologia,* in *Il Pensiero Scientifico Editore,* Rome, 1967. - JAWETZ E., JOSEPH L., MELNICK E., ADELBERG A., *Microbiologia Medica,* Éd. Piccini, Padoue, 1967. - LÉPINE P., *I Virus,* Ist. Sier. Mil. S. Belfanti, 1963. - LÉPINE P., *les Virus,* Coll. « Que sais-je? », 4e éd., Presses universitaires, Paris, 1973. - LÉPINE P., *Techniques de laboratoire en virologie humaine,* Masson & Cie, Paris, 1964. - LEVADITI C., LÉPINE P. et VERGE J., *les Ultravirus des maladies animales,* Librairie Maloine, Paris, 1949. - LOCKART L.R., *Recent Progress in Research on Interferons,* in *Progr. Med. Virol.,* 9, 451, Karger, New York, 1967. - LURIA S.E., *General Virology,* Wiley, New York, 1953. - MARAMOROSCH K., *Insect Viruses,* Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1968. - MERCHANT D.J., MURPHY W.H., *Handbook of Cell and Organ Culture,* Burgess Publishing Company, Minneapolis Minnesota, 1960. - PENSO G., BALDUCCI D., *Le culture dei tessuti nella ricerca biologica,* in *Il Pensiero Scientifico Editore,* Rome, 1962. - RAPP F., MELNICK J.L., *The Footprints of Tumor Viruses,* in *Scientific American,* 214, 34, mars 1966. - RIVERS T.M. et HORSFALL F.L., *Viral and Rickettsial Infections of Man,* Lippincott, Philadelphie, 1959. - SMITH K.M., *Insect Virology,* Academic Press, New York-Londres, 1967. - WATSON J.D., *Biologia molecolare del gene,* Zanichelli, Bologne, 1967. - WILDY P., GINSBERG H.S., BRANDES J., MAURIN J., *Virus Classification* (Nomenclature and the International Committee on Nomenclature of Viruses), in *Progr. Med. Virol.,* 9, 476, Karger, New York, 1967. - WILLMER B.I., *Classificazione dei principali Gruppi di Virus umani ed animali,* Ist. Sier. Milanese, S. Belfanti, Milan, 1967. - WILLMER E.N., *Cells and Tissues in culture. Methods and Physiology,* Academic Press, Londres-New York, 1965. - WOOD B.W., EDGAR R.S., Building a Bacterial Virus, in *Scientific American,* 217, 60, 1967.

BIOLOGIE ET PHYSIOLOGIE DES BACTÉRIES

Techniques bactériologiques

Il n'est pas possible d'entreprendre l'étude des Bactéries, sans auparavant connaître les techniques qui permettent de protéger les milieux de culture, les liquides, les instruments expérimentaux divers des contaminations : la **stérilisation** est à la base de toutes les techniques bactériologiques.

Pour effectuer cette stérilisation, il existe plusieurs moyens : la chaleur, la filtration, les agents chimiques et les radiations.

— La *chaleur sèche* (flambage à air chaud) est peu efficace, puisque des températures de 170 °C doivent être maintenues au moins pendant 30 minutes; cette méthode est cependant très utilisée pour le matériel sec (matériel chirurgical, récipients vides).

La *stérilisation par la chaleur humide,* d'emploi plus général, convient non seulement pour les récipients, mais aussi pour les solutions et les milieux nutritifs. Les Champignons, la majorité des virus et les cellules végétatives des Bactéries pathogènes sont tués en quelques minutes à 50-60 °C; la plupart des spores des germes pathogènes ne résistent pas quelques minutes à 100 °C; cependant, l'autoclave permet d'atteindre des températures de 120 °C, nécessaires pour détruire des spores très résistantes (les spores de *Clostridium botulinum* sont tuées par un chauffage de 10 minutes à 120 °C).

De nombreux milieux de culture subissent une modification de leur constitution sous l'action de la chaleur : milieux au sérum, milieux sucrés ou contenant certaines vitamines. De plus, il peut être indispensable d'éliminer les cellules microbiennes d'un milieu sans le soumettre à la chaleur : isolement de toxines, d'enzymes, etc. Pour y parvenir, il est nécessaire de le faire passer à travers des filtres qui arrêtent tous les micro-organismes en donnant un liquide stérile. De nombreux dispositifs ont été utilisés. Ils sont de deux types : les bougies d'une part, les disques en verre ou les membranes filtrantes d'autre part.

— De nombreux *agents chimiques bactéricides* sont employés pour détruire toutes les cellules végétatives et les formes de résistance des micro-organismes. L'action bactéricide des *alcools aliphatiques* augmente avec la longueur de la chaîne jusqu'à 5-8 atomes de carbone. La présence d'eau est indispensable pour que l'alcool éthylique soit efficace (l'efficacité est la plus élevée vers 70 °C). Les *aldéhydes* (formaldéhyde ou formol) sont également des agents très actifs. Les *phénols,* connus depuis fort longtemps, sont encore d'un usage courant. Toutes les nouvelles molécules, à pouvoir bactéricide, sont définies par le coefficient phénol, qui correspond au rapport de la concentration minimale stérilisante du phénol (sous des conditions standards) à celle du

A. Rizzi

◀ *Un autoclave; cet appareil utilise la stérilisation par la chaleur humide; il permet d'atteindre des températures de 120 °C.*

A. Rizzi

◀ *Stérilisateur à chaleur sèche très utilisé pour le matériel chirurgical et les récipients vides (température 160 °C).*

▶ ***Trois modes de filtration pour l'obtention de liquides stériles : à gauche, filtration à travers une membrane de collodion ; au centre, à travers un verre poreux ; à droite, page ci-contre, dispositif à la bougie.***

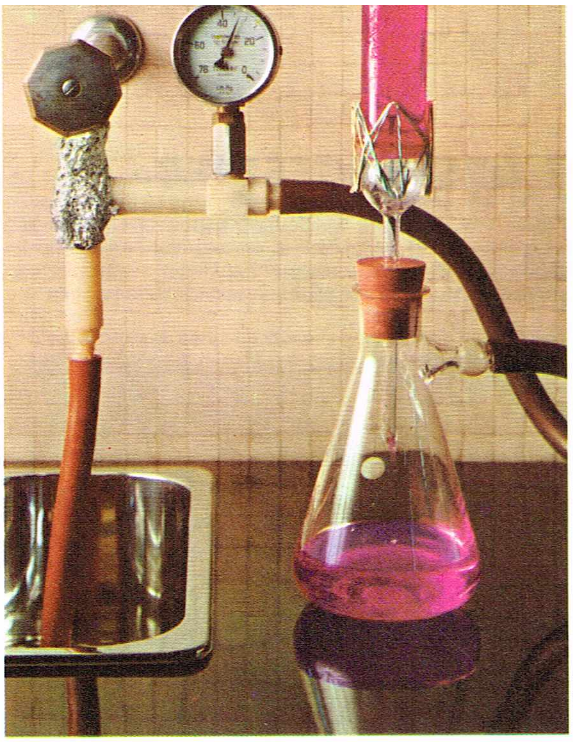

A. Rizzi

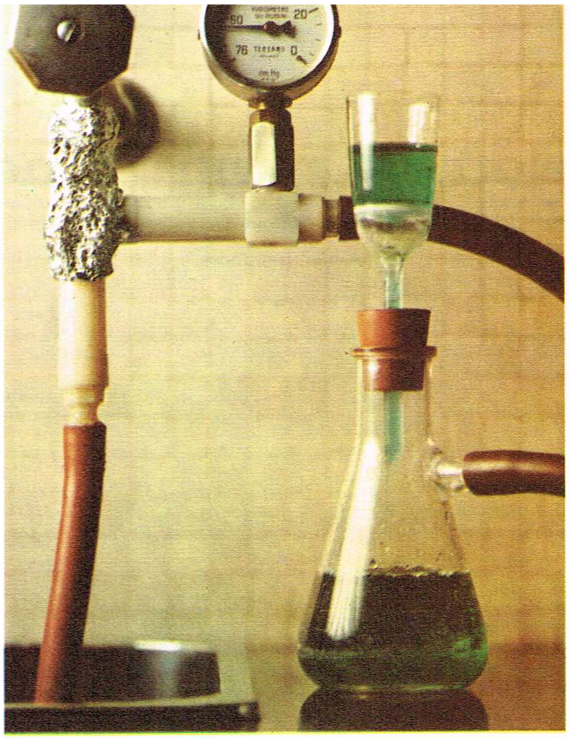

A. Rizzi

composé. L'halogénation du composé phénolique augmente le pouvoir bactéricide de la molécule.

L'*hexachlorophène* a défrayé la chronique il y a quelque temps. Excellent désinfectant, il est cependant toxique pour le système nerveux des Mammifères.

Les *agents tensio-actifs anioniques* ont comme partie hydrophile un sulfate (R—SO_4H) ou un sulfonate (R—SO_3H) ; les composés cationiques ont une amine substituée ou un groupe azoté hétérocyclique (pyridine). Contrairement aux composés anioniques, les détergents cationiques sont très bactéricides (chlorure de benzalkonium). Les chélateurs d'ions le sont également : par exemple, la 8-hydroxyquinoléine précipite les protéines. Les colorants dérivés du triphénylméthane (le violet gentiane, le vert malachite et les nitro-furanes) sont des antiseptiques à usage pharmaceutique.

Les *halogènes* (chlore, iode) sont universellement utilisés : hypochlorite de sodium, iode libre ou complexé (iodophore).

A. Rizzi

▶ ***Container étanche pour la culture en anaérobiose.***

Des *gaz toxiques* sont souvent employés pour la désinfection gazeuse : oxyde d'éthylène, β propiolactone, oxyde de propylène, bromure de méthyle, ozone. Certaines molécules, telles que l'acide peracétique, se décomposent en libérant de l'oxygène natif bactéricide.

Les micro-organismes ne peuvent se développer dans les milieux environnants que s'ils trouvent à leur disposition de l'eau libre (aw) qu'ils pourront utiliser. L'apport de NaCl est une méthode très simple, couramment utilisée pour la conservation des aliments : une pression osmotique trop élevée a un effet bactériostatique.

— Depuis quelques années, on a préconisé l'utilisation des *radiations* pour la stérilisation de divers produits. Cette action des radiations X, γ ou β se heurte cependant au fait que, dans certains cas, les radiations agissent non seulement sur les germes, mais aussi sur les substrats, dont les qualités organoleptiques sont modifiées. Pour les Bactéries, la longueur d'onde la plus active dans l'ultraviolet est de 2 537 Å. A cette longueur d'onde, pour détruire 90 % de la population bactérienne présente, il faut de 11 000 à 197 000 ergs/cm^2. Les survivants ont un taux élevé de mutations, car c'est l'ADN qui absorbe surtout les radiations ultraviolettes (pic d'absorption maximal à 260 nm). L'irradiation aux UV permet d'ailleurs l'obtention des mutants fournissant des souches industrielles dont le rendement de biosynthèse est accru (mutant de *Penicillium chrysogenum* pour la pénicilline). Des Bactéries soumises à une irradiation aux UV et exposées à la lumière visible (4 360 Å pour *Streptomyces griseus,* 4 047 Å pour *Bacillus subtilis*) sont photoréactivées. Une enzyme répare alors les dégâts occasionnés à l'ADN. Les rayons X inhibent spécifiquement la synthèse d'enzymes inductibles (β galactosidase) et déclenchent des mutations par cassure des chromosomes. Ce type de rayonnement déclenche l'apparition de radicaux libres avec formation d'eau oxygénée et de peroxydes organiques. En atmosphère d'azote, il faut une dose de rayonnement trois fois supérieure pour obtenir le même résultat qu'en atmosphère d'oxygène. Des molécules réductrices (hydrosulfite, cystéine, composées à — SH) protègent contre ce type de rayonnement.

Les milieux de culture doivent apporter aux micro-organismes les substances qui sont indispensables pour leur croissance. On a tout d'abord pensé préparer des milieux avec des tissus animaux ou végétaux, pour se rapprocher le plus possible des conditions naturelles ; ce sont des milieux complexes, qui s'opposent aux milieux synthétiques chimiquement définis.

Cependant, les Bactéries diffèrent beaucoup selon la nature des substances assimilables qu'elles exigent ; il est nécessaire, avant d'entreprendre la culture d'une Bactérie donnée, d'étudier l'écologie de cette espèce. Le type physiologique (photolithotrophe, photo-organotrophe, chimiolithotrophe, chimio-organotrophe, paratrophe) pourra dans de nombreux cas être précisé et permettre d'élaborer la formule du substrat nutritif.

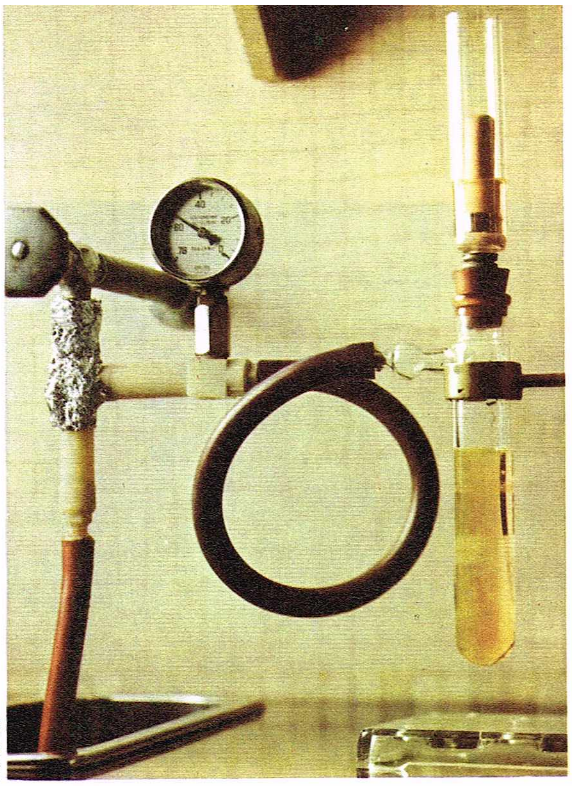

A. Rizzi

— Le carbone sera fourni sous forme de gaz carbonique ou de carbone organique (sucre par exemple);

— l'azote sera ajouté sous diverses formes : azote gazeux (fixateurs d'azote, comme les *Azotobacter*), sels ammoniacaux, nitrates ou azote organique (acides aminés, protéines) pour les Bactéries plus exigeantes;

— la plupart des Bactéries peuvent utiliser le soufre sous forme de sulfate et le phosphore sous forme de phosphate;

— les besoins en potassium, calcium, magnésium et fer seront assurés par divers sels minéraux;

— les oligo-éléments indispensables (Mo, Co, Mn, Zn, Cu, etc.) seront apportés en général sous forme d'impuretés par la source d'azote et les sels minéraux.

Il est souvent indispensable d'ajouter au milieu de culture des facteurs de croissance nécessaires pour que les Bactéries étudiées puissent se développer. Ces facteurs sont très variés et correspondent souvent à des molécules organiques que la cellule est incapable de synthétiser. Ainsi, l'acide thioctique est exigé par *Lactobacillus casei* et *Plectridium tetani;* l'acide folique est nécessaire pour que *L. casei* et *Streptococcus faecalis* se développent; la thiamine est un facteur de croissance pour *Staphylococcus aureus* et *Lactobacillus fermenti,* la riboflavine pour *Lactobacillus casei,* la vitamine B_{12} pour *Lactobacillus leichmanii,* la biotine pour *Lactobacillus arabinosus,* l'acide paraaminobenzoïque pour *Clostridium acetobutylicum.*

Toutes ces espèces peuvent être considérées comme des mutants biochimiques apparus au cours de l'évolution, car des espèces n'exigeant pas de telles molécules peuvent, après mutation provoquée par des agents divers, devenir auxotrophes, c'est-à-dire exigeantes vis-à-vis de telles substances.

Les milieux de culture devront satisfaire à certaines exigences bactériennes propres à chaque espèce. Les Bactéries se développent préférentiellement dans des milieux neutres ou légèrement basiques; les Bactéries lactiques croissent très bien dans un milieu acide (pH 4), et des Bactéries oxydant le soufre *(Thiobacillus)* supportent même des pH très bas, voisins de 0.

L'atmosphère avec laquelle est en contact le milieu nutritif est importante à considérer. Certains groupes bactériens sont aérobies stricts *(Micrococcus, Acetobacter, Nitrosomonas),* d'autres anaérobies facultatifs (Entérobactériacées); enfin, des anaérobies stricts ne supportent même pas des traces d'oxygène *(Clostridium, Desulfovibrio).* Il est cependant impossible de cultiver certains anaérobies dans l'atmosphère normale si le substrat est réducteur (présence de cystéine, de thioglycolate...). Certaines espèces hétérotrophes exigent des tensions en gaz carbonique très importantes (de 10 à 30 %); c'est le cas des *Brucella* (responsables de la fièvre de Malte).

Il est souvent nécessaire de solidifier les milieux de culture. A cet effet, diverses substances sont utilisées.

— La *gélose* est un polymère sulfaté de D galactose, extrait de diverses Algues; ce substrat, très utilisé, est rarement attaqué par les Bactéries.

— La *gélatine,* qui provient du collagène, est une protéine pauvre (absence de cystéine et de tryptophane); elle présente deux inconvénients : sa liquéfaction au-dessus de 22 °C (température ne permettant pas la croissance de nombreuses Bactéries) et son hydrolyse par des espèces variées de micro-organismes protéolytiques.

— Le *gel de silice* est un support inerte qui peut être imprégné par une solution nutritive; malheureusement, il ne peut être stérilisé à l'autoclave et son emploi est délicat.

La température d'incubation est un des facteurs les plus importants pour obtenir une bonne croissance microbienne. Certaines souches, dites *psychrophiles,* se développent à des températures inférieures à 10 °C, d'autres, *mésophiles,* ont une croissance optimale voisine de 30 °C. Quant aux *thermophiles,* elles ne se développent qu'à des températures supérieures à 40 °C.

Dans presque tous les milieux (air, eau, aliments, liquides biologiques), les micro-organismes ne vivent pas isolés : de nombreuses espèces établissent entre elles des relations de compétition, de symbiose, de commensalisme, etc. Pour identifier une souche pure et étudier sa physiologie, il est donc nécessaire de l'isoler des autres germes présents. Pour ce faire, il est évidemment possible de trier au micromanipulateur chaque cellule microbienne, mais ce travail est long, fastidieux et difficile, étant donné la petite taille des cellules.

Diverses techniques d'isolement d'une souche ont été mises au point pour obtenir le même résultat.

— *Méthode des dilutions :* le prélèvement originel est dilué dans un milieu liquide, en général dix fois à chaque stade. Dans le dernier tube où il y a croissance, on peut espérer avoir une population provenant d'une seule cellule initiale.

— *Méthode des stries :* à la surface d'un milieu nutritif gélosé solidifié dans une boîte de Pétri, le prélèvement est étalé à l'aide d'un fil à ensemencer (nichrome ou platine). Dans certaines zones, des colonies isolées les unes des autres proviennent d'une seule cellule bactérienne. Une culture pourra être obtenue après repiquage de la colonie isolée sur un substrat.

— *Méthode des milieux sélectifs :* la préparation des milieux sélectifs permettant d'obtenir la culture d'une

▼ ***Deux phases d'exécution de prélèvements de culture : en haut, manipulation dans un milieu liquide; en bas, manipulation dans un milieu gélosé.***

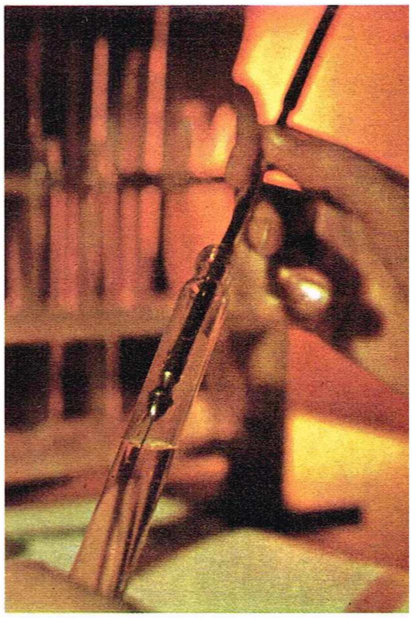

P. Castano

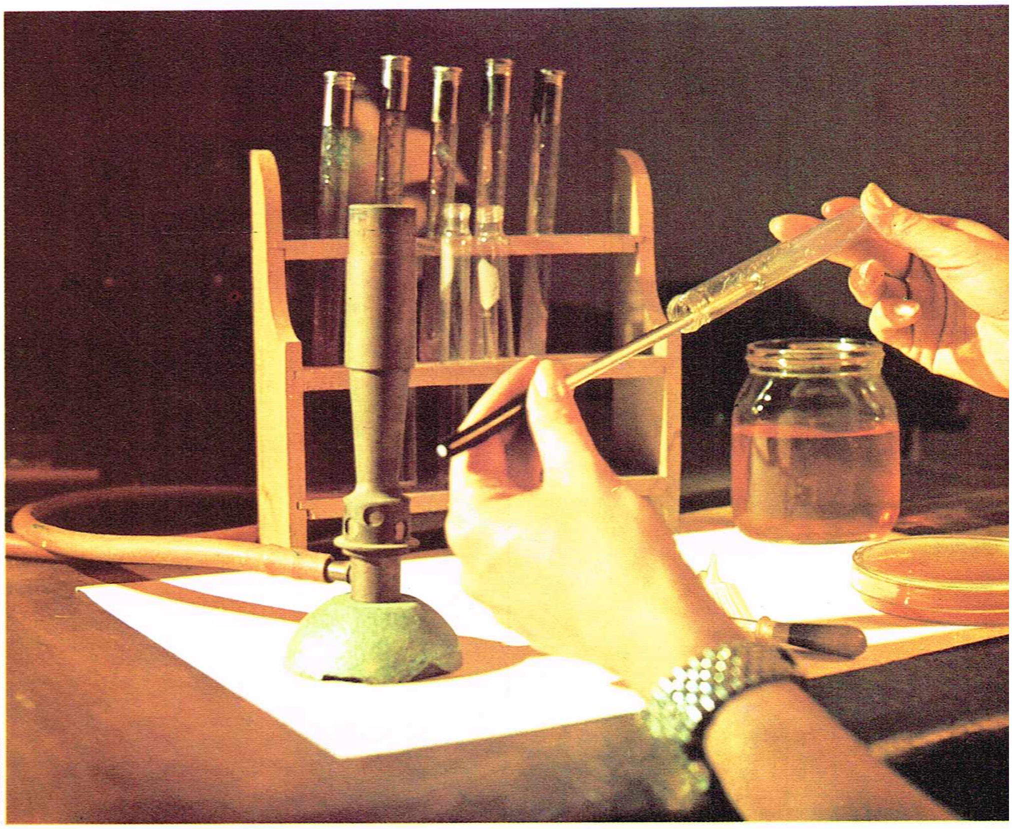

P. Castano

▶ *Culture en boîte de Pétri. A gauche, mode d'inoculation avec étalement.*

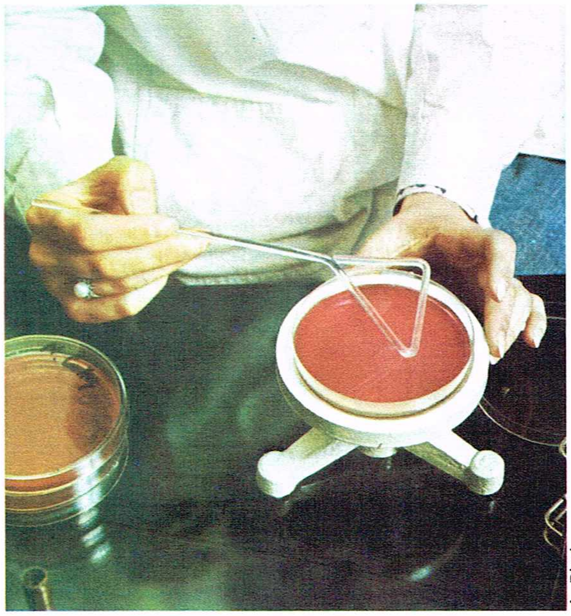

A. Rizzi

P. Castano

▼ *Exemple de culture en tube à essais de plusieurs espèces de Neissériacées, à divers stades de développement et sur des substrats différents comme le montre la variété des colorations.*

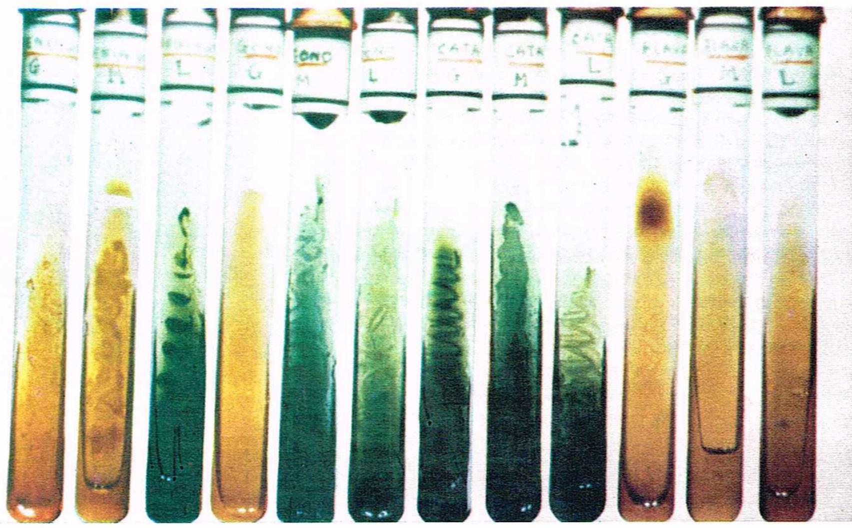

C.N.R.I. - Pr. Poutrel - Paris

A. Rizzi

▶ *Culture en boîte de Pétri, permettant d'effectuer le dénombrement des germes.*

espèce bactérienne isolée, à partir d'un mélange de germes, a permis à la bactériologie d'accomplir de grands progrès. La méthode la plus simple consiste essentiellement à utiliser un milieu de culture particulièrement favorable au germe que l'on veut isoler, dans lequel on introduit une substance bactériostatique, à concentration assez faible, pour entraver la culture des autres germes sans gêner celle de la Bactérie étudiée. Par exemple, les Entérobactériacées sont isolées sur le milieu de Mac Conkey, tandis que le milieu au désoxycholate-citrate-lactose est employé pour les *Salmonella ;* les staphylocoques sont mis en évidence grâce aux milieux de Chapman ou de Baird-Parker, les streptocoques sur ceux de Barnes ou de Packer. En général, ces diverses techniques sont utilisées conjointement de manière à obtenir une culture pure, provenant théoriquement du développement d'une seule cellule bactérienne. Une telle souche est génétiquement homogène. Au cours de toute recherche bactériologique, il sera souvent indispensable de vérifier qu'aucun micro-organisme n'est venu souiller la culture lors des diverses manipulations. Les contrôles porteront sur les caractères morphologiques des colonies et des cellules, et sur les caractères biochimiques et biologiques qui devront tous correspondre à l'espèce type. En effet, même s'il n'y a pas contamination, la rapidité du pouvoir de multiplication des Bactéries augmente les probabilités d'apparition de mutants divers, dont les propriétés physiologiques sont parfois très différentes de celles correspondant à la souche originelle.

La croissance des Bactéries dans un bouillon de culture entraîne pratiquement toujours la formation d'un trouble. Ce trouble peut rester homogène ou disparaître pour faire place à un liquide clair avec un dépôt floconneux, glaireux, ou un voile en surface. Au contraire, à la surface du milieu solide, les Bactéries se développent en formant des colonies de taille, d'aspect et de formes divers. La morphologie des colonies peut donner de précieuses indications sur l'espèce bactérienne étudiée, mais il est toujours nécessaire de procéder à une observation microscopique des cellules bactériennes.

L'examen des Bactéries sans coloration, à l'état frais, fournit des renseignements sur la morphologie cellulaire et la mobilité des cellules. Cependant, pour plus ample information, après fixation à la chaleur, les frottis bactériens doivent être soumis à plusieurs types de colorations :

— coloration de Gram ;

— coloration de Ziehl Nielsen ;

— coloration au vert malachite pour la mise en évidence des spores ;

— coloration des capsules ;

— coloration des cils par la méthode de Leifson ;

— coloration des granulations cellulaires.

Les caractères physiologiques des Bactéries seront précisés à la suite de nombreux tests biochimiques :

— caractérisation du métabolisme des glucides : étude des produits de la fermentation avec ou sans production de gaz ;
— détermination de l'activité protéolytique, action des Bactéries sur le lait ;
— détermination de l'activité lipolytique, recherche des lécithinases (à partir du jaune d'œuf) ;
— détermination de l'activité réductrice de certaines espèces ;
— recherche de l'indole ;
— recherche de certaines enzymes : uréase, catalase, oxydase, β galactosidase, décarboxylases ;
— mesure de la respiration ;
— étude du pouvoir pathogène ;
— détermination de la structure antigénique et de la sensibilité aux bactériophages.

La croissance bactérienne

La multiplication bactérienne se fait, dans la majorité des cas, par division binaire, dans de rares cas, par bourgeonnement *(Nitrobacter, Hyphomicrobium)*.

Deux grandeurs définissent une population microbienne :
— la *densité microbienne,* ou masse cellulaire ;
— la *concentration cellulaire,* ou nombre de cellules.

La mesure de la croissance se fait soit par la méthode directe de dénombrement des germes par unité de volume (concentration cellulaire), soit par des méthodes indirectes (calcul de poids sec ou mesure de densité optique au spectrophotomètre).

Divers paramètres peuvent être définis :
— le *temps de génération* est le temps que met une Bactérie pour donner deux cellules filles ;
— le *temps de croissance* représente le nombre de divisions par unité de temps. On peut le calculer pendant la période où les Bactéries se multiplient au rythme maximal :

Soit x_0 le nombre de cellules ensemencées ;
après 1 génération,
on a un nombre de cellules $x_1 = 2\,x_0$;
après 2 générations,
on a un nombre de cellules $x_2 = 2 \times 2\,x_0 = 2^2\,x_0$;
après n générations,
on a un nombre de cellules $x_n = 2^n\,x_0$.
Si r est le taux de croissance, après un temps t, $n = rt$, et le nombre de cellules devient :

$$xt = 2^{rt}\,x_0$$

Les différentes étapes de la croissance d'une culture bactérienne dans un milieu liquide se traduisent par cinq phases distinctes :
— la phase de latence ;
— la phase exponentielle ;
— la phase de ralentissement ;
— la phase stationnaire maximale ;
— la phase de décroissance.

La phase de latence correspond à une croissance d'abord nulle, qui va progressivement s'accélérer ; pendant ce temps, les cellules bactériennes repiquées dans un milieu neuf synthétisent les systèmes enzymatiques qui ont subi, dans les organismes à l'état non proliférant, des altérations progressives. La phase de latence est longue si les Bactéries de l'inoculum sont prises dans la phase stationnaire ou la phase de déclin. Pour réduire au minimum ce temps, il faut prélever l'inoculum en phase exponentielle dans le même milieu.

Le nombre de cellules ensemencées est également important à considérer : lorsqu'il est suffisant, des effets de stimulation réciproques sont possibles ; lorsqu'il est trop élevé, des inhibitions peuvent apparaître (surtout s'il s'agit de spores ou d'organes de résistance). Dans ce cas, il faudra d'ailleurs tenir compte du temps indispensable à la germination proprement dite, laquelle ne pourra quelquefois être déclenchée qu'après un choc physique ou chimique (dormance).

Les causes de latence qui viennent d'être décrites sont éliminées lorsqu'on emploie comme inoculum une préculture prélevée en phase exponentielle. Dans ce cas, les organismes transférés en milieu neuf de même composition reprennent immédiatement leur croissance exponentielle. Toutefois, si le transfert est fait dans un milieu nutritif de composition différente, on peut encore observer une phase de latence ; celle-ci est due à une adaptation enzymatique, c'est-à-dire à la synthèse d'une ou plusieurs enzymes initialement absentes, et nécessaires pour que les Bactéries puissent métaboliser leur nouveau substrat.

Au cours de la phase de croissance exponentielle, toutes les cellules se divisent à un taux de croissance constant maximal et le taux de mortalité est nul. En coordonnées semi-logarithmiques, la courbe de croissance s'exprime graphiquement par une droite ; l'équation est de la forme :

$$x^t = 2^{rt}\,x_0$$

Les conditions de développement optimal requises par les Bactéries et initialement présentes dans le milieu de culture varient au cours du temps. A un certain moment une des conditions nécessaires pour la croissance peut disparaître : la croissance s'arrête, le taux de croissance s'annule. Les facteurs responsables sont souvent de deux types : épuisement du milieu et accumulation de produits toxiques du métabolisme.

L'arrêt de la croissance entraîne un profond remaniement de la structure cellulaire et, notamment, un renouvellement rapide des protéines et des acides ribonucléiques. C'est à ce stade que se déclenchent les phénomènes de différenciation cellulaire conduisant, par exemple, à la sporulation. Plus ou moins tardivement suivant l'organisme

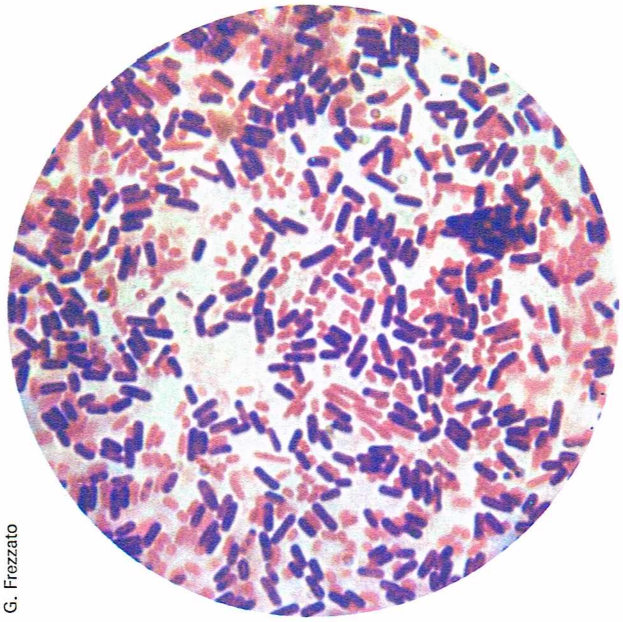

G. Frezzato

A. Rizzi

▲ A gauche, exemple de coloration de Bactéries diverses par la méthode de Gram (× 1 250 × 1,5). A droite, tubes de Durham permettant l'étude des produits de la fermentation avec ou sans production de gaz.

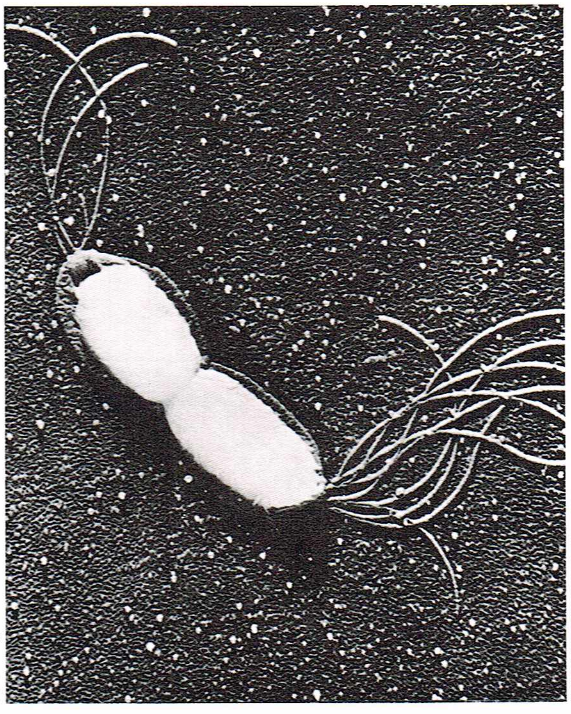

F. Scanga

◀ Bactérie anaérobie en phase avancée de division ; la touffe de cils est insérée au pôle distal de chacune des deux cellules. La multiplication bactérienne se fait généralement comme ici par division binaire (33 000)

considéré et suivant les conditions de culture, débute la phase de déclin, au cours de laquelle la population décroît. Le nombre d'organismes viables diminue, ainsi que la densité microbienne par autolyse des cellules sous l'action d'enzymes protéolytiques endogènes.

Il est toutefois possible, en renouvelant en permanence le milieu de culture, de maintenir indéfiniment constante la croissance à un taux élevé.

Il faut remarquer qu'à l'échelle de la cellule isolée, la division est un processus discontinu, tandis que l'accroissement de la masse cellulaire est un processus continu. D'autre part, dans les populations nombreuses, l'évolution de la concentration cellulaire se confond statistiquement avec celle de la densité microbienne. Mais on peut réaliser des croissances synchronisées où les deux paramètres sont dissociés : dans ce cas, toutes les cellules se divisent simultanément. Les rythmes de division sont faciles à synchroniser chez les Algues et certains Protozoaires, car les mitoses se déclenchent dans les quelques heures suivant l'illumination.

Pour les Bactéries, des chocs thermiques, l'apport à intervalles réguliers et en petite quantité d'une molécule indispensable pour la division cellulaire de certaines souches auxotrophes (la thymine par exemple), le calibrage par filtration permettent d'obtenir au moins pendant quelques divisions un synchronisme de la multiplication cellulaire.

La nutrition bactérienne

Les réactions de biosynthèse constituant la croissance bactérienne sont endergoniques : elles demandent donc de l'énergie. Les micro-organismes ont à leur disposition plusieurs possibilités, qui ont été tour à tour adoptées au cours de l'évolution : la fermentation, l'oxydation de substances organiques, l'oxydation de substances minérales, la photosynthèse.

Une fermentation est un processus grâce auquel l'énergie provient de l'utilisation de composés organiques comme donneurs et accepteurs d'électrons :

$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2\ CH_3 - CHOH - COOH +$ énergie disponible (58 kcal)
glucose

$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2\ CH_3CH_2OH + 2\ CO_2 +$ énergie disponible (57 kcal)

En termes de thermodynamique, cela signifie que les produits de la fermentation ont une énergie inférieure à celle des substrats fournis; mais le substrat, qui n'est pas totalement oxydé à la fin de la réaction, est encore très riche en énergie disponible, non utilisée par la cellule. Les principaux types de fermentations réalisés par les micro-organismes peuvent être résumés selon le schéma ci-dessous.

Dans tous les cas, l'énergie libérée au cours de la dégradation du substrat est stockée par la cellule sous forme d'adénosine triphosphate (ATP). L'homme a exploité de nombreux types de fermentations, notamment les fermentations alcoolique, lactique et propionique.

Les micro-organismes aérobies stricts et anaérobies facultatifs ont en présence d'oxygène un métabolisme respiratoire; le substrat organique est alors totalement oxydé :

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 6\ CO_2 + 6\ H_2O + 688\ \text{kcal}$$

L'énergie du substrat disponible pour la cellule est dans ce cas plus élevée, et le rendement énergétique de la respiration est bien meilleur que celui de la fermentation. Que ce soit dans la fermentation ou la respiration, le métabolisme est du type chimio-organotrophe hétérotrophe.

D'autres Bactéries n'ont pas besoin de substances organiques et utilisent diverses sources d'énergie employée à réduire le CO_2 en composés organiques nécessaires à la cellule.

— Les Bactéries chimiolithotrophes trouvent l'énergie nécessaire à la réduction du CO_2 en oxydant une molécule minérale. C'est le cas des Bactéries du soufre, qui oxydent le soufre ou ses dérivés minéraux, comme les sulfures. On a les réactions suivantes avec *Thiobacillus thioparus :*

$1/2\ O_2 + H_2S \rightarrow S + H_2O +$ énergie disponible

Dans le cas de *Thiobacillus thiooxydans,* l'oxydation est plus complète :

$2\ S + 3\ O_2 + 2\ H_2O \rightarrow 2\ H_2SO_4 +$ énergie disponible (120 kcal)

— Les *Nitrosomonas* oxydent l'ammoniaque en nitrite, et les *Nitrobacter* oxydent les nitrites en nitrates.

— Les Bactéries du fer *(Sphaerotilus, Leptothrix, Gallionella)* oxydent les sels de fer ferreux en sels de fer ferrique :

$2\ H^+ + 1/2\ O_2 + Fe^{++} \rightarrow Fe^{+++} + H_2O +$ énergie disponible (11,3 kcal)

— Les *Hydrogenomonas* peuvent oxyder l'hydrogène :

$4\ H_2 + 2\ O_2 \rightarrow 4\ H_2O +$ énergie disponible (224 kcal)

Comme ils réduisent le CO_2, ils se développent dans un simple milieu minéral dans une atmosphère complexe (CO_2, H_2, O_2).

Les Bactéries sulfato-réductrices *(Desulfovibrio)* réduisent les sulfates en sulfures grâce à l'hydrogène fourni par des substrats organiques spécifiques et à l'hydrogène gazeux. Ces sulfures sont responsables de corrosions de canalisations métalliques enfouies ou immergées, car il s'agit de Bactéries anaérobies.

La photosynthèse bactérienne ne libère pas d'oxygène, comme c'est le cas chez les Algues et les plantes supérieures.

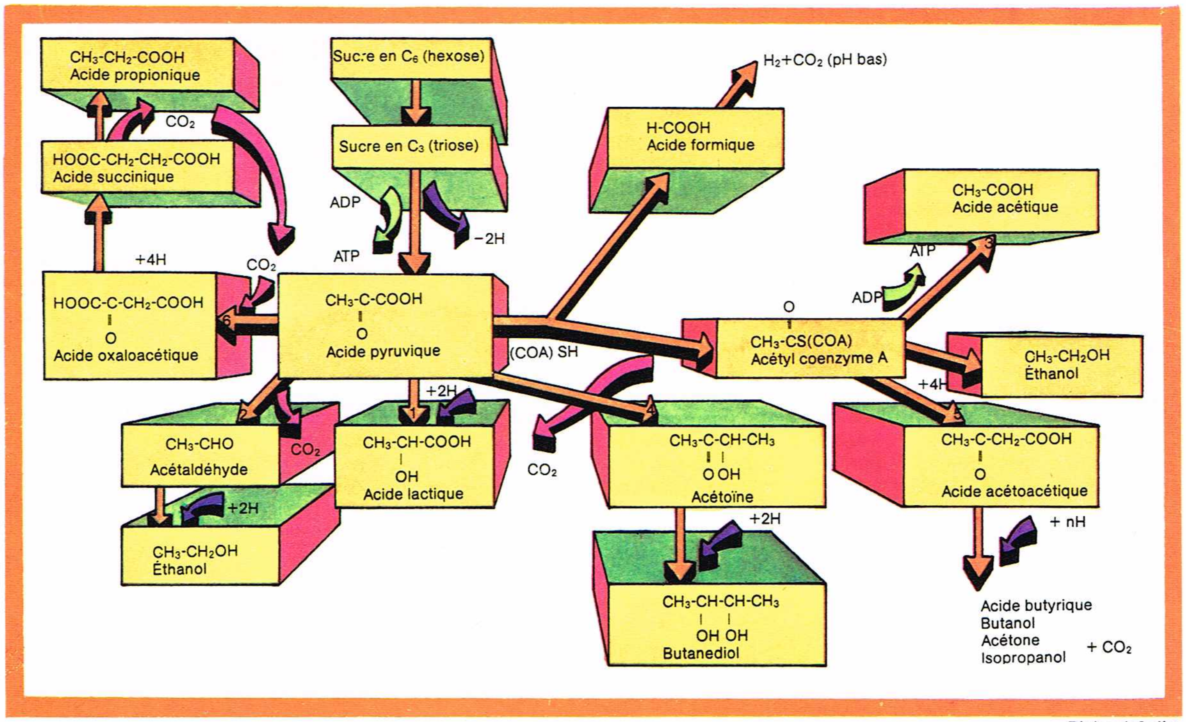

Richard Colin

▶ *Représentation schématique des principaux types de fermentations : 1,* **Streptococcus, Lactobacillus** *: fermentation lactique; 2, beaucoup de Levures, peu de Bactéries : fermentation alcoolique; 3,* **Enterobacteriaceae** *: fermentation acides mixtes; 4,* **Aerobacter** *: fermentation du butanediol; 5,* **Clostridium** *: fermentation butyrique; 6,* **Propionibacterium** *: fermentation propionique.*

Les Bactéries pourpres ou vertes du soufre réalisent la réaction suivante :

$$4\ CO_2 + 2\ H_2S + 4\ H_2O \rightarrow 4\ (CH_2O) + 2\ H_2SO_4$$

La bactériochlorophylle présente chez les *Rhodospirillales (Thiospirillum, Chromatium, Lamprocytis)* est masquée par les caroténoïdes, qui donnent la couleur pourpre de la cellule. Au contraire, chez les Chlorobiaceae *(Chlorobium, Pelodictyon)*, la couleur verte est celle de la chlorophylle. L'H_2S remplace l'H_2O utilisé par les Algues et les plantes supérieures comme donneur d'électrons. Les Rhodospirillaceae *(Rhodospirillum, Rhodopseudomonas)* se servent de molécules organiques (alcools, acides...) comme donneurs d'électrons.

Les mécanismes biochimiques permettant de transformer le CO_2 en molécules organiques réduites sont endergoniques. C'est la lumière captée par la chlorophylle qui fournit l'énergie nécessaire. Les voies de fixation du CO_2 sont assez comparables à celles prises par les Algues et les végétaux chlorophylliens.

Des Bactéries exigeantes (Bactéries lactiques, Bactéries pathogènes) demandent comme source d'azote des protéines, des peptides ou des acides aminés. Par contre, de nombreux Champignons et beaucoup de Bactéries se contentent d'azote présenté sous forme minérale : NH_4^+ ou NO_3^-. L'azote ammoniacal est fixé sur un acide organique qui sera transformé en acide aminé. Les nitrates peuvent avoir un autre rôle que celui de source d'azote. En effet, en anaérobiose, ils servent d'accepteur d'électrons et remplacent en quelque sorte l'oxygène de l'air : c'est la « respiration nitrate » (Entérobactériacées, *Thiobacillus denitrificans, Pseudomonas*) ; le terme ultime de la réduction des nitrates est l'azote gazeux dans le cas de la dénitrification. Certaines Bactéries sont capables de fixer l'azote atmosphérique pour synthétiser leurs protéines. Les Bactéries dites libres appartiennent aux genres *Azotobacter, Beijerinckia, Clostridium, Rhodospirillum, Rhodopseudomonas*. Les *Rhizobium* et certaines Actinomycètes vivent en symbiose avec les plantes supérieures (en particulier les Légumineuses). Ils fournissent de l'azote organique et récupèrent des molécules carbonées, synthétisées grâce à la photosynthèse. C'est pourquoi les Légumineuses peuvent être cultivées sans apport d'engrais azoté tout en enrichissant le sol en azote, utilisable par les cultures suivantes. Ils constituent un véritable engrais vert.

Parmi les composants minéraux de la Bactérie, le soufre et le phosphore tiennent une place de choix. Le premier est présent dans certains acides aminés et donc dans les protéines sous forme de groupement thiol (— SH) ; il est principalement incorporé sous forme de sulfate ou de composés soufrés organiques, rarement sous forme de soufre réduit. Le second fait partie des acides nucléiques, de nombreux coenzymes et de l'ATP ; il est incorporé dans la cellule sous forme de phosphate minéral. Le phosphore permet la récupération, l'accumulation et la distribution de l'énergie dans la cellule.

D'autres éléments minéraux jouent sans aucun doute un rôle dans l'équilibre physico-chimique de la cellule : ce sont notamment le sodium, le potassium, le magnésium et le chlore. D'autres, beaucoup plus nombreux, sont parties constituantes d'enzymes ou de coenzymes : c'est le cas du fer des cytochromes et du magnésium de la chlorophylle.

Outre les éléments déjà cités, le calcium, le magnésium, le cobalt, le cuivre, le manganèse et le molybdène jouent le rôle de cofacteurs ou d'activateurs enzymatiques. On les appelle fréquemment des oligoéléments car ils sont indispensables en quantités infimes, apportées le plus souvent sous forme de traces par les produits chimiques qui servent à préparer les milieux de culture. Quelques ions sont exigés, à des teneurs bien précises, pour l'élaboration d'une substance : la production de la toxine diphtérique est optimale à la concentration de 0,14 mg de fer par litre ; elle est pratiquement nulle lorsque celle-ci atteint 0,5 mg par litre. La thermorésistance des spores est sous la dépendance étroite du calcium ; le potassium agit dans le transfert des phosphates ; le molybdène a un rôle essentiel dans le métabolisme de fixation de l'azote ; le cobalt entre dans la molécule de la vitamine B_{12}, facteur de croissance pour de nombreuses Bactéries, qui intervient dans les formations et les transports de méthyle. Le NaCl est essentiel pour les Bactéries marines dites halophiles *(Halobacterium)*.

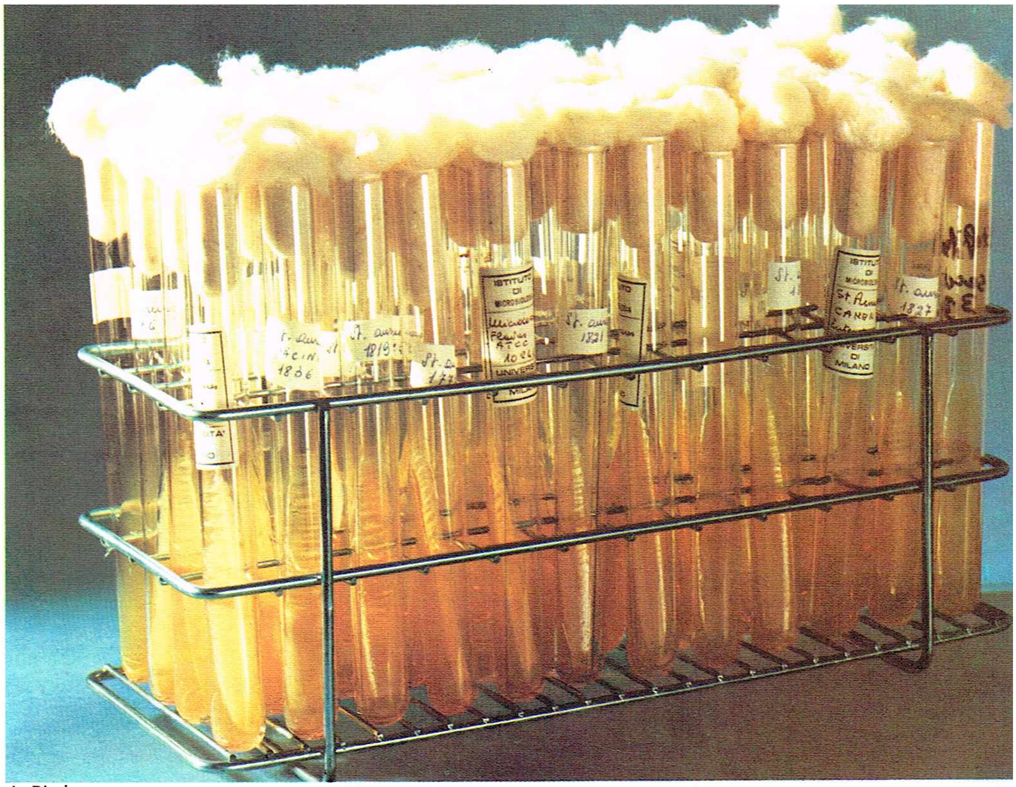

A. Rizzi

▲ Portoir métallique contenant une collection de cultures microbiennes en tube à essais, sur substrat gélosé.

La synthèse des antibiotiques exige des ions minéraux : pour la pénicilline il faut du fer, du soufre et du phosphore. De même, la synthèse d'acide citrique par *Aspergillus niger* demande 1 mg/l de fer ; au-dessus et au-dessous de cette concentration, le rendement diminue.

Action des facteurs du milieu

Les facteurs du milieu modifient la croissance, le métabolisme et la composition biochimique des Bactéries. Leur action peut aboutir à la destruction des germes.

Nous avons déjà parlé du rôle du *pH* lors de l'élaboration des milieux de culture. Contrairement aux Champignons, qui se développent bien dans les milieux de culture acides, les Bactéries préfèrent les milieux neutres ou basiques. Cependant, il existe à cet égard de nombreuses exceptions ; la plus importante est celle du groupe des Lactobacillacées, que l'on isole de substrats très acides et qui interviennent lors de la préparation des fromages, des saucissons et de la choucroute.

Il est possible de classer les Bactéries en fonction des *températures* de croissance (tableau 1).

La température influe sur le taux de croissance et le rendement pondéral de la culture. Le tableau 2 montre les résultats obtenus avec *Enterobacter cloacae*.

***▼ L'action des facteurs du milieu : les tableaux 1 et 2 montrent l'influence de la* température.**

TABLEAU 1
CLASSIFICATION DES BACTERIES EN FONCTION DES TEMPERATURES DE CROISSANCE

GROUPE	TEMPERATURE EN °C		
	Minimale	Optimale	Maximale
Thermophiles	40-45	55-75	60-80
Mésophiles	10-15	18-45	30-50
Psychotrophes	+ 5 à + 10	25-30	30-35
Psychrophiles	− 5 à + 5	15-18	19-22

TABLEAU 2
TAUX DE CROISSANCE ET RENDEMENT PONDERAL D'UNE CULTURE D'ENTEROBACTER CLOACAE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE

Température °C	Taux de croissance népérien	Rendement pondéral en g de cellules (poids sec) par g de glucose
23	0,552	0,354
27	0,751	0,356
32	0,967	0,336
37	1,305	0,324
38,8	0,832	0,217
39,7	0,600	0,172
40,8	0,400	0,095
42	0,000	0,000

TABLEAU 3 – POURCENTAGE DE CELLULES VIVANTES APRES UNE PERIODE DE CONGELATION			
température de congélation / durée de congélation	− 7 °C	− 18 °C	− 29 °C
24 heures	49	49	52
15 jours	2	13	41

Tableau 4		
SOUCHES	HUMIDITÉ RELATIVE EN %	
	Germination des spores	Croissance du mycélium
Aspergillus echinulatus	71	62
Aspergillus candidus	72	72
Aspergillus chevalieri	65	65
Rhizopus nigricans	92	94

▲ A gauche, tableau 3 montrant l'incidence du procédé de congélation sur les Bactéries. A droite, tableau 4, illustrant l'action de la pression osmotique sur la croissance des Champignons, qui sont plus tolérants que les Bactéries.

Par transfert de matériel génétique, une souche mésophile peut devenir thermophile. De ce point de vue, trois groupes de micro-organismes ont été définis :

— ceux dont les exigences nutritionnelles sont identiques quelle que soit la température ;

— ceux dont les besoins augmentent avec la température de culture (certaines enzymes sont inactivées par une température élevée) ;

— ceux dont les besoins augmentent lorsque la température diminue (activations d'enzymes par une température élevée).

Toutes les Bactéries pathogènes pour l'homme et les animaux sont mésophiles. A basses températures, seules les psychrophiles ont des systèmes transporteurs capables de faire entrer les métabolites dans la cellule. Les psychrophiles sont plus riches en acides gras non saturés que les mésophiles. La dénaturation par la chaleur des enzymes respiratoires est importante dans l'arrêt de la croissance des psychrophiles par la température élevée. Les Bactéries psychrophiles sont responsables de l'altération des aliments réfrigérés. Au contraire, chez les thermophiles, ces enzymes (ATPase, malate déshydrogénase, pyrophosphatase, déshydrogénase) sont thermostables. En général, les Bactéries thermophiles sont thermorésistantes et responsables des accidents de la fabrication des conserves appertisées. Aucune relation n'a pu être établie entre la stabilité thermique de l'ADN et l'optimum de température de croissance. Cependant, les ARN seraient plus stables chez les thermophiles que chez les mésophiles.

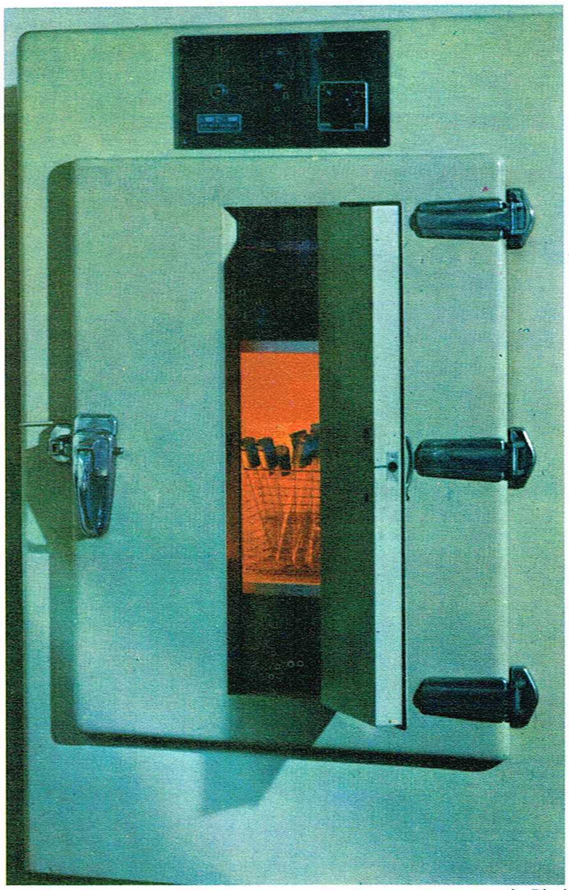

A. Rizzi

▶ Enceinte thermostatique pour la culture microbienne.

Un abaissement de la température tue de nombreuses Bactéries *(Escherichia coli, Pseudomonas aeruginosa, Salmonella typhimurium)*. Les cellules en phase exponentielle sont les plus sensibles, surtout dans un milieu chimiquement pur. Toutefois, la congélation est un bon procédé pour conserver les cultures utilisées comme levains dans l'industrie laitière (tableau 3).

Cette méthode de conservation cède la place à la lyophilisation, qui est sans doute la méthode idéale de conservation. La souche est congelée dans une chambre à basse température (— 26 °C au minimum) ; la chambre est ensuite soumise à un vide poussé (0,1 mm de mercure au minimum) qui sublime les cristaux de glace, formés à partir de l'eau cellulaire. La conservation des Bactéries est fonction du milieu dans lequel elles sont lyophilisées. En général, la présence de macromolécules (de protéines par exemple) favorise la conservation.

La **pression osmotique** est un facteur très important pour la croissance bactérienne. On l'exprime sous forme d'humidité relative ou d'activité aqueuse. Pour mesurer l'activité aqueuse d'un substrat, on l'amène à un équilibre de vapeur d'eau avec une solution de contrôle qui maintient une certaine humidité relative.

Les Champignons sont plus tolérants que les Bactéries ; c'est pourquoi ils sont souvent responsables de l'altération de produits insuffisamment déshydratés (tableau 4).

Certaines espèces de Levures sont osmophiles et tolérantes vis-à-vis du sucre et du sel : *Saccharomyces rouxii* supporte de 20 à 22 % de NaCl, 80 % de glucose, 90 % de saccharose ; *Saccharomyces mellis, Debariomyces* et *Torulopsis* sont également des osmophiles, qui occasionnent des accidents de fabrication dans des produits sucrés (sirops) ou dans des saumures (d'olives, de cornichons).

Chez les Bactéries, *Staphylococcus aureus* tolère 10 % de NaCl ; cette propriété a été exploitée dans la mise au point des milieux sélectifs. Les entérocoques sont également tolérants vis-à-vis de bouillon hypersalé, et cette résistance est mise à profit pour isoler, dans le groupe des *Streptococcaceae,* les streptocoques fécaux. On peut distinguer des halophiles extrêmes qui sont des *Halobacterium* (Gram —), des *Micrococcus* et *Sarcina* (Gram +). Parmi les halophiles légers, les *Pseudomonas, Vibrio, Achromobacter, Flavobacterium* représentent les groupes les plus importants. Certaines espèces, telles que le *Vibrio costicolus,* interviennent dans la maturation des jambons secs conservés par salaison, en réduisant les nitrates en nitrites. Ces derniers se combinent à la myohémoglobine en donnant de la nitrosomyohémoglobine, stable à la chaleur : en effet, les viandes salées restent colorées après cuisson (le jambon reste rose), ce qui n'est pas le cas du rôti de porc.

La croissance d'une culture est enfin souvent modifiée par la présence d'**agents antimicrobiens.** On appelle agent antimicrobien tout agent capable d'arrêter la croissance d'un micro-organisme. Un antiseptique est bactériostatique, tandis qu'un désinfectant est bactéricide. Les molécules antibactériennes actives sur la paroi sont en général peu actives sur les Champignons, puisque la composition chimique des parois des deux types d'organismes est fondamentalement différente.

La pénicilline (synthétisée par *Penicillium chrysogenum*) et la D cyclosérine (synthétisée par *Streptomyces orchidaceus*) bloquent l'édification de la paroi en intervenant sur la biosynthèse du mucopeptide. La pénicilline interdit les peptidisations et la cyclosérine, la racémisation de la L alanine en D alanine (présente dans le mucopeptide) ; la novobiocine *(Streptomyces niveus)* inhibe la fixation du mucopeptide sur les lipides phosphorylés. Ces antibiotiques sont donc actifs surtout sur les Bactéries proli-

férantes, mais peu ou pas actifs sur les micro-organismes à l'état de vie ralentie.

La griséofulvine *(Penicillium griseofulvum)* est, au contraire, active sur la biosynthèse de la paroi chez les Champignons.

Les antibiotiques de types polymixine *(Bacillus polymixa)* et nystatine *(Streptomyces noursei)* agissent au niveau de la membrane cytoplasmique en perturbant la perméabilité membranaire. La polymixine détruit la membrane bactérienne, comme les détergents cationiques.

Le chloramphénicol *(Streptomyces venezuelae)*, la puromycine *(Streptomyces alboniger)* et l'érythromycine *(Streptomyces erythreus)* inhibent à des étapes diverses la synthèse des protéines.

La mitomycine de *Streptomyces caespitosus* et l'acide nalidixique bloquent la synthèse d'ADN; l'actinomycine de *Streptomyces antibioticus* se fixe sur la guanine de l'ADN en inhibant la synthèse de l'ARN messager. Certains antibiotiques inhibent les phosphorylations oxydatives : c'est le cas de la gramicidine de *Bacillus brevis*. Les antimétabolites inhibent spécifiquement certaines synthèses.

La sulfonamide (sulfamide) est un médicament très actif, qui agit spécifiquement sur les Bactéries en entrant en compétition avec un métabolite naturel, le PAB, ou acide para amino benzoïque. Cette molécule est en effet un des éléments constitutifs de l'acide folique, que beaucoup de Bactéries sont incapables de synthétiser; l'acide folique est donc un facteur de croissance, car il est indispensable pour toutes les méthylations du métabolisme. En prenant la place du PAB, la sulfonamide est un inhibiteur compétitif. Les concentrations en PAB nécessaires pour neutraliser l'action des sulfamides sur la croissance d'*E. coli* dans un milieu synthétique sont indiquées dans le tableau 5.

	Concentrations en sulfamides (mg/l)	Concentrations en PAB (mg/l)
Tableau 5	1	0,003
	10	0,1
	100	1

◀ ***Tableau 5 : action des sulfamides et du facteur de croissance (PAB) sur la croissance d'E. coli.***

Les concentrations en PAB ou en acide folique nécessaires pour neutraliser l'action des sulfamides sur la croissance de *Streptococcus faecalis* dans un milieu synthétique sont indiquées dans le tableau 6.

De telles molécules sont de plus en plus étudiées, car il est possible de bloquer une chaîne métabolique indispensable à la croissance d'une Bactérie pathogène ou d'une cellule cancéreuse.

A la suite des traitements médicaux utilisant des substances de ce type (sulfamides ou antibiotiques), de nombreuses souches bactériennes sont devenues résistantes. A cet égard, divers mécanismes ont été mis en évidence.

Dans certains cas, la présence de la substance sélectionne les individus (mutants ou variants) capables de synthétiser en plus grande quantité que la souche originelle les enzymes susceptibles de détruire la substance inhibitrice. La *pénicillinase* est l'une des mieux connues; on a pu aussi mettre en évidence des enzymes s'attaquant aux céphalosporines, à la tétracycline, au chloramphénicol, à la streptomycine et aux sulfamides.

Le site d'action du métabolite normal peut être altéré de telle manière que l'antimétabolite ne joue pas son rôle de cofacteur dans une chaîne métabolique (cas du PAB et des sulfamides).

La présence d'un analogue peut sélectionner les mutants qui ont perdu les perméases (enzymes nécessaires à la pénétration intracellulaire de métabolites) pour le métabolite concerné. Si celui-ci ne pénètre pas, l'analogue inhibiteur non plus; il s'agit là d'une des méthodes de criblage pour obtenir des mutants perméases moins : par exemple, en présence de canavanine, on sélectionne les souches arginine perméase moins en isolant les cellules résistantes à la canavanine.

Au cours de la reproduction sexuée, de nombreuses espèces bactériennes peuvent transférer à une souche sensible un plasmide de polyrésistance aux antibiotiques. Ce facteur génétique transmissible d'une Bactérie à l'autre provoque l'apparition de « races » résistantes aux antibiotiques : c'est notamment le cas chez les staphylocoques. Il est très largement répandu et pose de plus en plus de problèmes en milieu hospitalier, où l'emploi parfois abusif des antibiotiques a sélectionné des mutants polyrésistants de Bactéries pathogènes dangereuses. De même, l'adjonction d'antibiotiques dans les aliments des animaux, ou lors d'un traitement prophylactique, sélectionne des colibacilles résistants qui transfèrent leur résistance à des germes pathogènes, comme les *Salmonella*. Ainsi, en Angleterre, on a isolé un grand nombre de souches de *Salmonella typhimurium* responsables d'intoxications alimentaires, résistantes à de nombreux agents antibactériens, dont la furazolidone. Cette dernière substance n'est employée que pour le traitement de la diarrhée infectieuse des jeunes veaux, ce qui implique donc un transfert génétique.

Rôle des micro-organismes dans les grands cycles biologiques

Les transformations chimiques assurées par les micro-organismes ont lieu dans une petite partie seulement de notre planète, qu'on appelle la biosphère et qui comprend les océans, la surface des continents jusqu'à une profondeur de quelques mètres et la partie inférieure de l'atmosphère.

C'est grâce à l'énergie solaire (photosynthèse) d'une part, à l'eau et aux éléments minéraux présents dans le sol ou dans l'atmosphère d'autre part, que les plantes vertes assurent leur développement. Elles assimilent les substances minérales et les convertissent en constituants organiques. Ensuite, elles serviront d'aliments aux animaux et seront transformées en de nouveaux composés organiques. Pour que le cycle de la matière vivante soit complet, il est nécessaire que ces éléments organiques soient reconvertis en éléments minéraux à nouveau disponibles pour les végétaux. Ce processus de transformation, appelé la minéralisation, fait appel presque uniquement à l'activité des micro-organismes.

Cycle du carbone

Le carbone sous forme minérale comprend le CO_2 atmosphérique, les carbonates et bicarbonates dissous dans les océans et les eaux douces de surface. La réduction du CO_2 en composés organiques est assurée par

Tableau 6		
Concentrations en sulfamides mg/l	Concentrations nécessaires pour rétablir la croissance	
	PAB mg/l	Acide folique mg/l
1	0,003	0,003
10	0,030	0,003
100	0,300	0,003

▲ ***Tableau 6 : action des sulfamides et de deux facteurs de croissance (PAB et acide folique) sur la croissance de* Streptococcus faecalis.**

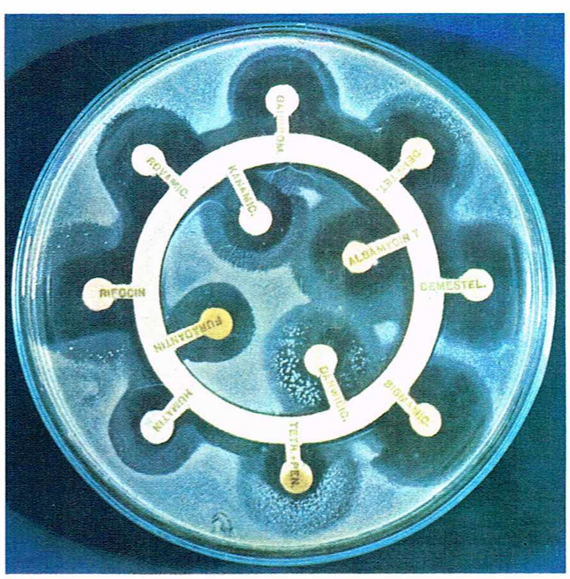

P. Castano

◀ ***Exemple d'antibiogramme sur une culture de Levures. Cette méthode permet de mettre en évidence très rapidement l'action d'antibiotiques sur des Bactéries ou des Champignons microscopiques.***

▶ *A gauche,* **Rhizobium leguminosarum** *se développant sur une membrane de collodion déposée sur un milieu nutritif gélosé. Ce micro-organisme vit en symbiose avec les plantes supérieures sans dommage pour ces dernières. A droite, chaîne de streptocoques; le processus de division est ici représenté dans ses différentes phases. Ces Bactéries sont pathogènes pour l'homme (× 8 000).*

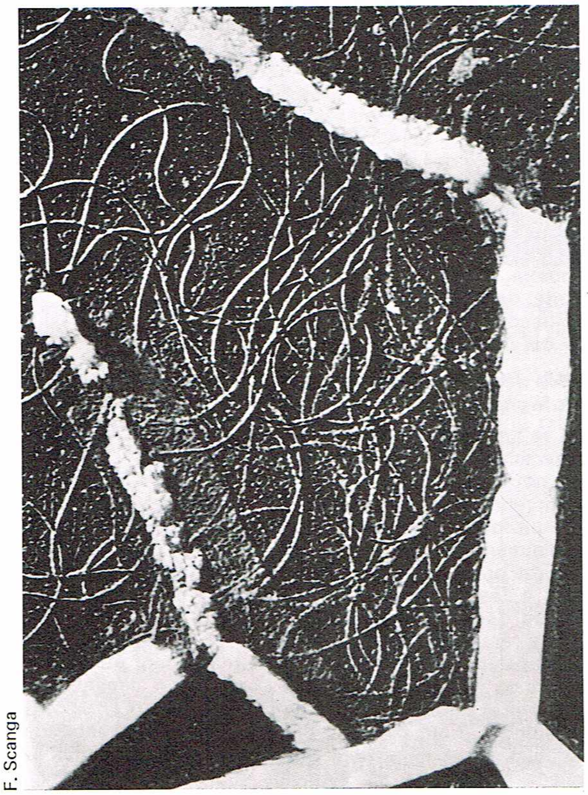

F. Scanga

F. Scanga

▼ *Un gonocoque,* **Neisseria gonorrhoeae,** *en culture de 48 heures. C'est un parasite strict pour l'homme; il provoque des infections du tractus génital masculin et féminin (× 21 000).*

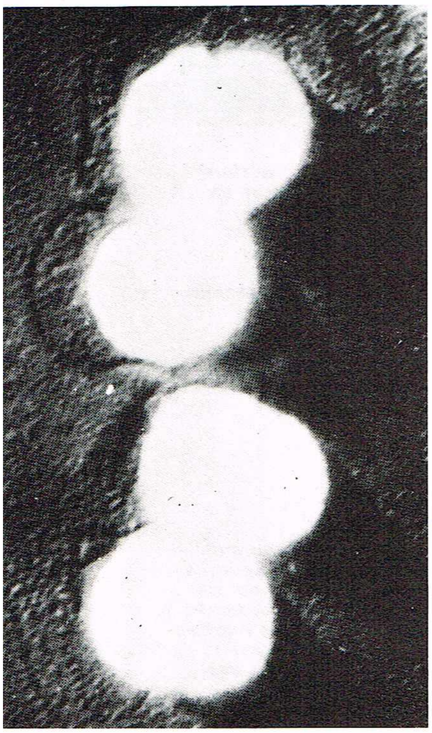

F. Scanga

l'activité photosynthétique des Bactéries et surtout par celle des Algues et des plantes vertes. Une très faible part en revient à l'activité chimiosynthétique de certaines Bactéries. Le carbone organique végétal ou animal est minéralisé au cours du métabolisme des micro-organismes, par respiration ou par fermentation. Ce sont surtout les Bactéries qui jouent un rôle essentiel : destruction de la cellulose *(Cell vibrio, Cytophaga),* des pectines *(Pectobacterium),* protéolyse (une grande partie des Bactéries hétérotrophes).

Cycle de l'azote

Les plantes vertes exigent de l'azote ammoniacal ou nitrique pour satisfaire leurs synthèses protéiques. Les composés azotés organiques animaux ou végétaux libérés à la mort de ces organismes subissent une décomposition microbienne, avec formation d'ammoniac. L'ammoniac est ensuite converti dans le sol en nitrites *(Nitrosomonas),* puis en nitrates *(Nitrobacter)* où ces derniers constituent la principale source d'azote assimilable par les plantes. Ils peuvent aussi être réduits jusqu'au stade d'azote moléculaire *(Desulfovibrio denitrificans),* en anaérobiose. Enfin, certaines Bactéries *(Azotobacter, Clostridium, Rhizobium)* sont capables d'assimiler l'azote atmosphérique pour former des protéines; ces dernières subiront le sort des autres composés azotés organiques.

Cycle du soufre

Le soufre est assimilé par les plantes sous forme de sulfates. Il est immédiatement réduit avant d'être incorporé dans les composés organiques, par exemple, sous forme de groupement sulfhydryle dans les acides aminés soufrés. Les constituants organiques soufrés provenant des plantes et des animaux sont, lorsque ceux-ci meurent, décomposés par les micro-organismes. Cette décomposition aboutit à la formation de sulfure, abondant en anaérobiose, dans les eaux stagnantes ou dans les eaux d'égout. L'hydrogène sulfuré est dans sa presque totalité reconverti en sulfates par des micro-organismes aérobies *(Thiobacillus thiooxydans),* ou en anaérobiose par les Bactéries soufrées pourpres ou vertes. Des Bactéries anaérobies sulfato-réductrices peuvent oxyder les matières organiques en utilisant les sulfates comme accepteurs d'électrons; les sulfates sont alors réduits en sulfures. Lorsque ce processus se réalise dans des monuments calcaires, il provoque la « maladie des pierres », due à la formation de sulfate de calcium (gypse) qui s'effrite au niveau des parements.

La permanence de l'activité microbienne dans la biosphère rend compte de la fertilité et de la richesse du sol et des eaux, principalement des océans.

Micro-organismes et maladies

Si de nombreux micro-organismes participent à l'équilibre biologique existant à la surface de la terre et même le conditionnent, d'autres, par contre, tendent à détruire cette harmonie. Ces derniers sont hautement nuisibles pour l'homme, les animaux ou les plantes, chez qui ils provoquent des désordres plus ou moins graves pouvant conduire à la mort; ce sont des micro-organismes pathogènes.

Si une coopération fructueuse (symbiose) s'est établie entre les plantes supérieures et les *Rhizobium,* ainsi qu'entre les Ruminants et les micro-organismes du rumen qui leur permettent d'assimiler la cellulose, beaucoup de micro-organismes vivent aux dépens de l'hôte qui les héberge.

Lorsqu'une telle dépendance n'entraîne pas de troubles graves, on peut considérer que le micro-organisme est un saprophyte qui vit aux dépens des matières organiques en décomposition : c'est le cas de nombreux micro-organismes du tube digestif des Mammifères (coliformes, entérocoques). Ces flores saprophytes, adaptées à l'homme ou à un type donné de Mammifères, sont souvent appelées commensales.

Au contraire, certaines Bactéries du tube digestif sont de véritables parasites pathogènes : *Salmonella typhi,* ou *Escherichia coli* des gastroentérites infantiles. Au demeurant, il serait trop simple de distinguer d'un côté des micro-organismes pathogènes et de l'autre des micro-organismes saprophytes. Le pouvoir pathogène, c'est-à-dire la propriété de provoquer une maladie, est en effet la résultante de l'action d'un micro-organisme sur l'hôte. Pour s'en convaincre, il suffit d'observer que certaines Bactéries très pathogènes (méningocoques, *Salmonella typhi, Corynebacterium diphteriae*) peuvent être hébergées par un hôte sans occasionner chez celui-ci le moindre trouble, tout en restant capables d'infecter gravement un autre individu : c'est le phénomène, bien connu des médecins, du « porteur sain ». Inversement, des Bactéries saprophytes peuvent devenir pathogènes si les défenses de l'hôte diminuent (état de moindre résistance) : c'est le cas de nombreuses Bactéries intestinales (coliformes, *Proteus*).

Nous nous intéresserons aux Bactéries pathogènes pour l'homme. Elles appartiennent aux six ordres suivants :

Eubactériales, Pseudomonadales, Actinomycétales, Spirochætales, Rickettsiales et Mycoplasmatales ou Mollicutes.

Eubactériales

— Les *Cocci Gram positifs* des genres *Staphylococcus, Streptococcus* et *Diplococcus,* et les *Cocci Gram négatifs (Neisseria)* représentent un groupe important de Bactéries pathogènes.

Les staphylocoques sont très répandus dans la nature, dans l'air, les eaux et le sol, et vivent à l'état commensal sur la peau, les muqueuses ainsi que dans les cavités closes des organismes humains et animaux. *Staphylococcus aureus* est le type même d'une Bactérie pyogène, c'est-à-dire provoquant essentiellement des lésions suppuratives et nécrotiques. Certaines souches sont toutefois capables de synthétiser dans un aliment une entérotoxine thermostable, responsable d'intoxications alimentaires (vomissements). Les infections à staphylocoques occupent en pathologie infectieuse une place dont l'importance relative a augmenté depuis l'antibiothérapie, peut-être en raison de la facilité avec laquelle le *S. aureus* devient résistant aux antibiotiques.

Les streptocoques représentent un vaste groupe où se côtoient des espèces pathogènes pour l'homme ou les animaux domestiques, et des espèces saprophytiques présentes dans la flore normale de l'homme ou des animaux et retrouvées, par exemple, dans les produits alimentaires. Le pouvoir pathogène des streptocoques, très polymorphe, varie selon le point de départ de l'infection, le terrain et la nature du germe. Les maladies streptococciques directes (en rapport direct avec la multiplication du germe) sont les infections rhinopharyngées (angine, sinusite, otite) ou cutanéomuqueuses (impétigo, érysipèle), des endocardites ou des infections urinaires; la scarlatine est provoquée chez un sujet sensible par un streptocoque érythrogène. Les maladies postinfectieuses apparaissent deux à six semaines après une infection aiguë à streptocoque du groupe A : rhumatisme articulaire aigu, glomérulonéphrite aiguë.

Le pneumocoque est un diplocoque agent de la pneumonie franche, aiguë.

Les Cocci Gram négatifs appartiennent au genre *Neisseria. N. meningitidis* est à l'origine d'une septicémie et de la méningite cérébrospinale; le gonocoque *(N. gonorrhoeae),* parasite strict pour l'espèce humaine, provoque des urétrites (blennorragies) chez l'homme et la femme, et diverses infections du tractus génital masculin et féminin.

— Les *Entérobactériacées,* très vaste famille, regroupent de nombreuses souches pathogènes. Chez les nourrissons, certains sérotypes d'*Escherichia coli* sont à l'origine de gastro-entérites épidémiques; les *E. coli* créent également des infections de l'appareil génito-urinaire. Les *Shigella* provoquent une colite infectieuse. *Klebsiella pneumoniae,* très répandue dans la nature, est un agent de surinfection respiratoire. Les *Serratia* sont des germes de surinfections chirurgicales et des agents de septicémies. Les divers sérotypes de *Salmonella* les plus fréquents en pathologie humaine sont : *S. typhi, S. paratyphi B, S. paratyphi C, S. cholerae suis, S. typhimurium* et *S. enteritidis.* Ces Bactéries sont responsables des infections de type « fièvres » et de nombreuses toxi-infections alimentaires (diarrhée, vomissement, fièvre). Les *Proteus* et *Providencia,* hôtes normaux du tube digestif et des orifices naturels (l'oreille externe par exemple) sont parfois associés à d'autres Entérobactéries dans des infections urinaires chroniques, et même dans des septicémies. *Yersinia pestis* est responsable de la peste, *Y. pseudotuberculosis* de septicémies et d'adénites mésentériques, *Y. enterolitica* d'entérites et d'entérocolites.

— Dans la famille des *Brucellacées,* on regroupe des Bactéries pathogènes très dangereuses. *Pasteurella multocida,* agent du choléra des poules, est rarement pathogène pour l'homme; *Francisella tularensis* est une maladie aiguë des Rongeurs et des gibiers (lièvres) et engendre chez l'homme des adénopathies. Les *Brucella* affectent l'homme et de nombreux animaux : *Brucella melitensis* contamine surtout les caprins et les ovins, *B. abortus* les bovins, *B. suis* les porcs; l'homme est contaminé à partir des animaux malades; une septicémie aiguë est parfois suivie par des lésions chroniques articulaires ou viscérales : c'est le cas de la fièvre de Malte, transmise par le lait de chèvre. Le genre *Haemophilus* est souvent responsable des surinfections survenant au cours de la grippe, de la rougeole, de la coqueluche, de méningites aiguës purulentes et de diverses autres infections (les pleurésies et endocardites notamment). La coqueluche est due à *Bordetella pertussis.* Les *Moraxella* provoquent des méningites, des conjonctivites aiguës, des suppurations et des infections urinaires ou digestives.

— Dans la famille des *Bactéroïdacées,* citons les *Fusobacterium* qui déclenchent des septicémies. Associé à une *Borrelia, Fusiformis fusiformis* est à l'origine de l'angine de Vincent.

— Chez les *Corynébactériacées,* les progrès réalisés dans la connaissance de *Corynebacterium diphteriae* et de sa toxine, ainsi que de la pathogénie et de l'immunologie de la toxi-infection, ont permis d'établir des techniques de diagnostic et surtout de mettre en œuvre une vaccination efficace; celle-ci a réduit considérablement la morbidité et la mortalité par diphtérie. *Listeria monocytogenes* est l'agent de la listériose, qui atteint les ovins, les lapins et l'homme (méningite, septicémies ou formes subaiguës de conjonctivites et d'infections urinaires); chez les femmes enceintes, cette Bactérie entraîne l'infection du fœtus, avec avortement ou accouchement prématuré d'un nouveau-né malade. Le rouget du porc

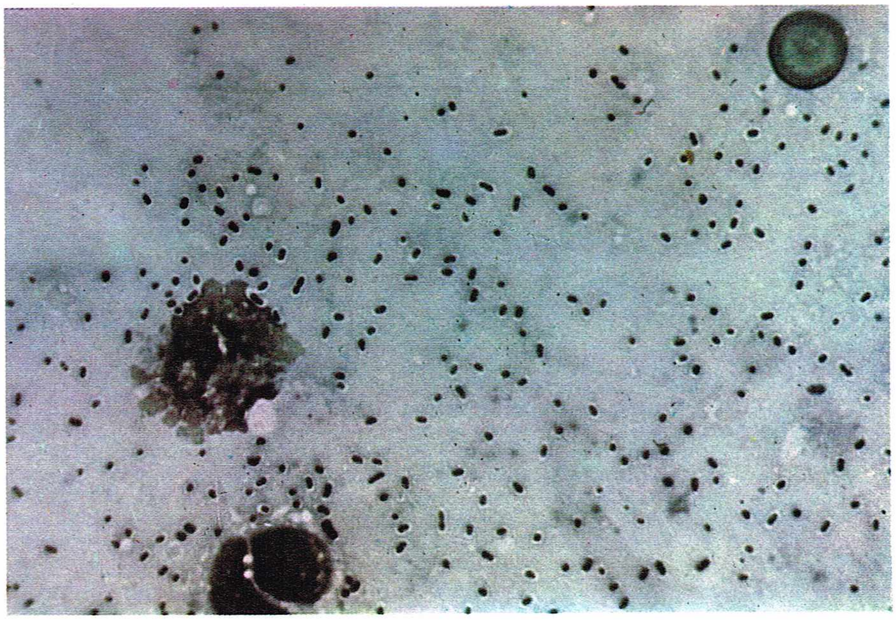

C.N.R.I. - Institut Pasteur - Paris

▲ **Pasteurella pseudotuberculis,** ***de la famille des Brucellacées, est responsable de septicémies et d'adénites mésentériques (× 800 × 1,5).***

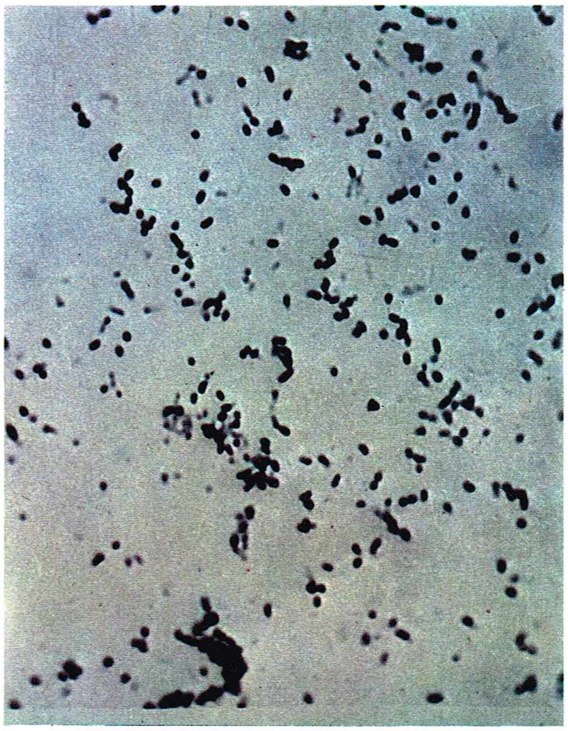

C.N.R.I. - Institut Pasteur - Paris

P. Castano

▼ ***A gauche, éléments isolés de*** **Proteus vulgaris** ***vus au microscope optique. Les Proteus sont des hôtes normaux du tube digestif mais sont parfois associés à d'autres Entérobactéries, dans des infections urinaires notamment. A droite,*** **Shigella dysenteriae** ***provoque une colite infectieuse (× 650 × 1,5).***

▶ *A gauche,* **Vibrio comma,** *l'agent du choléra. A droite, l'agent de la tuberculose humaine,* **Mycobacterium tuberculosis;** *sur cette préparation colorée par la méthode de Ziehl-Niessel, les Bactéries apparaissent en rouge violacé.*

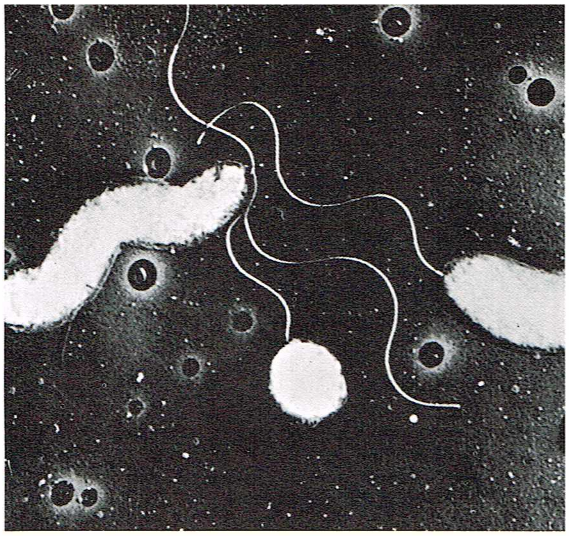

F. Scanga

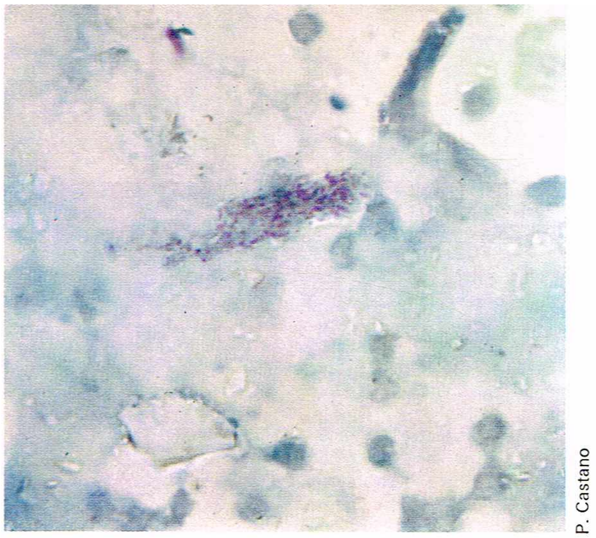

P. Castano

(*Erysipelothrix insidiosa*) se transmet à l'homme, chez lequel il provoque des artérites, et des endocardites.

— Parmi les *Bacillacées,* le genre *Bacillus* comprend essentiellement une seule espèce pathogène : *Bacillus anthracis,* Bactérie du « charbon », qui est une maladie des herbivores pouvant affecter l'homme par inoculation cutanée. Parmi les Bacillacées anaérobies, de nombreuses espèces sont des agents pathogènes redoutables. *Clostridium perfringens* sécrète toute une série de facteurs toxiques : le plus important est la toxine α ou lécithinase, qui transforme la lécithine des hématies en lysolécithine; les autres facteurs toxiques sont soit nécrotiques, soit hémolytiques, soit encore enzymatiques (collagénase, hyaluronidase). Ce *Clostridium* cause des gangrènes gazeuses très graves. D'autres espèces *(C. septicum, C. oedematiens* et *C. histolyticum)* ont également un pouvoir pathogène très fort : elles entraînent des gangrènes gazeuses, des septicémies, des myolyses, etc. *Clostridium botulinum* est responsable par l'action exclusive de sa toxine d'une maladie d'origine alimentaire, le « botulisme », intoxication grave à manifestations essentiellement neurologiques et mortelles. Ses spores sont thermo-résistantes, et on le retrouve surtout dans des conserves mal préparées. *Plectridium tetani,* le bacille tétanique, est l'agent du tétanos, maladie souvent mortelle. La toxine tétanique contient deux facteurs : la tétanolysine, douée de propriété hémolytique, et la tétanospasmine, qui, en se fixant sur certains lipides du système nerveux, provoque le syndrome tétanique (paralysies rigides).

Pseudomonadales

Les Bactéries affectant l'homme appartiennent aux vibrions et aux spirilles et à la famille des Pseudomonadacées, dont le genre *Pseudomonas* est le genre type. L'espèce *P. aeruginosa* est l'agent essentiel du pus bleu chez les grands blessés. Elle a retrouvé une importance qu'elle avait perdue; les infections actuelles sont des infections généralisées (septicémies particulièrement graves et fréquentes chez les nouveau-nés et les prématurés). Cette recrudescence a plusieurs causes : l'abus de l'antibiothérapie, qui a entraîné une sélection des germes résistants, comme le bacille pyocyanique; l'application de traitements par corticoïdes, antimétabolites et immunodépresseurs, qui ont pour corollaire une diminution de la résistance de l'organisme aux infections; l'introduction fréquente et répétée dans l'organisme de sondes et d'instruments d'observation difficilement stérilisables; enfin, l'utilisation thérapeutique de plus en plus répandue de sang et de produits dérivés non stérilisables.

Outre de nombreuses espèces de vibrions saprophytes (vibrions des eaux), *Vibrio comma* et son biotype *El tor* (agents du choléra) sont pathogènes pour l'homme. Transmis par morsure ou griffure de rat, le sodoku est une fièvre récurrente avec adénopathie, provoquée par *Spirillum minus.*

Actinomycétales

Deux espèces hautement pathogènes sont depuis longtemps des fléaux de l'humanité : le *Mycobacterium tuberculosis,* ou bacille de Koch, et le *Mycobacterium leprae,* ou bacille de Hansen. Les actinomycoses s'attaquent aux tissus osseux et sous-cutanés (*Nocardia* et *Actinomyces*).

Spirochætales

Les spirochètes, pathogènes pour l'homme et pour les animaux, appartiennent à trois genres : *Leptospira, Treponema* et *Borrelia.* Les tréponématoses, maladies endémiques, vénériennes ou non, sont dues à des tréponèmes, dont l'espèce la plus pathogène est *Treponema pallidum,* agent de la syphilis. Les fièvres récurrentes apparaissent à la suite de piqûres de tiques inoculant le *Borrelia recurrentis.* Parasites de nombreuses espèces animales, les leptospires sont très répandues dans le monde et sont accidentellement pathogènes pour l'homme : l'infection humaine la plus typique et la plus sévère est la leptospirose ictéro-hémorragique; la contamination humaine se fait directement par l'urine des rats infectés (eaux contaminées). Dans nos régions, les leptospires ont été apportées par les prisonniers de guerre russes originaires de Sibérie, où cette maladie est endémique.

Rickettsiales

Deux familles de Rickettsiales intéressent spécialement le médecin : les Rickettsiacées et les Chlamydiacées. *Rickettsia prowaseki,* transmis par les poux et les puces, est l'agent du typhus exanthémique; *Coxiella burnetii* est responsable de la fièvre Q. Quant à la famille des Chlamydiacées, elle regroupe tout un ensemble de micro-organismes, dont certains sont les agents de maladies humaines : psittacose et ornithose, lymphogranulomatose vénérienne, trachome, conjonctivite.

Mycoplasmatales ou Mollicutes

Les *Mycoplasma* isolés chez l'homme peuvent être classés en trois groupes, d'après leur pouvoir pathogène : celui-ci indiscutable pour *M. pneumoniae* et *M. hominis type 1,* douteux pour *M. tiny* et *M. hominis type 2,* et non défini pour *M. fermentans, M. salivarius* et *M. orale. M. pneumoniae* crée des lésions bronchopulmonaires, *M. hominis type 1* des bronchopneumopathies, des bartholinites, des salpingites avec septicémies et des avortements.

▼ **Clostridium tetani,** *l'agent du tétanos : en haut, en microscopie électronique (× 24 000) on observe les très nombreux cils insérés sur toute la surface cellulaire; en bas, la même Bactérie observée après coloration (× 650 × 1,5).*

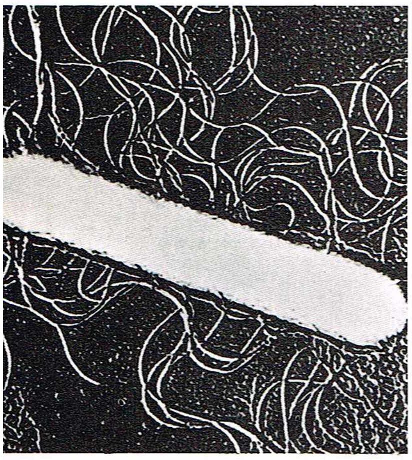

F. Scanga

P. Castano

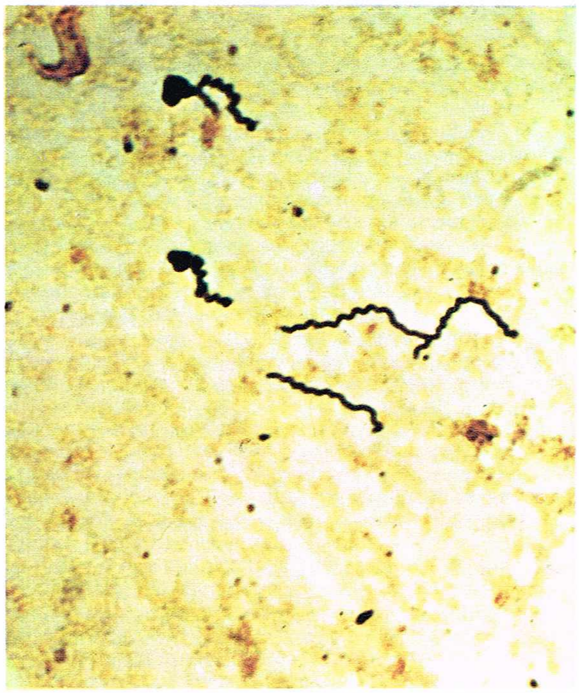

C.N.R.I. - Pr. Poutrel - Paris

LES MICROBES UTILES ; UTILISATION INDUSTRIELLE DES MICRO-ORGANISMES

S'il existe depuis très longtemps des applications traditionnelles des micro-organismes, la microbiologie industrielle, nouvelle branche de l'industrie, s'est constituée plus récemment.

Applications traditionnelles

Les applications traditionnelles des micro-organismes concernent les boissons alcoolisées, la panification, la fabrication des fromages et le rouissage.

La vinification

Le vin est le résultat de la fermentation alcoolique par divers *Saccharomyces* du jus de raisin. Le raisin est récolté à maturité, au moment où il contient le plus de sucres. Dans les années chaudes et sèches, il peut être nécessaire d'ajouter de l'acide tartrique, sinon la conservation est difficile. Dans les années froides et humides, on compense une maturité insuffisante par l'apport de saccharose (chaptalisation) ou par la concentration des moûts sous vide, et une désacidification par l'adjonction de carbonate de calcium. Certains vins spéciaux nécessitent une surmaturation : celle-ci s'obtient en laissant les grappes au soleil sur des claies (xérès) ou sur des lits de paille pendant plusieurs mois (vins de paille du Jura) ; pendant ce temps, l'évaporation de l'eau augmente la teneur en sucres.

La forme la plus originale de la surmaturation est la pourriture noble. Dans ce cas, le grain est envahi par un Champignon, *Botrytis cinerea,* dont les filaments restent en surface, attaquant la pellicule et consommant le glucose ; les grains se dessèchent sans pourrir ; l'acide tartrique disparaît, tandis qu'il se forme du glycérol, des gommes, de l'acide citrique et de l'acide gluconique. On a alors des moûts très sucrés (350 g par litre), peu acides, donnant des vins de Sauternes très alcoolisés, sucrés et liquoreux puisqu'ils contiennent de la glycérine.

Au cours du vieillissement des vins, un phénomène complexe se déroule après la fermentation alcoolique : des Bactéries lactiques appartenant aux genres *Lactobacillus* et *Leuconostoc* transforment l'acide malique en acide lactique.

Le cidre

C'est un vin de pommes. On inocule le moût avec des levures sélectionnées *(Saccharomyces uvarum, Saccharomyces florentinus).*

La bière

Le moût est constitué de malt ou mélangé avec des grains non germés (dits crus), d'origines diverses (riz, maïs). Durant le brassage, il se produit une double action enzymatique. D'abord l'α et β *amylase* produisent des sucres fermentescibles aux dépens de l'amidon ; il reste toujours des dextrines ; suivant la température du brassage (qui peut varier entre 40 et 70 °C), on obtient une hydrolyse plus ou moins poussée. Or, plus il y a de sucres fermentescibles dans le moût (maltose), plus le degré alcoolique de la bière obtenue est élevé et moins il reste d'extrait non fermenté. Dans le cas des bières brunes, on élève la température du brassage à la fin en vue d'obtenir un début de caramélisation.

Les enzymes protéolytiques hydrolysent les protéines du grain, fournissant des acides aminés nécessaires pour la croissance des levures. Un brassage à haute température favorise l'action de l'α *amylase,* qui produit plus de dextrines. A température plus basse, la β *amylase* est plus active, donnant surtout du maltose (donc de l'alcool). Le moût est filtré et porté dans une chaudière, en présence des cônes de houblon (inflorescences des pieds femelles), à raison de 100 à 350 g de houblon par hectolitre. Les bières brunes sont peu houblonnées et conservent ainsi un arôme de malt. L'ébullition dure une à deux heures et extrait les résines du houblon (humulone et lupulone), responsable de l'amertume de la bière et de la formation de la mousse. En même temps, les enzymes sont détruites, les tanins et une partie des protéines floculent, le moût est stérilisé. On décante le moût, on le refroidit, et on l'inocule avec un levain à raison de 0,3 à 0,5 litre par hectolitre.

Les Levures de bière sont rangées dans deux grands groupes : les Levures basses, appartenant à l'espèce *Saccharomyces carlsbergensis,* et les Levures hautes, classées dans l'espèce *Saccharomyces cerevisiae.*

La fermentation principale terminée, les Levures floculent, et on les élimine. La bière est alors stockée dans des tanks à basse température, où elle se sature en gaz carbonique (3 à 4 grammes par litre), grâce à une fermentation secondaire due aux levures restantes. Elle se clarifie par décantation et subit un affinage du goût pendant une durée qui peut atteindre plusieurs mois. On filtre pour obtenir une bière limpide, que l'on sature en gaz carbonique (0,5 %).

L'asepsie, voire une pasteurisation, les substances antiseptiques du houblon, une certaine acidité (pH 4,4) et une faible teneur en substances nutritives protègent la bière des proliférations bactériennes, responsables des accidents de fabrication (principalement dus à des Bactéries acétiques ou lactiques).

L'alcool éthylique

Les procédés de fabrication dépendent de la matière première. Pour avoir une bonne fermentation, la concentration en sucres fermentescibles ne doit pas dépasser 10 à 12 %. Le pH du moût est compris entre 4,0 et 4,5 afin d'inhiber le développement des Bactéries contaminantes ; on obtient cette acidité en ajoutant de l'acide lactique ou de l'acide sulfurique.

Les matières premières sucrées sont des mélasses, du sérum de fromagerie, ou des lessives sulfitées résiduaires de papeterie. Les matières premières amylacées (amidon de céréales ou de pommes de terre) sont hydrolysées avec des amylases provenant du malt ou d'origine fongique. Le moût est inoculé avec diverses souches telles que

◀ *Ci-contre, à droite, en bas,* **Treponema sp.** *appartient à la famille des Spirochætales pathogènes pour l'homme et pour les animaux.*

▼ *Fermentation de la bière dans des bacs appropriés ; c'est à ce stade de fabrication qu'intervient l'inoculation de levain à raison de 0,3 à 0,5 litre par hectolitre.*

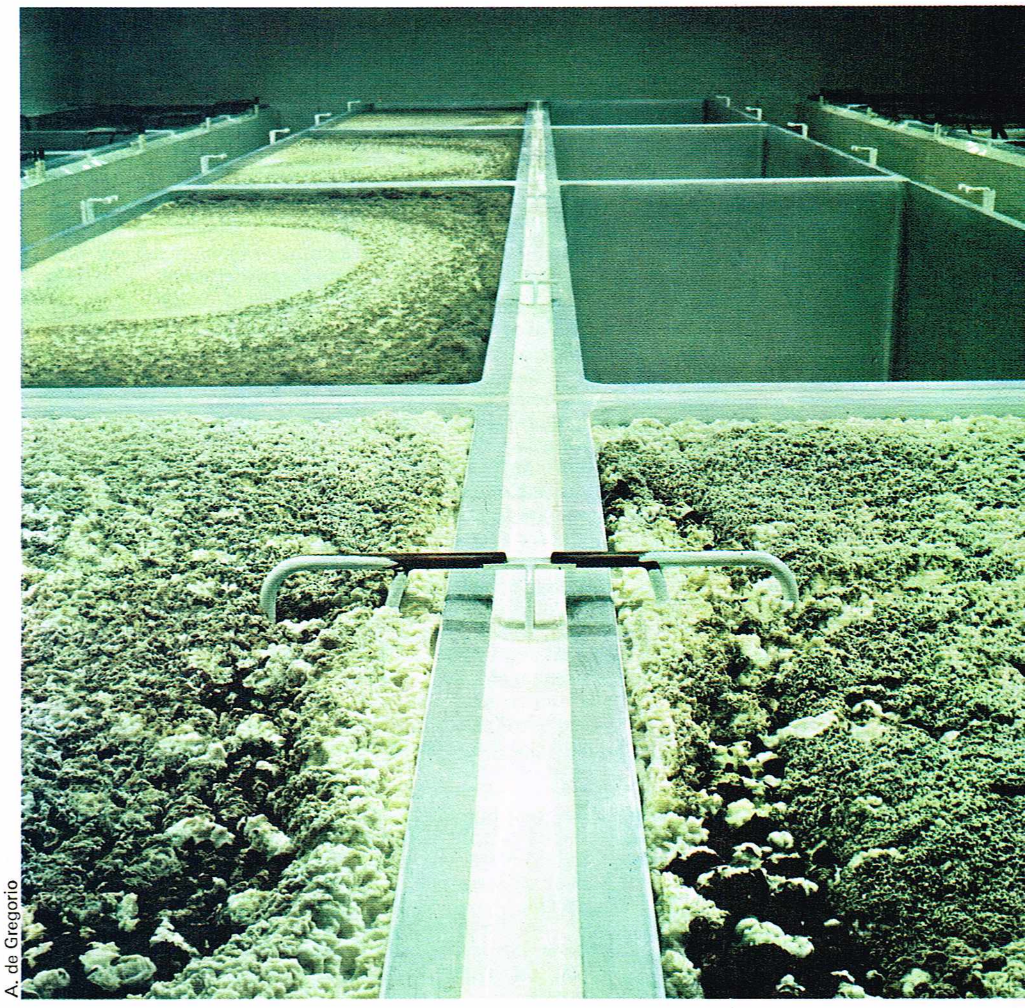

A. de Gregorio

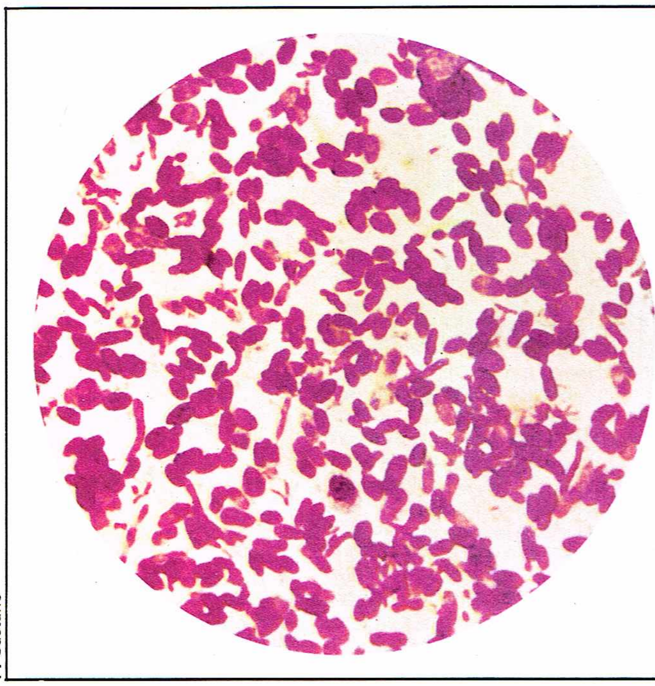

P. Castano

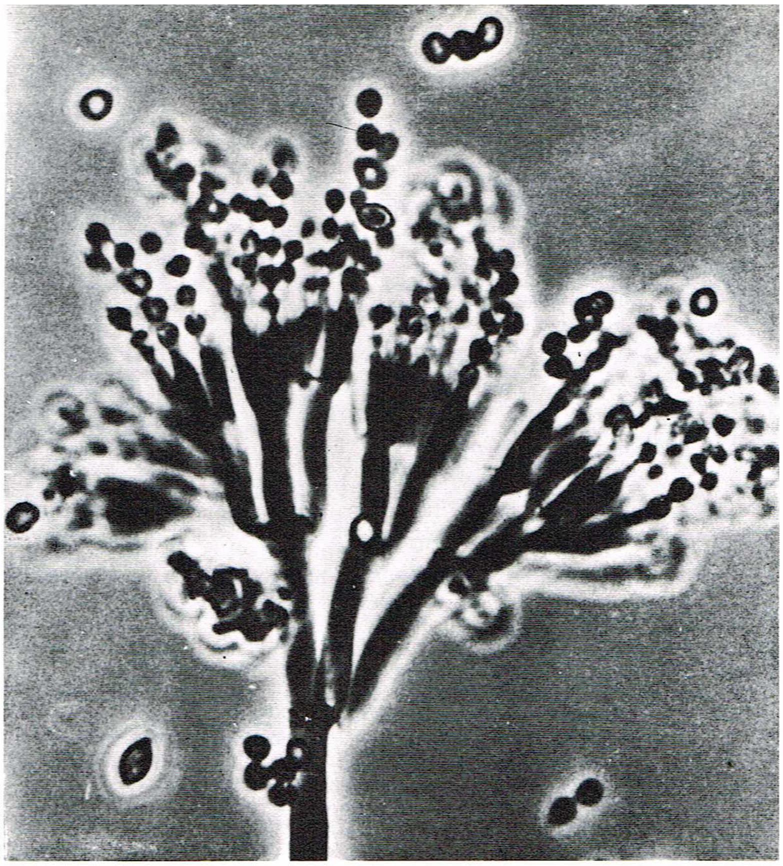

J. Rivière

▲ *A gauche,* **Acetobacter aceti,** *une des Bactéries du vinaigre. A droite, photomicrographie électronique de* **Penicillium caseicolum,** *Champignon utilisé dans la fabrication du camembert.*

▶ *Page ci-contre, à gauche,* **Lactobacillus bulgaricus,** *une des Bactéries de la fermentation lactique, reconnaissable à sa forme fréquemment allongée (coloration Gram).*

Saccharomyces cerevisiae (fermentant le saccharose ou le maltose provenant de l'hydrolyse de l'amidon), *Candida pseudotropicalis* (fermentant les pentoses contenus dans les lessives résiduaires de papeterie), à raison de 3 à 10 % en volume. La fermentation terminée, on recueille les Levures formées après centrifugation et on les ensemence à nouveau, ce qui augmente les rendements. Ces derniers ne dépassent pas 65 litres d'alcool pour 100 kg de sucre.

La glycérine

C'est un polyalcool dont l'utilisation industrielle est considérable, comme explosif (nitroglycérine), solvant, agent adoucissant ou antigel. Si l'on ajoute du sulfite de sodium dans un moût sucré en train de subir une fermentation alcoolique, il apparaît des quantités importantes de glycérine, selon la réaction suivante :

$$\begin{matrix} CH_2OH \\ | \\ C = O \\ | \\ CH_2OH \end{matrix} + 2\,H \longrightarrow \begin{matrix} CH_2OH \\ | \\ CHOH \\ | \\ CH_2OH \end{matrix}$$

Cependant, il est assez difficile d'extraire la glycérine par suite des quantités importantes de substances ajoutées pour dévier la fermentation. C'est pourquoi on a essayé d'isoler des souches capables de produire de la glycérine au cours de leur métabolisme normal : certaines souches osmophiles, telles que *Saccharomyces mellis* et *Saccharomyces rouxii*.

La panification

C'est une fermentation alcoolique dans laquelle l'alcool est un sous-produit qui s'élimine tout seul, le rôle principal des Levures étant de produire du gaz carbonique aux dépens des oses de la pâte (glucose et maltose).

L'acide acétique

Quand on abandonne un jus sucré extrait de fruits à la température du laboratoire, il se produit une fermentation alcoolique, puis on voit apparaître un voile bactérien au contact de l'air. Le liquide alcoolisé se transforme en vinaigre sous l'action de Bactéries aérobies strictes appartenant au genre *Acetobacter*. On peut faire du vinaigre avec du vin, du cidre ou de l'alcool dilué, suivant trois procédés :

— Le *procédé d'Orléans,* à base de vin et qui se déroule lentement; dans des cuves ou des tonneaux à moitié remplis d'un vinaigre riche en Bactéries acétiques qui forment un voile gélatineux en surface, on ajoute, avec précautions, à intervalles réguliers, environ 10 % de vin.

— La *méthode des copeaux,* plus rapide; on empile dans des cuves des copeaux de hêtre (ou tout autre support inerte), servant de support aux Bactéries acétiques.

— Une technique récente faisant intervenir des *cultures submergées dans des fermenteurs;* s'il y a un arrêt de l'aération pendant une dizaine de secondes, une grande partie des Bactéries acétiques meurent.

Le rouissage

C'est un vieux procédé qui permet de libérer les fibres cellulosiques de certains végétaux (lin, chanvre, ramie), soudées entre elles par des composés pectiques et constituant la couche lamellaire moyenne des membranes végétales. Les méthodes anaérobies sont les plus anciennes. On peut utiliser des cultures pures de *Clostridium felsineum*. Il apparaît des acides organiques et des gaz que l'on élimine par des lavages; puis, le rouissage terminé, les fibres sont séchées et séparées mécaniquement du cortex et du bois. Il est possible de réaliser un rouissage aérobie, ou rouissage à la rosée, qui se fait actuellement en cuves aérées, ensemencées avec une souche de *Bacillus comesii*.

Les fromages

Ce sont des conserves de lait, obtenues par coagulation, égouttage et acidification du caillé.

— *Classification des fromages en fonction des actions microbiennes*

On peut donner trois exemples types : les fromages à pâte molle comme le camembert, à pâtes cuites et à pâtes persillées.

● *Fromages à pâte molle*. Le camembert provient d'un caillé mixte. Le lait est ensemencé avec des Bactéries lactiques et emprésuré pendant une heure ou deux; on le répartit dans des moules, puis on le démoule, et on l'ensemence en surface par pulvérisation de spores de *Penicillium caseicolum*. Au cours du moulage, il se produit une importante fermentation lactique donnant un pH de l'ordre de 4,0. Ensuite, en surface, apparaissent des Levures *(Saccharomyces, Torula, Torulopsis)* fermentant le lactose. Il y a formation d'alcool, d'acides organiques et d'acétate d'éthyle (dont l'odeur caractérise ces jeunes fromages). Le salage a pour but de limiter la croissance d'un Champignon filamenteux, protéolytique, *Geotrichum candidum*. Ensuite, vers le cinquième jour, les filaments du *Penicillium* apparaissent.

Au cours de leur métabolisme, ces Champignons, riches en protéases exocellulaires, jouent un rôle dans la maturation du camembert. Ils oxydent complètement l'acide lactique produit par les Bactéries lactiques, élèvent le pH, rendent le caillé alcalin, éliminent les Levures et permettent l'apparition des ferments du rouge. Ce sont des Bactéries protéolytiques appartenant aux genres *Micrococcus* et *Brevibacterium* qui donnent la coloration orange d'un fromage à point; leur action protéolytique aboutit à une dégradation totale de la caséine avec production d'ammoniaque.

● *Fromages à pâte cuite*. On commence par mélanger, dans une chaudière, du lait avec de la présure et un levain constitué de Bactéries lactiques thermophiles : *Streptococcus thermophilus* et *Lactobacillus helveticus*. Au bout de 30 à 40 minutes, le lait est caillé, découpé, brassé et chauffé à 53-57 °C. On rassemble ensuite le caillé dans une toile et on le presse; les Bactéries lactiques thermophiles se développent; à la sortie de la presse, le caillé blanc est porté durant trois semaines dans une cave froide (10 à 12 °C) après avoir été salé en surface par frottis. Les Bactéries lactiques *(Lactobacillus)*, qui sont très nombreuses (10^9 par g), meurent, se lysent et libèrent des protéases exocellulaires; on porte alors ces dernières dans une cave chaude (16 °C), qui favorise la croissance d'une nouvelle microflore constituée de Bactéries propioniques *(Propionibacterium shermanii)*; ces Bactéries transforment l'acide lactique en acide propionique, en acide acétique et en gaz carbonique. Les ouvertures dans le fromage sont provoquées par la formation de gaz à l'intérieur de celui-ci. Au cours de son séjour en cave, la croûte est maintenue humide par des lavages fréquents à l'eau salée. On voit apparaître un revêtement visqueux, ou morge, constitué de Bactéries protéolytiques appartenant au genre *Brevibacterium* (*B. linens* et *B. gruyerense*).

● *Fromages à pâte persillée*. Ils contiennent les filaments d'une souche de *Penicillium glaucum* variété *roquefortii*. Ils peuvent être à base de lait de vache (bleus d'Auvergne, gorgonzola, stilton) ou de lait de brebis (roquefort). Pour préparer ces fromages, on incorpore des spores dans le caillé après l'avoir fissuré. Le long de ces fissures, se développent les hyphes du *Penicillium*, qui est aérobie strict. Au cours de son métabolisme, le Champignon oxyde l'acide lactique, solubilise la caséine et hydrolyse partiellement les lipides. Une partie des acides gras est oxydée, donnant lieu à la production de cétones, responsables du goût âcre et constituant l'arôme caractéristique de ce type de fromage. Toutes ces opérations se déroulent dans des caves.

En résumé, la fromagerie est une industrie de fermentation.

— *Transformations chimiques au cours de l'affinage*
Au cours de l'affinage, il se produit de nombreuses transformations chimiques dues au métabolisme des micro-organismes. Ce sont d'abord des dégradations, lors de fermentations microbiennes, des divers constituants du caillé. Le lactose est transformé en acide lactique et en acide citrique. Cet acide lactique donne lieu à la formation d'acide propionique dans les fromages à pâte cuite (gruyère) ou de diacétyle responsable de l'arôme (cheddar). On trouve également, en faibles doses, des acides organiques volatils, jouant un grand rôle dans la saveur et l'arôme. Dans le fromage de Comté, il y a de l'acide propionique et de l'acide acétique. On trouve de l'acide acétique et de l'acide butyrique dans le cheddar. Les lipides sont peu attaqués, sauf dans le cas des fromages à pâte persillée où l'on dose jusqu'à 10 g d'acides gras libres par kg. Certains acides gras subissent la β oxydation; on trouve des méthylcétones, responsables d'un goût piquant dans certains fromages.

L'attaque microbienne porte sur une fraction limitée de la caséine. Ainsi, il y a seulement 35 % d'azote soluble dans le camembert bien fait, avec 8 % d'azote ammoniacal. On dose 10 % d'azote aminé dans le cas du gruyère qui en est riche.

En dehors de ces dégradations, les micro-organismes sont responsables d'une abondante synthèse de vitamines du groupe B, surtout présentes dans la croûte.

Microbiologie industrielle

La microbiologie industrielle est également l'industrie des fermentations. Ce dernier terme désigne tout processus dans lequel des modifications d'ordre chimique sont apportées à un substrat par l'action d'enzymes microbiennes.

Les divers produits de fermentation

On peut classer les produits de la fermentation dans cinq groupes : les micro-organismes eux-mêmes, les métabolites primaires, les métabolites secondaires, les enzymes, et la transformation biochimique de composés définis.

Les cellules microbiennes et les produits de fermentation

Les microbes ont un taux de croissance élevé (tableau A) et une teneur en protéines importante. La quantité de protéines synthétisées par jour est très grande (tableau B).

C'est pourquoi on a eu l'idée d'utiliser des micro-organismes comme aliments au cours de périodes de pénurie, lors des deux grandes guerres mondiales. Au début, comme on savait cultiver des Levures de boulangerie, et qu'on en disposait de grandes quantités en tant que sous-produits de la brasserie, des chercheurs eurent l'idée d'ajouter des Levures sèches aux aliments destinés aux animaux d'élevage. Les résultats furent satisfaisants. Les Levures, en effet, sont capables de synthétiser des acides aminés à partir d'azote et de soufre sous forme minérale (sels d'ammonium, sulfates), qui sont des sources peu coûteuses. En général, ces protéines microbiennes sont riches en *lysine*, acide aminé indispensable, nettement déficient dans les céréales, ce qui permet de les utiliser pour supplémenter une ration alimentaire à base de céréales.

Bien que l'azote aminé ne représente que 70 à 80 % de l'azote total des cellules microbiennes, on y trouve des acides aminés essentiels. On peut comparer leur teneur à celle des protéines du blé et du blanc d'œuf

▼ *En haut, le* **tableau A** *montre le taux de croissance élevé des microbes et l'importance de leur teneur en protéines, dont la production est recensée dans le* **tableau B**.

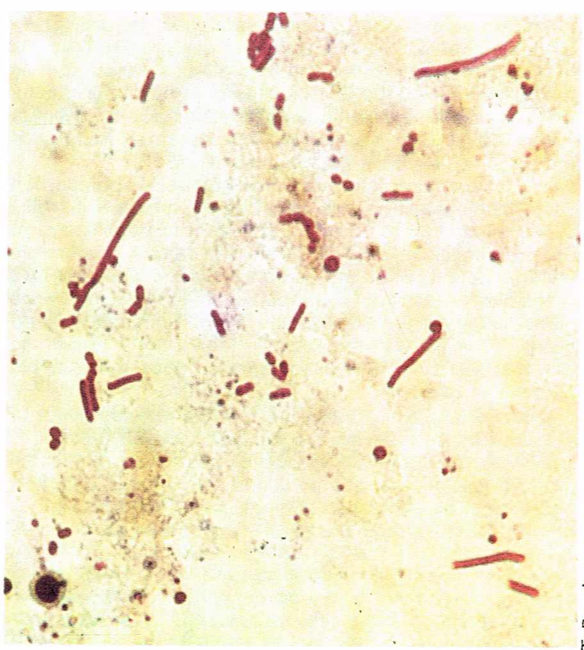
T. Poggio

Tableau A
Taux de croissance et teneur en protéines de quelques micro-organismes

Groupe	Micro-organisme	Taux de croissance (nb de divisions par h)	Teneur en protéines en %
Bactéries	Escherichia coli	3	82
Levures	Hansenula anomala	0,6	53
Algues	Chlorella pyrenoidosa	0,1	44

Tableau B
Protéines produites en 24 heures par divers organismes

Organisme (1000 kg)	Protéines produites par jour en kg	Rendement en %
Bœuf	1	0,1
Soja	10	1
Levures	10^5	1000
Bactéries	10^{11}	1000000000

Tableau C Besoins quotidiens en acides aminés essentiels exprimés en g pour un homme adulte		
Acides aminés essentiels	Recommandation FAO	Quantité minimale
Phénylalanine	2,2	1,1
Méthionine	2,2	1,1
Leucine	2,2	1,1
Valine	1,6	0,8
Lysine	1,6	0,8
Isoleucine	1,4	0,7
Thréonine	1,0	0,5
Tryptophane	0,5	0,25
Total	12,7	6,35

▲ **Tableau C :** ***les besoins quotidiens en acides aminés pour un homme adulte.***

(la protéine alimentaire la mieux équilibrée en ce qui concerne sa composition en acides aminés indispensables) : par rapport au blanc d'œuf, ces protéines microbiennes ont une composition bien équilibrée, sauf en ce qui concerne les acides aminés soufrés ; la teneur en méthionine des Bactéries est plus élevée que celle des Levures, alors que c'est plutôt l'inverse pour la lysine.

Les cellules microbiennes renferment des vitamines. Si les Levures sont particulièrement riches en vitamines du groupe B, c'est parmi les Bactéries que l'on retrouve des teneurs intéressantes en vitamines B_{12}. En plus de ces vitamines, les Algues contiennent du β carotène (provitamine A) et du tocophérol. Les Champignons filamenteux paraissent moins riches.

La composition en acides aminés d'une protéine détermine, dans une large mesure, sa valeur comme source d'azote. En effet, l'homme se procure ainsi les acides aminés essentiels dont il est incapable d'effectuer la synthèse (tableau C). S'il manque un seul de ces acides aminés, ou s'il est en quantités insuffisantes, il n'est plus possible d'assimiler les protéines alimentaires dans leur totalité. Par exemple, un homme se nourrissant exclusivement de riz, déficitaire en lysine, n'assimilera que 66 % des protéines de cet aliment. En fait, tous les aliments, sauf l'œuf, sont déficients en un ou plusieurs acides aminés.

Cependant, dans le cas des protéines microbiennes, la présence d'une paroi rigide peut diminuer l'utilisation des protéines cytoplasmiques. Il est donc indispensable de faire une expérimentation appropriée, en utilisant ces protéines en tant que telles dans des rations alimentaires données à l'homme ou à des animaux. Les premiers essais sont toujours réalisés avec des rats à qui l'on donne la protéine microbienne à tester comme seule source d'azote.

Si l'on appelle I la quantité d'azote ingérée sous forme de protéines microbiennes, F l'azote des fèces, U l'azote de l'urine, on retient trois valeurs caractéristiques données par ce type d'expérience :

▼ **Tableau D :** ***l'utilisation des Levures complète un régime à base de céréales dont les protéines sont pauvres en acides aminés indispensables tels que la lysine et la thréonine.***

Tableau D Effet de l'adjonction de Levures séchées (Candida utilis) sur la valeur nutritionnelle de la farine de riz (rats de 46 g au départ)			
Candida utilis %	Protéine du régime en %	Gain de poids en g	Valeur de l'efficacité protéique
0	6,5	30	1,87
2	5,9	36	2,19
4	7,3	68	2,90
6	7,8	95	3,13
8	8,2	108	3,29
10	9,9	122	3,03
12	11,0	137	2,93
14	11,9	132	2,75

— la *valeur biologique* (VB), ou pourcentage d'azote retenu par rapport à l'azote ingéré en tenant compte des pertes d'azote d'origine endogène :

$$VB = 100 \times \frac{I - (F + U)}{I - F} ;$$

— la *digestibilité* (D), ou pourcentage de l'azote absorbé par rapport à l'azote consommé en tenant compte seulement de l'excrétion de l'azote présent dans les fèces :

$$D = 100 \times \frac{I - F}{I} ;$$

— la *valeur de l'efficacité protéique* (P.E.R.), ou proportion de l'azote de la protéine éprouvée retenue par rapport à une protéine de référence, qui est souvent celle du blanc d'œuf. On peut ainsi la mesurer en gain de poids de l'animal pour le même poids de protéine consommée par rapport à la protéine de référence.

Les résultats d'un grand nombre d'expériences font ressortir que les Algues ont une assez faible digestibilité, dont la valeur est comprise entre 50 et 75, alors que celle des Levures peut atteindre 95. On obtient des valeurs voisines de 80 pour *Escherichia coli* et *Micrococcus cerificans,* et de 90 dans le cas d'*Hydrogenomonas eutropha*. Il est important, à ce sujet, de considérer le traitement que les cellules bactériennes ont subi avant d'être incorporées dans la ration ; ainsi, le broyage des cellules de *Bacillus megaterium* fait passer la digestibilité de 56 à 67. Les Protozoaires du rumen, qui assurent pour une bonne part la nutrition azotée des herbivores, ont des digestibilités beaucoup plus élevées, variant de 86 à 96.

Les protéines bactériennes, étant plus riches en acides aminés soufrés que les Levures, ont une valeur biologique plus élevée que ces dernières. Cependant, si l'on ajoute de la méthionine aux Levures, la valeur biologique augmente. Il est possible également d'utiliser des Levures riches en lysine et en thréonine pour complémenter un régime à base de céréales (blé, riz, manioc), puisque les protéines de ces dernières sont pauvres en acides aminés de ces types. Les résultats d'une telle expérience ont été résumés dans le tableau D.

Les expériences effectuées sur des animaux ne sont pas suffisantes ; il est indispensable de faire consommer ces protéines par l'homme pour se rendre compte si elles ne sont pas responsables d'accidents allergiques ou de troubles gastro-intestinaux. Les expériences sur l'homme, faites avec des Algues, sont rares et de courte durée, de l'ordre de 3 à 6 jours. Les sujets ont toléré des doses de 100 g par jour d'un mélange de *Chlorella* et de *Scenedesmus ;* mais à la dose de 200 g par jour, on observe des troubles gastro-intestinaux (nausées, vomissements, flatulences, diarrhées). Si un extrait alcoolique de *Chlorella pyrenoidosa* est parfois bien toléré, celui de *Scenedesmus obliquus* ne l'est pas. La seule expérience effectuée avec des protéines bactériennes consommées par l'homme n'a pas été couronnée de succès. Par contre, les Levures sont beaucoup mieux tolérées. Ainsi, des volontaires humains ont pu manger 135 g de Levures sèches par jour durant 9 jours sans présenter de troubles gastro-intestinaux.

Il faut cependant faire subir divers modes de préparation aux cellules microbiennes avant de les rendre utilisables pour l'alimentation, surtout dans les cas des Algues et des Bactéries. En effet, il existe un certain nombre de facteurs défavorables qui, si l'on ne prend pas quelques précautions, limitent la consommation des protéines microbiennes : présence d'une paroi indigeste, teneur élevée en acides nucléiques, coloration accentuée (surtout dans le cas des Algues), goût désagréable (Algues et Levures).

Il est toujours nécessaire de tuer les cellules avant la consommation. En effet, des cellules microbiennes ingérées vivantes peuvent se développer dans l'intestin, produire des fermentations, libérer des amines toxiques, utiliser les vitamines aux dépens de l'hôte. Toutes ces raisons ont conduit à prévoir des traitements variés ayant pour but de tuer les cellules, d'éliminer totalement ou partiellement la paroi résistante aux enzymes digestives, et de réduire la teneur en acides nucléiques.

Le problème le plus grave, en ce qui concerne l'alimentation humaine, est celui des acides nucléiques :

les cellules microbiennes peuvent contenir de 8 à 25 g d'acides nucléiques pour 100 g de protéines. Après ingestion, ces acides nucléiques sont hydrolysés par des enzymes digestives. Les bases puriques (adénine et guanine) sont alors excrétées sous forme d'*acide urique,* car l'homme a perdu, au cours de son évolution, le pouvoir de produire de l'urate oxydase, qui transforme l'acide urique peu soluble en allantoïne très soluble. En cas d'alimentation riche en acides nucléiques, des dépôts d'acide urique se forment dans le rein, la vessie et les articulations, provoquant des crises de goutte.

C'est pourquoi un grand nombre d'expériences cliniques ont été faites avec des volontaires humains. Dans le cas d'une consommation de 130 g de Levures par jour pendant une semaine, la teneur du plasma en acide urique passe de 4,8 à 8,3 mg pour 100 g, alors qu'elle double dans l'urine ; un régime contenant 20 g par jour de protéines microbiennes ayant une teneur de 8,5 % d'acides nucléiques a été très bien toléré. Tous les résultats obtenus permettent de conclure qu'un homme bien portant peut consommer 2 g d'acides nucléiques par jour sans inconvénient. On recherche activement des méthodes peu coûteuses pour diminuer la teneur en acides nucléiques des cellules microbiennes, en vue de leur utilisation par l'homme, le problème ne se posant pas dans le cas des animaux.

Les protéines microbiennes peuvent provenir de Bactéries, de Levures, de Champignons filamenteux et d'Algues.

— *Protéines microbiennes d'origine bactérienne*

● *Bactéries de l'hydrogène* (Hydrogenomonas). Ce sont des Bactéries aérobies qui tirent leur énergie de l'oxydation de l'hydrogène, et leur carbone du gaz carbonique. Elles se cultivent donc dans une solution minérale où l'on fait barboter un mélange gazeux (70 % d'hydrogène, 20 % d'oxygène et 10 % de gaz carbonique) ; le temps de génération varie entre 3 et 7 heures pour une température d'incubation comprise entre 33 °C et 35 °C ; on a pu obtenir des rendements de 28 g par litre après 10 jours. Des études faites en cultures continues ont mis en évidence le rôle de l'oxygène comme facteur limitant. Il est difficile d'obtenir un mélange gazeux en proportions convenables ($H_2/O_2 = 2$), à moins de réaliser une électrolyse de la solution nutritive minérale directement dans le fermenteur à l'aide d'électrodes de platine. Dans ce cas, l'hydrogène et l'oxygène produits sont consommés aussitôt par les Bactéries, ce qui supprime le danger d'explosion.

Les réactions qui interviennent sont les suivantes :

Énergie (1)	$4\,H_2 + 2\,O_2$	$\rightarrow 4\,H_2O + 224$ kcal
Assimilation du gaz carbonique (2)	$2\,H_2O + CO_2$	$\rightarrow (HCHO) + H_2O$
Réaction globale (3)	$6\,H_2O + 2\,O_2 + CO_2$	$\rightarrow 5\,H_2O$
Électrolyse de l'eau (4)	$6\,H_2O$	$\rightarrow 6\,H_2 + 3\,O_2$

Au cours de l'électrolyse, une mole H_2 est produite à partir de $2 \times 96\,500$ coulombs ou 53,6 ampères-heures :

$$1 \text{ kWh correspond à } \frac{1\,000}{53{,}6} = 18{,}65 \text{ moles } H_2 ;$$

6 moles H_2 sont donc consommées pour 12 g de carbone formés dans la biomasse, correspondant à 22 g de cellules en poids sec, contenant 11 g de protéines environ. Comme 1 kWh correspond à 66 g de biomasse ou 33 g de protéines, cette Bactérie est susceptible de transformer de l'énergie électrique en corps cellulaires.

En poids sec, la composition cellulaire est la suivante : 50 % de protéines, 15 % d'acides nucléiques et 20 % de paroi.

Les cellules de cette souche sont pauvres en acides aminés soufrés et riches en lysine. Leur digestibilité et leur valeur biologique sont également voisines de celles de la caséine.

Les équations (3) et (4) montrent qu'il y a, après électrolyse de l'eau et croissance bactérienne, une molécule d'oxygène non utilisée et une molécule de gaz carbonique absorbée. C'est pourquoi la N.A.S.A. a effectué des recherches appliquées en vue d'utiliser ces cultures pour régénérer l'atmosphère des capsules spatiales lors des vols interplanétaires. En continu, il faudrait environ de 20 à 30 litres d'une suspension contenant environ 10 g de cellules bactériennes (en poids sec) par litre pour absorber le gaz carbonique produit par la respiration d'un astronaute et régénérer l'oxygène.

● *Bactéries du méthane (méthylobactéries).* Le méthane est un substrat bon marché, non toxique, peu soluble dans l'eau. Les Bactéries oxydant le méthane sont ubiquistes ; on les isole dans les eaux (douces et salées), les boues et le sol. L'espèce la plus commune est *Pseudomonas methanica.* La purification étant très difficile, on a beaucoup de mal à éliminer les contaminants. L'oxydation du méthane suit la voie indiquée ci-dessous :

CH_4	$\rightarrow$	CH_3OH	$\rightarrow$	$HCOOH$	$\rightarrow$	CO_2
méthane		méthanol		acide formique		gaz carbonique

On peut noter que ces Bactéries utilisent également le méthanol comme source de carbone et d'énergie. Cependant, leur utilisation industrielle pose des problèmes dus au danger d'explosion. C'est pourquoi le méthanol présente des avantages, même par rapport aux paraffines (alcanes) qui servent de substrat à diverses Bactéries.

La composition en acides aminés des Bactéries utilisant le méthane ou le méthanol est voisine de celle des Bactéries utilisant le glucose ou les alcanes. Mais il n'y a pas eu suffisamment d'essais nutritionnels réalisés avec des animaux pour que l'on puisse en tirer des conclusions valables.

— *Protéines microbiennes provenant de Levures*

Ce sont celles qui ont fait l'objet d'un très grand nombre d'applications et d'expériences de nutrition de longue durée. Les souches utilisées diffèrent suivant le substrat carboné, mais la composition brute des cellules sèches est peu différente (tableau E).

Tableau E Composition brute des diverses Levures alimentaires (en % du poids sec)				
Constituants	S. cerevisiae Mélasses	Candida utilis Sulfite	S. fragilis Lactosérum	S. cerevisiae Bière
Protéines	50	55	54	45
Lipides	6	5	1	6
Humidité	5	6	7	6
Cendres	7	8	9	8
Sodium	0,3	0,001	–	0,2

▲ **Tableau E :** ***la composition brute des Levures sèches montre que les quantités de protéines sont voisines pour les diverses souches.***

On constate un déficit net en acides aminés soufrés par rapport à la caséine et au blanc d'œuf. *Candida lipolytica* et *Candida tropicalis* sont cultivées sur hydrocarbures. La récupération des cellules de Levures du pétrole est beaucoup plus compliquée et plus onéreuse que celle des Levures développées sur mélasses, car des hydrocarbures non consommés restent à la surface des cellules ; d'où la nécessité d'utiliser des solvants et d'éliminer également les lipides. Après séchage, on obtient alors un concentré protéique, d'une bonne valeur nutritionnelle s'il est enrichi en méthionine.

— *Protéines microbiennes à partir de Champignons filamenteux*

Les grains de céréales contiennent environ 10 % de protéines. Si l'on arrive à doubler cette teneur, ces grains constituent un bon aliment pour les animaux d'élevage. De nombreux essais ont été effectués en Angleterre et des résultats intéressants obtenus avec diverses souches de Champignons : *Rhizopus, Fusarium.* Cependant, une extraction paraît nécessaire, car leur paroi, riche en chitine, diminue la digestibilité.

— *Protéines microbiennes à partir d'Algues*

De nombreux chercheurs se sont intéressés aux Algues, du fait que celles-ci utilisent l'énergie lumineuse et le gaz carbonique. Les populations qui vivent autour du lac Tchad consomment des spirulines, Algues qui s'y développent bien, d'où l'idée de les cultiver dans des bassins ensoleillés. Le rendement de la conversion de l'énergie lumineuse étant très faible (de l'ordre de 4 %

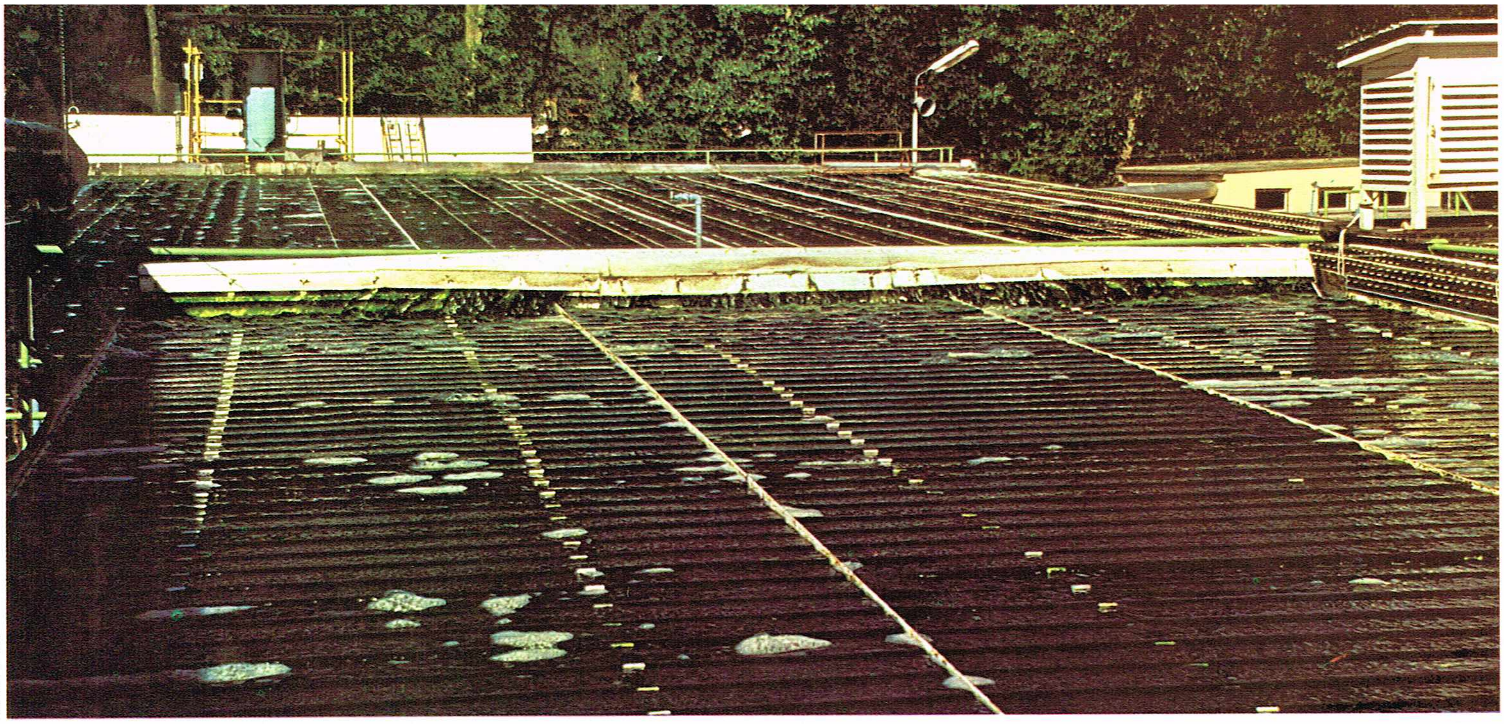

R. Bourdu

Produits	Besoins pour la croissance optimale en mg/l	Production en mg/l	Rapport : Quantité produite / Quantité nécessaire
Acide glutamique	300	60 000	$2{,}0 \times 10^2$
Lysine	250	42 000	$1{,}7 \times 10^2$
Acide inosinique (IMP)	25	13 000	$5{,}2 \times 10^2$
Riboflavine	0,5	5 000	$1{,}0 \times 10^4$
Cyanocobalamine	0,001	30	$3{,}0 \times 10^4$

Tableau F
Production excédentaire de certains métabolites primaires

▲ *En haut, la production de protéines microbiennes à partir d'Algues est tentée par certains pays à l'échelle industrielle; l'aménagement d'une telle culture se fait dans des bassins ensoleillés. En bas, le* tableau F *montre que certains métabolites primaires sont produits par les cellules microbiennes à des teneurs bien supérieures aux besoins.*

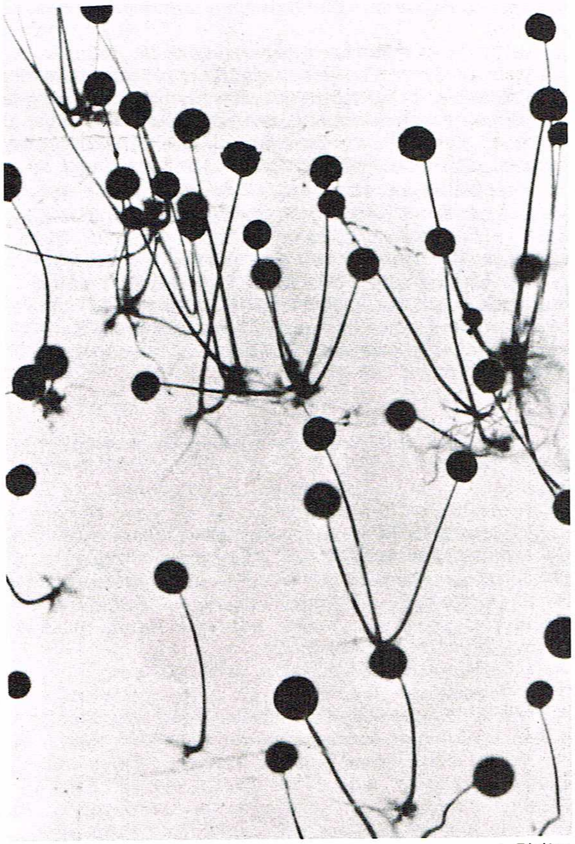

J. Rivière

▶ *Photomicrographie électronique de* Rhizopus, *Champignon filamenteux, source de protéines alimentaires.*

au maximum) et la pénétration de la lumière dans un bassin envahi par les Algues étant limitée par la turbidité, la profondeur d'un tel bassin ne doit pas dépasser 20 à 30 cm; la biomasse est faible, de l'ordre de 1 g par litre; l'azote et le phosphore doivent être apportés sous forme de sels minéraux. La récolte des Algues est assez onéreuse, car la biomasse est très diluée, sauf si les Algues floculent naturellement. Il est ensuite nécessaire de les sécher.

Des essais de nutrition protéique ont été réalisés dans divers pays. Les Algues contiennent environ 50 % de protéines, mais elles manquent d'acides aminés soufrés et parfois de lysine. Leur digestibilité est faible, à moins d'extraire les protéines (en outre, les consommateurs se plaignent souvent de leur mauvais goût). La faible digestibilité paraît liée à la présence d'une paroi importante (20 % du poids sec), riche en cellulose, résistante aux enzymes. C'est pourquoi des chercheurs ont eu l'idée d'alimenter des Ruminants avec des cellules d'Algues telles quelles, les micro-organismes du rumen dégradant la paroi, et l'ensemble pouvant servir comme un fourrage artificiel. Dans ce dernier cas, la productivité à l'hectare est élevée.

Métabolites primaires

Ils comprennent des alcools (éthanol, butanol, glycérol), des cétones, des vitamines, des acides aminés, des nucléotides et des polysaccharides. Certains métabolites primaires sont produits par les cellules, à des teneurs bien supérieures aux besoins (tableau F).

— *Solvants industriels*

Les solvants industriels : éthanol, glycérol, butanol, acétone et 2-3 butanediol ne sont pratiquement plus préparés par voie microbienne, du fait de la compétition économique avec les industries pétrochimiques qui utilisent les produits de la distillation du pétrole. Les procédés utilisés ont cependant permis d'élaborer les techniques actuelles de la microbiologie industrielle.

— *Acides organiques*

De nombreux acides organiques peuvent s'accumuler dans le milieu de culture, résultant du métabolisme des oses, soit comme produits terminaux de la glycolyse (acide lactique), soit provenant de l'oxydation incomplète de ces oses (acides citrique, itaconique, gluconique). Ces acides sont largement utilisés dans diverses industries.

L'acide lactique sert à acidifier des produits alimentaires (extraits de fruits, limonades, sirops, moûts de brasserie, saumures). On l'emploie comme mordant pour l'impression des lainages ou la teinture des soieries. La tannerie a besoin d'acide lactique pour décalcifier les peaux, les chiper et les gonfler. C'est aussi un produit de base dans la fabrication des matières plastiques. Les esters lactiques sont des solvants et des plastifiants qui interviennent dans la constitution des encres et des laques. Le lactate de chaux et le lactate de fer sont des médicaments. Le lactate de cuivre permet de préparer des bains d'électrolyse. On utilise des souches de *Lactobacillus*. De nombreuses matières premières sont employées (lactosérum, mélasses, amidon hydrolysé).

Il est parfois plus avantageux d'avoir des oses purs (glucose, saccharose) pour simplifier les opérations d'extraction et de purification.

● L'*acide gluconique* a beaucoup d'applications. Sous forme de sels (Ca, Fe, K), il permet d'introduire des cations dans la ration alimentaire. En outre, il diminue pour certains médicaments (antibiotiques) leur toxicité et pour d'autres (aspirine) leurs propriétés irritantes. Cependant, l'utilisation la plus fréquente de cet acide se trouve dans le nettoyage des métaux et le lavage des bouteilles : en effet, le gluconate de sodium permet d'adoucir les eaux calcaires sans risquer des précipitations de sels de calcium, propriété intéressante dans le cas des machines automatiques à laver les bouteilles. On l'emploie aussi sous forme de Δ-gluconolactone comme acidifiant dans divers produits alimentaires (Levure chimique, préparations à base de lait, charcuteries). Cet acide est préparé à l'aide de souches d'*Aspergillus niger* dans des milieux contenant 35 % de glucose, à condition d'ajuster et de maintenir le pH à 6,5 avec une aération importante tout au long de la fermentation.

● L'*acide citrique* est utilisé dans l'industrie alimentaire (boissons gazeuses, confiserie, conserverie), dans l'industrie des cosmétiques et comme agent séquestrant dans les lessives. On emploie des souches d'*Aspergillus niger* obtenues après mutations ou hybridations, donnant des rendements élevés. La synthèse de l'acide citrique se fait lorsque le milieu (sels minéraux et sucres, glucose, saccharose ou mélasses) est déséquilibré : on suppose qu'il manque un des constituants nécessaires à la biosynthèse d'une enzyme intervenant dans le cycle de Krebs. C'est le cas du fer et de la *cis aconitase*. C'est pourquoi la teneur en fer du milieu est un des principaux facteurs conditionnant le rendement. Parfois même, dans le cas des mélasses qui contiennent trop de fer, on doit précipiter ce dernier à l'aide de ferrocyanures. On peut également préparer de l'acide citrique de fermentation avec des souches de Levures *(Candida lipolytica)* qui produisent jusqu'à 112 g d'acide citrique par litre (après 3 jours d'incubation à 30 °C) à partir de paraffines.

● L'*acide itaconique* sert à fabriquer des résines, car les esters de cet acide peuvent être polymérisés et substitués à l'acide acrylique. Ces résines sont employées en papeterie, dans la préparation de fibres synthétiques (courtelle) et dans l'obtention de dents artificielles. C'est une souche d'*Aspergillus terreus* isolée d'un sol du Texas qui a servi à faire les mutants dont on se sert actuellement. Là encore, le rendement est fonction de la concentration du milieu en oligo-éléments (tableau G).

— *Vitamines*

Beaucoup de micro-organismes prototrophes ont la propriété de synthétiser des facteurs de croissance à partir d'éléments simples présents dans le milieu de culture (tableau H). Mais ces vitamines ne s'accumulent pas dans le milieu, et les généticiens n'ont pas encore réussi à préparer des souches à rendements élevés. C'est pourquoi on ne prépare commercialement qu'un petit nombre de vitamines.

● Le β *carotène,* précurseur de la vitamine A, est utilisé comme colorant dans certains produits alimentaires (margarines). Il est extrait des filaments d'un Champignon sexué, *Blakeslea trispora*. On prépare aussi de la riboflavine (vitamine B_2), à partir de cultures de Levures ou de Champignons phytopathogènes *(Ashbya gossypii)*.

● La *vitamine B_{12}* est la plus intéressante. Elle joue un grand rôle dans le traitement de l'anémie et stimule l'appétit. Dans la nature, sa biosynthèse est uniquement microbienne. En effet, chez les Ruminants, elle est fournie par la microflore du tractus digestif, d'où elle s'accumule dans le foie. L'homme et les autres animaux, qui ne paraissent pas pouvoir utiliser celle qui est produite par des Bactéries intestinales, dépendent de leur alimentation carnée pour leur approvisionnement. C'est pourquoi on incorpore de 10 à 15 mg de vitamine B_{12} par tonne d'aliments du bétail quand ceux-ci contiennent surtout des protéines végétales. De nombreuses souches de *Streptomyces* producteurs d'antibiotiques en synthétisent, et ce fut pendant longtemps un sous-produit de la fabrication des antibiotiques. Il existe maintenant divers procédés pour l'obtenir, mais ce sont des souches de Bactéries propioniques *(Propionibacterium shermanii)* qui donnent les rendements les plus élevés. Signalons qu'une dose

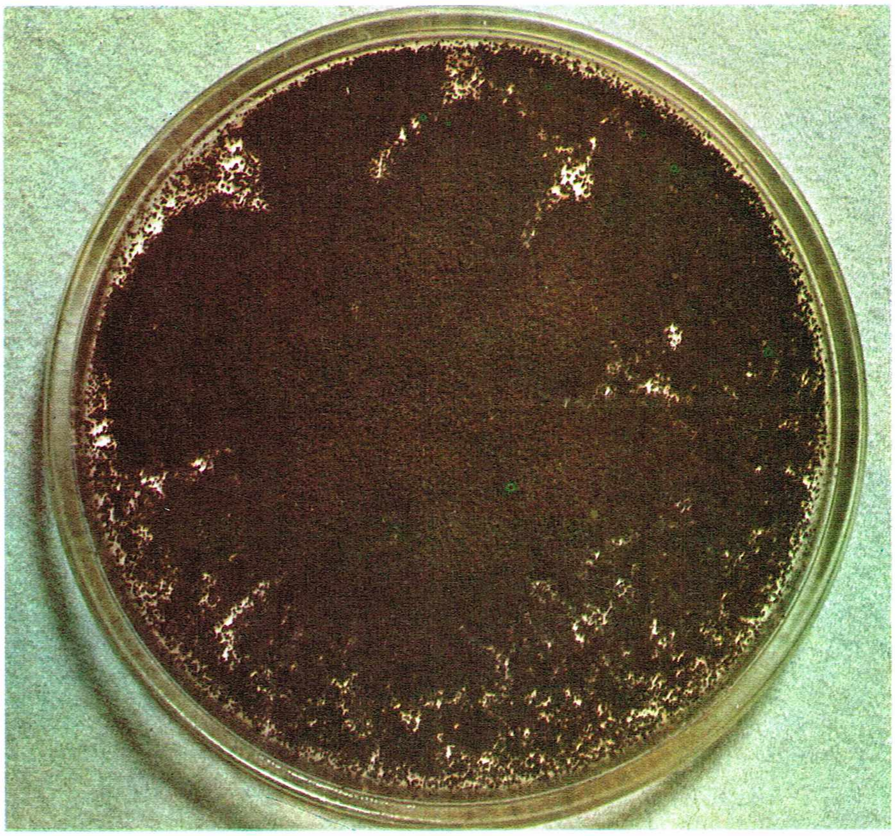

C. Bevilacqua

▲ ***Culture d'*Aspergillus niger*. Ce Champignon microscopique est utilisé dans la production d'acide citrique.***

▼ ***En haut, le* tableau G *montre que le rendement en acide itaconique est fonction de la concentration du milieu en oligo-éléments.***
En bas, le* tableau H *indique la teneur en vitamines dans trois souches bactériennes.

Tableau G
Rendement en acide itaconique en fonction de la concentration du milieu en cations

Fe mg/l	Rendement %	Ca mg/l	Rendement %	Cu mg/l	Zn/ml	Rendement %
0	57	0	9	0	0	16
1	25	337	43	0	0,5	43
2	27	2 700	59	0,5	0,5	55

Tableau H
Teneur en vitamines dans les cellules bactériennes (en ppm en poids sec)

Vitamines	Enterobacter aerogenes	Pseudomonas fluorescens	Clostridium butyricum
Acide nicotinique	240	210	250
Riboflavine	44	67	55
Thiamine	11	26	9
Pyridoxine	7	6	6
Acide pantothénique	140	91	93
Acide folique	14	9	3
Biotine	4	7	non synthétisée

bien précise de cobalt est nécessaire dans le milieu de culture (tableau I).

● La *vitamine C* (acide ascorbique) est préparée industriellement à partir du L sorbose, lequel provient de la fermentation du D sorbitol (résultant d'une hydrogénation catalytique du glucose) par une souche d'*Acetobacter suboxydans*.

— *Acides aminés*

Un grand nombre de micro-organismes sont capables d'élaborer, à partir de glucides et de sels ammoniacaux, les acides aminés nécessaires à la biosynthèse de leurs protéines. Bien que ces acides aminés soient un stade transitoire dans cette biosynthèse, ils peuvent être excrétés en quantités minimes dans le milieu à la fin de la phase exponentielle. De nombreuses souches mutantes ayant perdu les mécanismes normaux de la régulation ont été préparées, donnant des rendements élevés en divers acides aminés. Seuls l'acide glutamique et la lysine sont produits à l'échelle industrielle en vue d'un usage alimentaire.

● L'*acide glutamique* est une substance d'arôme. Sous forme de monoglutamate de sodium, on en met dans de nombreux aliments où il donne un goût de bouillon (potages en poudre). Un mutant de *Corynebacterium glutamicum* en excrète plus de 60 g par litre. La fermentation dure 40 heures à 30 °C. Le milieu contient du glucose ou des mélasses. Une souche de *Corynebacterium hydrocarboclastus* utilise les paraffines, le rendement atteignant 75 g par litre.

● Un autre mutant de *Corynebacterium glutamicum* produit 60 g par litre de *lysine,* avec un rendement de 25 % par rapport au glucose consommé. Cet acide aminé, indispensable à la croissance de l'homme et des animaux, se trouve en faibles quantités dans de nombreuses protéines végétales.

Les nucléotides, dont la production industrielle a fait l'objet de recherches importantes au Japon, présentent des propriétés gustatives qui renforcent l'action du monoglutamate de sodium. Outre leur saveur propre, ils donnent l'illusion d'une certaine viscosité dans les potages, créant une impression de corps et de richesse de goût. On peut les obtenir à partir d'acides ribonucléiques traités par un système enzymatique complexe, d'origine microbienne. Mais la fermentation directe, possible avec des mutants de *Corynebacterium glutamicum* ou de *Brevibacterium ammoniagenes,* permet d'obtenir des rendements de 70 g par litre.

Tableau I
Production microbienne de vitamine B_{12}

Souche	Milieu	Aération	Température en °C	Durée de fermentation en h	Rendement en mg/l
Propionibacterium shermanii	Corn steep Glucose Cobalt Ammoniaque	Anaérobiose	30	80	100
Streptomyces olivaceus	Farine de soja Glucose Cobalt Sels minéraux	Aérobiose	28	96	5,7
Bacillus coagulans	Corn steep Cyanure Cobalt Acide citrique Triéthanolamine	Aérobiose	55	18	6,0
Pseudomonas denitrificans	Bétaïne Acide oxalique Cobalt	Aérobiose	30	–	200

▲ ***Le* tableau I *indique la production microbienne de vitamine B_{12}.***

— *Polysaccharides*

De nombreux micro-organismes sont capables de synthétiser des polysaccharides exocellulaires qui rendent visqueux le milieu liquide où ils se développent. Il faut, en général, peu d'azote et de phosphore (par rapport au sucre) dans le milieu pour obtenir une production abondante de tels polysaccharides. On essaie de remplacer les gommes végétales, solubles dans l'eau, par des polysaccharides microbiens.

Les applications sont nombreuses : stabilisateurs dans l'industrie alimentaire (sirops et crèmes glacées), peintures (suspension des pigments), industrie textile (dispersion des pigments colorés pour l'impression et la teinture des tissus), cosmétiques (augmentation de la viscosité des lotions et des dentifrices), industrie pétrolière (additif dans les boues de forage, extraction secondaire du pétrole par injection de solutions visqueuses). Des rendements élevés, atteignant près de 50 % de la source de carbone, ont été obtenus; cependant, seuls des produits bon marché, ayant des propriétés intéressantes, peuvent s'imposer commercialement.

On distingue les *homopolysaccharides* et les *hétéropolysaccharides.* Dans le premier groupe, on trouve les dextranes, polymères du glucose produits au cours de la croissance d'une souche de *Leuconostoc mesenteroides* dans un jus sucré. Un hétéropolysaccharide est produit par *Xanthomonas phaseoli,* Bactérie pathogène responsable de la gomme du haricot. La viscosité de ce polysaccharide, polymère de glucose, de mannose et de glucuronate, est indépendante de la température, du pH, de la teneur en sels minéraux, ce qui lui confère de nombreuses utilisations possibles, en particulier pour solidifier les boues de forages pétroliers (surtout quand il y a de l'eau de mer). Dans un milieu contenant 20 g par litre de glucose, on obtient 15 g par litre de polysaccharides que l'on précipite par les solvants.

Métabolites secondaires

Ils comprennent les insecticides biologiques, les gibbérellines, les alcaloïdes de fermentation et les antibiotiques.

— *Insecticides*

C'est avec une Bactérie sporulée pathogène pour les larves de Lépidoptères, *Bacillus thuringiensis,* que l'application pratique d'un insecticide biologique a été réalisée la première fois. Ces larves (chenilles) sont paralysées une heure après l'ingestion d'une culture sporulée, alors que les cellules végétatives contenues dans une culture jeune sont sans action. Si l'on examine au microscope des cultures en train de sporuler, on voit apparaître, en même temps que la spore, un cristal à l'autre pôle de la cellule. Ce cristal, de constitution protéique, est soluble en milieu alcalin. Quand une larve ingère un tel cristal, celui-ci se dissout dans la cavité digestive dont le pH est alcalin, et des protéases transforment cette protoxine en petites molécules toxiques actives. Il existe une souche dont 32 % du poids total de la masse sporulée est constitué par cette protéine cristallisée, à toxicité élevée vis-à-vis des chenilles.

L'homme et les autres animaux n'y sont pas sensibles, probablement du fait de leur acidité gastrique, la pepsine transformant le cristal en substance atoxique. Comme les Insectes utiles, les abeilles par exemple, ne sont pas sensibles à de faibles doses, on a eu l'idée d'utiliser les spores de cette Bactérie comme insecticide sélectif. La préparation industrielle est très simple : les cultures se font à partir d'un milieu amylacé, en fermenteur, et le moût fermenté est séché par atomisation. Le produit en poudre est utilisé à la dose du DDT.

Il existe d'autres micro-organismes doués de propriétés insecticides : Champignons *(Beauveria bassiana),* virus, Nématodes, dont l'utilisation à l'échelle industrielle n'est pas encore possible. De telles préparations pourront rendre de grands services lorsque les chercheurs auront mis au point la sélection de souches appropriées et des méthodes de culture économiques. Actuellement, ces insecticides biologiques servent à protéger les plantes des attaques par les chenilles. On a pu ainsi obtenir des feuilles de tabac dépourvues de toute trace d'insecticide chimique.

— *Acide gibbérellique*

A partir d'un Champignon, *Fusarium moniliforme,* responsable d'une maladie se traduisant par l'élongation des entre-nœuds des jeunes pousses du riz, on prépare de l'acide gibbérellique de fermentation, ou gibbérelline A_3. Elle sert, en malterie, à augmenter la teneur en amylase tout en réduisant le développement des radicules de l'orge germée. Malgré de nombreuses expérimentations,

ses utilisations dans l'agriculture (pour augmenter les rendements) ou dans l'horticulture (afin de rendre la floraison indépendante du photopériodisme) n'ont pas abouti à des résultats concluants.

— *Alcaloïdes*

Les alcaloïdes de fermentation sont produits par des souches de *Claviceps purpurea* (responsable de l'ergot du seigle) cultivées en fermenteur. Le milieu doit contenir beaucoup de sucre (300 g par litre) ; ensuite on extrait les divers alcaloïdes par le chloroforme.

Ces composés ont une action pharmacologique sur le système nerveux sympathique. Le plus connu est le diéthylamide de l'acide lysergique (ou LSD), qui est un hallucinogène puissant.

— *Antibiotiques*

Ce sont des substances chimiquement définies, produites par des micro-organismes, et capables d'inhiber la croissance d'autres micro-organismes et de les détruire, en solution diluée, *in vitro* ou *in vivo*. Bien que la pénicilline, premier antibiotique connu, soit synthétisée par un Champignon, on s'est vite aperçu que 40 % des souches du genre *Streptomyces* isolées du sol sont productrices d'antibiotiques.

Quand on pense avoir découvert une souche source d'un nouvel antibiotique, de longues recherches sont nécessaires avant d'obtenir un produit commercialement utilisable. En effet, un antibiotique à usage thérapeutique doit ne pas être toxique, ne pas précipiter les protéines du sérum, ne pas hémolyser les globules rouges, ne pas toucher les globules blancs, et ne pas provoquer de réactions allergiques ; il faut qu'il soit soluble dans l'eau, relativement stable, actif vis-à-vis des microbes pathogènes à des concentrations réalisables en clinique humaine ; en outre il ne doit pas avoir de pouvoir pyrogène, c'est-à-dire que son injection ne doit pas donner lieu à une poussée de fièvre. (Bien entendu, si un nouvel antibiotique a une action thérapeutique remarquable, il est possible de l'utiliser malgré quelques défauts.) On peut classer les antibiotiques d'après leur constitution chimique (tableau J).

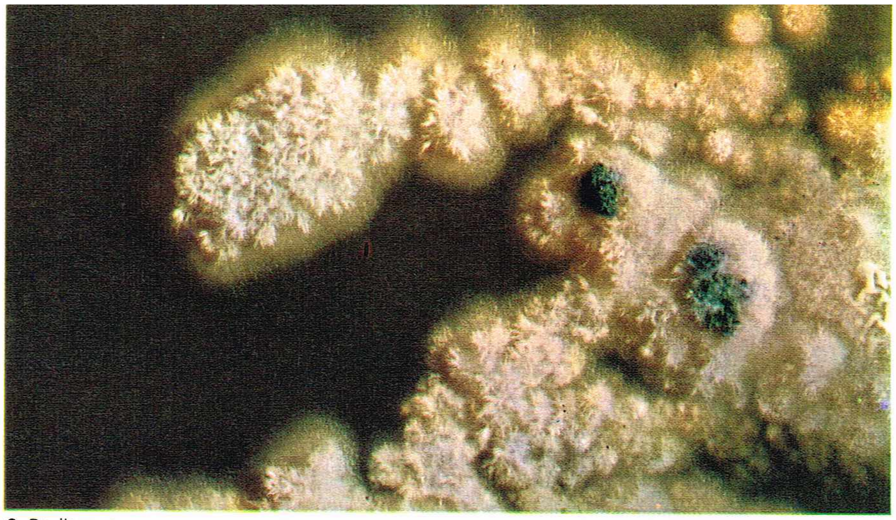

C. Bevilacqua

▲ ***A partir de ce Champignon (mycélium blanc)*** Fusarum moniliforme, ***on prépare de l'acide gibbérellique, ou gibbérelline*** A_3 ***(on observera les deux masses vertes qui sont des*** Penicillium***).***

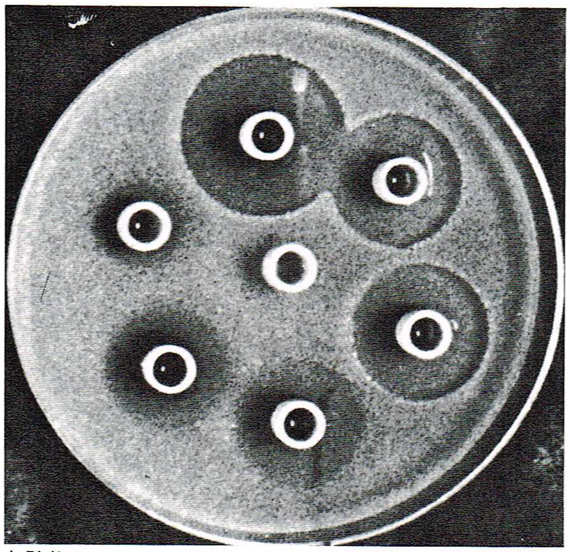

J. Rivière

◀ ***Mise en évidence de l'action antibiotique d'un filtrat de culture vis-à-vis d'une souche pathogène.***

Tableau J
Principaux antibiotiques utilisés en thérapeutique

Structure chimique	Souche productrice	Nom	Germes sensibles	Inconvénients
Oligopeptidique	Penicillium chrysogenum	Pénicilline	Bactéries Gram positives	-
	Cephalosporium	Céphalosporine	Bactéries Gram positives	-
	Streptomyces venezuelae	Chloramphénicol	Salmonella typhi	Toxique vis-à-vis des cellules de la moelle
Polypeptidique	Bacillus subtilis	Bacitracine	Nombreux germes	Hémolytique, donc applications locales
	Bacillus brevis	Tyrothricine	Nombreux germes	
Glucosidique	Streptomyces griseus	Streptomycine	Bactéries Gram négatives Bacille tuberculeux	Légère toxicité
Tétracycline	Streptomyces aureofaciens	Auréomycine Oxytétracycline Terramycine Chlortétracycline	Nombreux germes	Ne modifie pas la flore intestinale
Macrolidique	Streptomyces erythreus	Érythromycine	Bactéries Gram positives	-
	Streptomyces mediterranei	Rifamycine	Bacille tuberculeux	-
Polyénique	Streptomyces noursei	Nystatine	Champignons pathogènes	-

◀ ***Le tableau J indique le classement des antibiotiques d'après leur constitution chimique, et leur utilisation en thérapeutique.***

Les microbes pathogènes deviennent résistants aux antibiotiques. C'est ainsi que, dans un hôpital de Londres, après avoir employé la pénicilline pendant cinq ans, on s'est aperçu que 95 % des staphylocoques isolés étaient devenus résistants; en effet, ces derniers, sous l'action d'une enzyme, la *pénicillinase*, transforment la pénicilline en acide pénicilloïque inactif. Mais des chercheurs ont isolé une *amidase*, enzyme d'origine microbienne, qui transforme la pénicilline en acide 6-aminopénicillanique. A partir de cet acide, des chimistes ont préparé des pénicillines (dites synthétiques) actives vis-à-vis des germes résistants, car elles sont insensibles à la *pénicillinase*.

C'est cette acquisition par les microbes pathogènes de résistance qui entraîne la nécessité de rechercher de nouveaux antibiotiques. On essaie également de découvrir des substances antibiotiques douées de propriétés antivirales et antitumorales, bien que le dépistage soit difficile. Des chercheurs japonais ont extrait un antibiotique, la *bléomycine*, qui provoque la rupture des acides désoxyribonucléiques. Cette substance, cytotoxique, est inactivée par la plupart des tissus et s'accumule dans la peau, ce qui permet de l'employer pour le traitement de certains cancers de la peau (carcinome). Il existe également des substances antibiotiques spécifiques vis-à-vis de certains germes pathogènes pour les plantes. C'est le cas de la *kasagumycine*, qui sert à traiter le riz malade.

Enzymes

Les fermentations sont le résultat de l'activité enzymatique des micro-organismes; il est cependant parfois intéressant d'obtenir à l'échelle industrielle des enzymes microbiennes, considérées alors comme des produits de fermentation. Ce sont, en général, des enzymes exocellulaires, qui ont pour objet d'hydrolyser diverses molécules. Toutefois, quelques-unes sont endocellulaires et plus difficiles à obtenir, car il faut désintégrer au préalable les cellules microbiennes qui les contiennent avant de les extraire et de les purifier; c'est le cas, par exemple, de l'*invertase*, de l'*asparaginase* et de l'*urate oxydase*. La recherche de micro-organismes, sources d'enzymes, se fait surtout à partir de prélèvements de sol à l'aide de cultures d'enrichissement. Aussi arrive-t-on à isoler plusieurs micro-organismes différents produisant la même enzyme.

Prenons l'exemple de l'*amyloglucosidase*, qui hydrolyse l'amidon en glucose. Cette enzyme s'obtient à partir de cultures de diverses souches d'*Aspergillus (A. niger, A. awainori, A. phoenicis)*, de *Rhizopus (R. delemar, R. oryzae)* et d'*Endomycopsis*. Une fois la souche obtenue, on cherche à avoir des mutants à rendement élevé : il en est ainsi des mutants d'*Aspergillus oryzae*, qui produisent 15 fois plus d'amylase que la souche sauvage d'origine. En agissant sur la composition du milieu de culture et la durée de la fermentation, on arrive à augmenter considérablement les rendements.

Le cas de la *L asparaginase* est particulièrement intéressant. En 1953, un chercheur observa que certaines leucémies de la souris disparaissaient après injection de sérum de cobaye. Huit ans après, on a mis en évidence que le facteur responsable contenu dans le sérum

▼ ***Représentation schématique de l'obtention de pénicillines synthétiques.***

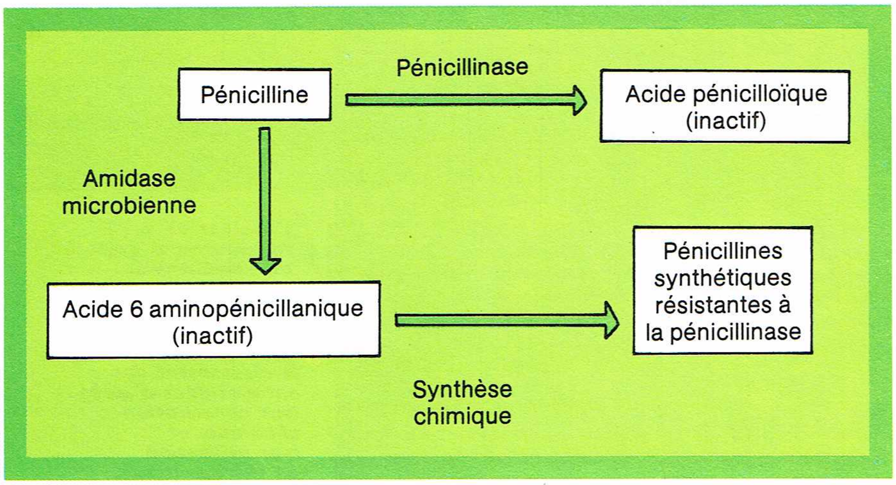

Richard Colin

était une L asparaginase : les cellules cancéreuses avaient perdu le pouvoir de synthétiser la L asparagine, en l'absence de laquelle elles ne pouvaient pas croître et se diviser. Il apparaissait donc possible de traiter ces leucémies à condition de préparer cette enzyme. Or, deux chercheurs purent l'obtenir à partir de cultures d'*Escherichia coli* (colibacille), en notant cependant que la production microbienne de la L asparaginase est limitée à un temps très court. Le milieu contient du glucose, des peptones et de l'hydrolysat de caséine. Comme c'est une enzyme induite qui n'est synthétisée qu'en présence du substrat sur lequel elle agit, on ajoute de la L asparagine dans le milieu de culture. Les conditions de la fermentation sont très curieuses. En effet, en aérobiose, la croissance cellulaire est importante, mais il y a peu d'enzyme, alors que c'est l'inverse en anaérobiose. De ce fait, la fermentation s'effectue en deux phases. La première dure huit heures, puis on supprime l'aération. Il faut alors 60 minutes pour que le taux de synthèse de l'enzyme atteigne sa valeur la plus élevée, qui se maintient pendant environ deux heures. On récolte aussitôt les cellules microbiennes et l'on extrait l'enzyme.

— *Utilisations et sources d'enzymes d'origine microbienne*

● *Amylases*. Il s'agit d'un mélange de trois enzymes comprenant en proportions variables, suivant les souches *(Bacillus* ou *Aspergillus)* : une *α amylase* qui agit sur l'amidon, donnant des dextrines et du maltose, une *maltase*, qui hydrolyse le maltose en glucose, une *amyloglucosidase*, qui hydrolyse l'amidon en glucose.

Les *amylases fongiques* hydrolysent l'amidon en sucres fermentescibles utilisés dans le cas de la distillerie, permettent de préparer des farines plus digestes pour les enfants, donnent des sirops sucrés à partir d'amidon de maïs. Elles servent à solubiliser l'amidon des extraits de fruits, évitant ainsi l'apparition de troubles dans ces jus. On les emploie en papeterie pour préparer de l'amidon servant lors de l'encollage et du couchage du papier. Un apport d'amylases dans la farine conduit à l'obtention d'un pain plus aéré.

Les *amylases bactériennes*, qui ont une plus grande stabilité à la chaleur, conviennent très bien à l'industrie textile. En effet, au cours du tissage, la chaîne est soumise à des efforts qui risquent de la casser. On renforce le fil en le trempant dans un apprêt d'amidon. Le tissage terminé, le tissu est plongé dans une solution diluée d'enzymes à 50 °C. Ces amylases bactériennes hydrolysent l'apprêt amylacé lors du désencollage, et les produits solubles partent après lavage.

● *Lactase* (β galactosidase). Au cours de la fabrication des crèmes glacées, le lactose peut quelquefois cristalliser lorsque sa concentration est trop élevée et rendre la dégustation du produit fini désagréable, comme s'il contenait du sable fin. On prévient cet accident en ajoutant, au préalable, une lactase extraite de Levures fermentant le lactose.

● *Invertase*. Elle est produite par des Levures de bière cultivées dans un milieu à base de saccharose. C'est une enzyme endocellulaire comme la lactase que l'on obtient facilement en séchant les cellules après autolyse, car elle se conserve bien. Elle hydrolyse le saccharose en un mélange de glucose et de fructose, qui sont plus solubles, ce qui permet, en confiserie, de faire des bonbons dont la partie centrale reste liquide.

● *Glucose isomérase*. Préparée à partir de souches du genre *Streptomyces*, elle donne la possibilité d'obtenir des sirops très sucrés à partir de jus glucosés, car le fructose a un fort pouvoir sucrant.

● *Protéases*. Elles sont d'origine bactérienne *(Bacillus)* ou fongique *(Aspergillus)*. Des protéases bactériennes servent en tannerie lors du confitage des peaux, qui consiste en une légère hydrolyse donnant un meilleur grain au cuir. D'autres protéases, produites par des *Streptomyces*, sont utilisées lors de l'épilage et le délainage des peaux. Dans l'industrie textile, les protéases bactériennes servent à dégommer la soie brute en solubilisant la séricine, substance gommeuse qui entoure la fibre protéique; quand l'apprêt de la soie est constitué de gélatine ou de caséine, les protéases de ce type éliminent ces substances au moment du désencollage. Elles servent aussi à récupérer l'argent des films usagés après hydrolyse de la gélatine. On en emploie de grandes quantités dans les lessives biologiques, où elles éliminent

les taches protéiques (particulièrement celles de sang). Il s'agit de protéases alcalines supportant des températures et des pH élevés, tout en étant actives en présence de perborate de sodium. Comme elles n'ont pas de ponts disulfures, l'oxydation provoquée par le perborate ne change pas leur structure tertiaire.

On peut ranger dans ce groupe d'enzymes les présures microbiennes, habituellement d'origine fongique *(Mucor pusillus)*, qui, dans les fromageries, remplacent la présure de veau pour cailler le lait.

● *Pectinases*. D'origine fongique *(Aspergillus, Penicillium)*, elles servent à clarifier les jus de fruits lors d'une filtration; elles sont efficaces seulement quand les matières pectiques ont été précipitées. On arrive aussi à concentrer des jus de fruits ou à les réfrigérer sans qu'ils se prennent en masse. Ces pectinases évitent la fermentation des grains de café avant torréfaction, car elles dissolvent les mucilages qui entourent ces grains.

● *Lipases*. Provenant de souches du genre *Rhizopus*, elles servent surtout à dégraisser les laines.

● *Glucose oxydase et catalase*. Ce mélange d'enzymes fongiques *(Aspergillus niger, Penicillium notatum)* sert à éliminer le glucose pour éviter le brunissement de certains produits alimentaires conservés sous forme de poudre (poudre d'œuf).

● *Naringinase*. Synthétisée par une souche d'*Aspergillus niger*, elle permet de supprimer l'amertume du jus de certaines variétés d'oranges contenant de la naringine.

— *Applications médicales des enzymes microbiennes*

Elles sont nombreuses. On peut utiliser les enzymes microbiennes pour suppléer une déficience dans la production d'enzymes digestives. Ainsi, des amylases fongiques résistantes à l'acidité *(Aspergillus niger)*, souvent associées à des cellulases *(Trichoderma viride)*, sont un remède contre les fermentations intestinales; des lipases fongiques *(Aspergillus oryzae, Candida lipolytica)* compensent une déficience en lipases pancréatiques; une lactase fongique intervient dans la préparation de produits lactés ne provoquant pas d'accidents d'intolérance au lait, fréquents dans les populations des régions en voie de développement (en effet, par suite d'un manque de β galactosidase, le lactose non hydrolysé n'est pas absorbé par la muqueuse intestinale et provoque des fermentations gazeuses dans le gros intestin).

Comme la L asparaginase est injectée par voie intraveineuse, pour éviter des réactions immunologiques au cours d'un traitement de longue durée, on en prépare à partir de plusieurs souches appartenant à des genres distincts.

Les enzymes purifiées provenant d'une souche de streptocoques hémolytiques sont utilisées, par perfusion, pour traiter des cas graves (infarctus, embolies) lors d'accidents cardio-vasculaires.

Une collagénase purifiée, provenant d'une souche de *Clostridium histolyticum*, élimine les tissus morts ou infectés dans les cas d'ulcères de la peau ou de graves brûlures.

Une urate oxydase, préparée à partir d'une culture d'*Aspergillus flavus*, permet de traiter les dépôts d'acide urique (maladie de la goutte) en les solubilisant progressivement.

On peut retenir qu'il existe divers modes d'utilisation des enzymes microbiennes. Le plus simple consiste à faire agir l'enzyme sur un substrat soluble, dans des conditions bien déterminées (température, pH, concentrations); ensuite, on recueille le produit résultant de la réaction recherchée.

Mais l'enzyme ne peut servir qu'une seule fois. C'est pourquoi on a eu l'idée d'insolubiliser les enzymes en les fixant de diverses manières. Il existe une méthode simple pour obtenir, en continu, du fructose à partir d'une solution de glucose : à partir de xylanes se trouvant dans le son de blé, *Streptomyces albus* produit une glucose isomérase intracellulaire stable à la chaleur; on peut donc réaliser une colonne de cellules tuées par chauffage et faire fonctionner le système en continu.

Transformation biochimique de composés définis

C'est dans le domaine des stéroïdes que les micro-organismes ont eu une action particulièrement spectaculaire au cours de ces dernières années. Les stéroïdes sont des substances ayant un squelette commun : le noyau perhydro 1-2 cyclo pentano phénanthrène.

C. Bevilacqua

▲ ***Des souches de* Penicillium *servent à préparer diverses enzymes fongiques, notamment des pectinases et de la glucose oxydase plus de la catalase.***

Il existe des stéroïdes microbiens (ergostérol), végétaux (diosgénine), animaux (cholestérol, acides biliaires, hormones du cortex surrénal et hormones sexuelles). C'est pourquoi, on a eu l'idée d'utiliser des stéroïdes comme agents thérapeutiques puisqu'ils étaient des régulateurs du métabolisme animal. C'est ainsi qu'on a mis en évidence l'action bienfaisante de la cortisone, qui réduit l'inflammation dans le cas des maladies de peau et des arthrites rhumatismales. Pour ce faire, la présence d'un groupement oxygéné sur le carbone 11 était essentielle; la synthèse chimique exigea deux ans de travail pour obtenir de la cortisone à partir de l'acide désoxycholique; il fallait effectuer 32 réactions différentes, dont 12 simplement pour faire passer un atome d'oxygène de la position 12 (acide désoxycholique) à la position 11 (cortisone ou hydrocortisone). Le rendement de cette synthèse chimique était très faible : on obtenait 1 kg de cortisone pour 500 kg d'acide désoxycholique.

En 1952, Peterson découvrit un Champignon, *Rhizopus nigricans*, capable de réaliser cette réaction, en transformant la progestérone en 11 α hydroxyprogestérone. Or, la progestérone est obtenue facilement et à bon marché par synthèse chimique à partir de la diosgénine, un alcaloïde végétal abondant. Cette découverte ouvrit la voie aux *bioconversions* de stéroïdes.

Ces transformations microbiennes simples et bien définies d'un type de structure chimique à un autre type voisin, appelées *bioconversions*, sont nombreuses et variées et font intervenir des micro-organismes différents suivant les réactions. En pratique, elles servent surtout à préparer des substances anti-inflammatoires ne présentant pas les inconvénients de la cortisone en ce qui concerne le pouvoir de rétention des sels. Il existe plusieurs méthodes pour réaliser ces bioconversions. On peut, par exemple, cultiver le micro-organisme dans un milieu convenable, puis recueillir les cellules microbiennes (après filtration ou centrifugation), les laver et les remettre en suspension dans une solution-tampon. On ajoute alors le stéroïde à transformer, dissous dans un solvant approprié, miscible dans l'eau (éthanol, acétone); la transformation s'effectue en quelques heures dans une cuve aérée et agitée, maintenue à température convenable; on suit la transformation par des prélèvements et des analyses chromatographiques. Quand elle est terminée, on extrait le stéroïde bioconverti par un solvant non miscible dans l'eau (chloroforme). Après évaporation, on reprend par d'autres solvants pour des cristallisations successives. Le rendement se situe entre 60 et 95 %.

Épuration des eaux résiduaires

Les quantités d'eau utilisées pour entraîner tous les déchets domestiques et industriels sont énormes. Selon la source d'énergie utilisée, les micro-organismes intervenant dans l'épuration des eaux peuvent être classés en trois groupes : les *phototrophes*, les *chimiolithotrophes* et les *chimio-organotrophes*.

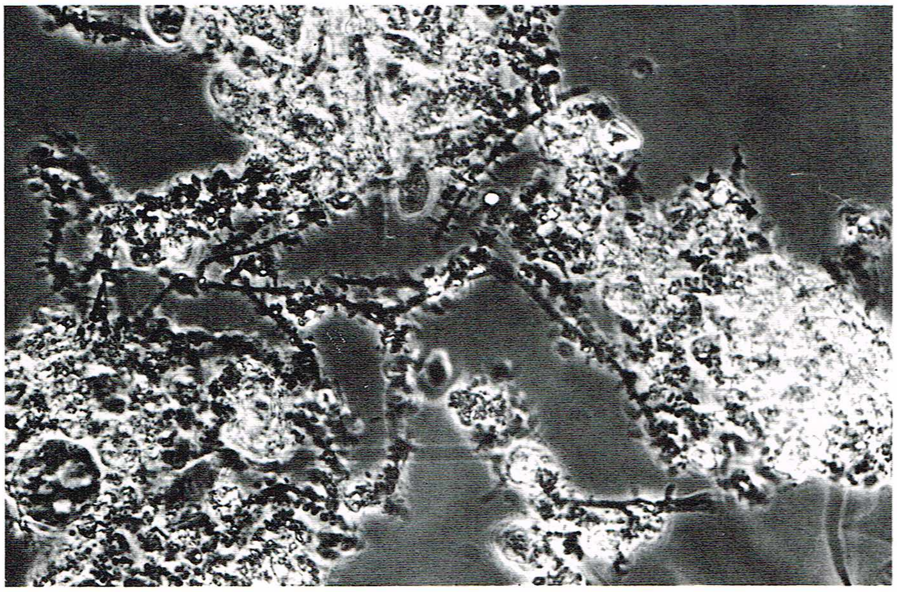

J. Rivière

▲ *La technique des boues activées comme procédé d'épuration biologique demande une bonne floculation ; ici, détail d'un floc.*

Méthodes servant à établir des normes de pollution

Il existe deux mesures différentes.

— *La demande biochimique en oxygène (DBO_5).* C'est la quantité d'oxygène dissous nécessaire pour assurer la dégradation par voie biologique des matières organiques présentes dans un litre d'eau à 20 °C pendant cinq jours. Pour la déterminer, on dilue l'échantillon à doser dans de l'eau saturée en oxygène, et on laisse incuber cinq jours à 20 °C, dans l'obscurité (pour éviter la prolifération des Algues). Une fois cette durée écoulée, on dose par iodométrie l'oxygène restant. On admet que la DBO_5 ne représente que les 2/3 de la demande totale en oxygène des eaux usées domestiques, car la consommation d'oxygène peut durer plusieurs mois.

— *La demande chimique en oxygène (DCO).* C'est la quantité d'oxygène consommée par les matières réductrices contenues dans l'eau. On oxyde ces substances avec un excès de bichromate de potassium en solution sulfurique et on dose l'excès par une solution de sel de Mohr.

Procédés d'épuration biologique

Ils ont pour but de limiter le rejet des matières organiques dans le milieu. Il s'agit de minéraliser une partie des matières organiques (CO_2, CH_4, NO_3^-), tandis que le reste sert à favoriser la croissance des cellules microbiennes éliminées sous forme de boues. Cette épuration est normalement réalisée dans la nature (auto-épuration), améliorée (épandage) ou artificielle.

— *Épandage.* Étant donné que le déversement des eaux usées dans les cours d'eau ne permet pas d'en épurer de grandes quantités, on a eu l'idée de les répandre directement sur le sol pour profiter de l'action des microbes et des plantes qu'il contient.

— *Lagunage.* Il s'agit d'une retenue des eaux à traiter, formant un bassin de stabilisation ou d'oxydation, dans lequel les effluents séjournent pendant une période variant de quelques jours à plusieurs semaines.

— *Boues activées.* On trouve beaucoup de Bactéries chimio-organotrophes aérobies et anaérobies facultatives (10^{10} par ml) ; une espèce particulière, *Zoogloea ramigera,* forme, en culture pure, des zooglées en doigt de gant. Il y a peu d'Algues, de Champignons ou de Bactéries de la nitrification. Par contre, les Protozoaires sont nombreux (50 000/ml) : ils représentent près de 5 % des matières en suspension ; ce sont surtout des Ciliés, dont près d'un tiers sont des Péritriches *(Vorticella) ;* ces Ciliés consomment les Bactéries libres dans le milieu et sont responsables de la limpidité des effluents ; une bonne floculation est indispensable pour obtenir un effluent clair et récupérer des boues, que l'on évacue après décantation.

— *Lits bactériens classiques.* Les micro-organismes responsables de l'épuration se fixent sur les matériaux poreux, formant des masses gluantes ou zooglées et réalisant un véritable film biologique.

— *Digesteurs anaérobies.* Ce sont des enceintes closes, habituellement cylindriques, comportant un système d'agitation et un système de chauffage ; on y traite les boues ou des effluents très concentrés (déjections animales) ; il s'y produit des fermentations complexes.

Conclusion

Il existe encore relativement peu d'applications industrielles par rapport aux énormes potentialités des micro-organismes. Mais nous ne sommes qu'au début de leur utilisation ; en effet, la demande d'un grand nombre de produits qu'ils peuvent élaborer ne s'est encore manifestée que dans des applications limitées au laboratoire (c'est le cas de la pénicillinase). On a envisagé leur emploi comme source de protéines alimentaires pour pallier une pénurie mondiale, mais ils pourraient également servir de source de matières grasses si ces dernières venaient à manquer. Certains envisagent même d'inoculer des gisements de pétrole avec des Bactéries susceptibles de se développer en diminuant la viscosité ou en augmentant la pression pour obtenir une récupération secondaire. Dans ces conditions, l'exploitation industrielle des micro-organismes a un grand avenir devant elle.

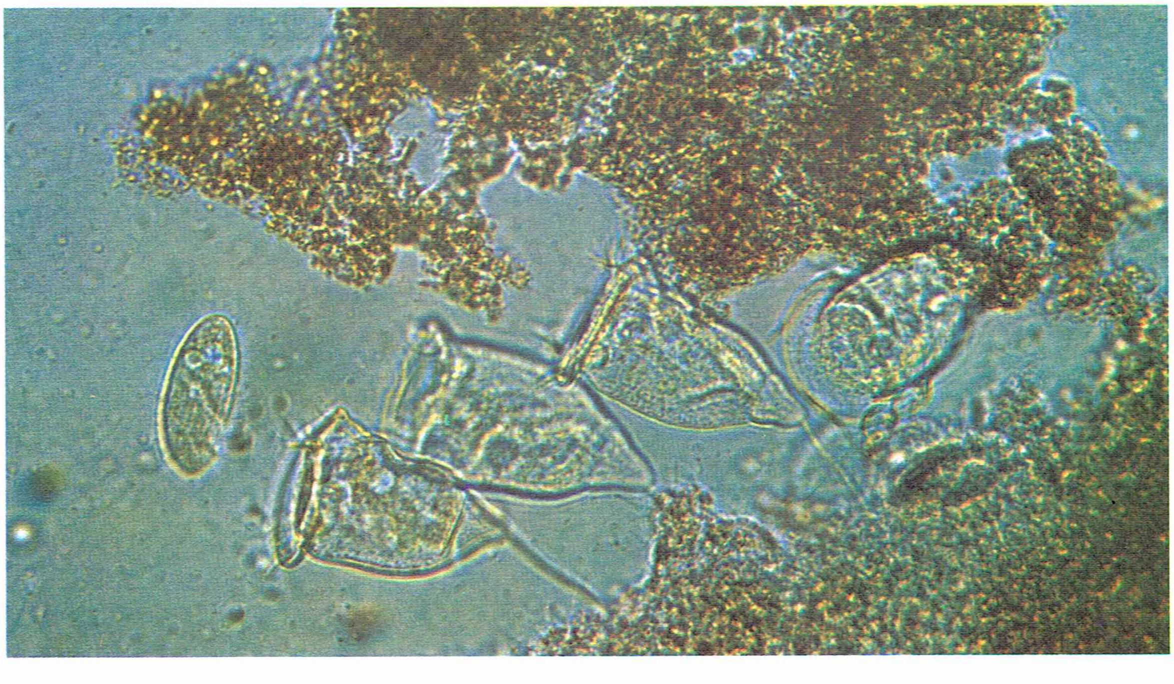

K. Ross - Jacana

▶ *Les* Vorticella *consomment les Bactéries libres dans le milieu et sont responsables de la limpidité des effluents.*

ENCYCLOPÉDIE DES SCIENCES

BIOLOGIE III

GRANGE BATELIÈRE

GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

BIOLOGIE

III

GRANGE BATELIÈRE, PARIS - ÉDITIONS KISTER, GENÈVE - ÉRASME, BRUXELLES-ANVERS

Publiée sous le haut patronage de :
Messieurs les professeurs :
Jean DORST, membre de l'Institut,
Charles FEHRENBACH, membre de l'Institut,
Roger HEIM, membre de l'Institut,
Monsieur l'amiral André JUBELIN,
Messieurs les professeurs :
Pierre LÉPINE, membre de l'Institut,
Louis LEPRINCE-RINGUET, de l'Académie française,
Jean-François LEROY, professeur au Muséum national d'histoire naturelle,
Henri NORMANT, membre de l'Institut,
Monsieur Jacques PICCARD, docteur ès sciences h.c.

Réalisation	IDÉES ET ÉDITIONS 16, avenue de Friedland, 75008 Paris
Comité de direction	Cristobal de ACEVEDO, Simone DEVAUX, Uberto TOSCO.
Rédaction	Patrick PHLIPONEAU, Françoise MENU, Marie-Noëlle RENARD, Vanina DORÉ.
Recherche de l'illustration	Mathilde RIEUSSEC.
Mise en pages	Tito TOPIN et Serge BROCHE.
Illustrations techniques	Richard COLIN.
Coordinateur des dessins	Mario LOGLI.
Fabrication	Sylvie MARCHAND, Jocelyne DUCHESNE, Jocelyne TÉPÉNIER.
Directeur de la publication	J.-P. BRÉVOST.

Ph. Marka

Ont collaboré à ce volume :

pour la biogéographie :

A. BEAUMONT, pour la distribution géographique des animaux.

M. GUÉDÈS, pour la distribution géographique des végétaux.

pour l'écologie :

E. DUHOUX, pour les milieux d'eau douce.

J.-C. GODINEAU, pour le milieu marin.

A. GRJEBINE, pour le milieu terrestre p. p. (forêts tropicales, savanes, steppes, déserts).

J.-J. LAZARE, pour les communautés.

C. SOUCHON, pour les facteurs écologiques, l'écologie des populations, l'écosystème et son fonctionnement, les cycles biogéochimiques, le milieu terrestre p. p., l'écologie appliquée à la gestion des ressources naturelles.

pour l'éthologie :

G. RICHARD.

pour la paléobiogéographie :

A. BEAUGRAND, F. DENIEL, G. PLAZIAT, D. TURKI ZAGHBIB et L. VAN EGROO.

pour l'évolution :

A. TÉTRY.

pour l'homme et l'évolution humaine :

J.-L. HEIM.

pour la préhistoire :

L. BALOUT.

Ostman - J. R. Simon

LA BIOGÉOGRAPHIE

Distribution géographique des animaux

Chaque espèce animale ou végétale occupe actuellement à la surface du globe une *aire de répartition* dont les limites sont imposées par des facteurs du milieu qui s'opposent à son extension. La délimitation de ces aires spécifiques constitue un premier aspect, dit *chorologique,* de la *biogéographie,* science de la distribution géographique des êtres vivants. Mais dans son aire de répartition, chaque espèce cohabite avec d'autres espèces animales ou végétales rassemblées par l'attraction qu'exercent sur elles certains facteurs du milieu. L'étude de ces *communautés* d'organismes du point de vue de leur composition taxonomique, de leur extension géographique, de leur origine et de leur évolution constitue un deuxième aspect, dit *biocœnotique,* de la biogéographie.

Les régions biogéographiques continentales

S'il était possible de porter sur une même carte toutes les aires spécifiques connues, on constaterait que leur distribution n'est pas quelconque. Il apparaîtrait des territoires où les limites sont rares, séparés par des zones où elles sont particulièrement nombreuses. Ces dernières zones, critiques, marquent les limites de territoires dont le peuplement animal et végétal présente une certaine similitude, caractérisée par la présence exclusive ou quasi exclusive de certaines unités taxonomiques (espèces, genres, voire familles et même ordres). La surface du globe est ainsi partagée en grandes régions biogéographiques continentales et maritimes. La définition des régions maritimes, délicate et peu nette, ne sera pas envisagée ici. Par contre, trois grandes régions biogéographiques continentales : l'Arctogée, la Néogée et la Notogée, sont généralement acceptées ; elles sont, à leur tour, subdivisées en territoires d'étendue plus restreinte.

● L'*Arctogée* comprend trois grandes régions :

— La *région holarctique,* ou *boréale,* couvre classiquement les terres situées au nord du tropique du Cancer (Amérique du Nord, Afrique au nord de l'Atlas, Eurasie au nord de l'Himalaya). Elle est caractérisée par l'absence complète de groupes zoologiques entiers, qui semblent exclus surtout par le climat : Mammifères Édentés, Proboscidiens, Lémuriens, Reptiles Crocodiliens, Amphibiens Apodes. Les singes et les Marsupiaux sont à peine représentés, les Reptiles sont relativement rares. Par contre, sont caractéristiques : les Urodèles, plusieurs Rongeurs

▲ ***La** biogéographie **est la science de la distribution géographique des êtres vivants; ici, un castor,** Rongeur **représentatif de la** région holarctique.*

▼ ***Planisphère des régions zoogéographiques.***

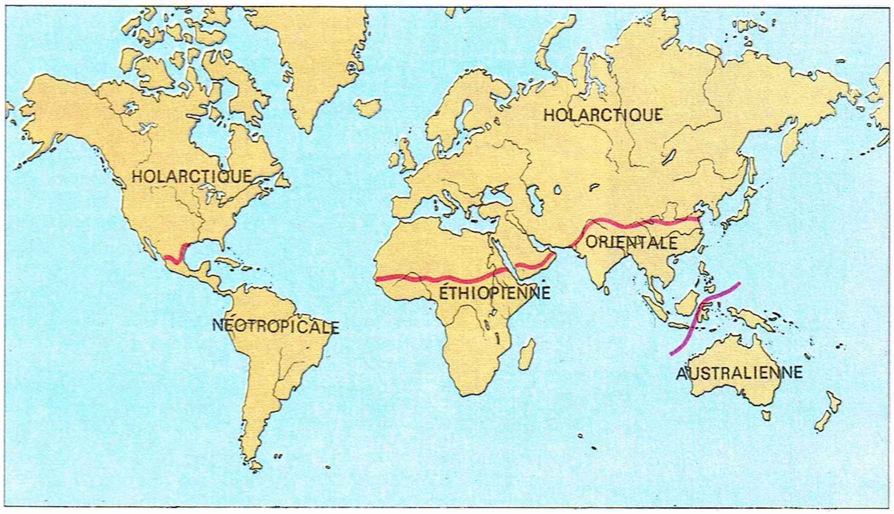

Bruce Coleman - S. C. Bisserot

T. Sacco

▲ *A gauche, le paon* (Pavo cristatus) *est un Phasianidé type de la* région indo-malaise *ou* orientale. *A droite, un lama guanaco* (Lama huanachus), *herbivore caractéristique de la* région néotropicale *(chaînes andines).*

▼ La région éthiopienne *ou* africano-malgache *couvre l'Afrique au sud de l'Atlas et Madagascar; elle possède en propre une famille d'Oiseaux, les touracos : ici,* Turacus leucotis.

J. Markham

(castors et *Ochotona*) et Insectivores (taupes), les esturgeons, les saumons et les brochets parmi les Poissons; les grands Ongulés n'y étaient pas rares avec des Équidés (chevaux, ânes), divers Suidés, Bovidés, Ovidés, Cervidés et Camélidés, mais très peu d'antilopes; les grands Carnivores sont surtout des Ursidés et des Canidés; les Téléostéens Cyprinidés dominent en eaux douces.

Cette région se subdivise en sous-régions *arctique* (Amérique du Nord et Eurasie), *euro-sibérienne, aralo-caspienne* et *chinoise* (Eurasie), *sonorienne, est-* et *ouest-américaines* (Amérique du Nord), *méditerranéenne.*

— La *région indo-malaise,* ou *orientale,* couvre tout le Sud-Est asiatique (Indes, Indochine, Malaisie) au sud de l'Himalaya. Ses limites occidentales et surtout orientales sont floues et discutées : classiquement, on admet que la ligne Wallace la sépare des Philippines, des Célèbes et de Lomboch, régions rattachées à la région australienne. Elle partage avec l'Afrique de nombreux groupes zoologiques : pangolins, rhinocéros, éléphants, Bovidés, Lémuriens; les espèces sont toutefois différentes, et l'on n'y connaît aucune antilope. Elle possède aussi en propre un important contingent de représentants dont les phylums se sont développés dans la région holarctique, au Tertiaire, et qui ont été refoulés dans le Sud-Est asiatique par le refroidissement du climat : gibbons, tarsiers, galéopithèques. La facilité des communications avec la région holarctique explique également la présence de genres communs ou apparentés : ours, sangliers, buffles, cerfs. Parmi les Oiseaux, les Gallinacés sont importants, notamment les Phasianidés (faisans, paons, coqs). On trouve encore beaucoup de Reptiles (parmi lesquels les gavials et les dragons volants sont à peu près endémiques), ainsi que des Amphibiens, mais pas d'Urodèles.

— La *région éthiopienne,* ou *africano-malgache,* couvre l'Afrique au sud de l'Atlas et Madagascar. Elle présente des affinités fauniques faibles avec l'Amérique du Sud, mais marquées avec l'Asie tropicale du fait de la permanence de leurs communications terrestres, dont l'isthme de Suez n'est plus qu'un étroit vestige.

Les régions africaines de forêt dense, aujourd'hui localisées au voisinage de l'équateur et très isolées des forêts tropicales asiatiques, étaient reliées à celles-ci au Tertiaire par un pont forestier au Proche-Orient, aujourd'hui disparu. D'où la présence de nombreuses familles communes, comme les singes Anthropomorphes, les Lémuriens Lorisinés, les pangolins, les chevrotains, les éléphants, mais avec peu de genres et surtout d'espèces communes. L'isolement ancien des deux régions se traduit également par l'absence de certains groupes dans l'une ou l'autre. Ainsi, l'Afrique tropicale forestière a en propre une famille d'écureuils, les anomalures, une famille d'Oiseaux, les touracos, et est également riche en tisserins et pies-grièches.

Contrairement aux régions forestières, les immenses régions de steppes et de savanes africaines ont été en continuité avec celles d'Asie jusqu'au Pléistocène récent, c'est-à-dire jusqu'à la désertification postglaciaire du Sahara et du Proche-Orient. D'où des affinités très nettes que présentent divers Ongulés des deux continents : antilopes, rhinocéros, éléphants, et le guépard. Cependant, la faune des savanes africaines est riche en groupes endémiques : babouins, girafes, okapis, zèbres, hippopotames, oryctéropes, potamogales. Il s'agit d'une endémicité relictuelle : la répartition de certains de ces animaux a été beaucoup plus large (girafes connues au Pliocène inférieur en Chine, en Inde, en Iran et en Grèce).

● La *Néogée,* ou région *néotropicale,* correspond à l'Amérique centrale et du Sud. Son originalité faunique est liée à son isolement de l'Amérique du Nord (et peut-être aussi de l'Antarctique et de l'Afrique) du début du Tertiaire jusqu'au Pliocène, et à son rattachement à l'Amérique du Nord au Pliocène par un pont intercontinental, dont l'isthme de Panama est le témoin actuel. Au cours de son long isolement, des formes nouvelles sont apparues et sont restées localisées à l'Amérique du Sud (Mammifères Édentés Xénarthres, singes Platyrhiniens); des phylums particuliers de certains groupes se sont épanouis (Notongulés, Litopternes, presque inconnus en Amérique du Nord). Au Pliocène, ce peuplement archaïque et original a été perturbé par l'invasion d'une faune holarctique comprenant beaucoup de Carnivores, (comme les jaguars et les pumas), les tapirs, les lamas (guanacos et vigognes), les pécaris, des Cervidés, des ours, les coatis. Cet apport a été suivi d'un appauvrissement spectaculaire de la faune autochtone, dû en partie à une concurrence avec des groupes ayant les mêmes niches écologiques.

En conclusion, la Néogée ne présente pas de Ruminants cavicornes, de rhinocéros, de hyènes, de Viverridés; les Insectivores y sont rares. Parmi les Poissons, les Cyprinidés, si répandus ailleurs, manquent totalement.

● La *Notogée* englobe surtout la région australienne (Australie, Nouvelle-Guinée, Moluques et Célèbes), à laquelle on peut rattacher quelques régions insulaires pacifiques discutées (néo-zélandaise, polynésienne et hawaïenne) et une région antarctique.

La *région australienne* est caractérisée par son isolement géographique ancien, qui remonte au moins au début du Tertiaire, et par un plateau continental commun et peu profond : la plate-forme du Sahul, qui fut émergée

au Pliocène et au Pléistocène et permit des apports d'éléments fauniques indo-malais. De cet isolement, la région australienne a gardé une faune archaïque et fortement endémique, caractérisée par les Mammifères Monotrèmes et Marsupiaux, les oiseaux-lyres et l'émeu, les lézards Apodes Pygopidés et le Dipneuste *Neoceratodus*.

La *Nouvelle-Zélande*, qui n'a jamais été reliée à l'Australie, a subi un isolement prolongé qui se traduit par une très forte endémicité de la faune : citons, entre autres, les Reptiles Rhynchocéphales représentés par le seul *Hatteria* et les Oiseaux Ratites (kiwi, *Dinornis* subfossile).

La *région antarctique* recouvre les terres situées au-delà de 45° de latitude sud, c'est-à-dire les îles océaniques australes (Kerguelen, Amsterdam, Tristan da Cunha, Géorgie du Sud, Falkland, etc.), le sud de la Patagonie et le continent antarctique. Elle est caractérisée par un endémisme marqué et surtout par une très grande pauvreté comparativement aux terres arctiques.

Les communautés d'organismes

Les organismes de notre biosphère vivent en commun, formant des ensembles plus ou moins complexes où cohabitent animaux, végétaux et micro-organismes liés par un réseau d'interactions. Le terme de *biocœnose* a été créé par Mobius, en 1877, pour désigner un groupement d'êtres vivants « rassemblés par l'attraction qu'exercent sur eux les divers facteurs du milieu ». Une biocœnose est caractérisée par une composition faunique et floristique déterminée, et occupe un espace défini, appelé *biotope*. La biocœnose et son biotope sont deux éléments inséparables qui réagissent l'un sur l'autre pour produire un système plus ou moins stable, appelé *écosystème*. Ce terme peut être appliqué à des biocœnoses et des biotopes d'extensions géographiques très variables : un tronc d'arbre mort de nos forêts est un *micro-écosystème ;* la forêt à laquelle ce tronc d'arbre appartient est un *méso-écosystème ;* l'ensemble des forêts à feuilles caduques est un *macro-écosystème*, ou *formation*, ou encore *biome ;* l'ensemble des formations terrestres (forêts de toutes sortes, formations herbacées, toundras, déserts) est un *méga-écosystème*, ou *communauté*. Nous envisagerons ici successivement les communautés terrestres, marines et d'eaux douces.

Seront données les caractéristiques essentielles de ces communautés, notamment en ce qui concerne leur composition faunique. Dans le chapitre consacré à l'écologie, nous reviendrons sur ce sujet sous la rubrique « Les grands biomes et leur fonctionnement en tant qu'écosystèmes ».

Milieux et communautés terrestres

Le milieu terrestre en général est relativement peu favorable à la vie animale. Il exige en effet : une rigidité du corps suffisante pour vaincre la pesanteur ; la capacité de respirer l'air atmosphérique ; une certaine souplesse d'adaptation à la sécheresse et aux variations de température ; une fécondation interne et un développement sans larves aquatiques. Ces exigences sont remplies dans quatre groupes zoologiques : les *Vertébrés Amniotes* (Reptiles, Oiseaux, Mammifères), les *Arthropodes* (sauf les Crustacés), les *Gastéropodes Pulmonés* et les *Annélides Oligochètes*. Toutefois, bien d'autres groupes zoologiques ont des représentants terrestres apparentés à des genres ou des espèces aquatiques : divers Planaires, Némertes, Hirudinés des régions tropicales humides, certains Gastéropodes Prosobranches (Cyclostomes), quelques Crustacés et divers Amphibiens vivipares (salamandre noire des Alpes) ou ovipares à développement direct (hylode de la Martinique). Enfin, certains animaux terrestres à l'état adulte conservent une ponte et un développement larvaire en milieu aquatique : les Amphibiens et certains Crustacés Décapodes exotiques (les crabes *Geocarcinus* et *Cardisoma*, les pagures *Birgus* et *Cenobita*, l'écrevisse *Engaeus*).

Les forêts

Ce sont des formations végétales fermées, c'est-à-dire couvrant le sol d'une façon continue au niveau des couronnes des arbres, sans laisser voir de taches de sol nu. La *végétation* se présente en *trois strates principales :* une strate supérieure, *arborescente*, une strate moyenne, *arbustive*, et une strate inférieure, *herbacée*. Le sol forestier reçoit un apport continu ou saisonnier de feuilles et de débris végétaux morts, qui se décomposent sur place en produisant un *humus* caractéristique des essences productrices.

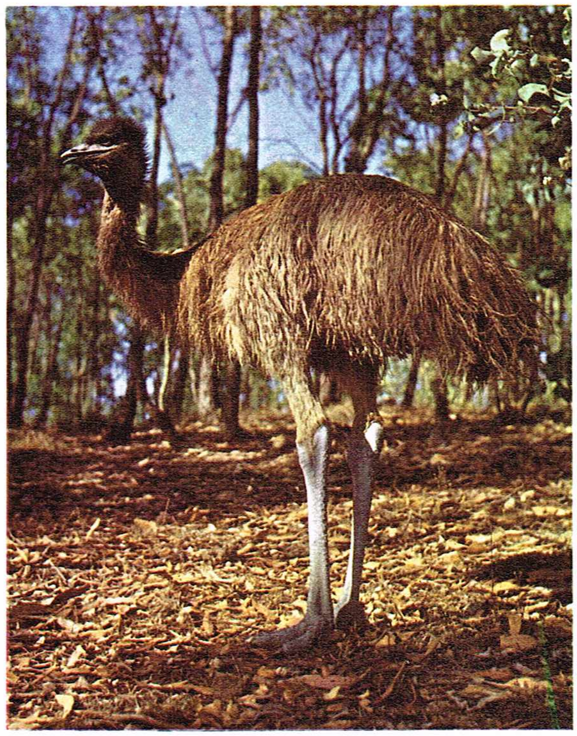

Bruce Coleman - J. Burton

◀ ***L'émeu, unique représentant de la famille des Dromicéiidés, habite exclusivement la région australienne.***

La faune des forêts s'est adaptée à ces conditions écologiques particulières. Si la voûte éclairée de la strate arborescente est richement peuplée d'Insectes, d'Oiseaux, de Mammifères adaptés à la vie arboricole, le peuplement animal de la surface du sol est peu dense et pauvre en grands Mammifères ; en revanche, la litière végétale et les sols forestiers sont très riches en détritivores (Oligochètes, Arthropodes divers), qui transforment plus de débris végétaux en humus qu'ils n'en consomment.

● *Les forêts tropicales*. Elles sont actuellement réparties en trois vastes domaines chevauchant l'équateur.

La *forêt du bassin de l'Amazone* est l'une des plus grandes du monde (7 millions de km^2) ; elle est plus étendue au sud qu'au nord de l'équateur ; à l'ouest, elle vient buter contre les chaînes andines, qu'elle gravit jusqu'à 2 000 m d'altitude.

La *forêt d'Afrique occidentale et centrale*, presque entièrement située au nord de l'équateur, est subdivisée en deux blocs par les savanes du Dahomey : la forêt guinéenne à l'ouest et la forêt congolaise à l'est.

La *forêt indo-malaise* est morcelée en plusieurs domaines : le pourtour de la plaine birmane, les côtes du Vietnam, Sumatra, Java, Bornéo, les Philippines, la Nouvelle-Guinée, le nord-est de l'Australie.

Le *climat* est caractérisé par la constance de la température, de l'ordre de 25 °C, et une humidité élevée, liée à une pluviosité énorme toujours supérieure à 1,50 m, répartie sur toute l'année au niveau de l'équateur, sur quelques mois seulement de part et d'autre de celui-ci.

La *végétation* y est d'une richesse exceptionnelle. Alors qu'il n'y a qu'une cinquantaine d'espèces d'arbres en France, il en existe 600 en Côte-d'Ivoire, 1 000 au Parana, 2 500 en Amazonie et 3 000 en Insulinde. Ils se répartissent à tous les niveaux, les plus grands émergeant isolément de la masse jusqu'à une hauteur de 40 à 50 m. La strate arbustive est mal individualisée et la strate herbacée assez clairsemée du fait de la densité du couvert, qui laisse pénétrer moins de 1 % de la lumière (Fougères, Graminées).

La *faune* est abondante et variée. Elle est surtout localisée à la voûte éclairée (couronnes d'arbres, lisières et bords des cours d'eau) aux dépens du sous-bois sombre : d'où une *vie arboricole dense* qu'on ne retrouve dans aucune autre forêt.

— Les *Mammifères arboricoles* et frugivores sont représentés essentiellement par les Primates, à mains

A. Visage - Jacana

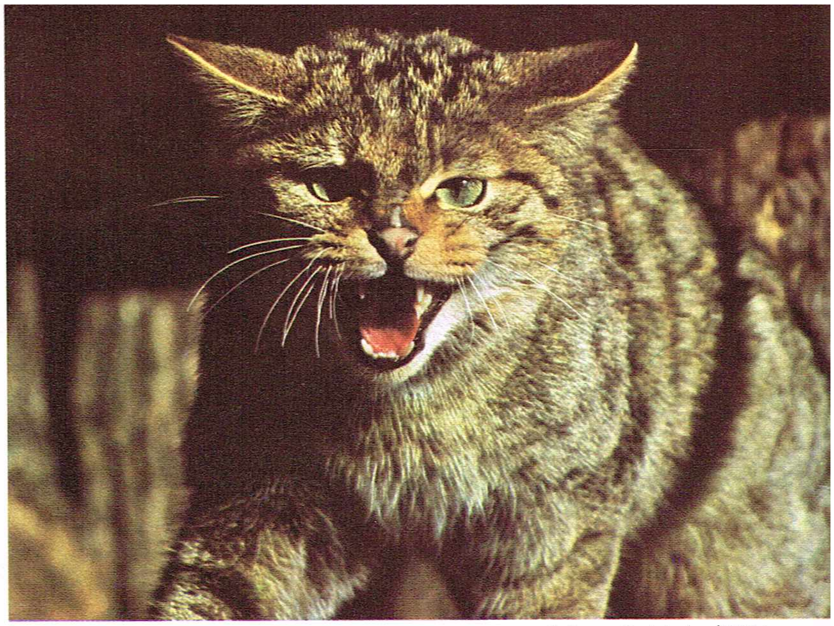

Arthus - Bertrand - Jacana

***▲ A gauche, la faune des forêts s'est adaptée à des conditions écologiques particulières; certains arboricoles américains, tel ce Procyonidé* (Potos flavus), *utilisent en outre leur queue préhensile pour s'accrocher aux branches. A droite, dans les forêts tempérées à feuilles caduques, vivent notamment des Rongeurs fouisseurs (souris, mulots) qui sont la proie des petits Carnivores, tel ce chat sauvage* Felis sylvestris.**

préhensiles : tarsier des îles de la Sonde, Lémuriens africains (galago et potto) et asiatiques (loris et nycticèbe) singes Catarhiniens Cynomorphes (cercopithèques et colobes) et Anthropomorphes (gorille et chimpanzé africains, gibbon et orang-outang asiatiques). Les arboricoles américains, à l'exception des paresseux suspendus par d'énormes griffes et si spécialisés qu'ils se traînent très difficilement à terre, utilisent en outre leur queue préhensile pour s'accrocher aux branches : tels sont les singes Platyrhiniens (singe-araignée, hurleur, capucin), le Rongeur *Coendu,* le fourmilier *Cyclops,* le Carnivore Procyonidé kinkajou, la sarigue *Metachirops.* De nombreux arboricoles indo-malais possèdent des replis cutanés s'étendant en planeur pendant le saut : les écureuils volants du genre *Pteromys* (quatorze espèces à Bornéo), le Lémurien *Microcebus,* le galéopithèque. Des adaptations similaires existent chez d'autres Vertébrés, tels le dragon volant où le repli cutané est tendu entre les côtes longuement saillantes, le gecko *Ptychozoon* muni d'une frange abdominale, la couleuvre *Chrysopelea* à l'abdomen aplati, la grenouille *Rhacophorus* dont les pattes largement palmées freinent la chute. Dans les arbres vivent aussi de grandes chauves-souris frugivores et surtout des Oiseaux, très variés et très colorés (calaos d'Afrique et d'Asie, perroquets, toucans, colibris d'Amérique), ainsi qu'une multitude d'Insectes : criquets, sauterelles, mantes, papillons, cigales, abeilles, fourmis, phasmes.

— *A terre,* les Mammifères vraiment forestiers, rares, sont représentés par quelques Ongulés : pécaris américains, tapirs américains et malais, babiroussa des Célèbes, phacochère, okapi, petites antilopes africaines, et, en Amérique du Sud, par des Rongeurs géants : cabiai, paca, agouti.

— *Dans la litière végétale,* abondante, grouillent de très nombreux Invertébrés, qui transforment les débris végétaux en humus. Il s'agit surtout d'Insectes, parmi lesquels dominent les Orthoptères, les Coléoptères, les termites et les fourmis. Abondent aussi des Arachnides et des Myriapodes, des Gastéropodes et diverses formes de Vers (partout ailleurs aquatiques) : des Planaires, des Hirudinés, des Némertes; on trouve même, à Java, une Annélide Polychète.

Les moustiques, abondants et variés (150 espèces sur une dizaine de kilomètres en Colombie), se répartissent à différentes hauteurs. Beaucoup sont des vecteurs de maladies graves et ont longtemps empêché la pénétration humaine. Parmi eux, les anophèles transmettent les hématozoaires du paludisme, les stégomyes le virus de la fièvre jaune, les simulies la filaire de l'onchocercose (qui entraîne la cécité), divers *Culex* la filaire de Bancroft (responsable de l'éléphantiasis). Les trypanosomes de la maladie du sommeil et la filaire loa-loa, qui provoque des tumeurs sous-cutanées, sont transmis par les piqûres de mouches, respectivement glossines ou tsé-tsé et taons.

● *Les forêts tempérées à feuilles caduques.* Essentiellement localisées à l'hémisphère Nord (à l'exception de la forêt patagonienne, à l'extrême sud du Chili), elles sont bien représentées en Europe occidentale et centrale (elles disparaissent en Sibérie), en Asie orientale (Corée, Chine du Nord-Est, sud du Japon) et en Amérique du Nord (forêt appalachienne de l'est des États-Unis).

La végétation y est nettement stratifiée : l'étage arborescent est fait de chênes, de hêtres, de charmes, d'érables; l'étage arbustif de houx, de cornouilliers, de noisetiers, de saules; le sous-bois herbacé ou buissonnant de Fougères.

Le climat, tempéré à influences océaniques (plus continental en Europe centrale), mais avec une saison froide marquée entraînant une période de repos de la végétation, ne permet pas l'installation d'une faune aussi riche que dans la forêt tropicale. D'autre part, la lumière n'a ici qu'un rôle secondaire, et la vie arboricole est limitée à quelques Rongeurs (écureuils et loirs en Europe, porc-épic au Canada), quelques Oiseaux (grimpereaux, pics) et les rainettes européennes. Les Mammifères terrestres sont des Cervidés (cerfs, chevreuils), des sangliers et des Rongeurs fouisseurs (souris, mulots) ; ceux-ci sont chassés par de petits Carnivores (chats sauvages, lynx, renards, putois, blaireaux). Les Insectes sont nombreux, surtout les xylophages (Coléoptères, Diptères, Hyménoptères), qui s'attaquent aux arbres morts ou malades. Ceux qui vivent dans le sol sont beaucoup moins abondants que dans les forêts tropicales et leurs groupes différemment représentés : les Collemboles et les thrips sont beaucoup plus nombreux, les fourmis beaucoup moins et les termites rares ou absents. Avec de très nombreux petits Invertébrés vivant dans la litière de feuilles mortes (Nématodes, Araignées, Acariens, Myriapodes), ils sont recherchés par des Mammifères insectivores (hérissons, taupes, musaraignes), des Oiseaux, des Reptiles (orvets, lézards) et des Amphibiens (crapauds, salamandres).

● *La forêt de Conifères boréale (taïga).* Limitée à l'hémisphère Nord, elle forme une immense ceinture continue dans les plaines américaines et eurasiatiques, entre les toundras au nord et les forêts tempérées à feuilles caduques ou les steppes continentales au sud. Elle se prolonge plus au sud, à la faveur des chaînes de montagnes, où elle constitue l'étage subalpin compris entre la toundra alpine d'altitude et la forêt feuillue.

Le climat continental, très rude, ne permet l'installation que d'une *végétation* monotone d'une grande simplicité floristique. L'étage arborescent est constitué exclusivement de Conifères : pins, sapins, épicéas, mélèzes; l'étage arbustif d'aulnes, de sorbiers, de cornouilliers; l'étage inférieur de Mousses et de Lichens.

La vie animale est relativement pauvre. Les arboricoles sont rares : on observe quelques écureuils et un porc-épic canadien. Les grands Ongulés herbivores sont des Cervidés (élan ou orignal, renne ou caribou, wapiti du Canada). Les Rongeurs terrestres (campagnols, lemmings, castors) sont la proie de Carnivores : loup, glouton, lynx, renards, vison, martres, belettes. Les Oiseaux sédentaires recherchent les Insectes xylophages sous les écorces, ou sont hautement spécialisés dans l'ouverture des cônes et l'extraction des graines : dur-bec du sapin, casse-noix moucheté, bec-croisé du sapin. La plupart émigrent l'hiver vers le sud.

Les formations herbacées

Ce sont des formations végétales ouvertes, c'est-à-dire laissant voir le sol entre les plantes, constituées essentiellement d'herbes et comprenant ou non des arbres. Elles se présentent sous forme de *savanes* dans les

régions intertropicales, de *steppes* dans les régions extratropicales.

● *Les savanes* existent sous tous les *climats tropicaux*, des plus humides aux plus secs. La pluviométrie y est toujours plus faible qu'en forêt dense (moins de 1 500 mm d'eau) ; l'hiver est marqué par une saison sèche de plusieurs mois, très chaude. La *strate herbacée* est dominée par une ou deux espèces de Graminées (*Andropogon*, *Pennisetum*, ou herbe à éléphants, *Imperata*, ou herbe à paillotes), formant un tapis dense de 1 m de hauteur (ou plus en saison des pluies). Elle est dominée par une *strate arbustive et arborescente* plus ou moins importante, représentée par des acacias, le baobab et le palmier rônier en Afrique, des cactées en Amérique du Sud, des euphorbes en Afrique orientale, des eucalyptus en Australie. En fait, les savanes sont extrêmement variées selon l'importance relative des herbes et des arbres et tous les intermédiaires existent entre la *savane boisée*, proche de la grande forêt équatoriale, et la *savane herbeuse*, dépourvue d'arbres.

La vie animale en savane est extraordinairement riche et la productivité naturelle en protéines y atteint le taux le plus élevé qui existe sur notre globe. L'abondance de la production végétale herbacée en saison des pluies permet une densité élevée de grands herbivores, tandis que l'absence de saison froide enlève de son importance à la population souterraine de Rongeurs, caractéristique des steppes.

— *Les Mammifères herbivores* sont surtout représentés par les grands Ongulés coureurs, vivant en troupeaux, particulièrement abondants en Afrique orientale : buffles, gazelles, antilopes, girafes, rhinocéros, zèbres, éléphants. Absents en Amérique du Sud, ils sont remplacés en Australie par les kangourous. Les savanes sont également le domaine des grands Ratites coureurs : autruches en Afrique, nandous en Amérique du Sud, émeu en Australie, casoar en Nouvelle-Guinée.

Tous ces herbivores sont la proie des *grands fauves*, qui les chassent à l'affût (comme le lion et les panthères d'Afrique, le jaguar d'Amérique du Sud, les tigres d'Indo-Malaisie), à courre (comme le guépard africain), ou en meutes (comme les lycaons d'Afrique et les cuons aux Indes). Les cadavres abandonnés sont dépecés par des charognards, comme les hyènes et les chacals. A ces Mammifères carnivores s'ajoutent une multitude d'Oiseaux Rapaces diurnes, qui chassent à découvert (aigles, milans, faucons, serpentaires) ou se nourrissent de charognes (vautours).

— Les savanes sont un milieu très favorable aux *Insectes*, particulièrement aux termites, aux fourmis et aux criquets. Les termites, qui s'attaquent aux arbres morts, sont les plus grands transformateurs de matière organique du globe. Ils édifient des termitières de forme différente selon les espèces, mais pouvant atteindre 3 à 5 m de hauteur et 30 à 35 m de diamètre à la base. Ces constructions modifient la morphologie de la surface du sol et nécessitent des déplacements énormes de terre (jusqu'à 1 200 m^3) qui bouleversent les sols, en modifient la composition minéralogique et le système hydrique.

Ces Insectes sont chassés par des Mammifères insectivores : pangolins et oryctérope en Afrique, fourmiliers en Amérique du Sud, fourmilier marsupial en Australie, et par de très nombreux Oiseaux sédentaires (ombrettes, pintades, tisserins, francolins, pies-grièches) ou migrateurs (cigognes, hirondelles).

● *Les steppes* se développent dans les régions tempérées de moyenne latitude à climat continental, caractérisé par un hiver rigoureux et sec et une fin d'été aride. A la différence des savanes, elles sont pratiquement dépourvues d'arbres. Dans l'hémisphère Nord, où elles sont particulièrement bien développées, elles forment la grande *steppe eurasiatique*. Dans l'hémisphère Sud, elles sont représentées par les *pampas argentines* et la *steppe patagonienne*, au sud du rio de la Plata.

La *vie animale* est nettement moins riche qu'en savane à cause du climat beaucoup plus rude. Les grands Ongulés herbivores ne sont représentés que par un petit nombre d'espèces plus ou moins en voie de disparition, du fait de l'exploitation des steppes par l'homme : le bison et *Antilocapra* dans la prairie nord-américaine ; deux Équidés (le cheval de Prjewalski et diverses variétés d'ânes sauvages, ou hémiones), l'antilope saïga en Eurasie ; le seul guanaco dans les pampas d'Amérique du Sud.

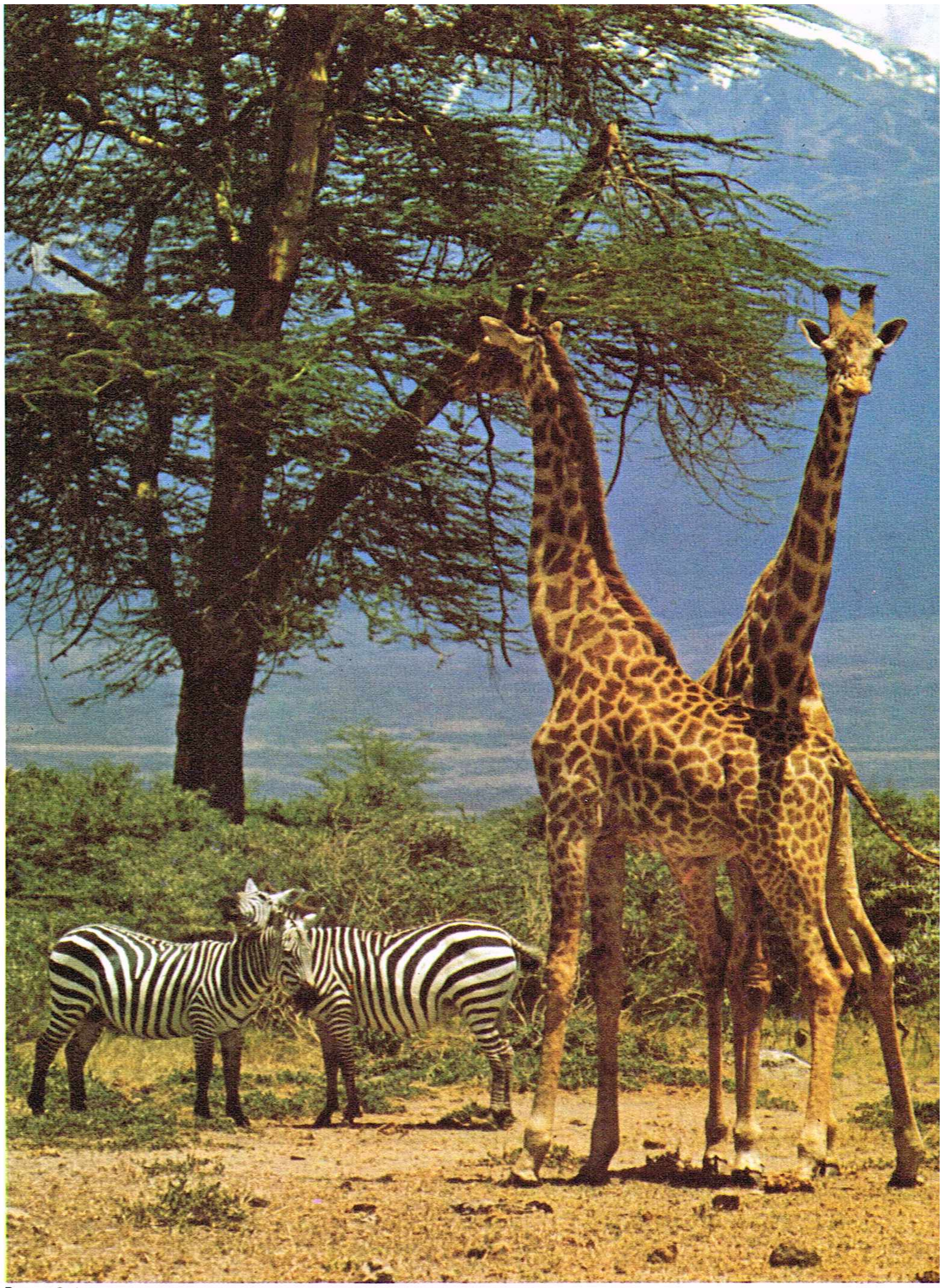

Bruce Coleman - N. Myers

▲ ***Les Mammifères herbivores africains sont surtout représentés par les grands Ongulés (zèbres, girafes, etc.), particulièrement abondants en Afrique orientale. Tous sont la proie des grands fauves.***

— Les *Oiseaux* sont relativement rares, faute d'arbres ; ils doivent nidifier à terre. La plupart, telles les grues, migrent avant la saison froide. Quelques-uns pourtant sont sédentaires et, bien que normalement ailés, sont adaptés à la course : c'est le cas des syrrhaptes, ou gangas, et des outardes d'Eurasie, des tétras et de la gelinotte d'Amérique du Nord. Ils chassent les Insectes, nombreux et variés : des Coléoptères coureurs, comme les Carabides et les Cicindélides, et surtout des Orthoptères, tel le criquet pèlerin, migrateur.

— L'abondance des *animaux fouisseurs* est certainement le caractère le plus frappant de la faune des steppes. Les *Rongeurs* occupent la première place, tant par le nombre des espèces que par celui des individus, et jouent un rôle considérable dans la modification du microrelief et de la composition physico-chimique des sols. Aux marmottes, spermophiles, hamsters, gerboises eurasiatiques correspondent les chiens de prairies en Amérique du Nord et les viscaches en Amérique du Sud. Ils sont chassés par divers Canidés (loup, renard), Félidés (chat ganté, manul) et Mustélidés (putois), ainsi que par des Oiseaux Rapaces (aigles, faucons, buses).

Les toundras

Les toundras correspondent aux terres polaires situées au-delà de la limite naturelle des arbres. Dans l'hémisphère Nord, cette limite coïncide pratiquement avec le cercle polaire arctique (latitude 66° 33'). Il n'y a pas de véritable toundra dans l'hémisphère Sud, où la limite des arbres atteint le 45^e parallèle au Chili et le 53^e en Nouvelle-Zélande. Dans les hautes montagnes des latitudes

Bruce Coleman - L. Lee Rue

▲ ***Groupe de bœufs musqués* (Ovibos moschatus) ; *ces animaux font partie de la faune, assez pauvre, des* toundras.**

moyennes, l'étage de végétation situé au-dessus de la limite des arbres présente tous les caractères d'une toundra, souvent appelée *toundra alpine*.

Le *climat* des toundras arctiques est très rude. Les hivers sont longs (trois mois de nuit polaire), froids, ventés ; les étés, brefs (la période sans gelée est inférieure à trois mois), froids (la moyenne du mois le plus chaud est inférieure à 10 °C), relativement secs (moins de 30 mm d'eau), ne permettent qu'un dégel très superficiel du sol (quelques décimètres) ; le sol profond reste gelé en permanence, ce qui empêche le drainage des eaux de fonte des neiges et provoque la formation de vastes marécages. La période de végétation active est donc très brève.

La *vie animale* dans les toundras n'est pas aussi pauvre que les conditions climatiques pourraient le laisser supposer : on connaît au Groenland 437 espèces d'Insectes, 124 Arachnides, 168 Oiseaux, 7 Mammifères terrestres. D'ailleurs, cette pauvreté relative de la faune ne s'explique pas uniquement par la dureté du climat. Elle correspond également à une colonisation inachevée par des éléments glaciaires refoulés au sud par les glaciations quaternaires et qui tentent encore actuellement de reconquérir les terres polaires libérées des glaces.

— Peu d'animaux *sédentaires* sont capables de rester sur place pendant le long hiver et d'y trouver leur nourriture : le bœuf musqué du Groendland et du Canada, quelques Rongeurs (campagnols et lemmings) et leurs prédateurs (renard et loup polaires), le lagopède, qui creuse un système de galeries sous la neige menant à des buissons où il trouve bourgeons et fruits ; enfin, on trouve de très nombreux Insectes qui demeurent en vie au-dessous de 0 °C pendant de longs mois et pullulent dès le dégel (mouches et moustiques).

— La plupart des animaux sont des *migrateurs* qui quittent la toundra à l'approche de l'hiver. Ainsi font le renne (Sibérie), ou caribou (Canada), l'élan, le plus grand des Cervidés actuels, de nombreux Rongeurs (écureuils, marmottes, castors, rats, souris, rats musqués, lièvre variable) et leurs prédateurs (renards et toute une cohorte de Mustélidés : martres, hermines, visons, belettes, gloutons). Les Oiseaux, nombreux et presque tous aquatiques, viennent hiverner dans nos régions. Parmi eux, se rencontrent presque tous les Ansériformes (cygnes, oies, canards, sarcelles), de nombreux Limicoles (chevaliers, barges, bécasseaux, pluviers), des pingouins, macareux, guillemots, des mouettes et des sternes.

Les déserts

Les déserts occupent 1/5 environ des terres. Ce sont des zones arides au climat très dur, très varié dans ses composantes, mais caractérisé surtout par une très grande sécheresse. Les vents, constants et souvent violents, l'insolation, souvent très forte (la température au sol peut atteindre 80 °C), assurent une évaporation intense. Le régime thermique est très varié en raison de l'extension des zones arides en latitude. L'hiver, rigoureux et peu enneigé dans les dépressions aralo-caspienne et centro-asiatique à climat continental, est frais dans les zones arides méditerranéennes. Les déserts proches de l'équateur sont constamment chauds, mais les nuits y sont généralement froides.

La *végétation* est par conséquent pauvre et clairsemée. Elle comprend : d'une part, des plantes annuelles ou vivaces très éphémères, qui germent ou croissent très rapidement après une pluie et fleurissent et fructifient en quelques semaines, voire quelques jours, puis se réduisent ensuite aux graines (plantes annuelles) ou aux parties souterraines (plantes vivaces) ; d'autre part, des plantes vivaces à organes aériens permanents, se présentant sous forme de buissons bas, souvent épineux.

La *faune des déserts* comprend des grands herbivores *migrateurs* venus des prairies avoisinantes (girafes, antilopes, autruches), et des animaux *sédentaires* capables de résoudre les deux problèmes essentiels posés par le climat désertique : l'*approvisionnement en eau* et la *protection contre la chaleur et la lumière*.

— Les *animaux obligés de boire de façon régulière* sont éliminés des déserts (c'est le cas de nombreux Mammifères qui ont pu vivre au Sahara quand il bénéficiait d'un climat humide : éléphant, rhinocéros, lion, panthère, aujourd'hui refoulés à sa périphérie) ou cantonnés autour des points d'eau permanents (par exemple, des chauves-souris, les singes patas de l'Aïr et cynocéphales du Tibesti, le hérisson du désert, enfin, le ganga et des pigeons bisets, qui ne s'écartent guère des oasis et des gueltas.

— Les *animaux qui boivent de façon irrégulière* et sont ainsi susceptibles de résister plus ou moins longtemps à l'absence d'eau sont des hôtes normaux des régions arides. Le dromadaire appartient à cette catégorie. Sa sobriété proverbiale lui permet de rester 60 jours sans boire en hiver, en mangeant uniquement des végétaux verts, deux semaines en été en consommant uniquement des végétaux secs. Il peut ainsi perdre 100 kg en 8 jours, mais peut aussi boire 100 l d'eau en 10 mn. L'économie de son eau est assurée par une extraordinaire résistance à la déshydratation (cette résistance lui permet de perdre 25 à 30 % de son poids sans dommage alors que l'homme ne peut en perdre que 10 %), par une homéothermie imparfaite (34 °C le matin, 41 °C l'après-midi), qui permet à la thermorégulation par sudation de ne se déclencher qu'au-delà de 41 °C, enfin, par une réduction des pertes d'eau au niveau des urines et des excréments. Les antilopes, autres que l'addax (gazelle dorcade, gazelle dama), et certains

Oiseaux surtout insectivores (corbeau du désert, alouette des déserts, pie-grièche grise, moineau blanc, divers traquets) ont également la possibilité de boire de façon très irrégulière.

— *D'autres animaux, enfin, ne boivent pas* (ou sont réputés tels); ils utilisent uniquement l'eau préformée contenue dans leurs aliments. Ce sont des herbivores, telle l'antilope addax, certains petits Rongeurs, comme les gerbilles africaines et les rats-kangourous américains. Ces derniers, privés d'eau pendant deux mois et nourris exclusivement de grains d'orge secs, non seulement survivent mais augmentent leur poids.

Les problèmes de la *chaleur* et de la *lumière* sont résolus par la suspension temporaire d'activité et par l'abri contre le rayonnement. Beaucoup d'animaux désertiques ont une activité nocturne (c'est le cas des Rongeurs, des Reptiles, de nombreux Insectes) ou présentent un sommeil prolongé en saison chaude (estivation), comme le hérisson du désert. Pendant le jour ou pendant la saison chaude, ces animaux se cachent dans un terrier (gerboises), sous les pierres, dans les fissures de rochers (serpents, lézards, Insectes), à l'ombre de rares plantes, ou bien encore s'éloignent du sol par perchage sur celles-ci (Oiseaux, certains lézards, sauterelles).

Milieux et communautés aquatiques

Le milieu aquatique en général est beaucoup plus favorable à la vie animale que le milieu terrestre.

— Sa *densité,* peu différente de celle de la matière vivante, permet la flottaison de petits organismes (plancton) et rend mécaniquement possible l'existence d'organismes si ramifiés qu'à l'air ils s'effondrent en pinceaux, comme les colonies d'Hydraires et de Bryozoaires, si mous qu'à terre ils s'aplatissent ou se déchirent, comme les méduses et les Céphalopodes planctoniques, si énormes qu'à terre ils s'écrasent et meurent, comme les grands Cétacés.

— Sa *viscosité* ralentit la chute des organismes planctoniques, surtout de ceux qui développent des expansions tégumentaires augmentant la surface de flottaison.

— Sa *chaleur spécifique* et sa forte conductibilité atténuent les variations thermiques et permettent l'installation de formes strictement sténothermes.

— Ses *mouvements,* en renouvelant l'air, l'oxygène et les matières nutritives, permettent l'installation d'une faune fixée, nourrie de particules flottantes.

— Si le facteur humidité n'intervient pas, l'*éclairement* est fortement modifié par l'absorption très rapide de la lumière solaire dans l'eau.

Milieu marin et communautés marines

A l'exception de quelques mers intérieures (Méditerranée, Baltique, mer Noire, mer Rouge), le milieu marin est caractérisé par sa *continuité,* sa *stabilité* et sa *salinité,* comprise entre 33 et 37 %.

Le *relief sous-marin* a une topographie générale assez constante qui permet de distinguer quatre régions : le *plateau continental,* qui correspond à la base immergée des continents, plus ou moins large selon les régions (en moyenne, 100 km), et s'enfonçant en pente douce (0,5 %) jusqu'à une profondeur moyenne de 200 m; le *talus continental,* plus incliné (5 %) et s'enfonçant jusqu'à 2 000 m environ; la *plaine abyssale,* qui constitue la plus grande partie du fond des océans (82,2 %) et s'enfonce insensiblement jusqu'à 6 000 m; la *zone hadale,* ou *ultra-abyssale,* correspondant aux plus grandes fosses (11 034 m près des îles Mariannes, dans le Pacifique).

Les régions peu profondes au-dessus du plateau continental constituent la province, ou zone, *néritique;* les eaux y sont agitées, alimentées en eaux douces, en sédiments et en matières organiques; le peuplement animal y est riche et varié. La province, ou zone, *océanique* recouvre les fonds dont la profondeur est supérieure à 200 m. Les eaux y sont plus stables du point de vue de leurs caractères physico-chimiques et assez pauvres en organismes.

Chacune de ces provinces comprend un domaine *benthique,* constitué par les fonds marins et peuplé par le *benthos* (l'ensemble des organismes liés au voisinage des fonds), et un domaine *pélagique,* constitué par l'énorme masse des eaux et peuplé par le *plancton* (l'ensemble des organismes flottants) et par le *necton* (l'ensemble des organismes nageurs).

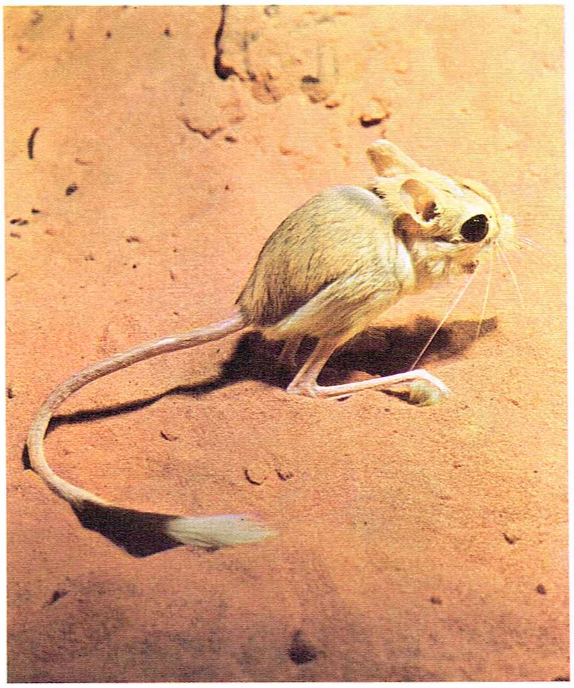

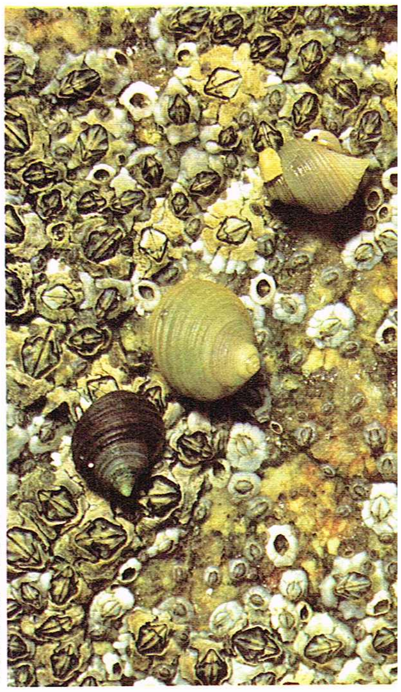

▲ ***A gauche, les problèmes de chaleur et de lumière qui caractérisent les déserts, sont résolus, pour les animaux, par une suspension temporaire d'activité et par l'abri contre le rayonnement; ainsi la gerboise* (Jaculus jaculus) *se cache le jour ou pendant la saison chaude dans un terrier. A droite,* Littorina saxatilis, *Gastéropode Prosobranche, est une espèce fréquente des* côtes rocheuses *des* étages supralittoral et médiolittoral.**

● *Le domaine benthique.* Péres et Picard, en 1961, l'ont subdivisé en sept étages sur la base de critères écologiques fondamentaux.

— L'*étage supralittoral* est situé au-dessus du niveau des plus hautes mers. Exceptionnellement submergé, il n'est atteint que par les embruns.

Sur les *côtes rocheuses,* il est recouvert par des Cyanophycées, des Lichens, des Gastéropodes Prosobranches (littorines, *Saxatila*), des Crustacés Isopodes (lygies) ou Décapodes (crabes des régions tropicales) capables de résister à une exondation prolongée.

Sur les *plages sableuses,* l'accumulation de débris végétaux assure l'implantation d'une faune détritivore abondante de Crustacés Amphipodes (talitres, *Orchestia*), Isopodes, Décapodes (crabes *Ocypode* et *Uca*), de Coléoptères Carabides et Ténébrionides, de Diptères.

— L'*étage médiolittoral* correspond à la zone de balancement des marées (zone intertidale). Il offre au benthos des conditions défavorables du fait de l'alternance régulière d'émersions et d'immersions. Les organismes benthiques doivent donc y être eurythermes, euryhyalins et résistants à la dessiccation ainsi qu'à la lumière, ou être capables d'éviter l'exondation.

Sur les *côtes rocheuses,* cet étage est ceinturé d'Algues (bleues, vertes, brunes) qui abritent de nombreux Invertébrés sessiles (Crustacés Cirripèdes du type balanes) ou vagiles, surtout représentés par des Gastéropodes Prosobranches (patelles, littorines, troques). Sa base est souvent occupée par des bancs d'huîtres et de moules dont se nourrissent des étoiles de mer et des Gastéropodes Prosobranches prédateurs (pourpres, murex).

Les *fonds sableux* qui retiennent l'eau à marée basse permettent aux animaux qui s'y enfouissent temporairement (divers Échinodermes, Crustacés et petits Poissons) ou qui y vivent en permanence (Annélides Polychètes, Mollusques, Gastéropodes et Lamellibranches) d'échapper à l'assèchement. Outre ces animaux de grande taille, le sable héberge une faune originale d'Invertébrés de petite taille (moins de 1 mm) vivant exclusivement dans les interstices des grains *(faune psammique)* constituée de Protozoaires Ciliés, de Rotifères, de Gastrotriches, d'Archiannélides, de Nématodes, de Copépodes, etc.

Les *fonds vaseux,* par la finesse du sédiment et leur oxygénation plus faible, ont une faune très différente de celle des sables; elle est pauvre en espèces (Annélide *Nereis diversicolor,* Lamellibranche *Mya arenaria,* Gastéropode *Hydrobia ulvae*) mais souvent riche en individus.

— L'*étage infralittoral,* exceptionnellement exondé, reçoit un éclairement suffisant pour permettre la vie d'Algues brunes (laminaires dont les thalles peuvent

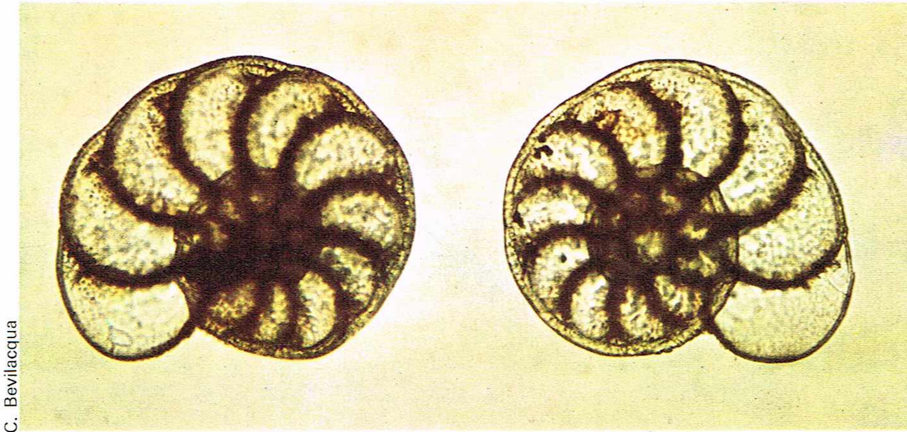

▲ ***Sur les* fonds rocheux *de l'*étage infralittoral, *les récifs coralliens sont des écosystèmes tropicaux qui abritent notamment des Foraminifères.***

dépasser 10 m) et de Phanérogames de la famille des Zostéracées *(Zostera, Posidonia, Cymodocea)* souvent étendues en prairies denses.

Sur les *fonds rocheux,* des Invertébrés coloniaux édifient des constructions calcaires : c'est le cas des serpules (Annélides), des vermets (Gastéropodes) et surtout des Madréporaires. Les récifs coralliens sont des écosystèmes tropicaux d'eaux chaudes, pures, agitées et très salées, qui abritent des Foraminifères, des Alcyonaires, des Bryozoaires, des Serpuliens, des Mollusques participant par leurs productions calcaires à la consolidation du récif édifié par les Madréporaires. Les anfractuosités du récif sont occupées par toute une série d'animaux : Échinodermes, Annélides, Crustacés, Poissons.

Les *fonds meubles* sont recouverts d'herbiers à zostères et posidonies, qui supportent ou abritent une faune variée.

— L'*étage circalittoral* s'étend jusqu'à la limite extrême des Algues les moins exigeantes vis-à-vis de l'éclairement (Algues rouges calcaires Mélobésiées), limite qui correspond approximativement à celle du plateau continental.

Sur les *fonds rocheux,* ces Algues encroûtantes constituent les formations, dites *coralligènes,* dont la surface et les cavités sont peuplées par des Spongiaires, des Cnidaires (gorgones, Alcyonaires, dont le corail rouge, Madréporaires), des Annélides Polychètes et des Bryozoaires.

Sur les *fonds meubles détritiques,* ces Algues dressées et rameuses constituent le *maërl,* utilisé comme engrais, abritant des Lamellibranches et des Échinodermes.

Les Annélides Polychètes dominent dans les *fonds vaseux.*

— L'*étage bathyal* correspond au talus continental et à la plaine abyssale jusqu'à 2 000 à 3 000 m.

Les *fonds rocheux* de l'Atlantique Nord portent une biocénose à grands Madréporaires coloniaux des genres *Amphelia* et *Lophelia,* dite à grands « coraux blancs ».

Les *fonds vaseux* sont peuplés de petits Lamellibranches *(Yoldia, Nucula, Chlamys)*, de Scaphopodes, de Spongiaires, d'Échinodermes et de Crustacés Décapodes.

— L'*étage abyssal* correspond à la plaine abyssale au-delà de 2 000 à 3 000 m ; il n'y pénètre aucune espèce du plateau continental ; les *fonds rocheux* sont très faiblement peuplés. Les *vases* abritent quelques Polychètes, Lamellibranches, Holothuries, Astérides.

— L'*étage hadal,* ou *ultra-abyssal,* représente les grandes fosses d'une profondeur supérieure à 5 000-7 000 m.

Les quelques Invertébrés benthiques qui y vivent (Holothuries, Actinies, Polychètes, Mollusques, Crustacés Amphipodes et Isopodes, Pogonophores) présentent généralement une remarquable réduction de leurs formations de soutien et un certain gigantisme, probablement consécutif à un accroissement de la durée de vie à ces basses températures.

● *Le domaine pélagique*

— Le *zooplancton* comprend, d'une part, des formes planctoniques *permanentes (holoplancton) :* Foraminifères, Radiolaires, Cnidaires, Cténaires, Rotifères, Chætognathes, Crustacés Copépodes, Tuniciers, et, d'autre part, des formes planctoniques *temporaires (méroplancton),* qui ne sont planctoniques que pendant une partie de leur cycle : œufs et stades larvaires de nombreux organismes benthiques (Cnidaires, Némertes, Bryozoaires, Polychètes, Mollusques, Crustacés, Échinodermes, Entéropneustes, Poissons).

Le zooplancton est répandu dans toute l'épaisseur des océans mais sa composition varie avec la profondeur. On distingue différentes zones.

La *zone épipélagique,* superficielle, est exposée à l'agitation, aux variations thermiques et surtout à la lumière. Elle est limitée à 50-100 m selon les régions et correspond à la zone du phytoplancton, dont le zooplancton tire, directement ou non, sa nourriture. Il comprend de nombreux Protistes (Diatomées en mers froides, Radiolaires, Globigérines en mers chaudes) et de petits Crustacés (Cladocères et Copépodes).

Dans la *zone mésopélagique* (de 50-100 à 200 m), la lumière ne pénètre pas assez pour que le phytoplancton y survive ; cependant, cette zone reste soumise au brassage et aux variations saisonnières de température.

La *zone infrapélagique* (de 200 à 500-600 m) est obscure, peu agitée et à température constante ; les Copépodes y dominent.

Ces trois zones ont un peuplement variable selon les heures du jour, du fait des *migrations verticales* quotidiennes qui affectent de nombreuses espèces. En général, le plancton de surface s'enfonce à l'aube pour remonter vers 23 h.

La *zone bathypélagique* (de 500 à 2 000 m) renferme des Copépodes, des Cœlentérés, des Amphipodes, des Décapodes, des Némertes ; sa limite inférieure correspond à peu près aux latitudes moyennes avec l'isotherme 4 °C.

Dans la *zone abyssopélagique* (de 2 000 à 5 000 m), les Copépodes sont remplacés par des Chætognathes, des Crustacés Mysidacés et Décapodes.

La *zone hadopélagique* (grands fonds au-delà de 6 000 m) est très pauvre (Crustacés Amphipodes, Ostracodes et Décapodes).

— Le *necton* comprend essentiellement des Poissons, des Céphalopodes, des Cétacés et, plus accessoirement, des Chéloniens, des Pinnipèdes (phoques, morses, otaries) et des Manchots près des rivages. Une partie du necton est *planctonophage :* Céphalopodes, Poissons jeunes (harengs, maquereaux) ou de petite taille (anchois, sardines), Cétacés Mysticètes. Les autres Poissons pélagiques (requins, thons) et les Cétacés Ondontocètes (dauphins, cachalots) sont des *prédateurs* ainsi que les Pinnipèdes.

Milieux et communautés d'eaux douces

Les eaux douces s'opposent aux eaux marines par : leurs propriétés physico-chimiques, leur discontinuité, leur extension et leur profondeur plus faibles, leur variété, les variations plus importantes d'éclairement et de température qui s'y produisent. On y rencontre donc souvent des *formes de résistance,* temporaires ou saisonnières, qui recouvrent leur activité quand les conditions de vie sont redevenues favorables : œufs durables des Rotifères, des Crustacés Phyllopodes et Cladocères et des hydres, gemmules des Spongilles, cocon du Dipneuste africain *Protopterus.* Les animaux aériens secondairement adaptés à la vie aquatique sont beaucoup plus nombreux qu'en mer, qu'ils mènent une vie amphibie (Amphibiens, Crocodiliens, Chéloniens, Ophidiens, Oiseaux, Mammifères) ou qu'ils passent une partie de leur cycle en eaux douces (larves des Insectes Odonates, Trichoptères, Perlides, Éphémérides, de nombreux Diptères, de quelques Coléoptères et Lépidoptères).

● *Les eaux courantes*

La vitesse du courant est le facteur écologique essentiel conditionnant le peuplement animal des cours d'eau. Elle intervient tant par son action mécanique directe que par ses incidences sur les caractères physicochimiques des eaux (nature du fond, température, oxygénation...).

— *Sources.* L'eau des sources est toujours peu oxygénée ; sa minéralisation et sa température sont relativement constantes, mais variables d'une source à l'autre.

Les *sources froides* hébergent des espèces sténothermes froides, comme *Planaria alpina,* divers Crustacés Amphipodes *(Gammarus)* et Isopodes *(Asellus),* quelques Hydracariens.

Les *sources chaudes* ont un peuplement d'autant plus pauvre que leur température est élevée. Jusqu'à 40 °C, on y trouve des Protozoaires, Rotifères, Nématodes, Mollusques, Crustacés, Insectes, la plupart eurythermes. Au-delà, les températures sont généralement incompatibles avec une activité métabolique normale, à quelques exceptions près.

— *Torrents et cours supérieurs des fleuves.* Les eaux agitées (et riches en oxygène) sont dépourvues de *plancton*.

Le *necton,* peu varié, est surtout constitué de Poissons bons nageurs : truites, chabot, vairon.

Le *benthos,* par contre, est abondant. Il comprend des formes fixées (Éponges, Bryozoaires du genre *Plumatella*) et des formes vagiles, qui présentent des dispositifs de résistance à l'entraînement par le courant (formes rhéobies) : corps déprimés des Planaires Triclades et des nymphes d'Insectes Éphémères; systèmes d'accrochage variés : ventouses des larves de Diptères Blépharocéroïdes, de certains têtards d'Anoures, crochets abdominaux et glandes séricigènes des larves de simulies. Les cavités entre ou sous les pierres ainsi que les touffes d'Algues filamenteuses et de Mousses abritent des animaux dépourvus de ces adaptations : écrevisses, Tardigrades, Hydracariens, larves d'Insectes Éphéméroptères et de Diptères Tabanides.

— *Fleuves et rivières.* Le *plancton* ne peut se développer que dans les fleuves de plaine, longs et à faible courant. Il est surtout composé de Rotifères et de Crustacés Copépodes.

Le *benthos,* très différent de celui des torrents, est assez analogue à celui des étangs; il comprend des Planaires, des Oligochètes, des Hirudinées, des Cœlentérés, des larves d'Insectes (Éphémères, Phryganes), mais les dispositifs de fixation ont disparu.

Le *necton* est essentiellement constitué de Poissons, qui occupent des secteurs différents de la source à l'embouchure. Les hydrobiologistes d'Europe centrale distinguent ainsi, après la *zone à truite* des eaux froides et rapides du cours supérieur, une *zone à ombre,* une *zone à barbeau* avec goujon, perche, vandoise, chevaine là où le courant est encore assez rapide, l'eau bien oxygénée et où existe un fond de sable ou de gravier (une grande partie de la Seine et du Rhin, le Rhône en aval de Lyon), enfin, une *zone à brême et carpe,* avec tanche, gardon, ablette, brochet dans les cours d'eau lents à fond de vase et de sable fin (la Saône, le cours supérieur de l'Elbe).

Sur les berges des cours d'eau vivent des Amphibiens et des Mammifères amphibies, comme la loutre, le castor, le rat d'eau, le rat musqué et la musaraigne aquatique.

— *Estuaires.* La pénétration des eaux marines entraîne des variations de niveau en rapport avec le balancement des marées, les modifications complexes du courant, une accumulation de sédiments fins, généralement argileux, des variations de salinité dans le temps et dans l'espace, enfin, une très grande richesse nutritive des eaux, due à l'accumulation de matériaux en suspension.

Le *benthos* comprend surtout des espèces marines littorales, qui remontent plus ou moins loin selon leur tolérance à la dessalure : les Mollusques Lamellibranches *Mya arenaria* et *Cardium edule,* le crabe *Carcinus maenas,* les Annélides Polychètes *Nereis cultifera* et *Arenicola marina*. D'autres sont spécifiques des eaux saumâtres, comme l'Annélide Polychète *Nereis diversicolor,* le Crustacé Amphipode *Corophium volutator,* les Scrobiculaires et le Mollusque Gastéropode *Hydrobia ulvae,* les crevettes *Leander longirostis* et *Palaemonetes varians*.

Le *plancton* est abondant du fait de l'accumulation du plancton d'eau douce, auquel s'ajoutent des formes marines.

Le *necton* consiste surtout en Poissons d'eau douce dans les couches superficielles peu salées et en Poissons marins dans les eaux salées profondes. Quelques espèces, comme les mulets et les plies, sont toutefois suffisamment euryhalines pour remonter dans la partie de l'estuaire totalement dessalée à marée basse et s'y mêler à divers Poissons d'eau douce, comme l'épinoche.

● *Les eaux stagnantes*

Le peuplement des eaux stagnantes dépend de leur profondeur, de leurs caractères physico-chimiques et du climat local. En particulier, leur richesse en éléments nutritifs, dont dépendent l'importance et la nature de la faune, est conditionnée par le degré d'oxygénation et le taux de matières organiques en suspension.

Le *benthos, zone littorale* où la végétation est distribuée en ceintures régulières, possède une faune riche et variée comprenant des représentants de la plupart des groupes limniques : Annélides, Nématodes, Mollusques, Crustacés (gammares, aselles), larves d'Insectes (Odonates, éphémères, chironomes). Dans les sables, vit une faune psammique interstitielle (Protozoaires, Rotifères, Nématodes, Tardigrades, Copépodes) qui présente les mêmes adaptations que celle des sables marins littoraux.

La *zone profonde* n'existe que dans les grands lacs (Léman, Baïkal, où elle atteint 1 741 m, Tanganyika). Elle est vaseuse et dépourvue de végétaux; sa faune benthique dépend surtout de l'oxygénation. Les lacs oligotrophes, riches en oxygène, ont un benthos assez riche, que caractérisent l'Oligochète *Tubifex velutinus* et, surtout, le Chironomide *Tanytarsus coracinus* qui ont des besoins élevés en oxygène. Les lacs eutrophes, moins riches en oxygène, ont des Chironomides moins exigeants *(Chironomus bathophilus, Tendipes)* capables même de vivre en semi-anaérobiose. Les lacs dystrophes, peu profonds, sont pratiquement dépourvus de benthos profond, comme les étangs où le benthos littoral recouvre le fond.

▼ ***A gauche, l'Oligochète* Tubifex velutinus, *dont les besoins en oxygène sont élevés, caractérise le* benthos *des* lacs oligotrophes.**
A droite, le* necton *des fleuves et rivières est essentiellement constitué de Poissons qui occupent des secteurs différents de la source à l'embouchure; ainsi la* zone à barbeau *(ici* Barbus plebejus*), avec goujon, perche, chevaine, a un courant assez rapide, une eau bien oxygénée et un fond de sable et de graviers.

G. S. Giacomelli

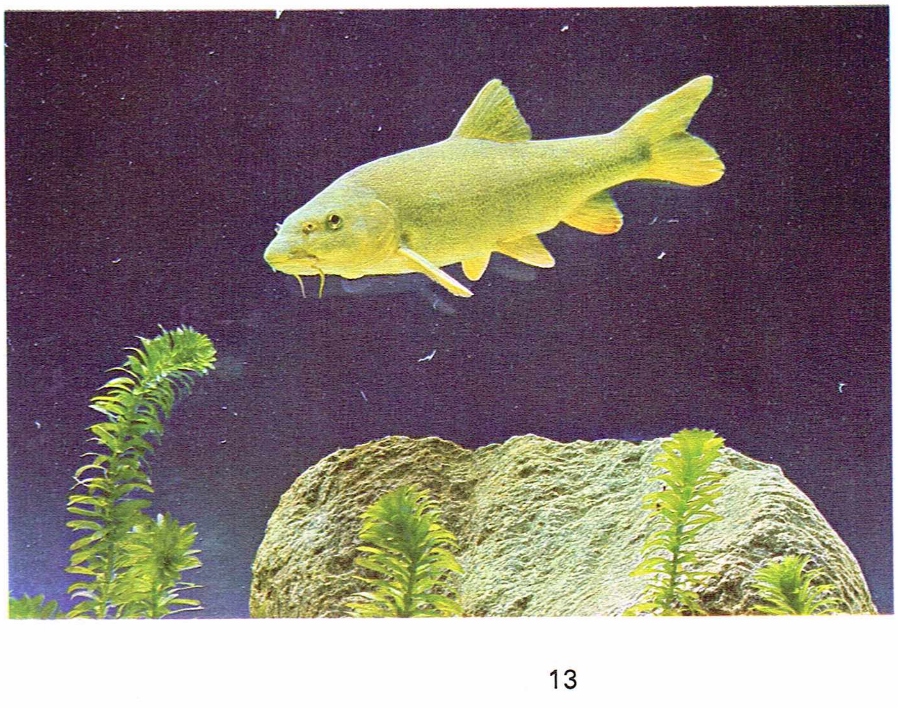

G. Mazza

Tercafs - Jacana

▲ *La plupart des* **troglobies**, *animaux strictement cavernicoles, ont des caractères morphologiques particuliers, telle la dépigmentation réversible du protée* **(Proteus anguineus).**

Le *plancton* lacustre est surtout représenté par des Algues unicellulaires (Volvocales, Euglènes, Péridiniens, Diatomées) ou filamenteuses (Cyanophycées), des Protozoaires, des Rotifères et des Crustacés (Cladocères, Copépodes, Ostracodes). Il diffère en outre du plancton marin par l'abondance des Rotifères et des Cladocères, la rareté ou l'absence de nombreux groupes (Cœlentérés, en particulier, avec de très rares méduses), l'absence d'œufs de Poissons (même les Poissons pélagiques comme les corégones, l'omble, la lotte, fraient en profondeur) et de fortes variations saisonnières. Les deux planctons présentent cependant en commun des migrations verticales saisonnières. Le plancton persiste dans les étangs mais se raréfie dans les simples mares.

Le *necton* comprend surtout des Poissons, auxquels s'ajoutent, sur les rives, des Insectes, des Amphibiens, des Chéloniens et des Ophidiens. Les lacs oligotrophes, très oxygénés, sont favorables aux Salmonidés (truite, corégone, omble chevalier) auxquels s'ajoutent, dans la zone littorale, des perches, des brochets, des gardons, des ablettes et des vairons. Les lacs eutrophes sont peuplés de carpes qui supportent une oxygénation plus faible, de gardons, de brêmes et de tanches.

Certaines eaux s'assèchent temporairement. Leurs habitants s'enfoncent dans la vase et s'enkystent, comme le protoptère africain, l'Unionide africain *Spatha,* les Rotifères et les Tardigrades des Mousses, pour reprendre une vie active au retour de l'eau. D'autres pondent des œufs durables avant de mourir (Crustacés Phyllopodes *Apus* et *Branchippus*) ou se métamorphosent et s'échappent avant la dessiccation (larves d'Insectes).

Le domaine souterrain

Les grottes et les cavernes, les nappes d'eau et les rivières souterraines sont habitées par des animaux *cavernicoles,* qui y trouvent une température à peu près constante, froide, une obscurité totale, ainsi que le milieu liquide ou l'atmosphère saturée d'eau indispensables.

En raison de la tension de la vapeur d'eau, qui, dans la plupart des grottes est voisine de la saturation, les limites entre milieux terrestre et aquatique y sont quelque peu arbitraires : les formes aquatiques peuvent séjourner longtemps hors de l'eau et, inversement, de nombreuses formes terrestres supportent sans dommage une immersion prolongée.

Les animaux cavernicoles constituent un ensemble très hétérogène, qu'on peut répartir schématiquement en trois catégories :

— Les *troglobies* sont strictement cavernicoles. Ils sont essentiellement représentés par des Arthropodes : Arachnides (nombreux Pseudoscorpions, Araignées et Acariens), Crustacés (des Copépodes et de nombreux Malacostracés Amphipodes et Isopodes), Insectes (essentiellement des Collemboles et des Coléoptères Carabides et Staphylinides). Sont également troglobies quelques Planaires, des Oligochètes, de nombreux Gastéropodes ainsi que divers Vertébrés : Téléostéens, Cypriniformes et Siluriformes, Amphibiens Urodèles néoténiques de la famille des Pléthodontidés (Amérique du Nord) et des Protéidés (avec le seul protée d'Europe centrale).

La plupart des troglobies ont des caractères morphologiques particuliers qui, sans être strictement spécifiques, sont statistiquement plus fréquents que chez les formes épigées. La dépigmentation et l'anophtalmie sont les plus évidentes. La *dépigmentation* peut être totale et définitive, par suppression de la synthèse pigmentaire (cas du Crustacé Amphipode *Niphargus*), ou réversible, la pigmentogenèse, simplement inhibée, pouvant reprendre à la lumière (cas du protée). A l'exception des Insectes cavernicoles, chez lesquels la *régression des yeux* résulte d'un arrêt de développement, dans la plupart des autres cas les yeux commencent à se développer à peu près normalement puis régressent et dégénèrent.

— Les *troglophiles* fréquentent les grottes mais n'y sont pas strictement inféodés. On les trouve surtout au voisinage de l'entrée, comme les chauves-souris, qui sortent régulièrement chaque soir pour chasser (rhinolophes et miniopteres) ou qui s'y réfugient pendant l'hibernation (noctules, pipistrelles, sérotines), et les souris américaines *Neotoma*.

— Enfin, les *trogloxènes* ne sont que des cavernicoles accidentels.

Distribution géographique des végétaux

La *biogéographie* est l'étude de la répartition géographique des êtres vivants, considérés isolément et dans leurs rapports entre eux et avec le milieu physique.

Un *taxon,* et en particulier une espèce, occupe une certaine portion de la surface de la terre, ou *aire,* d'étendue fort variable, qui caractérise sa distribution géographique. L'étude descriptive des aires est la *chorologie*. Leur circonscription entre dans la définition, ou diagnose, des taxons. Elle peut constituer un argument pour séparer deux espèces, ou une espèce d'une de ses sous-espèces, lorsque les caractères morphologiques distinctifs sont légers mais les aires bien caractérisées. Ainsi, *Ononis repens* présente une sous-espèce qui n'est pas reconnue de tous, mais dont la distribution est limitée au Maroc et à une grande partie de l'Espagne, tandis que l'espèce entière est répandue en Europe occidentale et centrale.

Les aires se modifient quelquefois rapidement sous l'influence de l'homme. Quoique celui-ci fasse évidemment partie de la nature, on a tendance à considérer ce mode d'expansion ou de réduction comme « artificiel ». Ces modifications anthropogènes, même si l'on considère à part le cas des plantes cultivées, conduisent fréquemment à des modifications profondes du paysage. Bien entendu, des changements « spontanés » s'observent aussi ; on peut décrire l'évolution des aires soit à l'échelle de la vie humaine ou de l'histoire de l'humanité, soit à l'échelle du temps géologique. Dans ce dernier cas, on fait de la *paléobiogéographie,* qui implique évidemment le recours aux fossiles.

Il faut également *expliquer* les aires. L'étude paléobiogéographique fournit un premier élément d'explication : elle indique, par exemple, que la dérive des continents a pu morceler bien des aires. Par ailleurs des plantes qui, actuellement, se trouvent dans les régions arctiques et les hautes montagnes de l'hémisphère Nord étaient, lors des glaciations, présentes dans les zones intermédiaires, où leur aire était normalement continue ; elles ont survécu là où un climat suffisamment froid a persisté.

Des faits tels que ce dernier amènent à envisager l'explication *écologique*. De fait, les exigences *auto-écologiques* des plantes rendent compte en partie, en conjonction avec les facteurs du sol, du climat, etc., de leur répartition géographique. A cet égard, les rapports qu'elles entretiennent avec celles qui y sont déjà jouent aussi un grand rôle ; ainsi, une plante de lumière ne franchira pas une importante zone boisée, même sous un climat convenable. Il faut donc tenir compte des rapports *synécologiques* de l'espèce qu'on considère et de celles qu'elle est susceptible de rencontrer. En outre, le peuplement animal a une grande importance dans la réalisation de la végéta-

tion d'un lieu. Des explications identiques sont nécessaires en ce qui concerne les aires du passé : il faut donc faire de la *paléo-écologie,* de la *paléoclimatologie,* etc.

Certaines plantes occupent des aires parce qu'elles viennent pour ainsi dire d'y naître : la biogéographie est donc un élément très important dans l'étude de la *genèse des taxons.*

Si les espèces entretiennent des relations étroites entre elles, il est normal de s'intéresser aux rapports existant entre leurs aires. Partout, les aires de nombreuses plantes se superposent et il apparaît une certaine *flore.* L'ensemble des taxons présents sur une plus ou moins grande surface définit la *composition floristique* de la végétation du lieu et contribue à donner leur faciès aux diverses *formations* qui constituent cette végétation. De plus, sur une petite surface, des plantes vont manquer bien qu'on se trouve à l'intérieur de leur aire. A l'endroit en question, on va pouvoir caractériser un groupement végétal par la présence de telles ou telles espèces, leur densité et leur mode de répartition local. Certains décriront, de façon rigide, de tels groupements comme des *associations végétales.* Cependant, elles ne sont pas immuables et leur évolution devra être étudiée : on parlera de *série de végétation* pour l'ensemble de la succession de groupements qui finalement se stabilise souvent pour assez longtemps.

Qu'il s'agisse de chorologie ou de l'étude des groupements, la biogéographie implique évidemment l'élaboration de cartes de répartitions des taxons et des groupements végétaux.

La chorologie

Pour établir les aires des taxons, il s'agit d'abord de connaître celles des taxons les plus inférieurs, surtout des espèces. La plupart du temps, une telle étude se fait en dépouillant des *listes de plantes,* ou *flores,* publiées pour les divers territoires. Pour plus de précision, on peut explorer systématiquement le territoire qu'on a reconnu occupé par une aire donnée, divisé en carrés de surface relativement petite (10 km de côté par exemple), et noter dans chacun de ces carrés la présence de l'espèce étudiée. Cette méthode ne peut être pratiquée que si l'aire est restreinte. Mais dans certains pays (Grande-Bretagne, Belgique), on a délimité avec une telle précision l'aire de la plupart des espèces ; la portion de l'aire plus vaste de ces espèces qui y est comprise, est ainsi connue avec beaucoup de précision. Toutefois il faut se garder d'extrapoler trop vite de la répartition d'une espèce en une région donnée à sa répartition d'ensemble. Par exemple, *Trollius europaeus,* plante de climat froid, n'existe que dans la partie nord-ouest de la Grande-Bretagne, mais son aire est loin de s'arrêter là vers l'est : elle occupe les montagnes d'Europe, la Scandinavie, et tout le nord de l'Asie. Des cartes de répartitions précises facilitent l'explication des aires par les caractères géographiques et géologiques : elles peuvent être comparées à celles du relief, de la pluviosité, etc. La connaissance de l'aire des espèces permet évidemment d'établir celle des genres et des familles qui les renferment.

Une aire peut être *continue* ou *disjointe.* Elle est continue si elle forme un territoire unique où la plante se trouve sans interruption : c'est le cas de *Poa annua* répandu au moins dans les régions tempérées du monde entier. Sous les tropiques, cette Graminée ne se voit qu'en altitude. Même si la plante, du fait de son écologie, est moins abondante, sans que ses stations soient très éloignées les unes des autres sur un territoire donné, un tel territoire constituera encore pour elle une aire continue. C'est le cas de *Poa nemoralis,* par exemple, qui existe dans toute l'Europe et l'Asie tempérée, mais est moins répandu que *Poa annua.*

L'aire est disjointe lorsque, à côté d'une aire principale, se trouvent de petites aires secondaires, séparées de la première par de vastes territoires où la plante manque totalement. L'aire anglaise de *Trollius europaeus* est ainsi séparée de l'aire principale par toute la plaine française et le Bénélux ; cette espèce se retrouve vers l'est à partir du Massif central, du Jura, des Alpes, de l'Allemagne et de la Scandinavie. Le phénomène peut être bien plus marqué : *Sagina procumbens* occupe toute l'Europe et l'Asie nord-occidentale, mais aussi le côté sud-ouest du Canada.

Hayon - Pitch

▲ ***L'étude descriptive des aires est la* chorologie *; une aire peut être* continue, *ou* disjointe *comme c'est le cas pour* Trollius europaeus *dont l'aire anglaise est séparée de l'aire principale (montagnes d'Europe, Scandinavie et nord de l'Asie) par toute la plaine française et le Bénélux où la plante manque totalement.***

Des disjonctions apparentes peuvent être dues à des introductions récentes par l'homme : par exemple, *Poa nemoralis,* qui se rencontre lui aussi au sud-est et même au centre du Canada, y a manifestement été introduit par l'homme et ne dépasse pas les zones habitées. Il se propage de lui-même : il est donc *naturalisé,* mais il est *synanthropique.* Il ne supporte pas la compétition de flore indigène. *Sagina procumbens* qui semble bien indigène sur la côte américaine, est synanthropique en d'autres points d'Amérique, d'Asie et même de l'hémisphère Sud.

En cas de naturalisation parfaite, il est parfois difficile de savoir si une plante est indigène sur un territoire. Cela est plus aisé si on la trouve à l'état fossile ou si on la rencontre dans la région intermédiaire entre son aire principale et l'aire disjointe. Ainsi, *Dryas octopetala* manque entre les montagnes de Scandinavie et les Alpes, mais a laissé des fossiles au Danemark et en Allemagne du Nord. Sa distribution est arctico-alpine : il se voit aussi dans les montagnes de Grande-Bretagne et du sud de l'Europe ; en Asie, il se trouve de la même façon dans le nord de la Sibérie et dans les montagnes d'Asie centrale.

Si les stations séparées de l'aire principale sont très exiguës et disséminées, il s'agit de *stations reliques,* plutôt que de portions de l'aire disjointe. *Linnaea borealis* a une distribution du type de celle du *Dryas,* mais n'existe

J.-F. Gonnet - Pitch

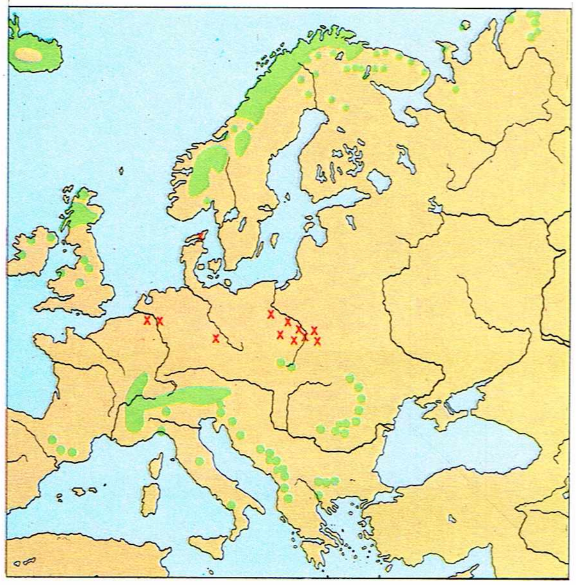

I.G.D.A.

▲ *A gauche,* **Dryas octopetala,** *qui manque entre les montagnes de Scandinavie et les Alpes et montagnes voisines, mais a laissé des fossiles au Danemark et en Allemagne du Nord; sa distribution* **est arctico-alpine.** *A droite, aire de distribution actuelle (en vert) et lieux de découverte de fossiles (croix rouges) de* **Dryas octopetala.**

▼ *A gauche,* **Linnaea borealis,** *dont la distribution est du type de celle de* **Dryas,** *n'existe au sud qu'en quelques rares points des Alpes, d'Allemagne et du Caucase* **(stations reliques).** *A droite, aire de distribution mondiale de* **Linnaea borealis.**

au sud qu'en quelques rares points des Alpes, d'Allemagne et du Caucase. (Il s'est cependant réinstallé en Allemagne du Nord, par suite d'introductions accidentelles à partir de la Scandinavie.)

Les aires peuvent être immenses, cosmopolites *(Poa annua),* surtout dans le cas de plantes aquatiques; elles peuvent occuper toutes les régions tempérées de l'hémisphère Nord, toutes les régions tropicales (pantropicales), les seules régions tropicales de l'Ancien ou du Nouveau Monde (paléo- ou néotropicales), ou les zones tempérées de l'hémisphère Sud, ou encore s'étendre dans les zones froides autour des pôles (circumpolaires ou arctiques, antarctiques).

Si l'aire est limitée à une région donnée, on parle d'*endémisme*. La région en question peut être d'importance très variable : les Broméliacées sont une famille endémique des Amériques (quoiqu'une espèce se trouve aussi sur la côte ouest d'Afrique tropicale; peut-être y a-t-elle été introduite par l'homme). De nombreuses espèces sont endémiques d'Europe ou de Madagascar, d'autres d'une portion des Pyrénées seulement.

L'histoire des aires

Les aires se modifient parfois à l'échelle de durée humaine, généralement sous l'influence de l'homme. Des plantes introduites au loin par l'homme peuvent trouver des conditions favorables et se répandre. *Conyza albida (C. naudinii),* d'Amérique du Sud, introduit à Collioure (Pyrénées-Orientales) vers 1870, a envahi le Sud-Ouest, le bassin occidental de la Loire, et s'avance maintenant jusqu'à Paris au moins. Il s'hybride avec *Conyza canadensis (Erigeron canadense),* répandu partout maintenant en Europe et dans le monde, mais depuis le XVIe siècle seulement. Auparavant, ce dernier ne se trouvait, comme le *Datura stramonium,* qu'en Amérique du Nord. En fait, dans de tels cas, l'homme ne fait que déclencher le mécanisme de conquête d'une aire nouvelle.

D'autres aires s'accroissent progressivement à partir de leur bordure jadis stable. Là aussi, l'action de l'homme peut être en partie en cause. *Berteroa incana* est une Crucifère d'Europe de l'Est et d'Asie centro-occidentale, que l'on connaît depuis la fin du XVIe siècle en Hongrie. Cette espèce est arrivée vers 1830 en Scandinavie, vers 1850 dans l'est de la France, vers 1870 en Touraine et au début de ce siècle en Grande-Bretagne. Dans le sud de la Scandinavie et l'est de la France, la plante est installée solidement; c'est une *néophyte.* Plus à l'est et au nord, elle est encore synanthropique, mais sans doute s'installera-t-elle plus largement dans ces régions aussi. Elle est aussi synanthropique en Amérique du Nord, comme beaucoup de plantes européennes.

Bien des plantes introduites n'ont guère de succès et disparaissent presque immédiatement *(éphémérophytes)* ou ne persistent guère *(adventices).* Si une plante est régulièrement cultivée, elle peut être constamment réintroduite, sans se multiplier elle-même, au voisinage des lieux de sa culture : elle est alors *subspontanée.* Les aires de plantes indigènes peuvent aussi se réduire très rapidement : les stations reliques disparaissent, souvent du fait de l'homme; mais cela n'est, en somme, que l'accélération d'un processus naturel. L'assèchement des marais, la lutte contre les « mauvaises herbes » des moissons *(messicoles)* rendent d'abord certaines plantes plus disséminées dans leur aire; puis ils peuvent réduire cette aire elle-même. Il est vrai qu'auparavant, l'aire des messicoles s'était étendue avant tout grâce aux cultures!

Mais on peut suspecter ou démontrer par le recours à la paléontologie le rétrécissement « catastrophique » de certaines aires sans que l'homme y soit pour rien. Ainsi, les distributions arctico-alpines s'expliquent par le réchauffement du climat après les glaciations. De nombreuses disjonctions doivent résulter de modifications écologiques profondes. *Cardamine impatiens,* à côté de son aire d'Europe et d'Asie occidentale, est présent en Asie centrale ainsi qu'au Japon, sur la côte mandchoue voisine, et en Chine du Nord; sans doute cette aire était-elle jadis continue. *Aconitum anthora* a une aire formée de six portions principales des Pyrénées à la Mandchourie : elle devait former une bande continue entre ces régions. Le recours aux fossiles, spécialement aux pollens, est fondamental pour révéler les fluctuations passées des aires. La famille des Magnoliacées, actuellement localisée en Extrême-Orient et en Indo-Malaisie, mais aussi dans l'est des États-Unis, l'Amérique centrale, les Guyanes et le sud-est du Brésil, présente des fossiles en Europe, dans le Caucase, l'est de l'Amérique du Nord, et même le Groenland et le Spitzberg. La disjonction de son aire actuelle laisse supposer l'ampleur de son aire continue ancienne, explicable grâce à la dérive des continents; ces plantes n'ont pu survivre dans tous les lieux qu'elles avaient un moment colonisés.

Une aire immense peut aussi se réduire *à une seule aire endémique* de faible étendue; rien sauf les fossiles ne permet alors de suspecter l'ancienne extension. *Sciadopitys verticillata* est limité actuellement au sud-est du Japon, mais des fossiles se trouvent en Sibérie, en Europe occidentale et du Nord, au sud du Groenland, et sur la côte voisine du Canada. En Angleterre, on trouve des fossiles du Jurassique, alors qu'au Japon, l'arbre est présent, au nord depuis la fin du Crétacé, et au sud depuis le Pliocène. C'est seulement dans cette région extrême de son expansion qu'il a pu survivre. Le séquoia *(Sequoiadendron giganteum),* dont l'aire actuelle est limitée aux sierras de Californie, occupait au Crétacé l'est des États-Unis jusqu'aux montagnes Rocheuses, le Groenland et l'Europe occidentale; c'est au Miocène qu'il a atteint le petit territoire où il a pu survivre, tandis qu'il s'éteignait ailleurs.

L'endémisme

Les aspects de l'endémisme ont été révélés surtout par C. Favarger. Ce chercheur a considéré particulièrement des taxons subspécifiques de la même espèce ou bien des espèces très voisines (ce qui revient au

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

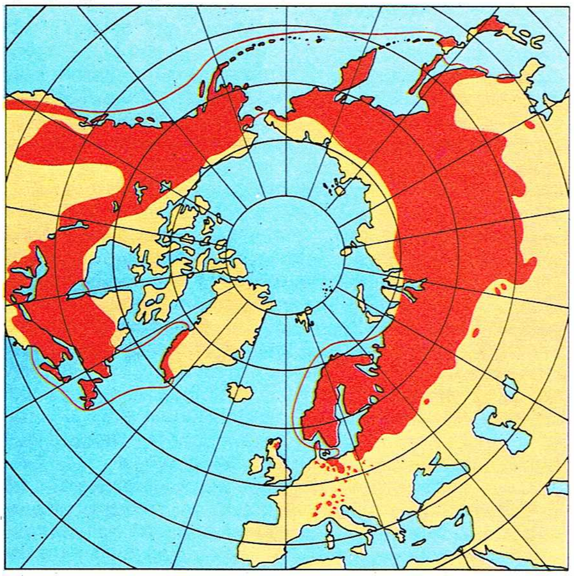

I.G.D.A.

C. Bevilacqua

▲ *L'aire de* **Papaver rhoeas** *s'étend à l'Europe centro-occidentale, à l'Asie occidentale et à l'Afrique du Nord, englobant celle de* **P. rumelicum**, *endémique du nord-est des Balkans et, peut-être, sa forme souche; on parle alors de* **patroendémisme**.

même) et les a analysés aux points de vue biogéographique et cytologique; ses résultats permettent de comprendre l'endémisme des taxons supérieurs.

Sciadopitys verticillata et *Sequoiadendron giganteum* sont endémiques par restriction de leur aire : ce sont des *endémiques passifs*. Mais d'autres aires restreintes peuvent être celles de taxons qui viennent de naître : de tels taxons sont des *endémiques actifs*. Il peut s'agir d'hybrides apparus au point de contact de deux aires, devenus fertiles, et constituant un taxon nouveau, lequel peut être assez caractérisé pour qu'on en fasse une espèce. Il peut également s'agir d'un taxon formé parmi les populations d'une espèce à aire plus vaste, soit par sélection de mutants adaptés aux conditions écologiques de l'aire de l'endémique, qui seraient alors des écotypes très caractérisés, soit simplement par survie de formes différentes du type de l'espèce, mais non spécialement adaptatives *(dérive génétique)*.

Spartina X townsendii est un hybride fertile qui s'est formé aux environs de Southampton vers 1870 à partir de *S. stricta* et de *S. alterniflora*, ce dernier d'ailleurs introduit d'Amérique du Nord. D'abord endémique, il s'est répandu vigoureusement et cette expansion a été beaucoup favorisée par l'homme, jusque dans l'hémisphère Sud. Un endémique ne l'est donc pas forcément à perpétuité. De tels hybrides fertiles peuvent apparaître en plusieurs points de l'aire commune de leurs parents. Le taxon qu'ils forment, souvent considéré comme une nouvelle espèce, est alors d'origine *polytopique*.

Un taxon endémique ainsi formé à partir d'un ou plusieurs autres est *apoendémique*. Il est souvent polyploïde, soit que la polyploïdie soit nécessaire à sa fertilité, soit qu'elle aille de pair avec une plus grande résistance. *Nigella arvensis*, dont l'aire occupe l'Europe centro-occidentale, l'Asie occidentale et l'Afrique du Nord, est apparenté à plusieurs endémiques de la région de la mer Égée, qui semblent s'être différenciés à partir de lui par apoendémisme. Comme leurs habitats sont comparables, leur genèse semble plutôt due à la dérive génétique. Il reste à déterminer si celle-ci est due au hasard.

Il peut aussi arriver qu'un endémique soit étroitement apparenté à une espèce à aire vaste, dans laquelle sa petite aire est incluse, mais que l'on ait des raisons de penser que l'endémique est plus primitif que l'espèce commune, soit à cause de sa morphologie, soit parce qu'il est diploïde alors que cette dernière est polyploïde. Il y a alors *patroendémisme :* un taxon demeuré endémique a donné un autre taxon plus conquérant, qui a envahi une aire bien plus vaste. Ainsi *Papaver rumelicum*, endémique du nord-est des Balkans, est peut-être la forme souche de *P. rhoeas*, dont il peut être considéré comme sous-espèce ou variété, et dont l'aire s'étend à l'Europe centro-occidentale, l'Asie occidentale et l'Afrique du Nord, englobant évidemment celle de *P. rumelicum*. L'aire de *P. rhoeas* a d'ailleurs été étendue par l'action de l'homme.

Lorsqu'une aire est morcelée, les populations d'un même taxon situées dans chaque portion peuvent se différencier sans échanger de gènes entre elles, du fait de l'éloignement, et deviennent autant de taxons, qui sont dits *schizoendémiques*. Un taxon s'est alors divisé en plusieurs endémiques et, de ce fait, a disparu. Ce phénomène, répandu dans les montagnes d'Europe, peut s'accompagner de modifications chromosomiques. Trois taxons d'*Iberis* du groupe *spathulata*, ibériques, ont un nombre chromosomique de base 7, alors que ceux des Alpes ont un nombre de base 9. Comme pour les nigelles égéennes, les conditions de milieu sont les mêmes pour ces divers taxons, qui sont donc *vicariants* puisqu'ils sont de morphologie très voisine et occupent le même milieu; comme les nigelles, ils sont *endémo-vicariants*.

Bien entendu, on peut aussi envisager que le taxon mère demeure stable sur une partie de son aire morcelée, tandis qu'une ou plusieurs portions de celle-ci donnent naissance à d'autres taxons voisins. Le résultat, considéré à lui seul, sera impossible à distinguer du précédent. Cependant, on peut, semble-t-il, voir le phénomène se produire actuellement : *Viola rostrata* est présent dans l'est des États-Unis et au Japon, et les plantes japonaises, très voisines, sont considérées comme une variété spéciale : peut-être deviendront-elles un jour suffisamment différentes pour mériter le rang d'espèce sans que se modifient les populations américaines. Il y a là une forme d'apoendémisme en rapport avec la disjonction.

Les taxons apo- ou schizoendémiques sont plus nombreux dans certaines régions, soit que les conditions écologiques les séparent simplement par sélection de leurs taxons mères, soit qu'elles induisent de plus leur variabilité, d'où des formes plus nombreuses parmi

▶ ***Le genre* Trifolium *a une aire immense en Eurasie, en Amérique du Nord et du Sud et en Afrique du Nord, orientale et du Sud, mais la plus forte concentration d'espèces se trouve dans la région méditerranéenne, qui semble être le lieu de naissance du genre.***

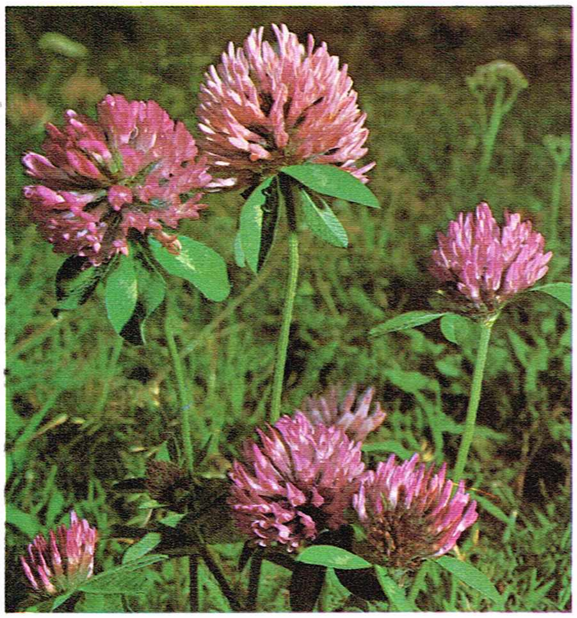

Archives P2

lesquelles la sélection pourra choisir, ou qui se conserveront simplement. Il en est ainsi des montagnes, des déserts ou des îles : tous ces territoires tendent à isoler les populations et à les empêcher d'échanger librement leurs gènes, maintenant ainsi les génotypes qui pourront être sélectionnés. 75 % des taxons du Haut-Atlas marocain sont endémiques de cette région, comme le sont 38 % des plantes de montagne de la Corse, région isolée du continent depuis le Miocène. L'endémisme peut cependant également être passif dans ces endroits. Dans beaucoup de cas, il est très difficile de savoir si une aire endémique n'est pas le résidu d'une aire plus vaste : beaucoup de recherches, paléontologiques en particulier, sont encore nécessaires sur ces sujets.

Par ailleurs, les plantes sont plus ou moins aptes à former des endémiques suivant les genres. 20 % des saules d'Europe, 50 % des silènes, 83 % des alchemilles sont endémiques. Dans le dernier cas, l'abondance est due à l'apomixie, qui maintient sans mélange des phénotypes divers dus aux génotypes mutants et qui semblent par ailleurs avoir un intérêt adaptatif. Bon nombre des silènes et alchemilles endémiques en Europe sont d'ailleurs limités à des territoires bien plus exigus à l'intérieur du continent.

La chorologie et le lieu de naissance des espèces et des genres

Les travaux de taxonomie expérimentale révélant des modes de formation de taxons nouveaux dont nous venons de parler mettent surtout en cause des taxons infraspécifiques ou des espèces très voisines. Leurs résultats peuvent cependant éclairer le mode de formation d'espèces bien tranchées ou de genres, ainsi que les aspects biogéographiques qui les manifestent.

Pour un genre donné, on observe en général qu'une portion de l'aire au moins comporte de nombreuses espèces, dont beaucoup sont endémiques, d'autres s'étendant aussi au loin. Ce fait est interprété comme correspondant à une intense diversification liée à la jeunesse du genre en question. Celui-ci serait né là, les espèces s'y seraient multipliées (puisqu'il y est présent depuis longtemps), beaucoup étant condamnées à demeurer locales, d'autres réussissant à s'étendre ou à produire des espèces nouvelles qui se sont répandues. Il est bien entendu difficile de savoir si ce *centre de spéciation* n'est pas en fait un lieu d'apoendémisme intense : des espèces diverses, nées au loin, auraient différencié de nombreuses endémiques dans ce lieu privilégié. Une telle interprétation est très vraisemblable pour beaucoup de centres s'il en existe plusieurs dans l'aire d'un genre : à moins d'admettre que celui-ci soit d'origine polytopique, un seul centre peut être son berceau. Le genre *Trifolium* a une aire immense en Eurasie, en Amérique du Nord et du Sud et en Afrique du Nord, orientale et du Sud. Une forte concentration d'espèces se trouve dans la région méditerranéenne (en Asie Mineure, il existe 76 espèces, en Espagne 50, dans le midi de la France 54), qui semble être le lieu de la naissance du genre. Il y a de moins en moins d'espèces au fur et à mesure qu'on s'éloigne de cette région : il n'y en a plus que 5 en Afrique du Sud, 2 au Japon et 7 dans l'est des États-Unis. Toutefois les espèces redeviennent nombreuses dans l'ouest de l'Amérique du Nord ainsi qu'au Chili, sans toutefois atteindre la densité méditerranéenne ; on peut penser qu'il y aurait là des *centres de spéciation secondaires,* par apoendémisme. Il reste pourtant à démontrer que le centre où la densité des espèces est la plus grande est bien le lieu de la naissance du genre. De la même façon, au niveau des genres d'une famille, on trouvera un ou plusieurs centres de multiplication de ces taxons.

Pour préciser la signification de ces centres, les données biogéographiques doivent être mises en rapport avec celles de la systématique phylogénétique. Des arguments morphologiques, anatomiques, palynologiques, etc., peuvent montrer que certaines espèces ou certains genres sont plus primitifs que d'autres et qu'ils sont présents uniquement ou plus abondamment dans l'un des centres. On pourra penser alors qu'il s'agit de celui de l'apparition du taxon en question. Mais il se peut aussi que l'espèce la plus primitive manque dans le centre unique de spéciation, qui est alors centre d'apoendémisme. C'est le cas de la tribu des Stapéliées en Afrique du Sud, le genre monospécifique le plus primitif étant indien (Good).

Il est clair que les migrations qui permettent à un genre ou une famille d'occuper une aire très vaste peuvent ne pas s'accompagner de modifications importantes, puisque des espèces ont pu occuper une grande partie de la terre tout en restant elles-mêmes. Mais la migration progressive s'accompagne souvent aussi de différenciations ; même lorsqu'on ne note pas de concentration d'espèces ou de genres, on remarque que certains de ces taxons localisés dans des territoires précis sont plus primitifs que les autres, et semblent donc plus proches du lieu d'origine du genre ou de la famille (ce qui ne veut pas dire qu'ils marquent véritablement l'emplacement de ce lieu).

Les *Nothofagus* ont ainsi une aire disjointe formée de plages, au Chili, en Nouvelle-Zélande, en Australie, en Nouvelle-Calédonie et en Nouvelle-Guinée ; l'espèce la plus primitive par la morphologie de ses infrutescences se trouve au Chili ; une espèce plus évoluée se trouve en Nouvelle-Zélande, et l'évolution se poursuit en Nouvelle-Calédonie, s'achevant en Nouvelle-Guinée. Cette évolution se manifeste par la réduction du nombre de bractées et de fruits dans les inflorescences partielles et par le passage de celles-ci de la trimérie à la dimérie. Elle semble bien indiquer le sens de la migration différenciatrice : des espèces sont demeurées en chaque point de l'aire sans subir de modifications importantes, tandis que s'avançaient d'autres espèces plus évoluées (Melville).

Au niveau familial, les Vochysiacées du Brésil montrent des caractères plus primitifs que celles d'Amérique centrale. Les secondes proviennent sans doute des premières par migration accompagnée de spécialisation. C'est une sorte d'*apoendémisme générique* lié à la migration.

La chorologie et l'origine des Angiospermes

Les familles d'Angiospermes, comme tous les taxons, sont généralement plus nombreuses en zone tropicale. Mais de plus, les familles présentes dans la forêt tropicale sont plus primitives qu'ailleurs (Sporne). Si l'on étudie les familles de Ranales arborescentes, qui semblent les plus primitives des Angiospermes (ce qui ne veut pas dire que chacune soit primitive dans *tous* ses caractères), on trouve avec Smith que le plus grand nombre d'entre elles est présent en Asie du Sud-Est et en Australasie, alors que l'Afrique en comporte moitié moins, et l'Amérique un nombre intermédiaire. Cette densité de familles primitives peut conduire à admettre que les Angiospermes sont nées dans ce qui est actuellement le Sud-Est asiatique et l'Australasie, d'autant plus que de nombreux genres, surtout tropicaux, ont dans cette zone leur centre de spéciation (Smith), ou bien qu'elles sont apparues dans toutes les zones équatoriales, les groupes primitifs n'ayant survécu que dans le Sud-Est asiatique et l'Australasie (Aubréville).

◀ *Les* **Nothofagus** *(ici, en Amérique du Sud) sont un exemple caractéristique que la migration progressive du genre ou de la famille s'accompagne de modifications importantes. Cette évolution se manifeste notamment dans la morphologie diverse des infrutescences.*

Il faut pourtant remarquer que les rares données paléontologiques montrent que les plus anciens pollens attribuables aux Angiospermes *(Clavatipollenites)* se rencontrent dans le Lias (Jurassique supérieur) d'Europe centrale, puis un peu plus tard en Égypte, mais aussi au Canada, c'est-à-dire, en tenant compte des reconstitutions paléogéographiques qui mettent en cause la dérive des continents, dans des régions qui pouvaient être situées à la latitude du Maroc actuel. Ces pollens sont comparables à ceux des Chloranthacées, des Myristicacées et des Canellacées, familles actuellement considérées comme primitives (les deux dernières proches des Anonacées, elles aussi primitives). Cela confirme le bien-fondé des études phylogénétiques utilisant les plantes actuelles; mais on peut alors se demander si ces familles n'ont pas été jadis plus répandues et si leur localisation tropicale, particulièrement dans le Sud-Est asiatique, n'est pas un phénomène d'endémisme passif. Il ne faut pas oublier, le *Sequoiadendron* et le *Sciadopitys* nous l'ont montré, que des taxons peuvent ne survivre que dans des lieux très éloignés de celui de leur naissance.

La forêt tropicale pourrait ainsi n'être qu'une zone d'endémisme passif. Elle ne semble pas induire un endémisme actif au niveau spécifique : Stebbins a fait remarquer que le nombre d'espèces par genre y est plutôt plus faible que dans les zones relativement sèches (Californie) : c'est au grand nombre de genres et, accessoirement, de familles que la forêt dense doit sa richesse floristique. Le même chercheur pense que la différenciation des genres, comme celle des espèces, s'est faite en milieu semi-aride. On peut se demander si les Angiospermes ne sont pas nées dans de tels milieux; cela concorderait assez bien avec le lieu où ont été trouvés les plus anciens pollens. Encore d'après Stebbins, le grand nombre de genres de la forêt tropicale provient de ce que les extinctions de taxons y sont plus rares, du fait de la stabilité du milieu.

En somme, si les plantes qui ont conservé le plus de caractères primitifs se trouvent aujourd'hui dans les zones tropicales, il est peu probable qu'elles y soient nées ou qu'elles soient nées sous un climat tropical. Cela n'exclut pas que des migrations accompagnées de différenciation aient pu se produire ensuite à partir d'un refuge tropical dans le Sud-Est asiatique et l'Australasie. Mais il ne paraît pas justifié pour l'instant de faire dériver de plantes localisées là les familles de la flore tempérée qui paraissent elles aussi primitives, qu'il s'agisse de Ranales ou d'Amentifères.

La chorologie et la dérive des continents

Le phénomène de la dérive des continents est maintenant universellement admis, grâce aux arguments paléomagnétiques et géophysiques. Les courants de convection dans la couche supérieure du globe, dus à l'existence des zones profondes plus chaudes, fournissent l'explication de l'étalement des fonds marins de part et d'autre de lignes précises, qui écarte progressivement les continents des deux côtés. Il y avait probablement au début du Primaire trois masses continentales : le Gondwana au sud, l'ensemble de l'Europe et de l'Amérique du Nord, et l'Asie (moins l'Inde). Ces blocs s'unirent en une pangée, et leurs zones d'affrontement donnèrent naissance à l'Oural et aux chaînes appalachiennes et calédoniennes. Ainsi, les terres émergées étaient devenues continues au Permien, au Carbonifère et au Trias.

Il est probable que des ancêtres des Angiospermes ont commencé à se différencier dès le Trias ou au début du Jurassique. Comme nous l'avons vu, des pollens angiospermiens se trouvaient à la fin du Jurassique en des points éloignés, ce qui implique sans doute une origine plus ancienne du groupe et des migrations subséquentes, à moins, ce qui n'est pas probable, que nous n'ayons affaire à un groupe polyphylétique. Nées quelque part sur la pangée, en zone sèche peut-être, les Angiospermes, encore rares, ont dû pourtant se répandre sur une bonne partie de sa surface.

Au Silurien (Ordovicien), la pangée était disposée de telle façon que le pôle Sud fût près de l'Afrique du Nord actuelle. C'est pourquoi le Sahara était le théâtre d'une glaciation intense. La pangée montait vers le nord et, à la fin du Carbonifère, l'Europe était arrivée sur l'équateur (effectivement, on y trouvait une forêt équatoriale, où se sont formées des houilles). Une bonne partie de l'ancien Gondwana était sous les glaces.

Mais la mer s'avança dès le Primaire à partir de l'est, sous forme d'un golfe géant, ou Thétys, entre l'Afrique et l'Asie. Celui-ci tendit à devenir moins profond par la suite, et une petite portion en devint la Méditerranée. Mais surtout, à partir de la fin du Jurassique, une fente apparut à l'emplacement du centre de l'Atlantique actuel, séparant les deux Amériques en progressant vers l'ouest, pour se transformer en un immense golfe du Pacifique. L'Amérique du Sud se sépara alors du nord de l'Afrique par prolongement vers le sud de ce golfe, tandis que l'ensemble de l'Australie, de l'Antarctique et de l'Amérique du Sud se détachait, donnant alors naissance à l'Atlantique Sud qui confluait avec le golfe précédent. De l'autre côté de l'Afrique se séparait l'Inde, qui remontait vers l'Asie, tandis que la Thétys se réduisait à une mer épicontinentale.

Au milieu du Crétacé, cette séparation n'était pas encore totale. L'Atlantique Sud était né à la fin du Crétacé, et l'Inde isolée au milieu de l'Éocène. A cette époque, l'Australie se séparait de l'est de l'Antarctique pour remonter elle aussi vers le nord-est et faire irruption dans l'Insulinde. La continuité de la Terre de Feu et de l'ouest de l'Antarctique était aussi rompue. En se dirigeant vers l'Asie, l'Inde abandonnait une partie d'elle-même : Madagascar, dont l'isolement était acquis à l'Éocène.

Pendant ce temps l'Amérique du Nord s'était progressivement séparée de l'Europe. A l'Éocène, cette séparation n'était pas très avancée, et le Groenland était encore uni à l'Amérique; il s'en séparait vers le Miocène, tandis que la continuité des deux Amériques, rompue depuis plus de 100 millions d'années, se rétablissait progressivement. A la fin du Tertiaire, l'Inde arrivait près de l'Asie, et leur affrontement donnait naissance à l'Himalaya, tandis qu'un mouvement plus léger de l'Afrique vers le nord faisait surgir les Alpes et les Carpates. Ces mouvements, évidemment fort lents, se poursuivent apparemment encore.

La pangée, ainsi en désorganisation, continuait à se déplacer vers le nord dans son ensemble. Au début du Jurassique, l'équateur coupait à peine l'extrême nord de l'Amérique du Sud et traversait obliquement le Sahara du sud-ouest au nord-est, l'Afrique étant inclinée. A la fin de l'Éocène, il n'était plus très loin de sa position actuelle.

Ce morcellement des terres a fragmenté l'aire de taxons qui avaient pu auparavant s'étendre suffisamment. C'est ainsi que l'on peut comprendre leur présence en Europe (ou en Eurasie) et en Amérique du Nord, ou bien en Afrique occidentale et en Amérique du Sud. Les aires pantropicales s'expliquent aussi de cette façon. Il ne faut toutefois pas oublier la possibilité de transferts transocéaniques qui ont pu se produire plus facilement lorsque l'Atlantique était moins large, notamment dans les cas d'espèces essentiellement américaines et présentes seulement sur une petite aire côtière en Afrique occidentale. Aujourd'hui encore, des fruits de palmiers brésiliens *(Attalea)* peuvent échouer sur les côtes de Bretagne (il est vrai que leurs graines sont mortes).

La présence de certaines espèces sur la côte pacifique de l'Amérique du Sud et en Polynésie ou en Nouvelle-Zélande s'explique aisément (sans qu'il soit nécessaire de faire intervenir des migrations transocéaniques) par la continuité de ces territoires, assurée grâce au continent antarctique avant la dislocation de la pangée à une époque où cette région était assez loin du pôle.

A titre d'exemples plus précis de distributions faciles à interpréter grâce à la dérive des continents, on peut citer, avec Melville, celle du genre *Cneorum* dont les trois espèces se trouvent respectivement sur les côtes nord-occidentales de la Méditerranée, aux Canaries et à Cuba, ou bien celle de la famille des Canellacées. Cette dernière est présente à Madagascar, en Afrique orientale, aux Antilles, en Amérique du Sud et jusqu'en Floride. Les migrations du *Sciadopitys* et du *Sequoiadendron giganteum* n'ont pu se faire que grâce à l'existence de la pangée. La biogéographie des Bryophytes notamment est aussi éclairée par la notion de dérive des continents.

Zones de végétation et grandes divisions floristiques

Les végétaux d'un territoire donné constituent dans leur ensemble sa *flore,* ou *cortège floristique*. Les aires d'un nombre suffisant d'entre eux se superposent, au moins en partie, pour former un *territoire floristique,* comme la région méditerranéenne. Ainsi, l'olivier, le chêne vert, l'arbousier, etc., caractérisent cette dernière. Au sein d'un tel territoire, comme la flore est relativement homogène, on atteindra vite une surface abritant un nombre d'espèces non susceptible d'augmentation lorsque la surface étudiée augmentera. Toujours dans la région méditerranéenne, cette surface minimale sera d'environ 150 000 km². Pour des surfaces plus grandes, les espèces changent en partie, mais leur nombre total n'augmente plus notablement.

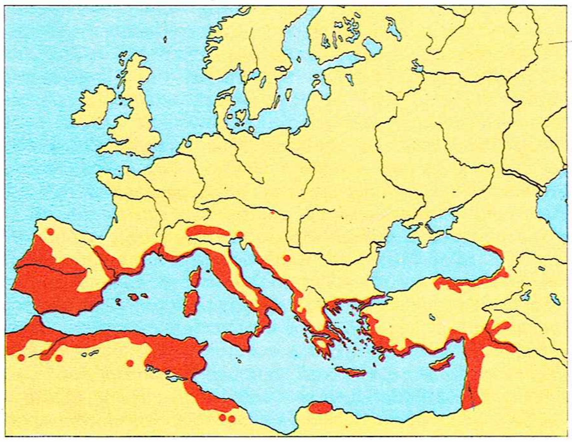

▶ *Le domaine méditerranéen (région méditerranéenne) [en rouge] est caractérisé par la distribution de l'olivier.*

I.G.D.A.

La richesse en espèces pour un territoire de référence (10 000 km²) varie avec les territoires et atteint son maximum en forêt tropicale. Certains centres d'endémisme sont aussi spécialement favorisés (Le Cap, Madagascar). Mais le cortège floristique d'un territoire comme celui de la Méditerranée est en rapport avec des conditions écologiques. Des conditions très comparables se retrouvent ailleurs sur la terre : en Californie, au Cap, etc. Il est intéressant de comparer la physionomie de ces territoires, dont les cortèges floristiques peuvent être fort différents mais où les espèces peuvent occuper des « niches écologiques » très semblables et donc être vicariantes. Ces espèces vicariantes peuvent être apparentées systématiquement ou très distinctes, leurs morphologies et leurs modes de vie similaires étant alors affaire de pure convergence. A ce point de vue, les divers aspects de la végétation méditerranéenne, la forêt dense tropicale, la forêt tempérée de feuillus, la forêt mixte ou celle de Conifères, la steppe tropicale ou tempérée, la toundra sont des entités, ou *formations végétales,* réalisées par des flores variées.

Ces grandes formations caractérisent des *zones de végétation* s'échelonnant en latitude, et dont une image est donnée par l'étagement de la végétation des montagnes avec l'altitude.

On peut, en se fondant sur la composition floristique, diviser la planète en plusieurs *empires,* ou *zones, floristiques* caractérisés par leur flore et présentant chacun diverses formations suivant les conditions écologiques : les empires holarctique, néo- et paléotropical, australien, du Cap et antarctique. Ces empires sont divisés à leur tour en domaines plus petits dans lesquels non seulement la flore, mais aussi les formations végétales sont plus homogènes. La région méditerranéenne est l'un de ces domaines. Le domaine atlantique, avec les côtes ouest de l'Europe et toutes les îles Britanniques, est également bien caractérisé. Des espèces sont plus ou moins inféodées à ces régions : par exemple, l'aire des plantes atlantiques ne dépasse pas une ligne qui joint Bordeaux à Orléans et Paris, ou bien atteint le Rhône et le Rhin (la plante est alors subatlantique). Certaines plantes méditerranéennes remontent au nord, le long des côtes atlantiques, ou même à l'intérieur des terres dans des stations bien exposées (plantes latéméditerranéennes).

Les grands empires et domaines n'ont évidemment pas toujours été localisés comme ils le sont maintenant. Les mouvements de la pangée dont nous avons parlé ont placé pour un temps le Sahara dans l'empire antarctique, et l'Europe dans l'empire paléotropical; le tropique du Cancer passait encore par l'Espagne à la fin du Crétacé. Il est vrai qu'à ces époques les flores étaient bien différentes : lorsque le Sahara était dans l'empire antarctique, les plantes vasculaires étaient à peine nées.

Description fine et histoire de la végétation

Dans un territoire floristique donné, l'écologie varie et entraîne la présence de groupements plus particuliers de plantes, qui donnent à petite échelle sa physionomie à la végétation. On peut alors définir localement des territoires floristiques de second ordre, dans lesquels la flore est homogène dès qu'on a atteint une aire limite, cette fois fort exiguë (50 m² par exemple). Ce sont des *associations végétales*. Ces associations sont extrêmement nombreuses, et on en trouve évidemment de vicariantes pour une écologie constante sous des compositions floristiques diverses. On les nomme d'après une *espèce caractéristique,* qui n'est pas forcément très abondante; une nomenclature latine assez lourde a été conçue pour cela, par J. Braun-Blanquet en particulier. Ces associations ont été rassemblées à leur tour en *ordres* et *alliances*. Elles sont peu nettes dans les forêts tropicales. Bien entendu beaucoup de plantes peu exigeantes peuvent se trouver dans de nombreuses associations.

D'une part, les associations peuvent passer progressivement les unes aux autres dans l'espace si les conditions

C. Bevilacqua

◀ *Dans un* **territoire floristique,** *la* **flore** *ou* **cortège floristique** *est relativement homogène. L'olivier, l'arbousier et le chêne vert caractérisent ainsi la flore méditerranéenne.*

écologiques ne se modifient pas brusquement. D'autre part, en un lieu donné, elles passent les unes aux autres de façon plus ou moins bien définie avec le temps. Ces faits, très bien étudiés par Braun-Blanquet lui-même, révèlent le *dynamisme de la végétation.*

Il semble qu'en tout lieu la végétation tende vers un type forestier; la forêt est donc le *climax* de toute végétation. Ce climax ne peut être atteint, pendant une période donnée, sur de vastes surfaces de la terre (déserts, zones froides, etc.), qui pourtant ont pu ou pourront être garnies de forêts. Même dans les régions où il peut être obtenu, comme les nôtres, il ne l'est pas partout. Il est atteint progressivement, grâce à une suite de stades menant de pelouses à des formations arbustives, puis forestières. L'évolution, qui forme une série de végétation, est souvent interrompue, notamment du fait de l'action des animaux (pâturages) ou de l'homme, mais aussi de celle du climat. Par exemple, une végétation qui se serait acheminée vers une forêt de chênes verts va s'arrêter au stade d'une brousse à chênes kermès. Il s'agit alors d'un *subclimax,* qui, dans ce cas et dans des conditions convenables, peut reprendre son évolution vers le stade à chênes verts. Mais, une fois formée, la forêt de chênes verts pourra se voir dégradée, pour les raisons déjà indiquées, en une nouvelle pelouse sur laquelle s'installera cette fois-ci non plus du chêne kermès, mais du pin d'Alep, pour peu que le sol ou le climat se soient un peu modifiés. Ce sera un *paraclimax,* qui est à vrai dire de même signification que le stade à chêne vert, souvent considéré comme climax unique, mais lié à des conditions un peu différentes. De toute manière, la région méditerranéenne, qui abrite ces divers paraclimax, ne restera pas toujours méditerranéenne; bien d'autres paraclimax plus ou moins forestiers suivront.

L'examen des pollens d'âges croissants accumulés dans les tourbières montre ainsi une dominance de diverses espèces arborescentes, qui se succèdent les unes aux autres et sont sans doute représentatives de « climax » successifs du lieu (Ozenda). Ceux-ci n'étaient donc bien, en fait, que des paraclimax.

De la même façon, en bien des endroits de la zone atlantique, la végétation évolue vers une chênaie, à chêne sessile surtout, mais celle-ci ne se réalisant pas toujours, l'évolution peut mener à des formations de chênes tauzins, voire simplement à des populations de bouleaux. Si la chênaie est réalisée, elle n'est ni forcément ni infiniment stable, le climat, les animaux et l'homme pouvant entraîner sa régression sous forme de lande, qui spontanément se reboise en bouleaux ou en chênes tauzins, son sol podzolique ne permettant plus l'installation de chênes sessiles. Là aussi, il n'y a que divers paraclimax, de rang finalement identique, liés à diverses conditions éco-climatiques (Couderc et Guédès).

On conçoit l'intérêt de procéder, pour des régions d'assez petite surface, à la cartographie de la végétation. Certains s'attachent à la délimitation des très nombreuses associations. D'autres, depuis H. Gaussen pour ce qui est de la France, constituent des groupements plus souples dont ils cherchent à révéler la sériation dans le temps, dans les conditions actuelles. C'est dans cette perspective de mise en évidence des séries de végétations que la carte de la végétation de la France au 1/200 000 est maintenant en bonne voie d'achèvement. La connaissance de la végétation naturelle indique les conditions écologiques locales et révèle les possibilités d'aménagement (reboisements, cultures, etc.) d'un lieu donné.

BIBLIOGRAPHIE

ANDREWARTHA H.G. et BIRCH L.C., *The Distribution and Abundance of Animals,* University of Chicago Press, 782 p., 1954. - BACHELIER G., *la Vie animale dans les sols,* Éd. de l'Orstom, 279 p., 1963. - DE BEAUFORT L.F., *Zoogeography of the Land and Inland Waters,* Sidwick and Jackson, London, 1951. - CLOUDSLEY-THOMPSON J.L. et CHADWICK M.J., *Life in Deserts,* Foulis, London, 1964. - DEKEYSER P.L. et DÉRIVOT J., *la Vie animale au Sahara,* Armand Colin, Paris, 1959. - DUSSART B., *Limnologie,* Gauthier-Villars, Paris, 1966. - FURON R., *Causes de la répartition des êtres vivants,* Masson, Paris, 1958. - LEMÉE G., *Précis de biogéographie,* Masson, Paris, 1967. - MERTENS R., *Die Tierwelt des tropischen Regenwaldes,* Kramer, Frankfurt, 1948. - PÉRÈS J.M. et DEVÈZE L., *Océanographie biologique et biologie marine,* t. I, 541 p., t. II, 514 p., Presses universitaires, Paris, 1961-1963. - PETTER F., *Répartition géographique et écologie des Rongeurs désertiques,* in *Mammalia,* 25, p. 1 à 222. - PRENANT M., *Géographie des animaux,* Armand Colin, 195 p., Paris, 1933. -

Archives P2

▲ **Pinus pinea** *et* **Pinus halepensis.**

RICHARDS P.W., *The Tropical Rain Forest.* An Ecological Study, Cambridge University Press, 1957. - VANDEL A., *Biospéléologie. La Biologie des animaux cavernicoles,* Gauthier-Villars, 619 p., Paris, 1964. - WEAVER J.E., *North American Prairie,* Johnsen Publ., Lincoln Nebr., 1954.

BARRY COX C., HEALEY I.N. et MOORE P.O., *Biogeography,* Oxford, 1973. - BIROT P., *les Formations végétales du globe,* Paris, 1965. - BOURNÉRIAS M., *Guide des groupements végétaux de la Région parisienne,* Paris, 1968. - BRAUN-BLANQUET J., *Pflanzensoziologie,* 3^e^ éd., Vienne, 1964. - CAIN S.A., *Foundations of Plant Geography,* New York, 1944. - *Carte de la végétation de la France au 1/200 000,* en cours depuis 1947, Paris. - DANSEREAU P., *Biogeography. An Ecological Perspective,* New York, 1957. - DARLINGTON P.J., *Biogeography of the Southern End of the World,* Cambridge, U.S.A., 1965. - EXCERPTA BOTANICA, B. Sociologica (bibliographies périodiques), Stuttgart, dep. 1949. - FAVARGER C., *Cytologie et distribution des plantes, Biol. Rev.,* 42, 163-206, 1967. - GAUSSEN H., *Géographie des plantes,* 2^e^ éd., Paris, 1954. - GOOD R., *The Geography of the Flowering Plants,* 4^e^ éd., Londres, 1974. - GUINOCHET M., *Logique et dynamique du peuplement végétal,* Paris, 1955. - ID., *Phytosociologie,* Paris, 1973. - HALLAM A., *A Revolution in Earth Sciences. From Continental Drift to Plate Tectonics,* Oxford, 1973. - ID., *éd. Atlas of Palaeobiogeography,* Amsterdam, 1973. - HULTEN E., *Atlas of the Distribution of Vascular Plants in NW Europe,* 2^e^ éd., Stockholm, 1971. - ID., *The Amphi-atlantic Plants,* in *Kungl. svenska Vetenskapsakad. Handl.,* sér. 4, 7 (1), 1958. - ID., *The Circumpolar Plants,* 2 vol. - *Ibid.,* 8 (5) et 13 (1), 1964-1971. - HUTCHINSON J., *The Families of Flowering Plants,* 3^e^ éd., Oxford, 1973. - JOVET P., *le Valois. Phytosociologie et Phytogéographie,* Paris, 1949, réimpr. Koenigstein, 1975. - KUCHLER A.W., *Vegetation Mapping,* New York, 1967. - ID., *International Bibliography of Vegetation Maps,* 3 vol. (en cours : vol. 2 ; Europe), Lawrence, U.S.A., 1965-69. - LACOSTE A. et SALANON R., *Précis de biogéographie,* Paris, 1969. - MC ARTHUR P.R., *Geographical Ecology,* New York, 1974. - MELVILLE R., *Continental Drift and Plant Distribution,* in TARLING D.H. et RUNCORN S.K. éd., *Implications of Continental Drift to the Earth Sciences,* New York, 1973. - MEUSEL H., *Vergleichende Chorologie der zentraleuropäischen Flora,* 2 vol. (en cours), Iéna, 1965. - MULLER J., *Palynological Evidence on Early Differentiation of Angiosperms,* in *Biol. Rev.,* 15, 417-450, 1970. - OBERDORFER E., *Pflanzen soziologische Exkursions Flora für Suddeutschland,* 3^e^ éd., Stuttgart, 1973. - OZENDA P., *Biogéographie végétale,* Paris, 1964. - POLUNIN N., *Introduction to Plant Geography,* Londres, 1960 (trad. franç., Paris, 1967). - REY P., *Essai de phytocinétique biogéographique,* Paris, 1960. - RILEY D. et YOUNG A., *World Vegetation,* Cambridge, 1966. - SCHMITHÜSEN J., *Vegetation Geography,* Londres, 1975. - SCHNELL R., *Introduction à la phytogéographie des pays tropicaux,* 2 vol., Paris, 1971. - SMITH A.C., *The Pacific as a Key to Flowering Plant History,* Honolulu, 1970. - TRALAU H., éd., *Index Holmensis. A World Index of Plant Distribution Maps,* 3 vol. (en cours), Stockholm, 1969-73. - TUXEN R., éd., *Bibliographia phytosociologica syntaxonomica,* Lehre, 1971-1975 (en cours). - ID., *Berichte intern. Symposien intern. Verein. Vegetationskunde,* 16 vol. (en cours), Lehre-La Haye, 1959-75. - VALENTINE D.H., éd., *Taxonomy, Phytogeography and Evolution,* Londres, 1972. - WALTER H., STRAKA H. et ELLENBERG H., *Einführung in die Phytologie,* III. *Pflanzenverbreitung ; IV. Vegetationsgliederung,* 4 vol., Stuttgart, 1960-70. - WULFF E.V., *An Introduction to Historical Plant Geography,* Waltham, U.S.A., 1943.

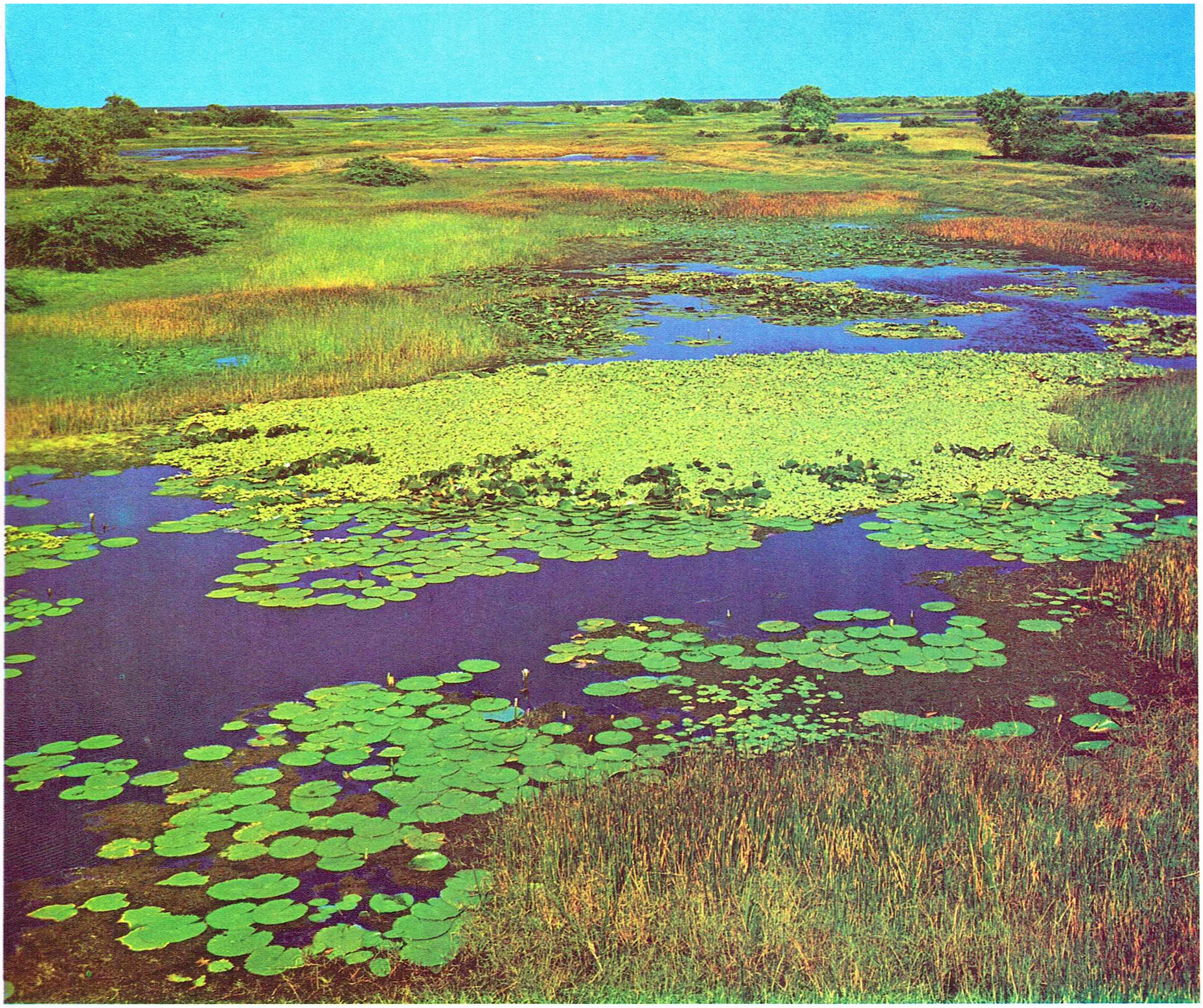

N. Cirani

▲ *« L'écologie est la science des relations des êtres vivants avec leur milieu »; ici un exemple de végétation hydrophile, formant un marécage le long de la côte colombienne de la mer des Caraïbes.*

ÉCOLOGIE

Historique et définitions

Si l'on cherche à donner une date de naissance à l'écologie, on obtiendra des résultats différents selon qu'il s'agit du contenu du terme, de son utilisation, ou de l'existence de définitions pouvant lui convenir. Ainsi des références aux relations entre les plantes ou les animaux et leur milieu se retrouvent chez les auteurs anciens : Théophraste, Aristote, Pline, etc. Des naturalistes tels que Buffon et Geoffroy Saint-Hilaire manifestaient déjà un esprit écologique dans bon nombre de leurs écrits. En 1854, le second avait proposé le terme d'*éthologie,* c'est-à-dire science du comportement, depuis considérée comme une partie de l'écologie — en la définissant comme « l'étude des relations des organismes avec la *famille* et la *société* dans l'agrégat et la communauté ». Quant à Darwin, sans utiliser le concept d'écologie, il parlait d'une « économie de la nature », ce qui constitue certainement une définition valable de l'écologie.

Le mot aurait été employé la première fois en 1858 dans une lettre de l'écrivain naturaliste américain H. D. Thoreau à son cousin G. Thatcher, un élève de Darwin. C'est au naturaliste allemand Ernest Haeckel qu'on en attribue la première introduction dans le langage scientifique, en 1866. Dans un texte de 1870, il en donne la définition suivante : « Par écologie nous entendons le domaine de la connaissance concernant l'économie de la nature. C'est la recherche de l'ensemble des relations de l'animal, à la fois avec son environnement inorganique et organique; ce qui comprend par-dessus tout ses relations amicales ou hostiles avec ceux des animaux ou des plantes avec lesquels il est en contact, directement ou indirectement. » En un mot, l'écologie est l'étude de toutes les relations complexes se rapportant, selon Darwin, aux conditions engendrant la lutte pour la vie. Cette science de l'écologie, souvent à tort considérée comme biologie dans un sens étroit, a longtemps formé le principal constituant de ce qui est communément considéré comme l'histoire naturelle. Comme cela est bien montré par les nombreuses histoires naturelles bien connues, à la fois récemment et dans les temps modernes, elle a été développée en très étroite relation avec la zoologie systématique.

On peut remarquer qu'Haeckel ne considérait que l'animal et la zoologie, mais les mêmes propos pourraient être tenus par un biologiste végétal : l'écologie concerne tous les êtres vivants. Il est probablement plus important de noter, à partir de ce texte, que la définition que donne cet auteur de l'écologie, que l'on retrouve le plus souvent, en tant que « science étudiant les rapports des êtres vivants avec leur milieu », est tronquée. En 1974, V. Labeyrie pense que cela a même pu influencer les progrès scientifiques dans ce domaine. Selon cet auteur, « Le sommeil de la démarche écologique pendant presque un siècle paraît lié à l'utilisation du concept de Haeckel dans son sens le plus étroit : l'écologie se résumait à l'étude des relations entre l'être vivant et son environnement; il n'était plus question de l'économie de la nature, qui disparaissait en tant que système complexe. »

En effet, actuellement, deux définitions de l'écologie sont généralement admises : celle qui se réfère aux relations entre les êtres vivants et le milieu environnant, et celle, déjà évoquée, d'économie de la nature. L. Bourlière (1970) les reprend toutes deux : « L'écologie est la science des relations des êtres vivants avec leur milieu; c'est-à-dire qu'elle vise à établir les lois qui règlent leurs

▶ *Les activités industrielles et la pollution qui en résulte, sensibilisent actuellement beaucoup le public aux divers aspects de la « crise de l'environnement ».*

N. Cirani

rapports, à la fois avec leur environnement physico-chimique et avec les autres plantes et animaux avec lesquels ils vivent. Elle est, en quelque sorte, à la fois une économie et une sociologie de la nature. »

La tendance moderne, et sûrement la plus fructueuse, est celle qui se rattache, sous l'impulsion d'E. P. Odum — écologiste américain contemporain, dont l'ouvrage *Fundamentals of Ecology* constitue la « Bible » de l'écologiste — au renforcement de la tendance à étudier l'économie de la nature. Odum définit l'écologie comme « l'étude de la structure et du fonctionnement de la nature ». W. Kunhnelt (1969) parle de « métabolisme de la nature ». Dans cette optique, la meilleure définition pour l'écologie serait peut-être : « science concernant l'étude des *écosystèmes* ». Mais cette définition n'a de valeur que lorsque la notion d'écosystème est acquise. Le terme d'écosystème est dû initialement à Tansley (1935) : il s'applique à l'ensemble constitué, d'une part par la totalité des êtres vivants formant sur une surface donnée une communauté (ou *biocénose*), d'autre part par l'environnement abiotique supportant et conditionnant cette biocénose *(biotope)*. Les êtres vivants et les facteurs abiotiques sont donc considérés comme les composants interagissant en interdépendance formant un tout unifié, ou système.

Le concept d'écosystème était cependant sous-jacent dans de nombreux écrits antérieurs à ceux de Tansley. Ainsi, Mobius (1877) avait décrit un banc d'huîtres en tant que « biocénose »; Forbes (1887) avait utilisé le terme de *microcosme* à propos de la communauté vivante d'un lac; Markus (1926) avait employé l'expression de *complexe naturel*. Des termes équivalents à écosystème ont été forgés par Thieneman (1939), qui parlait de *biosystème*, et par le Russe Sukachev (1944), qui a préféré l'emploi, devenu courant dans la littérature scientifique slave et germanique, du terme *biogéocénose*.

Actuellement, la recherche en écologie est donc conduite essentiellement selon une conception très liée à la notion d'écosystème : l'accent est mis surtout sur les différences entre écosystèmes, selon les communautés biotiques qui y participent, et sur le fonctionnement énergétique des écosystèmes. Par ailleurs, l'application à l'écologie de la théorie générale des systèmes (Wiener 1948; Bertalanfy, 1950, 1968) et l'utilisation des techniques de modélisation mathématique donnent lieu à de nombreux développements (Van Dyne, 1966; Patten, 1966, 1970).

L'écologie ne s'est pas seulement développée d'un point de vue strictement scientifique. Elle est aujourd'hui entrée dans la vie courante, comme en témoigne l'usage maintenant courant du mot, ainsi que de l'adjectif « écologique » associé à des vocables bien divers : conscience écologique, crise écologique, guerre écologique, révolution écologique, presse écologique... En effet, l'écologie, qui étudie le fonctionnement des systèmes naturels, ne laisse en dehors de son domaine d'investigation ni l'homme, être vivant au même titre que les autres (il se développe même une branche de l'écologie nommée écologie humaine), ni surtout le résultat des actions humaines sur les écosystèmes et donc sur la biosphère, ou *écosphère*, qui est en réalité la somme de tous les écosystèmes. De nombreux travaux décrivent les effets des pollutions sur les êtres vivants et les écosystèmes, cherchent à définir les critères écologiques d'une exploitation rationnelle des ressources naturelles ou de leur accroissement, rassemblent les données nécessaires à la gestion de certaines communautés naturelles. Ils sont souvent conduits sous l'égide des grands organismes internationaux (UICN; UNESCO) et insérés dans le cadre de programmes à l'échelle mondiale : Programme

biologique international (PBI) et Man and Biosphere (MAB). Néanmoins, ce qui frappe le plus le public, ce sont les cris d'alarme, les prises de position de scientifiques, qui, à partir des données de l'écologie, cherchent le plus souvent à sensibiliser le public aux divers aspects de la « crise de l'environnement ». Les ouvrages de R. Carson (*le Printemps silencieux,* 1969), B. Commoner (*Quelle terre laisserons-nous à nos enfants?* 1969), P. et A. Erhlich (*Population, ressources, environnement,* 1972) ont été parmi les premières et les plus marquantes de ces tentatives ; d'autres publications, telles que le rapport du Club de Rome (1972), ont aussi eu un grand retentissement. Certains voient dans l'écologie un véritable guide de conscience, une philosophie même : on a même proposé récemment de créer le terme d'*éco-philosophie*. Dans la mesure où les écologistes limitent leur ambition à une connaissance de plus en plus précise du fonctionnement des écosystèmes, l'écologie ne se distingue pas fondamentalement d'autres disciplines scientifiques. Mais il ne faut pas oublier que les découvertes scientifiques ont des répercussions sur l'histoire humaine : les effets peuvent être heureux ou malfaisants selon les cas. A cet égard, il est certain que la mise en œuvre des connaissances qu'apporte l'écologie ainsi que la compréhension des concepts qu'elle développe conduisent à des réflexions, des remises en cause des pratiques, des attitudes, voire à certaines formes de pensée ou de philosophie susceptibles d'intervenir à tous les niveaux de la vie.

Subdivisions de l'écologie

La conception unitaire globale à laquelle conduit la définition de l'écologie, en tant que science concernant l'étude des écosystèmes, conduit à la subdiviser selon les types d'écosystèmes étudiés ou selon les principales méthodes d'études de l'écosystème. Cependant, suivant les conceptions antérieures, on rencontre divers termes correspondant à des orientations différentes en écologie.

— *L'écologie mésologique,* ou *écologie « factorielle »,* porte d'une part sur l'étude du milieu et des facteurs le constituant *(mésologie),* d'autre part sur l'étude de l'action de ces facteurs sur les êtres vivants *(éthologie)*. Ce dernier terme désignait initialement l'étude du comportement des animaux sous l'action des facteurs du milieu. Il avait déjà été proposé en 1858 par Geoffroy Saint-Hilaire avant même l'usage scientifique du mot écologie. Rien ne s'oppose à ce que, malgré l'usage, il s'applique aussi aux végétaux. Dans le cadre de l'écologie mésologique, deux modalités d'étude sont possibles selon les termes créés par Kirchner (1902) : l'*auto-écologie* et la *synécologie*. Dans le premier cas, les êtres vivants objets d'études sont des populations d'une même espèce ; dans l'autre cas, ce sont les communautés, ou biocénoses, complexes d'êtres vivants, soumis ensemble à des conditions écologiques semblables.

● En réalité, l'*auto-écologie* ne constitue qu'une étape provisoire de la recherche : les travaux effectués dans son optique sont destinés à analyser et à expliquer des « comportements » qui sont naturellement situés dans le cadre général de l'écosystème.

● De même, en *synécologie* les problèmes de définition, de délimitation, de structure, de répartition et de dynamique liés à l'étude des communautés, ou biocénoses, ont parfois conduit à créer des termes spécifiques, tels que *biocénologie, biocénotique, phytosociologie* (ce dernier ne considérant que les communautés végétales), qui représentent en quelque sorte une « synécologie descriptive ». Cependant, si l'on envisage que le but à atteindre est l'étude des communautés dans leur fonctionnement, on peut alors aussi parler d'une « synécologie fonctionnelle », qui correspond à l'étude des écosystèmes, donc à la définition de l'écologie selon les tendances modernes.

— On parle aussi parfois de *démo-écologie,* pour désigner l'étude de la *dynamique des populations naturelles :* en effet, pour chacune des espèces d'une communauté, les effectifs des populations et leurs variations, qui commandent fondamentalement le fonctionnement de la communauté, sont en grande partie sous la dépendance de facteurs écologiques. En outre, l'évolution intraspécifique et spécifique se fait sous l'influence du milieu naturel. Il est donc parfaitement justifié d'envisager ces phénomènes sous un angle écologique.

LES FACTEURS ÉCOLOGIQUES

L'environnement et la notion de facteur écologique

Le mot *environnement* qui provient du mot anglais « environment », est passé dans le langage populaire. Dans le langage scientifique utilisé en écologie, il désigne l'ensemble des conditions (physiques, chimiques, ou même liées à la présence d'autres êtres vivants) auxquelles est soumis tout organisme. On en donne souvent comme équivalent le vocable *milieu,* et on parle ainsi indifféremment des conditions du milieu ou de l'environnement. Toutefois, certains auteurs préfèrent conserver le terme de milieu pour indiquer la nature de l'élément matériel majeur contenant les organismes : on parle ainsi des milieux aquatique, terrestre, marin, etc.

Une zone pouvant, à une certaine échelle, être considérée comme offrant un environnement homogène est appelée *habitat,* ou encore *biotope*. La plupart des conditions ou caractères de l'environnement dans l'habitat agissent directement sur les êtres vivants : ce sont alors des *facteurs écologiques*. Ne doivent pas être considérés comme des facteurs écologiques des caractères de l'environnement, l'altitude par exemple, qui n'ont d'action que par l'intermédiaire de facteurs écologiques climatiques, comme la température, la lumière, etc. Molinier et Vignes (1971) insistent sur la confusion entre les termes *agent* et *facteur*. Ils écrivent : « Il paraît logique de faire un usage normalisé des deux vocables. Un agent est une entité matérielle et énergétique organisée et bien individualisée... Du fait de sa matière complexe, il cumule dans le milieu plusieurs possibilités distinctes d'intervention physique ou chimique. » Cette conception tend à considérer les êtres vivants comme des agents écologiques susceptibles d'intervenir au niveau de nombreux facteurs. De fait, les habitudes de langage font que la plupart parlent aussi de facteurs biotiques pour désigner les êtres vivants et leur action sur les autres organismes.

Classification des facteurs

La difficulté d'analyser l'environnement et de séparer les facteurs est liée fondamentalement à l'existence de multiples interactions entre ceux-ci. Les tentatives de classification des « facteurs écologiques » le montrent bien. Ainsi, Molinier et Vignes (1971) sont orientés par la séparation entre facteur et agent, et proposent un tableau de classification pour l'ensemble des composants du milieu naturel.

CLASSIFICATION DES FACTEURS ET AGENTS ECOLOGIQUES SELON MOLINIER ET VIGNES

Facteurs écologiques

● Facteurs physiques
- énergie mécanique
- énergie photique (spectre visible et invisible pour nous)
- énergie thermique (rayonnement infrarouge)
- énergie électrique
- énergie chimique
- énergie atomique

● Facteurs chimiques
- eau
- pH (potentiel hydrogène)
- gaz du métabolisme (CO_2, O_2, N, etc)
- sels minéraux solubles et ionisables
- minéraux pratiquement insolubles et faiblement ionisables
- oligo-éléments
- matières organiques

Agents écologiques

● Agents abiotiques
- agents cosmiques (soleil, lune, terre)
- agents atmosphériques
- agents hydrosphériques
- agents édaphiques (du sol)

● Agents biotiques

Richard Colin

◀ ***Tableau de classification pour l'ensemble des composants du milieu naturel, proposé par Molinier et Vignes.***

Un autre système de classification, assez original, a été proposé par le biologiste soviétique Monchadsky (1958-1962) ; tenant surtout compte des réactions des êtres vivants et de leur degré d'adaptation aux différents facteurs, il établit trois catégories de facteurs :

— *Les facteurs périodiques primaires :* ce sont les facteurs du milieu présentant des variations régulières périodiques liées à la journée, à la saison, etc. Ce sont la température et la lumière.

— *Les facteurs périodiques secondaires,* dont les variations sont la conséquence de celles des facteurs périodiques primaires ; ainsi, la teneur de l'eau en différents éléments chimiques, qui dépend de la température, les sources alimentaires végétales, dont le rythme de production est réglé par l'énergie lumineuse disponible au cours de l'année, sont des facteurs périodiques secondaires.

— *Les facteurs non périodiques,* qui apparaissent de façon soudaine soit parce qu'ils ne font pas partie des facteurs habituels dans l'habitat (cas des interventions humaines sur divers milieux), soit parce que leur intervention n'a aucun caractère périodique prévisible. D'après Monchadsky, les interactions entre espèces différentes, donc une partie des facteurs biotiques, sont à ranger dans cette catégorie.

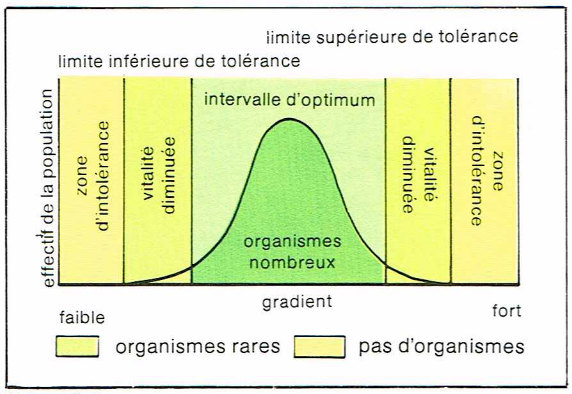

▶ ***Représentation graphique de la loi générale de* tolérance biologique.**

Richard Colin

En utilisant un point de vue essentiellement didactique, des simplifications sont possibles. Ainsi, G. Lemée (1967) a proposé une « classification basée sur la nature et les modalités d'action physiologique des facteurs indépendamment de leur localisation » dans les divers types de milieux. Il adopte la liste suivante :

— facteurs énergétiques (rayonnements) ;
— facteurs hydriques (dans l'atmosphère et dans le sol) ;
— facteurs chimiques (gaz, substances minérales et organiques) ;
— facteurs mécaniques (vent, érosion, neige, feu) ;
— facteurs biotiques.

En ce qui concerne les relations entre les facteurs écologiques et les organismes, il existe quelques principes essentiels s'appliquant de façon générale. Dans le cas assez simple des variations d'un seul facteur, les observations et les résultats expérimentaux montrent qu'en fonction de l'intensité de ce facteur, un processus biologique donné n'a lieu qu'entre deux limites, appelées *limites de tolérance,* et qu'il présente à l'intérieur de ces limites un *optimum* ou, tout au moins, une *zone optimale.* Pour un même facteur le comportement des différentes espèces n'est pas identique, et la courbe d'action caractérisée par les valeurs des trois points repères de l'intensité du facteur (les deux limites et l'optimum) peut servir à définir ce comportement. Ainsi, l'amplitude de variations supportée est variable selon les espèces : on qualifiera ces dernières par un adjectif rappelant le facteur étudié (par exemple *therme* pour la température) précédé des préfixes *eury-* pour marquer une large tolérance, et *sténo-* pour indiquer une amplitude faible.

En réalité, ces valeurs caractéristiques de l'intensité d'un facteur déterminant pour le comportement d'un organisme donné sont souvent variables avec les stades et les conditions de vie : par exemple, une plante peut réagir favorablement après l'exposition à un froid plus violent qu'elle ne pourrait normalement supporter, à condition d'avoir subi un endurcissement par l'application de plusieurs périodes de froid progressif.

En outre, les facteurs écologiques agissent les uns sur les autres : par exemple, pour la même espèce la résistance au froid est diminuée par une forte teneur en azote du sol. Une loi, formulée dès 1840 par l'Allemand Liebig à propos des éléments minéraux nécessaires à la croissance d'une plante et appelée *loi du minimum,* peut s'appliquer aux facteurs écologiques ; on nomme alors cette loi la *loi des facteurs limitants.* Blackman (1905) la définit ainsi : « la manifestation d'un processus biologique conditionné dans sa rapidité par plusieurs facteurs est limitée par celui de ces facteurs qui est le plus faiblement représenté dans le milieu, par rapport à sa concentration optimale ».

La connaissance des facteurs limitants est donc fondamentale lorsqu'on cherche à déterminer les exigences écologiques des organismes et à analyser l'action des facteurs sur eux. Dans la recherche des facteurs limitants, on pourra être guidé par quelques idées ou méthodes assez simples. Ainsi, quand une espèce a pour un facteur donné une très large amplitude et que, dans le milieu où elle vit, ce facteur est d'intensité relativement constante, ce dernier n'est sûrement pas limitant. Inversement, lorsqu'on observe des limites étroites de tolérance pour l'espèce et de grandes variations pour le facteur, celui-ci est très certainement limitant. On peut aussi étudier les conditions écologiques en bordure de l'aire de répartition d'une espèce : on s'aperçoit souvent que la limite géographique de l'espèce coïncide avec une valeur donnée d'un facteur, par exemple la température, qui est alors limitant. Dans les conditions naturelles, les organismes n'ont pas nécessairement les réactions que l'on pourrait attendre d'après les données d'études expérimentales, notamment celles qui concernent des facteurs abiotiques du milieu ; il faut, en effet, tenir aussi le plus grand compte des facteurs biotiques qui traduisent l'ensemble des interrelations entre êtres vivants au sein des communautés.

Facteurs abiotiques

Facteurs énergétiques et climatiques

La lumière

L'énergie lumineuse et ses variations — les microclimats lumineux

L'énergie lumineuse correspondant à la lumière représente la partie de l'énergie solaire apportée par les rayonnements de longueur d'onde de 400 à 750 nanomètres (nm) ou millimicrons (mμ). C'est la partie visible du spectre : la décomposition de la lumière par le passage à travers un prisme dissocie les différentes couleurs du spectre correspondant à différentes longueurs d'onde. L'énergie n'est pas également répartie dans tout le spectre visible : elle est maximale dans le vert, aux environs de 500 nm.

En ce qui concerne la lumière en tant que facteur écologique, il faut considérer que son action et son apport énergétique présentent une grande variabilité, à la fois dans l'espace et dans le temps, ainsi que dans la qualité du spectre. En effet, selon la position géographique d'un lieu (essentiellement sa latitude), la durée des jours, l'intensité de l'éclairement journalier et saisonnier sont différents. Cela est dû à l'inclinaison de l'axe des pôles par rapport au plan de l'orbite de la terre autour du soleil. Ainsi, sous notre latitude, on note une durée inégale des jours et des nuits : à partir du 21 décembre (jour le plus court) la durée du jour s'accroît jusqu'au 21 juin, puis décroît ensuite lentement. En s'approchant des pôles, apparaissent des périodes de jour continu en été et de nuit continue en hiver ; à 85° de latitude N., on compte 163 jours d'éclairement continu et 150 jours de nuit polaire.

A latitude égale, l'apport énergétique de la lumière est diminué par la nébulosité et accru en altitude, car l'absorption liée à l'épaisseur de l'atmosphère est moindre. En fait, pour considérer l'action de la lumière au niveau des êtres vivants, il faut tenir compte des microclimats lumineux, c'est-à-dire des modifications liées aux facteurs locaux : topographie, qualité d'absorption et de réflexion des surfaces, influence de la couverture végétale. Ainsi, le relief modifie l'inclinaison des rayons solaires sur le sol :

un flanc sud est plus ensoleillé qu'un flanc nord, un fond de vallée encaissée reçoit moins de soleil. Un sol couvert de cailloux blancs ou de neige réfléchit fortement la lumière : on dit que la *réflectivité (albedo)* est élevée; elle est, au contraire, plus basse pour des sols cultivés ou couverts de végétation naturelle.

La végétation influence fortement la répartition de l'éclairement. Dans nos forêts à feuilles caduques, on observe tout au cours de l'année une grande variation selon la position dans les strates élevées ou basses et selon que le feuillage est présent ou non; dans certaines hêtraies, 1 % seulement de l'éclairement total atteint le sol en été, alors que 50 % à 70 % y parvient après la chute des feuilles (la réduction est alors due aux branchages). Selon la nature du feuillage (persistant ou feuillu, composé de feuilles larges ou petites, très étalées ou pendantes, etc.), l'effet de l'ombrage est plus ou moins grand. Les irrégularités horizontales sont plus importantes par temps ensoleillé, où les taches d'ombre et de soleil sont bien marquées, que par temps couvert.

Le passage de la lumière à travers une couche de végétation transforme sa composition spectrale : on a même parlé d'« ombre verte » pour indiquer que les radiations vertes sont mieux représentées que les longueurs d'onde correspondant au bleu-violet et au rouge des extrémités du spectre.

Action de la lumière sur les végétaux et les animaux

Le rôle fondamental de la lumière est d'assurer l'apport énergétique permettant aux végétaux verts de synthétiser, à partir du gaz carbonique de l'air par le processus de photosynthèse, leur matière organique, qui sert ensuite de nourriture aux êtres vivants.

La lumière agit, en outre, pratiquement à toutes les phases du développement des êtres vivants. La croissance des plantes dépend de l'énergie lumineuse reçue, et tous les végétaux n'ont pas le même comportement : certaines espèces croissent mieux en lumière très vive, ce sont des *héliophytes,* comme la plupart des plantes cultivées. D'autres, les *sciaphytes,* ne peuvent vivre et se développer convenablement qu'à l'ombre : ce sont, par exemple, les Mousses et les plantes de nos sous-bois. Beaucoup de plantes ont d'ailleurs des exigences intermédiaires, moins tranchées. Quelques-unes, participant au peuplement des strates basses des forêts ombragées, satisfont leurs besoins de lumière pendant une phase très rapide au printemps avant la feuillaison des arbres, et leur propre feuillage disparaît dès que cette dernière a lieu : c'est le cas des plantes dites vernales, comme la jacinthe des bois et l'anémone sylvie. La distinction entre les essences d'ombre et les essences de soleil est essentielle pour les arbres forestiers : ainsi, le chêne ne peut reproduire de jeunes plantes que dans des zones bien éclairées; au contraire, le hêtre et le sapin germent et poussent facilement sous couvert (0,25 % de l'éclairement total suffit à des jeunes plantules de hêtre de un an pour croître).

Les longueurs respectives du jour et de la nuit commandent la floraison. Ainsi, on distingue des plantes de jour long, qui ne fleurissent qu'après avoir connu des journées à durée de jour supérieur à 12 heures, parfois 14 ou même 16 heures : c'est le cas du mouron rouge et de la betterave. D'autres, au contraire, nécessitent un passage par une série de nuits longues (on dit improprement qu'elles sont de jours courts), comme certains tabacs (variétés Maryland et Mammoth) et surtout les chrysanthèmes, dont la floraison assez tardive en automne est bien connue.

La chute des feuilles est aussi en partie liée à la lumière : la présence de lumières artificielles la retarde parfois.

La lumière agit également sur la forme des organes et sur la formation des pigments. Si l'éclairement est insuffisant, les tiges s'allongent et les feuilles jaunissent car les pigments chlorophylliens ne se forment plus : on dit que la plante s'étiole. Pour un même arbre, les feuilles développées dans la couronne, en pleine lumière, sont plus petites, plus épaisses et plus coriaces que celles qui, dans les strates plus basses, ont été ombragées. Une espèce comme la germandrée scorodoïne *(Teucrium scorodonia)* tolère l'ombre mais son aspect est alors différent : les plantes sont plus grandes et à feuilles plus larges à l'ombre qu'au soleil.

Chez les animaux, la lumière agit diversement sur les principaux comportements. En ce qui concerne l'activité,

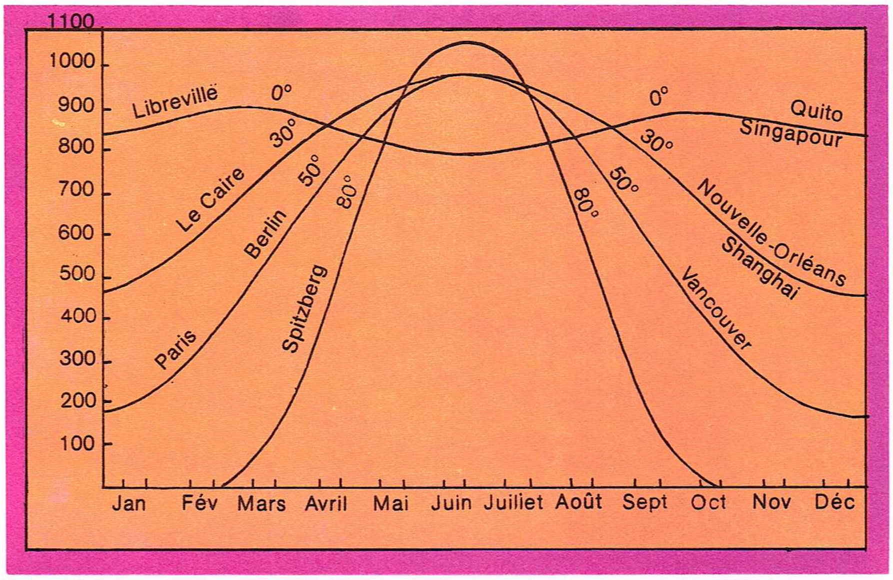

Richard Colin

▲ *Représentation graphique de l'ensoleillement total reçu, sur une surface horizontale, à différentes latitudes et à différentes périodes de l'année; le calcul est effectué à partir d'une valeur moyenne de référence pour l'intensité de l'énergie lumineuse de 1,94 g cal/cm²/an.*

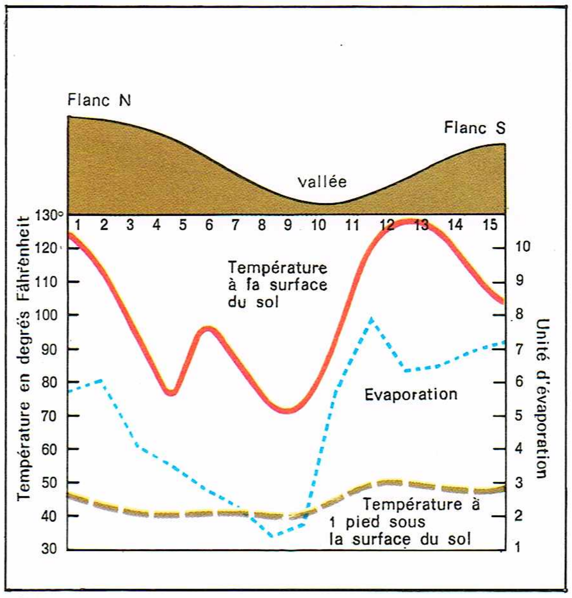

I.G.D.A.

◀ *Représentation graphique des variations des microclimats à travers une vallée des montagnes Rocheuses (Colorado).*

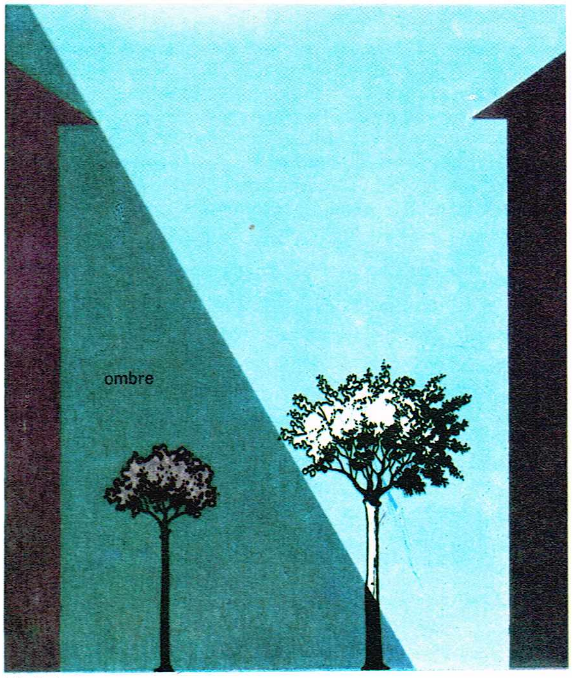

I.G.D.A.

◀ *La lumière agit pratiquement à toutes les phases du développement des êtres vivants et notamment des végétaux, en particulier pour la croissance et la forme; ainsi pour une même espèce d'arbres bordant une rue, le développement du feuillage sera différent selon que l'arbre est ensoleillé ou abrité.*

C. Souchon

▲ *La chute des feuilles est liée à la durée du jour; la présence de lumière artificielle la retarde parfois, comme en témoigne cette illustration.*

▼ *Représentation graphique de la fréquence relative de la ponte du moineau commun au cours de l'année sous différentes latitudes (d'après J. A. Baker).*

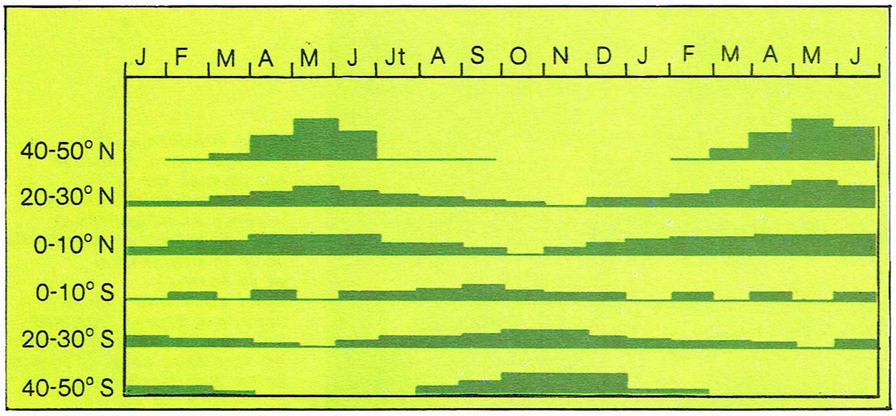

Richard Colin

les animaux diurnes recherchent à ce moment-là leur nourriture, se déplacent (passereaux); au contraire, d'autres ont des mœurs nocturnes (papillons de nuit, rapaces nocturnes). Assez nombreux aussi sont ceux qui ont un maximum d'activité au lever ou au coucher du soleil, comme le mulot *(Microtus agrestis)*.

La longueur du jour, ou *photopériode*, règle le cycle de vie de beaucoup d'espèces : ainsi, les périodes de repos *(diapauses)* observées chez les Insectes sont fréquemment induites par une photopériode courte. Les périodes de reproduction sont déterminées par la longueur du jour. C'est le cas pour les Poissons comme l'omble chevalier, qui fraie quand les jours sont courts; on a pu, en élevage expérimental, en modifiant la longueur du jour, obtenir des pontes plus précoces. C'est aussi le cas pour beaucoup de Mammifères ou d'Oiseaux : ainsi, le moineau pond toute l'année sous les latitudes faibles (à jour de durée presque égale à la nuit), tandis que sous nos latitudes sa ponte est limitée au printemps. Benoît a pu montrer, en encapuchonnant des canards, que la lumière était effectivement en jeu et agissait sur les mécanismes hormonaux. Les changements de livrée, comme ceux des animaux qui ont une forme blanche en hiver (hermine, lièvre variable, lagopède), seraient sous la dépendance de la photopériode. Il en serait de même pour l'apparition d'individus sexués chez les pucerons. Les départs migratoires des Oiseaux se déclenchent aussi au moment où les jours raccourcissent ou s'allongent, sans que la température intervienne.

Lors des déplacements, si un animal recherche un accroissement de l'éclairement, il est dit *luciphile* (sauterelles); si au contraire il fuit la lumière, il est *lucifuge*. Dans le premier cas, il y a phototactisme positif; dans le second, le phototactisme est négatif. Certains animaux se déplacent avec un angle constant par rapport à la source lumineuse (par exemple, les papillons de nuit). Cet angle peut aussi guider des déplacements habituels comme ceux des abeilles, ainsi que l'a montré le biologiste allemand K. von Frisch. On pense que des phénomènes semblables pourraient intervenir lors des migrations.

La lumière agit aussi sur la pigmentation. Les animaux cavernicoles sont toujours presque totalement dépigmentés; la formation de certains pigments *(mélanine)* a lieu sous l'action du soleil mais surtout sous celle des UV : des variations de colorations chez les organismes qui possèdent des cellules pigmentées capables de s'étendre ou de se rétracter *(chromatophores)* sont sous la dépendance de stimuli lumineux. Les radiations de courte longueur d'onde comme les UV sont plutôt défavorables à la vie : on pense qu'elles détruisent certaines molécules azotées. Elles ont une action bactéricide certaine. On leur attribue, en outre, un rôle morphogénétique responsable du nanisme des plantes d'altitude.

En milieu aquatique, la lumière pénétrant dans l'eau peut être tout d'abord considérablement atténuée, surtout si l'angle d'incidence est marqué, ce qui accroît la réflexion latérale, et aussi s'il y a des vagues; au fur et à mesure de la pénétration en profondeur il y a absorption et dispersion, si bien qu'à une certaine distance de la surface l'éclairement est presque nul. Cette profondeur, qui marque la limite de la vie de tous les végétaux photosynthétiques et des animaux qui y sont liés, varie selon la transparence de l'eau, laquelle est déterminée surtout par la teneur en particules en suspension. La qualité du spectre change aussi : le rouge et l'orange sont absorbés les premiers, près de la surface, avant le jaune et les UV, et c'est le bleu qui subsiste le plus profondément. Cette zonation verticale de l'intensité d'éclairement et la qualité de la lumière commandent en partie la répartition des êtres vivants dans le milieu aquatique.

B. Coleman

▲ *Action de la* **température** *sur les êtres vivants : entre des températures létales maximales et minimales, il existe un optimum qui correspond notamment aux meilleures conditions de reproduction. Ici, une vipère sud-africaine et sa progéniture.*

La température

Influence de la température sur les processus biologiques

La température d'un corps correspond à un certain degré d'agitation des molécules qui le constituent. Cette agitation dépend évidemment de la quantité d'énergie calorifique apportée, mais aussi du volume du corps ou de l'objet considéré et de sa chaleur spécifique. Il faut noter que la température est seulement repérable, tandis que la quantité d'énergie calorifique est mesurable.

Les processus biologiques étant liés à des activités chimiques, la température a une action déterminante sur les processus vitaux et sur la vitesse avec laquelle ils s'effectuent. En effet, la *vitesse des réactions chimiques* est soumise à la loi de Van'T Hoff, qui donne le rapport :
$\frac{\text{vitesse de réaction à } t^o}{\text{vitesse de réaction à } t^o + 10} = Q_{10}$. Ce rapport est assez souvent égal à 2.

L'influence de la température s'exerce également sur les réactions enzymatiques ainsi que sur tous les phénomènes physiques de diffusion, de solubilité, de viscosité, qui régissent notamment en partie la circulation des fluides dans les organismes, et les échanges entre ces derniers et leur milieu.

Les températures extrêmes ont sur les êtres vivants une action de limitation importante : au-dessus de 50 °C les protéines sont généralement détruites et les réactions enzymatiques stoppées ; au-dessous de 0 °C, étant donné la forte proportion d'eau dans les organismes, l'action du gel devient ainsi primordiale. On observe donc pour les êtres vivants une influence constante de la température au cours de la vie de l'individu sur la croissance, l'activité, la respiration, la reproduction... Par ailleurs, pour les conditions liées aux températures extrêmes, certains organismes possèdent des mécanismes de résistance. Au niveau de l'expression climatique, la température apparaît aussi comme un facteur agissant sur la répartition des espèces.

Action de la température sur les êtres vivants

Pour chaque espèce, on peut appliquer à la température les principes généraux valables pour l'étude de tout facteur. L'étude des capacités de survie montre qu'il existe des températures létales maximales et minimales, au-delà desquelles les organismes meurent. Dans l'intervalle entre les deux températures existe un optimum, qui correspond aux meilleures conditions d'activité, de reproduction, etc. L'écart entre les deux températures létales extrêmes détermine la tolérance des espèces à supporter soit de grands écarts (espèces dites *eurythermes*), soit de faibles écarts (espèces dites *sténothermes*). Souvent, l'activité ne reste élevée que dans un intervalle plus faible que celui permettant la survie : on a montré que diverses espèces de scolytes (Coléoptères

▶ *Parmi les Mammifères, beaucoup de Rongeurs et d'insectivores (ici des chauves-souris de l'espèce* **Rhinolophus ferrum-equinum)** *présentent des phénomènes d'hibernation.*

G. Venturini

xylophages) pouvaient vivre entre — 15 °C et 50 °C, mais qu'elles étaient actives seulement entre 5 °C et 40 °C. Pour une même espèce, l'optimum peut être différent selon l'origine géographique : ainsi, pour la méduse *Aurelia aurita,* Mayer (1955) a montré que des individus pêchés dans des eaux à température moyenne de 14 °C présentaient un maximum de pulsations natatoires entre 3 °C et 18 °C, alors que des individus recueillis dans une mer à température voisine de 29 °C atteignent ce maximum d'activité pour 28 °C à 30 °C. Les animaux à sang chaud *(homéothermes),* Oiseaux et Mammifères, peuvent garder une activité comparable pour une gamme de températures étendues; au contraire, les *poïkilothermes* sont très dépendants de la température pour leur activité.

Pour des températures extrêmes très froides ou très élevées, on note divers phénomènes de résistance. Dans le cas de l'action des températures élevées, le déclenchement des processus est, en outre, étroitement lié à la sécheresse.

— Une des façons d'échapper au froid est illustrée par les **migrations saisonnières** des Oiseaux, bien que leur départ semble donné par les fluctuations de la photopériode. De telles migrations existent aussi pour certains papillons, comme les phalènes, mais la réussite en est beaucoup plus aléatoire, à cause de leur mauvaise résistance aux vents.

— De même, une entrée en **vie ralentie** permet d'éviter la période froide. On connaît bien les phénomènes d'hibernation des Mammifères comme l'ours ou la marmotte, mais un état de vie ralentie existe aussi chez beaucoup de Rongeurs, d'insectivores (hérisson, chauve-souris) et chez les animaux à sang froid (Reptiles, Amphibiens, Poissons). Chez les Invertébrés, on observe des formes de résistance : kystes, gemmules, etc., ou bien des arrêts d'activité à divers stades du développement, comme chez de nombreux Insectes, dont on dit alors qu'ils sont en *diapause*.

— Une certaine adaptation permettant la résistance est également possible : ainsi, l'**abaissement du point de congélation du sang** de certains Poissons, par suite d'une augmentation du taux des sels, leur permet de résister dans les mers froides : le point de congélation du sang, voisin de — 0,5 °C en été, peut descendre en dessous de — 1,5 °C en hiver.

— L'**épaississement des pelages** est banal, mais significatif.

En comparant des espèces voisines vivant dans des climats différents, on montre que certains caractères morphologiques permanents sont adaptatifs et permettent une meilleure résistance aux froids. On présente parfois ces faits sous formes de « règles ».

— *La « règle de la fourrure »* établit que la fourrure est plus épaisse chez les animaux de pays froid; par exemple, le tigre de Mandchourie a une fourrure plus abondante que le tigre du Bengale.

— *La règle de Bergmann* indique que parmi des espèces voisines ou des variétés à l'intérieur d'une même espèce, les formes les plus grandes se rencontrent dans les régions froides. Si l'on considère, d'une part, que la déperdition de chaleur est proportionnelle à la surface, d'autre part, que la surface croît avec le carré de la taille et le volume avec le cube de la taille, il est facile de remarquer qu'en diminuant le rapport de la surface au volume du corps, une augmentation de la taille favorise une moindre perte de chaleur. Cette règle se vérifie pour les manchots, le macareux moine, le loup, le lièvre arctique, etc.

— *La règle d'Allen* met l'accent sur la diminution de la longueur des appendices en zone froide. Elle peut être illustrée par la comparaison entre les longueurs des oreilles du renard arctique, du renard de nos régions et du fennec saharien. Elle s'applique aussi aux races humaines : le nez des Lappons et des Eskimos, de race jaune, est plus aplati que celui des Européens.

En ce qui concerne les végétaux, pour les végétaux supérieurs, il suffit de rappeler la classification des types biologiques de Raunkiaer pour illustrer la façon dont les plantes passent l'hiver sous nos climats. Cet auteur distingue :

— les **phanérophytes** (arbres, arbustes), dont les bourgeons restent à l'air, mais comportent des écailles externes protectrices dans le cas des arbres à feuillage caduc;

— les **chaméphytes** (plantes basses), dont les bourgeons sont susceptibles d'être protégés par la couche de neige;

— les **hémicryptophytes** (souvent des plantes en rosette), dont les bourgeons sont juste à la surface du sol;

— les **cryptophytes** ou **géophytes,** qui persistent l'hiver, uniquement sous forme de rhizomes, de bulbes, de tubercules enterrés et contenant des réserves;

— les **thérophytes,** qui existent l'hiver seulement à l'état de graines en vie ralentie *(anhydrobiose)*.

Souvent, le froid est nécessaire à la levée des dormances hivernales : c'est le cas pour beaucoup de semences d'arbres forestiers de nos régions, ou pour celles de plantes de montagne, comme les gentianes. De même, les bourgeons de certaines espèces ne peuvent débourrer que s'ils ont subi une période de froid : ainsi, les pêchers doivent avoir subi, selon les variétés, de 20 à 400 h de

▼ *Une entrée en* **vie ralentie** *permet d'éviter la période froide; ici un loir en léthargie hivernale.*

B. Coleman - J. Burton

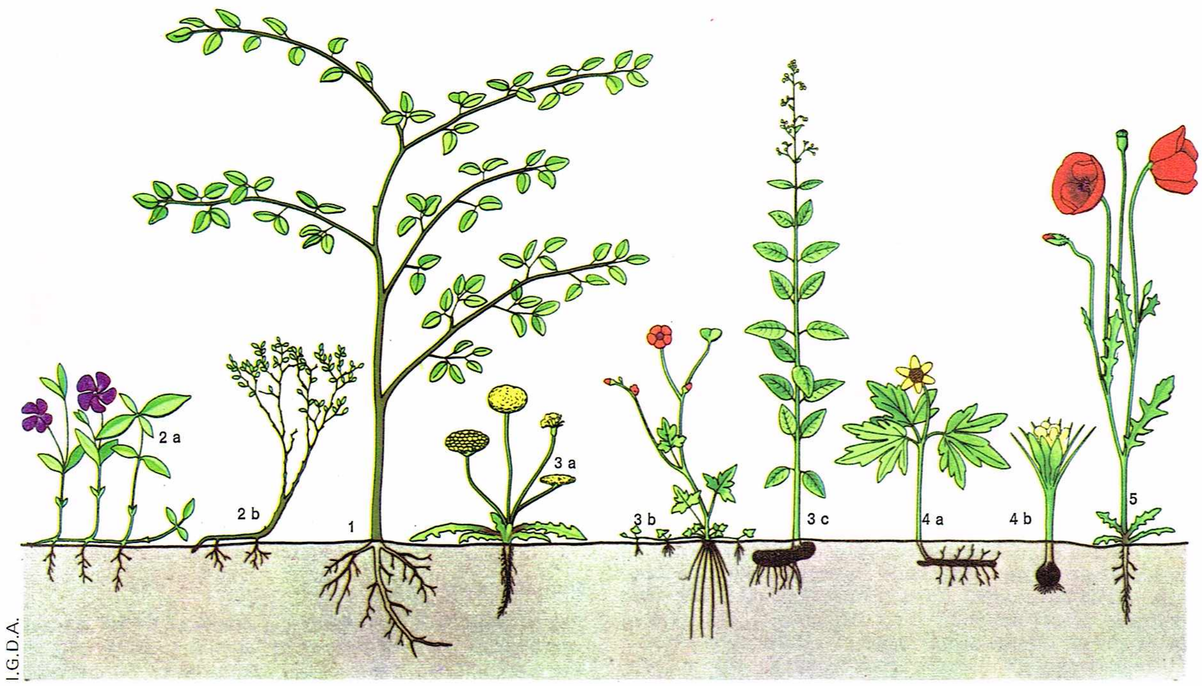

◀ *Représentation schématique, pour les végétaux, de divers types biologiques d'après Raunkiaer : 1, phanérophyte ; 2a, 2b, exemples de chaméphytes ; 3a, 3b, 3c, exemples d'hémicryptophytes dont les bourgeons persistent juste à la surface du sol ; 4a, géophyte à rhizome ; 4b, géophyte à bulbe ; 5, thérophyte (plante annuelle).*

▼ *Représentation graphique des successions de températures à appliquer pendant des durées précises pour favoriser une meilleure floraison : A, des tulipes ; B, des jacinthes (d'après Blaauw et coll.).*

températures en dessous de 7 °C ; cela explique la limite de cette espèce vers le sud et l'impossibilité de la cultiver dans les zones subtropicale et tropicale.

Un passage au froid est nécessaire à certaines plantes pour leur permettre de passer ensuite de l'état végétatif à l'état fertile : cette exposition au froid s'appelle la *vernalisation*.

Beaucoup de plantes cultivées, comme les blés d'hiver, la betterave, l'épinard, la carotte, le fraisier et l'oignon, nécessitent une vernalisation.

Comme pour la lumière, des alternances de températures différentes peuvent exercer une action sur la croissance des plantes. Chez la tomate, par exemple, pour des températures de jour toujours égales de 26 °C, on a appliqué diverses températures nocturnes : on a alors constaté que la croissance maximale est atteinte pour une température de nuit de 17 °C. En 1934, Blaauw et son école ont pu déterminer, en vue de pratiques culturales, des successions de température à appliquer pendant des durées précises pour favoriser une meilleure floraison des tulipes et des jacinthes. Ces essais ont d'ailleurs été conduits en tenant compte de certaines remarques écologiques : ainsi, N. Dames, rappelant que les tulipes et les jacinthes sont originaires du Proche-Orient et y subissent en été, à l'état de repos, des températures chaudes, avait proposé d'entreposer les bulbes dans des greniers chauds au lieu des caves fraîches en attendant de replanter : la floraison avait été bien meilleure.

Un certain endurcissement au froid est possible et est vraisemblablement assez répandu : pour des pieds de pin cembrot et de callune croissant dans les Alpes orientales vers 2 000 m d'altitude, les courbes expérimentales de résistance au froid des rameaux suivent sur l'ensemble de l'année une évolution comparable à celle de la température.

Température et répartition des organismes

Certains isothermes coïncident presque parfaitement avec les limites de répartition géographique de certaines espèces végétales. Ainsi, l'isotherme 4,5 °C de la moyenne du mois de janvier suit à peu près la limite vers le nord de la garance sauvage, plante subméditerranéenne : on peut en conclure que cette plante ne supporte que peu de temps cette température et rarement des températures plus froides. Dans d'autres cas, la limite correspond à celle des zones atteintes par des gelées tardives : c'est le cas pour beaucoup d'arbres fruitiers du sud de la France (abricotiers, pêchers, amandiers).

Pour les organismes des zones chaudes, la limite de survie et de reproduction peut apparaître à des températures beaucoup plus hautes. Par exemple, les récifs de coraux sont limités vers les hautes latitudes, à l'isotherme 21 °C des températures des eaux de surface.

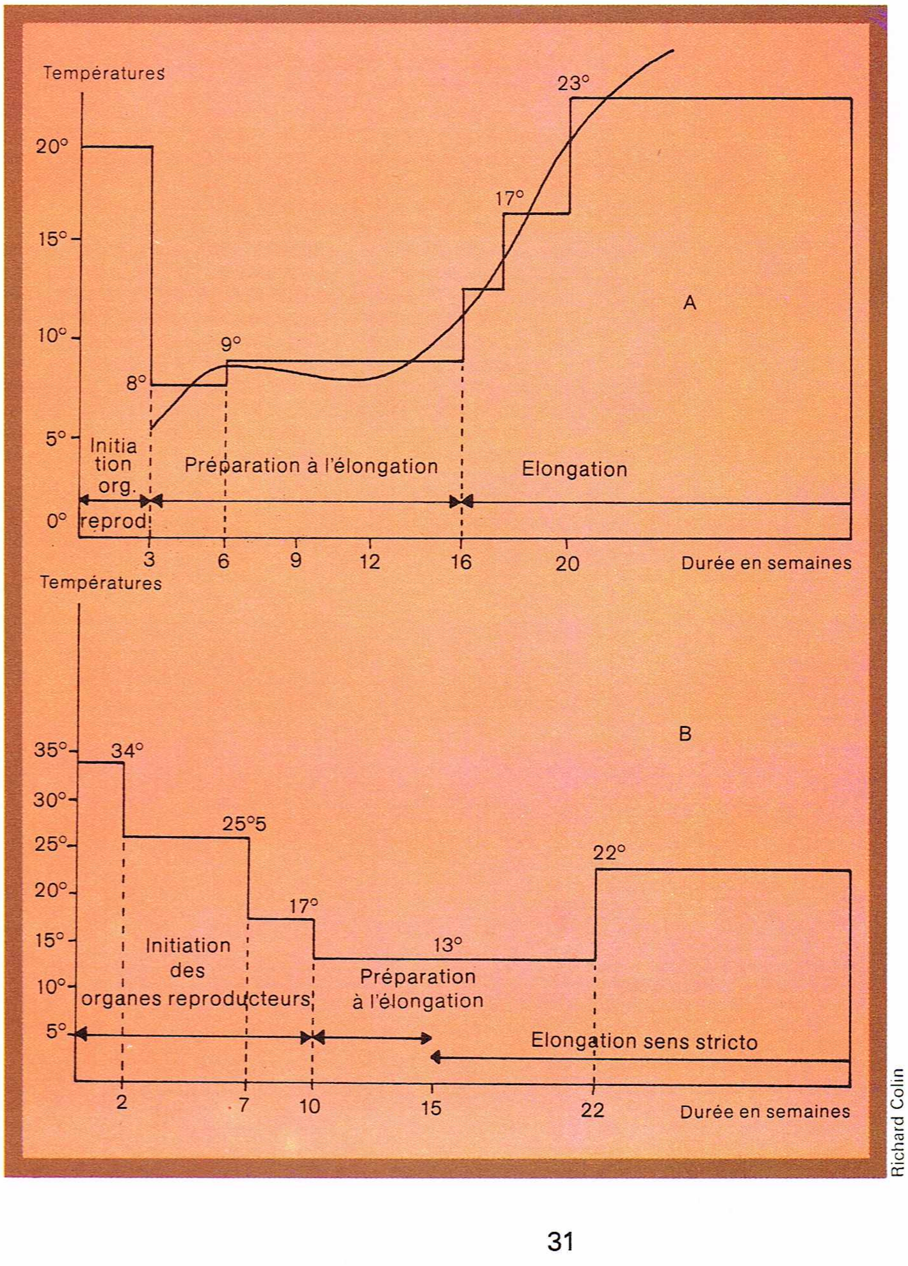

▶ *Représentation cartographique de la relation entre certains isothermes (moyennes des mois les plus chauds) et la limite boréale des épicéas et du chêne pédonculé (d'après H. Walter).*

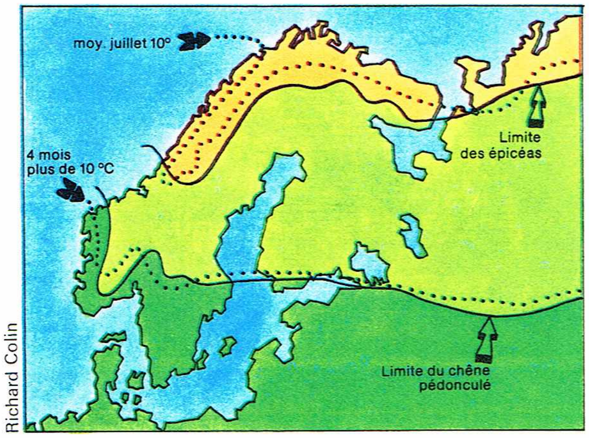

Richard Colin

▼ *Les œufs des lézards éclosent grâce à la chaleur du sable dans lequel ils sont enfouis; de ce fait, souvent, les espèces ont une limite nord, liée à l'insuffisance de chaleur au-delà.*

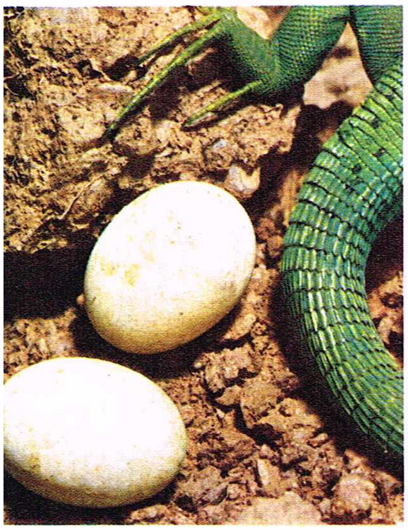

A. Margiocco

On estime que certains végétaux sont limités dans notre hémisphère vers le nord par la quantité de chaleur présente en été : c'est le cas de la vigne, du chêne pédonculé, de l'épicéa, dont la limite septentrionale correspond à des isothermes de mois chaud. Il en est de même pour une variété de criquet migrateur dont la limite d'extension coïncide avec l'isotherme d'été de 13,6 °C. On observe aussi que les lézards et les tortues, dont les œufs éclosent grâce à la chaleur du sable dans lequel ils sont enfouis, ont de ce fait une limite nord, liée à l'insuffisance de chaleur au-delà.

Les facteurs hydriques

État hydrique de l'air. Caractérisation de l'humidité climatique

La quantité d'eau contenue dans l'air sous forme de vapeur commande d'une part, au niveau des organismes, de nombreuses réactions, notamment celles de résistance à la sécheresse, d'autre part, à une autre échelle, la répartition des êtres vivants. Il s'agit en effet d'une composante essentielle du climat. Il convient toutefois de remarquer qu'elle est très dépendante des autres données climatiques, et surtout de la température qui commande l'évaporation. L'humidité de l'air est parfois donnée en grammes d'eau par mètre cube d'air *(humidité absolue)*, mais on utilise plus généralement une expression en pourcentage qui exprime l'*humidité relative*. L'humidité relative est le rapport de la quantité d'eau réellement contenue dans l'air à la quantité maximale que celui-ci pourrait contenir à saturation, pour des conditions de pression barométrique et de température fixées. Ce rapport peut être aussi fourni par celui de la pression partielle de vapeur d'eau par rapport à la pression de vapeur saturante à la même température.

La mesure de l'humidité atmosphérique est faite soit avec un hygromètre à cheveux, pour lequel on étalonne les variations de longueur d'une mince mèche de cheveux sous l'influence de l'humidité, soit avec un psychromètre, le modèle le plus simple étant constitué par deux thermomètres dont l'un est initialement maintenu humide au niveau du bulbe.

Ces mesures, d'une précision souvent assez faible, permettent d'évaluer l'humidité de l'air en un point, mais ce facteur est soumis à de grandes variations dans le temps et dans l'espace. C'est pourquoi, pour caractériser une région climatique quant à sa sécheresse relative, on se réfère à la pluviosité et à la température, qui commande principalement l'évaporation. Divers *indices* dits *pluvio-thermiques* ont ainsi été proposés; ils sont calculés de façon à fournir une appréciation moyenne annuelle de l'humidité de l'air.

— L'indice le plus simple est le rapport de la quantité d'eau tombée dans l'année (pluviosité P annuelle moyenne) à la température moyenne annuelle T.

— De Martonne a établi un *indice d'aridité* un peu plus compliqué : $I = \frac{P}{T + 10}$.

— Plus tard, L. Emberger a établi un indice encore plus élaboré, qui tient compte de l'amplitude de la variation des températures, car les accroissements de température agissent fortement sur l'évaporation; cet indice, prévu fondamentalement pour l'étude de la région méditerranéenne, s'écrit :

$$I = \frac{P}{\left(\frac{M + m}{2}\right)(M - m)} \times 1\,000;$$

M étant la moyenne des maximums du mois le plus chaud et m la moyenne des minimums du mois le plus froid, ces deux températures étant exprimées en degrés absolus.

On a, par ailleurs, proposé diverses représentations destinées à rendre compte de la répartition de l'humidité au cours de l'année. En effet, les indices précédents représentent, en quelque sorte, une vue synthétique et peuvent parfois en outre avoir une même valeur pour des endroits de climats cependant très différents. H. Gaussen pose en principe que le climat d'une localité est sec si la somme des précipitations d'un mois exprimée en millimètres est inférieure au double de la moyenne (en °C) des températures de ce mois. A partir de cela, on peut construire un *diagramme*, dit *ombro-thermique*, dans lequel on distingue aisément la période sèche,

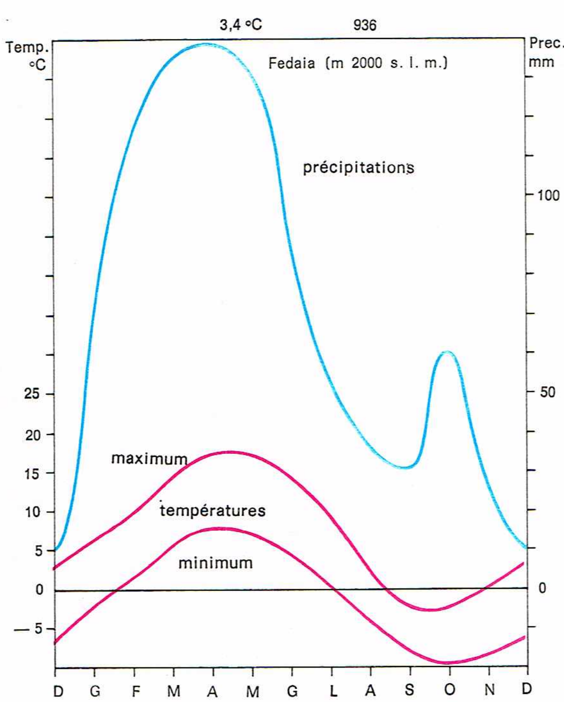

I.G.D.A.

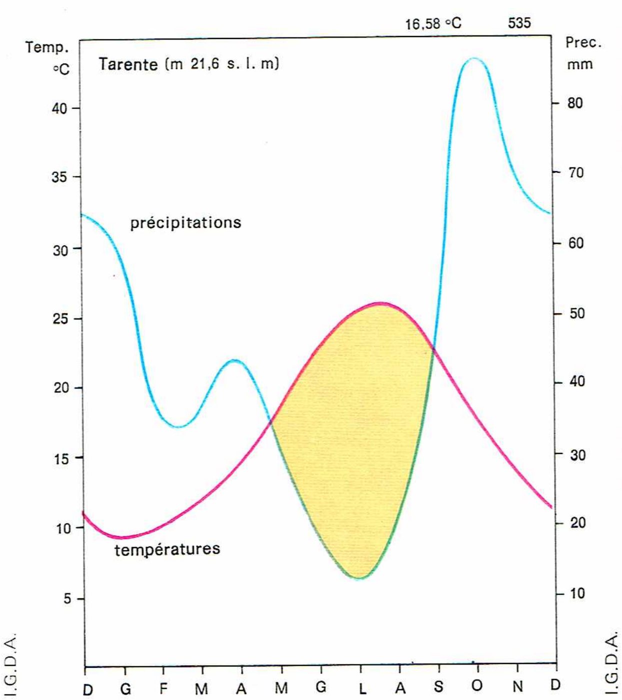

I.G.D.A.

▶ *Exemples de diagrammes ombro-thermiques, ou courbe de Gaussen, de deux localités à climat différent : à gauche, pour l'Alpe de Fedaia (Marmolada) : les moyennes des températures maximales et minimales sont indiquées en rose; à droite, pour Tarente : la période sèche de l'année est indiquée en beige.*

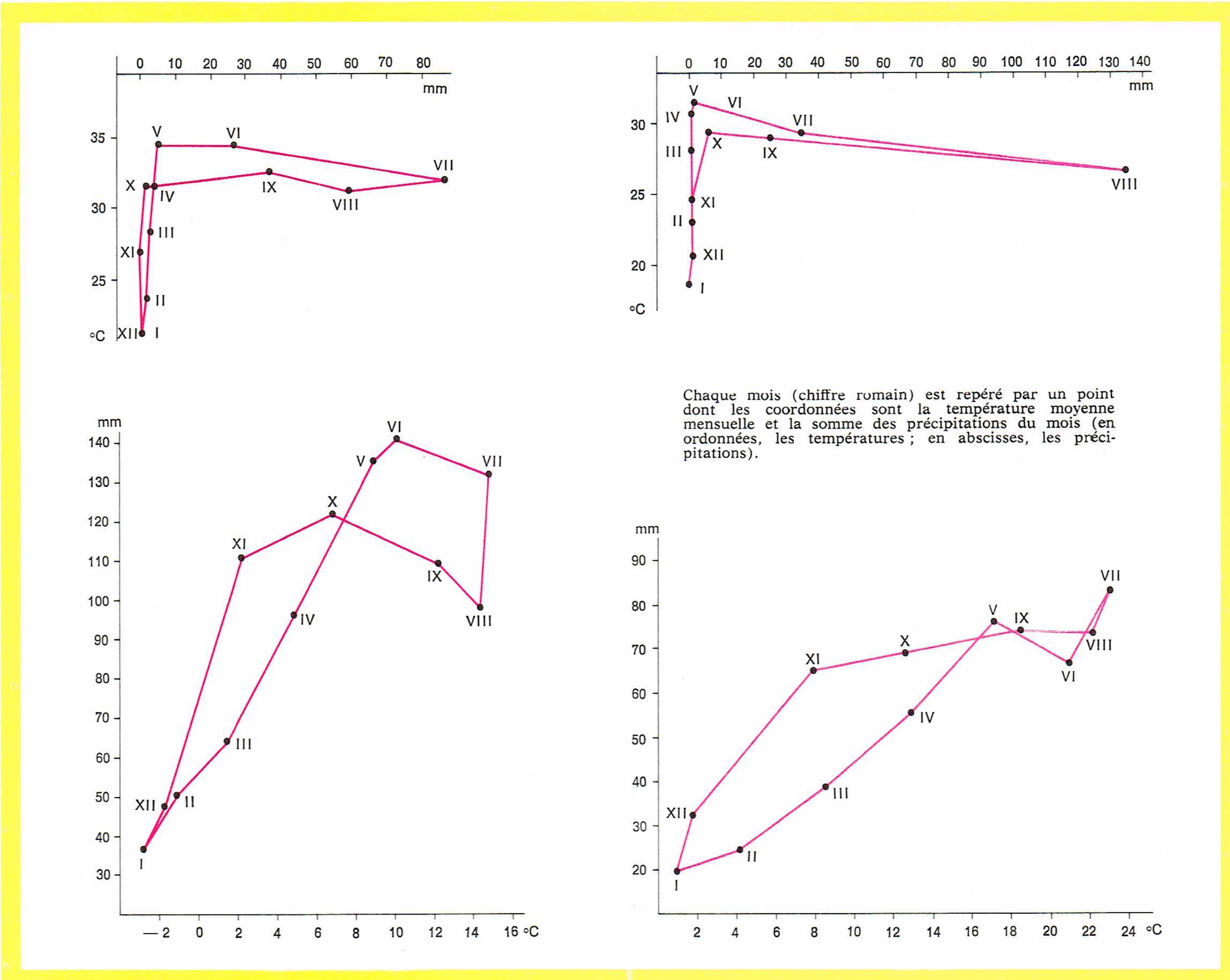

caractérisée par un niveau supérieur de la courbe thermique par rapport à celle de la pluviosité.

En 1948, Thornthwaite a suggéré une représentation semblable, mais en utilisant un autre critère que la température : celui de l'*évapo-transpiration potentielle*. Il calcule ainsi les variations de l'eau perdue, qui ne dépendent pas uniquement de la température : il établit donc un bilan d'humidité climatique plus précis.

D'autres représentations de la variation de l'humidité climatique au cours de l'année sont possibles : ainsi, les *climogrammes* sont obtenus en réalisant un graphique dans lequel chaque mois est représenté par un point, les coordonnées de ce point étant la moyenne mensuelle de la température et la pluviosité du mois. La forme de la figure obtenue en joignant les douze points représentatifs des mois de l'année est significative du type de climat ; la position des points sur le diagramme permet de situer les mois les plus secs.

Si l'humidité climatique est trop faible dans certaines zones, celles-ci sont arides, et certaines valeurs de ce facteur hydrique apparaissent alors comme critiques. Les aires géographiques de certaines espèces, les zones de végétations sont fortement influencées par ce caractère climatique ; c'est pourquoi on fait intervenir ce critère dans la délimitation des zones climatiques liées aux zones de végétation. L. Emberger (1933) considère que la végétation de l'étage méditerranéen est répartie dans des zones auxquelles correspondent plusieurs types climatiques, définis à la fois grâce aux valeurs du quotient pluviothermique et à la moyenne du mois le plus froid.

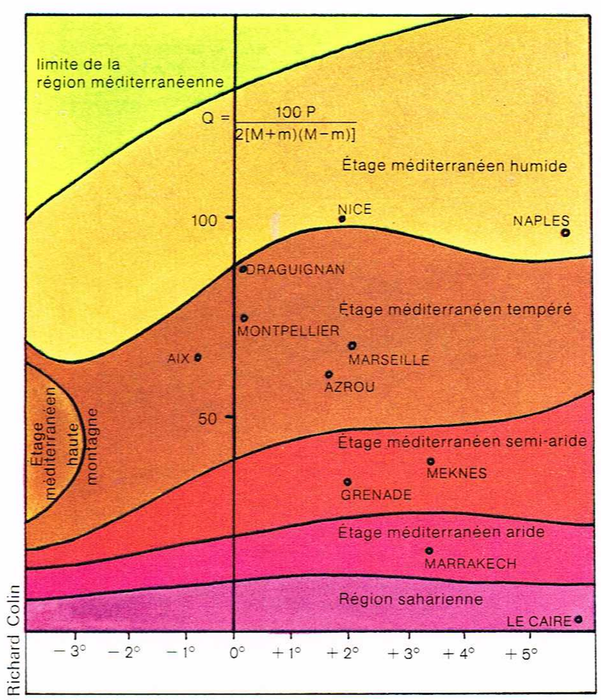

▲ ***Exemples de climogrammes permettant d'évaluer la variation de l'humidité climatique au cours de l'année : en haut, deux graphiques représentatifs de localités tropicales arides (à gauche, Tombouctou ; à droite, lac Tchad) ; en bas, deux graphiques représentatifs de localités tempérées (à gauche, Cortina d'Ampezzo ; à droite, Bolzano).***

◀ ***Pour la végétation de l'étage méditerranéen on peut distinguer des zones auxquelles correspondent plusieurs types climatiques définis à la fois grâce aux valeurs du quotient pluviothermique (Q), et à la moyenne du mois le plus froid (en abscisse).***

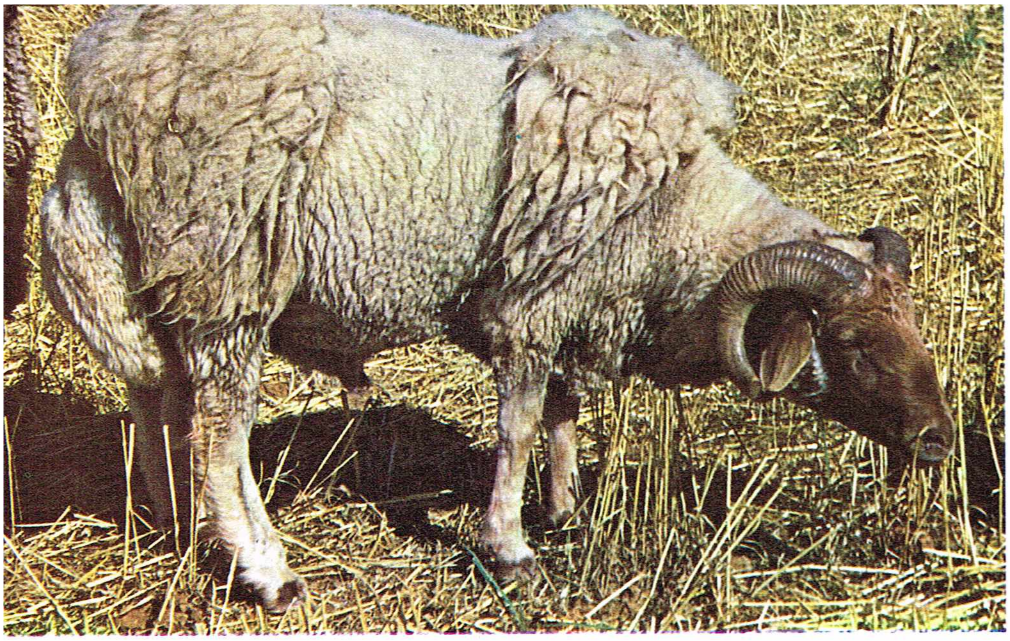

J. Six

▲ *La transformation métabolique d'oxydation des graisses produisant de l'eau favorise chez bon nombre d'animaux des régions désertiques, comme ce bélier à queue grasse* Ovis aries, *la résistance à la sécheresse.*

▼ *Certaines espèces animales marines sont adaptées aux variations d'émersion; un Crustacé libre, la lygie* (Ligia oceanica), *a fait l'objet d'études détaillées quant à son comportement vis-à-vis de l'humidité relative et à sa possibilité de régulation thermique.*

L'action de l'état hydrique de l'air sur les organismes ne peut être envisagée que par l'étude du bilan hydrique des êtres vivants; or, dans les communautés terrestres, cet état hydrique dépend étroitement, d'une part de l'eau disponible dans le sol pour les plantes, et dans la nourriture ou directement sous forme buvable en ce qui concerne les animaux, d'autre part des mécanismes d'utilisation de cette eau et de sa régulation.

Importance de l'eau pour les êtres vivants

L'eau est le constituant le plus important en poids de la matière vivante. Elle participe aux réactions chimiques; elle sert de milieu intérieur et de véhicule pour les produits du métabolisme; en outre, son évaporation intervient dans les phénomènes de régulation thermique.

Dans les milieux aquatiques d'eau douce ou marins, l'eau est évidemment disponible en grande quantité à tout moment : les relations entre les facteurs hydriques et les êtres vivants ne se situent donc pas au niveau des problèmes d'approvisionnement, d'économie et d'utilisation, mais sont uniquement dépendantes des actions liées aux propriétés physiques de l'eau. Ainsi, la pression hydrostatique, la densité et la viscosité du milieu aquatique peuvent intervenir au niveau de certains caractères physiologiques ou morphologiques, notamment ceux qui permettent de supporter les variations de pression.

Quant aux animaux et végétaux terrestres, ils ont besoin d'une alimentation en eau, et les pertes constantes constituent des éléments du bilan hydrique, bien que certains mécanismes puissent les réduire.

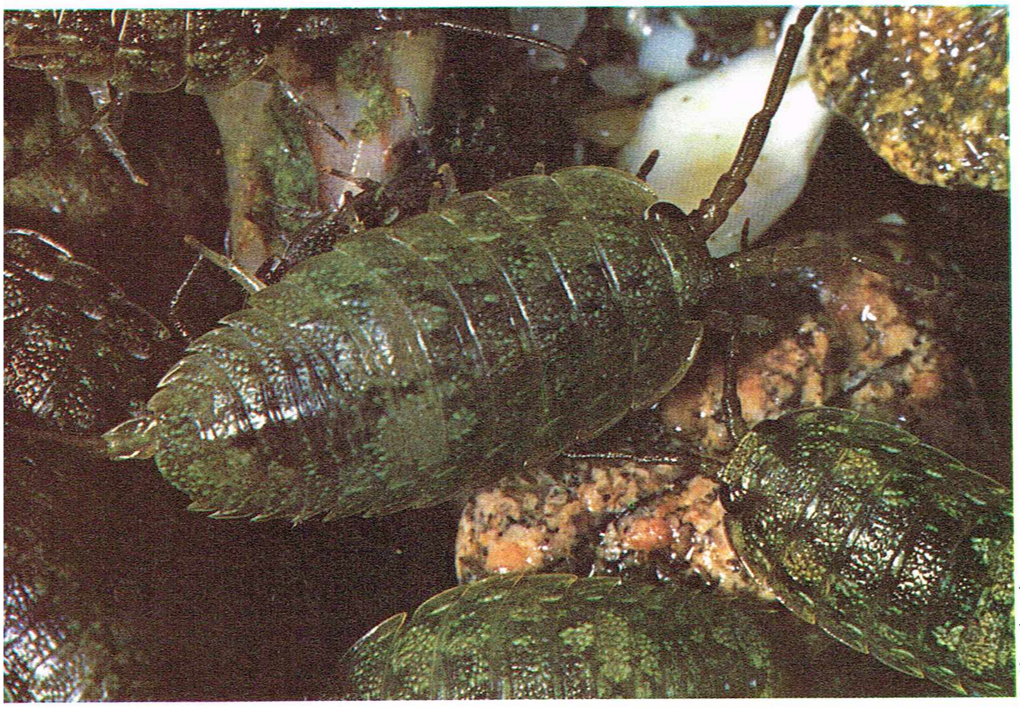

A. Kerneis - Jacana

Action des facteurs hydriques sur les animaux terrestres

Chez les animaux terrestres, les pertes d'eau sont dues à l'eau transpirée, à la vapeur contenue dans les gaz expirés, à l'eau présente dans les excréments solides et surtout dans l'urine. L'eau nécessaire leur est procurée de trois façons principales : tout d'abord celle de l'ingestion directe par boisson, puis celle d'une pénétration par la peau lors de l'immersion plus ou moins longue en milieu aquatique ou par contact avec des surfaces humides (Amphibiens, certains Mollusques, diverses larves d'Insectes, des Acariens et des Crustacés à cuticule mince) et, enfin, celle de l'eau contenue dans les aliments d'origine animale ou végétale. Dans ce dernier cas, l'eau est constituée par l'eau libre des milieux intérieurs ou intercellulaires ; cependant, dans quelques cas d'ingestion de substances très sèches, il est possible que l'eau soit produite par voie métabolique, par exemple par oxydation de lipides (chez les charançons du riz et du blé).

Cette transformation métabolique d'oxydation des graisses produisant de l'eau est celle qui a lieu chez certains animaux qui peuvent survivre longtemps sans boire. Le cas le plus classique est celui du chameau et du dromadaire, qui peuvent obtenir, en cas de privation, de l'eau à partir des graisses contenues dans leur bosse. D'autres animaux des zones désertiques, comme certaines gazelles, certaines races de moutons à queue adipeuse et le rat-kangourou *(Dipodomys)*, ont les mêmes possibilités. Chez ce dernier, en outre, plusieurs éléments favorisent la résistance à la sécheresse : l'absence de glandes sudoripares, la production de fèces très peu hydratées et d'une urine très fortement concentrée, la possibilité d'obtenir son eau presque uniquement à partir de l'eau métabolique, et aussi une activité limitée à la nuit, car il reste le jour dans son terrier.

Plusieurs comportements des animaux sont plutôt des façons d'éviter la sécheresse que de la supporter. Dans les régions à saison sèche, certains Vertébrés (Dipneustes, Amphibiens, Reptiles, Mammifères, Lémuriens) entrent en vie ralentie : il y a *estivation*. Au contraire, des déplacements permettent de quitter la région défavorable, soit de façon saisonnière par des migrations (Oiseaux, Mammifères), soit par le nomadisme, lequel est lié aux conditions du moment (présence de pâturages et de points d'eau), soit même par des émigrations définitives lorsque des territoires acquièrent et gardent pour de longues années des conditions défavorables.

Chez les Invertébrés, les mécanismes permettant de supporter ou d'éviter la sécheresse sont comparables. Chez les Insectes et l'ensemble des Arthropodes, ceux qui ont un tégument plus épais perdent moins d'eau. Une autre possibilité de réduction de la perte d'eau est la fermeture des orifices respiratoires, ou même l'obturation de la coquille, comme chez les Gastéropodes. Des phénomènes d'estivation permettant la vie sans apport d'eau *(anhydrobiose)* s'observent chez les Rotifères, les Tardigrades, les Nématodes, les Insectes, les Mollusques, etc. Cette anhydrobiose atteint plusieurs années pour un escargot de la bordure du désert saharien, *Helix desertorum*. Pour certaines espèces, il existe des formes de résistance : gemmules des Éponges, kystes, etc.

De nombreuses observations réalisées sur les Insectes montrent le rôle de l'humidité atmosphérique et de l'eau sur l'activité, le comportement et sur les cycles de reproduction. Ainsi, chez les moustiques, on a constaté que *Culex fatigans* cesse de se nourrir quand l'humidité relative descend en dessous de 40 %, alors que pour *Anopheles maculipennis* l'activité est maximale pour 94 % d'humidité relative. Certains Coléoptères, comme *Tribolium confusum* et *Dermestes vulpinus*, se nourrissent moins abondamment si l'humidité est trop haute. En ce qui concerne la reproduction, les phénomènes de copulation ainsi que la vitesse de développement des œufs et des larves sont généralement dépendants de l'humidité relative; il existe un optimum pour chaque processus et pour chaque espèce.

Les animaux marins soumis à des périodes d'émersion plus ou moins longues du fait qu'ils vivent dans la zone de balancement des marées constituent un cas particulier. Dans les endroits où la marée a un écart de plusieurs mètres entre marée haute et marée basse, il est possible d'observer une véritable *zonation verticale* sur la bande où les organismes sont à découvert deux fois par jour :

ceux des zones supérieures sont découverts plus longtemps, ceux de la zone la plus haute n'étant même atteints par l'eau qu'au moment des marées de vive eau. Plusieurs espèces animales, les littorines (Gastéropodes), des balanes (Crustacés fixés) et des lygies (Crustacés libres), sont adaptées à de telles variations : certains mécanismes leur permettent d'éviter la dessiccation lorsqu'elles sont à découvert.

Ces réactions sont surtout d'évitement; on peut les classer ainsi :

— le maintien dans les flaques dues aux irrégularités du relief, bien qu'il y ait des variations de nombreux autres facteurs écologiques (température et salinité en accroissement, taux d'oxygène en baisse) ;

— l'enfoncement dans le substrat meuble (vase ou sable), qui conserve plus longtemps de l'eau, ou dans les fentes de rochers, ou encore le déplacement sous un abri (galets, Algues) ;

— pour les espèces fixées surtout, la fermeture des coquilles (certains Mollusques) ou de la coque de protection (balanes), ou encore la rétraction (anémone de mer).

Un Crustacé libre, la lygie *(Ligia oceanica)*, a été étudié en détail par Edney (1953) des points de vue de son comportement vis-à-vis de l'humidité relative et de sa possibilité de régulation thermique. La lygie vit dans la zone supérieure de balancement des marées. Les jeunes restent toujours abrités dans des zones où l'humidité relative est proche de la saturation (100 %). Les adultes supportent par contre une humidité relative atteignant seulement 70 %, et des températures qui, lors d'une exposition au soleil, atteignent jusqu'à 40 °C ; cependant, à 100 % d'humidité, ces mêmes adultes meurent si la température dépasse 30 °C, car dans ce cas le processus thermorégulateur de la transpiration ne peut pas avoir lieu.

Les exigences des divers animaux terrestres vis-à-vis de l'eau permettent de les classer en groupes qui présentent les mêmes exigences écologiques sur ce plan. On distingue ainsi :

— les *amphibies* et les animaux marins découverts à marée basse, qui vivent une partie du temps dans l'eau ;

— les *hygrophiles,* qui recherchent les endroits très humides : sols, fentes de rochers, bois et écorces, comme c'est le cas pour les lombrics, les Gastéropodes, les cloportes, les Collemboles et autres Invertébrés du sol ;

— les *mésophiles,* dont les exigences vis-à-vis de l'eau sont moyennes et qui ont généralement une bonne tolérance (dans certaines limites) à la variation des facteurs hydriques ; c'est le cas le plus fréquent ;

— les *xérophiles,* qui habitent les zones sèches avec un certain échelonnement selon les régions (climats méditerranéens, désertiques, etc.) ; certains Mammifères, déjà cités, de nombreux lézards et, chez les Insectes, beaucoup de criquets sont adaptés à de telles conditions.

Les espèces vivant dans des milieux extrêmes, qu'elles soient hygrophiles ou xérophiles, ont généralement une marge de tolérance étroite, bien moindre que celle des mésophiles : ainsi, le poisson d'argent de nos habitations *(Lepisma saccharina)* ne peut vivre que dans un air à humidité relative supérieure à 70 %; par ailleurs, ses possibilités de reproduction sont les meilleures entre 85 % et 50 %.

La tolérance aux variations et les exigences globales peuvent varier considérablement selon le stade de vie (ou *écophase,* selon le terme de B. Dussart) : chez les Insectes, les larves et les adultes ont assez fréquemment des réactions différentes.

Action des facteurs hydriques sur les plantes

Les végétaux terrestres, essentiellement les plantes vasculaires, puisent leur eau dans le sol. L'eau provient des pluies et des autres précipitations (neige, rosée, brouillard) ; les plantes peuvent utiliser cette eau soit directement dans les couches superficielles du sol si le sol reste humide après des précipitations, soit de façon différée si l'eau a été emmagasinée au sein d'une nappe un peu plus basse mais restant à proximité des racines les plus profondes. L'eau est rejetée dans l'atmosphère sous forme de vapeur issue du phénomène physique d'évaporation et du processus biologique de transpiration des plantes elles-mêmes; la condensation de cette vapeur d'eau permet la formation de nuages. Le cycle est ainsi bouclé.

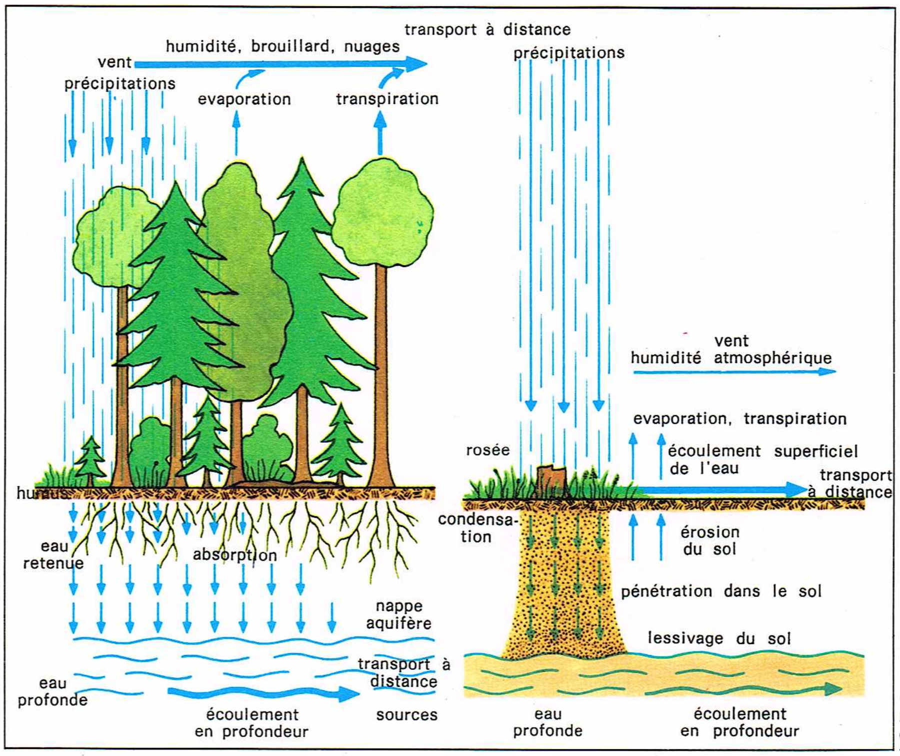

▲ Schéma de la répartition et des effets des précipitations sur une surface couverte de forêts d'une part et sur une zone à faible végétation d'autre part. Dans le premier cas, l'eau pénètre le sol lentement, s'y accumule, et constitue une réserve pour les racines; il y a augmentation de l'humidité ambiante et formation de brouillard et de nuages. Dans le second cas, les précipitations atteignent directement le sol, provoquant son lessivage et l'érodant.

Pour établir le bilan hydrique des plantes, il faut connaître la manière dont le sol est alimenté en eau et celle dont il la conserve, les possibilités d'utilisation de l'eau du sol par les plantes, et enfin l'importance des pertes par évaporation et transpiration. Indépendamment des facteurs climatiques généraux qui commandent le volume général des précipitations sur une région donnée, le couvert végétal influence localement la façon dont l'eau parvient au sol.

Si l'on considère le cas d'un couvert forestier, l'eau de pluie est interceptée par le feuillage ; une partie reste sur les feuilles après la pluie et s'évapore sans parvenir au sol : dans le cas d'une pluie très faible et douce, l'interception peut être totale. Par ailleurs, l'ensemble formé par les branches et le tronc, surtout chez les espèces feuillues, est analogue dans sa forme à un réseau hydrographique. Cela explique qu'une part parfois importante de l'eau ruisselle jusqu'à la base du tronc, ce qui entraîne une répartition inégale au sol; dans le cas de fortes pluies, l'eau ainsi conduite le long du tronc *(stem-flow)* dépasse 20 % du total pour des hêtres et même 40 % pour certains *Acacia* australiens. Lorsque l'eau arrive au sol, elle est absorbée comme par une éponge au niveau de la strate basse composée par les Mousses et les Lichens, au niveau de la litière de feuilles, plus ou moins décomposée, et au niveau des horizons superficiels du sol, riches en débris organiques et en humus.

Dans le sol, la partie en excédent s'infiltre lentement vers le bas et rejoint la nappe aquifère. Si le sol est déjà gorgé d'eau, il y a alors un ruissellement superficiel, ralenti cependant par les obstacles végétaux dans le cas où la couverture végétale est abondante. Au contraire, si le sol est nu ou en pente, l'importance du ruissellement s'accroît et l'eau ne se fixe pas dans le sol. On comprend que la présence d'un couvert végétal surtout forestier puisse limiter les risques d'inondation en cas de fortes pluies, essentiellement par le ralentissement qu'entraîne dans la circulation le stockage au niveau des strates basses et du sol.

Les brouillards et les nuages bas peuvent fournir un apport d'eau au sol s'il y a interception par la végétation : ce cas est fréquent sur la côte occidentale des États-Unis ou la côte de l'Amérique du Sud. Dans quelques cas, c'est même la seule source d'eau (désert côtier du Pérou). De même, si les rosées ne procurent qu'une faible quantité d'eau, on a pu montrer que dans certaines régions arides divers végétaux absorbaient directement cette eau par leur surface foliaire.

L'humidité du sol peut s'exprimer en pourcentage du poids sec, mais cette valeur ne renseigne pas sur la

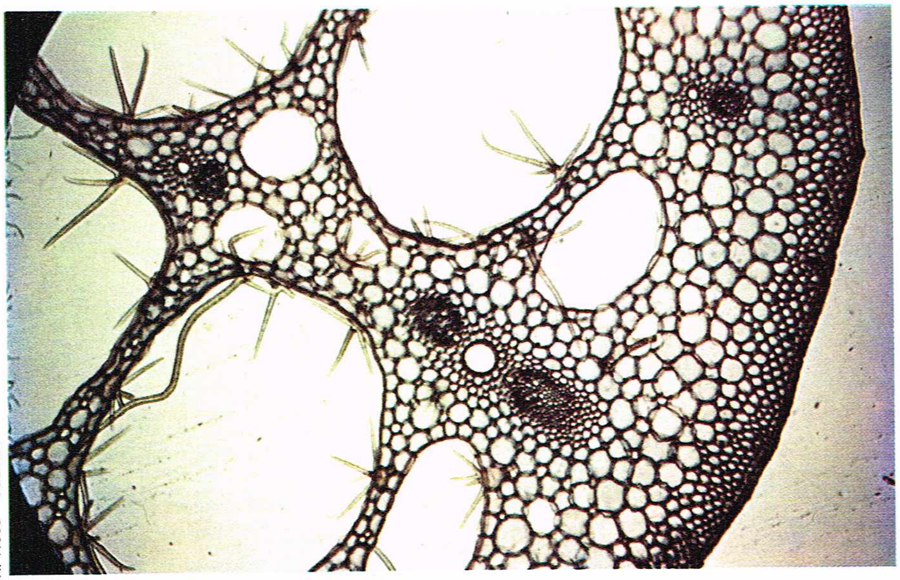

K. Ross - Jacana

▲ *Selon l'alimentation en eau des milieux qu'elles colonisent, les plantes présentent des caractères morphologiques particuliers ; ainsi chez le nénuphar, plante hygrophile, cette coupe de pétiole montre l'importance des lacunes aérifères.*

disponibilité exacte de l'eau pour les plantes. On distingue, en effet, suivant la manière dont l'eau se comporte vis-à-vis des structures présentes dans le sol, plusieurs états de l'eau dans le sol. Lorsqu'on laisse s'écouler l'eau présente dans un sol gorgé d'eau (dont tous les espaces libres entre les particules sont occupés par l'eau), on recueille l'eau s'écoulant par gravité sous l'effet de la pesanteur : c'est l'*eau de gravité*. Lorsque le sol a perdu cette eau, on dit qu'il est à son point de rétention maximale ou à sa *capacité au champ* (« field capacity » des auteurs anglo-saxons). Si le sol continue à perdre son eau par simple évaporation, l'eau contenue dans les plus fins capillaires part : elle constitue l'*eau de capillarité*. Même pour un sol apparemment sec, il reste toujours un peu d'eau dont la quantité dépend de l'humidité atmosphérique : c'est l'*eau d'hygroscopicité*.

Plus un sol s'assèche, plus l'eau s'y trouve retenue fortement : l'énergie de rétention de l'eau par le sol est appelée *potentiel hydrique*, ou *potentiel capillaire*, ou encore *contrainte totale d'humidité du sol* ; elle s'exprime, selon les cas, soit en unités de travail ou d'énergie, soit en unités de pression. Pour chasser l'eau de gravité d'un sol, il faut exercer selon la nature du sol des pressions diverses : 1/10 d'atmosphère pour un sol sableux, 1/3 d'atmosphère pour un sol limoneux, 1 atmosphère pour un sol argileux. Lorsque le sol ne renferme plus que l'eau d'hygroscopicité, celle-ci est retenue par des forces considérables, qui sont de l'ordre de 220 atmosphères dans un air à 85 % d'humidité relative, et 1 000 atmosphères dans un air à 50 % d'humidité relative, ces valeurs pouvant différer aussi selon les types de sols.

La tranche d'eau utilisable par les plantes est comprise entre la quantité d'eau présente dans le sol à la capacité au champ et la quantité d'eau qui correspond à la limite inférieure de l'eau de capillarité que peut utiliser la plante. En effet, cette dernière quantité, appelée *point de flétrissement permanent*, correspond à la force de succion maximale des racines permettant à la plante de puiser de l'eau. Si les forces de rétention de l'eau par le sol dépassent cette valeur, la plante fane. Au point de flétrissement permanent, la teneur en eau du sol correspond à une pression de 15 à 16 atmosphères pour des plantes vivant dans des sols moyennement humides ; elle est plus forte pour des plantes de lieux très secs, plus faible pour des plantes de lieux très humides.

Pour cette même force de rétention de l'eau par le sol, la quantité d'eau exprimée en pourcentage dépend de la nature du sol ; on observe pour un sol sableux environ 5 % d'eau, pour un sol limoneux de 8 à 10 %, pour un sol argilo-limoneux 15 %, enfin pour un sol tourbeux 50 %. Cela indique qu'un sol argileux ou un sol riche en matière organique peut contenir beaucoup d'eau sans que celle-ci soit disponible pour la plante.

La teneur en eau du sol, compte tenu des données précédentes, commande l'utilisation de l'eau par les plantes ; mais la quantité d'eau puisée par celles-ci, qui doit équilibrer les pertes qu'elles subissent, dépend de la taille du végétal dans ses parties souterraines. Certaines espèces ont un appareil radical très développé dans tous les sens de l'espace ; ce système, dit *intensif*, est fréquent chez de très nombreuses Graminées. D'autres systèmes, dits *extensifs*, ont leur développement limité dans le plan horizontal ou selon une seule direction vers la profondeur ; le système intensif est répandu chez les plantes de terrains sableux secs, où certaines espèces, comme le *Sedum acre* (J. Guittet, 1961), ont un ensemble de racines étalées à très faible profondeur, ce qui leur permet d'utiliser l'eau même dans le cas d'une petite pluie mouillant seulement la couche superficielle. Quant aux racines à développement en profondeur, elles peuvent même atteindre la nappe phréatique à des niveaux dépassant parfois 10 mètres (luzernes, *Alhagi, Andira humilis*). Dans un même endroit, on peut observer une stratification des systèmes radicaux correspondant à une occupation complémentaire des divers horizons du sol.

Il est certain que, surtout lors de l'établissement des plantes, celles qui ont une croissance radicale rapide sont avantagées dans la prise de possession de l'espace. La croissance n'a lieu que dans de bonnes conditions d'alimentation en eau du sol : ainsi, un excès d'eau empêche la croissance (phénomène d'asphyxie) ; des périodes de sécheresse induisent chez la moutarde *(Sinapis alba)* la formation de courtes racines tubérisées (N. Vartanian, 1970), qui pourraient intervenir dans la résistance à la sécheresse.

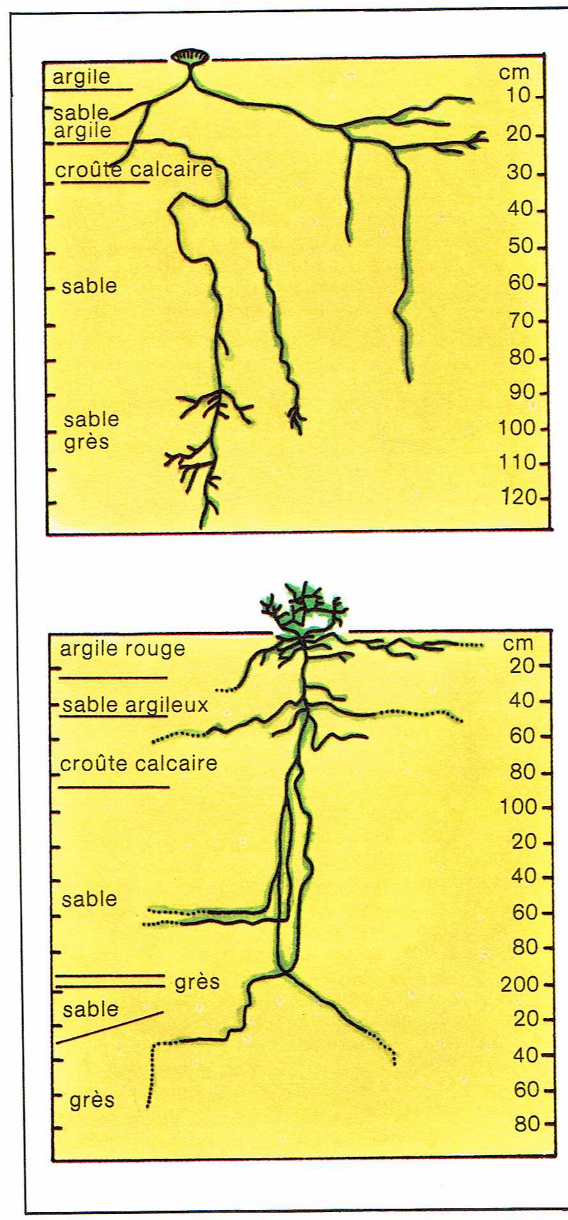

Richard Colin

▶ *La teneur en eau du sol commande l'utilisation de l'eau par les plantes ; on remarque, sur ces schémas du système racinaire de plantes du désert, à la fois un enracinement profond et une extension latérale du système à tous les niveaux, pour profiter en profondeur et en surface de l'eau disponible (d'après H. Walter).*

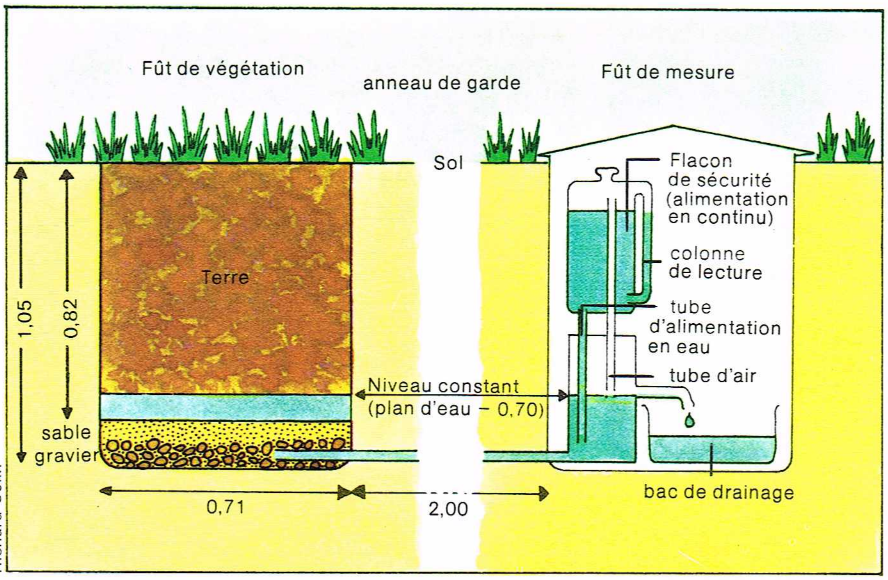

Richard Colin

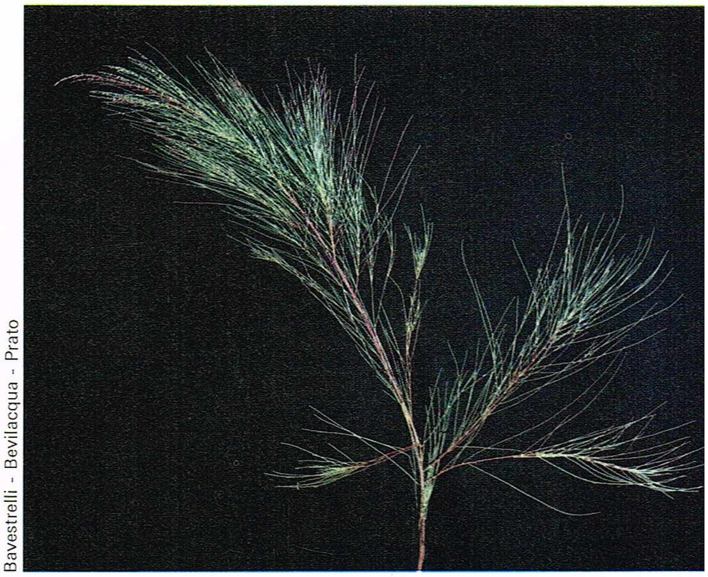

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***A gauche,* représentation schématique d'un** **évapotranspiromètre** ***(modèle Plaisance-Haut).*** ***A droite,* une plante xérophile** **(Casuarina).**

La perte d'eau par un couvert végétal est due à l'évaporation physique à partir du sol et au processus biologique de la transpiration des végétaux. L'évaporation de l'eau nécessite un apport d'énergie fournie par l'énergie lumineuse dans ses radiations infrarouges : elle dépend donc de la température. La température du sol est elle-même liée à sa couleur, à la qualité de sa surface, etc. Par ailleurs, l'évaporation est plus intense en air sec : elle dépend donc de l'humidité atmosphérique. Le vent accroît aussi le départ d'eau par évaporation.

Chez les plantes, l'eau est perdue par transpiration selon deux processus : la *transpiration cuticulaire* et la *transpiration stomatique*. La transpiration cuticulaire est plus réduite : il s'agit du départ d'eau par évaporation au travers de la cuticule des surfaces foliaires. La transpiration stomatique est beaucoup plus importante : elle se produit lorsque l'alimentation en eau est bonne et s'effectue par les ouvertures stomatiques des épidermes. Si un déficit hydrique se manifeste dans la plante, il y a fermeture des stomates et annulation de la transpiration stomatique, mais la transpiration cuticulaire persiste. Les quantités d'eau transpirées par les végétaux sont très importantes vis-à-vis de la matière produite (cf. le chapitre décrivant le cycle de l'eau).

Selon l'alimentation en eau des milieux qu'elles colonisent, les plantes présentent diverses adaptations et divers caractères morphologiques particuliers.

— Chez les *plantes hygrophiles* des milieux très humides, les feuilles sont de grandes dimensions et étalées, les stomates sont nombreux au niveau des épidermes des faces des feuilles et la cuticule est mince; dans les tiges, les tissus de soutien sont peu abondants et, au contraire, les lacunes aérifères sont bien développées, le port dressé de la plante étant assuré par une turgescence constamment élevée.

— Chez les *plantes xérophiles,* ou *xérophytes,* les feuilles sont de taille réduite, parfois même absentes (certains genêts, *Casuarina, Ephedra*) ; la cuticule épidermique est épaissie, ou un feutrage de poils recouvre les feuilles; les stomates sont peu nombreux, localisés à la face inférieure, et les feuilles de certaines espèces ont une possibilité de reploiement sur elles-mêmes, réduisant ou supprimant le contact des stomates avec l'extérieur; les tissus de soutien sont abondants et assurent la rigidité du port de la plante en cas de sécheresse. Les formes épineuses ne sont pas rares. Les plantes grasses (Cactées, Crassulacées, certaines Euphorbiacées et Composées) présentent des formes morphologiques particulières, liées à la vie dans les déserts ou dans les milieux salés (salicornes).

— Les *plantes mésophiles,* les plus répandues en zone tempérée, ont des caractères intermédiaires entre ceux des plantes hygrophiles et des plantes xérophiles.

Quel que soit le milieu où elles se trouvent, les plantes ne peuvent utiliser plus d'eau que celui-ci n'en reçoit au niveau du sol par les précipitations et, éventuellement, par l'intermédiaire de la nappe phréatique.

On a coutume d'évaluer la quantité d'eau perdue par une surface de sol nu ou portant de la végétation par l'*évapo-transpiration*. On distingue l'*évapo-transpiration potentielle* (Thornthwaite, 1948), correspondant à une notion théorique et définie comme la quantité d'eau que pourrait évaporer une surface terrestre continuellement alimentée en eau, et l'*évapo-transpiration réelle*.

En fait, l'*évapo-transpiration potentielle* représente une évaluation des influences climatiques sur le phénomène de perte d'eau par évaporation et par transpiration. Plusieurs auteurs ont donné des formules ne tenant pas compte de la nature du sol et de la végétation qui le recouvre; ainsi Turc (1961) a proposé une formule permettant de calculer l'évapo-transpiration potentielle (ETp), évaluée en mm/mois :

$$ETp = 0{,}4 \left(\frac{t}{t + 15}\right) (Rg + 50)$$

t étant la température moyenne de l'air sous abri pendant le mois considéré, et Rg la radiation globale d'origine solaire. Bouchet (1960) utilise dans sa formule des résultats de mesures d'évaporation réalisées à partir d'un *évaporimètre* de Piche. On peut aussi procéder à des mesures à l'aide de *cases lysimétriques,* comme le modèle Plaisance-Haut.

La mesure de l'*évapo-transpiration réelle* tient compte des périodes où l'alimentation en eau est mauvaise. Cette grandeur doit être mesurée sur un bilan annuel; s'il n'y a pas d'apport d'eau profonde, elle équilibre l'apport par les précipitations.

Les facteurs chimiques

Les facteurs climatiques, et même hydriques sous certains aspects, interviennent essentiellement au niveau de phénomènes physiques influençant le comportement, l'activité et la répartition des êtres vivants. Les éléments chimiques soit isolés, notamment sous les formes ionisées, soit incorporés dans divers corps, participent directement au métabolisme de la constitution même de la matière vivante ou exercent une influence en agissant sur diverses réactions métaboliques.

Les constituants gazeux, surtout l'oxygène et le gaz carbonique, ont une grande importance, qu'ils soient libres dans l'atmosphère ou dans les interstices des sols, ou qu'ils soient dissous dans les eaux ou dans la solution du sol.

Les éléments minéraux, parfois pondéralement importants dans la masse des êtres vivants, comme le calcium, le phosphore, le potassium et le soufre, sont indispensables à la formation de la matière vivante et au fonctionnement fondamental. Il en est de même pour d'autres, dits oligo-éléments. Les taux de ces différents éléments dans le milieu influencent donc indirectement les organismes. L'azote, qui forme la majeure partie de l'atmosphère et qui est présent dans les sols et dans les eaux sous diverses formes minérales, est aussi essentiel pour la

▼ **L'évaporimètre de Piche** ***permet d'évaluer la quantité d'eau perdue par évaporation physique selon les conditions ambiantes.***

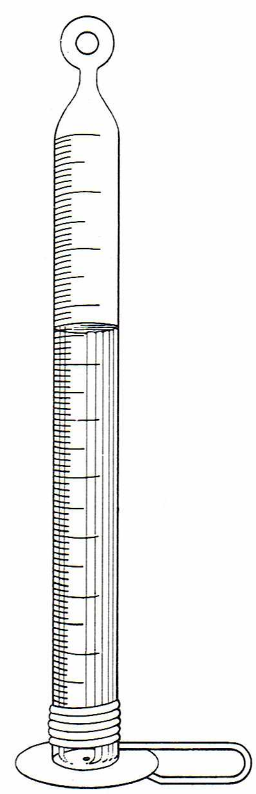

I.G.D.A.

R.T.F. Gantes - Pitch

▲ ***La présence de pigments respiratoires chez les organismes aquatiques, telle cette larve de libellule (Aeschne), joue un rôle fixateur d'oxygène pour des taux très faibles.***

fabrication des substances protéiques. Tous ces corps entrent dans des cycles biogéochimiques actuels, à durée de révolution variable, mais fortement liés aux processus géodynamiques externes qui s'intègrent dans l'échelle des temps géologiques. En tant que facteurs chimiques, c'est l'action due à leur présence ou leur absence, leurs teneurs et leurs variations dans le milieu qui influencent les êtres vivants.

Les facteurs chimiques gazeux

L'oxygène

Vis-à-vis de l'oxygène, tous les êtres vivants n'ont pas les mêmes besoins. Pour un grand nombre, il est indispensable : ce sont les organismes *aérobies*. Les aérobies utilisent l'oxygène à partir du phénomène respiratoire pour oxyder les molécules organiques ; cette réaction leur fournit l'énergie nécessaire à la poursuite de leur activité métabolique, à leurs déplacements, à la transpiration, etc. C'est seulement parmi les formes vivantes, souvent de petite taille (Bactéries, Champignons, surtout), qu'on rencontre les espèces capables, par d'autres types de réactions, de libérer de l'oxygène : ce sont les *anaérobies*. Il existe, en outre, des formes intermédiaires, dont les besoins en oxygène sont limités. En ce qui concerne les aérobies, non seulement les animaux respirent et donc consomment de l'oxygène, mais il en est de même des végétaux. Pour ceux-ci, si le phénomène est masqué pendant le jour par le processus photosynthétique, la respiration n'en continue pas moins d'exister, même pendant ce temps.

— C'est *dans l'air* que l'oxygène est le plus abondant : il représente presque 21 % de l'atmosphère ; cette teneur est pratiquement constante, étant donné le recyclage permanent et les mouvements de l'air, qui assurent une homogénéisation. Il y a toutefois une variation importante de la teneur en oxygène avec l'altitude : ainsi, au sommet du mont Everest, qui atteint presque 8 500 m, la pression relative d'oxygène est réduite de 68 % environ, au mont Blanc de 46 % et à Mexico de 23 % ; on estime que la réduction est de 50 % à environ 5 500 m d'altitude. Ce sont surtout les Vertébrés supérieurs qui sont le plus sensibles à cette variation.

Par exemple, les peuples de la cordillère des Andes présentent une adaptation caractérisée par une capacité pulmonaire accrue et un plus grand nombre de globules rouges, favorisant la fixation d'une plus grande quantité d'oxygène. Cette adaptation se produit aussi lorsqu'un sujet se déplace provisoirement vers une zone d'altitude. Ainsi, le nombre d'hématies, voisin de 5 000 000/mm^3 au niveau de la mer, peut atteindre 7 000 000 après 24 heures passées à 5 000 m (Folk, 1966) ; cependant, le taux d'oxygène dissous du sang reste de 73 % au lieu de 92 % en plaine. Au-delà d'un taux de 56 % environ, correspondant à une altitude supérieure à 7 500 m, les difficultés respiratoires deviennent alors trop grandes et l'adaptation insuffisante : les membres des expéditions en très haute montagne (monts himalayens) doivent alors recourir à des moyens d'oxygénation artificiels.

Chez les animaux des Andes, comme la vigogne et le lama, le sang est capable de contenir à pression égale d'oxygène une quantité plus élevée de celui-ci que l'homme (de l'ordre de 10 % à 15 % en plus).

— *Dans le sol* (sauf s'il s'agit de sols gorgés d'eau jusqu'à un niveau plus ou moins proche de la surface) de l'air et donc de l'oxygène sont présents dans les interstices. Les qualités mécaniques du sol, liées à la grosseur des particules et à la proportion des différentes catégories de celles-ci, commandent la possibilité d'espaces plus ou moins importants. La teneur en oxygène varie aussi avec la profondeur, car l'activité respiratoire des racines, de la microfaune et de la microflore consomme de l'oxygène, et la diffusion à partir de l'atmosphère se fait moins bien : par exemple, à 1,50 m le pourcentage d'oxygène n'est plus que de 8 à 9 %, alors qu'à cette même profondeur il est proche de 18 % dans un sol sableux.

Selon que le sol est bien ou mal aéré, on y rencontre des êtres vivants différents. Dans les sols convenablement aérés, des Bactéries, des Champignons, des Actinomycètes, de nombreux petits Invertébrés (Collemboles, Oribates, Nématodes, lombrics) sont présents et les racines des plantes se développent bien. En sol non aéré, dominent des Bactéries anaérobies comme les *Clostridium*, ou celles qui réduisent les nitrates, diminuant ainsi la fertilité.

Au cours d'une année, on peut observer d'assez grandes variations de la teneur en oxygène à une profondeur donnée du sol : cela est dû aux variations de l'activité biologique en général, mais certaines baisses brutales sont attribuées, d'une part aux pluies abondantes, d'autre part à un ralentissement en période sèche du fouissage de certains animaux, comme les lombrics.

— C'est probablement *dans les eaux* que la teneur en oxygène est à la fois la plus variable et la plus importante pour les êtres vivants. La solubilité de l'oxygène gazeux dans l'eau est réduite : elle est de 10 mg/l à 14 °C et de moins de 8 mg/l à 26 °C (sous des conditions normales de pression). Ces chiffres sont extrêmement bas, si on les compare à la teneur atmosphérique.

La solubilité de l'oxygène dans l'eau diminue avec l'élévation de la température ; pour une pression de 760 mm de mercure la correspondance est la suivante :
à 0 °C : 14,2 mg/l (10 cm^3/l),
à 5 °C : 12,4 mg/l (8,7 cm^3/l),
à 10 °C : 11 mg/l (7,8 cm^3/l),
à 15 °C : 9,7 mg/l (6,9 cm^3/l),
à 20 °C : 8,9 mg/l (6,2 cm^3/l),
à 25 °C : 8,1 mg/l (5,8 cm^3/l),
à 30 °C : 7,5 mg/l (5,3 cm^3/l).

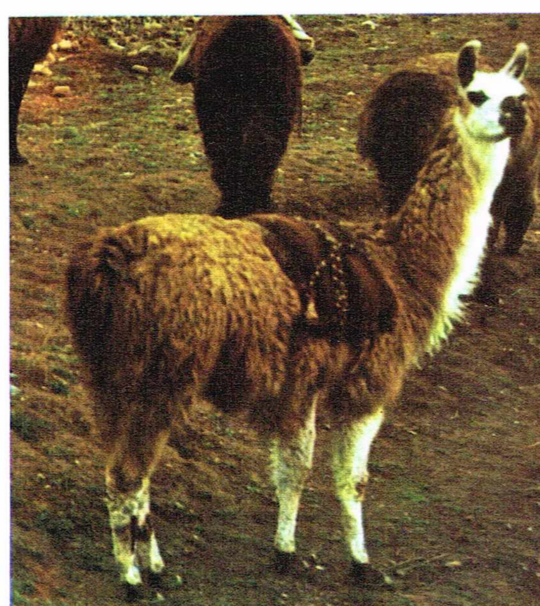

T. Sacco

▶ ***Chez les animaux des Andes, tel ce lama, le sang est capable de contenir, à pression égale d'oxygène, une quantité de ce dernier supérieure de 10 % à 15 % à celle de l'homme.***

Si la teneur en sels croît, elle diminue la teneur en oxygène : pour l'eau de mer, qui contient environ 35 grammes de sel par litre, la teneur en oxygène ne représente que 80 % de celle de l'eau douce aux mêmes conditions de température et de pression.

L'oxygène de l'eau se renouvelle par diffusion avec l'oxygène de l'air. Les divers mouvements de l'eau, dont les vagues, favorisent cet échange : ils régissent surtout la teneur en oxygène dans les couches superficielles. Plus en profondeur, l'équilibre dépend beaucoup plus de l'activité des êtres vivants : d'une part, celle des végétaux verts chlorophylliens, qui dans la journée libèrent de l'oxygène, d'autre part, celle de l'ensemble des êtres vivants utilisant l'oxygène pour leur respiration. La consommation d'oxygène par les Bactéries décomposant la matière organique est notamment un bon indice de l'activité biologique régnant dans une eau; celle-ci permettant d'éviter de façon naturelle la pollution par des matières organiques. On mesure cette activité par la D.B.O., « demande biologique en oxygène », qui correspond à la quantité d'oxygène consommée par les Bactéries aérobies pour des conditions précises (un volume d'eau de 1 litre, maintenu à une température de 5 °C pendant 5 jours). L'intervention des différents facteurs cités dans le renouvellement et la consommation de l'oxygène induit généralement un gradient selon la profondeur.

Dans un lac, on peut ainsi distinguer dans la partie superficielle une *zone trophogénique,* séparée de la *zone sous-jacente,* dite *tropholytique* (Reid, 1961), par un *niveau de compensation;* au-dessus de ce niveau, il y a production d'oxygène par les plantes vertes, et l'oxygène est en excès; en dessous de ce niveau, la photosynthèse peut encore se dérouler, mais la production d'oxygène par les plantes est inférieure à leur consommation. De même, en milieu marin, en partant de la surface on observe un gradient décroissant jusqu'à une certaine valeur (50 % de saturation environ, vers 800 m dans l'Atlantique Nord à latitude assez basse); puis la teneur en oxygène croît à nouveau, légèrement en profondeur.

En plus des variations spatiales selon la profondeur ou l'emplacement, la teneur en oxygène est soumise en un point donné à des variations dans le temps. Ces variations journalières sont directement liées à l'activité photosynthétique, qui, elle-même, dépend de l'intensité lumineuse. De même, les variations saisonnières sont induites par l'effet combiné de la production d'oxygène par les végétaux verts et de sa dissolution plus ou moins grande sous l'effet de la température : par exemple, dans un lac, après une phase printanière où l'eau est riche en oxygène, il y a un appauvrissement en été à cause de la chaleur, puis une amélioration de la teneur en oxygène avec les températures plus basses. Dans les lagunes saumâtres, la variation de salinité au cours de l'année, qui influence la dissolution de l'oxygène, est souvent un facteur supplémentaire de changement pour la teneur en oxygène : on observe un maximum en hiver, période au cours de laquelle les pluies diminuent la salinité et la température est la plus basse.

Les réactions des êtres vivants vis-à-vis des baisses du taux d'oxygène sont diverses : il peut y avoir des déplacements de certains organismes ou l'apparition de formes de résistance, comme dans tous les cas d'évitement d'un facteur défavorable.

Le rôle le plus important dans les régulations est dû aux procédés permettant une meilleure circulation de l'eau au niveau des organes respiratoires d'une part, aux capacités de fixation de l'oxygène par les divers pigments respiratoires d'autre part.

— Chez les animaux fixés (moules, ascidies, Éponges), des courants peuvent être créés par des cils, ou organes vibratiles, par des mouvements d'appendices, par des contractions rythmiques de cavités, ou encore par la combinaison de deux ou plusieurs de ces procédés. Quelques espèces aquatiques échappent par des prélèvements d'air à la contrainte du taux de l'oxygène du milieu; on peut distinguer ceux qui reviennent en surface faire une provision, comme les punaises d'eau, le dytique, l'argyronète, les limnées, les planorbes, la nèpe, etc., de ceux qui restent en contact par un tube au niveau de la surface, comme la larve des moustiques.

— En ce qui concerne les pigments respiratoires, les Vertébrés sont toujours pourvus d'*hémoglobine;* chez les Invertébrés, on rencontre d'autres pigments : l'*érythrocruorine,* la *chlorocruorine,* l'*émérythrine* et l'*hémocyanine* (Crustacés, Mollusques), qui, chez certaines espèces de milieux faiblement oxygénés, jouent un rôle fixateur d'oxygène pour des taux très faibles. Chez les larves de Chironomides (Diptères), par exemple, la concentration du pigment respiratoire, qui est une hémoglobine, est en moyenne égale à 15 % seulement de celle observée chez l'homme; mais l'hémoglobine de ces Insectes a une affinité très élevée pour l'oxygène, ce qui lui permet d'atteindre une saturation en oxygène de 50 % pour une pression de ce gaz de 0,6 mm de mercure seulement, alors que chez l'homme un tel résultat n'est atteint que pour une pression de 27 mm de mercure.

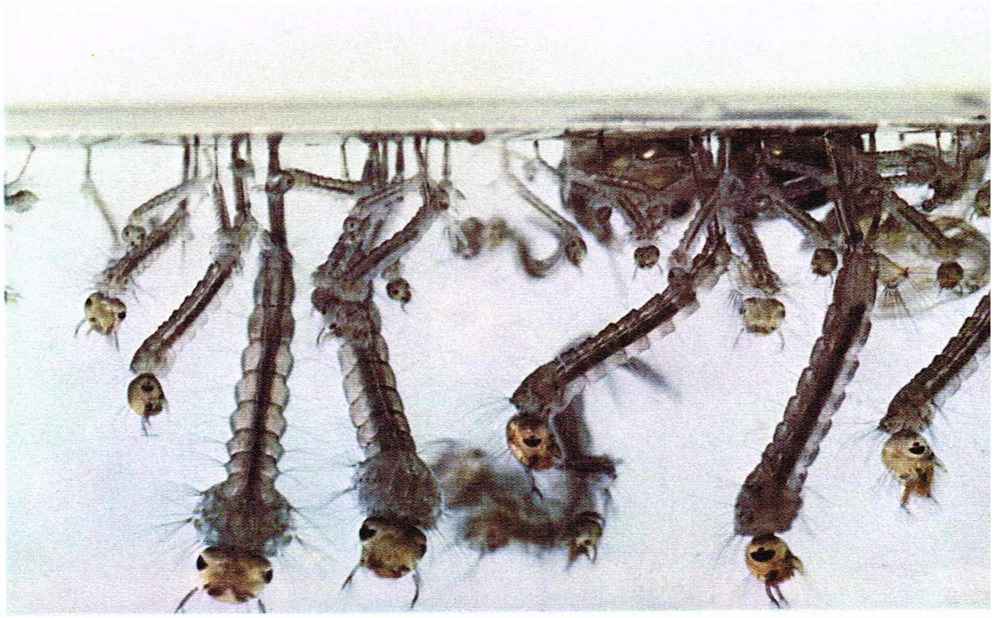
P. Ross - Jacana

▲ ***Quelques espèces aquatiques échappent par des prélèvements d'air à la contrainte du taux d'oxygène du milieu; ainsi les larves du moustique* (Anopheles maculipennis) *restent en contact avec l'air par un tube au niveau de la surface de l'eau.***

Le gaz carbonique

— Le gaz carbonique est en très petite proportion *dans l'atmosphère :* il en représente 0,030 %, soit environ 700 fois moins que l'oxygène. Ses variations sont liées aux échanges respiratoires et photosynthétiques des êtres vivants; on en observe une diminution dans la soirée, et un maximum à la fin de la nuit. Au cours de l'année, sous nos climats, son taux a tendance à s'élever en hiver, surtout dans les villes et les zones industrielles du fait de l'utilisation de combustibles fossiles (fuels, charbons) ou actuels (bois). Le gaz carbonique joue le rôle trophique essentiel dans la formation de la matière organique au niveau de la productivité primaire. L'étude globale en est faite au niveau de son cycle biogéochimique.

— *Dans les espaces gazeux du sol,* la respiration des racines et l'activité bactérienne tendent à accroître son taux en profondeur, corrélativement à l'appauvrissement en oxygène.

— *Dans l'eau,* la concentration du gaz carbonique reste faible, bien qu'il y soit beaucoup plus soluble que l'oxygène. Dans l'eau pure, le taux est de 0,2 ml/l à 24 °C, et de 0,5 ml à 0 °C car la teneur s'accroît avec la diminution de température. En présence d'une solution saline assez concentrée, la teneur s'élève beaucoup, comme dans le cas de l'eau de mer (35 g de sels par litre), où elle atteint 50 ml par litre. Cette propriété est à relier au rôle important de réservoir de gaz carbonique joué par les océans dans le cycle biogéochimique du carbone. A l'état dissous dans l'eau, le gaz carbonique est presque entièrement sous forme d'ion carbonate CO_3^{--} ou bicarbonate HCO_3^-; l'équilibre avec l'ion calcium Ca^{++} notamment :

$$CaCO_3 + H_2CO_3 \rightleftarrows Ca(HCO_3)_2,$$

ainsi que la formation d'acide carbonique :

$$H_2O + CO_2 \rightleftarrows H_2CO_3$$

sont les réactions fondamentales commandant la teneur en gaz carbonique de l'eau et, en grande partie, son acidité et son alcalinité; elles interviennent dans la formation des squelettes calcaires (coquilles de Mollusques, coraux, Algues calcaires...), le dépôt de calcaire

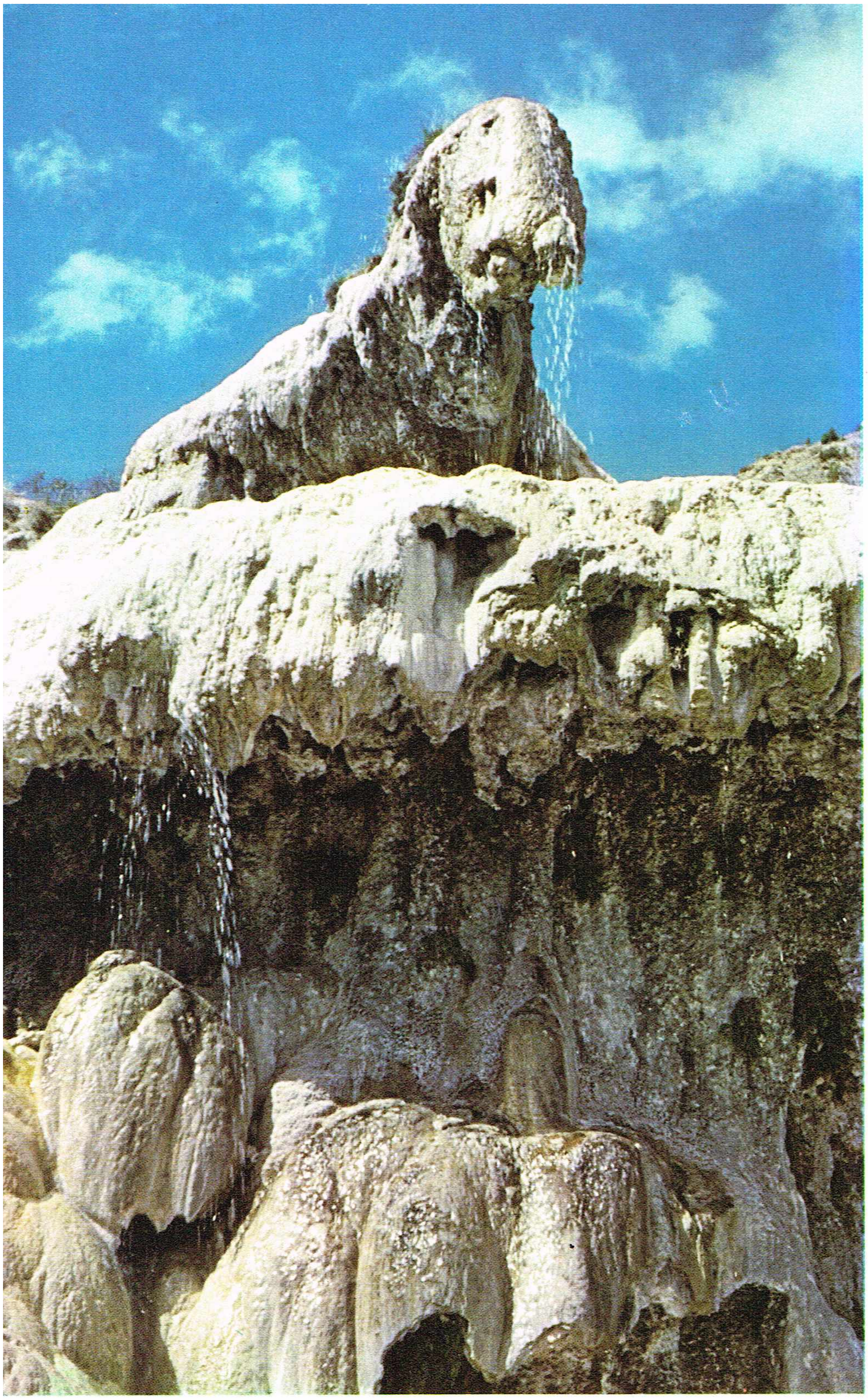

C. Souchon

▲ *La fontaine de Réotier, près de Montdauphin (Hautes-Alpes); le calcaire dissous dans l'eau grâce à la présence de gaz carbonique est précipité sous forme de sécrétions lorsque l'activité des végétaux verts (Mousses surtout), absorbant du gaz carbonique, déplace l'équilibre de la réaction chimique.*

par précipitation ainsi que, à l'inverse, dans la solubilisation de calcaires déjà formés.

Comme ces équilibres sont réversibles, ils sont déplacés, non seulement sous l'action directe des facteurs chimiques et physiques, tels que la teneur dans les différents ions et la température, mais aussi par le résultat de l'activité photosynthétique et respiratoire des êtres vivants. Cela influence fortement les variations du taux de CO_2 dans l'eau. Celles-ci, journalières ou saisonnières, sont sensiblement inverses de celles de l'oxygène.

Les éléments minéraux

Les éléments minéraux sont présents dans les eaux et dans la solution du sol, sous la forme de sels plus ou moins fortement dissociés en ions. La concentration totale en sels dans les eaux varie de concentrations inférieures à 1 g/l pour les eaux douces à 35 g/l pour l'eau de mer, mais peut dépasser 200 g/l (dans la mer Morte).

La concentration en sels de la solution du sol est plus difficile à chiffrer, car elle dépend de la quantité d'eau présente, elle-même variable selon les pluies, l'évaporation, etc. Toutefois on peut séparer nettement des autres sols les sols salés des zones littorales, de certaines régions arides, des endroits où affleurent des gisements salifères fossiles, dans lesquels les concentrations élevées déterminent la présence d'une végétation particulière.

De plus, les équilibres existant entre la concentration des différents ions minéraux et celle de l'ion H^+ qui détermine le pH influencent les valeurs de ce dernier.

Le taux des divers éléments minéraux, le pH dans une eau ou dans un sol sont des facteurs déterminants pour la localisation des différentes espèces; celles-ci sont plus ou moins adaptées, plus ou moins tolérantes à la présence de différentes substances et à leurs variations de teneur dans le milieu. Généralement, vis-à-vis de la salinité les organismes sont *sténohalins,* c'est-à-dire que leur amplitude de tolérance est réduite : certains organismes sont strictement marins, d'autres uniquement d'eau douce. Quelques espèces d'estuaire, dites *euryhalines,* sont capables de supporter des variations plus grandes, et les exigences peuvent varier au cours de la vie d'un même individu (comme chez l'anguille, les saumons, l'esturgeon, etc.). Pour les plantes, on observe de même divers degrés de tolérance.

Le pH traduit l'acidité ou la basicité d'une eau ou d'un sol. Dans une solution il existe un équilibre entre la quantité d'ion H^+ hydrogène et celle de l'ion OH^- oxhydrile, l'augmentation de la concentration de l'un entraînant la diminution de la concentration de l'autre et réciproquement. La concentration totale exprimée en ions-grammes par litre est toujours de 10^{-14} à 21 °C. Si la solution est neutre, les deux concentrations sont égales; celle de (H^+) est donc de 10^{-7}; le pH est alors de 7. Pour des concentrations plus fortes de H^+, de 10^{-1} à 10^{-7}, le pH est acide et varie de 1 à 7. De 7 à 14, le pH est dit basique.

La présence des ions calcium, sodium, potassium, etc., provoque une réaction alcaline du sol ou de l'eau. Le pH est, au contraire, rendu acide par la présence de silice, d'acides humiques ou de gaz carbonique dissous. Pour les sols, on distingue les sols fortement acides (pH de 3 à 5), les sols moyennement acides (pH de 5 à 6,7), les sols neutres (pH proche de 7) et les sols basiques (pH de 7,5 à 8). Seuls les sols salés peuvent atteindre des valeurs plus élevées, de l'ordre de 9,5. La présence de l'ion Ca^{++}, et aussi d'autres ions basiques Mg^{++}, K^+, Na^+, qui sont susceptibles, tout comme l'ion H^+, de se fixer sur les colloïdes argileux ou humiques du sol, détermine aussi le pH du sol. Ainsi, les sols calcaires sont généralement basiques, les sols siliceux ou riches en matières humiques acides. Le pH du sol dépend des facteurs intervenant dans la formation et l'évolution du sol : composition du substrat, climat, action de la couverture végétale et des êtres vivants... Réciproquement, le pH commande aussi en partie diverses propriétés du sol, comme sa structure, sa possibilité de rétention de l'eau, etc.

Les exigences des espèces vis-à-vis du pH sont diverses : certaines sont tolérantes, d'autres strictes; on distingue les *acidiphiles* et les *basophiles.* Beaucoup de plantes cultivées exigent un pH moyen; quelques-unes, comme le seigle et le sarrazin qui vivent sur les « sols pauvres acides », sont acidiphiles.

Le pH de l'eau douce est également variable selon l'apport venant du lessivage des sols et selon l'activité des organismes : les peuplements végétal et animal des eaux acides et ceux des eaux basiques sont différents, les eaux légèrement alcalines étant souvent plus riches en espèces. Dans l'eau de mer, le pH est toujours proche de 8 et les variations faibles, car le milieu est très tamponné par la salinité assez forte.

Parmi les éléments minéraux, le *calcium* joue un rôle important dans la répartition des plantes terrestres : les botanistes séparent depuis longtemps les plantes *calcicoles* des *calcifuges.* On connaît bien le cas d'espèces très voisines dont l'une est calcicole et l'autre calcifuge, par exemple, *Gentiana clusii* des pelouses alpines calcaires et *Gentiana kochiana* poussant sur la silice; on parle alors de *vicariance édaphique,* c'est-à-dire liée au sol. Des formes physiologiques, ou *écotypes,* à exigences différentes pour le calcium se rencontrent à l'intérieur d'une même espèce, comme la fétuque ovine.

C. Souchon

▲ ***Les lieux très riches en azote ont une flore particulière : la grande oseille des Alpes est caractéristique en montagne des abords des bergeries et des « reposoirs » du bétail.***

Pour une même espèce, l'exigence n'est pas forcément identique sur toute son aire de répartition : ainsi, le chêne pubescent est, dans le nord de son aire, strictement calcicole, alors qu'il croît indifféremment sur le calcaire ou sur la silice dans le Midi méditerranéen. Assez proche du calcium, mais moins abondant dans la nature, le magnésium, présent dans les calcaires dolomitiques par exemple, détermine la présence d'une flore particulière.

Les facteurs chimiques importants, capables d'influencer la production végétale et animale, sont surtout les sels minéraux azotés (nitrates), le potassium, le phosphore ainsi que des éléments qui interviennent à des doses très faibles (les *oligo-éléments*) et dont la carence peut provoquer des troubles de la croissance ou des maladies. Ce sont : le fer, le manganèse, le zinc, le cuivre, le bore, le molybdène, le chlore, etc.

L'*azote*, qui entre dans la constitution de la matière organique pour les protéines, a un cycle lié à l'azote de l'atmosphère ; c'est cependant essentiellement la forme nitrate qui est utilisable par les plantes. Pour la fixation de l'azote atmosphérique, il convient de noter le rôle des Bactéries symbiotiques présentes dans les nodosités des Légumineuses. Les nitrates proviennent de la transformation, sous l'action des Bactéries, des substances azotées contenues dans les excréments, les cadavres et les débris végétaux. Les lieux très riches en azote, comme les abords des villages, les « reposoirs » du bétail en montagne, ont une flore particulière : l'orme et l'ortie dominent en plaine et le chénopode Bon-Henri et la grande oseille des Alpes en montagne. Les rochers sur lesquels se juchent les Oiseaux reçoivent davantage de fientes et sont colonisés par des Lichens nitrophiles, qui sont pour la plupart de teinte jaune ou orangée.

Le *potassium* et le *phosphore* entrent, comme l'azote, dans la composition des engrais ; ils sont très importants pour la nutrition minérale des végétaux. Les exigences pour le potassium sont différentes selon les plantes : par exemple, la betterave, la pomme de terre et le tabac ont des besoins élevés. Le phosphore intervient dans l'équilibre calcium-phosphore indispensable pour une bonne minéralisation des os ; on a observé aussi que sa plus ou moins grande abondance dans un peuplement végétal peut influencer le nombre des individus d'une population animale s'en nourrissant : c'est le cas pour les lemmings.

Les *sols salés* supportent une végétation particulière, susceptible d'obtenir une alimentation suffisante, bien que cette alimentation s'opère à partir d'une solution du sol extrêmement concentrée. Les sols salés ne sont pas tous de même origine. En bord de mer les vases ou les sables sont salés du fait de l'imprégnation par l'eau de mer : le chlorure de sodium est donc dominant ; dans le cas où les sels proviennent du lessivage de dépôts fossiles, le chlorure de potassium, le sulfate de calcium (gypse) ou le sulfate de magnésium ont parfois une teneur plus importante. Une intense évaporation accroît la salinité des marais salés littoraux ; dans les zones arides, c'est à partir du lessivage des sols que la solution du sol dépose du sel sous forme de croûte, comme c'est le cas dans les chotts d'Afrique du Nord. Dans ces régions, l'irrigation, qui peut sembler une panacée pour accroître les productions agricoles, doit être conduite avec beaucoup de précautions pour éviter la formation de tels sols salés.

On nomme *halophytes* les plantes susceptibles de vivre en terrain salé. Certaines plantes ayant une croissance et un rendement meilleur en terrain non salé peuvent cependant supporter un peu de sel : c'est le cas de la betterave, de l'orge, du palmier-dattier. D'autres, comme les salicornes des vases salées, ne se rencontrent que dans ce type d'habitat ; on observe une véritable zonation de la végétation en bord de mer, pour des

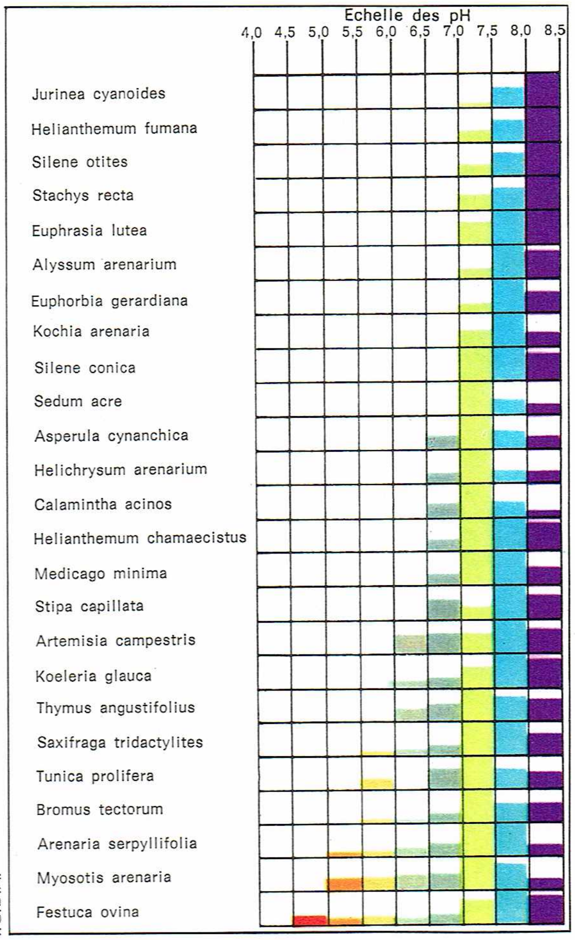

I.G.D.A.

◀ ***Représentation graphique du comportement de diverses espèces végétales vis-à-vis des différents pH du sol : les dix premières (fortement basophiles) ne poussent pas sur les sols dont le pH est inférieur à 7; les autres se montrent plus tolérantes, notamment*** **Festuca ovina** ***qui s'accommode de pH variant de 4,5 à 8,5.***

T. Sacco

▲ *A gauche, le port en coussinet de certaines plantes, comme ce* Silene acaulis, *favorise la résistance au vent. A droite, représentation schématique de l'effet abrasif du vent (la direction du vent est donnée par les flèches) sur le sol et sur la régénération de la végétation. Divers groupements sont ainsi différenciés dans l'exemple choisi (terrains calcaires de hautes montagnes).*

vases salées par exemple, qui montre que la variation du taux de salinité entraîne une différence de composition floristique de la végétation. Des expériences de P. Binet ont mis en évidence des différences de production de matière pour quelques espèces de ces vases.

Sur le plan morphologique, beaucoup de plantes de lieux salés sont succulentes et semblables aux plantes grasses des endroits secs. Elles présentent en outre un certain nombre de particularités physiologiques, comme la possibilité d'accumuler des sels dans leurs tissus, de réduire l'absorption de ces sels au niveau de leurs racines, ou encore de les excréter par des glandes épidermiques spéciales. En outre, certaines transpirent peu, mais ce n'est là le cas général que lorsque le climat et le sol sont secs.

Les facteurs mécaniques

Souvent sous la dépendance initiale des facteurs climatiques, certains mouvements de l'air (le vent), de l'eau (les courants, les vagues), de la neige et du substrat (l'érosion, les glissements) ont une action directe très importante sur les organismes.

Le vent agit tout d'abord en accroissant l'évaporation, donc la sécheresse ; il peut aussi, s'il est fréquent et fort, exercer une action morphologique sur les végétaux, en provoquant la destruction des jeunes rameaux et en empêchant ou en orientant la croissance : certains arbres, dits « arbres en drapeau », situés en bord de mer ou près des crêtes en montagne, sont ainsi sans branches du côté du vent dominant. Les broussailles en bord de mer forment une sorte de barrière s'élevant lentement au fur et à mesure qu'elles s'éloignent du bord et assurant pour les arbres de l'intérieur une protection contre les vents, parfois chargés de sels.

Par l'enlèvement des particules fines du sol, le vent participe à l'érosion superficielle et aux phénomènes de transport et de dépôts, particulièrement marqués en zone sableuse (formations des dunes par exemple). Il peut y avoir déchaussement des parties souterraines des plantes et même arrachement total de la végétation : on utilise certains végétaux à système radical se développant rapidement et sur de grandes distances, comme l'oyat, pour fixer les dunes.

L'effet abrasif du vent chargé de sable ou de cristaux de neige peut limiter la croissance : ainsi, la hauteur de la végétation dans la toundra est commandée par celle de la couche de neige protectrice au-dessus de laquelle un vent violent en hiver décime toute pousse qui dépasse. La limitation de la présence des arbres au fur et à mesure qu'on s'élève en montagne est déterminée surtout par la force du vent ; il en est de même pour certaines îles dépourvues de toute végétation ligneuse. Le port en coussinet ou les tiges rampantes de certaines plantes alpines, ainsi très appliquées au sol, favorisent la résistance au vent.

En ce qui concerne les animaux, ils restent au niveau du sol dans les zones de vents très violents ; dans certaines îles, il n'y a pas chez les Insectes d'espèces ailées.

Le transport par le vent du pollen, des semences, de fragments de Mousses ou de Lichens, d'animaux de petite taille (des Insectes surtout, parfois même des petites grenouilles) est un des facteurs de dissémination des espèces. La morphologie des éléments transportés facilite souvent leur transport par le vent : c'est le cas des expansions ailées ou des poils légers sur les semences, des ballonnets de grains de pollen de certains Conifères...

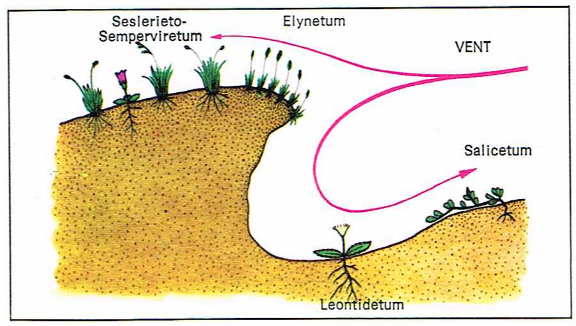

I.G.D.A.

Facteurs biotiques

Nous traiterons dans ce chapitre des différents types de relations entre les êtres vivants.

Les êtres vivants exercent les uns sur les autres des actions. Celles-ci peuvent être indirectes et modifier les facteurs initiaux du milieu (par exemple, un arbre faisant de l'ombre) ; dans ces cas, les êtres vivants changent les conditions dans lesquelles vivent d'autres organismes. Mais il existe aussi des actions directes, constituant un ensemble de véritables facteurs liés aux êtres vivants ; ils sont appelés des *facteurs biotiques*. Les *actions réciproques*, ou *interactions*, ou encore *coactions*, peuvent avoir des intensités différentes selon les cas ; on peut mesurer leurs conséquences en considérant la survie, la croissance ou la prospérité des organismes confrontés. Un tableau classique (page ci-contre, en haut) résume les différentes possibilités (Lemée, 1967).

La nature des interactions n'est d'ailleurs pas toujours nettement déterminée et, en outre, il peut être assez difficile de juger de leurs effets réels. Il convient de noter aussi que certains types d'interactions désignent nécessairement des relations entre individus d'espèces différentes *(réactions hétérotypiques* ou *interspécifiques) :* c'est le cas de la prédation, du parasitisme, de la symbiose et du commensalisme. D'autres termes s'appliquent à des interactions possibles entre individus de la même espèce *(réactions homotypiques* ou *intraspécifiques)*, mais qui se manifestent aussi entre espèces différentes : c'est le cas, notamment, de la compétition. Enfin, d'autres réactions sont plus particulièrement intraspécifiques. Ce sont tout d'abord celles qui sont liées aux caractères fondamentaux de l'espèce, commandant sa démographie : ces aspects seront abordés dans la partie consacrée à la dynamique des populations, ou démo-écologie. Parmi les autres réactions homotypiques, il faut signaler l'effet de groupe et l'effet de masse.

Effet de groupe et effet de masse

L'*effet de groupe,* terme proposé par Chauvin et Grassé en 1944, a été décrit chez de nombreuses espèces d'Insectes et chez quelques Vertébrés. Il comprend l'ensemble des modifications qui interviennent dans les comportements et la vitesse de croissance des individus, dans l'accroissement de la population, etc., à partir du moment où les individus ne sont pas isolés. On a montré notamment que, pour des effectifs en dessous d'une certaine limite, la reproduction et la survie deviennent impossibles : c'est le cas, par exemple, pour les rennes lorsque leurs troupeaux sont inférieurs à 350 individus environ, pour les éléphants si le groupe compte moins de 25 têtes et pour le cormoran du Pérou, qui doit former de grosses colonies de l'ordre de 10 000 individus.

Chez beaucoup d'Insectes, le passage d'une phase de vie solitaire à une phase de groupe, dite grégaire, s'accompagne de changements des comportements, de la fécondité, etc., en partie sous la dépendance de phénomènes hormonaux, eux-mêmes déclenchés par des stimuli réciproques entre individus. En outre, on assiste chez certaines espèces à des modifications de forme et de couleurs, particulièrement spectaculaires chez le criquet migrateur.

L'effet de groupe correspond à des phénomènes considérés comme favorables à l'ensemble de la population : on peut donc l'inclure dans les interactions de type coopération.

L'*effet de masse* désigne, au contraire, les effets liés au surpeuplement ; il entre dans le cadre de la compétition intraspécifique. Il peut se traduire par une diminution de la fécondité (chez *Tribolium* par exemple), par un cannibalisme à l'égard des œufs ou des jeunes. Les causes sont, le plus souvent, la limitation de la quantité de nourriture disponible ou encore le manque de sites de ponte favorables. L'effet de masse assure donc une régulation de la population en fonction d'un milieu.

On comprend toute l'importance de l'abondance des individus par rapport à l'espace occupé, c'est-à-dire de la densité des organismes. L'intensité des conséquences des interactions est fortement dépendante de la densité, lorsqu'il y a compétition.

Types de coactions entre espèces différentes

Types de coactions	Espèces réunies		Espèces séparées	
	Espèce A	Espèce B	Espèce A	Espèce B
Neutralisme	0	0	0	0
Compétition	−	−	0	0
Mutualisme	+	+	−	−
Coopération	+	+	0	0
Commensalisme (A commens. de B)	+	0	−	0
Amensalisme (A amensale de B)	−	0	0	0
Parasitisme (A parasite, B hôte)	+	−	−	0
Prédation (A prédateur, B proie)	+	−	−	0
Symbiose	+	+	−	−

0 : les espèces ne sont pas affectées dans leur développement.
+ : le développement de l'espèce est rendu possible ou amélioré.
− : le développement de l'espèce est réduit ou rendu impossible.

Richard Colin

▲ ***Tableau proposé par G. Lemée pour décrire les principaux cas de coactions entre espèces.***

Compétitions intraspécifique et interspécifique

La compétition est la concurrence s'exerçant entre plusieurs organismes lorsque la somme de leurs demandes en nourriture, en certains éléments minéraux du sol, en eau, en sources énergétiques, etc., est supérieure à ce qui est réellement disponible.

Compétition chez les végétaux

Pour les végétaux, essentiellement les végétaux supérieurs Phanérogames, de nombreux travaux ont été réalisés sur les effets de la compétition intra- et interspécifique ; les expériences les plus simples s'effectuent sur des individus de même âge appartenant à la même espèce. La façon dont l'espace est occupé, ce qui est traduit par la densité (nombre d'individus par unité de surface), affecte la croissance, la fécondité, et même la survie des individus.

En réalisant des cultures à des densités croissantes, on observe :

— au bout d'un temps donné, une réduction de poids par individu, réduction croissant avec la densité ;

— une apparition de cette réduction d'autant plus précoce que la densité est plus forte ;

— une production d'ensemble par unité de surface d'abord croissante avec la densité, puis atteignant une limite ;

— une diminution de la production de fleurs et de graines, et par conséquent de la fécondité, d'autant plus forte que la densité est plus élevée ;

— à fortes densités, un taux de mortalité plus élevé sur l'ensemble du peuplement ;

— des modifications morphologiques, telles que l'étiolement et la croissance en hauteur prédominante.

Les conséquences de ces résultats ont été appliquées depuis longtemps de façon empirique et plus récemment grâce à des essais agronomiques. Ainsi, pour une culture de céréales, s'il convient de choisir une densité de semis suffisante pour occuper au maximum le sol et obtenir la limite supérieure de production, il ne faudra pas atteindre une densité trop élevée, ce qui diminuerait le rendement en grains. De même, le forestier pourra volontairement serrer davantage les pieds d'une plantation de pins, de façon à favoriser un allongement des troncs et accélérer l'élagage naturel des branches basses, mais évitera une densité exagérée qui accroîtrait la mortalité, en partie à cause d'un étiolement trop important rendant les pieds fragiles.

▼ ***La modification morphologique telle que la croissance en hauteur prédominante peut être volontairement favorisée par un forestier dans une plantation serrée de Conifères.***

D. Delattre - Pitch

▶ *Coupe transversale schématique d'un sol montrant la disposition relative des systèmes radicaux dans l'association* **Elymo-Ammophiletum (*1*, Lathyrus maritimus; *2*, Ammophila arenaria; *3*, Eryngium maritimum; *4*, Honckenia peploides; *5*, Agropyron junceum; *6*, Elymus arenarius).** *La compétition pour l'espace, comme on le voit, s'exerce aussi dans le sol et entraîne une stratification des parties souterraines.*

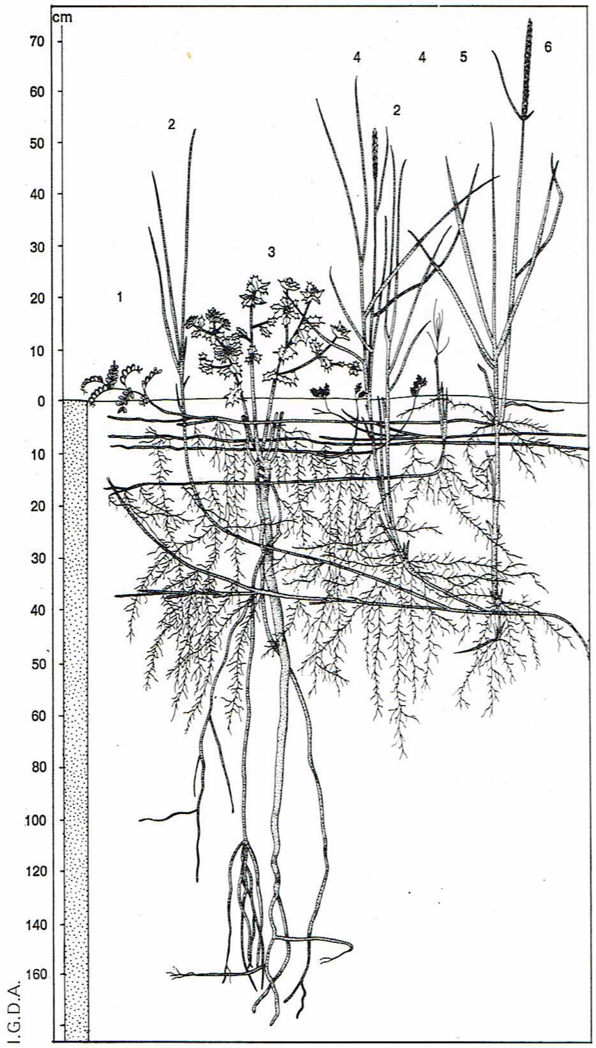

Les phénomènes de compétition sont encore plus complexes lorsque celle-ci s'exerce entre espèces différentes. Pour les végétaux supérieurs, l'évolution des groupements est en partie commandée par de telles interactions, mais les relations sont si nombreuses que l'analyse en est très difficile; c'est pourquoi on a eu recours à des expériences pratiquement limitées à la confrontation entre deux espèces différentes. On a cherché à déterminer les caractères morphologiques et biologiques qui jouent le plus grand rôle dans la compétition, et, par ailleurs, les facteurs écologiques. La compétition se manifeste, soit globalement pour l'occupation de l'espace, soit pour l'utilisation d'une ressource particulière du milieu (énergie lumineuse, eau, sels minéraux, etc.).

Les espèces à croissance rapide, à grande fertilité ou à moyens de multiplication végétative développés, à pouvoir de régénération élevé, à longue durée de vie, sont *a priori* mieux armées que celles qui ne possèdent pas ces caractères ou celles qui les possèdent en petit nombre. Cependant, même dans ce cas, l'espèce n'est pas toujours entièrement éliminée; elle peut contribuer aux premiers stades d'évolution (terrains dénudés, friches...). Par ailleurs, dans certains milieux, la périodicité saisonnière diminue par étalement dans le temps la compétition spatiale : ainsi, dans la chênaie-charmaie, un assez fort contingent de plantes printanières, comme les jacinthes, les ficaires, les arums, ont leur période de feuillaison et d'activité photosynthétique avant que se développent les Graminées forestières.

La compétition pour l'espace ne s'exerce pas seulement au niveau des parties visibles des plantes (essentiellement pour la lumière), mais aussi dans le sol (pour l'eau et les sels minéraux) entre les parties souterraines, qui présentent une stratification comparable à celle des parties aériennes.

La compétition pour la lumière se traduit par un défaut d'assimilation et de croissance des parties ombragées. Cela peut jouer entre des plantes de même espèce si elles sont d'âges différents; parmi des plantes d'espèces différentes cultivées ensemble, celles à feuilles larges et étalées, à possibilité de croissance rapide en hauteur, sont avantagées. De même, dans la compétition pour l'eau, un ensemble de racines bien développées dans toutes les dimensions s'avère plus efficace.

En ce qui concerne l'absorption des sels minéraux, notamment les engrais azotés, un cas bien étudié, mettant en présence un trèfle *Trifolium subterraneum* et une Graminée *Lolium rigidum,* fait ressortir l'importance de la teneur du sol en ces éléments. Lorsque l'azote est en très faible quantité, le trèfle domine, ce qui s'explique par le fait que les Légumineuses sont capables de fixer directement l'azote atmosphérique grâce aux Bactéries que renferment les nodosités de leurs racines. Au contraire, si l'apport azoté initial est suffisant, le développement de la Graminée est plus rapide; le trèfle est alors rapidement en partie ombragé et sa croissance diminuée. Cet exemple montre comment un des facteurs pour lequel il y a compétition initiale, ici l'azote, peut se trouver remplacé par un autre, en l'occurrence la lumière.

Le phénomène de compétition permet aussi d'expliquer certaines répartitions géographiques d'espèces. Un cas relativement simple peut être cité en exemple : sur les vases salées des côtes d'Europe de l'Ouest, deux espèces de Graminées du même genre, *Spartina stricta* et *Spartina townsendi,* sont susceptibles de se développer. On a observé que la seconde, qui est un hybride plus vigoureux, tend à se substituer peu à peu à *Spartina stricta* sur une partie importante de son aire.

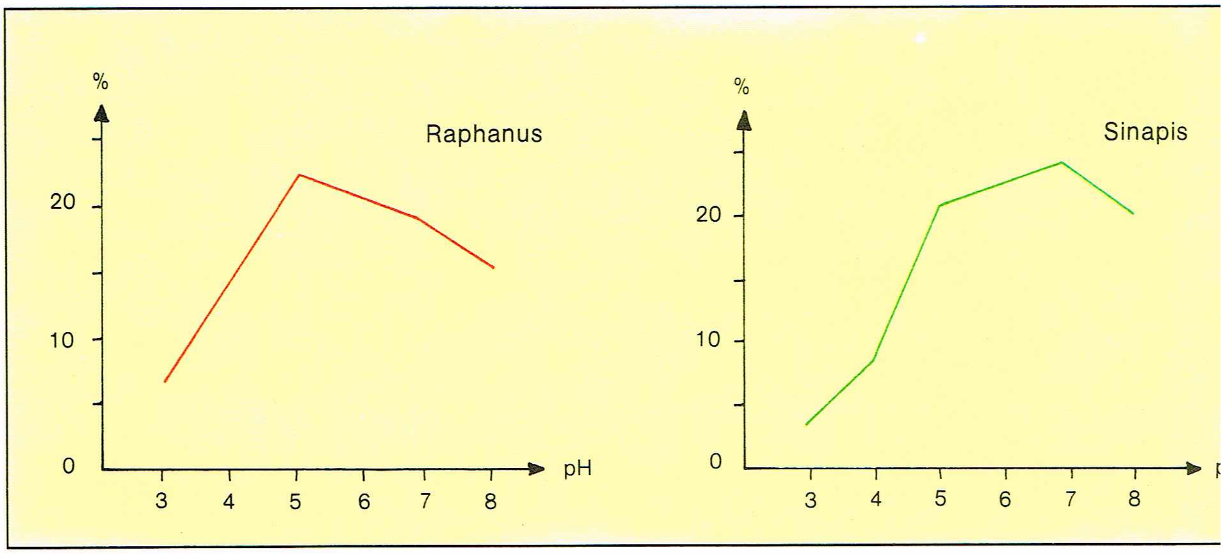

▶ *Représentation graphique de l'amplitude et de l'optimum, vis-à-vis du pH, pour deux espèces des friches* (**Raphanus**, *radis sauvage, et* **Sinapis**, *moutarde des champs*) *en culture pure et en mélange (d'après H. Ellenberg).*

Le jeu de la compétition est fondamental pour régler la composition floristique des groupements végétaux et même leur structure. Un exemple assez simple illustre bien ce phénomène. Si l'on cultive de jeunes pins sylvestres sur des sols à différents pH, on constate que le maximum de croissance est atteint pour des pH moyens. Or, si l'on relève le pH des stations où croît le pin sylvestre, on note la plus grande fréquence à des pH soit faibles, soit forts. Cela est dû en partie au fait que les forestiers ont utilisé cette essence assez rustique pour peupler des terrains à conditions difficiles, notamment à des valeurs pH du sol extrêmes, mais aussi à ce que dans les groupements spontanés en plaine le pin tend à être éliminé, à travers le jeu de la compétition pour la lumière, par les feuillus, chênes et surtout hêtres (Cajander, 1923; Ellenberg, 1956).

Chez les micro-organismes du sol, Bactéries et Champignons, une compétition existe aussi pour les différents types d'aliments disponibles. Ces phénomènes sont toutefois complexes et moins bien connus. Comme pour les végétaux supérieurs, la teneur en éléments minéraux peut orienter la composition des peuplements bactériens : ainsi, dans les sols à humus de type *mull calcique,* les Bactéries cellulolytiques se développent bien, alors que, pour un humus acide du type *mor,* la flore de Champignons est plus abondante.

Compétitions chez les animaux

Chez les animaux, l'effet de masse représente, nous l'avons vu, une forme de compétition lorsqu'il y a de fortes densités, mais la *compétition intraspécifique* s'exprime aussi par la constitution et la défense de territoires (chez de très nombreux Oiseaux, Mammifères et Poissons), qu'il s'agisse de territoires de chasse ou de zones de reproduction. Une compétition pour l'espace, similaire à celle des végétaux, se manifeste dans le cas des animaux à vie fixe, surtout les Invertébrés marins : moules, huîtres, balanes...

On peut observer aussi l'inhibition de développement à l'égard des générations plus jeunes : ainsi, des larves de hannetons âgés de 3 ans empêchent dans le sol le développement des larves de 1 ou 2 ans, ce qui expliquerait pourquoi les éclosions massives de hannetons n'ont lieu que tous les 3 ans. On peut aussi relier à l'effet de masse les phénomènes régulateurs qui interviennent lors de pullulations, telles que celles des lemmings ou des campagnols. Les lemmings (Rongeurs) deviennent certaines années extrêmement nombreux dans les landes nordiques; on en a observé des déplacements massifs, qui semblent liés à des effets physiologiques hormonaux par excitations réciproques des individus et qui conduisent à des suicides massifs en mer. Les années suivantes, les populations retrouvent un niveau plus bas, certainement aussi parce que les sources de nourriture détériorées lors de la pullulation ne se reconstituent pas immédiatement. Des faits comparables, bien que moins spectaculaires, ont été mis en évidence dans la campagne vendéenne pour le campagnol (Saint-Girons, 1960).

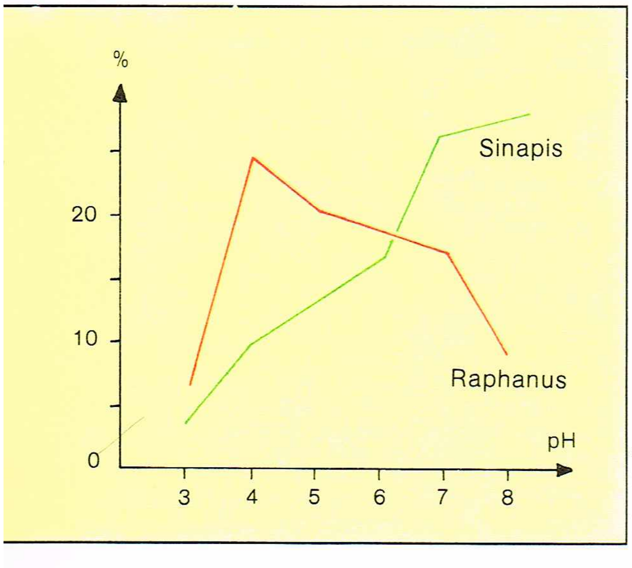

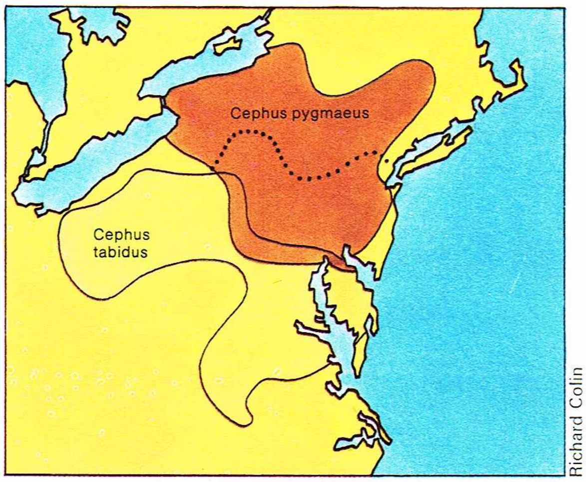

◀ *Représentation cartographique de distribution mutuellement exclusive de deux espèces d'Insectes parasites des chaumes de blé :* **Cephus tabidus** *a été supplanté dans la partie nord de son aire (ligne en tirets) par* **Cephus pygmaeus.** *La compétition a dans ce cas une influence évidente sur la répartition géographique (d'après E. J. Udine).*

En ce qui concerne la *compétition interspécifique* chez les animaux, elle se manifeste principalement par la concurrence vis-à-vis des sources de nourriture : la compétition est d'autant plus forte que les comportements alimentaires ou, de façon plus générale, « les niches écologiques » sont plus proches. La compétition pour l'espace existe aussi entre les divers organismes fixés en milieu marin, surtout entre Invertébrés (ascidies, Éponges, Mollusques fixés...); elle s'exerce même avec des représentants du règne végétal (Algues).

Comme pour les plantes, l'évolution des biocénoses en général est affectée par les phénomènes de compétition. Des influences sur la répartition géographique sont parfois évidentes. C'est le cas, aux États-Unis, pour deux espèces d'Insectes du genre *Cephus,* parasites du blé : l'aire de l'espèce la plus méridionale a perdu dans le nord une partie de son aire géographique aux dépens de l'autre espèce, qui pond environ une semaine plus tôt et occupe les sites de ponte disponibles.

Relations antagonistes : actions chimiques, prédation et parasitisme

Lorsque deux organismes sont en compétition vis-à-vis d'une même source d'énergie, d'aliments ou d'une même portion d'espace, la compétition aboutit parfois à la disparition de l'un des deux individus.

Les relations de type antagoniste sont celles qui entraînent à plus ou moins long terme la disparition de l'un des deux organismes, seul celui qui domine en tirant bénéfice. C'est le cas, par exemple, lorsqu'une plante élimine par des sécrétions toxiques les germinations d'autres espèces, empêchant celles-ci d'atteindre un stade de croissance qui leur permettrait d'entrer en compétition avec la première; c'est le cas aussi lorsqu'un organisme sert de nourriture à un autre, soit qu'il y ait *prédation* avec disparition brutale, soit qu'il s'agisse de *parasitisme,* auquel cas des phases de troubles plus ou moins aigus précèdent généralement la mort.

Les actions dues à des composés chimiques sont appelées *antibiose,* surtout lorsqu'il s'agit des micro-organismes qui produisent des antibiotiques, ou *télétoxie,* terme plus général. Quelques cas illustrent bien de telles actions. Une substance produite par les parties aériennes des noyers *(Juglans regia* et *J. nigra),* la juglone, conduite au sol par l'eau de pluie, entrave le développement de certaines plantes sous les arbres, comme on a pu le constater pour des cultures de pommes de terre, de luzerne et de tomates; des expériences en ont apporté la preuve (Davis). Plus récemment, Deleuil a montré que certains buissons du maquis méditerranéen ont une action comparable : c'est le cas du romarin, dont les racines sécrètent des produits toxiques inhibant le développement des herbes annuelles.

Pour les micro-organismes, les substances antibiotiques produites par divers groupes (Bactéries, Champignons Actinomycètes) sont très nombreuses; beaucoup ont été isolées et leur spectre d'action vis-à-vis des différentes espèces est bien connu *in vitro.* Toutefois,

▶ *Exemple de parasitisme végétal : une Malvacée* (Hibiscus sp.) *est parasitée par un* Cuscuta gronovii *dont les tigelles, privées de feuilles et manquant de chlorophylle, s'enroulent autour de la plante hôte.*

T. Sacco

dans le sol, il semble que les actions s'exercent moins facilement ; nos connaissances sont encore assez faibles dans ce domaine.

Le prélèvement de nourriture par des organismes aux dépens d'autres êtres vivants entre dans le cadre de l'exploitation, sous ses deux formes principales : le parasitisme et la prédation. L'exploitation représente un facteur biotique important agissant initialement sur les populations exploitées et, ensuite, sur la croissance et l'importance des prédateurs et des parasites. La distinction entre ces deux catégories paraît aisée lorsque l'on oppose des prédateurs tels que les carnivores tirant et mangeant des proies, le plus souvent de taille inférieure à la leur, aux parasites définis comme des espèces prélevant de la nourriture à partir d'un hôte, soit en restant extérieurs à l'organisme parasité *(ectoparasites)*, soit en se développant dans les liquides intérieurs ou les tissus *(endoparasites)*. La taille des parasites par rapport à leur hôte est toujours très réduite : ce sont, parmi les végétaux, essentiellement des Bactéries ou des Champignons, et parmi les animaux, des Protozoaires, beaucoup d'Invertébrés (surtout des Insectes, des Vers) et quelques rares Vertébrés. Autre différence frappante avec les prédateurs : le parasite cause des dommages plus ou moins graves à l'hôte et ne provoque pas obligatoirement la mort de celui-ci, bien que cette dernière survienne souvent, à plus ou moins long terme. Cependant, certains cas, pourtant très importants car il s'agit d'un type de relations alimentaires très répandu, se placent difficilement au niveau de cette distinction parasites-prédateurs : ainsi, les herbivores, qui prélèvent une partie des végétaux (feuilles des herbes ou des arbres, racines...), ne sont pas des parasites car ils ne sont pas fixés à un hôte source de nourriture : il faut plutôt les considérer comme des prédateurs partiels.

Qu'il s'agisse de parasites ou de prédateurs, leur prospérité ainsi que leur croissance individuelle et au niveau des populations dépendent des organismes qu'ils exploitent. Une plus ou moins grande spécificité se manifeste dans les relations parasite-hôte ou prédateur-proie. On distingue à cet égard :

— des espèces *polyphages,* ou *euryphages,* qui ont des sources d'aliments variées, en fonction essentiellement des disponibilités saisonnières. A côté d'espèces omnivores typiques, comme l'ours brun, d'autres animaux sont souvent considérés à tort comme inféodés à un seul type de nourriture. Ainsi, le renard peut trouver pendant certaines saisons (été et automne) un apport très important de nourriture à partir de fruits ; une atteinte à l'une de ses sources de nourriture (diminution de la quantité de lapins, provoquée par la myxomatose) entraîne une consommation accrue à partir d'autres sources encore disponibles ;

— des espèces *oligophages,* pour lesquelles la prise de nourriture se fait à partir d'un petit nombre d'espèces, et même *monophages,* ou *sténophages,* qui ont un régime alimentaire constitué par une seule espèce. Les monophages s'observent chez les prédateurs, tel ce milan vivant dans les marais de Floride qui ne consomme qu'une seule espèce d'escargot *(Pomatia caliginosa) ;* cependant, c'est surtout chez les parasites que se manifeste une si étroite spécificité. Dans le cas de cycles parasitaires, il y a fréquemment pour chaque stade biologique du parasite (Protozoaires, Vers Trématodes et Cestodes) un hôte spécifique.

La dépendance du prédateur ou du parasite vis-à-vis de la proie ou de l'hôte s'exprime par de nombreuses adaptations. Il est évident que l'organisme qui exploite doit pouvoir repérer sa source alimentaire, posséder les enzymes qui lui permettent d'utiliser la nourriture prélevée, etc. Dans certains cas, l'adéquation apparaît même au niveau d'une parfaite correspondance entre les phases biologiques des parasites et de l'hôte : ainsi, *Anthonomus,* le charançon du pommier, ne pond dans les bourgeons à fleur de cet arbre que lorsque ceux-ci

▼ *Pelouse calcaire du Doubs inhibée par les sécrétions de l'épervière piloselle* (Hieracium pilosella) *qui a évincé ses concurrentes et subsiste seule ici.*

C. Nardin - Jacana

B. Coleman - N. Myers

sont à un stade de développement très précis. Les quelques larves issues d'œufs, en très petit nombre d'ailleurs, pondus avec un peu de retard par rapport à ce stade ne trouvent pas par la suite de conditions favorables à leur développement.

Plus généralement, lorsque l'on étudie l'évolution de l'importance des populations des espèces exploitantes par rapport à celles qui sont exploitées, on observe des fluctuations concomitantes qui illustrent bien les interrelations existant au niveau des phénomènes de prédation ou de parasitisme. Au cours de l'histoire évolutive, même récente, des réajustements adaptifs ont pu se réaliser. C'est le cas pour les plantes cultivées; leurs Insectes prédateurs sont dans leur grande majorité issus de formes vivant initialement sur des plantes voisines sur le plan systématique et biochimique.

Commensalisme et mutualisme

Dans les cas de commensalisme et de mutualisme, il y a rapprochement des organismes d'espèces différentes. Le commensalisme est caractérisé par le fait qu'un seul des deux partenaires est bénéficiaire : il trouve un abri ou une source de nourriture liée à un hôte qui, lui, ne retire apparemment ni avantage ni désagrément du rapprochement. Il y a mutualisme si, au contraire, l'association entraîne des bénéfices réciproques. En réalité, il n'est pas toujours facile d'établir la limite entre ces deux catégories.

Le commensalisme s'observe dans de très nombreux cas. Les épiphytes, qu'il s'agisse de plantes supérieures (Broméliacées), de Mousses, de Lichens ou d'Algues, qui peuplent les branches et les troncs des arbres, sont des commensaux permanents. La composition et l'abondance de la flore épiphytique dépendent :

— de la nature des écorces, les écorces lisses ou s'exfoliant étant très faiblement colonisées par rapport à celles qui sont rugueuses et permanentes;

— des conditions microclimatiques liées à l'arbre porteur, mais aussi à l'ensemble du groupement, s'il s'agit par exemple d'une forêt; si l'arbre est isolé, les actions du vent accroissant l'évaporation et apportant diverses poussières minérales sont déterminantes.

L'étude de la flore lichénique des arbres autour des agglomérations permet de déterminer le degré de pollution de l'air.

Chez les animaux, parmi les espèces commensales on peut citer celles qui peuplent les terriers des Mammifères, les nids d'Oiseaux ou les constructions des Insectes sociaux (abeilles et bourdons, termites, fourmis, etc.). Ce sont des petits Invertébrés, surtout des Insectes, qui recherchent dans de tels gîtes un microclimat particulier (température plus forte et plus régulière, taux d'humidité plus constant). Ils se nourrissent souvent soit à partir des débris de nourriture de l'hôte, soit à partir de ses excréments.

Les commensaux peuvent être très nombreux; on en a compté cent dix espèces pour les seuls Coléoptères dans les terriers de la marmotte des Alpes. Les petits animaux inféodés aux maisons, comme le lépisme (« poisson d'argent »), l'araignée tégénaire, la mouche domestique, la souris, peuvent être considérés comme des commensaux de l'homme. Dans certains cas, le commensal est lié à son hôte, qu'il utilise comme moyen de transport *(phorésie)* : ainsi les géotrupes, ou bousiers, qui fréquentent les bouses des grands Mammifères, portent presque toujours de nombreux petits Acariens au niveau des articulations de leur face ventrale. D'autres animaux sont contenus dans l'organisme qui les héberge : il est plus difficile d'admettre qu'il s'agit là de simples commensaux. Si tel est sûrement le cas du petit crabe *Pinotheres pisum* vivant à l'intérieur de la coquille des moules, sous le manteau, il est probable qu'une partie de la flore bactérienne de l'intestin des grands animaux, considérée parfois comme « neutre », n'est pas tout à fait sans

▲ ***Un hippopotame, portant sur son dos un Oiseau qui le débarrasse des Insectes parasites : c'est un exemple de*** **phorésie**; ***le commensal est lié à son hôte qu'il utilise comme moyen de transport.***

▼ ***Le commensalisme est, en général, caractérisé par le fait qu'un seul des deux partenaires est bénéficiaire; ici une Fougère*** **(Polypodium sp.)** ***colonisant un tronc d'arbre dans une forêt tahitienne.***

T. Sacco

Bos - Jacana

▲ *Dans l'homochromie, l'animal possède ou prend, à certaines saisons, une couleur qui lui permet de se fondre avec le substrat (ici, un lièvre blanc dans la neige), et d'échapper à d'éventuels prédateurs.*

action sur son hôte. De même, le bénéfice réciproque n'est pas toujours évident. Cependant, quelques cas particuliers sont bien démontrés : l'un des plus spectaculaires est peut-être celui de l'association de certains Crustacés Décapodes, crabes ou pagures avec diverses actinies ou anémones de mer. Citons deux exemples très classiques : celui de l'association entre un pagure, ou bernard-l'ermite *(Eupagurus bernadus)*, et une anémone de mer *(Sagartia parasitica)*, la seconde étant fixée sur la coquille qu'habite le premier; d'autre part, celui de l'association entre *Pagurus prideauxii* et une autre anémone de mer *(Adamsia palliata)*. Dans cette dernière association, la coquille occupée par le pagure est agrandie par la croissance de la sole du pied de l'actinie. Dans la plupart des cas semblables, le pagure ou le crabe est capable d'exciter une actinie de l'espèce associée correspondante pour qu'elle se détache de son support et se fixe ensuite sur la coquille qu'il occupe ou sur sa carapace. L'actinie peut profiter des débris de nourriture de son hôte; il a été montré qu'un bernard-l'ermite porteur d'une *Sagartia* n'était pas inquiété par une pieuvre, alors que celle-ci fait aisément sa proie du pagure si l'anémone n'est pas présente. Dans le cas des Oiseaux qui se nourrissent aux dépens des parasites de la peau de grands herbivores, l'intérêt pour les deux partenaires est évident : l'un trouve sa nourriture et l'autre est débarrassé de parasites gênants.

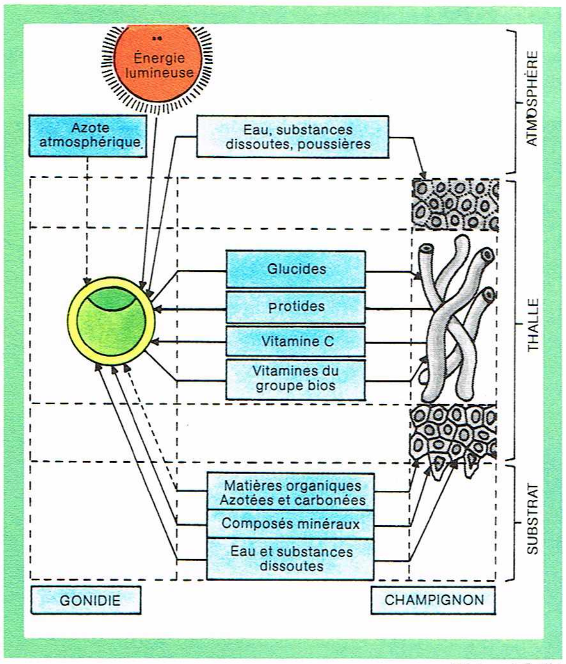

▶ *Représentation schématique des relations nutritionnelles entre les constituants et le milieu extérieur dans le cas de la symbiose lichénique.*

Richard Colin

En ce qui concerne l'intervention des Insectes dans la pollinisation des plantes supérieures, il y aurait en plus de l'existence de très remarquables coaptations des exemples d'avantages réciproques. Dans ce domaine, l'observation la plus générale et qui a la plus grande portée est la suivante : la fécondation croisée des plantes est favorisée par le type d'exploitation monospécifique fréquemment observée que pratiquent les Insectes (abeilles par exemple) prélevant leur nourriture dans la flore (Souchon, 1965).

Le type de mutualisme le plus achevé est probablement celui de la symbiose lichénique. Toutefois, au niveau écologique, il s'agit d'une relation constante et obligatoire, et vis-à-vis des facteurs du milieu on a plutôt tendance à considérer chaque espèce de Lichen comme une unité indivise.

D'autres associations semblent à sens unique. Par exemple, si les araignées de mer ou espèces voisines de plus petite taille, porteuses d'Algues diverses sur leur carapace, trouvent un avantage certain dans ce camouflage, il n'est pas sûr qu'il y ait un bénéfice pour les Algues transportées, si ce n'est, peut-être, au niveau d'une meilleure dispersion due à la mobilité. Dans les récifs de coraux, de petits Poissons sont constamment au-dessus de la bouche de certaines Actinies : ainsi, ils ne sont pas inquiétés et profitent éventuellement des débris des proies ingérées par l'anémone; *a priori*, aucun bénéfice n'est évident pour cette dernière.

Homochromie et mimétisme

L'homochromie et le mimétisme sont des phénomènes qui s'exercent au niveau de relations entre êtres vivants, mais qui sont, plus que tout autre, le résultat d'une histoire évolutive antérieure. Dans l'homochromie, l'animal possède ou prend, à certains moments ou à certaines saisons, une couleur qui lui permet, en se fondant avec le substrat, d'échapper à d'éventuels prédateurs; en outre, il y a parfois *homéomorphie :* l'animal, souvent un Insecte, possède une forme qui mime un fragment végétal, une feuille ou un autre Insecte. L'ensemble de ces procédés tendant à réaliser une ressemblance visuelle s'appelle le *mimétisme*. Son rôle peut être simplement protecteur; cette forme de mimétisme, si l'on ne s'attache pas exclusivement aux cas les plus spectaculaires, est en réalité très répandue et banale : grenouille verte, sauterelles dans l'herbe des prés, gibier fauve aux couleurs de terre, plumage moucheté, etc. Dans quelques cas, la proie éventuelle mime un animal d'un groupe différent : c'est le cas pour des papillons mimant des Hyménoptères. A l'inverse de ce procédé, qui tend à fondre l'animal dans le milieu, certains animaux, surtout des Insectes, attirent l'attention par des couleurs vives, des dessins contrastés, dont le rôle est d'effrayer ou de dissuader les agresseurs éventuels; ces procédés sont parfois accompagnés de la possibilité de produire un liquide nauséabond ou caustique, par exemple, chez les zygènes.

D'un point de vue écologique, il faut replacer de tels phénomènes au sein des chaînes alimentaires, dans le fonctionnement général des écosystèmes : les espèces pourvues de tels dispositifs ne sont ni plus ni moins abondantes que d'autres; en outre, l'évaluation de l'efficacité risque d'être faite sur un plan anthropomorphique et non qualitatif. L'utilité du mimétisme peut être considérée de façon relative lorsque l'on compare deux espèces voisines; mais en tant qu'ensemble de procédés, il n'a pas de valeur absolue.

ÉCOLOGIE DES POPULATIONS

On désigne sous le terme d'*écologie des populations,* ou *démo-écologie,* la partie de l'écologie qui étudie les aspects dynamiques observés au niveau des populations, dans la mesure où ces aspects sont influencés par les facteurs écologiques biotiques ou abiotiques. Ce point de vue distingue la démo-écologie de la génétique des populations au sens strict, qui cherche surtout à préciser les mécanismes génétiques permettant la variation et l'adaptation au milieu. Il convient toutefois de remarquer que les données fondamentales de la génétique des populations, qui sont d'ordre qualitatif, sont indispensables pour interpréter certains faits mis en lumière par les études démo-écologiques quantitatives, et réciproquement.

Le terme de *population* désigne l'ensemble des individus d'une même espèce capables d'échanger librement entre eux des gènes. Dans la pratique, cela implique qu'il n'y ait pas entre les individus un isolement géographique supérieur aux moyens de déplacement ou de dissémination, et que la parenté génétique ne soit pas éloignée au point d'empêcher des croisements fécondés. Dajoz (1974) fait appel à une définition plus courante : « Une population est formée par l'ensemble des individus de la même espèce qui occupe un espace déterminé à un moment donné. En raison de la grande variabilité des conditions, les divers endroits favorables à l'installation d'une espèce sont le plus souvent séparés entre eux par des discontinuités plus ou moins importantes. Chaque lieu favorable est occupé par une population : les hêtres d'une hêtraie, les merles d'un parc urbain, les carpes d'un étang, les escargots d'une haie constituent des exemples de population. »

En écologie, la population est l'unité d'étude de base : c'est à son niveau que s'exercent les relations entre les êtres vivants. Il ne saurait y avoir de compétition entre un seul pied de ray-grass et un seul de trèfle; ce qui est important au niveau du fonctionnement de l'écosystème, ce n'est pas qu'un lion dévore une antilope, c'est le fait que la prédation par une population de lions d'une partie d'une population d'antilopes assure la nourriture de la première et la régulation du nombre des individus de la seconde. Les communautés, qui sont constituées par un ensemble d'organismes d'espèces différentes peuplant une zone de conditions écologiques homogènes et définies, sont la résultante de l'assemblage des populations de ces espèces. Les relations entre les populations et leurs réactions vis-à-vis du milieu s'inscrivent dans le cadre du fonctionnement de l'écosystème.

De nombreuses études ont été effectuées dans le domaine de la dynamique des populations, assez souvent pour un but appliqué. L'attention s'est, par exemple, portée sur les populations de Poissons marins soumis à la pêche, sur le gibier, sur les espèces nuisibles à l'agriculture (Insectes, Rongeurs, parasites des animaux), sur les vecteurs de maladies (moustiques), sur les animaux que l'on souhaite protéger (dans les parcs naturels africains ou d'autres régions). Enfin, les études démographiques sur l'homme pourraient s'inscrire dans ce cadre, mais elles ont été effectuées en tenant presque exclusivement compte des considérations économiques et politiques. Depuis quelque temps, on établit des liens entre la population et la quantité de ressources naturelles disponibles; cependant, la mise en œuvre d'une véritable approche écologique, tant sur le plan local que sur le plan national ou celui des grandes régions du monde, n'en est qu'à de très timides débuts.

Les caractéristiques d'une population et leurs mesures

Dans le cas d'une population d'une seule espèce, il est possible de caractériser à chaque instant son état et donc sa dynamique par un certain nombre de données. Ces données portent essentiellement sur le mode de répartition spatiale (occupation plus ou moins forte d'une zone, types de distribution) d'une part, sur les effectifs et la façon dont la population s'accroît ou décroît d'autre part. Ce deuxième groupe de données fournit des indications d'ordre strictement démographique; certaines expressions chiffrées ou graphiques traduisent la *structure démographique* de la population; ces caractéristiques peuvent être fournies par des travaux sur le terrain, mais des expériences au laboratoire sont aussi très utilisées pour préciser les paramètres de la croissance de la population. Quant à l'obtention du premier type de données, qui s'effectue sur le terrain, elle nécessite l'utilisation de divers procédés d'échantillonnage.

Pulitzer

▲ *« Une population est formée par l'ensemble des individus de la même espèce qui occupe un espace déterminé à un moment donné... »; ce groupe de* **Mulloidichthys martinicus** *constitue une population.*

Répartition spatiale; densité et types de distribution

La plus ou moins grande abondance d'une espèce dans une zone ou une communauté donnée est exprimée par la **densité,** c'est-à-dire le nombre d'individus présents par unité de surface : il s'agit d'une caractéristique aisée à définir mais dont la mesure sur le terrain est plus compliquée.

Pour les plantes, il est relativement facile, soit en inventoriant toute une surface systématiquement, soit en procédant à des relevés sur des échantillons limités choisis au hasard, de mesurer la densité.

En ce qui concerne les animaux, leur mobilité et leur plus grande dispersion rendent les mesures plus difficiles : on doit souvent se contenter d'une évaluation relative de l'abondance. Par exemple, dans le cas d'un piège lumineux pour papillons de nuit dont on ignore la zone exacte d'action, on traduira l'abondance relative d'une espèce par son pourcentage vis-à-vis du total des captures. De même, pour des Oiseaux assez sédentaires d'un couvert forestier, on notera sur des parcours de longueur déterminée visités à la même vitesse et la même heure, le nombre de « contacts » (individus vus ou entendus) avec les différentes espèces et on comparera ainsi leurs nombres respectifs. Dans le cas des vols d'Oiseaux migrateurs, on peut procéder à un dénombrement, mais une densité ne pourrait être obtenue qu'à un moment d'utilisation d'un territoire limité, lors de la nidification par exemple. Les photographies aériennes permettent de connaître le nombre d'individus dans les grands troupeaux de Mammifères vivant en

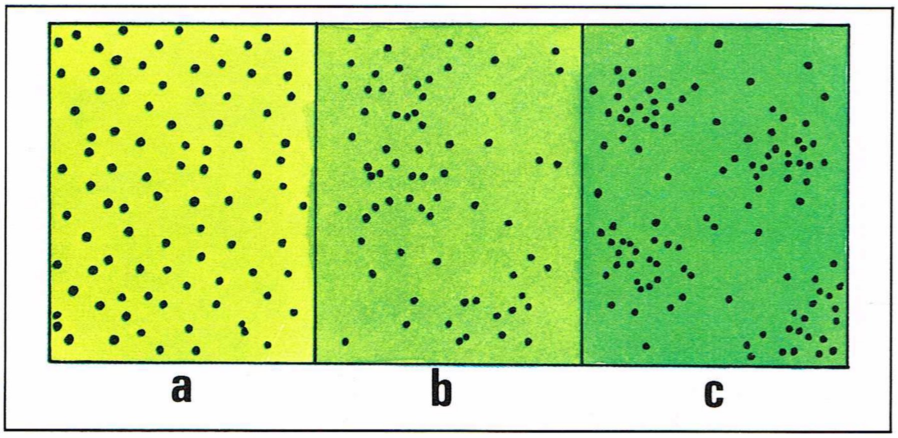

▲ ***Représentation schématique des types de répartition des individus d'une espèce : A, distribution régulière; B, distribution au hasard; C, distribution par agrégats.***

terrain découvert, mais il importe aussi de déterminer les limites des territoires qu'ils utilisent.

D'une manière générale, les procédés de piégeage pour les Insectes ou pour les petits Mammifères (Rongeurs, Insectivores) ne permettent pas, sauf si l'on est à même de préciser les limites du territoire colonisé, d'obtenir la densité. Dans certains cas, on ne peut procéder facilement ni au dénombrement direct total ou partiel par échantillonnage, ni au piégeage; on utilise alors les *traces d'activité :* intensité des dégâts causés aux végétaux, nombre de terriers, nombre de fèces, traces de passage, etc.

Sur le plan de la **distribution spatiale,** on distingue trois types, qui ne sont identifiables pratiquement pour une espèce que si l'on peut localiser chaque individu en un point (sur une carte par exemple).

— La *distribution régulière* ou *uniforme* est rare dans la nature; elle n'existe guère que pour les animaux dont chaque individu a un territoire bien défini; c'est le cas pour certains prédateurs à territoire étendu : grands fauves, Rapaces, Poissons carnivores, ainsi que, moins nettement, pour quelques Rongeurs, Oiseaux et Reptiles mâles. Selon Dice (1952), cette distribution pourrait aussi s'observer pour les grands arbres d'une forêt.

— La *distribution au hasard* suppose un milieu homogène sur le plan des conditions écologiques abiotiques, et même biotiques, et une tendance à un comportement sans interactions — « indifférent » en quelque sorte — entre les individus de la même espèce. Ce type de distribution, qui n'est pas non plus très répandu, peut s'observer dans le cas d'organismes appartenant à des groupes systématiques caractérisés par leur petite taille (Protozoaires, Bactéries, Algues unicellulaires) et aussi dans le cas de plantes supérieures chez lesquelles la dispersion des semences est essentiellement assurée par le vent.

— La *distribution par agrégats,* ou *par groupes,* dite encore *distribution contagieuse,* est de loin la plus répandue : cela s'explique bien, d'une part par la tendance naturelle de beaucoup d'espèces animales à réaliser des groupes sociaux d'importance numérique plus ou moins grande (familles, colonies, troupeaux), d'autre part, pour les plantes, par leurs réactions aux irrégularités du milieu. En outre, les modes de dispersion des spores, des semences, etc., et les divers procédés de multiplication végétative favorisent de telles dispositions.

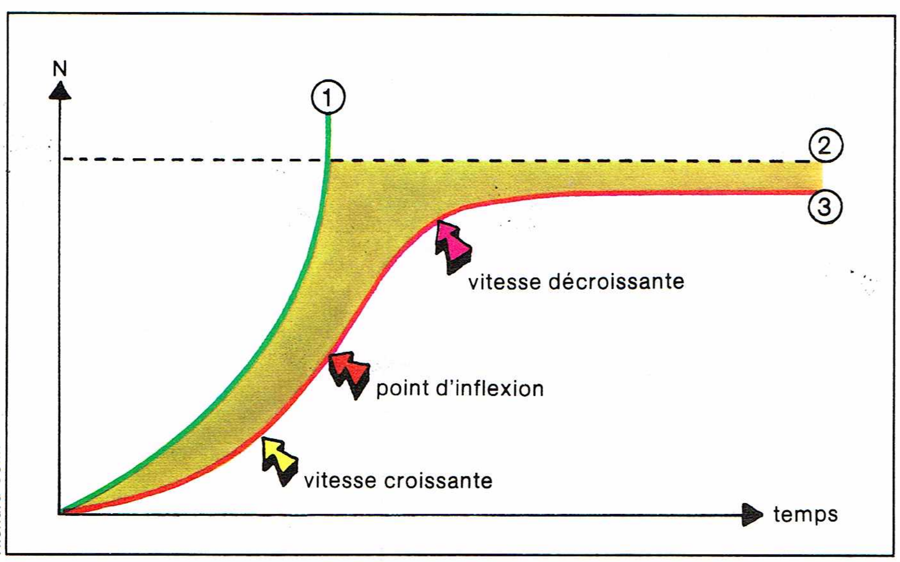

▼ ***Représentation graphique de la croissance d'une population : N, nombre d'individus de la population; 1, courbe de croissance exponentielle, traduisant le « potentiel biotique »; 2, limite imposée par le milieu; 3, courbe effective de croissance de la population; la zone ombrée représente la pression du milieu.***

Croissance des populations et structure démographique

La croissance d'une population, qui peut être positive ou négative, est la résultante de la natalité et de la mortalité; en outre, les phénomènes migratoires modifient les effectifs présents dans une zone donnée. Le **coefficient d'accroissement** correspond aux cas où seules la natalité et la mortalité interviennent. En théorie, si à chaque intervalle de temps le nombre d'individus s'est accru, le taux de croissance a tendance à augmenter : l'expression mathématique de ce phénomène est une *courbe* dite *exponentielle :* biologiquement, elle représente ce qu'on nomme le *potentiel biotique*. Dans le cas d'une espèce à multiplication végétative par division en deux se produisant une fois par jour, on aura selon la loi de croissance suivante : 1 individu le 1^er^ jour, 2 individus le 2^e^, 4 le 3^e^, 8 le 4^e^, 16 le 5^e^..., 512 le 10^e^..., 16 364 le 15^e^ et ainsi de suite...

Le coefficient d'accroissement, qui traduit cette vitesse d'expansion, est différent selon les espèces : il est de l'ordre de 0,005 5 pour l'homme, de 5 pour le rat, de plus de 20 pour beaucoup d'Insectes. En réalité, ni l'espace, ni la nourriture ne sont en quantité illimitée dans la nature; il faut de plus tenir compte de toutes les actions de limitation climatiques, de prédation, etc.; les courbes de croissance observées montrent donc des valeurs inférieures aux valeurs théoriques du potentiel biotique. L'ensemble des facteurs expliquant la différence entre ces valeurs est appelé *résistance du milieu,* ou *pression du milieu*. En outre, on observe qu'à partir d'un certain point la vitesse de croissance se ralentit avant de s'annuler : l'effectif de la population ne croît pratiquement plus; c'est que la *capacité de supporter (carrying capacity)* du milieu vis-à-vis de cette population a été atteinte; on parle encore de *stock-limit* du milieu ou de *charge biotique maximale*.

La courbe de croissance de la population est dite **courbe logistique,** ou **courbe en S :** c'est le mathématicien Verhulst qui, en 1845, l'avait proposée comme représentant une hypothèse appliquée à la croissance des populations humaines. Diverses études théoriques et essais expérimentaux auxquels sont associés les noms de Pearl (1925), Gause (1931-1935), Volterra (1931) et Lokta (1934) ont permis de vérifier la validité de cette hypothèse et d'affirmer son caractère de généralité.

Une représentation très classique permet d'obtenir à un instant donné une idée de la composition d'une population : c'est la **pyramide des âges,** d'un usage très courant en démographie humaine. La pyramide des âges ne donne pas seulement les effectifs par classe d'âge, elle permet de plus de juger de la stabilité d'une population et de son évolution probable. En démographie humaine, on distingue ainsi aisément une population « jeune » d'une population « âgée ». En démographie forestière, où l'on utilise le plus souvent des courbes présentant les effectifs sur l'axe des coordonnées, la structure des divers peuplements, leur origine, et leurs possibilités d'évolution sont bien traduites par de tels graphiques. Les travaux d'Hjort (1926), qui a établi les proportions des différentes classes d'âges présentes parmi les harengs pêchés en mer du Nord entre 1907 et 1919, ont montré comment la structure démographique à un moment donné conditionne celle des années suivantes.

Les représentations des structures démographiques sont plus compliquées dans le cas où l'espèce présente des stades différents bien marqués morphologiquement : un exemple en est fourni par les pyramides des âges établies pour une ruche par Bodenheimer (1938).

D'autres procédés servent à rassembler plusieurs types de données (vitesse de croissance, possibilité d'évolution...) selon les cas : on peut citer les **diagrammes de Lexis,** les **tables de vie** ou de **mortalité** qui per-

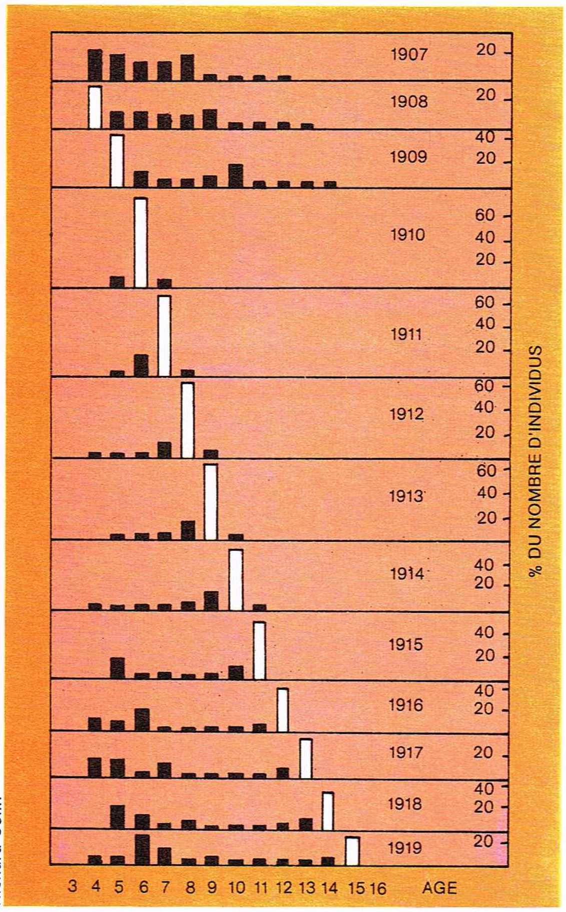

◀ *Représentation graphique des travaux de Hjort (1926) sur* **la structure démographique** *établie d'après les proportions de classes d'âges parmi les harengs pêchés en mer du Nord entre 1907 et 1919. La forte classe d'âge constituée par les individus nés en 1904 reste dominante pendant plusieurs années (colonnes claires). En abscisse, l'âge des Poissons; en ordonnée, le % de chaque classe dans la population annuelle.*

mettent d'établir des **courbes de survie.** Ces tables et ces courbes rendent compte du taux de mortalité dans les diverses classes d'âges et souvent selon les sexes, et donc de l'espérance de vie des individus qui leur appartiennent. Elles sont utilisées de façon courante en démographie humaine pour établir le coût des primes d'assurance-vie en fonction de l'âge de l'assuré.

Les courbes de survie sont construites en portant en ordonnées le nombre de survivants (généralement sur une échelle logarithmique) par rapport au temps; chez l'huître, la mortalité est très forte dans les premiers stades, alors que c'est le contraire chez la drosophile, pour laquelle la mortalité maximale intervient pour presque tous les individus à un même âge, très proche de la longévité potentielle. La courbe pour l'espèce humaine se rapproche de ce dernier cas, la mortalité ayant été considérablement réduite au niveau des nourrissons et des jeunes enfants; si l'on dissociait le cas de l'homme et de la femme, la courbe correspondant à cette dernière, dont la longévité moyenne est meilleure que pour les individus mâles, se rapprocherait davantage encore de la courbe observée pour la drosophile.

Pour la population humaine, sa constante expansion pose certainement le plus grave problème sur le plan écologique. On estime qu'il y avait environ 900 millions d'hommes sur la planète au début de l'ère industrielle, vers 1800. C'est surtout à partir de ce moment que la croissance a pris une allure exponentielle. L'Annuaire démographique des Nations unies donnait en 1971 un effectif total de 3 706 millions et une vitesse d'accroissement de 2,1 %. La période nécessaire pour atteindre un accroissement d'1 milliard supplémentaire est de plus en plus courte. Voici les durées nécessaires :

— de 1 à 2 milliards : 75 ans (de 1850 à 1925);
— de 2 à 3 milliards : 37 ans (de 1925 à 1962);
— de 3 à 4 milliards : 15 ans (de 1962 à 1977);
— de 4 à 5 milliards : 10 ans (de 1977 à 1987);

Le même phénomène est exprimé par le temps de doublement qui a été : de 150 ans (entre 1750 et 1900), de 65 ans (entre 1900 et 1965) et sera de 35 ans seulement entre 1965 et 2000, période à laquelle la population mondiale sera de 7 milliards environ. Les essais pour prévoir la tendance générale reviennent à s'interroger pour savoir si la pente de la courbe continuera à augmenter (vitesse d'accroissement en hausse, hypothèse dite « pessimiste ») ou si elle diminuera, comme il est de règle à un certain moment dans la courbe en S après le passage du point d'inflexion (vitesse d'accroissement en baisse, hypothèse dite « optimiste »).

Mais le problème démographique ne doit pas être envisagé à la seule échelle de la planète; il est avant tout régionalisé, car les accroissements sont très différents selon les parties du monde. Les pays dits « sous-développés » ou « en voie de développement » ont un taux d'accroissement bien supérieur à la moyenne mondiale, tandis que les pays dits « riches » ou « développés » ont un taux inférieur.

Des phénomènes de régulation naturelle interviennent et interviendront, mais ils ne relèvent que d'une froide appréciation scientifique qui paraît insensible et même cruelle : il faut cependant savoir que ces mécanismes régulateurs pour l'homme s'appellent surtout famines et guerres. A côté de ces perspectives, une approche écologique raisonnée, conduisant l'homme à un réel pouvoir sur sa croissance, dont la régulation des naissances et l'hypothétique accroissement des ressources naturelles ne sont que deux aspects, apparaît comme indispensable.

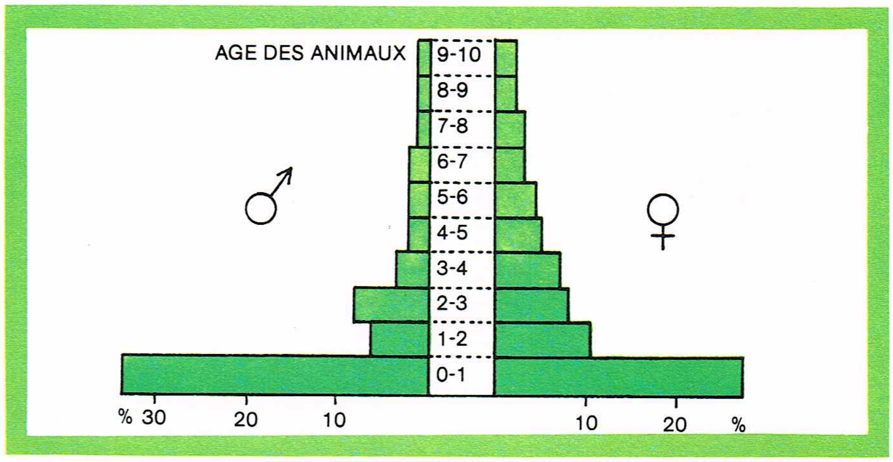

▲ *Pyramide des âges (selon les sexes, mâles à gauche, femelles à droite) pour une population du* **Cervidé Odocoileus hemionus** *dans le chaparral de Californie (Taber et Dasmann, 1958).*

Les fluctuations des populations et leurs causes

Les fluctuations des populations dans les conditions naturelles sont de divers types.

Les *fluctuations saisonnières* au cours de l'année sont liées à la biologie de l'espèce, à ses réactions vis-à-vis du climat ou, plus généralement, à l'ensemble de ses relations avec le milieu, y compris les autres êtres vivants.

▼ *Pyramide des âges, au cours d'une année,* **établie dans une ruche d'abeilles domestiques** *près de Jérusalem. Les nombres indiquent la population totale à chaque époque (d'après Bodenheimer, 1938).*

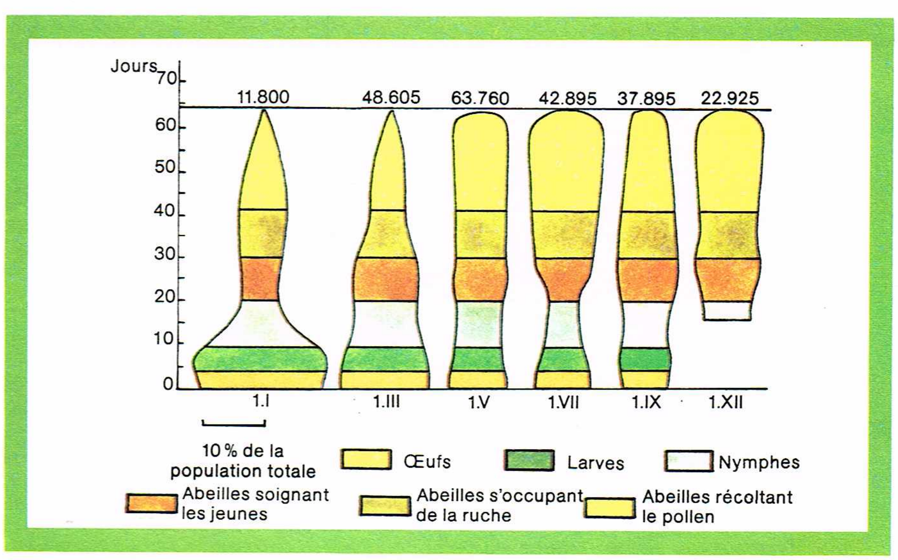

P. Dupont - Jacana

▲ *Les fluctuations périodiques de populations de lemmings, par exemple, sont suivies, avec un décalage, par des variations identiques de leurs prédateurs, tel ce hibou des neiges* (Nyctea scandiaca).

▶ *Page ci-contre, en haut, à gauche : l'action d'un facteur limitant sur la vitesse de croissance a été mise en évidence, notamment par Tassigny, qui a montré que de fortes teneurs en calcium ralentissaient la croissance et réduisaient la quantité de cellules par volume d'une espèce d'Algues calcifuges du genre* Staurastrum.

▶ *Page ci-contre, en bas, courbe de croissance de la population de moutons dans le sud de l'Australie. La courbe de croissance logistique correspondante est indiquée en trait plein (Davidson, 1938).*

Par exemple, en Australie, les populations de *Thrips imaginis*, petit Insecte vivant sur les rosiers, s'accroissent pendant l'été (Davidson et Andrewartha, 1948). Au printemps, dans la région d'Oxford, l'apport des jeunes mésanges charbonnières nouvellement écloses provoque un brusque accroissement, mais ces jeunes subissent presque aussitôt une mortalité élevée (Lack, 1954). D'autres exemples de variations d'abondance au cours de l'année ont été mis en évidence chez de nombreux Insectes (les moustiques en Colombie, les carabiques au Danemark, etc.) ou pour différents constituants du plancton végétal ou animal.

Chez les végétaux, la variation de la production végétale au cours de l'année est le résultat des changements qualitatifs et quantitatifs au niveau des populations des espèces formant les communautés. Dans quelques communautés, comme la chênaie-charmaie, établie sur calcaire humide dans la plaine française, on note pour certaines espèces de la strate herbacée dites vernales (jacinthe des bois, anémone Sylvie) une apparition réduite au premier printemps avant la feuillaison des arbres; ensuite, en été, ce sont des herbes comme la mélique, ou *Millium effusum*, qui connaissent le maximum de développement dans cette strate.

Les variations saisonnières sont encore plus accusées si des *phénomènes migratoires* interviennent : une étude d'A. B. Williams concernant l'ensemble du peuplement d'Oiseaux pour une forêt de hêtres et d'érables de l'Ohio montre bien que pour un ensemble de populations de plusieurs espèces la variation saisonnière peut être considérable. Si l'on dispose de données suffisantes, on constate dans les milieux, parfois éloignés, entre lesquels s'effectuent les déplacements, qu'il y a complémentarité dans les variations.

Frochot, en 1971, a ainsi montré que le rouge-gorge est abondant en été dans les vieilles futaies en Bourgogne et qu'en automne il s'y déplace vers les jeunes futaies, avant d'émigrer en hiver vers la garrigue méditerranéenne pour revenir au printemps dans les jeunes futaies bourguignonnes.

Les *variations cycliques sur plusieurs années* sont plus difficiles à expliquer. Les populations de certains Rongeurs, parmi lesquels les lemmings de la toundra arctique, connaissent de très forts accroissements, se traduisant parfois par de véritables pullulations, tous les trois à quatre ans; rappelons que leur abondance entraîne pour les lemmings eux-mêmes des difficultés de nourriture au niveau de la végétation, et que, lors de certaines pullulations exceptionnelles, on a pu observer en Norvège des migrations de milliers d'individus qui se jettent à la mer. Les populations des prédateurs des lemmings (harfangs, ou hiboux des neiges) subissent, peu de temps après, les mêmes changements. En effet, après une période d'abondance la nourriture devient rare pour les prédateurs, ceux-ci souffrent alors de famine et peuvent mourir (renard arctique) ou migrer vers le sud (hibou des neiges). En utilisant les données recensant sur près de 100 ans le nombre des peaux d'animaux vendues par les trappeurs canadiens, Mac Lulich, en 1937, a établi des fluctuations périodiques des populations de lièvres variables suivies avec un décalage par des variations identiques de son prédateur, le lynx du Canada. La périodicité du cycle est de l'ordre de 10 ans. On retrouve un cycle de même durée pour le renard roux et pour divers Oiseaux. Ces variations cycliques avaient été rapprochées du cycle d'activité des taches solaires, mais une analyse mathématique précise ayant infirmé cette hypothèse (Moran, 1949), on ne dispose pas à l'heure actuelle d'explication. Pour les Insectes causant des dégâts aux forêts par défoliation ou attaque du bois, des études détaillées ont été effectuées, étant donné l'intérêt économique évident; les variations ont été répertoriées en quatre groupes : le *type latent*, avec fluctuations réduites et dont le niveau de nocivité reste négligeable; le *type permanent,* qui au contraire correspond aux espèces toujours nuisibles; le *type temporaire,* qui reste longtemps à un niveau « latent » avec des phases occasionnelles aiguës mais irrégulières; enfin, le *type cyclique,* ou périodique.

D'autres fluctuations sont irrégulières, mais assez facilement mises en relation avec des phénomènes déter-

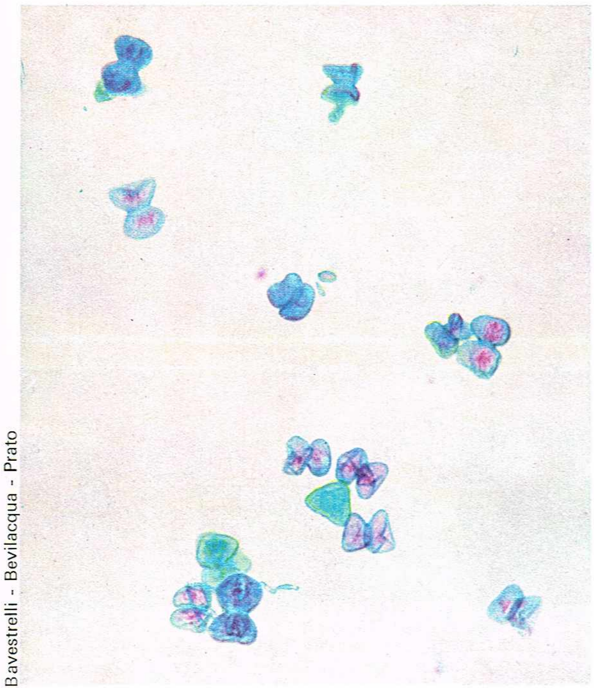

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

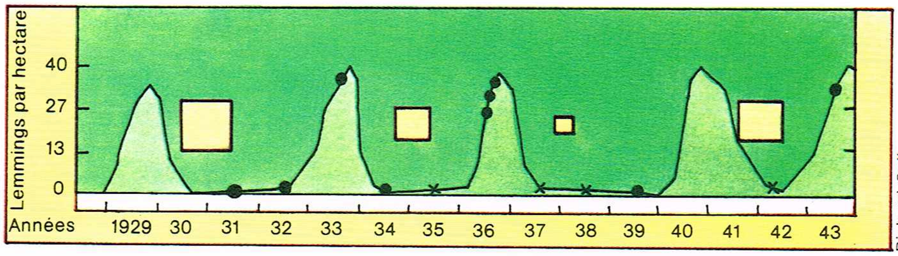

Richard Colin

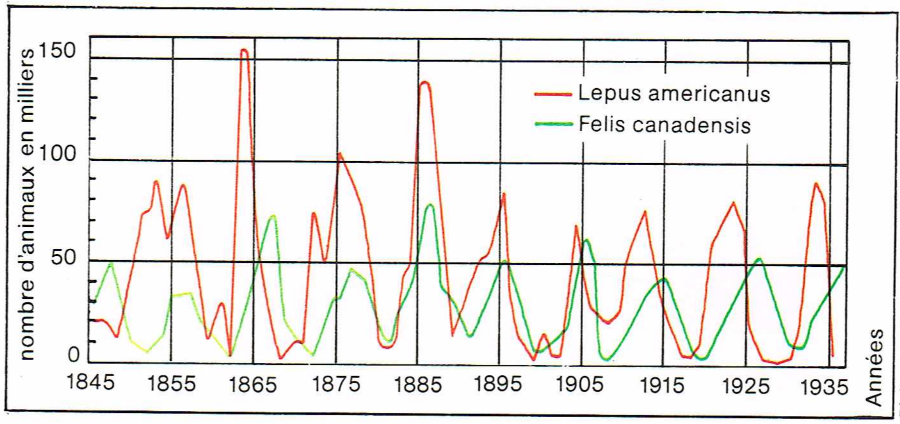

Richard Colin

minés : en Angleterre, les individus reproducteurs du héron cendré sont moins abondants après des hivers très froids, mais le niveau initial est assez rapidement retrouvé ; sur un temps assez long, la population est donc assez stable. Les fluctuations saisonnières ou cycliques n'empêchent pas d'ailleurs à long terme la stabilité ; dans le cas déjà cité de la mésange charbonnière, la courbe représentant les effectifs adultes reproducteurs présents à la fin de l'hiver est pratiquement toujours au même niveau tous les ans. Des augmentations ou diminutions d'effectifs de populations consécutives, par exemple, à des introductions dans le premier cas, à la destruction des milieux favorables, la pêche ou la chasse dans le second, sont possibles ; des extinctions d'espèces dans une région déterminée ou même sur l'ensemble du monde ont été enregistrées, et de nombreuses espèces sont encore menacées. Des cas historiques de brusques augmentations des populations sont bien connus, surtout en Australie avec l'introduction du lapin et du mouton. Davidson, en 1938, a établi la courbe de progression de la population du mouton à partir de 1814 jusque vers 1930 ; malgré ses irrégularités, cette courbe a une allure générale en S marquant un palier vers 1900 avec un effectif d'environ 7 500 000 individus. De tels accroissements de populations s'accompagnent bien entendu d'une expansion géographique de l'espèce : le doryphore introduit vers 1921 dans les Landes s'est étendu progressivement vers l'est jusqu'à atteindre la mer Noire en 1972.

Pour étudier les causes des variations des populations il existe deux voies principales : l'étude de la croissance de la population dans des conditions variées et la recherche directe de corrélations avec certains facteurs. Plusieurs techniques sont mises en œuvre à cette fin : des essais expérimentaux dans des conditions bien définies et faciles à reproduire, la réalisation de cultures expérimentales rendant un échantillonnage plus commode, l'observation des communautés dans la nature, la recherche de modèles mathématiques permettant de tester la valeur de certaines hypothèses.

Les premiers essais, qui ont établi expérimentalement la courbe de croissance sigmoïde en fonction de divers facteurs, sont ceux de Gause (1934). Cet auteur a montré que, pour un élevage de petits Coléoptères se nourrissant de farine *(Tribolium confusum)*, la quantité de farine disponible déterminait le nombre maximal d'individus : pour 16 g de farine, la population compte en fin d'expérience 650 individus, et, pour 64 g, 1 750 individus seulement. Les courbes de croissance ont, dans les deux cas, la forme sigmoïde conforme à l'équation proposée en 1845 par Verhulst. On remarque que la croissance se ralentit plus rapidement quand la nourriture est moins abondante. Des observations similaires mettent en évidence l'action d'un facteur limitant sur la vitesse de croissance. Ce facteur limitant apparaît comme un des éléments qui dans la nature est susceptible d'entrer dans la définition de la charge biotique maximale du milieu. Pour des Algues unicellulaires calcifuges, Tassigny, en 1970, a montré que de fortes teneurs en calcium sous forme d'ion Ca^{++} ralentissaient la croissance d'une part, réduisaient la quantité maximale de cellules par volume d'autre part ; une des espèces du genre *Staurastrum* apparaît comme plus fortement influencée que *Micrasterias crux-melitensis*.

Certaines courbes de croissance sont dites en J : la première partie de la courbe est de forme exponentielle, mais au bout d'un certain temps apparaît une chute brutale qui marque la disparition de presque toute la population. On interprète ce phénomène de la façon suivante : une absence de régulation permet à la population de dépasser la capacité de support du milieu, ce qui entraîne, par exemple, l'utilisation de toute la nourriture disponible, ou presque, et l'effondrement consécutif de la population consommatrice. Un bon exemple est fourni par le cas du cerf *Odocoileus* vivant sur le plateau Kaibab en Arizona.

▲ *En haut, représentation graphique de l'abondance du lemming,* **Dicrostonyx groenlandicus,** *à Churchill (Manitoba), et de l'invasion du hibou des neiges* **(Nyctea scandiaca),** *en Nouvelle-Angleterre, les années où les lemmings sont rares (carrés hachurés) [d'après Shelford, 1945]. En bas, fluctuations périodiques des populations du lièvre variable* **(Lepus americanus)** *et du lynx* **(Felis canadensis),** *d'après le nombre de peaux reçues par la Compagnie de la baie d'Hudson (d'après Mac Lulich, 1937).*

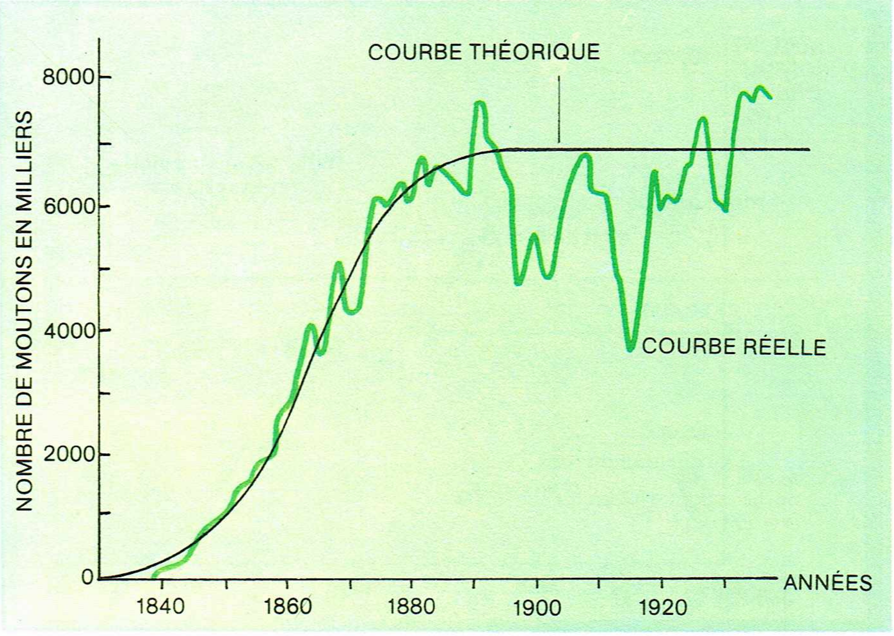

Richard Colin

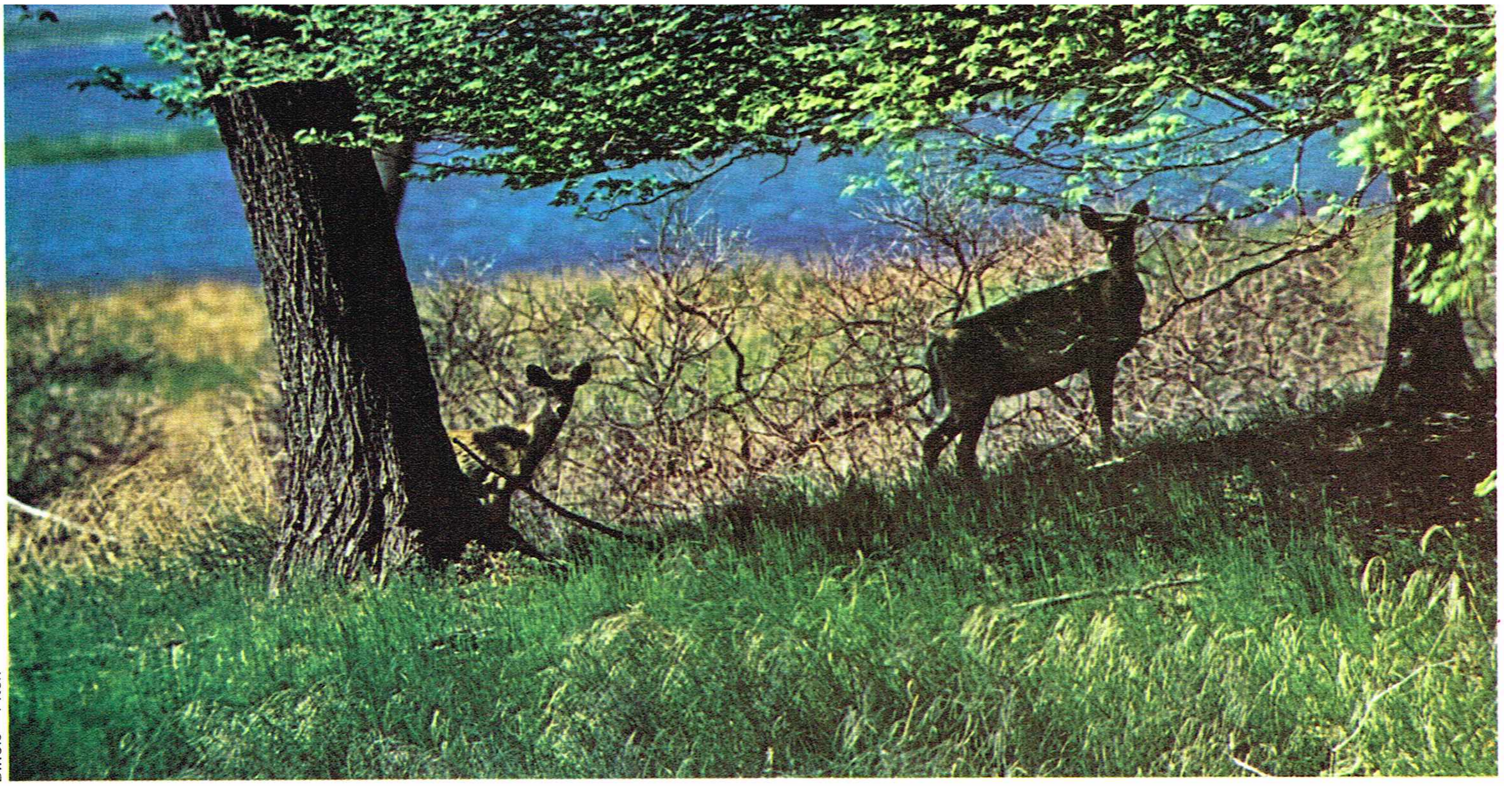

Binois - Pitch

▲ ***Le cerf de Virginie,* Odocoileus virginianus.**

Dans cette zone, on estime à 4 000 têtes la population au début du siècle. Presque tous les prédateurs, pumas, coyotes et loups, ont été exterminés dans les vingt ou trente premières années de ce siècle : de 1907 à 1917 on a compté 600 pumas tués, de 1918 à 1923 74 de plus, et de 1924 à 1939 encore 142 ; plus de 7 300 coyotes ont été détruits entre 1907 et 1939 ; quant aux loups, déjà peu nombreux, ils étaient considérés comme exterminés en 1939. Cette diminution très rapide des prédateurs du cerf étudié équivaut à la disparition d'un facteur régulateur ; la croissance de la population a entraîné une dégradation des lieux de pâture et, lors d'un ou deux hivers plus rigoureux, un grand nombre d'individus, surtout parmi les jeunes, n'ont pu résister et sont morts. Cet exemple, où l'homme est le destructeur initial des prédateurs, montre bien la complexité des relations entre êtres vivants.

La majeure partie des relations susceptibles d'influencer le développement des populations s'inscrit dans le cadre de la compétition intraspécifique et surtout interspécifique pour l'espace et la nourriture, notamment dans le cadre des relations proie-prédateur. Gause, en 1934, a cultivé ensemble deux espèces voisines de paramécies, *Paramecium caudatum* et *Paramecium aurelia,* utilisant la même source de nourriture dans le milieu, et il a comparé les courbes de croissance avec des témoins de chaque espèce cultivée seule. En culture mixte, la croissance de *Paramecium aurelia* n'est que légèrement ralentie par rapport au témoin ; celle de *Paramecium caudatum* l'est beaucoup plus et, au bout de 5 jours environ, on observe une décroissance qui aboutit finalement à l'élimination de cette espèce. Crombie, en 1946, obtient des résultats comparables pour les Coléoptères *Tribolium confusum* et *Oryzaephilus surinamensis ;* cependant, lorsqu'on place dans le milieu de fins tubes de verre, ce qui permet une diversification de l'espace, l'espèce dominée *(Oryzaephilus)* est susceptible de conserver une bonne croissance. Chez les végétaux, Harper, en 1961, a établi pour les lentilles d'eau *Lemma polyrrhiza* et *Lemma gibba*, qui entrent en compétition pour la lumière, qu'en culture mixte la croissance de *Lemma gibba* est très affectée et que cette espèce est pratiquement éliminée au bout de 8 semaines. Des phénomènes semblables peuvent s'observer entre plantes supérieures ; c'est le cas entre la flouve *(Anthoxanthum odoratum)* et la phléole *(Phleum pratense)* ou bien le ray-grass *(Lolium perenne)* et le trèfle *(Trifolium repens)* ; les résultats varient selon la densité initiale des semis en présence ainsi que selon les conditions du sol (la teneur en azote notamment).

Sur des périodes plus longues pour des populations établies, on observe diverses fluctuations, non seulement dans la nature, mais aussi sur des élevages réalisés dans des conditions expérimentales précises. L'analyse en est souvent compliquée. Nicholson, en 1954, a réalisé une étude très approfondie sur la mouche à viande *(Lucilia cuprina)* ; il a fourni aux larves de la nourriture à volonté mais seulement 0,5 g de viande par jour aux adultes de la population ; les courbes obtenues montrent de très fortes oscillations dans le nombre des adultes ; si l'on compte le nombre d'œufs pondus, on constate des oscillations plus faibles s'intercalant entre les précédentes. L'interprétation de ces résultats est la suivante : ce n'est que lorsque les adultes sont peu nombreux qu'ils peuvent disposer d'un milieu suffisant pour pondre ; au contraire, la fécondité des adultes diminue lorsqu'ils se développent en grand nombre, ce qui se produit après un certain délai à partir d'une ponte abondante précédente. Des oscillations sont aussi enregistrées dans le cas où les adultes sont nourris abondamment et où une quantité limitée de nourriture est fournie aux larves. Bien qu'il y ait toujours un grand nombre d'œufs pondus, la compétition entre les larves, devenues trop nombreuses, entraîne chez elles une forte mortalité ; ce n'est que lorsque leur nombre est faible que la croissance de la population larvaire reprend et ainsi de suite... Cela illustre bien ce que Nicholson a appelé l'*équilibre des populations (balance of populations).*

Ces mécanismes permettent un ajustement du niveau des populations selon les conditions du milieu. Huffaker, en 1958, a montré par une expérience amusante que la plus ou moins grande difficulté à trouver la nourriture influence les fluctuations d'abondance d'une population d'Acariens vivant sur les oranges *(Eotetranychus sexmaculatus)* ; si 4 oranges sont dispersées parmi 36 balles de

▼ ***Représentation graphique des effets de l'extermination des prédateurs (puma, coyote) sur la population du Cervidé* Odocoileus *du plateau de Kaibab en Arizona. La courbe en pointillé représente ce qu'aurait été la population du cerf dans l'hypothèse où les prédateurs n'auraient pas été exterminés.***

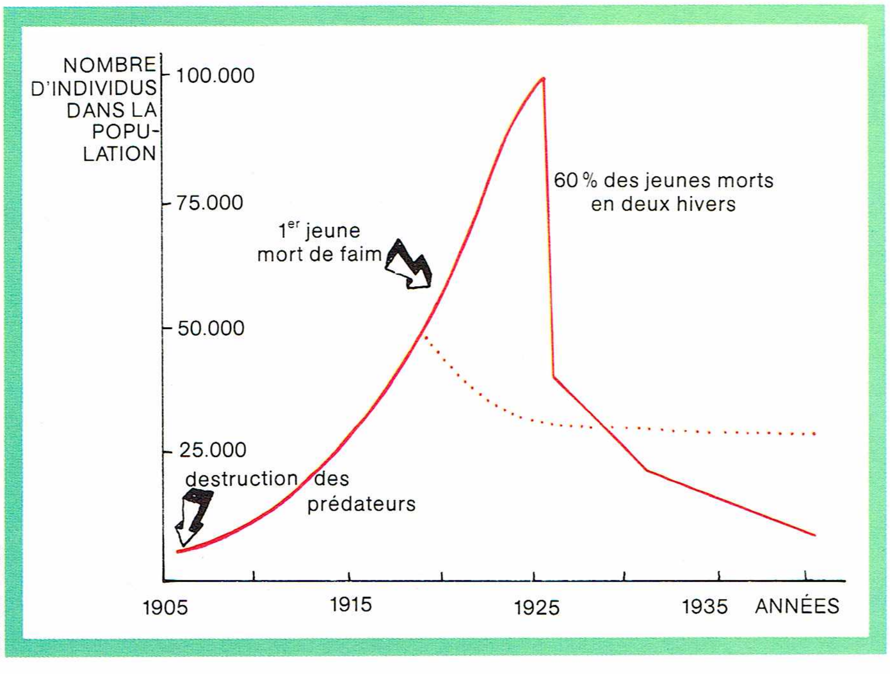

Richard Colin

caoutchouc. les fluctuations cycliques d'abondance sont de presque 6 en 3 mois; pour 20 morceaux d'oranges répartis parmi 20 balles de caoutchouc on observe au contraire une phase très forte d'accroissement en J, suivie d'une phase descendante quelque peu irrégulière.

C'est là un exemple de la diversité des facteurs pouvant commander des fluctuations de populations.

Des modèles mathématiques ont été proposés pour rendre compte de ces variations. La forme de croissance représentée par la courbe en S, comme celle du *Tribolium confusum*, correspond au cas où le nombre des descendants ne dépend pas de l'abondance des parents à partir du moment où ceux-ci ont atteint un certain niveau : on est alors à un niveau constant d'équilibre, et la courbe est dite *courbe de saturation*. Cela s'explique par le fait que les adultes de *Tribolium* vivent longtemps par rapport à la durée larvaire et qu'il y a ainsi un très large chevauchement de plusieurs générations. Au contraire, si les imagos ont une vie courte, les générations ne se chevauchent pas, et on observe des fluctuations périodiques : c'est le cas pour un autre petit Coléoptère, *Callosobruchus sinensis;* Utida, en 1941, a montré qu'il était possible d'utiliser une équation, donc un modèle mathématique, rendant compte de l'ensemble de ces phénomènes.

Les variations concomitantes ou légèrement décalées dans le temps entre l'abondance de la proie et du prédateur mettent en évidence, si besoin était, la dépendance du second vis-à-vis de la première. Une illustration très classique est fournie par le cas déjà cité du lièvre variable et du lynx du Canada. Des expériences de laboratoire reproduisent des variations similaires, comme celles, par exemple, d'Huffaker (1958), introduisant un prédateur *(Typhlodromus occidentalis)* dans les élevages de l'Acarien *Eotetranychus sexinaculatus,* qui se nourrit sur les oranges, et d'Utida (1957) à partir d'un ou deux parasites du *Callosobruchus sinensis*. Des expériences déjà anciennes mais très démonstratives ont été élaborées par Gause, en 1934 : dans un élevage de paramécies *(Paramecium caudatum),* il a introduit un de leurs prédateurs, *Didinium nasutum;* si les deux espèces sont seules en présence, le prédateur détruit les paramécies et meurt de faim; si la culture renferme en plus une nourriture à base d'avoine, formant un dépôt, la population des prédateurs se développe légèrement, puis décroît et disparaît, car les paramécies peuvent se réfugier dans le dépôt formé par l'avoine : rien n'empêche alors la croissance de la population de *Paramecium caudatum* de se poursuivre. On n'observe des fluctuations cycliques concomitantes que dans le cas où, en reprenant cette deuxième expérience, on apporte à intervalles réguliers de nouveaux individus de *Didinium*.

En 1968, Pimentel et Stone, en poursuivant pendant très longtemps des expériences mettant en présence la mouche domestique et un de ses parasites, l'Hyménoptère *Nasonia vitripennis,* ont montré que des variations très brutales s'observent pour les populations des deux espèces, surtout au début, durant les 70 premières semaines, alors que pour des populations ayant cohabité pendant 2 années les fluctuations sont faibles et la population du parasite reste à un niveau assez bas et régulier. Cela met en évidence le rôle des mécanismes génétiques permettant une évolution quantitative des populations en réaction à un facteur donné.

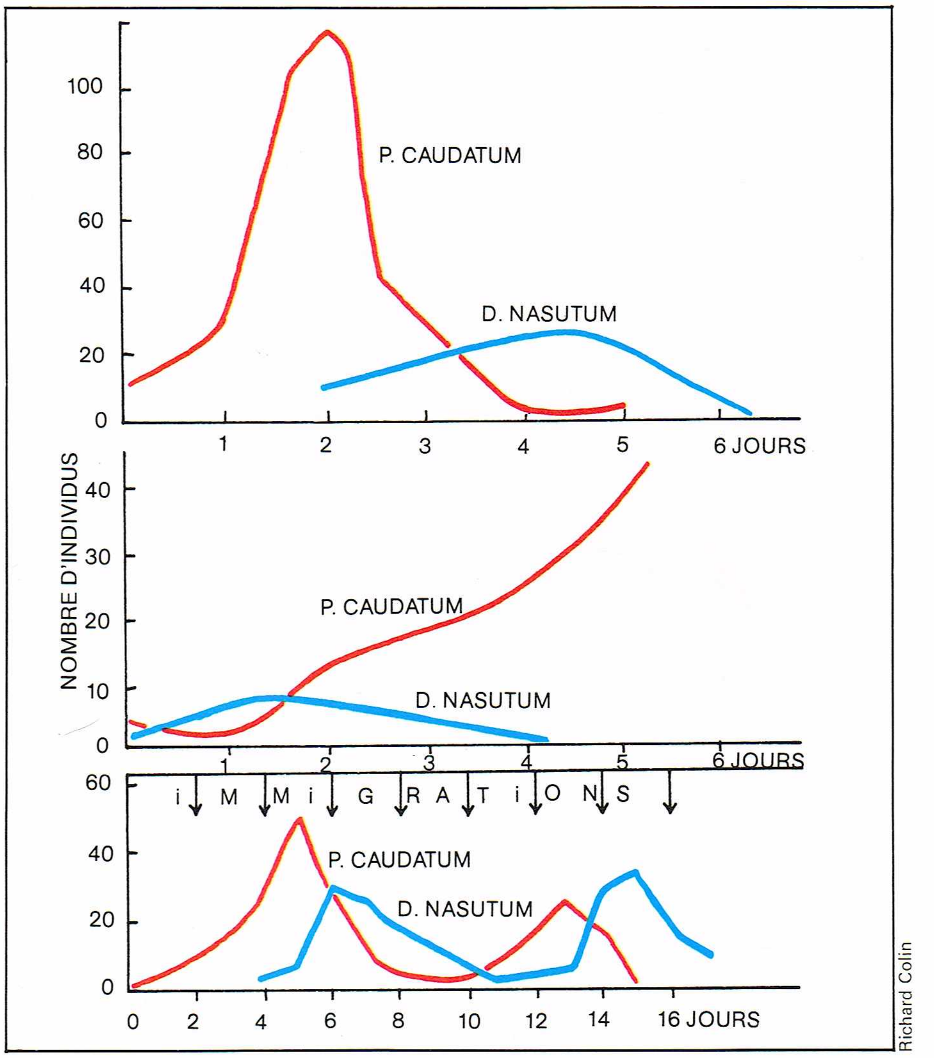

▲ ***Représentation graphique de la croissance en culture mixte de* Paramecium caudatum *: en haut, dans un milieu homogène sans immigration; au centre, dans un milieu hétérogène sans immigration; en bas, dans un milieu homogène avec immigrations périodiques (Gause, 1934).***

▼ **Courbes de croissance *de* Paramecium caudatum *et de* Paramecium aurelia *en culture pure et en culture mixte. Dans ce dernier cas,* Paramecium caudatum *est éliminé (d'après Gause).***

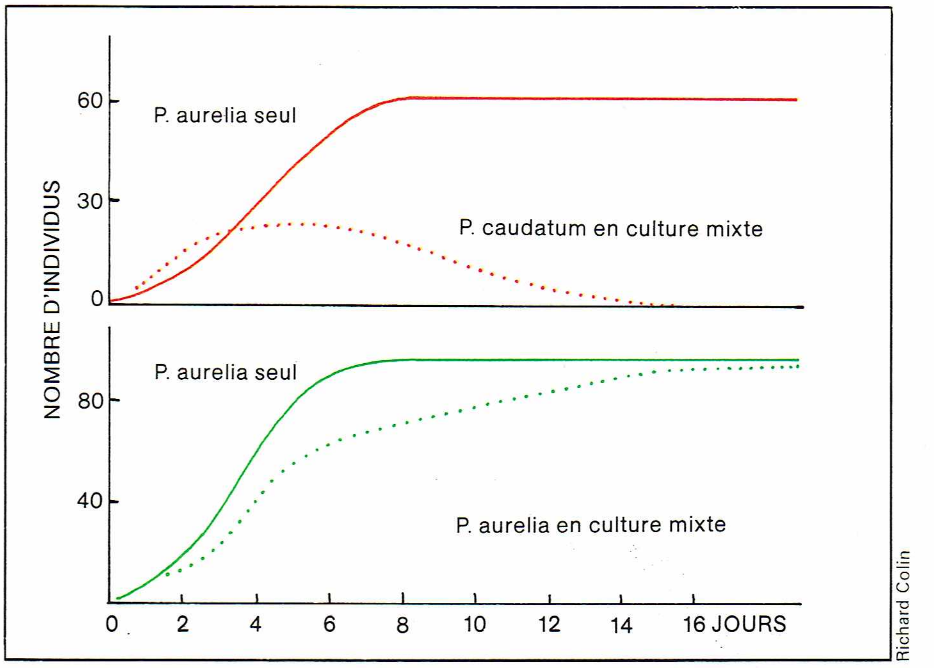

L'évolution des populations

En plus des fluctuations des populations sous l'angle de leur importance numérique, se manifeste à plus long terme une évolution, dont les aspects dits de *micro-évolution* peuvent être saisis à notre échelle de temps d'observation.

Variation et sélection

Au sein d'une population, on observe toujours une certaine hétérogénéité, ou polymorphisme. Une partie de cette variation est due au modelage au cours du développement par les facteurs du milieu (nourriture, température, etc.) ; elle est surtout liée aux variations spatiales et temporelles de ces facteurs : c'est la variation dite *phénotypique,* non héréditaire. On l'oppose à la variation *génotypique*, qui est due à des différences se transmettant

A. Girod

A. Girod

▲ ***Chez l'escargot des bois,*** **Cepaea nemoralis,** ***on rencontre de nombreuses formes de couleur qui conditionnent chacune un type de prédateurs; ceux-ci sont donc un agent sélectif parmi les différents génotypes. Ici, deux variations de la coquille de ce Mollusque Gastéropode.***

héréditairement. Au niveau d'une population, l'ensemble des caractères génétiques n'est pas fixe; il peut être modifié par le jeu des mutations, des recombinaisons lors des phénomènes sexués et, parfois, par les apports externes venant d'autres populations *(introgression)*. A tout moment, intervient aussi pour modifier ce pool génétique le phénomène de sélection, qui, par l'action de divers facteurs du milieu, élimine certains caractères, ne conservant que ceux qui permettent une meilleure adaptation au milieu. La loi de base de la génétique des populations, la loi de Hardy-Weinberg (1908), permet de prévoir, dans le cas le plus simple possible, comment s'effectue la transmission des génotypes au cours des générations successives. Elle s'énonce ainsi : « Dans une population pour laquelle les croisements se font au hasard ne présentant ni sélection, ni mutation et d'effectif élevé, la proportion des gènes et des génotypes est, d'une génération à l'autre, absolument constante. » Cette loi ne peut s'appliquer directement à des populations naturelles; on essaye d'envisager comment elle se modifie dans certains cas : influence d'une seule mutation irréversible, influence d'une mutation réversible, effet de la sélection seule en l'absence de mutations, influence combinée de la sélection et de la mutation. La loi s'exprime alors sous une forme modifiée par l'adjonction de coefficients divers.

Quelques cas observés dans la nature s'expliquent assez facilement par l'interaction de la mutation et de la sélection. Par exemple, l'acquisition de la résistance aux insecticides chez certaines espèces d'Insectes est une adaptation rapide, qui se déroule à notre échelle d'observation scientifique directe. Le DDT et plusieurs de ses dérivés ont eu, au début de leur emploi, une action destructrice très puissante, mais celle-ci a ensuite diminué considérablement. Ainsi, le pou du corps, vecteur du typhus, avait été éliminé de Naples en 1944 par le DDT, et ce dernier avait été utilisé avec succès au Japon et en Corée en 1945-1946; par contre, son emploi s'est révélé inefficace en 1948, contre une épidémie de typhus en Espagne, et on estime qu'en 1957, le pou du corps résistait à l'action du DDT pratiquement partout. Parmi les anophèles, vecteurs de paludisme, et des mouches, vecteurs de dysenteries, on rencontre aussi des souches résistantes. Un cas très similaire de résistance, mais à un virus cette fois, est celui de la myxomatose. Cette maladie existait à l'état latent en Amérique; son introduction en Australie et en Europe y provoqua de véritables hécatombes, mais les survivants constituent maintenant des populations en accroissement lent et résistantes à cette maladie.

Un autre exemple d'adaptation aux conditions du milieu, qui illustre la notion de micro-évolution se déroulant sous nos yeux, est celui d'un papillon : le phalène du bouleau *(Biston betularia)*. Ce papillon était connu sous une forme blanche légèrement tachée de noir : posés sur des écorces de bouleaux, les adultes étaient alors difficilement repérables. En 1848, près de Manchester, dans une zone industrielle aux murs et arbres noircis par les fumées, on trouva une forme foncée; peu à peu, dans toutes les zones fortement industrialisées, cette forme devint de plus en plus abondante par rapport à la forme claire, au point de la supplanter totalement. Dans ces régions, on a montré expérimentalement que la prédation par les Oiseaux est moindre pour les formes sombres. On pense que la forme sombre existait initialement en très faibles proportions (de l'ordre de 1 %); par le jeu de la sélection naturelle cette forme aurait supplanté la forme claire, dont la fréquence au bout de 50 ans n'est plus à son tour que de l'ordre de 1% dans ces zones industrielles. Ce cas n'est pas isolé : plus de 60 espèces des zones industrielles présentent aussi des formes foncées.

Chez l'escargot des bois, *Cepaea nemoralis,* on rencontre de nombreuses formes de couleur jaune, rose ou brune et comportant un nombre variable (0 à 5) de bandes brun foncé. Leurs prédateurs sont divers : grives, écureuils et autres petits Rongeurs. On a montré que les grives consomment beaucoup plus d'individus roses au moment du développement de la végétation au printemps, alors que les individus jaunes diminuent en proportion dans la consommation au fur et à mesure que la végétation verdit. Si l'on effectue un inventaire selon les milieux, on constate une plus grande abondance d'individus jaunes sur les substrats verts, et d'individus roses ou bistre sur les sols de couleur brune. Les prédateurs sont donc un agent sélectif parmi ces différents génotypes. Toutefois, il ne s'agit probablement pas du seul facteur; il a également été établi que les formes ne présentant pas de bandes et les formes jaunes étaient plus résistantes aux fortes températures : le facteur température aurait donc aussi un rôle sélectif. La difficulté dans ce type d'étude est d'appréhender le plus grand nombre possible de facteurs susceptibles d'intervenir et d'en apprécier la relative importance dans les phénomènes de sélection.

En règle générale, « des populations ou des espèces qui occupent des habitats très divers, ou un milieu hétérogène et fluctuant, sont plus polymorphes que celles qui vivent dans des milieux uniformes ou qui sont spécialement adaptées à des conditions écologiques étroites » (Binder, 1972). De plus, les mutations sont en réalité pour la plupart nuisibles au développement, à la reproduction et à la capacité de survie des individus qui sont porteurs du génome contenant la mutation. A cet égard, C. Petit et G. Prévost (1967) écrivent : « La plupart des mutations sont éliminées par la sélection, cette élimination étant d'autant plus active que l'espèce est plus ancienne et mieux adaptée à son milieu; alors qu'une espèce en cours d'expansion rencontre de nouveaux milieux pour lesquels les mutations nouvelles peuvent se révéler favorables, une espèce ancienne a déjà subi un nombre considérable de mutations, parmi lesquelles la sélection a pu choisir, de sorte que les nouveautés ont de fortes chances d'être néfastes donc éliminées. »

▲ *La variation à l'intérieur d'une espèce s'exprime selon deux formes : une variation phénotypique à laquelle correspondent des* accommodats, *une variation génotypique, à laquelle correspondent des* écotypes*; pour* Achillea millefolium, *on compte ainsi onze écotypes climatiques.*

Variation et plasticité écologique

La variation à l'intérieur d'une espèce selon les conditions écologiques stationnelles s'exprime selon les deux modes déjà cités :

— une variation phénotypique, qui n'est pas héréditaire et représente une accommodation à certains caractères particuliers de l'habitat local : les formes ainsi adaptées sont nommées *accommodats;*

— une variation génotypique provenant de la différenciation de génotypes différents caractérisant de véritables races écologiques, ou *écotypes,* dont les caractères sont héréditaires.

Certaines espèces manifestent une grande plasticité et prennent des formes relativement faciles à distinguer sous diverses influences : l'éclairement (*Teucrium scorodonia,* Labiées), l'humidité de l'air (épine-vinette), l'immersion ou la vie aérienne (diverses renoncules, diverses Ombellifères). On reconnaît que de telles formes sont des *accommodats,* car une forme donnée cultivée dans un autre milieu prend, dans les organes qu'elle développe à partir de ce moment-là, la morphologie qui correspond à cet habitat. Ces espèces manifestent, par leur souplesse d'adaptation morphologique, à laquelle est liée aussi une adaptation physiologique, une large amplitude de tolérance vis-à-vis de certains facteurs du milieu. Au contraire, d'autres espèces, incapables de cette souplesse, sont inféodées à un seul milieu très particulier et à conditions strictes.

Il arrive aussi que, pour une même espèce, il existe une variation selon un gradient géographique, dû à un facteur écologique, par exemple la température, et que la pression de sélection s'exerce elle-même de plus en plus fortement d'un point à l'autre de la zone concernée. Les caractères d'adaptation au facteur présentent également une variation progressive : on appelle une telle variation à peu près régulière un *cline* (Huxley, 1938) et, plus précisément, *écocline* s'il est établi que la variation est liée à un gradient écologique. Ainsi, *Rana pipiens,* une grenouille d'Amérique, présente de nombreuses formes adaptées aux conditions de température permettant sa reproduction et son développement; la période de reproduction dans le Nord, au Canada, se situe en mai-juin, alors qu'elle est plus précoce (avril) près de New York et qu'elle s'étend sur toute l'année en Floride. A une température de 28 °C, les œufs de grenouilles au Canada se développent en 50 h, alors qu'il suffit de 42 h pour ceux de Floride; au contraire, aux températures plus basses, à 12 °C par exemple, les œufs des formes du Canada se développent en 325 h contre 430 h pour ceux des formes de Floride. Gregor, en 1939, a montré que chez le plantain maritime *(Plantago maritima)* il existait un écocline en liaison avec les conditions climatiques et les conditions de salinité : la variation porte dans ce cas sur des caractères morphologiques et physiologiques qui commandent la croissance en fonction de la teneur en sel du sol. Burt, en 1954, a établi l'existence d'un cline chez le Rongeur *Neofiber alleni,* se traduisant par une variation dans la coloration de cet animal du nord au sud de la péninsule de la Floride.

Il est souvent possible d'établir parmi des formes observées dans un cline des distinctions les séparant les unes des autres, car la variation présente alors une certaine discontinuité : on est en présence de races écologiques, ou *écotypes.* A partir de la définition et des travaux de Turesson, qui est le créateur de ce terme (1922-1930), Lemée, en 1967, définit les écotypes comme « des formes plus ou moins distinctes morphologiquement, séparées les unes des autres par une discontinuité dans la variation, et adaptées à des habitats différents bien qu'elles soient capables de s'hybrider ». Ce qui permet de les différencier

▶ *Différentes formes d'adaptation phénotypique, ou accommodats, de* **Potentilla glandulosa** *selon les conditions du milieu :*
A, en climat sec, au soleil;
B, en climat sec, à l'ombre;
C, en climat humide, au soleil;
D, en climat humide, à l'ombre.

▼ *Localisation sur un transect en Californie des écotypes d'***Achillea borealis** *et* **lanulosa**, *et de ceux de* **Potentilla glandulosa**.
En violet, plantes toujours vertes;
en jaune, organes aériens mourant l'été;
en rouge, organes aériens mourant l'hiver;
en ocre, diagrammes de fréquence de la taille des individus (d'après P. Duvigneaud; **la Synthèse écologique**. *Doin).*

facilement des accommodats, c'est qu'une forme issue d'un milieu A, cultivée dans un milieu B de conditions différentes, voit sa croissance fortement réduite et, à plus ou moins long terme, ne peut se maintenir : cela montre qu'il y a une adaptation à des conditions écologiques précises et donc une amplitude de tolérance réduite.

La culture, en un même lieu, de différentes formes de provenances différentes peut aussi montrer la conservation de certains caractères morphologiques, lesquels apparaissent donc comme héréditaires. On s'aperçoit cependant qu'il n'est pas aisé d'apprécier le degré de discontinuité de la variation et que, dans certains cas, les discontinuités sont faibles; les écotypes doivent alors être considérés comme des éléments particuliers d'un écocline. Outre les travaux de Turesson et de Gregor, une étude de Clausen et son école (1940) est devenue très classique dans ce domaine. Des échantillons d'*Achillea millefolium* (Composée) ont été recueillis le long d'un transect ouest-est à travers la sierra Nevada, sur lequel étaient établies un certain nombre de stations de transplantation. Pour *Achillea millefolium*, on compte onze écotypes climatiques, dont quatre pour la sous-espèce *A. borealis* et sept pour la sous-espèce *A. lanulosa*; les formes de plaine sont généralement plus grandes que les formes de montagne, qui sont pratiquement naines à très haute altitude.

Des écotypes climatiques ont été mis en évidence pour de nombreuses espèces : MacMillan a noté que parmi huit genres d'arbres en Amérique *(Acer, Betula, Fraxinus, Prunus, Ulmus, Carix, Picea, Pseudotsuga)* on comptait 50 espèces présentant des écotypes, dont des écotypes dits photopériodiques pour lesquels la durée relative du jour et de la nuit influence la levée de dormance des semences. Mooney et Billings, en 1961, ont comparé sous plusieurs aspects physiologiques (photosynthèse, respiration, etc.) deux formes d'*Oxyria digyna* (Polygonacées), l'une issue de la toundra subarctique, l'autre

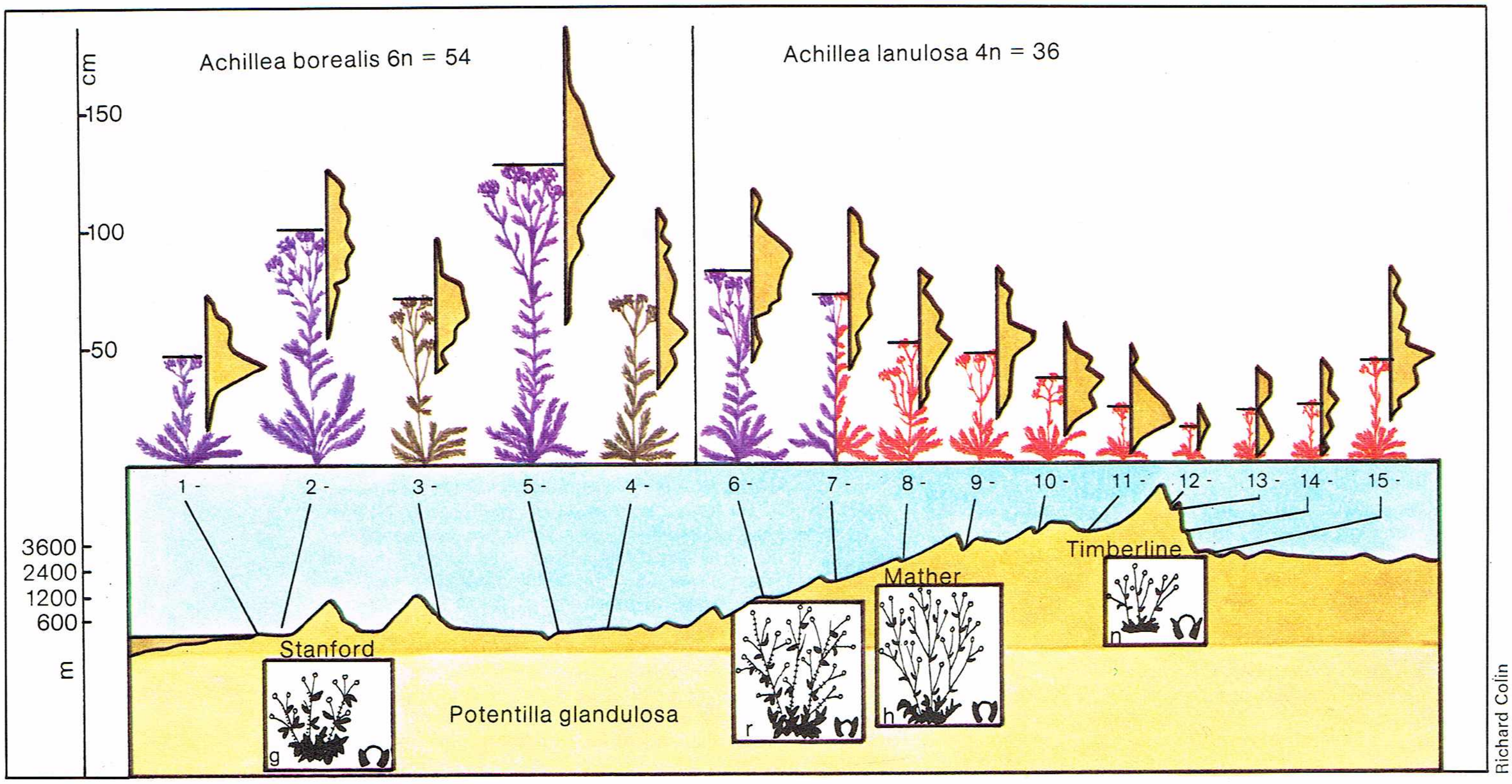

des montagnes du Colorado; les différences mises en évidence montrent une meilleure adaptation des deux formes à leur habitat respectif. Il est possible d'étudier de façon détaillée sur le plan éco-physiologique des formes inféodées à des groupements différents phytosociologiquement, comme cela a été réalisé par Guinochet et Lemée, en 1950, pour la molinie (*Molinia coerulea*, Graminées) ou pour la cardamine des prés (C. Souchon, 1971-1972). Certains écotypes sont des formes adaptées aux caractères du sol : on parle d'*écotypes édaphiques* par exemple, la fétuque ovine présente deux formes distinctes, l'une vivant sur calcaire, l'autre sur silice.

De tels travaux montrent l'importance des facteurs écologiques au niveau de la différenciation des formes et apportent quelques éléments concernant les processus adaptatifs.

Le processus général de la mutation et de l'introgression (apport génétique venant d'autres populations) auxquelles s'ajoutent la sélection, le changement de fréquence des gènes et la recombinaison liée aux phénomènes sexués, entraîne une variation. Cette variation fait apparaître la plupart des espèces comme un ensemble de populations, ou de formes interfertiles, dont chacune est adaptée à des conditions écologiques données. On parle alors d'espèce *polytypique*, comprenant plusieurs races, ou sous-espèces, ou écotypes... Pour distinguer les espèces les unes des autres, on insiste sur les phénomènes aboutissant à l'isolement reproductif. Il peut y avoir isolement génétique si les génomes ne sont pas compatibles : il ne peut alors se former d'hybrides et, s'il s'en forme, ils ne sont pas viables ou sont stériles. L'isolement est parfois mécanique : par exemple, la morphologie des parties génitales ne permet pas l'accouplement. L'isolement se réalise aussi pour des raisons écologiques, soit dans le cas où des populations vivent dans la même région mais ont des habitats différents, soit dans le cas où, vivant dans le même milieu, elles sont sexuellement mûres à des époques différentes. Enfin, le comportement (caractère éthologique) intervient si, par exemple, les pariades sexuelles sont inadaptées d'une espèce à l'autre, si les phérhormones attractives ne jouent pas leur rôle... De fait, c'est seulement à partir de populations occupant des zones différentes (allopatriques) que se différencient des espèces car « la condition essentielle d'une spéciation est un isolement géographique, ou tout du moins spatial prolongé » (Binder, 1967).

La notion de niche écologique

De cette façon, des espèces de même origine et proches d'un point de vue systématique sont susceptibles de rester isolées géographiquement; cependant, si leurs aires se chevauchent à un moment ou à un autre elles risquent d'entrer en compétition pour l'espace, les sources de nourriture, et cela d'autant plus fortement que ces espèces sont plus semblables dans leur besoin. C'est Darwin qui, dans l'*Origine des espèces*, a mis l'accent sur cette situation qui entraîne généralement l'élimination d'une des deux espèces concurrentes ayant le même mode de vie. Ce phénomène a été considéré comme une loi : c'est le *principe de Gause* ou *principe d'exclusion compétitive;* en effet, les travaux de Gause fournissent des éléments de confirmation expérimentale. Cela conduit aussi à la conclusion qu'une seule espèce, présentant un ensemble particulier de caractères biologiques et de réponses aux facteurs physiques et chimiques, est adaptée à un habitat donné. L'ensemble des paramètres définissant l'habitat est appelé *niche écologique* de l'espèce et chaque niche ne peut donc être occupée que par une espèce; le terme niche écologique a probablement été proposé pour la première fois par Grinnel en 1917, mais ce sont les écrits d'Elton (1927) qui ont entraîné la diffusion du mot dans le langage scientifique. Il faut remarquer que la définition adoptée s'éloigne du concept spatial, qui rapporte la niche à un endroit donné, et conduit plutôt à envisager un sens rappelant les multiples relations avec le milieu ou un sens fonctionnel. Odum utilise une comparaison particulièrement significative : « L'habitat d'une espèce correspond à son adresse, alors que la niche écologique correspond à sa profession, c'est-à-dire à son rôle dans l'écosystème. » Dajoz (1974) rappelle quelques autres définitions : « Avec Hutchinson (1947), on peut considérer la niche écologique comme recouvrant l'ensemble des facteurs du milieu qui agissent sur un être vivant. On peut l'assimiler, d'un point de vue théorique, à un hypervolume à *n* dimensions défini par des coordonnées dont chacune représente un facteur du milieu. »

D'Huison

▲ *L'importance des facteurs écologiques au niveau de la différenciation des formes et des processus adaptatifs a été étudiée, notamment, sur* **Molinia coerulea.**

La notion de niche écologique est très importante pour comprendre, d'une part le rôle de chaque espèce au sein de l'écosystème, d'autre part la signification de certains processus évolutifs. Le nombre de niches écologiques dans un habitat donné est fonction non seulement de la richesse en espèces due à l'évolution passée mais aussi de la productivité de l'habitat : les régions tropicales ont ainsi une bien plus grande diversité spécifique que les régions arctiques, dont la productivité est plus basse.

La règle d'unicité de la niche écologique, que l'on pourrait résumer par la formule : « une niche-une espèce », paraît quelquefois *a priori* ne pas être respectée; par exemple, sur les côtes d'Angleterre, deux espèces de cormorans *(Phalacrocorax carbo* et *Phalacrocorax aristotelis)* vivent dans le même milieu et pêchent ensemble :

► *La règle d'unicité de la* niche écologique, *« une niche — une espèce », est rarement transgressée; ainsi les deux espèces de cormorans,* Phalacrocorax aristotelis, *ci-contre,* et Phalacrocorax carbo, *ci-dessous, qui vivent dans le même milieu et pêchent ensemble, plongent, en réalité, à des profondeurs différentes et ne consomment pas les mêmes proies.*

Ziesler - Jacana

en réalité, une étude attentive montre qu'ils ne plongent pas à la même profondeur et ne consomment pas les mêmes proies. De même, pour des espèces de drosophiles vivant sur les mêmes fruits, le régime alimentaire composé de Levures et de Bactéries n'est pas constitué des mêmes espèces.

La compétition joue un grand rôle dans la délimitation des niches écologiques; en l'absence d'un occupant, une espèce voisine peut coloniser les habitats correspondants. Ainsi, à Terre-Neuve, le lièvre arctique, qui est une espèce de la toundra, avait aussi envahi la forêt en l'absence du lièvre américain, qui occupe normalement cet habitat; lorsque, plus tard, cette dernière espèce a été introduite, elle a réoccupé la forêt, sa niche écologique, en chassant le lièvre arctique (Cameron, 1958).

L'occupation des diverses niches écologiques d'un habitat est étroitement liée à l'évolution des espèces, sous l'influence des phénomènes de sélection par les facteurs du milieu, y compris le facteur biotique de la compétition. La meilleure illustration de cette liaison est encore fournie par les travaux de Darwin réalisés lors de l'expédition, faite au début du XIX[e] siècle, aux îles Galapagos. Ces îles, d'origine volcanique, auraient été formées il y a environ un million d'années, et sont depuis restées isolées du continent américain. La colonisation s'est réalisée vraisemblablement par l'apport extérieur d'un nombre restreint d'espèces et par une différenciation sur place à partir de celles-ci. Darwin a plus spécialement étudié le cas des pinsons, chez lesquels il a recensé une trentaine d'espèces. En général, ce groupe comprend uniquement des insectivores; aux Galapagos, au contraire, il y a une adaptation à des régimes très différents et, corrélativement, des formes de becs très diverses selon les espèces. Il s'est produit une diversification adaptative, ou *radiation adaptative,* qui a permis une adaptation précise aux diverses niches écologiques disponibles. A une échelle différente, celle du continent australien, le même phénomène a eu lieu : à partir du grand groupe des Marsupiaux se sont différenciées de nombreuses formes, qui sont les équivalents écologiques de celles que l'on rencontre sur les autres continents parmi les Mammifères placentaires. C'est pourquoi certaines introductions de formes étrangères en Australie se sont révélées particulièrement catastrophiques : des espèces végétales ou animales introduites se sont trouvées en concurrence avec les espèces indigènes, susceptibles de les éliminer et d'occuper leur niche. D'autres formes, comme les prédateurs, n'étaient pas adaptées à ces situations nouvelles et, l'action perturbante de l'homme s'y ajoutant, on a assisté à des proliférations excessives.

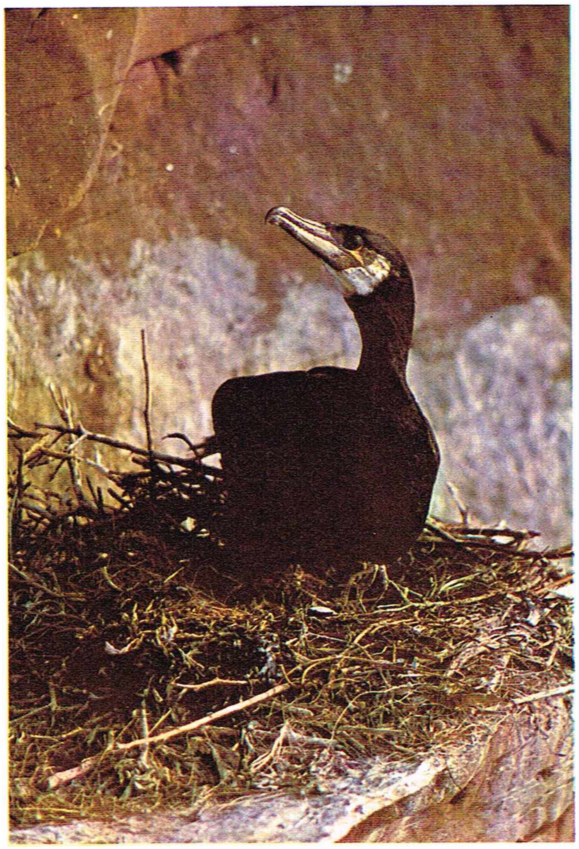

Binois - Pitch

► *Le grand cormoran,* **Phalacrocorax carbo.**

SYNÉCOLOGIE

Contrairement à l'auto-écologie, qui envisage les relations entre une espèce donnée, végétale ou animale, et le milieu où elle vit, la *synécologie* concerne essentiellement l'ensemble du peuplement d'une zone déterminée de la biosphère. Elle a pour but l'étude de la composition, de la structure et du fonctionnement des ensembles d'organismes peuplant un milieu déterminé.

Dans les conditions naturelles, les organismes vivent en commun, formant des ensembles souvent très complexes où cohabitent végétaux, animaux et micro-organismes. Ces ensembles peuvent être qualifiés de *communautés*.

Étude des communautés, ou biocénoses

En 1967, G. Lemée a ainsi défini la notion d'organisme et de communauté : « De même qu'un organisme n'est pas une simple juxtaposition de tissus et d'organes, mais une entité pourvue de propriétés que ne possèdent pas ses constituants séparés, une communauté d'organismes est une entité nouvelle qui n'est pas la simple rencontre fortuite d'individus, mais possède une structure, un fonctionnement et une évolution propres. »

Il faut, en écologie particulièrement, toujours être attentif à la notion d'échelle : en effet, dans son sens le plus large, on peut qualifier de *communauté biologique* un vaste ensemble apparemment homogène, tel que la forêt caducifoliée européenne, la savane arbustive africaine ou la toundra arctique. Du point de vue botanique, ces communautés correspondent à ce que l'on appelle des *formations végétales,* qui sont définies par leur physionomie générale seulement. On qualifie actuellement de *biome* l'ensemble du peuplement animal et végétal que renferment ces formations. L'étude des principaux biomes donnera lieu à un développement ultérieur.

En fait, l'homogénéité de ces vastes peuplements n'est qu'apparente et cache une grande diversité. Une analyse à plus grande échelle fait apparaître des groupements homogènes d'individus de différentes espèces, qui peuvent être définis avec précision. Ces communautés plus restreintes peuplant un milieu donné forment ce que l'on appelle des *biocénoses.* La description précise de ces biocénoses rencontre de grandes difficultés, suscitées par des causes diverses :

— la grande diversité taxonomique des populations, dont un inventaire complet exige la collaboration de nombreux spécialistes (botanistes, zoologistes, microbiologistes) ;

— la mobilité dans l'espace des populations animales, qui présente des problèmes d'échantillonnage ;

— les variations de la composition des populations, dans l'espace et dans le temps, qui posent un problème de délimitation et de classification.

De nombreuses relations, de nature essentiellement énergétique, s'établissent entre les différentes espèces de ces peuplements.

Le fonctionnement de ces ensembles complexes que sont les écosystèmes sera abordé plus loin. Nous traiterons successivement de la délimitation et de la structure, des méthodes d'étude, de la classification et enfin de l'évolution des communautés, ce qui nous permettra d'envisager finalement leur représentation cartographique.

Délimitation des communautés

La délimitation d'une communauté peut se fonder sur trois types de critères :

— Les *critères physionomiques* permettent de délimiter des surfaces portant une couverture végétale d'aspect uniforme. Cette uniformité apparente, qui se conserve au fil des saisons et ne tient pas compte de l'identification des espèces, est due à une coexistence dans les mêmes proportions d'espèces de types biologiques différents. Cela conduit à la notion déjà précisée de *formation.* Ce type de communauté est évidemment le plus facile à identifier et à délimiter dans la nature ; tout le monde connaît, par exemple, les pelouses alpines formées uniquement de plantes herbacées, la garrigue méditerranéenne aux buissons épineux et aux plantes herbacées

Archives P 2

▲ *Une* **savane arbustive** *africaine, constituée d'une strate herbacée, serrée, de hautes Graminées dans laquelle sont parsemés des arbres à feuillages épars et des arbustes xérophiles, représente une* **communauté biologique.**

▼ *Exemple de pâturage alpin, caractérisé par* **Ranunculus montanus** *;* **cette communauté** *est ici aisément identifiable. par la présence de cette plante dominante, surtout au moment de sa floraison.*

T. Sacco

souvent odoriférantes, le chaparral californien aux fourrés d'arbustes à feuilles persistantes, les forêts tropicales humides à forte densité d'arbres aux dimensions impressionnantes, etc.

— Les *critères taxonomiques,* c'est-à-dire concernant la classification systématique des individus, permettent de décrire avec une grande précision les biocénoses. Les individus ne sont pas disposés au hasard dans le milieu, et les naturalistes savent bien que certaines plantes vivent ensemble dans les mêmes types de station. De l'existence de ces groupements de plantes découle la notion d'*association végétale*. L'étude des associations végétales fait l'objet d'une discipline particulière : la *phytosociologie*. Aux associations végétales peuvent parfois se superposer des *associations animales* qui en sont étroitement dépendantes : c'est le cas des groupements d'individus de différentes espèces animales phytophages et peu mobiles (parmi les Insectes, les Arachnides et les Gastéropodes par exemple).

— Une autre méthode de délimitation de surfaces homogènes fait appel aux *caractéristiques physico-chimiques* du milieu. Mais ce procédé présente de grandes difficultés en raison de la masse des mesures à entreprendre. Ces critères de délimitation sont utilisés surtout par ceux qui se refusent à connaître la systématique nécessaire ou à reconnaître l'existence des associations d'organismes, ce qui entraîne souvent une grande perte de temps, d'énergie et de moyens matériels, car, en définitive, les résultats sont pratiquement les mêmes que ceux obtenus avec les critères taxonomiques, notamment par les phytosociologues. Cela prouve que les combinaisons d'organismes sont liées à des conditions de milieu homogènes et réciproquement.

Les limites entre les communautés sont parfois très nettes, surtout lorsqu'elles sont liées à l'influence humaine ; c'est le cas, par exemple, de la limite entre une forêt et une prairie ou une culture, entre une surface incendiée et une surface intacte. Cependant, les limites entre deux communautés voisines sont souvent plus subtiles et, les critères physionomiques ne suffisant plus, il faut faire appel aux critères taxonomiques pour les établir. Pour délimiter et tester l'homogénéité d'une surface apparemment uniforme floristiquement, les phytosociologues dressent la liste exhaustive des espèces appartenant aux végétaux vasculaires. Cette liste constitue alors un *relevé*.

Supposons que sur cette surface s (1 m² par exemple), on observe n espèces. En doublant cette surface de départ, c'est-à-dire sur $2\ s$, on observe n' espèces nouvelles : la liste totale d'espèces est donc $n + n'$. En doublant à nouveau la surface, on trouve n'' espèces nouvelles sur $4\ s$, et ainsi de suite. Il est alors possible de construire un graphe, dit *courbe aire-espèces,* ayant les surfaces pour abscisses et les nombres d'espèces correspondants pour ordonnées. Pour tous les types de groupements végétaux, la courbe obtenue présente la même allure. Le premier point de forte courbure obtenu correspond à l'*aire minimale,* c'est-à-dire à la surface sur laquelle on observe la quasi-totalité des espèces de la communauté considérée. Le deuxième point de forte courbure obtenu correspond à l'*aire maximale* de la surface floristiquement homogène. La forte augmentation du nombre d'espèces observée à partir de ce moment-là indique que l'on sort de la surface homogène et que les nouvelles espèces rencontrées appartiennent à une communauté adjacente à la première.

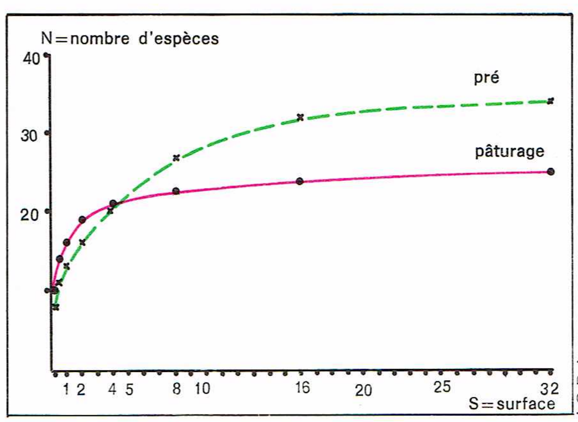

▶ ***Représentation graphique de courbes aire-espèces pour deux types de groupements végétaux : courbe en rouge, pâturage ; courbe en vert, pré. On observe que, pour le premier, le point de courbure, correspondant à l'aire minimale, est atteint au point 5 d'abscisse alors que, pour le second, cette aire minimale se situe au point 20.***

Outre l'aire minimale, cela donne donc une idée de la surface maximale et de la délimitation d'un groupement. Pour qu'un relevé soit suffisamment représentatif d'une zone floristiquement homogène, il doit être réalisé sur une surface au moins égale à l'aire minimale et évidemment inférieure à l'aire maximale. L'aire minimale fluctue considérablement suivant le type de groupement considéré : de quelques mètres carrés pour une pelouse, à plusieurs centaines de mètres carrés pour des groupements forestiers.

Dans la nature, la zone de contact entre deux biocénoses adjacentes est un *écotone ;* les effets de lisière peuvent y être fort importants. Parfois, deux groupements voisins se fondent partiellement l'un dans l'autre sans qu'il y ait entre eux de limite bien tranchée, à cause de la modification progressive selon un gradient d'un facteur écologique important, tel que le changement de climat avec l'altitude ou la variation d'humidité le long d'une pente. Certains écologistes ont reconnu là non des groupements juxtaposés, mais une variation continue de la végétation, qu'ils appellent un *continuum*. En réalité, une analyse précise de la flore effectuée sur des surfaces assez restreintes pour qu'elles aient des chances d'être uniformes fait apparaître une discontinuité relative. Il y a donc opposition entre deux conceptions différentes de l'organisation du tapis végétal.

Il faut noter que sur une surface homogène quant à sa composition en plantes vasculaires peuvent se trouver plusieurs communautés végétales de rang inférieur et plus ou moins dépendantes de la première : c'est le cas des groupements de plantes épiphytes des arbres d'une forêt et des groupements de Mousses, de Lichens ou de Champignons, dont il convient, dans la plupart des cas, de faire une étude séparée de celle des végétaux supérieurs. Un tel assemblage représente une *phytocénose*.

Comme on le voit, l'homogénéité floristique ou faunistique d'une surface donnée est une notion tout à fait relative, d'où l'importance en écologie de préciser l'échelle de travail envisagée.

La composition spécifique des communautés

La première étape de l'étude de la composition spécifique d'une communauté consiste évidemment à faire l'inventaire des espèces, tant animales que végétales. Cela est généralement possible lorsque l'on se limite aux organismes macroscopiques, mais il est extrêmement difficile de donner une liste des espèces microscopiques (Algues et Champignons microscopiques, Bactéries, Protozoaires, etc.), leur systématique demandant une spécialisation très poussée.

Un autre problème important réside évidemment dans l'échantillonnage et le prélèvement des organismes. C'est pourquoi la majeure partie des travaux actuels ne prend en considération qu'une fraction du peuplement de la communauté considérée : ainsi, on décrit des associations végétales correspondant à la phytocénose, des associations animales correspondant à la zoocénose, parfois même on ne décrit que les associations des espèces d'un seul groupe : associations de Diatomées, de Protozoaires Thécamœbiens, de Collemboles, de Mollusques, d'Insectes ou d'Oiseaux par exemple.

Cette première étape de simple description qualitative des espèces d'une communauté n'est pas toujours suffisante, comme le souligne M. Lamotte (1970) : « Les recherches de l'écologie moderne sur les bilans énergétiques des écosystèmes ou sur les équilibres entre espèces exigent une connaissance plus exhaustive de la structure démographique des différentes populations animales et végétales, c'est-à-dire le nombre des individus aux différents stades de développement, et les biomasses qu'ils représentent. » Aussi, a-t-on tenté de développer un ensemble de techniques permettant de déterminer soit par recensement complet, soit plus souvent par échantillonnage, la composition exacte de la biocénose.

Les techniques qui permettent, sur le terrain, de recenser les populations et de définir avec précision un peuplement animal sont nombreuses et diverses ; mais elles sont toujours difficiles à employer et ne sont jamais sûres.

— En *milieu aquatique,* certains appareils enferment une quantité donnée de liquide, et le tri des organismes

Fratelli - Montacchini

(obligatoirement de petite taille) est fait ensuite au laboratoire, après fixation au formol par exemple. La précision de l'analyse est alors satisfaisante, mais le volume étudié nécessairement très réduit. Une autre technique utilise des filets, qui, traînés sur une distance déterminée, retiennent les organismes présents dans le volume ainsi filtré ; l'imprécision provient alors du volume d'eau prospecté et de la perte d'animaux par fuite ; bien entendu, des filets différents doivent être adaptés aux différentes catégories de tailles des organismes, la méthode pouvant s'appliquer aussi bien au plancton qu'aux Poissons.

— Dans le *milieu endogé*, le prélèvement d'un volume déterminé de sol est aisé. Diverses techniques permettent ensuite d'en extraire de façon plus ou moins complète les habitants (Collemboles et Acariens, Nématodes, etc.), mais les volumes de sol étudiés restent minimes, de sorte que pour des organismes plus grands, comme les lombrics, la technique n'est plus utilisable.

— Enfin, le peuplement animal des *biocénoses terrestres* est le plus difficile à étudier. Dans le cas des forêts il est même pratiquement inaccessible à un recensement, même approximatif. Seuls les biotopes herbacés ou peuplés d'arbrisseaux sont susceptibles de faire l'objet d'une analyse répondant à une précision raisonnable si l'on emploie un jeu de méthodes diverses : le filet-fauchoir, le sélecteur se refermant sur des herbes ou des branches, l'aspirateur, le cylindre projeté sur le sol, les pièges à succion, auxquels il faut ajouter les carrés de ramassage et surtout les *biocénomètres*, cages sans fond que l'on place sur le sol et à l'intérieur desquelles se fait la collecte. Bien entendu, la surface prospectée doit être en rapport avec la taille des organismes ramassés : les petites surfaces permettent un bon échantillonnage des petites espèces, les grandes surfaces un bon échantillonnage des grandes espèces. Avec des surfaces suffisamment grandes, de bons résultats peuvent être obtenus dans la collecte des Reptiles et des petits Mammifères, lorsqu'on dispose d'une équipe suffisamment nombreuse.

Lorsque ces méthodes sont inapplicables, une grande variété de pièges de tous ordres permet d'obtenir au moins des indices d'abondance des espèces. Parmi ces pièges, citons seulement les trappes et fosses, appâtées ou non, les pièges adhésifs (type papier « tue-mouches »), les abris-pièges, les pièges lumineux, les pièges chimiques olfactifs, les pièges à eau (assiettes colorées), etc. Tous présentent le défaut majeur d'être extrêmement sélectifs et donc de donner une idée très déformée de la biocénose.

Il est évident que toutes les communautés d'un même type ne présentent pas la même diversification en espèces. Dans le cas des associations de végétaux vasculaires, signalons, par exemple, que les associations se trouvant dans certains milieux extrêmes : eaux courantes, fentes de rochers, sols très meubles, milieux très pollués, sont toujours d'une très grande pauvreté en espèces.

Structure spatiale des communautés

Les différents organismes qui vivent dans une communauté n'y sont pas mélangés en vrac. En effet, ils occupent dans l'espace correspondant des emplacements la plupart du temps bien définis, qui peuvent être variables dans le temps, s'il s'agit d'organismes animaux mobiles bien entendu. La répartition des organismes au sein d'une communauté peut y être envisagée sur un plan horizontal d'une part, selon un axe vertical d'autre part.

Structure horizontale d'une communauté

La structure horizontale d'une communauté s'exprime principalement par l'abondance-dominance, la sociabilité, la notion de mosaïque et le type de distribution des individus d'une même espèce.

L'*abondance* d'une espèce fait appel à la densité des individus de celle-ci dans la communauté envisagée ; elle relève donc de l'étude de sa composition spécifique ; par contre, la *dominance*, utilisée surtout pour les végétaux, est une expression de l'espace occupé par les individus de chaque espèce, déterminé par leurs dimensions.

▲ *L'abondance-dominance d'une espèce caractérise principalement la structure horizontale d'une communauté ; ici, la dominance de* **Leontodon hispidus** *caractérise le pâturage montagnard du Chatolivier dans la vallée de la Suse (Piémont).*

▼ *L'utilisation de pièges, tel ce dispositif de chasse aux papillons de nuit en lumière ultraviolette, permet de donner une idée, même approximative, de la* biocénose *d'une surface prospectée.*

H. Chaumeton-Jacana

— En ce qui concerne l'*abondance,* il vient immédiatement à l'idée, comme il n'est pas concevable de compter la totalité des individus présents sur une surface homogène donnée, d'en déterminer la densité. Cela présente souvent des difficultés d'échantillonnage, surtout lorsqu'il s'agit d'espèces animales mobiles et aussi parce que la densité est rarement uniforme sur une surface donnée.

— En ce qui concerne la *dominance,* la surface de projection au sol de l'appareil végétatif des végétaux semble en donner une bonne représentation. On peut envisager un rapport à l'unité de surface. Mais deux rapports égaux au sein d'une association végétale peuvent être fournis par des nombres d'individus très différents : par exemple, un individu à fort recouvrement au sol et de nombreux individus de faible recouvrement occupent des surfaces sensiblement égales.

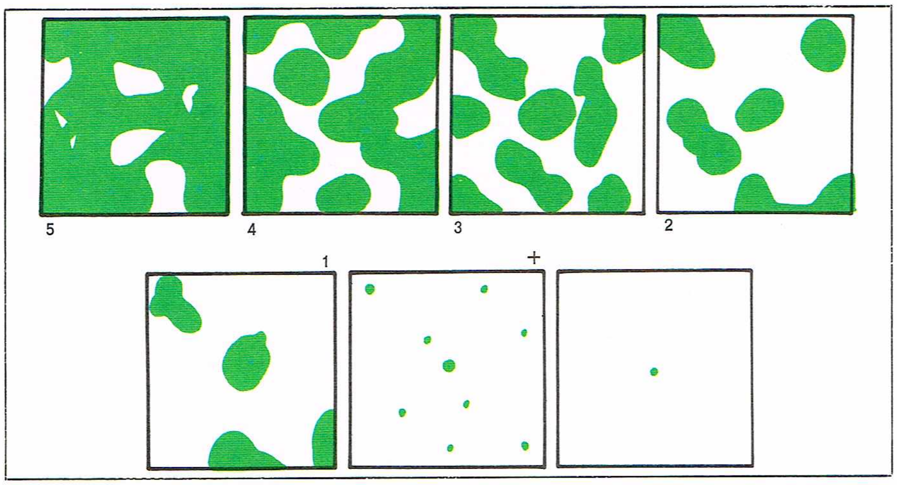

▲ ***Représentation graphique du recouvrement des espèces dans l'échelle de Braun-Blanquet donnant l'*****indice d'abondance-dominance** ***de chaque espèce d'un relevé.***

— C'est la raison pour laquelle on a recours à une estimation globale de ce qu'on appelle l'*abondance-dominance*. Ainsi, chaque espèce d'un relevé est accompagnée d'un *indice d'abondance-dominance,* déterminé selon l'échelle donnée par Braun-Blanquet :

5 : nombre d'individus (abondance) quelconque, recouvrant plus de 75 % de la surface étudiée.

4 : nombre d'individus quelconque, recouvrant de 50 à 75 % de surface.

3 : nombre d'individus quelconque, recouvrant de 25 à 50 % de surface.

2 : individus très abondants ou recouvrant au moins 5 % de la surface.

1 : individus assez abondants, mais degré de recouvrement faible.

+ : individus rares ou très rares; recouvrement très faible.

Les différents individus appartenant à une même espèce peuvent être répartis de différentes manières dans un plan horizontal.

— Ils peuvent être distribués de manière très régulière, c'est-à-dire selon une densité uniforme sur toute la surface considérée. C'est le cas, par exemple, pour la distribution des nichoirs de certaines espèces d'Oiseaux, qui ont un territoire bien délimité autour de leur nid; ces territoires juxtaposés, de mêmes dimensions, se répartissent régulièrement; on peut citer aussi la distribution des grands arbres d'une futaie, dont la taille des couronnes, sensiblement égale pour tous les individus de même âge, a pour conséquence de répartir ceux-ci à la même distance les uns des autres. Ce type de *distribution régulière,* très rare dans la nature, résulte de cas particuliers où s'établit un équilibre dans l'intensité de la compétition entre chacun des individus.

— Les individus d'une espèce donnée peuvent aussi être distribués de manière aléatoire dans un plan : on parle alors d'une *distribution au hasard*.

— Cependant, la plupart du temps, il s'établit des interrelations entre les individus d'une communauté, et ceux-ci peuvent être répartis en agrégats, avec une densité non uniforme sur la surface considérée : c'est la *distribution en agrégats,* ou de *type contagieux*. Citons l'exemple de la distribution en colonies d'individus de certains Eunicidés (Annélides) sur les plages sableuses.

Sur une surface de végétation, les individus des espèces présentes forment, en majorité, des colonies plus ou moins importantes. C'est le cas notamment pour les plantes cespiteuses et les plantes à fort pouvoir de multiplication végétative. Ce fait est exprimé par la *sociabilité,* qui est décrite à l'aide d'une échelle de cinq indices, également proposés par Braun-Blanquet :

5 : individus croissant en peuplements.
4 : individus croissant en petites colonies.
3 : individus croissant en troupes.
2 : individus croissant en groupes.
1 : individus croissant isolément.

Cet indice figure dans les relevés floristiques à côté de l'indice d'abondance-dominance de chaque espèce.

Généralement, le tapis végétal correspond à la juxtaposition de surfaces homogènes se rattachant à diverses associations, mais il arrive parfois que diverses associations soient très intriquées en *mosaïque ;* c'est le cas, par exemple, des prés-bois, où les bouquets d'arbustes ainsi que la strate herbacée située sous leur couronne d'une part et la pelouse située autour d'autre part appartiennent à des associations souvent très différentes. Les tourbières à sphaignes, dominées par *Trichophorum caespitosum,* présentent un autre exemple de mosaïque : on trouve des touffes de *Trichophorum,* hébergeant divers Spermaphytes, Bryophytes, Lichens, etc., alternant très régulièrement avec des trous où l'eau stagne plus ou moins longuement et dans lesquels sont localisées diverses espèces de Cryptogames (Bryophytes et Algues surtout). La végétation des touffes et des trous d'eau appartient à deux associations végétales différentes. Dans tous les cas de mosaïque, il convient de faire une étude séparée de chacune des communautés, donc d'en faire au départ des relevés floristiques séparés.

Structure verticale d'une communauté

La distribution des organismes suivant un axe vertical est à l'origine d'une diversification de la structure d'une communauté pouvant être considérable : c'est la stratification des organismes et, plus précisément, ce que l'on appelle la *stratification verticale*. Selon cet axe vertical, les conditions de milieu varient énormément. Il existe d'une part des discontinuités brusques, comme le passage de l'atmosphère au sol ou le passage de l'atmosphère à un milieu aquatique et ensuite du milieu au fond, et d'autre part des gradients de pression, d'intensité lumineuse, de teneur en oxygène ou en autres substances chimiques. L'ensemble de ces discontinuités et de ces gradients définit des strates caractérisées par une certaine distribution des organismes végétaux et animaux.

— La stratification aérienne des végétaux est souvent la plus apparente; c'est dans les forêts qu'existent les strates les plus nombreuses et les mieux différenciées. On y reconnaît en général :

- une *strate cryptogamique,* basse, de quelques centimètres de hauteur, composée essentiellement de Bryophytes et de Lichens;
- une *strate herbacée,* de hauteur variable;
- une *strate arbustive* qui comprend les plantes ligneuses de taille peu importante, et que l'on peut diviser en deux niveaux dans le cas où il y a des sous-arbrisseaux et des arbustes;
- une *strate arborescente,* généralement uniforme dans les plantations et souvent à plusieurs niveaux bien distincts, comme dans les forêts traitées en taillis-sous-futaie, ou alors moins apparents, comme dans les forêts tropicales.
- On peut trouver, dans les forêts tropicales notamment, un ensemble de plantes épiphytes au niveau d'une ou plusieurs strates ligneuses, formant ce que l'on appelle parfois la *strate épiphytique*.

Une communauté végétale peut comprendre une seule strate (cas de la pelouse et de la prairie) ou plusieurs strates (cas de la savane arbustive, du maquis et de la forêt); une même espèce peut participer à plusieurs strates selon son degré de développement.

— Dans le sol, les organes souterrains des végétaux présentent également une stratification de grande importance, par suite de la variation verticale des caractères physico-chimiques des sols et de la compétition qui peut avoir lieu au niveau des racines pour l'eau, l'oxygène et les éléments minéraux.

— Au sein de la couverture végétale, les animaux vivent de préférence ou exclusivement dans une seule

J. J. Lazare

strate, même lorsqu'il s'agit d'espèces très mobiles. Par exemple, les Oiseaux établissent leurs nids et volent à des niveaux déterminés, différents selon les espèces ; au niveau de la strate herbacée, une partie des animaux vit surtout au sommet des plantes, alors qu'une autre partie vit à leur base.

— En milieu aquatique la stratification peut prendre beaucoup d'ampleur, s'étendant sur plusieurs kilomètres de profondeur. Dans ce cas, les gradients des facteurs physico-chimiques (lumière, température, teneur en oxygène, en gaz carbonique, en matière organique, en sels dissous) sont très marqués et variables dans le temps. Cela est à l'origine d'une grande diversité des peuplements végétaux et animaux d'eau douce ou d'eau de mer.

Ces peuplements superposés sont souvent considérés et étudiés séparément comme des sous-ensembles, ou *synusies,* d'un même écosystème.

On peut signaler, enfin, que toutes les strates ne comportent pas des espèces végétales appartenant aux mêmes types biologiques de Raunkiaer : les phanérophytes déterminent les strates supérieures arbustives et arborescentes, alors que les autres types (chamæphytes, hémicryptophytes, cryptophytes et thérophytes) sont représentés au sein de la strate herbacée.

Différentes conceptions de l'étude et de la classification des communautés

Il est avant tout indispensable d'étudier les communautés, de façon à pouvoir les individualiser de façon analytique, pour pouvoir ensuite les classer en les regroupant suivant certains critères de façon synthétique.

A l'heure actuelle, les communautés végétales sont bien mieux connues que les communautés animales, en raison

▲ *La végétation des touffes et des trous d'eau, comme ces touradons de* **Carex paniculata** *en bordure d'un étang, appartient à deux associations végétales différentes, intriquées en* **mosaïque**, *et dont le relevé floristique doit être fait séparément.*

▼ *Représentation schématique de la* **stratification** *de la végétation en milieu forestier (à gauche) et dans un étang (à droite).*

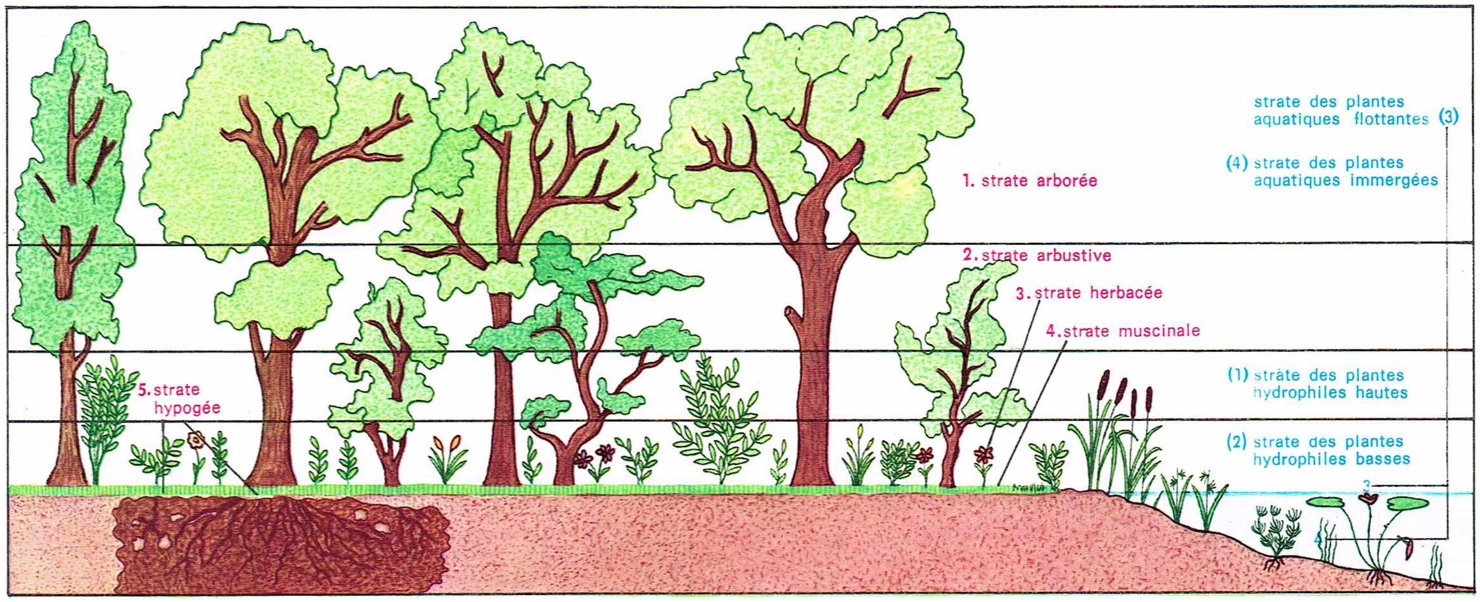

I.G.D.A.

Espèces présentes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	%
TABLEAU A — Numéros des relevés																Frequence relative de chaque espece en pourcentage ↓
Aeluropus litoralis	+				+			+		+	+					27
Poa pratensis	+				+											13
Agropyrum litorale	+	+	+		+	+	+	+			+		+	+		67
Hordeum marinum			+			+										13
Atriplex portulacoides		+		+			+	+	+	+	+		+			52
Salicornia herbacea		+	+		+				+							27
Trifolium campestre															+	6
Daucus carota	+															6
Linum maritimum				+								+				13
Althaea officinalis		+												+		13
Plantago coronopus						+										6
Artemisia palmata	+			+	+					+						27
Inula britannica		+														6
Pulicaria dysenterica							+									6
Aster tripolium													+			6

TABLEAU B		
Aeluropus litoralis	1	2
Poa pratensis	+	
Agropyrum litorale	2	2
Hordeum marinum	+	
Atriplex portulacoides	2	2
Salicornia herbacea	1	1
Trifolium campestre	+	
Daucus carota	+	
Linum maritimum	+	
Althaea officinalis	1	1
Plantago coronopus	+	
Artemisia palmata	1	2
Inula britannica	+	
Pulicaria dysenterica	+	
Aster tripolium	+	

I.G.D.A.

▲ ***Relevés floristiques* réunis en un tableau brut *(A)* et en un tableau élaboré *(B).***

surtout de la plus grande difficulté d'échantillonnage ainsi que de la diversité taxonomique dont font preuve ces dernières, mais peut-être aussi parce que la réalité des communautés est plus apparente dans le règne végétal.

Les communautés végétales

Diverses tendances se sont développées, mettant l'accent tantôt sur la dominance, tantôt sur la fidélité des espèces. On peut à ce sujet parler de véritables écoles de phytosociologie, dont la plus importante et la plus classique est celle de Zurich-Montpellier.

L'école zuricho-montpelliéraine, ou école sigmatiste de Flahaut et Braun-Blanquet

Cette école, la plus ancienne, s'est développée à partir de 1915. Le qualificatif *sigmatiste* provient du sigle S.I.G.M.A. désignant la Station internationale de géobotanique méditerranéenne et alpine, dirigée à Montpellier par J. Braun-Blanquet.

La définition précise des associations végétales, dont une notion intuitive a déjà été donnée, se fait à partir de la comparaison des relevés floristiques établis en différentes stations. Le relevé floristique, étant la liste exhaustive des espèces végétales d'une surface donnée, constitue l'unité d'étude des communautés végétales.

Il faut respecter certaines précautions importantes pour effectuer un relevé. Celui-ci doit intéresser une surface floristiquement homogène, ce qui conduit à choisir une végétation d'aspect uniforme (forêt, lande, pelouse, etc.). Par exemple, il ne faut pas faire un relevé comprenant la lisière d'une forêt et d'une pelouse. De plus, le substrat et la topographie doivent également être uniformes. La détermination de l'homogénéité floristique fait appel à la *courbe* dite *aire-espèce;* l'aire dont la flore est relevée doit être au moins égale à l'aire minimale ainsi déterminée.

Tout relevé floristique doit comporter un maximum d'informations complémentaires de la simple liste floristique : la localisation précise du relevé, l'altitude, la pente, l'exposition, la surface du relevé, le pourcentage de recouvrement de la végétation au sol (strate par strate dans le cas d'un groupement pluristratifié, une forêt par exemple), la nature du substrat, le pH de l'horizon de surface du sol, ainsi, bien sûr, que les coefficients d'abondance-dominance et de sociabilité affectés à chaque espèce.

Lorsque l'on dispose d'un nombre assez important de relevés effectués dans une même région, on doit les comparer, puis les classer en tenant compte des plantes qu'ils ont en commun. Ces relevés peuvent alors être réunis en un tableau, dit *tableau brut,* où les colonnes correspondent aux relevés et les lignes aux espèces; à l'intersection des deux, figurent les coefficients d'abondance-dominance et de sociabilité correspondants.

Ensuite, il faut déplacer les colonnes pour grouper les relevés qui se ressemblent plus entre eux qu'ils ne ressemblent aux autres, c'est-à-dire ceux qui ont le plus de plantes en commun. Aux deux extrémités du tableau se trouvent donc les relevés les plus différents entre eux. Puis il faut déplacer les lignes de façon à rassembler les espèces communes aux groupes de relevés précédemment établis. On a ainsi établi un *tableau élaboré,* d'où se dégagent un ou plusieurs ensembles de relevés de composition floristique voisine.

Les espèces particulièrement liées à chaque groupe de relevés sont dites *caractéristiques* de ces groupes, les autres sont dites *compagnes;* ces groupes de relevés ainsi formés correspondent à des *associations végétales.* D'où leur définition : une association végétale est une combinaison originale d'espèces, dont certaines, dites caractéristiques, lui sont plus particulièrement liées, les autres étant qualifiées de compagnes.

Il est bien évident que lorsque les données (relevés et espèces) sont trop nombreuses, il n'est plus possible de les trier manuellement en déplaçant les colonnes et les lignes du tableau brut formé. Aussi a-t-on recours aux techniques statistiques pour tester la ressemblance entre les objets (ici les relevés) pris deux à deux.

Une des premières méthodes utilisées à cette fin fut l'*analyse différentielle de Czekanowski :* elle est fondée sur le calcul d'un coefficient de similitude floristique entre les relevés pris deux à deux, c'est-à-dire du pourcentage d'espèces qu'un relevé possède en commun avec chacun des autres. Si l'on désigne par n le nombre d'espèces communes à deux relevés 1 et 2 (par exemple, 23), par N le nombre total d'espèces différentes présentes dans ces deux relevés (par exemple, 55), ce coefficient s'écrit :

$$C = \frac{n \times 100}{N} \text{ (dans cet exemple, } C = 42\ \%\text{)}$$

C'est le *coefficient de Jaccard,* du nom du botaniste qui s'est le premier livré à cette opération. Nous voyons que C est d'autant plus grand que les relevés ont plus d'espèces en commun; C est égal à 0 si les deux listes n'ont aucune espèce en commun, alors que si les deux listes étaient identiques C serait égal à 100 (mais on calcule aisément que la probabilité de réunir deux relevés identiques dans la nature est pratiquement nulle). Les

▼ ***La détermination des* classes de fréquence *pour obtenir une bonne notion de l'homogénéité floristique, se fait à partir de nombreux relevés. Ici, en A, les relevés sont régulièrement répartis et sont faits sur des carrés de 25 cm de côté; en B, ils sont faits au hasard, sur des surfaces circulaires équivalentes. Les couleurs ou les signes indiquent l'emplacement d'une espèce donnée a, b, c, d, e.***

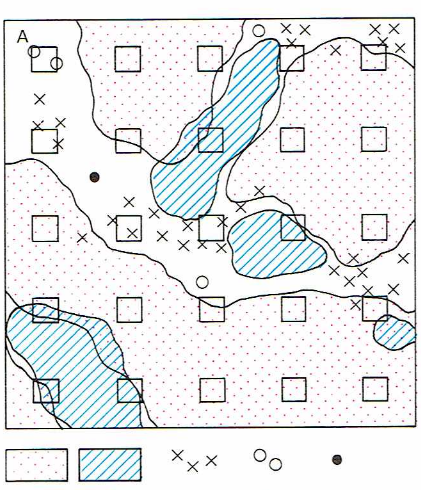

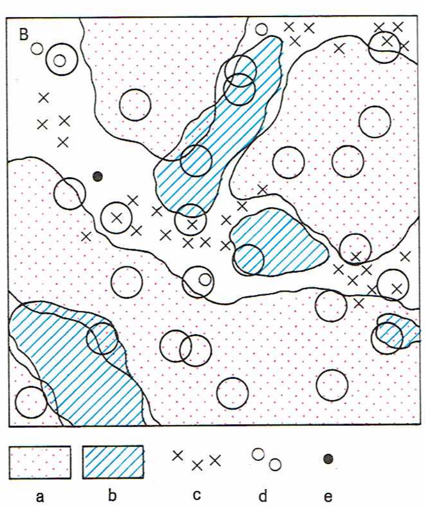

I.G.D.A.

coefficients ainsi établis sont répartis en *classes*. Classe I : 11 à 20 %, classe II : 21 à 30 %, classe III : 31 à 40 %, classe IV : 41 à 50 % et classe V : au-dessus de 50 %.

Pratiquement, cinq classes peuvent suffire, car l'expérience montre qu'un coefficient supérieur à 50 % est rarement atteint. Ces classes sont matérialisées par des signes conventionnels, ou par des couleurs d'autant plus foncées que le pourcentage est plus élevé.

Une fois calculés ces coefficients, on construit un tableau à double entrée dans lequel chaque relevé est affecté d'une ligne et d'une colonne, à l'intersection desquelles est porté le figuré conventionnel correspondant. Par permutations successives des lignes et des colonnes, on s'efforce d'obtenir un regroupement, le long de la diagonale, des figurés conventionnels correspondant aux plus forts pourcentages. Cela revient évidemment à rapprocher les relevés qui présentent entre eux le maximum de ressemblances floristiques.

On obtient alors un résultat variable selon les données utilisées : soit un seul noyau sombre axé sur le centre du tableau, ce qui permet de conclure que l'ensemble analysé représente un seul groupement, soit plusieurs noyaux sombres plus ou moins nettement individualisés et qui correspondent chacun à un groupement. Les résultats ainsi fournis par l'analyse différentielle permettent d'ordonner les relevés en un tableau plus rationnel, et d'y faire apparaître les coupures éventuelles.

M. Guinochet écrit : « L'intérêt de cette technique, qui, en son temps, a représenté un réel progrès, est qu'elle permet, beaucoup mieux que le triage visuel des relevés, de tenir compte des compositions floristiques globales et d'échapper à la tentation d'accorder *a priori* une importance privilégiée à certaines espèces. »

On se rend vite compte des limites d'utilisation de ce type d'analyse différentielle. En effet, si le tableau formé permet d'établir éventuellement des coupures dans le tri de relevés effectué dans un plan, c'est-à-dire dans un espace bidimensionnel, la plupart du temps les phytosociologues disposent de très nombreux relevés à analyser, et ceux-ci ne peuvent être triés de cette manière dans un seul plan ; les ressemblances entre les groupes formés sont telles qu'il est facile d'en imaginer une représentation dans l'espace, voire dans un espace multidimensionnel. C'est sur ce principe que sont fondées les méthodes d'analyse multivariable, dont les analyses factorielles sont actuellement utilisées en phytosociologie, comme dans de nombreuses autres disciplines, chaque fois que l'on a besoin de classer *n* objets en fonction de *m* caractères.

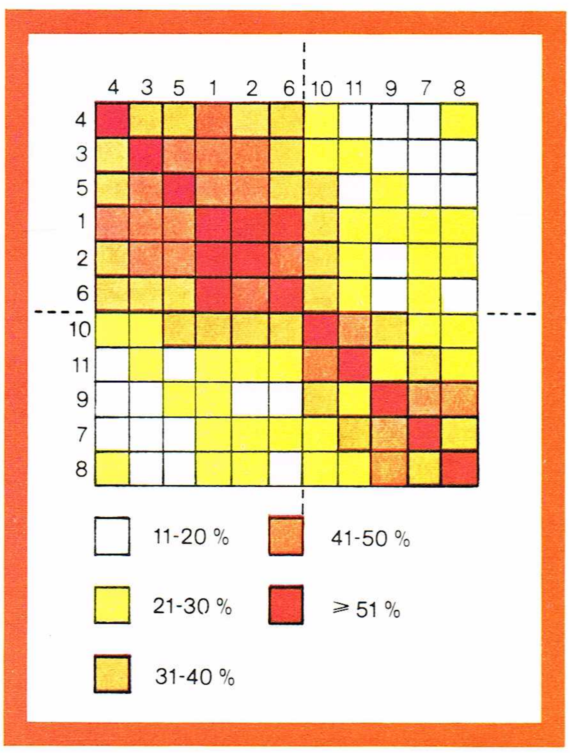

Richard Colin

◀ ***Exemple de tableau* d'analyse différentielle de Czekanowski *mettant en évidence deux groupes distincts de relevés (relevés 1 à 6 et 7 à 11), correspondant à deux groupements végétaux différents (d'après Guinochet et Casal).***

Il est possible d'imaginer que *R* relevés puissent figurer dans un espace à *E* dimensions (*E* étant le nombre d'espèces) et que, réciproquement, les *E* espèces prennent place dans un espace à *R* dimensions. Des analyses de ce type se proposent de représenter, avec le minimum de perte d'information, les points de ces espaces multidimensionnels, dans un espace réduit à deux ou trois dimensions. Ces méthodes demandent évidemment l'utilisation d'assez puissants ordinateurs.

Pour comparer les relevés entre eux, il est nécessaire de fixer une mesure des ressemblances en fonction des espèces : aussi choisit-on un système permettant de calculer les distances entre les points de cet espace multidimensionnel, en particulier entre les points-relevés. En fait, plus la distance séparant deux points-relevés est courte, plus les relevés qu'ils représentent se ressemblent. Dans cet espace, l'ensemble des points-relevés forme un nuage présentant des directions d'allongement privilégiées. L'analyse factorielle a pour but de déterminer ces directions. Pour projeter ce nuage sur un axe, il faut trouver un axe de projection déformant le moins possible le nuage initial. Il est très rare que l'ensemble des données se ramène à une seule dimension, d'où la nécessité de trouver d'autres axes factoriels successifs permettant de projeter les données sur des plans ainsi formés. Les résultats se présentent sous la forme de graphes plans, où chaque relevé est figuré par un point repéré par ses coordonnées suivant deux axes factoriels.

Une méthode d'analyse factorielle particulière, l'*analyse factorielle des correspondances,* dont l'idée revient à J.P. Benzecri, s'est révélée la mieux adaptée au traitement des problèmes phytosociologiques. Elle est fondée sur l'utilisation d'une méthode particulière pour calculer les distances entre les points, qui permet ensuite de représenter les points-relevés et les points-espèces sur le même graphe, de telle sorte que chaque relevé se trouve entouré de ses espèces et chaque espèce des relevés où elle est présente ; ainsi, les relevés les plus semblables et leurs espèces associées se trouvent regroupés. Il est possible, en interprétant les graphes correspondant à plusieurs axes factoriels, donc dans plusieurs plans (en général deux ou trois), d'individualiser des groupements végétaux, dont il est alors assez aisé de discerner les espèces caractéristiques. On le voit, cette méthode permet d'analyser un grand nombre de données d'une manière très rapide et le plus objectivement possible.

Les associations étant finalement individualisées, on présente les résultats obtenus sous forme de *tableaux définitifs* (en général, un tableau par association), dans lesquels on regroupe les espèces caractéristiques d'une part, et les espèces compagnes d'autre part. A l'intérieur de chacune de ces catégories, les espèces sont classées dans l'ordre des fréquences de présence décroissantes. Deux colonnes supplémentaires figurent en général en bordure latérale du tableau : une colonne indiquant la classe de fréquence ou classe de présence de chaque espèce (classe V si l'espèce est présente dans 81 à 100 % des relevés, classe IV de 61 à 80 %, classe III de 41 à 60 %, classe II de 21 à 40 %, et classe I de 1 à 20 %), et une seconde colonne indiquant le type biologique de l'espèce.

Il est possible de constituer l'*histogramme des fréquences* ainsi que la *courbe de distribution des fréquences* des espèces du tableau. Cela permet de tester l'homogénéité du tableau de relevés (ce qui est différent de l'homogénéité floristique d'une surface de végétation) : d'une façon générale, on peut considérer que le tableau est homogène, c'est-à-dire qu'il ne comporte pas de relevés étrangers au groupement, lorsque la courbe joignant le milieu des rectangles dite courbe de distribution des fréquences est régulière, de type unimodal. Une étude statistique a montré que cette courbe doit s'ajuster à celle représentative du type I de l'équation généralisée des probabilités de K. Pearson.

L'étude de l'association ne peut se borner à l'inventaire floristique. On doit s'efforcer de définir les conditions écologiques auxquelles elle correspond : c'est pourquoi on établit le profil du sol sous-jacent et on représente le spectre biologique, c'est-à-dire un histogramme des pourcentages respectifs des différents types biologiques (de Raunkiaer) pour l'ensemble du tableau définitif.

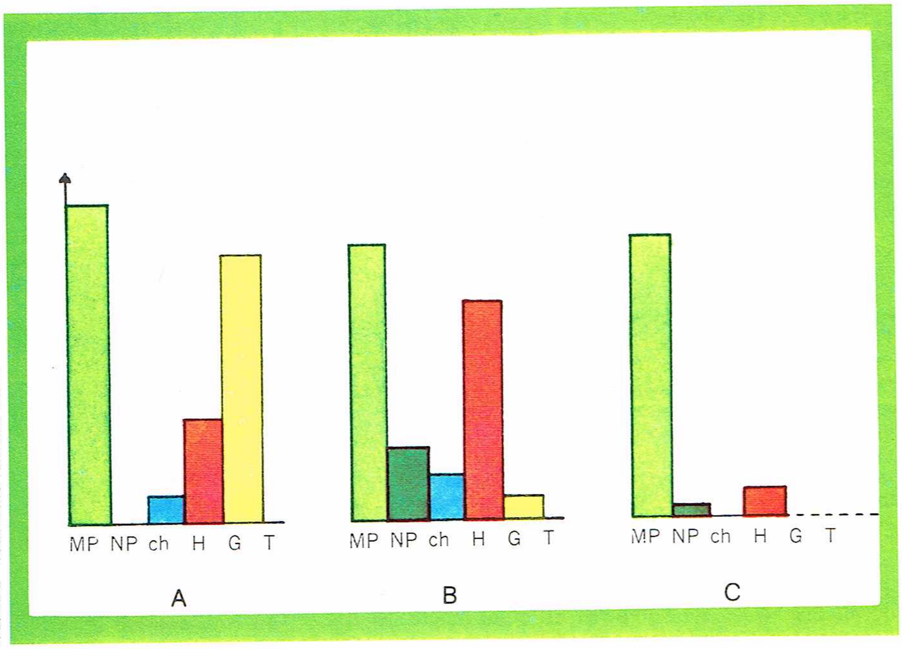

I.G.D.A. - redessiné Richard Colin

▲ *Représentation graphique des « spectres biologiques », selon Raunkiaer, dans des forêts à sol fertile (A, hêtraie) et à sol pauvre en éléments nutritifs (B, forêt à chênes et à bouleaux; C, pinède). Pourcentage des différentes catégories présentes : MP, macrophanérophytes; NP, nanophanérophytes; Ch, chaméphytes; H, hémicryptophytes; G, géophytes; T, thérophytes ou annuelles.*

▼ *Forêt de chênes pédonculés* (Quercus pedunculata) *caractéristique des régions centro-européennes.*

Archives P 2

Pour désigner les associations végétales, on utilise le nom d'une ou deux espèces de haute fréquence, caractéristiques ou compagnes de leur ensemble floristique. Le nom de l'association est formé par l'adjonction du suffixe *-etum* à la racine du nom de genre et par la mise au génitif du nom de l'espèce; par exemple, une association végétale dans laquelle le chêne vert, *Quercus ilex*, est dominant est nommée *Quercetum ilicis*. Dans le cas où deux espèces servent à nommer l'association, on ajoute le suffixe *-eto* au nom de genre de la première, et le mot ainsi formé est réuni au suivant par un trait d'union; citons par exemple le *Querceto-Carpinetum*, de *Quercus pedunculata* (chêne pédonculé) et *Carpinus betulus* (charme), qui désigne la chênaie-charmaie.

A l'intérieur d'une association végétale, on peut être conduit à distinguer, à l'aide d'*espèces* dites *différentielles*, des *sous-associations*. Les espèces différentielles revêtent, vis-à-vis de celles-ci, la même signification que les espèces caractéristiques pour les associations; cependant, on ne peut pas les assimiler à ces dernières espèces, car elles se retrouvent dans d'autres associations avec une fréquence plus ou moins équivalente. Les espèces différentielles sont, le plus souvent, indicatrices d'une propriété particulière du milieu physique (sol et microclimat).

Les sous-associations sont nommées par le nom de genre d'une espèce différentielle auquel on ajoute le suffixe *-etosum* : par exemple, *Caricetum curvulae elynetosum*.

La notion d'association végétale est acquise de la même façon que celle d'espèce. Pour arriver à cette dernière, on fait ressortir les ressemblances morphologiques entre individus, ici on examine les ressemblances de composition floristique existant entre les relevés. En outre, de même que les taxonomistes groupent les espèces en genres, les genres en familles, etc., les phytosociologues réunissent les associations végétales ayant la plus grande parenté floristique en *alliances*, en *ordres*, puis en *classes*. Lorsqu'il n'est pas possible de préciser le rang phytosociologique de communautés végétales non encore définies, on les désigne sous le nom de *groupements végétaux*, de même que, lorsqu'on ne peut pas ou l'on ne veut pas préciser le rang d'une unité systématique, on parle de taxon.

Il faut bien comprendre qu'une association végétale est un concept, fondé sur la comparaison de relevés floristiques, et représentant la description d'éléments concrets, les *individus d'association*.

PHYTOSOCIOLOGIE		TAXONOMIE
individu d'association		individu
association	(-etum)	espèce
alliance	(-ion)	genre
ordre	(-etalia)	famille
classe	(-etea)	ordre
groupement		taxon

L'école sigmatiste attribue le maximum d'importance à la fidélité : l'association végétale est caractérisée par des espèces qui lui sont fidèles. Ces espèces caractéristiques sont en outre d'excellentes indicatrices d'un milieu particulier, comme l'indique Braun-Blanquet dans une définition très complète : « L'association végétale est un groupement végétal plus ou moins stable et en équilibre avec le milieu ambiant caractérisé par une composition floristique définie, dans laquelle certains éléments exclusifs ou à peu près — les espèces caractéristiques — révèlent par leur présence une écologie particulière et autonome. »

Les espèces caractéristiques ont une amplitude écologique faible, et il est aisé de comprendre que les communautés fondées sur celles-ci sont directement dépendantes des conditions de milieu.

Quelles sont les relations entre les associations végétales et les facteurs édaphiques et microclimatiques? Une excellente définition du sol donnée par H. Jacques-Félix permet de mieux comprendre la réciprocité d'action

du sol sur la végétation, et de la végétation sur le sol : « Le sol est la formation superficielle meuble et relativement stable du terrain, portant une certaine végétation ; il comporte une fraction minérale et une fraction organique ; il est le siège de phénomènes physico-chimiques d'équilibre et d'une activité biologique participant, en particulier, au cycle de l'azote. Cette définition sépare bien le sol, tel qu'il doit nous retenir ici, des autres formations qui relèvent de la géologie ou de la géographie dynamique. Tout déséquilibre important dans le rapport entre la matière organique et la matière minérale tend à situer les sols en cause hors des frontières que nous leur assignons. Ainsi, une tourbe qui est une accumulation exclusive de matière organique ne se décomposant pas et, inversement, des sables désertiques dépourvus de matière organique, que le vent pousse comme les vagues de l'océan, occupent les deux extrémités d'une gamme où se situent les sols proprement dits dont la composition peut rester très diverse. »

La nature du sol influe nettement sur la composition floristique ; la comparaison des cartes phytosociologiques avec des cartes pédologiques permet de bien mettre en évidence ces rapports : par exemple, sur les sols salés, se trouvent des associations végétales particulières, différentes selon la teneur en sel des horizons de surface.

Il y a une quinzaine d'années, deux équipes distinctes entre lesquelles il n'y eut aucune collaboration ont dressé simultanément des cartes phytosociologiques et des cartes pédologiques dans les plaines sublittorales de l'Oranie orientale en Algérie. La comparaison entre les deux types de cartes révèle une coïncidence presque parfaite entre les associations végétales et les types de sol. Les cartes pédologiques fournissent des renseignements plus précis sur la structure, la texture et les propriétés chimiques des sols, alors que les cartes phytosociologiques donnent des indications importantes sur les conditions hydriques. Ces deux types d'études ne s'excluent pas mutuellement ; au contraire, elles sont complémentaires.

On arrive aux mêmes conclusions en comparant les cartes phytosociologiques et pédologiques établies dans d'autres régions, par exemple en forêt de Sainte-Hélène (Vosges) par J. Timbal, et en réserve biologique de la tillaie en forêt de Fontainebleau (Seine-et-Marne) par Bouchon, Faille, Lemée, Robin et Schmitt.

Voici, à titre d'exemple, les sols correspondant à quelques associations forestières du Bassin parisien :

Chênaie sessiliflore silicicole	sol podzolique
Hêtraie-chênaie acidophile	sol lessivé
Hêtraie calcicole	rendzine forestière, parfois sol brun calcaire
Pré-bois thermophile du *Quercion pubescentis*	rendzine
Ormaie rudérale	sol nitraté
Chênaie-charmaie	sol brun
Aulnaie-peupleraie	sol hydromorphe

Dans ce cas, il y a une assez bonne concordance entre les types de sols et les associations. Cependant, le nombre de types de sols reconnu par les pédologues est toujours inférieur au nombre d'associations végétales décrites. Ainsi, bien que nous trouvions deux associations distinctes sur le même type de sol, par exemple, une chênaie-frênaie calcicole et un pré-bois thermophile du *Quercion pubescentis* sur une rendzine, les conditions édaphiques (qui incluent des données n'entrant pas dans la classification des types de sols) sont toutefois différentes : le sol du pré-bois thermophile est beaucoup plus sec, de granulométrie beaucoup plus grossière, et de pH en surface légèrement plus alcalin que le sol de la chênaie-frênaie. Si la nature du sol influe nettement sur la composition floristique, la réciproque est vraie : il ne peut se produire de pédogenèse sans le concours de la végétation.

La preuve des relations entre les associations végétales et les facteurs climatiques est maintenant bien établie, malgré les difficultés techniques de mesures qu'entraînent les variations périodiques de température, de lumière, d'humidité relative, etc.

La majorité des observations donne des résultats surtout comparatifs entre les associations distinctes d'une même région. Ainsi, A. Quantin (1935) a effectué des mesures quotidiennes de température pendant trois semaines au cours de chacune des saisons d'une année, sur des individus d'association des principales associations du Jura méridional ; voici un résumé de ses résultats :

	Moyenne annuelle	Amplitude moyenne
Thlaspion rotundifolii : Petasitetum paradoxi sous-association à *Dryopteris robertiana*	8,1	7,8
Stipion calamagrostidis : Centranthetum	13,4	13,1
Xerobromion : Anthylli-Teucrietum	15,0	17,6
Xerobrometum lugdunense	13,1	10,9
Mesobromion : association à *Chlora perfoliata*	11,7	9,5
Ulicion : Calluno-Genistetum	9,6	9,5

Il faut souligner la relation très intime existant entre la systématique des organismes, ou taxonomie, et la phytosociologie. En effet, pour la définition d'une espèce, l'énumération des associations végétales auxquelles elle participe est une propriété aussi importante que celles que révèle l'examen de sa morphologie, de son anatomie, de sa constitution chimique, etc. Mais en outre, on a pu mettre en évidence qu'une espèce participant à plusieurs associations est représentée dans chacune d'elles par des populations génotypiquement plus ou moins différentes, constituant chacune un *écotype* (selon le terme de Turesson). Ainsi, dans le Jura, la Crucifère *Cardamine pratensis* possède 16 chromosomes dans les populations des associations du *Fraxino-Carpinion* et du *Mesobromion*, 30 dans celles de l'*Arrhenatherion* et 40 dans celles du *Magnocaricion*.

Selon l'intensité de leur individualisation, ces écotypes occupent un rang variable dans la hiérarchie systématique infraspécifique. Les caractéristiques phénotypiques distinctives de certains écotypes ne sont cependant pas immédiatement décelables sur le terrain : par exemple, lorsqu'elles correspondent à des interprétations statistiques de propriétés biométriques ou à des différences d'ordre physiologique ; les écotypes ne peuvent par conséquent être identifiés que par l'intermédiaire de l'individu de l'association dans laquelle ils se trouvent.

De plus, la connaissance des associations végétales offre la possibilité de nombreuses applications pratiques, notamment en ce qui concerne la productivité du tapis végétal, la mise en valeur des territoires et les problèmes

Groupements forestiers en France

Groupements forestiers acidophiles

Classe : Quercetea robori-petraeae
  Ordre : Quercetalia robori-petraeae
    Alliance : Quercion robori-petraeae

Groupements forestiers non acidophiles

Classe : Querco-Fagetea
  Ordre : Prunetalia spinosae
    Alliance : Salicion arenariae
    Alliance : Pruno-Rubion ulmifolii
    Alliance : Rubion subatlanticum
    Alliance : Berberidion
  Ordre : Fagetalia silvaticae
    Alliance : Alno-Ulmion
    Alliance : Fraxino-Carpinion
    Alliance : Scillo-Fagion
    Alliance : Fagion
      Sous-alliance : Eu-Fagion
      Sous-alliance : Acerion pseudoplatani
      Sous-alliance : Cephalanthero-Fagion
      Sous-alliance : Luzulo-Fagion
  Ordre : Quercetalia pubescentis
    Alliance : Fago-Pinion corsicanae
    Alliance : Quercion pubescenti-petraeae

Groupements forestiers ou arbustifs thermophiles méditerranéens

Classe : Quercetea ilicis
  Ordre : Quercetalia ilicis
    Alliance : Oleo-Ceratonion
    Alliance : Quercion ilicis
    Alliance : Pruno-Rubion ulmifolii.

▲ Exemple de tableau de la classification des groupements végétaux de rang supérieur (classes, ordres, alliances) pour les principaux groupements forestiers en France. On retrouvera, dans les noms utilisés, les noms latins désignant les arbres de notre flore.

◀ Page ci-contre, à droite, tableau indiquant le parallélisme entre les termes employés pour désigner diverses unités en phytosociologie et en taxonomie (entre parenthèses, terminaisons utilisées pour la nomenclature des groupements végétaux) [d'après Roux et Souchon, 1970].

▼ *Un exemple type de région où la réimplantation de chêne vert favoriserait la productivité du tapis végétal : une garrigue à exposition sud, sur sol calcaire à* Cistus albidus *(fleurs mauves). On reconnaît notamment dans ce paysage des Alpilles la plantation de chênes kermès* (Quercus coccifera), *des* Genista scorpius *(fleurs jaunes) et des* Asphodelus *(grandes fleurs).*

C. Nardin - Jacana

de protection et de conservation de la nature. A cet égard, un exemple pris en bas Languedoc et en Provence occidentale est très démonstratif : dans ces régions, la forêt de chêne vert a été détruite pratiquement partout, et il ne reste plus, en dehors des cultures, que des maquis et des garrigues à chêne kermès *(Quercetum cocciferae)*. Pour des raisons diverses, il y a intérêt à reboiser de grandes surfaces de ces étendues peu productrices. La solution raisonnable est de chercher à reconstituer la forêt de chêne vert (là où l'état du sol le permet encore), laquelle présente, entre autres avantages sous ce climat sec, celui d'être relativement peu inflammable. Le chêne vert, planté ou semé dans ces garrigues, se développe mal. Heureusement, l'expérience prouve qu'en régions calcaires il se régénère bien à l'abri d'essences plus héliophiles, comme le pin d'Alep. La voie à suivre est donc de planter ou de semer du pin d'Alep dans les garrigues à chêne kermès puis, lorsqu'il a atteint un certain développement, de favoriser ou même de provoquer l'installation du chêne vert sous ce couvert. C'est là que les connaissances phytosociologiques sont indispensables : on a reconnu que le pin d'Alep se développe très aisément, pratiquement sans soins, dans la sous-association à romarin du *Quercetum cocciferae,* mais ne vient que très difficilement et exige au début des arrosages nombreux dans la sous-association à *Brachypodium ramosum,* de la même association. Or, ces deux sous-associations sont dominées par la même espèce arbustive et ont la même physionomie : seule l'analyse phytosociologique permet de les distinguer.

L'école d'Upsala (Du Rietz, 1921)

Pour l'école d'Upsala (Suède), l'association est fondée sur la *constance-dominance;* la communauté végétale est stable, floristiquement homogène, chaque strate étant caractérisée par les espèces constantes et dominantes. Mais pour cette école, les strates sont considérées comme indépendantes : on change d'association chaque fois qu'une strate d'un certain type est remplacée par une autre; par exemple, les landes de sous-arbrisseaux appartiennent à autant d'associations qu'il existe d'espèces capables de dominer localement : association à *Calluna* (callune), association à *Vaccinium myrtillus* (myrtille), association à *Vaccinium uliginosum* (orcette), *association à Empetrum* (camarine), etc. Par conséquent, là où la flore est peu variée et le tapis végétal monotone, le nombre d'associations peut être énorme pour une surface restreinte.

Une association est désignée par le nom latin de genre d'une espèce dominante, suivi du génitif du nom d'espèce : par exemple, *Fagetum silvaticae* (du nom du hêtre *Fagus silvatica*) pour nommer une hêtraie. Les associations ainsi conçues, appelées aussi *sociations,* sont réunies en *groupes d'associations,* eux-mêmes classés en *formations* constituant des unités phytosociologiques supérieures; une formation est donc composée des associations de même physionomie.

Bien qu'au départ le critère floristique soit primordial, celui-ci fait place au critère physionomique au fur et à mesure que l'on s'élève dans la hiérarchie phytosociologique.

L'école esthonio-américaine (Lipmaa, 1933)

Pour cette école, les strates sont aussi considérées comme indépendantes au sein d'une communauté, si bien que les *synusies,* ou associations unistrates, sont les unités élémentaires de la végétation, caractérisées à la fois par leur composition floristique, leur écologie et leur physionomie. Par exemple, une forêt est considérée comme un ensemble d'associations unistrates.

Le système de Curtis

Pour Curtis, les espèces s'installent dans une station donnée pour des raisons individuelles et sans qu'il y ait de lien nécessaire entre elles. Il suffit que les conditions écologiques soient favorables et que l'espèce se trouve présente au moment opportun pour qu'elle s'établisse. Dans ces conditions, il n'est pas possible de définir sans arbitraire des unités naturelles de végétation homogène. Le tapis végétal se présente alors en général sans discontinuité, sous forme d'un *continuum* constamment variable dans le temps et dans l'espace. Les seules discontinuités possibles résultent de variations brusques de conditions écologiques naturelles ou du mode d'utilisation par l'homme. C'est pourquoi l'analyse et la classification des « communautés » établies selon cette conception sont on ne peut plus arbitraires. Curtis utilise surtout la physionomie et les espèces dominantes. Après avoir subdivisé arbitrairement en surfaces égales une surface de végétation en continuum, il échantillonne et décrit séparément des « types de communautés » au moyen de techniques standardisées. Sur cette base, Curtis a distingué dans le Wisconsin 21 grands types de communautés et 13 communautés de moindre importance.

Le système de Clements (1916)

Une communauté se modifie au cours du temps; si l'on part d'une surface nue, on y observe une succession de communautés de plus en plus complexes. On passe donc d'un stade pionnier à différents stades intermédiaires, aboutissant finalement à la communauté la plus stable, en équilibre avec le climat : c'est le *climax,* représentant l'unité de base de la classification naturelle des groupements végétaux proposée par Clements.

L'unité de végétation correspondant au climax général d'un territoire est la *formation,* par exemple la formation à *Quercus-Fagus,* forêt caducifoliée de l'est des États-Unis; elle est caractérisée par des espèces dominantes que l'on retrouve dans toute son étendue : huit espèces de *Quercus* et quatre espèces de *Carya.* Suivant les principaux types de climats régionaux, la formation est alors divisée en sous-unités, les *associations,* caractérisées

par la dominance locale de deux ou plusieurs espèces dans la strate supérieure. Ainsi, la formation à *Quercus-Fagus* comprend, aux États-Unis, l'association à *Quercus-Castanea dentula,* l'association à *Fagus-Acer saccharum* et l'association à *Quercus-Carya*.

L'école de Toulouse (Gaussen, Rey)

Comme le système de Clements, cette école fonde ses principes sur le phénomène de *succession*. La succession naturelle partant du substrat dénudé et aboutissant au climax, en englobant tous les stades intermédiaires, est une *série progressive primaire*. Une *succession secondaire* se développe lorsqu'une végétation primaire est détruite ou profondément modifiée par l'action de l'homme (incendie, coupe, défrichement) ou des animaux. Ces diverses actions replacent la végétation dans un stade de dénaturation plus ou moins important. Lorsqu'elles cessent, s'établit une succession, dont les premiers stades sont relativement différents, mais dont les stades ultérieurs et surtout terminaux peuvent se rapprocher des stades homologues de la série primaire : on parvient à un climax qui peut être voisin du climax idéal, mais qui, dans la plupart des cas, ne peut pas lui être intégralement superposé parce que le sol, plus ou moins dégradé au départ, n'est plus capable de se constituer en sol climacique.

Dans les pays tempérés à action humaine intensive, il n'existe guère que des séries secondaires menant aux *climax potentiels,* ou *plésioclimax,* qui sont le plus souvent forestiers.

On peut schématiser les deux types de séries rencontrées de la manière suivante :

— *Série régressive* sous l'action de l'homme (exemple : forêt → lande → pelouse → culture).

— *Série progressive* par évolution naturelle (exemple : culture abandonnée → pelouse → lande → forêt).

Remarquons que les divers stades d'une série progressive correspondent à des formations de plus en plus élevées quant à la taille des espèces dominantes : on peut constituer une échelle de 0 à 10 allant du sol nu à la forêt : 1 et 2 représentent, par exemple, les pelouses, prairies et steppes; 3, 4 et 5 les formations de sous-arbrisseaux : landes, maquis, garrigues; 8 et 9 les formations d'arbustes; 10 la forêt climacique.

Chaque série est désignée par le nom de l'espèce forestière dominante du stade climacique; par conséquent, dans une région donnée, il y a autant de séries qu'il existe de types de forêts climaciques.

Cette école est à l'origine du service de la Cartographie de la végétation de la France à l'échelle du 1/200 000^{e} dépendant du C.N.R.S.

La méthode des groupes socio-écologiques

Comme l'indique Duvigneaud : « Le concept d'affinité sociologique englobe toutes les tendances biologiques, biogéochimiques, mésologiques, géographiques et autres qu'ont certaines espèces de plantes à se grouper dans la nature; par exemple :

— plantes des sols décalcifiés très acides;
— plantes des sables calcaires mouvants;
— plantes des sols salés;
— plantes des milieux ombragés sur mull, mor, moder;
— plantes des milieux arides sur croûtes gypseuses, etc. »

Le groupe socio-écologique est donc un ensemble d'espèces ayant entre elles une affinité sociologique plus ou moins grande, marquée par une tendance à se rassembler dans des conditions de milieu déterminées.

En 1957, Duchaufour a rassemblé en *groupements écologiques* les plantes herbacées des sols forestiers se répartissant suivant trois facteurs édaphiques : la teneur en bases et en éléments nutritifs, l'économie de l'eau, et l'aération. Mais selon cet auteur, ces trois facteurs édaphiques peuvent être intégrés facilement dans le type d'humus, « qui dépend d'eux étroitement et qui constitue en quelque sorte le meilleur test biologique permettant de caractériser la station ». Il définit ainsi, dans le nord-est de la France, 11 groupes écologiques fondamentaux, d'après les caractères du sol et surtout de l'humus.

S.E.F.

▲ *Un type de sous-bois où domine une bruyère* (Calluna vulgaris).

Fratelli Montacchini

◀ *Un groupe socio-écologique est un ensemble d'espèces ayant une affinité plus ou moins grande, marquée par une tendance à se rassembler, dans des conditions de milieu déterminées; c'est le cas de l'association à* Rhododendron ferrugineum, *caractéristique de la lande montagnarde et subalpine. On observe, dans le fond, un bois de Conifères, et, mêlées aux* Rhododendron, *des fleurs blanches,* Anemone narcissiflora.

Caractéristiques du mull forestier
Poa chaixii, Melica uniflora, Milium effusum, Carex silvatica, Asperula odorata, Polygonatum multiflorum, Lamium galeobdolon, Euphorbia amygdaloides, Sanicula europea.
Caractéristiques du mull calcique
Brachypodium silvaticum, Melica nutans, Elymus europaeus, Carex glauca, Orobus vernus, Mercurialis perennis, Pulmonaria officinalis, Paris quadrifolia, Primula elatior.
Caractéristiques du mull actif
Urtica dioica, Arum maculatum, Ficaria verna, Glechoma hederacea, Galeopsis tetrahit, Sambucus ebulus, Geranium robertianum, Galium aparine, Stachys silvatica, Allium ursinum, Tamus communis.
Xéro-calciphiles des sols peu profonds, sur calcaire fissuré
pelouses calcaires : Festuca duriuscula, Bromus erectus, Brachypodium pinnatum, Asperula cynanchica, Hippocrepis comosa, Helianthemum vulgare, Cladonia endiviaefolia, Eryngium campestre, Euphorbia cyparissias. *fruticée claire :* Cornus sanguinea, Evonymus europaeus, Viburnum lantana, Vincetoxicum officinale, Teucrium chamaedrys.
Acidiphiles caractéristiques des moder acides
Ilex aquifolium, Deschampsia flexuosa, Agrostis vulgaris, Sarothamnus scoparius, Teucrium scorodonia, Dicranum scoparium, Polytrichum formosum, (Luzula forsteri). *chênaie acidiphile :* Lonicera periclymenum, Holcus mollis, Hypericum pulchrum, Veronica officinalis. *prairie acide de montagne :* Nardus stricta, Festuca rubra, Festuca ovina. *sapinière acidiphile :* Luzula albida, Luzula maxima, Hypnum loreum, Oxalis acetosella, (Vaccinium myrtillus).
Acidiphiles caractéristiques des moder tourbeux
Molinia coerulea, Agrostis alba, Carex pilulifera, Rhamnus frangula, (Erica scoparia, Deschampsia coespitosa).
Caractéristiques de l'humus brut
lande atlantique : Calluna vulgaris, Erica cinerea, Hypnum schreberi, Leucobryum glaucum, Hypnum cupressiforme ericetorum. *lande montagnarde et subalpine :* Rhododendron ferrugineum, Vaccinium myrtillus, Vaccinium vitis-idaea.
Hygrophiles des sols à mull
hygrophiles montagnardes : Impatiens noli-tangere, Ranunculus aconitifolius, Saxifraga rotundifolia, Chaerophyllum hirsutum, Petasites albus, Athyrium filix-femina, Mulgedium alpinum. *aulnaie :* Carex maxima, Carex remota, Scirpus silvaticus, Eupatorium cannabinum, Solanum dulcamara, Humulus lupulus, Convolvulus sepium, Angelica silvestris. *prairie humide :* Festuca arundinacea, Holcus lanatus, Deschampsia coespitosa, Carex leporina, Colchicum automnale, Potentilla anserina, Ranunculus repens, Cardamine pratensis, Lychnis flos-cuculi ; Polygonum bistorta (en montagne), Spirea ulmaria.
Hygrophiles de l'anmoor calcique
Carex paludosa, Carex riparia, etc., Phalaris arundinacea, Schoenus nigricans, Juncus obtusiflorus, Juncus effusus.
Hygrophiles caractéristiques des tourbes calciques
Phragmites communis, Iris pseudacorus, Cladium mariscus, (Typha latifolia).
Hygrophiles caractéristiques de la tourbe ou du mor tourbeux acide
Erica tetralix, Scirpus coespitosus, Eriophorum vaginatum, Drosera rotundifolia, Carex stellulata, Sphagnum sp., Polytrichum commune.

▲ ***Tableau récapitulatif des groupements écologiques d'après Duchaufour.***

Remarquons que ces « groupes écologiques » se superposent presque parfaitement aux ensembles spécifiques caractéristiques de divers groupements végétaux définis par l'école de Zurich-Montpellier. Ainsi, comme on peut le voir en se reportant à la classification donnée en exemple pour les groupements forestiers : en 1 et 2, on retrouve des caractéristiques des *Fagetalia silvaticae ;* en 3, des caractéristiques des *Fagetalia silvaticae* et du *Fraxino-Carpinion ;* en 4 b, des *Quercetalia pubescentis,* et en 5 a, des *Quercetea robori-petraeae.*

Les communautés animales

Les difficultés déjà signalées expliquent le retard pris par l'étude des groupements animaux sur celle des groupements végétaux. Malgré ces difficultés, il est souvent possible de mettre en évidence des associations animales, selon des critères et des méthodes voisines de celles utilisées en phytosociologie. (Nous ne considérons pas ici les groupements d'individus de même espèce maintenus rassemblés par une interaction ou par une appétition sociale [d'après Wheeler], appelés « groupements sociaux », qu'il ne faut pas confondre avec les associations animales.)

Trois possibilités sont offertes pour nommer les associations ainsi décrites :

— nommer l'association en faisant référence à son milieu : par exemple association des Coléoptères des forêts de Conifères de l'étage subalpin, association des bords ombragés des torrents montagnards, etc. ;

— nommer l'association en utilisant le nom d'une ou plusieurs espèces caractéristiques : par exemple on parlera de sables à *Amphioxus ;*

— nommer l'association comme en phytosociologie, en utilisant les noms des espèces les plus remarquables (caractéristiques ou dominantes), le nom du genre étant suivi du suffixe *-etum,* et le nom d'espèce mis au génitif. Ce procédé fut employé par Bonnet (1964) pour les Thécamœbiens du sol, par Sacchi (1952) pour les Gastéropodes Pulmonés terrestres, par Verdier et Quézel pour les Coléoptères Carabiques, par Amiet (1963, 1958) pour les Insectes terricoles.

Les associations peuvent ensuite être hiérarchisées en allant de la moins vaste à la plus vaste. La nomenclature des phytosociologues qui classent les associations en alliances, ordres, classes est adoptée par Bonnet (1964) qui distingue vingt-six associations de Thécamœbiens du sol, groupées en onze alliances, deux ordres et une classe : la classe des *Phryganelletea* (du genre *Phryganella* toujours présent dans le sol) est subdivisée en un ordre des *Centropyxidetalia* (du genre *Centropyxis*) des sols peu évolués, souvent squelettiques, et en un ordre des *Plagiopyxidetalia* (du genre *Plagiopyxis*) des sols évolués riches en matière organique.

Relations entre communautés animales et végétales

Les associations d'animaux de petite taille vivent en général sur une surface de végétation homogène correspondant le plus souvent à un individu d'association végétale. Par conséquent il est facile d'en déterminer la surface d'étude, en se référant d'abord à la végétation.

Par contre, dès que l'on s'intéresse aux espèces animales, très mobiles et de grande taille, leurs biotopes dépassent en général largement le cadre d'un individu

d'association végétale, et l'on est souvent obligé de se référer non plus à l'association mais à la formation végétale. C'est le cas par exemple pour les grands herbivores (girafes, antilopes, zèbres) de la savane arborée d'Afrique. L'ensemble du peuplement animal et de la formation végétale correspondante constitue alors un *biome*.

La reconnaissance des groupements animaux ou végétaux ne représente en réalité qu'un stade dans l'étude des peuplements d'êtres vivants. Le but fondamental de la *synécologie descriptive* est de pouvoir envisager, dans une étape encore plus synthétique, la totalité des organismes qui partagent les mêmes conditions de vie, et de mettre en évidence leurs relations d'interdépendance. Cette recherche conduit à un niveau d'organisation biologique plus complexe, la biocénose ou le biome, suivant l'échelle envisagée, qui englobe l'ensemble des groupements végétaux, animaux, et de micro-organismes vivant en un biotope donné.

De tels travaux synthétiques sont encore très rares, et l'on dispose simplement, à l'heure actuelle, de descriptions de biocénoses d'étendue assez réduite, comme par exemple les biocénoses marines de la zone littorale méditerranéenne du cap Corse étudiées et cartographiées par R. Molinier.

Évolution des communautés

Les communautés ne constituent pas des ensembles statiques, aux caractères définitivement acquis, mais sont l'objet d'une évolution continue, particulièrement perceptible au niveau des groupements végétaux. Il est facile, par exemple, de suivre la transformation progressive d'une culture abandonnée en friche, puis en broussailles et enfin en forêt. Cette transformation s'accompagne de modifications correspondantes du peuplement animal. Cette corrélation entre la dynamique des groupements végétaux et celle des groupements animaux peut être illustrée par l'évolution du peuplement animal, ou plus particulièrement de certains groupes systématiques tels que les Insectes et les Arachnides, Collemboles et Acariens, dans la série de la forêt mixte de l'Illinois à chênes rouges, ormes et platanes.

On peut ainsi mettre en évidence des séries dynamiques progressives ou régressives de la végétation adoptées comme principe de base par l'école phytogéographique de Toulouse. L'étude détaillée de l'évolution de la végétation d'un secteur donné peut être réalisée au moyen de petites surfaces permanentes dites « carrés permanents », dont la composition floristique est relevée périodiquement. De cette façon, on peut saisir assez vite les tendances à l'extension ou à la régression des différentes espèces, dans le cas de groupements ouverts à évolution rapide. Ces modifications entraînent alors la formation de communautés nouvelles.

Un exemple maintenant classique de succession d'associations végétales est emprunté à Braun-Blanquet et Jenny (1926), qui ont décrit avec précision l'évolution parallèle de la végétation et du sol à l'étage alpin des Alpes centrales. Un éboulis calcaire est rapidement ensemencé après sa formation, par les semences des espèces de la flore du massif montagneux dans lequel il se trouve. Mais seules s'implanteront celles qui peuvent supporter un milieu aussi inhospitalier, grâce en particulier à la faculté de développer un très important appareil souterrain et de régénérer assez aisément leur système aérien plus ou moins constamment mutilé par les déplacements des pierres. Il s'organise ainsi un individu d'association d'une association particulière : le *Thlaspeetum rotundifolii*. Les plantes peuvent alors contribuer à la fixation et au colmatage de l'éboulis par rétention autour de leurs parties aériennes d'éléments minéraux fins résultant de l'érosion des pierres avoisinantes, d'apports éoliens et de matériaux organiques provenant des parties mortes de ces végétaux. Du fait de leur existence même, elles créent des conditions nouvelles permettant l'installation d'autres espèces qui finiront par les supplanter. Au *Thlaspeetum rotundifolii*, succède un individu d'association appartenant au *Caricetum firmae*. Ce type de végétation est déjà plus fermé, c'est-à-dire que l'ensemble des parties aériennes des plantes constituantes recouvre une plus grande surface : il en résulte que le processus d'accumulation d'éléments minéraux fins et de matière organique non seulement continue, mais encore s'accentue. En outre, à l'étage alpin des Alpes centrales, la fréquence des précipitations et les faibles moyennes thermiques sont les causes respectives d'un entraînement vertical des cations et d'un ralentissement très considérable de la décomposition de la matière organique brute : il commence, ainsi, à se constituer un sol dont, progressivement, la partie supérieure s'enrichira en matière organique et s'acidifiera. Des espèces, plus tolérantes à l'égard de ces conditions, s'installeront au détriment des précédentes et il s'organisera, à partir et à la place du précédent, un troisième individu d'association, à peu près complètement fermé, d'une autre association, l'*Elynetum*. La continuation du processus aboutit à un sol dont l'horizon de surface, enrichi en matière organique non ou mal décomposée et complètement lessivé, est très acide, et à un nouvel individu d'association appartenant au *Caricetum curvulae*. Le sol étant totalement lessivé, les choses ne peuvent aller plus loin et l'on est en présence d'un état d'équilibre entre le climat, la végétation et le sol qui doit se maintenir aussi longtemps qu'existent les conditions dont il dépend, à moins qu'un accident ne remette la roche mère à nu. On peut donc parler de *phytoclimax* et de *pédoclimax*.

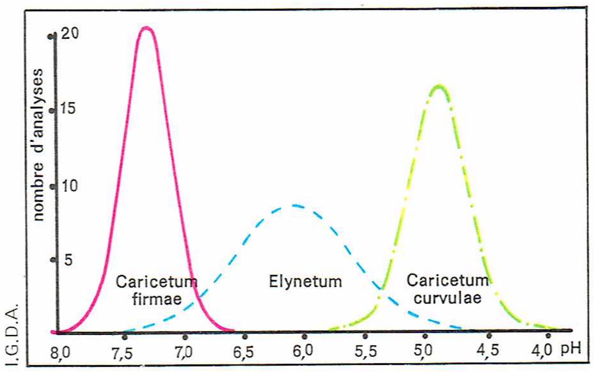

◀ ***Représentation graphique de l'évolution* parallèle du sol et de la végétation *à l'étage alpin des hauts massifs calcaires des Alpes centrales : à mesure que l'acidité augmente et donc que le pH diminue, on observe le passage du* Caricetum firmae *à l'*Elynetum *et enfin au* Caricetum curvulae.**

Remarquons que sous climat tempéré, l'évolution du sol, parallèle à celle de la végétation, se fait toujours par une acidification progressive, liée au lessivage sous l'action des précipitations, et entraînant un appauvrissement des horizons de surface.

Toute la surface d'un territoire n'évolue pas vers le climax climatique régional : ainsi à l'étage alpin, les creux où la neige séjourne très longtemps, les crêtes ventées, les parois rocheuses forment des stations particulières où ne peuvent subsister que les espèces d'associations végétales spécialisées s'installant directement et se maintenant sans subir de modification. A ces groupements permanents, on donne le nom de *climax stationnels*, par opposition au climax climatique.

Cartographie de la végétation

Un autre mode de représentation des résultats des études sur le tapis végétal, qui d'ailleurs ne se substitue pas aux précédents, mais en est un complément, est la *cartographie ;* c'est-à-dire la représentation topographique des séries de végétation ou des individus d'association selon la méthode utilisée. En suivant un exposé simplifié concernant seulement la France (Roux et Souchon, 1970) on peut donner les indications suivantes. Il existe en France deux types principaux de cartes de la végétation, publiées par le C.N.R.S. :

— la *Carte de la végétation* (centre de rédaction à Toulouse ; directeur : H. Gaussen puis P. Rey ; échelle 1/200 000e) pour laquelle de nombreuses feuilles sont déjà établies et qui tend à couvrir systématiquement tout le territoire français ;

— la *Carte des groupements végétaux* (centre de rédaction à Montpellier ; directeur : L. Emberger, avec la collaboration de J. Braun-Blanquet puis C. Sauvage assisté de G. Long ; échelles diverses de 1/5 000e à 1/20 000e) qui est moins connue car peu de coupures en ont été diffusées et les publications la concernant sont peu nombreuses.

Pour utiliser les documents que constituent de telles cartes, il faut connaître la façon dont elles sont établies dans la pratique, et quelles sont les ressources qu'elles offrent.

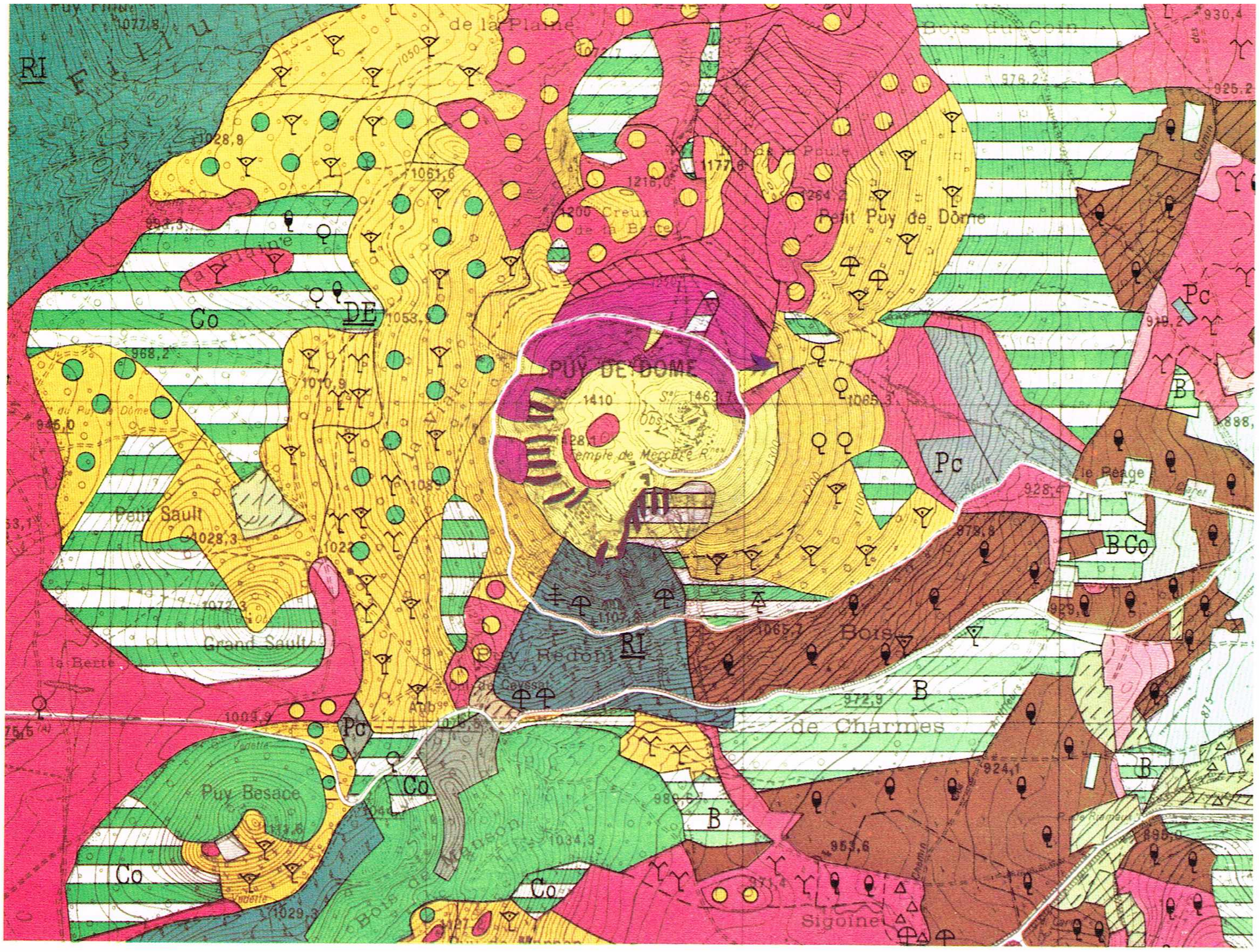

C.N.R.S.

▲ *Carte des* groupements végétaux *de la région de* Clermont-Ferrand, *établie au* 1/20 000ᵉ ; *on reconnaît, au centre, le* puy de Dôme.

La Carte des groupements végétaux

— *Nature des unités cartographiées*

Cette carte est une carte phytosociologique ; en première approximation, on peut dire que, sur une telle carte, chaque couleur correspond à une association végétale.

— *Levé et réalisation de la carte*

Même si le phytosociologue — une fois les associations définies ou les groupements délimités — n'effectue pas systématiquement de relevés, il doit s'assurer de la présence de certaines plantes permettant de repérer l'association ou le groupement correspondant à une liste floristique donnée.

A l'échelle employée, la difficulté majeure sera souvent de fixer les limites d'un groupement ; des figurés spéciaux sont utilisés pour noter les zones de transition, de mélange, d'intrication par petites taches juxtaposées (mosaïque). De même les peuplements, les groupements dégradés, parfois les faciès (dominance de certaines espèces) sont indiqués.

Le choix des couleurs est lié à la classification des associations. « Les associations d'une même alliance sont affectées d'une même couleur, mais plus ou moins foncée ou diversement surimposée par des signes en noir suivant l'association ; les alliances d'un même ordre reçoivent des teintes très voisines. On réserve généralement les teintes jaunes et rouges pour les groupements xérophiles, les teintes bleues et violettes pour les groupements hygrophiles et aquatiques, les verts pour les forêts, les gris pour les surfaces cultivées. » (G. Lemée, 1967.)

En réalité, ces directives sont suivies de façon souple et chaque auteur conserve une marge d'interprétation ; de plus, la gamme des couleurs et teintes employée sur une feuille donnée est enrichie de façon à permettre une distinction plus aisée des divers groupements. Une notice et parfois une ou deux petites cartes annexes (géologie, climat, végétation climacique...) complètent les informations.

— *Utilisation de la carte*

Sur le terrain, la carte phytosociologique constitue un document à grande échelle donnant des indications précises pour le choix d'une station à étudier et la préparation d'une sortie : si on peut y ajouter des données bibliographiques locales ou même générales sur les groupements présents, l'inventaire floristique et l'étude écologique seront largement facilités, le support fourni permettant même d'aborder dans certains cas l'étude de la faune (Molinier, 1957). Cependant, la nomenclature employée pour les groupements peut rendre l'utilisation directe par des non-spécialistes plus difficile.

L'étude théorique permet aussi, selon les cartes, de montrer l'influence de différents facteurs (climatique, édaphique, biotique), de faire ressortir la situation de petits groupements particuliers (groupements fontinaux, saxicoles, zonation d'un étang...), de relier entre eux les groupements d'une série d'évolution (étude dynamique)...

Il convient de signaler pour être complet que le Centre d'études phytosociologiques et écologiques du C.N.R.S. à Montpellier élabore maintenant dans un de ses services des cartes pour lesquelles les unités cartographiques sont définies sur une base phytosociologique mais aussi écologique, par la méthode des groupes écologiques (par exemple, carte phyto-écologique et carte de l'occupation des terres de Sologne, au 1/10 000ᵉ [M. Godron et coll., 1964]).

La Carte de la végétation

— *Nature des unités cartographiées*

La Carte de la végétation représente une description plus géographique du paysage : on l'oppose parfois à la carte phytosociologique en la qualifiant de carte phytogéographique. Elle est fondée sur les principes de l'école dynamiste de Toulouse (Gaussen, Rey) : l'unité cartographiée est la série, ou si l'on préfère une unité plus petite, « l'élément de série ».

On réunit dans une série l'ensemble d'un climax et des autres formations qui y conduisent par évolution et de celles qui en dérivent par dégradation. La série est

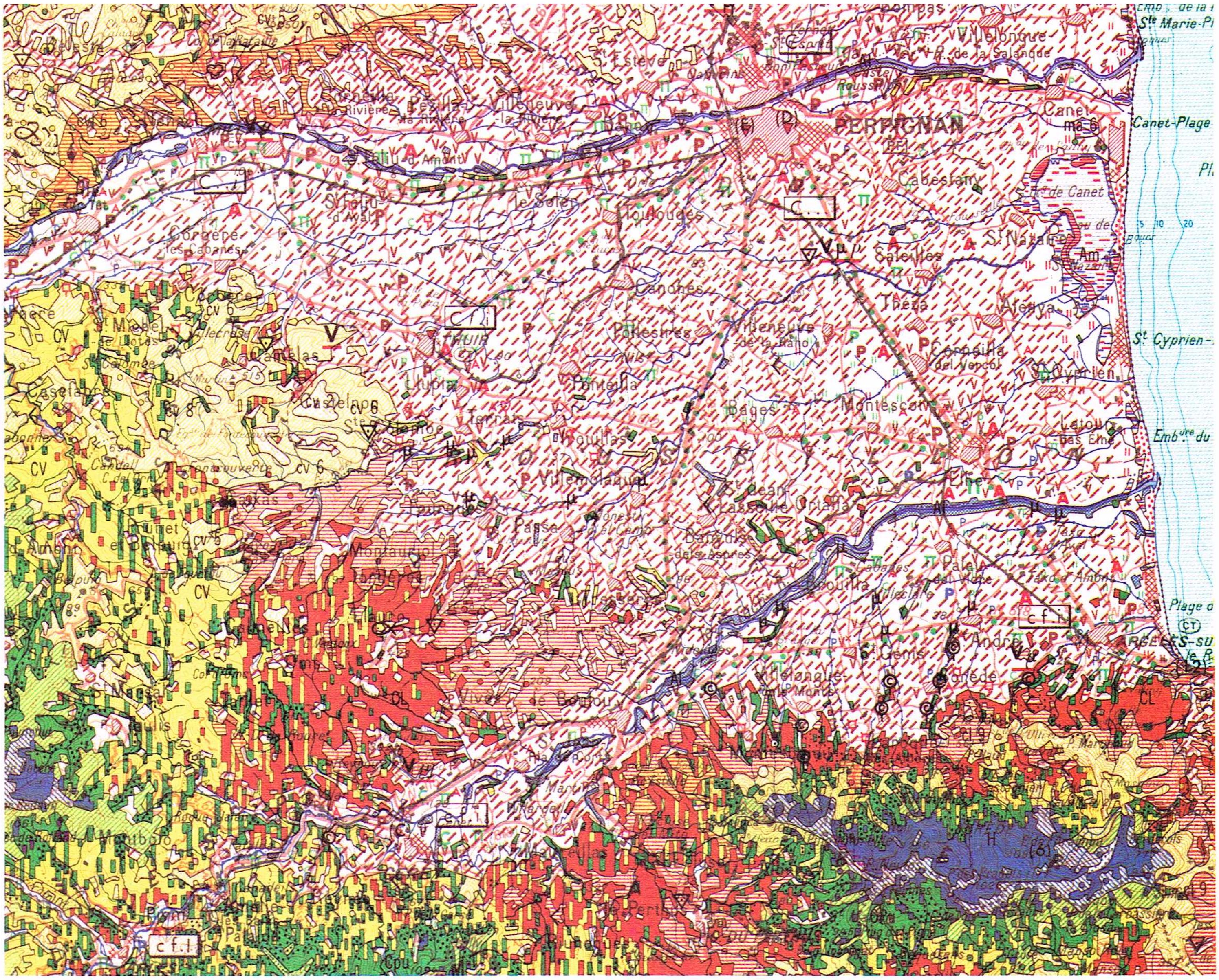

C.N.R.S.

le plus souvent définie et nommée à l'aide de l'essence dominante dans la formation forestière correspondant au climax. (Il arrive qu'on ne sache pas si ces forêts sont vraiment à l'heure actuelle en équilibre avec le climat : on parle parfois dans ce cas de *proclimax*).

Cette méthode cartographique fait donc essentiellement appel à la répartition des essences forestières : initialement, elle est d'ailleurs en partie issue de la description des étages de végétation (correspondant à la répartition altitudinale des arbres forestiers). Dans les cas simples, un étage donné peut correspondre à une seule série, mais, le plus souvent, à cause de différences climatiques ou édaphiques par exemple, plusieurs séries entrent dans un même étage.

— *Levé et réalisation de la carte*

Le premier travail est de repérer (sur cartes, sur photos aériennes, sur le terrain, assez rapidement : déplacement en voiture ou examen à la jumelle) les formations forestières et de les caractériser par la ou les essences dominantes. On identifie donc en priorité ces « fins de séries » et aussi les aspects de certains autres termes des séries à physionomie très typique ; dans le cas où ces termes inférieurs sont moins tranchés, on les replace dans la série en considérant surtout leur voisinage avec les éléments les mieux identifiés. Les noms des plantes donnés dans les notices correspondent à des précisions supplémentaires pour permettre de mieux identifier le paysage végétal, mais la plupart du temps on n'utilise pas de relevés nombreux pour définir les éléments cartographiques : en effet, l'échelle uniforme et réduite du 1/200 000ᵉ n'impose pas ce travail et elle interdit même de représenter certains détails (végétation des rochers, des sources...).

En ce qui concerne les couleurs et les figurés, chaque série est affectée d'une couleur selon un code précis, tenant compte des facteurs climatiques et édaphiques. De plus le choix des couleurs est fondé sur le principe selon lequel deux séries voisines doivent avoir des couleurs voisines. Pour attribuer des couleurs, on peut se reporter à une synthèse graphique des influences du milieu : jaune : soleil, sécheresse ; bistre : humus ; noir : ombre, nébulosité ; rouge : chaleur ; rose : lumière de haute montagne ; bleu : humidité.

Voici, par exemple, les couleurs des principales séries de la végétation de la France, obtenues par superposition des teintes correspondant aux facteurs écologiques dominants : rouge : olivier-caroubier, pin d'Alep ; orangé : chêne-liège (rouge + jaune) ; jaune : chêne vert ; vert : chênes caducifoliés (jaune + bleu) ; bleu : hêtre ; indigo : sapin (bleu + noir) ; violet : pin sylvestre, pin à crochets (bleu + rose) ; noir : épicéa ; rose : séries alpines. A l'intérieur de chaque série, la teinte, plate et foncée, correspond au terme final de la série ou climax (donc aux zones forestières), des teintes de plus en plus claires de la même couleur sont attribuées aux différents stades en descendant la série (landes par des croisillons ou des hachures, pelouses et prairies par des pointillés).

▲ ***Carte de la végétation de la région de Perpignan, établie au 1/200 000ᵉ.***

▼ ***Principe* de représentation chromatique des séries *dans la* Carte de la végétation.**

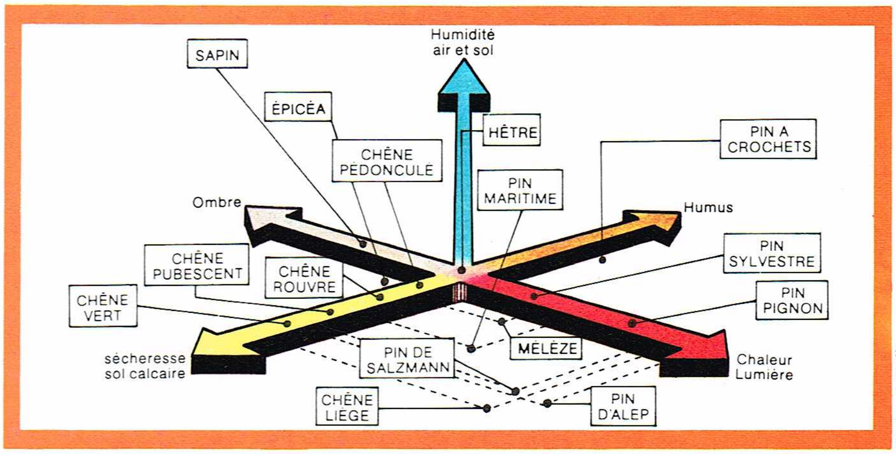

Richard Colin

T. Sacco

▲ ***Les consommateurs de premier ordre qui se nourrissent directement aux dépens des producteurs sont, notamment, les animaux herbivores (Mammifères, Insectes).***

Des figurés particuliers permettent d'indiquer les mélanges d'essences (bandes verticales alternées), les plantations, etc. Les champs et cultures sont laissés en blanc, mais portent des signes conventionnels et des chiffres indiquant le type de culture et son importance.

Un ensemble de cartons annexes à très petite échelle (1/1 250 000ᵉ; botanique, édaphologique, utilisation du sol et fruitiers, agricole, pluviothermique, adversités agricoles) et une notice donnent d'utiles indications complémentaires.

— *Utilisation de la carte*

Sur le terrain, ces cartes constituent un excellent guide pour la description d'un paysage dans son ensemble (végétation et divers aspects de l'aménagement de la nature) ou pour la préparation d'itinéraires d'excursions effectuées avec un moyen de déplacement rapide (car, train...). Mais elles peuvent être utilisées « en chambre » pour montrer par exemple sur celles des régions de montagne ou sur des profils réalisés à partir d'elles-mêmes l'étagement de la végétation, les effets d'adret et d'ubac... La comparaison de la carte avec les cartons et celle des cartons entre eux sont la base de remarques ou d'exercices pour montrer les liaisons entre végétation et différents facteurs, et préciser l'impact de l'activité humaine sur le couvert végétal.

Le fait que les conventions choisies pour la représentation cartographique soient assez simples et rigoureusement codifiées (et que les séries soient nommées à l'aide du nom français des arbres forestiers) rend la lecture de ces cartes plus directement accessible à tous.

Comparaison entre les deux types de cartes

Placé dans une même région, quelle que soit la méthode de description que l'on choisit, on est confronté avec la même réalité, avec les mêmes objets. Il est donc théoriquement possible de préciser les relations entre les deux systèmes.

Au niveau des formations forestières, on peut fréquemment faire correspondre à l'un de ces stades forestiers une association donnée. Ainsi la hêtraie (climax de la série du hêtre) définie par un phytogéographe correspond le plus souvent à un *Fagetum* de phytosociologue. Mais parfois, paradoxalement, la composition floristique conduit le phytosociologue, malgré la présence dominante du hêtre, à parler par exemple d'un *Querceto-Ilicetum* (groupement à chêne et houx, faciès à hêtre; G. Lemée, 1937) : il faut se rappeler alors que dans la liste floristique le hêtre compte seulement pour une espèce !

Quand il s'agit de termes inférieurs d'une série, tels que landes, prairies, pelouses, leur étude étant peu poussée pour l'établissement de la carte de la végétation, il est difficile d'établir une correspondance, mais on peut penser que très souvent chaque terme ou élément de série recouvre plusieurs associations. De façon plus générale cette correspondance élément de série - alliance serait assez souvent satisfaisante.

L'écosystème et son fonctionnement

Le concept d'écosystème

Tout être vivant, pour assurer sa pérennité au niveau de l'espèce, sa vie et sa maintenance au niveau de l'individu et de la population, est dépendant d'un certain nombre de conditions du milieu ou facteurs — soit abiotiques, constitués par des substances chimiques (oxygène, carbone, etc.), ou par des gradients ou valeurs d'un paramètre physique (température) — soit biotiques, qui sont les autres êtres vivants.

L'environnement physico-chimique abiotique (biotope) et l'assemblage des plantes, animaux et micro-organismes (biocénose) constituent un système écologique fonctionnel ou *écosystème* (Tansley, 1935). On propose souvent la définition suivante, sous une forme très simplifiée : écosystème = biotope + biocénose, mais cette superposition des deux termes est insuffisante si on n'insiste pas sur les constantes relations entre biotope et biocénose et si on ne marque pas fortement l'idée de fonctionnement du système écologique.

L'écosystème peut être envisagé comme une entité localisée géographiquement : une mare ou un étang, une forêt, un océan, ou bien l'ensemble de la biosphère.

On peut aussi ne s'intéresser qu'à la notion fonctionnelle que sous-entend ce mot et considérer alors qu'il s'agit d'un concept abstrait, quitte à l'appliquer ensuite à des communautés définies par ailleurs et bien matérialisées.

Les constituants d'un écosystème

La vie des êtres vivants suppose un apport énergétique; celui-ci peut provenir d'êtres vivants pour ceux se nourrissant à partir d'organismes préexistants, mais en dernière analyse l'énergie du rayonnement solaire est la source d'énergie primitive. Dans un écosystème, les organismes capables de capter l'énergie pour la transformer en énergie potentielle chimique sous forme de matière organique sont les *producteurs*. Leur ensemble forme le constituant de base de tout écosystème.

Les **producteurs** sont principalement les végétaux verts (Algues, végétaux supérieurs), à pigments chlorophylliens, capables de fixer l'énergie lumineuse pour former, à partir du CO_2 de l'air et de l'eau, de la matière organique par un processus nommé *photosynthèse*. Des végétaux possédant en outre d'autres pigments comme les Algues brunes, les Algues rouges (ainsi que certaines Bactéries, qui ont des bactériochlorophylles) sont aussi photosynthétiques.

On peut traduire simplement le bilan de la formation de la synthèse organique, en considérant le cas de la production du glucose :

$6\ CO_2 + 6\ H_2O +$ énergie (673 kcal) $\rightarrow C_6H_{12}O_6$,

la synthèse des autres molécules organiques s'effectuant par d'autres réactions complémentaires.

Certains organismes sont capables d'utiliser d'autres formes d'énergie sans avoir besoin de matières organiques préexistantes : ainsi, certaines Bactéries, dites chimiosynthétiques, obtiennent leur énergie par l'oxydation de composés chimiques simples non organiques. Ainsi : *Nitrosomas* qui oxyde NH_3 en NO_2; *Nitrobacter* qui oxyde NO_2 en NO_3; *Beggiatoa* qui oxyde SH_2 en S et S en SO_4; dans ce cas le carbone provient aussi de CO_2 assimilé à partir de l'air. Leur importance relative dans la fixation d'énergie est cependant faible. Les producteurs n'utilisant que des matières minérales fournies par le milieu abiotique pour la synthèse de leurs matières vivantes sont qualifiés d'*autotrophes*. Les producteurs, appelés *producteurs primaires,* constituent le point de départ de chaînes alimentaires ou trophiques, ensembles successifs d'êtres vivants hétérotrophes, se nourrissant à partir des niveaux trophiques précédents.

Les consommateurs ont, pour source d'énergie, l'énergie potentielle chimique existant dans les substances organiques déjà formées par d'autres êtres vivants. Ils sont donc par définition *hétérotrophes*.

On distingue les *consommateurs de premier ordre* qui se nourrissent directement aux dépens des producteurs. Ce sont évidemment les animaux herbivores (Mammifères, Insectes) mangeant de l'herbe, mais aussi les feuilles, graines et fruits, bois, organes souterrains... Il peut y avoir destruction totale de l'organisme végétal (cas du plancton végétal par exemple), destruction d'une partie seulement (broutage), exploitation de l'hôte par parasitisme (soit animal, soit végétal) qui pendant un temps au moins ne provoque pas la mort de l'hôte. Ces consommateurs de premier ordre sont aussi des « producteurs secondaires », la différence essentielle avec les producteurs primaires étant qu'ils ne tirent pas directement leur énergie du soleil, et qu'ils dépendent donc de ceux-ci.

Les *consommateurs de second ordre,* se nourrissant des précédents, sont des carnivores ou des parasites animaux pour lesquels les herbivores sont la source de nourriture.

Les *consommateurs de troisième ordre,* carnivores ayant comme principale source de nourriture les consommateurs du deuxième ordre eux-mêmes carnivores. Il peut exister des consommateurs d'ordre supérieur comme les parasites des consommateurs de deuxième ordre.

Les bioréducteurs forment une autre catégorie des constituants essentiels de l'écosystème : leur caractère fondamental est de fournir, à nouveau, au milieu les éléments minéraux. Les organismes *bioréducteurs* (terme qu'il faut préférer à celui de décomposeur) assurent en effet la minéralisation de la matière organique à partir des détritus végétaux, cadavres animaux et déjections : ce sont des *saprophytes* (du grec sapros : pourri), essentiellement des Bactéries, des Champignons et aussi des animaux de petite taille appartenant à des groupes divers. Il est évident que la matière organique soumise à leur activité provient de l'ensemble des catégories citées précédemment et aussi de leur propre catégorie. Si l'on excepte les petits Invertébrés, les bioréducteurs (Bactéries, Champignons) n'ingèrent pas la matière organique mais rejettent des enzymes à l'extérieur et ce sont les produits dégradés et digérés qui sont absorbés. Par cette activité ou au moment de la mort des organismes, la décomposition de la matière organique permet la libération des éléments minéraux dans le milieu.

Ces éléments minéraux, y compris le gaz carbonique libéré dans l'atmosphère ou l'eau, peuvent alors être repris par les producteurs primaires autotrophes. On perçoit donc la nature cyclique du mouvement des substances minérales, notamment.

Définir exactement, pour une espèce donnée, l'appartenance à l'un des groupes de constituants de l'écosystème n'est pas toujours facile. Tout d'abord, le régime alimentaire peut être varié : c'est le cas des « omnivores » (dits encore diversivores), comme l'ours, l'homme, le porc... Certains animaux, comme le renard, réputé carnivore, ont en réalité un régime alimentaire changeant au cours de l'année : ainsi les baies et autres fruits peuvent, pour le renard, constituer près de la moitié de l'alimentation en été et en automne. Le changement de régime peut coïncider avec différents stades de vie : chez les papillons, la chenille est très souvent phytophage et l'adulte se nourrit de nectar. Dans le groupe des bioréducteurs (dits encore détritivores), les animaux charognards (hyènes, vautours, chacals) ou nécrophages (Insectes comme le nécrophore) ne sont pas fondamentalement différents des carnivores, surtout si les cadavres qu'ils consomment sont frais. De même, les lombrics du sol qui se nourrissent de débris végétaux plus ou moins reconnaissables, depuis la feuille morte jusqu'aux débris plus ténus, ont surtout un rôle qui consiste à fragmenter davantage la matière organique

▼ ***Les vautours* (Gyps fulvus), *comme la plupart des animaux charognards, appartiennent, bien que se nourrissant de cadavres en début de décomposition, aux niveaux trophiques des carnivores d'ordre élevé.***

E. Hosking

N. Cirani

▲ *Si l'on applique la notion d'écosystème à la* toundra *(ici un aspect de la toundra arctique [extrême nord de l'Alaska]), on remarque qu'à l'intérieur de ce système coexistent plusieurs sous-systèmes tels que des landes, des marais, des tourbières, etc.*

▼ *A l'opposé, une touffe de Mousses (ici* Leucobryum glaucum*) est aussi un écosystème, petit, mais déjà complexe.*

Ruffier - Lanche - Jacana

dont on retrouve une partie dans leurs excréments; les espèces, autres que les Bactéries ou Champignons, qui se nourrissent des excréments, comme le bousier, ont un comportement alimentaire assez voisin de celui des vers de terre. Parmi les saprophytes, Bactéries et Champignons, réalisant une bioréduction ou minéralisation, il peut exister des chaînes trophiques à l'intérieur même du groupe, avant que la libération de la matière organique soit complète.

Chaînes et réseaux trophiques

Les séquences, formées par les différentes catégories d'organismes constituant l'écosystème et ordonnées de façon que la suivante dépende de la précédente, sont des chaînes alimentaires ou *chaînes trophiques*. Des exemples très simples sont souvent donnés (la flèche, →, signifiant *« est mangé par... »*) : herbe → lapin → renard — ou Lichen → renne → homme, ou encore herbe → veau → homme. Ces chaînes peuvent être plus longues comme : plancton végétal → plancton animal → lançon → hareng → cormoran; ou encore : chêne → chenille → mésange → épervier. Certaines chaînes comportent, bien sûr, la participation de parasites.

En réalité les remarques faites à propos du régime alimentaire et des sources de nourriture rendent la relation linéaire, exprimée par chaîne trophique, difficile à appliquer, et, lorsqu'on dresse, pour un écosystème, le schéma des relations alimentaires entre les organismes qui y participent, on aboutit vite à figurer un réseau, d'où la notion de *réseau trophique* plus conforme à la réalité. De fait, on cherche cependant toujours à effectuer un regroupement selon quelques maillons (3 ou 4) qui correspondent aux catégories composant l'écosystème : producteurs primaires, consommateurs de premier ordre, consommateurs de deuxième ordre et consommateurs de troisième ordre, auxquels on adjoint, à part, les décomposeurs ou bioréducteurs. Pour ces différents « maillons » on parle alors de *niveaux trophiques*, les producteurs primaires formant le niveau de base.

Dimensions de l'écosystème

Le concept d'écosystème repose sur deux notions : celle de fonctionnement et celle de relations entre les divers éléments le composant. En principe, rien ne

s'opposerait à utiliser ce concept pour étudier un territoire quelconque; en réalité, la définition générale d'un système implique que ce système soit bien défini et que l'ensemble des relations entre les éléments internes au système soit plus important que les relations possibles avec d'autres systèmes extérieurs. Toutes les fois que ce sera possible, on s'efforcera donc de considérer l'écosystème formé par une biocénose, dont on sait qu'elle est définie par une relative homogénéité de composition floristique et faunistique, de structure, d'organisation et de conditions écologiques. En réalité l'échelle d'appréhension pourra être extrêmement variée, selon le niveau d'intégration de systèmes ou de sous-systèmes que l'on réalisera.

Par exemple, si l'on applique la notion d'écosystème à la toundra, biome défini par sa situation dans une zone climatique donnée et par la relative homogénéité physionomique de sa végétation, il faut savoir qu'il existe cependant, à l'intérieur de ce système, plusieurs sous-systèmes correspondant à des landes, à des marécages, à des zones côtières... susceptibles d'être pris en compte, chacun séparément. Dans l'océan, au contraire, il est bien difficile d'établir des divisions territoriales et l'intégration en un grand écosystème est presque obligatoire. L'intégration la plus poussée que l'on puisse réaliser est celle qui consiste à envisager l'ensemble de la terre comme un écosystème : c'est la biosphère ou écosphère. A l'opposé, l'étendue d'un écosystème peut être très réduite. Ainsi, une touffe de Mousses, un système artificiel constitué par une limnée et un brin d'élodée enfermés dans une ampoule de verre remplie d'eau et scellée sont des écosystèmes petits mais déjà assez complexes. Dans ces quelques cas, tous les niveaux trophiques, y compris celui des producteurs primaires photosynthétiques, sont présents. Mais, on étudie parfois, comme des écosystèmes, des ensembles incomplets sur ce point : par exemple, le sol est certes un système complexe mais entièrement dépendant de la matière organique en provenance d'autres systèmes; beaucoup de milieux aquatiques de petite taille sont dépendants des alentours, non seulement pour leur alimentation en eau, mais aussi pour un apport parfois important de matière organique. Et que dire aussi de l'écosystème « ville » entièrement lié aux systèmes agricoles extérieurs? Il faudra donc, chaque fois que l'on souhaite étudier un écosystème, garder à l'esprit la nécessité de déterminer ses relations avec l'extérieur : on peut distinguer ainsi des *écosystèmes fermés,* à fonctionnement autonome sur place et ayant peu de relations avec d'autres systèmes, et des *écosystèmes ouverts*. Comme le fait remarquer Duvigneaud (1974) : « Dans de nombreux cas, rien n'empêche de donner au concept d'écosystème un sens plus large, si, comme l'étymologie l'indique, on considère un *système écologique :* un paysage défini, voire une région déterminée, peuvent constituer des systèmes écologiques fonctionnels particulièrement efficaces. Dans l'élément de paysage, les écosystèmes élémentaires sont unis par des rapports latéraux étroits. » L'unité de type géographique le plus souvent étudiée dans cet esprit est le bassin-versant; l'application récente à des régions agricoles, telle qu'elle est envisagée par Vieira da Silva (1973) et telle qu'elle a été conduite par J. de Moraïs (1974), en Angola, semble aussi très prometteuse, pour les régions en voie de développement, sur le plan de la recherche d'une stratégie agricole.

Méthodes d'étude de l'écosystème

Une bonne connaissance du fonctionnement d'un écosystème nécessite l'obtention, par les travaux de recherche, d'un certain nombre de données. En supposant que l'on travaille sur une biocénose bien définie, les renseignements dont on peut disposer à propos de la composition floristique et faunistique, de la structure, de l'évolution saisonnière, et éventuellement sur plusieurs années, représentent des éléments préalables fort utiles.

La description du fonctionnement de l'écosystème proprement dit se fait en essayant de quantifier le mieux possible :

— d'une part, les échanges de diverses substances ou éléments chimiques dans le cadre des cycles biogéochimiques;

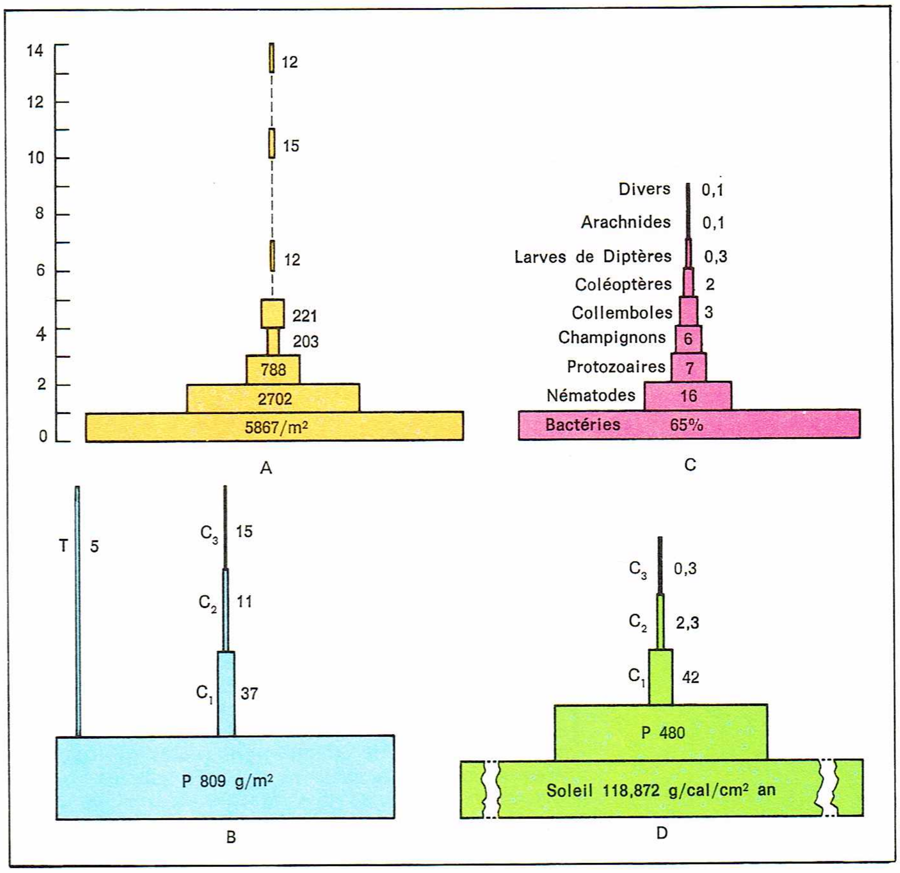

I.G.D.A.

▲ *Représentation schématique de pyramides écologiques de :*
A, nombre d'animaux par surface selon les diverses classes de taille;
B, biomasse par surface des différents niveaux trophiques (poids sec);
C, activité métabolique pour divers groupes animaux et végétaux en % du total;
D, productivité brute des divers niveaux trophiques.

— d'autre part le flux d'énergie parvenant à l'écosystème et son utilisation à l'intérieur de celui-ci.

La première démarche n'est pas toujours réalisée complètement et la présentation des cycles biogéochimiques pour les éléments gazeux (gaz carbonique et oxygène), pour l'eau, pour l'azote et pour les éléments minéraux (macro-éléments et micro-éléments) se fait généralement à l'échelle de la biosphère. Il faut cependant savoir qu'un cycle biogéochimique peut être envisagé au niveau d'un écosystème, même d'étendue restreinte : Duvigneaud et son école (1971) ont réalisé, par exemple, une très belle étude sur les cycles des éléments minéraux dans une forêt belge.

Les études sur le bilan énergétique, le flux d'énergie et son utilisation ne sont d'ailleurs pas indépendantes de données à rattacher à l'étude des cycles. En effet, elles reposent essentiellement sur l'évaluation de la biomasse et de la productivité, annuelle le plus souvent, des principaux constituants : la connaissance du cycle de la matière organique est déductible pour sa plus grande part de celle des cycles du carbone et de l'azote.

L'expression des résultats est résumée très fréquemment sous forme de schémas par des pyramides écologiques (pyramides des nombres, des biomasses, des productivités, des énergies), ou par des modèles « hydrauliques » figurant le flux énergétique. Parmi les techniques mises en œuvre, les plus importantes sont celles qui permettent la détermination des biomasses et des productivités. Il est aussi nécessaire de connaître les régimes alimentaires, pour établir les réseaux trophiques.

Pour déterminer les régimes alimentaires, plusieurs techniques ont été utilisées dont certaines sont très originales. Dans quelques cas, on peut observer directement le prélèvement fait aux dépens de certaines plantes par l'animal : cela a été réalisé pour le lièvre, par Andersen, qui se servait d'un petit télescope. Mais la méthode la plus courante est l'analyse des contenus stomacaux, qui impose de tuer l'animal étudié; elle permet l'identification de certains débris solides : dents, fragments de squelette, coquilles, tégument des Insectes et autres Arthropodes, poils, sabots, ongles... mais elle est forcément très imparfaite si les liquides ou les parties molles d'une proie sont surtout consommés. Des cas particuliers n'obligent pas à détruire l'individu étudié : ainsi,

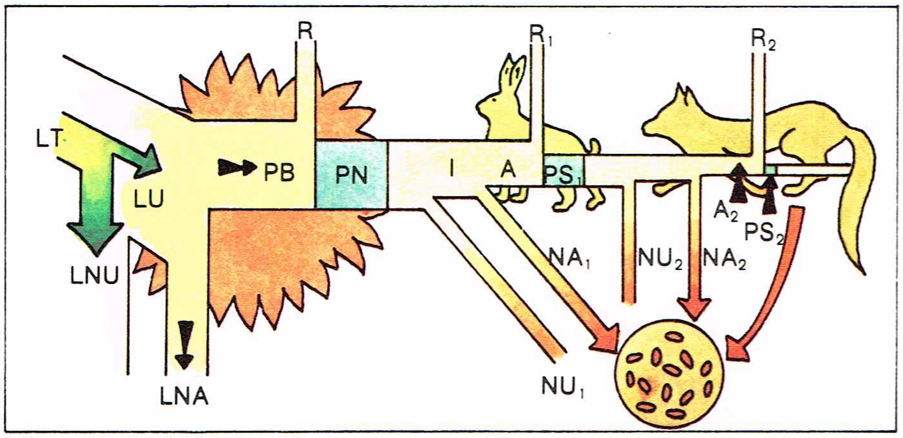

Richard Colin

▲ ***Représentation schématique des transferts d'énergie à travers les trois niveaux principaux d'une chaîne trophique. (d'après Duvigneaud)***

dans les pelotes de régurgitation des rapaces, on retrouve de nombreux débris qui donnent une bonne idée du régime alimentaire.

Parmi les méthodes plus élaborées figurent l'utilisation des radio-isotopes et la méthode sérologique. Dans la première on utilise un radioélément comme le phosphore ou le césium radioactifs (P_{32} et Cs_{137}). Odum et Kuenzler (1963) ont fourni à des pieds de trois espèces de plantes, la petite oseille *(Rumex acetosella)*, une Graminée *(Sorghum halepense)* et *Heterotheca subaxillaris*, une solution contenant du phosphore radioactif qui est très rapidement absorbé au niveau des racines; ils ont ainsi montré que c'était un grillon et une fourmi qui se nourrissaient le plus activement sur ces plantes, car ils deviennent radioactifs les premiers au bout de une à deux semaines. Des prédateurs comme les Araignées ne le deviennent que plus tard et certains animaux comme les succines (Gastéropodes) ne sont que très faiblement radioactifs. Au contraire certains buveurs de nectar présentent une radioactivité importante très rapidement.

La méthode sérologique qui a été employée chez les Insectes pour la détermination des régimes alimentaires est la suivante. Si on suppose qu'une espèce A est consommée par diverses espèces prédatrices, on injecte de l'hémolymphe de cette espèce A à un lapin : à partir du sang de ce dernier, se forme un sérum anti-A dont on vérifie s'il agglutine ou non l'hémolymphe des prédateurs présumés (Fox et Mac Lellan, 1956; Dempster, 1960).

Flux d'énergie à travers l'écosystème

Schéma général de l'utilisation de l'énergie

La première étape est l'entrée de l'énergie dans le système biologique *sensu lato* que constitue l'écosystème. La source d'énergie est le rayonnement solaire, et l'assimilation de l'énergie se fait par l'intermédiaire des végétaux verts chlorophylliens qui sont les producteurs primaires.

Dans le rayonnement solaire, la partie afférente au rayonnement infrarouge, producteur de chaleur, n'est pas absorbée bien qu'il puisse influencer, dans leur rapidité notamment, les processus biologiques. Seule la lumière est susceptible d'être captée au niveau des pigments chlorophylliens ou assimilés, mais, sur la lumière totale (LT), une partie importante est perdue, surtout par réflexion (lumière non utilisée : LNU). Sur la partie réellement utilisée par la plante (lumière utilisée : LU) une partie est dissipée sous forme de chaleur lors de la transpiration et n'est donc pas absorbée pour la formation de matière organique (LNA : lumière non absorbée). La partie absorbée sert à synthétiser les glucides et correspond à la photosynthèse brute (PB); une partie des glucides formés est perdue pour le processus respiratoire (respiration : R). La matière organique formée, soit glucides, soit substances autres en dérivant, constitue la photosynthèse nette PN; celle-ci est matérialisée par la masse du végétal, dite biomasse (si l'on considère toute la matière formée et que l'on suppose qu'il n'y a pas eu de pertes), ou par la productivité primaire, qui est l'accroissement de la biomasse pendant un temps donné. Une partie de l'énergie lumineuse qui correspond initialement à un rayonnement physique est donc en définitive transformée en énergie potentielle chimique contenue dans les substances formées, le reste ayant été dissipé sous forme de chaleur (transpiration, respiration) ou réfléchi ou diffusé.

Si l'on considère le niveau trophique suivant, celui des *consommateurs* de premier ordre ou herbivores, leur nourriture s'effectue à partir d'un prélèvement (I_1 : quantité ingérée) sur les produits de la photosynthèse nette PN (NU_1 étant la partie de PN non utilisée). Sur la quantité I_1 d'aliments ingérés par l'herbivore, une partie n'est pas assimilée (NA_1) et se retrouve dans les excréments et l'urine; de la partie assimilée (A_1), seule une fraction participe à la production nette de matière vivante qu'on nomme production secondaire (PS_1), le reste étant utilisé au fur et à mesure pour la respiration (R_1).

Pour un carnivore se nourrissant de l'herbivore précédent, et prenant place au niveau trophique des *consommateurs de deuxième ordre*, on peut définir les mêmes quantités NU_2, I_2, NA_2, A_2, PS_2, R_2. Les quantités NU_1, NA_1, NU_2, NA_2... constituent la source d'aliments du niveau trophique des décomposeurs, pour lequel des chaînes semblables fonctionnent. En définitive toute l'énergie réellement entrée dans ce système biologique, après un passage pour partie sous forme d'énergie potentielle chimique, se retrouve dissipée sous forme de chaleur.

Non seulement ce schéma général linéaire ramifié doit être appliqué aux réseaux trophiques dans toute leur complexité, mais on doit encore, et c'est le plus important, pouvoir chiffrer, pour un écosystème donné, les grandeurs définies ou, tout au moins, une certaine partie d'entre elles, lorsque les autres sont susceptibles d'être obtenues indirectement par différence, par exemple. Dans le cas des producteurs primaires, comme les plantes vertes, la production nette PN correspond à la récolte assez facile à connaître, mais il est nécessaire de mesurer aussi soit la productivité brute PB, soit la respiration R et, en outre, les quantités LNA, liée à la transpiration, et LT, énergie lumineuse totale.

Pour les animaux, il faut connaître la nature et la quantité d'aliments ingérés pour être à même d'établir un bilan nutritionnel. Ce bilan doit fournir : d'une part, la quantité d'aliments ingérés I et la quantité d'excréments NA rejetés pendant 24 h, d'autre part le poids de l'animal relevé chaque jour. La valeur calorifique des aliments et excréments peut être obtenue par l'usage d'une bombe calorimétrique; dans le cas des aliments, si on connaît leur composition on peut calculer approximativement leur valeur calorifique en s'aidant de valeurs moyennes tenant compte de la plus ou moins grande proportion relative des glucides, lipides, et protides. Les différences entre les poids journaliers donneront la production secondaire nette PS et, en tenant compte de l'apport alimentaire et des excréments, on obtiendra la valeur de R; on pourra donc en déduire A. La quantité R correspond à l'ensemble des dépenses de calories assimilées qui ne servent pas à l'accroissement de poids de l'animal (PS) : ces dépenses sont les dépenses dites de maintenance qui comprennent les dépenses d'entretien (métabolisme de base) et les dépenses d'activité (déplacements et mouvements).

Biomasses et productivité

On désigne par *biomasse* la masse à un instant déterminé d'un organisme vivant, ou d'une population, ou d'une communauté étudiée comme écosystème. Elle s'exprime par unités de surface (pour les groupements terrestres) ou de volume (pour les biocénoses aquatiques) en grammes, kilogrammes ou tonnes de matière sèche; toutefois, pour les animaux, on utilise parfois les poids vifs.

On cherche aussi, le plus souvent, à donner l'équivalent en calories. Lors de l'étude d'un écosystème, on exprime les biomasses à chaque niveau trophique. Les parties mortes, la litière, l'humus, la matière organique des excreta qui ne constituent plus une partie de la biomasse, au sens étymologique du terme, peuvent être considérés comme une « nécromasse » *sensu lato*, constituant un niveau servant de source de nourriture aux décomposeurs et bioréducteurs. Duvigneaud, en 1974, a proposé pour « l'ensemble de toute la matière organique, vivante ou morte, comprise dans l'écosystème... de parler de matière organique totale de l'écosystème » (M.O.T.).

La *productivité* est la vitesse de production de la biomasse ; elle s'exprime par l'accroissement de la biomasse pendant un intervalle de temps déterminé. En se servant d'une image simple, on peut dire que « la productivité est à la biomasse ce que l'intérêt est au capital ». On parle de *productivité primaire* pour ce qui concerne les végétaux photosynthétiques, tirant leur énergie directement du rayonnement solaire, et de *productivité secondaire* à propos de tous les autres organismes, consommateurs ou décomposeurs, qui initialement ont leur source d'énergie à partir de la catégorie précédente.

La **mesure des biomasses** pose de difficiles problèmes, tant sur le plan de la définition exacte des quantités mesurées, que sur celui des techniques à utiliser.

Pour la végétation terrestre, une méthode apparemment simple est celle de la récolte sur des surfaces échantillons convenablement choisies. Ainsi, il est aisé de recueillir Mousses, Lichens, parties aériennes des plantes supérieures herbacées, mais pour des racines il faut opérer un tri soigneux entre celles-ci et les particules minérales du sol : la séparation des divers éléments est délicate. Quand il s'agit de formations forestières, la méthode précédente, dite « destructrice », doit être entreprise sur des surfaces de quelques centaines de mètres carrés : elle est longue, coûteuse et présente l'inconvénient de ne pas permettre aisément la répétition sur plusieurs échantillons. C'est pourquoi, dans ce cas, on utilise des méthodes indirectes, notamment pour les arbres, où l'on s'inspire des mesures effectuées classiquement par les forestiers lors du cubage des bois. On a établi, pour d'assez nombreuses essences forestières, des tables permettant de déduire approximativement plusieurs données comme la biomasse du tronc, celle des branches, à partir d'une seule mesure, celle du diamètre du tronc à 1,30 m de hauteur. Pour les feuilles, s'il s'agit d'arbre à feuilles caduques, on recueille la litière au sol. On conçoit que les difficultés sont encore bien plus grandes quand il s'agit de connaître le poids des racines d'un arbre : il faut déterrer et séparer soigneusement un système racinaire parfois très développé latéralement et en profondeur. En réalité, la mesure directe de la biomasse des organes souterrains des arbres n'a été faite que rarement et, là aussi, on se sert de corrélations permettant des calculs indirects. La production de fruits (faînes, glands) est souvent pondéralement très importante et il ne faut pas la négliger.

Pour les animaux, l'obtention de la biomasse passe par une connaissance précise des différentes populations animales en ce qui concerne non seulement leur importance numérique totale mais encore leur structure démographique complète : effectifs pour les différents stades dans le cas des Insectes par exemple, effectifs dans les différentes classes d'âges pour les Mammifères... Il est souvent indispensable de séparer en outre les sexes, et l'on doit donc en définitive connaître les poids individuels selon l'âge et le sexe, ce qui est parfois très difficile à obtenir pour les espèces non domestiques.

Pour la microfaune et surtout pour les micro-organismes du sol des mesures de biomasse sont encore plus aléatoires et plus imprécises. Les mesures concernant la microflore de Bactéries et de Champignons sont relativement peu abondantes et il s'agit souvent d'évaluations approximatives : la biomasse en question est pourtant souvent considérable.

Pour les **mesures de productivité** il faut être à même d'évaluer des différences de biomasse entre deux instants donnés. Très généralement la productivité s'exprime sur un an, mais, quelquefois, on se réfère à des unités de temps plus courtes, la journée par exemple, ce qui correspond à des valeurs de la productivité en quelque sorte instantanées. Les difficultés de mesure sont les mêmes sur le fond que pour la biomasse, mais cependant multipliées par deux puisqu'en théorie il faut deux mesures différentielles pour obtenir une donnée.

En réalité, pour les mesures de *productivité primaire* la méthode de la récolte ne s'applique qu'à des groupements végétaux herbacés dont le rythme annuel est bien marqué ; elles sont réalisées plus commodément s'il s'agit de cultures de plantes annuelles par exemple. Pour les autres groupements terrestres comme les landes et les forêts et surtout pour les écosystèmes aquatiques, on a recours à des méthodes d'évaluation indirecte. Dans le cas d'un écosystème forestier comme pour la

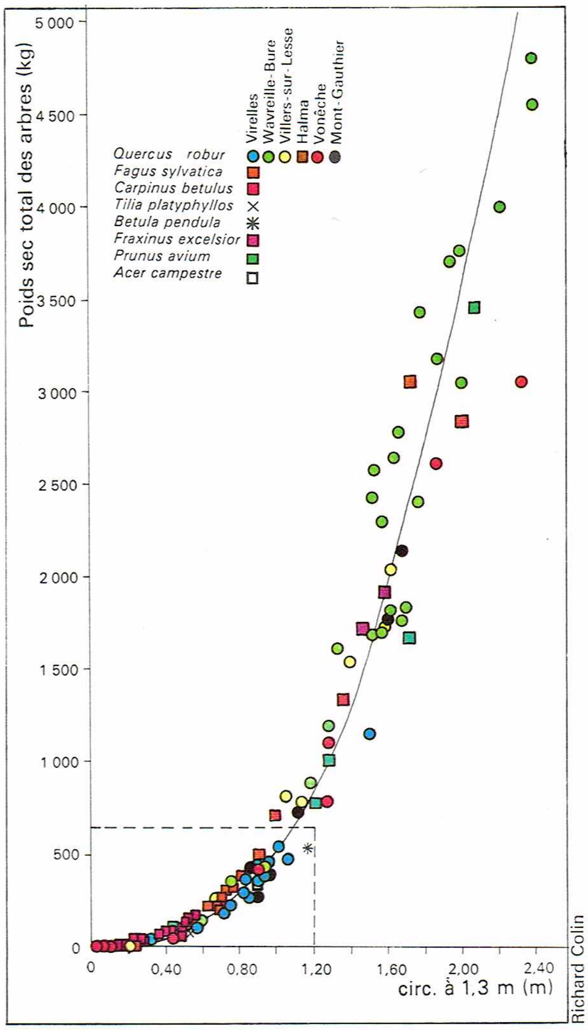

◀ ***Représentation graphique de la relation entre le poids des arbres et la circonférence à 1,30 m, pour 8 essences caducifoliées appartenant à 6 écosystèmes forestiers distincts de Haute-Belgique (d'après P. Duvigneaud;* la Synthèse écologique-*Doin).***

biomasse, l'utilisation de corrélations à partir de quelques grandeurs faciles à obtenir est la règle. On peut aussi utiliser la quantité de gaz carbonique absorbé ; on mesure la variation de taux de gaz carbonique de l'air passant dans une enceinte transparente contenant une petite surface de végétation ou un rameau ; si l'on souhaite obtenir la productivité brute, il faut réaliser la même mesure à l'obscurité : la productivité est proportionnelle à la somme de la quantité de gaz carbonique absorbée à la lumière (photosynthèse apparente) et de celle rejetée à l'obscurité (respiration).

En milieu aquatique une méthode analogue est employée : elle consiste à mesurer l'oxygène rejeté dans un certain volume d'eau contenant du phytoplancton. La mesure nécessite l'utilisation de deux bouteilles, l'une opaque, l'autre transparente à la lumière ; dans la première le taux d'oxygène baisse à cause de la respiration du phytoplancton et éventuellement du zooplancton ; dans la seconde la libération d'oxygène correspond à la photosynthèse apparente du phytoplancton ; la somme des taux d'oxygène dans les deux bouteilles au bout d'un temps fixe est proportionnelle à la productivité primaire nette. D'autres méthodes utilisent des éléments radioactifs : l'une d'elles, notamment, est fondée sur la mesure de la vitesse d'incorporation du C_{14}, carbone radioactif.

Les résultats obtenus pour la mesure de la productivité sont assez variables à cause des difficultés de mesure et de la diversité des écosystèmes étudiés : cependant, un ordre de grandeur peut être fourni et permettre une comparaison entre les différents grands types d'écosystèmes ; d'après Odum, la productivité primaire brute exprimée en grammes de matière sèche produite par m² et par jour est :

— inférieure à 0,5 g/m²/jour pour les déserts et l'Antarctique ;

— comprise entre 0,5 et 3 g/m²/jour pour les steppes,

les savanes, les lacs profonds, les forêts de Conifères de montagne, les zones d'agriculture temporaire;

— de 3 à 10 g/m²/jour pour les lacs peu profonds, les zones d'agriculture permanente et les forêts humides.

Les plus fortes productivités s'observent pour les zones de culture intensive, pour les estuaires, les récifs de coraux et les marais littoraux comme la mangrove; les océans ont une productivité faible, inférieure à 0,5 g/m²/jour pour la zone située en dehors des plateaux continentaux; pour ces derniers les valeurs varient entre 0,5 et 3 g/m²/jour.

La *productivité secondaire* est encore bien plus difficile à estimer car il faut au moins pouvoir évaluer la variation pondérale des populations entre deux instants, ce qui suppose une parfaite connaissance des nombres d'individus et de leur poids. En outre, si l'on veut pouvoir juger du rôle des animaux dans les écosystèmes, il est indispensable de connaître les régimes alimentaires, de fixer l'appartenance d'une espèce à un ou plusieurs niveaux trophiques, de procéder à des bilans nutritionnels. Les données relatives à la productivité secondaire varient beaucoup selon les espèces, et les renseignements les plus abondants se rapportent à des animaux soit domestiques ou d'élevage, soit exploités par la pêche ou la chasse. Il est très fréquent d'ailleurs qu'on ne puisse fournir pour les animaux que des données concernant la biomasse; mais il y a généralement une certaine proportionnalité entre biomasse et productivité, et ces valeurs ont donc une valeur certaine d'information, surtout pour des comparaisons.

On peut ainsi indiquer, en se référant à des valeurs obtenues par divers auteurs et rassemblées surtout par Lamotte et Bourlière, que les biomasses exprimées en tonnes de poids vif par km² sont, par exemple, pour des Mammifères herbivores sauvages :

— de 24,4 t/km² dans des plaines du Parc national Albert (Congo);

— de 13,2 t/km² pour une steppe en pays Masaï (Kenya);

— de 3,5 t/km² pour la prairie américaine dans le Montana;

— de 1 t/km² pour une forêt à Cervidés d'Écosse;

— de 0,8 t/km² pour la toundra à caribous;

— de 0,08 t/km² pour une steppe dans la zone du Sahel (Tchad).

Pour les Oiseaux, les chiffres, exprimés en kg par km², sont extrêmement variables et vont de 0,5 pour une lande à bruyères du nord-ouest de l'Allemagne à 130 pour des rivages marins, en passant par 58 pour une forêt mixte finlandaise. La biomasse des Invertébrés, malgré la petite taille des individus qui la forme, est parfois considérable et parfaitement comparable à celle des Mammifères herbivores; ainsi, pour une savane herbacée (à Andropogonacées) de la Guinée, au moment de la saison des pluies, les Invertébrés représenteraient 25 t de poids frais par km²; et pour la sansouire de Camargue 5,5 t par km².

Pour le milieu aquatique, d'assez nombreux chiffres sont avancés, très souvent issus de données statistiques sur la pêche en mer (données de la F.A.O.); en eau douce, les essais de pisciculture fournissent aussi une grande part des données. Ces données seront fournies au cours de l'étude plus détaillée des communautés aquatiques marines et d'eau douce.

Les rendements

En écologie, la notion de rendement utilisée est une notion de rendement énergétique, donc identique à celle utilisée à propos des moteurs par exemple. On veut en effet se rendre compte de l'efficacité des « rouages » de l'écosystème, soit en considérant un de ses éléments (population d'une espèce avec son bilan nutritionnel), soit en envisageant le passage d'un niveau trophique à un autre. Le rendement agronomique d'une culture (*n* quintaux de blé à l'hectare) est une productivité ou production primaire partielle; le terme rendement a alors un sens différent.

Plusieurs rapports définissent des rendements écologiques :

— Le rapport $\frac{PN}{LT}$, productivité nette sur lumière totale, qui représente l'*efficacité photosynthétique;* ce rapport est généralement très faible, de l'ordre de 1 % et parfois moins.

— Des rapports significatifs de l'*efficacité écologique* du passage d'un niveau trophique au niveau immédiatement supérieur; on distingue :

● le rendement de l'énergie apportée à un niveau trophique donné : $\frac{I_2}{I_1}, \frac{I_3}{I_2}, ...,$ et $\frac{I_1}{LU}$, dans le cas du rapport de l'énergie ingérée par les consommateurs primaires à l'énergie utilisée par les producteurs primaires;

● le rendement de l'assimilation à un niveau trophique donné, soit $\frac{A_2}{A_1}, \frac{A_3}{A_2}, ...,$ et $\frac{A_1}{PB}$ dans le cas des consommateurs primaires; ce sont des rapports souvent utilisés mais assez difficiles à obtenir;

● le rendement de la production à un niveau trophique donné, obtenu par les rapports des productivités nettes : $\frac{PS_1}{PN}, \frac{PS_2}{PS_1}, \frac{PS_3}{PS_2}...$ qui sont donc les plus immédiatement accessibles par les méthodes de « récolte » et de pesée.

En pratique ces rapports pour un même niveau trophique sont assez voisins les uns des autres, et, dans l'ensemble, on donne pour eux un ordre de grandeur de l'ordre de 10 %; cependant, les observations réalisées

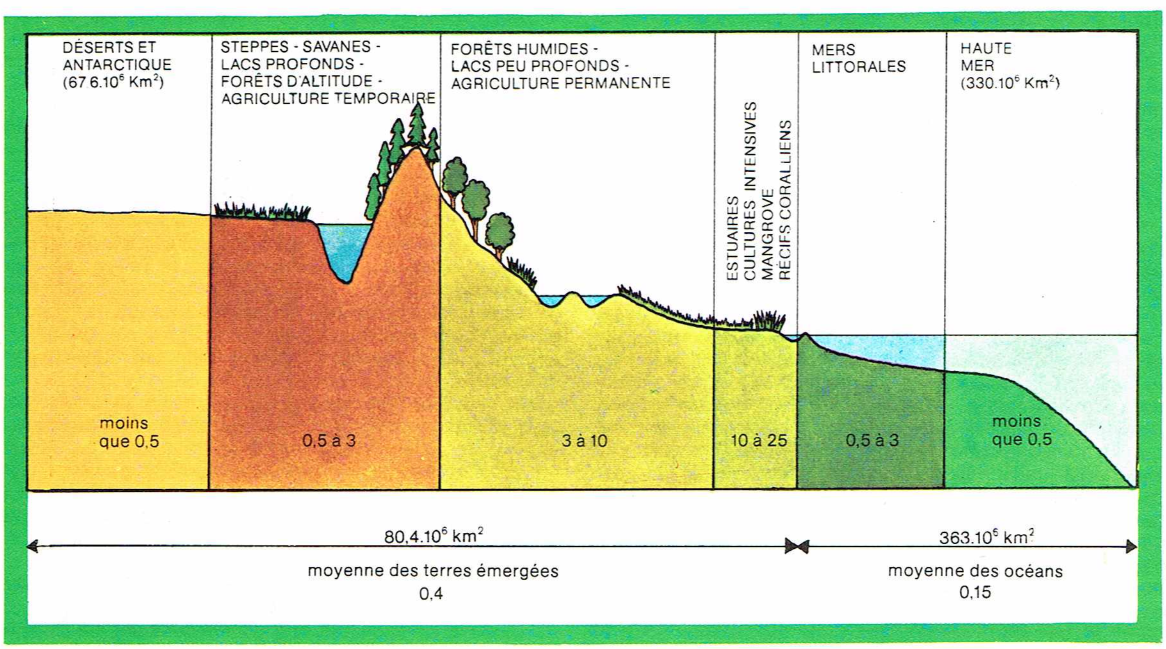

▶ **Productivité primaire brute** *en grammes de matière sèche par m² et par jour pour les grands types d'écosystèmes de la biosphère (d'après Odum; Dajoz,* Précis d'écologie, *Dunod).*

Marka

▲ ***Les* écosystèmes « jeunes », *telle cette agriculture moderne dans le Texas, ont plutôt un rôle de* production en quantité.**

montrent qu'ils sont souvent bien inférieurs. Le schéma fourni par les pyramides énergétiques de productivité permet une appréciation presque immédiate de ces rapports par la comparaison de la longueur des deux segments contigus.

— Les rapports tels que $\frac{PS_1}{I_1}, \frac{PS_2}{I_2}$... qui expriment le *rendement écologique de croissance;* on calcule le rapport de la quantité de matière vivante produite par rapport à la quantité de matière ingérée : cette notion est utilisée par les éleveurs, lorsque, par exemple, ils évaluent la quantité d'herbe ou d'aliments qui a été nécessaire pour produire telle quantité de viande.

— *Le rendement d'assimilation* $\left(\frac{A_1}{I_1}, \frac{A_2}{I_2}...\right)$ et le *rendement de production* $\left(\frac{PS_1}{A_1}, \frac{PS_2}{A_2}...\right)$ traduisent la façon dont une espèce, en tant qu'individu ou population, utilise la nourriture en tenant compte respectivement de la partie de nourriture perdue dans les excréments et de la partie d'énergie perdue par la respiration; le rendement d'assimilation s'exprime aussi, pour les producteurs primaires, par $\frac{PB}{LA}$, rapport de l'énergie correspondant à la productivité brute à l'énergie lumineuse utilisée à la fois pour la transpiration, la respiration ainsi que la production nette.

Caractéristiques générales de l'écosystème

Un écosystème est bien décrit lorsqu'on connait les différents trophiques, les biomasses et les productivités correspondantes, et que l'on peut donner alors un schéma de son fonctionnement énergétique à un moment donné. D'autres éléments, comme la vitesse de recyclage de la matière organique et des éléments, sont aussi à prendre en compte, ainsi que tous les aspects liés à la *dynamique de l'écosystème* qui sont fondamentaux.

En effet, d'une année sur l'autre, les données caractérisant le fonctionnement de l'écosystème varient : il peut s'agir de fluctuations réduites liées aux conditions climatiques générales, mais aussi d'une variation marquant une tendance évolutive et suivant l'évolution même de la biocénose. Si l'on considère une série évolutive simplifiée telle que : sol nu → pelouse → lande → forêt, au fur et à mesure que cette séquence se déroule la biomasse s'accroît à partir de la productivité cumulée des différentes années. Lorsque pour la biocénose le climax est atteint, c'est-à-dire qu'elle est en état d'équilibre avec les conditions climatiques, la biomasse est optimale mais la productivité nette est plus faible. Une autre grandeur nommée *productivité nette de l'écosystème* (PNE) est obtenue en déduisant de la productivité primaire brute PB, non seulement l'énergie perdue par la respiration des producteurs primaires autotrophes eux-mêmes RA ($PB - RA = PN$ = productivité primaire nette), mais en plus celle utilisée par la respiration des hétérotrophes RH (respiration des animaux et des décomposeurs); cette grandeur, PNE, traduit bien dans ses variations l'évolution de l'écosystème. En effet, à l'équilibre climatique, cette valeur, $PB - (RA + RH) = PNE$, est nulle; concrètement, pour une forêt climatique non exploitée par exemple, cela signifie que le bilan entre la matière organique produite dans l'année et sa décomposition dans le sol est nul, bien que la biomasse totale reste inchangée. On dit que l'écosystème est un *écosystème mûr;* les premiers stades d'évolution sont au contraire des *écosystèmes jeunes* ou *immatures*.

Une succession évolutive s'accompagne d'un certain nombre de transformations.

M. Pedone

▲ ***Les** écosystèmes « **mûrs** » comme cette forêt de hêtres au printemps sont importants pour la protection des sols, la régularisation du régime hydrique, les loisirs, l'esthétique... et sont ainsi générateurs d'une **production de qualité**.*

— Sur le *plan énergétique,* alors que la biomasse B s'accroît, la productivité brute PB tend à se stabiliser, le rapport $\frac{PB}{B}$ élevé pour les stades jeunes diminue ensuite ; le rapport $\frac{PN}{B}$ est de même élevé au début, il diminue ensuite mais reprend des valeurs assez fortes au climax ; enfin au terme évolutif PNE = O et PN = M, M représentant la biomasse qui meurt dans un an et PN la productivité primaire annuelle.

— Sur le plan de la *composition biocénotique* et de la *structure :*

● La diversité spécifique s'accroît ; cette grandeur, qui s'exprime par divers coefficients dont le plus connu est celui de Shannon-Wienner, tient compte du nombre d'espèces présentes par unité de surface (variabilité spécifique) et du nombre d'individus par espèce (équitabilité) ; on considère couramment que la diversité favorise la stabilité de l'écosystème. La notion de diversité et sa liaison avec la stabilité ont un caractère général. Ainsi, à l'échelle d'une zone agricole, un territoire de polyculture est plus diversifié qu'une région de monoculture : il est aussi plus stable dans la mesure où il risque moins de perdre toute productivité en cas de conditions climatiques brusquement difficiles, où il est moins sensible au développement rapide d'une épidémie parasitaire, et où même il est moins sujet à une conjoncture économique affectant brutalement le prix d'un seul produit.

Au sein de l'écosystème, la diversité peut se manifester à d'autres niveaux : Margaleff a, par exemple, signalé la diversité biochimique qui résulte de l'augmentation du nombre des pigments assimilateurs au cours d'une succession biocénotique en milieu aquatique. La stabilité ne représente pas une situation figée, mais, au contraire, la possibilité d'une homéostasie permettant de résister à des variations des conditions extérieures et de retrouver un équilibre.

● La structure se complique, et l'organisation spatiale s'affirme : ce sont d'ailleurs aussi les signes d'une augmentation de la diversité. Les chaînes trophiques, qui, dans les premiers stades, sont plutôt linéaires tendent à être remplacées par des réseaux de plus en plus complexes ; parallèlement le rôle des détritivores s'accroît, ainsi que leur diversité spécifique. En ce qui concerne la structure spatiale, l'organisation en strates, pour une forêt par exemple, s'établit peu à peu, chaque niveau étant de plus en plus complexe et mieux adapté à une fonction particulière (feuillages de la couronne des arbres adaptés à un éclairement maximal et ombrageant les strates inférieures ; strates basses formées de plantes sciaphiles aptes à utiliser une lumière d'intensité réduite ; horizons superficiels du sol avec organismes assurant la décomposition des litières...).

— En ce qui concerne les relations avec les autres écosystèmes on distingue, comme nous l'avons déjà signalé : les écosystèmes « ouverts », ayant d'assez nombreux échanges, des écosystèmes « fermés », qui ont peu de relations extérieures ; ce dernier cas est plus fréquent dans le cas de systèmes mûrs, pour lesquels le recyclage de la matière organique et des matières minérales qui lui sont liées, se fait entièrement sur place. Duvigneaud (1974) fait remarquer que, pour l'utilisation par l'homme, les écosystèmes « jeunes » (cultures par exemple) ont plutôt un rôle de production en quantité, alors que les écosystèmes « mûrs » (forêts climatiques ou traitées par prélèvements discrets) sont plus importants pour la protection des sols, la régularisation du régime hydrique, les loisirs, l'esthétique... et sont ainsi générateurs d'une production de qualité. Il note que certains écosystèmes cumulent les deux types de fonctions et propose pour eux le terme d'« écosystèmes de compromis ».

D. La Chaise

Quelques exemples d'écosystèmes

Le but primordial de l'écologiste, qui est de connaître le fonctionnement complet d'un écosystème et de le présenter en unités d'énergie, est très difficile à atteindre dans la pratique. De fait, un nombre très réduit d'écosystèmes ont pu être étudiés de façon assez complète : on pourrait dire qu'ils se comptent sur les doigts de la main, bien que l'effort de recherche scientifique dans ce domaine ait été considérablement amplifié depuis quelques années.

Quelques études sont d'ores et déjà devenues classiques; ce sont essentiellement, pour les premières, des travaux américains :

— ceux d'Odum en 1955 sur le récif de coraux d'Enivetok, et en 1957 sur les marais de Silver Springs en Floride;

— ceux de Teal sur une source froide du Massachusetts (1957) et sur un marais salé de Georgie (1962);

— ceux de Golley (1960) sur un champ en friche du Michigan.

Pour les équipes européennes, plusieurs travaux sont à citer :

— Sur la prairie, pour les élevages bovins, Mac Fayden (1964) en Grande-Bretagne a fourni un bilan complet; en France des données concernant l'écologie prairiale ont été rassemblées par Hedin et Duval (1967), et une étude plus exhaustive de l'écosystème est en cours par Mme Ricou et ses collaborateurs.

— Pour la forêt à feuilles caduques d'Europe, Duvigneaud et son équipe (1957, 1964, 1971...) ont donné une bonne image de l'écosystème tant sur le plan énergétique que sur celui des cycles des éléments minéraux.

— Pour la savane de la région de Lamto (Côte-d'Ivoire), Lamotte et ses collaborateurs (Paris) rassemblent depuis plusieurs années de très nombreuses données sur ce type d'écosystème.

— En U.R.S.S., Nichiporovich (1968) a quantifié le fonctionnement énergétique d'un hectare de froment.

On remarque que ces recherches concernent surtout des communautés terrestres ou aquatiques d'eau douce de petite taille; en ce qui concerne les écosystèmes aquatiques de grande étendue et notamment les océans, les données sont encore plus fragmentaires.

Par la présentation plus détaillée des principaux résultats, pour quelques écosystèmes parmi les mieux connus, il est possible de montrer l'application pratique des divers concepts permettant la description du fonctionnement de l'écosystème.

▲ ***Un exemple d'écosystème dont le fonctionnement fait actuellement l'objet d'études approfondies :** la **savane guinéenne** à **rôniers et aux tapis graminéens à Andropogonées de la région de Lamto (Côte-d'Ivoire).***

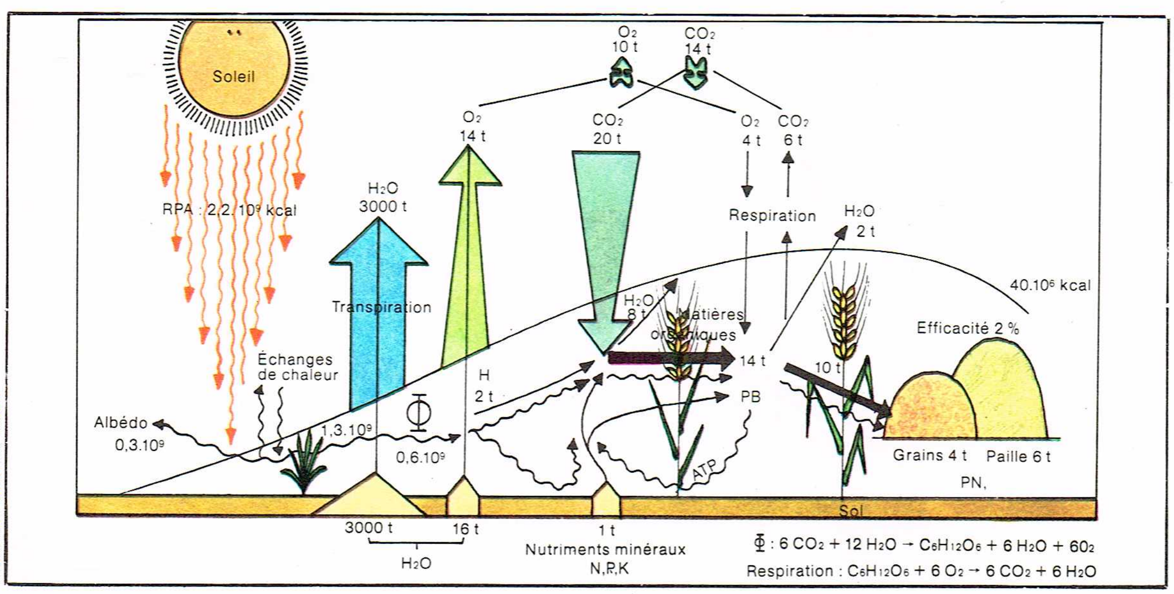

redessiné Richard Colin

◀ ***Représentation schématique du fonctionnement d'un hectare de l'écosystème « champ de blé » (d'après Nichiporovitch; Duvigneaud,** la Synthèse écologique, **Doin).***

● **Les marais de Silver Springs en Floride** (Odum, 1957), situés en zone subtropicale, sont alimentés par des sources à température voisine de 23 °C et pratiquement constante au cours de l'année. La végétation est formée surtout par une Monocotylédone qui domine *(Sagittaria lorata)* et par quelques autres plantes supérieures *(Ceratophyllum demersum, Potamogeton sp., Vallisneria sp., Naias sp.)*; parmi les Algues on trouve des Algues filamenteuses, des Diatomées épiphytes et de nombreuses Algues unicellulaires. Pour ce niveau trophique constitué par les autotrophes, la biomasse (809 g de matière sèche par m^2) est surtout formée par le *Sagittaria lorata*, tandis qu'en ce qui concerne la productivité primaire brute (6 390 g/m^2/an de matière sèche) il n'intervient que pour un tiers, les Algues, à plus grande vitesse de croissance, jouant le rôle essentiel. Pour évaluer la quantité de nourriture disponible pour les herbivores, il faut soit retrancher :

— la partie perdue par respiration, soit 600 g/m^2/an : la productivité nette est donc de 5 790 g/m^2/an ;

— l'exportation sous l'effet du courant : 766 g/m^2/an ;

— la part qui sert directement de nourriture aux décomposeurs, soit environ 1 500 g/m^2/an ;

soit ajouter un apport extérieur végétal de 120 g/m^2/an environ.

Au total, les herbivores, d'une biomasse de 37 g/m^2, qui sont des Poissons, des Chéloniens *(Pseudemys floridana* et *P. nelsoni)*, des Crustacés, des Gastéropodes, des larves d'Insectes..., disposent d'environ 3 640 g/m^2/an. Les herbivores fournissent aux carnivores une quantité de nourriture d'un peu plus du dixième de la quantité précédente, compte tenu de la consommation par la respiration et des exportations en dehors de l'écosystème (envol d'imagos d'Insectes...).

Les carnivores, dont la biomasse est de 11 g/m^2, et qui sont des animaux de position systématique variée (Oiseaux, Amphibiens, Poissons, Insectes, Acariens...) servent de nourriture à d'autres carnivores dits « carnivores secondaires » (« top-carnivores » des auteurs anglo-saxons) dont la biomasse est de 1,5 g/m^2 et qui sont des Reptiles (alligator) et des Poissons *(Lepidosteus, Amia)*.

Les décomposeurs (Bactéries et détritivores comme l'écrevisse *Procambarus fallax*) représentent une biomasse de 4,6 g/m^2.

La pyramide des biomasses et le modèle « hydraulique » figurant les transferts d'énergie résument le fonctionnement de l'écosystème. Les quantités de matière organique sont au préalable transformées en kcal/m^2/an, pour pouvoir utiliser cette seule unité pour toutes les données. Une pyramide énergétique des productivités pourrait aisément être déduite du schéma représentant le flux énergétique ; on peut aussi calculer les rendements d'assimilation :

— pour les producteurs primaires : $\frac{PB}{LA} = 5\ \%$;

— pour les herbivores : $\frac{A_1}{PB} = 11\ \%$;

— pour les carnivores primaires : $\frac{A_2}{A_1} = 16\ \%$;

— pour les carnivores secondaires : $\frac{A_3}{A_2} = 6\ \%$.

Le rapport $\frac{PB}{B} = \frac{6\ 390}{819}$ est proche de 8, ce qui indique une forte activité, normale sous ce climat. Odum estime que cet écosystème est stable et qu'il a pratiquement atteint son stade climatique.

● **La forêt caducifoliée européenne** (Duvigneaud et coll., à partir de 1957). Les forêts de Belgique sont de divers types phytosociologiques, et donc de composition floristique différente selon les types de sol. L'équipe de Duvigneaud a effectué de nombreux travaux permettant de comparer entre elles notamment la hêtraie (à Mirwart) et la chênaie-charmaie (à Wawreille, Férage et Vonêche). Le cycle des éléments minéraux a aussi été envisagé en détail.

Pour une forêt feuillue de 120 ans avec un taillis en sous-bois, Duvigneaud fournit les données suivantes :

— La biomasse végétale totale est estimée à 315 tonnes de matière sèche à l'hectare dont 2 t seulement pour les plantes herbacées (1 t pour les parties aériennes et 1 t pour les parties souterraines) ; pour les arbres et le taillis, la biomasse se décompose en 3 t pour les feuilles, 76 t pour les branches, 180 t pour les troncs et 54 t pour les souches et racines.

— La biomasse des animaux en poids vif est pour les grands Mammifères (cerf, chevreuil, sanglier) de 2,2 kg/ha, pour les petits Mammifères (Rongeurs, Insectivores, Carnivores) de 5 kg/ha et pour les Oiseaux de 1,3 kg/ha, soit pour l'ensemble des consommateurs herbivores et carnivores appartenant aux groupes des Mammifères et des Oiseaux 8,5 kg/ha. Il faudrait connaître l'apport des autres groupes et surtout des Insectes (défoliateurs, mangeurs de bois, de semences...), qui doivent représenter une grande masse, pour avoir une idée plus complète de l'importance de ces niveaux trophiques de consommateurs.

— La biomasse de la faune du sol (poids frais) est de 1 t à l'ha, dont 600 kg/ha pour les seuls lombrics, et la biomasse de la flore bactérienne et fungique de l'ordre de 0,3 t/ha.

▼ *Schéma des transferts d'énergie dans les* **Silver Springs**, *en kcal/m^2/an. En hachures sont représentées les pertes dues à la respiration, et par les végétaux sous forme de chaleur (d'après Odum, 1957;* **Dajoz**, Précis d'écologie, *Dunod).*

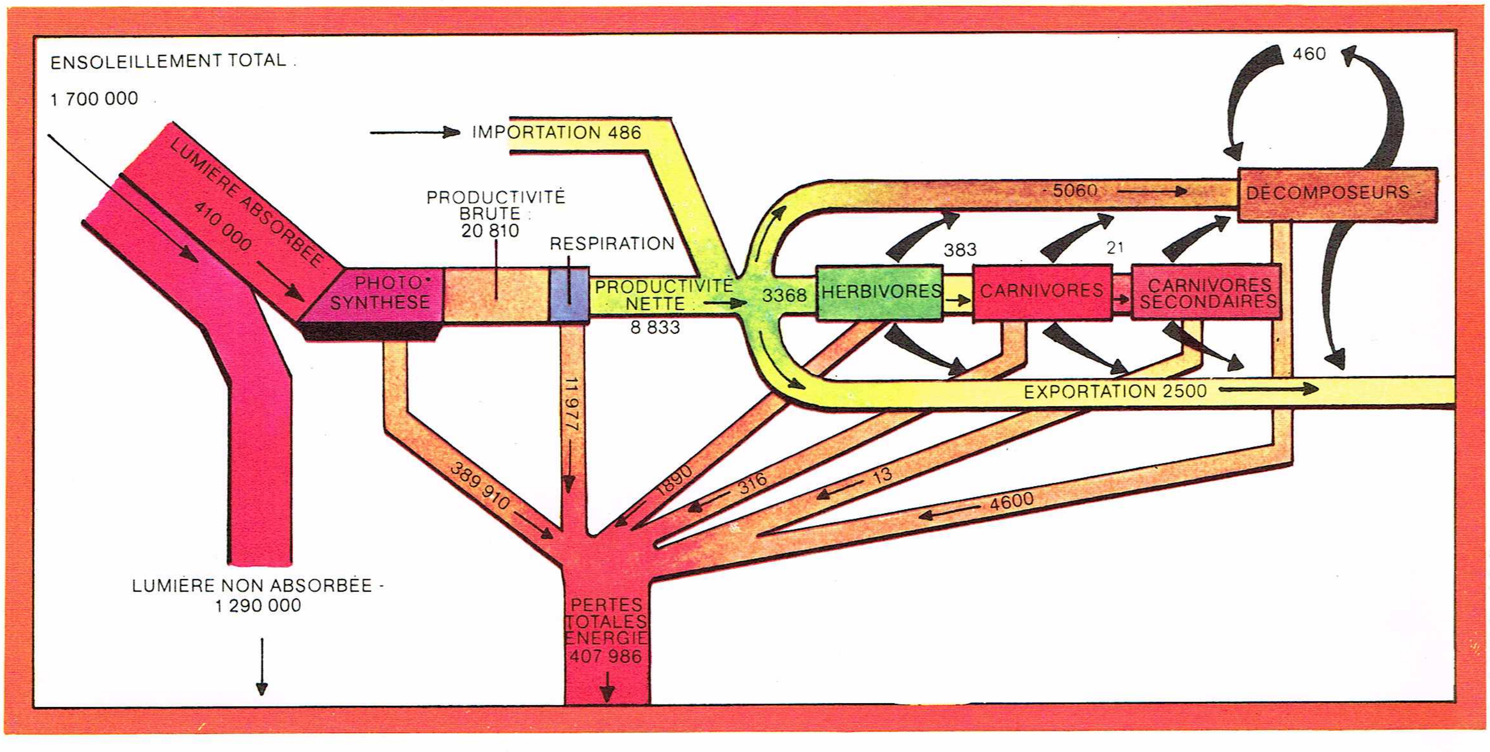

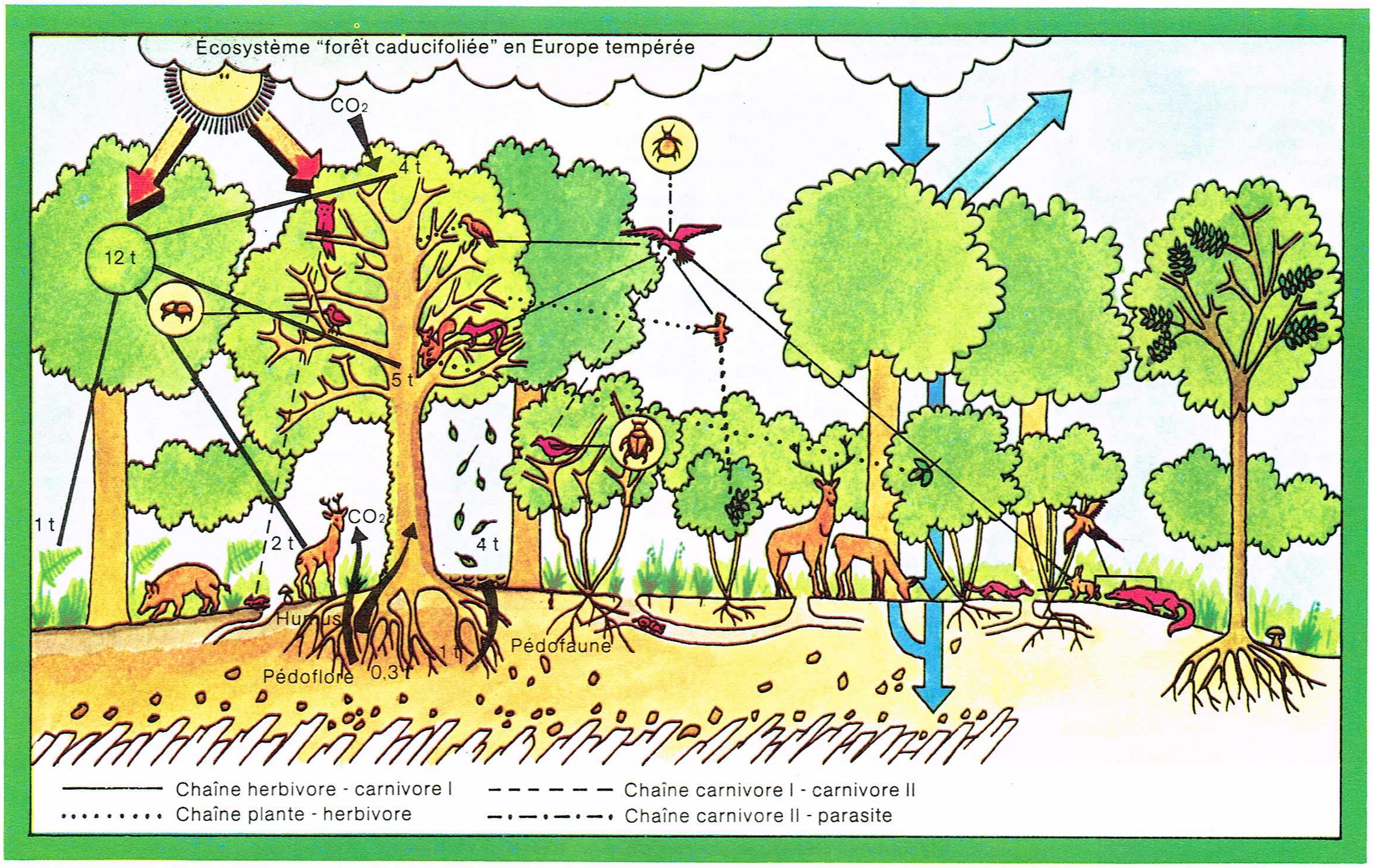

redessiné Richard Colin

▲ *Représentation schématique du fonctionnement de l'écosystème* **« forêt caducifoliée »** *en Europe tempérée (d'après Duvigneaud,* **la Synthèse écologique,** *Doin).*

En ce qui concerne la productivité primaire : l'énergie solaire reçue totale LT est de $9 \cdot 10^9$ kcal/ha/an, et c'est seulement 1,5 % (efficacité photosynthétique) de cette quantité, qui fournit 30 t/ha de productivité brute. Les pertes respiratoires sont de l'ordre de 50 %, et la productivité primaire nette de 15 t de matière sèche par ha et par an représentant $7 \cdot 10^7$ kcal. Ces 15 t de matière sèche se répartissent en 8 t de bois, 3 t de feuilles, 1 t de fruits, fleurs et écailles, 2 t de racines : soit 14 t pour les arbres et taillis, et 1 t pour les herbes. Malgré l'importance de ces résultats on est encore assez mal renseigné sur les transferts d'énergie, surtout pour les niveaux impliquant l'action des consommateurs. On note cependant l'importance des détritivores dans le fonctionnement de l'écosystème forestier tempéré.

● **La source froide du Massachusetts** (Teal, 1957). Cet exemple permet d'illustrer plusieurs points, parmi lesquels l'existence de relations avec les écosystèmes voisins et le fait qu'un écosystème ne peut être étudié facilement que s'il est relativement simple. En

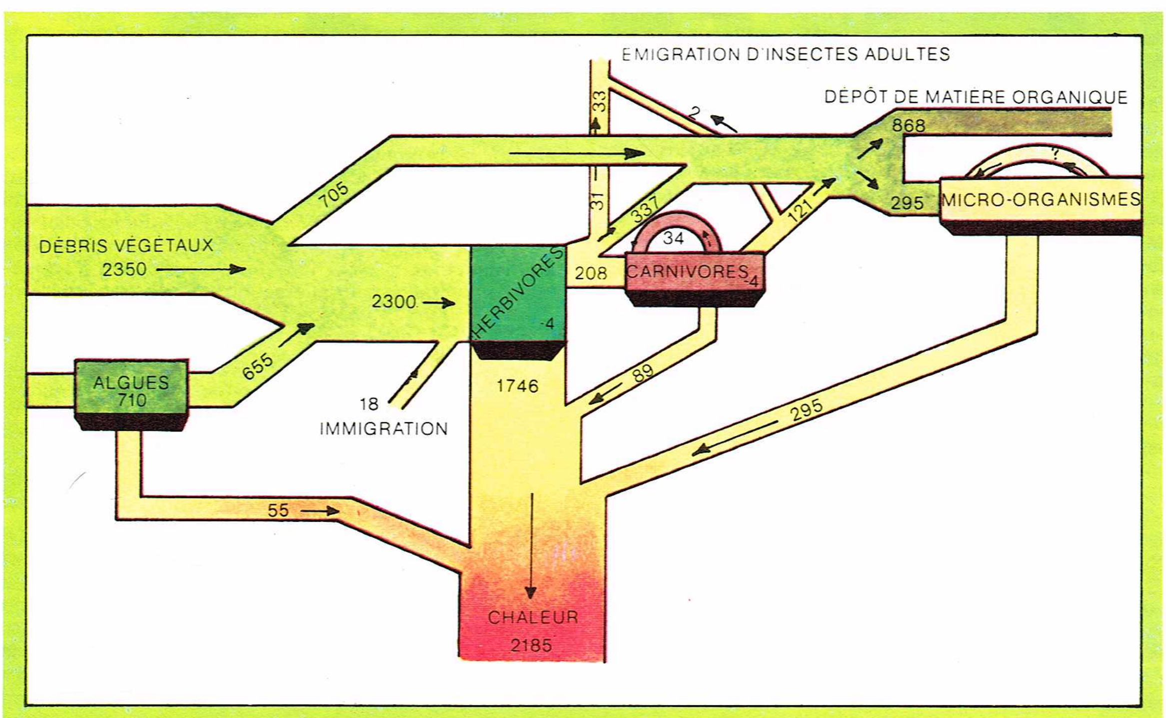

redessiné Richard Colin

◀ *Transferts d'énergie dans* **une source froide du Massachusetts.** *Les hachures indiquent les pertes dues à la respiration, et par les végétaux sous la forme de chaleur (d'après Teal, 1957; Dajoz,* **Précis d'écologie,** *Dunod).*

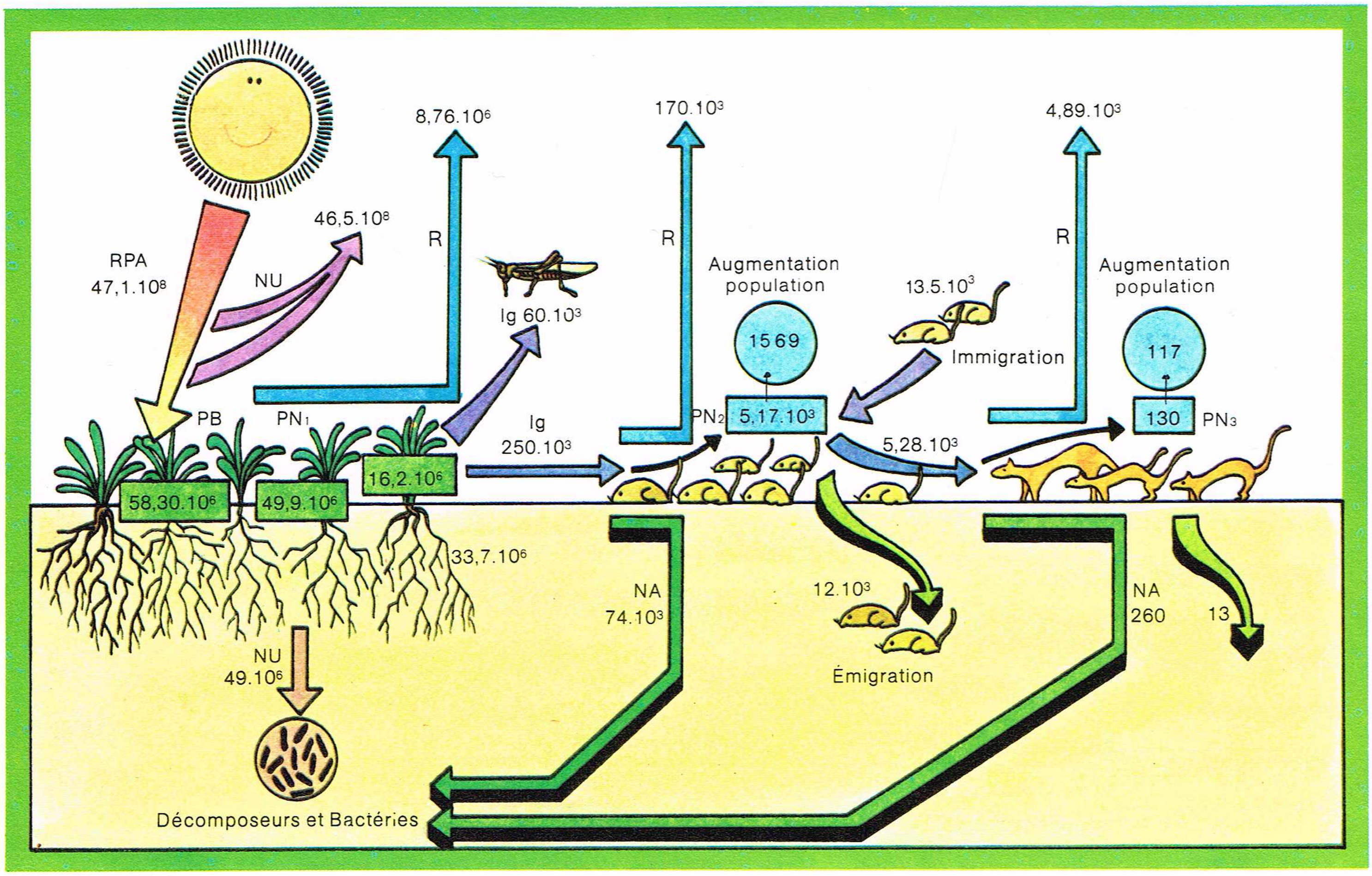

redessiné Richard Colin

▲ ***Représentation schématique d'une* chaîne trophique *dans la prairie à* Poa compressa *du* Michigan *(d'après* Golley; Duvigneaud, *la* Synthèse écologique, *Doin).***

effet, Teal a étudié une petite mare d'environ 2 m de diamètre, profonde de 10 à 20 cm, dont l'eau provient d'une source. La température de l'eau reste, au cours de l'année, assez constante : elle est comprise entre 8 et 11 °C. Un apport important de matière organique constituée par divers débris végétaux, dont les feuilles mortes de la végétation alentour, constitue une source de nourriture pour les herbivores et les décomposeurs. Dans le bilan énergétique, il faut donc ajouter cet apport extérieur (2 350 kcal/m^2/an) à l'énergie solaire fixée par les producteurs primaires qui sont essentiellement des Algues (*Spirogyra* et d'autres Algues filamenteuses), des Diatomées et une lentille d'eau *(Lemna minor)*. La productivité brute par photosynthèse est de 710 kcal/m^2/an; l'apport énergétique initial est donc aux 3/4 fourni par les débris végétaux, et pour 1/4 seulement dû aux végétaux chlorophylliens. La faune est peu abondante : elle est surtout formée de détritivores (Vers Oligochètes, Crustacés, Mollusques, larves d'Insectes) et de quelques carnivores. Pour l'ensemble des deux niveaux trophiques des herbivores (Invertébrés détritivores surtout) et des carnivores la productivité est négative (— 8 kcal/m^2/an). Ceci s'explique en tenant compte de l'évolution de la biocénose : en effet, un tel écosystème n'est pas stable et ses échanges avec l'extérieur sont importants. Les causes de l'ouverture de l'écosystème et de son évolution sont :

— l'apport détritique extérieur (2 350 kcal/m^2/an);

— l'accumulation de matière organique sur place par dépôt (868 kcal/m^2/an);

— l'émigration d'animaux (Insectes adultes ailés : 35 kcal/m^2/an).

Une telle biocénose, considérée en tant qu'écosystème, n'est pas, en réalité, indépendante de l'extérieur. C'est le cas pour tous les milieux d'eaux douces non courantes (mares, étangs, lacs...), dont la dépendance extérieure est d'autant plus forte que la taille est plus petite. En effet, pour ces biotopes il y a, à partir du milieu environnant, apport d'eau, de substances minérales, de matière organique détritique, et une tendance évolutive générale au comblement progressif.

● **Le champ abandonné du Michigan** (Golley, 1959, 1960). La biocénose étudiée est une prairie basse à Graminées *(Poa compressa)*, renfermant aussi des pieds de carotte sauvage *(Daucus carota)*, de chardon *(Cirsium arvense)* et de linaire *(Linaria vulgaris)*. Les herbivores consommateurs de premier ordre sont presque uniquement représentés par des campagnols *(Microtus pennsylvanicus)* et leurs prédateurs sont des belettes *(Mustella rixosa)*. Golley a étudié les transferts d'énergie pour une période de végétation active allant de mai à septembre pour la chaîne alimentaire : herbes → campagnol → belette. L'efficacité photosynthétique est de l'ordre de 1 %; les *Microtus* n'utilisent à leur tour qu'environ 2 % de la nourriture disponible et le rendement écologique de croissance $\frac{PS_1}{I_1}$ n'est que de 2 %; bien que les belettes consomment plus que la productivité des campagnols sur place, car elles utilisent aussi un apport migratoire extérieur, la population des campagnols tend à augmenter; il en est de même d'ailleurs pour les belettes : ceci traduit l'évolution de la biocénose, qui sur le plan de la végétation, à assez long terme, conduirait à l'apparition de plantes ligneuses et au boisement. Le rendement de croissance des belettes $\frac{PS_2}{I_2}$ est meilleur (de l'ordre de 30 %) : malgré cela, si l'on passe de l'énergie initiale à celle correspondant à la population de belettes, l'efficience écologique totale n'est que de 0,000 000 5. L'énergie perdue par la respiration, évaluée par les rapports, est de plus en plus forte pour les maillons les plus élevés de la chaîne; la perte est de 15 % pour les herbes, 68 % pour le campagnol, 93 % pour la belette.

● **La prairie d'élevage** (Mac Fayden, 1964). Le bilan énergétique a été établi pour des bœufs pâturant un pré semi-naturel en Grande-Bretagne. L'énergie solaire apporte, par m^2, 400 000 kcal/an; la productivité primaire de l'herbe est équivalente à 5 120 kcal/m^2/an. Sur cette quantité seulement 730 kcal sont utilisées par les bœufs qui élaborent ainsi une productivité secondaire nette de 30 kcal. Le reste a des destinées diverses :

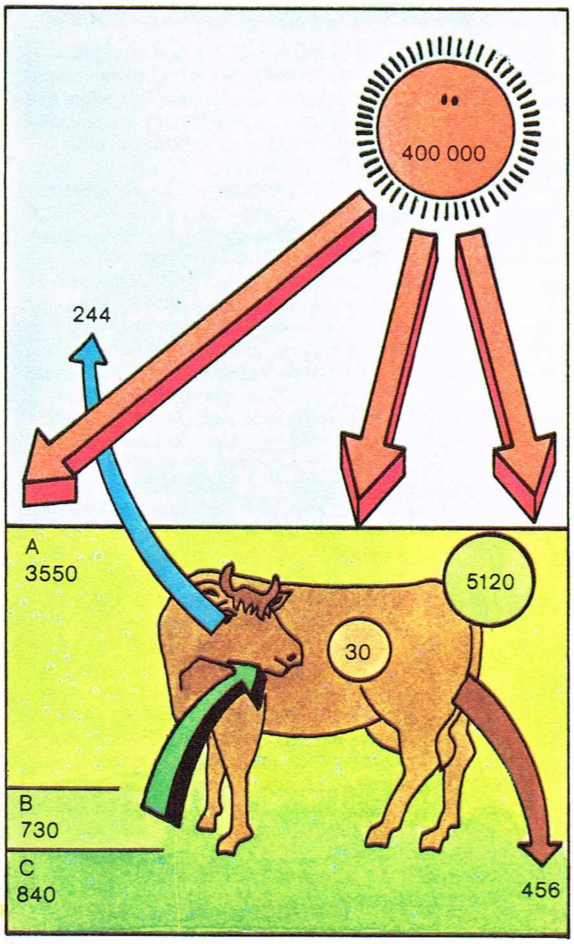

◀ *Représentation schématique* **du flux d'énergie et des productivités primaires et secondaires** *(entourées d'un cercle)* **dans un écosystème simple** *(bœufs sur un pré) correspondant à une prairie de Grande-Bretagne. Les chiffres sont donnés en kcal/m²; A, parties mortes ou écrasées livrées aux décomposeurs; B, nourriture des bœufs; C, nourriture d'autres herbivores; on notera la mauvaise utilisation des calories alimentaires par le bœuf : excédents énormes de la respiration et de l'excrétion sur la production nette (30 kcal) [d'après Mac Fayden et la Nuffield Foundation; Duvigneaud,* **la Synthèse écologique,** *Doin*].

— 244 kcal/m²/an sont perdues par la respiration des bœufs;

— 456 kcal/m²/an se retrouvent dans les excréments des mêmes animaux;

— 3 550 kcal/m²/an correspondent au fourrage piétiné et écrasé;

— 840 kcal/m²/an sont utilisées par les autres herbivores.

Une grande partie, plus de 4 000 kcal/m²/an, (3 550 + 840 = 4 390 kcal/m²/an), soit les 4/5 de la productivité primaire de l'herbe, n'est donc pas utilisée par les bovins, mais par les décomposeurs et les autres herbivores. On voit aussi que le rendement énergétique est faible : il est un peu supérieur à 1 % pour l'efficacité photosynthétique et, si l'on fait le rapport de la productivité secondaire des bovins à l'énergie totale reçue par la prairie, on s'aperçoit qu'il est de 30/400 000, soit à peu près 8×10^{-5} (= 0,008 %). La comparaison de ces deux résultats montre bien l'énorme avantage qu'il y aurait à axer la consommation humaine sur des produits végétaux plutôt qu'animaux.

Les cycles biogéochimiques

Pour chacun des éléments constitutifs de la matière vivante, il est possible d'établir un *cycle biogéochimique* qui rend compte des relations avec le substrat chimique et montre les liaisons avec les processus géologiques de formation ou de décomposition des roches sous l'action des êtres vivants. Le substrat géologique constitue d'ailleurs un « réservoir » des différents éléments.

Les éléments les plus importants à envisager sont : le *carbone,* constituant majeur de la matière organique; l'*azote,* qui participe à la constitution de molécules protidiques; d'autres éléments minéraux assez importants quantitativement : *phosphore, soufre, calcium,* etc., ou agissant à l'état de traces (oligo-éléments : *zinc, molybdène,* etc.).

L'*eau* (H_2O) est un composé chimique, dont les éléments H et O participent à la composition des molécules organiques. C'est en outre un « véhicule » pour de nombreuses substances, tant à l'extérieur qu'à l'intérieur des organismes. L'*oxygène* (O_2) a un cycle étroitement lié à celui du carbone par le biais des processus respiratoires et photosynthétiques.

On peut aussi distinguer parmi les cycles : ceux où les éléments interviennent sous forme de composés gazeux, comme le gaz carbonique, l'oxygène et l'azote; ceux concernant les autres éléments minéraux non ou peu liés des composés gazeux; celui de l'eau, composé intervenant sous formes liquide et de vapeur.

Des données quantitatives concernant les cycles peuvent être obtenues, directement ou par calcul. Cependant, il s'agit très souvent d'estimations à l'échelle de la biosphère, obtenues en regroupant des données écologiques (provenant de l'étude de divers écosystèmes), des données économiques (statistiques agricoles de productions animales ou végétales, d'utilisations d'engrais, etc.). Ces évaluations peuvent donc être très différentes selon les auteurs : elles permettent toutefois de juger du rôle de l'homme dans la biosphère.

Le cycle du carbone

Ce sont le gaz carbonique de l'atmosphère et celui dissous dans les eaux qui constituent la source de carbone servant à l'élaboration initiale de la matière organique. Bien qu'à une concentration très faible dans l'air (320 ppm, ou parties par million, soit environ 3/10 000), le gaz carbonique est capté par les végétaux verts, qui, grâce à leurs pigments chlorophylliens, utilisent l'énergie lumineuse par le processus de la photosynthèse. Dans le cas simple de la formation d'un glucide, le glucose, la réaction globale est :

$$6\ CO_2 + 6\ H_2O + \text{énergie solaire} \rightarrow \underset{\text{glucose}}{C_6H_{12}O_6} + 6\ O_2$$

La synthèse des composés organiques autres que les glucides se fait ensuite, à partir de ceux-ci, par des réactions complémentaires à l'intérieur de la cellule. Les glucides, les lipides et les protides ainsi formés constituent la matière vivante, source de nourriture et donc de carbone pour les herbivores, puis, à l'échelon supérieur, pour les carnivores.

Le gaz carbonique retourne à l'atmosphère par l'intermédiaire de la respiration de tous les êtres vivants, y compris les plantes vertes. La respiration apparaît schématiquement comme le processus inverse de la photosynthèse : elle consomme de l'oxygène et libère le gaz carbonique lors de l'utilisation ou de la décomposition des corps organiques formés initialement; en effet, la libération du gaz carbonique a aussi lieu à partir des déchets et des cadavres par les micro-organismes du sol, qui sont des saprophytes. Leur activité se traduit au niveau du sol, par exemple, par un dégagement de gaz carbonique : c'est pourquoi on parle parfois d'une « respiration du sol ».

Dans les eaux, les phénomènes sont comparables. Le taux du gaz carbonique dissous dans l'eau dépend de deux équilibres principaux, l'un avec le gaz carbonique de l'air, l'autre avec les carbonates dissous ou formant les roches calcaires. Dans le premier cas, si le taux du gaz carbonique s'élève dans l'eau il y a diffusion vers l'atmosphère et réciproquement. Dans le second cas, le gaz carbonique dissous se comporte comme un acide faible (CO_3H_2) capable d'attaquer les roches calcaires en transformant le carbonate de calcium (CO_3Ca) en carbonate acide soluble transporté par les eaux de ruissellement; le calcaire peut ensuite être précipité à nouveau, surtout en milieu marin, soit sous la forme de calcite et d'aragonite provenant des coquilles, soit sous la forme de sédiments calcaires par une précipitation chimique directe. Le carbone peut donc rester fixé sous une forme minérale dans les roches calcaires d'origine biogène ou d'origine chimique.

Mais il est aussi stocké pendant des durées plus ou moins longues sous des formes d'origine organique. Ainsi, lors du déroulement du cycle biologique du carbone, celui-ci reste lié à la biomasse des êtres vivants pendant le temps de leur vie. La durée de cette immobilisation peut atteindre plusieurs dizaines d'années dans le bois des arbres, dans l'humus du sol, dans la matière organique des vases. Le carbone demeure fixé tant que la décomposition par les micro-organismes n'a pas eu lieu;

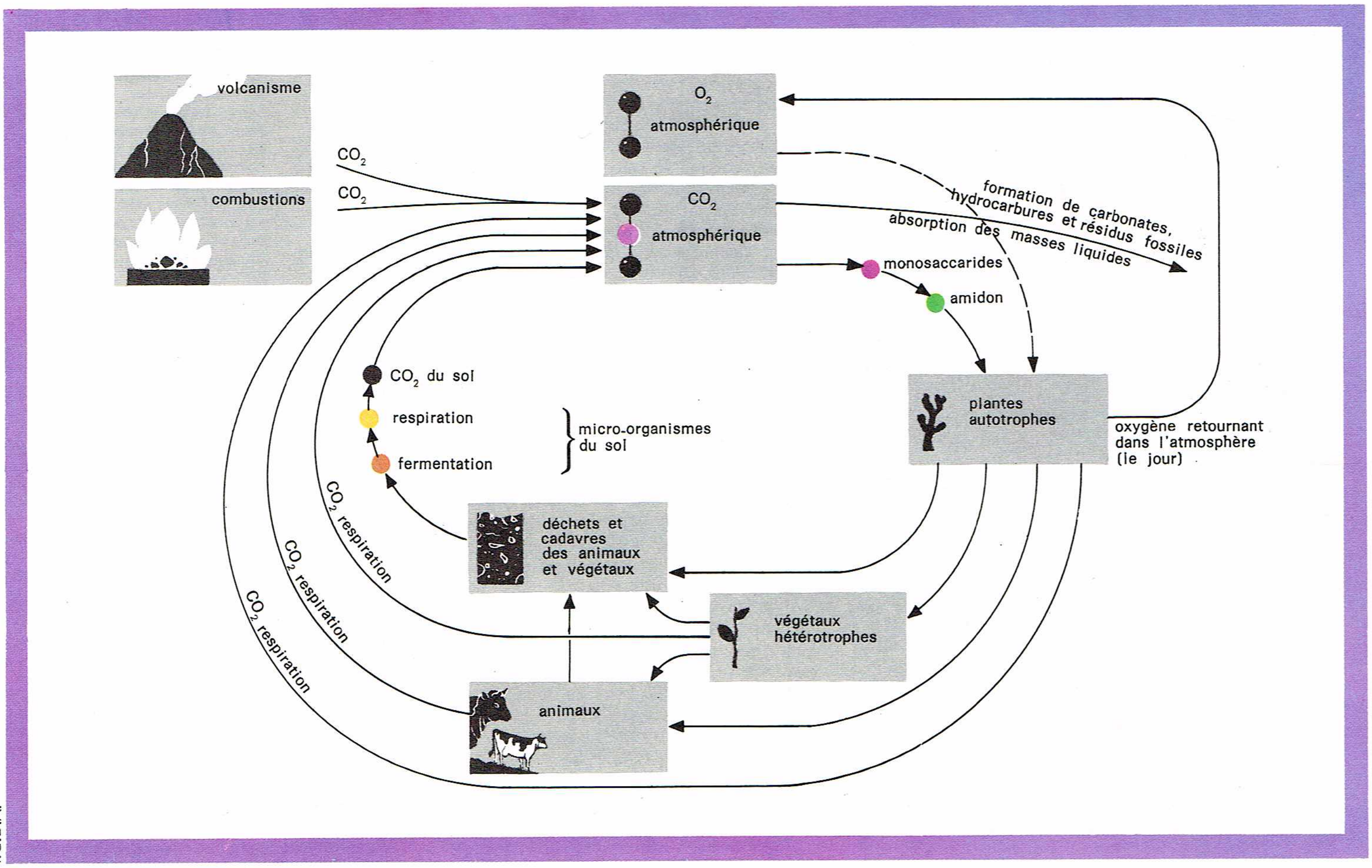

I.G.D.A.

▲ ***Liaisons entre les cycles de l'*****oxygène** ***et du*** **carbone** ***dans la nature.***

par exemple, dans les tourbières acides à sphaignes, l'épaisseur de tourbe parfois considérable (10 à 20 m) témoigne d'une accumulation sur plusieurs siècles et parfois même sur plusieurs millénaires. La durée de stockage peut être beaucoup plus longue grâce à la fossilisation des composés organiques déposés en grandes quantités : c'est le cas pour les lignites et surtout pour le charbon et le pétrole.

Si l'on fait le bilan des sources possibles de carbone, on constate que le CO_2 sous forme gazeuse de l'atmosphère représente environ 700 milliards de tonnes de carbone. L'océan contient sous forme de CO_2 dissous près de cinquante fois plus de carbone que l'air, ce qui représente un réservoir considérable. Ce sont les seules sources immédiatement utilisables par les végétaux verts pour les synthèses organiques. On a évalué respectivement à environ 460 et 3 700 milliards de tonnes le poids de carbone correspondant d'une part aux êtes vivants, d'autre part à la matière organique morte. Le charbon et le pétrole représenteraient 10 000 milliards de tonnes, et les autres roches sédimentaires calcaires 20 000 000 milliards de tonnes de carbone.

Par rapport à ces quantités, le flux annuel de carbone qui entre dans le cycle pour la photosynthèse ou en sort par le jeu de la respiration et de la décomposition de la matière organique, soit 135 milliards de tonnes de carbone, paraît faible. Cela représente pourtant presque 1/5 du carbone de l'air, ainsi sujet à renouvellement par l'intermédiaire du cycle du carbone.

Une autre donnée mérite attention : 5 milliards de tonnes de carbone sont libérées chaque année dans l'atmosphère du fait de la combustion des réserves fossiles (fuel, charbon) par l'activité humaine ; cette quantité correspond à 3,7 % de l'activité respiratoire de la biosphère et à une augmentation théorique de 0,7 % par an du taux de CO_2 de l'atmosphère. En réalité, on s'aperçoit que l'augmentation observée (0,7 ppm sur 320 ppm au total) n'est que de 0,25 %, comme on a pu le mesurer à Hawaï ; donc, près des 2/3 de ce surplus de CO_2 sont en fait absorbés par la végétation ou au niveau des océans. En effet, le taux du CO_2 actuel dans l'atmosphère est un facteur limitant pour la croissance des plantes ; expérimentalement, on a montré que les plantes peuvent utiliser des taux de CO_2 beaucoup plus élevés, et on peut supposer que les plantes utilisent une partie de ce surcroît de gaz carbonique ; c'est sûrement la solution saline formée par l'eau de mer qui joue le rôle d'absorption le plus important. Cependant, ce phénomène régulateur ne se produit pas à une vitesse suffisante pour maintenir le taux de gaz carbonique constant, et certains auteurs pensent qu'à plus ou moins long terme l'accroissement, même léger, de taux de gaz carbonique dans l'air pourrait entraîner d'importantes modifications climatiques.

▼ **Cycle de l'azote** ***dans la nature.***

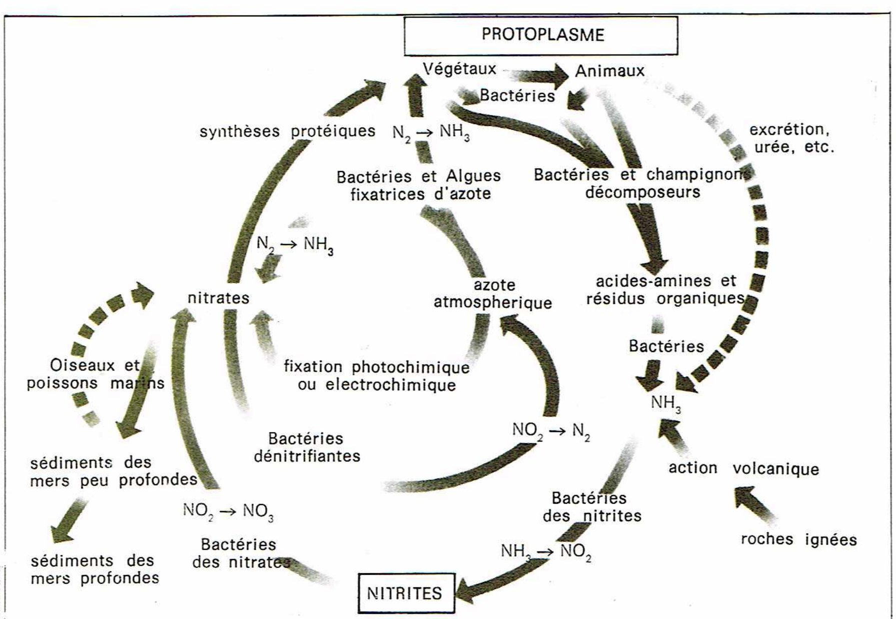

I.G.D.A.

Le cycle de l'oxygène

L'oxygène est un des principaux constituants de la matière vivante : il est présent dans toutes les molécules organiques et dans l'eau des tissus et des milieux intérieurs. Dans un organisme, cet élément est souvent trois fois plus abondant que le carbone. Dans l'atmosphère, il a un taux de 21 %, qui est incomparablement plus élevé que celui du CO_2 (0,03 %). L'oxygène est aussi lié aux molécules des roches carbonatées, des oxydes de nombreux minéraux, et surtout présent dans l'eau. Sur le plan biologique, son cycle est très imbriqué avec celui du carbone : en effet, la photosynthèse produit de l'oxygène, et la respiration en consomme. « Le cycle de l'oxygène apparaît donc en grande partie comme l'image inversée de celui du gaz carbonique, les mouvements de l'un s'effectuant dans le sens opposé de ceux de l'autre. » (Ramade, 1974.)

Comme pour le CO_2, un équilibre s'établit entre l'oxygène de l'air et celui dissous dans les eaux. Dans l'atmosphère, sous l'action du rayonnement ultraviolet, diverses réactions photochimiques se produisent, la plus importante étant celle qui conduit à la formation d'ozone O_3. En effet, l'ozone forme un écran arrêtant les radiations ultraviolettes les plus nocives qui empêcheraient la vie des formes les plus évoluées dans la biosphère.

On a établi que l'ensemble de l'oxygène atmosphérique est dû à l'activité des êtres vivants depuis l'apparition de ceux-ci. C'est à partir du processus photosynthétique que l'oxygène formé a été, au cours des temps géologiques, en partie libéré dans l'atmosphère, en partie fixé dans certains sédiments (carbonates, sulfates, oxyde de fer...). En effet, si l'on calcule le rapport de l'oxygène ainsi produit au carbone sédimentaire d'origine organique qui existe sous forme de diverses roches (charbon, pétrole, graphite, tourbe, etc.), on obtient un rapport de 3 environ, proche de 32/12, rapport des deux éléments C et O dans le CO_2 ; il est donc vraisemblable que la source principale de l'oxygène de l'air a été due au phénomène photosynthétique, au cours duquel il y a échange de carbone et d'oxygène selon cette même proportion. Actuellement, l'équilibre entre la photosynthèse et la respiration entraîne que le taux d'oxygène dans l'atmosphère est constant.

Le recyclage de tout l'oxygène de l'atmosphère se fait en 2 000 ans environ (Penman, 1970) ; cette vitesse est considérée comme assez élevée, bien qu'elle soit inférieure à celle du recyclage du gaz carbonique (300 ans).

Le cycle de l'azote

L'azote entre dans la composition des protides, qui sont des substances organiques fondamentales pour la constitution de la matière vivante et pour divers phénomènes physiologiques, notamment ceux de la multiplication et de la reproduction au niveau cellulaire (rôle des acides nucléiques).

La principale source d'azote pour les êtres vivants est l'atmosphère, qui en est formée pour près des 4/5, ce qui représente près de 3 800 millions de tonnes d'azote. Cet azote gazeux N_2 peut parvenir aux plantes par deux voies : l'une de fixation biologique directe par certains organismes comme les Bactéries symbiotiques des racines de Légumineuses du genre *Rhizobium,* l'autre de fixation photochimique ou électrochimique (éclair). Dans ce dernier cas, il y a combinaison de l'azote avec l'oxygène de l'air et formation d'oxydes d'azote : NO, puis NO_2 qui avec l'eau donne NO_3H_2, apportant ainsi au sol l'ion nitrate (NO_3^{--}). La fixation serait d'environ 35 mg/m²/an. La fixation biologique est plus élevée : elle varie de 140 à 700 mg/an, mais peut atteindre 20 000 mg/an pour certaines terres très fertiles. Si les *Rhizobium* symbiotiques sont les fixateurs les plus importants, des organismes libres (Bactéries, Cyanophytes) interviennent aussi. Certaines Bactéries sont aérobies, tels les *Azotobacter,* qui vivent dans le sol ou dans des eaux bien aérées ; d'autres sont anaérobies, comme les *Clostridium*. Dans les eaux, la fixation a souvent lieu grâce aux *Anaboena,* Cyanophytes aquatiques.

Dans le cas où il y a symbiose, de l'azote est ainsi théoriquement disponible directement dans la plante. Cependant, le plus souvent, la fourniture d'azote aux végétaux se fait sous la forme nitrate (NO_3^{--}). Ces nitrates peuvent provenir directement de la fixation chimique dans l'atmosphère, mais en général ils sont issus des substances azotées complexes existant déjà dans les êtres vivants, à la suite de la minéralisation de ces substances organiques par l'action des micro-organismes décomposeurs ou bioréducteurs. A partir des débris végétaux, des cadavres et des excréments animaux, l'azote, fréquemment présent sous forme d'un radical —NH_2, est transformé sous l'action des Bactéries, des Champignons (surtout des Actinomycètes) en ion de type NH_4^+ *(ammonification)*. D'autres micro-organismes, comme les Bactéries du genre *Nitrosomas,*

T. Poggio

◀ *La fixation biologique directe de l'azote* **atmosphérique** *est effectuée par certains organismes, telles ces Bactéries symbiotiques des racines de Légumineuses :* **Rhizobium leguminosarum** *(× 33 000 environ).*

C. Nardin - Jacana

▼ *Lors du cycle biologique du carbone, celui-ci reste lié à la biomasse des êtres vivants tant que la décomposition par les micro-organismes n'a pas eu lieu ; cette durée d'immobilisation peut être très importante et l'épaisseur parfois considérable, notamment dans les tourbières. Ici, front de taille effectué dans une tourbière à* **Pinus uncinata,** *dans le Doubs ; on observe au premier plan des* **Calluna,** *des* **Vaccinium** *et quelques* **Salix.**

▶ *Le bouclage du cycle de l'azote s'effectue par la libération de N_2 dans l'atmosphère par des Bactéries telles que les* **Pseudomonas** *qui réalisent une* **dénitrification.**

produisent une oxydation jusqu'au stade NO_2^{--} (nitrite); celles du genre *Nitrobacter* poursuivent cette oxydation jusqu'au stade NO_3^{--}. L'ensemble de cette transformation est nommé *nitrification;* c'est elle qui rend l'azote assimilable par les plantes vertes. L'azote parcourt ensuite la succession obligatoire de la chaîne alimentaire formée par les herbivores et les carnivores, puisque ceux-ci sont hétérotrophes pour l'azote comme ils le sont pour le carbone.

Le bouclage du cycle s'effectue par une libération d'azote gazeux N_2 dans l'atmosphère par des Bactéries, telles que les *Pseudomonas,* qui réalisent une *dénitrification,* c'est-à-dire la transformation : $NO_3^{--} \rightarrow N_2$.

En plus de cette circulation biologique, l'atmosphère s'enrichit en azote juvénile à partir des volcans, et une mise hors circuit a lieu par sédimentation de sels azotés dans les profondeurs marines.

L'action humaine dans le cycle de l'azote s'exerce surtout au niveau de l'utilisation des engrais. Des dépôts sédimentaires azotés nitrés peuvent être utilisés, mais ils existent rarement sous forme concentrée et sont peu abondants; aussi a-t-on recours à une fabrication industrielle. Très schématiquement, on peut indiquer que les engrais sont obtenus surtout sous forme d'urée $CO(NH_2)_2$ ou de nitrate d'ammonium $NO_3(NH_4)_2$; ces composés sont synthétisés à partir d'hydrocarbures fournissant des atomes de C et d'H, les atomes d'O et d'N provenant de l'atmosphère. D'après les données de Delwiche (1970), cette fixation d'origine industrielle de l'azote de l'air serait de 30 millions de tonnes par an, soit environ 1/3 de tout l'azote fixé. Cette production engendre un déséquilibre dans le bilan entre la fixation et la dénitrification; localement, l'excès d'utilisation et la mauvaise répartition des engrais interviennent dans la pollution du sol et dans les phénomènes d'eutrophisation observés dans divers cours d'eau et lacs.

▼ *Tableau récapitulatif des quantités d'azote fixé et d'azote dénitrifié pour l'ensemble de la biosphère en millions de tonnes par an (d'après Delwiche).*

AZOTE FIXE		AZOTE DÉNITRIFIÉ	
Fixation par les micro-organismes terrestres	14	Dénitrification terrestre	43
Lessivage de sédiments nitrés	30		
Fixation marine	10		
Fixation industrielle	30		
Apport juvénile et fixation atmosphérique	8	Dénitrification marine	40
Fixation totale	92	Dénitrification totale	83

Le cycle de l'eau

Les éléments de l'eau, H et O, participent très largement à la formation des molécules organiques. L'eau est, en outre, le « véhicule » de diverses substances nutritives et minérales (sang et milieux intérieurs des animaux, sève des plantes, etc.). L'organisme des êtres vivants contient généralement environ 70 % d'eau (jusqu'à plus de 95 % chez certains végétaux).

Les réserves d'eau sont essentiellement celles fournies par les océans : ceux-ci contiennent 97 % du total, recouvrant 363 millions de km² de terre; cela représente 1 400 à 1 500 millions de km³. Si cette masse était répartie sur la surface du globe en une couche d'épaisseur régulière, celle-ci aurait 2 700 m. En faisant la même supposition pour les autres réservoirs d'eau, on obtiendrait des couches de 100 m pour l'eau provenant des calottes glaciaires, 15 m pour les eaux souterraines y compris les nappes phréatiques, 0,4 m pour les eaux douces continentales de surface et seulement 0,03 m pour l'eau contenue dans l'atmosphère. C'est pourtant à partir de cette dernière quantité, qui représente moins de 1/100 000 du total, que s'effectue le cycle de l'eau.

— Le cycle de l'eau est en majeure partie lié aux *mécanismes climatiques :* évaporation de l'eau des lacs et des mers, phénomènes de condensation de la vapeur d'eau puis précipitations; les deux tiers des précipitations retournent aussitôt aux océans puisque ceux-ci occupent une surface équivalente de la surface du globe. Sur les continents, après passage à travers les sols et les nappes

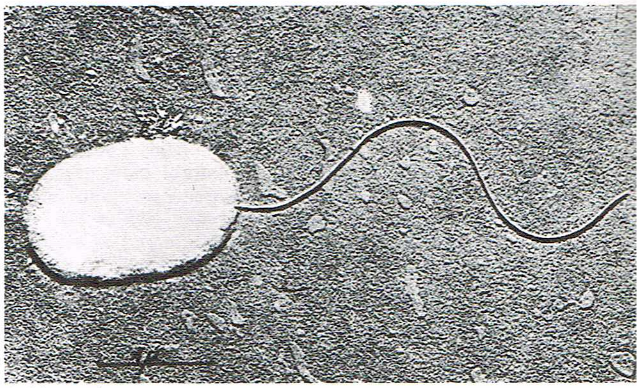

G. Marcuzzi

phréatiques, ou après ruissellement, les précipitations retournent aux surfaces d'eau libre.

Le rôle du couvert végétal modifie ce schéma : aussitôt après les précipitations, une partie de celles-ci, demeurant à la surface des végétaux, est évaporée : il s'agit généralement d'une part assez faible, mais qui peut atteindre jusqu'à 25 %, surtout dans le cas d'une petite pluie; ainsi, une précipitation faible et courte peut parfois être soustraite presque entièrement à l'infiltration ou au ruissellement. La circulation de l'eau est ralentie parce qu'une partie est absorbée comme dans une éponge par certains végétaux : Mousses, Lichens, ou au niveau des sols, particulièrement dans les horizons de surface s'ils sont riches en débris végétaux et en matière organique. Au niveau du couvert végétal, l'eau subit normalement l'évaporation physique, qui tend à son retour vers l'atmosphère; mais, en outre, l'eau puisée dans le sol par les racines des plantes est rejetée dans l'atmosphère par la transpiration de celles-ci. L'ensemble des deux processus s'appelle l'*évapotranspiration.* Elle est mesurée par la quantité totale d'eau évaporée physiquement ou transpirée biologiquement pour une surface donnée de couvert végétal. La transpiration et le rejet de vapeur d'eau par la respiration des animaux pourraient aussi être pris en compte, mais ils sont de très faible valeur par rapport à l'évapotranspiration.

L'évapotranspiration est d'autant plus grande que l'alimentation en eau du sol est meilleure : par exemple en Suède, pour 1 ha de forêts d'épicéas, 2 100 m³ d'eau sont transpirés en un an sur sol plutôt sec, et 4 000 m³ sur sol humide. En moyenne, sous nos latitudes, ce sont toujours des quantités de l'ordre de 2 000 à 4 000 m³/ha qui sont évapotranspirées, ce qui correspond à peu près à la pluviosité. La quantité évapotranspirée en un lieu donné n'est pas forcément égale à la pluviosité : il peut y avoir des apports ou des pertes par l'intermédiaire de la nappe phréatique ou du réseau superficiel. La quantité d'eau transpirée par les végétaux est toujours importante en soi : ainsi, un tilleul consomme 200 l d'eau par jour, 1 ha de forêt jusqu'à 50 000 l.

Dans les plantes, la transpiration et la circulation d'eau qui lui est liée sont nécessaires aux mécanismes physiologiques généraux, notamment ceux qui permettent la synthèse de la matière organique. Si l'on calcule le rapport de la masse d'eau transpirée pendant un an à la matière sèche produite, on obtient un coefficient transpiratoire toujours élevé, et variable selon les exigences des différentes espèces. Il est, par exemple, de 250 à 550 pour le blé, et peut atteindre 1 000. On estime que seulement environ 1/100 de l'eau qui traverse une plante y reste et que, pour les 3/4, il s'agit d'eau libre (milieu intérieur) dont les atomes ne sont pas liés par combinaison chimique à l'intérieur de molécules organiques. Finalement, à peine 0,15 % de l'eau utilisée se combine chimiquement dans la plante. Il ne faut cependant perdre de vue ni le rôle essentiel de l'eau dans le maintien de tous les processus biologiques, ni son importance en tant que milieu de vie particulier, comme dans les eaux douces et les océans. Réciproquement, la végétation, surtout, régit par son activité le cycle de l'eau et peut avoir localement un rôle régulateur non négligeable sur le plan climatique, la réduction de l'érosion, etc.

Des variations sont observables dans le cycle de l'eau selon les régions : par exemple, les bilans sont différents selon qu'il s'agit d'une zone tropicale ou d'un pays

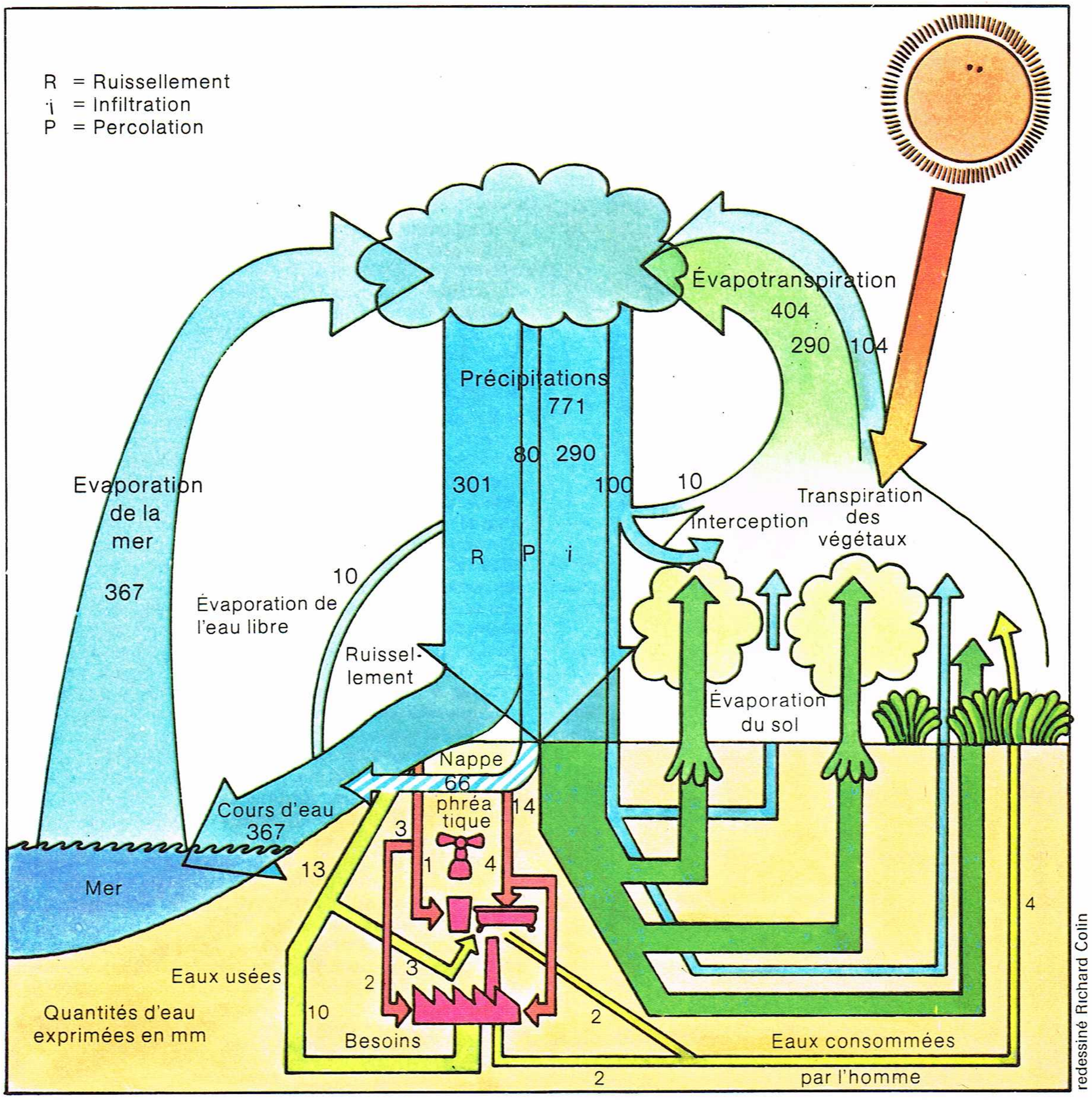

◀ ***Représentation schématique* du cycle de l'eau *(d'après Clodius et Keller; Duvigneaud,* la Synthèse écologique, *Doin).***

tempéré d'Europe occidentale. Dans ce dernier cas, on note la part relative (2 %), assez faible cependant, liée à l'intervention humaine dans le cycle de l'eau. Il serait toutefois erroné de croire que l'homme dispose de ressources illimitées en eau : de fait, l'inégalité de la répartition et une gestion peu soigneuse entraînant des pollutions créent localement de graves problèmes d'approvisionnement, notamment en eau douce.

Cycles des éléments minéraux biogènes

Bien que peu importants pondéralement, divers éléments minéraux participent à la constitution de la matière vivante, comme le soufre au niveau des protéines ou le phosphore pour la constitution des squelettes. En outre, ils ont souvent un rôle fondamental dans des systèmes d'utilisation de l'énergie, des systèmes enzymatiques et, par là même, dans divers processus d'absorption, de croissance et de régulation.

Cycle du phosphore

Le phosphore (P) est un composant du cytoplasme qui intervient pour la mise en œuvre de l'énergie à l'intérieur de la cellule. En effet, la réaction

$$ATP \rightarrow ADP + E$$

(ATP = adénosine-triphosphate; ADP = adénosine-diphosphate; E = énergie)
fournit l'énergie nécessaire aux synthèses et à la respiration. De plus, le phosphore est fixé en quantité assez grande au niveau des os.

La source de phosphore initiale est située dans les roches, mais généralement de façon assez diffuse. Puisé dans l'eau du sol par les racines des plantes, incorporé à la matière vivante de celles-ci, le phosphore circule dans les chaînes trophiques terrestres. De même, présent dans les eaux douces ou marines, il est incorporé au phytoplancton puis au zooplancton et se retrouve en bout de chaînes chez les Poissons et les Oiseaux carnivores. La plus grande partie est fixée au niveau du squelette ; c'est à partir des cadavres animaux et végétaux et des déjections que le phosphore organique retourne dans le sol ou dans les vases, où il est minéralisé sous forme de phosphates à nouveau assimilables. Ses sels étant extrêmement solubles, une très grande partie est entraînée par les eaux courantes jusqu'à la mer ; s'il y a dépôt en eau peu profonde, ce phosphore peut encore participer au cycle des écosystèmes marins ; s'il y a sédimentation en profondeur, le phosphore participe au cycle géochimique à l'échelle des temps géologiques.

Certains dépôts actuels permettent, dans quelques cas très localisés, un retour du phosphore des écosystèmes marins vers la terre. En effet, les Oiseaux de mer pêcheurs, très nombreux, forment des colonies sur certains points côtiers ; dans ces endroits, les squelettes des Poissons pêchés et surtout les fientes des Oiseaux forment un sédiment très riche en phosphore : le *guano ;* celui-ci est exploité comme engrais, notamment sur la côte péruvienne, où les dépôts ont été très importants. Les pêcheries exercent une action comparable mais faible : l'apport serait de moins de 100 000 tonnes par an.

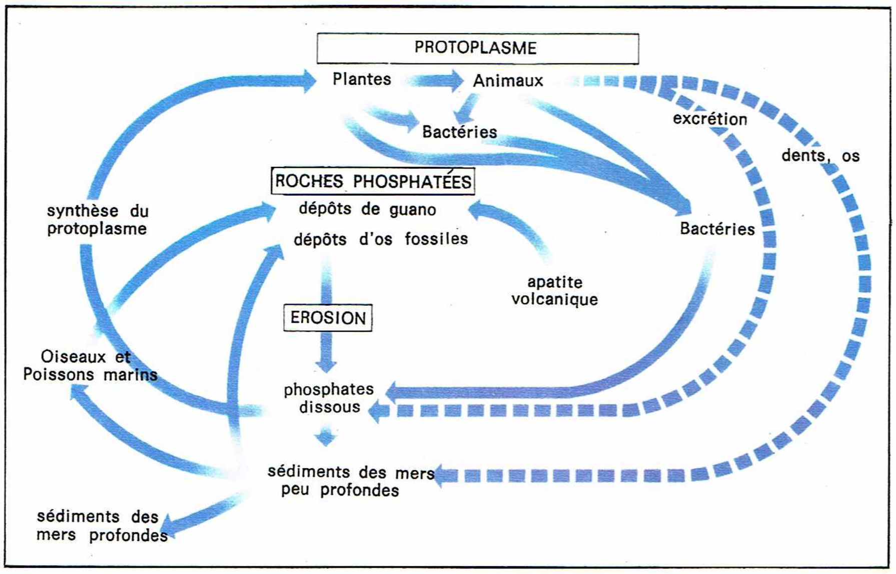

I.G.D.A.

▲ **Cycle du phosphore** *dans la nature.*

▼ **Le lessivage** *des sols entraîne une infertilité qui, sous un climat tropical, s'appelle la* **latéritisation** *: un exemple nous est donné ici par la rivière Betsiboka, charriant, après érosion du sol, des eaux rouges chargées en latérite.*

C'est là une quantité très faible par rapport aux 2 000 000 tonnes de phosphates utilisées annuellement comme engrais à partir des roches phosphatées fossiles anciennes (Maroc) ou des dépôts plus récents (guano).

Comme dans le cas de l'azote, une mauvaise répartition de ces engrais peut contribuer localement à la pollution des eaux, alors que globalement le phosphore est un élément peu abondant, diffus, extrêmement sensible à l'entraînement par les eaux, et qui risque d'être limitant pour les productions végétales. Certains auteurs ont fait remarquer que le phosphore était le maillon le plus faible dans la chaîne de vie qui permet l'existence des hommes.

Cycle du soufre

Le soufre est présent chez les êtres vivants dans des acides aminés (cystine, méthionine) et dans certains peptides (cystéine). Les composés soufrés sont abondants chez quelques végétaux (moutarde) et chez les animaux, dans les cheveux, les cornes...

Le soufre est présent à l'état natif dans les zones volcaniques, dans les gaz naturels, notamment sous forme d'hydrogène sulfuré (SH_2), dans les pétroles et les charbons dont il se dégage lors de la combustion sous forme de gaz sulfureux (SO_2), dans les minerais tels que la pyrite (S_2Fe).

Dans la partie biologique de son cycle, à partir des composés organiques azotés, certains micro-organismes ont une action réductrice et permettent la libération de SH_2 (ce sont surtout des Bactéries anaérobies, comme *Escherichia, Proteus*) ou la formation de S (comme *Beggiatoa*). D'autres, des Bactéries ou des Champignons comme *Aspergillus* et *Neurospora,* oxydent les composés soufrés en sulfates (SO_4^{--}) utilisables par les producteurs primaires. Du sulfate peut aussi retourner au sol, en se formant à partir du SO_2 des atmosphères polluées. Le S de ces sulfates, absorbé par les plantes, est donc finalement incorporé à la matière organique et le cycle se poursuit.

Cycle des autres éléments minéraux

Parmi les autres minéraux constitutifs de la matière vivante et qui participent donc aux cycles biologiques, on distingue : d'une part, les *macro-éléments,* encore appelés *cations biogènes* (K, Ca, Mg, Na), dont la présence dans la substance vivante peut être exprimée en quelques unités de % ; d'autre part, les *micro-éléments,* ou *oligo-éléments* (les métaux Fe, Bo, Zn, Cu, Mn, Mo, et un anion Cl^-), présents à l'état de traces de l'ordre de quelques parties par million (ppm).

Ces éléments issus des roches mères, où ils sont présents en petites quantités, se retrouvent dans la solution du sol ou dans les eaux : l'eau de pluie peut en contenir, par l'intermédiaire des poussières, surtout après le lessivage des feuillages des strates hautes en forêt par exemple. L'incorporation à la matière organique a lieu après l'absorption par les racines des producteurs primaires terrestres ou par le plancton végétal. Le retour à l'état minéral se fait sous l'action des organismes bioréducteurs, à partir de la litière et de l'humus des sols ainsi que de la matière organique des vases. Les combustions, comme celle du bois, laissent aussi des cendres qui contiennent ces éléments.

Selon les écosystèmes, la vitesse de recyclage qui commande la mise à disposition des producteurs primaires est plus ou moins grande. Un ralentissement de la circulation se produit soit au niveau des végétaux, comme dans le cas du stockage dans le tronc des arbres, soit, principalement, au niveau de la litière ou de l'humus

A. Grjebine

des sols lorsque l'activité des micro-organismes est faible à leur niveau. Un danger beaucoup plus grave est celui de la perte de ces éléments par lessivage. Ce lessivage conduit à la *podzolisation* des sols sous climat tempéré, à leur *latéritisation* sous climat tropical : de tels sols sont alors peu ou pas fertiles. L'action de l'homme est fréquemment déterminante dans le déclenchement de tels phénomènes ; à cet égard, l'exemple de la déforestation en zone tropicale est particulièrement typique. En effet, la présence de ces cations est liée à certaines propriétés du sol, comme la présence de colloïdes ; la disparition du couvert forestier entraîne la suppression de l'apport organique par la litière du feuillage et la modification des caractères microclimatiques : il y a perte des propriétés absorbantes liées aux colloïdes organiques et aux argiles et entraînement des substances minérales. Les argiles se trouvent alors transformées en une croûte infertile, la *latérite*. Une telle transformation est irréversible ; l'érosion jouant, on peut dire que tout sol disparaît peu à peu.

Nos systèmes d'exploitation agricole, qui conduisent à la consommation dans des lieux souvent fort éloignés du lieu de production, engendrent une exportation d'une grande partie de ces éléments, surtout dans le cas de cultures dites « épuisantes » (par exemple, la culture de betteraves). Dans ces conditions, on doit recourir à un réapprovisionnement artificiel par les engrais, qui n'est pas toujours bien conduit et présente parfois des inconvénients. A ce sujet Duvigneaud écrit : « La situation peut devenir particulièrement grave dans les régions tropicales, où l'équilibre est plus difficile à maintenir. Les monocultures de canne à sucre, de café, de cacao, de maïs, d'arachide, etc., se déplacent des sols épuisés vers les sols les plus riches, détruisant sur leur passage des écosystèmes forestiers productifs et laissant derrière elles des écosystèmes ruinés, à productivité très basse. »

Les grands biomes et leur fonctionnement en tant qu'écosystèmes

La répartition des communautés d'êtres vivants sur le globe est déterminée principalement par le climat. Une description à grands traits conduit à identifier de grandes régions biogéographiques, qui correspondent à des types de végétation ou formations caractérisées surtout par leur physionomie : ce sont les *biomes*. Bien que les données concernant le fonctionnement des écosystèmes soient encore réduites, il est néanmoins possible de donner quelques indications concernant les productivités primaires et secondaires, ainsi que de souligner l'impact des activités humaines sur ce type de communautés, envisagées assez largement à l'échelle de la biosphère. Il faut cependant se rendre compte que même si on les considère en tant qu'écosystèmes, il s'agit, en fait, d'ensembles complexes composés d'un grand nombre de sous-systèmes.

Ces communautés sont d'abord séparées les unes des autres par les grands types de milieux. Elles doivent donc être envisagées dans le cadre de ceux-ci, et on distingue le milieu aquatique marin, les milieux aquatiques d'eau douce et les milieux terrestres.

Le milieu marin

Les facteurs écologiques en milieu marin

Les étendues marines sont immenses et profondes. Océans et mers occupent près de 362 millions de km², soit environ 70 % de la surface du globe terrestre, pour un volume d'eau d'environ 1 milliard de km³. Aucune partie n'est complètement dépourvue de vie, bien que les couches superficielles et les zones proches des terres soient les plus peuplées. Malgré la grande étendue relative des océans par rapport aux terres, la biomasse totale n'y est pas plus forte que pour l'ensemble des organismes terrestres.

La lumière

Dans la masse des eaux marines, on peut distinguer trois zones, en fonction de la lumière reçue : la *zone euphotique,* où l'assimilation chlorophyllienne est possible, et dont la profondeur varie de 20 à 180 m en fonction de la clarté de l'eau ; la *zone oligophotique,* où il n'y a plus assez de lumière pour les végétaux mais où un certain éclairement est encore perceptible (jusqu'à 300-500 m de profondeur) ; la *zone aphotique,* où l'obscurité est totale.

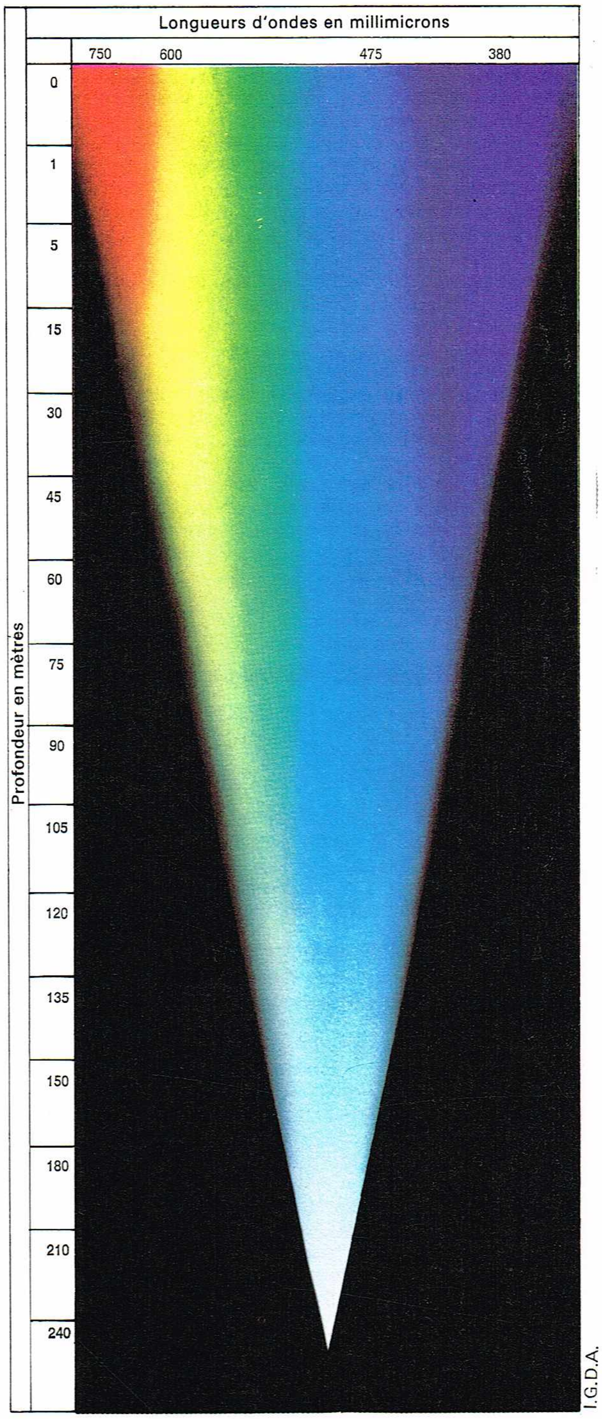

◀ **« Spectre » d'absorption** ***de la lumière solaire par les eaux marines.***

L'eau absorbe certaines longueurs d'onde plus rapidement que d'autres : les infrarouges et les ultraviolets sont absorbés dans les premiers centimètres, alors que le rouge est totalement absorbé à 15 m. L'eau, qui agit comme une sorte de filtre, laisse passer surtout les radiations vertes (560 $m\mu$) et bleues (480 $m\mu$). Or, les Algues vertes présentent un taux de photosynthèse maximal dans le secteur rouge du spectre (avec un autre « pic » dans le bleu). Comme les grandes longueurs (rouge, orange) sont absorbées en premier, ces Algues se trouvent reléguées, en principe, dans les couches d'eau superficielles. Les Algues brunes, les Algues rouges et les Cyanophytes sont pourvues de pigments « surnuméraires » ; ceux-ci sont capables de capter l'énergie lumineuse sur d'autres longueurs d'onde et de la transmettre

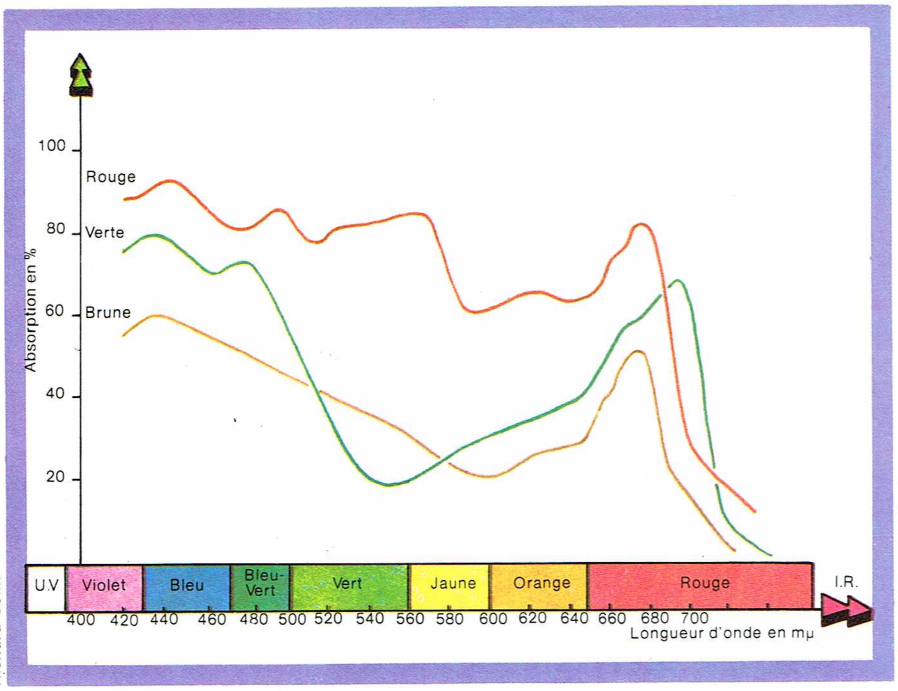

Richard Colin

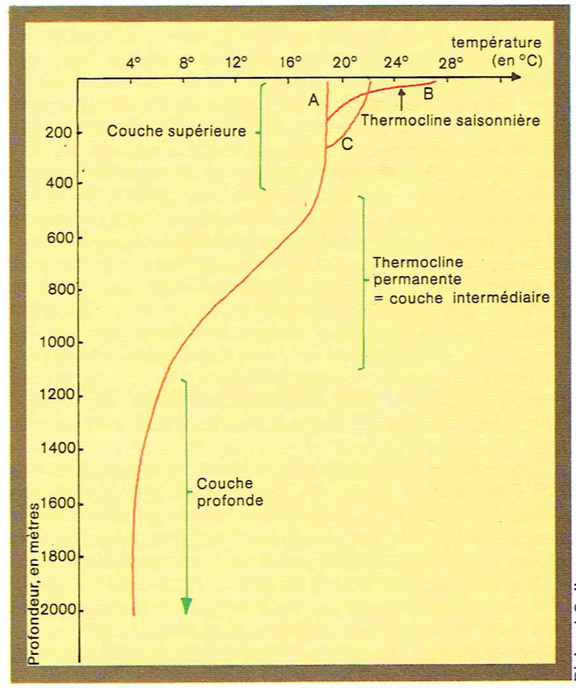

Richard Colin

▲ *A gauche, représentation graphique du spectre d'absorption de trois Algues (verte, rouge et brune) : les longueurs d'onde les plus efficaces sont celles qui sont absorbées. L'Algue brune et l'Algue rouge fonctionnent mieux dans le vert (d'après Haxo et Blinks). A droite, représentation graphique de la répartition verticale de la température dans l'Atlantique Nord : A, température en avril : plus de thermocline saisonnière; B, température en août; C, température en décembre : la thermocline s'estompe (d'après Clarke).*

▶ *Tableau récapitulatif des quantités moyennes de sels dissous dans l'eau de mer.*

à la *chlorophylle a,* qui peut seule la transformer en énergie chimique. On peut donc trouver ces Algues à des profondeurs où seuls le bleu et le vert persistent.

La température

Les variations de *température* n'intéressent qu'une faible épaisseur de la masse d'eau, en raison de la faible pénétration des rayons solaires et de la forte inertie thermique de l'eau. Un brassage est cependant réalisé par l'action des courants, du vent et des mouvements de convection.

— Si l'on étudie les *eaux de surface,* on observe des variations géographiques et saisonnières de température. Dans les régions polaires, la température de l'eau peut descendre jusqu'à — 1,5 °C (le point de congélation de l'eau de mer est, en raison de la salinité, inférieur à 0 °C). Sous les tropiques, elle peut atteindre 27 °C au large et même 35 °C dans le golfe Persique. Par ailleurs, la température des eaux de surface présente d'importantes variations annuelles dans les régions où il existe un cycle saisonnier (les pays tempérés par exemple). Ces fluctuations sont d'ailleurs amorties par rapport à celles de l'air, en raison de la forte chaleur spécifique de l'eau. Par exemple, à Roscoff, dans la Manche, la température de l'eau oscille en moyenne entre 7 °C et 18 °C selon les saisons.

— En *profondeur,* les océans présentent une sorte de stratification thermique. On distingue trois couches.

● La *couche supérieure* (de la surface à environ 400 m de profondeur) est soumise au brassage (courants, mouvements de convection) ; la température y fluctue en fonction des variations saisonnières. Dans les régions tempérées, à la saison chaude et aux basses latitudes, les eaux superficielles de cette couche (jusqu'à 10 ou 100 m de profondeur selon les régions) sont chaudes et présentent une température uniforme. En dessous, la température baisse assez rapidement, puis se stabilise vers 300 mètres. A la saison froide, la température est à peu près identique dans toute cette épaisseur.

● Dans la *couche intermédiaire,* non soumise aux variations climatiques, la température baisse lentement jusqu'à ce qu'elle atteigne 3 °C-4 °C (à environ 1 500 m de profondeur).

● Enfin, dans la *couche profonde,* la température est uniforme (3 °C-4 °C dans les régions tropicales et tempérées, 0 °C dans les régions polaires). Les zones où la température décroît rapidement portent le nom de *thermoclines :* thermocline *saisonnière* pour la zone superficielle dont nous avons parlé, thermocline *permanente* pour la couche intermédiaire.

Les sels dissous

L'eau de mer est une solution de très nombreux sels minéraux. Presque tous les éléments connus y sont représentés, parfois en quantité infime. En moyenne, si l'on évapore 1 litre d'eau de mer, on trouve un poids de sels d'environ 35 grammes; ce chiffre représente la salinité, qui est exprimée en grammes pour 1 000 cm³ (S °/₀₀). Certaines mers ont des taux de salinité assez éloignés de ce taux habituel de 35 °/₀₀ ; ainsi, la teneur en sel est de 1 °/₀₀ dans la Baltique et de 41 °/₀₀ dans la mer Rouge. Dans tous les cas, les proportions respectives des différents éléments restent à peu près constantes.

Composition moyenne en sels de l'eau de mer (en g/l, à 20 °C, pression de 760 mm de Hg)	
Chlorures	19 g
Sulfates	2,7 g
Bicarbonates	0,14 g
Bromures	0,06 g
+ Fluorures, Iodures...	
Sodium	10,6 g
Magnésium	1,3 g
Calcium	0,4 g
Potassium	0,3 g
+ Strontium, Fer, Vanadium, Cobalt, Nickel...	

Richard Colin

Parmi les métaux précieux, l'or, l'argent et l'uranium sont en très faible quantité. Par exemple, il faut évaporer 8 millions de tonnes d'eau de mer pour trouver environ 31 grammes d'or (1 once) parmi les 280 000 tonnes de sels déposés.

La silice, qui est nécessaire aux Diatomées pour la formation de leurs frustules, est, bien que très abondante dans l'écorce terrestre, peu soluble dans l'eau où sa concentration est très faible. L'azote et le phosphore sont indispensables aux organismes vivants, notamment pour le plancton végétal, qui les introduit dans les chaînes alimentaires. Lorsque les déchets et les cadavres des organismes descendent vers le fond, les décomposeurs assurent la minéralisation de ces éléments qui sont donc restitués dans des régions où le plancton végétal est absent, faute de lumière. Les eaux de surface s'appauvrissent donc en éléments biogènes; leur fertilité n'est rétablie que lorsque des courants remontent ces substances en surface.

Les gaz dissous

L'eau de mer renferme également des gaz dissous, dont les plus importants pour les organismes marins sont l'oxygène et le gaz carbonique.

— L'*oxygène* est peu soluble dans l'eau : on en trouve 7,2 ml dans un litre d'eau pure à 15 °C et à la pression atmosphérique normale, soit environ 1/30 de sa concentration dans l'air ; sa solubilité diminue avec la salinité ou lorsque la température augmente : les eaux marines froides sont plus riches en oxygène que les eaux tropicales.

En fait, grâce aux brassages dus aux vagues et en raison de l'activité photosynthétique des végétaux, le taux d'oxygène dissous est toujours maximal en surface et dépasse souvent la saturation. En profondeur, la teneur diminue progressivement, puis augmente à partir de 1 500 m. Ce phénomène serait dû à de lentes descentes d'eaux provenant des basses latitudes. Dans certains cas, l'oxygène peut faire totalement défaut ; par exemple, dans la mer Noire à partir de 150 m de profondeur, le brassage vertical des eaux est empêché par d'importants apports d'eaux fluviales, tandis que les échanges d'eaux profondes ne peuvent s'effectuer avec la Méditerranée en raison de la faible profondeur du Bosphore.

— Le *gaz carbonique* est, au contraire, très soluble dans l'eau ; on l'y trouve donc en plus grande quantité que dans l'air, mais la plupart du temps à l'état combiné (carbonates et bicarbonates). L'eau de mer renferme de 40 à 50 ml de CO_2 par litre (dont seulement 1 % est à l'état libre), soit 150 fois plus que l'air. Les océans sont donc le réservoir le plus important de gaz carbonique pour la biosphère. Ils jouent un rôle primordial en ce qui concerne la régulation de la teneur de ce gaz dans l'atmosphère.

La pression, la viscosité et la densité

La *pression* subie par les organismes aquatiques augmente de 1 atmosphère par 10 m de profondeur. A 10 000 m, la pression est donc de 1 000 atmosphères (1 000 kg/cm^2). Elle ne semble pas poser de problèmes aux animaux, dont certains effectuent pourtant des mouvements verticaux considérables. Il semble qu'elle ne présente d'inconvénients que pour les organismes dont le corps renferme des masses gazeuses. La *densité* est plus élevée dans les eaux froides que dans les eaux chaudes ; elle augmente également avec la salinité. Lorsque leur volume est important, les masses d'eau de densité différente ne se mélangent pas ; leurs mouvements relatifs sont donc conditionnés par ce facteur. C'est ainsi que les eaux polaires froides passeront sous les eaux superficielles plus chaudes des régions tempérées. Les possibilités de sustentation des organismes flottants sont directement liées à la *viscosité*, qui varie dans le même sens que la densité.

Les mouvements de la mer

Certains de ces mouvements (la houle, les vagues et, partiellement, les courants) sont dus à des agents atmosphériques, d'autres (les marées) à des phénomènes astronomiques.

— *Les marées*. Les organismes vivants situés au bord des côtes où la marée se fait sentir subissent des alternances d'émersion et d'immersion qui ont des conséquences importantes quant à leur répartition. On sait que les marées sont un mouvement oscillatoire du niveau de la mer, dû à l'attraction conjuguée de la Lune et du Soleil. Leur amplitude, ou marnage, c'est-à-dire la hauteur séparant une haute mer de la basse mer suivante, est variable selon les régions. Faible dans la Méditerranée, elle peut atteindre dans certains cas plus de 15 m. C'est ainsi que l'amplitude des plus fortes marées peut monter jusqu'à 16,1 m à Granville (Manche) et même 19,6 dans la baie de Fundy au Canada. L'amplitude est maximale (marées de vives eaux) à chaque pleine lune ou nouvelle lune (syzygies) et minimale (marées de mortes eaux) aux premier et dernier quartiers (quadratures). La marée est encore plus forte aux équinoxes.

Sur nos côtes atlantiques, on observe deux hautes mers et deux basses mers, c'est-à-dire deux cycles de marée par 25 heures. On dit que la marée y est de type *semi-diurne*. Dans certains cas (Tonkin, golfe du Mexique), il n'y a qu'une oscillation par jour : la marée est *diurne*. On distingue, enfin, un type *mixte*, où l'on observe deux cycles par jour, mais d'amplitude différente (mer de Chine).

— *Les courants*. Les marées peuvent donner naissance au voisinage des côtes à des courants parfois très violents (flot et jusant). Les grands courants océaniques sont, en général, dus au vent ou aux différences de densité des eaux. Ils sont soumis aux forces de Coriolis, liées à la rotation de la Terre. Ces forces s'exercent toujours dans le même sens. Elles entraînent les courants dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère Nord et dans le sens contraire dans l'hémisphère Sud. Dans certaines régions, très souvent le long des côtes ouest des continents aux latitudes subtropicales, où dominent des vents venant de terre ainsi que de forts courants, les eaux de surface sont poussées vers le large. Ce phénomène, qui provoque une remontée des eaux sous-jacentes, plus froides et très riches en substances nutritives, porte le nom anglais d'*upwelling*. On l'observe sur les côtes du Pérou, de l'Afrique du Sud-Ouest, etc., régions d'upwelling qui sont les plus poissonneuses des océans.

Des changements de courant peuvent avoir des effets désastreux sur les organismes marins. C'est ainsi qu'à certaines périodes, la zone côtière du Pérou reçoit des eaux plus chaudes et moins salées par suite de modifications des courants. Le plancton végétal diminue alors fortement, ce qui entraîne une forte réduction de la population piscicole (plus de la moitié des Poissons). Cet événement a lieu en général vers Noël, d'où son nom d'El Niño. Il se reproduit tous les 7 ans environ.

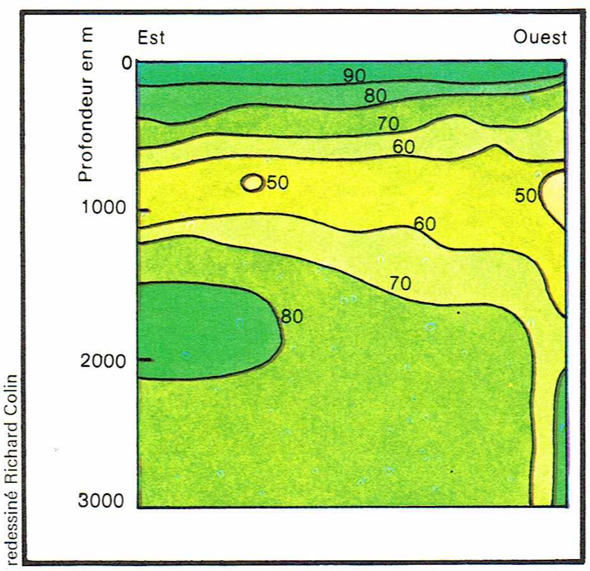

◀ ***Représentation schématique de la distribution verticale de l'oxygène** (pourcentage de saturation) dans l'Atlantique Nord, entre 20 et 25° N. Les zones hachurées correspondent aux zones les moins oxygénées (d'après Seiwell, Sacchi et Testard, **Écologie animale**, Doin).*

▼ ***Section de l'Atlantique :** les courants marins entre les surfaces et les profondeurs. Dans les zones subpolaires, les eaux à faible salinité, froides et lourdes, vont vers le fond et attirent celles, plus chaudes et légères, des zones équatoriales, constituant ainsi un mouvement compensé en profondeur par la migration des eaux polaires vers les zones équatoriales.*

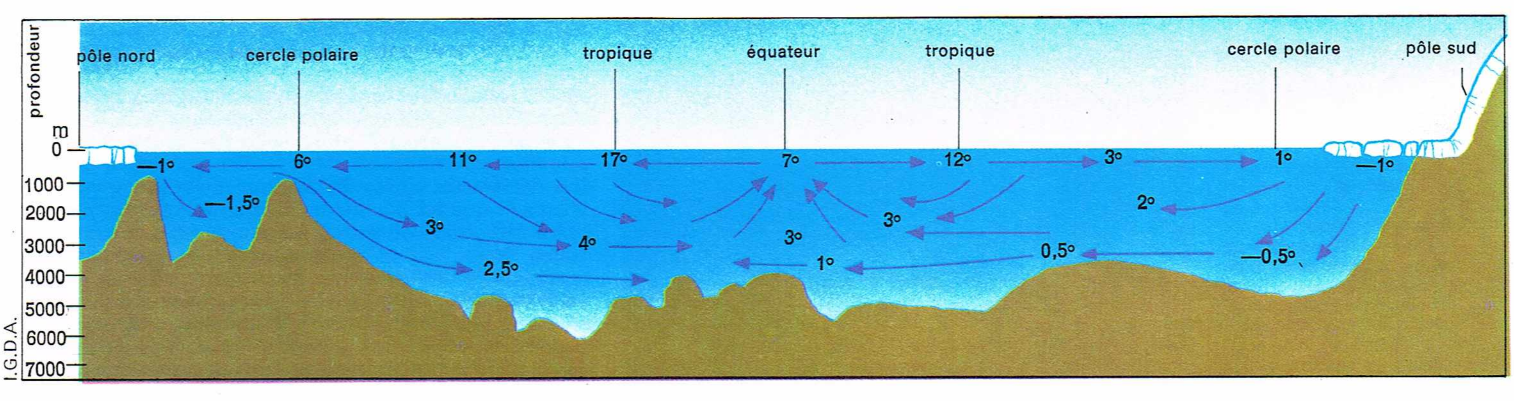

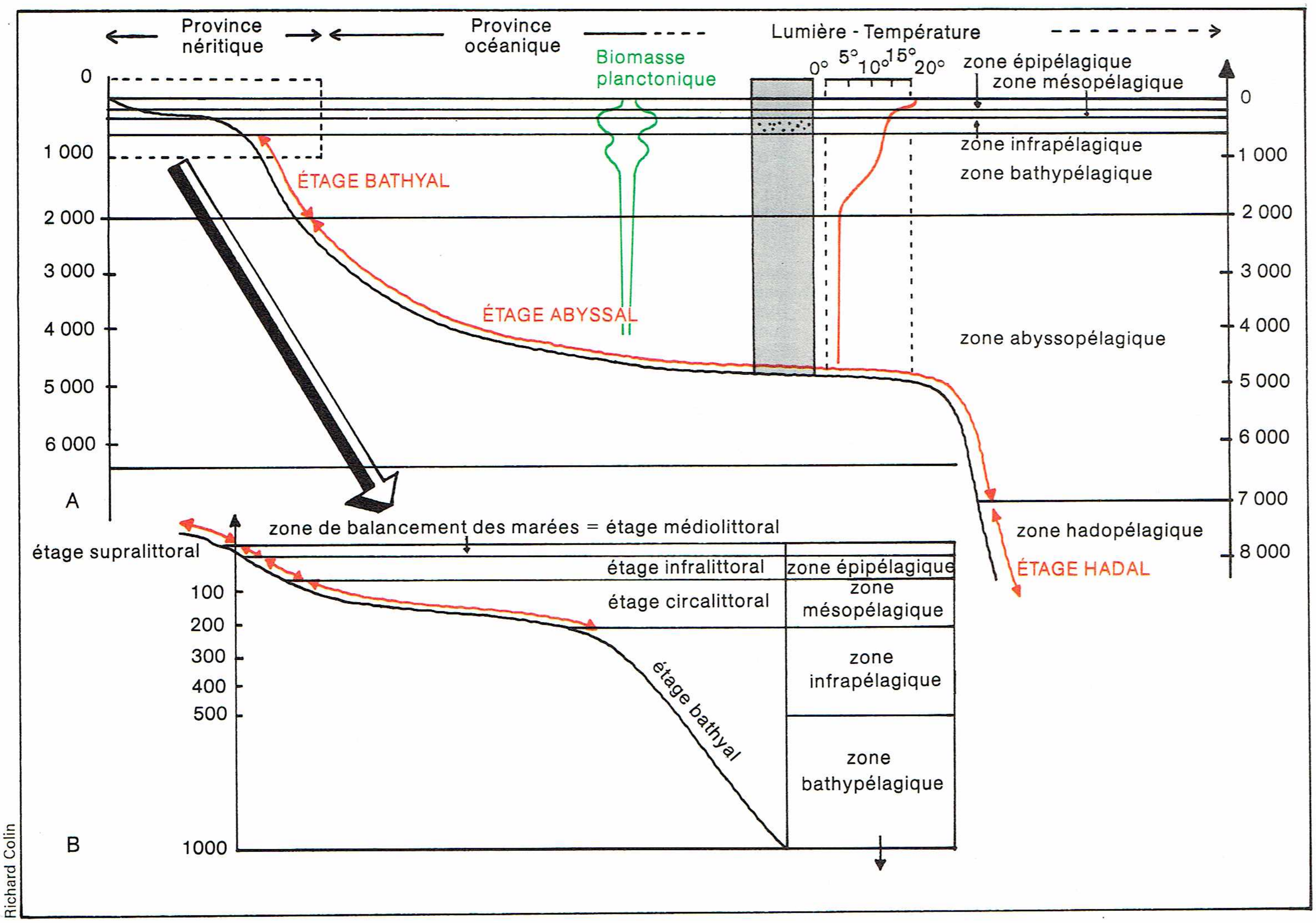

▲ ***Représentation graphique des différents types de milieux marins en fonction de leurs caractères écologiques fondamentaux : A, les principaux ensembles biologiques marins ; B, détail de l'étage supralittoral (d'après Pérès).***

La vie dans les mers : caractères généraux et types de milieux

Le cycle de la vie dans les mers

Comme la vie terrestre, la vie marine dépend du soleil. A la surface des océans, l'énergie solaire est utilisée par les végétaux chlorophylliens, qui trouvent dans les eaux les sels nutritifs, toujours présents en petites quantités, et le gaz carbonique qui leur sont nécessaires. La lumière solaire étant progressivement absorbée par les eaux, on est amené à distinguer un *système phytal,* qui reçoit assez de lumière pour que les Algues puissent y vivre, et un *système aphytal,* dépourvu de végétaux chlorophylliens.

Les Algues attachées sur le fond, tels les *Fucus,* ne peuvent donc vivre qu'à faible profondeur : elles forment une mince frange le long des côtes. Mais ces Algues sont trop peu nombreuses pour suffire à tous les animaux marins (ceux-ci, curieusement, les consomment peu) ; la plupart d'entre eux vivent d'Algues microscopiques qui flottent au gré des courants et qui forment le plancton végétal, ou *phytoplancton.* Ces végétaux se trouvent par milliers dans les couches supérieures des eaux. Quand les apports de sels nutritifs, la température et la luminosité sont suffisants, leur population peut doubler chaque jour ! Ils sont consommés par de petits herbivores du plancton animal *(zooplancton),* qui sont ensuite dévorés par des carnivores de petite taille (autres animaux du zooplancton, Poissons, etc.). Certains Poissons (maquereau, hareng) mangent du plancton toute leur vie ; d'autres en consomment lorsqu'ils sont jeunes puis, quand ils sont adultes, s'attaquent à des proies plus volumineuses. Au-dessus des carnivores primaires, on trouve des niveaux successifs de formes carnivores, la chaîne se terminant par les prédateurs terminaux (par exemple, le requin). A leur mort, ces derniers sont décomposés par les Bactéries. Les sels minéraux ainsi formés seront à nouveau utilisés par les Algues photosynthétiques, qui sont donc les *producteurs primaires.*

Le cycle ainsi formé est en réalité plus complexe : à chaque phase, tous les organismes ne sont pas condamnés à être mangés. Beaucoup d'entre eux réussissent à survivre, à se reproduire et meurent de leur belle mort. Leurs cadavres tombent continuellement des couches d'eau supérieures vers le fond, où ils servent de nourriture à d'autres êtres vivants *(saprophages)* [à moins qu'ils n'aient été happés ou décomposés au cours de la descente]. Dans cette dernière phase, les cadavres sont transformés en sels minéraux par les Bactéries *(décomposeurs).*

L'ensemble du cycle forme donc un réseau de chaînes alimentaires, que nous allons analyser plus en détail. Ces chaînes sont très variées et dépendent des habitudes alimentaires des organismes, lesquels ne sont pas répartis au hasard dans le milieu marin. Nous savons en effet que, si les océans forment un milieu continu, c'est-à-dire sans obstacles « matériels » empêchant la propagation des êtres, les conditions physico-chimiques y diffèrent selon les régions et selon la profondeur. Les milieux aquatiques offrent donc une grande diversité d'habitats ; ceux-ci ont fait l'objet d'une classification, d'ailleurs applicable à toute collection d'eau de grand volume.

Les différents types de milieux marins

On sait que les continents sont bordés par un *plateau continental,* plus ou moins large, qui descend en pente douce. Vers 200 m de profondeur, le fond s'incline brusquement et présente une pente très accentuée (le *talus continental*) jusqu'à une profondeur de 2 000 à 5 000 m. Les grands fonds, qui sont souvent assez plats (les *plaines abyssales*), peuvent être coupés de chaînes de montagnes sous-marines ou de grandes fosses.

Le plateau continental et les masses d'eau qui le couvrent constituent la *province néritique;* cette région contient la plupart des Algues fixées et presque tous les Poissons pêchés par l'homme. La *province océanique* englobe tout le reste, c'est-à-dire la région des hautes mers située au-delà du plateau continental.

Dans chacune de ces provinces, les organismes marins, les crabes par exemple, peuvent vivre sur le fond; on dit qu'il s'agit d'espèces *benthiques*. Le *benthos* est un ensemble complexe constitué de diverses biocénoses. On peut en effet y rencontrer des organismes *fixés* : des Algues, mais aussi des animaux dont de nombreuses espèces vivent attachées au substrat *(animaux sessiles)*, tels les Éponges, les Hydraires, les balanes, etc. D'autres animaux marchent, rampent ou nagent sur le fond. Les uns, certains Vers par exemple, se déplacent très peu : ce sont des *sédentaires*. D'autres, comme les étoiles de mer, les bigorneaux, etc., sont capables de déplacements importants *(faune vagile)*. Les sédiments eux-mêmes sont habités : on y rencontre des animaux fouisseurs (Vers, Lamellibranches...) et de nombreux micro-organismes décomposeurs.

Si les êtres benthiques sont très nombreux, il existe aussi de nombreux organismes vivant en pleine eau, sans contacts avec le fond, même pour leur nourriture. De telles espèces sont dites *pélagiques*. Le *pélagos* se subdivise en deux sous-ensembles : le *plancton*, formé par l'ensemble des organismes vivant librement dans les eaux et passivement entraînés par elles, et le *necton*, qui englobe toutes les espèces dont la motilité propre est suffisante pour qu'elles soient indépendantes des courants (Poissons, baleines, etc.).

Les biocénoses sont réparties selon une *zonation verticale*, correspondant à la variation des propriétés physico-chimiques du milieu marin avec la profondeur. Le peuplement des provinces benthiques et pélagiques s'effectuera donc selon cette zonation.

Pérès et Picard ont proposé une classification qui repose sur des caractères écologiques fondamentaux (éclairement, durée d'émersion, pression) et permet de classer les principaux ensembles biologiques marins de la surface du globe. Dans le domaine benthique on distingue ainsi les étages : supralittoral, médiolittoral, infralittoral, circalittoral, bathyal et enfin abyssal. Le domaine pélagique est divisé en zones. On distinguera successivement, en allant vers le fond, une zone *épipélagique* qui est celle où l'assimilation chlorophyllienne est possible (jusqu'à 120 m environ), puis les zones *méso-*, *infra-*, *bathy-*, *abysso-* et *hadopélagique*.

La vie en pleine mer : les organismes pélagiques

Le plancton

Le plancton est constitué des organismes flottant librement dans les eaux ou nageant faiblement, et qui ne peuvent échapper aux courants qui les entraînent. Le terme, créé par V. Hensen en 1886, englobe donc, par définition, non seulement les petits organismes, mais aussi les êtres vivants de grande taille qui, telles les méduses ou les sargasses flottantes, sont entraînés passivement par les masses d'eau en mouvement.

On récolte le plancton en traînant dans l'eau, à vitesse réduite, une sorte de filet conique constitué d'un tissu à mailles fines. L'eau filtre, et les organismes retenus par le tissu s'accumulent dans un collecteur détachable fixé à la pointe du cône. Les dimensions des éléments du plancton sont d'ailleurs très variées. On peut répartir arbitrairement les formes planctoniques en plusieurs types : le *macroplancton*, formé d'êtres visibles à l'œil nu (de quelques millimètres pour la plupart à plus de 1 mètre chez certaines grandes méduses), le *microplancton* (de quelques millimètres à 50 μ), et le *nanoplancton*, constitué d'organismes d'une taille inférieure à 50 μ qui passent à travers les mailles du filet. Naturellement, la capture d'êtres de tailles aussi dissemblables exige la mise en œuvre de techniques de pêche différentes. Le même problème se pose à leurs prédateurs. Certains animaux consommateurs de plancton filtrent d'énormes quantités d'eau pour en extraire les minuscules organismes qui y sont contenus. Un tel mécanisme alimentaire exige de la part de l'animal filtreur la différenciation de structures spécialisées. D'autres n'utilisent pas des dispositifs aussi complexes et se spécialisent dans la chasse d'animaux, parfois aussi gros qu'eux.

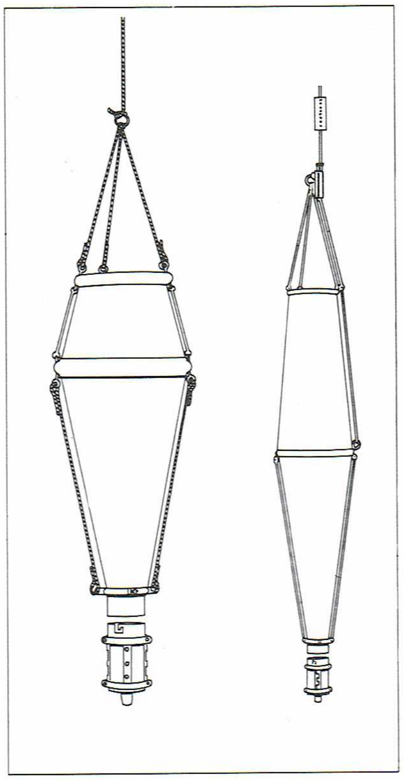

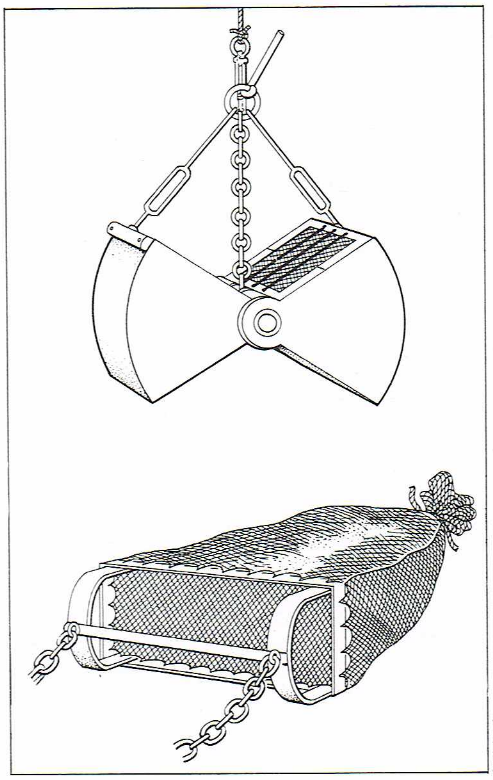

I.G.D.A.

▲ *Divers* **dispositifs de capture** *des organismes marins : à gauche, deux filets à plancton (modèle normal, à gauche; modèle à fermeture, à droite); à droite, en haut, une benne pelteuse de Petersen; en bas, une drague.*

— *Diversité des organismes planctoniques*

● Le *phytoplancton* est composé d'Algues, souvent microscopiques, qui synthétisent leur propre substance en utilisant l'énergie lumineuse captée par leurs pigments et les éléments minéraux qu'elles puisent dans l'eau. Ces végétaux servent de nourriture aux animaux herbivores. Ils forment ainsi ce que Prescott a appelé de façon imagée les « pâturages de la mer ». La photosynthèse exigeant un éclairement suffisant, le phytoplancton occupe donc les parties supérieures des mers, sur quelques mètres d'épaisseur. Les Algues qui le constituent appartiennent à des groupes très divers, dont les mieux représentés sont les groupes des Diatomées et des Dinophycées (Péridiniens).

Les Diatomées sont des Algues microscopiques unicellulaires possédant des plastes bruns dont la composition rappelle celle des Algues brunes (Phéophycées). Chaque cellule est enfermée dans une sorte de boîte siliceuse transparente, formée de deux valves s'emboîtant l'une dans l'autre; ces *frustules* présentent parfois des appendices très développés *(Biddulphia, Chaetoceros)*, qui, semble-t-il, aident l'Algue à flotter en augmentant sa surface portante. Les Diatomées peuvent être solitaires *(Navicula)* ou rester reliées entre elles pour former des filaments ou des colonies d'aspects variés (en tube, en éventail, etc.), dont certaines sont visibles à l'œil nu.

Les Dinophycées sont pourvues de flagelles qui leur permettent de se déplacer. Si la plupart des espèces ont

P. Wilson

◀ *Les Diatomées constituent un des éléments les plus importants* **du phytoplancton** *; ici, quelques Diatomées et autres Algues vues,* **in vivo**, *au microscope :* **Biddulphia sinensis, Rhizosolenia sp., Talossiothrix sp. ; Chaetoceros sp.**, *etc.*

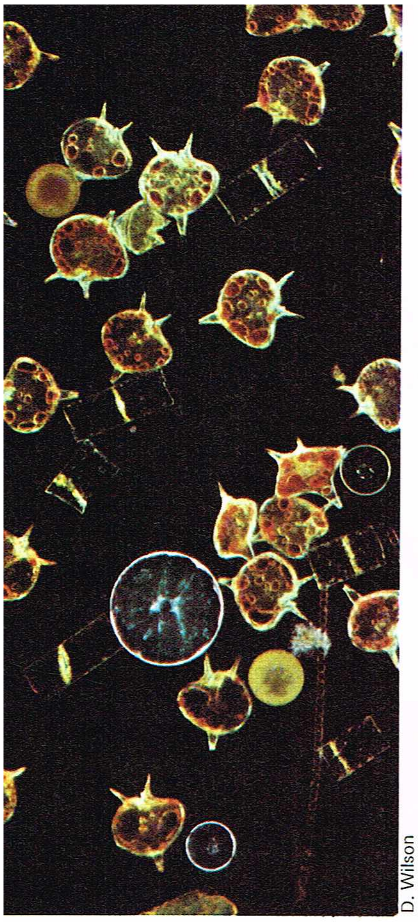

D. Wilson

C. Carré - Jacana

▲ A gauche, plancton marin à* Peridinium depressum *(dominant), Diatomées, œufs et larves divers. A droite, dans le plancton permanent (holoplancton), les Chétognathes, tels ces* Sagitta setosa, *sont des « Vers » particulièrement abondants.

▼ Des études précises sur le* phytoplancton *et ses variations* d'abondance, *dans l'Atlantique Nord notamment, ont montré que la population des Diatomées* (Chaetoceros curvisetus, *ici) présente deux poussées successives au cours de l'année.

une nutrition typiquement végétale, d'autres n'ont pas de plastes et se nourrissent par ingestion de proies solides, comme les animaux. Parmi les formes les plus souvent rencontrées, citons *Peridinium, Gonyaulax* et *Gymnodinium*. La noctiluque *(Noctiluca)*, dépourvue de pigments, a la particularité d'émettre une lumière blanchâtre quand elle est excitée par le choc des vagues.

On trouve également des Cyanophytes *(Trichodesmium)* et des Coccolithophoridés à coque munie de petits disques calcaires. Les *Phaeocystis* (Chrysophycées) forment des colonies flottantes mucilagineuses, dans lesquelles les cellules sont groupées en amas et dont la pullulation peut causer des dommages aux filets des pêcheurs. Il existe bien d'autres organismes que nous ne citerons pas ici. Par ailleurs, aux époques reproductrices, on rencontre le long des côtes des myriades de spores et de gamètes flagellés émis par les Algues benthiques.

● Le *zooplancton* englobe une extraordinaire variété d'organismes, qui appartiennent parfois à des groupes très évolués. Tous les embranchements marins possèdent des formes planctoniques. Si certains animaux sont toujours planctoniques, beaucoup d'autres présentent, en plus de leur vie planctonique, une période nageuse dans le necton ou une phase de vie benthique.

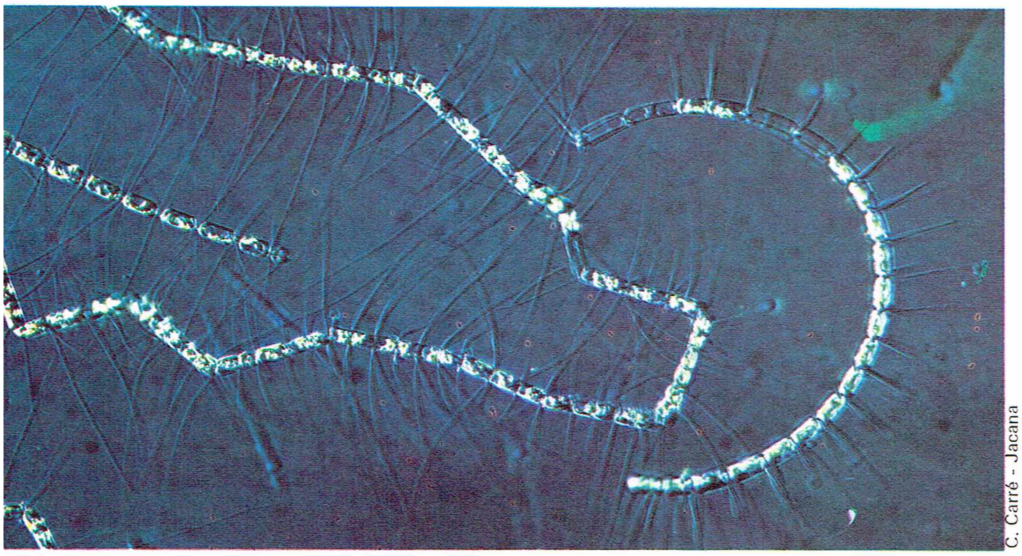

C. Carré - Jacana

★ Dans le *plancton permanent (holoplancton)*, on rencontre des Protistes, comme les Foraminifères à coquille calcaire et les Radiolaires à squelette siliceux. On trouve également de nombreux organismes pluricellulaires. Parmi les Cœlentérés, signalons les Siphonophores, qui forment des colonies flottantes fréquemment présentes dans les eaux chaudes. Ces curieux organismes sont munis de filaments pêcheurs fortement urticants qui peuvent mesurer plus de 10 m. Leur sustentation est assurée par un énorme flotteur pouvant atteindre 10 à 20 cm de long et qui contient de l'azote, de l'oxygène et de l'oxyde de carbone (velelles, physalies). Les Chétognathes sont des « Vers » particulièrement abondants *(Sagitta)*. Ces animaux, proches des Annélides, possèdent des crochets céphaliques mobiles leur permettant de saisir leurs proies. Certains groupes de Mollusques sont uniquement planctoniques, celui des Ptéropodes par exemple. Certains Tuniciers (Pyrosomes, Dolioles, Salpes et Appendiculaires) sont également particulièrement adaptés à ce mode de vie. Les Crustacés, excessivement nombreux, forment la plus grande partie du zooplancton. Deux groupes sont particulièrement importants, celui des Copépodes et celui des Euphausiacés. Les Copépodes sont de petits Crustacés inférieurs qui mesurent quelques millimètres de long. On en connaît de nombreuses espèces, dont la plus étudiée est *Calanus finmarchicus*, petit animal à antennes démesurées, fréquent dans l'Atlantique Nord. Les Euphausiacés sont des Crustacés supérieurs (Malacostracés), assez analogues à des crevettes et pouvant atteindre jusqu'à 5 cm de long. Ils portent souvent des organes lumineux. Le krill de l'Antarctique *(Euphausia superba)* est la nourriture exclusive des baleines. Cet organisme est si abondant que les baleines peuvent en consommer suffisamment pour atteindre, deux ans après leur naissance, des poids de l'ordre de 80 tonnes pour une longueur de 24 m.

★ Le *plancton temporaire* (méroplancton) est surtout formé de larves libres de nombreux animaux, Vertébrés ou Invertébrés, qui, à l'état adulte, appartiennent au necton ou au benthos. Citons le cas des oursins dont seule la larve *(pluteus)* est planctonique.

— *Biologie du plancton*

● *Le phytoplancton et ses variations d'abondance.* La quantité de lumière nécessaire pour une photosynthèse efficace est différente selon les espèces. La zone superficielle des mers, la plus éclairée, n'est pas forcément la plus productrice; c'est ainsi que les Diatomées ont moins de besoins en lumière que les Péridiniens. Il n'en reste pas moins que toute la vie végétale est concentrée dans une très faible épaisseur d'eau. Des études précises ont montré que, dans l'Atlantique Nord, la population des Diatomées *(Chaetoceros)* présente deux poussées successives au cours de l'année, l'une au printemps et l'autre en automne. Un tel cycle semble dû aux variations de facteurs externes, tels que l'éclairement, la température de l'eau et la teneur en sels nutritifs. L'azote (sous forme d'ammonium, de nitrites et de nitrates) et le phosphore (phosphates) sont nécessaires au plancton. En hiver, ces sels minéraux sont abondants, mais l'éclairement et la température sont trop faibles pour que la photosynthèse s'effectue dans de bonnes conditions : la production de Diatomées est donc basse. Avec le retour du printemps, toutes les conditions sont remplies pour que les synthèses puissent se dérouler à nouveau favorablement, et les Diatomées se multiplier : on a calculé que l'eau de mer peut produire 26,8 milliards de Diatomées pour 0,03 mg de phosphate consommé! Tout va bien tant que ces éléments biogènes sont en quantité suffisante. Mais il apparaît dès la fin du printemps un phénomène d'échauffement assez rapide des eaux superficielles; une discontinuité, la thermocline saisonnière, s'installe alors entre les eaux chaudes supérieures et les eaux froides plus profondes. Cette discontinuité empêche les remontées des nitrates et phosphates. Dans ces conditions, tous les sels nutritifs disponibles sont rapidement utilisés et, faute d'éléments biogènes, la population de Diatomées se réduit de plus en plus, bien que les conditions de température et d'éclairement soient particulièrement favorables. A la fin de l'été, la thermocline tend à disparaître, et des courants ascendants peuvent enfin apporter les sels minéraux dont le besoin se faisait sentir avec de plus en plus d'acuité.

Il en résulte une deuxième poussée de croissance de la population de Diatomées. Puis la lumière devient à nouveau insuffisante.

Cet exemple nous montre l'importance considérable des nitrates et des phosphates en ce qui concerne la densité des populations (d'autres éléments sont également nécessaires : le fer, la silice, la vitamine B_{12}). Quand ils sont abondants, on assiste parfois à de véritables pullulations. Les marées rouges *(red tides)* sont dues à des Dinophycées *(Gymnodinium)*, dont le prodigieux accroissement en nombre est lié à une augmentation périodique de la quantité de sels nutritifs disponibles; on a pu compter, le 23 juillet 1947, plus de 60 millions d'individus par litre dans les eaux du golfe du Mexique! Ces pullulations entraînent des destructions spectaculaires des Poissons qui sont empoisonnés. Cet effet nocif est dû à la présence de toxines qui, en agissant un peu comme le curare, inhibent la réponse des muscles squelettiques et les paralysent. On estime que 500 millions de Poissons auraient été ainsi détruits en 8 mois dans le golfe du Mexique.

Les Péridiniens présentent des variations annuelles d'abondance, très souvent à d'autres époques que les Diatomées. Dans ces conditions, les proportions relatives de ces deux types d'Algues se modifient continuellement. Des échantillonnages de plancton atlantique ont montré que les Dinophycées constituent, par exemple, 27 % de la flore en octobre, 64 % en novembre et 10 % en décembre. Au cours d'une année, la quantité et la composition du phytoplancton varient donc considérablement. Comme celui-ci constitue la nourriture des herbivores du zooplancton, on peut se demander si ces fluctuations se répercutent sur la population des animaux planctoniques.

● *Le zooplancton : mécanismes alimentaires et répartition*. Il est possible de connaître le *régime alimentaire* de ces animaux en examinant le contenu de leurs tubes digestifs. Les premières conclusions qu'on peut tirer d'un tel examen doivent être confirmées par des élevages réalisés au laboratoire avec essais de régimes différents. Certains animaux planctoniques sont herbivores, d'autres sont carnivores. Les mécanismes de préhension des aliments sont très variés et dépendent naturellement de la taille de la proie.

Prenons, par exemple, un Copépode. Il mesure quelques millimètres de long et se nourrit de petits organismes microscopiques (en général des Diatomées). Pour extraire cette nourriture de l'eau, il doit mettre en œuvre un véritable dispositif de filtration. Certains de ses appendices (les maxilles) sont pourvus de soies garnies de fines barbules. L'ensemble forme une sorte de grille à travers laquelle passe un courant d'eau déterminé par le battement des antennes, mandibules et maxilles. Ce filtre retient les aliments, qui sont ensuite consommés; chez *Calanus* par exemple, la surface de filtration est d'environ 0,4 mm^2 et l'animal filtre une centaine de cm^3 par jour.

Une telle technique se retrouve, avec des modalités différentes, chez de nombreux animaux. Dans certains cas, il s'y ajoute un enrobage des aliments par des substances muqueuses. C'est ainsi que chez les Tuniciers, les particules alimentaires filtrées par le pharynx sont dirigées par des mouvements ciliaires vers l'endostyle, sorte de canal dont les cellules sécrètent un mucus; celui-ci se condense en une sorte de « boudin », sur lequel viennent se coller les aliments; l'ensemble est ensuite conduit jusqu'à l'œsophage. La nutrition par filtration implique une certaine passivité : l'animal filtre tout ce qu'il y a dans l'eau. Son régime alimentaire n'est donc pas strict : il consomme des Algues et de petits animaux.

D'autres animaux capturent leur proie. Les Chétognathes, par exemple, peuvent manger des animaux aussi gros qu'eux; ils les immobilisent avec leurs crochets céphaliques. Les Siphonophores, également des prédateurs, consomment en général des Copépodes, mais aussi des petits Poissons; la capture est effectuée à l'aide des filaments pêcheurs pourvus de nématocystes dont les minuscules harpons empoisonnés sont déchargés sur la victime.

★ *Répartition en profondeur, migrations verticales.* Les animaux planctoniques dépendant de l'activité du phytoplancton, il serait logique de les rencontrer à proximité de leurs pâtures. Cela se vérifie en partie. En effet, la vie se clairsème au fur et à mesure que l'on va vers le fond. La biomasse est mille fois plus faible entre 6 000 et 6 500 m de profondeur que de 0 à 50 m. Le plancton se trouve donc plutôt dans les eaux peu profondes (il existe cependant un plancton profond dont nous ne parlerons pas ici).

Mais les animaux planctoniques ne restent pas toute la journée au même endroit. En étudiant la répartition en profondeur du zooplancton, on a pu mettre en évidence un phénomène migratoire nycthéméral. Pour des femelles adultes de *Calanus,* d'après Cushing, le schéma général serait le suivant. Ces petits Copépodes montent vers la surface à la tombée du jour, puis descendent au milieu de la nuit; ils remontent en surface juste avant l'aurore, puis redescendent rapidement en même temps que pénètrent les rayons lumineux, et restent en profondeur (vers 50 m) pendant tout le jour. Ces migrations peuvent atteindre, selon les espèces, de quelques mètres à plus de 800 m. Leur déterminisme est peu connu. Il semble en relation directe avec la lumière; ces animaux exigent sans doute une intensité lumineuse optimale : ils sont repoussés par une lumière forte et attirés par une lumière faible. Outre ce facteur, des recherches ont montré que d'autres agents pouvaient intervenir : on a observé des réponses différentes aux effets de la gravité, un rythme journalier de besoins en nourriture végétale, des réactions à de faibles changements d'acidité du milieu.

★ *Variations saisonnières.* Les populations du zooplancton subissent, comme celles du phytoplancton, des variations saisonnières en abondance et en composition. Ainsi, dans la Manche, les populations de Copépodes présentent deux maximums dans l'année, l'un en

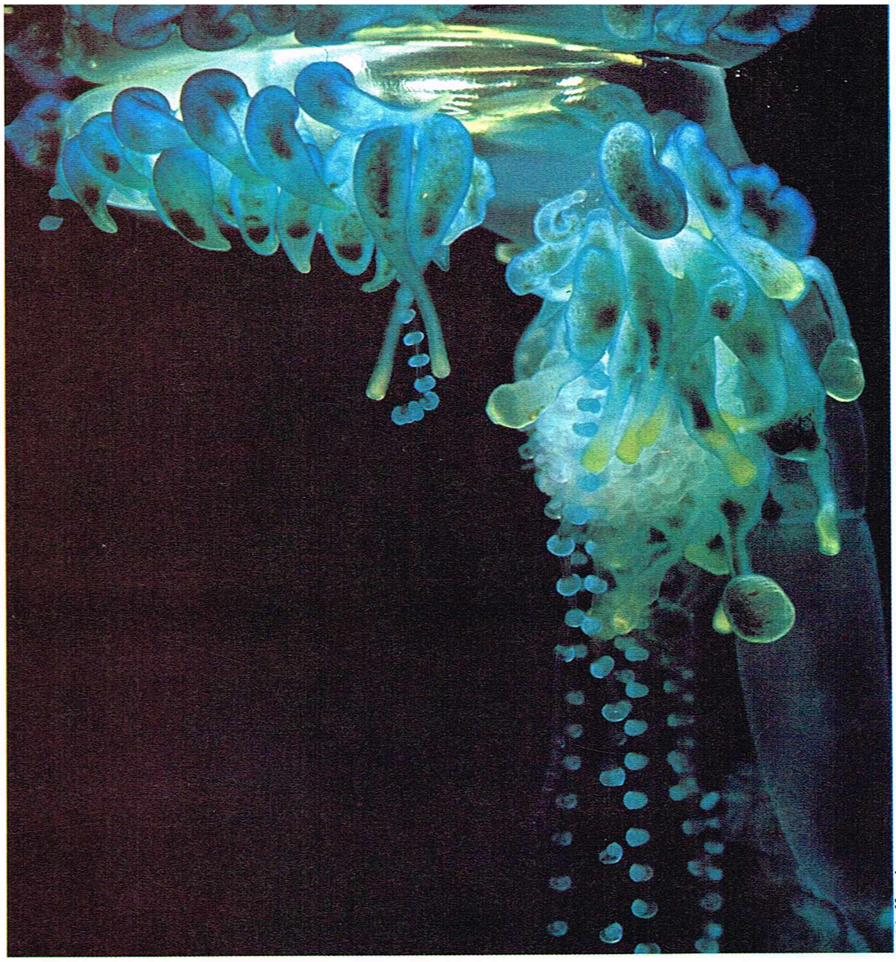

S. Yoff - Jacana

▲ ***Les Siphonophores, tel ce* Physalia*, consomment en général des Copépodes et des petits Poissons qu'ils capturent à l'aide de leurs filaments pêcheurs pourvus de nématocystes.***

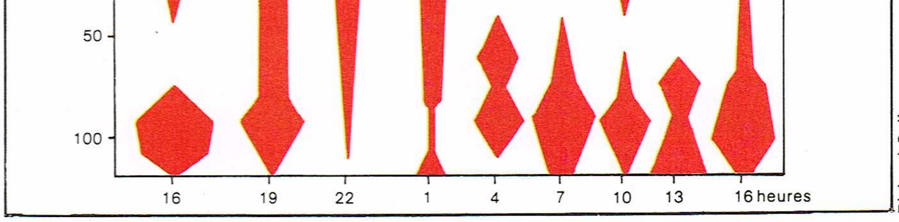

Richard Colin

▼ ***Représentation schématique de la* migration verticale journalière *de femelles de* Calanus finmarchicus *au large de la Grande-Bretagne (11-12 juillet). La largeur des graphes indique l'abondance à chaque profondeur (d'après Nicholls).***

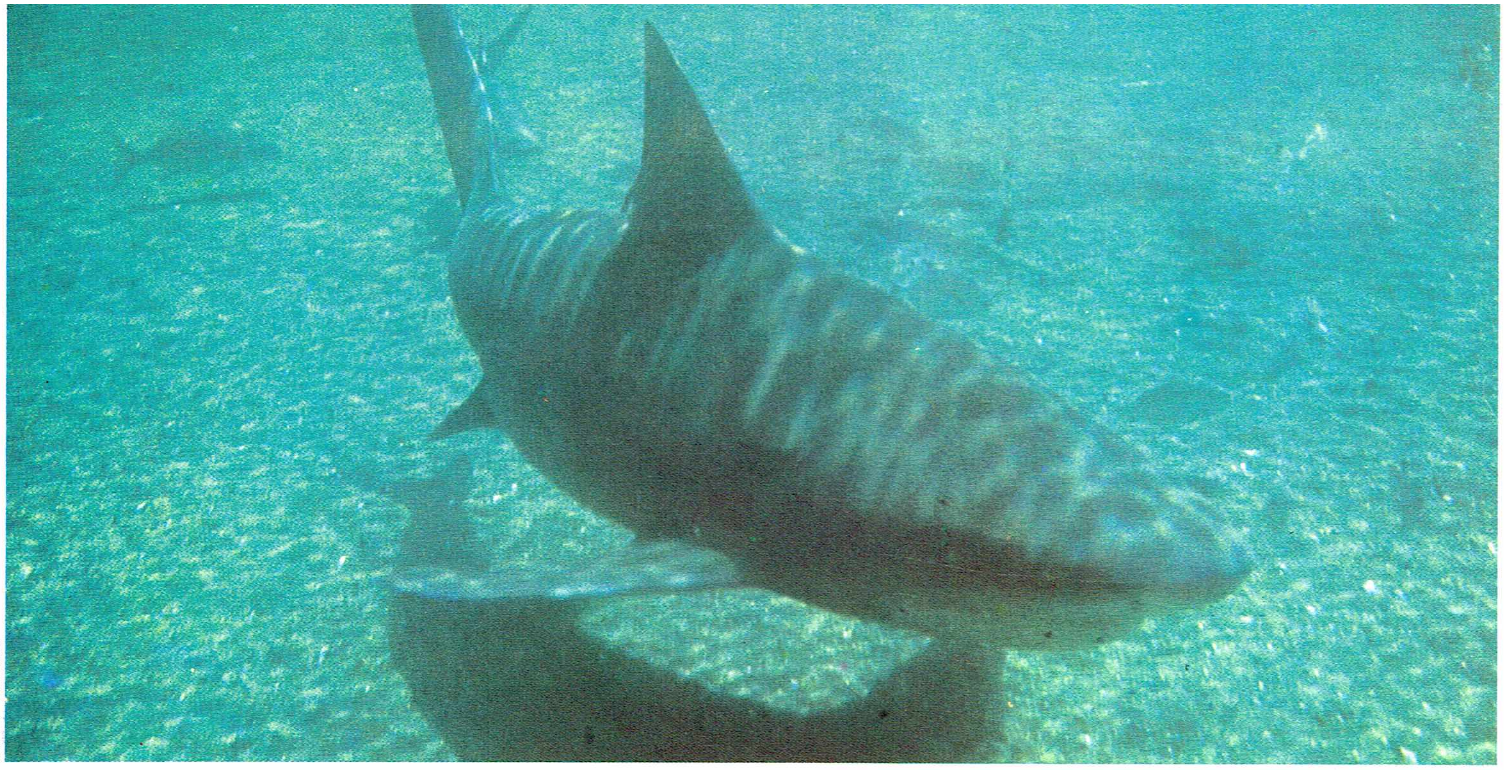

Eliott - Jacana

▲ *Les requins-baleines, ici* **Rhincodon typus**, *gros consommateurs de plancton, possèdent un filtre à plancton formé par des filaments branchiaux.*

mai, l'autre en août-septembre. Des variations identiques ont été mises en évidence pour d'autres groupes. L'augmentation de la biomasse suit celle du phytoplancton ; ce décalage s'explique, en partie, par le fait que la multiplication du zooplancton est plus lente que celle du plancton végétal. La composition du zooplancton présente également des variations. Certaines sont dues aux compétitions pour la nourriture entre les différentes espèces vivant dans le même milieu. Dans d'autres cas, la décroissance d'une population peut être liée à la voracité ou au grand nombre d'espèces carnivores qui s'en nourrissent. Le long des côtes, enfin, viennent s'ajouter, aux époques reproductrices, les innombrables larves des espèces benthiques.

★ *Répartition géographique*. On connaît peu de formes cosmopolites. Les êtres planctoniques sont, en général, répartis en fonction de la salinité, de la température et de l'éclairement. La plupart ont des exigences écologiques limitées et se trouvent donc toujours dans des eaux présentant les mêmes caractéristiques ; on pourra ainsi reconnaître ces eaux sans faire aucune mesure physique ou chimique, et les suivre dans leurs déplacements ainsi que dans leurs mélanges, en recherchant simplement si telle espèce caractéristique y est présente ou non. Par exemple, dans la Manche, deux espèces de Chétognathes, *Sagitta setosa* et *Sagitta elegans* caractérisent deux masses d'eau différentes. La première espèce est indicatrice d'eaux provenant de la zone néritique et contenant très peu de phosphates ; par contre, *S. elegans* se trouve dans des eaux provenant d'un mélange d'eaux côtières et océaniques de l'Atlantique Nord, lesquelles sont plus riches en plancton ; le développement des larves de Poissons s'y effectue de façon excellente ; la présence d'eaux à *Sagitta elegans* est donc un bon indicateur d'abondance possible de Poissons (harengs).

Voilà quelques données sur les premiers maillons de la chaîne alimentaire des régions pélagiques. Le plancton, qui comprend en effet les producteurs primaires, des herbivores et des carnivores, forme une chaîne ouverte vers le haut. Elle se continue dans le necton : les formes de petite taille sont à leur tour la proie d'organismes plus gros et plus puissants, excellents nageurs qui peuvent échapper aux courants.

Le necton

C'est parmi les animaux du necton que l'on observe la plupart des Poissons consommés par l'homme. On y trouve aussi des Crustacés, des Céphalopodes, des Mammifères marins, etc. Ce sont presque tous des carnivores lorsqu'ils sont adultes.

— *Les consommateurs de plancton*. Ces animaux dépendent assez étroitement du plancton et donc, indirectement, des différents facteurs qui conditionnent l'abondance ou l'absence de celui-ci. C'est dire l'importance d'une bonne connaissance de ces facteurs pour la mise en œuvre de pêcheries rationnelles. En raison de la petite taille de leurs proies, ces animaux doivent eux aussi filtrer l'eau qui les contient. Les arcs branchiaux des Poissons planctonivores sont munis d'épines développées qui réalisent une sorte de filet permettant de concentrer la nourriture dans la bouche. Les baleines utilisent leurs fanons, qu'elles raclent avec leur langue lorsque la pêche est finie.

Le hareng, la sardine et le sprat (Clupéidés) ainsi que l'anchois (Engraulidés) se nourrissent presque exclusivement de plancton. Certains ont un régime mixte composé d'Algues et d'animaux. Par exemple, le hareng jeune consomme des éléments de petite taille : larves diverses, Diatomées, Dinophycées, puis il change de régime pour se consacrer exclusivement à la chasse aux Copépodes ; on a pu compter plus de 50 000 Copépodes dans l'estomac d'un hareng ! Les lieux de pêche sont ceux où ces Crustacés sont abondants, puisque le hareng suit les déplacements horizontaux (courants) des eaux qui en contiennent. D'ailleurs, les pêcheurs évitent depuis longtemps les eaux riches en Diatomées (les « eaux sales »), qui sont pauvres en Copépodes. On connaît un certain nombre de races de harengs, localisées chacune dans des zones déterminées. On les pêche par chalutage ou avec des filets dérivants. De même, la sardine *(Clupéidés)*, la morue *(Gadidés)*, le maquereau *(Scombridés)*, etc., vivent dans les eaux peu profondes de la zone néritique. Le maquereau n'est d'ailleurs consommateur de plancton que dans sa jeunesse ; adulte, il chassera des jeunes d'autres espèces de Poissons (hareng) ou des Poissons de petite taille (lançon).

Les baleines sont des gros consommateurs de plancton. Elles recherchent les couches riches en krill, utilisant un dispositif analogue au « sonar ». Citons aussi les requins-baleines, qui possèdent également un filtre à plancton formé par des filaments branchiaux. Le requin-baleine, parfaitement inoffensif, est le plus grand Poisson connu : il peut atteindre près de 20 m de long.

— *Les grands prédateurs*. Ce sont des Poissons, des Oiseaux, des phoques, des cachalots et certains Invertébrés. Avec eux, nous parvenons au sommet de la chaîne alimentaire. Si de nombreux Céphalopodes (calmars, seiches, pieuvres) vivent de préférence le long des côtes, on peut aussi rencontrer des représentants de ce groupe au large. On les connaît en général à l'état d'échantillons morts ou de débris résultant de combats avec des cachalots, qui en font leur proie. Certains d'entre eux atteignent des dimensions gigantesques : le formidable *Architeuthis* pourrait mesurer, bras compris, de 18 à 20 m de long.

Parmi les Poissons, citons simplement les requins et les thons, qui sont tous les deux des espèces de haute mer. Les requins sont de redoutables prédateurs dont les mâchoires sont garnies de multiples dents. Certains d'entre eux (les roussettes) fréquentent nos côtes, mais la plupart se trouvent au large. La pêche au requin,

effectuée de manière industrielle au filet, est assez pratiquée. Les thons (Thunnidés) sont également des prédateurs terminaux. On distingue communément deux espèces, le thon rouge *(Thunnus thynnus),* qui peut atteindre plus de 2 m de long, abondant dans les mers chaudes et en Méditerranée, et le thon blanc, ou germon *(Thunnus alalonga),* beaucoup plus petit et que l'on rencontre à certaines époques dans l'Atlantique. Ces animaux migrateurs restent toujours dans les eaux ayant les mêmes caractéristiques. Ils se concentrent en certains endroits pour frayer. Après la ponte, ils se dispersent en quête de nourriture dans les eaux qui leur conviennent. Le thon blanc, par exemple, fraye au large des côtes marocaines; on le trouve ensuite en mai dans le golfe de Gascogne, en septembre en mer d'Irlande, puis il disparaît dans les eaux profondes. L'examen du contenu stomacal des représentants de cette espèce montre qu'ils dévorent tout ce qu'ils rencontrent!

— *La faune pélagique des grandes profondeurs.* La biomasse est relativement réduite. Les carnivores et les mangeurs de cadavres dominent. Les effets de l'obscurité, totale à partir de 500 m, ainsi que ceux de la pression sont peu connus. Les Poissons vivant dans les abysses présentent en commun un certain nombre de caractères, qui semblent liés aux conditions de milieu. La bouche prend un développement considérable *(Macropharynx, Gonostoma) :* certains Poissons peuvent absorber des proies aussi grosses qu'eux. Par ailleurs, il se développe de nombreux appendices préhensiles, tactiles, parfois aussi grands que l'animal qui les porte. Enfin, les yeux peuvent être énormes, pédonculés ou au contraire totalement atrophiés. Dans certains cas, sans doute pour pallier le hasard des rencontres, que le petit nombre d'individus rend aléatoires, le mâle vit attaché en parasite sur le corps de la femelle. Autre curiosité, de nombreux organismes présentent des organes lumineux.

Conclusion. Pour les organismes pélagiques, la chaîne trophique, depuis les producteurs primaires jusqu'aux consommateurs terminaux, comporte un nombre de maillons relativement élevé, de l'ordre de quatre ou cinq. En réalité, le fait que beaucoup d'espèces ont un régime diversifié rend plus complexe le schéma des relations alimentaires : on est en présence de réseaux trophiques plutôt que de simples chaînes. L'action des décomposeurs (Bactéries), qui permet de boucler le cycle de la matière organique, est fondamentale pour la remise en circulation, sous forme minérale, des constituants de la matière vivante. Les eaux du large sont cependant pauvres en Bactéries (5 000 à 20 000 par litre); une partie des restes organiques qui tombent lentement vers le fond n'a donc pas le temps d'être minéralisée dans la zone photique; celle-ci perd ainsi régulièrement une bonne portion de ses sels nutritifs au bénéfice des couches profondes.

La vie sur les fonds marins : les organismes benthiques

Les organismes benthiques sont très divers et très nombreux dans l'étage littoral. Leur nombre diminue ensuite rapidement avec la profondeur. Par exemple, sur la côte californienne on a pu estimer la biomasse à 4 800 g/m² (dont 4 670 g d'Algues) à 1,5 m de profondeur; à 22 m, elle n'est plus que de 980 g/m² (dont 600 g d'Algues). Les fonds océaniques sont peu peuplés : la biomasse est de 1 g/m² dans le fond de l'océan Pacifique, et de 0,7 g/m² pour l'Atlantique. Comme nous allons le voir, la vie sur les fonds exige des adaptations particulières.

Caractères généraux de la vie benthique

— *Faciès.* La différence entre les vases rencontrées à l'estuaire d'un fleuve et les chaos rocheux qui, non loin de là, s'enfoncent dans l'eau est frappante. On conçoit que les organismes qui vivent dans des milieux si différents aient à résoudre des problèmes différents, que ce soit pour leur fixation, leur nourriture ou leurs déplacements. On voit d'ailleurs tout de suite que le peuplement n'est pas du tout le même. On est ainsi amené à distinguer différents *faciès :* le *faciès rocheux* (roches, quais) et le *faciès meuble,* qui englobe tous les cas où le substrat est mou (sable, vase).

— *Mode de vie.* Une visite de la plage à marée basse permet d'observer des modes de vie très divers. Certains organismes, tels les crabes, se déplacent avec vivacité; d'autres, comme les anémones de mer et les Algues, vivent fixés sur le fond. Enfin, les « tortillons », que l'on rencontre çà et là, nous indiquent que dans les sédiments eux-mêmes vivent des formes fouisseuses (arénicoles par exemple).

● Les *organismes fixés* (sessiles) sont très nombreux : Algues, Bryozoaires, Éponges, Tuniciers (Ascidies), Mollusques, Crustacés (balanes), etc. Sur les sols meubles, la fixation est assurée par des racines dans le cas de Phanérogames marines, telles que *Zostera*. Certaines actinies sont fichées dans le sédiment comme un pivot. Sur le sol rocheux, les organismes sessiles utilisent divers dispositifs : crampons (haptères) chez certaines Algues, ventouses, etc. Les animaux fixés ont souvent une phase de vie nageuse (larves). La fixation s'effectue selon des modalités assez diverses : la plupart du temps, la forme nageuse, souvent pélagique, voit son phototropisme s'inverser; elle se dirige alors vers le fond et se fixe par la région antérieure. Chez les formes évoluées, les Cirripèdes par exemple, la métamorphose qui suit s'accompagne d'une rotation de 180° ramenant la bouche à l'opposé de la région de fixation.

● Les *organismes libres* peuvent être *sédentaires,* c'est-à-dire effectuer de faibles déplacements (Polychètes sédentaires, Lamellibranches, etc.) ou, comme les crabes et les Poissons, être capables d'effectuer des déplacements notables (formes *vagiles*). Les organismes *fouisseurs* vivent dans le substrat. Quelques-uns d'entre eux sont capables de percer les rochers, *Lithophaga* par dissolution chimique, *Pholas* en utilisant sa coquille comme une vrille. Néanmoins, bien plus nombreux sont ceux que l'on rencontre dans les sédiments meubles, soit

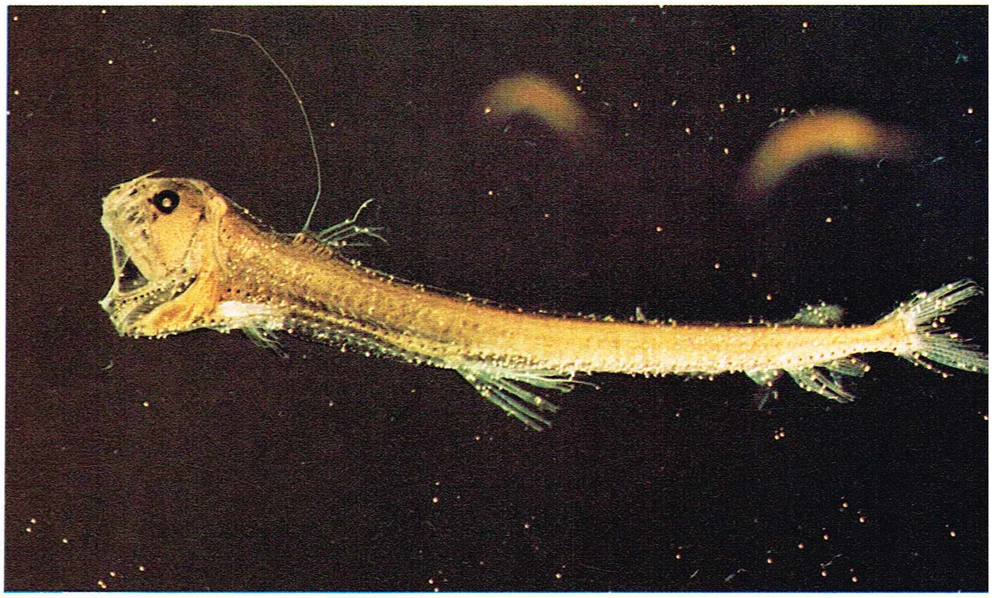

C. Carré - Jacana

▲ ***Les Poissons des grandes profondeurs présentent en commun un certain nombre de caractères qui semblent liés aux conditions de milieu. La bouche, comme on peut en juger sur ce* Chaulodius sloani, *prend un développement considérable.***

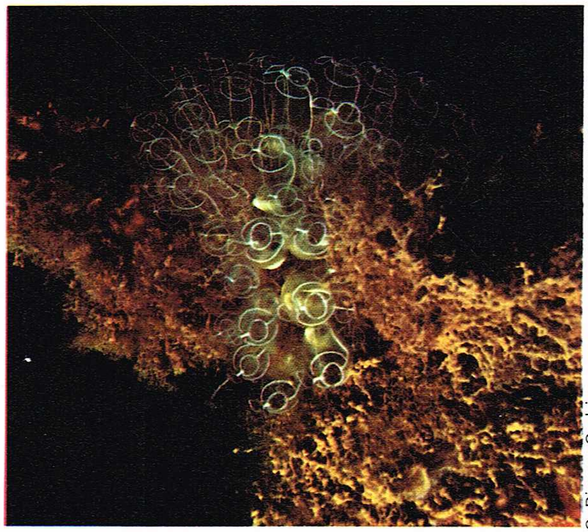

C. Rives - Cedri

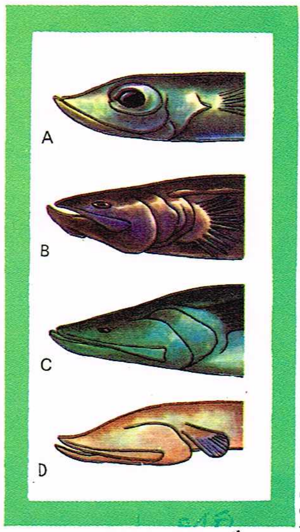

I.G.D.A.

▼ ***A gauche,* Clavellina lepadiformis, *Ascidiacé sessile caractéristique de la vie benthique. A droite, régression progressive de l'œil de divers Poissons Scopélidés des profondeurs : A,* Chlorophthalmus productus, *à 575 m de profondeur; B,* Bathypterois dubius, *à 800-1 000 m; C,* Benthosaurus grallator, *à 3 000 m; D,* Bathymicrops regis, *à 5 000 m.***

C. Rives - Cedri

D. Faulkner

▲ ***En haut,* Birgus latro, *le crabe des cocotiers, qui, est un organisme marin de la zone supralittorale, qui, pour respirer hors de l'eau, a un système buccal et branchial adapté. En bas,* Syllarides tridacnophaga, *Crustacé benthique capable de se déplacer sur les fonds marins (forme* vagile*).***

en surface, soit dans le sédiment lui-même. Les Poissons plats s'enfoncent, le corps maintenu paradoxalement à l'horizontale, et se recouvrent de sable à l'aide du battement de leurs nageoires (soles et carrelets, raies). Les animaux qui vivent dans le sédiment creusent leurs trous selon des techniques éprouvées (par exemple, certains Lamellibranches utilisent leur pied en forme de soc) et consolident leurs terriers par tassement ou par imprégnation avec des substances muqueuses.

L'extrême variété de ces modes de vie permet une colonisation importante du biotope. Sur certaines côtes, la densité de peuplement est fantastique. La plupart des rochers sont recouverts d'Algues, sur et sous lesquelles vivent de nombreux organismes fixés ou vagiles : Hydraires, Bryozoaires, Ascidies, Crustacés, etc. De telles communautés présentent une très grande diversité, d'une structure et d'une organisation complexes.

— *Nutrition.* Chez les végétaux, les Algues absorbent les sels dissous par toute la surface de leur thalle, les crampons leur servant uniquement à se fixer. Les Phanérogames marines puisent dans le sédiment, avec leurs racines, une partie des sels nutritifs qui leur sont nécessaires. Les animaux peuvent utiliser les petites particules en suspension dans l'eau, les dépôts ou les sédiments *(microphagie)*, ou s'adresser à des proies plus grosses : herbivores, carnivores, nécrophages et détritivores *(mégalophages)*.

● *Mangeurs d'aliments en suspension.* Ce sont des Crustacés, des ophiures, des holoturies, des Polychètes et des Tuniciers, Lamellibranches, etc. Les dispositifs sont assez analogues à ceux observés chez le plancton. Les Bryozoaires, par exemple, possèdent des tentacules munis de cils vibratiles et recouverts d'un mucus engluant les particules. Le battement des cils déplace l'eau vers les tentacules et entraîne le film muqueux vers la bouche; un dispositif analogue est réalisé chez les Polychètes. Chez la moule et l'huître, l'eau est filtrée au niveau des branchies; les particules les plus lourdes sont rejetées à l'extérieur, tandis que les plus légères passent à travers les branchies, puis sont conduites jusqu'aux palpes labiaux par le battement de cils spéciaux; la récolte est ensuite envoyée dans la bouche (une moule filtre plus d'un litre d'eau à l'heure).

● *Mangeurs de dépôts.* Il s'agit de nombreux Polychètes, de Lamellibranches et de certains Échinodermes. On trouve sur le sable et la vase des particules alimentaires sédimentées. Ces couches minces sont formées de matières organiques mortes sur lesquelles prolifèrent des Bactéries, des Diatomées et des larves diverses. Les animaux peuvent soit manger les particules alimentaires du dépôt, soit consommer l'ensemble du sédiment. Certains Lamellibranches (par exemple, *Macoma*) possèdent des siphons inhalants et exhalants très longs et séparés, formant deux tubes sortant de l'animal. Celui-ci vit enterré dans le sédiment et ne laisse passer à l'extérieur que son siphon inhalant, qu'il utilise comme le tuyau d'un banal aspirateur : il le promène sur la surface du dépôt et aspire les substances nutritives, l'eau étant évacuée par le siphon exhalant; le « rayon d'action » est égal à la longueur du siphon. Quand tout ce qui se trouve à sa portée est aspiré, l'animal n'a plus qu'à se déplacer un peu plus loin. Parmi les mangeurs de sédiments, l'arénicole est bien connue des pêcheurs. Elle vit dans un tube en U, dont une extrémité est obstruée par le sable, l'autre, en général ouverte, étant marquée par un tortillon. L'animal se trouve dans la région coudée à la base du U. Il crée, grâce à ses mouvements péristaltiques, un courant d'eau qui va de l'ouverture vers l'extrémité obturée, où cet apport d'eau provoque des éboulements. L'arénicole se nourrit des éboulis ainsi obtenus et rejette périodiquement le sable par l'anus (tortillon).

● *Mégalophages.* Les *herbivores* se trouvent en général dans les habitats rocheux, où ils trouvent un tapis d'Algues. Les Gastéropodes possèdent un bulbe buccal musclé sur lequel on trouve une radula, sorte de ruban où sont plantées de nombreuses petites dents. L'animal râpe l'Algue en sortant sa radula et, en la rentrant, ramène la nourriture dans sa bouche (bigorneaux, troques, patelles, haliotis). Certains oursins et quelques Crustacés sont également herbivores. Les *nécrophages* (Crustacés, goélands) consomment des cadavres. Ils sont d'ailleurs rarement exclusifs.

Les *carnivores* présentent des dispositifs d'attaque très variés : nématocystes des Cnidaires, colloblastes des Cténaires, trompe des Polychètes, tentacules des seiches, dents des Poissons, etc.; certains Gastéropodes (Muricidés) percent un trou dans la coquille de leur proie; les étoiles de mer entrebâillent les valves des Lamellibranches à l'aide de leurs bras, puis introduisent leur estomac en le dévaginant; les sucs digestifs sont déversés sur la victime; la digestion est donc externe.

On voit que les régimes alimentaires sont très variés. De nombreuses chaînes alimentaires sont ainsi mises en œuvre, interférant les unes avec les autres en un réseau trophique, dont l'analyse se révèle difficile.

La vie au voisinage immédiat de la mer : la zone supralittorale

L'étage supralittoral est très rarement submergé, si ce n'est aux fortes tempêtes.

La végétation est composée de Phanérogames halophytes, c'est-à-dire tolérant (ou exigeant) des sols salés. La concentration des sols en sels dissous réduit les possibilités d'absorption d'eau par la plante, en augmentant la pression osmotique externe. Les halophytes pallient cet inconvénient soit en absorbant très peu de sels, soit, au contraire, en les absorbant de manière active de façon à équilibrer les pressions externes et internes. D'autre part, la transpiration ayant tendance à provoquer une accumulation de sels dans les tissus de la plante, ces végétaux ralentissent leur transpiration (plantes « succulentes », par exemple, les salicornes) ou excrètent les sels superflus par des glandes épidermiques *(Tamaris, Avicennia)*.

On rencontre dans la zone supralittorale des animaux terrestres et des animaux marins. Les organismes marins doivent pouvoir respirer hors de l'eau : leurs cavités buccales ou branchiales sont en général très vascularisées et peuvent fonctionner comme un poumon. C'est le cas du crabe des cocotiers *(Birgus latro)* ou des périophtalmes, petits Poissons des mangroves qui vivent presque plus hors de l'eau que dedans. Ces curieux organismes possèdent d'énormes yeux placés sur la face dorsale de la tête (comme de nombreux animaux amphibies), permettant la vision hors de l'eau quand le corps est immergé. Les nageoires pectorales, à base longue, musclée, conformées en pattes, leur permettent de se déplacer en sautillant sur la vase ou même de grimper sur des branches; ils creusent des terriers et se nourrissent d'Insectes, d'araignées et de crabes, qu'ils poursuivent sur le sol; leur respiration est aérienne, et leur bouche emmagasine l'air; la paroi interne y est richement irriguée de capillaires sanguins, au niveau desquels s'effectuent les échanges gazeux.

En ce qui concerne leur reproduction, les animaux qui vivent dans la région supralittorale présentent des adaptations différentes. Certains reviennent à la mer pour pondre. D'autres attendent le moment des pleines mers de vive eau. Ainsi un petit Gastéropode de cette zone, *Littorina neritoides,* synchronise l'émission de ses larves avec l'arrivée de ces grandes marées.

— *Les sables littoraux et les dunes*

Les sables situés près de la laisse de haute mer sont riches en sel et en calcaire (débris de coquille). Sur nos côtes atlantiques, la végétation pionnière est constituée par des Graminées à rhizome traçant (*Agropyrum maritimum, Ammophila arenaria,* l'oyat), des plantes épineuses (*Eryngium maritimum,* le panicaut), des Crucifères *(Cakile maritima),* etc. Le sable apporté par le vent est retenu par les touffes de cette végétation ; il s'accumule derrière chacune d'entre elles, où il forme de petites buttes de sable. Certaines espèces ne survivent pas à cet enfouissement, tandis que d'autres (l'oyat, le panicaut) incurvent leur rhizome vers la surface et le maintiennent ainsi à profondeur constante. Les petites buttes de sable deviennent ensuite coalescentes et se transforment en une dune couverte d'oyats du côté marin et sans aucune végétation du côté opposé. Ensuite, la dune se couvre de végétation sur toutes ses faces : Mousses, Lichens, arbustes, etc. Cette évolution, présentée ici dans le temps, se retrouve en allant de la mer vers l'intérieur.

La faune est constituée de nombreux animaux terrestres, sauf à la laisse de haute mer, où, sous les débris d'Algues ou de feuilles de posidonies (Méditerranée), on trouve des Crustacés, comme le talitre (puce de mer), etc.

— *Les vases littorales*

● Les *marais maritimes des régions tempérées* ont été bien étudiés le long des côtes plates de la mer du Nord. Les vases littorales *(tangue* ou *slikke)* sont formées par des dépôts d'argiles extrêmement fines, apportées par les eaux douces à l'état de suspensions, qui précipitent sur le fond au contact de l'eau de mer. Le substrat ainsi formé dans les estuaires, dans le fond des baies ou le long des cordons littoraux est colonisé par une végétation d'halophytes. Dans les mers à marée, le long des côtes de la Manche par exemple, la slikke est d'abord colonisée par les Diatomées, qui lui donnent sa couleur brune, et par des Cyanophytes. La haute slikke est ensuite occupée par des salicornes, qui freinent le courant et retiennent la vase. Le sol s'élève et se consolide. D'autres espèces peuvent alors venir s'y ajouter : la soude *(Suaeda maritima),* l'obione *(Obione portulacoides),* etc. Ce groupement s'élève au-dessus des eaux, qui ne le recouvrent plus qu'exceptionnellement. On appelle cette formation indurée le *schorre,* qui constitue des prairies salées. Celles-ci peuvent être ensuite dessalées par les eaux de pluie et transformées en polders. La séquence de la colonisation est analogue sur les côtes méditerranéennes, en Camargue par exemple, où les prairies à salicornes (les « sansouires ») couvrent de grands espaces. A mesure que la salure diminue (par exemple, par irrigation), les végétaux terrestres ou d'eau douce peuvent s'y développer (le riz par exemple). Ces groupements sont fréquentés par des milliers d'Oiseaux. Les animaux qui peuplent la vase elle-même sont assez caractéristiques. Le milieu est en effet pauvre en oxygène, et la finesse des sédiments peut entraîner une obturation des orifices respiratoires. Les espèces bien adaptées sont peu nombreuses

C. Souchon

▲ *Le lis des sables,* **Pancratium maritimum,** *est une forme caractéristique de la végétation des dunes.*

J. Six

◀ *La faune des sables littoraux et des dunes est constituée de nombreux animaux terrestres, et notamment de Crustacés comme le talitre* **(Talitrus sp.)** *ou puce de mer.*

▼ *Biotope lagunaire à végétation halophile, paysage familier de la Camargue. On reconnaît, à droite, la « sansouire », prairie constituée essentiellement de salicornes* **(Salicornia).**

C. Nardin - Jacana

C. Souchon

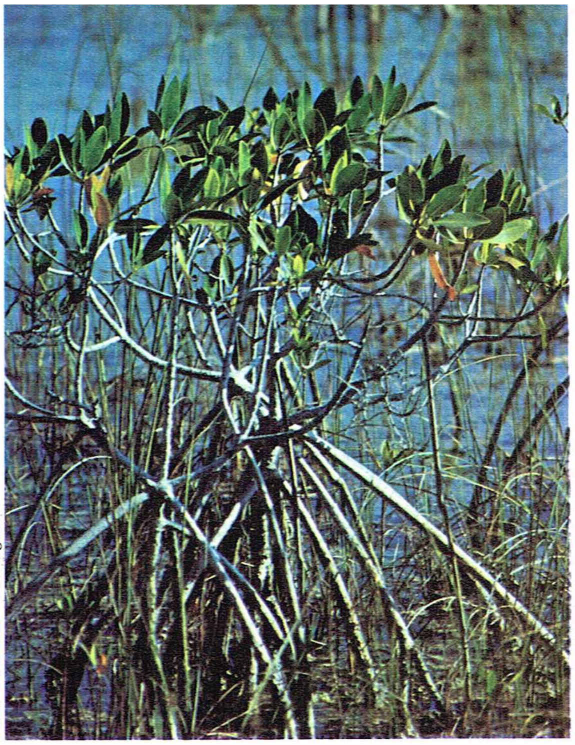

Bruce Coleman - D. Hughes

▲ *A gauche, les rochers des côtes atlantiques sont peuplés de Phanérogames variées, notamment de* **Crithmum maritimum,** *Ombellifère à feuilles « grasses ». A droite,* **Rhizophora mangle,** *le palétuvier caractéristique des* **mangroves,** *forêts amphibies des côtes tropicales.*

mais peuvent pulluler en raison de la faible compétition. Ce sont, par exemple : *Mya, Cardium* (Lamellibranches), *Nereis* (Polychète), etc.

● Les *côtes tropicales* sont aussi souvent bordées de véritables forêts amphibies : les *mangroves,* que l'on trouve dans la zone de balancement des marées. Ces formations se développent sur la vase et sont parcourues par un lacis inextricable de marigots. A mesure que de nouvelles vases se déposent, elles sont colonisées par les arbres dont le front avance, tandis que du côté de la terre ferme les sols se consolident, s'assèchent et se dessalent. On distingue, selon leur composition floristique, les mangroves orientales et les mangroves atlantiques, ces dernières étant plus pauvres en espèces. Parmi les arbres citons, entre autres, les palétuviers (*Rhizophora, Avicennia,* etc.). Ils présentent un certain nombre de particularités biologiques remarquables, en relation avec les conditions asphyxiques du milieu : ils ont des racines échasses, leur donnant une assise solide, et des pneumatophores (chez *Avicennia,* ce sont des sortes de piliers verticaux que les racines émettent hors de l'eau et qui permettent une meilleure aération).

▼ *Tableau récapitulatif de la zonation des Algues et des Lichens.*

NIVEAUX	ÉTAGE	VÉGÉTATION
		Faciès rocheux Mode moyennement battu
	Supra-littoral	Ramalina scopularum Xanthoria parietina Verrucaria maura et Caloplaca marina
Pleine mer de vive eau	Mésolittoral	Pelvetia canaliculata Fucus spiralis
Pleine mer de morte eau	Mésolittoral	Fucus vesiculosus
MI-MARÉE	Mésolittoral	Fucus serratus
Basse mer de morte eau	Mésolittoral	Himanthalia elongata Bifurcaria rotunda Laminaria digitata
Basse mer de vive eau		
Basse mer exceptionnelle 0 des cartes	Infra-littoral	Laminaria hyperborea Laminaria ochroleuca

Richard Colin

Le palétuvier est vivipare : le fruit qui contient la graine reste attaché à l'arbre et l'embryon commence à croître; la plantule se forme avec ses cotylédons, ses feuilles et sa « racine » renflée et longue. On voit ainsi d'innombrables plantules pendre sur les branches, puis elles tombent et viennent se fixer comme des fléchettes dans la vase, où elles s'enracinent. Si elles tombent horizontalement, à marée haute par exemple, elles sont capables de flotter relativement longtemps jusqu'à ce que les conditions soient favorables.

La faune est composée d'animaux terrestres, marins et d'eau douce, notamment de petites anémones de mer *(Thelaceros rhizophorae),* des milliers de crabes. Un Mérostome *(Tachypleus gigas)* se trouve dans les mangroves de l'archipel Indo-Malais. On trouve également des huîtres, de nombreux autres Mollusques marins ou terrestres, et des Poissons (périophtalmes).

— *Les rochers*

Les rochers des côtes atlantiques sont recouverts de Lichens et peuplés de Phanérogames variées : *Crithmum maritimum* (Ombellifère à feuilles « grasses »), *Limonium,* des plantains. De nombreux animaux y vivent : des Oiseaux, des Gastéropodes, des Crustacés (un Isopode : *Lygia oceanica*), etc.

La vie dans les étages médiolittoral et infralittoral

La partie supérieure de cette zone est caractérisée par les variations de niveau des eaux dues aux marées. Les conditions de vie y sont donc très particulières : les organismes ont une vie tantôt terrestre, tantôt aquatique. Ils se répartissent selon leur capacité de résistance.

Ils doivent tout d'abord pouvoir supporter le dessèchement. Certains se réfugient dans des fissures ou sous les Algues au moment de la marée basse. D'autres présentent des adaptations morphologiques leur permettant de retenir de petites provisions d'eau : de nombreux Gastéropodes possèdent un opercule qu'ils maintiennent fermé, les Lamellibranches ferment leur coquille, certains crabes retiennent de l'eau dans leur cavité branchiale. D'autres organismes, enfin, peuvent survivre à la dessiccation et réabsorbent de l'eau lorsqu'ils sont à nouveau immergés (certaines Algues par exemple). Le soleil accélère le dessèchement; de plus, il échauffe l'eau qui se trouve dans les cuvettes, ce qui entraîne une baisse du taux d'oxygène dissous : les conditions respiratoires des organismes sont donc modifiées.

Les variations très importantes de la salinité peuvent être dues aux apports d'eaux douces des fleuves ou des sources voisines. Les flaques et les cuvettes subissent des sursalures par beau temps, en raison de l'évaporation et des dessalures en cas de pluie. Enfin, l'agitation et le choc des vagues exigent des dispositifs de fixation solides : de nombreux animaux vagiles possèdent des ventouses qui leur permettent de se maintenir au substrat de façon temporaire (les ambulacraires des Échinodermes, les ventouses de certains Poissons, les bras et les ventouses des Céphalopodes).

C. Souchon

▲ ***Les côtes rocheuses sont riches en Algues (brunes, rouges, vertes...). Certaines, comme les laminaires, font l'objet d'une exploitation; ainsi les Algues brunes donnent le goémon qui sert à la fabrication d'engrais, d'iode et d'algines.***

— *Les substrats rocheux*

● *Un exemple de zonation : les côtes rocheuses de la Manche.* Les conditions écologiques particulières aux côtes rocheuses entraînent la formation de ceintures d'Algues brunes dont chaque espèce a des exigences différentes et qui ne se mélangent donc pas. De haut en bas, on rencontre successivement *Pelvetia canaliculata, Fucus spiralis, Fucus vesiculosus, Fucus serratus,* puis les ceintures à laminaires, qui marquent la partie supérieure de l'étage infralittoral.

Dans ces zones les producteurs sont représentés par des Algues très nombreuses (brunes, rouges, vertes...). Dans certaines régions, ces Algues sont d'ailleurs l'objet d'une exploitation : les Algues brunes (fucus et laminaires) donnent le goémon servant à la fabrication d'engrais, d'iode, et d'algines, et les Algues rouges *(Chondrus, Gigartina)* le goémon blanc (dont on extrait l'agar).

Les consommateurs, très abondants, ont les régimes alimentaires les plus variés. Ce sont des animaux fixés : Éponges, Hydraires (anémones de mer), Bryozoaires, Lamellibranches (moules, huîtres...), Crustacés (balanes), etc., ou des animaux vagiles : des Lamellibranches (coquilles Saint-Jacques), des Gastéropodes (gibbules, littorines), Échinodermes (oursins...), des Crustacés (crabes, homards, langoustes, crevettes...), des petits Poissons de roches, etc.

● *Autres biocénoses.* Dans les autres régions du globe où les marées se font sentir, l'organisation générale des biocénoses est assez comparable à celle que nous venons de décrire. On retrouve des ceintures horizontales formées d'Algues brunes, qui sont souvent d'espèces différentes. Par exemple, en Australie, *Hormosira* remplace le fucus et les laminaires de l'hémisphère Nord. Le long du cap Horn et de la Terre de Feu, deux espèces de *Macrocystis* dominent. Dans la Méditerranée, on peut également distinguer une zonation plus ou moins liée aux exigences lumineuses des espèces et caractérisée par des Algues rouges et brunes. Les grandes Algues brunes de l'Atlantique y sont absentes, et les laminaires sont remplacées dans l'étage infralittoral par des *Cystoseires* (fucales). Le sommet de cet étage est souvent marqué par l'abondance des Algues rouges à thalle imprégné de calcaire (« Mélobésiées »), dont certaines espèces *(Lithophyllum)* construisent de véritables plates-formes (les « trottoirs d'Algues »), le long des côtes. Dans tous les cas, les animaux fixés de l'étage infralittoral sont souvent imprégnés de calcaire. Les récifs coralliens sont d'ailleurs une des biocénoses les plus remarquables de cet étage.

● *Récifs coralliens.* Ils constituent une biocénose extrêmement complexe, à biomasse particulièrement élevée (environ 840 g de matière sèche par m²). Ce sont des formations tropicales dont les conditions de vie sont très précises : les eaux doivent être chaudes (25-30 °C), bien oxygénées (eaux agitées) et claires, cet ensemble de conditions permettant un haut taux de métabolisation du calcium chez les organismes qui y vivent. En raison de ces exigences, les récifs sont répartis dans les régions tropicales, entre 30° de latitude nord et 30° de latitude sud (exceptionnellement 32° N. aux Bermudes en raison de l'influence du Gulf Stream), et ne se trouvent jamais à proximité des estuaires ou des volcans en éruption, dont les sédiments les enfouiraient. On distingue communément les *récifs frangeants,* accolés à la terre, le long des côtes escarpées, les *récifs-barrières,* laissant un espace entre eux et la côte (par exemple, la Grande Barrière sur la côte nord de l'Australie), et les *atolls,* qui sont des îles en forme d'anneau entourant un lagon central, qui communique avec la mer par des passes. A marée basse, l'atoll est entouré d'une plate-forme émergée, qui est constituée de coraux et dont le bord externe (vers le large) plonge très rapidement en formant le talus. Les coraux vivants se trouvent au sommet de cette pente, entre 20 et 30 m de profondeur (jamais en dessous de 100 m, ni près de la surface). L'atoll s'accroît donc à ce niveau et « pousse » sur les squelettes calcaires entassés des coraux morts.

★ *Les constructeurs récifaux.* Ce sont essentiellement des Madréporaires (Cnidaires de la classe des Hexacoralliaires), qui sont des colonies de petits *polypes* à squelette calcaire commun massif, le *polypier.* Ces organismes vivent en symbiose avec des Algues unicellulaires microscopiques : les zooxanthelles, qu'ils abritent dans leurs tissus. Ils sont carnivores et mangent de petits Crustacés ou des larves. Des Algues vertes et

R. Maltini - P. Solaini

◀ ***Cystoseira fimbriata, Algue de l'étage infralittoral en Méditerranée.***

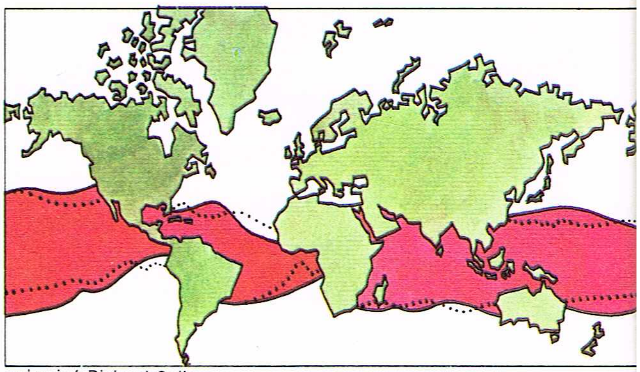

▲ *A gauche, un exemple de biocénose récifale : la masse poreuse des coraux offre aux organismes des gîtes nombreux. Ici, des Poissons aux vives couleurs du genre* Anthias *sillonnent la barrière de Cœlentérés et de Madréporaires. A droite, représentation cartographique de la distribution des récifs coralliens dans les mers du globe (hachures) et isotherme représentant un minimum de température à la surface de 21 °C en hiver (d'après Moore ;* Dreux, Paécis d'écologie, *P.U.F).*

rouges à thalle imprégné de calcaire participent également à la construction. Les Algues rouges (par exemple, *Lithothamnium*) prédominent à l'extérieur du récif (le côté « au vent »). Ces Corallinacées cimentent, en quelque sorte, les organismes entre eux. A l'arrière du récif (le côté « sous le vent »), ce sont les Algues vertes qui sont les plus nombreuses, par exemple, *Halimeda* dont le thalle est entouré d'une sorte de gelée qui s'incruste de calcaire. D'autres organismes à squelette calcaire jouent également un rôle : des Protozoaires (Foraminifères), Bryozoaires, Brachiopodes, Échinodermes, Mollusques Lamellibranches ou Gastéropodes ; leur empilement contribue à colmater les interstices laissés par les Madréporaires. La croissance est d'ailleurs très lente : on a calculé que dans les îles Maldives la vitesse de croissance est de l'ordre de 27 à 29 cm pour 1 000 ans ! Les modalités de formation sont d'ailleurs peu connues et ont fait l'objet de plusieurs théories.

★ *La biocénose récifale*. De nombreux organismes vivent dans ces récifs sans participer à leur édification. Ils présentent une variété étonnante de formes et de couleurs. Ils sont adaptés à un milieu sans changement, caractérisé par l'absence de variations saisonnières significatives : la différence de température entre la saison chaude et la saison froide ne dépasse pas 3 °C (d'où les résultats catastrophiques de tout changement). De nombreux gîtes sont offerts aux organismes par la masse poreuse des coraux creusée de cavernes et de tunnels communiquant entre eux. Ces organismes ont des régimes variés : plancton, Algues, coraux, autres animaux, détritus, etc. Selon Odum, la biomasse se répartirait ainsi : 700 g de matière sèche par m^2 d'Algues, 130 g/m^2 d'herbivores (dont les coraux), 10 g/m^2 de carnivores.

Le fond est tapissé d'organismes sessiles : des Hexacoralliaires solitaires *(Fungia)*, la gigantesque anémone de mer *Stoichactis*, etc. Les Lamellibranches ont une coquille spécialement épaisse. On rencontre l'huître perlière, l'énorme tridacne, qui peut atteindre 250 kg (récifs indo-pacifiques). Les Gastéropodes présentent des formes fixées (par exemple, *Magilus antiquus*). Les Crustacés sont innombrables, depuis les « crabes-pistolets » *(Alpheus)*, qui claquent des pinces avec force, jusqu'aux crabes terrestres vivant sur l'atoll. On peut encore citer les Échinodermes, les Annélides, à la biologie si curieuse (palolo).

Les Poissons se rencontrent en profondeur ou dans les cuvettes qui se trouvent à la surface du récif. Leurs couleurs sont souvent extrêmement vives et leurs formes très belles. Certains types de coloration ou de forme du corps se retrouvent chez des Poissons parfois assez éloignés du point de vue taxonomique : par exemple, des Poissons, tels que *Chaetodon, Malacanthus* et *Dascyllus,* ont des ornementations identiques dessinant des bandes verticales. Les dents ont souvent subi des adaptations convergentes : ainsi, elles se soudent en un bec permettant de brouter les branches du corail qui constituent leur nourriture habituelle *(Balistes)*, Poissons-coffres, Poissons-globes *(Tetrodon)*, Poissons porcs-épics *(Diodon)*.

Toute la place disponible est donc utilisée. Certaines espèces se laissent recouvrir par le corail : il s'agit de Gastéropodes *(Magilus)*, Lamellibranches ou Sipunculiens. Pour échapper aux prédateurs, des dispositifs de protection sont mis en œuvre : certains crabes se masquent avec une Éponge ; les Poissons et les Céphalopodes adaptent leurs couleurs à celle du milieu ; certains Poissons *(Amphiprion, Premnas)* vont même chercher refuge entre les tentacules ou dans la cavité d'anémones de mer géantes *(Stoichactis)*, dont le venin ne semble pas les affecter (ces Poissons sont recouverts d'un mucus protecteur). De nombreuses espèces sont toxiques, parfois à certains moments de l'année seulement.

— *Les substrats meubles*

La végétation immergée est assez pauvre en Algues, en raison des difficultés d'ancrage. On trouve cependant un certain nombre d'Algues rouges, brunes, vertes lorsque le substrat le permet (coquilles, galets...). Les producteurs sont surtout représentés par des Phanérogames marines qui forment des herbiers dans l'étage infralittoral : leur rhizome fixe le sable. Ces Monocotylédones de l'ordre des Fluviales sont représentées dans la Manche et l'Atlantique par le genre *Zostera,* en Méditerranée par *Posidonia,* à larges feuilles et dont la souche est recouverte des débris des anciennes feuilles, ainsi que, localement, par *Cymodocea* (jusqu'à 50 m de profondeur environ). De nombreux animaux vivent ou viennent frayer dans ces herbiers.

Sur le sable et dans le sédiment, vivent des Lamellibranches (coques, praires, palourdes, couteaux...), des Polychètes (arénicoles, *Nereis,* sabelles...), des Échinodermes, des Crustacés, des Poissons (dorades, grondins, soles, plies, limandes, etc.). On trouve également dans le sable une faune très curieuse dont les représentants, souvent très éloignés taxonomiquement, présentent des formes convergentes. De très petite taille (inférieure à 1 mm), vermiformes, ils sont munis de dispositifs leur permettant d'adhérer aux grains de sable (Protozoaires, Hydraires, Annélides, Copépodes...).

— *Le faciès d'estuaire*

L'onde de marée se propage en remontant le cours du fleuve. Les estuaires sont donc le lieu de courants

▼ *Un herbier à* Zostera marina, *végétation immergée de l'étage infralittoral atlantique.*

parfois très violents dont le sens varie plusieurs fois par jour. Les variations de salinité sont importantes. Au contact avec les eaux salées, les argiles en suspension précipitent et forment des vases. La végétation est celle que nous avons décrite plus haut à propos du faciès vaseux. Aux animaux déjà cités s'ajoutent des organismes adaptés au milieu saumâtre : *Nereis diversicolor, Scrobicularia*. Sur les rochers, on trouve des Algues brunes, *(Fucus ceranoides)* et vertes *(Enteromorpha intestinalis)*, ainsi que des animaux : balanes, huîtres, moules, patelles, etc. Les conditions de vie étant très dures, on trouve peu d'espèces; mais celles qui y survivent peuvent pulluler, en raison précisément de la faible compétition.

L'étage circalittoral

A cet étage, l'éclairement est assez faible; aussi n'y trouve-t-on que des Algues tolérantes. Les Algues rouges calcaires sont fréquentes (par exemple, le maerl). Dans les fonds sableux, on trouve de nombreux Lamellibranches (coquilles Saint-Jacques), Échinodermes (ophiures). Sur d'autres substrats, les biocénoses sont différentes. Les Poissons, très nombreux (Poissons plats, grondins, merlus, baudroie, etc.), permettent la « petite pêche ».

Le benthos profond

Dans ces régions, encore peu connues, les peuplements s'appauvrissent avec la profondeur. Dans l'*étage bathyal,* ils sont encore variés et constitués d'espèces vagiles, sessiles ou fouisseuses selon le substrat, qui appartiennent à des groupes différents : Hydraires, Bryozoaires, Polychètes, Mollusques, Échinodermes, Poissons, etc.; dans certains cas, on trouve des Madréporaires (sols rocheux de l'Atlantique Nord). A partir de l'*étage abyssal,* la faune se raréfie fortement. Dans l'*étage hadal,* elle n'est plus représentée que par quelques formes parasites, carnivores ou saprophages.

La biomasse est de l'ordre de 0,1 à 0,2 g par m^2 entre 3 500 et 4 000 mètres de profondeur dans la mer de Behring, alors qu'elle est de 1 000 g/m^2 dans la région infralittorale. Aucun rythme saisonnier n'est discernable. Les populations diminuent non seulement avec la profondeur, mais aussi avec l'éloignement du rivage. Les animaux sont souvent endémiques et présentent les particularités que nous avons déjà soulignées à propos de la faune pélagique des grandes profondeurs : les yeux sont énormes ou absents, les appendices très longs (Crustacés, holothuries...). La nourriture, peu abondante, est surtout constituée de Bactéries et des particules alimentaires qui tombent des étages supérieurs.

Bactéries

Les eaux côtières sont riches en Bactéries (de 500 000 à 3 000 000 de cellules par litre d'eau). La réduction des matières organiques s'effectue très rapidement, et les éléments biogènes sont remis presque immédiatement en circulation. Les quantités disponibles de ces éléments sont donc importantes (avec, en plus, les apports fluviaux), contrairement à ce que nous avons vu pour les zones océaniques. A l'approche des grands fonds, la quantité de Bactéries augmente brusquement pour atteindre des valeurs très élevées (500 000 par cm^3). Elles constituent une part importante de la nourriture des animaux vivant dans ce milieu.

Fonctionnement des écosystèmes marins

Chaînes alimentaires

— *Un exemple : des Diatomées au thon*

Le thon blanc est un grand chasseur qui capture au cours de ses migrations de nombreux animaux nectoniques, des harengs par exemple, lesquels consomment des Copépodes, qui mangent eux-mêmes du phytoplancton (Diatomées). La chaîne alimentaire ainsi constituée comporte des *producteurs* (le phytoplancton), des *consommateurs de 1er ordre* (des herbivores : les Copépodes), de *2^e ordre* (des carnivores 1 : le hareng) et de *3^e ordre* (carnivores 2). Le terme final, sauf si le thon est pêché, est formé par les *décomposeurs* (Bactéries, Champignons), qui transforment progressivement la matière organique en sels minéraux, lesquels seront ensuite réutilisés.

Chacune de ces étapes correspond à un *niveau trophique,* les organismes d'un niveau donné se nourrissant des êtres du niveau immédiatement précédent et servant de proies à ceux du niveau suivant.

Organisme	Diatomée →	Copépode →	Hareng →	Thon
Taille	0,005 cm	0,01 cm	30 cm	200 cm
Fonction	Producteur primaire	Consommateur 1 Herbivore	Consommateur 2 Carnivore primaire	Consommateur 3 Carnivore secondaire
Niveau trophique	I	II	III	IV

On constate que la taille des organismes augmente au fur et à mesure que l'on monte d'un niveau trophique au niveau suivant : les animaux ne peuvent pas attaquer et consommer des proies trop grosses. Ils ne peuvent d'ailleurs pas non plus manger des proies trop petites, l'énergie et le temps dépensés pour la chasse de tels organismes n'étant pas rentable. Dans une telle chaîne, qui est une *chaîne de prédateurs,* il y a donc un rapport assez étroit entre la taille d'un organisme et celle de son prédateur.

Nous ne nous sommes intéressés jusqu'à maintenant qu'à des individus isolés et à leurs rapports respectifs. Cependant, il est bien évident que l'analyse du fonctionnement de la chaîne trophique doit faire intervenir tous les organismes qui la composent. Pour ce faire, on peut compter le nombre d'individus trouvés à chaque niveau ou, mieux, mesurer leur poids total (leur biomasse) à chaque maillon. Les données ainsi recueillies peuvent être représentées par des « pyramides écologiques » (pyramides des nombres, des biomasses, énergétiques), réalisées en traçant, pour chaque niveau trophique, un rectangle (à largeur constante) dont la longueur est proportionnelle à la valeur du paramètre étudié. La pyramide des biomasses a, en général, la pointe tournée vers le haut. Dans le milieu marin (et dans de nombreux autres milieux aquatiques), cette pyramide est inversée pour les peuplements pélagiques. Dans la Manche, par exemple, la masse du phytoplancton (4 g/m^2) est inférieure à celle du niveau comprenant le zooplancton et la faune benthique (21 g/m^2).

En réalité, bien que la biomasse du phytoplancton soit faible, sa productivité est importante en raison de sa vitesse de multiplication; c'est simplement parce qu'il est consommé rapidement par les autres niveaux qu'il n'est présent qu'en faible quantité à un instant donné. La chaîne que nous venons d'illustrer rapidement n'est d'ailleurs pas si simple. Tout d'abord, des organismes meurent et sont décomposés à chaque niveau trophique. D'autre part, les régimes alimentaires ne sont pas exclusifs : un même animal peut appartenir à des niveaux trophiques différents. Dans ce cas, les chaînes se relient entre elles et forment un *réseau trophique.*

Si la connaissance des biomasses est importante, il convient toutefois de la compléter par des études donnant la productivité, c'est-à-dire la quantité de matière vivante produite par unité de temps à chaque niveau trophique.

— *Chaînes de prédateurs benthiques*

Elles sont souvent assez courtes.

Dans les récifs coralliens, la structure devient extrêmement complexe, du fait de l'appartenance des coraux à plusieurs niveaux trophiques. On sait qu'ils vivent en symbiose avec des Algues microscopiques, les zooxanthelles, ainsi qu'avec d'autres Algues filamenteuses. Des calculs précis (Odum et Odum, 1955), effectués dans l'atoll d'*Eniwetok,* ont montré, après examen au microscope des tissus coralliens et dosage des chlorophylles, que les coraux contenaient plus de 75 % de

H. Chaumeton - Jacana

▲ *En haut, schéma de la chaîne alimentaire des Diatomées au thon. En bas,* **Nereis diversicolor,** *organisme adapté au milieu saumâtre et vaseux des estuaires.*

▼ *Tableau représentatif d'un niveau trophique étudié le long de la côte du Pacifique. Les biomasses sont indiquées pour un volume donné : on constate que les rapports entre les biomasses des niveaux successifs sont tels que la pyramide revêt un aspect classique.*

Organisme	Plancton →	Coquillage (Chama) →	Étoile de mer
Nombre	4 milliards	110 000	2 800
Biomasse	2 903 kg	725 kg	90 kg

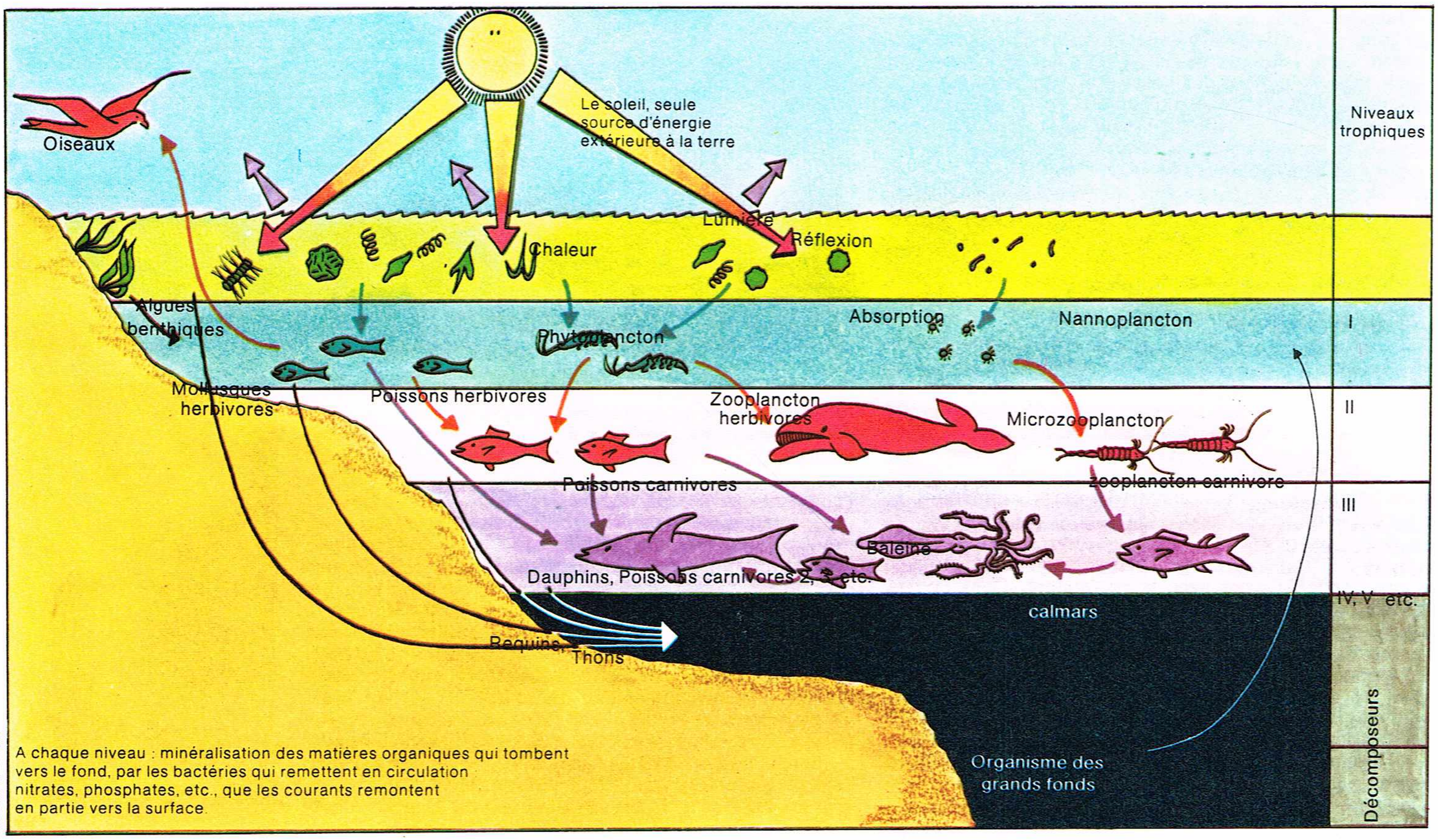

Richard Colin

▲ Diagramme simplifié des transferts d'énergie dans l' « écosystème marin ». La stratification représentée correspond uniquement à celle des niveaux trophiques (pour les 4 premières strates seulement) et non à une quelconque répartition selon la profondeur; les animaux des niveaux 3 et 4 pouvant se trouver près de la surface.

tissus végétaux contre 25 % seulement de tissus animaux (on trouve en effet des Algues dans, entre et sous les polypes). La biomasse végétale est de 500 à 1 000 g de matières sèches par m^2, la biomasse totale des coraux étant de 665 à 1 335 g/m^2. Ces producteurs servent pour la nourriture des herbivores, qui sont les coraux (puisqu'ils utilisent les Algues symbiotes), des Échinodermes, Mollusques, Crustacés et Poissons. Les carnivores (consommateurs 2) sont encore les coraux, qui consomment la nuit des larves et de petits Crustacés, ainsi que d'autres animaux (Annélides, Crustacés, Mollusques, Poissons...). Dans la pyramide des biomasses, les coraux apparaissent aux trois niveaux trophiques, même au niveau des producteurs primaires si l'on tient compte de la présence des Algues qui leur sont liées.

— *Chaînes de prédateurs conduisant à des Poissons pêchés par l'homme*

Les chaînes sont ici plus longues que dans les écosystèmes terrestres ou benthiques. Il n'est pas rare d'y rencontrer cinq ou six niveaux trophiques successifs. La taille des producteurs influence d'ailleurs considérablement la longueur de la chaîne.

Selon Ryther (1969), on peut, à cet égard, distinguer trois zones.

● *En haute mer,* le nanoplancton, qui domine, ne peut être utilisé par les Crustacés du zooplancton, en raison de sa petite taille : ceux-ci doivent donc se rabattre sur d'autres nourritures. *Euphausia pacifica,* par exemple, est herbivore dans les eaux côtières du Pacifique; il devient carnivore dans les eaux du large, où le plancton est trop petit pour lui. Le nanoplancton est donc consommé par des éléments du microzooplancton (Foraminifères, Radiolaires), lesquels sont la proie des Copépodes, etc. :

I		II		III		IV
Nano-plancton	→	Microzoo-plancton herbivore	→	Plancton carnivore	→	Chétognathe
						↓ V
				Thon Dauphin...	←	Petits Poissons

Il y a donc au moins cinq niveaux trophiques entre le producteur et le Poisson consommable par l'homme.

● Dans les *régions côtières,* où les sels nutritifs sont abondants, on trouve, en plus du nanoplancton, du phytoplancton suffisamment grand pour être filtré par les Euphausiacés et les Copépodes du zooplancton, lesquels sont mangés par de nombreux Clupéidés comestibles. Ainsi, on peut compter trois niveaux trophiques successifs avant d'atteindre les Poissons susceptibles d'être pêchés.

● Dans les *régions d'upwelling,* le phytoplancton est souvent constitué de formes coloniales qui atteignent parfois de grandes dimensions (quelques centimètres). Ces agrégats peuvent être directement consommés par des Poissons. La plupart de ceux que l'on rencontre dans ces zones sont d'ailleurs des herbivores pendant la plus grande partie de leur vie (par exemple, l'anchois péruvien *Engraulis ringens*). La chaîne alimentaire qui conduit aux animaux comestibles est donc ici très courte.

— *Chaînes à point de départ détritique*

Un exemple en est fourni par l'étude très complète de Teal, sur des marais salants de Géorgie. Le producteur est une Graminée qui est consommée par certains Insectes, lesquels sont la proie d'animaux carnivores. A cette chaîne de prédateurs s'ajoute une chaîne saprophytique : la litière des feuilles décomposées sert de nourriture à des crabes, des Mollusques ou des Polychètes, lesquels sont mangés à leur tour par des carnivores (des crabes, des Oiseaux, des ratons-laveurs). On a donc la chaîne :

Litière de spartines producteurs primaires	→	Annélides saprophages	→	Oiseaux carnivores primaires

Productivité des océans

— *Productivité primaire*

Les producteurs sont les végétaux autotrophes, surtout le plancton. Pour évaluer la productivité primaire, on dispose de plusieurs méthodes.

On peut récolter à des intervalles de temps précis la totalité des végétaux contenus dans un endroit témoin et mesurer, après déshydratation, la quantité de calories qu'ils renferment. Cette méthode est aléatoire en ce qui concerne le phytoplancton.

La méthode de Gaarder et Gran (1927) se fonde sur le fait qu'on sait que l'émission d'oxygène et l'absorption

de gaz carbonique sont en rapport direct avec la quantité de substances organiques synthétisées par assimilation chlorophyllienne : on peut mesurer l'un ou l'autre de ces paramètres et en déduire les synthèses. On se sert de deux récipients contenant du phytoplancton et de l'eau; la consommation d'oxygène est mesurée dans un récipient opaque, la production (moins l'oxygène qui est absorbé par la respiration) dans un flacon transparent; on dose l'oxygène au bout d'un temps déterminé. La somme des valeurs obtenues donne la productivité primaire nette.

Il existe une méthode utilisant des éléments radioactifs. Elle a été employée pour la première fois en 1957 par Steemann-Nielsen. Une quantité connue de gaz carbonique marqué au carbone $_{14}$ est ajoutée à un volume précis d'eau de mer dont on connaît la teneur en CO_2. En déterminant la quantité totale de carbone marqué contenu dans le plancton à la fin de l'expérience, on peut calculer la quantité totale de carbone assimilé par le phytoplancton (en admettant que les gaz carboniques marqué et non marqué sont utilisés uniquement pour la photosynthèse et à la même vitesse).

Les résultats obtenus avec ces différentes méthodes ne sont d'ailleurs pas identiques : la méthode de mesure de l'oxygène rejeté donne des valeurs de productivité supérieures de 33 % environ à celles établies par la méthode du carbone marqué. Cette productivité peut être donnée en grammes de carbone, en poids de matière sèche ou fraîche, ou en kilocalories par unité de surface et par unité de temps.

Il faut aussi distinguer productivité nette et productivité brute; ainsi, la productivité primaire brute dans la mer des Sargasses (Riley, 1957) est de 0,55 g C/m²/jour, alors que la productivité primaire nette y est de 0,26 g C/m²/jour : les pertes sont donc là de l'ordre de 50 %.

Nous donnons ci-dessous quelques chiffres (Ramade, 1974, d'après divers auteurs) qui permettront de faire des comparaisons entre la productivité primaire nette de quelques écosystèmes marins et celle de certains écosystèmes terrestres.

		Mat. sèche/m²/an
Marin	Zone pélagique tropicale	100 g
	Plateau continental tempéré	200 g
	Récif corallien tropical	4 900 g
Terrestre	Forêt caducifoliée tempérée	1 200 g
	Forêt ombrophile tropicale	6 000 g
	Champ de maïs	2 500 g
	Désert	200 g

La productivité primaire des océans est donc très faible, surtout dans le domaine pélagique. Seuls les récifs et quelques écosystèmes particuliers (estuaires, mangroves) atteignent les niveaux élevés des forêts tropicales.

L'évaluation de la productivité primaire totale des océans se heurte à de nombreuses difficultés. Il faut d'abord recueillir le plus grand nombre de valeurs dans les milieux les plus variés (or, les océans n'ont pas été entièrement étudiés). D'autre part, tous les calculs doivent être corrigés par une estimation des variations annuelles. C'est ce qui explique que l'on trouve dans la littérature consacrée à ce sujet les chiffres les plus divers et parfois contradictoires.

Compte tenu des expéditions les plus récentes, on peut donner les valeurs suivantes.

- La *productivité en pleine mer* serait de 0,15 g de C/m²/jour, soit environ 50 g de C/m²/an.
- La *productivité des régions côtières* varierait selon les milieux (Dajoz, 1971, d'après divers auteurs).

Algues de la Nouvelle-Écosse :	3,58 g de C/m²/jour
Eaux côtières de Long Island Sound :	3,20 —
Mangrove à Porto-Rico :	16 —
Récif corallien :	10 à 23 —

En moyenne, la productivité se situe entre 0,8 et 3,5 g de C par m² et par jour. Ryther (1969) l'estime à 100 g/m²/an.

- Pour la *productivité des régions d'upwelling*, Ryther donne des valeurs de l'ordre de 300 g de C/m²/an.

Grâce à ces renseignements, on peut alors estimer la production moyenne totale en multipliant les résultats obtenus par les surfaces correspondant aux types définis. Ryther propose les valeurs suivantes :

- *Eaux du large* (90 % de la surface) : 326 millions de km²; la productivité totale serait donc de 16,3 milliards de tonnes de carbone par an.
- *Zones côtières* (9,9 % de la surface) : 36 millions de km². La productivité totale serait de 3,6 milliards de tonnes de carbone par an.
- *Régions d'upwelling* (0,01 %) : 0,1 milliard de tonnes de carbone par an.

La productivité primaire totale des océans serait donc d'environ *20 milliards de tonnes de carbone par an*. Steeman-Nielsen donnent, pour leur part, des chiffres de l'ordre de 15 milliards de tonnes. La productivité est donc bien plus faible que celle des terres émergées : les océans qui recouvrent les 7/10 de la surface du globe ne participent que pour 40 % à la productivité primaire mondiale. On évalue à $5 \cdot 10^{20}$ kcal l'énergie solaire totale reçue par la Terre en un an, soit $3{,}6 \cdot 10^{20}$ kcal pour les océans : or, la production des océans ne correspond qu'à environ $4 \cdot 10^{17}$ kcal. L'efficacité photosynthétique est donc très faible : elle est de l'ordre de 0,1 %.

— *Productivité secondaire et sources maritimes de nourriture humaine*

Il s'agit du taux d'accumulation de matière vivante au niveau des hétérotrophes (consommateurs et décomposeurs). On l'évalue en calculant la biomasse à chaque niveau trophique ou en étudiant le rendement des pêcheries. L'efficacité des transferts d'énergie d'un niveau trophique au niveau suivant varie beaucoup d'une chaîne à l'autre : Slobodkim (1961) l'estime à 10 %, Schaeffer à 20 %. De toute façon, il est évident que la production sera d'autant plus faible que la chaîne trophique y conduisant sera plus longue. Par exemple, si l'on estime l'efficacité à 10 %, on aura :

I	II	III	IV	V
Phytoplancton →	Copépode →	éperlan →	maquereau →	thon
1 000 kg	100 kg	10 kg	1 kg	0,1 kg

alors que :

I	II	III
Phytoplancton →	Euphausiacé →	baleine
1 000 kg	100 kg	10 kg

Ainsi, la même quantité de phytoplancton donne 10 kg de baleine et 100 g de thon. Il serait donc plus rentable, au point de vue économique, de consommer des organismes situés à un niveau trophique relativement bas !

Si l'on connaît la productivité primaire totale, le nombre de niveaux trophiques conduisant aux Poissons comestibles et l'efficacité écologique, on peut calculer, de manière théorique, la production piscicole totale. On le voit, le grand large produit une fraction négligeable de Poissons : la plupart d'entre eux se trouvent le long des côtes et dans les régions de remontée. Le chiffre de 241 millions de tonnes n'est, bien sûr, qu'une approximation (Schaeffer l'évalue, de son côté, à 200 millions). Une large part d'incertitude demeure; elle est due aux estimations de l'efficacité et à celles des surfaces à productivité haute, moyenne et basse.

▼ ***Tableau donnant les estimations de Ryther (1969) en ce qui concerne la production totale de Poissons dans les trois « provinces » océaniques.***

Province	Productivité 1^re totale tonnes de C/an	Niveaux trophiques	Efficacité écologique	productivité piscicole (tonnes de mat. fraîche/an)
Large	16,3 milliards	5	10 %	1,6 million
Côtière	3,6 milliards	3	15 %	120 millions
Upwelling	0,1 milliard	1,5	20 %	120 millions
	20 milliards de tonnes			241 millions de tonnes

Comparons ces données avec le produit des pêches. Les statistiques de la F.A.O. donnent les chiffres suivants (en milliers de tonnes de matière fraîche) pour les pêcheries maritimes :

	1964	1967	1969
Poissons	40 540	43 700	48 600
Crustacés	1 130	1 360	1 490
Mollusques	2 610	3 090	3 170
	44 280	48 150	53 260

M. Minnella

▲ ***Une scène de la pêche au thon.***

Les Poissons de haute mer représentent à peine 7 % de ce total, et les Invertébrés, pourtant les plus nombreux, 15 %. En ce qui concerne les prises de Poissons, les pays les plus producteurs étaient en 1969 : le Pérou (9 233 000 t), le Japon (8 623 000 t), l'U.R.S.S. (6 500 000 t), la Chine (5 800 000 t), les États-Unis (2 638 000 t).

Les prises des pêcheries représenteraient donc à peine le quart de la production totale. Il semble que l'on soit loin de la saturation, et l'on pourrait penser qu'il est encore possible de développer cette industrie (d'autant que le produit des pêches représente seulement 1 % de l'alimentation humaine). En fait, la production totale n'est pas équivalente au potentiel de pêche : les prédateurs prennent leur part et, par ailleurs, il est nécessaire de laisser dans l'eau un certain nombre de Poissons afin que le banc puisse se régénérer.

Prenons un exemple. Nous venons de voir que le Pérou est le plus grand producteur mondial de Poissons. Il s'agit, en grande partie, de l'anchois péruvien *Engraulis ringens,* qui pullule. Cette pêcherie se trouve dans l'aire d'upwelling provoquée par le courant de Humboldt. Sa surface est restreinte (60 000 km²). En plus des 10 millions de tonnes pêchées annuellement, Ryther estime que les Oiseaux à guano (cormoran de Bougainville) consomment 4 millions de tonnes d'anchois et que les thons, calmars, dauphins, etc., utilisent à peu près la même quantité pour leur nourriture. Si l'on estime qu'il faut laisser environ 2 millions de tonnes de Poissons pour maintenir la productivité, on peut évaluer la productivité de ces eaux à environ 20 millions de tonnes. Les estimations théoriques donnent le même chiffre. Les pêches actuelles représentent donc un maximum. La production de guano a d'ailleurs tendance à baisser depuis quelques années; cette diminution, sans doute due à une baisse des effectifs d'Oiseaux, est peut-être le signe prémonitoire d'un début d'épuisement des stocks d'anchois (Ramade, 1974).

Si les facteurs que nous venons d'évoquer sont pris en considération, on peut estimer que le potentiel de Poissons utilisables chaque année par l'homme est d'environ 100 millions de tonnes, soit à peine le double des prises actuelles. Or, la production des pêcheries s'accroît régulièrement chaque année d'environ 8 %. Il est donc clair que, sauf erreur d'estimation, cette augmentation ne pourra pas durer très longtemps. La plupart des pêcheries sont d'ailleurs incapables de contribuer dès maintenant à une expansion de la production. Nombreuses sont celles qui sont surexploitées *(overfishing)*. D'après Holt, sur 30 espèces considérées en 1949 comme sous-exploitées par les experts, plus de la moitié présentait des signes d'épuisement des stocks en 1969; c'est le cas du hareng dans l'Atlantique Nord.

On doit donc s'attacher à exploiter des espèces non utilisées jusqu'à maintenant et à développer de nouvelles surfaces de pêches. Les 3/4 des prises mondiales sont actuellement, par importance décroissante : les Clupéidés (harengs, sardines, anchois); les Gadidés (morues, lieus, merlus...); les saumons; les Poissons plats (soles, plies...); les maquereaux et le thon. Si l'on excepte les Clupéidés, la plupart des espèces consommées se situent à l'extrémité de longues chaines alimentaires, ce qui constitue une énorme perte de protéines.

Il a été ainsi proposé (Duvigneaud, 1974) : d'exploiter les espèces non utilisées actuellement (sur plus de 7 000 espèces pélagiques, on exploite seulement le thon); d'utiliser certains êtres planctoniques, comme ceux formant le krill de l'Antarctique; de rendre plus productives les zones côtières en y déversant des engrais azotés et phosphorés; de faire de l'élevage dans des enclos (ce qui est actuellement pratiqué en Extrême-Orient pour le mulet).

J. Muench

▲ *Les eaux douces peuvent être classées en deux grandes catégories : les eaux courantes (rivières, torrents) et les eaux stagnantes (lacs, étangs, mares, etc.). Ici, un lac (Mary Lake) entouré de forêts de Conifères dans le « Yoho National Park », en Colombie Britannique (Canada).*

Les milieux d'eau douce

Les eaux douces peuvent être classées en deux grandes catégories : les **eaux stagnantes** (lacs, étangs, mares), et les **eaux courantes** (rivières, torrents). Cette distinction n'exclut pas l'existence de stades intermédiaires : ainsi un torrent, zone d'eau courante, peut-il présenter en profondeur des cuvettes où règne un calme relatif des eaux.

Le peuplement et le fonctionnement des écosystèmes de ces milieux aquatiques présentent des particularités propres aux milieux d'eau douce. De même, ces milieux réunissent des propriétés physiques et chimiques semblables à celles des milieux marins mais se singularisent par certains caractères que nous allons étudier.

Rôle de certains caractères spécifiques aux milieux d'eau douce

Alors que la surface recouverte par les eaux marines représente 70 % du globe terrestre, les milieux d'eau douce, eux, n'occupent au contraire que des zones très réduites. De même, leur profondeur reste insignifiante par rapport à celle des fosses abyssales des océans.

Le *volume réduit,* premier caractère original des milieux d'eau douce, n'entraîne pas une limitation proportionnelle de la biomasse des êtres vivants, car la mer ne constitue par un élément naturel aussi favorable à la vie que les milieux aquatiques d'eau douce.

En outre la multitude des points d'eau répartis sur toute la surface du globe entraîne un deuxième trait original : les *biotopes sont isolés* les uns des autres. Cet isolement géographique empêche les organismes vivants d'une espèce déterminée de se propager partout et favorise ainsi l'isolement génétique, responsable de l'origine de nouvelles espèces.

Parmi les facteurs physico-chimiques agissant sur les êtres vivants et sur le fonctionnement des écosystèmes, la lumière, la température et certaines substances dissoutes sont les plus importants.

Pour la *lumière,* aux phénomènes physiques de réflexion, diffusion et absorption qui diminuent l'intensité lumineuse et modifient la composition spectrale, s'ajoute la présence de particules en suspension qui provoquent la turbidité de l'eau et en modifient la transparence, entraînant une diminution notable de la productivité des organismes chlorophylliens. Ainsi, dans les grandes rivières où le plancton crée un coefficient d'atténuation de 0,5 %, la perte de lumière est négligeable, mais, dans certains torrents de l'Himalaya où l'eau contient plus de 4 % de particules en suspension, l'eau devient très trouble et cette obscurité relative entraîne des adaptations fonctionnelles particulières. Dans ce cas on trouve certaines espèces de Poissons dont les yeux, très petits, ne sont plus fonctionnels, mais sont des organes tactiles nouveaux qui assurent la recherche de la proie. Au-delà d'une certaine quantité d'éléments en suspension, la vie n'est d'ailleurs plus possible.

Dans les milieux aquatiques, les variations de *température* sont atténuées par rapport aux variations atmosphériques. Ces dernières, dues au rayonnement solaire, ne concernent qu'une faible épaisseur de liquide dans les eaux dormantes peu profondes, mais, généralement, l'action des vents et des courants crée un brassage thermique qui atténue ses variations. Cependant, dans les lacs et les étangs suffisamment profonds, il s'établit une stratification thermique très caractéristique due au fait que la densité de l'eau est maximale à la température de 4 °C. Les eaux dont la température est inférieure ou supérieure à 4 °C ont donc tendance à monter. Alors, tout au moins dans les lacs tempérés, la température de l'eau présente au cours de l'année un cycle régulier.

En été, l'eau se répartit généralement en trois zones : la première, superficielle, appelée *épilimnion,* présente

M. Pedone

▲ ***Toute cuvette naturelle ou artificielle, contenant de l'eau et ayant une vie propre, est un lac.***

une température supérieure à 4 °C qui décroît avec la profondeur; la deuxième, zone de transition, réduite à quelques mètres, se nomme *thermocline;* enfin, l'*hypolimnion,* dont la température reste très faible et constante, correspond à la zone la plus profonde.

En automne, la baisse de la température entraîne les eaux superficielles vers le fond, et il se produit un brassage général qui conduit à une égalisation des températures. Puis le cycle recommence : la stratification thermique de l'été fait suite à l'uniformisation constatée en hiver. Ces mouvements d'eau sont écologiquement importants : on sait, en effet, que les eaux superficielles sont bien oxygénées et que les eaux profondes, elles, sont très minéralisées. Grâce au brassage des deux zones, l'ensemble bénéficie d'un renouvellement favorable à la vie des organismes.

Les *substances dissoutes* sont importantes et parmi elles les gaz dissous, dont l'*oxygène* est certainement le plus important car il règle l'activité animale tout entière. La teneur en oxygène de l'eau est faible, comparée à celle de l'air, et elle est très dépendante de la température.

Les organismes sont, selon les espèces, plus ou moins exigeants vis-à-vis de l'oxygène dissous; ainsi, c'est seulement dans les lacs subalpins profonds (Léman, Bourget), riches en oxygène, qu'on trouve des Salmonidés comme l'omble-chevalier, Poissons ayant de grands besoins en oxygène. Cependant, certains animaux aquatiques résistent à cette faible teneur en oxygène par des adaptations particulières : ainsi, les Vers *Tubifex* (Oligochètes), les larves chironomes (Diptères) possèdent des substances voisines de l'hémoglobine qui ont une grande affinité pour l'oxygène. Beaucoup d'Invertébrés aquatiques (dytiques, nèpes, corises) doivent, eux, venir prendre des réserves d'air à la surface de l'eau par des processus variés.

Le *gaz carbonique,* très soluble dans l'eau, a une concentration dans les eaux douces à 20 °C de 0,56 %, assez nettement supérieure à sa concentration dans l'atmosphère (0,033 %). En outre, il se combine facilement avec des sels de métaux alcalins et alcalino-terreux pour former des carbonates et des bicarbonates qui constituent alors une réserve de gaz carbonique facilement mobilisable. Il joue un rôle considérable au niveau des processus photosynthétiques des végétaux chlorophylliens. La consommation du gaz carbonique par la photosynthèse rend l'eau plus acide et provoque la précipitation du carbonate. C'est là l'origine des concrétions calcaires qui recouvrent certains végétaux *(Chara)*.

Les eaux douces se caractérisent enfin par leur concentration en sels dissous, concentration variable pouvant atteindre 0,5 g/l, mais toujours très inférieure aux 35 g/l de l'eau de mer. Néanmoins, même avec cette faible concentration, tous les éléments biogènes existent dans les eaux douces. Parmi eux, les nitrates et les phosphates, nécessaires à la croissance des végétaux, sont, souvent, des facteurs limitants.

Les eaux stagnantes

Les eaux stagnantes, appelées parfois dormantes, sont constituées par les lacs, les étangs, les mares et les flaques. Ces catégories correspondent à des appréciations courantes et sont généralement mal définies : on peut cependant en préciser le sens.

Toute cuvette, naturelle ou artificielle, contenant de l'eau et ayant une vie propre, est un *lac*. Les *étangs* sont des lacs artificiels, d'au moins un mètre de profondeur, dont la formation dépend directement de l'homme, qui les assèche et les utilise. (Les étangs sont généralement moins profonds que les lacs, et sont envahis par une végétation qui ne reste pas localisée aux seuls bords comme dans les lacs.) Les *mares* sont de petits étangs dont la profondeur peut atteindre 60 cm à 1 m. La température y est variable, en relation avec la chaleur solaire qui produit une petite stratification thermique. Les *flaques* n'atteignent pas 20 cm de profondeur. La température de l'eau est ici directement liée à l'action du soleil, lequel ne produit pas, cette fois, de stratification thermique. Au cours de l'année, les mares et les flaques peuvent s'assécher naturellement. Ce caractère temporaire en fait des habitats très particuliers.

Classification des lacs

On définit généralement trois catégories de lacs.

— *Les lacs oligotrophes* (« qui nourrissent peu »)

▼ ***Les plantes aquatiques, libres ou fixées, abondent à la surface des eaux douces, constituant même, dans les étangs, de véritables îles vertes. A gauche, des touffes de Cypéracées; à droite, la zone à nénuphars.***

G. Mazza

N. Cirani

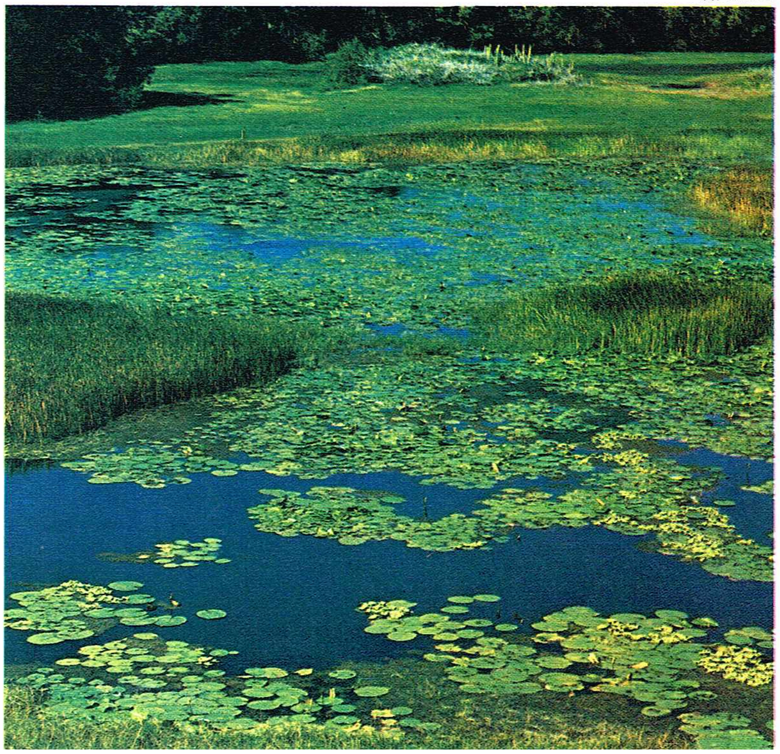

sont des lacs profonds. Leurs eaux limpides sont pauvres en azote et en phosphore minéraux, mais, par contre, riches en oxygène dans leur zone profonde. Des Salmonidés de fond, comme l'omble-chevalier et les corégones, affectionnent leurs eaux, riches en oxygène. La ceinture végétale de ces lacs est réduite ; la décomposition des cadavres, animaux et végétaux, est lente, le plancton rare. On considérait encore, il y a quelques années, le lac Léman et celui du Bourget comme des lacs oligotrophes. Mais les lacs s'enrichissent naturellement en matières organiques et minérales et tendent vers l'eutrophisation, phénomène accéléré artificiellement par les apports résiduels urbains.

— *Les lacs eutrophes* (« qui nourrissent bien ») sont relativement peu profonds. Leurs eaux, peu transparentes, colorées de nuances allant du vert au brun, contiennent beaucoup d'éléments nutritifs. La teneur en oxygène peut être élevée dans les eaux superficielles mais elle décroît vite avec la profondeur ; en effet, dans le fond de ces eaux, la température est plus élevée que dans les lacs oligotrophes et, surtout, l'abondance des organismes vivants cause une grande consommation d'oxygène. Ces lacs peu profonds, à bords plats, favorisent une colonisation végétale importante. Les lacs de Nantua et de Chambon appartiennent à cette catégorie.

— *Les lacs dystrophes* (« qui nourrissent mal ») se distinguent des deux précédents par l'abondance d'acides humiques, responsables de la coloration brune de ces eaux. Ces lacs, peu profonds, contiennent des eaux légèrement acides qui favorisent le développement des tourbières. Le lac de Gérardmer dans les Vosges est dystrophe.

Le peuplement des lacs

Les fonds lacustres présentent une répartition spatiale des organismes vivants, végétaux et animaux, qui s'étage sur deux niveaux : une *zone littorale* et une *zone profonde*. Les organismes de ces fonds peuvent être inféodés à un substrat, de la zone littorale ou profonde *(le benthos)*, ou au contraire répartis au large, dans les eaux superficielles, menant une vie nageante ou flottante *(le plancton)*.

— *La zone littorale*. La première ceinture, déterminée par la profondeur à laquelle descend la lumière, correspond à la zone littorale. Ses eaux, fortement oxygénées, constituent un lieu de prédilection pour les Poissons, qui trouvent, à l'abri des végétaux, des conditions favorables à leur reproduction. Les végétaux supérieurs sont abondants, et se répartissent au bord des étangs selon des zones plus ou moins régulières.

La composition et la répartition des associations végétales varient selon la profondeur, la nature du substrat, et la composition chimique de l'eau. Lorsque les conditions sont favorables, on remarque une succession régulière des végétaux supérieurs :

La *zone à nénuphars*, associée à des Characées pouvant descendre à 4 et 5 m de profondeur. Dans le cortège floristique, on rencontre les espèces suivantes : le nénuphar jaune *(Nuphar luteum)*, le nénuphar blanc *(Nymphea alba)*, la renouée aquatique *(Polygonum amphibium)*, la châtaine d'eau *(Trapa natans)*, le myriophylle en épi *(Myriophyllum spicatum)*, un potamot *(Potamogeton natans)*.

La *zone à « joncs » (Scirpus lacustris)* suivie de celle des roseaux *(Phragmites)* ne descend guère au-dessous de 1,50 m.

La *cariçaie* est constituée d'une ceinture de touradons de *Carex*.

Avant d'atteindre les premiers arbres de la *saussaie* (divers saules) riveraine, on peut rencontrer, sur les rives plates, de petits scirpes *(Scirpus palustris)*, la glycérie aquatique *(Glyceria aquatica)* ainsi que quelques touffes de molinie *(Molinia coerulea)*.

Ce sont les lacs eutrophes qui présentent la végétation la plus abondante, les lacs oligotrophes abritant une végétation littorale beaucoup plus réduite *(Littorella, Isoetes, Nitella)*. Les Algues, accompagnant ces végétaux supérieurs, se présentent sous forme de longs filaments verts, enchevêtrés (Chlorophycées : *Cladophora, Spirogyra*) ou bien sous forme microscopique (Diatomées, Cyanophycées).

La faune de cette zone littorale présente, en particulier dans les lacs eutrophes, une très forte densité. Elle est variée et riche : Mollusques, larves d'Insectes, Annélides,

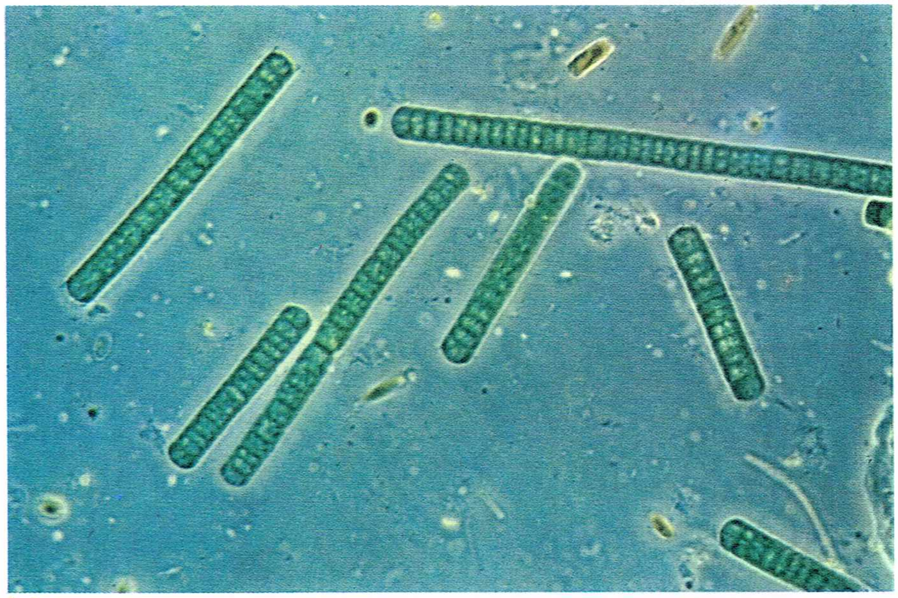

G. S. Giacomelli

▲ ***Les Algues microscopiques du phytoplancton donnent aux eaux leurs différentes couleurs ; ainsi les eaux bleues sont le fait des Cyanophycées ; ici, des* Oscillatoria *(× 170 × 3).***

Nématodes, Crustacés. De plus, la zone à potamots héberge une faune piscicole très diversifiée : carpes, tanches, gardons, rotengles...

— *La zone profonde*. Elle correspond à la portion du lac pauvre en lumière. Elle n'existe que dans les grands lacs : lac Léman, lac Tanganyika, lac Baïkal... Dans cette zone, les Bactéries, ainsi que les espèces fouisseuses, Annélides, larves d'Insectes, Chironomides, qui assurent la décomposition et la minéralisation de la matière organique, sont très abondantes. Les végétaux chlorophylliens ont pratiquement disparu de ces fonds obscurs. A leur place, évoluent des Crustacés aveugles, adaptés à ces conditions de vie difficiles, comme *Niphargus puteamus* et *Asellus foreli*.

— *La zone du plancton*. Le domaine du plancton s'étend sur toute la partie superficielle du lac : zone pélagique et littorale. Il renferme beaucoup moins d'espèces que le milieu marin mais n'en demeure pas moins très important, car, nous le verrons, il constitue une bonne part des producteurs.

Le phytoplancton, ou plancton végétal, est représenté par les Algues vertes *(Closterium, Cosmarium, Scenedesmus)*, des Algues bleues *(Oscillatoria)*, des Dinophycées *(Peridinium, Ceratium)*, et surtout des Diatomées.

La faune planctonique comprend quelques Protozoaires avec des Infusoires Spirotriches mais ce sont surtout les Rotifères et les Crustacés (Copépodes et Ostracodes) qui constituent l'essentiel du zooplancton. Tous ces organismes, qu'ils appartiennent à la flore ou à la faune, ne mesurent souvent que quelques fractions de millimètre. Translucides et transparents, ils assurent le filtrage de l'eau. Ils constituent parfois des concentrations importantes : des myriades d'animaux et de végétaux minuscules sont présents dans la zone superficielle des lacs. Ils descendent pendant la journée et montent en surface pendant la nuit, comme s'ils recherchaient une luminosité réduite. De plus, on remarque des différences de comportement entre espèces, mais aussi entre individus d'une même espèce. Cette distinction spécifique entraîne l'existence, dans un même lieu, d'une répartition du plancton en strates horizontales, qui permet à chacun de trouver sa place.

Les réseaux trophiques de l'écosystème lacustre

En milieu aquatique, les *producteurs* primaires sont surtout les Algues planctoniques servant de nourriture aux petits Crustacés (gammares, daphnies), aux alevins et à quelques Poissons adultes (gardons). Mais la tige et les feuilles des végétaux supérieurs sont parfois broutées par des Gastéropodes, comme la limnée, la planorbe, ou des Poissons réellement herbivores (brêmes, gardons). Ces herbivores forment la catégorie des *consommateurs de premier ordre*.

Les *consommateurs de deuxième ordre* se nourrissent des consommateurs de premier ordre. Ce sont les carnassiers, comme les Insectes et leurs larves, et certains Poissons : carpes, poissons-chats, perches. Certains

▼ ***En haut, des Algues vertes :* Scenedesmus *(× 210 × 2,2) ; en bas, une Diatomée :* Cymbella lanceolata *(× 430).***

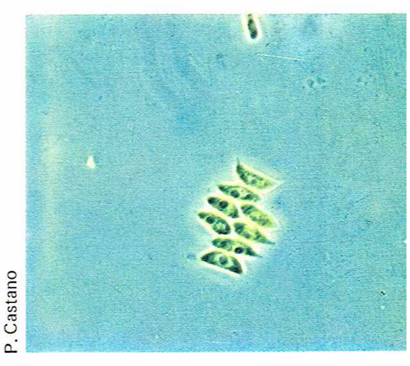

P. Castano

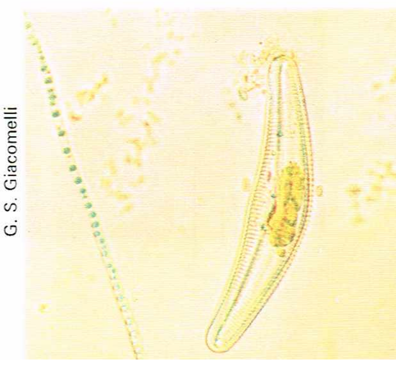

G. S. Giacomelli

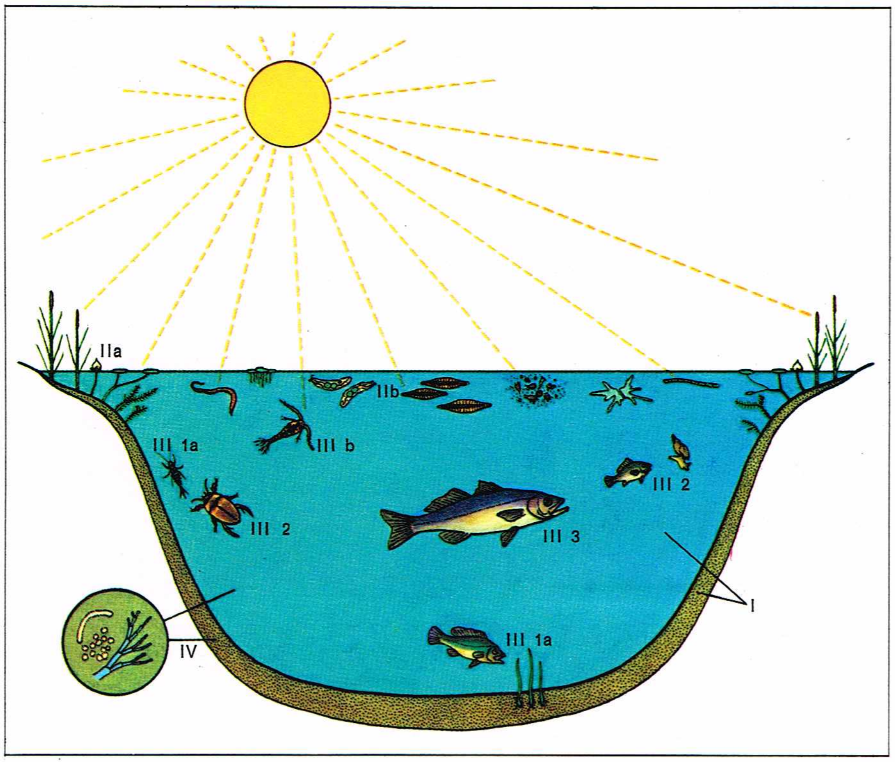

I.G.D.A.

carnivores, tels le brochet, le martin-pêcheur, la loutre, peuvent consommer ces carnassiers. On les appelle parfois des *consommateurs de troisième ordre.*

La mort des producteurs et des consommateurs fournit des débris de toute sorte qui servent de nourriture aux *saprophages* ou *décomposeurs.* Une partie de cette matière organique est utilisée comme source d'alimentation des omnivores (carpes), le reste est décomposé en substances minérales (carbonates, nitrates, phosphates...), sous l'influence d'agents de la fermentation comme les Bactéries.

Des déséquilibres apparaissent en milieu aquatique d'eau douce stagnante, notamment par une exagération de la production végétale : c'est le cas initialement lors du processus d'eutrophisation ou lorsque certaines espèces prolifèrent activement de façon saisonnière : c'est le cas des « fleurs d'eau ». Ainsi, au printemps ou à l'automne, il n'est pas rare de voir apparaître dans les étangs ou les lacs plus ou moins eutrophes des taches épaisses vert rougeâtre à la surface de l'eau, composées d'un enchevêtrement d'Algues et de plancton. Ces « fleurs d'eau », apparues brusquement, se maintiennent quelques semaines, puis disparaissent aussi vite qu'elles étaient venues. Ce phénomène peut s'expliquer de la façon suivante : à la suite de conditions biologiques favorables, certaines Algues se développent rapidement, éliminant par leurs excrétions la plupart des autres espèces concurrentes. Puis, leur croissance tend à se ralentir car elle provoque un surpeuplement qui conduit à l'accumulation de leurs produits d'excrétion, produits qui les intoxiquent elles-mêmes. Les Algues, dont les cellules se vacuolisent et se remplissent de lipides, montent alors à la surface pour former ces fleurs d'eau. Leur décomposition par les Bactéries se produit en quelques jours, surtout l'été. Cette décomposition des cellules végétales entraîne l'émission de substances toxiques qui dégradent certains végétaux, et parfois même des animaux. De nombreuses intoxications ont été signalées chez des animaux qui ingéraient des « fleurs d'eau » à Algues bleues.

Productivité des eaux stagnantes

La *productivité primaire* est due surtout au plancton végétal. On utilise son pouvoir de photosynthèse pour évaluer sa productivité par la méthode Steemann-Nielsen. Cette méthode consiste à mesurer l'assimilation par le plancton du carbone radioactif fourni sous forme de bicarbonate. On opère dans des flacons de plancton immergés à différentes profondeurs, généralement de mètre en mètre. Les résultats fournis concernent la quantité de carbone, en milligrammes, assimilée en un jour, dans une colonne d'eau de 1 m^2 de section horizontale. On connaît ainsi la productivité primaire de quelques écosystèmes d'eau douce (Odum et Odum, 1959). Celle-ci est très variable et dépend :

— *Du type de lac auquel on s'adresse :* lac eutrophe peu profond (Japon), 2,1 g/m^2/jour en moyenne annuelle ; lac de type dystrophe (Cedar Bog, Minnesota), 0,3 g/m^2/jour en moyenne annuelle.

— *De la saison :* lac Érié, en hiver, 1 g/m^2/jour (moyenne inférieure à celle de l'année) ; en été, 9 g/m^2/jour.

— *De l'intervention humaine :* cultures d'Algues avec addition de gaz carbonique, 43 g/m^2/jour.

Selon les mêmes auteurs, la productivité primaire des lacs peu profonds varie de 3 à 10 g/m^2/jour. Elle vient immédiatement après la productivité des récifs coralliens, laquelle dépasse 10 g et peut, dans certains cas, atteindre 20 g/m^2/jour, et est très supérieure à celle des hautes mers qui présentent une productivité très faible, n'atteignant qu'exceptionnellement 0,5 g/m^2. Dans les écosystèmes aquatiques, une bonne productivité nécessite des conditions de vie particulières, indispensables à la croissance du phytoplancton avec en particulier une couche d'eau transparente assez peu profonde pour que le réchauffement soit possible et le rayonnement solaire suffisant.

Les données concernant la *productivité secondaire* sont souvent des estimations établies à partir de renseignements concernant la productivité piscicole. L'homme représente en effet un nouveau maillon du réseau trophique, et c'est avec un grand intérêt qu'il s'intéresse au résultat de ces pêches, résultat qui ne représente en fait qu'une partie de la productivité totale d'un milieu aquatique. Au niveau mondial, on avance pour 1970 le chiffre de 7 millions de tonnes de Poissons pêchés en eau douce.

Les chiffres rassemblés par Odum et Odum (1959) indiquent, comme on pouvait s'y attendre, un rendement meilleur en Poissons herbivores de type carpe que pour les Poissons carnivores. La croissance de la carpe est si importante qu'à partir d'alevins, on peut obtenir en deux étés, de façon naturelle, des individus atteignant 1 kg. On comprend pourquoi les pisciculteurs s'intéressent particulièrement à ce Poisson !

Pourtant, dans les pièces d'eau recherchées par les pêcheurs, tant d'un point de vue « sportif » que dans un meilleur usage des possibilités nutritives de l'étang,

▼ ***Tableau estimatif des rendements de la pêche dans quelques écosystèmes d'eau douce (d'après Odum et Odum, 1959).***

Rendement de la pêche dans quelques écosystèmes d'eau douce

Écosystèmes et niveaux trophiques	Poissons capturés (en kg/ha/an)
1. Plans d'eau sans apports d'engrais.	
a) Herbivores et carnivores réunis :	
Grands lacs américains	0,9 à 8
Lacs africains	1,5 à 247
Petits lacs américains	2,0 à 178
b) Carnivores :	
Petits étangs de pêche américains	44 à 165
c) Herbivores :	
Étangs à carpes d'Allemagne	110 à 383
2. Plans d'eau avec apports d'engrais.	
a) Carnivores :	
Petits étangs de pêche américains	220 à 550
b) Herbivores :	
Étangs saumâtres des Philippines	495 à 990
Étangs à carpes d'Allemagne	980 à 1 540
3. Plans d'eau avec apports d'engrais et de nourriture.	
a) Carnivores :	
Petits étangs américains de 1/2 ha	2 409
b) Herbivores :	
Hong Kong	2 200 à 4 400
Chine du sud	1 100 à 14 850
Malaga	3 850

il est recommandé de joindre aux herbivores ou omnivores des carnivores comme la perche, le brochet, le black-bass.

Les eaux courantes

Caractères écologiques des eaux courantes

Par comparaison avec les eaux stagnantes, ce milieu réunit des conditions particulières : l'existence d'un courant, la variété des substances dissoutes et de la nature du fond.

— *Le courant* est certainement, par son action mécanique et ses conséquences sur les facteurs physico-chimiques, le facteur le plus déterminant dans les conditions écologiques des eaux courantes. La vitesse du courant est très variable. Au sein d'un même cours d'eau, et *a fortiori* d'un cours à un autre, de nombreux facteurs la modifient : la largeur et la profondeur du lit, les irrégularités du fond, la pente de la surface. La vitesse diminue sur les rives et le fond ainsi que sur les parois lisses où les couches, liquides, glissent parallèlement entre elles sans se mélanger et constituent un écoulement de type laminaire. Par contre, en contact avec un substrat plus grossier, l'écoulement devient turbulent et il y a alors mélange des différents constituants dissous, ou en suspension dans l'eau.

— Pour *la nature du fond,* deux facteurs interviennent sur le déplacement des éléments qui constituent le lit d'un cours d'eau : la taille de ces éléments et la vitesse du courant. Selon cette vitesse, les grosses pierres seront peu ou pas charriées, tandis que les matériaux plus fins seront, ou bien transportés en suspension dans l'eau, ou bien décantés. Ces particules minérales ou organiques rendront le fond du lit successivement graveleux, sableux et enfin vaseux.

— En ce qui concerne la *température,* à cause de leur faible profondeur, les cours d'eau ne possèdent pas de stratifications thermiques comparables à celles des lacs. Par contre, au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la source d'un cours d'eau, on observe des zones de fluctuations thermiques : les amplitudes journalières et annuelles augmentent.

— Les variations de *substances dissoutes,* ou *en suspension,* sont d'autant plus grandes que le cours d'eau est long et que la nature des roches mères traversées est diversifiée. L'influence de l'environnement sur la nature chimique des eaux a été étudiée par Serra Tosio (*in* Decamps, 1971) sur une rivière du Vercors, le Furon. A partir des graphiques présentés, on note tantôt une augmentation, tantôt une diminution simultanée, très significative, des ions NO_3^-, PO_4^{--} et de la silice. L'augmentation de ces substances a lieu lorsque le Furon traverse les prairies (décomposition végétale et pollution animale) ou lorsque la rivière est soumise à la pollution humaine. La diminution se présente lors de la traversée de la rivière dans les forêts. L'eau, apportée par les affluents non pollués, accentue, par un phénomène de dilution, la chute de concentration des substances étudiées.

Les cours d'eau, par suite d'un brassage important de leurs eaux et surtout de leur renouvellement, sont généralement bien pourvus en *oxygène.* Malheureusement, l'apport de nouvelles eaux ne permet pas toujours un renouvellement de l'oxygène; l'apport est souvent réduit à néant par le déversement de matières organiques diverses qui provoquent une pullulation de Bactéries et diminuent ainsi le taux en oxygène.

Les communautés

De la grande variation des facteurs écologiques des eaux courantes résulte une grande diversité des communautés qui y vivent. Ces variations dépendent de la nature du substrat et de la vitesse du courant; les communautés changent selon les différents secteurs des cours d'eau : les sources, les eaux torrentielles, et les cours lents ou rapides des fleuves et des rivières.

— *Les sources,* à température constante et généralement faible, sont le site de nombreuses Mousses et Algues, mais n'abritent que quelques végétaux supérieurs. Dans les sources d'eau calcaire on rencontre des Mousses comme *Cratoneuron commutatum, Philonotis calcarea* qui forment des coussinets vert jaunâtre, incrustés de calcaire. Dans leur voisinage immédiat, croissent des tapis de dorines *(Chrysosplenium),* ou des cardamines. Parmi les Algues, il n'est pas rare de trouver dans les eaux fraîches acides la très caractéristique Algue rouge *Batrachospermum,* dont les pigments rouges sont masqués par la chlorophylle et la phycocyanine, pigments responsables de la couleur vert glauque de l'Algue. Sur les pierres, se développent des Algues encroûtantes *(Hildenbrandia, Lithoderma)* qui colorent les pierres en rouge verdâtre. Les animaux de ces milieux sont représentés par des Protozoaires, des Rotifères, des Mollusques, des larves de phryganes et des Chironomides.

Un cas particulier est constitué par les sources chaudes où l'activité métabolique des organismes reste normale en dépit de températures très élevées. Ainsi, on cite le cas de certaines Algues bleues, *Oscillaria* et *Phormidium,* qui vivent dans des eaux à 85 °C. On a même trouvé des Bactéries vivantes dans des eaux thermales à près de 90 °C.

— Les *torrents* n'hébergent que des formes fixées d'Algues et de Mousses; celles-ci sont accompagnées d'organismes animaux comme des Spongiaires et des Bryozoaires. Quelques plantes supérieures parviennent à s'installer lorsque le courant se calme : parmi les espèces

J. Six

A. Margiocco

▲ Pour un meilleur usage des possibilités nutritives d'un étang, il est recommandé de joindre aux herbivores ou omnivores des carnivores comme la perche (en haut) et le brochet (en bas).

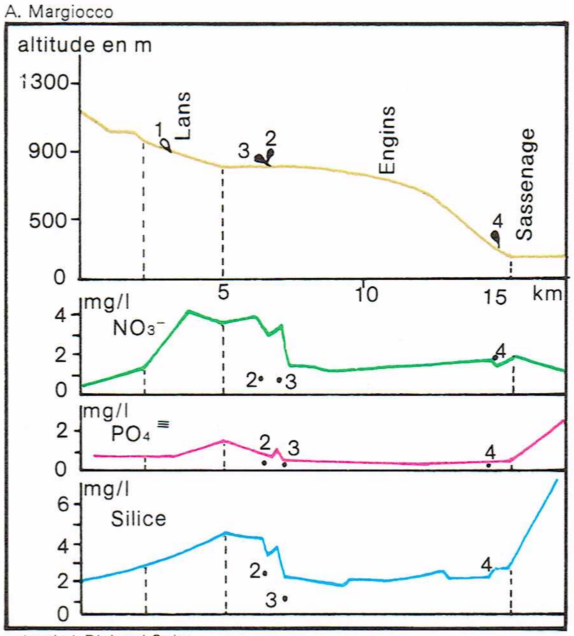

redessiné Richard Colin

◀ Représentation graphique du profil longitudinal et de la teneur en nitrates, phosphates et silice des eaux du Furon; les chiffres 1, 2, 3 et 4 correspondent à des affluents (d'après Serra Tosio, H. Decamps, la Vie dans les cours d'eau, Que sais-je? P.U.F.).

◀ Page ci-contre, en haut, représentation schématique d'un écosystème douce d'eau (ici, un étang) montrant les unités fondamentales : I, substances abiotiques (composés organiques et inorganiques); II a, producteurs (plantes fixées); II b, producteurs (phytoplancton); III 1 a, consommateurs primaires (phytophages) du fond; III 1 b, consommateurs primaires du zooplancton; III 2, consommateurs secondaires (carnivores); III 3, consommateurs tertiaires (carnivores secondaires); IV, réducteurs (Bactéries et Champignons de la décomposition).

▼ *Ci-dessous, en haut, la Mousse des fontaines,* **Fontinalis antipyretica,** *plante résistante au courant des torrents; en bas, l'espèce dominante du lieu définit la zonation du cours d'eau : ici,* **Abramis brema** *caractérise la zone à brème.*

les plus résistantes, on peut citer le myriophylle, la renoncule flottante et la Mousse des fontaines, *Fontinalis antipyretica*. De petits organismes animaux (Protozoaires, Rotifères, Nématodes, Mollusques) vivent abrités dans des anfractuosités, ou rampent sur le fond. De façon générale, les animaux réagissent à la violence du courant par des adaptations particulières; quelques larves de perlides peuvent vivre et se glisser sous les pierres, grâce à leurs corps aplatis. Des dispositifs d'accrochage permettent à certains animaux de se fixer; c'est le cas des *Liponeura* qui possèdent sur leur face ventrale six ventouses; certaines larves de Trichoptères sécrètent des fourreaux protecteurs qu'elles alourdissent avec des cailloux. Parfois les animaux réagissent au courant, en s'orientant face à lui, et en progressant contre lui. Les Poissons des eaux torrentielles sont peu nombreux; ce sont de puissants nageurs comme la truite, le saumon. Les Poissons sont effilés comme l'anguille, ou aplatis dorsoventralement comme le chabot, ce qui leur permet de se plaquer contre le fond.

— Dans *les rivières et les fleuves,* lorsque la vitesse du courant diminue, les organismes vivants trouvent des conditions de vie plus favorables et sont plus nombreux. La faune s'enrichit d'espèces eurythermes plus nombreuses et le plancton apparaît, encore en nombre limité. Parmi les végétaux, on rencontre la renoncule flottante, l'élodée, le potamot flottant, la vallisnérie, la glycérie flottante, la sagittaire... Les organismes animaux sont très variés et se répartissent selon la nature des substrats. Les fonds sableux constituent un support instable, peu habité, où les Nématodes, Copépodes, Rotifères et l'esturgeon, par exemple, représentent les locataires les plus fréquemment rencontrés. La vase du fond est peuplée d'espèces fouisseuses : Lamellibranches *(Unio, Anodonte),* Oligochètes *(Tubifex)* et larves d'éphémères. On retrouve dans les communautés de ces fonds vaseux la plupart des espèces vivant dans les lacs et les étangs, à la différence près qu'elles ont, dans les cours d'eau, un caractère temporaire dans un lieu donné. Le cours d'eau, en fonction de la pente ou de la largeur de son lit, héberge des Poissons d'espèces différentes, l'espèce dominante du lieu définit la zonation : zone à truite, zone à ombre, zone à barbeau et zone à brème (Huet, 1960). Ainsi, compte tenu de la largeur et de la pente de la rivière, on peut s'attendre à trouver tel ou tel Poisson.

P. Castano

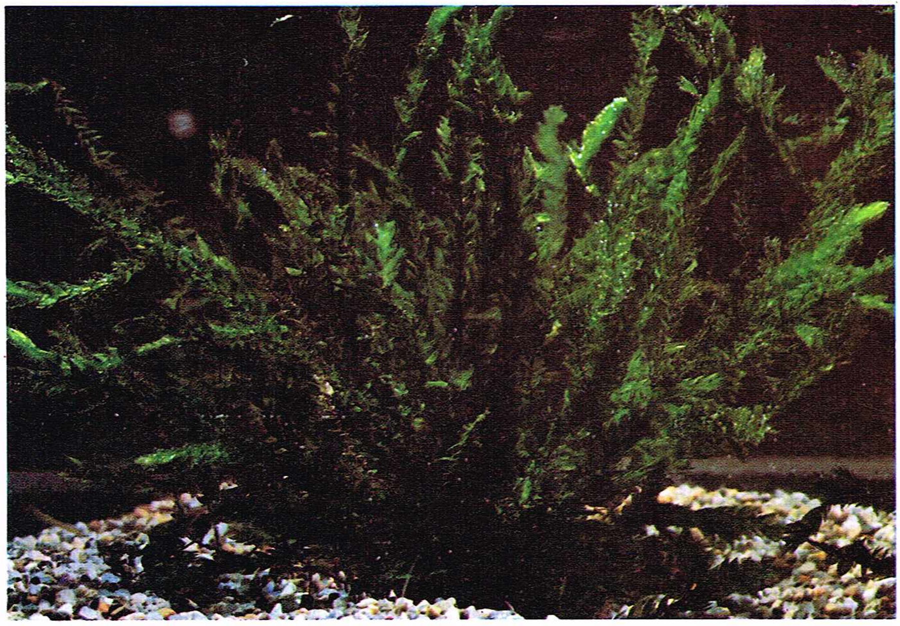

R. H. Noailles - Jacana

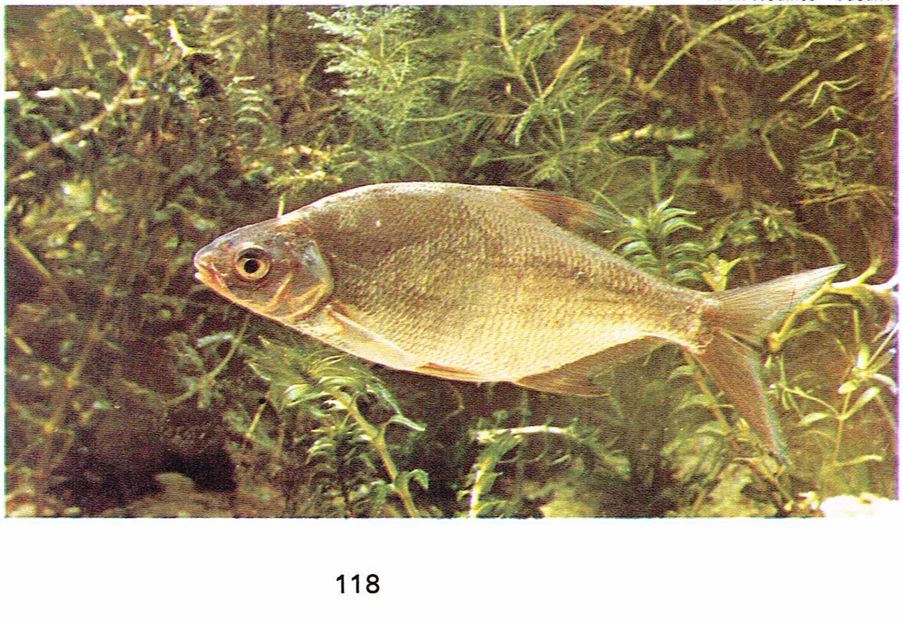

Fonctionnement de l'écosystème

Au niveau des *producteurs primaires,* les cours d'eau ne sont pas caractérisés par l'abondance de la flore. Les végétaux supérieurs sont peu nombreux. Le plancton n'apparaît que dans les rivières à cours lent et demeure beaucoup moins dense que dans les lacs. Seul, un apport étranger à l'écosystème peut expliquer la présence des nombreux organismes animaux.

Plus encore que les lacs, les cours d'eau constituent des écosystèmes ouverts, très dépendants des systèmes voisins; en particulier, ils sont grandement soumis à l'influence de l'environnement terrestre. Les sources de la nourriture animale proviennent, non seulement des producteurs originaires du milieu, mais aussi des nombreux détritus venus de l'extérieur. Ces détritus peuvent flotter un certain temps, puis être entraînés en suspension, ou bien se déposer sur le fond et être décomposés par les micro-organismes. Les feuilles mortes tombées des arbres constituent le plus gros apport externe et contribuent principalement à la nourriture des Invertébrés herbivores pendant la mauvaise saison. Les consommateurs absorbent des organismes liés aux détritus : Bactéries, Champignons, Algues et Protozoaires. Parmi les *consommateurs,* les brouteurs sont représentés par des larves d'Insectes, des Gastéropodes, des Planaires, quelques Poissons. Comme dans les étangs, beaucoup d'espèces sont omnivores : les larves d'Insectes et les carpes. Ces dernières consomment indifféremment, selon la saison, des végétaux ou des animaux. Quelques Poissons sont des carnassiers stricts (brochet, sandre). Parmi les Vertébrés du rivage, certains s'alimentent au détriment de la faune aquatique; c'est le cas des Oiseaux suivants : hérons, martins-pêcheurs, mouettes.

La *productivité primaire* des rivières correspond dans l'ensemble à de faibles taux : les valeurs moyennes s'échelonnent de 0,3 à 2 g/m²/jour. Dans certaines conditions, comme les « Silver Springs » de Floride, en zone subtropicale, la production atteint 7,5 g/m²/jour. Ces chiffres varient beaucoup avec les caractères physicochimiques des eaux : les rivières froides oligotrophes sont très peu productives; par contre, des eaux chaudes, qui traversent des terrains cultivés, ont des taux de productivité plus élevés.

Richard Colin

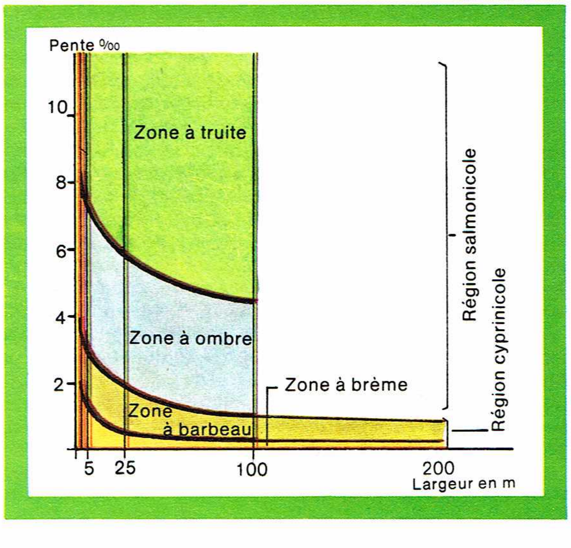

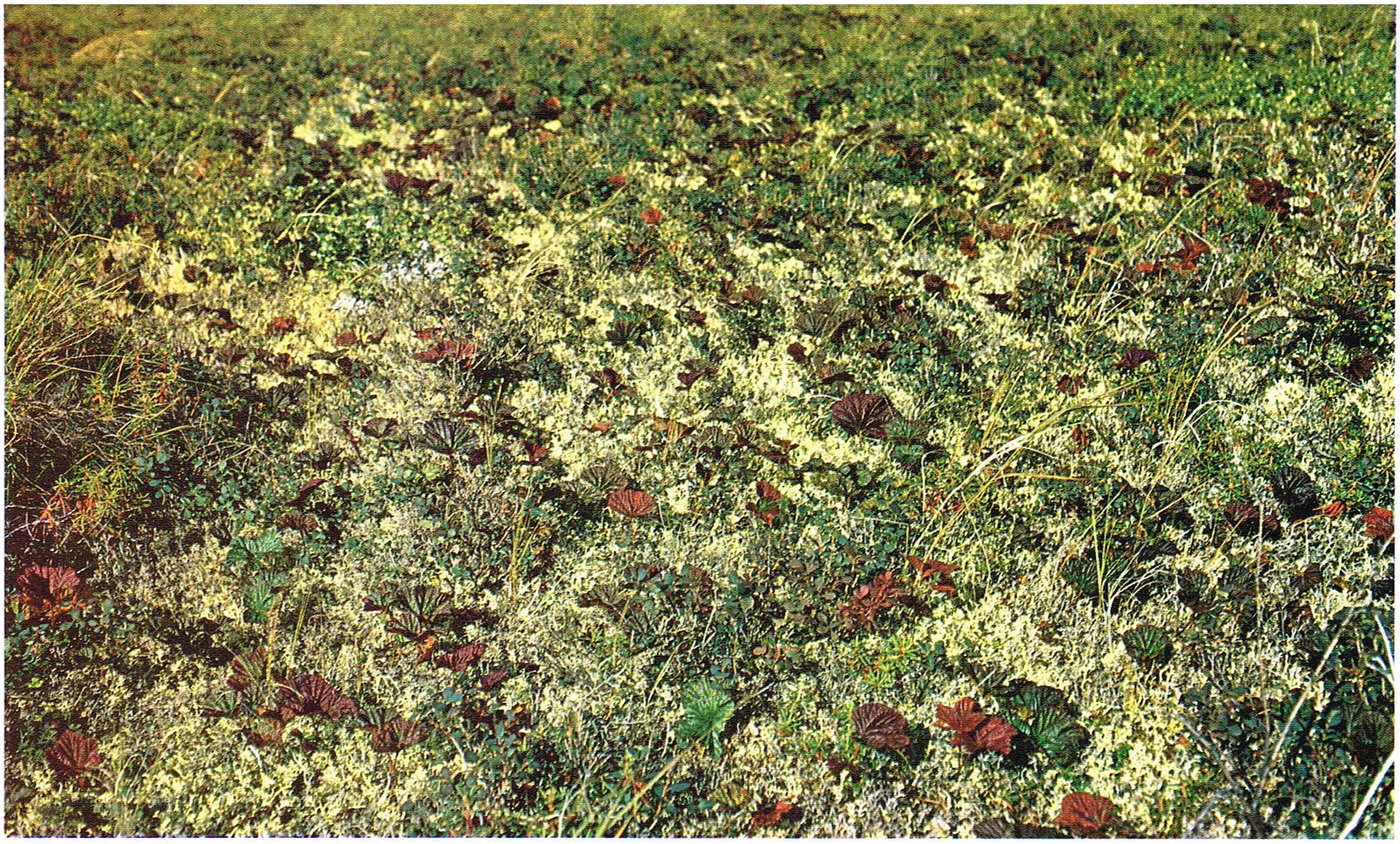

S. et D. Mc Cutcheon

▲ *Une toundra à Cladonia : entre les buissons, les espaces sont occupés par une strate dense de divers Lichens ; c'est un paysage de landes caractéristique.*

Pour la *productivité piscicole* des eaux courantes, ce sont les populations de truites qui ont été le plus étudiées. D'après les chiffres donnés par Decamps (1971) et reproduits dans le tableau ci-dessous, il apparaît que la plus grande biomasse de Poissons vivants est atteinte à l'âge de 12 mois. Avant 12 mois, les individus, nombreux, sont trop petits et, après 12 mois, la mortalité naturelle est responsable d'une diminution de la biomasse. Il en résulte qu'une bonne exploitation de truites devra tenir compte de ces données.

Évolution d'une population de truites à partir de l'éclosion						
Age (en mois)	0	6	12	18	24	30
Nombre	1000	15	7	4	2	1
Poids d'un poisson (en grammes)	0,1	60	200	250	350	450
Poids des poissons en vie (en kg)	0,10	0,90	1,40	1,00	0,70	0,45
Poids des poissons morts (en kg)	0	1,60	2,20	3,00	3,70	4,10
Production totale (en kg)	0,10	2,50	3,60	4,00	4,40	4,65

Richard Colin

◀ *Tableau estimatif de la* **productivité piscicole** *des eaux courantes : ici, dans le cas d'une population de truites. (Ces nombres correspondent approximativement à ceux donnés par Allen dans son étude de l'Horokiwi, rivière très productive de Nouvelle-Zélande.)*

Conclusions

Les écosystèmes des eaux continentales, à cause de l'intérêt pratique de la pêche, sont assez bien connus. Ainsi, les facteurs physico-chimiques de ces milieux aquatiques sont souvent étudiés avec une assez grande précision. Cependant, les recherches menées au niveau de la productivité restent insuffisantes et doivent absolument être poursuivies et développées pour contribuer à un aménagement plus rationnel des cours d'eau et des étangs. En effet, l'équilibre biologique de l'écosystème s'avère très fragile et la rupture peut, par là même, survenir rapidement : il suffit qu'une espèce prolifère trop brutalement ou encore, et c'est hélas le cas le plus fréquent, que l'homme, par son activité industrielle et les pollutions qui en résultent, détruise l'équilibre établi. Pour remédier à ce déséquilibre, un certain nombre de moyens doivent être mis en œuvre tels que le repeuplement, une surveillance accrue et une législation efficace.

Des tentatives d'aménagement d'étangs ont été réalisées, visant à l'obtention d'une plus grande production de Poissons de consommation et d'alevins. Certains étangs deviennent ainsi de véritables « usines productrices de carpes » et le rendement croît avantageusement. Dans certains cas, la productivité s'est accrue grâce à une culture plus intense d'Algues, telles que *Chlorella, Chlamydomonas, Scenedesmus,* qui nourrissent le zooplancton et les Poissons herbivores. C'est l'épandage d'« engrais » comme la chaux agricole, les superphosphates, le chlorure de magnésium qui a permis d'augmenter la production d'Algues. Les concentrations utilisées doivent tenir compte de la dureté de l'eau, facteur très important. Les rendements obtenus sont tels que certains pays, qui manquent de terres cultivables, comme le Japon, consomment les Algues ainsi cultivées. D'après Dajoz (1970), on utilise, en pisciculture, dans le sud de la Chine un autre type d'aménagement : on choisit cinq à six espèces de Poissons, en fonction de leur régime alimentaire ; un herbivore de surface, deux planctonophages, un mangeur de Vers et de détritus organiques de fond, un mangeur de Mollusques, un carnivore, un omnivore. Ce procédé, qui permet une exploitation à plusieurs niveaux trophiques, aboutit à des rendements très élevés, de l'ordre de 5 000 kg de Poissons à l'hectare.

Les milieux terrestres

La toundra

La végétation

La toundra représente la dernière formation végétale, aux fortes latitudes, entre la zone boisée et la zone constamment enneigée ou glacée des pôles. En fait, seule la toundra arctique est développée. Sur le plan du paysage, la végétation qui apparaît comme la plus typique est une formation basse dont les arbres sont absents, sauf dans la zone transitoire vers la forêt boréale, où on trouve encore quelques bouleaux et quelques saules ; cette formation est composée de buissons bas, de bouleaux nains surtout *(Betula nana)*, de petits saules *(Salix repens, Salix lapponum)*, de diverses Éricacées et, dans les endroits les plus humides, de linaigrettes *(Eriophorum)*, de joncs et de carex ; les endroits très exposés au vent et à l'action du gel ne portent que quelques touffes d'herbe rase ou des plantes en coussinet. Dans les landes, les espaces entre les buissons sont occupés par une strate souvent dense de divers Lichens (surtout des *Cladonia : C. rangiferina* et *C. alpestris*) et de Mousses *(Rhacomitrium lanuginosum)*.

Climatiquement, la zone de la toundra est caractérisée par moins de 3 mois sans gelées, et, en dehors de cette période estivale courte, le sol est entièrement gelé. La moyenne du mois le plus chaud n'excède pas 10 °C. Pendant l'été, le sol ne dégèle pas sur toute sa profondeur, ce qui empêche la percolation et la circulation de l'eau : en surface, le sol est donc toujours très humide,

◀ *Page ci-contre, à droite, représentation graphique des pentes (d'après Huet).*

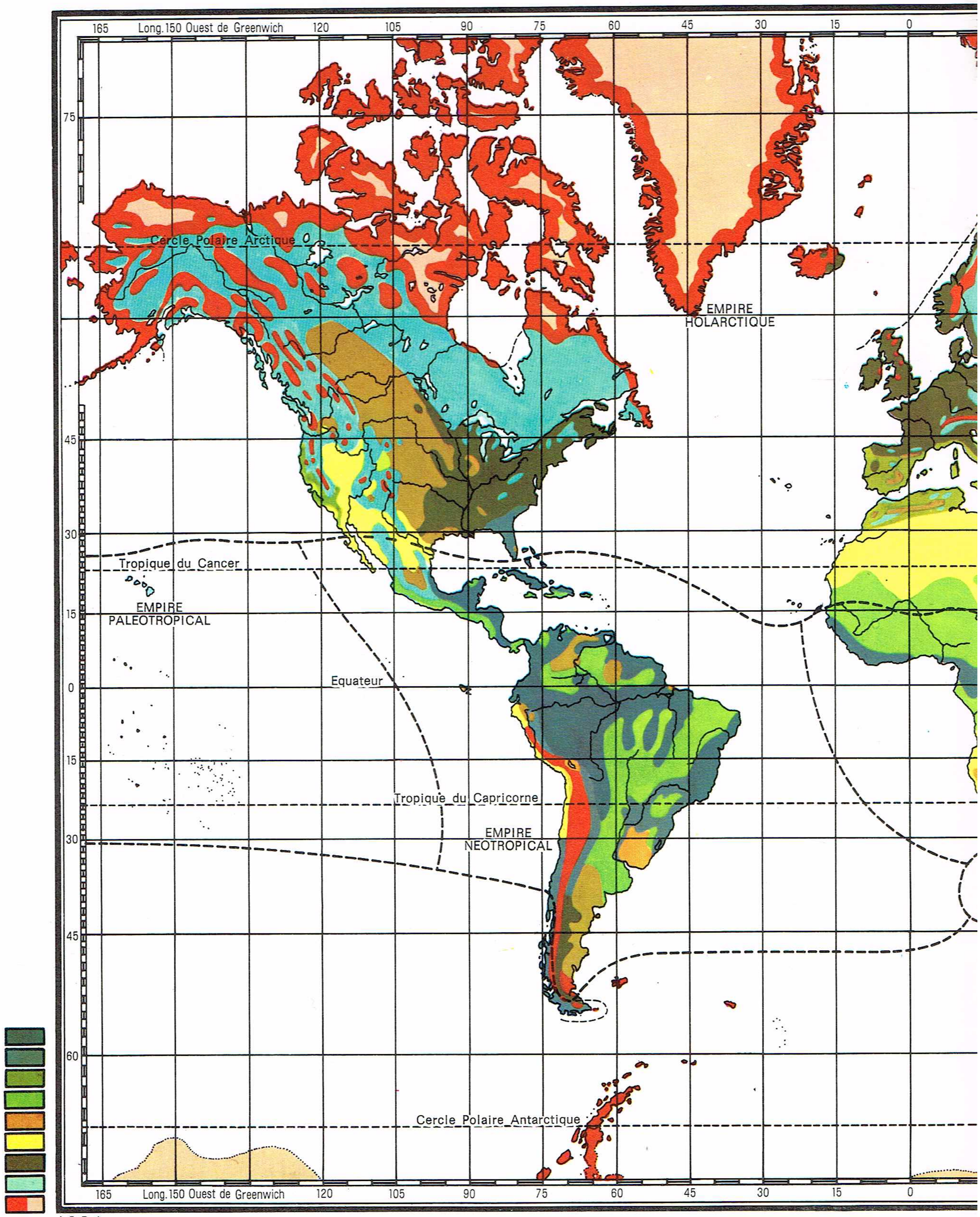

I.G.D.A.

et les zones marécageuses abondantes. En outre, les phénomènes périglaciaires (solifluxion, cryoturbation créant des sols polygonaux) sont importants. En plus du gel, le vent très fort limite probablement la croissance des arbres : en hiver, le manteau neigeux est la seule protection pour les branches des buissons ; en effet le vent chargé de cristaux de glace abrase tout rameau qui émerge.

La faune

En ce qui concerne la faune, on évalue à plus de 60 le nombre d'espèces de Mammifères, mais, sur le plan de l'appartenance biogéographique stricte à la zone de la toundra, seule une dizaine lui serait réellement inféodée, parmi lesquelles le renard bleu, le renne, le caribou, le bœuf musqué, des campagnols et des lemmings. Parmi les carnivores, il faudrait encore citer le lynx, le glouton, l'hermine, l'ours blanc, etc. ; parmi les omnivores, l'ours brun. Les petits Rongeurs sont aussi abondants. Selon les cas, l'adaptation à la saison froide apparaît soit sous forme de migrations comme pour les rennes et les caribous qui atteignent même la limite de la forêt, soit par l'hibernation (spermophile souslik ou *Citellus*

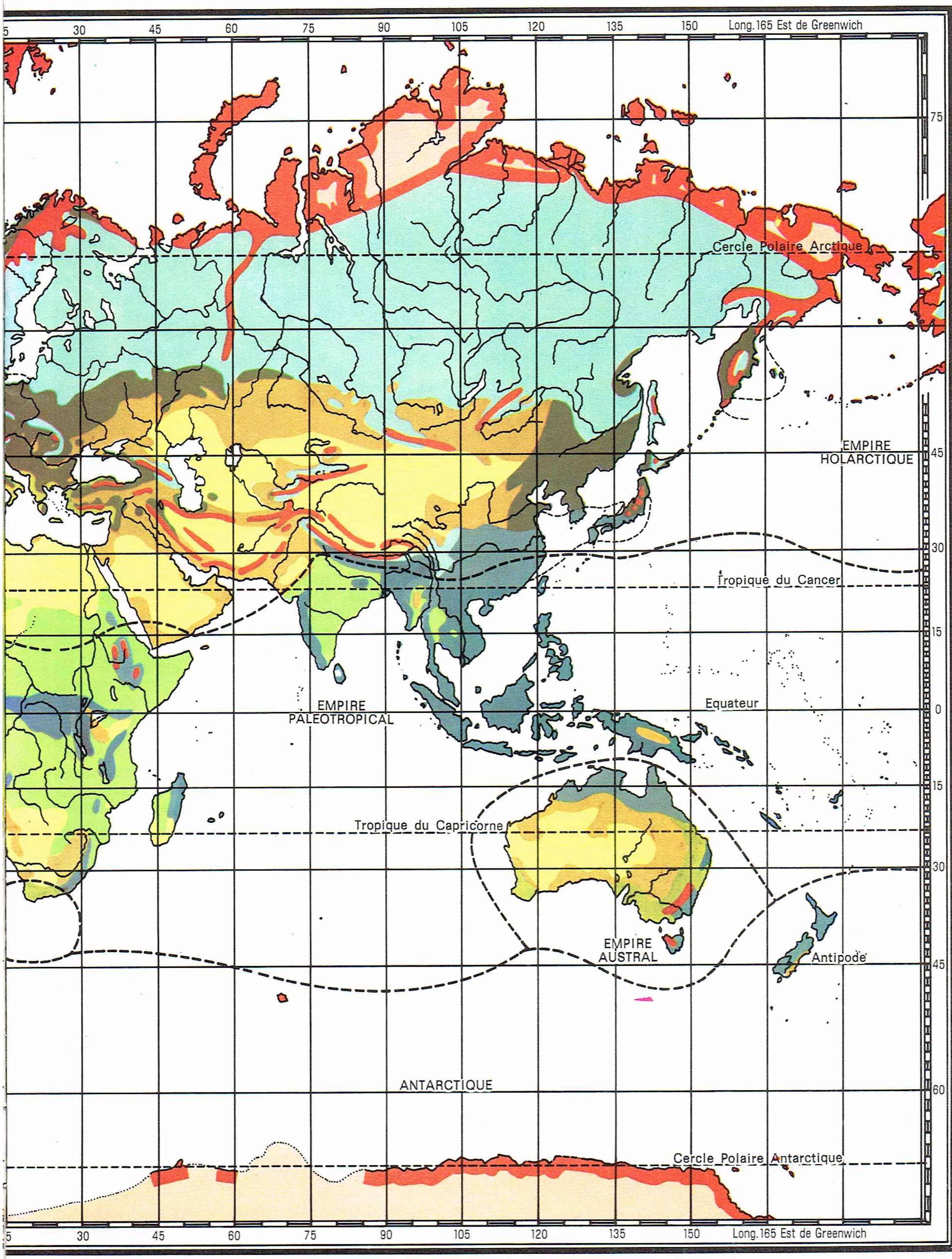

◀ ***Les formations végétales du globe, d'après Brockmann-Jerosch : 1, forêts pluviales tropicales; 2, forêts pluviales subtropicales; 3, forêts subtropicales sempervirentes-sclérophylles; 4, savanes arborées à végétation en périodes de pluie; 5, steppes herbeuses à végétation hiverno-printanière; 6, déserts; 7, forêts latifoliées à végétation estivale; 8, forêts angustifoliées sempervirentes; 9, régions polaires et alpines sans arbres.***

citellus), soit même en conservant une activité. Les principales adaptations au froid sont : l'augmentation de l'épaisseur de la fourrure, la présence d'une couche graisseuse sous la peau, les caractères morphologiques — faible valeur de la surface du corps par rapport à son volume et réduction de la taille des appendices (règles de Bergmann et d'Allen). Très abondantes en été avec l'apport des migrateurs, les espèces d'Oiseaux sédentaires sont peu nombreuses : le lagopède, le ptarmigan, le harfang des neiges sont les plus typiques. Les Reptiles et les Amphibiens sont rares. Parmi les Invertébrés, ce sont les Insectes qui dominent, plus spécialement les Diptères avec des formes piqueuses (moustiques et Tabanides), mais aussi les bourdons, et quelques papillons comme les *Colias* et les *Erebia*. Les Insectes, surtout les mouches, moucherons et moustiques, pullulent en été, et passent la phase froide en hibernation (diapause).

Le fonctionnement de l'écosystème

Nos connaissances sur le fonctionnement de l'écosystème « toundra » se sont récemment enrichies grâce à des études faites en Alaska, à Point Barrow; Schultz

Bruce Coleman - C. J. Ott

▲ *Un troupeau de caribous dans une toundra d'Alaska (U.S.A.).*

▼ *Climatiquement, la zone de la toundra est caractérisée par moins de 3 mois sans gelées, la moyenne du mois le plus chaud n'excédant pas 10 °C. Ici, un troupeau de rennes dans une lande boisée en Suède septentrionale.*

(1969) estime que l'on peut avoir une image assez bonne du fonctionnement de cet écosystème, en cette localité, en considérant que seulement un nombre réduit d'espèces interviennent : « La liste pourrait être réduite à environ 10 espèces et comprendre cependant 90 % ou plus de la totalité de la biomasse dans chaque groupe principal. Il faut y inclure les sphaignes pour les végétaux inférieurs, quelques Graminées et *Carex* pour les plantes supérieures, le lemming brun et le lynx parmi les herbivores et les carnivores respectivement. » Cet auteur fait remarquer par là même que cet écosystème est relativement simple. Près de 90 % de la production primaire est due à 3 espèces *(Dupontia fischeri, Eriophorum augustifolium* et *Carex aquatilis)* et elle constitue l'essentiel du régime alimentaire du lemming. Une étude très précise et des tentatives de modélisation mathématique ont été réalisées pour rendre compte des fluctuations bien connues des populations de lemmings et tenter de les expliquer : la teneur en phosphore de l'herbe consommée en serait un élément essentiel. Durant les périodes de fort accroissement pour les populations de lemmings, on observe une plus grande abondance des prédateurs (hiboux des neiges et lynx). Malgré des fluctuations très importantes, le système, par régulation en retour, conserve une certaine stabilité.

En considérant des territoires de toundra sur une plus grande étendue, on peut prendre en compte les grands herbivores, rennes et caribous; on estime à environ 8 km² la surface de pâturage nécessaire par individu. Si la densité des grands herbivores s'accroît, il y a généralement migration mais, en Laponie, pour les rennes (semi-domestiques), elle se fait moins rapidement que pour les caribous en Amérique du Nord; en trop grand nombre, les rennes risquent alors dans certains cas de détruire par surpâturage leur source de nourriture future.

Globalement, la production primaire est faible : d'après Johnson (1970), la production primaire brute à Point Barrow serait seulement de 344 g/m². G. Lemée (1967) met l'accent sur les liaisons possibles avec les écosystèmes voisins; il dit : « Mais à côté de ces écosystèmes exclusivement terrestres existent dans les régions arctiques et antarctiques des écosystèmes littoraux remarquables par l'abondance des carnivores : Oiseaux, phoques, ours, renards, en raison de la source de nourriture offerte par la mer. Cette richesse animale est elle-même la cause déterminante de la quasi-localisation des habitants humains sur les côtes. » On trouve là une illustration des échanges entre écosystèmes voisins géographiquement, et on perçoit en outre plus aisément comment les

Ostman - G. Rönn

Binois - Pitch

▲ *Type de végétation dans la vallée de la Matanuska dans les monts Chugach (Alaska, U.S.A.).*

populations humaines sont en réalité dépendantes des écosystèmes naturels. Cette règle est moins évidente sous des climats moins rudes et pour des civilisations apparemment plus indépendantes des impératifs du milieu ; elle est pourtant universelle et sans exception.

La taïga

La taïga est la forêt boréale de Conifères, qui forme une ceinture dans les plaines d'Europe, d'Asie et d'Amérique, entre la toundra et la zone de la forêt tempérée ou de la steppe, plus méridionales. Dans l'hémisphère Sud, cette ceinture est pratiquement absente.

La végétation

L'aspect de la végétation reste monotone malgré la présence d'assez nombreux Conifères dans la strate arborescente : quelques-uns sont à feuillage caduc (mélèzes : *Larix sibirica, L. dahurica*), mais la plupart sont à feuillage persistant (pins : *Pinus sylvestris, P. pumila ;* sapins : *Abies sibirica ;* épicéa : *Picea obovata*). Le fait que les feuilles de ces arbres soient des aiguilles à faible surface et qu'elles possèdent divers dispositifs de régulation de la transpiration, leur permet de passer l'hiver malgré l'absence d'alimentation en eau à partir du sol gelé. On trouve peu d'arbres à feuilles larges, à l'exception des bouleaux (espèces à très large tolérance écologique) et de quelques espèces de peupliers et d'aulnes. Les strates basses ont une végétation assez réduite à cause de l'ombrage important de la strate arborescente et de la présence au sol d'une épaisse litière d'aiguilles mortes à décomposition très lente. Parmi les arbustes, on retrouve des espèces de la toundra *(Vaccinium, Empetrum, Salix)* et quelques autres espèces comme des cornouilliers, des groseilliers. Au sol, la végétation, irrégulière, est surtout faite de Mousses, de Lichens *(Cladonia)*, de quelques Fougères et de certaines espèces liées aux Conifères comme les piroles.

Le climat reste rude ; la neige et le gel du sol interdisent à la période de végétation active de dépasser 4 mois environ.

La *taïga* correspond à la zone climatique pour laquelle on peut trouver environ 2 mois sans gelées et 1 mois avec une température moyenne supérieure à 10 °C. Les précipitations sont réduites : en plaine, elles sont souvent de l'ordre de 20 à 25 cm, mais sont plus élevées en montagne, où l'enneigement est plus abondant.

Certaines forêts de Conifères sont d'un aspect comparable mais, en réalité, elles correspondent à des climats d'un caractère très différent. C'est le cas de la *forêt à résineux*, dite *pluvieuse*, présente sur la côte pacifique de l'Amérique. Les températures sont plutôt douces, et l'alimentation en eau est bonne grâce au régime élevé des précipitations (de l'ordre de 1 m à 2,50 m en hiver) et à l'interception de brouillards côtiers ; plusieurs espèces particulières sont présentes, parmi lesquelles le célèbre *Sequoia sempervirens*.

La faune

Le peuplement animal de la taïga n'est pas très diversifié et le climat impose une périodicité saisonnière marquée. En hiver, beaucoup d'espèces de petite taille (Invertébrés, petits Mammifères Rongeurs et carnivores) hivernent ; les Oiseaux migrent pour la plupart vers le sud, sauf quelques sédentaires (bec-croisé, casse-noix), qui trouvent leur nourriture sous les écorces ou à partir des graines contenues dans les cônes. En bordure nord, les grands herbivores, comme les Cervidés, sont aussi des migrants depuis la toundra (élans, rennes) ; ils se nourrissent des Lichens présents sur les troncs, des écorces jeunes et aussi de bourgeons.

Au printemps et en été, on note une pullulation d'Insectes, surtout des mouches et des moustiques ; les xylophages (scolytes, buprestes, longicornes) et les défoliateurs (tenthrèdes, chenilles processionnaires) prélèvent une importante partie de la productivité primaire des arbres. Aux dépens des strates basses vivent les Cervidés et les Rongeurs (campagnols, lemmings, lièvres, lapins). Les ours participent à différents niveaux trophiques à cause de leur régime varié : fruits, racines, miel, Insectes, Poissons... Parmi les carnivores, les loups s'attaquent parfois en bandes aux grands herbivores ; les autres (renard, glouton, belettes, visons, lynx) s'attaquent à des proies plus petites. L'intervention de l'homme, outre l'exploitation forestière, réduit considérablement les peuplements, surtout par la chasse aux animaux à fourrure.

Le fonctionnement de l'écosystème

Le fonctionnement complet de l'écosystème constitué par la taïga n'a pas été décrit avec précision ; on connaît cependant les principales relations alimentaires et, par ailleurs, la productivité primaire de forêt à pu faire l'objet d'assez nombreuses évaluations à cause de l'intérêt économique qu'elle présente. Biomasses et productivités sont, à cause de la courte période de végétation, notablement plus faibles que celles observées pour nos forêts tempérées à feuilles caduques : pour l'U.R.S.S., Rodin et Bazilevic donnent les valeurs suivantes :

	biomasses	*productivité*
— **taïga septentrionale :**		
— pineraies :	80	—
— pessières :	100	4,5
— sapinières :	100	4,5
— **taïga méridionale :**		
— pineraies :	280	6,1
— pessières :	330	7,0
— sapinières :	400	8,5

La biomasse est exprimée en tonnes par ha, et la productivité primaire nette en tonnes par ha et par an. Ces chiffres sont donc souvent inférieurs de moitié et, parfois, de beaucoup plus, à ce qu'on observe pour la forêt à feuilles caduques de la zone tempérée.

Bruce Coleman - C. J. Ott

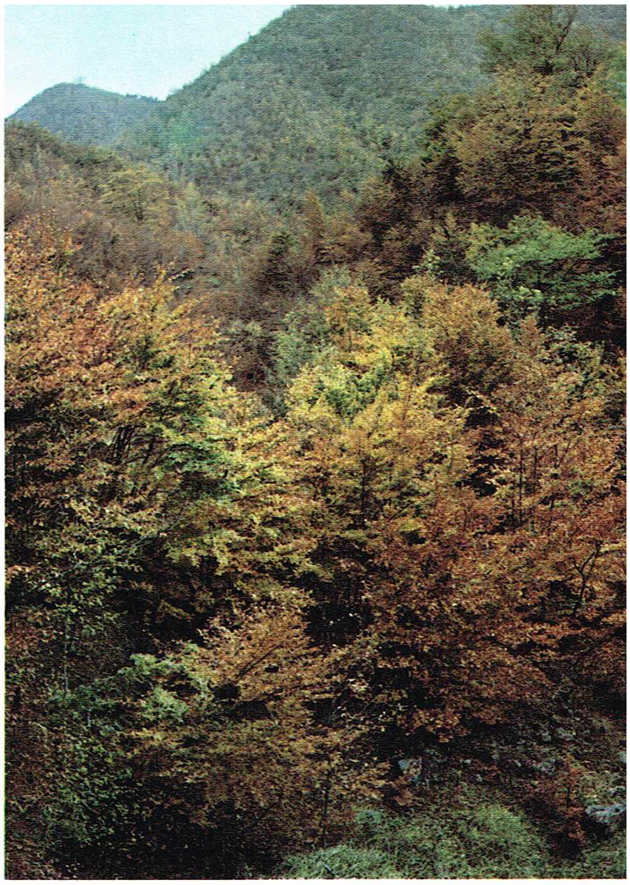

▲ *A gauche,* **Lynx canadensis,** *le lynx du Canada, est un des grands prédateurs des animaux herbivores peuplant la taïga. A droite, au centre, le hêtre* **(Fagus sylvatica)** *est une des essences dominantes en Europe occidentale ; il est abondant notamment en milieu humide ou à l'étage montagnard (1 000-1 500 m environ).*

Le maximum de productivité s'observe, pour les forêts de Conifères de la taïga, vers 40 ans : à ce moment-là, elle peut atteindre pendant quelques années un pic de 20 t/ha/an pour la taïga septentrionale. Les plantations de divers Conifères que l'on rencontre en plaine, sous climat plus tempéré que dans la zone de la taïga, ont une meilleure productivité primaire nette : elle est par exemple de 15,5 t/ha/an pour une forêt d'épicéas en Ardennes, dans le cas d'un peuplement de 55 ans dont la biomasse est de l'ordre de 230 t/ha. Mais, fréquemment, comme les résineux sont implantés sur les sols les plus pauvres, la productivité primaire nette est presque aussi faible que pour la taïga : des mesures effectuées en Allemagne pour des peuplements de *Pinus sylvestris* ont donné les chiffres de 9 t/ha/an, et même de 1,5 t/ha/an dans un cas particulièrement défavorable.

La forêt tempérée à feuillage caduc

La zone de la forêt tempérée à feuillage caduc ne forme pas dans l'hémisphère Nord une bande continue : elle est assez bien développée en Europe occidentale et en Asie orientale, mais entre ces deux régions elle est absente de Sibérie où la taïga rejoint directement au sud la zone des steppes. En Amérique du Nord, la forêt à feuillage caduc est surtout développée à l'est ; au centre du continent, à latitude égale, elle laisse place à la grande prairie américaine. Dans l'hémisphère Sud, ce type de formation forestière n'est présent que sur une surface assez réduite, au sud du Chili et de l'Argentine.

L'aspect des forêts caducifoliées est assez varié selon les domaines floristiques et à cause de l'action humaine (exploitation forestière) très intense dans cette zone.

Quelques caractères généraux peuvent cependant être dégagés. Les conditions climatiques qui agissent sur la localisation de ce type de végétation, sont surtout d'ordre thermique : ainsi, dans l'hémisphère Nord, la forêt caducifoliée tempérée est limitée vers le nord par le froid trop vif en hiver et par la courte période de chaleur en été qui permet une végétation active, bien que sans doute certains besoins de froid pour la levée de dormance des bourgeons puissent au contraire entraîner une limitation thermique vers le sud. En outre, la sécheresse de l'été semble bien être le facteur déterminant le passage vers les steppes plus continentales ou vers les zones méditerranéennes.

La végétation

Dans les forêts tempérées, la stratification est bien nette. Les feuillus sont donc en principe dominants dans la strate arborescente, mais les forêts mixtes de Feuillus-Conifères sont assez nombreuses aussi, souvent en liaison avec l'exploitation forestière ; la hauteur de cette strate est limitée et ne dépasse que rarement 30 à 40 m. La strate arbustive est parfois bien développée : y participent soit des espèces forestières rejetant facilement de souche (taillis), soit les jeunes stades des essences arborescentes (fourrés), soit encore des espèces de taille maximale plus réduite (par exemple les noisetiers et les houx). Les épiphytes, à part les Lichens et les Mousses, sont représentées seulement par quelques lianes (clématites, lierre, chèvrefeuille, houblon). La strate basse est plus dense que dans les forêts de Conifères et les Graminées y prennent davantage d'importance, bien que le recouvrement et la composition soient assez variables, selon les sols notamment.

En Europe occidentale et centrale, les essences dominantes sont les chênes *(Quercus pedunculata* et *Q. sessiliflora)*, le charme et le hêtre, ce dernier n'étant abondant que dans un milieu assez humide ou en altitude à l'étage montagnard (1 000-1 500 m environ). D'autres essences sont plus discrètes comme le frêne, le tilleul et l'orme. Certaines ne se trouvent que dans des secteurs géographiques particuliers : ainsi, le chêne tauzin caractérise le sud du domaine atlantique (Landes), tandis que le chêne pubescent fait la transition vers les groupements méditerranéens. On a relevé une nette correspondance entre les types de sols et d'humus qui caractérisent ces derniers et les groupements forestiers ; par exemple, lors de l'étude phytosociologique, nous avons vu que le *Querceto-Carpinetum* (chênaie-charmaie à *Quercus pedunculata*) se trouve sur les sols assez humides à mull calcique, alors que le *Quercetum sessiliflorae* (chênaie à *Quercus sessiliflora*) est lié aux sols acides plutôt secs.

En Amérique du Nord, de nombreuses races de chênes *(Quercus coccinea, Q. macrocarpa, Q. alba, Q. montana, Q. borealis, Q. velutina)*, des chataîgniers *(Castanea dentata)*, des noyers *(Carya p.sp.)*, le tulipier *(Liriodendron tulipiferum)* forment la majeure partie de la végétation arborescente, surtout dans l'est des U.S.A. ; vers le nord, dans la région des Grands Lacs et le sud du Canada, un hêtre *(Fagus grandifolia)* et l'érable à sucre *(Acer saccharum)* dont la feuille est l'emblème du Canada, sont les principales espèces à feuillage caduc, auxquelles se mêle assez fréquemment un Conifère : le *Tsuga canadensis*.

La faune

Le peuplement animal de la forêt tempérée à feuillage caduc est varié, car il correspond à l'utilisation à la fois de l'ensemble du couvert et des divers microbiotopes qui sont surtout liés à la stratification. Parmi les arboricoles, en plus des Oiseaux frugivores, granivores ou insectivores (pigeon ramier, geai, pics, divers petits Passereaux et grimpereaux), on rencontre aussi des

M. Pedone

M. Pedone

◀ *Les châtaigniers constituent une grande partie de la végétation arborescente de l'est des États-Unis.*

Mammifères Rongeurs (écureuils) ou Carnivores (chats sauvages). Les grands Mammifères les plus connus sont le cerf, le chevreuil et le sanglier; pour ceux de plus petite taille, ce sont surtout les fouisseurs creusant des galeries ou des terriers qui dominent : parmi eux des Rongeurs (campagnols, mulot, souris), des Lagomorphes (lapins), quelques Insectivores (musaraigne, taupe), le blaireau, et le renard, qui, bien que de régime carnivore, peut trouver un appoint de nourriture végétale avec les baies en cas de difficulté. Bien que les conditions climatiques ne soient pas très difficiles, beaucoup d'espèces hibernent, surtout parmi les petits Mammifères, les Reptiles (vipères, lézards) et les Amphibiens (grenouilles, crapauds).

Les Arthropodes, et surtout les Insectes, sont extrêmement nombreux, tant par le nombre des individus durant la période active que par le nombre d'espèces présentes. Barbey (1913) a dressé l'inventaire des principaux Insectes qui s'attaquent au chêne rouvre; cette liste, sûrement incomplète, comporte plus de 60 noms, et on constate à sa lecture que toutes les parties de la plante sont attaquées par plusieurs espèces. Ces dernières, qui attaquent non seulement les arbres, mais l'ensemble des plantes sous couvert forestier, ont un rôle de consommateurs de premier ordre dans l'écosystème; elles sont elles-mêmes victimes de divers prédateurs ou parasites (Oiseaux, Araignées, Insectes Diptères ou Hyménoptères). Dans le sol, dans les touffes de Mousses, dans les bois morts et les souches en décomposition, la faune entomologique est également très diversifiée; selon la nature des horizons superficiels des sols, on peut y observer de sensibles différences : ainsi le mull calcique est plus apte à la présence de Mollusques, de vers de terre et d'une flore bactérienne cellulolytique très active; au contraire, le mor acide, qui renferme une microflore fongique, abrite plutôt des petits Insectes comme les Collemboles.

Le fonctionnement de l'écosystème

Parmi les études relativement nombreuses consacrées à cet écosystème — la forêt caducifoliée — l'ensemble le plus complet est certainement celui que constituent les travaux de l'équipe belge animée par Duvigneaud. En effet, les réseaux trophiques ont été précisés et le bilan énergétique établi comme nous l'avons déjà vu, mais, fait plus rare, le cycle des éléments minéraux a été aussi très soigneusement décrit et l'importance des transferts quantifiés a été mise en évidence.

Dans le cas d'une futaie de chênes de 117 ans surmontant un taillis de noisetiers de 20 ans, Duvigneaud et ses collaborateurs (1971) ont fait le bilan entre les quantités de Ca, K, Mg, N, S et P retenues chaque année par la végétation dans le bois, les écorces et les parties pérennantes des plantes herbacées, et celles qui retournent au sol par la chute des feuilles, le feuillage mort des herbes, les brindilles tombées au sol et le lessivage par la pluie. La différence entre ces quantités correspond à ce qui reste fixé par la végétation; par ailleurs, une petite quantité de ces éléments est exportée par les eaux de drainage, tandis que les eaux de pluie peuvent fournir un apport. C'est toujours le calcium qui est l'élément le plus important pondéralement, la fixation par les feuilles étant beaucoup plus élevée pour les feuillus (jusqu'à 4 fois) que pour les Conifères.

La perte la plus importante d'éléments minéraux est due à l'exploitation forestière : on a calculé qu'à partir d'un hectare de forêt de feuillus, pour une révolution de 100 ans, des quantités voisines de 2 000 kg pour le Ca, 500 kg pour le K, et 100 kg pour le P, sont ainsi exportées. La fertilité d'un sol forestier ne peut donc se maintenir qu'à la condition suivante : les prélèvements de ces éléments à partir du substrat minéral dans le sol doivent

▼ *Le peuplement animal de la forêt tempérée à feuillage caduc est varié : parmi les grands Mammifères, le chevreuil* **(Capreolus capreolus)** *est un des plus connus.*

P. Castel - Jacana

C. Nardin - Jacana

▲ *La forêt méditerranéenne du midi de la France est formée par le chêne vert (Quercus ilex); ici, une chênaie verte, presque vierge, dans le Gard.*

compenser cette perte; certaines pratiques comme le pâturage sous forêt, l'enlèvement de la strate muscinale et herbacée, ou encore de l'humus, de même que la coupe à blanc qui favorise le lessivage et l'entraînement de ces éléments, ont donc des effets négatifs.

La productivité des forêts feuillues caducifoliées varie selon les pratiques forestières, les types de sols et l'âge des biocénoses. Pour une forêt de « haute productivité », Ovington (1962) a proposé les valeurs suivantes, en t/ha de matière sèche par an : productivité primaire brute, PB = 40, productivité primaire nette, PN = 22, production de bois fort, BF = 17. Pour diverses forêts caducifoliées de Belgique, Duvigneaud a fourni des données très précises; pour des forêts mixtes à chênes et à charmes installées, d'une part sur sol à mull calcique, et d'autre part sur sol à mor acide, les valeurs pour la biomasse et la productivité primaire nette sont respectivement : pour la biomasse 316 et 243 t/ha, pour la productivité nette

Fratelli Montacchini

▶ *Un exemple de paraclimax : la garrigue méditerranéenne, très appauvrie, du cap d'Orsa en Sardaigne.*

15,5 et 10,6 t/ha/an ; pour une hêtraie sur sol à humus neutre (moder), d'une biomasse de 447 t/ha, la productivité primaire nette est 12,7 t.

Comme pour les autres écosystèmes, les données concernant la production secondaire sont moins abondantes : parmi les cas exposés pour illustrer le concept d'écosystème, nous avons déjà vu un exemple assez complet de description de l'écosystème pour une forêt européenne. Il convient de noter, parmi les herbivores, l'importance des Cervidés, des petits Rongeurs, des Insectes phytophages et, parmi la faune du sol, celle des vers de terre dont la biomasse peut atteindre 140 kg/ha dans la forêt américaine à tulipier ; pour les Mammifères, la biomasse est évaluée à 7,4 kg/ha environ dans les forêts d'Europe. Il faut aussi remarquer que, pour les grands animaux herbivores, les prédateurs naturels sont très souvent absents et la régulation se fait par la chasse, ou encore par les accidents tels que les collisions avec les véhicules automobiles !

La zone méditerranéenne

La végétation de la zone méditerranéenne comprend des forêts à feuillage persistant et des formations buissonnantes typiques plus basses, telles que la garrigue et le maquis, qui sont dérivées de la forêt par dégradation. Ces types de formation ne sont pas limités au seul bassin méditerranéen, mais, même ailleurs, l'adjectif est conservé pour les qualifier. Dans notre pays, la végétation méditerranéenne paraît former une ceinture plus méridionale que celle de la forêt caducifoliée.

Des saisons nettement différentes par leurs températures et une pluviosité limitée à la saison froide caractérisent le climat méditerranéen, ce qui implique donc, en été dans notre hémisphère, une certaine sécheresse. Une grande partie des travaux du botaniste montpelliérain L. Emberger a porté sur la végétation de la région méditerranéenne, pour laquelle, en se servant notamment du coefficient qui porte son nom, il a établi des subdivisions selon le climat ; il distingue ainsi : le climat méditerranéen aride, le climat méditerranéen semi-aride, le climat méditerranéen tempéré, le climat méditerranéen humide, le climat méditerranéen de haute montagne. A chacune de ces subdivisions est lié un type particulier de végétation et on peut observer un étagement en liaison avec ces différences climatiques.

La végétation

La forêt méditerranéenne du midi de la France, malheureusement bien réduite de nos jours, est formée par le chêne vert *(Quercus ilex)*, dont les individus ne dépassent que très rarement une vingtaine de mètres, et sont le plus souvent de taille beaucoup plus réduite. Cette essence est à feuilles persistantes, petites et coriaces, comme celles de beaucoup d'arbustes du sous-bois : arbousier, laurier-tin, lentisques, *Phillyrea*. La strate herbacée et muscinale n'est pas très dense et le recouvrement du sol est donc assez faible. Le chêne-liège *(Quercus suber)*, d'aspect très semblable, est limité aux terrains siliceux et à des régions un peu plus chaudes : il ne peut supporter de fortes gelées, même courtes, surtout s'il est exploité pour son écorce.

Mais le plus souvent, au lieu des forêts, on trouve les formations plus basses et de pénétration difficile que sont la garrigue et le maquis. La garrigue, issue de la dégradation de la forêt par l'exploitation, le pâturage et principalement l'incendie, est formée essentiellement par le chêne kermès *(Quercus coccifera)* à feuilles persistantes coriaces, petites et piquantes. Cette formation est dite *paraclimacique*, car elle reste très longtemps dans cet état, et il est très difficile de reconstituer la forêt de chênes verts : on facilite cependant la réimplantation de cette dernière essence en procédant à des plantations de pins d'Alep *(Pinus halepensis)*. Sur silice, le maquis comprend diverses espèces comme l'olivier sauvage, l'arbousier, les lentisques, les *Phillyrea*, la grande bruyère *(Erica arborea)* et des cistes dont certains ont un feuillage très inflammable. A ces formations — forêts de chênes verts, maquis, garrigues — les forestiers ont tenté de substituer des forêts de Conifères *(Pinus laricio, Pinus halepensis, Pinus pinea, Pinus pinaster)*, mais les risques de feu sont alors toujours très grands.

Les Conifères sont présents naturellement dans les zones méditerranéennes montagneuses : on peut citer les cèdres du Liban, le pin noir de Corse (variété de *Pinus laricio*), divers sapins à aire géographique réduite *(Abies maroccana, A. cephalonica)*.

Hors du bassin méditerranéen, existent des formations homologues, tel le *« chaparral »* californien, qui comprend plusieurs *Quercus* et d'autres arbustes à feuilles réduites et coriaces *(Arctostaphylos p.sp., Adenostoma, Ceanothus p.sp., Rhus p.sp.)*. Au Chili, on trouve l'équivalent du chaparral californien : c'est le *« mattoral »* avec *Boldea boldus* (le boldo), *Quillaja saponaria* (le quillay) et *Acacia cavenna*. En Australie du Sud, une végétation de même type à base de *Melaleuca*, d'*Eucalyptus* bas et buissonnants, d'*Acacia p.sp.* constitue le *« mallee »*.

Fratelli Montacchini

▲ ***Un exemple de végétaux ligneux arbustifs ; le laurier-rose*** (Nerium oleander)***, caractéristique de la région méditerranéenne, pousse le long des cours d'eau (ici, au bord du Rio Manna, en Sardaigne).***

La faune

Le peuplement animal de ces formations forestières ou de fourrés méditerranéens est très diversifié : les groupes les mieux représentés sont les Insectes (Coléoptères, Diptères, Hyménoptères, etc.), les Reptiles (serpents, lézards), les Oiseaux et les Rongeurs. L'activité est maximale au printemps et certains modes de vie s'apparentent déjà à ceux de la faune du désert.

Le fonctionnement de l'écosystème

Les écosystèmes méditerranéens sont, depuis quelques années, l'objet d'investigations scientifiques poussées dans plusieurs régions du monde, grâce à l'impulsion donnée par le Programme biologique international (P.B.I.). Des études sont en cours, principalement en Californie (sous la direction du professeur H. Mooney), au Chili, et dans le sud de la France, grâce à une équipe de Montpellier (P. Lossaint, M. Rapp). Une comparaison entre les diverses régions du monde portant une végétation de type méditerranéen est ainsi tentée, les sols faisant l'objet d'attention particulière (P. Zinke, P. Schaeffer, et F. Di Castri).

A titre d'exemple, signalons que l'équipe du C.E.P.E. de Montpellier a pu obtenir, depuis 1967, divers résultats concernant la biomasse végétale, la productivité primaire, le cycle de l'eau et des éléments minéraux dans le cas de groupements à *Quercus ilex*, à *Quercus coccifera* (garrigue) et à pin d'Alep. En ce qui concerne les échelons trophiques plus élevés, la variété et la complexité des biocénoses animales rendent les données encore très fragmentaires. L'ensemble de ces études est surtout très révélateur de la marque de l'homme, pour une période relativement courte (moins de 10 000 ans) à l'échelle de l'évolution biologique, sur un certain type d'écosystèmes.

N. Cirani

▲ *La végétation des forêts tropicales humides est caractérisée par une très grande diversité des arbres, surtout en Amérique du Sud: ici un aspect de la forêt tropicale le long de l'Amazone au Brésil.*

● *La zone tropicale*

Géographiquement, les régions tropicales se situent surtout jusqu'à 15° de latitude nord, mais atteignent par endroits 30° de latitude nord, et s'étendent jusqu'à 30° dans l'hémisphère Sud. L'amplitude thermique annuelle, différence entre les températures moyennes du mois le plus chaud et du mois le plus froid, est égale environ à 5/10 °C pour les régions tropicales et à quelques degrés pour les régions équatoriales.

Le monde tropical, constitué par différents types de forêts, savanes, steppes et mangroves, est caractérisé par des températures relativement élevées au cours de toute l'année, l'isotherme mensuel le plus bas se situant aux environs de 18 °C, la moyenne du mois le plus chaud étant supérieure à 25 °C et la pluviométrie forte (l'isohyète le plus bas se situant vers 750 mm de pluies) ; les pluies annuelles atteignent, en général, 1 500 à 2 000 mm et plus. La saison sèche, bien marquée pour le climat tropical, l'est moins pour le climat équatorial où les températures mensuelles présentent très peu de différence, les pluies se répartissant pratiquement sur toute l'année.

Les différences de climat, d'altitude, de nature du sol, etc., l'influence de l'homme et des animaux déterminent plusieurs types de végétations intertropicales.

Les forêts tropicales

On distingue plusieurs types de forêts tropicales : les forêts hygrophiles, mésophiles et tropophiles. Les forêts hygrophiles comprennent la forêt primaire, dense et humide, à caractère physionomique sempervirent, la forêt dense humide secondaire et les galeries forestières de ces formations. Les forêts mésophiles comprennent les forêts semi-caducifoliées et les forêts tropophiles les forêts caducifoliées plus ou moins denses et sèches. Selon le niveau et la permanence de l'eau, on distingue : la forêt périodiquement inondée, la forêt marécageuse et la mangrove.

La végétation

La végétation des forêts tropicales humides est caractérisée par une très grande diversité des arbres (surtout en Amérique du Sud), de grandes dimensions, rendant le sous-bois obscur et humide et empêchant ainsi la prolifération de la végétation du sous-bois et de sa floraison. Il existe néanmoins des clairières naturelles et artificielles, et des surfaces réduites où pénètre la lumière grâce à la chute d'un ou de plusieurs arbres ou le long des pistes. Le long des lisières bordant les clairières, dans les galeries forestières en savanes, le long des grandes rivières et des routes, la végétation devient luxuriante et très dense à tous les niveaux ; elle est caractérisée en partie par de nombreuses lianes et de nombreuses plantes épiphytes tout le long des arbres.

Les types physionomiques de la forêt tropicale (formations arborées) sont extrêmement diversifiés selon les régions ; la transformation de la forêt en savanes se fait graduellement, par régions intermédiaires comportant des galeries forestières, ainsi que par multiplication des clairières de plus en plus importantes, qui donnent en vue aérienne un aspect de mosaïque forêt-savane. La forêt présente aussi plusieurs aspects en fonction de la nature du sol et de son altération par l'action de l'homme et des animaux.

Dans l'évolution de la forêt, on distingue :

— *la forêt primaire intacte,* formée surtout de grands arbres avec une absence de sous-bois, dont la faune, presque entièrement localisée à la voûte et aux troncs, est inexistante sur le sol ; l'absence du sous-bois permet de circuler facilement ;

— *la forêt secondaire,* consécutive à un déboisement plus ou moins important, au sous-bois très riche, est caractérisée par certaines essences qui s'implantent grâce à la pénétration du soleil, comme les parasoliers *(Musanga),* les *Costus,* certains *Ficus, Palisota hirsuta,* les bambous, et l'installation secondaire de certains arbres tels que les *Terminalia.*

Pour la forêt primaire et secondaire, on distingue, d'une part, la forêt de terre ferme et, d'autre part, la forêt marécageuse ou inondée.

— *La forêt de terre ferme,* de formation secondaire, comporte des strates de végétation bien définies ; l'étage

dominant est constitué de grands arbres de 40 à 50 m appartenant à de nombreuses espèces parmi lesquelles les *Parinari,* le limba, l'iroko, l'acajou, le fromager, etc.

— *La forêt marécageuse* est inondée la majeure partie de l'année; elle présente un sous-bois extrêmement pauvre, ce qui permet de circuler en pirogue dans certaines régions.

Un des caractères essentiels de la forêt tropicale consiste dans la diversité des essences appartenant à de nombreuses familles et dans leur dispersion, ce qui rend toujours l'exploitation forestière très difficile. Presque tous les groupes botaniques participent à la flore de la forêt tropicale : les Lichens sont très nombreux sur les troncs d'arbres et leurs branches et acquièrent un développement extraordinaire en forêt de montagne; les Mousses sont relativement peu nombreuses mais les Hépatiques sont bien représentées; les Fougères constituent un des groupes les plus exubérants et spectaculaires; les Fougères aquatiques forment des peuplements très étendus sur les étangs et les rivières, alors que sur terre, dans les régions humides, les Fougères arborescentes peuvent atteindre 15 à 20 m de haut; les Gymnospermes jouent un rôle très réduit sauf dans certaines régions montagneuses; citons les Cycadales qu'on rencontre en sous-bois et les pins en forêt montagneuse.

Parmi les plantes Angiospermes, les Monocotylédones présentent une grande diversité d'espèces dont certaines sont de très grande taille; elles comportent les Pandanacées *(Pandanus),* caractéristiques des régions marécageuses, à racines aériennes arquées; les Palmiers (palmier-liane, raphia, rônier, cocotier); les Aracées *(Arum, Colocosia, Typhonodorum);* les Lemnacées ou lentilles d'eau; les Graminées auxquelles appartiennent la canne à sucre et certains bambous, ainsi que des herbes des genres *Panicum, Andropogon* et *Hypparhenia;* les Musacées (bananiers et ravenales); les eichhornies et les Orchidées.

Les Dicotylédones comportent les Moracées (figuiers); les *Celtis;* les Nymphéacées (nénuphars), les Anonacées (dont l'ylang-ylang); les Lauracées (avocatiers); les Bégoniacées (bégonias), les Malvacées (fromagers, baobabs, cacaoyers, kolatiers); les Euphorbiacées (hévéas, manioc); les Rutacées (oranges, citrons); les Térébinthacées (manguiers); les Méliacées (acajou), les Rosacées (parinari); les Mimosées; les Cæsalpiniées; les Cassiées (flamboyant); les Papilionacées; les Combrétacées *(Terminalia* et *Combretum);* les Rhizophoracées (palétuviers de la mangrove); les Ébénacées; les Apocynacées (frangipaniers); les Convolvulacées; les Solanacées (piment, tabac); les Népenthacées (plantes carnivores); les Verbénacées (teck, *Avicennia* de la mangrove); les Rubiacées (caféiers et quinquina); et les Composées (herbes, arbustes, lianes et arbres).

On peut dire que la flore tropicale est composée soit de familles exclusivement tropicales, soit de familles cosmopolites, certaines familles faisant défaut. Le développement des formes ligneuses par rapport aux formes herbacées est spectaculaire; pour certaines familles il est de dix à cent fois supérieur, voire exclusif.

La structure générale de la forêt dense et humide est caractérisée par la présence d'une végétation luxuriante, sans variation annuelle importante, riche en arbres, lianes et épiphytes, et pauvre en strate herbacée. Cette forêt comprend :

— la strate arborescente supérieure, haute de 40 à 50 m, formée des cimes qui constituent la voûte bien individualisée; les fûts droits comportent des contreforts; les espèces qui atteignent cette voûte sont héliophiles;

— la deuxième strate est composée d'arbres encore très élevés dont les cimes arrivent en dessous de la voûte arboricole;

— la troisième strate est composée d'arbres beaucoup plus petits qui sont ombrophiles;

— la quatrième strate est composée d'arbustes;

— la cinquième strate, ou strate inférieure (sol), comporte quelques plantes herbacées rares qui se présentent souvent sous forme de touffes aux endroits ensoleillés;

— enfin, les lianes qui appartiennent à la fois au sol sur lequel commencent la germination et le cheminement de la tige, et également à la voûte où elles se ramifient et où apparaissent les feuilles et les fruits;

— et également les épiphytes qui s'étagent selon les différentes catégories.

Les arbres des régions tropicales présentent une morphologie très particulière qui tend à une certaine convergence dans des familles très différentes. Les caractères particuliers affectent le port, c'est-à-dire le tronc, les ramifications, la présence des accotements (contreforts) et les racines.

Le port, et en particulier la taille, reflète la lutte et l'adaptation à pousser en sous-bois sombre jusqu'à la voûte et la lumière. Les troncs majestueux et droits ne présentent des branches que dans la partie supérieure, le tronc, haut de 20 à 45 m, restant simple. Les branches, en nombre réduit, sont très épaisses à la base, atteignant 20 à 40 cm de diamètre pour des fûts de 40 à 45 m; chez certaines espèces, les ramifications sont très réduites. La cime se présente, tantôt en dôme, tantôt en parasol largement étalé, à frondaison large et apicale. Les contreforts sont bien développés chez les grands arbres et peuvent avoir plusieurs mètres de haut, ou par contre, être bas, sinueux et étendus horizontalement; ils sont indispensables pour soutenir les grands arbres car le système de racines est très réduit.

Les racines des arbres tropicaux sont généralement très courtes, mais on rencontre différentes adaptations aux divers milieux écologiques comme les racines-échasses, les racines aériennes pendantes, les racines aérifères et les racines adventives extensives. Les racines-échasses se rencontrent souvent chez les plantes qui poussent en terre meuble ou marécageuse, souvent le long du littoral et des rivières. Les racines aériennes pendantes des branches, mais ne touchant pas le sol, existent chez de nombreux arbres et certaines lianes. Les racines aérifères sont présentes surtout chez les plantes qui poussent sur le sol marécageux, peu oxygéné, comme celui de la mangrove; il en est ainsi des racines des *Bruguiera* qui, après être sorties du sol, se recourbent et pénètrent de nouveau dans le sol, ou celles des *Avicennia* qui sortent comme de multiples bougies autour de l'arbre, au-dessus de l'eau. Chez certains figuiers, comme le figuier-banian et le figuier des pagodes, des milliers de racines adventives (et des anastomoses des branches) permettent à la plante de s'étendre sur une surface de plusieurs dizaines de mètres.

La croissance des arbres dans la forêt tropicale est généralement rapide. Le fromager s'accroît en épaisseur de 3 cm par an et d'environ 70 cm en hauteur; le bambou dans les bambuseraies a une croissance spectaculaire, ainsi que certaines espèces d'eucalyptus (vallée du Niari au Congo). Quand il se produit une trouée dans la forêt, les jeunes arbres pionniers de la forêt secondaire gagnent environ 1 m en quelques mois. Le plus souvent, la taille des arbres est très élevée; les plus grands, constituant la voûte arboricole, atteignent 30 à 50 m de haut; ainsi, les fromagers atteignent facilement 40 m, les Sapotacées encore plus, et ces tailles gigantesques leur permettent de bénéficier du maximum de lumière (arbres

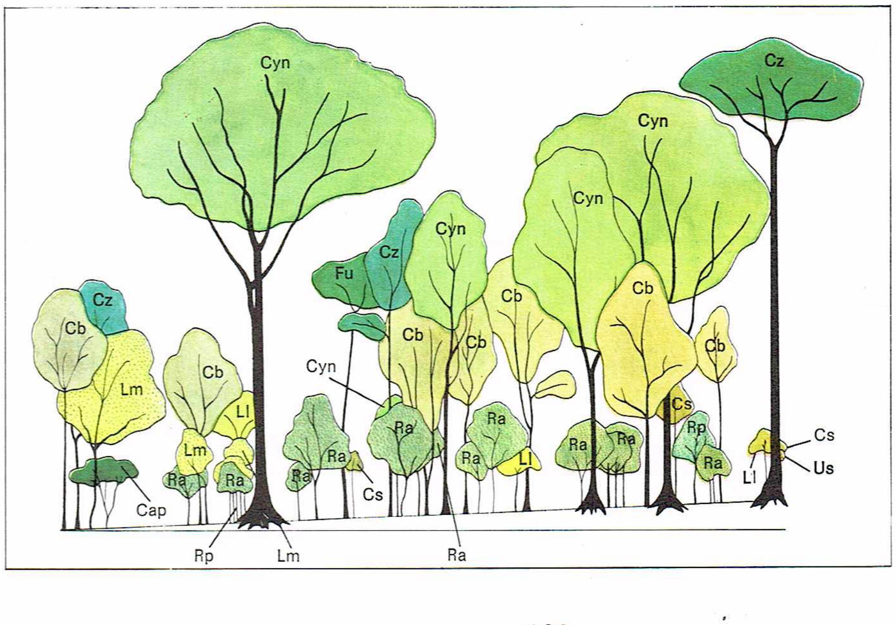

▼ ***Représentation schématique d'une forêt pluviale en Ouganda; le schéma correspond à un relevé fait sur une surface de 61 m de long et de 7 m de large : 44 arbres de 4,6 m ou plus de haut. L'aspect et les proportions sont rigoureusement respectés :***
***Cap,* Capparis afzeli;**
***Cb,* Celtis browni;**
***Cs,* Celtis spyauxis;**
***Cyn,* Cynometra alexandri;**
***Cz,* Celtis zenkeri;**
***Fu,* Funtumia elastica;**
***Ll,* Lepidoturus laxiflorus;**
***Lm,* Lasiodiscus mildbraedii;**
***Ra,* Rinorea ardisiaflora;**
***Rp,* Rinorea poggei;**
***Us,* Uvarioxis sp.**

T. Sacco

▲ *A gauche, dans les bambuseraies de la forêt tropicale, le bambou* (Bambusa arundinacea) *a une croissance spectaculaire. A droite, dans le sous-bois, on trouve des plantes qui se contentent de peu de lumière pour germer et croître ; les lianes, ici* Strophanthus hispidus, *appartiennent à cette catégorie.*

▼ *Exemples de plantes épiphytes :* Aechmea sp. ; Rhiposalis sp., *etc., sur les arbres d'une forêt brésilienne près de Rio de Janeiro.*

héliophiles). La dimension des feuilles est très variable suivant les familles et espèces, mais on remarque souvent que dans le sous-bois les feuilles sont plus grandes que dans la voûte arboricole.

Dans le sous-bois, on trouve des plantes qui se contentent de peu de lumière pour germer et croître : les lianes appartiennent à cette catégorie ; leurs tiges longues et non ramifiées, sans feuilles, s'allongent du sol à la strate supérieure où feuilles et fruits ont suffisamment de lumière pour se développer.

Les épiphytes sont innombrables, surtout en forêt tropicale humide. Les Lichens abondent, les Mousses sont mal représentées mais les Fougères sont innombrables. Ces dernières vivent soit sur des rochers humides, soit sur les troncs et leurs branches. Les épiphytes se développent selon des strates bien définies et comportent des faunes d'Insectes spécifiques selon la stratification. Les Orchidées sont très bien représentées à différents niveaux. Les Broméliacées à citernes (Amérique Latine) contiennent des collections d'eau qui servent au développement d'une faune spécifique.

T. Sacco

La faune

La faune forestière tropicale est abondante et surtout très diversifiée par suite des divers microclimats qu'on rencontre du sol jusqu'à la voûte et de la multitude des ressources alimentaires ainsi que des lieux de reproduction très variés liés à de nombreuses biocénoses. De nombreux groupes d'animaux ont peuplé les différentes strates de la végétation, dont certains très primitifs (blattes, termites, caméléons, Lémuriens, etc.) ont pu survivre et se diversifier à l'extrême, présentant une spécialisation très poussée. L'humidité atmosphérique, très particulière aux strates inférieures, a permis à certains groupes aquatiques ou semi-aquatiques de mener une vie terrestre ou partiellement terrestre, comme les sangsues et les grenouilles arboricoles, ces dernières faisant parfois des pontes sur les branches. L'étude rapide de la macrofaune et de sa stratification montre une richesse extrême des formes arboricoles, l'éthologie forestière sélectionnant les formes les plus aptes à vivre dans ce milieu.

Étude des groupements

Le milieu très hétérogène de la forêt détermine une répartition et une activité spécifiques. Les facteurs les plus importants intervenant dans les groupements faunistiques sont représentés par la lumière et l'humidité des différents microclimats.

Parmi les groupements écologiques animaux, on peut distinguer : le groupement du sol et du sous-bois, branchages bas y compris, le groupement de la voûte arboricole, le groupement des clairières et des pistes, le groupement de la lisière.

— *Groupement du sol et du sous-bois*

Le groupement animal localisé au sol et à la strate arbustive est caractérisé, d'une part, par la faune du sol proprement dite, sol dont les caractères essentiels sont une structure plus ou moins compacte et une faible oxygénation, et, d'autre part, par la faune de la strate du sous-bois (strate arbustive). Les conditions écologiques de ce milieu sont extrêmement homogènes durant toute l'année et ne présentent que de très faibles amplitudes journalières. On peut noter que l'humidité varie du simple au double par rapport à la voûte arboricole, et que l'éclairement, extrêmement faible au sol, est d'environ 100 lux contre 100 000 lux à 45 m. La forte humidité de ce milieu permet la multiplication des formes à respiration cutanée, comme les Collemboles, et la présence des sangsues arboricoles. Les consommateurs primaires ont pour ressources alimentaires les substances végétales du sol (racines, tubercules, etc.), la base des troncs, des tiges, des feuillages, fruits et graines tombés sur le sol, différents débris végétaux, Champignons, feuilles mortes, etc. Le régime des consommateurs primaires dans ce milieu pauvre en feuillage est typiquement microphage, saprophage, xylophage et nécrophage.

Les consommateurs secondaires sont relativement bien représentés dans ce milieu.

La microfaune (individus de moins de 0,2 mm) est formée par des animaux qui, ayant besoin de beaucoup d'humidité, vivent dans des interstices (faune interstitielle). Ce sont surtout des Protozaires, des Vers Nématodes, des Rotifères. Cette faune est souvent reviviscente (Rotifères) ou présente des kystes et des œufs résistant à la dessiccation. La mésofaune comprend des animaux de petite taille (0,2 à 4 mm) qui ont besoin de l'humidité pour respirer; citons les Acariens, les petits Myriapodes, des larves et adultes d'Insectes de petite taille, comme les termites et les fourmis, les Collemboles, les Diploures et les Thysanoures. La macrofaune est composée d'animaux de taille relativement grande (4 mm à 80 mm) et comporte des Vers Annélides Oligochètes, des Mollusques, des Péripates, des Acariens et des Araignées, des Crustacés (Isopodes et Amphipodes), des Myriapodes et des Insectes. La mégafaune comporte les animaux de taille plus importante (80 mm à 1,50 m) qui creusent des terriers et remontent des matériaux des profondeurs à la surface. Certains creusent des terriers jusqu'à la nappe aquifère, comme les crabes d'eau douce du Congo *(Cardisoma armatum)*, ou des terriers dans l'eau saumâtre de la mangrove, comme les crabes *Cardisoma carnifex, Sesarma* et *Gelasimus;* d'autres animaux, certains Insectivores et Rongeurs creusent des terriers en terre ferme.

Pour leurs sources alimentaires, les animaux du sol tropical forestier, étant donné la pauvreté végétale et la faible oxygénation, dépendent en grande partie de la productivité de la voûte arboricole et de la strate végétale intermédiaire. Les interactions entre organismes sont surtout liées aux dégradations primaires des substances végétales mortes et à leur transformation en humus. Sur ce plan, le rôle des Collemboles et des termites humivores et lignivores est primordial. Les débris végétaux passent généralement par plusieurs animaux successifs, l'assimilation étant souvent très imparfaite; aussi, il se forme des associations par coprologie, chaque animal avalant les matières mélangées avec les excréments, n'assimilant qu'une partie déterminée de la nourriture, les débris végétaux passant ainsi par plusieurs tubes digestifs avant leur transformation définitive. Le groupement de ces animaux forme ainsi une biocénose très particulière où dominent les microphages, saprophages et coprophages.

La biomasse globale des animaux du sol de la forêt est très faible par rapport à celle des clairières et des savanes; elle est composée surtout de Protozoaires (Flagellés, Rhizopodes), Nématodes, certains parasites d'Insectes, comme les Gordiens, et d'autres parasites des plantes, Annélides, Mollusques *(Achatina, Vaginula)*, Acariens, Pseudoscorpions, Opilions, Araignées, Crustacés (Isopodes), Myriapodes (Symphiles, Pauropodes, Chilopodes, Diplopodes), Insectes Aptérygotes (Protoures, Diploures, Thysanoures et surtout les Collemboles), Insectes Ptérygotes : termites, blattes, Orthoptères, Thysanoptères, Psocoptères, Coléoptères (Élatérides, Scolytidés, Carabiques, etc.), Homoptères, Hétéroptères (Réduves, en particulier les larves), Hyménoptères : fourmis (*Crematogaster, Anomma* appelées manians qui effectuent des razzias au sol et dans la strate arbustive), Diptères : larves de tipules, larves de moustiques dans différentes collections d'eau, larves de Psychodidés; pupes de glossines.

Les Vertébrés de la faune du sol d'une forêt primaire ou d'une vieille futaie secondaire sont peu nombreux en population et en espèces, mais très typiques de ce milieu. Ce sont des serpents comme les pythons et les vipères, des lézards, des Amphibiens, des Oiseaux marcheurs granivores (pintades de forêt) ou des Oiseaux insectivores, quelques Rongeurs, ratels, pangolins, oryctéropes, buffles de forêt, hylochères (fouillant peu le sol), quelquefois des potamochères et des bongos (Tragelaphinae); on trouve aussi des Primates terrestres comme le mandrill, le gorille et le chimpanzé. Dans les forêts secondaires, caractérisées par la présence des pistes, des clairières et d'une végétation secondaire, la faune des Mammifères au sol est beaucoup plus abondante et variée. On note l'apparition de nombreux Rongeurs terricoles : Muridae, qui comprennent des rats variés comme le *Thamnomys*, le rat de Gambie, *Lophiomys, Oenomys, Mastomys*, des Thryonomyidae *(Thryonomys)*, Hystricidae (athérure ou « porc-épic »); de petits Carnivores : civettes, genettes, nandines.

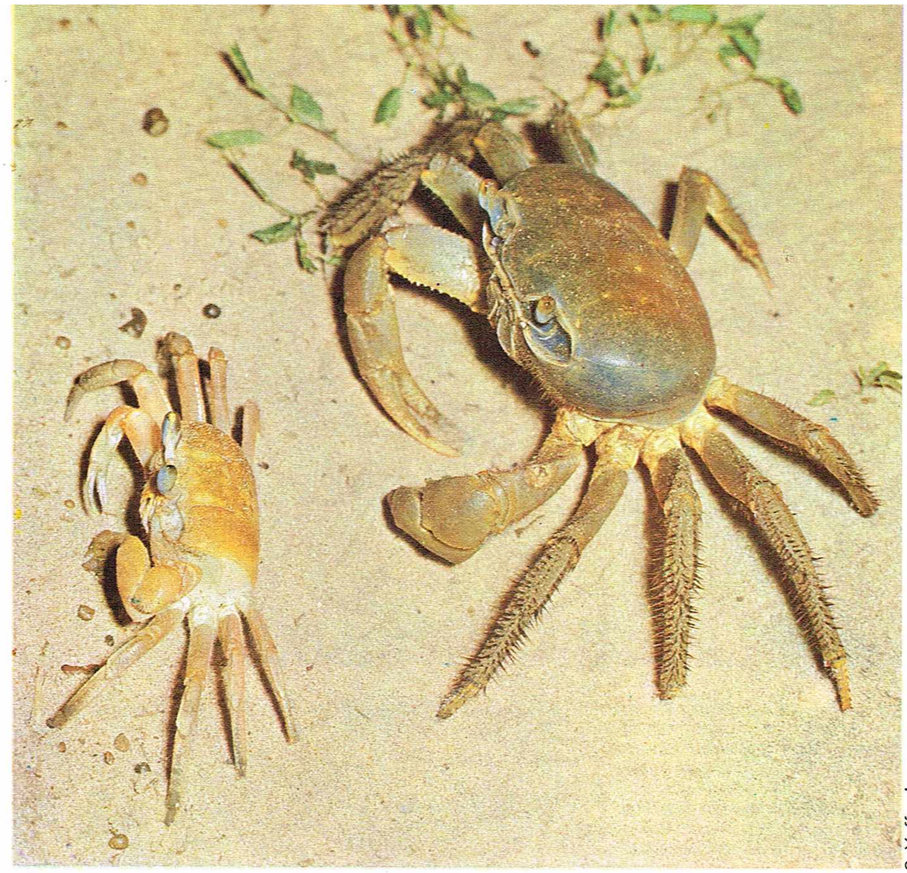

▲ ***la macrofaune des forêts tropicales est composée d'animaux de taille relativement grande, tels ces crabes d'eau douce du Congo* (Cardisoma armatum), *qui creusent des terriers jusqu'à la nappe aquifère.***

Avec le développement des hautes futaies secondaires et la multiplication des ressources alimentaires (graines, fruits), on voit apparaître un nombre important de grands Mammifères terrestres; on note ainsi au sol la présence typique des Cephalophinae (céphalophes, tragélaphes, guibs l'eau), des buffles de forêt, des potamochères, éléphants, pangolins et une plus grande abondance des Rongeurs, ainsi que celle des Carnivores : ratels, poianes, léopards *(Panthera pardus)*, chats dorés, etc.

La végétation de la strate du sous-bois recevant plus de lumière que le sol, le milieu présente des oscillations de température et d'humidité plus marquées. L'abondance relative des tiges, des plantes herbacées et ligneuses (arbres et lianes), du feuillage sombre et coriace des plantes ombrophiles, des Fougères et des épiphytes, permet le développement d'une faune variée mais peu diversifiée riche en éléments frondicoles. La faune comporte des éléments microphages, phytophages et des prédateurs, ce qui lui donne un équilibre écologique malgré l'indice de diversité relativement faible pour la faune frondicole. La pénétration de la lumière provoque, avec les modifications et les déplacements verticaux des microclimats, un rythme nycthéméral très marqué pour certains de ces éléments : Insectes vivant sur les feuilles le jour, se raréfiant ou se cachant ailleurs la nuit. Les formes les plus adaptées au sous-bois ont une activité diurne et nocturne presque continue avec de faibles interruptions; par contre, les formes moins inféodées à ce milieu présentent un rythme nycthéméral accentué et des migrations nycthémérales plus ou moins importantes.

Dans cette strate, sur les troncs d'arbres intacts, la faune est relativement pauvre, composée d'Araignées coureuses et prédatrices, d'Insectes Aptérygotes, de blattes et termites, de Coléoptères, Orthoptères, Homoptères, Lépidoptères et de Diptères, ces derniers bien représentés en Tipulides, Culicides (*Anopheles, Uranotaenia, Mansonia, Aedes, Culex*, etc.), parfois de glossines et de quelques Mollusques. Cette faune des troncs d'arbres est caractérisée par des Insectes à régimes microphage, xylophage et prédateur, de même que par des Insectes qui se reposent sur le tronc et ses contreforts, en particulier les Diptères : Tipulides, moustiques, Psychodides, dont certains, hématophages, digèrent leur repas sanguin. Par sa composition, la faune de la partie basse des troncs d'arbres a beaucoup d'analogies avec celle du sol; l'une et l'autre ont d'ailleurs certains éléments en commun.

Par contre, la faune des arbres mutilés (cerclés, brûlés, etc.) et celle des arbres abattus est très différente de la précédente. Ces arbres sont habités par de nombreux

T. Sacco

Ph. Frederic - Jacana

▲ ***Le groupement arbustif est caractérisé, notamment, par des fourmis œcophylles* (Oecophylla), *tisseuses de feuilles, dont les fourmilières sont suspendues.***

Coléoptères xylophages qui font des galeries dans le bois, parfois avec culture de Champignons comme les Platypodides et Scolytides, d'autres se nourrissant aux dépens de ces troncs, à l'état adulte ou larvaire, comme les Lyctides, Bostrychides, Scolytides, Platypodides, Cérambycides, Buprestides, etc., certains de ces groupes étant plus ou moins corticoles. Sous l'écorce, on trouve une faune différente suivant les espèces végétales et le degré d'humidité et de pourrissement. Citons les phrynes (Amblypyges), les grillons, des Coléoptères avec des formes prédatrices (Carabiques et staphylins), des Thysanoures, faune qui devient beaucoup plus riche avec une écorce plus humide et plus pourrie qui s'enrichit en Myriapodes, Diploures, Thysanoures, blattes, Dermaptères, Zoraptères et une faune diversifiée de Coléoptères.

Le groupement arbustif proprement dit comporte des espèces frondicoles et prédatrices : Araignées, Blattidés, Mantides, Grillides, Coléoptères, Homoptères (Cicadides), Hémiptères (punaises), Hyménoptères. Ce groupement est caractérisé surtout par l'abondance des fourmis frondicoles carnassières comme les crématogasters, qui bâtissent leurs nids sphériques sur les branches et les lianes, et par ailleurs par les fourmis œcophylles, tisseuses de feuilles, dont les fourmilières sont suspendues; ces fourmis extrêmement agressives vivent en petites colonies.

On peut conclure que la strate arbustive, représentée par des régimes variés, en particulier par des phytophages, présente un équilibre écologique avec une diversité relativement faible.

— *Groupement de la voûte arboricole*

Ce groupement est caractérisé par les Arachnides et des Insectes appartenant à deux catégories principales : les saproxylophiles et les frondicoles; il comporte également des Vertébrés arboricoles adaptés à ce milieu.

Les Arthropodes saproxylophiles vivent dans l'humus accumulé sur les branches plus ou moins horizontales, et dans l'humus qui se trouve à la base des épiphytes (surtout à la fourche des branches). L'humus aérien constitue un sol effectif et son épaisseur peut atteindre plusieurs centimètres. La faune des épiphytes est très voisine, parfois identique pour certaines espèces, de celle du sol forestier. Elle comprend des Aptérygotes (Collemboles et Thysanoures), des termites, de petites blattes et de nombreuses familles de Coléoptères, certaines saproxylophiles et phytophages, d'autres prédatrices. Elle comporte, d'autre part, des Annélides (Oligochètes), des Chélicérates (opilions), des Araignées et des Myriapodes (iules).

La faune des Insectes corticoles de la voûte arboricole, Insectes qu'on trouve sous l'écorce en voie de pourrissement, est caractérisée par la présence d'Embioptères, Isoptères, et Coléoptères (Buprestides, etc.). Les épiphytes peuvent jouer un rôle dans la remontée des Insectes du sol vers la voûte, en formant des relais entre ces deux biotopes.

Les animaux vivant dans les feuillages (frondicoles) sont surtout des Arthropodes comprenant des éléments plus ou moins sédentaires (Collemboles, Araignées, etc.), ainsi que des éléments plus mobiles (Mantides, Carabiques, etc.). Le groupement de la voûte présente une grande diversité en ordres et familles : citons les Araignées (Salticides, Thomisides, etc.), des Crustacés Isopodes, des Collemboles, des termites, des blattes, des Mantides, des Phasmoptères, différents Orthoptères (Pseudophyllides, Conocéphalides, Grillides, etc.) ; des Planipennes, Psocoptères, Embioptères, Coléoptères (Bruchides, Chrysomélides, Galérucides, Hélodides, Carabiques, etc.), des Hyménoptères : de nombreuses fourmis dont les œcophylles, des Lépidoptères, des Diptères (Tipulides et moustiques, etc.), ce milieu étant très fréquenté parfois par des Insectes hématophages (Cératopogonides et *Chrysops*).

La faune nocturne de la voûte est beaucoup plus riche que la faune diurne et présente une grande diversité : elle comporte une ou deux centaines d'espèces différentes ou plus. Cette faune est attirée par la lumière d'une lampe de chasse sur un drap blanc. Elle est composée en particulier de blattes, d'Orthoptères (sauterelles vertes variées), de Dermaptères, de Trichoptères, d'Hémiptères, d'Homoptères, et de nombreuses familles de Coléoptères, ainsi que de fourmis ailées (sexuées), de nombreux Lépidoptères et Diptères (Chironomides, Tipulides et moustiques). La faune des Insectes frondicoles de la voûte est caractérisée par une extrême abondance de phytophages et une population relativement pauvre en prédateurs (Mantides, Carabiques). Les régimes alimentaires des Insectes de la voûte sont très diversifiés, comportant des phyllophages (Galérucides, différents Orthoptères), des floricoles (Coléoptères Lycides), des séminivores (Bruchides), des xylophages (Cérambycides, Platypodides), des microphages, des gallicoles, des entomophages, des hématophages et des prédateurs. Cette faune, caractérisée par l'abondance des phytophages, semble montrer un excédent important de ces derniers par rapport aux prédateurs (Arachnides, Insectes et Oiseaux insectivores), d'où une importante chute de cadavres sur le sol forestier où ils sont consommés; cet excès permet aussi de nourrir les Oiseaux migrateurs de la région paléarctique et des zones sahéliennes dont certains migrent en forêt, sans préjudice pour les Oiseaux sédentaires de la forêt. Cet excédent provoque donc un déséquilibre très caractéristique de la voûte de la forêt tropicale, s'opposant à l'équilibre réalisé au niveau de la strate arbustive; la cause de cet excédent réside dans l'exubérance du feuillage due à l'éclairement, feuillage qui persiste pratiquement toute l'année.

Dans la forêt primaire parmi les Vertébrés, les formes arboricoles sont surtout représentées par les Reptiles, les Amphibiens, les Oiseaux, par une population de Rongeurs comprenant en particulier les Anomaluridae (écureuils volants), et par des Primates arboricoles (colobes, cercopithèques et cercocèbes).

En forêt secondaire, les populations varient suivant la structure et la physionomie de la végétation. Dans une forêt jeune, à brousse basse et à jeunes futaies, correspondant à l'emplacement des anciennes plantations abandonnées de palmiers à huile, de bananiers et d'ananas, etc., on remarque une flore plus ou moins analogue à celle des clairières qui attire de nombreux animaux arboricoles; cette faune est représentée par des lérots, des écureuils palmistes, des écureuils pygmées, des écureuils planeurs, etc., de nombreux Chiroptères, des Carnivores bon grimpeurs (civettes, genettes) et des singes sédentaires ou visiteurs saisonniers, tous ces animaux étant répartis entre les étages supérieur et inférieur. Dans la forêt secondaire ancienne, à hautes futaies, l'abondance des ressources alimentaires (graines, fruits) fait de ce milieu un domaine d'élection pour les grands Mammifères terrestres, aussi bien que pour un grand nombre d'espèces arboricoles.

Parmi les espèces arboricoles, on trouve à l'étage inférieur de nombreux Sciuridae (petits et grands écureuils) et de nombreux *Funisciures*. A l'étage moyen ou supérieur, on trouve des espèces arboricoles typiques : les anomalures (écureuils planants), les damans et de nombreux Chiroptères qui trouvent refuge surtout dans les grands arbres; les Microchiroptères sont représentés, en particulier, par les genres *Mops, Eptesicus, Pipistrellus,* à régime essentiellement insectivore; les Mégachiroptères, frugivores, comprennent de nombreuses roussettes, etc.; les Primates arboricoles comprennent des Lémuriens (potto, galago) et des singes (colobes, cercopithèques et cercocèbes).

La population des Oiseaux se répartit entre la strate arbustive et moyenne et, d'autre part, la voûte. Dans la

Bruce Coleman - Des et J. Bartlett

◀ *Un exemplaire d'une des très nombreuses espèces de perroquets vivant dans les forêts tropicales; ces animaux sont caractéristiques de la faune aviaire dans la voûte arboricole.*

strate arbustive et moyenne vivent des Oiseaux surtout grimpeurs tels que les Picidés (pics) se nourrissant d'Insectes xylophages ou d'Insectes fréquentant ce milieu. Dans la voûte arboricole, on trouve, par contre, beaucoup de polyphages, frugivores, granivores, insectivores, etc. Citons les Columbidae (pigeons), les Musophagidae (touracos), les Alcedinidae (martins-pêcheurs), les Bucerotidae (calaos), les Pittidae (brèves), les Pycnonotidae (bulbuls), les Muscicapidae (Turdinés, Timaliinés, Sylviinés, Muscicapinés), les Picnonotidae (Passereaux à espèces typiquement forestières), les Ploceidae (tisserins, bengalis), et les Psittacidae (perroquets). Les Oiseaux qui vivent dans la voûte sont en général brillamment colorés, contrairement à ceux du sol et de la strate arbustive, généralement de couleur terne. Les Oiseaux qui fréquentent l'espace au-dessus de la voûte arboricole sont peu nombreux en raison de la pauvreté du plancton aérien; leur régime est surtout phytophage ou mixte, comportant la nourriture fournie par les arbres et celle fournie par les Insectes.

— *Groupement des clairières et des pistes*

Les clairières de la forêt dense humide sont caractérisées par l'existence d'une flore à éléments héliophiles, avec une strate herbacée plus ou moins dense; la stratification de la végétation est très peu développée du fait que toutes les plantes sont héliophiles. Les clairières, dues à un déboisement plus ou moins ancien (cultures abandonnées, implantations de villages, exploitations forestières, aurifères ou diamantifères), comportent des vestiges forestiers, certains arbres n'ayant pas été abattus pour des raisons économiques ou des croyances religieuses. Les clairières présentent un aspect chaotique de souches ou de troncs d'arbres abattus. Dans ces clairières, on trouve parfois des vestiges d'anciennes plantations comme celles des palmiers à huile, arachides, etc., qui peuvent attirer une faune particulière.

Les pistes et saignées plus ou moins larges qui parcourent la forêt représentent, au point de vue de la végétation et du microclimat, des prolongations de clairières, bien éclairées, possédant un tapis de plantes herbacées et certaines plantes caractéristiques : Zingibéracées *(Aframomum, Costus)*, Maranthacées *(Thaumatococus)*, Commélinacées *(Palisota hirsuta)*.

La faune des clairières annonce celle des savanes arborées humides, caractéristiques des milieux ouverts. Citons les Annélides Oligochètes, les Arachnides dont de nombreux Acariens et Araignées, les Myriapodes, et pour les Insectes : des Trichoptères, Odonates (æchnes, libellules, lestides, Agrionides), termites, Psocoptères, Thysanoptères, Orthoptères (Grillides, Conocéphalides, Acridides), Homoptères (Cicadides, Aphides), Névroptères (Planipennes), Coléoptères (Passalides, Anthribides, Lycides, Chrysomélides, Dermestides, Élatérides, Curculionides, Méloïdes, Cérambycides, Clérides, Séricides, Lampyrides et Carabiques); de nombreux Lépidoptères (Lycénides, Nymphalides, Psychides, Hespérides, Limacodides, Saturnides, Sphingides et Piérides); des Hyménoptères (fourmis *Anomma*, crématogasters, œcophylles, Braconides, Ichneumonides, etc.); des Hétéroptères (Réduvides, Coréides, Pentatomides, etc.); des Diptères (Tachinides, Asilides, glossines, Mycétophilides, Syrphides, drosophiles, tipules, moustiques, simulies, Cératopogonides, Psychodides). Le groupement de la clairière comporte aussi des Mollusques Gastéropodes (achatines), des serpents bien représentés par les espèces du sol (pythons, Vipéridés), ainsi que des lézards Agamidés. Les Amphibiens sont diversifiés, représentés par des crapauds localisés au sol et des grenouilles à régimes variés.

Les Oiseaux des clairières reflètent très bien le biotope de ce milieu. Les clairières marécageuses sont riches en espèces aquatiques et semi-aquatiques comprenant des Ardéiformes (hérons) et des Coraciadiformes (martins-pêcheurs). Les clairières abritent en général des Oiseaux spécifiques au milieu ouvert, et également des Oiseaux de la forêt environnante, attirés par les ressources alimentaires. Comme les Graminées sont l'élément dominant de la végétation, on y rencontre d'importantes populations de granivores et des Oiseaux qui s'installent en général près des habitations humaines, l'habitat ordinaire de ces Oiseaux étant la savane. Les visiteurs occasionnels comprennent des Cuculidae, Corvidae (corbeaux), Falconidae (milans et autres rapaces), et des hérons gardes-bœufs *(Bulbucus ibis)* attirés surtout par les prairies humides et par la présence du bétail. L'avifaune des villages abandonnés et des cultures voisines en friche (palmiers à huile, maïs, manioc, etc.) est très riche en Ploceidae (Passereaux) comprenant de très nombreux tisserins et des mange-mil *(Quelea)*, des Astrildes, spermestes et négrettes; ces clairières comportent aussi divers Turdidae (grives, traquets, etc.), des Columbidae (turturs), Pycnonotidae (bulbuls) et, dans l'espace aérien, on remarque des Hirundininae (hirondelles, martinets). Les nids des tisserins sont très caractéristiques de ces milieux : ils sont construits en général sur l'aire du village, sur les branches des palmiers à huile, en très forte densité.

Les clairières et les aires cultivées près des agglomérations constituent un pôle d'attraction pour de nombreux animaux petits et grands : chauves-souris, Insectivores, Rongeurs, Ruminants, porcins et Carnivores. Parmi les Insectivores, citons les musaraignes qui peuvent fréquenter les habitations humaines, pour les Rongeurs des écureuils planants qui s'installent sur les arbres de la clairière d'où ils descendent le soir en vol plané, de nombreux Muridae dont les rats *(Rattus rattus, R. norvegicus)*, des souris *(Leggada musculoides, Mus musculus)* et d'autres Rongeurs comme les *Mastomys, Praomys*, etc. Les rats peuvent être très nombreux dans les touffes de bambous où ils s'installent pour faire leurs nids. Les Rongeurs terrestres et arboricoles sont caractérisés par des nids construits au-dessus du sol dans la végétation et une nourriture à base de Graminées, de plantes cultivées et de détritus. Pour les chauves-souris, certains Microchiroptères (insectivores), installés en clairière,

▼ *Les pistes et saignées plus ou moins larges qui parcourent la forêt (ici une forêt pluviale équatoriale au Brésil) représentent, au point de vue de la végétation et du microclimat, des prolongations de clairières, bien éclairées.*

T. Sacco

T. Sacco

▲ *L'influence de l'homme sur la végétation s'exerce notamment par l'introduction et la culture de plantes alimentaires* (**Musa paradisiaca**, *à droite, en lisière de forêt*) *et l'arboriculture* (**Carica papaya**, *à gauche*).

gîtent dans les maisons, sous les toits. Il faut signaler, à ce sujet, que de nombreux rapaces (hiboux, chouettes) laissent dans les greniers des « pelotes » de déjection comprenant des excréments, des crânes et os des victimes (Rongeurs, chauves-souris, Oiseaux, etc.). De nombreuses chauves-souris se réfugient le jour dans les boisements voisins, en particulier dans la forêt vierge des îles qui parsèment les fleuves, d'où elles sortent au crépuscule, notamment les Mégachiroptères (roussettes), formant parfois des bandes de milliers d'individus, pour aller chercher leur nourriture dans les arbres fruitiers (manguiers, cocotiers, etc.), alors que les Microchiroptères insectivores chassent surtout dans les clairières.

La clairière et les anciens emplacements culturaux attirent aussi de gros animaux : les buffles de forêt, de nombreux céphalophes forestiers, les tragélaphes, potamochères, éléphants de forêt, et des Carnivores : civettes, genettes, et surtout des léopards (panthères) qui, la nuit, s'attaquent aux cabris et chiens du village. Les cultures d'arachides sont particulièrement recherchées par les Bovidés, les plantations d'ananas par les éléphants, le manioc par les potamochères et les bananiers par une pléiade d'animaux dont les éléphants et les singes (chimpanzés, gorilles, etc.).

Les chaînes alimentaires des clairières sont caractérisées par la richesse de la faune à régimes variés : microphages, saproxylophages, granivores et phytophages en général, avec une relative pauvreté en floricoles et frugivores, ainsi que la présence de nombreux prédateurs (Araignées, Insectes, Reptiles, Amphibiens) qui font de ce milieu un biotope équilibré. Il faut noter que l'évolution saisonnière de la clairière est très marquée et que la faune présente d'importantes variations nycthémérales et saisonnières en raison de nombreux éléments héliophiles qui effectuent des déplacements en fonction des variations micro-climatiques.

— *Groupement de la lisière*

Ce groupement comporte beaucoup d'espèces frondicoles et floricoles communes à la forêt, ainsi que des phytophages et des Carnivores prédateurs, présentant une grande diversité d'espèces héliophiles. De nombreux éléments de ce groupement peuvent le quitter, soit par le sol pour aller en clairière, soit par vol le jour ou la nuit. La faune des Insectes est très riche et écologiquement bien équilibrée. Les Reptiles et les Amphibiens comportent de nombreuses formes arboricoles. Les Oiseaux sont répartis sur différentes strates et font des incursions en clairière (insectivores) ou sur des surfaces aquatiques, proches des lisières. Les singes fréquentent les différents niveaux et pénètrent dans les plantations où ils sont piqués par des moustiques inféodés à ces milieux particuliers (par exemple *Aedes simpsoni* qui se reproduit dans les ananas) ; ces singes, véritables réservoirs de virus, peuvent infecter les moustiques avec des virus forestiers comme le virus amaril (fièvre jaune). Ces moustiques des clairières sont ainsi l'intermédiaire entre le singe et l'homme pour l'infection de ce dernier.

L'influence de l'homme sur la végétation et sur la faune qu'il détruit ou qu'il fait fuir, s'exerce par son implantation en forêt, l'utilisation de cette dernière, l'ouverture des pistes, des axes routiers, l'exploitation forestière, et la création de clairières pour les cultures familiales ou de vastes cultures industrielles. Cette influence se marque par l'introduction et la culture des plantes alimentaires (ananas, bananiers, manioc, etc.) et autres plantes vivrières, l'arboriculture (papayers, citronniers, cocotiers, palmiers à huile, manguiers, etc.) ou bien par la culture de la végétation à usage technique (utilisation des Graminées pour la confection des toits en chaume, des clôtures tressées, divers ustensiles). D'autres plantes sont cultivées pour le plaisir comme le tabac ou bien à des fins médicales ou magiques (comme le poison d'épreuve).

Agissant sur la végétation et la flore, l'homme, en débroussant à la machette, à la hache et par le feu (brûlis), crée des clairières qu'il abandonne après quelques années d'utilisation pour recommencer ailleurs la même opération. Au cours de ces défrichements, certaines plantes sont respectées comme les arbres utilitaires (palmiers à huile) ou des arbres « tabous » sur lesquels vivent des chenilles comestibles, ou servant d'indicatifs climatiques, leur défoliation indiquant le moment propice à une culture saisonnière, ou bien des arbres « sacrés » entourant des tombeaux. A côté de la destruction intense de la forêt, et la création de clairières de plus en plus nombreuses, plus ou moins dégénérées en savanes, l'homme favorise l'extension des espèces héliophiles, en particulier, celle des grands arbres géants qui ne peuvent germer et s'imposer qu'en l'absence de la voûte arboricole.

Chaînes alimentaires et fonctionnement de l'écosystème

La forêt, par la diversité des aliments mis à la disposition des animaux, a permis le développement de chaînes alimentaires très complexes, comportant des régimes alimentaires très diversifiés, avec les catégories des phytophages (frondicoles, frugivores, granivores, etc.) jusqu'aux différents régimes des prédateurs. Le régime alimentaire détermine souvent des changements radicaux du biotope au cours des différents stades de développement (mode de vie aquatique ou terrestre), certaines larves menant une vie xylophage dans le bois et une vie libre à l'état adulte. Le régime alimentaire permet de classer les animaux et leurs stades de développement en plusieurs catégories écologiques :

— *les consommateurs primaires phytophages* qui constituent le groupe majeur, comportent les herbivores, les granivores, les mangeurs de racines, de tubercules et de rhizomes (Suidés forestiers), les phyllophages (mangeurs de feuilles), les xylophages (mangeurs de substance ligneuse), les frugivores (mangeurs de fruits), les saprophages, les saproxylophages (mangeurs de débris de bois et de déchets laissés par d'autres Insectes), les coprophages, les microphages, suceurs de sève, de nectar, de miel, etc. A cette catégorie appartiennent également les corticoles qui vivent et se nourrissent de bois dans l'écorce ou sous l'écorce, les mycétophages, les mycophages et les gallicoles (galles végétales) ;

— *les consommateurs secondaires* qui vivent aux dépens des premiers, sont soit des prédateurs carnivores, soit des hématophages, des entomophages, des omnivores, etc.

L'écosystème forestier tropical est caractérisé par une vitesse élevée de recyclage des éléments minéraux. De même, le cycle du carbone s'accomplit rapidement : dans une forêt du Ghana, par exemple, on a montré que la matière organique de la litière formée par les feuilles et les petits rameaux était décomposée au sol à raison de 1,3 % par jour, soit 465 % par an !

Grâce aux conditions climatiques générales, la photosynthèse est très active, ce qui conduit à une productivité brute élevée, mais la respiration étant aussi très importante, la productivité nette, malgré la luxuriance de la

végétation et sa biomasse élevée, n'est pas aussi forte qu'on pourrait s'y attendre.

Plusieurs travaux fournissent des valeurs très comparables entre elles pour la biomasse végétale et la productivité primaire. A Porto Rico, pour une forêt climacique, Odum (1971) indique une biomasse de 272 t/ha de matière sèche, une productivité brute de 100 t/ha/an et une productivité nette de 28,9 t/ha/an : la respiration des producteurs primaires dépense donc l'équivalent énergétique de 71,1 t/ha/an; la productivité nette de l'écosystème (PNE) est nulle, et l'accroissement en bois n'est que de 2,5 t/ha/an. En 1967, en Thaïlande, Kira et ses collaborateurs ont trouvé des valeurs semblables : une productivité brute de 124,4 t/ha/an de matière sèche, une productivité nette de 29,8 t/ha/an, et donc, une respiration des autotrophes correspondant à 94,6 t/ha/an.

Pour une forêt secondaire ancienne, au Ghana, la biomasse serait de l'ordre de 360 t/ha en poids sec et la productivité nette de 24 t/ha/an dont 1 t/ha/an pour le bois. En ce qui concerne le bois, une valeur de productivité nette de 2,5 t/ha/an, comme celle fournie par Odum (1971) pour Porto Rico, indique que le rendement forestier en bois est souvent du même ordre que dans certaines forêts à feuilles caduques de nos régions; toutefois, dans le cas de plantations en zone tropicale, les valeurs obtenues peuvent être beaucoup plus fortes et atteindre pour la productivité nette 50 t/ha/an pour une plantation à croissance rapide.

En prenant comme valeur moyenne de la productivité nette 20 t/ha/an, et en tenant compte de la surface couverte par la zone de forêts tropicales (soit environ 20 millions de km^2), on constate que la productivité de cette formation atteint 40 milliards de t/ha/an, soit plus de la moitié de l'ensemble de toutes les forêts du globe.

La complexité des réseaux trophiques, la grande diversité de la faune et les difficultés techniques de recherche réduisent les données relatives à la productivité secondaire de la forêt tropicale. Il suffit de rappeler qu'en Guyane anglaise, par exemple, on a dénombré 59 espèces de Mammifères et près de 20 000 espèces d'Insectes; or les pullulations de ces derniers peuvent être considérables et leur biomasse est alors très importante malgré leur petite taille individuelle. Il est cependant très difficile d'établir leur rôle dans l'écosystème. On ne possède souvent que quelques indications fragmentaires sur les animaux de la forêt tropicale : ainsi, au Ghana, on a estimé à 75 kg/m^2 la biomasse des Mammifères herbivores. La forêt tropicale constitue donc un écosystème particulièrement achevé, dont l'étude approfondie pourrait donner de précieuses indications sur les critères de préservation et d'utilisation optimales de ses ressources naturelles.

Les savanes tropicales

Le terme de savane a été employé pour la première fois par Oviedo, en 1535, pour les llanos du Venezuela. Il désigne des étendues herbeuses, tropicales, dont la strate herbacée est continue; les Graminées pérennes en sont les principaux constituants, représentées par un petit nombre d'espèces. Il s'agit d'étendues parsemées ou non d'arbres et d'arbustes à espèces relativement diversifiées. Les Graminées, herbes dures et rigides, ont une hauteur au moins égale à quelques décimètres et atteignent souvent plusieurs mètres; elles présentent une période de repos qui correspond à la saison sèche, après laquelle les herbes poussent très rapidement.

Au point de vue géographique, les savanes existent dans toutes les régions tropicales, basses ou montagneuses, humides ou sèches, et occupent d'immenses étendues (presque les 3/4 du continent africain). Elles sont voisines des formations forestières denses et humides (sempervirentes) ou plus ou moins sèches (forêts semi-sempervirentes ou caducifoliée, etc.). Leurs sols sont très variés, ferrugineux ou ferralitiques, souvent sur une cuirasse, ou sur sols hydromorphes.

La savane, constituée de Graminées à feuilles planes basilaires ou caulinaires et comportant en général un certain nombre de plantes ligneuses (arbustes et arbres), est brûlée annuellement. Les savanes sont classées schématiquement suivant le développement de la végétation ligneuse.

La *savane herbeuse* est uniquement herbacée; arbres et arbustes y sont en général absents; c'est le type des prairies campos d'Amazonie.

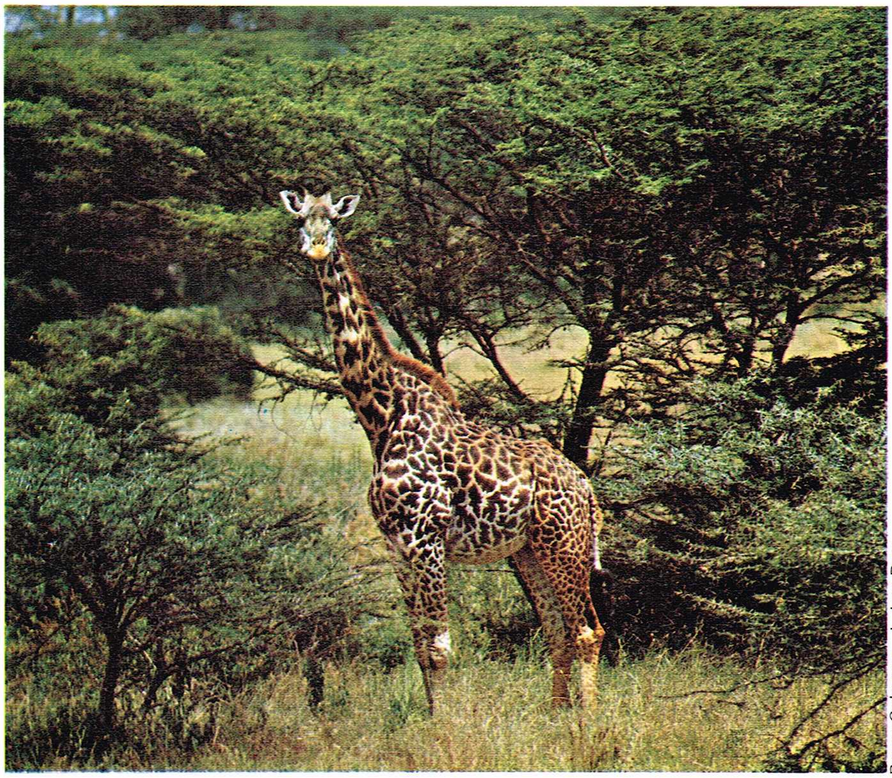

Bruce Coleman - L. Lee Rue

▲ ***La richesse de la strate herbacée, et la présence d'arbres et d'arbustes dispersés, favorisent, en savane, l'existence de nombreuses espèces d'Insectes et l'abondance d'animaux herbivores, de taille importante, telle cette girafe.***

La *savane arbustive* comporte des arbustes disséminés.

Dans la *savane arborée,* les arbustes et les arbres sont moyennement nombreux; les arbres forment un couvert léger et clair, de 6 à 8 m de haut.

Dans la *savane forestière,* les arbres sont plus grands et plus nombreux.

Si les couronnes des arbres sont subcontiguës, la strate herbacée se maintenant, on a alors une formation appelée « forêt claire ».

Origine et évolution des savanes

Les origines des savanes sont parfois difficiles à expliquer; elles sont d'ordres climatique, édaphique ou anthropomorphique.

— *Savanes d'origine climatique*

Cette origine serait due au fait que l'Afrique, à l'époque quaternaire, a connu une alternance de périodes humides pluviales et de périodes sèches, correspondant aux époques glaciaires et interglaciaires des régions tempérées et froides. Certaines des savanes actuelles constituent ainsi des reliques des régions sèches, restes climatiques des savanes septentrionales, qui avaient, à une époque plus sèche, une expansion beaucoup plus grande. Ces savanes ont favorisé l'installation de l'homme, dont les activités agricoles et les brûlis ont contribué à leur maintien dans des régions à vocation forestière. Cette thèse est confirmée par la présence de plantes témoins sous forme de vicariants de forêt dense restés sur place après les variations climatiques. La présence d'une cuirasse ferrugineuse, sous les actuelles forêts denses humides, plaide aussi pour l'existence ancienne d'une autre formation végétale correspondant à une longue période sèche. L'extension des savanes semble se faire rapidement dans les régions à saison sèche relativement prolongée, régions où elles auraient succédé à des forêts denses, semi-caducifoliées ou caducifoliées, à la suite de déboisements intenses et du maintien de ces nouvelles formations par les feux annuels. Les régions de l'ouest de Madagascar sont un exemple significatif de ce processus.

— *Savanes d'origine édaphique*

Ce sont des savanes situées sur des sols pauvres, généralement sablonneux, à rétention faible pour l'eau (savanes des plateaux batékés du Congo); ces sables sont soumis à une action du climat tropical peu humide, avec une longue saison sèche de trois mois ou plus. Les associations végétales, caractéristiques de ces savanes, se trouvent sur des sols sablonneux secs ou périodiquement inondés; cette écologie particulière permet d'expliquer leur stabilité.

T. Sacco

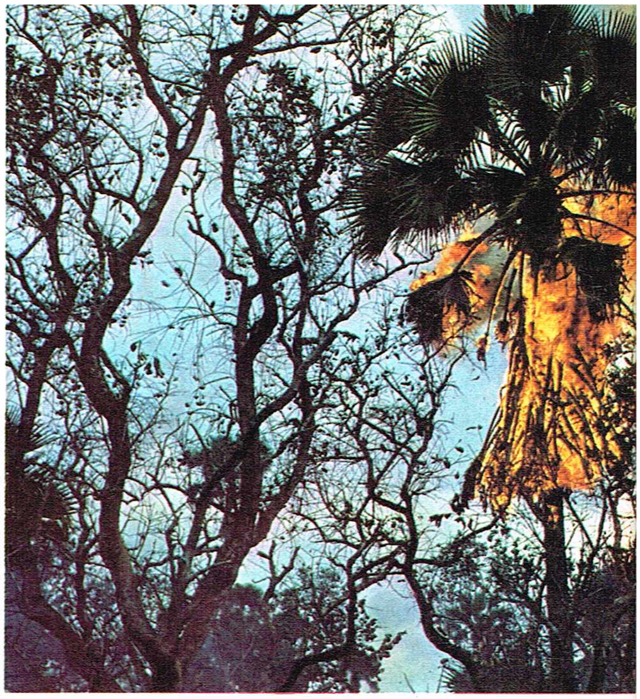

La Chaise

▲ ***Ci-dessus, le très caractéristique arbre de la savane africaine : le baobab* (Adansonia digitata) *[au Kenya].***

— *Savanes d'origine anthropomorphique, ou savanes secondaires*

Aubreville (1949), puis Schnell (1952) ont attiré l'attention sur l'action capitale exercée par les défrichements des forêts et les feux de brousse. La présence de très nombreux gisements de pierres taillées du Néolithique sur des collines nues témoigne de l'importance des populations humaines de cette période, qui, pour implanter des villages et des cultures, avaient peu à peu déboisé d'immenses régions de forêt humide. Ces régions sont actuellement peu ou pas du tout habitées, par suite de l'appauvrissement du sol dû à l'érosion.

En effet, c'est au cours de la période néolithique que l'homme a commencé à pratiquer l'agriculture et a provoqué ainsi le recul de la forêt. On trouve des vestiges de la présence humaine dans des régions très variées : les clairières en forêt d'Amazonie (vestiges de poteries), une multitude de gisements en Afrique, correspondant aux périodes néolithique et paléolithique, avec une accumulation énorme d'outils divers (pierres taillées, éclats), dans la vallée du Niari, à Madingou, Boko-Songho, Foati et Brazzaville, etc. L'existence des reliques forestières (bosquets et galeries forestières) ainsi que la présence de savanes plus ou moins jeunes et l'existence des coutumes indigènes prouvent que certaines régions appartenaient à la forêt et que certaines savanes actuelles, extrêmement appauvries, étaient cultivées jadis.

En résumé, on peut dire que les origines des savanes sont complexes, certaines étant dues au cataclysme glaciaire survenu il y a 20 000 ans (cause climatique), d'autres à l'action édaphique, d'autres, enfin, à l'action désastreuse de l'homme, en particulier à ses feux de brousse, en l'absence desquels la forêt pourrait se régénérer dans des régions à sol et climat propices. Par contre, les cultures intensives permettent l'établissement de savanes secondaires avec la formation d'une cuirasse ferrugineuse et la disparition définitive de la forêt.

La végétation des savanes

— *Strate herbacée*

La strate herbacée est caractérisée par quelques espèces de Graminées : *Loudetia, Andropogon, Hyparrhenia, Pennisetum, Imperata, Aristida,* etc., de hauteur variable, « l'herbe à éléphant » *Pennisetum purpureum* et *Imperata cylindrica* atteignant plusieurs mètres de haut. Dans les régions où la saison sèche est très longue, les herbes courtes et plus ou moins espacées donnent une physionomie de steppes, appelées pseudo-steppes, ou steppes soudano-sahéliennes, ou steppes sahéliennes à épineux. Les Graminées des savanes sont caractérisées par une xéromorphie plus ou moins prononcée, un appareil végétatif en touffes denses, un enracinement profond et d'abondantes semences. On peut citer comme exemples certaines savanes du Congo (Koechlin, 1961) à formations herbeuses variées. Un premier type comprend des Graminées cespiteuses à feuilles basses et des chaumes peu feuillés atteignant un mètre *(Trachypogon tholloni, Loudetia demeusii)*, poussant sur les sols sableux, comportant un cycle végétatif court ; ces Graminées sont brûlées après la floraison et remplacées par des Dicotylédones à belle floraison en saison sèche, mêlées à d'autres Graminées. Un deuxième type est caractérisé, par contre, par une longue période végétative, le tapis étant constitué par de robustes et grandes Graminées *(Hyparrhenia)* dépassant deux mètres de haut et portant des petites feuilles tout le long des chaumes, formant une strate supérieure très dense, difficilement pénétrable, et comportant un cycle végétatif très long durant toute la saison des pluies ; avec la saison sèche, après les feux, le sol reste nu sans aucune plante.

Pour les savanes de Côte-d'Ivoire, on peut citer deux types différents. Le premier, caractérisé par la Graminée *Imperata cylindrica,* formant une strate supérieure très élevée, présente très peu de plantes accessoires qui peuvent lutter avec cette plante, qui possède un pouvoir de bouturage extrêmement étendu ; de vastes étendues déboisées ont ainsi été envahies par cette herbe, introduite dans certaines régions par l'homme, qui l'a utilisée comme clôture de protection contre les animaux et pour la confection des toits de chaume ; les champs envahis par cette herbe sont abandonnés définitivement par les paysans, qui ne savent pas lutter contre sa multiplication. Pour le deuxième type, citons *Pennisetum purpureum,* Graminée ne gênant pas le paysan, qui continue à exploiter le terrain pour les cultures vivrières et l'élevage.

— *Strate arbustive et arborescente*

La flore ligneuse des savanes est composée d'espèces à caractères biologiques et morphologiques spécifiques de ces milieux. L'enracinement est très profond et solide ; les troncs sont courts, de forme irrégulière, plus ou moins tourmentés ; les dômes sont en couronnes étalées avec de nombreuses branches horizontales ; l'écorce, très souvent épaisse, comporte du liège qui protège la couche génératrice contre l'action des feux. Les arbustes comprennent quelques espèces caractéristiques de ces régions : *Maytenus senegalensis, Grewia villosa, Parinari macrophylla, Acacia atexantha, Calatropis,* et des arbres dont de nombreuses Légumineuses : *Acacia, Albizzia, Celtis,* des Combrétacées (surtout nombreuses dans les régions sèches), ainsi que d'autres arbres, comme les parkias, *Anacardium occidentale, Cordyla africana, Balanites aegyptica,* des manguiers dans des régions humides, des baobabs, de nombreux palmiers dont les rôniers ; certains arbres sont caractéristiques des savanes humides et des forêts claires, tels que les *Isoberlinia, Bachystegia* et *Julbernardia*.

Les arbustes et arbres des savanes sont, en général, caducifoliés, la chute des feuilles se produisant au début de la saison sèche, mais il existe des arbres qui gardent leurs feuilles pendant toute la saison sèche et peuvent servir d'abris pour les Insectes et les Oiseaux : *Acacia (Faidherbia) albida*.

En s'approchant de la forêt dense, les savanes prennent des aspects variés (savanes forestières et forêts sèches) ; le long des rivières et des ruisseaux, il existe des bandes forestières, d'une dizaine de mètres de large ou plus, qui prolongent la forêt et servent d'abris, en particulier pour la reproduction, à de nombreux Insectes, Reptiles, Amphibiens, Oiseaux et Mammifères.

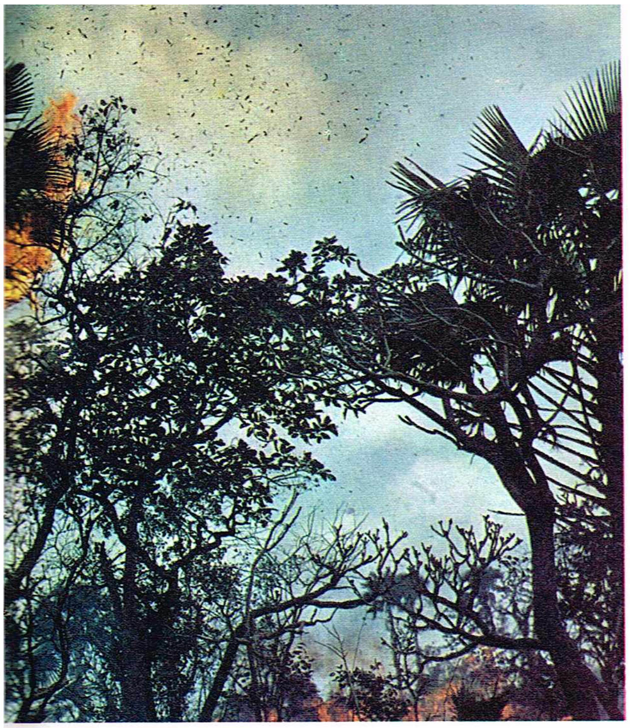

◀ *L'utilisation intensive des feux de brousse exerce deux types d'actions, d'une part une action sur le sol, et d'autre part une action sur les végétaux; ici, un feu allumé sur des Palmiers rôniers, à Lamto, en Côte-d'Ivoire.*

L'action des feux de brousse sur la végétation

Chaque année, en saison sèche, de violents feux de brousse détruisent les parties aériennes de la végétation herbacée et endommagent les arbres; ces derniers, plus ou moins détériorés, deviennent noueux et difformes. Ces feux de brousse ont fait disparaître une grande partie de la végétation primitive, sélectionnant les espèces qui résistent aux feux. Les feux de brousse se pratiquent dans des régions qui présentent une saison sèche plus ou moins longue : la sécheresse facilite la combustion des plantes, tandis qu'en forêt le feu ne peut s'étendre que si l'humidité relative des matières inflammables est inférieure à 60 %.

L'incinération des savanes et des forêts claires est déjà signalée dans la Bible et remonterait à près de 600 ans av. J.-C. Ces feux sont cités par Virgile, le navigateur carthaginois Hannon (vers 500 av. J.-C.) et Vasco de Gama (1497). Les causes de ces feux peuvent être soit naturelles (foudre), soit provoquées par l'homme (volontairement ou involontairement). L'homme allume les feux pour des buts agricoles. Ainsi, le cultivateur arabe et le paysan africain les pratiquent pour l'élimination de la broussaille et la fertilisation du sol par les cendres, action de courte durée. Les feux de brousse sont allumés également par les éleveurs de bétail en Afrique et à Madagascar pour permettre une poussée précoce de l'herbe sur les sols couverts de cendre. Il en est de même pour la pratique de la chasse du gros gibier qui ne peut être poursuivie qu'en terrain découvert. Ces feux sont pratiqués aussi pour l'apiculture et la protection contre les animaux venimeux et hématophages (serpents, moustiques, etc.).

La rapidité de propagation de ces feux de brousse atteint, en savane herbeuse, une vitesse de 100 à 300 m/h avec un vent favorable. Les conséquences des feux avec un vent fort sont moins graves que celles des feux à cheminement lent, ces derniers provoquant des températures supérieures et de plus longue durée. L'intensité la plus forte est atteinte aux heures les plus chaudes, tandis que la rosée nocturne est capable d'éteindre les feux courants.

L'action des feux de brousse s'exerce, d'une part, directement sur le sol proprement dit, et d'autre part, sur les végétaux. La température de ces feux peut varier suivant la hauteur des herbes : 100 à 200 °C pour des herbes hautes de 40 à 60 cm, 700 °C pour des herbes atteignant 1 m et 800 °C pour les herbes de 1,50 m; cette température élevée peut détruire l'humus superficiel, modifier la vie microbienne et la résistance à l'érosion. En outre, l'action de la température diminue la densité fixatrice d'azote, notamment celle des aérobies. Il se produit également une réduction spectaculaire de l'ammonification. Ces phénomènes sont accompagnés par l'accroissement de la nitrification et l'augmentation parallèle du pH, dus à l'apport des cendres; cette richesse explosive des germes nitreux permet une libération brusque de l'azote nitrique, très assimilable, et l'accroissement temporaire de la fertilité du sol.

On observe une modification du faciès végétal par suite du cycle des incendies répétés. Il se produit une évolution de la flore vers un faciès pyrorésistant ou pyrotolérant avec une strate dominante d'espèces rhizomateuses et cespiteuses se substituant au tapis herbacé primitif. De nombreuses graines perdent leur faculté germinative, les rhizomes n'étant pas détruits. Certaines plantes herbacées échappent totalement à la destruction par le feu du fait que leur partie inférieure reste verte en saison sèche : c'est le cas de certaines Graminées *(Brachara)* et Vitacées *(Cissus)* qui présentent après le passage du feu des îlots verts. Certaines Graminées cespiteuses possèdent des pousses qui demeurent intactes après le feu : les graines sont protégées par la touffe, dont la température intérieure est très basse par rapport à celle de l'air. Des espèces non cespiteuses sont calcinées, mais les organes souterrains ou au ras du sol sont épargnés. Les espèces annuelles sont entièrement calcinées, sauf les graines si elles ont été formées avant le passage du feu. Les plantes suffrutescentes, plantes vivaces à organes de persistance ou de réserve, acquièrent des types biologiques très particuliers comportant des souches souterraines extrêmement développées. Quant aux plantes ligneuses, elles sont relativement peu affectées par le feu; cependant leurs troncs peuvent présenter des blessures difficiles à guérir et qui se prêtent aux attaques intensifiées des Insectes.

En conséquence, les feux de brousse provoquent un appauvrissement spectaculaire du sol, avec une érosion éolienne très poussée; la diminution de l'humus provoque une baisse du pouvoir de rétention de l'eau par le sol. Les feux répétés conduisent à une colonisation du terrain par des Graminées rhizomateuses et cespiteuses, dont la densité décroît annuellement, pour aboutir à un faciès végétal en touffes, formant un microrelief qui favorise l'érosion.

La faune des savanes

La faune des savanes, malgré la diversité des régions biogéographiques, présente des caractères faunistiques (groupements) et éthologiques particuliers, très différents de ceux de la forêt tropicale.

Les savanes les plus typiques se trouvent en Afrique équatoriale, occidentale et orientale. Le caractère essentiel de cette faune est dû à l'importance de la strate herbacée, plus ou moins élevée, dont la production en saison des pluies permet une vie intense à des espèces herbivores et granivores pour leur alimentation, l'utilisation des matériaux (chaumes) par certains Oiseaux pour leurs nids ainsi que par les hommes pour les toits de leurs cases. La richesse en strate herbacée, avec des arbustes et des arbres dispersés, permet l'existence de nombreuses espèces d'Insectes à forte population ayant un pouvoir de dispersion élevé : termites, Acridiens migrateurs, Coléoptères, Hyménoptères, Diptères, ainsi qu'une forte densité d'animaux herbivores, de taille importante, effectuant de nombreux déplacements, soit en petits groupes, soit en troupeaux : rhinocéros, hippopotames, éléphants, buffles, bubales, antilopes, élands de Derby, gazelles,

▼ *La forte densité des animaux herbivores, ici des impalas* **(Aepyceros melampus)** *dans une savane arborée, conditionne l'existence de nombreux carnivores d'une grande diversité.*

E. Hosking

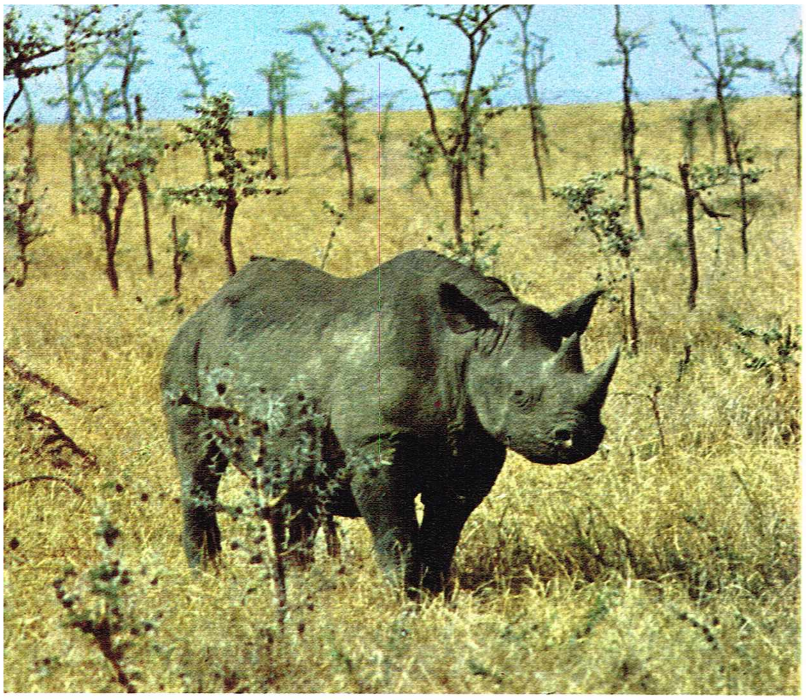

E. Hosking

Archives P 2

▲ *Les lions, qui sont les plus importants pour l'équilibre écologique, s'attaquent à de jeunes hippopotames à gauche,* **Diceros bicornis,** *et à de jeunes éléphants* **(Loxodonta africana),** *à droite, animaux typiques des savanes arborées ouvertes.*

hippotragues, gnous, zèbres, girafes, etc. Le réseau hydrographique, où les crues et les décrues sont importantes, crée d'immenses zones inondées, propices à la vie des Poissons et à leur reproduction dans la strate végétale herbacée, riche en graines et Insectes, constituant un biotope analogue à celui des rizières. La richesse en graines, Insectes et Poissons (aux différents stades de développement) entraîne l'implantation de Poissons carnivores ainsi que de nombreux Oiseaux à régimes variés (granivores, insectivores, piscivores et rapaces).

L'abondance de Mammifères herbivores de toutes les tailles entraîne l'existence de nombreux Carnivores à grande diversité : genettes, civettes, servals, bandes de lycaons (cynhyènes), chacals, lions, léopards de savane, hyènes, etc. Ces Carnivores s'attaquent, suivant leur taille, à des proies très différentes ou se contentent de manger les restes des cadavres. Les lions, qui sont les plus importants pour l'équilibre écologique, s'attaquent à des proies variées : phacochères, gnous, etc., et aux jeunes hippopotames, éléphants, etc. ; les léopards chassent des proies de taille plus petite ; les lycaons, en bandes, s'attaquent aux zèbres, phacochères, antilopes, Oiseaux et petits Rongeurs ; les chacals chassent les Oiseaux terrestres (Gallinacés) et les Rongeurs, etc.

Les Carnivores sont soit diurnes (lycaons), soit crépusculaires ou nocturnes. Certaines espèces d'herbivores (zèbres, gnous, etc.) ont plusieurs prédateurs, mais leur taux de reproduction élevé permet de faire face à la « pression de prédation ». Dans beaucoup de régions, en dehors des réserves, l'homme représente le plus grand destructeur du gibier herbivore (éléphants, antilopes, etc.), qu'il tue soit pour se nourrir, soit pour les trophées de chasse, détruisant souvent l'équilibre écologique et rendant des régions immenses vides de gros gibier.

La faune terrestre des savanes est caractérisée par l'existence des animaux à terriers, comme les pangolins et les oryctéropes. Les pangolins vivent parmi les blocs rocheux ou dans des régions buissonneuses, se nourrissant de termites, de fourmis et parfois d'autres Insectes. Les oryctéropes passent la journée dans leurs terriers, qui comportent un vaste réseau de galeries, se nourrissent la nuit de fourmis et de termites dont ils démolissent les termitières, et parcourent de grandes distances. Ces animaux possèdent de nombreux Insectes parasites, hématophages ou qui sont à l'origine des myases. Les terriers abandonnés servent de refuge à de nombreux animaux : des serpents, des chauves-souris, des chouettes, et quantité d'Insectes, représentant ainsi un abri écologique très important.

La faune des Rongeurs comporte des lièvres, des écureuils terrestres à vie partiellement souterraine, caractéristique des savanes (rats palmistes), et d'autres écureuils dont les *Funisciures*. Les rats sont nombreux (rat de Gambie) ; les aulacodes sont bien représentés par les *Thryonomys ;* les porcs-épics vivent dans des terriers et sont végétariens (racines, bulbes, etc.) ; les souris sont nombreuses et à nourriture variée. Les Insectivores sont très bien représentés en savane par des hérissons, des musaraignes, des tanrecs (Madagascar) se nourrissant d'Insectes terrestres.

La faune des arbres comprend de nombreuses chauves-souris : des Microchiroptères insectivores et des Mégachiroptères frugivores, ces derniers effectuant des déplacements crépusculaires importants. Les Primates comportent des espèces localisées aux arbres et d'autres surtout au sol.

Pour la faune arboricole des savanes, citons les Lémuriens (galagos), les Simiens, qui comprennent de rares colobes, *Colobus polycomos,* vivant dans des galeries forestières, et quelques cercopithèques : le malbrouk, *Cercopithecus aethiops, Cynosurus* qui vit en bandes en lisière forestière.

Pour les singes du sol, citons le singe rouge ou patas *(Erythrocebus patas)* qui vit en bandes parfois importantes dans des rochers. Il faut également citer les babouins surtout terrestres, très caractéristiques des savanes : le babouin de Guinée, qui vit dans les régions rocailleuses, le babouin Doguera, le babouin jaune et le chacma. Les babouins vivent en bandes de 50 à 200 individus, en fonction des possibilités de nourriture, et possèdent une organisation sociale et hiérarchique remarquable, caractéristique des animaux de savane. Leur régime alimentaire est très varié et comprend surtout de l'herbe, des jeunes pousses, des graines, des boutons de fleurs, des fruits, des gousses, de la sève, mais ils ne mangent jamais de feuilles, et déterrent en saison sèche des rhizomes et tubercules ; ces singes complètent leur nourriture d'origine végétale par une alimentation animale constituée notamment d'Acridiens, de chenilles, de petits Oiseaux, etc.

▼ *Pour la faune arboricole des savanes, citons le malbrouk,* **Cercopithecus aethiops ;** *ici une femelle et son petit.*

A. Margiocco

A. Visage - Jacana

◀ ***Le problème de l'eau est capital en savane; ainsi les Oiseaux granivores, tels les mange-mil (Quelea), effectuent, par bandes, de longs déplacements journaliers à sa recherche. Ici, une nuée de mange-mil au Cameroun.***

Le problème de l'eau est capital en savane; nous avons vu qu'il est d'une importance primordiale pour les Oiseaux granivores (le mange-mil, *Quelea*), qui effectuent, par bandes, de longs déplacements journaliers à sa recherche; il en est de même pour les Mammifères qui sont obligés de compléter leur régime herbivore soit en s'abreuvant, soit en consommant des fruits, des tiges et des feuilles succulents (raquettes des Cactées) et même des tiges épineuses, soit encore en déterrant des rhizomes et des tubercules. Ainsi, certaines plantes jouent un rôle en tant que source d'eau, comme les fruits de *Citrullus coffer* (Cucurbitacée) consommés par les antilopes. Les espèces qui ont besoin d'eau en permanence vivent près des marigots, des rivières, des mares, etc. : antilopes, rhinocéros et bœufs domestiques. Au début de la saison sèche, après les feux de brousse, on assiste à de nombreux déplacements et migrations des bœufs domestiques d'une part, et des animaux sauvages d'autre part, vers des régions où ils peuvent trouver de l'eau; il en est ainsi des éléphants, antilopes, etc. Les migrations les plus spectaculaires étaient effectuées par les gazelles *(Antidorcas euchore)*, qui quittaient les vastes plaines désertiques de la Cafrerie de l'Afrique du Sud où elles séjournaient pendant la saison des pluies pour émigrer en saison sèche vers le sud jusqu'aux pâturages des montagnes et qui revenaient annuellement à leur point de départ après avoir parcouru des milliers de kilomètres. Tous les herbivores migrateurs sont suivis par des animaux prédateurs : lions, léopards, chacals, hyènes, et vautours.

La biologie des Insectes et de certains Oiseaux reflète d'une façon très spécifique la vie dans les savanes. Cette vie est caractérisée, en effet, par des phases de reproduction saisonnières très marquées, une organisation sociale qui comporte des populations très importantes pour certaines espèces, et des migrations locales ou de longue portée. Citons comme exemple les nids des termites, très caractéristiques des savanes, qui ont une grande importance écologique. Certains d'entre eux, comme les *Cubitermes* (humivores), construisent des termitières cartonnières, en forme de grands champignons, qui parsèment d'une façon très dense les savanes sur d'énormes étendues. D'autres, les *Bellicositermes natalensis*, construisent d'énormes termitières, appelées « termitières-cathédrales », comportant des petits orifices pour l'aération qui permettent une véritable climatisation de l'habitacle; ils installent en outre sur le sol des galeries couvertes à l'intérieur desquelles les ouvriers moissonnent pratiquement sans venir à l'air libre. Certains termites construisent de véritables mamelons qui peuvent servir ultérieurement à l'implantation d'une végétation spéciale et de cases pour les hommes. Dans les savanes, les termites exercent une action très profonde sur le sol; ils assurent la remontée des couches argilo-sableuses plus fertiles et exercent une action sur l'enrichissement bactériologique du sol; par ailleurs, ils favorisent les remontées saisonnières des eaux des nappes aquifères et provoquent la remontée artésienne de l'eau par leurs galeries.

Une autre population d'Insectes des savanes présente une grande importance par sa biomasse et les dégâts qu'elle cause aux végétaux : il s'agit des Orthoptères, ou Acridiens migrateurs, connus sous le terme de « sauterelles », qui forment des essaims impressionnants composés en particulier par le criquet-pèlerin et le criquet migrateur. Ces criquets connaissent une phase solitaire sédentaire et, d'autre part, une phase grégaire migratrice se produisant à partir de certaines régions où les pontes sont extrêmement nombreuses, larves et adultes cheminant d'une façon organisée et dévastant tout sur leur passage. Le vol des adultes, très connu par les Africains, peut s'effectuer sur des distances immenses; il présente une importance écologique fondamentale, par ses dégâts, d'une part, en tant que source alimentaire pour de nombreux animaux d'autre part : Reptiles, Oiseaux insectivores et rapaces (qui suivent ces migrations), certains singes et l'homme lui-même.

Les Hyménoptères les plus caractéristiques des savanes sont les mélipones (Apidae), qui n'ont pas d'aiguillon et qui forment parfois des populations immenses dans certaines régions, venant se coller par centaines sur les yeux des hommes et des animaux, créant des barrières écologiques pour la traversée de ces régions. Parmi les Diptères Nématocères, citons les simulies, petits moucherons piqueurs qui se reproduisent dans l'eau courante et dont les femelles, très nombreuses, jouent un rôle capital en écologie médicale : l'espèce *Simulium damnosum* d'Afrique est le vecteur de l'onchocercose, filariose provoquant des tumeurs et nodosités qui sont à l'origine de la cécité dans de vastes régions (Mali, Haute-Volta, Niger, Côte-d'Ivoire, Tchad). Parmi les moustiques proprement dits, citons les anophèles, vecteurs du paludisme, qui se développent dans les eaux stagnantes ou courantes, et les *Mansonia* et *Coquilletidia*, dont les larves se fixent par leur siphon aux racines de différentes plantes *(Pistia* et *Eichhornia)*, prenant l'air directement dans les lacunes aérifères. Les femelles de ces moustiques attaquent en masse, jour et nuit, animaux et hommes, et peuvent leur transmettre certaines maladies (virus et filarioses). En ce qui concerne les mouches, les glossines, ou mouches tsé-tsé, sont représentées en savane arborée et dans les clairières forestières par *G. morsitans* dans l'Ouest et le Centre africains, tandis que dans les savanes plus sèches des régions orientales cette espèce est remplacée par *G. submorsitans;* dans les régions plus septentrionales (Tchad), on trouve *G. tachinoides* et *G. longipalpalis*. Toutes ces mouches se nourrissent sur des animaux variés, des Reptiles aux Mammifères, le choix des hôtes étant différent suivant les espèces. Les tsé-tsé sont vectrices de nombreuses trypanosomiases, dont la trypanosomiase humaine (maladie du sommeil) causée dans l'Ouest par *Trypanosoma gambiense*, très adaptée à l'homme, et dans la région orientale par la forme très voisine : *T. rhodesiense*, cette dernière ayant pour réservoirs de virus de nombreuses antilopes. Rappelons que les trypanosomiases qui touchent les Bovidés empêchent les élevages de ces derniers dans les savanes plus ou moins humides.

Le nombre des Oiseaux en savane, relativement élevé en population mais plus réduit en espèces qu'en forêt, présente de grandes variations saisonnières, parfois avec

J. Robert - Jacana

▲ ***En savane, il y a beaucoup d'Oiseaux; ils appartiennent à des espèces moins nombreuses qu'en forêt; ici un pique-bœuf,* Buphagus africanus, *perché sur un Ruminant.***

une prédominance très nette pour certaines espèces. Les Oiseaux, en particulier ceux qui sont liés à la strate herbacée et au milieu aquatique, sont représentés par des groupes très variés. On remarque la présence d'Oiseaux coureurs, comme les autruches, d'autres vivant surtout sur le sol, comme les grands calaos, d'Oiseaux aquatiques, comme les hérons, marabouts, cigognes, spatules, ibis, cormorans africains, oiseaux-serpents, ou anhingas, pélicans gris et canards. Parmi les Charadriiformes, citons les tringas, ou chevaliers; pour les Ralliformes, les grues, outardes, râles, poules d'eau; pour les Galliformes, les gangas, pintades, francolins et cailles; pour les Colombiformes, les pigeons; pour les Falconiformes, les aigles, vautours, chouettes; pour les Caprimulgiformes, les engoulevents; pour les Coraciadiformes, les calaos, rolliers, martins-pêcheurs, guêpiers; pour les Passériformes, les pique-bœufs, tisserins, mange-mil, gobe-mouches, bulbuls, souïmangas, euplectes, veuves, estrildes et bengalis.

Les régimes alimentaires de ces Oiseaux sont très variés. On distingue :

— les *phytophages,* qui comportent un nombre restreint d'Oiseaux frugivores;

— les *granivores,* qui sont très nombreux, aussi bien en savane sèche qu'en région inondée; certains de ces Oiseaux, grâce à la légèreté de leur corps, peuvent prélever les graines en se posant directement sur les Graminées; mais les granivores, en général, ont de grands besoins d'eau et doivent effectuer pour les satisfaire de longs déplacements journaliers;

— les *piscivores,* qui sont attirés, en saison sèche, le long des fleuves et dans des régions inondées peu profondes qui comportent Poissons, Mollusques, Crustacés, Insectes aquatiques, etc.;

— les *prédateurs,* ou rapaces, qui ont un régime soit carnivore (Oiseaux, Rongeurs, etc.), soit piscivore ou essentiellement insectivore; au moment des feux de brousse, on voit de nombreux milans chassant les Rongeurs.

Le régime alimentaire dominant des Oiseaux de savane est mixte (granivore et insectivore); ce régime subit de grandes variations en fonction des saisons sèche et humide, obligeant les Oiseaux à rechercher des sources alimentaires accrues au moment de la reproduction, ce qui entraîne parfois de longues migrations. Les périodes de reproduction sont ainsi étroitement liées aux successions des biomasses spécifiques, elles-mêmes tributaires soit de la saison des pluies, soit des inondations, crues et décrues, soit des fructifications, soit de la formation des graines et de leur persistance, soit enfin de l'abondance des Insectes, en particulier des Acridiens. Il faut signaler que les pontes des Oiseaux de savanes sont plus réduites dans le temps que celles des Oiseaux de forêt, mais très prolifiques : elles permettent aux populations de se maintenir en nombre très important malgré un taux de mortalité très élevé. Remarquons aussi que les migrations des espèces de savanes sont très importantes, contrairement à celles des forêts, et que les savanes tropicales constituent des lieux d'hivernage pour de nombreux Oiseaux paléarctiques qui émigrent en hiver, comme les canards, Échassiers et Passereaux.

Comme celle de la forêt tropicale, l'étude des écosystèmes formés par les savanes tropicales est encore incomplète; là aussi, les renseignements sont meilleurs pour les producteurs primaires que pour les échelons trophiques plus élevés. La productivité primaire nette des herbes de la savane comprend la partie vivante de celle-ci, maximale à la période de repousse en dehors de la saison sèche, et une grande masse de feuilles mortes formant un épais tapis de litière. Le feu est un élément important pour la quantité et la qualité de l'herbage produit. Une équipe étudie, depuis plusieurs années, la savane de la région de Lamto en Côte-d'Ivoire (Lamotte et coll.); pour une savane à *Loudetia,* la biomasse est estimée à 20 à 30 t/ha de matière sèche avec une productivité primaire nette de 18 t/ha/an; les valeurs sont un peu plus élevées pour la savane à *Hyparrhenia* (B = 25-35 t/ha; PN = 24 t/ha/an). Dans le cas de savanes arbustives ou arborées, la biomasse est plus élevée : elle est de l'ordre de 70 t/ha et de 100 t/ha. La strate herbacée prend un peu moins d'importance et ne représente plus que 15 t/ha ou même moins. Au Ghana, Nye (1959) a obtenu des valeurs plus faibles en ce qui concerne les biomasses végétales : 13,2 t/ha pour une savane à *Imperata*; 18,6 t/ha pour une savane à *Andropogon;* dans une savane avec arbres, 14,7 t/ha pour la strate herbacée et 58,2 t/ha pour la strate haute.

Les herbes des savanes sont riches en cellulose et en lignine. Elles contiennent 50 à 60 % d'eau mais n'ont qu'une très faible teneur en azote et en phosphore : c'est pourquoi leur valeur nutritionnelle pour les animaux herbivores n'est pas excellente. L'action du feu, si elle est bien contrôlée, peut accroître la teneur en azote et produire une herbe plus digestible. Les feuilles des arbustes sont généralement de meilleure qualité nutritive.

Au niveau de l'utilisation par les herbivores, le fonctionnement de l'écosystème savane est caractérisé par des rotations entre divers sous-systèmes des grandes espèces que constituent les Ongulés. Un exemple a été étudié en détail dans le parc de Serengeti en Tanzanie (23 000 km^2). Buffles, zèbres, gazelles parcourent, suivant les saisons, une succession de pâturages permettant une rotation d'utilisation favorable à leur alimentation et à la reconstitution des milieux pâturés. Parmi les producteurs secondaires (herbivores), on s'est surtout intéressé aux Ongulés, et on dispose d'assez nombreuses estimations de densité et de biomasse pour plusieurs espèces; il ne faut cependant pas négliger d'autres catégories, comme celles des petits Mammifères Rongeurs et des Insectes, qui ont probablement un rôle tout aussi important à ce niveau trophique.

Dans le cadre des grands parcs et des réserves, une attention plus grande est portée aux grands animaux dont la « charge », c'est-à-dire la densité, ne doit pas dépasser certaines limites sous peine d'être destructrice du milieu : par exemple, les éléphants sont très dévastateurs car ils abattent des arbres dont le feuillage leur sert de nourriture. Si la régulation des divers troupeaux par le jeu des prédateurs (lions, guépards) n'est pas suffisante, l'homme intervient par des chasses de sélection, qui permettent en outre d'éliminer les individus malades ou tarés, ou encore appartenant à une certaine classe d'âge. Certains auteurs font remarquer que la productivité de certaines antilopes est supérieure à celle obtenue avec des bovins maintenus en élevage et que, de plus, la qualité des carcasses (proportion de viande maigre) est bien meilleure chez les premières; ils suggèrent d'agir directement sur la faune sauvage par prélèvement contrôlé : c'est là un exemple d'utilisation rationnelle possible des ressources naturelles.

J. Valentin - Explorer

▲ *En Amérique du Sud — en Argentine notamment — les steppes couvrent de grandes étendues. Ici, des chevaux dans une pampa de Patagonie.*

Les steppes

Les steppes sont définies par une végétation herbeuse (Graminées) qui couvre le sol en tapis discontinu, plus ou moins associée à une végétation arbustive et arborée clairsemée. Les Graminées de type xéromorphe possèdent des parties aériennes peu développées par rapport aux racines, profondes et nombreuses. Les plantes qui y sont associées sont variées. En Eurasie, les Graminées présentent deux périodes de repos : l'hiver et l'été (sécheresse), tandis que dans les régions tropicales (Sahel africain), elles n'ont qu'une seule période de repos, correspondant à la sécheresse prolongée.

Les steppes existent dans des régions climatiques très différentes : sous des climats continentaux (Eurasie), à hiver rude et à été aride, ou bien dans des régions tropicales subdésertiques, comme les steppes sahéliennes. En Eurasie, elles s'échelonnent, d'une façon plus ou moins continue, avec d'autres formations végétales, de l'Ukraine, la Kazakhie, la Turkménie, l'Ouzbékie jusqu'à la Mongolie orientale, régions caractérisées par une sécheresse saisonnière, une faible pluviosité annuelle (25 à 50 cm) et surtout un vent violent et fréquent qui favorise la sécheresse et diminue l'humidité. En Amérique du Nord, les steppes couvrent une bande très large, des montagnes Rocheuses jusqu'au lac Michigan, d'ouest en est, et s'échelonnent du nord (Canada) jusqu'au golfe du Mexique; les plus classiques sont celles du Texas, désignées sous le nom de « prairies ». En Amérique du Sud, les steppes couvrent de grandes étendues : on les appelle les « pampas d'Argentine ».

Parmi les steppes tropicales, citons celles du Sahel, qui s'étendent environ entre le 14^{e} et le 16^{e} degré de latitude nord, au sud du Sahara, s'allongeant d'est en ouest, du Sénégal et du Mali jusqu'à la partie septentrionale de la boucle du Niger, le nord du Tchad et le Soudan. Toutes les steppes présentent une vocation pastorale ou bien, quand le sol s'y prête, sont cultivées de façon intensive, comme les terres noires de l'Ukraine (tchernoziom).

Les sols des steppes eurasiennes et américaines comportent une grande richesse de matières fertiles à humus formant un complexe avec l'argile, structure perméable et bien aérée. Cette richesse est due aux Graminées dont les racines, pénétrant dans le sol à des profondeurs variées suivant les espèces, donnent partiellement chaque année beaucoup de matières décomposées riches en éléments minéraux et en azote. La répartition de l'humus est bien assurée en profondeur grâce à la richesse de la faune des Rongeurs qui mènent une vie souterraine importante et creusent sans cesse le sol, ainsi que par celle des Vers de terre, qui rendent le sol plus ou moins homogène (sol isohumique). Les conditions climatiques exercent une action importante sur le sol, par la densité des Graminées, et sur les substances solubles (calcaire), en particulier sur les déplacements en profondeur de ces éléments; citons les terres noires de l'Ukraine, dont la couche humifère atteint jusqu'à 1,50 m avec un horizon sombre, ayant à sa base des concrétions calcaires; dans les zones plus humides, continuées par des formations forestières, le tchernoziom présente une couche humifère moins épaisse et un début de migration de l'argile et du fer sous l'action d'une saturation incomplète des acides humiques qui tendent à se disperser; c'est ce que l'on appelle le « tchernoziom septentrional lessivé ».

Le domaine sahélien est caractérisé par des sols isohumiques bruns et brun-rouge subarides, très souvent sablonneux, correspondant à des régions à pluviométrie très limitée (environ 500 mm).

Végétation des steppes

La végétation des steppes eurasiennes et américaines est caractérisée par des Graminées vivaces xérophiles des genres *Stipa, Koeleria, Festuca, Andropogon,* etc., à racines profondes leur permettant de rechercher l'eau de 50 cm à 2 m de profondeur; l'appareil aérien de ces plantes peut être relativement bas dans des régions sèches mais, par contre, très élevé dans les régions humides, comme les « prairies » à grandes herbes des États-Unis, l'*Andropogon* atteignant 2 m dans certaines régions. L'herbe la plus caractéristique des régions sèches est représentée par *Buchloa dactyloides* et *Bouteloua gracilis* (« l'herbe à bisons »). La compétition des espèces végétales de ces régions est très réduite en raison des différents niveaux d'enracinement d'une part, et des différents cycles saisonniers d'autre part : la croissance de certaines espèces, très précoce, s'effectue au printemps et cesse au début de l'été, tandis que la croissance des autres espèces, beaucoup plus tardive, atteint son maximum en fin d'été ou même en automne. Remarquons que la productivité des steppes est liée étroitement aux variations climatiques annuelles : les espèces les plus importantes à grand besoin hydrique se développent mal pendant les années à faible pluviométrie, lesquelles sont, au contraire, favorables aux espèces plus xérophiles.

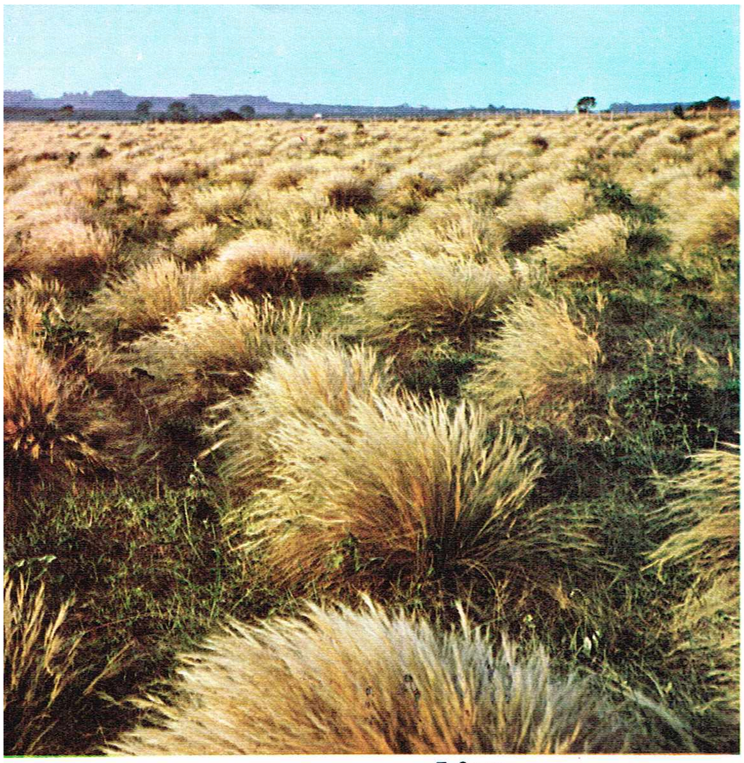

T. Sacco

SEF

▲ *Les steppes sont constituées par une végétation herbeuse discontinue; à gauche, une « prairie » à* **Aristida pallens** *dans l'État de Sao Paulo, au Brésil; à droite, une partie de l'immense steppe Kirghise : la végétation singulièrement monotone est constituée presque exclusivement de Graminées cespiteuses* (**Stipa kirghisorum, S. capillata,** *etc.*) *et de quelques Composées, Légumineuses, Ombellifères, Crucifères, etc.*

Cela explique les grandes variations de productivité pour les céréales et les pâturages, comme dans les régions eurasiennes, où le déficit de production locale nécessite des importations étrangères massives.

La végétation des steppes tropicales est très souvent variée; elle présente des types herbacés, arbustifs, arborés ou à plantes succulentes (plantes grasses), qui peuvent être des Euphorbiacées dans le sud de Madagascar ou des Cactées en Amérique du Sud. Les steppes sahéliennes sont caractérisées par la prédominance des Graminées xéromorphes, les intervalles entre ces herbes étant occupés par des formes biologiques diverses, annuelles, bulbeuses, vivaces, etc. Ces Graminées possèdent un appareil souterrain profond pour absorber l'eau et des feuilles sclérifiées, fortement cutinisées. Les touffes d'herbes présentent une longue période de vie latente en saison sèche; le tapis herbacé devient verdoyant avec les premières pluies, les graines tombées sur le sol ayant résisté aux feux germant d'une façon explosive. Les arbustes, clairsemés et rabougris, présentent un feuillage médiocre, réduit, et sont souvent des épineux. Les arbres des steppes sont en général caducifoliés; ce sont les thérophytes et les chaméphytes qui prédominent, la dissémination des diaspores (graines) se faisant surtout par le vent. Les arbres, surtout des épineux, sont en général de petite taille (8 à 10 m) et résistent bien aux feux. En saison sèche, presque tous les arbres et arbustes sont dépouillés de leurs feuilles, mais une partie des espèces garde son feuillage et peut servir ainsi de nourriture à divers Insectes et animaux ainsi que d'abri à des Oiseaux.

Archivio Longo

▶ *Ce hamster* (**Cricetus cricetus**) *vit dans les prairies steppiques d'Eurasie.*

La flore des steppes sahéliennes est caractérisée par des Graminées des genres *Aristida, Cenchrus, Panicum, Cornulaca*, etc., et des arbres, tels que les acacias, *Capparis, Maerua*. Citons aussi les tamariniers, les caïlcédrats *(Khaya senegalensis)*, les karités, les palmiers doums, les rôniers, les figuiers, ainsi que de nombreuses Euphorbiacées qui ne sont consommées ni par le bétail ni par les Oiseaux en raison de leur latex vénéneux. Rappelons que les baobabs sont bien représentés ainsi que les Combrétacées.

Les feux de brousse du domaine sahélien sont relativement rares et peu importants, du fait du tapis herbacé discontinu et des arbres et arbustes épineux ou succulents qui brûlent mal.

Faune des steppes

La faune des steppes est sujette à de grandes variations saisonnières : ainsi, dans les steppes d'Eurasie, les animaux doivent faire face à un hiver très froid doublé d'un été sec et chaud, tandis que dans le Sahel, ils subissent une longue période de sécheresse chaude; en l'absence d'un couvert arboré, les animaux doivent supporter un ensoleillement intense à la surface du sol ou bien s'en protéger en creusant des terriers ou en se cachant sous des blocs de rochers, etc. Par ailleurs, les ressources alimentaires dépendent des saisons, la productivité en surface étant pratiquement nulle en hiver dans les steppes eurasiennes et faible à la fin de l'été, et relativement limitée dans le temps dans les steppes sahéliennes; c'est pourquoi les animaux sont obligés soit de se constituer des réserves (amassées dans les terriers), soit d'effectuer des déplacements et des migrations plus ou moins importants. Les vents violents, très caractéristiques de toutes les steppes, assèchent l'atmosphère et seuls les animaux présentant des adaptations physiologiques à la sécheresse peuvent survivre. Les grandes variations de température entre le jour et la nuit nécessitent un cycle nycthéméral d'activité développé surtout pendant la nuit, en particulier par les Mammifères, les Oiseaux pouvant supporter des températures beaucoup plus élevées que ceux-ci. Cet ensemble de facteurs détermine des chaînes alimentaires très spécifiques pour les steppes, relativement simples pour les steppes eurasiennes et beaucoup plus complexes pour les steppes sahéliennes, qui présentent une grande diversité animale et un cycle végétal diversifié.

L'abondance des animaux fouisseurs est très caractéristique des steppes. On distingue : d'une part, des Rongeurs vivant parfois la majeure partie de leur vie dans leurs terriers et dont certains entrent en hibernation l'hiver, tandis que d'autres continuent à être actifs, vivant des réserves accumulées, et, d'autre part, des Carnivores qui creusent des terriers ou bien exploitent les terriers creusés par les Rongeurs.

A titre d'exemple, les *steppes euro-caucasiennes*, qui s'étendent de la Hongrie jusqu'aux régions montagneuses d'Altaï (Mongolie), présentent une faune intermédiaire entre celle des forêts et des plaines d'Asie d'une

part et celle des déserts de l'autre, et comptent un noyau d'animaux endémiques, spécifiques, comprenant plusieurs espèces de sousliks (spermophiles), de marmottes, de rats-taupes, le grand touchkantchik (gerboise), le hamster commun, le siciste des steppes et l'antilope saïga. Parmi les Oiseaux les plus caractéristiques, citons la grande caille, l'outarde, la petite grue, le busard pâle, l'aigle des steppes, et, en ce qui concerne les Reptiles, la vipère Orsini et le lézard *Eremias,* multicolore.

Pour les autres Mammifères, fréquents dans ces steppes, on trouve le lièvre, le mulot, et, parmi les Carnivores, le putois clair, le putois marbré *(Vormela peregusna),* l'hermine, la belette, le blaireau, le renard et le loup.

En ce qui concerne les Arthropodes, remarquons que les Scorpions sont fréquents dans certaines régions, ainsi que les Myriapodes.

Les Insectes sont surtout représentés par les Orthoptères, en particulier des grillons, sauterelles et Acridiens migrateurs. Ils comprennent également de nombreux Hyménoptères (guêpes, *Sphex, Styrus, Scolia,* etc.), des Lépidoptères (*Pieris, Satyrus,* etc.), des Diptères, en particulier des *Sarcophaga,* tandis que les Coléoptères sont représentés par des Scarabéides, Buprestides, Cérambycides, Carabides, Dyticides et surtout de très nombreux Ténébrionides *(Blaps, Adesmia, Cyphogenia, Podomala)* ainsi que des Curculionides.

La steppe est un milieu ouvert, comportant, comme le désert, un été long et chaud avec un déficit d'humidité important, ce qui rend le sol sec et non marécageux, et un hiver avec une couche de neige peu profonde mais ferme, due aux fréquents réchauffements et aux vents, les précipitations se situant au printemps et au début de l'été.

Au point de vue écologique, les animaux les plus caractéristiques sont constitués par les troupeaux des grands Ongulés (saïgas, chevaux sauvages, animaux domestiques, tels que les moutons d'espèces particulières et les chameaux). Les Ongulés sauvages ont une bonne vue et une course très rapide. Parmi les Rongeurs, citons les sousliks et les marmottes, ainsi que les ochotones. La population très nombreuse des Rongeurs des steppes garde un certain équilibre grâce, d'une part, aux petits Carnivores (putois) et, d'autre part, à de très nombreux Oiseaux rapaces (busards pâles, crécerelles, aigles, faucons). Les migrations des animaux sont relativement réduites, les Oiseaux étant pratiquement tous sédentaires, tandis que les saïgas présentent des migrations limitées vers le sud, dans des régions où la neige est moins épaisse.

Les chaînes alimentaires sont assez complexes. On peut en signaler les plus importantes :

— Les Graminées et leurs graines sont consommées par les Insectes, les outardes, alouettes, etc., les saïgas, des Rongeurs et Lagomorphes, comme les marmottes, sousliks, lièvres, etc. ;

— Les Insectes (Ténébrionides, Acridiens, etc.) sont consommés par les alouettes, outardes, crécerelles, faucons Kobez, etc. ;

— Les sousliks, les hamsters, etc., sont consommés par les crécerelles, faucons, busards, putois, renards ; les marmottes surtout par les loups, les lièvres surtout par les renards et les loups.

De très nombreux Rongeurs sont nuisibles pour les cultures et provoquent de véritables catastrophes en détruisant des champs de blé. Citons « l'invasion des souris » de 1894-1895 et celle de la région d'Oumansk en 1914. En Sibérie en 1922, les sousliks ont détruit 950 000 hectares, tandis que les campagnols et les mulots ont ravagé 50 000 hectares.

L'occupation du sol des steppes par l'homme, l'introduction des cultures ou de l'élevage ainsi que la chasse intensive (fourrures) ont apporté de profondes modifications au milieu naturel des steppes. La faune endémique a tendance à disparaître ou à diminuer ; citons à cet égard les chevaux tartan, et l'antilope saïga, presque disparus. L'introduction massive de bétail : les moutons Kourdyouk, des brebis à queue grasse, les karakuls (astrakan), les chameaux, etc., a eu pour conséquence un surpâturage avec de graves répercussions sur la végétation locale, en particulier le remplacement des grandes Graminées par des herbes basses et l'apparition d'espèces végétales désertiques qui ont favorisé la multiplication des Rongeurs. Ces modifications ont entraîné également une augmentation des Acridiens, qui ont trouvé à la suite des surpâturages des zones découvertes favorables à leur multiplication. Par ailleurs, à la suite de cultures massives, de nombreux Insectes endémiques disparaissent et font place à de nouvelles populations importantes d'Insectes liés à ces cultures et présentant moins de diversité (*Thrips* du blé, Élatérides, etc.). La chasse aux Carnivores pour la fourrure (en particulier, celle des renards et des putois) a favorisé l'augmentation des populations des Rongeurs.

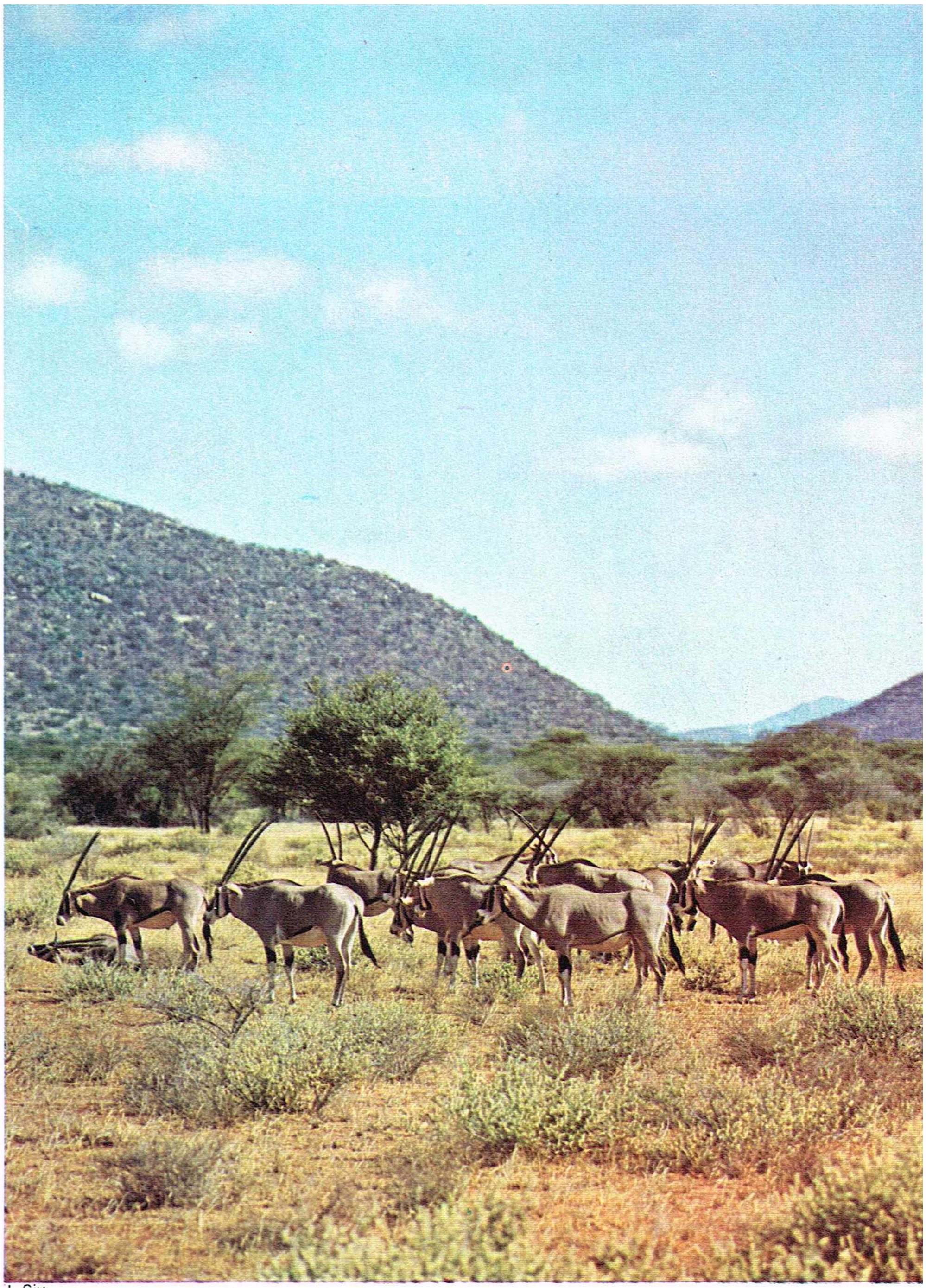

J. Six

▲ ***Un troupeau*** **d'Oryx beisa** ***à Samburu au Kenya.***

Fonctionnement des écosystèmes steppiques

Pour la steppe russe, dans certaines rares parties qui peuvent encore être considérées comme climatiques, la biomasse varie de 10 à 25 t/ha environ, selon les conditions climatiques générales, depuis la prairie-steppe du nord encore fraîche jusqu'à la steppe aride du sud, et selon les années plus ou moins sèches et humides (Basilevitch, 1962). La proportion d'organes souterrains est toujours très forte ; le rapport de l'appareil souterrain aux parties aériennes varie de 2 dans les steppes les plus humides à 10 dans les plus sèches. On estime que la productivité primaire est proportionnelle à la biomasse : importante au niveau des racines, elle est variable d'année en année selon les changements climatiques.

La prairie américaine apparaît également comme un grand biome composé de plusieurs écosystèmes ; certains grands herbivores comme le bison et l'antilope américaine *(Antilocapra americana)* effectuent d'ailleurs d'assez grands déplacements et participent à plusieurs des sous-systèmes présents. On distingue : la haute prairie à *Stipa* dans le Nord ou *Andropogon* dans le Sud, la basse prairie, avec « l'herbe à bisons » *(Bouteloua* et *Buchloe),* et un type intermédiaire, la prairie mixte ; pour la prairie à *Andropogon,* on a calculé une productivité

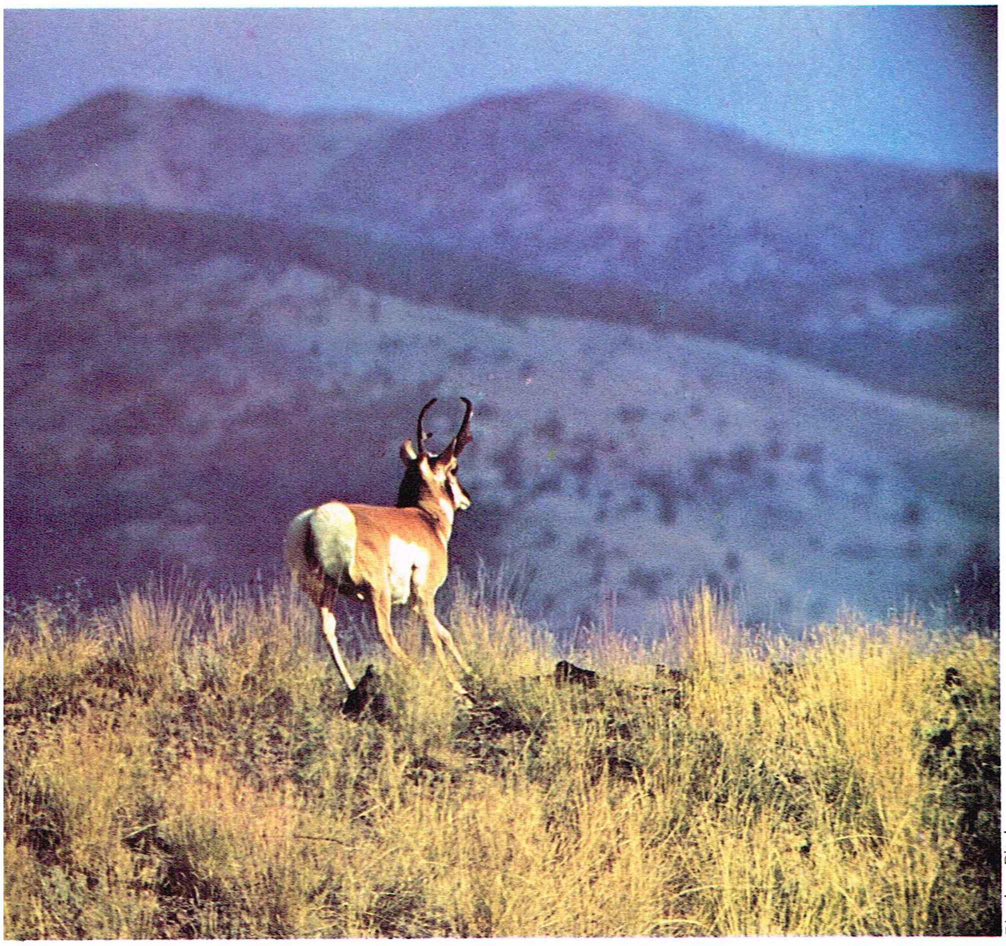

Binois - Pitch

▲ *La prairie américaine apparaît comme un grand biome composé de plusieurs écosystèmes auxquels participent certains grands herbivores comme cet* Antilocapra americana.

▼ *La limite entre le désert sableux du Sahara et la steppe désertique au nord d'Agades.*

T. Poggio

primaire, nette, de 12,8 t/ha/an de matière sèche pour une biomasse de 20 à 30 t/ha, dont près des 3/4 sont constitués d'organes souterrains. L'action du feu, comme en savane tropicale, accroît la production aérienne, qui passe de 5,9 à 12,7 t/ha/an, et favorise surtout la production des inflorescences. En ce qui concerne les autres échelons trophiques, rappelons l'étude très précise de Golley (1959), qui porte sur la chaîne : Graminée *(Poa compressa)* → campagnol → belette, dans une formation basse de la prairie américaine.

Les régions semi-arides, comme celles portant la steppe sahélienne, sont moins bien connues encore. On peut citer, pour l'Afrique du Nord, quelques estimations correspondant à des steppes semi-désertiques. En ce qui concerne l'Algérie, Rodin et Basilevitch (1970) évaluent la productivité moyenne en fourrage à 0,25 t/ha par an; Le Houérou (1970), considérant des pâturages à moutons assez divers dans leur composition en Afrique du Nord, indique des productivités variant de 0,02 t/ha/an à 1 t/ha/an, au maximum. On pourrait espérer, comme cela a été réalisé en Israël, atteindre par un aménagement judicieux une productivité approchant 4 à 5 t/ha/an. Les valeurs maximales possibles dépendent de la pluviosité : ainsi, pour une pluviosité annuelle faible, de 70 à 100 mm, Le Houérou (1972) indique que l'on pourrait atteindre une productivité secondaire du mouton de 4 à 5 kg/ha de poids vif et, dans le cas d'une pluviosité plus élevée (de 300 à 400 mm par an), une productivité de 35 à 50 kg/ha de poids vif. Actuellement, la moyenne pour l'Afrique du Nord serait de un mouton pour 2 ha, soit une productivité secondaire d'environ 8 à 10 kg/an. Là encore, une bonne connaissance du fonctionnement des écosystèmes naturels ou semi-naturels existants s'avère indispensable pour procéder avec discernement à des aménagements.

Les déserts

Les déserts sont des zones arides où la végétation xéromorphe, éparse, est bien adaptée à la sécheresse et présente des caractères morphologiques et physiologiques très particuliers. La faune, pauvre en espèces, parfois très ancienne, sélectionnée par les conditions désertiques, frappe le voyageur. Le biome désertique est caractérisé surtout par la faible couverture végétale et la diminution spectaculaire du réseau hydrographique, qui présente des tronçons désorganisés se tarissant avant d'atteindre la mer et formant des bassins très fermés. La disparition importante de la végétation, l'action des anciens feux de brousse, les érosions par l'eau et le vent violent donnent un aspect spécifique au désert, caractérisé par des dunes, des amas de rochers et des étendues salées.

Le **climat** est caractérisé par de très faibles précipitations, une sécheresse atmosphérique extrême et une température très élevée le jour : certaines pluies s'évaporent avant même de toucher le sol. Toutes les régions désertiques, bien qu'individualisées par l'altitude, la nature du sol, la position géographique, etc., le sont surtout par les différents climats désertiques et leur degré d'aridité. La nébulosité moyenne du ciel est partout très faible, variant entre 0,7 et 3,0; le nombre de jours ne comportant aucun nuage s'élève souvent à 150-200 jours par an; celui des jours à ciel entièrement couvert, tout au plus 1 ou 2 semaines. L'insolation est très violente : au Sahara, la moyenne journalière varie de 7 à 12 h suivant les saisons et le rayonnement du sol peut atteindre la moitié ou les 3/4 de la radiation reçue au sol.

La température au sol est très élevée dans les régions basses, mais peut être moindre en altitude. Dans le sol, en profondeur, la température est beaucoup plus constante que dans l'air; par exemple, elle peut atteindre entre 20 et 25 °C à un mètre de profondeur le jour, favorisant ainsi la vie des Rongeurs dans les terriers. La température sous abri présente des fortes variations journalières, saisonnières, et beaucoup d'irrégularités d'une année sur l'autre. Les maximums atteignent fréquemment 40 à 50 °C, tandis que les minimums absolus varient, suivant les saisons, de 10 à 20 °C, et peuvent descendre, dans certains déserts, à — 20 ou — 30 °C; dans certaines régions comme la mer d'Aral, le minimum moyen de janvier peut être parfois de — 15 °C. L'amplitude annuelle des variations thermiques est très élevée : 66 °C à Boukhara, 77 °C à la mer d'Aral, et environ 50 °C au Sahara. Les variations de la température entre le jour et

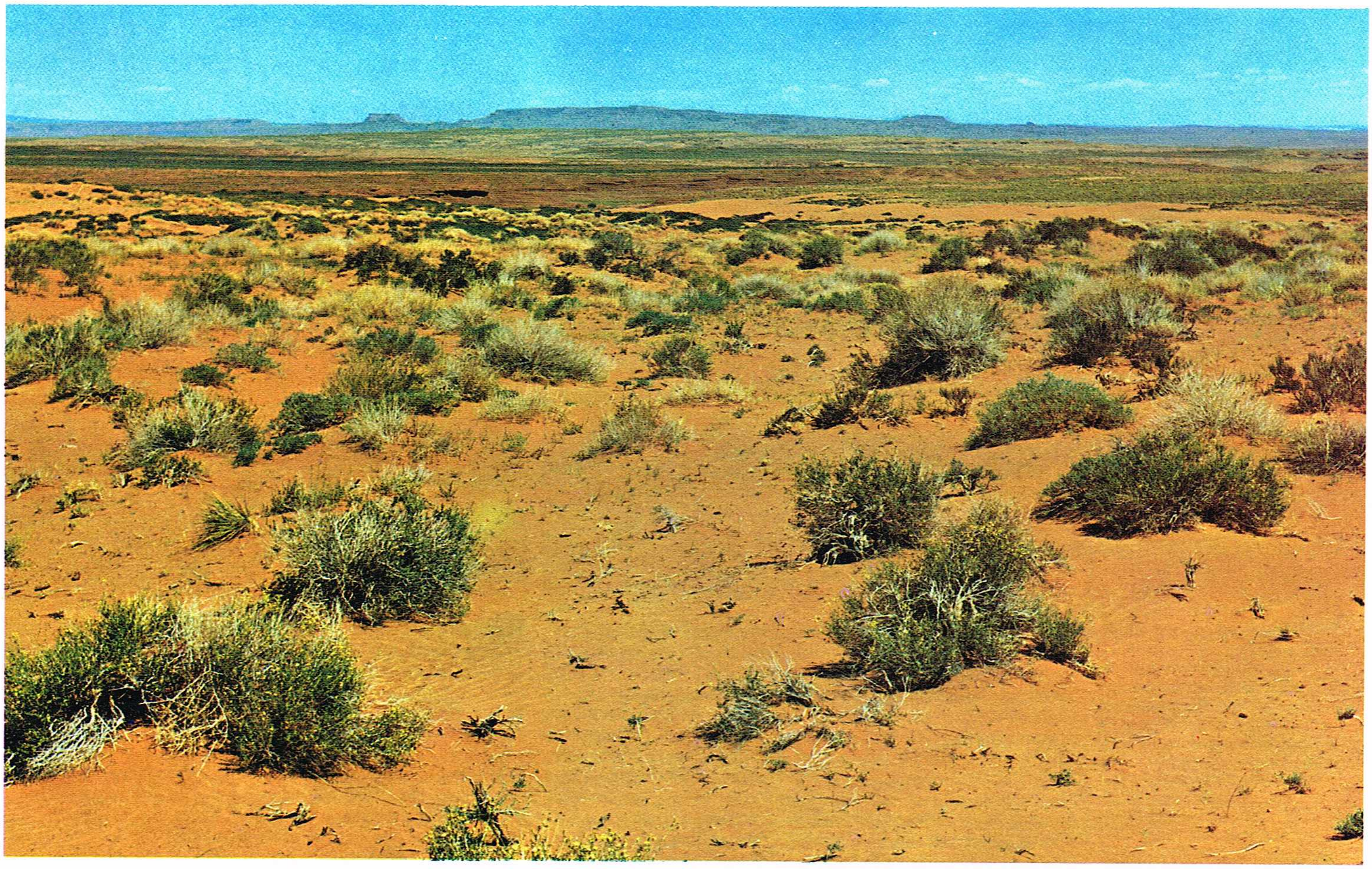

N. Cirani

la nuit peuvent atteindre jusqu'à 30 ou 35 °C. L'humidité de l'air (humidité relative) est très faible en général, variant pour les déserts de l'Asie moyenne suivant les années. Les moyennes annuelles oscillent entre 33 et 60 % et descendent à 12 h jusqu'à 14 % et même à 5 % dans certaines régions du Sahara.

Dans les déserts, l'évaporation l'emporte sur les précipitations; exprimée en chiffres obtenus par l'évaporimètre de Piche, elle se situe au Sahara entre 2 et 6 m suivant les régions. En Asie moyenne, à la mer d'Aral, elle est moindre, mais atteint quand même 1,246 m contre 101 mm de pluie. Les précipitations sont, en général, inférieures à 250 mm par an et très irrégulières selon les années, les moyennes annuelles étant de 125 à 150 mm pour les régions sahariennes et de 100 à 150 mm pour les déserts de l'Asie moyenne, une des régions les plus sèches du monde étant celle d'Assouan avec 2,2 mm. Les précipitations apparaissent dans les déserts d'Asie en période froide (hiver et printemps), les pluies d'été étant très rares; par contre, dans d'autres déserts, cette répartition peut être très différente. La grande variabilité annuelle des pluies rend la vie dans les déserts extrêmement difficile et fragile : peu d'espèces peuvent supporter plusieurs années consécutives de sécheresse associée à une chaleur extrême.

Le vent constitue un des traits les plus caractéristiques des déserts; toutefois, bien que dans certains d'entre eux les vents soient très fréquents, dans d'autres, comme le Sahara, ils sont relativement modérés et les nuits sans vent sont fréquentes. En Asie moyenne, les vents soufflent parfois à 10 m/s et peuvent provoquer des trombes hautes de 200 m. L'énergie éolienne, exprimée en kWh/m²/an à 20 m du sol, varie entre 1 000 et 4 000, contre 220 à Paris et 3 900 à l'île de Ré. Les vents de poussière et de sable obligent les caravaniers à s'arrêter et à s'accroupir, parfois une journée entière, mais les petites brises du désert s'exercent surtout au niveau du sol où elles poussent le sable, épargnant ainsi les voyageurs assis sur les chameaux. L'action du vent sur la végétation est très importante : il peut dénuder des racines ou, au contraire, ensevelir entièrement les plantes sous le sable.

Il existe dans le désert de nombreux microclimats très différents du climat déterminé par les mesures météorologiques classiques sous abri à 2 m du sol; ces mesures ne correspondent pas du tout aux conditions dans lesquelles vivent les plantes et les animaux, conditions microclimatiques sans lesquelles la survie serait impossible. En effet, si l'on prend comme exemple un désert de sable de l'Asie moyenne, on s'aperçoit que dans des régions en apparence sèches, à une faible profondeur de 50 cm, le sable peut déjà être mouillé. Les microclimats spéciaux se forment à l'intérieur des buissons, des touffes d'herbes, des terriers, des amas de rochers, et même des nids. Ils présentent parfois de 10 à 20 °C de différence par rapport à la température de la surface nue du sol surchauffé. Ces différences sont particulièrement importantes pour les terriers, aussi bien en hiver glacial qu'en été aride. Dans les déserts, les saisons sont très marquées et influencent l'existence et le comportement des êtres vivants. Elles se succèdent rapidement : par exemple, dans le désert de Syr-Daria, en Asie, à un hiver rigoureux de — 25 °C fait suite rapidement un printemps au cours duquel la végétation et la faune des Insectes connaissent une explosion, grâce aux précipitations. Au cours de l'été, aride et chaud, l'herbe commence rapidement à se dessécher et à griller. En automne, les nuits deviennent plus fraîches et il apparaît une végétation différente de la première.

Les **sols** peuvent être sablonneux, argileux salés ou rocheux.

Les sols sablonneux sont très caractéristiques et couvrent d'immenses étendues; le sable est dû à la longue action du climat désertique sur le sol. Les variations thermiques, les vents violents, etc., provoquent en effet une érosion continuelle et une destruction de tous les sols; les morceaux des roches éclatent et s'effritent en cailloux, graviers et poussière de sable fin, transportés facilement par le vent, constituant des monticules et des dunes de sable vif.

Les sols argileux salés sont fréquents dans les déserts à lœss friable et poreux; ces sols, de structure très fine et dure, imperméables, permettent le ruissellement des

▲ ***Les déserts** sont des zones arides où la végétation xéromorphe, éparse, est bien adaptée à la sécheresse et présente des caractères morphologiques et physiologiques particuliers : ici un désert à sol sablonneux (Monument Valley National Park, Arizona) dont la végétation est constituée de plantes en coussinets et de buissons d'épineux.*

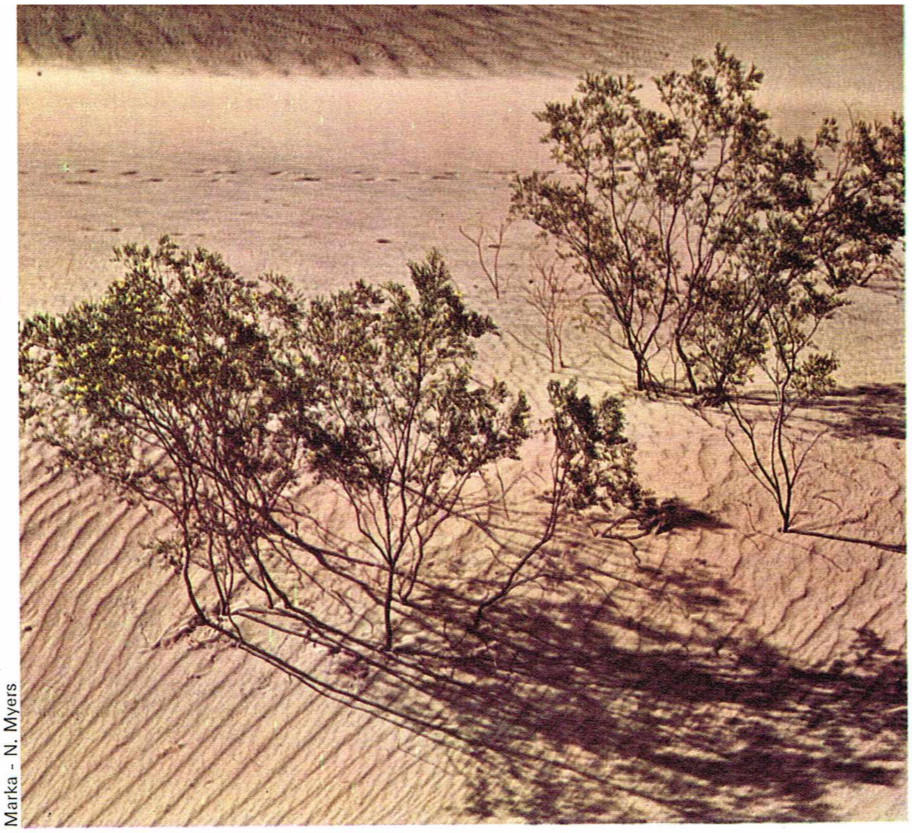

Marka - N. Myers

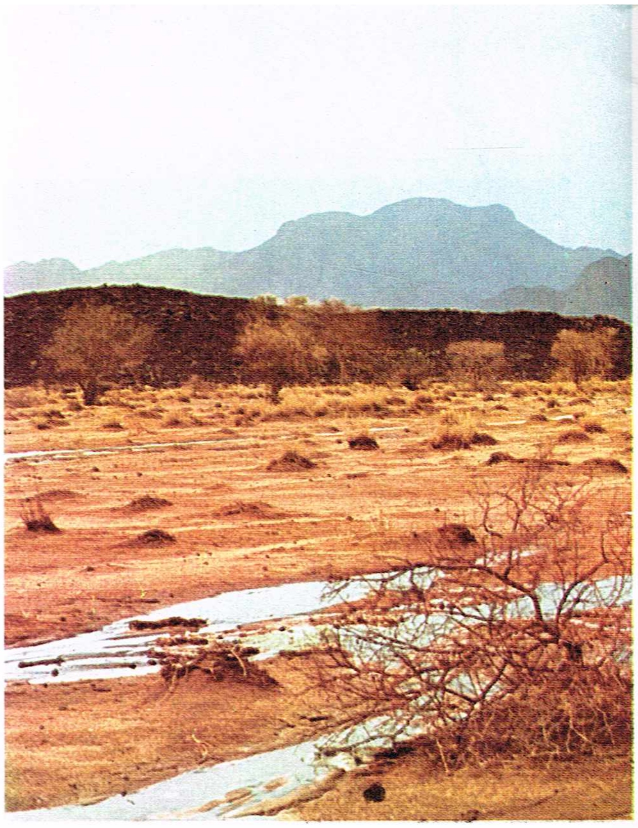

▲ *La végétation des déserts est parfois formée comme ici dans la Vallée de la mort (ouest de la Californie) d'espèces arbustives à racines profondes et à feuillage réduit.*

▼ *Un autre exemple de vie végétale dans les déserts de sable : des buissons sans feuilles ou à feuilles réduites, épars, adaptés aux températures extrêmes et à la rareté de l'eau.*

eaux. Par temps chaud, leur surface craque, tandis que dans certaines régions, les cuvettes se transforment en immenses étendues d'eau peu profondes, appelées par certains « lacs ». La surface de ces sols étant surchauffée, l'évaporation intense aspire les eaux souterraines et provoque avec elles la remontée du sel, qui forme des dépôts. Ces dépressions salées, analogues à la sansouire de la Camargue, s'appellent *solontchak* en Asie et *sebkha* au Sahara; elles possèdent une flore et une faune très pauvres, spécifiques à ce milieu. Les solontchak, en particulier, peuvent être extrêmement dangereux pour les animaux : ils constituent une croûte solide à leur surface qui peut craquer sous le poids d'une antilope ou d'un chameau, lesquels s'enfoncent alors et meurent dans la boue salée.

Les sols rocheux se rencontrent dans de nombreuses régions, souvent en altitude. L'eau de pluie n'y séjourne pas et ruisselle dans des ravins. Le revêtement de ces sols se constitue difficilement et présente une végétation éparse. La faune est rare : les espèces sont très adaptées à ce milieu rocheux et caillouteux. Notons que les cailloux et les amas de rochers peuvent mieux retenir l'humidité et constituer des refuges pour des Invertébrés comme les Scorpions, Myriapodes, Insectes, etc., aussi bien que pour quelques gros Vertébrés tels que les damans des rochers. Les grottes qu'on trouve parfois dans les régions rocheuses servent d'abris pour les porcs-épics, les chauves-souris, les Rapaces.

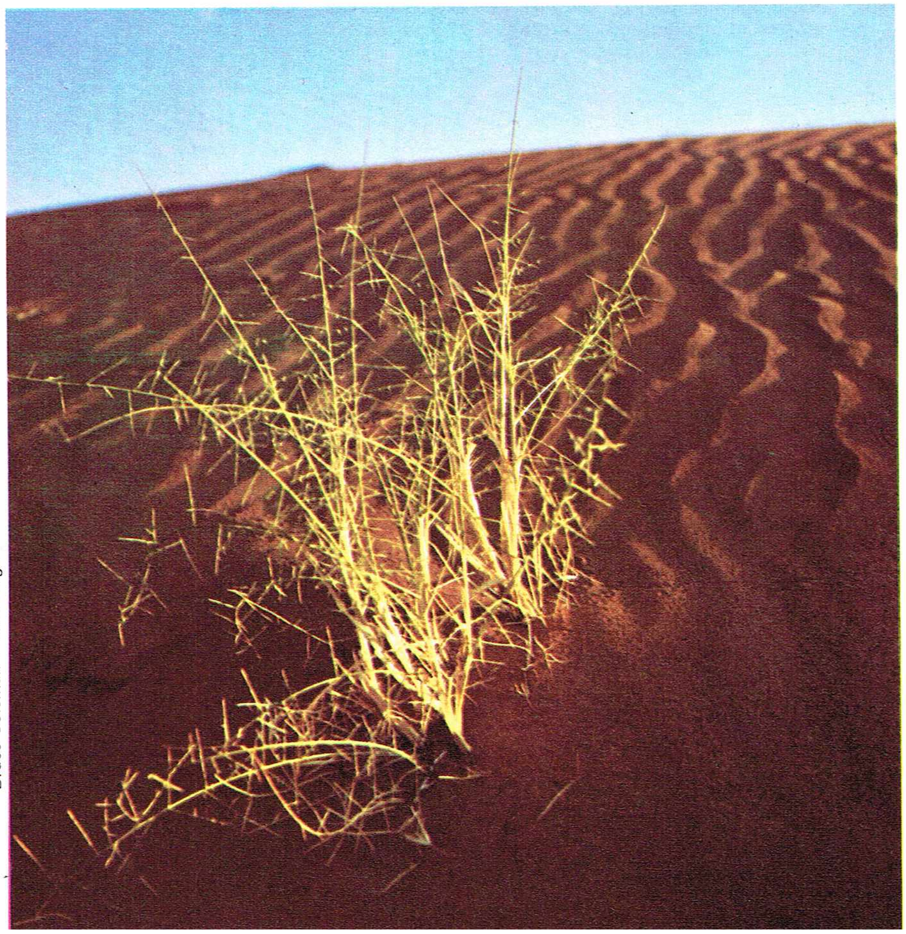

Bruce Coleman - G.D. Plage

Végétation et faune des déserts

Le monde désertique comprend : d'une part, les êtres vivants locaux, très adaptés à ce milieu, y compris les micro-organismes, tels certaines Bactéries et Champignons qui vivaient il y a 200 à 500 millions d'années dans le sol du Permien et du Cambrien; d'autre part, des animaux que l'on trouve par accident dans le désert, transportés d'une façon passive par le vent ou échouant au cours de leurs migrations lointaines. Les conditions désertiques mettent les êtres vivants à la limite de la vie par leur température extrême, la rareté de l'eau, la forte évaporation et l'action du vent.

La pauvreté en végétaux et en Invertébrés qui sévit presque toute l'année détermine une rareté de la biomasse qui agit comme facteur limitant pour beaucoup d'animaux. Pour survivre dans ce milieu hostile et sélectif, les êtres vivants ont adopté plusieurs modes de protection : l'adaptation physiologique (perte minimale de l'eau, élimination du sel par des systèmes ingénieux), des adaptations structurales morphologiques et anatomiques, l'adaptation du cycle d'activité, qui comporte en particulier un ralentissement du métabolisme le jour (la vie devenant surtout nocturne) et des phases de repos estival et hivernal. A ces adaptations s'ajoutent des migrations locales ou saisonnières, importantes pendant la période chaude ou l'hiver rude. Les conditions désertiques, avec leurs phases propices pour la vie de très courte durée (pluies), déterminent des cycles de développement bien tranchés chez les végétaux et animaux. Ceux-ci comportent très peu de générations ou une seule génération annuelle : plante-graine résistante ou bien Insecte adulte-œuf résistant à la dessiccation, ou bien une résistance des larves et des adultes de très longue durée, certains animaux pouvant rester à jeun des mois, et même des années ! Confrontés aux conditions désertiques, beaucoup d'animaux cherchent, d'une part, un refuge souterrain (terriers), et d'autre part, une nourriture plus constante qu'ils peuvent trouver sous terre (racines, bulbes, etc.).

Les biotopes désertiques sont très variés : rocheux, compacts, meubles, parfois humides (eaux temporaires ou permanentes), et organiques (troncs d'arbres, débris végétaux, cadavres, excréments, etc.). Les écosystèmes désertiques, formés par le biotope (habitat) et la biocénose, sont individualisés soit par des structures de grande

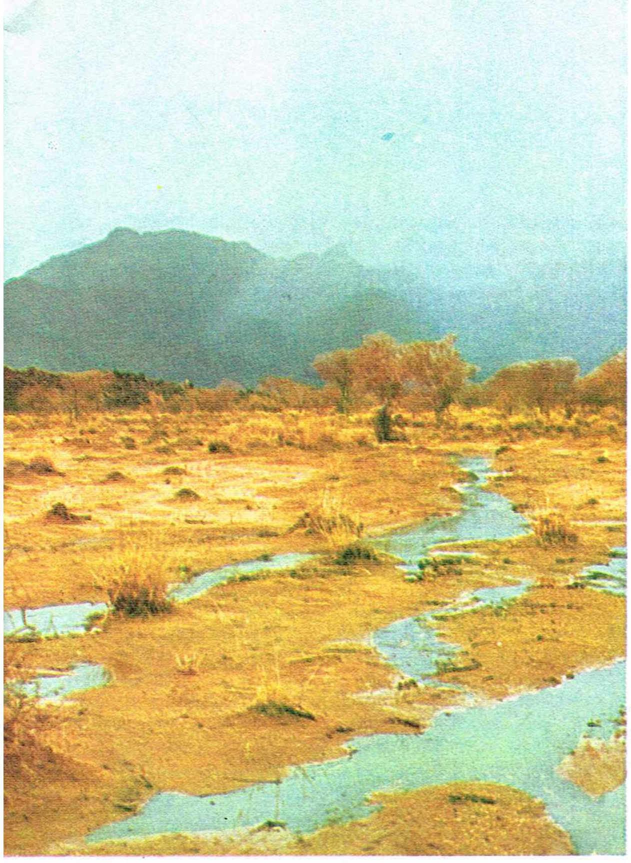

P. Verbeeck - Explorer

E. Muench

▲ ***Au centre, ici dans l'Aïr au Niger, les rares pluies favorisent la floraison et la fructification de certaines plantes qui traversent la période sèche sans aucune activité métabolique. A droite, l'aspect de ces gigantesques*** **Pachycereus pringlei,** ***dans le désert de Sonora (Mexique), est très significatif de l'adaptation remarquable de certaines plantes aux conditions de vie désertique.***

échelle (cordons de dunes, étendues salées), soit par de petites formations (grotte, tronc d'arbre, touffe d'herbes). Le caractère principal de l'écosystème désertique réside dans le fait que ses cycles climatiques capricieux éliminent tous les êtres vivants trop exigeants pour des périodicités régulières d'apport d'eau. Les sécheresses trop longues entraînent une mortalité spectaculaire ou les migrations massives de certains animaux; la région touchée devient alors une place vide, prête à accueillir de nouveaux occupants si les nouvelles pluies le permettent.

★ La *végétation*, qui présente des densités très variables selon les milieux très voisins, peut atteindre quelques centaines d'espèces ou se réduire à néant. La très faible diversité est caractéristique des déserts : parfois, d'immenses étendues à perte de vue sont occupées par une seule espèce végétale. Contrairement à ce qu'on observe dans la forêt et la savane tropicales, l'association végétale majeure est généralement unique, mais la présence de microclimats et la diversité des sols ont permis l'établissement d'une flore endémique, soit dérivant des flores voisines, soit représentant des reliques du temps passé. Les formes biologiques comportent peu d'arbres mais beaucoup de formes arbustives. Certaines plantes traversent la période sèche sans aucune activité métabolique, accomplissant leur cycle de végétation (floraison et fructification comprises) seulement avec les pluies. Ces plantes comportent plusieurs espèces.

● Des espèces annuelles à activité plus ou moins éphémère, qui fleurissent et fructifient avec une rapidité remarquable (2 à 3 semaines pendant la période des pluies).

● Des plantes éphémères vivaces qui ont des organes souterrains (bulbes, rhizomes) et donnent, avec les premières pluies, tige, feuilles et fleurs en quelques semaines (cas des *Carex* du Turkestan).

● Des espèces vivaces, à organes aériens permanents. Celles-ci comprennent :

— des arbres et arbustes à racines très profondes et à feuillage réduit (acacias);

— des buissons bas, à forme tortueuse, à croissance rapide en saison humide, donnant à cette époque de grands rameaux et de grandes feuilles; au début de la saison sèche, ils présentent un ralentissement de la croissance, donnant des rameaux courts à petites feuilles qui tombent au milieu et à la fin de la saison sèche (armoises du Turkestan);

— certains buissons sans feuilles ou à feuilles réduites à des écailles (saxaouls du Turkestan);

— des Graminées à feuilles enroulées en gouttière, à racines profondes;

— des plantes succulentes à réserves d'eau, à faible transpiration et à racines superficielles étendues sur une grande surface.

Les adaptations des plantes aux conditions de vie désertique sont remarquables, et des familles très lointaines les unes des autres présentent à cet égard des convergences. L'aspect cactiforme est fréquent, avec des raquettes, des cierges, ou des formes coralliformes complexes, comme celles des euphorbes de Madagascar. Parmi ces cactiformes, citons les Cactées du Nouveau Monde, les *Didierea,* les *Alluaudia* qui sont des Didiéracées spectaculaires de Madagascar; dans le type *Agave,* citons les agaves, les aloès, les *Sanseveria;* dans le type *Dracaena,* les *Dracaena* d'Afrique et de Madagascar avec le bouquet de feuilles apicales, les *Yucca* d'Amérique et les *Pandanus* de certaines régions semi-arides. D'autres plantes présentent un port renflé en bouteille, de petite ou grande dimension, comme les baobabs, dont les réserves d'eau peuvent servir à l'homme, qui stocke l'eau dans des excavations latérales de l'arbre, ainsi que les *Pachypodium* arborescents.

★ *Faune et chaînes alimentaires*. Comme les plantes, les animaux sont très adaptés aux conditions désertiques; étant donné les difficultés de la vie, les espèces ainsi que les populations sont peu nombreuses.

Les déserts caillouteux comme celui du Betpak-Dala dans le Turkestan sont particulièrement pauvres, de même que les déserts argileux; par contre, la vie est plus riche dans les déserts sableux. La faune actuelle représente les vestiges d'une faune qui a subi l'influence soit des glaciations, soit des modifications climatiques qui ont abouti à la disparition de la majeure partie de la végétation et des animaux. Ainsi, les peintures rupestres du Sahara révèlent que des éléphants, rhinocéros, girafes et antilopes peuplaient ces régions il n'y a pas si longtemps. Les peuplements des déserts comprennent deux grands groupes : les animaux aquatiques et les animaux terrestres.

La faune aquatique d'eau douce et d'eau salée n'est pas totalement absente : elle est représentée par des Éponges, des méduses, des sangsues, de nombreux Crustacés dont des crabes; les Insectes aquatiques sont eux aussi bien représentés : Coléoptères, Hémiptères *(Nepes, Notonectes),* Libellules, Diptères (chironomes, moustiques, Tabanides); on trouve même des Mollusques aquatiques (limnées, bullins, planorbes), etc., et des Lamellibranches (*Cardium edule* au Sahara). Il y a également de nombreux Poissons (Cyprinides, silures, etc.), des crapauds et grenouilles dans les rares mares permanentes, ainsi que tout un groupe d'Amphibiens vivant la majeure partie du temps sous terre et qui sortent juste après les pluies pour pondre. Les Oiseaux aquatiques sont nombreux : poules d'eau, pélicans, hérons crabiers, ombrettes, cigognes, marabouts, etc.

En ce qui concerne la faune terrestre, on trouve des Crustacés comme les Isopodes, ou cloportes, dont la présence est remarquable, des Scorpions, qui représentent

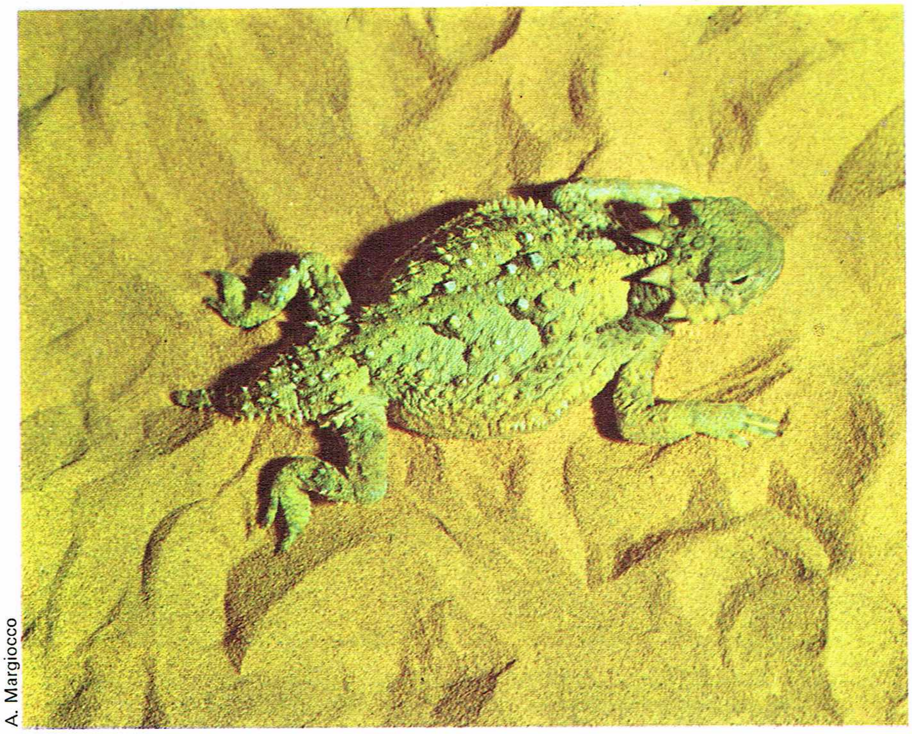

A. Margiocco

▲ *Un phrynosome, ou lézard cornu, Reptile vivant dans les déserts du Nevada* (Phrynosoma platyrhinos).

▼ *Certains Rongeurs sont typiques des milieux subdésertiques, notamment des « souris » telles que la gerbille du Mali* (Taterillus gracilis).

les vestiges d'une faune très ancienne et sont des reliques de la faune locale, parfaitement adaptés au désert. Citons également les solifuges, ou galéodes, gros Arachnides d'une grande agilité, aux chélicères puissants, qui s'attaquent aux Insectes mais ne sont pas venimeux. Les Araignées sont très nombreuses (comme les grosses lycoses, qui creusent des terriers assez profonds). Les Acariens comptent des Ixodes, ecto-parasites des chameaux, des bœufs, etc., et des Ornithodores, vivant dans le sable et vecteurs de la spirochétose (fièvres récurrentes), ainsi que des argas qui parasitent les volailles. Les Acariens Trombididés se rencontrent dans différentes régions. Les Insectes, bien représentés, comptent des Thysanoures (lépismes), quelques Collemboles, de nombreux Orthoptères dont la tribu des sauterelles *Batrachotetrigini,* aptères, qui se retrouvent dans les principaux déserts du monde, formant peut-être des reliques d'une ancienne population. On rencontre également des Acridiens migrateurs, comme le criquet pèlerin *(Schistocerca gregaria).* Les Mantides (mantes) sont bien représentées par des Érémiaphiles. Les Blattides présentent souvent des formes aptères. Les termites sont nombreux et forment

J. Six

une population importante dans certains déserts, par exemple le Sahara. Les Hémiptères comprennent des espèces phytophages (réduves et cochenilles), souvent attachées à des plantes déterminées (tamarix, Salsolacées). Les Coléoptères forment une population importante, où l'on observe surtout des Ténébrionides Mélasomes *(Pimelia, Akis, Blaps)* qui présentent une résistance extraordinaire et peuvent rester à jeun pendant une très longue durée ; ces formes aptères sont surtout nocturnes. Les papillons comprennent des Psychides, des Hétérocères, ainsi que des Rhopalocères spécifiques du Sahara ; citons l'espèce *Papilio machaon,* dont les chenilles vivent sur les Ombellifères mais qui peuvent s'attaquer aussi aux Papilionacées, et la vanesse du chardon (*Vanessa cardui,* ou « belle-dame »). Les Hyménoptères comptent des guêpes *(Vespa),* des Scolides, des Euménides et des Sphégides. Les fourmis, très bien représentées, forment avec les termites, dans certaines régions, une fraction très importante de la biomasse ; citons les fourmis moissonneuses *(Messor)* et les fourmis chasseresses *(Myrmecocystus)* du Sahara. Les Diptères sont extrêmement nombreux : on trouve la mouche domestique, des *Calliphora,* des stomoxes, des hippobosques (« mouche araignée »), des Tabanides, des chironomes (vers de vase), des Cératopogonides et des moustiques.

Les Vertébrés terrestres comprennent de très nombreux lézards (geckos, agames, varans, etc.) ; on les rencontre sur le sable ou dans les déserts rocheux. Tous sont bien adaptés à la progression sur le sable, notamment les scinques, qui possèdent des pattes très réduites leur permettant aussi bien de glisser sur le sable que de s'enfoncer dans le sable. Le lézard le plus caractéristique du Turkestan est *Phrynocephalus interscapularis,* appelé krouglogolovka. Les Oiseaux proprement désertiques sont représentés par un petit nombre d'espèces, parmi lesquelles les plus communes sont les corbeaux, alouettes, fauvettes, mésanges, pies-grièches, moineaux, pigeons, traquets, gangas, outardes, etc. La plupart d'entre eux sont insectivores : ils peuvent vivre loin de l'eau, utilisant celle contenue dans les Insectes. Par contre, les granivores (gangas, pigeons) sont obligés de vivre près des points d'eau. Les rapaces sont représentés par les buses, busards, aigles, etc. Les insectivores comprennent des hérissons et des « rats à trompe » (Macrocélides). Les chauves-souris sont peu nombreuses en raison de la rareté des abris et des Insectes ailés. Les Rongeurs sont très nombreux et des plus caractéristiques : lièvres *(Lepus),* ochotones qui amassent des provisions pour les mauvaises saisons, écureuils terrestres *(Citellus),* gerboises proprement dites, ainsi que d'autres types de Rongeurs qui ressemblent aux gerboises, comme la « souris-pygmée » *Perognathus,* le rat-kangourou *Dipodomys ;* le type morphologique gerboise se retrouvant ainsi dans divers genres de familles différentes de Rongeurs. Les « souris » : gerbilles, mériones, *Psammomys, Acomys* (souris épineuses), etc., sont aussi très nombreuses ; les mériones creusent de très grands terriers, comportant de nombreuses galeries, chambres à provisions et nids où pullulent les puces (dont certaines peuvent être vectrices de la peste, notamment au Turkestan, en Iran, etc.). Les Ongulés sont bien représentés : les Bovidés comprennent des mouflons, des bouquetins, des antilopes saïgas, addax, oryx, des Équidés dont le cheval de Przewalski et l'âne sauvage ; Citons aussi les hémiones, les onagres et les chameaux. Les Hyracoïdes, représentés par les damans (de la taille d'un lapin), vivent dans les rochers et sont végétariens et nocturnes. Les Carnivores sont représentés par le loup (Asie), le fennec, le ratel, la zorille et différents Félidés (désert d'Asie).

Si l'on considère le désert en tant que biocénose, on remarque que dans la végétation, ce sont les Graminées qui y acquièrent la prépondérance dans la lutte pour l'existence : elles dominent et forment parfois des peuplements importants sur de vastes étendues. La végétation, bien que pauvre, assure la vie du monde animal du désert ; dès qu'elle s'enrichit, la faune devient plus diversifiée et importante.

Par exemple, l'étude de la biocénose désertique du désert de Betpak-Dala (Turkestan), constitué de régions rocheuses ou caillouteuses ainsi que de bassins salés sans écoulement (solontchak), montre que la végétation y est formée de buissons épineux *(Salsola),* de l'armoise *(Artemisia),* ainsi que de tulipes en quantité importante

Les animaux y sont peu nombreux. Si les Lépidoptères et les Orthoptères sont très rares, les Coléoptères Ténébrionides, qui composent la majeure partie de l'entomofaune de ce désert, le sont moins : *Cyphogenia, Podomala, Blaps,* etc. On rencontre aussi des Carabides et des Cérambycides. Ce désert, pauvre en Vertébrés, comporte néanmoins de nombreux fouisseurs *(Alactaga, Ellobius),* des hérissons, des antilopes djeïrans et des loups. Les Oiseaux, très rares, sont représentés par le traquet du désert, le pipit rousseline, la fauvette, l'alouette, l'outarde et le hibou. Les Reptiles sont peu nombreux. Ainsi, les oignons de tulipes et autres bulbes, qui constituent l'élément de base de la chaîne alimentaire, assurent la vie à de très nombreux Rongeurs, ces derniers servant eux-mêmes de nourriture aux hiboux, loups, etc., de sorte que le cycle alimentaire ne possède parfois que trois éléments. Par contre, dans les oasis, les cycles sont plus complexes et plus longs, avec la présence d'Oiseaux, comme les canards, les chevaliers et d'autres espèces servant de proies aux hiboux et busards, et qui dépendent des Insectes.

Dans le cas d'un désert sableux, comme celui de Kara-Koum, les relations entre le monde végétal et le monde animal sont plus riches et plus complexes.

La végétation herbacée comporte surtout des *Carex* ou des Graminées *(Poa, Bromus)*. Les *Carex,* les bulbes de *Poa* servent de nourriture aux pietschankis *(Gerbillus meridianus)* ; les *Carex* et autres plantes sont aussi mangés par les lièvres et les moutons.

Les buissons et les plantes herbacées servent de nourriture aux chameaux et aux gerboises. Certains Oiseaux (gangas et alouettes huppées) consomment les graines des différentes plantes et buissons. Les Insectivores, comme les hérissons, et de nombreux Oiseaux (crécerelles, fauvettes) se nourrissent d'Insectes, tandis que les engoulevents et les martinets se nourrissent surtout des Insectes ailés : mouches, moustiques et taons, les mouches étant liées surtout à la présence du fumier. Les lézards, qui se nourrissent d'Insectes, sont eux-mêmes les proies des serpents. Les différents Rongeurs, gerboises, souslikis et lièvres, servent de proies aux différents Carnivores (des chats sauvages, des renards et des Oiseaux prédateurs, comme la buse féroce, l'aigle fauve et le corbeau) ainsi qu'aux serpents. Le fumier laissé par les animaux herbivores, en particulier par les chameaux, permet le développement de beaucoup d'Insectes, en particulier des Coléoptères coprophages, lesquels servent de nourriture de base aux lézards et aux Oiseaux (alouettes et huppes).

Les régions argileuses, inondées en saison des pluies, appelées *takyrs*, forment des centres d'attraction pour les troupeaux des nomades et pour des Oiseaux qui nichent à proximité de l'homme : moineaux, tourterelles, etc.

En étudiant une chaîne alimentaire, on s'aperçoit que plus la taille de ses éléments est faible, plus le chaînon de ses animaux est riche en individus et sa biomasse est grande; par exemple, les Rongeurs classiques des déserts sont extrêmement nombreux, tandis que les aigles qui s'en nourrissent sont relativement rares, l'aire de chasse de chaque individu nécessaire pour assurer ses besoins et ceux de sa couvée étant très large. La biocénose du désert est caractérisée par une structure particulière avec, à la base, de nombreuses plantes vivaces et des animaux proprement désertiques sédentaires (Rongeurs, lézards, etc.). A ces groupes s'ajoutent certains groupes d'Oiseaux migrateurs saisonniers : corbeaux désertiques, gangas, traquets, tandis que d'autres Oiseaux font leur apparition dans les déserts d'une façon plus ou moins irrégulière : busards des marais, milans, hiboux, etc. Ce sont les espèces spécifiques du désert qui constituent les formes vitales pour les chaînes alimentaires; celles-ci peuvent se modifier avec une dégradation de la biocénose, ou, par contre, se compliquer et se diversifier à la suite d'une amélioration du milieu. Ainsi, le désert ne constitue pas une unité fixe mais présente des modifications permanentes, dont témoignent d'ailleurs des vestiges très anciens.

La productivité des déserts, rapportée à une année, est extrêmement faible : elle est comparable à celle des zones de glaces ou de rochers. Whittaker et Likens (1972) indiquent : pour les semi-déserts, une productivité primaire de 0,7 t/ha/an, et, pour les déserts, de 0,03 t/ha/an seulement. Les déserts au sens large (glaces, rochers, zones à climat aride), bien qu'ils couvrent environ 1/6 de la surface des continents, n'apporteraient même pas 1/1 000 de leur productivité totale. Walter (1954) a montré que, comme dans les zones semi-arides, on observe dans les déserts une étroite corrélation entre leur productivité et la pluviosité : le long d'un gradient climatique, dans l'ouest de l'Afrique du Sud, pour 200 mm de hauteur annuelle de pluie, la productivité est de l'ordre de 1,5 t/ha/an et tombe à 0,7 t/ha/an pour 100 mm de pluviosité. Lorsqu'on exprime ces productivités par jour, on se rend mieux compte de leur faiblesse : moins de 5 mg/m^2/jour sont produits dans les déserts. Pour les déserts situés dans les régions chaudes et bien ensoleillées, l'apport d'eau par irrigation permet en principe les cultures ; cependant, en pratique, la quantité d'eau doit être très grande car l'évaporation est forte et conduit peu à peu à une concentration des sels du sol. Beaucoup de vestiges archéologiques témoignent d'efforts pour construire des systèmes d'irrigation : ainsi, en Israël, on a retrouvé récemment des cuves souterraines qui permettaient de recueillir et de conserver l'eau de ruissellement des rares pluies et de l'utiliser ensuite pour des cultures; des techniques modernes ont tiré profit de telles découvertes. Cependant, comme le fait remarquer Odum (1971), les échecs passés montrent bien qu'il faut prendre en compte les bases naturelles avant tout essai d'aménagement : « Au moins, les ruines (de vieux systèmes d'irrigation) devraient nous avertir que le désert irrigué ne pourra continuer à s'étendre indéfiniment sans l'attention qui est due aux lois fondamentales de l'écosystème. »

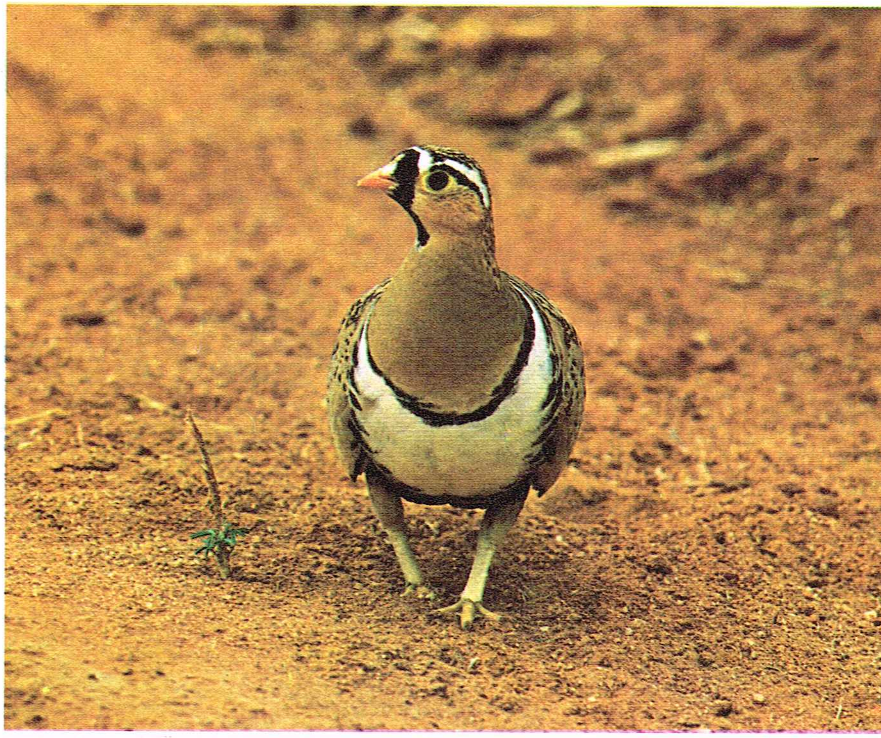

P. Montoya - Pitch

▲ ***Même dans les déserts des relations complexes entre le monde végétal et le monde animal existent en particulier au niveau des réseaux trophiques; ainsi, les graines des différentes plantes et buissons servent de nourriture à certains Oiseaux comme le ganga à face noire*** **(Pterocles decoratus).**

La zonation de la végétation dans les montagnes

La végétation

La description de la zonation générale de la végétation correspondant aux grands biomes déterminés par le climat est valable en plaine et aux basses altitudes. Dans quelque région que ce soit, la présence d'un relief montagneux modifie la composition des communautés vivantes. En effet, les conditions climatiques changent avec l'altitude. La plus importante de ces modifications porte sur les températures : la température moyenne s'abaisse environ de 1 °C pour 20 m de dénivelé. Très schématiquement, on peut dire que les montagnes reproduisent, au fur et à mesure que l'on s'élève sur leurs flancs, une zonation comparable à celle qui s'observe globalement en passant, dans l'hémisphère Nord, des régions méridionales aux régions nordiques. En fait, ce schéma est trop grossier : il ne tient pas compte des autres modifications climatiques ou microclimatiques liées au relief (précipitations accrues,

▶ A gauche, représentation schématique de l'étagement de la végétation dans l'Oural. Une série de coupes (I à IV), dont la localisation du nord au sud de la chaîne montagneuse est indiquée sur la carte de gauche, montre les variations de l'altitude atteinte par les différents groupements en fonction de la latitude. 1, toundra à Mousses et Lichens; 2, toundra buissonnante à bouleaux et saules; 3, bouleaux nains et fourrés de sapins et d'épicéas; 4, forêt de Conifères; 5, mélèzes dominants; 6, forêt-parc avec sapins et prairie; 7, feuillus de montagnes (chênes, tilleuls); 8, steppe boisée (d'après V.S. Sukatchev). A droite, représentation schématique (d'après Hauman) de l'étagement de la végétation dans le Kilimandjaro au-dessus de 3 600 m : 1, Éricacées arborescentes (Philippia)*; 2, lobélies; 3, Graminées du bord des eaux; 4, séneçons arborescents; 5 et 6, diverses Composées (et pour le symbole 5, Cypéracées près des étendues d'eau); 7, Mousses et Fougères. Au-dessus de cette végétation, neiges éternelles. Aux altitudes inférieures à 3 600 m, d'après Hedberg, la végétation sur les flancs du Kilimandjaro se distribue ainsi : 3 000-3 500 m, étage des Éricacées avec séneçons et lobélies; 1 700-3 000 m, forêt montagnarde, avec ceinture de bambous (2 300-2 700 m), une forêt de feuillus (oliviers) et de Conifères* (Podocarpus, *genévriers*)*; en dessous de 1 700 m, savane.*

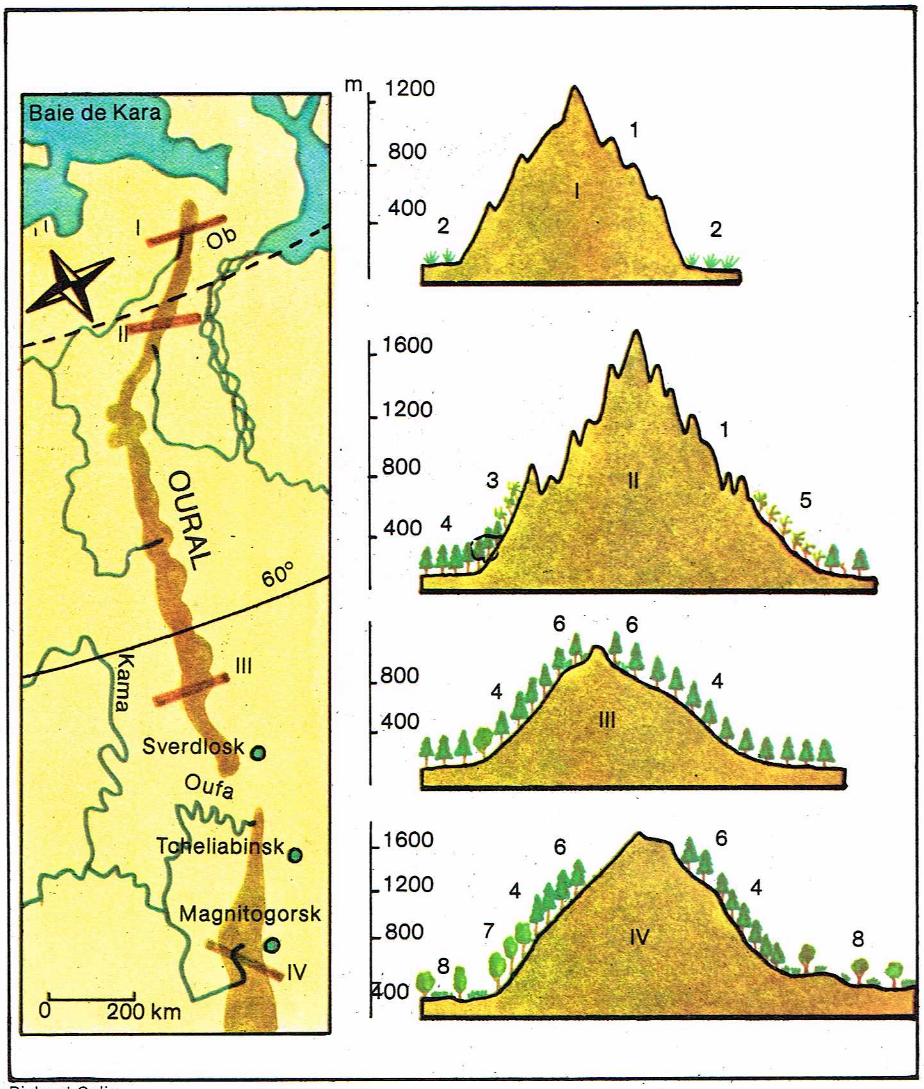

Richard Colin

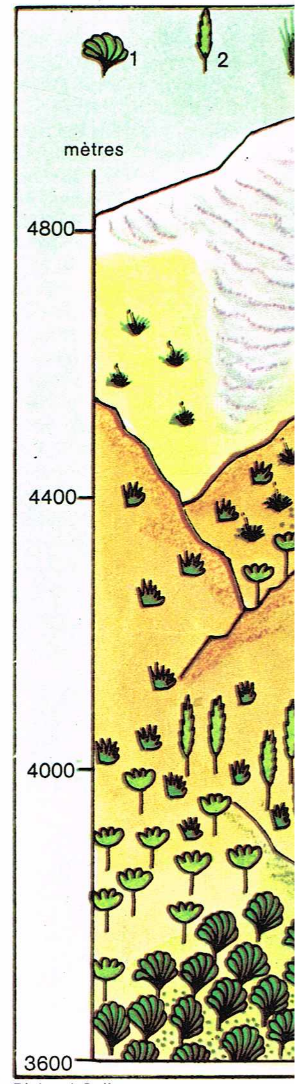

Richard Colin

vents, ruissellement important...) et de la position géographique générale du massif montagneux.

Sukatchev (1965) a présenté une série de cinq coupes ouest-est effectuées à travers l'Oural du nord vers le sud : celle qui est située le plus au nord montre que la montagne est recouverte de rochers et de la végétation de Mousses et de Lichens typique de la toundra; celles qui sont intermédiaires et placées dans la zone de la taïga font ressortir, en dessous de l'étage précédent, la présence d'un étage de Conifères qui atteint une altitude de plus en plus haute quand on se déplace vers le sud; enfin, la plus méridionale présente, au moins sur le flanc Est, un étage montagnard de feuillus. Dans ce cas, l'étagement reproduit assez bien la « zonalité » de la végétation. Cependant, si l'on considère l'étagement sur les flancs d'une montagne tropicale, comme le Kilimandjaro (4 800 m), la flore rencontrée n'évoque pas du tout la zonation générale du globe. C'est pourquoi le schéma proposé n'est pas assez précis : l'étagement et la zonalité ne doivent pas être confondus sans discernement.

A titre d'exemple, nous décrirons l'étagement de la végétation dans les Alpes du Nord. A la suite de l'étage collinéen, qui est caractérisé surtout par les chênes et s'élève jusque vers 800 m, on rencontre l'étage montagnard, avec le hêtre de façon générale, le sapin si l'humidité est assez forte et le pin sylvestre, qui se rencontre sur les sols pauvres et secs; l'étage montagnard s'élève en moyenne jusque vers 1 500 m (1 300 à 1 700 m). Au-delà, atteignant en moyenne 2 000 m (1 700 à 2 300 m) c'est l'étage subalpin, avec les Conifères; dans sa partie inférieure, domine l'épicéa, dans sa partie supérieure d'autres essences sont présentes, comme le mélèze, le cembrot, ou arole *(Pinus cembra)*, le pin de montagne; à cet étage, surtout dans la partie supérieure, les territoires déboisés peuvent être très étendus, sous l'action

▶ Page ci-contre, en haut à droite, au-delà de 1 500 m et jusqu'à 2 300 m, dans les Alpes du Nord, l'étage subalpin est dominé par les Conifères.

▶ L'exposition différente des versants d'une vallée fait qu'ils sont soumis à des conditions climatiques et microclimatiques très dissemblables. L'aspect de la végétation sur l'ubac (à gauche ici), versant humide exposé au nord, et sur l'adret (à droite ici), versant exposé au sud, traduit bien cela.

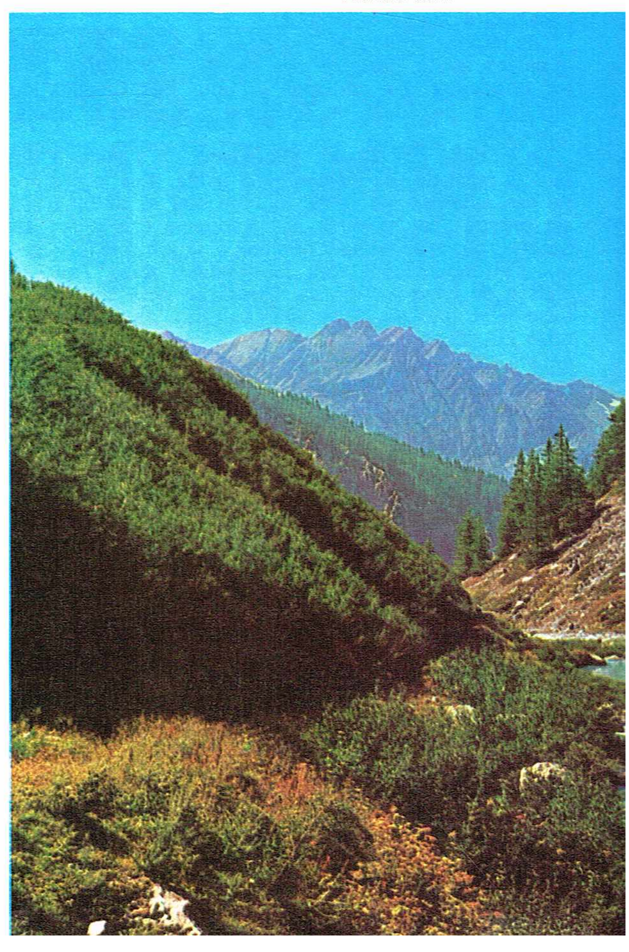

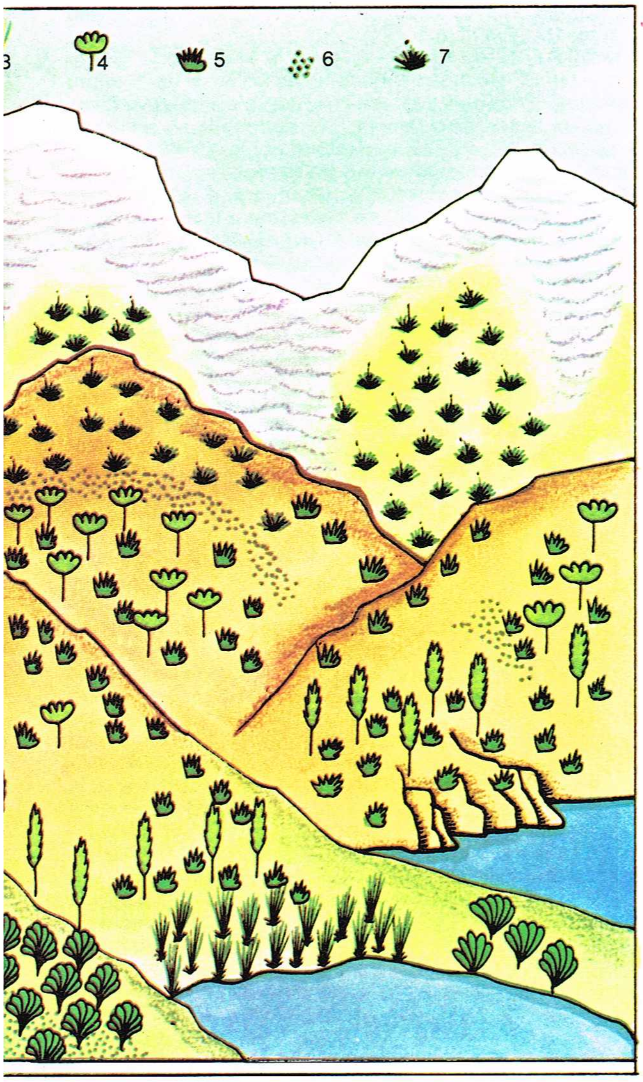

Archives P2

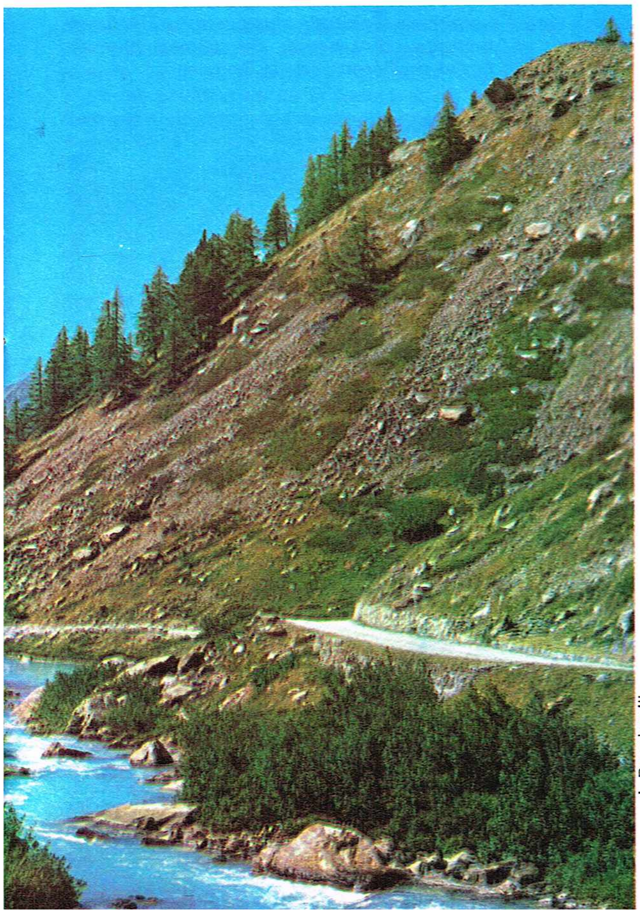

I. Bucciarelli

du pâturage notamment, et présenter alors l'aspect de pelouses subalpines. En s'élevant encore, à l'étage alpin, on trouve l'edelweiss (qui se trouve aussi en prairie), la linaire des Alpes *(Linaria alpina)*, la primevère auricule, etc.

Les pelouses plus fermées avec Graminées sont aussi très riches. Sur silice, on rencontre *Festuca spadicea*, le nard raide *(Nardus stricta)* dans les endroits très pâturés, *Centaurea uniflora*, le trèfle des Alpes, la campanule barbue, la nigritelle, etc.; sur calcaire, poussent *Salix reticulata*, la gentiane de Clusius, *Carex sempervirens*... Les endroits humides (fontaines, ruisselets) sont aussi porteurs d'une flore particulière très variée : *Saxifraga aizoides*, *Bartschia alpina*... L'apport azoté, lié aux déjections des animaux pâturant, détermine, aux lieux favoris d'arrêt du bétail autour des bergeries, la présence exclusive de quelques espèces nitrophiles bien particulières : *Rumex alpinus* et *Chenopodium bonus-henricus*.

▼ ***Représentation schématique de la succession des associations végétales en fonction de la durée d'enneigement (l'exemple concerne le mont Mindjoch dans le massif de la Bernina) : a, niveau de la neige au printemps ; b, résidu estival de neige ; c, tapis de* Polytrichum sexangulare *; d, faciès à* Gnaphalium supinum *; e, faciès à* Ligusticum mutellina *; f, association à* Carex curvula.**

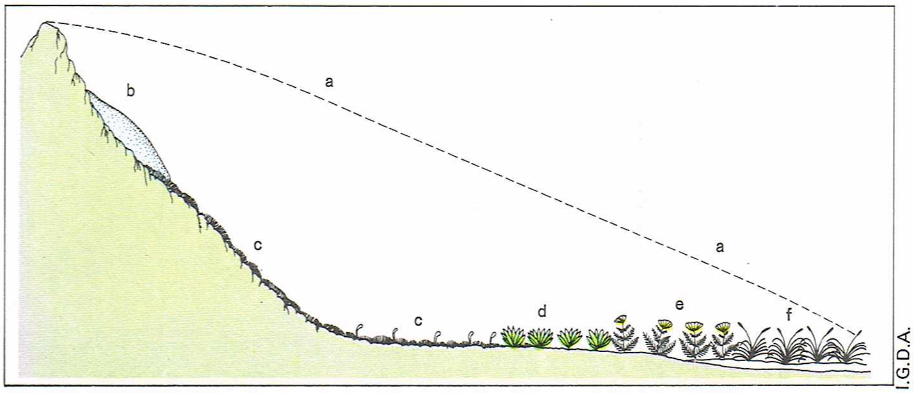

I.G.D.A.

S. Stefenelli

▲ *Le bouquetin est un des herbivores les plus caractéristiques de la faune alpine européenne.*

Les combes à neige, petites cuvettes conservant plus longtemps des plaques de neige, renferment une végétation à période annuelle d'activité très courte. On observe même une zonation très caractéristique à partir du point où reste la dernière neige; on rencontre le saule nain *(Salix herbacea)*, la soldanelle, des gentianes *(Gentiana verna, Gentiana acaulis)* et une petite Mousse, *Polytrichum sexangulare*.

A la base de l'étage alpin et dans l'étage subalpin supérieur se développent divers types de landes, dans lesquelles dominent des Éricacées : les landes à azalée naine *(Loiseleuria procumbens)*, à rhododendrons, à camarine *(Empetrum nigrum)*, à genévrier nain. Enfin, les bois d'aulnes verts, qui colonisent les couloirs de passage des eaux sur éboulis assez fins, sont aussi très typiques de ces niveaux; ils sont souvent intriqués avec un groupement de hautes herbes : la mégaphorbiée, qui comprend le lis martagon, la grande astrance, la renoncule à feuilles, l'aconit tue-loup...

La faune

La faune est assez différente de celle de la toundra arctique. Parmi les Mammifères, les plus spectaculaires sont les grands herbivores : le bouquetin, le chamois et la marmotte, qui creuse des terriers; les petits Mammifères carnivores sont aussi présents : renard, martre, fouine, hermine... Parmi les Rongeurs, il faut citer le lièvre variable, l'écureuil, les lérots, ainsi que les campagnols et les mulots. Quelques Oiseaux sont typiques de l'étage alpin : lagopède, perdrix bartavelle, niverolle, accenteur alpin, chocard, aigle royal; d'autres sont typiques des étages forestiers : tétras, casse-noix, bec-croisé, mésange alpestre, merle à plastron. Les rares espèces de Reptiles présentes sont vivipares, ce qui en permet la reproduction malgré les températures basses; on peut considérer que, sans cela, la chaleur serait insuffisante pour l'éclosion d'œufs. La vipère, l'orvet, le lézard vivipare et quelques couleuvres se rencontrent parfois jusqu'à 2 000 m. Parmi les Amphibiens, le triton alpestre, la grenouille rousse et le crapaud sont ceux qui atteignent les altitudes les plus élevées. Le Poisson alpin le plus répandu dans les lacs d'altitude est la truite, que l'on trouve jusqu'à plus de 2 500 m; le vairon, de taille beaucoup plus petite *(Phoxinus laevis)*, est aussi présent.

Parmi les Invertébrés, les Insectes ont une place prépondérante : l'été permet l'apparition de nombreuses espèces, surtout parmi les Lépidoptères, les Coléoptères et les Orthoptères (criquets). Cependant, seules des espèces diurnes sont présentes, car la nuit la température est trop basse pour permettre une activité; globalement, la proportion de formes sans ailes est plus forte qu'en plaine, ce qui est en relation avec la présence très fréquente de vents forts. Certaines espèces parcourent la totalité de leur cycle dans la zone alpine; d'autres sont des migrantes estivales venant d'une altitude plus basse; enfin, quelques individus sont transportés accidentellement par le vent.

Malgré des études très poussées concernant les inventaires faunistiques, les problèmes biogéographiques, etc., on est à peu près totalement dépourvu de données concernant les transferts énergétiques dans l'écosystème. On se contente souvent d'assimiler la zone subalpine des Conifères à la taïga, et de considérer l'étage alpin comme correspondant à une toundra alpine voisine de la toundra arctique. Une telle approche n'est pas pleinement satisfaisante, d'autant plus que des formations analogues sont présentes dans beaucoup de régions du globe. On a ainsi diverses « prairies » d'altitude : les *paramos* d'Afrique orientale, d'Amérique, d'Australie, de climat humide mais froid, les *punas* du Pérou et de la Bolivie.

▼ *Un aspect de la « puna », prairie à 4 000 m d'altitude dans les Andes péruviennes (près de Pomata).*

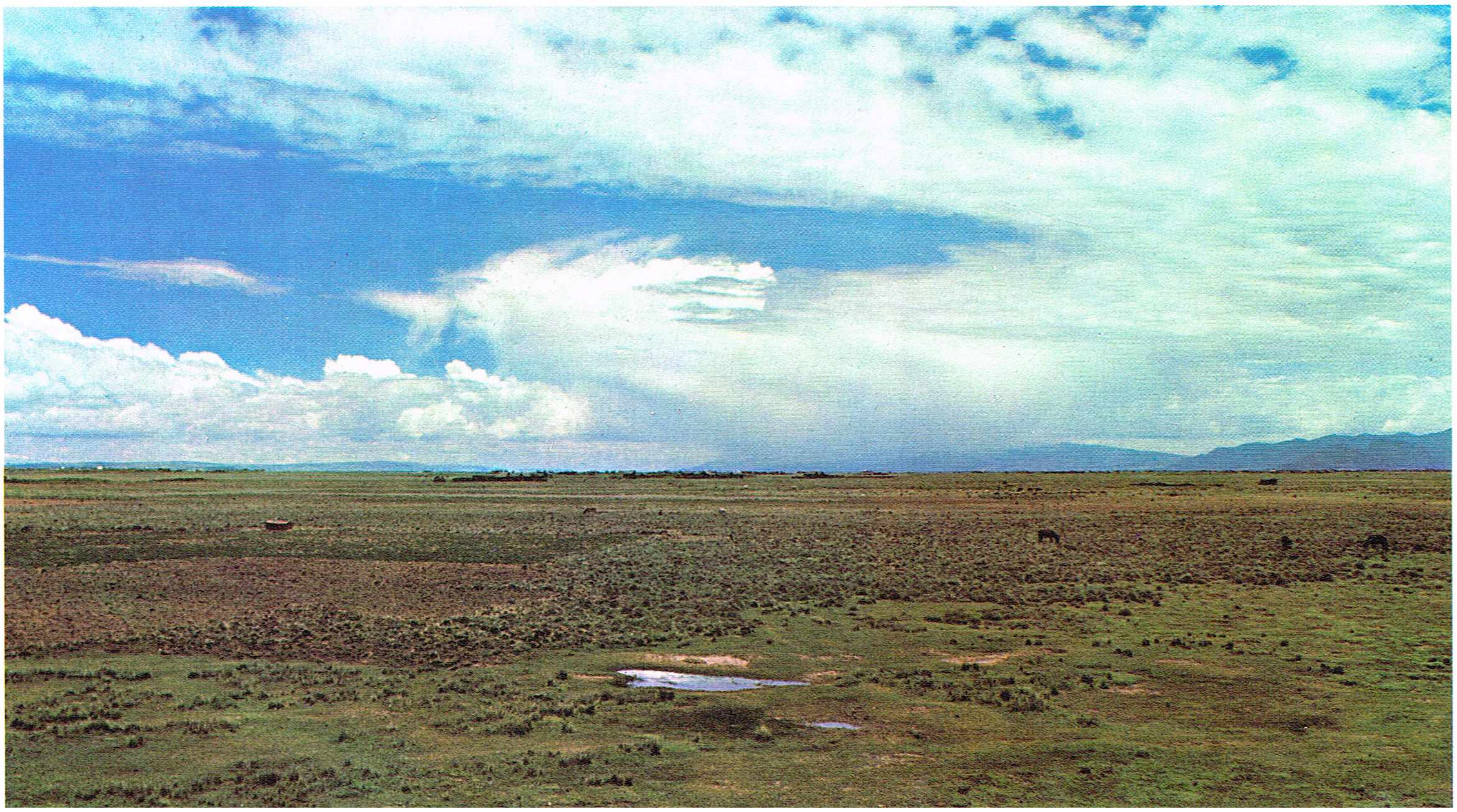

N. Cirani

L'ÉCOLOGIE APPLIQUÉE A LA GESTION DES RESSOURCES NATURELLES

Il est évident à chacun, tout au moins s'il accepte d'étendre son regard sur l'ensemble de notre planète, que de très graves problèmes se posent, essentiellement à cause de l'expansion démographique humaine. Or, la nourriture des hommes vient des ressources naturelles, le plus souvent produites par des systèmes agricoles, qui apparaissent comme des écosystèmes simplifiés créés par l'action de l'homme. L'homme, être vivant entièrement dépendant des systèmes qui régissent le fonctionnement naturel de la biosphère, est partie intégrante de celle-ci : conserver et gérer avec soin les ressources naturelles renouvelables constituées par la production des cultures, des forêts, des espaces « intermédiaires » (ou zones marginales, comme les landes, les marais), des mers... devrait être la préoccupation primordiale de l'humanité, car c'est la survie même de l'espèce humaine qui est en question.

L'utilisation des minerais et des combustibles fossiles a permis le développement rapide de certains secteurs de l'activité humaine. Les progrès technologiques ont ainsi créé l'illusion qu'il était possible de s'affranchir de la nature. Cependant, la récente « crise du pétrole » est venue confirmer les avertissements de ceux qui insistaient, depuis déjà quelques années, sur le fait que ces ressources ne sont pas renouvelables (à notre échelle de temps). Il faudrait ajouter que l'énergie ainsi fournie n'est qu'un appoint, relativement faible, par rapport à la source énergétique essentielle qu'est le Soleil. En outre, le développement industriel s'est accompagné de l'apparition de diverses pollutions et nuisances qui portent atteinte à la santé de l'homme et aux équilibres naturels. L'usage de ce « supplément » énergétique dû aux progrès technologiques de l'homme nécessite donc quelques précautions.

Les écologistes, par l'objet même de leurs études, sont bien placés pour comprendre et faire comprendre autour d'eux les mécanismes qui régissent les rapports de l'homme et de l'ensemble des autres êtres vivants formant la nature. Lorsque certains ont signalé des erreurs et tenté d'éviter des dégradations en alertant l'opinion, il a trop souvent été facile, par ignorance ou par mauvaise foi, de ne tenir aucun compte de ces mises en garde et de considérer les écologistes comme des rêveurs ou des passéistes.

J. Dorst, dans son très remarquable ouvrage *Avant que Nature ne meure* (1965), fut l'un des premiers à sensibiliser l'opinion dans ce domaine. Il proposait déjà une voie réaliste : « Il est urgent que cesse un vieil antagonisme entre les protecteurs de la nature et les planificateurs. Il faut sans doute que les premiers comprennent que la survie de l'homme sur la terre exige une agriculture intensive et la transformation profonde et durable de certains milieux, et qu'ils abandonnent de ce fait beaucoup de préjugés sentimentaux, dont certains ont nui gravement à la cause qu'ils défendent. Mais il faut, en revanche, que les technocrates admettent que l'homme ne peut s'affranchir de certaines lois biologiques, que l'exploitation rationnelle des ressources naturelles ne signifie nullement leur dilapidation ou la transformation automatique et complète des habitats. »

Pour apprécier le rôle de l'homme vis-à-vis des écosystèmes, il est nécessaire de décrire son action. Dans une première partie, nous envisagerons seulement les aspects négatifs destructeurs, soit en général ceux qui se produisent au niveau des espaces naturels, soit plus particulièrement ceux qui sont dus aux activités modernes polluantes. Un deuxième volet montrera comment la prise en compte de certaines connaissances en écologie pourrait aider à la rectification des erreurs passées, et à une meilleure préparation de l'avenir.

La destruction des milieux naturels

La modification du couvert végétal

Dès que l'homme, dans les temps préhistoriques, a commencé à développer une civilisation, son action a eu un impact sur la nature. Lorsque les hommes, peu nombreux d'ailleurs, ne prélevaient dans le milieu naturel que le nécessaire pour leur nourriture, et cela par la cueillette et la chasse, la végétation et la faune n'étaient que très faiblement atteintes et le climax forestier persistait sans mal, là où les conditions climatiques le permettaient. C'est l'utilisation du feu qui a marqué le début de dégradations plus importantes, car c'est là un moyen puissant de destruction qu'il n'est pas toujours aisé de contrôler. Le feu a été un des premiers outils de déforestation et de défrichement : il a permis le développement des civilisations rurales fondées d'abord sur l'élevage puis davantage sur les cultures.

Aujourd'hui encore, beaucoup de paysages dans de nombreuses régions du monde et sous tous les climats sont marqués par cette utilisation humaine du feu, et il serait facile d'en retrouver les traces, surtout dans les régions tropicales. Les coupes définitives de forêts, parfois l'enlèvement de l'humus (écobuage), la mise en culture des zones trop exposées au lessivage ou au ruissellement, certaines pratiques d'élevage (nomadisme, semi-nomadisme, élevage des chèvres...) ont aussi largement contribué à la dégradation de milieux naturels, conduisant parfois à une véritable désertification.

Cependant, certains systèmes artificiels, qui ont été établis progressivement et de façon empirique, représentent une modification parfaitement tolérable du milieu naturel ; ils remplissent leurs fonctions de sources alimentaires (cultures, prairies supportant le bétail) ou de productions de matières premières (bois), et réalisent parfois même des paysages harmonieux. De fait, dans un pays comme le nôtre, il n'existe plus guère d'espaces totalement naturels, sauf peut-être en quelques localités très précises et en haute montagne. Tous les ensembles végétaux qui nous sont familiers sont plus ou moins marqués par l'action humaine ; ils sont donc semi-naturels, sinon totalement artificiels ; même la forêt, qui apparaît à beaucoup comme l'exemple idéal du lieu sauvage, est en réalité le résultat de l'œuvre patiente du forestier.

La dégradation du couvert végétal, ou sa destruction totale par endroits, continue de se produire sous nos yeux, fréquemment à une vitesse accrue à cause de la puissance technique dont disposent les aménageurs, les constructeurs, etc.

Le littoral est le plus durement atteint. Les dunes, mal protégées d'une fréquentation désordonnée du public, perdent la végétation qui les fixent : le sable est alors emporté vers l'intérieur par le vent. Dans le nord de la France, on a récemment assisté à un pillage de sable. La destruction des dunes et de leur végétation n'est pas seulement déplorable, du fait de leur richesse floristique

▼ ***La dégradation du couvert végétal, ou sa destruction totale par endroits, est liée à divers aménagements, telles ces constructions situées en bordure immédiate de la mer ; ici, un complexe hôtelier à Porto Cervo en Sardaigne.***

T. Poggio

et faunistique particulière, de leur importance esthétique ou pour les loisirs; c'est aussi un dommage non négligeable à cause de la perte de protection physique de la zone située immédiatement en arrière vis-à-vis de l'action du vent, des projections d'eau salée et de leurs conséquences sur la douceur du climat, les cultures et l'entretien des habitations. Sur tous les types de côtes, on assiste à une emprise de plus en plus grande de constructions situées en bordure immédiate de la mer : la destruction des biocénoses liées à cette situation s'accompagne, en outre, d'une privation de jouissance pour l'ensemble des citoyens. Le mal est tel que l'on a même proposé, comme une panacée, la conservation « d'un tiers sauvage »! En outre, les routes situées très près du bord de mer, difficiles à établir sur côte rocheuse (ouvrages divers) et coûteuses à entretenir en zone sableuse, détériorent aussi le milieu; aux alentours immédiats, elles rendent finalement l'accès peu agréable au touriste, même si elles paraissent le faciliter.

Les zones lagunaires et les marécages en général sont très souvent drainés, asséchés, voire comblés, sans que le bénéfice d'une utilisation ultérieure soit toujours clairement établi. Or, ces « zones humides » sont des biotopes favorables, notamment, au passage des Oiseaux migrateurs; réduire trop fortement de tels espaces, c'est à terme menacer l'existence de ces espèces.

Dans des zones agricoles, un équilibre, parfois établi de longue date, est brusquement rompu par des travaux sacrifiant promptement au modernisme, avant même que des études préalables (écologiques, hydrologiques, pédologiques et climatologiques) aient été entreprises pour tenter d'en prévoir les effets ultérieurs. Cette attitude a été illustrée par la destruction inconsidérée des haies dans les pays de bocage lors des opérations de remembrement. Il s'agissait essentiellement d'accroître la taille des parcelles pour faciliter le passage de machines agricoles, mais aussi pour récupérer des surfaces occupées par les haies, augmenter les rendements par la suppression des zones d'ombre, et par la disparition des refuges des parasites. En réalité, le faible rendement au voisinage immédiat de la haie est compensé par un accroissement se produisant ailleurs, dû principalement à la protection contre les vents desséchants. En outre, les haies abritent des biocénoses complexes qui comprennent aussi tous les destructeurs des parasites; elles servent de milieux de vie (nourriture, nidification...) pour beaucoup d'Oiseaux insectivores et pour divers gibiers; leur présence ralentit le ruissellement des eaux et par conséquent l'érosion; enfin, l'abri qu'elles forment pour le bétail n'est pas inutile. Au demeurant, il est nécessaire de prendre en compte l'aspect esthétique général du paysage. Un moyen terme entre les exigences techniques et les impératifs biologiques aurait été le maintien d'un maillage de taille raisonnable; cela aurait évité beaucoup de déboires, et peut-être même des inondations à caractères catastrophiques; sur ce dernier point, la preuve scientifique est difficile à apporter, mais l'hypothèse doit cependant être retenue et soigneusement examinée (pour la région de Quimper par exemple).

Pour les zones de grande culture sur bonnes terres, en plaine, plusieurs auteurs, dont K. Watt (1973), ont fait remarquer que, du fait qu'une ferme ou un village formaient le premier noyau originel de certaines villes, celles-ci s'étaient étendues sur des terres à vocation agricole, ainsi perdues pour la production. Cette mise hors circuit de bonnes terres agricoles a lieu actuellement en France dans presque tous les cas d'implantation de villes nouvelles, surtout celles de la région parisienne, qui présentent en outre l'inconvénient de se greffer directement sur l'énorme agglomération déjà existante et de la gonfler encore. Par contre, en Angleterre, pour Londres, les plans mis en œuvre beaucoup plus tôt ont conduit à prévoir des générations successives de villes nouvelles de plus en plus éloignées du centre (maintenant près de 100 km) et à conserver de très importantes ceintures vertes. Il est significatif que l'emprise des constructions de toutes sortes (habitations, établissements industriels, routes, etc.) commence maintenant à représenter, dans les pays dits développés, un pourcentage déjà important (de l'ordre de quelques unités de %) du territoire total.

Les forêts sont aussi très fréquemment victimes du développement des équipements : ainsi, le choix des tracés d'autoroute a partagé nombre de massifs forestiers en deux. Bien que ce type de solution présente divers avantages indéniables sur les plans technique et financier, il est certain que les prises de décision ont lieu souvent dans le sens de la facilité : par exemple, on retient surtout le coût moins élevé du terrain en zone forestière. Les effets écologiques d'un passage d'autoroute ne sont pas nuls : outre ceux qui affectent la bordure et la zone immédiatement voisine (pollution et bruit), il convient de signaler l'effet de coupure, qui est fortement préjudiciable au maintien de la grande faune des forêts (Cervidés, sangliers).

En matière de forêts, sans nier les efforts entrepris pour conserver ce milieu privilégié, il faut signaler quelques pratiques critiquables, tels l'abus des coupes à blanc et la préférence donnée aux résineux.

Même des gestionnaires extrêmement scrupuleux ont cédé à ces pratiques dans les dernières années sous

▼ L'abattage de haies (à gauche, avant; à droite, après) dans les pays de bocage a, dans les zones agricoles, rompu un équilibre parfois établi de longue date.

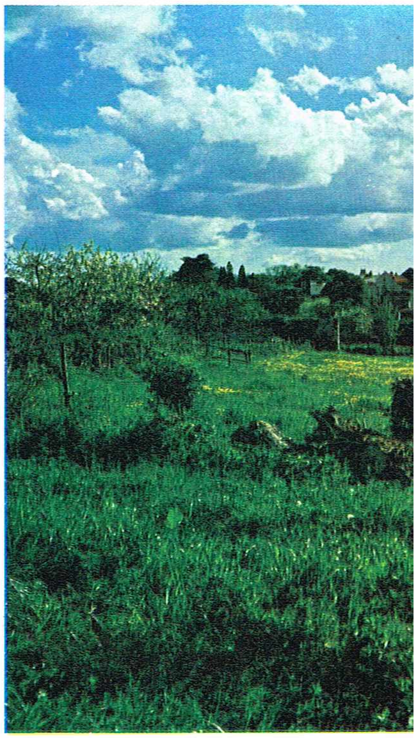

Binois - Pitch

une pression politique de rentabilité accrue. Le débat parfois passionné qui s'est produit à ce sujet a conduit à une meilleure compréhension des problèmes économiques forestiers par les défenseurs de la nature et, réciproquement, les forestiers ont pris en compte un certain nombre de remarques de ces derniers.

Il faut noter dans ce domaine une nette tendance à l'amélioration : ainsi, les subventions accordées par le Fonds national forestier pour le boisement et le reboisement, jusqu'à maintenant limitées aux résineux, vont être étendues à plusieurs essences feuillues : le hêtre, le chêne rouvre, le chêne pédonculé, le sycomore, le frêne et le merisier. Il sera aussi possible de transformer des taillis en futaies feuillues au lieu de planter des résineux. En effet, malgré l'intérêt des résineux pour une production rapide, les préférer systématiquement n'est pas sans inconvénient : on a souvent évoqué à cet égard l'acidification des sols, mais le plus grave est sûrement leur grande sensibilité au feu. Il est probable que le bénéfice réel des plantations de pins laricio dans le Midi méditerranéen a été fortement réduit par les incendies très fréquents : sur une période de dix ans, on estime que 240 000 ha de forêts de Provence et de Corse ont été atteints par le feu, ce qui représente plus de 60 % de la surface forestière de ces régions.

Par ailleurs, la préférence accordée au système des plantations plutôt qu'au régime de la futaie jardinée conduit à l'utilisation des coupes à blanc, soit pour la régénération de zones traitées autrement, soit automatiquement lors de l'exploitation. Or, la dénudation brutale d'un sol forestier l'expose au lessivage (perte de fertilité) et au ruissellement (risque d'érosion). De plus, le public est extrêmement sensible à l'aspect désolé d'une parcelle coupée à blanc ; il faut bien reconnaître que le système de la plantation impose une période de non-pénétration très longue, et, même lorsque la plantation est âgée, l'alignement régulier fait perdre beaucoup au charme de la forêt. Le milieu forestier ne doit donc pas être considéré uniquement comme une usine à bois, car il représente aussi un lieu privilégié de détente et de contact avec la nature.

En zone tropicale, la forêt est très menacée. En Afrique, la pratique de la culture sur brûlis a été depuis longtemps une cause de déforestation ; de nombreuses savanes ont une origine anthropique. Le contact avec les civilisations industrielles n'a fait qu'accroître les dommages : actuellement, l'exploitation de la forêt se fait avec des moyens mécaniques très puissants et exerce de véritables ravages. L'introduction des cultures industrielles, comme celle du cacaoyer, a accéléré ces destructions : on estime qu'au Ghana, la forêt a été ainsi amputée de près de 85 % de sa surface ; il convient à ce sujet de se rappeler qu'au bout de quelques années les sols privés de leur couvert sont totalement dégradés par la latéritisation et soumis à l'érosion. Madagascar est également un des territoires les plus touchés : la forêt, qui, il y a un siècle, couvrait plus de 75 % de la surface de l'île, ne représente plus actuellement que 30 % du territoire. De même, le Brésil a perdu presque la moitié de ses forêts, et la mise en construction des axes routiers transamazoniens peut faire craindre, à partir d'eux, une dégradation accélérée, « en tache d'huile », par un défrichement qui n'apporterait qu'une prospérité trompeuse de quelques années.

Marka - G. Heilman

▲ ***Les forêts sont très fréquemment victimes du développement des équipements ; ainsi, le choix des tracés d'autoroutes (ici, en Pennsylvanie, U.S.A.) a partagé nombre de massifs forestiers en deux ou plusieurs parties isolées les unes des autres.***

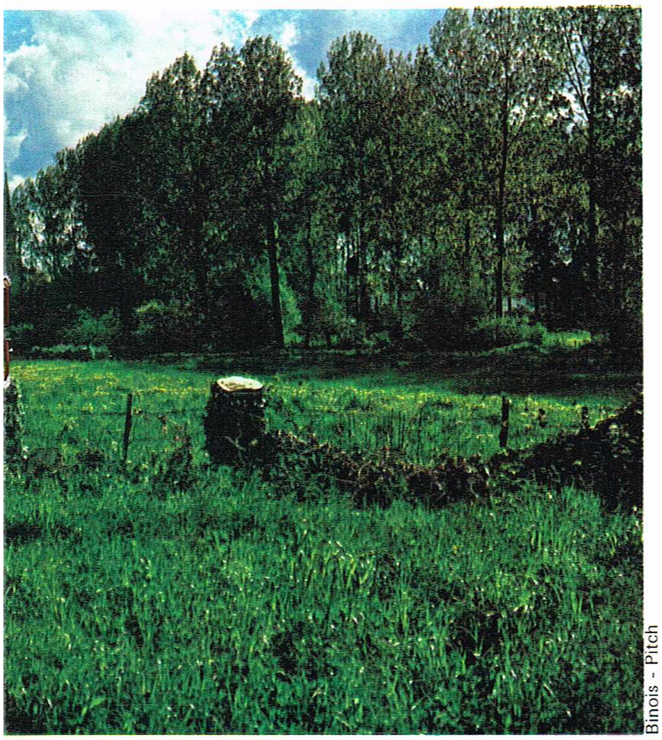

Binois - Pitch

A l'échelle de la planète la stérilisation des sols, leur érosion et la désertification, qui sont les conséquences des atteintes au couvert végétal, privent l'homme de ressources potentielles pour le futur : depuis moins d'un siècle, ce sont ainsi plus de 10 millions de km^2 (soit 14 % des terres utilisables), situés pour la majeure partie en Afrique ou en Asie, qui ont été perdus.

La destruction des espèces animales

La destruction de la végétation et des biotopes dont elle forme la structure fonctionnelle de base porte, encore bien plus sûrement que la chasse ou la pêche sans limites, un coup fatal à de nombreuses espèces animales. Beaucoup d'espèces de petite taille disparaissent ainsi sans que personne, à l'exception de quelques scientifiques, ne s'en aperçoive. Par contre l'attention est plus facilement attirée par les grandes espèces, surtout Mammifères et Oiseaux. Mais il ne faut pas oublier que des activités humaines telles que la mise en culture, l'exploitation de

▶ *La destruction de la végétation, la chasse ou la pêche sans limites ont porté un coup fatal à de nombreuses espèces animales comme le bison d'Europe* (Bison bonasus) *qui a disparu au fur et à mesure de l'établissement des civilisations et ne subsiste plus que dans une réserve en Pologne.*

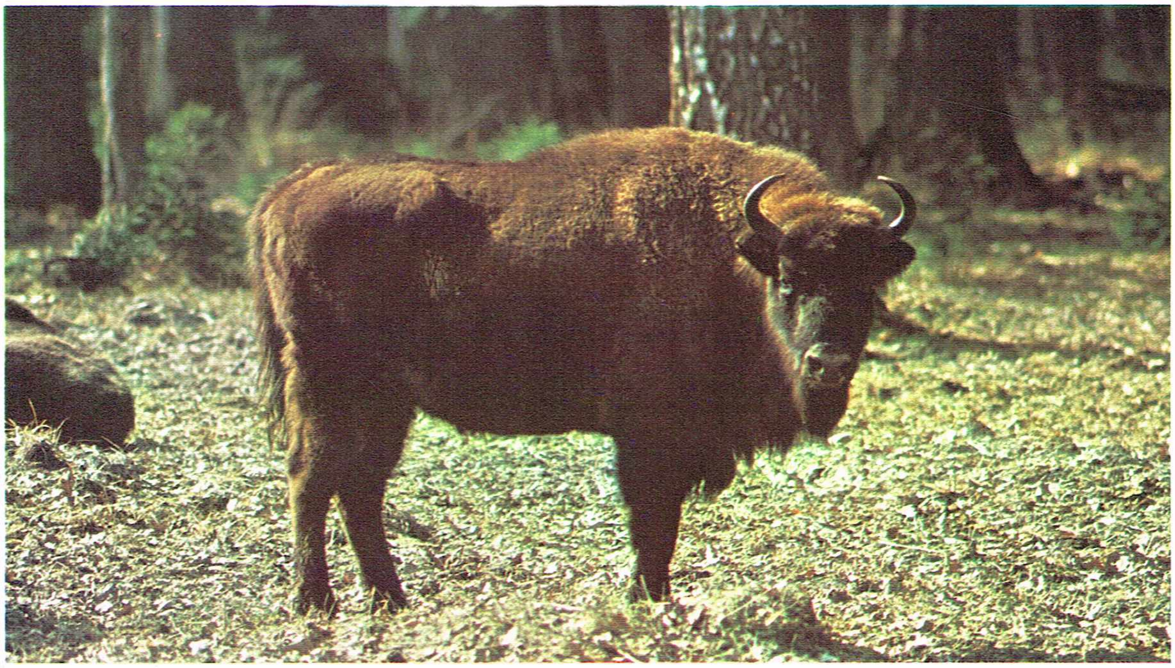

G. Vienne - F. Bel - Pitch

la forêt, l'assèchement des marais et aussi l'introduction d'espèces d'une région à l'autre, sont responsables de déséquilibres graves pouvant entraîner des disparitions parmi la faune.

Très tôt dans l'histoire de l'humanité, la chasse a pu amorcer ou précipiter le déclin de certaines espèces. Les animaux de l'époque quaternaire, tels que l'ours des cavernes, le mammouth, le rhinocéros à narines cloisonnées, le cerf géant, ont peut-être disparu sous la pression de l'homme, mais il est toujours difficile de faire la part exacte de ce qui est dû à l'évolution normale sous l'influence des conditions climatiques. Malheureusement, l'appréciation est plus aisée au fur et à mesure que l'on se rapproche de notre époque; on estime que depuis 2 000 ans une bonne centaine d'espèces de Mammifères ont disparu, dont presque 70 pendant le XX^{e} siècle. Pour les seuls Mammifères, on compte toujours de 500 à 600 espèces menacées. Toutefois, l'examen des chiffres depuis 1900, par périodes de 20 ans, donne la séquence suivante : de 1900 à 1919, 23 espèces de Mammifères détruites; de 1920 à 1939, 27; de 1940 à 1959, 14; à partir de 1960, 3. Est-on sur la bonne voie ou bien le nombre d'espèces à anéantir a-t-il diminué?

Parmi les cas récents ou actuels, quelques exemples illustrent bien la folie destructrice des hommes. Si le bison d'Europe a disparu lentement au fur et à mesure de l'établissement des civilisations, au point de n'être plus qu'une relique soigneusement conservée dans une réserve en Pologne, le bison américain a échappé de justesse à une quasi-extermination en règle, extrêmement rapide. L'aire de ce bel animal, qui s'étendait sur l'ensemble de la grande plaine américaine, a commencé à se restreindre dès l'arrivée des premiers colons Européens. Au début du XX^{e} siècle, la troupe, initialement estimée à plus de 70 millions de têtes, était pratiquement exterminée et limitée à un nombre restreint de très petites régions. La grande majorité des 70 millions d'animaux a été tuée dans une période de 70 ans seulement (de 1820 à 1890) : en 1893, il n'y avait déjà plus qu'un millier de bisons. Les scènes pittoresques, mais attristantes, ne manquent pas : citons les trains spéciaux, où le tir se faisait même à partir des compartiments, les tueurs laissant les animaux sur place après en avoir seulement prélevé la langue, le rôle du fameux Buffalo Bill Cody qui tua à lui seul 4 280 bisons et le record d'un certain Billy Tilghman qui en extermina 3 300 en sept mois! L'espèce fut sauvée *in extremis* par des mesures de protection et plusieurs troupeaux sont maintenant prospères dans des parcs américains et canadiens (10 000 têtes environ).

D'autres espèces plus proches de nous, comme l'ours brun des Pyrénées, sont à la limite de la survie; le bouquetin aurait probablement été éliminé de la faune alpine sans la providentielle existence de la réserve de chasse du roi Victor-Emmanuel. Faut-il rappeler que le village de Bièvres et la rivière du même nom, qui se jette dans la Seine par une conduite souterraine dans Paris, doivent leur nom à la présence encore assez récente des castors, ou bièvres?

Parmi les Oiseaux aussi, de grandes espèces ont été anéanties, comme le coq de prairie américain ou le pigeon migrateur (« passenger pigeon », *Ectopistes migratorius*). Le dernier individu de cette espèce est mort en 1914 au Jardin zoologique de Cincinnati, alors qu'on observait autrefois dans le ciel des vols de plusieurs kilomètres de long. Près de 15 millions furent tués et vendus en 1861 en une seule année. Sont à ajouter à la liste des victimes : le moa de Nouvelle-Zélande, une autruche de près de 3,50 m de haut, les *Aepiornis* de Madagascar dont les œufs avaient une contenance de 8 litres, le pigeon dodo de l'île Maurice, espèce qui ne volait pas et s'est éteinte en 1693.

Parlant de l'arrivée des Européens en Afrique du Sud, R. Heim (1952) écrit : « Elle a coûté à la nature, irrémédiablement et dans un temps record, la perte de l'hippotrague bleu, ou bloubok, du quagga, sorte de cheval sauvage dont le dernier fut fusillé en 1858, du lion du Cap et du zèbre de Burchell. » A propos des Mammifères marins, eux aussi durement atteints (baleines, phoques, lamantins), le même auteur évoque le cas d'une sirène (la rhytine de Steller, ou *Hydrodamalis*) : « Découverte en 1741 dans le détroit de Behring, elle était définitivement exclue de la faune de la planète 27 ans plus tard. L'homme va vite. »

Qu'en est-il de nos jours? On pourrait croire qu'un certain intérêt pour les problèmes de protection de la nature et les mesures qui en ont découlé ont porté définitivement remède à cette situation. En fait, il n'en est rien. Certes, les massacres massifs sont évités, mais il faut tenir compte du fait que la réduction d'un grand nombre de biotopes particuliers à des surfaces limitées, dans des localités bien précises, met beaucoup d'espèces en danger. La surexploitation lors de la chasse ou de la pêche n'est pas non plus toujours évitée. Il s'agit en effet de respecter des limites de prélèvements des espèces, qui permettent de maintenir un bon niveau de population : si l'on dépasse ces limites, cela revient à « manger le capital », qui, par la suite, ne pourra donc produire d'« intérêts ».

La pêche baleinière illustre bien ce point. L'effort de capture s'est d'abord porté sur le rorqual, dont la population était évaluée à 200 000 individus; bien que l'on sache que cette espèce a un taux faible de reproduction et une vie courte, les prélèvements ont atteint des valeurs exagérées; ainsi, près de 30 000 individus ont été pêchés au cours de la seule année 1930. L'espèce était très menacée, lorsqu'en 1964 une mesure internationale permit de la protéger. Le même scénario se déroule pour un autre

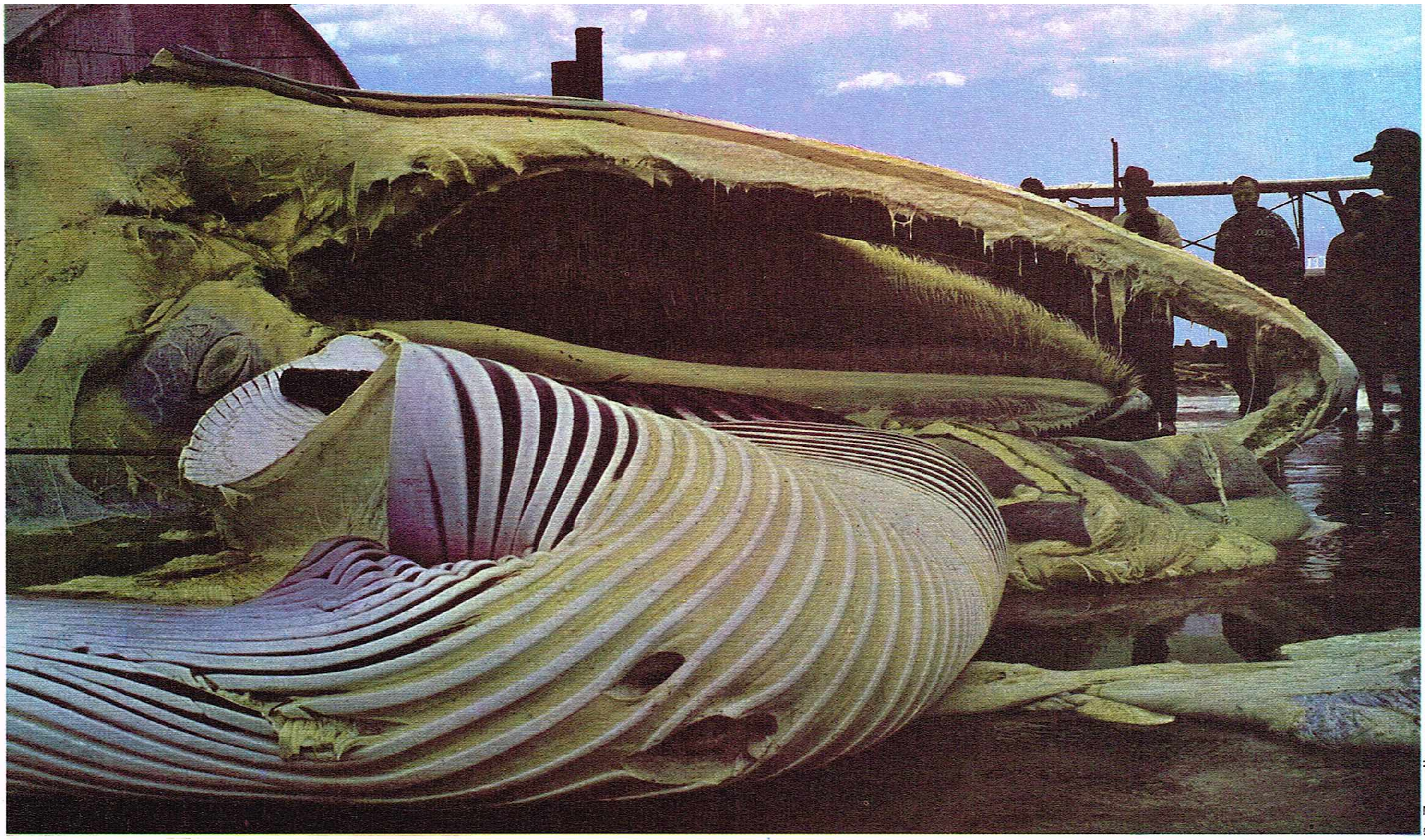

B. Zuccoli

▲ *La* **surexploitation,** ***lors de la pêche baleinière notamment, peut s'avérer un facteur important de destruction animale si l'on ne respecte pas des limites de prélèvement.***

grand Baléinoptère, le rorqual commun, dont les effectifs et les prises ont diminué rapidement à partir de 1965. Afin d'amortir les investissements réalisés dans la flotte baleinière, la pêche continue en se reportant sur d'autres espèces plus petites, dont les populations ont baissé de façon alarmante, puis sur le cachalot, pour lequel le nombre de prises (25 000 individus en 1970) apparaît aussi dramatiquement élevé. Outre l'huile, la production baleinière fournit de la viande, utilisée dans la fabrication des aliments pour chiens et chats. De même les kangourous australiens, capturés aussi pour leur peau, fournissent pour nos animaux familiers 4 000 tonnes de viande par an.

La chasse dite sportive peut aussi donner quelques inquiétudes. En France, le nombre de porteurs de permis pour 1973 était de 2 112 581. La superficie disponible par chasseur est donc de moins de 30 ha en moyenne, ce qui est de loin le chiffre le plus bas de tous les pays européens; très souvent dans ce domaine, des préoccupations bassement électorales permettent des abus et le non-respect de règlements, qui ne protègent d'ailleurs même pas assez efficacement la faune sauvage. Les safaris africains s'exercent encore aux dépens d'espèces qui n'auront plus de refuge que dans les rares parcs : notamment les girafes, rhinocéros, éléphants, etc.

L'industrie de la fourrure est responsable d'un danger permanent d'élimination de beaucoup d'espèces de grands fauves : guépards, tigres, panthères, ocelots, etc., et de nombreuses autres espèces de Mammifères. Les trafics d'animaux sauvages pour la vente à des particuliers ou à des zoos privés à buts mercantiles sont aussi fortement nuisibles à la faune exotique.

Signalons, enfin, que quelques espèces de rapaces ont payé chez nous un très lourd tribut à leur réputation de nuisibles. Celle-ci est tout à fait fausse en l'occurrence, car il s'agit d'actifs destructeurs de rats et de mulots.

Les aspects affectifs ou spectaculaires de ces problèmes ne doivent cependant pas donner l'impression d'une inéluctable élimination de la faune devant la marche du « progrès ». Nous verrons plus loin que des motivations profondes et tangibles existent en faveur de la protection du milieu naturel; les connaissances scientifiques sont dès à présent suffisantes pour mettre en œuvre des stratégies prudentes : il ne manque que la volonté politique de les réaliser.

Les pollutions et les nuisances

Les pollutions et les nuisances dues à l'action de l'homme sont souvent considérées, dans le fonctionnement technique de nos sociétés, comme de simples inconvénients ou accidents, auxquels il serait aisé de remédier par l'application de techniques curatives; le seul obstacle invoqué à la mise en œuvre de leur élimination est l'impératif économique et financier. En réalité, une pollution ou une nuisance ne sont prises en compte que lorsqu'on a perçu leur influence plus ou moins directe sur l'homme, sur sa santé, sur ses ressources alimentaires (les autres êtres vivants), sur la qualité de son cadre de vie. Le problème doit donc d'abord être considéré essentiellement sous cet aspect biologique. Dans une optique écologique, les pollutions sont des atteintes aux écosystèmes, atteintes engendrant immédiatement des destructions importantes ou induisant une série de réactions en chaîne, créant de véritables « maladies » de l'écosystème. A une échelle plus étendue, celle de la biosphère, les pollutions apparaissent aussi comme des perturbations du fonctionnement des cycles biogéochimiques. Au niveau de l'espèce, plus spécialement dans le cas de l'homme, c'est un phénomène portant atteinte à la santé de l'individu et même des populations.

La pollution est liée au développement industriel amorcé à la fin du siècle dernier, mais qui s'est accru considérablement, surtout dans les pays dits « développés », durant les dix dernières années. La pollution peut être due à la dispersion dans le milieu, soit de produits de synthèse qui n'ont pas toujours d'équivalent dans les cycles naturels (pesticides, détergents non biodégradables, etc.), soit d'un excès de produits qui existent normalement mais en quantité telle que le recyclage s'accomplit régulièrement, soit des produits de combustion ou d'utilisation des combustibles fossiles et des minerais dont les éléments ne seraient, sans l'intervention de l'homme, incorporés dans les cycles biogéochimiques qu'à une échelle de temps géologique donc très lentement.

On peut classer les pollutions selon les milieux ou les organismes atteints ou selon les agents polluants dont on précise la nature. Généralement on considère les grands milieux et on envisage l'action des divers polluants qui y sont présents. Le terme de *nuisance* est équivalent de celui de *pollution,* mais il introduit plus fortement l'idée d'inconvénient, pour l'homme essentiellement; pour le bruit, agent physique, on utilise de préférence ce terme, parfois aussi sur le plan visuel pour les « nuisances » esthétiques. Ramade (1974), dans son remarquable ouvrage, *Éléments d'écologie appliquée,* propose une brève classification montrant que les divers polluants peuvent agir sur plusieurs milieux et qu'aucune classification ne peut donc être parfaitement rigoureuse.

La pollution atmosphérique

Les causes de la pollution atmosphérique sont surtout les combustions d'origine industrielle ou domestique, la consommation d'hydrocarbures par les véhicules automobiles, la dispersion de poussières ou de gaz résidus

de l'industrie chimique. Il faut aussi signaler la pollution par les substances radioactives dans le cas des explosions nucléaires dans l'atmosphère et au sol, ou lors de l'utilisation des réactions nucléaires à des fins pacifiques.

La combustion du bois et d'autres matériaux divers (usines d'incinération d'ordures), mais surtout celles du charbon et du fuel pour l'usage domestique, pour les fabrications industrielles et pour l'automobile, accroissent la quantité de *gaz carbonique* présent dans l'atmosphère.

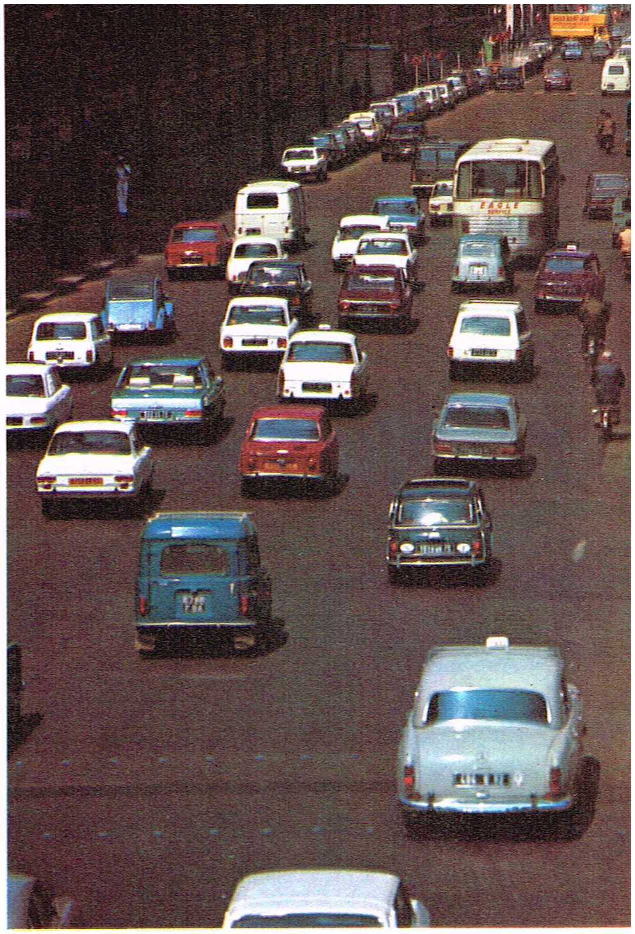

Pictor

▲ *La* **pollution atmosphérique** *menace les végétaux, les animaux mais aussi l'homme; ainsi l'air des grandes cités où se déversent* **gaz et fumées** *se transforme peu à peu en une atmosphère brumeuse (ici, à Milan) qui peut être préjudiciable à la santé de beaucoup.*

Sur le plan biologique, aux doses présentes dans l'atmosphère et même légèrement accrues, le gaz carbonique n'est pas un produit toxique. La végétation est capable de l'utiliser et d'en absorber une partie de l'excédent; par ailleurs les océans, réservoirs essentiels de gaz carbonique, ont aussi vis-à-vis de lui un pouvoir tampon non négligeable. Toutefois, un effet climatique de réchauffement de la planète ne serait pas impossible, bien que certains spécialistes pensent que cette tendance serait combattue par l'accroissement de la teneur en poussières de l'air, qui empêche une partie du rayonnement solaire d'atteindre le sol. Il y aurait là un effet de compensation entre deux formes de pollutions !

De l'*oxyde de carbone* est aussi produit lors des combustions. Selon Robinson et Robbins (1960), cette production supplémentaire pour l'ensemble de la biosphère serait de 257 millions de tonnes, dont presque 200 millions sont dus à l'automobile. Bien que cela puisse théoriquement conduire à une augmentation de taux d'oxyde de carbone de l'ordre de 5 % par an, il ne semble pas que l'accroissement réel soit très important, soit que les végétaux l'absorbent, soit qu'il y ait transformation en gaz carbonique. Il est très difficile d'évaluer l'impact de ce polluant, sauf dans le cas particulier des villes, où la teneur moyenne est de l'ordre de 20 ppm (parties par million) contre 0,1 à 0,2 de teneur normale. A certains carrefours, à des moments d'embouteillages, cette teneur peut passer à 100 et même à presque 300 ppm dans un tunnel autoroutier; des accidents sont alors possibles, comme des malaises chez des agents de police séjournant longtemps à de tels endroits.

Parmi les pollutions gazeuses carbonées, celle due aux gaz brûlés et imbrûlés issus de la combustion des hydrocarbures par les moteurs des automobiles est probablement la plus grave. Les carbures imbrûlés représentent souvent plus de 10 % de ce qui est consommé; en outre, il faut citer divers produits provenant de combustion incomplète : les plus connus sont le *benzo-pyrène,* qui a un pouvoir cancérigène certain, et le PAN ou *péroxyacyl nitrate*. Ce dernier résulte de la combinaison, par des réactions photochimiques, des carbures imbrûlés et des oxydes d'azote, eux-mêmes produits par les moteurs à explosion. Le PAN est le constituant le plus nocif du *smog* (dit encore smog oxydant, ou smog photochimique), qui sévit dans certaines villes de climat assez chaud et dont la localisation entraîne à certains moments une inversion de température maintenant les gaz chauds dans les zones basses. C'est le cas à Los Angeles, où le PAN, gaz très irritant pour les yeux et toxique, atteint parfois des taux tels qu'il faut lancer de véritables alertes : on doit alors arrêter pendant quelques heures la circulation automobile et demander aux habitants, surtout aux sujets fragiles sur le plan pulmonaire ou cardiaque, de suspendre toute activité. Un cas limité de smog a été signalé en zone méditerranéenne, à Gênes, et, fait plus curieux, un autre dans le nord de l'Europe, dans une région pour laquelle il semblait *a priori* que les conditions climatiques de l'apparition d'un tel phénomène n'étaient pas remplies. Il semble qu'en réalité aucune grande ville à circulation automobile intense ne soit totalement à l'abri de tels risques.

Le *plomb* contenu dans les carburants, sous forme de plomb tétra-éthyle destiné à permettre des taux de compression plus élevés (voitures plus « nerveuses »), se retrouve aussi, dispersé dans l'atmosphère, sous forme de fines particules au sein des aérosols; les concentrations observées sont directement liées à l'intensité du trafic. Il existe aussi des dangers au niveau de l'ingestion de végétaux provenant de cultures exposées fortement aux dépôts de telles poussières (en bordure d'autoroutes par exemple).

Une autre forme importante de pollution de l'atmosphère est due au dégagement de *gaz sulfureux* (SO_2) à partir de la combustion de certaines qualités de charbons ou de fuels dont la teneur en soufre n'est pas négligeable. La pollution par le SO_2 est aussi bien provoquée par les industries que par le chauffage domestique : dans certains arrondissements de Paris, pour lutter contre la pollution, la réglementation impose l'usage de fuel à faible teneur en soufre pour le chauffage. Le SO_2, qui n'est pas un composant normal de l'atmosphère, sauf au voisinage des zones volcaniques, se combine à l'eau atmosphérique et revient au sol sous forme d'acide sulfurique; le pH des eaux de pluie peut alors baisser jusqu'à 4. Cette acidité est une des causes principales des dégâts de corrosion observés sur les édifices : les dépenses de ravalement et d'entretien des façades devant être répétées plus souvent, le coût de cette pollution n'est pas négligeable. En outre, le gaz sulfureux a un effet très défavorable sur les affections respiratoires : le taux très élevé des bronchites chroniques observé dans les zones urbaines et industrielles est certainement dû en grande partie à ce facteur. A Londres, durant l'hiver 1952, un smog acide, dû à une forte teneur en SO_2 et à une période de fort brouillard, a été considéré comme responsable de la mort de 4 000 personnes; plusieurs dizaines de milliers d'autres furent atteintes de troubles broncho-pulmonaires. Sans que les effets soient toujours aussi

T. Poggio

R. Favier - Explorer

frappants, il est certain que plusieurs affections et surtout la bronchite chronique, engendrée aussi par l'habitude de fumer, sont liées à la pollution ; d'ailleurs, les fumeurs ne font rien d'autre que d'inhaler une atmosphère polluée et de la créer également pour leur entourage.

D'autres formes de pollution atmosphérique, moins répandues, ont toutefois des effets localement très spectaculaires. C'est le cas de la pollution par les rejets fluorés des usines de fabrication d'aluminium, dans lesquelles on utilise la *fluorine*, ou *spath-fluor*, comme fondant avec la bauxite. Dans la vallée de la Maurienne, la pollution par le fluor a fortement endommagé la forêt de Conifères, et le bétail broutant les prairies contaminées a été atteint de troubles au niveau des os, nécessitant parfois l'abattage ; en 1970, Bossavy estimait que dans cette région plus de 3 000 hectares de forêts étaient condamnés et qu'une telle déforestation dans une zone de montagne pouvait aussi avoir de graves conséquences sur le ruissellement des eaux et accroître les risques de glissements de terrain.

Les végétaux sont plus ou moins sensibles aux divers polluants, selon les groupes et selon les espèces. On connaît bien les atteintes dues à la pollution fluorée : les espèces les plus sensibles sont le pin sylvestre, l'épicéa et les arbres fruitiers. En ce qui concerne le gaz sulfureux, le tabac et la luzerne y sont très sensibles ; le maïs, la tulipe, le cotonnier sont plus résistants. Les Lichens sont d'excellents indicateurs cumulatifs du niveau de pollution de l'air ; on a pu établir, en étudiant la flore lichennique épiphyte sur les troncs d'arbres, qu'il existait une zonation en auréole autour des centres urbains : en zone centrale, seules quelques rares espèces crustacées, comme *Lecanora conizoides*, persistent ; puis on observe des zones intermédiaires, et les grandes espèces foliacées ou buissonnantes, comme *Usnea* et *Ramalina fraxinea*, ne se rencontrent que là où l'air n'est plus pollué.

Quant à la pollution atmosphérique, la diffusion des masses gazeuses dans l'atmosphère pose des problèmes de transfert de polluants, même entre pays plus ou moins éloignés : des dommages peuvent être supportés par d'autres pays que ceux dont proviennent les polluants. Les dégâts liés à la pollution qui se manifestent au niveau de la santé des citadins, au niveau de la production des cultures, ou encore par les atteintes de vieillissement prématuré des constructions, devraient, malgré leur forme parfois insidieuse, être pris en compte au passif de certaines industries et de l'ensemble de l'activité économique : cela permettrait de juger plus exactement des bienfaits techniques, dont on masque trop facilement les inconvénients.

La pollution des eaux

Les cours d'eaux ont été considérés, dans les pays industriels, comme des sources gratuites d'eau de refroidissement, mais aussi, ce qui est plus grave, comme des sortes d'égouts à ciel ouvert : les rejets les plus divers y sont déversés, auxquels s'ajoutent d'ailleurs les eaux usées domestiques et les produits issus du lessivage des sols par le ruissellement des eaux de pluie. Les lacs ne sont pas exempts non plus de rejets, et les mers reçoivent, en plus de ce qui est drainé vers elles par les fleuves, les rejets des villes et des établissements installés sur les côtes.

▲ ***Au centre, lors de trafics automobiles intenses, la concentration de plomb, contenu dans les carburants et qui se retrouve dispersé, peut atteindre un taux alarmant.***
A droite, une autre forme de pollution ; moins répandue, mais très spectaculaire, celle des rejets fluorés des usines de fabrication d'aluminium dans la vallée de la Maurienne.

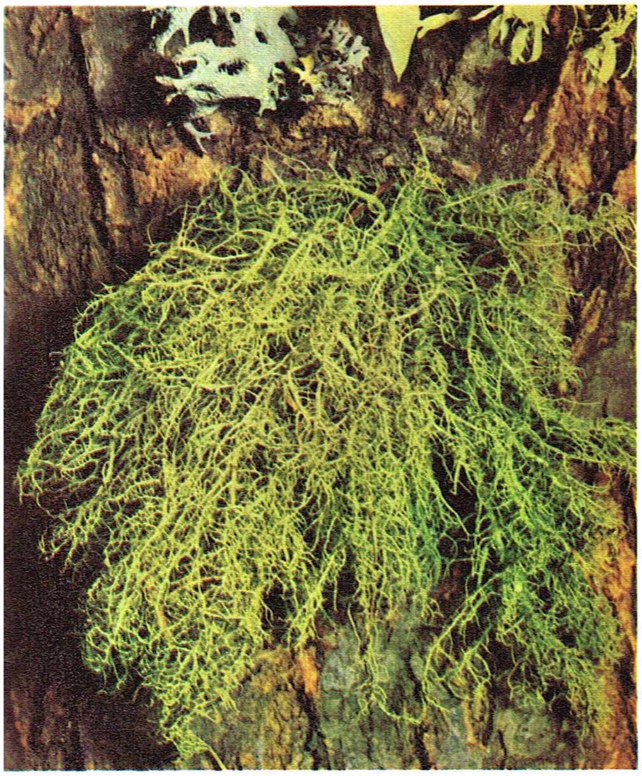

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ ***Les Lichens sont d'excellents indicateurs du niveau global de pollution atmosphérique. Ici, un Lichen buissonnant (Usnea), qui ne persiste que dans les zones forestières non polluées.***

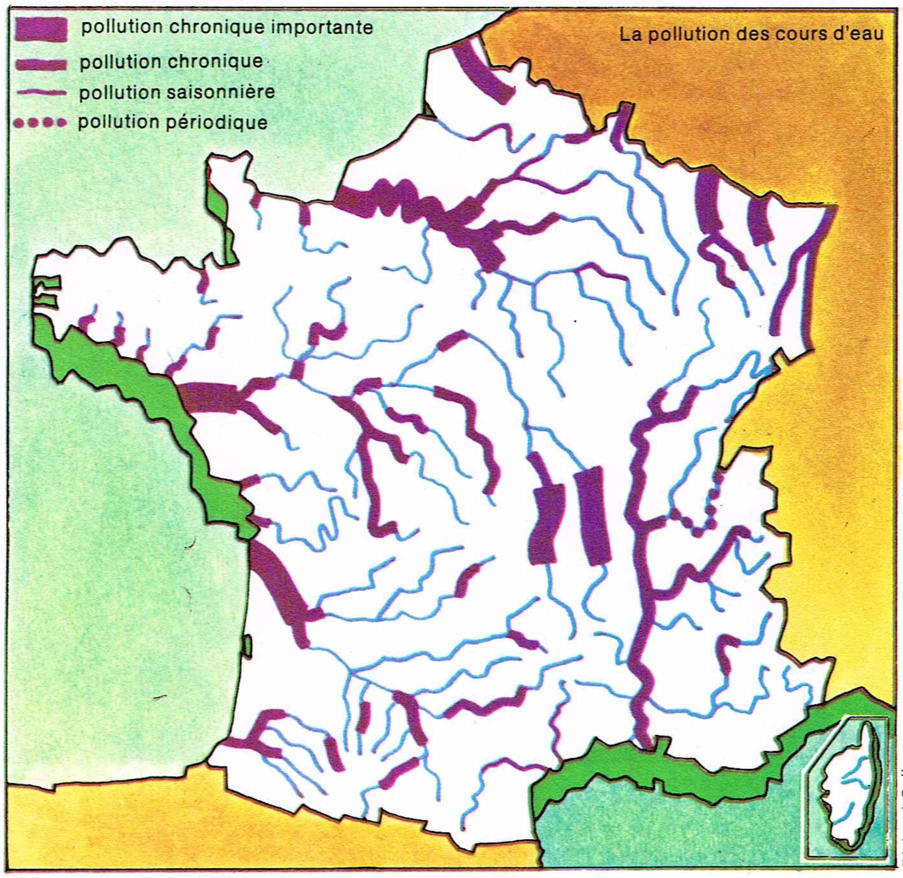

▲ *A gauche, la pollution organique des eaux, et plus particulièrement celle qui est provoquée par les hydrocarbures difficilement décomposables, entraîne en plus des inconvénients décelables (souillures des plages, etc.) un effet biologique considérable en empêchant la vie du plancton. A droite, représentation cartographique des cours d'eau pollués en France* (Revue de la D.A.T.A.R. *1970*).

La pollution organique des eaux

L'eau contient toujours des Bactéries capables d'assurer la décomposition d'une quantité donnée de matières organiques en suspension qui peuvent être issues des excréments, des débris végétaux, des résidus des papeteries, des laiteries et des sucreries; un dépôt s'effectue aussi dans les vases. Il n'y a pollution que si ces substances sont en quantité trop élevée pour que la capacité d'auto-épuration de l'eau puisse jouer. En fait, une certaine quantité d'oxygène est nécessaire aux micro-organismes pour qu'ils puissent exercer leur activité de décomposition; la charge de polluants organiques se mesure d'ailleurs par la DBO, ou demande biologique d'oxygène, qui traduit ce besoin d'oxygène. En plus de cela, ce type de rejet de matières organiques s'accompagne d'une prolifération bactérienne, y compris celle de germes pouvant provoquer des maladies graves (choléra, typhoïde, dysenteries, etc.). De tels germes peuvent être transmis directement à des baigneurs ou lors de la consommation de coquillages.

Les quantités de matières rejetées sont considérables. Des villes importantes comme Marseille sont dépourvues de stations d'épuration et leurs eaux d'égouts sont directement rejetées à la mer! L'industrie du papier et les industries alimentaires sont aussi extrêmement polluantes. On estime qu'une usine de papier de taille moyenne pollue autant qu'une ville de 500 000 habitants.

A ces facteurs de pollutions organique et biologique peuvent s'ajouter des facteurs purements physiques de l'eau, comme son réchauffement lors du rejet d'eau chaude à partir des circuits de refroidissement des centrales nucléaires. La pollution thermique qui s'ajoute alors fait décroître le taux d'oxygène de l'eau et augmente donc la pollution d'ensemble.

Parmi les pollutions organiques particulières, citons celles provenant des rejets d'hydrocarbures, de détergents et de pesticides. Les hydrocarbures, bien que ce soient des composés organiques, sont très difficilement décomposés dans les eaux car ils sont formés de longues chaînes de molécules. Des quantités considérables sont pourtant déversées en mer par des pétroliers qui rejettent les résidus de nettoyage de leurs soutes, ou lors d'accidents survenant à des bateaux *(Torrey Canyon)*, ou encore à des puits installés en mer (accident de Santa Barbara en Californie). Les rejets des petits bateaux (la vidange de moteur par exemple) seraient aussi à prendre en compte. En plus des inconvénients facilement décelables, comme la souillure des plages, l'engluement des Oiseaux, le goût de « mazout » des coquillages et Poissons, les effets biologiques sont considérables, car une nappe de pétrole crée un écran empêchant les transferts gazeux entre l'eau et l'air et donc la vie du plancton, source primaire de la productivité marine.

La législation concernant ces rejets en mer semble bien trop souple; de plus, elle est constamment bafouée. On estime qu'en 1970, pour la seule Méditerranée, 300 000 tonnes d'hydrocarbures ont été légalement rejetées dans les zones autorisées; il faudrait y ajouter les opérations illicites auprès des côtes. La construction d'énormes bateaux transporteurs et la plus grande fréquence des puits de pétrole en mer (technique dite *off-shore*) aggravent encore les risques en ce domaine.

Les produits détergents et les pesticides sont des substances organiques de synthèse parfois complexes et non biodégradables; cela veut dire qu'elles ne sont pas détruites par les micro-organismes et sont donc susceptibles de se concentrer le long des chaînes alimentaires, ce qui peut comporter des risques sérieux pour les espèces en bout de chaîne. Pour les détergents, on a créé depuis quelques années des produits biodégradables; en France, la loi impose que les lessives soient biodégradables à 80 %; cependant, les 20 % non biodégradables restent un danger pour l'environnement, surtout si l'on considère que la consommation de tels produits ne fait qu'augmenter. Notons au passage que nos voisins de Grande-Bretagne ne fabriquent pour eux-mêmes que des détergents biodégradables. Quant aux pesticides, des quantités impressionnantes en ont été retrouvées dans la graisse de certains Oiseaux marins.

Les pollutions minérales des eaux

Parmi les polluants minéraux des eaux on peut distinguer deux catégories : d'une part, les métaux lourds, et d'autre part, les phosphates et les nitrates.

Parmi les métaux lourds, le *plomb*, largement répandu dans l'atmosphère par les gaz d'échappement des véhicules automobiles, est ensuite nécessairement entraîné dans les eaux; le risque de concentrations, fortement toxiques, dans les chaînes alimentaires n'est pas exclu.

Divers métaux rejetés dans les effluents des industries sous forme de sels comme le *cuivre*, le *chrome*, le *cadmium*, le *zinc* peuvent aussi polluer les eaux et présenter le même risque. L'attention sur les pollutions de ce type a été brusquement marquée par le cas de la baie de Minamata au Japon en 1956 : une quarantaine de morts, plusieurs centaines de personnes intoxiquées dont des enfants rendus anormaux par les lésions du système nerveux, tel en est le triste bilan. L'intoxication était due à des rejets de *sels de mercure*, qui étaient utilisés par une usine voisine comme catalyseurs : une concentration s'était produite dans les Algues et le plancton, puis dans les animaux marins et les Poissons dont cette population se nourrissait. C'est là une tragique illustration des risques de la concentration des produits, jusqu'à des doses hautement toxiques, le long des chaînes trophiques. Ce qui est apparu comme un « accident » peut, un jour, se reproduire ailleurs si les précautions nécessaires ne sont pas prises.

Si les *nitrates* et les *phosphates* sont surtout issus des engrais, les phosphates existent aussi dans les effluents domestiques car ils sont employés comme anticalcaires. Il est d'ailleurs étonnant de voir que dans des régions de France (Massif central, Bretagne, Vosges, Landes) où l'eau n'est pas dure, la publicité réussit à faire vendre ces lessives anticalcaires, qui y sont parfaitement inutiles ! Ces sels, nitrates et phosphates, sont les principaux responsables de l'eutrophisation des eaux. Le lac Érié, aux États-Unis, a été victime de ce phénomène : les eaux se sont chargées de dépôts noirâtres et les esturgeons, qui constituaient une production intéressante, ont pratiquement disparu. En France, le lac d'Annecy était sur une voie semblable : la construction d'un égout périphérique et d'une station d'épuration a permis d'éliminer la pollution.

La pollution des sols : engrais et pesticides

Les pratiques de l'agriculture moderne introduisent un certain nombre de déséquilibres dans les sols, en perturbant les mécanismes de formation et d'évolution normale de l'humus d'une part, en introduisant des produits chimiques divers dont quelques-uns apparaissent comme de véritables polluants d'autre part. L'exportation de sels minéraux et de matières organiques que représente la récolte appauvrit le sol, car actuellement les déchets (détritus végétaux, fumier, etc.) ne reviennent pas toujours en quantité suffisante aux champs. L'absence de matière organique, donc d'humus, abaisse la fertilité d'ensemble ; en effet, elle nuit au bon développement de la flore bactérienne et aux propriétés physiques du sol, provoquant ainsi une dégradation à long terme. Pourtant, très généralement, on ne s'en soucie guère, malgré des mises en garde comme celle de Keilling (1974), qui préconise un développement de l'agriculture fermentaire.

Au contraire, en ce qui concerne le départ des éléments minéraux, l'agriculteur s'efforce de le compenser par l'apport d'engrais, essentiellement des nitrates, des phosphates et des sels de potassium. L'utilisation des engrais se fait maintenant de façon massive et à un rythme sans cesse accru : entre 1945 et 1970, la consommation mondiale a été multipliée par plus de six. Les engrais employés sont issus de synthèses chimiques ou proviennent de gisements sédimentaires dont l'origine ancienne est parfois biologique (phosphates par exemple). Malgré cela, les tenants de l' « agriculture biologique » les rejettent en bloc comme engrais « chimiques » (!) ; ce qu'ils préconisent, en réalité, c'est l'emploi exclusif d'engrais organiques. Si l'utilité d'un bon humus n'est pas contestable, il est certain aussi que l'usage des fertilisants minéraux permet l'accroissement des rendements agricoles, de façon parfois spectaculaire.

Cependant, diverses erreurs et certains inconvénients doivent être mis en lumière.

En premier lieu, la répartition des engrais selon les terres et les régions est très inégale : ils font défaut en certains points et sont en excès en d'autres. Dans le dernier cas, les surdosages entraînent un gaspillage, et le surcroît est lessivé par les eaux de pluies qui risquent de polluer la nappe phréatique ; c'est aussi une des causes du phénomène d'eutrophisation observé dans certains lacs. Il faut savoir en outre que l'augmentation de rendement des cultures ne reste pas aussi forte pour un même apport supplémentaire d'engrais au fur et à mesure que la quantité totale elle-même s'accroît *(loi des rendements décroissants)*. De plus, en vertu de l'application de la *loi des facteurs limitants*, il convient d'appliquer une fertilisation bien équilibrée dans ses divers constituants, car c'est celui qui est le plus faiblement représenté qui commande la production de la culture. On a aussi signalé que les métaux lourds présents à l'état d'impuretés dans les engrais pouvaient avoir un effet toxique sur les plantes et les animaux qui les consomment.

Marka

▲ ***L'utilisation des engrais se fait maintenant de façon massive et à un rythme sans cesse accru, souvent sans souci du gaspillage et des risques réels de pollution des sols mais aussi des eaux.***

Par ailleurs, la qualité des produits agricoles obtenus est susceptible d'être influencée par les engrais : à titre d'exemple, rappelons que des nitrates appliqués en excès à des carottes pouvaient, après la récolte, se transformer en nitrites préjudiciables à la santé (c'est le cas notamment pour les aliments en petits pots pour les nourrissons). A l'échelle de la biosphère, l'action de l'homme parvient à influencer fortement le cycle de certains éléments, comme l'azote ou le phosphore. D'après les données de Delwiche (1970), la production d'engrais par l'homme (30 millions de tonnes par an) intervient pour 1/3 dans la quantité d'azote entrant dans le cycle (92 millions de tonnes par an) ; en outre, l'équilibre entre les apports d'azote (92 millions de t/an) et les pertes d'azote (83 millions de t/an) a été rompu, ce qui signifie qu'il y a excès de nitrates dans les sols et surtout dans les eaux. De même, pour le phosphore, la quantité d'engrais formés par les roches et minerais phosphatés extraite en un an constitue presque les 3/4 de ce qui est entraîné chaque année des terres vers les eaux. L'eutrophisation des eaux due à cet excès d'engrais se manifeste essentiellement dans les eaux continentales (lacs) ; mais le phénomène pourrait atteindre le milieu marin, notamment les mers fermées de surface assez restreinte.

Parmi les techniques modernes de l'agriculture, figure aussi l'emploi des pesticides (principalement les insecticides, les herbicides et les fongicides). Dans ce domaine aussi, ce n'est pas un usage conscient, modéré, réalisé avec toutes les précautions souhaitables qui est condamnable, mais plutôt des abus dans la quantité de produits utilisés ainsi qu'une certaine imprévoyance quant aux effets secondaires sur la faune et même sur la santé humaine. Les insecticides (qu'il s'agisse des organochlorés comme le DDT, des esters phosphoriques comme le parathion ou des carbamates), de même que les herbicides, qui sont de compositions chimiques assez diverses, sont des corps issus de synthèses chimiques, et leurs molécules sont parfois difficilement dégradables par les micro-organismes du sol. On connaît parfois très mal les effets des produits secondaires qui apparaissent lors de leur décomposition. De plus, l'apparition de souches résistantes parmi les espèces d'Insectes que l'on cherche à détruire conduit à créer sans cesse rapidement de nouveaux insecticides, et la tentation est grande de les

▶ *Parmi les techniques modernes de l'agriculture figure aussi l'emploi des pesticides (insecticides, herbicides et fongicides), dont l'utilisation peut être envisagée, mais seulement de façon mesurée, rationnelle, localisée, et avec une parfaite connaissance des effets secondaires. Ici, technique d'épandage massif, peu soigneuse, présentant bien souvent de grands risques.*

commercialiser avant même que tous les effets, surtout à moyen et à long terme, soient connus.

Entre le rejet complet de toute utilisation de ces substances et un usage massif (dont les effets sont encore exagérés par les pratiques de surdosage de quelques agriculteurs), il y a place pour des techniques plus soigneuses. Il semble en effet difficile de contester que, grâce à ces produits, les rendements agricoles sont accrus et que, dans certaines zones du monde, les vecteurs de graves maladies ont pu être efficacement atteints. Pour prendre un exemple concret, si l'on souhaite limiter le nombre de moustiques, dans une zone de lagunes ou de lacs, si l'on saupoudre simplement toute la région de DDT ou d'un autre insecticide, celui-ci atteindra alors indistinctement toute la faune y compris l'homme ; mais si l'on a pris la peine de faire des études écologiques préalables, montrant quels sont pour les différentes espèces de moustiques les lieux exacts de ponte et l'époque précise de celle-ci, on pourra se contenter d'actions limitées à des surfaces réduites et à des moments bien choisis : les effets secondaires sur les autres espèces seront alors considérablement réduits et, en outre, une très forte économie sera réalisée sur la quantité de produit utilisé. De même, en agriculture, la lutte biologique qui utilise les prédateurs des dévoreurs ou des parasites, ou encore la lutte intégrée, combinant l'utilisation des procédés de la lutte biologique avec celle des insecticides de façon mesurée, peuvent être préconisées.

Radio-activité et écologie ; les pollutions radio-actives

Depuis quelques années, une branche de l'écologie a été désignée sous le nom de *radio-écologie :* c'est une discipline qui envisage tout spécialement « les relations entre les êtres vivants et le milieu en présence de radio-activité » (Bovard, 1974). De façon générale, il s'agit de suivre les processus d'absorption, puis de transport et éventuellement de concentration des radio-isotopes à l'intérieur des organismes, ainsi que, à une autre échelle d'appréhension, parmi les maillons des chaînes trophiques et dans les biocénoses. Excepté dans le cas d'expériences bien localisées et parfaitement contrôlées, réalisées dans des buts scientifiques précis, la présence de radio-isotopes dans le milieu est due aux pollutions radio-actives liées aux explosions atomiques ou bien aux installations nucléaires (production de matériaux fissiles, centrales électriques, usines de traitements de déchets). Il convient d'ajouter, pour l'homme, l'influence des rayons utilisés lors des examens radiologiques et même celle des radiations produites par les écrans de télévision (Cook, 1971).

▶ *Page ci-contre, l'explosion atomique de Bikini. Naissance d'une nouvelle technique aux conséquences écologiques bien difficiles à prévoir : utilisation meurtrière liée à la folie destructrice de l'homme et entraînant la destruction partielle ou presque totale de la planète? Effets sur l'environnement de l'usage pacifique de l'atome délibérément négligés?*

Les études qui ont été faites dans ce domaine sont orientées vers la mise en évidence de telles atteintes sur le milieu d'une part, de leurs effets sur les organismes vivants, notamment sur l'homme, d'autre part. Les résultats fournissent des bases pour établir des normes de protection radiologique, par exemple, les concentrations maximales admissibles dans l'eau ou dans l'air ou les temps d'exposition tolérables pour diverses espèces.

L'action sur les organismes et sur le milieu est très différente selon la nature des corps radio-actifs, ou *radionucléides*. Chaque radionucléide est caractérisé par le type de rayonnement qu'il produit (α, β et γ) et par sa période (temps au bout duquel la moitié de sa masse se sera désintégrée), qui est un des éléments essentiels de sa persistance plus ou moins longue dans le milieu. Au niveau des organismes, l'action du radio-élément dépend de la vitesse à laquelle il est absorbé et éliminé, ainsi que des lieux ou organes de stockage préférentiels (par exemple, la thyroïde pour l'iode, le rein pour l'uranium, les os pour le radium et le strontium). En outre, les effets sont différents selon qu'il y a simplement exposition à une source radio-active ou ingestion du corps radio-actif lui-même, sous forme de poussières, d'eau ou d'aliments pollués. Dans les biocénoses, les effets nocifs sont accrus le long des chaînes alimentaires par le phénomène de concentration, bien connu aussi pour les métaux lourds.

Dans les conditions naturelles, les organismes sont soumis à une certaine irradiation provenant de la croûte terrestre ou due à l'action du rayonnement solaire : bien que cette irradiation soit inégalement répartie sur le globe, elle reste généralement très faible. Mais, comme le fait remarquer F. Ramade (1974) : « Les radiations ionisantes représentent dans la biosphère un risque potentiel de lésions pathologiques (somatiques) ou germinales (génétiques), dont l'importance a considérablement augmenté au cours des dernières décennies à la suite de la découverte et du développement de l'énergie nucléaire à des fins militaires et pacifiques. » En effet, les risques sont essentiellement de deux sortes : tout d'abord, même si l'on écarte les fortes doses de radio-activité capables d'entraîner plus ou moins rapidement la mort, l'individu peut être atteint insidieusement dans sa santé (cancers des os, leucémies...) ; ensuite, au niveau des populations, la probabilité d'apparition de mutations s'accroît (anomalies de la descendance). En réalité, dans ce domaine, l'évaluation précise des dangers est difficile ; c'est sur cela que jouent aussi bien ceux qui, poursuivant avant tout des buts économiques par exemple, cherchent à minimiser les risques, que ceux qui pensent qu'il faut avant tout alerter l'opinion. Mais peut-on reprocher à ces derniers, qui sont des propagandistes désintéressés, un excès de prudence ?

Compte tenu de leurs caractéristiques et de leurs rapports avec les êtres vivants, tous les éléments radio-actifs ne présentent pas le même degré de nocivité. Les plus dangereux présentent les deux propriétés suivantes :

— une période moyenne, de l'ordre de quelques semaines à quelques années, ce qui correspond à la durée de vie de diverses espèces animales ou végétales ; de telles durées de la période facilitent donc une accumulation, et les corps radio-actifs ont alors un effet portant sur cette même durée ;

— une incorporation facile à la matière vivante parce que leur isotope non radio-actif est un des constituants fondamentaux de la matière vivante (carbone, phosphore, calcium, etc.) ou parce qu'ils ont des propriétés chimiques analogues à ces éléments (par exemple, le strontium et le césium, qui peuvent se fixer dans les os à la place du calcium et du potassium) ;

Interviennent aussi l'intensité du rayonnement, et les temps d'exposition des organismes.

Pour apprécier le rayonnement, on dispose de diverses unités de mesure. Certaines reposent sur des bases uniquement physiques, comme le *curie* (quantité de radiations émises pendant une seconde par 1 gramme de radium, ce qui correspond à la désintégration de $3,7 \cdot 10^{10}$ atomes). Le *rad* et le *rem* tiennent compte, en plus, des

données biologiques : le rad est la dose de rayonnement correspondant à l'absorption d'une énergie de 100 ergs par 1 gramme de tissu vivant ; le rem en dérive par l'application d'un *coefficient,* dit *d'efficacité biologique,* qui tient compte de la nature du rayonnement appliqué et non seulement de son énergie.

Les normes de radioprotection, établies par des organismes officiels mais contestées par certains, sont exprimées à l'aide de ces unités. Ainsi la dose maximale admissible (D.M.A.) a été fixée par la Commission internationale pour la protection radiologique d'abord à 5 rems, puis à 1,5 rem par an pour les travailleurs appelés à travailler auprès des sources de rayonnement, et à 10 fois moins pour les autres personnes. Dans le cas des explosions de bombes atomiques ou lors d'accidents conduisant à une irradiation totale, on a estimé les effets de différentes doses sur l'homme (Cook, 1971) :

— 100 000 rems : mort dans les minutes qui suivent ;
— 1 000 rems : mort dans les jours qui suivent ;
— 200 rems : 10 % de mortalité dans les mois qui suivent ;
— 100 rems : pas de mortalité mais augmentation des cas de cancer et de stérilité définitive chez la femme.

Les évaluations des effets de la pollution radio-active sont bien plus difficiles dans le cas d'une sorte de pollution chronique, telle qu'elle résultait des essais de bombes atomiques dans l'atmosphère ou telle qu'elle découlera d'un usage intensif de l'énergie nucléaire pacifique. C'est un élément de l'important débat qui, au début de 1975, a commencé à s'instaurer lentement en France. Parmi les arguments relevés, on note le suivant : la radio-activité supplémentaire pouvant résulter de l'implantation des centrales nucléaires reste de l'ordre de celles des régions à forte radio-activité naturelle (pays à roches cristallines : Bretagne, Massif central, etc.), et elle est toujours très inférieure à celle qui résulte des examens radiologiques. Il y a un seul oubli dans ce raisonnement, c'est qu'en ce domaine les effets sont cumulatifs. En outre, la répartition des risques n'est pas égale : être près d'une centrale ou « sous le vent » de celle-ci accroît les risques. S'il est certain qu'en fonctionnement normal, la pollution radioactive peut être très réduite, qu'en est-il exactement quand on considère l'escalade possible des incidents, des accidents, de la catastrophe explosive même (bien que celle-ci soit extrêmement improbable). Il est vrai que la probabilité d'un accident décroît en général avec sa gravité. Mais, selon le degré de gravité, il y a des estimations à faire sur le retentissement possible au niveau de la santé de la population, d'autant plus que les incidents ne sont pas rares. Aux États-Unis, on estime que la production d'énergie a été, à cause précisément d'incidents, réduite de 40 % par rapport à la production maximale prévue ; dans ce même pays, pour la seule année de 1973, on a noté 861 « anomalies » de fonctionnement. On s'accorde généralement aussi à considérer que le risque de pollution est plus grand pour les nouveaux types de centrales à uranium enrichi, prévus actuellement (PWR et surtout BWR à « eau bouillante »), que pour le type à uranium naturel, graphite-gaz, qui correspond aux premières centrales mises en service en France. Et que dire des risques réels que représentent les surgénérateurs à plutonium ? Ce type de centrale est encore à l'étude, mais on fonde sur lui de grands espoirs pour utiliser le plutonium, qui, pour l'instant, apparaît comme un déchet des centrales à uranium enrichi. Un déchet qui a une très forte radio-activité et une période de vie de 24 000 ans !

Le problème des déchets est d'ailleurs primordial. Un spécialiste de la radioprotection au C.E.A., P. Bovard, écrivait en 1970 : « Pour se débarrasser des déchets radioactifs, l'industrie nucléaire est désarmée, elle ne peut ni détruire, ni modifier les rayonnements. » Mais, plus loin, il ajoutait : « La dilution, en abaissant la teneur en radionucléides, rend les déchets inoffensifs et permet leur dispersion. » On ne peut qu'opposer entre elles ces deux affirmations et faire remarquer, d'une part, que les phénomènes de concentration dans les chaînes alimentaires vont à l'encontre des processus de dilution, d'autre part, que, si la dilution doit s'exercer à propos de quantités énormes de déchets radio-actifs, elle perd beaucoup de son caractère rassurant.

Sur ce point, plus que sur tout autre, sans céder à un catastrophisme *a priori*, il faut prendre en compte toutes les données et ne pas opposer sommairement les impéra-

Marka

▲ ***La centrale nucléaire de Saint-Laurent-des-Eaux. « Il faut surtout agir de telle sorte que les générations futures n'aient pas à maudire la nôtre. »***

tifs techniques et économiques d'un côté aux lois écologiques de l'autre; il faut surtout agir de telle sorte que les générations futures n'aient pas à maudire la nôtre, comme les ayant sacrifiées trop allègrement à la recherche du profit, à la croissance à tout prix et à la vénération aveugle du « progrès ».

Utilisation des ressources naturelles

Besoins alimentaires

Les ressources naturelles les plus importantes sont celles qui sont susceptibles de satisfaire les *besoins alimentaires* des hommes. Quel peut être, pour reprendre l'expression de P. Duvigneaud, l' « espoir alimentaire » des hommes? Peut-on répondre de façon optimiste à la question que pose le titre du livre publié en 1975 par J. Klatzmann : *Nourrir dix milliards d'hommes?*

Actuellement, des techniques comme celles de la photographie aérienne sont d'un grand secours pour identifier, inventorier et localiser les ressources naturelles à l'échelle de la biosphère. Par ailleurs, les études écologiques fournissent de précieuses indications sur le potentiel de productivité des différentes communautés d'êtres vivants. Enfin, de nombreuses autres recherches en physiologie, en agronomie, en génétique, etc., ouvrent chaque jour des perspectives nouvelles. Il est cependant nécessaire de distinguer ce qui est réalisable à court terme, ce qui est possible à long terme, et ce qui risque de se révéler impossible à jamais.

Le problème de la faim dans le monde est, bien évidemment, lié au problème de la croissance démographique mondiale. Les inégalités de production d'aliments selon les régions s'ajoutent aux différences d'accroissement démographique; ce sont bien souvent les pays les plus démunis, à la fois sur le plan énergétique et sur le plan agricole (ceux qu'on appelle depuis peu le Quart-Monde), qui ont la population la plus nombreuse. Les efforts accomplis pour accroître les productions alimentaires, comme ceux qui ont été réalisés lors des « révolutions vertes », y sont souvent annihilés par une croissance encore plus rapide de la population : c'est le cas en Inde par exemple. Cela montre bien que les possibilités techniques ne sont pas seules en cause et que les aspects humains, économiques et politiques au sens large sont aussi primordiaux.

▼ ***Le problème de la faim dans le monde : aux inégalités de productions d'aliments selon les régions s'ajoutent les différences d'accroissement démographique.***

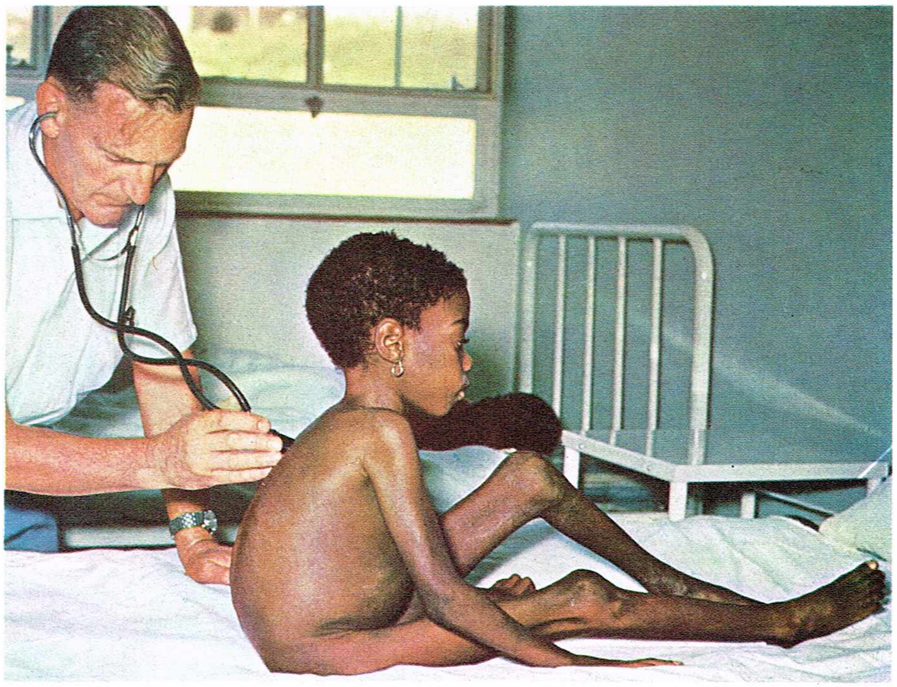

La description des atteintes au milieu naturel permet d'établir la liste des mesures destinées à conserver un potentiel de production existant. Dans cette liste, la lutte contre l'érosion, le lessivage et l'épuisement des sols apparaît comme prioritaire; elle est fortement liée aux problèmes de l'eau, car elle passe par la lutte contre le ruissellement grâce aux reboisements, au maintien des structures en terrasses, des haies, aux techniques de labour selon les courbes de niveau et, de façon générale, à l'aide de la protection du sol par la végétation. On luttera contre l'épuisement des sols en leur fournissant le maximum de débris végétaux ou d'apports organiques (fumier, litière, etc.) et des engrais. La maîtrise de l'eau permettra aussi l'irrigation; mais il faut rappeler que celle-ci nécessite quelques précautions, surtout en zone désertique chaude, où elle aboutit facilement à une salure exagérée des sols.

Respecter la vocation des sols est aussi un impératif majeur : il est criminel, comme on le fait pour les forêts tropicales, de défricher un terrain producteur de richesses, parfaitement exploitables avec mesure, pour en tirer un profit à court terme, qui ruine cet espace à tout jamais. De même, il est aberrant de construire des villes ou même de planter des forêts sur des terres riches permettant facilement des cultures vivrières. L'accent est souvent mis sur des mises en valeur ou des travaux spectaculaires qui, pourtant, ne donnent pas toujours les résultats espérés.

Par exemple, la construction du barrage d'Assouan, en Égypte, a été considérée comme une œuvre maîtresse, devant permettre l'irrigation de vastes régions et apporter la prospérité. Or, certaines conséquences écologiques n'avaient pas été correctement estimées et d'autres n'avaient pas été prévues du tout : ainsi, l'évaporation à partir de la grande surface d'eau libre formée a été supérieure aux prévisions; l'apport d'éléments minéraux en aval par les eaux limoneuses du Nil en crue a été supprimé; le barrage se comble lentement avec les sédiments, et les canaux d'irrigation favorisent l'extension d'une redoutable maladie : la bilharziose. Des effets à longue distance se sont même révélés : les eaux du Nil arrivent à la mer en ayant perdu la plupart de leurs éléments nutritifs favorables au développement du plancton; en conséquence, les pêcheurs de sardines ont vu leurs prises décroître considérablement. Si l'ensemble du bilan n'est peut-être pas totalement négatif, on est quand même en droit de s'interroger sur les processus de décision qui permettent d'entreprendre de telles opérations, sans études suffisantes au préalable.

On pourrait aussi rappeler l'expérience malheureuse qui, en U.R.S.S. à partir de 1954, a consisté à cultiver des céréales sur des terres traditionnellement vouées au pâturage dans le Kazakhstan : quelques années sèches ont ramené la production céréalière à un taux très bas et de vastes territoires ont été menacés par l'érosion due au vent. On a pu y remédier en partie, mais il est certain que, là aussi, des essais préalables bien conduits auraient économisé beaucoup de peine et d'argent.

De tels exemples conduisent à s'interroger sur les possibilités réelles d'extension des terres cultivées, par exemple à partir des zones marginales ou des régions semi-arides. En réalité, les sols les plus fertiles sont déjà cultivés. Certains auteurs pensent cependant qu'à partir des sols tropicaux et des sols podzoliques (comme ceux du nord de l'Europe), il serait encore possible de mettre en culture 5 millions de km^2 si toutefois l'effort technique, y compris un important apport d'engrais, pouvait être réalisé. Par l'irrigation des zones arides, on pourrait atteindre au maximum 10 millions de km^2, ce qui aboutirait à un doublement des surfaces cultivées. Ces vues sont-elles trop optimistes ? Même si l'on y adhère, il importe de considérer que l'effort serait énorme, qu'il nécessiterait un apport d'énergie (à partir de ressources non renouvelables, de pétrole notamment), qui n'est peut-être pas disponible ; en outre, il serait peu raisonnable de détruire d'importantes surfaces de forêts, alors que celles-ci sont déjà très menacées.

D'autres perspectives s'offrent à nous au niveau d'une meilleure gestion de ce qui existe. Par exemple, dans les pays africains, les introductions de races bovines extérieures et de techniques d'élevage européennes ou américaines ont souvent déçu. Or, K. Watt (1974), à la suite de Talbot et d'autres auteurs, fait remarquer que les Ongulés de la savane (gazelles, antilopes, gnous, etc.) ont une meilleure productivité que le bétail domestique et que la qualité de leurs carcasses (rapport de viande maigre par rapport au poids total) est très supérieure. On a suggéré l'exploitation par des prélèvements soigneusement calculés de tels troupeaux sauvages : ce serait là une voie originale, très différente de l'approche habituelle, et qui reposerait sur une bonne connaissance de l'écosystème ainsi exploité.

L'utilisation d'espèces comme les trèfles et les luzernes, ou d'arbustes appartenant comme celles-ci à la famille des Légumineuses, présente un grand intérêt. En effet, les plantes de cette famille, grâce aux nodosités bactériennes de leurs racines, sont capables de fixer directement l'azote de l'air, réalisant elles-mêmes leur apport d'engrais azoté. Le choix des variétés à cultiver, la création de ces variétés, qui, pour le maïs, le blé et le riz, ont été la base des révolutions vertes, sont très importants ; il ne faut cependant pas abandonner le potentiel génétique que peuvent représenter des races locales, de régions semi-arides par exemple ; en effet, bien que de rendement moindre, elles sont, ce qui n'est pas à négliger, parfaitement adaptées depuis longtemps aux conditions climatiques. De plus, l'apport en engrais et en énergie mécanique pour mettre en œuvre de nouvelles cultures suppose un effort que des pays pauvres ne peuvent souvent accomplir ; à cela, il faut ajouter que la rentabilité réelle n'est pas toujours assez clairement établie : ainsi, on a calculé qu'une multiplication par vingt de l'apport d'énergie mécanique provoque une récolte seulement huit fois supérieure à la récolte initiale (Gilles, 1967). Dans le même ordre d'idée, une analyse écologique globale, telle que la propose Vieira Da Silva (1974), permet d'appréhender complètement, sur le modèle de l'étude des écosystèmes, le fonctionnement des sociétés rurales et d'établir des stratégies mieux adaptées et plus indépendantes des phénomènes du marché.

Les écologistes jouent encore un rôle important dans la mise en œuvre des procédés de lutte contre les parasites des cultures par exemple. En effet, la lutte biologique ou la *lutte intégrée* (qui est une combinaison de celle-ci avec la lutte chimique) nécessitent une connaissance approfondie des biocénoses auxquelles participent ces parasites et leurs ennemis. De beaux succès ont déjà été remportés dans ce domaine ; en dehors des cas, devenus très classiques, de la lutte contre l'*Opuntia* en Australie à l'aide de la chenille du *Cactoblastis* et de l'introduction de la coccinelle *Novius cardinalis* pour lutter contre une cochenille attaquant les oranges en Californie, beaucoup de travaux de ce type sont réalisés (Grison, Biliotti, Van Den Bosch).

La grande étendue des mers ainsi que leur forte productivité primaire justifient l'opinion répandue qu'elles constituent un immense réservoir de ressources inexploitées. En fait, il convient de distinguer entre ce qui est réalisable dans l'état actuel et les vues lointaines et hypothétiques. L'exploitation des océans est limitée à des zones particulières, surtout les zones de remontées de courants et les plateaux continentaux, qui ne s'étendent guère qu'à quelques dizaines de kilomètres des côtes. De même, parmi les Poissons pêchés, quelques espèces dominent (hareng, anchois, morue, sardine, maquereau, sole, thon...) et de nombreuses autres sont presque négligées.

On fait remarquer que beaucoup des Poissons consommés sont des carnivores et que, d'un point de vue énergétique, l'homme se place donc en bout d'une chaîne très longue, où les pertes sont grandes. Et que dire, à cet égard, de l'aberrante opération qui consiste à nourrir des poulets avec de la farine de Poissons ?

▼ *Le barrage d'Assouan : une œuvre maîtresse dont certaines conditions écologiques n'ont pas été correctement estimées ou même prévues.*

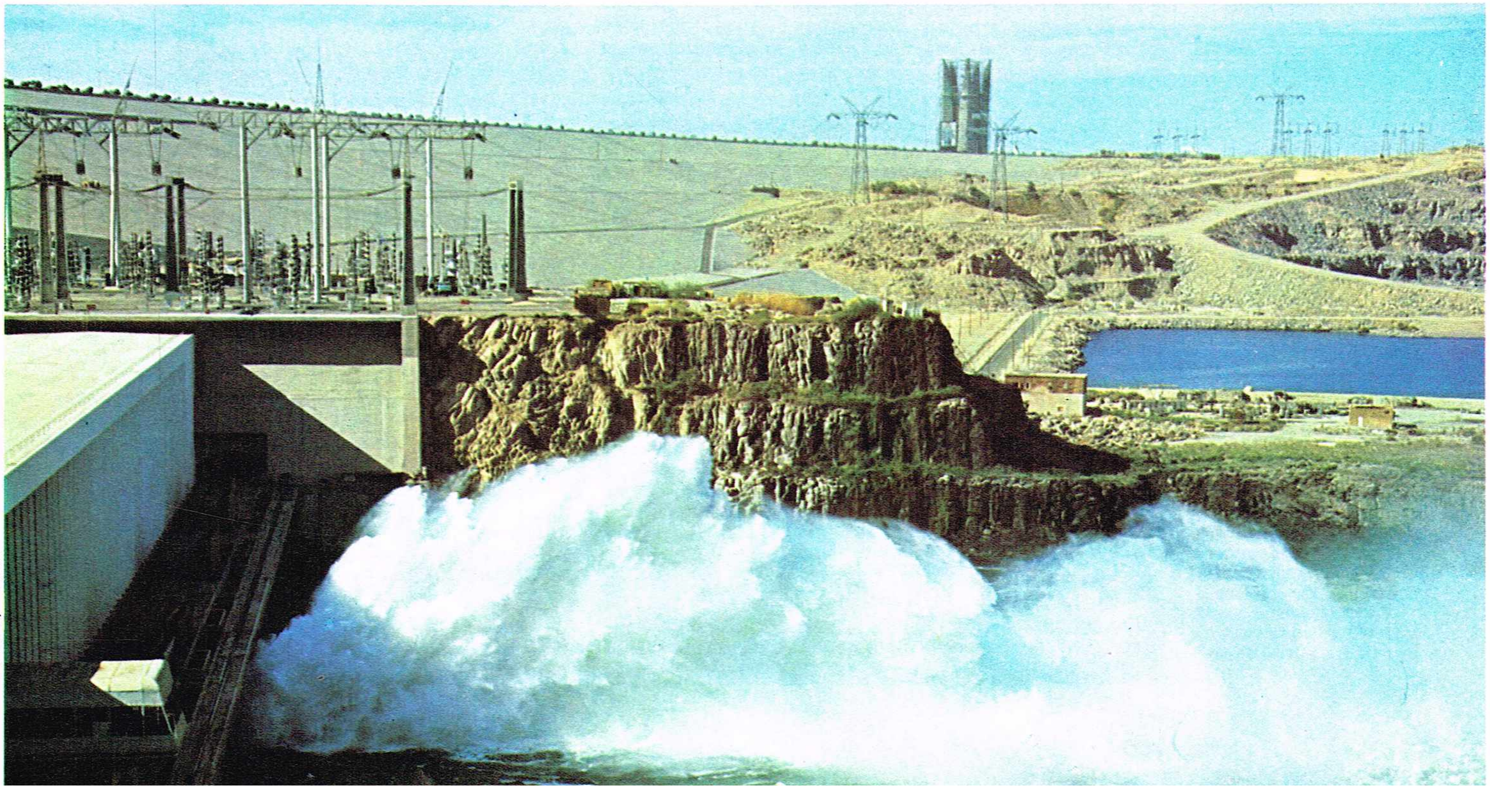

Tortevoy - Pitch

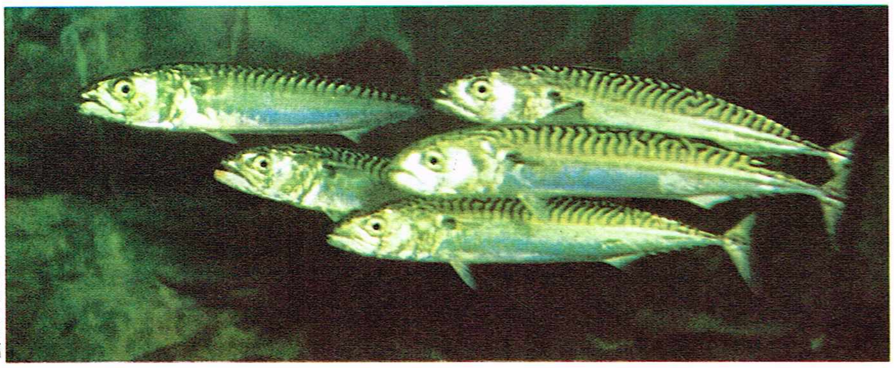

D. P. Wilson

▲ ***La grande étendue des mers constitue un immense réservoir de ressources inexploitées; de nombreuses espèces sont négligées au détriment de quelques autres, comme le maquereau, excessivement pêchées.***

Toutefois, ceux qui préconisent l'utilisation directe du plancton comme source de protéines doivent faire intervenir deux éléments supplémentaires : d'une part, le risque de non-acceptation par les populations d'un aliment qui leur est inhabituel, d'autre part, le coût élevé de la récolte dû à la dispersion du plancton dans l'eau. Il serait théoriquement possible d'accroître la production sur les plateaux continentaux par des apports d'engrais (phosphates, nitrates) : un essai, déjà ancien, en Écosse (1941), semble le confirmer. Mais, là encore, il convient d'apprécier la rentabilité réelle.

Dans les estuaires et le long des côtes plates, on développe la « culture » de diverses espèces, comme on l'a fait depuis longtemps pour certains coquillages (huîtres, moules). Cette technique s'étend à diverses espèces de Poissons. Elle s'applique aussi aux eaux saumâtres et aux eaux douces. Par ailleurs, de nombreux travaux portent sur un usage éventuel plus intensif des Algues marines (fucus, laminaires, Algues rouges) : dès maintenant, en Chine et au Japon, les quantités d'Algues consommées directement ou sous forme de gelées ne sont pas négligeables.

En conclusion, si des possibilités existent pour résoudre le problème de la faim dans le monde, elles sont malgré tout limitées. En outre, il ne suffit pas de bien gérer le patrimoine des ressources naturelles existant et de chercher à l'accroître par des recherches et des techniques appropriées : il faut que s'imposent des conceptions économiques nouvelles permettant de réduire les inégalités et une volonté politique constante à l'échelon national et international. Enfin, le succès de telles entreprises serait vite compromis si la croissance démographique mondiale se poursuivait au rythme actuel.

Ressources énergétiques et minérales

Mieux que tous les discours et tous les rapports (comme celui du M.I.T., le rapport Meadows, 1972), la récente crise du pétrole a permis de montrer que les principales ressources énergétiques nécessaires au développement industriel sont limitées; il en est de même pour les minerais de métaux courants ou d'uranium. En effet, toutes ces ressources, bien que recyclées au cours des temps géologiques, ne sont pas renouvelables à l'échelle de la durée de vie des civilisations humaines. Or l'homme brûle le pétrole et le charbon, et quant aux métaux, ceux-ci se retrouvent en quelque sorte fragmentés et dispersés après usage (décharges, oxydation, mise en solution saline, etc.). Dans le rapport du M.I.T., deux hypothèses sont formulées, selon que la consommation augmentera dans le sens actuel ou qu'une politique de croissance industrielle réduite se développera.

En plus des problèmes posés sur le plan de l'environnement et de la santé de l'homme, l'énergie nucléaire sera aussi limitée à plus ou moins long terme car l'uranium est une ressource non renouvelable. Seules des sources d'énergie comme les marées, le Soleil et la chaleur interne du globe sont inépuisables à notre échelle de temps, mais la difficulté réside dans leur exploitation.

L'écologie appliquée à la planification et à l'aménagement

Si l'homme acquiert une conscience profonde de sa place dans la biosphère, il devra s'appuyer, sur le plan pratique, sur les résultats écologiques et les concepts fondamentaux de l'écologie pour mettre en œuvre une politique rationnelle de conservation et d'utilisation des ressources naturelles. Il trouvera ainsi les éléments devant nécessairement prendre place dans les processus de planification et d'aménagement. J. Dorst (1965) proposait un aménagement qui tienne tout d'abord compte des nécessaires mesures de protection de la nature ainsi que, à travers elle, des espèces qui la forment et du potentiel génétique qu'elles constituent. Le schéma qu'il propose est le suivant : « La surface du globe doit donc être formée de zones très diverses comprenant :

— des réserves naturelles intégrales où l'ensemble des communautés est conservé dans son état primitif;

— à l'opposé, des zones entièrement transformées, vouées à l'urbanisation, à l'industrie et à l'agriculture;

— entre les deux, une large gamme de milieux plus ou moins transformés, mais ayant néanmoins conservé une partie de leur équilibre primitif. Ces habitats assurent à l'homme un rendement économique souvent important, tandis que la survie de beaucoup d'êtres vivants y est assurée. »

Les motivations pour la conservation de la nature se situent sur plusieurs plans. Établir des réserves, conserver des biotopes, cela peut se justifier d'un point de vue aussi bien éthique que scientifique, voire même esthétique. En 1952, R. Heim écrivait avec passion : « La destruction d'une relique vivante... est sur le plan philosophique et scientifique aussi grave peut-être que le meurtre d'un homme et aussi irréparable que la lacération d'un tableau de Raphaël. Elle tarit à tout jamais une partie de la Nature terrestre, c'est-à-dire un morceau du passé... Cette destruction supprime une preuve de la Nature, et peut-être une preuve particulièrement essentielle, qui

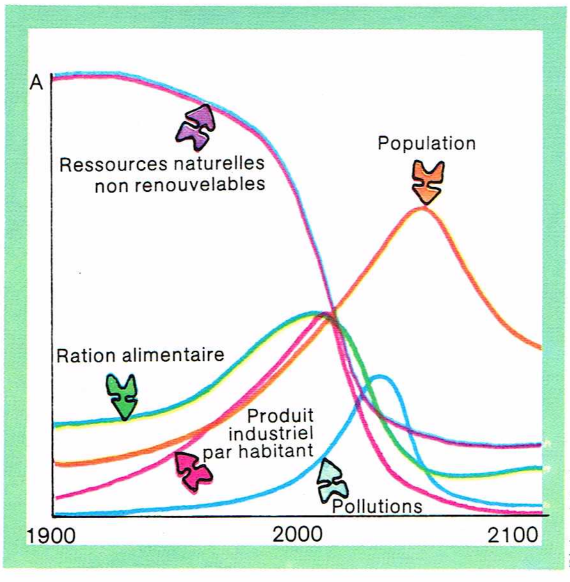

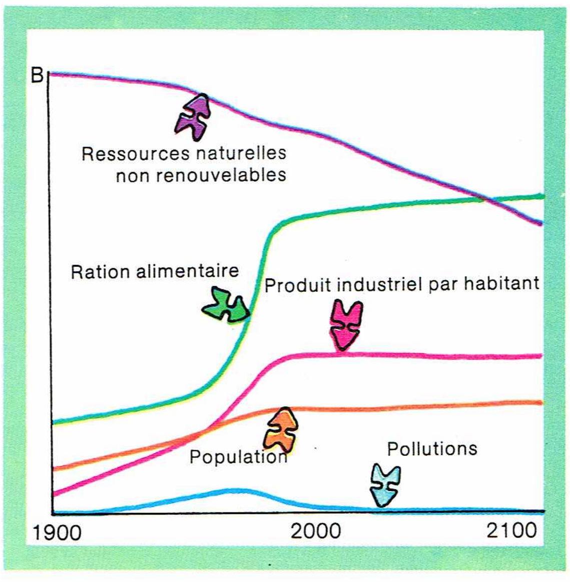

▶ ***Représentation graphique de l'avenir de l'humanité, révélé par les ordinateurs du M.I.T. (d'après Meadows et al., 1972, travaux du Club de Rome) : A, si la situation actuelle se poursuit; B, si une politique nouvelle de « halte à la croissance » est adoptée (Duvigneaud, la Synthèse écologique, Doin).***

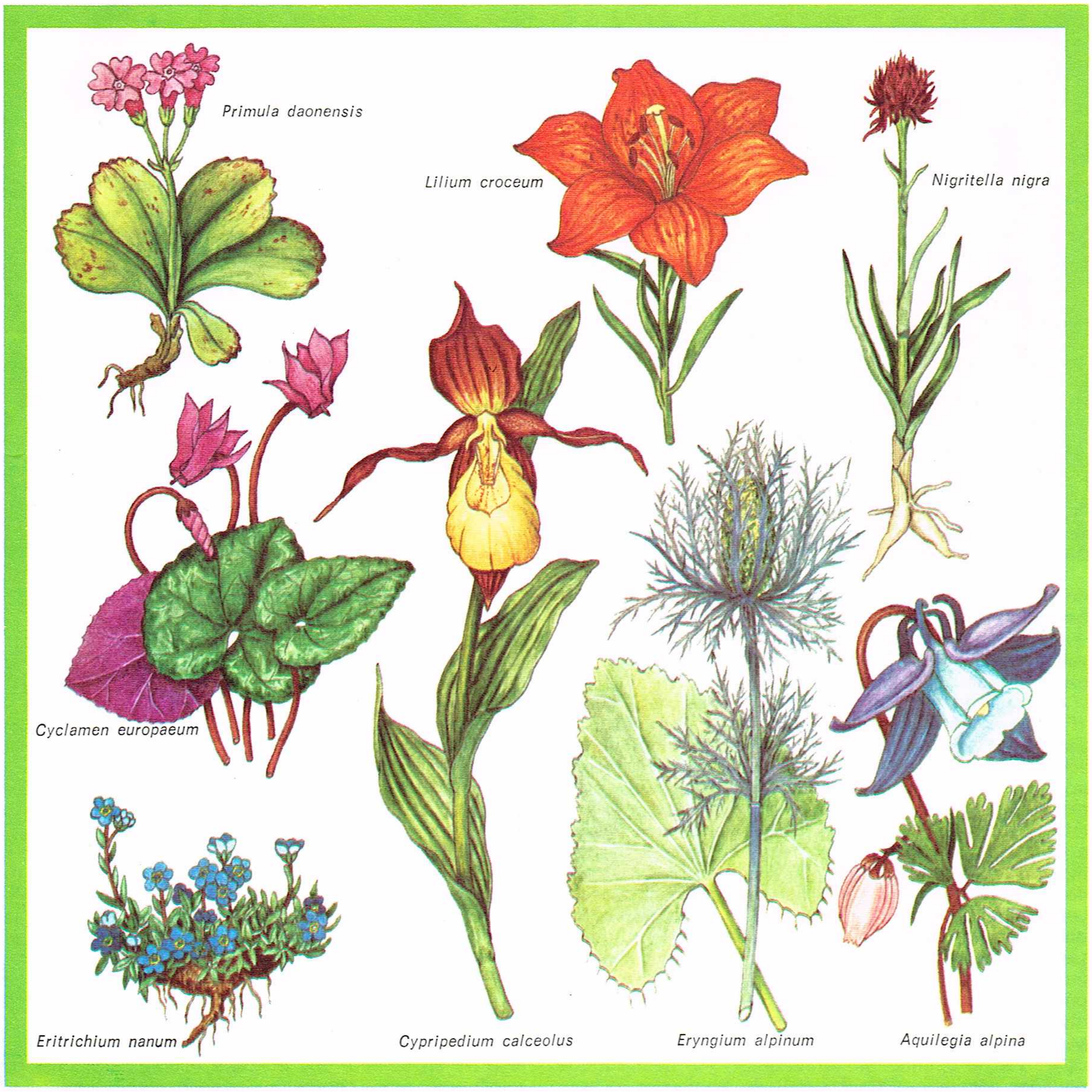

I.G.D.A.

◀ ***Quelques-unes parmi les plus belles et les plus intéressantes plantes alpines, actuellement protégées.***

sait? la preuve la plus cruciale d'une théorie générale ou importante. » On peut aussi mettre l'accent, comme cela est souvent fait maintenant, sur la conservation des patrimoines génétiques de la nature, sur le rôle psychique que celle-ci joue pour la détente et l'équilibre affectif de l'homme. Sur les plans pratique et même strictement économique, c'est le maintien des potentialités génétiques qui reste l'argument le plus fort : détruire aujourd'hui une espèce de plante, même insignifiante aux yeux des technocrates, c'est peut-être se priver demain d'une ressource alimentaire nouvelle ou d'un médicament précieux. De fait, grâce à l'action généreuse de quelques-uns, souvent mal compris au début, tournés en dérision, traités de passéistes, une politique de conservation a pu commencer à s'établir. Elle se concrétise surtout par la création de parcs nationaux et de réserves.

Les parcs et réserves correspondent à un besoin de conservation et de préservation de biotopes ou d'écosystèmes types, d'espèces menacées ; la recherche scientifique peut et doit s'exercer à leur sujet et sur leurs territoires, mais, quand cela est possible, l'accès au public est favorisé dans un but d'éducation sur le milieu naturel. Il peut aussi s'agir de préserver des sites, des paysages, ou des traces de l'action humaine particulièrement dignes d'intérêt.

Le premier parc fut créé aux États-Unis par une loi du 1er mars 1872 : c'est le « Yellowstone National Park ». A l'époque, il s'agissait de réserver cet espace essentiellement pour le plaisir du public. Par la suite, une série de conférences internationales s'appliquèrent, à partir de 1933, à définir et à préciser le but de tels parcs. En 1947, dans le cadre de la Conférence internationale pour la protection de la nature, la définition suivante a été adoptée : « Les parcs nationaux sont des réserves naturelles générales de grand attrait naturel, instituées dans un double but de protection de la nature, d'éducation ou d'agrément du public ; leur accès est ouvert à tous, dans les limites prescrites par les statuts et les règlements propres à chaque parc. » En France, certains territoires furent mis en réserve assez tôt. Ce fut le cas de la réserve en forêt de Fontainebleau dont le début de création remonte à 1853, ce qui en ferait la première réserve naturelle créée dans le monde ; cependant, il s'agissait plutôt à l'époque d'une mise en réserve à des fins esthétiques et artistiques effectuée sous l'impulsion des peintres de l'école de Barbizon. Ce fut également le cas de la réserve de Camargue créée en 1928. En fait, le premier parc national, celui de la Vanoise (53 000 ha), a été créé seulement en juillet 1963. Depuis, la liste s'est enrichie : Port-Cros (1963 ; 700 ha), Pyrénées occidentales (1967 ; 46 000 ha), Cévennes (1970 ; 84 200 ha), Écrins (1973), Mercantour (à l'étude).

Les parcs comprennent généralement une zone centrale, à protection plus poussée (réserve scientifique intégrale réservée aux chercheurs en quelques points ; interdiction de la chasse et de la cueillette), et une zone dite périphérique, ou préparc, zone d'accueil où des structures pour le tourisme peuvent se développer sous certaines conditions.

Les parcs naturels régionaux (16 créés ou à créer, dont ceux de la Camargue, du Vercors, du Morvan, de la forêt d'Orient, du Haut-Languedoc, d'Armorique, de Lorraine,

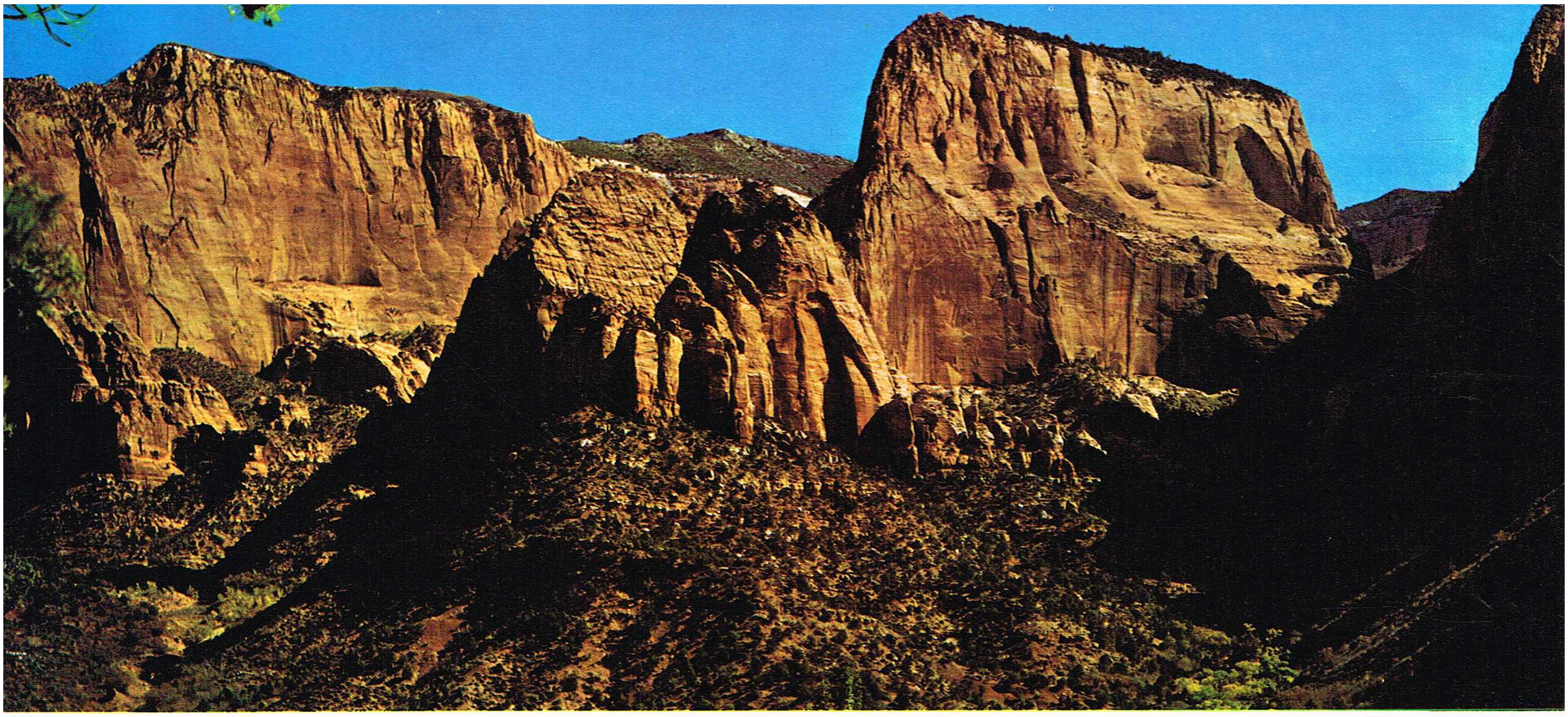

J. Muench

▲ *Les parcs et les réserves correspondent à un besoin de conservation et de préservation des biotopes ou d'écosystèmes d'espèces menacées. Ici, une vue partielle du « Zion National Park » dans l'Utah (U.S.A.).*

▼ *Les plans d'aménagement doivent prendre en compte les données du milieu naturel au même titre que les impératifs sociaux ou économiques. Ici, dans la vallée de la Tamise, un exemple de réutilisation d'un ancien site d'exploitation de sables et de graviers.*

de Corse, de Luberon...) ont une vocation de protection beaucoup moins affirmée; comme il s'agit cependant de régions à paysages d'un grand intérêt, c'est surtout vers le maintien d'une vie locale et le développement du tourisme qu'y est tournée l'action.

Au contraire, les réserves, dont certaines sont célèbres (Fontainebleau, Camargue, Sept-Iles, Néouvielle, cap Sizum), sont à vocation de protection très stricte, à but scientifique dominant et d'accès très limité, sinon interdit, pour le public. Leur liste serait longue; certaines sont très petites (quelques hectares seulement). Pour la première fois en France, en mars 1974, une réserve maritime a été créée à Banyuls (Pyrénées orientales). Dans le monde, on recense près de 500 parcs nationaux et plus de 1 000 réserves (dites *réserves analogues*). Il convient cependant de remarquer que la mise en place de réserves ou de parcs ne constitue pas une panacée pour une protection efficace de la nature. Il faut en effet les considérer un peu à l'image de musées vivants; pas plus qu'une ville polluée et invivable ne serait sauvée par l'existence de quelques beaux musées, un pays ne saurait sauvegarder son environnement par ses seules réserves. Le souci de conserver un patrimoine naturel aussi bien pour soi que pour les générations futures doit se manifester en tout lieu et à tout instant, et s'appliquer à l'ensemble du territoire.

Depuis quelques années, à la suite de la parution du livre de Ian Mac Harg, *Design with Nature* (1969), un nouveau terme est apparu, celui de *planification écologique*. Cet auteur a montré comment, dans des plans d'aménagement régionaux, il était possible de prendre en compte les données du milieu naturel au même titre que les impératifs sociaux ou économiques. Concrètement, cela se traduit initialement par l'établissement de cartes sur divers thèmes (aptitudes à la construction, à la conservation du milieu naturel, aux loisirs...), dont la superposition met aussitôt en évidence les antagonismes et les contraintes. La méthode a été perfectionnée et testée sur plusieurs cas, y compris en France pour un plan d'aménagement de la zone de Toulon-Ouest (Falque, Tarlet, 1972). Par d'autres voies similaires, ou par une analyse encore plus globale (Vieira Da Silva, 1974), se forme ainsi peu à peu une « écologie d'aménagement », selon l'expression de R. Bechmann et J.-C. Fischer (1973), qui font, à juste titre, remarquer que dans toutes les opérations de planification et d'aménagement la présence d'écologistes devrait compenser « la méconnaissance des phénomènes écologiques — bien excusable il est vrai — dont font preuve la plupart des techniciens de l'aménagement et de l'équipement ». Bien des erreurs seraient ainsi évitées, et des économies réalisées. En effet, la prise en compte des données écologiques n'est pas forcément une contrainte supplémentaire coûteuse, comme on a tendance à la croire. Toutefois, elle impose généralement de faire preuve d'une certaine prudence et d'éviter une précipitation abusive, en un mot, de s'insérer « dans la trame des nécessités de l'économie de la nature » (V. Labeyrie, 1974).

C. Souchon

Marka - F.H. Ragsdale

▲ *L'éducation de l'enfant est probablement la méthode la plus sûre pour que l'individu adulte comprenne ensuite quelle est sa place dans la biosphère et qu'une « conscience écologique » se développe en lui. Ici, une forêt le long d'un cours d'eau en Amérique septentrionale.*

Recherches et perspectives

Les concepts de l'écologie générale ont été peu à peu introduits et développés dans d'autres domaines. Par exemple, il s'est créé une *écologie médicale* (nouvelle approche des problèmes épidémiologiques de la transmission des maladies parasitaires, des effets de certains facteurs sur la santé humaine) primordiale du milieu environnant. Ainsi, la connaissance parfaite de la biologie du vecteur d'une maladie (le moustique par exemple), des biotopes qu'il occupe et de ses périodes de reproduction fournit des éléments précieux dans la lutte globale contre la maladie.

De même, la recherche des facteurs affectant en milieu urbain (écosystème *urbs*) l'équilibre psychique ou la santé physique des habitants peut aboutir à des propositions concrètes au niveau des travaux ou des projets d'urbanisme. L'approche écologique permet ici une meilleure vision des relations entre l'homme et son milieu de vie. C'est aussi le cas dans le cadre plus vaste de ce que l'on nomme l'*écologie humaine*, terme popularisé par le géographe Max Sorre (1947). Celui-ci constatait, en effet, que l'action des populations humaines est subordonnée aux caractères du milieu qu'elles occupent, et, par ailleurs, comme tout géographe, il s'intéressait aux transformations imposées par l'homme à la nature. Des sociologues, comme l'Américain Robert Ezra Park, ont utilisé les concepts écologiques pour l'étude des faits sociaux, surtout en sociétés urbaines : ils définissent des ensembles par le réseau de relations qui s'y exercent et délimitent ainsi des aires fonctionnellement homogènes. Actuellement, deux courants majeurs se dessinent en écologie humaine. Le premier s'intéresse surtout à l'adaptation des populations vis-à-vis des facteurs du milieu dans diverses situations climatiques et différents modes de vie. Le second cherche à préciser le fonctionnement des systèmes écologiques auxquels participe l'homme et le rôle qu'y joue ce dernier. Dans ces recherches de même qu'en écologie générale, on s'appuie de plus en plus sur la méthode d'analyse générale des systèmes (en partie issue de la cybernétique de Wiener) et sur des techniques de modélisation mathématique. Au-delà de ces tendances théoriques, de nombreux travaux écologiques de recherche se déroulent non seulement dans des pays industrialisés mais aussi dans des pays en voie de développement. Une certaine coordination pour l'étude des principaux écosystèmes est réalisée au sein de programmes internationaux, comme le Programme biologique international (P.B.I.) auquel a succédé le projet M.A.B. (« Man and Biosphere »).

L'enseignement de l'écologie, donné par l'intermédiaire des universités au niveau de la recherche et de l'enseignement supérieur, est maintenant largement présent dans les enseignements de biologie du secondaire, soit qu'il constitue des tranches de programme bien individualisées, soit qu'il imprègne largement l'ensemble éducatif. Dans beaucoup de pays, une initiation au niveau élémentaire, avec les tout jeunes enfants, est tentée avec succès : en France, des ouvrages de parution récente témoignent de l'intérêt que manifestent beaucoup de pédagogues pour l'écologie. L'éducation de l'enfant est en effet probablement la méthode la plus sûre pour que l'individu adulte comprenne ensuite quelle est sa place dans la biosphère et qu'une « conscience écologique » se développe en lui. Mais devant la rapidité des dégradations et l'emprise d'une technique brutale, il y a urgence : il faudrait dès maintenant que ceux qui agissent, bâtissent, décident (politiciens, technocrates, urbanistes, agronomes, forestiers, etc.) reviennent à une conception cohérente et plus juste du rôle de l'homme dans le monde vivant. Cela va peut-être d'ailleurs au-delà des choix de société, car c'est toute une philosophie nouvelle qui peut en découler. C'est à cette condition qu'il est permis de rester optimiste : « Peut-être y aura-t-il un autre siècle de choses vivantes... enfants, herbe verte, insectes d'été et vieilles gens... et non une planète consumée flottant dans l'univers, aussi abandonnée qu'un cratère de lune battu au vent » *(Joan Baez)*.

BIBLIOGRAPHIE

Généralités-facteurs écologiques

AGUESSE P., *Clefs pour l'écologie*, Seghers, Paris, 1971. - ALLEE W.C., EMERSON A.E., PARK T. et SCHMIDT K.P., *Principles of Animal Ecology*, Saunders, Philadelphie, 1965. - ASHBY M., *Plant Ecology*, Macmillan, Londres, 1963. - BILLINGS W.D., *Plants and the Ecosystem*, Macmillan, Londres, 1964. - BODENHEIMER F.S., *Précis d'écologie animale*, Payot, Paris, 1955. - BUCHSBAUM R. et M., *Basic Ecology*, The Boxwood Press, Pittsburgh, 1964. - CLARKE G.L., *Elements of Ecology*, Wiley, New York, 1954. - DAJOZ R., *Précis d'écologie*, Dunod,

C. Bevilacqua

▲ **Helianthemum chamaeciscus**, *un exemple de plante chaméphyte suffrutescente cespiteuse, d'après le schéma d'Ellemberg et Mueller-Dombois.*

Paris, 1971. - DAUBENMIRE R.F., *Plants and Environment,* Wiley, New York, 1959. - DAUBENMIRE R., *Ecology of Fire in Grasslands,* in *Adv. In Ecol. Res,* 5, p. 209-266, 1970. - DUVIGNEAUD P., *l'Écologie, Science moderne de synthèse,* vol. 2, *Écosystèmes et Biosphère,* min. de l'Éducation nationale et de la Culture, Bruxelles, 1962. - DUVIGNEAUD P., *la Synthèse écologique,* Doin, Paris, 1974. - KORMONDY E.J., *Concepts of Ecology,* Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1969. - ELTON C., *Animal Ecology,* Sidgwick and Jackson, Londres, 1927. - FARB P., *l'Écologie,* in *le Monde vivant,* coll. Life, 1970. - KÜHNELT W., *Écologie générale,* Masson, Paris, 1969. - LACOSTE A. et SALANON R., *Éléments de biogéographie,* Nathan, Paris, 1969. - LEWIS T. et TAYLOR L.R., *Introduction to Experimental Ecology,* Acad. Press, Londres, 1967. - Mac FAYDEN A., *Animal Ecology,* Pitman, London, 1963. - ODUM E.P., *Fundamentals of Ecology,* Saunders, Philadelphie, 19171. - OZENDA P., *Biogéographie végétale,* Doin, Paris, 1964. - RAMADE F., *Éléments d'écologie appliquée,* Ediscience, Paris, 1974. - SACCHI C.F. et TESTARD P., *Écologie animale. Organismes et milieu.* Doin, Paris, 1971. - SOUCHON C. et J., *Notions d'écologie,* Dauphin, Paris, 1966. - WEAVER J.E. et CLEMENTS F.E., *Plant Ecology,* Mac Graw Hill, New York, 1938. - WHITTAKER R.H., *Communities and Ecosystems,* Mac Millan, New York, 1970.

Dynamique des populations

ADAMS L., *Population Ecology,* Dickenson, Belmont, 1970. - ANDREWARTHA H.G. et BIRCH L.C., *The Distribution and Abundance of Animals,* Chicago University Press, 1954. - AYALA F.J., *Environmental Fluctuations and Population Size,* in *Nature,* 231, p. 112-114, 1970. - BIRCH L.C., *The Role of Environmental Heterogeneity and Genetical Heterogeneity in Determining Distribution and Abundance,* in DEN BOER et GRADWELL, *Dynamics of Populations,* p. 109-128. - BLONDEL J., *Réflexions sur les rapports entre prédateurs et proies chez les Rapaces, I : les Effets de la prédation sur les populations des proies,* in *la Terre et la Vie,* 114, p. 5-32, 1967. - BOUGHEY A.S., *Ecology of Populations,* Macmillan, Londres, 1968. - CHABOUSSOU F., *Influence des pesticides sur la plante : conséquences écologiques* in *Bull. Soc. Écol.,* 1, p. 146-158, 1970. - CLARK L.R., GEIER P.W., HUGHES R.D. et MORRIS R.F., *The Ecology of Insect Populations in Theory and Practice,* Methuen and Co., Londres, 1967. - CLAUSEN J., KECK D.D. et HEESEY W.M., *Experimental Studies on the Nature of Species,* Carnegie Instit., Washington, 1940-1948. - DAJOZ R., *Dynamique des populations,* Masson, Paris, 1974. - DARWIN C., *l'Origine des espèces,* Schleider, Paris. - DEEVEY E.S., *Life Tables for Natural Populations of Animals, Quart. Rev. Biol.,* 22, p. 283-314, 1947. - ELTON C., *The Ecology of Invasions by Animal and Plants,* Methuen et Co., Londres, 1958. - FERRY C. et FROCHOT B., *Une méthode pour dénombrer les oiseaux nicheurs,* in *la Terre et la Vie,* 105, p. 85-102, 1958. - ID., *l'Avifaune nidificatrice d'une forêt de chênes pédonculés en Bourgogne : étude de deux successions écologiques,* in *la Terre et la Vie,* 1970. - GAUSE G.F., *Vérifications expérimentales de la théorie mathématique de la lutte pour la vie,* Hermann, Paris, 1935. - GERI C. et DUSSAUSOY G., *Étude d'une population de* Diprion pini *Hym. Symphytes en forêt de Fontainebleau,* in *Ann. Soc. ent. Fr,* 2, p. 535-548, 1966. - GIBAN J., LE LOUARN H. et SPITZ F., *État d'avancement des études sur les Micromammifères et les Oiseaux des mélezins du Briançonnais,* in *Ann. Zool. Écol. animal* (N° hors-série, *« La lutte biologique en forêt »*), p. 123-136, 1971. - HARPER J.L., *Approaches to the Study of Plant Competition,* in *Mechanism in Biological Competition,* Cambridge University Press, 1961. - HOLLING C.S., *The Components of Predation as Revealed by a Study of Small Mammal Predation of the European Pine Sawfly,* in *Can. Entom.,* 91, p. 293-320, 1959. - HUFFAKER C.B., *Experimental Studies on Predation : Dispersion Factors and Predator-Prey Oscillations,* in *Hilgardia,* 27, p. 343-383, 1958. - HUFFAKER C.B., MESSENGER P.S. et DE BACH P., *The Natural Enemy Component in Natural Control and the Theory of Biological Control,* in DE BACH, *Biological Control of Insects, Pests and Weeds,* p. 16-67, Chapman et Hall, Londres, 1964. - LAMOTTE M. et BOURLIÈRE F., *Problèmes d'écologie, I : l'Échantillonnage des peuplements animaux des milieux terrestres,* Masson, Paris, 1969. - LAMOTTE M. et BOURLIÈRE F., *Problèmes d'écologie, II : l'Échantillonnage des peuplements animaux des milieux aquatiques,* Masson, Paris, 1971. - NICHOLSON A.J., *Dynamics of Insect Populations,* in *Ann. Rev. Ent,* 3, p. 107-136, 1958. - PETIT C. et PREVOT G., *Génétique et évolution,* Hermann, Paris, 1967. - PIMENTEL D., *Population Regulation and Genetic Feedback,* in *Science,* 159, p. 1432-1437, 1968. - PIMENTEL D. et STONE F.A., *Evolution and Population Ecology of Parasite-Host System,* in *Can. Ent,* 100, p. 655-662, 1968. - SLOBODKIN L.B., *Growth and Regulation of Animal Populations,* Holt, Rinehart et Winston ed., New York, 1966. - SOKAL R.R. et HUBER I., *Competition among Genotypes in* Tribolium castaneum *and Varying Densities and Gene Frequencies (the Sooty Locus), Amer. Nat.,* 97, p. 169-184, 1963. - SOLOMON M.E., *Population Dynamics,* Arnold, Londres, 1969. - SOUTHWOOD T.R.E., *Ecological Methods,* Methuen, Londres, 1966. - SPITZ F., *Facteurs du milieu agissant sur la multiplication de* Microtus arvalis, in *Ann. Epiphy,* 16, p. 399-400, 1965. - TABER R.D. et DASMANN R.F., *The Dynamics of Three Natural Populations of the Deer* (Odocoileus hemionus columbianus), in *Ecology,* 38, p. 233-246, 1957. - UTIDA S., *Population Fluctuations, an Experimental and Theoretical Approach,* in *Cold Spring Harbor Symp. Quant. Biol.,* 22, p. 139-151, 1957. - WALTERS M. et BRIGGS D., *les Plantes : variations et évolution,* Hachette, Paris, 1969. - WYNNE EDWARDS V.C., *Feed-back from Food Resources to Populations Regulation,* in WATSON, *Animal Populations in Relation to their Food Resources,* p. 413-427, Blackwell, Londres, 1970.

Phytosociologie

BOURNÉRIAS M., *Guide des groupements végétaux du Bassin parisien,* Sedes, Paris, 1968. - BRAUN-BLANQUET J., ROUSSINE N. et NÈGRE R., *les Groupements végétaux de la France méditerranéenne,* C.N.R.S., Paris, 1952. - BRAUN-BLANQUET J., *Pflanzensoziologie,* Springer, Vienne, 1964. - CLEMENTS F.E., *Plants Succession. An Analysis of the Development of Vegetation,* Carnegie Inst., Washington, 1916. - GOUNOT M., *Méthodes d'étude quantitative de la végétation,* Masson, Paris, 1969. - GUINOCHET M., *Logique et*

dynamique du peuplement végétal, Masson, Paris, 1955. - ID., *Phytosociologie,* Masson, Paris, 1973. - SOUCHON C. et ROUX G., *Méthodes de description de la végétation et cartographie,* in *Bull. A.P.B.G.,* 3, 197, p. 321-328, 1970.

Écosystèmes - Cycles biogéochimiques

BORMANN F.H. et LIKENS G.E., *The Nutrient Cycles of an Ecosystem,* in *Scient. American,* 223, 4, p. 92-101, 1970. - COLLIER B., COX G., JOHNSON A. et MILLER P., *Dynamic Ecology,* Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1972. - DE VOS A., *Ecological Conditions Affecting the Productions of Wild Herviborous Mammals on Grasslands,* in *Adv. in Ecol. Res.,* 6, p. 137-183, 1969. - DUVIGNEAUD P. et DENAEYER-DE SMET S., *le Cycle des éléments biogènes dans l'écosystème forêt,* in *Lejeunia, Rev. de Bot.,* 5, 28, 1964. - DUVIGNEAUD P., DENAEYER S., AMBROES P. et TIMPERMAN J., *Recherche sur l'écosystème forêt,* in *Mém. Inst. Roy. Sci. nat. de Belgique,* 164, 1971. - DUVIGNEAUD P., *Productivité des écosystèmes forestiers,* in *Actes du Colloque de Bruxelles,* UNESCO, Paris, 1973. - ENGELMANN M.D., *Energetics, Terrestrial Field Studies, and Animal Productivity,* in *Adv. in Ecol. Res.,* 3, Acad. Press, Londres, 1966. - GOLLEY F.B., *Energy Dynamics of a Food-Chain of an Old-Field Community,* in *Ecol. Monog.,* 30, 2, p. 187-206, 1960. - HEDIN L., KERGUELEN M. et DE MONTARD F., *Écologie de la prairie permanente française,* Masson, Paris, 1972. - JEFFERS J.N., *Mathematical Models in Ecology,* Blackwell, Oxford, 1972. - LAMOTTE M. et BOURLIÈRE F., *Problèmes de productivité biologique,* Masson, Paris, 1967. - LIKENS G.E., BORMANN F.H., PIERCE R.S. et FISCHER D., *Nutrient-Hydrologic Cycle Interaction in Small Forestea Watershed Ecosystems,* in *Ecol. et cons.,* 4, p. 553-563, UNESCO, Paris, 1971. - MacFAYDEN A., *Energy Flow in Ecosystems and Its Exploitation by Grazing,* in *Grazing in Terrestrial and Marine Environments,* Blackwell, Oxford, p. 1-20, 1964. - MARGALEF R., *Perspectives in Ecological Theory,* Univ. of Chicago Press, Chicago, 1968. - NICHIPOROVICH A., *Photosynthesis of Productive Systems,* in *Acad. Sc. USSR,* 1967. - ODUM E.P., *The Strategy of Ecosystem Development,* in *Science,* 164, p. 262-270, 1969. - OVINGTON J.D., *Quantitative Ecology and the Woodland Ecosystem Concept,* in *Adv. in Ecol. Research,* 1, p. 103-192, 1962. - PESSON P., *Écologie forestière,* Gauthier - Villars, Paris, 1974. - PETRUSEWICTZ K. et MacFAYDEN A., *Productivity of Terrestrial Animals,* in *IBP Handbook,* 13, Blackwell, Oxford, 1970. - PHILIPSON J., *Ecological Energetics,* Arnold, Londres, 1973. - REICHLE D.E., *Analysis of Temperate Forest Ecosystems,* Springer, Berlin, 1970. - RODIN L.E. et BASILEVICH N.I., *Production and Mineral Cycling in Terrestrial Vegetation,* Oliver and Boyd, Londres, 1967. - SUKACHEV V. et DYLIS N., *Fundamentals of Forest Biogeocoenology,* Oliver et Boyd, Londres, 1, 1964. - TEAL J.M., *Community Metabolism in a Temperate Cold Spring,* in *Ecol. Monog.,* 27, p. 283-302, 1957. - WOODWELL G.M. et SMITH H.H., *Diversity and Stability in Ecological Systems,* in *Brookhaven Symposia in Biology,* 22, 1969. - WOODWELL G.M. et WITTAKER R.H., *Primary Production in Terrestrial Communities,* in *Am. Zool.,* 8, p. 19-30, 1968.

Les biomes et leur productivité

ADJANOHOUN E.J., *Études phytosociologiques des savanes de basse Côte-d'Ivoire (savanes lagunaires),* in *Vegetatio,* 11, 1-2, p. 1-38. - AUBREVILLE A., *Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale,* in *Soc. d'éd. Géogr. Mar. et Colon.,* Paris, 1949. - AUBREVILLE A., *Étude écologique des principales formations végétales du Brésil et contribution à la connaissance des forêts de l'Amazonie brésilienne,* Centre techn. forest. tropical, Nogent-sur-Marne, 1961. - BASILEVICH N.I., RODIN L.Y. et ROZOV N.N., *Geographical Aspects of Biological Productivity,* in *Soviet Geography,* mai 1971, p. 293-317, 1971. - BELL H.V., *A Grazing Ecosystem in the Serengeti,* in *Sc. Amer.,* 225, 1, p. 86-93, 1971. - BIROT P., *Formations végétales du globe,* Sedes, Paris, 1965. - BORINSKII N.A., *Zoogéographie,* éd. Scientifico-pédagogiques, ministère de l'Enseignement, Moscou (en russe), 1951. - BOUGIS P., *le Plancton,* P.U.F., Paris. - BOYER A., *les Pêches maritimes,* P.U.F., Paris. - COLLECTIF, *les Divisions écologiques du monde. Moyens d'expression, nomenclature, cartographie,* in

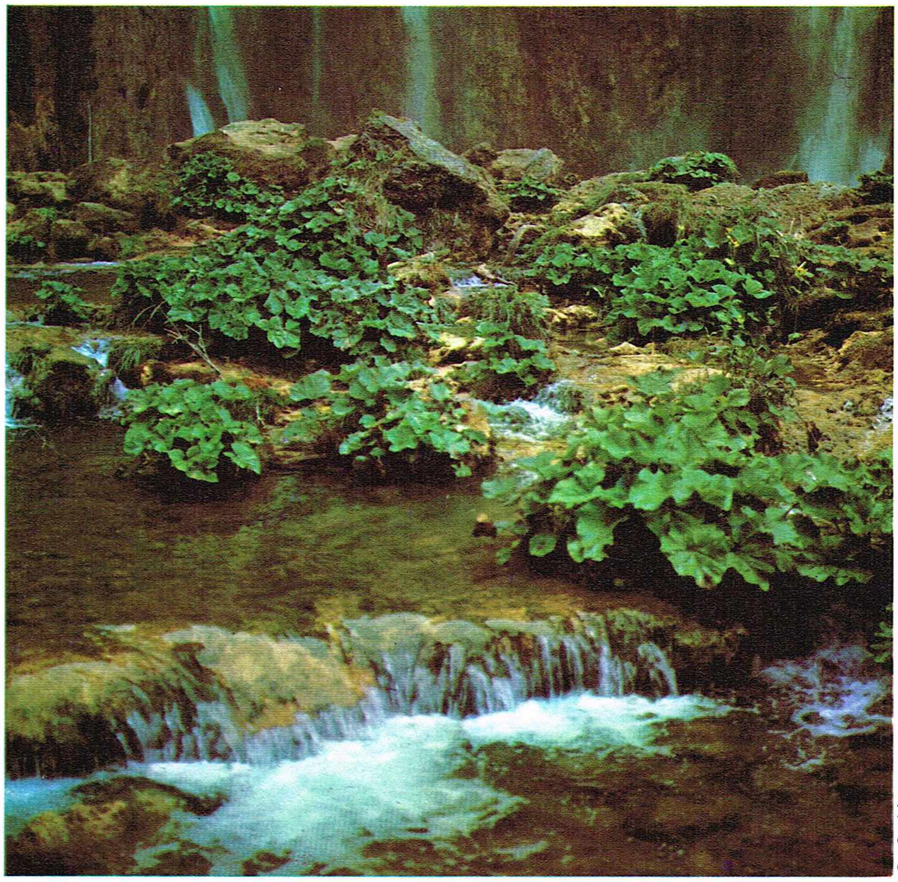

O. Geddo

▲ **Un exemple de phytocénose à hygrophytes (Petasites sp., *Mousses, Hépatiques*) dans une zone ombragée et riche en eau.**

Colloques internationaux du C.N.R.S., Paris, juin-juillet 1954, Paris, 1955. - DANSEREAU P., *Biogeography in an Ecological Perspective,* The Ronald Press, New York, 1957. - DÉCAMPS J., *la Vie dans les eaux douces,* P.U.F., Paris. - DORST J. et DANDELOT P., *Guide des grands Mammifères d'Afrique,* Delachaux et Niestlé, Neuchâtel, 1972. - ELHAI H., *Biogéographie,* Colin, Paris, 1968. - EVENARI M. et KOLLER D., *Desert Agriculture : Problems and Results in Israel. The Future of Arid Lands,* in *Amer. Ass. Adv. Sc.,* p. 390-413, 1956. - GUILLAUMET J.-L., *Recherches sur la végétation et la flore de la région du Bas-Cavally (Côte-d'Ivoire),* in *Mémoires ORSTOM,* 20, Paris, 1967. - KACHAROV D.N. et KOROVINE E.P., *la Vie dans les déserts,* Payot, Paris, 1942. - KIRA T. et SHIDEI T., *Primary Production and Turnover of Organic Matter in Different Forest Ecosystems of Western Pacific,* in *Jap. Journ. of Ecol.,* 17, 2, p. 80-87, 1967. - LAMOTTE M., *Recherches écologiques dans la savane de Lamto (Côte-d'Ivoire) : présentation du milieu et du programme de travail,* in *la Terre et la Vie,* 21, p. 197-215, 1967. - LAMOTTE M., *la Participation au PBI de la station d'écologie tropicale de Lamto (Côte-d'Ivoire),* in *Bull. soc. écol.,* 1, 2, p. 58-65, 1970. - LE HOUÉROU H.N., *la Végétation de la Tunisie steppique,* in *Ann. I.N.R.A., Tunisie,* 42, 5, 1969. - LOSSAINT P. et RAPP M., *Répartition de la matière organique, productivité et cycle des éléments minéraux dans des écosystèmes de climat méditerranéen,* in *Écol. et cons.,* 4, p. 597-617, UNESCO, 1971. - MALBRANT R. et MACLATCHY A., *Faune de l'équateur africain français,* Lechevalier, Paris, 1949. - MONOD T., *les Déserts,* Horizons de France, Paris, 1973. - MOREL G., *Contribution à l'étude de la synécologie des Oiseaux du Sahel sénégalais,* in *Mémoires ORSTOM,* 29, Paris, 1968. - PAULIAN R., *Observations écologiques en forêt de basse Côte-d'Ivoire,* Lechevalier, Paris, 1947. - PESSON P., *la Vie dans les sols,* Gauthier-Villars, Paris, 1971. - PÉRÈS J.-M. et DEVEZE L., *Océanographie biologique marine,* P.U.F., Paris, 1964. - RICHARDS P.W., *The Tropical Rain Forest,* Cambridge University Press, 1952. - RICOU, *Étude biocœnotique d'un milieu naturel. La Prairie permanente pâturée,* Thèse Fac. Sc. Univ. Paris, 1967. - RYTHER J.H., *Photosynthesis and Fresh Production in the Sea,* in *Science,* 166, p. 72-77, 1969.

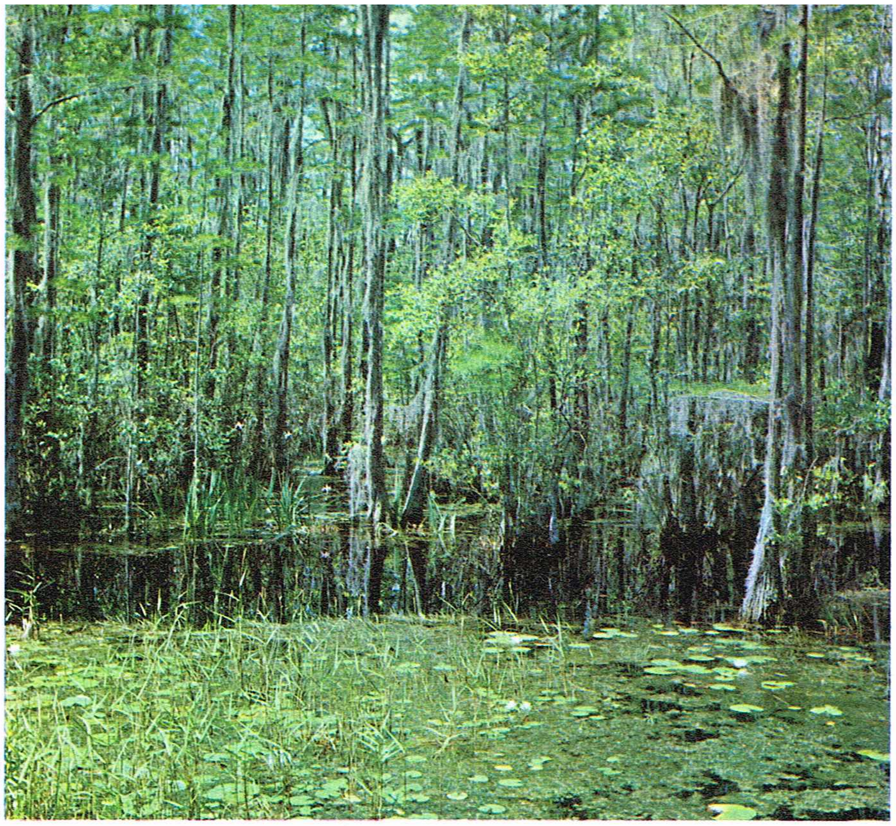

T. Poggio

▲ *Un bois paludéen en Géorgie (U.S.A.).*

- SCHNELL R., *la Forêt dense,* Lechevalier, Paris, 1951. - ID., *Introduction à la phytogéographie des pays tropicaux,* 2 vol., Gauthier-Villars, Paris, 1970. - WALTER H., *Vegetations Zonen und Klima,* Ulmer, Stuttgart, 244 p., 1970. - ID., *Klimadiagram-Weltatlas,* Fischer, Iéna, 3 vol., 1960, 1964, 1967. - SCHAER J.P. et al., *Guide du naturaliste dans les Alpes,* Delachaux et Niestlé, Neuchâtel, 1972.

Écologie appliquée

BELLAN G. et PÉRÈS J.-M., *la Pollution des mers,* P.U.F., Paris, 1974. - BÉNARD J., BILIOTTI E., BOUVARD P., LABEYRIÉ V. et OZENDA P., *l'Écologie contre les nuisances pour la conservation de la nature,* Le Prat, Paris, 1974 (et autres tomes du *Précis général des nuisances*). - BONNEFOUS E., *l'Homme ou la Nature ?,* Hachette, Paris, 1971. - BOUGHEY A., *Man and the Environment,* Macmillan, New York, 1971. - BRESLER J.B., *Human Ecology,* Addison-Wesley, États-Unis, 1966. - BURCH W.R. et al., *Social Behaviour, Natural Resources, and the Environment,* Harper et Row, New York, 1972. - CARSON R., *Printemps silencieux,* Plon, Paris, 1963. - CEPEDE M., *la Faim occulte : la Lutte contre la faim,* in *le Courrier,* UNESCO, 7-8, 1962. - CHOVIN P. et ROUSSEL A., *la Pollution atmosphérique,* P.U.F., Paris, 1974. - CLARK C., *Population Growth and Land Use,* Macmillan, Londres, 1968. - COLAS R., *la Pollution des eaux,* P.U.F., Paris, 1973. - COLLECTIF, *Utilisation et conservation de la biosphère,* UNESCO, Paris, 1970. - COLLECTIF, *Écologie et aménagement,* in *Aménagement et Nature,* Paris, 1973. - COMMONER B., *Quelle terre laisserons-nous à nos enfants ?,* Seuil, Paris, 1969. - COURRIER DE LA NATURE Revue Périodique, Paris. - COX G.W., *Readings in Conservation Ecology,* Appleton, New York, 1969. - DASMANN R.F., MILTON J.-P. et FREEMAN P.H., *Ecological Principles of Economic Development,* J. Wiley, Londres, 1973. - DAVIS K. et BLUMENSTROM R.L., *Business, Society and Environment : Social Power and Social Response.* Mc Graw Hill, New York, 1971. - DORST J., *la Nature dénaturée* (extraits de *Avant que Nature ne meure,* in *« Points »*), Delachaux et Niestlé, Neuchâtel, 1965. - EHRLICH P.A. et EHRLICH A.H., *Population, Resources, Environment,* Freeman, San Francisco, 1970. - FRANKEL O.H. et BENNETT E., *Genetic Resources in Plants : Their Exploration and Conservation,* IBP Handbook, Blackwell, Oxford, 1970. - HEIM R., *Destruction et protection de la nature,* Colin, Paris, 1952. - KLATZMANN P., *Nourrir dix milliards d'hommes,* P.U.F., Paris, 1975. - LAMBERT J.M., *The Teaching of Ecology,* Blackwell, Oxford, 1967. - Mac HARG I., *Design with Nature,* Doubleday, New York, 1969. - MELLANBY K., *The Biology of Pollution,* Arnold, Londres, 1972. - MEADOWS et al., *Rapport sur les limites à la croissance,* in DELAUNAY J., *Halte à la croissance,* Fayard, Paris, 135-309, 1972. - ODUM H.T., *Environment, Power and Society,* Wiley-Interscience, Londres, 1971. - PELLERIN P., *Nature, attention : poisons !,* Stock, Paris, 1970. - SAINT-MARC P.H., *Socialisation de la Nature,* Stock, Paris, 1971. - *SCIENCE ET VIE, l'Environnement,* in n° 106 (spécial), 1974. - THERNISIEN J.A., *les Pollutions et leurs effets,* P.U.F., Paris, 1968. - THERNISIEN J.A., *la Lutte contre les pollutions,* P.U.F., Paris, 1968. - VAN DEN BOSCH R. et MESSENGER P.S., *Biological Control of Pests,* in *Intext. Educ. Publ.* Scranton., 1973. - WATT K., *Principles of Environmental Science,* Mc Graw-Hill, New York, 1973.

Bruce Coleman - J. Van Wormer

▶ *Un ours dans un parc américain.*

E. Miyazawa - Black Star

▲ *L'éthologie : « Branche de la zoologie ayant pour objet l'étude du comportement des animaux dans leur milieu naturel » (Geoffroy Saint-Hilaire, 1855 ; Giard, 1972). L'étude, par les primatologues japonais, de macaques (dont quelques individus sont ici représentés au bain) montre bien l'importance et l'influence du réseau complexe des liaisons interindividuelles dans la découverte et l'utilisation de l'environnement.*

L'ÉTHOLOGIE

Les définitions des termes les plus couramment utilisés dans les disciplines du comportement permettent d'établir une première approche des objets du présent exposé.

Voici, par exemple, celles du *Vocabulaire de la psychologie* de Piéron.

Éthologie

— « Branche de la zoologie ayant pour objet l'étude du comportement des animaux dans leur milieu naturel » (Geoffroy Saint-Hilaire, 1855; Giard, 1972). Cette discipline connaît un regain d'intérêt considérable avec les travaux de l'école objectiviste de Lorenz et Tinbergen (depuis 1935). D'une part, elle est un complément précieux à l'étude des caractères morphologiques et anatomiques des animaux, en vue de la distinction des espèces et de la caractérisation des groupes zoologiques. D'autre part, elle devrait permettre de fonder l'expérimentation, dans le domaine du comportement animal, sur une base d'observation plus solide, et d'orienter les recherches zoopsychologiques et psychophysiologiques vers des espèces animales encore peu étudiées.

— « Étude sociologique des mœurs et de la morale humaine. »

Éthologie objective

— « L'école de Lorenz-Tinbergen pratique sous ce terme l'étude des comportements instinctifs des animaux fondée sur une description exacte de ces comportements dans leur complexité réelle, et tend à découvrir leurs causes par voie expérimentale ainsi qu'à retracer leur évolution dans la série zoologique par des comparaisons interspécifiques *(éthologie comparée)*. Dans l'esprit de Lorenz, l'éthologie objective s'oppose à toute théorie préconçue de l'*instinct*, que celle-ci soit d'ordre physiologique (mécaniste) ou d'ordre psychologique (finaliste). »

Comportement

— « Ce vieux mot pascalien, réintroduit par Piéron (1907) dans le langage psychologique comme équivalent de *behavior* (ou *Verhalten*), désigne les manières d'être et d'agir des animaux et des hommes, les manifestations objectives de leur activité globale. Pierre Janet a désigné du nom de *conduites* certaines actions, certaines formes particulières du comportement humain (conduites de l'attente, du triomphe ou de l'échec, etc.). Le comportement est l'objet d'étude de la *psychologie objective.* »

Ainsi, c'est seulement dans la seconde moitié du XIXe siècle que le terme d'éthologie a été utilisé pour désigner une discipline qui concernait la zoologie et qui, comme l'approche morphologique, se donnait une finalité de caractérisation taxonomique et de comparaison phylogénétique.

Il faut souligner qu'*avec l'éthologie objectiviste, on se réfère à une discipline zoologique à valeur descriptive, comparative, évolutive et expérimentale ;* il est intéressant que des hommes comme Piéron la sentent comme *cherchant à se distancier de deux courants instinctivistes (mécaniste et finaliste) considérés comme préconçus.*

Approche historique

Il est impossible de comprendre les contenus actuels de l'éthologie sans une connaissance de l'organisation historique progressive des idées dans ce champ des connaissances.

Les origines

Sans aucun doute, les hommes du Paléolithique étaient déjà parvenus intuitivement à l'idée d'une caractérisation possible des animaux par certains au moins de leurs comportements, et ils devaient utiliser cette connaissance dans leurs méthodes de chasse. Il est cependant difficile de juger avec sûreté du niveau de leur réflexion par la seule analyse des peintures murales des cavernes, bien que celles-ci révèlent des mouvements, des postures, des attitudes souvent exacts jusque dans leurs détails... d'autant mieux apparents d'ailleurs que l'environnement végétal ne vient jamais distraire l'attention dans ce type de représentation.

Un pas a été franchi lorsque des hommes, en domestiquant les animaux, ont su tirer parti de leurs dispositions éthologiques pour orienter et organiser leur action. Très probablement, ces hommes ont d'abord procédé vis-à-vis des troupeaux à la manière dont procèdent encore les

N. Cirani

▲ *Les hommes préhistoriques, déjà, étaient parvenus intuitivement à l'idée d'une caractérisation possible des animaux par certains au moins de leurs comportements, comme le révèlent ces peintures murales de Kondoa Trangi (Kolo) en Tanzanie.*

Lapons, qui sont nomades pendant les migrations des rennes et sédentaires pendant leur pâturage à points fixes. Quelle que soit la phase, les rythmes physiologiques de l'homme coïncident avec ceux de l'animal, qui cependant reste canalisé par le premier dans ses évolutions et utilisé par lui de tous les points de vue.

Cette interdépendance de l'homme et de l'animal crée des liens : par exemple, si le jeune chiot ou le jeune porc sauvage nourri par une femme en même temps ou à la place de l'enfant de celle-ci s'attache à l'animal bipède, de son côté, celui-ci développe un attachement réciproque. L'identification est proche, et si les étapes nous échappent encore, du moins l'évocation de civilisations comme celle de l'Égypte pharaonique (cultes d'Isis, du bœuf Apis, etc.) montre que l'assimilation s'est faite et qu'elle se poursuivra longtemps dans l'imagination humaine. Dans la mythologie grecque, les Centaures, le Minotaure et les apparitions volontaires de Zeus sous des formes animales ou humaines attestent qu'à cette époque l'ensemble de l'animalité comprend vraiment toutes les espèces (y compris la nôtre) sans coupures fondamentales.

L'Antiquité

C'est avec la pensée aristotélicienne et ses développements que naissent les prémisses structurées d'une réflexion sur les comportements, accompagnée d'une coupure entre l'homme et les animaux. Cette pensée distingue trois sphères : la végétative, la sensitive et la rationnelle. Les animaux, qui possèdent les deux premières, sont doués de sensibilité et de motricité, à quoi s'ajoutent une « mémoire » et une « imagination » qui les conduisent à une « intelligence empirique » impliquant une faible possibilité de choix. L'homme, par contre, joint la raison à l'habitude et à la nature, et peut donc choisir « librement ». Cette séparation de l'homme et de l'animal conduit obligatoirement à l'anthropocentrisme, soit que l'animal serve à ridiculiser ou à éduquer l'homme en prenant ses travers ou ses qualités (épopée de la Batrachomyomachie, comédies d'Aristophane, fables d'Ésope, etc.), soit qu'on l'utilise pour punir l'homme qui transgresse les règles sociales (réincarnation des bouddhistes).

Il est évident qu'une rupture s'installe dans la continuité d'autrefois. Elle aboutit à opposer deux types d'actes dans le comportement.

— Les comportements qui, à première vue, donnent l'impression de la régularité mécanique, de la stabilité spécifique, de l'indépendance vis-à-vis des résultats atteints ; leur valeur réelle ne peut être révélée que par la qualité globale qui les caractérise (survie, reproduction, etc.) ; ces actes seraient l'apanage des animaux infra-humains et de l'homme et caractériseraient les *comportements instinctifs*.

— Les comportements qui, au contraire, apparaissent d'emblée davantage modifiables, plus susceptibles d'être soumis à une correction en fonction de leurs résultats et dont la valeur transparaît déjà à travers la stratégie de leur déroulement. Ces actes seraient le propre de l'homme et caractériseraient les *comportements intelligents*.

Cette opposition, dont les conséquences épistémologiques sont énormes, sera encore renforcée par l'idéologie chrétienne, bien que certains penseurs aient souligné avant l'époque moderne qu'une telle coupure établie *a priori* fausse l'analyse.

Boyer - Viollet

▶ *L'interdépendance* de l'homme et de l'animal *crée des liens : l'identification s'est faite jusqu'à l'assimilation, notamment dans la civilisation de l'Égypte pharaonique ; ici, la déesse Isis.*

Archives I.G.D.A. - Scala

◀ *L'idée d'une séparation radicale entre les animaux et l'homme va marquer la pensée de* René Descartes.

La Renaissance

Si la Renaissance accumule une grande quantité de faits aux niveaux anatomique ou physiologique (Léonard de Vinci, Belon, Rondelet, Aldrovande, Vésale, Servet, etc.), elle s'intéresse peu au comportement. Certains penseurs des XVIe et XVIIe siècles reviennent toutefois sur les affirmations des Anciens.

Montaigne, par exemple, réunit l'instinct et l'intelligence faute de critères objectifs pour les séparer : « Il n'y a pas d'apparence d'estimer que les bêtes fassent par inclination naturelle et forcée les mêmes choses que nous faisons par notre choix et notre industrie : nous devons conclure de pareils effets pareilles facultés. » Si ces vues s'appuient sans doute parfois sur certaines extrapolations hâtives à partir des comportements réels des animaux, elles n'en conduisent pas moins nettement à faire une place — pas toujours la première — à l'homme dans le règne animal.

A l'inverse, c'est l'idée d'une séparation radicale entre les animaux et l'homme qui va marquer la pensée de Descartes et le conduire à la description de « bêtes-machines », prisonnières de leurs automatismes. Malgré certaines oppositions, comme celle de Gassendi, c'est sur cette base que l'évolution se poursuit, préparant le succès éphémère de certains concepts mécanistes au XIXe siècle. Pour Descartes, ce qui nous est le mieux connu, le plus familier, c'est l'âme, substance spirituelle que nous pouvons saisir directement. A l'autre pôle, se situe la mécanique des corps, accessible à des recherches empiriques ou expérimentales.

Véritable continuateur de Descartes, Locke jettera les bases de l'école empiriste anglaise, ajoutant à l'intuition directe de nos idées une recherche des lois de la composition des idées simples par association successive ou simultanée.

Le XVIIIe siècle

Le XVIIIe siècle va représenter un véritable carrefour pour l'affrontement de tous les grands courants de la pensée moderne.

Linné classe les espèces végétales et animales, ordonnant les correspondances, précisant les descriptions, rapprochant les semblables. Cependant, fidèle à sa foi en la création divine, il refuse presque jusqu'à la fin de sa vie de voir les apparentements d'espèces ; sa belle systématique, dont aucun naturaliste moderne ne peut se passer, fige étrangement la nature en une juxtaposition de formes distinctes dont on décrit les rapports anatomiques mais dont on ne cherche pas les règles d'ordonnancement.

Buffon, adversaire irréductible de « Monsieur Linné », classe lui aussi les espèces, ou plutôt, il les décrit de son style alerte, avançant vers l'étude de leurs mœurs. Remarquable vulgarisateur, il a une grosse influence, d'autant que ses efforts coïncident avec l'action de Rousseau. S'il croit, malheureusement, encore à la génération spontanée, il n'en entrevoit pas moins une unité de plan, une continuité dans la série des êtres : existence d'intermédiaires entre les quadrupèdes, les Oiseaux, les Poissons et le reste des animaux ; intermédiaire possible (polypes) entre les animaux et les plantes. Cependant, ces idées sont encore peu assurées et soumises à la pression des hégémonies spiritualistes de l'époque. Il décrira des espèces animales « nobles », irréductibles les unes aux autres depuis la « création » (lion, tigre, éléphant, ours, etc.) et des espèces « ordinaires », qui semblent dériver les unes des autres sous l'effet de la « dégénération » (cheval et âne ; brebis, chèvre et gazelle ; loup, renard et chien ; panthère, léopard et chat, etc.). Ces idées prétransformistes ne s'organisent pas en un système cohérent, mais elles s'imposent certainement au jeune Lamarck, que Buffon fait entrer au service du Jardin du Roy en 1778.

Pendant ce temps, certains continuent à unifier l'instinct et l'intelligence (G. Leroy attribue aux animaux une « intelligence pratique » ; Condillac considère que le concept d'instinct est vide de sens), alors que d'autres établissent l'idée d'instinct comme caractéristique d'une partie seulement des actes du monde animal, idée qui sera défendue ardemment un peu plus tard par F. Cuvier.

Au moment où s'achève le XVIIIe siècle, le goût de la nature s'est particulièrement développé dans le public cultivé, en même temps que la société européenne « éclairée » devenait « scientiste » et que l'esprit philosophique se répandait dans toutes les classes. Le rationalisme cartésien, le déterminisme issu des travaux de l'analyse leibnitzienne, l'esprit expérimental newtonien, et le matérialisme de Lavoisier ont pénétré les cerveaux. Rousseau prône l'anti-science en ouvrant cependant

▼ *Buffon entrevoit une continuité dans la série des êtres, les polypes (ici, un* Corallium rubrum) *se trouvant peut-être en situation d'intermédiaire entre les animaux et les plantes.*

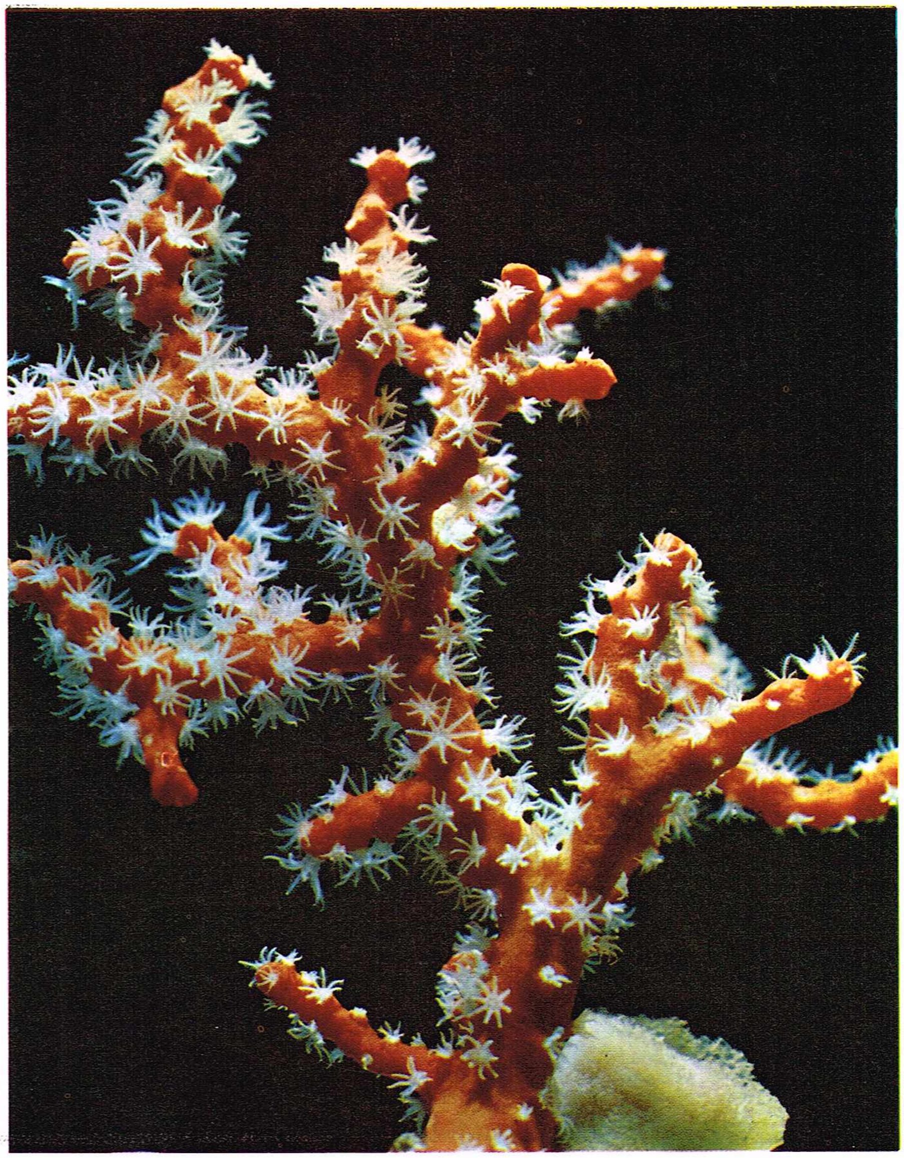

G. Mazza

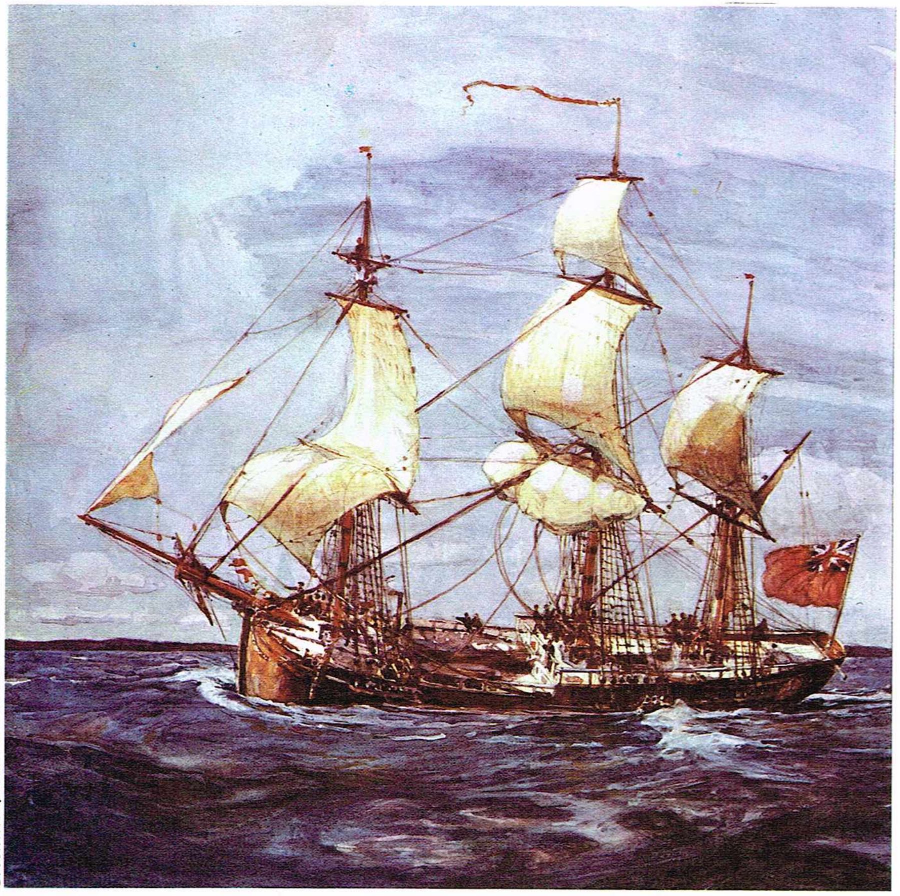

Greenwich, National Maritime Museum

C. Bevilacqua

▲ *En haut, le navire sur lequel le capitaine James Cook (en bas) entreprit les expéditions qui marquèrent la fin de l'ère des voyages de découverte et le début de celle des explorations scientifiques au XVIIIe siècle.*

▶ *Page ci-contre, les noms des hommes qui ont jalonné l'histoire des sciences du comportement de 1550 à 1950.*

toutes grandes les portes de la nature à ses disciples. Kant sépare radicalement la science de la philosophie, et le grand mouvement d'idées et de structures issu de la Révolution française de 1789 ou de ses prémices favorise l'ascension de l'esprit scientifique.

A l'ombre de tels événements, se prépare l'avènement de l'observation scientifique objective sur les animaux et l'homme.

Avant de quitter le XVIIIe siècle, il nous faut signaler deux faits de la plus grande importance pour l'avenir.

— C'est au cours de ce siècle qu'est dépassée l'habitude prise par les explorateurs de recueillir de façon aveugle tous les matériaux possibles. Chaque grande expédition s'adjoint désormais au moins un naturaliste de profession. Joseph Banks, qui accompagne le capitaine Cook, sert ainsi de précurseur aux grands découvreurs que seront Bonpland, Humboldt et Darwin. Ainsi se trouvent réalisées des récoltes rationnelles de matériel qui, complétées par des observations directes sur les mœurs des animaux recueillis, alimenteront aussi bien la méthodologie classificatrice de Linné que le transformisme de Lamarck.

— Simultanément, dans les sciences de la nature, des hommes comme Réaumur et ses disciples (Bonnet, de Geer, Trembley, entre autres) montrent la voie de l'observation précise, de l'expérimentation fine et de la transcription fidèle des faits. Ainsi, ses *Mémoires pour servir à l'histoire naturelle des Insectes* ont dominé le XVIIIe siècle et vont constituer un modèle pour beaucoup d'auteurs du XIXe siècle. Chez Réaumur, la rigueur expérimentale (« plus les faits s'écartent de la règle générale et plus ils ont besoin d'être prouvés ») mais aussi les ouvertures nouvelles sur le comportement (conception des « franges d'intelligence » chez les animaux) dépassent de beaucoup en précision les idées souvent mièvres de Buffon, dont le timide transformisme avait cependant introduit un coin de science dans la doctrine de l'Église. De nombreux chapitres de Réaumur contiennent une masse considérable d'observations sur les façons de vivre, les mœurs, les « industries » des Insectes ; il s'est attaché passionnément aux questions d'embryologie et de génétique. A bien des égards, son œuvre est de tout premier plan.

Le XIXe siècle

C'est au cours de la première moitié du XIXe siècle que sera établie la base du comportement, qui émerge lentement de la simple histoire des mœurs.

A ce titre, le génie de F. Huber, inspiré par Réaumur, semble exemplaire. Cet aveugle, doué d'un solide esprit d'investigation, se livra à d'importants travaux sur les abeilles et les fourmis. Son fils et continuateur, J.-P. Huber, étendit les recherches sur les fourmis et observa les bourdons.

Ces deux chercheurs s'intéressent à tous les aspects de la biologie, de l'équilibre social et du comportement des Insectes étudiés : l'époque est à l'observation d'ensemble, non à la spécialisation. F. Huber démontre, entre autres, la réalité et le rôle de la ventilation dans la ruche, décrit les vols nuptiaux et précise plusieurs des faits rapportés par Réaumur ; J.-P. Huber, grâce à l'emploi d'une méthode expérimentale rigoureuse, découvre les modalités du désailage des fourmis femelles fondatrices, met en rapport ce désailage avec la séparation de la colonie, la fécondation et l'aptitude à fonder une nouvelle société. La même méthode conduit à la certitude d'une orientabilité dans l'environnement et d'une communication entre individus différents d'une même espèce chez les Hyménoptères sociaux. En outre, l'« esclavagisme » des fourmis et le transport du couvain sont démontrés par les mêmes auteurs.

Cependant, l'enthousiasme et l'admiration se surajoutent très souvent à la précision des observations, et l'interprétation des faits dépasse la pure objectivité pour rejoindre une philosophie. Par exemple, si J.-P. Huber annonce sans doute les futurs taxonomistes du comportement lorsqu'il écrit : « Chaque espèce a ses mœurs, chaque individu sa constitution particulière... », il dépasse les strictes règles de l'objectivité lorsqu'il voit chez les fourmis « esclavagistes » où « règne l'ordre et l'harmonie », « l'Auteur de la nature tracer de sa main toute-puissante les lois d'une république exempte d'abus, ébauchant le modèle de ces sociétés complexes où la servitude s'allie à l'intérêt commun ». De même, il révèle les préoccupations philosophiques de certains de ses contemporains lorsqu'il écrit à propos des rapports entre fourmis dans les colonies mixtes, qu'il a souvent observées : « Ce grand trait où brille une bonté infinie, en nous rappelant les abus auxquels une institution semblable est sujette chez plusieurs nations policées, nous fait admirer la douceur des lois par lesquelles la Providence régit ces peuplades dont elle s'est réservée l'entière direction, et nous montre qu'en livrant l'homme à lui-même, elle l'a placé sous une grande et redoutable responsabilité. »

Plus que tous les autres sans doute, les comportements des Insectes sociaux frappent les observateurs et les conduisent à poser les problèmes de l'instinct dans les termes où ils vont se trouver discutés pendant cent ans. Cette problématique se caractérise par :

— une opposition simpliste entre le comportement « rigide » de l'animal et le comportement « libre » de l'homme. Ainsi, H. Burmeister écrit en 1836 : « L'instinct de l'animal est l'analogue de l'âme de l'homme ; une âme ne différant de celle de l'homme que par les nécessités imposées à toutes ses actions, alors que l'âme humaine est indépendante des nécessités et résout ses problèmes en toute liberté » ;

— mais aussi des possibilités non négligeables de « régulation », au moins pour certains comportements « qui se présentent comme le résultat d'une analyse libre et rationnelle ainsi que d'un certain degré de réflexion... la réflexion chez les Insectes consistant dans le choix des meilleures voies pour atteindre un objet », comme l'écrit Burmeister, qui ajoute : « L'expérience acquise peut continuellement être utilisée si elle est avantageuse et ceci grâce à une disposition particulière de l'âme que nous nommons mémoire. »

On ne sait si ces auteurs sentaient vraiment leurs contradictions de raisonnement, mais tout cela reste confus ; en particulier, les interférences entre instinct et intelligence sont nombreuses tant les définitions sont peu opératoires.

F. Cuvier considère l'instinct comme « une sorte de rêve, une vision que les animaux poursuivent toujours, qui les fait agir à la manière de somnambules », une « faculté spéciale qui leur est accordée comme supplément à l'intelligence et pour concourir avec elle et avec la force

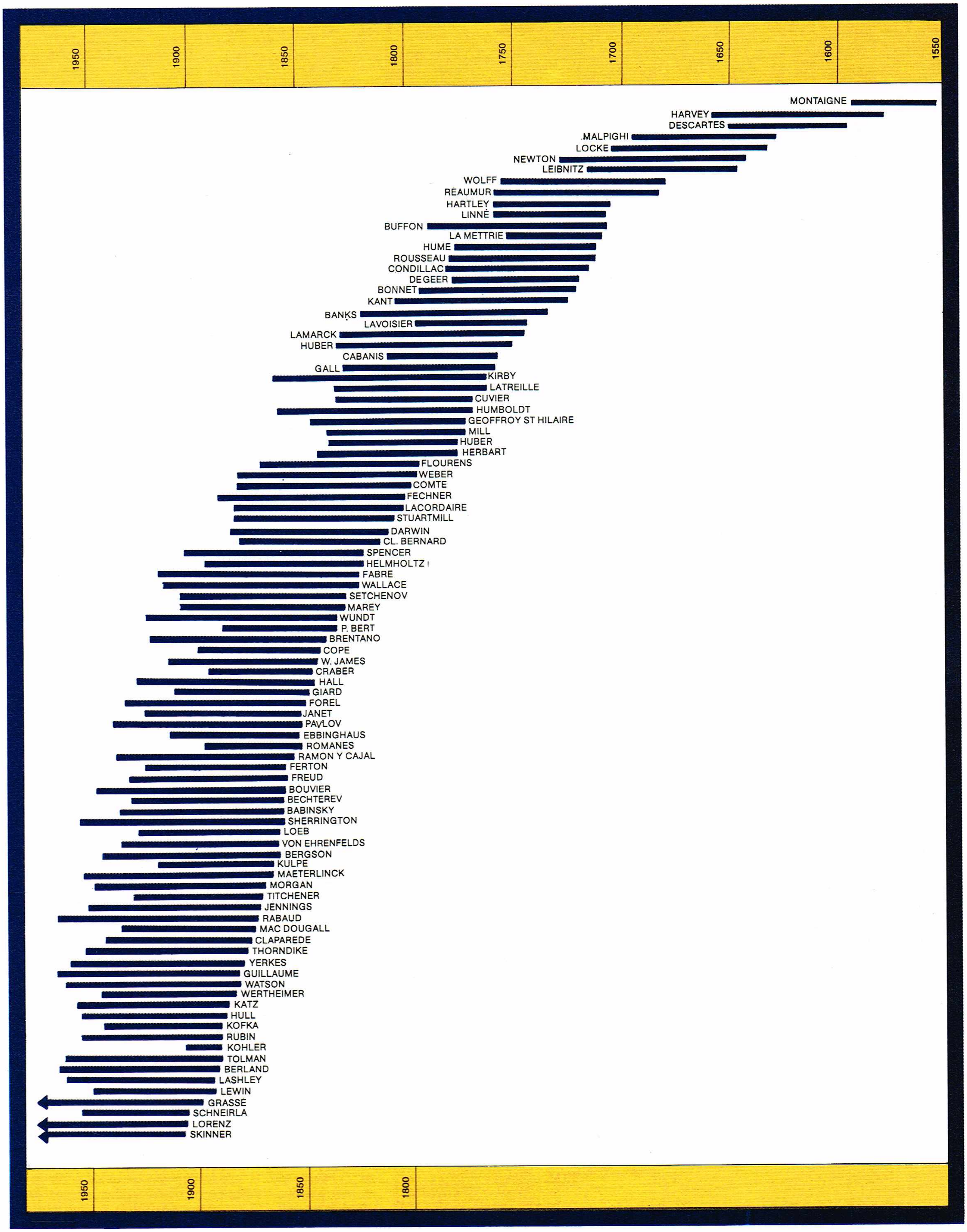

1950
1900
1850
1800
1750
1700
1650
1600
1550
MONTAIGNE
HARVEY
DESCARTES
MALPIGHI
LOCKE
NEWTON
LEIBNITZ
WOLFF
REAUMUR
HARTLEY
LINNÉ
BUFFON
LA METTRIE
HUME
ROUSSEAU
CONDILLAC
DE GEER
BONNET
KANT
BANKS
LAVOISIER
LAMARCK
HUBER
CABANIS
GALL
KIRBY
LATREILLE
CUVIER
HUMBOLDT
GEOFFROY ST HILAIRE
MILL
HUBER
HERBART
FLOURENS
WEBER
COMTE
FECHNER
LACORDAIRE
STUARTMILL
DARWIN
CL. BERNARD
SPENCER
HELMHOLTZ
FABRE
WALLACE
SETCHENOV
MAREY
WUNDT
P. BERT
BRENTANO
COPE
W. JAMES
CRABER
HALL
GIARD
FOREL
JANET
PAVLOV
EBBINGHAUS
ROMANES
RAMON Y CAJAL
FERTON
FREUD
BOUVIER
BECHTEREV
BABINSKY
SHERRINGTON
LOEB
VON EHRENFELDS
BERGSON
KULPE
MAETERLINCK
MORGAN
TITCHENER
JENNINGS
RABAUD
MAC DOUGALL
CLAPAREDE
THORNDIKE
YERKES
GUILLAUME
WATSON
WERTHEIMER
KATZ
HULL
KOFKA
RUBIN
KOHLER
TOLMAN
BERLAND
LASHLEY
LEWIN
GRASSE
SCHNEIRLA
LORENZ
SKINNER
1950
1900
1850
1800

Boyer - Viollet

▲ ▼ *Ci-dessus, l'entomologiste J. H. Fabre ; dans le débat instinct-intelligence, il alimentera la querelle en décrivant l'instinct comme une « activité innée, spécifique, immuable, aveugle, adaptée à un but biologique... » et comparera* l'activité instinctive de l'animal *(ci-dessous, une chenille en position de dissuasion) à la* motricité végétative *dont l'homme n'a pas* normalement « conscience » *dans son propre corps.*

G. Richard

et la fécondité au juste degré de conservation de chaque espèce ».

H. Spencer décrit en parallèle l'intelligence comme une acquisition secondaire qui « substitue à l'infaillibilité de l'instinct les incertitudes de l'activité rationnelle ».

A. Comte et les positivistes adhèrent à la conception selon laquelle l'instinct n'est qu'une forme d'intelligence pratique et non une catégorie spéciale de comportement. C. Cope ne conçoit pas d'instinct sans intelligence.

Les écrits enflammés de J. H. Fabre alimentent la querelle : celui-ci décrit l'instinct comme une « activité innée, spécifique, immuable, aveugle, adaptée à un but biologique puisque manifestation de l'esprit universel, du Créateur de la nature... », et il déclare : « L'instinct sait tout dans les voies invariables qui lui sont tracées, il ignore tout en dehors de ces voies. » Mieux encore : « L'Insecte ignore ses merveilleux talents, de même que l'estomac ignore sa chimie savante. Il maçonne, il tisse, il chasse, il poignarde, il paralyse comme il digère, comme il sécrète le venin de son arme, la soie de sa coque, la cire de ses rayons, toujours sans se rendre compte des moyens et du but. » *(Souvenirs entomologiques.)*

Il est intéressant de signaler que cet auteur compare l'activité instinctive de l'animal à la motricité végétative dont l'homme n'a pas normalement « conscience » dans son propre corps. Il devient alors possible de traiter cette activité comme un véritable automatisme, un « rêve », et de se dispenser de faire son analyse, en considérant qu'il s'agit d'un phénomène dû à une Providence organisatrice. Cependant, même pour Fabre, cette rigidité spécifique n'exclut pas un certain discernement : « L'instinct discerne le sec de l'humide, l'abrité du découvert, le solide du fragile et sait choisir un gîte aux moindres frais. » Cette rigidité peut même être compatible avec quelques possibilités de régulation chez des espèces « privilégiées » : le *Copris,* qui adapte parfois son comportement à la collecte et à la préparation de son matériau stercoral, l'osmie, qui « dispose » du sexe de sa progéniture, etc. Sans doute ces conceptions contribuent-elles à valoriser l'idée d'une utilisation possible des critères « fixes » de comportements en complément des caractères morphologiques pour la comparaison interspécifique, mais elles enferment la recherche de Fabre dans un cadre étroit et figé.

Malgré la tendance à l'interprétation subjective, les faits se sont accumulés pendant les cinquante premières années du XIXe siècle, en ce qui concerne à la fois des comportements simples, comme ceux de la ponte de divers Insectes, et des comportements plus complexes, comme ceux des Hyménoptères prédateurs. Mais c'est au sujet de la liaison des animaux avec leur milieu qu'on saisit le mieux à quel point les matériaux descriptifs ne permettaient pas encore d'aboutir aux interprétations définitives. Par exemple, les Huber ont établi la réalité d'une reconnaissance par l'odeur dans les sociétés de fourmis ; mais si les mêmes auteurs, puis Kirby et Spence, Goureau, ont acquis la certitude de l'existence d'une communication chez les Hyménoptères sociaux, les moyens de cette communication, sa liaison avec les afférences sensorielles possibles n'ont pas été découverts. Les traités ou manuels qui abordent les problèmes du comportement (Kirby et Spence, Burmeister, Blanchard) reflètent totalement l'absence de généralisation qui existe à cette époque.

Ce n'est pourtant pas faute de capacités et d'exemples de généralisation : les magnifiques leçons de Lamarck en sont une preuve absolue. Ce protégé de Buffon qui a vécu, grandi parmi les collections du Jardin du Roy (devenu le Muséum d'histoire naturelle par décision de la Convention) se chargea à l'aube du XIXe siècle d'étudier les riches collections d'Invertébrés du Muséum. Il conçut un système révolutionnaire de filiation des formes et des structures.

La contribution de Lamarck au transformisme s'appuie sur l'idée d'une dérivation des êtres complexes à partir des plus simples ; l'emploi plus fréquent d'un organe fortifie peu à peu cet organe et, réciproquement, le plus faible usage l'affaiblit ou même le fait disparaître. Lamarck pense que ce qui est gagné ou perdu dans ces conditions est conservé par la génération aux nouveaux individus pourvu que les changements soient communs aux deux sexes. Bien entendu, la durée joue un rôle capital dans ces transformations, dues à la pression progressive du milieu.

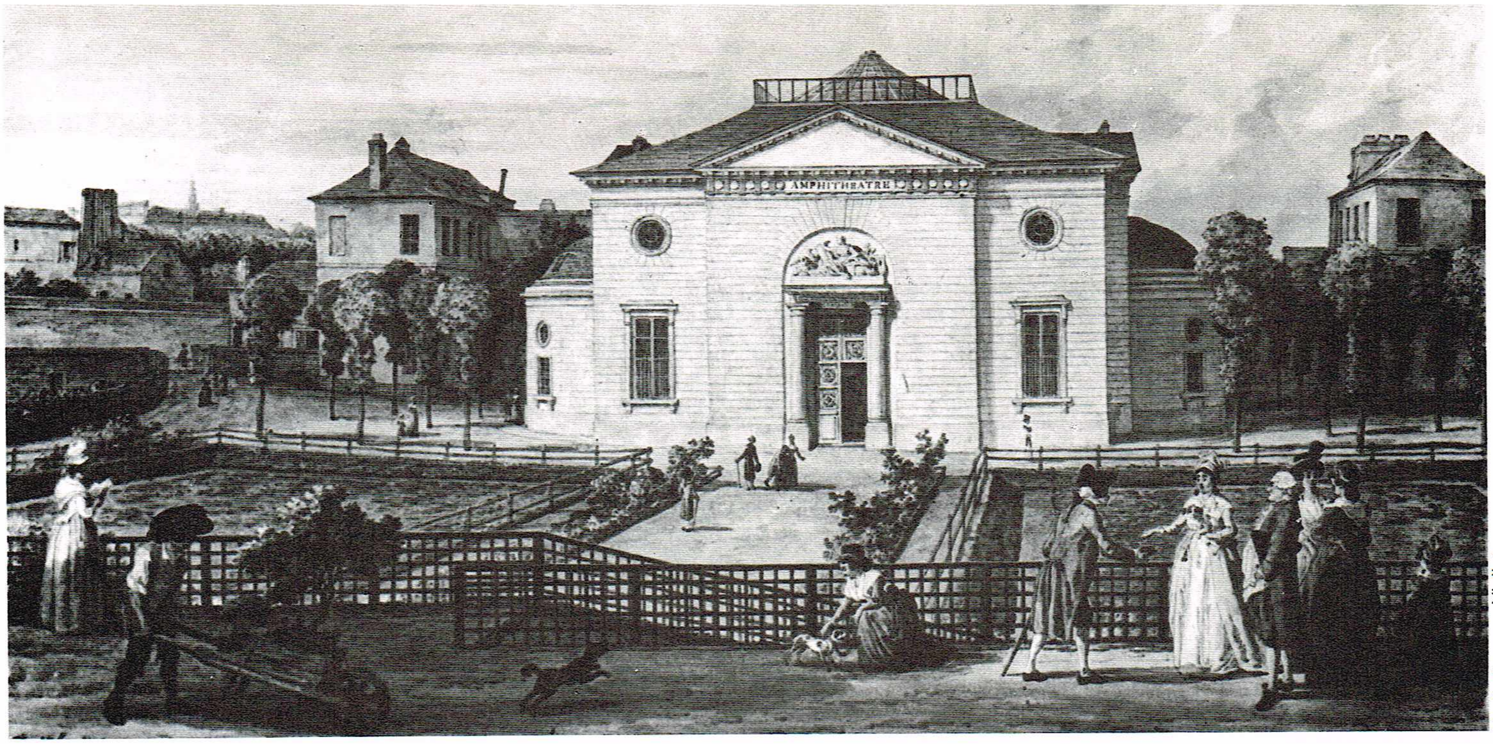

N. D. Roger - Viollet

▲ *L'amphithéâtre* **du Jardin du Roy,** *actuel Jardin des Plantes, à Paris (gravure de B. Hilaire, 1795, Bibliothèque nationale).*

Cette médiation du transformisme par des comportements exprimés dans les milieux de vie des êtres vivants requiert une attention particulière à cette époque. En effet, les progrès de la physiologie du système nerveux (qui ont dépendu des progrès de l'optique : anatomie microscopique, et de l'électricité : électrophysiologie), comme les développements de la psychologie (philosophie déterministe de La Mettrie, traité des sensations de Condillac, physiologie de la sensation de Bonnet, etc.), ont conduit peu à peu à mettre l'accent sur les organes des sens comme décodeurs du milieu et la mesure psychophysique comme méthode d'étude des comportements.

Cependant, contrairement à ce qui s'est produit pour l'évolution du concept d'instinct, c'est d'abord la psychologie humaine qui se préoccupe de fonctionnement d'organes sensoriels.

Le premier sans doute à avoir parlé de mesure en psychologie fut Wolff (1734). Mais c'est Herbart qui, en 1821, affirma que la psychologie devait se fonder sur l'expérience, la métaphysique et les mathématiques; c'est lui qui insista sur l'échelon différentiel, que Weber précisa en 1846, après avoir distingué des classes de sensations dans le toucher (pression, température, localisation), et que Fechner utilisera comme quantification indirecte des phénomènes psychiques (1860).

Helmholtz, physiologiste rattaché par les idées à l'école empiriste anglaise, inventa des appareils et des méthodes originales de mesure; il utilisa les temps de réaction pour mesurer la vitesse de l'influx nerveux chez l'homme. Mais c'est vraiment à Wundt que revient l'établissement de la psychologie expérimentale. Il fonde, en 1879, le premier Institut de psychologie, donnant à sa discipline la valeur d'une psychologie de la conduite.

Néanmoins, dans la transposition à l'étude de l'animal d'une telle méthodologie, l'expérimentateur humain subjectivise trop souvent l'environnement, et c'est surtout le sens visuel qui est étudié. Cela comporte un grave danger : celui de laisser croire que l'animal effectue dans le milieu une analyse similaire à la nôtre. Les limites de l'appareillage physique de l'époque ne permettaient pas les généralisations. Mais, surtout, la discontinuité d'analyse de l'environnement introduite par nos divers organes des sens entraîne souvent une fausse discontinuité de l'environnement lui-même. Sa séparation en espaces visuel, auditif, gustatif, olfactif, tactile est un anthropocentrisme. La réalité physique est autre : dans le domaine des vibrations mécaniques, par exemple, on passe insensiblement des vibrations infrasonores (décelables pour partie par le tact) aux ultrasons (que nous ne pouvons analyser) en passant par les vibrations audibles (décelables par l'oreille). La même chose est vraie pour le domaine des sens chimiques, où nos organes olfactifs et gustatifs ne séparent les sensations que parce qu'ils sont morphologiquement distincts et parce qu'ils extraient les informations de milieux fluides différents.

Une telle fragmentation, combinée aux idées préconçues sur l'instinct, ne peut que porter préjudice aux interprétations. Balbiani, par exemple, analyse avec soin le rôle des antennes dans le rapprochement des sexes du papillon *Bombyx mori.* Mais lorsque Fabre élargit ces résultats au grand et au petit paon de nuit, on reste confondu de le voir s'interroger longuement et avec naïveté sur le fait que l'odeur « nauséabonde » de l'arum introduit dans la cage de la femelle du grand paon ne modifie en rien la découverte de cette femelle (qui pourtant n'excite pas les terminaisons olfactives de Fabre !) par le mâle.

Cependant, la psychophysique et la méthodologie de la mesure des capacités sensorielles vont permettre progressivement de mieux approcher les descriptions comparatistes exactes, qui fourniront les bases expérimentales de la théorie de von Uexkull : chaque espèce possède un *Merkwelt* (monde sensible) dont il faut préciser les limites et sur lequel elle agit par l'intermédiaire de son *Wirkwelt* (monde de motricités), l'ensemble formant un *Umwelt* (monde total) définissable et caractéristique de l'espèce.

Un des faits fondamentaux de l'interaction être vivant-milieu, celui de l'orientation sous l'effet des facteurs physiques ou chimiques (lumière, pesanteur, humidité,

▼ **Balbiani** *analyse avec soin le rôle des antennes dans le rapprochement des sexes du papillon de* **Bombyx mori.**

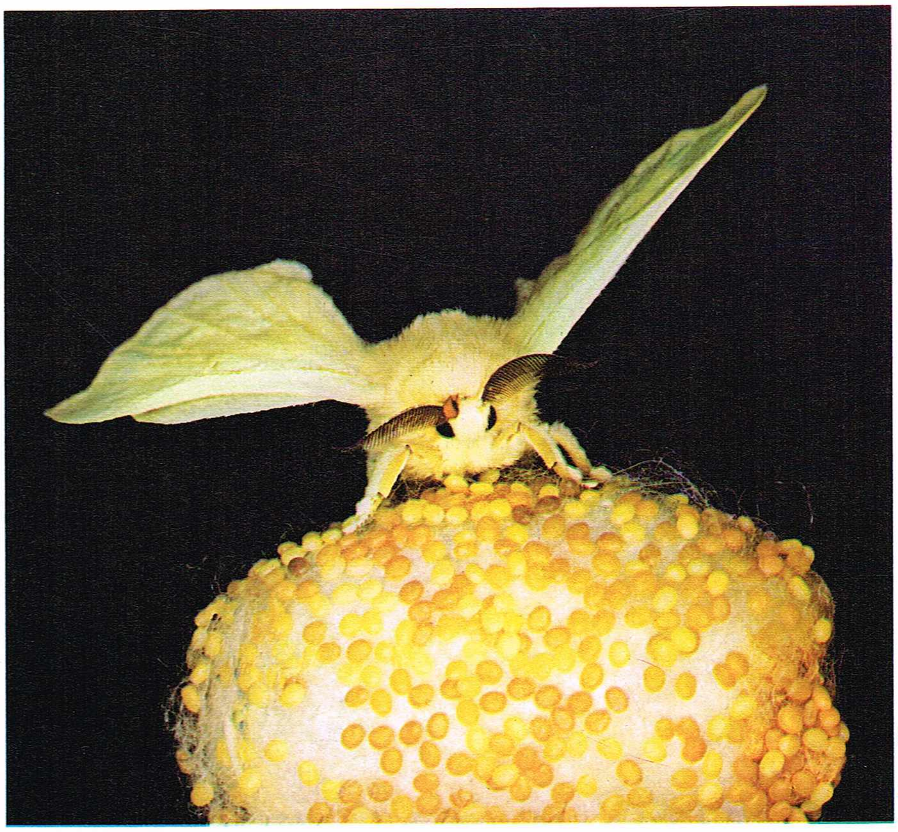

Archives P2

contact, etc.), reçoit ses lois chez les plantes (lois de Candolle, 1832; loi de Sachs, 1887). Loeb, séduit par l'apparente simplicité de ces lois, cherche une généralisation possible au cas des animaux. Utilisant presque uniquement la lumière comme agent excitant et les Insectes comme matériel réagissant, il formule divers principes qui lui paraissent régler le problème de la position des animaux vis-à-vis des facteurs de leur environnement :

— ce positionnement dépendrait de l'action quantitative de l'énergie provenant du milieu extérieur à l'animal ;

— la symétrie morphologique, physiologique, chimique des animaux, tant sur le plan sensoriel que sur le plan moteur, déterminerait l'orientation par égalisation des actions de l'environnement sur les récepteurs;

— le rapprochement, l'éloignement et l'orientation précise vis-à-vis d'une source seraient de véritables « mouvements forcés ».

La question des *tropismes* était née. Elle l'était de cette poursuite d'une analyse des mécanismes fondamentaux des comportements; elle s'exprimait en réaction contre les idées vitalistes ou finalistes, et en corollaire de l'extension prise par la théorie réflexologique dans le champ de la physiologie ; elle avait, sans doute, le mérite d'inclure pour la première fois dans un schéma général les facteurs responsables du positionnement spatial et de la forme du déplacement des animaux. Bien que Loeb n'eût pas réellement ouvert la recherche d'explications physiologiques, ses travaux y conduisirent : il faudra en effet lier la réception sensorielle aux qualités de la fonction motrice (tonus, coordination) et analyser les variations des facteurs internes propres à l'animal (milieu intérieur circulant, système nerveux central, etc.) qui commandent la régulation de la réponse. Loeb ouvrait ainsi la voie aux machines cybernétiques, aux modèles, bien que sa recherche obsessionnelle de réponses simples et de réactions ouvertes, ne lui permît guère la réussite.

Pour ses opposants (Jennings par exemple), dans la réaction de l'animal au milieu qui l'entoure, l'aspect d'orientation immédiate n'était justement pas le vrai problème. Selon eux, c'était au contraire la réaction adaptative qu'il fallait étudier fondamentalement, car c'est d'elle que dépend en définitive la survie de l'individu, voire de son espèce. Cependant, Jennings étudia des Protozoaires dans des gradients chimiques qu'il produisait dans un milieu liquide, et Loeb étudia des Insectes dans des champs lumineux fortement directifs. Si le premier avait placé ses paramécies dans un champ électrique et le second ses Insectes dans un simple gradient lumineux, vingt ans de querelles stériles auraient pu être évités !

Ces querelles étaient sans doute inévitables dans un monde partagé entre ceux qui poursuivaient l'atome dans la fragmentation de la matière et ceux qui admettaient l'organisme global dans une adaptation au milieu dont ils oubliaient de considérer la lenteur de réalisation.

Pourtant, le transformisme s'impose : une dynamique est née entre les XVIIIe et XIXe siècles. Indépendamment mais non concurremment, Darwin et Wallace la reprennent et l'élargissent à la suite de leurs innombrables observations *in natura*. Les idées d'un foisonnement des formes lorsqu'une espèce animale échappe aux contraintes initiales d'un milieu, d'une nature-sanction, d'une suite temporelle entre le buissonnement morpho-physiologique et son contrôle naturel s'imposent dans la théorie darwinienne, qui se différencie dans ses explications, sinon dans les faits sur lesquels elle se fonde, de la théorie lamarckienne.

La nuit profonde dans laquelle Cuvier, vainqueur de Geoffroy Saint-Hilaire, a fait retomber la pensée transformiste en France, à la suite du triomphe de sa théorie des cataclysmes successifs, la puissance de pénétration de l'idée darwinienne, très vite appuyée par la génétique morganienne, expliquent assez bien comment le transformisme l'emporta sur le créationnisme et le vitalisme. Il fallait être Fabre pour s'acharner, malgré tous les efforts de médiation de L. Dufour, à considérer la théorie transformiste comme une « baudruche » à dégonfler. Il était établi qu'une évolution des conditions géologiques de la Terre s'accompagne d'une évolution des organismes. Cependant, ce sont les moyens de cette évolution qui allaient conduire à des affrontements, dont nous entrevoyons seulement maintenant à peine l'issue.

▶ Page ci-contre, représentation graphique des grands courants de pensée qui, depuis les Anciens, ont conduit à l'éthologie évolutionniste moderne. A droite du graphique, sont indiquées les œuvres les plus marquantes de ce cheminement.

Sur la lancée du triomphe du transformisme, Galton, appliquant le darwinisme à l'homme, opposa pour la première fois *nature* et *nurture* (hérédité et environnement) ; il introduisit la statistique dans l'analyse psychologique, étudia le premier comparativement les jumeaux vrais, fonda l'eugénique (1883), inventa les tests d'intelligence et établit la méthode des questionnaires en psychologie.

Le XXe siècle

Quelle que soit la place que l'on concède au milieu dans les processus évolutifs, on ne peut plus nier son importance. Il pénètre dans l'animal au niveau des organes des sens; l'animal s'y dirige, y exprime ses comportements alimentaires, sexuels ou autres. Au tournant du siècle, on découvre l'idée d'un lien de succession temporelle entre la manifestation d'un événement physicochimique du milieu et la manifestation objective d'un comportement. La motricité devient une *réponse* aux actions du milieu *stimulant*. Le lien S → R se conceptualise et les causalités s'ébauchent.

Mast se fait le champion de l'idée d'une liaison entre les excitations visuelles et le tonus musculaire : les dissymétries d'éclairement provoqueraient une dissymétrie tonique expliquant à elle seule les mouvements tournants des Insectes dans des plages lumineuses.

Rabaud, s'appuyant sur ses propres travaux et sur ceux de Pictet, élargit cette notion de réponse tonique à d'autres excitations que les visuelles; il se vante de ranger les Insectes dans une série continue de ce point de vue, sur les critères combinés de taille de l'œil et d'importance relative de la musculature locomotrice. Des possibilités de suppléances sensorielles sont alors souvent évoquées.

Cependant, plusieurs faits exigent une explication : les tropismes lœbiens connaissent de nombreuses exceptions; sous l'impulsion de von Buddenbrock, une idée de régulation s'impose même dans ces mouvements; les auteurs s'affrontent à propos du sens de la réaction tropistique, certains considérant que les tropismes négatifs relèvent des mêmes explications au sens près que les tropismes positifs, d'autres que les premiers sont des réactions régulatrices et les seconds des automatismes. Tous ces faits ouvrent la voie à des expériences nouvelles dans leur forme et dans leur esprit, comme celles qui tentent de lier le type de réaction de l'animal à son fonctionnement interne : Mast montre qu'en manipulant un papillon, on peut transformer sa réponse positive en réponse négative. Woodsedalek établit que les dermestes sont photonégatifs à l'état larvaire mais photopositifs lorsqu'ils sont accouplés et qu'ils ont pondu. Bethe, en 1897, avait par ailleurs déjà montré qu'on pouvait abolir la photonégativité de l'hydrophile en opérant une section médiane de son cerveau. Matula, en enlevant diverses parties des ganglions cérébroïdes de larves d'*Aeschmes*, transforma leur comportement.

Ainsi, les auteurs du début du XXe siècle prennent l'habitude d'interpréter le comportement comme la résultante d'une série d'actions complexes dans lesquelles les milieux extérieur et intérieur de l'animal combinent leurs effets. Malheureusement, le mécanisme domine et cette combinaison apparaît trop souvent comme dérisoirement schématique. Ainsi, Rabaud, évoquant des successions linéaires de complication entre les réflexes élémentaires et les instincts, fourvoie les explications.

Le mécanisme est toujours en lutte contre le vitalisme : les exemples de Fabre, réétudiés par Peckham ou Picard, conduisent à des interprétations opposées. Pour ces auteurs, la piqûre paralysatrice des Hyménoptères sphégiens est une somme de réflexes qui dépendent fondamentalement des réactions de la proie et qui ne sont jamais « admirables de précision ». Ces mêmes prédateurs, observés par Marchal, lèchent les liquides qui sourdent de la proie en fonction de réflexes alimentaires et non en fonction d'un quelconque intérêt de la progéniture.

Dans cette lutte, on observe souvent des outrances, mais même Rabaud finit par accepter les modulations que peut imposer un milieu intérieur aux réponses développées par l'animal aux stimuli venant du milieu de vie : « Tout mouvement d'un animal est la résultante de deux éléments de valeur équivalente. Chacun d'eux possède des propriétés définies qui ne se manifestent

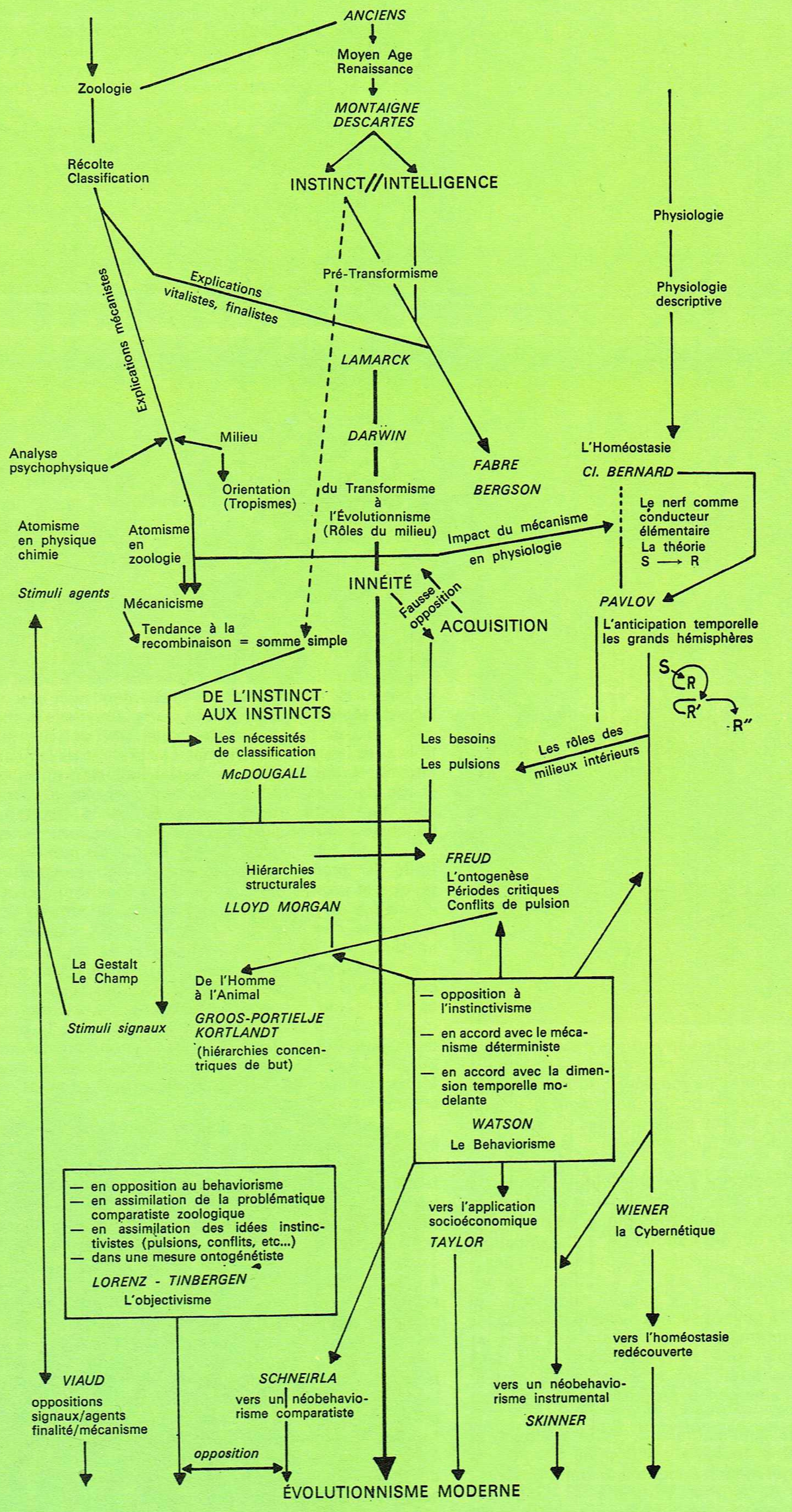

⟶ Discours de la méthode
Descartes 1637

⟶ Essay on human understanding
Locke 1690

⟶ Mémoires pour servir à l'Histoire Naturelle des Insectes
Réaumur 1732-1789

⟶ L'homme machine
La Mettrie 1748

⟶ Histoire naturelle
Buffon 1749-1789

⟶ Traité des sensations
Condillac 1754

⟶ Rapports du physique et du moral chez l'homme
Cabanis 1802

⟶ Philosophie zoologique
Lamarck 1809

⟶ Psychologie als Wissenschaft neu gegründet auf Erfahrung Metaphysik und Mathematik
Herbert 1824-1825

⟶ De l'origine des espèces par la sélection naturelle
Darwin 1859

⟶ Elemente der Psychophysik
Fechner 1860

⟶ Introduction à la médecine expérimentale
Cl. Bernard 1865

⟶ Chronophotographie
Marey 1882

⟶ Éléments de psychologie physiologique (Trad.)
Wundt 1886 (éd. all. 1873-1874)

⟶ Principles of psychology
W. James 1890

⟶ Conférence sur l'activité des principales glandes digestives
Pavlov 1897

⟶ Traité de psychologie
Ebbinghaus 1902

⟶ Étude expérimentale de l'intelligence
A. Binet 1903

⟶ L'évolution créatrice
Bergson 1907

⟶ Introduction à la psychologie sociale
McDougall 1908

⟶ La psychologie telle que le behavioriste la conçoit
Watson 1913

⟶ Introduction à la psychanalyse
Freud 1916

⟶ Traité de psychologie
G. Dumas 1924

⟶ Inhibition, symptômes et angoisse
Freud 1926

⟶ Leçons sur le travail des grands hémisphères cérébraux
Pavlov 1927

⟶ Premier électroencéphalogramme
H. Berger 1929

⟶ Gestalt psychology
Köhler 1929

⟶ Purposive behavior in animals and men
Tolman 1932

⟶ Principles of animal psychology
Maier et Schneirla 1935

⟶ Principles of Gestalt psychology
Koffka 1935

⟶ Les débuts de l'intelligence
P. Janet 1935

⟶ Principes de la psychologie topologique
K. Lewin 1936

⟶ L'intelligence avant le langage
P. Janet

⟶ Psychologie de la forme
Guillaume 1937

⟶ Behavior of organisms
Skinner 1938

⟶ La cybernétique
Wiener 1942

⟶ Principles of behavior
Hull 1943

⟶ La perception de la causalité
Michotte 1946

⟶ The organization of behaviour
Hebb 1949

⟶ L'étude de l'instinct
Tinbergen 1950

⟶ Typologie et pathologie activité nerveuse supérieure
Pavlov 1955

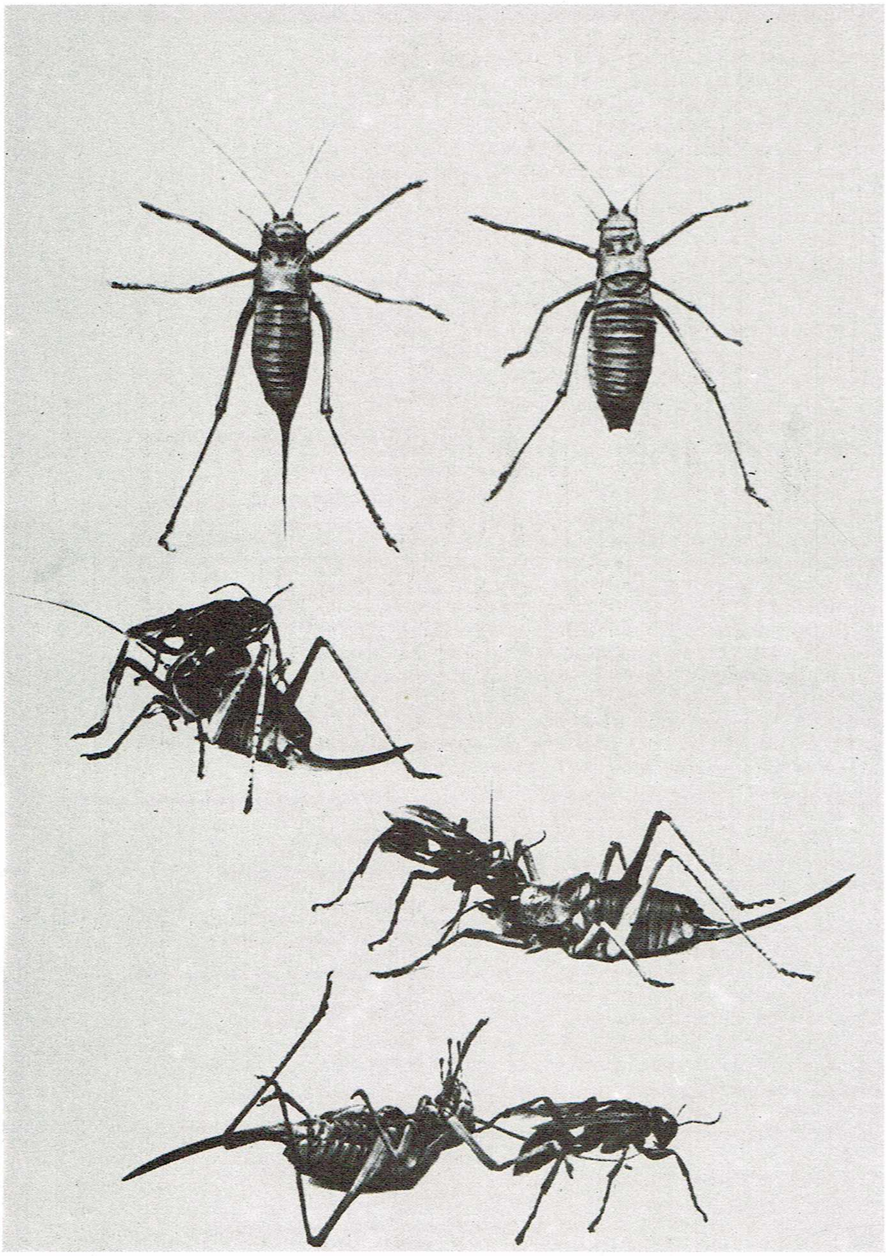

▲ *La piqûre paralysatrice des Hyménoptères Sphégiens (illustration tirée des* Souvenirs entomologiques *de J.-H. Fabre, tome I, Delagrave, 1925) n'est pas « admirable de précision » (Fabre); elle n'est pas non plus une somme simple de réflexes élémentaires (Ferton).*

pas toutes simultanément. De même que le milieu extérieur varie, l'animal traverse des états physiologiques normaux ou accidentels, temporaires ou durables : de toute nécessité, l'interprétation générale du comportement doit tenir compte au même titre de ces deux groupes de variables, inéluctablement fondus en un complexe : le complexe organisme-milieu. »

Cette référence nécessaire à la physiologie conduit à examiner les débuts de cette discipline. Tout ce qui vient d'être dit se réfère à une optique zoologique, en particulier à la filiation des idées qui ont conduit de la classification, de la mise en ordre des collectes d'abord « sauvages » à une idée de la modulation par les fonctions internes à l'animal, de ses réponses aux milieux stimulants; et cela en passant par l'analyse psychophysique des organes sensoriels et de la motricité et en voguant soit dans les eaux d'un mécanisme voué au mécanicisme, soit dans celles d'un finalisme aussi peu acceptable. Le moteur de l'ensemble est l'émergence progressive des théories évolutionnistes.

La physiologie ne peut naître que d'une zoologie, et particulièrement d'une zoologie anatomique fine. Il y a loin de la « gelée » qui remplit la boîte crânienne observée par les chercheurs de la Renaissance à la machinerie cérébrale complexe décrite pas à pas grâce à des chercheurs du XIX^e^ siècle, dont un des plus remarquables est Ramon y Cajal. La physiologie circulatoire (Harvey) et la physiologie excrétrice (Malpighi) se développent depuis longtemps sur la base de descriptions anatomiques. Mais le coup d'envoi de la science physiologique moderne est certainement donné par Claude Bernard, qui, en forgeant le concept d'*homéostasie* et avec la rigueur de la méthode expérimentale, ouvre toutes grandes les portes de l'avenir... d'un avenir qui ne va cependant pas comprendre d'emblée le parti à tirer de ce concept et de cette méthode.

En effet, le nerf est à la mode au début du XX^e^ siècle. La psychophysique cherche d'abord à prolonger, à poursuivre sur les longues voies des nerfs moteurs périphériques les propriétés de la conduction, dont on pense bien qu'elle est un des éléments interposés entre S et R. Et les idées mécanistes aidant, on cherche à décrire, à mesurer, des caractéristiques élémentaires : rhéobase, chronaxie, etc. C'est l'apogée de Lapicque; mais la physiologie, elle, ne progresse pas et le comportement reste enfermé dans une causalité linéaire S → R. C'est aussi l'apogée de la *réflexologie* qui se développe comme une systématique zoologique : la liste des réflexes simples descriptibles s'allonge. Les Moro, les Babinsky... sont légion, qui transforment l'organisme dans le milieu en un véritable puzzle réflexologique et pensent que la description de l'ensemble des éléments du puzzle permettra de reconstituer le comportement.

Fort heureusement, en ce début de siècle, trois événements indépendants, mais souvent en corrélation avec des progrès techniques indéniables, vont se produire.

— Dans les mains de Marey, le cinématographe devient instrument d'analyse. On a peu ajouté depuis à sa description du retournement du chat en chute libre. L'œil humain, s'il saisissait là un fait, ne pouvait saisir les enchaînements temporels qui placent en corrélation successive les déplacements de la tête, des segments antérieurs, puis des segments postérieurs du tronc. Il est nécessaire d'introduire dans la reconstruction des comportements à partir de leurs éléments non pas une dimension de hasard de recombinaisons mosaïques, mais une dimension de régularité séquentielle, sans laquelle le comportement disparaîtrait ou n'atteindrait pas une fin compatible avec la survie de l'animal. Les progrès de la technique cinématographique, la nécessaire inclusion du magnétoscope dans les études modernes d'éthologie descriptive sont une justification *a posteriori* de l'importance de l'analyse séquentielle objective des comportements.

— En 1929, Hans Berger fournit au monde scientifique le premier enregistrement électroencéphalographique et prouve ainsi la réalité du fonctionnement de la « gelée » qu'au Moyen Age on voyait remplir la boîte crânienne des Vertébrés. Certes, toutes les recherches anatomiques du XIX^e^ siècle que nous avons évoquées plus haut avaient déjà fourni la preuve de la structure complexe de l'encéphale; mais les travaux de H. Berger apportent une confirmation éclatante de son fonctionnement, même s'ils n'atteignent pas d'emblée la précision de mesure qui est la règle pour les conducteurs nerveux périphériques. Là aussi, les progrès de la technique sont fondamentaux. Là aussi, la valeur des premiers succès est confirmée à notre époque.

— Il faut enfin évoquer les découvertes d'Ivan Pavlov, chercheur qui est parfaitement rompu à toute la dynamique physiologique du tube digestif des Mammifères quand il entre d'emblée au plus haut niveau parmi les comportementalistes. Connaissant bien les fonctions digestives, sachant pratiquer les opérations nécessaires pour recueillir les sucs, possédant la méthodologie expérimentale et mécaniste matérialiste, Pavlov profite à la fois des apports théoriques ou méthodologiques des contemporains de Claude Bernard et des implications causales développées par la théorie S → R. Il est frappé de voir se modifier les sécrétions digestives de ses chiens (les sécrétions salivaires en particulier) au cours des répétitions de situations stimulantes ou en fonction de la manifestation régulière de faits dans l'environnement, pourvu que ceux-ci se présentent un certain nombre de fois en association temporelle avec l'excitant choisi. Pavlov comprend et utilise l'anticipation temporelle qui conduit le chien à saliver à la seule vue de l'arrivée de son soigneur habituel. C'est une véritable révolution dont on n'a jugé l'importance réelle que plus de 30 ans après. En effet, nous voyons là s'animer réellement le comportement, nous voyons s'établir et se prouver l'idée que les

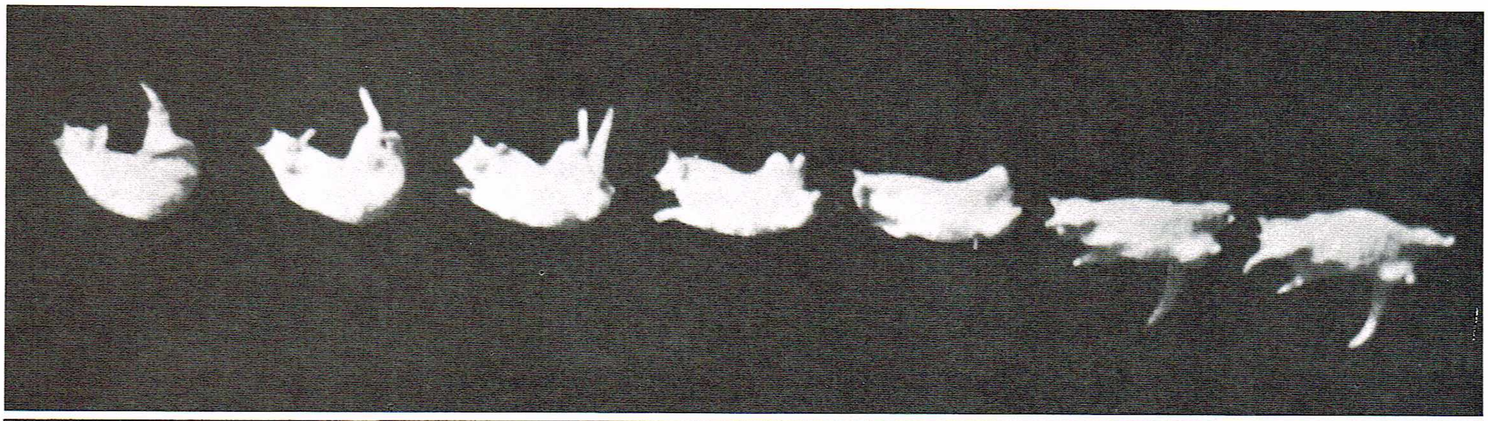

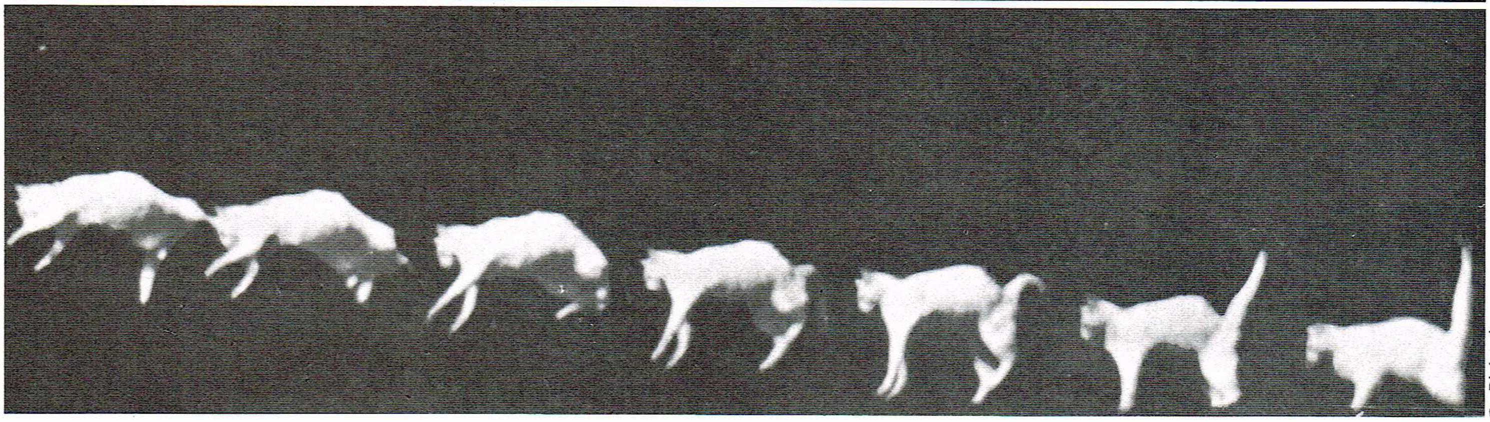

D. Richard

Collection Viollet

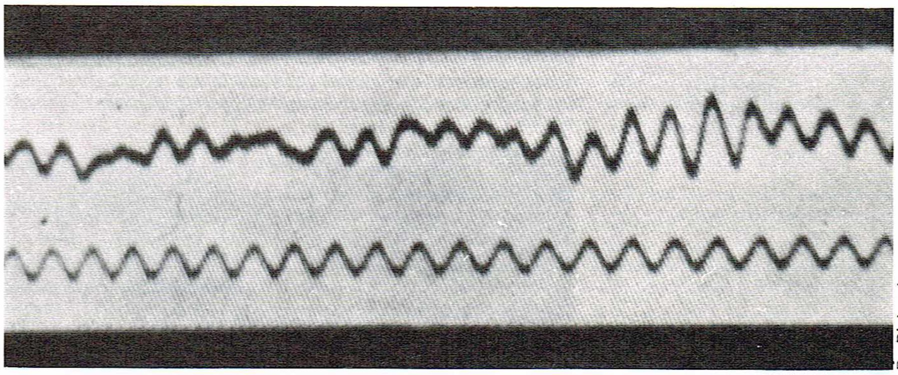

D. Richard

réponses d'ordre moteur végétatif (mouvements, sécrétions) ont également une grande importance; nous voyons aussi s'établir l'idée qu'une réponse n'est pas limitée à ses effets immédiats dans l'environnement qui l'a produite, mais comprend également des effets à plus ou moins long terme sur d'autres réponses, qu'elles soient de même type ou d'un autre type. Le mécanisme physiologique français ne comprend pas toute l'ampleur de la découverte pavlovienne : pendant cinquante ans, malgré les efforts de Piéron, les traités français de physiologie, enfermés dans leur fausse conception réflexologique, vont soit ignorer, soit traiter trop succinctement ce qu'ils nomment le « réflexe conditionnel » (fausse dénomination de ce qui est vraiment une réaction, un comportement intégré).

Le mérite de Pavlov ne s'arrête pas à cette première étape explicative. Ayant maintenant démontré que le lien S → R est en réalité un lien S → R → R′ → R″, il se préoccupe de rechercher l'étage nerveux auquel on peut attribuer entre S et R ces propriétés de fermeture, de mobilité; tout naturellement, il se tourne vers les « grands hémisphères », vers le cortex. Il analyse leur rôle possible dans tous les processus dynamiques de liaison conditionnelle, d'inhibition, d'excitation, d'irradiation, etc., et il dresse le premier, avec fougue, un tableau des plus convaincants. Ce tableau sera repris et complété (en particulier par les interactions dynamiques cortex/sous-

▲ ◀ *Au début du XX^e siècle, trois événements indépendants, mais en corrélation avec le progrès des techniques, vont contribuer à celui des idées sur le comportement et ses déterminismes : Marey filme et décrit des mouvements dont la cinétique n'apparaît pas à l'œil nu (en haut, retournement du chat en chute libre); Hans Berger fournit au monde scientifique le premier enregistrement électroencéphalographique (en bas, repris de Neurophysiology); Pavlov (ci-contre) découvre des mécanismes physiologiques dont l'importance ne sera comprise que 30 ans plus tard.*

Ostman - G. Rönn

▲ *La* **naissance** *reste un* **moment** *particulier où paraît* **débuter** *la vie* **comportementale** *de l'individu.*

cortex) par Fessard et son école, entre autres, qui tireront parti de l'évolution des techniques dont Berger fut le pionnier.

Dans la ligne continue d'un évolutionnisme triomphant, le monde scientifique se trouvait, vers 1920, engagé profondément dans une voie d'analyse zoologique des comportements où le mécanisme (voire le mécanicisme) imposait une option quelque peu schématique comme il l'avait imposée dans la voie physiologique, éclipsant la dynamique bernardienne, laquelle resurgit au plus haut niveau d'intégration nerveuse avec Pavlov.

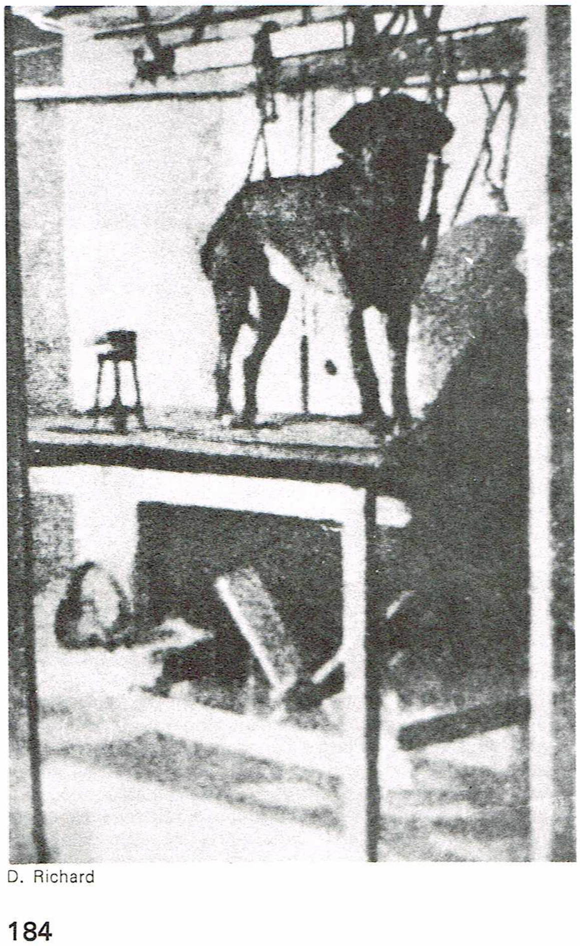

▶ **Le chien de Pavlov** *dans son harnais (repris de Pavlov).*

D. Richard

Qu'en est-il de l'interprétation globale finalisée des comportements ? Les psychologues ont cherché, à la fin du XIX^e^ siècle et au début du XX^e^ siècle, à dépasser les idées peu précises de leurs précurseurs philosophes.

La psychophysique de Fechner avait été une « théorie exacte des rapports entre l'âme et le corps et, d'une manière générale, entre le monde physique et le monde psychique ». Quant à Wundt, il avait donné ses lettres de noblesse à une psychologie du contenu, expérimentale, empiriste, technique et scientifique. Cependant, à la fin du XIX^e^ siècle, en face de celle-ci, s'épanouit, en Allemagne même, une autre psychologie : celle de l'acte, qui se réfère à l'activité de l'esprit. La pensée de Brentano, qui anime cette psychologie, se trouve à l'origine de la *phénoménologie*. Pour cette école, c'est l'acte de percevoir un objet et non cet objet lui-même qui est important. Brentano influencera Ward, McDougall, Köhler. Ce dernier distingue : d'un côté, le *phénomène,* donnée des sens et de l'imagination, et de l'autre les *fonctions psychiques* comme percevoir, désirer, vouloir. Les deux sont indépendants, c'est-à-dire que chacun peut varier sans impliquer une variation de l'autre.

En réaction contre l'élémentarisme des psychologues associationnistes, von Ehrenfelds souligne que la perception de l'espace et du temps ne peut résulter d'une combinaison simple d'éléments; une forme peut demeurer quand ses éléments changent de nature, car c'est une activité de l'esprit qui combine les éléments en un tout signifiant *(Gestalt)*. Wertheimer, en mettant en évidence le phénomène *phi,* ajoute sa pierre à la théorie gestaltiste, dont les lois se précisent : lois de l'organisation des formes, principes de relativité et de transposition, isomorphisme des formes physiques et des formes physiologiques, etc. Lewin y ajoutera un peu plus tard la *dynamique du champ*.

Dans le même temps, l'instinct, rapporté à une force interne indéfinie, s'incorpore les subtilités fixistes de Fabre. La référence stérile à un « élan vital » sert de point de départ à Bergson, qui retrouve dans « la vie végétative, la vie instinctive et la vie raisonnable trois directions divergentes d'une activité qui se scinde en grandissant ». L'instinct, comme l'intelligence, est expliqué par des qualités innées : en effet, les classificateurs morphologistes, qui ont cherché les critères spécifiques, ont maintenant présent à la pensée le fait que l'individu perpétuant son espèce a lui-même atteint l'état adulte au travers d'une ontogenèse (que les généticiens décrivent comme déterminée dans l'œuf et que les embryologistes décrivent en stades successifs morphologiques). La naissance reste un point particulier où paraît débuter la vie comportementale de l'individu. Mais ce qui est inné dans l'instinct et ce qui est inné dans l'intelligence se séparent déjà : l'innéité dans l'intelligence est « la connaissance d'une forme, de rapports », alors que dans l'instinct, c'est la « connaissance d'une matière, de choses ». « L'intelligence est capable de chercher sans toujours trouver, alors que l'instinct trouve sans jamais chercher. » (Bergson.) Ces distinctions de vocabulaire n'empêchent pas ce dernier d'évoquer des « franges d'intelligence » dans l'instinct et de ne pas trop séparer les deux courants. Cependant, il considère que l'un est caractéristique des Vertébrés, l'autre des Arthropodes, ce qui revient à les séparer dans les classifications.

Tout cela est verbal. Il n'en reste pas moins que c'est autour de la *référence à un but* que s'oriente maintenant, pour une part, la définition de l'instinct. Ce but, l'animal ne le connaît pas, il y tend sans connaître la relation entre celui-ci et les moyens mis en œuvre pour l'atteindre (Claparède).

D'autres chercheurs mettent l'accent sur un « besoin ». Hachet-Souplet, qui s'intéresse tout particulièrement au comportement de dressage des animaux de cirque *(zoopédie),* représente bien cette tendance. A la différence de Pavlov, Hachet-Souplet ne conçoit pas une analyse fondée sur la dimension temporelle ; il définit l'instinct comme la complication d'un besoin qu'il relie à des sensations affectives et représentatives, ajoutées aux anciens critères d'innéité, de préformation et d'inconscience de but, ce qui lui vaut les foudres de Rabaud.

Tom McHugh - Pitch

▲ **Hachet-Souplet** ***met l'accent sur un*** **« besoin »** ***et s'intéresse tout particulièrement au comportement*** **de dressage des animaux** ***(ici, le dressage d'un éléphant de mer au cirque).***

La référence à des forces non mesurables : besoins, pulsions (on utilisera bientôt les termes de *drive* et de *motivation*), va trouver son couronnement chez l'homme avec la *force hormique* de McDougall ou la *libido* de Freud. Cependant, une autre référence émerge avec le fondateur de la psychanalyse : celle à l'histoire de l'individu.

Que l'on utilise la finalité de but ou des états d'ordre physiologiques, il est difficile de poser les problèmes en termes de causalité. Cependant, l'instinct est devenu une classe de comportement qu'on s'efforce d'étudier en suivant plusieurs voies.

La recherche d'un contenu physiologique, même imprécis, ne pouvait manquer d'attirer l'attention sur des processus comportementaux qui connaissaient un regain d'intérêt au début du siècle : ceux de l'acquisition de nouveaux comportements sous l'influence de la répétition et de l'association. Or, ces phénomènes d'acquisition semblent caractériser tout particulièrement et à un haut niveau l'intelligence humaine (voire certaines « franges d'intelligence » chez l'animal).

On avait opposé intelligence et instinct à travers les modalités d'une « domination » du milieu; on avait, par ailleurs, réduit l'instinct à une « innéité » pure; enfin, on constatait que les processus d'acquisition caractérisent le comportement intelligent. Dans ces conditions, il était inévitable qu'on s'engageât dans une opposition verbale entre innéité et acquisition.

L'éthologie s'est embourbée pendant plusieurs décennies dans cette erreur historique. En réalité, ces deux termes ne peuvent s'opposer de manière dialectique. En effet, l'innéité correspond historiquement à une dimension spécifique consacrée par trois siècles de description morphologique d'individus adultes dans un but taxonomique, où tous les critères cherchent à séparer les espèces les unes des autres. Par contre, l'acquisition se réfère à une dimension individuelle, liée à une plasticité révélée au cours de mises en présence répétées de l'animal avec un même milieu. Les deux concepts ne peuvent se comparer ni par la dimension de base, ni par le milieu dans lequel s'expriment ces capacités, ni par la dimension temporelle en cause. Ils peuvent encore moins s'opposer, et l'on comprend mieux la complexité de la phraséologie utilisée par Lorenz dans son pamphlet sur l'inné et l'acquis, publié en 1960.

Revenant aux voies fondamentales de l'analyse de l'instinct, il faut évoquer à nouveau McDougall, qui voit dans l'instinct le lien émotionnel unissant les trois aspects de la vie subjective : « connaître, sentir, tendre vers ». Mais cette définition, jointe à la référence permanente à une introspection, ouvre la porte à ce que nous appellerions aujourd'hui un *feed-back*. Il s'agit au moins d'une notion réciproque : à chaque « émotion » humaine, il devient vite nécessaire de faire correspondre un instinct. La connaissance courante de nos états dans des comportements, comme les comportements alimentaire et sexuel, et la nécessité mécaniste de classer ce qu'on a d'abord nommé conduisent à passer du concept d'*instinct* au concept d'*instincts*. McDougall en a établi une liste (curiosité, affirmation de soi, soumission, recherche de nourriture, accouplement, etc.) que Thorndike et Warren allongeront par la suite.

Bien sûr, il est difficile de traiter sur le même plan des instincts aussi disparates que l' « instinct » d'accouplement (survie de l'espèce, innéité, fixité, transmission génétique, etc.) et l' « instinct » de rire par exemple. Il est également difficile de classer les « instincts » sans introduire des liens de discontinuité. Si McDougall distinguait 13 instincts majeurs et 6 instincts mineurs, nous trouvons, avec Lloyd Morgan, 6 niveaux, le plus haut correspondant à l'instinct de préservation et le plus bas aux réflexes. Les instincts des 2^{e}, 3^{e} et 4^{e} niveaux sont organisés hiérarchiquement et représentent des mécanismes dépendant du niveau supérieur mais commandant le 5^{e} niveau, lequel s'apparente aux mécanismes moteurs de McDougall.

Le principe d'économie de Lloyd Morgan accentue les discontinuités entre les niveaux puisqu'il pose en nécessité de ne pas référer à un niveau supérieur ce qui peut être expliqué avec le seul recours à un niveau inférieur. Deux autres progrès paraissent fondamentaux :

— *Les travaux de l'école de la Gestalt* se présentent comme une antithèse et un défi lancé au mécanisme. Pour ce courant, les globalités peuvent laisser émerger des propriétés non référables à leurs parties ou à l'accumulation de ces parties. Les globalités prennent alors valeur de configurations prégnantes sans qu'il soit nécessaire d'étudier leur constitution en éléments. C'est à ce courant de pensée qu'il faut rattacher l'idée que l'animal peut, dans son milieu, appréhender des globalités stimulantes qui ont une valeur organisatrice sur les comportements : des *stimuli signifiants*. Cette idée est une sorte de révolte conceptuelle, et tout de suite vient

▶ **Freud,** *connaissant les problèmes et les concepts de la psychologie ainsi que les données de la neurologie et sachant que tout individu* **porte en lui une histoire,** *se passionne pour ceux que la société de son époque déclare « pathologiques » psychologiquement parlant.*

à l'esprit que ces configurations doivent être opposées aux stimuli en jeu dans les tropismes lœbiens, les *stimuli-agents*. Viaud, dans les années 1940 à 1960, sera un défenseur de cette théorie qui, elle aussi, s'éloigne d'une conception synthétique des comportements.

— L'autre progrès intervient avec *les travaux de Freud*. Celui-ci, connaissant les problèmes et les concepts de la psychologie ainsi que les données de la neurologie, sachant que tout individu porte en lui une histoire, se passionne pour ceux que la société de son époque déclare « pathologiques » psychologiquement parlant. Il va s'emparer de l'ensemble de ces notions et découvrir leur fil rouge dans l'ontogenèse. Partant des hiérarchies fixistes d'instincts classés par des philosophes taxonomistes, il va transposer ces hiérarchies dans une dynamique ontogénétique. Par cela même, il les distord, tout en conservant les suprématies. Aux discontinuités de concepts, il superpose les discontinuités temporelles du développement et s'engage dans la description d'une série ontogénétique de stades : oral, anal, phallique, etc. Malheureusement, on projettera la problématique classificatrice fermée sur ces stades, qui deviendront ainsi très vite des périodes fixes caractéristiques d'un âge.

Cependant Freud cherche sinon un retour, du moins la représentation de ce retour. Il la trouve dans la situation verbale établie entre le patient et lui, retranchés (sinon exclus) tous deux de la société. Un tel retour effectué uniquement dans l'abstraction risque d'être insuffisant pour compenser des variantes importantes de la construction individuelle, et la méthode a des limites. Un dernier élément de la problématique freudienne qui la distancie irrémédiablement des mécanistes est l'idée de conflits établis entre les pulsions, voire entre les instincts. Ces conflits portent un nouveau coup à la conception hiérarchique, trop rigide, et permettent d'ouvrir la porte à de nombreux amendements à la linéarité des anciennes représentations.

Nantis de toutes ces idées, exprimées ou en gestation, des psychologues des animaux, comme Groos et Portielje, vont introduire la notion de hiérarchie dans leur domaine ; en même temps, ils souligneront l'importance d'une différenciation entre *drive* et *émotion* et utiliseront les concepts de *précision* et de *diversification de but réel*. L'ensemble s'applique à l'organisation du comportement au cours de l'ontogenèse et de la maturation. Les travaux de Portielje sur les singes anthropoïdes servent de base conceptuelle à son élève Kortlandt, qui interprète le comportement des cormorans dans un triple système de structuration hiérarchique des instincts : une hiérarchie de drives (appétits), une hiérarchie de décharge de dispositions, de propensions, et enfin, en parallèle avec la première, mais sans lien avec la seconde, un système d'émotions représentant les corrélats subjectifs des comportements activés.

Cette organisation s'inscrit schématiquement dans des cercles concentriques *(concentric purposiveness)* en fonction de buts définis comme la réalisation d'une activité spécifique *(activité consommatoire)* en présence d'un stimulus, lui-même spécifique *(stimulus consommatoire)*. Dans une telle conception, chaque activité joue à son niveau un *rôle consommatoire,* mais prépare l'expression d'une activité de plus haut niveau (*rôle instrumental* vis-à-vis de cette dernière). Il s'agit là d'une nouvelle manière d'aborder l'échelle spatio-temporelle d'organisation des divers degrés reconnus dans l'expression d'un comportement.

Deux remarques s'imposent encore avant de préciser les modalités de la naissance des deux courants éthologiques qui vont s'affronter avec fougue vers 1950 : le *behaviorisme* et l'*objectivisme*.

Depuis les travaux de Réaumur, poursuivis par ceux des Huber, de Forel et de bien d'autres, le « milieu social » a pris une place de choix comme milieu particulier d'interactions individuelles et évolutives. Mais souvent les assimilations des animaux à l'homme ont été trop rapides : par exemple, il est impossible de voir dans les Insectes sociaux la préfiguration des sociétés humaines du futur. Cependant, entre 1920 et 1930, deux faits fondamentaux ont été compris dans leur forme, sinon dans toute leur dynamique. Il s'agit :

— de la *trophallaxie* (ou échange complexe de signaux tactiles, chimiques ou autres, entre deux ou plusieurs Insectes), bien décrite par Wheeler ;

Snark International

J.P. Richard

▶ **Kortlandt** *interprète le comportement des cormorans dans un triple système de* **structuration hiérarchique des instincts.**

— de l'*intégration permanente des facteurs abiotiques et des facteurs internes* de réglage de la population d'une fourmilière (ponte de la reine, activité des ouvrières, présence et activité du couvain, etc.), bien analysée par Schneirla.

Ce dernier auteur organise le traité qu'il publie avec Maier en 1935 *(Principles of Animal Psychology)* autour d'une idée qu'il explicitera ensuite de mieux en mieux : celle des *niveaux (levels)*. Il est possible de considérer cette conception comme une première tentative d'analyse synthétique des comportements dans le règne animal. En effet, Schneirla s'efforce de dépasser les oppositions simplistes instinct/intelligence ou animal/homme et de s'orienter vers une étude des capacités d'interactions de chaque espèce avec le milieu dans lequel elle vit ; si l'on ajoute à cela les variations des rapports organisme/milieu au cours de l'ontogenèse, on s'achemine vers une conception dans laquelle disparaît l'idée même d'une séparation des espèces fondée sur leurs capacités respectives de « dominer » le milieu. Il devient évident que tout individu ou toute espèce qui n'entretient pas de rapports dynamiques homéostasiques avec son environnement disparaît ; le concept de niveau est posé davantage en termes évolutifs de complexité de comportement, un peu à la manière dont se pose en termes de complexité progressive l'évolution morphologique. Dans ce cadre, l'homme ne s'oppose plus aux animaux (encore moins à l'Animal), mais chaque espèce représente un maillon important de la phylogenèse, et les niveaux successifs se trouvent en assimilation progressive. Comme Schneirla le souligne souvent, le concept d'instinct se vide de sens.

Une étude schématique de l'évolution des travaux en Europe et aux États-Unis permet de constater, dans les quinze premières années du XX[e] siècle, un certain partage des idées évoquées ci-dessus. Ainsi, l'Europe centrale est sans conteste le domaine d'une psychologie globaliste, instinctiviste, introspectionniste, qui se refuse à l'analyse mécaniste pour rechercher au travers de leurs finalités les valeurs des comportements. Fondamentalement innéiste, elle met en avant pour caractériser l'instinct les critères suivants : universalité, apparition précoce, apparition chez les individus isolés, absence apparente d'expérience.

C'est, dans une certaine mesure, la position de divers Français et Américains. Cependant, pour la plupart des instinctivistes anglo-saxons, le mécanisme a produit des séductions, dont le plus clair des résultats est représenté par la classification (d'abord simple juxtaposition, puis hiérarchisation) des instincts.

• Le behaviorisme

En réaction totale contre la psychologie subjectiviste, les idées de Watson s'opposent à la distinction dogmatique entre l'inné et l'acquis et à la caractérisation de l'instinct évoquée ci-dessus. En créant l'école behavioriste, ce chercheur se donne pour objet l'analyse expérimentale des acquisitions individuelles possibles (Pavlov est à ce titre un des premiers behavioristes, un behavioriste antérieur à Watson) ; il pose le problème des effets du passé de l'animal sur un comportement donné, en mettant l'accent à la fois sur les conséquences d'une répétition de ce comportement et sur l'état physiologique supportant ces conséquences. Il y a là un net progrès et probablement un essai sérieux d'analyse de conséquences temporelles d'une action du milieu. Bien entendu, il ne s'agit pas au début d'héritabilité de ces conséquences temporelles. A ce sujet, si les expériences « lamarckiennes » naïves (pour ne pas dire plus) de divers auteurs ne prouvent rien de ce qu'elles veulent prouver, elles ne prouvent pas non plus le contraire.

L'école behavioriste américaine cherche de plus en plus à préciser les modalités temporelles du changement d'un comportement locomoteur exprimant une motricité squelettique plus ou moins complexe ; pour se donner une dimension expérimentale valable, on en vient à trouver les moyens réels du travail en laboratoire. Au même moment où Pavlov se fait créer, par décret spécial de Lénine, les laboratoires de Soutchi où s'édifieront des tours du silence dans lesquelles les animaux se trouveront en situation totalement artificielle, les disciples de Watson introduisent en laboratoire, en modèle réduit bien entendu, le labyrinthe de Hampton Court, origine d'une nombreuse génération de dispositifs expérimentaux, tous plus ingénieux les uns que les autres. Ceux-ci servent à préciser non plus seulement les modalités de l'incorporation du temps aux comportements, mais aussi les facteurs sensoriels impliqués dans cette incorporation (à quelque sensibilité qu'ils appartiennent) ainsi que les facteurs physiologiques internes sous-tendant les états de l'animal, régulateurs de l'intensité ou de la forme de ses comportements. Comme on a réduit à des dimensions propres à l'expérimentation le labyrinthe, on cherche à trouver l'animal de laboratoire le plus adéquat (placidité relative, facilité d'élevage, facilité de mise en mouvement, petite taille) de la même manière que Morgan introduisait la drosophile dans les recherches en génétique. On découvre, on élève, on multiplie ainsi le rat blanc, cet albinos, lointain cousin du surmulot. Une infinie quantité de travaux, de résultats concordants ou contradictoires, de lois plus ou moins sophistiquées, sort de cette conjonction labyrinthe/rat blanc qui domine les années 1920-1935. Si tout n'est pas à rejeter, loin de là, un sérieux élagage est nécessaire. Ce sont les voies du passage du behaviorisme au *néobehaviorisme* qui s'en chargeront.

Avant de dégager deux voies particulièrement fécondes, il est nécessaire de souligner qu'un behaviorisme américain, préoccupé de connaître, de décrire et d'analyser les processus par lesquels un comportement moteur squelettique se transforme (au cours de sa répétition provoquée par un stimulus défini), ne pouvait manquer d'être immédiatement connu, propagé, et utilisé à des fins industrielles. C'est, en effet, l'époque d'un passage à une productivité accrue dans une économie totalement dépendante des individus tout en tendant vers une mécanisation à outrance. Quand Watson fonde le behaviorisme, les chaînes de production de la métallurgie ne sont pas loin. Le taylorisme représente l'adaptation schématique de cette théorie à l'homme engagé dans un système socio-économique de production industrielle. Les excès de cette application furent dégagés avec lucidité dans les satires de Charlie Chaplin.

Par malheur pour le behaviorisme, certains se fondent sur la critique de cet aspect totalement négatif (ou presque) pour rejeter bien d'autres apports de la théorie.

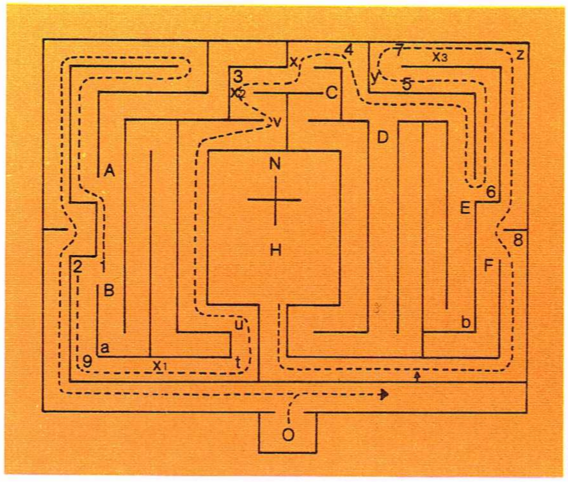

Richard Colin

◀ *A l'origine d'une nombreuse génération de dispositifs expérimentaux,* **le labyrinthe de Hampton Court** *utilisé par* **Small et Watson** *: O, entrée ; H, pièce d'alimentation ; A, B, C, D, E, F, allées sans issue (d'après* **Watson***, 1907).*

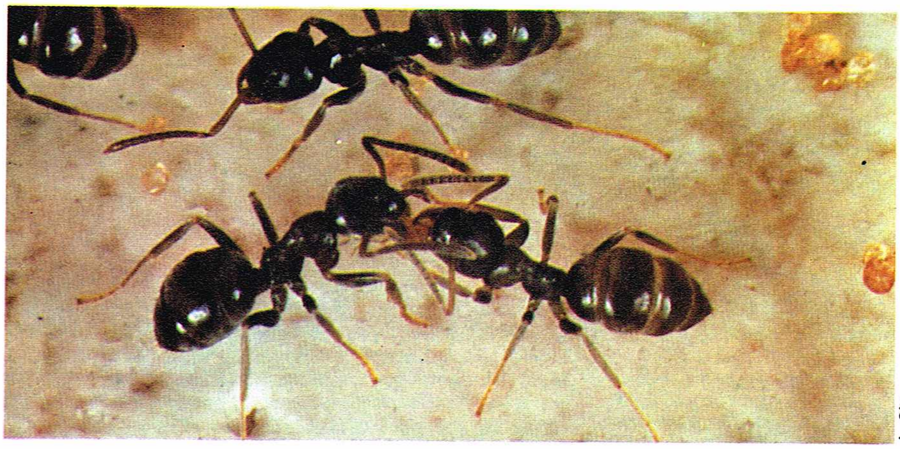

J. Six

▲ *Le phénomène de trophallaxie, ici entre fourmis brunes* **(Lasius niger)***, fut décrit par* **Wheeler** *et constitua un fait fondamental entre 1920 et 1930 dans l'étude du « milieu social » comme milieu particulier d'interactions individuelles et évolutives.*

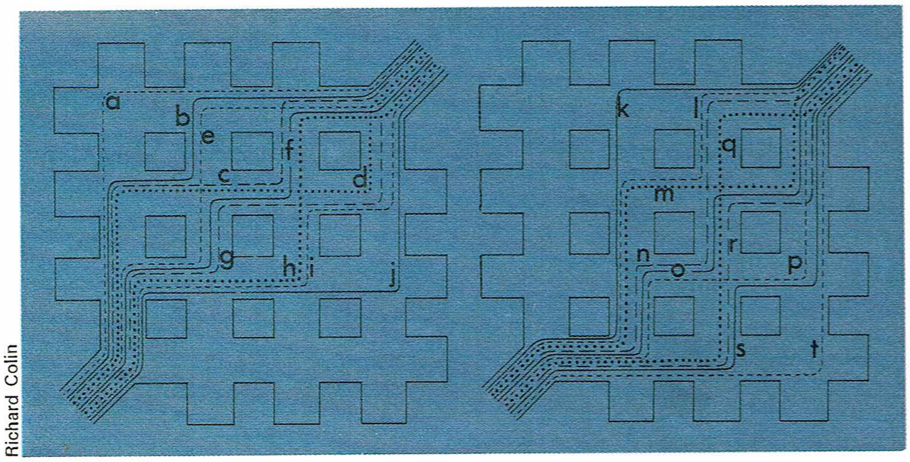

Richard Colin

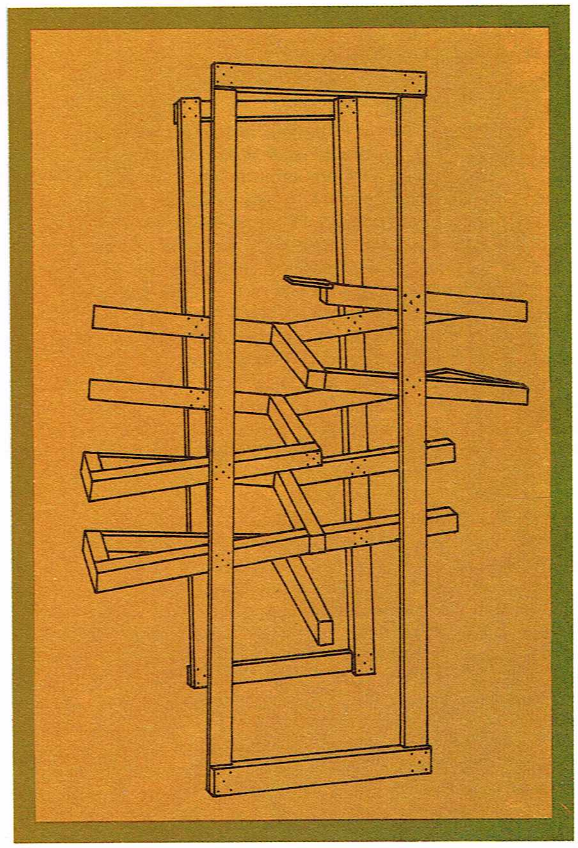

Richard Colin

▲ ▶ *Une des voies d'apport du behaviorisme sera notamment celle qui multiplie les systèmes expérimentaux de test, tels ces labyrinthes : à droite labyrinthe tridimensionnel (d'après Hunter) ; à gauche labyrinthe de Dashiell (d'après Dashiell).*

Une des *voies d'apport* est celle qui multiplie les systèmes expérimentaux de tests, passant du labyrinthe à des boîtes de plus en plus élaborées sous l'influence de Skinner et de son école. Elle se développe en parallèle avec l'augmentation du nombre des espèces animales utilisées : le singe, le chat et surtout le pigeon, qui, aux mains de Skinner, de Terrace et de bien d'autres, devient un matériel aussi fondamental que le rat. L'homme enfin devient matériel expérimental, avant de bénéficier dans les dernières années d'un *feed-back* sous la forme de nouvelles méthodes d'éducation (apprentissage sans erreurs) ou de soins *(behavior therapy)*. Nous reviendrons sur les problèmes posés par le développement fulgurant du néo-behaviorisme skinnérien. Une des dernières incorporations de Skinner et de son école dans les années 1950 est, avec Miller, celle de la physiologie postpavlovienne (Bykov, Ayrapetianz) concernant les systèmes du domaine végétatif et leurs combinaisons éventuelles avec les systèmes moteurs squelettiques.

Que ce soit par les instinctivistes ou par les behavioristes, les grands singes anthropoïdes (les chimpanzés surtout, mais aussi les gorilles) sont explorés expérimentalement en captivité dans leurs comportements. O. Koehler, les Kellog, M^me^ Khots, Guillaume et Meyerson expérimentent et construisent parfois des centres importants dans lesquels, au niveau d'une analyse globale ainsi que d'une analyse élémentaire des comportements, les progrès sont rapides. Ils sont toutefois bloqués soit par l'idée préconçue d'une interprétation intelligente *(insight)*, soit par les limites assignées aux capacités d'abstraction des animaux dans des situations où l'apprentissage n'est pas multiforme. Il était cependant intéressant de souligner la simultanéité d'introduction au laboratoire d'un même matériel animal utilisé dans des problématiques fondamentalement diverses.

L'autre voie d'apport au behaviorisme est celle ouverte en Amérique par Schneirla qui se veut comparatiste (il est zoologiste avant d'être comportementaliste et homme de terrain avant d'être homme de laboratoire). Après avoir été formé dans les travaux sur la psychologie du rat blanc, il revient aux Insectes sociaux et étudie les fourmis dans la nature. Il en tire un enrichissement extrême et devient capable de dépasser à la fois la psychophysique et le behaviorisme dans l'incorporation de la dimension temporelle aux comportements. En effet, pour lui, le temps joue à plusieurs niveaux : un niveau individuel, s'exprimant par les transformations des motricités décrites sous la rubrique de l'apprentissage ; un niveau parfois individuel mais souvent supra-individuel et pouvant atteindre les descendants, qui s'exprime par les transformations de comportements corrélées aux grandes variations physiologiques dépendantes des grands cycles du milieu. La physiologie éco-éthologique des fourmis dorylines est caractéristique de cet état d'esprit.

▼ *Le comportement des Anthropoïdes a passionné beaucoup de chercheurs au début du XX^e^ siècle, mais dans le cadre d'une interprétation qui ne faisait presque pas de part aux capacités de ces animaux dans leur environnement naturel.*

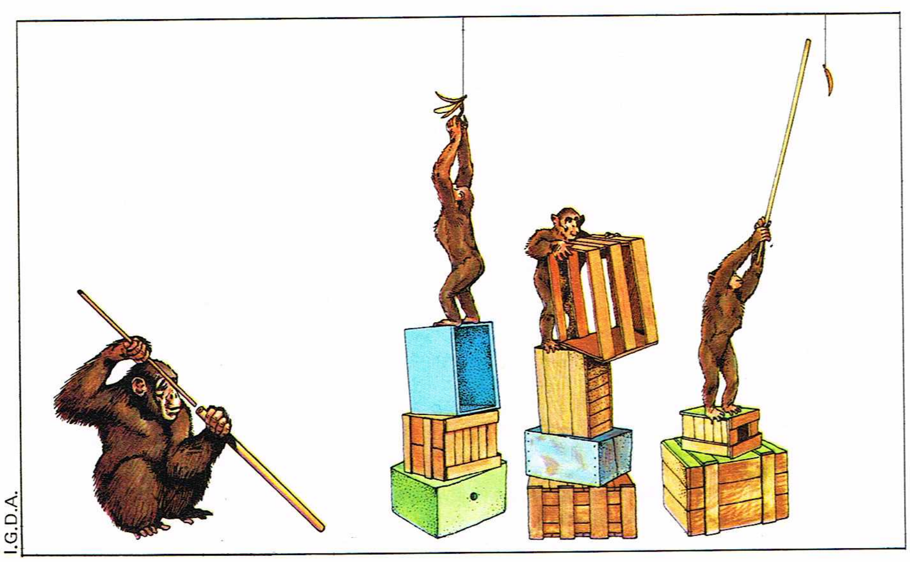

I.G.D.A.

● L'objectivisme

Les outrances de certains psychologues du rat blanc qui se complaisent dans une situation artificielle mal explicitée et dans un pathos mathématico-descriptif, l'appartenance à une famille de pensée dont la vision rencontre les limites de celle de la bourgeoisie viennoise du début du siècle, l'acceptation d'une théorie instinctiviste vaguement référencée à une physiologie pulsionnelle... et quelques autres facilités provoquent un homme de caractère comme Lorenz à partir en guerre contre le behaviorisme. Celui-ci se met à observer (soi-disant avec un regard neuf) les comportements « libres » d'animaux « sauvages », et prétend, dans la lignée zoologique comparatiste, établir pour des Vertébrés (les Oiseaux surtout) un certain nombre de lois de l'activité instinctive. Dans un cadre innéiste pulsionnel, auquel Tinbergen ajoutera les éléments de hiérarchisation structurale, Lorenz tend à une comparaison interspécifique dans le cadre d'une évolution et d'une ontogenèse quelque peu ponctuelles : l'homme est, bien entendu, inclus dans la phylogenèse.

C'est l'origine de ce que l'on a trop souvent appelé en France l'« éthologie objective » et que, pour en établir la symétrie avec le behaviorisme, il faut nommer l'objectivisme.

Née d'emblée d'un parti pris de conflit avec le behaviorisme, la théorie objectiviste reçoit le choc en retour des Américains (Schneirla, Lehrman), puis des Anglais

(Kennedy, Carthy). La France est, encore une fois, en retard; en 1945, l'école y fait une entrée triomphale et d'autant plus remarquée qu'elle paraît utiliser certaines des conceptions évolutionnistes darwiniennes sans trop battre en brèche le fixisme de Fabre, tout en utilisant au niveau des « fenêtres » ouvertes par l'animal sur le monde beaucoup des « conquêtes » de la physiologie des sensations et de la théorie des tropismes.

Depuis cette date, le nombre des éthologistes et la quantité de leurs travaux dans tous les domaines n'ont cessé de progresser; il faut dire que, selon une règle très générale, les heurts d'école ont permis de dégager des idées et des voies nouvelles. Des revues internationales de haut niveau ont été créées, des livres ont été publiés et des colloques se sont tenus. L'importance des recherches effectuées sur les Mammifères supérieurs, particulièrement sur les Primates non humains, a permis de rapprocher les problèmes étudiés par les éthologistes de ceux traités par les psychologues. On assiste actuellement à la publication de travaux de valeur ayant l'*Homo sapiens* pour objet et des méthodes éthologiques pour moyen. Cela augure bien d'un avenir dont les querelles oiseuses de vocabulaires seront absentes et dans lequel les chercheurs n'étudieront plus les espèces pour elles-mêmes, mais illustreront les problèmes globaux par des travaux comparatistes évolutifs.

Vers une théorie synthétique en éthologie

Caractéristiques du règne animal

Une des caractéristiques importantes des êtres vivants, lorsqu'on les compare aux structures non vivantes, est l'assimilation de croissance qui conduit à la multiplication de matière et à l'occupation de plus en plus large des environnements, donc à la transformation de plus en plus complexe de ceux-ci.

Certains faits doivent être soulignés : lorsque les chloroplastes ont établi leur fonctionnement dans les plantes vertes, la matière vivante a certainement manifesté pour la première fois sur une grande échelle à quel point était importante la transformation qu'elle imposait au milieu abiotique en assurant le tamponnage de la composition gazeuse de ce milieu. Cela n'est évoqué que pour indiquer l'idée de rétroaction biochimique par la matière vivante. Il ne s'agit pas, à proprement parler, de comportement.

Par contre, la courbure des plantes en fonction des facteurs abiotiques de l'environnement : lumière, gravité, etc., se révèle d'un autre ordre et ouvre la porte aux réactions motrices. Souvenons-nous que Loeb, séduit par les lois de Verworn, de Candolle et de Sachs, chercha à les transposer aux animaux. Toutefois, les courbures des plantes les conduisant à présenter certaines de leurs parties vers la lumière ou vers d'autres facteurs sont toutes combinées à des réactions de croissance, lesquelles, par des accélérations et des ralentissements dans les zones symétriques, provoquent ces déflexions.

D'autres mécanismes sont nécessaires pour les réactions rapides. Celles des plantes carnivores, comme la *Drosera* ou les Mimosées qui reploient leurs feuilles, évoquent déjà davantage, par cette rapidité, des réactions d'animaux.

Les réactions primitives des animaux peuvent s'exprimer à peu près de la même manière; toutefois, et c'est un autre fait d'ordre qualitatif qui différencie ceux-ci des plantes, ces réactions conduisent à une dispersion immédiate dans l'espace au moyen d'organites ou d'organes adaptés à assurer cette dispersion. Les plantes supérieures ont, au cours de l'évolution, adapté des organes morphologiques à leur dispersion : étamines qui « confient » leur pollen à des Insectes, expansions des graines, fruits ingérés par des Oiseaux, etc. Les animaux, par contre, ont multiplié les organes de mouvement : on passe progressivement de l'organisation unitaire à l'organisation composite des systèmes ciliaires chez les Protozoaires, comme l'on passe progressivement, aussi bien dans le rameau hyponeurien que dans le rameau épineurien, des éléments contractiles les plus simples anatomiquement à des masses musculaires antagonistes faisant se mouvoir l'une par rapport à l'autre des pièces squelettiques externes (comme chez les Arthropodes) ou internes (comme chez les Vertébrés).

Toutes ces références à l'évolution et à l'utilisation de structures morphologiques dans le comportement sont de la plus grande importance : Il faut souligner les étapes de cette conquête de l'espace libre par la matière vivante.

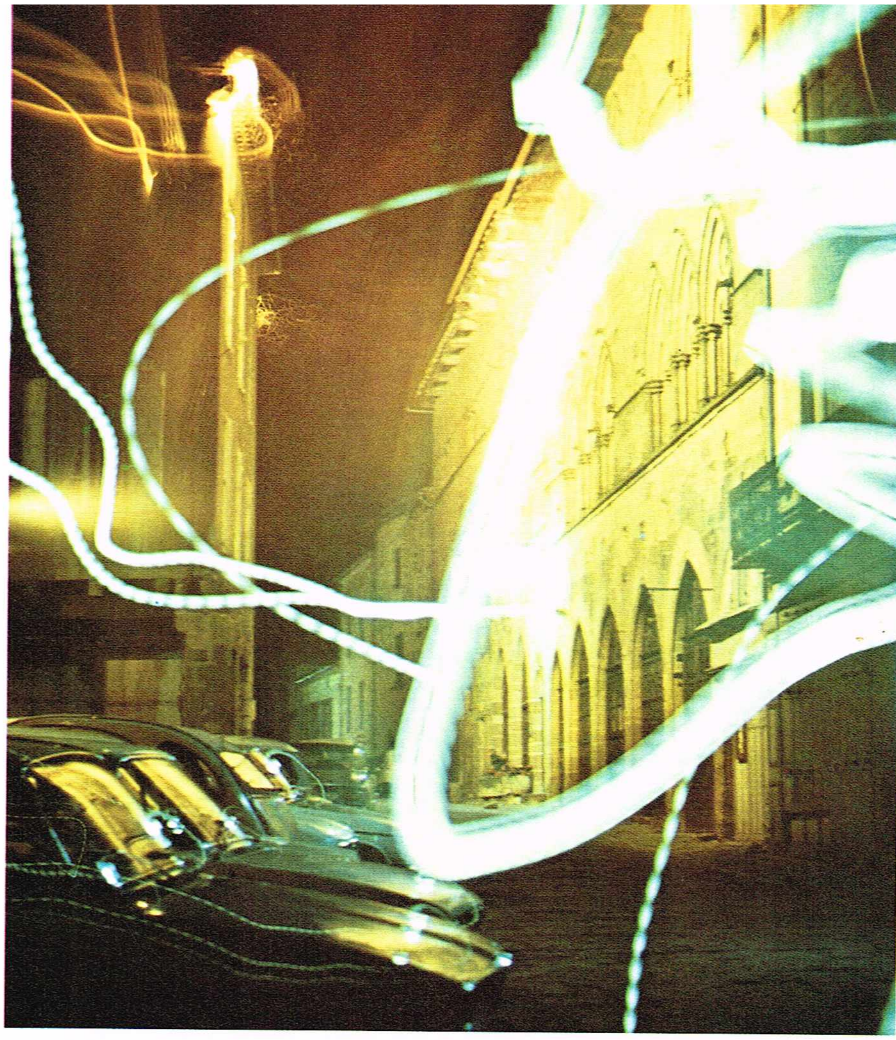

G. Richard

▲ *Vol de papillons et de chauves-souris dans une lumière artificielle : les traits fins matérialisent le mouvement des Lépidoptères, les traits épais celui des Chiroptères.*

Dans cette optique, les mouvements des animaux dans le milieu où ils s'expriment semblent bien constituer un fait saillant : c'est pourquoi on est tenté de focaliser l'analyse éthologique sur ces mouvements. Mais pour en opérer une analyse, il faut leur donner une mesure. Cette mesure permettra l'étude quantitative, bien qu'elle présente des limitations.

Des *contraintes mécaniques et morphologiques* limitent beaucoup les capacités d'expression de comportement : il est impossible à un individu humain de toucher son coude droit avec sa main droite; il est impossible de se gratter simultanément d'une seule main la tête et le pied; il est impossible de marcher et de courir en même temps. Des *contraintes mécaniques et physiologiques* apportent d'autres limitations : une contraction simultanée des extenseurs et des fléchisseurs d'un même segment de membre ne se produit quasiment jamais; au contraire, il y a succession coordonnée de contractions.

Ces remarques étant faites, la *description* des comportements des animaux est possible sous la forme d'*une série finie d'actes* plus ou moins diversifiés et plus ou moins coordonnés les uns aux autres. Dans bien des cas, on a assimilé la marche à une combinaison de réflexes segmentaires et suprasegmentaires des membres en mouvements, mais elle s'accompagne en général de mouvements liés de la tête, de la queue, d'autres organes, et la description devient très vite fort complexe. Elle s'oriente rapidement vers la reconnaissance de coordinations dont beaucoup peuvent être qualifiées par des mots pris dans le vocabulaire humain. Malgré leur relent de finalisme, ceux-ci assurent les globalités des descriptions : toilettage, comportements alimentaire, copulatoire, parental, etc.

Les descriptions d'actes moteurs « simples », de coordinations motrices plus « complexes » peuvent suffire dans un premier temps, mais lorsqu'il s'agit d'analyses plus fines, l'unique référence à un mouvement vu de l'extérieur (même s'il a été filmé) est insuffisante. Bien des chercheurs se sont orientés, sous l'influence de la physiologie, vers des mesures plus précises, pratiquées soit au niveau musculaire périphérique, soit au niveau du système nerveux moteur central. Ici apparaissent davantage, à cause de la simultanéité des mesures en divers points, des

▼ *Dans la nature, un acte étudié chez les divers individus d'une espèce peut paraître identique. (ici, à droite, le grattage chez une barge à queue noire). Cependant, l'analyse fine de l'acte permet d'atteindre divers niveaux de variabilité individuelle. L'étude de l'apprentissage en cage de Skinner permet de quantifier les paramètres temporels de l'expression d'un acte ou d'un ensemble d'actes au cours de leurs répétitions (à gauche).*

synchronies et des diachronies de production de mouvements qui conduisent obligatoirement à la mise en relief d'une *dimension temporelle* de successions coordinatrices. Elles aboutissent à la construction réelle des *éthogrammes,* répertoires dynamiques complets des animaux.

De 1930 à 1960, la science éthologique objectiviste a accumulé sur un nombre considérable d'animaux des éthogrammes de plus en plus précis dans leur structuration temporelle. Il est impossible d'ignorer que cette accumulation est hautement précieuse et qu'elle a donné un nouveau souffle aux sciences du comportement. Il était nécessaire et urgent en 1930 de se tourner vers la nature, d'ouvrir toutes grandes les portes de la science à nombre d'animaux dont on soupçonnait à peine le comportement ainsi qu'à nombre d'actes dont on mesurait mal la valeur.

Mais la dimension temporelle physiologique conduit également à d'autres observations qui n'ont pas été réalisées par les objectivistes, et que les behavioristes ont peut-être eu tendance trop exclusivement à monter, à une certaine époque, en épingle. Il s'agit de la transformation des coordonnées de l'expression temporelle (latence, durée, espacement) d'un acte ou d'un ensemble d'actes par le seul fait que cet acte doit se répéter. Tout l'apprentissage, qu'il se fasse en tour de silence chez Pavlov, en labyrinthe ou en boîtes de Skinner, relève de ce type de transformation. Il y a là certes un fait expérimental de laboratoire, mais il est impossible que ces transformations ne puissent se retrouver dans les actes naturels et donc jouer quelque rôle dans l'éthogramme lui-même. Non seulement cette dimension est importante en elle-même, mais elle mène à une véritable incorporation du temps aux comportements, ce qui conduit, bien entendu, à chercher tous les aspects de la dimension temporelle. La transformation ontogénétique ne peut alors manquer d'intérêt. Elle est même certainement plus fructueuse à beaucoup d'égards que la comparaison d'éthogrammes d'animaux différents parvenus à la fin de leur croissance morphologique. Il devient donc nécessaire de comparer les éthogrammes successifs d'un même animal au cours de son ontogenèse, en cherchant tout particulièrement les filiations d'actes en construction ou en destruction. Cette problématique, proposée de façon cohérente par l'école de Schneirla, est fondamentale.

On ne peut manquer, dans une telle problématique, de se trouver frappé par la variabilité de la construction et même par la variabilité de l'organisme construit. Surgit alors une autre dimension temporelle : *la transformation spécifique incluse dans la transformation phylogénétique*. C'est le mérite d'hommes comme Dobzhansky d'avoir su formuler justement ce type de passage en s'appuyant non plus sur l'analyse descriptive d'états relativement figés, mais sur l'analyse d'interactions à l'œuvre dans les populations naturelles d'êtres vivants ou dans les populations géniques des patrimoines héréditaires des espèces.

On ne peut pas inclure la dimension temporelle dans l'ontogenèse et l'abstraire de la phylogenèse. Il s'agit en fait de processus de même type : l'introduction d'une variation modèle progressivement, à partir des *interactions* établies dans un milieu défini, des comportements qui s'exprimeront complètement en interaction avec un *autre milieu.* C'est ainsi que les transformations morphologiques et comportementales manifestées par le fœtus dans son milieu embryonnaire permettent de donner progressivement une valeur diversifiante aux milieux successifs dans lesquels vivra l'individu.

Si donc les objectivistes ont cherché à décrire les comportements en séquences d'actes, les behavioristes les ont décrits beaucoup plus en changements de fréquence d'un acte particulier. Aucune entente n'était possible pour ceux qui voulaient rester sourds et aveugles à la méthodologie de mesure de l'autre école.

Mais la voie moderne, tracée par Lehrman, Carthy, Kennedy, Hinde et bien d'autres depuis, passe obligatoirement par la synthèse des deux points de vue, laquelle confrontera de plus nombreux éthogrammes aux sources de la variation temporelle par la médiation d'une théorie génétique renouvelée.

Les actes moteurs

Généralités sur la variabilité

En ce qui concerne la description des actes « élémentaires » et des coordinations « finalisées » de l'éthogramme, il faut maintenant souligner avec force que, dans une voie spécifiquement zoologique avec une méthodologie comparative reprise (sans renouvellement) à la morphologie taxonomique, et avec l'arsenal conceptuel d'une génétique mécaniste morganienne, en 1930 peut-être, il était intéressant de tenter une caractérisation des comportements dégagée des interprétations instinctivistes du type de celles de Fabre.

Mais c'était tomber de Charybde en Scylla que de passer du fixisme créationniste de Fabre au fixisme prétendument évolutionniste de Lorenz. Celui-ci, dans le Colloque sur l'instinct tenu en 1954, à Paris, sous l'impulsion de Grassé, écrivait, au sujet de l' « unité d'actes » de l'objectivisme :

« Ni Whitman, ni Heinroth n'ont présenté de suggestions à propos des mécanismes physiologiques sous-tendant les schèmes moteurs qu'ils avaient découverts. Ils étaient bien plus intéressés par les conclusions taxonomiques à tirer de ces schèmes. Ainsi, l'éthologie commença à être une science purement descriptive et classificatrice, et c'était le meilleur départ possible. Cette manière de procéder a conduit à l'accumulation d'un tel matériel d'observation concernant les schèmes moteurs nouvelle-

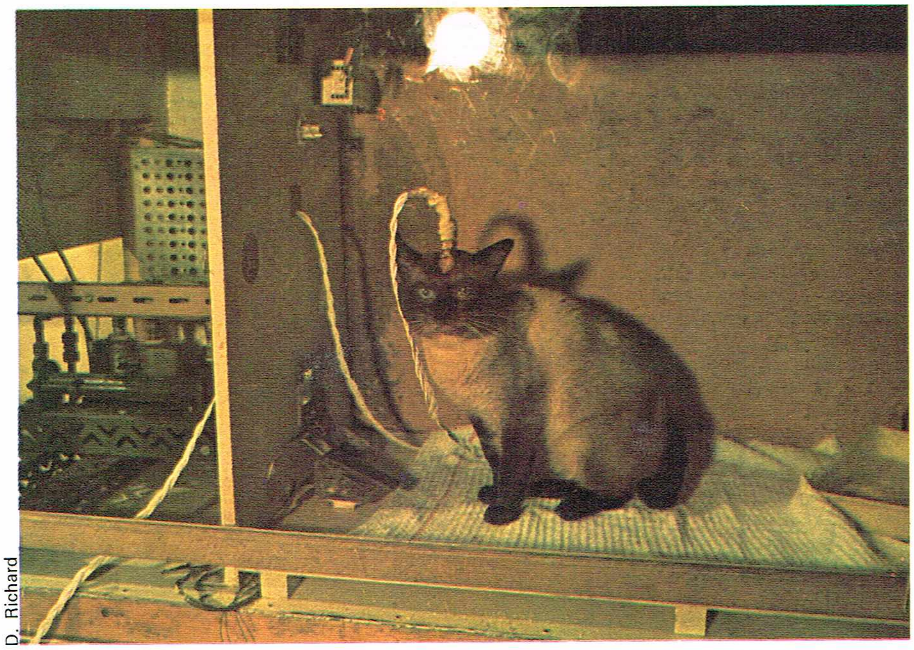

D. Richard

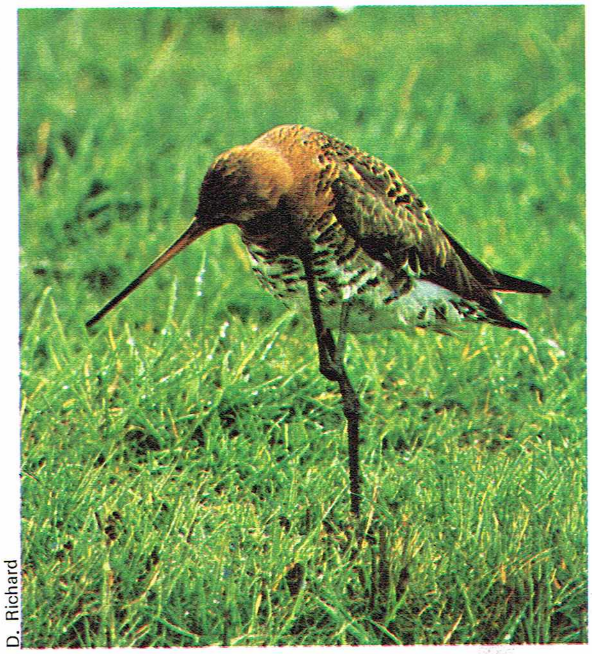

D. Richard

D. Richard

D. Richard

D. Richard

▲ ***Alors que les* Gallinacés *(en haut), effectuent des mouvements alternatifs de ramassage de l'eau (à gauche) en surface avec le bec et de relèvement de la tête (à droite) qui permet une déglutition par gravité, les* Colombiformes *qui boivent (ci-dessus), trempent leur bec dans l'eau et aspirent.***

ment découverts que leurs propriétés devenaient évidentes. Les plus importantes de ces propriétés sont alors les suivantes :

— la modificabilité de tels schèmes est infinitésimale et en tout cas beaucoup plus faible que celle des caractères morphologiques, lesquels sont considérés comme « hérités » par les biologistes ;

— les mêmes schèmes moteurs qui, en phylogenèse, se trouvent très conservateurs tendent à apparaître, en ontogenèse, comme indépendants de l'apprentissage individuel ;

— Ils montrent un type évident de spontanéité et une tendance à une récurrence rythmique qui est particulière à chacun. »

Ainsi, en 1954, *non seulement le comportement des animaux est décrit par les objectivistes comme un ensemble coordonné d'actes (ou de schèmes) moteurs, mais de plus ces actes sont spécifiques, fixés dans une transmission génétique seulement soumise aux règles de la mutagenèse et de la combinaison morganienne, et en outre indépendants pour leur expression des milieux dans lesquels ils s'expriment.* Il y a manifestement là une exagération, qu'il faut dépasser sous peine de retrouver très vite au niveau des comportements tous les dangers d'un fixisme générateur des cataclysmes à la Cuvier.

En réalité, deux types d'actes ont souvent été confondus sous la même dénomination :

— ceux qui peuvent être reliés à une fin biologique immédiate pour l'individu (picorer, voler, nager, marcher, s'ébouriffer, se toiletter, etc.) ;

— ceux qui sont inclus dans les communications (mimiques, gestes, postures, vocalisation, etc.).

Pour les uns comme pour les autres, l'acte étudié chez un individu dans la nature rappelle de très près l'acte étudié chez un autre individu. Mais en réalité l'analyse très précise pratiquée à l'aide du cinéma accéléré (pour les mouvements) ou à l'aide du sonagraphe (pour les cris) a largement battu en brèche l'idée de l'identité de l'acte pour tous les individus d'une espèce, même pour tous les individus d'une population.

Lorsque Huxley, en 1910, observait les parades des grèbes huppés avec des jumelles à quelques dizaines de mètres de distance, lorsque Whitman décrivait le vol d'Oiseaux d'abord retenus prisonniers comme *presque semblable* à celui d'Oiseaux libres, ou lorsque Lorenz observait les comportements sexuels des canards ou le « vol de chasse » d'un sansonnet, la précision n'était sans doute pas nécessaire à ces travaux pionniers. A présent, par contre, il est important de considérer l'importante variabilité relative de la plupart des actes des éthogrammes.

Certes, à première vue, cette variabilité n'apparaît pas. Toutes les vaches broutent en arrachant l'herbe grâce à une traction de la langue enroulée autour de la touffe visée, et leurs incisives cisaillent à peine la base des tiges ; tous les Colombiformes qui boivent trempent leur bec dans l'eau et aspirent, alors que les Gallinacés effectuent des mouvements alternatifs de ramassage de l'eau en surface avec le bec et de relèvement de la tête, qui permet une déglutition par gravité ; l'utilisation par les Palmipèdes des sécrétions huileuses de leur glande uropygienne prélevées du bout du bec et répandues sur les plumes est semblable ; les mouvements de grattage de la tête par la patte postérieure passée au-dessus du membre antérieur tendu appartiennent à presque tous les Vertébrés ; la femelle de canari pousse par un mouvement de tissage spécial les fragments de matériaux dans la coupe du nid, et effectue ce mouvement presque avec la même forme si on ne lui donne pas de matériaux, et alors elle le fait sur le plancher de la cage ; tous les enfants humains ont des mouvements quasi similaires de recherche du sein, de positionnement correct du mamelon et de la partie antérieure du sein dans la partie postérieure de la cavité buccale, puis présentent une intégration de la coordination musculaire de succion, de déglutition, de respiration, de repoussement du sein à la fin de l'alimentation.

Mais une analyse plus fine incluant les temps (et non seulement les formes des comportements) introduit déjà une *variabilité individuelle* qu'il est impossible de nier. D'autre part, lorsqu'on s'adresse non plus à des mouvements simples mais à des séquences de mouvements, on s'aperçoit fort aisément de la disparition sans conséquences graves pour la réalisation du comportement de certaines parties de la séquence (voir plus loin) ; on

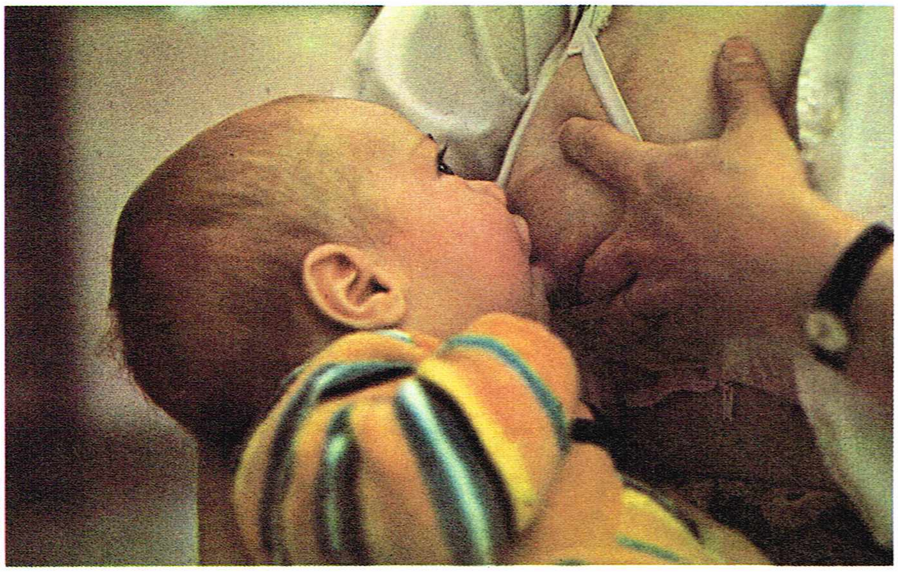

D. Richard

▲ *Un enfant tétant le sein de sa mère exprime au travers des caractéristiques individuelles des protagonistes, une modalité spécifique de comportement.*

s'aperçoit également que c'est plutôt *une modalité générale des actes* (modal action pattern) *qui se maintient similaire dans le cadre spécifique.*

Si nous nous tournons maintenant vers les comportements à valeur de communication, comme les échanges entre partenaires sexuels ou entre partenaires au combat, nous trouvons beaucoup d'actes enchaînés, mais qui devront subir une épreuve décisive de valeur de leur enchaînement. C'est l'interprétation du comportement par le *socius,* l'interprétation par le vis-à-vis, laquelle n'échappe pas à la dynamique phylogénétique.

A cet égard, deux exemples nous retiendront :

● *Les actes appartenant au premier système* mentionné ci-dessus (alimentation, toilettage) *et qui,* dans une interprétation finalisée des comportements, *ne devraient pas venir interrompre le déroulement d'une séquence sexuelle ou d'une séquence de bataille.*

Pourtant, il arrive souvent qu'un goéland ou un poulet au combat suspendent leurs actions antagonistes ; un court instant, on voit le premier arracher une herbe, le second picorer un grain. Il arrive aussi qu'en cours de parade sexuelle, une cane tourne la tête de la même façon que lorsqu'elle se nettoie les plumes. De tels actes, détachés de leur contexte habituel (séquences alimentaires, séquences de toilettage) et insérés dans une autre séquence (peut-être l'ont-ils été au cours de l'évolution en raison des limitations morphologiques évoquées plus haut), vont prendre, *à cause de l'improbabilité de leur manifestation à cette place,* une valeur particulière de signal. Ils pourront décrire non plus une *étape de réalisation* d'un comportement, mais bien plutôt un *état de l'animal.* La pression sélective spécifique, s'emparant de tels actes, leur donne une valeur de plus en plus précise et les stabilise assez étroitement en durée d'expression et en place dans la séquence pour une espèce donnée.

Or, ce phénomène, dit de *ritualisation,* est un de ceux sur lesquels Lorenz a particulièrement insisté, en 1937, lorsqu'il décrivait des mouvements innés fixes spécifiques (la projection de la tête du garrot à l'œil d'or en parade nuptiale, toujours citée depuis Dane, dure 1,21 seconde ± 0,08 seconde !). La sélection évolutive dans une espèce ou dans une population découpe toujours dans la courbe de Gauss de répartition quantitative d'un caractère (qu'il soit morphologique ou comportemental) des tranches d'autant plus étroites que la pression sélective est plus forte. Or, la pression du congénère dans la mise en place des actes ritualisés est une des plus intenses qui puissent être.

● Les *vocalisations,* bien étudiées depuis 20 ans, fournissent un autre exemple non seulement de variabilité d'actes moteurs, mais également d'utilisation de cette variabilité par l'espèce dans le cadre de la concurrence naturelle.

On a sans doute trop longtemps considéré les vocalisations comme un comportement particulier à la fois dans sa manifestation et dans sa physiologie de production. Cependant, comme tous les comportements évoqués plus haut, l'émission sonore implique en coordination temporelle un grand nombre d'actes élémentaires : mouvements respiratoires, contractions pharyngées et laryngées (cordes vocales, syrinx, etc.), mouvements de la cavité buccale ou de ses annexes assurant certains éléments de modulation de l'émission. Sans doute cette coordination s'est-elle établie avant que la vocalisation prenne une

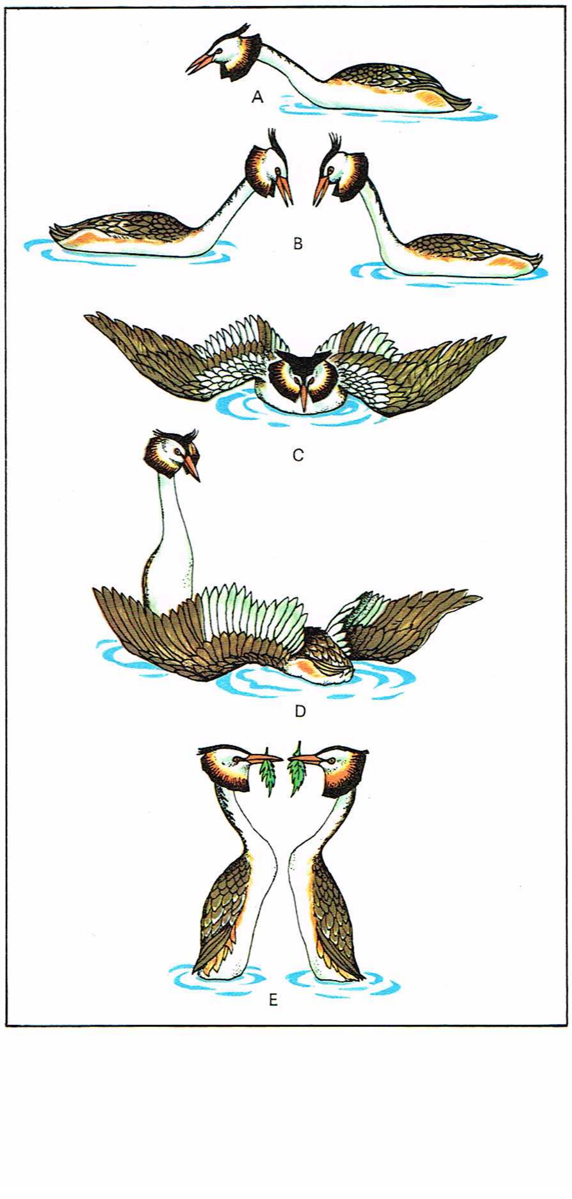

I. G. D. A.

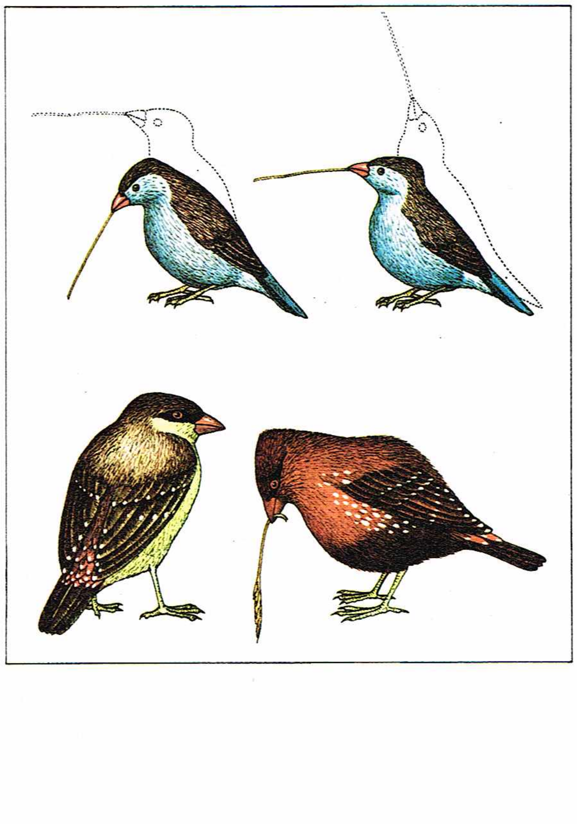

I. G. D. A.

▶ *A gauche,* parade sexuelle *du grèbe huppé. Le mâle et la femelle érigent les plumes du cou (A) et se rejoignent face à face (B) ; le mâle écarte les ailes et plonge devant la femelle (C, D) puis tous deux s'affrontent, une plante aquatique au bec (E). A droite, en haut, le mâle du « cordon bleu » effectue une* danse ritualisée *impliquant des éléments de la construction du nid ; en bas, présentation par un bengali d'un morceau végétal sous une forme ritualisée.*

G. Richard

▲ *Des nombreuses études sur les Passereaux (ici, une mésange), se dégage l'idée que les modalités éthologiques des vocalisations d'une espèce dépassent de beaucoup ce qui pourrait être déduit de l'audition d'un individu.*

valeur de communication (c'est le cas pour beaucoup d'onomatopées). Mais dans bien des cas, la communication s'établit grâce à un filtrage de compréhension sélective qui est réalisé par le congénère.

Des nombreuses études de Marler, Konishi, Nottebohm, Thorpe, Hinde, Bremond, Kreutzer sur les Passereaux, de Guyomarc'h sur les Gallinacés, se dégage l'idée que les modalités éthologiques des vocalisations d'une espèce dépassent de beaucoup ce qui pourrait être déduit de l'audition d'un individu; chaque sujet est loin d'exprimer l'ensemble des potentialités propres à l'espèce. Ainsi, certains chants de troglodytes de la région moscovite sont plus proches (si on les compare en spectres de fréquences) de chants de troglodytes de la région parisienne que ne sont proches entre eux deux chants de troglodytes de Moscou ou deux chants de troglodytes de Paris. Il semble bien que la nécessité de caractérisation sonore d'un individu dans une population et sa reconnaissance par les autres imposent une restriction d'expression à des potentialités beaucoup plus vastes et (contrairement à ce qu'affirmait la théorie génétique classique) maintenues vastes justement par une sélection naturelle favorisant l'hétérozygotie par rapport à l'homozygotie.

De nombreux autres exemples de variabilité pourraient être décrits. Ils n'ajouteraient rien au fait que *l'éthogramme d'une espèce ne peut se déduire de celui d'un seul individu. Par ailleurs, cet éthogramme n'est pas composé de patterns moteurs indépendants entre eux et indépendants de l'environnement dans lequel ils se sont construits.* Il n'existe en fait pas de cas bien étudiés où tous les critères définis par l'école objectiviste soient réunis.

Le concept de *modalité thématique d'action,* ou M.A.P., (modal action pattern) de G.B. Barlow rend mieux compte de toutes les *dimensions des unités comportementales visées : ce sont des schèmes spatio-temporels de mouvements coordonnés, capables de se regrouper selon des modalités qui rendent le comportement identifiable. L'individu exprime, sous les pressions immédiates auxquelles il est soumis dans la population à laquelle il appartient, tout ou partie des capacités d'expression de M.A.P. de l'espèce; la variabilité ainsi mise en réserve doit jouer un rôle important dans les processus de l'adaptation phylogénétique.*

Variabilités phylogénétique et ontogénétique

Un des points sur lesquels, à la suite de Whitman et de Heinroth, l'objectivisme semblait le plus affirmatif vis-à-vis de la valeur spécifique des « actes fixes » était le critère de la transmission héréditaire. Or, diverses recherches tendent actuellement à démontrer que pratiquement tous les comportements relèvent d'un déterminisme héréditaire polygénique et que la construction complète d'un comportement nécessite l'incorporation au programme génétique individuel d'informations qui dépendent fondamentalement des milieux successifs dans lesquels se réalise cette construction.

Il est impossible, dans une étude de la variabilité des actes moteurs spécifiques, de se passer de l'analyse ontogénétique, laquelle conduit à donner au concept une dimension supplémentaire. Deux exemples serviront ici de démonstration.

● Hailman a repris, en 1967, l'étude analytique d'un des actes moteurs utilisé pratiquement comme « acte fixe spécifique » depuis les origines de l'objectivisme, et a montré où se placent les éléments de variation possible. Il s'agit de l'acte de demande de nourrissage *(quémande, ou pecking)* exprimé par un jeune goéland, qui vient frapper de la pointe de son bec la tache rouge de la mandibule inférieure de son parent; le contact est en général suivi, chez le parent, d'une régurgitation dont se nourrit le jeune.

Ce mouvement est en réalité la somme de quatre composantes motrices coordonnées et organisées spatiotemporellement, dont l'ensemble, agissant sur le comportement de nourrissage du parent, se précise au cours des tout premiers jours de la vie du jeune. La *première composante* est un mouvement de la tête du poussin vers le haut et vers le parent, ou vers l'objet substitué. Ce mouvement s'achève par une chute de la tête en dessous de la position de départ, puis on observe un retour à la position de repos par retrait du cou. La *seconde composante* est une ouverture du bec (par soulèvement de la mandibule supérieure) suivie d'une fermeture rapide. La *troisième composante* est une rotation de la tête autour d'un axe, passant par la pointe de la mandibule inférieure et par la tête en dessous du niveau des yeux. La *quatrième composante*

Marka

◀ *Adulte de goéland marin. Remarquer la tache rouge, à l'extrémité de la mandibule inférieure, que le jeune vient frapper lorsqu'il exprime sa demande de nourrissage.*

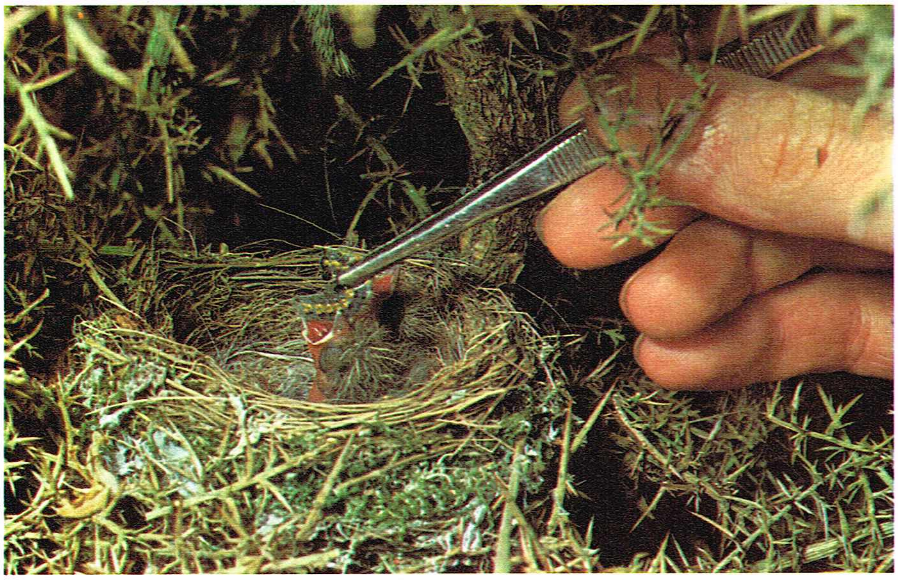

J.C. Guyomarc'h

▲ **Prechtl** ***montre qu'on peut*** **provoquer la réponse de quémande alimentaire** ***chez les jeunes Oiseaux nidicoles en faisant apparaître une forme quelconque au-dessus du bord du nid, surtout si on l'accompagne d'une secousse mimant l'atterrissage des parents.***

est une poussée des pattes suivie de relaxation. Ces quatre composantes, analysées sur film, se coordonnent progressivement entre elles de telle sorte que leurs maximums se groupent en quelques centièmes de seconde qui correspondent à l'impact du bec du jeune sur le bec du parent. A ce moment, le mouvement de la tête vers le haut est à son maximum; l'ouverture du bec, qui a commencé au début de ce mouvement, est maximale peu avant l'impact; la poussée des pattes est également maximale très peu avant l'impact; ce qui est encore plus intéressant, c'est que la composante rotatoire (qui manque chez des poussins éclos dans l'obscurité et élevés à la main par l'expérimentateur sans contact avec un bec parental) se met en place au cours des répétitions de quémandes.

Cette analyse met bien en évidence les intrications de mouvements; de plus, elle souligne qu'un des facteurs de la coordination est le comportement même du parent présentant le bec, alors qu'un autre facteur est l'alimentation prise par le jeune qui renforce, essai après essai, les comportements suivis de succès, ainsi que nous le verrons plus loin.

● *Fox* et *Apelbaum* ont étudié, en 1962, avec une méthodologie voisine, un comportement du jeune lapereau qui est une réponse orientée de saut dans la direction d'un stimulus, réponse accompagnée d'une vocalisation et de mouvements de pattes contre le stimulus. Grâce à des procédures expérimentales graduées au cours de l'ontogenèse, ces deux chercheurs ont décomposé ce comportement en une série d'actes plus simples, coordonnés entre eux mais dont le décours temporel est différent : certains sont précoces et disparaissent plus tard, d'autres sont d'apparition tardive, d'autres encore présentent une période d'hypermanifestation ou de régression. Néanmoins, tous jouent un rôle dans la construction du schème moteur qu'exprimera l'adulte. Les auteurs pensent même que ce schème, observé par eux au nid, est peut-être celui utilisé par l'adulte fuyant en zigzag devant un prédateur. Une dernière remarque s'impose : tous les lapereaux n'expriment pas le « saut retourné » avec la même intensité; ce sont les lapins de garenne (lapins sauvages) qui le montrent au maximum. Sans doute faut-il voir là un support héréditaire de capacités à répondre dans le milieu.

En complément, deux éléments de la variabilité doivent être maintenant précisés :
— la *variabilité par répétition;*
— la *variabilité sous-tendue par des variations physiologiques.*

Variabilité de répétition

Tous ces actes isolés ou construits en séquences montrent dans leur dynamique une première dimension temporelle : la *latence* de manifestation dans un environnement donné. Un mâle de drosophile peut très bien ne pas avoir d'activité sexuelle lorsqu'il est mis en présence pour la première fois d'une femelle : il peut la toucher de ses pattes antérieures, mais rester immobile jusqu'à ce qu'elle se déplace. Ce n'est que lors d'une seconde présentation qu'il commencera sa parade.

A l'inverse, un comportement, de quelque ordre qu'il soit, ne cesse pas immédiatement après l'arrêt du stimulus; on observe souvent l'équivalent de ce que Sherrington, dans un tout autre cadre, a nommé une *postdécharge.* Hinde, observant le comportement de harcèlement des Passereaux devant un prédateur, a montré que, en cage par exemple, le taux temporel unitaire d'émission de cris s'atténue lentement après que le prédateur a disparu. Un mâle de drosophile continue sa cour quelques secondes après la disparition de la femelle, sur le point où elle vient de disparaître. Nous reviendrons plus loin sur les causalités possibles de ce maintien de comportement (lien conditionnel avec d'autres stimuli, décharge d'énergie endogène, etc.)

Les phénomènes de latence aussi bien que ceux de postdécharge peuvent jouer un rôle avec d'autres dans les *sommations diverses* observables dans beaucoup de comportements. Dethier a montré avec la mouche *Phormia regina* comment les stimuli chimiques reçus par deux pattes se sommaient en quelque sorte algébriquement vis-à-vis de la production du mouvement d'extension de la trompe. De la même manière, la réponse sexuelle des rats mâles décrits par Beach vis-à-vis d'une femelle est une sommation de stimuli olfactifs, visuels et tactiles.

Mais il y a plus : la sommation peut provenir d'une espèce d'*auto-excitation* par la manifestation du comportement elle-même. Ainsi dans le cas du harcèlement *(mobbing)*, Hinde montre que le maximum de réponse n'est obtenu qu'au bout d'environ deux minutes et demie. Sevenster Bol montre que le nombre de mouvements de cour d'un mâle d'épinoche devant une femelle croît pendant une période de 5 minutes environ.

A l'inverse, des phénomènes de *fatigue* peuvent intervenir à la répétition de comportements. Cette fatigue peut être de deux types : purement physiologique, liée à une transformation du comportement, ou plus spécifiquement comportementale par transformation de la réponse en fonction de sa valeur dans l'environnement. Ainsi, le taux d'émission d'un pinson décroît dans la situation de harcèlement lorsque le stimulus est maintenu. Cependant, tous ces phénomènes sont largement mobiles. Il suffit de présenter à un chat une *nouvelle* femelle pendant la période réfractaire qui suit un accouplement pour produire avec très courte latence un nouvel accouplement.

Prechtl montre qu'on peut provoquer la réponse de quémande alimentaire chez de jeunes Oiseaux nidicoles en faisant apparaître une forme quelconque au-dessus du bord du nid, surtout si on l'accompagne d'une secousse mimant l'atterrissage des parents. Mais à la répétition de la présentation, la réponse devient de plus en plus faible et peut même disparaître. Toutefois, une brusque secousse d'intensité différente peut la faire réapparaître à pleine intensité.

L'exemple du harcèlement nous donne d'autres éléments d'appréciation. Ainsi, lorsqu'on présente une chouette à un pinson, au bout de 30 minutes le harcèlement est arrêté. Si la chouette reste hors de la vue de l'Oiseau pendant des temps variant entre 1/2 minute et 24 heures, lorsqu'elle est remise en présence de l'Oiseau, elle déclenche à nouveau les cris. Le décompte des cris émis dans les 6 premières minutes de chaque présentation montre que plus le temps de disparition est court, moindre est le nombre de cris réémis; le nombre atteint 50 % du niveau initial lorsque 30 minutes séparent les tests. Cependant, 24 heures sont insuffisantes en général pour retrouver l'intensité de réponse de la toute première présentation. Si, au lieu de la chouette, on se sert à la seconde présentation d'un Mustélidé naturalisé, on observe un léger accroissement des cris, mais l'ensemble du comportement suit à peu près la même loi que précédemment. Deux processus sont ici en cause : l'un à récupération rapide, l'autre à récupération lente et faible; peut être faut-il en ajouter un autre, lié à la spécificité du stimulus (chouette-Mustélidé).

Tout cela peut être prolongé par la notion de variabilité due aux processus d'*inhibition*. Par exemple, on sait bien maintenant que les ganglions cérébroïdes des Insectes (Roeder) modulent les motricités périphériques par un effet global inhibiteur sur celles-ci (mante). Souvent, ce phénomène s'observe également chez les Vertébrés.

Mais Kennedy, étudiant le vol des pucerons, a montré que se manifestent des alternances entre des périodes de vol et des périodes d'atterrissage sur les feuilles, ces atterrissages étant suivis de prise de nourriture. Si un puceron atterrit sur une surface « non attractive » (une vieille feuille par exemple), il n'y reste pas longtemps et s'envole à nouveau, mais moins énergiquement, et se repose vite. A l'inverse, s'il a atterri sur une surface attractive (une feuille jeune), il y reste plus longtemps; Kennedy a été capable de réfuter l'explication simple qui consisterait à établir une relation basée sur un épuisement du vol par le vol et une récupération par le repos et l'alimentation sur une feuille jeune. Il a suggéré une inhibition mutuelle entre les systèmes du vol et de l'atterrissage; l'activation de l'atterrissage servirait d'inhibiteur temporel à l'expression du système de vol, mais réduirait en même temps le seuil de déclenchement du vol. Kennedy appelle cette interrelation une *induction antagoniste*.

Tous ces résultats nous conduisent à mieux préciser à quels niveaux peut se reconnaître la variabilité d'un acte moteur ou d'un complexe d'actes. Cela nous conduit également à mieux mesurer l'importance et la place de la physiologie dans le comportement.

Variabilité physiologique

Siegel (1955) sur le coq, Guyomarc'h et Cariou (1969-1971) sur la caille japonaise ont montré que certaines des caractéristiques individuelles du chant ou du cri de reconnaissance sont modulées par les changements saisonniers ou expérimentaux de la photopériode, par le taux d'hormone mâle dans le sang, par les rapports hiérarchiques dans un groupe, par le sexe, par l'âge, sans pour cela que les caractéristiques globales du thème vocal soient altérées.

De la même manière, il est tout à fait certain que les émissions sonores des animaux vivant en grands groupes présentent, sur un thème général unique, des variations dans leurs éléments qui permettent la reconnaissance interindividuelle : c'est justement un cas dans lequel la pression de sélection naturelle a joué dans le sens de la préservation d'une diversité qui s'avérait fondamentale. Tschanz a démontré (1959-64) la réalité et le rôle de cette reconnaissance dans les relations parents/jeunes chez le guillemot : Hutchinson, Stevenson et Thorpe (1967) ont mis en évidence chez *Sterna sandvicensis* que le cri dénommé *fish-call*, poussé par le parent qui revient de la pêche, est individualisé à la fois dans ses éléments et dans la manière dont ceux-ci se combinent. Cependant, le thème total du *fish-call* permet son identification en qualité de schème moteur spécifique. Ce sont toutes ces variations possibles de la caractéristique spécifique d'une émission sonore particulière qui permettent l'établissement des « dialectes régionaux » évoqués ci-dessus.

Même dans les comportements reproducteurs des Insectes, où pourtant on a souvent évoqué la rigidité du comportement spécifique, des variations individuelles dans les schèmes moteurs peuvent être reconnues. Elles ont été décrites par Brown, par Bastock et Manning dans le comportement sexuel de la drosophile. Il existe trois éléments spécifiques dans le comportement de cour du mâle de ces Insectes : une orientation (O), un mouvement de vibration d'ailes (F) et un mouvement de léchage (L). A la fois la forme, la durée et l'organisation successive de ces éléments caractérisent individuellement chaque mâle, mais les espèces d'un même groupe diffèrent fondamentalement par la fréquence relative des divers éléments et par l'intensité de l'excitation des mâles : les espèces de groupes distincts diffèrent par des éléments particuliers : ainsi, le léchage des *D. melanogaster* est remplacé par un saut copulatoire dans le groupe *D. obscura*. Cela montre à quels niveaux réels se situent les variations individuelles d'expression d'un schème moteur et les incompatibilités motrices entre deux schèmes caractéristiques de deux espèces différentes. En outre, cela permet de comprendre sur quels critères peuvent s'établir les choix de comportements qui jouent un rôle fondamental dans les processus évolutifs de la spéciation ou du maintien de l'hétérozygotie dans le pool de gènes d'une population (avantage du « rare » dans les choix sexuels par exemple).

Synthèse

Tous ces exemples permettent de souligner la réalité et les limites du concept de schème moteur spécifique.

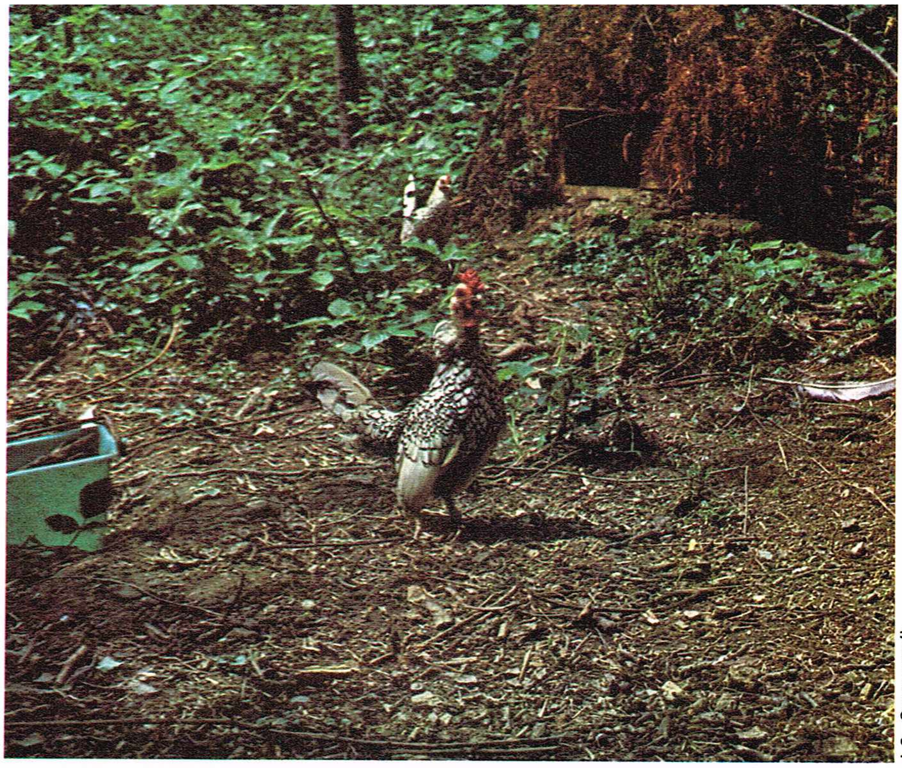

J.C. Guyomarc'h

Cependant, un problème reste encore à résoudre à ce propos : quelles sont les parts respectives de la maturation morphologique et physiologique d'une part, de l'expérience individuelle d'autre part, dans la réalisation par un animal, à un moment donné, d'un comportement caractéristique de son espèce? La composante rotatoire de la quémande du jeune goéland s'affine en quelques heures et quelques répétitions de contact suivi de nourrissage avec un objet qui, dans la nature, est le bec du parent.

Les travaux de Kortlandt sur le cormoran indiquent l'importance d'une expérience acquise au cours de la maturation du jeune sur les actes moteurs futurs de la nidification des adultes, ce qui laisse à penser que des actes de ce type, même caractéristiques de l'espèce, hérités des parents et manifestés à plein par les adultes, doivent subir un certain exercice dans des milieux adéquats pour être complets.

Thorpe et Hinde ont longuement étudié le développement du chant du pinson, dont le thème est un des critères de reconnaissance de l'espèce, dont certaines variations géographiques caractérisent la population, et dont certaines variations de structure caractérisent l'individu. Ce chant, d'une durée totale d'environ 2,5 secondes, est constitué de notes dont la fréquence d'émission est comprise entre 2 et 8 kHz. L'ensemble est divisé en trois phrases principales de fréquence décroissante, suivies par une « fioriture » finale. Chaque individu possède un répertoire de 1 à 6 chants présentant des variantes minimes vis-à-vis du type. Les premières manifestations de ce chant chez le jeune en nature sont représentées par un *sous-chant (subsong)* dont la durée est mal définie, dont les notes sont variables et qui ne comporte pas de fioriture finale. Les pinsons élevés dans l'isolement dès

▲ *Certaines des caractéristiques individuelles du chant ou du cri de reconnaissance, bien étudiées notamment chez les Gallinacés, sont modulées par une* **variabilité physiologique** *sans pour cela que les caractéristiques globales du thème vocal soient altérées.*

▼ *Des* **variations individuelles** *peuvent être également reconnues dans les* **comportements reproducteurs** *des Insectes où, pourtant, on a souvent évoqué la rigidité du comportement spécifique. Ici, phase terminale de la parade sexuelle, juste avant l'accouplement, chez* **Drosophila melanogaster** *: la femelle faisant saillir son ovipositeur accroît l'excitation du mâle dont l'abdomen se recourbe en préalable à l'accouplement.*

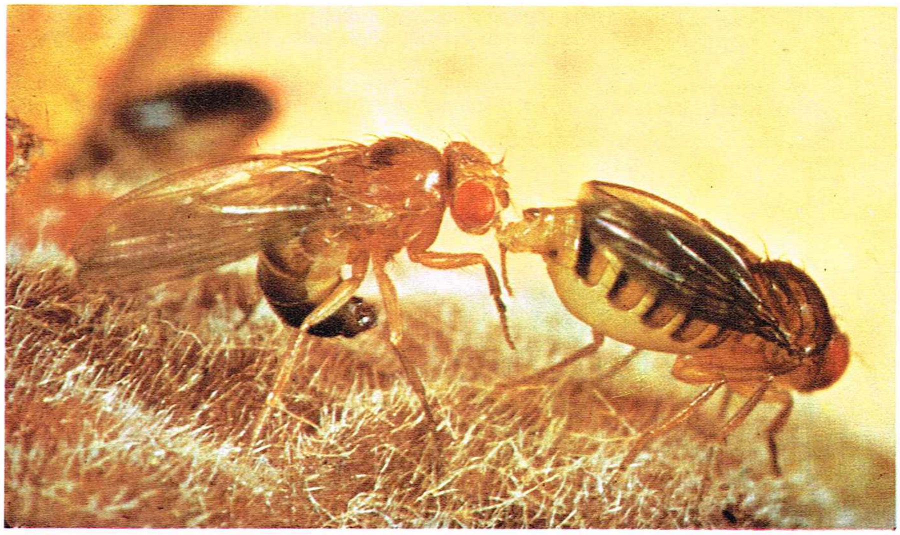

J. Six

J.P. Levistre

▲ ***Un pinson mâle; c'est son chant que le jeune au nid entend au début de sa vie.***

l'âge de quelques jours ne développent qu'un chant fort simple, ayant à peu près la longueur et le nombre de notes spécifiques, mais non divisé en phrases et sans fioriture. Cependant, de jeunes pinsons, pris également au nid très tôt après leur naissance, mais élevés en groupe, manifestent un chant plus élaboré (il est structuré en phrases, bien que les notes soient différentes de celles du chant d'un adulte libre) : cela tient à l'effet stimulant de la compétition de chant entre partenaires de même âge.

Des pinsons capturés juvéniles à l'automne et conservés en isolement jusqu'à leur maturité sexuelle expriment alors le chant typique. Il faut donc penser que le pinson « apprend » le chant spécifique et sa variante géographique bien avant de l'émettre lui-même. En effet, des pinsons élevés en isolement et soumis à l'audition d'enregistrements de chants de leur espèce sont capables d'émettre le chant spécifique ultérieurement. Il semble important d'insister ici sur la véritable dimension héréditaire de cette organisation des émissions sonores. De jeunes pinsons soumis à l'audition d'enregistrements de divers chants d'Oiseaux ne sont susceptibles d'imiter ultérieurement que des chants de pinson ou des chants ayant une structure de phrases voisine (ceux du pipit des arbres par exemple). Ils sont également susceptibles d'imiter un réarrangement des phrases du pinson. Mais lorsque le chant total est développé chez l'Oiseau, aucun autre chant ne peut être appris. Il y a donc chez cet Oiseau une *période privilégiée* pour l'apprentissage du chant, mais le phénomène est complexe puisqu'il est incorporé à toute la croissance de l'individu.

— Le jeune au nid entend (sans vocalise personnelle de ce type) les chants des mâles de la population (et particulièrement ceux de son père) dans une situation de totale dépendance alimentaire, thermique et de nettoyage vis-à-vis des parents.

— Le jeune en « sevrage » acquiert une indépendance et se distancie des parents tout en restant dans une population dont les chants se réduisent en forme et en intensité (régression saisonnière).

— Le juvénile vit en groupe saisonnier, automnal et hivernal, souvent interspécifique mais composé d'individus d'âges similaires émettant des cris de cohésion.

— Enfin, le juvénile à son premier printemps après l'éclosion commence, en groupe d'individus d'âges similaires, à organiser un premier chant qui régressera dans l'été pour faire progressivement place au printemps suivant, dans la situation géographique de compétition territoriale de mâle reproducteur, au chant totalement développé.

Cette ontogenèse ne va pas sans référence à tous les facteurs physiologiques propres à l'individu. Parmi ces facteurs, il faut en premier retenir le taux d'hormones sexuelles du mâle en maturation : Nottebohm montre qu'un pinson, castré avant sa première saison de reproduction et induit à chanter à 2 ans par injection de testostérone, est capable à ce moment d'apprentissage du chant, comme si les variations de la capacité d'incorporer le schéma entendu dans le milieu dépendaient pour partie des caractéristiques quantitatives des hormones circulantes.

Parmi les autres facteurs physiologiques importants dans l'apprentissage du chant, Nottebohm, après Konishi, démontre ce qui revient à l'auto-audition : les Oiseaux rendus sourds lorsque le chant est acquis conservent les émissions spécifiques ; les Oiseaux rendus sourds avant montrent des déficiences qui varient selon l'âge auquel l'opération est pratiquée. Ces déficiences vont de l'expression d'un chant rudimentaire à une véritable régression de l'aptitude à chanter.

Ainsi, la réalisation totale du schème spécifique chez un individu ne peut se référer, comme l'affirment les objectivistes, à un simple « blueprint », à une « image », à un « plan » contenu dans le matériel héréditaire ; il s'agit d'un ensemble interagissant constitué par ce matériel héréditaire et les interférences fonctionnelles qu'il entretient par l'intermédiaire de la morphogenèse et de la construction physiologique avec des milieux abiotiques et biotiques successifs. Comme le soulignent avec insistance Schneirla, E. Tobach et bien d'autres, *le matériel héréditaire et les milieux actuels de l'espèce pinson ont progressivement coadapté leurs manifestations au cours de l'évolution phylogénétique ; comme il a été indiqué plus haut, l'apparente fixité du schéma moteur spécifique de l'adulte observé dans les conditions naturelles ne doit en aucune façon laisser oublier les processus phylogénétiques et ontogénétiques en cause dans son expression du moment.*

L'étude totale de ces processus est même l'objet le plus enthousiasmant que l'on puisse donner à l'éthologie. Elle dépasse de beaucoup en intérêt la taxonomie comportementale dans laquelle s'est trop enfermé l'objectivisme de Lorenz ou d'Eibl Eibesfeldt.

▼ ***Le sonagramme du chant du pinson.***

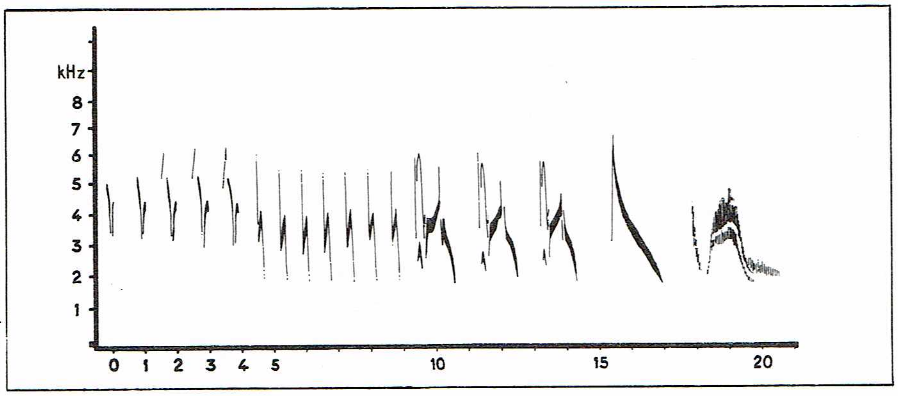

J.C. Guyomarc'h

G. Richard

▲ *L'expression motrice des comportements (ici, mante avant l'acte de capture) dépend du fonctionnement de réseaux nerveux plus ou moins complexes.*

Programmation et régulation du comportement

La référence faite ci-dessus à des mécanismes d'ordre nerveux et d'ordre endocrine sous-tendant l'expression motrice des comportements conduit à une analyse plus complète de ces mécanismes. Dans les deux cas, il faut envisager deux niveaux d'analyse expérimentale :

— la *programmation* du comportement ;

— les *systèmes de régulation,* qui ont un rôle d'ajustement de ce même comportement.

Bien entendu, il faut enfin analyser l'*intercorrélation* des mécanismes nerveux et des mécanismes endocrines (neuro-endocrinologie).

Programmation du comportement

● *Système nerveux central*

Von Holst et von Saint-Paul, en stimulant électriquement divers sites cérébraux chez des poules et en variant les sites et les intensités d'excitation, ont obtenu des comportements qui miment à peu près certains des actes moteurs exprimés par ces animaux : actes agressifs, actes sexuels, etc. Ces expériences et leurs résultats ont été utilisés par Tinbergen, en 1951, pour appuyer ses conceptions selon lesquelles les comportements instinctifs seraient, pour leur expression motrice, sous la dépendance d'un *système hiérarchisé de centres nerveux :* la stimulation électrique aurait pour effet d'exciter un centre nerveux de contrôle commun de coordination des éléments musculaires mis en jeu dans les comportements.

Cependant, la réalité est moins simple. Il est maintenant évident que des stimulations électriques ou des stimulations biochimiques des aires motrices du système nerveux central peuvent faire exprimer des mouvements partiels du corps. A certains égards, cette caractérisation topographique reste cependant dépendante pour ses résultats de l'intensité de la stimulation artificielle produite et de l'état préliminaire d'excitation des zones étudiées. Ainsi, Tadaaki-Sumi délimite sur la surface antérolatérale du cortex frontal du lapin une aire motrice étroite, correspondant à la déglutition, et une aire assez grande, correspondant à la mastication. Ces deux aires sont de forme irrégulière et non concentriques. La mastication rythmique est obtenue pour une fréquence optimale de 30 à 50 stimulations par seconde ; l'anesthésie profonde produit un rétrécissement topographique des aires et un amenuisement de l'intensité de leurs réponses (élévation des seuils, diminution des taux de réponse, augmentation des latences de réponse). Par contre, la stimulation corticale bilatérale facilite les réponses. Dans tous les cas, la déglutition est plus susceptible aux procédures expérimentales complémentaires que la mastication ; cependant, son expression est facilitée par une stimulation faible appliquée sur le nerf laryngé supérieur.

Par ailleurs, les physiologistes de l'école de Penfield ont depuis longtemps attiré l'attention sur le fait que le cortex moteur n'est pas le site d'organisation des mouvements volontaires : c'est plutôt une partie de la voie descendante, normalement activée par des programmes afférents en provenance d'autres régions cérébrales organisatrices dont l'importance de mise en cause est fonction du programme considéré. De tels contrôles se développent au cours de l'ontogenèse. Ainsi, le jeune rhésus perfectionne son habileté motrice pendant sa croissance ; on observe alors de plus en plus de connexions corticales établies avec les motoneurones, la distribution de type adulte étant atteinte seulement huit mois après la naissance. Le répertoire limité des mouvements du jeune Primate est probablement dépendant de cette absence relative de connexions corticomotrices. Réciproquement, une ablation d'aires motrices produit un moindre déficit et une récupération plus rapide chez le jeune que chez l'adulte.

L'étude des aires corticales motrices ne peut donc permettre, à elle seule, d'éclairer le problème de la programmation des schèmes moteurs de l'animal.

Hess et ses collaborateurs, Ranson et Magoun notamment, ont mis en évidence des structures diencéphaliques dont l'excitation électrique fait apparaître soit des actes dans lesquels on peut reconnaître au moins certaines composantes des actes du comportement agressif ou du comportement de fuite des Vertébrés, soit des expressions variables de l'intensité de divers comportements. Des excitations (ou des destructions) de diverses régions hypothalamiques permettent d'atteindre au moins partiellement l'expression de comportements aussi divers que ceux de manger, de boire, d'attaquer, de fuir, d'émettre des déchets, de s'accoupler et de dormir. Par exemple, Morgane a montré, en 1962, que la stimulation graduée de l'hypothalamus latéral du rat peut déterminer soit des mouvements de prises aux lèvres ou de léchage ou de mastication, soit l'ensemble de ces mouvements. Cependant, en 1965, contrairement à ses prédécesseurs, Stellar (sur la base d'une critique méthodologique et d'une étude approfondie des comportements) a affirmé qu'il ne faut pas voir, dans l'hypothalamus latéral et dans l'hypothalamus ventromédian, deux pôles d'un système de tout ou rien pour la commande du comportement de prise alimentaire, mais *une structure qui réorganise, recode et distribue les instructions reçues du système limbique et de ses connexions de contrôle néocorticales, assurant en particulier une modulation des comportements de défense, de fuite, d'alimentation, d'approche grâce aux informations qui lui parviennent de l'hippocampe et de l'amygdale.*

Il est ainsi très difficile de concevoir l'implication d'une structure précise unique dans la commande d'actes moteurs coordonnés, et *c'est plutôt vers l'étude de réseaux nerveux complexes que s'oriente la neuro-éthologie.* Ces réseaux seront sollicités dans toute leur complication lorsqu'il ne s'agira plus seulement d'analyser la commande d'un acte moteur, comme ceux de prendre un aliment aux

▶ ***La neuro-éthologie s'oriente vers l'étude de réseaux nerveux complexes en tenant compte du fait que la commande d'un acte moteur comme celui de prendre un aliment est incluse dans une séquence dont peuvent faire partie des activités locomotrices telles que le vol. Ici, un huîtrier-pie en vol.***

D. Richard

lèvres, de mastiquer, de saliver, d'avaler, mais lorsqu'il faudra analyser la *succession programmée* de ces activités (succession faute de laquelle le comportement alimentaire n'existera pas ou sera sans objet) et leur combinaison avec des éléments moteurs accompagnant presque obligatoirement le comportement alimentaire proprement dit (courir ou voler, tirer, effectuer des toilettes pré- ou postalimentaires, etc.) ainsi qu'avec d'autres éléments moteurs encore, appartenant à d'autres comportements.

Des expériences particulièrement significatives à ce sujet, et qui ouvrent de nouvelles perspectives, ont été réalisées sur l'opossum par Roberts et ses collaborateurs en 1967 : ces auteurs ont implanté des électrodes d'excitation en divers points de l'hypothalamus et étudié en cage les comportements des animaux ainsi appareillés mais libres de leurs mouvements. Les cages contenaient divers objets, ce qui permettait d'observer une gamme importante d'actes appartenant aux comportements de parade sexuelle, de morsure agressive de défense, d'alimentation, de toilettage, de bâillement, d'exploration et de fuite. Les actes manifestés après stimulation électrique sont semblables en forme à des actes moteurs naturels ; mais une stimulation définie peut produire diverses réponses en fonction des qualités de l'environnement ; celles de ces réponses qui nécessitent dans

▼ ***Représentation schématique d'un exemple de complexe de régulation neurophysiologique de comportements.***

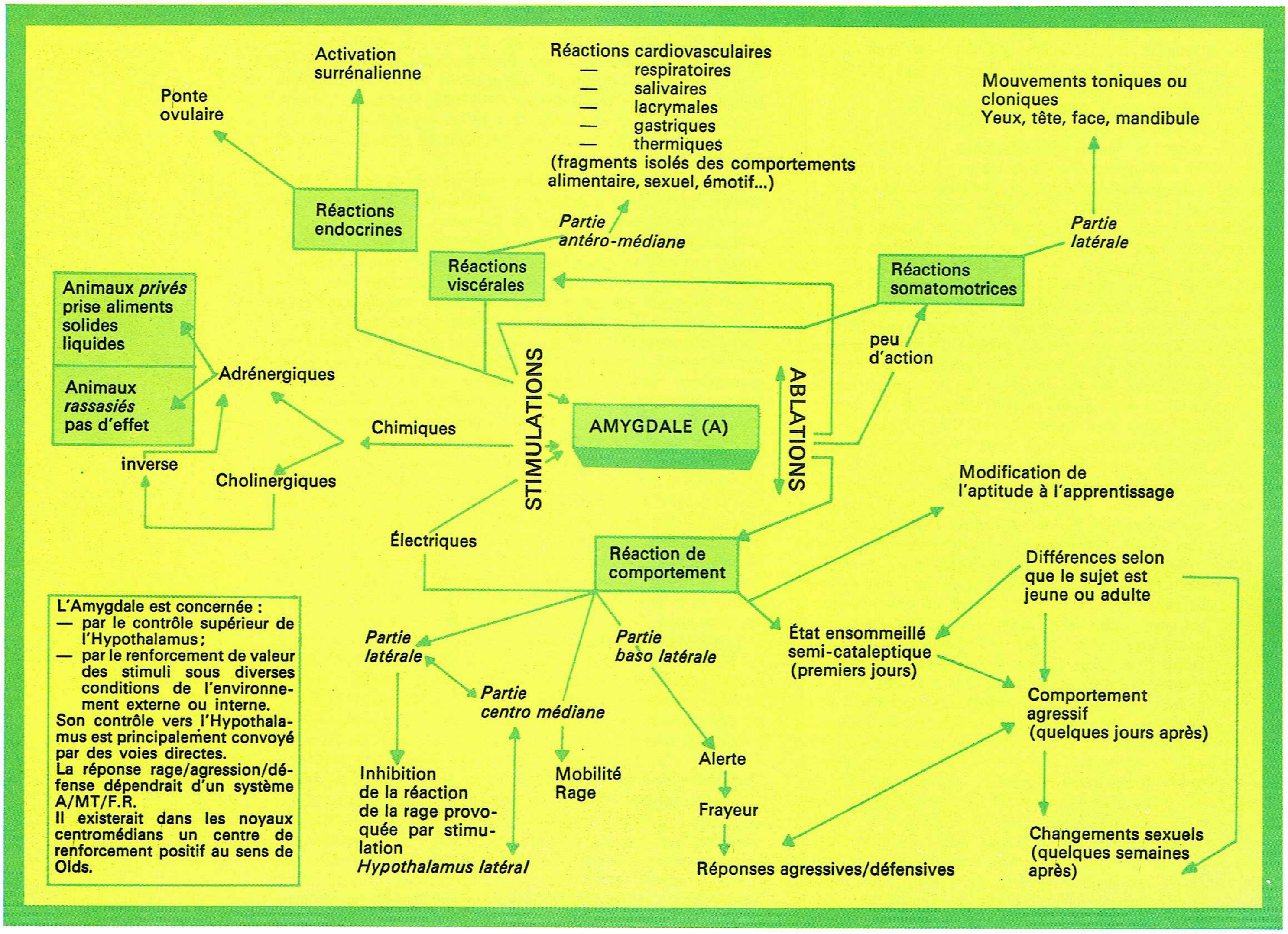

Richard Colin

l'environnement la présence d'objets vers lesquels elles sont dirigées ne s'expriment pas à la stimulation électrique utilisée si ces objets ne sont pas présents. Certaines réponses évoquées sont susceptibles de s'intégrer à d'autres comportements, non évoqués par la stimulation. Ces expériences mettent en relief la nécessité d'élargir le schéma de réseau nerveux évoqué plus haut, et de ne pas prendre en compte seulement des zones motrices spécialisées, dont l'effet est modulé par des zones concernées par le stockage d'informations sur l'environnement résultant d'expériences préliminaires réalisées dans le cadre naturel spécifique ou dans le cadre artificiel du laboratoire.

● *Milieu intérieur et hormones*

L'exemple du chant du pinson a servi à évoquer des modulations saisonnières de la capacité d'expression d'actes moteurs directement corrélés aux taux d'hormones sexuelles circulantes. Les activités de parade sexuelle et de copulation auraient pu apporter la même démonstration.

Il est maintenant classique d'affirmer que la castration d'un animal déprime ses capacités d'expression des comportements sexuels; en revanche, l'injection d'hormones sexuelles au castrat fait réapparaître ces capacités. Tous les physiologistes savent, en outre, que la sécrétion des hormones par les glandes périphériques (gonades, surrénales, mammaires, etc.) est sous la dépendance d'autres sécrétions hormonales propres à l'hypophyse (le lobe antérieur joue un rôle de premier plan à ce sujet), laquelle sécrète elle-même sous la commande de l'hypothalamus, qui se trouve lié anatomo-physiologiquement au plancher de l'encéphale. C'est donc, pour chaque hormone circulante, un ensemble cohérent d'organes (*axes* hypothalamo-hypophyso-gonadique, hypothalamo-hypophyso-surrénalien, etc.) qui est mis en cause. Il faut cependant se rendre compte de deux faits : il existe une certaine concentration anatomique des divers axes lorsqu'on se rapproche des régions céphaliques, mais une certaine indépendance fonctionnelle des cellules de chacun des axes dans les groupes cellulaires anatomiquement concentrés (l'hypophyse par exemple).

Cela dit, il faut souligner que, comme pour les réseaux nerveux, les problèmes de la commande endocrine des comportements sont très complexes.

— Chez le mâle de Mammifère, il est certain que la castration avant puberté suspend la mise en place du comportement sexuel; par contre, si la castration a été effectuée après la puberté, la copulation peut encore se produire pendant un certain temps après dépression totale du taux des hormones circulantes; puis, les capacités d'exprimer un comportement sexuel se réduisent en commençant par la suppression de la fin de la chaîne séquentielle. Plus on s'élève dans la série évolutive des Mammifères, et plus l'effet de la castration postpubertaire peut être faiblement apparent : alors que chez le rat, 33 % des sujets ne copulent plus après un mois et 45 % après deux mois, chez le chien, certains individus copulent encore après deux ans et chez le chimpanzé ou chez l'homme, il n'y a presque plus de perte de comportement. Toutefois, et c'est toujours ainsi que s'exprime l'effet de la suppression d'un des facteurs de l'équilibre animal/milieu, *la variabilité individuelle est devenue considérable,* d'autant plus d'ailleurs que le Vertébré étudié est plus évolué. Cette variabilité dans le cas présent peut être expliquée en grande partie par l'expérience accumulée par l'individu avant l'opération. A l'inverse, les réinjections d'hormones à des castrats font progresser la reconstruction de la réaction comportementale dans le sens de la séquence normale, aux variations individuelles près.

— En ce qui concerne les femelles de Mammifères, l'ablation ovarienne les rend inactives sexuellement, quelle que soit la place de l'opération par rapport à la puberté. Cependant, si la castration est effectuée pendant l'œstrus, le comportement sexuel persiste un certain temps à cause de la présence dans l'organisme de quantités résiduelles d'œstrogènes. Chez la femme, l'effet de l'ablation des ovaires n'est toutefois pas aussi complet, et, s'il y a diminution du désir sexuel, les comportements sont affectés de façon variable suivant les individus.

Il est utile de s'interroger sur la spécificité des hormones sexuelles vis-à-vis du sexe qui les produit en plus grande abondance. Dans la plupart des cas, l'injection d'androgènes à des castrats mâles ou femelles conduit à faire exprimer des comportements mâles, alors que l'injection d'œstrogènes les conduit à faire exprimer des comportements femelles. Cependant, il faut moins d'androgènes à un mâle qu'à une femelle pour obtenir ce résultat, comme si les seuils de réponse comportementale mâle à un androgène étaient moins élevés chez le mâle que chez la femelle. Si, par contre, on s'adresse à des animaux entiers et non à des castrats, la modification du comportement est beaucoup moins nette. Beach, en 1948, et Yaschine, en 1967, ont même montré que, dans certaines circonstances, les œstrogènes peuvent activer le comportement mâle chez les mâles ou les femelles, comme elles activent le comportement femelle normal chez les femelles; de même, les androgènes peuvent activer certains comportements d'une femelle : en effet, une femelle de rhésus traitée à la testostérone augmente le nombre de ses comportements d'initiation à l'accouplement, sans cependant devenir plus attractive pour le mâle et sans que la fréquence des copulations augmente.

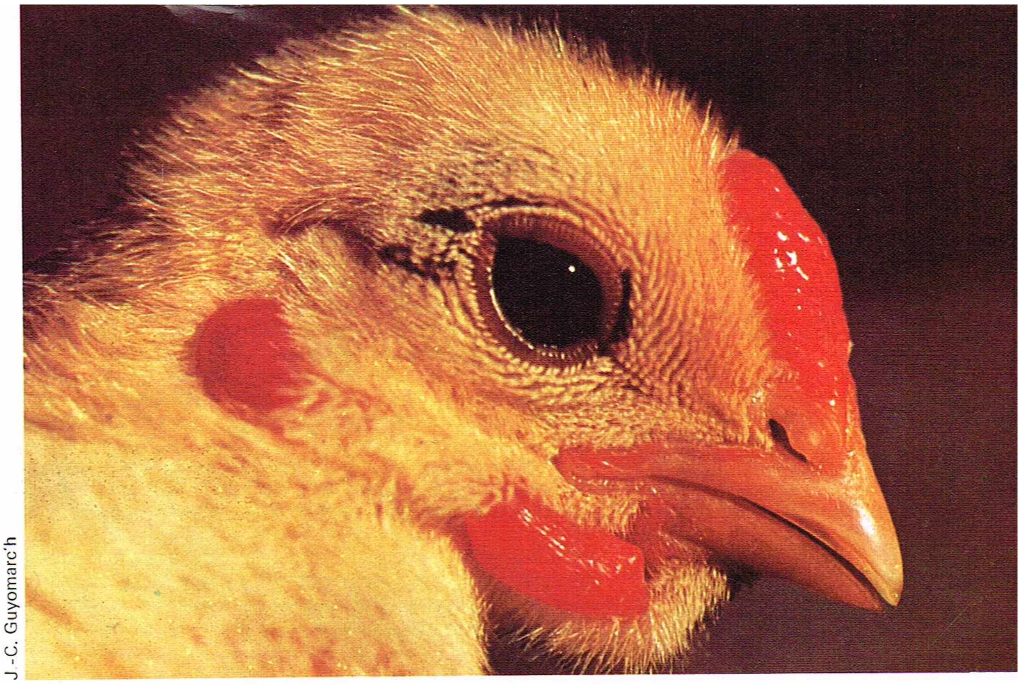
J.-C. Guyomarc'h

▲ **La castration d'un animal déprime l'expression de ses caractères sexuels (comportement, caractères secondaires). En revanche, l'injection d'androgènes renforce cette expression. Pratiquée chez un jeune poussin, une telle injection cause la turgescence de la crête et des barbillons.**

S'il est possible de réactiver les castrats par injection d'hormones, il est également possible de faire apparaître les comportements sexuels chez des animaux qui n'y sont pas naturellement préparés : des sujets trop jeunes et immatures, des sujets dans leur phase saisonnière de repos, ou encore des sujets dans leur phase de sénilité.

On peut donc penser, et ceci est du plus haut intérêt, qu'*une partie au moins des schèmes moteurs du comportement sexuel existent très tôt chez l'individu, qu'ils sont susceptibles de perfectionnement par la répétition, et qu'ils nécessitent pour s'exprimer qu'un certain taux d'hormones soit présent dans le milieu intérieur de l'organisme.*

Il faut y ajouter que *le mâle comme la femelle possèdent les schèmes moteurs sexuels des deux sexes : un seul des groupes de schèmes est activé dans le cadre naturel de la détermination du sexe, mais après castration (donc retrait des hormones correspondantes) les deux types de schèmes peuvent s'exprimer, en fonction toutefois de l'expérience accumulée préalablement par l'animal.* Cela peut fournir quelques éléments d'explication de certains au moins des cas décrits d'homosexualité. Bien entendu, chez l'homme, il faut considérer que les comportements sont toujours fortement dépendants des conditions de l'environnement dans lequel se sont déroulées les expériences infantiles et juvéniles. Comme cela fut le cas plus haut, il est impossible d'expliquer la causalité des comportements en faisant appel à un ensemble trop restreint de facteurs et surtout en négligeant la référence à l'histoire de l'individu. Il faut ajouter enfin à ce qui vient d'être dit que les *séquences de comportement deviennent plus stables, précises et caractéristiques au fur et à mesure de leur déroulement. Dans une série d'actes, les premiers peuvent être peu marqués par une finalité spécifique, alors que les derniers ont une expression non équivoque.* Ainsi, la seule référence aux actes du début de la séquence sexuelle est insuffisante pour rapporter à l'un ou à l'autre sexe les actes observés.

S'il existe donc au moins une certaine spécificité des hormones sexuelles, on ne peut s'empêcher d'évoquer des suppléances possibles d'action. Une voie d'approche des mécanismes de ces suppléances est incluse dans les recherches de Rouger (1974) sur l'expression des

comportements sexuels chez les Bovidés domestiques. Cet auteur constate de longs délais entre les maximums de concentration de testostérone dans le sang et les maximums d'expression du comportement sexuel. Mieux, au moment où le comportement sexuel est important, le taux de testostérone est devenu très faible. On peut donc penser que la testostérone n'agit pas elle-même sur les mécanismes moteurs du comportement sexuel, mais qu'elle met en marche des processus biologiques (sa transformation en composés actifs ?), qui seraient plus directement impliqués. L'injection de divers métabolites de la testostérone affecte différemment les actes moteurs de la séquence sexuelle ou de ses corrélats (activité générale, flairage, chevauchement, saillie, comportement alimentaire, etc.). Cela, joint au fait que ces produits de métabolisation peuvent se retrouver dans diverses chaînes de stéroïdes, permet de comprendre que certains animaux castrés depuis longtemps sont, à un moment donné, susceptibles de manifester à nouveau des comportements sexuels.

▼ *Ci-dessous, à gauche, chez les Bovidés domestiques, Rouger a constaté qu'au moment où le comportement sexuel est important (ici, une monte de taureau), le taux de testostérone est devenu très faible.*

trée au nid) sont sous la dépendance successive complexe d'hormones complémentaires : hormones hypophysaires, thyroïdiennes, gonadiques; ces hormones participent à la commande d'aiguillage des comportements.

A ce titre, les interactions mère/jeune chez le Mammifère sont fort intéressantes à analyser, l'espèce humaine ne pouvant se comprendre en dehors de la référence à ce schème. Le comportement spécifique de succion du jeune (progressivement élaboré en coordination pendant la vie fœtale) commande, par la voie hypothalamique de la mère, un réflexe hormonal qui aboutit à la sécrétion d'ocytocine par le lobe postérieur de l'hypophyse. Cette hormone déclenche à son tour le réflexe d'éjection du lait (qui passe alors de la glande mammaire proprement dite au mamelon) en même temps qu'elle stimule la sécrétion de la prolactine par le lobe antérieur de l'hypophyse. La prolactine, qui inhibe probablement la sécrétion des œstrogènes par l'ovaire (et contribue donc à suspendre les cycles de réceptivité sexuelle de la femelle), active aussi la production de lait par la glande mammaire. Le comportement de succion est renforcé en qualité discriminative et en quantité par la valeur alimentaire du lait...

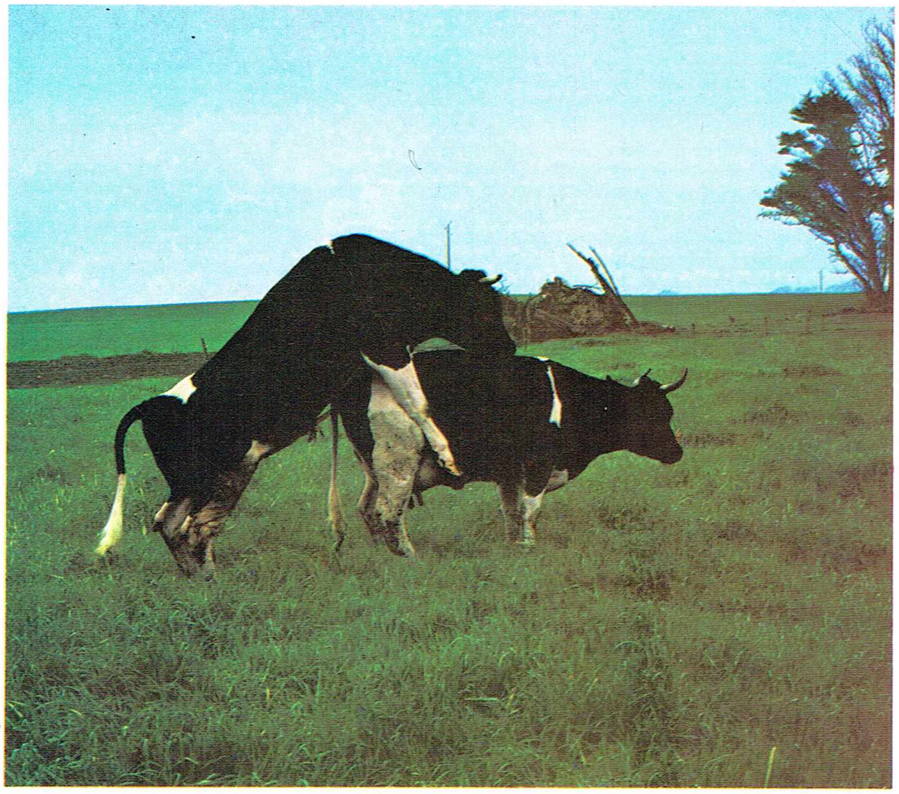

Y. Rouger

C. Bevilacqua

▲ *Chez les Mammifères, ci-dessus, à droite, une femelle de babouin et son petit, les interactions mère/jeune sont sous la dépendance successive complexe d'hormones qui participent à la commande d'aiguillage des comportements.*

Successions et synergies d'actions de diverses hormones

Brockway a montré qu'une injection d'œstradiol (avec ou sans progestérone) stimule le comportement orienté d'exploration du lieu de ponte chez les mâles comme chez les femelles de perruches (un peu moins facilement chez les mâles), que ces femelles soient vierges ou expérimentées (un peu moins facilement chez les vierges). En revanche, de grandes quantités de testostérone peuvent l'induire chez des femelles vierges, mais ce comportement est alors inorganisé, erratique.

La progestérone a un effet positif vis-à-vis du départ de l'incubation chez la tourterelle turque puisque, s'il existe un nid et des œufs dans la cage, l'injection de cette hormone induit le début de la couvaison (Lehrman). Lorsque cet effet est obtenu, c'est la prolactine qui maintient les comportements d'incubation, puis de réchauffement et de nourrissage des jeunes. Mais ce rôle de la prolactine ne semble pas direct : elle agirait plutôt par inhibition des sécrétions hormonales des gonades, ce qui laisserait aux stimuli provenant de la présence des jeunes la possibilité d'atteindre un seuil de commande suffisant pour maintenir le comportement parental normal (l'injection d'androgènes ou d'œstrogènes à des poules couveuses inhibe rapidement la couvaison). De la même manière, chez les Mammifères, la construction du nid et les soins généraux aux jeunes (réchauffement, regroupement, rentrée au nid) sont sous la dépendance successive complexe d'hormones complémentaires.

Systèmes de régulation du comportement

● *Régulation nerveuse*

L'expression d'un acte ne relève pas du seul problème de la commande de cet acte, que celle-ci soit d'ordre nerveux ou d'ordre endocrine. Il est nécessaire d'établir ici quelques-uns au moins des éléments de sa régulation.

Dès 1895, Mott et Sherrington, après avoir désafférenté le membre antérieur d'un singe par section des racines dorsales de la moelle, montraient que la patte n'était plus utilisée convenablement. La conclusion de ce type d'expérience est qu'un feed-back provenant de l'activité d'un membre est essentiel à la réalisation correcte des mouvements de ce membre. Cependant, on a pu montrer qu'un réapprentissage visuel peut être effectué sous contrôle visuel chez un singe ainsi opéré, ce qui laisse à penser que la régulation des activités motrices fines est réellement un phénomène en « boucle » dans lequel toutes les possibilités de la programmation motrice centrale et celles du retour d'informations doivent être intégrées. Tous les traités modernes de physiologie accordent maintenant la place qui leur revient à ces divers types de régulation (un de ces types, largement connu par de nombreux travaux dont ceux de Paillard, est la

boucle γ caractéristique du fonctionnement des muscles striés des Vertébrés).

Ce type de feed-back, relativement simple, ne peut pas rendre compte de toutes les régulations. Von Holst et Mittelstaedt, dans leur *théorie de la réafférence,* ont voulu modéliser des étapes plus complexes. Dans le cadre de cette théorie, un « ordre » d'expression d'un programme moteur lancé par les réseaux nerveux laisserait au niveau de ces réseaux une « trace fonctionnelle » à laquelle se comparerait l' « image » du mouvement ou de l'acte en cours de réalisation, « image » qui peut se concevoir en termes nerveux grâce aux informations intégrées venant des propriocepteurs. Une identité de l' « ordre » et de l' « image » annulerait l'ordre ; une dissimilarité modifierait l'ordre dans le sens d'une augmentation ou d'une diminution jusqu'à similitude avec l'image. Cette hypothèse, d'inspiration cybernétique, se révèle fort utile comme modèle explicatif, bien qu'on ne connaisse pas sous quelle forme se réalise effectivement le rôle comparateur du système nerveux.

Chez des mâles, diverses régions préoptiques et hypothalamiques antérieures sont sensibles à la testostérone ; soulignons, en outre, que la spécificité d'action des œstrogènes et des androgènes vis-à-vis de la production de comportements femelle ou mâle n'est pas totale.

On sait actuellement peu de chose sur les mécanismes par lesquels les neurones de quelques sites privilégiés sont capables de transformer l'hormone en ordre nerveux propagé jusqu'aux réseaux de commandes motrices ; on ne sait guère mieux comment des hormones peuvent se potentialiser mutuellement. Si, chez les femelles de Vertébrés en particulier, œstrogène, progestérone, et prolactine combinent certainement leurs actions, cette combinaison réalisée expérimentalement n'a pas toujours les mêmes effets sur des espèces différentes, et il est très difficile de conclure.

A peu près tous les exemples analysés ci-dessus au niveau de la commande des comportements ont été choisis parmi les Vertébrés. Si les connaissances actuelles dans ce domaine sont moins abondantes pour les Invertébrés,

▼ A gauche, le mâle d'une Araignée Salticide* (Corythalia xanthropa) *utilisant diverses postures (A, B, oscillations du corps ; C, attitude de menace ; D, E, soulèvement des pattes antérieures et abaissement des chélicères et des pédipalpes) dans sa parade sexuelle devant une femelle lorsque sa maturité génitale est totale. A droite, schéma simplifié de la régulation neuro-endocrine des cycles ovariens, de la gestation et de la lactation chez la femelle de Mammifère. L'ensemble agit sur les comportements.

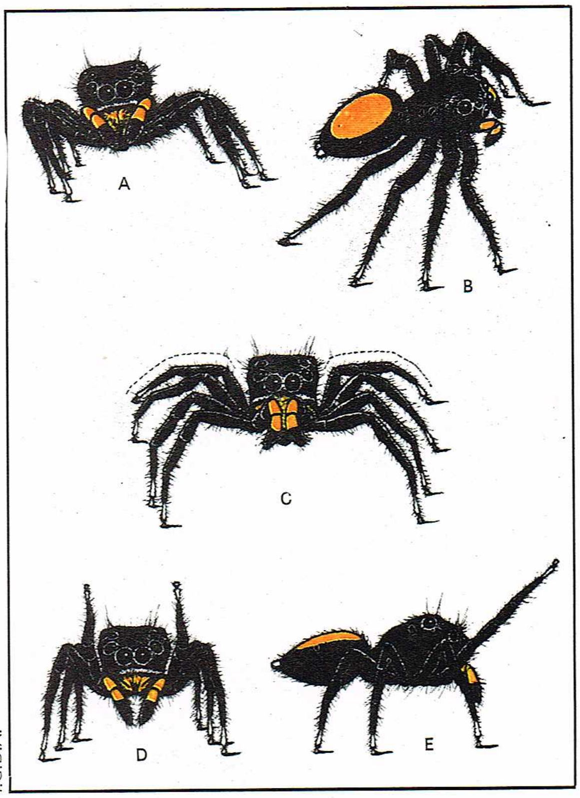

I.G.D.A.

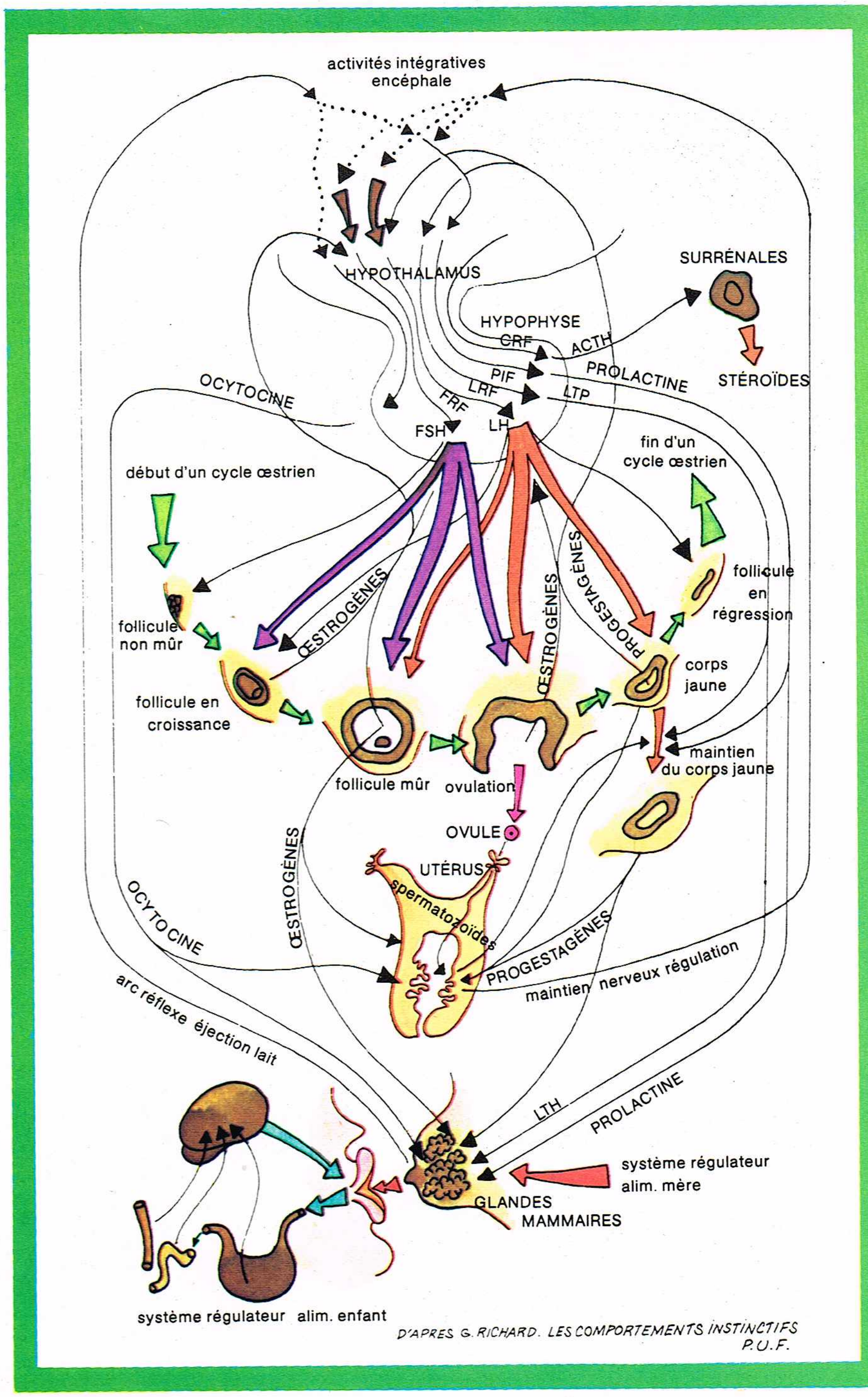

redessiné Richard Colin

● *Intercorrélation neuro-endocrine*

Le système nerveux central est susceptible d'agir sur les zones hypothalamiques où se trouvent émis les neurosécrétats qui agiront sur les axes hypothalamo-hypophysoglandulaires. En revanche, les hormones sécrétées aux divers étages peuvent agir soit sur les mécanismes nerveux périphériques (moelle, organes des sens), soit sur les centres supérieurs.

Harris, en 1958, a implanté des cristaux d'œstrogènes dans l'hypothalamus postérieur de chattes au repos sexuel ; ces chattes ont développé des comportements sexuels (chaleur comportementale) non accompagnés de transformations physiologiques (repos ovarien). Placés sous la peau ou dans une autre région de l'encéphale, les cristaux n'induisent pas de comportement sexuel. L'implantation d'œstradiol dans les régions préoptiques médiobasales et dans les régions hypothalamiques antérieures de rattes au repos a les mêmes effets (Lisk, 1962). Il s'agit bien, sur ces structures, d'un effet spécifique de l'hormone, puisque diverses autres implantations (même de progestérone) ne produisent pas les mêmes résultats (Palka, 1960). Flerko, en 1962, en greffant des ovaires dans l'hypothalamus antérieur de rattes, a montré que même les sécrétions biologiques sont efficaces et que diverses structures sous-corticales se révèlent sensibles aux œstrogènes à la manière de chémorécepteurs.

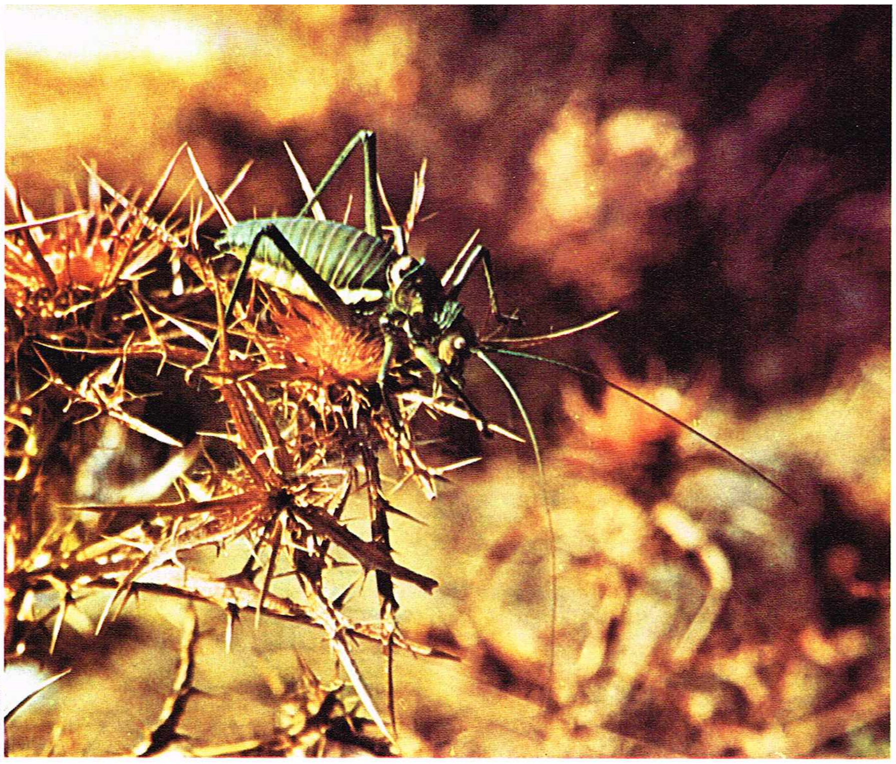

D. Richard

▲ *Les travaux de l'école Huber prouvent qu'il est possible, par excitation électrique de centres nerveux, de mimer des comportements comme ceux du chant des Orthoptères. Ici, une éphippigère (Orthoptère) chantant.*

il n'en reste pas moins que les recherches des entomologistes vont dans le même sens que celles dont il vient d'être question. Les travaux de l'école Huber prouvent qu'il est possible, par excitation électrique de centres nerveux, de mimer des comportements comme ceux du chant des Orthoptères; que l'excitation électrique peut se combiner avec l'excitation biologique; que les « centres » impliqués ne sont pas spécifiques d'un comportement mais sont inclus dans des réseaux; que des mécanismes rétroagissants interviennent dans la régulation des comportements; que des mécanismes endocrines règlent la mise en place de comportements; que des feed-back endocrines ou humoraux jouent un rôle régulateur par action dans les réseaux nerveux.

L'environnement

Dans tout ce qui précède, l'observation des comportements de l'animal a été effectuée avec une volonté de recherche des caractérisations possibles de ces comportements dans un but descriptif, comparatif et évolutif. Les moyens neuro-endocrines de la commande et de la coordination ont été évoqués, mais nous les avons reproduits un peu comme l'homme primitif représentant des êtres vivants sur les parois de sa caverne : sans tenir compte de l'environnement dans lequel ils vivaient. Il faut dire que cette tendance s'est longtemps maintenue :

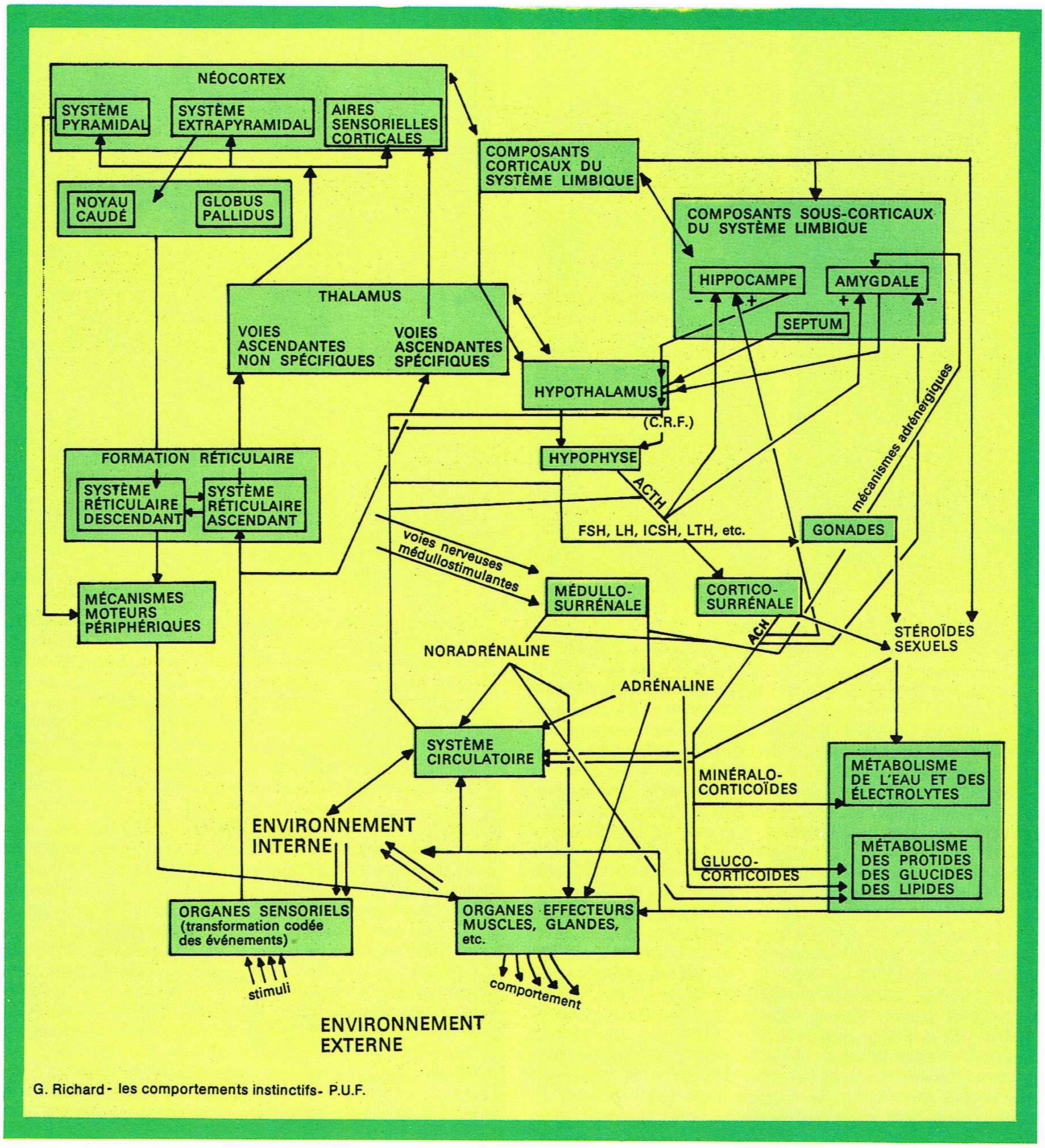

▶ *Représentation schématique des principales voies neuro-endocrines impliquées dans la régulation du comportement interindividuel des Vertébrés.*

« On ne voyait jadis dans l'environnement rien de plus que le lieu dans lequel les animaux et les hommes agissaient. Certes, il pouvait arriver qu'ils agissent de façon différente dans des milieux différents, mais non parce que les milieux étaient différents. L'environnement était là comme une scène indispensable, propre peut-être à favoriser ou à entraver le comportement, mais il n'en déterminait ni la fréquence ni la forme. » (Skinner)

Rapports avec la fréquence des comportements

Une chose est certaine pour qui observe des êtres vivants : c'est la récurrence de leurs activités. Les comportements réapparaissent régulièrement dans le temps et généralement en simultanéité de phénomènes, eux-mêmes cycliques, de l'environnement : nycthémère, saisons, etc.

C'est ainsi que le plancton monte le soir vers la surface de la mer, stationne vers minuit de manière passive, puis commence à descendre au matin pour atteindre, avant la fin de la matinée, un palier de stationnement spécifique d'où les animaux repartiront le soir.

L'abeille se retrouve aux sources de nourriture à la même heure chaque jour. Certains moustiques montrent un pic d'activité au lever et un autre au coucher du soleil ; ces heures sont spécifiques : les nuages de moustiques étudiés par Corbet en forêt équatoriale se succèdent par populations monospécifiques de manière très régulière.

Beaucoup de Poissons pondent au crépuscule, d'autres au petit jour ; le grunion des Américains pond, lui, à une période bien déterminée des phases de la lune ; c'est aussi le cas de certains Vers marins néréidiens (palolo).

Les Oiseaux de nos pays pondent chaque printemps, et beaucoup d'espèces ont hiverné sous les tropiques.

Cependant, une étude très précise montre qu'il faut se référer à une synergie de manifestation de facteurs abiotiques dans l'environnement plutôt qu'à un seul facteur : les relevés de chasses nocturnes montrent bien que les vols estivaux de reproduction des Insectes aquatiques, des Lépidoptères, de certains Coléoptères ont lieu à des périodes caractérisables par le complexe des lunaisons, des alternances nycthémérales de lumière, de température et d'hygrométrie, des variations complexes de l'ionisation et de la pression atmosphérique.

En général, il faut souligner que les animaux d'une même espèce montrent à peu près les mêmes caractéristiques de corrélation de leurs comportements avec les facteurs de l'environnement. Mais les facteurs de l'environnement terrestre sont variables selon les lieux géographiques où on les observe, et c'est à l'intérieur des populations dans des biocénoses particulières que se remarquent les meilleures coordinations temporelles des individus. Là aussi, la pression sélective de l'évolution n'a maintenu que les animaux capables des coordinations temporelles qui permettaient la rencontre des sexes, la rencontre des prédateurs et des proies, etc.

Des cycles de comportement peuvent justement, par l'intermédiaire et au-delà des individus, affecter des populations entières : un cycle de quatre ans affecte les lemmings dans la toundra ; un cycle de deux ans affecte les lapins des régions septentrionales nord-américaines. Ces cycles sont marqués par des *émigrations,* qui suivent des pullulations d'animaux et se présentent alors comme des « soupapes » éco-éthologiques.

Il est manifeste, lorsqu'on observe la corrélation entre les comportements et les variations des facteurs abiotiques de l'environnement, que certains éléments de cet environnement semblent jouer préférentiellement le rôle de synchronisateurs : par exemple, le lever du jour et la tombée de la nuit. Mais pour un même animal, cette synchronisation peut être variable dans le cycle saisonnier : pour le campagnol roux, étudié par Durup et Saint-Girons, la remise à l'heure, matinale en été, s'effectue immédiatement après le coucher du soleil en hiver. Si le problème de savoir où se trouvent les « horloges » n'est pas totalement résolu, il est certain cependant, comme précédemment, que l'expression d'une activité rythmique liée aux variations du milieu ne peut être qu'une synthèse complexe d'actions et de réactions enchaînées. A ce sujet, les problèmes ne sont pas simples : le géotrupe présente une activité rythmique bimodale en lumière alternante, unimodale en lumière continue ; les chenilles d'*Halisidota* élevées au laboratoire sous un éclairement rythmique 12 h/12 h sont actives le jour à 5 °C, la nuit à 23 °C, le jour et la nuit à 10 °C. Beaucoup d'Insectes aquatiques nagent le jour et volent la nuit.

Un élément intéressant est fourni par l'étude de l'ontogenèse. Chez la plupart des Vertébrés, le jeune est un être vivant polyphasique. De courtes phases d'activités succèdent rapidement à de courtes phases de repos, les critères du passage des unes aux autres étant parfois assez flous comme l'ont signalé les psychologues de l'enfant (Gesell, Piaget). Ces alternances de phases semblent liées aux événements métaboliques de l'organisme et non pas aux événements du milieu extérieur, encore que la mère ait pu donner pendant la gestation au jeune une certaine expérience de certains au moins de ses rythmes propres réglés directement sur l'environnement. Progressivement, s'établit un système rythmique d'activité similaire à celui de l'adulte. De jeunes hamsters de 10 jours (encore au nid) présentent une activité locomotrice qui s'étend sur tout le jour et sur toute la nuit de l'animal. Elle s'exprime par des bouffées successives, séparées par des moments de repos d'un quart d'heure environ : le rythme est polyphasique, et le nombre des déplacements diurnes dépasse parfois celui des déplacements nocturnes. Une brusque augmentation de l'activité sans changement de répartition se manifeste les 14e et 15e jours (ouverture des yeux). C'est entre le 17e et le 21e jour que, sans transition nette, l'activité nocturne croît fortement, alors que l'activité diurne croît légèrement, établissant le schéma du rythme diphasique de l'adulte.

Il en est de même chez l'enfant humain, d'abord polyphasique, qui devient monophasique en parallèle avec le développement de la corticalité. Buhler et Helzer constatent durant la première année, chez l'enfant occidental, une diminution du nombre des périodes de sommeil ininterrompues : de 12 à 6, et une augmentation de leur durée moyenne sans qu'il y ait diminution de la durée totale du sommeil. En même temps, s'observe une tendance au regroupement des périodes de repos pendant la phase obscure du nycthémère. Une périodicité jour/nuit indépendante des heures de repos commence à se manifester au cours de la 2e semaine de la vie. Le développement du cycle veille/sommeil devient apparent de la 4e à la 18e semaine ; dans le groupe de 5 à 8 mois, le rythme est bien établi. Durant la seconde année, la répartition des repas n'a plus d'influence. Une analyse ontogénétique plus fine de ces problèmes permet de montrer qu'en réalité, la rythmicité des comportements de l'adulte établie sous l'influence des actions de l'environnement n'efface pas totalement les rythmicités du jeune. Elle permet également de montrer comment ces comportements du jeune sont en continuité avec ceux de l'embryon. De plus, et nous retrouvons ici encore des problèmes déjà évoqués à propos du programme génétique, même les rythmes dits « endogènes » manifestent une certaine plasticité d'expression qui les prépare à s'accorder sur les effets de l'environnement.

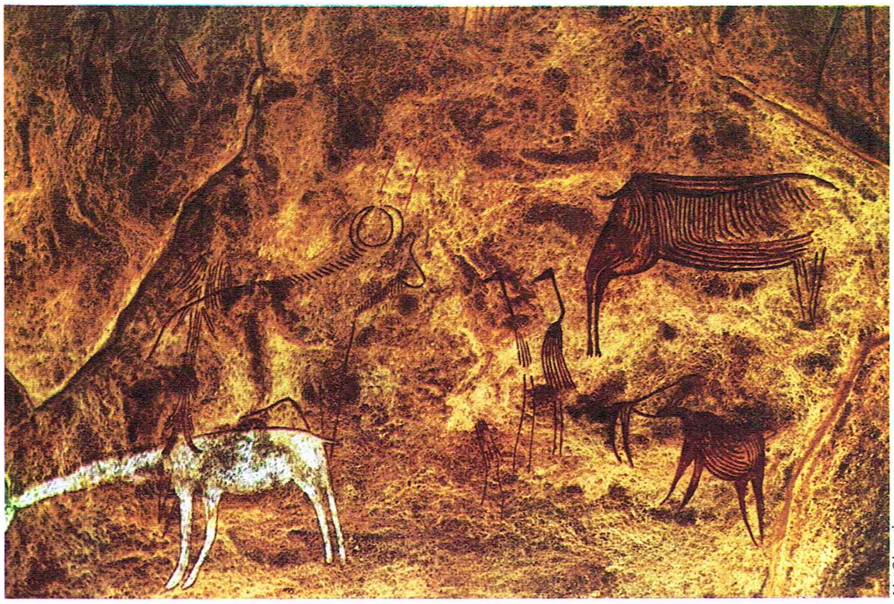

N. Cirani

▲ ***Les représentations graphiques et picturales sur les parois des cavernes (ici, en Tanzanie) montrent que l'homme primitif représentait des êtres vivants sans tenir compte de l'environnement où ils vivaient.***

J.-C. Guyomarc'h

▲ *La prise d'orientation dans l'environnement de ce jeune poussin est provoquée par l'émission sonore de la poule couveuse.*

Il faut probablement chercher les mécanismes d'interaction avec l'environnement au niveau des régulations neuro-endocrines des comportements. Chez de nombreux Poissons, Oiseaux et Mammifères, l'accroissement de la longueur des jours à la fin de l'hiver et au début du printemps est suivi d'un accroissement pondéral et fonctionnel des gonades, lequel prépare la mise en place successive des comportements migratoire, territorial, sexuel et parental.

Baggerman a montré, en 1957, que des épinoches capturées en fin de saison estivale et soumises à une périodicité stable d'éclairement de 8 h de jour et de 16 h de nuit, à 20 °C, ne rentrent jamais en phase reproductrice, même si l'on maintient ce régime pendant 2 ans. Par contre, l'exposition à une longue photopériode (16 h de jour, 8 h de nuit, à la même température) leur permet d'atteindre la maturité sexuelle en 2 à 4 semaines. Chez les Poissons et les Oiseaux, d'autres facteurs de l'environnement que la lumière peuvent jouer : la température, la présence de matériel de nidification, la présence du partenaire sexuel ou du jeune jouent un rôle certain dans la mise en route et le fonctionnement de diverses fonctions hormonales, et partant, de divers comportements. Ces diverses actions transitent par l'intermédiaire des organes visuels ou des organes olfactifs : l'odeur de la femelle en œstrus est un puissant dynamisant sexuel pour les mâles de Mammifères; de la même manière, des émissions de substances dans le milieu extérieur (phéromones) jouent souvent un rôle très important dans la dynamique sexuelle de beaucoup d'espèces. A l'inverse, l'odeur d'un mâle étranger parvenant à une femelle de souris qui vient d'être fécondée par un mâle de son groupe peut bloquer instantanément l'implantation de l'ovule (Bruce et Parrot, 1960), comme peuvent le faire divers stimuli de l'environnement.

Ainsi, des actions très diverses de l'environnement, recueillies par les divers récepteurs de l'animal et transférées jusqu'aux effecteurs endocrines par des voies qui ne sont pas toujours anatomiquement bien connues dans leur détail, permettent une organisation progressive des comportements. Ces actions, depuis longtemps distinguées par les éthologistes, ont reçu le nom d'*effet primaire,* ou *primordial (priming effect)*. En réalité, elles préparent l'organisme à l'action; elles lient ses niveaux d'activation aux rythmes et aux cycles de l'environnement, et, comme elles subissent à leur tour la rétroaction des comportements qu'elles ont permis, l'ensemble reste caractéristique d'une dynamique fort précise.

▼ *L'émission d'odeurs ou de substances chimiques joue un rôle très important dans la dynamique sexuelle de beaucoup d'espèces; ainsi l'odeur de la femelle en œstrus est un puissant dynamisant sexuel pour ce mâle de cercopithèque.*

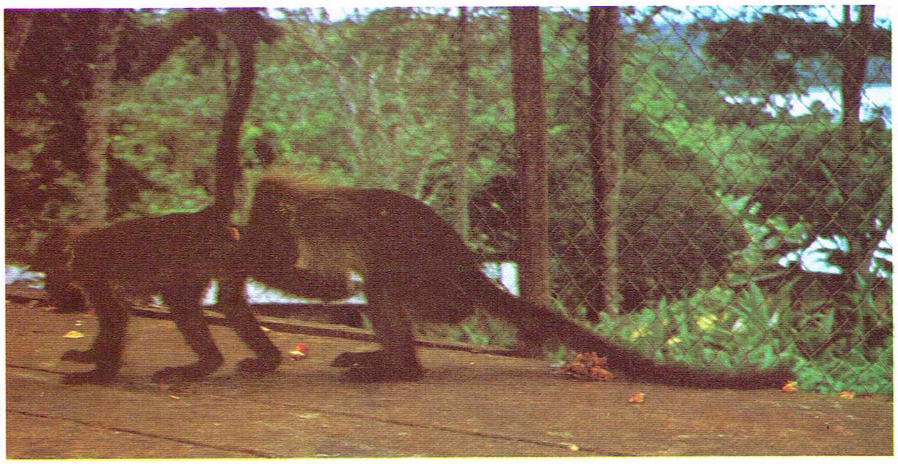

A. Gautier

Rapports avec la forme des comportements

● *Orientation du comportement*

Un des aspects fondamentaux de cette forme réside dans le sens du vecteur qui lie un événement de l'environnement à l'animal qui se comporte, dans cet environnement, en corrélation temporelle avec l'événement considéré. Il était tentant, au siècle de l'interprétation mécaniste, de considérer que ce qui est fondamental est primitif; ce piège, dans lequel est tombée la théorie des tropismes, a fait interpréter l'orientation (et particulièrement l'orientation vers...) comme un mouvement automatique, irrémédiable, uniquement lié à des variations du tonus musculaire en réponse aux variations de la dissymétrie d'excitation des récepteurs d'un animal à symétrie bilatérale.

En réalité, ce phénomène d'orientation est une dimension incluse à tous les comportements, comme l'a bien souligné Lorenz *(Taxiskomponente)*. Le prédateur s'oriente vis-à-vis de sa proie, qui s'oriente elle aussi vis-à-vis du prédateur; les partenaires sexuels s'orientent l'un vis-à-vis de l'autre; les combattants ne sont pas répartis au hasard l'un par rapport à l'autre; la poule qui promène des poussins, la guêpe qui creuse un nid dans le sol, l'animal qui se toilette, celui qui regagne son gîte, tous effectuent des mouvements qui expriment des orientations préférentielles, souvent très stables, dans leurs modalités d'expression. C'est cette stabilité qui fait que l'animal sauvage n'utilise pas toute l'aire dans laquelle il s'établit, mais plutôt, comme l'a fait remarquer Hediger, certains points préférentiels à des moments qui sont toujours les mêmes (*système espace-temps* de l'exploitation du territoire). Mais il faut préciser ce que sont les facteurs permettant la prise d'orientation dans l'environnement et leur rôle dans la mise en place et le maintien des comportements.

Une première remarque s'impose. Elle a été bien formulée par Verheijen (1960), qui met l'accent sur l'hétérogénéité de la distribution angulaire des intensités d'un même facteur autour d'un animal dans la nature. Si l'on assimile l'animal à un point de l'espace, qu'on mesure la luminosité autour de lui dans toutes les directions puis qu'on figure chaque mesure par un vecteur, on obtient (pour un moment donné), en joignant les extrémités des vecteurs, une surface complexe, irrégulière, fonction de l'encombrement du milieu, des réflexions possibles, des couleurs des supports, etc. Verheijen désigne du nom de « pomme de terre » cette surface complexe. Si l'on se place d'un point de vue éco-éthologique intégré, on doit penser que la « pomme de terre » d'un moment donné change aux moments suivants (le passage d'un nuage devant le soleil diminue plus fortement l'intensité lumineuse directe que la réfléchie); on doit aussi penser que l'animal n'est que rarement assimilable à un point, même pour l'observateur humain, et que cela distord considérablement la surface de la « pomme de terre »; enfin, il faut envisager que chaque animal est simultanément enfermé dans le milieu par plusieurs « pommes de terre ». Si l'on ajoute à cela que certains des facteurs physico-chimiques susceptibles de provoquer des réponses de placement ou d'orientation sont des facteurs à gradients (facteurs chimiques affectant les récepteurs de type olfactif ou gustatif), d'autres des facteurs à directivité stricte (courants électriques, courants aériens, courants d'eau), d'autres enfin mixtes (lumière, température, tourbillons d'air ou d'eau, etc.), on complique considérablement les appréciations de causalités de comportements, mais on se rapproche du réel.

L'école de Perttunen a montré expérimentalement qu'un Crustacé comme la ligie vit normalement dans les crevasses de rochers battus par la mer, mais sort des anfractuosités sous l'effet combiné de la lumière (phototropisme positif), de la température (thermotropisme négatif), de l'humidité (hygrotropisme positif) et de ses états

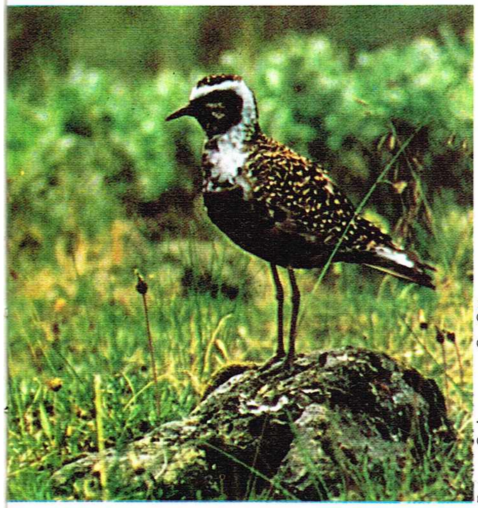

Bruce Coleman - C. Ott

D. Richard

◀ *A gauche, le pluvier est un migrateur qui navigue de manière très stricte au cours de ses grands déplacements A droite, une migration de canards.*

▼ *A gauche, démonstration schématique de la façon dont les talitres (puces de mer), récoltées à Gombo et transportées soit à l'île de Capri, soit à Rimini, s'orientent de la même manière par rapport aux points cardinaux. Cependant, celles de la mer Tyrrhénienne vont vers l'eau ; celles de la mer Adriatique vers le sec. A droite, orientation des talitres récoltées sur une plage bordant une mer au sud, face à la lumière solaire (en haut, à gauche) et à une lumière artificielle fixe (en bas, à gauche) ; aux mêmes heures, l'angle entre la direction de fuite et celle de la lumière est, dans les deux cas, le même. Ci-dessous, la même expérience exécutée au moyen d'un miroir.*

physiologiques alimentaires. Fortement photogéonégative en atmosphère humide, elle l'est moins après 15 minutes de dessèchement ; après 3 heures, les réactions sont indifférentes à la lumière ; après 4 heures, les animaux qui ne sont pas morts sont fortement photopositifs. Là, comme précédemment, il faut insister sur le fait que dans la nature ces réactions d'orientation variables en intensité et en direction ont joué dans les possibilités de survie des animaux, réalisant des complexes de comportements adaptés dans l'environnement. Cela prouve, comme il a été indiqué dans l'introduction, que les barrières hiérarchiques élevées entre les réflexes, les taxies et les instincts sont de fausses barrières. *C'est, à tout moment, l'ensemble des capacités de comportement de l'animal qui inter-agissent avec l'ensemble des situations du milieu.*

Si dans beaucoup de cas la réponse à la lumière est plus mobile en fonction des autres conditions, c'est peut-être, comme le soulignaient Fraenkel et Gunn en 1940, parce qu'elle est en général *dans la nature* moins

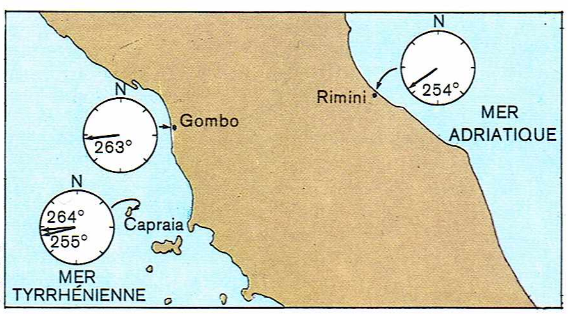

I.G.D.A.

souvent la cause de catastrophes métaboliques que les facteurs comme la température ou le degré hygrométrique ; elle peut alors jouer le rôle de stimulus directeur permettant d'échapper à ces catastrophes.

Vowles, en 1953, a émis l'hypothèse de l'existence dans le système nerveux (?) de l'animal de « centres taxiques », qui correspondraient chacun à un facteur d'orientation et s'influenceraient réciproquement, atteignant ainsi une espèce de régulation des orientations prises par l'animal dans l'environnement. En transposant la notion de « centres » (concept qui est bien dans l'optique des années 1950) sur une notion plus dynamique de *réseaux,* l'hypothèse de Vowles peut être conservée comme modèle des interactions de stimulations qui se traduisent par des positionnements résultants.

Cependant, beaucoup d'animaux utilisent autrement l'environnement pour leur positionnement qu'à travers une synthèse des actions de facteurs physico-chimiques simples. En particulier, le problème de la régulation des déplacements orientés à longue distance a souvent retenu les chercheurs. Par ailleurs, beaucoup de travaux ont été effectués en vue de préciser la manière dont une orientation prise à un moment donné par un animal peut se conserver en « mémoire » pour être réutilisée dans un comportement ultérieur (retour des fourmis ou des abeilles à la colonie, retour des Hyménoptères nidificateurs solitaires au nid, retour des pigeons, des Rongeurs, des Oiseaux ou des Poissons migrateurs, etc.).

Les problèmes de la détermination des repères qui guident cette orientation et des moyens de contrôle de sa réalisation ont retenu tout spécialement les auteurs :

— des repères locaux topographiques ou géographiques, des repères lointains (souvent astronomiques), des indices proprioceptifs, des sensibilités mal définies (magnétisme, appréciation des forces de Coriolis) sont parmi les plus fréquemment invoqués ;

— le « pilotage », c'est-à-dire la recherche au hasard (ou de manière systématique) de repères simples connus et à partir desquels les animaux se dirigent, l' « orientation directionnelle » (la recherche et le maintien d'une direction sans point de référence connu), la « navigation » (l'établissement d'une route en référence au but en faisant le point en cours de trajet) : tous ces moyens sont successivement employés si nécessaire par les animaux,

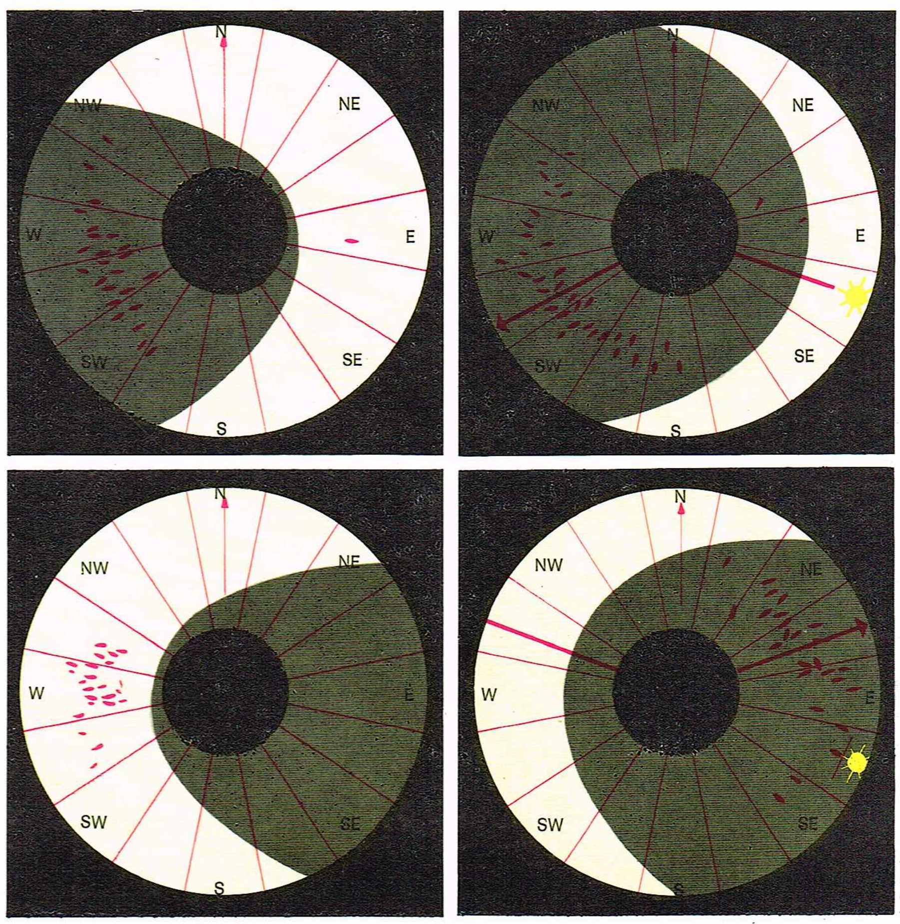

I.G.D.A.

▶ *On a disposé en dehors de la coupe du nid d'une poule couveuse deux œufs : le petit est un de ceux qu'elle a pondus, le gros est un autre œuf de poule. Elle choisit pratiquement toujours de ramener sous elle d'abord le gros œuf qui peut ainsi être interprété comme le plus attractif* (stimulus supra-normal).

J.-C. Guyomarc'h

mais un seul peut leur suffire. A ce sujet, la confusion qui s'était instaurée pendant longtemps dans les explications tenait seulement au fait que les conditions des expérimentations n'étaient pas toujours comparables.

Un des corrélats fondamentaux de l'orientation prise par l'animal dans son environnement se trouve dans la mise en mémoire des critères du milieu ayant permis cette orientation. Dès la fin du siècle dernier, Forel avait mis en évidence une orientation des fourmis sur leurs pistes de récolte pour laquelle le trajet « retour » dépendait du trajet « aller ». Les analyses sont maintenant plus précises. Pour beaucoup d'Insectes, on a démontré le rôle de repères géographiques proches ou de repères sidéraux dans cette correspondance. Chez tous les Hyménoptères nidificateurs, la femelle quittant son nid effectue un vol stationnaire de localisation et d'orientation qui assure la mémorisation à terme de tous les aspects fondamentaux de l'environnement et qui permet, au retour, d'atterrir juste à l'emplacement du nid, même si celui-ci a « disparu » aux regards de l'homme. Couturier et Robert ont montré qu'après leur éclosion, les femelles de hanneton commun se dirigent vers des zones boisées en fonction d'une réponse à des silhouettes de groupes d'arbres profilées sur l'horizon ; après l'achèvement de la phase alimentaire sur les arbres et la maturation concomitante des ovaires, les femelles effectuent un vol de retour en s'orientant à l'inverse sur les mêmes éléments.

● *Configurations signifiantes ?*

Dans beaucoup de comportements, cette forme du mouvement liée à divers facteurs de l'environnement est peut-être moins nette. C'est le cas de l'expression de la plupart des schèmes moteurs spécifiques dont il a été question plus haut. Un des exemples historiques souvent cité est celui du « ramener de l'œuf au nid » par l'oie grise (Lorenz). Si l'expérimentateur retire un œuf de la coupe du nid et le place au sol à portée de l'Oiseau qui couve, celui-ci, sans se relever, étend le cou, passe le bec derrière l'œuf et, d'un mouvement régulier stéréotypé de retrait du cou, le ramène sous lui. Si l'œuf est retiré à nouveau lorsque le mouvement de rentrée du cou a commencé, celui-ci s'effectue complètement à une vitesse relativement constante, le bout du bec se déplaçant dans un plan quasi horizontal (c'est la composante « fixe », l'*Erbkoordination* de ce comportement). Par contre, si on rend le substrat rugueux ou si on remplace l'œuf par un modèle difficile à rouler, le mouvement de rentrée s'accompagne d'oscillations du bec qui compensent les irrégularités du « roulage » de l'œuf (c'est la composante taxique, la *Taxiskomponente*).

Des mesures précises seraient nécessaires pour analyser plus à fond l'intrication complexe des deux composantes. Néanmoins, cet exemple nous conduit à souligner que, pour l'oie qui couve, l'œuf a une valeur particulière qui se lie au mouvement de ramener ; comme pour l'épinoche mâle possesseur d'un nid, la femelle prend une valeur particulière qui se lie à la danse en zigzag, prélude à la ponte ; comme pour le putois affamé, le rat qui bondit prend une valeur particulière qui se lie à la course poursuite du prédateur.

Beaucoup de comportements pourraient ici être cités en exemple ; tous montreraient que le rôle de l'environnement ne se réduit pas au réglage de leur seule composante directionnelle.

Les objectivistes ont recherché :

— s'il existait des rapports spécifiques entre certaines situations et des activités du type schèmes moteurs ;

— si certains éléments de ces situations se trouvaient préférentiellement porteurs de l'efficacité à ce titre ;

— si ces éléments restaient distincts ou s'ils se groupaient en configurations signifiantes.

C'est particulièrement dans cette recherche que la méthode des *leurres* a révélé son efficacité : il s'agit, à partir de reconstructions partielles du milieu, de tester l'intensité des comportements de l'animal. En 1932, Tinbergen a montré, sur l'épinoche, avec des leurres dont l'un est figuré page ci-contre, que la posture tête en bas et la couleur rouge en position ventrale déclenchent souvent des attaques de la part d'une épinoche mâle, alors que la posture tête en haut et ventre argenté gonflé déclenche souvent des comportements de cour de la part du même mâle.

De la même manière, on a pu démontrer que pour le jeune goéland, le leurre le plus efficace vis-à-vis de l'induction du comportement de quémande alimentaire

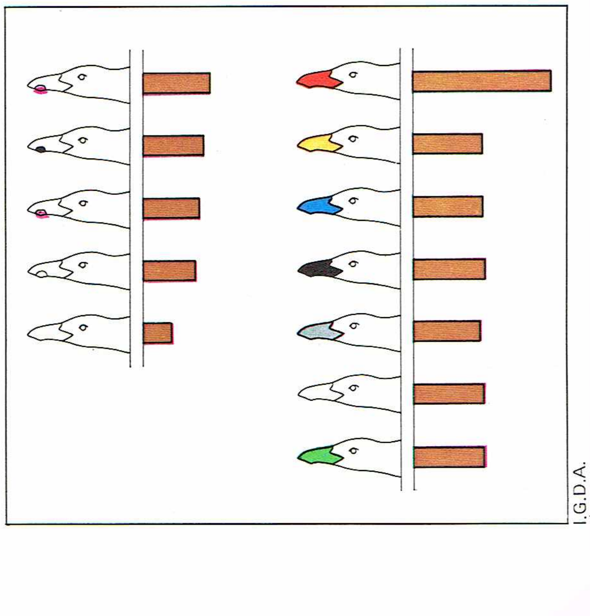

I.G.D.A.

▶ *Leurres utilisés par l'école de Tinbergen pour découvrir quels éléments de la tête du parent ont une valeur « déclenchante » de la quémande du jeune goéland.*

était une forme oblongue ou en baguette d'environ 9 mm d'épaisseur, tenue verticalement, en mouvement horizontal à une fréquence de 80 balancements par minute, en contraste avec le fond (cette forme est d'autant plus efficace qu'elle est sombre sur un fond incolore, et le rouge et le bleu sont plus stimulants que d'autres couleurs). Cet objet provoque d'autant plus de comportements de quémande qu'il est déplacé à la hauteur des yeux du jeune et qu'il peut être vu simultanément par les deux yeux (Hailman, 1967).

Dans le cadre d'une interprétation S → R, l'école objectiviste a tiré de ces expériences la conclusion que les schèmes moteurs, dont elle avait fait les unités topographiques du comportement, ne se produisent pas au hasard, sous la seule commande « spontanée » des réseaux neuro-endocrines. Il faut en général à ces réseaux, lorsqu'ils sont capables de fonctionner, une stimulation, et cette stimulation, organisée en configuration à partir d'éléments de l'environnement, présenterait comme les schèmes moteurs des caractères d'ordre spécifique.

Il était logique qu'ayant « fixé » ainsi les actes moteurs, cette école dût également fixer les configurations stimulantes susceptibles d'induire les réponses spécifiques. De telles configurations *(auslösende Schema, releaser, déclencheur)* seraient « extraites » par l'animal, à certains moments, de l'environnement où il se trouve ; elles contribueraient à l'évocation des actes moteurs qui leur correspondent, grâce à l'action de mécanismes impliquant les centres perceptifs intégrateurs et les centres moteurs du système nerveux *(angeborene auslösende Schema, innate releasing mechanism, mécanisme inné de déclenchement)*.

Bien entendu, toute la discussion commencée au sujet de l'innéité des actes moteurs peut être reprise ici. Les configurations stimulantes dont il s'agit sont pour la plupart impliquées dans les communications intraspécifiques et, de ce fait, ont subi les multiples pressions de la sélection évolutive. Certaines des configurations peuvent cependant être mises en rapport avec des valeurs supraspécifiques, mais les critiques des concepts objectivistes restent les mêmes dans tous les cas.

Critique

Une analyse des comportements de l'épinoche plus précise que celle effectuée en 1932 conduit Chauvin-Muckensturm, van den Assem et quelques autres auteurs à modifier les premières interprétations. La livrée à ventre rouge du mâle, dont les objectivistes ont fait le déclencheur de l'activité agressive, est fort variable. Une étude éco-éthologique du Poisson permet de préciser que cette livrée apparaît progressivement au cours de la remontée migratoire dans les eaux douces ; à l'inverse, elle disparaît progressivement en fin de cycle de reproduction lors du retour en eau saumâtre. De plus, elle est sujette, pendant la saison de reproduction, à des variations brutales, qui portent sur tout ou partie de cette livrée. Des Poissons qui s'établissent dans une anse sableuse de ruisseau ont toutes chances, si la population n'est pas dense, d'accéder tous à la possession d'une livrée complète. Dans les groupes denses, l'animal qui occupe le plus haut niveau dans la hiérarchie qui s'installe est aussi celui dont la livrée est la plus éclatante et celui qui manifeste les comportements d'exclusion les plus intenses vis-à-vis du fond de l'aquarium. Le dernier de la hiérarchie est terne, mais il est à peu près le seul supporté par le dominant, alors qu'il est souvent harcelé par les autres Poissons.

Si l'objet oblong de couleur rouge située en dessous joue, tout particulièrement dans les cas expérimentaux du laboratoire, un rôle préférentiel de déclenchement de comportements agressifs, il faut bien se garder d'en faire *le* stimulus déclencheur inné. Dans la nature, l'attaque ne dépend ni de la coloration des individus en présence, ni de la possession d'un nid ; elle n'est pas non plus réservée au seul sexe mâle, puisque des femelles peuvent se faire attaquer par un mâle territorial.

En fait, c'est tout l'ensemble de l'environnement et du passé récent des animaux en cours de migration reproductrice qui doit se trouver pris en compte. Un comportement agressif d'un Poisson n'est d'ailleurs souvent qu'une manière de s'assurer de l'identité de l'intrus pénétrant dans son territoire, et c'est la réaction de cet intrus à l'approche du propriétaire qui sera, beaucoup plus que ses qualités physiques appréciées d'abord, l'élément d'information qui orientera les comportements futurs. De plus, le cas de certains mâles, appelés *rapteurs* par van den Assem, prouve toute la complexité d'établissement des comportements reproducteurs. Ces mâles, qui (en cas de surpopulation) n'ont pas réussi à établir un territoire, donc à construire un nid, réussissent souvent, par des comportements très élaborés, à déloger un mâle territorial au moment où il fait pondre une femelle dans son nid et à se substituer à lui pour la fécondation !

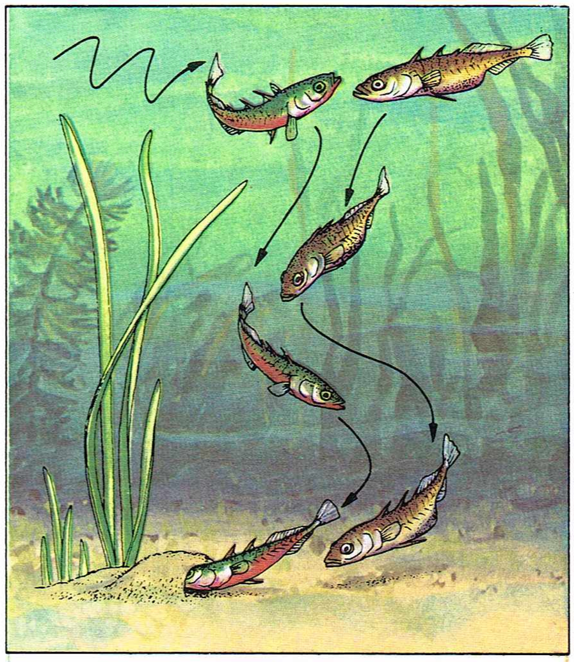

I.G.D.A.

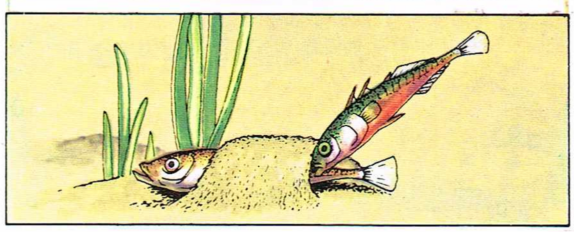

I.G.D.A.

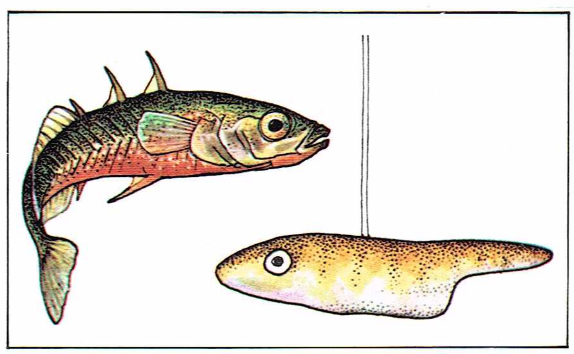

I.G.D.A.

◀ ***Après avoir établi un territoire et y avoir construit un nid, le mâle de l'épinoche effectue (en haut) une « danse en zigzag » devant la femelle, après quoi (au centre), celle-ci rejoint le nid où elle pond. L'école de Tinbergen a étudié, grâce à des leurres (en bas), les stimuli déclencheurs des comportements agressifs vis-à-vis des mâles, et ceux des comportements sexuels vis-à-vis des femelles.***

Pour revenir au stimulus propre à établir la réponse de quémande du jeune goéland, Hailman montre que des poussins éclos en incubateurs puis maintenus à l'obscurité sont susceptibles d'exprimer la réponse de quémande devant un grand nombre de modèles. En particulier, les poussins de *Larus argentatus* et *L. atricilla* quémandent aussi bien devant le modèle de leur parent spécifique que devant celui de l'autre espèce. Les jeunes expriment leur réponse devant une tache rouge, quelle que soit la position de cette tache sur le modèle de tête, pourvu que les diverses taches effectuent des mouvements semblables en vitesse et en quantité au niveau des yeux du poussin.

Deux faits doivent être soulignés : d'une part, la répétition d'une situation de test suivie de nourrissage fixe le comportement ; d'autre part, la situation de test doit, pour fixer le comportement, s'insérer dans des limites définissables. Cela fait référence, comme pour les actes moteurs, à une variabilité à l'intérieur d'un schème stimulant spécifique.

D. Richard

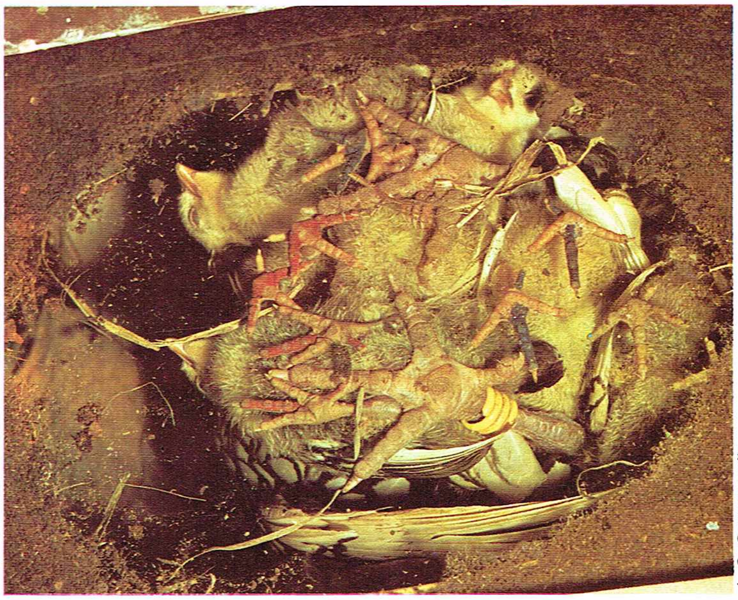

J.-C. Guyomarc'h

▲ *A gauche, tous les Oiseaux nidifuges, particulièrement les Gallinacés, montrent, quelques heures après l'éclosion, une capacité de picorer, qui, médiocre au début de leur vie, s'affine et se précise avec le processus de maturation nerveuse et celui d'expérience fondé sur les renforcements reçus. A droite, pendant la couvaison et plus tard pendant toutes les périodes de repos, le poussin établit avec sa mère, source de chaleur et de gloussements, des liens qui joueront un grand rôle dans l'établissement des comportements d'exploration, d'alimentation et de poursuite.*

Tous les Oiseaux nidifuges, particulièrement les Gallinacés, montrent, quelques heures après l'éclosion, la capacité de picorer différents stimuli visuels de leur environnement. Pendant les premières heures de leur vie, on observe une précision médiocre des coups de bec : frapper en direction de... mais manquer le but; toucher le but, mais ne pas saisir entre les mandibules; attraper dans le bec, mais ne pas réussir à avaler; acte complet achevé par la déglutition. Peu à peu, la précision et la qualité du comportement s'affinent à la suite de processus de maturation nerveuse et de processus d'expérience basés sur les renforcements reçus.

A tout moment de leur vie, ces Oiseaux pourront d'ailleurs adapter de nouvelles stratégies de picorage à de nouveaux éléments alimentaires. Guyomarc'h décrit de jeunes dindons qui se spécialisent dans la chasse aux mouches, utilisant pour les capturer le même mouvement de projection de la tête que dans le picorage, mais adapté en forme et en précision au gibier visé. Une longue expérience est nécessaire, et les animaux spécialisés dans cette chasse y consacrent une grande partie de la journée.

Les mécanismes innés de déclenchement avaient d'abord été conçus comme des mécanismes centraux. Diverses recherches ont montré que le premier filtrage de l'environnement est dû aux récepteurs (inclusions lipidiques jaunes ou rouges dans les cônes des rétines de goélands, peigne des yeux des Oiseaux, mieux et plus vite développé chez les jeunes à nourrissage diurne que chez les jeunes à nourrissage nocturne, etc.). Par ailleurs, une grande part de la mise en place des mécanismes de correspondance entre des stimuli de l'environnement et des comportements doit être rapportée au rôle de l'expérience de la nature des renforcements, obtenus lors des premières répétitions des comportements. Bien entendu, dans le cadre naturel, l'adaptation phylogénétique laisse prévoir une bonne concordance entre stimuli, réponses, renforcements, de telle sorte que les comportements acquièrent très vite leur moindre variabilité et leur plus grande stéréotypie.

● *Généralisation*

Enfin, il ne faut pas oublier que, si certaines situations stimulantes sont spécifiques par leur contexte général et leur forme, beaucoup des paramètres qui les composent sont déjà filtrés d'une manière spécifique par les organes des sens de l'animal impliqué. De plus, certaines configurations ont, dans le milieu extérieur où vit l'animal, davantage de chances d'apparaître que d'autres; c'est peut-être cette balance entre la probabilité et l'improbabilité qui joue un grand rôle dans l'association entre une réaction et une situation. L'étude totale des interactions possibles doit conduire aux meilleures explications.

Quelques exemples permettront de mieux préciser ces interactions complexes.

Les jeunes Oiseaux nidifuges (c'est aussi le cas des Mammifères nidifuges) manifestent très tôt après leur naissance une réaction de poursuite vis-à-vis de leur mère, et il est tentant d'assimiler alors la mère à un stimulus signal spécifique. Toutefois, cette réaction a un long passé dont Gottlieb et Guyomarc'h ont tracé les grandes lignes. Le jeune Oiseau, dans l'œuf couvé par sa mère, établit, dès avant l'éclosion, un véritable lien sonore avec la couveuse : celle-ci glousse et le jeune émet quelques types de cris, dont l'un est celui qui (au cours de l'ontogenèse) se transformera en gloussement d'adulte. Le jeune se familiarise avec le gloussement de la mère et lui donne une signification dans l'environnement à travers l'autoaudition de ses propres cris; ce gloussement est particulièrement émis en réponse aux cris des jeunes dans l'œuf; il s'accompagne souvent d'un accroissement du réchauffement par suite du réarrangement des œufs sous les plaques d'incubation de la couveuse (renforcement physiologique) ; cela va conduire le jeune éclos, qui aura lié source de gloussement et source de chaleur, à rejoindre la mère qui s'éloigne; un conditionnement simple liera désormais les stimuli visuels aux stimuli auditifs, et la poursuite s'établira en quelques dizaines d'heures, la mère s'éloignant d'ailleurs très progressivement des jeunes. Des canetons dévocalisés (qui ne peuvent donc émettre eux-mêmes dans l'œuf) quatre jours avant la naissance se trouvent dans l'incapacité d'établir la réaction de poursuite dans le même délai. Bien entendu, la liaison sonore pouvant être suppléée par bien d'autres lorsque le jeune est éclos, la réaction finira par s'établir, mais plus tard. Cette expérience prouve bien la progressivité et la complexité d'établissement des réponses à l'environnement.

Un autre exemple de stimulus-signal déclencheur a fait couler beaucoup d'encre dans les années 1950. Il s'agit de la question des effets comparés de la silhouette du rapace et de celle de l'oie. Lorenz avait insisté sur le fait que lorsque la première passait dans le ciel au-dessus d'oies ou de canards, elle déclenchait (de façon « innée ») un comportement de fuite, alors que la seconde déclenchait tout au plus un mouvement d'intérêt. Or Schutz d'une part et Guyomarc'h d'autre part, reprenant l'expérimentation, ont prouvé que la réaction de la couvée n'est pas d'abord la réaction au passage de la silhouette mais une réponse à la réaction de la mère; par ailleurs, toute silhouette familière a moins de chances de provoquer une réaction que toute silhouette non familière : il est plus fréquent pour un troupeau d'oies de voir passer au-dessus de lui une de ses congénères qu'un rapace. Cette référence à la familiarisation aux stimuli nous conduit, à nouveau, à introduire les contingences de renforcement dans toute interprétation de configuration stimulante dans l'environnement.

Un dernier exemple complétera cet élargissement de valeur des stimuli en provenance du milieu. En 1968, Liley a étudié quatre espèces de Poissons d'une même famille : *Poecilia vivipara* (le guppy des aquariophiles), *P. reticulata*, *P. picta* et *P. parae*. Ces Poissons vivent

C. Bevilacqua

dans les mêmes milieux (rigoles de drainages de l'Amérique tropicale), et on peut penser que si les espèces se maintiennent séparées (on ne trouve pratiquement pas d'hybrides dans la nature), c'est que des mécanismes d'opposition à l'hybridation existent. Parmi ces mécanismes, on peut penser au « stimulus déclencheur » que constitue la femelle d'une espèce pour le mâle de cette espèce et *vice versa*. En effet, *P. vivipara* est beaucoup plus gros que les autres, qui sont de tailles à peu près semblables; mais tous les mâles présentent des répartitions de taches, lesquelles distinguent fort les espèces. Les femelles sont à première vue semblables; cependant, une analyse plus précise permet de distinguer des marques spécifiques sur les orifices anal et urogénital. En ce qui concerne les comportements, les parades des mâles de chacune des espèces sont différentes; les réponses des femelles sont moins distinctes pour l'observateur humain. Des tests de choix préférentiels de conjoints ont été réalisés en présentant à différents mâles des groupes de quatre femelles (une de chaque espèce) et en analysant leur comportement de cour. Les mâles étudiés ont été au préalable soit uniquement conservés en groupe conspécifique (C), soit placés en groupes hétérospécifiques (H) pendant les trois semaines précédant l'expérience, laquelle a lieu bien entendu à l'époque favorable à l'expression des comportements visés.

Dans tous les cas où les mâles ont eu l'expérience des quatre espèces, le choix de leur propre espèce est renforcé, et on a pu établir que cela provient du rôle des femelles, les conspécifiques étant les seules qui fournissent sur le plan de leur réponse aux parades du mâle des renforcements positifs permettant la poursuite de la cour dans les conditions naturelles. On peut donc penser ici que les valeurs des stimuli de l'environnement sont établies progressivement dans les conditions naturelles, et ce d'autant mieux et d'autant plus strictement que les modalités de la compétition interspécifique sont plus sévères. Des faits similaires avaient été évoqués pour la mise en place des caractéristiques motrices spécifiques (chants des Oiseaux par exemple).

Les objectivistes ont bien étudié une des modalités particulières de variabilité des stimuli possibles vis-à-vis d'un comportement défini : il s'agit de leurres qui déclenchent des comportements quantitativement plus intenses que les objets naturels mimés par ces leurres. D'où leur nom de *suprastimuli*.

L'école de Tinbergen a montré qu'un leurre formé d'une mince baguette rouge portant deux bandes blanches contrastées provoquait chez le jeune goéland plus de réponses de becquetage que le bec normal du parent, toutes autres conditions étant maintenues identiques. Par ailleurs, l'huîtrier-pie et le goéland rentrent plus volontiers au nid et tentent de couver un œuf deux ou trois fois plus volumineux que le leur; l'huîtrier-pie couve plus intensément une couvée de cinq œufs que la sienne propre, limitée à trois. Les bengalis, étudiés par Mme Morel, couvent mieux, et avec plus de succès à l'élevage, une couvée de cinq œufs (dont ceux de la veuve qui les parasite) qu'une couvée de trois œufs. Quant au rouge-gorge, il nourrit comme sa couvée un énorme jeune coucou éclos dans son nid.

De fait, dans beaucoup de cas, si l'on isole de tout son contexte dans l'environnement (y compris le contexte physiologique) une configuration stimulante, on peut trouver de tels stimuli supranormaux. Il n'y a pas lieu de s'en étonner : cela prouve seulement d'une part que l'évolution n'est pas achevée, d'autre part, que la nature présente un équilibre sous la forme de compromis entre toutes les pressions de sélection évolutive. La marge de variation montrée par de telles supranormalités est justement celle qui maintient les possibilités de variations de réponses à l'environnement modifié. Pour reprendre l'exemple de l'œuf, celui-ci représente un compromis entre les capacités morphologiques et physiologiques de l'Oiseau, les potentialités alimentaires du milieu, les pressions des prédateurs ou des éléments climatiques, etc. La solution d'un œuf unique, plus gros, peut être valable pour certaines espèces, alors que, pour d'autres, la solution de la ponte multiple est mieux adaptée. Mais les possibilités de réponses comportementales laissent la porte ouverte à plusieurs solutions.

A l'inverse, si l'on peut dire, Lorenz a insisté, en 1957, sur les cas où les comportements spécifiques peuvent se manifester en l'absence du signal déclencheur : un sansonnet réalisait les actes de capture en vol d'un Insecte sans qu'aucun stimulus décelable et assimilable à un Insecte pût être reconnu par l'observateur. Lorenz a créé pour ce type de comportement le terme de *Leerlaufreaktion* (activité vide), dépassant probablement les possibilités de dénomination. En effet, un tel comportement n'est « vide » que dans la mesure où il n'aboutit pas dans l'environnement à une capture de mouches; il ne peut être vide de causalités.

A la recherche justement de causalités explicitant ces phénomènes, Lorenz, manifestement inspiré par les théories pulsionnelles de l'instinct, avait envisagé pour compléter le système « stimulus déclencheur/mécanisme inné de déclenchement/acte moteur fixe » une modélisation hydraulique représentant l'accumulation d'une énergie endogène spécifique pour chaque comportement instinctif. Cette énergie accumulée était nécessaire pour

▲ ***Liley a pu démontrer, avec le « guppy » des aquariophiles, toute l'importance des stimuli complexes provenant du milieu extérieur pour la construction des comportements spécifiques.***

▼ ***Différents modèles d'œufs utilisés par l'école de Baerends pour analyser les éléments ayant valeur de reconnaissance de leur œuf par des Oiseaux qui couvent (goélands).***

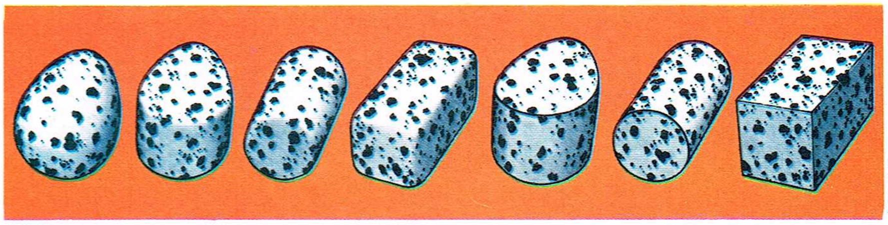

I.G.D.A.

la manifestation de l'activité réponse au déclencheur; mais son accumulation au-delà des limites habituelles pouvait expliciter la manifestation de comportements comme les activités vides.

Certes, un tel modèle n'est pas dépourvu de toute valeur, mais il simplifie trop la situation qui découle d'une étude approfondie des interactions neuro-endocrines auxquelles il a été fait allusion plus haut. Ainsi que l'expriment Hinde, Slater et bien d'autres, ce genre de modèle comme les références à des notions de motivations perdent actuellement leur nécessité.

Cependant, il ne faut pas se laisser enfermer dans une conception rigide S → R, et les objectivistes ont insisté sur le fait que l'animal est très loin d'être continuellement poussé par le stimulus. Au contraire, par ses comportements explorateurs, il le chercherait plutôt, si bien que la coïncidence S — R serait réalisée par une activité de l'animal et non passivement subie.

Plusieurs auteurs ont tenté d'approfondir ce problème. Croze sur les Corvidés, Beukema (1968) sur l'épinoche, Dawkins (1971) puis Tinbergen et ses collaborateurs (1971) ont montré l'importance de stimuli efficaces à un moment donné dans la construction totale des comportements futurs.

En maîtrisant les facteurs suivants : temps depuis le précédent nourrissage, température, heure de l'expérience, alternance de jeûnes et de phases alimentaires, type de nourriture préalablement absorbée, Beukema tente de définir au mieux l' « état » de l'épinoche à un moment donné. Cet état (« appétit » = fluctuation d'intensité du mécanisme qui règle les variations parallèles des diverses parties du comportement alimentaire) influence nettement le « risque » encouru par les proies (qui est mesuré par le nombre de proies détruites par un prédateur par unité de temps, rapporté à la densité des proies à ce moment). La privation de nourriture accroît l'appétit, ce qui se manifeste par un plus grand nombre de proies consommées, aussi bien que par une activité natatoire plus grande et par des réactions plus complètes à l'égard des proies découvertes (davantage de proies découvertes sont attaquées; davantage de proies attrapées sont mangées). Il faut souligner que l'efficacité des rencontres de proies augmente avec la meilleure connaissance du milieu dans lequel le prédateur peut les trouver (dans l'expérience de Beukema, un labyrinthe constituait un dispositif d'enrichissement spatio-temporel du milieu). Bien entendu, beaucoup de facteurs supplémentaires doivent être intégrés : ainsi, au cours de la croissance des épinoches, la capacité natatoire augmente moins vite que la capacité à prendre de la nourriture; les grands Poissons se rassasient donc proportionnellement moins vite que les petits, ce qui présente une conséquence sur le « risque » encouru par les proies. Cela étant, l'introduction dans l'aquarium d'un nouveau type de proies en simultanéité avec les proies habituelles peut (si la valeur alimentaire supérieure de celles-là est « reconnue » par l'épinoche) singulièrement augmenter le risque encouru par les nouvelles et diminuer le risque encouru par les anciennes.

Ce qui précède confirme le fait que, sous l'influence d'un système activant lié à la privation alimentaire (mais on pourrait transposer les conclusions à d'autres privations [la privation sexuelle par exemple]), l'animal peut restreindre, au moins temporairement, son comportement dans l'environnement à la « recherche » d'un certain nombre d'objets ou de situations. Après de Ruiter et L. et N. Tinbergen, les éthologistes ont développé l'étude de cette capacité d'établissement d'une *image attendue et recherchée (searching image)*.

La recherche de nourriture peut être effectuée en l'absence de stimulation provenant de la nourriture potentielle elle-même; cependant, la localisation spatiale des proies potentielles est tellement restreinte par les réponses éco-éthologiques spécifiques de ces proies que l'exploration d'un animal prédateur se concentre rapidement sur ces zones favorables : les zones les plus riches en proies reçoivent davantage de visites que les autres; par ailleurs, très rapidement, les capacités discriminatrices des localisations dans le milieu, du goût et de la valeur nutritive des aliments ingérés dirigent le comportement de l'animal vers les aliments réunissant un certain nombre au moins de qualités.

Hinde et beaucoup d'éthologistes considèrent que, si le concept d'image attendue et recherchée peut avoir une certaine utilité, il faut se garder de lui attribuer, par anthropomorphisme, une valeur de représentation mentale. Les récents travaux de M. Dawkin, qui étudie la capacité de poulets à déceler des grains de riz sur un environnement dans lequel ceux-ci sont contrastés, par rapport à la même capacité dans un environnement où leur coloration cryptique les fait disparaître, montrent que, par répétition, des poulets qui ne sont au début pas capables de distinguer des grains cryptiques vont le devenir. Cela peut être dû à des changements centraux dans les modalités perceptives. Mais cette capacité n'est pas complètement retenue et l'apprentissage doit être repris d'un jour sur l'autre. Les poulets qui sont entraînés à manger des grains bien visibles ont une mauvaise aptitude à apprendre à découvrir les grains cryptiques, ce qui est en rapport avec une variation de leur capacité de « prêter attention », qui est fonction de ce qu'ils ont déjà mangé.

Enfin, les travaux d'Andrew et Rogers (1972) sur les poulets prouvent qu'une préférence alimentaire, comme celle de rechercher un type de graine plutôt qu'un autre, peut se trouver quantitativement sous l'influence du taux de testostérone; un fort taux augmente les performances, ce qui tendrait à montrer également que certains aspects centraux du fonctionnement du système nerveux (persistance d'utilisation de diverses données, comme l'image de recherche) relèvent de mécanismes neuro-endocrinologiques complexes, établis par la phylogenèse et par l'ontogenèse selon des modalités beaucoup plus nuancées que ne le postulait le concept de mécanisme inné de déclenchement.

Circonstances complexes environnement-comportement

Les données du behaviorisme et particulièrement de l'école skinnérienne, prolongées par les données de l'électrophysiologie et de l'endocrinologie modernes, peuvent nous aider à comprendre certains au moins des

▼ L'importance de stimuli efficaces à un moment donné dans la construction totale des comportements futurs a été étudiée et approfondie par Beukema sur l'épinoche (à gauche) et par Croze sur les Corvidés (à droite, un corbeau freux).

Ross - Jacana

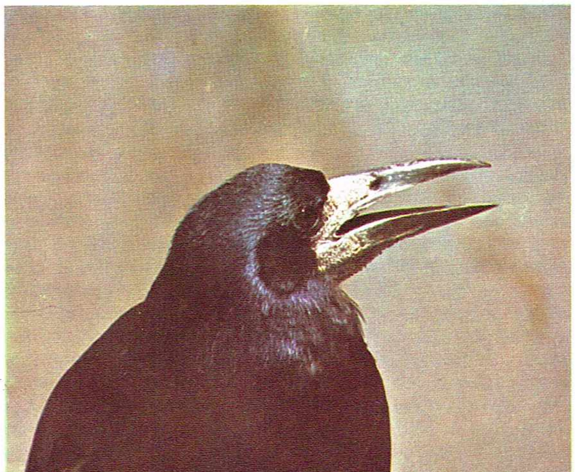

C. Nardin - Jacana

mécanismes d'effet d'une liaison entre situation stimulante et acte moteur sur les comportements ultérieurs.

L'incorporation temporelle

Il a été précisé plus haut, à propos de l'exemple du comportement de harcèlement des Passereaux devant un prédateur, que la répétition même d'un acte moteur avait des conséquences quantitatives multiples sur la dynamique ultérieure de cet acte.

Composantes d'évanouissement, composantes de renforcement des comportements, dont l'importance quantitative dépend des conséquences de l'acte considéré, généralisation discriminative, mais surtout procédure d'incorporation du temps aux comportements des animaux : ces phénomènes sont bien mis en évidence dans les procédures skinnériennes d'enregistrement automatique d'un comportement choisi (il s'agit souvent d'un mouvement apparemment simple, comme l'appui d'une patte ou la poussée du bec sur un levier), lié de diverses manières à une situation plus ou moins complexe.

L'accent est particulièrement mis, dans ces procédures, sur la fréquence du comportement choisi (le *débit de réponse,* qui traduit la probabilité temporelle d'expression du comportement), sur les conséquences de ce comportement qui modifient le débit de réponse (aliment reçu par exemple) et qu'on nomme des *renforcements,* sur l'ensemble de la situation présente lorsque le comportement s'organise *(fonction de contrôle).* Le fait que la distribution du renforcement dépende d'une action effectuée par l'animal sur l'environnement a conduit à appeler ce type d'action un *operant,* d'où le nom de *conditionnement operant* donné le plus souvent aux techniques skinnériennes.

Il faut insister sur la *fonction de contrôle* effectuée par l'ensemble de la situation présente au moment où un *operant* est renforcé. En effet, il s'agit là d'une fonction fort différente de celle attribuée à l'environnement par les objectivistes sous la dénomination de déclencheur. Skinner, en 1948, a attiré l'attention sur le fait que des pigeons auxquels on distribue automatiquement des renforcements à intervalles fixes développent, indépendamment de toute manipulation imposée par l'expérimentateur, des comportements comme tourner deux ou trois tours dans le sens des aiguilles d'une montre, pousser la tête vers un coin supérieur de la cage, abaisser la tête vers le sol en un endroit précis, etc. ; ces comportements sont répétés à fréquence régulière et souvent dans une zone particulière de la cage. Or, il n'existe aucune relation directe entre eux et le renforcement. On a, depuis, décrit beaucoup de types d'activités similaires, caractérisées par l'existence dans l'environnement d'éléments appartenant aux « circonstances dans lesquelles une réponse est émise et renforcée ». De tels comportements ont été dénommés « superstitieux » par les behavioristes. Ils traduisent en effet l'établissement par l'animal de liens de causalité qui n'existent qu'en apparence.

En définitive (et c'est l'apport du behaviorisme à la synthèse éthologique), *notre objet d'étude est bien l'ensemble des circonstances complexes dans lesquelles se manifeste un comportement, ainsi que ce comportement lui-même, et les conséquences renforçantes qu'il entraîne. C'est toute la dynamique phylogénétique et ontogénétique de ces problèmes qui couronne la recherche éthologique.*

Mintz considère comme un premier élément de cette approche des interrelations l'étude des diverses propriétés d'une réponse : force, taux, durée, place, etc. C'est ainsi que la force d'une réponse peut croître sans que son taux d'expression soit modifié. Notterman ajoute que les changements de cette force dépendent des conséquences de la réponse et représentent une intégration complexe, impliquant à la fois les non-renforcements et les renforcements. Si, par exemple, un organisme émet une réponse trop faible pour produire un renforcement, la réponse suivante ne pourra être renforcée que si elle est plus intense. D'où l'acquisition par cet organisme d'une histoire qui fera suivre des réponses fortes à des réponses faibles ; cela fournit des bases discriminatives cohérentes à des unités de comportement plus vastes.

A ce titre, un des problèmes importants du comportement est celui dit du *chaining,* ou *formation d'un ensemble coordonné, enchaîné,* dans lequel chaque réponse (ou chaque variation de réponse) agit comme (ou produit) un stimulus discriminatif vis-à-vis de la réponse suivante.

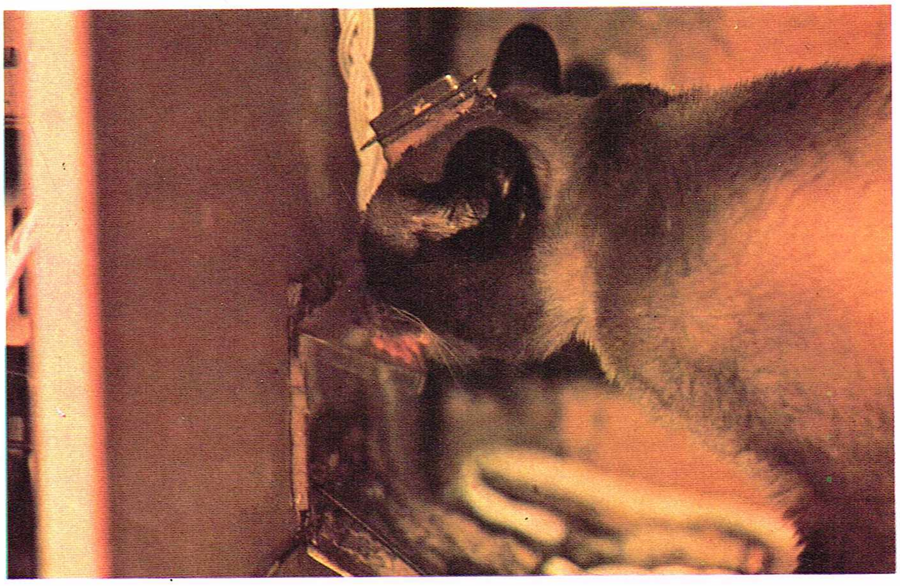

D. Richard

▲ ***Récompense (viande) du chat venant d'appuyer sur le levier lors d'une expérience conduite selon des procédures skinnériennes d'enregistrement automatique d'un comportement choisi.***

Un des facteurs modulants de ces enchaînements et de leurs paramètres est le *temps* qui sépare deux réponses. Si dans une procédure expérimentale on ne renforce que les réponses qui suivent une période déterminée de temps sans réponse, le taux d'appui sur le levier décroît de manière caractéristique. A l'inverse, si l'on arrange le renforcement de telle sorte que seules les réponses qui suivent immédiatement une autre réponse soient renforcées, le taux d'appui croît. Ces procédures de renforcement différentiel des temps qui s'écoulent entre deux réponses peuvent être considérées comme des processus établissant *un operant complexe, constitué par une réponse plus la pause qui la précède.*

Diverses expériences de Blough et de ses collaborateurs, ainsi que de Dews, montrent, par ailleurs, qu'il existe un gradient temporel de tendance croissante à répondre pendant l'intervalle entre deux renforcements, de telle sorte que l'enchaînement successif d'actes n'est pas toujours le seul déterminant. Le taux de réponses dans une période $t + \Delta t$ n'est pas fonction du taux de réponses dans la période $t - \Delta t$ mais plutôt de la place de t dans l'intervalle entre deux réponses. Wilson et Kellar ont notamment interprété les comportements collatéraux effectués par l'animal comme un moyen proprioceptif d'évaluation du temps. Et c'est bien de cela qu'il s'agit : le temps qui sépare deux pressions successives sur le levier dans la cage de Skinner *(interresponse time,* ou *IT)* est un élément important pour l'animal, qui « calculera » la probabilité d'obtenir un renforcement après une réponse en fonction de la fréquence à laquelle des renforcements ont suivi les IT dans les expériences préalables ; l'animal agit comme s'il calculait la variable « IT/possibilité de renforcement » (Anger), qui représente une mesure plus adéquate de la capacité de réponses dans une situation donnée que le seul nombre des réponses ou des IT.

De telles conceptions permettent de comprendre non seulement les mécanismes déclencheurs mais aussi les mécanismes suppresseurs d'activités. Tous ces facteurs sont inclus dans la manifestation des séquences longues de comportement, pour lesquelles des activités ayant des facteurs communs de causalité tendent à se réunir dans le temps et à former des ensembles qu'il est difficile de scinder au cours d'une expérience simple. Une guêpe qui construit effectue successivement des activités de récolte de matériaux, puis de renforcement du support du nid, puis de construction de nouvelles cellules, puis de surélévation d'anciennes cellules : ces activités sont organisées de manière récurrente dans un *thème cyclique temporel fondamental* (Deleurance). Une guêpe qui paralyse des proies passe par des phases successives de repérage, d'identification de l'aire privilégiée, de déclenchement de l'acte ; la phase de repérage elle-même est organisée en un guidage de situation qui tient compte de l'ensemble des données de l'environnement, un repérage visuel qui utilise les caractéristiques anatomiques globales de la proie, un repérage tactile qui est constitué par des palpations d'une zone précise (Steiner). La suppression

E.P.S.

▲ *La construction d'un nid de guêpes réclame de la part de l'animal une succession d'activités organisées de manière récurrente dans un* thème cyclique temporel fondamental *(Deleurance).*

▼ *Accouplement de l'huîtrier-pie.*

D. Richard

d'une ou de plusieurs étapes de ce schéma est d'autant plus gênante pour la guêpe que l'étape est plus rapprochée de la phase terminale. Lorsque l'expérimentateur fait s'« opposer » les effets des diverses étapes au lieu de les laisser se « confirmer », c'est l'effet de l'étape la plus proche de la phase terminale qui finit généralement par l'emporter.

Ainsi, les séries d'actes moteurs enchaînés organisés en séquences temporelles spécifiques ne sont pas exemptes d'une certaine variabilité possible. Mais chacun des actes ne peut être dissocié de la situation dans laquelle il se déroule, et cet ensemble, lorsqu'il est réalisé et lorsqu'il s'éteint, joue un rôle permissif vis-à-vis de l'acte suivant inclus dans sa situation propre. A chaque instant de déroulement du programme, un *maximum de coïncidence* doit se réaliser entre ce moment du déroulement et le milieu dans lequel il s'exprime (Deleurance). La progressivité de réalisation propre pour chaque phase du programme et pour le programme tout entier tient à cette incorporation des milieux aux comportements, qui modifie l'animal en le complexifiant et qui le rend d'autant moins ouvert aux actions préliminaires du milieu qu'on s'approche de la réalisation totale de l'acte. Tout cela permet de comprendre sur un mode dynamique les prétendues « aberrations » de l'instinct de Fabre.

Les mêmes faits peuvent être démontrés pour des cycles plus longs d'actes enchaînés plus nombreux; c'est le cas pour les comportements reproducteurs (sexuels et parentaux) [Vancassel] et leurs interférences avec les comportements alimentaire et agonistique. Des exemples semblables ont été mis en évidence par Hinde et par Baerends dans le comportement des Oiseaux, particulièrement dans les systèmes de reproduction, lesquels révèlent des intrications constantes.

Dans le cas des activités de construction, l'animal modifie son environnement et reçoit en retour des informations dépendant du travail réalisé qui orientent le travail ultérieur. Peu d'exemples montrent mieux l'intégration comportement/environnement, qui fait progresser à la fois les thèmes cycliques temporels propres à l'espèce et les stimuli les plus aptes à réaliser le maximum de coïncidences.

Variables « motivationnelles »

Cependant, il faut s'élever dans la complexité et comprendre comment des actions neuro-endocrines vont permettre de diriger, simultanément ou en concurrence, des schèmes moteurs appartenant à des registres de comportements différents : alimentaire (aliments solides, boisson), interindividuel de type agressif, interindividuel de type sexuel ou parental, de construction, etc.

Baggerman (1968) considère que les hormones peuvent être classées en trois groupes vis-à-vis de leurs actions sur les comportements de l'épinoche : les hormones gonadotropes et gonadiques, qui contrôleraient les comportements agressifs et ceux de construction du nid et de cour; les hormones neurohypophysaires, qui contrôlent l'expression des mouvements de ponte; la prolactine, qui contrôle le comportement parental. Il s'agit en fait de savoir (mais ainsi le problème serait repoussé d'un cran) s'il existe un enchaînement défini des sécrétions hormonales. On comprendrait alors que le comportement agressif lié à l'établissement territorial précède le comportement sexuel; en effet, le premier est dépendant des gonadotrophines et le second des hormones gonadiques.

On peut montrer expérimentalement qu'un facteur stimulant externe ou interne peut affecter non un seul, mais plusieurs schèmes moteurs appartenant à des comportements différents. En 1963, Miller a montré que la stimulation électrique de l'hypothalamus de rats assoiffés cause, lorsqu'elle est appliquée au cours d'une prise d'eau, un arrêt de ce comportement de boisson et une mise en marche vers les aliments solides. De petites quantités de substances sympathicomimétiques (épinéphrine, norépinéphrine) injectées dans l'hypothalamus latéral de rats provoquent la réponse alimentaire, même chez des animaux rassasiés : l'injection de parasympathicomimétiques (acétylcholine, carbamacétylcholine) provoque la réponse de boisson. Si la norépinéphrine cause la prise d'aliment chez le rat affamé, alors qu'elle inhibe la prise de boisson chez le rat assoiffé, la carbamacétylcholine provoque l'effet inverse. Cette combinaison des processus de prise solide et liquide s'établit progressivement chez le

jeune Mammifère au cours des premières semaines ou des premiers mois de la vie. Krecek et Kreckova séparent, de ce point de vue, la vie postnatale du rat en trois périodes : celle qui va de la naissance au 14e jour, celle du sevrage et la période postsevrage. Dans la première période, le seul aliment ingéré est le lait, et tous les essais de sevrage sont pratiquement voués à l'échec. A cette époque, se mettent en place les régulations thermique et osmotique de l'individu. Le sevrage est un processus graduel qui se poursuit entre le 14e et le 30e jour. Au début de cette période, les ratons préfèrent le lait à l'eau. Même si on les assoiffe pendant 24 h, ils boivent plus de lait que d'eau dans une situation de choix. Plus tard, à 24 jours, si on leur injecte du sérum hypertonique, ils boivent plus d'eau que de lait dans l'appareil de choix. Cela apporte la preuve qu'à cette époque leur organisme commence à distinguer l'eau et sss qualités, ce qui est le fondement discriminatif sur lequel repose la distinction entre ingestion d'aliments solides et boisson.

Dans la période du sevrage, si on nourrit un jeune rat avec des boulettes solides et de l'eau avant de lui faire subir un test alimentaire comportant du lait, le résultat du test sera fonction de sa structure :

— si le lait remplace l'eau (boulettes + lait), le rat boit du lait volume pour volume, en tenant compte de sa prise antérieure d'eau, et réduit sa quantité d'aliments solides ingérés de telle sorte que sa courbe de poids ne se modifie pas ;

— si le lait est fourni seul, l'animal accroît sa prise de fluide et stabilise son poids après une légère perte (il « boit des calories ») ;

— si le lait est joint aux autres (lait + boulettes + eau), l'animal prend très peu d'eau, le lait est traité comme boisson et l'augmentation en calories est compensée par une légère diminution de la prise solide.

Cet ensemble des comportements alimentaires peut se combiner à d'autres, comme l'émotivité, la frayeur, et l'anxiété. Dans des procédures expérimentales, on peut mesurer ces interférences par l'importance des obstacles qu'un animal franchit pour atteindre les aliments ou par l'intensité d'une décharge électrique à laquelle il réagit. Toutefois, Sterrit montre que des pigeons recevant des chocs électriques mangent davantage que ceux qui n'en reçoivent pas et que si, à un moment donné, on supprime les chocs administrés aux pigeons du premier groupe, ils mangent moins que les témoins. Ce résultat tendrait à prouver que les stimuli de type choc électrique peuvent bien avoir d'autres effets que les effets aversifs.

Diverses recherches poursuivies à partir de celles d'Olds (1960) doivent être évoquées ici. Cet auteur analysait les régions hypothalamiques impliquées dans la prise alimentaire. Si on place un rat dans une boîte de Skinner et si la pédale de cette boîte est établie de telle sorte qu'elle délivre à chaque appui à la fois une boulette d'aliment dans l'environnement immédiat du rat et une décharge électrique dans certains lieux précis de son hypothalamus, le rat passera pratiquement tout son temps à appuyer sur la pédale sans jamais manger la nourriture qui tombe. C'est le phénomène de l'*autostimulation*, qui, une fois découvert, a donné lieu à de multiples expériences. Les sites reconnus joueraient, lorsqu'ils sont excités, un rôle comparable à celui d'un acte consommatoire (suppression de comportement) mais, pour ainsi dire, par anticipation. L'école française de Cardo analyse très longuement ces phénomènes, exprimant une position beaucoup plus objective et prudente que d'autres, qui ont évoqué pour de tels sites l'idée et la fonction anthropomorphisées de « centres de plaisir ».

Des expériences élégantes poursuivies par de Ruiter et Wiepkema montrent bien qu'aucun système n'est indépendant des autres ; il devient évident que les variables neuro-endocrinologiques *(variables motivationnelles)* et les contingences de renforcement correspondant à un groupe d'activités dans le comportement général d'un animal interagissent avec celles qui caractérisent d'autres groupes.

Ainsi, une substance comme l'aurothioglucose injectée à des souris a été longtemps considérée comme mimant chimiquement l'effet d'un blocage chirurgical du fonctionnement de l'hypothalamus ventromédian : les souris, hyperphagiques, devenaient obèses. Or, l'étude du partage temporel des activités de souris d'une souche CBA, avant et après injection intrapéritonéale d'aurothioglucose, donne les résultats suivants :

— *souris-témoins :* sommeil, 40 % ; toilette, 25 % ; alimentation, 10 % ; séquences brèves de boisson, construction de nid, séquences longues d'exploration, 25 % ;

— *souris injectées :* sommeil, 50 % ; toilette, 25 % ; alimentation, jusqu'à 70 % chez certains sujets ; peu d'exploration et d'autres activités.

Que le lien entre toutes ces activités qui se groupent soit d'ordre neuro-endocrine, qu'il soit supporté par le fonctionnement du système sympathique ou qu'il soit davantage exprimé par des variations des seuils des récepteurs périphériques, que les effets observés soient excitateurs ou dépresseurs, il n'en reste pas moins que ces interactions existent. Elles permettent sans doute de comprendre certaines des ambiguïtés du comportement. Elles montrent l'organisme comme un tout dont les parties s'isolent difficilement et conduisent à mieux poser les problèmes des interactions de comportements.

Ces problèmes se compliquent du fait des incompatibilités motrices de l'animal et du fait que l'environnement stimulant est souvent simultanément polymorphe.

Les conflits

Toutes ces interactions sont en général résolues assez aisément par l'animal en termes d'isolement vis-à-vis des autres d'un comportement qui s'exprime (*cf.* la règle de Steiner). Cependant, certaines interactions conduisent à une impossibilité de décision (*cf.* l'âne de Buridan) : on observe fréquemment, chez des animaux explorant un milieu familier, des Oiseaux engagés dans une opération de harcèlement sur un prédateur ou des animaux sur les limites de leurs surfaces territoriales, à la fois une tendance à fuir et une tendance à poursuivre qui s'opposent et qui, finalement, causent une tension extrême de l'individu. Une telle situation est appelée *conflit*.

Les éthologistes objectivistes ont fréquemment insisté sur les conflits entre le comportement agressif et le comportement sexuel. Ceux-ci vont, au maximum de leur intensité, jusqu'à occuper chacun une moitié du corps de l'animal. On pourrait, par exemple, interpréter la danse en zigzag de l'épinoche comme le résultat d'une opposition entre la tendance à se rapprocher de la femelle (peut-être pas très différente d'une tendance agressive) et la tendance à s'en éloigner et à se rapprocher du nid ; c'est ainsi que la moitié du corps du coq qui parade devant une poule se trouve très fléchie (fuite) et que l'autre moitié, opposée à la poule, est très étendue (attaque), ce qui amène le coq paradant à « valser » devant la poule.

Dans les cas où un conflit atteint de très forts niveaux d'intensité, comme dans certaines frayeurs, l'inhibition qu'il provoque est suffisamment étendue pour supprimer

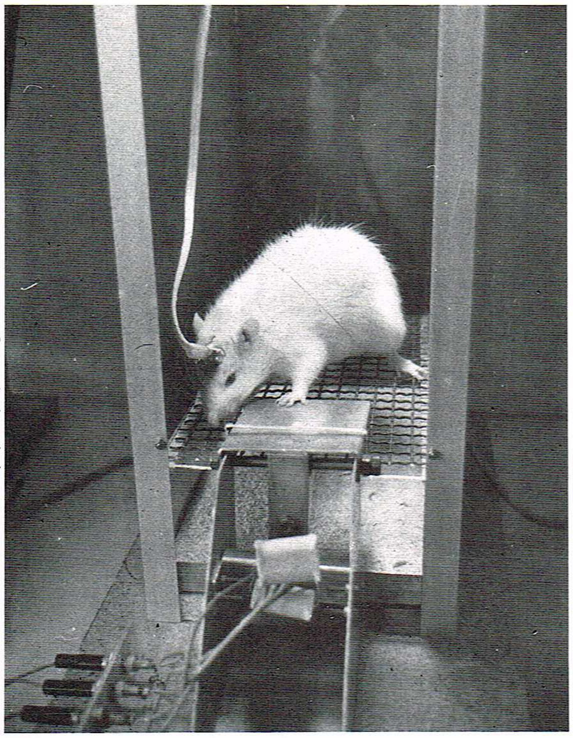

Professeur Cardo, laboratoire de psychophysiologie, Université de Bordeaux

◀ *Rat en* **autostimulation** *; ce phénomène, une fois découvert, a donné lieu à de multiples expériences.*

Archivio Longo

D. Richard

▲ *A gauche, divers Oiseaux, et les Gallinacés en particulier, exhibent pendant la parade sexuelle ou pendant la parade agonistique certaines parties de leur corps, redressent la tête et divers organes érectiles congestionnés, le tout constituant un comportement complexe accompagné d'émission sonore. A droite, une mouette en posture de « regard fixe ».*

▼ *Les activités comme le toilettage (ici celui d'une foulque à côté de son nid) ou la construction, qui apparaissent souvent dans les cas de déplacement, font partie intégrante des séquences quotidiennes du comportement des animaux.*

toute possibilité d'action. Mais en général, l'impossibilité d'expression n'est pas totale et, souvent, on voit l'animal osciller entre deux manifestations incomplètes successives des comportements en cause. Il s'agit alors de manifestations *ambivalentes,* dont l'importance dépend des tendances en conflit. Tout cela, bien entendu, peut en réciproque servir de mesure comportementale aux états internes des animaux. En particulier, certaines activités végétatives (déféquer, uriner, émettre un son, etc.) accompagnent souvent les états de conflit ; ces activités ont servi à mesurer l' « anxiété », l' « émotionalité » de l'individu (Broadhurst).

Un cas particulier plus intéressant encore est celui dans lequel, en cours d'expression d'un conflit de comportements, l'animal manifeste un ou quelques actes qui n'appartiennent ni à l'un ni à l'autre des comportements qui s'opposent. Ainsi, les animaux qui se battent interrompent de temps en temps la bataille pour effectuer des séquences alimentaires ou de toilettage par exemple. De telles activités sont dites de *déplacement,* et, dans la mesure où elles s'orientent dans l'environnement, en tenant compte de l'orientation en cours, elles sont dites *redirigées.* Dans l'optique objectiviste des années 1950, on les considérait comme induites par les activités en conflit. Cependant, dans un cas de conflit, ce n'est pas n'importe quelle activité déplacée qui se manifeste : des dindons qui se battent boivent s'il y a de l'eau, mais picorent s'il n'y a que de la nourriture solide sur le sol. La posture que manifeste un animal en cours de conflit influe sur la posture prise pendant les mouvements déplacés ; l'intensité et la « nervosité » avec lesquelles est effectuée l'activité déplacée dépendent de la phase et de l'intensité du conflit en cours.

D. Richard

Il faut toutefois remarquer que des activités comme le toilettage ou la construction, qui apparaissent souvent dans les cas de déplacement, font partie intégrante des séquences quotidiennes du comportement des animaux. Van Iersel et Bol (1958) faisaient justement remarquer que, chez des mouettes en couvaison, dans les séquences non conflictuelles, les toilettages encadrent des séries d'actes de couvaison : une forte tendance à couver « inhiberait » le toilettage, et celui-ci ne se manifesterait que lorsque les tendances à couver sont relativement faibles. De la même manière, en cas de fuite provoquée par une action du milieu extérieur, l'Oiseau couveur se trouve plongé dans un conflit entre la tendance à incuber et la tendance à fuir : il se pose alors à des distances variables de son nid suivant l'importance du conflit et s'engage dans un toilettage plus ou moins discontinu. Ces faits ont conduit à penser que l'opposition de deux tendances en conflit pouvait tendre à « désinhiber » des activités qui, normalement, sont tenues « inhibées » par l'une ou l'autre des tendances en cause.

Cependant, McFarland (1965-1966) a tenté de substituer à l'hypothèse de désinhibition celle de *frustration.* Il a attiré l'attention sur le fait qu'un animal ne peut manifester une attention soutenue pour les deux situations stimulantes d'un conflit et que l'activité qui prédomine est celle pour laquelle son attention s'exprime au mieux ; or, une frustration implique un changement d'attention et, dans ce cas, l'animal se tournerait vers d'autres stimuli que ceux correspondant à l'activité en cours. Un déplacement ne serait que la traduction d'une substitution d'attention. Cette hypothèse, qui met en cause l'attention et donc des phénomènes de vigilance, est certainement très fructueuse. Dans beaucoup de situations où s'observent des activités déplacées, en effet, le degré d'éveil est élevé et il est possible de lui attribuer une influence sur diverses activités et sur leurs intensités. Bindra suggère que, dans ce cas, les seules activités qui tendent à se manifester sont celles qui sont hautement habituelles ; cette suggestion semble confirmée par le fait que ce sont des activités alimentaires ou des activités de toilettage qui se manifestent lors des conflits.

Delius (1967) est parvenu, par une étude minutieuse du cerveau antérieur et du tronc cérébral de la mouette rieuse et du goéland, à délimiter des loci impliqués préférentiellement dans le comportement de toilettage. Leur stimulation à intensités variables provoque des comportements ou des postures comme : regard fixe dirigé vers le bas, picorage, bâillement, accroupissement, relaxation, sommeil. Des mouvements de mandibules, de secouage

de la tête, des mouvements latéraux de la queue peuvent être induits de la même façon.

De ces faits, on peut déduire que les comportements de toilettage et peut-être d'autres sont plus ou moins sous le contrôle des mécanismes physiologiques et des réseaux nerveux responsables du sommeil. Or, si un conflit peut avoir un effet augmentateur de l'éveil, les comportements de déplacement, comme le toilettage, pourraient traduire la mise en jeu par l'organisme de l'animal d'un système de *feed-back* homéostasique qui, par appel aux mécanismes de l'endormissement, s'opposerait à l'excès de l'éveil dans lequel le conflit engage l'individu. Si cette hypothèse, déjà fortement étayée, se vérifiait dans les années qui viennent, les activités déplacées pourraient servir à la fois de mesure qualitative et quantitative aux états conflictuels de l'animal; elles pourraient également mesurer son état général de vigilance dans l'environnement. Toutes ces propriétés en font effectivement des activités fort capables de porter des valeurs informationnelles précieuses et les désignent particulièrement aux pressions sélectives de l'évolution : ce sont elles qui se sont trouvées chargées de signification, sous la forme des ritualisations évoquées plus haut.

Les complexités de l'ontogenèse

L'interaction continue de la *maturation*, de l'*expérience* et de l'*apprentissage* caractérise le développement du comportement. La *naissance* d'un jeune se place de manières diverses dans ces continuums ontogénétique et phylogénétique; elle est décrite comme l'arrivée de l'organisme dans un nouvel environnement complexe, hétérogène, très différent de l'environnement embryonnaire relativement monotone d'où, cependant, le jeune commençait sa communication préparatoire avec l'environnement futur (voir l'exemple, donné précédemment, du caneton dévocalisé). La naissance est à ce titre génératrice de nouvelles continuités, qui supporteront des changements importants du comportement.

Schneirla voit se constituer les premières étapes du comportement sur la base de dynamismes dans lesquels des *processus biphasiques d'approche et d'éloignement* jouent un rôle considérable. Ces processus, replacés dans les gradients des facteurs abiotiques de l'environnement (un stimulus de faible intensité ou à variation décroissante tend à évoquer des réactions d'approche; un stimulus de forte intensité ou à variation croissante tend à évoquer des réactions d'éloignement), s'accompagnent de transferts de valeur possible des réponses par conditionnement de contiguïté des stimuli, dont l'effet quantitatif serait prioritaire sur l'effet qualitatif. A tout cela s'ajoutent, dans les stades postnataux, une *fonction tonique* (processus continus qui permettent une intensification de l'action) et une *fonction phasique* (processus en degrés venant de la répétition de phases accrues, courtes, temporaires), qui agissent sur le développement des centres de commande des comportements. C'est ainsi que les divers aspects du développement du comportement assurent les liens fonctionnels avec les milieux successifs par lesquels passe l'individu et qu'ils préparent les liaisons caractéristiques des étapes futures.

Dans un tel cadre ontogénétique, pour les Vertébrés supérieurs, l'environnement privilégié du jeune est constitué par la mère; mais, à l'inverse, l'environnement privilégié de la mère est le ou les jeunes. Ainsi, la seule étude des initiatives de début de tétée prises par la mère ou les jeunes d'une portée de chatons montre trois phases successives : jusqu'à 3 semaines, c'est la mère qui manifeste pratiquement toutes les initiatives; après 6 semaines, ce sont les initiatives des jeunes qui tendent à devenir prépondérantes; entre ces deux âges, mère et jeunes se partagent les initiatives. Des phénomènes tout à fait semblables peuvent être décrits chez les singes (Harlow) : le nouveau-né développe très rapidement une forte réaction d'agrippement à la fourrure de sa mère (combinée à une exploration active de contact); cette réaction s'atténue vers la fin du 2e mois; pendant ce temps, la mère développera (point culminant vers le 60e jour) des réponses positives à son enfant, qui se manifestent par le fait qu'elle ne lui permet pas de la quitter. Mais un peu plus tard (90e-100e jour), quand la vie sexuelle de la mère reprend, les réponses positives au jeune diminuent et des réponses négatives (indifférence, repoussement) s'observent en simultanéité à une recherche active par le

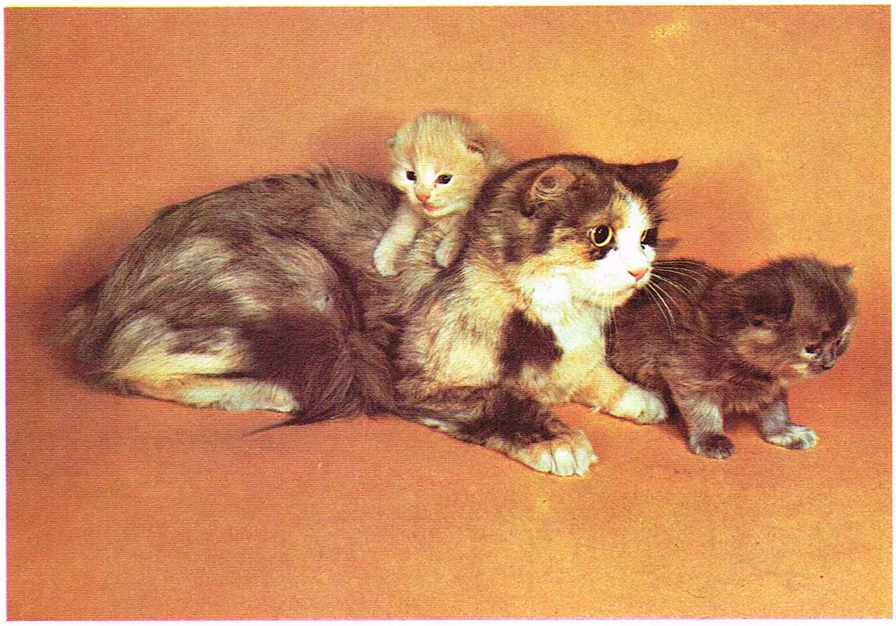

N. Myers

▲ ***Pour les Vertébrés supérieurs,* l'environnement privilégié *du jeune est constitué par la mère, de même que le ou les jeunes constituent* l'environnement privilégié *pour la mère.***

J.-C. Guyomarc'h

◀ ***La naissance d'un jeune (ici l'éclosion d'un poussin), se place de manières diverses dans les continuums ontogénétique et phylogénétique; elle est génératrice de nouvelles continuités qui supporteront des changements importants du comportement.***

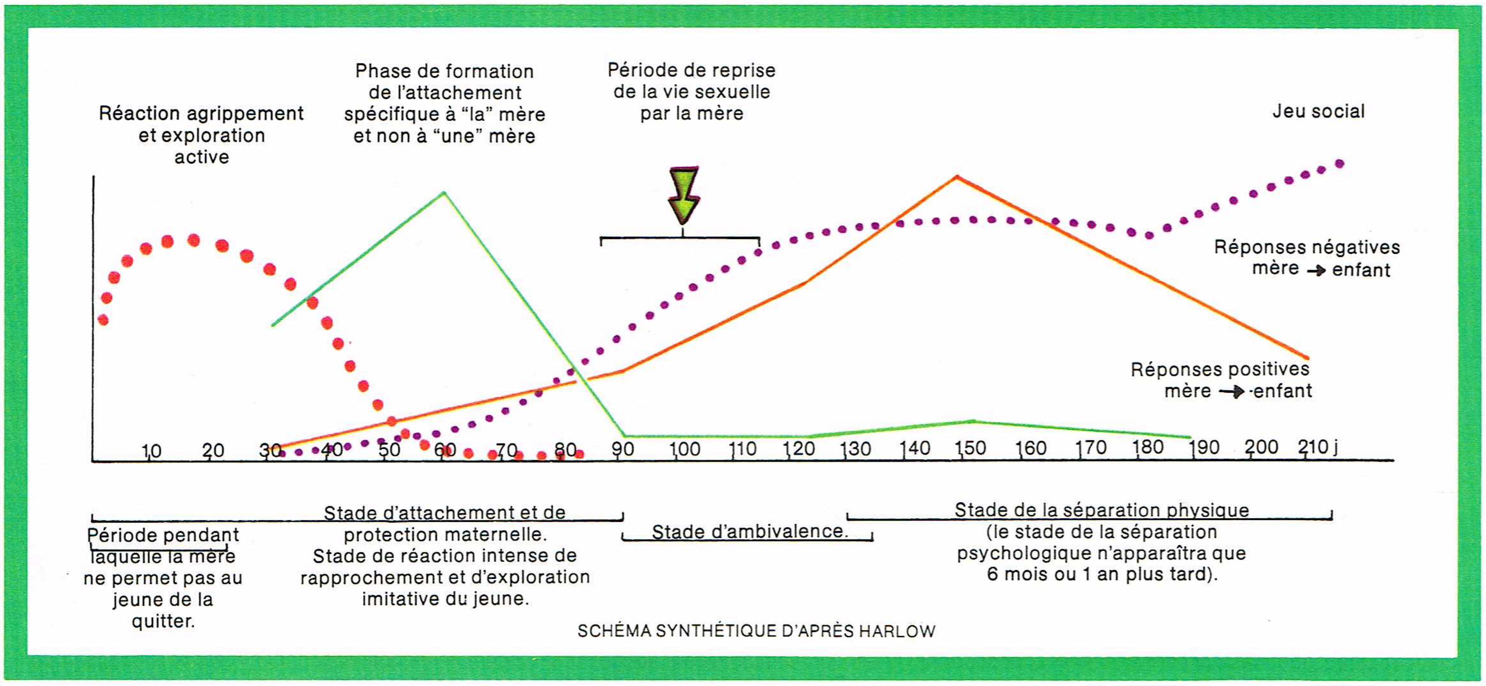

Richard Colin

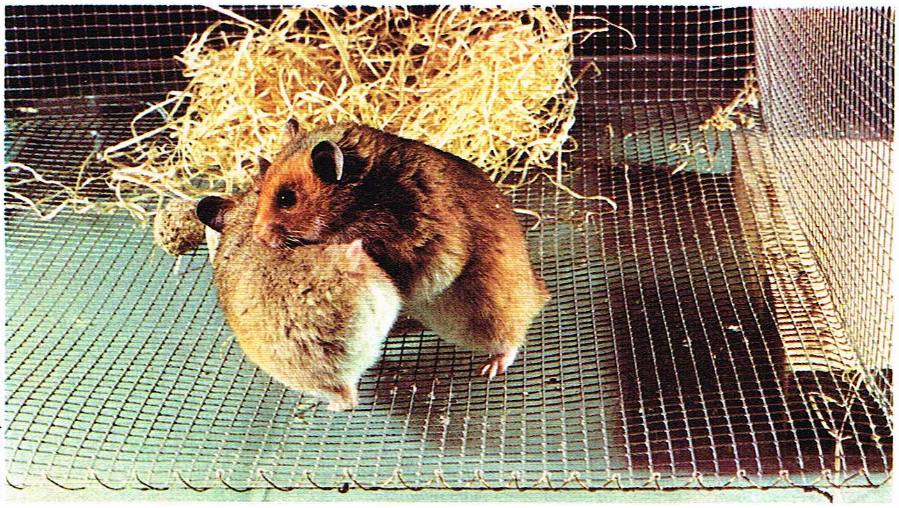

J.-C. Guyomarc'h

▲ *En haut, représentation schématique des concordances entre le comportement de la mère et le comportement du jeune chez le singe macaque. En bas, le hamster doré a servi de matériel pour de nombreux travaux sur l'intrication des transformations physiologiques et psychologiques de la mère et du jeune selon le mode d'élevage; ici, combat de deux mâles préalablement isolés.*

jeune de la rencontre avec des congénères de sa classe d'âge.

L'intrication des transformations physiologiques et psychologiques de la mère et du jeune est abondamment mise en évidence dans les travaux de Rosenblatt, qui a été l'un des premiers à montrer les conséquences (parfois à très long terme) des manipulations plus importantes reçues de leur mère par les jeunes qui avaient, pour une raison ou une autre, provoqué des réponses de soins augmentées.

Morin et Gingras élèvent des hamsters dorés dans diverses conditions d'isolement ou de groupement, avec ou sans leur mère ou avec un substitut de mère (ratte). La comparaison à 3 mois et demi ou 4 mois des activités motrices des animaux dans un test d'*open-field* montre que les animaux élevés en groupe par leur mère marchent davantage que les autres; toutes les femelles marchent plus que les mâles, sauf celles élevées seules avec leur mère; de tous les hamsters étudiés, ceux qui ont été élevés avec des rats sont les moins actifs. A la répétition du test après 3 jours, on s'aperçoit que les animaux élevés en groupe par leur mère diffèrent davantage des autres après le second test qu'après le premier; cet effet est plus manifeste chez les mâles que chez les femelles. A l'inverse, les femelles élevées avec des rats sont, au second test, plus actives que les mâles élevés avec des rats.

Dans les rencontres mâles-femelles, les latences de premier contact sont plus courtes chez les hamsters élevés en groupe par leur mère, et ce davantage encore au second test. De la même manière, les temps de contact varient de façon significative. Il semble que l'expérience sociale acquise entre le 30e et le 50e jour soit fort importante pour augmenter le temps de contact, même si l'expérience d'abord acquise n'est pas spécifique (élevage avec des rats). On a pu montrer que l'expérience acquise par l'animal avant qu'il n'atteigne la maturité sexuelle contribue à l'action des hormones sur les centres nerveux et sur les structures périphériques responsables des schèmes spécifiques de comportement.

A l'inverse de l'exemple précédent, qui étudiait les réponses de jeunes au maternage, Lehrman assure que des Oiseaux et des Mammifères ayant déjà élevé des jeunes deviennent plus aptes à en élever d'autres et que, avec des différences spécifiques, toutefois, les injections d'hormones à des animaux expérimentés et non expérimentés conduisent à des effets différents.

Harlow, qui étudie les conséquences de divers modes d'élevage de jeunes macaques sur leurs comportements de jeu, de défense et de sexualité, montre que des jeunes élevés dans un isolement total depuis leur naissance jusqu'à l'âge de deux ans ne développent plus aucun des trois comportements. Ils vivent prostrés dans un coin de cage, repliés sur eux-mêmes et s'automutilent gravement les extrémités des membres. Si on les réunit en groupe de jeunes ayant subi un traitement similaire, ils se placent en contact étroit ventrodorsal les uns vis-à-vis des autres et s'immobilisent. Une rupture de l'isolement après 6 mois laisse persister des comportements de jeu rudimentaires, mais ne permet pas le développement des autres comportements sociaux. La rupture de l'isolement au bout de 80 jours permet une construction des trois comportements, mais chacun d'eux reste en partie désorganisé. L'élevage des jeunes par leur mère sans possibilité d'accès à d'autres jeunes permet un comportement de défense normal, un comportement sexuel subnormal, mais un comportement de jeu rudimentaire. L'élevage sans mère, mais avec d'autres enfants de même âge, permet une certaine organisation d'au moins deux des trois comportements, variable suivant les richesses des environnements des cages d'élevage.

Une analyse plus précise montre les effets comparatifs de l'élevage avec une mère normale et de l'élevage avec une « mère artificielle ». Cette dernière peut être une planche recouverte de fourrure, portant des « yeux », chauffée, etc. Or, tant pour leur capacité orale d'exploration dans l'environnement, pour leur expressivité faciale que pour le développement de leurs jeux sociaux, les jeunes singes élevés dans les deux conditions extrêmes montrent des capacités qui s'éloignent fortement. L'âge augmente souvent l'écart, mais il serait étonnant de voir celui-ci s'exprimer seulement en termes de comportement

du jeune : comme il a été dit plus haut, la mère et le jeune interagissent dans une transformation mutuelle de leurs comportements.

Si tous ces exemples sont fort importants, le rôle de variations fortuites dans les interrelations mère-jeunes est encore plus impressionnant. Barnett et Brun (1967) ont modifié la forme de l'oreille de jeunes souris en y découpant une petite entaille au poinçon (ou bien ils soumettaient chaque jour les jeunes à un froid modéré). Cette modification altère les comportements d'exploration ou de léchage de la mère sur les jeunes ainsi modifiés. Il s'ensuit, chez les jeunes, des taux accrus de développement de diverses structures morphologiques, de résistance au froid, de capacité reproductrice. Par ailleurs, les jeunes souris ainsi stimulées dans leur enfance maturent plus vite que les souris-témoins sur le plan du comportement. A l'opposé, des rats élevés à la main par l'expérimentateur très tôt après leur naissance manifestent ultérieurement une réduction de leur capacité à réaliser le comportement sexuel (Thoman et Arnold, 1968). L'élevage d'un rat unique par sa mère conduit aux mêmes extrêmes (Hard et Larsson, 1968).

Sans doute par généralisation hâtive, diverses méthodes d'éducation des enfants humains ont été élaborées à partir de ces expériences : par leur outrance même, elles étaient d'emblée vouées à l'échec. Il n'en reste pas moins que le rôle des environnements dans lesquels mûrit le jeune ne peut être surestimé. Les célèbres observations de Spitz sur l'hospitalisme en sont un exemple.

Ces divers stades de formation d'un lien interindividuel mère-jeune puis d'une séparation physique corrélée à la formation d'un lien interindividuel jeune-jeune, puis de la séparation psychologique constituent le décours obligatoire pour une adaptation totale de l'animal à son groupe. Étudiés dans le cadre de la réaction de poursuite des jeunes Oiseaux nidifuges, dont il a été question plus haut, ces problèmes ont conduit Lorenz à élaborer une théorie de l'*empreinte (Prägung)*, selon laquelle l'objet poursuivi par le jeune devient, lorsque l'individu atteint l'âge adulte, celui sur lequel on dirige préférentiellement les comportements sexuels. La réaction de poursuite devient alors un moyen de stockage d'informations (l'école de Bloch a montré que les caractéristiques neurophysiologiques de ce stockage peuvent se comparer à celles d'autres phénomènes de mémorisation), et celles-ci sont utilisées plus tard dans un autre contexte par l'individu, qui « apprend » en quelque sorte de sa mère les caractéristiques de la femelle future (dans la quasi-totalité des expériences, il s'agit de mâles...). Lorenz considérait cette situation comme rigide et irréversible à partir du stockage effectué dans une « période sensible » du développement du jeune. Cette conception a dû subir quelques aménagements en même temps que le phénomène d'empreinte était testé sur des Oiseaux nidicoles et sur des Mammifères, en même temps également que s'approfondissait l'analyse de l'attachement de la mère à son jeune et que se poursuivait l'étude longitudinale de diverses espèces.

Tout particulièrement depuis une quinzaine d'années, on étudie l'intégration d'effets de la poursuite de la mère et de l'établissement des relations sociales dans le groupe de jeunes qui l'accompagne. Guiton (1958) a montré que des poussins élevés en groupe pendant quelques heures, puis isolés avant le test, réalisent de meilleures performances de poursuite que des sujets totalement isolés d'emblée. Cependant, si l'expérience sociale est prolongée, les poussins s'imprègnent les uns aux autres et ne présentent plus de réaction de poursuite vers un objet mouvant. Sluckin et Salsen (1961) ont montré que des poussins élevés socialement pendant 21 heures et individuellement confrontés à un objet mobile pendant 3 minutes ne manifestent pas de réaction de poursuite; après 3 heures d'isolement, les mêmes sujets suivent parfaitement. Par contre, après 48 heures d'expérience sociale spécifique et 3 heures d'isolement, aucun poussin ne réagit, alors que, si l'isolement est prolongé de 24 heures, des réactions de poursuite peuvent à nouveau être obtenues.

Si le début de manifestations d'une réaction de poursuite coïncide avec l'achèvement fonctionnel des liaisons sensori-motrices du système locomoteur du poussin (quelques heures), la fin de la période où cette réaction est possible se révèle beaucoup plus variable et dépend

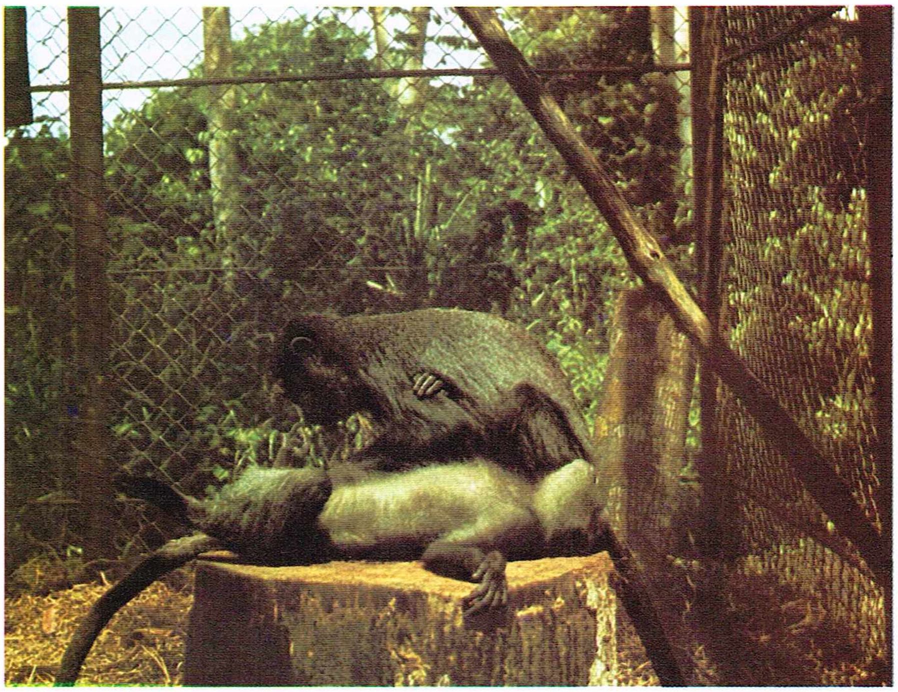

A. Gautier

J.-C. Guyomarc'h

▲ ***Les activités sociales (en haut,*** **Cercopithecus nictitans*****) venant après les relations mère-jeune (en bas, ouistiti) déterminent la richesse des comportements de chaque individu. A l'inverse les comportements d'animaux élevés sur des « mères » artificielles ou élevés dans l'isolement présentent d'importantes déviations.***

▼ ***Groupe mère/jeunes chez un Anatidé : réaction de poursuite impliquée dans le*** **phénomène d'imprégnation.**

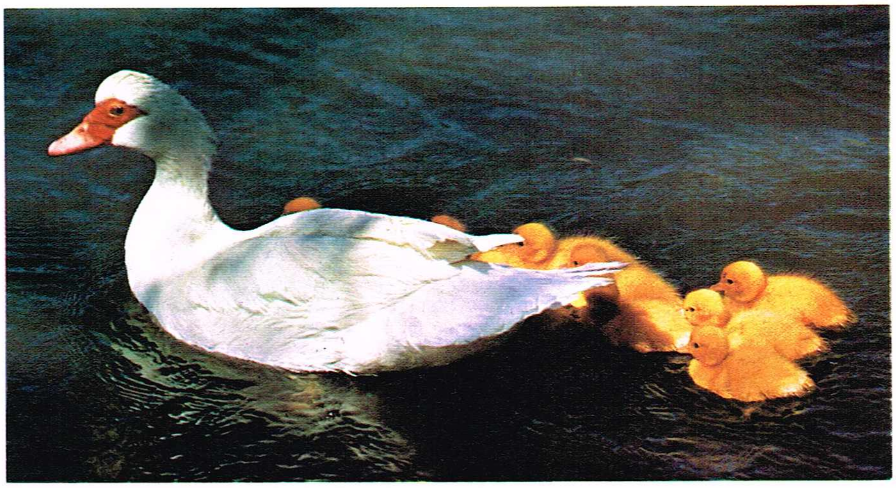

Marka

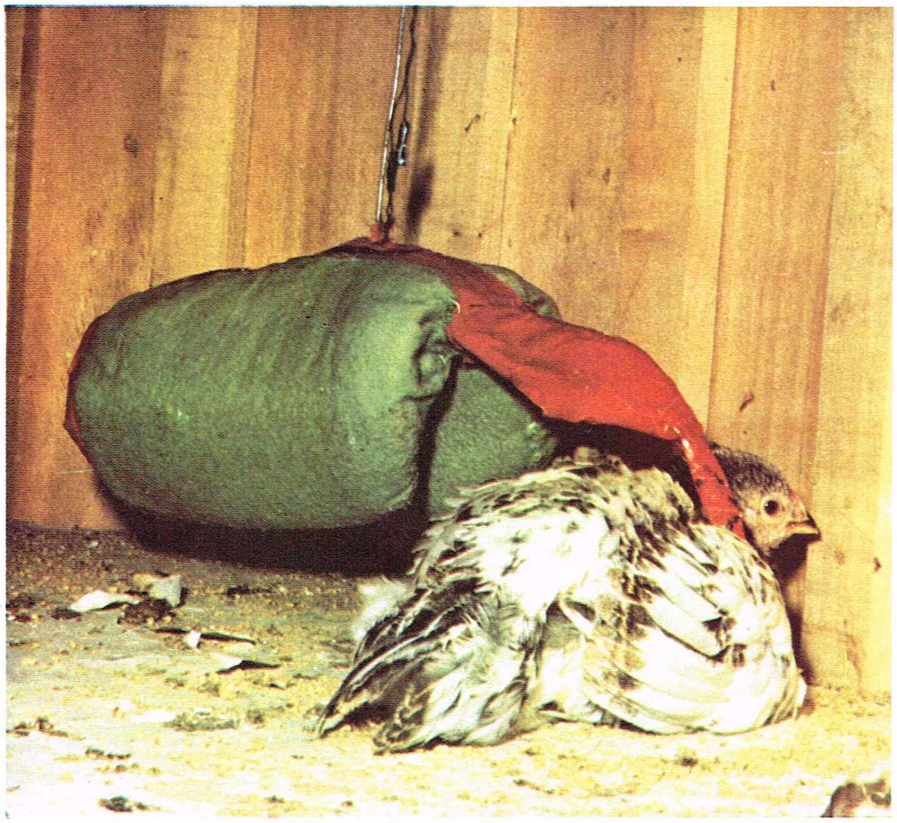

J.-M. Vidal

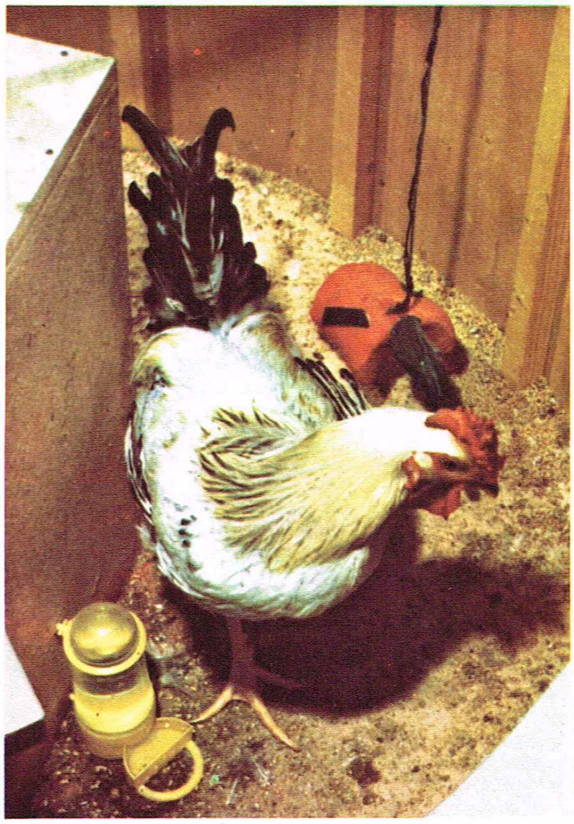

J.-M. Vidal

▲ *Les poulets âgés sont susceptibles, comme les plus jeunes, de manifester des comportements de poursuite (à droite) mais montrent, de plus, des phénomènes de régression tels que la reprise du comportement de blottissement (à gauche) et d'endormissement sous le modèle.*

de nombreux facteurs, parmi lesquels la durée de la stimulation d'entraînement occupe une place importante. En effet, la prolongation de cette stimulation montre qu'on peut encore déclencher la réaction de poursuite après la période soi-disant critique de 15 jours. En 1973, Vidal a étudié les capacités de poursuite d'un modèle par trois lots d'animaux : poussins de 0 à 15 jours, de 15 à 30 jours, de 30 à 45 jours. Il les a maintenus en compagnie du modèle pendant les 15 jours expérimentaux, alors qu'avant et après l'expérience ils se trouvaient en rapports directs avec un animal de leur âge, mais sans rapports directs autres que sonores avec d'autres animaux. Les poulets âgés sont susceptibles comme les plus jeunes de manifester des comportements de poursuite, mais ils montrent de plus des phénomènes de régression : reprise du comportement de blottissement et d'endormissement sous le modèle, reprise d'émissions sonores de poussins de quelques jours (avec un appareil phonatoire d'adulte !). La seule différence entre le premier et le troisième groupe, c'est qu'il faut aux plus âgés quelques jours d'habituation au modèle pour transformer leurs réactions primaires d'évitement en réactions de rapprochement. Ainsi, on peut affirmer que la succession des divers modes de relation de l'animal et de son milieu n'est pas programmée de manière rigide et linéaire, mais que l'individu peut répondre à des changements dans son environnement par un « retour » à des caractéristiques antérieures de son comportement.

J.-M. Vidal

J.-M. Vidal

▶ *Le coq adulte copule avec le modèle qu'il poursuivait dans les jours qui ont suivi sa naissance (à gauche). Le coq, élevé en isolement total, peut, dans les tests (à droite), orienter ses comportements sexuels à l'envers du sens habituel.*

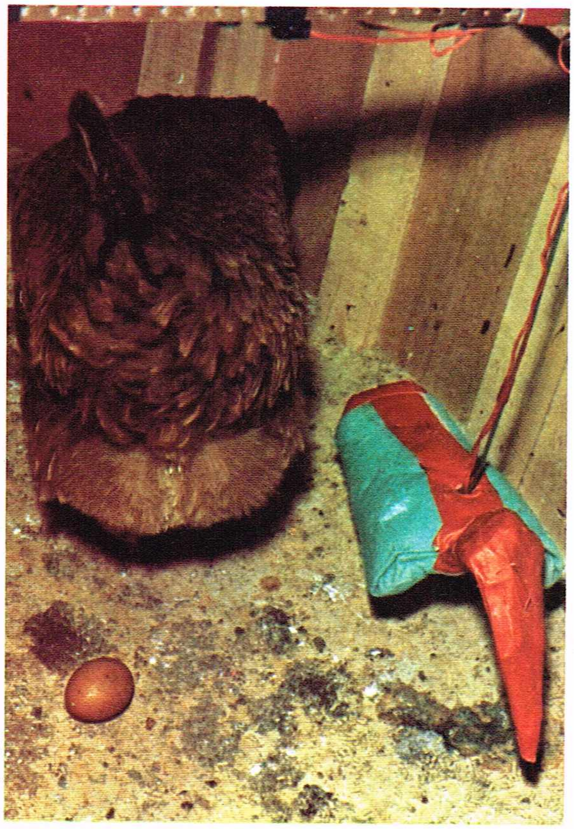

J.-M. Vidal

G. Richard

▲ *A gauche, un poussin femelle a été familiarisé pendant une dizaine de jours après sa naissance à la présence continue d'un modèle coloré, animé, chauffant (à droite sur la photographie). Devenue adulte, la poule replacée dans les conditions de cette première familiarisation, vient le plus souvent pondre au voisinage du modèle manifestant ainsi son imprégnation. A droite, dans tous les groupes permanents à individus nombreux se créent des fonctions de communication. Ces fonctions sont intégrées au système des castes chez les Insectes sociaux comme les fourmis (ici, une fourmilière).*

La persistance de l'empreinte dépend naturellement des conditions de vie sociale après l'entraînement ainsi que, lorsque le groupe est nombreux et structuré, du rang hiérarchique du sujet à l'intérieur du groupe. Vidal a montré, en 1968, que lorsque des coqs sont élevés en groupe de mâles, le dominant sélectionne dans ses choix sexuels un partenaire identique à son congénère d'élevage, alors que le dominé préfère un objet de coloration différente. De la même manière, élevé en isolement total (Kruijt, Vidal), le coq oriente ses parades vers sa propre queue (autoperception) et peut, dans les tests, orienter ses comportements sexuels (lorsque leur expression est encore possible) à l'envers du sens habituel, cochant le modèle vers la partie antérieure et non vers la partie postérieure, occupé qu'il est à enserrer dans son bec la queue au lieu de la tête. Bien entendu, les conditions physiologiques de l'individu soumis au test (son âge en particulier) sont importantes : diverses expériences avec les Gallinacés (Guiton, Vidal) confirment la réversibilité plus ou moins rapide de l'imprégnation selon l'âge auquel est effectué le test, la durée de l'entraînement préalable et la quantité stimulante de l'objet d'empreinte utilisé.

Un des autres aspects de l'établissement du lien social au cours de l'ontogenèse chez les Gallinacés réside dans la plasticité des liens de communication auditive. On a souvent prétendu que les jeunes parvenaient à identifier le cri maternel de leur espèce sans aucun apprentissage apparent préalable. Guyomarc'h montre que les processus sont sans doute plus complexes et, une fois de plus, tirent parti de l'expérience embryonnaire. Chez le poussin, le cri d'activité normale (ou cri d'équilibre psychophysiologique), émis dès avant l'éclosion, est privilégié. L'ensemble des vocalisations juvéniles s'organise autour de lui. Ses qualités propres assurent la cohésion sociale, l'attraction interindividuelle dans les phases d'asservissement actif collectif du milieu par les groupes de poussins. Les mêmes qualités sont progressivement assurées par le gloussement maternel, qui, comme le cri d'équilibre du poussin, diminue la légère tension sociale créée par une réduction des distances interindividuelles. Comme il a été signalé plus haut, le gloussement maternel tirerait son origine ontogénétique du cri d'équilibre psychophysiologique, ce qui permet au jeune de s'autofamiliariser avec les modulations de fréquence du cri maternel au travers des émissions sonores qu'il produit lui-même dans l'œuf et d'y lier des éléments de valeur. Au contraire, tous les cris de déséquilibre, d'évitement, émis par le poussin dans l'œuf, qui sont des cris descendants, ne prendraient pas de valeur attractive après transposition dans le répertoire maternel. Reste un problème : celui de l'attraction préférentielle vers la mère et non vers les jeunes du groupe. Guyomarc'h, après Schneirla, l'attribue au fait qu'un cri détermine d'autant mieux une réponse d'approche qu'il est plus grave, ce qui est le cas de celui de la poule.

Le jeune, ainsi conduit progressivement à son état d'adulte, voit émerger la plénitude de ses capacités d'expression des comportements agonistes et sexuels. Cependant, dans le cadre naturel, il est loin d'être véritablement naïf. Son premier accouplement réussi sera, en définitive, l'aboutissement de nombreux échanges avec les autres individus de son groupe. Il sera tout à fait apte à se guider sur l'ensemble des contingences de renforcement de son milieu ainsi qu'à exprimer ses états physiologiques par des comportements progressivement adaptés, et à reconnaître des expressions similaires dans le partenaire. Les zigzags des parades agressives ou des parades nuptiales prennent alors toute leur valeur entre partenaires et aboutissent naturellement à la conclusion adoptée par la phylogenèse. Tout en surspécialisant certains comportements du répertoire par ritualisation, le groupe transitoire, constitué par les parents entourés de leurs jeunes ou par les partenaires sexuels, peut n'utiliser dans son maintien que les fonctions communicatives de certains organes bien caractérisés (chants, postures).

Le cadre social

Dans tous les groupes permanents à individus nombreux, comme les sociétés vraies (Grassé), la communication fixe des aspects particuliers de même que la morphologie et la physiologie atteignent des spécialisations nouvelles. Ce double processus aboutit à conférer à certains individus remarquables des fonctions communicatives qui leur appartiennent en propre. Ce phénomène atteint son maximum de rigidité dans le système des castes des Isoptères (termites) et des Hyménoptères Formicidés (fourmis). Il s'exprime dans une certaine mesure dans les systèmes hiérarchiques des Vertébrés, pour lesquels les schèmes moteurs exprimant les rôles dominants et ceux exprimant les rôles dominés diffèrent fondamentalement. De plus, « les sociétés vraies témoignent d'une accentuation de la tendance à l'enrichissement du code. Elle se traduit à la fois par la multiplication des types

Bruce Coleman - R. Böck

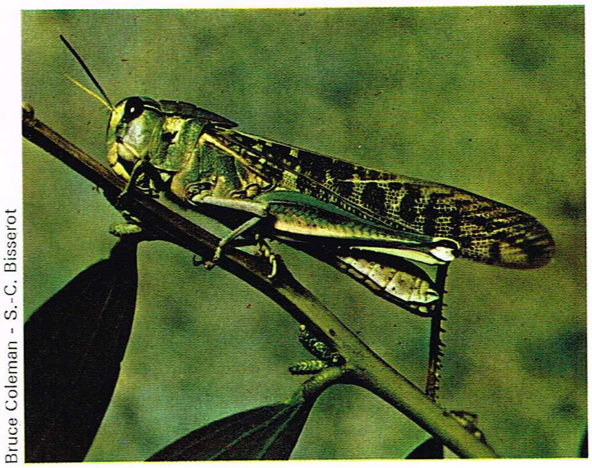

Bruce Coleman - S.-C. Bisserot

▲ *La plupart des Acridiens (et bien d'autres Insectes) réagissent au regroupement dense spécifique ou à l'isolement par des variations importantes de la morphologie, de la physiologie et de l'équilibre éco-éthologique (effet de groupe).*

▼▶ *La troupe de babouins a une structure sociale précise qui se manifeste à tous les moments de la vie du groupe. Ici, les déplacements : ci-contre, on note que les femelles et les petits accompagnés par les mâles dominants sont au centre; autour d'eux, femelles en œstrus accompagnées chacune par un mâle; les juvéniles se dispersent à la périphérie; le groupe est précédé et suivi par les mâles adultes. Ci-dessous, représentation schématique du groupe : en bleu, les mâles; en rouge, les femelles; en vert, les jeunes.*

d'interactions spécifiques existant et par l'augmentation du nombre des consignes correspondantes » (Gervet). De plus, dans toutes les sociétés où jeunes et adultes se maintiennent en contact, certaines des fonctions de communications appartiennent aux premiers, d'autres aux seconds.

Les macaques, étudiés par les primatologues japonais depuis de longues années, peuvent servir à illustrer ce fait. L'approvisionnement régulier de bandes naturelles en produits alimentaires de base et en friandises a permis de montrer que ce sont les enfants dans la période de l'exploration proche de la mère qui, dans certaines bandes, goûtent les premiers aux aliments; les mères tentent d'abord de les en empêcher, puis s'intéressent à leur tour aux aliments étrangers, et l'habitude se généralise par elles de proche en proche à l'ensemble du groupe. La vitesse d'acquisition de ces « traditions » varie considérablement avec l'âge, les sujets les plus vieux étant en général les plus conservateurs. Cependant, les différences individuelles sont marquées, et certains individus appartenant à une classe d'âge et à un statut social déterminés sont plus curieux et plus adaptables que d'autres, apparemment similaires. Alors que le mâle dominant de la troupe du mont Takasaki hésita toujours à s'intéresser à un aliment nouveau, celui de la troupe du mont Mino apprit rapidement à tirer parti de ce qui lui était offert, et le comportement nouveau progressa plus vite dans cette troupe. La troupe de l'île Kopina « inventa » un comportement alimentaire non observé avant 1953 : le « lavage » des patates douces dans l'eau de mer avant consommation. Cette invention est due à une femelle d'un an et demi; elle s'est répandue par l'intermédiaire de la mère, des camarades de jeu, des frères et sœurs de l'animal pionnier; puis elle s'est transmise à d'autres troupes par l'intermédiaire de mâles solitaires qui passent d'un groupe à l'autre, diffusant les habitudes acquises.

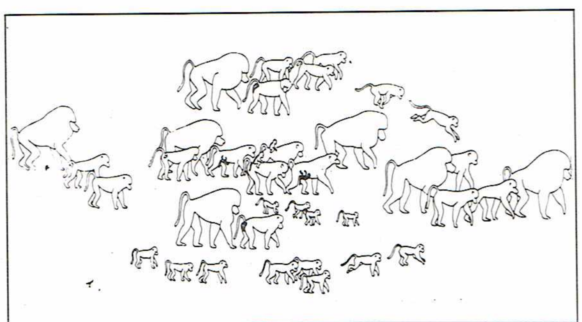

I.G.D.A.

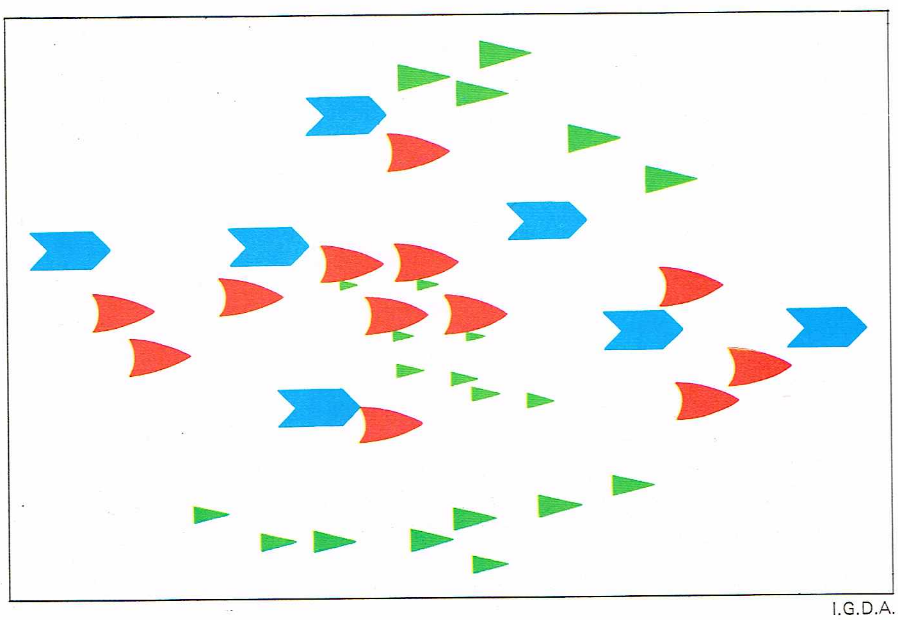

I.G.D.A.

Nous touchons ici au plus haut point de l'action comportementale sur l'environnement, à la fois parce que nous étudions des Primates et parce que nous étudions des animaux sociaux. Le développement des capacités de régulation des comportements liées à la structure plus complexe de l'encéphale permet une organisation plus élaborée des interrelations. Mais aussi, la longue maturation ontogénétique du jeune Primate dans le cadre d'une société organisée permet la transmission de caractères propres au groupe (tradition, protoculture), lesquels vont donner de nouvelles capacités d'adaptation dans l'environnement.

Les chimpanzés, étudiés par Jane Goodall, sont un autre exemple de ces capacités. Leur utilisation, dans les conditions naturelles, d'outils simples préparés dans un but déterminé, ne peut manquer d'évoquer les multiples travaux du début du siècle, auxquels sont attachés les noms des Kellog, de Koehler, de Khots, de Guillaume et de Meyerson. Dans ces recherches, on a conduit très loin l'utilisation des capacités manipulatrices du chimpanzé; on s'est approché de la symbolisation et l'on a décrit les capacités d'intégration des aspects quantitatifs de l'environnement. Les expériences, maintenant assez largement diffusées, des Gardner (apprentissage d'un langage de sourds-muets par une femelle chimpanzé) ou de Premack (apprentissage de symboles par d'autres chimpanzés) ouvrent des voies complémentaires aux interprétations. Elles prouvent en effet (tout comme les expériences antérieures de Koehler sur la capacité de dénombrement des Oiseaux) que certains individus de certaines espèces animales sont susceptibles d'abstraction; mais leur système de communication utilise très mal ces abstractions et les acquis culturels d'un individu semblent ne pouvoir être transmis à d'autres qu'à travers des apprentissages en contact direct avec le réel.

Pour la plupart des éthologistes actuels, c'est cette différence qui sépare le fait de la communication du fait du langage. Ainsi, il est à présent établi que, contrairement à ce qu'on avait pu croire il y a 30 ans, l'abeille, dans ses communications avec des congénères, n'utilise en aucune mesure un langage de concepts abstraits. Actuellement, seule l'espèce humaine, et c'est une de ses caractéristiques, a fondé sur un *premier système de signalisation* (suivant les dénominations pavloviennes), inséré dans le concret, un *second système de signalisation* purement abstrait (langage articulé, parlé, écrit, transmis).

Conclusions

Tous les travaux évoqués ci-dessus nous ramènent donc au cas de l'*Homo sapiens,* dont il n'est pas inutile de répéter qu'il ne peut s'interpréter que dans le continuum évolutif. A aucun moment, il n'apparaît nécessaire d'établir des barrières dans le fonds commun d'organisation continue des comportements des animaux. Toutefois, chaque espèce actuelle a développé ses modalités propres d'interactions avec l'environnement, et il n'est pas toujours aisé de distinguer dans les comportements ce qui est homologie et ce qui est analogie (R.D. Martin).

Une des méthodologies de l'objectivisme actuel (Eibesfeldt) consiste à rechercher chez les Mammifères et, en particulier, chez l'homme, des actes moteurs similaires (soulèvement des sourcils, exploration visuelle simultanée d'autres comportements, mouvements de groupes, etc.). Les études d'enfants sourds et aveugles de naissance, d'enfants phocomèles, etc., paraissent apporter des arguments similaires à ceux du Kaspar Hauser, de l'isolement. Mais il s'agit toujours de comparaisons ponctuelles, auxquelles il vaut certainement mieux substituer une étude longitudinale de l'incorporation de la culture et de la biologie au cours de l'ontogenèse. Plutôt que de référer un comportement à l'innéité, il vaudrait mieux déterminer non qu'il existe, mais comment il est utilisé dans le cadre des relations sociales propres à chaque culture. Il est important d'étudier l'homme pour lui-même avant de lui transférer simplement les concepts qui proviennent d'autres animaux (phylogénétiquement aussi âgés que lui). A ce sujet, des études particulièrement importantes sont en cours actuellement sous l'impulsion de Tinbergen, dans le groupe dirigé par Blurton Jones. Ils vont donner à la structure du comportement humain une dimension nouvelle, grâce à l'utilisation d'une méthode éthologique d'observation de l'enfant qui renouvelle les conclusions des psychologues (Piaget, Wallon).

L'émergence évolutive de l'homme est remarquable par ses caractères et par sa rapidité. Dans l'adaptation de l'homme à son environnement, la culture est aussi significative que l'environnement physique. C'est pourquoi on ne peut pas discuter de la base biologique du comportement humain sans faire référence aux caractéristiques culturelles fondamentales (pas plus qu'on ne peut discuter d'adaptation animale sur la seule base d'une analyse réflexologique). Cela d'autant plus que, chez l'homme, les systèmes neuro-endocriniens qui sous-tendent les comportements des autres Mammifères ont un rôle moins strict vis-à-vis d'autres systèmes de régulation. Il existe certainement des bases biologiques au comportement humain, mais elles ne peuvent être révélées simplement par un « épluchage de l'oignon comportemental » (R.D. Martin) qui séparerait les phénomènes culturels les plus manifestes. Ces phénomènes, que Crook (1968) réfère à des « concomitants culturels de la socialisation expérimentés pendant l'enfance et l'adolescence », sont partie intégrante de la construction du comportement humain. Cependant, l'explication de l'évolution humaine a souvent été biaisée (peut-être sous l'influence de certaines options darwiniennes) par le rôle trop exclusif donné aux activités du mâle, alors que les rôles des femelles et des jeunes étaient pratiquement ignorés.

Au cours de son ontogenèse, l'homme passe par des périodes qui ne sont pas sans rappeler (si on n'oublie pas l'intégration individu/environnement) certains niveaux d' « éveil » de la phylogenèse ; mais l'appartenance du jeune à un groupe social capable de transmettre une culture marque profondément les diverses étapes de son développement.

Le jeune de 2 ans se distingue peu dans son action d'essais et erreurs sur l'environnement d'un chimpanzé de son âge. Mais à partir de 4 ans, une distinction radicale s'établit grâce à l'utilisation de plus en plus fréquente du langage abstrait. L'enfant s'attache alors à résoudre mentalement, sans tâtonnement direct, les mêmes problèmes dont il découvrait précédemment la solution par l'action matérielle. Au cours de cette période transitoire, l'efficacité mesurée en rapidité de résolution décroît, mais très vite le langage permet de poser les opérations dans un système abstrait de significations, où les relations critiques ne sont plus seulement celles de l'organisme avec les choses, mais encore celles des choses entre elles. Il devient l'outil fondamental, peut-être le plus caractéris-

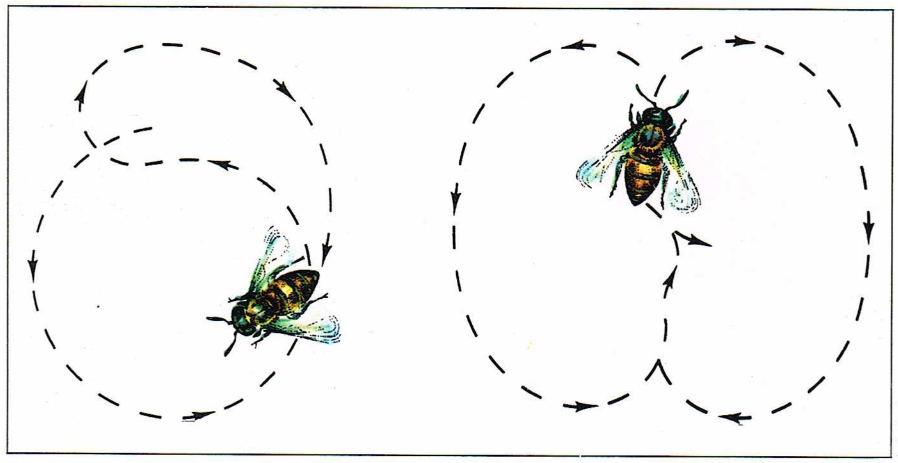

I.G.D.A.

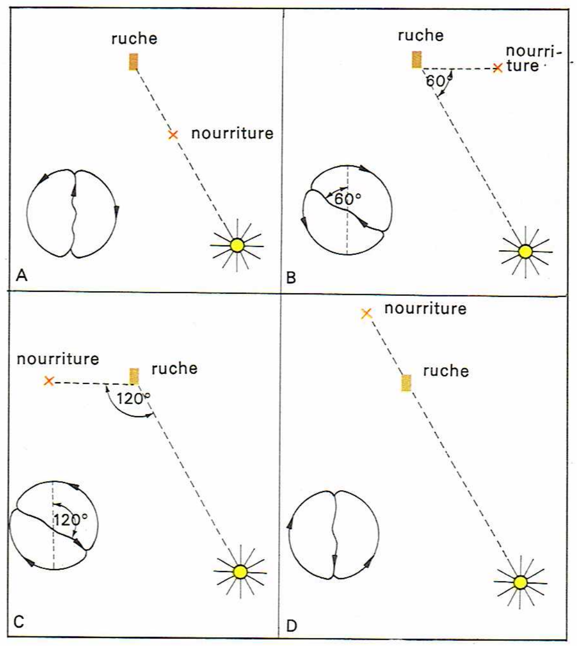

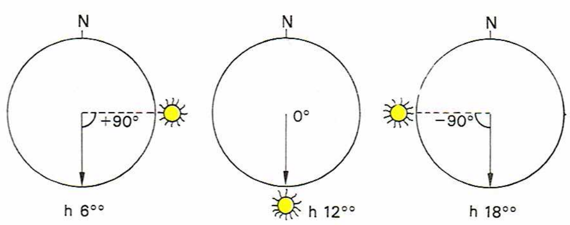

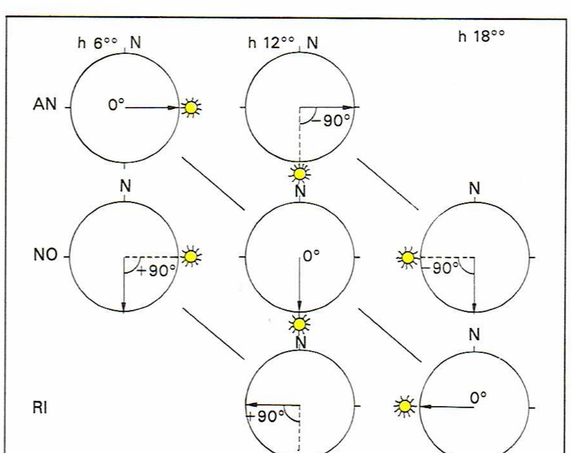

I.G.D.A.

◄▲ Les abeilles communiquent par des moyens complexes décrits par von Frisch et son école. En haut, la « danse » en rond (à gauche) et la « danse » en 8 (à droite) constituent un aspect moteur d'un comportement complexe dans lequel sont impliquées des informations odorantes, tactiles, sonores. Ce comportement est suivi, interrompu et pour partie répété par d'autres abeilles. Dans ce comportement se trouvent des informations quantitatives et qualitatives sur les sources de nourriture, leur position, leur distance vis-à-vis de la ruche (schéma ci-contre, A, B, C, D). Bien qu'une « horloge » permette de tenir compte du déplacement apparent du Soleil (schéma, au centre), beaucoup d'informations sur le milieu ne sont pas fournies, et, en aucune manière, ceci ne peut être considéré comme un langage abstrait. Si une abeille qui récolte au sud de sa ruche à midi (cercles du milieu du schéma du bas, NO) est soumise à une anticipation de 6 h du lever du soleil (transport de 6 fuseaux horaires vers l'est) elle récoltera à l'ouest de sa ruche, c'est-à-dire dans la direction où se trouvera le soleil au lieu de transport à 18 h (RI). Par contre, si elle est soumise à un retard de 6 h du lever du soleil (transport de 6 fuseaux horaires vers l'ouest), elle récoltera à l'est de sa ruche, c'est-à-dire dans la direction où se trouvera le soleil au lieu de transport à 6 h (AN). Après un certain délai dans le nouveau milieu, l' « horloge » de l'abeille se règle à nouveau sur les repères astronomiques du lieu.

Bruce Coleman - J.-R. Brownlie

▲ ***Les grandes termitières représentent l'organisation, par une société, d'un milieu abiotique particulier, réglé dans ses variations par les animaux eux-mêmes et qui fait partie de l'homéostasie sociale.***

tique de notre espèce, celui sans lequel, en tout cas, aucune évolution technologique n'eût été possible. Vivant jusqu'à sa 6e année dans un univers de régulations éco-éthologiques marquées par l'égocentrisme, le jeune enfant se dégage peu à peu de ce type d'échanges pour s'ouvrir à la perception du monde des rapports objectifs et des causalités. Une nouvelle période (6 à 12 ans), où les intérêts intellectuels et moteurs l'emportent sur les autres, prépare l'état de puberté; cependant, l'ensemble du développement ultérieur sera fonction des niveaux d'équilibre ou de déséquilibre établis antérieurement.

Dans la transformation évolutive qui aboutit à l'espèce humaine, la perte de la queue, l'acquisition d'une stature bipède, la perte de la mobilité des oreilles, la grande importance de la vision, la transformation morphologique de la tête, avec en particulier le modelage de la face, ont concentré sur cette dernière un très grand nombre d'actes moteurs importants, qui ne sont d'ailleurs pas tous « nouveaux ». Ceux-ci servent de base à l'établissement des rapports interindividuels avec les semblables et, dans une certaine mesure, avec les animaux d'autres espèces. Bien entendu, ces caractères s'accompagnent de l'évolution du cerveau, de celle de la main et de celle de l'appareil phonatoire. Dans cet ordre d'idée, la mise en place du comportement réciproque de sourire entre la mère et l'enfant est tout à fait importante. Étant donné l'importance de la région céphalique pour l'espèce humaine, c'est vers la tête que se déplacent ou se reportent la plupart des actes moteurs de l'homme en cas de conflit : se gratter le crâne ou le nez, se frotter le menton, se mordre les lèvres, se ronger les ongles, etc. Cependant, beaucoup d'expressions faciales s'observent en synergie avec d'autres éléments moteurs, concernant la posture, les rythmes cardiaques ou respiratoires ou sécrétoires (rire, pleurer), les mouvements d'ensemble (danse avec ou sans masque), les attitudes (« domination », « déférence », « prosternation », etc.).

Une des autres caractéristiques de l'homme, qu'il partage au plus haut point avec les Insectes sociaux, réside dans une restriction artificielle de l'environnement dans lequel il vit. En se reconstruisant un milieu à variations « tamponnées » (voire nulles) dans son habitat, ses travaux, ses loisirs, l'homme attend des stimuli de forme connue (familiarisation) qui assurent une certaine stabilité à ses activités, en canalisant davantage qu'elle ne peut l'être chez les animaux sa perpétuelle « course aux stimuli » (D. Morris). Cette course est d'ailleurs souvent, à cause de l'impact sur l'individu des systèmes socio-économiques dans lesquels il se trouve, une course aux suprastimuli (travail acharné, alimentation surabondante, consommation intense d'excitants ou de déprimants, utilisation de vêtements, de produits de beauté et de parures hautement élaborés). Dans la société dite « occidentale », tout l'arsenal de la publicité exploite abondamment cette recherche du stimulus supranormal.

Deux aspects fondamentaux confèrent aux comportements de l'homme un degré d'intégration particulièrement élevé : d'une part, les capacités de rétention mnémonique et d'utilisation des informations ainsi stockées sont incomparablement plus fortes que dans les autres espèces ; d'autre part, la vie au sein de groupes puis de sociétés de plus en plus nombreux, a permis le développement d'une nouvelle forme de fixation et de transformation de l'information : la culture.

De même, les propriétés de systématisation, de transfert, de signification donnent au comportement de l'homme un caractère particulier : les actes cessent d'être les seuls véhicules de transmission des informations, et le véritable support de l'échange social devient le langage articulé, qui facilite la valorisation continuelle des messages.

Cela permet à l'homme de ranger les événements en classes d'équivalences, d'établir des relations de probabilité entre des événements appartenant à des classes variées, de conjuguer ensuite des causalités qui serviront à créer un système formalisé de traitement de toute l'information qui lui est transmise. Cette véritable fonction d'assimilation de l'information rend l'homme capable de dominer et d'utiliser très largement son environnement. C'est elle qui permet à la conscience d'émerger du réseau complexe des relations établies.

Le travail devient une action systématique, organisée en vue d'un effet à produire, effectuée en commun par les hommes et destinée à créer des objets ou des valeurs utiles au groupe. Cette action, préfigurée par la stigmergie, devient fondamentalement modificatrice grâce à l'outil, qui prolonge le corps de l'homme et prend une valeur abstraite fonctionnelle, et grâce à une organisation consciente de la production sociale dans laquelle la production et la répartition sont planifiées. C'est donc la transformation de la nature par l'homme, et non la nature en tant que telle, qui devient le facteur le plus essentiel et le plus direct de la pensée humaine.

Cependant, si l'intelligence de l'homme a grandi dans la mesure où il a appris à modifier son milieu, ce n'est pas l'individu, mais la société, qui accomplit des progrès continus. Ainsi, l'homme, espèce parmi les autres du règne animal, manifeste ses possibilités et ses caractéristiques. Celles-ci ne peuvent être comprises que par l'utilisation de la même méthode éthologique permettant d'atteindre les caractéristiques et les possibilités des autres espèces animales : une méthode qui se donne comme but non la recherche d'un invariant facilitant des classifications simplificatrices, mais bien plutôt la recherche des descriptions dynamiques de structurations ontogénétiques ou phylogénétiques des ensembles interagissants, constitués par le matériel héréditaire et les interférences fonctionnelles qu'il entretient par l'intermédiaire de la morphogenèse et de la construction physiologique avec des environnements abiotiques ou biotiques successifs.

BIBLIOGRAPHIE

The Biology of Brains, in *Institute of Biology Symposium,* n° 21, Ed. W.B. Brougton, Blackwell Scientific Publ., 1974. - DOBZHANSKY Th., *l'Évolution humaine.* - EIBL EIBESFELDT, *Éthologie : Biologie du comportement,* in *Naturalia et Biologia,* Jouy-en-Josas. - McFARLAND, *Feed-back Mechanisms in Animal Behaviour,* Acad. Press, 1971. - GOTTLIEB G., *Behavioral Embryology,* Acad. Press, 1973. - HINDE, *Animal Behaviour,* McGraw-Hill, 1970. - HINDE et STEVENSON, *Contraints of Learning,* Acad. Press, 1973. - MAIER et SCHNEIRLA, *Principles of Animal Psychology,* Dover Publ., New York, 1964. - MOLTZ H., *The Ontogeny of Vertebrate Behaviour,* Acad. Press, 1971. - RICHARD G., *les Comportements instinctifs,* P.U.F., 1975. - TINBERGEN N., *The Animal in Its World,* George Alley, 1973.

PALÉOBIOGÉOGRAPHIE

Les provinces

La biogéographie étudie la répartition géographique des plantes et des animaux ainsi que les causes de cette répartition. Cette répartition varie au cours du temps : elle est liée à des facteurs d'ordre géologique, climatique, etc. Pour l'étudier, on dresse des cartes biogéographiques à l'aide des connaissances géologiques (paléontologiques, stratigraphiques).

On a établi, avec une relative précision, des provinces paléogéographiques du monde pour chaque époque depuis le Cambrien.

Ainsi, on distingue les différentes provinces de cette ère grâce aux Trilobites (ces derniers sont de bons fossiles, très nombreux ; le tégument chitineux de leurs mues est bien conservé). A cette époque, la vie dans les mers était très riche ; elle comprenait plus de 1 500 espèces d'Invertébrés : 60 % d'entre eux étaient des Trilobites et 30 % des Brachiopodes. Cette suprématie des Trilobites s'exprime par un grand nombre d'espèces, qui comptent elles-mêmes beaucoup de représentants.

Du point de vue de leur biologie, les Trilobites sont dans leur ensemble des animaux marins, absents des milieux littoraux (on les trouve entre les Brachiopodes et les Graptolites plus profonds). Leur milieu biologique est variable. On remarque que la fréquence des Trilobites varie en sens inverse de celle des Brachiopodes. Après une vie larvaire planctonique, les adultes sont soit benthiques (harpes), soit nectiques (longue épine frontale), soit planctoniques (long pédoncule oculaire).

Les larves et les petits adultes planctoniques sont répandus et communiquent facilement entre les provinces.

		M. d'années
QUATERNAIRE	Holocène Pléistocène	 — 2
CÉNOZOIQUE ou TERTIAIRE	Pliocène Miocène Oligocène Éocène Paléocène	 — 25 — 38 — 65
MÉSOZOIQUE ou SECONDAIRE	Crétacé Jurassique Trias	— 140 — 200 — 225
PALÉOZOIQUE ou PRIMAIRE	Permien Carbonifère Dévonien Silurien Ordovicien Cambrien	— 280 — 345 — 400 — 440 — 500 — 570
PRÉCAMBRIEN	Protérozoïque Archéen	— 2 400 — 4 500

Les Trilobites présentent des formes très variées, dont l'évolution s'est effectuée en 250 millions d'années. Au cours du Cambrien, s'est produite l'extinction de certaines familles (notamment les *Redlichiidae* à la fin du Cambrien inférieur). D'autres familles dérivent d'une branche en extinction : *Paradoxides* est issu des *Olenellidae ;* par contre, les Paradoxides de Sibérie auraient une origine différente (convergence de forme en des endroits éloignés). Dans ses grandes lignes, l'évolution des Trilobites s'est faite par un accroissement de l'ornementation céphalique, la régression des sillons glabellaires, la régression de l'œil et la pygidation.

Les Trilobites ont eu une évolution rapide au Cambrien, ce qui nous permet en 70 millions d'années (de —570 à —500) de distinguer trois périodes : Cambrien inférieur, moyen et supérieur. Durant chacune d'elles, on retrouve les mêmes provinces : les deux principales sont la province Atlantique (terres situées de part et d'autre de l'Atlantique actuel), et la province Pacifique (pourtour du Pacifique).

Les provinces au Cambrien

Au **Cambrien inférieur,** on distingue deux provinces :

— la *province à* Olenellus (représentant de la sous-famille des *Olenellinae*), ou *province Atlantique,* englobe l'Amérique du Nord, l'Écosse et la Scandinavie. La famille des *Olenellidae,* bien représentée, est caractérisée par une taille petite, souvent plate, à pygidium peu développé (un seul segment), à céphalon sans suture, à glabelle avec de nombreux sillons latéraux, à pointes génales normales et yeux bien développés. Le sous-ordre des *Olenellina* ne dépasse pas le Cambrien inférieur ;

— la *province à* Redlichia (représentant de la sous-famille des *Redlichiinae*), ou *province Pacifique,* englobe la plus grande partie de l'Asie et de l'Australie. Comme le genre *Olenellus,* la famille des *Redlichiidae* ne dépasse pas le Cambrien inférieur. Par rapport à *Olenellus,* les *Redlichiidae* ont des pointes génales plus longues, une crête oculaire unissant les yeux à la glabelle, plus allongée et étroite ; la suture céphalique est de type opisthoparia.

La limite des deux provinces n'est pas toujours très nette. Ainsi, au Maroc et en Espagne, on trouve des représentants des *Olenellidae* et des *Redlichiidae.* D'autre part, certaines espèces ont des localisations très particulières : par exemple, *Bonnia* est observé au Groenland et en Amérique du Nord.

Au **Cambrien moyen,** on distingue également deux provinces :

— la *province à* Paradoxides s'étend sur la Scandinavie, l'Europe occidentale, l'Afrique du Nord et Terre-

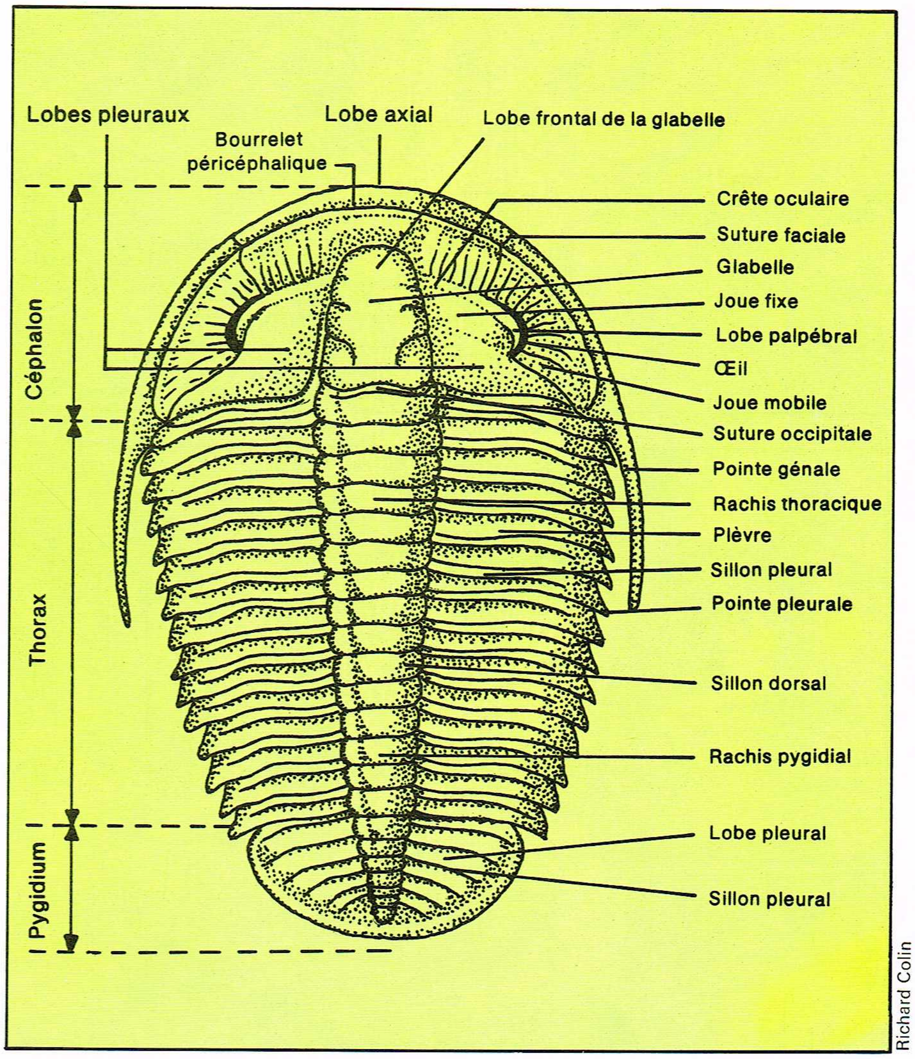

▼ *A gauche, tableau chronologique. A droite, représentation schématique de* **Ptychoparia striata,** *un Trilobite (Acadien moyen).*

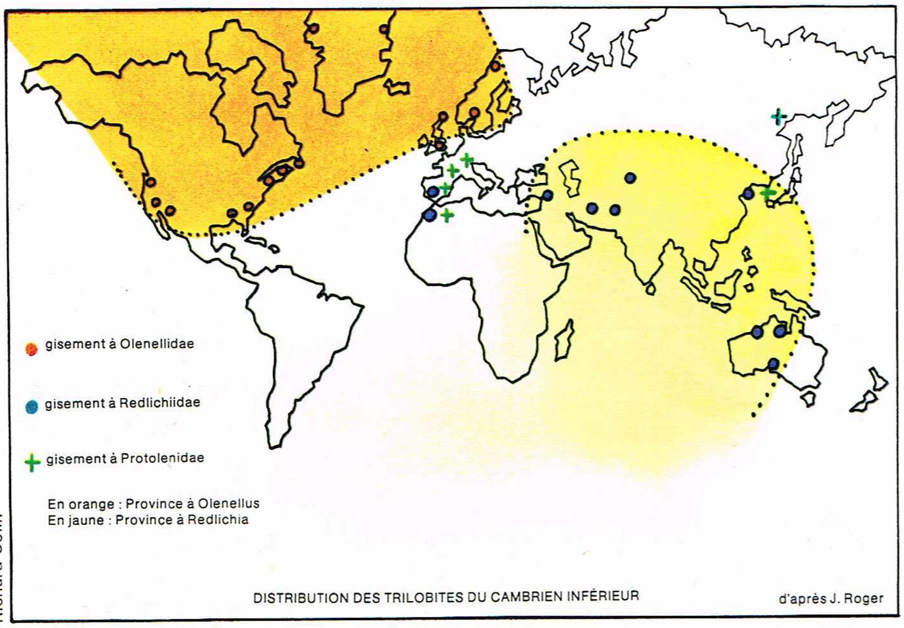

DISTRIBUTION DES TRILOBITES DU CAMBRIEN INFÉRIEUR — d'après J. Roger

Richard Colin

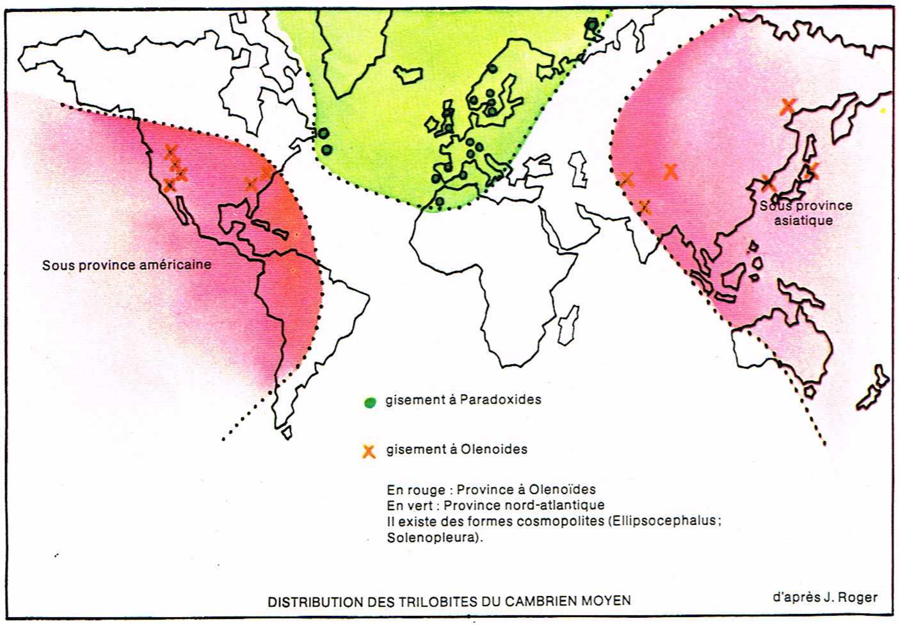

DISTRIBUTION DES TRILOBITES DU CAMBRIEN MOYEN — d'après J. Roger

Richard Colin

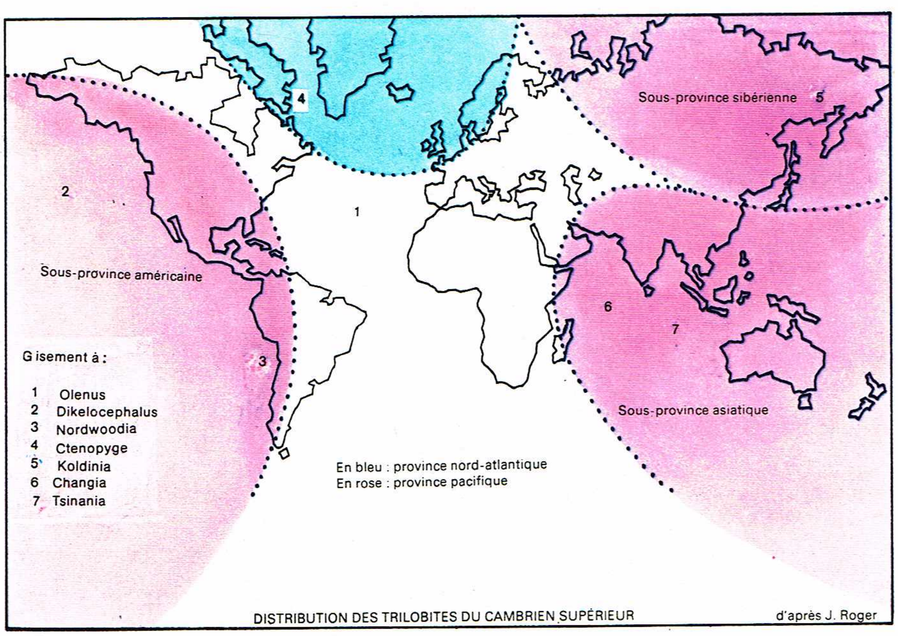

DISTRIBUTION DES TRILOBITES DU CAMBRIEN SUPÉRIEUR — d'après J. Roger

Richard Colin

Neuve. *Paradoxides* se caractérise par son petit pygidium et sa suture opisthoparia (les pointes génales font partie des joues mobiles) ;

— la *province à* Olenoides englobe la province Pacifique avec l'Amérique. Le genre *Olenoides* a un pygidium bien développé et plusieurs épines marginales (4 à 8 paires). La province à *Olenoides* est divisée en deux sous-provinces : asiatique (famille des *Damesellidae*) et américaine. Certaines formes sont cosmopolites : notamment, *Ellipsocephalus*, de la famille des *Ellipsocephalidae* (en Europe, au Maroc, à New Brunswick, en Australie), et *Solenopleura*, de la famille des *Solenopleuraceae*. On suppose qu'il y avait des communications faciles entre les provinces.

Au **Cambrien supérieur,** on distingue deux provinces avec quelques caractéristiques :

— la *province Nord-Atlantique à Olenellidae* (*Olenus* en Scandinavie) ;

— la *province Pacifique à Dikelocephalidae,* découpée en trois sous-provinces : américaine, très riche en Trilobites, asiatique, et sibérienne. Certaines formes sont cosmopolites : il s'agit de *Crepicephalus* (Amérique du Nord, Sibérie) et de *Saukia* (Amérique du Nord, nord-est de l'Asie).

Problèmes posés par l'établissement des provinces

Si l'on compare les trois cartes correspondant aux trois périodes précédemment énumérées, on s'aperçoit qu'au Cambrien inférieur on ne trouve de Trilobites ni en Amérique du Sud, ni au centre de l'Afrique. Aussi peut-on se demander s'il y avait une mer au niveau de ces régions ou s'il s'agissait d'une partie émergée. On constate, en outre, que si entre le Cambrien inférieur et moyen, la province Atlantique garde le même nom, en fait elle subit un déplacement vers l'ouest. Dans ce cas, la faune de *Paradoxides* dérive-t-elle des Olenellidae? Enfin, la spécialisation des provinces en sous-provinces est plus nette au Cambrien supérieur qu'aux époques précédentes. Ces observations posent plusieurs problèmes : choix du groupe étudié, évolution, temps recouvert par chaque carte; en effet, sur chaque carte on projette toute une période (quelques millions d'années). D'autre part, les provinces sont établies à partir d'un seul groupe et doivent refléter des unités de vie distinctes.

Les Trilobites se sont éteints à la fin du Primaire.

Étude des végétaux fossiles : la paléobotanique

La répartition des végétaux se modifie au cours du temps, soit que l'espèce s'étende ou régresse (dissémination), soit que le milieu se modifie.

Si l'on observe la répartition des espèces arctico-alpines par exemple, on s'aperçoit qu'après une large extension en Europe, elles se sont réfugiées en altitude après la dernière glaciation quaternaire. Les aires ainsi formées sont disjointes. Le ginkgo est un autre exemple de régression : au Secondaire, il était répandu sur tout le globe; actuellement, il est localisé à une aire endémique en Chine.

L'observation des localisations actuelles des végétaux est incomplète, et une étude des répartitions anciennes est nécessaire.

La flore à *Glossopteris*. On a trouvé en Afrique des dépôts houillers, d'âge permo-triasique, qui diffèrent beaucoup de ceux de l'hémisphère Nord de la même époque. Ces dépôts sont caractérisés par une Ptéridospermée arborescente à grande feuille, *Glossopteris*, plante typique du climat froid. On en trouve aussi dans la péninsule Indienne, en Australie et au Brésil : d'où l'idée de l'existence d'un territoire unique autour du pôle Sud, le Gondwana.

Les flores tertiaires. Au Tertiaire, les flores actuellement tropicales étaient étendues vers le nord. L'aire du palmier s'étendait, au Miocène, de 1 500 à 2 000 km au nord de l'aire actuelle; on trouve des palmiers fossiles au Labrador et au sud de la Sibérie. Le climat a été la cause de la migration de l'aire tout entière. Le séquoia, après une large extension, est localisé à deux stations : en Californie et en Chine.

Les flores quaternaires. A l'échelle humaine, on note des variations de distribution (extinction et extension). Ainsi, l'extension de l'élodée est remarquable : depuis son arrivée sur le continent européen en 1850, cette plante a envahi toutes les eaux douces.

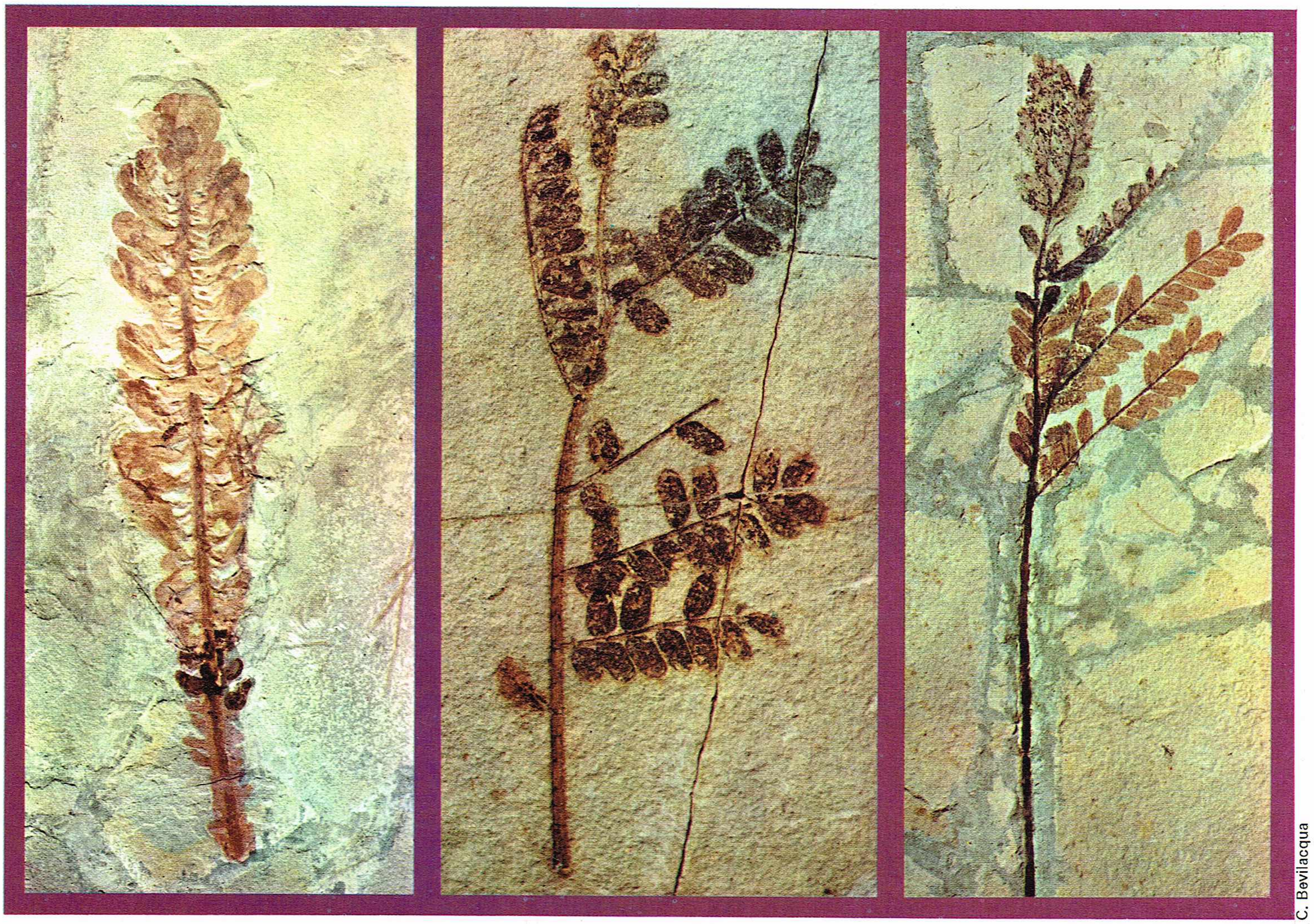

C. Bevilacqua

▲ ***L'étude des végétaux fossiles, ici quelques empreintes et restes fossiles de plantes supérieures, porte sur un genre, une espèce ou une famille qui occupe un espace réduit appelé* aire *(biogéographie).***

Apports de la biogéographie des végétaux

Les végétaux, surtout terrestres, sont très sensibles aux variations climatiques, sur lesquelles ils fournissent des renseignements précis.

L'étude des végétaux fossiles porte sur un genre, une espèce ou une famille occupant un espace réduit du globe ; on parle alors d'*aire* et non plus de province. Les aires aquatiques sont plus étendues que les terrestres. On distingue des aires *cosmopolites, disjointes,* et *endémiques.* Les limites de celles-ci peuvent être expliquées par l'existence de barrières géologiques, climatiques et géographiques (île). D'une façon plus dynamique, la distribution résulte de l'action du milieu et de l'adaptation des organismes.

On estime que la flore mondiale s'est uniformisée au Trias. En étudiant la répartition des êtres en fonction du temps, on note des changements qui deviennent des limites stratigraphiques. Enfin, la paléogéographie nous confronte à de nombreux problèmes : évolution, biologie, dérive des continents, expansion du globe et des fonds océaniques.

La dérive des continents

Selon l'hypothèse, les continents, peuplés de façon similaire dans les temps géologiques anciens, auraient dérivé progressivement à partir d'un ou deux blocs primitifs (la *Pangaea*, ou la *Laurasia,* et le *Gondwana*), ces ruptures ayant entraîné des isolations génétiques parmi le peuplement originel homogène. Citons le cas des Rongeurs de Madagascar et du Sud africain. L'apparition des grands félins, en Afrique seulement (ils sont inconnus à Madagascar), fournit une indication sur la date du début de la dérive.

Cette théorie a été émise après la constatation des parentés entre les flores carbonifères d'Europe et d'Amérique (Snider, 1859), entre la flore gondwanienne à *Gangamopteris, Glossopteris* et *Noegerathiopis* en Inde, en Indochine, en Chine, en Sibérie, en Amérique du Sud et en Afrique du Sud, et entre l'existence des Reptiles Théromorphes et des Amphibiens d'eau douce des séries gondwaniennes de Russie du Nord et d'Europe (Wegener, 1910). Elle est étayée par d'autres similitudes, morphologiques, structurales et magnétiques. L'hypothèse des ponts continentaux ne suffit pas à expliquer toutes les observations. L'hypothèse de la dérive donne une explication des similitudes de faunes et de flores en des régions aujourd'hui très éloignées.

De nombreux groupes d'êtres vivants sont communs aux diverses parties continentales ayant formé le Gondwana. Même s'ils ne sont pas uniquement limités au sud, leur répartition indique une certaine continuité continentale.

Parmi les exemples de ces phénomènes, citons la flore à *Glossopteris,* l'*Araucaria,* le *Sequoiadendron* et les Reptiles.

La flore à Glossopteris

Dans les nouvelles théories, la Terre apparaît comme une planète où les continents sont en mouvement les uns par rapport aux autres, ce qui entraîne de nombreuses variations dans les connexions continentales et océaniques. L'existence du continent de Gondwana dans l'hémisphère austral peut être illustrée par les formations permo-carbonifères communes à l'Inde, à Madagascar, à l'Afrique du Sud, à l'Australie et à l'Amérique du Sud : ce sont des couches horizontales d'origine continentale, caractérisées par la présence, à la base, des formations glaciaires à *galets striés,* ou *tillites,* et par des couches de houille. La flore, caractéristique, est appelée *flore à* Glossopteris, du nom de l'une des espèces, inconnue dans l'hémisphère Nord. Le schéma général de la série est le suivant : à la base, le Carbonifère avec les niveaux de

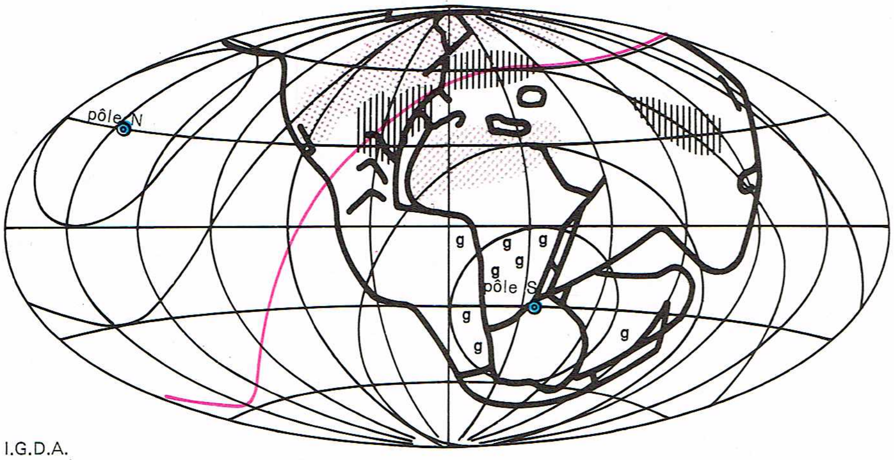

I.G.D.A.

I.G.D.A.

▲ *En haut, représentation schématique de la Terre au Carbonifère, selon Köppen et Wegener (1924) : les continents n'ont pas encore subi la dérive ; les positions des pôles et de l'équateur sont indiquées ; les traits verticaux noirs indiquent la zone de distribution des gisements de charbons fossiles ; le pointillé beige indique les dépôts désertiques ; les lettres « g » les empreintes des glaces à la calotte.*

En bas, représentation simplifiée de la flore à Glossopteris *du continent du Gondwana, à la fin du Paléozoïque (seuls les végétaux les plus caractéristiques sont indiqués). B,* Buriadia ; *C,* Cordaites (Noeggerathiopsis) ; *G,* Glossopteris ; *Gd,* Gondwanidium ; *Gg,* Gangamopteris ; *P,* Phyllotheca ; *Pg,* Psygmophyllum ; *Ps,* Psaronius ; *Sg,* Sigillaria ; *Sz,* Schizoneura.

tillite et les *Glossopteris* et *Gangamopteris ;* au-dessus, le Permien avec les lentilles de houille et la flore à *Glossopteris ;* enfin, le Trias à *Thinfeldia*.

Il existe une identité entre ces dépôts houillers, typiques des tourbières tropicales, dont l'épaisseur est la conséquence de l'importance des pluies. Ces diverses formations de charbon et la flore à *Glossopteris* exigent un rapprochement des zones citées, qui sont actuellement éparpillées sur une étendue trop grande pour qu'aient pu y régner partout les conditions suivantes : au Carbonifère un grand développement de glaciers ; au Permien inférieur, après la fonte de ces derniers, le développement de la flore à *Glossopteris* dans un climat humide permettant sa croissance et la formation de houille ; enfin, au Permien supérieur, le remplacement de ces conditions par un climat désertique, qui expliquerait les sédiments détritiques rubéfiés et azoïques.

Une première hypothèse avait été émise, qui concevait un seul vaste continent, grâce à l'existence de masses continentales aujourd'hui disparues. Mais cela, ajouté à l'existence des dépôts permo-carbonifères, impliquerait l'existence, à la fin du Primaire, d'un immense *inlandsis*, c'est-à-dire d'une grande calotte glaciaire continentale. Or, une telle formation ne pourrait s'expliquer que lors d'un refroidissement général du globe, ce qui n'est pas envisageable.

Par contre, la théorie de la dérive, combinée avec le déplacement du pôle Sud, fournit une solution satisfaisante au problème : aucune disparition continentale n'est à expliquer, l'inlandsis a des proportions raisonnables, et des régions actuellement proches ont pu avoir des climats très différents dans le passé.

L'Araucaria

Au cours du temps, l'*Araucaria* s'est dispersé dans le monde. Au Trias, il s'étendait en Inde, en Virginie, en Asie centrale et en Europe occidentale. Au Crétacé inférieur, il a conquis l'Australie orientale et méridionale, persiste au Pakistan, en Argentine du Sud, en Europe occidentale et en Afrique du Sud. Au Crétacé supérieur, il atteint la Nouvelle-Zélande, l'Australie orientale, l'Europe centrale, orientale et méridionale, l'Amérique du Nord, centrale et du Sud-Est, tandis qu'au Tertiaire il persiste en Nouvelle-Zélande, en Australie orientale, en Tasmanie, dans les îles antarctiques et en Argentine du Sud. C'est donc à partir d'une souche commune, antérieure au Secondaire, localisée en Inde et en Insulinde, que cette espèce s'est dispersée sur des masses continentales proches, où elle a continué ensuite son évolution. Au Crétacé, elle disparaît de l'hémisphère Nord.

La répartition actuelle de l'*Araucaria* (Amérique du Sud, Australie, Nouvelle-Zélande et Indonésie) ne peut s'expliquer qu'à partir d'une aire de distribution continue, antérieure à la disjonction wégenérienne, lorsque les continents tels que l'Amérique et l'Australie étaient contigus.

Le Sequoiadendron

Le *Sequoiadendron* qui ne pousse de nos jours que dans les montagnes californiennes, a eu une répartition plus importante au Crétacé, où il s'étendait du Groenland, à l'est des États-Unis, puis jusqu'en Europe. Au Miocène, il atteignait l'ouest des États-Unis, où il se développe encore actuellement, et disparaissait à l'est. En Europe, il s'est éteint à l'Oligocène.

Les Reptiles

La répartition des Reptiles fossiles, abondants au Secondaire, est intéressante dans l'étude de la dérive des continents.

La faune des forêts carbonifères montre qu'il existait des liaisons continentales entre l'Europe et l'Amérique il y a 280 à 345 millions d'années. A côté des Amphibiens, qui représentaient l'embranchement dominant, les premiers Reptiles ont commencé à occuper les terrains fangeux. La ressemblance entre les Tétrapodes de l'Europe centrale et ceux de l'est des États-Unis avait suggéré des migrations à partir de l'Eurasie de l'Est par un pont trans-Béring et, ensuite, à travers l'Amérique du Nord vers les côtes orientales. Mais des migrations sur de telles distances auraient entraîné des différences plus grandes que celles qui apparaissent. On admet, aujourd'hui, que l'Atlantique n'existait pas à cette époque.

Au Permien (—280 à —225 millions d'années), les mêmes conditions persistent, mais les Reptiles augmentent en nombre par rapport aux Amphibiens, et en taille. Le genre *Edephosaurus*, présent dans les terrains permiens du Texas, de Virginie et d'Autun en France, montre la continuité continentale. Le genre *Mesosaurus* existe dans les couches de Dwyka d'Afrique du Sud et dans la formation d'Itarare du Brésil, ce qui constitue un critère pour montrer les jonctions terrestres existant au Carbonifère et au Permien entre l'Europe et l'Amérique, comme entre l'Afrique et la Russie et entre les continents de l'hémisphère Sud, en accord avec les évidences physiques d'un vaste continent au nord, la *Laurasia*, et d'un continent sud-hémisphérique, le *Gondwana*. Les fossiles présentent aussi des connexions entre ces deux continents, qui formaient une grande *Pangaea*.

Au début du Trias (vers —225 millions d'années), la répartition des Reptiles montre de grandes liaisons continentales entre les pays cités précédemment. C'est le cas des genres *Lystrosaurus* et *Cynognathus*. *Lystrosaurus* a vécu aussi en Inde, dans le Sinkiang, le centre-est de la Chine, l'Indochine, et l'Est antarctique, ce qui est un signe des liaisons entre l'Antarctique, l'Afrique, la Chine et l'Indochine. *Lystrosaurus* et *Cynognathus* existent aussi en Amérique du Sud et dans la zone supérieure de l'étage de Beaufort d'Afrique du Sud.

Vers la fin du Trias (—200 millions d'années), les répartitions des Thécodontes et des Dinosaures sont plus cosmopolites. Ces espèces marquent le début de la grande ère reptilienne. La zone à *Cynognathus* est de type gondwanien, avec une prédominance des Thérapsidés en Afrique et un nombre moindre en Amérique du Sud, en Chine et en Inde. La répartition cosmopolite est due à l'existence de corridors nord-sud et est-ouest, même au début de la fragmentation de la *Pangaea*.

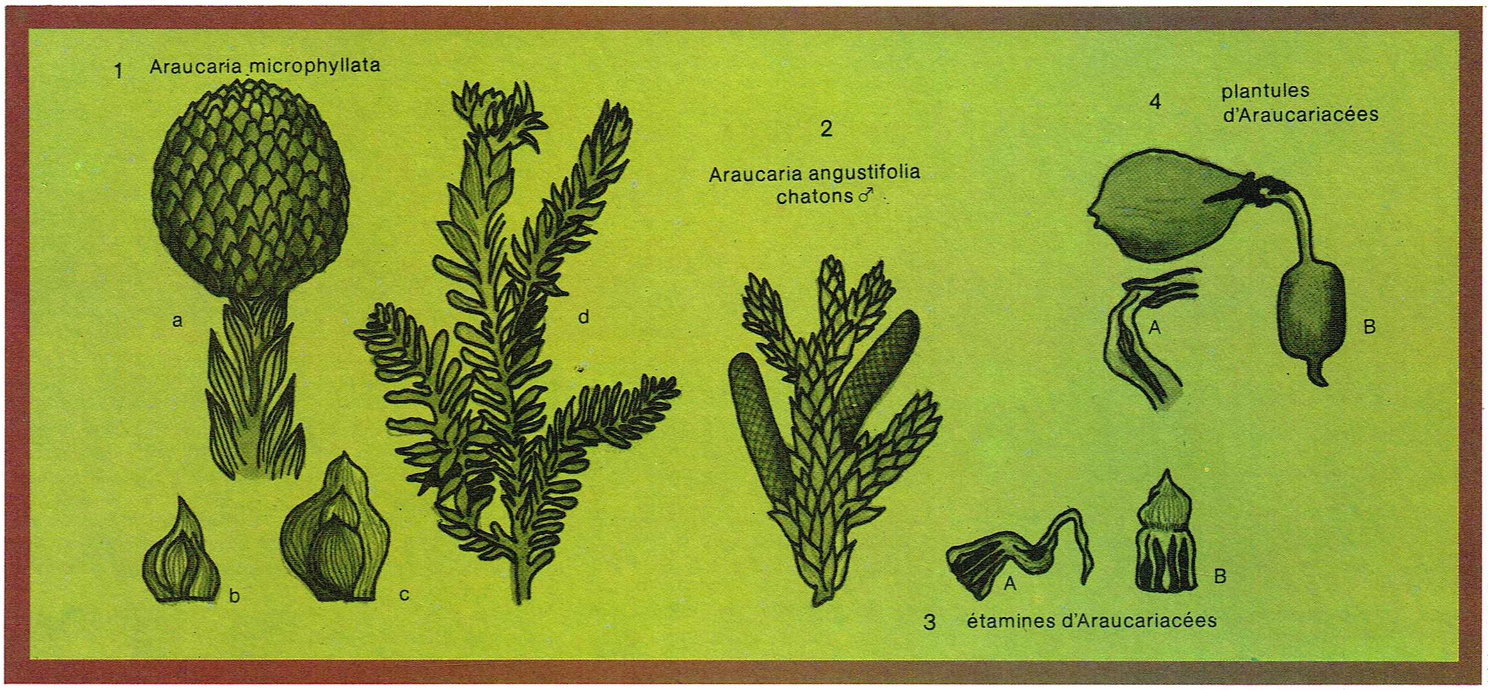

Les Reptiles jurassiques sont des Dinosaures, des Crocodiliens, des Reptiles volants ; on en a retrouvé des restes en Amérique du Nord, dans l'ouest de l'Europe, en Afrique (Tanzanie), ce qui permet de figurer des connexions entre l'Europe et l'Amérique, ainsi qu'entre l'Afrique et les continents du Nord ; par contre, l'Amérique du Sud présente une lacune.

Au Crétacé, la répartition est analogue. L'Iguanodon se retrouve dans les terrains d'Angleterre, d'Europe, du Spitzberg et d'Australie ; les Dinosaures colonisent l'Amérique du Sud, la Mongolie et l'Afrique du Sud, favorisés par le développement des Angiospermes. Les Dinosaures nord-américains et mongoliens ont de nombreuses similitudes. *Tyrannosaurus* a franchi la zone de Béring. Les deux Amériques n'étaient pas reliées, mais l'Amérique du Sud était liée au Gondwana. Au Crétacé, débutent des connexions modernes, pendant que persistent quelques anciennes routes de migrations.

Au Cénozoïque, la répartition des Reptiles, comme celle des Mammifères, s'appuie sur les relations continentales. Les Reptiles étaient plus répandus au Tertiaire qu'actuellement, car les climats mondiaux étaient plus généralisés. Les fossiles découverts indiquent des migrations entre l'Asie et l'Amérique du Nord. Il n'y a plus de liaisons entre les continents du Sud à partir du Crétacé.

Au Quaternaire, les mouvements amorcés se poursuivent. Les faunes et les flores évoluent isolément, sauf lorsque l'homme intervient.

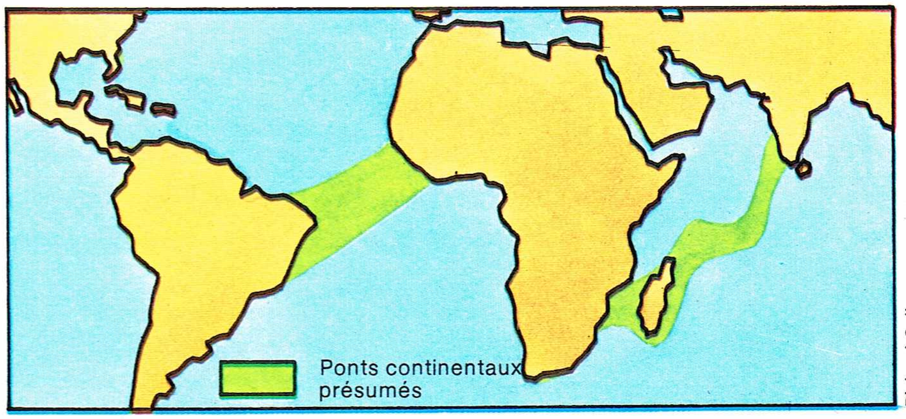

Les ponts continentaux

La théorie des ponts continentaux permet d'expliquer les analogies existant entre les faunes de deux continents distincts : ces ponts sont des liaisons terrestres intermittentes, alternant avec des périodes d'isolement total. Un bon exemple de pont fonctionnant actuellement est fourni par l'isthme d'Amérique centrale, que nous étudierons plus en détail.

▲ ***En haut, reconstitution des organes d'*****Araucaria** ***à partir de restes fossiles : 1,*** **Araucaria microphyllata saporta** ***(a, cône restauré ; b, écaille strobilaire ; c, la même, grossie ; d, rameau feuillé avec restes d'un cône [Kimméridgien de Bellay, Ain ; d'après Moret]) ; 2,*** **Araucaria angustifolia** ***(chatons mâles) ; 3, étamines d'Araucariacées (A,*** **Araucaria araucana** ***; [face latérale]) ; B,*** **Araucaria rulei** ***(face inférieure) ; 4, plantules d'Araucariacées (A,*** **Araucaria araucana** ***; B,*** **Araucaria bidwellii**) ***[d'après Chadefaud et Emberger]. En bas, représentation cartographique des ponts continentaux supposés, d'après Ch. Schubert, 1932.***

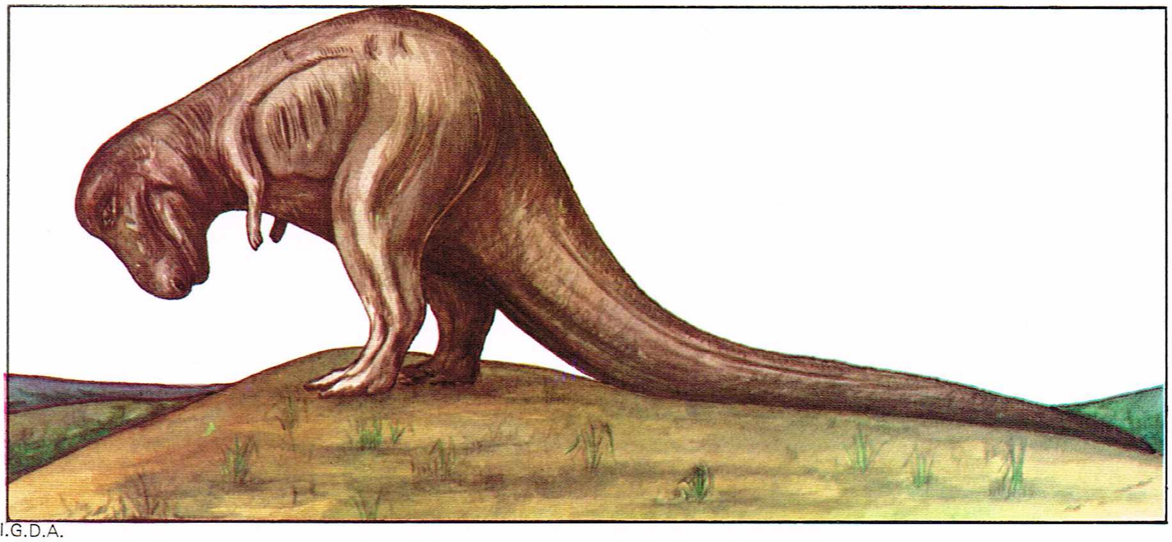

◀ ***Un exemple de tyrannosaure*** **(Tyrannosaurus rex).**

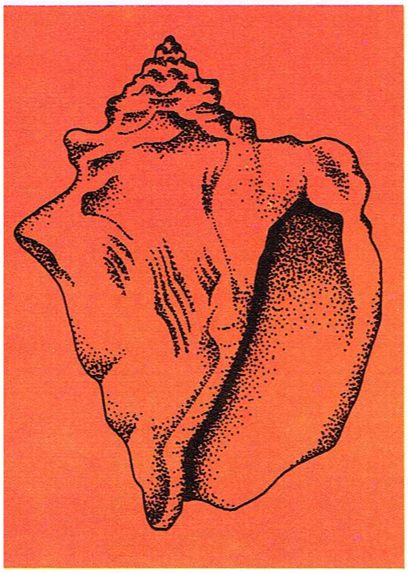

Richard Colin

▲ *La migration dans un sens unique qui se traduit par une séparation définitive du berceau a été étudiée notamment sur des Strombidés ou migrants « sénégalais ».*

Jusqu'au début du XXe siècle, à une époque où la physique du globe était encore mal connue, les biogéographes ont imaginé l'existence de multiples ponts pour expliquer la moindre ressemblance faunistique entre deux régions éloignées, séparées actuellement par de grands fonds océaniques. Ainsi, la *Lémurie,* du nom des Lémuriens, sorte de singes primitifs vivant en Inde et à Madagascar, était supposée avoir mis en communication ces deux territoires; de même le pont *Méso-Pacifique* aurait relié au Paléocène (début du Tertiaire) le sud de l'Asie à l'Amérique tropicale, en passant par la Polynésie. Si l'on admettait l'existence des divers ponts imaginés au cours des temps, la répartition des eaux océaniques poserait un problème, car l'ensemble de ces ponts couvrirait pratiquement le globe. Il est possible néanmoins que les chaînes d'îles existant aujourd'hui aient été plus étendues dans le passé.

Toutefois, les ponts ayant occupé l'emplacement de mers épicontinentales sont nombreux : ils ont fonctionné à chaque baisse importante du niveau de la mer, au cours de glaciations par exemple, ou à la suite d'un soulèvement tectonique. Leur action est multiple : ils permettent le passage des animaux dans les deux directions, favorisant l'extension de faunes équilibrées vers les aires inoccupées. Ils tendent ainsi à maintenir des faunes complètes sur les deux territoires qu'ils relient; mais leur action de filtrage est forte, et tous les animaux ne peuvent les emprunter.

Deux exemples permettent d'étudier leur rôle spécifique : la liaison Asie-Amérique du Nord et l'isthme de Panama, pont actuel jeté entre les deux Amériques.

La liaison Asie-Amérique du Nord

Tout au long du Tertiaire, il y eut des échanges intermittents au niveau du détroit de Béring entre les faunes du continent asiatique et les faunes d'Amérique du Nord. Ces échanges furent particulièrement intenses au début de l'Éocène, à la fin de l'Éocène, ainsi qu'au début de l'Oligocène, au Miocène supérieur, au Pliocène supérieur et au Pléistocène. Au contraire, à l'Éocène moyen, à l'Oligocène moyen et au Pliocène inférieur, le détroit de Béring formait, comme maintenant, une barrière marine infranchissable.

Au début du Tertiaire, les échanges concernaient des groupes majeurs; par la suite, ces échanges furent de plus en plus sélectifs, et n'intéressèrent que de petites fractions de faunes; ils semblent s'être produits surtout d'Eurasie vers l'Amérique du Nord. Certains groupes de Mammifères, tels les Primates supérieurs, les Viverridés, les Mégachiroptères, ne purent jamais franchir le pont, arrêtés probablement par une barrière climatique.

L'isthme de Panama

L'isthme de Panama fournit l'exemple d'un pont actuel, d'existence récente; son fonctionnement a été particulièrement bien étudié par G.G. Simpson (1965), qui explique les particularités du peuplement d'Amérique du Sud par des arrivées successives en trois étapes :

— les « immigrants primitifs » sont arrivés avant l'isolement (avant l'Éocène), comprenant, notamment, l'ordre des Édentés (tatous, paresseux), inconnu ailleurs;

— pendant le Tertiaire (environ 70 millions d'années), les deux Amériques étaient séparées; néanmoins, quelques formes (Rongeurs, singes) parvinrent à migrer du nord au sud en passant par étapes sur les îles;

— enfin, une grande variété d'animaux atteignirent l'Amérique du Sud à la fin du Tertiaire et au Quaternaire (d'autres, moins nombreux, firent le chemin inverse); ils entrèrent en compétition avec les formes indigènes, et les organismes les plus résistants l'emportèrent.

La faune originale de l'Amérique du Sud (comprenant, en particulier, des Insectivores, des Rongeurs et des Carnivores Marsupiaux) fut profondément modifiée par la fin de l'isolement du continent. Les faibles différences existant entre les faunes marines de part et d'autre de l'Amérique centrale indiquent aussi que l'isthme est d'existence récente.

▼ *Représentation cartographique du Gondwana au Mésozoïque d'après A. Hallam, 1967.*

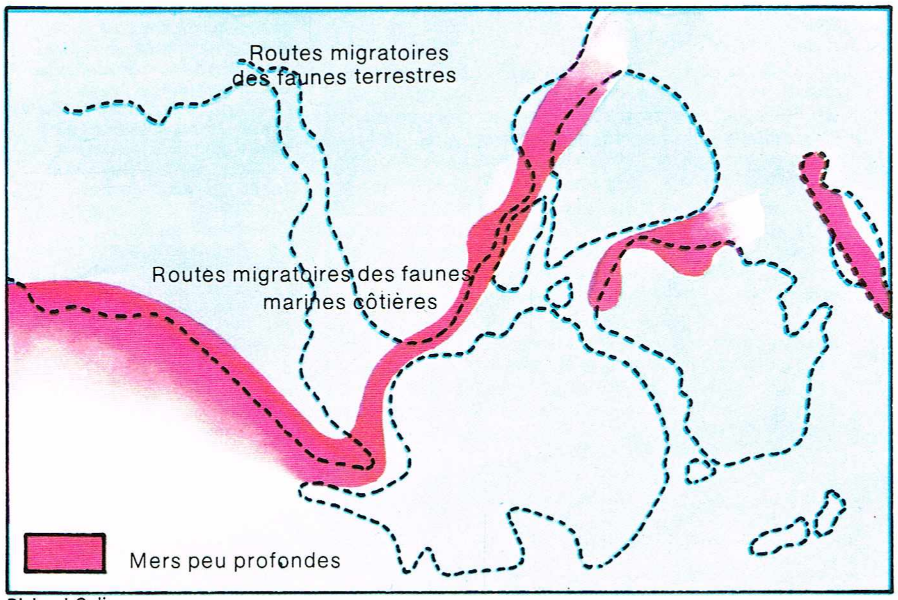

Richard Colin

Les migrations de faunes

Le terme *migration* évoque le problème fondamental des centres d'origine, ou *berceaux,* même si on l'applique à un seul taxon.

Il peut s'agir d'un déplacement saisonnier avec retour (cas des anguilles, des criquets-pèlerins, des Oiseaux migrateurs, etc.), encore que, pour un écologiste, la migration d'une faune dans sa quasi-totalité implique une *migration du milieu.* Notre étude va se concentrer essentiellement sur un cas particulier de migration : celle qui traduit un déplacement dans un sens unique, c'est-à-dire une séparation définitive du berceau. Des précisions paléontologiques quant aux migrations sans retour sont fournies, en principe, par des cartes de répartition du même taxon à différentes époques. On peut prendre quelques exemples parmi les migrants « sénégalais ».

Les migrants « sénégalais »

Actuellement, on observe au large des côtes sénégalaises des Mollusques que l'on trouve sous forme de fossiles dans les couches du Miocène (il y a 25 millions d'années) de l'Europe occidentale (dans les faluns de Touraine). Ainsi, dans le Miocène de la France, on trouve l'espèce *Strombus coronatus Def.;* dans le Quaternaire méditerranéen, *Strombus bubonius Lmk.* est voisin et peut être considéré comme son descendant; il est actuellement répandu sur la côte occidentale d'Afrique.

La voie suivie par ces *Strombus* aurait été la suivante. Au Miocène, les communications de la mer Méditerranée avec l'Atlantique devaient être larges; au Pliocène, les communications ne se faisaient plus que par un détroit, celui de Gibraltar. C'est à ce moment que se produisait la différenciation d'une province atlantique et d'une province méditerranéenne. La migration aurait pu se produire vers le sud en suivant les côtes du Maroc puis de la Mauritanie; l'absence de ces espèces dans les sédiments le long de ces côtes pourrait s'expliquer par le manque de calcaires organogènes, biotopes propres à *Strombus bubonius.* De plus, la traversée du golfe de Mauritanie, dessalé régulièrement par le fleuve Sénégal, n'aurait pas pu être favorable à l'installation de cet animal. Cette migration s'est certainement effectuée par les îles atlantiques de Lanzarote, de Fuertaventure, de Gran-Canaria, etc., où l'on trouve des restes à différents niveaux. On a pensé que ces différents niveaux résultaient des mouvements eustatiques (théorie des « eustatistes », basée sur le balancement des mers).

On a cherché également à savoir pourquoi ces strombes ont abandonné le bassin de la Loire. Depuis longtemps, des chercheurs (Dollfus, Dautzenberg en 1866, Lecointre en 1908, Gignoux en 1913, etc.) se sont aperçus que le refroidissement des mers néogènes a amené certaines espèces à émigrer vers la zone tropicale; certaines d'entre elles ont suivi les côtes occidentales de l'Afrique, éventuellement jusqu'au Sénégal (d'où le nom des migrants « sénégalais »), sans évolution notable, ce qui a donné naissance à la notion d'espèces « vicariantes ».

On peut encore citer, parmi les Gastéropodes : *Melongena melongena L.* (actuel) des Antilles et *Melongena coronatus Ag.* du Miocène d'Europe, *Siliquaria anguina Duj. (= Tenagodus senegalensis Recluz.), Murex bour-*

geoisi Tourn. (= Quadrifrons Lmk.) et *Nucella angulata Duj.* Parmi les Lamellibranches, on cite : *Crassostrea gryphoides Schotheim., Tellina strigosa Gmelin., Capsa lacunosa Chmtz.* Parmi les Bryozoaires, on cite : *Diaporoecia major Jnst., Lichenopora mediterranea De-Blv., Biflustra savartii Svgn-Adn., Cupuladria canariensis Busk.* et *Copidozoum teninrostre Hinks.*

Autres migrants

On a pu reconstituer, d'autre part, les migrations des mastodontes qui ont pu suivre des itinéraires beaucoup plus complexes que celui évoqué ci-dessus : à l'Oligocène (—37 millions d'années), on trouve les ancêtres en Égypte ; au Miocène (—25 millions d'années), ils se répandent vers le nord en Europe, puis parviennent en Amérique du Nord. Enfin, ils disparaissent en Europe et persistent en Amérique centrale, où ils ont vécu au moins jusqu'au Pléistocène.

Les migrations qui ont pu se produire vers l'est ou le Pacifique auraient été facilitées par des ponts continentaux, tel le détroit de Béring, qui, à certaines époques géologiques, était fermé, ou au contraire gênées par des « barrières » ; ainsi, les taxons subissaient une perte en passant d'un continent à un autre, d'où la notion des *filtres*.

Bruce Coleman - J.-R. Brownlie

▲ *Les émeus* **(Dromiceius novaehollandiae)** ***appartiennent à la faune endémique de l'Australie (île-continent).***

Transgression et régression

Les termes de *transgression* et de *régression* traduisent des mouvements de la mer ayant pour conséquence des changements des positions des rivages. Lorsque le domaine marin gagne sur une région précédemment émergée, on dit qu'il y a une transgression, et les dépôts amenés par cette mer nouvelle sont dits *transgressifs*. Dans le cas inverse, lorsqu'il se produit un retrait de la mer par rapport à l'ancienne position du rivage, il y a une régression.

En général, en raison de l'érosion, on connaît mal le rivage de la série stratigraphique qui doit se traduire par des faciès littoraux ; par contre, on peut bien connaître la limite d'affleurement des couches sans pouvoir délimiter la surface d'extension de la mer pour un étage donné. C'est là un des problèmes essentiels de la paléogéographie.

Dans le cadre de la paléontologie, une régression se traduit par la disparition de la majeure partie de la faune marine qui a pris son plein essor au cours de la période géologique qui la caractérise. Par exemple, le sommet du Crétacé est dit régressif dans le domaine mésogéen. Il est caractérisé par la disparition des Globotruncanidés (pour la microfaune) et des Ammonites (pour la macrofaune).

La transgression, au contraire, annonce une nouvelle faune marine. Ainsi, l'Aquitanien marque, dans le domaine mésogéen, la base de la transgression miocène et contient des Lépidocyclinés et des Miogypsinoïdes, annonciatrices des miogypsines du Miocène.

Il reste à signaler une dernière notion : celle de l'*émersion*. L'émersion est la période qui suit une régression et précède une transgression : il ne s'est formé que peu ou pas de dépôts marins, ce qui traduit une lacune de sédimentation ; le contraire n'est pas toujours vrai ; car on peut avoir une lacune due à une simple absence de sédimentation par le jeu de courants marins sans qu'il y ait émersion ; il se forme alors une surface durcie (ou *hardground*) où on peut trouver une faune marine, au-dessus de laquelle les nouveaux dépôts témoignent d'une reprise de la sédimentation sans qu'il y ait transgression.

Toute série de formations marines qui, dans une région déterminée, est encadrée entre deux régressions, constitue un *cycle sédimentaire*. Ainsi, cette définition répond à la définition générale : dans un cycle, le phénomène évolue en faisant retour à l'état initial (supposé être dans notre cas la régression). En ce qui concerne le faciès, cette série doit commencer par des dépôts littoraux correspondant à l'arrivée de la mer ; elle se continue par des formations plus profondes indiquant le maximum d'extension marine, et se termine enfin par des dépôts littoraux inaugurant une nouvelle régression.

Paléontologiquement, chaque régression, ou lacune dans le cas extrême, correspond non seulement à un intervalle de temps souvent long, mais encore à d'importants changements dans la configuration des terres et des mers ; lorsque, par la suite, une nouvelle mer revient, inaugurant un nouveau cycle sédimentaire, elle ramène avec elle une faune nouvelle. Il faut donc signaler qu'au début de chaque cycle, se produit en général un renouvellement de la faune (et, éventuellement, de la flore) : les étages paléogéographiques doivent donc coïncider avec les étages paléontologiques.

L'insularité

Le peuplement des îles a attiré depuis longtemps l'attention des biologistes et des paléontologues. Classiquement, on distingue : d'une part, les *îles continentales*, fragments détachés des continents, peuplées au départ par une faune équilibrée, qui aurait évolué en conservant quelques formes archaïques, disparues dans les régions d'origine ; d'autre part, les *îles océaniques*, volcaniques ou coralliennes, isolées dès leur apparition et dont les occupants arrivèrent à la suite d'une dispersion à longue distance, donnant une faune pauvre et déséquilibrée.

D'après R. Paulian (1972), l'évolution du peuplement de ces deux types d'îles est très différente. Dans les îles continentales, la faune est au départ variée, mais la pression de sélection naturelle est forte, ce qui provoque peu à peu un appauvrissement ; seules subsistent les formes les mieux adaptées. Au contraire, dans le cas des îles océaniques, la pression de sélection naturelle, faible au départ, favorise l'apparition, par mutation, de formes nouvelles, adaptées à des milieux particuliers ; par la suite, la sélection naturelle se renforce. Nous allons étudier successivement le processus de la colonisation des îles, et les conséquences de l'isolement sur les organismes. Puis, nous considérerons deux exemples : le peuplement de Madagascar et celui de l'Australie.

Processus de colonisation

Les organismes terrestres ont pu parvenir dans les îles par divers moyens :

— certains individus ont profité de ponts continentaux ;

— les autres ont dû traverser l'étendue marine. Certains ont pu le faire par leurs propres moyens, en volant, tels les Insectes, les Oiseaux, les chauves-souris, ou encore à la nage. D'autres se sont laissés transporter, soit par le vent, telles les graines, soit par des radeaux naturels (icebergs, radeaux de branchages arrachés par les fleuves en crue). Le taux de mortalité, certainement élevé, dépend beaucoup de la distance entre l'île et le continent. Il faut rappeler, d'autre part, que le processus de colonisation est un phénomène dynamique, et non un événement isolé dans le temps.

Conséquences de l'isolement

Dans les îles, protégées des prédateurs terrestres, les espèces vont évoluer et donner des formes très particulières. Le meilleur exemple en est donné par les îles

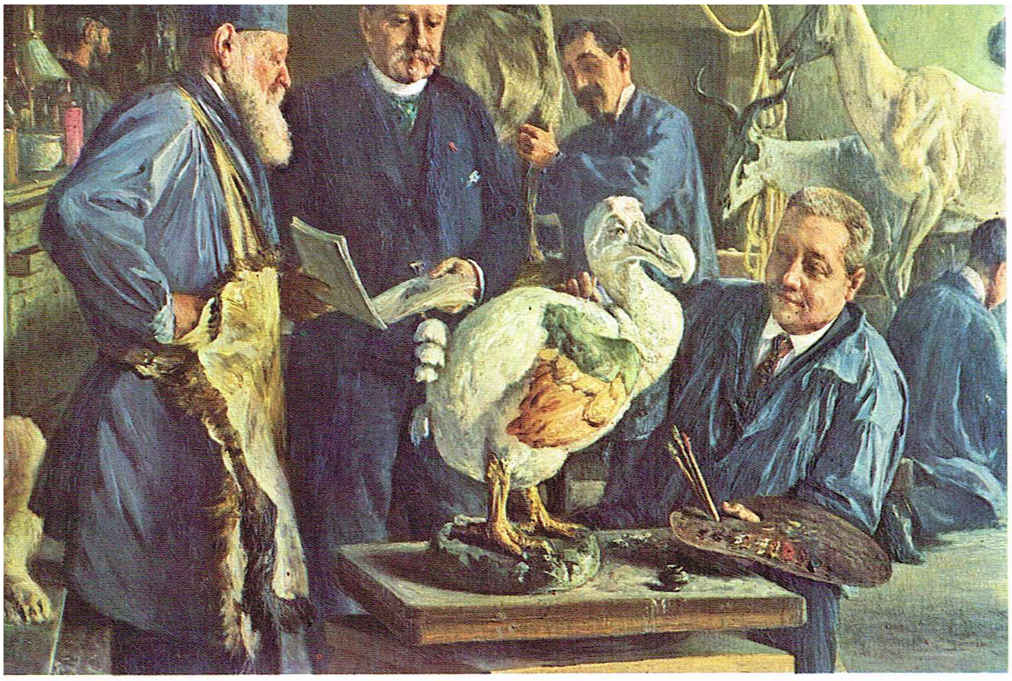

Bibliothèque du Muséum, Paris

▲ *Le dodo de l'île Maurice a été exterminé par l'homme.*

▼ *A gauche, parmi les formes à caractère essentiellement malgache, citons le* Lemur catta *qui habite la partie sud de Madagascar. A droite, les Marsupiaux, tel ce kangourou, auraient atteint l'Australie à la fin du Crétacé ou au début du Tertiaire. Aujourd'hui, ils occupent la plupart des niches écologiques et ont produit une faune équilibrée.*

T. Okapia.

Galapagos, « paradis du naturaliste », peuplées d'iguanes et de tortues géantes. L'évolution en vase clos favorise des adaptations diverses (citons le dodo de l'île Maurice et le dronte des îles Mascareignes, gros Oiseaux incapables de voler qui ont été exterminés par l'homme) tout en provoquant des dysharmonies dans le peuplement.

La taille réduite des îles est à l'origine d'une autre évolution; c'est ainsi que l'on a trouvé dans différentes îles méditerranéennes de nombreux restes de formes géantes et naines de Mammifères, datant du début du Quaternaire. Seuls les Rongeurs (famille des Gliridés) présentent des formes géantes. Les formes naines comprennent des éléphants, des hippopotames, des cerfs. Tous ces individus sont bien proportionnés et physiologiquement bien portants. On peut donc admettre que ce sont les conditions écologiques, l'absence de prédateurs (dans le cas du gigantisme) et le manque de ressources (dans le cas du nanisme) qui ont conduit à ces formes.

Peuplement de Madagascar

Le canal du Mozambique, séparant Madagascar de l'Afrique, commença à s'ouvrir au cours du Permien, mais des liens ont subsisté encore entre les deux terres jusqu'au Tertiaire. A partir du Pliocène, commence pour Madagascar une longue période d'isolement.

Le peuplement de l'île se caractérise par son ancienneté (nombreuses formes archaïques), par une grande originalité (formes endémiques; ainsi, les 2/3 des genres de Reptiles sont endémiques), et par une abondance de particularités masquant une grande pauvreté. Parmi les formes de caractère essentiellement malgache, on peut signaler les Tenrécidés (Insectivores) et les lémurs (sorte de singes primitifs). Il paraît peu douteux que ces formes sont venues par arrivées successives à partir du continent noir, et ont évolué indépendamment.

Peuplement de l'Australie

Du fait de la taille de cette île-continent, les phénomènes insulaires sont plus complexes et plus difficiles à interpréter. Deux des traits caractéristiques des faunes insulaires, l'appauvrissement et l'endémisme, frappent immédiatement; la plupart des niches écologiques sont occupées par des Marsupiaux, qui ont produit ici une faune équilibrée.

La faune de Mammifères peut se différencier en quatre vagues d'arrivées successives (G.G. Simpson, 1965) :

— à la fin du Trias ou au Jurassique, les Reptiles mammaliens, qui ont évolué en donnant les Monotrèmes (l'ornithorynque et l'échidné) ;

— à la fin du Crétacé ou au début du Tertiaire, les Marsupiaux, qui ont connu une grande diversification et une grande différenciation ;

— au Miocène, les rats de l'Ancien Monde;

— enfin, à la fin du Pléistocène et à l'époque actuelle, les lapins et de nombreuses espèces introduites par l'homme, qui sont entrées en concurrence avec la faune plus ancienne, provoquant sa raréfaction et parfois sa disparition.

BIBLIOGRAPHIE

AUBOIN J. et al., *Précis de géologie,* Doin éd., 1967. - BATTISTINI R. et RICHARD-VINGARD G., *Biogeography and Ecology in Madagascar,* 1972. - DARLINGTON P.J., *Zoogeography,* J. Wiley, 1966. - ELHAI H., *Biogéographie,* Armand Colin, 1968. - EKMAN S., *Zoogeography of the Sea,* Sidgwick et Jackson, Londres, 1953. - GOOD R., *The Geography of the Flowering Plants,* Longmans éd., 1969. - HALLAM A., *Atlas of Palaeobiogeography,* Elsevier, 1973. - HUGHES N.F., *Organisms and Continents through Time, in Palaeontol. Assoc. G. B. Spec. Paper,* nº 12, 1973. - JEANNEL R., *la Genèse des faunes terrestres,* P.U.F., 1942. - LECOINTRE C., *les Faluns de Touraine,* 1908. - LEMÉE G., *Précis de biogéographie,* Masson éd. - MIDDLEMISS F. et al., *Faunal Provinces in Space and Time,* Seel House Press, Liverpool, 1971. - MOORE R.C., *Introduction to Historical Geology,* McGraw-Hill, 1949. - MORET L., *Précis de géologie,* Masson éd., 1967. - NICOLINI P., *Gîtologie des concentrations minérales stratiformes,* Gauthier-Villars éd., 1970. - OZENDA P., *Biogéographie végétale,* Doin éd., 1964. - RICARD M., *les Migrations animales,* Coll. Jeune Science, Laffont éd., 1968. - ROGER J., *Paléontologie générale,* Masson éd., 1974. - SIMPSON G.G., *The Geography of Evolution,* Chilton Books Publ., 1965. - TARLING D.H. et RUNCORN S.K., *Implications of Continental Drift to the Earth Sciences,* 2 vol., Academic Press, 1972. - TERMIER H. et G., *Atlas de paléogéographie,* Masson éd., 1960. - ID., *les Temps fossilifères, I, Paléozoïque inférieur,* Masson éd., 1964. - ID., *Biologie et écologie des premiers fossiles,* Masson éd., 1968. - THALER L., *Nanisme et Gigantisme insulaires, La Recherche,* nº 37, p. 741, 1973. - UDVARDY M.D., *Dynamic Zoogeography,* Van Nostrand Reinhold Comp., 1969. - ZIEGLER B., *Biogeographie der Tethys, in Jh. Ges. Naturkde Württemberg,* 126, p. 229-243, 1971. - ID., *Einführung in die Paläobiologie. Teil I. Allgemeine Paläontologie, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung,* Stuttgart, 1972. - Extraits du XVIIe Congrès zoologique de Monte-Carlo, 25-30 septembre 1972. - Mém. B. R. G. M. nº 34 (1965) : *Colloque sur le Crétacé inférieur. - Encyclopédie Collier. - Encyclopaedia Britannica. - Encyclopédie Universalis. - Encyclopédie géographique Bordas.*

Bruce Coleman - J. Carnemolla

L'ÉVOLUTION

Une des préoccupations permanentes de l'homme a été de chercher à découvrir son origine et celle de tous les êtres vivants. Depuis la plus haute antiquité, deux théories, le créationnisme ou fixisme et l'évolutionnisme, ont tenté d'expliquer la genèse des espèces animales et végétales.

Le créationnisme, ou fixisme

Aristote et les philosophes anciens reconnaissaient dans le monde vivant les espèces, entités discontinues, éternelles et immuables. Mais les docteurs scolastiques christianisèrent la pensée d'Aristote et imaginèrent le créationnisme. D'après la tradition biblique, les êtres vivants ont été créés séparément « chacun selon son espèce »; l'origine de chaque espèce requiert une intervention spéciale du Créateur; les espèces successivement créées se succèdent progressivement, l'homme apparaissant le dernier. Chaque espèce possède l'organisation compatible avec son mode de vie : le problème de l'adaptation est ainsi résolu *a priori*. C'est un jésuite espagnol, le père Suarez (fin du XVI^e siècle), qui a défendu cette hypothèse conforme au récit de la Genèse relatant la création en six jours. Elle fut généralement admise jusqu'au XVIII^e siècle. Elle était simple, et l'on pouvait croire à la création d'un couple de chaque espèce vivante; ainsi, un couple de souris aurait été à l'origine de toutes les souris et le même phénomène se serait répété pour les diverses espèces animales et végétales. Linné, le fondateur de la systématique, écrivait en 1736 : « Il y a aujourd'hui autant d'espèces que l'Être infini en a créé au début. » Vingt ans plus tard, il constatera la naissance de nouvelles espèces à la suite de croisements; cette observation renouvelée laissait entrevoir un autre mode de naissance des espèces.

Cependant, la découverte des fossiles et leur interprétation dès la fin du XVIII^e siècle obscurcissaient la question; Cuvier, le fondateur de la paléontologie admet que des événements géologiques, des catastrophes (le déluge) avaient détruit les flores et les faunes, et que le repeuplement s'était effectué soit par des espèces réfugiées dans des régions épargnées par les catastrophes, soit par de nouvelles créations. Un des élèves de Cuvier, A. d'Orbigny, interpréta avec exagération les idées de son maître et n'hésita pas à reconnaître vingt-sept créations successives afin de repeupler la Terre après chaque cataclysme. Ce fixisme intégral perdit peu à peu ses partisans et, actuellement, cette hypothèse ne présente plus qu'un intérêt historique.

L'évolutionnisme

L'idée de la transformation des êtres vivants, de leur divergence à partir d'une souche commune, a donné naissance à la théorie du *transformisme*.

Le déroulement spatial et temporel des transformations des organismes simples jusqu'aux organismes les plus compliquées constitue l'évolution. Le terme transformisme est de moins en moins utilisé et cède la place à celui d'*évolution*.

L'idée d'évolution, fort ancienne, remonte à l'Antiquité grecque, mais elle est alors essentiellement spéculative par suite du faible nombre de documents. Des interprétations évolutionnistes sont écrites par Anaximandre de Milet (610-547), Empédocle d'Agrigente (495-435); Théophraste d'Erésos (370-285) note la présence d'organes inutiles (mamelles des mâles) ou dangereux (ramures hypertéliques des grands cerfs); enfin Lucrèce (96-53) décrit la lutte pour la vie.

Jusqu'au VIII^e siècle, des Pères de l'Église (saint Grégoire de Nysse et saint Augustin) admettent que le monde évolue en fonction des puissances que Dieu lui a attribuées en le créant. Des interventions spéciales sont superflues pour expliquer aussi bien la naissance de la vie qui provient de la matière organique que la naissance des espèces successives qui ont été créées en puissance.

Pendant la Renaissance, les idées évolutionnistes des Grecs sont reprises par J.-C. Vanini (1586-1619). Celui-ci constate les changements provoqués par la culture des plantes, qui lui révèlent le passage d'une espèce à l'autre. D'autre part, les ressemblances entre l'homme et le singe lui suggèrent l'idée d'une dérivation directe. Il estime alors, comme Démocrite et Empédocle, que l'univers est une combinaison fortuite d'atomes. Accusé d'athéisme par l'Inquisition, il sera brûlé vif à Toulouse.

Au XVII^e siècle, Swammerdam (1672) note les ressemblances entre les animaux et se demande si on ne pourrait pas « dans une certaine mesure affirmer que Dieu n'a créé qu'un seul animal diversifié en un nombre infini de sortes ou d'espèces ».

Au XVIII^e siècle, les idées changent sous l'influence de Buffon, des encyclopédistes et notamment de Diderot. Les esprits se libèrent des fables et des superstitions pseudo-scientifiques. Les inventaires floristiques et faunistiques sont commencés; les travaux sur l'espèce de J. Ray en Angleterre et de Theodor Klein en Allemagne fournissent des conceptions nouvelles. Linné, bien que fixiste, apporte des arguments favorables à l'évolution.

Buffon est véritablement le premier évolutionniste. D'abord fixiste, il modifie rapidement ses idées à la suite de ses études sur les fossiles. Il interprète correctement des restes de mammouths et de rhinocéros; il reconnaît une succession de flores et de faunes différentes des flores et faunes actuelles : ses idées révolutionnaires lui valent, en 1751, une condamnation par la Sorbonne; il se rétracte. Mais en 1778, Buffon reprend ses conceptions évolutionnistes. Il place l'homme parmi les animaux, auxquels, déclare-t-il, « il ressemble par tout ce qu'il a de matériel », ajoutant que « même leur instinct lui paraîtra peut-être plus sûr que sa raison et leur industrie plus admirable que ses arts ». Il décèle l'unité de plan de l'homme et des Vertébrés. Il attribue les variations des animaux et des plantes à des causes multiples : nourriture, climat, domestication, changement de comportement. Il reconnaît aux faunes américaine et euroasiatique une origine commune : « Ayant été séparées dans la suite par des mers immenses ou par des terres impraticables, elles auront avec le temps reçu toutes les impressions, subi tous les effets d'un climat devenu nouveau lui-même et qui aurait aussi changé de qualité par les causes mêmes qui ont produit la séparation... Mais

C. Bevilacqua

▲ ***La connaissance des fossiles est fort ancienne. Ils ont très tôt suscité la curiosité, mais leur interprétation exacte rencontra des difficultés. Ici, des fossiles d'Arnocieras sp., ammonites datant du Jurassique inférieur (Musée National d'Histoire Naturelle, Milan).***

▼ ***Georges Cuvier (1769-1832), le fondateur de la paléontologie. Partisan du fixisme, il fut l'un des plus âpres critiques du lamarckisme.***

F. Arborio Mella

cela ne doit pas nous empêcher de les regarder aujourd'hui comme des animaux d'espèces différentes... La Nature, je l'avoue, est dans un mouvement de flux continuel. » Cependant, Buffon a, peut-être par prudence, renoncé à donner une théorie de l'évolution.

Parmi les précurseurs du « Siècle des lumières » il convient de citer Maupertuis (1698-1759), qui souligna l'importance des variations héréditaires et de la sélection : « Le fond de ces variétés se trouve dans les liqueurs séminales mêmes. » Apparues par hasard, elles subissent ensuite l'action de la sélection : « Les seuls individus qui soient restés sont ceux où se trouvaient l'ordre et la convenance ; et les espèces que nous voyons aujourd'hui ne sont que la plus petite partie de ce qu'un destin aveugle avait produit. » Maupertuis imagine une genèse des espèces : « Ne pourrait-on pas expliquer par là comment de deux seuls individus, la multiplication des espèces les plus dissemblables aurait pu s'ensuivre ? Elles n'auraient dû leur première origine qu'à quelques productions fortuites dans lesquelles les parties élémentaires n'auraient pas retenu l'ordre qu'elles tenaient dans les animaux père et mère ; chaque degré d'erreur aurait fait une nouvelle espèce ; et à force d'écarts répétés serait venue la diversité infinie des animaux que nous voyons aujourd'hui, qui s'accroîtra peut-être encore avec le temps, mais à laquelle la suite des siècles n'apportera que des accroissements imperceptibles. » Pour Érasme Darwin (1731-1803), le grand-père de Charles Darwin, les êtres tirent leur origine d'un filament organique sécrété par le sang paternel. Lamarck, disciple de Buffon, formulera la première théorie de l'évolution ; son œuvre provoque un grand intérêt mais peut-être moins intense qu'elle ne le méritait.

Enfin, Darwin (1809-1862) vint. Il exerca une influence décisive sur les idées, et sa théorie connut un grand retentissement. Le lamarckisme, le darwinisme, le néolamarckisme, le néodarwinisme, le mutationnisme, la théorie synthétique : telles sont les théories de l'évolution jusqu'au XX^{e} siècle.

Après ce rapide historique et avant l'étude proprement dite de l'évolution, il est nécessaire de faire une remarque importante. Il est indispensable de bien séparer le « fait de l'évolution » de ses théories explicatives. L'évolutionnisme admet la continuité du monde vivant et la dérivation des animaux et des végétaux les uns des autres par filiation. Tous les biologistes sont d'accord là-dessus et « l'insidieuse morsure du doute » quant au fait de l'évolution n'atteint personne. Les êtres vivants sont ce qu'ils sont parce qu'ils le sont devenus ; le changement est la règle. Tout évolue d'ailleurs dans l'univers, et le vivant n'échappe pas à la règle. Mais cet accord unanime n'existe plus lorsqu'il s'agit d'expliquer le fait de l'évolution, c'est-à-dire d'en analyser les causes et d'en trouver les déterminismes. Plusieurs théories sont proposées et font l'objet de critiques fort sévères. C'est pourquoi, périodiquement, l'on parle d'une « crise du transformisme » ; il s'agit d'une crise concernant les théories explicatives.

Les preuves de l'évolution

Depuis son apparition sur la Terre, il y a peut-être deux ou trois milliards d'années, la matière vivante a subi des changements. L'histoire de ces changements illustre l'évolution, qui, à côté des transformations, implique aussi la continuité et la filiation. Diverses disciplines apportent des preuves à l'évolution, notamment la paléontologie, l'embryologie, l'anatomie comparée, la biochimie et l'immunologie.

Preuves paléontologiques

Le paléontologiste, qui étudie les fossiles, observe le film de l'évolution réelle du vivant dans le temps. Selon Osborn, il voit « le mouvement des caractères » dans les séries d'organismes alliés. Dans certains cas, il est possible de suivre l'évolution historique et la filia-

▼ *Dans* **Recherches sur les ossements fossiles,** *Cuvier explique ses reconstitutions d'Ongulés Périssodactyle et Artiodactyle (ce dernier sur notre illustration) du gypse de Montmartre, et montrera que l'étude des fossiles repose sur l'anatomie comparée.*

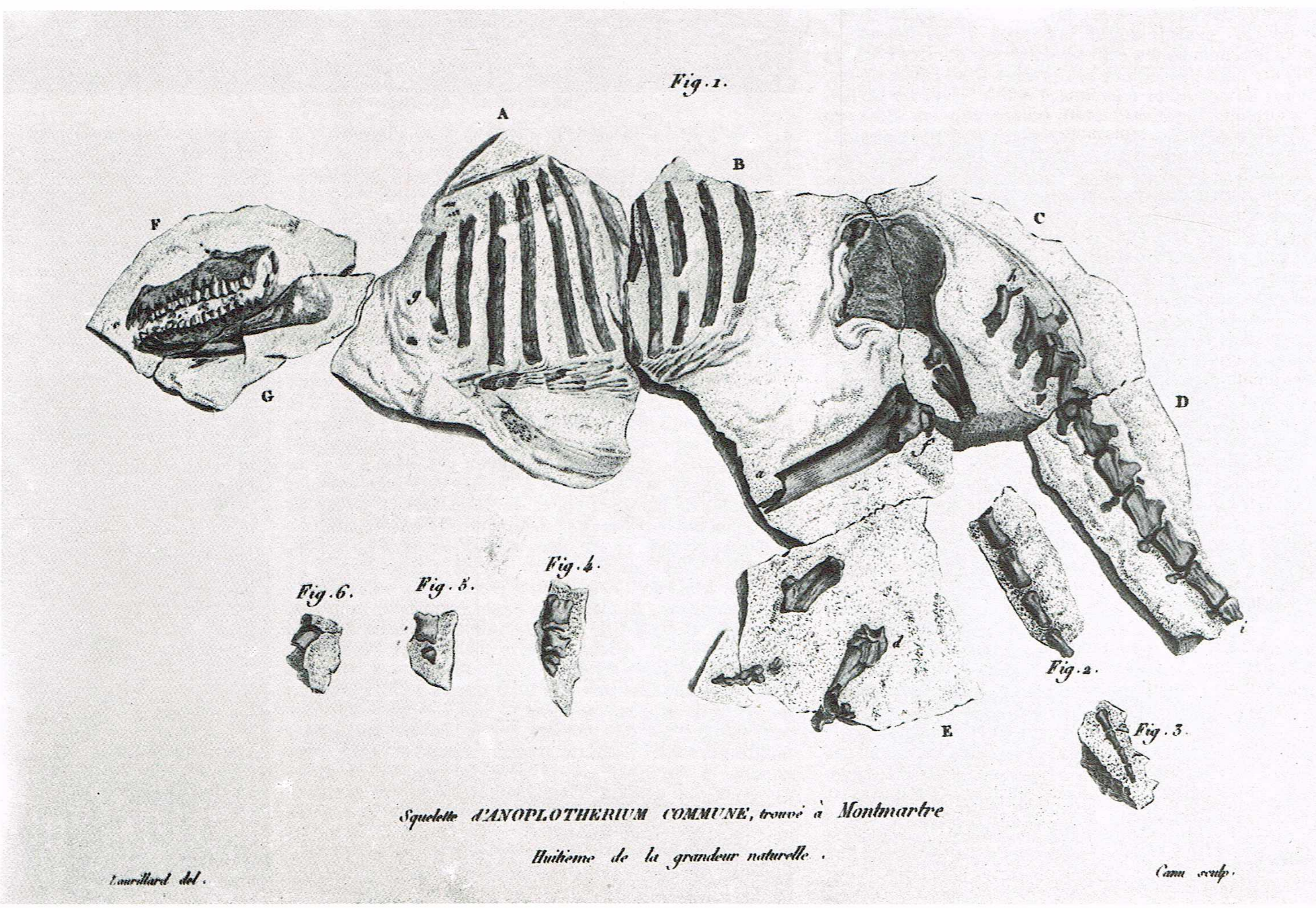

Bibliothèque du Muséum, Paris.

tion pendant une durée se chiffrant en centaines de millions d'années. Quel est l'âge des premiers éléments de l'écorce terrestre? A quelle époque s'est manifestée la vie? Des estimations sont possibles grâce à la radioactivité des minerais d'uranium. L'horloge du temps repose en effet sur la désintégration précise et invariable de l'uranium, fort abondant dans la croûte terrestre : d'un gramme d'uranium présent à une date donnée, il ne restera qu'un demi-gramme au bout de 4,5 milliards d'années. On retrouve dans la roche, avec le demi-gramme d'uranium, les produits de la désintégration; hélium et plomb^{206} (un isotope du plomb). Depuis le moment où le gramme d'uranium était dans la roche, la proportion de plomb^{206} par rapport à l'uranium s'est accrue constamment. Pour connaître l'âge d'une roche ou le temps qui s'est écoulé depuis sa formation, il suffit de mesurer le rapport du plomb^{206} et de l'uranium contenus dans la roche. D'après les calculs, les roches antécambriennes les plus anciennes ont plus de 3 milliards d'années; le Primaire date de 600 millions d'années environ, le Secondaire de 230 millions d'années, le Tertiaire de 70 millions d'années et le Quaternaire d'un million d'années.

Les fossiles

La connaissance des fossiles est fort ancienne. Ils ont très tôt suscité la curiosité, mais leur interprétation exacte rencontra des difficultés. Ils furent considérés comme des jeux de la nature, des os de géants; ainsi, des « gigantologies » reposaient sur des os d'éléphants. Avicenne (XI^{e} siècle), Albert le Grand (XIII^{e} siècle) avaient déjà identifié les fossiles pour des restes d'êtres vivants. Au XVI^{e} siècle, Léonard de Vinci et Bernard Palissy avaient une vue assez exacte de la nature des fossiles. A partir du XVIII^{e} siècle, les fossiles sont reconnus comme des restes d'organismes, le scepticisme de Voltaire à cet égard étant une exception. Buffon ajouta une notion nouvelle, à savoir que certains fossiles étaient les restes d'êtres disparus et totalement éteints. Enfin, Cuvier sera le fondateur incontesté de la paléontologie. Il montrera que l'étude des fossiles repose sur l'anatomie comparée, et, dans les *Recherches sur les ossements fossiles* (1812), il expliquera ses reconstitutions de deux Ongulés Périssodactyle et Artiodactyle du gypse de Montmartre.

Les fossiles plus anciens sont relativement simples, et une complexification croissante se manifeste progressivement. Des roches non métamorphisées (Transvaal oriental), âgées approximativement de 3,2 milliards d'années, portent des microtraînées de matière organique (9 μ de long) et renferment des microfossiles. Pendant une longue période, allant de 3,2 milliards à 1 milliard d'années, on trouve, dans le Sud africain, l'Ontario et l'Arizona, des preuves d'activité vitale et des micro-organismes fossilisés; ce sont surtout des Algues fort proches des Cyanophycées (Algues bleues) et des Bactéries; ces dernières ont participé à la formation des roches ferrugineuses et phosphatées précambriennes. Les stromatolithes, formations particulières, sont abondants; tout d'abord considérés comme des Algues, ils sont interprétés actuellement comme des précipitations de calcaire sur des filaments d'Algues bleues.

Les fossiles animaux précambriens sont connus par des fragments isolés de Polychètes, de méduses, de Pennatulides et surtout par la faune d'Ediacara, gisement découvert, en 1947, en Australie à 300 km au nord d'Adélaïde; cette faune de plus de mille spécimens renferme des méduses, des Pennatulides (l'abondance des Cnidaires flottants explique le nom d'*ère des méduses*), des Annélides et des organismes non identifiés avec certitude, peut-être des Échinodermes. Aucun Mollusque, probablement aucun Échinoderme, aucun Arthropode et aucun Vertébré n'est présent. L'absence de coquilles et de squelettes indique la carence d'un certain métabolisme du calcaire.

Évolution du règne végétal

Au Cambrien, vivaient des Algues vertes, rouges et brunes. Les Champignons les plus anciens datent du Dévonien. Les Bryophytes sont connus dans l'Ordovicien et le Silurien supérieur. Les premiers Cryptogames vasculaires (Psylophytes, *Rhynia* à structure primitive) apparaissent au Silurien inférieur; les Psylophytes persistent au Dévonien inférieur. A la base du Dévonien

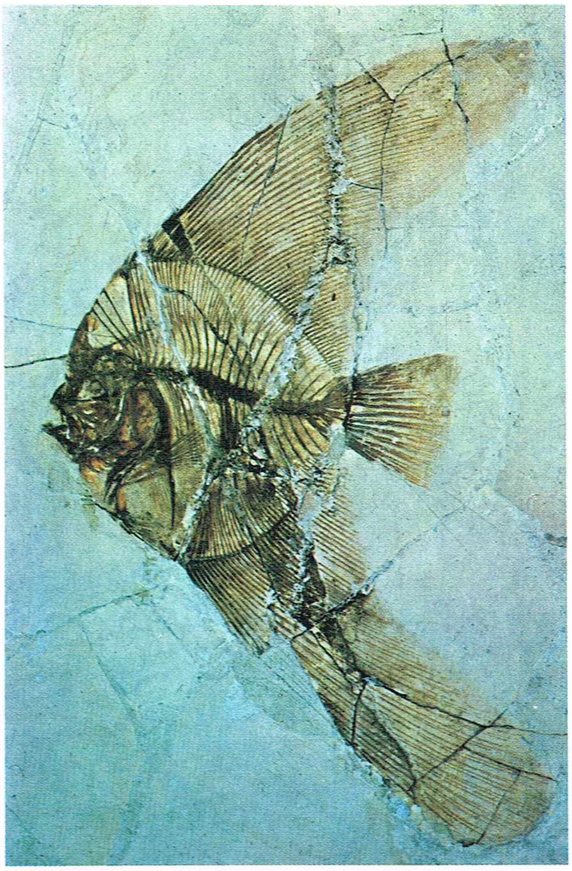

C. Bevilacqua

◀ *Un Poisson fossile de l'Éocène :* Platax sp., *retrouvé dans les gisements de Bolca (Musée National d'Histoire Naturelle, Vérone).*

I.G.D.A.

◀ *Reconstitution de deux espèces du genre* Rhynia (*A,* Rhynia major; *B,* Rhynia gwynnevaughanii); *les sporanges sont représentés bien qu'ils ne furent jamais repérés sur ces premières Cryptogames vasculaires (d'après Emberger et Boureau).*

C. Bevilacqua

moyen, les premières Ptéridospermées (Fougères à graines) sont signalées, et le Dévonien moyen connaît les vraies Fougères et quelques Articulées. Du Silurien supérieur au Dévonien se succèdent des Cryptogames vasculaires à structure de plus en plus complexe. Ces groupes s'épanouissent au Carbonifère et participent à la formation de la grande forêt houillère. Les Conifères appartenant aux Phanérogames, ou plantes à graines, apparaissent pendant le Carbonifère. Au Jurassique et au Crétacé inférieur, les Gymnospermes prédominent. Quelques Angiospermes ont été identifiées dès le Trias et le Lias, mais elles s'épanouissent à la fin du Crétacé.

Aux premières traces végétales font suite des végétaux dont les structures marquent une complication progressive; une structure primitive précède toujours dans le temps une structure plus complexe. Seule l'évolution fournit une explication de ces progressions chronologiques.

Évolution du règne animal

Au Précambrien, très peu d'Invertébrés ont laissé des fossiles : le métamorphisme est peut-être responsable de cette carence. Mais dès le Cambrien, d'abondants fossiles d'Annélides, de Bryozoaires, de Brachiopodes, de Mollusques, d'Arthropodes et d'Échinodermes sont présents; tous présentent une évolution en rapport avec les temps géologiques. Prenons l'exemple des Brachiopodes: au Cambrien prédominent les Inarticulés (lingules) ; les Articulés *(Orthis)* existent déjà et seront de plus en plus nombreux et diversifiés; les Pentaméracés, caractéristiques du Silurien supérieur, seront relayés par les Spiriféracés au Dévonien; au Secondaire, les Inarticulés ne comptent plus que quelques reliques; les Articulés disparaissent progressivement, et seules se maintiennent des Rhynchonelles, des Térébratules et des Térébratelles, qui comptent encore actuellement des représentants.

Le premier Insecte connu est le Collembole *Rhyniella*. Au Carbonifère, les Insectes comprennent des groupes disparus : Paléodictyoptères, Protoodonates, Protoorthoptères, Protoéphéméroïdes; les Holométaboles datent du Permien, les premiers Diptères et Hyménoptères, du Jurassique; les Lépidoptères, plus récents, sont apparus à l'Éocène, leur présence étant solidaire de celle des

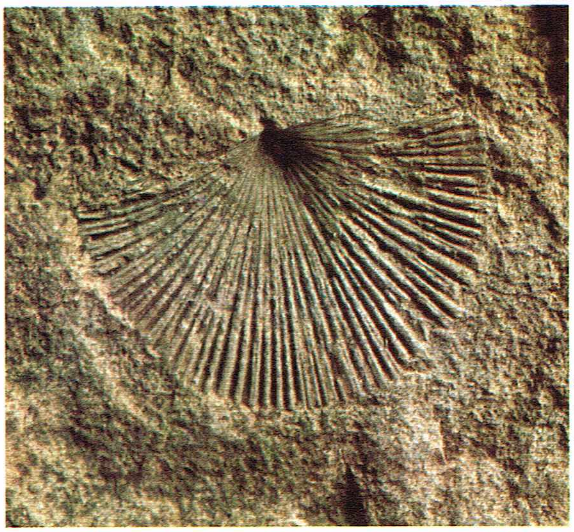

G. Leonardi - G. Pinna

plantes à fleurs. Les Hémimétaboles ont donc précédé les Holométaboles, et les ordres les plus évolués sont les plus récents.

Ces conclusions sont encore plus manifestes chez les Vertébrés car les fossiles, beaucoup plus abondants, sont étudiés soigneusement et l'anatomie comparée permet des déductions intéressantes. Les Vertébrés les plus anciens, les Agnathes ou Vertébrés sans mâchoires, existent dès le Silurien-Dévonien; ce sont des formes ossifiées, alors que leurs représentants actuels sont mous (lamproies, myxine). Les premiers Vertébrés à mâchoires, ou Gnathostomes, sont connus à partir du Silurien; ce sont des Poissons qui coexistent alors avec les Agnathes. Au Silurien, apparaissent successivement les Arthrodires et les Acanthodiens, au Dévonien les Sélaciens (raies observées seulement au Jurassique inférieur), puis les Actinoptérygiens, les Crossoptérygiens et les Dipneustes.

Ichthyostega, le premier Amphibien Stégocéphale, a été découvert dans le Dévonien supérieur du Groenland;

▲ Ci-dessus, feuille de Betula carpinea. Présentes dès le Trias et le Lias, les Angiospermes s'épanouissent à la fin du Crétacé. En haut, à droite, Orthys anomala, Brachiopode fossile du Silurien (Allemagne).

G. Leonardi - G. Pinna

▶ Les Reptiles apparaissent à la base du Carbonifère inférieur avec des Cotylosaures (ici, Lobidosaurus hamatus du Permien au Texas), qui s'éteignirent au Permien supérieur.

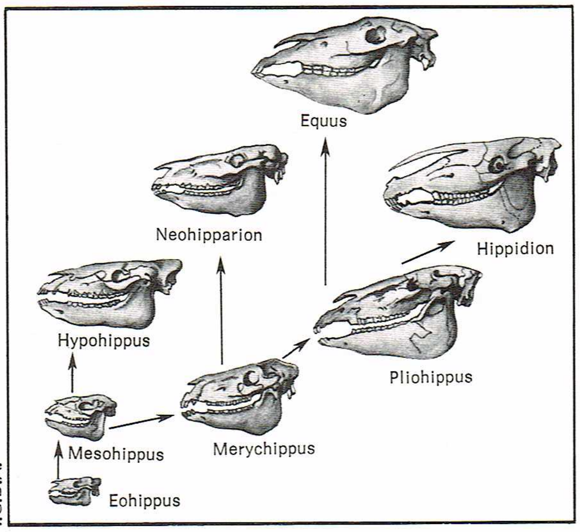

I.G.D.A.

les Stégocéphales disparaissent au Lias inférieur. Les Anoures sont signalés dès le début du Trias (*Protobatrachus* de Madagascar) et les Urodèles à partir du Crétacé supérieur.

Les Reptiles apparaissent à la base du Carbonifère inférieur avec des Cotylosaures, qui s'éteignent au Permien supérieur. Les premiers Reptiles mammaliens peu différenciés (Pélycosaures) datent du Carbonifère supérieur et du Permien inférieur; au Trias, leur succèdent les Thérapsidés (Cynodontes, Trytilodontes), qui ressemblent davantage aux Mammifères. Les Reptiles non mammaliens et les Sauropsidés sont plus tardifs; les Squamata datent du Trias, les Lacertiliens du Jurassique supérieur, les Ophidiens du Crétacé supérieur. Crocodiliens et Chéloniens sont connus au Trias moyen; les ichtyosaures s'étendent du Trias moyen au Crétacé supérieur; les plésiosaures vivent à partir du Trias inférieur pendant tout le Secondaire.

Les Oiseaux, qui proviennent des Sauropsidés, apparaissent au Jurassique supérieur *(Archaeopteryx)*.

Les premiers Mammifères alliés aux Reptiles mammaliens datent du Jurassique inférieur; c'est seulement au Crétacé qu'apparaissent les Marsupiaux et les Mammifères placentaires. Les Mammifères placentaires tertiaires les plus archaïques s'éteignent rapidement et les ordres apparaissent progressivement. Des Insectivores vivaient au Crétacé supérieur; ils persistent dans le Paléocène et sont alors entourés de Lémuriens, de Créodontes (Carnivores primitifs), de Condylarthres porteurs de griffes ou de sabots, et d'Amblypodes. Le Paléocène européen et surtout d'Amérique du Nord compte, outre des Placentaires, des Marsupiaux et des Multituberculés. Dès l'Éocène, les Multituberculés et les Créodontes disparaissent; les Marsupiaux, les Lémuriens insectivores se maintiennent et une floraison de groupes se manifeste : Périssodactyles et Artiodactyles, Proboscidiens, Édentés, Rongeurs, Carnivores fissipèdes, Cétacés, Simiens. L'Oligocène marque la fin des Condylarthres et des Amblypodes. Les Placentaires comprenant les familles actuelles se diversifient. Les Vertébrés témoignent donc également d'une évolution progressive allant toujours du plus simple au plus complexe. La progression organique et l'adaptation à des milieux nouveaux se manifestent sans ambiguïté.

Les règnes végétal et animal témoignent d'une concordance rigoureuse entre l'époque d'apparition d'une catégorie taxinomique et la place que lui confère son organisation. Les Cryptogames vasculaires précèdent les Phanérogames, et, parmi ces dernières, les Gymnospermes apparaissent avant les Angiospermes. Chez les Vertébrés, les Agnathes précèdent les Poissons, qui précèdent euxmêmes les Amphibiens et les Reptiles, auxquels feront suite les Oiseaux et les Mammifères.

Les lignées évolutives

Dans quelques cas, il est possible de suivre, dans les couches géologiques successives et de plus en plus jeunes, des fossiles dont les caractères évoluent progressivement; ainsi se dessinent des lignées évolutives offrant un aspect buissonnant et composées de types de plus en plus récents. Parmi ces lignées, certaines sont particulièrement bien connues : celles des Équidés, des Camélidés, des Proboscidiens.

Lignée des Équidés

Le tableau ci-dessus résume l'évolution buissonnante, de l'Éocène inférieur au Quaternaire, des lignées d'Équidés en Amérique, en Asie et en Europe.

Lignée des Proboscidiens

Les Proboscidiens présentent un aspect particulièrement buissonnant; la variation des incisives, ou défenses, et des molaires est très intense.

Les premiers Proboscidiens datent de l'Éocène moyen et de l'Oligocène inférieur d'Égypte; les couches du Fayoum abritent le *Mœritherium,* forme archaïque de la taille d'un ours, qui devait mener une vie amphibie ou aquatique. Le crâne, normal, porte une denture composée de trois incisives en haut, deux en bas, une canine en

LES PINSONS DE DARWIN (D'APRÈS P. R. EHRLICH ET R. W. HOLM)

ESPÈCES	CARACTÈRES	ALIMENTATION	NOMBRE D'ILES OU L'ESPÈCE VIT EN PERMANENCE
Geospiza magnirostris	Grande; vit sur le sol, dans les buissons et et les arbres.	Quelques variétés de grosses graines très dures.	14
Geospiza fortis	Moyenne; même habitat que la précédente.	Grande variété de petites et grosses graines moyennement dures.	12
Geospiza fuliginosa	Petite; vit sur le sol plus que les deux précédentes.	Grande variété de petites graines molles.	14
Geospiza difficilis	Moyenne; vit sur le sol.	Graines molles probablement.	7
Geospiza scandens	Moyenne; au repos sur *Opuntia*' (Cactées).	Petite variété de graines pas trop dures, tissus végétaux mous, nectar.	11
Geospiza conirostris	Grande; mode de vie mal connu, ressemblance avec la précédente.		3
Platyspiza crassirostris	Grande; vit dans les buissons denses et les grands arbres.	Fruits charnus, graines molles ou un peu dures, jeunes feuilles, fleurs.	10
Camarhynchus psittacula	Moyenne; vit dans les arbres, les buissons, parfois sur le sol.	Insectivore; creuse les tissus ligneux des grosses branches.	11
Camarhynchus pauper	Comme la précédente qu'elle remplace dans l'île Charles.		1
Camarhynchus parvulus	Petite; vit dans les arbres, les buissons, les Cactées, sur le sol.	Insectivore; creuse moins profondément que *c. psittacula.*	12
Cactospiza pallida	Moyenne; mœurs rappelant celles des tanagras.	Utilise une épine de cactus pour attraper les larves dans les branches.	7
Cactospiza heliobates	Moyenne; mœurs mal connues; vit dans la mangrove côtière.		2
Certhidea olivacea	Petite; ressemble à une fauvette; vit à tous les niveaux dans les arbres.	Carnivore, de préférence les petites larves.	16
Pinaroloxias inornata	Moyenne; vit sur le sol et dans les arbres.	Insectes, nectar, quelques fruits.	1

▲ A gauche, évolution du crâne des Équidés (d'après Simpson). A droite, tableau récapitulatif de l'évolution buissonnante des lignées d'Équidés (d'après Arambourg).

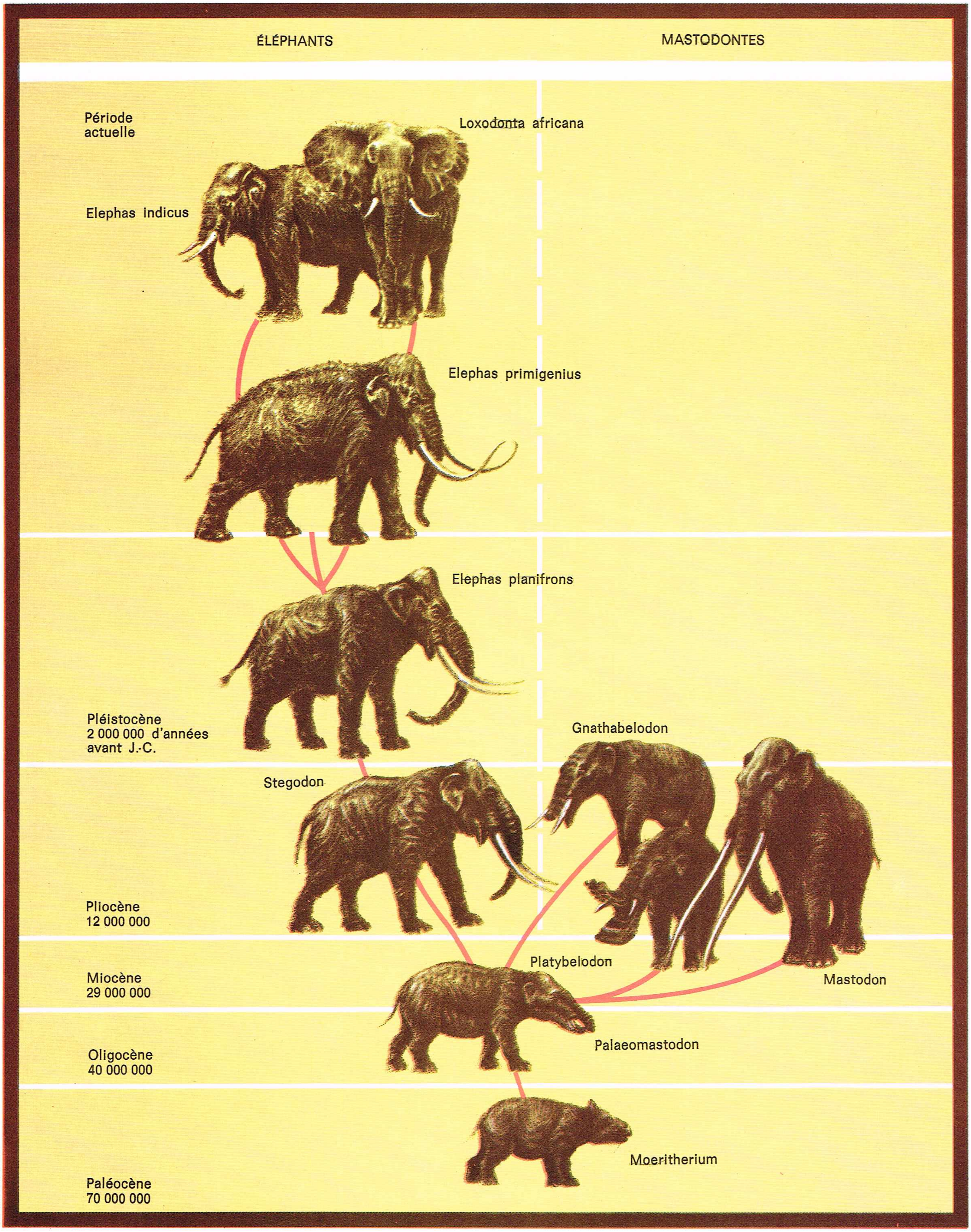

Marcelo Socias

haut, et six molaires en haut et en bas. La trompe n'existe pas.

A partir du *Mœritherium* divergent trois rameaux : les mastodontes, les éléphants et les dinothères. Dans ces trois rameaux se manifestent un accroissement de la taille, le développement de la trompe, un allongement des deuxièmes incisives aux mâchoires supérieure et inférieure et une diminution du nombre des molaires. Outre ces caractères communs aux trois rameaux, chacun d'eux offre des particularités.

Le rameau des mastodontes est particulièrement buissonnant. Ils naissent en Afrique (couches du Fayoum en Égypte) à l'Oligocène et, rapidement, gagnent tous les continents excepté l'Australie. Au Miocène inférieur, ils sont en Europe et en Asie; au Miocène moyen, ils arrivent en Amérique du Nord, puis en Argentine et en Bolivie. Le *Palaeomastodon* primitif, de la taille d'un rhinocéros, possédait de courtes défenses inférieures et supérieures et une petite trompe. La branche des *Tetrabelodon* comprend des espèces à quatre défenses, les inférieures étant plus allongées que chez les *Palaeomastodon*. La branche des *Amebelodon* et des *Platybelodon* est dotée d'une mandibule de plus en plus aplatie portant deux défenses, élargies en pelle, probablement utilisées à retourner la vase. La branche des *Mastodon* possède deux défenses supérieures, pouvant mesurer jusqu'à 2,50 m. L'atrophie ou l'absence des défenses inférieures entraînent, chez certains types, la transformation de la mandibule, qui acquiert l'aspect d'une spatule et atteint parfois 1,50 m. Les molaires des *Mastodon* sont hérissées de collines tuberculeuses.

Le rameau des éléphants, caractérisés par des molaires en râpes et deux défenses supérieures, apparaît au Miocène dans l'Ancien Monde. La branche des mammouths gagne l'Amérique du Nord, puis l'Amérique du Sud. A la fin du Quaternaire, les mastodontes et les mammouths *(Elephas primigenius)* s'éteignent.

Actuellement, vivent encore deux espèces d'éléphants : l'éléphant d'Asie *(Elephas indicus)*, dérivé d'*Elephas antiquus*, et l'éléphant d'Afrique *(Elephas africanus)*, dérivé d'*Elephas atlanticus*. Ils portent deux défenses correspondant aux incisives supérieures; leurs quatre molaires, une par demi-mâchoire, sont puissantes et garnies de crêtes d'émail séparées par des vallées de cément. Lorsqu'elle est usée, la molaire tombe, et une autre la remplace.

Enfin, le troisième rameau, celui des *Dinotherium*, apparaît brusquement en Europe au Miocène inférieur. Ces formes ont un crâne bas, qui contraste avec le crâne élevé des éléphants actuels. Les défenses supérieures ont disparu, mais les mâchoires inférieures sont devenues de fortes défenses recourbées vers l'arrière. Chaque demi-mâchoire porte cinq molaires garnies de crêtes transversales, rappelant celles des dents du *Meritherium*. Les *Dinotherium* du Miocène moyen mesuraient 2,70 m, mais *Dinotherium gigantissimum* (Pliocène inférieur et moyen) atteignait 4 à 5 m.

L'exemple des Proboscidiens illustre bien la notion d'évolution buissonnante, dans laquelle à partir de rameaux principaux divergent des ramifications secondaires.

Les diverses séries évolutives présentent souvent des *hypertélies*, c'est-à-dire des développements exagérés : défenses recourbées en dedans, bois extravagants de quelques Cervidés, canines-poignards de *Machairodus* et de *Smilodon*. Une croissance allométrique ou différentielle pourrait expliquer les hypertélies; un organe possédant un taux de croissance différent de celui de l'organisme est dit *hétérogonique*, ou *allométrique*. Un tel organe acquiert des dimensions excessives lorsque l'organisme s'agrandit. Une formule mathématique permet de préciser le rapport entre les dimensions de l'organe et de l'organisme.

— *Les formes intermédiaires*. Elles présentent des traits caractéristiques présents dans deux catégories taxinomiques, deux classes par exemple. En voici quelques exemples choisis chez les Vertébrés.

Ichthyostega. Ce Tétrapode fut découvert, en 1931, dans les Vieux Grès rouges du Dévonien supérieur du Groenland oriental et décrit par le Suédois S. Soderbergh (1932). Actuellement, plus de deux cents spécimens sont connus et étudiés, notamment par Jarvik. *Ichthyostega*, tout en possédant des pattes, présente à la fois des caractères de Poissons Crossoptérygiens Rhipidistiens et d'Amphibiens Stégocéphales. Parmi les premiers, il faut mentionner la présence de canaux sensoriels dans les os et la joue composée des mêmes os (postorbitaire, jugal, lacrymal, maxillaire, quadratojugale). Dépourvu de branchies, *Ichthyostega* ne possède pas d'opercule; et le pré-opercule, en régression, est devenu un os écailleux et isolé, qui disparaîtra totalement chez les autres Stégocéphales. Le toit crânien est déjà celui d'un Stégocéphale, mais les structures du palais buccal, de la mandibule, de la colonne vertébrale sont plus proches de celles des Rhipidistiens. Le crâne s'articule avec la colonne vertébrale par un double condyle occipital, absent chez les Rhipidistiens. Malgré des pattes puissantes, *Ichthyostega* possède encore une nageoire impaire caudalo-dorsale dont la structure rappelle celle d'une nageoire impaire de Rhipidistien. La présence de cette nageoire révèle qu'*Ichthyostega* menait, le plus souvent, une vie aquatique. Le squelette interne de la nageoire pectorale du Rhipidistien *Eusthenopteron* correspond à un bras en miniature, bien qu'il mène une vie toujours aquatique. *Ichthyostega* représente un chaînon entre les Poissons Crossoptérygiens Rhipidistiens et les Amphibiens Stégocéphales; sa structure et son organisation le rendent apte à vivre sur terre et dans l'eau.

Archaeopteryx. Cet animal présente des caractères mixtes entre Reptiles et Oiseaux. Quatre exemplaires sont connus : le premier (musée de Londres) fut découvert, en 1861, dans le calcaire lithographique du Jurassique supérieur de Bavière (Solenhofen), le deuxième (musée de Berlin) près d'Eichstädt (1877), le troisième (1956) au voisinage du premier, et le quatrième, très fragmentaire, a été retrouvé dans des collections du musée de Haarlem (1970). Dans cette association de caractères reptiliens et aviens, les premiers prédominent et comprennent : la non-pneumaticité des os, la présence

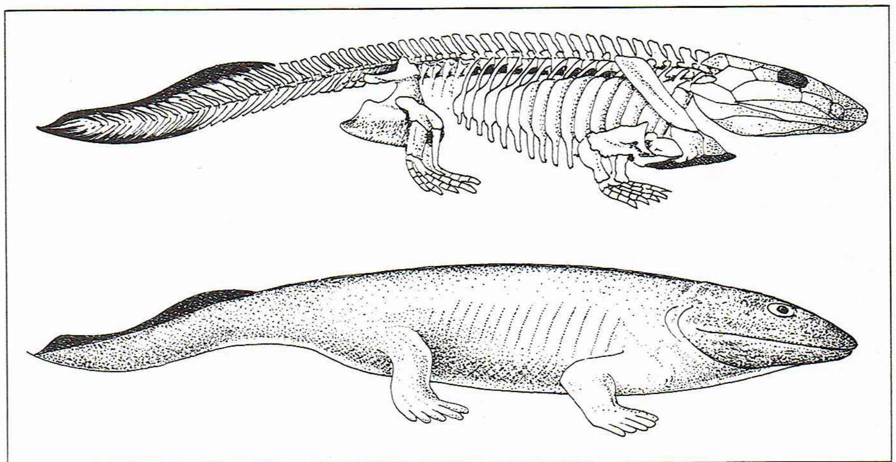

I.G.D.A.

▲ *Squelette et reconstitution, d'après Jarvik, d'un* **Ichthyostega**, *Amphibien Stégocéphale du Dévonien supérieur; ce Tétrapode se présente comme une forme intermédiaire entre Poissons Crossoptérygiens Rhipidistiens et Amphibiens Stégocéphales (on observera en particulier la structure de la queue).*

◀ *Page ci-contre, la lignée des Proboscidiens, du* **Mœritherium**, *forme archaïque du Paléocène, aux* **Elephas indicus** *et* **Loxodonta africana**, *formes actuelles.*

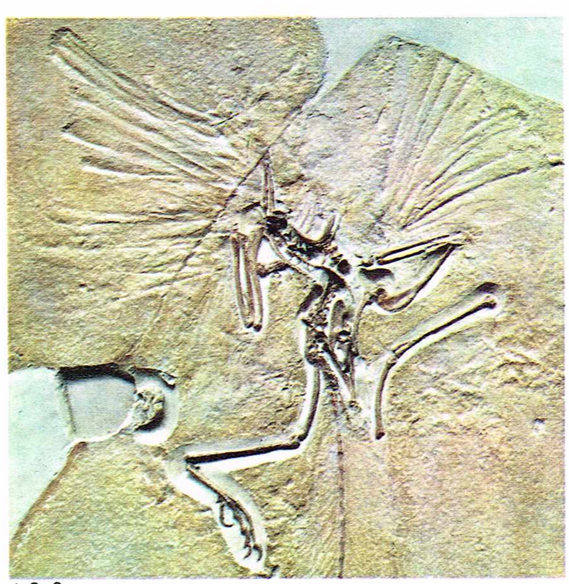

A.C. Cooper

◀ *Empreinte d'un* **Archaeopteryx** *montrant des caractères reptiliens et aviens; il représente une forme de passage entre Reptiles et Oiseaux.*

de dents, la forme amphicœlique des vertèbres, six vertèbres sacrées (les Oiseaux en possèdent de 11 à 23), une longue queue à vertèbres bien séparées, la gracilité des côtes non articulées au sternum et dépourvues d'apophyses uncinées, la présence de côtes ventrales rendant impossible le vol, la non-soudure des métacarpiens et des métatarsiens, la présence de griffes, les dimensions analogues du péroné et du tibia, une structure cérébrale avec lobes optiques et cervelet assez peu développés. Les caractères aviens sont moins nombreux : présence de plumes sur les bras (rémiges) et sur la queue (rectrices), structure des plumes composées d'un rachis avec barbes et barbules, soudure des deux clavicules en une fourchette, allongement du pubis vers l'arrière. L'ensemble des caractères laisse supposer qu'*Archaeopteryx* n'était pas un bon voilier.

— *Formes intermédiaires entre les Reptiles mammaliens et les Mammifères*. Chez les Reptiles, l'articulation mandibulaire se fait entre le carré et l'articulaire; chez les Mammifères, elle intéresse le squamosal et le dentaire. La distinction entre Reptiles et Mammifères repose donc sur un caractère précis. Mais les travaux paléontologiques modernes révèlent que les deux types d'articulation, carré-articulaire et squamoso-dentaire, se trouvent réunis chez des Reptiles mammaliens et des Mammifères du Trias supérieur ou du Lias inférieur de divers pays. Ces animaux à double articulation appartiennent-ils aux Reptiles ou aux Mammifères? Leur place dans l'une ou l'autre des classes est arbitraire. Il existe donc des formes intermédiaires entre Reptiles mammaliens et Mammifères.

Le facteur durée tient une place importante dans les preuves paléontologiques, qui constituent un argument de poids en faveur de l'évolution.

Preuves embryologiques

Le développement des individus, ou ontogenèse, présente de nombreux faits qui ne se comprennent que dans une perspective évolutive.

Les étapes embryonnaires des organes offrent des ressemblances avec les mêmes organes dans d'autres groupes. A une certaine phase du développement, la corde dorsale d'*Amphioxus* et des Agnathes se retrouve chez tous les Vertébrés; son absence rendrait impossible l'édification de la colonne vertébrale. Le cœur du fœtus humain comprend un tube courbé divisé en une oreillette, un ventricule et un bulbe; à ce stade de différenciation il correspond à un cœur de Poisson. La région cervicale des embryons d'Amniotes porte des fentes branchiales rappelant celles des Poissons. Tous les embryons de Vertébrés possèdent des arcs branchiaux; à l'état adulte, ils ne sont fonctionnels que chez les Agnathes et les Poissons; chez les autres Vertébrés, ils participent à la formation de l'appareil respiratoire (trompe d'Eustache), d'organes lymphoïdes (amygdale, thymus) et de la région cervicale. La larve pédonculée de la comatule, le seul Crinoïde libre, rappelle l'adulte pédonculé des autres types de Crinoïdes.

Comment interpréter ces répétitions sans admettre l'existence d'une origine commune aux organismes qui, au cours de leur ontogenèse, possèdent les mêmes organes et passent par les mêmes stades? Haeckel (1866) résuma ce fait par une phrase lapidaire : « L'ontogénie est une courte récapitulation de la phylogénie. » Cette loi biogénétique fondamentale rappelle que pendant son développement l'animal repasse rapidement par les états de ses ancêtres. Ainsi s'expliquent les organes transitoires des embryons. Les fœtus des baleines possèdent des ébauches dentaires qui ne percent pas la gencive et s'atrophient rapidement; elles témoignent de l'état cétodonte des ancêtres de la baleine dotés de fanons cornés. A l'état adulte, les Mollusques Nudibranches sont dépourvus de coquille, mais une coquille transitoire existe au cours du développement et montre leur descendance à partir de Gastéropodes à coquille. Autrefois considérés comme des Mollusques, les Tuniciers montrent des affinités avec les Vertébrés en raison de la présence de certains organes analogues à ceux d'*Amphioxus*.

Mais à la loi de Haeckel on préfère actuellement les lois de von Baer (1828), plus exactes, qui ont été tirées de l'oubli par des embryologistes anglais. Elles reconnaissent que, pendant le développement, les structures et les caractères généraux apparaissent avant les caractères particuliers; par exemple, un chien est successivement un Vertébré, puis un Mammifère et enfin un Canidé. L'ontogenèse ne récapitule pas la phylogenèse, car la loi de Haeckel s'applique aux organes et non à l'organisme entier. Ainsi, l'embryon humain possède des fentes branchiales, une notocorde, un cœur rappelant les mêmes organes de l'embryon de Poisson, mais l'embryon humain ne possède à aucun moment la structure d'un Poisson adulte. Haeckel avait d'ailleurs distingué des caractères *palingénétiques* (de *palingenésie*, renaissance), ou caractères ancestraux, et des caractères *cœnogénétiques* (de *cainos*, nouveau) ou caractères nouveaux, s'ajoutant aux premiers. Les fentes branchiales, le cœur courbé en S, la corde dorsale sont palingénétiques, alors que le placenta est cœnogénétique. Les caractères cœnogénétiques correspondent souvent à des adaptations à un mode de vie particulier. Les diverses larves pélagiques des Échinodermes, des Crustacés et des Annélides sont des adaptations cœnogénétiques à la vie pélagique, particulières aux phases larvaires.

Chez les adultes profondément modifiés par le parasitisme, la persistance des stades larvaires permet une identification systématique. Ainsi, la sacculine parasite du crabe, le peltogaster parasite des pagures sont des Rhizocéphales totalement déformés par le parasitisme, et seules leurs larves révèlent leur position systématique.

Les ressemblances embryonnaires traduisent des liens de parenté. Le développement des Annélides et des Mollusques indique une origine commune. Le Procordé *Amphioxus* présente des caractères d'Invertébrés (épiderme avec une seule couche de cellules, sang incolore, néphridie à solénocytes), et son ontogenèse rappelle celle des Vertébrés.

Preuves anatomiques

L'anatomie et l'anatomie comparée apportent des arguments intéressants à la théorie de l'évolution.

L'embryologie révèle que des organes de morphologie et de physiologie différentes possèdent parfois une origine commune; ils présentent des rapports constants

▼ En haut, les ressemblances embryonnaires traduisent des liens de parenté; ainsi les Mollusques Nudibranches (ici,* Aeolidiella sanguinea*), à l'état adulte, sont dépourvus de coquille, mais une coquille transitoire existe au cours du développement et montre leurs affinités avec des Gastéropodes à coquille. En bas, formes larvaires et adulte du Rhizocéphale* Sacculina carcini*; A, nauplius; B, cypris; C, adulte parasitant le crabe* Carcinus maenas*, vu par la face ventrale. L'adulte étant profondément modifié par le parasitisme, seule la morphologie normale des stades larvaires permet l'identification systématique.

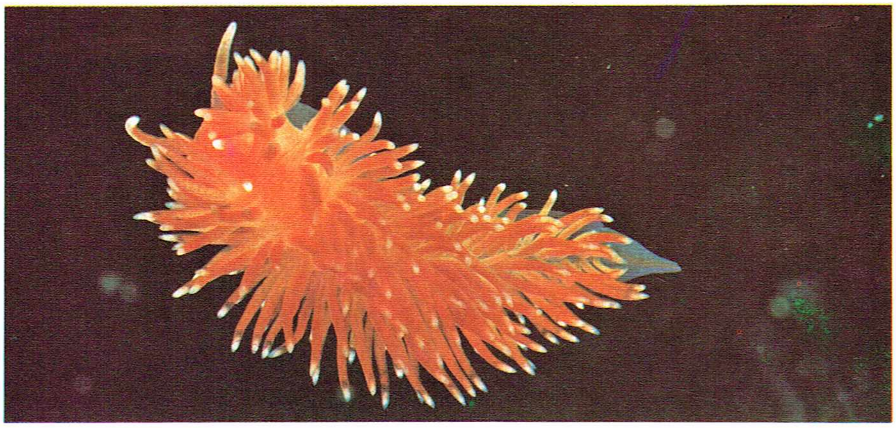

H. Chaumeton - Jacana

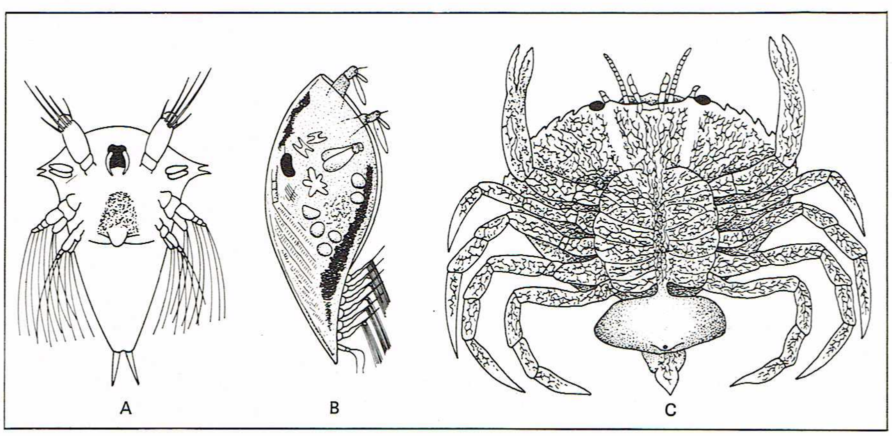

I.G.D.A.

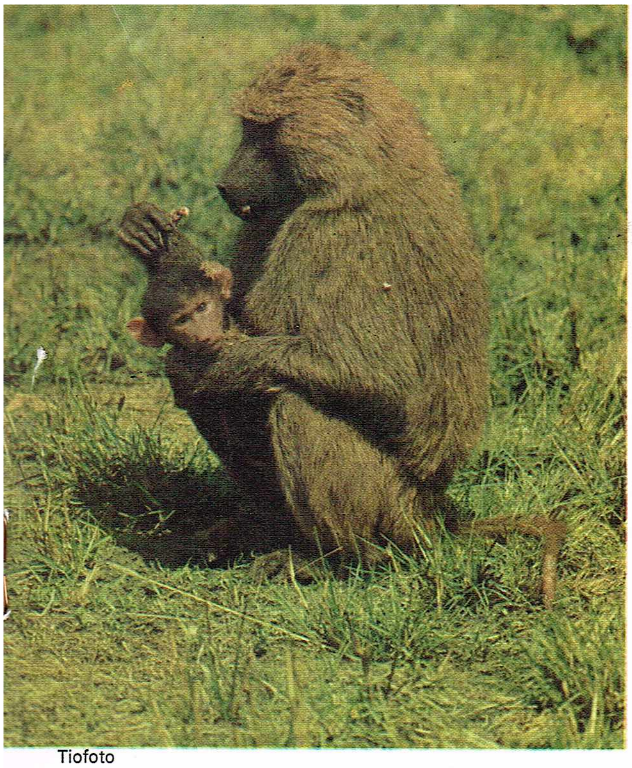

Tiofoto

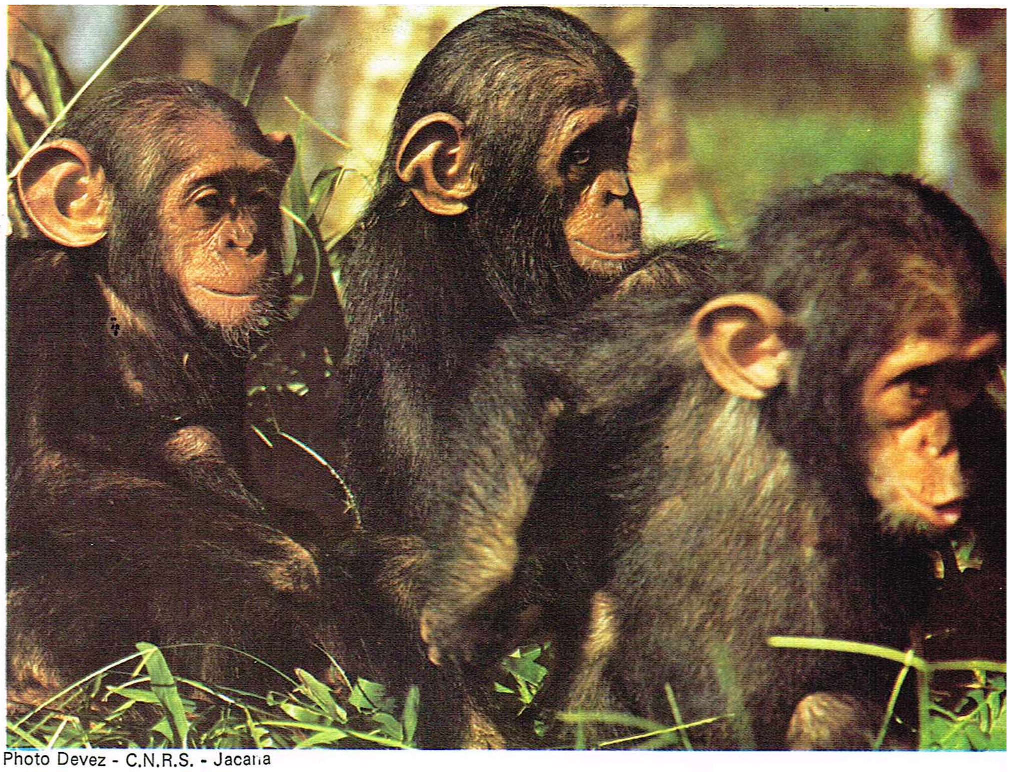

Photo Devez - C.N.R.S. - Jacana

de situation, d'innervation avec les organes voisins. Ces organes sont des *organes homologues*. Darwin avait déjà constaté que « la main de l'homme faite pour saisir et toucher, la griffe de la taupe destinée à fouir la terre, de même que la jambe du cheval, la nageoire du marsouin et l'aile de la chauve-souris » sont « construites sur le même plan et renferment des os semblables placés dans la même position relative ». Une évagination du tube digestif antérieur produit la vessie natatoire et le poumon. Chez les Poissons Dipneustes, la vessie natatoire se plisse, forme des alvéoles et prend la structure d'un poumon; elle devient un poumon fonctionnel chez les Protoptères. Tous les Mammifères, à quelques exceptions près, possèdent 7 vertèbres cervicales, aussi bien la girafe au long cou que la baleine sans cou. L'armature buccale d'un Insecte broyeur compte le même nombre de pièces que celle d'un Insecte piqueur. Le crâne des Mammifères comprend toujours les mêmes os; les connexions des os entre eux et des os avec les organes des sens mettent en évidence les homologies. L'homologie des osselets de l'oreille moyenne des Mammifères est bien connue; l'étrier est homologue de l'hyomandibulaire des Poissons; le marteau, l'enclume, le tympanique sont respectivement homologues du carré, de l'articulaire, de l'angulaire des Reptiles.

Les organes rudimentaires, peu développés et n'exerçant plus de rôle, sont des homologues d'organes normalement développés dans des groupes plus primitifs. L'homme possède ainsi de nombreuses « reliques anatomiques » : le repli semi-lunaire de l'œil correspond au reste de la paupière nictitante fonctionnelle chez divers Mammifères; l'appendice vermiculaire représente le vestige de la portion distale du cæcum; la musculature atrophiée de l'oreille témoigne d'une oreille mobile, de même la musculature coccygienne non fonctionnelle rappelle la musculature caudale. L'embryon ou le très jeune organisme possède des organes transitoires : l'embryon d'orvet présente des ébauches de pattes, alors que l'adulte est apode; les mâchoires de quelques embryons d'Oiseaux portent des bourgeons dentaires dont la durée est éphémère.

Preuves biochimiques

La biochimie, comme l'anatomie comparée, met en évidence l'unité du vivant. Des morphologies voisines se doublent de chimismes communs. La chitine caractérise tous les Arthropodes; l'hémoglobine est présente chez tous les Vertébrés, les hémocyanines ou hémérythrines chez les Vers, les Mollusques et les Crustacés. Les Composées contiennent de l'inuline; les Crucifères et les espèces voisines renferment des hétérosides à essences sulfurées. L'hémoglobine des espèces d'un grand genre cristallise en cristaux du même système : tous les *Canis*, y compris *Vulpes*, ainsi que tous les *Felis* possèdent des hémoglobines à cristaux isomorphes. Le tissu musculaire renferme des quantités importantes d'un phosphagène qui intervient dans la concentration musculaire. La nature du phosphagène varie avec les groupes : chez les Invertébrés, c'est le plus souvent une phosphoarginine; mais chez les Annélides, c'est une phosphoglycamine ou phosphotaurocyanine. Les Vertébrés et les Procordés renferment de la phosphocréatine, et, chez les Échinodermes, le phosphagène diffère selon les groupes : les ophiures ont de la phosphocréatine, les oursins de la phosphoarginine et de la phosphocréatine.

Les groupes sanguins témoignent d'une parenté étroite entre l'homme et les singes Anthropoïdes. Les réactions d'agglutination fournissent des indications analogues. Le sérum d'un animal qui reçoit des globules rouges d'une autre espèce agglutine les hématies de cette espèce et des espèces alliées : par exemple le lapin à qui l'on injecte des globules rouges humains élabore un sérum anti-homme qui agglutine les globules rouges de l'homme et ceux des Anthropoïdes; il n'exerce pas d'action sur les globules rouges des singes inférieurs. Cette technique des agglutinations permet de déceler les affinités réelles : ainsi, la parenté entre la limule et les Arachnides a été mise en évidence. Mais elle permet aussi de séparer deux espèces morphologiquement très voisines.

La « molécularisation » de la biologie a révélé l'existence dans les substances organiques de « grandes familles moléculaires » fondées sur des ressemblances de structure et de fonctions. Elle a favorisé la recherche de filiation à l'échelle moléculaire. L'évolution moléculaire se manifeste, par exemple, dans les cytochromes *c*, les hémoglobines, les hormones neurohypophysaires. De même que des organes sont homologues, certaines protéines sont homologues parce qu'elles proviennent d'une protéine ancestrale commune (c'est le cas de l'hémoglobine et de la myoglobine). Les hémoglobines de Vertébrés (Agnathes exclus) se composent de deux chaînes α et de deux chaînes β constituées respectivement de 141 et 146 acides aminés; ainsi, la longueur de la chaîne polypeptidique est un caractère constant. Par substitutions plus ou moins nombreuses d'acides aminés, les chaînes se différencient : les chaînes β des hémoglobines de l'homme et du gorille sont identiques, sauf pour un seul acide aminé en position 104 (chez le gorille, la lysine s'est substituée à l'arginine). Quant à l'hémoglobine de la lamproie, elle ne compte qu'une chaîne polypeptidique composée de 160 acides aminés; de par sa structure, elle est très proche de la myoglobine des muscles de Vertébrés. Une globine ancestrale serait donc à l'origine de la myoglobine, de l'hémoglobine à une chaîne de la lamproie et des hémoglobines à quatre chaînes. Les transferrines sont des protéines plasmiques qui fixent spécifiquement le fer dans les organismes; elles existent chez tous les Vertébrés. Des réactions croisées entre les transferrines de diverses espèces de Poissons classées dans un même genre ont été réalisées; des réactions croisées ont également été obtenues avec la transferrine humaine et les transferrines des Simiens *Papio, Macaca* et *Pan*.

▲ ***La biochimie, comme l'anatomie comparée, met en évidence l'unité du vivant; ainsi, des réactions croisées ont été obtenues entre la transferrine humaine et les transferrines des Simiens des genres* Papio, Pan *(représentés respectivement à gauche et à droite), et* Macaca.**

▼ ***La technique des agglutinations permet de déceler des affinités réelles : ainsi la parenté entre la limule (ici, un fossile du Kimméridgien de Solenhofen :* Mesolimulus walchii*) et les Arachnides a été mise en évidence.***

G. Leonardi - G. Pinna

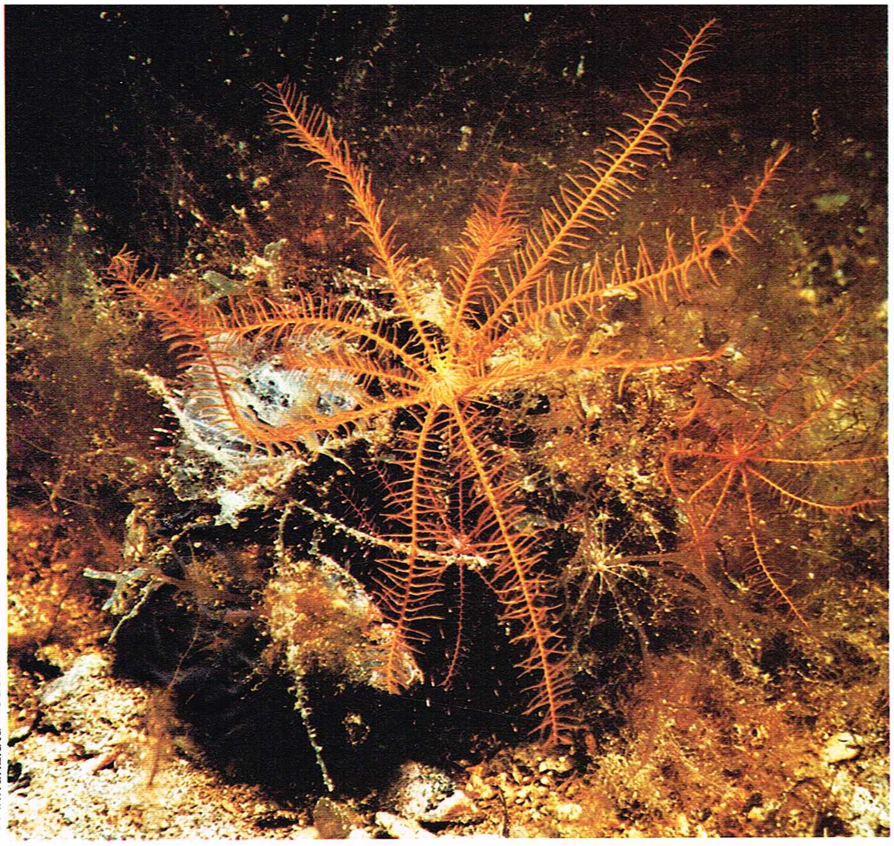

G. Annunziata - Jacana

▲ *Entre la naissance et la mort, certains groupes présentent plusieurs périodes florissantes ; ainsi le Silurien et le Dévonien l'ont été pour les Crinoïdes, notamment. Ici,* Antedon mediterranea.

Ces diverses preuves paléontologiques, embryologiques, anatomiques, biochimiques établissent rigoureusement le fait de l'évolution et confirment que seule une conception évolutionniste apporte une certaine compréhension du monde vivant.

Modalités de l'évolution

La paléontologie donne une idée du déroulement de l'évolution : les êtres vivants les plus simples apparaissent les premiers et des êtres de plus en plus compliqués les suivent. Cette complexité croissante se vérifie à chaque découverte paléontologique. Dans la succession des êtres et dans l'échelle chronologique, le nouveau fossile trouve toujours une place en accord avec l'évolution. Même à l'échelon le plus bas, on constate que les Procaryotes dépourvus d'un vrai noyau (Bactéries, Mycoplasmes, Algues bleues), à organisation simple, sont apparus avant les Eucaryotes porteurs d'un noyau bien défini (végétaux verts, Champignons, animaux), et à structure beaucoup plus complexe. Les schistes du Précambrien inférieur du sud de l'Afrique (3,2 milliards d'années) renferment des Bactéries en bâtonnets et des Algues bleues unicellulaires. Au Précambrien moyen (2 milliards d'années), près du lac Supérieur aux États-Unis, vingt espèces de Procaryotes (Bactéries, Algues bleues unicellulaires et pluricellulaires) sont présentes. Les roches renferment des traces d'hydrocarbures résultant de la dégradation de la chlorophylle. Au Précambrien supérieur (1 milliard d'années), en Australie, apparaissent les premiers fossiles d'Eucaryotes : ce sont des Algues vertes unicellulaires associées à des Algues bleues. A la fin du Cambrien (600 millions d'années), les Eucaryotes manifestent une diversification intense. La coexistence des Pro- et des Eucaryotes est donc relativement récente. La chronologie du phénomène a même été imaginée.

Il est souvent admis que l'histoire évolutive de chaque groupe se déroule à peu près comme le développement des organismes. Le groupe naît d'une façon plus ou moins explosive, s'épanouit, subit une différenciation buissonnante, se spécialise, puis diminue et s'éteint plus ou moins rapidement. Ce film n'est pas toujours aussi régulier ; évidemment les groupes naissent et meurent encore que quelques-uns persistent et participent à la faune actuelle : ce sont les *types panchroniques*, les reliques ou encore des fossiles vivants. En voici quelques exemples : des micro-organismes âgés de 2 milliards d'années ne peuvent être différenciés d'espèces actuelles ; la lingule est un Brachiopode actuel du Pacifique ; or, les Brachiopodes datent du Cambrien. Les Mollusques monoplacophores du Cambrien-Silurien sont actuellement représentés par deux espèces de *Neopilina* dans l'océan Pacifique à l'ouest du Mexique ; d'autres Mollusques Gastéropodes et Lamellibranches, des Crustacés des temps primaires et secondaires sont encore présents. Certains Insectes particulièrement bien conservés dans l'ambre ressemblent étonnamment aux formes actuelles. Le cœlacanthe des eaux marines profondes de l'archipel des Comores est l'ultime représentant des Poissons Crossoptérygiens, qui se sont éteints à la fin du Crétacé. Le Reptile *Sphenodon,* de Nouvelle-Zélande, est le dernier survivant des Rhynchocéphales du Trias et du Jurassique d'Europe et d'Afrique. Les espèces panchroniques qui ne présentent réellement aucune évolution depuis les ères primaire et secondaire sont, en grande majorité, des espèces aquatiques, généralement marines. Les milieux marins d'une assez grande profondeur représentent des milieux d'une grande stabilité ; celle-ci est peut-être responsable de l'arrêt de l'évolution et de la non-extinction de ces animaux. Mais il est possible aussi que les panchroniques possèdent un *épigénotype* particulièrement bien équilibré qui maintient la stabilité phénotypique.

Cependant, entre la naissance et la mort, certains groupes présentent plusieurs périodes florissantes ou explosives, alors que d'autres se diversifient peu. La période de prolifération se manifeste assez rapidement après la naissance (Tribolites, Nautiles) ou beaucoup plus tardivement (les Mammifères présents dès le Trias présentent leur grande diversification au Paléocène et à l'Éocène, il y a 100 millions d'années). Divers groupes ont plusieurs périodes florissantes (les Crinoïdes au Silurien, au Dévonien, les Ammonoïdés à la fin du Dévonien, au Permien, au Trias et au Crétacé).

La diversification buissonnante prend parfois l'aspect d'une *radiation adaptative,* expression qui marque la prolifération et l'adaptation au milieu. A l'ère secondaire, les Reptiles ont, en l'absence de concurrence, occupé tous les milieux et se sont différenciés en types aquatique, terrestre et aérien, dont les dimensions variaient de celles d'une souris à celles d'un éléphant ; tous présentaient une grande variété de régimes. Au début du Jurassique, les Mammifères étaient de petite taille et peu différenciés. Après la disparition des grands Reptiles secondaires, les Mammifères ont établi leur supériorité, se sont grandement diversifiés et ont occupé tous les milieux libres. La radiation adaptative coïncida donc avec une diversification intense, conditionnée par l'absence de concurrence et par l'abondance des niches écologiques non occupées. Un autre type de radiation adaptative se réalise, par exemple en Australie, où les Marsupiaux ont évolué sur place et sans la concurrence des Mammifères placentaires, qui n'avaient pas encore atteint ce continent. Ils se sont adaptés aux divers milieux, et ainsi se sont développées des formes parallèles à celles des Mammifères placentaires (loup marsupial, chat marsupial, musaraigne marsupiale, lapin marsupial, souris marsupiale, Marsupial volant, ruminant marsupial, etc.).

Ce type de radiation adaptative peut provoquer des phénomènes de convergence, c'est-à-dire des ressemblances. Il s'observe également chez les Lémuriens et les Insectivores histricomorphes de l'Amérique du Sud.

Extinction des espèces. Si la disparition des espèces s'effectue d'une façon permanente, elle semble toutefois plus marquée à certaines époques. Au Permien, l'extinction frappe plusieurs groupes, et au Trias naissent de nouveaux groupes ; le Permo-Triasique marque une période critique. De même, du Crétacé au Tertiaire, se dessine un renouvellement des Tétrapodes marqué par le déclin des Reptiles et l'accroissement des Mammifères.

Les causes de ces extinctions demeurent assez obscures. Les accidents physiques, géologiques, tectoniques, interviennent à certaines périodes particulièrement perturbées : érection des chaînes montagneuses, formation de ponts entre des continents qui favorisent les échanges fauniques, ou apparition de détroits qui modifient l'environnement. Les périodes glaciaires et xérothermiques exercent aussi une profonde influence sur les distributions des êtres vivants. Une corrélation se manifeste entre les phénomènes physiques et les phénomènes biologiques qui en dérivent. Les modifications locales du milieu, les restrictions de nourriture entraînant une diminution de la fécondité, les épidémies, les parasites, les batailles compétitives exercent très probablement un rôle dans l'extinction des grands groupes. Les disparitions d'espèces s'expliquent plus facilement ; de nombreux cas

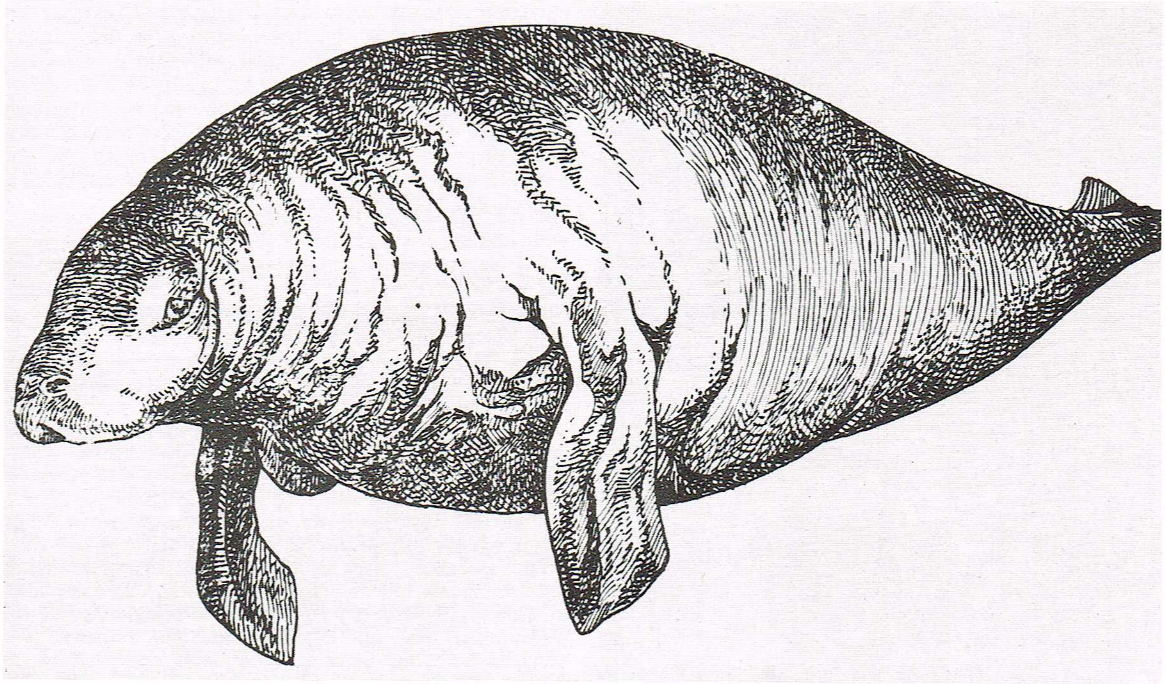

Cl. Bibl. Muséum Paris - Sciences Progrès La Nature - N° 3348 - Avril 1964 - Dunod Éditeur

◀ *L'extinction d'une espèce semble toujours liée à une modification de l'environnement; cependant, l'homme, souvent, accélère cette disparition comme c'est le cas pour la* rhytine de Steller *qui, découverte en 1742, s'est éteinte 27 ans plus tard.*

sont d'ailleurs connus à l'époque historique. L'homme, par ses chasses inconsidérées, le défrichement, l'introduction d'animaux nouveaux, accélère la disparition des espèces, principalement des Oiseaux des îles (dronte ou dodo gris de l'île Maurice, didide ou *Pezophaps* de l'île Rodriguez, le dinornis de Nouvelle-Zélande, l'æpyornis de Madagascar, le grand pingouin de l'Atlantique-Nord, le pigeon migrateur d'Amérique du Nord, le canard du Labrador, etc.). Parmi les Mammifères sauvages, se sont éteints à des dates connues : le chinchilla des Andes, deux Ongulés, l'hippotrague bleu et le couagga, la rhytine de Steller, les Édentés géants de Madagascar; les phoques à fourrure, des Siréniens (dugong, lamantin), des Cétacés sont également menacés d'extinction.

En conclusion, l'extinction d'une espèce ou d'une catégorie taxinomique plus importante semble toujours liée à une modification de l'environnement, qui exigerait des organismes une adaptation qu'ils sont incapables de réaliser. La surspécialisation représente donc à cet égard un facteur essentiel de l'extinction. La naissance et la mort des grands groupes entraînent le remplacement, le relais, du groupe disparu par un autre. Ce phénomène général existe aussi bien chez les végétaux que chez les animaux, et les exemples en sont abondants.

L'évolution présente encore une modalité qui peut être qualifiée de loi; il s'agit de la *loi de Dollo* (du nom du paléontologiste belge), ou *loi de l'irréversibilité régressive*. Cette loi générale avait déjà été pressentie par Edgar Quinet, qui écrivait : « La Nature ne retourne pas en arrière; elle ne refait pas ce qu'elle a détruit; elle ne revient pas au moule qu'elle a brisé. Dans le monde infini des combinaisons que l'avenir renferme, vous ne reverrez pas deux fois la même humanité, ni la même flore, ni la même faune. » Dollo (1893), paléontologiste belge, a développé cette loi. Lorsqu'un organe entre en régression, il ne fait pas retour en arrière. Par exemple, les Ongulés possédant un nombre réduit de doigts (3, 2, 1), descendent de formes ayant 4 ou 5 doigts, mais n'engendreront pas de types avec un nombre supérieur de doigts. L'homme ayant 5 doigts, tout Tétrapode appartenant à sa lignée en possède également 5. Les animaux qui retournent à un mode de vie analogue à celui des ancêtres posséderont des organes analogues, assumant les mêmes fonctions, mais ayant une origine différente. Des Reptiles (Ichtyosaures, Plésiosaures, Crocodiliens, Chéloniens, Sauriens) et des Mammifères (Pinnipèdes, Cétacés, Siréniens) ont fait retour à la vie aquatique; chez aucun d'eux, les nageoires et l'appareil branchial des Poissons ne sont réapparus; la nageoire caudale du Cétacé présente une structure différente de celle de la nageoire caudale du Poisson. Les Insectes terrestres respirent avec des trachées, et certaines larves aquatiques possèdent des trachées modifiées, les trachéo-branchies; mais les branchies ne sont pas réapparues.

Les orthogenèses, c'est-à-dire les séries évolutives orientées aboutissant à un type d'organisation de plus en plus spécialisée dans un sens, certains caractères se compliquant et d'autres se simplifiant, sont de plus en plus discutées. Elles seraient même l'exception. Les orthogenèses classiques reposeraient sur des arguments erronés ou sur un choix inconscient et arbitraire de types qui ont fait croire à une orthogenèse. L'évolution n'est pas rectilinéaire, mais buissonnante. La phylogénie du cheval a été citée comme un exemple typique d'orthogenèse, et pourtant elle comprend au moins douze branches. En réalité, la pseudo-orthogenèse du cheval est une construction subjective traduisant une sorte de modalité moyenne et statistique de plusieurs lignées comprenant diverses orientations.

Les développements linéaires ne sont réellement observés que pendant de courtes, ou relativement courtes, périodes géologiques. Ainsi, les oursins du genre *Micraster*, dans la falaise de Margate (Angleterre), qui s'est édifiée dans une mer peu profonde et calme pendant le Crétacé, Turonien et Sénonien (3 à 4 millions d'années), ont subi une évolution qui porte sur la forme générale, l'ornementation du test et le déplacement de la bouche vers la périphérie. Ces fossiles forment une série continue ayant évolué lentement. Il en est de même pour les paludines de Slavonie et les planorbes de Steinheim, Gastéropodes des grands lacs d'eau douce du Pliocène.

La vitesse de l'évolution

Le phénomène de l'évolution est d'une extrême lenteur : un changement profond exige des millions d'années. Osborn estime que la réalisation de la troisième molaire des mastodontes triphodontes a nécessité 20 millions d'années; chez l'ancêtre le plus ancien (Éocène), cette dent portait 7 tubercules; chez le dernier représentant, elle en compte 37. Vingt millions d'années ont été nécessaires au développement de 30 tubercules, ce qui représente 660 000 années pour l'apparition d'un tubercule. Cette extrême lenteur donne l'illusion d'une stabilité. A l'échelle d'une vie humaine, on ne constate que l'apparition de mutations modifiant les organismes, mais sans exercer de transformations profondes.

Certaines évolutions paraissent plus rapides que d'autres. Le passage de la vie aquatique à la vie terrestre exige des transformations de longue durée; elles se réalisent en plusieurs étapes. Les poumons se développent chez les Poissons Crossoptérygiens, qui possèdent encore des branchies. Les nageoires des Crossoptérygiens se

▶ *Le paléontologiste américain H. F. Osborn (1857-1935) spécialisé dans l'étude des Vertébrés fossiles, Reptiles et Mammifères principalement.*

transforment en pattes marcheuses chez les Stégocéphales, premiers Tétrapodes terrestres, temporaires. Chez *Eusthenopteron*, Crossoptérygien Rhipidistien (Dévonien, Permo-Carbonifère) à choane (communication nouvelle avec la cavité buccale), le squelette de la nageoire pectorale présente la disposition d'un bras avec un humérus massif, court, inséré sur un scapulo-coracoïde, un cubitus assez large, un radius allongé, une palette osseuse terminée par sept doigts; carpiens, métacarpiens et phalanges n'existent pas. La nageoire pelvienne, qui correspond au membre postérieur des Tétrapodes, se compose d'un fémur, d'un tibia et d'un péroné indépendants; les autres os sont encore mal connus. La ceinture pelvienne est déjà un vrai bassin. Les structures de la colonne vertébrale, des apophyses vertébrales et du crâne des Crossoptérygiens présentent des ressemblances qui annoncent les structures observées chez les premiers Tétrapodes. La disparition de la vie larvaire et le développement d'une peau imperméable sont indispensables pour abandonner définitivement la vie aquatique.

D'après Simpson, le taux de changement structural chez les chevaux correspondrait à un genre pour 7,5 millions d'années; chez les Ammonites, un genre demanderait 20 millions d'années. Dans la lignée cheval, l'évolution est donc plus rapide que dans la lignée Ammonite. Il semble que les groupes les plus élevés dans la hiérarchie organique, ceux qui apparaissent les derniers ou ceux qui sont proches de l'homme, évoluent beaucoup plus rapidement que les autres.

L'évolution est-elle terminée? Le point d'interrogation demeure. Le temps représente un paramètre essentiel de l'évolution. En raison de son extrême lenteur, nous ne pouvons observer les modifications évolutives. Cependant, le développement de l'homme, doté d'un psychisme particulièrement développé, ne risque-t-il pas de perturber l'évolution? L'homme modifie tous les facteurs de l'environnement, provoquant la disparition des faunes et des flores. Il cherche même à modifier sa propre espèce, voire à la détruire. L'homme tend à diriger l'évolution, qui échappe ainsi aux facteurs naturels au profit de facteurs biologiques et surtout sociaux.

Les théories explicatives

La vie est apparue il y a probablement trois milliards d'années et avec elle l'évolution, qui a donné naissance à plus de deux millions d'espèces. Des preuves variées établissent le fait de l'évolution qui s'exprime dans la phylogenèse; mais ses mécanismes sont encore bien mal connus. Diverses hypothèses plus ou moins satisfaisantes ont été proposées. Toute théorie explicative doit rendre compte de l'origine des espèces et de celle des autres catégories taxinomiques; mais elle doit surtout expliquer l'adaptation des organismes à leur milieu et celle des organes à leur fonction.

Qu'entend-on par adaptation? Etymologiquement, c'est un ajustement de l'organisme à toutes les conditions de l'environnement. L'adaptation éthologique caractérise un mode de vie : une nageoire, une queue aplatie, une palmure sont des caractères fréquents chez les aquatiques; les fouisseurs possèdent une patte d'un type spécial révélant immédiatement leur aptitude à fouir le sol. Cette adaptation éthologique se traduit également en termes statistiques car sa probabilité de liaison avec un mode de vie est grande, sans être absolue. Des aquatiques sont dépourvus de palmure, des fouisseurs de pattes spéciales; mais le nombre et l'importance des adaptations statistiques déterminent la plus ou moins bonne adaptation à un mode de vie; ainsi il existe des adap ations à la nage, à la plongée, au grimper, à la sécheresse, à l'obscurité, à la salure, à l'altitude, au froid, à l'humidité... Il en est de

Bruce Coleman - J. Burton

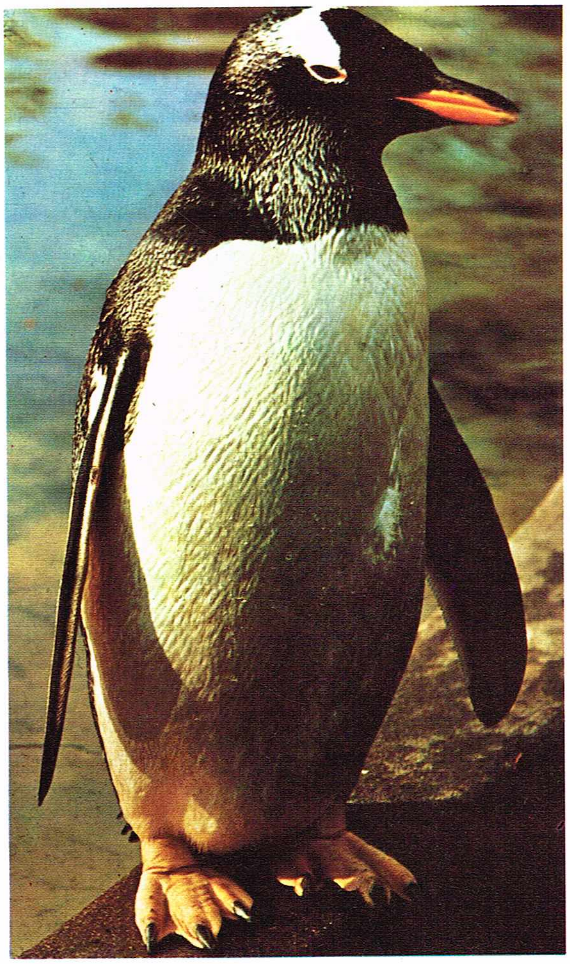

S. Prato

▶ *L'adaptation éthologique caractérise un mode de vie; les pattes fouisseuses de la taupe (à gauche), les pattes palmées du manchot (à droite) révèlent pour la première son aptitude à fouir le sol et pour le second sa vie surtout aquatique.*

même pour l'adaptation des organes à leur fonction ; elle conditionne un fonctionnement correct des divers appareils. L'évolution doit résoudre un paradoxe : « Accorder l'imprévisible au rationnel, l'inattendu à la finalisation, le hasard à l'adaptation. » Nous résumerons brièvement les hypothèses proposées.

Le lamarckisme

Jean-Baptiste de Monet de Lamarck (1744-1829), systématicien et philosophe de la nature, est le père de cette théorie. Chargé de classer des collections chaotiques (Insectes, coquilles, Vers, coraux) du Muséum d'histoire naturelle, il découvrit les difficultés que présente la séparation des espèces ; il estima que les espèces passaient de l'une à l'autre ; qu'elles n'ont pas été créées une à une, mais qu'elles descendent les unes des autres ; ainsi s'établit une série progressive des Infusoires aux Mammifères. L'espèce possède une stabilité temporaire et apparente, liée à celle du milieu : « A mesure que les circonstances d'habitation, d'exposition, de climat, de nourriture, d'habitude de vivre... viennent à changer, les caractères de taille, de forme, de proportion entre les parties, de couleur, de consistance, d'agilité et d'industrie pour les animaux, changent proportionnellement. » Les transformations de milieu entraînent des modifications des besoins ; les animaux acquièrent de nouvelles habitudes et, partant, de nouvelles actions s'accomplissent. Les mouvements différant, les organes exerçant un autre travail se fortifieront ou s'atrophieront. Pour Lamarck, « ce ne sont pas les organes d'un animal qui ont donné lieu à ses habitudes et à ses facultés particulières, mais ce sont au contraire ses habitudes, sa manière de vivre et les circonstances dans lesquelles se sont rencontrés les individus dont il provient, qui ont avec le temps constitué la forme de son corps, le nombre et l'état de ses organes, enfin les facultés dont il jouit ».

La succession des phénomènes se présente donc ainsi : un changement de circonstances provoque un changement des habitudes qui entraîne lui-même un changement des actes qui à son tour détermine un changement de forme. Lamarck cite de nombreux exemples qui illustrent sa théorie. La girafe broute les feuilles des arbres et s'efforce de les atteindre. De cette ancienne habitude pratiquée par tous les individus, il résulte un allongement des jambes antérieures et du cou permettant à l'animal d'atteindre des branches à six mètres de hauteur. Les Oiseaux aquatiques, attirés par l'eau où ils trouvent leur nourriture, écartent les doigts pour nager ; ainsi la peau acquiert l'habitude de s'étendre : ainsi se formera, par hérédité des effets de l'exercice répété pendant des générations successives, la palmure des Oiseaux aquatiques. Le même raisonnement s'applique à la girafe. Au contraire, l'Oiseau de rivage, afin d'éviter l'enfoncement dans la vase, cherche à étendre et à allonger ses pieds ; il devient un Échassier, apte à pêcher sans mouiller son corps ; son cou s'allonge à la suite d'efforts répétés. Les serpents rampent sur la terre et se cachent dans les anfractuosités ; leurs efforts répétés pour s'étirer et passer dans les fentes étroites induisent un allongement considérable du corps ; inutiles, les pattes ont disparu. Les variations sont adaptatives.

Deux règles essentielles définissent le lamarckisme :

— le besoin crée l'organe nécessaire ; l'usage le fortifie et l'accroît ; le non-usage l'atrophie et provoque sa disparition. La première partie de ce postulat est impensable : la fonction ne crée pas l'organe, pas plus que l'organe ne s'édifie en vue d'une fonction. La fonction se réalise dans l'organe tel qu'il est fait ;

— les caractères acquis sous l'influence des conditions de l'environnement se transmettent d'une génération à l'autre ; ils sont donc héréditaires.

Ces deux postulats suscitent deux remarques. La faculté d'auto-adaptation de l'individu est bien connue ; il est banal d'affirmer que l'usage fortifie un organe et que le non-usage a tendance à l'atrophier. Le rameur aux gros bras, le portefaix à gros dos, le cycliste aux gros mollets, l'athlète à la musculature puissante sont une réalité. Mais il est aussi vrai que le fils du rameur, du cycliste, du portefaix, de l'athlète ne possède pas, à la naissance, des bras, des mollets, une musculature différente de celle des autres enfants. Ces deux constatations caractérisent les critiques soulevées par les postulats du lamarckisme ; elles intéressent l'action du milieu et l'hérédité des caractères acquis par le soma.

A. Margiocco

◀ ***Pour Lamarck, c'est parce que l'Oiseau de rivage cherche à éviter l'enfoncement dans la vase qu'il devient, par allongement de ses pieds, un Échassier.***

C. de Klemm - Jacana

▲ ***L'action du milieu provoque des changements physiologiques, accompagnés parfois de modifications morphologiques ; ainsi un ajonc (ici,* Ulex europaeus *de Bretagne) élevé à l'ombre et à l'humidité porte moins de piquants que s'il se développait en plein soleil et dans un air sec.***

● *L'action du milieu.*

Elle est incontestable ; un changement de milieu provoque des changements physiologiques, accompagnés parfois de modifications morphologiques. Un ajonc *(Ulex europaeus)*, plante à piquants, élevé à l'ombre et à l'humidité, porte moins de piquants ; mais en plein soleil et dans un air sec, les piquants augmentent en nombre et en dimensions et favorisent ainsi une transpiration moins intense par diminution des surfaces foliaires. Les réponses adaptatives aux modifications des conditions du milieu sont également bien connues chez les animaux. En voici quelques exemples : la pigmentation cutanée, provoquée par l'exposition aux rayons ultraviolets, protège des brûlures ; la formation d'un cal à la suite de frictions évite l'ulcération de la peau ; la cicatrisation, l'hypertrophie compensatrice, la régénération constituent des réactions aux blessures. Ces diverses réponses favorables à l'organisme illustrent la régulation fonctionnelle, propriété générale du vivant. L'ablation d'un rein entraîne une hypertrophie du rein restant ; l'immobilité à la suite d'une fracture provoque une régression musculaire qui nécessite une rééducation plus ou moins longue. Conditionnées par les changements du milieu, ces modifications constituent les *accommodats* ou *morphoses ;* mais tous ne sont pas utiles et beaucoup d'entre eux semblent quelconques et dépourvus de valeur adaptative.

● *L'hérédité des caractères acquis par le soma.*

Lamarck n'a jamais cherché à expliquer comment les circonstances pouvaient agir sur l'hérédité ; il mentionne seulement des « fluides internes » qui opèrent sur « les parties souples » de l'animal. Il ne tient aucun compte des expériences (Haller, Bonnet) qui prouvent que les mutilations répétées à chaque génération ne produisent aucune modification morphologique. L'idée de l'hérédité des caractères acquis par le soma demeure liée à des superstitions variées. Les expériences de Weismann (1892) mettent en évidence que des organismes mutilés (souriceaux dont on coupe la queue) n'engendrent pas une descendance mutilée ; les accidents frappant les individus n'exercent pas d'action sur la descendance. Les réponses

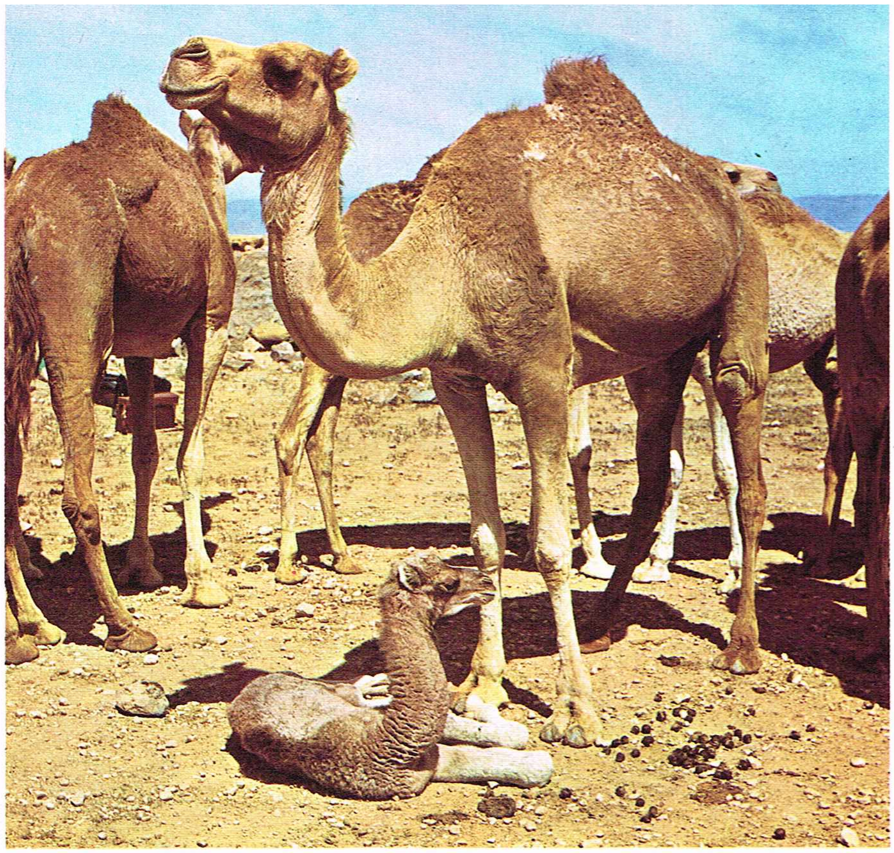

S.F.A.

▲ *Divers Mammifères, comme ces dromadaires* **(Camelus dromedarius)** *possèdent des callosités spécifiques en rapport avec des positions d'agenouillement.*

adaptatives aux variations de l'environnement, n'étant pas héréditaires, perdent toute valeur évolutive.

Et cependant si le lamarckisme était vrai, il fournirait une explication séduisante de quelques faits biologiques : l'architecture des os, les callosités héréditaires, la cécité des cavernicoles, la courbure abdominale des pagures (Crustacés à abdomen mou) vivant dans des coquilles, etc.

Les callosités. Pressions et frottements répétés épaississent et durcissent l'épiderme. Des callosités professionnelles sont bien connues : callosités des malléoles externes des tailleurs d'habits qui cousent les jambes croisées, callosités sur les doigts des coiffeurs tenant les ciseaux, callosités des violonistes, des écrivains, des graveurs, des riveteurs. Des bourses séreuses professionnelles se développent chez le chiffonnier, le fort des halles, le frotteur... Ces callosités individuelles se forment chez tout individu dont le travail exige une position particulière; elles ne sont en aucune façon héréditaires.

Or, divers Vertébrés (autruches, dromadaires, chèvres, phacochères, singes) possèdent des callosités spécifiques en rapport avec des positions d'accroupissement. Chez le phacochère, les callosités sont « préparées » avant la naissance, *in utero,* et progressent chez l'embryon, bien qu'aucun contact avec une surface dure ne s'effectue. Appartiennent-elles donc au patrimoine héréditaire et correspondent-elles à un caractère acquis par un ancêtre et qui se serait transmis à la descendance? La réponse est négative, bien que certains n'en soient pas profondément convaincus.

Cependant le lamarckisme ne fut pas pour autant liquidé; il connut un renouveau à la fin du XIX[e] et au début du XX[e] siècle au moins en France où Giard, E. Perrier, G. Bonnier, Le Dantec, Costantin, F. Houssay, notamment, furent les ardents défenseurs du néo-lamarckisme.

Le darwinisme

Ch. Darwin (1809-1882) partit à 22 ans comme naturaliste sur le *Beagle* qui explorait l'Amérique du Sud et certaines îles du Pacifique. Ce voyage exerça sur lui une profonde influence et contribua à bouleverser sa conception fixiste alors largement répandue. Darwin constata une substitution, du nord au sud, des espèces animales alliées, une parenté faunique entre les îles proches de l'Amérique du Sud et le continent lui-même, une grande variété dans la faune des diverses îles des Galapagos, des traits communs entre Mammifères Édentés actuellement vivants et les espèces fossiles découvertes dans les couches pampéennes.

Accumulés, tous ces faits rendaient caduque la perspective fixiste; ils témoignaient d'une évolution progressive des formes animales. Mais comment avait-elle pu s'effectuer ?

Dans *Essai sur le principe de population,* l'économiste Malthus montrait que la population s'accroît selon une progression géométrique et que les ressources alimentaires n'augmentent pas aussi rapidement; par ce déséquilibre, la conquête de nourriture engendre donc une lutte, la survie revenant à ceux qui présentent quelques avantages par rapport aux autres compétiteurs. Ainsi ont été formulées les idées de lutte pour la vie ainsi que de sélection naturelle.

Darwin édifia alors sa théorie. Les changements de milieu provoquent la variation des êtres vivants en agissant soit sur le corps, soit sur les cellules reproductrices. Il distingue des *variations définies* identiques chez tous les individus et des *variations indéfinies* qui diffèrent d'un individu à l'autre (variation individuelle). L'accroissement de la population entraîne une lutte pour l'existence *(« struggle for life »),* lutte pour se nourrir et pour occuper un territoire. Toute variation nuisible sera condamnée; les organismes porteurs de variations avantageuses subsisteront et les transmettront à leur descendance. Une sorte de tri, de sélection naturelle s'opère ainsi, qui conduit à la survivance du plus apte : « Cette loi de conservation ou de survivance du plus apte, je l'ai nommée sélection naturelle. » La fécondité constitue un des facteurs les plus favorables affectés par la sélection; une descendance abondante permet une fréquence plus élevée de variations sur lesquelles agira la sélection. Dans cette hypothèse, l'exemple de la girafe est ainsi interprété : pendant les périodes de disette, les girafes les plus grandes pouvaient brouter les feuilles sur les branches les plus hautes; la grande taille exerçait aussi une protection contre les carnassiers; les girafes les plus grandes étaient avantagées et survivaient; elles transmettaient leurs avantages à la descendance.

L'évolution résulte donc de l'association de deux facteurs, la variabilité et la concurrence, dont le jeu réciproque explique des phénomènes variés. En l'absence des deux facteurs, les espèces ne subissent aucun changement pendant de longues durées (lingule). Une variation faible et une concurrence élevée entraînent la disparition de l'espèce. Une grande variation et une grande concurrence favorisent l'évolution et la diversification des espèces. Les espèces à large distribution, formant des populations riches en individus, établies dans des biotopes différents, présentent des espèces naissantes capables d'occuper de nouveaux biotopes.

Plus tard, Darwin ajouta à sa théorie la notion de sélection sexuelle, car les femelles choisissent les mâles les plus beaux, les plus colorés, les plus vigoureux, si bien que ces qualités se transmettent aux descendants.

La théorie de Darwin connut un grand succès; sa logique fut pour beaucoup dans son retentissement; Th. Huxley (1825-1895) en Angleterre, E. Haeckel (1834-1919) en Allemagne propagèrent les idées darwiniennes. Cependant, *l'Origine des espèces* et plus encore *la Descendance de l'homme* suscitèrent de vives discussions.

Les ultradarwinistes, A. Weismann (1834-1914) et A.R. Wallace (1823-1913), notamment, portèrent à l'extrême les idées de Darwin. Ils réfutaient la conception lamarckienne de l'hérédité des caractères acquis et ne reconnaissaient que la sélection, qui est un facteur tout-puissant. Tout caractère, pour être soumis à la sélection, doit être utile. Wallace qui, en même temps que Darwin, avait mis en évidence le rôle de la sélection s'efforça de le démontrer; il n'hésita pas à outrer sa conception en donnant des exemples analogues à ceux de Bernardin de Saint-Pierre qui prétendait expliquer la nature par une finalité centrée sur l'homme. Pour Weismann, l'organisme des pluricellulaires se divise en deux parties, le soma et le germen, totalement indépendants. De ce fait exact, il fait un dogme aujourd'hui exagéré. Toute variation est provoquée par une cause interne située dans le germen, estime Weismann, et l'essence de l'hérédité réside dans la transmission d'une substance nucléaire, d'une structure moléculaire spécifique. Les changements affectant cette substance sont seuls capables de provoquer des modifications héréditaires. Les conceptions actuelles sur l'ADN, le code génétique, les synthèses des protéines confirment la non-hérédité des caractères acquis. Les modifications frappant le soma ne possèdent aucune valeur évolutive. Un dispositif nuisible est éliminé par la sélection, alors

que le dispositif inutile ne donnant plus prise à la sélection régressera et deviendra un organe rudimentaire. Weismann nomme *panmixie* cette cessation de sélection.

Darwinistes et ultradarwinistes expliquent ainsi la palmure des Oiseaux aquatiques. Les individus présentent entre eux de légères variations dans les replis cutanés entre les doigts; la mortalité des jeunes est assez élevée, surtout chez les mauvais nageurs, moins efficaces dans la fuite ou la capture des proies. La présence par hasard d'une variation avantageuse dans le dispositif natatoire favorisera la survie de l'organisme. Ainsi s'effectue, par la sélection, un tri des individus les plus aptes à la nage, tri qui, en se répétant de génération en génération, entraîne un progrès lent et continu dans la palmure des pattes chez les Oiseaux aquatiques.

Critiques du darwinisme

Darwin accorde une grande influence aux variations et ainsi reconnaît une hérédité des caractères acquis; mais seules les variations héréditaires, c'est-à-dire les mutations, présentent une valeur évolutive. Cette restriction enlève toute importance aux variations non héréditaires, les *somations,* de beaucoup les plus nombreuses. Il est de plus bien difficile d'évaluer un avantage, une utilité; en effet, favorable dans telles conditions, une adaptation peut devenir gênante dans telles autres : la palmure favorise la nage, mais elle rend difficile la marche sur un sol raboteux. La mort exerce-t-elle réellement un triage? Est-elle différenciatrice? Frappe-t-elle au hasard? Darwin admet, en 1844, une mort différenciatrice : « Moins d'un gramme dans la balance déterminera quels sont les individus qui vivront ou qui périront. » Il est bien évident que les œufs monstrueux, les embryons anormaux, les larves mal conformées, les jeunes et les adultes sérieusement handicapés disparaissent; mais tous les autres, ceux qui vivent, sont-ils les meilleurs, les plus forts? Le *« struggle for life »* ne donne-t-il pas une impression exagérée de lutte active? Dans la nature survivent des adultes porteurs d'anomalies, de malformations (Poissons à colonne vertébrale ondulée, sauterelles privées d'une ou de deux pattes sauteuses, Mammifères supportant des fractures mal réparées). Dans l'ensemble, les individus moyens se conservent par élimination des types extrêmes (infirmes, tarés) et aussi parce qu'ils sont les plus nombreux.

Pour Darwin, la sélection naturelle est analogue à la sélection artificielle pratiquée par l'homme afin d'obtenir une race porteuse de caractères souhaités. Ce que fait l'homme, « c'est choisir les variations que la nature produit et les accumuler dans la direction qui lui plaît... Il n'est aucune raison pour que les mêmes principes qui ont agi si efficacement à l'état domestique, n'agissent pas à l'état de nature ». La sélection naturelle comprend donc un choix, celui du plus apte, et une ségrégation, un isolement qui peut être géographique ou physiologique : « La sélection naturelle agit seulement en accumulant des variations successives légères et favorables, elle ne peut produire soudainement de grandes modifications, elle ne peut agir qu'à pas lents et courts. » La sélection exerce donc un rôle conservateur en maintenant les variations favorables; selon cette perspective elle n'est point créatrice; il est important de le préciser, nous le verrons ultérieurement.

Le mutationnisme

Au darwinisme orthodoxe avait donc succédé le néodarwinisme de Wallace et de Weismann. Vers 1900, une nouvelle théorie, le mutationnisme, était proposée par H. de Vries; elle se rapprochait d'un darwinisme n'admettant ni l'hérédité des caractères acquis, ni l'omnipotence de la sélection naturelle; en revanche, elle se fondait sur la génétique, ce qui lui conférait une base solide.

Au départ, cette théorie reposait sur une interprétation erronée de faits exacts. En cultivant une plante des dunes de Hollande d'origine inconnue, *Oenothera lamarckiana,* de Vries obtint des descendants différents auxquels il donna les noms de *gigas, lata, nanella,* estimant que c'était de nouvelles espèces nées brusquement par mutation. En réalité, il s'agissait d'un tout autre phénomène fort compliqué : *O. lamarckiana* est un polyhybride hétérozygote; lors de croisements, des disjonctions entre les divers caractères des hybrides se réalisent; les plantes obtenues correspondent à la réapparition de l'un des parents de l'hybride. De Vries remplaça la notion de variation continue de Lamarck et de Darwin par la notion de variation discontinue, la *mutation*, qui s'inscrit d'emblée dans le patrimoine héréditaire. La redécouverte des lois de Mendel (1900) apportait un solide soutien à la théorie. On comprenait enfin comment se transmettaient les caractères héréditaires; on savait obtenir par des croisements judicieux une qualité recherchée, ou éliminer un défaut chez des plantes ou des animaux.

Rejetant totalement l'hérédité des caractères acquis par le soma, le mutationnisme est en accord avec les ultradarwinistes; mais il reconnaît à la sélection un rôle beaucoup moins important, celui de conserver le type moyen.

Enfin l'hypothèse de la préadaptation, préconisée par L. Cuénot (1902), s'incorpore au mutationnisme; elle représente un aspect particulier de la sélection et correspond à « des caractères indifférents ou semi-utiles qui se montrent chez une espèce et qui sont susceptibles de devenir des adaptations évidentes si cette dernière adopte un nouvel habitat ou acquiert de nouvelles mœurs, changement rendu possible grâce précisément à l'existence de ces préadaptations ». Des perturbations brusques (hiver particulièrement rigoureux, été exceptionnellement sec, changement de salinité, multiplication anormale d'un parasite ou d'un prédateur) entraînent la mort d'un grand nombre d'organismes; les plus résistants, préadaptés aux conditions nouvelles, survivent; la mort est alors différenciatrice. La sélection agit sur les formes préadaptées et intéresse l'ensemble des caractères anatomiques, physiologiques, chromosomiques; il peut aussi apparaître un nouveau type, un *écotype* ou une race locale.

Une mutation désavantageuse dans un milieu peut devenir intéressante dans d'autres conditions. Le vent, par exemple, exerce une sélection sur les Insectes qui volent dans des stations particulièrement éventées, ainsi que le montre une simple expérience (L'Héritier, Neefs, Tessier). Des cultures comprenant des drosophiles normales ailées et des mutants *vestigial* incapables de voler sont exposées l'une au bord de la mer à Roscoff, l'autre dans une chambre. Dans ce dernier milieu, les drosophiles normales ailées, à plus grande fécondité et à plus grande longévité, se multiplient rapidement et se substituent au mutant *vestigial*. Au contraire, en plein vent, le type normal est entraîné et, partant, désavantagé; dépourvu d'ailes, le mutant résiste au vent et dès lors se multiplie. Cette notion de préadaptation a été adoptée par divers biologistes. Parfois elle a été déformée et détournée dans le sens d'une prédestination, interprétation totalement erronée : le préfixe *pré* marque seulement une antériorité, la préadaptation précède l'adaptation. Elle permet de comprendre comment un animal peut s'établir dans un milieu nouveau ou s'adapter à un autre mode de vie, et

▼ *A gauche,* **A. Weismann** *(1834-1914) porta à l'extrême les idées de Darwin. A droite,* **H. de Vries** *proposa une nouvelle théorie, le* **mutationnisme,** *qui se rapprochait d'un darwinisme n'admettant ni l'hérédité des caractères acquis, ni l'omnipotence de la sélection naturelle.*

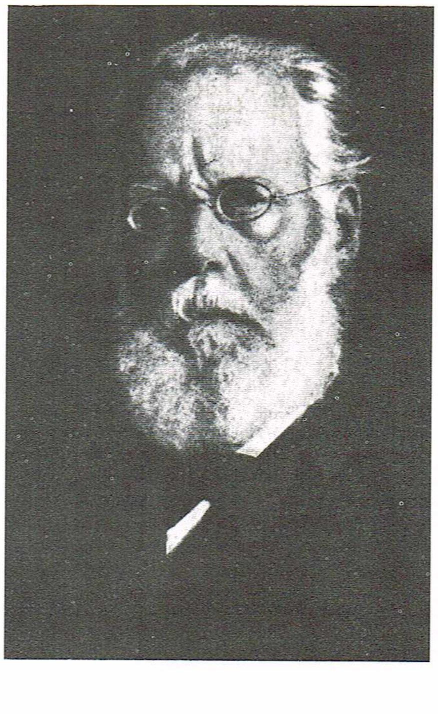

▲ *Un exemplaire de la race « Ayrshire », bovins sélectionnés pour leur production laitière.*

▼ *Le cœlacanthe* **(Latimeria chalumnae)**, *Poisson Crossoptérygien récemment découvert dans les eaux profondes des Comores. Ce fossile « vivant » appartient à un groupe florissant au Dévonien et que l'on croyait disparu depuis la fin du Crétacé.*

joue ainsi un rôle important dans le peuplement des places vides.

Ces places vides correspondent à un nouveau milieu, résultant de phénomènes cosmiques ou d'interventions humaines; une île émergeant des eaux à la suite d'un accident géologique, l'édification d'un barrage entraînant la formation d'un lac, le creusement d'un canal, de galeries de mines, l'incendie d'une forêt, la formation de mares salées à partir d'eaux résiduaires de salines constituent des places vides qui seront plus ou moins rapidement colonisées par la faune et la flore.

Le canal de Caen à la mer, creusé de 1844 à 1857, constitue une place vide dont le peuplement a été suivi et décrit. La faune compte une cinquantaine d'espèces euryhalines et cosmopolites; elles comprennent des espèces dulçaquicoles, saumâtres et marines. Une sorte de filtrage fonctionne pour les espèces environnantes; des espèces marines sont incapables de supporter l'eau saumâtre; les aquatiques ne pourront vivre sur la terre humide; seules les espèces préadaptées s'établissent dans le nouveau biotope. Le peuplement des places vides constitue peut-être un élément non négligeable de l'évolution. Un phénomène climatique d'importance (périodes glaciaires ou xérothermiques) ou tout autre phénomène physique assez général créent des niches écologiques nouvelles où pourront s'établir les espèces préadaptées. Elles se multiplieront, se différencieront et occuperont les diverses niches écologiques de l'habitat. Une expansion adaptative nette se manifeste dans les îles, les lacs et dans les biotopes isolés en général.

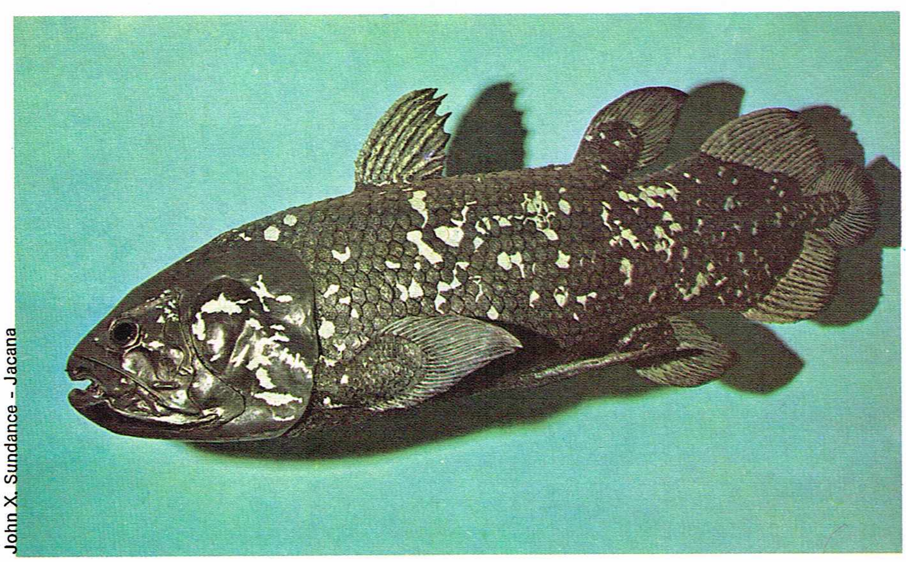

Ainsi aux îles Hawaï, les Passereaux de la famille des Drépanidés présentent une expansion adaptative; la forme primitive, dotée du bec typique de l'ordre, se nourrissait d'Insectes capturés sur les troncs d'arbres; les diverses îles hébergent d'autres espèces, pourvues de becs aux formes variées qui correspondent aux régimes frugivore, granivore, nectarivore ou insectivore. Gastéropodes arboricoles ou terricoles, les achatinelles vivent aux îles Hawaï; plus de mille variétés ont été identifiées dans une seule de ces îles. Dans les lacs, des faits analogues s'observent chez les Poissons; le Tanganyika renferme plus de 156 espèces de Poissons dont 90 appartiennent aux Cichlidés et sont réparties en 36 genres.

Critiques du mutationnisme

Certains éléments du mutationnisme sont fondés : les mutations, leur transmission, la non-hérédité des caractères acquis, la préadaptation; cependant, il accorde une bien large part au hasard : la mutation et la découverte d'un nouveau milieu. La valeur évolutive des mutations semble assez réduite; elles sont surtout soustractives et rarement additives. Or l'évolution ne transforme pas seulement les caractères existants, mais elle doit innover et conditionner des structures, des architectures nouvelles.

Ces trois théories principales ont vieilli et sont devenues plus ou moins périmées; mais de chacune, il subsiste quelque chose. Le lamarckisme a annoncé l'évolution et l'action modificatrice du milieu sur l'individu; le darwinisme a révélé la concurrence vitale, la sélection naturelle, la sélection sexuelle, l'adaptation; le mutationnisme a mis en valeur la mutation, la non-hérédité des caractères acquis, la naissance d'espèces nouvelles. Vers les années 1920, aucune théorie scientifique de l'évolution n'était plus discutée. Des hypothèses souvent finalistes florissaient : le psycho-lamarckisme de Pauly (1905), l'entéléchie de Driesch, la conception organismique de von Bertalanfy (1928), l'holisme de Smuts (1916), la normogenèse de L.S. Berg (1922), l'ologenèse de Rosa (1909), l'aristogenèse d'Osborn... Elles suscitaient peu de réactions critiques : aujourd'hui, il n'en reste rien. L'explication de l'évolution était en quelque sorte au point mort.

La théorie synthétique

La redécouverte des lois de Mendel, les progrès de la génétique, l'application des méthodes statistiques à la biologie, l'abondance des fossiles récemment découverts, l'expérimentation sur les populations apportent une documentation qui permet de préciser quelques mécanismes responsables de l'évolution et de fonder une nouvelle théorie, la théorie synthétique de l'évolution.

Elle est considérée comme l'œuvre anonyme de toute une génération; une vingtaine de chercheurs, surtout des Anglo-Saxons (fort peu de Français), qui ne se connaissaient pas, mais qui étaient tous préoccupés par l'évolution et souhaitaient l'étudier théoriquement ou expérimentalement. Ils étaient persuadés « qu'il existait des forces responsables de l'évolution; elles ne pouvaient pas être d'une autre nature que celles qui agissent encore aujourd'hui et elles pouvaient par conséquent être décelées, puis étudiées par des méthodes scientifiques régulières ». Les plus ardents défenseurs de cette théorie furent les Américains G.G. Simpsom, E. Mayr et Th. Dobzhansky. Le Français G. Tessier et son école initièrent les biologistes français à cette nouvelle conception mal connue, mal comprise et souvent réfutée avec, peut-être, une absence d'impartialité.

La théorie se présente comme un néodarwinisme amendé (et non comme une « survivance attardée du néodarwinisme de jadis ») ou comme une synthèse du néodarwinisme et du mutationnisme. Un certain opportunisme (« tout ce qui est en puissance d'arriver arrive ») marque le cours de l'évolution plutôt que la réalisation d'un plan. Les mutations donnent les possibilités; la sélection sert de guide et détermine le chemin. Le facteur orientant de l'évolution est l'adaptation; le mécanisme de l'adaptation se trouve dans la sélection agissant sur la structure génétique des populations.

Actuellement, la tendance dominante considère que l'évolution intéresse les populations et non les individus; elle résulterait des interactions entre populations et environnement, celui-ci modifiant la composition géné-

tique des populations. Le milieu offre des possibilités, les populations doivent en profiter et s'adapter à elles.

● *Qu'est-ce qu'une population ?*

C'est l'ensemble des individus sympatriques (de la même patrie) vivant sur un territoire donné et capables de se reproduire par des croisements effectués au hasard (population panmictique). Ces individus possèdent en commun un « pool de gènes » renfermant toute l'information génétique. Une seule population, ou plusieurs populations locales communiquant entre elles, composent une espèce. Ces populations se définissent par leur dimension, leur densité, leur distribution spatiale, leur variation dans le temps, leur comportement, leur composition génétique, leur évolution. Cette évolution modifie leur composition génétique, ce qui se traduit par l'apparition de nouveaux individus porteurs de caractères différents. Les populations naturelles sont extrêmement hétérogènes; l'hétérozygotie est intense, et de nombreux gènes létaux ou à action nocive sont maintenus à l'état hétérozygote.

● *Génétique des populations*

Elle présente une importance particulière; deux paramètres essentiels sont à retenir : la fréquence du génotype (fréquence des divers individus dans une population) et la fréquence des divers gènes (fréquence des allèles dans une population). Il est aisé de calculer la fréquence des génotypes et d'en déduire la fréquence génique. Des croisements mendéliens montrent que la fréquence génique ne change pas d'une génération à l'autre; un équilibre s'établit, qui est nommé *équilibre de Hardy-Weinberg* (d'après les noms des deux généticiens qui les premiers ont constaté ce fait). La loi de Hardy-Weinberg exprime que la fréquence génique dans une population est constante, à moins qu'un nouveau facteur n'intervienne et perturbe cet équilibre. Son exactitude mathématique définit une situation théorique qui exclut l'évolution. Mais l'intervention de divers facteurs rendra caduque cette loi et provoquera une certaine déviation qui se traduira par une évolution de la population.

Les principaux facteurs destructeurs de l'équilibre génique comprennent :

— *les croisements effectués selon un choix* et non au hasard (homogamie, consanguinité), qui entraînent un accroissement de la fréquence de certains allèles et une diminution de celle d'autres allèles;

— *l'apparition de mutations* qui sont des changements brusques de l'information génétique et d'emblée héréditaires. Un allèle subit une transformation en un autre allèle; elle détermine donc un changement de la fréquence génique;

— *la présence de migrations différentielles*. Certaines populations se modifient par l'arrivée ou le départ de migrants dont les fréquences géniques sont différentes de celles des populations dans lesquelles ils s'intègrent ou qu'ils abandonnent; ils provoquent alors une modification du « pool génique ». Les migrations et les mutations doivent induire des effets assez voisins;

— *les problèmes d'échantillonnage*. La loi de Hardy-Weinberg s'applique aux populations ayant des dimensions importantes, les problèmes d'échantillonnage sont alors négligeables. Mais ils se posent lorsque l'effectif de la population est relativement faible. Les échantillons de gamètes et de zygotes formés après la fécondation ont moins de chances d'être obtenus au hasard dans une petite population; il en résultera une modification génique de génération en génération, d'autant plus considérable que la population sera plus petite. De telles fluctuations constituent la *dérive génétique ;*

— *la sélection*. Aux quatre premiers facteurs s'en ajoute un cinquième, le plus important, la sélection. Dans une population, la sélection correspond à la reproduction différentielle des génotypes plutôt qu'à une survie différentielle. Cette conception de la sélection naturelle diffère de celle de Darwin. Plus complexe et plus nuancée, elle mesure moins le taux de « survivance du plus apte » que le « taux de remplacement », notion bien connue des démographes. Le succès reproductif d'un individu (ou valeur adaptative, ou valeur sélective) dépend de ses propriétés génétiques. Les divers génotypes manifestent une reproduction différentielle variable. Le génotype qui aura le plus grand nombre de gamètes présents dans les individus de la génération suivante aura une valeur adaptative égale à 1. Cette valeur adaptative n'a pas de rapport avec la fréquence du génotype; c'est le phénotype qui détermine la valeur adaptative. L'analyse mathématique démontre que les avantages sélectifs, même minimes, favorisent l'accumulation, dans les populations, des gènes responsables de ces avantages. De même, la propagation des gènes désavantageux est stoppée et ainsi se normalise le type moyen. Aucun génotype n'est meilleur qu'un autre; il l'est dans des conditions précises, d'autres le sont dans d'autres conditions. Relatives, les valeurs adaptatives ou sélectives sont fonction de l'environnement. La variation génique permet aux populations de se maintenir lors des modifications de l'environnement grâce aux transformations du « pool génique ». Trois facteurs contrôlent cette variation génique : mutations et migrations, sélection, protection par des processus cytophysiologiques et écologiques.

● *Rôle de la sélection dans l'évolution des populations naturelles*. Quelques exemples récemment étudiés apportent des résultats intéressants.

— *Le mélanisme industriel*. Cet exemple, fort bien analysé, illustre le cas où le mutant, étant supérieur au type, se substitue à lui. La phalène du bouleau *(Biston betularia)*, papillon nocturne, vivait en Angleterre jusque vers 1850 sous sa forme blanche piquetée de noir qui donne une teinte grisaille, homochrome avec celle des Lichens qui couvrent les arbres où se posent les papillons. A partir de 1850, apparurent dans le Manchester des mutants sombres mélaniques dénommés *insularia* (avec encore un peu de blanc) et *carbonaria* (totalement sombres et fort visibles sur les Lichens blanchâtres). Les deux mutations sont indépendantes : *carbonaria* dépend d'un gène dominant; elle est plus vigoureuse et plus féconde que le type. Les mutants vivent sur les mêmes plantes que le type, se croisent avec lui et se substituent à lui. On connaît les dates d'apparition des mutants dans diverses régions d'Angleterre, de Hollande, de Belgique, du nord de la France (jusqu'à Paris), d'Allemagne... Il est indéniable que les mutants mélaniques apparaissent et se développent dans les régions industrielles; le centre de

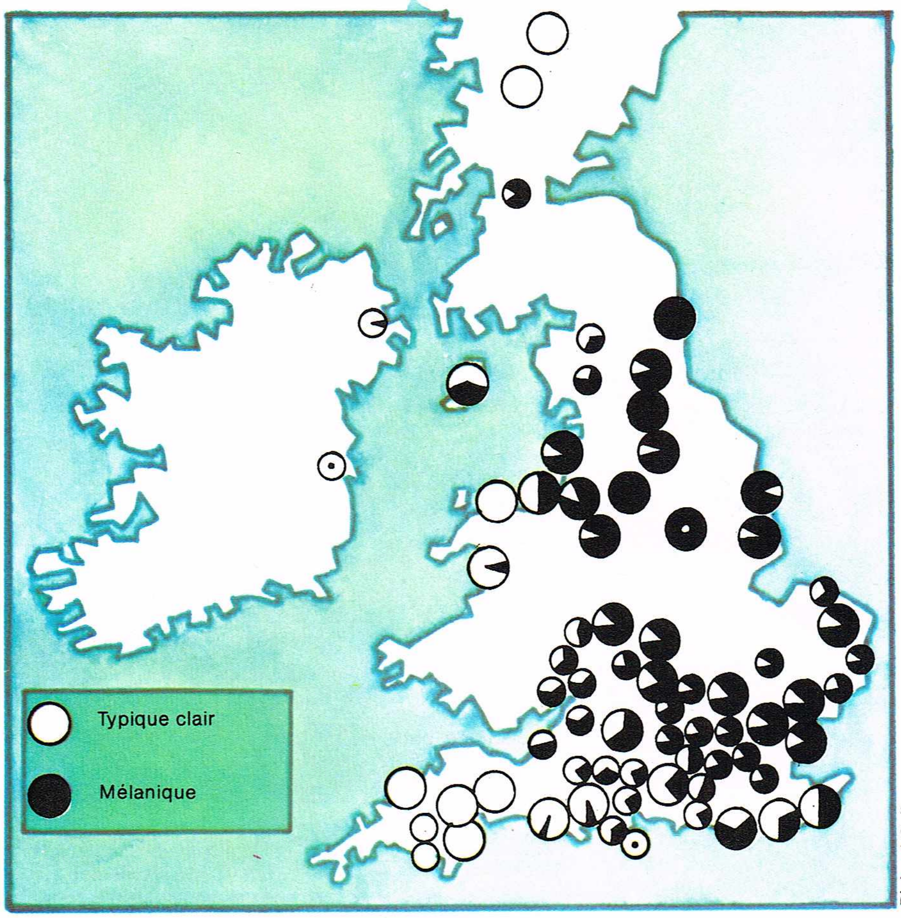

▲ ***Distribution géographique du papillon*** **Biston betularia**, ***montrant la fréquence des formes claires et des formes mélaniques dans les diverses régions de Grande-Bretagne. Noter l'accumulation des mélaniques dans les zones industrielles.***

C. Vidano

▲ *L'épandage abusif d'insecticides par les moyens modernes a des effets nocifs.*

dispersion coïncide avec une ville de « contrée noire » où sont concentrées des forges, des mines de charbon, des fabriques de munitions, des usines métallurgiques, etc. ; c'est pourquoi le phénomène se nomme *mélanisme industriel.* Les éléments de l'alimentation (comme les sels métalliques des fumées d'usines qui se déposent sur les plantes nourricières des chenilles) n'exercent pas d'influence. A son apparition, *carbonaria* était mangée parce que trop visible sur les troncs et ne se maintenait qu'en raison de la fréquence élevée de la mutation. Mais le développement industriel a profondément modifié le milieu (pollution de l'air, dépôt de suie sur la végétation) ; dans ce nouveau milieu assombri, le type clair n'était plus avantagé, alors que *carbonaria* l'était grandement. Le mutant *carbonaria* survit moins bien dans une région non polluée (en proportion de 17 %) et mieux dans une région polluée (10 %). Il y a cent ans, *carbonaria* représentait moins de 11 % de la population ; aujourd'hui, elle en forme les 99 %.

Comment s'effectue cette substitution ? Les expériences de Kettlewell et Tinbergen sont démonstratives. Ils lâchent dans une forêt non polluée un nombre égal de phalènes claires et sombres ; des Oiseaux variés ont mangé 164 mélaniques et seulement 26 clairs. Pour la même expérience répétée dans une forêt polluée près de Birmingham, le rapport est inverse : 15 mélaniques et 43 clairs sont mangés. Les papillons non homochromes avec leur substrat disparaissent davantage. Des expériences pratiquées avec des papillons lâchés et recapturés donnent des résultats analogues : dans une région polluée, 493 papillons noirs (78 % des papillons lâchés) ont été lâchés, 131 ont été recapturés (88 % des recapturés) ; 137 papillons clairs ont été lâchés (22 % des lâchés) et 18 ont été recapturés (12 % des recapturés). Le pourcentage des recapturés clairs est nettement inférieur à celui des lâchés ; ils ont été sélectivement mangés par les Oiseaux ; la constatation inverse s'applique aux mélaniques.

Le mélanisme industriel qui frappe plus de 50 espèces de papillons illustre comment la sélection joue en faveur des formes homochromes avec leur substrat. Des expériences plus récentes semblent indiquer qu'à la coloration sélective s'ajoute un caractère éthologique, les formes sombres se posant plutôt sur les fonds sombres et les formes claires sur les fonds clairs. La force sélective essentielle réside dans la prédation différentielle pratiquée par les Oiseaux.

▶ *Page ci-contre, en bas,* *représentation schématique des rapports entre la forme du bec et les modes d'alimentation chez 10 espèces de Géospizinés de l'île Indéfatigable (d'après Bowman).*

— *Résistance des Bactéries*

La résistance des Bactéries à divers antibiotiques est bien connue, tant en thérapeutique qu'au laboratoire. S'agit-il d'une adaptation à un milieu nouveau, ou bien une mutation a-t-elle produit des individus résistants qui se multiplient et engendrent des lignées résistantes ? La technique de la duplication sur velours, pratiquée au laboratoire, établit que la sélection intervient dans le développement des lignées résistantes : avant l'addition d'un antibiotique, une culture renferme des Bactéries résistantes à cet antibiotique ; celui-ci les sélectionne et favorise leur multiplication alors que les Bactéries sensibles disparaissent.

— *Résistance aux insecticides*

Les cas d'acquisition de résistance aux insecticides sont nombreux. L'action fort efficace du DDT sur le pou (1944), vecteur du typhus, a totalement cessé depuis 1957, date à laquelle le pou est devenu résistant au DDT dans le monde entier. Des résistances analogues caractérisent l'anophèle, vecteur du paludisme, ou des mouches responsables de dysenteries. Cette résistance des Insectes aux insecticides synthétiques pose un grave problème. A quel mécanisme répond-elle ? Le cas de drosophiles a montré expérimentalement que, de génération en génération, certaines populations peuvent résister à des concentrations croissantes de DDT. Cette résistance tient à l'action de gènes tantôt dominants, tantôt récessifs : elle a donc une origine génétique. Mais une sélection naturelle favorise la multiplication des individus préadaptés à une résistance aux insecticides.

— *Hémoglobinose S et paludisme*

L'hémoglobinose S résulte de la présence d'une hémoglobine S de structure anormale (dans la chaîne bêta, le sixième acide aminé, l'acide glutamique, est remplacé par de la valine). Les individus homozygotes dont les hématies ne possèdent que de l'hémoglobine S (hémoglobine S/hémoglobine S) souffrent d'une drépanocytanémie, ou anémie à drépanocytes, se manifestant par une anémie hémolytique avec une réticulocytose accrue. L'évolution plus ou moins lente de la maladie est toujours fatale. Chez les individus hétérozygotes, les hématies de formes anormales (drépanocytes) renferment de l'hémoglobine S (20 à 40 %) et de l'hémoglobine normale A (hémoglobine S/hémoglobine A). Cette drépanocytose ne présente aucun danger et ne modifie pas la durée de la vie. La fréquence du gène S régissant la présence de l'hémoglobine S présente une certaine stabilité ; puisque les homozygotes meurent, la fréquence de ce gène S devrait diminuer. Or il n'en est rien. Un mécanisme intervient donc : ou de nouvelles mutations maintiennent la fréquence du gène S ou les hétérozygotes (Hb S/Hb A) présentent un avantage sélectif sur les homozygotes à hémoglobine normale (Hb A/Hb A). La première hypothèse n'apporte pas de solution, le taux de mutation étant insuffisant. La deuxième hypothèse, en revanche, donne une solution : les homozygotes pour l'hémoglobine normale (Hb A/Hb A) meurent de la malaria ; les hétérozygotes (Hb S/Hb A) résistent à la malaria. L'hémoglobine S exerce donc une protection contre le paludisme à *Plasmodium falciferum ;* le paludisme endémique favorise donc le maintien des hétérozygotes, de telle sorte que la fréquence du gène S reste constante. Dans la zone intertropicale, le parallélisme entre les zones à forte endémicité du paludisme et à fréquence élevée d'hémoglobine S est frappant. Le paludisme constitue une facteur sélectif décisif pour la persistance du gène de l'hémoglobine S. Selon Ford, les rapports de l'hémoglobine S et du paludisme constituent un cas de *polymorphisme balancé* ou *équilibré.*

Tous ces exemples relativement simples montrent que la sélection naturelle favorise la survie de certains génotypes qui remplacent plus ou moins rapidement et totalement les génotypes moins bien adaptés. Dans des cas plus complexes (coloration voyante de quelques Poissons mâles, coloration d'avertissement de certains Insectes, mimétisme), interviennent diverses pressions de sélection qui réagissent les unes sur les autres et permettent ainsi l'adaptation des organismes à leurs milieux. L'apparition de nouveaux génotypes dans des populations devient ainsi compréhensible. Mais si les nouveaux organismes demeurent interféconds avec les autres, les échanges géniques ne sont pas exclus et, partant, les différences s'atténueront. Comment les nouveaux organismes pour-

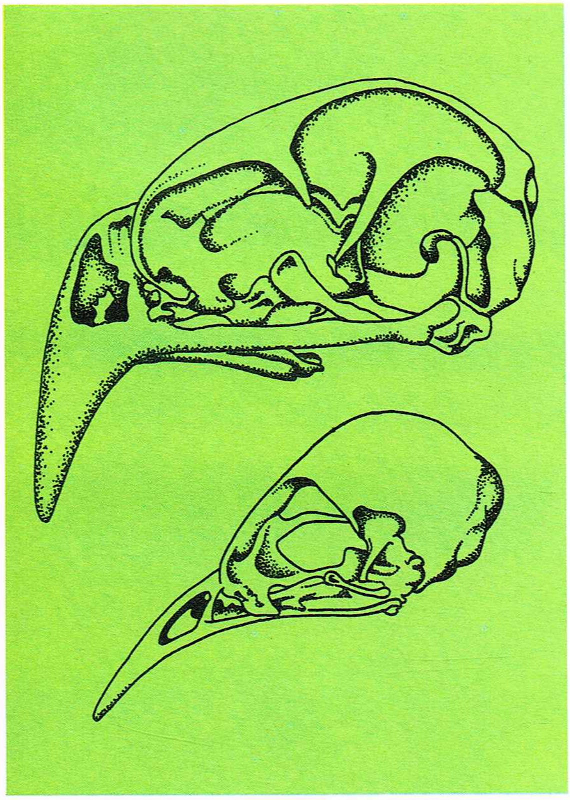

Richard Colin

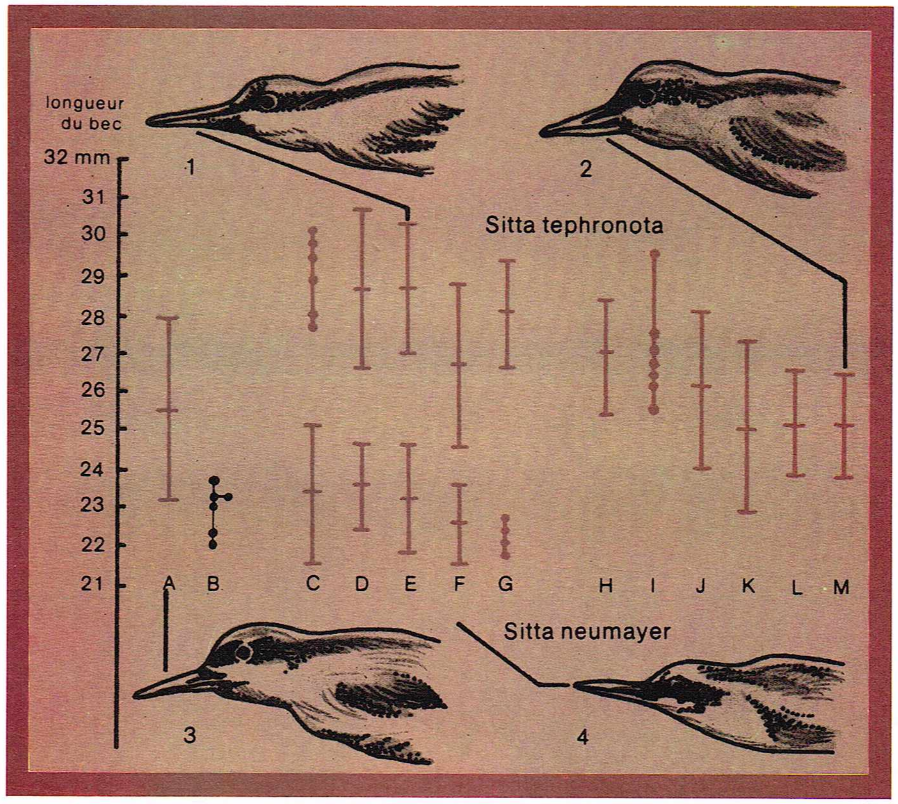

Richard Colin

▲ *A gauche, crânes de pinsons des Galapagos montrant les deux types extrêmes de différenciation : en haut,* **Geospiza magnirostris**; *en bas,* **Certhidea olivacea** *(d'après Bowman).*
A droite, schéma montrant la divergence des caractères morphologiques du bec et des stries du plumage de la tête chez deux espèces, **Sitta tephronota** *et* **Sitta neumayer**, *lorsqu'elles sont sympatriques (1 et 4), et au contraire leurs ressemblances lorsqu'elles sont réparties dans des zones distantes (2 et 3). Les aires A et B sont situées à l'ouest de la zone de chevauchement; C, D, E, F et G sont dans la zone de chevauchement; H, I, J, K, L et M sont à l'est de la zone de chevauchement* (*d'après Paul R. Ehrlich et Richard W Holm;* **The Process of Evolution**).

ront-ils s'isoler, afin que les échanges géniques deviennent impossibles, et former alors un autre groupe capable d'évoluer différemment ? Se pose maintenant le problème de la naissance des espèces, c'est-à-dire celui de la spéciation.

Espèce et spéciation

Sans développer ici les importantes notions d'espèce et de spéciation, nous n'en retiendrons que les aspects plus directement en rapport avec l'évolution.

L'espèce correspond à un groupe de populations naturelles, c'est-à-dire à une association caractéristique de gènes qui exerce un contrôle épigénétique. Polymorphe, l'espèce est capable de s'adapter à des conditions de milieu différentes, et par suite d'agrandir sa niche écologique; les diverses populations peuvent acquérir les gènes qui favoriseront de nouvelles adaptations et l'occupation de nouvelles zones écologiques. Le premier Oiseau ou le premier Amphibien a trouvé une nouvelle zone adaptative; ainsi furent déclenchées des spéciations correspondant à une radiation adaptative.

Entre deux espèces voisines dont les territoires se chevauchent, une compétition se manifeste, dont les conséquences sont variables. Une espèce supérieure élimine l'autre; chacune des espèces prédomine dans un domaine bien délimité et son expansion est inhibée soit par la compétition, soit par l'impossibilité écologique d'occuper un autre domaine. Deux espèces très proches peuvent alors cohabiter dans une zone de chevauchement géographique : une forte pression sélective sévira, qui conduira à la divergence d'un caractère. La sélection de caractères morphologiques détermine à son tour la différenciation écologique. Par exemple, les *Sitta* asiatiques, *Sitta tephronota* et *S. neumayer*, diffèrent par l'aspect de leur plumage et par la longueur du bec quand elles sont sympatriques. Dispersées dans des zones distantes, les deux espèces ne se distinguent pas. Ainsi, dans les aires sympatriques, une divergence de caractères se manifeste. Des faits analogues s'observent chez les fourmis, les Coléoptères, les crabes, les Poissons, les grenouilles.

La formation d'une espèce nouvelle exige que celle-ci soit isolée de la souche et des espèces voisines. L'aphorisme de Moritz Wagner (1813-1887) : « Sans isolement pas d'espèces », est exact. Les causes de l'isolement sont variées : isolement géographique, isolement par suite

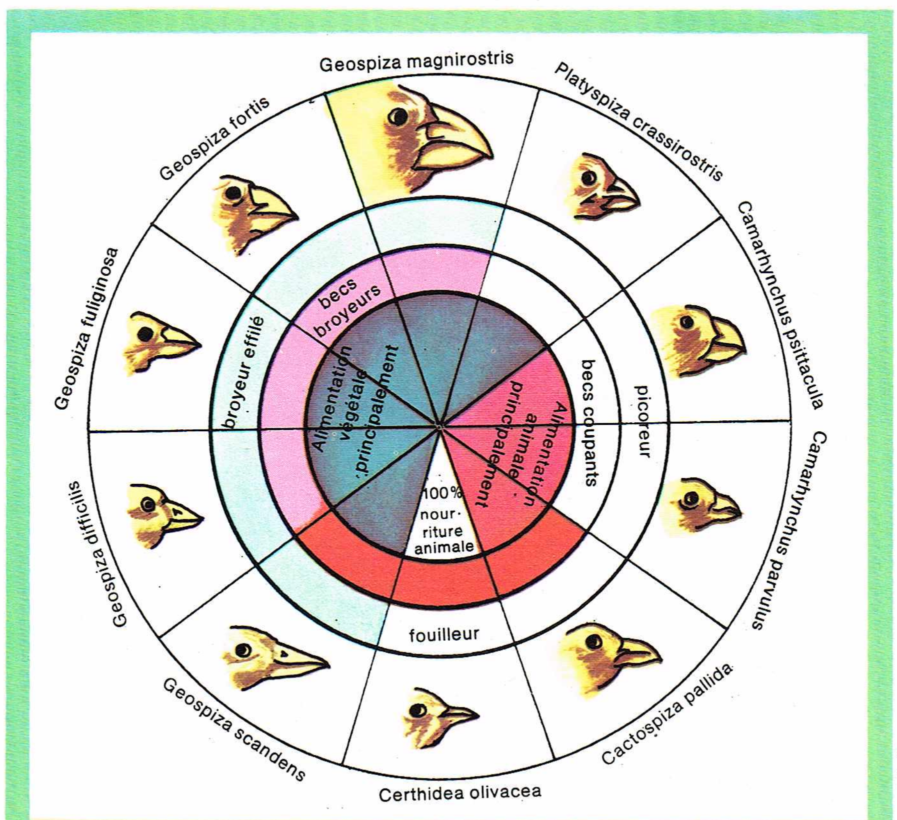

Richard Colin

ÉVOLUTION DES ÉQUIDÉS (D'APRÈS ARAMBOURG)				
	Caractères	Amérique	Asie	Europe
Quaternaire	Membres monodactyles.	*Equus, Hippidus*	*Equus*	*Equus*
Pliocène supér.	Membres monodactyles; dents hypsodontes.			
Pliocène infér.	Taille d'un poney; dents hypsodontes; doigts latéraux rudimentaires.	*Pliohippus*	*Hipparion*	*Hipparion*
Miocène supér.	Dents hypsodontes, cément abondant; doigts latéraux réduits; cubitus soudé au radius.	*Protohippus*	*Hipparion*	*Hipparion*
Miocène moyen	Dents moyennement hypsodontes, cément abondant; doigts latéraux non fonctionnels; cubitus et péroné non fonctionnels.	*Merychippus*	*Anchitherium*	
Miocène infér.	Molaires avec trace de cément, tubercules en croissant; 2 doigts latéraux non fonctionnels.	*Parahippus*		*Anchitherium*
Oligocène supér.	Taille d'un tapir; molaires brachyodontes à 2 tubercules externes en croissant; 2 doigts, le médian prédominant; cubitus et péroné développés.	*Miohippus*		
Oligocène moyen		*Mesohippus*		
Oligocène infér.	Taille d'un grand chien; prémolaires semblables aux molaires à 6 tubercules disposés en crêtes obliques; 3 doigts fonctionnels, vestige du 5ᵉ; os de l'avant-bras séparés.	*Mesohippus*		
Éocène supér.	Les 2 premières prémolaires molarisées; membres antérieurs tétradactyles avec prédominance du 3ᵉ et réduction du 5ᵉ doigt.	*Epihippus*		
Éocène moyen	Dents brachyodontes tuberculeuses; dernière prémolaire molarisée; membres antérieurs tétradactyles.	*Orohippus*		
Éocène infér.	Taille d'un renard; dents brachyodontes tuberculeuses; prémolaires différentes des molaires; membres antérieurs tétradactyles; membres posrieurs tridactyles; cubitus et péroné bien distincts.	*Eohippus*		*Hyracotherium*

▲ ***Tableau résumant les caractères, le mode d'alimentation et la fréquence des quatorze espèces de pinsons de Darwin qui vivent dans les diverses îles des Galapagos (d'après P.R. Ehrlich et R.W. Holm).***

d'une modification de comportement, isolement psychique, isolement par décalage des périodes de maturité sexuelle, isolement mécanique, isolement par incompatibilité cellulaire et obstacle à la réalisation des zygotes hybrides.

— *Les pinsons des Galapagos*. Les îles Galapagos abritent des Passereaux fort intéressants, de la sous-famille des Géospizinés (famille des Fringillidés). Bien connus sous le nom de pinsons de Darwin, ils ont fait l'objet de recherches récentes. Ils comptent 14 espèces réparties en 6 genres (voir tableau ci-dessus). Ils habitent les diverses îles des Galapagos, dont certaines sont particulièrement riches en espèces différentes; d'autres en connaissent seulement une, deux ou trois. Ces Oiseaux diffèrent par leurs dimensions et la forme du bec, en rapport avec le régime — granivore à bec globuleux, frugivore et insectivore à bec mince, pointu, plus ou moins allongé — et non par les variations de plumage fort fréquentes chez les Oiseaux.

— L'exemple des *Larus* ou goélands mérite d'être cité. *Larus argentatus* et *Larus fuscus* vivent sur les côtes d'Europe occidentale. Elles se distinguent par la couleur du plumage et des pattes ainsi que par les mœurs : l'une se reproduit dans les landes et migre en hiver, l'autre adopte les falaises où elle nidifie. Elles ne se croisent pas, bien que vivant côte à côte. Mais si on se déplace sur un cercle qui tourne autour du pôle en passant par les côtes d'Amérique et d'Asie, on découvre une chaîne continue de goélands offrant des caractères intermédiaires; l'isolement sexuel n'existe pas dans les zones de chevauchement. Le *fuscus* à dos noir et pattes jaunes des îles Britanniques passe au goéland à dos noir de Scandinavie, qui passe lui-même au goéland plus clair et à pattes couleur chair de Sibérie; ce dernier conduit au goéland argenté américain qui ramène à l'*argentatus* britannique plus clair et à pattes rosées. Les deux espèces *argentatus* et *fuscus* sont les termes extrêmes d'une série de populations disséminées autour de l'océan Arctique et proviennent probablement des côtes de la mer de Behring. Ce sont des sous-races géographiques que l'on peut considérer comme des espèces naissantes. Si les phénomènes invoqués pour expliquer la différenciation génétique des populations locales interviennent assez longtemps et si les conditions sont favorables, ils conditionnent la formation d'espèces nouvelles. De nombreux exemples analogues ont été bien analysés.

L'étude détaillée des types d'isolement permet d'élaborer des théories compatibles avec les faits observés. Trois théories essentielles ont été proposées pour rendre compte de la naissance d'espèces nouvelles : une théorie géographique, éco- ou étho-allotropique, une théorie sympatrique et une théorie stasipatrique.

La première est proposée principalement par E. Mayr (1942, 1962). Un obstacle géologique ou géographique vient à interdire les échanges géniques entre populations jusqu'alors homogènes et occupant de vastes zones. La durée d'action de la barrière doit être suffisamment longue pour que deux populations puissent diverger. Ainsi apparaîtront de petites différences morphologiques et physiologiques auxquelles s'associera un obstacle intrinsèque qui supprimera toute interfécondité. Dès lors deux espèces seront en présence et elles persisteront même si l'obstacle extrinsèque disparaît. Les « pools géniques » des deux populations forment deux ensembles clos en équilibre. La compétition interviendra entre les deux espèces qui chercheront à accroître leur territoire; une zone de chevauchement se dessine; les espèces s'y maintiennent sans aucun croisement ou avec naissance d'hybrides (apparemment féconds) dans la zone de cohabitation.

Ainsi les fauvettes européennes *Hypolais polyglotta* et *H. icterina* fréquentent respectivement l'ouest et l'est d'une zone correspondant à l'extension glaciaire du Pléistocène; la barrière n'existe plus mais les deux espèces, isolées avant le retrait des glaciers, persistent distinctement, toute hybridation étant impossible. Au contraire la corneille noire *(Corvus corone)* et la corneille mantelée *(C. cornix)* qui présentent une distribution analogue à celle des fauvettes, déterminée par le même phénomène glaciaire, produisent des hybrides dans la zone de chevauchement. La spéciation des corneilles n'a pas été aussi rapide que celle des fauvettes; mais elle est assez avancée pour que les deux espèces se maintiennent et que le monotypisme ne réapparaisse pas.

Selon la théorie sympatrique, des faits d'ordre écologique ou éthologique provoqueront un isolement génétique suffisant pour supprimer l'interfécondité et induire une spéciation.

La théorie stasipatrique, élaborée par M.J.D. White (1967), estime qu'une modification de structure chromosomique est susceptible de produire un isolement génétique. L'analyse concerne des Insectes Orthoptères.

Quel que soit le mécanisme, toute espèce nouvelle se forme avec une extrême lenteur, ainsi que semble le prouver la faible différenciation des Poissons des deux côtés de l'isthme de Panama. Par ailleurs, le mélanisme des Insectes dans les zones industrielles s'est effectué en moins d'un siècle. Dans une population qui peut ainsi être à l'origine d'un nouveau type, la sélection intervient sur les gènes, dont elle détermine la formation de nouvelles

Ziesler-Jacana

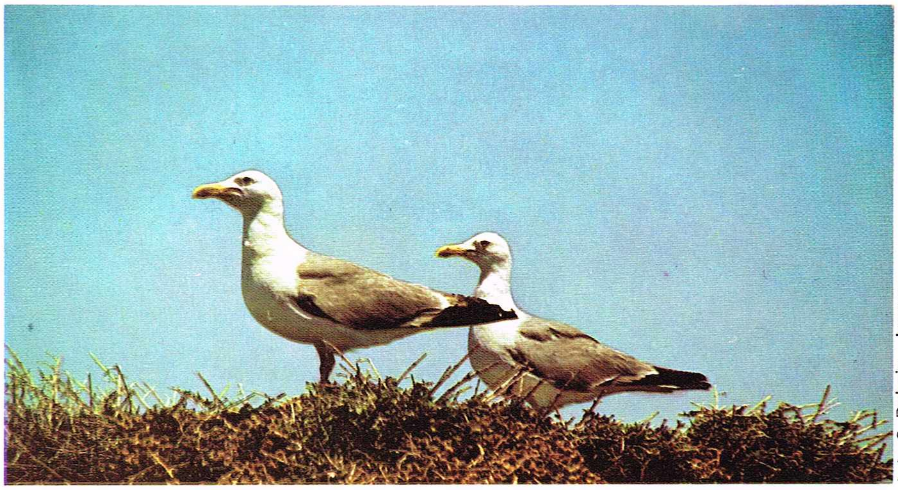

J.-L.-S. Dubois - Jacana

John X. Sundance - Jacana

combinaisons. La réorganisation du génotype, sorte de « révolution génétique », transforme un génotype préalablement établi.

Vraisemblablement, les Géospizinés des Galapagos descendent de quelques ancêtres Fringillidés qui ont atteint accidentellement les îles à partir du continent sud-américain. Peu nombreux, ils possédaient une part réduite du « pool génétique » parental. Agissant sur un ensemble génétique différent, la sélection se manifestait par des effets différents de ceux propres aux populations parentales. La diversité des sources alimentaires conditionnait la forme et la longueur des becs ; ces caractères favorisaient aussi la reconnaissance des Oiseaux lors de leur reproduction. Peu à peu, les pinsons atteignaient les diverses îles où se répétaient les causes et les résultats de la sélection. C'est un cas de spéciation *allopatrique* (allo : autre), puisque les deux populations qui s'isolent génétiquement sont séparées dans l'espace. La spéciation est dite sympatrique (sym : avec, ensemble) lorsque les deux populations qui s'isolent génétiquement vivent

▲ *Les deux espèces de goélands,* **Larus argentatus,** *en haut, et* **Larus fuscus,** *en bas, sont les termes extrêmes d'une série de populations disséminées autour de l'océan Arctique, et proviennent probablement des côtes de la mer de Behring.*

A. Visage - Jacana

◀ *Les fauvettes européennes* **Hypolais icterina,** *en haut, à gauche, et* **Hypolais polyglotta** *ci-contre, fréquentent respectivement l'ouest et l'est d'une zone correspondant à l'extension glaciaire du Pléistocène ; la barrière n'existe plus, mais les deux espèces, isolées alors, persistent distinctivement aujourd'hui, toute hydridation étant impossible.*

▶ *Troupeau de* Mesohippus, *Équidés de l'Oligocène.*

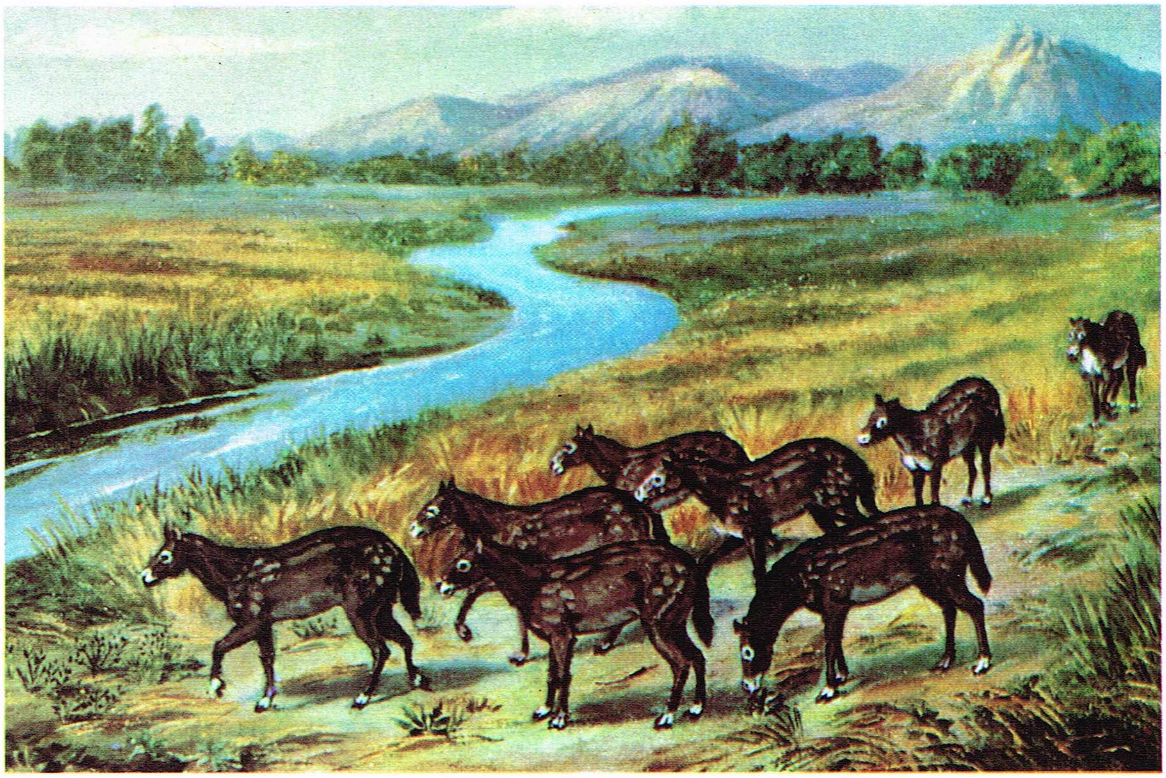

Turtox

ensemble. On comprend donc comment une nouvelle espèce se forme à partir d'une « révolution génétique » qui réorganise un génotype antérieurement équilibré. Les populations périphériques isolées ont le plus de chance de subir ce processus. Les individus d'une espèce possèdent un lien de continuité, et ils se séparent des individus d'une autre espèce par une discontinuité fondamentale. Plus les complexes géniques nouveaux seront fréquents, plus les probabilités seront grandes que l'un d'entre eux permette la réalisation d'un progrès évolutif. Dans cette perspective, la multiplication des espèces est un préalable nécessaire à la diversification évolutive.

Toute espèce naissante est une expérience écologique puisqu'elle doit occuper une niche nouvelle, ce qui nécessite une subdivision de la zone adaptative groupant l'ensemble des niches des formes parentes.

L'espèce est aussi une expérience biologique; il est impossible de prévoir, lorsqu'une nouvelle espèce pénètre dans une nouvelle niche, si cette dernière constituera une autre grande zone adaptative. Les espèces dotées de complexes géniques harmonieux représentent les unités de l'évolution, et la spéciation ou formation des espèces favorise la radiation adaptative et la diversification évolutive.

Après avoir analysé les divers éléments de la théorie synthétique, voyons comment elle se présente dans son ensemble.

Elle est « l'extrapolation » rapportée à toutes les époques géologiques, et à tous les éléments des mécanismes de transformation observée dans la génétique des populations. Le caractère essentiel de l'évolution est « l'opportunisme » : tout ce qui est en puissance d'arriver, arrive. Le milieu offre des possibilités et les organismes doivent en profiter, c'est-à-dire être capables de s'y adapter. Les systèmes génétiques des populations et les mutations représentent le matériau évolutif; les croisements, la fréquence des mutations, la sélection édifient de nouvelles combinaisons génétiques favorisant les transformations évolutives. La sélection qui affecte la fréquence des gènes réalise de nouveaux systèmes génétiques; son rôle moteur ne se limite plus à « une canalisation dans un sens restrictif mais il est également créateur en faisant naître une progression dans un sens défini ». Par son phénotype, l'individu exprime les interactions de son génome; la sélection « module » la probabilité de dissémination de son génome dans les générations suivantes. L'action complexe de la sélection naturelle emprunte plusieurs formes : élimination des « mauvais gènes » effectuée par une sélection normalisatrice, maintien des allèles à leur locus, œuvre d'une *sélection équilibrée* ou *stabilisatrice,* modifications évolutives accomplies par une *sélection directionnelle*. La sélection naturelle est une sorte de lien entre le « pool génique » et l'environnement. Dobzhansky la compare à un servomécanisme dans un système cybernétique composé des espèces et du milieu.

L'évolution est une évolution dirigée tendant à accorder le fonctionnement de chaque être avec le milieu dans lequel il vit. Toute transformation évolutive comporte une interaction de deux phénomènes statistiques, le hasard (apparition des mutations) et la sélection (elle oriente le choix des génotypes qui présideront à la naissance de la génération suivante). Le hasard est source de désordre alors que la sélection qui guide conditionne l'ordre.

La sélection agissant sur de petites populations isolées provoque le passage rapide d'une population en déséquilibre vers une population ayant acquis un nouvel équilibre différent de l'équilibre primitif. C'est une évolution quantique dont le déroulement comporte trois phases : — une phase inadaptative, la population perd son équilibre; — une phase préadaptative, une intense pression de sélection entraîne la population vers un nouvel équilibre; — une phase adaptative marquée par la réalisation de l'équilibre.

La préadaptation est nécessaire, elle comprend des caractères qui étaient inadaptatifs ou non adaptatifs dans les conditions où ils sont apparus.

Simpson explique ainsi l'évolution des chevaux qui intéresse la taille, l'hypsodontie ou accroissement de la hauteur des dents jugales par rapport aux dimensions horizontales, le dessin des couronnes dentaires, la structure du pied. A l'Éocène, les ancêtres des chevaux fréquentaient les forêts et consommaient des feuilles. De nouveaux caractères se manifestaient; l'accroissement de la couronne dentaire était une préadaptation à l'hypsodontie, caractère d'un consommateur d'herbe; la réduction du nombre des doigts était une préadaptation à la course; les dents hypsodontes plus larges exigeaient un élargissement de la face. Nantis de ces préadaptations, les mutants gagnèrent la savane herbeuse. Ils étaient devenus imparfaitement adaptés à la consommation des feuilles ou de l'herbe; mais ils étaient préadaptés à brouter l'herbe. Les populations les plus hypsodontes consommèrent plus d'herbe et évoluèrent assez rapidement vers le régime herbivore. Les préadaptations se transforment en postadaptations et le nouvel équilibre s'édifie.

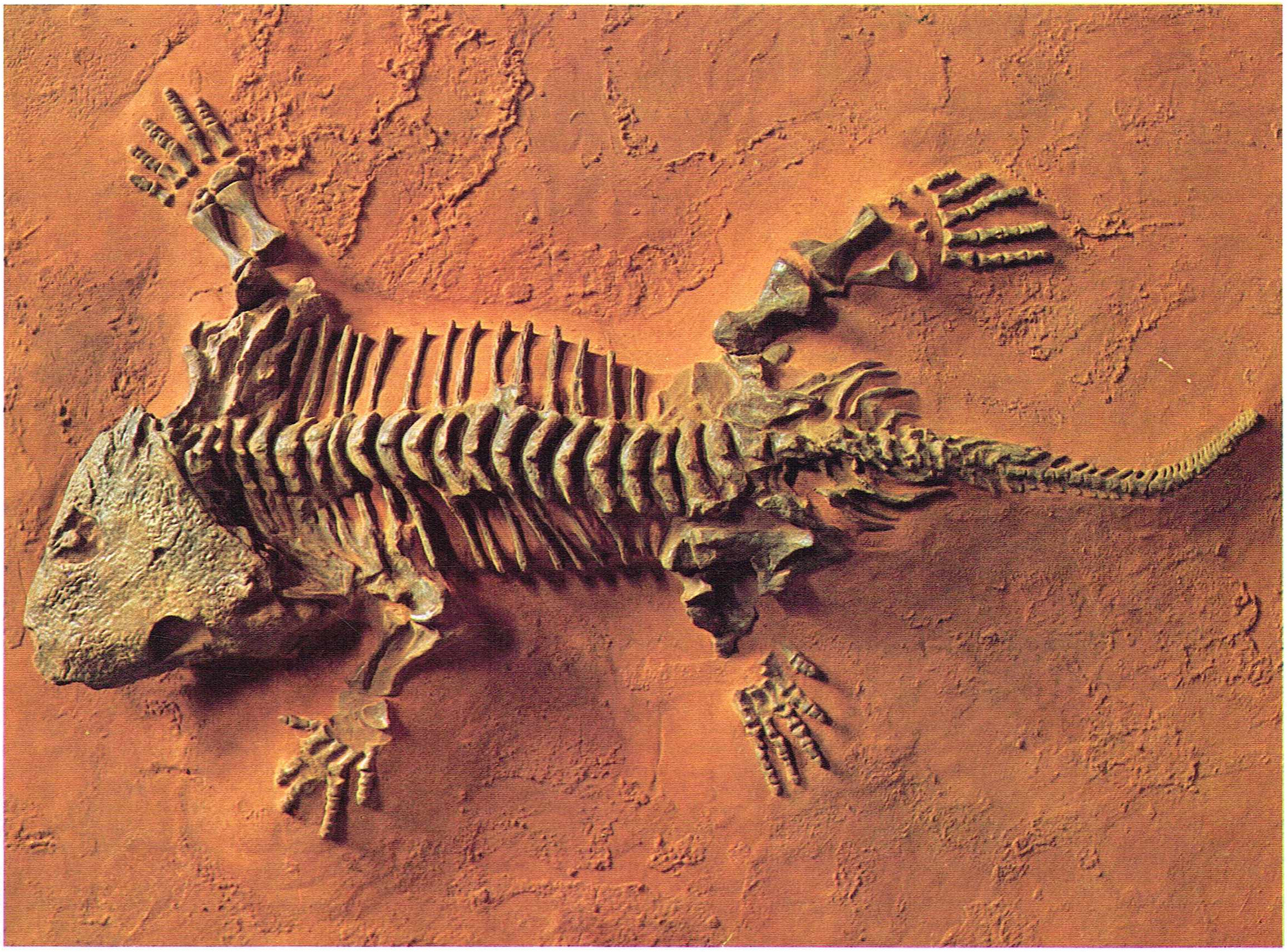

G. Leonardi - G. Pinna

▲ *Un Reptile Tétrapode du Permien (Texas, U.S.A.) :* **Seymouria babylonensis ;** *cet animal marque le passage entre les Amphibiens et les Reptiles.*

Critiques de la théorie synthétique

La théorie synthétique de l'évolution est une construction originale, reposant sur des faits solides et présentant des aspects positifs ; les mutations, la génétique des populations, la sélection jouent un rôle plus ou moins important.

La spéciation ou naissance des espèces a reçu à ce jour des réponses satisfaisantes. Mais une théorie de l'évolution ne doit pas seulement expliquer la formation des espèces. Les mécanismes qui ont présidé à la naissance des petites catégories taxinomiques (espèce, genre, famille) peuvent-ils expliquer aussi l'origine des grandes catégories taxinomiques (classes, embranchements) ? Est-il justifié de considérer une micro-évolution et une macro-évolution ? Ou la macro-évolution n'est-elle qu'un agrandissement des phénomènes qui se passent dans les espèces et les populations ? Les partisans de la théorie synthétique estiment que des facteurs génétiques et sélectifs commandent la micro- et la macro-évolution. Au contraire, d'autres biologistes, Goldschmidt, Schindewolf, Cuénot, Cannon, Brien, considèrent que les mécanismes de la spéciation propres à une micro-évolution progressive ne sauraient expliquer la macro-évolution, parce qu'elle présente des discontinuités fondamentales ; cette dernière exige des saltations responsables de l'apparition de types nouveaux.

L'espèce est une catégorie taxinomique naturelle qui peut être définie de façon précise. En est-il de même des catégories supérieures ? Toute tentative de classification comporte une part d'arbitraire ; pour établir une classification naturelle, il faudrait connaître la phylogenèse des espèces, c'est-à-dire leurs liens de parenté, leurs affinités. Les diverses catégories n'existent réellement qu'à partir des espèces qui les composent. Chaque espèce représente un genre naissant, pourrait-on dire, et chaque genre correspond à une nouvelle famille naissante... Une population allopatrique grandement différenciée est considérée comme un genre ; si elle n'est pas très différenciée, le systématicien en fait une sous-espèce. Les catégories systématiques offrent un caractère utilitaire incontestable ; leurs limites se précisent au fur et à mesure que s'approfondit la connaissance des espèces.

Tout comme une espèce, la classe se réalise par addition de caractères nouveaux présentant une importance beaucoup plus grande que ceux qui différencient les espèces. Cette nouvelle organisation conditionne une tendance adaptative caractérisée. En somme, il est difficile de donner une définition rigoureuse aux catégories supraspécifiques. Les coupures paraissent moins discutables lorsque beaucoup de lignées sont éteintes ; mais elles deviennent d'autant plus confuses que les groupes renferment d'abondants fossiles. Il est difficile de séparer les Amphibiens des Reptiles et les Reptiles des Mammifères en raison de l'abondance des fossiles et de la présence de types intermédiaires.

Ainsi, il paraît logique de penser que les processus évolutifs qui donnent naissance aux espèces et aux classes sont les mêmes ; il n'y a donc pas lieu d'imaginer des mécanismes différents pour la micro- et la macro-évolution. En raison de l'homogénéité des Gnathostomes, on peut admettre que la micro-évolution rend compte de leur évolution et même de celle des Vertébrés (Agnathes et Gnathostomes), comme le présuppose leur unité anatomique.

Par ailleurs, les catégories taxinomiques supérieures (classes, embranchements) sont trop « complètement développées » pour éclairer leur origine, tandis que les catégories taxinomiques les plus simples, particulièrement l'espèce, fournissent des indications précieuses. Les

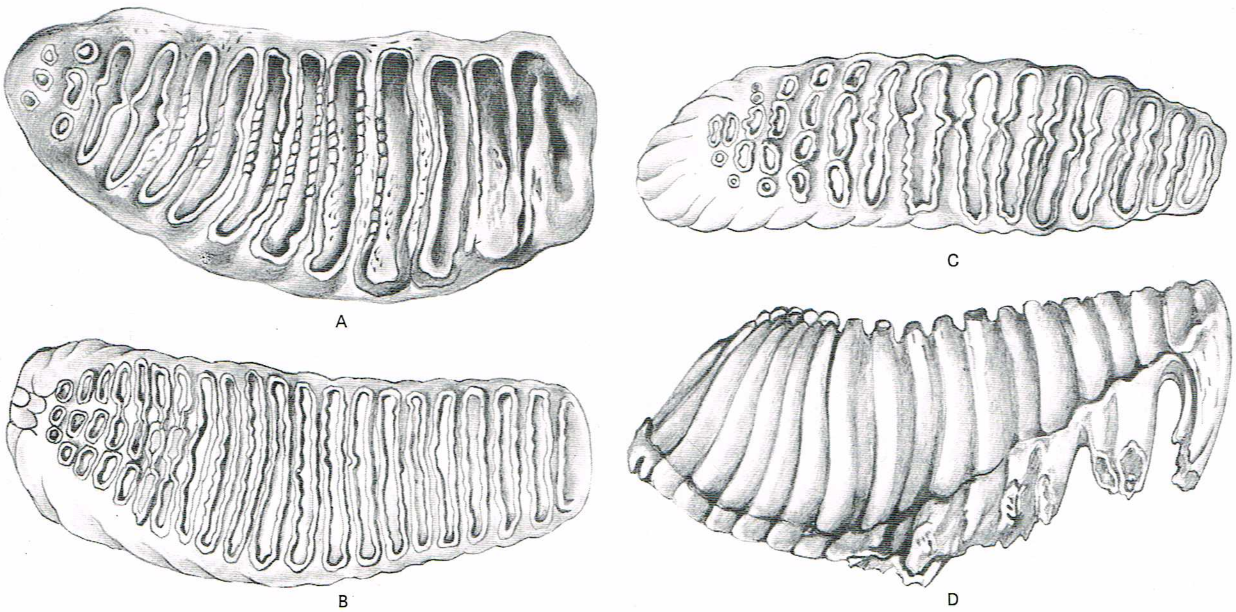

I.G.D.A.

▲ *Molaires fossiles de quelques Proboscidiens : A,* Elephas meridionalis, *du Pliocène supérieur ; B,* Elephas primigenii, *de la faune froide du Quaternaire moyen ; C et D,* Elephas antiquus, *de la faune chaude du Quaternaire moyen (dent en vues occlusale et latérale) [d'après Denizot].*

espèces très différenciées sont des catégories supérieures potentielles.

L'espèce représente donc une unité d'évolution. « Tout taxon supérieur est né en définitive sous la forme d'une population locale d'une espèce. » On pourrait même poser que l'unité qui évolue, c'est la population, dans laquelle s'effectuent tous les échanges et recombinaisons de l'ensemble génétique formé par la totalité des génomes individuels.

Mais les mutations conditionnent-elles toute la micro-évolution ? Comment a pu s'effectuer l'acquisition progressive des cuspides, puis des lamelles des dents des Proboscidiens ? La même question se pose pour tous les organes compliqués dont l'organisation nécessite de multiples corrélations. Actuellement, les mutations géniques ne paraissent pas coordonnées, peut-être en raison de la stabilité du matériel. La genèse des corrélations et des coordinations si fréquentes chez les organismes vivants peut-elle se développer comme des effets pléiotropiques ? Des conditions nouvelles seraient-elles intervenues, formation de gènes nouveaux, incorporation de virus dans un génome ? Existait-il des mécanismes totalement inconnus que nous n'imaginons même pas ?

Pour être objectif, il faut reconnaître que l'on conçoit assez mal la formation des types d'organisation présentant une grande discontinuité ou celle des organes fort complexes. Personne, jusqu'à présent, n'a formulé d'hypothèses vraiment satisfaisantes. Simpson, grand mammalogiste, a appliqué la théorie synthétique de l'évolution aux Mammifères surtout, dont les populations abondantes sont soumises à la génétique des populations. La question de la durée du développement des grands groupes est un facteur dont l'action est totalement inconnue et aucune expérimentation n'est possible. Le facteur temps restera toujours une inconnue.

En biologie, les mathématiques sont souvent l'objet de réprobation et de scandale ; aussi certains regrettent que la théorie synthétique repose sur des bases mathématiques : génétique des populations, coefficient de sélection, pression de sélection, vitesse de l'évolution, dont les estimations ne peuvent être rigoureuses. Beaucoup n'accordent pas une grande confiance à ces calculs.

Des divergences se manifestent également quant à la sélection et à son rôle. Pour les tenants de la théorie synthétique, la sélection est à la fois conservatrice et novatrice. Pour les autres, la sélection n'exerce qu'un effet conservateur ; elle filtre, conserve les mutations favorables, mais elle n'est pas créatrice. La théorie synthétique accorde une large place à la spéciation qui serait le point de départ de l'évolution. Cette conception n'est pas adoptée par tous ; ceux-là estiment que la spéciation accompagne l'évolution mais qu'elle ne se confond pas avec elle ; elle intéresse des détails superficiels et non l'organisation fondamentale. Les espèces primitives sont peu fréquentes ; elles augmentent dans les groupes plus évolués. L'évolution correspond à une typogenèse ; elle a des limites tandis que la spéciation se poursuit sans arrêt.

En conclusion, il faut reconnaître que bien des points d'interrogation subsistent ; il serait exagéré de dire que tous les mécanismes évolutifs sont bien analysés et bien compris, que l'évolution, phénomène aléatoire, se déroule selon un schéma qui ne laisse rien dans l'obscurité. La théorie synthétique est une théorie cohérente, rationnelle, qui a dépassé le vitalisme et le finalisme ; pour elle, l'évolution est inéluctable, elle n'a ni but ni souci d'un mieux-être quelconque. Mais n'est-ce pas rétrécir l'image de l'évolution que de la considérer comme « une gigantesque expérience de génétique évolutive » ?

BIBLIOGRAPHIE

BOESIGER E., *Studies in the Philosophy of Biology,* New York, 1974. - BRIEN P., *Propos d'un zoologiste. Le Vivant, Épigenèse, Évolution épigénétique,* Bruxelles, 1974. - CUÉNOT L. et TÉTRY A., *l'Évolution biologique,* Paris, 1951. - DEVILLERS Ch., *Introduction à l'étude systématique des Vertébrés,* Paris, 1973. - DOBZHANSKY Th., *Genetics of Evolutionary Process,* New York, 1970. - EHRLICH P.R. et HOLM R.W., *Evolution,* Biocore Unit XXII, New York, 1974. - GOLDSCHMIDT R.B., *The Material Basis of Evolution,* New Haven, 1940. - GRASSÉ P.P., *l'Évolution du vivant,* Paris, 1973. - JACOB F., *la Logique du vivant,* Paris, 1970. - JACQUARD A., *Génétique des populations humaines,* Paris, 1974. - LEHMANN J.P., *les Preuves paléontologiques de l'évolution,* Paris, 1973. - MAYR E., *Populations, Espèces et Évolution,* Paris, 1974. - MONOD J., *le Hasard et la Nécessité,* Paris, 1970. - ROSTAND J. et TÉTRY A., *la Vie,* Paris, 1968. - SIMPSON G.G., *The Meaning of Evolution. A Study of the History of Life and of Its Significance for Man,* Londres, 1950. *The Major Features of Evolution,* New York, 1953. *La Géographie de l'évolution,* Paris, 1969. - TESSIER G., « Transformisme d'aujourd'hui », *Année biologique,* Paris, 1962. - WALLACE B., *Génétique des populations,* Paris, 1974. - WINTREBERT P., *le Vivant créateur de son évolution,* Paris, 1962.

J.-L. Heim

L'HOMME ET L'ÉVOLUTION HUMAINE

L'*anthropologie* (du grec *anthropos :* Homme, et *logos :* discours) est l'histoire naturelle de l'Homme. Elle étudie l'Homme au sein du règne animal en mettant en évidence ses différences et ses analogies avec les Primates, dont l'étude constitue la *primatologie,* branche de la zoologie et de l'anatomie comparée.

L'anthropologie étudie l'Homme parmi ses semblables ; elle s'efforce d'en traduire les variations (morphologie, ostéologie, sérologie, physiologie) et d'établir les modalités de la transmission de ses caractères de génération en génération (génétique). Elle fait appel aux interactions sociales (ethnologie et sociologie) ainsi qu'aux rapports entre l'Homme et son environnement (écologie), qui peuvent influer plus ou moins profondément sur ses caractères spécifiques. L'ensemble des données recueillies par l'étude comparative des Hommes fait l'objet d'*analyses statistiques*.

Enfin, l'anthropologie s'intéresse à l'Homme fossile (paléontologie humaine) et fait appel aux données de la stratigraphie, de la minéralogie, de la pédologie (étude des sols), de la palynologie (étude des pollens) et de la paléontologie animale et végétale.

Il s'agit donc d'une science pluridisciplinaire qui fait intervenir toutes les sciences biologiques et les sciences de la Terre. Aussi est-elle différenciée actuellement en de nombreuses spécialités permettant une analyse exhaustive de notre espèce.

L'Homme et le règne animal

La place exacte que l'Homme occupe parmi les êtres vivants n'a pas été définie *a priori.* Sa recherche a subi l'influence profonde de l'évolution des idées qui a marqué l'histoire des grands courants de la pensée religieuse, philosophique et biologique.

Être suprême, isolé pour les philosophes des temps modernes de toutes les autres formes vivantes par sa spiritualité et par la perfection de son organisation corporelle, l'Homme trouva peu à peu sa place au sein du règne animal. Il devint alors un « animal raisonnable » et fut classé dès 1758 dans l'ordre des Primates (Linné). Depuis Aristote, la ressemblance anatomique entre l'Homme et les grands singes avait attiré l'attention des observateurs. Ainsi Buffon écrivait : « L'espèce du Singe pourrait être prise pour une variété de l'espèce humaine ; le Créateur n'a pas voulu faire pour le corps de l'Homme un modèle différent de celui de l'animal. » L'insertion de l'Homme à côté des singes entraîna les plus vives réactions des hommes de science, encore tout imprégnés des principes religieux et des idées traditionnelles de l'Antiquité et du Moyen Age. Aussi, à la suite de Blumenbach (1791) et de Cuvier, l'Homme fut rangé dans l'ordre des Bimanes par opposition aux Quadrumanes, qui regroupaient tous les autres Primates. D'autres classifications furent proposées : elles tendaient toutes à élever l'Homme au-dessus de l'animalité, en l'individualisant dans une sous-classe (Owen, 1866), dans une classe (Carus, 1818), dans un embranchement distinct de tous les autres Vertébrés (Zencker, 1828) et même dans un règne humain (Geoffroy Saint-Hilaire, 1842 ; Quatrefages, 1887).

L'évolutionnisme devait profondément modifier les préjugés concernant la situation de l'Homme dans le règne animal. Avec l'*Origine des espèces* (1859) et *Descent of Man* (1871), Darwin apportait un argument supplémentaire à la signification zoologique de l'Homme : « L'Homme a une structure extrêmement voisine de celle des grands singes, il a donc avec eux une parenté réelle, il descend de quelqu'un de ceux-ci. » Cette idée trouvait un appui favorable dans les découvertes paléontologiques effectuées peu avant et qui n'avaient pu, malgré leur intérêt certain, franchir les barrières de l'incrédulité des autorités scientifiques. Les travaux de Haeckel en Allemagne rejoignirent vite les thèses de Darwin. Huxley, en Angleterre, montrait que les grands singes offrent davantage d'affinités avec l'Homme qu'avec les autres formes de Primates. Les progrès de l'anatomie comparée, de la physiologie, de l'embryologie et la découverte de la génétique devaient définitivement confirmer la place zoologique de l'Homme dans la classe des Mammifères et, plus particulièrement, dans l'ordre des Primates. Malgré leurs différences et leurs variations individuelles et géographiques, les Hommes actuels offrent un ensemble de traits anatomiques, physiologiques et éthologiques communs justifiant leur groupement au sein d'une même famille, les *Hominidés,* et sous l'appellation d'un même genre et d'une seule espèce, *Homo sapiens.* Cette communauté de structure est corroborée par l'existence d'un comportement psychique qui, malgré ses variantes culturelles, religieuses, éthiques, politiques ou climatiques, demeure profondément constant. Enfin, le groupement de tous les Hommes dans la même entité spécifique se confirme par leur interfécondité, qui s'exprime non seulement par la production d'hybrides fertiles, source de combinaisons infinies de gènes (métissage), mais également par la différenciation de formes intermédiaires dont l'existence semble confirmer l'origine commune de

F. Arborio Mella

▲ ***Portrait de Geoffroy Saint-Hilaire (1772-1844), qui proposa en 1842 la création d'un règne humain pour individualiser l'Homme par rapport aux animaux.***

▼ ***Trois exemples de types humains actuels : à gauche, un homme de Bali (race jaune) ; au milieu, une femme Djerma du Niger (race noire) ; à droite, un Berbère du Maroc (race blanche).***

J.-L. Heim

J.-L. Heim

J.-L. Heim

▲ *L'Homme est capable d'imposer des transformations à son environnement, mais elles ne sont pas toujours favorables à ce dernier : ainsi en est-il du déboisement, accéléré, ici, par le surpâturage (plaine de Talak au Niger).*

▶ *Page ci-contre, tableau donnant la classification, le nombre et la répartition des Primates Prosimiens actuels et fossiles.*

l'humanité. La définition zoologique de l'espèce humaine répond par conséquent aux règles générales de la systématique des êtres vivants. Si son polymorphisme est sous la dépendance des facteurs les plus divers, il demeure toutefois dans les limites de différences intraspécifiques. Conformément à la grande majorité des Primates, l'espèce humaine est *polytypique*.

Limité à l'Ancien Monde jusqu'à la fin du Pléistocène, l'Homme s'est répandu sur presque toute la surface du globe. Par son intelligence et son langage, par son pouvoir d'abstraction et son esprit inventif, par son habileté manuelle et ses techniques, il a pu parfaitement s'intégrer à son milieu. Son aptitude à créer des conditions artificielles de survie, grâce à ses vêtements, à ses habitations et aux transformations qu'il est capable d'imposer à son environnement par la domestication et l'agriculture, lui a permis de s'adapter à toutes les latitudes et à tous les biotopes, contrairement aux autres Mammifères. En ce sens, l'Homme est un « animal particulier ». Il ne subit pas seulement la nature, il la façonne et la modèle selon ses propres besoins dans la mesure du possible. Il n'est plus entièrement soumis aux aléas d'une évolution irrémédiable. La possibilité pour les individus de choisir leurs conjoints en fonction des exigences du groupe ou suivant leurs tendances personnelles, l'aptitude de l'espèce à modifier largement les processus de sélection naturelle par la médecine, la chirurgie ou la contraception, enfin, sa répartition démographique en fonction de ses nécessités vitales permettent d'envisager la possibilité d'un contrôle volontaire et raisonné de l'avenir génétique de l'Homme.

Les Primates et l'espèce humaine

A l'inverse des concepts anciens qui plaçaient l'Homme au-dessus de tous les êtres vivants, il convient de le définir au sein de l'ordre des Primates, dont il constitue un genre (et une espèce), qui, malgré son individualité biologique, psychique ou sociale, ne peut en aucune façon en être séparée. Il existe en effet chez tous les Primates, l'Homme compris, de nombreux traits communs qui apparaissent avec d'autant plus d'évidence que les individus sont plus jeunes et les espèces chronologiquement et morphologiquement plus proches de leur souche ancestrale. Le fonds « primate » dont nous sommes profondément imprégnés constitue la base sur laquelle s'est édifiée l'*anthropogenèse* de l'Homme actuel. Aussi la connaissance des Primates doit-elle constituer véritablement la première définition biologique de l'Homme.

L'anatomie comparée des Vertébrés actuels et fossiles fait apparaître une complication et un perfectionnement croissants du système nerveux et notamment de l'encéphale, qui atteint son plus haut degré d'achèvement chez les Primates et plus particulièrement chez les Hominidés. Cette tendance à la cérébralisation, qui se traduit par l'augmentation volumétrique du crâne cérébral comparativement au crâne facial, est perceptible dans toute la classe des Mammifères par rapport aux Amphibiens ou aux Reptiles. Certains groupes mammaliens dont la cérébralisation est particulièrement nette présentent même des spécialisations poussées du crâne, des membres et de la denture.

Chez les Primates, la cérébralisation s'associe à une adaptation particulière de l'appareil locomoteur à la fonction de préhension concomitante de l'arboricolisme. Ce mode de vie fait appel à des structures squelettiques, sensorielles, nerveuses et musculaires autorisant une véritable spécialisation ; celle-ci n'a pu apparaître qu'à partir d'une architecture corporelle conservant un certain nombre de dispositions primitives.

L'arboricolisme impose, en premier lieu, le maintien de la structure pentadactyle fondamentale de l'autopode (pied et main) et l'opposabilité du pouce et du gros orteil par rapport aux autres doigts. Il exige l'indépendance des os de l'avant-bras (radius et cubitus) et de la jambe (tibia et péroné), dont la mobilité doit permettre des mouvements de pronation et supination suffisamment amples pour faciliter la fonction de préhension des extrémités des membres. La clavicule, toujours présente, assure les mouvements de latéralité (adduction et abduction) du membre antérieur ; grâce à ses connexions avec l'omoplate, le tronc et le bras, elle diminue l'effort de tension des muscles au cours de la progression dans les branches.

En outre, l'arboricolisme a favorisé un certain redressement corporel s'accompagnant du raccourcissement progressif du tronc, de l'élargissement du thorax et de la disposition particulière des viscères.

La fonction de préhension induite par la vie arboricole a pour effet d'augmenter les connexions neuro-sensorielles et neuro-motrices entre l'appareil locomoteur et le cerveau. Les extrémités digitales s'élargissent devant la prolifération du nombre des terminaisons sensorielles, qui assurent un rôle capital dans l'exploration et la perception du milieu environnant. L'ongle remplace la griffe. La surface de projection de la main sur l'aire corticale correspondante du néopallium s'étend considérablement par rapport à celle des autres Mammifères et contribue, de ce fait, à l'augmentation proportionnelle du nombre des neurones ainsi qu'à la céphalisation.

Les dispositions primitives du crâne des Primates intéressent différemment plusieurs caractères anatomiques du

Sous-ordre	Infra-ordre (ou Super-famille)	Famille	Sous-famille	Genres actuels Genres fossiles *	Espèces actuelles	Distribution et âge géologique
INSECTIVORES OU PRIMATES selon les caractères considérés (et les auteurs)	TUPAIOIDEA (TUPAIIFORMES) [tendent à être classés avec les Insectivores]	TUPAIIDAE	Tupainae	Tupaia Tana Anathana Dendrogale Urogale	30 6 3 3 everetti	Forêts tropicales d'Asie et d'Indonésie Indonésie Indes Indochine, Bornéo Philippines
			Ptilocercinae	Ptilocercus	lowii	Bornéo, Sumatra et Sud de la Malaisie
			* Anagalinae	* Anagale		Oligocène inférieur de Mongolie
PROSIMIENS	LEMUROIDEA (LEMURIFORMES)	LEMURIDAE	Lemurinae	Lemur (Maki) Hapalemur Lepilemur Mixocebus	5 2 mustelinus	Comores et Madagascar
			Chirogalinae	Chirogalus Microcebus Allocebus Phaner	2 2 4 ex. connus furcifer	Madagascar
			* Adapinae	* Protoadapis * Adapis * Pronycticebus * Caenopithecus * Anchomomys * Gesneropithex * Lantianus		Éocène inférieur, moyen et supérieur d'Europe Éocène supérieur d'Asie
			* Notharctinae	* Notharctus * Pelycodus * Cantius * Smilodectes * Telmatolestes		Éocène inférieur et moyen d'Amérique du Nord et Éocène inférieur d'Europe
			* Archaeolemurinae	* Hadropithecus * Archaeolemur		Pléistocène récent de Madagascar
			* Megaladapinae	* Megaladapis		
	LEMURIFORMES	INDRIDAE		Indri Avahi Propithecus	indri laniger 2	Madagascar
				* Palaeopropithecus * Mesopropithecus * Neopropithecus * Archaeoindris		Pléistocène de Madagascar (sub-fossiles)
PROSIMIENS	LORISOIDEA (LORISIFORMES)	LORISIDAE	Lorisinae	Perodicticus Arctocebus Nycticebus Loris * Indraloris * Propotto	potto calabarensis 2	Afrique occidentale, Nigéria Cameroun, Asie du Sud-Est, Ceylan, Inde du Sud Pliocène de l'Inde Miocène du Kenya
			Galaginae	Galago	6	Afrique
			?	* Progalago * Mieuoticus * Komba		Miocène du Kenya
	DAUBENTONOIDEA (DAUBENTONIFORMES)	DAUBENTONIDAE		Daubentonia * Daubentonia	madagascarensis	Madagascar Forme sub-fossile
	TARSIOIDEA (TARSIIFORMES)	TARSIIDAE	Tarsiinae	Tarsius	3	Sud-Est asiatique
			* Microchoerinae	* Microchoerus * Necrolemur * Pseudoloris * Agerina * Nannopithex		Éocène moyen et supérieur d'Europe
PROSIMIENS	* OMOMYOIDEA	* PAROMOMYIDAE	* Purgatoninae	* Purgatorius * Palaechton * Plesiolestes * Palaenochta		Crétacé supérieur, Paléocène, Paléocène moyen (Amérique du Nord)
			* Paromomyinae	* Paromomys * Phenacolemur		Paléocène et Éocène d'Amérique du Nord)
		* OMOMYIDAE		* Teilhardina * Periconodon		Éocène inférieur et moyen d'Europe
				* Hoanghonius * Lushius		Éocène supérieur d'Asie
				* Omomys * Macrotarsius * Hemiacodon * Arisella Etc.		Miocène inférieur d'Amérique du Nord
				* Rooneyia		Oligocène inférieur du Texas
		* ANAPTOMORPHIDAE		* Anaptomorphus * Tetonius * Tetonoides * Trogolemur Etc.		Éocène inférieur et moyen d'Amérique du Nord
		* PLESIADAPIDAE		* Plesiadapis * Pronothodectes * Chiromyoides * Platychoerops		Paléocène moyen, Éocène inférieur d'Amérique du Nord et d'Europe
		* PICRODONTIDAE		* Picrodus * Zanycteris		Paléocène moyen et supérieur d'Amérique du Nord
		* CARPOLESTIDAE	* Carpolestinae	* Carpolestes * Carpodaptes * Elphidotarsius		Paléocène moyen et supérieur d'Amérique du Nord
			* Saxonellinae	* Saxonella		Paléocène supérieur d'Europe

* : Formes fossiles.

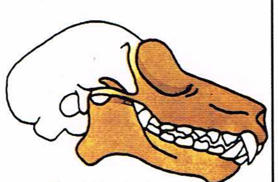

Prosimien (galago)

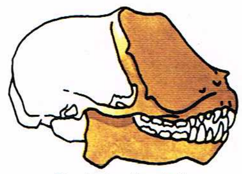

Prosimien (tarsier)

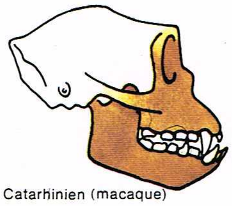

Catarhinien (macaque)

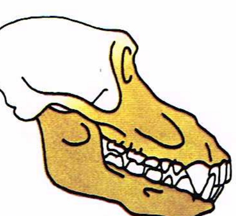

Catarhinien (babouin)

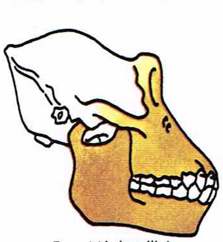

Pongidé (gorille)

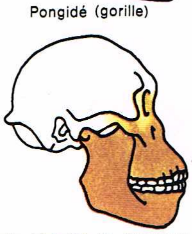

Australopithécidé (A. africanus)

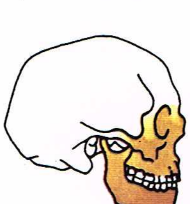

Homo sapiens

☐ Crâne cérébral

■ Crâne facial

Richard Colin

squelette céphalique. On peut citer, à titre d'exemple, les rapports de l'aile du sphénoïde et de l'os pariétal, qui illustrent chez l'Homme et les singes Anthropoïdes le maintien d'une connexion présente chez les Placentaires primitifs. Il en est de même pour la structure cartilagineuse archaïque du crâne, pour de nombreux traits relatifs à la denture ainsi que pour la perforation inconstante de la voûte palatine, qui évoque chez certains Prosimiens la disposition observée chez les Marsupiaux.

Les principales modifications du crâne des Primates par rapport à celui des autres Mammifères reposent sur les conséquences de l'accroissement du volume du cerveau par rapport à celui de l'ensemble du corps. Cet accroissement cérébral est lié autant à l'arboricolisme qu'à la tendance au maintien d'une certaine structure infantile. Il s'exprime par le *coefficient de céphalisation* (rapport du poids cérébral au poids du corps), lequel augmente fortement des Mammifères Placentaires aux Primates pour atteindre sa valeur la plus forte dans l'espèce humaine. A l'augmentation du coefficient de céphalisation se superpose un développement psychique indiscutable.

Souris	0,07
Lémurs	0,28
Simiens	0,40-0,50
Anthropoïdes	1,14-0,75
Hommes	2,82

Le cerveau des Primates est caractérisé par l'hypertrophie et le plissement du néopallium (cortex des hémisphères cérébraux) aux dépens du rhinencéphale (cerveau primitif correspondant aux lobes olfactifs) et par l'operculisation progressive de sa partie centrale. L'augmentation du volume cérébral et la réduction concomitante de la face (rapport mis en évidence par l'indice cranio-facial de J.-L. Heim) s'accentuent chez les Primates supérieurs et contribuent à modifier la statique de la tête et ses rapports avec la colonne vertébrale. La base du crâne subit une flexion amenant la partie faciale au-dessous du neurocrâne (flexion qui atteindra son maximum chez *Homo sapiens*), en même temps que le trou occipital tend à se placer sous le crâne et non pas en arrière, comme c'est le cas chez les quadrupèdes typiques.

Encore dirigées latéralement chez les formes les plus primitives (Prosimiens Tupaiiformes et Daubentoniformes), les orbites s'orientent progressivement vers l'avant pour se placer dans le plan frontal chez les Simiens, les Anthropoïdes et l'Homme. La frontalisation de l'orbite permet la vision stéréoscopique et augmente le champ visuel, favorisée en cela par l'extension des centres visuels du néopallium. Contrairement à celle des autres Mammifères, l'orbite des Primates est complètement isolée de la fosse temporale, sauf chez quelques formes fossiles (certains Lémuriformes et *Anagale*), où une communication telle qu'on la rencontre normalement chez les Mammifères les plus primitifs est encore assurée.

Les Primates désignés abusivement sous le nom global de « singes », représentent en réalité un ensemble fort complexe de Mammifères Placentaires très largement diversifiés depuis 80 millions d'années (début du Paléocène), au cours desquelles ils subirent un certain nombre de transformations plus ou moins importantes et sans lesquelles l'Homme n'aurait pu devenir ce qu'il est. Leur origine lointaine n'a pu être clairement définie. La thèse d'une descendance issue d'Insectivores primitifs semble actuellement prévaloir. Cependant, la séparation entre les deux ordres n'est pas aussi tranchée que semblent l'indiquer les données quelque peu arbitraires de la systématique. La continuité entre les Insectivores et les Primates est tellement graduelle que seul un examen anatomique détaillé des formes fossiles et de certains groupes actuellement vivants permet, dans une certaine mesure, d'orienter le choix de la place zoologique des types de transition. L'exemple le plus classique est fourni par la famille des Tupaiidés (Prosimiens de l'Asie du Sud-Est et de l'Indonésie), dont la position systématique oscille entre l'ordre des Primates et celui des Insectivores suivant les caractères considérés et en fonction de l'opinion des mammalogistes. Selon les hypothèses les plus récentes, les toupayes seraient les descendants actuels de formes primitives d'Insectivores.

S'il est vrai que les transformations caractérisant l'évolution et la différenciation des divers groupes de Primates demeurent le plus souvent sous la dépendance de facteurs adaptatifs variés, il ne faut pas perdre de vue un fait essentiel : les Primates ont conservé dans leur structure anatomique de nombreuses dispositions mammaliennes primitives grâce auxquelles a pu s'élargir l'éventail de leurs spécialisations.

Les Prosimiens

Les Prosimiens constituent le groupe le plus primitif des Primates. Malgré une certaine uniformité de leurs caractères anatomiques et de leurs modes de vie généralement crépusculaires ou nocturnes, ils offrent des radiations adaptatives diverses et certaines spécialisations parfois très poussées (par exemple, la denture de *Daubentonia*, les modifications squelettiques en rapport avec le saut chez *Tarsius*), qui les rapprochent des Insectivores, voire même des Rongeurs. Le volume proportionnel de leur encéphale est réduit. Leur face est généralement projetée vers l'avant et forme un museau pourvu d'un rhinarium (muqueuse nasale apparente), sauf chez les tarsiers. La morphologie et les formules dentaires diffèrent de celles des Simiens. Les doigts portent souvent des griffes. Leur embryogenèse, leur rythme de croissance, leur multiparité et leur reproduction, le plus généralement saisonnière, distinguent les Prosimiens des autres Primates, notamment des Cercopithecoidea et des Hominoidea. La position reculée du trou occipital témoigne d'un faible redressement corporel, en rapport avec leur locomotion quadrupède de type grimpeur arboricole. Enfin, à l'exception des Tarsiidae, chez qui une ébauche de conduit auditif externe est reconnaissable, la région otique des Prosimiens est constituée par une bulle auditive formée à partir de l'os pétreux (rocher des Primates supérieurs). Cette disposition, en partie conservée chez les Platyrhiniens, est nettement différente du conduit osseux de la presque totalité des Cynomorphes et de celui des Pongidae et des Hominidae.

C'est cependant parmi les Prosimiens fossiles de la famille des Omomyidae que se situent vraisemblablement les formes les plus généralisées des Primates, c'est-à-dire celles dont la faible spécialisation permet de penser qu'elles se trouvent plus près de la souche commune d'où dérivent les autres familles de l'ordre. Le nombre important de genres et d'espèces de Prosimiens fossiles, leur longue histoire paléontologique et leur répartition géographique nettement plus étendue que celle des Prosimiens actuels montrent que leurs radiations évolutives furent considérables au cours de l'ère tertiaire. Il semble que les formes actuelles soient des reliques qui ont pu se maintenir et s'adapter jusqu'à nos jours grâce à leur isolement et à certaines conditions écologiques particulièrement favorables.

Les Simiens

Les Simiens sont les formes que l'on désigne communément par le terme de « singes ». Ils sont divisés en deux catégories bien distinctes suivant leur répartition géographique, leur mode de locomotion, leur denture, l'extrémité de leurs membres, leur pilosité et leur pigmentation, leur morphologie osseuse, etc. On sépare ainsi taxonomiquement les singes d'Amérique (Platyrhiniens) des singes de l'Ancien Monde (Catarhiniens). Ces deux infra-ordres de Simiens comprennent de nombreuses familles actuellement vivantes, très diversifiées bien que certaines soient assez proches les unes des autres par leur squelette, leur éthologie ou leur distribution géographique. Les plus primitives (Hapalidae) offrent une parenté avec les Prosimiens, alors que les formes les plus évoluées (Pongidae) présentent des traits de ressemblance et une convergence indiscutables avec l'Homme.

Bien qu'ils soient actuellement confinés à l'Amérique centrale et méridionale, les Platyrhiniens possèdent en effet de nombreuses particularités qui évoquent, d'une part, les Lémuriens malgaches, notamment en ce qui concerne la morphologie et la complication de l'encéphale, la trituberculie des molaires supérieures, la gémellité habituelle (Hapalidae), l'adaptation à la vie nocturne (Aotinae) et, d'autre part, les tarsiers du Sud-Est asiatique (structure crânienne, colonne vertébrale, musculature), dont les ancêtres semblent avoir été aussi ceux des Platyrhiniens. Toutefois, et c'est là un point capital que nous enseigne l'histoire paléontologique des Primates, les Ceboidea fossiles, moins spécialisés que les Platyrhiniens actuels qui leur ont succédé dans le temps, possèdent des

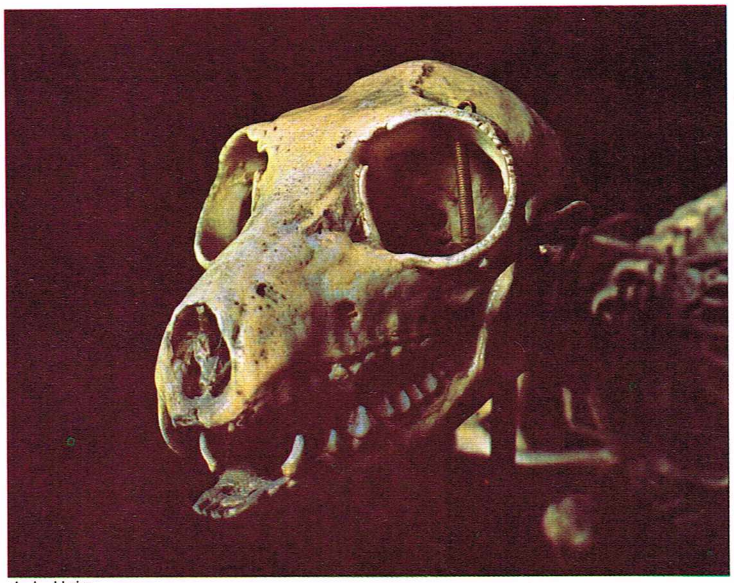

J.-L. Heim

J.-L. Heim

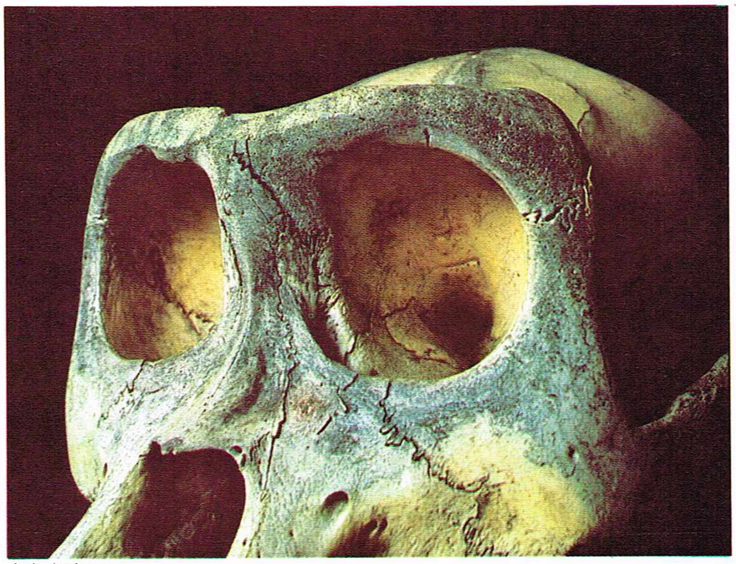

J.-L. Heim

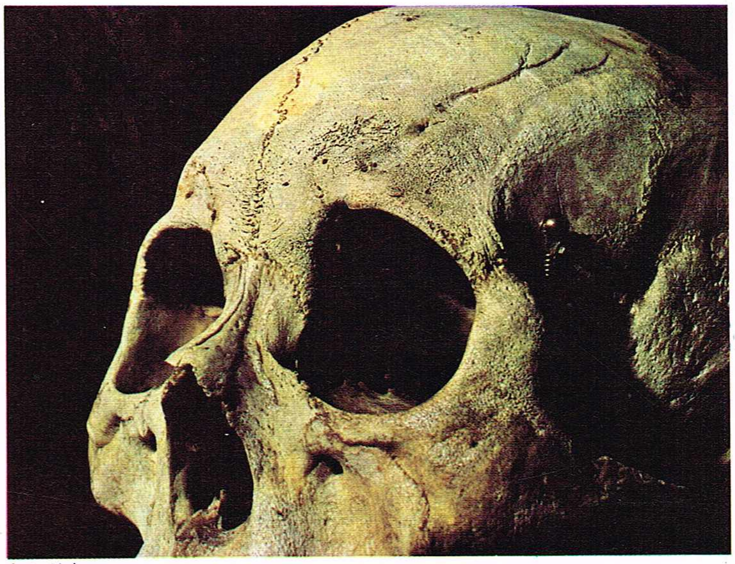

J.-L. Heim

caractères archaïques, tels que le contour arrondi du front, la dépression sous-orbitaire (fosse canine), les membres antérieurs relativement courts (dont le rôle sustentateur est considérablement aidé par la longue queue préhensile de ces animaux), la faible saillie du menton, la présence d'apophyses géni à la face postérieure de la symphyse mentonnière ; on retrouve ces caractères plus ou moins nettement tout au long de l'histoire des Hominidae. De telles analogies structurales et morphologiques entre la lignée (phylum) par laquelle s'est réalisée la forme humaine et celle qui s'est plus précocement diversifiée en donnant naissance aux Platyrhiniens, confirment l'origine commune des Primates américains et des Primates de l'Ancien Monde, l'Homme faisant partie de ces derniers.

Chez les Primates supérieurs, les singes Anthropoïdes manifestent des tendances au redressement corporel consécutif à un mode particulier de locomotion arboricole, le mode suspendu, ou *brachiation*, qui a pour effet de réduire la longueur du tronc, d'augmenter la largeur du bassin et la longueur des membres antérieurs. Ce mode de locomotion s'accompagne d'une cérébralisation plus poussée, concomitante d'une réduction du volume facial et d'une disposition nouvelle des viscères, en rapport avec la posture ainsi acquise. Toutes ces transformations, imputables à l'hyperspécialisation arboricole, offrent des analogies frappantes avec un tout autre type de locomotion, non arboricole cette fois et caractéristique des Hominidae : la bipédie, où seul le membre postérieur assure la fonction locomotrice et sustentatrice. Ainsi, deux spécialisations totalement opposées ont abouti par convergence et par une relation de cause à effet au redressement corporel, partiel chez les Pongidae, total chez les Hominidae. L'une et l'autre ont leur propre histoire paléontologique mais proviennent de formes ancestrales communes portant des caractères encore indifférenciés et, par cela même, voués à s'orienter dans telle ou telle voie.

J.-L. Heim

▲ *Disposition de la région orbitaire chez les Primates : en haut à gauche, chez un Lémurien (le galago) ; en haut à droite, chez un Platyrhinien (le sajou) ; en bas à gauche, chez un Anthropoïde (le gorille) ; en bas à droite, chez un Homme actuel de type mongol.*

◀ *Page ci-contre, vues latérales de la tête osseuse de différents Primates.*

◀ *Un crâne de tarsier* (Tarsius spectrum). *Noter le grand développement des cavités orbitaires de ce Prosimien.*

Sous-ordre	Infra-ordre	Super-famille	Familles	Sous-familles	Genres	Noms communs	Espèces	Distribution
SIMIENS DU NOUVEAU-MONDE	PLATYRHINIENS (PLATYRHINI)	CEBOIDEA	HAPALIDAE (CALLITHRICIDAE)	HAPALINAE	Hapale (Callithrix) Leontocebus (Midas) * Dolichocebus	Ouistiti Singe-lion ou tamarin	8 20	Amazonie, Colombie, Bolivie Amérique Centrale et Amérique du Sud Oligocène d'Amérique du Sud
				CALLIMICONINAE	Callimico		goeldii	Amazonie
			CEBIDAE	AOTINAE	Aotes	Douroucouli	3	Amérique Centrale et du Sud
				CALLICEBINAE	Callicebus	Titi	7	Amérique Centrale et du Sud
				PITHECINAE	Pithecia Chiropotes Cacajao * Cebupithecia	Saki ou singe-moine Saki-capucin Ouakari	2 3 4	Amazonie et bassin de l'Orénoque Amazonie et bassin de l'Orénoque Haut-Amazone Miocène supérieur de Colombie
				CEBINAE	Cebus Saimiri * Neosaimiri	Sajou, sapajou, capucin Singe-écureuil	4 2	Amérique du Sud Versant Pacifique de l'Amérique Centrale et du Sud Miocène supérieur de Colombie
				ALOUATTINAE	Alouatta (= Mycetes) * Homunculus	Singe hurleur	6	Amérique Centrale et du Sud (jusq. Sud-Brésil) Miocène supérieur de Colombie
				ATELINAE	Ateles Lagothrix Brachyteles * Brachyteles	Singe-araignée Singe laineux	5 3 arachnoides	Amazonie et Amérique Centrale Bassin Amazone S.-E. du Brésil Pléistocène
					* : formes fossiles.			

▲▶ ***Classification et répartition des Simiens : en haut, ceux du Nouveau Monde ; page ci-contre, ceux de l'Ancien Monde.***

C'est par le jeu de spécialisations de cet ordre que la diversification des Primates s'est déroulée au cours de leur longue histoire. Les analogies et les convergences, qui rendent leur classification souvent délicate, demeurent toutefois l'expression de leur cohésion indiscutable.

Bien qu'étant fondamentalement arboricoles, puisqu'ils occupent essentiellement les zones forestières comprises entre les tropiques et l'équateur, les Simiens ont fréquenté au cours de l'ère tertiaire des zones nettement plus étendues, telles que l'Amérique du Nord, l'Europe et l'Asie centrale. Certaines familles de Simiens de l'Ancien Monde ont abandonné plus ou moins complètement la forêt pour s'installer dans des régions subdésertiques, dans des savanes clairsemées, sur des terrains rocheux et même dans des régions montagneuses parfois très élevées. Les différences notables de milieu ont favorisé la recherche d'une meilleure adaptation et, spécialement, d'un type de locomotion particulièrement favorable à leurs conditions écologiques. Aussi, à l'exception des Prosimiens, qui demeurent essentiellement quadrupèdes, les Primates offrent quatre possibilités locomotrices.

● *Type grimpeur normal.* C'est le type fondamental d'organisation locomotrice des Primates, en rapport direct avec l'arboricolisme, caractérisant la presque totalité des Platyrhiniens et certains Cynomorphes. Ce mode de déplacement nécessite un redressement très peu accentué du tronc ; le membre antérieur est légèrement plus long que le membre postérieur (105 à 110 %). Les Primates répondant à ce type reposent sur le sol par la paume et par la plante (pronogrades) mais deviennent digitigrades lors de la marche. La queue joue un rôle essentiel dans la suspension ; aussi est-elle le plus souvent très longue et préhensile *(Alouatta, Ateles)*, sauf chez *Cacajao*, où elle est courte.

● *Type marcheur.* Ce type répond à une adaptation à la vie en savane et en forêt clairsemée. La plupart des Cynomorphes *(Cercopithecinae)* correspondent à ce type ; il faut y ajouter le gorille (notamment *G. beringei*), qui, du fait de son poids, a plus ou moins abandonné le domaine arboricole en se spécialisant secondairement dans la marche plantigrade.

Les singes marcheurs sont quadrupèdes *(Papio, Mandrillus, Theropithecus, Macaca)*, et possèdent une queue non préhensile souvent plus courte que celle des Platyrhyniens, parfois même absente *(Gorilla)*. Le membre antérieur est à peu près aussi long que le membre postérieur, sauf chez le gorille, dont la structure fondamentalement brachiatrice a fortement développé le bras et l'avant-bras.

● *Type brachiateur ou suspendu.* La locomotion brachiatrice est liée à la vie arboricole, mais comprend toutefois des possibilités de marche sur terrain dégagé (*Colobinae, Pongidae* et certains Platyrhiniens). Elle s'accompagne, de ce fait, d'un certain nombre de modifications anatomiques concernant les proportions corporelles :

— un allongement marqué du membre antérieur qui atteint 180 % de la longueur du membre postérieur chez les Pongidae (surtout chez l'orang et le gibbon), les Colobinae et les Atelinae ; cet allongement est plus faible chez les Alouattinae ;

— un allongement des quatre derniers doigts de la main, qui fait fonction de crochet rendu encore plus efficace par la réduction du pouce et même par sa disparition (*Ateles*, Colobinae) ;

— une diminution de la hauteur et un redressement partiel du tronc (surtout chez le gorille et le chimpanzé) consécutifs à la réduction du nombre des vertèbres thoraciques et lombaires :

	thoraciques + lombaires	lombaires	sacrées
Lémuriens	19-23	6-9	3-6,5
Platyrhiniens	18-21	4 *(Ateles)*-7	3-4,5
Cynomorphes	19	7	3-4
Gibbon	18	5	4-5 (Gibbon, Siamang)
Siamang	17	4-5	
Orang	17	3-4 (Orang, Gorille, Chimpanzé)	5-6 (Orang, Gorille, Chimpanzé)
Gorille	16,5		
Chimpanzé	16		

● *Type bipède.* L'orthostatisme, ou bipédie, n'est réalisé complètement que chez les Hominidae (Archanthropiens, Paléanthropiens et Néanthropiens). Ce type implique un redressement parfait du corps ; le membre

Sous-ordre	Infra-ordre	Super-familles	Familles	Sous-familles	Genres	Nom commun	Espèces	Distribution
SIMIENS DE L'ANCIEN MONDE	CATARHINIENS (CATARHINI)	CERCOPITHECOIDEA (CYNOMORPHES)	CERCOPITHECIDAE	CERCOPITHECINAE	Cercopithecus	Cercopithèque	13	Afrique tropicale et équatoriale
					Erythrocebus	Singe rouge ou patas	patas	Afrique tropicale et équatoriale
					Cercocebus	Mangabey	4	Afrique équatoriale
					Macaca	Macaque	12	Asie
						Magot	sylvana	Afrique du Nord et Gibraltar
					Cynopithecus		niger	Célèbes
					Papio	Babouin	5	Afrique tropicale
					* Parapapio * Dinopithecus * Gorgopithecus			Plio-Villafranchien d'Afrique australe
					Mandrillus	Drill et mandrill	2	Afrique tropicale et équatoriale
					Theropithecus	Gelada	gelada	Éthiopie
					* Simopithecus			Pliocène supérieur - Pléistocène inférieur d'Afrique orientale
				COLOBINAE	Colobus	Colobe	4	Afrique tropicale
					Presbytis (= Semnopithecus)	Langur	13	Asie méridionale
					* Semnopithecus		monspessulanus	Asie méridionale
					Pygathrix	Langur (Douc)	nemaeus	Indochine
					Simias		concolor	Iles Mentawei
					Rhinopithecus		2	Chine et Indochine,
					Nasalis	Nasique	larvatus	Bornéo
					* Mesopithecus			Pontien (Grèce, Iran, Tchécoslovaquie, Inde, Russie méridionale). Miocène inférieur du Kenya
					* Libypithecus			Pliocène moyen d'Égypte
					* Dolichopithecus			Pliocène de France
					* Oligopithecus			Oligocène inférieur d'Égypte
		* PARAPITHECOIDEA			* Parapithecus			Oligocène inférieur d'Égypte
					* Amphipithecus ?			Éocène supérieur de Birmanie
					* Apidium ?			Oligocène inférieur d'Égypte
SIMIENS	CATARHINIENS	ANTHROPOIDEA (ANTHROPOMORPHES)	PONGIDAE (PONGOIDEA)	HYLOBATINAE	Hylobates	Gibbon	5	Asie orientale et méridionale + Indonésie
					Symphalangus	Siamang	syndactylus	Asie orientale et méridionale + Indonésie
					* Aeolopithecus			Oligocène d'Égypte
					* Pliopithecus			Miocène moyen-début Pliocène d'Europe
					* Limnopithecus			Miocène moyen et supérieur d'Afrique orientale
				PONGINAE	Pongo	Orang-outan	pygmaeus	Sumatra et Bornéo
					Pan	Chimpanzé	troglodytes	Afrique équatoriale
					Gorilla	Gorille	gorilla	Afrique centrale
					* Aegyptopithecus			Oligocènesupérieurd'Égypte
					* Dryopithecus * Hispanopithecus * Paidopithex			Miocène moyen, Afrique, Eurasie
					* Proconsul			Miocène inférieur d'Afrique orientale
					* Sivapithecus * Kenyapithecus			Miocène inférieur d'Asie et d'Afrique orientale
					* Ramapithecus			Mio-Pliocène d'Asie
					* Giganthopithecus			Pléistocène de Chine
			* OREOPITHECIDAE		* Oreopithecus			Miocène supérieur d'Europe
			* Australopithecidae (ou-cinae)		* Australopithecus	Australopithèque	2	Villafranchien d'Afrique méridionale et orientale
			HOMINIDAE (HOMINOIDEA)	HOMINIDAE (*sensu stricto*) ou HOMININAE	Homo (Hommes actuels et fossiles)	* Archanthropiens	archaeus (= erectus)	Pléistocène inférieur et moyen de l'Ancien monde
						* Paléanthropiens	(H. sapiens neandertalensis)	Pléistocène moyen et supérieur
						Néanthropiens	(H. sapiens sapiens)	Fin du Pléistocène supérieur et actuel

* : Formes fossiles

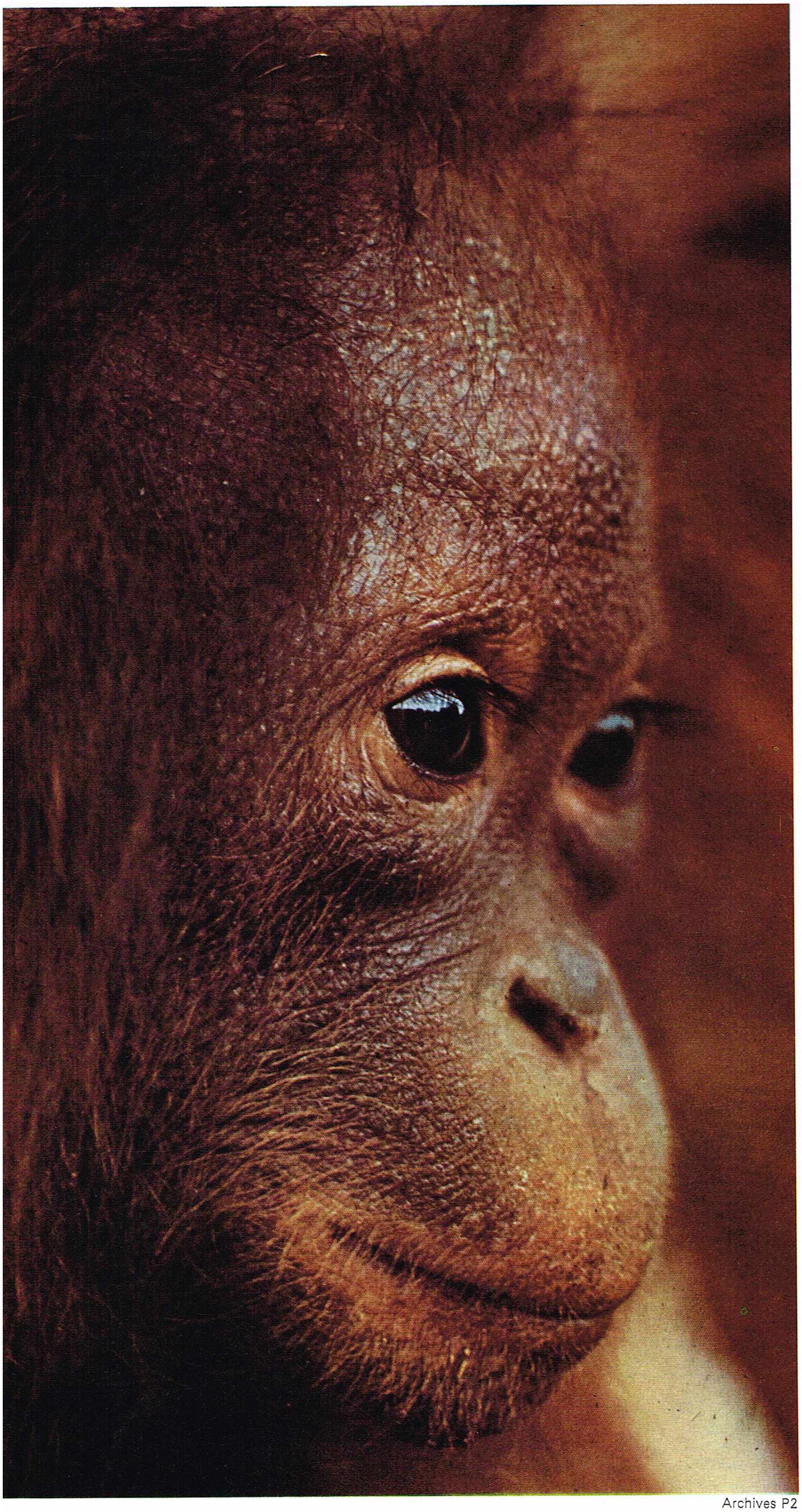

Archives P2

postérieur (membre inférieur) s'allonge notablement par rapport au membre antérieur (supérieur). La bipédie s'accompagne de nombreuses modifications intéressant la colonne vertébrale (courbures rachidiennes), d'un raccourcissement du tronc, d'un très grand développement de la boîte crânienne et des hémisphères cérébraux, d'une réduction de la face et de l'appareil masticateur, de la libération de la main de toute fonction locomotrice ou sustentatrice, de l'élargissement du pied et du bassin, de la formation d'une voûte plantaire, du développement de certains muscles (fessiers) alors que d'autres (grand droit de l'abdomen) subissent une nette régression, etc.

L'ensemble des transformations anatomiques et psychologiques résultant de la bipédie et de l'hypercéphalisation constitue l'hominisation. Elle permet de suivre les grandes étapes de la genèse de l'Homme chez les formes fossiles précédant son apparition et de mieux saisir ses différences structurales, adaptatives et éthologiques par rapport aux autres groupes de Primates.

La tête

L'augmentation du volume de la boîte crânienne et la régression proportionnelle du massif facial sont très nettes chez les Platyrhiniens, les Anthropomorphes et les Hominidae, alors qu'elles sont parfois masquées chez d'autres formes par les facteurs suivants :

— un allongement secondaire de la face, qui constitue un véritable museau chez les Cercopithecidae cynocéphales, où le maxillaire supérieur s'allonge en présentant des crêtes latérales (plus marquées chez *Mandrillus* et *Papio* que chez *Theropithecus*) ;

— le développement des superstructures osseuses du crâne, qui constituent des crêtes ayant pour effet d'augmenter la surface d'insertion de certains muscles. Ces superstructures traduisent la puissance de l'appareil dentaire (torus sus-orbitaire) ou l'hypertrophie des muscles temporaux (crête sagittale du crâne résultant de la fusion des crêtes temporales) et nucaux (crête, ou torus occipital). Ces superstructures sont rares chez les Platyrhiniens, où le torus sus-orbitaire est toujours absent; *Cebus* et *Alouatta* mâles présentent le plus souvent une crête sagittale ou occipitale. Les superstructures sont bien visibles chez les Cynomorphes et surtout chez les Anthropomorphes, notamment chez le gorille mâle. Chez les Hominidae fossiles, elles diminuent fortement par suite de la gracilisation du crâne (stature bipède et réduction de l'appareil dentaire) ; on retrouve toutefois chez *Paranthropus robustus* une légère crête sagittale. Le torus sus-orbitaire se maintient chez les Archanthropiens et les Paléanthropiens *(Homo « erectus »* et *Homo sapiens neandertalensis)*. Une crête occipitale très atténuée peut se rencontrer aujourd'hui chez certains types humains (Mélanésiens, Australiens) ; elle n'a toutefois pas de signification évolutive ou atavique.

Le développement de la boîte crânienne chez les Simiens s'accompagne de l'élévation de l'écaille temporale et de l'écaille occipitale. Les orbites se placent désormais dans le plan frontal et demeurent définitivement isolées de la fosse temporale. Le frontal, particulièrement redressé et convexe chez les Platyrhiniens, prend part à la constitution de la fosse temporale chez les Catarhiniens et l'Homme. Les contacts entre les os de la voûte au niveau de la fosse temporale (région du ptérion) sont de trois types chez les Primates. Leur reconnaissance constitue un excellent caractère pour la distinction des groupes :

- *Type sphéno-pariétal :* articulation entre l'alisphénoïde et le pariétal; séparation entre frontal et temporal. Ce type se rencontre chez les Tarsiidae, les Lémuriens, les Hominidae, *Pongo, Hylobates;* il est fréquent chez les Colobinae.
- *Type fronto-temporal :* articulation entre frontal et temporal ; le sphénoïde et le pariétal restent séparés. Cette disposition est générale chez les Cynomorphes, le gorille, le chimpanzé et les Cercopithecinae. Elle est rare chez les Colobinae.

La constance de ces deux types est sujette à certaines variations selon les genres et les groupes cités.

- *Type jugo-pariétal :* articulation entre l'os jugal et l'os pariétal; le temporal et le frontal sont séparés. Ce type est constant chez les Platyrhiniens. Les singes américains présentent un os jugal très développé et entrant en contact avec le pariétal, contrairement aux Catarhiniens, chez qui il est réduit, situé davantage en façade et séparé de ce dernier.

Un autre trait de reconnaissance des Simiens, auquel nous avons déjà fait allusion, est la forme de la région otique (ou auditive). La bulle auditive, présente chez tous les Prosimiens, se retrouve, quoique petite, chez les Platyrhiniens, où le conduit auditif externe osseux est réduit à un anneau (anneau tympanique). Un conduit est toutefois différencié chez *Lagothrix*. L'anneau tympanique, présent chez le fœtus des Catarhiniens et le très jeune enfant humain, s'allonge en se différenciant en un conduit auditif externe chez les Catarhiniens et l'homme adulte, en même temps que la bulle auditive régresse et se pneumatise chez les Pongidae et les Hominidae, pour former la région mastoïdienne.

La pneumatisation du crâne (présence de sinus et de cavités aériennes) augmente, en règle générale, des Prosimiens aux Hominidae. Un petit sinus maxillaire parfois présent chez les Hapalidae existe en permanence chez les Cebidae. Le sinus frontal, absent chez les premiers, peut se rencontrer chez les seconds. Chez les Cynomorphes, le frontal et le sphénoïde sont presque toujours dépourvus de sinus. Seul le sinus maxillaire est bien développé chez les Cercopithecidae, mais il fait défaut chez les Colobinae. La pneumatisation s'accentue chez les Anthropomorphes. Peu développée chez le gibbon et l'orang, où le sinus frontal manque généralement (disposition primitive), elle s'accentue nettement chez le chimpanzé et le gorille : les sinus maxillaires et sphénoïdaux sont très développés, alors que le sinus frontal se loge au-dessus du bourrelet sus-orbitaire entre les deux tables osseuses. Dans le groupe des Hominidae, la pneumatisation est forte chez les Archanthropiens et les Paléanthropiens. Elle atteint son degré maximal chez les Hommes de Néanderthal, où elle efface complètement les fosses canines (sinus maxillaires) et creuse, en le gonflant, le torus sus-orbitaire. Chez *Homo sapiens sapiens*, elle demeure plus réduite malgré l'existence de variations individuelles.

Contrairement aux Prosimiens, la face des singes est souvent glabre, sauf chez quelques formes *(Hapalidae, Aotes)*, ce qui favorise vraisemblablement la différenciation et la complication des muscles peauciers de la mimique, qui n'atteignent des possibilités nuancées que chez les Pongidae et surtout les Hominidae.

Un nez dépourvu de rhinarium caractérise l'ensemble des Simiens. Il est pourvu d'une cloison élargie avec des narines orientées de chaque côté (Platyrhiniens) ou s'ouvrant en dessous (Catarhiniens, *Alouatta, Aotes*). Chez certains Colobinae *(Simias, Rhinopithecus)*, le nez peut présenter des dimensions notables, voire très importantes (*Nasalis* de Bornéo).

Les modifications de la mandibule des singes par rapport à celle des Prosimiens résultent de la régression du massif facial et du raccourcissement de l'arcade alvéolo-dentaire et du palais. La mandibule simienne forme un os unique dont les deux moitiés sont solidement unies dans la région médiane (ou symphyse). Le rapport entre la diminution de la longueur de la branche horizontale et l'élévation de la branche montante permet une mastication plus énergique que chez les Prosimiens.

De ce fait, l'apophyse coronoïde ne s'élève guère au-dessus du condyle. La région angulaire, ou gonion, prolongée par une apophyse chez les Prosimiens (apophyse lémurienne), présente un contour arrondi chez les singes.

La denture subit une régression numérique par rapport à celle des Prosimiens. S'il existe des variations morphologiques concernant les dimensions absolues et relatives ainsi que la morphologie des couronnes, qui peut différer quelque peu d'un groupe à l'autre (la troisième molaire inférieure de *Macaca* et *Cercocebus* présente 5 tubercules, alors qu'on en dénombre 4 chez *Cercopithecus* et *Erythrocebus*), la formule dentaire (nombre absolu et relatif des dents) demeure fixe pour un groupe donné :

	incisives	canines	prémolaires	molaires	total
Platyrhiniens					
Hapalinae	2	1	3	2	32
Callimiconinae Cebidae	2	1	3	3 (2)	36
Catarhiniens					
Catarhiniens Homo	2	1	2	3 (2)	32

Il est intéressant de noter que, par le nombre des prémolaires, les Platyrhiniens sont plus primitifs que les Catarhiniens, alors qu'ils sont plus évolués par la tendance à la régression des molaires. En effet, cette régression se retrouve non seulement chez les Hapalinae, où elle constitue la règle générale : la troisième molaire des autres Platyrhiniens est souvent plus ou moins atrophiée et fait même défaut chez *Ateles*.

Contrairement à ce que l'on observe chez les Prosimiens, la différence sexuelle de la denture est nettement marquée : les canines dépassent le niveau des autres dents (sauf chez *Homo*).

La tendance au redressement corporel se manifeste d'une façon plus ou moins évidente chez tous les Simiens. Elle est accentuée par la suspension et intervient sur la morphologie de la base du crâne, qui répond à ces nouvelles conditions d'équilibre de la tête par le retrait plus ou moins marqué de la face et le développement graduel de la cavité cérébrale, laquelle s'étend principalement au profit des lobes occipitaux (aire visuelle). La base du crâne accentue de ce fait la coudure ethmo-sphénoïdale et foramino-nucale, ce qui tend à faire avancer le trou occipital ; dans l'espèce humaine, celui-ci s'ouvre en dessous de la boîte crânienne et non plus en arrière comme chez les quadrupèdes. Ce schéma est bien entendu sujet à des variations importantes selon les familles.

Le développement du crâne cérébral chez les Simiens est corrélatif à celui du cerveau, dont le volume augmente aussi bien en valeur absolue qu'en comparaison du poids du corps. Le rapport le plus élevé est atteint chez les Platyrhiniens en raison de leurs faibles dimensions corporelles. Ce développement neurocrânien s'accompagne :

— de la grande extension des hémisphères cérébraux, qui masquent à peu près complètement le cervelet (la plupart des Platyrhiniens et surtout le genre *Saimiri*) ;

— de l'atrophie de l'appareil olfactif (rhinencéphale), qui est déjà marquée chez les Lémuriens, plus accentuée chez les Hapalidae et surtout chez les Cercopithecidae ;

— de l'operculisation du territoire central, qui s'accroît progressivement des Lémuriens à l'Homme ;

— de la complication et de l'enroulement progressif du cortex (gyrencéphalie), déjà marqués chez les Platyrhiniens (sauf chez les Hapalidae, qui demeurent lissencéphales).

Le tronc et les membres

Au niveau du tronc, le redressement corporel entraîne des modifications notables.

— Les courbures vertébrales s'accentuent avec la brachiation (une légère courbure lombaire et une courbure dorsale chez les Hylobatinae) et la bipédie (courbures cervicale, thoracique lombaire et sacrée). Chez les quadrupèdes, les Platyrhiniens et les Cynomorphes, il n'existe qu'une seule courbure comme chez l'enfant humain.

— Le thorax s'élargit transversalement chez les formes suspendues (*Ateles*, Anthropoïdes) et surtout avec la bipédie *(Homo)*.

La main des singes est adaptée à l'arboricolisme. La préhension de la main varie fortement en fonction du mode de locomotion suspendu et du degré d'opposabilité du pouce. Chez les formes essentiellement brachiatrices, le pouce est généralement réduit (Colobinae), parfois même absent *(Ateles)*. Il n'est pas opposable chez les Hapalidae : la préhension est par conséquent imparfaite et, en plus de sa fonction locomotrice essentielle, la main sert bien plus à fixer et à rechercher la nourriture qu'à la véhiculer vers la bouche. Chez les Cebidae, la préhension est plus élaborée : les objets peuvent être saisis, et certains genres parviennent même à utiliser un objet comme outil *(Cebus)*. Chez les Catarhiniens, le pouce est toujours opposable, alors que le rôle préhenseur de la main se perfectionne en même temps que l'usage du membre postérieur devient plus fréquent (Ponginae). La main s'allonge et atteint les dimensions du pied.

Les transformations relatives du pied des Simiens sont principalement soumises à l'adaptation à la bipédie et à la marche plantigrade *(Pongidae)*. Chez les Platyrhiniens, pied et main sont très différents. L'évolution du pied s'effectue par l'allongement des métatarsiens par rapport au tarse. La vie arboricole favorise des dispositions telles que l'écartement et l'opposabilité du gros orteil ainsi que l'allongement des orteils, ce qui a valu jadis aux singes anthropomorphes l'appellation de « Quadrumanes ». L'orthostatisme *(Homo)*, en revanche, s'accompagne de

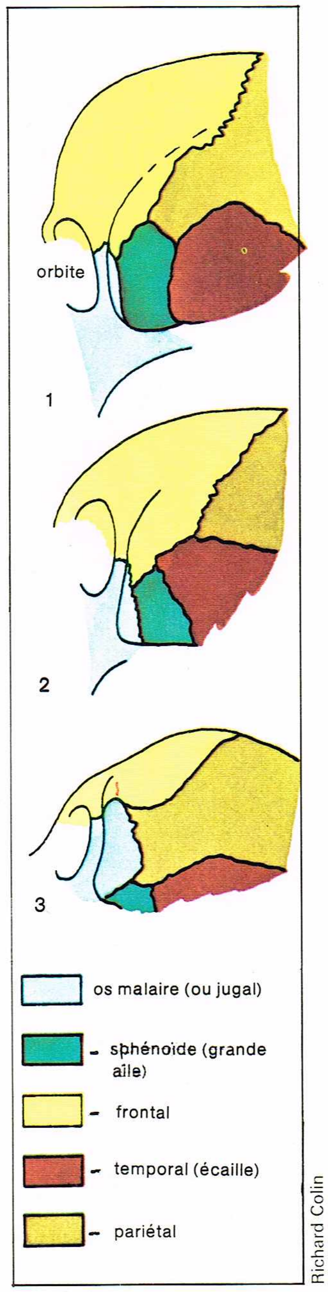

▲ *Articulation des os du crâne dans la région du ptérion : 1, type sphéno-pariétal (Homme) ; 2, type fronto-temporal (Catarhiniens) ; 3, type jugo-pariétal (Platyrhiniens)* [*d'après J.-L. Heim*].

◀ *Tête d'orang-outan* (Pongo pygmaeus) *; chez ce Pongidé, les muscles peauciers ont atteint une grande différenciation permettant des mimiques très nuancées.*

Les caractères du cycle génital et de la reproduction chez les Primates (d'après H. STEINER et H.V. VALLOIS)							
	Cycles œstrien et menstruel	*Durée de la gestation*	*Nombre de jeunes*	*Durée de l'allaitement*	*Fin de l'enfance*	*Fin de l'adolescence*	*Particularités de la reproduction*
LEMUROIDEA	Polyœstriens saisonniers ou permanents. Faible hémorragie intra-utérine.	4-5-6 mois	1-2	4-6 semaines	6 mois	2 ans	Couples monogames. Groupes de constitution sociale inconnue. Jeune porté d'abord sur le ventre, ensuite sur le dos. ♂ participant aux soins des jeunes?
TARSIOIDEA	Polyœstriens permanents. Menstrues toutes les 3 semaines.	?	1	?	?	?	Couple monogame? Jeune porté sur le ventre.
PLATYRHINIENS	Polyœstriens, menstrues incomplètes : desquamation utérine, faible hémorragie vaginale.	3-4-5 mois	1-2	4-6 semaines	2-4 mois	1-2 ans	Couple monogame ou clan sans hiérarchie. Jeune porté sur le ventre ou le dos. ♂ porte les jeunes et joue avec eux.
CATARHINIENS CERTAINS *MACACA* CERTAINS *MACACA* CYNOCÉPHALES	Vraies menstrues, sans tuméfaction de la région ano-génitale avec tuméfaction.	7 mois 5-6 6-7-8	1-2 1-(2)	4 semaines 2 2-6 semaines	6 mois	3-4 4-6 ans	Harem avec ♂ dominant. Jeune porté surtout sur le dos, précocement autonome ; ♂ ne s'occupant pas des jeunes.
ANTHROPOMORPHES GIBBON	Cycle menstruel 28-30 jours	7 mois	1	6 mois	3 ans	7 ans	Groupe de familles monogames. Jeune porté sur le côté. ♂ aidant à soigner les jeunes.
CHIMPANZÉ	34-35 jours avec tuméfaction	8 mois 1/2	1-(2)	4-6 mois	3-4 ans	8-12	Familles polygames groupées ou isolées. Jeunes portés sur le ventre. ♂ n'aidant pas à l'élevage.
GORILLE	45 jours avec tuméfaction	?	1-(2)	?	2-3 ans	10-14 ans	
ORANG	29 jours	8-9 mois	1-(2)	4-6 mois	3 ans 1/2	8-12	Idem?
HOMME	27-28 jours	9 mois	1-(2)	9-12 mois	6 ans	14-16 ans	Famille monogame. Jeune avec réflexe d'accrochage. Jeunes soignés par le père et la mère.

▲ *Tableau récapitulatif des caractères du cycle génital et de la reproduction chez les Primates (d'après H. Steiner et H.-V. Vallois).*

spécialisations particulières en rapport avec l'appui sur le sol, parmi lesquelles il convient de souligner :

— la formation de la voûte plantaire longitudinale qui se superpose à la voûte transversale, déjà présente chez les Pongidae ;

— la situation de l'axe du pied entre le premier et le second rayon (I-II) ;

— le raccourcissement des orteils II et IV avec modifications des formules digitales ;

— l'allongement du gros orteil et la disparition de son opposabilité.

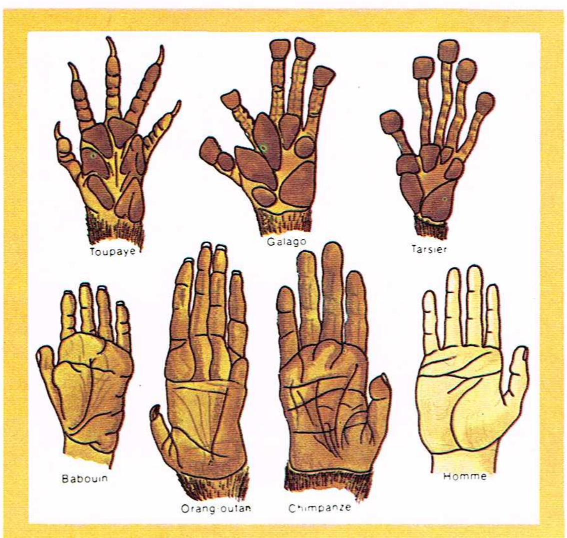

▶ *Différents types de mains chez les Primates (d'après Biegert).*

Richard Colin

Les doigts et les orteils se terminent soit par des griffes ou des ongles carénés, soit par des ongles plats. S'il n'existe en effet jamais de griffes chez les Catarhiniens (ongles plats ou parfois carénés), on les rencontre chez les Hapalidae (sauf sur le gros orteil).

Contrairement aux autres Mammifères et aux Prosimiens, l'activité sexuelle est fonction d'une périodicité en rapport avec la fécondité. La reproduction des Simiens s'effectue de façon ininterrompue. Le flux menstruel, absent ou incomplet chez la plupart des Platyrhiniens, devient normal chez les Catarhiniens dont le cycle sexuel des femelles *(Macaca)* passe par les mêmes phases que celui de la femme. Les principales différences entre l'espèce humaine et les autres Catarhiniens intéressent les modifications périodiques de la région génitale des seconds (peau sexuelle). La possibilité d'accouplement indépendamment des périodes de fécondité favoriserait chez les Simiens l'établissement de familles persistantes et une organisation sociale hiérarchisée (Zuckerman).

Les Hominidae

La famille des Hominidae, représentée depuis 40 000 ans par un seul genre et une seule espèce : *Homo sapiens,* possède une structure fondamentalement catarhinienne. En effet, son organisation biologique, sérologique et morphologique, les caractères anatomiques de ses formes fossiles les plus reculées ainsi que son origine géographique localisée à l'Ancien Monde la rapprochent davantage de la famille des Pongidae que de toute autre famille de Primates. Si Hominidae et Pongidae ont atteint chacun pour leur propre compte le degré le plus poussé d'organisation des Primates et plus particulièrement des Catarhiniens, leurs ressemblances, très étroites à bien des égards, semblent être l'expression d'une convergence de processus adaptatifs plutôt que la preuve d'une

parenté réelle. De nombreuses dispositions anatomiques communes aux deux familles apparaissent dès le stade catarhinien et atteignent leur plein épanouissement au terme des deux lignées. C'est, par exemple, le cas de la tendance au redressement corporel, de l'organisation musculaire d'ensemble, du développement de l'encéphale, de la disparition de la queue, de l'élargissement thoracique et de la réduction du nombre des vertèbres dorsales, auxquels nous avons déjà fait allusion. A ces similitudes de structure corporelle, qui résultent de l'héritage d'un ancêtre commun, s'ajoutent de nombreuses analogies ayant trait au mode de fonctionnement des organes, au comportement, à la réceptivité à certains parasites et affections, à la sexualité, au développement ontogénique et, dans une certaine mesure, à quelques aspects psychologiques.

Parmi ces ressemblances, on a pu étudier tout particulièrement :

— la sensibilité gustative à certaines substances (phénylthiocarbamide), qui varie selon les individus dans des fréquences voisines chez l'Homme et le chimpanzé ;

— la réceptivité à plusieurs maladies telles que le choléra, la rage, la variole, la syphilis, l'herpès, le cancer, le paludisme, la tuberculose et la leucémie lymphocytaire, qui se retrouvent aussi bien chez l'Homme que chez quelques genres de Pongidae ;

— la présence de parasites intestinaux et cutanés communs, tels que le pou *Pediculus,* qui fréquente autant l'espèce humaine que le chimpanzé.

Si les fréquences des groupes sanguins des grands singes et de l'Homme diffèrent plus ou moins, on retrouve toutefois les mêmes facteurs sériques dans les deux groupes. De même, par ses protéines plasmatiques, l'Homme est plus proche des Anthropoïdes africains que des formes asiatiques. Les ressemblances sont cependant plus ou moins prononcées selon les groupes. Par exemple, l'albumine et les alpha-globulines du gorille sont voisines de celles de l'Homme alors que celles du chimpanzé s'en différencient. En revanche, les gamma-globulines de ce dernier sont les plus proches des nôtres.

On pourrait étendre de tels exemples à d'autres constituants sériques tels que les hémoglobines.

Il existe néanmoins entre Pongidae et Hominidae des différences significatives, qui témoignent de leur individualisation et de leur divergence très anciennes. La spécialisation particulièrement poussée de certains organes a en quelque sorte bloqué l'évolution des Pongidae à un stade à peu près acquis depuis une dizaine de millions d'années ; depuis lors, leurs formes ancestrales se sont engagées dans une voie évolutive nettement orientée vers la réalisation des types actuels. En revanche, la structure encore peu spécialisée sur de nombreux points des Hominidae leur a assuré une radiation évolutive beaucoup plus étendue en laissant ouvertes des possibilités exceptionnelles, qui leur ont garanti une suprématie adaptative indiscutable sur tous les autres Primates.

Par-dessus la structure fondamentalement catarhinienne des Hominidae se sont greffés deux faits dominants dans lesquels résident les principales différences avec les Pongidae :

— la possession de la posture bipède ;

— le développement extrême de l'encéphale, dont les volumes absolu et relatif ainsi que la complication des territoires corticaux et le nombre des neurones dépassent ceux de tous les autres Primates.

La plupart des caractères anatomiques de l'Homme résultent de ces deux faits de premier ordre, y compris ses propriétés psychiques hautement différenciées et la possibilité de communications interindividuelles par le langage articulé, l'imagination et l'abstraction des concepts.

La bipédie et le redressement corporel

L'Homme est le seul Primate qui présente une attitude verticale parfaite (orthostatisme) et qui pratique la locomotion bipède orthograde.

Nous avons déjà souligné le fait que cette fonction s'accompagne de l'augmentation de la longueur du membre postérieur par rapport au membre antérieur. Le premier assure seul la sustentation ; ses longueurs absolue et relative sont les plus élevées de celles des Primates, bien que l'allongement caractéristique de la jambe humaine apparaisse progressivement au fur et à mesure du développement postnatal et en même temps que l'enfant acquiert la marche bipède. Le rapport entre la longueur du membre inférieur et la longueur du tronc est de l'ordre de 115 % à la naissance, alors qu'il atteint 171 % chez l'homme adulte. Il varie chez les Anthropoïdes de 118 % (orang) à 149 % (gibbon).

Dégagé de toute fonction locomotrice, le membre supérieur humain assure la préhension grâce à la main. Par suite de sa faible spécialisation anatomique, cette dernière est capable d'une multitude d'activités, que rendent particulièrement élaborées sa très grande différenciation musculaire et l'abondance des terminaisons sensorielles (pelotes tactiles) répondant à une projection cérébrale remarquablement étendue. La fonction mécanique de la main humaine est rendue possible par l'opposabilité totale du pouce, dont la longueur atteint 68 % de celle de la main, alors qu'elle varie de 46 à 54 % chez les grands singes.

En revanche, le pied humain a perdu pratiquement toute fonction préhensive (s'il l'a jamais eue) pour s'adapter exclusivement à la sustentation. Il supporte de ce fait sur une très faible surface (polygone de sustentation) un poids corporel qui, exception faite pour le gorille, dépasse largement celui des autres Primates.

La spécificité du pied humain résulte de la coexistence de plusieurs facteurs, notamment :

— de la spécialisation de sa musculature, qui diffère nettement de celle de la main ;

— de la réduction remarquable des quatre derniers orteils qui s'accentue vers le 5ᵉ, cette tendance se traduisant par la disparition presque complète de l'ongle du dernier orteil ;

— de l'accolement du gros orteil aux quatre autres, ce qui supprime toute possibilité d'opposition : l'axe de la tête astragalienne se rapproche de l'axe du pied, avec lequel il fait un angle de 17 à 24° contre 30 à 40° chez les Anthropoïdes ;

— de l'allongement du tarse qui occupe la moitié de la longueur totale du pied, alors qu'il n'en représente que le tiers chez les Anthropoïdes par suite de la grande longueur des métatarsiens et des phalanges ;

— enfin, de la formation d'une voûte plantaire longitudinale propre à l'espèce humaine, qui apparaît avec la marche orthograde et qui se surajoute à la voûte transversale présente chez les Pongidae. Le pied humain repose sur le sol par sa tubérosité calcanéenne hypertrophiée (talon) et par la tête des métatarsiens.

▼ ***Différents types de pieds chez les Primates (d'après Biegert).***

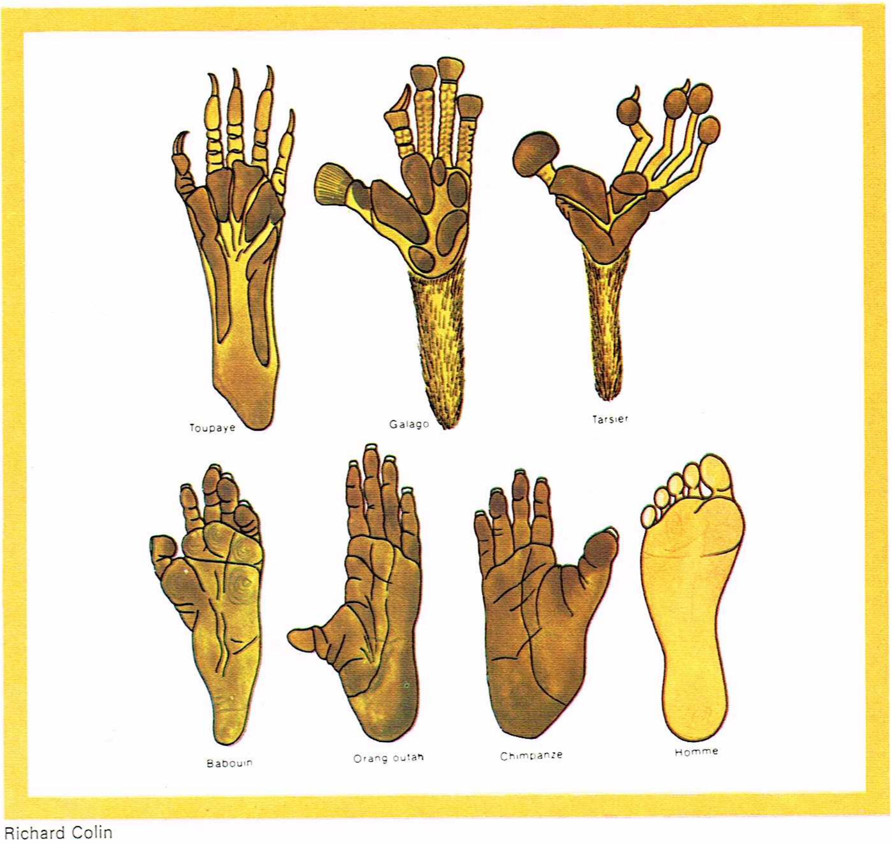

Richard Colin

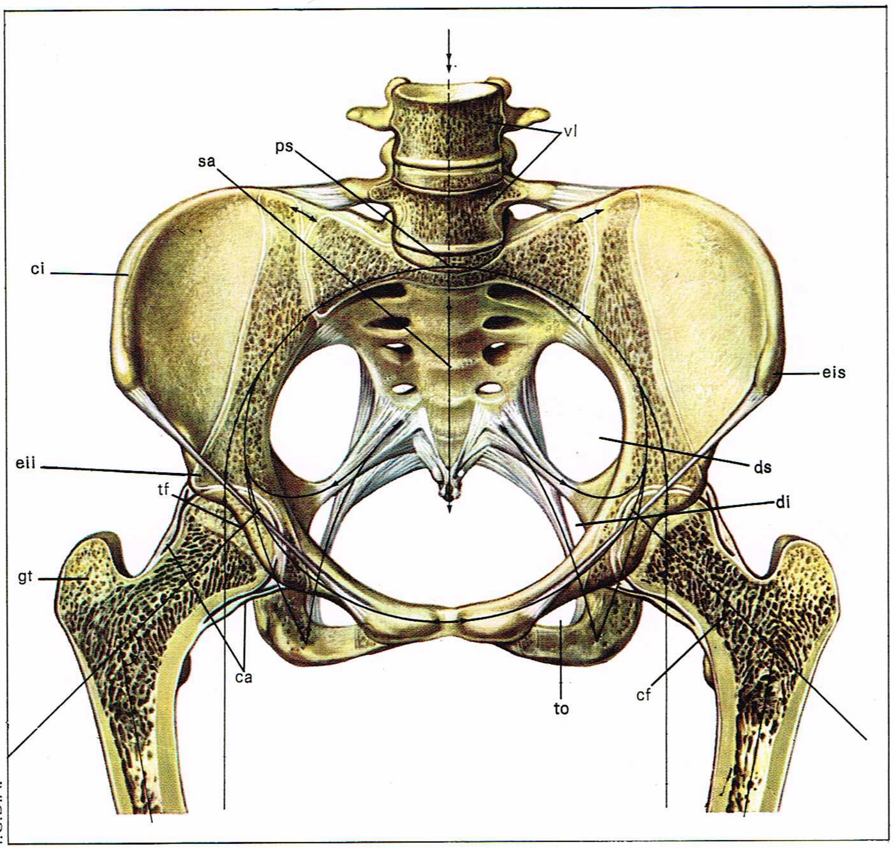

▲ *Coupe frontale du bassin humain, intégrée dans une représentation tridimensionnelle du bassin lui-même : vl, vertèbres lombaires ; eis, épine iliaque supéro-antérieure ; ds, détroit supérieur du bassin ; di, détroit inférieur du bassin ; cf, col du fémur ; to, trou obturateur ; ca, capsule articulaire ; gt, grand trochanter ; tf, tête fémorale ; eii, épine iliaque antéro-inférieure ; ci, crête iliaque ; sa, sacrum ; ps, promontoire du sacrum.*

La spécialisation des extrémités des membres induite par la posture bipède ne peut être complètement réalisée que par l'adaptation des ceintures et des os longs à ce mode de locomotion.

Par suite de l'élargissement du tronc, l'omoplate humaine s'élargit également et se place sur la face postérieure du thorax, de telle sorte que la cavité glénoïde, articulaire avec la tête de l'humérus, s'oriente latéralement et non plus vers le haut, alors que l'épine de l'omoplate tend à prendre une direction horizontale. Cet effet de bascule de la ceinture scapulaire augmente la torsion humérale en favorisant les mouvements de pronation et de supination de l'avant-bras et de la main.

La station debout modèle profondément la structure du bassin, qui s'évase du fait de la dilatation des ailes iliaques et de l'élargissement du sacrum, constituant de la sorte un support solide pour la masse viscérale. La face externe des ailes iliaques, contournée en *S* italique, forme une large surface pour l'insertion des muscles fessiers. Le grand fessier, qui est nettement le plus développé et le plus puissant, assure le balancement du corps lors de la marche en raison de son rôle extenseur dans l'espèce humaine et non plus exclusivement abducteur comme chez les grands singes, ce dernier rôle étant dévolu au muscle moyen fessier, nettement plus réduit chez l'Homme. Les os iliaques humains sont donc plus courts et plus larges que ceux des singes Anthropoïdes : leur élargissement vers l'avant est en partie favorisé par la traction du muscle droit antérieur et du ligament ilio-fémoral, qui maintient la hanche en extension complète et qui s'attache à l'os iliaque par l'épine iliaque antéro-inférieure. Cette épine, plus ou moins saillante selon les individus, est considérée à juste titre comme caractéristique de la posture érigée.

En raison de leur rôle dans le soutien du corps, les os longs du membre inférieur sont particulièrement longs et robustes. La rigidité de l'articulation du genou, nécessaire à l'extension de la jambe, est assurée par les formes et les développements respectifs des ménisques et par des ligaments croisés puissants empêchant les mouvements de rotation qui s'effectuent normalement chez les Anthropoïdes.

Les modifications du corps humain contrôlées par l'orthostatisme vont parfaire le redressement du tronc, déjà en partie réalisé avec le mode de locomotion suspendu chez certains Platyrhiniens, les Cebidae et les Anthropoïdes (le gorille et le gibbon surtout).

Si le nombre de pièces du sternum est réduit à trois chez les Hominidae, c'est surtout la colonne vertébrale qui portera les signes de ce redressement, dont on peut suivre l'effet autant sur l'ensemble du rachis que sur les vertèbres considérées individuellement. Le recul de la ligne de gravité du corps va tout d'abord faire apparaître trois courbures vertébrales alternativement convexes et concaves en avant (plus une courbure sacro-coccygienne), dont la concavité est mise en évidence par la différence entre les hauteurs antérieure et postérieure des corps vertébraux et surtout par la forme et les dimensions des disques intervertébraux.

En raison de la situation du trou occipital sous le neurocrâne permettant l'équilibre de la tête au-dessus de la colonne vertébrale, le rôle de soutien des muscles nucaux est considérablement réduit dans l'espèce humaine. De ce fait, les apophyses épineuses des vertèbres cervicales qui donnent attache à ces muscles vont être particulièrement courtes par rapport à celles des Anthropoïdes. Le redressement corporel fait supporter aux vertèbres lombaires un poids relativement important. Leur rôle de soutien dans l'équilibre orthograde sera donc prépondérant, ce qui explique, d'une part, que cette portion du rachis s'enrichit d'une vertèbre (5 lombaires chez l'Homme et le gibbon au lieu de 4 chez les Ponginae) et, d'autre part, qu'il existe une courbure rachidienne plus marquée à ce niveau (cambrure pouvant être exagérée dans les cas de lordose), accentuant le relief de la région fessière et augmentant de volume de la 1^re^ à la 5^e^ vertèbre lombaire.

Nous avons écrit précédemment que le redressement corporel, même lorsqu'il est incomplet comme chez les Anthropomorphes, a fait disparaître la queue. Il s'agit là d'une structure secondairement acquise puisqu'une ébauche de queue existe chez l'embryon humain et qu'un appendice caudal formé d'éléments squelettiques peut se conserver très exceptionnellement chez l'adulte. C'est là un des nombreux signes d'atavisme de l'espèce humaine qui témoignent de sa structure fondamentalement catarhinienne.

La céphalisation

La céphalisation est l'ensemble des acquisitions anatomiques, mécaniques et neurologiques du crâne humain aboutissant à la prédominance du crâne cérébral (siège de la pensée, des perceptions et de la motricité volontaire) sur le crâne facial (siège des organes sensoriels de la tête). Ce processus, qui est déjà ébauché chez les Primates inférieurs, s'accentue des Prosimiens aux singes pour atteindre son plein épanouissement chez les Hominidae.

Les variations normales (900-2 000 cm^3) de la capacité crânienne de l'Homme (en moyenne, 1 450 chez l'homme et 1 300 cm^3 chez la femme) surpassent toujours les valeurs les plus élevées des Anthropoïdes (650-700 cm^3).

L'augmentation du volume de la boîte crânienne s'accompagne de celle du cerveau, dont le poid moyen est respectivement de 1 350 et 1 220 g chez l'homme et la femme ; il atteint sa valeur définitive un peu avant la puberté (12-15 ans). Le poids cérébral le plus bas autorisant des possibilités mentales normales est de 975 cm^3 : au-dessous de cette valeur, le sujet est dit microcéphale. Le poids moyen de l'encéphale humain est le plus élevé de tous les Mammifères : il est égal à trois fois celui des plus grands Anthropoïdes. Le développement du cerveau résulte, ainsi que nous l'avons déjà écrit, de l'hyperdéveloppement de sa surface corticale (néopallium), de la multiplication du nombre des neurones et des sillons secondaires (gyrencéphalie), bien que la topographie générale des sillons et des scissures soit la même que celle des Pongidae. L'accroissement du lobe frontal, considéré par certains auteurs comme le siège de l'intelligence et de la réflexion, est un fait particulier au cerveau humain allant de pair avec la réduction proportionnelle des lobes pariétaux et temporaux. Le lobe frontal représente 43 % de la surface totale du cerveau, alors qu'il n'est que de 32 % chez les grands singes.

Une autre particularité du cerveau humain réside dans l'hyperdéveloppement de la 3^e^ circonvolution frontale et notamment de son pied (cap de Broca), qui obture complètement le lobe de l'insula, dont l'operculisation demeure incomplète chez les grands singes adultes et chez le fœtus humain.

Corrélativement aux transformations de la cavité cérébrale, le massif facial est relativement peu volumineux et prend place au-dessous de la boîte crânienne en raison de la régression de l'appareil masticateur (dents, musculature temporale et superstructures des os de la voûte) et, par conséquent, des maxillaires. Les arcades dentaires offrent un contour caractéristique parabolique ou elliptique (largeur optimale au niveau de M2 ou M3) s'opposant à la forme en U (arcades upsiloïdes) des grands singes.

On considère généralement que la saillie du menton et la saillie du nez, toutes deux propres à l'espèce humaine, sont les vestiges d'une face ancestrale proéminente qui a subi une régression dans la série évolutive des Hominidae.

La réduction de l'appareil masticateur chez l'Homme porte sur un certain nombre de points que l'on peut résumer de la façon suivante :

— la diminution de volume de toutes les dents, notamment des canines, dont la hauteur des couronnes ne dépasse jamais le niveau des autres dents : cette régularité de la surface occlusale rend possibles les mouvements de diduction et de glissement des arcades ;

— l'absence de dimorphisme sexuel dans les dimensions dentaires et dans la saillie des canines ;

— la tendance à la réduction de la 3e molaire et des incisives latérales supérieures, qui peuvent même manquer dans certains cas ;

— la tendance à la simplification des dessins de la face occlusale des molaires inférieures : la disposition dryopithécienne primitive (sillons dessinant entre les cuspides un tracé en Y) est le plus généralement remplacée par la disposition cruciforme (+) ;

— la tendance à la simplification et à la fusion des racines (deux racines aux molaires inférieures et fusion des racines en une seule sur la 3e molaire) ;

— enfin, l'augmentation de la durée d'éruption, principalement en ce qui concerne la dent de sagesse, correspondant à une régression secondaire en rapport avec la diminution de volume de la face.

Le redressement du corps humain a pour effet de libérer la tête au-dessus du tronc, dont elle est séparée par un cou d'autant mieux dégagé que la réduction de sa masse musculaire est particulièrement remarquable en comparaison de celle des singes Anthropoïdes. L'équilibre de la tête au-dessus de la colonne vertébrale rend parfaitement inutile la fonction sustentatrice des muscles nucaux (et par cela même de la crête occipitale et des apophyses épineuses cervicales des grands singes), qui régressent et n'exercent plus qu'un rôle moteur dans les mouvements de flexion-extension de la tête. Les mouvements de rotation qui contribuent à la grande mobilité de la tête humaine sont assurés par les muscles sternocléidomastoïdiens, qui sont en revanche très développés, ce qui favorise la formation des apophyses mastoïdes sur lesquelles ils s'insèrent. C'est pourquoi la saillie mastoïdienne est une formation osseuse considérée comme particulière au crâne humain.

Chez l'Homme le dégagement de l'arrière-crâne de la masse musculaire, qui soutenait nécessairement la tête des Pongidae, est l'une des causes évidentes de l'élévation de notre écaille occipitale au-dessus de la ligne nucale supérieure (région sus-iniaque de l'occipital) et de la formation de la nuque de l'Homme, qui contribuent l'une et l'autre au développement de la voûte crânienne et à l'augmentation de la capacité crânienne. Cette libération musculaire s'exerce également au profit des parois latérales du crâne (os pariétal et temporal) ainsi qu'aux dépens des muscles temporaux, lesquels, en raison de la réduction de l'appareil masticateur, s'insèrent moins haut que chez les grands singes. La crête sagittale n'a donc plus aucune raison d'exister, la limite supérieure de l'empreinte des muscles temporaux étant soulignée par deux lignes temporales qui demeurent à une distance respectable l'une de l'autre.

Ainsi, la plus grande partie de la voûte crânienne de l'Homme est libre de toute contrainte mécanique directement liée à deux fonctions anatomique et physiologique primordiales : la position d'équilibre de la tête (attitude bipède) et la régression du système masticateur (réduction de la face). Les os de la voûte deviennent capables, sans entraver en aucune façon l'une ou l'autre de ces fonctions, de se modeler directement sur la forme du cerveau.

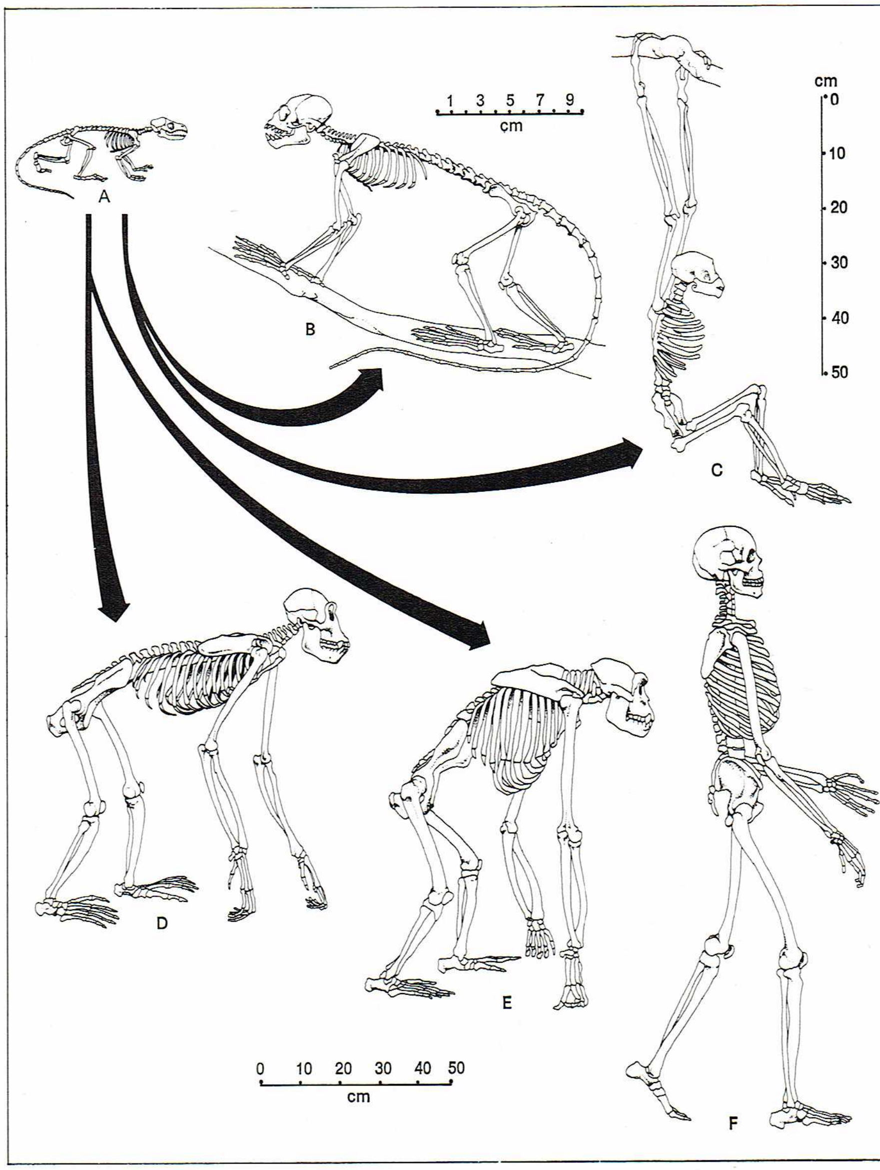

I.G.D.A.

▲ *Les différents types de posture et de locomotion chez les Primates : A,* Tupaia, *type primitif quadrupède ; B,* Saguinus, *adaptation arboricole ; C,* Hylobates, *spécialisation arboricole (suspension brachiale) ; D,* Macaca, *adaptation terrestre, type marcheur quadrupède ; E,* Pan, *adaptation semi-terrestre ; F,* Homo, *adaptation terrestre, type bipède.*

▼ *Représentation schématique montrant les différences et les correspondances entre les os du crâne chez le chimpanzé (à gauche) et chez l'Homme (à droite) : fr, frontal ; zy, zygomatique ou malaire ; max, maxillaire supérieur ; cm, mandibule (corps) ; te, temporal ; pa, pariétal ; lt, ligne temporale ; oc, occipital ; ms, mastoïde ; bm, mandibule (branche montante).*

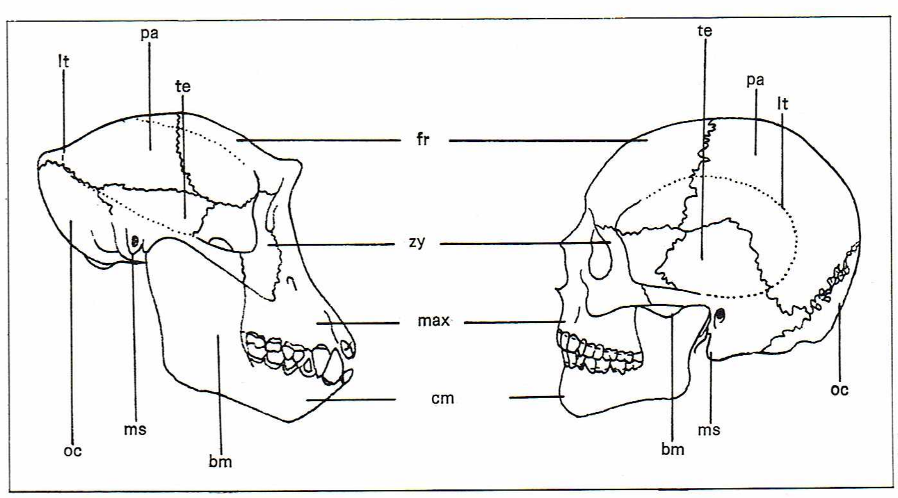

I.G.D.A.

▶ *Crâne humain vu par-dessous, la mandibule ayant été ôtée afin de mettre en évidence la position du trou occipital; chez l'Homme, ce trou est situé très en avant, en liaison avec le redressement de la colonne vertébrale : ces deux caractères sont indispensables à la posture bipède.*

On accorde généralement (Delattre et Fenart) à l'hyper-développement de la voûte crânienne de l'Homme (os de membrane) le rôle prédominant des segments moyens (temporal et pariétal) et postérieurs (occipital). Alors que l'écaille frontale (segment antérieur) conserve des dimensions absolues voisines de celles des grands singes et qu'elle est souvent même encore moins étalée vers l'arrière que chez certains Primates *(Cebus)*, elle se redresse et tend à surplomber verticalement la face en donnant naissance au front; en même temps, elle s'écarte du temporal, favorisant de ce fait l'apparition du ptérion de type sphéno-pariétal, alors que le contact fronto-temporal n'est assuré que dans 2 à 4 % des cas. Le neurocrâne humain se caractérise, en outre, par une écaille temporale étalée en avant et en arrière qui tend à s'élever chez *Homo sapiens*, dont le crâne est le plus globuleux de la série des Hominidae. Enfin, l'écaille occipitale est une acquisition typiquement humaine, en rapport étroit avec la station verticale. Elle résulte, en premier lieu, de la migration de l'os vers le bas consécutivement au redressement corporel, à l'avancée du trou occipital, à la bascule concomitante de l'arrière-crâne et à la flexion basicrânienne. D'autre part, la formation de l'écaille occipitale humaine s'accompagne de son extension au-dessus de la ligne nucale supérieure, par suite de la disparition de la crête occipitale et de la réduction musculaire résultant de l'acquisition de l'équilibre statique de la tête au-dessus de l'axe rachidien.

La manière dont se développe le neurocrâne humain a fait l'objet de très nombreuses recherches. Celles-ci s'accordent toutes à reconnaître un fait général : le rapport volumétrique entre la face et le crâne cérébral conserve chez l'Homme adulte une certaine structure juvénile, normalement présente chez les Pongidae jeunes, mais qui disparaît chez ces derniers au cours de la croissance. On attribue volontiers cette « fœtalisation » du crâne humain à la lenteur extrême de notre développement ontogénique (embryon, fœtus et croissance postnatale), lequel se manifeste également par la soudure tardive des os de la voûte, qui demeure même souvent incomplète, laissant ainsi libre cours au développement cérébral.

L'augmentation du volume des hémisphères cérébraux et de la capacité crânienne, le développement considérable du neurocrâne (en volume absolu et comparativement à celui du massif facial), enfin, la flexion basicrânienne et l'acquisition de la station verticale représentent donc tout un ensemble de conditions anatomo-fonctionnelles indispensables à la réalisation du genre humain.

Si la bipédie et la céphalisation constituent les deux aspects essentiels de l'hominisation, il est difficile de déterminer laquelle de ces deux fonctions a précédé l'apparition de l'autre au cours de la genèse paléontologique des Hominidae. Il n'est pas question d'entrer ici dans un débat qui ne saurait, de toute façon, trouver ni une réponse absolue ni la preuve péremptoire de telle ou telle proposition. Il est admis, à la lumière des données paléontologiques concernant l'évolution humaine, que le redressement corporel, la libération de la main et le dégagement de la tête au-dessus du tronc ont favorisé le développement du cerveau. Il est non moins certain, lorsque l'on considère les diverses phases du développement ontogénique de l'individu au cours de sa vie fœtale et des premiers stades de son développement postnatal, que, réciproquement, le crâne membraneux s'est moulé directement sur son contenu, que le développement cérébral a précédé la station verticale, la marche orthograde, l'apparition des courbures rachidiennes et la formation de la voûte plantaire.

Existe-t-il véritablement une priorité de l'une des deux tendances sur l'autre ? C'est là un des problèmes les plus controversés de l'anthropologie. Voici quelques exemples du bien-fondé de chacune des thèses en présence.

— *La bipédie précède le développement du cerveau.*

La plupart des acquisitions « humaines » de la tête (position du trou occipital sous la boîte crânienne, développement et bascule de l'arrière-crâne, réduction de la face et du système dentaire libérant le crâne cérébral de son étau musculaire) sont directement liées à l'adaptation de la colonne vertébrale, au redressement corporel et à l'attitude verticale : la verticalisation du rachis a entraîné la migration du trou occipital vers l'avant en favorisant la bascule occipitale et la coudure de la base du crâne. De ce fait, le crâne humain va se mettre en place grâce à

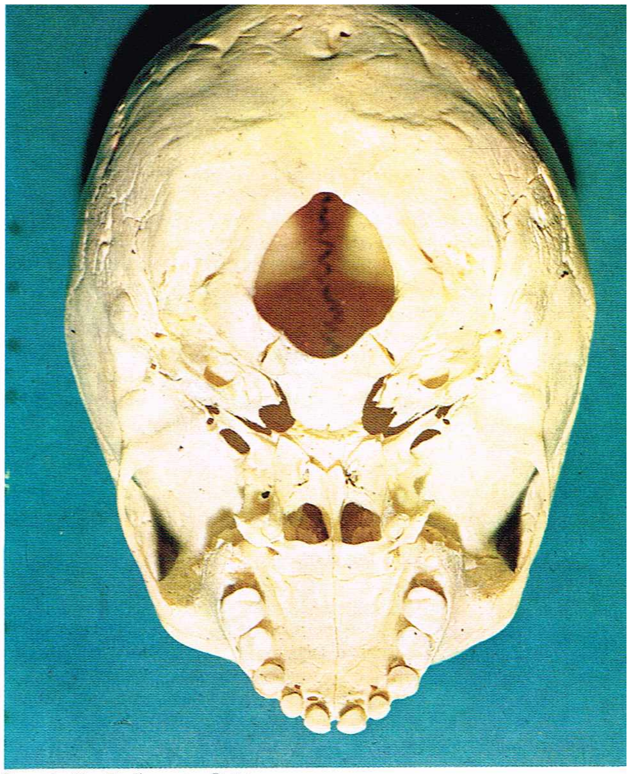

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

l'action libératrice de la colonne vertébrale. Ainsi, la forme du crâne conditionne la forme du cerveau, ce qui est tout à fait évident dans les déformations crâniennes intentionnelles. La paléontologie des Primates, et plus spécialement des formes présumées appartenir à la lignée des Hominidae, montre que la tendance au redressement corporel serait déjà parfaitement reconnaissable chez des formes dont la capacité crânienne était encore très faible, dont la morphologie néopalléale n'avait pas encore atteint un grand degré de perfectionnement et chez lesquelles le rapport volumétrique entre le crâne cérébral et le crâne facial demeurait encore très proche de celui des Primates non humains (Oréopithèques, Australopithèques). Chez les premiers représentants du genre *Homo* (Archanthropiens), le crâne est encore peu volumineux, la face importante, et pourtant rien ne semble les différencier des Hommes modernes en ce qui concerne le redressement corporel et les caractères du squelette postcrânien.

— *La forme du cerveau détermine la forme du crâne. La station verticale est postérieure au développement encéphalique.*

La céphalisation, dont on peut suivre le processus dans les diverses familles de Primates depuis les Prosimiens jusqu'aux singes supérieurs, atteint dans certains cas un stade particulièrement poussé (saïmiris, singes Anthropoïdes), indépendamment de la posture érigée. Ce fait est particulièrement évident chez les formes jeunes. La céphalisation est très marquée chez les Primates au moment de la naissance et avant que se différencient les diverses spécialisations anatomo-fonctionnelles liées à la marche et au redressement du corps. Il en est de même chez le fœtus et le nouveau-né humains, dont le neurocrâne atteint, proportionnellement à l'ensemble du corps et à la face, un volume considérable qui subsistera chez l'adulte humain, alors qu'il s'estompera chez les singes au cours de la croissance sous l'effet du développement de la denture et de la face. On peut donc considérer que le crâne humain conserve, dans ses proportions relatives à celles de la face, un certain état infantile de Primate. Chez l'enfant, le caractère humain du crâne paraît donc exagéré, bien que les principales dispositions relatives à l'érection du corps (courbures rachidiennes, bascule occipitale, voûte plantaire...) ne soient pas encore présentes. Les os du crâne sont à ce stade extrêmement malléables et se mouleront sur l'encéphale. Un arrêt précoce du développement du cerveau avec les conséquences que cela entraîne (idiotie, troubles fonctionnels) s'accompagne de microcéphalie.

Autres caractères des Hominidae

Bien que la musculature des Hominidae offre de nombreux points communs avec celle des Pongidae (ce qui confirme une fois de plus l'origine commune des deux familles), elle présente certains traits spécifiques en rapport avec le redressement corporel total et la spécialisation

des mouvements de la mimique, corollaire de la céphalisation.

La station debout fait intervenir le développement de la masse sacro-lombaire et des muscles du périnée (résistance à la pression verticale des viscères abdominaux), l'hyperdéveloppement du grand fessier, l'apparition du péronier antérieur, l'involution du fessier antérieur, du petit psoas et de l'extenseur du 5e orteil, ainsi que le raccourcissement du grand droit de l'abdomen.

Les muscles de la mimique sont fort bien différenciés (lèvres, régions zygomatique, orbitaire et mentonnière) et permettent la motricité liée à la parole, alors que le peaucier du cou et le muscle épicrânien sont notablement réduits.

L'oreille se caractérise par l'extension et l'enroulement de l'hélix.

Les organes génitaux externes humains conservent plusieurs dispositions « infantiles » présentes chez les fœtus simiens. On peut citer, par exemple, la persistance du frein préputial du pénis chez l'Homme adulte qui n'existe que chez les fœtus de singes et les animaux castrés. Les grandes lèvres de la femme adulte sont les vestiges du repli génital externe des fœtus des singes, absent chez les femelles adultes. L'hymen représente le reste des formations épithélio-conjonctives fermant le vagin embryonnaire. Cette membrane a normalement disparu chez les Mammifères au cours du développement, alors qu'elle subsiste chez la jeune fille. Elle est détruite lors du coït. Le redressement corporel a fait disparaître l'os pénien et tend à placer la vulve en position antérieure comparativement à celle des Anthropoïdes. Ainsi, la copulation peut se pratiquer chez l'Homme en position *ab anteriori*, alors que seule la position *ab posteriori* est possible chez les Primates, exception faite pour le gibbon, qui est le plus bipède des Anthropoïdes.

Bien que la pilosité fœtale humaine (lanugo ou duvet fœtal) soit encore très dense, le système pileux humain subit une nette régression par rapport à celui des Anthropoïdes, dont il se distingue par quelques particularités :

— la pilosité corporelle est réduite aux régions axillaire, pubienne, péri-anale et surtout céphalique, la densité des cheveux étant supérieure à celle des grands singes ;

— elle est contrôlée par la nature hormonale, la présence d'hormone mâle favorisant le développement pileux du corps, des membres et de la face (barbe, moustache) ;

— enfin, les poils tactiles (vibrisses) ont entièrement disparu.

Le caryotype

Les caractères qui définissent les genres et les espèces (caractères héréditaires) sont transmis de génération en génération selon des lois bien précises, indépendamment des conditions d'environnement capables de faire apparaître des particularités directement liées au milieu (caractères acquis), ces dernières ne marquant la descendance que si celle-ci est soumise aux mêmes conditions écologiques que la génération parentale.

Les caractères héréditaires sont des caractères spécifiques qui assurent la fixité de l'espèce au cours de son évolution biologique : tous les êtres vivants et, en particulier, les animaux appartenant au même genre et à la même espèce offrent un certain nombre de caractères communs, présents chez les parents et chez leurs descendants, qui permettent de les distinguer des autres genres et des autres espèces du groupe.

Les caractères qui définissent l'individu d'une espèce donnée (phénotype) sont inscrits au sein du noyau cellulaire lui-même (génotype) et sont portés par des particules (gènes) fixées sur les chromosomes.

Chacune des cellules constituant les divers tissus du corps d'un individu possède normalement *2 n* chromosomes (cellule diploïde), sauf les cellules sexuelles (gamètes), qui ont subi la réduction chromatique (méiose) et comportent *n* chromosomes (cellules haploïdes). La diploïdie sera rétablie lors de la fusion des gamètes (fécondation), de telle sorte que l'œuf ainsi formé sera porteur du même nombre de chromosomes que ses parents. Chaque espèce et chaque genre issus d'une même lignée sont porteurs d'un même nombre de chromosomes (caryotype) comprenant *n* chromosomes somatiques (autosomes) plus 2 chromosomes sexuels. Dans chaque cellule diploïde, les autosomes se distinguent les uns des autres par leur taille et par la position du centromère (granule chromatique réunissant les deux chromatides, c'est-à-dire les deux composants maternel et paternel du chromosome), lequel peut se trouver à une extrémité du chromosome (chromosomes acrocentriques) ou vers son milieu (chromosomes métacentriques).

L'Homme se distingue des Anthropoïdes par un caryotype différent concernant le nombre total de chromosomes, la répartition de leur taille et les nombres respectifs d'auto-

▼ *Des caryotypes différents distinguent l'Homme des Anthropoïdes : à gauche, caryotype de l'Homme (46 chromosomes au total) ; à droite, caryotype de* **Gorilla gorilla**, *le gorille (48 chromosomes).*

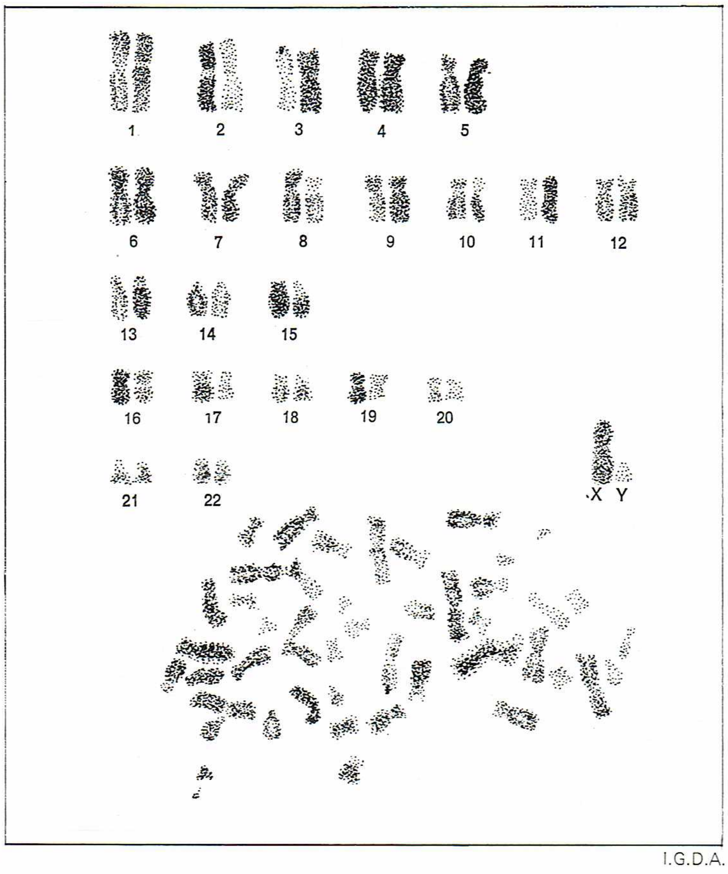

I.G.D.A.

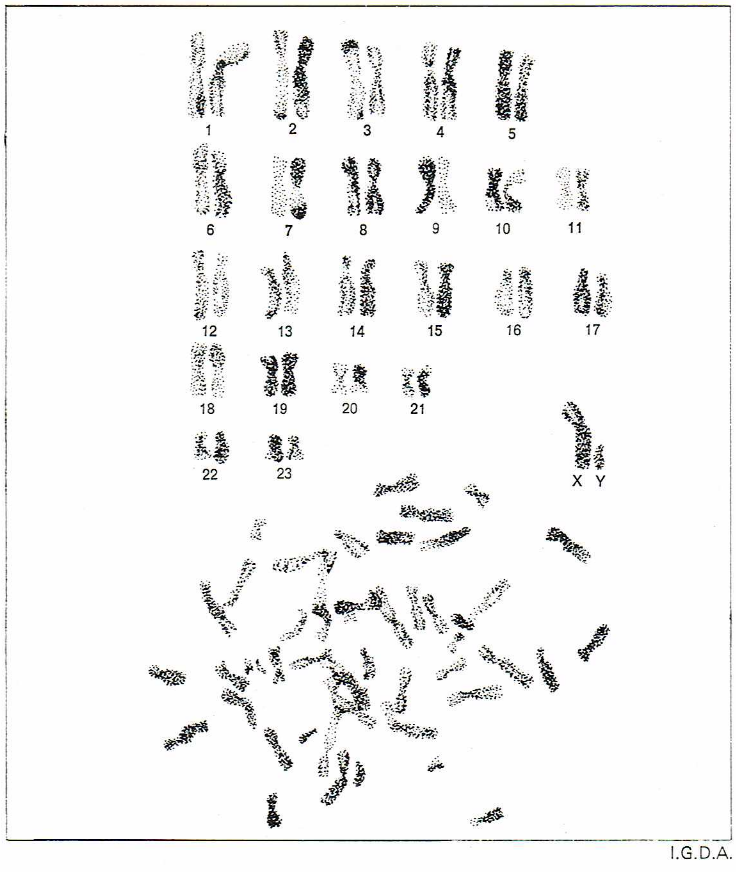

I.G.D.A.

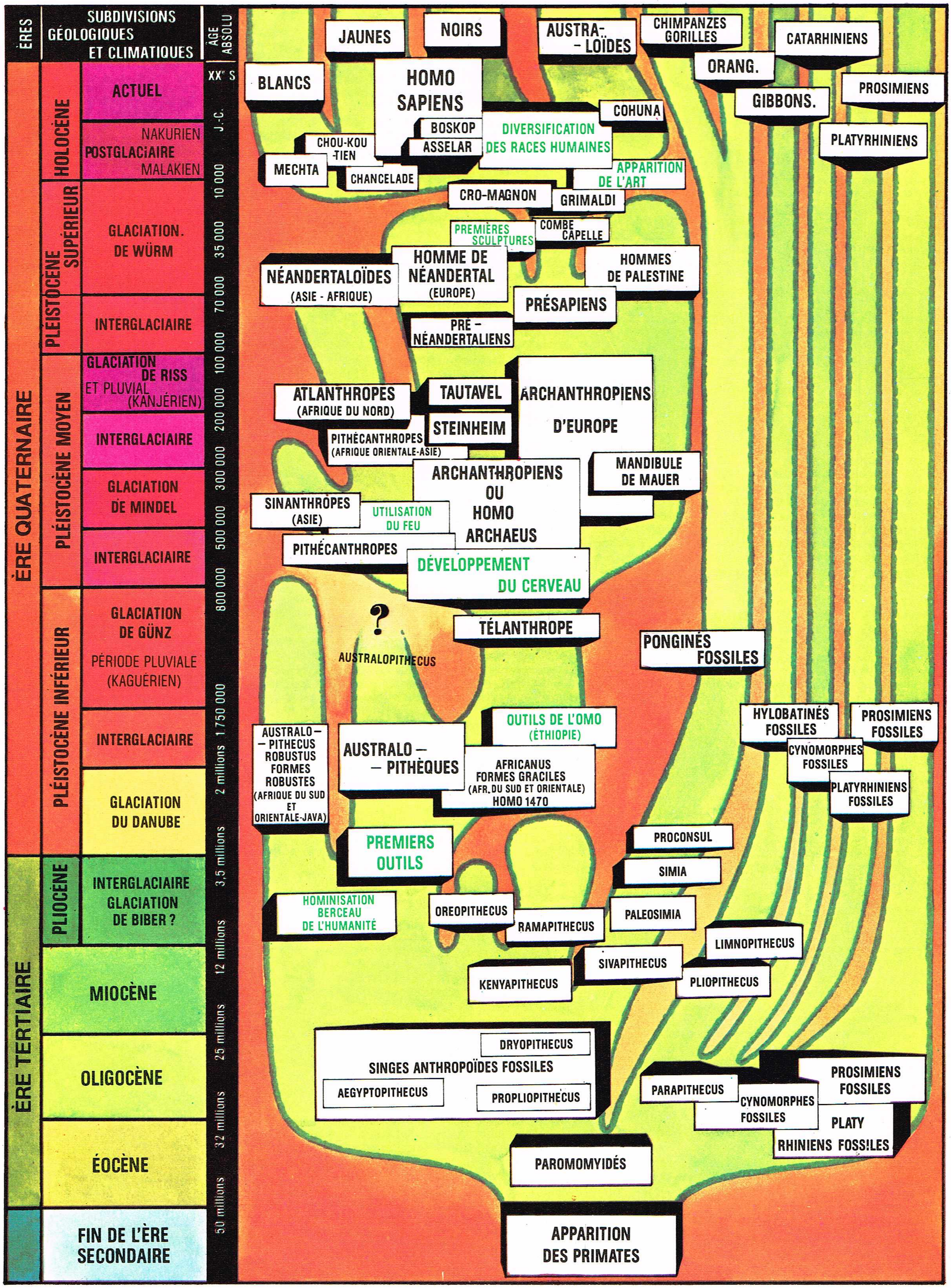

ÈRES
SUBDIVISIONS GÉOLOGIQUES ET CLIMATIQUES
ÂGE ABSOLU
ÈRE QUATERNAIRE
HOLOCÈNE
ACTUEL
NAKURIEN
POSTGLACIAIRE
MALAKIEN
PLÉISTOCÈNE SUPÉRIEUR
GLACIATION. DE WÜRM
INTERGLACIAIRE
PLÉISTOCÈNE MOYEN
GLACIATION DE RISS ET PLUVIAL (KANJÉRIEN)
INTERGLACIAIRE
GLACIATION DE MINDEL
INTERGLACIAIRE
PLÉISTOCÈNE INFÉRIEUR
GLACIATION DE GÜNZ
PÉRIODE PLUVIALE (KAGUÉRIEN)
INTERGLACIAIRE
GLACIATION DU DANUBE
ÈRE TERTIAIRE
PLIOCÈNE
INTERGLACIAIRE GLACIATION DE BIBER ?
MIOCÈNE
OLIGOCÈNE
ÉOCÈNE
FIN DE L'ÈRE SECONDAIRE
XX^e S J.-C.
10 000
35 000
70 000
100 000
200 000
300 000
500 000
800 000
1 750 000
2 millions
3,5 millions
12 millions
25 millions
32 millions
50 millions
JAUNES
NOIRS
AUSTRA-LOÏDES
CHIMPANZES GORILLES
CATARHINIENS
ORANG.
PROSIMIENS
GIBBONS.
PLATYRHINIENS
BLANCS
HOMO SAPIENS
COHUNA
BOSKOP
ASSELAR
DIVERSIFICATION DES RACES HUMAINES
CHOU-KOU -TIEN
MECHTA
CHANCELADE
APPARITION DE L'ART
CRO-MAGNON
GRIMALDI
PREMIÈRES SCULPTURES
COMBE CAPELLE
NÉANDERTALOÏDES (ASIE - AFRIQUE)
HOMME DE NÉANDERTAL (EUROPE)
HOMMES DE PALESTINE
PRÉSAPIENS
PRÉ-NÉANDERTALIENS
ATLANTHROPES (AFRIQUE DU NORD)
TAUTAVEL
ARCHANTHROPIENS D'EUROPE
STEINHEIM
PITHÉCANTHROPES (AFRIQUE ORIENTALE-ASIE)
MANDIBULE DE MAUER
ARCHANTHROPIENS OU HOMO ARCHAEUS
SINANTHROPES (ASIE)
UTILISATION DU FEU
PITHÉCANTHROPES
DÉVELOPPEMENT DU CERVEAU
?
AUSTRALOPITHECUS
TÉLANTHROPE
PONGINÉS FOSSILES
OUTILS DE L'OMO (ÉTHIOPIE)
HYLOBATINÉS FOSSILES
PROSIMIENS FOSSILES
CYNOMORPHES FOSSILES
PLATYRHINIENS FOSSILES
AUSTRALO-PITHECUS ROBUSTUS FORMES ROBUSTES (AFRIQUE DU SUD ET ORIENTALE-JAVA)
AUSTRALO-PITHÈQUES
AFRICANUS FORMES GRACILES (AFR. DU SUD ET ORIENTALE) HOMO 1470
PREMIERS OUTILS
PROCONSUL
SIMIA
HOMINISATION BERCEAU DE L'HUMANITÉ
OREOPITHECUS
RAMAPITHECUS
PALEOSIMIA
LIMNOPITHECUS
SIVAPITHECUS
KENYAPITHECUS
PLIOPITHECUS
DRYOPITHECUS
SINGES ANTHROPOÏDES FOSSILES
AEGYPTOPITHECUS
PROPLIOPITHECUS
PARAPITHECUS
PROSIMIENS FOSSILES
CYNOMORPHES FOSSILES
PLATY RHINIENS FOSSILES
PAROMOMYIDÉS
APPARITION DES PRIMATES

somes acrocentriques et métacentriques (voir tableau ci-dessous). Les cellules diploïdes de l'Homme contiennent 46 chromosomes (44 autosomes + 2 chromosomes sexuels), alors que ce nombre est de 48 (46 + 2) chez les Ponginae (chimpanzé, gorille et orang) et de 44 (42 + 2) chez les Hylobatinae (gibbon).

		autosomes			
	caryotype	métacentriques		acrocentriques	
		grands	petits	grands	petits
Homo	46	24	10	6	4
Pan	48	24	10	8	4
Gorilla	48	24	6	12	4
Pongo	48	22	6	16	2
Hylobates	44	24	18		

Ce tableau confirme l'existence des plus grandes affinités entre les Pongidae africains et l'Homme, alors que le gibbon s'en écarte nettement pour se rapprocher davantage des autres Catarhiniens.

L'étude du caryotype des différentes formes actuelles de Primates apporte donc une indication de toute première importance sur leurs radiations évolutives. Ainsi que nous avons pu le constater pour l'ensemble des caractères anatomiques, physiologiques et sérologiques, c'est encore le chimpanzé qui semble être le Ponginae le plus proche de l'Homme. Le gorille et surtout l'orang ont subi une différenciation plus marquée et probablement plus précoce qui les a spécialisés plus tôt, ce qui peut expliquer dans une certaine mesure leur plus lointaine divergence.

L'évolution humaine

La genèse paléontologique de l'Homme obéit aux lois générales de l'évolution et se déroule dans un sens défini, comme si le phénomène s'était irrémédiablement orienté dès son début dans une voie parfaitement déterminée, conduisant ainsi le phylum vers l'espèce actuelle, *Homo sapiens*.

Les phénomènes évolutifs peuvent s'effectuer par l'acquisition ou le perfectionnement de certains organes destinés à satisfaire une fonction indispensable à la survie de l'espèce (phénomènes *progressifs*) ou, au contraire, par la disparition ou la simplification d'autres organes en raison de leur inutilité ou de leur rôle inadéquat (phénomènes *régressifs*). Ce type d'évolution caractérise l'ensemble du règne animal et porte le nom d'*orthogenèse*.

L'évolution orthogénétique des phylums conduit à la spécialisation progressive plus ou moins poussée d'organes dont la fonction adaptative ou sélective peut revêtir une valeur très inégale, et parfois même semble ne répondre à aucune fonction bien définie (Deperet). C'est, par exemple, le cas de la réduction du 5e orteil chez les Hominidae, du développement excessif des sinus frontaux et maxillaires chez les Hommes de Néandertal ou de la disparition de la membrane hyménale chez les Anthropoïdes.

L'orthogenèse régressive est irréversible, c'est-à-dire qu'un organe ayant disparu au cours de l'évolution d'un groupe ne peut réapparaître chez une forme plus récente issue du groupe primitif (Dollo).

Les formes les moins spécialisées d'un phylum sont les seules sur lesquelles puisse porter l'évolution. En raison de leur simplicité relative, qui leur confère une certaine « plasticité », elles font plus facilement l'objet de mutations phylogénétiques importantes que les formes dérivées, dont la spécialisation a fixé le potentiel évolutif d'un plus grand nombre de caractères. Cette loi, définie par Cope, porte le nom de *loi de non-spécialisation des espèces-souches de lignées*. Dans le cas des Hominidae, l'exemple le plus significatif est fourni par les Paléanthropiens qui précédèrent, avant la glaciation würmienne, l'apparition des Hommes de Néandertal et d'*Homo sapiens*. L'un et l'autre offrent à la fois des traits spécifiques et des traits communs qui témoignent en faveur d'une origine commune. Ces derniers traits ainsi que les caractères propres à chacun des deux groupes « spécialisés » sont présents chez les Paléanthropiens antewürmiens, qui sont par conséquent plus « généralisés » par rapport aux deux formes auxquelles ils ont donné naissance.

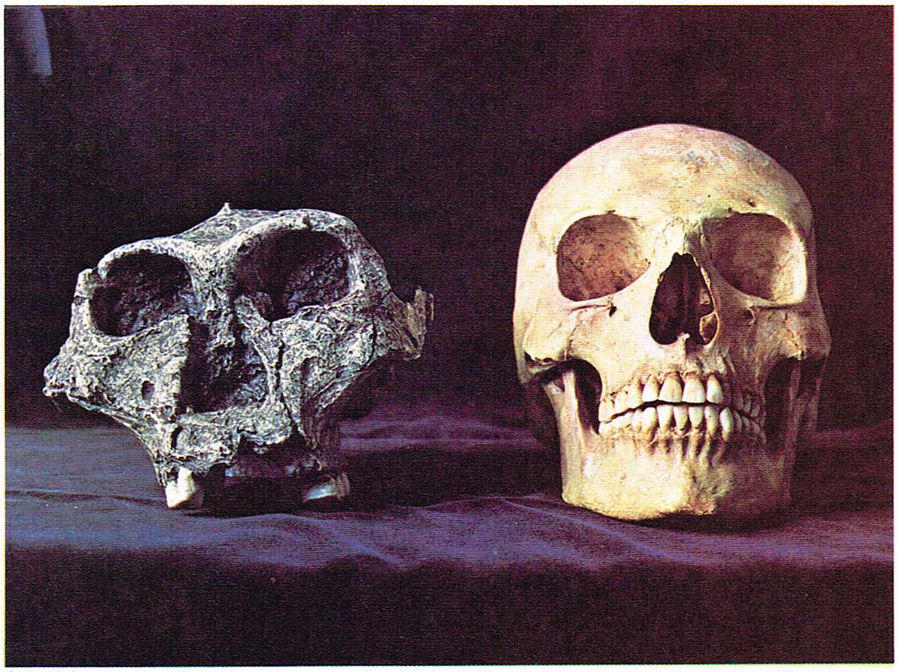

J.-L. Heim

▲ *A gauche, un crâne d'Australopithèque robuste* (**Zinjanthropus boisei**, *découvert à Oldoway) ; à droite, un crâne d'Homme moderne.*

La loi de Deperet, selon laquelle l'évolution des rameaux phylétiques s'accompagne d'une augmentation de la taille des individus ou de l'augmentation du volume de certains organes, peut s'appliquer en partie à la lignée humaine. Si la stature n'a guère vraiment évolué depuis le Pithécanthrope jusqu'à l'Homme moderne (à l'exception toutefois des phénomènes de micro-évolution, suivant lesquels la stature est soumise à des fluctuations plus ou moins sensibles en relation avec divers facteurs), l'évolution du groupe des Primates se caractérise en revanche par l'augmentation de la taille depuis les formes du début du Tertiaire jusqu'aux Anthropoïdes actuels (gorille). Chez l'Homme, l'augmentation de la capacité crânienne et du volume de la tête a atteint sa valeur la plus élevée chez les Néandertaliens il y a 40 000 ans.

Tout comme l'individu, la vie d'une lignée passe d'abord par un *stade de jeunesse :* durant cette phase, les espèces, généralement de petite taille, offrent un grand nombre de traits généralisés susceptibles de se spécialiser dans les voies les plus diverses grâce à un potentiel évolutif considérable.

La *phase de maturité* du phylum correspond à son épanouissement : les espèces ou formes, encore peu spécialisées, sont le théâtre d'innombrables mutations et la source de radiations évolutives encore assez étendues.

Chaque lignée issue d'un tronc primitif s'engage ensuite dans sa *phase de sénescence* par une accélération des processus de spécialisation, qui conduira à plus ou moins brève échéance au déclin puis à l'extinction du groupe. Ainsi, l'Homme de Néandertal a probablement disparu à cause de son hyperspécialisation. Cependant, au facteur temporel, qui assure à l'évolution d'un rameau une condition nécessaire à l'acquisition des phénomènes progressifs ou régressifs par lesquels les transformations s'effectuent, s'ajoute un facteur géographique auquel Cuvier avait accordé une importance primordiale. En particulier, en ce qui concerne l'espèce humaine, qui ne se distingue pas sur ce plan des autres formes vivantes, l'isolement géographique favorise une certaine fixité du groupe en exerçant un effet ralentisseur sur les mécanismes évolutifs. C'est ainsi qu'entre les plus anciens Pithécanthropes de Java et les Hommes de Solo provenant du même gisement mais qui demeurent séparés des premiers par un intervalle de temps compris entre 1 million et 200 000 ans au moins, on retrouve une morphologie presque semblable excepté une capacité crânienne légèrement plus élevée chez les seconds, caractère qui témoigne toutefois de la poursuite du phénomène évolutif. L'Homme de Rhodésie, que l'on fait aujourd'hui remonter à 100 000 ans, illustre parfaitement la survivance du vieux stade pithécanthropien en Afrique méridionale sous l'effet de l'isolement ; il conserve

◀ *Page ci-contre, tableau de l'évolution humaine (d'après J.-L. Heim).*

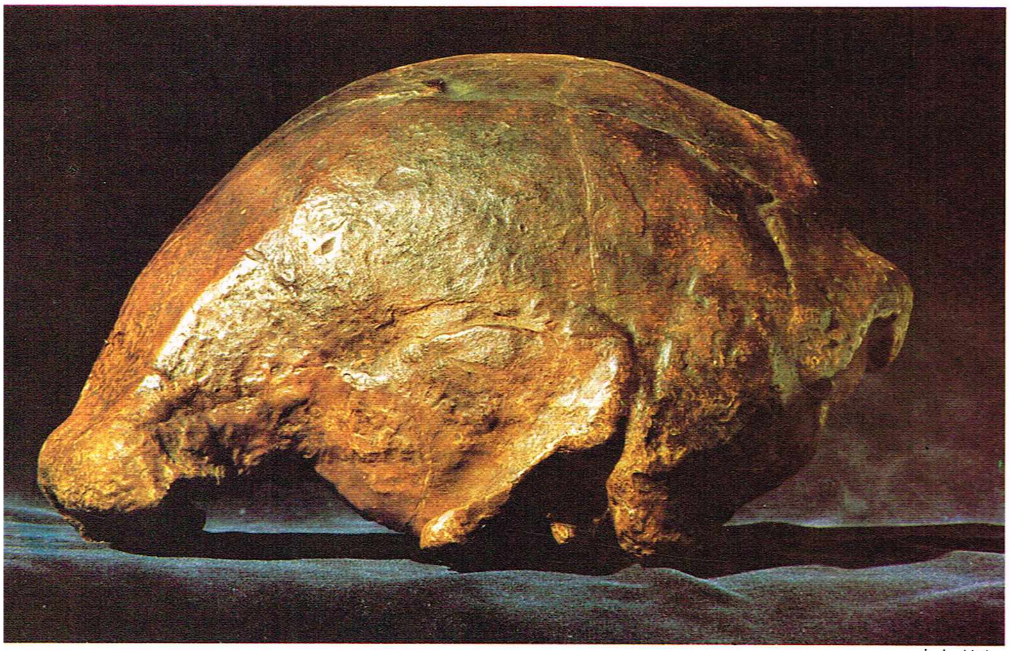

J.-L. Heim

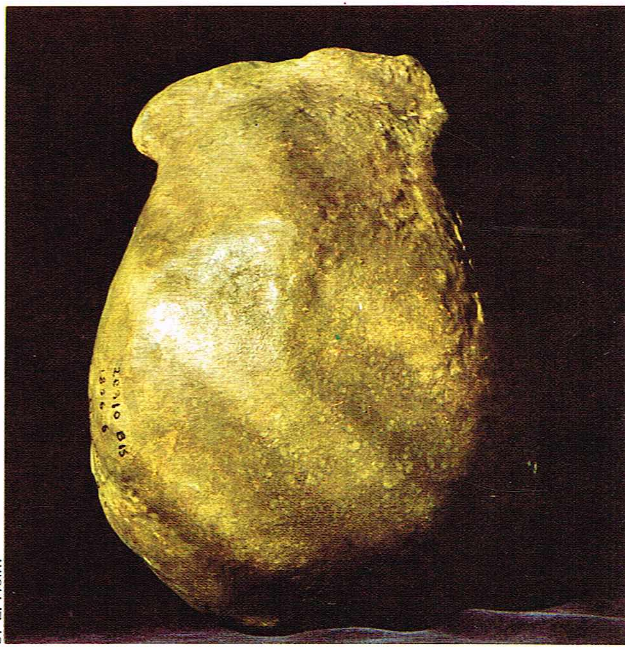

J.-L. Heim

▲ *A gauche, crâne de l'un des Hommes de Solo (Java), en vue latérale ; à droite, crâne du Pithécanthrope de Java, en vue supérieure.*

et exagère même des caractères archaïques du crâne qui contrastent singulièrement avec la morphologie de ses contemporains d'Europe. Les caractères particuliers des Hommes de Cro-Magnon, qui peuplèrent l'Europe occidentale il y a 35 000 à 40 000 ans, se sont en partie conservés sur les squelettes des Guanches, qui habitaient encore les îles Canaries au moment de l'arrivée des Espagnols. Cette survivance est d'autant plus étonnante que les Hommes de Cro-Magnon étaient généralement considérés comme les plus anciens représentants de l'*Homo sapiens*. De telles reliques se rencontrent parfois chez les Hommes modernes. On a déjà fait mention de la persistance de l'hymen chez la femme adulte et de l'existence exceptionnelle d'un appendice caudal. On pourrait citer de nombreux exemples d'atavisme, tels que le tubercule de Darwin du pavillon de l'oreille, qui évoque, dans les cas où on le rencontre chez l'Homme, la disposition simienne, ainsi qu'un certain nombre de particularités et même d'anomalies dont la fréquence au sein d'une population est le reflet d'une forte endogamie consécutive à l'isolement.

A l'inverse, les migrations des espèces au-delà de leurs aires d'apparition semblent leur donner une sève nouvelle et favoriser l'accélération de leurs rythmes d'évolution. Il se crée de la sorte une multitude de petites mutations, donnant naissance à un véritable éclatement de variétés subspécifiques, source de nouvelles combinaisons de gènes. Ainsi se constituent plusieurs rameaux latéraux qui vont acquérir rapidement leur patrimoine génétique propre. C'est par un processus semblable qu'ont dû s'individualiser les races humaines fossiles et actuelles issues d'un stock *sapiens* primitif qui était alors trop peu spécialisé pour avoir atteint son plein épanouissement. Si l'isolement (géographique ou autre) intéresse à son tour l'un des rameaux ainsi formés, celui-ci va rapidement faire apparaître des caractères de spécialisation très poussée qui provoqueront son extinction. Tel fut le cas à la fin du siècle dernier des Tasmaniens et, plus près de nous, des Fuégiens. Les aborigènes d'Australie, les Khoisans du Kalahari (Boschimans et Hottentots), les Aïnous du Japon et les divers groupes paléo-sibériens, véritables reliques de races subfossiles, sont pour leur part désormais engagés dans la voie d'une disparition qui semble inéluctable.

▼ *Portrait de Buffon (1707-1788) : les idées de ce dernier préfiguraient déjà un premier courant transformiste dont Lamarck devint le théoricien.*

F. Arborio Mella

Les théories de l'évolution humaine

L'historique des théories relatives à la genèse paléontologique de l'Homme montre une opposition constante entre un *courant traditionnaliste,* caractérisé par la fidélité aux conceptions anciennes sur la fixité de l'espèce humaine, et un *courant transformiste* reconnaissant une évolution du phylum des Hominidae à partir d'autres formes du règne animal. Une telle opposition exprime en réalité des tendances générales représentatives d'une époque donnée.

Depuis la plus haute antiquité, le concept de l'ancienneté de l'Homme demeurait toujours présent dans l'esprit des premiers savants et des philosophes avant de devenir l'objet de recherches scientifiques.

Le *monogénisme,* émanant directement des conceptions bibliques, faisait descendre toute l'humanité d'un seul ancêtre ; néanmoins, ce mythe devait parfois trouver quelque support matériel dans des restes fossilisés que l'on qualifiait alors d' « antédiluviens ». Le monogénisme devait trouver ses premières oppositions dans les idées de la Renaissance (Isaac de La Peyère, 1555). Les vives polémiques suivies du scandale déclenché par les « pré-Adamites » ne firent qu'annoncer le *polygénisme,* qui connut son apogée dans le courant *polyphylétique*.

Le XVIII^{e} siècle apportait les premières bases scientifiques du *transformisme*. La classification du règne animal proposée par Linné (1707-1778) était couronnée par l'espèce humaine, elle-même subdivisée en plusieurs variétés qui témoignaient de ses nombreuses possibilités de variations micro-évolutives. Buffon, Leibniz, Maupertuis préfiguraient un premier courant transformiste, dont Lamarck (1744-1829) devint bientôt le théoricien. L'Homme, redevenu un animal pour les biologistes les plus avancés, allait à son tour entrer dans l'engrenage de l'évolution. Les transformations successives du règne animal sous-entendaient par conséquent celles de l'Homme lui-même et semblaient liées irrémédiablement à l'environnement et aux habitudes. L'adaptation héréditaire au milieu devenait la cause essentielle des variations intraspécifiques, sources des principales différences existant entre les types humains.

Toutefois, l'idée d'une influence possible de la sélection favorisant les individus les plus féconds et les mieux adaptés au milieu, et donc les plus susceptibles d'assurer le devenir de l'espèce aux dépens des moins aptes, allait susciter l'intérêt d'A. Wallace et surtout de Ch. Darwin, dont les écrits trouvèrent un écho favorable dans les découvertes d'Hommes fossiles, ou présumés tels, de la seconde moitié du XIX^{e} siècle. Celles-ci illustraient parfaitement la parenté simienne de l'humanité qui découlait des thèses du naturaliste anglais. Cette parenté reculait même jusqu'à l'ère tertiaire avec E. Lartet (1845) et Desnoyers (1863).

Au début du XX^{e} siècle, une nouvelle crise transformiste devait peu à peu s'imposer avec la reconnaissance des lois de la génétique. Alors que Galton, Bateson et Morgan faisaient réapparaître les travaux de G. Mendel, le *mutationnisme* s'imposait avec de Vries (1901) comme fournissant l'explication de l'une des principales modalités de l'évolution.

Cependant, les premiers balbutiements de la génétique issue des thèses mendéliennes s'opposèrent bien souvent

au transformisme; en effet, elles supposent avant tout l'invariabilité des caractères, qui conservent leur stabilité au cours des générations successives. Que les caractères passent inaperçus du fait de leur récessivité ou qu'ils soient identifiables du fait de leur dominance, ils resurgissent toujours identiques à eux-mêmes.

Le mutationnisme devait toutefois apporter une dimension nouvelle à l'hérédité; il mettait en évidence le jeu incessant des mutations ayant pour effet de transformer progressivement chaque espèce en une autre. Une telle conception dynamique de l'évolution devait contribuer à la renaissance du transformisme : elle s'accordait avec l'idée d'une pluralité originelle de l'humanité et supplantait le monophylétisme monogénique de Haeckel (1834-1919).

Le *polyphylétisme* en tant que doctrine scientifique s'épanouit entre 1910 et 1930. Il fait appel à la notion fondamentale de la pluralité phylogénique de l'espèce humaine : il suppose que chaque groupe racial, actuel ou fossile, dérive d'une souche propre dont l'évolution a donné naissance à un ou à plusieurs types d'Hominidae ainsi qu'à une forme définie de grand singe dont l'origine géographique est commune avec celle des groupes humains considérés. En conséquence, cette manière de considérer le schéma de l'origine humaine élimine toute possibilité de migrations de l'humanité fossile : chaque espèce, voire chaque race, est apparue à l'endroit même où elle existe actuellement ou, tout du moins, là où se situe son origine géographique présumée. Cela s'accorde avec une provenance ubiquiste de l'Homme. C'est essentiellement le rythme d'évolution, variant d'un groupe à l'autre, qui constitue la cause de scission de l'espèce mère en deux (ou plusieurs) sous-espèces, l'une parvenue rapidement et précocement à maturité, l'autre (ou les autres) ayant connu une élaboration plus lente permettant l'accès à un stade évolutif plus poussé. La théorie du polyphylétisme s'est exprimée à travers un certain nombre de conceptions, parmi lesquelles celles de Klaatsch (début du XXe siècle), d'Arldt (1915), de Rosa (1918) et de Montandon (1928) eurent un succès particulièrement retentissant.

Vers 1945, le polyphylétisme perdit la plupart de ses adeptes en raison des critiques justifiées de H.-V. Vallois et sous l'impulsion de la théorie synthétique, conception matérialiste fondée sur la génétique des populations et attribuant au taux et à la pression de mutations les causes les plus évidentes de l'évolution, aussi bien des Hommes fossiles que des races humaines actuelles. C'est ainsi que l'unité de l'espèce humaine devait supplanter sa pluralité.

Avec le *monophylétisme,* le choix des hommes de science s'orientait en faveur de la thèse de la différenciation à partir d'un seul phylum. Comme l'écrit J. Piveteau : « L'hominisation ne s'est faite qu'en un seul point du rameau des Hominidés... Elle constitue un événement unique dans l'histoire de la vie, et la diversité humaine ne s'est manifestée qu'après son achèvement. »

Cependant l'hypothèse d'un berceau unique de la lignée humaine *(monophylétisme monogénique)* accordait un rôle excessif au hasard, alors que l'examen et l'interprétation des documents paléontologiques faisaient plutôt ressortir l'action prédominante de mutations simultanées portant sur plusieurs espèces primitives et non sur une seule. En vérité, un phylum ne peut être défini qu'à travers un nombre suffisamment représentatif de spécimens; comme l'écrivait Teilhard de Chardin, « le premier Homme est et ne peut être qu'une foule ». C'est dans la voie du *monophylétisme polygénique,* dont le principe introduit la pluralité au sein de l'unité, que s'oriente actuellement le fil conducteur des recherches en paléontologie humaine.

Le polygénisme s'appuie sur l'hypothèse de la division relativement précoce du phylum des Hominidae à partir d'un groupe ancestral de Primates. Il comprend trois thèses, dont la dernière (celle de l'Anthropoïde bipède) semble le mieux correspondre aux données actuelles de la paléontologie humaine :

Théorie de l'Anthropoïde arboricole

Aujourd'hui totalement abandonnée par les spécialistes, cette théorie ne subsiste plus que sous forme de la croyance erronée selon laquelle « l'Homme descend du singe ». Elle correspond à une interprétation abusive des thèses darwiniennes et ne trouve de justification ni dans les données de l'anatomie comparée ni dans celles de la paléontologie humaine. S'il est désormais reconnu que l'Homme et les grands singes dérivent d'une origine commune, il est parfaitement inconcevable de considérer que le premier provient de la transformation des seconds !

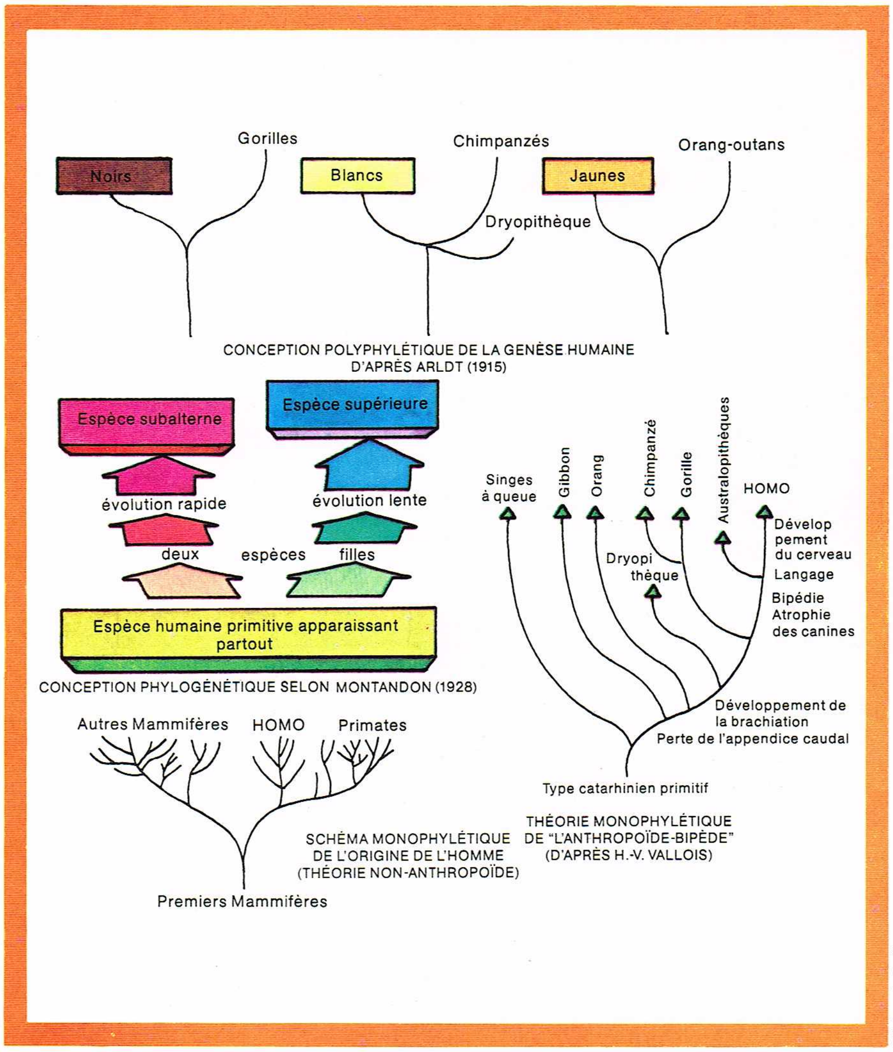

Richard Colin

▲ ***Schémas de la phylogenèse humaine selon diverses théories.***

Théorie « non anthropoïde » de l'origine humaine

Selon cette conception, qui s'appuie sur quelques arguments plausibles, le rameau humain dériverait d'un Primate très peu spécialisé (un petit Catarhinien pour Strauss, un Platyrhinien pour Ameghino, un Tarsien pour Wood-Jones), voire même de l'un des tout premiers Mammifères vivant avant même la différenciation des Primates.

Théorie de l'Anthropoïde bipède

La grande majorité des anthropologistes s'accorde à reconnaître que les premiers représentants des Hominidae dérivent d'un Anthropoïde fossile généralisé ayant vécu sur le sol de l'Ancien Monde et ayant déjà acquis la bipédie ainsi qu'un certain degré de céphalisation par suite d'un processus orthogénétique et de mutations successives (H.-V. Vallois). Cette conception s'accorde parfaitement avec les données de la paléontologie et sert de référence aux recherches et aux interprétations actuellement en faveur chez les anthropologistes.

Les précurseurs des Hominidae

On ne connaît pour l'instant, parmi les Primates fossiles de l'Éocène au Pliocène, aucun genre qui puisse s'inscrire d'une façon certaine sur la lignée évolutive humaine. La grande majorité des restes actuellement mis au jour se situe sur des phylums conduisant aux diverses formes qui précédèrent la différenciation des Primates actuels, ou qui se sont acheminées vers des rameaux disparus. Toutes ces formes fossiles portent plus ou moins les marques d'une spécialisation témoignant de leur orientation dans une ou plusieurs voies différentes de celles des Hominidae, alors que les ancêtres supposés de ces derniers devraient à la fois porter des traits « généralisés » et

J.-L. Heim

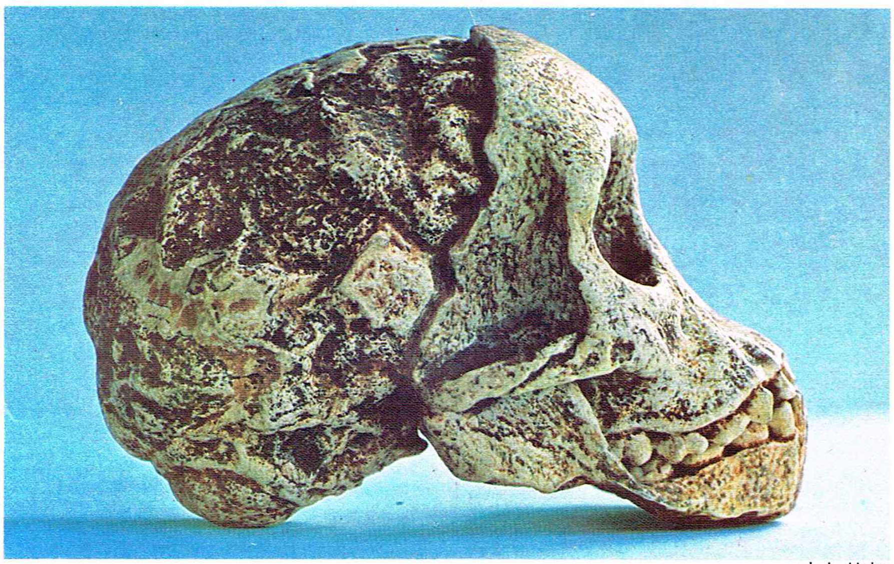

J.-L. Heim

▲ *En haut, crâne du Proconsul africanus, du Miocène inférieur d'Afrique orientale, précurseur des singes Anthropoïdes actuels. En bas, l'enfant de Taung, premier Australopithèque découvert en 1924 en Afrique du Sud.*

▶ *Page ci-contre, en haut à gauche, tableau des Australopithèques et de leurs gisements.*

annoncer quelques signes évidents d'une tendance au redressement corporel, à la réduction dentaire et au développement du neurocrâne.

Les précurseurs des singes Anthropoïdes apparaissent dans l'Oligocène ; à partir de là, on assiste à leur évolution *cladogénétique* (évolution par buissonnement issue d'un tronc commun) débouchant sur des formes éteintes, probablement sans descendance *(Parapithecus)*, ou s'orientant dans des phylums distincts dont certains sont parvenus jusqu'à l'époque actuelle. Les premiers Pongidae ont été reconnus dans l'Oligocène du Fayoum (Égypte). Si quelques genres, comme *Propliopithecus,* ne peuvent être rapprochés d'aucun genre actuellement défini, d'autres, en revanche, s'inscrivent par la spécialisation de certains caractères particuliers (denture, tendance marquée à la brachiation, caractères du squelette) dans la lignée des Hylobatinae *(Aeolopithecus)*, que l'on peut suivre dès le Miocène moyen *(Pliopithecus, Limnopithecus)*.

Les ancêtres des Ponginae sont également connus dès l'Oligocène supérieur du Fayoum par le genre *Aegyptopithecus,* dont le développement des canines, l'hétéromorphie des prémolaires, l'augmentation du volume des molaires de la première à la troisième, l'ébauche d'une plaque simienne, la forme upsiloïde de l'arcade dentaire et les proportions des membres corroborant l'adaptation à l'arboricolisme, sont autant de traits annonciateurs de la famille fossile des Dryopithecinae. Cette dernière comporte un certain nombre de formes diversifiées au cours du Miocène en Europe *(Dryopithecus, Hispanopithecus, Paidopitex)*, au sud de l'Himalaya *(Ramapithecus)* et en Afrique orientale *(Proconsul, Kenyapithecus)*. Les Dryopithecinae offrent à la fois des caractères archaïques hérités d'une souche commune et des traits déjà spécialisés dans la voie des Ponginae. De ce fait, ils ne semblent guère pouvoir se situer dans l'ascendance humaine. Toutefois, certains de ces genres présentent dans leur structure archaïque des dispositions qui se maintiendront dans l'espèce humaine. Nous pouvons citer, par exemple, la présence chez le genre *Kenyapithecus* de la fosse canine, la situation basse de l'arcade zygomatique, l'absence de diastèmes (intervalles entre les dents pour loger les dents correspondantes du maxillaire opposé), l'absence de plaque simienne, l'implantation verticale des incisives ainsi que des canines inférieures et la divergence des dents jugales.

Tous ces Primates fossiles sont par conséquent déjà trop spécialisés pour s'être engagés dans la lignée des Hominidae, bien que la découverte du genre *Oreopithecus* ait pu laisser croire, après l'étude de Hurzeler (1947), à l'existence de l'un de ses lointains représentants au Miocène (— 12 millions d'années). En 1872, P. Gervais découvrait dans les lignites de Toscane près de Grossetto les restes d'un Primate de taille notable (1,10-1,20 m), dont les caractères généraux offraient une coexistence de tendances évolutives opposées. Plusieurs individus furent mis au jour, dont un squelette presque complet (1958). L'Oréopithèque présente une tendance certaine à la bipédie (tronc court, os iliaque élargi par une épine iliaque antéro-inférieure bien développée et une symphyse pubienne courte, cinq vertèbres lombaires, morphologie des os longs, ordre de grandeur relatif des dents, caractères de l'usure dentaire et de l'implantation des dents, etc.). Cependant, les proportions corporelles (membre supérieur plus long que le membre inférieur) témoignent en faveur de la brachiation, qui devait se surajouter aux tendances bipèdes de ce Primate. *Oreopithecus* n'est donc pas un de nos lointains ancêtres, mais plutôt le représentant d'un rameau latéral et éteint des Hominidae ayant très tôt dévié du tronc humain et acquis des spécialisations, qui justifient la création de la famille des Oreopithecidae. Cette famille montre que le redressement corporel, l'élargissement du bassin et la structure corporelle nécessaire à la bipédie étaient sur le point de se réaliser dès le Miocène supérieur.

Les Australopithecidae

Avec les Australopithèques, qui apparaissent à la limite du Pliocène et du Quaternaire (Villafranchien), l'évolution des Primates semble désormais s'orienter vers le redressement corporel et une céphalisation plus prononcée, sans doute grâce à de nouvelles conditions d'environnement qui imposèrent pour la survie du groupe l'adaptation à la vie terrestre. On peut supposer, par exemple, que des modifications climatiques ont favorisé au début du Villafranchien l'extension de la savane aux dépens des forêts. Ces nouvelles circonstances écologiques ont pu contribuer sélectivement à faire disparaître les formes déjà fortement spécialisées dans l'arboricolisme au profit de Primates non spécialisés dans cette voie et capables de développer, dans la posture érigée ainsi que dans la libération concomitante de la main et l'acquisition corrélative de la réflexion, de nouvelles possibilités vitales, telles que l'usage d'armes de jet ou la conservation du feu.

C'est en 1924 que l'on découvrit le premier Australopithèque (enfant de Taung) en Afrique du Sud. Celui-ci fut immédiatement reconnu par Dart comme étant un Primate fossile nettement plus proche de l'Homme que toutes les autres formes simiennes connues alors. Il est vrai que les traits anatomiques des sujets jeunes accentuent les caractères « évolués » ou « humains » des fossiles. Aussi le problème de leur position systématique se posat-il une nouvelle fois après la découverte des formes adultes qui furent mises au jour dans les gisements sud-africains de Sterkfontein, Kromdraai, Swartkrans et Makapansgat.

Après l'Afrique australe, ce fut l'Afrique orientale qui attira l'attention des paléontologistes par sa richesse en restes d'Hominidae anciens. Dès 1914, la région comprise entre les lacs Victoria et Eyassi et entre le Kilimandjaro et le lac Rodolphe se révéla être le creuset d'une humanité peut-être plus ancienne encore que l'Afrique du Sud. Les gisements d'Oldoway (Tanzanie), de la vallée de l'Omo et de la région de l'Afar (Éthiopie) ont livré les

restes de plusieurs individus et un grand nombre de dents. Les datations au potassium-argon effectuées sur les découvertes de 1974 dans la région de l'Afar (squelette de « Lucy ») ont atteint le chiffre de — 3,5 millions d'années.

Les Australopithèques, dont l'existence a duré au moins 3 millions d'années, apparaissent comme un ensemble hétérogène sur le plan anthropologique, accusant des tendances phylogéniques divergentes qui autorisent la reconnaissance d'au moins deux espèces, *Australopithecus africanus* et *A. robustus ;* celles-ci regroupent d'une façon plus conforme aux règles de la nomenclature zoologique internationale toutes les désignations que l'on a coutume d'attribuer à chaque nouvelle découverte ou presque.

		Gisements
Australopithecus africanus	A. africanus	Taung
	Plesianthropus transvaalensis	Sterkfontein
	A. prometheus	Makapansgat
	Meganthropus africanus	Garusi
	Homo habilis	Oldoway
Australopithecus robustus	Paranthropus robustus	Kromdraai
	Meganthropus palaeojavanicus ?	San Giran
	Paranthropus crassidens	Swartkrans
	Zinjanthropus boisei	Oldoway
	Paraustralopithecus aethiopicus	Omo

Ces deux espèces diffèrent l'une de l'autre par un certain nombre de traits anatomiques en rapport avec le régime omnivore d'*A. africanus* et le régime plus spécialement végétarien d'*A. robustus*. La denture du premier montre en effet des différences dimensionnelles assez peu prononcées entre les dents jugales (molaires et prémolaires) et les dents labiales (canines et incisives), bien que la canine soit plus forte et dépasse même le niveau des autres dents et que la première prémolaire soit encore incomplètement molarisée (la prémolaire sectoriale a des dispositions de canine, ce qui est un caractère primitif). En revanche, les dents jugales d'*A. robustus* sont remarquablement volumineuses, fait d'autant plus évident que les canines et les incisives sont petites ; la première prémolaire est complètement molarisée. La différence entre la forme gracile et la forme robuste apparaît, en outre, dans les proportions du massif facial, qui est très volumineux et aplati transversalement chez *A. robustus ;* ce caractère est accentué par le développement considérable des arcades zygomatiques en rapport avec un muscle temporal très développé, ainsi qu'en témoigne la constance de la crête sagittale, généralement absente chez *A. africanus*. La mandibule présente quelques différences notables, portant principalement sur le redressement de la branche montante chez *A. robustus,* laquelle est inclinée vers l'arrière chez *A. africanus.*

Les Australopithèques avaient acquis un certain redressement corporel, sinon l'attitude verticale complète, ainsi qu'en témoignent la morphologie des os des membres, l'élargissement de la main, la forme générale du pied *(« Homo habilis »)* et la largeur de l'aile iliaque : l'ilion forme en effet une surface étalée pour les muscles dorsaux (crête iliaque), les muscles fessiers (fosses iliaques externes) et les vastes externes, favorisant la position verticale du tronc pendant la station debout et la marche. La situation antéro-latérale de la cavité cotyloïde et la présence d'une épine iliaque antéro-inférieure permettent une certaine convergence des fémurs vers le bas et un ancrage solide du ligament ilio-fémoral et du muscle droit antérieur de la cuisse, maintenant le genou en extension dans la posture érigée.

Cette tendance au redressement corporel se confirme en partie sur le crâne :

— les apophyses mastoïdes sont bien marquées et permettent une attache solide à la musculature du cou ;

— l'orientation des orbites traduit un port plus redressé de la tête comparativement à celui des singes Anthropoïdes.

La céphalisation accuse un progrès certain sur les autres Primates fossiles et sur les Pongidae actuels. Elle se traduit par plusieurs caractères « évolués », parmi lesquels on peut citer :

— un frontal plus globuleux et moins fuyant (surtout chez *A. africanus*) ;

— un occipital arrondi, marqué par un bourrelet transverse plus discret qui occupe une situation nettement plus basse que chez les grands singes (toutefois, le trou occipital se trouve dans une position intermédiaire entre celle des Anthropoïdes et celle de l'Homme, ce qui laisse entrevoir un redressement corporel moins parfait que chez ce dernier) ;

— l'absence de plateau simien à la face interne de la symphyse mandibulaire ;

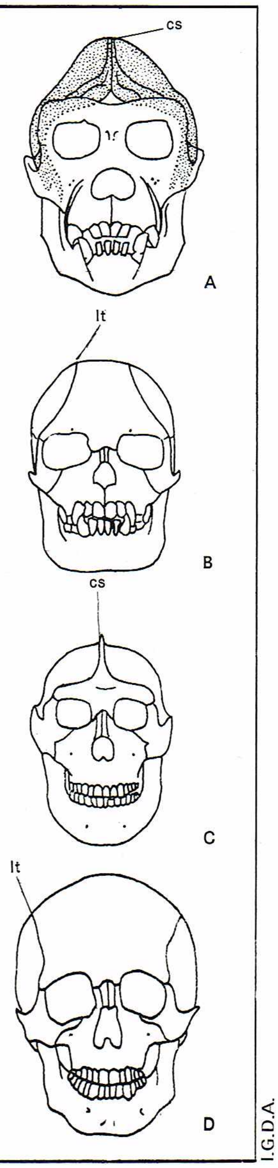

▲ *Crânes de Pongidés et d'Hominidés actuels et fossiles en vue antérieure (reconstitution) :* *A,* Gorilla ; *B,* Proconsul ; *C,* Australopithecus robustus ; *D, Homme actuel ; cs, crête sagittale ; lt, ligne temporale.*

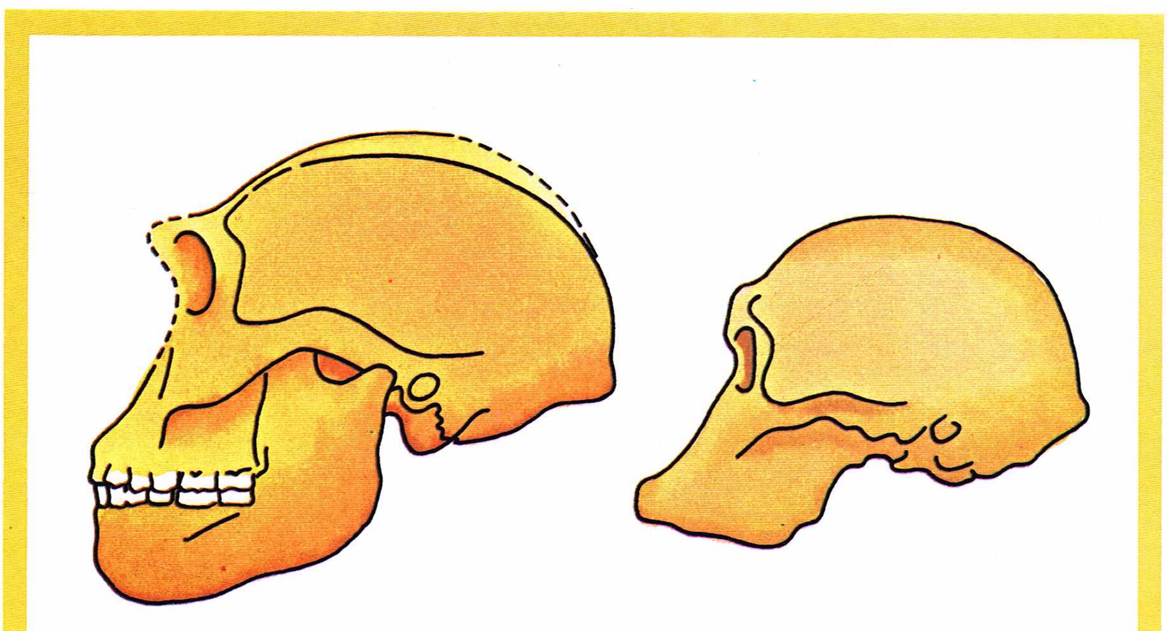

Richard Colin

◀ *Profils crâniens des deux espèces d'Australopithèques : à gauche,* Australopithecus robustus ; *à droite,* Australopithecus africanus.

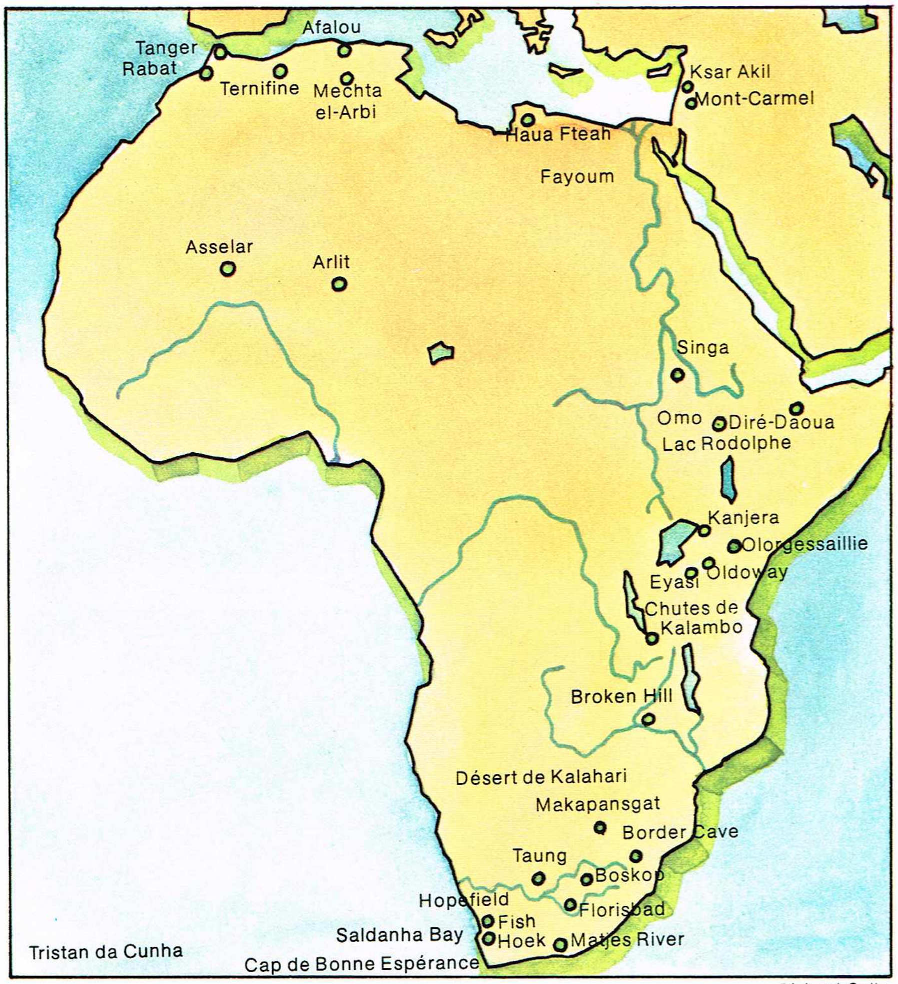

Richard Colin

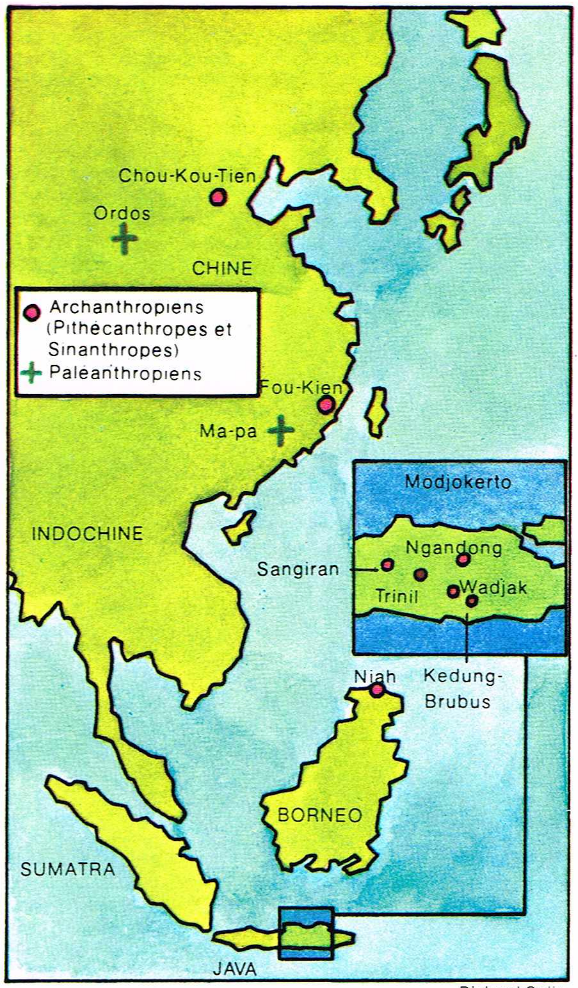

Richard Colin

▲ *A gauche, carte des principaux sites africains ayant livré des restes d'Hommes fossiles. A droite, carte de la localisation des Archanthropiens (Pithécanthropes et Sinanthropes) et des Paléanthropiens en Asie du Sud et en Indonésie.*

— l'absence de diastèmes entre les dents ;

— la présence d'un alvéole unique à chaque molaire comme chez l'Homme et non d'un alvéole multiple comme c'est le cas chez les Pongidae ; les molaires des Australopithèques possèdent une *fovea* (fossette entre les cuspides dentaires) antérieure qui les rapproche davantage de l'Homme que des singes Anthropoïdes ;

— la marge de variabilité de la capacité crânienne ; elle varie, selon Robinson, entre 450 et 550 cm^3, ce qui est faible en valeur absolue si l'on se réfère à l'espèce humaine (minimum : 900 cm^3) et même au gorille, dont le volume peut atteindre 750 cm^3. Mais on ne doit pas perdre de vue que la capacité crânienne des Australopithèques s'avère relativement plus élevée si l'on tient compte de leur stature (et, par conséquent, de leur masse corporelle probable), qui oscille entre 1,25 m chez *A. africanus* et 1,55 m chez *A. robustus*, ce qui implique certainement un coefficient de céphalisation intermédiaire entre celui du gorille et celui de l'Homme.

Doit-on considérer les Australopithèques, ainsi que semblent le faire actuellement beaucoup d'anthropologistes, comme d'authentiques Hominidae parvenus à un stade évolutif où ce phylum atteignait le cap de l'hominisation ? Selon Schepers, la morphologie squelettique des Australopithèques laisse supposer qu'ils étaient aptes à une certaine habilité manuelle et probablement à un langage articulé, ce qui leur avait permis de développer une structure sociale supérieure à celle des autres Primates contemporains. Ainsi pouvaient-ils transmettre à leurs descendants le fruit de leurs acquisitions et de leurs techniques. La vie matérielle et l'outillage des Australopithèques semblent prouver, du moins s'ils en sont bien les artisans, qu'ils avaient atteint le stade humain, bien que leur adaptation à la posture bipède présente quelque retard par rapport à leurs possibilités cérébrales. L'outillage le plus ancien semble avoir été un matériel non lithique (industrie ostéo-dento-kératique décrite par Dart), auquel s'est associé en divers gisements (Sterkfontein, Makapansgat, Oldoway, Omo) un outillage réalisé sur galets de rivières dont la nature pétrographique témoigne d'un apport intentionnel (*peeble culture,* ou Oldowayien, de L.S.B. Leakey). En outre, les gisements d'Australopithèques ont fait apparaître des sols d'habitats où un aménagement en « dallage » a pu être reconnu (Oldoway). Enfin, on a cru durant un certain temps que l'Australopithèque gracile de Makapansgat *(Australopithecus prometheus)* utilisait le feu, mais il s'agirait dans ce cas plutôt de la marque d'incendies de forêt et non pas d'un usage intentionnel.

Une autre hypothèse concernant la position des Australopithèques dans l'évolution humaine consiste à admettre qu'ils représenteraient plutôt, comme ce fut le cas pour l'Oréopithèque, une spécialisation précoce de la lignée humanoïde, ayant évolué pour son propre compte en constituant un phylum autonome qui s'est engagé dans une impasse évolutive. On serait en effet tenté d'accréditer cette hypothèse en considérant le très fort développement de la face par rapport au crâne cérébral (leur indice cranio-facial se situe dans les limites des variations des grands singes), les superstructures crâniennes évoquant celles des Ponginae, la taille des orbites, l'aspect très simien de l'ouverture nasale et plusieurs traits du squelette postcrânien : astragale traduisant un fort écartement du gros orteil, torsion et mobilité du tibia sur le fémur, hauteur du grand trochanter atteignant et dépassant même le niveau de la tête fémorale, absence de tubercule fessier et d'épine sciatique sur l'os iliaque. Ces caractères semblent montrer que la spécialisation des Australopithèques serait intervenue sur la lignée humaine mais bien avant que l'acquisition définitive de la bipédie et la réalisation complète de la céphalisation aient engagé le grand courant évolutif humain vers ses formes ultérieures.

La place des Australopithèques dans la genèse de l'humanité demeure encore fort douteuse. Une solution prudente, tenant compte de l'alternative qui s'impose, consiste à admettre que, sans se placer complètement parmi les Hominidae, les Australopithèques en représentent les premières ébauches, tant sur le plan anatomique que

sur les plans socio-culturel et psychique. Ce sont des formes les moins spécialisées du rameau (famille des Australopithecidae), représentées par l'espèce *A. africanus,* que l'origine de l'humanité pourrait dériver (squelette de l'Afar, *« Homo habilis »* d'Oldoway). Les formes robustes (*A. robustus,* Paranthropes, Zinjanthrope, Paraustralopithèques...) sont déjà trop spécialisées pour avoir un avenir évolutif. Par conséquent, la diversification des Australopithèques serait le premier indice d'une divergence primitive d'un groupe de Primates fossiles au sein duquel ont pris naissance les Hominidae.

Des Australopithèques à l'apparition du genre Homo

La radiation évolutive des Australopithèques graciles s'est accompagnée de l'acquisition de la posture parfaitement redressée et de la diminution du volume facial par rapport à celui du neurocrâne sous l'effet de la poursuite du processus orthogénétique de céphalisation. Si nous admettons théoriquement que la forme gracile, et notamment *« Homo habilis »,* a, en raison de sa moindre spécialisation, précédé dans le temps *Australopithecus robustus,* des Hominidae véritables offrant une capacité crânienne supérieure devaient coexister avec les formes robustes dès la phase australopithécienne.

Les dernières estimations (Tobias, 1964) accordent à « *Homo habilis* » une capacité crânienne de 680 cm^3, ce qui est déjà élevé par rapport à celle des formes australopithéciennes plus récentes. La transition entre le complexe australopithécien et l'avènement du genre *Homo* constitue une lacune dans la chronologie couvrant près de 2 millions d'années, durant lesquelles on a toutes les raisons de situer les transformations évolutives principales qui présideront à la mise en place du genre humain.

Outre les Australopithèques dont il vient d'être question, deux formes provenant d'Afrique comblent en partie, malgré leur état fragmentaire, le long intervalle de temps qui sépare les Australopithèques des premiers Pithécanthropes, longtemps considérés comme les plus anciens représentants véritables de la famille des Hominidae.

La forme la plus ancienne fut extraite en 1972 par Richard Leakey des couches lacustres et fluviatiles comprises entre deux tufs volcaniques au nord-est du lac Rodolphe (Kenya). Il s'agit d'une importante portion de voûte crânienne, encore inédite et appelée provisoirement *Homo 1470,* à laquelle étaient associés les fragments du membre inférieur, et dont les caractères anatomiques semblent intermédiaires entre ceux des Australopithèques graciles et ceux des Pithécanthropes. La datation absolue de ces restes, effectuée par la méthode du potassium-argon, accorde à *Homo 1470* une ancienneté comprise entre — 2,9 millions et — 2,6 millions d'années. Le crâne, dont la capacité dépasse légèrement 800 cm^3, offre un contour occipital arrondi et un resserrement postorbitaire visible en vue supérieure annonçant la structure crânienne des Pithécanthropes, dont les premiers représentants classiquement décrits apparaissent au moins 1,5 million d'années plus tard !

L'examen des fragments d'os longs semble montrer un degré d'orthostatisme plus poussé que celui observé chez les Australopithèques.

La seconde découverte consiste en quelques restes fossiles exhumés en 1948-1949-1952 au gisement de Swartkrans (Afrique du Sud) des couches qui livrèrent l'Australopithèque robuste, désigné alors sous le nom de *Paranthropus crassidens*. Il s'agit de deux fragments de mandibules et d'une portion de maxillaire supérieur, auxquels on donna le nom de *Telanthropus,* et qui différaient du Paranthrope par une moindre robustesse de la branche montante et du corps mandibulaire ainsi que par des molaires plus petites sur lesquelles apparaît une légère réduction de M_3 par rapport aux deux premières. Le maxillaire supérieur est dépourvu de l'hyperprognathisme caractéristique des Australopithèques, particulièrement apparent chez les formes graciles, alors que la voûte palatine offre des ressemblances certaines avec celle de l'Homme. Les restes du Télanthrope ont été datés de — 1,5 million d'années. Ils pourraient constituer la preuve de l'existence de variations étendues chez les Australopithèques, dont les limites de la variabilité approcheraient singulièrement celles d'Hominidae plus récents (Le Gros, Clarke). Au contraire, Broom et Robinson voient plutôt dans le Télanthrope une forme de passage possible entre les Australopithèques graciles et le genre *Homo*. Quoi qu'il en soit, ces restes maxillaires revêtent une importance primordiale dans la genèse de l'Homme : ils semblent encore aujourd'hui constituer les plus anciens documents osseux pouvant être classés avec certitude dans le genre *Homo*.

Cet aperçu de l'histoire des premiers Hominidae situe actuellement le berceau de l'humanité sur le continent africain, notamment en Afrique orientale et méridionale. Mais doit-on pour autant sous-estimer les indices d'une humanité peut-être aussi ancienne sur le sol d'autres continents ? Si les ancêtres des Archanthropiens de Chine et de Java n'ont pu jusqu'à présent faire l'objet d'une identification indiscutable *(Meganthropus ?),* il existe des signes évidents de la présence humaine à l'aurore du Quaternaire au Maghreb (boules polyédriques de l'Aïn-Anech, en Algérie ; industrie du plateau de Mansourah, au Maroc) et en Europe (Roumanie ?, Monte Peglia, en Italie). La France a livré des industries très primitives dans les dépôts de grottes dont le remplissage a été exceptionnellement préservé du lessivage produit par les

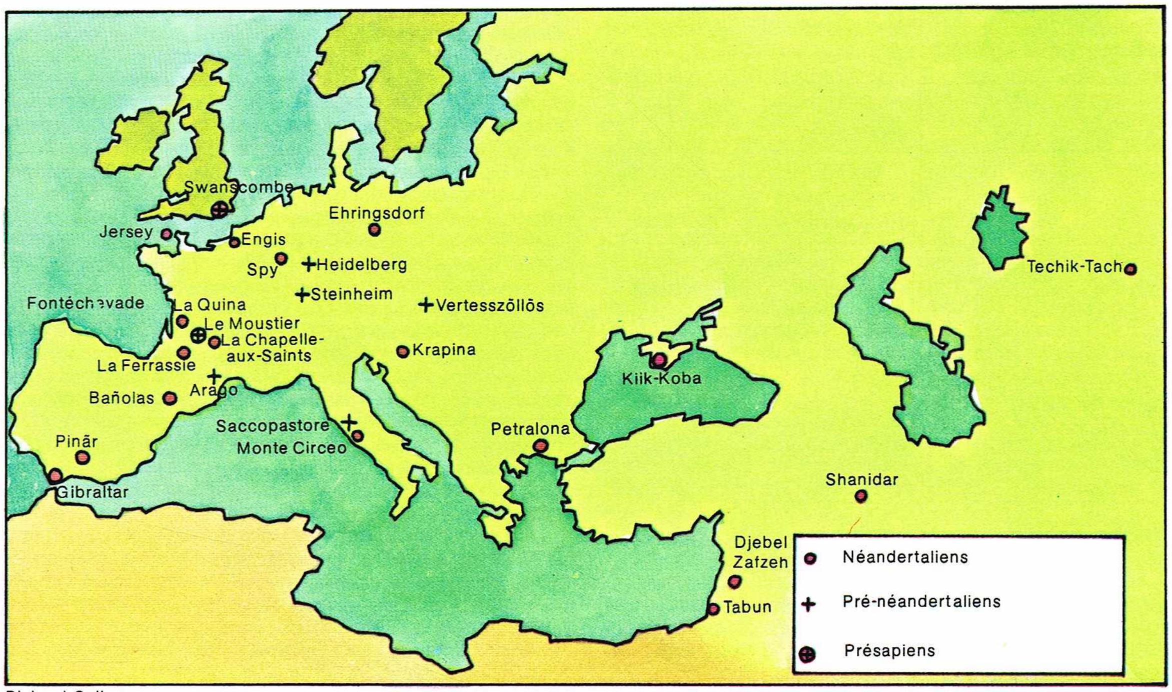

Richard Colin

◀ *Carte des restes des Paléanthropiens d'Europe.*

I. — ARCHANTHROPIENS (= " *Homo erectus* ") (*Homo archaeus*)	
Java, Afrique orientale	*Pithecanthropus (erectus, robustus, modjokertensis, dubius)* *Meganthropus palaeojavanicus*
Tchad	*Tchadanthropus uxoris?*
Chine	*Sinanthropus (= Pithecanthropus) pekinensis*
Afrique du Nord	*Atlanthropus mauritanicus*
Allemagne	*Homo heidelbergensis*
II. — PALÉANTHROPIENS (*Homo sapiens neandertalensis s.l.*)	
1. Formes antéwürmiennes d'Europe (ancêtres des Néandertaliens classiques et d'*Homo sapiens*.)	Hommes de Steinheim, Montmaurin, Tautavel, Swanscombe, Fontéchevade, Saccopastore, Ehringsdorf, etc.
2. Néandertaliens classiques (principalement en Europe) (Würm I et II)	*Homo sapiens neandertalensis*
3. Néandertaloïdes extra-européens	Formes de Palestine et du Moyen-Orient *H.s. rhodesiensis* (Broken Hill et Saldanha) *H.s. soloensis* (Java)
Ces deux dernières « espèces » sont souvent classées avec les Archanthropiens, dont elles semblent directement issues malgré leur ancienneté relativement faible.	
III. — NÉANTHROPIENS (*Homo sapiens sapiens*)	
Hommes actuels et fossiles diversifiés sur toute la surface du globe depuis le début du Paléolithique supérieur (— 40 000 ans). Les Néanthropiens comprennent de nombreuses races fossiles (Cro-Magnon, Combe-Capelle, Afalou, Boskop, Wadjack, etc.).	

▲ ***Tableau de classification et de localisation des Hominidés fossiles.***

facteurs climatiques en relation avec l'alternance des phases glaciaires et interglaciaires au cours du Quaternaire européen. Bien que, pour l'instant, aucun reste squelettique n'ait pu fournir une indication, même partielle, sur l'aspect physique des auteurs de telles industries, nous pouvons citer ici quelques-uns des gisements les plus anciens reconnus en France :

Gisements	Période géologique	Age absolu
Grotte du Vallonet (Alpes-Maritimes)	Début de la glaciation du Danube	— 3,5 à — 3 millions d'années
Grotte de l'Escale (avec les premiers foyers connus)	Günz II	— 1,5 à — 1 million d'années
Saint-Vallier et Saint-Prest (Drôme) Forêt de Sénart (Essonne)	Glaciation du Danube	— 3,5 à — 2 millions d'années
Hautes terrasses de la Somme	Günz-Mindel et Mindel I	— 800 000 à — 400 000
Hautes terrasses du Roussillon	Danube et Günz	— 3,5 millions à — 800 000

Ces indices de la présence très ancienne de l'Homme en dehors de l'Afrique montrent que, selon l'expression de F. Bordes, « l'Asie ou même l'Europe sont des outsiders qui n'ont pas dit leur dernier mot ».

L'avènement du genre Homo

On supposait autrefois qu'une évolution linéaire s'appuyant sur l'orthogenèse de quelques caractères significatifs conduisait progressivement la transformation du phylum des Hominidae depuis les Australopithèques aux Pithécanthropes, de ces derniers à l'Homme de Néandertal et du Néandertalien à *Homo sapiens* en passant par les divers stades qui furent peu à peu identifiés à mesure des découvertes. On sait maintenant que cette conception de l'anthropogenèse est un schéma inexact répondant à une image simpliste, sinon en contradiction avec les principes élémentaires de l'évolution des Primates. Les nappes successives, regroupées sous la dénomination générique d'*Homo,* se sont révélées bien plus complexes qu'on n'avait pu l'admettre auparavant car elles offraient des possibilités évolutives qui différaient de l'une à l'autre. C'est ainsi que la survie et la capacité de transformation de certaines se trouvaient favorisées par une différenciation peu poussée, alors que d'autres nappes, moins bien adaptées génétiquement ou trop engagées dans une spécialisation particulière, étaient vouées à une disparition certaine. C'est la raison pour laquelle certaines formes fossiles, considérées généralement comme archaïques du fait de la présence de particularités morphologiques et ostéométriques inexistantes chez l'Homme moderne, se sont révélées chronologiquement plus récentes que d'autres formes, dont la ressemblance avec les Hommes actuels aurait plutôt incité à les faire dériver des premières.

La diversité des restes humains fossiles qui précédèrent l'apparition d'*Homo sapiens* a entraîné la nécessité de plusieurs classifications permettant un regroupement selon leur appartenance géographique, leur position chronologique et leurs particularités anatomiques. Toutefois, le caractère arbitraire de telles classifications ne saurait rendre compte de toutes les hypothèse ni encore moins de toutes les découvertes d'Hommes fossiles. Il s'agit, en effet, de restes toujours fragmentaires dont la connaissance est généralement réduite à quelques éléments osseux ou dentaires. De plus, aucun des groupes ainsi créés ne tient compte de la position intermédiaire ou de la persistance de nombreuses formes qui, tout en étant contemporaines de types auxquels on les rapporte habituellement, peuvent représenter le terme ultime de l'évolution d'une forme définie au stade précédent. Enfin, la notion d'espèce ne repose pas uniquement sur des critères d'ordre morphologique du squelette, les seuls que permettent d'établir les restes fossiles ; elle fait intervenir en outre des données physiologiques, écologiques, histologiques et biochimiques qui échappent de toute évidence au paléontologue.

On découpe habituellement les Hominidae fossiles en trois grandes nappes, dont les limites sont d'ailleurs sujettes à des différences suivant les auteurs, à la suite de découvertes importantes ou d'interprétations nouvelles.

Le problème de la nomenclature

Si l'on tient compte de toutes les dénominations de genres, d'espèces ou de variétés que l'on a coutume d'employer pour désigner les diverses formes humaines fossiles, on peut être surpris à juste titre de l'abondance d'une telle terminologie latine. Il est bien évident qu'aucun de ces termes génériques, hormis *Australopithecus* et *Homo sapiens* dont les caractères distinctifs ne laissent aucun doute sur leurs diagnoses respectives, ne répond aux règles habituelles de la systématique auxquelles les biologistes font appel pour désigner telle ou telle forme animale au sein d'un même groupe zoologique.

Le genre *Homo* sous-entend la spécialisation particulière de la fonction cérébrale liée à la prédominance quantitative et qualitative du cortex néopalléal et l'acquisition de la bipédie. De ce double avantage, fait unique dans le règne animal, résultent toutes les corrélations anatomiques et fonctionnelles intervenant dans les processus de l'hominisation somatique, auxquelles s'ajoutent les manifestations évidentes des possibilités techniques, créatrices et spirituelles de l'Homme.

En revanche, la terminologie se complique si l'on s'aventure dans une analyse taxonomique intragénérique, ou encore au sein de l'espèce et à plus forte raison à l'intérieur de la race. La définition du genre *Homo* a été établie d'après *Homo sapiens,* qui représente dans toute la famille des Hominidae la seule espèce dont on puisse mesurer avec le maximum de moyens les limites des variations

individuelles, sexuelles, géographiques et génétiques. Si l'on se réfère à la définition de Mayr selon laquelle l'espèce regroupe tous les individus d'une population naturelle capables de s'interféconder et d'engendrer des descendants également féconds, on constate qu'elle s'applique parfaitement à *Homo sapiens*. Enfin, notre espèce est la mieux représentée sur le plan paléontologique : on peut suivre son évolution depuis le début du Paléolithique supérieur (— 40 000 ans) dans toutes les régions du monde. Malgré les phénomènes de micro-évolution auxquels son ubiquité a donné libre cours, *Homo sapiens* constitue une espèce en équilibre adaptatif, puisque les transformations qu'a rendues nécessaires l'explosion démographique qui s'accélère depuis 10 000 ans, demeurent assez limitées.

Les diverses dénominations génériques et spécifiques par lesquelles on désigne habituellement les *Archanthropiens,* dont l'appartenance au genre *Homo* est désormais parfaitement établie depuis la découverte du fémur de Trinil à Java (E. Dubois, 1891), expriment le polymorphisme et l'extension de ce vieux type humain. Les « genres » et « espèces » ainsi créés se rapportent en vérité à plusieurs types géographiques d'un même genre et vraisemblablement d'une même espèce, plus primitive certes qu'*Homo sapiens,* mais dont certains traits anatomiques et peut-être même culturels (bifaces) se sont maintenus jusqu'à nous. La désignation d'*Homo erectus* adoptée par quelques auteurs anglo-saxons pour faire valoir le caractère redressé et bipède des Archanthropiens n'est qu'un pléonasme dépourvu du moindre intérêt systématique, que tout anthropologue désireux de parfaire le sens d'une classification devrait éliminer de son vocabulaire scientifique. Le terme *Homo* suffit largement pour désigner non seulement l'acquisition de la bipédie, mais encore tous les caractères anatomiques, physiologiques, psychologiques et culturels qui distinguent l'Homme des autres Primates. C'est afin de mieux exprimer la position évolutive des Archanthropiens dans la genèse de l'Homme que nous proposons le terme d'*Homo archaeus* (J.-L. Heim, 1975).

La nappe humaine désignée classiquement par le terme de *Paléanthropiens* comble la lacune chronologique et évolutive séparant les Archanthropiens *(Homo archaeus)* des Néanthropiens *(Homo sapiens sapiens)*. Cette nappe était assimilée durant le premier quart du siècle au type fossile désigné par King (1864) sous le terme d'*Homo neandertalensis*. Cette appellation, aujourd'hui pratiquement abandonnée, réunissait, souvent sans discernement, ce qui était la source de confusions durables, tous les restes humains fossiles associés à des industries moustéroïdes ou moustériennes ; ceux-ci se révélaient postérieurs aux Archanthropiens dont ils étaient supposés descendre et précédaient la brusque éclosion d'*Homo sapiens,* et plus spécialement de la nappe cro-magnoïde à l'aurore du Paléolithique supérieur, déjà pourvu de toutes ses possibilités techniques et créatrices et en possession de sa forme définitivement achevée.

La découverte des restes de Steinheim (1933), de Swanscombe (1935) et de Fontéchevade (1947) devait modifier l'idée trop simplifiée que l'on se faisait de la genèse humaine. C'est à la suite de la monographie consacrée aux restes humains de Fontéchevade (Charente), dont la structure sus-orbitaire et le contour de l'écaille occipitale annoncent les caractères d'*Homo sapiens* alors que l'Homme de Néandertal n'avait même pas encore acquis sa forme définitive, que H.-V. Vallois fut conduit à distinguer deux tendances évolutives au sein des Paléanthropiens : leurs transformations conduisent, d'une part, à l'Homme de Néandertal proprement dit par l'intermédiaire de formes plus généralisées de ce type (Prénéandertaliens), d'autre part, vers *Homo sapiens* avec les Présapiens. Cette double radiation évolutive des Paléanthropiens contrastait avec les conceptions en vigueur au début du siècle, selon lesquelles la position taxonomique et les particularités ostéométriques et anatomiques des vieux Paléanthropiens ne différaient pas ou trop peu de celles des Hommes de Néandertal d'Europe pour qu'il fût nécessaire de les en distinguer. C'est à la suite des travaux de Morant et de Weidenreich (1928) que l'on prit conscience de l'étendue de leurs variations, de leurs affinités, bien souvent opposées, et que l'on tenta de les différencier.

Aussi le mot *Homo neandertalensis* fut-il momentanément remplacé par celui de *Paleanthropus* (S. Sergi),

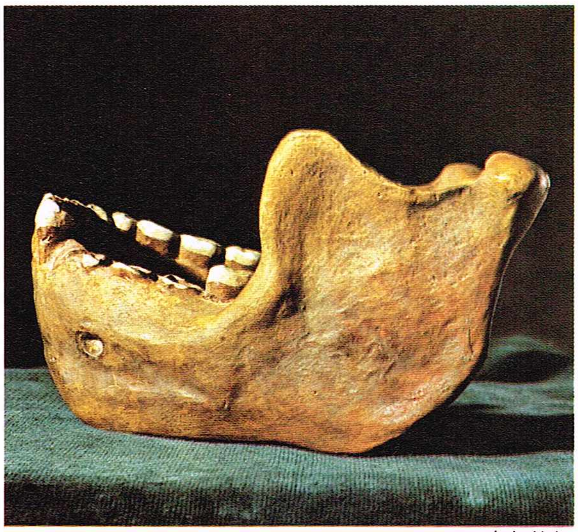

J.-L. Heim

◀ ***Mandibule de Mauer (Allemagne), représentant le plus ancien reste humain découvert jusqu'à présent en Europe.***

terme moins restrictif sous lequel on pouvait enfin regrouper un ensemble de formes fossiles qui n'auraient trouvé dans la simple définition donnée à l'Homme de Néandertal qu'une image assez incomplète. Le genre *Homo* devait finalement prendre la relève du mot *Paleanthropus,* d'où dérive le qualificatif universellement admis de Paléanthropiens. Ce terme englobe non seulement les Néandertaliens classiques, mais également leurs ancêtres ainsi que ceux d'*Homo sapiens,* qu'il est bien souvent malaisé de distinguer les uns des autres tant leurs caractères respectifs peuvent plus ou moins coexister chez un même individu. Le terme Paléanthropiens a été ensuite abusivement étendu à tous les restes humains de l'Ancien Monde contemporains de ceux d'Europe et qui semblent pour la plupart dériver directement de formes archanthropiennes préexistantes (Hommes du Djebel Irhoud, au Maroc ; de Saldanha et de Broken Hill, en Afrique australe ; de Ma-Pa, en Chine ; de Solo, à Java ; de Shanidar, Tabun, Skhul, Djebel Kafzeh et Amud, en Asie occidentale). Peut-être certaines de celles-ci sont-elles encore des Archanthropiens tardifs dont la disparition s'est effectuée au profit de quelques types plus récents, qui les ont progressivement supplantés sur le sol même qu'ils occupent encore ?

Les Archanthropiens

Les Archanthropiens apparaissent à la fin du Pléistocène inférieur (vers — 1 million d'années), probablement à partir de formes évoluées d'Australopithèques graciles dont le Télanthrope serait le seul représentant actuellement reconnu. Les plus anciens Archanthropiens proviennent du niveau de Djetis (Java), les plus récents du niveau de Ngandong (Java), de Zambie (Broken Hill) et d'Afrique du Sud (Saldanha), ces trois dernières formes étant contemporaines de la fin du Pléistocène moyen ou du début du Pléistocène supérieur. C'est la raison pour laquelle ils sont souvent considérés comme des Paléanthropiens.

Malgré la présence de traits archaïques au niveau du crâne et des dents, les Archanthropiens avaient atteint le stade de l'hominisation physique puisque leur capacité crânienne s'échelonnait autour de 1 000 cm^3 et que, surtout, le redressement corporel et la bipédie étaient parvenus à un degré comparable à celui de l'Homme moderne.

L'évolution des Archanthropiens a porté principalement sur le crâne, dont la capacité augmente depuis les vieux Pithécanthropes de Java (minimum : 750 cm^3) jusqu'aux formes récentes de Broken Hill (1 400 cm^3) et de Solo (maximum : 1 225 cm^3). En même temps que la capacité endocrânienne, la voûte s'élève en s'accompagnant de l'augmentation de hauteur de l'écaille occipitale et de l'écaille temporale.

L'existence d'un outillage lithique ou osseux souvent associé aux restes d'Archanthropiens, les traces de foyers présents dans les couches à Sinanthropes ainsi que le témoignage d'activités rituelles (pratiques probables de cannibalisme à Choukoutien) indiquent que les Archanthropiens étaient arrivés à des niveaux culturel et mental nettement plus élevés que ceux des Australopithèques.

J.-L. Heim

▲ *Vue latérale du crâne du Sinanthrope (reconstitution d'après Weidenreich).*

Java (Pithécanthropes)

Les premiers Archanthropiens ont été découverts dès 1890 à Java par le médecin hollandais E. Dubois. Entre 1936 et 1939, de nouvelles recherches dans l'île fournirent à von Koenigswald de nouveaux restes de Pithécanthropes dont un crâne d'enfant *(P. modjokertensis)*, deux mandibules et plusieurs calottes crâniennes. La stratigraphie de ces couches a permis de définir trois niveaux :

Niveau de Ngandong :

Hommes de Solo } début du Pléistocène supérieur (— 100 000)

Niveau de Trinil :

mandibule A, Pithéc. I, II, III, V, VI } — 800 000 à — 400 000

Niveau de Djétis :

Pithéc. IV, enfant de Modjokerto, mandibule C } début du Pléistocène moyen (— 1 000 000)

Entre 1960 et 1965, de nouveaux restes découverts sous la conduite de Teuku Jacob révélèrent des parties du squelette céphalique qui demeuraient très peu connues par les chercheurs précédents.

Chine (Sinanthropes)

La présence d'Archanthropiens en Asie continentale fut révélée par des dents fossiles utilisées dans la pharmacopée chinoise qu'Haberer et Max Schlosser attribuèrent à un Archanthropien (1903), auquel D. Black donna le nom de *Sinanthropus pekinensis* (1927). Dès 1921, et surtout entre 1928 et 1937, les fouilles entreprises à Choukoutien, au sud de Pékin, par F. Weidenreich, Teilhard de Chardin et Peï, entre autres, livrèrent les restes de quarante-cinq individus représentés par des dents, des calottes crâniennes, des mandibules et quelques fragments d'os longs. Les fouilles furent reprises dans d'autres sites dès 1949 par Woo Ju Kang. Elles mirent au jour de nouvelles dents, deux mandibules et surtout un crâne (1963) d'aspect plus primitif que ceux des autres Sinanthropes, daté de — 600 000 ans et provenant du site de Lan-t'ien, près de Kongwang (Chen-Si).

▼ *Mandibule d'un* **Atlanthropus mauritanicus** *(mandibule n° 2) découverte en 1954 à Ternifine, en Algérie.*

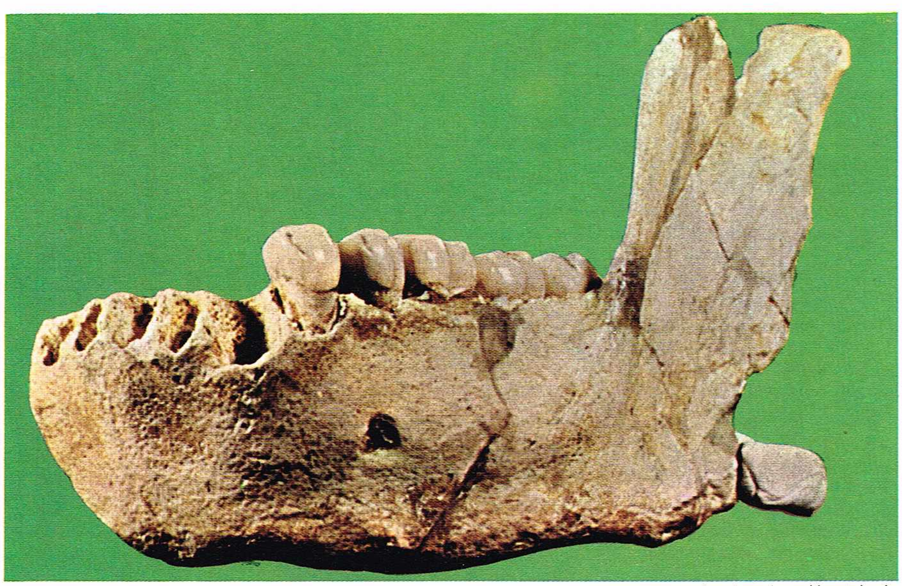

Institut de paléontologie

Maghreb (Atlanthropes)

Les Archanthropiens sont connus au Maghreb depuis les découvertes d'Arambourg et Hoffstetter en 1954, à Ternifine (Algérie). Les trois mandibules, les dents et le pariétal qui furent ainsi mis au jour reçurent le nom d'*Atlanthropus mauritanicus*. D'autres restes, découverts plus récemment au Maroc par E. Ennouchi et par J. J. Jaeger, confirment l'extension de ce type d'Archanthropiens à l'ouest du Maghreb. La pièce la plus complète provient de grès dunaires d'une carrière près de Salé : il s'agit d'une importante portion de crâne dont les caractères offrent des analogies frappantes avec ceux des Sinanthropes. Il n'a pas encore faire l'objet d'une étude détaillée (Jaeger, 1971).

Afrique orientale

En 1960, L.S.B. Leakey faisait connaître un crâne d'Archanthropien découvert dans le gisement d'Oldoway *(Homo 9)*, auquel fit suite un second crâne en 1964 *(Homo 13)*. Ces crânes relativement anciens sont datés du début du Pléistocène moyen et seraient, par conséquent, contemporains de ceux du niveau de Djétis à Java.

Afrique centrale *(Tchadanthropus)*

En 1961, Yves Coppens découvrait un fragment craniofacial près du puits de Yayo et dans une couche de surface (Tchad) qu'il considéra d'abord comme appartenant à un Australopithèque. Il s'agirait plutôt d'un Archanthropien, son âge géologique n'ayant pu être défini avec précision.

Europe *(Homo heidelbergensis)*

Le seul reste humain que l'on puisse attribuer aux Archanthropiens en Europe est une mandibule complète découverte en 1907 dans une carrière de sables fluviatiles d'un affluent du Neckar, près de Mauer, au sud-est d'Heidelberg (Allemagne), à laquelle Schoetensack donna le nom d'*Homo heidelbergensis*. Cette mandibule, qui représente le plus vieux reste d'Hominidae actuellement mis au jour en Europe, est contemporaine des Pithécanthropes de Java et des Sinanthropes. Elle daterait de la période mindélienne (— 500 000 à — 300 000 ans) ou peut-être même d'un interstade de la glaciation de Günz qui se termina il y a 800 000 ans. L'intérêt de cette mandibule réside dans le fait qu'outre ses caractères archanthropiens (largeur importante de la branche montante, symphyse très fuyante, faible profondeur de l'échancrure sigmoïde, robustesse de l'os), elle offre certains traits (troncature de l'angle mandibulaire, forme de l'arcade alvéolo-dentaire de type carré-parabolique) qui annoncent les Néandertaliens, forme la plus spécialisée et la plus récente des Paléanthropiens, qui atteindra son plein épanouissement durant les deux premiers stades de la dernière glaciation (— 70 000 à — 40 000 ans).

Le squelette postcrânien des Archanthropiens est mal connu. La stature a pu toutefois être estimée d'après quelques os longs provenant des couches de Trinil et du site de Choukoutien. Elle varie de 1,58 m (Sinanthropes les plus petits) à 1,78 m au maximum (Java) ; ces différences sont imputables non seulement à des différences raciales mais également à un fort dimorphisme sexuel.

Le crâne offre, dans l'ensemble, des traits primitifs avec un front fuyant chez les formes de Java qui devient plus redressé chez les Sinanthropes. Il est pourvu d'un fort bourrelet sus-orbitaire, auquel répond en arrière un bourrelet occipital très marqué (torus occipital). La voûte crânienne est marquée sagittalement par une carène présente chez les formes asiatiques et l'Atlanthrope de Salé. Le massif facial, qui semble avoir été très développé, présente un fort prognathisme alvéolaire, mais la fosse canine est présente.

Tous ces traits confirment un stade ancestral dont l'évolution conduira vers une gracilisation du crâne, une augmentation de la portion cérébrale aux dépens de la région faciale et une élévation de tous les os de la voûte.

J.-L. Heim

▲ *C'est durant la période interglaciaire du Mindel-Riss (— 300 000 à — 200 000 ans) qu'apparaissent pour la première fois les dispositions structurales annonçant l'*Homo sapiens *; ici, le crâne de l'Homme de Steinheim découvert en Allemagne.*

Les Paléanthropiens

C'est vraisemblablement au sein de la nappe archanthropienne que les Paléanthropiens ont pris naissance, il y a environ 400 000 ou 500 000 ans, pour s'éteindre avec les derniers Hommes de Néandertal juste avant le Paléolithique supérieur, il y a 40 000 ans. La séparation entre les Archanthropiens et les Paléanthropiens demeure extrêmement difficile tant sur le plan anatomique que du point de vue chronologique.

C'est en Europe, où les documents fossiles sont les plus nombreux, qu'apparaît le mieux la transformation physique progressive du genre *Homo,* surtout discernable au niveau du crâne. Cette transformation s'accompagne de la différenciation d'un archétype encore peu spécialisé, pourvu d'une grande capacité évolutive et dont l'acheminement aboutira d'une part à l'*Homo sapiens* fossile, ancêtre direct des types humains actuels, d'autre part à l'Homme de Néandertal, éteint sans descendance. Bien que cette orthogenèse fût certainement amorcée chez des formes humanoïdes du Pléistocène inférieur, dont on ignore l'aspect physique en Europe (industries danubiennes du Vallonet par exemple), elle s'observe dès le stade archanthropien, reconnu sur la mandibule de Mauer. Les caractères de spécialisation que présente cette mandibule, outre ses traits archanthropiens, laissent à penser que l'Homme de Heidelberg était déjà engagé vers une évolution annonçant les formes paléanthropiennes antéwürmiennes.

La période paléanthropienne correspond à l'ensemble du Pléistocène moyen et à la majeure partie du Pléistocène supérieur.

Cette longue phase de la préhistoire a été le théâtre des transformations et des processus évolutifs les plus importants que l'anthropogenèse ait connus depuis l'apparition de la station bipède, l'acquisition de la réflexion ainsi que du langage et la libération de la main de toute fonction locomotrice. La succession chronologique des diverses formes humaines indique une différenciation lente et progressive de toutes les structures qui conduisent au parachèvement de l'espèce humaine, dont on peut suivre l'épanouissement avec *Homo sapiens* fossile et les ancêtres directs des races actuelles. Mais tout le potentiel évolutif des Paléanthropiens archaïques ne se limite pas à notre ascendance. Le mélange de leurs tendances évolutives indique une autre issue, débouchant vers le Néandertalien classique, « terme ultime d'une lignée parvenue à bout de course, engagée dans une Europe trop étroite entre la Méditerranée et la calotte glaciaire de l'époque würmienne et destinée à survivre en vase clos puis finalement à s'éteindre sous le fardeau pesant d'une spécialisation trop poussée » (J.-L. Heim, 1975).

Cette double radiation évolutive autorise une classification dans le temps et dans l'espace. Les Paléanthropiens actuellement reconnus correspondent à près de deux cents individus, dont cent vingt-cinq environ répondent au type néandertalien classique. L'ensemble de ce matériel intéresse une soixantaine de gisements ou de sites préhistoriques. La grande majorité des Paléanthropiens provient d'Europe, où l'on suit particulièrement bien son évolution depuis la glaciation mindélienne jusqu'à la fin du second épisode glaciaire du Würmien.

Il est actuellement difficile de connaître à quel moment les Paléanthropiens ont pris la relève des Archanthropiens. Une telle séparation serait d'ailleurs arbitraire et ne saurait interrompre l'enchaînement d'un phylum dont on peut discerner les maillons sur plus d'un demi-million d'années.

Sur le plan anatomique, les Paléanthropiens diffèrent des Archanthropiens par un squelette céphalique moins robuste ; leur capacité crânienne traduit une augmentation sensible, qui atteindra sa valeur la plus forte chez les Néandertaliens et les Hommes modernes. La voûte du crâne s'élève en même temps que le front se redresse. L'évolution concerne également la face, qui devient moins massive, le torus sus-orbitaire, qui se réduit, et l'arrière-

DATE DES DÉCOU-VERTES	LIEU	RESTES HUMAINS
1887	Bañolas (Espagne)	Mandibule adulte.
1888	Malarnaud (Ariège)	Mandibule et vertèbre d'un sujet jeune.
1895	Isturitz (Pyrénées-Orientales)	Mandibule (disparue depuis).
»	Taubach (Allemagne)	Deux dents.
»	Fond-de-Forêt (Belgique)	Fragment de fémur.
1899-1905 1933	Krapina (Yougoslavie)	Restes fragmentaires de 13 individus au moins (hommes et femmes) + 5-6 enfants.
1907-1908	Petit-Puymoyen (Charente)	Fragments de mandibules et de maxillaires + dents.
1908	Le Moustier (Dordogne)	Squelette incomplet d'un adolescent + fœtus (disparus).
»	La Chapelle-aux-Saints (Corrèze)	Squelette adulte.
1909	Peche-de-l'Azé (Dordogne)	Crâne d'enfant de 2 ans.
1909-1921	La Ferrassie (Dordogne)	2 squelettes adultes + 5 enfants.
1910	Saint-Brelade (Jersey)	9 dents.
1911-1965	La Quina (Charente)	Restes de 27 individus.
1914-1916 1925	Ehringsdorf (Allemagne)	Restes humains divers.
1924	Kiik-Koba (Crimée)	Restes d'un adulte et d'un enfant.
1926	Gibraltar (II)	Crâne d'enfant de 5 ans.
1929-1935	Saccopastore (Italie)	2 crânes adultes.
1934	Marillac (Charente)	Mandibule adulte.
1934-1935	Piñar (Espagne)	Restes crâniens et dents.
1939-1950 1954	Monte-Circeo (Italie)	Crâne + 2 mandibules adultes + 1 mandibule d'enfant.
1949-1950 1951	La Chaise (Charente)	Restes divers, notamment d'enfants.
1951	Montsempron (Lot-et-Garonne)	Fragments de mandibules + dents.
1953	Cova Negra (Espagne)	Pariétal droit.
»	Starolesje (Crimée)	Crâne d'un enfant de 18 mois.
1957	Regourdou (Dordogne)	Squelette incomplet d'un sujet adulte.
1959	Petralona (Grèce)	Crâne adulte.
»	Combe Grenal (Dordogne)	Fragment de mandibule d'enfant avec dents.
1960-1964	L'Hortus (Hérault)	Restes de 20 à 30 individus jeunes et adultes.
1961	Roc de Marsal (Dordogne)	Restes d'un enfant.
1973	La Ferrassie (Dordogne)	Restes de plusieurs enfants (fouilles H. Delporte).

▲ ***Tableau des dates et des lieux de découverte des principaux restes de Néandertaliens d'Europe.***

crâne, qui tend peu à peu à s'étirer chez les Néandertaliens en même temps que les dimensions crâniennes augmentent et que le volume des sinus frontaux s'accuse. Les dents, volumineuses et fortement ridulées chez les Archanthropiens extra-européens, offrent déjà une structure et des dimensions nettement voisines des nôtres sur les mandibules paléanthropiennes antéwürmiennes d'Europe.

En revanche, il semble que les différences entre les Paléanthropiens et les Archanthropiens étaient moins évidentes sur le squelette postcrânien. De ce fait, la réalisation précoce de l'orthostatisme aurait fixé la morphologie générale du corps, alors que le crâne bénéficiait de l'essentiel des transformations liées au processus orthogénétique.

Les Paléanthropiens d'Europe

● *Paléanthropiens du Mindel et du Riss*

Cette longue période (— 400 000 à — 100 000 ans) a livré les formes les plus anciennes et les moins différenciées.

— *Mindel*

La mandibule de *Montmaurin* (Haute-Garonne) et l'occipital de *Verteszöllös* (Hongrie) montrent un mélange de caractères archanthropiens (écaille occipitale basse et large, mandibule robuste pourvue d'une branche montante large et courte, échancrure sigmoïde peu profonde...) et de caractères « évolués » annonçant les Hommes de Néandertal (capacité crânienne de 1 463 cm^3, donc plus élevée que celle des Archanthropiens, élargissement antérieur de l'arcade dentaire, troncature de l'angle mandibulaire...).

— *Interglaciaire Mindel - Riss (— 300 000 à — 200 000 ans)*

Les crânes de *Steinheim* (Allemagne) et de *Swanscombe* (Angleterre) offrent, en plus du mélange de caractères archanthropiens issus d'un héritage ancestral et de caractères progressifs annonçant les Hommes de Néandertal, certaines particularités anatomiques qui préfigurent *Homo sapiens*, et qui sont absentes chez les Néandertaliens classiques : faibles dimensions générales de la tête osseuse, occiput arrondi et régulièrement convexe, vue postérieure du crâne s'inscrivant dans un contour pentagonal, contrairement à la forme observée chez les Néandertaliens, qui est subcirculaire, écaille occipitale haute. Les orbites sont quadrangulaires et petites, particularités que l'on retrouvera au Pléistocène supérieur chez l'Homme de Cro-Magnon. Le massif facial est peu volumineux par rapport à la boîte crânienne et les fosses canines sont indiquées, ce qui atteste des sinus maxillaires de dimensions voisines des nôtres. L'écaille temporale est de type moderne : au lieu d'être basse et séparée du pariétal par une suture rectiligne, comme chez les Hommes de Néandertal, elle est haute et convexe. Enfin, la dent de sagesse (M_3) accuse une réduction marquée par rapport aux deux premières molaires.

Autrement dit, si les caractères protonéandertaliens sont déjà ébauchés sur les formes mindéliennes, c'est véritablement à l'interglaciaire Mindel-Riss qu'apparaissent pour la première fois les dispositions structurales annonçant l'*Homo sapiens*. L'Homme de Néandertal et *Homo sapiens* proprement dit représentent chacun l'aboutissement de deux lignées dont les caractères de spécialisation respectifs ont peu à peu fait leur apparition à partir d'une souche commune aux potentialités évolutives ambivalentes, elle-même issue d'un stock archanthropien ancestral. La séparation entre ces deux tendances a dû s'effectuer entre — 200 000 et — 300 000 ans.

— *Riss (— 200 000 à — 100 000 ans)*

La morphologie crânienne des restes humains d'âge rissien confirme les tendances amorcées chez les formes précédentes. Ces tendances semblent désormais s'inscrire dans le sens de la « néandertalisation », car la spécialisation vers les Néandertaliens classiques devient un peu plus poussée sur les crânes rissiens que sur les formes précédentes. A la période rissienne se rapportent les fragments de voûte de *La Chaise*, grotte Suard (Charente), et du *Lazaret* (Nice), le crâne et les deux mandibules de la *Caune de l'Arago* près de Tautavel (Pyrénées-Orientales).

● *Paléanthropiens de l'interglaciaire Riss-Würm*

La différenciation entre la lignée néandertalienne et la lignée *sapiens sapiens* s'accentue avant la glaciation de Würm. C'est durant cette période humide (— 100 000 à — 70 000 ans) que les caractères anatomiques et dimensionnels des Hommes de Néandertal vont se dégager du stock primitif antérieur par une spécialisation de plus en plus prononcée.

C'est à cette phase de l'évolution des Paléanthropiens que l'on attribue les restes humains d'*Ehringsdorf* (Allemagne), de la grotte Bourgeois-Delaunay (*La Chaise*, Charente), de *Saccopastore* (Italie) et le moulage intracrânien de *Ganovce* (Tchécoslovaquie). Ces Hommes fossiles sont déjà profondément engagés dans le phylum néandertalien, bien que les dimensions de la tête demeurent encore assez faibles et que la capacité crânienne n'excède pas 1 200 à 1 450 cm^3. L'arrière-crâne n'est plus arrondi comme chez les formes précédentes mais s'étire en fuseau. Le contour postérieur de la boîte crâ-

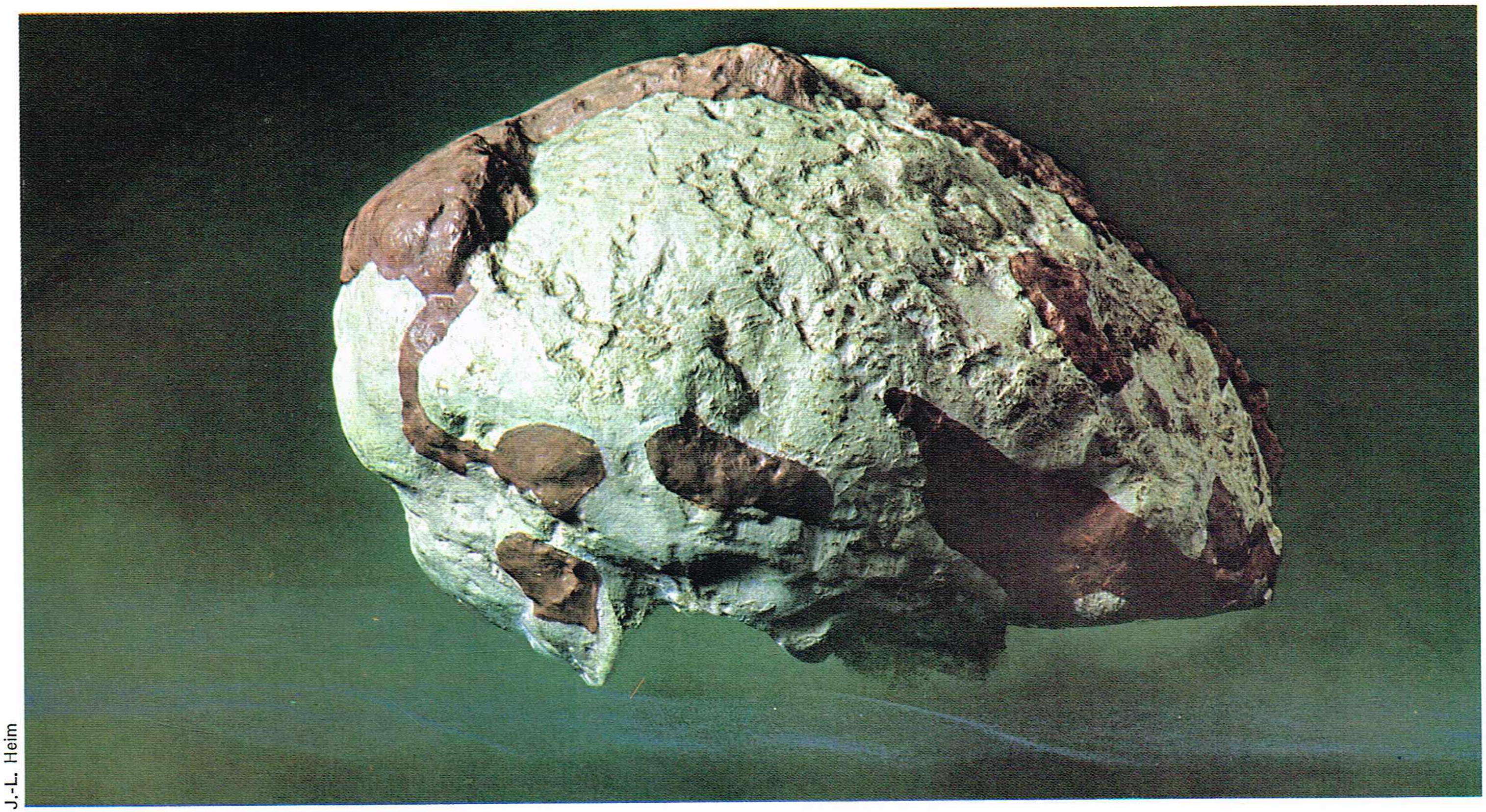

J.-L. Heim

▲ *Moulage d'un endocrâne recueilli à Ganovce (Tchécoslovaquie) : ce reste de Paléanthropien correspond à la période interglaciaire Riss-Würm (— 100 000 à — 70 000 ans).*

nienne n'est plus pentagonal mais tend vers la forme circulaire. Les sinus frontaux augmentent de volume, ce qui confère au bourrelet sus-orbitaire un aspect globuleux. Les sinus maxillaires dilatent la région sous-orbitaire en même temps que s'efface la fosse canine. Les orbites s'agrandissent et s'élèvent. La symphyse mandibulaire se redresse, à tel point que sur certains spécimens une ébauche de menton devient discernable. Ce processus de « néandertalisation » s'accentue chez les individus du Würm ancien (Petralona, en Grèce ; Krapina, en Yougoslavie ; Gibraltar), dont les caractères anatomiques et ostéométriques s'inscrivent dans les limites des variations des Hommes de Néandertal.

En même temps que les représentants de cette lignée prénéandertalienne, dont on suit la progression depuis le début du Pléistocène moyen d'Europe, vivaient les ancêtres de l'*Homo sapiens sapiens,* dont le seul exemplaire connu fut découvert en 1947 par M[lle] G. Henri-Martin dans la grotte de *Fontéchevade* (Charente). Contrairement aux Prénéandertaliens, chez qui le processus de pneumatisation de la tête osseuse est intimement lié à l'augmentation du volume de la face par rapport au crâne cérébral, les Présapiens subiront une régression notable des sinus frontaux, régression qui semble constituer un des facteurs majeurs de la réalisation de la forme *sapiens*. De ce fait, le torus sus-orbitaire, qui caractérise toute la lignée humaine depuis les Archanthropiens jusqu'aux Hommes de Néandertal, disparaît avant même que ces derniers soient complètement différenciés.

En résumé, c'est au cours de l'interglaciaire Riss-Würm que les deux grands aboutissements de la genèse humaine ont totalement acquis leur indépendance à l'égard de la souche primitive commune : l'Homme de Néandertal, qui disparaîtra à la fin du Würm II, et *Homo sapiens* proprement dit, auquel son expansion garantira une diversification de plus en plus poussée dès la fin de la glaciation de Würm et jusqu'à l'époque actuelle.

● *Les Néandertaliens classiques* (Homo sapiens neandertalensis)

Malgré l'existence de variations individuelles et intraspécifiques, les Néandertaliens classiques constituent un groupe relativement homogène, représentant, ainsi que nous l'avons écrit, l'aboutissement d'une lignée indépendante qui s'est détachée d'un stock ancestral issu de formes archanthropiennes. Les Hommes de Néandertal, principalement limités à l'Europe, ont vécu au cours du Würm I et II. Les datations au radiocarbone font remonter leurs formes les plus anciennes à la fin du Riss-Würm (— 70 000 à — 75 000 ans), alors que les plus récentes proviennent principalement du Würm II (— 55 000 à — 35 000 ans). C'est à cette dernière période que l'on attribue les spécimens les plus connus dans diverses régions d'Europe et plus particulièrement en Europe occidentale.

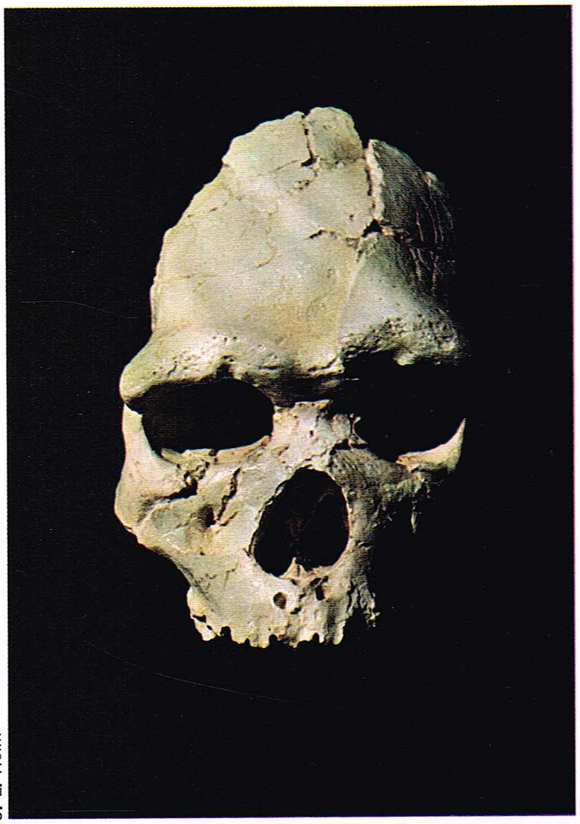

J.-L. Heim

◀ *Crâne découvert à la Caune de l'Arago, près de Tautavel (Pyrénées-orientales). Ce Paléanthropien a vécu durant la période du Riss entre — 200 000 et — 100 000 ans.*

Musée de l'Homme - J. Oster

▲ ***Crâne d'un Homme de Néandertal adulte, découvert à La Ferrassie, Dordogne (La Ferrassie 1). Les Néandertaliens, principalement limités à l'Europe, ont vécu au cours de la période du Würm I et II (entre — 75 000 et — 35 000 ans).***

Les Néandertaliens avaient une taille variant entre 1,50 m environ (La Ferrassie 2) et 1,70 m (La Ferrassie 1). Contrairement à ce que l'on a pensé autrefois, ils étaient parfaitement bipèdes, comme nous le sommes, et dotés d'une musculature importante, d'un tronc large et épais, d'une ossature puissante et d'un crâne volumineux dont la capacité encéphalique atteignait presque 1 700 cm^3 chez les mieux pourvus. Le développement de leurs sinus frontaux et maxillaires était à l'origine d'une structure crânienne un peu particulière, avec un torus sus-orbitaire prononcé et un gonflement des maxillaires qui masquait la fosse canine et donnait l'impression d'une sorte de museau (oncognathisme de S. Sergi) [J.-L. Heim, 1974]. La mandibule, robuste, traduisait une vigueur certaine de la mastication (usure prononcée des dents chez les sujets âgés).

Musée de l'Homme - J. Oster

Sur le plan culturel, les Néandertaliens étaient nettement évolués comparativement aux formes précédentes. Leur outillage *(Moustérien)* offre parfois une belle facture. Ils inhumaient leurs morts soit individuellement *(La Chapelle-aux-Saints)*, soit en famille *(La Ferrassie)*. Ils habitaient le plus souvent sous des abris naturels ou à l'entrée de grottes. Leurs ressources étaient obtenues essentiellement par la chasse et la cueillette. On ne leur connaît cependant aucune œuvre d'art. Les Hommes de Néandertal se sont éteints assez brusquement sans descendance à la fin du Würm II pour une raison que l'on ignore : il s'agit peut-être d'un métissage avec *Homo sapiens* ou, ce qui est plus probable, d'une élimination par une sélection naturelle dans laquelle leur constitution physique ne leur aurait pas été favorable.

Les Paléanthropiens en dehors de l'Europe

Les Paléanthropiens d'Asie continentale, d'Indonésie et d'Afrique représentent un ensemble de types très hétérogènes, souvent mal datés, que la constance de certains caractères a permis de regrouper sous l'appellation de *Néandertaloïdes*.

Si certains individus rappellent les Néandertaliens d'Europe (*Ma-Pa,* Chine ; *Shanidar,* Irak ; *Techik-Tash,* Uzbékistan), d'autres spécimens n'ont de toute évidence rien de commun avec les formes européennes, bien qu'ils en soient plus ou moins contemporains. Cette diversité trouve probablement son origine dans l'évolution *in situ,* qui s'est traduite par le maintien prolongé de la structure archanthropienne jusqu'à une époque relativement récente ; de ce fait, l'éclatement du potentiel évolutif et la différenciation de certains archétypes *africains (Broken Hill, Saldanha)* ou *asiatiques (Solo)* se seraient déroulés beaucoup plus tardivement qu'en Europe. Cela explique la coexistence de nombreux traits archaïques et de dispositions plus évoluées, voire *« sapiens »*, chez un même individu.

Au Maghreb, le processus de néandertalisation peut être suivi à travers les restes humains de *Sidi-abd-er-Rhaman* (Casablanca), de *Rabat,* de *Temara,* de *Mugharet-el-Aliya* jusqu'aux Hommes du *Djebel Irhoud,* homologues des Néandertaliens classiques d'Europe mais en différant par un certain nombre de traits structuraux. On ne connaît pas cependant les ancêtres de l'*Homo sapiens* du Maghreb.

Au Moyen-Orient, le stade archanthropien n'a pas livré jusqu'à présent de restes humains. Par contre, les Paléanthropiens, contemporains des Néandertaliens classiques d'Europe, sont particulièrement bien diversifiés et offrent tous les intermédiaires entre les formes aux traits néandertaliens indiscutables *(Tabun, Amud)* et celles dont les affinités avec *Homo sapiens,* notamment avec les Hommes de Cro-Magnon *(Tabgha, Skuhl, Djebel Kafzeh),* ne laissent désormais plus aucun doute. Ce curieux mélange de caractères semble être distribué autant sur les individus eux-mêmes qu'en fonction de la localisation géographique des gisements. Un tel polymorphisme pourrait résulter d'un métissage entre une population aux affinités néandertaliennes très prononcées et un peuplement *sapiens* dont les ancêtres respectifs demeurent actuellement inconnus. Les Paléanthropiens du Moyen-Orient confirment de toute évidence les données recueillies en Europe, à savoir que les deux formes *sapiens* et néandertalienne ont parfaitement pu coexister en certaines régions du monde et que la seconde ne peut en aucune façon dériver de la première. C'est là un fait désormais acquis, qui représente sans aucun doute l'une des dernières conquêtes de la paléontologie humaine.

***Les Néanthropiens* (Homo sapiens sapiens)**

Avec *Homo sapiens sapiens,* l'évolution des Hominidae est parvenue à son terme alors que s'éteignaient les derniers Néandertaliens d'Europe. La nappe néanthropienne devient la seule forme humaine représentée depuis la fin du Pléistocène supérieur, soit vers — 40 000 à — 35 000 ans.

Il n'existe sur le plan culturel aucune coupure véritable : les survivances moustéroïdes de l'industrie lithique et la pratique d'inhumations funéraires ont persisté plus ou moins longtemps durant l'Age du Renne (notamment au cours du Châtelperronien pour l'outillage lithique) en association avec de nouvelles formes techniques, certes plus élaborées (technique laminaire, apparition de nou-

veaux outils et industrie osseuse). Cependant l'*Homo sapiens* du Paléolithique supérieur manifeste un pouvoir d'abstraction supérieur à celui des nappes précédentes et témoigne d'une prise de conscience plus élaborée de son environnement, avec les premières créations artistiques et symboliques connues.

Sur le plan physique, l'*Homo sapiens* du Pléistocène supérieur diffère peu dans ses grandes lignes des Hommes actuels. La forme du crâne résulte d'une gracilisation plus poussée et de la diminution du rapport cranio-facial, qui atteint les limites des variations humaines modernes. Les sinus frontaux et maxillaires demeurent toujours plus réduits que chez les Néandertaliens, ce qui va de pair avec la disparition définitive du torus sus-orbitaire et la permanence de la fosse canine. Le front s'arrondit et se redresse. L'apophyse mastoïde est bien marquée, bien qu'elle soit généralement plus saillante chez le sexe masculin. L'occipital s'arrondit sous l'effet d'une bascule portant la protubérance occipitale externe au-dessous de la ligne tangente au bord inférieur de l'orbite et au bord supérieur de l'ouverture du conduit auditif externe (plan de Francfort, ou plan porio-orbitaire). Le menton devient constant malgré son développement plus ou moins prononcé selon les types, et la troisième molaire subit une tendance très marquée à la réduction, pouvant même conduire à sa disparition.

Il existe toutefois de légères différences avec les Hommes actuels occupant les mêmes régions géographiques; elles laissent supposer que l'évolution s'est quelque peu prolongée depuis l'avènement des premières formes *sapiens*. En effet, la différenciation des Néanthropiens fut lente et progressive : les civilisations du Paléolithique supérieur s'imbriquent de telle sorte que certaines régions, notamment l'Amérique et l'Océanie, semblent avoir été peuplées plus tardivement que l'Europe, l'Afrique et l'Asie. Si leur apparition résulte d'une différenciation *in situ* de formes préexistantes, on ne doit pas pour autant négliger le rôle des migrations successives et l'action du métissage, dont l'effet a pu apparaître plus ou moins précocement.

Europe

La paléanthropologie de l'Europe au Paléolithique supérieur semble reposer sur la différenciation de deux formes raciales fondamentales, à partir desquelles dérivent la plupart des autres types classiquement décrits qui résultent de variations géographiques particulières issues de spécialisations locales ou de croisements entre les deux stocks raciaux primitifs. Les caractères d'un tel métissage font apparaître soit un véritable mélange de particularités, soit une prédominance à divers degrés de tel ou tel trait subspécifique des formes initiales.

★ *Race de Combe-Capelle.*

Ce vieux type humain fossile, qui représente la forme *sapiens* la plus ancienne d'Europe, a été défini sur un squelette mis au jour en 1909 au roc de Combe-Capelle (Dordogne). Il avait fait l'objet d'une sépulture intentionnelle et fut découvert avec une industrie datée du Périgordien inférieur.

Ce type présente une stature moyenne (1,63 m) ; des membres à l'ossature grêle font apparaître, contrairement à ce qui s'observe chez les Hommes de Néandertal, un allongement marqué de l'avant-bras et de la jambe par rapport au bras et à la cuisse : cette tendance à l'allongement du segment distal est un fait qui se retrouve d'ailleurs souvent chez les Hommes du Paléolithique supérieur. Le crâne offre à la fois des caractères plutôt archaïques (front fuyant, effacement des bosses pariétales, menton peu accusé, occlusion dentaire en bout à bout) et des caractères accusant une structure crânienne très évoluée, plus évoluée même à certains égards que celle des Hommes de Cro-Magnon (écaille occipitale régulièrement arrondie, bascule de la région occipitale vers le bas amenant la protubérance médiane nettement au-dessous du plan porio-orbitaire, voûte crânienne élevée, etc.). La face est haute, orthognathe, pourvue d'une ouverture nasale plutôt large et d'orbites de hauteur moyenne.

Les caractères anthropologiques de la race de Combe-Capelle se retrouvent, de façon plus ou moins accusée, chez d'autres formes du Paléolithique supérieur *(Grimaldi, Chancelade)*, pour ce qui est des proportions des membres, de la forme ovoïde du crâne, du contour arrondi de l'occiput. Elle évoque le crâne de l'*Abri Pataud* par

Musée de l'Homme - J. Oster

▲ ***Crâne du vieillard de Cro-Magnon (Néanthropien) découvert en 1868 dans la grotte de Cro-Magnon aux Eyzies en Dordogne. Les Hommes de Cro-Magnon vivaient au Pléistocène supérieur, soit vers — 40 000 à — 35 000 ans; sur le plan physique, cet* Homo sapiens *diffère assez peu des Hommes actuels.***

la voussure du crâne, par la verticalité des plans pariétaux, par la hauteur moyenne des orbites et par la faible saillie mentonnière. Elle présente surtout des ressemblances avec les Néanthropiens d'Europe centrale, principalement avec les crânes de *Brno* (Bohême) et de *Predmost* (Moravie) ainsi que, dans une certaine mesure, avec les deux crânes d'*Obercassel* (Allemagne). Les traits combecapelliens semblent se prolonger après le Pléistocène supérieur chez certains squelettes mésolithiques proto-méditerranéens de *Mugem* (Portugal) et de Palestine (Natoufiens).

★ *Race de Cro-Magnon.*

Les Hommes de Cro-Magnon ont laissé des traces abondantes de leur existence, de leurs conditions de vie (habitat, parures, déchets de cuisine) ainsi que de leurs activités techniques et artistiques, dont les peintures rupestres, les os gravés et les statuettes d'ivoire (vénus) nous offrent des exemples parfois surprenants.

Les Hommes de Cro-Magnon furent découverts en 1868 dans l'abri sous roche du même nom aux *Eyzies* (Dordogne). D'autres squelettes, mis au jour entre 1870 et 1902 dans les grottes des *Baoussé Roussé* sur le littoral des Alpes-Maritimes, ont permis une diagnose assez complète de ce type. Leurs squelettes donnent l'impression d'une certaine vigueur, que rendent encore plus apparente la haute stature, laquelle dépasse 1,80 m chez les formes du midi de la France, la massivité des extrémités des os longs et le modelage de la plupart des os. Le crâne cérébral est volumineux (la capacité crânienne peut dans certains cas atteindre 2 000 cm^3) et allongé, notamment par la région occipitale, qui forme un chignon. Celle-ci contraste avec une face peu élevée, pourvue d'une ouverture nasale étroite, d'orbites basses et rectangulaires, de fosses canines très déprimées et d'un menton particulièrement saillant, autant de traits différents de ceux de la race de Combe-Capelle.

Les caractères cro-magnoïdes se sont maintenus pendant toute la durée du Paléolithique supérieur sur la plupart des restes humains européens *(Abri Pataud, Solutré, La Madeleine, Les Hoteaux, Le Placard)*. Ils ont persisté chez les formes postpaléolithiques de *Culoz, Ofnet, Stangenäs, Hengelo*, etc., et ont même atteint des périodes récentes (*Guanches* des Canaries), voire l'époque contemporaine.

Variations régionales de ces deux races fondamentales

Les limites de la variabilité des caractères ostéologiques des Hommes de Combe-Capelle et de Cro-Magnon, ainsi

◀ ***Page ci-contre, en bas crâne d'un Néandertalien masculin adulte, découvert en 1908 à la Chapelle-aux-Saints en Corrèze.***

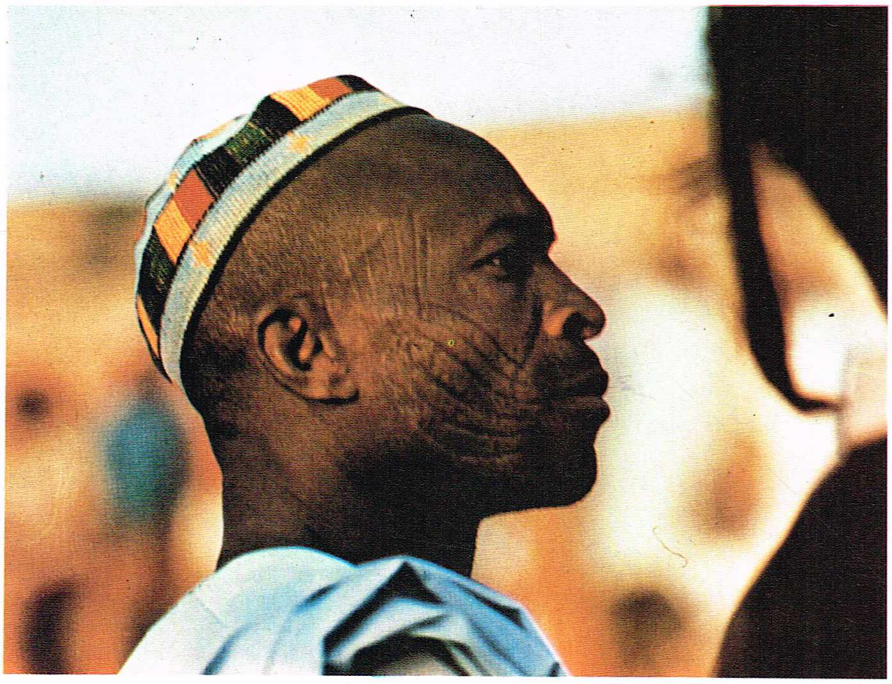

J.-L. Heim

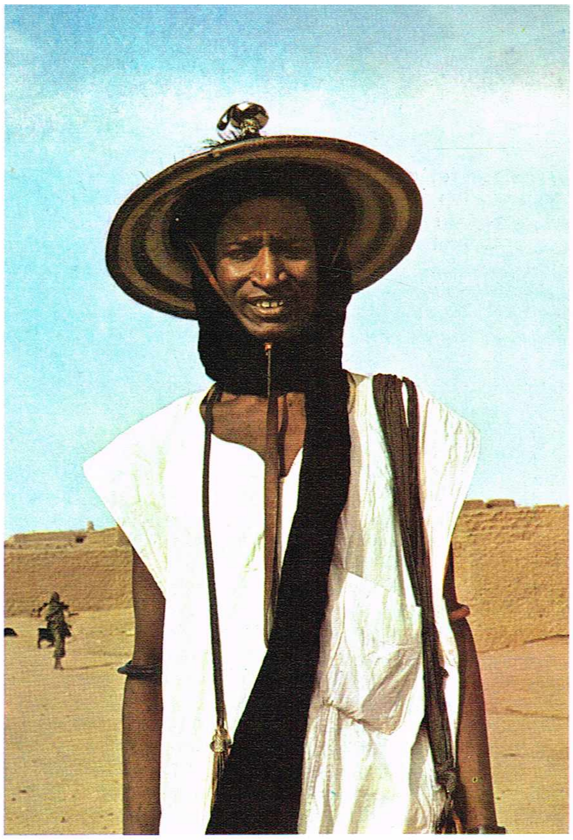

J.-L. Heim

▲ *Deux exemples de* la race mélano-africaine : *à gauche, un homme* de type soudanais *(Agadès-Niger), à droite, un homme* de type peul *(Niger).*

que les possibilités de métissage existant entre elles, semblent être la cause d'une certaine diversification de l'humanité au cours du Paléolithique supérieur. Certains types locaux, souvent élevés au nom de races, ont pu être décrits. Parmi ceux-ci on connaît plus particulièrement :

— *le type de Grimaldi,* caractérisé par une stature n'excédant pas 1,60 m, une ouverture nasale élargie, une hyperdolichocéphalie, une face basse et large, un prognathisme marqué et certains traits classiquement considérés comme ayant des affinités négroïdes ;

— *le type de Chancelade,* qui offre des affinités indiscutables avec Combe-Capelle en ce qui concerne la forme générale du crâne, la stature et les proportions corporelles. Il présente toutefois des caractères propres, tels que la largeur des pommettes, l'orthognathisme parfait et la présence d'une voûte crânienne carénée, qui l'ont fait pendant un temps considérer à tort comme le représentant d'une population protomongoloïde. Le type de Chancelade se retrouve chez les Hommes de *Sorde-l'Abbaye,* du *roc de Sers,* de *Bruniquel,* de *Saint-Germain-la-Rivière,* de *Cap-Blanc,* datant généralement de l'époque magdalénienne. Ses caractères se sont maintenus chez les dolicho-mésocéphales de *Téviec,* de *Hoedic* et de *Kauferstberg.*

Afrique

Les restes humains correspondant au Pléistocène supérieur d'Afrique semblent plus récents que ceux d'Europe. Si les caractères relevés sur certains d'entre eux préfigurent indiscutablement quelques populations actuelles, d'autres paraissent au contraire avoir disparu progressi-

R. Heim

▶ *Un groupe de Pygmées Babingas de la région de la Lobaye (République centrafricaine) ; ces Pygmées appartiennent* à la race négrille.

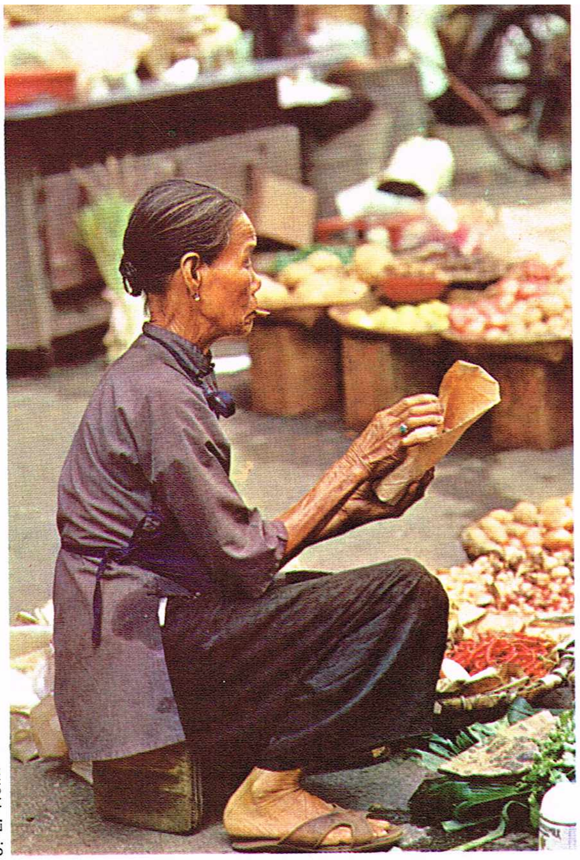

J.-L. Heim

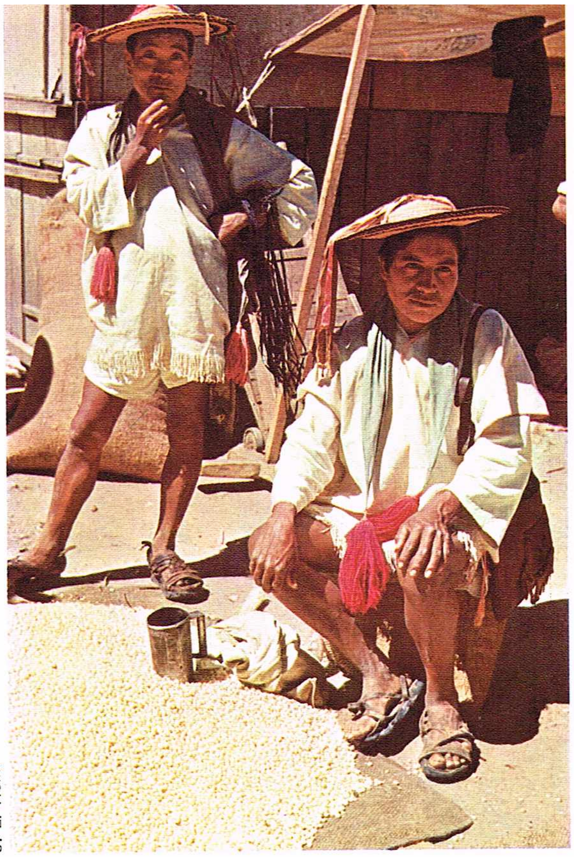

J.-L. Heim

J.-L. Heim

▲ ***Trois types représentatifs du groupe des races jaunes :*** ***à gauche,*** **race mongole :** ***ici, une femme chinoise de Singapour ;*** ***au milieu,*** **race amérindienne :** ***des Indiens Zinacantan du Mexique ;*** ***à droite,*** **race indonésienne :** ***une femme Minangkebau de Sumatra.***

vement sans engendrer les types humains présents actuellement dans les mêmes régions et qui proviennent plutôt d'apports extérieurs.

Maghreb. Le type de *Mechta-Afalou-Taforalt* offre des affinités avec la race de Cro-Magnon, dont il pourrait dériver. Chronologiquement, ces formes datent de la fin du Paléolithique supérieur et du début des temps mésolithiques (Épipaléolithique).

Afrique orientale. Les restes humains de *Gamble's Cave* (Oldoway, Tanzanie) s'apparentent aux populations actuelles de la région (Nilotiques, Massaï) par leur grande stature (1,80 m), leur dolichocéphalie prononcée et leur face haute et étroite.

Afrique orientale. A la race de *Boskop* (Transvaal) se rapportent les restes humains de *Springbock Flats*, de *Fish Hoeck*, de *Matjes River*, de *Tzitzikama* et d'*Otjiseva*, chez lesquels des caractères cro-magnoïdes s'associent à des traits « protoboschimans ».

Les caractères « australoïdes » présents actuellement chez les aborigènes d'Australie ont été relevés pour la première fois sur des crânes de *Cape Flats* (Capetown) et de *Florisbad* (Orange).

Asie

Les caractères squelettiques des races jaunes actuelles apparaissent dès le Paléolithique supérieur sur les sujets fossiles de la grotte supérieure de Choukoutien (Chine), au-dessus des niveaux qui avaient livré les Sinanthropes. Toutefois, à l'élargissement des pommettes s'ajoutent un front plus fuyant, une dolichocéphalie marquée et un certain prognathisme alvéolaire témoignant d'un état moins différencié que celui des types actuellement représentés dans cette région du monde. Des exemplaires peu différents proviennent du Kwangsi et du Szechwan (Chine).

L'existence de formes australoïdes en Asie du Sud-Est et en Indonésie est corroborée par les caractères relevés sur les squelettes de *Wadjack* (Java) et les types, peut-être plus anciens, de *Niah* (nord de Bornéo), de *Talgaï*, de *Keilor* et de *Cohuna* (Australie), qui préfigureraient ainsi le peuplement aborigène de la grande île, effectué tardivement à la fin du Würmien à partir d'un centre sud-asiatique ou indonésien.

Amérique

Selon Bryan, l'arrivée de l'Homme en Amérique remonte à 40 000 ans, estimation qui paraît certainement excessive en raison du faible nombre de restes humains véritablement anciens recueillis au Nouveau Monde. Cependant, il semble que des populations asiatiques protomongoloïdes aient pu traverser, il y a au moins 15 000 ans, le détroit de Behring, alors exondé. Par la suite, d'autres groupes humains en provenance d'Indonésie ou d'Asie du Sud-Est ont pu rejoindre le continent américain pour s'y fixer et s'adapter de la sorte à de nouvelles conditions d'environnement. On connaît en effet plusieurs sites et de nombreux documents archéologiques attestant l'existence de cette vieille occupation humaine, qui se déroula à une époque sensiblement contemporaine de notre Paléolithique supérieur final et du Mésolithique. Les restes humains associés à ces divers gisements diffèrent très peu des Indiens actuels : c'est pourquoi on les qualifie de *Proto-Amérindiens*.

En résumé, c'est à la fin de l'époque mésolithique que les principaux groupes anthropologiques de l'Europe se sont peu à peu mis en place. En revanche, les races noires semblent s'être différenciées plus tardivement sur le sol africain, alors que les Australoïdes, les Mélanodermes d'Océanie et les Jaunes dans leur ensemble résulteraient d'une spécialisation plus précoce.

J.-L. Heim

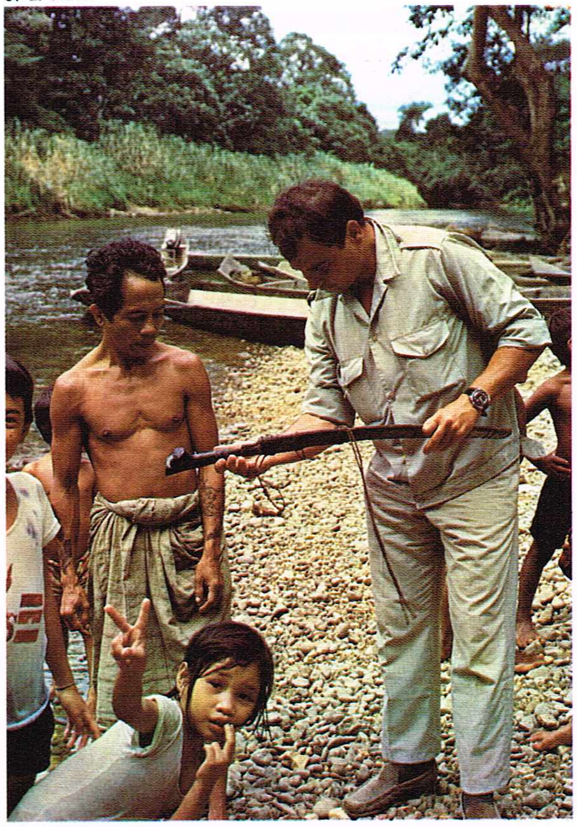

◀ ***Les Dayaks de Bornéo, appartenant à la race indonésienne, sont caractérisés par une petite stature.***

La diversité humaine

La thèse monophylétique dont les pages précédentes ont fait rejaillir tout l'intérêt puisqu'elle propose la seule explication véritablement fondée de l'évolution humaine, se confirme dans le fait que tous les Hommes actuels relèvent d'une seule et unique entité taxonomique, *Homo sapiens sapiens*.

L'unité de l'espèce humaine repose sur la communauté de structure physique et psychique de tous ses représentants, et sur leur interfécondité qui s'exprime non seulement par la production d'hybrides féconds mais également par l'apparition de groupes mixtes ou intermédiaires.

Bien qu'appartenant à la même espèce, tous les Hommes ne sont pas identiques les uns aux autres et diffèrent par de nombreux caractères, transmis héréditairement de génération en génération, dont les fréquences varient d'une manière plus ou moins significative d'un groupe à l'autre. Un tel polymorphisme intra-spécifique n'est d'ailleurs pas exclusif à l'espèce humaine : dans toutes les espèces du règne animal (et végétal) il existe des variétés dont l'apparition a pu être favorisée par un état d'isolement particulier, par un contexte écologique défini ou par un taux de mutations plus élevé dans une région que dans une autre, par suite de l'action particulièrement importante des processus de sélection. Il est inutile de rappeler l'importance que revêtent ces variétés dans un but économique ou esthétique (élevage, agriculture, plantes et animaux d'agrément).

Dans le cas de l'espèce humaine, on a coutume de désigner sous le nom de *races,* terme que l'on pourrait d'ailleurs remplacer plus justement par types géographiques, un groupement naturel d'individus présentant un ensemble de caractères physiques, physiologiques, pathologiques, biochimiques ou écologiques communs dont la fréquence des gènes conditionnant ces caractères demeure transmise de génération en génération suivant des règles bien définies, lesquelles constituent les lois de la génétique.

La notion de race appliquée à l'espèce humaine est donc une notion essentiellement biologique. Elle ne saurait se distinguer des autres règles de la nomenclature zoologique si on ne l'avait trop souvent mal interprétée ou si elle n'avait donné lieu à de fâcheuses confusions et même à de dramatiques méprises. On ne doit en aucun cas confondre la *race* avec l'*État* qui est une formation politique soumise à des lois et à un gouvernement uniques, ni encore moins avec la *nation,* groupement d'hommes qui habitent un même territoire et ayant en commun des intérêts, une histoire, une religion ou une langue, et quelquefois même une unité raciale. Par *population,* on entend une association d'individus composant une catégorie sociale (population ouvrière) ou démographique (urbaine, rurale, insulaire...). Enfin, on ne saurait confondre race et *ethnie,* cette dernière faisant appel à une communauté de caractères culturels, linguistiques, religieux, c'est-à-dire à une civilisation. Par exemple, les Slaves, les Germains et les Latins représentent chacun une civilisation, une entité linguistique et non pas raciale. De même, on parlera de langues aryenne, dravidienne, sémite, hamite, bantoue et non pas de races. Toutefois, dans certains cas particuliers (isolement géographique, événements historiques, circonstances économiques), l'ethnie, la religion et la race peuvent se superposer très étroitement (Australiens, Négrilles, Boschimans, Esquimaux et certaines populations autochtones insulaires). De telles circonstances tendent de plus en plus à disparaître. En effet par suite d'événements politiques et historiques, de nécessités économiques et culturelles, les relations interhumaines ont provoqué un phénomène d'*hétérosis* (éclatement des isolats) tendant vers une *panmixie* par laquelle les groupements démographiques en perpétuelle évolution ont depuis bien longtemps déjà dépassé leur simple cadre racial.

Les caractères qui définissent un individu ou un groupe d'individus supposés appartenir à une même entité raciale se divisent schématiquement en deux types.

— *Les caractères acquis* apparaissant sous l'effet du milieu, c'est-à-dire du climat, des habitudes, de l'alimentation, des structures sociales. Ces caractères, qui varient avec les conditions de l'environnement, n'apparaissent d'une génération à l'autre que si ces conditions sont maintenues.

— *Les caractères héréditaires* sont transmis d'une génération à l'autre quelles que soient les conditions du milieu. Ce sont les seuls caractères qui intéressent l'anthropologue et qui permettent de regrouper les Hommes dans une classification définie.

Ces caractères permettent de mieux comprendre les particularités profondes des groupes humains naturels et d'en expliquer, dans une certaine mesure, les traits sélectifs et adaptatifs. Certains caractères héréditaires définis par un petit nombre de gènes sont particulièrement indiqués pour comparer les groupes raciaux et pour analyser leur propre évolution. De tels caractères supposent qu'on en connaisse la fréquence au sein d'une population (phénotype) et par conséquent d'en déduire leur fréquence génique. C'est ainsi que l'on accorde une place importante à l'étude des groupes sanguins, des protéines sériques, des enzymes cellulaires et plasmatiques (caractères sérologiques et biochimiques), à la sensibilité à diverses substances (primaquine, phénylthiocarbamide), aux empreintes digitales et palmaires (dermatoglyphes) ou encore à certains états pathologiques dont la fréquence semble spécifique d'une population donnée (trachome, thalassémie, sicklémie, trypanosomiases, kuru, polyostéochondrite...).

Cependant, la plupart des caractères (pigmentaires, dimensionnels, histologiques, morphologiques) sur lesquels portent les diagnoses raciales les plus généralement employées résultent, non pas d'un simple gène, mais de l'effet cumulatif de plusieurs, dont le mode de transmission est beaucoup plus difficile à connaître que celui des caractères précédents. La fréquence des gènes, dont dérivent les caractères polymériques, ne peut alors être connue avec précision. D'autre part, la variabilité des combinaisons peut rapprocher phénotypiquement des populations offrant un génome différent. De ce fait, le même gène peut faire apparaître des caractères dissemblables chez deux ou plusieurs populations différentes alors que le même phénotype peut résulter d'une autre combinaison de gènes.

Ainsi le problème des regroupements et des affinités intra-spécifiques apparaît-il bien plus complexe en réalité que ne le laissent supposer les diverses *classifications des races* ayant pu être proposées.

Il semble que les Hommes aient depuis les temps les plus reculés pris conscience de leur hétérogénéité, car ils se sont efforcés à maintes reprises de diviser leur propre espèce en catégories distinctes. C'est ainsi que les anciens Égyptiens avaient reconnu au sein des populations voisines de la Méditerranée orientale un certain nombre de groupes à la morphologie différente (peintures représentant l'arrivée des Sémites à Beni-Hassan, vers 1900 avant J.-C.). C'est au XVIII^e^ siècle avec Linné que les classifications acquirent une valeur plus scientifique. Afin de les établir, les savants ont fait appel aux caractères morphologiques car c'étaient les seuls caractères qui pouvaient servir de références et dont les seules différences ou analogies semblaient suffisantes pour établir des groupements : couleur de la peau (Linné), forme de la tête (Blumenbach, Dixon), profil facial (Camper, G. Saint-Hilaire), forme et texture des cheveux (Haeckel, Deniker, Haddon), forme du nez (Topinard), groupes sanguins (Wiener), etc.

Si toutes ces classifications eurent le mérite d'approfondir la connaissance des variations de l'espèce humaine, elles demeurent toujours arbitraires et insuffisantes en raison du nombre considérable de types intermédiaires, alors que le pourcentage d'individus répondant véritablement au type racial proposé est réellement très faible, voire même souvent exceptionnel. En effet, le brassage et le mélange des populations se sont accrus à mesure que le progrès créait de nouveaux besoins et perfectionnait les techniques et les moyens de transport. Lorsque le mélange dépasse le cadre restreint de l'*isolat,* il se produit un *métissage* se soldant par une atténuation plus ou moins prononcée des caractères pris pour référence, une augmentation de la diversité génétique, une sélection naturelle ou démographique plus rapide, une élévation du taux de mutation et une augmentation de la marge d'adaptation. On comprend alors aisément qu'une classification fondée essentiellement sur la présence de caractères arbitrairement choisis ne soit plus en mesure de répondre à l'image exacte de la population, compte tenu de ses variations qui parviennent bien souvent à chevau-

▶ ***Page ci-contre, tableau de la répartition géographique et des caractères morphologiques des différentes races humaines.***

LES RACES HUMAINES (J.-L. Heim)

Groupes raciaux	Continents	Races	Types	Répartition géographique	Stature[1]	Tête[2]	Face	Nez	Cheveux	Yeux	Peau	Groupes sanguins	Caractères morphologiques divers
GROUPE DES RACES BLANCHES	EUROPE	nordique		Scandinavie, pourtour des mers du Nord et Baltique	G	D et M	allongée	étroit	clairs	clairs	claire	Le groupe O l'emporte nettement sur les autres (50 à 75 %) Le groupe B est le plus rare (0 à 25 %)	corps élancé
			dalique	Allemagne, Lorraine, sud de la Suède		M et B	large						corps moyennement trapu
		est-européenne		Europe orientale	SSM et M	B	large à pommettes saillantes	court et large à dos concave					corps trapu
		alpine	alpin continental	Europe centrale et orientale		B	large		foncés ou châtains	foncés ou clairs			
			lapon	nord de la Scandinavie	P	TB	très large						
		dinarique		Balkans, Carpates	SRM ou G	B	allongée	proéminent et convexe		foncés			corps moyennement élancé
	ASIE	anatolienne		de l'Asie Mineure au Pamir				rectiligne					corps massif, obésité fréquente, pilosité marquée / lèvres minces
			arménoïde	sud de l'U.R.S.S., nord de la Palestine		TB		convexe					lèvre inférieure éversée
		touranienne		Turkestan, Oural, Pamir et Crimée	M	TB	très large à pommettes saillantes	parfois concave		foncés et parfois étirés	mate		présence de caractères mongoloïdes
	EUROPE - ASIE AFRIQUE	méditerranéenne	atlanto-méditer.	divers points de France et d'Espagne	M	M			foncés				lèvres fines
			ibéro-insulaire	îles et côtes européennes de la Méditerranée	SSM ou M	D	allongée	droit et fin		foncés			lèvres souvent charnues
			saharien	Afrique du Nord, Canaries et Sahara	SRM ou G	M, D, TD		droit ou busqué					épaules étroites, structure longiforme, membre inférieur relativement allongé pilosité faible
			sud-oriental	Moyen-Orient, Arabie, Égypte	SRM et M	TD	allongée et étroite	fin et étroit		foncés en amande	brune		
			indo-afghan	Iran, sud Afghanistan, Inde				large		foncés	très brune		
	ASIE	aïnou		nord du Japon, Sakhaline et Kouriles	P	D	large à pommettes saillantes	droit ou concave	noirs	noirs	claire		corps trapu, forte pilosité
GROUPE DES RACES JAUNES	OCÉANIE - ASIE	paléo-sibérienne		Sibérie du Nord-Ouest et de l'Est	P ou SSM	M et D tête basse	aplatie	moyen	noirs ou châtains lisses ou ondulés	obliques	claire	Augmentation du groupe B (10-20 %)	pilosité faible, caractères mongoloïdes assez peu accusés
		nord-mongole		steppes et plateaux d'Asie orientale et septentrionale	SSM	B tête basse	aplatie avec pommettes saillantes	déprimé à la racine		œil mongolique	jaunâtre		pilosité faible, barbe développée
		centro-mongole		Asie orientale et méridionale	SSM	M	moins plate	parfois saillant	lisses et raides	œil à peine mongolique			caractères mongoloïdes moins accusés
		sud-mongole		régions tropicales du sud-est de l'Asie, Japon, Tibet, Malaisie	P et SSM	B	arrondie et prognathe	large		bride mongolique inconstante	jaune-brun		corps grêle
			deutéro-malais	régions côtières de Malaisie	SSM	métissage avec la race indonésienne							
		indonésienne		régions montagneuses d'Indonésie	P	M	losangique et pommettes saillantes	souvent aplati	lisses ou ondulés	rectilignes	blanc cuivré ou brun clair		caractères mongoloïdes atténués ou mal différenciés, métissage avec les Veddas, Négritos ou Mongols, lèvres épaisses
		polynésienne		archipels polynésien et micronésien	G	B rarement D	losangique, pommettes saillantes parfois	droit et saillant			olivâtre ou brunâtre		pilosité réduite, hanches larges, tendance à l'obésité
	AMÉRIQUE	esquimau		côtes des terres boréales	P ou SSM	D ou M tête carénée	ovale, pommettes parfois saillantes, mâchoires massives	moyennement large		bride mongolique souvent présente	brun jaunâtre	Grande fréquence de O (80 à 100 %)	corps trapu, membres courts
		amér-indienne	nord-pacifique	ouest de l'Amérique du Nord	SRM	B	large avec pommettes saillantes	« en bec d'aigle »	noirs et raides		blanc jaunâtre ou brun clair		pouls lent, corps trapu, pilosité faible, incisives supérieures spatulées
			nord-atlantique	est de l'Amérique du Nord	SRM et G	M							
			sud-pacifique	Amérique centrale, ouest de l'Amérique du Sud	P	B	large	moyennement large			brune		lèvres épaisses, corps moins lourd
			sud-atlantique	Antilles, est de l'Amérique du Sud		M	ovale avec pommettes saillantes	droit	longs, droits ou ondulés	œil non mongolique	jaune-brun		aspect mongoloïde atténué
			Indiens des pampas	partie méridionale de l'Amérique du Sud	GG	TB		saillant	épais				corps massif
			paléo-amér-indien	extrême sud de l'Amérique	P	D	front bas prognathe	large	parfois ondulés	œil non mongolique	jaune-brun		caractères primitifs
GROUPE DES RACES NOIRES	AFRIQUE	mélano-africaine	soudanais	prairies et savanes d'Afrique occidentale	G et GG	D	moyennement large avec pommettes saillantes	moyennement large		foncés	très noire	Augmentation du groupe B (5 à 25 %)	corps élancé
			guinéen	le long du golfe de Guinée	M et SRM	D et M		large	courts et crépus		marron foncé		corps trapu, membres inférieurs courts, thorax développé
			congolais	forêt équatoriale	SSM et M	M	basse et large, pommettes saillantes, prognathe	très large			brun foncé		corps trapu, mollet apparent, pilosité forte, lèvres éversées
			nilotique	Haut-Nil	G, GG et GGG	TD	longue et orthognathe	large	très crépus		très noire		corps élancé
			sud-africain	Afrique du Sud et une partie de Madagascar	SRM	D	prognathisme modéré		crépus	foncés	brune		trapu, bassin large
		éthiopienne		Afrique orientale	M et SRM		allongée	étroit et saillant	ondulés ou frisés		brun cuivré		corps élancé, lèvres minces, nez peu large
		négrille		forêt équatoriale d'Afrique centrale	PP	D et M	large et pommettes saillantes	très large et épaté	crépus	grands et étirés	brun jaunâtre		pilosité développée, corps trapu, glandes sudoripares et sébacées développées
		khoisan	boschiman	désert du Kalahari	P	M	aplatie avec des pommettes saillantes	large	« en grain de poivre »	étroits et obliques	jaune cuir ou brun foncé		corps gracile, pilosité nulle, stéatopygie, disposition particulière des organes génitaux
			hottentot	steppes sud-africaines	SSM	D		moins large					
	ASIE	mélano-indoue		Inde et Ceylan	SSM	D	fine	droit et mince	bouclés		foncée		menton saillant, lèvres charnues
	OCÉANIE	négrito		Philippines, Andaman, presqu'île de Malacca	PP	B ou M tête courte	arrondie	large et saillant	crépus	foncés	chocolat		pilosité faible, corps bien proportionné
		mélanésienne	proprement dit	Mélanésie, Nouvelle-Guinée, Tasmanie et Nouvelle-Calédonie	SSM et M	D	massive et prognathe, bourrelet sus-orbitaire	très large	crépus et longs dits « en vadrouille »		brun foncé		corps trapu, lèvres épaisses, menton fuyant
			papou (pseudo-sémite)	nord-est de la Nouvelle-Guinée	SRM		allongée	saillant et convexe					structure plus fine
RACES AUSTRALOÏDES	OCÉANIE - ASIE	vedda	vedda proprem. dit	est de Ceylan	P	D	basse et large, front fuyant	large à racine déprimée	foncés, longs ou ondulés	foncés	brun foncé	B pratiquement nul	barbe et pilosité réduites, menton fuyant
			veddoïde	Deccan, plaine du Gange		D ou M	allongée				brun clair		
		australienne	australe	Australie	M	D voûte basse	arcades sus-orbitaires proéminentes	aplati à racine enfoncée	noirs frisés ou ondulés	foncés	brun clair ou chocolat		barbe et pilosité développées, lèvres épaisses, corps élancé, jambes longues

[1] Statures. - PP : très petites (de 1,25 m à 1,49 m); P : petites (de 1,50 m à 1,59 m); SSM : sous-moyennes (de 1,60 m à 1,63 m); M : moyennes (de 1,64 m à 1,66 m); SRM : surmoyennes (de 1,67 m à 1,69 m); G : grandes (de 1,70 m à 1,79 m); GG : très grandes (de 1,80 m à 1,99 m); GGG : géantes (au-delà de 2 m).

[2] Tête (indice céphalique). - TD : très dolichocéphales; D : dolichocéphales; M : mésocéphales; B : brachycéphales; TB : très brachycéphales.

J.-L. Heim

J.-L. Heim

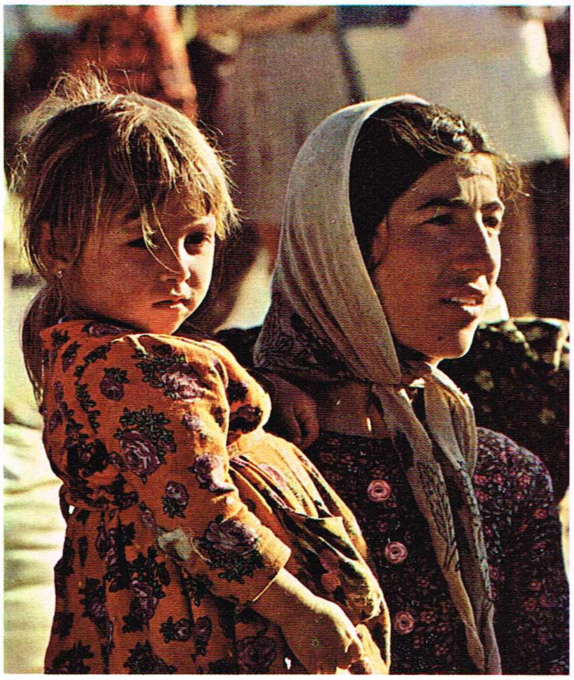

J.-L. Heim

▲ ***Quelques représentants** du groupe **des races blanches : à gauche : race nordique : un couple de mariés norvégiens ; au milieu, race dinarique : un joueur de flûte crétois ; à droite, race anatolienne : une femme et une fillette d'Anatolie centrale.***

cher celles de groupes supposés relever d'une autre entité raciale. La classification aboutit en fin de compte à la représentation sous forme d'un « modèle » de l'élément type de chaque catégorie raciale. Encore est-il indispensable que celui-ci représente bien le terme moyen d'un nombre suffisamment élevé de sujets choisis parmi ceux qui offrent l'image la plus conforme à la description proposée. Dire par exemple que les Nordiques sont de grands dolichocéphales blonds aux yeux bleus, n'est valable que pour une certaine partie du groupe ; de nombreux Nordiques ont en effet subi par suite d'un métissage avec les aires anthropologiques voisines des transformations qui ont diminué leur taille ou coloré leur pigmentation (métissage avec les Lapons au Nord, avec les Alpins au Sud et à l'Ouest).

La notion de classification raciale doit donc être admise avec une certaine réserve. Il faut se représenter une race humaine, non seulement comme une « variation de l'espèce fixée par l'hérédité » (Marcellin, Boule), mais comme une entité anthropologique capable de se transformer continuellement, de s'accroître ou de disparaître.

Si nous considérons le passé paléontologique de l'Homme, on peut constater que les espèces fossiles étaient déjà différenciées en races distinctes : les Néandertaliens classiques, les Paléanthropiens de Palestine, les Hommes du Djebel Irhoud représentaient bien autant de races d'*Homo sapiens neandertalensis*. Les Hommes de Cro-Magnon, de Combe-Capelle, de Choukoutien, de Wadjack, de Boskop étaient les témoignages évidents d'une diversité raciale de l'*Homo sapiens sapiens* fossile avant même l'apparition des types actuels, dont ils sont peut-être les ancêtres, ou dont les traits de ressemblance n'expriment que de simples convergences favorisées par un même contexte écologique ou par une origine géographique commune. Ce n'est véritablement qu'à partir du Mésolithique (— 10 000 ans), avec l'augmentation et la dispersion des effectifs humains, que les races actuelles se sont diversifiées en Blancs, Noirs, Jaunes et Australoïdes. Cette floraison raciale n'est point encore totalement achevée sur toute la surface du globe puisqu'il existe encore des groupes qui ne peuvent être classés dans aucune de ces quatre grandes catégories anthropologiques.

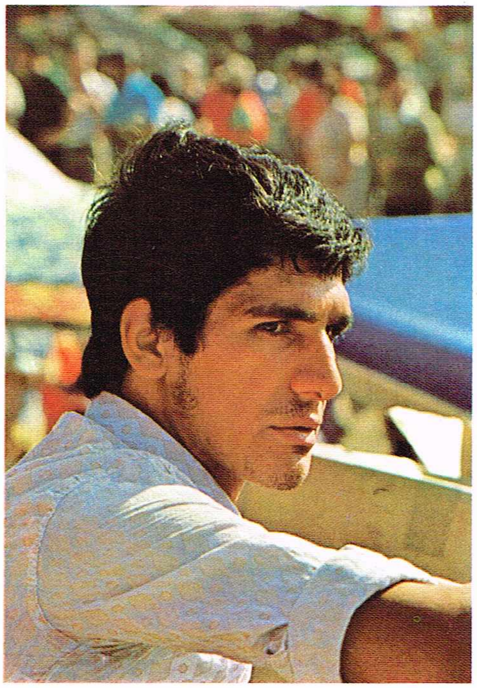

J.-L. Heim

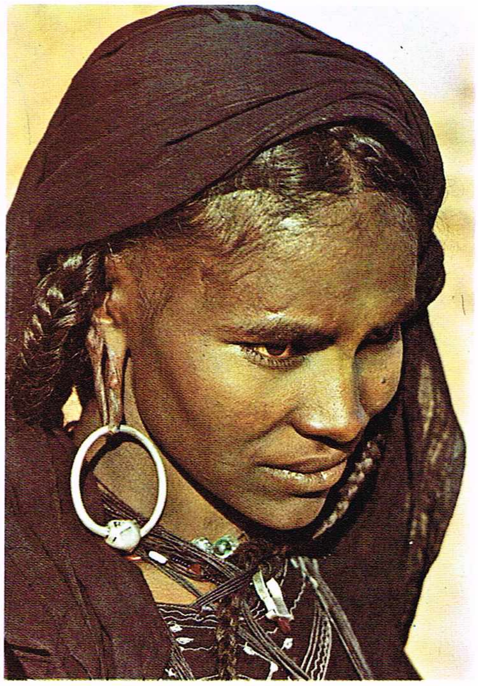

J.-L. Heim

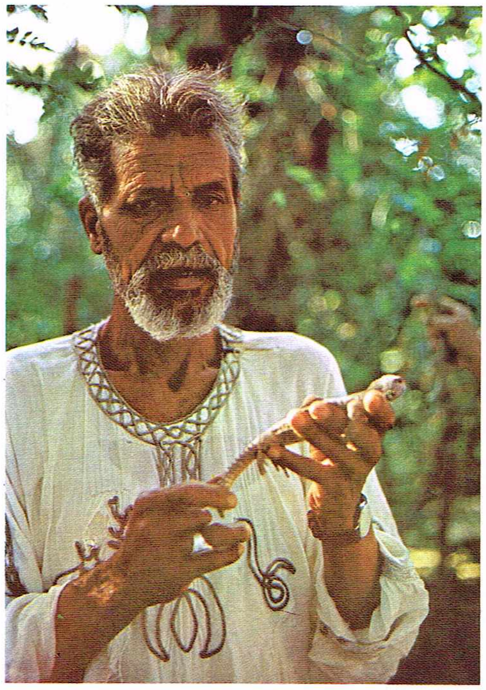

J.-L. Heim

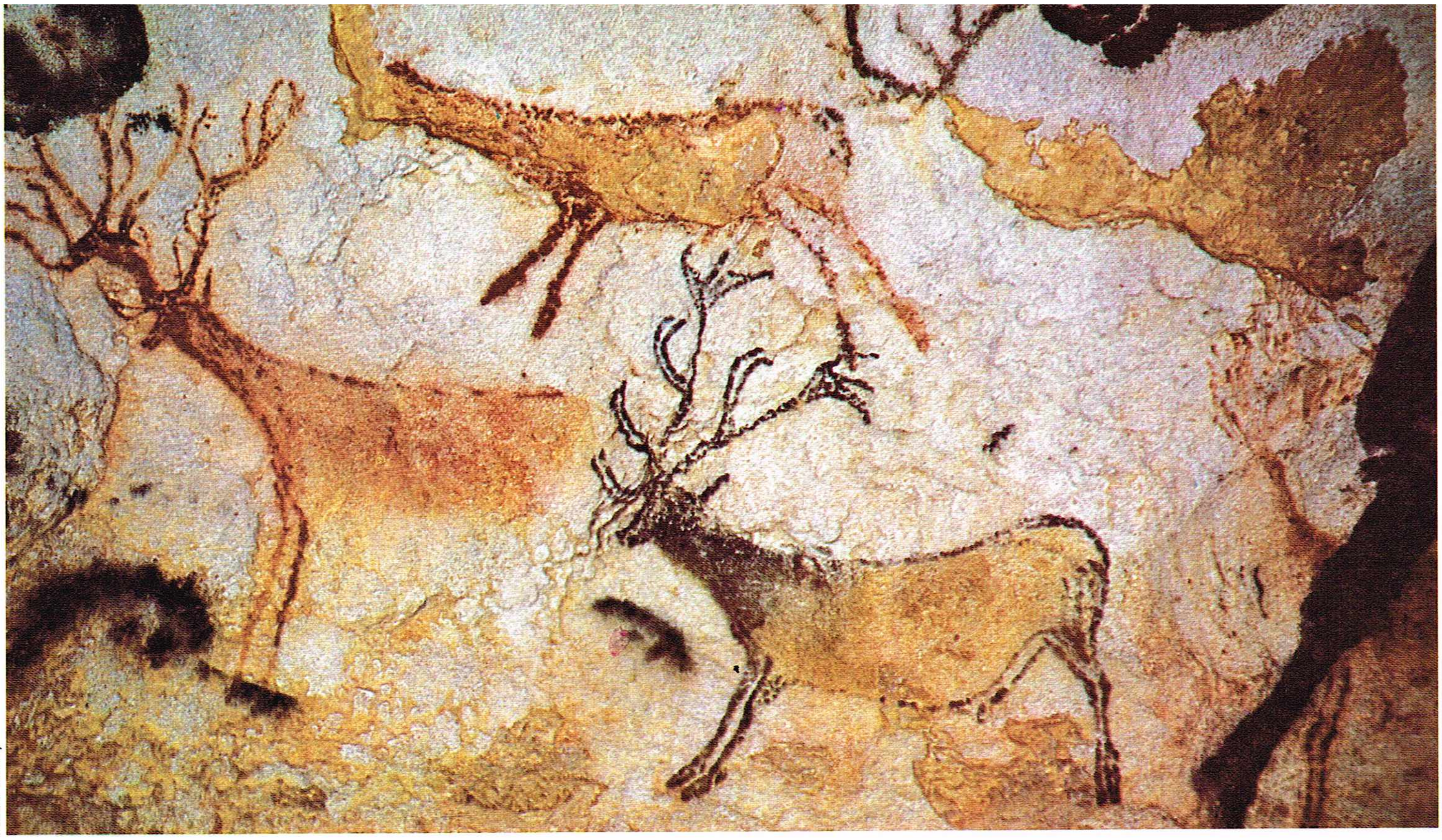

Abbé Glory

▲ *Un exemple de l'art pariétal au Paléolithique : le panneau « des cinq cerfs » de la grotte de Lascaux (Dordogne).*

LA PRÉHISTOIRE

Le terme « Préhistoire » apparaît en 1877 dans le supplément au Dictionnaire de la langue française de Littré. Elle y est définie comme l'« histoire de l'homme avant le temps où l'on a des documents ou traditionnels ou écrits ». Cette phrase mérite exégèse. Elle fait du mot préhistoire une manière de contresens : l'histoire étant fondée sur l'existence de textes intelligibles pour nous, une préhistoire, privée par définition de ces textes, est inconcevable en tant que science historique. Seule la forme adjective est correcte : il y a bien une période, des temps, des hommes, des civilisations, une archéologie préhistoriques. C'est d'ailleurs cette forme qui fut la première et d'abord la seule employée, ayant été préférée à « antéhistorique », assez peu euphonique et susceptible de deux acceptions. Prise substantivement, cette forme adjective a connu quelque faveur : *Le préhistorique* fut le titre d'un manuel de Gabriel de Mortillet, maintes fois réédité. De bons esprits souhaitaient enfin confiner la préhistoire dans l'étude de la période immédiatement antérieure à l'histoire, que nous appelons aujourd'hui protohistoire : c'est une exagération en sens contraire qui l'a trop souvent emporté.

Du jour où le préhistorique envahit la période antédiluvienne, cette remontée dans le temps ne connut plus de limite raisonnable, et une confusion tenace s'établit, au moins dans le public non averti, c'est-à-dire l'immense majorité de nos contemporains, entre *temps préhistoriques* et *époques géologiques*.

Même si la minorité des Hommes instruits limite les temps préhistoriques à la période géologique où l'existence de l'Homme est attestée, c'est-à-dire à l'Ère quaternaire, une confusion non moins regrettable, car elle trouble une partie du monde savant et même certains « préhistoriens », est manifeste entre préhistoire et « études du Quaternaire » : elle revient très exactement à prendre la partie pour le tout. Les études préhistoriques ne sont qu'une manière d'aborder les problèmes du Quaternaire, et la préhistoire ne recouvre qu'un secteur de ceux-ci. Ce n'est point l'affaire du préhistorien, et il n'y est généralement pas préparé, d'étudier en eux-mêmes les phénomènes géologiques et le milieu biologique dont l'Homme a été le témoin pour nous muet. L'étude des glaciations, des variations du niveau marin, la sédimentologie, la paléontologie végétale, animale et humaine, requièrent autant de spécialistes. Cependant, bien plus que l'historien, le préhistorien a besoin de connaître le milieu qui entoura les premiers hommes. Si, pas plus que l'historien, il ne saurait être également géographe, climatologiste, pédologue, botaniste, zoologiste, anthropologue, il doit être ouvert à ces sciences pour pouvoir utiliser judicieusement ceux de leurs résultats qui intéressent ses propres recherches. Qu'il leur offre les siens et en contrôle l'emploi est l'évidence même; l'interdépendance des sciences n'exclut pas l'étroite spécialisation des chercheurs.

En énonçant que la préhistoire est l'histoire de l'Homme avant l'histoire des textes, Littré distinguait au fond, mais implicitement, deux sortes de sciences historiques : l'histoire naturelle et l'histoire événementielle. L'heureuse expression « histoire naturelle de l'Homme » avait précédé celle d'« anthropologie ». La série justement célèbre des *Matériaux pour l'Histoire primitive et naturelle de l'Homme* porte un titre qui aurait d'autant moins dû être abandonné que son complément : « et l'étude du sol, de la faune et de la flore qui s'y rattachent », constituait une définition parfaite dans le choix des termes et dans leur subordination de ce que doit être la recherche que nous appelons préhistorique, d'autres « palethnologique ».

L'usage consacra vite la forme adjective « préhistorique » aux dépens d'« antéhistorique ». Cependant, *paléo-ethnologie* ou plutôt, d'après la graphie italienne, *palethnologie* fut d'abord préféré à préhistoire pour désigner la science étudiant l'Homme préhistorique. Après Littré, le Dictionnaire des sciences anthropologiques parle d'archéologie préhistorique et de palethnologie, mais non de préhistoire. On doit faire quelques réserves sur cette dénomination, qui est en grande partie un faux sens. La méthode fondamentale de l'ethnologie est l'enquête. Elle est inapplicable aux humanités éteintes. Même dans le domaine le plus commun aux hommes fossiles et aux primitifs actuels : l'ergologie (l'étude des produits de l'industrie humaine), la conception ethnologique représente pour le préhistorien le plus souvent un idéal inaccessible. La qualification des objets y est fonctionnelle alors que la terminologie préhistorique, même si elle peut faire illusion par l'emploi de noms empruntés, souvent à la légère, à des objets dont ils définissent l'usage, est trop souvent celle de formes dont l'utilisation nous est inconnue. Pour ces raisons, la palethnologie ne se confond pas avec l'étude de la préhistoire. Elle n'en représente qu'une partie, un moyen d'aborder, d'éclairer certains problèmes préhistoriques et, bien rarement, de les résoudre.

Si ambigu que soit son nom, la préhistoire n'est ni un prolongement de l'histoire, ni un prolongement de l'ethnologie. Elle est en réalité une forme d'archéologie, tout simplement parce qu'elle se fonde sur des fouilles,

◀ *Page ci-contre, en bas trois représentants de la* **race blanche méditerranéenne :** *à gauche,* **type ibéro-insulaire :** *un Sarde; au milieu,* **sous-race saharienne :** *une femme Touareg; à droite,* **sous-race saharienne :** *un Tunisien.*

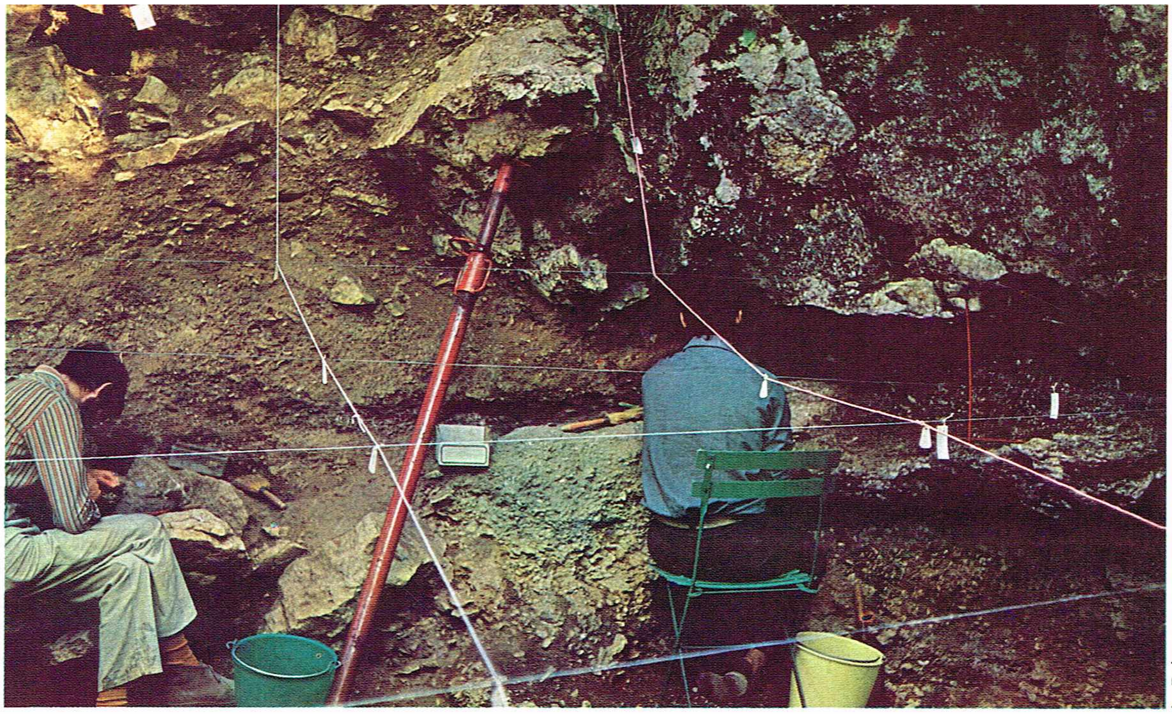

▶ *Le chantier des fouilles du gisement moustérien de La Cave (Vilhonneur, Charente) : le quadrillage visible ici permet de localiser exactement les différents restes (fouilles L. Balout).*

non sur des textes ou des enquêtes. L'archéologie préhistorique est même plus minutieuse, plus exigeante que celle des civilisations historiques : la fouille d'objets y est la règle et celle de monuments l'exception, car les structures humaines y sont plus sommaires, plus estompées, moins déchiffrables. Elle est privée, par définition, du secours des documents épigraphiques indispensables à la chronologie en archéologie classique ; les impératifs de la stratigraphie y deviennent d'autant plus souverains que c'est sur celle-ci que repose presque totalement la chronologie relative des documents préhistoriques.

Ce lien de la préhistoire avec l'archéologie se manifeste encore par l'imprécision et la variabilité de leurs limites respectives. Nous appelons *protohistoire* l'étude des civilisations primitives qui ont pu être contemporaines de civilisations historiques, que celles-ci ont pu connaître, qui entraient en quelque sorte dans leur documentation ethnologique, sur lesquelles nous avons donc des textes étrangers déchiffrables (la Libye d'Hérodote, la Gaule de César, la Germanie de Tacite). Ce fut le cas de l'Égypte pharaonique avant Champollion et, longtemps après, des Étrusques et des Crétois. On garde espoir de sortir un jour de cet antichambre de l'histoire, de cette sorte de purgatoire, vers le paradis des études historiques. Nous réservons le terme de préhistoire à l'étude de ce qui est pour toujours en deçà d'une porte infranchissable : même si les Magdaléniens ont utilisé un rudiment d'écriture, ils ne livreront jamais de pierre de Rosette.

Les fouilles

La fouille archéologique est le moyen de récolter les documents préhistoriques. Complétée par les travaux de laboratoire, elle fournit au préhistorien ce qu'il lui appartient en propre d'étudier : *tout ce que la main humaine a ouvré,* du galet aménagé aux fresques de Lascaux, *tout ce qui nous informe sur la vie de l'Homme préhistorique,* sa civilisation matérielle, son comportement religieux et social, la psychologie de son intelligence.

Certes, il en est encore pour estimer que cette définition de la préhistoire ne saurait s'appliquer qu'aux périodes les plus récentes des temps préhistoriques, c'est-à-dire aux civilisations de notre ancêtre direct, *Homo sapiens fossilis,* et, à la rigueur, aux structures archéologiques laissées par l'Homme de Néandertal. Seules la découverte fortuite et la recherche conduite en géologue stratigraphe conviendraient aux époques plus reculées. C'est bien à ce stade qu'en est encore fréquemment la recherche dans les formations quaternaires, au hasard de l'exploitation des carrières et sablières, et plus ou moins par l'intermédiaire des ouvriers qui y travaillent. Cependant, le préhistorien estime que dans ce domaine aussi, les règles de la fouille archéologique doivent être appliquées. Il appuie son jugement sur les incontestables réussites que furent, en Afrique, les fouilles conduites dans le Quaternaire de Casablanca, dans les dépôts lacustres de l'Aïn Hanech et de Ternifine, en Algérie, à Oldoway et Olorgessaillie, dans la Vallée de l'Omo (Éthiopie) et au lac Rodolphe (Kenya). Même lorsque les plus anciennes industries lithiques sont en cause, si le transport n'en a pas bouleversé la disposition primitive, les structures humaines doivent être recherchées : ce peut être l'atelier de taille, le campement, l'affût. Les pierres taillées ne sont pas des fossiles ; elles n'appartiennent au milieu biologique quaternaire que par l'intermédiaire de l'Homme.

On a dit de la fouille archéologique qu'elle est la lecture d'une liasse d'archives dont il faudrait, pour les déchiffrer, détruire les feuillets un à un. Les coupes stratigraphiques ne sont jamais que la tranche du livre. De même que le massicot sert à rogner, et non à lire, la fouille verticale des coupes, si elle permet de recueillir un à un tous les silex taillés dans l'ordre chronologique de leur dépôt, interdit de comprendre leur présence, leur disposition, leurs relations au moment de leur abandon. Elle est la négation même de l'archéologie. La fouille par décapages horizontaux, la recherche des sols d'occupation humaine, le repérage et le relevé des objets en place par notation de leurs coordonnées sont la règle de toute fouille préhistorique. L'examen des coupes permet le contrôle de la position stratigraphique, c'est-à-dire de la place dans la chronologie relative. Ainsi la fouille préhistorique, par sa minutie, par son souci de tout recueillir, par la pratique systématique du tamisage, par le rôle très secondaire qu'y jouent les découvertes accidentelles des ouvriers, l'essentiel étant fait par les préhistoriens eux-mêmes, s'est-elle révélée plus rigoureuse que la fouille archéologique. Il est aujourd'hui reconnu qu'elle a eu une influence bénéfique sur celle-ci.

Par de telles fouilles, le préhistorien s'efforce de saisir en premier lieu tous les indices devant lui permettre d'éclairer la vie matérielle des hommes : leur mode d'habitat, l'usage du feu, les ateliers de fabrication d'armes et d'outils, les activités de tous les jours, la chasse, la pêche et la guerre. Voici le fond de cahute, que l'on croyait si tardif, retrouvé avant le temps de l'Homme de Néandertal, les sols dallés aménagés par l'Homme du Paléolithique supérieur découverts déjà par l'Homme acheuléen, les foyers du Sinanthrope, les ateliers où l'on dénote parfois même une spécialisation des fabrications.

La vie spirituelle est révélée par les rites funéraires et par l'art. Ce n'est point la présence d'une industrie moustérienne qui a fait la preuve de l'hominisation du Néandertalien de la Chapelle-aux-Saints, car on pouvait toujours prétendre qu'il avait été gibier et que l'artisan était un chasseur qu'on découvrirait bien un jour ; c'est la mise en évidence, grâce à la fouille conduite par les abbés Bardon et Bouyssonie, que cet Homme avait été inhumé avec soin et que l'on semblait avoir déposé près de lui une offrande funéraire d'aliments pour l'au-delà.

L'art mobilier est révélé par les fouilles. Si l'art pariétal est de découverte le plus souvent fortuite, il n'exclut pas cette méthode. On ne saurait trop blâmer la légèreté avec laquelle le souci d'aménagement touristique des grottes ornées a parfois conduit à détruire les sols archéolo-

giques sans les avoir explorés préalablement avec minutie. Cela est d'autant plus grave que l'art préhistorique, quand il ne peut être valablement raccordé à telle ou telle civilisation, est livré à tout l'incertain des classifications fondées sur les techniques, les styles, les sujets figurés, leur superposition en un point donné.

En l'état actuel de nos connaissances, il semble que l'art figuratif n'apparaît qu'avec notre ancêtre direct : *Homo sapiens fossilis*. Il constitue cependant le monument le plus précieux des temps préhistoriques. Sa valeur documentaire, sa signification magique ou religieuse, les sanctuaires, les « grottes-temples », comme on les a parfois appelées, en font l'ensemble évocateur d'un passé beaucoup plus reculé que les civilisations méditerranéennes importées, trop longtemps considérées comme les premières à s'être développées sur notre sol.

Le laboratoire

Les travaux de laboratoire complètent les fouilles du préhistorien. Ils précisent notre connaissance du milieu dans lequel vécurent les Hommes d'autrefois. A la paléobotanique, le préhistorien pose des questions précises et essentielles. Il souhaite connaître la nature du tapis végétal et sa signification climatique; il voudrait être en mesure d'apprécier l'introduction des plantes cultivées. Aux restes végétaux carbonisés qu'il a parfois la chance de recueillir, il demande encore et surtout les repères trop peu nombreux d'une chronologie absolue.

L'apport du préhistorien à la paléontologie animale est généralement réduit à des déchets de cuisine, et c'est en fonction de l'Homme qu'il les étudie. Certes, il lui importe que soient déterminées les espèces consommées. Il prend note de leur écologie; il recherche certains détails dans la croissance du gibier qui puissent lui permettre de situer les périodes de chasse; en particulier, pour ce qui est du renne, il relève les quartiers de venaison qui ont été rapportés au campement et s'interroge ainsi sur les procédés de chasse. Il observe les traces de dépeçage, le bris systématique des os longs, le prélèvement des tendons, qui conduit à désarticuler les extrémités des membres, l'utilisation de certains os pour la taille ou la retouche de l'industrie lithique, les procédés de fabrication de pointes de sagaies et d'aiguilles d'os, l'utilisation des bois de Cervidés. Il voulait enfin déceler l'apparition de la domestication et de l'élevage.

Aux restes humains, dont l'étude anthropologique relève uniquement du spécialiste, il demande, outre les indications spécifiques ou raciales que celui-ci lui fournit, des informations sur certaines coutumes, comme les mutilations dentaires ou le remploi d'ossements humains, sur les rites funéraires, la pathologie et la thérapeutique. Le paléontologiste étudie l'Homme dans l'évolution, le préhistorien dans le cadre où il a vécu.

La typologie

L'étude scientifique des produits de l'industrie humaine est le domaine propre du préhistorien. Les objets d'art mobilier et de parure, ceux décorés ou non en ivoire, en os ou en bois de Cervidé, *a fortiori* la pierre polie, la céramique et le métal ne sont manufacturés et utilisés qu'au cours du dernier centième des temps préhistoriques. Jusqu'à la fin de ceux-ci, l'étude de l'outillage lithique n'est pas négligeable; elle constitue l'essentiel pendant leur plus grande partie. Même si elles ne représentent que le squelette minéral de civilisations qui utilisèrent évidemment des matières périssables, végétales et animales, les pierres taillées doivent faire l'objet d'une étude d'autant plus exhaustive qu'elles sont toute notre documentation.

Le problème était de définir une méthode d'investigation et d'analyse qui permît de comprendre et de classer ces innombrables mais énigmatiques objets. L'inexistence d'une telle méthode, le fait qu'on en soit encore à des tentatives plus ou moins heureuses de classification démontrent que la nomenclature, la taxonomie, la systématique de la préhistoire ne sont pas stabilisées et que cette jeune science sort à peine d'un stade prélinnéen.

La silhouette des pierres taillées fut parfois considérée comme un moyen de classification : nous disons encore une « amande » acheuléenne, une « feuille de laurier » solutréenne, un trapèze. Neuf végétaux étaient utilisés, encore en 1949, pour classer les variétés de pointes foliacées solutréennes, et la nomenclature des bifaces se fait toujours par référence à des silhouettes de lance (bifaces lancéolés), de cœur (bifaces cordiformes), ou à des figures géométriques pour un grand nombre d'entre eux. Le caractère artificiel, extérieur à l'objet, d'une telle systématique n'est pas à démontrer.

D'autres, tombant dans l'excès contraire, voulurent tenter l'impossible, et, se fondant sur des comparaisons ethnologiques, s'efforcèrent de classer les pierres taillées selon leur usage. On parla de « coups de poing », de « pointes à main » ou emmanchées pour armer sagaies et flèches, de « racloirs » et de « raclettes », de « grattoirs », « burins », « perçoirs », « forets », « tarauds », « couteaux » et « coupoirs », « haches » et « hachereaux ». Cette terminologie pseudo-fonctionnelle ne devrait plus faire illusion. Elle présentait au moins l'avantage d'attirer l'attention sur des formes stables, aux caractéristiques bien définies. Sous l'influence magistrale de l'abbé Breuil, elle orienta les préhistoriens vers une classification morphologique. Les *Subdivisions du Paléolithique supérieur,* qu'il présenta en 1912 au Congrès de Genève et réédita en 1937, presque sans corrections, représentent parfaitement cette tendance, qui met même en évidence l'enchaînement des formes, révélé par leur évolution stratigraphique. On passe même d'une forme à l'autre, du grattoir caréné au burin busqué par exemple.

Néanmoins, dès avant la Première Guerre mondiale, certains préhistoriens poussaient plus loin l'analyse, pour expliquer la forme en fonction non plus d'un usage hypothétique, mais d'une technique de fabrication : la théorie des « gestes techniques » était implicitement née. Mais elle ne devait s'imposer que grâce aux expériences de laboratoire qui permirent de redécouvrir les gestes techniques, le tour de main de l'artisan préhistorique. En France, en Angleterre, en Afrique et, tout spécialement, à l'Institut de Paléontologie Humaine, ces expérimentations ont donné des résultats tels qu'elles ont permis de fonder dorénavant notre classification sur les techniques de débitage, de taille et de retouche. L'application systématique de techniques définies à un objet l'aménage en une « forme », qui a parfois son prototype et ses variétés. Ainsi est née la discipline fondamentale de la science préhistorique : la *typologie*. Elle en est la partie la plus difficile, la plus rigoureuse aussi. Désormais, une pierre taillée s'analyse comme un fossile et se déchiffre comme un texte épigraphique. La systématique repose sur des caractères internes, structuraux, et non plus externes. C'est là un domaine spécifique du préhistorien.

La méthode est d'application délicate. A une époque donnée ou à des époques différentes, les mêmes techniques sont ou peuvent être utilisées dans tout le monde habité. Telle technique est observée en Afrique du Nord et peut se retrouver en Scandinavie et au Japon. Il en est de même de bien des formes. Une fois inventées, les unes et les autres peuvent subsister pendant des centaines de millénaires et être redécouvertes ailleurs, beaucoup plus tard. C'est que les techniques et les formes paraissent liées à quelque chose de bien plus vaste que les migrations et les contacts des tribus primitives : au développement même de l'esprit humain.

C'est l'association constante de techniques et de formes qui nous permet de définir des civilisations préhistoriques. Les types minutieusement analysés ayant été inventoriés dans une « série type » et publiés dans des *Fiches typologiques,* il est aisé de comparer entre elles les séries recueillies dans divers gisements. Des procédés graphiques commodes permettent de superposer les diagrammes de chacun d'eux et d'apprécier ainsi les rapports et différences. Néanmoins, il ne s'agit pas encore d'une application réelle des méthodes statistiques à la préhistoire. L'appartenance à une même civilisation, l'identité des genres de vie, sont attestées par l'identité des techniques et des formes, la proportion analogue de chacune de celles-ci.

Il existe une distinction fondamentale, dont l'ignorance a conduit au chaos actuel. C'est celle des techniques et méthodes de *taille,* de *débitage* et de *retouche* (des formes, types et variétés obtenus par ces techniques et méthodes) des civilisations, ou cultures, caractérisées pour nous par une certaine association, en proportions définies, de formes et de types.

L. Balout

▶ *Abri sous roche du Relilai (région de Tébessa en Algérie); ce gisement capsien a permis de préciser l'évolution de cette civilisation.*

Les formes et types sont désignés par des noms qui le plus souvent font image : racloir, hachereau, trièdre. L'ensemble de ces noms forme la *nomenclature* des objets manufacturés par l'Homme préhistorique. Les techniques, méthodes, procédés, civilisations et cultures sont désignés par des termes tels que : percussion indirecte, méthode Levallois, « Pebble Culture », dont l'ensemble constitue la *terminologie* préhistorique.

Aucune confusion ne doit naître de l'emploi des noms et des termes sur le sens qui leur est propre, sur l'acception technologique, morphologique et typologique, culturelle de chacun d'eux.

Les techniques et méthodes sont indépendantes du temps et de l'espace (percussion simple — retouche écailleuse par exemple) : leur terminologie doit donc être fixée sur le plan mondial. Ainsi, on parlera d'« éclat Levallois » partout où cette méthode de débitage a été employée, que ce soit en Europe, en Asie ou en Afrique, à l'Acheuléen, au Moustérien ou plus tardivement encore. Le seul problème à résoudre est celui de la traduction des termes, de leur équivalence dans les différentes langues scientifiques une fois leur définition générale admise par tous. Certains cas sont difficiles : par exemple, la distinction entre éclat, lame, et lamelle.

Les formes et les types ont une extension plus limitée, dans le temps comme dans l'espace; elle est parfois très vaste (biface), parfois très localisée (hachereau du type de Tabelbalat-Tachenghit). L'unité internationale de la nomenclature doit néanmoins être recherchée en partant des listes types, désormais classiques, établies pour le Paléolithique de l'Europe par F. Bordes (1961), D. de Sonneville-Bordes et J. Perrot (1954-56). Ne seront donc créés que les noms indispensables pour désigner des formes et des types originaux : « pebble tools », hachereaux sur éclat, pièces pédonculées, etc. On dispose déjà pour l'Atérien et l'Epipaléolithique du Maghreb des listes typologiques dressées par J. Tixier (1963). L'établissement et la publication des fiches typologiques africaines ont pour objet cette unité internationale de la nomenclature.

Les cultures, ou civilisations (ce dernier terme est préférable en français) sont par définition temporaires et régionales et de ce fait délimitées dans le temps comme dans l'espace. Leur terminologie doit donc être empruntée de préférence à des toponymes régionaux ou locaux. Cette règle est très généralement admise à partir du Paléolithique supérieur. En Afrique du Nord, on dit Ibéromaurusien, Capsien, après avoir enfin renoncé à Aurignacien, Tardenoisien, etc. Cela est moins net au Paléolithique inférieur et moyen : on conserve Moustérien à côté d'Atérien et l'on exporte volontiers à travers le monde les termes français d'Abbevillien, Chelléen, Acheuléen, Micoquien, Levalloisien, etc.

On parle communément de techniques, méthodes ou procédés de taille, de débitage et de retouche. Ces mots demandent à être précisés.

Technique doit être employé pour qualifier les moyens mis en œuvre pour la taille, le débitage ou la retouche. On connaît cinq *moyens techniques* fondamentaux :

— percussion lancée, au percuteur manuel dur ou tendre;
— percussion lancée de la matière première sur un percuteur dormant;
— percussion lancée du percuteur manuel sur la matière première posée sur un percuteur dormant;
— percussion indirecte au poussoir;
— pression.

Méthode, ou **procédé,** désignent la succession raisonnée des gestes techniques permettant la taille, le débitage, la retouche. On taille un galet, un rognon, une plaquette de silex pour les transformer en objets : un galet est taillé en « chopping tool », un rognon est taillé en biface. On débite un nucléus en éclats ou en lames. La langue française établit une nette distinction entre tailler et débiter un arbre. La retouche accommode la pierre taillée (par exemple, la retouche secondaire, ou retaille des bifaces), elle spécialise les produits du débitage (éclats, lames, lamelles) en formes (pointe, racloir, etc.).

Les expérimentations de taille poursuivies dans plusieurs pays ont démontré que les percuteurs manuels pouvaient être de pierre, mais aussi d'autres matières telles que le bois de Cervidé ou l'os, l'ivoire, le bois d'arbre. La retaille acheuléenne des bifaces semble être la première à utiliser ces percuteurs moins durs que la pierre à tailler; ce qui compte est moins la nature de la matière que la dureté relativement plus grande de celle-ci par rapport à celle de l'objet taillé ou débité. On dira plus justement « percuteur manuel dur » ou « tendre » selon que sa résistance est supérieure ou inférieure à celle du matériel taillé ou débité.

C'est en déformant la pensée de Commont que l'on a mis abusivement l'accent sur le facettage du plan de

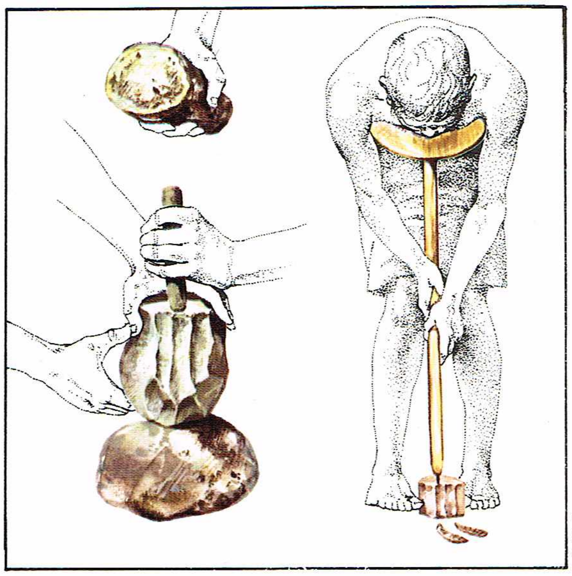

I.G.D.A.

▶ *Deux procédés servant à la taille de la pierre : à gauche, taille avec un outil intermédiaire (percussion indirecte); il s'agit ici d'obtenir des lames, et le nucléus est posé sur une enclume; à droite, taille par pression pectorale (d'après Bordes).*

frappe, qui n'est pas une condition nécessaire, et peut faire défaut sur les talons des éclats, pointes et lames Levallois. La réciproque est vraie; à cet égard, on se souvient des discussions nées autour d'éclats à talon facetté de l'Acheuléen de la Somme, qui étaient en réalité des éclats de taille de bifaces.

L'opération essentielle est la préparation systématique, plus ou moins centripète, de la face supérieure du nucléus, qui constituera, à l'exception des bords, la face supérieure de l'éclat Levallois. En étudiant les hachereaux les plus primitifs, et les plus anciens, nous verrons naître ce que L. Balout appelle l'*idée Levallois*, c'est-à-dire la prédétermination sur le nucléus, qui est au début un galet, du tranchant futur du hachereau, idée qui aboutira, dès l'Acheuléen moyen, au hachereau sur éclat Levallois.

Procédés de retouche. On doit considérer : d'abord la retouche d'accommodation, ou de spécialisation; ensuite la retouche d'utilisation, ou d'usage. La retouche a pour objet d'accommoder un produit du débitage (éclat, lame, lamelle) et de le « spécialiser » dans une forme (par exemple, l'éclat, Levallois ou non, retouché en pointe moustérienne).

La retouche étant un procédé technique non limité à une région ou à une civilisation, les termes servant à désigner les différents types de retouche devraient entièrement faire l'objet d'une entente sur le plan international.

Pour le Paléolithique inférieur et moyen, F. Bordes a proposé des dénominations qui sont valables :

— *retouche en écaille,* ou *retouche écailleuse,* obtenue au percuteur dur ou tendre, et peut-être même par pression, c'est la retouche « moustérienne »;

— *retouche en écaille scalariforme,* variété de la précédente, obtenue au percuteur de bois ou d'os « en utilisant dans ce percuteur, non point la partie distale, mais une partie assez éloignée du bout »; par son profil en escalier, elle caractérise le Moustérien du type Quina (Charentien);

— *retouche parallèle,* considérée habituellement comme caractéristique du Solutréen, mais en fait très antérieure (Moustérien, Acheuléen); elle est obtenue au percuteur tendre, voire par pression ou par percussion indirecte;

— *retouche subparallèle,* variété moins régulière de la précédente, commune dans le Moustérien;

— *retouche plano-convexe* de Mc Burney (1950), variété de la taille bifaciale largement utilisée dans le Moustérien du type Quina.

J. Tixier a complété cette liste pour ce qui est de l'Épipaléolithique du Maghreb :

— *retouche écailleuse scalariforme abrupte, retouche en écaille scalariforme* mais caractérisée par le caractère abrupt, voire « ultra-abrupt » de la surface des retouches par rapport à la face d'éclatement;

— *retouche abrupte normale* pour l'obtention de « bords abattus » ou « dos »;

— *retouche abrupte, sur enclume,* dont les enlèvements partent des deux faces et forment un dos; c'est la retouche qualifiée de « bibord » par le Dr. Gobert dans la préhistoire tunisienne;

— *la retouche d'utilisation,* ou *d'usage,* permet de déceler la partie utile de l'objet; son examen est important dans l'étude des hachereaux, par exemple.

Nomenclature des formes et types

Le principe général est de ne créer des noms nouveaux que lorsqu'ils désignent des formes et des types propres. On s'alignera tout d'abord sur les listes établies pour le Paléolithique européen. Dans cette perspective, plusieurs points sont à considérer.

L'expression française *galets aménagés* correspond à *trimmed pebbles,* préférable à « pebble tool », ou « pebble implement », dont le sens est trop général : le marteau étant un outil, le percuteur constitué par un galet est aussi un « pebble tool ». Des noms divers ont été créés pour désigner les formes de galets aménagés. Deux ont eu une fortune particulière : *chopper* et *chopping tool.* Ils sont malheureusement intraduisibles en français d'une manière satisfaisante, et, ce qui est plus grave, leur emploi ne correspond plus à la définition donnée par leur auteur. Il paraît souhaitable de renoncer en bloc à toute cette nomenclature et de se fonder sur les méthodes de taille des galets aménagés. Les tentatives de synthèse établies par Biberson et Ramendo pour le Maroc et le Sahara constituent les meilleures bases de discussion. L'étude récente des galets aménagés de Ternifine (1965) en a fait une application valable. Chaque forme sera désignée par un numéro dans l'une des trois grandes séries (taille unidirectionnelle, bidirectionnelle, multidirectionnelle).

Bifaces. Ce terme, dû à Vayson de Pradenne, est préférable à tous autres. « Axe » est à rejeter comme maintenant une interprétation fonctionnelle erronée de ces objets, qui ne sont pas des « haches ». La meilleure nomenclature des bifaces est celle établie par Bordes (1961). Elle doit servir de point de départ. Récemment, Guichard (1965) l'a appliquée au Paléolithique inférieur de Nubie au prix de quelques adjonctions. Les formes seront le plus souvent désignées par leur silhouette, en partant du triangle pour aboutir au cercle (triangulaire, triangulaire allongé, subtriangulaire, cordiforme, cordiforme allongé, amygdaloïde, « ficron », lancéolé, Micoquien, ovalaire, « limande », discoïde).

Hachereau. Ce nom, dû à l'abbé Breuil (1924), est généralement admis, bien qu'il ne soit pas parfait. Le mot « biseau », anciennement employé et préféré par certains (Champault, 1956), a le défaut de ne pas s'appliquer uniquement au tranchant du hachereau; il est trop général. En français, « hachereau » est pris dans le sens de « petite cognée », c'est-à-dire de hache à fendre, sens que rendent plus précisément l'anglais « cleaver » et l'espagnol « hendidor ». Le hachereau acheuléen de l'Afrique est un outil de typologie variable dont le tranchant, toujours brut de taille, est la partie d'usage, ainsi que le prouvent les retouches d'utilisation.

Produits du débitage Levallois. La méthode dite *Levallois* de débitage est une. La nomenclature établie par Bordes doit être appliquée, qu'il s'agisse des nucléi (à éclats, à pointe, à lame), des variétés d'éclats (subcirculaires, ovalaires, subquadrangulaires, subtriangulaires), de pointes (du premier ordre, du deuxième ordre) de lames, des caractéristiques du débitage (nucléi à deux éclats, éclats réfléchis, éclats outrepassés) ou de la préparation de celui-ci (épannelage, préparation centripète de la face supérieure, plan de frappe préférentiel), etc.

Formes du Paléolithique moyen et du Paléolithique supérieur. La présence de certaines de ces formes dès l'Acheuléen est aujourd'hui très généralement admise. Leur nomenclature doit, sans exception, être empruntée aux listes typologiques établies pour l'Europe (Bordes, et D. de Sonneville-Bordes) et aux adjonctions apportées pour une partie de l'Afrique par Tixier en 1958-1963 (Atérien et Épipaléolithique). Les mots grattoir, racloir, burin, perçoir, couteau, raclette, etc., ne sauraient être employés dans une autre acception que celle de leur définition typologique.

Terminologie des civilisations (cultures)

Le terme *civilisation* est préférable en français, car *culture,* en dehors de son sens propre agricole, s'applique aux formes les plus élevées de civilisation, ce qui est hors de propos.

Il faut se rappeler que *Chelléen* avait été créé pour remplacer *Acheuléen* (Mortillet, 1883), d'où le « Pré-Chelléen » (Commont, 1911) puis, lorsque Breuil (1939) démontra le caractère remanié des gisements de Chelles, l'« Abbevillien ».

Défini par sa position stratigraphique à Abbeville (Porte-au-Bois) [1939], par sa paléontologie *(Elephas meridionalis, Rhinoceros etruscus),* par sa place dans la chronologie (premier stade interglaciaire), *Abbevillien* est donc un terme d'étage qui ne peut être exporté sur la base unique d'affinités typologiques.

Au contraire, *Acheuléen,* repris par Mortillet et étendu par Breuil à un ensemble de formations se succédant au cours d'une glaciation et deux interglaciaires, tire son unité de critères archéologiques (moyens techniques, méthodes de taille, formes et types) et de leur évolution. Il n'y a donc pas d'obstacle à l'emploi de ce terme ailleurs que là même où il a été défini. Il suffit de le régionaliser dès qu'on le subdivise pour éviter toute confusion avec les subdivisions établies dans la Somme.

Ainsi, la systématique des techniques nous révèle les formes, et l'assemblage de celles-ci nous conduit

▲ ***Hachereau biface trouvé à Bihorel, près de Rouen, daté de l'Acheuléen moyen (d'après Bordes).***

aux civilisations. Notre guide est donc bien la main même de l'artisan préhistorique. Nous devons penser que cette main obéissait à une intelligence qui avait conçu l'objet qu'elle devait exécuter. S'il y avait bien, en deçà des formes, la technique, il y avait aussi, avant la technique, la conception de l'outil. La main qui nous guide nous conduit à l'esprit.

Nous devons admettre qu'en possession des mêmes techniques, des groupes humains de genres de vie différents pouvaient concevoir la manufacture de formes différentes. Par exemple, utilisant la technique de la retouche abrupte et celle de la fracture des lamelles, les Hommes ibéromaurusiens du type cro-magnoïde de Mechta el-Arbi fabriquaient systématiquement des lamelles à dos et piquant trièdre; les Méditerranéens capsiens ouvraient des trapèzes et des triangles, armatures foncièrement différentes; les Hommes moustériens auraient pu munir aisément d'un pédoncule d'emmanchement leurs pointes de sagaies, ce que seuls les Atériens du Maghreb découvrirent et réalisèrent.

Le singe Anthropoïde pourrait aménager un galet pour le rendre tranchant : il suffit de le briser obliquement, en biseau. Encore faut-il le concevoir. Nous touchons ici au but des recherches du préhistorien, qui est l'Homme.

Le « peintre » de Lascaux ne diffère de nous que par la masse de techniques et de savoir que nous avons acquise depuis l'arrivée d'*Homo sapiens* dans nos régions. Cela n'est discuté par personne. Il est généralement admis que le Néandertalien était un Homme qui enterrait ses morts, croyait à une vie d'outre-tombe, vouait un culte aux restes humains et répandait dans une grande partie de l'Ancien Monde la civilisation moustérienne.

Le problème commence en deçà. Il est double : celui de l'existence de l'Homme et celui de l'hominisation de ces formes aussi archaïques, si différentes de nous, que sont les Pithécanthropes et les Australopithèques. Le paléontologiste et le préhistorien recherchent la solution par des voies différentes, qui au début semblaient ne pas vouloir se croiser. C'est chose faite aujourd'hui.

Unité des industries préhistoriques

L'existence d'industries bien avant l'Homme de Néandertal et jusqu'à l'aube du Quaternaire est démontrée. Archiac n'enseignait-il pas, il y a un siècle, que l'authenticité de l'Homme de Moulin-Quignon importait peu, puisque les silex taillés suffisaient à faire la preuve de l'existence d'un Homme? Ce qui était vrai alors du Chelléen et de l'Acheuléen ne l'est pas moins aujourd'hui des galets aménagés du Villafranchien. « L'Homme est entré sans bruit », écrivit un jour le père Teilhard de Chardin. Permettez au préhistorien de vouloir entendre le bruit du choc aménageant le premier galet, et qui marque la limite extrême d'hominisation qui nous soit perceptible. Déjà, par une intuition remarquable, le Dr Garrigou et Henri Filhol, longtemps avant que celui-ci ne devînt professeur au Muséum, avaient écrit : « Avant de tailler un caillou siliceux en forme de hache, il faut que l'Homme ait su d'abord qu'un caillou tranchant était préférable à un simple caillou roulé, uni et égal sur toute sa surface... ». Tel est le geste que les Anthropoïdes les plus évolués n'ont pas conçu, et qui est, pour le préhistorien, la trace la plus ancienne d'*Homo faber,* faute de pouvoir jamais savoir ce que put être auparavant l'utilisation du bois périssable, si elle précéda celle de la pierre brute, puis taillée.

De son côté, le paléontologiste, ayant franchi le pas qui sépare l'homme dans sa forme fossile et actuelle des êtres les plus primitifs dans lesquels il découvre des traits humains, voudrait faire la preuve de leur hominisation, être sûr qu'ils ont su créer des armes et des outils.

Le préhistorien, qui possède la preuve de l'existence de ces industries, se pose le problème d'identifier leurs auteurs.

Devant la succession des formes : Australopithèque — Pithécanthrope — Néandertalien — *Homo sapiens,* le paléontologiste peut être tenté d'envisager des stades progressifs d'intelligence se traduisant par des techniques de plus en plus complexes : à chaque état cérébral correspondrait un ensemble de possibilités dont les techniques seraient le reflet. A l'Homme de Néandertal, correspondraient les industries sur éclat du Moustérien, aux Pithécanthropiens les bifaces acheuléens et abbevilliens, aux Australopithèques les galets aménagés de la *Pebble Culture*. En ajoutant *Homo sapiens,* on compterait ainsi quatre étapes physiques et psychiques. La liaison de chaque ensemble industriel avec un groupe d'Hominiens expliquerait commodément l'extension et la similitude des industries préhistoriques dans le monde. Partout où ils vivaient, les Australopithèques, les Pithécanthropes, les Néandertaliens et *Homo sapiens* auraient découvert les mêmes solutions aux problèmes de la vie parce que leur esprit n'en pouvait concevoir d'autres. C'était néandertalien que de débiter des éclats levalloiso-moustériens, pithécanthropien que de tailler des bifaces, australopithécien que d'aménager des galets.

Le préhistorien ne peut approuver cette utilisation de ses propres documents, car il a conscience de l'étonnante continuité des techniques et des formes dans l'industrie humaine. Il pense ainsi apporter une donnée nouvelle, riche de conséquences, au problème de l'Homme fossile.

Il y a continuité et filiation, découvertes et survivances. Les techniques et une partie des formes de l'industrie néandertalienne sont indiscutablement un héritage du passé : nul ne le niera pour ce qui est des bifaces justement dits de « tradition acheuléenne » et des éclats innombrables de technique « Levallois ». La taille des bifaces, cette obtention progressive de la régularité, de la finesse, de la symétrie surtout, par la découverte de techniques de taille plus perfectionnées, au percuteur manuel de pierre, puis de bois ou d'os, sont le fait de l'Homme acheuléen. Tirer un éclat d'un biface acheuléen, après préparation d'un plan de frappe, est sans doute ce qui a conduit à la fabrication systématique de ces éclats que nous appelons Levallois, dont la forme a été prédéterminée par la préparation du bloc de matière première. Le dernier geste de l'ouvrier détache l'objet achevé, qui était jusque-là virtuel, en puissance. Cela trahit un concept raisonné guidant les gestes nécessaires, dont aucun ne laisse prévoir le but final si l'on n'a pas d'abord celui-ci dans l'esprit. Mécanisme complexe d'association d'idées, sens de l'abstrait : nous sommes au temps des Pithécanthropes. Et le biface n'est que l'extension progressive de la taille des galets, elle-même partie d'une simple fracture pour aboutir à l'aménagement d'un tranchant de plus en plus étendu et complexe.

Aucune de ces découvertes ne sera ensuite définitivement abandonnée. On continuera la taille des galets, des bifaces, des éclats, souvent sous les formes les plus archaïsantes, quelquefois jusqu'à la fin des temps préhistoriques. A la continuité, à la filiation s'ajoute l'unité : il n'y a pas de *missing link* (chaînon manquant).

▼ Grotte de Lascaux : la « scène du puits », d'interprétation très discutée.

L. Balout

◀ *Vue partielle du chantier du gisement moustérien de La Cave (fouilles L. Balout).*

L. Balout

C'est aujourd'hui au préhistorien de défendre la réalité de l'« enchaînement » non du monde animal, comme le fit malgré mille obstacles Albert Gaudry en 1878, mais celui des industries préhistoriques, reflet de l'intelligence humaine, contre tout morcellement, fût-il ramené à l'hypothèse d'une simple discontinuité de l'histoire paléontologique de l'Homme, coupée de paliers stabilisés et de stades évolutifs.

Ce faisant, le préhistorien ne défend-il pas à son tour, et par un argument nouveau, l'hominisation des prédécesseurs de l'Homme de Néandertal? Ce que la juxtaposition de bifaces et d'un Pithécanthropien ou de galets aménagés et d'un Australopithèque rend simplement soutenable, le préhistorien l'affermit en montrant que l'industrie de l'Homme moustérien, déjà si différent de nous, était largement héritée d'un prédécesseur plus primitif, qui en tenait lui-même une partie d'un plus archaïque encore.

Permettre par l'outil d'atteindre l'Homme, tel est l'objet exaltant de l'archéologie préhistorique.

Chronologie relative et absolue

Dater les documents qu'il découvre est la première ambition du préhistorien. Il n'a longtemps disposé que de méthodes de *chronologie relative,* essentiellement fondées sur la stratigraphie, c'est-à-dire la disposition dans le temps des couches contemporaines de l'occupation humaine. En utilisant la sédimentologie, la palynologie, l'analyse des faunes, il tente de se raccorder aux séquences stratigraphiques établies par les quaternaristes, de se situer dans le cadre des phénomènes glaciaires, des variations du niveau marin, des pulsations climatiques. Cela reste le fondement d'une chronologie des temps préhistoriques, qui se confondent avec le Quaternaire. Le Paléolithique du préhistorien correspond ainsi au Pléistocène du géologue, mais avec la même imprécision, surtout au début et à la fin. Les découvertes accumulées en Afrique ces dernières années enjambent la limite Plio-Pléistocène, toujours en discussion ; l'Holocène des géologues ne correspond pas à la coupure majeure du préhistorien entre le Paléolithique et ses prolongements d'une part, et le Néolithique, que caractérise un genre de vie nouveau de l'Humanité, d'autre part. Et si les phénomènes du Quaternaire : glaciations et interglaciaires, stades et interstades, eustatisme, pluviaux et interpluviaux, doivent être considérés plus ou moins à l'échelle planétaire, les faits humains, eux, comportent une variable dans le temps comme dans l'espace, qui s'inscrit dans un domaine régional, voire local.

Dans son traité classique de géologie stratigraphique, Gignoux écrivait fort justement : « Nous voulons, au Quaternaire, savoir si tel lambeau de sable, ayant fourni dans une gravière des ossements ou des silex taillés, est plus ancien ou plus récent que tel autre, visible dans une autre gravière... Les faciès sont à la fois trop uniformes dans l'ensemble et trop localement variables dans le détail pour pouvoir nous guider utilement. L'histoire détaillée des flores, des faunes et industries humaines a été troublée par des impressions multiples et répétées. »

Ce n'est point d'aujourd'hui que quaternaristes et préhistoriens ont essayé de déceler des repères de chronologie absolue. On a tenté d'apprécier la vitesse de dépôt des sédiments, d'interpréter les « varves » rythmant certains dépôts périglaciaires; on a fait appel à la dendrochronologie, au magnétisme rémanent, à la thermoluminescence, à la vitesse d'hydratation des obsidiennes, etc. Toutes ces tentatives ont été dépassées par les méthodes très modernes de *datations absolues radiométriques*.

Parmi les nombreux procédés mis en œuvre, les préhistoriens en utilisent principalement trois : le *radiocarbone,* le déséquilibre *thorium-uranium,* le *potassium-argon*.

On doit à l'Américain Libby d'avoir, dès 1946, formulé l'hypothèse que le carbone de poids atomique 14, isotope du C^{12} qui constitue près de 99 % du carbone terrestre, était assimilé par les êtres vivants jusqu'à leur mort, et se désintégrait ensuite, à une vitesse qui pouvait être calculée, constante, constituant une « période ». Il devenait ainsi possible de dater la mort d'un organisme vivant et, par là-même, celle de la couche archéologique ou géologique le contenant. Cette méthode, qui a livré des milliers de dates, est tout à fait valable, si l'on prend quelques précautions, ce que les préhistoriens n'ont pas toujours fait.

D'une part, elle a ses limites d'application : au-delà de 30 000 ans avant le temps présent, elle devient de plus en plus hypothétique. Certains l'utilisent pour proposer des dates jusqu'à 70 000 ans, qui sont audacieuses. La multiplicité des dates concordantes à partir du Würm II/III, c'est-à-dire pour tout le Paléolithique supérieur et les périodes plus tardives de la préhistoire, en fait un instrument remarquable de chronologie absolue. Encore faut-il que le préhistorien n'oublie pas que l'utilisation d'une date telle que, par exemple, 33 500 $\pm$ 450 B.P. signifie seulement qu'il y a une probabilité de 2/3 pour que la date exacte se situe entre 33 950 et 33 050, ce qui exclut les rapprochements à quelques siècles près. Il y a, d'autre part, bien des dates « aberrantes », qui tiennent surtout à la contamination des échantillons soumis à l'analyse, sinon à la nature de ceux-ci : charbons, coquilles, collagène des os. Dans l'avenir, les dents offriront peut-être le matériau le plus imperméable aux contaminations dues à l'action du milieu ambiant, qui peut être lui-même radio-actif. Maniées avec prudence, les dates 14 C permettent néanmoins de commencer à écrire la préhistoire dans un cadre de chronologie absolue, comme l'histoire. C'est évident dès avant le Néolithique.

La méthode fondée sur le déséquilibre thorium-uranium (T^{230} — U^{234}), née en 1967, et utilisant exclusivement à ce jour des coquilles marines, permet des datations entre 300 000 et 20 000 B.P. Bien qu'elle pose aussi des problèmes, tels que la recristallisation des coquilles, elle a donné des résultats remarquables, sur le plan planétaire, pour la datation de l'interglaciaire Riss-Würm, charnière entre les industries acheuléenne et moustérienne (*circa* 150 000 B.P.). Sur le plan local, elle a permis de dater le « Tyrrhénien » du Maghreb et certaines formations coralliennes de l'Erythrée.

La méthode du potassium-argon (K^{40}/A^{40}), mise au point par Curtis et Miller, a été expérimentée tout d'abord sur les dépôts volcaniques de l'Afrique orientale. Nous lui devons la datation des niveaux d'Olduvai, de l'Omo, du lac Rodolphe et de l'Afar, c'est-à-dire du Pléistocène et du Paléolithique le plus ancien. Appliquée aux bancs de cinérite (Marker Beds), elle a vieilli l'Humanité de trois millions d'années et l'a replacée dans l'évolution du monde vivant. C'est là une des acquisitions remarquables de ces dernières années, qui met fin au problème jusque-là insoluble de l'enchaînement des Hominidés, de l'Australopithèque au Pithécanthrope. Les temps préhistoriques ont ainsi acquis leur vraie dimension chronologique : trois et peut-être cinq millions d'années.

Les grandes périodes

Dans cette optique, les vieilles divisions : *Paléolithique inférieur, moyen* et *supérieur* n'ont plus qu'une valeur commode d'étiquette. L'Acheuléen est le composant essentiel du *Paléolithique inférieur,* mais il y a des industries pré-acheuléennes : non seulement l'Abbevillien d'Europe, mais toute la « Pebble Culture » de l'Ancien Monde, l'industrie « ostéodontokératique » d'Afrique et les industries sur éclats, qui apparaissent peut-être avant celle des galets aménagés et s'affirment, au cours de l'Acheuléen, par la découverte de la méthode « Levallois » de débitage. Le *Paléolithique moyen* est un buissonnement d'industries qui vont du Moustérien de tradition acheuléenne à l'Atérien nord-africain, et au-delà. Le *Paléolithique supérieur* ne peut plus être confiné à la séquence européenne de l'« Age du Renne » : Châtelperronien — Aurignacien — Périgordien — Solutréen — Magdalénien. La régionalisation des cultures est plus marquée au *Mésolithique,* encore et plus justement appelé *Epipaléolithique*. Le *Néolithique* marque une coupure majeure, le passage du genre de vie de chasseur-prédateur à celui de pasteur de troupeaux et d'agriculteur. Là est la naissance de l'Humanité moderne. En bref, les périodes traditionnelles depuis les balbutiements de la science préhistorique sont devenues à peu près vides de sens. La fresque de l'aventure humaine s'insère dans d'autres cadres, ceux de l'évolution du monde vivant depuis plusieurs millions d'années.

Les plus anciennes industries « humaines »

Plus personne ne prend au sérieux les éolithes, ou « pierres de l'aurore » (des temps préhistoriques), qui n'étaient que des jeux de la nature lorsqu'on les exhumait de formations géologiques antéquaternaires. Leur abandon entraîna celui de l'« Homme tertiaire », qui devait être plus tard repensé sur de nouvelles bases. Le problème posé est en effet celui de la valeur de la preuve. Quels sont les critères permettant au préhistorien de reconnaître l'action de l'Homme sur une pierre, un os ou un bois? La preuve est d'autant plus insaisissable que l'intervention humaine a été plus sommaire. A la limite, celle-ci peut n'avoir consisté qu'à apporter cette pierre ou cet os là où nous les trouvons et où aucune cause naturelle ne paraît expliquer leur présence. C'est le cas extrême des « artefacts » recueillis par L. Leakey, dans le gisement du Kenyapithèque, daté du Miocène! C'est, avec un doute plus nuancé, le cas des quartz débités, recueillis dans les fouilles de l'Omo (Éthiopie). Le préhistorien ne nie pas : il n'est pas en mesure de prouver, dans un sens ni dans l'autre.

Les plus anciennes industries attribuables à une main humaine sont d'une part l'« Osteodontokeratic Culture », d'autre part la « Pebble Culture », l'une et l'autre attribuées aux Australopithèques *sensu lato*.

Une industrie sur os, dents, bois et cornes (ostéodontokératique) a été reconnue par Dart dans certains gisements à Australopithèques. En particulier, des humérus de grands Ongulés auraient servi de massues. L'hypothèse de Dart alimenta de longues controverses avant d'être reconnue valable. La découverte d'une industrie lithique (1955) l'avait rendue plausible; mais le problème fut réglé par l'existence dans les niveaux les plus anciens d'Olduvai (Tanzanie) d'industries lithiques et osseuses déjà très différenciées et hors de discussion.

La « Pebble Culture », c'est-à-dire une industrie de galets aménagés par la taille, n'est peut-être pas la plus ancienne. La main a pu utiliser des pierres brutes et des éclats quelconques ainsi que ceux du débitage des galets. Le fait a été constaté dans les fouilles effectuées sur la rive orientale du lac Rodolphe, et expérimentalement par L. Leakey. L'analyse de la taille des galets a conduit à plusieurs tentatives de classification des formes. Il a fallu éliminer, faute de preuve, les galets simplement brisés (« split pebbles ») pour ne conserver que ceux qui sont indiscutablement taillés (« trimmed pebbles »). Il est apparu que la taille pouvait être *uniface* (une seule direction de percussion), *biface* (bidirectionnelle) ou même *polyédrique* (multidirectionnelle). La répétition des mêmes gestes techniques a déterminé des formes bien définies, que l'on a pu mettre en fiches, et qui sont connues de plusieurs régions de l'Ancien Continent, surtout l'Afrique, considérée volontiers comme ayant été le « berceau de l'Humanité ».

On a ainsi constaté que la première découverte technique avait été celle de la *préparation d'un plan de frappe,* grâce à l'enlèvement d'une « entame ». Là est la condition *sine qua non* de toute industrie de la pierre taillée, depuis les Australopithèques jusqu'aux ouvriers carriers de nos jours. Ce deuxième geste technique, qui consiste à utiliser comme plan de frappe l'empreinte de l'entame, n'est-il pas un des critères de l'Hominisation?

L. Balout et ses collaborateurs ont, dans le second cahier des *Fiches typologiques africaines,* examiné le très lent processus des progrès techniques de ces formes, lesquelles dépassent la vingtaine. Trois sur cinq des moyens techniques qui seront utilisés par l'Homme préhistorique le sont déjà : taille au *percuteur manuel,* sur *percuteur dormant,* au *percuteur manuel sur percuteur dormant*. La taille bidirectionnelle met l'artisan en mesure de réaliser les bifaces de l'Abbevillien et de l'Acheuléen ancien. La transition entre ces formes est insensible. Le *trièdre* du Paléolithique inférieur naît également dans la « Pebble Culture ». L'exemple du *hachereau* est particulièrement significatif, dès la fin de l'Acheuléen ancien, en Afrique : la prédétermination du tranchant, dès le « proto-hachereau » sur galet, trahit l'idée qui conduira à la méthode Levallois de débitage et que, pour cette raison, L. Balout a appelée « idée Levallois ».

L'épannelage périphérique des galets en fera des *nucléus* dès que l'idée de débitage, c'est-à-dire l'utilisation d'éclats, se substituera au concept de *taille,* aménagement du bloc de matière première lui-même.

En bref, toutes les formes essentielles du Paléolithique inférieur sont en puissance dans la « Pebble Culture » : bifaces et trièdres, hachereaux, nucléus. L'immense durée de cette période de gestation hantait le préhistorien : il a fallu près de deux millions d'années pour être en mesure de léguer aux Archanthropiens, Paléanthropiens et Néanthropiens les techniques fondamentales des industries lithiques.

Cette chronologie longue est pleinement satisfaisante. Elle permet en particulier de mieux comprendre l'expansion en Europe, en Asie et en Afrique de ces industries tout à la fois primitives et élaborées, dont seule l'hypothèse des convergences permettait jusqu'ici de rendre compte.

Le Paléolithique inférieur

L'abbé Breuil a fait abandonner pour l'Europe le terme de « Chelléen », qu'on a également renoncé à appliquer à l'Afrique. Pour qualifier les plus anciennes et plus frustes industries à bifaces, on parle d'Abbevillien; mais faute de gisements en place en dehors de ceux d'Abbeville, le terme a pris surtout une valeur typologique, l'Acheuléen apparaissant en principe avec l'usage du percuteur tendre. L'Abbevillien de la Somme daterait d'un interstade mindélien. Il a dû s'étendre à diverses régions européennes; mais on n'en trouve trace qu'à l'état dérivé (France, Angleterre) du fait de l'action des

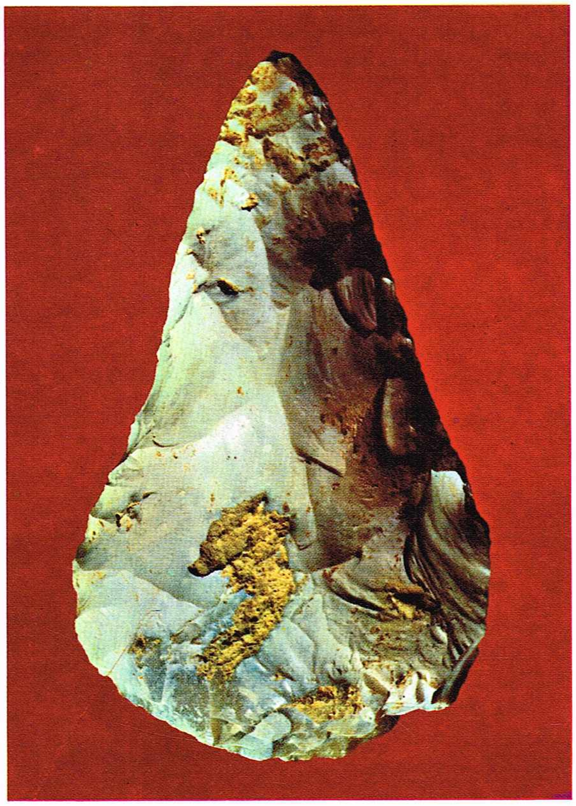

Musée d'Histoire naturelle de Vérone - C. Bevilacqua

glaciations ultérieures. Tel qu'il est typologiquement défini, le « biface abbevillien » peut être d'époque plus récente, d'âge acheuléen.

L'Acheuléen paraît commencer au cours de l'interglaciaire Mindel-Riss et évolue tout au long de la glaciation rissienne. Il est très abondamment répandu en Europe, mais il serait faux de n'y voir qu'une industrie de bifaces de plus en plus parfaits grâce à la taille au percuteur tendre. D'abord, on ne fait pas de bifaces sans tirer de nombreux éclats de la matière première. Pourquoi ces éclats n'auraient-ils pas été utilisés, voire aménagés par la retouche ? Il y a ainsi dans l'Acheuléen des racloirs, des couteaux à dos, des coches et denticulés, voire des grattoirs. Surtout, l'Homme acheuléen, au temps des Pithécanthropes, découvre la technique « Levallois » de débitage des éclats et même celle de l'éclat à double face d'éclatement, l'une et l'autre méthode produisant des tranchants parfaits quoique bruts de taille, alors que ceux des bifaces n'étaient obtenus, jusqu'à l'interglaciaire Mindel-Riss et même au début de la dernière glaciation (Würm), que par régularisation, grâce à une « retaille » de plus en plus poussée. Des sites d'habitat acheuléen présentant une structure archéologique sont connus, depuis l'« atelier » Commont à Saint-Acheul (d'où « Acheuléen ») jusqu'à la « cabane » de la grotte du Lazaret (Nice).

En bref, l'Homme acheuléen utilise toutes les méthodes de taille et de débitage qui seront celles d'*Homo neandertalensis*. La seconde grande découverte technique, qui lui est due, est celle de la taille et de la retouche au percuteur tendre (os, bois) qui permet les bifaces plats, admirablement symétriques, aux bords rectilignes et tranchants. La face de l'un de ces outils est telle qu'il suffit d'aménager la base en plan de frappe pour tirer un « éclat Levallois ». C'est peut-être ainsi que l'idée en vint, au début de l'Acheuléen moyen, en Afrique. La méthode de débitage dite « Levallois » est remarquablement élaborée. Elle postule une série de gestes techniques préparatoires, uniquement reliés par la notion abstraite de la forme finale que conçoit l'artisan. La forme même de cet éclat Levallois est prédéterminée par le choix du nucléus, sa préparation et l'orientation de la percussion ultime qui détache l'éclat achevé. Le problème de la régularisation des tranchants est ainsi résolu par l'élimination de toutes les zones proximales des enlèvements préparatoires. Cette découverte acheuléenne sera couramment utilisée par l'Homme de Néandertal : on passe à volonté du nucléus Levallois à débitage préférentiel au nucléus discoïde moustérien.

Il est exact d'écrire que les industries préhistoriques sont « additives » ; encore faut-il préciser que ces additions ont été découvertes et mises au point par les prédécesseurs de ceux qui en ont généralisé l'emploi.

Si l'Acheuléen est rare en Europe centrale et orientale, sans doute en raison de l'ampleur géographique des phénomènes glaciaires, il est présent en Italie et jusqu'en Sicile, le gisement le plus important étant sans doute celui de Venosa, dans l'Italie méridionale. Par la méthode radiométrique du potassium-argon une date a été obtenue pour le gisement romain de Torre in Pietra : 430 000 B.P.

L'Acheuléen espagnol est riche et trahit des affinités africaines qu'H. Alimen a tout récemment soulignées. Si le détroit de Gibraltar était infranchissable au Prénéolithique, il n'en était pas nécessairement de même au Pléistocène moyen. On ne comprendrait pas autrement la progression des hachereaux sur éclats du Sud au Nord, de l'Acheuléen ancien de l'Afrique au Moustérien de l'Europe. Les gisements de Tolède et de Madrid sont encore mal connus. Ceux d'Ambrona-Torralba ont, en plus, livré une industrie osseuse qui paraît s'inscrire dans la lignée de l'industrie « ostéodontokératique » d'Afrique méridionale et orientale.

L'Acheuléen en Afrique

Il y est d'une richesse exceptionnelle : on le trouve au Maroc, en Algérie, en Tunisie, en Égypte, au Sahara, en Afrique orientale et méridionale. Le gisement de référence, par sa merveilleuse stratigraphie, est celui d'Olduvai ; mais on ne saurait minimiser le Maroc atlantique, Ternifine (Algérie occidentale) qui a livré une faune considérable et les restes de l'Atlanthrope, Sidi-Zin (Tunisie), El Beyed et Tihodaïne (Sahara). L'évocation la plus saisissante est sans doute celle d'Olorgessaillie (Kenya) ou encore celle d'Isimila (Tanzanie). Les hachereaux sur éclats peuvent jouer un rôle essentiel (Tabelbalat-Tachenghit) ou très variable (Melka Kontouré, Éthiopie). Des datations au potassium-argon ou au thorium-uranium, enfin au radiocarbone, enferment dans un million d'années cette période essentielle. La méthode Levallois n'est pas partout présente, et le passage aux industries plus récentes est complexe. Le « Sangoen » d'Afrique centrale paraît bien être un épigone de l'Acheuléen. Il en va différemment ailleurs, comme nous le verrons.

Les plus importants gisements acheuléens qui se soient conservés en Afrique représentent des habitats au bord de la mer (Maroc, baie de Djibouti-Obock) et surtout sur les rives de lacs dont les crues ensevelissaient les dépôts humains. Leur dégagement par les méthodes modernes de fouilles en décapage permet d'exhumer dans un état évocateur les sols d'occupation humaine jonchés d'ossements et de pierres taillées. Cette vision, que l'on pouvait croire réservée aux époques récentes de la préhistoire, nous l'avons en Afrique dès le temps des Australopithèques, il y a deux millions d'années.

L'Acheuléen en Asie

L'Acheuléen est abondant au Proche- et Moyen-Orient avec ou sans hachereaux sur éclats. Il s'agit le plus souvent d'une industrie évoluée. Certains gisements sont des grottes dans lesquelles l'habitat humain s'est poursuivi au Paléolithique moyen et supérieur : par exemple, Et-Taboun, au mont Carmel. Des traces s'observent en

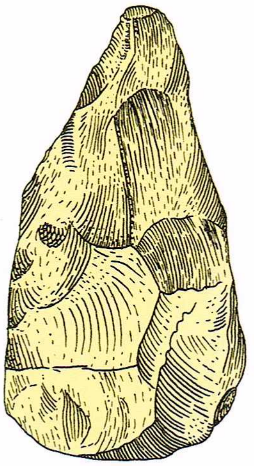

I.G.D.A.

◄▲ *Ci-dessus, biface abbevillien (très réduit) du gisement de Quinzano près de Vérone (d'après Graziosi et Biasotti). A gauche, biface micoquien.*

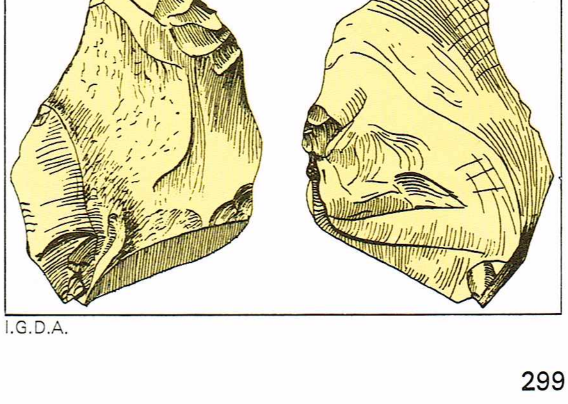

I.G.D.A.

◄ *Industrie du Clactonien de Barnfield Pit, en Angleterre (d'après Breuil, très réduit).*

▶ *Page ci-contre, en haut à gauche, industrie du Paléolithique moyen de l'Afrique : un pic « sangoen » de Sango (d'après Bordes). A droite, « Blattspitzen » de la grotte de Mauer, en Allemagne (d'après Bordes).*

Anatolie, et de vrais gisements ont été découverts au Caucase; la Péninsule arabe, l'Iran et l'Afghanistan en sont encore au stade de l'exploration.

On retrouve dans le nord de la Péninsule indienne des séries importantes qui paraissent couvrir l'Acheuléen tout entier, en particulier dans la vallée de la Soan (Penjab) et, plus à l'est, dans les vallées de Beas et de Bangada. On retrouve en abondance les hachereaux sur éclats de type africain. Ce sont des gisements de terrasses alluviales, comme il en est des régions plus méridionales, de Bombay et de Madras.

Le Paléolithique inférieur asiatique pose le problème des industries sur éclats, ne comprenant donc pas de bifaces, sur d'autres bases que celles utilisées par l'abbé Breuil pour admettre un « Clactonien », un « Levalloisien » et un « Tayacien ». Alors qu'en Europe, en Afrique et dans une partie de l'Asie, la séquence : galets aménagés — bifaces abbevilliens et acheuléens (accompagnés ou non de hachereaux sur éclats souvent de débitage Levallois) est la règle générale, de la Sibérie à l'Insulinde en passant par la Chine, il paraît bien en être autrement. Or, nous avons là des gisements à Hominidés : Pithécanthropes — Sinanthropes, et les industries les accompagnant ne sont pas celles d'Australopithèques ou de Pithécanthropiens africains. Une sorte de ligne de démarcation passerait par l'Inde. C'est la *Movius Line*, du nom du préhistorien américain, spécialiste de l'Asie du Sud-Est, qui l'a proposée. Elle n'a peut-être pas de valeur absolue, mais il n'en reste pas moins que les industries attribuées aux Sinanthropes passent du galet aménagé à des éclats où les racloirs sont remarquables. Il en est de même à Java, bien que les « bifaces » du Patjitanien posent un problème. De là l'hypothèse défendue par Kœnigsvald, d'une évolution divergente vers l'Est asiatique et vers l'Ouest africain et européen, partie de l'Inde et de la « Pebble Culture », où le « Ramapithèque » serait l'ancêtre (et non pas le « Kenyapithèque » africain, comme le voulait Leakey). Quoi qu'il en soit, les bifaces sont rarissimes en Chine, et l'Anyathien de Birmanie est fait d'outils souvent en bois silicifié, qui vont d'un faciès oldowayen à des éclats. Comme l'écrit très justement F. Bordes : « Il semble donc bien établi qu'il existe, en Asie du Sud-Est, un grand complexe industriel évoluant différemment du complexe à bifaces. »

▼ Soanien ancien *de l'Inde septentrionale; A, chopper de l'Anyathien de Birmanie; B, chopper de bois silicifié; C, chopper pointu de tuf silicifié (d'après Bordes).*

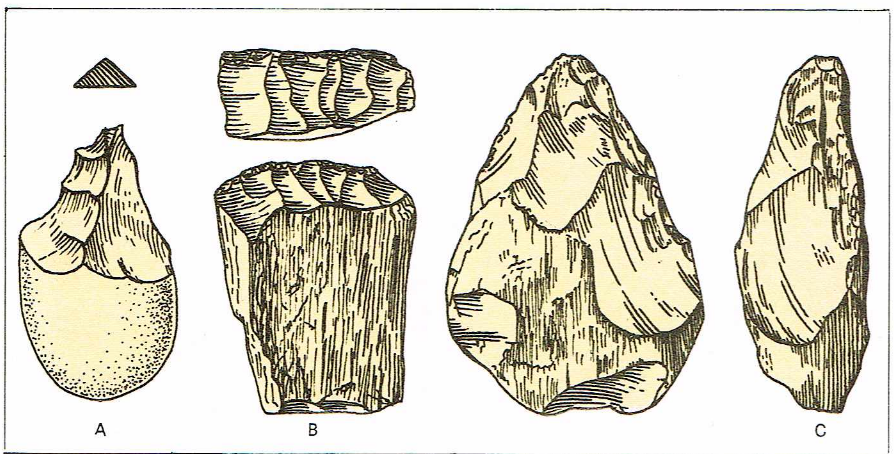

I.G.D.A.

Un problème analogue s'est récemment posé en Europe centrale, où le site hongrois de Vertesszöllös, d'âge mindélien, n'a pas de bifaces, mais des galets aménagés de petite taille et des éclats. On peut penser que le « Clactonien » et le « Tayacien » chers à l'abbé Breuil se rattachent à cette lignée encore très imprécise. Le Clactonien du gisement éponyme (Essex) est comparable à la « Pebble Culture », sauf qu'il est tiré de rognons de silex et non de galets. Quant au « Tayacien », il contient des bifaces à la Micoque (Tayac). Ce terme doit être abandonné.

Le complexe moustérien

Il groupe, sous des faciès très divers, les industries de l'Homme de Néandertal pendant environ 100 000 ans, si l'on se fonde sur les datations thorium-uranium pour l'interglaciaire Riss-Würm et le radiocarbone pour les stades würmiens. Le fait essentiel est la continuité des industries : tout le Moustérien est en puissance dans les techniques mises au point par les Hommes acheuléens, en particulier la méthode Levallois de débitage. Le Moustérien est répandu dans toute l'Europe habitable, il pénètre même en montagne, sous forme de haltes de chasse (à l'ours ?). En Afrique, il se transforme en *Atérien* à outillage pédonculé dans le quart nord-ouest, en faciès locaux mal datés et mal classés au sud du Sahara. Il reste plus pur au Proche- et Moyen-Orient et s'étend en U.R.S.S. et en Chine.

● *En Europe*. La classification française, établie par F. Bordes, est très généralement suivie. On distingue ainsi en France plusieurs types : le Moustérien « typique » (Würm I-II), auquel se rattache l'*Homo neandertalensis* du Moustier (Dordogne); le « Charentien » ou type Quina-Ferrassie, caractérisé par ses racloirs et l'absence presque totale de débitage Levallois; le « type Ferrassie », qui est au contraire à débitage Levallois; le Moustérien « à denticulés », original et mystérieux, car il manque des éléments classiques du Moustérien, où ils ne tiennent qu'une place restreinte; le Moustérien de « tradition acheuléenne », qui évolue en deux stades, le premier apparaissant au début du Moustérien, avec ses nombreux bifaces et ses couteaux à dos, le second pouvant couronner la série moustérienne (en Charente par exemple, avec ses très petits bifaces cordiformes).

C'est par référence à ces types que l'on interprète les découvertes infiniment moins denses faites en Angleterre. La Belgique meusienne est en revanche assez riche (Spy). L'Allemagne révèle un faciès moustérien à pièces foliacées (Blattspitzen). Citons le gisement de Kulna, le plus important de Tchécoslovaquie, celui de Tata en Hongrie, celui de Krapina en Yougoslavie. La traînée continue en Pologne, en Roumanie, en Ukraine et en Crimée; à Molodova (Ukraine) une cabane charpentée en os de mammouths est à coup sûr d'âge moustérien.

Les péninsules méditerranéennes ont été occupées par les Hommes moustériens : la Grèce (Thessalonique, Épire, Péloponnèse), l'Italie abondent en faciès divers où le débitage Levallois tient une place importante. Le « Pontinien » tire son originalité de son débitage sur petits galets. En Espagne, les gisements du Castillo, de Cariguela del Piñar et de l'Abri Romani sont bien connus. C'est par la Péninsule ibérique que les hachereaux sur éclats de l'Acheuléen africain ont gagné, tardivement, le sud-ouest de la France.

● *En Afrique*. Le Moustérien n'est représenté que par un très petit nombre de gisements au Maroc (1), en Algérie (1), en Tunisie (5) ; encore la pointe pédonculée atérienne apparaît-elle dans deux d'entre eux. En revanche, on n'y observe pas de « tradition acheuléenne », sauf si l'on qualifie ainsi l'usage généralisé de la méthode Levallois de débitage. La grotte démantelée du Djebel Irhoud (Maroc) a donné, avec un très riche Moustérien typique, des restes importants d'Homme de Néandertal. A El-Guettar (Tunisie) a été exhumé le plus vieux monument religieux du monde, le cairn de galets et de silex taillés,

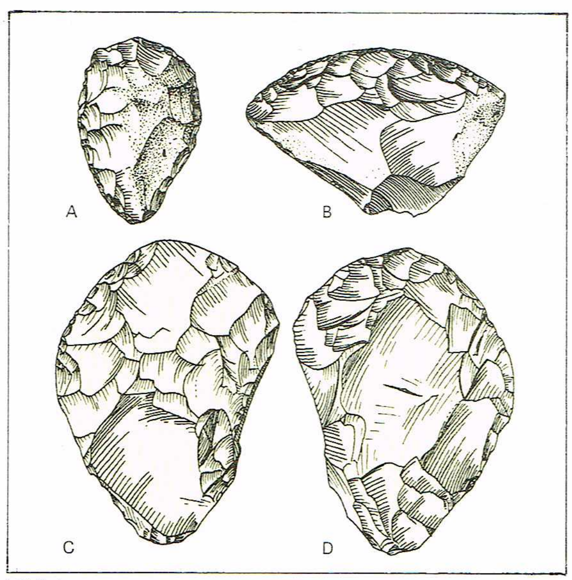

▶ *Industrie du* **Moustérien, type Quina** : *A, grattoir épais; B, racloir transversal, type Quina; C et D, racloir à retouche biface, type Quina (d'après Bordes).*

I.G.D.A.

aujourd'hui conservé au musée du Bardo (Tunis). Aucun gisement moustérien n'est jusqu'ici connu au Sahara, si l'on excepte la frange littorale de Cyrénaïque (Haua Fteah) et l'Oasis de Khargeh.

La position de R. Vaufrey, selon laquelle l'Atérien était un épigone du Moustérien contemporain du Paléolithique supérieur de l'Europe occidentale, ne paraît plus soutenable. La rareté du Moustérien en Afrique septentrionale, son absence au Sahara s'expliquent par le fait que la transformation en Atérien est précoce. L'Atérien est présent partout, et sa position chronologique se précise : postérieur à la plage néotyrrhénienne (interstadiaire Würm I-II), il se prolonge, comme le Moustérien français, jusqu'au début du Würm II-III. Il peut être contemporain des débuts du Paléolithique supérieur français, mais certains pensent qu'il s'attarde au Sahara jusqu'au Prénéolithique. J. Tixier a lumineusement démontré que l'Atérien est un Moustérien de débitage Levallois dont tous les constituants ou presque ont pu être munis d'un pédoncule d'emmanchement. L'Atérien est donc un faciès évolutif africain du Moustérien. Plus récent à ses débuts, il a une fin plus tardive.

Au sud du Sahara, le paysage est plus complexe et ses composants sont parfois imprécis. C'est le « Middle Stone Age », terme qui ne correspond pas à celui de Paléolithique moyen. Le Sangoen paraît être une forme évolutive terminale de l'Acheuléen, dans les zones forestières, le Fauresmithien. Le premier a été daté de 40 000 ans en Rhodésie, le second évoque un Moustérien de tradition acheuléenne B, en Afrique du Sud et de l'Est.

● *En Asie*. Notre découpage géographique en continents ne fournit qu'un cadre factice aux faits préhistoriques. Au Proche- et Moyen-Orient, le Moustérien est très comparable à celui de l'Europe. De plus, les gisements y offrent parfois des stratigraphies d'épaisseur totale exceptionnelle ailleurs : c'est le cas de Yabroud (Syrie), Ksar Akil (Liban), Et-Tabun et Es-Skhül (Israël), qui ne sont point les seuls. Un autre groupe est à citer en Irak, dont le plus beau fleuron est Shanidar. Des Néandertaliens classiques proviennent de ces gisements, et aussi les « Hommes de Palestine », plus proches de l'Homme moderne.

Le Moustérien atteint le Caucase, la mer Caspienne, l'Ouzbékistan, où reposait un enfant néandertalien dans un cercle de cornes de chèvres sauvages. Après les régions méridionales de l'U.R.S.S., on l'observe en Chine où les foyers de l'Ordos ont donné un Moustérien de débitage Levallois.

Avec la fin du Moustérien, quels qu'en soient les faciès, se termine la lente ascension, longue de plusieurs centaines de millénaires, des Humanités qui ont précédé la nôtre. Nous allons évoluer maintenant dans un cadre chronologique qui ne paraît pas dépasser 40 000 ans, celui de notre ancêtre direct : *Homo sapiens*. L'héritage qu'il va recueillir est immense. Toutes les techniques d'utilisation de la pierre sont acquises, sauf le polissage. Les formes qu'il va multiplier ont été découvertes avant lui. L'usage du feu est connu, en Europe, avant l'Afrique, depuis le temps des Pithécanthropes, et aussi, très vraisemblablement, le langage articulé, fût-il rudimentaire. Les structures d'habitat des vivants, l'inhumation rituelle des morts ne seront pas choses nouvelles. L'Ancien Continent a été exploré, parcouru, habité par une Humanité clairsemée qui n'a pu survivre que parce qu'elle était en symbiose avec tout le reste de la nature vivante, dont les petits groupes humains ne pouvaient altérer tant soit peu l'équilibre.

Paléolithique supérieur et Épipaléolithique

Le passage du complexe moustérien au Paléolithique supérieur correspond au remplacement de l'Homme de Néandertal par *Homo sapiens*. Dans l'un et l'autre cas, les synthèses les plus récentes supposent la transition plutôt que la coupure.

● *La France*. C'est le Moustérien de tradition acheuléenne, dont l'auteur est encore pratiquement inconnu, qui établit un lien hors de discussion entre le Moustérien et le *Périgordien ancien* (type Châtelperron), au cours du long interstade Würm II-III, il y a près de 40 000 ans. L'évolution autonome du Périgordien, longtemps discutée, semble établie par le gisement des Cottés, conduisant au Périgordien moyen (type La Gravette), puis à un

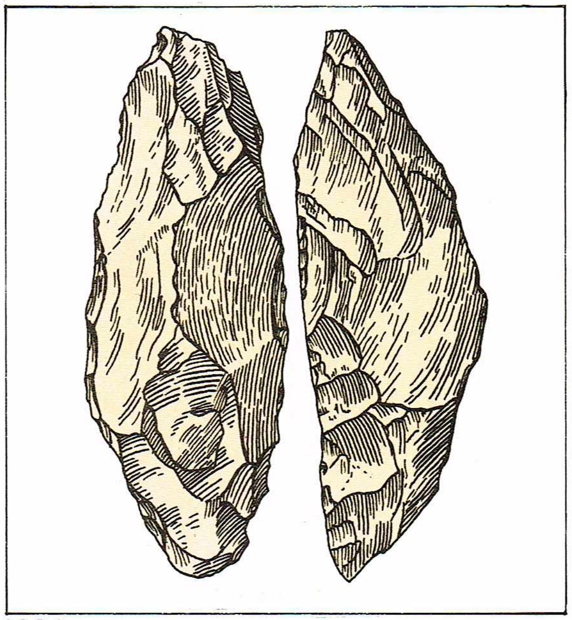

I.G.D.A.

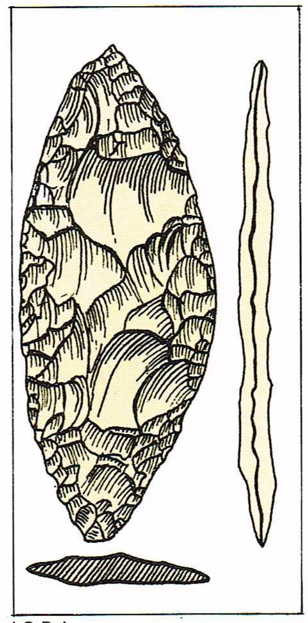

I.G.D.A.

▼ *En haut, industrie de Châtelperron et de La Gravette (réduit de moitié - d'après Bordes).*

En bas : A, burin dièdre du Périgordien supérieur *de Dolni-Vistonice (Tchécoslovaquie) ;*
B et C, pointes de La Gravette (d'après Bordes) ;
*D-E-F, industrie osseuse de l'*Aurignacien *: pointe osseuse à base fendue (d'après Mortillet et Biasutti).*

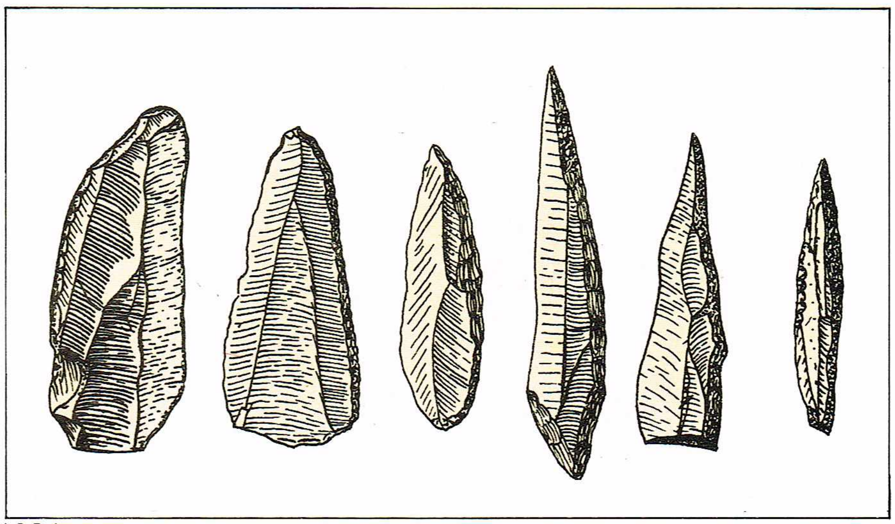

I.G.D.A.

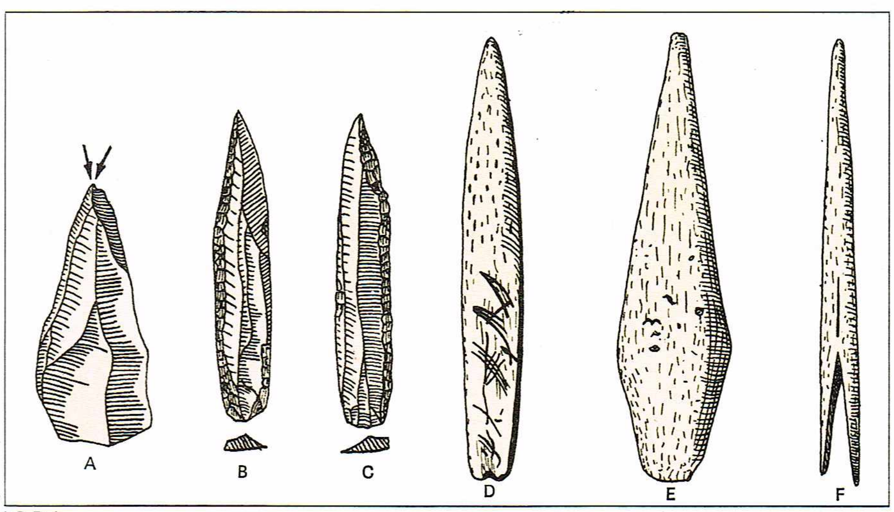

I.G.D.A.

▶ *A gauche : A, burin busqué de La Ferrassie :* Aurignacien II; *B, perçoir multiple « en étoile » :* Magdalénien I; *C, pointe à face plane :* Solutréen ancien; *D, grattoir à retouche solutréenne :* Solutréen ancien; *E, perçoir-grattoir sur feuille de laurier :* Solutréen moyen; *F, burin :* Magdalénien supérieur. *A droite, industries* de l'Aurignacien I : *A, lame étranglée; B, lame aurignacienne; C, grattoir sur lame retouchée; D, pointe en os à base fendue provenant de Font-Yves en Corrèze; E, pointe en os à losange (La Ferrassie, Dordogne)* [*d'après Bordes*].

Périgordien supérieur multiforme, dont les niveaux à burins de Noailles devront sans doute être soustraits. L'origine de l'*Aurignacien* reste obscure. Il paraît être en France un faciès intrusif, comme le sera plus tard le Solutréen. L'outillage aurignacien, qui apparaît tout constitué, tant le lithique que l'osseux, évolue parallèlement au Périgordien. Il peut y avoir des cas d'alternance dans l'occupation humaine d'un même abri, ainsi que des

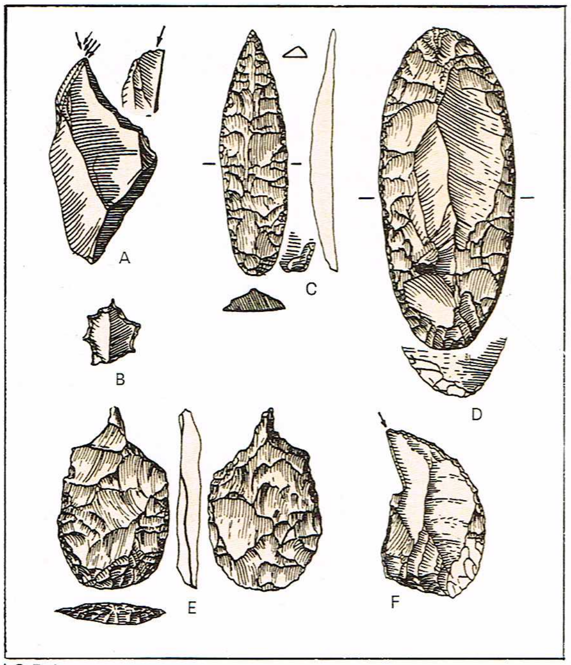

I.G.D.A.

cas de symbiose, toujours discutés, mais qui finiront par ne plus être mis en doute.

Avant la fin du Würm III, l'industrie *solutréenne* met fin à la fois à l'Aurignacien et au Périgordien. Contrairement à ce qui a été longtemps soutenu, elle ne vient pas d'Afrique du Nord. Reste l'hypothèse de l'Europe centrale, qui est également douteuse. La durée de cette industrie est relativement courte : deux ou trois millénaires avant et après 20 000 B.C. C'est une apogée de la taille du silex, grâce à la retouche par pression, facilitée par un chauffage préalable. En France, le Solutréen n'est connu qu'à l'ouest du Rhône. Si le gisement éponyme de Solutré est proche de la vallée de la Saône, les plus nombreux gisements se situent dans le Périgord et en Charente, avec prolongements vers les Pyrénées et le Solutréen espagnol. Les pointes à face plane, les « feuilles de laurier », les pointes à cran, les fines lamelles à bord abattu, les objets de parure, disparaissent si brutalement que les premiers occupants magdaléniens s'installeront parfois sur le sol de l'abri que les solutréens ont abandonné. Le pauvre « Magdalénien O » n'est alors discernable que par sa typologie. La disparition des lamelles à bord abattu, si abondantes au Solutréen supérieur, est totale. Ces premiers Magdaléniens ont parfois apporté leur matière première. L'évolution ultérieure se fera par saccades. Les « raclettes » du vieux Magdalénien vont disparaître devant un retour en force de l'outillage sur lamelles (Magdalénien II). L'outillage en os, qui va prendre une place essentielle, comporte des objets d'art mobilier de toute beauté. Apparus au Magdalénien IV, les harpons ont un rang de barbelures au V et deux au VI. Les microlithes géométriques annoncent l'Épipaléolithique. La glaciation würmienne meurt, d'autres genres de vie s'instaurent. L'art pariétal, sur lequel nous reviendrons, s'appauvrit et meurt, en France tout au moins.

● *L'Europe*. En partant de la France, deux axes doivent être prospectés : les péninsules méditerranéennes, ibérique et italienne, et l'Europe continentale, centrale et orientale.

L'Espagne est riche en industries du Paléolithique supérieur : Périgordien, Aurignacien, Solutréen, Magdalénien, Azilien. Les gisements vont du Pays basque et des Cantabres (Castillo) à la Catalogne et à l'Andalousie, où les grottes du Parpalló donnent une série allant du

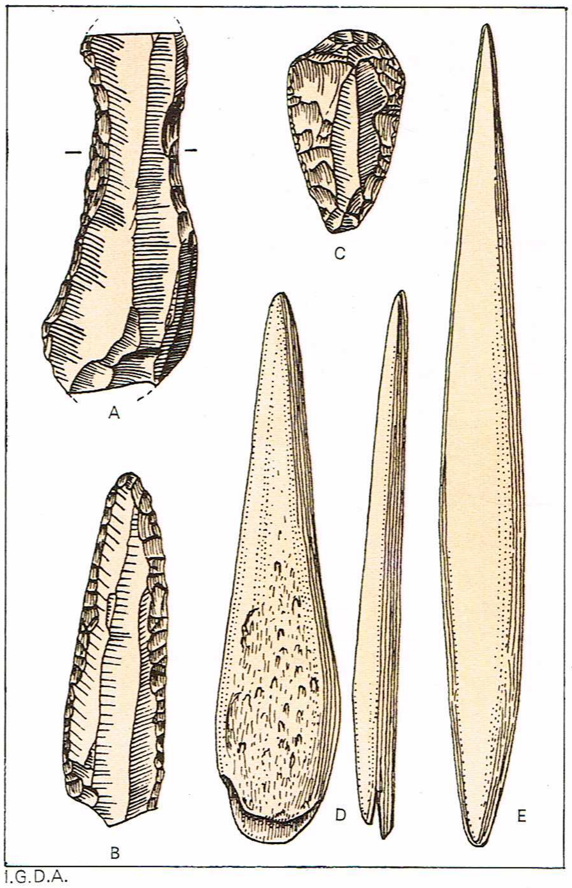

I.G.D.A.

Périgordien au Solutréen et au Magdalénien avec de très nombreuses œuvres d'art. Moins prospecté, le Portugal ne paraît pas étranger à ces civilisations.

Dès la frontière française, les grottes de Grimaldi (Italie) se rattachent à l'ensemble aurignaco-périgordien. La grotte du Fossellone a livré un Aurignacien typique. L'industrie de la grotte Romanelli (Terre d'Otrante) serait contemporaine du Magdalénien. Il y a du Paléolithique supérieur en Sicile.

La Belgique est déjà en partie liée à l'Europe centrale. La Suisse n'a connu que des Magdaléniens suivant le retrait des glaciers. En revanche, l'Allemagne rhénane a connu le Périgordien et un Aurignacien original; mais on n'y a pas trouvé trace de Solutréen, ni de vieux Magdalénien. Le retrait de la glaciation permet l'approche de la grande plaine du Nord, où se développent des faciès épimagdaléniens : l'Hambourgien, l'Ahrensbourgien; il en est de même aux Pays-Bas et probablement aussi en Angleterre, où, après un Aurignacien et un Solutréen douteux, le Creswillien paraît être un épigone du Magdalénien final.

Dès qu'en progressant vers l'est, on atteint l'Autriche et la Tchécoslovaquie, des gisements très importants se révèlent. L'Autriche est riche en Aurignacien (Willendorf, Krems, etc.), auquel succède un Périgordien moyen et récent. Puis la séquence s'interrompt : pas de Solutréen, un Magdalénien *sub judicio*. Le Szélétien pourrait dériver, selon F. Bordes, d'un Moustérien à pièces foliacées (« Blattspitzen ») ; mais il ne peut être considéré comme un ancêtre du Solutréen. Il tient lieu ici tout à la fois de Périgordien et d'Aurignacien anciens. Le gisement morave de Dolni Vestonice est en tous points remarquable, et par sa richesse et par sa ressemblance étonnante avec le Périgordien supérieur « classique »; le site de Pavlov n'est pas moins intéressant. L'un et l'autre datent d'environ 25 000 ans. Citons aussi Pekarna et Predmost. La richesse de cette région en œuvres d'art mobilier a été une révélation pour le préhistorien occidental. Si le Solutréen est absent, le harpon magdalénien de Pekarna, dit à trois rangs de barbelures (en réalité deux, l'un étant dédoublé), est une pièce exceptionnelle.

En Hongrie, se trouve la station éponyme du Szélétien (grotte de la Szeleta). L'Aurignacien est aussi présent et a été daté en un point d'environ 29 000 ans B.C.

Le Magdalénien reste douteux. Le même qualificatif peut être appliqué aux industries trouvées en Pologne, dont certaines présentent des affinités aurignaciennes ; mais l'ensemble est assez original pour justifier des noms régionaux comme le Masovien et le Tarnovien, qui paraissent être des épigones du Magdalénien.

Il faut atteindre la partie européenne de l'U.R.S.S. pour rencontrer un Paléolithique supérieur abondant mais qui pose d'autant plus de problèmes qu'il s'intègre moins dans le schéma classique de l'Europe occidentale. Il n'y a en fait que des affinités plus ou moins marquées, comme le Périgordien ou le Magdalénien (Molodova 5, sur le Dniestr), bien que les cadres chronologiques s'inscrivent dans ceux des industries occidentales (du XXI^{e} au X^{e} millénaire B.C.). Pour le professeur Bordes, d'éventuelles assimilations ne seraient pas plus fondées dans d'autres gisements de la même région (Babini, Voronovitsai, Mezzin, dans le bassin de la Diesna). L'ensemble de Kostienki-Borchevo, sur le Don, est d'une extraordinaire richesse, tant en industries qu'en objets de parure, et dans certains cas on observe de remarquables lieux d'habitat ; une « maison » au bâti en os de mammouth couvrait 150 m^{2} (Kostienki II). On peut étendre à tous ces gisements, y compris ceux de Borchevo, du Don inférieur de Crimée et de Vladimir (Soughir), le jugement du professeur Bordes sur Kostienki IV : « Malgré quelques ressemblances..., la distance et certains caractères font que, pour le moment, l'hypothèse d'une convergence est la seule qu'on puisse soutenir. Mais il y a des affinités occidentales... »

● *L'Asie*. Comme pour le Paléolithique moyen, il faut mettre à part la frange moustérienne du Proche-Orient et certains points explorés du Moyen-Orient. Des gisements sont justement célèbres, par exemple : Shanidar (Kurdistan), Ksar Akil (Liban), Jabroud (Syrie). Encore notre connaissance de ces sites dépend-elle de la qualité des fouilles, qui ne fut pas toujours digne de la richesse et de l'intérêt des dépôts archéologiques. On a voulu voir dans l' « Émiréen » une industrie de transition, traduisant une évolution sur place du Moustérien au Paléolithique supérieur ; cette hypothèse conforterait la thèse des « Hommes fossiles de Palestine », considérés eux aussi comme intermédiaires entre l'Homme de Néandertal et *Homo Sapiens*.

La coupe de Jabroud pose même le problème d'un « Pré-Aurignacien » qui, à la fin du Würm II, serait antérieur à un Moustérien évolué. Le gisement clé est probablement Ksar Akil, où un Aurignacien vrai, qui ne fait aucun doute, est précédé de formes apparentées au Périgordien et au Solutréen, et suivi d'une sorte de vieux Magdalénien. Les fouilles en cours, conduites d'une façon très scientifique, préciseront ces traits. Il y aura lieu de revoir dans le détail la terminologie proposée : Baradostien, Émiréen, Antélien, Atlitien, Kébarien, etc.

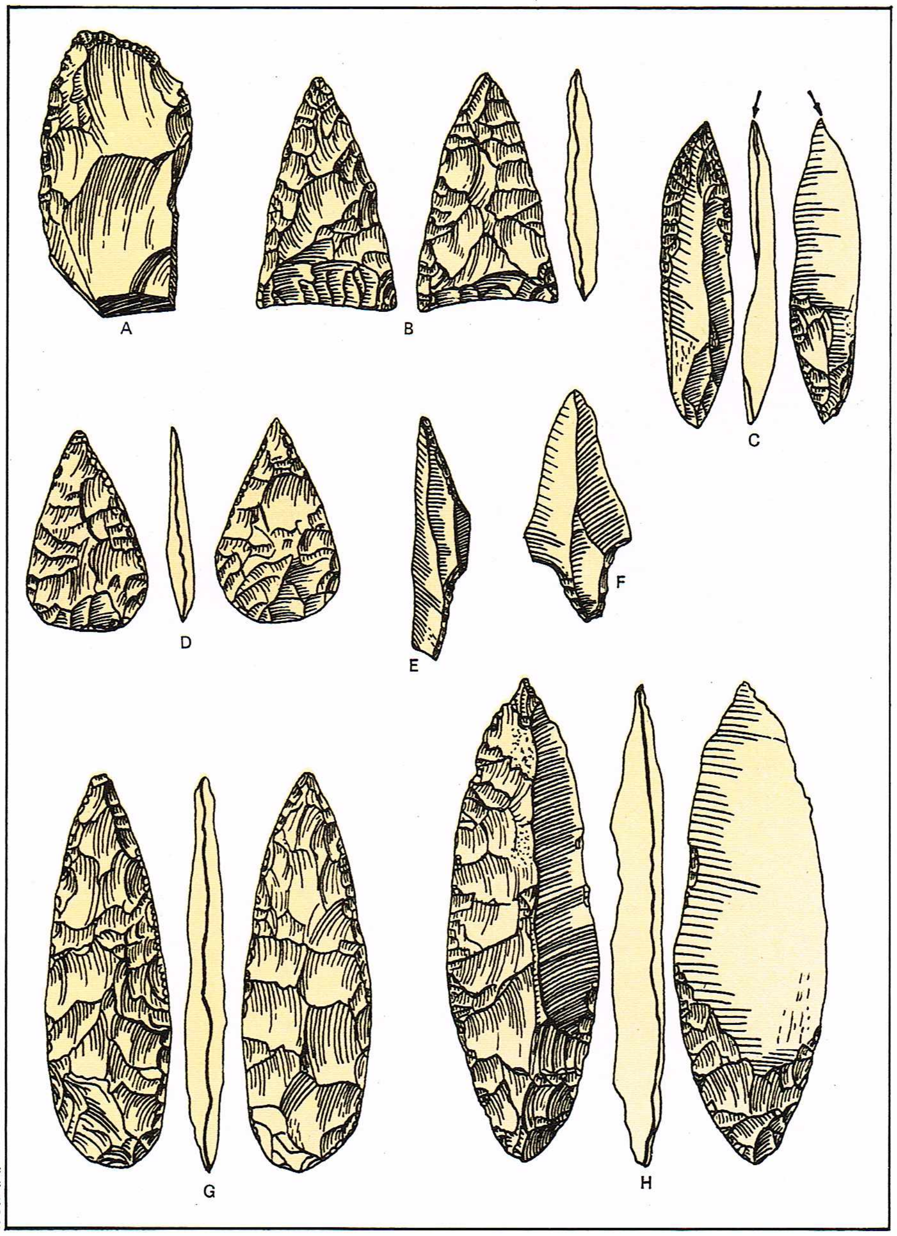

▲ *A, racloir du niveau inférieur de* Kostienki I ; *B, pointe triangulaire biface de* Kostienki I, *niveau inférieur ; C, pointe à face plane légèrement retouchée à la base, du* Jermanovicien ; *D, pointe foliacée biface de Miskolc,* Szélétien hongrois ; *E, pointe à cran :* Ahrensbourgien ; *F, pointe à soie :* Culture de Bromme ; *G, pointe foliacée biface de la Szélétie :* Szélétien hongrois ; *H, pointe à face plane légèrement retouchée à la base :* Jermanovicien *(d'après Bordes).*

Musée d'Histoire naturelle de Vérone - C. Bevilacqua

Musée d'Histoire naturelle de Vérone - C. Bevilacqua

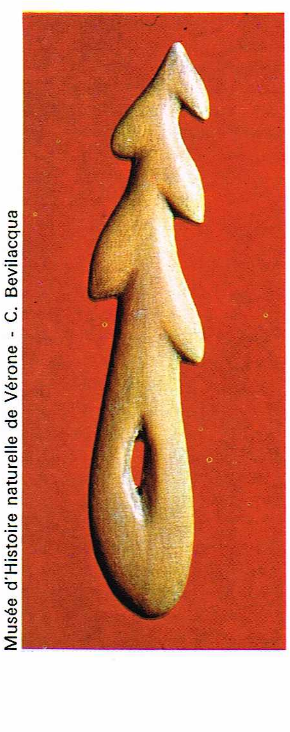

Musée d'Histoire naturelle de Vérone - C. Bevilacqua

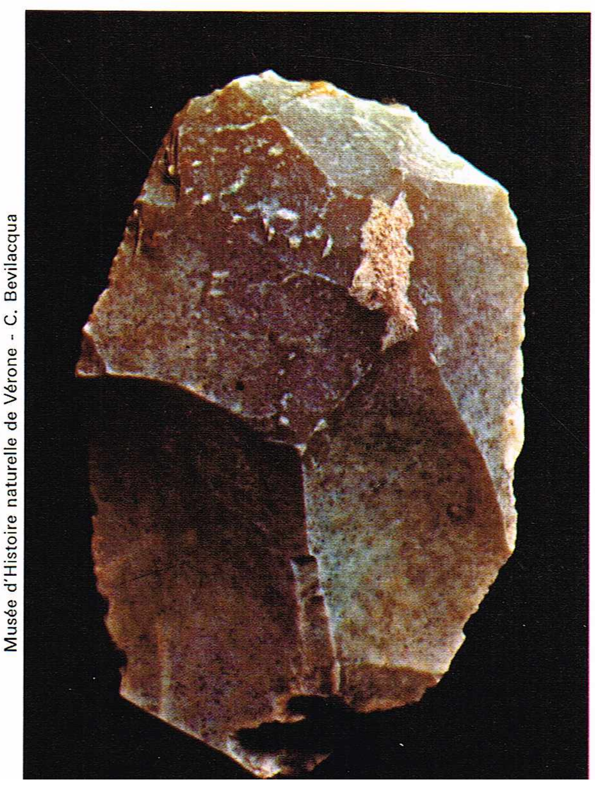

◀ *Trois objets du* Magdalénien : *à gauche, un perçoir sur lame ; au milieu, un harpon en os ; à droite, un grattoir sur éclat.*

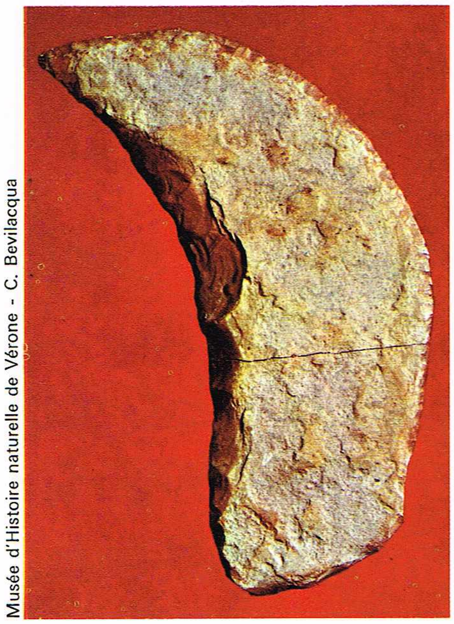

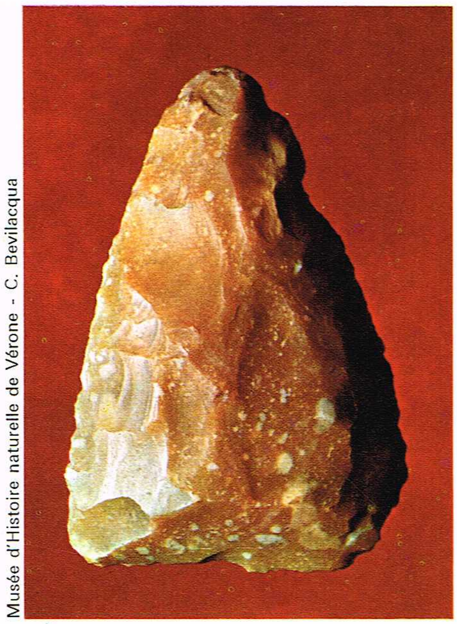

▲ *A gauche, industrie lithique des Kjökkenmöddinger du Danemark; à droite, « Campignien » de Gargano, en Italie.*

D'immenses régions asiatiques sont à peu près inexplorées. Les trop rares points de repère sont : en Chine, l'Ordos et Choukoutien, en Sibérie, Malta et Bouriet, avec de nombreux objets de parure et d'art mobilier. Ce caractère très localisé des connaissances est d'autant plus gênant qu'il ne fait de doute aujourd'hui pour aucun chercheur sérieux que la colonisation préhistorique du continent américain s'est faite par le Nord-Est sibérien.

Longtemps rattachées au continent asiatique, les îles du Japon ont été occupées par l'Homme paléolithique. Les recherches préhistoriques à Hokkaido et Hondo, appuyées sur des datations absolues (14 C et hydratation de l'obsidienne) le confirment de façon définitive. L'attention doit donc être portée, dans le Pacifique, sur les terres qui ont pu ne pas être insulaires à certaines périodes du Quaternaire. Les Philippines, l'Indonésie, Bornéo et jusqu'à l'Australie émergent d'un plateau continental qui contraste avec les fosses abyssales bordières. Il y a très vraisemblablement du Paléolithique aux Philippines, à Célèbes, Bornéo (grotte de Niah, Sarawak), et sans doute en Australie.

● *L'Amérique*. Le continent américain a été abordé par le détroit de Behring, ou par le plateau qui unit les îles Aléoutiennes (mais cette dernière hypothèse est plus douteuse). Le détroit a pu totalement disparaître lors des régressions marines. La voie de pénétration a dû être la vallée du Yukon, qui permettait d'éviter les montagnes couvertes de neige et les glaciers. Ces événements se seraient produits au cours des stades würmiens, ce qui n'exclut donc pas la possibilité d'un Paléolithique moyen et rend probable celle d'un équivalent chronologique du Paléolithique supérieur. Les gisements proposés, avec l'appui de dates radiométriques, restent *sub judicio;* mais il semble bien qu'au Postglaciaire, le continent tout entier, du Nord au Sud, ait été découvert.

Le « Paléo-indien » d'Amérique du Nord doit commencer vers 10 000 B.P. Il est marqué par la succession chronologique de types de pointes : Sandia, Clovis, Folsom. La technique de taille des pointes de Clovis est unique au monde. On chasse le mammouth, puis le bison. En Amérique du Sud, des « complexes industriels » sont datés de 14 000/12 000 B.C. au Venezuela, de 12 000/10 000 en Équateur et au Pérou, de 10 000/7 000 en Patagonie.

Une hypothèse intéressante soutient qu'à partir de la réouverture du détroit de Behring et de la découverte de la navigation sur les grands fleuves puis en haute mer, l'apport et la diffusion du Néolithique ont emprunté des voies nouvelles.

Au IVe millénaire, paraît commencer la navigation transpacifique.

● *L'Afrique*. Ce continent est beaucoup mieux connu que l'Asie ou l'Amérique, et l'ensemble des faits acquis impose la notion d'une *régionalisation* des cultures.

En Afrique du Nord, l'Atérien étant désormais considéré comme un faciès moustérien, le Paléolithique supérieur est maintenant représenté par l'Ibéromaurusien, contemporain du Magdalénien et peut-être du Solutréen de France. Cette industrie est littorale, de la Tunisie méridionale au Maroc. Ses porteurs, les Hommes de Mechta el-Arbi, appartiennent au groupe des Cro-magnoïdes, comme les Hommes du Paléolithique supérieur de l'Europe occidentale.

Bien plus récente est la « série » capsienne : Capsien typique, supérieur (ou évolué, aux multiples faciès), Néolithique « de tradition capsienne ». De très nombreuses datations radiométriques permettent de cerner cette civilisation, avec une précision parfois abusive, entre le VIIe et le IIIe millénaire B.C. Le Capsien évolué a pénétré au Sahara. La persistance d'une tradition capsienne y est d'autant plus marquée que la « néolithisation » telle qu'on la définit aujourd'hui y est moins achevée. Dans le Sahara méridional, où l'Atérien pourrait avoir longtemps persisté, la néolithisation est ancienne : le Néolithique saharo-soudanais remonte au VIIe millénaire.

Le Paléolithique supérieur de Cyrénaïque paraît tourné vers l'Est et étranger au Maghreb. La préhistoire de l'Égypte est en cours de réexamen; or, il s'agit du pays charnière entre l'Orient et l'Afrique. Après un Paléolithique moyen de débitage Levallois, dont le « Sébilien » ne découle pas chronologiquement — il est trop récent, épipaléolithique — le Silsilien et le Sébékien, récemment

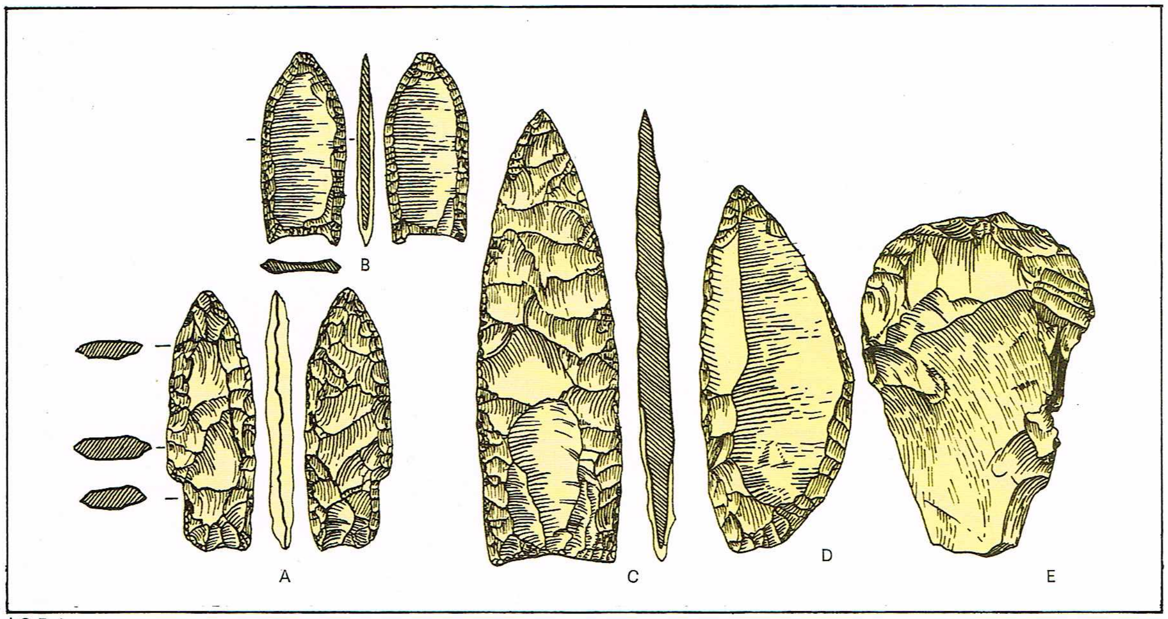

I.G.D.A.

▶ *Industrie des Paléo-Indiens d'Amérique du Nord : A, pointe de Sandia (grotte de Sandia); B, pointe de Folsom (Folsom); C, pointe de Clovis (Blackwater Draw); D, couteau ou racloir; E, grattoir (d'après Bordes).*

reconnus, seraient d'âge paléolithique et non sans affinités avec l'Ibéromaurusien du Maghreb. L'Égypte, où se côtoient industries d'inspiration Levallois et industries lamellaires, n'a pas été un isolat.

La « révolution néolithique » et la fin de la préhistoire

Dans les régions qui avaient connu cet apogée de civilisation que fut l'Age du Renne, avec son art mobilier et pariétal, les conditions de vie postglaciaires entraînèrent un bouleversement profond. La faune recherchée par les chasseurs paléolithiques disparaît ou émigre : plus de mammouths, de rhinocéros, de rennes surtout. La forêt se renouvelle et s'étend. Après un temps plus ou moins long où subsistent les genres de vie fondés sur la chasse, la pêche et la cueillette, et que l'on désigne sous les termes d'*Epipaléolithique* ou *Mésolithique,* la grande transformation se produit.

Ces civilisations qui succèdent immédiatement au Paléolithique sont très diverses. Tant en Europe occidentale qu'en Afrique du Nord, la récolte des escargots joue un rôle important dans l'approvisionnement en nourriture. Sur les rivages, les Mollusques d'eaux salées ou douces sont collectés. « Kjökkenmöding », « Concheiro », « Escargotière » désignent les amas de coquilles des tas de refus. Mêlés de pierres brûlées et de cendres, ils justifient leur nom arabe dans le Maghreb : « rammadya » (cendrière). Il y a plusieurs milliers de rammadya en Algérie orientale et en Tunisie centrale. Ces genres de vie s'attarderont plus ou moins selon les régions, selon la date où se manifestera la « révolution néolithique ».

C'est probablement dans le Proche-Orient qu'elle a été la plus précoce. C'est là en tout cas que nous saisissons le mieux le plus ancien passage d'un genre de vie de chasseur-prédateur *(hunting-gathering)* à celui d'éleveur et d'agriculteur, producteur de vivres *(food-producer)*. Au contraire de ce qui se passe en Afrique, par exemple, les céréales essentielles : orge et blé, certains des animaux domestiques : chèvres et moutons, étaient endémiques à l'état sauvage, dans le Proche- et le Moyen-Orient. La « néolithisation » y est donc sensible plus tôt qu'ailleurs. L'unité chronologique est maintenant le millénaire. Le phénomène néolithique se produit, suivant les régions, du IX^e^ millénaire avant J.-C. jusqu'à des époques qui peuvent être très proches de nous.

Bien que la seule définition valable du Néolithique soit fondée sur un genre de vie pastoral et agricole, il est extrêmement difficile de recueillir, dans la plupart des sites, des céréales cultivées, et la détermination d'après les débris osseux d'animaux domestiques reste hypothétique dans bien des cas. On a donc fondé l'étude du Néolithique sur les documents technologiques qui reflètent, plus ou moins pertinemment, le nouveau genre de vie. Le plus classique, mais non le meilleur, tout au contraire, est la pierre polie. Le Néolithique fut longtemps appelé l'« Age de la pierre polie » ; or, le polissage était connu antérieurement ; les haches et même les herminettes ne sont pas des arguments décisifs. Les pierres polies perforées qui ont pu servir de poids de bâtons à fouir *(digging sticks)* sont d'attribution douteuse. Le matériel de broyage : meules, molettes et pilons, paraît plus utilisable, bien qu'il puisse convenir à une simple cueillette et ait été connu avant le Néolithique pour broyer les matières colorantes, par exemple. Les pointes de traits, dites très généralement « pointes de flèches », témoignent du maintien d'activités de chasse ou de guerre, mais non d'une vie agricole et pastorale.

La céramique est en fait le principal « fossile directeur » : cependant elle n'apparaît pas toujours au début de la néolithisation, et il y a des stades « précéramiques ». A ce sujet tout est donc très imprécis : la réalité semble insaisissable. Il faut que convergent toutes sortes de données pour emporter la conviction. Cela explique la multiplication par les auteurs des « faciès » néolithiques régionaux.

C'est dans le Proche-Orient que la néolithisation paraît la plus précoce. Au VIII^e^ millénaire avant J.-C., Jéricho, par exemple, est déjà une petite cité ceinte de murailles et d'un fossé, à l'intérieur desquels s'abritent des maisons et des silos à grains. Tout le « croissant des terres fertiles », où naîtront les civilisations de l'Orient classique, participe à ce courant. Mais il ne faudrait pas oublier que, presque en même temps, le phénomène néolithique apparaît et se développe dans un Sahara qui n'est pas encore le désert d'aujourd'hui.

L'expansion du Néolithique paraît en partie liée au développement de la navigation fluviale et maritime. Les pirogues monoxyles puis les coques à membrures calfatées au bitume, en Méditerranée orientale tout au moins, permettent d'atteindre les îles et les continents. Cela est vrai de la Méditerranée comme du Pacifique, des Canaries comme de la Crête ou de l'Indonésie, voire de la côte Pacifique sud-américaine.

L'usage de l'écriture, qui clot l'ère des « révolutions néolithiques », fait apparaître les premiers *documents historiques*. On passe ainsi de la préhistoire à l'histoire ; mais comme cette transformation n'est pas simultanée dans tout le monde habité par l'Homme, il subsiste plus ou moins longtemps des « peuples sans écriture », soit qu'ils n'en aient pas eu, soit qu'il n'en subsiste aucune trace pour nous déchiffrable. On doit réserver le terme de *Protohistoire* à l'étude des populations contemporaines des civilisations historiques qui ont pu nous parler d'elles. Avant Champollion, on voyait l'Égypte pharaonique à travers les textes grecs. Le même problème s'est posé ou même se pose encore pour les Étrusques, les Crétois, la Gaule indépendante, la Germanie, les civilisations précolombiennes. Le contact s'établit ainsi entre l'archéologie et l'ethnologie.

L'art préhistorique

Art mobilier, art pariétal ; art paléolithique, mésolithique, néolithique ; art naturaliste, figuratif, schématique : telles sont les étiquettes habituellement utilisées et dont chacune des associations possibles définit un moment, un caractère, un style de l'art préhistorique.

— L'*art mobilier.* Outre sa valeur esthétique, il présente l'avantage d'être très généralement associé à des niveaux archéologiques datables, ce qui n'est que trop rarement le cas de l'art pariétal. Mais la notion même d'art mobilier est délicate. Si l'on tient simplement compte de l'émotion esthétique qu'éveillent en nous les documents préhistoriques, il est évident que tel biface acheuléen taillé au percuteur tendre, telle pointe moustérienne, telle feuille de laurier ou pointe à cran solutréenne ou tel harpon magdalénien sont, par les seules formes que l'artisan préhistorique leur a données, des œuvres d'art.

En fait, on réserve le terme d'« art mobilier » à la décoration sculptée, gravée ou peinte, de supports qui vont du bloc à la plaquette et à l'objet typologiquement élaboré,

Musée d'Histoire naturelle de Vérone - C. Bevilacqua

▲ ***Pointe de flèche de la période prédynastique du Fayoum en Égypte.***

Musée de Saint-Germain-en-Laye - Sappa - Cedri

◀ ***Deux harpons magdaléniens en provenance de la Madeleine, en Dordogne (à gauche), et de la Laugerie basse (à droite).***

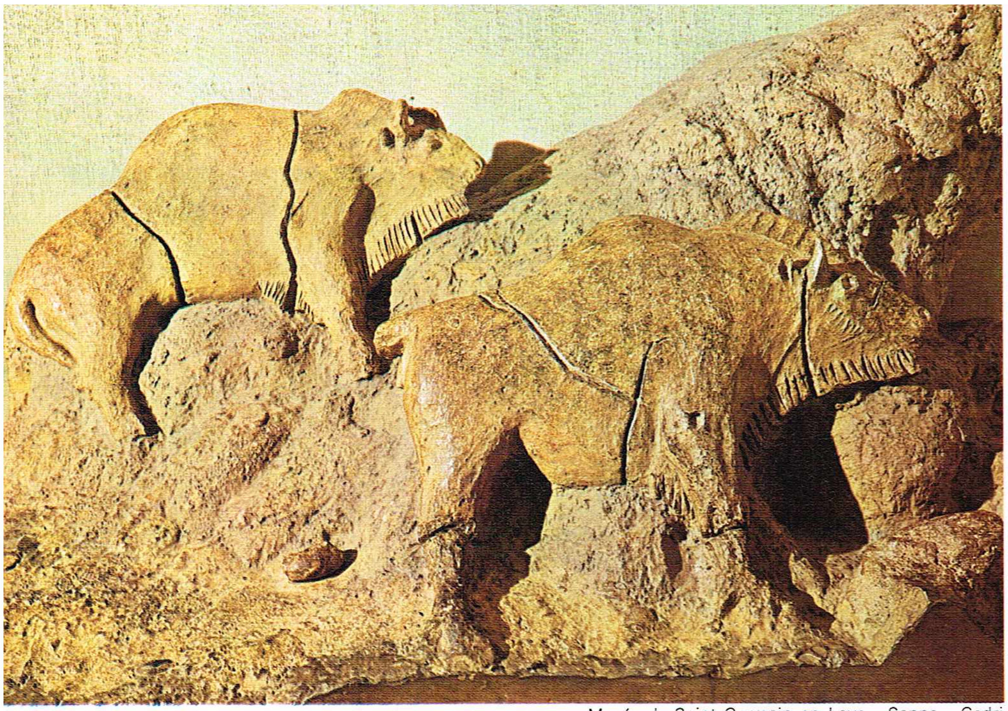

Musée de Saint-Germain-en-Laye - Sappa - Cedri

Musée de Saint-Germain-en-Laye - Sappa - Cedri

▲ *Deux chefs-d'œuvre de l'art mobilier paléolithique : à gauche, un moulage des bisons d'argile du « Tuc d'Audoubert » (Ariège) ; à droite, un moulage d'une statuette anthropomorphe : la « figurine à la capuche », de Brassempouy (Landes).*

▼ *A gauche, un moulage du « Bâton de commandement » de Teyjat (Dordogne) ; à droite, un propulseur provenant de la grotte de Placard (Vilhonneur, Charente).*

le « bâton percé » ou le « propulseur » par exemple. Dans tous les cas, il s'agit d'œuvres attribuées à coup sûr à *Homo sapiens,* excluant ainsi les Néandertaliens et *a fortiori* les Pithécanthropiens.

Le grand art mobilier paléolithique appartient ainsi aux Aurignaciens, Périgordiens, Solutréens et Magdaléniens. Les classifications qui ont été proposées tendent à s'inscrire dans un cadre chronologique, en partant à la fois des positions stratigraphiques et des styles. Plus récemment, est apparue la notion de « province », qu'il s'agisse de l'Aquitaine française ou de l'Europe centrale et orientale.

L'art mobilier paléolithique contient d'indiscutables chefs-d'œuvre, tels « la Figurine à la capuchette » de Brassempouy, la « Vénus » de Lespugue, et tant d'autres documents, dont le musée des Antiquités nationales, au château de Saint-Germain-en-Laye, a organisé récemment une exposition très révélatrice. Outre les figurations féminines, fréquemment sculptées en ronde bosse, que l'on qualifie traditionnellement de « Vénus » et dont le nombre s'accroît au fil des années, signalons les plaquettes calcaires de La Marche, avec des figurations humaines, les modelages d'argile comme les célèbres bisons du Tuc d'Audoubert, les bas-reliefs animaliers de Charente ou de Dordogne (La Chaire-à-Calvin, Sers, Laussel, Cap-Blanc, etc.). Mais, dans un ensemble d'une richesse et d'une variété infinies, ce qui émeut le plus est sans doute le décor des bâtons percés (en bois de renne), autrefois qualifiés de « bâtons de commandement », celui de Teyjat (Dordogne) par exemple, et les propulseurs, de la région pyrénéenne. C'est un très grand art, qui s'éteindra en Europe avec la fin du Paléolithique supérieur et la déglaciation. S'il avait survécu, à quels sommets eût-il conduit l'Humanité ?

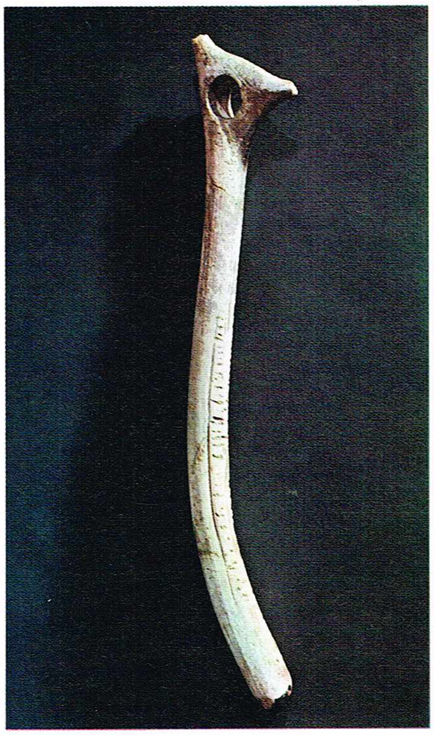

Musée de Saint-Germain-en-Laye - Sappa - Cedri

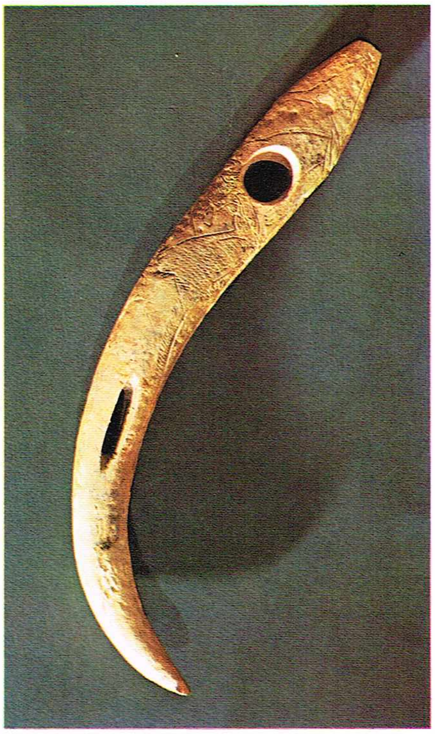

Musée de Saint-Germain-en-Laye - Sappa - Cedri

Tout récemment, un chercheur américain, Marshack, a proposé de reconnaître dans certains groupes de signes les éléments d'un calendrier. Grâce à des moyens techniques très élaborés, il a pu établir la succession de gravures sur un même objet et en proposer une interprétation. Si tout dans son hypothèse n'est pas encore démontré, il n'en reste pas moins que sa démarche scientifique, très neuve, a apporté une vision nouvelle d'une partie des éléments de l'art mobilier paléolithique.

Un relais est pris, au Néolithique, par l'extraordinaire art mobilier de l'Afrique saharienne. En particulier, la statuaire de ronde bosse est considérable, qu'il s'agisse du bélier de Tamentit, du Bovidé de Silet (Hoggar) ou de la gazelle de l'Imakassen (Tassili-n-Ajjer). Le Tassili oriental paraît bien être le foyer de cet art, dont les équivalences techniques avec l'Égypte pharaonique ne peuvent, en l'état actuel de nos connaissances, être appuyées par des relations chronologiques ou culturelles.

— *L'art pariétal.* L'abbé Breuil, qui, pendant plus d'un demi-siècle, domina la recherche préhistorique dans le monde entier, avait la vision d'un « Grand Art d'Occident » qui, parti d'Europe au Paléolithique supérieur, passait par la Péninsule ibérique, atteignait l'Afrique du Nord et le Sahara au Néolithique et aboutissait, en Afrique méridionale, à la « Dame blanche » de Brandberg, et à l'art pariétal attribué aux Bushmen. Une telle hypothèse ne peut plus être défendue : en effet, l'art paléolithique atteint l'Oural, l'art néolithique nord-africain déborde dans la Péninsule asiatique, et même le continent américain ne peut être négligé.

Il n'en demeure pas moins que nous pouvons prendre comme exemples :

l'art pariétal *paléolithique* de la France et de l'Espagne, avec ses extensions à l'Italie et à l'U.R.S.S. ;

l'art *mésolithique* du Levant espagnol ;

l'art *néolithique* de l'Afrique du Nord et du Sahara, avec ses prolongements à l'est de la mer Rouge.

— L'art *paléolithique* de la France du Sud-Ouest et de l'Espagne du Nord-Ouest, dit « franco-cantabrique » ou « aquitano-cantabrique », est celui des « grottes ornées ». Ces « grottes-temples », selon l'expression employée pour désigner celle de Cabrerets (Lot), ou « grottes-sanctuaires », doivent être abordées avec admiration et respect. Les grottes ornées ne sont pas seulement des galeries souterraines d'œuvres d'art ; leur sol, souvent détruit par le passage des hommes modernes et l'aménagement « touristique », fait partie d'un tout prodigieusement évocateur. Les fouilles, trop hâtivement

conduites à Lascaux, ne nous ont pas donné, autant qu'elles auraient pu le faire, les documents qui eussent permis de comprendre l'histoire de la décoration pariétale. Plus récemment, dans des grottes encore intactes, les empreintes laissées au sol par le passage des femmes et des enfants surtout nous ont apporté des éléments évocateurs quant à la fréquentation de ces sanctuaires. Le Dr Pales y a consacré des études bouleversantes.

Depuis la découverte d'Altamira (1878), le nombre des sites d'art pariétal paléolithique a largement dépassé la centaine, et il s'accroît encore d'année en année. Néanmoins, les sceptiques n'ont pas tous disparu : les incidents de Cabrerets, la « bataille » de Rouffignac sont proches de nous.

Bien qu'essentiellement « animalier », cet art n'ignore pas systématiquement l'Homme. Il comprend aussi de nombreux « signes » difficiles à classer et plus encore à interpréter. Les *juxtapositions* d'animaux sont d'autant plus artificielles que leurs constituants vivent en groupes spécifiques dans des biotopes différents, ce qui pose le problème de la « composition » des panneaux ornés. La fréquence des *superpositions* oriente la recherche dans une direction très différente : ce que nous voyons est le dernier état d'un palimpseste et non un ensemble structuré. Cela est d'autant plus obscur que le paysage végétal n'est pas figuré, pas plus que le sol d'ailleurs. Les rapports dimensionnels des figures sont peu corrects, il n'y a très généralement pas d'échelle commune.

Deux problèmes dominent tous les autres : celui de la *chronologie* et celui de l'*interprétation,* de la *signification* de l'art pariétal. Alors que nous disposons, pour le Paléolithique supérieur, d'une chronologie absolue de plus en plus serrée grâce à la multiplication des dates radiométriques (14 C), les auteurs ne s'accordent pas sur la position chronologique des œuvres d'art, c'est-à-dire sur leur appartenance à l'Aurignacien, au Périgordien, au Solutréen ou au Magdalénien. Il est trop rare que des fragments de sculptures ou de peintures pariétales soient pris dans des couches archéologiques datées.

On a longtemps vécu sur la classification de l'abbé Breuil, fondée sur ce qu'il pensait être l'évolution des styles. Il distingua ainsi deux cycles : l'aurignaco-périgordien et le solutréo-magdalénien. L'idée fondamentale était celle de l'*homogénéité* de cet art, dont l'évolution aurait été donc unilinéaire, en allant du simple au complexe. Cette conception résiste mal à la notion de la durée de la période considérée, quelque 20 000 ans. Il paraît peu soutenable que des croyances et des rites aient pu se maintenir inchangés pendant une aussi longue période. Une interprétation unique de l'ensemble artistique est donc aventureuse.

Ce fut d'abord la théorie de l'« art pour l'art », aujourd'hui abandonnée, puis celle de l'art magique, qui a encore de nombreux partisans, et totémique. Pour l'abbé Breuil, les grottes ornées sont des sanctuaires où se déroulaient des cérémonies sacrées, ce qui est sans doute vrai pour les grottes profondes, mais moins certain pour les abris sous roche qui constituent, grâce à leur éclairement naturel, des lieux d'habitat. La magie sympathique aurait pour objet essentiel la fécondité.

Plus récemment, A. Laming-Emperaire et le professeur Leroi-Gourhan sont sortis des sentiers battus en rejetant le comparatisme ethnographique et les interprétations devenues classiques. Leur démarche consiste à tirer d'une analyse systématique et statistique des œuvres d'art des tendances, voire des constantes qui manifestent la volonté de l'artiste et orientent vers une signification. En étudiant la fréquence, la répartition spatiale et les associations d'animaux figurés, en utilisant les signes accompagnant les figures, Leroi-Gourhan conclut à l'aménagement systématique des sanctuaires, ce que l'abbé Breuil se refusa à admettre jusqu'à sa mort. Le dénominateur commun de tout l'art pariétal serait d'ordre sexuel. Tout est ainsi remis en question, et ordonné dans un système cohérent dans l'espace des grottes et dans le temps du Paléolithique supérieur, système qui a suscité un légitime intérêt dans le monde entier et alimenté d'âpres controverses. Peut-être une interprétation globale est-elle impossible : tel est l'avis qui paraît prédominer.

Quoi qu'il en soit, l'émotion artistique qui naît d'Altamira, Lascaux, Niaux, Pech-Merle, pour ne citer que les exemples les plus communs, est hors de discussion. Cet art n'est ni primitif, ni l'œuvre de « Primitifs ».

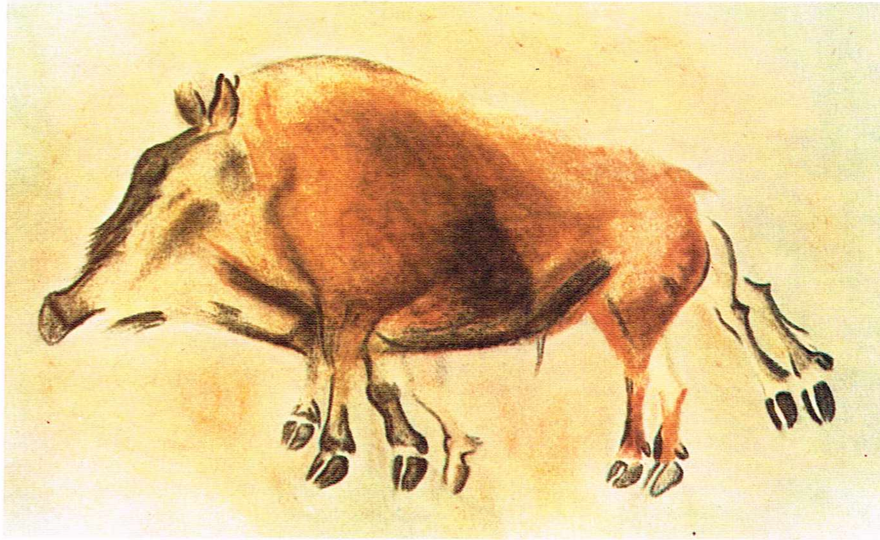

Musée de l'Homme

▲ ***Dessin de l'abbé Breuil reproduisant un sanglier de la grotte d'Altamira en Espagne (Paléolithique supérieur).***

— Au *Mésolithique,* après la fin des civilisations de l'« Age du Renne », se maintient dans certaines régions un art très différent, qui a son apogée dans le Levant espagnol. Cet art figuratif, puis schématique, fait une place beaucoup plus considérable aux figurations humaines, en tableaux composés évoquant telle ou telle activité : les scènes de chasse, de guerre, de danse, de la récolte du miel font la transition entre le Paléolithique supérieur et le Néolithique. Parmi les quelque cent sites ornés, les célèbres « Danseuses de Cogul » (Lerida), l'ensemble d'Albarracin (Teruel), les abris de la région de Castellon de la Plana (Morella, La Gasulla, etc.), ceux de la Valltorta, des régions de Valence (Dos Aguas) et d'Albacete (Alpera, Minateda, Nerpio), font partie d'un tout extrêmement riche, varié, et tellement original qu'il n'a pas fini de poser des problèmes de chronologie et d'affinités.

— Au *Néolithique* et après celui-ci, l'Afrique tient dans le développement chronologique de l'art pariétal préhistorique une place de choix. Il s'agit surtout de l'Afrique saharienne, des massifs montagneux qu'elle inclut et qui la bordent. Tous les préhistoriens sérieux ont renoncé à la vieille hypothèse de relations entre les arts pariétaux de part et d'autre de la Méditerranée. Dans les pays du Maghreb, le foyer originel est sans doute la civilisation capsienne, et plus précisément à El-Mekta (région de Gafsa, Tunisie), le gisement *princeps* du « Capsien typique » : la sculpture, la gravure (sur pierre ou sur œuf d'autruche) annoncent la floraison artistique du Néolithique dit de « tradition capsienne ». Celui-ci intéresse dans son ensemble l'Atlas présaharien et

▼ ***Deux bisons de la grotte de Font-de-Gaume en Dordogne; sur la droite, on peut noter la surimposition d'un mammouth (dessin de l'abbé Breuil).***

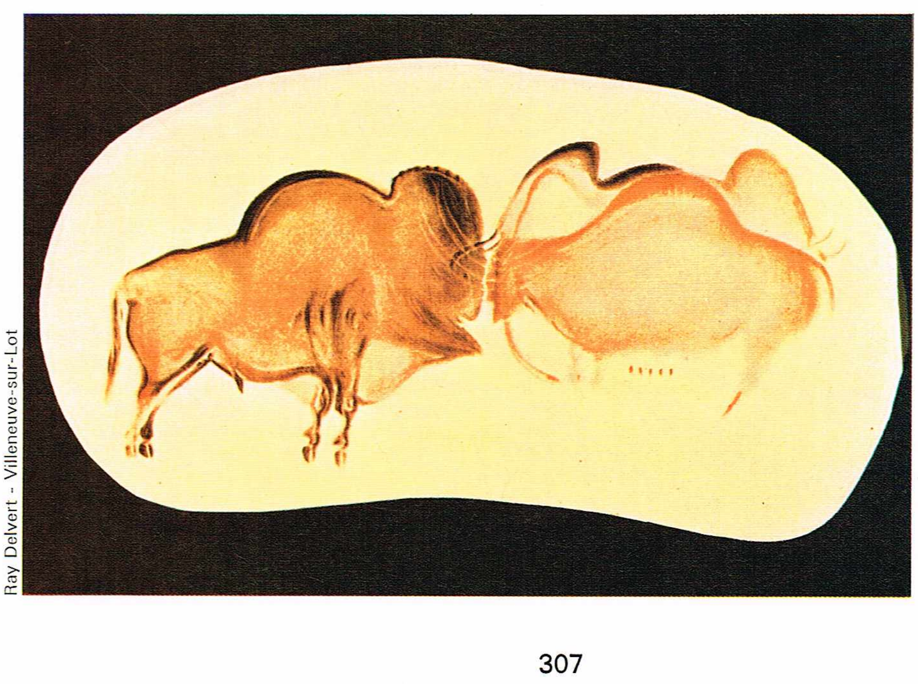

Ray Delvert - Villeneuve-sur-Lot

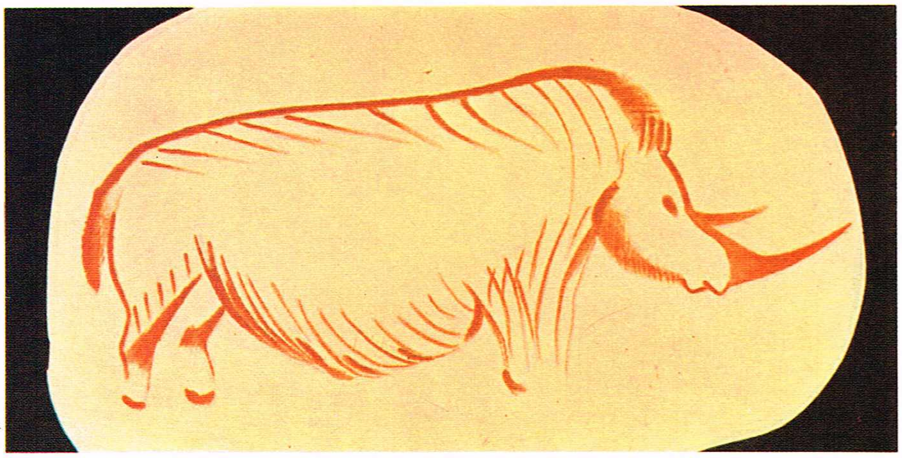

Ray Delvert - Villeneuve-sur-Lot

▲ ***Rhinocéros bicorne de facture aurignacienne, de la grotte de Font-de-Gaume (dessin de l'abbé Breuil).***

déborde plus au nord dans le Constantinois et la région de Tiaret. Chronologiquement, il se prolonge certainement au-delà du Néolithique, dans la protohistoire. Les gravures en sont l'élément essentiel et les animaux, tant chassés que domestiques, y tiennent une place de choix. On a pu qualifier de « monumentales » les figurations du buffle antique *(Homoioceras antiquus)* ou la *Curée des lions* du Kef Messiouer.

L'association avec le bélier est assez fréquente, et il n'y a aucune raison de penser qu'elle ne soit pas synchrone, car le buffle antique a vécu jusqu'à l'aube des temps historiques, même si, de nos jours, l'espèce et même le genre doivent être considérés comme fossiles.

L'art néolithique saharien ajoute aux gravures les sculptures de ronde bosse et surtout de merveilleuses galeries de peintures dans l'Ahaggar (Tefedest), le Tassili-n-Ajjer, l'Akakous et jusqu'au Tibesti. L'apogée est certainement la période « bovidienne », dont les grandes fresques sont l'œuvre de populations pastorales (peut-être les ancêtres des Peuls). Ensuite viendront les chevaux attelés à des chars à deux roues, puis montés, et enfin le dromadaire.

L'art saharien, dont la valeur documentaire est immense, ne sera pleinement utilisable que lorsque sa chronologie pourra être plus finement établie, en l'associant avec l'étude des industries, de façon moins fragmentaire qu'aujourd'hui.

Conclusions

Deux sujets n'ont été abordés que brièvement dans cet exposé : l'art d'une part, la fin des temps préhistoriques d'autre part, du Néolithique à l'Age du Bronze.

A s'en tenir au Paléolithique et aux seules industries, le préhistorien affronte néanmoins d'immenses problèmes.

C'est tout d'abord celui du « berceau de l'Humanité ». En l'état actuel des connaissances, il ne fait aucun doute que c'est l'Afrique orientale (Éthiopie, Kenya, Tanzanie) qui nous a révélé les plus anciennes industries identifiables. Ce sont les immenses progrès faits dans la connaissance des techniques de taille de la pierre, grâce aux expérimentations multipliées en laboratoire, qui permettent au préhistorien d'être affirmatif à propos de telle hypothèse ou de la mettre en doute. Mais il sait qu'il ne saisira jamais le vrai commencement, en deçà des plus vieilles pierres utilisées dont il dénie à des causes naturelles d'avoir réalisé l'aménagement, si sommaire soit-il.

Le second problème est celui de l'évolution dans le temps des industries préhistoriques. Nous avons, à maintes reprises, insisté sur la continuité, l'enchaînement, la filiation, qui caractérisent l'industrie lithique depuis les galets aménagés de la « Pebble Culture » jusqu'à la fin des temps préhistoriques. On peut en déduire la continuité et l'unité de l'intelligence des artisans, que l'on désigne souvent d'un nom impropre : l'« hominisation ». Terme impropre, car il est impossible d'en fixer le point initial aussi bien que l'achèvement.

Un autre problème très controversé, et qui a récemment bénéficié de données nouvelles, est celui de l'expansion dans l'espace des industries préhistoriques. Les ressemblances indiscutables observées entre des pierres taillées par l'Homme en des points très distants du monde, ont conduit, dans le cadre étroit d'une chronologie courte, à l'inévitable hypothèse des convergences. Où qu'ils fussent, et sans aucune relation entre eux, les hommes disposant des mêmes possibilités psychiques auraient résolu de la même manière les problèmes de la vie. Cependant, une telle vision ne rendait pas compte de l'expansion de l'espèce humaine dans une hypothèse monogéniste, très généralement acceptée.

La chronologie longue à laquelle les dates radiométriques nous ont récemment conduits, a permis de renouveler le problème. Si le temps des Australopithèques a duré deux millions d'années, celui des Pithécanthropes un million, les possibilités de découverte de la Terre ne sont plus limitées que par les eaux infranchissables ou les régions glacées. La paléogéographie peut alors rendre compte du peuplement très ancien de domaines devenus insulaires, en particulier dans le Pacifique, comme du peuplement tardif du continent américain ou de Madagascar.

Ainsi, l'aventure humaine ne s'inscrit pas seulement dans l'évolution des êtres vivants, mais aussi dans les transformations considérables que la « face du monde » a connues au Quaternaire.

On ne sépare pas la préhistoire des temps préhistoriques.

BIBLIOGRAPHIE

L'évolution humaine

CHAMLA M.-C., *l'Anthropologie biologique,* P.U.F., Paris, 1971. - MacGARN S., *les Races humaines,* Vigot Frères, Paris, 1964. - GENET-VARCIN E., *A la recherche du Primate ancêtre de l'Homme,* N. Boubée, 1969. - HEIM J.-L., *les Hommes fossiles de La Ferrassie et le Problème de la définition des Néandertaliens classiques,* in *l'Anthropologie,* t. 78, 1974. - MARQUER P., *Morphologie des races humaines,* Coll. A. Colin, nº 395, Paris, 1963. - PIVETEAU J., *Traité de paléontologie,* t. VII, Masson et Cie, Paris, 1957. - VALLOIS H.-V., *Ordre des Primates,* in GRASSÉ P.P., *Traité de zoologie,* t. XVII, fasc. 11, Masson et Cie, Paris, 1955. - SCHULTZ A.H., *les Primates. La Grande Encyclopédie de la nature,* t. XVIII, Éd. Rencontre, Lausanne, 1971. - WEINER J.-S. et HEIM J.-L., *la Genèse de l'Homme. La Grande Encyclopédie de la nature,*, t. XIX, Éd. Rencontre, Lausanne, 1971.

La préhistoire

ALIMEN H., *Préhistoire de l'Afrique,* Éd. Boubée, Paris, 1955. - ALIMEN H., *Atlas de préhistoire,* Éd. Boubée, Paris, 1950. - ALIMEN H. et STEVE J., *Vorgeschichte,* Éd. Fischer, Frankfurt-am-Main, 1966. - BALOUT L., *Préhistoire de l'Afrique du Nord,* Éd. A.M.G., Paris, 1955. - BALOUT L., *l'Algérie préhistorique,* Éd. A.M.G., Paris, 1958. - BORDES Fr., *le Paléolithique dans le monde,* Hachette, Paris, 1968. - BREUIL H., *Quatre cents siècles d'art pariétal : les Cavernes ornées de l'Age du Renne,* Centre ét. et doc. préhist., Montignac, 1952. - BRÉZILLON M., *la Dénomination des objets de pierre taillée,* C.N.R.S., Gallia, Paris, 1968. - BRÉZILLON M., *Dictionnaire de la préhistoire,* Larousse, Paris, 1969. - BUTZER K.W., *Environment and Archeology,* Éd. Aldine, Chicago, 1964. - CAMPS G., *les Civilisations préhistoriques de l'Afrique du Nord et du Sahara,* Éd. Doin, Paris, 1974. - CHALINE J., *le Quaternaire,* Éd. Doin, Paris, 1972. - COMAS J., *Introducción a la prehistoria general,* Univ. Mexico, 1971. - DESMOND-CLARK J., *The Prehistory of Africa,* Thames and Hudson, Londres, 1970. - HUGOT H.J., *le Sahara avant le Désert,* Éd. Hespérides, Toulouse, 1974. - LAMING-EMPERAIRE A., *la Signification de l'art rupestre paléolithique,* Éd. A.J. Picard, Paris, 1962. - LAVOCAT R. *et alii, Faunes et flores préhistoriques,* Éd. Boubée, Paris, 1966. - LEROI-GOURHAN A., *les Religions de la préhistoire,* P.U.F., Paris, 1964. - LEROI-GOURHAN A. *et alii, La Préhistoire,* P.U.F., Paris, 1966. - LEROI-GOURHAN A., *Préhistoire de l'art occidental,* Mazenod Éd., Paris. - SCHOBINGER J., *Prehistoria de Suramerica,* Editoria Labor, Barcelone, 1969. - SONNEVILLE-BORDES D. de, *la Préhistoire moderne,* Fanlac, Périgueux, 1967. - UCKO P.J. et ROSENFELD A., *l'Art paléolithique,* Hachette, Paris, 1966. - VAUFREY R., *Préhistoire de l'Afrique,* 2 vol., Inst. Hautes Études, Tunis 1955-1969.

LEXIQUE DE BIOLOGIE

SUPPLÉMENT AUX VOLUMES VI, VII, VIII DE LA GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

ABRÉVIATIONS

adj.	adjectif	*n.*	nom	*p. ex.*	*par exemple*
ex.	exemple	*par ext.*	par extension	syn.	synonyme

A

abaxial, e. *adj.* Se dit d'une partie d'organe dirigée du côté opposé à l'axe qui le porte. La face inférieure d'une feuille est abaxiale.

abbevillien. *n.* Période du Paléolithique inférieur caractérisée par la taille biface des galets.

abiotique. *adj.* **(milieu).** Où la vie est impossible.

aborigène. *n.* Qui est originaire du pays qu'il habite.

absorption. *n.* 1° Incorporation à leur propre substance, par les cellules d'un organisme, d'éléments du milieu externe. 2° Fixation d'une substance chimique par une autre plus abondante avec formation d'un composé nouveau : l'eau de chaux absorbe le CO_2 et il se forme du $CaCO_3$. 3° Incorporation physique d'un corps par un autre sans intervention d'un phénomène de surface : absorption d'eau par l'acide sulfurique. 4° Consommation énergétique (de la lumière, de la chaleur). Ne pas confondre avec *adsorption*.

abyssal. *adj.* **(étage).** Zone profonde du benthos où la faune se raréfie.

abysses. *n.* Grandes fosses océaniques d'une profondeur minimale de 2 000 m.

accommodat ou **morphose.** *n.* Organisme qui a subi des modifications morphologiques ou physiologiques non héréditaires sous l'influence des variations du milieu.

acénaphtène. *n.* Hydrocarbure à trois cycles condensés, les deux cycles benzéniques du naphtalène étant liés par l'intermédiaire de deux $—CH_2$:

$$C_{10}H_6\begin{matrix}\diagup CH_2 \\ | \\ \diagdown CH_2.\end{matrix}$$

acétylcholine. *n.* Médiateur chimique libéré à l'extrémité des fibres nerveuses *parasympathiques*.

acétylcholinestérase. *n.* Enzyme provoquant la dégradation de l'*acétylcholine*.

acheuléen. *n.* Période du Paléolithique inférieur caractérisée par la fabrication d'outils grossiers appelés « coups-de-poing ».

achondroplasie. *n.* Trouble héréditaire de la croissance des cartilages de conjugaison entraînant le nanisme. La maladie est transmise par un gène autosomal dominant.

achromatique. *adj.* Se dit d'un instrument d'optique (objectif) qui ne manifeste pas l'aberration chromatique, c'est-à-dire le phénomène entraînant des halos colorés dus à ce que les radiations de diverses longueurs d'onde de la lumière blanche sont inégalement réfractées par les lentilles.

acide adénosine-triphosphorique, adénosine triphosphate ou **ATP.** Substance organique constituée d'une base purique, l'adénine, d'un sucre à cinq atomes de carbone et de trois molécules d'acide phosphorique. Elle se forme à partir d'acide adénosine diphosphorique, ou ADP (dont la composition est identique, mais avec deux molécules d'acide phosphorique seulement), lors d'une réaction endergonique qui permet d'emmagasiner l'énergie issue de la dégradation d'un métabolite et qui sera récupérée par décomposition de l'ATP en ADP et phosphate.

acide citrique. Acide tricarboxylique, abondant dans les citrons, de formule :

$$HOOC—CH_2—COH—CH_2OH—CH_2—COOH.$$

Présent dans toute cellule, où il provient de la fixation d'acétyl ($H_3C—CO—$) sur l'acide oxaloacétique.

acide désoxyribonucléique, ADN ou **DNA.** Substance organique complexe comportant des molécules de bases organiques et le même nombre de molécules d'un sucre à cinq atomes de carbone et d'acide phosphorique, liées les unes aux autres en longues chaînes. La molécule d'ADN est généralement formée de deux de ces chaînes unies de manière lâche. Présent dans les chromosomes et d'autres organites (mitochondries, plastes). Les bases sont disposées le long de la chaîne selon un ordre invariable qui sera reflété par celui des acides aminés des protéines de la cellule. Ces dernières sont responsables de toute l'édification de l'organisme (le métabolisme dépend des enzymes, qui sont des protéines). L'ADN représente l'information, le code génétique de l'organisme. L'ADN des chromosomes des gamètes assure donc la transmission de ce code d'une génération à l'autre.

acide 2-4 dichlorophénoxyacétique ou **2-4 D.** Substance synthétique à propriété d'auxine. Très utilisée comme désherbant. De formule :

$$Cl_2—C_6H_3—O—CH_2—COOH.$$

acide folique. Considérée comme une *vitamine,* cette substance est notamment un facteur de croissance extrêmement important, spécialement pour les micro-organismes.

acide gibbérellique. Facteur de la croissance végétale qui stimule les divisions cellulaires et l'élongation des cellules.

acide glucuronique. *n.* Acide uronique correspondant au glucose, dont la fonction $—CH_2OH$ (carbone 6) est remplacée par une fonction acide. Présent dans les mucopolysaccharides et les mucilages végétaux.

acide glutamique. L'acide aminé de formule

$$HOOC—CH_2—CH_2—\underset{\underset{NH_2}{|}}{CH}—COOH.$$

Abondant dans le cerveau. Utilisé comme stimulant nerveux et pour protéger le cerveau de l'ammoniaque dans les comas hépatiques.

acide glycolique. L'acide correspondant au glycol : $HOOC—CH_2OH$. Essentiel au métabolisme de la photorespiration des végétaux.

acide hyaluronique. Polysaccharide du tissu conjonctif dont il forme la substance fondamentale. C'est un polymère d'acide hyalobiuronique. Lié éventuellement à des protéines. La zone entourant l'ovule *(corona radiata)* est riche en acide hyaluronique, et le spermatozoïde a dans son acrosome l'enzyme (hyaluronidase) qui l'hydrolyse en acide hyalobiuronique.

acide indole-acétique. Substance azotée, à noyau indole, qui est l'une des hormones végétales essentielles. Active sur l'allongement des cellules, l'inhibition des bourgeons axillaires, etc.

acide indole-acétique oxydase ou **AIA-oxydase.** Enzyme oxydant l'acide indole-acétique et le rendant inactif.

acide iodoacétique. Acider acétique dont un, deux ou trois H sont remplacés pa de l'iode dans le radical : acides mono-, di- et triodoacétique.

acide nitrique. Acide minéral azoté, de formule HNO_3. Ses sels sont les nitrates, tel le salpêtre, à partir duquel il est facile à produire par action de l'acide sulfurique. L'acide nitrique est connu depuis le Moyen Age sous le nom d'*eau-forte*.

acides nucléiques. Voir *acides désoxyribonucléique* et *ribonucléique*.

acide oxaloacétique. Acide organique dicarboxylique de formule $HOOC—CO—CH_2—COOH$; il a de plus une fonction cétone —CO. Très important dans le métabolisme des glucides (dégradation du glucose, fixation du CO_2).

acide para-aminobenzoïque. Acide benzoïque ($C_6H_5—COOH$) porteur d'une fonction amine opposée à son carboxyle : $H_2N—C_6H_4—COOH$.

acide pénicilloïque. Produit de dégradation inactif de la *pénicilline* par la *pénicillinase*.

acide ribonucléique, ARN ou **RNA.** Molécule organique voisine de l'acide désoxyribonucléique, mais dans laquelle le sucre à cinq atomes de carbone est différent. Il en existe plusieurs formes, dont le

poids moléculaire est différent. Deux d'entre elles au moins sont essentielles à la synthèse des protéines : l'*ARN messager* et l'*ARN de transfert*. Le premier est formé sur le modèle de l'ADN et passe dans le cytoplasme pour s'associer aux ribosomes. C'est à son contact que seront unis les acides aminés qui constitueront une protéine déterminée. Chaque acide aminé arrive fixé à une molécule d'ARN de transfert particulière, plus petite, qui s'unit transitoirement et spécifiquement à un point donné du premier ARN et place l'acide aminé au bon endroit.

acidiphile. *adj.* Caractérise une plante qui se développe sur les sols acides.

acidophile. *adj.* Qui fixe les colorants acides. Ne pas confondre avec *acidiphile*.

acinus pancréatique. Élément structural du pancréas exocrine qui sécrète le suc pancréatique riche en enzymes digestives.

acœlomate. *adj.* **(organisme).** Métazoaire triploblastique dépourvu d'un vrai cœlome. Les Plathelminthes, les Mésozoaires, les Acanthocéphales, les Priapuliens, les Némertes, les Némathelminthes et les Rotifères sont des acœlomates.

acrosome. *n.* Pièce constitutive distale du *spermatozoïde* contenant les enzymes nécessaires à la destruction des membranes ovulaires.

actine. *n.* Protéine fibrillaire constitutive du muscle et impliquée dans sa contraction. Voir *contraction musculaire*.

actinodermatite. *n.* Irritation du derme provoquée par les rayons ultraviolets.

actinomycine. *n.* Substance antibiotique qui se fixe sur la *guanine* de l'ADN et inhibe la synthèse de l'ARN messager.

actinotriche. *n.* Rayon simple non ossifié qui soutient les nageoires des Poissons Chondrichthyens.

acuité. *n.* Degré de sensibilité des sens chez les animaux. *Ex. Acuité visuelle :* angle qui mesure le pouvoir séparateur de l'œil.

adaptation. *n.* 1° Rapport heureux entre l'organisation et le fonctionnement d'un être d'une part, et les conditions du milieu où il vit d'autre part. 2° Trait particulier de l'organisation en rapport avec ce but : p. ex. la possession de pattes palmées est une adaptation à la nage.

adaxial, e. *adj.* Se dit d'une partie d'organe dirigée du côté de l'axe qui le porte. *Ex.* La face supérieure d'une feuille est adaxiale.

adénine. *n.* Base azotée cyclique purique constitutive des *acides nucléiques*.

adénopathie. *n.* Infection bactérienne des ganglions lymphatiques situés le long du cou, sous les aisselles, au pli de l'aine, etc.

adénosine triphosphatase. Enzyme qui décompose l'*adénosine triphosphate* (ATP) en adénosine diphosphate (ADP) et phosphate. Cette réaction libère de l'énergie.

adénosine triphosphate. Voir *acide adénosine triphosphorique*.

adénovirus. *n.* Virus des tissus adénoïdes, tels que les amygdales des Vertébrés.

adénylcyclase. *n.* Enzyme déterminant la production d'AMP, ou adénosine monophosphate, cyclique (AMPc) à partir d'AMP ordinaire, qui est *cyclisé*.

adiurétine ou **hormone antidiurétique.** Hormone posthypophysaire provoquant une réabsorption de l'eau au niveau du segment distal du *néphron*.

ADN. Voir *acide désoxyribonucléique*.

ADN-polymérase. Enzyme déterminant la synthèse d'ADN sur le modèle fourni par un ADN préexistant et grâce aux nucléotides de l'ADN, dont elle permet l'union ordonnée. Elle est « ADN-dépendante ». Il en existe aussi une qui produit un ADN à l'image d'un ARN (« ARN-dépendante »).

adrénaline. *n.* Hormone sécrétée par la partie médullaire des capsules surrénales ; régularise de nombreuses fonctions.

adsorbant. *n.* Substance susceptible d'en fixer d'autres par adsorption. *Ex.* Le charbon pour les colorants.

adsorption. *n.* Fixation, par un processus physique ou chimique, d'une substance à la surface d'une autre, ou d'une structure plus complexe. Ne pas confondre avec *absorption*.

adventice. *adj.* **(plante).** Introduite accidentellement dans un endroit où elle n'est pas indigène et qui ne s'y maintient généralement pas ; sinon elle est dite *naturalisée*.

adventif. *adj.* **(organe).** Formé sur un autre organe de façon atypique. *Ex.* Un bourgeon sur une feuille, ou une racine sur la surface d'une tige et non dans son prolongement. Le phénomène peut être constant. *Ex.* Bourgeons adventifs sur les feuilles de *Bryophyllum* (Crassulacées) ; racines adventives sur d'innombrables tiges.

aérobie. *adj.* 1° Qui ne peut vivre qu'en présence d'oxygène. 2° Qui se déroule en présence d'oxygène (réaction métabolique).

agammaglobulinémie. *n.* Affection dans laquelle le sujet, toujours un garçon, ne présente presque pas de γ-globulines dans le plasma sanguin. Il en résulte une grande sensibilité aux infections.

âge radiométrique. Age absolu d'une formation en nombre d'années (milliers ou millions), déterminé par la méthode des isotopes radio-actifs. *Ex.* Datation au C_{14} (Carbone 14).

agglutinine. *n.* Substance du sérum capable d'agglutiner les globules rouges porteurs de l'*agglutinogène* correspondant. De ce fait, une agglutinine donnée ne doit être associée à l'agglutinogène correspondant au cours d'une transfusion sanguine.

agglutinogène. *n.* Portée par les globules rouges, cette substance du sang est condensée par l'agglutinine correspondante. Ces deux corps ne doivent donc pas être en présence l'un de l'autre lors d'une transfusion sanguine.

aire minimale. Territoire sur lequel on rencontre la totalité des espèces d'une *communauté*. Il est déterminé par la courbe aire-espèces.

aire préfrontale. Aire de projection cérébrale de la motricité volontaire localisée à la circonvolution frontale ascendante.

aire somato-sensitive. Aire de projection cérébrale de la sensibilité générale localisée à la circonvolution pariétale ascendante.

alanine. *n.* Acide aminé de formule :

$$H_3C—CH—COOH.$$
$$|$$
$$NH_2$$

Très abondant dans les protéines. Fournit son groupe $—NH_2$ à des acides cétoniques (l'acide α-cétoglutarique notamment) et devient de l'acide pyruvique $H_3C—CO—COOH$ à partir duquel peuvent être synthétisés des glucides et des lipides.

albinisme. *n.* Anomalie correspondant à une dépigmentation de la peau qui se rencontre chez de nombreux Mammifères, par exemple chez le lapin, l'ouistiti, l'homme...

albuginée. *n.* Paroi interne du testicule des Vertébrés, d'origine mésenchymateuse, contenant les vaisseaux sanguins de la glande.

albumen. *n.* 1° Chez les végétaux, tissu formé à partir d'une cellule issue de la fécondation de la cellule centrale à deux noyaux du sac embryonnaire et par conséquent triploïde. Subsiste ou non dans la graine mûre, qui est albuminée ou non. On distingue trois types d'albumen : a) l'*albumen nucléaire*, dans lequel les premières divisions du noyau triploïde se font sans qu'il y ait formation de cellules ; b) l'*albumen cellulaire*, dans lequel il y a formation immédiate de cellules et pas de stade à noyaux libres ; c) l'*albumen hélobial*, dans lequel il y a division en deux cellules dont l'une seulement subit par la suite des divisions selon le mode nucléaire. 2° Blanc de l'œuf des Oiseaux sécrété par le segment antérieur de l'oviducte.

albumine. *n.* Protéine sanguine, soluble dans l'eau pure, qui sert à la régulation osmotique du sang et peut se lier réversiblement à de nombreuses substances (rôle de transporteur).

alcaloïdes. *n.* Substances organiques, souvent complexes, azotées, de structure variable, de réaction alcaline. Présentent des réactions caractéristiques ; par exemple, ils forment un précipité brun avec la solution iodo-iodurée et des précipités orangés ou rouges avec l'iodobismuthite de potassium, ou réactif de Dragendorff.

aldéhyde glycérique ou **glycéraldéhyde.** Aldéhyde de l'acide glycérique :

$$COH$$
$$|$$
$$CHOH$$
$$|$$
$$CH_2OH.$$

C'est l'un des deux sucres à 3 atomes de carbone, ou trioses. Il intervient dans la synthèse des autres oses lors de la photosynthèse ainsi que dans leur dégradation respiratoire.

aldéhyde glycolique. Le mono-aldéhyde correspondant au glycol

$$COH$$
$$|$$
$$CH_2OH.$$

C'est le plus simple des sucres, ou oses. Il est cristallisé.

aldose. *n.* Ose dont la molécule possède une fonction aldéhyde (—CHO), quoique celle-ci soit engagée dans une liaison semi-acétal qui donne lieu à la formation d'un cycle pyrannique ou furannique. L'aldose est néanmoins réducteur grâce à cette fonction aldéhyde.

aldostérone. *n.* Hormone, sécrétée par la glande cortico-surrénale, qui stimule la réabsorption active du sodium par le rein au niveau du segment large de l'anse de Henlé.

alécithe. *adj.* Se dit d'un œuf sans vitellus, que l'on rencontre chez les animaux vivipares comme les Mammifères.

aleurone (grain d'). Vacuole déshydratée de nombreuses graines. Riche en protéines présentes sous forme d'une matrice et éventuellement d'un ou plusieurs cristalloïdes, ainsi qu'en acide phytique (constituant les globoïdes de l'aleurone de ricin). Redeviennent des vacuoles à contenu liquide lors de la germination, puis confluent les uns avec les autres.

alevin. *n.* Embryon de Poisson.

alexine. *n.* Substance produite par un organisme pour lutter contre des germes pathogènes qui l'ont envahi.

aliphatique. *adj.* **(substance organique).** Dont le squelette carboné forme une chaîne et non un cycle.

alkylant. *adj.* Qui introduit dans les molécules biologiques des radicaux organiques liés aux fonctions $—COOH$, $—NH_2$, $—SH$, etc., et, par l'établissement de liaisons anormales et de ruptures de ces molécules, nuit à leur fonctionnement. Le prototype en est l'*ypérite*.

allanto-chorion. Membrane vascularisée de l'embryon des Vertébrés amniotes résultant de la fusion du *sac allantoïdien* avec le *chorion*. Cet organe intervient dans les échanges respiratoires, dans l'absorption des réserves et dans l'accumulation des déchets du métabolisme.

allantoïde. *n.* Paroi endomésodermique du sac allantoïdien de l'embryon des Vertébrés amniotes.

alliance. *n.* Terme de phytosociologie, qui rassemble plusieurs associations végétales.

allogamie. *n.* Croisement entre plantes différentes maintenant un *état hétérozygote*.

allogreffe. *n.* Greffe effectuée entre deux individus d'une même espèce.

allopatrique. *adj.* 1° Qualifie deux espèces, dont les aires de répartition ne se recouvrent pas. 2° Qualifie une population occupant des zones différentes, sans quoi il n'y a pas *spéciation*.

alpha (α). La *forme* α de la molécule des oses est celle dans laquelle le groupement —OH, situé sur le C adjacent à l'O, supposé en arrière, est situé *au-dessous* du plan du cycle pyrannique ou furannique. La *forme* β correspond à sa position *au-dessus*. Une isomérie comparable existe pour d'autres molécules des plantes (stéroïdes).

alphaglobulines. *n.* Protéines du plasma sanguin, insolubles dans l'eau, et dont les rôles sont extrêmement divers (transport de graisses, inhibiteur, précurseur de substances coagulantes, etc.).

α-mannosidase. *n.* Enzyme détachant le mannose α des liaisons glucosidiques où il est engagé.

alpin. *adj.* **(étage).** Situé au-dessus de la zone des forêts. On y rencontre des végétaux herbacés et des arbrisseaux.

alvéole pulmonaire. Petite cavité intrapulmonaire tapissée d'un épithélium plat et vascularisé au travers duquel s'effectuent, chez les Vertébrés terrestres (les Oiseaux exceptés), les échanges respiratoires entre l'air et le sang.

alvéolisation. *n.* Processus de différenciation des *alvéoles pulmonaires* chez les Vertébrés terrestres conduisant à la réalisation d'une grande surface d'échanges entre l'air et le sang.

amine. *n.* Corps correspondant à la substitution d'un ou deux des trois atomes d'H de l'ammoniac NH_3 par un radical hydrocarboné : en principe, le C lié à l'N ne doit pas être porteur d'O.

aminopeptidase. *n.* Enzyme qui libère le groupement aminé ($—NH_2$) de l'acide aminé terminal d'un peptide.

amitose. *n.* Division du noyau sans individualisation et clivage des chromosomes.

ammonification. *n.* Ensemble des réactions biochimiques produites par un bioréducteur et qui transforment l'azote du radical NH_2 en ion NH_4.

ammonium quaternaire. Composé organique où un atome d'azote est lié à 5 groupements univalents. Dit parfois aussi *amine quaternaire*. Il s'agit en somme de dérivés de sels d'ammonium $R—NH_4$ avec substitution des 4 H du groupe ammonium.

amniogenèse. *n.* Formation de l'amnios qui s'effectue chez les Mammifères selon deux modalités essentielles : 1° par *plissement* chez les Ruminants et les Carnivores par exemple ; 2° par *cavitation* ou creusement chez les Insectivores, les Chiroptères et les Primates.

amnios. *n.* Enveloppe interne, d'origine ecto-mésodermique, protégeant l'embryon chez les Insectes et les Vertébrés amniotes.

amniote. *adj.* Qualifie les Vertébrés dont le développement embryonnaire s'effectue à l'intérieur d'une poche appelée *amnios* (Reptiles, Oiseaux et Mammifères).

amœbocyte. *n.* Cellule de l'hémolymphe des Invertébrés apte à des mouvements amiboïdes. Parfois aussi syn. d'*histiocyte*.

amorphe. *adj.* Qui ne présente pas de structure cristalline.

AMP cyclique ou **AMPc.** Adénosine monophosphate dans lequel un cycle est formé par l'acide phosphorique ($—PO_3H_2$) lié aux deux atomes de carbone 2 et 3 du ribose.

amphiarthrose. *n.* Type de syndesmose réalisé entre les vertèbres.

amphimixie. *n.* Union des noyaux haploïdes mâle et femelle s'effectuant au cours de la fécondation.

amphipériodique. *adj.* **(végétal).** Qui fleurit sous des régimes photopériodiques à jours ni trop longs ni trop courts. Syn. de *sténophotopériodique*.

amphipolaire. *adj.* Qui présente deux pôles de propriétés différentes, notamment un ayant de l'affinité pour l'eau, l'autre la repoussant. Se dit d'une molécule organique et, par extension, du corps correspondant.

amphotère. *adj.* Qui présente à la fois des fonctions acide et basique.

amplification génique. Répétition d'une séquence donnée de bases de l'ADN. Cette séquence forme un gène qui se trouve donc présent en nombreux exemplaires consécutifs.

amygdale palatine paire. Chez les Mammifères, aire muqueuse chargée de lymphocytes et de nodules lymphoïdes et située dans la cavité buccale entre l'insertion de la langue et celle du voile du palais.

amyloglucosidase. *n.* Enzyme qui hydrolyse l'amidon en glucose.

amylopectine. *n.* Substance dont la molécule est formée d'une chaîne de molécules de glucose α portant des rameaux constitués comme elle et liés au carbone 6 de certains de ses éléments. Forme avec l'amylose les amidons et glycogènes.

amyloplaste. *n.* Plaste qui accumule de l'amidon et se réduit finalement à un grain d'amidon.

amylose. *n.* En biochimie, substance dont la molécule est une chaîne non ramifiée de molécules de glucose α. Constitue avec l'amylopectine l'amidon et le glycogène.

anabiose. *n.* État de suspension de la vie par la sécheresse ou les très basses températures. L'organisation est conservée, et la vie active peut reprendre lorsque les conditions sont meilleures.

anachromase. *n.* Augmentation progressive de la colorabilité des chromosomes lors de leur individualisation.

anaérobie. *adj.* 1° Qui peut vivre sans oxygène. Une forme anaérobie peut l'être de façon facultative ou « stricte » ; dans ce dernier cas, l'oxygène est toxique pour elle. 2° Qui se produit sans oxygène (réaction du métabolisme).

anamniote. *adj.* Qualifie les Vertébrés dont l'embryon ne possède pas d'*amnios* (Agnathes, Poissons et Amphibiens).

anaphase. *n.* Troisième phase de la mitose au cours de laquelle les chromatides de chaque chromosome se séparent et glissent sur les fibres du fuseau de division pour se grouper autour de chaque pôle.

anaplasique. *adj.* Caractérise les cellules tumorales qui présentent des anomalies nucléaires et chromosomiques.

anatomie. *n.* Étude de la disposition des organes d'un être vivant. S'applique chez les animaux aux organes internes, la description des formes externes étant la *morphologie*. Chez les végétaux supérieurs, se confond avec l'*histologie*.

anatomie comparée. Étude comparative de l'organisation des êtres qui a pour fonction de déterminer lesquelles de leurs parties sont homologues entre elles.

anatrope. *adj.* **(ovule).** Chez les végétaux, ovule pendant le long de son funicule et uni à lui en un raphé. Le micropyle se trouve donc non loin du hile, point d'insertion apparent du funicule.

anémie falciforme ou **drépanocytose.** Maladie hémolytique héréditaire de l'homme due à la synthèse d'une hémoglobine anormale S donnant aux hématies une forme caractéristique en faucille.

anémophilie ou **anémogamie.** *n.* Pollinisation avec transport du pollen par le vent.

aneuploïde. *adj.* Qui comporte un ou quelques chromosomes surnuméraires par rapport aux autres individus de la même espèce, ou à des espèces voisines.

angioblastème. *n.* Amas de cellules mésenchymateuses, situées entre la splanchnopleure, dont elles proviennent, et l'entoblaste, et qui sont à l'origine des premiers vaisseaux et des premiers globules sanguins chez l'embryon des Vertébrés.

angström. *n.* Unité de longueur (abrégée A) représentant la dix-millième partie du micromètre (micron). Actuellement, pour mesurer des dimensions de cet ordre, on a recours au *nanomètre (nm)*, ou millième de micromètre (millimicron).

animalcule. *n.* Littéralement, petit animal, visible seulement au microscope. Le terme s'appliquait jadis à toutes les formes vivantes microscopiques mobiles, uni- ou pluricellulaires, en particulier aux spermatozoïdes *(animalcules spermatiques)*.

animalculiste. *n.* Partisan de la doctrine de l'*animalculisme*, qui considérait que les êtres vivants se formaient par grandissement d'un germe contenu dans le spermatozoïde, ou animalcule spermatique, du mâle. *Adj.* Concernant cette doctrine.

anion. *n.* Ion chargé négativement, et se rendant donc à l'anode (pôle positif).

anisocytique. *adj.* **(stomate).** Accompagné de trois cellules annexes de tailles différentes.

anisogame ou **anisogamique.** *adj.* Voir *hétérogame*.

annélides. *n.* Embranchement animal constitué par les Vers *métamérisés* dont la segmentation de l'œuf est *spirale* et la larve du type *trochophore*. Suivant l'importance des soies qu'ils portent sur le corps, on distingue les *Polychètes*, les *Oligochètes* et les *Hirudinés*.

annexes embryonnaires. Organes temporaires de l'embryon nécessaires à son développement : vésicule vitelline, séreuse, amnios, allantoïde et placenta.

anomalie triplo X. Anomalie des chromosomes sexuels chez la femme : le sujet atteint possède trois chromosomes X et présente des malformations diverses, des troubles gynécologiques ainsi que des signes de débilité mentale.

anomocytique. *adj.* **(stomate).** Non accompagné de cellules annexes.

anophtalmie. *n.* Absence d'yeux.

anoures. *n.* Ordre d'Amphibiens dont les représentants, à l'état adulte, n'ont pas de queue. Leurs larves sont des têtards qui subissent une métamorphose avant d'atteindre le stade adulte. *Ex.* La grenouille.

anse de Henlé. Segment grêle, incurvé, intercalé entre le segment proximal et le segment distal du *néphron* des Mammifères.

antagonisme. *n.* Effet d'une substance qui s'oppose au moins partiellement à l'effet d'une autre lorsqu'elles agissent ensemble.

antécambrien ou **précambrien.** *n.* Première période géologique de l'histoire de la Terre, évaluée à 4 milliards d'années. Les fossiles qui la caractérisent sont essentiellement des Bactéries, des Algues bleues, des Cnidaires et des Polychètes.

anthère. *n.* Partie terminale de l'étamine, où se forment les grains de pollen. Comprend généralement quatre sacs polliniques, qui s'ouvrent par deux fentes, après avoir conflué en deux loges.

anthéridie. *n.* Organe où sont élaborées les cellules mâles des Cormophytes lorsque le gamétophyte est suffisamment différencié (Mousses, Fougères). Le grain de pollen est un gamétophyte formant une seule anthéridie, l'ensemble étant très simplifié. Ce terme est parfois utilisé pour désigner les spermatocystes des Thallophytes.

anthérozoïde. *n.* Chez les végétaux, cellule sexuelle mâle. On dit aussi spermatozoïde, par analogie avec les animaux.

anthocyanes. *n.* Substances non azotées responsables des couleurs bleues, violettes ou rouges de beaucoup de fleurs. Les anthocyanes sont présentes principalement à l'état d'hétérosides.

anthropocentrisme. *n.* Philosophie qui considère l'homme comme le centre de l'univers.

anthropogenèse. *n.* Ensemble des processus de tous ordres qui ont participé à la formation du genre *Homo.*

anthropologie. *n.* Science qui étudie le genre humain.

antibiose. *n.* Destruction d'un organisme vivant par l'action d'*antibiotiques* ou composés chimiques élaborés par des micro-organismes.

antibiotique. *n.* Substance qui empêche la croissance et le développement d'un organisme vivant.

anticorps. *n.* Molécule protéique produite en réaction à l'introduction d'un antigène et susceptible d'immobiliser ce dernier et éventuellement de le détruire.

antifolique. *adj.* Qui empêche l'intervention normale de l'acide folique, dont il est analogue, et nuit donc à la synthèse des purines, de la thymidine, etc. ; bloque donc la synthèse des acides nucléiques. *N.* Un antifolique.

antigène. *n.* Substance à grosse molécule susceptible de déterminer chez un hôte vertébré la formation de molécules protéiques (anticorps) qui se fixent à elle et éventuellement la détruisent.

antimétabolite. *n.* Substance inutilisable par le métabolisme, mais ressemblant à l'une de celles qu'il utilise. Absorbée à sa place, et incorporée d'abord comme le produit normal, elle ne peut subir les autres réactions métaboliques, qui se trouvent ainsi bloquées.

antimitotique. *adj.* Qui empêche le déroulement de la mitose et, par voie de conséquence, la prolifération des tumeurs ou autres cellules néoplasiques ; c'est pourquoi on utilise, en thérapeutique, des substances antimitotiques.

antiparallèle. *adj.* Deux structures linéaires identiques et polarisées sont antiparallèles si leurs directions sont parallèles, alors que l'ordre de leurs éléments constitutifs est inverse.

antipodes. *n.* Cellules (haploïdes), au nombre de trois, situées à l'extrémité du sac embryonnaire opposée à l'oosphère ; se multiplient parfois intensément.

antiseptique. *n.* Substance détruisant les germes pathogènes ou empêchant leur prolifération. *Adj.* Qui a les propriétés d'un antiseptique.

antrum. *n.* Cavité du *follicule de de Graaf.*

apex. *n.* Pointe d'un organe, en particulier de la tige et de la racine. Contient des cellules se divisant activement.

aplasie. *n.* Absence de division cellulaire.

apneumone. *adj.* Qualifie certains Amphibiens dépourvus de poumons par suite d'une régression de la respiration pulmonaire. *Ex.* Les Pléthodontidés.

apoendémique. *adj.* D'aire restreinte, donc endémique, parce qu'il est apparu dans cette portion exiguë de l'aire plus vaste d'un taxon dont il dérive. *N.* Un apoendémique.

apoenzyme. *n.* Enzyme fonctionnant en présence d'une coenzyme.

apomixie. *n.* Parthénogenèse.

appareil gubernaculaire ou **gubernaculum testis.** Appareil ligamentaire inséré sur les testicules de nombreux Mammifères ; sa contraction provoquerait la descente de ces glandes.

appareil hyoïdien. Chez les Vertébrés tétrapodes, ensemble des arcs hyoïdiens et branchiaux atrophiés qui soutient la langue et constitue le larynx.

apprentissage. *n.* Méthodes qui permettent d'établir des relations entre des stimuli et leurs réponses, facilitant ainsi l'adaptation de l'animal à son milieu.

aquixylème. *n.* Syn. de *tissu de transfusion.*

arachnoïde. *n.* Méninge moyenne, en forme de réseau conjonctif, située entre la *dure-mère* et la *pie-mère*, entourant le névraxe des Vertébrés.

arboricole. *adj.* Qualifie un animal vivant dans les arbres. *Ex.* Certains singes.

arboricolisme. *n.* Mode de vie des Primates qui vivent dans les arbres ; leur appareil locomoteur est adapté à ce milieu de vie.

arbovirus. *n.* Virus pathogène transmis par des Arthropodes tels les moustiques, les tiques, les puces, etc.

archanthropienne. *adj.* Qualifie les premières formes humaines (Pithécanthrope, Sinanthrope, Homme de Heidelberg) qui sont apparues vers — 1 million d'années.

archégone. *n.* Organe reproducteur femelle des Cormophytes. Renferme l'oosphère, qui, après fécondation, deviendra l'œuf. Chez les Angiospermes, les archégones sont indistincts, l'oosphère étant présente dans un sac embryonnaire, qui comporte aussi, en général, six autres cellules, dont la centrale est binucléée.

archentéron. *n.* Cavité digestive primitive (limitée par le feuillet interne, ou endoblaste) qui se forme, lors de la gastrulation, par invagination de la *blastula,* au cours du développement embryonnaire d'un œuf de Métazoaire (type oursin).

archéologie. *n.* Partie de l'histoire ancienne dont les vestiges, écrits et non écrits, de civilisations disparues forment le matériau.

archétype. *n.* Modèle originel qui sert à façonner des formes plus élaborées.

archicérébellum. *n.* Parties latérales constitutives du *cervelet* des Vertébrés en relation avec les organes stato-acoustiques.

archipallium. *n.* Zone médio-dorsale du *télencéphale* des Mammifères ayant une fonction olfactive et en relation avec le *thalamus.*

arcocentre. *n.* Partie de l'autocentre du corps vertébral formée à partir des bases des arcs neuraux et hémaux.

ARNm ou **ARN messager.** Voir *acide ribonucléique.*

ARNt ou **ARN de transfert.** Voir *acide ribonucléique.*

aréole. *n.* En général, espace arrondi ou cavité délimités par des protubérances. *Ex.* Des nervures délimitent des aréoles sur un limbe de feuille. Surtout employé à propos des ponctuations aréolées des trachéides et vaisseaux.

aréolé. *adj.* 1° Qui a la forme d'une aréole. 2° Qui constitue des aréoles. *Ex.* Nervation aréolée.

arginine. *n.* Acide aminé qui joue un rôle important dans la constitution de l'*hémoglobine.*

aristogenèse. *n.* Conçue par le paléontologiste Osborn, théorie selon laquelle l'évolution se fait par l'apparition de caractères nouveaux survenant accidentellement et la modification progressive des caractères préexistants.

aromatique. *adj.* **(substance organique).** Dont les molécules ont un squelette carboné formant un ou plusieurs cycles.

arrhénotoque. *adj.* Qualifie la parthénogenèse ne produisant que des mâles : la reine des abeilles donne ainsi naissance aux faux bourdons lorsque l'ovule n'est pas fécondé.

artefact. *n.* Structure apparaissant du fait des traitements subis par une préparation biologique pour son étude, et qui n'existe donc pas à l'état vivant.

artère. *n.* Vaisseau à paroi musculo-élastique épaisse qui conduit le sang du cœur vers les organes.

artère arciforme. Ramification de l'artère rénale des Mammifères adoptant un trajet arqué à la limite des zones corticale et médullaire de l'organe.

artères interlobulaires. Ramifications radiaires intracorticales de l'*artère arciforme* du rein des Mammifères.

arthropodes. *n.* Le plus important embranchement du règne animal. Ses représentants sont des Métazoaires métamérisés dont le corps, enveloppé d'une cuticule épaisse, est constitué de segments articulés. On distingue : les Arachnides, les Crustacés, les Insectes, les Myriapodes, etc.

article. *n.* 1° Segment ou élément d'une structure métamérisée (où une même formation élémentaire se répète successivement). *Ex.* Les entre-nœuds sont des articles de la tige. 2° Élément cytoplasmique tubulaire plurinucléé. Chez certaines Algues et chez de nombreux Champignons, la succession des articles forme un filament.

art pariétal. Ensemble des peintures et des gravures exécutées sur les parois de certaines grottes par les Hommes de la préhistoire.

arylsulfatase. *n.* Enzyme détachant les radicaux sulfate fixés à un noyau benzénique.

asepsie. *n.* Ensemble de méthodes physiques et chimiques qui permettent de protéger un organisme contre tout apport microbien.

asparaginase. *n.* Enzyme qui hydrolyse l'*asparagine* en acide aspartique.

asparagine. *n.* Amide dont l'hydrolyse libère l'acide aspartique, aminoacide important du cycle de l'urée.

asphyxie. *n.* État pathologique résultant de l'absence d'oxygène, soit pour l'organisme entier, soit pour une de ses parties mal irriguée par le système circulatoire.

asque. *n.* Sporocyste des Champignons Ascomycètes : une cellule mère forme, en général, huit spores situées les unes au-dessus des autres, et qui restent encloses dans sa paroi, ou asque. Ces spores sont formées avec réduction chromatique, après fusion (caryogamie) des deux noyaux du dicaryon que contenait initialement la cellule mère.

assise génératrice. Tissu méristématique formant un manchon autour du bois ou dans l'écorce. Se divise en produisant soit vers l'intérieur du nouveau bois et vers l'extérieur du liber, soit vers l'intérieur de l'écorce secondaire et vers l'extérieur du liège. Chez quelques Monocotylédones, une assise externe produit un parenchyme, dans lequel se différencient des faisceaux libéro-ligneux.

assise mécanique. Ensemble de cellules formant une couche, à paroi squelettique lignifiée d'une manière particulière. Les variations de l'humidité de l'air entraînent des mouvements de ces cellules, qui déforment et déchirent la paroi de l'organe auquel elles appartiennent, occasionnant ainsi la dispersion de son contenu. Se rencontre dans les anthères des étamines ou les sporanges des Ptéridophytes.

associationnisme. *n.* Théorie de la psychologie qui soutient qu'une forme demeure quand ses éléments changent de nature dans la mesure où ce serait l'activité de l'esprit qui combinerait les éléments en un tout.

association végétale. Groupement de plantes vivant le plus souvent ensemble, et, suivant les cas, plus ou moins strictement limitées à une association donnée. Les associations végétales s'expliquent par les exigences écologiques des plantes qui les constituent et leurs rapports avec les conditions du milieu où se trouve l'association.

aster. *n.* Formation de microtubules disposés de façon rayonnante autour des centrosomes des cellules ; manifeste en particulier dans les œufs.

astragale. *n.* Os de la cheville qui s'articule en haut avec les os de la jambe, en bas avec le calcanéum, en avant avec le scaphoïde.

atavisme. *n.* Réapparition d'un caractère ancestral qui ne s'était pas manifesté durant plusieurs générations.

atérien. *adj.* Qualifie la civilisation préhistorique africaine du Paléolithique inférieur qui correspond à la civilisation *moustérienne* européenne.

atoll. *n.* Ile en forme d'anneau constituée par des récifs coralliens entourant un lagon central.

atomisme. *n.* Doctrine suivant laquelle la matière est constituée d'atomes ne pouvant être divisés. Par extension, doctrine pour laquelle une structure est formée de structures plus simples conservant les propriétés essentielles de l'ensemble mais les perdant si on les fragmente ; la cellule peut être ainsi considérée comme un « atome » de l'organisme vivant : isolée, elle demeure vivante.

ATP. Voir *acide adénosine-triphosphorique.*

atrium. *n.* 1° Cavité du cœur des Vertébrés qui reçoit le sang collecté par le sinus veineux et l'envoie dans le ventricule. 2° Renflement antérieur de la cavité nasale situé entre la narine et la cavité olfactive chez les Reptiles Sauriens (lézards). 3° *Atrium génital.* Carrefour où débouchent les voies génitales mâles et femelles chez les espèces hermaphrodites.

australoïde. *adj.* Qualifie les deux races humaines des Veddas de Ceylan et des Australiens d'Australie.

australopithèques. *n.* Primates apparus il y a 3,5 millions d'années environ, et dont les restes ont été découverts en Afrique du Sud. Annoncent l'évolution qui conduira à l'Homme.

autocatalyse. *n.* Augmentation de la vitesse d'une réaction chimique par un produit qui apparait grâce à la réaction elle-même.

autocentre. *n.* Région du corps vertébral extérieure à la gaine cordale qui s'ossifie directement à partir du mésenchyme.

autoclave. *n.* Instrument clos dans lequel on fait chauffer de l'eau qui se vaporise en partie : la température de la vapeur d'eau peut s'élever au-dessus de 100 °C parce que sa pression devient supérieure à la pression atmosphérique. Une « cocotte-minute » est un petit autoclave.

auto-écologie. *n.* Branche de l'écologie portant sur l'étude d'une espèce animale ou végétale et des relations qu'elle entretient avec son biotope.

autogamie. *n.* 1° Fécondation qui se produit entre des gamètes formés dans un même gamétocyste. 2° Fécondation du pistil par le pollen de la même fleur.

autolyse. *n.* Destruction d'une cellule par ses propres enzymes.

autophagie. *n.* Digestion par une cellule de parties d'elle-même, dans des vacuoles spéciales, ce qui contribue notamment à sa dédifférenciation. C'est un aspect cytologique de l'autolyse.

autopode. *n.* Segment terminal du membre chiridien des Vertébrés tétrapodes : chez l'homme, l'autopode correspond à la main au membre antérieur, et au pied au membre postérieur.

autosome. *n.* Chromosome ordinaire, présent sous la même forme dans les deux sexes d'une espèce.

autostylique. *adj.* Qualifie l'articulation de la mâchoire des Vertébrés tétrapodes chez lesquels le ptérygo-carré articulé ou soudé au neurocrâne reste indépendant de l'arc hyoïde.

auxine. *n.* Substance produite par les plantes et déterminant leur propre croissance. L'auxine proprement dite est l'acide ß-indole-acétique.

aviaire ou **avien.** *adj.* Qui a rapport aux Oiseaux.

avifaune. *n.* Faune constituée par les Oiseaux.

avitaminose. *n.* Maladie provoquée par la carence en une vitamine, qui peut être due à son absence dans l'alimentation ou à sa non-utilisation par l'organisme du fait d'un autre trouble.

axe. *n.* Structure allongée, dont la section présente, en principe, une symétrie radiale, et s'accroissant soit par le sommet, soit par divers points intercalaires. Chez les Cormophytes, syn. de *tige.*

axe épicotylé. Toute la portion de la tige située au-dessus du ou des cotylédons.

axe floral. Axe portant les pièces de la fleur. C'est simplement le prolongement du pédoncule floral.

axe hypocotylé ou **hypocotyle.** Portion de la plantule située entre la jeune racine (radicule) et le ou les cotylédons, qui sont les premières feuilles. L'axe hypocotylé ressemble à une tige, mais sa structure rappelle celle de la racine.

axillaire. *adj.* Situé dans une aisselle. Se dit surtout du bourgeon axillaire de la feuille.

axodendritique. *adj.* **(synapse).** Qualifie la jonction s'effectuant entre l'axone d'un neurone et les dendrites d'une autre cellule nerveuse.

axosomatique. *adj.* **(synapse).** Qualifie la jonction s'effectuant entre l'axone d'un neurone et le corps cellulaire d'une autre cellule nerveuse.

azoïque. *adj.* Qui possède un ou plusieurs groupements diazo : —N = N—. C'est le cas de colorants très importants (hélianthine, chrysoïdine, rouge Congo, Soudan III, etc.).

B

bactéricide. *n.* ou *adj.* Substance qui tue les Bactéries. *Ex.* La pénicilline.

bactériologie. *n.* Étude des Bactéries et de leurs effets pathogènes ou écologiques.

bactériophage ou **phage.** *n.* Virus se comportant en parasite de Bactéries.

bactériostatique. *n.* ou *adj.* Substance qui arrête le développement d'une population de Bactéries.

baie. *n.* Fruit à mésocarpe charnu, à épicarpe et endocarpe membraneux, et pouvant contenir une ou plusieurs graines.

balance ionique. Équilibre entre les différents ions d'une solution : les concentrations de ceux-ci doivent être présents dans des rapports déterminés pour que la vie d'un tissu ou de certaines cellules y soit optimale ou possible. *Équilibre ionique* est préférable.

bambuseraie. *n.* Peuplement de bambous.

barrière. *n.* Obstacle quelconque, géographique, écologique ou génétique, s'opposant à la dissémination des espèces.

bartholinite. *n.* Infection bactérienne (généralement par un gonocoque) des glandes de Bartholin situées de part et d'autre du vagin et dont la sécrétion s'écoule par des orifices qui s'ouvrent à la face interne des petites lèvres.

basicité. *n.* Propriété d'un corps à réaction basique, c'est-à-dire libérant des ions OH^-.

baside. *n.* Sporocyste de certains Champignons, formant, après réduction chromatique, quatre spores ou basidiospores situées à l'extrémité de petits pédoncules, ou stérigmates. La formation des spores est exogène, mais ces dernières n'en sont pas moins des sortes de hernies du sporocyste.

basifixe. *adj.* **(anthère).** Fixée par sa base au filet de l'étamine.

basipode. *n.* Région basale de l'autopode correspondant au poignet et à la cheville.

basophile. *adj.* Qualifie les tissus qui retiennent électivement les colorants basiques tels que l'hématoxyline.

bassin euxinique. Mer fermée, pauvre en oxygène et riche en résidus sulfureux, dans laquelle la vie est rendue difficile, voire impossible. *Ex.* La mer Noire.

bassin paralique. Lagune (bassin côtier) tantôt émergée, avec développement des végétaux, tantôt inondée, d'où le dépérissement de ceux-ci. Ceci entraîne des accumulations successives de matière organique. Un tel processus a contribué à former les couches de houille.

bathyal. *adj.* **(étage).** Zone superficielle du benthos où la faune reste encore riche.

behaviorisme. *n.* Théorie de la psychologie qui se donne pour objet l'analyse expérimentale des acquisitions individuelles, rendues possibles par les changements de fréquence des actes de l'animal.

benthique. *adj.* Qui concerne le benthos.

benthos. *n.* Ensemble des êtres marins qui vivent au contact du fond, souvent même fixés à lui.

benzopyrène. *n.* Composé chimique ayant un pouvoir cancérigène et provenant d'une combustion incomplète des hydrocarbures.

berceau. *n.* Centre d'origine d'une espèce, à partir duquel elle s'est disséminée.

ß-galactosidase. *n.* Enzyme détachant le ß galactose d'une molécule qui le renferme, comme le lactose (glucose-galactose).

ß-glucuronidase. *n.* Enzyme détachant l'acide ß-glucuronique des liaisons osidiques où il est engagé. Abondante dans l'hépatopancréas d'escargot.

ß-oxydation. Oxydation des acides gras saturés dans laquelle les atomes de carbone sont détachés par paire, en plusieurs étapes, à partir de la fonction acide liée à la coenzyme A. Le couple séparé se trouve donc lié à cette CoA, tandis que le carbone où s'est effectuée la coupure devient une nouvelle fonction acide, qui se lie à une autre molécule de CoA et est susceptible d'être emportée de la même manière avec le carbone qui la précède.

bicaténaire. *adj.* Qualifie les acides nucléiques viraux (ADN ou ARN) lorsqu'ils forment une spirale double.

biceps. *n.* Muscle fléchisseur ventral du bras qui relie le coracoïde et la partie proximale du radius.

bichromate de potassium. Sel orangé de formule $K_2Cr_2O_7$. Utilisé comme fixateur des mitochondries en microscopie optique.

bicollatéral. *adj.* Qui possède du liber tant à l'extérieur qu'à l'intérieur du bois, comme les faisceaux libéro-ligneux des tiges des Cucurbitacées.

biface. *adj.* Qualifie un *galet aménagé* taillé selon deux axes.

bifacial. *adj.* Qui présente deux faces distinctes, dorsale et ventrale. Se dit d'un appendice (phyllome) de plante vasculaire ou d'une de ses portions.

bifactoriel. *adj.* Caractérise un croisement où deux couples d'allèles sont en ségrégation.

bifonctionnel. *adj.* Qui présente deux fonctions chimiques.

bile. *n.* Substance sécrétée par le foie, contenant des sels des acides biliaires qui, en abaissant la tension superficielle (tensio-actifs), émulsionnent les graisses et activent les lipases.

biliverdine. *n.* Pigment biliaire provenant de la décomposition de l'*hémoglobine* du sang.

biocénomètre. *n.* Appareil destiné à évaluer un peuplement animal. Il se présente sous la forme d'une cage sans fond placée sur le sol qui permet d'emprisonner la faune qu'elle recouvre.

biocénose. *n.* Communauté des êtres vivants, végétaux et animaux, peuplant le même *biotope* et unis entre eux par des relations nutritives et compétitives.

biocénotique. *n.* Étude des communautés d'êtres vivants du point de vue de leur description, leur genèse, leur évolution et des rapports écologiques de leurs membres entre eux et avec leur biotope.

biodégradable. *adj.* Qualifie une substance chimique détruite par un micro-organisme.

biogène. *adj.* Qui participe à la production de structures vivantes.

biogéocénose. *n.* Syn. d'*écosystème*.

biogéographie. *n.* Étude de la distribution géographique des divers taxons d'êtres vivants. La biogéographie des plantes est la *phytogéographie*.

bioherme. *n.* Édifice récifal, non stratifié, dû à des coraux et autres organismes constructeurs.

bioluminescence. *n.* Chez les animaux, émission lumineuse produite par des réactions biochimiques.

biomasse. *n.* Dans un endroit donné, masse d'êtres vivants par unité de surface ou parfois de volume.

biome. *n.* Vaste écosystème couvrant de grandes étendues de la Terre, ayant une physionomie et une écologie communes (savane, forêt de feuillus) sous des compositions floristiques et faunistiques diverses. Syn. de *formation*.

bioréducteurs. *n.* Organismes qui décomposent la matière organique (détritus végétaux, cadavres d'animaux, etc.) et contribuent ainsi à la libération d'éléments minéraux dans le milieu.

biosphère ou **écosphère.** *n.* Ensemble des êtres vivants qui peuplent la surface de la Terre.

biostrome. *n.* Récif en bancs continus, lités suivant les lois de la stratification.

biotine. *n.* Vitamine H, dérivé cyclique de l'urée, qui fixe le gaz carbonique intervenant au cours des réactions de carboxylation.

biotope. *n.* Milieu occupé par une ou des communautés d'êtres vivants, et caractérisé par certains traits écologiques en rapport avec la vie de ceux-ci.

bipédie ou **orthostatisme.** *n.* Mode de locomotion où seuls les membres postérieurs assurent la fonction motrice. *Ex.* Certains Oiseaux et les Hominidés (Primates).

biréfringent. *adj.* Corps qui, recevant un rayon lumineux, entraîne l'apparition de *deux* rayons réfractés et non d'un seul.

biuret. *n.* Substance correspondant à l'union de deux molécules d'urée :

$$2\,CO\begin{smallmatrix}NH_2\\NH_2\end{smallmatrix} \rightarrow \begin{matrix}CO\langle^{NH_2}\\ \rangle NH\\ CO\langle_{NH_2}\end{matrix} + NH_3.$$

blastème rénal. Ébauche primitive du système rénal chez l'embryon des Vertébrés.

blastocèle. *n.* Cavité de segmentation de la *blastula* se formant par écartement des *blastomères*.

blastomère. *n.* L'une des premières cellules issues de la division de l'œuf.

blastopore. *n.* Orifice extérieur de l'*archentéron* résultant de la gastrulation par invagination de la *blastula* lors du développement embryonnaire d'un œuf de Métazoaire. Il donnera l'anus chez les Deutérostomiens (les Échinodermes et les Cordés notamment) et la bouche chez les Protostomiens (la plupart des autres Métazoaires).

blastula. *n.* Premier stade embryonnaire apparaissant à la fin de la segmentation de l'œuf et précédant la *gastrula*.

blennorragie. *n.* Infection du tractus génital masculin et féminin dont l'agent pathogène est un gonocoque : *Neisseria gonorrhoeae*.

bléomycine. *n.* Substance antibiotique qui provoque la rupture des acides désoxyribonucléiques.

blépharoplaste ou **cinétosome** ou **corpuscule basal.** *n.* Granule présent à la base d'un cil ou d'un flagelle, chez les Bactéries et les cellules munies d'un appareil locomoteur, comme les Péridiniens. Il est intracytoplasmique dans le second cas. Contient parfois de l'ADN.

bleu de méthyle. Colorant bleu acide. Colore entre autres la callose ainsi que le tissu conjonctif. Dérivé aminé du triphénylméthane.

bleu de méthylène. Colorant basique qui peut servir de colorant vital, en particulier du système nerveux. Ses dérivés *(azur* et *violet de méthylène)* sont spécialement importants.

bleu de toluidine. Colorant histologique basique (chlorure de triméthylthionine). Voisin du bleu de méthylène, il est cependant métachromatique. Sert en particulier à colorer les acides nucléiques à pH bas (auquel les protéines, du fait de leur point isoélectrique, ne sont plus acides et ne fixent donc plus les colorants basiques).

bogheads. *n.* Charbons bitumineux spéciaux, constitués par des Algues monocellulaires.

bois de cœur. Bois secondaire formé anciennement par le *cambium*, et situé par conséquent au centre du tronc. Dur et non fonctionnel, il ne conduit plus la sève, mais contribue à assurer la résistance mécanique du tronc.

botulisme. *n.* Maladie à manifestation neurologique produite par la toxine d'une Bactérie, *Clostridium botulinum*, présente dans certaines viandes, conserves, etc., qu'il est donc nécessaire de bien cuire.

bouchon vitellin. Amas de *blastomères* obstruant le *blastopore* au cours du développement embryonnaire des Amphibiens.

bourgeon caudal. Stade du développement embryonnaire des Vertébrés caractérisé par la mise en place des organes et l'apparition de la queue.

bourgeon glandulaire. Ébauche embryonnaire d'une glande.

bourgeonnement. *n.* Mode de reproduction asexuée par lequel se forme, sur la paroi d'un animal, une excroissance qui se sépare de l'organisme maternel pour donner un nouvel individu. *Ex.* Chez l'hydre d'eau douce.

bourgeons du goût. Organes gustatifs, dispersés chez les Poissons et concentrés en papilles gustatives sur la langue des Mammifères. Chaque bourgeon gustatif comporte des cellules chimioréceptrices entourées par des cellules de soutien.

bourrelets branchiaux. Ébauches des futures branchies externes chez l'embryon des Amphibiens.

bourrelets neuraux. Bords soulevés de la plaque neurale qui formeront, en convergeant, la gouttière neurale.

bourses. *n.* Voir *sacs scrotaux*.

bouton embryonnaire. Massif cellulaire interne de la *blastula* des Mammifères qui donnera naissance à l'embryon.

bouturage. *n.* Mode de reproduction dans lequel un fragment de l'organisme, ou *bouture*, formé sans intervention de la sexualité, se sépare ou est séparé de l'organisme père et se développe en un organisme similaire. Se dit en particulier de l'utilisation de fragments isolés de plantes supérieures portant des bourgeons pour les reproduire.

brachial. *n.* Muscle fléchisseur ventral du bras qui relie la tête de l'humérus et la partie proximale de l'ulna.

brachiation. *n.* Mode de locomotion arboricole de certains singes qui se déplacent à bout de bras en se balançant de branches en branches.

brachydactylie. *n.* Anomalie du squelette caractérisée par un raccourcissement des doigts.

branchiospine ou **branchicténie.** *n.* Chez les Poissons cartilagineux, appendice situé sur le bord interne de l'arc branchial et servant à filtrer le plancton.

bronche. *n.* Chez les Vertébrés terrestres, ramification de la trachée conduisant l'air aux poumons.

bronchioles. *n.* Ramifications des *bronches* chez les Vertébrés terrestres.

broyat. *n.* Produit du broyage d'un élément quelconque. En particulier, en cytologie, produit d'un tissu broyé de telle manière que les cellules soient rompues et les organites dispersés.

bulbe. *n.* En général, tout renflement. *Spécialt.* Renflement de la tige des Cormophytes dû à l'accumulation de matières de réserves (amidon surtout) dans celle-ci ou dans des feuilles densément disposées sur elle.

bulbe éjaculateur. 1° Portion supérieure renflée du canal éjaculateur des Insectes où débouchent les glandes annexes. 2° Chez les Araignées, organe copulateur mâle situé dans une dépression du tarse des *pédipalpes*.

bulbille. *n.* 1° Petit bulbe, ne constituant pas la base d'une tige, mais un bourgeon axillaire ou adventif de celle-ci, susceptible de se détacher et de se développer en une nouvelle plante. 2° Formation condensée du thalle de certains Champignons, très comparable aux sclérotes.

bulliforme. *adj.* Renflé en bulle. Les cellules bulliformes des feuilles de Monocotylédones sont volumineuses, arrondies et susceptibles de changer de volume par l'entrée et la sortie d'eau, ce qui entraîne l'enroulement et le déroulement du limbe.

bunodonte. *adj.* Qualifie, chez les Mammifères, la dent qui présente des cônes arrondis. *Ex.* Primates et Suidés.

bursicon. *n.* Hormone sécrétée par les ganglions cérébroïdes des Insectes et intervenant dans le tannage de la cuticule.

C

cactiforme. *adj.* Qualifie une plante désertique ayant l'aspect d'un cactus.

cadre de Caspary. Encadrement de lignine des cellules de l'endoderme des racines (et parfois des tiges). Se trouve sur les 4 parois radiales et est étroitement accolé aux 4 cadres des cellules voisines, empêchant le passage de liquides entre celles-ci. Syn. *Bandes de Caspary*.

caducifolié. *adj.* Fait d'arbres à feuilles caduques. *Ex.* Forêt caducifoliée.

cal. *n.* 1° Amas cellulaire osseux de régénération qui se forme au niveau d'une fracture. 2° Épaississement de l'épiderme qui apparaît à certains endroits de la peau soumis à un frottement intense.

calcémie. *n.* Concentration en calcium du sang.

calcicole. *adj.* Qui affectionne les terrains calcaires.

calcifuge. *adj.* Qualifie une plante qui pousse sur un sol acide ne renfermant pas de calcium.

calcite. *n.* La plus commune des deux formes cristallines du calcaire, ou carbonate de calcium, cristallisant dans le système hexagonal. Existe dans les coquilles d'œufs et les os, ainsi que les marbres et la craie.

calice. *n.* 1° Chez les végétaux, ensemble des sépales d'une fleur. 2° Cavité, coiffant les *pyramides de Malpighi* du rein des Mammifères, au niveau de laquelle débouchent les tubes collecteurs des néphrons.

callose. *n.* Polymère du glucose, où les molécules sont liées autrement que dans l'amidon ou la cellulose, et qui se rencontre notamment dans les cellules du liber et dans les gamétanges des plantes vasculaires, ainsi que chez les Thallophytes.

callosités. *n.* 1° Épaississements cornés des pouces permettant aux mâles des Amphibiens Anoures de maintenir la femelle lors de l'accouplement. 2° Épaississements cornés, nus, fortement colorés et localisés au niveau des fesses de certains singes (*ex.* chimpanzés, babouins).

calotte. *n.* Syn. de *tegmentum.*

cambium. *n.* Assise génératrice produisant du liber secondaire vers l'extérieur et du bois secondaire vers l'intérieur. Peut s'employer pour l'assise génératrice subéro-phellodermique (écorce à l'intérieur, liège à l'extérieur). Certains cambiums produisent un parenchyme banal où se différencient ensuite des faisceaux libéro-ligneux.

camphre. *n.* Terpène à deux cycles possédant une fonction cétone. Extrait du bois du camphrier.

canal de Bartholin. Canal excréteur des glandes sublinguales de l'homme.

canal cochléaire. Formation de l'oreille interne, rectiligne chez les Reptiles et les Oiseaux, enroulée en spirale chez les Mammifères.

canal déférent. Conduit évacuateur des spermatozoïdes des Vertébrés.

canal épendymaire. Canal axial de la moelle épinière contenant du liquide céphalo-rachidien et en relation avec les *ventricules encéphaliques.*

canal galactophore. Canal d'évacuation de la sécrétion lactée dans les glandes mammaires.

canal ombilical. Syn. de *pédicule vitellin.*

canal de Wharton. Canal excréteur de la glande sous-maxillaire de l'homme.

canal de Wolff ou **uretère primaire.** Canal collecteur du *pronéphros* des Vertébrés inférieurs.

canaux semi-circulaires. Diverticules membraneux de l'*utricule* de l'oreille interne des Vertébrés qui, disposés dans les trois plans de l'espace, constituent un organe d'équilibration.

capacité au champ d'un sol. État d'un sol se trouvant, après perte de l'eau de gravité, à son point de rétention maximale.

cape apicale. Composant ectodermique du bourgeon d'un membre chez un embryon de Vertébré.

cap de Broca. Région postérieure de la troisième circonvolution frontale de l'encéphale, particulièrement développée chez l'homme.

capillaire. *n.* Vaisseau, du diamètre d'un cheveu, reliant les réseaux artériel et veineux au niveau des organes. Ce conduit ne comporte qu'un simple endothélium doublé d'une basale contre laquelle s'appliquent quelques *péricytes.*

capillarité. *n.* Phénomène se manifestant lorsque des liquides peuvent s'engager dans des conduits de faible diamètre; leur tension superficielle aide ou s'oppose alors à leur progression.

capitule. *n.* Inflorescence de forme massive, renfermant, en principe, de nombreuses fleurs. Ressemble souvent à une fleur simple, parce qu'elle est entourée inférieurement d'un involucre de bractées semblable à un calice, et présente des fleurs inférieures à corolle hypertrophiée, dont l'ensemble offre l'aspect d'une corolle simple. Certains capitules sont groupés eux-mêmes en capitules secondaires. *Ex.* Capitule des Composées.

capside. *n.* Enveloppe protidique qui entoure le nucléoïde du virion.

capsomère. *n.* Type de capside du virion constituée par plusieurs protéines.

capsule. *n.* 1° Chez certaines Bactéries, enveloppe glucidique et protéique entourant la paroi squelettique. 2° Portion terminale du sporogone, ou sporophyte, des Bryophytes, renflée en forme d'urne, et libérant les spores par rupture de sa paroi ou par chute d'un couvercle (opercule). 3° Chez les Angiospermes, fruit sec déhiscent issu d'un gynécée pluricarpellaire.

capsule de Bowmann. Cupule à double paroi enfermant le *glomérule de Malpighi.*

caractère Killer. Chez la paramécie *Paramecium aurelia,* facteur à hérédité extrachromosomique localisé dans les *particules kappa* du cytoplasme.

caractéristique. *adj.* Qualifie une espèce végétale appartenant généralement à une association végétale donnée.

carboxylation. *n.* Fixation de CO_2 sur une molécule. Il y devient une fonction acide organique —COOH, ce groupement étant le *carboxyle.*

carboxyle. *n.* Le groupement —COOH, caractéristique des acides organiques, qui en comportent au moins un, mais peuvent être aussi *di-*ou *tricarboxyliques.*

carboxypeptidase. *n.* Enzyme qui libère l'acide aminé fixé en bout de chaîne peptidique (extrémité C - terminale).

carcinogène ou **oncogène.** *adj.* Qui entraîne la multiplication néoplasique ou tumorale des cellules.

carcinome. *n.* Tumeur maligne qui se forme à partir des tissus épithéliaux.

cariçaie. *n.* Zone à *Carex* bordant un lac ou un étang.

carmin. *n.* Colorant produit par la femelle d'une cochenille et utilisé pour colorer la cellulose (en présence d'alun de potassium) ou les chromosomes (en présence d'acide acétique et de fer).

carottage. *n.* Extraction en profondeur d'une colonne cylindrique de sédiment.

carpelle. *n.* Pièce florale, homologue d'une feuille, et formant les ovules qui semblent correspondre à des sortes de folioles. Enroulés sur eux-mêmes lorsqu'ils sont libres, les carpelles sont parfois plats lorsqu'ils sont unis à leurs voisins en un gynécée. *Carpelle* s'appliquait originellement à un élément de fruit, mais ne s'emploie plus dans ce sens.

carte factorielle. Localisation des gènes sur les chromosomes d'une espèce donnée.

cartésien. *adj.* Relatif à la doctrine méthodique et rationaliste de Descartes, philosophe et mathématicien du XVII^e^ siècle.

cartilage de conjugaison. Plaque de *chondrocytes* située entre l'épiphyse et la métaphyse de l'os et qui assure sa croissance en longueur.

caryocinèse. *n.* Division d'un noyau cellulaire. Ce terme est parfois utilisé comme synonyme de *mitose.*

caryogamie. *n.* Fusion des noyaux des gamètes, lors de la fécondation, aboutissant à l'œuf qui devient ainsi une cellule diploïde.

caryorexie ou **caryorrhexie.** *n.* Segmentation d'un noyau sous l'influence d'un agent viral ou chimique.

caryotype. *n.* Garniture chromosomique spécifique d'une espèce.

catalase. *n.* Enzyme décomposant l'eau oxygénée (H_2O_2) en oxygène et eau, l'oxygène servant à oxyder un métabolite.

cathepsines. *n.* Enzymes protéolytiques intervenant dans l'autolyse des tissus.

cation. *n.* Ion chargé positivement, se rendant donc à la cathode (pôle négatif).

caulinaire. *adj.* Qui concerne la tige (caule), soit en général (rameaux compris), soit par opposition à ses rameaux.

cavernicole. *adj.* Qui vit dans les cavernes et les grottes.

cavité allantoïdienne. Sac formé par l'évagination de l'*allantoïde;* recouvre l'*amnios* et assure les échanges respiratoires de l'embryon des Vertébrés amniotes.

cavité amniotique. Poche qui se forme autour de l'embryon des Vertébrés amniotes par repliement d'une partie de l'*ectoderme* et de la *somatopleure.* Remplie d'un liquide dit amniotique, elle permet à l'embryon de se développer en milieu aqueux.

cavité cœlomique. Cavité qui se forme chez certains animaux par creusement du *mésoderme.*

cécidie. *n.* Syn. de *galle.*

cellophane. *n.* Substance résultant de la repolymérisation de la cellulose dégradée par certaines solutions (chloroiodure de zinc). Permet la purification des solutions colloïdales par dialyse : seuls l'eau et les solutés à petites molécules la traversent. Les pellicules vendues sous le nom de « cellophane » sont en général, des produits très différents, imperméables même à l'eau !

cellularisé. *adj.* Constitué de cellules, par opposition à *syncytial.*

cellulase. *n.* Enzyme dégradant la cellulose. Produite notamment par des Bactéries et des Champignons.

cellule. *n.* Structure de base des êtres vivants, limitée par une *membrane cytoplasmique* souple et formée d'un *cytoplasme* contenant un *noyau* et divers autres *organites.* La cellule représente l'unité morphologique et physiologique des êtres vivants.

cellule bordante. Cellule de l'épithélium gastrique des Mammifères qui sécrète l'acide chlorhydrique nécessaire à l'action de la pepsine.

cellule principale. Chez les Mammifères, cellule de l'épithélium gastrique qui sécrète une enzyme *protéolytique :* la pepsine.

cellules chromaffines. Cellules de la médullo-surrénale renfermant des granulations qui fixent les sels de chrome et qui sécrètent l'*adrénaline* ou la *noradrénaline.*

cellules germinales. Cellules reproductrices d'un être vivant. On les oppose généralement aux cellules somatiques qui constituent l'organisme.

cellules de Kupffer. Cellules endothéliales des capillaires hépatiques qui peuvent se transformer en cellules phagocytaires.

cellules de Paneth. Cellules séreuses de l'épithélium intestinal des Mammifères qui sécrètent les enzymes du suc intestinal.

cellules « petites ». Cellules de la Levure *Saccharomyces cerevisiae* présentant une hérédité de type cytoplasmique et caractérisées par une physiologie perturbée (incapacité de respirer, etc.).

cellules pyramidales du cortex. Neurones du cortex cérébral dont le corps cellulaire présente une forme typique de pyramide.

cellules de Sertoli. Cellules nourricières de la paroi du *tube séminifère* des testicules des Vertébrés amniotes.

cellules visuelles. Cellules nerveuses de la rétine des Vertébrés comprenant un *segment externe* photorécepteur allongé (bâtonnets) ou court (cônes), un *segment intermédiaire* et un *segment interne.*

cellulose. *n.* Polymère insoluble d'une forme de glucose, à longues molécules en forme de chaînes, elles-mêmes groupées en faisceaux. Constituant essentiel des parois squelettiques des végétaux.

celluloso-pectique. *adj.* Constitué de cellulose et de composés pectiques. C'est le cas de la partie périphérique de la paroi primaire des cellules végétales.

cémentocyte. *n.* Cellule qui fabrique le cément entourant la racine des dents et parfois leur couronne.

centimorgan. *n.* Unité de longueur des cartes génétiques définie par le rapport :

$$\frac{\text{nombre de remaniements chromatidiques}}{\text{nombre total de chromatides}} \times 100.$$

central. *n.* Os court constitutif du poignet ou de la cheville *(basipode)* des Vertébrés.

centre cellulaire ou **centriole.** Organite intracytoplasmique caractéristique des cellules animales, jouant un rôle important au moment de la division cellulaire. De cet élément dérivent les cils et les flagelles des cellules mobiles.

centre organisateur. Territoire du germe contrôlant l'organisation de l'embryon et correspondant, chez un Amphibien, à la lèvre dorsale du blastopore formée au niveau du *croissant gris.*

centres taxiques. Centres hypothétiques du système nerveux qui correspondraient à des facteurs d'orientation.

centrolécithe. *adj.* Caractérise le type d'œuf dont les réserves vitellines occupent la partie centrale. *Ex.* Les œufs des Insectes.

centromère. *n.* Rétrécissement des chromosomes par où ils sont en rapport avec certaines fibres du fuseau. Le centromère est unique sur un chromosome et y occupe une position définie, variable suivant les chromosomes d'un même caryotype. Syn. *Constriction primaire.*

centrosome. *n.* Formation constituée de tubules et située aux extrémités du fuseau lors de la mitose des cellules animales et des cellules de Thallophytes.

céphalique. *adj.* Qui concerne la tête ou parfois le cou. *Ex.* Vertèbres céphaliques.

cératobranchial. *n.* Troisième des quatre os disposés dorsoventralement qui constituent l'arc branchial des Poissons.

cérébralisation. *n.* Caractère évolutif de la lignée des Vertébrés consistant en un développement croissant du cerveau, et par conséquent du psychisme.

cerveau postérieur. Voir *cervelet.*

cervelet ou **cerveau postérieur** ou **métencéphale.** Quatrième vésicule de l'*encéphale* des Vertébrés servant de centre de contrôle de l'équilibre et de coordination motrice ainsi que de modulateur de toute l'activité nerveuse.

cétose. *n.* Ose dont la molécule comporte une fonction cétone et qui est moins réducteur que les aldoses.

chaining. *n.* Enchaînement de comportements dont chacun joue le rôle de stimulus vis-à-vis du suivant.

chalazes. *n.* Tortillons de fibres de mucine maintenant en suspension dans l'albumen le jaune de l'œuf des Oiseaux.

chalone. *n.* Substance encore hypothétique. Serait produite par un tissu pour limiter sa propre prolifération.

chambre sous-stomatique. Espace ménagé entre les cellules du mésophylle, au-dessous d'un *stomate.*

chaméphyte. *n.* Plante basse dont les bourgeons peuvent être protégés par la neige.

champ morphogénétique local. Territoire du germe au stade neurula : cette zone est dépourvue de différenciations morphologiques ou histologiques, mais présente une détermination.

chaparral. *n.* Formation végétale californienne ressemblant à la garrigue.

charbon. *n.* Infection animale d'origine bactérienne. Elle commence au niveau de la peau où elle forme des pustules et s'étend à la circulation générale, ce qui peut provoquer la mort.

charentien. *adj.* Qualifie la sous-division de la période préhistorique *moustérienne* caractérisée par ses racloirs.

charge. *n.* Syn. de *densité.*

charge biotique maximale. Capacité maximale d'un milieu à accepter une population animale ou végétale.

chélat. *n.* Complexe résultant de la chélation d'un métal par un chélateur.

chélaté. *adj.* Fixé sous forme de chélat.

chélateur. *n.* Substance susceptible d'opérer la chélation d'ions métalliques. L'ion éthylène-diamine-tétra-acétate est le chélateur le plus connu.

chélation. *n.* Fixation d'ions métalliques sur une substance, chacun étant uni par au moins deux liaisons de coordinance à celle-ci, qui est donatrice d'électrons dans le processus.

chimiorécepteur. *n.* Récepteur sensoriel sensible aux substances dissoutes. *Ex.* Cellules gustatives.

chimiotactisme ou **chimiotaxie.** *n.* Tactisme où le stimulus est chimique.

chitinase. *n.* Enzyme qui hydrolyse la chitine, acétylglucosamine constitutive de la carapace des Arthropodes.

chitine. *n.* Polymère comparable à la cellulose, mais azoté, car formé de glucose aminé. Abondante dans le règne animal, en particulier dans la carapace des Insectes, la chitine se trouve aussi chez beaucoup de Champignons.

chitobiose. *n.* Glucide formé de deux molécules d'acétyl-glucosamine. Une chaîne de molécules de chitobiose constitue une molécule de *chitine.*

chloral. *n.* Dérivé chloré de l'aldéhyde acétique : $Cl_3C—CHO$, obtenu par action du chlore sur l'alcool éthylique.

chloramphénicol. *n.* Antibiotique inhibiteur des synthèses protéiques mitochondriales utilisé notamment en génétique pour étudier une résistance à l'hérédité cytoplasmique chez les Levures.

chlorophylles. *n.* Substances vertes, à noyau complexe, azoté et renfermant un atome de magnésium. Permettent la captation de l'énergie lumineuse lors de la photosynthèse. Il existe des chlorophylles a, b, c, d et e. Les Cormophytes possèdent seulement les deux premières, tandis que les divers groupes d'Algues sont caractérisés par la présence de deux ou trois des cinq chlorophylles.

chloroplaste. *n.* Organite des Végétaux eucaryotes possédant des lamelles sur lesquelles est fixée la chlorophylle qui permet la photosynthèse.

chlorose. *n.* Maladie qui se manifeste par un blanchissement ou un jaunissement d'organes normalement verts. Provoquée soit par un défaut de fer, souvent dû à la présence de calcium, soit par des parasites.

choline. *n.* Base organique très répandue dans les phospholipides. De formule :

$$(CH_3)_3—N(OH)—CH_2—CH_2OH,$$

elle y est liée à un radical phosphoryle estérifiant lui-même une fonction alcool primaire du glycérol.

chondrification. *n.* Ensemble des processus de formation du cartilage.

chondriome. *n.* Ensemble des mitochondries.

chondrocyte. *n.* Cellule cartilagineuse.

chondromucoprotéine. *n.* Protéine constitutive de la substance fondamentale du cartilage.

chopping tool. Terme anglo-saxon utilisé pour désigner un type particulier de *galet aménagé.*

chorde ou **corde.** *n.* Organe embryonnaire d'origine mésodermique autour duquel se forme la partie ventrale du corps des vertèbres des Vertébrés, mais qui subsiste intact chez l'adulte des Procordés.

chorion. *n.* 1° Enveloppe dure de l'œuf des Insectes sécrétée par les cellules folliculaires. On y distingue, de l'extérieur vers l'intérieur, deux couches : l'*exochorion*, renfermant une lipoprotéine, la *chorionine*, et l'*endochorion*, comprenant des protéines associées à des polyphénols. 2° Élément constitutif du placenta chez les Mammifères Euthériens.

chorion conjonctif. Couche de tissu conjonctif enveloppant la muqueuse intestinale des Vertébrés.

chorologie. *n.* Description des aires de répartitions des différents taxons (espèces, genres, familles, etc.).

chromatide. *n.* Produit du clivage longitudinal d'un chromosome. Même d'allure massive, les chromosomes peuvent déjà être clivés en deux chromatides à la prophase, ce qui est compréhensible puisque la duplication de l'ADN a alors déjà eu lieu.

chromatine. *n.* Partie colorable du contenu du noyau. Présente la forme de filaments et de grains. Est constituée surtout d'acide désoxyribonucléique et de protéines.

chromatographie. *n.* Technique de séparation physique de substances organiques en mélange. On utilise l'aptitude différente de ces substances à migrer dans des colonnes de poudre de cellulose, d'alumine, etc., sur des feuilles de papier ou dans des couches de gel de silice, lorsqu'elles sont entraînées par divers solvants. On peut aussi *chromatographier* des mélanges gazeux, dont les constituants sont diversement entraînés par un gaz inerte à travers une colonne adsorbante.

chromomère. *n.* Renflement présent sur chaque chromonéma d'un chromosome. Les chromomères, correspondants des deux chromonéma sont normalement situés l'un près de l'autre au même niveau.

chromoprotéine. *n.* Hétéroprotéine colorée. *Ex.* L'hémoglobine.

chromosomes. *n.* Éléments en général allongés, formés par le noyau de la cellule lors de sa division. Sont constitués d'ADN et constituent le support de l'hérédité. Leur nombre et leur forme sont caractéristiques d'une espèce donnée.

chromosome polytène. Chromosome géant présent chez certains animaux (glandes salivaires de certains Diptères).

cicatricule. *n.* Syn. de *disque germinatif.*

cicatrisation. *n.* Phénomène de régénération tissulaire au niveau d'une blessure.

cinétique. *n.* La cinétique d'un phénomène est l'évolution de son intensité dans le temps.

cinétosome. *n.* Voir *blépharoplaste.*

cladode. *n.* Rameau aplati en forme de feuille. Porte lui-même de petites feuilles qui peuvent abriter des fleurs ou des inflorescences, ce qui révèle sa vraie nature : celle de tige.

classe. *n.* Ensemble d'ordres apparentés.

climacique. *adj.* Qualifie un *écosystème* en équilibre.

climax. *n.* État stable de la végétation lorsque, dans une zone donnée, le climat ne se modifie pas et que les êtres vivants, l'homme en particulier, n'interviennent pas. Par exemple, dans beaucoup de régions, une forêt de composition variable tend à s'installer si on abandonne la végétation à elle-même : c'est le climax du lieu.

climogramme. *n.* Traduction graphique du climat d'une station : chacun des douze mois y est représenté par un point dont les coordonnées sont la moyenne mensuelle de la température et de la pluviosité. La forme de la figure, obtenue en joignant les douze points représentatifs des mois de l'année, diffère selon que la station subit une influence continentale ou océanique p. ex.

cline ou **écocline.** *n.* Variation progressive et régulière d'une espèce suivant un gradient géographique.

clone. *n.* Ensemble d'individus ou de cellules provenant d'un même individu ou d'une même cellule. *Ex.* Descendance d'une même Bactérie, ou d'une daphnie par parthénogenèse.

cluster. *n.* (angl. = *amas*). En particulier, portion d'ADN où certaines bases sont très abondantes et comme « entassées ».

cnidaires. *n.* Embranchement animal constitué par des Métazoaires diblastiques dont l'ectoderme contient des cellules urticantes à filament dévaginable : les cnidoblastes ou nématoblastes, qui caractérisent le groupe.

coaptation. *n.* Convenance entre deux structures distinctes permettant leur interaction physiologique ou biochimique.

cocarcinogène. *adj.* Qui renforce l'action d'un agent carcinogène.

cochlée ou **limaçon.** *n.* Formation en spirale de l'oreille interne des Mammifères constituée par le *canal cochléaire* et son enveloppe osseuse.

code génétique. Ensemble des informations qui, portées par l'acide désoxyribonucléique, s'expriment par des associations de nucléotides.

codon. *n.* Ensemble des trois bases (puriques et pyrimidiques) nécessaires pour définir un acide aminé lors des synthèses protéiques.

coefficient de céphalisation. Critère fondé sur le rapport entre le poids du cerveau et celui du corps.

coefficient de coïncidence. Rapport de la fréquence observée de *crossing-over* simultanés à la fréquence prévue par le calcul dans l'hypothèse où l'*interférence* serait nulle.

coefficient de croissance. Taux de croissance d'une population résultant de la différence entre les taux de natalité et de mortalité.

coefficient de Jaccard. Relation qui évalue la ressemblance floristique de deux associations végétales d'après les espèces qu'elles ont en commun.

cœlomate. *adj.* **(organisme).** Métazoaire triploblastique pourvu d'un *cœlome. N.* Les Annélides, les Mollusques, les Arthropodes, les Échinodermes, les Procordés et les Vertébrés sont des cœlomates.

cœlome. *n.* Cavité close provenant du creusement du mésoderme et contenant un liquide. Chez les Annélides, chaque segment comporte deux sacs cœlomiques distincts, alors que, dans d'autres groupes, il n'existe qu'une seule cavité cœlomique, ou cavité générale.

cœnocyte. *n.* Filament contenant de nombreux noyaux, mais non divisé en cellules.

coenzyme. *n.* Substance nécessaire au fonctionnement d'une enzyme : elle fournit le corps que l'enzyme doit fixer à la molécule qu'elle attaque, ou bien reçoit celui que l'enzyme a arraché à ce substrat; l'enzyme effectue alors un transfert entre son substrat et sa coenzyme.

cœur. *n.* Organe contractile et pulsatile des animaux qui permet la diffusion du sang dans tout le corps. Originellement formé, chez les Vertébrés, par le *sinus veineux*, une ou deux *oreillettes*, un ou deux *ventricules* et le *bulbe artériel* antérieur.

colchicine. *n.* Alcaloïde du colchique. Empêche l'organisation du fuseau lors de la mitose, quoique la protéine fusoriale se forme encore. Utilisée en médecine dans le traitement de la goutte.

colite. *n.* Infection du *colon* due à divers micro-organismes tels que les Bactéries.

collagénase. *n.* Enzyme dégradant le *collagène*. Les micro-organismes en sécrètent plusieurs. Rompent la liaison peptidique entre le —NH_2 de la glycine et le —COOH de la proline ou de l'hydroxyproline.

collagène. *n.* Substance fondamentale du tissu conjonctif qui se transforme en gélatine sous l'effet de la chaleur.

collatéral. *adj.* **(faisceau).** Faisceau libéro-ligneux formé de bois à l'intérieur et de liber à l'extérieur seulement. C'est le type usuel.

collenchyme. *n.* Tissu de soutien, à parois cellulaires épaissies par le dépôt de couches de cellulose alternant avec des composés pectiques. Très fréquent dans les tiges et les feuilles.

collet. *n.* Chez les plantes supérieures, région souvent renflée, parfois indistincte, qui limite la radicule de la plantule par rapport à l'axe hypocotylé.

collinéen. *adj.* **(étage).** Souvent, étage de végétation englobant les plaines et les collines, donc situé en dessous de l'étage montagnard, jusque vers 800 ou 1 000 m. Désigne aussi un étage situé au-dessus des plaines, qui constituent alors l'étage planitaire, et en dessous de l'étage montagnard.

colon. *n.* Partie médiane du gros intestin comprise entre le cæcum et le rectum.

colorant semi-vital ou **postvital.** Colorant qui est absorbé par la cellule encore vivante; il en colore certaines parties, mais entraîne plus ou moins rapidement sa mort.

colorant vital. Colorant que la cellule peut absorber sans être tuée, si la concentration n'en est pas excessive.

coloration topographique. Coloration qui met simplement en évidence les divers éléments tissulaires d'un organe, sans permettre l'analyse fine de sa cytologie.

col utérin. Bord externe de l'*utérus*, ouvrant dans le vagin.

commensalisme. *n.* Relation entre organismes profitant de la même nourriture mais sans se comporter en parasites. *Ex.* Les hyènes mangent les restes laissés par les lions et les tigres.

communauté. *n.* Ensemble des espèces animales, végétales et micro-organiques qui vivent ensemble.

compagne. *adj.* Qualifie une espèce végétale occasionnellement associée à une formation végétale donnée.

comparatisme. *n.* Théorie éthologique prônée par Schneirla selon laquelle le temps s'exprime au niveau individuel en transformant les gestes par l'apprentissage, et au niveau des descendants par les variations de comportements corrélées aux grandes variations physiologiques.

compétence. *n.* État physiologique d'un tissu lui permettant de réagir spécifiquement à un stimulus donné.

complément. *n.* Ensemble de neuf protéines du sérum sanguin nécessaires à l'interaction de nombreux antigènes et des anticorps correspondants, après laquelle les premiers sont finalement détruits.

complexes synaptinémaux. Structures différenciées du chromosome qui matérialisent la *synapsis* lors de la méiose; on les distingue parfaitement au microscope électronique.

composée. *adj.* **(feuille).** Constituée de plusieurs folioles, ayant elles-mêmes la forme de petites feuilles avec leur pétiolule, et insérées soit sur un rachis qui prolonge le pétiole (disposition pennée), soit toutes au même point, au sommet de ce pétiole (disposition palmée). L'ensemble de la feuille composée occupe dans la phyllotaxie la place d'une seule feuille, et sur la même plante on observe très souvent des intermédiaires entre feuilles simples et composées. Chaque foliole peut elle-même être composée de foliolules qui peuvent être composées à leur tour.

comportement instinctif. Manière d'être soumise à une régularité mécanique qui ne semble pas pouvoir être modifiée.

comportement intelligent. Manière d'être qui semble pouvoir être modifiée et corrigée en fonction de ses résultats sous l'effet d'une réflexion.

comptage par plage. Méthode d'évaluation des unités pathogènes virales d'une culture cellulaire.

conflit. n. Terme utilisé par les éthologistes pour désigner chez l'animal une situation dans laquelle il est soumis à deux stimuli opposés.

concanavaline A. L'une des phytohémagglutinines.

concentrique ou **centrique.** *adj.* **(faisceau).** Qui comporte du liber tout autour d'un massif de bois.

concrescent. *adj.* Soudé congénitalement. Deux structures concrescentes sont nées fusionnées à partir d'un primordium unique, et ont crû ensemble, sans jamais se séparer. Leur morphologie et leur anatomie manifestent, malgré tout, leur dualité.

condensateur ou **condenseur.** *n.* Dispositif optique destiné à concentrer les rayons lumineux à un niveau donné dans un instrument d'optique, en particulier au niveau de la préparation examinée au microscope.

condupliqué. *adj.* Plié longitudinalement suivant une ligne médiane et vers l'intérieur (du côté adaxial). *Ex.* Feuille condupliquée.

cône. *n.* Toute formation fertile massive et allongée. *Ex.* Cône de houblon. Cône mâle des Conifères : fleur mâle à étamines aplaties. Cône femelle de ces plantes : inflorescence dans laquelle les bractées abritent un rameau axillaire virtuel produisant une, deux ou plusieurs feuilles fertiles modifiées, soudées les unes aux autres, et portant les ovules dorsalement. L'ensemble constitue l'écaille séminale, souvent soudée à la bractée correspondante, au moins en partie.

conjugaison. *n.* 1° Union de deux cellules fonctionnant comme gamètes. 2° Chez les Bactéries, union temporaire de deux cellules, au cours de laquelle l'une d'elles injecte à l'autre un segment de molécule d'acide désoxyribonucléique de son chromosome.

conné. *adj.* Soudé par ses bords, spécialement à la base. *Ex.* Feuilles connées, souvent dites à tort perfoliées.

consommateurs. *n.* Animaux qui tirent leur énergie des substances organiques déjà formées par d'autres êtres vivants. On les dit primaires s'ils se nourrissent directement aux dépens des producteurs, secondaires s'ils se nourrissent des consommateurs primaires.

constriction primaire. Voir *centromère*.

continu. *adj.* **(capillaire).** Qualifie un capillaire dont le revêtement endothélial est ininterrompu. *Ex.* Capillaires musculaires, pulmonaires...

continuum. *n.* Terme utilisé par certains phytosociologues pour désigner une variation continue de la végétation.

contraction musculaire. Réponse du muscle à une excitation efficace entraînant un raccourcissement dû à un glissement des filaments d'actine des myofibrilles sur les filaments de myosine.

contrainte totale d'humidité du sol ou **potentiel capillaire** ou **potentiel hydrique.** Énergie de rétention de l'eau par le sol s'exprimant, selon les cas, en unités de travail, d'énergie ou de pression.

convergent. *n.* Élément anatomique de l'appareil conducteur des plantes vasculaires formé d'un faisceau ligneux centripète et/ou de ses éléments intermédiaires puis superposés, ainsi que des portions libériennes correspondantes qui viennent former le ou les faisceaux superposés en fin d'évolution vasculaire. Repérables dans les plantules, les convergents n'apparaissent plus dans l'épicotyle, où la différenciation commence au stade superposé.

conversion génique. Mis en évidence chez les Champignons Ascomycètes, processus de recombinaison génétique d'où on obtient trois produits parentaux et un seul recombiné, à la différence de la *méiose* avec *crossing-over* qui donne deux produits parentaux et deux recombinés.

coprah. *n.* Substance blanche tapissant les parois de la cavité de la noix de coco. C'est la portion cellularisée de l'albumen; le reste est liquide, à l'état de *lait de coco,* dans la cavité limitée par le coprah.

coprolithe. *n.* Concrétion riche en phosphates formée à partir d'excréments fossilisés; on en connaît notamment dans le Lias, produits par les Reptiles.

coprophage. *adj.* Qui se nourrit d'excréments.

copy-choice. Formulée pour expliquer la conversion génique, hypothèse actuellement écartée car elle contredit certains faits tels que la réplication de l'ADN qui s'effectue avant la formation du zygote.

coraco-brachial. *n.* Muscle ventral de l'épaule qui relie le coracoïde et la face interne de l'humérus.

coralliforme. *adj.* Qualifie une plante désertique ayant l'aspect de corail.

cordacentre. *n.* Élément du corps vertébral qui, chez les Sélaciens, s'ajoute à l'*autocentre* et occupe la gaine fibreuse interne.

corde. *n.* Voir *chorde.*

cormus. *n.* Ensemble de la racine, de la tige et des phyllomes d'une plante.

corps de Barr. Masse de chromatine attachée à la membrane nucléaire des cellules humaines femelles. Correspond à un couple de chromosomes X. Sa présence ou son absence dans des cellules banales, notamment celles du liquide amniotique, permet de déterminer le sexe de l'embryon.

corps cellulaire du neurone ou **soma.** Territoire cytoplasmique du neurone présentant des formes variables et renfermant le noyau ainsi que des inclusions spécifiques telles que les *neurofibrilles* et les *corps de Nissl.*

corps genouillé externe. Noyau du *thalamus* servant de relais des voies visuelles chez les Vertébrés.

corps genouillé interne. Noyau situé sur les côtés des tubercules quadrijumeaux postérieurs et relié au *thalamus*; sert de relais auditif chez les Mammifères.

corps gras. Substance de réserve des Insectes et de leurs larves, constituée essentiellement de protéines et de lipides.

corps d'inclusion. Formation nucléaire importante (30 μ), arrondie et acidophile, observée dans le noyau et le cytoplasme des cellules envahies par des virus.

corps multivésiculaires. Poches contenant de nombreuses vésicules en rapport avec la pellicule ectoplasmique des cellules. Peuvent correspondre à un stade d'absorption de ces vésicules, ou au contraire de leur extrusion.

corps de Nissl. Granulations intracytoplasmiques du neurone correspondant à des éléments du réticulum endoplasmique et à des particules de ribonucléoprotéines.

corps opto-striés. Chez les Mammifères, noyaux résultant de la fusion des *couches optiques* diencéphaliques avec les *corps striés* télencéphaliques.

corpuscule basal. Voir *blépharoplaste.*

corpuscule élémentaire. Petite formation nucléaire ou cytoplasmique observée dans des cellules envahies par des virus.

corpuscules de Krause. Corpuscules encapsulés, sensibles au froid, particulièrement concentrés dans la paume des mains des Mammifères.

corpuscule de Malpighi. Dans le rein, ensemble formé par le *glomérule de Malpighi* et la *capsule de Bowmann.*

corpuscules de Meissner. Corpuscules tactiles encapsulés des Mammifères et localisés surtout aux extrémités des doigts.

corpuscules de Pacini. Corpuscules tactiles profonds, encapsulés et localisés dans la paume des mains et la plante des pieds des Mammifères.

corrélation. *n.* 1° Relation de cause à effet entre l'activité et le développement de deux ou plusieurs parties d'un organisme. 2° Présence d'une association de plusieurs caractères dans des êtres vivants sans qu'il y ait de rapports de cause à effet entre eux.

cortex. *n.* Enveloppe externe d'un organe à structure plus ou moins concentrique.

cortical. *adj.* Qui est localisé vers l'extérieur d'un organe ou d'un organisme.

corticole ou **corticicole.** *adj.* Qui habite la surface et les interstices des écorces.

corymbe. *n.* Grappe dont les pédoncules floraux sont de plus en plus courts vers le haut, de telle manière que les fleurs sont disposées suivant un plan. *Par ext.* Toute inflorescence hormis l'ombelle, notamment la grappe composée, ou grappe de cymes, dont les fleurs sont disposées suivant un plan (on dit aussi dans ce cas *fausse-ombelle*).

cotylédon. *n.* 1° Chez les végétaux, première ou une des premières feuilles de la plante. De forme spéciale, les cotylédons sont souvent gorgés de réserves ou servent de suçoirs pour l'utilisation des réserves de l'albumen ou du périsperme. Dans les deux cas, ils permettent à la plantule de vivre pendant qu'elle s'enracine. Ils deviennent éventuellement, par la suite, chlorophylliens et fonctionnent comme des feuilles ordinaires. Il y a deux cotylédons chez les Dicotylédones, un chez les Monocotylédones; les Gymnospermes en ont deux ou un assez grand nombre. 2° Plage du *placenta* des Mammifères Ruminants où sont localisées les villosités choriales.

couche de Malpighi. Couche cellulaire basale de l'épiderme, génératrice des cellules de la peau.

couches optiques. Syn. de *thalamus.*

courant de blessure. Courant électrique hypothétique qui, provoqué par la section d'un tissu, induirait la formation d'un blastème de régénération.

courbe aire-espèces. Utilisé par les phytosociologues, graphe qui traduit les relations entre les espèces et les territoires qu'elles occupent. Cette courbe permet de délimiter les *communautés.*

courbures rachidiennes. Chez les Hominidés, flexion de la colonne vertébrale, liée à la station bipède.

cow-pox. *n.* Syn. de *vaccine.*

crâne. *n.* Région antérieure du squelette des Vertébrés constituée par une partie protectrice de l'encéphale *(neurocrâne)* et une partie en liaison avec la région antérieure du tube digestif *(splanchnocrâne).*

crassulescent. *adj.* Qui est très riche en eau et adapté à sa conservation (lutte contre la transpiration), comme les Cactées et autres plantes grasses. Syn. de *succulent.*

créationisme. *n.* Théorie selon laquelle les espèces animales et végétales sont apparues d'emblée sous leur forme actuelle. Admise durant plusieurs siècles, cette hypothèse est aujourd'hui abandonnée par les scientifiques et ne présente plus qu'un intérêt historique.

crêtes neurales. Cordons cellulaires externes des bourrelets neuraux qui se segmenteront pour donner les ganglions crâniens, spinaux, sympathiques, etc.

crible positif. Chez une Levure, caractère des facteurs génétiques responsables d'une résistance à un *antibiotique.*

crible de sélection. Méthode de génétique qui consiste à sélectionner des souches mutantes, incapables d'effectuer, par exemple, une fonction cellulaire donnée.

crinophagie. *n.* Digestion par une cellule sécrétrice de son propre produit de sécrétion, pour en modérer la libération.

cristallin. *n.* Partie du globe oculaire constituée par une lentille épithéliale transparente qui focalise les rayons lumineux sur la rétine.

cristalloïde. *n.* 1° Substance donnant des solutions vraies, par opposition à *colloïde.* 2° Partie du grain d'aleurone des cellules végétales à contours anguleux, par opposition aux *globoïdes.* Ces derniers cristalloïdes sont protéiques, comme d'autres inclusions similaires des cellules animales et végétales également nommées cristalloïdes.

croisement. *n.* Produit de deux individus de variétés ou de races différentes *(métis)* ou d'espèces différentes *(hybrides).*

croisement intergénique. Croisement entre mutants au niveau de gènes différents.

croisement intragénique ou **croisement interallélique.** Croisement entre mutants au niveau du même gène.

croissance. *n.* Augmentation de volume de l'individu ou d'une de ses parties par multiplication des cellules ou simple grandissement de celles-ci.

croissance appositionnelle. Processus de croissance du cartilage au cours duquel les cellules conjonctives de la couche interne du périchondre se différencient en cellules cartilagineuses.

croissant dépigmenté. Syn. de *croissant gris.*

croissant de Gianuzzi. Amas de cellules séreuses dans les glandes sublinguales de l'homme.

croissant gris ou **croissant dépigmenté.** Zone en forme de croissant, identifiable par sa couleur intermédiaire entre celles des deux pôles de l'œuf des Amphibiens.

cro-magnoïde. *adj.* Qui se rapporte aux caractères morphologiques ou psychiques de l'Homme de Cro-Magnon.

crossing-over. *n.* Échange de gènes entre les chromatides de chromosomes homologues.

crown-gall. *n.* Tumeur végétale provoquée par une Bactérie : *Agrobacterium tumefaciens.*

crustecdysone. *n.* Hormone de mue des Crustacés produite par l'organe Y.

cryptique. *adj.* Qualifie un objet dont la coloration se confond avec celle du substrat qui le porte.

cryptorchidie. *n.* État d'un Mammifère chez lequel les testicules, n'ayant pas effectué leur descente normale dans les sacs scrotaux, restent intra-abdominaux. Cette anomalie s'accompagne de stérilité, la température corporelle étant trop élevée pour permettre la *spermatogenèse.*

culot. *n.* Masse accumulée au fond du tube après une centrifugation, correspondant à la réunion d'éléments relativement volumineux et denses précédemment en suspension.

curare. *n.* Substance empêchant la transmission de l'influx nerveux au muscle, déterminant donc une paralysie flasque. Plusieurs curares sont végétaux, d'autres de synthèse (curarisants).

curie. *n.* Quantité de radiations émises pendant une seconde par un gramme de radium.

cuticule. *n.* 1° Couche résistante et imperméable, dirigée vers l'extérieur, couvrant la paroi squelettique des cellules de l'épiderme des feuilles et des tiges. Contient notamment des cires. *Par ext.* Chez les Champignons, croûte dure de divers organes formée de plectenchyme. 2° Chez les Arthropodes (Insectes, Crustacés, etc.), production des cellules de l'épiderme, constituée surtout de chitine et formant une carapace éventuellement incrustée de calcaire.

cybernétique. *n.* Science qui étudie les mécanismes de communication et de contrôle chez les machines et les êtres vivants.

cycle alpin. Ensemble des phases de sédimentation (formation de dépôts marins ou continentaux), de plissement et d'érosion qui ont contribué à la formation de la chaîne des Alpes.

cycle biogéochimique. Ensemble des transformations biologiques, géologiques ou chimiques que

subissent les éléments constitutifs de la matière vivante tels que le carbone, l'azote, le phosphore, le soufre, le calcium, etc.

cycle sédimentaire. Désigne une série de formations marines encadrée par deux régressions : cette série débute par des dépôts littoraux correspondant à l'arrivée de la mer (transgression) ; elle se continue par des formations plus profondes indiquant le maximum d'extension marine, et se termine par des dépôts littoraux inaugurant une nouvelle régression.

cyclose. *n.* Mouvement spontané du cytoplasme des cellules se manifestant par des courants qui mettent en cause des lames de cytoplasme, en entraînant les organites.

cyclosérine. *n.* Antibiotique synthétisé par un Champignon du genre *Streptomyces* qui agit comme la *pénicilline* en bloquant l'édification de la paroi des Bactéries en prolifération.

cyste. *n.* Ampoule sphérique du *testicule* des Vertébrés anamniotes dans laquelle s'effectue la maturation des gamètes mâles.

cystéine. *n.* Acide aminé à radical soufré, de formule HS—CH$_2$—CH(NH$_2$)—COOH, abondant, par exemple, dans le jaune d'œuf. Sa présence dans les protéines permet les liaisons disulfures entre deux molécules de cystéine : R—S—S—R'.

cytoblastème. *n.* Milieu organique à partir duquel on a cru d'abord que les cellules pouvaient se former par simple condensation.

cytochalasine β. Substance produite par le Champignon *Helminthosporium demativideum,* parasite de la flouve. Inhibiteur de nombreux processus de mouvements cellulaires (phagocytose, pinocytose, etc.) et de morphogenèse.

cytochimie. *n.* Étude de la constitution chimique des éléments des cellules par examen microscopique de réactions de coloration, précipitation, etc. Se pratique au microscope optique ou électronique.

cytochrome. *n.* Pigment respiratoire constitué d'une protéine et d'une substance azotée renfermant du fer. Sert au transport d'électrons lors de la respiration cellulaire, permettant le stockage sous forme d'acide adénosine-triphosphorique (ATP) de l'énergie issue de la dégradation des aliments.

cytolysome. *n.* Vacuole formée par une cellule en englobant une partie de ses organites et de son hyaloplasme. Grâce à l'apport d'enzymes des lysosomes primaires, ces éléments seront digérés.

cytomégalique. *adj.* Qualifie des virus qui provoquent la formation de grosses masses cytoplasmiques et nucléaires, ce qui permet de les identifier.

cytopathique. *adj.* Qui se rapporte aux maladies cellulaires faisant suite à la multiplication d'un virus.

cytoplasme. *n.* Ensemble des éléments d'une cellule, à l'exclusion du noyau, enfermés dans la membrane cytoplasmique. Comprend le hyaloplasme et les divers organites qui s'y trouvent (notamment l'appareil de Golgi, les mitochondries et le réticulum endoplasmique).

cytosine. *n.* Base pyrimidique constitutive des acides nucléiques. Son association avec un sucre (ribose ou désoxyribose) forme un nucléoside. Elle s'apparie toujours avec la guanine.

D

daunomycine. *n.* Antibiotique produit par des *Streptomyces (S. caeruleorubidus)* et utilisé comme antimitotique dans le traitement des leucémies aiguës. Syn. *Daunorubicine* ou *rubidomycine.*

D-ARN. Acide ribonucléique synthétisé par un gène pour induire la mise en fonction d'autres gènes. Son existence demeure hypothétique.

darwinisme. *n.* Théorie évolutioniste du biologiste anglais Ch. Darwin, selon laquelle les changements du milieu induisent des variations chez les individus. Ceux-ci doivent s'adapter ou périr. C'est la « sélection naturelle », qui élimine les plus faibles au profit des plus résistants.

D.B.O. Syn. de *demande biologique en oxygène.*

débitage. *n.* Technique grossière de fabrication d'un objet manufacturé utilisée par certaines civilisations préhistoriques ; elle sert actuellement de repère dans la classification de ces dernières.

débourrement. *n.* Commencement du développement d'un bourgeon en rameau ou pousse (végétative ou inflorescentielle).

décarboxylase. *n.* Enzyme arrachant du CO_2 à son substrat.

déclencheur. *n.* Selon la théorie objectiviste, stimulation de l'environnement qui induit les réponses spécifiques des actes moteurs.

décortication annulaire. Ablation des tissus d'une tige ligneuse extérieurs au bois suivant un anneau autour de cette tige : la descente de la sève élaborée est interrompue et un bourrelet se forme à l'incision supérieure.

dédifférenciation. *n.* Réacquisition par une cellule ou une autre structure différenciée et spécialisée de caractères juvéniles, indifférenciés, ce qui lui permettra souvent de subir une différenciation nouvelle, différente de la première.

défoliateur. *adj.* Qui entraîne la destruction des feuilles. *N.* Un défoliateur (*ex.* chenilles processionnaires).

déhiscent. *adj.* Qui s'ouvre spontanément suivant des lignes précises de moindre résistance. *Ex.* Fruit sec déhiscent.

deltoïde. *n.* Muscle de l'épaule reliant la ceinture pectorale à l'humérus.

demande biologique en oxygène ou **D.B.O.** Quantité d'oxygène, consommée par les Bactéries aérobies, dont la mesure permet de connaître l'activité biologique d'une masse d'eau (à raison d'un volume d'un litre maintenu à 5 °C pendant 5 jours).

démo-écologie. Syn. d'écologie des populations. Partie de l'écologie qui étudie la dynamique des populations sous l'influence des facteurs abiotiques et biotiques.

dendrochronologie. *n.* Méthode de datation basée sur l'étude des anneaux de croissance des arbres.

dengue. *n.* Maladie virale de l'homme, localisée en Inde et en Afrique équatoriale, se manifestant principalement par de la fièvre.

dénitrification. *n.* Ensemble des réactions biochimiques produites par certaines Bactéries qui libèrent de l'azote gazeux à partir d'ions NO_3^-.

dent. *n.* Organe dur, fortement minéralisé, implanté le plus souvent dans les mâchoires des animaux et servant à la préhension et à la mastication des aliments. Chaque dent comprend une racine basale surmontée d'une couronne visible.

dentine. *n.* Substance fibrillaire calcifiée qui constitue la majeure partie de la dent des Vertébrés. Elle est sécrétée par des cellules spéciales : les *odontoblastes.* Syn. d'*ivoire.*

denture. *n.* Ensemble des dents portées par une mâchoire. Leur nombre et leur répartition caractérisent chaque espèce de Mammifère.

dépolarisation. *n.* Disparition ou diminution de la différence de potentiel électrique entre deux points, en particulier entre l'intérieur d'une cellule et la surface de sa membrane cytoplasmique.

dérépression. *n.* Cessation, sous l'effet d'un stimulus précis, de l'inhibition qui se manifestait au préalable vis-à-vis d'un gène, qui ne pouvait donc s'exprimer (il était *réprimé*). Déréprimé, il pourra déterminer la synthèse de la protéine dont il détient l'information.

dérive des continents. Théorie, postulée par Wegener (1912), selon laquelle les continents ne sont pas fixes mais se sont déplacés au cours des temps, et continuent de le faire.

dérive génétique. Ensemble des modifications géniques, dues au hasard, qui se manifestent à chaque génération dans les petites populations.

dermatoglyphes. *n.* Microvillosités que forme la surface de l'épiderme. *Ex.* Les empreintes digitales.

désert. *n.* Zone aride à végétation xéromorphe, éparse, bien adaptée à la sécheresse et présentant des caractères morphologiques et physiologiques très particuliers.

déshydrogénase. *n.* Enzyme arrachant de l'hydrogène à son substrat.

desmosome. *n.* Ultrastructure différenciée de la membrane plasmique augmentant l'adhésivité entre deux cellules voisines.

désoxycholate. *n.* Sel de l'acide désoxycholique, à noyau stéroïdique ; présent dans la bile. Utilisé comme agent émulsifiant et, par conséquent, désorganisateur des structures membranaires partiellement lipidiques.

désoxyribose. *n.* Sucre en C_5 dont le carbone 2, voisin du groupe réducteur, porte 2 atomes d'H et pas de fonction alcool, ce qui lui confère des propriétés aldéhydiques nettes (recoloration du réactif de Schiff).

désoxyvirus. *n.* Virus dont l'acide nucléique est l'ADN.

desquamation. *n.* Chez les Vertébrés, renouvellement constant de l'épiderme, qui est éliminé sous forme de particules plus ou moins importantes.

desquamer. *v.* Pour « se desquamer ». Se résoudre en petites écailles, ou *squames,* comme la partie supérieure morte et kératinisée de l'épiderme pluristratifié.

détritique. *adj.* Se dit d'un matériel provenant d'une roche préexistante, soumise à l'érosion. Le matériel a été arraché sous forme de particules qui peuvent être de taille très variée.

détritivore. *adj.* Qualifie les animaux qui se nourrissent de matières organiques en décomposition. *Ex.* Hyènes, vautours...

deutérotoque. *adj.* Qualifie la parthénogenèse produisant des femelles et des mâles. *Ex.* Chez les pucerons et les daphnies.

dextrane. *n.* Polyholoside dont la molécule est formée de molécules de glucose α liées par leurs carbones 1 et 6, tandis que, dans l'amidon par exemple, la liaison est entre les carbones 1 et 4. Formé par des Bactéries, *Leuconostoc mesenteroides* surtout.

dextrine. *n.* Substance résultant de l'hydrolyse partielle de l'amidon, dont les chaînes moléculaires sont fragmentées. Les molécules plus courtes formées alors se colorent en rougeâtre par l'iode, à la différence de l'amidon, qui se colore en bleu. La suite de l'hydrolyse donne des dextrines à molécules plus petites, qui ne se colorent presque plus.

dextrogyre. *adj.* Qui dévie vers la droite le plan de polarisation de la lumière polarisée.

diachronies. *n.* Faits ou situations qui se déroulent durant la même période de temps.

diacinèse. *n.* Dernière phase de la prophase méiotique au cours de laquelle disparaît la membrane nucléaire.

diacytique. *adj.* **(stomate).** Accompagné de part et d'autre de deux cellules annexes dont les parois en contact sont perpendiculaires aux parois adjacentes des cellules stomatiques, qui délimitent l'ostiole.

diagenèse. *n.* Ensemble des processus physiques, biochimiques et physico-chimiques qui transforment un sédiment en une roche sédimentaire.

diagéotropisme. *n.* Mouvement de croissance d'un organe végétal effectué de manière à se placer parallèlement au sol, soit au-dessus, soit dans son sein. Il se manifeste alors une sorte d'équilibre entre les géotropismes positif et négatif.

diagramme. *n.* Figure schématique d'une coupe de fleur ou de bourgeon représentant les positions relatives des constituants. *Par ext.*, schéma de la ramification d'une pousse (diagramme de ramification).

dialyse. *n.* 1° Passage de molécules à travers les pores très fins d'un filtre convenable (membrane de cellophane) qui retient au contraire les macromolécules colloïdales et permet leur purification. 2° En tératologie végétale, séparation anormale de parties normalement soudées, comme les pétales d'une corolle gamopétale.

diapause. *n.* Arrêt du développement de l'œuf, de l'embryon, de la larve ou de l'imago chez les Insectes. Provoqué par des facteurs externes (photopériode, température), cet arrêt est sous la dépendance des hormones du cerveau.

diapédèse. *n.* Traversée de la paroi des capillaires par certains globules blancs.

diaphragme. *n.* Cloison musculaire séparant, chez les Mammifères, le thorax de l'abdomen et jouant un grand rôle dens la respiration.

diaphyse. *n.* Partie médiane étroite d'un os long.

diarthrose. *n.* Mode d'articulation de deux os qui leur laisse une certaine mobilité.

diaspore. *n.* Syn. de *graine*.

diastole. *n.* Phase de décontraction des oreillettes et des ventricules du cœur des Vertébrés.

dicaryon. *n.* Couple de noyaux dans certaines cellules de Champignons.

dichasium. *n.* Ensemble ramifié en sympode dans lequel deux bourgeons axillaires végétatifs floraux se sont développés en dessous de l'apex du rameau père, qui a lui-même formé une fleur ou s'est arrêté de croître. Si l'ensemble demeure à l'état végétatif, on parle aussi de *dichopode*, et la ramification est dite *pseudo-dichotome*.

diencéphale. *n.* Vésicule embryonnaire moyenne constitutive du cerveau des Vertébrés au niveau de laquelle se différencie l'hypothalamus, qui est en relation avec l'hypophyse. Ce complexe hypothalamo-hypophysaire commande ainsi la régulation de nombreuses fonctions : l'homéothermie, la reproduction, etc.

différenciation. *n.* Processus par lequel à partir d'éléments identiques apparaissent des structures spécialisées diverses, comme les organes de l'embryon à partir des blastomères issus de la segmentation de l'œuf, ou les feuilles et les bourgeons à partir des cellules de la pointe de la tige.

différenciation cellulaire. Phénomène histologique par lequel, au cours de l'*ontogenèse*, les cellules embryonnaires acquièrent leurs particularités propres. Ces cellules différenciées constitueront des tissus.

diffusion libre. Dispersion spontanée des molécules, ions ou micelles, pour occuper tout le volume de fluide qui leur est offert.

digestion extra-orale. Mode de digestion propre à certains organismes primitifs; l'animal commence par évacuer hors du tube digestif le suc, puis ingère dans un deuxième temps les produits de la digestion.

digitonine. *n.* Saponoside (hétéroside dont l'aglycone est une saponine) présent dans la digitale. Sert à la précipitation des stérols après saponification des graisses.

diglycéride. *n.* Lipide résultant de l'estérification de 2 des fonctions alcool du glycérol par des acides gras.

dihybridisme. *n.* Croisement entre deux parents que différencient deux caractères : cobaye noir à poils courts et cobaye blanc à poils longs.

dimorphisme. *n.* 1° Possibilité, pour un organe ou un organisme, de se présenter sous deux formes différentes. 2° *Dimorphisme sexuel :* cas dans lequel, indépendamment des caractères sexuels primaires, les individus mâles et les femelles peuvent être d'aspect bien différent.

dioïque. *adj.* **(plante).** Qui possède des pieds mâles et femelles séparés.

dipeptidase. *n.* Enzyme hydrolysant les dipeptides en deux acides aminés.

dipeptide. *n.* Substance formée de deux acides aminés liés par une liaison peptidique.

diplobiontique. *adj.* Qualifie le cycle d'un organisme dont la phase *diploïde* est prépondérante par rapport à la phase *haploïde* réduite. *Ex.* Cycle des Ciliés.

diploïde. *adj.* Qui possède un nombre de chromosomes double de celui des noyaux des gamètes. C'est le cas de l'œuf notamment.

diplotène. *n.* Stade de la prophase méiotique qui suit la phase pachytène et au cours de laquelle se forment les *chiasmas*.

discoblastique. *adj.* Syn. de *télolécithique*.

disque germinatif ou **cicatricule.** Zone germinative disposée à la partie supérieure du jaune de l'œuf des Oiseaux.

dissociation ionique. Clivage d'une partie au moins des molécules d'un corps en solution en ions de composition précise chargés les uns positivement, les autres négativement. Le corps est alors électrolyte : il laisse passer le courant électrique et les ions s'accumulent aux deux pôles, où ils se déchargent et réagissent éventuellement avec l'eau du solvant, l'air du milieu externe ou le métal des électrodes.

distique. *adj.* Disposé sur deux rangs. Les feuilles distiques sont également alternes (alternes-distiques), sauf dans certains cas rarissimes où elles sont opposées (mais non décussées).

diversivore. *adj.* Syn. d'*omnivore.*

DNA. Voir *acide désoxyribonucléique.*

dolichocéphale. *adj.* Qualifie un crâne allongé suivant son axe antéropostérieur (*indice céphalique* supérieur à 80).

dominant. *adj.* Qualifie le gène qui, dans un couple d'allèles, s'exprime chez les individus hétérozygotes.

donneur universel. Individu dont les globules rouges ne possèdent pas d'agglutinogène. Aucun sang ne pouvant en agglutiner les globules rouges, il peut être fourni au possesseur des autres groupes sanguins. Par contre il ne peut recevoir de sang que de son propre groupe.

dopamine. *n. Dihydroxyphénylalanine*. Précurseur de l'adrénaline. Utilisé dans le traitement de la maladie de Parkinson.

dormance. *n.* Arrêt de croissance et de développement d'un embryon ou d'un organe. Des atteintes naturelles ou expérimentales, mécaniques, physiques ou chimiques, permettent de « lever » cette dormance et le développement reprendra.

dorsifixe. *adj.* 1° Inséré sur le filet par le milieu de sa face dorsale (côté abaxial). 2° Dont l'anthère est ainsi insérée. *Ex.* Anthère ou étamine dorsifixes.

dose maximale admissible ou **D.M.A.** Quantité maximale de rayonnement radio-actif qui peut être absorbée sans danger par un sujet. *Ex.* 1,5 rem/an.

drastique. *adj.* Purgatif violent. *Par ext.* Qui manifeste une action quelconque de façon intense.

drépanocytanémie. *n.* Syn. *anémie falciforme.*

drépanocyte. *n.* Hématie anormale qui possède de l'*hémoglobine S* en forte proportion et dont la présence dans le sang provoque une *drépanocytanémie.*

drépanocytose. *n.* Syn. *anémie falciforme.*

drive. *n.* Syn. de *motivation.*

drupe. *n.* Fruit formé d'une partie charnue (pulpe) limitée extérieurement par une membrane assez consistante (« peau ») et entourant un ou plusieurs noyaux, qui abritent eux-mêmes une ou plusieurs graines chacun.

dryopithécienne. *adj.* Caractérise la dent des Primates inférieurs; le sillon de sa surface occlusale dessine un tracé en forme de Y.

duplication semi-conservative ou **répétition semi-conservative.** Phénomène biochimique au cours duquel une moitié de la molécule d'ADN reconstitue une autre moitié; la nouvelle molécule ainsi formée est alors constituée d'une moitié préexistante et d'une moitié néoformée.

duramen. *n.* Bois de cœur, ancien et non fonctionnel. Le plus dur de l'arbre. Par opposition à l'aubier.

dure-mère. *Méninge* externe, dure et fibreuse, protégeant le *névraxe* des Vertébrés.

dystrophe. *adj.* **(milieu).** Qui ne permet pas une bonne nutrition des êtres vivants qui l'occupent, notamment parce qu'il est trop acide et pas assez oxygéné.

E

eau de capillarité. Eau présente dans les plus fins capillaires du sol même lorsque celui-ci continue à perdre son eau par évaporation.

eau de gravité. Eau s'écoulant par l'effet de pesanteur dans un sol gorgé d'eau.

eau d'hydroscopicité. Eau résiduelle de tout sol, même apparemment sec; son taux est fonction de l'humidité atmosphérique.

ecdysis. *n.* Seconde étape de la mue des Crustacés durant laquelle l'animal quitte son exuvie.

ecdysone ou **hormone de mue.** Substance libérée par la glande ecdysiale des Insectes sous l'action du facteur cérébral et intervenant dans les phénomènes de mue. Interviendrait aussi dans le dépôt de certains pigments, les processus de régénération et, peut-être, dans la spermatogenèse de certains Lépidoptères.

échange génétique. Mécanisme correcteur qui permet de réparer les lésions existant dans l'ADN hybride au niveau des sites d'*hétérozygotie*.

écobuage. *n.* Enlèvement de l'humus d'un sol.

écocline. *n.* Syn. de *cline*.

écologie. *n.* 1° Étude des rapports entre les êtres vivants et le milieu où ils vivent. 2° Étude des conditions de vie dans un milieu donné (écologie des landes), ou des conditions de vie d'un être ou d'un groupe d'êtres donnés (écologie de la fougère-aigle, des plantes halophiles).

écologie médicale. Étude de la transmission des maladies parasitaires et de l'effet de certains facteurs du milieu sur la santé de l'homme.

écologie mésologique ou **factorielle.** Science traitant, d'une part, de l'étude du milieu et des facteurs le constituant et, d'autre part, de l'action de ces facteurs sur les êtres vivants.

écophase. *n.* Stade de vie d'un organisme. *Ex.* Larve ou adulte d'un Insecte.

écorce. *n.* En général, couche dure protectrice entourant un organe. Plus particulièrement, tissu entourant les éléments des tissus conducteurs (bois et liber) de la tige et de la racine. L'écorce des arbres,

susceptible de se séparer de diverses façons, est formée de tissus secondaires repoussés par l'activité d'une assise génératrice plus interne, et qui fournira des tissus susceptibles d'être rejetés à leur tour. Une telle écorce est un *rhytidome*.

écosphère. *n.* Syn. de *biosphère*.

écotone. *n.* Zone de contact entre deux *biocénoses* adjacentes. Cette limite est très souvent peu tranchée et présente des gradients écologiques.

écotype. *n.* Forme physiologique d'une espèce présentant des exigences écologiques particulières.

ectoderme. *n.* Feuillet cellulaire externe de l'embryon dont dérivent le système nerveux, les organes des sens, l'épiderme et les glandes cutanées.

ectoparasite. *n.* Parasite vivant au contact de son hôte, mais aussi dans le milieu externe. *Ex.* Un pou ou une puce.

ectophylle. *n.* Feuillet le plus externe du germe diblastique d'un Oiseau p. ex.

effet de groupe. Apparition chez les individus d'une même espèce, de formes, ou « phases », présentant des caractères morphologiques, anatomiques et physiologiques différents selon que ces organismes ont évolué isolément ou en groupe. *Ex.* Le criquet « solitaire » se distingue du criquet « grégaire » par la couleur de son tégument et la forme de son *pronotum*.

effet de masse. Effet dû au surpeuplement d'une espèce qui se traduit par une diminution de la fécondité et par des réactions de cannibalisme. Il assure ainsi une régulation de la population dans un milieu donné.

effet Pasteur. Intensification des échanges respiratoires qui intervient avec la baisse de la quantité d'oxygène disponible.

efficacité écologique. Rendement d'un niveau trophique au niveau trophique immédiatement supérieur.

efficacité photosynthétique. Critère d'évaluation d'un rendement écologique défini par le rapport de la *productivité nette* sur la lumière totale.

efficience écologique. Capacité de production d'une chaîne alimentaire.

élastine ou **réticuline.** *n.* Substance de texture fibrillaire constitutive de certains tissus conjonctifs.

électrocardiogramme. *n.* Courbe d'enregistrement de l'activité électrique du *myocarde*.

électroencéphalogramme. *n.* Enregistrement graphique des potentiels électriques des neurones cervicaux, potentiels qui déterminent l'état physiologique de la masse céphalique.

électron. *n.* Particule pesante et chargée négativement, présente en nombre déterminé à la périphérie des atomes. Les électrons sont localisés suivant des couches concentriques et peuvent passer des unes aux autres dans certaines circonstances.

électro-osmose. *n.* Déplacement d'un liquide sur un support (papier-filtre) ou à travers une membrane, sous l'effet d'un champ électrique.

électrophorèse. *n.* Procédé de séparation des éléments d'un mélange de substances organiques. Placés dans un champ électrique, au sein d'un solvant conducteur, les éléments migrent plus ou moins vers l'un ou l'autre pôle suivant l'existence, le signe et l'intensité de leur charge.

électrophysiologie. *n.* Domaine de la physiologie étudiant les phénomènes électriques du fonctionnement des organes et des cellules, nerveuses et musculaires en particulier.

éluant. *n.* Solvant utilisé pour détacher des substances préalablement retenues par une colonne de chromatographie. Ces substances sont éluées lors de l'élution.

émail. *n.* Substance calcifiée recouvrant les dents des Mammifères, sécrétée par des cellules spéciales : les adamantoblastes.

embryon. *n.* Nom donné au produit du développement de l'œuf entre le moment où il commence sa segmentation et celui où il se dégage des enveloppes vitellines. *Spécialt.* Chez l'homme, désigne l'organisme résultant de la conception, jusqu'à la fin du deuxième mois de la grossesse.

embryon adventif. Embryon formé par des cellules du nucelle de l'ovule et qui pénètre dans le sac embryonnaire et y évolue comme un embryon normal. Des embryons adventifs s'obtiennent artificiellement sur de nombreuses cultures de tissus ou d'organes végétaux.

embryologie. *n.* Étude de la formation des êtres vivants à partir de leurs œufs, et éventuellement de leurs autres germes.

embryopathie. *n.* Maladie acquise au cours du développement de l'embryon : cas du développement anormal de l'embryon quand la mère est atteinte par la rubéole p. ex.

émulsion. *n.* Suspension de gouttelettes liquides non miscibles dans un milieu liquide.

enchondral. *adj.* Qualifie l'ossification qui donne naissance aux os profonds, à partir du tissu conjonctif qui a remplacé le tissu cartilagineux.

encyclopédistes. *n.* Nom donné aux auteurs qui, sous la direction de Diderot, écrivirent la Grande Encyclopédie du XVIII[e] siècle.

endarche. *adj.* Qui se différencie à partir de l'intérieur et dont les éléments les plus jeunes sont donc externes. Se dit d'un faisceau de bois et accessoirement de liber.

endémisme. *n.* Possession par un taxon d'une aire nettement délimitée. Existence dans un lieu donné de taxons qui y sont inféodés. *Adj.* Endémique.

endocardite. *n.* Inflammation de la tunique interne du cœur (endocarde). Généralement due à un streptocoque, elle présente différentes formes dont la plus grave est l'endocardite maligne ou maladie d'Osler.

endocrine. *adj.* Qui présente une ou plusieurs sécrétions internes hormonales. *Ex.* Glande endocrine.

endocrinien. *adj.* Qui concerne les sécrétions internes hormonales. *Ex.* Corrélations endocriniennes.

endocytose. *n.* Absorption d'un élément figuré du milieu externe par une cellule dans une dépression de sa membrane cytoplasmique, qui se détache dans le cytoplasme et y devient une vacuole ou vésicule, avec « cicatrisation » de la membrane cytoplasmique au point de séparation.

endoderme. *n.* 1° Assise de cellules entourant le cylindre central de la racine et de quelques rares tiges. Chaque cellule de l'endoderme possède un cadre lignifié. 2° Feuillet cellulaire interne de l'embryon dont dérivent le tube digestif et ses glandes annexes ainsi que l'appareil pulmonaire.

endogamie. *n.* Organisation de certaines tribus qui oblige leurs membres à contracter mariage à l'intérieur de la tribu, ce qui provoque souvent des anomalies au cours des générations.

endogène. *adj.* Qui apparaît ou existe à l'intérieur d'une structure préexistante.

endolymphe. *n.* Liquide baignant le *saccule* de l'oreille interne des Vertébrés.

endomètre ou **muqueuse utérine.** Paroi interne de la cavité utérine des Mammifères, constituée d'un tissu épithélial doublé d'un tissu conjonctif.

endopeptidase. *n.* Enzyme rompant les liaisons peptidiques au sein de la chaîne d'acides aminés.

endosperme. *n.* Tissu haploïde des Gymnospermes formé dans l'ovule à partir d'une cellule ayant subi la réduction chromatique. Forme la partie non sexualisée du gamétophyte, ou prothalle femelle. Sert de nourriture à l'embryon. Ne pas confondre avec l'albumen, qui, lui, est triploïde et résulte de la prolifération du produit de la fécondation d'un couple de noyaux du sac embryonnaire par un gamète mâle.

endostyle. *n.* Profonde gouttière ciliée, largement ouverte, qui parcourt l'axe médio-ventral du pharynx des Urocordés et des Céphalocordés. Elle sécrète en permanence un film de mucus enveloppant les particules alimentaires retenues par le pharynx.

endothécium. *n.* Assise mécanique d'un sporange (sac pollinique) formée par la couche sous-épidermique (l'exothécium étant épidermique et n'existant probablement pas chez les Angiospermes).

endothélioblastème. *n.* Amas de cellules mésenchymateuses de l'embryon des Vertébrés conduisant à la formation des ébauches du cœur, des artères et des veines principales.

endothélium. *n.* Tissu animal formé d'une seule couche de cellules aplaties et limitant la cavité d'un organe. Syn. d'*épithélium pavimenteux simple* ou *unistratifié*.

énergide. *n.* Unité formée par un noyau et le cytoplasme qui l'entoure et appartenant à un territoire plurinucléé. *Ex.* Vitellophages des œufs des Insectes.

entéléchie. *n.* Cause de la réalisation, lors du développement, d'un organisme de forme déterminée. C'est l'information agissante détenue par son germe.

entérovirus. *n.* Virus de l'intestin de l'homme et des animaux dont le plus connu est le *poliovirus* qui provoque la *poliomyélite* ou maladie de Heine-Medin.

entoblaste. *n.* Feuillet interne de la gastrula qui donnera le tube digestif et ses glandes annexes, l'appareil respiratoire et les dérivés pharyngiens (thyroïde, parathyroïde, thymus, etc.).

entomofaune. *n.* Faune des Insectes d'un milieu donné.

entomogame ou **entomophile.** *adj.* Dont la pollinisation est effectuée par les Insectes.

entomophage. *adj.* Qualifie un organisme qui se nourrit d'Insectes.

entophylle. *n.* Feuillet le plus interne du germe diblastique d'un Oiseau p. ex.

enzyme. *n.* Molécule protéique permettant la réalisation, dans un organisme, de réactions chimiques (synthèses ou dégradations) qui n'auraient pas lieu spontanément dans les conditions propres à cet organisme.

enzyme « branchante ». Qui permet la fixation d'une molécule de glucose sur le carbone 6 d'une autre molécule de glucose engagée dans une chaîne d'amylopectine, et entame la ramification *(branching)* de celle-ci.

éosine. *n.* Colorant acide rouge. Utilisé pour la coloration de fond du cytoplasme.

éphémérophyte. *n.* Plante introduite accidentellement en un endroit et ne s'y maintenant pas.

épiaison. *n.* Apparition des épis. Floraison des plantes à épis (Graminées).

épiblaste. *n.* Tissu embryonnaire qui donnera l'épiderme.

épibolie. *n.* Mouvement d'étalement dû surtout à une multiplication cellulaire de l'ectoderme présomptif qui recouvre alors le mésoderme et l'endoderme.

épibranchial. *n.* Deuxième des quatre os disposés dorso-ventralement qui constituent l'arc branchial des Poissons.

épicontinentale. *adj.* **(zone).** Marge marine à très faible profondeur d'eau, en bordure du continent.

épiderme. *n.* Couche protectrice externe des végétaux et des animaux. Chez ces derniers, il est composé d'un épithélium simple (Invertébrés) ou d'un épithélium stratifié (Vertébrés).

épididyme. *n.* Portion glandulaire du *canal déférent* coiffant le testicule des Vertébrés amniotes.

épigenèse. *n.* Doctrine suivant laquelle l'organisation apparaît progressivement par différenciation du germe qui croît, et non par simple augmentation de taille d'un germe déjà organisé comme l'adulte (voir *préformationnisme*).

épigénétique. *adj.* Qui se développe par épigenèse.

épilimnion. *n.* Zone superficielle d'un lac ou d'un étang dont la température, en été, est supérieure à 4 °C.

épineurien. *adj.* Qualifie un organisme dont le système nerveux est dorsal par rapport au tube digestif. *Ex.* Les Vertébrés.

épiphyse. *n.* 1° Partie terminale renflée d'un os long. 2° Évagination dorsale impaire de l'*épithalamus* des Vertébrés correspondant à un organe photorécepteur rudimentaire chez les anamniotes, et fonctionnant, chez les amniotes, comme une glande intervenant dans les fonctions de reproduction. Syn. d'*organe pinéal*.

épiphyte. *adj.* Qui vit sur d'autres plantes, sans en être parasite.

épirogenèse. *n.* Phase qui suit un plissement et aboutit à la formation d'une chaîne de montagne.

épisome sexuel. Nom donné parfois au *facteur F* des Bactéries.

épistémologie. *n.* Étude des sciences en rapport avec la valeur qu'elles ont toutes pour l'esprit humain.

épithalamus. *n.* Toit du *diencéphale* des Vertébrés comportant notamment les *ganglions de l'habenula* fonctionnant comme centres de corrélation olfactive.

épithélioma. *n.* Tumeur bénigne de la peau.

épithélium. *n.* Tissu en forme de membrane formée d'une ou plusieurs couches de cellules limitant des organes ou des cavités de ceux-ci.

épitoquie. *n.* Modification liée à la maturité sexuelle se traduisant par le passage d'une forme benthique *Nereis*, p. ex., à une forme pélagique nageuse *Heteronereis* permettant la fécondation à la surface de l'eau.

épitrichium. *n.* Nom donné au *périderme* embryonnaire des Vertébrés qui recouvre longtemps les poils en formation.

éponyme. *adj.* Qui donne son nom.

équilibre dynamique. Situation stable d'un système dont les éléments sont pourtant en transformations continuelles (les unes restituent ce que les autres font disparaître), ou qui reçoit constamment de quoi compenser les pertes qu'il subit.

équitabilité. *n.* En écologie, nombre d'individus par espèces et par unité de surface.

ergastoplasme. Voir *réticulum endoplasmique*.

ergonomie. *n.* Science qui étudie le travail sous ses différents aspects physiologique, économique, législatif, etc.

ergostérol. *n.* Provitamine D, extrêmement répandue dans le régne végétal, particulièrement dans la Levure.

érythrocyte. *n.* Syn. de *globule rouge*.

érythromycine. *n.* Antibiotique inhibiteur des synthèses protéiques mitochondriales, utilisé en génétique pour étudier une résistance à l'hérédité cytoplasmique chez les Levures.

érythrophore. *n.* Cellule dermique spécialisée des *poïkilothermes;* contient des granules pigmentées appelées *ptérinosomes*.

espace de Disse. Espace séparant les cellules hépatiques des capillaires sanguins du foie.

espèce. *n.* Ensemble des individus possédant des caractères morphologiques, anatomiques, chromosomiques et biochimiques identiques et susceptibles de donner une descendance féconde.

ester ou **éther-sel.** Composé organique résultant de l'union, avec élimination d'eau, d'un acide organique (R—COOH) et d'un alcool (R'—OH) : R—CO—O—R'.

estivation. *n.* Période pendant laquelle certains animaux, tel le crapaud, entrent en léthargie par suite des fortes chaleurs de l'été.

étage. *n.* 1° En géologie, désigne une subdivision du temps géologique; tous les étages n'ont pas la même durée. 2° Désigne une zonation verticale. *Ex.* Étage collinéen, alpin...

étamine. *n.* Pièce mâle d'une fleur, productrice de pollen. Comme toutes les autres pièces florales, les étamines sont homologues de feuilles végétatives. Elles comportent fondamentalement quatre sacs polliniques parallèles, deux de chaque côté, qui confluent en deux loges polliniques. En général, ces dernières s'ouvrent chacune longitudinalement par une fente située entre les deux sacs de chaque couple.

ethnologie. *n.* Étude du comportement des groupes humains, en particulier de ceux qui sont dits « primitifs ».

éthogramme. *n.* Enregistrement d'une séquence comportementale chez les animaux.

étiologie. *n.* Partie de la science qui traite des causes des maladies.

étrier. *n.* Chez les Mammifères, dernier des trois os de l'oreille moyenne qui relient la membrane du tympan à la fenêtre ovale de la capsule otique.

eucaryote. *n.* Organisme dont les cellules possèdent un vrai noyau (*ex.* végétaux verts et animaux).

eugénique ou **eugénisme.** *n.* Science qui étudie les situations nécessaires au maintien de l'espèce humaine dans les meilleures conditions possibles.

euryhalin. *n.* Qui supporte de larges variations de la concentration de sel dans le milieu où il vit.

euryphage. *adj.* Syn. de *polyphage*.

eurytherme. *adj.* Qui supporte de larges variations de température.

eutrophe. *adj.* **(milieu).** Riche en éléments nutritifs, mais insuffisamment oxygéné.

eutrophisation. *n.* Enrichissement naturel en matières organiques et minérales d'un milieu. *Ex.* Eutrophisation d'un lac.

évagination. *n.* 1° Dilatation localisée d'une structure laminaire conduisant à une poche qui fait protrusion vers l'extérieur. 2° Cette poche elle-même.

évapotranspiration. *n.* Somme de l'évaporation du sol et de la transpiration des plantes d'un *écosystème*.

évolutionnisme. *n.* Théorie selon laquelle les espèces animales et végétales actuelles dérivent d'espèces éteintes. Les formes complexes proviendraient de formes plus simples selon des mécanismes qui ont fait l'objet de nombreuses controverses (lamarckisme, darwinisme, etc.).

exarche. *adj.* Qui se différencie à partir de l'extérieur, ses éléments les plus jeunes étant internes. Se dit d'un faisceau de bois, et accessoirement du liber.

exergonique. *adj.* **(réaction).** Qui fournit de l'énergie susceptible, chez les êtres vivants, d'être dépensée en chaleur ou mise en réserve par la synthèse de composés phosphorés (acide adénosine-triphosphorique), qui est, elle, *endergonique* (nécessite de l'énergie). La décomposition de ces composés permettra plus tard la récupération de l'énergie emmagasinée.

exocrine. *adj.* Qui sécrète un ou des produits issus de son activité dans le milieu extérieur (y compris l'appareil digestif) et non dans le sang (milieu intérieur).

exocytose. *n.* Rejet par une cellule du contenu d'une vacuole, ou vésicule, de son cytoplasme. Celle-ci vient s'unir à la membrane cytoplasmique et la zone d'union se perfore : la paroi de la vésicule s'intègre à la membrane et son contenu est expulsé.

exogène. *adj.* Qui apparaît ou existe extérieurement à une structure préexistante.

exopeptidase. *n.* Enzyme détachant les acides aminés un par un en commençant par l'une des extrémités (à fonction —NH_2 libre : « N-terminale », ou à fonction —COOH libre : « C-terminale ») de la chaîne peptidique.

explant. *n.* Portion d'un organisme séparée et mise en culture *in vitro*.

extensif. *adj.* Qualifie l'appareil radiculaire de certaines plantes (*ex.* les *Sedum*) dont le développement est limité à une seule direction de l'espace.

exuvie. *n.* Cuticule abandonnée par un animal lors de la mue.

F

facial. *n.* Septième paire de nerfs crâniens des Vertébrés innervant la musculature superficielle de la face et responsable de la mimique.

faciès. *n.* Ensemble des caractères liés à la nature et la composition d'une roche ainsi qu'à la faune et la flore fossiles qu'elle renferme.

facteur F. Segment d'ADN, soit libre, soit intégré à un chromosome, et qui particularise les Bactéries.

facteurs biotiques. Facteurs liés à la présence des êtres vivants dans un *biotope* donné.

facteurs écologiques. Caractères de l'habitat, ou *biotope,* ayant une action directe sur les êtres vivants. *Ex.* Température, lumière, etc.

faisceaux ascendants. Faisceaux de fibres nerveuses conduisant l'influx nerveux vers les centres supérieurs.

faisceaux descendants. Faisceaux de fibres nerveuses conduisant l'influx nerveux des centres supérieurs vers des centres inférieurs.

faisceau de His. Élément du *tissu nodal* situé dans la cloison interventriculaire du cœur des Oiseaux et des Mammifères et transmettant l'excitation du *nœud d'Aschoff-Tawara* aux ventricules.

faisceau libéro-ligneux. Ensemble constitué par un faisceau libérien et un faisceau ligneux. Les *faisceaux libériens,* formés de vaisseaux eux-mêmes constitués de cellules vivantes disposées bout à bout, conduisent surtout la sève élaborée, qui vient des feuilles et s'est enrichie en sucres formés à partir du gaz carbonique fixé par photosynthèse. Les *faisceaux ligneux* sont surtout formés de vaisseaux de bois, constitués de cellules mortes réduites à leurs parois lignifiées, disposées bout à bout, avec de grandes perforations dans leurs parois transversales. Ils conduisent surtout l'eau et les sels minéraux absorbés par les racines.

falun. *n.* Dépôt calcaire riche en débris coquilliers. *Ex.* Faluns de Touraine (Miocène).

famille. *n.* Ensemble de genres ayant en commun certains caractères morphologiques. *Ex.* Les Félidés constituent une famille comportant, notamment, le lion, le léopard, le tigre, etc.

fanaison permanente (point de). Concentration d'eau pour laquelle, dans un milieu donné, le feuillage de la plante se fane en partie et ne peut plus revenir à son état normal une fois mis en atmosphère humide. Syn. de *flétrissement permanent*.

« fast-green ». Colorant acide, vert, pris par le cytoplasme. En français, *vert lumière*.

fausse cloison. Lame qui sépare des loges dans divers ovaires, mais non formée par les parois des carpelles eux-mêmes, et ne portant par conséquent pas d'ovules sur ses bords. Présente par exemple dans les ovaires des Crucifères.

faux opercule. Repli cutané recouvrant les branchies des Poissons Holocéphales.

fèces. *n.* Nom donné aux excréments d'un animal.

fécondation. *n.* 1° Union de deux gamètes haploïdes mâle et femelle. 2° Arrivée d'une structure destinée à produire des gamètes mâles sur les structures contenant les gamètes femelles (fécondation du pistil par le pollen). 3° Rapprochement des sexes (fécondation de la femelle par le mâle).

fenestré. *adj.* **(capillaire).** Qualifie un capillaire dont le revêtement endothélial est perforé dans les régions les plus minces. *Ex.* Capillaires du rein des Mammifères.

fente operculaire ou **ouïe.** Ouverture postérieure de la chambre branchiale des Poissons Ostéichthyens permettant l'expulsion de l'eau.

ferment. *n.* Produit causant la fermentation d'un milieu organique. En général, il s'agit d'un être vivant (Levure, Bactérie). Parfois syn. d'*enzyme*.

fermentation butylique. Variante de fermentation butyrique due à des *Clostridium,* et par l'effet de laquelle apparaît de l'alcool butylique en plus de l'acide butyrique.

fermentation butyrique. Fermentation bactérienne produisant de l'acide butyrique, $H_3C—(CH_2)_2—COOH$, par dégradation des sucres et polyosides. Due à des *Clostridium,* anaérobies.

fermentation méthanique. Fermentation bactérienne produisant, par hydrogénation du CO_2 et du méthane, CH_2, dont la combustion donne lieu aux feux follets.

ferricyanure. *n.* Sel de l'acide ferricyanhydrique $H_3Fe(CN)_6$. Les ferricyanures ne sont pas toxiques; ils apparaissent par oxydation des ferrocyanures. Le ferricyanure de K est soluble et rouge.

ferrocyanure. *n.* Sel de l'acide ferrocyanhydrique $H_4Fe(CN)_6$. Les ferrocyanures ne sont pas toxiques, à la différence des cyanures, sels de l'acide cyanhydrique HCN ; ils apparaissent par réduction des ferricyanures. Le ferrocyanure de K est soluble et jaune.

fessier. *n.* Muscle qui constitue la fesse des Primates. Épais et quadrilatère, il s'insère plus particulièrement sur la crête iliaque, le bord du sacrum et le fémur, et joue un rôle important dans la station bipède.

feuille. *n.* Appendice, ou phyllome, de la tige des Cormophytes, en principe chlorophyllien et dépourvu de spores. Sinon, devient une sporophylle ou une pièce florale (étamine ou carpelle). Dans sa forme typique chlorophyllienne, c'est la feuille végétative.

feuille axillante. Feuille dont l'aisselle abrite un rameau ou un pédoncule inflorescentiel ou floral.

feuille primaire, primordiale ou **juvénile.** L'une des premières feuilles apparaissant, chez les Mousses. sur le « bourgeon » formé par le protonéma ou formées par la tige lors de la germination chez les plantes à graines.

feuille primordiale. Voir *feuille primaire*.

feuillet germinatif. *n.* L'une des trois nappes cellulaires superposées, formées par division de l'œuf et à partir desquelles se différencieront de façon déterminée les divers organes de l'embryon.

feulgen + ou **feulgen positif.** Qui se colore en rouge par la *réaction de Feulgen,* et contient donc de l'ADN.

fibre adrénergique. Fibre nerveuse sympathique dont l'excitation provoque la libération de *noradrénaline*.

fibre cholinergique. Fibre nerveuse parasympathique dont l'excitation provoque la libération d'*acétylcholine*.

fibre musculaire. Cellule musculaire spécialisée dans sa fonction de contractilité. Elle est allongée en fuseau dans le sens de la contraction et son cytoplasme est différencié en *myofibrilles* constituées de protéines contractiles disposées en *myofilaments* parallèles.

fibre nerveuse. Axone d'un neurone, jadis considéré comme ne dépendant pas d'une cellule.

fibres de Sharpey. Fibres de *collagène,* qui servent à ancrer le *périoste* à l'os sous-jacent.

fibrinogène. *n.* Protéine fibrillaire constitutive du plasma sanguin se transformant en fibrine lors de la coagulation du sang.

fibroblaste. *n.* Élément cellulaire constitutif du tissu conjonctif banal.

fibrome. *n.* Tumeur bénigne virale localisée; apparaît chez de nombreux Mammifères.

fibulaire. *n.* Os court externe du *basipode* du membre chiridien.

fièvre typhoïde. Terme désignant un ensemble d'affections graves qui comprend la typhoïde et les paratyphoïdes, maladies bacillaires caractérisées par une température élevée, de violents maux de tête et de la diarrhée.

figure myélinique. Masse lipidique présente dans une vacuole autophagique des cellules et ressemblant par ses striations concentriques à une coupe dans la gaine de myéline d'un neurone. Provient du remaniement de membranes diverses emprisonnées dans la vacuole.

filariose. *n.* Syn. d'*onchocercose*.

filet. *n.* Élément inférieur de l'étamine, généralement allongé, portant l'anthère.

fish-call. *n.* Cri que poussent les parents chez les sternes (Oiseaux) lorsqu'ils reviennent de la pêche.

fission ou **scissiparité** ou **fragmentation.** *n.* Mode de reproduction asexuée des organismes par lequel un individu se scinde en deux, chaque moitié reconstituant la partie manquante.

fissure hippocampienne. Repli de l'*archipallium* du *télencéphale* des Mammifères constitué par une zone interne, le *gyrus dentatus*, et une zone externe, la *corne d'Ammon* ou cortex hippocampien.

fixation. *n.* Traitement d'un échantillon organique par une préparation destinée à le tuer tout en conservant les caractères morphologiques, et éventuellement les aptitudes enzymatiques de ses constituants cellulaires et inertes. En fait, seuls certains d'entre eux peuvent être bien préservés par une fixation donnée. La fixation permet l'étude cytologique et cytochimique de la préparation.

fixisme. *n.* Syn. de *créationisme*.

flagelle. *n.* Organite contractile de cellules mobiles, comme les spermatozoïdes p. ex.

Flemming (méthode de). Technique histologique de fixation, par un mélange d'acide osmique, d'acide chromique et d'acide acétique, suivie de coloration par la safranine (le noyau est rouge) et un colorant de fond.

fleur. *n.* Groupe de phyllomes (pièces du type des feuilles) sexués ou non, portés par un axe peu allongé, l'ensemble ayant l'aspect d'un bourgeon. Si la fleur est réduite à des phyllomes fertiles (étamines et/ou carpelles) disposés en spirale ou en verticille (s), elle est nue (ou apérianthée, ou achlamydée). Cependant, elle comporte souvent, en dessous des phyllomes fertiles, des phyllomes stériles (sépales verts à l'extérieur, pétales colorés à l'intérieur) formant le périanthe, qui protège les pièces sexuelles et attire les Insectes pollinisateurs. Toutes les pièces de la fleur sont portées par l'axe floral, mais des déformations de celui-ci et des soudures des pièces entre elles et avec l'axe rendent souvent la reconnaissance des rapports fondamentaux entre les éléments très difficile.

« fleurs d'eau ». Amas superficiel d'Algues dû à la prolifération saisonnière de ces organismes.

flocculus. *n.* Syn. de *glomérule de Malpighi*.

floculation. *n.* Précipitation d'un colloïde précédemment en solution, en particulier par modification du pH.

floricole. *adj.* Organisme qui vit dans les fleurs.

fluorescence. *n.* Émission par une substance éclairée sous une certaine longueur d'onde d'une lumière de longueur d'onde supérieure.

fluorine. *n.* Fluorure de calcium CaF_2. C'est un minéral appelé aussi *spath-fluor*. Incolore, il réfléchit une lumière bleuâtre si on l'éclaire : il est fluorescent.

flux osmotique. Courant de solvant entre deux milieux séparés par une membrane, déterminé par la différence de pression osmotique entre eux, et tendant à égaliser ces deux pressions.

focaliser. *v.* Concentrer les rayons lumineux ou électroniques en une zone étroite, ou *foyer*.

fœtopathie. *n.* Maladie acquise par le fœtus au cours de son développement. *Ex.* La syphilis congénitale.

fœtus. *n.* 1° Produit du développement de l'œuf qui montre déjà tous les caractères de l'espèce. 2° Désigne aussi l'organisme humain à partir du troisième mois de grossesse.

foie. *n.* Glande digestive des Vertébrés. Outre sa fonction excrétrice de bile (qui participe à la digestion des lipides), il synthétise le glycogène et les lipoprotéines plasmatiques.

foliole. *n.* Division de premier ordre d'une feuille composée. La foliole peut elle-même être simple ou composée de diverses manières. Le terme s'utilise surtout si l'élément considéré n'est pas découpé ; chez les Fougères il peut s'employer pour désigner les pinnules de premier ordre.

follicule. *n.* Fruit sec et déhiscent, à plusieurs graines, formé par la transformation d'un carpelle et s'ouvrant par une fente à l'endroit de la suture des marges carpellaires, donc ventralement. S'il s'ouvre aussi dorsalement, on a alors une gousse, ou légume. Si la fleur comporte plusieurs carpelles libres pluriovulés, elle peut donner autant de follicules.

follicule de de Graaf. Structure entourée de deux thèques et constituée de cellules folliculeuses disposées autour du gamète femelle ou ovocyte. A maturité, ce follicule se caractérise par la masse énorme de sa *granulosa* et par sa cavité ou *antrum*.

folliculo-stimulating-hormone ou **F.S.H.** Hormone sécrétée par l'antehypophyse et provoquant le développement des *follicules de de Graaf* et la sécrétion des œstrogènes.

fonction glycogénique du foie. Fonction du foie dans laquelle celui-ci stocke sous forme de glycogène le glucose provenant des aliments, ou inversement le libère pour pourvoir aux besoins des cellules de l'organisme, de manière que la concentration en glucose du sang soit maintenue stable.

fongicide. *n.* Substance chimique détruisant les Champignons.

foramen magnum. Syn. de *trou occipital*.

foramen ovale. Syn. de *trou de Botal*.

forêt mixte. Forêt constituée de Feuillus et de Conifères.

formation. *n.* Terme de phytosociologie qui désigne des groupes d'associations réunissant eux-mêmes des *sociations*.

fossettes faciales. Organes thermo-sensibles permettant la détection, chez les serpents Crotalinés, de certaines proies telles que des Vertébrés à sang chaud (Oiseaux, Mammifères).

fossile. *n.* 1° Reste d'organisme, complet ou fragmentaire, trouvé dans les roches. 2° Plus généralement, toute trace d'activité due à des êtres vivants, et conservée dans les formations géologiques.

fossile de corrélation. Fossile utilisé pour faire des comparaisons entre des localités éloignées; Permet ainsi de tirer des conclusions d'ordre biogéographique.

fossile de faciès. Fossile caractéristique d'un milieu, d'un biotope donné; les fossiles de faciès sont donc des indicateurs écologiques. *Ex.* Les coraux sont des indicateurs de mer chaude.

fossile stratigraphique. Fossile-repère, à partir duquel on peut donner un âge relatif à une formation géologique. Syn. de *fossile caractéristique*.

fossilisation. *n.* Conservation dans un sédiment des restes d'organismes ou des traces de leur activité. Elle nécessite un enfouissement très rapide après la mort.

fragmentation. *n.* Syn. de *fission* et de *scissiparité*.

free-martin. Génisse stérile appartenant à un couple de jumeaux de sexes différents. Il s'agit en réalité d'un veau intersexué possédant des testicules associés à des ovaires rudimentaires. Ce phénomène s'explique par la communication des circulations sanguines placentaires entre les deux fœtus.

freeze-etching. *n.* Technique dans laquelle un échantillon organique est d'abord congelé profondément *(to freeze)*, puis sectionné avec un microtome. Placé alors dans le vide, l'eau des structures proches de la surface se sublime, ce qui entraîne une sorte de gravure *(etching)* au niveau de celle-ci. Une « réplique » (moulage) métallique en est alors prise, puis observée au microscope électronique.

frondicole. *adj.* Organisme vivant sur les feuilles des arbres, arbustes, etc.

frottis. *n.* Préparation microscopique s'obtenant en étalant rapidement un liquide organique contenant divers éléments cellulaires libres, qui se trouveront disposés sans superposition sur la lame porte-objet. Le simple séchage rapide ou un liquide approprié après séchage fixera ces éléments qu'on pourra ensuite colorer et examiner. C'est la méthode essentielle de l'examen du sang.

frugivore. *adj.* Qui mange des fruits.

fruit. *n.* Élément provenant de la transformation du gynécée et contenant la ou les graines destinées à assurer la propagation de l'espèce. Les carpelles séparés d'une même fleur peuvent donner des formations qui, prises dans leur ensemble, sont appelées *fruit multiple* ou qui sont considérées chacune comme un fruit. On distingue des *fruits charnus,* dont la paroi (péricarpe) est gorgée d'eau dans sa couche moyenne (mésocarpe) et qui ne sont généralement pas déhiscents, et des *fruits secs,* dont la paroi (péricarpe) est ordinairement sèche et lignifiée. Les *fruits composés* correspondent au rapprochement de nombreux fruits de fleurs distinctes, comme la mûre du mûrier.

frustration. *n.* État d'un animal dont une tendance naturelle ne peut être satisfaite.

frustule. *n.* Chez les Diatomées, sorte de boîte siliceuse sécrétée par l'appareil de Golgi de la cellule et dans laquelle cette dernière se trouve contenue.

F.S.H. Voir *folliculo-stimulating-hormone*.

furanne. *n.* Substance organique ternaire dont la molécule comporte un cycle à 4 atomes de C et 1 d'oxygène, avec deux doubles liaisons. Ce cycle se retrouve chez divers oses (furannoses), mais sans double liaison.

fuseau. *n.* (ou *fuseau achromatique,* car il ne prend pas les colorants). Structure protéique transitoire qui se forme au moment de la division du noyau des cellules et qui permet, par un processus mal connu, le mouvement des chromosomes nécessaires à la constitution des noyaux des deux cellules filles.

fuseau neuro-musculaire. Corpuscule encapsulé sensible à la contraction musculaire et formé par une terminaison nerveuse qui s'enroule en spirale autour de fibres musculaires partiellement modifiées.

fuseau neuro-tendineux. Corpuscule formé par une terminaison nerveuse venant en contact avec des fibres tendineuses.

G

gaine. *n.* 1° Enveloppe épaisse de diverses Bactéries et Cyanophycées. 2° Portion inférieure d'une feuille, insérée sur la tige, et se continuant au-dessus par le pétiole. La gaine, très développée (Ombellifères, Graminées) ou fort réduite, porte les stipules, de part et d'autre de la région inférieure du pétiole. 3° Parfois, formation cylindrique entourant la tige et correspondant à l'union de plusieurs feuilles verticillées (Prêles).

gaine de myéline. Enveloppe interne de myéline (lipide complexe), entourant l'axone des fibres nerveuses.

gaine de Schwann. Enveloppe externe formée de cellules aplaties entourant les fibres nerveuses et élaborée par la gaine de myéline.

galactanes. *n.* Polymères du galactose (sucre à six atomes de carbone).

galactosémie congénitale du nouveau-né. Maladie métabolique héréditaire qui se traduit par des troubles digestifs à l'ingestion du galactose et qui peut entraîner une arriération mentale et un retard de croissance.

galet aménagé. Pierre manufacturée selon différents procédés (taille, retouche...), caractérisant les civilisations préhistoriques au cours desquelles elle était fabriquée.

galle ou **cécidie.** *n.* Production de forme définie, déterminée par un Champignon, ou par la piqûre d'un Insecte (qui pond en un point déterminé de la plante), et qui abritera dans ce dernier cas la ponte et les larves.

gallicole. *adj.* Qualifie un organisme habitant dans une *galle*.

gamètes. *n.* Cellules reproductrices mâles ou femelles contenant seulement *n* chromosomes (nombre *haploïde*), soit la moitié du nombre présent dans toutes les autres cellules de l'organisme animal ou du sporophyte végétal (2*n*, ou nombre *diploïde*).

gamétogamie. *n.* Fécondation mettant en cause des gamètes.

gamétogenèse. *n.* Formation des cellules sexuelles, ou *gamètes;* on distingue la formation des cellules mâles : la *spermatogenèse*, et celle des cellules femelles : l'*ovogenèse*.

gamétophyte. *n.* L'une des deux phases de l'alternance de générations. Le gamétophyte porte les organes sexuels où se forment les gamètes.

gammaglobulines. *n.* Protéines du plasma sanguin qui sont des anticorps de protéines étrangères ou des antigènes bactériens.

gamones. *n.* Substances chimiques sécrétées par les gamètes et facilitant leur rencontre.

gamopétale. *adj.* A pétales soudés par leurs marges, au moins en bas.

gamosépale. *adj.* A sépales soudés par leurs marges, au moins en bas.

ganglion de l'habenula. Parties constitutives de l'*épithalamus*.

garrigue. *n.* Formation végétale des régions méditerranéennes constituée de buissons établis sur sol calcaire ou marneux, plus ou moins disséminés et comprenant des romarins, des cistes, des chênes-kermès, etc.

gastrine. *n.* Agent sécréteur du suc gastrique produit par la muqueuse pylorique.

gastrula. *n.* Stade embryonnaire succédant à la *blastula* et au cours duquel s'effectue la mise en place des feuillets embryonnaires : il y a formation de l'intestin primitif.

gastrulation. *n.* Formation de la *gastrula* correspondant à la mise en place des trois feuillets embryonnaires.

gemmule. *n.* Chez certains Spongiaires, forme de résistance assurant la reproduction asexuée. Les gemmules sont libérées à la mort de l'éponge souche et sont constituées de fragments globuleux de 1 à 2 mm de diamètre, renfermant presque toutes les catégories cellulaires qui permettront une régénération facile.

gène. *n.* Segment de chaîne d'ADN, contenu essentiellement dans les chromosomes et déterminant la réalisation d'un certain caractère héréditaire. L'ensemble des gènes est copié lors de chaque mitose de manière à être présent dans toutes les cellules de l'organisme, en particulier dans les cellules sexuelles, qui assurent sa transmission à la génération suivante.

génotype. *n.* Ensemble des caractères pour lesquels l'information nécessaire se trouve stockée dans le code génétique (acide désoxyribonucléique) d'un être. Certains de ces caractères sont exprimés dans son phénotype, d'autres le seront dans celui de ses descendants, d'autres, encore, ne le seront probablement jamais, du moins normalement.

genre. *n.* Ensemble d'espèces présentant entre elles des caractères communs qui leur donnent un aspect caractéristique. Le plus souvent, les espèces d'un genre donné, si elles peuvent être croisées, ne donnent pas de produits fertiles. Des espèces appartenant à deux genres différents se croisent bien plus rarement encore et les produits sont alors très rarement fertiles; cependant, il y a des exceptions et certains genres semblent n'exister que du fait d'un isolement géographique.

gentianose. *n.* Triholoside dont la molécule comporte glucose β - glucose α - fructose β, c'est-à-dire glucose β + saccharose. Abondant dans les racines de gentiane.

géosynclinal. *n.* Bassin très étendu, subsident, dans lequel s'est déposée une grosse épaisseur de sédiments (de 10 à 20 000 m), au cours de plusieurs millions d'années. Le géosynclinal se plisse fortement lors des mouvements de l'écorce terrestre, car c'est une zone de moindre résistance.

géotropisme. *n.* Mouvement de croissance d'un organe végétal déterminé par la gravité, à laquelle l'organe s'oppose (*géotropisme négatif* de la tige) ou obéit (*géotropisme positif* de la racine).

GERL. *n.* Système de tubules situé du côté concave des dictyosomes (appareil de Golgi), donc en liaison avec leurs saccules les plus âgés. Semble exister chez les animaux comme chez les végétaux. L'autre face du dictyosome est nettement en rapport avec le réticulum endoplasmique, qui sert à la production des saccules.

germe. *n.* 1° Formation organisée, d'apparence simple et de petite taille, dont le développement est susceptible de fournir un individu. C'est le cas d'un œuf, d'une bouture, etc. 2° *Par ext.* Ébauche d'un organe ou d'une partie de l'organisme.

germination. *n.* Reprise de la vie active d'une graine (et, par extension, de toute forme de dissémination à vie latente des Cryptogames, en particulier les spores) lorsque les conditions de milieu deviennent favorables.

ghost. *n.* (angl., « fantôme »). 1° Membrane cytoplasmique d'une hématie vidée de son contenu à la suite de l'hémolyse. 2° Toute paroi d'une structure biologique vidée de son contenu.

glaciation. *n.* Phénomène qui s'est reproduit plusieurs fois dans la suite des temps géologiques, particulièrement au cours du Quaternaire : à la suite d'un refroidissement climatique, des glaciers importants ont recouvert certaines régions du globe.

glande. *n.* Organe d'origine épithéliale à fonction sécrétrice.

glande de Brünner. Cellule muqueuse à sécrétion alcaline du duodénum des Mammifères.

glande de Lieberkühn. Cellule de l'épithélium intestinal des Vertébrés (excepté les Poissons) qui sécrète les enzymes du suc intestinal.

glande de mue ou **glande prothoracique.** Glande des Insectes qui sécrète l'*ecdysone*, ou hormone de mue.

glande nidamentaire. Glande sexuelle annexe de la femelle des Poissons Chondrichthyens sécrétant l'albumine et la coque de l'œuf.

glande prothoracique. Syn. de *glande de mue.*

glande septale. Chez les Monocotylédones, écartement localisé entre les deux parois adjacentes des carpelles constituant un gynécée, au niveau duquel les épidermes sécrètent du nectar, qui s'écoule à l'extérieur par un orifice diversement placé.

globine. *n.* Protéine constitutive de l'*hémoglobine* du sang des Vertébrés.

globule polaire. *n.* Cellule haploïde de très petite taille provenant de la mitose de maturation inégale des ovocytes de premier ou de deuxième ordre. Cette cellule n'intervient pas dans le processus normal de la fécondation.

globules blancs ou **leucocytes.** Cellules sanguines complètes classées, selon la forme de leur noyau, en *polynucléaires* et *mononucléaires.* Ces cellules interviennent dans la défense de l'organisme contre les microbes.

globules rouges ou **érythrocytes** ou **hématies.** Cellules sanguines, dépourvues de noyau et colorées par l'hémoglobine, intervenant dans le transport des gaz respiratoires.

globuline. *n.* 1° Anciennement, substance considérée parfois comme constituant sous forme de grains la matière vivante élémentaire 2° Actuellement, catégorie de protéines dont la molécule est de forme arrondie.

globulins ou **plaquettes sanguines.** Corpuscules sanguins de petite taille et dépourvus de noyau; jouent un rôle important dans la coagulation du sang.

glomérule de Malpighi ou **flocculus.** Appareil de filtration du sang dans le rein des Vertébrés. Il est constitué par un peloton de capillaires en relation avec le *tube urinifère.*

glomérulopathie. *n.* Affection des glomérules du rein, qui trouble leur fonction excrétrice.

glucagon. *n.* Hormone sécrétée par le pancréas endocrine et qui augmente la teneur du sang en glucose.

glucane. *n.* Polymère de glucides.

gluconéogenèse. *n.* Production par l'organisme de glucides à partir d'aliments ou de réserves non glucidiques (protides et surtout lipides).

glucoprotéine. *n.* Hétéroprotéine dont le groupement prosthétique est glucidique. *Ex.* Les mucopolysaccharides.

glucosane. *n.* Syn. de *glucane.*

glucose 1-phosphate. « Ester » du glucose où un radical phosphoryle $—PO_3H_2$ est porté par le carbone 1. En fait, l'acide phosphorique est combiné à la fonction aldéhyde et non à une fonction alcool, et le produit est un hétéroside.

glutamine. *n.* Amide de l'acide glutamique

$$H_2N—CO—CH_2—CH_2—\underset{\displaystyle NH_2}{\underset{|}{CH}}—COOH.$$

Un groupe $—NH_2$ est à la place de l'OH de la fonction acide du radical. Ce groupe est la source de l'un des atomes d'azote de la purine lors de la biosynthèse de celle-ci.

glutaraldéhyde. *n.* Le dialdéhyde de l'acide glutarique $HOOC—(CH_2)_3—COOH$ de formule

$$HOC—(CH_2)_3—CHO.$$

Utilisé comme fixateur en microscopie électronique.

glutathion. *n.* Le tripeptide acide glutamique-cystéine-glycocolle, l'acide glutamique étant lié par la fonction acide de son radical. Très répandu et servant au maintien du potentiel d'oxydo-réduction des cellules.

glycémie. *n.* Taux de sucres présents dans le sang des Vertébrés.

glycéraldéhyde. *n.* Syn. d'*aldéhyde glycérique.*

glycéride. *n.* Lipide résultant de l'estérification d'une, deux ou surtout des trois fonctions alcool du glycérol par des acides gras.

glycérol. *n.* Syn. de *glycérine.* Corps à trois fonctions alcool, deux primaires ($— CH_2OH$) et une secondaire ($= CHOH$).

glycine. *n.* Syn. de *glycocolle.*

glycocalyx. *n.* Enveloppe mucopolysaccharidique formée par diverses cellules extérieurement à la membrane cytoplasmique.

glycocolle ou **glycine.** *n.* Le plus simple des acides aminés

$$H—\underset{\displaystyle NH_2}{\underset{|}{CH}}—COOH,$$

très répandu dans toutes les protéines.

glycogène. *n.* Polymère du glucose qui y est disposé en chaîne ramifiée. Présent surtout chez les animaux (« amidon animal »), il se trouve aussi chez les Champignons. Il se colore en brun acajou en présence d'eau iodée.

glycogène-synthétase. Enzyme permettant la synthèse du glycogène à partir de glucose qui, lui, est fourni lié à un nucléotide.

glycogénolyse. *n.* Dégradation du glycogène, impliquant très généralement la phosphorylation du glucose séparé, qui paraît donc d'abord sous forme de glucose 1-phosphate.

glycol. *n.* Dialcool le plus simple, de formule

$$\begin{matrix} CH_2OH \\ | \\ CH_2OH. \end{matrix}$$

C'est un liquide sirupeux comme la glycérine, et un antigel comme elle.

glycolyse. *n.* Dégradation de glucose lors du métabolisme respiratoire ou fermentaire.

gnosie. *n.* Faculté intellectuelle de reconnaître un objet en saisissant sa signification symbolique.

goethite. *n.* Minéral; hydroxyde de fer, ayant pour formule α FeO (OH)

gonadotrophine chorionique. Hormone sécrétée par le placenta des Mammifères, une fois la nidation achevée, et qui assure le maintien du corps jaune ovarien.

gondwana. *n.* Ancien continent de l'hémisphère Sud qui, selon des arguments paléontologiques et stratigraphiques, existait au cours du Paléozoïque. Il s'est fragmenté en donnant l'Amérique du Sud, l'Afrique, Madagascar, l'Arabie, l'Inde péninsulaire, l'Australie et l'Antarctique.

gonochorisme. *n.* Processus au cours duquel, dans une espèce donnée, les sexes sont séparés.

gonocyte. *n.* Stade intermédiaire de la cellule sexuelle situé entre la gonie et le gamète. Il peut être de premier ordre (diploïde) ou de second ordre (haploïde) suivant le nombre de ses chromosomes.

gononéphrotome. *n.* Partie moyenne métamérisée du mésoderme de la *neurula* qui donnera l'appareil uro-génital de l'embryon des Vertébrés, Amphibiens. p. ex.

gorgonine. *n.* Scléroprotéine formant le squelette rigide des gorgones (Cnidaires Octocoralliaires).

gouttière neurale. Formation dorsale issue de la *plaque neurale* de l'embryon des Vertébrés et qui donnera le *tube neural.*

graine. *n.* Organe issu de la transformation de l'ovule et contenant l'embryon de la plante à fleur. La graine, entourée de deux téguments, dont l'un est généralement très résistant, peut demeurer vivante pendant des mois, des décennies et même, dans certains cas, des siècles (jusqu'à 1 700 ans) en attendant les conditions favorables à sa germination.

gramicidine. *n.* Substance antibiotique qui inhibe les phosphorylations oxydatives.

grand dorsal. Muscle dorsal de l'épaule étendu des vertèbres dorsales à l'humérus.

grand nerf pétreux. Branche du nerf facial innervant les glandes de la face, en particulier les glandes lacrymales.

granivore. *adj.* Qui se nourrit de graines. *Ex.* Linotte, poule.

granulométrie. *n.* Classement des grains d'une roche selon leur taille.

granulosa. *n.* Zone granuleuse interne constitutive du *follicule de de Graaf.*

granulose. *n.* Maladie larvaire des Insectes Lépidoptères caractérisée par une attaque virale du corps gras.

granum. *n.* Structure interne du chloroplaste formée d'un empilement de saccules issus de la membrane interne. Manque chez la plupart des Algues.

griséofulvine. *n.* Substance produite par un Champignon du genre *Penicillium*; elle active la biosynthèse de la paroi chez les Champignons.

groupe de liaison. Ensemble de gènes qui apparaissent liés entre eux et indépendants de tous les autres gènes.

groupement prosthétique. Groupement chimique lié à une molécule protéique, mais lui-même de nature non protéique et par conséquent non hydrolysable en acides aminés.

guanine. *n.* Base purique constitutive des acides nucléiques, qui forme un nucléoside avec un sucre (ribose ou désoxyribose). Elle s'apparie toujours avec la cytosine.

guano. *n.* Engrais phosphaté et azoté provenant d'excréments d'Oiseaux ou de chauves-souris.

gubernaculum testis. *n.* Syn. d'*appareil gubernaculaire.*

gymnospermes. *n.* Sous-embranchement des Phanérogames comprenant des arbres dont les ovules et les graines sont nus.

gynécée ou **pistil.** *n.* Organe femelle de la fleur des Angiospermes, constitué de carpelles en nombre variable, libres ou unis les uns aux autres de diverses manières et formant sur leurs bords les ovules qui deviendront les graines.

gyrencéphalie. *n.* Torsion affectant l'organisation du système nerveux des Mammifères.

H

hachereau. *n. Galet aménagé* travaillé par retouches successives et présentant une arête tranchante.

hadal. *adj.* **(étage).** Zone la plus profonde du benthos où ne subsistent que quelques formes animales.

halophile. *n.* Qui vit en milieu salé (plantes des déserts salés et des plages).

hambourgien. *adj.* Qualifie la civilisation du Paléolithique supérieur qui s'est développée dans la plaine glaciaire de l'Europe du Nord.

haplobiontique. *adj.* Qualifie le cycle d'un organisme dont la phase *haploïde* est prépondérante par rapport à la phase *diploïde,* réduite. *Ex.* Cycle des Sporozoaires.

haplo-diplobiontique. *adj.* Qualifie le cycle d'un organisme caractérisé par l'alternance de deux générations d'égale durée, l'une *haploïde* et l'autre *diploïde*. *Ex.* Cycle des Foraminifères.

haploïde. *adj.* Qui possède un nombre de chromosomes de moitié inférieur à celui des cellules somatiques. C'est le cas des gamètes, formés après réduction chromatique, ou *méiose*, et dont l'union (la fécondation) produira un œuf diploïde.

haptotropisme. *n.* Mouvement de croissance d'un organe végétal déterminé par une excitation mécanique de contact, comme celle qui cause l'enroulement d'une vrille.

hasté. *adj.* Muni de deux lobes inférieurs horizontaux ou obliques.

heLa (cellules). Souche de cellules humaines dérivant d'une tumeur utérine. Les lettres HeLa sont les initiales de la malade dont provenait celle-ci. Très cultivées dans le monde entier et utilisées pour toutes sortes de travaux de biologie cellulaire.

héliophyte. *adj.* Qualifie une plante dont le développement exige une grande quantité de soleil.

héliotropisme. *n.* Mouvement de croissance d'un organe végétal déterminé par la direction du soleil. Il est positif ou négatif. C'est un cas particulier de *phototropisme*.

hématie. *n.* Syn. de *globule rouge du sang*.

hématite. *n.* Minéral; oxyde de fer ferrique, ayant pour formule Fe_2O_3.

hématophage. *adj.* Qui se nourrit de sang.

hématopoïèse. *n.* Formation de cellules sanguines par le système réticulo-endothélial constitué de la moelle osseuse, des ganglions lymphatiques et de la rate.

hématoxyline. *n.* Substance extraite du bois de campêche et formant avec des sels (aluns de fer) un colorant noir très précieux pour la coloration de la chromatine et des mitochondries.

hème. *n.* Groupement prosthétique de l'*hémoglobine* du sang des Vertébrés constitué d'un groupement porphyrinique uni à un atome de fer.

héméropériode. *n.* Période d'éclairement.

hémérythrines. *n.* Pigments respiratoires non porphyriniques du sang de certains Vers.

hémibranchie. *n.* Ensemble des lames branchiales situées du même côté d'un *septum* chez les Poissons Sélaciens.

hémicryptophyte. *n.* Plante en rosette dont les bourgeons restent l'hiver à la surface du sol.

hémisphères cérébelleux. Excroissances latérales paires du *cervelet* des Mammifères. Ces formations contrôlent la motricité volontaire.

hémocyanines. *n.* Pigments caractéristiques de l'hémolymphe des Vers.

hémocytoblastes. *n.* Cellules initiales des futures cellules sanguines présentes dans les îlots vasculo-sanguins de l'embryon des Vertébrés.

hémodynamique. *n.* 1° Modalités de l'écoulement du sang dans les vaisseaux. 2° Science qui étudie ces phénomènes.

hémoglobine. *n.* Pigment respiratoire du sang des Vertébrés constitué d'une protéine spécifique, la *globine*, associée à un groupement prosthétique, l'*hème*.

hémolymphe. *n.* Milieu intérieur des Invertébrés, correspondant à la fois au sang et à la lymphe.

hémolyse. *n.* Éclatement de la membrane cytoplasmique d'une hématie, avec fuite de l'hémoglobine dans le milieu. Consécutif à un afflux d'eau à partir d'un milieu hypotonique.

hémolysine. *n.* Substance toxique qui produit l'*hémolyse* (l'éclatement) des globules rouges.

hémophilie. *n.* Anomalie héréditaire de la coagulation du sang due à l'absence de globuline antihémophilique A ou B. Cette maladie atteint les hommes auxquels elle est transmise par les femmes, en général non affectées (sauf les homozygotes).

hémorragine. *n.* Toxine qui altère l'*endothélium* de la paroi des vaisseaux sanguins.

héparine. *n.* Substance complexe, comprenant des polymères de sucres sulfatés et aminés et des polypeptides. D'origine animale (foie, poumon), elle est douée d'une puissante activité anticoagulante.

hépatite. *n.* Maladie virale du foie des Vertébrés détruisant les cellules hépatiques et produisant, chez l'homme, un ictère (jaunisse).

herbicide. *n.* Substance chimique détruisant les mauvaises herbes.

herbivore. *adj.* Qualifie un animal qui se nourrit d'herbe. *Ex.* Ruminants, certains Oiseaux.

hérédité liée au sexe. Transmission des caractères parentaux portés par les gènes situés sur les chromosomes sexuels.

hermaphrodisme. *n.* État d'un organisme possédant de façon *simultanée* des gonades des deux sexes (*ex.* escargot). Il existe aussi des organismes dotés d'un hermaphrodisme *successif* : ils sont d'abord mâles puis femelles. *Ex.* Crépidule.

herpès. *n.* Inflammation cutanée qui se présente sous la forme de vésicules groupées sur un épiderme irrité.

hétérocaryon. *n.* Chez les Champignons Ascomycètes, type de filament contenant deux sortes de noyaux haploïdes qui proviennent de deux souches différentes.

hétérochromatine. *n.* Chromatine restant condensée et colorable, alors que la chromatine ordinaire, déspiralisée, ne l'est plus.

hétérochromosome. *n.* Chromosome de forme et de colorabilité différentes des autres, et dont la présence est généralement liée au sexe de l'individu.

hétéroduplex. *n.* Molécule d'ADN formée d'un brin provenant d'un chromosome et d'un brin provenant de son homologue.

hétérogame ou **hétérogamique** ou **anisogame.** *adj.* Où se manifeste l'hétérogamie.

hétérogamétique. *adj.* Qualifie le sexe produisant deux types de gamètes différents par leurs chromosomes, les uns donnant des mâles et les autres des femelles. Chez les Lépidoptères et les Trichoptères, les femelles sont hétérogamétiques, tandis que chez tous les autres Insectes, ce sont les mâles.

hétérogamie ou **anisogamie.** *n.* Fécondation entre gamètes de forme et de taille différentes.

hétérogène. *adj.* **(induction).** Qualifie une induction provoquée par des tissus ou des agents chimiques divers.

hétérogreffe. *n.* Greffe où le donneur de greffon et le porte-greffe appartiennent à des espèces différentes.

hétérolécithe ou **hétérolécithique.** *adj.* Qualifie un type d'œuf qui renferme une teneur moyenne en vitellus, celui-ci étant réparti de façon inégale dans toute la cellule. *Ex.* Œuf de certains Échinodermes, de certains Poissons et d'Amphibiens.

hétérologue. *adj.* Qualifie une même substance organique issue d'animaux de différentes espèces.

hétéromorphose. *n.* Régénération qui donne naissance à un nouvel organe différent de l'organe amputé.

hétéroprotéine. *n.* Protéine comportant, en plus de chaînes d'acides aminés, une ou plusieurs molécules de nature non protéique, qui forment son *groupement prosthétique*.

hétéropycnotique. *adj.* Qui se colore plus intensément que les autres éléments nucléaires ou reste coloré à des moments où ils ne le sont plus.

hétérosis ou **hétérozygosis** ou **vigueur hybride.** Phénomène génétique qui renforce la vigueur d'une population par des croisements entre individus présentant des caractères extrêmement différents.

hétérosome. *n.* Chromosome sexuel; s'oppose à *autosome*.

hétérozygosis. *n.* Syn. d'*hétérosis*.

hétérozygote. *adj.* Caractérise une cellule (et, par extension, un organisme) qui possède deux allèles différents d'un même gène. *N.* Un hétérozygote.

hibernation. *n.* Période pendant laquelle certains animaux entrent en léthargie par suite de mauvaises conditions (froid, neige).

histidine. *n.* Acide aminé hétérocyclique.

histiocyte. *n.* Cellule amiboïde du tissu conjonctif, arrondie, à cytoplasme abondant et noyau réniforme excentrique, munie de vacuoles. Les histiocytes peuvent emmagasiner des colloïdes et sont voisins des macrophages, lesquels sont toutefois aptes à la phagocytose de particules visibles au microscope optique, à la différence des hystiocytes.

histochimie. *n.* Étude de la constitution chimique des éléments des tissus vivants d'après l'observation de réactions de coloration, de précipitation, etc., au microscope optique ou électronique.

histofluoroscopie. *n.* Examen de la fluorescence des éléments d'un tissu ou d'une cellule et détermination éventuelle de son spectre, permettant des conclusions sur la nature des substances en cause.

histologie. *n.* Étude des tissus. En botanique, se nomme souvent *anatomie*. Le terme d'*anatomie générale* lui était anciennement appliqué en biologie animale.

histolyse. *n.* Destruction d'un tissu par l'activité de ses propres cellules, d'autres cellules du même organisme, ou par l'action d'un parasite.

histones. *n.* Protéines globulaires liées aux *acides nucléiques*.

histospécifique. *ad.* Particulier à un tissu déterminé.

hivernation. *n.* Période pendant laquelle certains animaux entrent en léthargie par suite des basses températures de l'hiver. *Ex.* Crapaud, marmotte, etc.

holisme. *n.* Thèse psychologique selon laquelle l'organisme forme un tout différent de la somme des parties qui le composent.

holobranchie. *n.* Ensemble formé par les deux *hémibranchies* d'un même *septum* chez les Poissons Sélaciens.

holocrine. *adj.* Caractérise un mode de sécrétion au cours de laquelle la cellule excrétrice est entièrement expulsée.

holoplancton. *n.* Plancton constitué d'organismes qui sont planctoniques durant toute leur vie.

holoprotéine. *n.* Protéine constituée uniquement de chaînes d'acides aminés.

homéomère. *adj.* Qui se compose de matière homogène.

homéomorphie. *n.* Syn. d'*homotypie*.

homéostasie. *n.* État stable de l'organisme, qui répond aux atteintes du milieu par des réactions propres à maintenir ses paramètres caractéristiques.

homéotherme. *adj.* Qualifie un animal dont la température interne est constante et indépendante de celle du milieu extérieur. *Ex.* Les Oiseaux et les Mammifères.

hominisation. *n.* Ensemble des processus qui ont participé à la phylogenèse humaine; parmi ceux-ci, la *bipédie* et la *céphalisation* sont les plus caractéristiques.

homme de Néandertal. Premier Hominien fossile pouvant être considéré comme un Homme. Très largement répandu sur la planète (Europe, Afrique du Nord et du Sud, Asie), il vécut entre — 70 000 et — 35 000 ans.

homochromie. *n.* Ressemblance, portant sur la couleur, entre un animal et le substrat sur lequel il vit, lui permettant de se soustraire à l'attention de ses prédateurs.

homogamétique. *adj.* Qualifie le sexe produisant un seul type de gamètes.

homogénat. *n.* Produit du broyage très fin d'un tissu vivant *(homogénéisation)* qui le transforme en un milieu d'apparence homogène, dans lequel les membranes cellulaires sont rompues et les organites répandus.

homologie. *n.* Caractère des éléments homologues.

homotypie ou **homéomorphie.** *n.* Ressemblance morphologique entre un animal et certains éléments du milieu dans lequel il vit : le phasme présente ainsi l'aspect d'une brindille, la phyllie celui d'une feuille.

homoxylé. *adj.* **(bois).** Qui ne contient, en plus des rayons médullaires et d'un peu de parenchyme ligneux, que des trachéides.

homozygote. *adj.* Caractérise une cellule (et, par extension, un organisme) qui possède deux allèles identiques d'un même gène. *N.* Un homozygote.

horizon. *n.* Couche caractéristique d'un sol.

hormone. *n.* Substance excitatrice d'organes élaborée par des glandes à sécrétion interne (endocrines) et déversée dans la circulation générale par l'intermédiaire du sang. *Par ext.,* voir *phéromones.*

hormone antidiurétique. Syn. d'*adiurétine.*

hormone de mue. Syn. d'*ecdysone.*

hormone juvénile. Syn. de *néoténine.*

humivore. *adj.* Qui se nourrit d'humus. *Ex.* Insectes Collemboles.

humulone. *n.* Résine du houblon qui détermine l'amertume de la bière et la formation de la mousse.

humus. *n.* Couche superficielle du sol résultant de l'interaction entre les éléments de la roche sous-jacente, les éléments morts d'origine biologique qui la recouvrent et les êtres vivants qui y prospèrent.

hyaloplasme. *n.* Portion du cytoplasme dans laquelle aucune structure n'est décelable au microscope électronique. Les organites baignent dans le hyaloplasme.

hybride. *n.* Animal ou végétal issu du croisement de deux parents appartenant à des espèces différentes. Improprement employé à la place de *métis,* qui est le produit du croisement de deux individus de la même espèce hétérozygote.

hybridation. *n.* En biochimie, union par liaison hydrogène de molécules d'ARN et d'ADN à chaîne simple. Se produit si les séquences de bases des deux types de molécules sont homologues. L'intensité du phénomène dans un mélange d'ADN et ARN donnés permet d'apprécier la proportion de molécules des deux types manifestant cette homologie. Dit plus exactement *hybridation moléculaire.*

hydathode. *n.* Structure des végétaux vasculaires servant à l'excrétion de l'eau, et formée souvent d'un parenchyme (épithème) plus ou moins différencié et en rapport avec une nervure. L'eau excrétée sort par un ou plusieurs *stomates aquifères.* D'autres hydathodes sont des poils particuliers.

hydrocarbure. *n.* Composé organique constitué d'hydrogène et de carbone, existant à l'état gazeux, liquide ou solide.

hydrogène sulfuré. L'acide sulfhydrique H_2S, gaz à odeur d'œufs pourris, dont les sels sont les sulfures.

hydroïde. *n.* Cellule morte, présente dans la tige des Muscinées, ressemblant à des éléments de vaisseaux de bois. Les hydroïdes sont perforées à l'extrémité chez les Sphaignes, mais non chez les Mousses.

hydrolase. *n.* Enzyme déterminant l'hydrolyse de certaines liaisons réalisées avec élimination d'eau entre les produits liés (acides aminés, sucres simples, etc.).

hydrolysat. *n.* Mélange apparaissant après hydrolyse d'une substance, une protéine en particulier, et contenant les éléments isolés par l'hydrolyse (acides aminés, peptides).

hydrolyse. *n.* Rupture d'une liaison chimique avec fixation sur les valences libérées de groupements —H et —OH provenant de l'eau. Se produit en présence d'acides ou de bases, ou bien grâce à des enzymes (hydrolases).

hydrophile. *adj.* Qui a de l'affinité pour l'eau et les milieux aqueux.

hydroponique. *adj.* **(culture).** Culture effectuée sans sol, les racines des plantes baignant dans une solution aqueuse des éléments nutritifs convenables.

hydrotropisme. *n.* Mouvement de croissance d'un organe végétal déterminé par la proximité de l'eau.

hygrophile. *adj.* Caractérise un organisme animal ou végétal vivant dans des endroits très humides.

hymen. *n.* Membrane qui obstrue l'orifice vaginal chez la vierge.

hyostylique. *adj.* Qualifie l'articulation de la mâchoire de la plupart des Poissons chez lesquels l'hyomandibulaire est l'élément essentiel de la suspension.

hyperglycémie. *n.* Taux de glucose sanguin supérieur au taux normal.

hyperplasie compensatrice. Chez les Mammifères, augmentation du nombre des cellules par multiplication mitotique après l'ablation totale ou partielle de certains organes (rein p. ex.).

hypertélie. *n.* Évolution des organismes au sein d'un groupe; se manifeste par une augmentation de taille.

hypertélisme. *n.* Développement anormal de certains organes qui peuvent devenir inutiles ou nuisibles. *Ex.* Les bois gigantesques de certains Cervidés; les mandibules des lucanes mâles.

hypertrophie. *n.* Développement exagéré d'un organe ou d'un tissu.

hypochlorites. *n.* Sels de l'acide hypochloreux HClO. L'hypochlorite de K ou Na (KClO, NaClO) est l'eau de javel, qui peut aussi être de l'hypochlorite de Ca [$Ca(ClO)_2$], suivant qu'elle a été obtenue par action du Cl sur la potasse, sur la soude, ou sur la chaux éteinte.

hypochromatique. *adj.* Qui se colore moins intensément que d'habitude par les techniques histologiques de coloration.

hypoderme. *n.* 1° Couche profonde de la peau qui contient les réserves de graisse. 2° Improprement, syn. d'*épiderme* chez les animaux (tels que les Arthropodes) qui possèdent une cuticule.

hypogammaglobulinémie. *n.* Affection dans laquelle le sujet présente une concentration insuffisante de γ-globulines dans le sang. Comme celles-ci constituent les anticorps, le sujet est plus exposé aux infections.

hypoglycémie. *n.* Taux de glucose sanguin inférieur au taux normal.

hypolimnion. *n.* Zone profonde d'un lac ou d'un étang dont la température reste très faible et constante.

hyposulfite. Sel de formule $Na_2S_2O_4$, rapidement oxydé par l'air en sulfite $NaHSO_3$. Réduit l'indigo et permet sa dissolution dans l'eau.

hypothalamus. *n.* Plancher du *diencéphale* des Vertébrés comprenant des centres coordinateurs du système sympathique et siège de neurosécrétions transmises jusqu'à l'*hypophyse.*

hypothalamus antérieur ou **chiasmatique.** Région antérieure de l'*hypothalamus* où se situe le chiasma optique. Cette zone comporte également deux noyaux importants, un supra-optique et un paraventriculaire.

hypothalamus moyen ou **infundibulo-tubérien.** Région moyenne de l'*hypothalamus* où le troisième ventricule forme un cul-de-sac conique, le *récessus infundibulaire,* autour duquel les parois épaissies constituent le *tuber*; ce dernier contient de nombreux noyaux. Cette région est reliée ventralement à l'*hypophyse* par la tige pituitaire.

hypothalamus postérieur ou **olfactif.** Région postérieure de l'hypothalamus constituée essentiellement par les tubercules mammillaires en relation avec le rhinencéphale.

I - J - K

ichnologie. *n.* Étude des traces résultant du déplacement des organismes.

îlots de Langerhans. Ensemble de cellules pancréatiques qui sécrètent l'insuline.

imine. *n.* Corps correspondant au remplacement de deux des atomes d'hydrogène de l'ammoniac (NH_3) par un radical bivalent.

immortalité cellulaire potentielle. Possibilité théorique de reproduction cellulaire *ad infinitum,* dans l'hypothèse où des conditions de milieu adéquates assureraient l'élimination fréquente des déchets et l'apport des substances de croissance.

immunoélectrophorèse. *n.* Technique combinant l'électrophorèse et l'obtention de complexes entre l'un ou plusieurs des corps qu'elle sépare et un immunsérum spécifique de ceux-ci.

immunoglobulines. *n.* Protéines du groupe des globulines, constituant les anticorps.

immunologie. *n.* Étude de la réaction immunitaire (formation d'anticorps à la présence des produits antigéniques).

immunsérum ou **sérum immunisant.** *n.* Sérum d'animal immunisé contre un antigène déterminé; contient l'anticorps correspondant.

indice céphalique. Critère anthropologique évalué par le rapport :

$$\frac{\text{largeur de la tête}}{\text{longueur de la tête}} \times 100.$$

indice cranio-facial. Critère anthropologique qui évalue le rapport entre les longueurs du crâne et de la face.

indice de réfraction. Rapport entre les sinus des angles faits par un rayon lumineux avec la normale en entrant dans un milieu différent, et une fois à l'intérieur de celui-ci. Définit l'ampleur du changement de direction (« cassure ») du rayon, c'est-à-dire le pouvoir réfringent d'un des milieux par rapport à l'autre.

indole acétonitrile. *n.* Nitrile de l'acide indole-acétique, dont le groupe —COOH est remplacé par —C≡N. Formé à partir du tryptophane (acide aminé à noyau indole), il est ensuite transformé en acide indole-acétique.

inducteur. *n.* 1° Portion de l'organisme embryonnaire susceptible d'agir sur une ou plusieurs autres pour commander leur différenciation. 2° Substance qui permet cette action. 3° Substance qui provoque la synthèse d'une enzyme. *Adj.* Qui est apte à commander la différenciation (de parties voisines). *Ex.* La vésicule optique est inductrice du cristallin.

inducteur mésoblastogène. Protéine provoquant l'*induction* d'un territoire du germe en mésoblaste.

inducteur neural. Protéine qui, associée à de l'acide ribonucléique, provoque l'*induction* d'un territoire du germe en système nerveux.

inductible. *adj.* **(enzyme).** Qui n'est synthétisée par la cellule qu'à la suite d'une induction par son substrat.

induction. *n.* 1° Processus tel que la détermination et le développement d'un territoire de l'embryon dépendent des stimulations de massifs cellulaires voisins. 2° Augmentation du taux de synthèse de certaines enzymes sous l'effet d'un inducteur, leur substrat en général, ou déclenchement de cette synthèse.

inflammation. *n.* Réponse tissulaire localisée de l'organisme à une atteinte extérieure, généralement une infection, avec le plus souvent afflux de globules blancs de divers types.

inflorescence. *n.* Groupe de fleurs formé par la tige après que la plante ou le rameau concerné a atteint l'état reproducteur.

infralittoral. *adj.* **(étage).** Zone maritime peu profonde mais toujours immergée, juste en dessous du niveau des basses mers.

infusion. *n.* Milieu aqueux résultant du séjour de matière végétale dans l'eau chaude mais non en ébullition.

ingesta. *n.* Nom donné aux substances ingérées par un organisme.

initiation. *n.* Première étape de la cancérisation qui peut durer plusieurs mois. Elle consisterait en une « préparation » du tissu qui amènerait la *promotion.*

inlandsis. *n.* Calotte glaciaire qui recouvre les terres polaires sur d'immenses étendues.

inné. *adj.* Qui est acquis à la naissance.

insaturé. *adj.* Qui possède des doubles liaisons —C = C— ou des triples liaisons —C ≡ C—.

insecticide. *n.* Substance chimique détruisant les Insectes. *Ex.* D.D.T., parathion.

instinct. *n.* Pulsion naturelle qui dirige les animaux dans leur comportement.

instinctivisme. *n.* Syn. d'*objectivisme.*

insula. *n.* Lobe de l'encéphale des Primates situé dans le fond de la scissure de Sylvius.

insuline. *n.* Hormone produite par le pancréas endocrine et réglant l'utilisation du glucose par les cellules de l'organisme entier et du foie.

intensif. *adj.* Qualifie l'appareil radiculaire de certaines plantes, très développé dans tous les sens de l'espace. *Ex.* Appareil radiculaire des Graminées.

interface. *n.* Zone de contact entre deux milieux non miscibles.

interférence. *n.* En génétique, probabilité pour que la formation d'un *crossing-over* diminue la possibilité d'en trouver un autre.

interféron. *n.* Protéine cellulaire induite par la présence d'un virus et qui protège la cellule contre une autre attaque virale.

intermédiaire. *n.* Os court, central, de la cheville ou du poignet *(basipode)*, situé à l'extrémité des deux os constituant le *zeugopode.*

intersexué. *n.* Organisme possédant un appareil reproducteur fonctionnel d'un sexe, associé à des caractères de l'autre sexe.

intragénique. *adj.* Qui concerne l'intérieur d'un gène, conçu comme un segment de chaîne désoxyribonucléique.

introgression. *n.* Processus au cours duquel deux populations d'une même espèce peuvent échanger du matériel génétique.

introrse. *adj.* Qui s'ouvre vers l'intérieur de la fleur. *Ex.* Une étamine introrse.

inversion. *n.* Arrangement intrachromosomique tel qu'un segment chromosomique est inversé dans une souche par rapport à une autre.

inversion sexuelle. Chez un organisme d'un sexe donné, transformation en organisme du sexe opposé : ainsi, les crépidules (Mollusques) mâles deviennent femelles.

in vitro. (lat. « dans le verre »). Hors du milieu naturel où vit un organisme, hors de l'organisme auquel appartiennent des organes ou des cellules, ou hors des cellules ou tissus dans lesquels se trouvent normalement des substances organiques. En milieu artificiel inerte.

in vivo. (lat. « dans le vivant »). Dans l'organisme entier vivant de sa vie normale.

involution. *n.* Disparition progressive spontanée d'une structure.

iodopsine. *n.* Pigment visuel localisé dans les *cônes* de la rétine des Vertébrés.

ion. *n.* Corpuscule chargé apparaissant lors de la mise en solution de certaines substances. Peut correspondre à un seul atome, ou à un groupe d'atomes, ayant gagné ou perdu des électrons par rapport à leur condition normale, ce qui entraîne leur charge et les propriétés d'électrolyte du corps dissous.

ionisation. *n.* Dissociation en ions.

isoélectrique *adj.* **(point** ou **pH).** pH auquel un acide aminé, une protéine, ou en général une substance amphotère ne sont pas chargés, et ne migrent donc pas dans un champ électrique. La dissociation des fonctions acides et basiques se compensent à ce point.

isohumique. *adj.* Qualifie un sol dont l'humus est réparti de façon homogène.

isolement. *n.* Qu'il soit géographique, éthologique, mécanique ou génétique, facteur indispensable à la genèse d'une espèce, selon les théories évolutionnistes.

isolement sexuel. État d'une souche dont le croisement avec d'autres souches n'est plus possible pour diverses raisons (géographique, chromosomique, etc.).

isomère. *n.* Composé chimique dont les molécules sont constituées des mêmes atomes que celles d'un autre composé semblable du même corps, mais sont liées de façon à occuper des positions différentes.

isomérisation. *n.* Transformation chimique d'un composé en un autre, qui en est isomère.

isoprotérénol. *n.* Isopropylnoradrénaline. Composé sympathicomimétique β-adrénergique. Accroît l'énergie et le débit du cœur et dilate les bronches. Utilisé notamment en cardiologie et dans le traitement de l'asthme. Dit aussi *isoprénaline.*

isopycnique. *adj.* **(centrifugation).** Centrifugation d'un mélange au sein d'un milieu de dispersion de densité graduée : les constituants du mélange, séparés grâce à la centrifugation, se placeront dans la zone du milieu dont la densité est identique à la leur. Cette flottation, associée à la centrifugation, permet une meilleure séparation.

isotonique. *adj.* **(solution).** Qui a la même pression osmotique (qu'une autre solution).

isotope. *n.* Substance chimique ne différant d'une autre que par le nombre des neutrons des noyaux de ses atomes. Deux isotopes auront donc les mêmes propriétés chimiques, dues à leurs électrons, mais des masses atomiques différentes. Certains sont radioactifs.

isotrope. *adj.* Qui a des propriétés identiques quelle que soit la direction où l'on se place.

isthme. *n.* Portion rétrécie de l'oviducte des Oiseaux sécrétant les deux membranes coquillières de l'œuf.

juglone. *n.* Substance chimique élaborée par les parties aériennes des noyers et inhibant le développement de certaines plantes sous ces arbres.

kératinase. *n.* Enzyme qui hydrolyse la *kératine,* protéine fibrillaire des cellules superficielles de la peau des Vertébrés terrestres et des phanères (poils, cheveux, etc.).

kinétine. *n.* La 6-furfuryl-aminopurine, hormone végétale essentielle, agissant sur la division cellulaire, les migrations dans l'appareil conducteur, etc.

kinines. *n.* Hormones végétales voisines de la kinétine, à rôles comparables.

L

labile. *adj.* Qui est facilement décomposé par la chaleur, la lumière, etc., ou dans l'organisme par les enzymes.

labyrinthe ou **oreille interne.** *n.* Ensemble de cavités remplies d'un liquide clair, l'*endolymphe,* qui constitue le système stato-acoustique de l'oreille interne des Vertébrés.

lactase. *n.* Enzyme qui hydrolyse le lactose, sucre disaccharide fondamental du lait des Mammifères.

lagena. *n.* Diverticule du *saccule* ventral de l'oreille interne des Vertébrés.

lait utérin. Liquide nutritif dans lequel baigne l'embryon des Mammifères comme les marsupiaux, le porc et le cheval. Cette sécrétion des glandes utérines est absorbée par l'embryon au niveau du placenta.

lamarckisme. *n.* Conçue par Jean-Baptiste de Monet, chevalier de Lamarck, biologiste au Muséum de Paris, théorie évolutionniste selon laquelle l'utilisation ou la non-utilisation d'un organe entraîne son développement ou son atrophie, caractère qui se transmet aux générations suivantes.

lamelle moyenne. Lame de substances pectiques, colorables au rouge de ruthénium, située entre deux cellules végétales et apparue lors de leur formation par division d'une cellule mère, au sein des vésicules qui constituent la plaque cellulaire.

lame mince. Très fine section de roche (de l'ordre du dixième de millimètre) montée entre lame et lamelle de verre, en vue d'une étude au microscope. Syn. de *plaque mince.*

lames latérales du mésoderme. Feuillets mésodermiques délimitant le cœlome des Vertébrés.

lanoline. *n.* Substance grasse imprégnant la laine et sécrétée par les glandes sébacées du mouton (« graisse de laine »). Riche en cholestérol et autres stérols grâce auxquels, à la différence des autres graisses, elle est miscible à l'eau (émulsion due au caractère bipolaire des stérols).

larynx. *n.* Partie antérieure différenciée de la trachée des Vertébrés. Il est renforcé par des éléments cartilagineux qui proviendraient des derniers *arcs branchiaux.*

latex. *n.* Liquide produit dans les cellules laticifères. Les latex sont riches en caoutchouc, pour lequel certains d'entre eux sont exploités; ils contiennent aussi des enzymes, de l'amidon, éventuellement des alcaloïdes, etc.

laticifères. *n.* 1° Canal sécrétant du latex (caoutchouc, etc.). Peut être formé d'une seule cellule devenue géante et formant un syncytium par multiplication de ses noyaux *(laticifère vrai),* ou bien d'une succession de cellules fusionnées par leurs parois contiguës *(laticifère articulé).* 2° Chez les Champignons (lactaires), filament de mycélium sécrétant des substances comparables au latex. *Adj.* Cellule ou hyphe laticifère.

laurasia ou **laurasie.** *n.* Ensemble des continents de l'hémisphère Nord, qui se trouvaient en continuité jusqu'au Mésozoïque. La Laurasia était séparée du Gondwana (continent de l'hémisphère Sud) par une mer, la *Téthys.*

lécithinases. *n.* Enzymes détachant de la lécithine l'acide gras insaturé (lécithinase A), puis l'acide gras saturé du produit résultant de l'action précédente (lécithinase B), ou encore la choline et l'acide phosphorique (phosphorylcholine) en respectant les acides gras (lécithinase C, ou phospholipase). Enfin, la lécithinase D détache seulement la choline.

lécithine. *n.* Phospholipide dans lequel deux fonctions alcool du glycérol sont estérifiées par des acides gras (un saturé et un insaturé) ; le troisième l'est par une molécule d'acide phosphorique, elle-même liée à une molécule de choline. Elle est soluble dans l'alcool, l'éther, mais non dans l'acétone. La lécithine est abondante dans le jaune d'œuf.

lécithocœle. *n.* Cavité de la blastula des Mammifères, remplie de réserves nutritives.

leibnitzien. *adj.* Relatif à la pensée de Leibnitz, philosophe et mathématicien du XVII[e] siècle pour lequel tous les êtres vivent en harmonie.

lémurie. *n.* Ancien continent indo-malgache, postulé autrefois par certains biogéographes pour expliquer la présence des lémurs — sortes de singes primitifs — à la fois en Inde et à Madagascar.

lenticelle. *n.* Ouverture ménagée dans la couche de liège formée par l'assise génératrice externe d'une tige ou d'une racine, et permettant les échanges gazeux. Les fentes sombres d'un bouchon de liège sont des lenticelles.

lépidotriche. *n.* Rayon ossifié qui soutient les nageoires des Poissons Ostéichthyens.

leptoïde. *n.* Cellule présente dans la tige des Mousses, comparable à celles du liber des plantes à fleur. Les leptoïdes entourent des hydroïdes qui ressemblent à du bois, quoiqu'elles soient, le plus souvent, non lignifiées.

leptotène. *n.* Début de la prophase méiotique caractérisé par l'apparition des chromosomes sous forme de longs filaments grêles.

leucocyte. *n.* Syn. de *globule blanc.*

leucose. *n.* Maladie virale maligne des globules blancs dont la multiplication anarchique est le symptôme essentiel.

leurre. *n.* Objet utilisé dans l'étude du comportement animal, et destiné à provoquer une séquence comportementale en trompant le sujet expérimenté.

levain. *n.* Mélange de micro-organismes susceptibles de provoquer une fermentation dont le dégagement gazeux fera lever une pâte (pain ou fromage.)

levallois. *n.* Type de technique utilisée par certaines civilisations préhistoriques qui consiste à produire des éclats de pierre.

lévogyre. *adj.* Qui dévie vers la gauche le plan de polarisation de la lumière polarisée.

L.F.R.F. Voir *Luteinising-Folliculo-Releasing-Factor.*

L.H. Voir *Luteinising-Hormone.*

liaison. *n.* En génétique, situation de deux allèles qui ne ségrègent pas étant donné leur localisation sur le même chromosome.

liaison hydrogène. Liaison chimique, lâche, se faisant par l'intermédiaire d'un atome d'hydrogène qui, son électron étant engagé dans une liaison ordinaire de covalence, voit son proton libre de manifester sa charge positive et d'attirer une charge négative voisine.

liber interne. Liber situé à l'intérieur du bois, qui se présente en massifs séparés de ce dernier par du parenchyme. Se rencontre surtout chez les Gamopétales et les Cucurbitacées.

libido. *n.* Terme psychanalytique proposé par Freud pour désigner l'énergie fondamentale de l'être vivant, telle qu'elle se manifeste par la sexualité principalement.

liège. *n.* Tissu constitué de cellules mortes, aplaties, à parois incrustées d'une substance légère et résistante, la subérine. Formé vers l'extérieur par une assise génératrice, née dans l'écorce de la tige ou de la racine, et qui produit vers l'intérieur une nouvelle écorce (écorce secondaire).

ligne latérale ou **système latéral.** Système sensoriel formé par une disposition régulière de papilles situées sur le côté du corps d'un Poisson, par exemple, et qui recueille les variations de pression de l'eau.

ligne primitive. Sillon longitudinal renflé antérieurement en un nœud de Hensen et résultant de la gastrulation d'un œuf d'Oiseau p. ex.

lignée. *n.* Au cours de l'évolution, série d'espèces nées successivement les unes à partir des autres.

lignée pure. Souche homozygote pour un gène considéré. *Ex.* Drosophile de type « sauvage » à yeux rouges.

lignine. *n.* Substance s'incrustant dans les parois des cellules du bois, responsable de la lignification. Polymère de composés aromatiques à fonction aldéhyde. Difficilement attaquable, elle est pourtant décomposée par certains Champignons.

lignivore. *adj.* Qui peut se nourrir de lignine.

ligule. *n.* Formation membraneuse ventrale de la surface de diverses feuilles et pièces florales (surtout les Lycopsides et les Angiospermes) de signification variable. Vascularisée ou non.

limaçon. *n.* Syn. de *cochlée.*

limbe. *n.* Partie plate d'une feuille, portée par la queue, ou pétiole.

lipase. *n.* Enzyme dégradant les lipides en séparant les acides gras et le glycérol.

lipoïde. *n.* Ancien terme désignant les substances, en particulier lipidiques, miscibles à divers solvants, notamment aux narcotiques (chloroforme, éther).

lipoprotéine. *n.* Hétéroprotéine dont le groupement prosthétique est lipidique. Le sérum sanguin, les membranes cellulaires en contiennent.

liquide amniotique. Liquide remplissant la cavité amniotique de l'embryon.

liquide céphalo-rachidien. Liquide organique qui circule dans les ventricules de l'encéphale et dans l'axe de la moelle épinière.

liquide interstitiel. Liquide présent entre les cellules d'un tissu, sécrété par certaines d'entre elles ou provenant d'autres tissus.

lissencéphale. *adj.* Qualifie le cerveau de certains Vertébrés, dépourvu ou faiblement pourvu de circonvolutions.

lithique. *adj.* Qui est constitué par de la pierre.

lithophile. *adj.* Qui recherche la présence de pierres.

lobe polaire. Portion du pôle végétatif de l'œuf du dentale (Mollusque) qui conduira à la formation du mésoderme de l'embryon.

lobes optiques. Syn. de *tectum.*

loculicide. *adj.* **(déhiscence).** Qui se produit suivant une fente longitudinale au milieu du dos des carpelles constituant le fruit.

locus. *n.* 1° Emplacement d'un gène ou de ses allèles sur un chromosome. 2° Région délimitée de l'encéphale et impliquée dans une séquence comportementale précise.

loge pollinique. *n.* Cavité résultant de la fusion des deux sacs polliniques situés d'un côté de l'anthère d'une étamine, par désorganisation de la cloison du connectif qui les sépare. Il y a donc deux loges par anthère. Chaque loge s'ouvre, en général, par une fente longitudinale, mais parfois par un pore.

loi de Cope. Hypothèse selon laquelle, dans un phylum donné, ce sont les formes les moins spécialisées qui sont le plus affectées par l'évolution.

loi de Dollo. Principe selon lequel un organe perdu au cours de l'évolution ne réapparaît jamais. S'il le fait, il n'est pas semblable à celui qu'il remplace.

loi de Hardy-Weinberg. Loi qui postule que la fréquence génique dans une population est constante si aucun facteur nouveau ne perturbe l'équilibre de la population.

lombaire. *adj.* Qui concerne les lombes, c'est-à-dire la région située en arrière de l'abdomen : vertèbres lombaires, douleurs lombaires.

lordose. *n.* Accentuation exagérée de la courbure rachidienne lombaire chez certains Hominidés.

lucifuge. *adj.* Se dit d'un organisme fuyant la lumière.

luciphile. *adj.* Se dit d'un organisme recherchant la lumière.

Lugol (liquide de). Solution d'iode et d'iodure de potassium dans l'eau. Utilisé comme fixateur et colorant des cellules, en particulier des Bactéries dans la méthode de Gram. Syn. d'*eau iodo-iodurée.*

lumière polarisée. Lumière ayant traversé certains corps ou ayant été réfléchie par un miroir *(polariseur)* et ne vibrant plus que suivant un plan dit de polarisation. Le même dispositif placé à angle droit par rapport à ce plan empêchera le passage d'une telle lumière. C'est alors un *analyseur.* Si entre les deux se trouve une substance qui dévie plus ou moins ce plan, plus ou moins de lumière franchira l'analyseur.

Luteinising-Folliculo-Releasing-Factor ou **L.F.R.F.** Neuro-hormone hypothalamique stimulant la sécrétion par l'antéhypophyse des gonadotropes F.S.H. et L.H.

Luteinising-Hormone ou **L.H.** Hormone de l'antéhypophyse provoquant la formation du corps jaune après l'ovulation.

lutte intégrée. Méthode de lutte contre les parasites des cultures faisant intervenir des moyens biologiques et chimiques.

lymphocytes. *n.* Type de *globules blancs* mononucléaires de petite taille caractérisés par leur noyau volumineux et leur cytoplasme réduit. Ils interviennent, par sécrétion d'*anticorps,* dans la défense de l'organisme contre les microbes.

lymphomatose. *n.* Maladie virale maligne caractérisée par une multiplication pathologique des cellules lymphatiques.

lyophilisation. *n.* Méthode de conservation des produits organiques. Elle consiste à congeler les produits (— 26 °C au minimum) et à les déshydrater sous vide (0,1 mm de mercure).

lysogénie. *n.* Possibilité qu'ont certains virus de donner des *prophages.*

lysosome. *n.* Vésicule du cytoplasme contenant des enzymes hydrolytiques (phosphatases, ribonucléases, etc.). Formés par l'appareil de Golgi ou l'ergastoplasme. Ces *lysosomes primaires* s'unissant à des vacuoles leur apportent leur enzyme et en font des *lysosomes secondaires,* où pourront être hydrolysés les produits exogènes ou endogènes contenus d'abord dans la vacuole.

M

macro-élément. *n.* Élément chimique qui doit être présent en grande quantité dans l'alimentation car il entre dans la constitution des structures de base du corps. Voir *micro-élément.*

macrofaune. *n.* Groupement d'animaux de taille relativement grande (4 à 80 mm). *Ex.* Annélides, Mollusques, Araignées, etc.

macromère. *n.* *Blastomère* de grande taille provenant d'une division inégale de l'œuf.

macronucléus. *n.* Le gros noyau polyténique (à brins de chromatine multipliés) des Infusoires ciliés. Dégénère lors de la conjugaison. Voir *micronucléus.*

macrophage. *adj.* Qualifie un animal qui se nourrit de grosses proies.

macroplancton. *n.* Plancton constitué d'organismes visibles à l'œil nu.

macroscopique. *adj.* De taille telle qu'il peut être observé à la loupe.

macules. *n.* Plages sensorielles de l'oreille interne des Vertébrés comportant des cellules ciliées sensibles et des cellules de soutien.

magdalénien. *adj.* Qualifie la dernière civilisation du Paléolithique, caractérisée par le grand développement de l'industrie de l'os et de l'art pariétal. Elle fut découverte dans la grotte de la Madeleine à Tursac (Dordogne).

magnum. *n.* Portion glandulaire de l'oviducte des Oiseaux sécrétant l'albumine de l'œuf.

maladie du cri du chat. Affection héréditaire de l'homme due à la perte d'un segment du bras court du chromosome 5. Les malades poussent des cris aigus et plaintifs et montrent souvent un retard psychomoteur important.

maladie de Newcastle. Maladie virale dite pseudo-peste des Oiseaux.

maladie de Parkinson. Maladie nerveuse, due à une lésion des corps striés, qui se traduit par un tremblement de repos joint à la rigidité et à une difficulté de mouvement.

maladie du « ring spot ». Maladie virale des feuilles de tabac caractérisée par des taches annulaires concentriques.

maladie de Tay-Sachs. Affection neuro-musculaire héréditaire s'observant surtout chez les Juifs d'Europe centrale.

mallee. *n.* Formation végétale australienne ressemblant à la garrigue et comprenant des eucalyptus et des acacias.

maltase. *n.* Enzyme dégradant le maltose en glucose, par séparation des deux éléments de glucose α qui constituent sa molécule.

maltose. *n.* Ose formé de deux molécules de glucose α liées de manière que le groupe réducteur (fonction aldéhyde) de l'une soit libre : il est donc réducteur, à la différence du *tréhalose.*

mammalien. *adj.* 1° Qui présente certains caractères de Mammifère. 2° Qui se rapporte aux Mammifères.

mangrove. *n.* Groupement de végétaux comprenant des arbres et s'étendant, en zone tropicale, au bord de la mer ou à l'embouchure des fleuves.

mannose. *n.* Sucre voisin du glucose, constitutif, notamment, des glycoprotéines.

manomètre. *n.* Appareil destiné à la mesure de la pression d'un fluide (gaz ou liquide).

marnage. *n.* Amplitude des marées ou hauteur séparant une haute mer de la basse mer suivante.

marquée. *adj.* **(substance).** Dont un des atomes a été rendu radioactif. Différents procédés analytiques permettent de suivre le trajet de cette substance dans l'organisme.

marsupiaux. *n.* Sous-classe de Mammifères dont les représentants n'ont pas recours à la présence d'un *placenta* pour leur développement. Les jeunes, qui naissent très tôt, sont portés et allaités dans une poche ventrale de la mère : le marsupium.

mastocyte. *n.* Cellule du tissu conjonctif non phagocytaire, à cytoplasme bourré de granulations métachromatiques.

masse atomique. Masse d'un volume de corps simple représentant $6{,}023.10^{23}$ atomes de celui-ci. La masse atomique de l'hydrogène est de 1 g.

matériel génétique. Ensemble des substances qui transmettent les caractères héréditaires.

mattoral. *n.* Formation végétale américaine ressemblant à la garrigue et contenant des essences comme le boldo et le quillay.

méat. *n.* Petit espace, en particulier celui que laissent entre elles plusieurs cellules dont les parois sont imparfaitement soudées (méat intercellulaire). Un parenchyme lacuneux montre des méats relativement importants.

mécanisme. *n.* Doctrine suivant laquelle le fonctionnement des êtres vivants ne met en cause que des phénomènes physico-chimiques. N'est pas incompatible avec le *vitalisme,* qui ne distingue les vivants que par leur organisation.

mécanorécepteur. *n.* Récepteur sensoriel sensible aux variations de pression ou aux vibrations de l'air. *Ex.* Fuseau neuro-musculaire.

méconium. *n.* Substances de déchet accumulées dans le tube digestif de nombreux animaux lors de leur développement embryonnaire et qui sont rejetées lors de l'éclosion ou de la naissance.

médiateurs chimiques. Substances chimiques labiles sécrétées à l'extrémité des fibres nerveuses et facilitant depuis celles-ci la transmission de l'influx nerveux à un organe périphérique, un muscle p. ex.

méduse. *n.* Forme sexuée libre de certains polypes de Cnidaires dont les déplacements permettent la dissémination de l'espèce (généralement fixée).

mégafaune. *n.* Groupement d'animaux de taille importante (80 mm à 1,50 m) creusant des terriers dans le sol.

mégalophage. *adj.* Qualifie un organisme se nourrissant de proies de taille visible.

mégaphorbiée. *n.* Groupement montagnard de hautes herbes comprenant le lis martagon, la grande astrance, l'aconit...

méiose. *n.* Ensemble de deux divisions cellulaires successives par lesquelles une cellule mère fournit quatre cellules filles possédant moitié moins de chromosomes qu'elle-même.

mélanine. *n.* Pigment noir de la peau, des cheveux, etc.

mélanisme. *n.* Aptitude qu'ont certains organismes à fabriquer des pigments mélaniques sous l'action du milieu. Ce phénomène peut donner prise à la sélection et provoquer l'apparition de nouvelles races.

mélasse. *n.* Résidu sirupeux riche en glucides, provenant de la fabrication du sucre après traitement de la plante sucrière.

melphalan ou **sarcolysine.** *n.* « Moutarde à l'azote » synthétisée sur le modèle de l'ypérite. Possède comme celui-ci les deux groupes — $(CH_2)_2Cl$, liés ici à un N porteur lui-même d'un groupe phényl-β-alanine. Utilisé notamment dans le traitement du myélome.

membrane. *n.* 1° Couche limitant la cellule toute entière et ses organites. Peut s'étendre à l'intérieur de ceux-ci. Les membranes sont formées de molécules de lipides et de protides. Au niveau des membranes se trouvent certaines substances comme la chlorophylle, ou diverses enzymes (sur la membrane interne des mitochondries, par exemple). Les membranes remplissent une fonction primordiale dans la régulation des échanges entre la cellule et le milieu ou entre les organites eux-mêmes. 2° A l'échelle des organismes, le terme de membrane désigne un tissu en forme de lame mince.

membrane basale. Pellicule non cellulaire située entre un tissu épithélial et le tissu voisin (tissu conjonctif). Assure la solidité de l'épithélium, dont les cellules lui sont très solidement adhérentes.

membrane chorio-allantoïdienne. Enveloppe protectrice des embryons de Vertébrés amniotes constituée par l'association du *chorion* et de l'*allantoïde.*

membrane coquillière. Membrane formée de deux feuillets et qui entoure l'*albumen* de l'œuf des Oiseaux.

membrane unitaire. Membrane cellulaire simple mais apparaissant après fixation osmique, sous forme de deux lignes sombres de part et d'autre d'une zone claire. Supposée identique chez tous les organites. La membrane cytoplasmique est formée d'une seule couche d'une telle membrane, celle des mitochondries et des plastes de deux couches. Les membranes unitaires ont en fait une structure sans doute différente d'un organite à l'autre.

méninges. *n.* Membranes protectrices et nourricières du système nerveux central des Vertébrés.

ménisque. *n.* Disque cartilagineux situé entre les deux os d'une articulation. *Ex.* Au niveau du genou.

menstruation. *n.* Chez la femme, et quelques autres femelles de Mammifères, émission sanguine marquant la fin d'un cycle sexuel au cours duquel la fécondation n'est pas intervenue. Correspond à la destruction des structures utérines mises en place pour recevoir l'œuf, qui se serait formé si la fécondation avait eu lieu.

menstruel. *adj.* Qui concerne la menstruation.

méristème. *n.* Ensemble de cellules se divisant activement et contribuant à la croissance d'un organe, soit dans un plan, soit dans les trois dimensions. On distingue : des *méristèmes apicaux,* situés au sommet d'une tige ou d'une racine ; des *méristèmes intercalaires,* situés entre deux zones de tissus plus âgés, dont les cellules ne se divisent plus et qu'ils ont précédemment engendrées ; des *méristèmes marginaux,* situés au bord d'un organe plan et dont l'activité engendre ce dernier, qui grandit alors par croissance marginale.

méristème secondaire. Tissu méristématique ne dérivant pas directement de l'apex de la tige ou de la racine, et où se mettent en place les éléments de la plante, mais formé par reprise de l'activité dans certaines zones des organes déjà constitués, comme entre le bois et le liber, ou au sein de l'écorce.

méroplancton. *n.* Plancton constitué d'organismes qui ne sont pas planctoniques durant toute leur vie.

mésarche. *adj.* Qui se différencie à partir de son milieu et dont les éléments les plus jeunes sont à la périphérie. Se dit d'un faisceau de bois.

mésencéphale. *n.* Vésicule embryonnaire postérieure constitutive du cerveau des Vertébrés et au niveau de laquelle se différencient les lobes optiques.

mésenchyme primaire. Amas de cellules provenant des *micromères* et migrant dans le blastocèle de la blastula de l'oursin.

mésenchyme secondaire. Formation dérivant du *mésenchyme primaire* et des vésicules cœlomiques chez la blastula d'oursin.

mésoblaste. *n.* Feuillet moyen de la *gastrula* qui est à l'origine du cœlome et de deux masses embryonnaires latérales qui sont chacune constituées de trois parties : dorsalement les somites, latéralement les mésomères et ventralement les lames latérales. Les somites édifieront le derme de la peau, la musculature de la paroi du corps et les ébauches vertébrales. Les mésomères constitueront les tubes urinaires, et les lames latérales seront à l'origine des muscles lisses et du tissu conjonctif.

mésoderme. *n.* Feuillet cellulaire de l'embryon situé entre l'ectoderme et l'endoderme. Il est à l'origine des éléments du tissu conjonctif, du squelette, des muscles, du sang, des organes excréteurs et des glandes reproductrices. N'existe que chez les animaux triploblastiques.

mésogène. *adj.* Voir *syndétochéile.*

mésolithique. *n.* Période comprise entre le Paléolithique (— 12 000 avant J.-C.) et le Néolithique (— 6 000 avant J.-C.), caractérisée par un grand développement de l'habitat.

mésonéphron ou **mésonéphros.** *n.* Rein secondaire apparaissant en arrière du *pronéphros* et devenant fonctionnel chez les adultes des Poissons et Amphibiens. Cet organe est transitoire chez les Reptiles, les Oiseaux et les Mammifères, et évolue en un *métanéphron*.

mésofaune. *n.* Groupement d'animaux de petite taille (0,2 à 4 mm) qui ont besoin d'humidité pour respirer. *Ex.* Acariens, Myriapodes, Insectes.

mésophile. *adj.* Caractérise un organisme vivant ayant des besoins en eau modérés.

mésophylle. *n.* Tissu fondamental chlorophyllien de la feuille, comprenant le parenchyme lacuneux et le parenchyme palissadique.

mésothélium. *n.* Épithélium de revêtement constituant la paroi cœlomique des animaux cœlomates.

métabolisme. *n.* Ensemble des transformations chimiques aboutissant aux synthèses *(anabolisme)* ou aux dégradations *(catabolisme)* de substances présentes dans une cellule ou un organisme vivant.

métabolisme intermédiaire. Ensemble des réactions biochimiques impliquées dans la transformation des molécules composant les aliments pour entretenir l'activité cellulaire.

métamère. *n.* Motif structural répété plusieurs fois de façon identique ou comparable dans l'organisation d'un être vivant. *Ex.* Les anneaux des Arthropodes, les phyllomes des plantes à fleurs.

métamorphisme. *n.* Transformation, à l'état solide, des roches, dans des conditions physiques définies, et correspondant à des processus endogènes (en dessous de la surface du sol). Ensemble de ces processus affectant la minéralogie et souvent la texture des roches initiales.

métanéphron ou **métanéphros.** *n.* Rein tertiaire, se différenciant en arrière du *mésonéphron* et correspondant à l'organe fonctionnel des adultes des Reptiles, des Oiseaux et des Mammifères.

métaphase. *n.* Seconde phase de la mitose au cours de laquelle les chromosomes, fissurés en deux chromatides et appariés par couples, sont disposés dans le plan équatorial du fuseau de division.

métaphyse. *n.* Ensemble de travées osseuses formant une zone transitionnelle d'os spongieux sur toute la largeur de la diaphyse.

métastase. *n.* Tumeur issue de la multiplication d'une cellule tumorale séparée d'une tumeur existant ailleurs dans l'organisme. La métastase a pénétré dans les vaisseaux sanguins ou lymphatiques, où elle a été transportée.

métaxylème. *n.* Bois primaire formé tardivement dans un faisceau, après la fin de l'allongement de celui-ci. Il restera donc fonctionnel, alors que le *protoxylème* aura été étiré et rendu inapte à la conduction de l'eau.

métecdysis. *n.* Troisième étape de la mue des Crustacés durant laquelle le tégument s'imprègne de calcaire pour former la carapace.

métencéphale. *n.* Vésicule embryonnaire à l'origine du cervelet des Vertébrés.

météorite. *n.* 1° Masse de matière d'origine spatiale tombée sur la Terre, où elle peut déterminer des cratères. 2° En général, toute masse spatiale tombant sur un astre comme la Lune.

météoritique. *adj.* Qui concerne les météorites.

méthode. *n.* Succession raisonnée de techniques utilisées lors d'un travail manuel ou d'une démarche intellectuelle.

méthode d'Altmann. Méthode cytologique dans laquelle le tissu est fixé par un mélange d'acide osmique et de bichromate de potassium, puis coloré à la fuchsine acide anilinée. Les mitochondries sont alors colorées en rouge.

méthode sandwich. Technique d'immunofluorescence dans laquelle un premier immunsérum est mis en présence de l'antigène à détecter dont il est spécifique et auquel il se fixe. Un second immunsérum, préparé avec un autre animal contre le premier immunsérum, est couplé à une molécule fluorescente. Appliqué à la première préparation, il se fixe au premier immunsérum, lui-même lié à l'antigène originel, et permet par sa molécule fluorescente de localiser celui-ci indirectement.

méthode des sections sériées. Méthode permettant de connaître la structure interne des fossiles : on procède par une usure régulière, très progressive, et chaque étape successive s'accompagne d'un dessin ou d'une photographie.

méthode Steemann-Nielsen. Méthode de mesure de l'assimilation par le plancton du carbone radioactif (C_{14}) fourni sous forme de bicarbonate. Cette valeur permet d'évaluer la *productivité primaire* d'un écosystème.

méthode de Thiéry. Technique permettant la mise en évidence des polysaccharides au microscope électronique, par fixation à leur niveau, après traitement convenable, de protéinate d'argent, dont les grains sont alors visibles.

méthylation. *n.* Fixation de radicaux méthyle $—CH_3$, sur les fonctions alcool d'une substance organique en particulier, par action de l'iodure de méthyle. Il y a formation de liaisons éther-oxyde.

méthylglucose. *n.* Glucose dont les fonctions alcool ont été méthylées. On parlera de mono-, di-, tri-, ou tétraméthylglucose. Seules les fonctions —OH libres sont méthylées, ce qui permet de localiser, après hydrolyse, celles qui étaient engagées dans des liaisons osidiques. Les autres oses sont aussi méthylables.

métissage. *n.* Mélange de deux sous-espèces (ou de deux races d'une même espèce) qui donne des individus possédant des caractères propres à l'un et à l'autre de leurs parents.

miasme. *n.* Anciennement, émanation susceptible d'entraîner l'apparition de maladies.

micro-analyse. *n.* Analyse chimique effectuée sur de très petites quantités de produits.

microbiologie. *n.* Étude des micro-organismes, en particulier des Bactéries et de leurs effets pathogènes ou écologiques.

microcéphalie. *n.* Atrophie du cerveau qui provoque certains troubles fonctionnels, moteurs ou psychiques.

microcinématographie. *n.* Obtention de films cinématographiques par prises de vue au microscope.

microclimat. *n.* Caractéristiques climatiques d'un milieu extrêmement limité : zone située sous une pierre, dans une anfractuosité de tronc d'arbre, etc. Souvent confondu avec *climat local*, qui s'applique à une zone plus vaste : espace abrité par une falaise, par un bouquet d'arbres, etc.

microdissection. *n.* Dissection de cellules et de tissus à l'échelle du microscope, grâce à un micromanipulateur.

micro-élément. *n.* Élément chimique qu'il suffit à l'organisme d'ingérer en très petite quantité. Tout en étant essentiel, il n'agit que comme catalyseur de réactions biologiques, et les quantités requises en sont très faibles. Syn. *oligo-élément*.

microfaune. *n.* Groupement d'animaux dont la taille est inférieure à 0,2 mm et qui vivent dans les interstices. *Ex.* Protozoaires, Vers Nématodes, Rotifères.

microforge. *n.* Instrument chauffant destiné à préparer des outils de verres utilisables à l'échelle cellulaire lors de micromanipulations.

micro-incinération. *n.* Combustion par l'effet de la chaleur d'une préparation microscopique, dont les cendres restent en place. Leur composition pourra être caractérisée et la constitution minérale du tissu en sera déduite.

micromanipulateur. *n.* Instrument permettant les *micromanipulations* : les micro-outils qu'il utilise sont portés par des supports, commandés par l'expérimentateur grâce à un système de démultiplication des mouvements, soit mécanique, soit (mieux) pneumatique *(micromanipulateur de Fontbrune)*.

micromanipulation. *n.* Opération se déroulant à l'échelle des structures visibles au microscope optique (énucléation d'une cellule, injection d'un noyau dans une cellule, etc).

micromère. *n.* *Blastomère* de petite taille provenant d'une division inégale de l'œuf.

micromérisme. *n.* Doctrine d'après laquelle la substance vivante présente une organisation submicroscopique, intermédiaire entre sa morphologie visible et la disposition de ses molécules constituantes.

micron. *n.* Ancien nom du micromètre, ou millième de millimètre. S'abrégeait μ. Le micromètre s'abrège μm.

micronoyau. *n.* Portion de chromatine isolée lors de mitoses perturbées, par la colchicine notamment. Les micronoyaux sont voués à la dégénérescence. Ne pas confondre avec le *micronucléus* des Infusoires ciliés, qui est leur noyau normal et essentiel.

micronucléus. *n.* Le petit noyau normal (non polyténique) des Infusoires ciliés. C'est le noyau essentiel : il subit la réduction chromatique lors de la conjugaison pour donner un gamète.

micro-organisme. *n.* Organisme de petite taille, en général unicellulaire.

microphage. *adj.* Qualifie un organisme se nourrissant de fines particules présentes dans l'eau ou le sol. *Ex.* Vers, Crustacés, etc.

microphagie. *n.* Absorption de Bactéries par phagocytose.

microplancton. *n.* Plancton constitué par des organismes microscopiques dont la taille varie de 50 μm à quelques millimètres.

micropyle. *n.* Petit orifice, en particulier celui de l'ovule, percé dans un ou dans les deux téguments ; c'est en général par lui que le tube pollinique pénètre dans le nucelle pour atteindre le sac embryonnaire.

microscope composé. Microscope comportant au moins deux lentilles : un objectif et un oculaire.

microscope électronique. Microscope utilisant un rayonnement d'électrons à la place de la lumière.

microscope optique. Le microscope ordinaire, utilisant les rayons lumineux. Il vaut mieux dire *microscope photonique*.

microscope simple. Microscope comportant une seule lentille ou un dispositif fonctionnant comme tel. C'est en fait une forte loupe.

microsomes. *n.* Particules correspondant à des fragments de réticulum endoplasm que isolés d'abord par centrifugation avant que le réticulum ait pu être vu au microscope électronique.

microstructure. *n.* Structure trop ténue pour être décelée, même au microscope électronique.

microtome. *n.* Instrument permettant de préparer des sections très minces de tissus le plus souvent préalablement inclus dans un milieu résistant, de façon à pouvoir les observer par transparence au microscope photonique ou électronique. Les coupes obtenues doivent mesurer de 5 à 30 μm pour l'observation au microscope photonique, et 50 nm par exemple (500 Å) pour le microscope électronique.

microtome à congélation. Microtome grâce auquel on débite un objet non inclus dans un milieu dur (paraffine) mais congelé sans fixation préalable. Les structures vitales ne sont pas mises en danger par la fixation, mais en général les coupes doivent être bien plus épaisses.

microtubule. *n.* Organite en forme de tube.

microvillosité. *n.* Dilatation en doigt de gant de la membrane cytoplasmique dont l'aspect est comparable à celui d'une villosité intestinale (laquelle est faite de nombreuses cellules).

microvirus. *n.* Selon la classification LHT (Lwoff, Horne et Tournier), virus possédant 12 capsomères.

migrateur. *adj.* Susceptible de se déplacer par ses propres moyens ou emporté par une autre structure. Se dit aussi de cellules, de parasites à l'intérieur d'un organisme, etc.

migration du milieu. Déplacement des conditions écologiques d'une région donnée. *Ex.* Le refroidissement de la mer au Miocène a provoqué le déplacement des Strombes (Gastéropodes) vers des régions plus chaudes, au sud.

milieu intérieur. Ensemble des substances constituant une phase liquide en contact avec toutes les cellules de l'organisme et susceptible de les alimenter ainsi que de coordonner leur action, et qui est maintenue plus ou moins stable et indépendante du monde externe *(homéostasie)*.

milliéquivalent. *n.* Millième d'un « équivalent », c'est-à-dire du quotient de la masse « atomique » d'un ion en g par sa valence. Un « équivalent » par litre donne une solution normale de l'ion, un milliéquivalent par litre une solution « millinormale ».

mimétisme. *n.* Phénomène par lequel un animal peut prendre la forme ou la couleur du substrat sur lequel il est posé.

mindélien. *adj.* Qualifie la période de glaciation européenne de l'ère quaternaire. Comprise entre — 500 000 ans à — 250 000 ans, elle correspond à la civilisation acheuléenne du Paléolithique inférieur.

minéralisation. *n.* Processus de transformation des éléments organiques en éléments minéraux par l'activité des micro-organismes ou lors de l'analyse chimique.

mitochondrie. *n.* Organite cytoplasmique des Eucaryotes, formé de deux membranes concentriques, l'interne produisant des invaginations vers l'intérieur. Porteur d'une partie des enzymes nécessaires à la respiration cellulaire.

mitomycine. *n.* Substance antibiotique qui bloque la synthèse d'ADN.

mitose. *n.* Division du noyau d'une cellule en deux noyaux fils, ces derniers conservant le même nombre de chromosomes que la mère. *P. ext.* Division de la cellule elle-même, ce qui implique celle de son cytoplasme, ou cytodiérèse.

mobilisation. *n.* Mise à l'état mobile, en solution, d'un élément préalablement engagé dans une combinaison insoluble. *Ex.* Le calcium des os est susceptible d'être *mobilisé* sous forme d'ions Ca^{++} dans le sang.

moder. *n.* Sol à humus neutre.

moelle. *n.* 1° En général, tout tissu situé au cœur d'un organe et entouré de tissus différents. Le plus souvent de consistance molle. 2° *Particult.* Chez les plantes à fleurs, tissu situé à l'intérieur du cylindre.

moelle osseuse. Tissu conjonctif hématopoïétique présent dans la diaphyse des os longs. Au même titre que la rate, il participe à la formation des cellules sanguines.

molarité. *n.* Nombre de *moles* de soluté (molécules-gramme) présentes dans un litre de solution.

mole. *n.* Ensemble de $6{,}023.10^{23}$ molécules d'un composé chimique. Sa masse est la masse moléculaire, somme des masses atomiques des atomes constitutifs. Syn. de *molécule-gramme*.

molécule. *n.* Unité de structure d'un composé chimique, constitué d'atomes de nature et de nombre définis, liés de diverses manières. L'identité du composé est perdue si la molécule est rompue.

mollusques. *n.* Embranchement animal dont les représentants sont des Métazoaires à corps mou et non segmenté, enveloppé dans une coquille. Suivant leur morphologie et l'importance de leur coquille, on distingue : les Lamellibranches, les Gastéropodes, etc.

mongolisme ou **trisomie 21.** Anomalie héréditaire de l'homme due soit à la présence d'un chromosome 21 surnuméraire (trisomie 21), soit plus rarement à une *translocation* entre le chromosome 21 et l'un des chromosomes, 13, 14 ou 15.

monocaténaire. *adj.* Qualifie les acides nucléiques lorsqu'ils forment une spirale simple.

monochasium. *n.* Ensemble ramifié dans lequel un seul bourgeon axillaire s'est développé à l'état floral ou végétatif, tandis que l'apex du rameau père formait une fleur ou s'arrêtait de croître. Si l'ensemble est végétatif, on parle aussi de *monopode*.

monocytes. *n.* Type de *globules blancs* mononucléaires de grande taille à noyau globuleux et à cytoplasme hyalin. Ils « nettoient » l'organisme, par digestion intracellulaire, de tous les débris tissulaires.

monofactoriel. *adj.* Caractérise un croisement où un seul couple d'allèles est en ségrégation.

monogenèse. *n.* Théorie selon laquelle tous les êtres vivants proviendraient d'une unique cellule initiale.

monogénique. *adj.* Qualifie un caractère contrôlé par un seul gène.

monohybridisme. *n.* Croisement entre deux parents qui ne se distinguent que par un seul caractère : couleur des plumes; ailes longues ou courtes, chez la drosophile etc.

monoïque. *adj.* **(plante).** Qui possède les deux sexes sur le même pied.

monophage ou **sténophage.** *adj.* Caractérise un Insecte ne mangeant qu'une seule plante. *Ex.* Le ver à soie se nourrit exclusivement de mûrier.

monophylétisme. *n.* Doctrine selon laquelle un groupe d'êtres vivants, et en particulier toute l'humanité, dérive d'un ancêtre unique.

monostomatique. *adj.* Qualifie une glande dont la sécrétion s'effectue par un canal excréteur unique.

monotypisme. *n.* Hypothèse selon laquelle une espèce n'apparait qu'en un seul lieu.

monstre. *n.* Être de forme différente de celle des individus de son espèce, parce que l'application des lois de son développement a été empêchée ou modifiée dans sa localisation ou son intensité.

mor. *n.* Humus acide favorable au développement des Champignons.

morphographie. *n.* Figuration à l'aide de schémas parlants des formes caractéristiques des corps solides naturels, en particulier des organes.

morphollaxie. *n.* Type de régénération au cours de laquelle des tissus déjà différenciés se réorganisent pour donner de nouvelles structures.

morphose. *n.* 1° Syn. d'*accommodat.* 2° Forme monstrueuse.

mort absolue. Cessation de la vie d'un organisme au niveau de toutes les cellules et particulièrement des cellules du cerveau.

mort apparente. Arrêt de la respiration et de la circulation chez les organismes supérieurs.

mosaïque. *n.* Tachetures des feuilles de certains végétaux qui manifestent la présence d'une maladie virale. *Ex.* La mosaïque du tabac.

mosaïque (développement en). Développement au cours duquel les différents blastomères ont une destinée fixée très tôt et continuent à former les parties embryonnaires ainsi déterminées même si on les sépare de leurs voisins.

motivation. *n.* Pulsion qui provoque un comportement instinctif ou intelligent.

motoneurone. *n.* Neurone moteur des Vertébrés.

moule. *n.* 1° *Moule interne.* Remplissage minéral laissé dans un sédiment par la dissolution d'une coquille et reproduisant plus ou moins fidèlement l'aspect de la face interne du squelette. 2° *Moule externe.* Empreinte dans le sédiment laissé par un fossile.

moustérien. *adj.* Qualifie une période préhistorique du milieu du Paléolithique dont la découverte fut faite près du village de Moustier (Dordogne).

moût. *n.* Mélange généralement constitué de fruits écrasés qui, après fermentation, donne une boisson alcoolisée.

mouvement brownien. Agitation de particules très petites (1 µm), due au choc des molécules du milieu dans lequel elles se trouvent.

mouvement eustatique. Changement uniforme du niveau de la mer, à l'échelle du globe, provoquant selon les cas une émersion ou une submersion des marges continentales.

mouvements morphogénétiques. Mouvements actifs, orientés et coordonnés des *blastomères* aboutissant à l'acquisition de la forme et de la structure de l'embryon. *Ex.* Invagination, épibolie.

mucopolysaccharides. *n.* Glucides complexes liés à des protéines, présents en grande quantité dans la substance fondamentale des tissus conjonctifs notamment.

mull. *n.* Humus de type calcique favorable au développement des Bactéries cellulolytiques.

muqueuse. *n.* Couche pluricellulaire interne d'organes des Vertébrés. Elle contient principalement un épithélium interne constitué par des cellules muqueuses ou séreuses, des cellules absorbantes et un chorion conjonctif externe.

muqueuse utérine. Syn. d'*endomètre*.

muscle abducteur. Muscle qui écarte un membre du corps.

muscle adducteur. Muscle qui rapproche un membre du plan médian du corps.

muscle dépresseur. Muscle qui abaisse un membre ou une partie du corps.

muscle élévateur. Muscle qui élève un membre ou une partie du corps.

muscle extenseur. Muscle dont la contraction ouvre l'angle entre deux os.

muscle fléchisseur. Muscle dont la contraction ferme l'angle formé par deux os.

muscle fusiforme. Muscle dont les fibres sont parallèles à la direction de l'effet et qui possède deux extrémités tendineuses.

muscle oculomoteur. Muscle fixé sur le globe oculaire et dont la contraction oriente l'œil.

muscle penné. Muscle dont les fibres prennent une direction oblique par rapport à leur point de fixation, qui se fait par des aponévroses.

muscle péronier antérieur. Muscle de la jambe humaine qui s'est développé avec l'apparition de la station debout.

muscle protracteur. Muscle qui tire vers l'avant du corps.

muscle rétracteur. Muscle qui tire vers l'arrière du corps.

muscle sterno-cléidomastoïdien. Muscle du cou particulièrement développé chez l'homme, qui s'insère, d'une part, sur la base du crâne et, d'autre part, à la partie supérieure du *sternum* et de la *clavicule*.

musculeuse. *n.* Enveloppe musculaire externe du tube digestif des Vertébrés p. ex. constituée de fibres lisses disposées en un double manchon interne (formé de fibres circulaires) et externe (fait de fibres longitudinales).

mutagène. *n.* Agent physique ou chimique susceptible de provoquer l'apparition de mutations.

mutagenèse. *n.* Expérimentation qui consiste à provoquer des *mutations* par l'action d'agents mutagènes.

mutant. *n.* Individu dont le *génome* a été soumis à une ou plusieurs *mutations*.

mutation. *n.* Altération des facteurs héréditaires par changement d'un gène (mutation génique), d'un ou de plusieurs chromosomes (mutation chromosomique) ou par changement dans le nombre des chromosomes (mutation de génome).

mutationnisme. *n.* Théorie évolutionniste selon laquelle la transformation des espèces se fait par des mutations qui affectent le *germen* et qui sont par conséquent héréditaires.

mycétophage. *adj.* Qualifie un organisme se nourrissant de Champignons.

mycophage. *adj.* Qualifie un organisme se nourrissant de moisissures.

myéline. *n.* Substance grasse formant une gaine autour des fibres nerveuses (axone) du système nerveux central. Il s'agit en fait d'une partie de la membrane cytoplasmique, enroulée de nombreuses fois sur elle-même, des cellules de Schwann qui entourent l'axone.

myleran. *n.* Agent alkylant non azoté, mais avec deux groupements ester-sulfonique. Utilisé notamment dans le traitement des leucémies myéloïdes chroniques. Syn. de *busulfan*.

myoglobine. *n.* Ferroprotéine conférant leur couleur rouge aux muscles. Voisine de l'hémoglobine, mais avec une seule chaîne protéique reployée.

myélencéphale. *n.* Vésicule embryonnaire postérieure du cerveau des Vertébrés et à partir de laquelle se différencie le bulbe rachidien.

myéloblastose. *n.* Maladie virale maligne caractérisée par une multiplication anormale des cellules de myéline.

myocarde. *n.* Muscle strié à contractions involontaires constituant la paroi du cœur.

myofibrille. *n.* Différenciation du cytoplasme des cellules musculaires constituée par des protéines contractiles.

myofilament. *n.* Protéines contractiles constitutives des myofibrilles du cytoplasme de la cellule musculaire.

myosine. *n.* Protéine fibrillaire constitutive du muscle et impliquée dans sa contraction. Voir *contraction musculaire*.

myostinine. *n.* Substance antibiotique qui agit en perturbant la perméabilité membranaire.

myxomatose. *n.* Maladie virale qui affecte les lapins.

N

N-acétylglucosamine. *n.* Glucosamine (glucose dont le groupe —OH du carbone 2, près de la fonction aldéhyde, est remplacé par un groupe $—NH_2$) dont l'un des H du groupement $—NH_2$ est substitué par un radical acétyl $CH_3—CO—$.

NAD ou **nicotinamide - adénine - dinucléotide.** *n.* Transporteur d'hydrogène jouant un rôle dans la respiration cellulaire. Se charge d'un atome d'hydrogène et d'un électron, qui proviennent d'une molécule d'hydrogène arrachée aux aliments.

nanomètre. *n.* Unité de mesure de longueur correspondant au milliardième de mètre ($=10^{-9}$ m), donc au millième de micron.

nanoplancton. *n.* Plancton constitué par des organismes dont la taille est inférieure à 50 μ.

nastie. *n.* Mouvement relativement brusque, sans rapport avec la croissance, d'un organe végétal causé par une excitation (mécanique, lumineuse, etc.).

néandertalisation. *n.* Ensemble des processus qui caractérisent la phylogenèse des Paléanthropiens.

néanthropienne. *adj.* Qualifie la forme humaine qui a succédé à l'Homme de Néandertal vers — 40 000 ans. Physiquement, elle diffère très peu de la forme actuelle.

nécrohormone. *n.* Substance hypothétique produite par les cellules lésées lors d'une blessure, et qui serait susceptible d'induire la prolifération réparatrice des cellules voisines demeurées intactes. Si les nécrohormones existent, ce seraient plutôt des médiateurs.

nécromasse. *n.* Ensemble des matières organiques mortes de la biosphère.

nécrophage. *adj.* Qui se nourrit de cadavres.

nécrose. *n.* Dégradation, normale ou pathologique, d'un tissu par la mort de ses cellules, consécutivement ou non à une infection.

necton. *n.* Ensemble des organismes de taille moyenne ou grande vivant au sein de l'eau, comme les Poissons.

négroïde. *adj.* Qualifie les races humaines noires telles que les Négritiens, les Dravidiens et les Mélanésiens.

néoblaste. *n.* Dans un organisme adulte, cellule qui a gardé des potentialités embryonnaires et peut reconstituer n'importe quel tissu au cours des phénomènes de régénération.

néocérébellum. *n.* Partie néoformée correspondant aux *hémisphères cérébelleux* du *cervelet* des Mammifères.

néocortex ou **néopallium.** *n.* Nouveau constituant du *télencéphale* des Mammifères apparaissant entre l'*archipallium* et le *paléopallium*. Cette zone est le siège de la motricité volontaire et de la sensibilité consciente.

néo-lamarckisme. *n.* Théorie évolutionniste qui précise le lamarckisme en distinguant, parmi les éléments qui agissent sur les organismes, les facteurs externes, de nature physico-chimique (la nourriture p. ex.), et les éléments mécaniques.

néolithique. *n.* Dernière période de la Préhistoire qui s'étend de 6 000 à 2 000 avant J.-C. et durant laquelle l'Homme se livre à la culture et à la domestication d'animaux sauvages et vit en cités lacustres.

néopallium. *n.* Syn. de *néocortex*.

néophyte. *n.* Plante d'introduction récente dans une région, mais s'y maintenant parfaitement sans intervention humaine.

néostriatum. *n.* Partie nouvelle du *striatum* en relation avec le thalamus et apparaissant dans le télencéphale des Reptiles.

néoténine. *n.* ou **hormone juvénile.** Substance sécrétée par les *corps allates* des Insectes déterminant, selon sa concentration, le type de mue, laquelle peut être larvaire, nymphale ou imaginale. Cette hormone agit aussi dans la maturation sexuelle des femelles.

néphélémétrie. *n.* Mesure par photométrie de la transparence d'un milieu contenant un précipité ou une culture de micro-organismes; comme ce milieu est d'autant plus opaque que les organismes ou la substance insoluble sont plus abondants, on mesurera indirectement le nombre des premiers ou la quantité de la seconde.

néphrogenèse. *n.* Différenciation des *néphrons*, ou tubes urinifères.

néphron. *n.* Voir *tubes urinifères*.

néphrostome. *n.* Pavillon cilié de la néphridie.

néphrotome ou **pièce intermédiaire.** Ébauche mésoblastique paire, métamérisée, interposée entre les somites et les lames latérales de l'embryon des Vertébrés; conduit à la formation de l'appareil urinaire.

nerf glossopharyngien. Neuvième nerf crânien des Mammifères; il innerve l'arrière-gorge.

nerf hypoglosse. Douzième nerf crânien des Mammifères; il innerve la région cervicale antérieure.

nerfs mixtes. Nerfs constitués de fibres motrices et de fibres sensibles.

nerf pneumogastrique. Dixième nerf crânien des Vertébrés; il innerve les régions pulmonaire et gastrique.

néritique. *adj.* Qui concerne le milieu marin au niveau du plateau continental (jusqu'à 200 m de profondeur, au bord des côtes).

neuramidase. *adj.* Une des rares enzymes virales, connue chez le virus de la grippe. En général, les virus ne possèdent pas de systèmes enzymatiques propres.

neurhormone. *n.* Hormone d'origine nerveuse, telle que celle produite par l'organe X des Crustacés, stockée dans la glande du sinus et qui inhibe la production d'hormone de mue (crustecdysone).

neuroblaste. *n.* Cellule embryonnaire qui se différenciera en *neurone*.

neurofibrilles. *n.* Neurofilaments plus ou moins enchevêtrés du corps cellulaire et des prolongements du neurone.

neurogène. *adj.* Voir *primaire*.

neuromaste. *n.* Mécanorécepteurs comportant des cellules ciliées et des cellules de soutien et groupés dans des canaux épidermiques formant le *système latéral*.

neuromusculaire. *adj.* **(jonction).** Contact entre l'extrémité de l'axone, ou d'un rameau d'axone d'un neurone, et la fibre musculaire qu'il innerve.

neuromusculaire. *adj.* **(synapse).** Qualifie la jonction s'effectuant entre des *neurones* et des *fibres musculaires*.

neurone. *n.* Cellule nerveuse formée d'un corps cellulaire prolongé de fines ramifications, ou dendrites, et d'un long axone. Cette cellule spécialisée capte l'excitation et conduit l'influx nerveux.

neuropores. *n.* Orifices mettant en relation le tube neural de l'embryon des Vertébrés avec le milieu extérieur.

neurosécrétion. *n.* Sécrétion d'origine nerveuse.

neurotendineuse. *adj.* **(synapse).** Qualifie la jonction s'effectuant entre des neurones et des fibres tendineuses.

neurulation. *n.* Formation de la *neurula* qui se caractérise par la mise en place du système nerveux et qui succède à la gastrulation.

neutrons. *n.* Particules pesantes mais non chargées, présentes dans le noyau des atomes en nombre défini. Deux atomes ne différant que par le nombre de leurs neutrons appartiennent à des *isotopes* d'un même élément.

névraxe ou **système nerveux central** ou **système cérébro-spinal.** Contenant les centres nerveux formés par l'*encéphale* et la *moelle épinière*, axe chargé des fonctions de relation chez les Vertébrés.

névroglie. *n.* Tissu de liaison nourricier du système nerveux.

newtonien. *adj.* Qui se rapporte à la pensée de Newton, philosophe et physicien du XVII[e] siècle qui découvrit les lois de l'attraction universelle.

niche écologique. Ensemble des paramètres qui conditionnent l'environnement physique d'une espèce et son rôle dans la communauté des êtres vivants.

nicotinamide - adénine - dinucléotide. Voir *NAD.*

ninhydrine. *n.* Substance organique à deux cycles susceptible d'oxyder à chaud les acides aminés en libérant de l'ammoniaque. Celui-ci sert alors à l'union d'une molécule de ninhydrine réduite et d'une autre de ninhydrine oxydée en un corps coloré en bleu-violet, violet ou orangé. La réaction sert à la caractérisation et au dosage des acides aminés.

nitrate-réductase. Enzyme permettant la transformation des nitrates en nitrites. Elle fonctionne grâce à du molybdène et à de la flavine-adénine-dinucléotide comme donneur d'électrons.

nitrification. *n.* Ensemble des réactions biochimiques produites par certains micro-organismes qui oxydent le radical NH_2 en ions NO_2^- ou NO_3^-.

nitrile. *n.* Substance présentant le groupement $—C \equiv N$. Susceptible de donner de l'acide cyanhydrique $H—CN$.

nitrites. *n.* Sels de l'acide nitreux HNO_2. Intermédiaires de la formation dans le sol de nitrates à partir de l'ammoniaque issu des fermentations, et de la réduction de ces nitrates, une fois absorbés par les végétaux vivants à l'état d'ammoniaque, pour incorporation dans des acides aminés.

nitrogénase. *n.* Enzyme permettant la fixation de l'azote moléculaire.

nitrophile. *adj.* Qui affectionne les sols riches en composés azotés, notamment l'ammoniaque et les nitrates, issus de la fermentation des débris organiques.

niveau de compensation. Limite entre la *zone trophogénique* superficielle d'un lac et la *zone tropholytique* sous-jacente.

niveau trophique. Étape d'une chaîne alimentaire formée par les organismes se nourrissant des êtres du niveau précédent et servant de nourriture à ceux du niveau suivant.

nodosité. *n.* 1° Renflement déterminé dans la racine de diverses plantes, en particulier les Légumineuses, par la présence de Bactéries symbiotiques. C'est au niveau des nodosités qu'est fixé l'azote atmosphérique. 2° En général, tout renflement d'une structure quelconque.

nœud d'Aschoff-Tawara. Élément du *tissu nodal* situé dans la partie postérieure du septum inter-auriculaire du cœur des Oiseaux et des Mammifères et transmettant l'excitation aux ventricules.

nœud de Hensen. Élément constitutif de la *ligne primitive* du germe d'un Oiseau.

nœud de Ranvier. Interruption, sous forme d'étranglement, des gaines entourant les fibres nerveuses.

nœud sino-atrial de Keith et Flack. Élément du *tissu nodal* situé au niveau de l'oreillette droite du cœur des Oiseaux et des Mammifères ; se comporte comme l'entraîneur cardiaque, ou « pace-maker », qui impose son rythme de contraction à l'ensemble de l'organe.

nombre atomique. Nombre d'électrons possédés par un atome. Il est égal à celui des protons.

noradrénaline. *n.* Médiateur chimique libéré à l'extrémité des fibres nerveuses sympathiques.

novobiocine. *n.* Substance antibiotique produite par un Champignon du genre *Streptomyces* qui agit sur les Bactéries en inhibant la fixation du mucopeptide sur les lipides phosphorylés.

noyau. *n.* Organite fondamental des cellules eucaryotes. Une membrane double, dont le feuillet externe est continu avec le réticulum endoplasmique, percée de pores, délimite un espace renfermant la chromatine, dont l'élément essentiel est l'acide désoxyribonucléique.

noyau arqué. Noyau du *thalamus* servant de relais des voies gustatives chez les Vertébrés.

noyau basal ou **striatum.** Centre ventral de corrélation sensorielle du *télencéphale* des Amphibiens.

noyau caudé. Portion dorsale interne du *néostriatum* du *télencéphale* des Vertébrés.

noyau lenticulaire. Formation du *télencéphale* des Vertébrés due à l'association du *putamen* et du *pallidum.*

nucléine. *n.* Anciennement, substance supposée contenue dans le noyau et considérée comme servant à la transmission de l'information héréditaire.

nucléocapside. *n.* Partie du virion constituée par le *nucléoïde* et la *capside.*

nucléoïde. *n.* Molécule centrale d'acide nucléique du virion.

nucléole. *n.* Formation globuleuse située à l'intérieur du noyau, produite par un ou plusieurs chromosomes, formée de granules et de fibrilles. C'est là que sont produits les ribosomes, qui passent ensuite dans le cytoplasme par les pores de la membrane nucléaire.

nucléoside. *n.* Corps résultant de la liaison d'un sucre en C_5 (ribose ou désoxyribose) avec une base organique, purique ou pyrimidique, l'azote de celle-ci étant fixée au carbone 1 du sucre, c'est-à-dire à son groupement réducteur. Ce sont des N-hétérosides, constituants des acides nucléiques.

nucléotide. *n.* Corps formé par phosphorylation d'un nucléoside, le groupement $-PO_3H_2$ étant fixé sur le carbone 5 (fonction alcool primaire) du pentose; c'est alors un *mononucléotide.* Si un second radical phosphoryle est fixé au premier, on a un *dinucléotide*, et si un troisième est fixé au second, un *trinucléotide*, comme l'ATP : acide adénosine-triphosphorique, formé d'adénine-ribose-PO_3H—PO_3H—PO_3H_2. Il existe même des *tétranucléotides*, à 4 radicaux phosphoryles.

nuisance. *n.* Type de pollution (*ex.* bruit).

nutation. *n.* Inclinaison spontanée d'un organe végétal par croissance plus intense sur l'un des côtés. Si cette région favorisée se déplace régulièrement autour de l'organe, celui-ci subira un mouvement circulaire ou *circumnutation.* Ce dernier phénomène, général pour la pointe des tiges, est spécialement marqué chez les plantes volubiles.

nutriment. *n.* Substance qui, résultant du catabolisme de la digestion, est directement absorbable au niveau de la paroi intestinale.

nyctipériode. *n.* Période d'obscurité.

nymphe. *n.* Larve d'Insecte qui n'a plus qu'à subir une mue pour devenir un *imago*, ou Insecte parfait. Souvent immobile, elle subit avant cette mue de profondes modifications.

nystagmus. *n.* Chez l'homme, anomalie héréditaire des muscles de l'œil; sa transmission est liée au sexe.

O

objectivisme ou **instinctivisme.** *n.* Méthode de la psychologie qui tente de décrire les comportements en séquences d'actes.

ocytocine. *n.* Hormone hypophysaire qui provoque les contractions utérines lors de l'accouchement.

œil. *n.* Organe photorécepteur des animaux, constitué de trois parties : des cellules photoréceptrices reliées au cerveau par un nerf optique, un système optique plus ou moins perfectionné suivant les groupes, et une paroi protectrice. On distingue les *yeux simples* et les *yeux composés.*

œstradiol. *n.* Hormone sexuelle femelle sécrétée par le follicule.

œuf ou **zygote.** *n.* Cellule résultant de l'union des deux gamètes, ou cellules sexuelles, produite au cours de la fécondation. Œuf fécondé.

oligochètes. *n.* Classe de l'embranchement des Annélides dont les segments sont dépourvus de parapodes. Les soies, peu nombreuses, s'implantent directement dans la paroi du corps.

oligodendrocytes. *n.* Cellules névrogliques remplaçant les cellules de Schwann des fibres de la substance blanche des centres nerveux.

oligo-élément. *n.* Voir *micro-élément.*

oligolécithe ou **oligolécithique.** *adj.* Qualifie un type d'œuf ne renfermant qu'une faible teneur en vitellus. *Ex.* Œuf d'Échinodermes et Procordés.

oligophage. *adj.* Caractérise un Insecte se nourrissant de plantes appartenant à des espèces voisines. *Ex.* Le doryphore, qui consomme surtout de la pomme de terre, mais parfois aussi de la tomate.

oligosaccharide. *n.* Holoside dont la molécule est formée d'un petit nombre (2 à 5) de molécules d'oses, ou sucres simples.

oligotrophe. *adj.* **(milieu).** Peu riche en éléments nutritifs, mais fortement oxygéné.

ologenèse ou **hologenèse.** *n.* Théorie conçue par D. Rosa suivant laquelle l'évolution se produirait selon des lignées dichotomiques, chaque espèce étant prédestinée dans l'espèce précédente.

ombelle. *n.* Inflorescence constituée de fleurs longuement pédonculées, à pédoncules insérés presque au même point sur le pédoncule inflorescentiel (faux verticille), qui, lui-même, se termine ou non par une fleur. L'ombelle peut être composée d'ombelles élémentaires, ou *ombellules.*

ombrophile. *adj.* Se dit d'une végétation à couverture arborescente très dense, où les rayons solaires n'atteignent guère le niveau du sol : c'est le cas de la forêt dense équatoriale.

omnivore ou **diversivore.** *adj.* Qui a un régime alimentaire non sélectif.

onchocercose. *n.* Maladie due à la filaire *Onchocerca* qui provoque des tumeurs sous-cutanées et peut entraîner des troubles oculaires.

oncogène. *adj.* Syn. de *carcinogène.*

oncognathisme. *n.* Gonflement des maxillaires associé à un fort développement des arcades sourcilières; il caractérisait la face des Néandertaliens.

ontogénie. *n.* Ensemble des modifications subies par l'œuf ou un germe d'individu ou d'organe pour aboutir à la morphologie spécifique définitive.

oosphère ou **oogone.** *n.* Cellule sexuelle (gamète) femelle des Cormophytes. Enclose en principe dans le ventre de l'archégone, qui est indifférencié chez les Angiospermes, où l'oosphère est simplement l'une des sept cellules du sac embryonnaire.

opérateur. *n.* Locus du gène qui porte ou non l'*inducteur* ou le *répresseur.*

opposé. *adj.* 1° Qui est situé en face d'une autre pièce et contre elle. *Ex.* Étamine opposée à un pétale. 2° Situés deux par deux en face l'un de l'autre, de part et d'autre de la tige. Des feuilles opposées forment un verticille de deux éléments, ou dimère, et deux verticilles superposés sont disposés à 90° l'un de l'autre (feuilles opposées, dites *décussées*).

opsine. *n.* Protéine spécifique constitutive des pigments visuels.

orcéine. *n.* Colorant basique rouge utilisé pour la coloration des chromosomes et leur comptage.

ordre. *n.* Actuellement, groupe de familles supposé naturel, de rang inférieur à la classe. La délimitation des ordres est fort délicate; leur nombre est donc variable et tend, avec les progrès de la classification, à augmenter. Plus les ordres sont petits, plus ils sont « naturels », mais moins ils sont utiles, car beaucoup ne comprennent alors qu'une seule famille.

oreille. *n.* Organe stato-acoustique des Vertébrés comprenant généralement une portion externe, ou

pavillon, une portion moyenne assurant la perception des sens et une portion interne jouant un rôle dans l'équilibration.

oreille interne. Syn. de *labyrinthe.*

oreillette. *n.* 1° Chez les Invertébrés, cavité cardiaque qui reçoit le sang veineux. 2° Chez les Vertébrés, partie de l'*atrium* cardiaque, lorsque celui-ci est cloisonné.

organe de Corti. Papille sensorielle de l'oreille interne, perfectionnée et enroulée en spirale chez les Mammifères.

organe parapinéal. Évagination dorsale impaire de l'*épithalamus* située en avant de l'*organe pinéal.* Cet « œil pinéal », peu fonctionnel, n'existe que chez quelques Poissons et Reptiles.

organe pinéal. Voir *épiphyse.*

organe X ou **de Hanström.** Glande endocrine céphalique paire sécrétant une hormone inhibitrice de la *mue* et dont dépendent les phénomènes d'adaptation chromatique, de gamétogenèse et de différenciation sexuelle chez les Crustacés Malacostracés.

organes périsympathétiques. Organes constitués des cellules neurosécrétrices des ganglions de la chaîne nerveuse et des glandes neurohémales.

organes Y ou **organes frontaux latéraux.** Glandes endocrines céphaliques paires dont dépendent la croissance (et même la régénération des appendices locomoteurs) ainsi que les mues chez les Crustacés Malacostracés.

organelle. *n.* Voir *organite.*

organisateur nucléolaire. Zone de certains chromosomes où ceux-ci sont étranglés, la portion distale étant un satellite (chromosome SAT). Un nucléole se forme en rapport avec l'organisateur nucléolaire après la mitose, ou plusieurs organisateurs servent à constituer un seul nucléole.

organite ou **organelle.** *n.* Structure entrant dans la composition d'une cellule et fonctionnant comme un de ses « organes ».

organogène. *adj.* D'origine organique, non minérale, c'est-à-dire produit par l'activité d'êtres vivants. *Ex.* Les récifs.

organogenèse. *n.* Édification des organes, au cours du développement embryonnaire, où interviennent mouvements, prolifération et différenciation cellulaires.

organographie. *n.* Description des organes qui ne tient pas compte de leurs relations morphologiques et par conséquent phylogéniques.

organométallique. *adj.* Qui comporte un ou plusieurs atomes métalliques incorporés à une molécule organique.

ornithine. *n,* Acide aminé spécifique des Oiseaux.

orogenèse. *n.* Ensemble des différentes phases qui contribuent à la formation d'une chaîne de montagnes.

orthogenèse. *n.* Au cours de l'évolution, apparition d'une succession de formes manifestant graduellement des caractères qui vont s'intensifiant dans un sens précis, parfois jusqu'à devenir nuisibles *(hypertélie).*

orthograde. *adj.* Qualifie la marche bipède de l'homme en position dressée.

orthostatisme. *n.* Syn. de *bipédie.*

os compact ou **os haversien.** Os constitué de lamelles osseuses concentriques constituant les *ostéones* ou *systèmes de Havers.*

os dermique ou **os de revêtement.** Os qui se forme dans le derme de la peau directement, à partir du tissu conjonctif, et qui constitue l'exosquelette.

os haversien. Syn. d'*os compact.*

os pétreux. *n.* Chez les Prosimiens (Primates primitifs), os qui protège l'oreille interne et que l'on nomme « rocher » chez les Primates supérieurs.

os de revêtement. Voir *os dermique.*

os sésamoïde. Os qui se forme dans un tendon. *Ex.* La rotule.

os spongieux. Os constitué de lamelles de substances osseuses qui forment des trabécules à disposition et orientation variables.

oscule. *n.* Orifice interne des branchies en bourses des Agnathes s'ouvrant dans le pharynx.

osmolarité. *n.* Nombre d'osmoles présentes dans un litre d'une solution.

osmole. *n.* Masse de substance dissoute (soluté) susceptible d'entraîner dans un litre de solvant une pression osmotique identique à celle causée par une molécule-gramme (mole) de soluté non dissocié. Si la substance est totalement dissociée et fournit deux ions, une mole fournira deux osmoles.

osmomètre. *n.* Appareil destiné à mesurer la pression osmotique d'une solution.

osmotrophe. *adj.* Qui se nourrit de molécules organiques transférées directement du milieu ambiant à travers la paroi du corps de l'animal (par osmose).

ostéoblastes. *n.* Cellules du tissu conjonctif qui fabriquent la substance osseuse.

osteodontokeratic culture. La plus ancienne industrie attribuable aux Australopithèques.

ostéogenèse. *n.* Ensemble des processus qui participent à l'édification du tissu osseux.

ostéologie. *n.* Science qui étudie les os sous leurs aspects morphologique, histologique, biochimique, mécanique, etc.

ostéone. *n.* ou **système de Havers.** Assemblage de lamelles osseuses concentriques qui comporte un canal central contenant des vaisseaux sanguins.

ostéoplaste. *n.* Petite cavité de substance osseuse qui renferme un ostéocyte, ou cellule du tissu osseux minéralisé.

ostéosarcome. *n.* Sarcome qui se forme sur un os.

ostiole. *n.* Petite ouverture plus ou moins arrondie, telle celle des stomates.

ouïe. *n.* Syn. de *fente operculaire.*

ovaires. *n.* Glandes génitales femelles élaborant les ovules.

overfishing. *n.* Surexploitation des pêcheries.

oviducte. *n.* Canal de l'appareil génital femelle qui conduit les ovules à partir de l'ovaire (chez les Vertébrés : *canal de Muller*; dans l'espèce humaine : *trompe de Fallope*).

ovisme. *n.* Doctrine ancienne d'après laquelle l'être vivant est préformé dans l'œuf fourni par la femelle, et ne connaît qu'une augmentation de taille au cours du développement.

oviste. *n.* Partisan de la doctrine de l'*ovisme.* *Adj.* Concernant cette doctrine.

ovocyte. *n.* 1° Ovocyte de premier ordre : stade diploïde du gamète femelle résultant d'une augmentation de taille de l'*ovogonie* et qui va subir la première division de la méiose. 2° Ovocyte de deuxième ordre : cellule haploïde résultant de la division inégale de l'ovocyte de premier ordre.

ovogenèse. *n.* Transformation des cellules initiales femelles en ovules fécondables terminant leur maturation au moment de la fécondation.

ovogonies. *n.* Cellules initiales diploïdes des gamètes femelles, ou ovules.

ovule. *n.* 1° Chez les végétaux supérieurs, organe porté par le carpelle et contenant au sein d'un nucelle (massif de cellules), entouré d'un ou deux téguments, le sac embryonnaire qui renferme lui-même l'oosphère, ou gamète femelle, de la plante à fleur. Fécondé par le tube pollinique, se transformera en graine. 2° Chez les animaux, cellule sexuelle femelle.

oxamide. *n.* Le plus simple des diamides,

$$\begin{array}{l}CO{-}NH_2\\ |\\ CO{-}NH_2\end{array}$$

correspondant à l'acide oxalique

$$\begin{array}{l}COOH\\ |\\ COOH.\end{array}$$

C'est un corps insoluble blanc.

P

pachytène. *n.* Période de la prophase méiotique au cours de laquelle les chromosomes s'épaississent par fissuration longitudinale des chromosomes appariés, qui forment alors des tétrades.

palais primaire. Ensemble d'os enchondraux (épiptérygoïde en avant, carré en arrière) et d'os dermiques (un parasphénoïde impair, deux vomers, deux palatins, deux ectoptérygoïdes, deux ptérygoïdes) qui constituent le plafond buccal des Vertébrés.

palais secondaire. Voûte osseuse qui double le palais primaire à l'intérieur de la cavité buccale de certains Reptiles et de tous les Mammifères.

paléobiogéographie. *n.* Étude de la répartition géographique des faunes et des flores fossiles.

paléobotanique. *n.* Étude des plantes fossiles.

paléocérébellum. *n.* Partie médiane constitutive du *cervelet* des Vertébrés.

paléoécologie. *n.* Étude des relations ayant existé dans le passé entre les êtres vivants et leur milieu.

paléolithique. *n.* Première période de la Préhistoire, qui s'étend jusqu'à 12 000 avant J.-C. Caractérisée par l'industrie de la pierre taillée.

paléontologie. *n.* Étude des animaux (paléozoologie) et végétaux (paléobotanique) disparus de la nature actuelle.

paléopallium. *n.* Partie dorsale du *télencéphale* correspondant aux lobes olfactifs des Vertébrés.

paléostriatum ou **pallidum.** *n.* Portion ventrale du télencéphale des Vertébrés inférieurs.

paléoxylologie. *n.* Science faisant partie de la paléobotanique et qui étudie l'appareil conducteur des plantes vasculaires disparues, notamment les bois fossiles.

paléozoologie. *n.* Étude des animaux ayant vécu dans le passé.

paléthnologie. *n.* Terme parfois utilisé comme synonyme de Préhistoire mais controversé par certains auteurs.

palingénétiques. *adj.* **(caractères).** Caractères ancestraux que l'on rencontre tout au long d'une lignée évolutive.

palissadique. *adj.* Dont les éléments ressemblent aux planches constituant une palissade. *Ex.* Parenchyme palissadique.

pallidum. *n.* Syn. de *paléostriatum.*

palolo. *n.* Aliment de certains peuples des îles Samoa constitué par des Vers Annélides marins qui remontent à la surface de la mer au moment de la reproduction.

paludisme. *n.* Maladie tropicale de l'homme, due au Protozoaire *Plasmodium vivax,* transmis par les moustiques anophèles (Diptères). Débute par une

fièvre suivie d'une forte diarrhée et se prolonge souvent par un coma fatal.

palynologie. *n.* Étude des grains de pollen et des spores.

pampa. *n.* Steppe, de grande étendue, en Amérique du Sud.

PAN (peroxy-acylnitrate). Dérivé nocif résultant de la combinaison, par réaction photochimique, des carbures imbrûlés et des oxydes d'azote.

panchronique. *adj.* Qualifie les organismes qui n'ont pas évolué et présentent actuellement les mêmes caractères que leurs ancêtres.

pancréas. *n.* Glande digestive des Vertébrés dont la fonction est double : *exocrine,* elle sécrète le suc pancréatique chargé d'enzymes digestives; *endocrine,* elle règle l'équilibre de la glycémie.

pandémie. *n.* Épidémie à très grande échelle.

pangaea ou **pangée.** *n.* Continent primitif unique, dont la fragmentation en deux parties a donné la Laurasia, continent de l'hémisphère Nord, et le Gondwana, continent de l'hémisphère Sud.

panmictique. *adj.* Qualifie une population dans laquelle la rencontre des gamètes s'effectue au hasard.

panmixie. *n.* Cessation de sélection. Ce phénomène affecte essentiellement les espèces qui ont atteint un haut degré de spécialisation. *Ex.* Chez les animaux cavernicoles.

panspermie. *n.* Théorie ancienne selon laquelle la vie est partout présente dans l'univers, sous forme de germes capables de se multiplier lorsque les conditions deviennent favorables.

papillome. *n.* Maladie virale de la peau qui provoque des excroissances cutanées, ou verrues.

papovavirus. Virus tumorigène des Vertébrés déterminant le papillome du lapin, le polyome de la souris et le vacuolant du singe.

parabronches. *n.* Bronches tertiaires des Oiseaux se raccordant à d'autres bronches *(mésobronches).*

paraclimacique. *adj.* Qualifie une formation végétale ayant atteint son état d'équilibre. *Ex.* La garrigue.

paracristallin. *adj.* Qui évoque la structure d'un cristal par la régularité de la disposition de ses éléments constitutifs. Les dispositions paracristallines sont visibles au microscope électronique, tandis que les réseaux cristallins sont formés de molécules, atomes ou ions trop petits pour l'être.

paracytique. *adj.* **(stomate).** Accompagné de part et d'autre de deux cellules annexes dont les parois en contact sont parallèles aux parois adjacentes des cellules stomatiques, qui délimitent l'ostiole.

paramos. *n.* Prairies d'altitude, humides et froides, d'Afrique orientale, d'Australie...

parasite. *n.* Qui vit aux dépens d'un autre être vivant en lui empruntant tous les éléments nécessaires à son entretien. On distingue les *parasites facultatifs,* qui peuvent vivre indifféremment soit en parasites, soit à l'état libre, ou, surtout, suivant leur degré de développement, les *parasites obligatoires,* qui ne peuvent vivre qu'en parasites, et les *parasites stricts,* parasites obligatoires qui ne peuvent pas se développer sur milieu artificiel.

parasitisme. *n.* Relation entre deux êtres vivants dont l'un, le « parasite », vit totalement aux dépens de l'autre, considéré comme son « hôte ». *Ex.* La puce du chien, la douve du mouton, le ver solitaire de l'homme.

parasitisme alimentaire. Désigne le *parasitisme* d'un animal qui se nourrit d'aliments récoltés par d'autres individus. *Ex.* Cas de certaines espèces de mouettes volant les Poissons pêchés par d'autres Oiseaux, des labbes ou des frégates.

parasitoïde. *n.* Organisme parasite pendant une période de sa vie, comme de nombreux Insectes Hyménoptères et Diptères.

parathion. *n.* Insecticide correspondant à un ester phosphorique.

parathyroïde. *n.* Glande endocrine des Vertébrés tétrapodes qui sécrète une hormone hypercalcémiante.

parc national. Territoire protégé comprenant une *zone d'accueil,* ou préparc, à structures touristiques, et une *zone centrale* servant de réserve scientifique intégrale, où chasse et cueillette sont interdites. *Ex.* Le parc de la Vanoise.

parc naturel régional. Territoire préservé pour l'intérêt de son paysage et de sa vie locale. *Ex.* Parcs de la Camargue, du Vercors.

parenchyme. *n.* Tissu végétal constitué de cellules, assez peu différenciées, disposées dans les trois dimensions, et plus ou moins solidement unies les unes aux autres de tous côtés. Peut aussi désigner des tissus animaux (parenchyme hépatique).

paroi ou **paroi squelettique.** Enveloppe cellulaire non vivante et mécaniquement résistante. Extérieure à la cellule mais sécrétée par elle. Formée surtout de cellulose chez beaucoup de plantes, elle renferme aussi d'autres polyosides et également des protéines, notamment des enzymes. Parfois nommée *membrane,* mais ce terme doit être réservé à la membrane cytoplasmique, pellicule limitant le cytoplasme vivant, et au niveau de laquelle, précisément, est sécrétée la paroi.

paroi primaire. Paroi cellulosique déposée par la cellule végétale juste après son individualisation. Elle est formée de fibres de cellulose, d'abord entremêlées puis disposées parallèlement les unes aux autres suivant des couches concentriques inclinées les unes par rapport aux autres, et noyées dans une « matrice » d'hémicelluloses et éventuellement d'un peu de composés pectiques.

paroi secondaire. Paroi faite de couches de cellulose dans une matrice d'hémicellulose et éventuellement incrustée de lignine, déposée intérieurement à la paroi primaire par des cellules souvent destinées à perdre leur protoplasme (éléments de vaisseaux, sclérites). La paroi secondaire est souvent divisée en trois couches concentriques. Plus ou moins distincte de la paroi primaire, elle se dépose en général après la fin de la croissance de la cellule.

pars renalis. Région postérieure du *mésonéphros* des Poissons Chondrichthyens fonctionnant comme un rein.

pars sexualis. Région antérieure du *mésonéphros* des Poissons Chondrichthyens servant à l'évacuation du sperme chez les mâles.

parthénogenèse. *n.* Développement du gamète femelle non fécondé. Cette modalité de reproduction peut être soit *obligatoire (ex. Artemia),* soit *facultative* (*ex.* abeilles), ou encore être *cyclique* et alternée avec un mode de reproduction sexuée normale (*ex.* daphnies, pucerons).

particule kappa. Système cytoplasmique d'hérédité extrachromosomique, porteur du « *caractère killer* » chez la paramécie *Paramecium aurelia.*

particule ρ. Particule qui existerait dans le cytoplasme des Levures (Champignons) et qui serait nécessaire à la synthèse des enzymes respiratoires.

parvovirus. *n.* Selon la classification LHT (Lwoff, Horme et Tournier), virus possédant 32 *capsomères.*

P.A.S. (Periodic Acid-Schiff). Réaction qui consiste à faire agir l'acide périodique HIO_4 sur un produit glucidique; des fonctions aldéhydes seront formées, qui réagiront avec le *réactif de Schiff* (fuchsine basique décolorée par le gaz sulfureux, qui se recolore en rouge en présence d'aldéhydes).

patroendémique. *adj.* D'aire restreinte, donc endémique, mais qui a engendré un taxon voisin, qui, lui, a pu conquérir une aire bien plus vaste. *N.* Un patroendémique.

pattern. *n.* Modèle qui représente d'une façon simplifiée la structure d'un phénomène humain.

pectoral. *n.* Muscle ventral de l'épaule qui relie le sternum à la clavicule.

pédicule de fixation. Élément provenant du mésoderme extra-embryonnaire et reliant l'embryon des Mammifères au *trophoblaste.*

pédicule vitellin ou **canal ombilical.** Formation reliant le tube digestif de l'embryon d'un Oiseau à la vésicule vitelline.

pédoclimax. *n.* Type de sol en équilibre avec des conditions écologiques données.

pédoncule. *n.* 1° Portion de tige portant une inflorescence, une fleur ou le fruit qui provient de cette dernière. 2° Toute formation allongée portant une structure plus ample qu'elle.

pédoncules cérébraux. Formations paires du plancher du *mésencéphale* des Mammifères servant de voies descendantes de la motricité volontaire.

pélagique. *adj.* 1° Qui vit en mer au sein de l'eau. 2° Qui concerne le milieu correspondant.

pélagos. *n.* Ensemble des organismes marins vivant en pleine eau et constitué par le *plancton,* qui se laisse entraîner par les courants, et le *necton* qui possède sa motilité propre.

pelote de régurgitation. Boulette régurgitée par certains Oiseaux rapaces, constituée par les éléments squelettiques non digérés des proies.

pelté. *adj.* Présentant une surface insérée sur un pédoncule par sa surface et non par son bord. Une feuille peltée (capucine) a un pétiole fixé à la surface inférieure (abaxiale) de son limbe. Un poil pelté comporte un disque horizontal de cellules fixé par sa surface inférieure à un pédoncule dressé.

pénicillinase. *n.* Enzyme capable de détruire la *pénicilline* et de la transformer en *acide pénicilloïque,* inactif, chez certains individus mutants.

pénicilline. *n.* Substance antibiotique synthétisée par un Champignon du genre *Penicillium,* utilisée en pharmacologie. Elle agit en particulier sur les Bactéries en prolifération car elle bloque l'édification de la paroi.

pénis. *n.* Organe copulateur du mâle, permettant l'intromission du sperme.

péplos. *n.* Membrane externe qui recouvre la *capside* de certains virus.

perforation. *n.* Dans le bois, zones où les parois de deux cellules mortes (trachéides) adjacentes sont totalement interrompues, et où le passage de l'eau est donc absolument libre. Voir *ponctuation.*

périanthe. 1° Chez les Hépatiques, verticille de feuilles entourant le périchétium, qui abrite lui-même les organes femelles. 2° Ensemble des éléments floraux suivants : sépales formant le calice et les pétales constituant la corolle.

périchondre. *n.* Tissu conjonctif fibreux qui entoure le cartilage.

péricycle. *n.* Manchon de cellules entourant les éléments conducteurs de la racine et de la tige. C'est la couche la plus externe du cylindre central.

péricyte. *n.* Cellule conjonctive du capillaire sanguin plaquée contre les cellules endothéliales à l'extérieur de la basale.

périderme. *n.* Couche externe, parfois pigmentée, de l'épiderme embryonnaire des Vertébrés.

périgordien. *adj.* Qualifie la première civilisation du Paléolithique supérieur rencontrée en France après la civilisation moustérienne.

périnée. *n.* Ensemble des parties molles qui ferment la région inférieure du bassin chez l'homme et chez la femme.

périnèvre. *n.* Gaine conjonctive entourant les faisceaux des fibres nerveuses.

période. *n.* Temps au bout duquel la masse d'un corps radioactif a diminué de moitié.

périoste. *n.* Tissu conjonctif qui entoure l'os et participe à sa croissance.

perméase. *n.* Enzyme permettant le passage d'une substance à travers la membrane cytoplasmique et, par conséquent, sa pénétration dans la cellule. Il s'agit en fait d'un *transporteur* de substance.

peroxydase. *n.* Enzyme utilisant un péroxyde, tel H_2O_2 (l'eau oxygénée) pour oxyder un substrat.

peroxyde d'hydrogène. L'eau oxygénée H_2O_2.

persistant. *adj.* 1° Qui reste en place durant plus d'une période de végétation sans mourir. *Ex.* Feuille persistante. 2° Qui reste en place plus longtemps que les organes comparables dans le cas habituel. *Ex.* Calice ou corolle demeurant lorsque la fleur est passée.

pesticide. *n.* Substance chimique de synthèse employée en agriculture contre les Insectes, les mauvaises herbes ou les moisissures.

petite neutre. *Cellule « petite »* de *Saccharomyces cerevisiae* qui a perdu le caractère « petit » après croisement avec une cellule normale et est redevenue normale.

pH. Indice permettant de noter l'acidité ou la basicité d'une solution. Celle-ci est neutre à pH 7, acide en dessous, et basique de pH 7 à pH 14.

phage. *n.* Syn. de *bactériophage*.

phagocytose. *n.* Processus d'englobement, de destruction et de digestion, par une cellule, de particules, ou d'autres cellules, qu'elle trouve dans son milieu.

phagosome. *n.* Vacuole qui enclôt des proies figurées et a reçu des enzymes d'hydrolyse d'un lysosome primaire : celles-ci vont lui servir à la digestion des éléments qu'elle contient.

phanérogames. *n.* Embranchement du règne végétal dont les représentants possèdent des fleurs et des graines.

phanérophytes. *n.* Arbres et arbustes dont les bourgeons, souvent protégés par des écailles externes, restent à l'air.

pharmacologie. *n.* Étude des modalités d'action des substances chimiques sur les organismes, les organes ou les cellules.

pharynx. *n.* Segment antérieur du tube digestif des Cordés. Originellement percé de fentes pharyngiennes chez les Cordés inférieurs, il assure des fonctions nutritive et respiratoire. Cette dernière a disparu chez la plupart des Vertébrés.

phase céphalique. Première phase de la sécrétion de suc gastrique dont le stimulus est essentiellement psychique.

phase gastrique. Seconde phase de la sécrétion de suc gastrique, sous la dépendance d'un mécanisme essentiellement humoral.

phelloderme. *n.* Chez les végétaux, écorce secondaire formée, vers l'intérieur, par l'assise génératrice subéro-phellodermique.

phénoménologie. *n.* théorie en psychologie, énoncée par Brentano, selon laquelle la perception d'un objet est plus importante que l'objet lui-même.

phénotype. *n.* Ensemble des caractères apparents d'un être (voir *génotype*). Tous les phénotypes expriment une partie du génotype, mais ce dernier comprend des caractères qui n'apparaissent pas dans le phénotype.

phénylalanine. *n.* Acide aminé dont le radical porte un noyau benzénique (phényl-) substitué sur le méthyle de l'alanine :

$$C_6H_5{-}CH_2{-}\underset{\displaystyle NH_2}{\underset{|}{CH}}{-}COOH.$$

phénylcétonurie. *n.* Maladie métabolique héréditaire de l'homme transmise par un gène autosomal récessif. Le sujet peut devenir un débile mental profond par suite de son incapacité à transformer la phénylalanine en tyrosine par manque d'hydroxylase, enzyme nécessaire à cette réaction.

phényluréthane. *n.* Le corps de formule

$$O = C\begin{matrix}\diagup NH{-}C_6H_5\\ \diagdown OC_2H_5\end{matrix}$$

dérivé de l'isocyanate de phényle : $O = C = N{-}C_6H_5$ par addition d'alcool éthylique.

phéromone. *n.* Hormone sécrétée par un individu et agissant sur un autre individu de la même espèce. Dans ce cas, la sécrétion hormonale n'est pas une sécrétion interne. Quoique moins correct, le terme a prévalu sur *phérhormone*.

phocomèle. *n.* Être tératologique caractérisé par l'absence de certains segments de membres, les mains ou les pieds s'insérant directement sur le tronc.

phorésie. *n.* Aptitude de certains animaux à se faire transporter par d'autres. *Ex.* Le Pseudoscorpion du genre *Chelifer* s'accroche à la patte d'une mouche.

phosphatase alcaline. Enzyme hydrolysant les phosphates et active un milieu alcalin.

phosphoarginine. *n.* Phosphagène musculaire que l'on rencontre chez la plupart des Invertébrés.

phosphocréatine. *n.* Phosphagène musculaire que l'on rencontre chez les Échinodermes, les Procordés et les Vertébrés.

phosphoglycamine. *n.* Phosphagène musculaire caractéristique des Annélides.

phosphomonoestérase. *n.* Enzyme qui décompose les monoesters de l'acide phosphorique (un seul radical phosphoryle) en libérant ce dernier.

phosphoprotéine. *n.* Protéine contenant du phosphore, sous forme de radicaux phosphoryle $—PO_3H_2$, comme la caséine du lait.

phosphorolyse. *n.* Dégradation d'une molécule avec fixation de radicaux phosphoryle $—PO_3H_2$ sur les éléments séparés.

phosphorylase-kinase. *n.* Enzyme permettant la fixation d'un radical phosphoryle $—PO_3H_2$ sur la phosphorylase, ce qui est indispensable au fonctionnement de celle-ci.

phosphorylation. *n.* Fixation d'un radical phosphoryle $—PO_3H_2$ sur un groupement $—OH$ d'une molécule, éventuellement libérée au préalable d'une combinaison polymère où elle se trouvait : l'une des phosphorylases sépare ainsi du glucose de l'amidon, tout en le faisant passer sous forme de glucose 1-phosphate.

phosphoryle. *adj.* Groupement phosphoryle : le groupe $—PO_3H_2$, intervenant dans les phosphorylations.

photobiologie. *n.* Étude des effets biologiques des radiations lumineuses.

photopériodisme. *n.* Rythme des périodes d'éclairement et d'obscurcissement en un lieu donné. Les variations du photopériodisme peuvent entraîner des modifications du développement, de la physiologie ou du comportement d'un organisme vivant.

photophore. *n.* Organe bioluminescent logé dans le derme de nombreuses espèces abyssales. Il est constitué par des cellules photo-émettrices qui contiennent deux constituants, la *luciférine* et la *luciférase*, responsables de l'émission de rayons lumineux.

photorécepteur. *n.* Organe ou organite sensible à la lumière.

photorespiration. *n.* Échanges respiratoires déterminés par la lumière chez certaines plantes et dont la voie métabolique est particulière, mettant en cause l'acide glycolique.

photosynthèse. *n.* Processus par lequel les végétaux autotrophes pour le carbone fixent celui du gaz carbonique de l'air. L'énergie nécessaire à cette réaction est fournie par la lumière ; elle est captée grâce aux chlorophylles.

phototropisme. *n.* Mouvement de croissance d'un organe végétal déterminé par la direction de la lumière incidente.

phragmoplaste. *n.* Petit fuseau qui se forme à l'équateur de l'ancien fuseau achromatique des cellules végétales après disparition de celui-ci, et s'étend sur toute la surface de section de la cellule. Les fibres du phragmoplaste guident les vésicules d'origine golgienne, qui viennent s'unir à l'équateur en une *plaque cellulaire* où se dépose la lamelle pectique, qui séparera les cellules filles.

phyllode. *n.* Pétiole élargi et épanoui en lame ressemblant à un limbe. La présence sur certaines feuilles du véritable limbe réduit révèle la vraie nature du phyllode. Si le rachis d'une feuille composée est élargi tandis que les folioles manquent, ou sont réduites, on parle parfois aussi de *phyllode*.

phyllome. *n.* Terme général qui désigne l'ensemble des appendices de l'axe des plantes à fleurs (et en général des Cormophytes), que ce soient des feuilles végétatives (y compris les cotylédons) ou des pièces inflorescentielles et florales (bractées, préfeuilles, sépales, pétales, étamines et carpelles).

phyllophage. *adj.* Qualifie un organisme se nourrissant de feuilles d'arbres.

phyllorhize. *n.* Unité théorique de l'organisation végétale, qui comporterait une feuille (phylle), un entre-nœud et une racine (rhize). Une suite de phyllorhizes formerait la pousse.

phyllotaxie. *n.* 1° Disposition des feuilles sur la tige. 2° Étude de cette disposition.

phytine. *n.* Sel de l'acide phytique, substance de réserve phosphorée abondante dans les graines. C'est l'ester hexaphosphorique du mésoinositol, qui possède 6 fonctions alcool disposées en cycle. L'*acide phytique* est le composé naturel le plus riche en phosphore.

phytoalexine. *n.* Substance produite par les plantes en réponse à un agent pathogène.

phytocénose. *n.* Ensemble de communautés végétales plus ou moins dépendantes d'une communauté principale.

phytochrome. *n.* Pigment végétal appartenant aux biliprotéines, sensible à la lumière rouge dont deux longueurs d'onde distinctes lui font prendre deux formes séparées. L'une de celles-ci est active sur de nombreux processus physiologiques, et rend compte de leur sensibilité à la lumière rouge.

phytogéographie. *n.* Géographie des plantes : étude de leur répartition à la surface de la Terre.

phytohémagglutinines. *n.* Protéines végétales déterminant la prolifération des leucocytes en s'attachant à des sites de leurs membranes où sont présents des glucides. Déterminent aussi l'agglutination de diverses autres cellules.

phytonisme. *n.* Doctrine d'après laquelle les végétaux supérieurs sont constitués de végétaux élémentaires, ou *phytons*, formés chacun d'une feuille, d'un entre-nœud et d'une racine élémentaire.

phytophage. *adj.* Qualifie un organisme se nourrissant de végétaux.

phytoplancton. *n.* Partie du plancton constituée par les végétaux.

phytosociologie. *n.* Science qui étudie les associations végétales.

picornavirus. *n.* Les plus petits virus à ARN connus. Ils mesurent de 15 à 30 nm et comprennent les entérovirus de l'intestin et les rhinovirus de la muqueuse nasale.

pièce intermédiaire. 1° Partie constitutive du *spermatozoïde*, localisée entre sa tête et son flagelle.

Elle permet, par les mitochondries qu'elle renferme, de fournir l'énergie indispensable aux battements du flagelle. 2° Syn. de *néphrotome*.

pie-mère. Méninge interne vascularisée adhérant au névraxe des Vertébrés.

pigment. *n.* Substance colorée, c'est-à-dire qui absorbe certaines radiations du spectre, laissant passer les autres, dont l'ensemble caractérise sa « couleur ».

pinocytose. *n.* Modalité cellulaire d'ingestion d'aliments à l'état de gouttelettes, captées dans le milieu extérieur par des invaginations de la membrane plasmique.

piscivore. *adj.* Qualifie un organisme se nourrissant de Poissons.

pistil. *n.* Syn. de *gynécée*.

pithécanthropes. *n.* Les plus anciens Hominiens connus (—1 million d'années) dont les restes ont été découverts dans l'île de Java et en Chine. Leur attitude bipède, leur capacité crânienne, la morphologie de leur mâchoire et de leurs dents en font sans conteste des représentants à part entière de ce groupe.

placenta. *n.* 1° Zone marginale ou submarginale du carpelle où sont insérés les ovules, en une ou plusieurs rangées. 2° Annexe embryonnaire des Mammifères au niveau de laquelle s'effectuent les échanges entre l'organisme maternel et le fœtus.

placentaire. *adj.* Dont les échanges trophiques, respiratoires et excréteurs avec la mère s'effectuent, chez la plupart des Mammifères, par l'intermédiaire d'un *placenta*.

placentation. *n.* 1° Chez les végétaux, disposition des ovules dans l'ovaire. On distingue : la *placentation axile*, caractérisée par le fait que les ovules sont au centre de l'ovaire et donnent l'impression qu'ils sont portés par l'axe de la fleur (en fait, ils sont insérés sur les marges des carpelles repliées vers l'intérieur et plus ou moins unies les unes aux autres); la *placentation laminale*, dans laquelle les ovules sont disposés sur la surface interne d'une grande partie de la paroi des carpelles et non sur leurs marges; la *placentation pariétale*, où les ovules sont disposés sur la paroi ovarienne (il ne se forme pas de cloisons car les marges ovulifères ne se replient pas vers l'intérieur). 2° En biologie, établissement, entre l'embryon et la mère, d'une zone de contact (placenta) à travers laquelle se font les échanges chimiques.

placodes sensorielles. Épaississements épidermiques de la larve des Vertébrés conduisant à la formation des vésicules olfactives et auditives, ainsi qu'à celle des cristallins.

planachromatique. *adj.* **(objectif).** Qui est corrigé pour compenser l'aberration chromatique et la courbure de champ, de manière à fournir une image nette sur toute sa surface et sans franges colorées. Se dit d'un objectif de microscope photonique.

planctonophage. *n.* Organisme se nourrissant de plancton.

plantule. *n.* Jeune plante en train de germer, et n'ayant encore formé que quelques feuilles au-dessus du ou des cotylédons. P. ext., œuf ou spore de Thallophyte en train de germer.

plaque neurale. Épaississement dorsal, d'origine ectodermique, dû à un mouvement d'*épibolie* servant d'ébauche au système nerveux.

plaque de Peyer. Nodules lymphoïdes disséminés dans le chorion intestinal des Mammifères.

plaquettes sanguines. Voir *globulins*.

plasma. *n.* Liquide clair dans lequel baignent les cellules sanguines.

plasmatique. *adj.* Qui concerne le plasma sanguin.

plasmique. *adj.* Qui concerne le cytoplasme cellulaire *(membrane plasmique)*.

plasmode. *n.* Structure contenant de nombreux noyaux dans un seul cytoplasme. Peut être considéré comme correspondant à plusieurs cellules fusionnées, et se forme effectivement, parfois, par union de nombreuses cellules. Dit aussi *syncytium*, surtout chez les animaux.

plasmodesme. *n.* Ouverture submicroscopique assurant la continuité des cytoplasmes de deux cellules végétales contiguës. Le réticulum endoplasmique semble y passer.

plasmodiérèse. *n.* Division du cytoplasme, suivant plus ou moins rapidement celle du noyau. Syn. préférable : *cytodiérèse*.

plateau continental. Plateau, d'une profondeur inférieure à 200 m, situé entre le littoral et le talus continental abrupt qui mène aux fosses abyssales.

pléiotropie. *n.* Propriété d'un gène dont l'influence s'exerce non seulement sur le caractère qu'il contrôle mais aussi sur tout ou partie des autres caractères de l'organisme.

plésioclimax. *n.* *Climax* dont l'équilibre est fortement influencé par l'action de l'homme. Plus ou moins voisin du climax idéal, il dépend des modifications du sol par les cultures.

plexodonte. *adj.* Qualifie une dent qui possède plusieurs tubercules ou cuspides.

plexus d'Auerbach. Plexus nerveux situé dans la musculeuse de la paroi intestinale des Vertébrés.

plexus de Meissner. Plexus nerveux situé dans la sous-muqueuse de la paroi intestinale des Vertébrés.

plexus nerveux. Ensemble de fibres nerveuses enchevêtrées qui ne constituent pas un nerf.

pluricellulaire. *adj.* Qui compte plusieurs cellules, généralement un très grand nombre. *N.* Un pluricellulaire.

pneumatophore. *n.* Appendice dressé émis par l'appareil radiculaire de certains arbres. Un pneumatophore qui sort du sol peut être constitué de racines particulières ou d'excroissances latérales volumineuses de racines restées horizontales dans le substrat. Semble aider à la respiration des racines de certains arbres, qui croissent dans des sols marécageux, donc asphyxiques (*ex.* mangrove).

pœcilosmotique. *adj.* Qui supporte de larges variations de pression osmotique.

point de compensation pour le gaz carbonique. 1° Intensité lumineuse pour laquelle seul le gaz carbonique produit par la respiration est absorbé par la photosynthèse, de telle façon que l'assimilation de carbone est nulle. La plante a intérêt à abaisser son point de compensation, de manière à assimiler du carbone dès que l'intensité lumineuse est un peu élevée. 2° Concentration stable, atteinte dans une enceinte par le gaz carbonique en présence d'une plante photosynthétisant sous une intensité lumineuse moyenne, quelle que soit sa concentration initiale dans l'enceinte.

pôle animal de l'œuf. Zone de l'œuf au niveau de laquelle débutent les divisions de la segmentation.

pôle végétatif de l'œuf. Zone de l'œuf opposée au *pôle animal* et contenant le vitellus.

pollen. *n.* Poussière, en général jaune, émise par les sacs polliniques des étamines des plantes à fleurs.

pollinisation. *n.* Apport de pollen sur le stigmate où il pourra germer.

polyaromatique. *adj.* Se dit d'une substance organique dont la molécule contient plusieurs cycles.

polychètes. *n.* Classe de l'embranchement des Annélides dont les représentants portent une paire de saillies latérales, ou *parapodes*, dans lesquelles s'implantent de fortes et nombreuses *soies*.

polyédrose. *n.* Maladie virale dont le virion est enfermé dans de gros cristaux protidiques.

polyembryonie. *n.* 1° Existence dans une même graine de plusieurs embryons, dont certains peuvent être des embryons adventifs. 2° Développement de plusieurs embryons à partir d'un œuf unique. Le phénomène se rencontre fréquemment chez des Insectes Hyménoptères et Strepsiptères parasites, ainsi que chez des Mammifères Édentés, comme le tatou.

polygénique. *adj.* Qualifie un caractère contrôlé par plusieurs gènes.

polyholoside ou **polysaccharide.** *n.* Substance à haut poids moléculaire formée par la polymérisation de sucres simples, ou oses. *Ex.* Amidon, cellulose, glycogène.

polymère. *n.* Substance de haut poids moléculaire produite par polymérisation. *Adj.* Constitué d'éléments nombreux (verticille, corolle polymères).

polymérie. *n.* Détermination de l'état d'un caractère par plusieurs gènes agissant conjointement.

polymixine. *n.* Antibiotique qui agit sur la membrane cytoplasmique en perturbant la perméabilité membranaire.

polymorphisme. *n.* Faculté d'un être ou d'un taxon de se présenter sous des aspects divers, interconvertibles ou au moins interféconds.

polymorphisme balancé. Phénomène génétique qui fait que deux génotypes s'équilibrent, comme dans le cas du *paludisme* et de la *drépanocytanémie*.

polynucléaire. *n.* A plusieurs noyaux. Se dit surtout de *globules blancs* caractérisés par leur noyau plurilobé bien qu'unique. On distingue, selon leur affinité chimique pour les colorants : des polynucléaires neutrophiles, éosinophiles, ou basophiles. Ces cellules participent à la défense de l'organisme par digestion intracellulaire des microbes.

polyphage. *adj.* Caractérise un organisme omnivore.

polyphasique. *adj.* Qualifie un être vivant chez lequel les phases d'activité succèdent rapidement aux phases de repos.

polyphylétisme. *n.* Doctrine selon laquelle chaque groupe racial humain, actuel ou fossile, dérive d'une souche propre dont l'évolution a donné naissance à plusieurs types d'Hominidés.

polysaccharide. *n.* Syn. de *polyholoside*.

polystomatique. *adj.* Qualifie une glande dont la sécrétion s'effectue par plusieurs ouvertures.

polytène. *adj.* Qui manifeste le phénomène de *polyténie*.

polyténie. *n.* Multiplication des chaînes d'ADN d'un chromosome. Ces chaînes demeurent parallèles entre elles, et le chromosome garde son identité et sa forme, mais devient de plus en plus volumineux (chromosome géant).

polytopique. *adj.* Qui s'est produit indépendamment en plusieurs endroits. Se dit de la genèse de taxons.

polytypique. *adj.* Qualifie une population comprenant plusieurs races ou sous-espèces, ou *écotypes*, etc.

polyuronide. *n.* Substance polymère dont la molécule renferme de nombreuses molécules d'acides uroniques (sucres dont la fonction alcool primaire est oxydée en une fonction acide) ou de leurs esters méthyliques.

ponctuation. *n.* Interruption de la paroi secondaire de cellules végétales à parois épaisses, de bois notamment. Les échanges sont plus faciles ou seulement possibles au niveau de la ponctuation où demeurent la paroi primaire et la lamelle moyenne.

pont continental. Liaison terrestre postulée par les biogéographes afin d'expliquer les analogies, anciennes ou actuelles, entre les faunes de deux continents distincts. *Ex.* Le détroit de Behring a joué plusieurs fois un rôle de pont; à cet emplacement, en effet, une bande de terre a pu relier l'Asie à l'Amérique du Nord.

pont de Varole. Syn. de *protubérance annulaire.*

pontinien. *adj.* Qualifie la sous-division de la civilisation préhistorique moustérienne découverte en Italie et caractérisée par son débitage de petits galets.

pool. *n.* Réserve d'un métabolite dans les cellules. Est alimenté par apport direct, ou par certaines réactions, tandis que d'autres réactions ou des exportations en consomment une quantité plus ou moins identique.

pool génique. Ensemble des *gènes* portés par les individus qui composent une population.

population. *n.* Ensemble des individus d'une espèce qui ont la possibilité de se croiser.

porteur sain. Individu qui héberge une Bactérie pathogène dont l'activité toxique ne s'exprime pas par suite des réactions de l'hôte. Par contre, ce dernier peut infecter un autre individu.

post-décharge. *n.* Comportement qui se manifeste encore après que le stimulus ait cessé.

postréduction. *n.* Ségrégation des deux allèles d'un gène, lorsqu'elle se produit lors de la deuxième division de la méiose.

potentiel d'action. Différence de potentiel modifiée par rapport à celle du repos, se manifestant entre le cytoplasme et l'extérieur d'une cellule, nerveuse en particulier, à la suite d'une stimulation ou spontanément, et se propageant sur la cellule (et éventuellement à ses voisines).

potentiel capillaire. Voir *contrainte totale d'humidité du sol.*

potentiel hydrique. Voir *contrainte totale d'humidité du sol.*

potentiel de membrane ou **potentiel de repos.** Différence de potentiel existant entre les faces interne et externe d'un neurone au repos, par exemple, et due aux différences de concentrations ioniques entre le cytoplasme et le milieu extracellulaire. Négatif, ce potentiel est compris entre — 60 et — 90 millivolts.

poumons. *n.* 1° Organes respiratoires formés de lamelles empilées chez certains Arachnides (Scorpions). 2° Organes respiratoires (généralement vessie gazeuse modifiée) chez les Dipneustes Cératodiformes. 3° Organes respiratoires provenant d'une dilatation du *pharynx,* au niveau desquels s'effectuent les échanges gazeux entre le sang et l'air chez les Amphibiens adultes, les Reptiles, les Oiseaux et les Mammifères.

pourpre rétinien ou **rhodopsine.** Pigment visuel photolabile localisé dans les bâtonnets de la rétine des Vertébrés. Cette substance est constituée par un aldéhyde de la vitamine A, le *rétinène,* associé à une protéine, l'*opsine.*

poussée radiculaire. Pression exercée sur la sève brute par la racine et aidant à son ascension dans la tige.

pouvoir séparateur. Distance minimale à laquelle deux objets doivent être situés l'un de l'autre pour être vus séparés par un instrument d'optique, en particulier un microscope. Les détails de grandeur inférieure ne peuvent être décelés grâce à l'instrument.

poxvirus. *n.* Virus qui détermine des pustules sur la peau de l'homme et de nombreux animaux. Il provoque en particulier le *cow-pox,* ou *vaccine,* de la vache.

préadaptation. *n.* Caractère morphologique ou physiologique qui prédispose à la réalisation d'une transformation évolutive.

précambrien. *n.* Syn. d'*antécambrien.*

préfeuille. *n.* La première ou l'une des deux premières petites feuilles de tout rameau axillaire, en général très distincte des suivantes. Dans le cas d'un rameau formant une fleur, et qui est donc son pédoncule, les préfeuilles sont aussi nommées bractéoles, la feuille axillante étant la bractée de la fleur en question.

préformationniste. *n.* Partisan de la doctrine de la *préformation,* ou *préformationnisme,* d'après laquelle les êtres vivants apparaissent par simple grandissement d'un germe préformé, soit dans l'œuf *(ovisme),* soit dans le spermatozoïde *(animalculisme). Adj.* Concernant cette doctrine.

prépuce. *n.* Formation annulaire cutanée entourant l'extrémité de la verge.

préréduction. *n.* Lors de la méiose, ségrégation des deux allèles d'un gène lorsqu'elle se produit au cours de la première division.

présocratique. *adj.* Concernant la période de l'histoire intellectuelle grecque antérieure à celle de la vie de Socrate (468-400 av. J.-C.). *N.* Un présocratique : philosophe de cette période.

pression oncotique. Pression correspondant à la pression osmotique, mais développée par une solution colloïdale, de protéines en particulier.

pression partielle. Pression qu'aurait la masse d'un des constituants d'un mélange gazeux si celui-ci occupait seul le même volume que le mélange entier.

pression de turgescence. Pression égale à la différence entre la pression osmotique, qui tend à gonfler la cellule végétale par entrée d'eau, et la résistance de la paroi squelettique, qui s'oppose à la distension. C'est à cette différence qu'obéit en fait l'entrée d'eau.

présure. *n.* Enzyme du suc gastrique qui coagule le lait.

primaire ou **neurogène.** *adj.* Qualifie l'induction conduisant un territoire du germe à évoluer en système nerveux.

principe de l'actualisme. Application aux époques passées des phénomènes existant actuellement. Résumé par la formule : « les mêmes causes produisent les mêmes effets » (Dollo, 1893).

proboscidiens. *n.* Ordre de Mammifères qui comprend les éléphants.

procambium. *n.* Tissu à partir duquel se forment les éléments conducteurs (bois et liber). Il est encore méristématique, mais ses cellules ont commencé à s'allonger.

procaryote. *n.* Organisme dont les cellules sont dépourvues d'un vrai noyau (Bactéries, Algues bleues, etc.).

proclimax. *n.* *Climax* qui n'a pas encore atteint son équilibre.

producteurs. *n.* Organismes capables de capter l'énergie pour la transformer en énergie potentielle chimique sous forme de matières organiques. Ce sont principalement les végétaux verts qui effectuent la *photosynthèse.*

productivité. *n.* Quantité de matières organiques synthétisées par les *producteurs* dans un *écosystème.* On distingue la *productivité brute,* correspondant au rendement de la photosynthèse, et la *productivité nette,* qui tient compte de la respiration des végétaux chlorophylliens.

productivité primaire. Quantité de substances organiques synthétisées par les végétaux chlorophylliens d'un milieu donné. Celle-ci peut être évaluée en grammes de carbone par unité de surface et par unité de temps. *Ex.* En pleine mer 0,15 g/m²/jour.

productivité secondaire. Taux d'accumulation de matière vivante au niveau des hétérotrophes.

proecdysis. *n.* Première étape de la mue des Crustacés durant laquelle l'épiderme se sépare de la cuticule. L'espace ainsi formé se remplit d'un liquide qui dissout la région interne de la vieille cuticule.

proglottis. *n.* Segment du corps d'un Cestode (*ex.* ver solitaire) contenant les organes génitaux.

prognathisme. *n.* Dans les races humaines, développement important des mâchoires vers l'avant.

progressionnisme. *n.* Doctrine selon laquelle les espèces sont apparues successivement dans le temps, et avec une organisation progressivement modifiée dans une ou plusieurs directions, mais sans être filles les unes des autres.

promonocytes. *n.* Cellules de la moelle osseuse, précurseurs des monocytes du sang.

promotion. *n.* Transformation effectivement visible d'un tissu aux dépens duquel va se former une tumeur maligne.

pronéphron ou **pronéphros.** *n.* Rein primaire antérieur, fonctionnel chez les embryons ou larves des Poissons et des Amphibiens. Cet organe reste rudimentaire et non fonctionnel chez les adultes des Vertébrés inférieurs (Cyclostomes, Poissons Téléostéens) et disparaît chez tous les adultes des Vertébrés terrestres.

pronograde. *adj.* Qualifie la marche des Mammifères lorsque l'autopode, plantigrade à l'arrêt, devient digitigrade durant la locomotion.

prophage. *n.* Forme que prend un bactériophage lorsqu'il reste inactif à l'intérieur d'une Bactérie.

prophase. *n.* Première phase de la mitose caractérisée par une spiralisation des chromosomes qui se manifeste au microscope optique par un raccourcissement et un épaississement de ceux-ci. La membrane nucléaire disparaît et le fuseau de division se forme.

prophyllaxie. *n.* Ensemble des mesures qui empêchent la prolifération d'une maladie.

prosencéphale. *n.* Vésicule antérieure de l'encéphale primitif de l'embryon des Vertébrés. Cette formation se subdivisera par la suite en deux vésicules secondaires.

protéine ou **protide.** *n.* Substance formée de l'union de nombreux acides aminés. Éléments essentiels des êtres vivants, les protéines constituent toutes les enzymes et forment avec des lipides les membranes cellulaires.

protéines de Bence-Jones. Protéines apparaissant dans l'urine de beaucoup de sujets atteint de myélome ; précipitant à chaud, elles se dissolvent à nouveau si l'on poursuit le chauffage.

prothalle. *n.* Gamétophyte en forme de lame ou de massif cellulaire. Se dit surtout du gamétophyte des Ptéridophytes.

protohistoire. *n.* Étude des civilisations « primitives » qui ont laissé une documentation écrite.

proton. *n.* Particule pesante et chargée positivement présente dans le noyau des atomes. Il y a autant de protons dans le noyau que d'électrons à la périphérie.

protonéma. *n.* Filament rampant, notamment celui sur lequel se développent les tiges feuillées des Mousses. Désigne aussi une espèce de filament comparable au thalle de certaines Algues.

protophytolysosome. *n.* Lysosome primaire végétal.

protoplasme. *n.* 1° Anciennement, substance vivante, supposée relativement homogène. 2° Actuellement, ensemble des éléments vivants de la cellule (hyaloplasme et organites) par opposition à ses sécrétions inertes (paraplasme).

protoxylème. *n.* Bois primaire formé le premier dans un faisceau avant que l'allongement de celui-ci soit achevé. Le protoxylème sera vite étiré et deviendra inutilisable. Mais, entre temps, du *métaxylème* qui n'est pas distinct de façon très tranchée se sera formé et assurera la conduction de l'eau.

protubérance annulaire ou **pont de Varole.** Pont de substance blanche reliant les *hémisphères cérébelleux* du *cervelet* des Vertébrés.

proventricule ou **ventricule succentorié.** *n.* 1° Syn. de *gésier ;* chez les Insectes, en particulier

les Coléoptères et les Orthoptères, portion de l'intestin antérieur, située en arrière du jabot et revêtue d'une cuticule épaisse formant des dents qui triturent les aliments. 2° Syn., chez les Oiseaux, d'*estomac glandulaire*.

province néritique. Région du plateau continental qui contient la plupart des Algues fixées et des Poissons pêchés par l'homme.

province océanique. Région des hautes mers située au-delà du *plateau continental*.

psammique. *adj.* Qui habite les interstices des grains de sable, où l'eau demeure longtemps.

pseudo-dichotomie. *n.* Production par un axe de deux rameaux latéraux, au-delà desquels l'extrémité de l'axe elle-même dégénère. L'ensemble ressemble à une dichotomie.

pseudobranchie. *n. Hémibranchie,* à rôle respiratoire réduit, portée par l'arc mandibulaire chez les Poissons Sélaciens.

pseudomorphose. *n.* Substitution de matière minérale, essentiellement de la silice, à de la matière organique. Ce remplacement s'effectue très fidèlement, et les structures fines sont conservées. *Ex.* Bois silicifiés.

psoas. *n.* Muscle de la cuisse humaine inséré antérieurement sur les vertèbres lombaires, postérieurement sur la crête du fémur et qui, participant à l'articulation de la hanche, joue un rôle important dans la station bipède.

psychisme. *n.* Ensemble des manifestations « nerveuses », conscientes ou non, des êtres vivants, qui semblent tous en manifester des aspects plus ou moins nets.

psychologie. *n.* Science qui étudie les processus mentaux normaux des êtres vivants.

psychophysique. *n.* Science qui étudie les relations liant les phénomènes physiques *(stimuli)* aux réactions mentales.

ptéridospermées. *n.* Plantes fossiles du Carbonifère (ère primaire) à feuilles de Fougères et se reproduisant par graines.

ptérinosomes. *n.* Granules de ptérines constituant certains pigments des *xanthophores* et des *érythrophores*.

« puff ». *n.* (*angl.*, « bouffée ».) Halo visible autour de certaines régions de chromosomes géants correspondant à la synthèse à ce niveau de molécules d'ARN messager sur des boucles d'ADN chromosomal. Connu depuis le siècle dernier (Balbiani).

pulpe dentaire. Partie vivante interne d'une dent contenant les vaisseaux sanguins et le nerf.

pupaison. *n.* Transformation de la larve de Diptère (asticot) en nymphe, ou *pupe*.

pupe. *n.* Nymphe de Diptère.

puromycine. *n.* Antibiotique inhibiteur des synthèses protéiques mitochondriales, utilisé en génétique pour étudier une résistance à l'hérédité cytoplasmique chez les Levures.

putrescine. *n.* La tétraméthylène-diamine
$NH_2—(CH_2)_4—NH_2$.
Apparaît lors de la putréfaction de la viande.

punas. *n.* Prairies d'altitude, humides et froides, du Pérou et de la Bolivie.

putamen. *n.* Portion ventrale externe du néostriatum du *télencéphale* des Vertébrés.

pycnose. *n.* Dégénérescence du noyau, qui devient très colorable avant d'être décomposé. Bien que voué à disparaître, il synthétise alors beaucoup d'ADN.

pygidation. *n.* Fusion des segments du pygidium (région postérieure de la carapace dorsale des Trilobites) ; caractérise l'évolution de ce groupe.

pyogène. *adj.* Qualifie une Bactérie qui provoque des lésions suppuratives et nécrotiques.

pyramide des âges. Méthode d'évaluation d'une population qui consiste à la répertorier en classes d'âges. On peut ainsi apprécier sa stabilité ou son évolution.

pyramide écologique. Représentation graphique des variations des paramètres intervenant dans une chaîne alimentaire.

pyramide de Malpighi. Élément constitutif de la zone médullaire du rein des Mammifères, dont l'aspect strié correspond à la disposition caractéristique des *néphrons* à ce niveau.

pyranne. *n.* Substance organique ternaire dont la molécule comporte un cycle à 5 atomes de carbone et 1 atome d'oxygène, avec deux doubles liaisons. Ce cycle se retrouve chez beaucoup d'oses (pyrannoses), mais sans double liaison.

pyritisation. *n.* Transformation d'un corps en pyrite (sulfure de fer, de formule FeS_2) sous l'effet de conditions réductrices.

pyrolyse. *n.* Décomposition chimique par la chaleur.

pyrophosphates. *n.* Sels de l'acide pyrophosphorique $H_4P_2O_7$, constitué de deux molécules d'acide phosphorique.

pyrorésistant ou **pyrotolérant.** *adj.* Qualifie un végétal résistant au feu. *Ex.* Plantes rhizomateuses et cespiteuses.

Q - R

Q 10. Rapport de l'intensité d'un certain processus à son intensité lorsqu'il s'opère à une température de 10 °C inférieure.

race. *n.* 1° En zoologie, syn. de *sous-espèce*. 2° En anthropologie, groupement d'êtres humains qui présentent certains caractères héréditaires communs (morphologiques, sérologiques, psychologiques, etc.).

racémique. *adj.* Qualifie une forme d'une substance qui ne dévie pas le plan de polarisation de la lumière polarisée, tandis que d'autres préparations de la même substance le font à droite ou à gauche. La forme racémique est un mélange de ces deux formes, dont l'action se neutralise.

rachis. *n.* Élément étroit, central, qui porte les folioles d'une feuille composée pennée. Prolongement du pétiole, il correspond à la nervure médiane du limbe d'une feuille entière.

rad. *n.* Dose de rayonnement d'un corps radioactif correspondant à l'absorption d'une énergie de 100 ergs pour un gramme de tissu vivant.

radiation. *n.* Apparition, à partir d'une lignée réalisant un grand nombre d'adaptations évolutives au milieu écologique dans lequel elle vit, de nouvelles races écologiques, qui deviennent indépendantes génétiquement.

radio-. Lié au nom d'un élément chimique, indique qu'il s'agit d'un isotope radioactif de celui-ci. *Ex.* Radiosodium, radiocarbone, etc.

radioactif. *adj.* Qui émet des rayonnements particulaires ou électromagnétiques susceptibles, notamment, d'impressionner la plaque photographique. Le phénomène correspond à la rupture des noyaux des atomes du corps simple ou d'un ou plusieurs corps simples d'un composé chimique.

radio-écologie. *n.* Science étudiant les relations entre les êtres vivants et le milieu en présence de radioactivité.

radio-nucléides. *n.* Corps radioactifs.

radula. *n.* Pièce masticatrice des Mollusques, en forme de ruban charnu, plus ou moins longue, garnie de rangées de denticules cornées, dont la forme, le nombre et la disposition sont des caractères spécifiques de chaque espèce. Cette languette fonctionne à la façon d'une râpe.

raffinose. *n.* Triholoside dont la molécule comporte galactose α -glucose α -fructose β, donc galactose + saccharose, le galactose étant lié par sa fonction aldéhyde au carbone 6 du glucose. Commun chez les végétaux.

raphé. *n.* 1° Chez les Diatomées pennées, dépression longitudinale médiane des valves de la carapace. 2° Dans les ovules anatropes des plantes à fleurs, zone d'union du funicule avec le tégument unique ou avec le tégument externe de l'ovule. Le tégument externe d'un ovule à deux téguments ou le tégument unique d'un ovule unitegminé manquent souvent au niveau du raphé, qui, dans ce dernier cas, semble marquer l'union du funicule et du nucelle.

rapteur. *n.* Terme désignant un mâle qui réussit à se substituer à un mâle territorial au moment de la reproduction.

réactif de Schiff. Solution de fuchsine basique décolorée par l'action du gaz sulfureux. Se recolore en rouge en présence d'aldéhydes, par exemple ceux qui apparaissent par attaque des sucres grâce à l'acide périodique (méthode P.A.S.) ou de groupements comparables comme ceux du désoxyribose, qui apparaissent par hydrolyse ménagée des acides désoxyribonucléiques (réaction de Feulgen).

réaction de Feulgen. Coloration rouge du réactif de Schiff par les acides désoxyribonucléiques après hydrolyse ménagée (HCl normal à 60 °C). Celle-ci arrache les bases puriques, et les groupements réducteurs du désoxyribose, ainsi libérés, manifestent des propriétés d'aldéhyde que n'ont pas ceux du ribose : ils recolorent donc le réactif de Schiff, ce qui permet la localisation et le dosage colorimétrique (histophotométrie des ADN).

réaction de Hill. Décomposition de l'eau lors de la photosynthèse grâce à l'énergie lumineuse captée par la chlorophylle.

réceptacle. *n.* Axe renflé, portant en général des organes sexuels, qu'il s'agisse d'une portion de thalle, comme celle qui porte les conceptacles de certaines Algues brunes, ou, chez les Phanérogames, d'une dilatation de l'axe floral portant les différentes pièces de la fleur (réceptacle floral).

récepteur. *n.* Structure ou molécule susceptible de recevoir et de fixer au moins temporairement une autre substance ou des éléments figurés, ou encore de réagir à une excitation physico-chimique (récepteur sensoriel).

récessif. *adj.* Chez les individus hétérozygotes, qualifie un gène qui reste à l'état latent, dominé par son allèle dominant.

receveur universel. Individu dont le sang ne contient pas d'*agglutinine* et qui ne peut de ce fait agglutiner aucun sang. Il peut donc recevoir du sang de chacun des autres groupes. Il ne peut, par contre, en donner qu'aux représentants de son groupe.

récif-barrière. Récif corallien séparé de la côte. *Ex.* La Grande Barrière du nord de l'Australie.

récif frangeant. Récif corallien accolé à la côte.

récifs coralliens. Formations calcaires édifiées par les coraux dans les mers tropicales chaudes, bien oxygénées et claires.

recombinaison. *n.* Phénomène qui aboutit à l'apparition, dans la descendance d'un croisement, de combinaisons génotypiques différentes de celles des parents.

recombinaison génétique. Mécanisme par lequel les gènes d'une même paire de chromosomes se combinent différemment du fait des *crossing-over*.

recombinaisons mitotiques. Échanges chromosomiques qui se produisent en dehors de la méiose ; bien étudiés chez les Champignons.

récurrence. *n.* Terme utilisé en éthologie pour exprimer une répétition.

régénération. *n.* Phénomène physiologique qui permet à certains animaux de reconstituer une partie détruite de leur organisme, soit naturellement (régénération physiologique), soit accidentellement (régénération traumatique).

région fundique. Région de l'estomac des Mammifères qui possède les cellules sécrétrices de pepsine et d'acide chlorhydrique.

région mastoïdienne. Région du crâne, postérieure au conduit auditif des Pongidés et des Hominidés, qui protège l'oreille interne. Son affection provoque une mastoïdite.

régression. *n.* Retrait de la mer d'une région donnée.

régulation. *n.* Formation par un germe incomplet, ou présentant des parties surnuméraires, d'un individu pourtant normal. Il y a régulation des déficiences dans le premier cas, des excédents dans le second.

relevé. *n.* Méthode de travail des phytosociologues qui consiste à dresser l'inventaire exhaustif des espèces de plantes d'un territoire donné.

rem. *n.* Unité de mesure du rayonnement émis par un corps radioactif et absorbé par un tissu vivant en tenant compte d'un coefficient d'efficacité biologique.

rendement d'assimilation. Bilan nutritionnel évalué par le rapport de l'énergie assimilée à l'énergie ingérée.

rendement écologique de croissance. Bilan nutritionnel évalué par le rapport de la production secondaire nette à l'énergie ingérée.

rendement de production. Bilan nutritionnel évalué par le rapport de la production secondaire nette à l'énergie assimilée.

réovirus. *n.* Virus des Vertébrés qui jouent un rôle pathogène sur les muqueuses respiratoires et oculaires.

repli céphalique. Chez l'embryon d'un Oiseau, formation provenant d'un soulèvement de la *plaque neurale*.

replum. *n.* Cadre commun à deux carpelles, et auquel sont attachées les graines, restant après la chute des valves des siliques et de certaines capsules (Bignoniacées). Net surtout chez les Crucifères et la chélidoine.

répresseur. *n.* Corps qui inhibe la synthèse d'une enzyme.

répression. *n.* Inhibition de la synthèse de certaines enzymes d'une chaîne métabolique sous l'effet d'un répresseur.

reproduction asexuée. Mode de reproduction qui ne nécessite pas la présence de gamètes. *Ex.* Bourgeonnement, fragmentation, scissiparité, etc.

reproduction sexuée. Qui met en cause des gamètes et implique par conséquent une alternance de générations.

réseau de Purkinje. Ramifications du *faisceau de His*, élément du *tissu nodal* du cœur des Oiseaux et des Mammifères.

réseau trophique. Ensemble constitué par plusieurs chaînes alimentaires reliées entre elles.

réserve. *n.* Zone à protection stricte et d'accès très limité. *Ex.* Cap Sizun.

résine. *n.* Substance complexe, insoluble dans l'eau, soluble dans l'alcool, presque solide à la température ordinaire, translucide, non entrainable par la vapeur d'eau (au contraire des huiles essentielles), et contenant des alcools aromatiques ou triterpéniques ainsi que des acides aromatiques, terpéniques ou aliphatiques.

résistance du milieu. Ensemble des facteurs du milieu qui freinent l'accroissement d'une population.

respiration nitrate. Chez certaines Bactéries, phénomène au cours duquel les nitrates, en anaérobiose, servent d'accepteurs d'électrons et remplacent ainsi l'oxygène de l'air.

rete testis. Réseau permanent de canalicules par lequel s'effectue l'évacuation des spermatozoïdes au niveau du testicule des Vertébrés.

réticuline. *n.* Syn. d'*élastine*.

réticulum endoplasmique. Système de membranes parcourant le cytoplasme d'une cellule et délimitant des espaces qui font communiquer l'extérieur avec la région contenue entre les deux feuillets de la membrane nucléaire. Lorsque le réticulum est abondant et dense, il devient un *ergastoplasme*.

rétinène. *n.* Aldéhyde de la vitamine A constitutif du *pourpre rétinien*, ou *rhodopsine*. Le rétinène existe sous forme de deux isomères : l'un *« trans »*, donnant avec l'*opsine* un composé instable, l'autre *« cis »*, donnant un composé stable.

retouche. *n.* Méthode de façonnage d'un objet grossièrement travaillé, employée par les Hommes préhistoriques et qui sert actuellement de critère de classification de ces civilisations.

réversion. *n.* Mutation qui fait retourner un type mutant au type sauvage.

rhéobie. *adj.* Qui vit dans les eaux présentant un fort courant.

rhinovirus. *n.* Virus de la muqueuse nasale responsable du rhume.

rhizoïde. *n.* Cellule allongée, qui s'enfonce dans le support pour y prélever des matériaux nutritifs. Fonctionne comme une racine (Thallophytes, Bryophytes).

rhizome. *n.* Formation souterraine, en général horizontale, à aspect de racine, mais qui est en fait une tige, portant vers l'apex un ou plusieurs bourgeons susceptibles de se développer en tiges aériennes ordinaires, et munie de feuilles écailleuses réduites et charnues.

rhodopsine. *n.* Voir *pourpre rétinien*.

rhombencéphale. *n.* Vésicule postérieure de l'encéphale primitif de l'embryon des Vertébrés. Cette formation se subdivisera par la suite en deux vésicules secondaires.

rhytidome. *n.* Couche de tissu formée par une assise génératrice externe et repoussée extérieurement, lorsque se développe dans un arbre une nouvelle assise plus interne. Voir *écorce*.

ribonucléase. *n.* Enzyme dégradant l'acide ribonucléique.

ribosomes. *n.* Organites cytoplasmiques constitués de protéines et d'acide ribonucléique (ARN), au niveau desquels s'effectue la synthèse des protéines à partir des acides aminés du cytoplasme et en fonction de l'information apportée par l'ARN messager, synthétisé dans le noyau.

ribovirus. *n.* Virus dont l'acide nucléique est l'ARN.

riss. *n.* Période de glaciation européenne située vers —200 000 ans qui correspond à la civilisation moustérienne des premiers Néandertaliens.

ritualisation. *n.* Terme d'éthologie utilisé par Lorenz pour préciser que la *sélection* stabilise les actes comportementaux pour une espèce donnée.

rouge de ruthénium. Sel complexe de ruthénium [oxychlorure ammoniacal : $(NH_4)_2RuO_5$]. Colore électivement en rouge les substances pectiques.

rouissage. *n.* Procédé très ancien qui consiste à isoler les fibres textiles du lin et du chanvre en faisant détruire les composés pectiques qui les lient par des micro-organismes.

rubéfié. *adj.* Coloré en rouge par des oxydes de fer; cette altération se produit en milieu oxydant.

S

S. Abréviation de *Unité Svedberg*. Indique la plus ou moins grande aptitude de molécules ou autres structures à se déplacer vers le fond du tube lors d'une centrifugation. Plus le nombre d'unités S est grand, plus les éléments contenus dans le liquide du tube de centrifugation sont volumineux.

saccharimétrie. *n.* Mesure de l'angle de déviation du plan de polarisation de la lumière polarisée par une substance optiquement active. La saccharimétrie utilise des degrés arbitraires, alors que la *polarimétrie* utilise des degrés de circonférence usuels.

saccules. *n.* 1° Petites vésicules incolores bien enfoncées dans le tégument, de chaque côté du sillon nourricier des bras des Crinoïdes (Échinodermes). Elles sont pleines de sphérules réfringentes formées de cellules épithéliales groupées et présentent une affinité très grande pour les colorants; leur fonction est mal connue (elles ont peut-être un rôle excréteur, ou de réserve pour des protides). 2° Le **saccule** : partie dorsale du labyrinthe de l'oreille interne des Vertébrés.

sac embryonnaire. Cavité formée entre les cellules du nucelle de l'ovule des Angiospermes et renfermant le gamète femelle, ou *oosphère*, ainsi que, le plus souvent, deux *synergides* au voisinage de cette dernière, trois *antipodes* à l'autre pôle, et une cellule à deux noyaux (cellule centrale). Les noyaux de la cellule centrale fusionneront entre eux et avec celui de l'un des gamètes mâles apportés par le tube pollinique pour fournir le noyau triploïde d'où sont issus les noyaux de l'albumen.

sacs crémastériens. Sacs musculaires de la paroi abdominale de nombreux Mammifères formés lors de la migration des testicules.

sacs scrotaux. Syn. de *scrotum* ou de *bourses*.

salpingite. *n.* Affection bactérienne chronique ou aiguë des trompes ovariennes.

sansouire. *n.* Prairie à salicornes de Camargue.

saprophage. *adj.* Qui se nourrit de produits en décomposition.

saprophyte. *adj.* Qualifie un végétal qui tire sa nourriture de matières organiques en décomposition.

saproxylophage. *adj.* Qualifie un organisme se nourrissant de bois en décomposition. *Ex.* Termites.

saproxylophile. *adj.* Qualifie un organisme vivant sur du bois en décomposition.

sarcolysine. *n.* Voir *melphalan*.

sarcome. *n.* Tumeur maligne qui se forme dans un tissu conjonctif. En général, on précise la nature du tissu conjonctif : chondrosarcome, ostéosarcome, etc.

saturation. *n.* En physiologie, état vis-à-vis d'un de ses facteurs d'un processus qui ne peut plus être intensifié par augmentation de la valeur du facteur en question; d'autres facteurs nécessaires au processus d'ensemble deviennent alors des *facteurs limitants*.

saturé. *adj.* 1° *Solution saturée :* où l'on ne peut dissoudre plus de soluté. 2° *Molécule organique saturée* : qui ne comporte pas de double liaison (permettant des réactions d'addition).

saumâtre. *adj.* Désigne l'eau de salure inférieure celle de l'eau de mer.

sauropsidés. *n.* Terme regroupant les Reptiles et les Oiseaux utilisé pour rappeler leurs nombreux caractères communs et, en particulier, leur mode de reproduction (fécondation interne, oviparité, présence d'un amnios et d'une allantoïde...).

saussaie. *n.* Zone riveraine d'un lac peuplée de divers saules.

savane. *n.* Formation végétale tropicale comportant de hautes herbes (80 cm au moins) et, parmi elles, des végétaux plus bas et des arbres disséminés, isolés ou en bosquets.

scalariforme. *adj.* 1° **(conjugaison).** Mode de conjugaison de certaines Algues Zygophycées dans lequel les cellules de deux filaments différents s'unissent deux par deux grâce à un canal (canal de conjugaison), l'ensemble constituant une sorte d'échelle. 2° **(perforation).** Orifice situé entre deux cellules successives formant un vaisseau de bois, barré partiellement par des barreaux ligneux parallèles, comparables à ceux d'une échelle. 3° **(trachéide).** Trachéide dont la paroi est imprégnée de lignine, excepté des bandes disposées très régulièrement comme les barreaux d'une échelle.

scanning. Pour *Scanning Electron Microscope* (SEM). Microscope électronique à balayage.

schème. *n.* Représentation intermédiaire entre le concept et la perception.

schiste noir. Roche cristalline, micacée, de couleur sombre, qui se débite en feuillets. Les schistes noirs à Graptolites (Ordovicien à Dévonien) sont caractéristiques d'un dépôt en milieu réducteur.

schizo-endémique. *adj.* D'aire restreinte parce qu'apparu récemment dans cette aire par suite du morcellement en plusieurs taxons d'un taxon mère, de ce fait disparu. *N.* Un schizo-endémique.

sciaphyte. *adj.* Qualifie une plante ne se développant qu'à l'ombre. *Ex.* Fougères, Mousses, hêtre.

scissiparité. *n.* Syn. de *fission* et de *fragmentation.*

sclérite. *n.* Cellule végétale à paroi épaissie et très généralement lignifiée, de forme très variable et isolée parmi des cellules banales.

scléroprotéine. *n.* Protéine fibreuse, sécrétée par des *scléroblastes* (ou sclérocytes), qui constitue la spongine des Éponges.

schorre. *n.* Prairie salée littorale, où prolifèrent notamment les salicornes.

sclérenchyme. *n.* Tissu constitué de cellules, mortes en général, à paroi lignifiée, conférant une certaine résistance mécanique à l'organe qui le possède.

sclérocyte ou **scléroblaste.** *n.* Cellule ectodermique mobile sécrétant les spicules chez les Spongiaires et les Cnidaires Anthozoaires Octocoralliaires.

sclérotome. *n.* Amas de cellules de la zone interne des somites de l'embryon qui formera la colonne vertébrale remplaçant la *corde dorsale.*

sebkha. *n.* Dépression salée du Sahara.

sécrétion interne. Production par certaines cellules d'un organisme de substances qui passent dans le milieu intérieur de celui-ci, dans l'ensemble duquel elles se répandent, à la différence des médiateurs chimiques, mais ne sont pas rejetées à l'extérieur.

sédiment. *n.* Dépôt, d'origine marine ou continentale (lac, cours d'eau), d'un matériau meuble au cours du transport.

sédimentologie. *n.* Partie de la géologie qui étudie la structure des roches qui se sont formées dans les fonds marins et lacustres par dépôts des organites en suspension dans l'eau.

segment externe. Partie constitutive des *cellules visuelles* formée par l'empilement de disques (provenant des replis de la membrane plasmique) et contenant le pigment visuel.

segment intermédiaire. Partie constitutive des *cellules visuelles* intercalée entre le *segment externe* et le *segment interne.*

segment interne. Partie constitutive des *cellules visuelles,* contenant le noyau et des mitochondries, et dont l'extrémité entre en relation avec les neurones bipolaires.

ségrégation. *n.* 1° Lors de la méiose, séparation des chromosomes homologues. 2° Séparation des caractères parentaux d'un hybride lors des croisements.

ségrégation postméiotique. Séparation de deux allèles après la méiose au cours de la mitose postméiotique.

sélection. *n.* Choix d'individus présentant des caractères dont on désire la conservation dans une lignée. Parmi les individus choisis, croisés entre eux, certains ne transmettront pas ces caractères à tous leurs descendants, d'autres par contre, qu'on finira par isoler, le feront et produiront une lignée pure.

sélection artificielle. Choix imposé par l'homme dans la reproduction d'une population animale ou végétale afin d'en retirer certaines combinaisons qui lui sont favorables. Cette technique est largement employée dans l'amélioration du cheptel, des animaux domestiques et des plantes.

sélection naturelle. Processus selon lequel, au cours de l'évolution, les conditions de milieu et de compétition avec les autres êtres agissent comme un sélectionneur, et ne laissent survivre que les individus présentant, grâce à des mutations survenues par hasard, tel ou tel avantage. Certains affirment que toutes les nouveautés apparues au cours de l'évolution seraient nées ainsi, c'est-à-dire que tous les caractères seraient ou auraient été, à un moment donné, adaptatifs. Cette hypothèse néo-darwinienne ne semble pas entièrement acceptable.

semence. *n.* 1° Toute formation propre à propager une plante, c'est-à-dire contenant une graine, ou un autre germe, libre ou enclos dans d'autres structures. 2° Chez les animaux, sécrétion du mâle contenant les spermatozoïdes libérés par ses testicules.

semi-fine (coupe). D'épaisseur intermédiaire entre celle requise pour les coupes histologiques. (5 µm) et pour les coupes à examiner au microscope électronique (50 nm) : environ 0,5 µm.

semi-perméable ou **hémiperméable.** *adj.* Qui ne laisse passer que les molécules du solvant, et non celles du soluté.

sénescence. *n.* Vieillissement.

séquence. *n.* Ordre de succession des éléments d'une structure en chaîne (acides aminés d'une protéine, bases organiques d'un acide nucléique).

série stratigraphique. Succession, au cours du temps, de formations géologiques; chacune d'entre elles est caractérisée par une lithologie et une association d'organismes (faune et flore) propres.

sérine. *n.* Acide aminé à fonction alcool

$$HO—CH_2—\underset{\displaystyle NH_2}{\underset{|}{CH}}—COOH.$$

sève brute. Solution aqueuse d'éléments minéraux divers absorbée par la plante au niveau de ses racines, parfois de ses feuilles. Circule essentiellement dans le bois. Ne contient pas de glucides.

sève élaborée. Solution circulant essentiellement dans le liber des plantes, et contenant notamment les glucides (saccharose) qui proviennent de la photosynthèse. Servira à la nutrition des cellules du végétal, y compris les racines.

sinus galactophore. Réceptacle de la mamelle des Mammifères qui collecte le lait provenant des différents *acini* avant son écoulement par l'extrémité du mamelon.

sinus génito-urinaire. Chez les Mammifères Monotrèmes, région recevant les canaux urinaires et génitaux et où débouche ventralement la vessie. Chez le mâle, il s'ouvre dans le cloaque; chez la femelle, il joue le rôle de vagin.

sinus veineux. Large vaisseau contractile, courbé en U, et situé au milieu de la face ventrale du corps de l'amphioxus (Céphalocordés). Il propulse dans les branchies le sang reçu par les *canaux de Cuvier* et les veines intestinale et hépatique.

sinusoïde. *adj.* **(capillaire).** Qualifie un capillaire dont le revêtement endothélial est constitué de cellules fenestrées et non jointives. *Ex.* Capillaires du foie et de la rate.

site d'hétérozygotie. Zone d'ADN de deux chromatides homologues dans laquelle les séquences des bases nucléotidiques sont différentes par suite de l'hybridisme.

semi-dominant. *adj.* Caractérise les deux allèles d'un même gène, tels que le phénotype qui en résulte présente des caractères intermédiaires de ceux des deux parents.

séminivore. *adj.* Qualifie un organisme se nourrissant de graines.

sempervirente. *adj.* Qualifie une forêt dense et humide.

sensibilité épicritique. Type de sensibilité tactile précise.

sensibilité extéroceptive. Sensibilité recueillie au niveau du tégument par des cellules ou des organes sensitifs.

sensibilité intéroceptive. Type de sensibilité aux stimuli émanant des viscères internes.

sensibilité proprioceptive. Type de sensibilité aux stimuli provenant des muscles, des tendons ou des articulations.

sensibilité protopathique. Type de sensibilité tactile diffuse à la douleur.

septum. *n.* Cloison. 1° En cytologie : cloison de séparation entre deux cellules filles formées de façon centripète à partir de la membrane cytoplasmique de la cellule mère, à la manière d'un diaphragme-iris qui se fermerait progressivement. 2° En morphologie florale, cloison délimitant les loges d'un ovaire pluriloculaire.

septum lucidum. Chez les Mammifères, cloison séparant les deux ventricules latéraux des hémisphères cérébraux.

séreuse. *n.* 1° Enveloppe externe d'origine ectomésodermique, protégeant l'embryon des Insectes. 2° Fine membrane tapissant certains organes et cavités du corps.

sérologie. *n.* Science qui étudie le sang des Vertébrés.

sérum. *n.* Liquide obtenu après la coagulation du sang. Il correspond au plasma sanguin débarrassé de son fibrinogène.

sérum immunisant. Voir *immunsérum.*

sex-ratio. Rapport ou proportion relative des sexes dans une population donnée.

sexupares ou **sexupara.** *n.* Femelles parthénogénétiques issues des *fundatrigeniae* chez les pucerons.

silique. *n.* Fruit sec des Crucifères essentiellement formé par deux carpelles à placentation pariétale, dont les placentas sont unis par une fausse cloison. La déhiscence libère deux valves par rupture de la paroi de part et d'autre des placentas. Ces valves sont libérées à partir du bas et demeurent longtemps attachées en haut. Il reste un replum portant les graines et la fausse cloison, continuant le pédoncule floral et terminé par les stigmates sessiles.

simple. *adj.* **(feuille).** Qui n'est formée que d'un seul élément comprenant gaine, pétiole et limbe, et non pas plusieurs folioles.

sinanthropes. *n.* Noms donnés aux Pithécanthropes asiatiques.

siphon. *n.* Structure présentant de nombreux noyaux, chloroplastes, etc., dans une seule membrane cytoplasmique. Il s'agit donc d'un *syncytium,* comparable à des cellules fusionnées. *Ex.* Chez les Algues Chlorophycées.

slikke ou **tangue.** *n.* Vase littorale formée d'argiles fines apportées par les eaux douces à l'état de suspensions et qui précipitent au contact de l'eau de mer.

smog. *n.* Brouillard constitué de gaz chauds, dont le *PAN*, sévissant au-dessus de villes de climat assez chaud.

sociabilité. *n.* Critère de définition d'un végétal selon qu'il vit isolément, en groupe ou en peuplement.

sociation. *n.* Terme utilisé par certains phytosociologues comme synonyme « d'association végétale ».

sol. *n.* 1° Solution colloïdale superficiellement analogue à une solution vraie, notamment par sa grande fluidité. 2° Partie superficielle de la croûte terrestre où se manifeste la vie animale et végétale.

sole pédieuse. Partie basale de certains animaux servant à la fixation (hydre d'eau douce) ou à la reptation (escargot).

solontchak. *n.* Dépression salée d'Asie.

soluté. *n.* Corps dissous dans un milieu de dispersion, ou solvant.

solvant. *n.* Milieu de dispersion, très généralement liquide, des molécules ou ions d'un corps dissous ou soluté.

solvatation. *n.* Formation d'une enveloppe de molécules d'eau autour d'un ion, qui est donc *hydraté*.

solvaté. *adj.* Qui a subi le phénomène de solvatation.

soma. *n.* 1° Ensemble des cellules non sexuelles d'un organisme. 2° Syn. de *corps cellulaire du neurone*.

somation. *n.* Variation qui, n'affectant que le *soma*, n'est pas héréditaire.

somatopleure. *n.* Paroi externe du mésentère chez les cœlomates.

somite. *n.* Segment primitif apparaissant latéralement sur la chorde dorsale, chez l'embryon, et donnant principalement les muscles.

soudan III. Colorant rouge spécifique des lipides, de la cuticule des cellules végétales et du liège. Dit aussi *écarlate de cérol BXL*.

soulèvement tectonique. Mouvement de bas en haut de l'écorce terrestre, avec élévation d'ensemble de toute une région, s'accompagnant de failles et de plissements.

sous-association. *n.* Subdivision d'une association végétale caractérisée par une espèce différentielle de l'association.

sous-muqueuse. *n.* Couche cellulaire conjonctive, extérieure à la muqueuse, constituée de tissu conjonctif lâche renfermant des plexus nerveux.

spectrophotométrie. *n.* Mesure de l'absorption plus ou moins intense des radiations de diverses longueurs d'onde par une substance (le spectre obtenu aide à son identification).

spermathèque. *n.* Poche de l'appareil génital de certaines femelles servant à la réception et à la rétention des spermatozoïdes en attendant la fécondation.

spermatide. *n.* Cellule sexuelle mâle *haploïde* qui conduira, après différenciation, au spermatozoïde mûr, muni de son flagelle.

spermatocyte. *n.* 1° Spermatocyte de premier ordre: cellule diploïde résultant d'une multiplication de la *spermatogonie* et ayant subi une légère augmentation de taille. 2° Spermatocyte de deuxième ordre : cellule haploïde résultant de la mitose réductionnelle du spermatocyte de premier ordre.

spermatogenèse. *n.* Transformation des cellules initiales mâles en spermatozoïdes mûrs s'effectuant dans les testicules.

spermatogonie. *n.* Cellule diploïde initiale du spermatozoïde conduisant à la formation du spermatocyte.

spermatophore. *n.* Dispositif permettant le transfert du sperme dans l'organisme femelle. Il peut y avoir perforation du tégument de la femelle dans le cas de la fécondation *hypodermique* (nombreux Vers) ou dépôt au voisinage de l'orifice génital de la femelle (nombreux Insectes).

spermatozoïde. *n.* Cellule sexuelle mâle haploïde caractérisée, en général, par sa différenciation en une *tête*, comportant le noyau coiffé par l'acrosome, une *pièce intermédiaire* et un *flagelle* mobile.

spiracule. *n.* Orifice externe des branchies en bourses des Agnathes.

spire. *n.* Spirale ou hélice suivant le cas.

spirochétose. *n.* Fièvre récurrente due à un spirochète transmis par certains Acariens.

spiromètre. *n.* Appareil destiné à mesurer la capacité des poumons de l'homme. Également, appareil destiné à mesurer les échanges respiratoires (O_2 absorbé, CO_2 rejeté). Dit surtout alors *respiromètre*. Appliqué à l'étude d'échanges respiratoires minimes, comme ceux d'un fragment tissulaire, c'est un *microrespiromètre*.

spiromycine. *n.* Antibiotique inhibiteur des synthèses protéiques mitochondriales, utilisé en génétique pour étudier une résistance à l'hérédité cytoplasmique chez les Levures.

splanchnopleure. *n.* Paroi interne du mésentère constituant la musculature de l'intestin chez les cœlomates.

sporange. *n.* Sac contenant des spores. Chez les végétaux autres que les Cormophytes (Mousses, Fougères, plantes à fleurs), il vaut mieux dire *sporocyste*.

spore. *n.* 1° Cellule libre et éventuellement mobile assurant la reproduction asexuée (voir *spore de répétition*) ou la survie dans des conditions difficiles (spore de conservation). 2° Cellule formée par le sporophyte avec réduction chromatique et donnant naissance au gamétophyte. Dans ce sens, la spore est dite également *méiospore*, ou *spore réductionnelle* (les spores du type précédent étant *équationnelles*). Les cellules des spores (cellules sporales) comportent souvent une paroi gluante ou surtout dure et épaisse qui leur permet d'attendre en état de vie latente les conditions favorables à la germination. Les spores des Bactéries et les ascospores sont des endospores, formées à l'intérieur du cytoplasme de la cellule mère et différenciant une paroi propre; en revanche, dans le cas de la plupart des autres spores, c'est la membrane de la cellule mère, ou d'un bourgeon produit par elle, qui devient celle de la spore et se charge extérieurement de sporopollénine. Il en est de même en ce qui concerne les grains de pollen.

spore de répétition. Spore dont le développement reproduit le thalle qui lui a donné naissance. Sa production ne marque donc pas un progrès dans le cycle de développement de la plante. Au contraire, les spores formées avec réduction chromatique donnent un gamétophyte bien différent du sporophyte qui les a engendrées.

sporopollénine. *n.* Substance extrêmement résistante formant la paroi externe des grains de pollen et des spores. Produit de la polymérisation d'esters de divers caroténoïdes (carotène, anthéraxanthine, zéaxanthine) associée à une oxydation. L'acide estérifié est lui-même un acide gras, palmitique notamment, et le produit résultant est un polymère à quatre-vingt dix atomes de carbone.

stathmocinèse. *n.* Division des chromosomes non suivie de la séparation des chromatides filles du fait de l'inhibition de l'organisation du fuseau achromatique, sous l'action de la colchicine notamment.

stèle. *n.* 1° Chez les plantes à fleurs, désigne le cylindre central. 2° Chez les Ptéridophytes, il peut y avoir plusieurs stèles, pourvues chacune de bois, de liber et de péricycle (polystélie). Le phénomène est très rare chez les plantes à fleurs, et les faisceaux de bois et de liber n'ont pas les mêmes caractères dans les deux cas.

sténohalin. *adj.* **(organisme).** Qui doit pour survivre être placé dans un milieu de concentration très précise en sel (chlorure de sodium).

sténon. *n.* Canal excréteur des glandes parotides séreuses de l'homme.

sténophage. *adj.* Syn. de *monophage*.

sténophotopériodique. *adj.* Voir *amphipériodique*.

sténose pylorique. Rétrécissement de l'orifice stomacal provoquant des troubles digestifs. Cette anomalie héréditaire affecte surtout le sexe masculin.

sténotherme. *adj.* **(organisme).** Qui ne vit que dans d'étroites limites de température.

steppe. *n.* Zone à végétation peu dense (« ouverte ») où dominent les herbes (Graminées) vivaces se desséchant l'été, mêlées à des plantes annuelles ou des buissons. A la différence de la savane, il n'y pousse pas d'arbres. C'est la *prairie* d'Amérique du Nord, la *pampa* d'Argentine, la *puszta* de Hongrie. Dans les zones chaudes, à longue saison sèche, la steppe forme une région intermédiaire entre la savane et le désert, comme au sud du Sahara; on y trouve alors des arbres, au fur et à mesure qu'on approche de la savane.

stéréoisomère. *adj.* Qualifie des composés organiques dont la structure chimique est identique mais dont la disposition spatiale des atomes est différente. *N.* Un stéréoisomère.

stéréoscan. *n.* Microscope électronique à balayage, qui permet des grossissements très importants (jusqu'à 20 000).

stimulus. *n.* Agent physique ou chimique qui excite des organes ou des sens, déterminant chez les animaux des réactions comportementales (tropismes).

stipule. *n.* Appendice supérieur de la gaine de la feuille, correspondant à une foliole insérée à cet endroit. Lorsque les stipules, généralement disposées une de chaque côté, semblent insérées directement sur la tige, c'est que la gaine ou base est très courte, mais elle est toujours reconnaissable, surtout sur les premières feuilles du rameau ou de la plante entière.

stomate ou **stomate aérifère.** Ouverture dans l'épiderme des feuilles et de la tige ménagée par l'écartement de deux cellules (cellules stomatiques). Les échanges de gaz peuvent s'effectuer plus facilement qu'à travers la cuticule des cellules épidermiques.

stomate aquifère. Stomate par lequel est émise de l'eau ou une solution aqueuse qui laisse cristalliser son contenu (calcaire, etc.) en s'évaporant. Les stomates aquifères sont situés à la pointe, aux marges du limbe ou sur la face supérieure de celui-ci, près de la marge. *Ex.* Certaines saxifrages.

stratification. *n.* Disposition selon un gradient vertical des facteurs d'un milieu (température, lumière, etc.) ou des couches végétales d'une forêt p. ex.

stratigraphie. *n.* Étude de la succession des couches terrestres, ou *strates* (elles sont appelées ainsi car elles se sont déposées horizontalement).

striatum. *n.* Syn. de *noyau basal*.

strobilisation ou **strobilation.** *n.* 1° Phénomène de segmentation transversale par creusement de constrictions annulaires à partir du sommet du polype fixé (ou scyphistome) au cours du cycle de reproduction sexuée des Cnidaires Scyphozoaires. 2° Processus de fragmentation du corps s'effectuant lors de la reproduction de certains Urocordés (Aplousobranches, Pyrosomes et Salpes).

stroma. *n.* 1° Formation massive produite par un mycélium de Champignon et abritant, sans les enclore, des structures reproductrices. Parfois nommée *tubercule*, ou *sporodochie*. 2° Substance fondamentale contenue dans les plastes ou les mitochondries, entourant leurs lamelles. 3° Membrane cytoplasmique d'une hématie vidée de son contenu.

subérine. *n.* Substance imprégnant les membranes des cellules du liège, ou suber. C'est un mélange

complexe d'esters d'acides gras hydroxylés et d'alcools à longue chaîne.

subspontané. *adj.* Qui est cultivé communément et constamment réintroduit dans les terrains voisins à partir des cultures, mais ne se maintient pas si celles-ci sont abandonnées.

substance blanche. Substance du système nerveux des Vertébrés constituée par les prolongements des corps cellulaires des neurones de la *substance grise.* Celle-ci, en position interne au niveau de l'encéphale, devient externe au niveau de la moelle épinière.

substance grise. Substance du système nerveux des Vertébrés constituée par les corps cellulaires des *neurones.* En position externe au niveau de l'encéphale, elle devient interne au niveau de la moelle épinière.

substance parasympathicomimétique. Substance provoquant les mêmes effets que le système parasympathique.

substance sympathicomimétique. Substance provoquant les mêmes effets que ceux propres au système sympathique.

sucs digestifs. Liquides contenant les enzymes digestives. Suivant leur origine, on distingue les sucs gastrique, intestinal et pancréatique.

suffrutescent. *adj.* Ligneux en bas, herbacé en haut, et dont seule la partie inférieure survivra à l'hiver. Syn. *sous-frutescent.*

suint. *n.* Produit gras séparé de la laine. Correspond à la sécrétion des glandes sébacées du mouton et contient notamment de la *lanoline.*

sulfhydrylé. *adj.* Qui comporte le groupement —SH (*ex.* la cystéine).

sulfonamide. *n.* Substance antimétabolite de l'acide para-aminobenzoïque, élément constitutif de l'acide folique qui intervient au cours des méthylations du métabolisme.

supermolécule. *n.* Unité formée de l'union de plusieurs molécules du même corps de manière déterminée mais sans liaison chimique entre elles, à la différence d'un polymère.

suppresseur. *n.* Mutation qui laisse intacte une mutation antérieure, mais rétablit le phénotype de l'espèce avant la première mutation.

supracoracoïde. *n.* Muscle ventral de l'épaule qui relie le coracoïde et la clavicule à la tête de l'humérus.

supralittoral. *adj.* Situé tout à fait à la limite supérieure du niveau de la haute mer, et qui n'est atteint qu'occasionnellement par les flots.

suprastimulus. *n.* Leurre qui déclenche un comportement plus intense que le stimulus naturel.

surdominance. *n.* Interaction entre allèles qui se manifeste chez les hybrides présentant une vigueur supérieure à celle de leurs parents.

surfusion. *n.* État d'une substance qui demeure liquide bien qu'elle se trouve à une température inférieure à sa température de fusion.

surnageant. *n.* Liquide demeurant après une centrifugation, qui a permis d'en séparer sous forme de culot les éléments relativement volumineux qu'il tenait en suspension. Une seconde centrifugation plus intense pourra éventuellement séparer un nouveau culot à partir du premier surnageant, si celui-ci contenait encore des éléments assez volumineux et si la nouvelle centrifugation est assez intense et prolongée.

suspenseur. *n.* 1° Chez les Moisissures (Champignons Zygomycètes), filament mycélien portant le gamétange (gamétocyste) et issu du cloisonnement du progamétange. 2° Chez les Phanérogames et certaines Ptéridophytes, filament issu de l'œuf et auquel est attaché l'embryon au début de son développement.

suture. *n.* Ligne d'union de deux régions différentes d'un même organe ou d'organes différents. Peut marquer une union postgénitale (les parties étaient libres puis se sont rapprochées lors de l'ontogénie) ou être congénitale (les parties sont nées unies).

symbiose. *n.* Association étroite de deux êtres dont chacun bénéficie des produits de l'activité de l'autre.

sympatriques. *adj.* Qualifie des espèces occupant des aires géographiques qui se recouvrent.

sympode. *n.* Système de ramification dans lequel un segment (article) d'axe cesse sa croissance en formant éventuellement une fleur et une inflorescence, tandis qu'un ou plusieurs bourgeons axillaires supérieurs se développent en autant de nouveaux articles, qui évolueront de la même façon. Lorsqu'il y a deux axillaires, on obtient un *dichasium (ramification pseudo-dichotome),* lorsqu'il n'y en a qu'un, un *monochasium,* et s'il y en a plusieurs, un *pléiochasium.* Une ramification assez comparable est parfois présente chez les Thallophytes (articles de mycélium des Champignons).

sympodial. *adj.* Qui concerne le sympode. Qui se fait en réalisant un sympode. *Ex.* Ramification sympodiale.

synange. *n.* Groupe de sporanges soudés, plus ou moins reconnaissables chez diverses Ptéridophytes.

synapse. *n.* Jonction entre deux neurones, ou entre un neurone et une fibre musculaire, que l'influx nerveux franchit généralement par l'intermédiaire de médiateurs chimiques.

synapsis. *n.* Appariement des chromosomes homologues au *stade zygotène* lors de la prophase méiotique.

synarthrose. *n.* Mode d'articulation entre deux os qui leur interdit toute mobilité.

synchondrose. *n.* Type d'articulation (*synarthrose)* entre deux os reliés par du cartilage.

synchronies. *n.* Faits ou situations qui se déroulent durant la même période de temps.

syncydiogène. *adj.* Qui provoque la disparition des membranes cellulaires d'un tissu, transformant celui-ci en *syncytium.*

syncytial. *adj.* Constitué d'un *syncytium,* c'est-à-dire d'un cytoplasme où baignent de nombreux noyaux sans que l'ensemble soit divisé en autant de cellules.

syncytium. *n.* Structure vivante comportant de nombreux noyaux dans un seul cytoplasme, enveloppé d'une seule membrane cytoplasmique, comme si plusieurs cellules avaient fusionné. Voir *cœnocyte* et *siphon.*

syndesmose. *n.* Articulation souple entre deux os réalisée par du tissu conjonctif.

syndétochéile. *adj.* **(stomate).** Muni de cellules annexes provenant de la même cellule mère que les cellules stomatiques. Syn. de *mésogène* (chez les Angiospermes).

syndrome de Klinefelter. Anomalie chromosomique de l'homme due à une garniture de type XXY (au lieu de XX ou XY). Le sujet atteint est de grande taille et, tout en présentant des caractères sexuels secondaires masculins, possède des glandes sexuelles atrophiées.

syndrome de Turner. Anomalie chromosomique de l'homme due à l'existence d'une garniture chromosomique sexuelle de type XO (au lieu de XX ou XY). Le sujet atteint présente une petite taille et des caractères secondaires sexuels féminins, selon que les glandes sexuelles sont réduites ou absentes.

synécologie. *n.* Branche de l'écologie étudiant les *communautés* ou *biocénoses,* complexes d'êtres vivants soumis ensemble à des conditions écologiques semblables.

synergide. *n.* L'une des deux cellules entourant la cellule œuf dans le sac embryonnaire des Angiospermes. Les synergides semblent très importantes, puisque l'une recevrait du tube pollinique les deux gamètes mâles et servirait d'intermédiaire à la double fécondation.

synergie. *n.* Association de deux substances dont l'action combinée est généralement supérieure à la somme des effets séparés.

synostose. *n.* Type d'articulation *(synarthrose)* entre deux os soudés.

synsacrum. *n.* Pièce unique osseuse du squelette axial des Oiseaux constituée par les vertèbres sacrées et lombaires soudées aux premières vertèbres caudales et aux dernières vertèbres thoraciques.

synthèse résiduelle. Synthèse d'ADN qui se produit au *stade zygotène* après la duplication de l'ADN qui s'effectue avant que la méiose commence.

synusie. *n.* Peuplement animal ou végétal considéré comme sous-ensemble d'un même écosystème.

systématique. Syn. de *taxonomie.*

système aphytal. Système océanique dépourvu de végétaux chlorophylliens par suite du manque de lumière.

système autonome. Syn. de *système nerveux viscéral.*

système cérébro-spinal. Voir *névraxe.*

système de Havers. Voir *ostéone.*

système latéral. Syn. de *ligne latérale.*

système nerveux central. Syn. de *névraxe.*

système nerveux viscéral. Système nerveux contrôlant le fonctionnement des viscères et la contraction des muscles lisses. Il est constitué de deux ensembles antagonistes : le *système parasympathique* et le *système orthosympathique.*

système orthosympathique. Système constitutif du système nerveux viscéral, formé d'une chaîne ganglionnaire en relation avec des nerfs particuliers.

système parasympathique. Système constitutif du système nerveux viscéral dont les centres localisés au niveau du bulbe sont en relation avec des nerfs particuliers. Il provoque, notamment, un ralentissement du rythme cardiaque.

système des phagocytes mononucléaires. Ensemble de toutes les cellules hautement phagocytaires et mononucléaires d'un organisme. Ce nouveau concept remplace actuellement celui de *système réticulo-endothélial.*

système phytal. Système océanique recevant assez de lumière pour permettre le développement des Algues.

systole. *n.* Phase de contraction des oreillettes et ventricules du cœur des Vertébrés.

T

taïga. *n.* Forêt de Conifères des pays froids. Se trouve en Amérique et en Eurasie, au sud de la toundra et au nord des forêts de Feuillus.

taille. *n.* Technique utilisée par l'homme préhistorique pour la fabrication d'objets manufacturés. Sert actuellement de critère de classification des civilisations anciennes.

takyr. *n.* Région argileuse d'un désert, inondée en saison des pluies, et servant alors de point d'eau pour les troupeaux de nomades.

talus continental. Abrupt situé entre le *plateau continental* et les *abysses.*

tamis moléculaire. Colonne de substance (silicates, dextranes) se présentant sous forme d'un réseau délimitant des espaces plus ou moins exigus où seules peuvent pénétrer les petites molécules qui seront adsorbées. Les autres, ne pouvant pénétrer,

dans ces espaces, qui représentent la plus grande partie de la surface disponible par l'adsorption, passeront sans être retenues.

tampon (solution). Mélange conservant un pH constant malgré l'introduction d'acides ou de bases. Des transformations chimiques s'y produisent sous l'effet des molécules ajoutées et les neutralisent, aboutissant à la stabilité du pH.

tangue. *n.* Syn. de *slikke*.

tanins. *n.* Ensemble de substances à fonctions phénol et éventuellement acide, liées ou non à des sucres. Abondants dans diverses écorces; utilisés dans le tannage, c'est-à-dire dans la création, par leur intermédiaire, de liaisons entre les chaines protéiques des peaux, de manière à augmenter leur résistance mécanique et à les rendre imputrescibles et moins perméables. En médecine, ils sont astringents, antidiarrhéiques et ont aussi des propriétés antiseptiques.

taphonomie. *n.* Étude de tout ce qui se rapporte à la formation de gisements fossilifères.

taux de mutation. Probabilité pour qu'un gène issu d'une lignée génique *A* soit devenu *a* au bout d'une génération de l'organisme considéré.

taux de mutation réverse. Probabilité pour qu'un gène muté revienne à l'état initial après une nouvelle mutation.

taxonomie ou **systématique.** *n.* Science qui classe les êtres vivants.

tchernoziom. *n.* Terre noire fertile des steppes.

technique. *n.* Procédé utilisé pour produire un objet manufacturé ou non. Sert de critère de classification des civilisations préhistoriques.

technique off-shore. Technique d'extraction du pétrole en mer.

tectum ou **lobes optiques.** Partie dorsale du *mésencéphale* des Vertébrés servant de relais visuel et formant les *tubercules bijumeaux* chez les Vertébrés non mammaliens, ou les *quadrijumeaux* chez les Mammifères.

tegmentum ou **calotte.** *n.* Partie ventrale du *mésencéphale* des Vertébrés servant de centre de corrélation des influx acoustiques, statiques et visuels chez les Vertébrés.

tégument. *n.* Revêtement externe du corps d'un animal qui peut être de natures diverses : 1° Simple épithélium de certains Vers libres (Planaires). 2° Couche de cuticule, doublée d'un épithélium, des Vers parasites (*ex.* ascaris) et de quelques Mollusques (Polyplacophores). 3° Carapace chitineuse des Arthropodes. 4° Peau des Vertébrés formée d'un épiderme d'origine ectodermique et d'un derme profond d'origine mésodermique.

télencéphale. *n.* Vésicule embryonnaire antérieure constitutive du cerveau des Vertébrés et à partir de laquelle se différencient les hémisphères cérébraux.

télencéphalisation. *n.* Processus de développement et de différenciation de nouvelles structures au niveau du *télencéphale* des Mammifères.

télétoxie. *n.* Destruction d'un organisme vivant par des composés chimiques toxiques élaborés par certains micro-organismes.

télolécithe ou **télolécithique.** *adj.* Qualifie un œuf renfermant un vitellus abondant. La segmentation d'un tel œuf est partielle. *Ex.* L'œuf de poule.

télophase. *n.* Dernière phase de la mitose durant laquelle se forment deux cellules filles par division du cytoplasme et reconstitution des membranes nucléaire et cytoplasmique.

tensio-active. *adj.* Qualifie une substance qui abaisse la tension superficielle d'un produit et facilite ainsi son émulsion (*ex.* propriétés des sels des acides biliaires).

tension superficielle. Résistance mécanique de la surface d'un liquide, dont les molécules forment une sorte de film.

ternaire. *adj.* En chimie organique, qui comporte du carbone, de l'hydrogène et de l'oxygène.

territoire. *n.* Zone entourant le nid ou l'habitat d'un animal (Oiseau ou Mammifère), dans laquelle celui-ci trouvera une alimentation suffisante et pourra se reproduire.

territoires présomptifs de la blastula. Amas de cellules localisées au niveau de la *blastula* et dont l'évolution doit conduire à l'élaboration d'un organe donné.

testicule. *n.* Glande génitale mâle élaborant les spermatozoïdes.

tétracoordiné. *adj.* Qualifie un élément présentant quatre liaisons chimiques de coordinance, c'est-à-dire avec cession de quatre doublets électroniques par les atomes auxquels il est lié.

tétrose. *n.* Sucre (ose) dont la molécule comporte quatre atomes de carbone.

test-cross. Technique de génétique qui permet de connaître le génotype d'un individu. Elle consiste à croiser des individus de génotype inconnu avec des individus *homozygotes* pour l'allèle récessif dont on veut tester la présence.

test fonctionnel d'allélisme ou **test de complémentation.** Expérience de génétique qui permet, en confrontant des mutants deux à deux, de déterminer si les deux gènes mutants sont allèles ou non.

test à trois points. Méthode de génétique qui permet d'établir les ordres respectifs des *loci* sur les chromosomes en analysant les fréquences de recombinaisons entre trois couples d'allèles.

testostérone. *n.* Hormone mâle sécrétée par le *tissu interstitiel* du testicule des Vertébrés; elle contrôle l'apparition des caractères sexuels secondaires et la réalisation de la *spermatogenèse*.

tétratype. *adj.* Qui renferme quatre éléments de types différents à la suite de recombinaison génétique. *Ex.* Ascospores de certains Champignons.

thalamus ou **couches optiques.** *n.* Centre de relais sensoriels correspondant aux parois latérales épaissies du *diencéphale* des Vertébrés. Cette zone est en relation ascendante avec le *télencéphale*.

thalassémie. *n.* Anémie hémolytique héréditaire de l'homme due au déficit d'une enzyme : la glucose-6-phosphate-déshydrogénase (G.6PD).

thanatocénose. *n.* Accumulation des organismes après la mort, sans qu'il y ait eu déplacement des cadavres. Lorsque cette accumulation se présente à l'affleurement, elle porte le nom d'*oryctocénose*.

thélytoque. *adj.* Qualifie la parthénogenèse ne conduisant qu'à une descendance femelle, chez les pucerons par exemple.

théorie chromosomique de l'hérédité. Théorie établie par les méthodes de la génétique formelle, selon laquelle le matériel héréditaire est localisé sur les chromosomes.

théorie de l'évolution. Théorie proposée par Darwin, selon laquelle chaque espèce provient d'une espèce préexistante qui est apparue par *mutation* et s'est adaptée à son environnement.

théorie géographique. Hypothèse proposée par Mayr pour expliquer la spéciation. Un obstacle géographique doit isoler deux populations chez lesquelles apparaîtront des modifications morphologiques, qui persisteront même si l'obstacle disparaît.

théorie stasipatrique. Hypothèse de White qui explique la spéciation par une modification de structure chromosomique pouvant produire un isolement génétique.

théorie sympatrique. Hypothèse selon laquelle la spéciation s'effectue dans une population sous l'action de facteurs éco-éthologiques qui isolent génétiquement une partie de cette population.

thermocline. *n.* Zone de transition thermique d'un milieu aquatique.

thérophyte. *n.* Plante passant l'hiver à l'état de graines en vie ralentie.

thiol. *n.* Corps organique présentant le groupement —SH, qui peut être considéré comme un groupement —OH où O est remplacé par S. Syn. *mercaptan*.

thymus. *n.* Organe juvénile des Vertébrés, qui coiffe le cœur chez les Mammifères, et joue un rôle capital dans la formation des lymphocytes.

thyroglobuline. *n.* Glycoprotéine spécifique de la glande thyroïde sécrétée par les cellules épithéliales.

tige. *n.* Axe, en principe aérien, de la plante Cormophyte. Porte des appendices, ou phyllomes, et se prolonge par la racine, qui ne porte pas de phyllomes. La racine vraie, qui prolonge la tige, peut disparaître et l'appareil radical n'être représenté que par des racines adventives.

tissu. *n.* Ensemble de cellules différenciées et spécialisées dans une même fonction. Il peut par exemple être épithélial, conjonctif, musculaire ou nerveux.

tissu conducteur. 1° Tissu (liber ou bois) assurant le transport de la sève chez les Cormophytes. 2° Tissu spécial formé au centre des styles et sur les placentas, aidant mécaniquement, mais aussi chimiquement, la progression des tubes polliniques qui, pour féconder les ovules, se déplacent dans son sein ou à sa surface, et qu'il nourrit et attire.

tissu conjonctif. Tissu constitué par des fibres noyées dans une substance fondamentale et assurant une fonction de soutien.

tissu épithélial. Tissu de revêtement recouvrant le corps ou tapissant la lumière de divers conduits (digestif, urinaire, etc.).

tissu hématopoïétique. Tissu réticulo-endothélial dans lequel se forment les cellules sanguines (hématopoïèse).

tissu interstitiel. Tissu d'origine mésenchymateuse, situé entre les *cystes* ou les *tubes séminifères* des testicules des Vertébrés, sécrétant la *testostérone*.

tissu musculaire. Tissu constitué par des cellules contractiles dont la structure peut être striée ou lisse suivant que leur contraction est volontaire ou non.

tissu nerveux. Tissu constitué par des cellules, ou *neurones*, comprenant un corps cellulaire, des *dendrites* et un *axone*.

tissu nodal. Amas de cellules musculaires spécialisées du myocarde des Oiseaux et Mammifères, responsable de l'automatisme cardiaque. Cette formation comprend le nœud sino-atrial de Keith et Flack de l'oreillette droite, le nœud d'Aschoff-Tawara du septum interauriculaire, le faisceau de His et le réseau de Purkinje.

tissu de transfusion ou **aquixylème.** Tissu partiellement lignifié des feuilles de Gymnospermes, situé au voisinage des faisceaux de bois et qui correspond au moins en partie au bois centripète ancestral.

tocophérol. *n.* Vitamine E liposoluble, connue comme antioxydant des composés insaturés et comme facteur de fécondité chez les Vertébrés et chez certains Invertébrés (Insectes).

toit dermique. Bouclier osseux qui recouvre, dorsalement et latéralement, le *neurocrâne enchondral* lors de l'évolution du *neurocrâne*.

tonofilaments. *n.* Filaments intracytoplasmiques des cellules épidermiques attachés aux desmosomes. Visibles au microscope électronique. Rapprochés en tonofibrilles visibles au microscope optique dans les cellules plus kératinisées.

tores semi-circulaires. Saillies nerveuses situées en arrière et au-dessous des *tubercules bijumeaux* et qui sont à l'origine de la paire postérieure des tubercules quadrijumeaux des Mammifères.

toundra. *n.* Végétation croissant au nord de la limite des forêts (taïga), et correspondant, dans la zonation de la végétation en latitude, à celle de l'étage alpin de la zonation en altitude.

toxine. *n.* Substance protéique, produite en général par des Bactéries, dont l'action détruit une fonction vitale chez l'organisme qui la reçoit.

traces d'activité. Méthodes indirectes d'estimation d'une population se fondant sur le nombre de plantes détruites, le nombre de terriers, la quantité de fèces, etc.

traceur. *n.* 1° Substance radioactive susceptible d'être suivie par sa radioactivité lors de son parcours à l'intérieur de l'organisme auquel on l'a administrée. 2° Atome radioactif ou isotope lourd prenant part à la constitution d'une certaine molécule, et qui pourra être suivi lors de son incorporation à d'autres molécules au cours des réactions du métabolisme.

trachéide. *n.* Cellule morte, allongée, à paroi lignifiée, présente dans le bois. Ce dernier peut être entièrement constitué de telles cellules dont les extrémités ne sont pas perforées, à la différence des cellules (articles) des vaisseaux.

trachome. *n.* Inflammation de la conjonctive par des rickettsies (Bactéries) endémiques dans certains pays chauds.

transaminase. *n.* Enzyme permettant le transfert d'une fonction amine ($—NH_2$) d'un acide aminé à un acide cétonique, notamment de l'acide aspartique et de l'alanine à l'acide α-cétoglutarique, avec production d'acide glutamique et d'acide oxaloacétique ou pyruvique.

transduction. *n.* Processus au cours duquel des gènes bactériens sont transmis d'une Bactérie à une autre par des particules virales.

transformation. *n.* Modification du patrimoine génétique d'un individu par apport artificiel d'ADN appartenant à un autre. Concerne essentiellement les Bactéries.

transformisme. *n.* Terme utilisé par les biologistes avant celui d'évolutionnisme.

transgression. *n.* Envahissement d'une région donnée par la mer.

transgression téthysienne. Avancée de la Téthys sur les terres avoisinantes : la Téthys était une mer très étendue, qui occupait l'emplacement de l'actuelle Méditerranée depuis l'ère Primaire jusqu'à la fin du Miocène.

translocation. *n.* Arrangement interchromosomique tel qu'un segment chromosomique est transféré entre deux chromosomes (homologues ou non).

transmembranaire. *adj.* Qui se produit à travers une membrane, la membrane cytoplasmique des cellules en particulier.

transpiration végétale. Perte d'eau par évaporation s'effectuant soit au travers de la cuticule des feuilles, soit par les ouvertures stomatiques des épidermes des feuilles.

transport actif. Transport de molécules ou d'ions ne s'effectuant que grâce à des activités biochimiques de la cellule et impliquant donc une dépense d'énergie par celle-ci. Le blocage des réactions permettant l'accumulation de l'énergie (respiration) arrêtera le transport actif.

trapèze. *n.* Muscle de l'épaule qui s'étend entre la région occipitale du crâne, les vertèbres cervicales et thoraciques et la scapula.

travertin. *n.* Calcaire lacustre, compact et dur, présentant des cavités remplies de calcite.

tréhalose. *n.* Ose formé de deux molécules de glucose α liées par leurs groupes réducteurs (fonctions aldéhydes). Il n'est donc pas réducteur, à la différence du maltose. Abondant chez les Insectes, mais présent aussi chez les Champignons.

tribosphénique. *adj.* **(disposition).** Du grec *tribos*, frottement, et *sphen*, coin. Disposition occlusive (de fermeture) des mâchoires d'un Mammifère, avec alternance des dents des mâchoires supérieure et inférieure.

triceps. *n.* Muscle extenseur dorsal du bras qui relie la ceinture pectorale, l'humérus et l'olécrane de l'ulna.

trijumeau. *n.* Cinquième paire de nerfs crâniens des Vertébrés dont chaque élément se subdivise en trois ramifications innervant les muscles masticateurs.

trilobites. *n.* Classe d'Arthropodes marins, exclusivement paléozoïques, qui doivent leur nom à la subdivision longitudinale de leur corps en trois lobes.

triose. *n.* Ose dont la molécule possède trois atomes de carbone. Il s'agit de l'aldéhyde glycérique

$$HOH_2C—CHOH—CHO$$

et de son isomère, le dihydroxyacétone

$$HOH_2C—CO—CH_2OH.$$

trisomie 21. Syn. de *mongolisme*.

tritié. *adj.* Dont certains atomes d'hydrogène sont remplacés par du tritium ($_3H$) radioactif.

trochophore. *n.* Larve ciliée nageuse formée des trois feuillets embryonnaires, caractéristique des Annélides et des Mollusques.

trompe de Fallope. Syn. d'*oviducte* chez les Mammifères.

trophectoderme ou **trophoblaste.** *n.* Formation périphérique de la blastula des Mammifères qui sera à l'origine des *annexes embryonnaires,* en particulier du *placenta.*

trophique. *adj.* Qui concerne la nutrition.

trophoblaste ou **trophectoderme.** *n.* Au stade morula, assise cellulaire externe de la cavité dans laquelle l'embryon se localise dans le bouton embryonnaire (Mammifères).

trou de Botal ou **foramen ovale.** Perforation mettant en communication les deux oreillettes du cœur de l'embryon des Oiseaux et des Mammifères. S'oblitère à la naissance, permettant ainsi l'acquisition d'une double circulation.

trou occipital ou **foramen magnum.** Orifice postérieur de la boîte crânienne qui permet le passage de la moelle épinière.

trypanosomiase. *n.* Maladie due à un Protozoaire flagellé, le trypanosome. *Ex.* Maladie du sommeil chez l'homme.

tube criblé. « Vaisseau » du liber, formé de cellules allongées empilées, séparé par des parois perforées (cribles) et ayant conservé un cytoplasme modifié ainsi que, souvent, un noyau dégénéré.

tube floral. Structure en tube, terminée par les sépales et les pétales, souvent aussi les étamines, qu'elle porte au moins intérieurement. Uni ou non à l'ovaire. Formé par la soudure des régions inférieures des pièces qui le terminent, ou par une excroissance en tube de l'axe floral.

tube neural. Ébauche nerveuse due à la soudure des bourrelets neuraux de la *gouttière neurale.*

tube pollinique. Tube produit par la protrusion du contenu du grain de pollen lors de sa germination. Circule dans ou sur le tissu conducteur. Contient les gamètes mâles et va les déposer jusque dans une synergide du sac embryonnaire des ovules, d'où ils pourront féconder l'oosphère et la cellule centrale de ce dernier.

tube séminifère. Tube des testicules des Vertébrés amniotes dans la paroi duquel s'effectue, de la base vers la lumière du tube, la maturation des spermatozoïdes entre les *cellules de Sertoli.*

tubes urinifères ou **néphron** ou **tubes néphritiques.** Tubes constitutifs du rein des Vertébrés au niveau desquels se fait la filtration du sang à partir des *glomérules de Malpighi.*

tubercule. *n.* Toute portion renflée (*ex.* base d'un poil), toute formation tubérisée qui peut être formée par une racine ou une tige.

tubercule de Darwin. Petite protubérance du lobe de l'oreille considérée comme un caractère atavique qui réapparaît parfois chez l'homme.

tubercules quadrijumeaux. Formations provenant du dédoublement des deux lobes optiques chez les Mammifères.

tuf . *n.* Pierre tendre et poreuse, qui peut être soit *calcaire* (déposée à la sortie au jour d'eaux souterraines riches en carbonates), soit d'origine *volcanique* (formée de cendres ultérieurement consolidées).

tumeur. *n.* Amas de cellules non organisées dû à une multiplication anarchique de celles-ci. On distingue les tumeurs bénignes, bien localisées, et les tumeurs malignes, ou cancers, qui envahissent les tissus voisins.

turgescence. *n.* Augmentation de volume d'une cellule due à l'accumulation d'une quantité d'eau qui dépend de la résistance de la paroi squelettique cellulaire. L'entrée de l'eau est due elle-même à la pression osmotique déterminée par la concentration du contenu de la cellule.

turn-over. *n.* 1° Rapport de la quantité de substance détruite ou synthétisée en remplacement dans un temps donné, à la masse totale de substance qui demeure stable.

tympan. *n.* Membrane tendue en travers du conduit auditif et qui sépare l'oreille moyenne de l'oreille externe.

typage lysotypique. Procédé d'identification des Bactéries en fonction de leur sensibilité vis-à-vis de *bactériophages* connus.

typhus exanthématique. Maladie virale transmise par les poux. Elle débute par un exanthème (taches rosées sur tout le corps) suivi d'une fièvre et d'un délire. Dans les cas graves (25 % de mortalité), elle se complique et peut provoquer des gangrènes ou des défaillances cardiaques.

typologie. *n.* Étude scientifique des produits de l'industrie humaine. Elle consiste à analyser et à classer ces objets en fonction des techniques et des méthodes qui ont servi à leur fabrication.

U

ultramicroscope. *n.* Microscope où l'observateur ne reçoit pas directement la lumière qui sert à éclairer la préparation, mais seulement la lumière diffractée par les particules de celle-ci. Cette lumière peut être visible sur fond noir même si en lumière blanche les particules sont invisibles. On peut ainsi déceler leur présence, mais non étudier leur forme.

unifacial. *adj.* Qui présente une seule face apparente, très généralement la face dorsale. Se dit d'une portion d'un appendice (phyllome) d'une plante vasculaire, qui peut parfois représenter la presque totalité de ce phyllome.

unité structurale. Type de capside virale monomère, c'est-à-dire formée d'une seule protéine.

upwelling. *n.* Remontée des eaux marines sous-jacentes plus froides et plus riches en matière nutritives par suite du déplacement vers le large des eaux superficielles.

urate. *n.* Sel de l'acide urique, substance azotée à noyau purique, qui provient de l'oxydation des bases puriques. L'acide urique (trioxypurine) n'est pas un véritable acide, mais l'H de deux de ses trois hydroxyles est remplaçable par des cations. Formé abondamment par les Reptiles et les Oiseaux.

urée. *n.* Substance organique azotée présente dans le sang et éliminée par le rein, de formule $CO-(NH_2)_2$. Provient du catabolisme des substances azotées (protéines).

uretère. *n.* Canal de l'appareil urinaire des Vertébrés qui conduit l'urine des reins à la vessie; l'urètre la conduisant de la vessie à l'orifice extérieur.

uretère primaire. Syn. de *canal de Wolff.*

urodèles. *n.* Ordre des Amphibiens dont les représentants conservent leur queue à l'état adulte. *Ex.* La salamandre.

utérus. *n.* Partie de l'appareil génital où débouchent les oviductes chez les femelles vivipares de Vertébrés et où se développe l'embryon.

utérus bicorne. Utérus réduit à une cavité ou corps utérin. *Ex.* Chez les Artiodactyles, Périssodactyles...

utérus biparti. Utérus séparé en deux parties par une cloison partielle qui s'ouvre dans le vagin par un seul col utérin. *Ex.* Chez le hamster et le porc.

utérus duplex. Utérus formé par deux portions indépendantes s'ouvrant dans le vagin par deux cols utérins. *Ex.* Chez la lapine, la rate.

utérus simplex. Utérus indivis comportant un long corps utérin. *Ex.* Chez la femme.

utricule. *n.* Partie ventrale du labyrinthe de l'oreille interne des Vertébrés.

V

vaccin. *n.* Culture microbienne ou virale, ou toxine microbienne à virulence atténuée; inoculée à un individu, elle oblige celui-ci à fabriquer des anticorps qui le protégeront contre le microbe correspondant ou la toxine du microbe.

vaccine ou **cow-pox.** *n.* Maladie de la vache ou du cheval qui, transmise à l'homme, lui assure l'immunité variolique.

vacuole. *n.* Cavité cellulaire limitée par une membrane simple contenant un milieu aqueux, avec des enzymes, ou parfois gazeux.

vagile. *adj.* Susceptible de se déplacer.

vagin. *n.* Organe copulateur de la femelle des Mammifères permettant l'intromission du *pénis.*

vaisseau. *n.* Tube formé par la succession de cellules à paroi lignifiée dont les parois transversales sont perforées. Les vaisseaux sont l'élément essentiel du bois, du moins chez les Angiospermes. Dans une coupe transversale de tronc, ils apparaissent sous forme de pores, au niveau du bois formé chaque année au printemps, lors de la pousse des bourgeons (débourrement).

valvule connivente. Repli transversal musculaire de l'intestin des Mammifères qui augmente la surface épithéliale.

valvule spirale. Repli longitudinal, spiral, qui occupe le centre du gros intestin des Poissons (excepté celui des Téléostéens).

variabilité. *n.* Terme d'écologie désignant le nombre d'espèces animales ou végétales par unité de surface.

variation. *n.* Transformation d'un organisme sous l'effet des changements du milieu. Elle peut être individuelle (indéfinie) ou identique chez tous les individus (définie).

vascularisé. *adj.* Qui possède des vaisseaux, sanguins chez les animaux, libériens et ligneux (ou de simples trachéides) chez les plantes supérieures.

vasoconstriction. *n.* Phénomène d'origine nerveuse ou chimique qui provoque le rétrécissement des vaisseaux sanguins.

vasodilatation. *n.* Phénomène d'origine nerveuse ou chimique qui provoque une augmentation du diamètre des vaisseaux sanguins.

vaso-moteur. *adj.* Qui concerne les changements de diamètre des vaisseaux sanguins.

végétatif. *adj.* 1° En biologie végétale, qui appartient à la phase du développement antérieure à l'apparition des organes reproducteurs (fleurs). 2° En biologie animale, se dit de la vie inconsciente et non soumise à la volonté de certains organes, et des éléments nerveux qui commandent à celle-ci.

veine. *n.* Vaisseau à paroi musculo-élastique assez mince, ramenant le sang des organes au cœur.

veines vitellines. Vaisseaux conduisant le sang, chez l'embryon des Vertébrés, de la *vésicule vitelline* au cœur.

ventricule. *n.* 1° Région moyenne de l'intestin des Insectes correspondant à l'estomac (mésentéron). 2° Ventricule chylifère : estomac vrai dans lequel la digestion commence. 3° Cavité contractile du cœur, séparée de l'oreillette par des valvules.

ventricules encéphaliques. Ensemble de cavités intercommunicantes de l'encéphale des Vertébrés, remplies de liquide céphalo-rachidien.

ventricule succentorié. Voir *proventricule.*

vernalisation. *n.* Application d'une période de froid, 4 °C par exemple, à une jeune plante. Souvent nécessaire pour que le développement de celle-ci se poursuive, en particulier pour qu'elle puisse fleurir.

vert Janus. Colorant vital fixé par les mitochondries.

vésicule auditive primaire. Formation de l'embryon des Vertébrés due à l'invagination de la placode auditive (voir *placodes sensorielles*).

vésicule optique. Ébauche auditive de l'embryon.

vestibule. *n.* Portion statique de l'oreille des Vertébrés, constituée dorsalement de l'*utricule* d'où partent trois canaux semi-circulaires, et ventralement du *saccule* et de la *lagena.*

vestigial. *adj.* Chez les drosophiles (Insectes Diptères), qualifie certaines souches dont les ailes ne se développent pas.

vieux grès rouges. Formations continentales déposées au cours du Dévonien. On les connaît particulièrement en Grande-Bretagne et dans certaines régions d'Europe.

vigueur hybride. Syn. d'*hétérosis.*

vincaleucoblastine. *n.* Alcaloïde de la pervenche de Madagascar *Catharanthus roseus.* Antimitotique utilisé en hématologie.

vincristine. *n.* Alcaloïde de la pervenche de Madagascar *Catharanthus roseus.*

violet de crésyl. Colorant vital accumulé par les vacuoles.

virologie. *n.* Science qui étudie les virus.

virulence. *n.* Propriété pathogène d'un parasite.

viscosimétrie. *n.* Mesure de la viscosité d'une substance fluide. Permet de déterminer son *coefficient de viscosité.*

viscosité. *n.* Caractère d'un fluide visqueux, c'est-à-dire qui résiste au mouvement d'un corps placé en son sein. Tous les fluides ont une certaine viscosité, caractérisée par un coefficient.

vitalisme. *n.* Doctrine suivant laquelle les êtres vivants ne sont pas réductibles à l'ensemble des constituants chimiques qui les forment. La disposition de ceux-ci, qui définit l'organisation, et même pour certains penseurs l'existence d'une âme immatérielle surajoutée, sont pour les vitalistes les caractères propres du vivant.

vitellophages. *n.* Cellules provenant du blastoderme et digérant le vitellus de l'œuf des Insectes.

vitellus. *n.* Réserve nutritive de l'œuf, particulièrement développée dans l'œuf d'Oiseau.

vivipare. *adj.* Qui donne naissance à des petits vivants. *Ex.* Chez les Invertébrés, certains Vers, Mollusques et Insectes; chez les Vertébrés, les Mammifères.

vocalisation. *n.* Émission de sons de hauteurs différentes dont le rythme peut varier. Elle caractérise certains comportements animaux.

voile du palais. Chez les Mammifères, membrane qui prolonge le palais secondaire et qui rejette les choanes secondaires au-dessus de la glotte.

voûte plantaire. Soulèvement de la plante du pied humain, qui ne repose donc pas sur le sol par toute sa surface.

X

xanthophylles. *n.* Pigments jaunes ou rougeâtres voisins du carotène mais contenant des groupements —OH sur les groupes terminaux de la chaîne carbonée. Apparaissent en abondance lorsque les feuilles jaunissent.

xéromorphie. *n.* Adaptation morphologique de certains végétaux à la sécheresse. *Ex.* Les Graminées des savanes.

xérophile. *adj.* Caractérise un organisme vivant dans une zone sèche.

xérophyte. *n.* Plante vivant dans les milieux secs.

xérothermique. *adj.* Qualifie une région chaude et désertique.

xylophage. *adj.* Caractérise un Insecte qui se nourrit de bois. *Ex.* Termite.

Y - Z

ypérite. *n.* Gaz vésicant soufré de formule $S = [(CH_2)_2Cl]_2$. Type des agents alkylants antimitotiques. Les « moutardes azotées » ont été synthétisées sur son modèle. Dit aussi *gaz moutarde* du fait de son odeur. Utilisé comme gaz de combat durant la première guerre mondiale.

zéaxanthine. *n.* Sorte de xanthophylle.

zoïdogamie. *n.* Fécondation s'effectuant, chez certaines Gymnospermes, par des gamètes mâles à nombreux cils, libérés par le grain de pollen retenu dans une cavité à l'entrée de l'ovule.

zone aphotique. Zone des eaux marines où règne l'obscurité totale.

zone euphotique. Zone superficielle des eaux marines bien éclairée et au niveau de laquelle la photosynthèse est possible.

zone oligophotique. Zone moyenne des eaux marines où l'éclairement, bien qu'insuffisant pour les végétaux, existe encore.

zone trophogénique. Zone superficielle d'un lac au niveau de laquelle les plantes vertes produisent de l'oxygène en excès.

zone tropholytique. Zone profonde d'un lac où la production d'oxygène par les plantes vertes est inférieure à leur consommation.

zooplancton. *n.* Partie du plancton constituée par les animaux.

zoopédie. *n.* Science qui s'intéresse au comportement de dressage des animaux.

zygote. *n.* Syn. d'*œuf.*

zygotène. *n.* Second stade de la prophase méiotique, au cours duquel les chromosomes homologues s'apparient.

zymase. *n.* Ensemble d'enzymes de la levure de bière, considéré d'abord comme une seule substance responsable de la fermentation alcoolique.

BIBLIOGRAPHIE

BEAUMONT A., et CASSIER P., *Biologie animale, les Cordés, Anatomie comparée des Vertébrés,* Éd. Dunod, Paris, 1972. - BOUÉ H. et CHANTON R., *Zoologie,* tomes I et II, Éd. Doin, Paris, 1966. - DURAND M. et FAVARD P., *la Cellule,* Éd. Hermann, Paris, 1968. - GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie,* tous les tomes, Masson Éd., Paris, 1970; *Précis de zoologie,* tomes I et II, Masson Éd. - HOUILLON C., *Embryologie,* Hermann, 1967. - HUSSON R., *Glossaire de biologie animale,* Gauthiers-Villars, Paris, 1970. - KARLSON P., *Biochimie,* Doin. - MALMEJAC J., *Éléments de physiologie,* Éditions Médicales, Flammarion, Paris, 1964. - PETIT G. et PRÉVOST G., *Génétique et Évolution,* Hermann (collection). - SCHAPIRA G., *Éléments de biochimie générale,* Éditions Médicales, Flammarion, Paris, 1965. - SOUCHON C. et SOUCHON J., *Notions d'écologie,* Éditions du Dauphin. - YOUNG J. Z., *la Vie des Vertébrés,* Payot Éd., Paris.

ERRATA

Volume I

Page 16, fin de l'avant-dernier paragraphe, lire : S.G. Navachine et Guignard découvrirent la double fécondation chez les Angiospermes.

Page 16, dans la légende, lire : la réduction chromatique fut mise en évidence en 1883 par E. Van Beneden.

Page 20, légende du haut à remplacer par : A. Van Leeuwenhoek (1632-1723).

Page 26, colonne de gauche, 2e paragraphe, lire : Grâce à cette facilité de culture et à leur organisation simple de Procaryotes (et non d'*Eucaryotes*).

Page 27, colonne de droite, lire : A. Payen (1795-1781).

Page 49, schéma en bas, à gauche, inverser le sens des flèches placées au niveau des bandes bleues.

Page 51, légende du bas, lire : Action du calcium sur la fibre musculaire ; le médiateur, libéré par le nerf, pénètre dans de profondes invaginations de la fibre musculaire et permet la libération, au contact des fibrilles contractiles, du calcium précédemment accumulé dans un réseau cavitaire (système réticulaire) étroitement accolé à ces fibrilles.

Page 113, dans la légende, lire : Un dérivé de cette vitamine, le pyrophosphate de thiamine (TPP) est nécessaire à l'utilisation de l'acide pyruvique...

Page 114, dans le schéma, lire : 7 étapes → 4 H^+ + 4e^- ↓ capturés par les cytochromes → énergie et ↓ e^- + H^+ capturé par les cytochromes → énergie.

Page 121, deux schémas du milieu à intervertir.

Page 123, 2e paragraphe, supprimer le texte avant « c'est une méthode comparative ».

Page 135, deux photos du haut à intervertir.

Page 136, légende du haut, lire : Coupe longitudinale du tissu méristématique de la racine d'ail. Ce type de cellules végétales claires et de grande taille, permet une étude facile des variations de structure du noyau.

Page 137, schéma en bas, à droite, remplacer par un 6 le 1 de gauche.

Page 168, 2e colonne, 17e ligne, lire : Cohn et Hirsch...

Page 169, deux photos couleurs à intervertir.

Page 197, ajouter, au début de la légende : La régulation de l'activité mitotique peut être étudiée *in vitro*.

Page 147, dans le schéma, la *musculaire de la muqueuse* appartient à la muqueuse.

Page 157, photo en bas à droite, supprimer le *N*.

Page 189, tourner le cliché en haut à gauche de 180°.

Page 189, photo en haut à droite, légende : Pronéphros de jeune têtard d'Amphibien Anoure.

Pages 190 et 191. Dessins d'après 1° Vouyouvitch et Kampmeyer ; 2° Einerby et Cowdry.

Volume II

Page 89, schéma du haut, fig. 5 : par rapport aux indications inscrites sur la figure, faire tourner le dessin de 180°.

Page 97, colonne de droite du tableau, lire : cartilages branchiaux et non cartilages bronchiaux ; médulla des gonades et non médullo des gonades ; épithélium du tube digestif et non épithélum du tube digestif ; ovogonies et non orogonies.

Volume III

Page 110, schéma colonne de droite, le niveau trophique I correspond en fait au niveau coloré en jaune-vert, le II à celui coloré en bleu, le III au niveau blanc, le IV, V à celui coloré en mauve.

Page 138, légende du haut, lire : Les lions, qui sont les plus importants pour l'équilibre écologique, s'attaquent à de jeunes rhinocéros, à gauche.

INDEX DES NOMS CITÉS

L'index donne tous les noms d'espèces, de genres, de familles, d'ordres et de groupements supérieurs qui figurent dans les volumes I, II et III de Biologie.

Les espèces et les genres — et exceptionnellement les groupes supérieurs — sont indiqués par leur nom latin (en italique), en général suivi du nom français (en caractères droits), lorsque ce dernier est expressément cité dans le texte. En ce cas, on trouvera le renvoi, par un astérisque, du nom français au nom latin. Des renvois ont également été utilisés pour toutes les variantes désignant un même groupe. *Ex. :*

Cuniculus taczanowskii (Stictomys taczanowskii) [paca de montagne] III - 171
Stictomys taczanowskii
* *Cuniculus taczanowskii*
paca de montagne
* *Cuniculus taczanowskii*

Les familles, les ordres et les groupements supérieurs sont mentionnés soit par leur nom latin, suivi éventuellement par leur nom français, soit uniquement par leur nom latin si celui-ci figure seul dans l'ouvrage.

On trouvera en outre dans l'index les différents termes d'anatomie, de morphologie, de physiologie, de chimie, etc., figurant dans les trois volumes de Biologie.

En ce qui concerne les composés chimiques recensés, l'index comprend leurs abréviations, leurs dénominations françaises et, éventuellement, anglaises.

La référence est donnée par l'indication du volume I, II ou III en chiffres romains et du numéro de la page où se trouve la citation, suivi, le cas échéant, des lettres *a* ou *b*, indiquant respectivement la colonne de gauche et la colonne de droite de chaque page.

Les références sont données, pour les illustrations, par le numéro de la page en caractères gras, et, pour le texte, par le numéro de la page en caractères maigres pour une simple citation, et en italique pour un développement plus complet.

ABRÉVIATIONS

cl.	classe	gen.	genre	*sp.*	espèce
fam.	famille	ord.	ordre	var.	variété

A

B

C

D

E

H

I

J

K

L

M

N

O

P

Q

R

S

T

X

Y

Z

ENCYCLOPÉDIE DES SCIENCES

LES SCIENCES ET LEURS MERVEILLES

GRANGE BATELIÈRE

GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

GRANGE BATELIÈRE, ÉDITIONS ATLAS, PARIS - ÉDITIONS KISTER, GENÈVE
ÉDITIONS ÉRASME, BRUXELLES-ANVERS

Dépôt légal : 4e trimestre 1978.
Imprimé en Italie par I.G.D.A. Officine Grafiche, Novara.

LES SCIENCES ET LEURS MERVEILLES

SOMMAIRE

LA BOTANIQUE

Dans la nature, le monde des végétaux, riche et diversifié, nous offre des merveilles à profusion.
Nous avons choisi de vous faire mieux connaître celles dont l'homme aime à s'entourer, celles qui viennent jusque dans nos jardins et nos maisons égayer notre cadre de vie.
Vous découvrirez l'origine de vos fleurs préférées, vous serez surpris par l'immense variété des races, vous verrez ces splendeurs avec un œil neuf et vous percevrez quelle perfection elles représentent. Ces merveilles le sont en effet à double titre : merveilles par essence, mais embellies et multipliées par les soins et le travail de sélection de générations d'hommes.

LES ORCHIDÉES

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Par la diversité de leurs formes, la beauté de leurs couleurs et la subtilité de leurs parfums, les Orchidées comptent parmi les plus belles et les plus étranges fleurs du règne végétal. Elles sont devenues le symbole du raffinement et de la distinction. Sans doute est-ce pour cette raison qu'on les croit rares, alors qu'il en existe près de vingt mille espèces, et difficiles à cultiver, alors qu'elles débordent de vitalité. Autant de paradoxes qui invitent à les étudier d'un peu plus près...

La vie des Orchidées

Les Orchidées ou Orchidacées sont divisées en deux groupes : les plantes terrestres et les plantes épiphytes qui se développent sans aucun contact avec le sol.

Les deux types d'Orchidées présentent les mêmes caractères botaniques fondamentaux. La forme des feuilles varie d'un contour ovulaire ou arrondi à un contour linéaire. Les fleurs sont solitaires ou réunies par couples, ou bien encore groupées en épis ou en grappes.

Les Orchidées terrestres comme les Orchidées épiphytes ne peuvent se féconder et croître seules ; leur multiplication dépend d'un certain nombre de « collaborateurs extérieurs » qui interviennent à ces deux stades de leur vie.

Quoique hermaphrodites, les Orchidées présentent au niveau de l'appareil floral des particularités anatomiques qui interdisent l'autofécondation. Ce sont les Insectes qui, en butinant, réalisent la pollinisation. On peut voir en France un exemple spectaculaire de cette association Insecte-fleur lorsque, au mois de mai ou de juin, l'ophrys abeille fleurit sur les coteaux herbeux. Sa forme, sa couleur, l'odeur même qu'il dégage rappellent irrésistiblement une abeille. Le bourdon, abusé par ces apparences, cherche à s'accoupler avec la fleur, et il repart coiffé par les pollinies de l'ophrys.

Parce qu'elles sont très petites et presque totalement dépourvues de substances de réserve, les graines des Orchidées ne peuvent se développer par elles-mêmes. Pour parvenir à maturité, elles ont besoin d'un Champignon Basidiomycète microscopique (Rhizoctonia) *qui, vivant en symbiose avec la plante, lui fournit sa nourriture. Chaque espèce d'Orchidée est associée à un Champignon différent et spécifique.*

Les Orchidées épiphytes méritent une mention particulière. Ces plantes vivent loin du sol, accrochées le plus souvent à des arbres mais aussi à des rochers. Leurs racines aériennes pendent librement dans l'air en longs filaments. Grâce à un tissu spécial, elles absorbent l'eau et l'humidité atmosphérique. Ces Orchidées croissent donc le plus souvent dans des régions où les pluies sont fréquentes et abondantes : forêts tropicales et subtropicales.

Orchidées de notre flore et Orchidées tropicales

Quand on parle d'Orchidées, on imagine aussitôt la vitrine d'un fleuriste de luxe où s'épanouissent les spécimens les plus rares et les plus somptueux. Peu de gens savent qu'il existe aussi des Orchidées en France. Plus modestes que les espèces exotiques, elles n'en sont pas moins décoratives. Une cueillette abusive réduisant leur nombre, certaines Orchidées de montagne sont maintenant protégées afin d'éviter leur disparition.

Parmi les Orchidées de nos régions, la plus remarquable est le cypripède ou sabot de Vénus (Cypripedium calceolus), *brun pourpre et jaune, que l'on trouve dans le*

La fleur fascinante d'un vanda, Orchidée d'Asie méridionale et d'Océanie.

commerce des fleurs coupées. Nous avons déjà parlé des ophrys, ces Orchidées qui imitent les Insectes; nous citerons encore la nigritelle (Nigritella nigra), charmante espèce montagnarde au parfum vanillé, et Neottia nidus avis, roussâtre, qui possède des racines en forme de nid d'Oiseau.

Les Orchidées tropicales sont somptueuses, insolites de formes et de couleurs. Les espèces les plus répandues sont les Paphiopedilum, originaires de Nouvelle-Guinée, des Philippines et de Malaisie. Les fleuristes proposent souvent des corbeilles de Cattleya, beaux entre tous. Ils proviennent des forêts tropicales d'Amérique où ils poussent sur les troncs et les branches d'arbres. Le Mexique s'enorgueillit des Stanhopea; parmi eux, Stanhopea tigrina exhale un merveilleux parfum de vanille.

Un peu d'histoire

C'est en 1615 qu'Hernandez décrivit pour la première fois une Orchidée exotique, Laelia majalis du Mexique. En 1688, Jean Ray mentionna Disa grandiflora du Cap dans son Histoire des plantes.

Dès 1731, les Anglais rapportèrent des Bahamas Cypripedium reginae et tentèrent de le cultiver en Europe. Curiosités de jardins botaniques, ces fleurs devinrent très vite l'objet d'un commerce de luxe. Leur prix était très élevé car on les obtenait difficilement par semis : il fallut attendre qu'en 1899 le botaniste français Noël Bernard découvrît le rôle joué par les Champignons dans la germination des Orchidées pour que ce mode de culture devînt possible. Depuis, les horticulteurs n'ont cessé de créer de nombreux hybrides dont ils peuvent varier les formes et les couleurs selon la demande du marché des fleurs coupées.

Culture en serre

La plupart des Orchidées cultivées à des fins commerciales proviennent des pays chauds. Leur culture se fait donc généralement dans des serres qui reproduisent leur milieu d'origine. Elle nécessite un personnel spécialisé, exige énormément de patience et de soins.

Il faut en effet attendre un an pour que les fruits mûrissent et une seconde année pour que les graines produisent des plantules : les graines sont cultivées soit aseptiquement sur gélose en présence d'une souche convenable de Rhizoctonia, soit sur un milieu enrichi en sucres et autres substances (vitamine, hormones végétales, etc.).

Au bout de deux ans, les plantules sont transplantées dans un compost où le Champignon spécifique de l'espèce cultivée a été introduit. Il faudra plusieurs années pour obtenir la première floraison, et encore sera-t-elle peu colorée.

Pendant leur période végétative, la plupart des espèces tropicales réclament de la lumière, une température élevée, une atmosphère humide, aérée mais peu ventilée, et surtout un arrosage à l'eau non calcaire. Cette dernière condition est indispensable.

Les espèces originaires de l'Inde, de Madagascar et des régions tropicales américaines exigent des températures élevées : de 28 °C à 35 °C le jour et de 22 °C à 25 °C la nuit en été; de 18 °C à 22 °C le jour et de 13 °C à 16 °C la nuit en hiver qui est leur période de repos. Ce sont des Orchidées dites de serre chaude.

Cattleya, Laelia, Oncidium, Odontoglossum, Cypripedium et Dendropium proviennent de régions moins chaudes ou de montagnes tropicales. Ils sont cultivés dans des serres tempérées maintenues entre 25 °C et 28 °C le jour, entre 16 °C et 22 °C la nuit en été; entre 12 °C et 18 °C le jour et entre 10 °C et 2 °C la nuit en hiver.

Enfin certains Masdevallia, Cymbidium, Oncidium sont dits de serre froide. Ils réclament de 20 °C à 24 °C le jour et de 14 °C à 16 °C la nuit en été; de 8 °C à 12 °C le jour et de 6 °C à 9 °C la nuit en hiver.

Les cultivateurs d'Orchidées utilisent donc trois sortes de serres ou une seule, divisée en trois parties de températures différentes.

Les difficultés de la culture des Orchidées ont retenu l'attention des chercheurs français qui, depuis quinze ans, se sont attachés à les résoudre.

Dès 1964, le biologiste G. Morel mettait au point une méthode permettant d'obtenir de nombreuses plantules d'Orchidées à partir d'un seul groupement de cellules jeunes indifférenciées. Cette technique n'était toutefois pas applicable au genre Cymbidium.

En collaboration avec G. Morel, Pierre Chouard, directeur du phytotron de Gif-sur-Yvette, se penchait à son tour, avec son équipe, sur les problèmes de croissance et de floraison des Orchidées : en 1968, il faisait fleurir de jeunes plants d'Odontonia au bout de dix-huit mois de culture. Aujourd'hui, il a réduit des deux tiers le temps nécessaire à l'obtention d'une plante adulte, et le problème particulier des Cymbidium a été résolu. Ces résultats ont été obtenus grâce à l'outil exceptionnel qu'est le phytotron : il s'agit d'un ensemble de serres et de salles entièrement conditionnées où l'on peut faire varier simultanément ou isolément les différents facteurs qui agissent sur la croissance des plantes : température, éclairement, nutrition. Grâce au phytotron, les scientifiques sont parvenus à retarder ou à accélérer à volonté la floraison des Orchidées. Il reste maintenant à adapter ces méthodes à la culture industrielle ou privée.

Culture d'amateurs

Les amateurs peuvent cultiver les Orchidées en appartement ou en pleine terre. Il s'agit évidemment dans les deux cas d'espèces sans exigences thermiques particulières. Les Bletilla hyacinthia, originaires d'Extrême-Orient, sont parfaitement rustiques dans une grande partie de la France. Ces fleurs, de petite taille, croissent à mi-ombre. En revanche, Polystachia pubescens d'Afrique du Sud, à fleurs jaunes striées de rouge, ne pousse bien que dans le Midi. Certaines Orchidées épiphytes, Oncidium ornithorrhyucum ou Odontoglossum grande, de même que toutes les Orchidées terrestres du genre Pephiopedilum, vivent très bien en appartement. Un seul grand écueil à signaler à ceux que l'expérience tente : l'excessive sécheresse de l'air provoquée par le chauffage moderne. Pour obtenir des fleurs de rêve, ils devront prodiguer arrosages et bassinages fréquents avec une eau non calcaire à ces belles exotiques.

Bavestrelli, Bevilacqua, Prato

***Laeliocattleya,* très recherché par les amateurs, est cultivé intensivement en serre.**

LES ROSES

Reine des fleurs, inspiratrice des poètes, des sculpteurs et des peintres, la rose a une lointaine et riche histoire. Le musée de la Rose, à l'Hay-les-Roses, près de Paris, possède même des fossiles récupérés dans les sédiments de l'ère tertiaire. Aucune fleur ne semble autant symboliser l'art floral. Aimée de tous, son parfum, ses couleurs, ses formes sont un enchantement pour les sens.

Un peu d'histoire

La culture de la rose est très ancienne. Probablement originaire d'Asie, elle fut très appréciée des peuples méditerranéens. Chez les Romains, les roses étaient cultivées l'hiver dans des serres spéciales. On en extrayait le parfum et l'huile de rose, qui servaient à parfumer les banquets et les convives.

Les Arabes, ensuite, introduisirent en Europe la rose de Damas, qui fut surtout cultivée aux environs de Provins. Elle a gardé depuis son nom de « rose de Provins ». C'est à la fin du XVIIIe siècle que furent importées d'Orient de nombreuses espèces nouvelles, dont Rosa indica *et* Rosa burboniona, *qui, perfectionnées au XIXe siècle, donnèrent naissance aux roses-thé et aux hybrides refleurissants. Le célèbre peintre Redouté a illustré les plus belles d'entre elles.*

En France, la culture de la rose pour le commerce des fleurs coupées ne remonte guère à plus d'un siècle.

Les rosiers et leurs variétés

La rose appartient à la famille des Rosacées représentée par le genre Rosa. *Les rosiers comprennent une extrême diversité de races et de variétés (quinze mille environ). Cultivés sous diverses formes, ils se prêtent à des emplois multiples et jouent un rôle capital dans la décoration des jardins et des parcs. Pour la simplicité du classement, les roses sont réparties en deux catégories : les roses anciennes et les roses modernes. Les premières comprennent les espèces originelles et leurs hybrides dont le nom est précédé du mot* Rosa.

La plus célèbre rose ancienne est la rose de Chine (Rosa chinensis) *d'où dérivent des variétés à floraison continue. La rose à cent feuilles* (Rosa centifolia) *a donné naissance à des plantes très odorantes avec lesquelles on prépare l'eau de rose. A cette espèce appartient la rose-chou. La rose de Damas* (Rosa damascena) *et la rose de Provins* (Rosa gallica) *sont surtout fréquentes dans le centre et le sud-ouest de la France. Elles ont formé, par croisements avec d'autres espèces, de nombreuses variétés actuelles.*

Les roses modernes, provenant d'hybridations, sont divisées en deux groupes :

1° Les roses-thé hybrides ou hybrides de thé, à grandes fleurs décoratives, apparues à la fin du siècle dernier.

2° Les roses floribunda, *dont les fameux* polyanthas, *faciles à cultiver.*

En France, les rosiers se présentent sous les aspects suivants :

— Les rosiers-buissons dont les branches se ramifient dès le niveau du sol ; leurs roses sont bien formées, telle la célèbre « Madame Meilland », jaune et rose. De nombreuses nouveautés produisent des roses analogues mais moins grosses, groupées par trois ou cinq sur des pédoncules ramifiés dont les touffes décorent agréablement les parterres.

— Les rosiers grimpants et sarmenteux, à grosses fleurs, également ramifiées dès le sol. Ils forment des pergolas, des portiques, des treillages. Certains rosiers qui peuvent refleurir à la fin de l'été (appelés « remontants »), ou en automne, conviennent particulièrement à la décoration des murs et des façades. C'est le cas de « Madame Édouard Herriot », grosse fleur rose corail.

— Les rosiers-pleureurs, obtenus par greffage de rosiers grimpants sur des tiges d'églantiers. Ces espèces peuvent être dispersées sur des pelouses.

La baccara, rose foncé ou carmin, une des variétés les plus spectaculaires sur tige.

Une nouvelle rose, la viola, dont la simplicité apparente résulte de savants croisements.

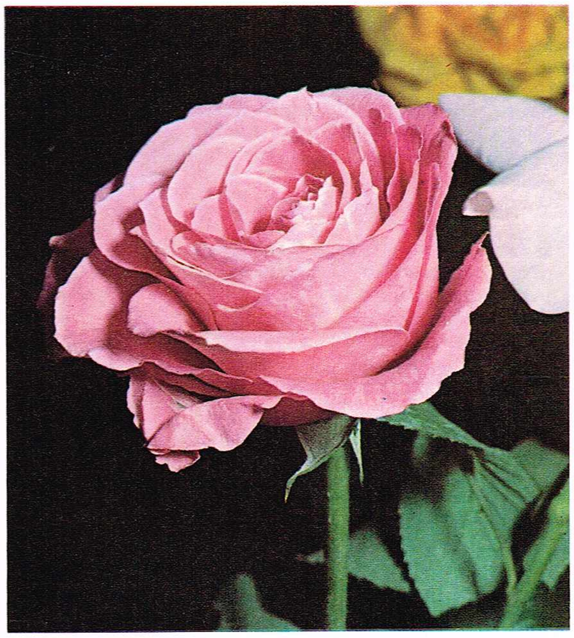

Photos Bavestrelli, Bevilacqua, Prato

— *Sur tiges, ce sont les variétés les plus spectaculaires, spécialement destinées à la vente sous forme de fleurs coupées. La baccara, rose foncé ou carmin, est la plus réussie. Il faut également citer la super star, vermillon clair. Les croisements sont parfois très complexes et donnent des résultats surprenants : on obtient des fleurs aux couleurs magnifiques allant du pourpre au jaune d'or, du blanc au violet et même du rose vif au bleu. Mais les rosiéristes rêvent toujours de la fameuse rose noire.*

— *Les rosiers miniatures, très petits buissons à fleurs en forme de rosette, tel le colibri.*

La roseraie de Bagatelle offre un exemple harmonieux de ces variétés où le talent des paysagistes et des jardiniers a heureusement marié les rosiers de toutes sortes.

La culture des rosiers

Peu exigeants sur la nature du sol, les rosiers préfèrent cependant les terres argilo-siliceuses, riches, profondes et fraîches où ils deviennent vigoureux et florifères. Il faut leur éviter les terrains trop calcaires, glaiseux ou imperméables, sablonneux et secs. Ils se plaisent dans les lieux aérés et ensoleillés, sauf les rosiers grimpants qui affectionnent l'abri des murs.

Les rosiers peuvent être plantés, à ciel ouvert, d'octobre à avril. La préparation du sol est essentielle et s'effectue au moins trois semaines avant la plantation : on creuse un large trou carré de 30 à 40 cm sur 60 cm de profondeur. Après qu'on l'a labouré et rempli d'engrais (animal ou végétal), on y étend les racines d'un pied ôté de la pépinière, puis on les recouvre de terre mélangée à de la tourbe. La distance entre deux pieds doit être de 45 à 60 cm pour les rosiers buissonnants, de 2 m au moins pour les espèces grimpantes et environ de 1 m pour les autres. Avant la floraison, le rosier a besoin d'engrais organiques (environ quatre litres par rosier et par semaine). Puis, juste avant la floraison, on arrête la fertilisation, pour effectuer des pulvérisations à base de DDT contre les parasites animaux (cétoine, pucerons).

Les plus graves maladies des rosiers sont dues à des Champignons microscopiques : la moisissure blanche (oïdium), qui apparaît après les brusques écarts de température; les taches noires de la rose s'observent sur les feuilles inférieures qui noircissent et meurent les unes après les autres; la rouille, maladie mortelle du rosier, qui se révèle par la présence sur la face inférieure des feuilles d'une poussière rougeâtre.

Au printemps, on supprime les « gourmands » (drageons ou rejets), qui, en se développant, risqueraient d'entraîner le dépérissement du rosier.

Variétés à grosses fleurs pour parterres

Anne Letts	*gamme des rose pâle tendre*
Grace de Monaco	
Ballet	*gamme des rose carminé*
Christian Dior	*gamme des rouge carmin au rouge cramoisi*
Chrysler impérial	*gamme des rouge cramoisi, foncé, velouté*
Diamond Jubilee	*gamme des jaune abricoté, chamoisé orangé*
Gail Borden	*bicolores, rouge et jaune*
My choice	*bicolores, rouge et argent*
Madame Meilland	*gamme des crème au jaune*

Grimpants-remontants

Conrad F. Meyer	*(rose argenté)*
Danse du feu	*(rouge écarlate)*
Gloire de Dijon	*(jaune chamois)*
Leverkusen	*(jaune d'or clair)*

Variétés remontantes pour haies

Amna	*(écarlate, orangé sombre)*
Enterprise	*(rose foncé, ourlé de rose)*
Orange triumph	*(rouge teinté d'orange)*
Yvonne Rabier	*(blanc pur légèrement teinté de jaune soufre à la base)*

La multiplication des roses se fait par reproduction sexuée ou asexuée. Les jardiniers pratiquent fréquemment la greffe : le greffon, future variété de rose cultivée, est inséré par une entaille en « T » sur un porte-greffon, souche sélectionnée de rosier sauvage. Une autre forme de multiplication, très facile à réaliser, est le marcottage, qui se fait en été.

Cultivées en serre, les roses se récoltent en toute saison.

Aucun arbuste ornemental ne possède des qualités aussi précieuses que celles du rosier : tronc rustique et robuste, vie durable, ramifications aux aspects variés, fleurs parfumées aux couleurs et aux formes d'une infinie variété. Docile, la rose se soumet aux modifications que lui imposent les chercheurs et en sort embellie.

Une rose moderne, la rose romantique, une des plus séduisantes réussites des rosiéristes.

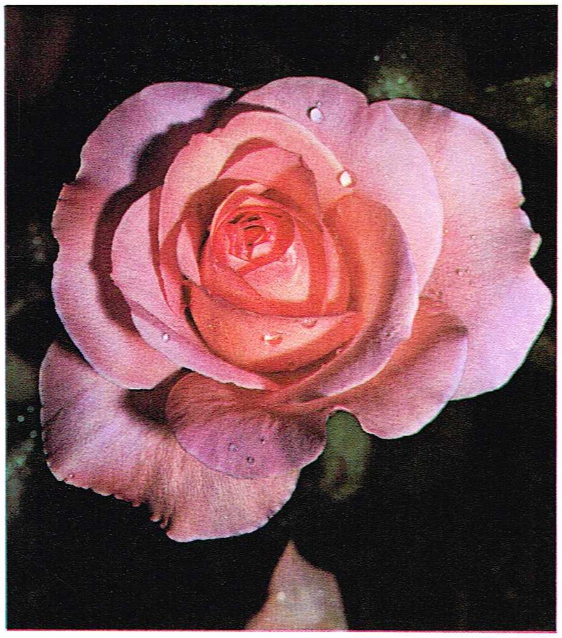

La rose-thé hybride, aux pétales délicatement saumonés, apparue à la fin du siècle dernier.

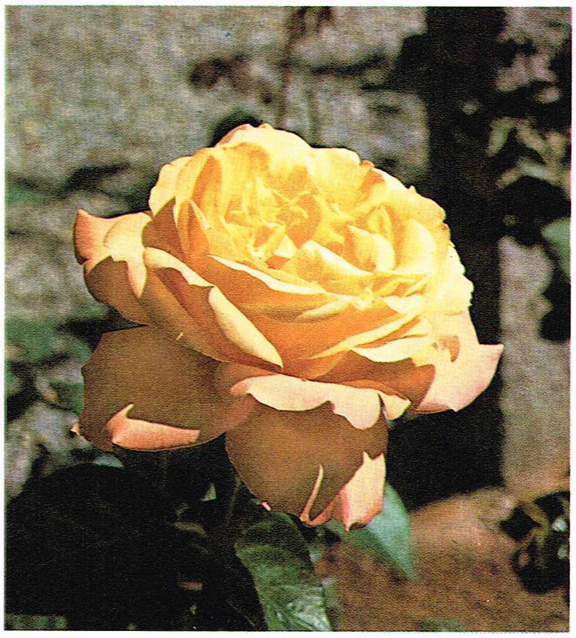

Photos Bavestrelli, Bevilacqua, Prato

LES DAHLIAS

M. Bavestrelli, C. Bevilacqua, S. Prato

▲ Thor, un très beau dahlia qui se prête merveilleusement à l'art des bouquets. ▼ Le capitule étoilé et velouté de Symphonia, une des plus belles variétés de l'espèce Coccinea.

M. Bavestrelli, C. Bevilacqua, S. Prato

Très appréciés pour les décorations estivales et automnales, les dahlias, grâce à leur croissance rapide et à leur floraison abondante, permettent l'ornement des jardins et la production de fleurs coupées. En fleurs depuis juillet-août, ils connaissent leur apothéose en septembre.

Plante de la famille des Composées, à racines charnues, les fleurs, ou inflorescences terminales en capitules, sont très variables dans leurs formes, leurs dimensions et leurs couleurs qui vont du crème au carmin vif, du jaune au rouge feu. Les feuilles dentées et composées, échelonnées le long de la tige, sont également très décoratives.

Races et variétés

Les dahlias proviennent tous des espèces du genre Dahlia *— neuf au total — originaire du Mexique où il vit à l'état sauvage sur les hauts plateaux. Introduit au jardin botanique de Madrid en 1789, il reçut son nom du botaniste suédois Dahl, élève de Linné, et se répandit sous cette appellation à travers tous les pays d'Europe.*

Plante ornementale, cultivée pour la beauté de ses fleurs, le dahlia faillit faire une carrière de plante alimentaire : en 1802, l'ambassade de France en Espagne envoie au Muséum des spécimens de tubercules de dahlias afin de déterminer leur valeur nutritive. De nos jours, celle-ci est reconnue sans être pour autant exploitée systématiquement : Dahlia pinnata *fournit de l'inuline, substance de base permettant d'obtenir le fructose.*

Dahlia variabilis *a été le premier introduit dans les jardins. Il possède de gros capitules doubles à l'extrémité des rameaux. Ces capitules peuvent dépasser chez certaines variétés un diamètre de plusieurs centimètres : le disque central jaune, constitué de petites fleurs en tubes, est entouré d'une couronne de larges fleurs en languettes, ovales, d'une belle couleur rouge à l'origine. On a depuis obtenu par hybridation des couleurs variées. La plante herbacée (comme toutes les autres espèces) possède des racines tuberculeuses, oblongues, prolongées par un filament, une tige dressée peu lignifiée à la base, des feuilles de cinq à sept folioles, larges, vert foncé sur la face supérieure, vert plus clair sur la face inférieure.*

Dahlia pinnata *a été la souche des dahlias lilliputiens qui n'atteignent pas 1 m, à fleurs moyennes ou petites, utilisés pour les massifs bas et parterres.*

Les dahlias à colliers, à grandes fleurs simples ornées autour du cœur d'une collerette de petites ligules d'un coloris différent de celui des ligules principales, dérivent de Dahlia crocata, *plus rarement cultivé que l'espèce précédente : les plus connus sont les dahlias hollandais vigoureux et très décoratifs.*

Avoir dans son jardin des dahlias en novembre et même en décembre est possible grâce à une autre variété, Dahlia imperialis. *Il possède des capitules pendants et légèrement campanulés, réunis en grappes qui donnent à la plante un aspect curieux. Le disque central, grand et jaune, est entouré de fleurs en languettes pliées et ondulées de couleur blanc rosé avec des nuances pourprées.*

Importé du Mexique en 1872, Dahlia juarezi, *appelé communément dahlia cactus, et dans certaines régions étoile du diable, à fleurs grandes ou moyennes, élégantes, composées de ligules enroulées en forme de cigarettes plus ou moins pointues, de couleur rouge écarlate ou rose corail, a connu immédiatement un grand succès. Sa beauté se prête merveilleusement à l'art des bouquets. On cultive aujourd'hui une infinité de dahlias hybrides ; certains ont des couleurs franches : rouge, rose, violet ou brun-rouge, jaune même avec un aspect velouté*

M. Bavestrelli, C. Bevilacqua, S. Prato

Les caprices de l'hybridation : les touches de blanc se sont dispersées aux extrémités des ligules au lieu d'entourer le disque central.

Duindigt, variété du célèbre *Dahlia juarezi*, appelé communément dahlia cactus.

ou soyeux; d'autres variétés offrent plusieurs nuances d'une même couleur. Certaines formes de Dahlia juarezi *en languettes droites et pointues sont parmi les formes horticoles les plus anciennes et les plus répandues. Les dahlias pompons à petits capitules ronds et globuleux aux couleurs surprenantes en sont les formes hybrides.*

La culture des dahlias

Les dahlias s'accommodent de tout bon sol de jardin bien travaillé et bien fumé, à exposition ensoleillée.

Les racines tuberculeuses sont des organes de réserves, et, comme elles sont fasciculées, les dahlias se prêtent bien à la multiplication par divisions des souches. La souche est l'ensemble des racines récoltées au pied d'une plante à l'automne précédent. On divise la souche en trois fragments et on ne met en terre que des tubercules ayant une portion de tige : celle-ci doit posséder à la base un bourgeon, unique siège du départ de la végétation au printemps suivant. La meilleure époque de division se situe dans la première quinzaine d'avril et la mise en place définitive début mai. La floraison terminée, et après les premières gelées, on arrache les souches par temps sec, et elles passent l'hiver dans des locaux aérés et protégés du froid.

Bouturage

Une autre forme de reproduction des variétés par voie végétative est le bouturage. La plantation en boutures donne des résultats parfaits quant à la beauté des fleurs obtenues, en particulier pendant l'arrière-saison. On prélève ces boutures quand les bourgeons ont de 3 à 5 cm de longueur, on les place dans des pots bien abrités du vent; on peut les porter en plein air après trois ou quatre semaines; elles sont mises à demeure en mai.

La floraison obtenue par bouturage ne fléchit jamais, mais commence trois semaines ou un mois plus tard que celle qui est obtenue par tubercules. Les deux systèmes réunis permettent d'assurer une floraison continue.

Semis

Les dahlias se reproduisent aussi par semis de mars à mai dans des pépinières couvertes en utilisant de la terre légère; la première transplantation doit être effectuée quand les plantules possèdent de quatre à six folioles; on les place alors à la distance de 1 m l'une de l'autre. La floraison se fait dès la première année, mais la forme et les couleurs définitives des variétés s'affirment seulement après deux ou trois ans. Les semis de graines sont employés pour la recherche de nouvelles variétés et ne présentent que peu d'intérêt pour l'amateur car, sans précautions spéciales et délicates, les résultats sont décevants.

Les dahlias sont généralement rustiques; ils s'adaptent facilement à tous les sols, résistent bien en plein air pourvu que leurs racines soient enfoncées profondément. Les variétés délicates ont besoin de sol sablonneux, frais et bien fertilisé.

Facile à faire pousser s'il a de l'eau et du soleil, donnant quatre bons mois de floraison massive, il n'est guère de plante qui ait autant de présence et de valeur décorative que le dahlia. Aussi n'existe-t-il pratiquement pas de jardins en France dont il soit absent. Il offre tant de formes et de couleurs différentes qu'on peut l'associer à d'autres fleurs en des haies somptueuses, des massifs bas et des bouquets composés.

Des expositions lui sont consacrées comme celle qui est réalisée chaque année dans le parc de Sceaux : plus de huit mille plantes en font un jardin de dahlias unique au monde, et permettent à l'amateur de reconnaître, d'apprécier et de comparer l'ensemble des variétés cultivées en France.

Les dahlias pompons, à petits capitules ronds, sont des formes hybrides de *Dahlia juarezi*.

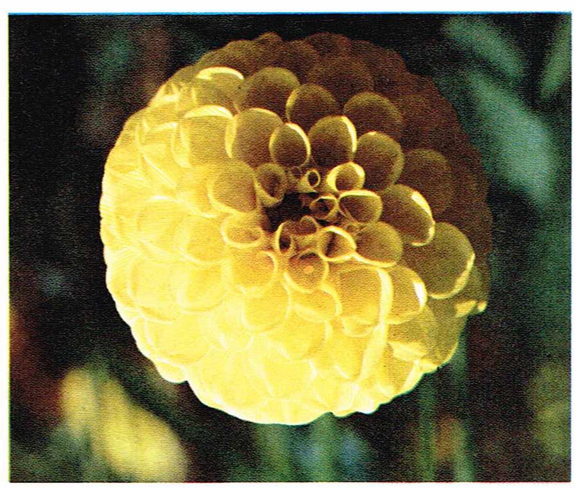

LES JACINTHES ET LES TULIPES

Parmi les bulbes florifères donnant une floraison précoce, au printemps, dans les jardins, et même en hiver, dans les serres et les appartements, ceux des jacinthes et des tulipes méritent la première place.

Ces deux groupes de plantes appartiennent à la famille des Liliacées. *Dans certains pays, notamment en Hollande, leur culture a donné naissance à une industrie florale hautement spécialisée. La tulipe est devenue le symbole des plaines néerlandaises où elle est entourée des soins patients et amoureux d'un peuple de paysans-jardiniers.*

LA JACINTHE

Comme l'indique son nom, Hyacinthus orientalis, *la jacinthe est originaire d'Orient et plus précisément d'Asie occidentale. L'élégance de ses fleurs, son parfum captivant et la facilité de sa culture lui ont valu un rapide succès à travers toute l'Europe. Les horticulteurs s'y sont intéressés dès le XVIe siècle, mais c'est aux Hollandais que revient le mérite de l'avoir portée au point de perfection que nous lui connaissons.*

Les différentes espèces

Classées tantôt en fonction de leur morphologie en groupe à fleurs simples et groupe à fleurs doubles, ou en fonction de leur couleur, les jacinthes horticoles peuvent se répartir plus simplement en deux espèces : les jacinthes de Hollande et les jacinthes françaises, ou de Paris. Les premières sont caractérisées par une grappe florale épaisse et pesante. Les secondes, plus rustiques, se reconnaissent à leurs panicules florales plus lâches et plus espacées.

Le très large développement de la culture de la jacinthe a permis la réalisation d'intéressantes hybridations. A partir des teintes fondamentales, les horticulteurs ont créé de multiples colorations intermédiaires. En outre, ils ont réussi à obtenir des fleurs de taille, de forme et de volume très divers.

Chacune des régions où la jacinthe a trouvé un milieu approprié à sa culture, s'est spécialisée peu à peu dans la production de variétés originales. Ainsi, il existe aujourd'hui des jacinthes romaines qui présentent de nombreuses inflorescences à chaque pied. Chacune d'entre elles est peu fournie, de trois à huit fleurs, de couleur blanche ou bleu foncé uniquement. Elles sont très souvent utilisées pour composer des parterres. On les vend aussi en pots, ou même en bouquets, mariées par exemple avec des violettes de printemps.

Les jacinthes hollandaises sont les plus belles et les plus recherchées. Actuellement, il en existe deux mille variétés environ. Parmi celles-ci, la « De Lieber » est considérée comme un modèle de perfection.

Les couleurs de la jacinthe ornementale sont : le blanc, toutes les teintes du jaune doré, toutes celles du rose au carmin, celles du violet et celles enfin du bleu à l'indigo.

La culture des jacinthes

La culture de ces fleurs, au parfum subtil et pénétrant, ne présente pas de difficultés. Comme pour toutes les plantes à bulbes, il faut procéder avec méthode.

Les bulbes sont enterrés à une profondeur de 10 à 20 cm et à des distances de 12 à 15 cm les uns des autres ; la meilleure période pour la mise en terre va de septembre à novembre pour les variétés de pleine terre et de novembre à décembre pour les plantes de serre. La terre doit être légère et modérément riche. Il faut absolument éviter tous engrais organiques, surtout frais. Après la floraison, lorsque les feuilles sont flétries, les bulbes doivent être déterrés et nettoyés ; séchés à l'ombre, ils seront conservés dans un lieu frais et sec.

Quand on désire obtenir une floraison très précoce, il convient d'avoir recours au forçage. A cette fin, on plante les bulbes dans de petits pots (il en existe de forme spéciale pour les jacinthes), dans une terre mêlée d'un peu de terreau et d'engrais, que l'on aère fréquemment.

Les pots doivent ensuite être placés dans des trous et recouverts de 10 cm de terre. Dès que les bulbes commencent à germer, on retire les pots et on les met sous châssis ou en serre ; on peut aussi les placer dans la maison, dans un endroit bien ensoleillé.

Une autre méthode de culture consiste à remplacer la terre par de la mousse. Dans ce cas, il faut placer les bulbes dans la mousse humide ou sur l'eau, et les conserver ainsi pendant un certain temps (de cinq à sept semaines) dans l'obscurité.

La multiplication par semis n'est guère utilisée pour les jacinthes, étant donné qu'il faut attendre quatre ans avant d'obtenir des plantes fleuries. En outre, les graines, sauf quand il s'agit de plantes mères spécialement soignées, donnent des plantes à fleurs pendantes. On a donc recours à la propagation à l'aide de morceaux prélevés sur des bulbes bien développés.

L'épaisse grappe florale d'une jacinthe ornementale.

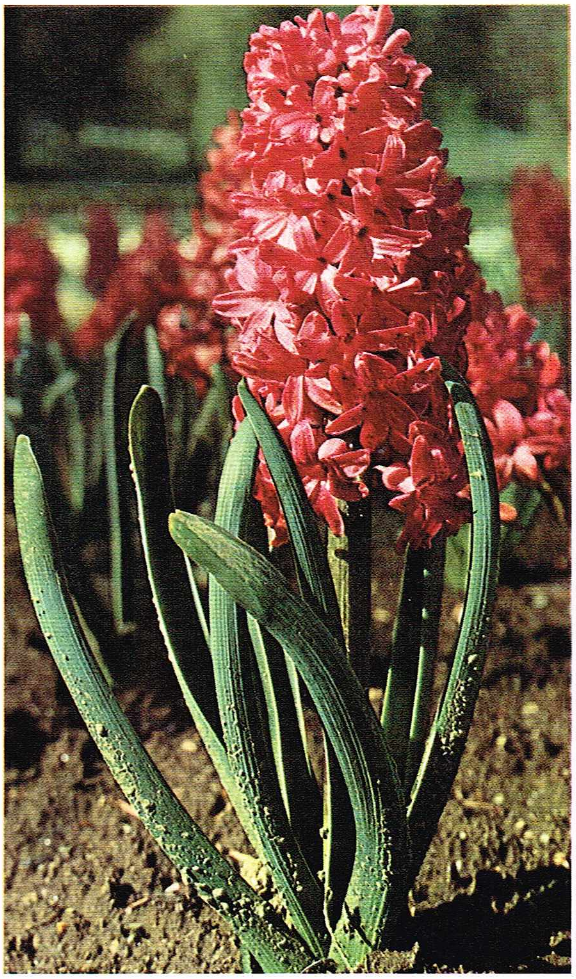

M. Bavestrelli, C. Bevilacqua, S. Prato

M. Bavestrelli, C. Bevilacqua, S. Prato

▲ Variation sur le thème de la tulipe tigrée.

▶ Une tulipe unicolore jaune de la variété « Golden harvest ».

▼ Un très bel hybride de la célèbre variété hollandaise « Darwin ».

LA TULIPE

C'est le botaniste suisse Conrad qui, le premier, a fait connaître cette fleur en 1559. Un certain nombre d'entre elles ornaient alors le jardin d'un magistrat d'Augsbourg; elles étaient rouges et l'on en mangeait les oignons.

Les Hollandais ont fêté, en 1960, le quatrième centenaire de l'entrée dans leur pays du premier oignon de tulipe; il aurait été rapporté d'Istanbul par un diplomate autrichien, envoyé extraordinaire de Frédéric Ier auprès du Grand Turc.

Espèces et variétés

Parmi les espèces les plus appréciées, on peut citer : Tulipa gesneriana, *originaire d'Asie du Sud-Ouest, d'où proviennent la plupart des tulipes communes;* Tulipa turcica, *d'Asie Mineure, qui a donné les innombrables tulipes « perroquet » et les « monstres »;* Tulipa suaveolens, *tulipe odorante du sud-est de l'Europe.*

La Hollande, qui consacre à cette culture 8 000 ha, produit des variétés remarquables, dont les plus belles et les plus connues sont : la tulipe Mendel, aux fleurs élégantes de forme allongée; la tulipe Darwin, dont les tiges raides peuvent atteindre 1 m; la tulipe lis, aux extrémités pointues en forme d'étoile; la tulipe Rembrandt, aux fleurs striées ou marbrées, etc. Les plus belles proviennent essentiellement d'hybridations interspécifiques.

Les couleurs de ces fleurs sont si nombreuses qu'on ne peut en exclure aucune, à l'exception du bleu pur, que les spécialistes n'ont pas encore réussi à obtenir. Elles peuvent être unicolores ou tachetées, flammées ou tigrées; leurs tépales — car il s'agit de tépales et non de pétales chez ces fleurs — ont un bord soit dentelé, soit ondulé, soit entier, et même lacinié ou effrangé.

Les tulipes sont parmi les plantes ornementales les plus prisées, tant dans les jardins que dans les maisons. Naines, elles ornent les bordures des massifs ou émaillent les pelouses de groupes aux coloris vifs et gais. Grandes, elles sont alignées contre haies et murets, ou dessinent des volutes fantasques dans les parterres des jardins publics.

Comme il en existe de précoces et de tardives, on peut, en les cultivant en alternance, prolonger leur présence dans les parcs pendant de nombreux mois.

La culture des tulipes est très facile. Les bulbes sont enterrés, au début d'octobre, à une profondeur de 4 cm et à une distance non inférieure à 10 cm; le sol et les traitements sont les mêmes que ceux qui sont conseillés pour les jacinthes. Il est cependant bon, après la chute des tépales floraux, de tailler le sommet des hampes, afin d'éviter le développement des fruits capsulaires. La propagation se fait aussi par des morceaux de bulbes.

La vogue de la tulipe

Bien que les tulipes nous charment fort, on aurait peine à croire aujourd'hui qu'elles ont été l'objet de véritables passions pendant la première moitié du XVIIe siècle en Europe. Elles suscitèrent un tel engouement parmi les bourgeois hollandais qu'elles furent cotées à la bourse de Haarlem... On vit de respectables commerçants engager tous leurs biens pour un oignon : spéculation ou amour des fleurs ? Quoi qu'il en soit, le gouvernement fut contraint, en 1637, de prendre des mesures draconiennes pour lutter contre cette folie.

La mode de la tulipe parvint à Paris vers 1633; elle remplaçait les pierreries dans les coiffures ou aux corsages des grandes dames... Cette vogue est passée, mais la tulipe nous est restée, séduisante et d'une distinction qui, lorsqu'on y songe, rappelle son ancienne et éphémère royauté.

M. Bavestrelli, C. Bevilacqua, S. Prato

M. Bavestrelli, C. Bevilacqua, S. Prato

LES RENONCULES ET LES ANÉMONES

M. Bavestrelli, C. Bevilacqua, S. Prato

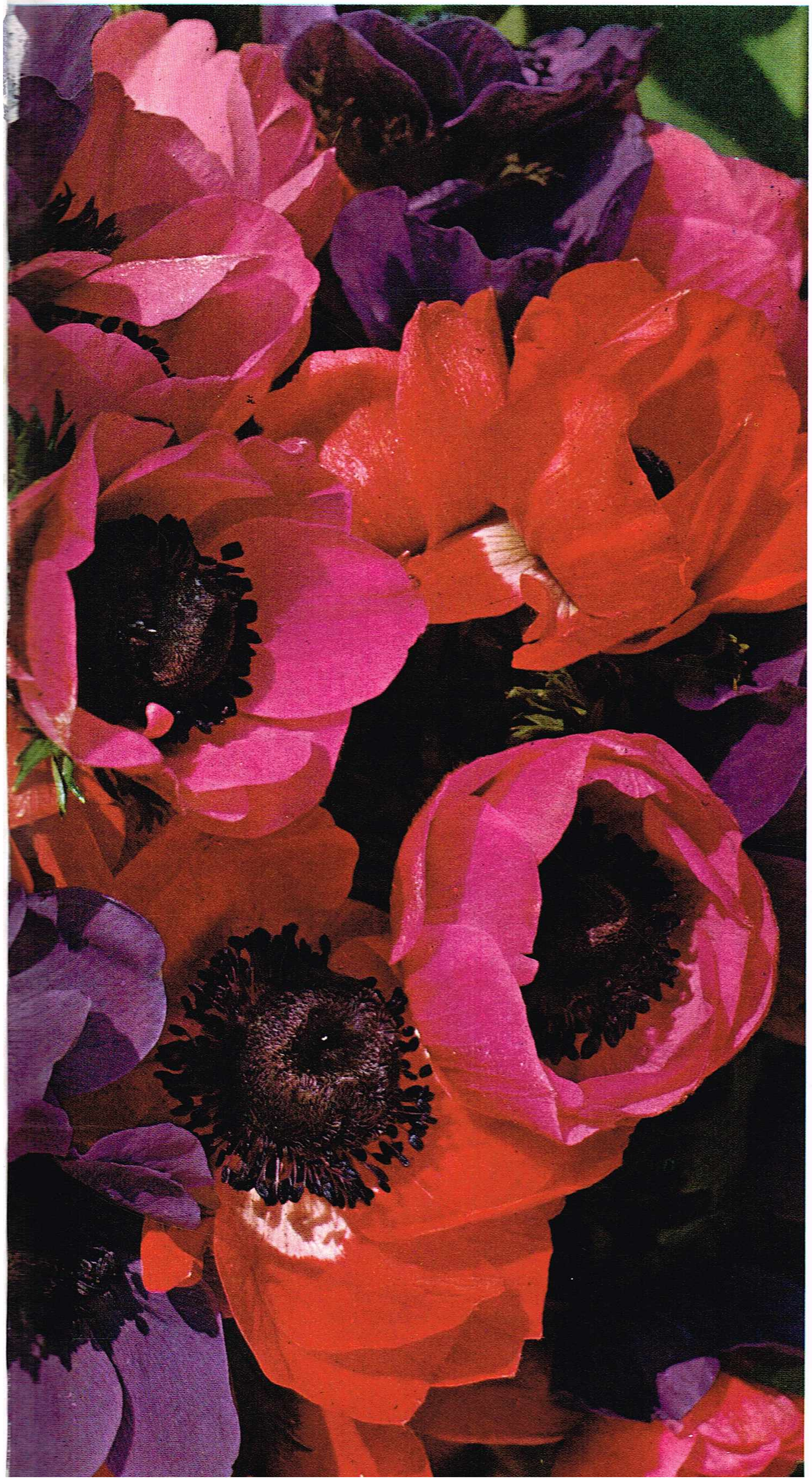

Fleurs robustes des jardins, élégantes fleurs coupées, les renoncules et les anémones ont pris une grande place dans nos pays.

Fleurs de la famille des Renonculacées, elles nous viennent d'Asie et étaient déjà connues des Anciens qui les appréciaient sous leurs formes spontanées ou horticoles.

LES RENONCULES

Ranunculus asiaticus, *originaire d'Asie Mineure, a été introduit en Hollande par les Croisés. Sous sa forme sauvage que l'on rencontre encore actuellement dans nos régions, c'est une petite fleur à cinq pétales rouge foncé alors que, semble-t-il, la plante ancestrale était jaune. Les soins des floriculteurs en ont fait une fleur magnifique, aux innombrables pétales et aux coloris très variés où dominent les tons blancs et jaunes et des dégradés du rouge-écarlate.*

Toutes les variétés et races cultivées dérivent de cette espèce, également appelée renoncule des jardins. Parmi elles, la renoncule de Turquie possède des pétales à l'aspect de minuscules turbans, la renoncule pivoine se distingue par des pétales plus ou moins dressés donnant des fleurs en pompon très séduisantes par la perfection de leurs formes et la beauté de leurs coloris.

Objets des soins attentifs des amateurs ou parures des vitrines des fleuristes, ces brillantes renoncules sélectionnées ne doivent pas nous faire oublier des espèces plus modestes, comme la renoncule âcre ou bouton d'or, qui embellit les champs du printemps à l'automne, ainsi que la grenouillette, ou renoncule aquatique, dont les fleurs blanches égaient dès le mois de mars les mares et les étangs.

LES ANÉMONES

Les anémones nous viendraient des rivages méditerranéens. Introduites aux environs de 1525, dans les jardins des pays du Nord, elles y ont été cultivées depuis avec succès.

*Les anémones des fleuristes, intéressantes comme fleurs coupées, dérivent d'*Anemone coronaria, *originaire d'Orient. On le rencontre sous sa forme typique à fleurs bleues dans les moissons du midi de l'Europe. Sa culture a donné des variétés remarquables aux couleurs jaspées. Les feuilles ont de nombreux segments divisés; la tige porte une collerette très découpée à la moitié de sa hauteur. En mars-avril, elle s'orne de fleurs en forme de coupe largement ouverte, aux coloris nombreux et brillants, présentant toute la gamme des couleurs, excepté le jaune. La base des pétales se nuance d'un coloris plus clair; leur ensemble simule une couronne entourant les étamines qui forment au centre une houppe de couleur foncée.*

*Les anémones de jardin, utilisées comme décoration des parterres, proviennent d'*Anemone hortensis, *apporté en Europe au XVIII*e *siècle, aux fleurs et feuilles polymorphes, ou d'*Anemone japonica, *belle plante vivace importée du Japon en 1844. Extrêmement florifère, cette dernière est très appréciée à la fois pour sa rusticité, pour sa nature très accommodante et pour sa floraison tardive. Elle s'épanouit à la fin août et reste en fleurs, certaines années clémentes, jusque sous le ciel brumeux de novembre. Très décorative, elle forme de grandes touffes au feuillage largement découpé d'où jaillit une multitude de gracieuses fleurs solitaires, larges de 4 à 9 cm, simples,*

L'harmonie des couleurs intenses et variées d'un bouquet d'anémones des fleuristes.

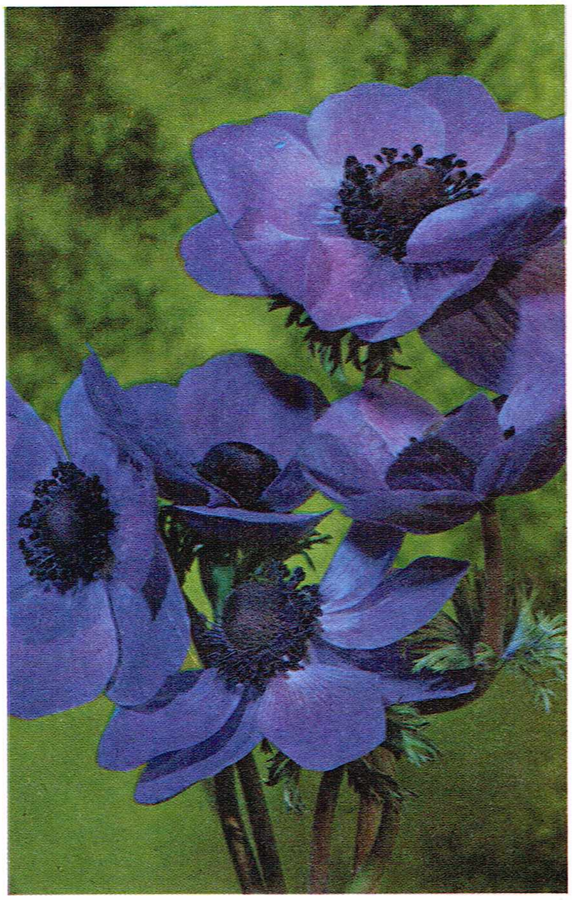

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ Encore un exemple du merveilleux coloris d'une anémone des fleuristes.
▼ Une belle variété de renoncules rouges en forme de demi-globe.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

doubles ou semi-doubles, toujours parfaites, aux teintes d'une grande fraîcheur empruntées aux tons roses ou blancs.

Toutes les anémones cultivées possèdent les caractères de ces trois espèces dont elles sont issues. Perfectionnées par l'art des floriculteurs, leurs couleurs sont devenues plus subtiles et leurs fleurs peuvent orner nos maisons depuis le début du printemps jusqu'au cœur de l'hiver.

En même temps que les anémones obtenues par sélection, on cultive aussi de nombreuses espèces pures ou presque pures. Dans les jardins de rocaille, l'Anemone nemorosa, ou anémone sylvie à fleurs doubles, et l'anémone sylvestre à fleurs blanc rosé portées par des hampes grêles, posent des taches colorées.

L'anémone pulsatille se rencontre à l'état spontané dans les bois clairs, les prés secs et les côteaux calcaires. Découpées en fines lamelles, les hampes florales sont munies vers le sommet d'une sorte de collerette à lanières et se terminent par une seule fleur couverte extérieurement d'un duvet soyeux et argenté ; la corolle est d'un violet intense sur lequel tranchent les étamines d'un beau jaune vif ; sa floraison précoce de mars à mai lui a valu le nom de « Pâques ». C'est une plante polymorphe, excellente fleur de rocaille ou de jardin alpin. Bien qu'il ait été reconnu toxique, son suc est cependant considéré comme une véritable panacée en homéopathie si on l'utilise sous forme de teinture.

La culture des renoncules et des anémones

Ces deux plantes sont cultivées de la même façon. Elles possèdent un rhizome ou tige souterraine modifiée, organe de réserve et de production annuelle de nouvelles plantes à partir de bourgeons. C'est pour cela que les floriculteurs considèrent souvent de façon inexacte que les renoncules et les anémones sont des plantes à bulbes.

C'est en octobre ou en novembre qu'on met en terre les petits rhizomes pourvus de bourgeons à 5 ou 6 cm de profondeur et à 6 ou 8 cm d'écartement. Les réserves emmagasinées pendant la période de repos végétatif sont utilisées par la nouvelle plante dont on voit rapidement apparaître les folioles dès avril. Sous le climat parisien, on préfère la plantation en février-mars, et la floraison s'étage alors de juin aux premières gelées.

Si toutes les expositions conviennent à cette culture, il faut en revanche éviter de la pratiquer sur des sols trop secs. La terre ne doit jamais être fumée à l'engrais organique trop peu de temps avant l'implantation. Jusqu'à la floraison, on arrose fréquemment et on désherbe.

Après la floraison, on déterre les rhizomes. Nettoyés et séparés, séchés à l'ombre, on les conserve en boîtes. Ils peuvent rester ainsi longtemps intacts, jusqu'à plus de deux ans. Ils se remettent en activité dès qu'ils sont replantés. Les anémones du Japon, peu exigeantes sur la nature du terrain, préfèrent cependant une terre fraîche modérément ensoleillée. On les multiplie par éclats de touffes. Leur végétation n'ayant pas d'arrêt complet, elles ne devront être déplacées que tous les trois ans.

Si on laisse les plantes aller jusqu'à la production de semence, les rhizomes sont épuisés, et leur transplantation l'année suivante donne de mauvais résultats. De plus, les semis effectués en mai ou en juin en pépinière, sur terre légère recouverte de sable, ne peuvent guère être pratiqués avec succès que par des professionnels. Ils y recourent surtout pour créer de nouvelles variétés.

Les renoncules et les anémones ont leur place dans tous les jardins. La facilité de leur culture et la précocité de leur floraison, la diversité de leurs coloris en font l'un des éléments indispensables de toute décoration printanière. Premières fleuries, elles peuvent être la dernière parure des jardins en hiver, selon que l'on retarde ou que l'on avance l'époque de leur mise en terre. Il suffit de les entourer de soins appropriés pour qu'elles s'adaptent au climat des pays nordiques aussi bien qu'à celui du midi de l'Europe.

Elles sont partout d'un effet charmant en corbeilles, plates-bandes, bordures et massifs. Fleurs coupées, elles mettent dans les appartements l'éclat velouté de leurs coloris aux époques où les autres fleurs à couper sont rares, pendant les longs hivers septentrionaux comme au début des doux printemps méditerranéens.

LES PRIMEVÈRES ET LES CYCLAMENS

M. Bavestrelli, C. Bevilacqua, S. Prato

Un groupe de primevères de jardin aux coloris variés.

Ces fleurs toutes simples introduisent sans qu'on y pense un plaisant paradoxe dans notre vie. Alors que leur nom évoque les débuts aigres-doux du printemps et les premières fleurs sauvages des campagnes, elles sont devenues depuis quelques années la parure hivernale traditionnelle des étalages des fleuristes.

Primevères et cyclamens appartiennent à la même famille, celle des Primulacées, dont le nom, Primula, *indique une floraison précoce.*

LES PRIMEVÈRES

Les primevères, providence de tous les jardins, sont d'une culture ancienne, et leurs ancêtres les hôtes humbles de nos prés, de nos bois et de nos montagnes.

La plus commune de nos primevères sauvages est le coucou odorant dont les fleurs jaunes s'épanouissent de mars à mai dans les clairières et sur les talus un peu partout en France, sauf dans la région méditerranéenne. C'est Primula officinalis, *la primevère officinale, ainsi nommée à cause de ses nombreuses vertus médicinales et alimentaires (ses parties souterraines ont des vertus expectorantes, ses fleurs sont offertes en boissons rafraîchissantes) : elle faisait autrefois partie des « simples » qui servaient à préparer potions et onguents de la médecine populaire.* Primula acaulis, *ou la primevère acaule, en est voisine ; elle est très commune dans l'ouest de la France : ses fleurs solitaires dépourvues de tiges sont posées sur une grosse touffe de feuilles rugueuses, et les coloris variés se situent toujours dans la gamme des tons pastel, rose, blanc, jaune, bleu pâle.*

En montagne, Primula auricola *pousse spontanément sur les rochers calcaires. C'est une plante vivace, rustique, à larges feuilles dentées et charnues, qui lui ont valu le nom populaire « d'oreille d'ours ». Selon l'altitude et l'exposition, les fleurs d'un beau jaune apparaissent d'avril à juin ; odorantes, elles se dégagent bien du feuillage et sont portées par une hampe florale de 10 à 15 cm.*

Cette plante a donné de très belles variétés cultivées que l'on peut disposer en touffes dans les jardins de rocaille à exposition nord ou garder en pots ; elles furent à la mode en Angleterre au début du siècle.

Les amateurs épris de simplicité peuvent se contenter de ces plantes très attachantes, mais ceux qui désirent des fleurs plus élaborées les choisiront parmi les nombreuses variétés d'hybrides créées par les floriculteurs. Les plus connues d'entre elles sont les primevères des jardins, Primula hortensis, *plantes issues d'hybridation entre la primevère officinale et la primevère auricole. Elles portent de mars à mai des hampes florales de 20 à 30 cm, terminées par une ombelle de grosses fleurs légèrement odorantes et souvent teintées de coloris bien fondus. La couleur bleu indigo, relativement nouvelle, n'existait pas dans les espèces types ; cette dernière vire au violacé rougeâtre lorsqu'on multiplie les plantes par semis. Les horticulteurs se sont efforcés de sélectionner des variétés géantes à hampes robustes, portant des ombelles de fleurs énormes appréciées en bouquets.*

Autres variétés d'hybrides, les primevères du Japon sont particulièrement indiquées pour la plantation au bord des eaux, en rocaille semi-ombragée ou sous le couvert d'arbres à feuillage léger. Les jardiniers anglais aiment tout particulièrement la primevère orchidée aux fleurs groupées en bel épi compact, allongé, bleu lavande ou violet intense. C'est la primevère des amateurs difficiles, attirés par sa forme originale et gracieuse et sa tendance à se naturaliser : elle fleurit en juin.

Ces différentes primevères ont des caractères botaniques et culturaux peu tranchés, et l'on trouve des termes de passage entre hybrides et espèces spontanées.

Il faut enfin réserver une place particulière aux espèces exotiques, originaires pour la plupart des zones tempérées ou froides de l'Asie nord-occidentale, comme Primula sinensis, *importé de Chine en 1879, ou* Primula obconica, *des mêmes régions, mais à la floraison moins abondante. Ces primevères, que l'on cultive en pots, sont peu différentes des nôtres, elles ont des feuilles pourvues d'un pétiole et des fleurs en ombelle aux coloris variés, du blanc au violacé en passant par toute la gamme des roses et des rouges. A partir de* Primula sinensis,

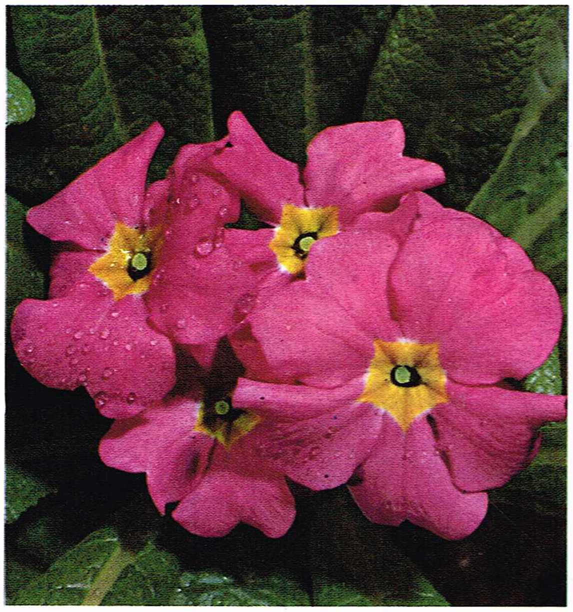

M. Bavestrelli, C. Bevilacqua, S. Prato

Les hybridations ont donné naissance à des fleurs aux teintes délicates.

les floriculteurs ont créé des races horticoles à grandes feuilles, aux limbes diversement lobés, effrangés, crêpelés et à fleurs géantes aux pétales échancrés mais à floraison plus tardive.

Primula malacoides, *originaire lui aussi du Japon, est une espèce exotique aux hampes grêles couvertes d'une multitude de petites fleurs gracieuses et légères du blanc pur au rose liliacé.*

Toutes ces primevères se plaisent dans les lieux humides et ombragés et participent à la décoration des parterres et plates-bandes exposés au nord.

LES CYCLAMENS

Pour beaucoup, le mot cyclamen évoque les luxueuses plantes en pots que l'on voit apparaître dès le mois de septembre dans la vitrine des fleuristes.

La plus aristocratique de nos fleurs d'appartement porte le nom du pays dont elle semble être originaire : le cyclamen de Perse déploie ses grandes ailes de papillon rose, blanc saumon ou mauve. Les fleurs solitaires, ovales, en forme de cœur, sont originales et élégantes avec leurs pétales brusquement redressés ; la culture et la sélection ont permis d'en créer différentes races.

Pourtant, les cyclamens sauvages sont de charmantes petites plantes indigènes, sans caprice, qui croissent librement par larges groupes et font de merveilleux sous-bois. Ils résistent bien à l'hiver et on les désigne sous le nom de cyclamens d'Europe.

Au printemps, ils sont les premiers à s'épanouir dans les forêts clairsemées de hêtres, où ils vivent à l'état naturel ; ils ne poussent d'ailleurs pas au-dessus de la limite supérieure de ces arbres : leurs fleurs hautes de 15 à 20 cm, penchées, odorantes, rose plus ou moins foncé, se dégagent bien des feuilles rondes, épaisses et rouges au-dessous.

Le cyclamen de Naples, spontané en Italie, fleurit en fin d'été, rose, lilas, rouge ou blanc, et ses feuilles marbrées de taches claires ressemblent à celles du lierre. C'est une plante de rocaille côté ombre.

Les racines tuberculeuses de ces deux espèces sont violemment toxiques.

La culture et l'entretien des primevères et des cyclamens

Pour entretenir et conserver ces plantes d'appartement le plus longtemps possible, des soins précis sont à recommander.

Les primevères exigent seulement d'être bien arrosées et fumées tous les huit à dix jours : on ralentira ce rythme pendant quatre ou cinq mois, la floraison terminée. Pour les faire refleurir après cette période de repos, on les transvasera dans des pots garnis de terreau et de sable mélangés.

Les cyclamens demandent davantage : il leur faut un terreau de qualité et des engrais solubles peu concentrés. L'arrosage à l'eau pure leur est recommandé et se fait à la partie supérieure du bulbe en évitant de mouiller la base des feuilles facilement atteintes par la pourriture. L'eau fournie par imbibition reste la meilleure solution. On doit éliminer les fleurs fanées et se rappeler que les cyclamens ne sont pas des hôtes de serre chaude : 12° conviennent parfaitement aux plantes (le jaunissement des feuilles indique que la température est trop élevée) ; en outre, le cyclamen est une plante qui « a besoin d'air » et aime la lumière. Pour garder les cyclamens, il est nécessaire, la floraison terminée, de placer les plants en pots dans des lieux frais et secs en interrompant tout arrosage. On peut ensuite les conserver en plein air, à l'ombre, sans enterrer la partie supérieure du bulbe. Rentrés en septembre dans une pièce bien éclairée et tiède, la floraison se produira pendant l'hiver.

Les plantes obtenues à partir de bulbes sont moins vigoureuses que celles qui proviennent de semis, et les floriculteurs préfèrent semer chaque année primevères et cyclamens en utilisant les graines issues des plus belles fleurs des années précédentes.

Le semis de primevères se fait en juillet ou en fin d'hiver en châssis ou pépinières. Les graines fines doivent être à peine recouvertes. La levée se produit en trois semaines : une belle rosette de trois à quatre petites feuilles peut être mise en pot dans un mélange de terreau et de terre de jardin.

Les semis de cyclamens effectués à partir d'août-septembre permettent d'obtenir des spécimens l'hiver de l'année suivante. Le trempage des graines pendant vingt-quatre heures dans de l'eau tiède accélère leur germination. On repique après dix à douze semaines les semis quand la première feuille est bien développée, dans du terreau de forêt mélangé à du sable fin et à de la tourbe. Mis en pots pour la première fois, en mars-avril de l'année suivante, ils possèdent alors cinq à huit feuilles, et la plante sera, un an plus tard, une belle touffe compacte de feuilles protégeant des pédoncules floraux pleins de promesses.

Primevères et cyclamens sont des plantes parfaites pour la culture en pots et la décoration hivernale des serres et des appartements. Ils y apportent la grâce de leurs fleurs, la richesse de leur feuillage et la gaieté de leurs coloris.

Les élégantes corolles d'un cyclamen européen.

M. Bavestrelli, C. Bevilacqua, S. Prato

LES PENSÉES ET LES PAVOTS

Plantes annuelles à l'état spontané, pensées et pavots sont des fleurs très décoratives, faciles à cultiver, rustiques et à floraison massive. Horticoles, elles deviennent vivaces et ornent bordures et massifs.

Les pensées doivent leur nom à la symbolique des amoureux. Elles appartiennent au genre Viola, *groupant violettes et pensées, dont la couleur d'origine était le violet. Il existe pourtant en montagne des violettes sauvages jaunes, comme* Viola biflora, *et d'autres, plus rares, comme* Viola cenisia, *rouge lie-de-vin ou bleu céruléen.* Viola calcarata, *des pâturages alpins, parfume l'air de sa bonne odeur de miel et de vanille, et ses fleurs plus grandes que celles des violettes se situent dans les tons pastel.*

LES PENSÉES

Les pensées existent uniquement sous forme cultivée; elles ont pour origine la violette tricolore — Viola tricolor *— commune dans les champs et dont le nom spécifique indique le mélange de jaune, de blanc et de violet. Les floriculteurs ont réussi à varier à l'infini ses couleurs, et il existe désormais des variétés nuancées de rouge foncé et d'orangé. Elles ont été cultivées en Europe dès 1542, mais les variétés à fleurs jaunes dérivent de* Viola altaica, *originaire d'Asie Mineure et du Caucase, connu en Europe depuis 1805, ou de* Viola lutea, *d'Europe boréale, connu dès 1587.*

La floriculture s'est appliquée à diversifier les races, à multiplier les couleurs à partir de Viola tricolor, *et à en faire des plantes vivaces. On a ainsi obtenu* Viola hybrida *et* Viola hortensis, *cultivés comme bisannuels, objets d'importantes améliorations caractérisées par la dimension plus ou moins grande de la fleur, la tonalité des mélanges, la variété des coloris et la précocité de la floraison.*

Les pensées à floraison hâtive commencent à fleurir à la sortie de l'hiver : ce sont les pensées hiémales; leurs fleurs sont de proportion parfaite et leurs coloris très purs. Dans les tons d'un bleu très soutenu, presque noir et velouté, on trouve « la Mars » aux taches noires centrales; dans la gamme des jaunes, le « soleil d'hiver », dont chaque fleur porte des macules noires.

Les pensées à floraison normale et de très longue durée commencent à fleurir en avril et atteignent leur plénitude en mai : ce sont les géantes rêve et les fameuses géantes de Suisse, les premières plus précoces que les secondes. Elles ont des fleurs amples, aux coloris nets sans macule : ce sont des fleurs parfaites pour les massifs.

Dans la gamme infinie des teintes mixtes, nous trouvons les pensées marron ou cuivrées à rayons jaunes, résultat probable d'hybridations. Elles permettent de créer dans les jardins de véritables mosaïques de floraison pendant tout le printemps.

Les pensées se reproduisent par semis : on sème les graines autour du 14 juillet et jusqu'au 15 août; il est indispensable de les protéger du grand soleil. On les recouvre légèrement et on les maintient sous châssis jusqu'à ce que les jeunes plants soient bien sortis. Quand ceux-ci ont trois ou quatre feuilles, on les repique en pépinière. La mise en place se fait en automne dans les terres légères, au printemps lorsque les plantes ont une fleur ouverte, dans les terres lourdes et les régions à hiver rigoureux; la distance entre chaque plant doit être de 20 à 40 cm. On peut aussi propager par boutures les variétés les plus recherchées. La pensée préfère la terre de forêt mélangée à du sable fin et a besoin d'eau.

Les pensées, quelle que soit leur race, peuvent être utilisées seules. Il suffit de choisir deux variétés de couleur opposée pour constituer de beaux parterres fleuris, l'une

Une magnifique touffe de pensées "Roggli Jätte"

M. Bavestrelli, C. Bevilacqua, S. Prato

▲ **Un pavot d'Islande** ***(Papaver nudicaule)***

▼ **Gros plan sur la capsule caractéristique du coquelicot commun** ***(Papaver Rhoeas)***

M. Bavestrelli, C. Bevilacqua, S. Prato

servant de fond et l'autre de bordure ; mais elles s'accordent aussi très bien avec d'autres fleurs précoces comme les myosotis, les tulipes et les narcisses.

LES PAVOTS

Les pavots, annuels, bisannuels ou vivaces, sont originaires des steppes ensoleillées et venteuses d'Asie. Ils ont une très longue histoire puisque leur nom botanique Papaver *est tiré du celte « papa » qui signifie bouillie. Nos lointains ancêtres avaient en effet coutume de mêler les graines de cette plante ou son suc à la bouillie des enfants pour les faire dormir...*

La capsule de Papaver somniferum, *variété* album, *a de nos jours une utilisation moins inoffensive : elle fournit l'opium dont on sait les dangers pour les fumeurs mais aussi les vertus pour la pharmacopée. Ce ne sont pas les champs maléfiques de pavots blancs du Proche-Orient qui retiendront notre attention mais, plus modestement, les pavots que l'on cultive dans nos jardins comme plantes ornementales.*

Il en existe plusieurs variétés : le modeste pavot des champs, Papaver rhoeas *ou coquelicot, est le plus banal représentant du genre à fleurs annuelles qui se multiplie par graines. Il a produit en culture une race décorative à larges fleurs simples ou doubles, le « pavot à fleurs de renoncules » aux couleurs variées, y compris le bleu ardoise.*

On connaît les belles grosses fleurs doubles du pavot des jardins, Papaver somniferum. *C'est une plante de 1 m à 1,20 m de hauteur, aux fleurs globuleuses dont les coloris varient du blanc au violet-noir. Dans ce dernier cas, elle appartient à la variété* nigrum, *et l'on extrait de ses graines l'huile d'œillette. Les variétés bien fixées du pavot des jardins se reproduisent par semis. Certaines ont des pétales frangés, frisés, qui ressemblent à des plumes. Ces pavots somnifères s'utilisent en plates-bandes et en corbeilles ; cependant les fleurs sont de très courte durée, et le repiquage des plants reste donc difficile. Pour pallier ce dernier inconvénient, on sème les pavots annuels en place, sur les lieux mêmes de leur effet décoratif ; le semis se fait au printemps en terrain léger, perméable, même pauvre mais à exposition ensoleillée. Ces deux espèces peuvent aussi être cultivées en bisannuelles ; les semis se font en septembre, toujours en place. Les plants passent un hiver en plein air et fleurissent quatre à cinq semaines plus tôt que ceux que l'on a semés au printemps.*

Le pavot d'Islande, Papaver nudicaule, *originaire de l'Himalaya et de l'Asie arctique, est une plante vivace aux feuilles en touffes dressées, divisées en segments étroits d'un vert glauque, aux fleurs jaune-orangé avec des pétales ondulés ou chiffonnés sur les bords. Ce pavot qui fleurit de mai à juillet fait merveille dans les rocailles, et ses fleurs tiennent fort bien dans des vases. Assez exigeant, il recherche les terrains légers, une situation mi-ombragée, à l'abri des vents violents, et redoute l'excès d'humidité. Bien qu'il soit vivace, il est préférable de le semer tous les ans : directement en place en avril, fin juillet en pépinière. On lui fournira un apport substantiel sous forme d'arrosage à l'engrais liquide une fois tous les quinze jours.*

Le plus vivace de tous est le pavot d'Orient hybride, Papaver orientale hybridum, *connu dans nos régions depuis 1714 et originaire d'Asie Mineure. C'est une plante à tiges poilues de 1 m de hauteur se terminant chacune par une seule fleur. Les horticulteurs ont isolé des variétés aux couleurs diverses : rose, saumon, orangé, rouge, dont la fixité est assurée par le mode de multiplication par éclats ; après la floraison, ou en septembre, des racines charnues grosses comme un crayon sont débitées en tronçons de 3 à 4 cm de longueur et le côté inférieur de la bouture coupé en biseau. Ces tronçons de racines sont repiqués en pots remplis de terre de bruyère fine ou d'un mélange de tourbe et de sable et espacés de 3 à 4 cm. Après bassinage, les pots sont placés en serre sous châssis froid ou sous cloche. On peut aussi semer en septembre le pavot d'Orient, le transplanter en automne une première fois puis le mettre à demeure en mars-avril en écartant les plants de 60 à 80 cm, et il fleurit de mai à juillet.*

Annuels ou vivaces, les pavots donnent de mai à juillet des fleurs d'une grande beauté aux pétales soyeux et aux coloris somptueux.

LES LIS ET LES NARCISSES

Les narcisses et les lis sont des Monocotylédones florales ; ils comprennent les uns et les autres un grand nombre de belles espèces ornementales, herbacées et bulbeuses, mais n'appartenant pas à la même famille botanique. Les narcisses (genre Narcissus*) sont en effet des Amaryllidacées, alors que les lis (genre* Lilium*) sont des Liliacées. Nous les avons associés, cependant, pour la beauté et le parfum de leurs fleurs.*

LES LIS

Les lis doivent à leur port majestueux, à la beauté de leurs fleurs, à leur parfum suave et à la richesse de leurs coloris d'être universellement appréciés. Ce sont des plantes à bulbes écailleux ou à rhizomes, à tige droite, à feuilles lancéolées, à grandes fleurs terminales solitaires ou réunies en groupes. On en connaît une cinquantaine d'espèces répandues dans les pays tempérés de l'hémisphère boréal.

Les lis ont été employés comme fleur ornementale et symbolique depuis des temps très anciens ; motif décoratif fréquent dans l'art indien et l'art antique, symbole de pureté, son introduction dans les armoiries du roi de France lui a valu une place éminente dans l'histoire du blason.

Le lis blanc, ou Lilium candidum, *est connu et cultivé depuis la plus haute antiquité dans les régions méditerranéennes. On pense que ce sont les Croisés qui l'ont introduit chez nous aux environs de 1365.*

Il fleurit abondamment et son odeur caractéristique embaume les jardins depuis le printemps jusqu'au milieu de l'été.

Le lis à longue fleur (Lilium longiflorum), *originaire de Chine et du Japon, n'est pas rustique. Connu dans nos jardins depuis 1819, il donne des fleurs pédonculées réunies en groupes de trois à cinq, longues de 15 à 20 cm chacune, en forme de trompettes, blanc ivoire, parfumées ; il est planté en pots profonds et forcé en serre.*

Le lis royal (Lilium regale) *porte sur une longue tige élégante des fleurs blanches à gorges jaunes, groupées par quatre ou huit, prospérant bien sur une bonne terre de jardin à exposition ensoleillée.*

Le lis doré (Lilium auratum), *fort beau, a des pétales blancs, recourbés en arrière, parsemés d'un pointillé rouge-brun avec une raie jaune pâle simulant une nervure médiane.*

Le lis tigré (Lilium tigrinum) *fleurit en juillet et en août ; il peut porter jusqu'à vingt fleurs pendantes rouge-orangé tachées de pourpre noire. C'est une espèce rustique qui se cultive en terre légère plutôt fraîche. Toutes ces espèces botaniques et leurs variétés sont produites et forcées en serre. Mais pour la décoration des jardins, elles sont supplantées par plusieurs lignées hybrides de création récente, obtenues par croisement des espèces originelles et désignées sous le nom de lis américains : ces hybrides ont une floraison plus importante, une grande diversité de coloris et une parfaite rusticité.*

Les lis demandent un sol bien drainé. Le terrain doit être riche en humus (terre de jardin et terreau mélangés en parts égales) ; on enterre les bulbes à 20 cm de profondeur, d'août à septembre, à une distance de 35 à 40 cm.

Ils peuvent aussi être laissés en pleine terre pendant quatre ou cinq ans, à condition de bénéficier d'une exposition ensoleillée de préférence à l'est. Sous un ombrage léger, ils prennent des nuances plus délicates, mais les hampes florales deviennent fragiles par suite de l'étiolement.

Les lis s'enracinent profondément et nécessitent un arrosage abondant. Pendant la période végétative, ils n'aiment pas à être déplacés et il ne faut pas les trans-

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Un lis tigré *(Lilium tigrinum)* d'un bel effet décoratif en raison de sa chaude couleur rouge-orangé.

Un exemple d'hybride dérivé de *Narcissus incomparabilis.*

Une autre variété d'hybride d'un jaune d'or intense.

planter tant que les touffes ne se dégarnissent pas au centre.

De nombreuses espèces hybrides peuvent être cultivées en pots : les bulbes plantés en automne sont mis dans un endroit frais jusqu'au printemps où ils porteront une floraison précoce.

Toutes les variétés de lis sont très appréciées des fleuristes pour le commerce des fleurs coupées ; certaines font l'objet de cultures horticoles en serre.

LES NARCISSES

Les narcisses doivent leur nom à un jeune Grec trop beau et trop amoureux de sa beauté que les dieux changèrent en fleur. Ce mythe a inspiré poètes et peintres ; Paul Valéry lui a consacré un de ses plus admirables poèmes. Typiquement printaniers, les narcisses existent sous des formes rustiques ; en particulier, le narcisse des poètes (Narcissus poeticus) *parsème les forêts et les bois. Ses fleurs d'un blanc transparent, parfumées, sont faites d'une coronule ou œil central plat. Les narcisses décorent également les jardins car ils se cultivent facilement et ont une floraison très précoce. Le narcisse des poètes a donné des variétés à fleurs doubles. Hybridées avec* Narcissus tazzetta, *espèce méridionale à bouquet de petites fleurs blanches, elles deviennent* Narcissus poetaz *à fleurs plus grandes que* Narcissus tazzetta *et à la coronule jaune-orangé. Des variétés ornementales totalement blanches ont été créées par sélection : les floriculteurs les appellent narcisses à bouquets car ils présentent de petites fleurs à couronne centrale peu développée, réunies par quatre ou dix au sommet des tiges.*

Le développement considérable de la coronule peut former un tube plus ou moins long : c'est le cas des narcisses trompettes ou coucous, Narcissus pseudonarcissus *aux fleurs simples ou doubles, larges, penchées, jaunes, solitaires à bords effrangés, improprement appelés jonquilles. Ce nom doit être réservé aux narcisses jonquilles,* Narcissus jonquilla, *fort communs dans les garrigues du Midi. Le parfum de ses petites fleurs jaunes, doubles, évoque l'acacia et la fleur d'oranger ; son feuillage est persistant. En général, les narcisses à coronule plate sont plus odorants que les narcisses à long tube.*

Le narcisse incomparable, Narcissus incomparabilis, *hybride du narcisse des poètes et du narcisse trompette, a une coronule très ouverte, une fleur solitaire sur une tige grande et élégante. Les variétés diffèrent par leurs colorations du blanc au jaune, les dimensions de la coronule jaune, rouge ou orangée. Citons « Scarlet élégance » aux fleurs jaune d'or avec une couronne frisée, effrangée, vermillon vif.*

Il existe de multiples variétés de narcisses, certaines uniflores et étoilées comme les narcisses barii, *d'autres à fleurs doubles comme « white lion ».*

La culture des narcisses est simple et demande peu de soins. Ils prospèrent en tous terrains. A l'automne, on plante les bulbes par deux ou trois à 15 cm de profondeur dans du terreau sec et sableux. Les bulbes se multiplient d'eux-mêmes et forment avec l'âge des touffes énormes qui peuvent porter chacune une centaine de fleurs, accompagnées d'un feuillage rubané vite fané après la floraison et que l'on supprimera. Les narcisses sont très sensibles aux engrais qui améliorent considérablement leur floraison. En juillet, on arrache les touffes et on sépare les bulbes.

On peut aussi effectuer des semis mais ce procédé est habituellement réservé à la sélection de nouvelles variétés car les plantes provenant des graines mettent quatre ans à fleurir.

Les narcisses à bouquets poussent très bien en appartement soit sur carafes, soit dans de la mousse humide ou encore selon le procédé chinois dans une coupe remplie d'eau enfouie partiellement dans du gravier : on dispose les bulbes dès le mois d'octobre, les tiges florales se développent rapidement, on peut espérer les voir fleurir pour Noël : c'est là un mode de culture spécial car les bulbes sont perdus.

Les narcisses sont une des plus belles parures du printemps. Plantés en touffes au bord des bosquets, ils les animent ; on peut aussi les disposer en corbeilles ou les disséminer sur les pelouses, dans les parties éclairées des sous-bois et au bord des pièces d'eau.

Les fleurs coupées sont de longue durée. Les fleuristes les associent souvent aux bleuets et aux coquelicots pour composer des bouquets champêtres.

Un narcisse trompette *(Narcissus pseudonarcissus)* improprement appelé jonquille.

LES GLAIEULS

Avec les roses et les œillets, les glaïeuls forment l'essentiel des fleurs nobles que l'on cueille au jardin pendant l'été. Très appréciés également pour la composition de bouquets, ils font l'objet d'une demande croissante chez les fleuristes. Les glaïeuls, plantes bulbeuses, vivaces, de la famille des Iridacées (monocotylédones), doivent leur nom à la forme en glaive de leurs feuilles longues, étroites, pointues et plates comme des épées, à nervation parallèle. Les fleurs sont grandes et de vives couleurs : elles forment une hampe florale droite avec de longs et gros épis terminaux se présentant généralement sur une seule face. Les coloris, frais et variés, vont du blanc au violet en passant par le jaune, le rose et le rouge.

Le genre comprend trois cents espèces, et beaucoup croissent à l'état sauvage en Afrique et en Asie. Toutefois, en France, deux espèces au moins existent à l'état spontané : la petite flambe lis de saint Jean (assez rare) et le glaïeul des moissons ; ajoutons-y le glaïeul des marais.

C'est aux Hollandais que nous devons la grande diffusion de ces plantes. Les Boers en furent les principaux exportateurs en Europe. Si on excepte Gladiolus byzanthinus, *introduit en 1629 et originaire de Turquie, les glaïeuls cultivés résultent de nombreux croisements entre espèces typiques africaines.*

Souchet, jardinier de Napoléon III, a lié son nom aux premières sélections. Le fondateur des glaïeuls à grandes fleurs est Beddinghaus qui a obtenu le glaïeul de Gand en 1841 par croisement entre Gladiolus psittacinus *(glaïeul perroquet) et* Gladiolus cardinalis *(glaïeul cardinal), espèces sauvages africaines. Par la suite, Lemoine de Nancy créa des glaïeuls à grandes macules en croisant les belles variétés de glaïeul de Gand avec le glaïeul pourpre et or* (Gladiolus purpureo-auratus). *Cette race a donné des variétés de toutes couleurs allant jusqu'au bleu (alors qu'il n'existe pas dans les espèces naturelles).*

UN VASTE CHOIX DE VARIÉTÉS ET DE COULEURS

Aujourd'hui, les glaïeuls des jardins résultent de tant de croisements qu'il n'est plus possible de distinguer leur parenté botanique. Les horticulteurs se contentent de les classer en hâtifs, mi-hâtifs, tardifs, et par couleurs. Les collections se modifient d'une année à l'autre, des variétés nouvelles apparaissent continuellement, auxquelles certaines, plus anciennes, doivent faire place.

Parmi les plus cultivées, nous citerons le Jean-Sébastien Bach hâtif, à très grandes fleurs rouges, la princesse des neiges, le plus populaire des blanc crème demi-hâtifs, le Picardie rose saumon ainsi que le Leuwenhorst : tous fleurissent d'avril à juin.

Le Washington rose champagne, l'Europe nouvelle, écarlate, le baiser du matin, blanc teinté de rose, le Maria Goretti, blanc à grandes fleurs, sont considérés comme mi-hâtifs et fleurissent en juillet-août.

La saison se termine en août-septembre par le spic and span, saumon vif, le sans souci, écarlate avec une petite raie jaune, et le cardinal Spellman, pourpre.

On commence également à cultiver les glaïeuls à petites fleurs, les « miniatures » et les butterfly, races précoces, hybrides aux coloris variés et au port gracieux. Certains fleurissent en pots de novembre à janvier, comme le très précoce glaïeul perroquet variété Hoker. Certaines variétés à floraison hivernale cultivées dans le nord de l'Europe sont intéressantes comme fleurs coupées : elles portent

Bavestrelli-Bevilacqua-Prato.

La perfection des formes des glaïeuls et la richesse de leurs coloris résultent d'hybridations complexes et nombreuses.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Encore un hybride particulièrement réussi : remarquez l'intensité du jaune et l'ampleur de chaque fleur.

quatre ou cinq fleurs sur une hampe fine mais ferme, tel le Tristis, *odorant, à fleurs blanc crème tacheté de café.*

Malgré toutes leurs qualités présentes, les glaïeuls ne sont sans doute pas arrivés à l'apogée de leur évolution. On arrive à obtenir des fleurs de plus en plus grandes, plus nombreuses dans l'épi, plus précoces et à bulbe « éléphant » donnant chacun plusieurs épis ; on améliore aussi leur rusticité. Des glaïeuls parfumés sont apparus aux U.S.A., mais c'est en Nouvelle-Zélande que les résultats les plus spectaculaires ont été obtenus. Déjà ornements admirables, les glaïeuls ajouteront par leur parfum une âme à leur beauté.

Une variété cultivée en Hollande : les hampes fines portent de nombreuses fleurs de taille moyenne.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

LA CULTURE DES GLAIEULS

Plantes peu exigeantes en matière de sol, elles préfèrent cependant les terres argilo-calcaires à exposition très éclairée et aérée mais à l'abri des vents violents. On choisira les bulbes de taille moyenne car les plus gros donnent des fleurs imparfaites, dégénérées, à épis souvent déformés et mal disposés.

Si l'on veut éche'onner les floraisons de juillet à octobre, on fera trois plantations successives : la première s'étale du 15 mars à la fin d'avril sous les climats de type parisien (à ne planter que lorsque le sol est suffisamment réchauffé, vers 12 °C), de janvier à juin dans les régions chaudes (Côte d'Azur et Riviera) et jusqu'en juillet pour les variétés tardives.

Le bulbe ou cormus est un rhizome dont la durée est limitée à une seule année. Au cours de son développement un nouveau cormus s'organise à la base de la tige feuillée et fleurit au-dessus de l'ancien qui s'épuise. Lorsqu'on arrache le glaïeul, on se trouve donc en présence d'un oignon nouveau enveloppé de quelques peaux pelliculaires roses, jaunes ou violacées, et l'on aura soin d'éplucher celui-ci pour s'assurer de son bon état sanitaire : ni parasites, ni zones nécrotiques. A la partie supérieure de l'oignon, on distingue une cicatrice ronde : c'est l'emplacement de la tige florale ; contre elle, un bourgeon, promesse de celle de l'année suivante. Un autre petit bourgeon existe, diamétralement opposé au précédent. Son développement futur est aléatoire ; il peut cependant produire une seconde hampe florale. On trouve souvent à la périphérie du nouvel oignon de minuscules caïeux : ce sont des bulbillons. Stratifiés dans du sable, puis semés de bonne heure au printemps, ils peuvent former des cormus qui arrivent à fleurir au bout de deux ou trois années de culture.

Une fois sélectionnés, les bulbes sont mis à demeure au printemps à 10 ou 15 cm de profondeur à lignes distantes de 40 à 50 cm. On doit les recouvrir suffisamment afin de leur assurer un bon ancrage et de faciliter ainsi la formation du bulbe de remplacement ; les arrosages seront fréquents ; on pourra y incorporer une fumure minérale ; l'azote sera donné en cours de culture. On voit sortir d'entre les feuilles la hampe florale dressée jusqu'à 2 m de hauteur. La récolte s'effectuera dès l'éclosion des fleurs de base, les supérieures s'ouvrant dans un vase. On évitera de cueillir les feuilles car ce sont elles qui élaborent les principes nutritifs nécessaires à la formation du nouveau bulbe, et on continuera les arrosages et les traitements antiparasitaires jusqu'à jaunissement complet de celles-ci. Il est préférable de ne pas replanter des bulbes au même emplacement avant trois ans.

Les oignons sont arrachés début novembre et séchés à l'air. Quand les tiges se détacheront sans effort, on rangera les bulbes en lieu sec pour les replanter au printemps. Le semis est réservé au spécialiste qui recherche de nouvelles variétés car il ne donne qu'un nombre infime de plantes de valeur.

Comme toutes les plantes cultivées, les glaïeuls ne sont pas exempts de maladies : la mosaïque (virus) attaque les pieds qui présentent alors des marbrures ou des stries jaunâtres sur les feuilles ; les feuilles sont réduites en taille, en nombre ou avortées. Si l'on ajoute trop d'engrais azoté, il y a risque de dépérissement des individus robustes et sains. En outre, un petit Insecte, le thrips, hiberne sous les enveloppes du bulbe et provoque leur anémie. Il peut y pondre, et on compte de cinq à sept générations d'Insectes par saison qui feront jaunir les feuilles et n'épargneront pas les fleurs. Pour combattre ce parasite, on fera des épandages et des pulvérisations à base de DDT ou d'éther phosphorique ; le meilleur moment pour effectuer ce travail sera la tombée de la nuit au moment où les Insectes sortent.

D'autres maladies assez fréquentes d'origine bactérienne provoquent la pourriture molle des bulbes et sont traitées avec des anticryptogamiques spécifiques.

Les glaïeuls permettent surtout de composer de magnifiques bouquets de très longue durée, dont les fleurs s'épanouissent successivement. Ils peuvent être associés à d'autres fleurs.

LES ŒILLETS ET LES GÉRANIUMS

Œillets et géraniums ornent souvent ensemble balcons et terrasses. Odorants, de coloris gais et variés, ils éclairent murs, escaliers, fenêtres.

LES ŒILLETS

Les œillets appartiennent tous au genre Dianthus *(famille des Caryophyllacées) et peuvent être annuels ou vivaces, à fleurs solitaires ou en groupes, et fleurissent une fois ou deux par an.*

Dianthus plumarius, *connu dans nos jardins d'Europe depuis 1542, est l'œillet mignardise, espèce d'origine purement orientale. Haut de 10 à 20 cm seulement et formant des touffes denses aux tiges rameuses, courtes et couchées, les œillets mignardises constituent parfaitement bordures de parterres ou entourent rocailles et massifs. Ils fleurissent avec générosité d'avril à juillet; le feuillage, compact, est vert glauque; les tiges s'étalent en larges touffes, et les fleurs grandes, odorantes, sont roses ou blanches, simples ou doubles. Elles affectionnent les expositions ensoleillées. Les formes horticoles de l'œillet mignardise sont fort nombreuses, car la plante s'hybride facilement : les variétés ne diffèrent guère que par des nuances et par leur résistance plus ou moins grande aux Champignons qui les attaquent.*

C'est une plante annuelle ou vivace, selon les climats et les méthodes de culture. On la reproduit facilement par semis ou par division des touffes les mieux développées.

Les œillets de Chine de l'espèce Dianthus chinensis, *connue en Orient dans les jardins depuis 1702, en Europe depuis 1713, s'emploient en pleine terre pour la décoration des massifs, des plates-bandes, corbeilles ensoleillées, et se contentent de sols peu fertiles. Ils fleurissent de mai à septembre. C'est une plante annuelle, à tige rameuse, de 20 à 30 cm de hauteur, aux fleurs nombreuses, solitaires, de tous coloris, allant du blanc au pourpre-noir en passant par le violet, sauf le jaune et le bleu. Les pétales frangés ont des bords plus clairs ou des taches foncées.*

Autre variété appréciée soit pour les plates-bandes, soit pour les bouquets, l'œillet des poètes (Dianthus barbatus) *est une plante vivace, ou bisannuelle; il présente des tiges rameuses de 30 à 40 cm de hauteur, à feuilles larges, lancéolées, à fleurs petites simples ou doubles, réunies en grand nombre formant des bouquets arrondis, parfaits, unicolores, panachés, veloutés. Il fleurit de mai à juillet et se reproduit par semis. Susceptible d'être atteint par de fortes gelées, l'œillet des poètes doit être ressemé régulièrement. Il en existe des variétés naines intéressantes pour l'emploi en pots et en bordures.*

Mais l'œillet par excellence est celui qui dérive de Dianthus caryophyllus, *ou œillet des fleuristes, vivace, riche en variétés et en races; cultivé pour le commerce des fleurs coupées, il pousse également en pot. Ce genre très étendu comprend un très grand nombre d'espèces botaniques et de variétés horticoles résultant d'hybridations successives entre différentes races et variétés. De toutes tailles, de toutes formes, de toutes gammes de couleurs, parfumés ou inodores, simples ou doubles, tigrés, tachetés, striés ou ornés de figures, l'emploi de ces œillets est très varié.*

On le cultive industriellement dans le midi de la France. Il est vivace, à souche ligneuse, ramifiée. Il se propage par boutures en pleine terre ou par marcottage en terreau léger, sableux, à l'ombre. On peut aussi faire des semis d'avril à mai en pépinière bien exposée. Les jeunes plants sont repiqués quand ils possèdent six à huit folioles à des

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

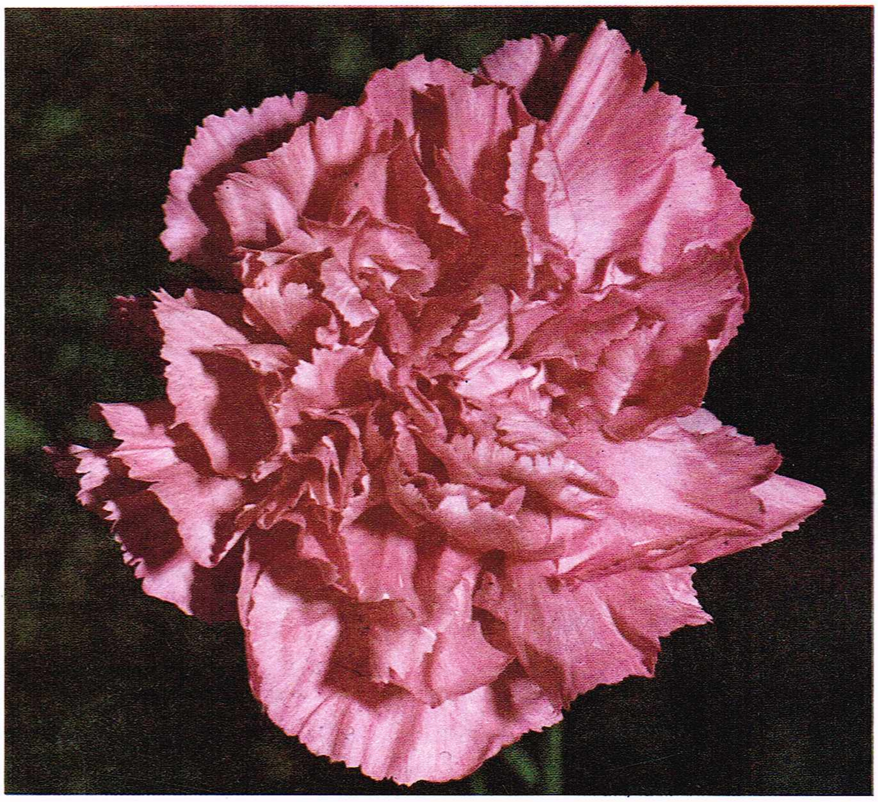

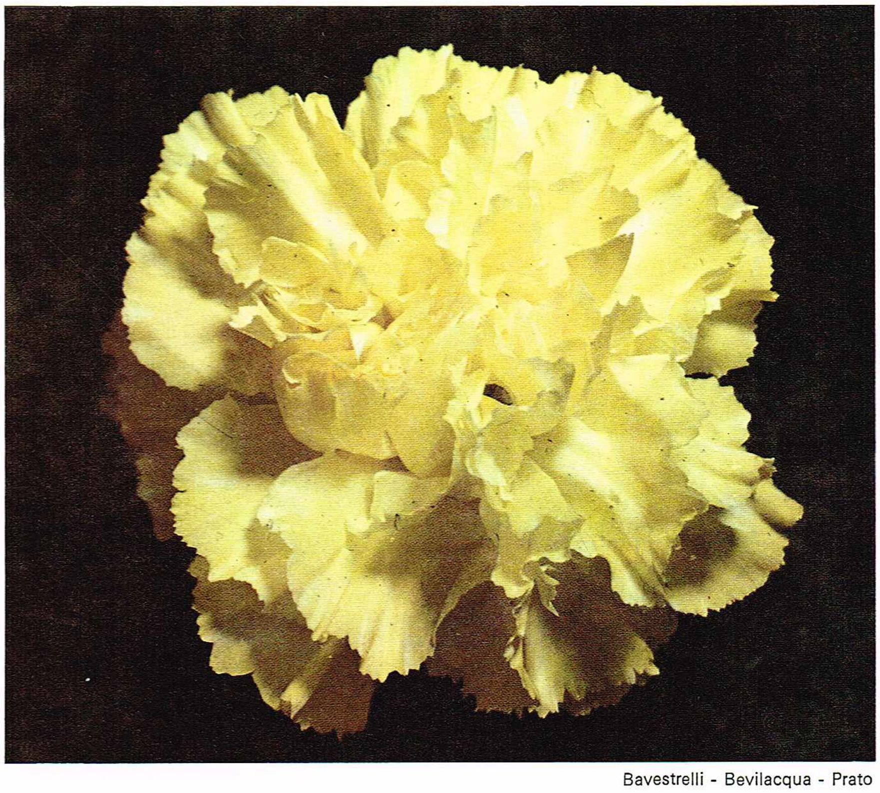

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Délicatesse du parfum, richesse des coloris, deux qualités appréciées chez les œillets.

Le géranium lierre se prête admirablement à la décoration des murets et des haies.

intervalles de 10 à 12 cm. Les races vivaces fleurissent l'année suivant celle du semis. Dans ce groupe, on trouve les non-remontants à floraison précoce et à floraison estivale, puis les remontants à floraison tardive, parmi lesquels l'œillet de Nice, champion de la fleur à couper.

Les races annuelles fleurissent l'année même du semis : en général remontantes, il existe des variétés doubles dont le port et la floribondité permettent de composer de magnifiques bouquets très tenaces.

Pour s'assurer d'une belle floraison avec des fleurs régulières, on taillera les rejetons basaux trop nombreux et on ôtera les boutons les moins vigoureux et les plantes en surnombre.

LES GÉRANIUMS

Ces plantes si populaires fleurissant tout l'été en rocaille ou dans des pots, sur les balcons ou dans des jardinières, sont pour les botanistes des pélargoniums (famille des Géraniacées). Le genre Geranium *comprend des plantes vivaces, rustiques, poussant à l'état sauvage en altitude, à l'ombre. Les pélargoniums sont des plantes herbacées, souvent de grande taille, retombantes, dressées ou même rampantes. Les feuilles, arrondies, polygonales ou découpées, encadrent des fleurs plus ou moins importantes, rarement solitaires, mais plutôt réunies en inflorescences globuleuses de toutes nuances, couvrant toute la gamme du rouge, du rose clair au rouge très vif ; on trouve parfois le blanc, rarement le jaune. On continue cependant à parler de géraniums, et les espèces les plus utilisées pour les parterres, les terrasses, les serres ou les appartements proviennent des hybrides entre* Pelargonium zonale *et* Pelargonium inquinans, *originaires d'Afrique australe. Le plus connu est le géranium lierre :* Pelargonium peltatum, *rampant ou retombant. Les feuilles coriaces et brillantes sont ciselées, tachetées comme celles du lierre ; les fleurs simples ou doubles conviennent parfaitement pour rompre l'uniformité d'une fenêtre ou garnir une jardinière. Il résiste bien à la chaleur, à la sécheresse ; il est très florifère. Les branches palissées sur des tuteurs se prêtent aux formes les plus fantaisistes et les plus diverses, cascades de fleurs sur des murs de la Côte d'Azur et de la Riviera.*

Autre hybride, Pelargonium grandiflorum *(ou à grandes fleurs), généralement connu sous son vrai nom, est moins rustique que le géranium lierre. C'est une belle plante avec des coloris remarquables et des pétales tachetés à la base, dont on cultive de nombreuses variétés pour les plates-bandes et la décoration du jardin.*

Cultivés depuis 1810, d'autres hybrides, Pelargonium hortorum *et* Pelargonium hybridum, *aux feuilles arrondies, peu lobées et crénelées, de couleur vert foncé, molles, épaisses, parfumées, présentent des zones rougeâtres caractéristiques. Les fleurs simples ou doubles sont en inflorescences globuleuses.* Pelargonium hybridum *sert à composer des corbeilles et, quand le climat le permet, à orner avec des plants juvéniles et courts des parterres, des massifs et des bordures.*

La culture des géraniums

Tous les Pelargonium *se multiplient par semis dont la réussite est liée à un éclairement aussi intense que possible, à une humidité constante, mais, dans la pratique, on préfère le bouturage. A la fin de l'été, les boutures sont prélevées sur les pieds mères spécialement plantés à cet effet en terrain maigre et peu arrosé afin d'obtenir des boutures bien lignifiées, plus résistantes à la pourriture. Les boutures s'enracinent facilement en un mois environ et ne demandent guère de soins. Préparées en pleine terre ou en serre froide dans du terreau léger, on les repique à la fin septembre dans un sol bien drainé en serre tempérée, éclairée et aérée. On arrosera modérément, et on ôtera les feuilles jaunies ou mortes. Vers la fin d'avril, on plantera ces boutures à demeure en arrosant fréquemment. Géranium à massifs ou géranium lierre ont tous les mêmes besoins : de l'air et du soleil. Ils craignent seulement l'ombre et les excès de calcaire : trois expositions sont possibles : est, ouest, sud.*

Les beaux géraniums méritent d'être conservés en fin de floraison : ce seront les pieds mères. Arrachés et taillés, on réduira du quart les branches choisies que l'on placera dans des pots bien drainés, et on arrosera modérément pendant l'hiver.

La durée de leur floraison, leur bon comportement aux situations ensoleillées, la facilité de leur culture, surtout, font des géraniums des éléments de décoration incomparables, appréciés de tous.

LES IRIS ET LES FREESIAS

Iris et freesias sont des Iridacées, famille riche en espèces ornementales à belles fleurs qui a pris une très grande importance dans la décoration des jardins.

LES IRIS

Ces fleurs de forme étrange sont des plantes susceptibles de pousser dans les conditions les plus diverses, dans l'eau, dans les murs et même sur les toits. La structure très personnelle de leurs fleurs (on les a souvent comparées aux orchidées), l'étonnante diversité de leurs coloris, la proverbiale facilité de leur culture et leur fidélité (ils peuvent rester à la même place pendant des années) les ont rendus indispensables dans toute propriété.

Originaires des régions extratropicales septentrionales, ce sont des plantes à bulbe ou à rhizome, à feuilles en forme de sabre et à belles fleurs de six pétales alternes : les trois externes sont recourbés à la partie supérieure et pourvus d'une bande de papilles jaunes en saillie ; les trois internes, plus petits, s'étendent vers le haut.

Les iris spontanés existent dans nos régions, comme l'iris faux acore (Iris pseudocorus) *jaune veiné de pourpre qui vit dans les marais et le long des fossés (mais il en existe des variétés horticoles) ou l'iris de Sibérie* (Iris sibirica) *et l'iris bâtard* (Iris spuria) *plus rare à fleurs violacées, l'iris d'Allemagne* (Iris germanica)*, des régions méditerranéennes jusqu'aux pentes les plus ensoleillées des Alpes.*

Les iris des jardins peuvent se diviser en trois groupes : dans le premier groupe, xiphium/xiphioïdes, on trouve l'iris d'Espagne cultivé depuis 1570. Il a des feuilles étroites, filiformes et des fleurs solitaires, odorantes. Souvent spontané en Corse, Sardaigne, Espagne, Afrique du Nord et dans les prairies proches de la mer, il a donné par sélection l'iris de Hollande précoce. Dans ce groupe, on trouve aussi l'iris des Pyrénées connu en floriculture depuis 1571 au bulbe ovoïdal et aux feuilles linéaires et enroulées. Les fleurs doubles se trouvent à l'extrémité de hampes de 40 à 50 cm.

*Le second groupe est celui d'*Iris germanica *et d'*Iris florentina *(iris d'Allemagne et de Florence) à fleurs plus grandes. Un travail considérable de sélection a permis d'obtenir de cette espèce une gamme de coloris très riche où se retrouvent toutes les couleurs teintant uniformément les fleurs ou se mélangeant en panachures et en nuances délicates. A la gamme des bleus et des violets qui étaient la caractéristique de l'espèce type, s'ajoutent maintenant des jaunes, des orangés, des roses et des rouges d'une richesse extraordinaire. Les variétés modernes se différencient par leur précocité et leur hauteur : ce sont les iris hybrides des jardiniers connus en culture depuis 1542. Ces iris modernes ont remplacé les variétés anciennes. Il y a maintenant des iris de plus de 1 m de haut. Certains portent de quinze à dix-huit boutons par tige ; d'autres fleurissent pendant trois semaines et même un mois. Tous ont conservé la proverbiale opiniâtreté des anciens iris de talus alliée à une grande rapidité de croissance et à une même facilité de multiplication.*

*Le troisième groupe est celui d'*Iris pumila*, ou iris humble, introduit en floriculture vers 1558 et constitué par des plantes naines. Plusieurs variétés sont également d'origine hybride. Leur taille n'excède pas 20 cm, et ce sont des plantes précoces qui fleurissent en avril-mai, violet foncé, bleu pâle, blanc plus ou moins teinté de jaune. Parfait pour les rocailles, dallages et vieux murs de pierre,* Iris pumila *offre ses splendides touffes de fleurs.*

*Sous le nom d'iris intermédiaire, on trouve un certain nombre de variétés résultant de croisements de l'iris des jardins et d'*Iris pumila*. Intermédiaires, ces iris le sont en tous points par la taille et l'époque de floraison.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

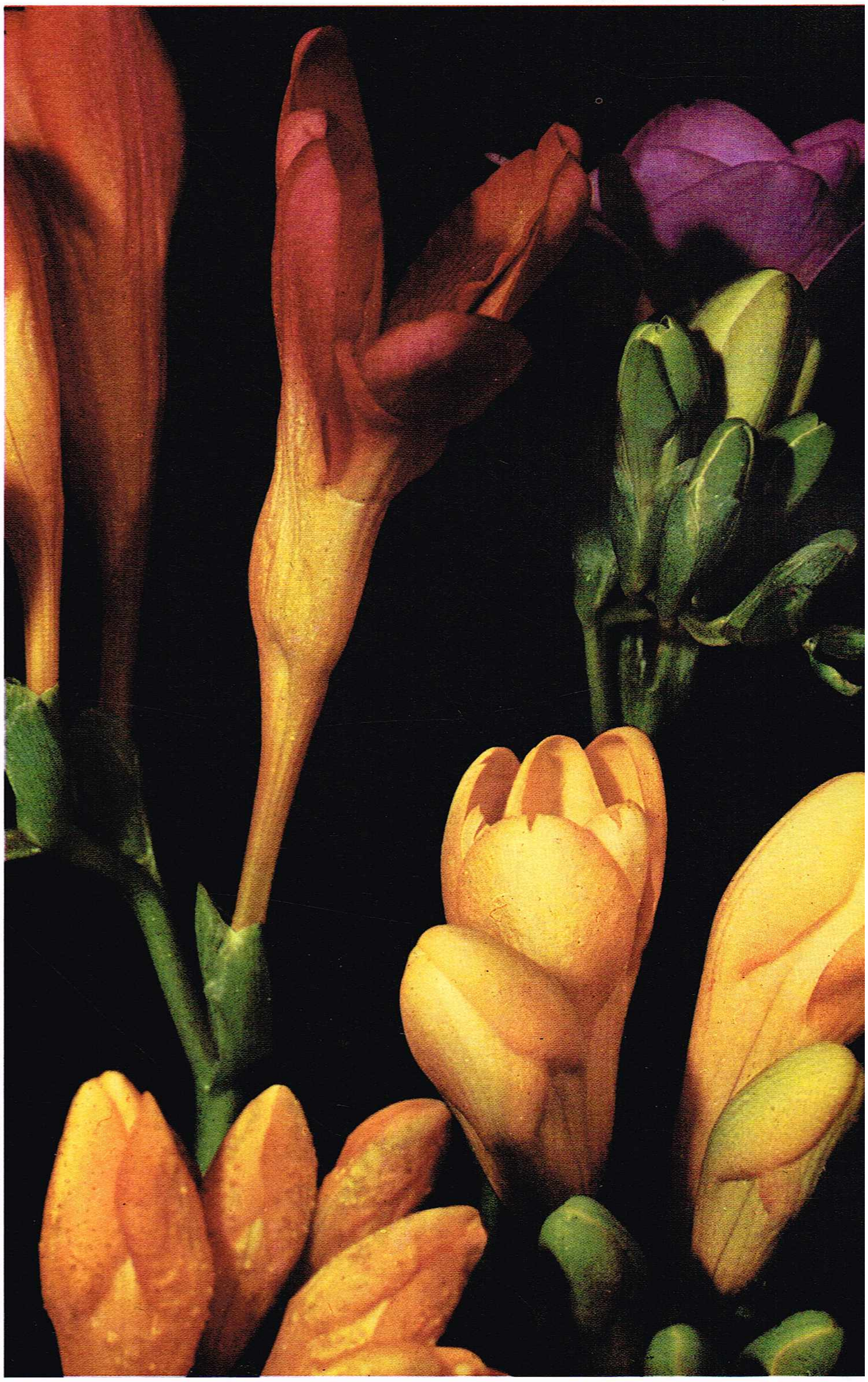

De très jolies taches florales sont obtenues grâce aux teintes délicates et dégradées des freesias.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Les iris d'Espagne, dérivés d'*Iris xiphium*, peuvent être soit jaunes, soit blancs, soit bicolores.

Pour garnir le bord des étangs où ils composent des décors d'une originale élégance, les iris de Kaempfer, ou iris japonais, originaires de ce pays, sont une espèce semi-aquatique. Ils diffèrent des précédents par une corolle largement étalée comme un énorme papillon blanc, pourpre ou bleu foncé souvent strié. Au Japon, cet iris est l'objet d'un véritable culte. Au début de l'été, les Japonais se rendent en pèlerinage au « jardin du seul iris », où tout est disposé pour mettre la fleur en valeur. Il existe localement une centaine de variétés cultivées depuis plus de mille ans.

La culture des iris

Ces plantes se multiplient par division des rhizomes effectuée de juillet à octobre, ce qui correspond à la période de repos. Les fragments de rhizomes doivent comporter au moins une pousse et être espacés d'une trentaine de centimètres. On peut grouper ces plants ; les rhizomes doivent rester à fleur de sol, leur partie supérieure recevant le soleil. Trop enterrés, ils pourrissent.

Au bout de trois ou quatre ans, les iris sont trop serrés. On arrache les touffes et on refait la plantation en utilisant les pousses qui se trouvent à l'extrémité du rhizome. Ces iris poussent à la rigueur à l'ombre mais ne fleurissent généreusement qu'au soleil, même en terre médiocre. Leurs fleurs ont la grâce et les dégradés de l'orchidée.

De nombreuses variétés d'iris présentent des teintes bicolores délicatement nuancées.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Iris xiphium* aux fleurs plus étroites que celles d'*Iris germanica.

On peut aussi multiplier ces iris par semis de graines récoltées en juillet et semées au mois de mars de l'année suivante. Les plants à deux ou trois feuilles sont repiqués en pépinière, la mise en place se fait l'année suivante, et ce n'est qu'à la troisième année de culture que l'on obtient une floraison importante. Certaines variétés se reproduisent facilement, d'autres donnent des plantes à fleurs différentes de celles du porte-graines, mais toujours intéressantes. On les utilise au bord d'un bassin, d'une pièce d'eau où ils se plaisent particulièrement. Ils rentrent aussi dans la composition d'une plate-bande fleurie ou de petits massifs à mi-ombre.

Il y a des jardins d'iris comme il y a des jardins de roses et de dahlias. Le parc de Bagatelle, dans le bois de Boulogne, possède la plus belle collection française d'iris, et il existe au Muséum d'histoire naturelle un jardin d'iris anciens.

Rivaux des orchidées, leurs fleurs généralement odorantes ont acquis dans les nouvelles variétés des coloris d'une diversité et d'une somptuosité sans égale. Ce sont des plantes d'une grande valeur décorative : le reproche concernant la brièveté de leur floraison n'est plus justifié aujourd'hui puisque leur période de beauté peut se prolonger d'avril à fin juin.

LES FREESIAS

Les freesias dérivent de Freesia refracta (Gladiolus refractus)*, originaire d'Afrique australe. C'est une plante vivace, haute de 25 à 40 cm, à feuilles linéaires, légères et fines, engainantes à la base, à hampe florale souple supportant une petite grappe de fleurs tubuleuses, odorantes, dressées du même côté, apparaissant de mars à mai en culture de pleine terre.*

Il y a peu d'espèces et de variétés. Les Freesia refracta *à fleurs blanches d'origine présentent des formes à fleurs jaunes, violettes ou pourprées.*

Introduit en France en 1879 et importé du cap de Bonne-Espérance, nous citerons Freesia armstrongii *qui, par croisement avec* Freesia refracta*, a donné une série d'hybrides, plantes plus hautes et plus vigoureuses.*

La culture des freesias

La culture se fait par multiplication des bulbes, après séparation en août-septembre. Triés, on les plante dans un mélange de terre et de terreau de feuilles ; on les place ensuite sous châssis très éclairés, aérés, et peu arrosés. Ils peuvent être forcés en serre. Les premiers, plantés à la fin d'août, fleurissent en décembre ; quand le climat le permet, on les cultive en pleine terre soit pour le jardin, soit pour le commerce des fleurs coupées. La propagation se fait aussi par semis très clairsemé, mais le repiquage est difficile.

Les freesias sont également d'excellentes plantes de serre ; en appartement, elles sont très appréciées car leur floraison dure longtemps.

ZINNIAS, CINÉRAIRES ET AUTRES COMPOSÉES

En botanique, les Composées forment le groupe qui rassemble le plus grand nombre d'espèces, et il est impossible de les dénombrer dans les fleurs cultivées de nos jardins. Des dahlias aux chrysanthèmes, des marguerites aux centaurées, ce sont des fleurs en général rustiques et décoratives, parmi lesquelles nous choisirons tout d'abord zinnias et cinéraires.

LES ZINNIAS

Les zinnias nous viennent du Mexique où ils sont représentés par Zinnia elegans *et* Zinnia aurea. *Introduits en France dès le XVIII*[e] *siècle, ils ont pris une place définitive dans nos jardins depuis une centaine d'années. Plantes à tiges rigides, dressées, élevées, se terminant par des capitules composés de nombreux pétales, aux ligules larges et charnues, les* Zinnia elegans *offrent tous les coloris excepté le bleu ; les* Zinnia aurea *se caractérisent par des capitules jaune-orangé avec un disque noirâtre.*

Les horticulteurs ont obtenu par hybridation une multitude de variétés et classent les zinnias selon leur taille.

Les grands zinnias dits géants, à fleurs pleines, d'origine américaine, surpassent de très loin les variétés anciennes : ils peuvent atteindre 70 à 90 cm de hauteur et forment de vastes massifs unicolores ou panachés. Citons le « géant de Californie » aux ligules tuyautées qui donnent à ces fleurs une légèreté bien attrayante.

Il existe des variétés naines ne dépassant pas 30 à 50 cm et portant de nombreuses fleurs doubles et bien formées à petits capitules globuleux. Ce sont les « Lilliput » et les « pompons » très florifères, parfaits pour les bordures.

La culture des zinnias

Les zinnias sont des plantes annuelles dont les semis s'effectuent en avril-mai en pépinière abritée ; on les met en place après repiquage. Ils sont semés « à chaud » (la température idéale de germination se situe à partir de 15°) dès mars, mis en châssis en avril ; la mise en place définitive se fait en pleine terre dès le mois de mai, après les gelées ; cette méthode permet une floraison plus rapide. De la fin de mai jusqu'au 15 juin, on peut directement les semer sur place pour former des touffes dans une plate-bande de plantes annuelles. Ils aiment toutes les terres à exposition ensoleillée.

Malgré leur port lourd et géométrique, leur manque de parfum, les zinnias, par leur robustesse, la facilité de leur culture, et la durée de leurs fleurs, sont des plantes annuelles idéales pour les jardins de week-end et les bouquets. Plantureux et riches en couleurs, ils se cueillent à peine ouverts : ce sont les fleurs d'été par excellence.

LES CINÉRAIRES

Au point de vue botanique, elles appartiennent à l'espèce Senecio cruentus *introduite en 1777 et originaire des îles Canaries. Plantes bisannuelles, de 40 à 60 cm de hauteur, à tiges dressées et ramifiées, à feuilles larges, dentées, plus ou moins cotonneuses. Les fleurs nombreuses, grandes, réunies en un large bouquet, couvrent entièrement la plante de février à juin selon l'époque du semis. Les coloris varient du blanc pur au pourpre velouté en passant par toute la gamme des rouges, des bleus, des violets.*

On distingue deux races principales qui se différencient par la précocité, la grandeur de la fleur et la hauteur de

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Les cinéraires offrent une gamme infinie de coloris variés.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Capitules doubles de soucis « ball's orange » d'un bel effet décoratif.

la plante : les cinéraires hybrides à grandes fleurs, variété naine, de 18 à 20 cm, hâtive, et les cinéraires hybrides multiflores plus tardives aux fleurs petites et nombreuses et aux coloris variés multiples.

D'autres cinéraires originaires des îles Canaries ont un disque jaune et des rayons lilas ; certaines, entièrement jaunes, proviennent du Mexique, d'autres, d'Amérique du Sud, ont de beaux capitules dorés.

Les cinéraires maritimes créent par leur feuillage clair et argenté de superbes contrastes de couleurs quand elles voisinent dans les bordures avec des plantes à feuillage foncé.

Les semis se font en juin-juillet en cassettes, en pépinière ou en pleine terre fraîche et ombragée ; les graines clairsemées sont peu recouvertes ; la germination demande de huit à dix jours. Les jeunes plants de deux feuilles sont repiqués sous châssis aéré, ensoleillé, dans un sol bien drainé. On empote en novembre-décembre dans un mélange de terreau, tourbe, sable, terre. La période de forçage demande de six à huit semaines à température élevée (10-12°) ; la propagation par bouture peut se faire aussi pour les espèces rares et les races à capitules doubles. Les types à floraison tardive peuvent constituer de magnifiques massifs de plein air dans des régions à climat suffisamment doux.

Les cinéraires sont très utilisées en pots, pour les décorations intérieures où elles se montrent assez durables si la température n'est pas trop élevée.

AUTRES COMPOSÉES

Septembre, octobre, novembre sont trois mois difficiles pour fleurir le jardin ; pourtant de belles composées vivaces peuvent être à la base de la palette du jardin d'arrière-saison. De famille robuste, elles s'accordent bien avec la lumière d'automne ; elles s'accommodent d'une terre ordinaire et n'exigent qu'un emplacement bien dégagé.

Une riche floraison et des coloris très chauds, parfois agressifs, caractérisent les Rudbeckia. *La plante type est* Rudbeckia speciosa *(rudbeckia élégant) : 50 cm de hauteur et une profusion de grandes fleurs jaune d'or à centres bien noirs. Les grands* Rudbeckia *(1 m, 1,50 m) aux tiges fermes permettent de faire de très beaux bouquets. Si les* Rudbeckia *à tonalité jaune paraissent un peu trop communs, on adoptera le rudbeckia pourpre* (Rudbeckia purpurea) *plus rare dans les jardins, dont une espèce cultivée, « the king », à capitules cramoisis, représente le maximum d'élégance. D'origine américaine, elle s'élance jusqu'à 2 m de hauteur et peut former de belles haies.*

Très faciles à cultiver, on les sème de mars à avril sous châssis, de mai à juin en pépinière, et on les transplante sur place en automne. On peut aussi les multiplier par division des touffes en automne ou au printemps.

Les soucis jaune doré aux fleurs lumineuses (Calendula officinalis), *originaires d'Europe méridionale, sont cultivés pour les fleurs à couper. Les variétés les plus appréciées, ball's gold ou ball's orange, à capitules doubles, éclairent parfaitement les bordures printanières.*

Annuels, ils sont semés en septembre-octobre en pépinière et transplantés en mars-avril. On peut aussi les semer sur place d'avril à juillet, et la floraison a lieu de juillet à octobre. Ils se contentent de tous les terrains et de toutes les expositions. Le repiquage donne des fleurs plus grosses et doubles.

Pour décorer des bordures, les tagetes, du genre Tagetes, *originaires du Mexique, sont particulièrement indiqués. Introduite dans nos jardins vers 1550, l'espèce la plus belle est* Tagetes erecta, *ou rose indienne : c'est une plante rustique, à port dressé et buissonnant, au feuillage découpé exhalant une odeur très particulière peu agréable. Ses tiges robustes portent de gros capitules globuleux doubles, jaune soufre comme chez yellow supreme ou orangé vif chez Guinea gold.*

La seconde espèce, Tagetes patula, *ou œillet d'Inde, est plus réduite, de 40 à 50 cm. Ses capitules simples ou doubles à pétales tubulés ont des coloris variés.*

Enfin une troisième espèce, Tagetes tenuifolia pumila, *haute de 30 cm, de port compact, à capitules réduits et nombreux, jaunes, se présente comme un œillet d'Inde miniature. Les* Tagetes *sont semés de février à avril, repiqués en pépinière, mis en place en mai-juin à des intervalles de 30 à 50 cm.*

De vraies campagnardes, telles sont les gaillardes. Très décoratives, originaires d'Amérique du Nord, elles ont toutes de grandes fleurs simples et naïves à capitules peu fournis, à centres jaune rougeâtre aux rayons jaunes, souvent avec des ligules rouge pourpré.

Les dimorphotèques sont plus élégantes et délicates ; elles sont originaires d'Afrique du Sud ; leurs fleurs en forme de marguerites apparaissent de juin à septembre avec des coloris très brillants (blanc, orangé ou pourpre), rappelant celles des Gerbera, *ou marguerites du Transvaal.*

Comme les gaillardes, ce sont des plantes annuelles ou vivaces qui, semées en août, transplantées à la fin d'avril, s'épanouiront dans tous les jardins de juin aux gelées et assureront une floraison continue.

Les Coreoptis *d'Amérique du Nord sont annuels ou vivaces, aux feuilles légères et à capitules jaune d'or très lumineux.*

Les cosmées en sont proches. Originaires du Mexique, Cosmos bipinnatus *est une plante annuelle à tige élevée de 1,20 m, rameuse, aux feuilles divisées, fines, aux fleurs groupées par trois ou quatre, rappelant celles des dahlias.*

Semées en avril, repiquées en pépinière, mises à demeure en mai-juin, les cosmées sont cultivées pour le commerce des fleurs à couper.

Toutes ces retardataires sont précieuses ; elles prolongent le spectacle floral et retardent la relâche annuelle du jardin.

Zinnia elegans **d'une belle tonalité de rouge enrichie de reflets d'or.**

G. Mazza

LES CHRYSANTHÈMES ET LES MARGUERITES

Le genre Chrysanthemum *comprend non seulement les chrysanthèmes proprement dits, mais encore les marguerites, telle la grande marguerite blanche des prés, dont le nom scientifique est* Chrysanthemum leucanthemum.

Les marguerites sont innombrables : leur forme caractéristique est celle des Composées, capitules avec disque central jaune ou diversement coloré formé par de petites fleurs tubuleuses, entouré d'une couronne de fleurs en languettes. Cette description s'applique aussi bien aux pâquerettes et aux asters qu'aux chrysanthèmes.

LES CHRYSANTHÈMES

Cette appellation très générale désigne les nombreuses variétés issues de croisements effectués entre des espèces de chrysanthèmes originaires d'Extrême-Orient, dont les fleurs embellissent les jardins à l'arrière-saison.

Tous les chrysanthèmes font partie de l'espèce Chrysanthemum hortorum.

Des hybridations multiples ont donné naissance aux chrysanthèmes à grosses fleurs qui font l'objet d'un commerce important à l'occasion de la Toussaint, mais aussi à des races très différentes d'aspect, à capitules plus ou moins gros, simples ou doubles. Dans les chrysanthèmes à grosses fleurs, nous trouvons des variétés de coloris divers aux capitules plus ou moins plats, globuleux, réguliers ou non, et, suivant la disposition de leurs pétales ou ligules, on distingue les fleurs incurvées (à ligules tournées vers l'intérieur) qui sont les plus appréciées, les fleurs échevelées (à ligules retournées vers l'extérieur), les fleurs rayonnantes (à ligules enroulées sur elles-mêmes). Tous ces chrysanthèmes peuvent avoir des fleurs doubles.

D'autres races, très différentes des chrysanthèmes à grosses fleurs, ont des capitules moyens ou petits. Le fameux chrysanthème exotique Spider, dit Tokyo, appartient à cette catégorie, et sa vogue assez récente en France est due aux qualités d'une variété peu exigeante. Originaire du Japon dans la région d'Osaka et de Kobé, cette race existait déjà il y a deux cents ans, mais, si les capitules des anciens types présentaient un aspect filiforme, ils étaient bien loin d'avoir la grâce et la légèreté des productions actuelles. Leurs fleurs très originales ont une forme rayonnante aux ligules fines et contournées, et présentent des coloris pastel (blanc, jaune, mauve ou rose).

Les chrysanthèmes « pompons » à petites fleurs, de Chine et du Japon, connus en Europe depuis 1689, le chrysanthème chinois cultivé depuis 1789, le chrysanthème japonais connu des jardiniers depuis 1862, le chrysanthème coréen, plus récent, tous appartiennent à cette même catégorie. Plus rustiques, leurs fleurs sont doubles, les plantes très florifères et buissonnantes.

De race tardive, à fleurs petites, simples, nombreuses, les chrysanthèmes cascades, découverte des Japonais, ont des tiges souples retombant avec élégance comme celles d'un saule pleureur. En automne, placée sur un mur, la cascade fait une retombée de centaines de fleurs. A sa beauté, elle ajoute un léger parfum de miel. Au palais impérial de Tokyo, on peut admirer des cascades de 2,50 m de longueur et de plus de 1 m de diamètre.

La culture des chrysanthèmes réclame des soins particuliers. Ils sont semés dans du terreau léger et tiède en février-mars ; on déplante les pousses à quatre ou cinq feuilles, et on les soumet à des rempotages successifs jusqu'à l'obtention de plantes robustes qui, mises à demeure, devront être taillées et pincées au printemps.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Chrysanthemum coronarium, **une plante aussi rustique que décorative.**

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Hybrides de chrysanthèmes du Japon à capitule radié.

Mais le point de départ le plus fréquent est constitué de boutures enracinées et livrées en mottes, placées sous châssis dans un endroit bien exposé ou en pleine terre, en terrain fertile ou ensoleillé à 60 cm de distance.

Quand on désire des capitules très grands (de 15 à 20 cm de diamètre), il convient de ne laisser qu'un seul bouton terminal à chaque pied. La sélection du bouton floral s'obtient par la méthode dite de pincement qui consiste à sectionner l'extrémité herbacée de la tige de la bouture au-dessus des cinq à huit premières feuilles bien développées comptées à partir de la base. La plante ne pouvant plus croître en hauteur émet alors des pousses latérales issues de bourgeons latents situés à l'aisselle des feuilles conservées. Cette opération permet d'obtenir sur chaque plant un nombre plus ou moins grand de branches destinées chacune à porter une fleur terminale, et elle détermine la taille des capitules qui deviendront d'autant plus gros qu'ils sont moins nombreux sur chaque pied.

Il est possible de greffer des chrysanthèmes sur des plants vigoureux de Chrysanthemum frutescens, *marguerites à port buissonnant ; on obtient ainsi de beaux spécimens très florifères et multicolores.*

La culture en pot donne les plantes les plus régulières, car elle évite tout arrêt de végétation. Dès que les racines commencent à tapisser le pourtour de la motte, on réempote et on assure un drainage parfait. Les chrysanthèmes sont sujets à des maladies dues à l'humidité automnale : on les traite au soufre et à la nicotine contre la rouille.

Nains ou élevés, les chrysanthèmes sont cultivés pour la production des fleurs coupées, mais aussi pour la décoration des jardins, pour orner corbeilles et bordures. Ils sont de toutes couleurs (cependant, la recherche du chrysanthème bleu est restée vaine) ; peu de plantes ont eu des utilisations aussi originales : au Japon, dont ils sont l'emblème, ils permettent des scènes fleuries extraordinaires : paysages en réduction, scènes mythologiques, combats de lutteurs, etc. Ils sont l'objet de recherches constantes et, en raison de leur épanouissement tardif, ce sont réellement les rois de l'automne.

Des marguerites comme le chrysanthème des jardins et Chrysanthemum coronarium, *à capitules jaunes doubles, proviennent de plantes spontanées répandues dans presque tout le bassin méditerranéen. Le chrysanthème tricolore dont les capitules ressemblent à des cocardes (disque brun, couronne de ligules jaunes, puis roses ou blanches) est une plante annuelle vivace, originaire du Maroc et cultivée chez nous depuis 1796.* Chrysanthemum frutescens, *très proche de la marguerite des prés, est vivace quand on le protège du froid ; haut de 1 m, il provient des îles Canaries et a été introduit chez nous peu avant le XVIII[e] siècle.*

Capitule d'*Aster alpinum*, variété horticole spécialement recommandée pour les jardins d'altitude.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

LES ASTERS

Les asters comprennent de nombreuses variétés horticoles, des plantes vivaces dont les unes, généralement de taille basse, aux tiges terminées par une fleur unique, s'épanouissent au printemps et en été, et dont les autres, de taille variée mais souvent élevée, fleurissent en bouquets à la fin de l'été et en automne.

Les fleurs semblables à de petites marguerites présentent pour la plupart un cœur jaune d'or.

Trois espèces, toutes trois buissonnantes, sont à retenir : la première, ou œil du Christ (Aster amellus) *a de grandes fleurs bleu violacé à rayons lilas ou roses et fleurit pratiquement sans interruption de juillet à octobre.*

Les deux autres espèces (aster des jardins) et surtout leurs hybrides sont très proches les uns des autres mais diffèrent par la taille de leurs capitules et leurs coloris.

Les asters, plantes rustiques et vivaces, poussent dans tous les terrains et à toutes les expositions. On les multiplie par éclats de touffes faits au printemps et à l'automne : on les changera de place tous les trois ans. Semés en février sur terreau tiède ou en pépinière d'avril à juillet, ils donnent des plantes à transplanter au printemps. Cette méthode est utilisée pour la recherche de variétés nouvelles.

Proches des asters, les érigérons à fleurs orangées, roses ou bleues, légèrement odorantes selon les espèces, apparaissent de mai à septembre. Ce sont des plantes vivaces originaires d'Amérique du Nord, parfaites pour les plates-bandes, les corbeilles ou les rocailles.

La pâquerette (Bellis perennis), *dans sa variété cultivée à capitules doubles, forme des bordures, des corbeilles, et des plates-bandes printanières.*

Semée en juillet-août en pépinière, on la repique avant de la mettre en place en automne ou au printemps. On peut aussi parfois la semer directement sur les lieux de sa floraison.

Les asters, par leur port léger, leur coloris vifs ou tendres et leur robustesse à toute épreuve, sont des fleurs précieuses pour la décoration des jardins et la production de fleurs coupées.

LES ANTHURIUMS, LES AMARYLLIS ET LES CLIVIAS

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

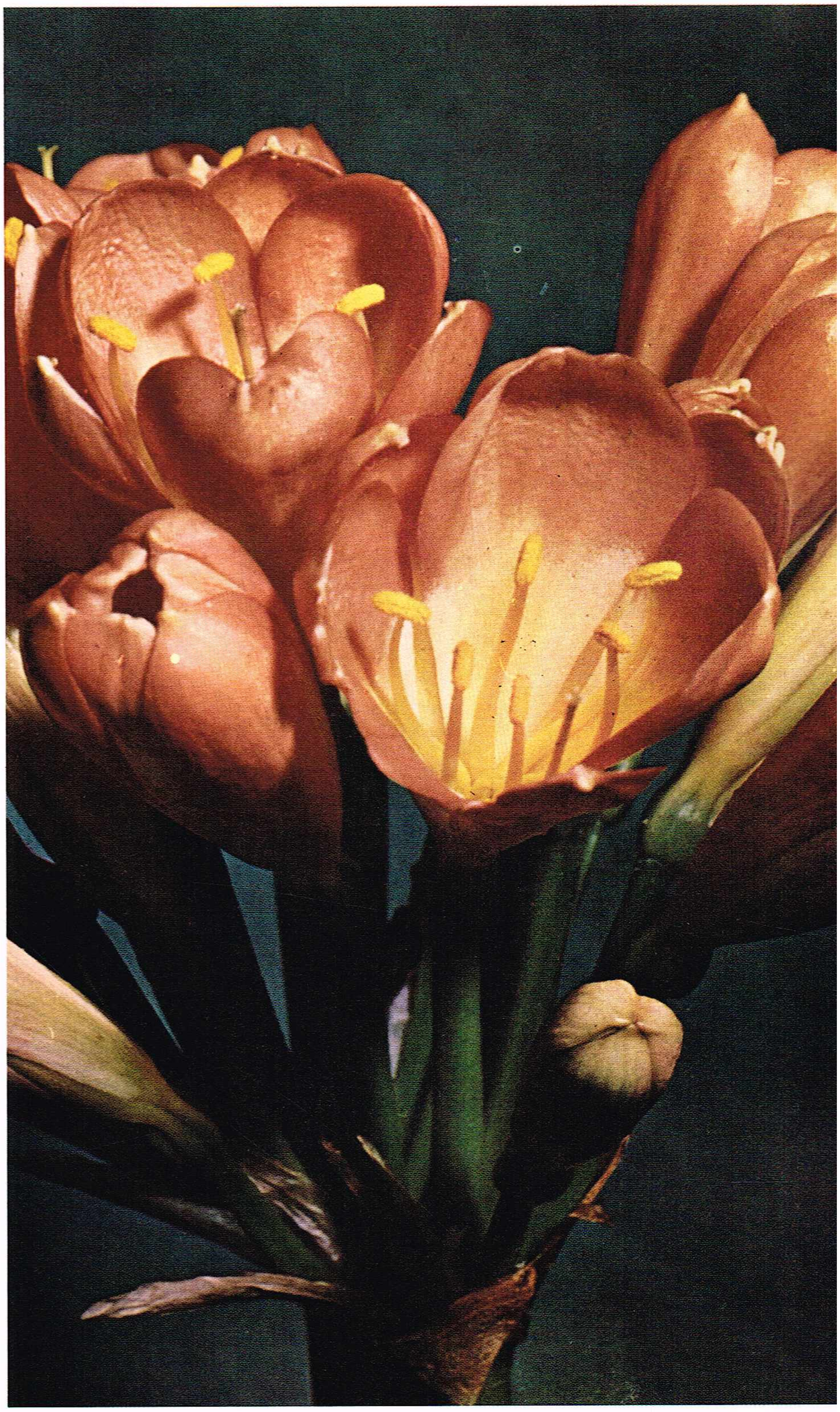

Oiseau des îles, langue de feu, flamand rose, papillon mexicain, tous ces surnoms enchanteurs désignent les anthuriums, plantes exotiques tropicales que l'on cultive en serre sous nos climats.

Les anthuriums appartiennent à la famille des Aracées. Les fleurs ou plutôt les inflorescences sont fort étonnantes, formées d'une spathe cordiforme d'aspect coriace et brillant, de couleur blanche, rose, rouge ou chair. En son centre apparaît le spadice, épi jaune parfois orangé. C'est une plante dont les feuilles, toutes basales, lancéolées ou sagittées, vert luisant, sont d'un bel effet décoratif.

Anthurium scherzerianum, *originaire de Costa Rica et du Guatemala, a été introduit en Europe en 1862.*

*C'est une plante touffue ne dépassant pas 50 cm de hauteur. La silhouette générale s'apparente à une souche d'où émergent des feuilles oblongues ou lancéolées. Les spathes roses, rouges ou blanches, piquetées ou mouchetées selon les variétés, engendrent un spadice souvent spiralé. Il existe plusieurs variétés d'*Anthurium scherzerianum *très faciles à hybrider.*

Anthurium andreanum *a été découvert en Colombie en 1894 par Edmond André auquel il doit son nom. C'est une plante dépassant 1 m de hauteur, à grandes feuilles en forme de cœur, à tiges florales nettement détachées du pied et se terminant par une spathe large d'une dizaine de centimètres. Celle-ci, colorée en rose, rouge ou blanc, est souvent gaufrée et brillante. C'est une curiosité végétale peu commune en raison de sa forme, de sa couleur et de la rigidité du spadice.*

La culture des anthuriums

Belles et délicates, ces plantes aux fleurs irréelles sont parfaitement à l'aise en serre chaude humide reproduisant le mieux possible le climat tropical de leur région d'origine. Il leur faut un sol spécial : parties égales de terreau de châtaignier, humus de forêt homogène, tourbe et racines de polypodes.

Semis, division, bouturage et marcottage des tiges constituent les quatre modes de multiplication possibles des anthuriums.

Le semis s'applique aux deux espèces et à condition d'assurer la pollinisation artificielle en l'absence d'Insectes pollinisateurs. Les anthuriums donnent des graines : celles-ci, récoltées sur les spadices, doivent être semées très rapidement en caisses fermées contenant un mélange à parts égales de sphaigne et de terre de bruyère. Quand les jeunes plants possèdent leurs deux premières feuilles (deux mois après le semis), on les transplante dans de petits pots que l'on remplacera par de plus grands au fur et à mesure de la croissance, qui se termine par la floraison au cours de la troisième année.

La division des touffes est réservée aux Anthurium scherzerianum *et se fait de préférence au printemps en conservant le maximum de terre et de racines.*

La multiplication des Anthurium andreanum, *qui présentent un petit tronc s'allongeant chaque année, se fait par marcottage et bouturage.*

La culture des anthuriums repose sur trois facteurs importants : une température de 20°, une lumière sans excès et une humidité constante.

Certaines espèces d'anthuriums originaires d'Amérique tropicale sont cultivées pour la beauté de leur feuillage. Alocasia, Caladium, Diefenbachia, *et d'autres encore aux feuilles polychromes, tachetées, piquetées ou veinées, appartiennent tous à la famille des Aracées.*

Le *Clivia*, originaire du Cap, est une plante d'appartement très appréciée.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Hippeastrum hybridum, une Amaryllidacée dont la chaude couleur rouge éclaire les feuillages d'hiver.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Amaryllis vittatum, très décoratif avec ses fleurs rouges singulièrement striées de blanc.

La beauté des anthuriums n'a d'égale que celle des orchidées. Ils sont appréciés pour la décoration des serres et la confection des bouquets évoquant la luxuriance et l'originalité de la végétation tropicale. Chaque fleur peut, sur pied, durer plus de deux mois ; dans un vase, trois semaines.

En serre ou en vase, l'anthurium, par son étrange beauté, évoque la luxuriance des tropiques.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

LES AMARYLLIDACÉES

Ce sont des plantes exotiques bulbeuses dont les fleurs rappellent un peu celles des Liliacées.

Les plus belles sont surtout les amaryllidés (genre Amaryllis).

Amaryllis belladonna, *originaire d'Afrique du Sud et introduit en Europe en 1712, est très apprécié. Il pousse en pleine terre dans les régions où l'hiver n'est pas trop rude. La majesté de sa hampe florale haute de 30 à 60 cm, la délicatesse des coloris de ses fleurs (cinq à douze fleurs roses odorantes groupées au sommet) en font assurément la plus belle des bulbeuses d'appartement. Le gros bulbe grisâtre aux tuniques séchées donne habituellement plusieurs hampes florifères.*

C'est une plante rustique, cultivée en pot à partir de jeunes bulbes forcés dans une terre riche (mélange de terreau de feuilles, de fumier et de sable). On arrose quand le bouton apparaît à la partie supérieure du bulbe, et on continuera après la floraison car les feuilles ont besoin d'eau et se chargent comme les racines d'alimenter le bulbe de la saison suivante. On cessera d'arroser en septembre ; le bulbe sera rempoté en décembre ; il lui faut de la lumière et une température douce.

Dès janvier, il est facile de cultiver les amaryllis sur carafe comme les jacinthes.

*D'autres espèces connues sous le nom générique d'*Hippeastrum *sont, semble-t-il, originaires du Pérou. Elles ont de belles fleurs rouges striées de blanc avec une gorge verdâtre. Les fleurs énormes de 12 à 15 cm, odorantes, peuvent être réunies par quatre ou six à l'extrémité d'une forte hampe comme chez* Amaryllis vittatum *(ou amaryllis de Rouen). Écarlates ou saumon avec des taches rouge sang, les* Hippeastrum hybridum *fleurissent tous depuis Noël jusqu'à la fin du mois d'avril.*

D'autres Amaryllidacées comme les Clivia (Clivia miniata), *originaires d'Afrique du Sud, ont des feuilles en lanières, larges de 2 à 4 cm, vert foncé, rayées, retombant à l'extérieur. Du centre des feuilles part une hampe florale droite et raide de 40 cm environ supportant de février à juin un bouquet de dix à vingt grandes fleurs en entonnoir rouge-orangé brillant.*

Les Clivia *sont rustiques et se multiplient par des rejetons naissant au pied de la plante mère. On les cultive dans de l'humus de forêt. Le semis est peu usité.*

Les Clivia *fleurissent de janvier à mars, et leurs fleurs durent trois à quatre semaines. Plantes à végétation continue, les* Clivia *peuvent être gardés plusieurs années et refleurissent chaque hiver si on les maintient dans une pièce fraîche, en pleine lumière au moment de la floraison qui dépend aussi de l'arrosage (réduit à partir de septembre, normal dès qu'apparaissent les boutons floraux).*

Les Clivia *sont des plantes d'appartement par excellence.*

LES FLEURS RUSTIQUES

Sous la dénomination de « fleurs rustiques », les botanistes désignent les plantes qui poussent spontanément, ne nécessitent pas de soins particuliers et s'adaptent aux différents climats et types de sols.

Dans nos régions, elles arrivent à vivre sans que personne les soigne, les arrose, les propage ou les défende contre les froids hivernaux.

Les plantes herbacées forment la partie la plus importante de ces fleurs rustiques, bien que certaines plantes ligneuses arbustives ou buissonnantes puissent être classées dans cette catégorie. On peut voir fréquemment, en se promenant dans la campagne, des fleurs de jardins redevenues sauvages et poussant le long des haies, dans les champs : liserons, rudbeckias, et bien d'autres espèces plus ou moins exotiques d'origine.

Les unes sont vivaces et survivent d'une année sur l'autre grâce à leur partie souterraine (rhizomes, bulbes, racines gorgées de réserves), les autres, biennales ou annuelles, constituent la majorité des espèces les plus rustiques.

Les plantes annuelles accomplissent leur cycle vital entre le printemps et l'hiver, et leurs graines assurent la conservation de l'espèce : de nombreuses plantes sylvestres comme la camomille ou la marguerite sont dans ce cas. Elles sont extrêmement variées tant par leur aspect que par leurs exigences culturales dépendant de leurs origines ; selon qu'elles proviennent d'un climat voisin du nôtre ou au contraire de régions plus chaudes, elles nécessitent plus ou moins de chaleur pendant la première phase de leur végétation.

C'est ainsi qu'on les divise en fleurs annuelles, semi-rustiques et rustiques.

LES PLANTES ANNUELLES

Les espèces annuelles semi-rustiques ont un cycle de végétation court. Pour obtenir une floraison précoce, elles peuvent être semées dès mars sous châssis, dès avril en plein air ou en pépinière bien exposée. La pépinière peut consister en un ensemble de petits pots ou de caissettes, en serre ou en pleine terre, ensemencés d'espèces les plus délicates en automne et rentrés en hiver. Certains semis se font au printemps après les dernières gelées. Il s'écoule en général trois mois entre la date du semis et celle du début de la floraison : cette dernière se prolonge plus ou moins en arrière-saison. Nous trouvons dans cette catégorie capucines, coréopsis, cosmos, gaillardes, giroflées, mufliers, œillets d'Inde, phlox, pois de senteur, tagetes et zinnias.

Les espèces annuelles rustiques dérivent généralement des plantes indigènes et sont parfaitement adaptées à nos climats. Il est possible de les semer dès mars en pleine terre, mais il n'y a pas de période générale de semis.

De la mi-août à la fin de septembre, on sème le souci, le lis, le coquelicot, le rudbeckia et bien d'autres.

De la mi-février à la fin de mars, les achillées, les amarantes, les célosies, les pavots ; en avril-mai, les campanules, les belles de jour, les belles de nuit, les centaurées, les lupins, les ipomées.

Suivant le cas, la floraison débute de huit à douze semaines après le semis, mais elle est souvent plus brève que celle des fleurs annuelles semi-rustiques. La durée de floraison de ces plantes est généralement plus longue sous les climats maritimes humides que dans les régions plus arides du Midi où les fleurs sont brûlées par le soleil.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

L'abondante floraison estivale des pétunias, cultivar « Satellite ».

Toutes ces fleurs rustiques présentent une gamme étendue de couleurs depuis le rouge de la sauge jusqu'au violet foncé des pétunias et à l'orangé du souci.

Les plantes rustiques bisannuelles sont appelées ainsi car, semées au printemps ou en été, elles fleurissent seulement dans le courant du printemps ou de l'été suivant après avoir passé l'hiver en pleine terre. Cette distinction résulte en général d'un artifice de culture car il s'agit soit d'espèces annuelles traitées pour obtenir une floraison plus précoce, soit d'espèces vivaces dont la végétation est interrompue après leur première floraison, les suivantes étant de moins bonne qualité (pensées, par exemple).

La rusticité varie cependant selon les espèces.

Certaines plantes annuelles ou biennales, bien qu'elles soient rustiques, nécessitent des soins spéciaux. C'est le cas des calcéolaires et des cinéraires, très exigeants pour les arrosages. On sème ces plantes de juin à août dans des caissettes bien ventilées sur terre de bruyère humide sans recouvrir les graines. On repique les jeunes plants lorsqu'ils possèdent deux ou trois feuilles, et ils sont hivernés jusqu'en mars sous châssis froid. Ils seront alors rentrés en serre ou en appartement bien éclairé mais pas trop chaud. On traitera ces plantes avec des produits soufrés contre les parasites cryptogamiques qui provoquent des pourritures en milieu humide, mais aussi à l'aide d'insecticides contre pucerons, mouches, thrips.

LES PLANTES VIVACES

Les plantes rustiques vivaces sont moins délicates, car elles résistent aux rigueurs de l'hiver grâce à leur partie souterraine. Cette perennité est un grand avantage puisque ces espèces sont plantées pour plusieurs années et ne réclament pas d'autre soin que leur défense contre les mauvaises herbes, leur division (en cas d'espèces trop envahissantes) et éventuellement une fertilisation annuelle.

Ces plantes sont très diverses tant par leur aspect que par leur période de floraison ; les jardins s'ornent ainsi de chrysanthèmes, d'asters, de delphiniums, etc. Toutes ces plantes à fleurs rustiques doivent être plantées ou semées dans des sols sains, pas trop humides, à sous-sol perméable et à exposition de préférence ensoleillée. Dans nos jardins, on en compte une centaine d'espèces et de variétés parmi les plus communes.

Avec leurs élégantes hampes florales, les lupins se prêtent admirablement à la décoration des corbeilles.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Des fleurs à la forme singulière, les calcéolaires.

Elles présentent des avantages certains : leur floraison est continue de mars à septembre et leurs couleurs très variées. Les pétunias offrent une gamme allant du blanc au rose, du carmin au pourpre foncé et jusqu'au violet vif, à l'exception du jaune d'or.

Les verveines, largement utilisées pour la décoration des jardins publics, ont des coloris intenses et variés pendant toute la belle saison. L'agérate est violette, les célosies jaunes ou pourprées, les capucines vont du rose au bleu, et les tagetes unicolores ou bicolores offrent une palette du jaune à l'orangé et jusqu'au pourpre brunâtre.

Ces fleurs appartiennent à de nombreuses familles botaniques : les Composées en forment la majeure partie, suivies des Renonculacées, des Crucifères, des Violacées, des Boraginées, etc.

Si l'on aime les jardins sauvages à qui l'on consacre peu de temps, les gros bouquets de fleurs plantées sans façon, on peut réaliser avec succès la culture des fleurs rustiques. Elles orneront avec bonheur parterres, bordures et massifs, tous de vives couleurs.

Tache de gazania, petite plante vivace de la famille des Composées, poussant au ras du sol.

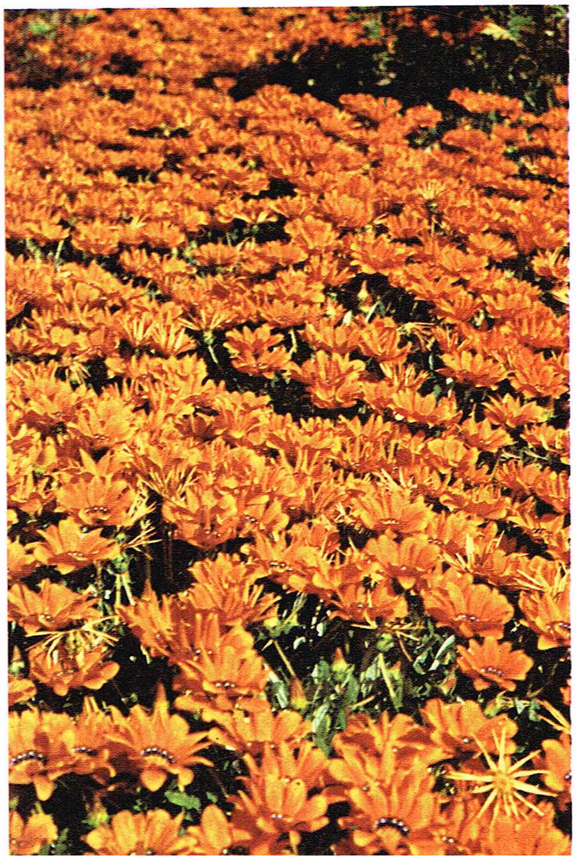

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

LES AZALÉES ET LES RHODODENDRONS

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Si le mot rhododendron éveille pour le jardinier l'image précise d'un bel arbuste bien distinct des azalées, il n'en est pas de même dans l'esprit des botanistes qui ne savent pas où finissent les rhododendrons et où commencent les azalées. Leur plus nette différence réside seulement dans le nombre des étamines (dix chez les premiers, cinq chez les secondes), caractère insuffisant pour singulariser ces deux sortes d'arbustes. Ces deux espèces sont donc réunies et ne forment plus qu'un seul et même genre : le genre Rhododendron, *famille des Éricacées.*

Botaniquement, le genre est très important : il comprend près de cinq cents espèces, largement dispersées dans les régions montagneuses de l'Amérique du Nord et de l'Europe, en Asie, surtout en Himalaya, en Chine et au Japon, et même en Nouvelle-Guinée. En France, on rencontre Rhododendron ferrugineum *dans les Pyrénées, le Jura et les Alpes où on l'appelle le « laurier-rose des Alpes »; avec leurs feuilles vertes et luisantes dessus, ferrugineuses en dessous, ils embellissent de leurs buissons et de leurs branches tordues les pentes alpines où habitent les mélèzes et les pins. On y trouve aussi* Rhododendron hirsutum, *à feuilles ciliées au bord et non ferrugineuses en dessous.*

Ces deux espèces indigènes, rustiques, ne se cultivent aisément que dans les jardins alpins sous des climats appropriés.

Azalées et rhododendrons sont des arbustes buissonnants au port très décoratif, au feuillage persistant, aux grandes fleurs blanches ou colorées, en inflorescences terminales.

L'ancêtre de ces plantes est Rhododendron indicum *ou* Azalea indica, *introduit de Chine en 1810 : en Belgique où il est cultivé intensivement, il représente une véritable industrie.*

Des variétés intéressantes sont apparues dès 1750 jusqu'en 1810, comme Rhododendron arboreum *arborescent et provenant de l'Himalaya ; ou d'autres, originaires du Népal et d'Asie Mineure.*

L'étude de toutes les espèces de rhododendrons n'est permise qu'aux spécialistes et il suffit aux jardiniers de connaître les rhododendrons hybrides, les seuls qui soient utilisés pour la décoration des parcs, et qui proviennent presque tous de croisements faits entre quatre espèces : Rhododendron ponticum, R. caucasicum, R. catawbiense *et* R. griffithianum.

L'espèce Rhododendron hybridum, *qui comprend la majeure partie de nos belles azalées, est très artificielle et possède des fleurs allant du blanc pur au rose, au rouge écarlate, du lilas pâle au pourpre : on en obtient maintenant des fleurs à la corolle campanulée, au limbe plus ouvert, en inflorescences en grappes. Ces arbustes à feuillage persistant, plantés dans un sol et sous un climat qui leur convient, prennent d'importantes proportions, comme les rhododendrons d'Isola Madre, sur le lac Majeur, qui atteignent 10 m de hauteur. En France, le parc de Châteauneuf-sur-Loire est réputé pour son sous-bois de rhododendrons.*

Le Rhododendron ponticum *ou rose alpine de la mer Noire est cultivé chez nous depuis 1763. Ses feuilles coriaces rappellent celles du laurier-cerise et ses fleurs sont typiquement lilas foncé ; il a donné naissance à de nombreuses variétés aux couleurs et aux formes décoratives.*

Le Rhododendron maximum *ou rhododendron élevé d'origine nord-américaine, cultivé en Europe depuis 1738, est une espèce robuste poussant facilement. De grande*

Arbustes très décoratifs, les rhododendrons appartiennent à la même famille que les azalées.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

De nombreuses variétés de rhododendrons hybrides présentent des fleurs exceptionnellement riches.

taille à l'état spontané (9 à 12 m), le bois de ses tiges, dur et lourd, sert à faire des manches d'outils. Ses fleurs sont toujours grandes et campanulées.

A côté des rhododendrons hybrides à floraison riche et opulente, il existe d'autres espèces naines ou de taille moyenne présentant des caractères décoratifs différents et très attrayants. A quelques exceptions près, leur feuillage est persistant : ils possèdent des rameaux plus ramifiés, des feuilles et des fleurs plus petites marquant une ressemblance avec les azalées classiques.

Les rhododendrons demi-nains peuvent atteindre 1 m à 1,50 m, mais, pour qu'ils parviennent à cette hauteur, leur croissance nécessite une douzaine d'années. C'est le cas de Rhododendron praecox, *demi-persistant, aux fleurs lilas rose qui s'épanouissent au début de mars.*

Certains rhododendrons lilliputiens dont la taille n'excède pas 50 cm sont par excellence des arbustes de rocaille.

Les azalées sont peu différentes des rhododendrons ; de taille plus faible, elles ont des variétés à fleurs jaunes ou dorées comme Rhododendron kosterianum, *hybride originaire de Chine, et* Rhododendron flavum, *originaire de Galicie. Odorantes, certaines ont des feuilles caduques, d'autres persistantes en hiver comme l'ensemble des azalées japonaises. L'azalée asiatique, à feuilles de romarin, possède des fleurs blanches ou violettes.*

LA CULTURE DES RHODODENDRONS

Rhododendrons et azalées ont des exigences de culture peu nombreuses mais impérieuses. Ils ont besoin d'un sol acide, non calcaire et frais, avec de l'humus de châtaignier et du sable. Ce sont des plantes de terre de bruyère. Il leur faut aussi de l'air humide pas trop chaud car, comme toutes les plantes d'ombre ou de demi-ombre, ces arbrisseaux aiment l'humidité. Ils fleurissent mieux cependant dans une ombre légère ou en plein soleil, mais ils redoutent avant tout la sécheresse de l'air et du sol. Le climat méditerranéen leur convient peu, la grande chaleur provoquant la chute des feuilles.

Trop d'arrosages sont cependant nuisibles aux boutons qui se forment mal, mûrissent mal ou avortent.

Rhododendrons et azalées se reproduisent si l'on enterre les courts rejetons émis au moment de la floraison.

Les jeunes bourgeons doivent être plantés en pot dans un terreau léger et frais, et ces boutures doivent rester en place un peu plus de deux semaines. Celles-ci, avec leurs premières racines, seront progressivement dégagées pour être prêtes au printemps à la mise en pleine terre.

Certains rhododendrons, comme Rhododendron ponticum, *sont issus de semis, d'autres se multiplient par greffage.*

Les rhododendrons se plantent en toute saison sauf pendant la floraison ; cependant l'époque la plus favorable est la fin de septembre. Ils ne se taillent que dans deux cas : lorsqu'on veut les maintenir dans une forme donnée ou lorsqu'on désire favoriser le départ de rameaux plus vigoureux. Il faut enlever les fleurs fanées après éclosion.

L'azalée en pot est par excellence le cadeau de début d'année. Les floriculteurs français importent, de Belgique ou de Hollande, les jeunes plants déjà prêts pour le forçage qui se fait de janvier à avril. Dans les jardins, ces magnifiques plantes, par la splendeur de leur floraison, méritent d'être souvent employées pour décorer les massifs et border les allées. Au printemps, leurs fleurs, aux délicatesses d'orchidées, durent facilement un mois.

La gamme des couleurs permet de composer des massifs éclatants.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Les hybridations ont donné naissance à des fleurs bicolores délicatement tachetées.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

LES ROSACÉES ORNEMENTALES

Parmi toutes les familles de plantes, les Conifères, les Composées, les Papilionacées et les Rosacées sont celles qui ont été le plus utilisées du point de vue ornemental. Mais, alors que les Conifères sont tous ligneux et que les Composées sont à peu près uniquement des herbes sous nos climats, les Papilionacées et les Rosacées ornementales comprennent aussi bien des herbacées que des arbustes buissonnants et même des arbres proprement dits.

Nous nous limiterons ici à de brèves notions sur les Rosacées, car elles sont plus nombreuses que les Papilionacées, mais plus gracieuses aussi, avec leur floraison dense et délicatement nuancée.

Parmi celles-ci, les Prunus *printaniers désignent à la fois pruniers et cerisiers à fleurs.*

Prunus serrulata *ou cerisier du Japon a des feuilles dentées et d'abondantes fleurs roses doubles aux pétales étroits. C'est un arbrisseau de 5 m de hauteur originaire de Chine, du Japon ou de Corée et introduit en Europe il y a longtemps. Les plus beaux cerisiers poussent à l'état sauvage au pays du soleil levant. Depuis des générations, les Japonais en ornent leurs temples, leurs villes et leurs jardins. D'abord emblème des samouraïs, la fleur du cerisier est devenue rapidement une des fleurs nationales du Japon : aussi les empereurs décrètent-ils la fête nationale le jour du plein épanouissement des cerisiers.*

Prunus triloba *se rapproche plutôt de l'amandier ou du pêcher; il est appelé aussi prunier de Chine, d'où il est originaire. Ses feuilles trilobées, dentées, ses fleurs roses, doubles, aux corolles arrondies, ou blanches sont très recherchées. D'autres variétés de pruniers et de cerisiers servent également à décorer les jardins : chaque année, ces arbres annoncent le vrai printemps; ils ont leur place partout : l'utilisation la plus classique est d'en border une allée et de planter un sujet pleureur à proximité d'une pièce d'eau.*

Les pommiers d'ornement s'épanouissent après les cerisiers du Japon. Ce sont des Pomoïdés à fleurs blanches et simples sous leur forme naturelle. Malus floribunda *est un arbre de 6 à 10 m de haut à cime étalée et ramure ployée. Les fleurs carminées en boutons, puis rose pâle, sont suivies de petites baies rouge et jaune. Par leur prodigieuse floraison printanière, par leur brillante fructification qui persiste souvent au-delà de la chute des feuilles, et pour certains par leur feuillage coloré, ces pommiers sont parmi les arbres les plus décoratifs dont on puisse garnir un parc. Leur taille moyenne permet de les planter même dans les plus petits jardins.*

Mais de tous les arbres à floraison printanière, le plus connu reste le cognassier du Japon (ou Chaenomeles japonica*). Hauts de 1,50 à 2 m, ses rameaux épineux raides et étalés, aux feuilles ovales, luisantes et finement dentées, portent des fleurs nombreuses en ombrelles pendantes, carminées à l'extérieur et blanches à l'intérieur; elles précèdent l'apparition des feuilles. Connu dans nos jardins depuis 1815 et originaire du Japon, il a donné de nombreux cultivars dont certains à fleurs doubles.*

Tous ces arbres ornementaux sont très rustiques et se reproduisent par marcottage ou par greffage. Les Prunus *sont greffés sur le prunier Saint-Julien qui sert de sujet en arboriculture fruitière parce qu'il est de vigueur modérée et d'enracinement abondant.*

On peut les bouturer (les boutures repiquées à la fin de mars mettent trois à quatre semaines à s'enraciner). Toutes ces espèces peuvent être taillées après floraison.

Tout le monde connaît l'aubépine, ses abondantes

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Le *Prunus serrulata,* ou cerisier du Japon, est considéré comme le plus bel arbuste à fleurs.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Détail d'un rameau en fleur de *Prunus triloba.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Gros plan sur des fleurs doubles de *Prunus serrulata.*

petites fleurs blanches à odeur de miel, et ses innombrables baies écarlates qui égaient les haies à l'automne. Décorative par son beau feuillage, l'aubépine épineuse de nos campagnes a donné des variétés ornementales à fleurs simples ou doubles.

Les buissons ardents ou Pyracantha, *botaniquement très voisins de l'aubépine, en diffèrent par leur feuillage persistant et par leurs exigences culturales : ils prospèrent dans des sols moins calcaires. Leurs fruits en forme de pois rouges brillants persistent tout l'hiver.*

Ils forment avec les Cotoneaster *ou cotonniers les espèces de base de toute plantation d'arbustes. Ceux-ci comportent de très nombreuses espèces d'arbustes extrêmement divers par leur taille, leur port, leur aspect et qui s'adaptent en conséquence à des usages très variés. Leur seul point commun est de porter en automne des baies brillamment colorées de rouge et d'orangé persistant plus ou moins longtemps en hiver.*

Proches des aubépines, les spirées se couvrent de fleurs blanches dès le mois de mai.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Le plus populaire est Cotoneaster horizontalis, *originaire de Chine, au port très caractéristique, rampant, aux branches principales horizontales avec de fins rameaux qui s'appuient à terre. Leurs petites feuilles coriaces et caduques prennent avant de tomber une belle couleur jaune, puis rouge.*

D'autres Cotoneaster *(dont le nom botanique est passé dans le langage courant) ont un port dressé et un feuillage persistant en hiver : c'est le cas du cotoneaster à feuilles de saule aux grandes feuilles lancéolées, introduit en Europe au début du XXe siècle : c'est un arbrisseau puissant, à la floraison insignifiante mais aux fruits globuleux brillants et hivernaux. Cette variété agrémente les jardins de rocaille qu'elle recouvre de ses longues branches étalées, et peut garnir également des murets ou des haies.*

D'autres Cotoneaster *de moyenne ou de petite taille perdent en partie leur feuillage en hiver, comme* Cotoneaster dielsiana, *à fruits écarlates, ou* Cotoneaster franchcti, *originaire du Thibet : il donne en mai-juin de petites fleurs roses auxquelles succèdent des fruits ovoïdes orange. Très répandues dans les jardins, ces deux espèces s'intègrent aux massifs d'arbustes mais peuvent aussi constituer des haies taillées.*

Tous ces Cotoneaster *comptent parmi les plus jolis arbrisseaux à fruits qu'ils produisent à profusion. Par la variété de leur forme, de leur taille et de leur vigueur, ils conviennent à des emplois multiples.*

Proches parents des aubépines avec lesquelles on les confond souvent, les spirées sont des arbustes buissonnants soit nains, soit plus élevés, à fleurs roses et blanches.

La plus répandue des spirées de printemps est la spirée de Van Houtte de 1,50 m qui se couvre au début de mai d'innombrables bouquets de fleurs blanches espacées les unes des autres sur les rameaux. La spirée japonica porte des fleurs roses et a donné de nombreux hybrides de floraison estivale. Une autre spirée d'été assez populaire est la spirée de Douglas qui forme des touffes de 1,50 m aux rameaux raides et dressés terminés en juillet-août par des épis serrés de petites fleurs roses.

Tous ces arbustes poussent bien dans un sol sec, sablonneux et peu caillouteux. Ils supportent bien l'ombre, mais fleurissent plus abondamment s'ils sont exposés au soleil. On les reproduit par semis, mais mieux encore par marcotte, par bouture ou par division de touffes. Ils possèdent la propriété de drageonner, c'est-à-dire de développer rapidement leurs racines, et peuvent ainsi fixer des talus. On les taille chaque année après floraison pour obtenir le maximum d'effet.

Il existe bien d'autres Rosacées ornementales qui, herbacées comme les potentilles ou les fraisiers, sont cultivées pour former massifs ou bordures. Mais, dans leur majorité, les Rosacées sont arbustives et, par leur facilité d'adaptation et leur floraison hâtive, elles rendent grand service au créateur d'un jardin.

LES ARBUSTES A FLEURS

Les arbustes à fleurs occupent une place importante dans l'aménagement d'un jardin car ils en constituent la structure.

Parmi les plus remarquables de ces arbustes, nous pouvons choisir les glycines, plantes grimpantes sarmenteuses d'une vigueur exceptionnelle, odorantes et aux fleurs en grappe. Elles appartiennent à la famille des Papilionacées caractérisées par des fleurs irrégulières lavande clair à large étendard et au feuillage vert doré à l'époque de la floraison. La plus cultivée est la glycine de Chine (Wistaria sinensis) *introduite dans nos pays depuis 1825 : elle a supplanté la glycine d'Amérique connue en France depuis 1724, mais moins vigoureuse.*

La glycine de Chine est capable de couvrir de grandes surfaces de mur ou de garnir des grilles ou des façades en de longues guirlandes ; ses rameaux croissent annuellement de plusieurs mètres, s'entrelacent et s'enroulent autour des supports qui s'offrent à eux. Elle est douée d'une grande longévité, de l'ordre d'un siècle. Les fleurs en grappe s'épanouissent presque toutes en même temps et font un effet de masse des plus heureux.

La glycine du Japon est voisine de la précédente, mais ses fleurs s'épanouissent successivement et sont dépourvues de parfum. Ces deux espèces offrent des coloris roses ou blancs.

La culture des glycines est facile. Ces plantes se contentent de tous les sols (elles préfèrent cependant des sols frais et légers) et fleurissent bien en situation ensoleillée. On les reproduit difficilement par semis; elles sont surtout propagées par bouturage ou marcottage. En mars ou en juillet, on couche les rameaux d'un an dans le sol ; l'enracinement est rapide, mais les plants doivent être cultivés plusieurs années en pots pour former des sujets convenables propres aux plantations. La taille des glycines est indispensable, sinon elles pousseraient de façon désordonnée au détriment de la floraison. On peut aussi les forcer en serre.

A côté des glycines grimpantes, il existe un certain nombre d'arbustes rampants à port de lianes, tel le jasmin de Virginie (Bignonia radicans) *: ce nom a le mérite de rappeler le souvenir de l'abbé Jean-Paul Bignon, bibliothécaire de Louis XIV, qui le fit connaître.*

C'est une liane rugueuse pouvant atteindre 15 à 20 m de longueur, originaire d'Amérique du Nord et très répandue dans nos régions depuis 1640. Ses fleurs sont groupées par deux à cinq à l'aisselle de feuilles persistantes ; l'extérieur est rouge-orangé, l'intérieur jaune à corolles tubuleuses en forme de trompettes. Cette bignone résiste bien aux hivers du Sud-Ouest et préfère les situations abritées et les expositions ensoleillées. Elle ne redoute pas la sécheresse.

Les bignones se reproduisent par tronçons de racines par bouture ou par greffage pour les différentes variétés.

Pour tapisser un mur ou garnir des treillages, le chèvrefeuille est une plante frugale et solide. Cet arbuste aux rameaux volubiles pouvant atteindre 4 à 5 m se caractérise par ses feuilles caduques, ovales, et des fleurs très odorantes, tubuleuses, jaunes à l'intérieur, rouges à l'extérieur, qui sont remplacées par de petites baies rouges translucides et décoratives en fin d'été. Cette plante, qui existe à l'état sauvage, se propage facilement par bouturage et marcottage à l'aide de ses rameaux adventifs et radicants.

Les clématites, plantes rampantes peu lignifiées, s'imposent par leurs grandes fleurs et comprennent de nombreuses espèces que l'on peut diviser en clématites à grandes fleurs et à petites fleurs, différentes par leur végétation et la qualité de leur floraison.

Issues d'espèces exotiques originaires d'Extrême-Orient et du bassin méditerranéen, les premières atteignent dans certaines variétés 15 à 18 cm de diamètre et leurs coloris riches en bleu et en violet s'étendent du blanc au rouge carmin ; elles fleurissent de mai à octobre.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

L'*Hibiscus syriacus* présente une corolle très large avec des tâches pourpres à l'onglet de ses pétales.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

La glycine, plante grimpante et sarmenteuse, aux fleurs en grappe bleu-violet clair, est cultivée en Europe pour sa floraison abondante et parfumée.

Le lilas *(Syringa vulgaris)* est un arbuste superbe à panicules de petites fleurs odorantes, blanches ou mauves, qui fleurit au printemps.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Elles se prêtent à de nombreuses utilisations : arcades de fleurs sur pergolas et arceaux, décoration de murs, de grilles, etc., car elles se fixent naturellement aux supports.

A petites fleurs, elles sont plus vigoureuses et couvrent des surfaces parfois étendues de leur belle floraison printanière. Elles aiment les sols siliceux, frais, bien drainés.

Par leur éclat, l'abondance et la durée de leur floraison, les clématites sont les plus belles lianes d'ornement.

Très répandues sur la Côte d'Azur et la Riviera, les bougainvillées couvrent les murs d'épaisses tentures mauves, mêlées parfois aux géraniums-lierres. Leurs fleurs (en fait les bractées florales) larges, ovales, lancéolées de couleur lilas, tranchent sur un feuillage vert vif. Ils sont les compléments du jasmin blanc commun, arbuste grimpant à rameaux verts et lisses et aux fleurs odorantes qui embellit les murs ensoleillés de juin à septembre.

Presque tous les jardins comportent du lilas. En effet, on aime retrouver dès le printemps leurs grappes à fleurs parfumées qui annoncent de façon définitive le retour des beaux jours. Le lilas commun à odorantes panicules de petites fleurs en croix mauves ou blanches est si répandu qu'on pourrait le croire indigène : il se propage spontanément par ses drageons et ses graines. Originaire des Balkans, il pousse à l'état sauvage dans les montagnes de Bulgarie.

On se sert parfois du lilas pour constituer des haies. La durée de la floraison n'excédant pas quinze jours, on a multiplié les hybrides et les espèces voisines afin d'obtenir des races doubles et refleurissantes. Ce sont de superbes arbustes souvent cultivés en touffes très précieux dans les petits jardins. Les fleuristes vendent souvent à contre-saison des plantes forcées.

Les forsythias ou mimosas de Paris se couvrent dès février-mars d'une multitude de fleurs jaunes avant même que leurs rameaux aient des feuilles. Ce sont pratiquement les premiers arbustes à fleurir sous le climat parisien. On peut les faire épanouir dans une pièce chauffée en mettant les rameaux aux boutons gonflés dans de l'eau.

Bien taillés, les troènes trouvent un emploi idéal dans la création des haies. Leur feuillage est pratiquement persistant et, comme le lilas et le forsythia, ils appartiennent à la famille des Oléacées.

Bien d'autres arbustes à fleurs ornent nos jardins : des Rosacées (cotoneasters, prunus, spirées, pivoines), des Saxifragacées (groseilliers à fleurs), dont l'hortensia, qui est le plus connu et contribue à la beauté des jardins de la côte atlantique. Il est d'introduction relativement récente ; il a été importé de Chine en 1896.

C'est une plante calcifuge qui aime un sol sain, perméable et frais, riche en humus. Il préfère l'air humide et la lumière atténuée, se plaisant dans les climats maritimes. Cette masse colorée terminant chaque branche n'est en réalité qu'un rassemblement de fleurs stériles, décoratives, mais impropres à la fécondation. Les variétés d'hortensias sont donc multipliées par bouturage de terminaisons herbacées — en serre — de février à juin qui donneront l'année suivante, après pincement, des plantes fortes et multiples ou uniques selon la date du bouturage. Les hortensias sont roses ou blancs. La couleur bleue est obtenue à partir de variétés roses lorsque le sol contient des sels d'aluminium ou lorsqu'on les arrose avec une petite quantité d'eau additionnée de sulfate de fer.

La durée exceptionnelle de la floraison des hortensias en fait un décor idéal pour les appartements ou les massifs rustiques.

Les hibiscus, tous originaires de l'est de l'Asie, sont deux espèces cultivées : l'une, l'hibiscus proprement dit ou althéa, arbuste dressé au port pyramidal, aux fleurs passant du jaune doré au blanc et au rose lilas, est une espèce rustique de sol calcaire aimant les expositions ensoleillées où il s'épanouit en été et en automne ; la seconde ou rose de Chine a des fleurs rouge vif et forme des haies taillées dans les pays méditerranéens. En Polynésie, ils fleurissent toute l'année et sont d'une infinie variété. Sous nos climats, c'est une plante de serre facile à cultiver dans un mélange de terre de bruyère et de terreau de feuilles qui accueillera les boutures de rameaux demi-lignifiés.

LES PLANTES GRASSES

Extraordinaires exemples d'adaptation du monde végétal aux rigueurs des régions de type semi-désertique, les Cactées, nommées plus communément plantes grasses, ces « Végétaux d'une autre planète » ainsi qu'on les appelle parfois, ont acquis, afin de pouvoir survivre, des formes étonnantes et caractéristiques dues à la disparition des feuilles pour réduire la perte d'eau.

Leur introduction en Europe débute au XVI^e^ siècle, mais leur culture ne se généralisa qu'un peu plus tard. Attachante à plus d'un titre, cette famille qui renferme 2 700 espèces environ et dont la présence sur terre est relativement récente, compte parmi les plus riches. Outre leur rôle décoratif, leurs ressources sont multiples : dans certains pays déshérités, elles jouent un grand rôle dans l'alimentation des populations, elles procurent du fourrage, des engrais, du bois de construction et de chauffage, des fibres laineuses et sont même utilisées en médecine. De plus, les Cactées agissent comme « colonisateurs » des régions arides : grâce à la frugalité de leurs besoins, elles préparent le terrain à des espèces plus exigeantes.

Elles sont d'origine américaine (de part et d'autre des tropiques) et leur aire de répartition commence au Canada et se prolonge jusqu'à la Patagonie. Certaines espèces offrent une grande résistance à la chaleur (plus de 60°) ou au froid (— 50°).

Ces plantes grasses appartiennent à des familles variées, et seuls leurs exigences et leur mode de vie (résister à la sécheresse) les font rassembler sous ce terme général quelquefois remplacé par celui de plantes succulentes qui rappelle l'eau mise en réserve dans leurs organes vitaux.

Elles présentent parfois des formes très bizarres, et le paysage, le climat, la nature du sol, la latitude influent beaucoup sur la transformation de certains organes végétaux : leur épiderme épaissi est souvent couvert d'épines, de poils, de cire; des individus de familles et d'ordres différents présentent des formes convergentes.

Les Cactacées sont un groupe très important (plus de 2 000 espèces) dont la moitié est représentée dans les collections européennes.

Elles ont toutes les formes possibles depuis les puissantes colonnes simples ou ramifiées de plus de 10 m, cierges, figures indissociables des westerns et des déserts américains, jusqu'aux boules de toutes tailles des Echinocactus. *En buissons de rameaux, aplatis ou ovales, nous trouvons les* Opuntia *largement cultivés avec le figuier de Barbarie aux feuilles cylindriques tombant rapidement; leurs épines à harpons s'attachent aux doigts fort désagréablement.*

Les Echinocactus en forme de globes et les Mamillaria *cylindriques ou sphériques, à sève laiteuse et aux vertus hallucinogènes, sont de petite taille.*

Plantes à tiges plates et à bords crénelés, très florifères, les Epiphyllum *vivent dans la nature en épiphytes à la manière des orchidées. Leurs fleurs de multiples couleurs s'ouvrent la nuit.*

Toutes ces Cactées possèdent des organes particuliers appelés aréoles : ce sont des sortes de dépressions de la tige, souvent placées à l'extrémité d'une protubérance, remplies de laine courte, blanchâtre ou grisâtre, et d'où sortent les épines, les branches et les fleurs. Celles-ci, qui peuvent être rouges, violacées, roses, jaunes ou vertes mais jamais bleues, généralement très belles, sont directement attachées à la plante.

Il existe, en dehors des Cactées, des familles de plantes grasses, telles les Euphorbiacées, les Crassulacées, les Agavacées et bien d'autres.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Le genre *Opuntia*, communément appelé figuier de Barbarie, appartient à la famille des Cactacées.

▶ Les **Cereus** sont des plantes à suc, vivaces, à l'aspect élancé, souvent en forme de gigantesques candélabres.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

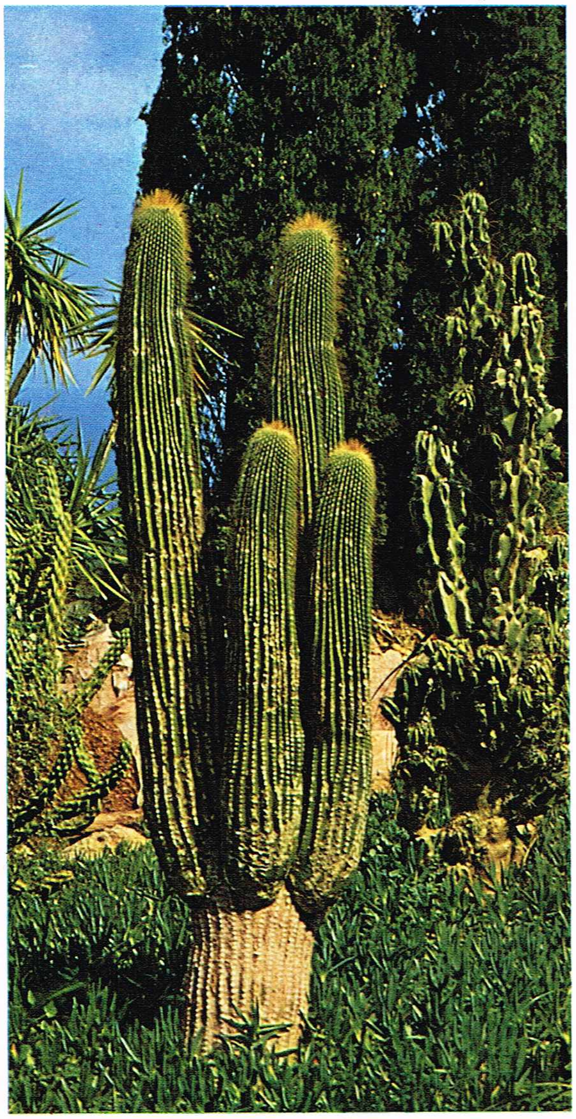

Les Euphorbiacées ont un bel aspect cactiforme, mais, si elles revêtent presque autant de formes diverses que les Cactées, elles s'en distinguent par leur sève laiteuse qui s'écoule à la moindre piqûre. Ce latex est souvent toxique et caustique pour les muqueuses et les yeux. De plus, il est impossible d'arracher les épines des euphorbes sans déchirer l'épiderme avoisinant. Ces plantes curieuses d'origine africaine ont des tiges quadrangulaires et sont surtout représentées par Euphorbia resinifera *qui forme des touffes importantes connues pour la gomme-résine que l'on tire de son latex coagulé, et* Euphorbia splendens, *plante ornementale à vastes bractées florales rouges.*

Les fleurs des euphorbes, à l'opposé de celles des Cactées, ont des pédoncules floraux, sont insignifiantes mais présentent une attraction certaine vis-à-vis des Insectes. Ces pédoncules desséchés deviennent ornementaux en se tordant, se ramifiant, après la floraison.

De nombreux représentants de la famille des Crassulacées se trouvent à l'état spontané dans la flore française. tels les sedums et la joubarbe. Ils se défendent de la sécheresse par leurs feuilles très charnues réunies en rosettes et réparties le long de la tige. Leurs fleurs en étoiles, jaunes, blanches ou roses forment des groupes plus ou moins denses. Les Kalanchoe *et* Echeveria *ont des fleurs en clochettes rouges, roses, mélangées de jaune.*

Les ficoïdes sont des plantes d'aspect variable de la famille des Aïzoacées aux fleurs à nombreux pétales étroits et longs, de toutes teintes. Elles affleurent entre les pierres avec lesquelles elles se confondent par mimétisme, se révélant seulement par leurs fleurs.

Enfin, il ne faut pas oublier les Agavacées dont l'agave méditerranéenne, qui fleurit une fois, est le représentant le plus caractéristique, et le Sanseveria, *aux feuilles rubanées et coriaces, vert olive, zonées de blanc, qui ornent les appartements. Ajoutons-y les aloès très adaptés à la culture en serre.*

Toutes ces variétés font de remarquables jardins exotiques en plein air, sous les climats qui le permettent (comme à Monaco), ou bien en serre, en recréant leurs conditions d'origine.

LA CULTURE DES PLANTES GRASSES

Pour obtenir des résultats durables, quelques règles essentielles sont à respecter : les plantes grasses ont besoin d'eau, bien que leur croissance dans des lieux naturellement secs les rende peu exigeantes. Dans les appartements très chauffés, on se contentera de les arroser en évitant l'humidité stagnante, grande ennemie de toutes les plantes grasses car elle provoque leur pourriture. Un sol poreux, mêlé à de la terre de jardin et à du terreau de feuilles mélangé à du sable, combat cet inconvénient.

Leur place préférée sera près d'une fenêtre dans un emplacement aussi dégagé que possible, bien ensoleillé (le milieu d'une double fenêtre est idéal).

Quant à la fumure, celle-ci se fera surtout à base de phosphates plus que de nitrates. Au bout d'un ou deux ans, la terre contenue dans le pot est privée de tous ses principes nutritifs : on rempotera la plante au début du printemps de préférence, on la placera dans un endroit assez chaud pour faciliter la reprise, on arrosera, pas avant une semaine, afin de donner aux racines endommagées par l'opération le temps de se cicatriser, et d'éviter tout pourrissement.

Quoiqu'elles soient très résistantes, les plantes grasses sont sujettes à certaines maladies : la plus courante est la pourriture. Viennent ensuite les parasites : les cochenilles à enlever avec un bâtonnet pointu et les araignées rouges que l'on combat avec des composés phosphorés.

Les plantes grasses peuvent se cultiver et fleurir en appartement. On peut les multiplier par semis, bouturage et greffe.

Le semis est effectué début mars dans le compost suivant : terreau de jardin, terreau de feuilles, sable de rivière. Les graines assez serrées, peu recouvertes et placées dans un endroit clair et chaud, germent au bout d'une semaine à quinze jours. On les repique, et, après trois ans, elles pourront être placées séparément en petits pots.

Le bouturage, plus simple et moins lent, se fait sans difficulté dans un compost sableux : les boutures, détachées, sèchent jusqu'à cicatrisation et seront enfoncées dans un sol humide.

Quant à la greffe, bien qu'elle soit facile à réaliser, elle reste un procédé de professionnel.

Par leur aptitude à supporter des conditions climatiques extrêmement diverses, la plupart des plantes grasses font d'excellentes plantes d'appartement. A leur rusticité, elles joignent l'attrait de leurs formes curieuses, variées, et une floraison éphémère mais remarquable.

▼ A gauche, un **Pilocactus;** ses longues épines le préservent efficacement des Animaux qui se nourrissent de Végétaux. A droite, un **Echinocactus,** dont la carcasse ressemble à celle d'un oursin.

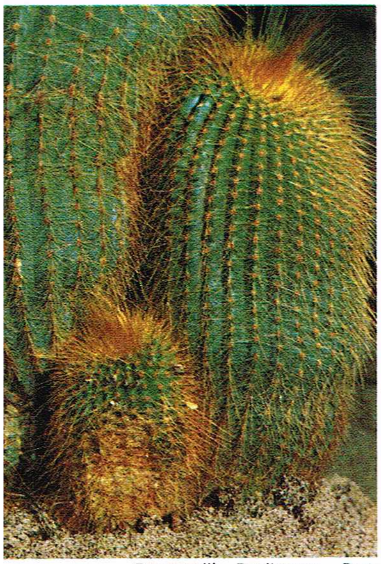

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

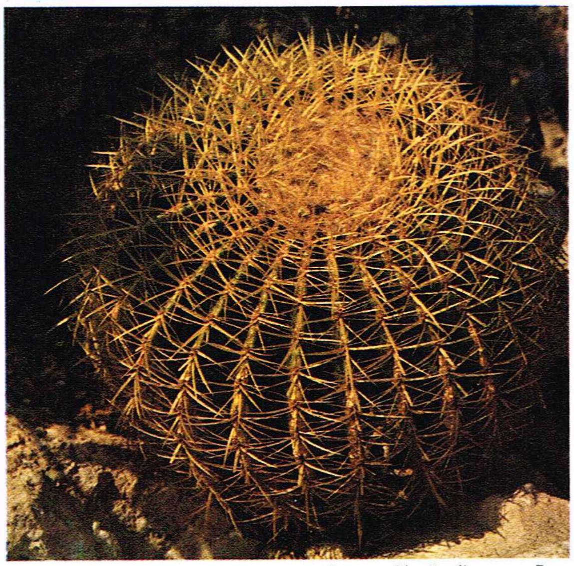

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

LA ZOOLOGIE

La zoologie est l'étude des animaux, et ceux-ci offrent une extraordinaire abondance et une diversification extrême.
Nous nous sommes volontairement limités à quelques exemples représentatifs, car prospecter complètement un aussi vaste domaine nécessiterait d'avoir recours à diverses coordonnées indispensables à une connaissance approfondie : morphologie, anatomie, physiologie, écologie, étude du comportement, etc.
Dans les pages qui suivent, vous trouverez une sélection parmi les animaux familiers ou ceux appartenant à la faune de nos régions, en passant par quelques espèces présentant certaines particularités ou curiosités, ou offrant un intérêt économique.

LE CORAIL

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Parmi les étranges habitants des mers, le corail occupe une place privilégiée en raison de sa beauté et de son mystère. L'éclat de ses couleurs embellit les paysages marins. Il intrigue aussi bien le voyageur que le savant par sa ressemblance avec les organismes végétaux.

Linné lui-même, fondateur de la classification moderne, avait commencé par l'admettre dans le règne végétal, le rangeant parmi les Cryptogames. Plus tard, après une étude approfondie, le savant lui découvrit une composante animale et, en le dénommant Zoophyte, lui donna une position intermédiaire entre le règne animal et le règne végétal. Différents auteurs, von Siebold, Leuckart, entre autres, reprirent après Linné le terme de Zoophyte dans la même acception. Aujourd'hui, la nature animale du corail ne fait plus de doute : c'est un Cnidaire, et plus précisément un Anthozoaire.

Les caractères des Anthozoaires sont originaux et il faut être familiarisé avec la zoologie pour les reconnaître. Les deux plus évidents sont, d'une part, leur symétrie typiquement radiobilatérale qui les fait ressembler à d'étranges fleurs, d'autre part, leur immobilité : certains individus adultes sont comme « soudés » aux fonds marins, ils ne se déplacent jamais; c'est pourquoi on a longtemps cru qu'ils étaient des plantes pourvues de racines.

Les petits polypes qui produisent le corail vivent en colonies; on dénombre plusieurs espèces : Corallium rubrum *(le corail rouge, le plus connu et le plus apprécié),* Heliopora coerulea *(le corail bleu) et* Parantipathes larix *(le corail noir).*

Ces espèces ont traditionnellement un usage ornemental. Par ailleurs, il faut également noter que l'on désigne sous le nom de « coraux » les Anthozoaires madréporaires dont nous ne parlerons pas ici et qui appartiennent en majorité aux genres Acropora, Meandrina, *et* Fungia. *Ces espèces donnent lieu à d'importantes formations corallines, fréquentes dans l'océan Indien et l'océan Pacifique (récifs de la Grande Barrière australienne, îles madréporiques de la Polynésie, atolls coralliens, etc.).*

LE CORAIL ROUGE

Le corail rouge, bien qu'il soit fragile, se travaille aisément; les bijoutiers l'utilisent pour confectionner des colliers, des broches, des boucles d'oreilles, des statuettes et de petits objets précieux. Tout le monde connaît le corail rouge ainsi travaillé, mais ceux qui ont eu la chance de pouvoir observer une colonie de coraux dans son milieu naturel sont rares. Le spectacle est merveilleux : les petits arbrisseaux rose ou rouge vif sont parsemés de minuscules polypes d'un blanc pur qui les font ressembler à d'étranges branches de pêchers en fleur.

La reproduction du corail, particulièrement intéressante, peut être asexuée ou sexuée.

Corallium rubrum *est une espèce dont les colonies, hermaphrodites, vivent dans les eaux limpides, fraîches, fréquemment renouvelées de la Méditerranée.*

Quand une partie de la colonie meurt, la matière organique dont elle était constituée se dissout, tandis que les squelettes subsistent. De nouveaux polypes prennent la place des anciens avant de mourir à leur tour. Le résidu calcaire augmente ainsi, se développant à la fois en longueur et en épaisseur. Pour éviter une trop grande densité d'individus qui priverait la colonie de lumière et provoquerait une trop forte accumulation de déchets, les coraux se ramifient dans différentes directions,

Reconstitution d'une formation arborescente de coraux telle qu'on la découvre dans les eaux limpides et agitées où elle vit.

donnant ainsi naissance à une formation arborescente. Les coraux sont en effet très sensibles à la lumière : lorsqu'ils croissent dans des anfractuosités du fond, ils tendent à se développer vers les zones plus lumineuses, et on a constaté que les colonies bien éclairées sont toujours luxuriantes. Outre la lumière, les coraux ont besoin d'eaux limpides et agitées, à température régulière oscillant aux environs de 15°. Les lieux réunissant ces conditions sont peu nombreux. En Méditerranée, ils se situent entre 60 et 200 m, le long des côtes de Sicile, de Sardaigne et dans l'archipel grec.

▶ Branche de corail sculptée, représentant Fhu-hsi, le dieu de la longévité, appuyé à l'arbre de la vie (art chinois, époque Ch'ien-lung, 1736-1795; Milan, coll. privée).

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

L'INDUSTRIE DU CORAIL

Autrefois l'industrie du corail était florissante dans le midi de la France. Au XVI[e] siècle, des Corses, établis à Marseille, avaient obtenu du dey d'Alger le droit exclusif de pêcher le corail sur 200 km de côtes à l'est de Bône. Cette concession dura jusqu'au XVIII[e] siècle. Aujourd'hui, on travaille encore le corail en France, malgré la forte concurrence de l'artisanat italien qui règne sur un marché fragile, car il est menacé par l'apparition des résines synthétiques permettant des imitations parfaites et peu coûteuses.

On pêche le corail à l'aide de filets attachés à une croix de bois. Les filets, dès qu'ils ont touché le fond, s'accrochent dans les rameaux de corail qu'ils arrachent. Lorsqu'ils semblent assez lourds, les pêcheurs les retirent de l'eau, trient et nettoient le corail ainsi récolté. Une grande partie de la pêche est rejetée à la mer, soit parce que le corail a perdu, en mourant, sa couleur caractéristique, soit parce qu'il présente des imperfections dues à des Éponges sécrétant des acides corrosifs. Cette méthode de pêche primitive est peu rentable si l'on ne connaît pas exactement la position des bancs de corail. Elle présente en outre le grave défaut d'appauvrir considérablement les bancs par sa brutalité : le filet détruit tout ce qui se trouve sur son passage, en particulier les petites colonies en formation, causant des pertes irréparables, étant donné la lenteur de croissance du corail. Les spécialistes estiment qu'une limitation de la récolte devient indispensable pour assurer la survie du corail et éviter sa disparition totale.

Le façonnement du corail est exécuté presque entièrement à la main. Le produit de la pêche est trié par taille et par calibre différents. Les aspérités sont retirées, puis le corail est percé afin d'être meulé ou poli. Une partie est vendue après le premier traitement pour faire des colliers plus ou moins coûteux. Les branches plus importantes sont sculptées au burin pour devenir des statuettes. Les ciseleurs italiens excellent à ce délicat travail d'artiste et les bijoux et objets qu'ils réalisent sont recherchés dans le monde entier.

▼ Vue d'avion d'un atoll de la Polynésie française : la zone émergée est recouverte de riches palmiers.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

LES ÉTOILES DE MER

Découvrir une étoile de mer sur une plage est toujours une joie pour l'ami de la nature qui passe ses vacances au bord de la mer. Pour le zoologiste, l'étoile de mer est une astérie : ce nom vient d'ailleurs du mot grec ἀστήρ, qui signifie étoile et que l'on retrouve dans astérisque et astéroïde. Pourquoi donc rapprocher cet Animal d'une étoile ? Tout simplement parce qu'il possède cinq bras (au moins dans le cas de la plupart des espèces) et qu'il a de ce fait l'allure d'une étoile stylisée.

Les astéries se rangent dans l'embranchement des Échinodermes, qui regroupe des Invertébrés strictement marins, et dont la « peau » est constituée, en tout ou en partie, de pièces calcaires. Mais surtout, les Échinodermes sont construits selon une symétrie rayonnée, c'est-à-dire autour d'un axe qui passerait par le centre de leur corps.

Ces Échinodermes se divisent en cinq groupes principaux qui sont : les holothuries ou concombres de mer, à l'allure de gros Vers ; les oursins, bien connus, de forme globuleuse, couverts de piquants ; les crinoïdes, aux longs bras ramifiés, le plus souvent fixés par un pédoncule ; les ophiures, qui ressemblent aux astéries, mais ont des bras beaucoup plus grêles, et mobiles ; et donc, enfin, les astéries elles-mêmes.

AMBULACRES ET PODIA

L'anatomie d'une étoile de mer est riche en particularités étranges. Sa peau est hérissée de petites pinces, les pédicellaires, qui sont portées par les plaques calcaires situées légèrement en profondeur. La face dorsale de l'astérie montre, en son centre, l'anus et une plaque dite « madréporique » ; cette plaque, qui est poreuse, fait communiquer l'intérieur de l'Animal avec l'eau de mer.

Si nous retournons l'étoile de mer, nous découvrons sa face ventrale. Celle-ci présente en son milieu la bouche, à partir de laquelle rayonnent cinq gouttières ou ambulacres, une par bras. De chaque côté de ces gouttières, nous remarquons des sortes de petits pieds, les podia, grâce auxquels l'astérie se déplace ; c'est à eux qu'elle doit son surnom de « mille-pattes de mer ». C'est grâce à ces pieds qu'une étoile de mer mise sur le dos se retourne rapidement.

De plus, les podia sont en relation avec un appareil propre aux Échinodermes, le système ambulacraire, qui est constitué d'un réseau de canaux contenant de l'eau. Ce système est à la fois circulatoire, respiratoire et locomoteur : en effet, la pression de l'eau qu'il renferme provoque un allongement des podia.

Les astéries ont bien sûr un tube digestif, mais pas de véritable appareil excréteur. Le système nerveux est évidemment simple : il est fait de cellules nerveuses dispersées dans la peau, d'un anneau autour de la bouche et de cinq cordons rayonnants. L'étoile de mer ne voit guère, faute de véritables organes de la vision ; son odorat est au contraire développé, et c'est grâce à lui qu'elle « détecte » les Mollusques enfouis dans le sable.

A L'ASSAUT DES MOLLUSQUES

Les Mollusques lamellibranches ou bivalves, c'est-à-dire la moule et les types parents, constituent en effet la nourriture des astéries. Et c'est là l'un des aspects les plus passionnants de leur biologie. Progressant à l'aide de ses podia, l'étoile de mer se dirige vers un Mollusque et lui donne l'assaut. Desserrant l'étreinte de sa coquille, l'astérie dévagine son estomac (autrement dit, elle le retourne comme un doigt de gant), et l'introduit entre

D. Faulkner

Cette étoile de mer présente l'aspect d'une étoile stylisée à cinq bras.

R. Ames

Ci-dessus, une étoile de mer d'une forme moins classique, à bras multiples.

les deux valves ; elle digère alors le Mollusque par osmose à travers les parois de son tube digestif.

Des zoologistes ont voulu en savoir plus sur cette nutrition sans pareille et ont, pour cela, effectué des expériences à son sujet. Certains spécialistes estimaient que, pour obtenir l'écartement des valves de sa victime, l'étoile de mer sécrétait un poison mortel pour le Mollusque.

On observe ici une autre espèce d'étoile de mer, au milieu d'une colonie d'oursins.

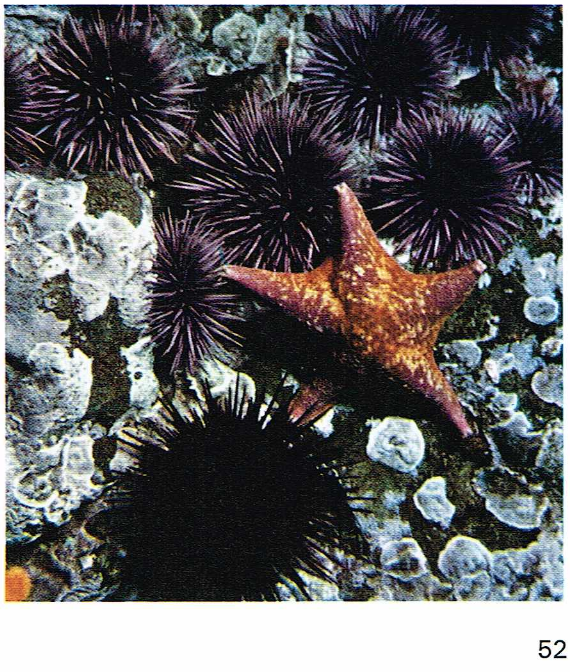

R. Ames

Pour savoir si un éventuel poison pouvait pénétrer entre les valves, le biologiste américain A. L. Burnett versa des particules de carmin dans un aquarium hébergeant plusieurs peignes, Lamellibranches du genre Venus, *solidement ligotés avec de la ficelle ; aucune particule ne fut décelée chez eux après l'expérience. La pénétration d'un poison paraissait donc improbable.*

Des peignes, dont la coquille avait été percée de petits trous, puis recouverts d'une étoffe très fine et enfin ligotés, furent digérés alors que l'étoffe empêchait tout contact entre l'estomac de l'astérie et la chair du Mollusque. Cette expérience démontre l'existence, chez l'étoile de mer, d'une enzyme très puissante, capable de digérer le corps du peigne. Cependant, on pouvait encore penser que l'astérie sécrétait un poison en même temps que l'enzyme.

Une autre expérience prouva que cette dernière substance suffisait à elle seule. Des peignes furent soustraits à leurs agresseurs à des stades différents de leur digestion ; or, le cœur des sujets à demi digérés battait encore... Ils n'avaient donc pas été tués par un poison avant la digestion. Tout devenait clair, sauf un point : comment l'astérie parvenait-elle à séparer les deux valves d'un Lamellibranche ? Pour écarter de 1 à 2 mm ces valves, maintenues fermées par de puissants muscles, la force nécessaire est de 6 kg. L'étoile de mer, grâce à sa puissance musculaire, parvient à ouvrir la coquille pendant un bref instant ; elle passe alors son estomac par l'ouverture, et laisse la coquille se refermer sur lui.

Depuis 1962, des astéries du genre Acanthaster *ravagent les récifs coralliens des océans Indien et Pacifique : en certains endroits, elles ont détruit jusqu'à 90 % des coraux.*

DES BRAS QUI REPOUSSENT

Un album de famille des étoiles de mer nous montrerait d'ailleurs des types très variés. L'astérie rouge Asterias rubens *habite la zone côtière de la Manche. La petite* Asterina gibbosa, *grise et bordée de jaune, vit dans les fucus du littoral atlantique ; ses bras sont courts et à peine distincts.* Solaster papposus, *séjournant dans les cailloutis de la Manche, et certaines espèces voisines possèdent, cas exceptionnel, de treize à vingt et un bras disposés autour d'un disque épais. L'étoile palmée,* Palmipes membranaceus, *en forme de pentagone écarlate, peuple la zone des sables du large, en Méditerranée. Sur le plan de la taille, le record appartient à une espèce qui atteint 90 cm de diamètre.*

Les astéries présentent au plus haut point le phénomène de la régénération. Si l'on coupe un bras à l'une d'elles, il repousse rapidement. Mieux encore ; un bras isolé peut régénérer une « étoile » complète, à condition toutefois qu'on lui ait laissé une portion du disque central. Certaines astéries peuvent même se reproduire par « scissiparité », c'est-à-dire en se scindant en deux étoiles filles.

Le zoologiste déjà cité, A. L. Burnett, a implanté des électrodes dans le disque central d'astéries. Il a pu constater que, si un courant de forte intensité est appliqué à l'étoile de mer, celle-ci se « débarrasse » de ses cinq bras...

Ce procédé d'autotomie, ou amputation volontaire, l'astérie l'utilise parfois lorsqu'un ennemi attaque un de ses bras : elle le lui abandonne alors tout simplement. L'autotomie est rendue possible par une liquéfaction des tissus conjonctifs de la racine du bras.

Normalement, les étoiles de mer se reproduisent par voie sexuée. Les sexes sont, chez elles, séparés, c'est-à-dire qu'il existe des mâles et des femelles. La rencontre dans l'eau de mer d'un spermatozoïde et d'un ovule donne un œuf puis une larve, dite brachiolaria ou bipinnaria, et pourvue de plusieurs bras. Après avoir flotté entre deux eaux, la larve tombe sur le fond et se fixe : elle devient alors une jeune astérie, qui se débarrasse de ses organes larvaires.

Comme on peut s'y attendre, les étoiles de mer présentent des associations avec de nombreux organismes marins : des Vers vivent parfois dans leur intestin, des Crustacés s'installent à la surface de leur peau, un Protozoaire cilié se loge dans leurs glandes génitales. Certains Mollusques s'attaquent aux astéries en enfonçant leur trompe dans leur corps ; c'est là, après tout, un juste retour des choses.

LES PERLES

Les perles sont, depuis fort longtemps, et au même titre que les pierres précieuses, le symbole de la beauté. Montées en colliers, en diadèmes, en bagues, ou en boucles d'oreilles, elles sont la fierté des élégantes les plus fortunées. Sans doute, les perles ne présentent pas l'éclat incomparable du diamant, ni les profondes couleurs des pierres précieuses, mais elles possèdent des teintes chaudes et mystérieuses. C'est le monde animal qui nous fait don de ces joyaux de la nature. Plus précisément, les perles sont produites par des Mollusques lamellibranches ou bivalves, c'est-à-dire dont la coquille est composée de deux valves.

Une perle est en fait le résultat de la réaction des tissus de ces Mollusques à une excitation mécanique d'origine externe; celle-ci est due à la pénétration dans l'Animal d'un parasite ou d'un corps étranger quelconque.

Premier cas : c'est un parasite qui pénètre à l'intérieur des valves de ces Animaux. Le manteau de l'hôte (repli cutané qui sécrète la coquille grâce aux nombreuses glandes dont il est pourvu) arrive à englober complètement l'intrus qui cherche à s'enfoncer. Il se forme, par suite, à l'intérieur du corps du Mollusque, une sorte de kyste; le manteau recouvre le parasite de couches plus ou moins concentriques de nacre, mais de nature différente de celle qui se dépose à l'intérieur des valves. C'est ainsi que naît une perle, qui grossit de plus en plus avec le temps.

Deuxième cas : il s'agit d'un corps inerte. Le processus est alors différent : comme il n'y a pas pénétration active, le manteau recouvre donc sur place ce corps, à l'aide d'une sécrétion qui adhère à la couche nacrée de la face interne des valves.

MOLLUSQUES PERLIERS

Les principaux Mollusques producteurs de perles sont les « huîtres perlières ». En réalité, ce ne sont pas de vraies huîtres, mais des Mollusques bivalves assez différents, les méléagrines; celles-ci ont une nacre beaucoup plus belle; de plus, elles se fixent à l'aide d'une touffe de filaments ou byssus qui manque aux huîtres véritables. Les méléagrines mesurent de 7 à 20 cm, et pèsent jusqu'à 10 kg.

En effet, les plus belles perles ne se trouvent pas dans nos mers, mais viennent principalement de l'océan Indien ou des rivages du Japon, mais il existe aussi des « huîtres perlières » sur les côtes de la Méditerranée, de la mer Rouge, du golfe Persique et du Pacifique. Il existe d'autres Mollusques perliers, par exemple les jambonneaux, ainsi nommés en raison de leur forme, et les « moules d'eau douce », c'est-à-dire les mulettes et les anodontes.

Naguère, la production de ces Bivalves d'eau douce — et principalement la mulette perlière, Margaritana margaritifera *qui habite les cours d'eau des Cévennes, des Vosges et de l'Écosse — a connu une certaine vogue; ces perles, bien que moins lumineuses que celles des mers, ont cependant des colorations remarquables : les ducs de Lorraine surveillaient l'exploitation des mulettes de la Vologne, petite rivière des Vosges. Passant à Plombières, l'impératrice Joséphine reçut en cadeau un collier de perles de mulettes; elle essaya alors, mais sans succès, d'acclimater ces Mollusques à la Malmaison. A l'occasion, même des espèces très banales, comme l'huître ordinaire ou la moule, peuvent receler des perles.*

LES PERLES CÉLÈBRES

Les perles sont d'ailleurs appréciées depuis la plus lointaine antiquité. Les Perses, les Arabes, les Juifs

F. Quilici

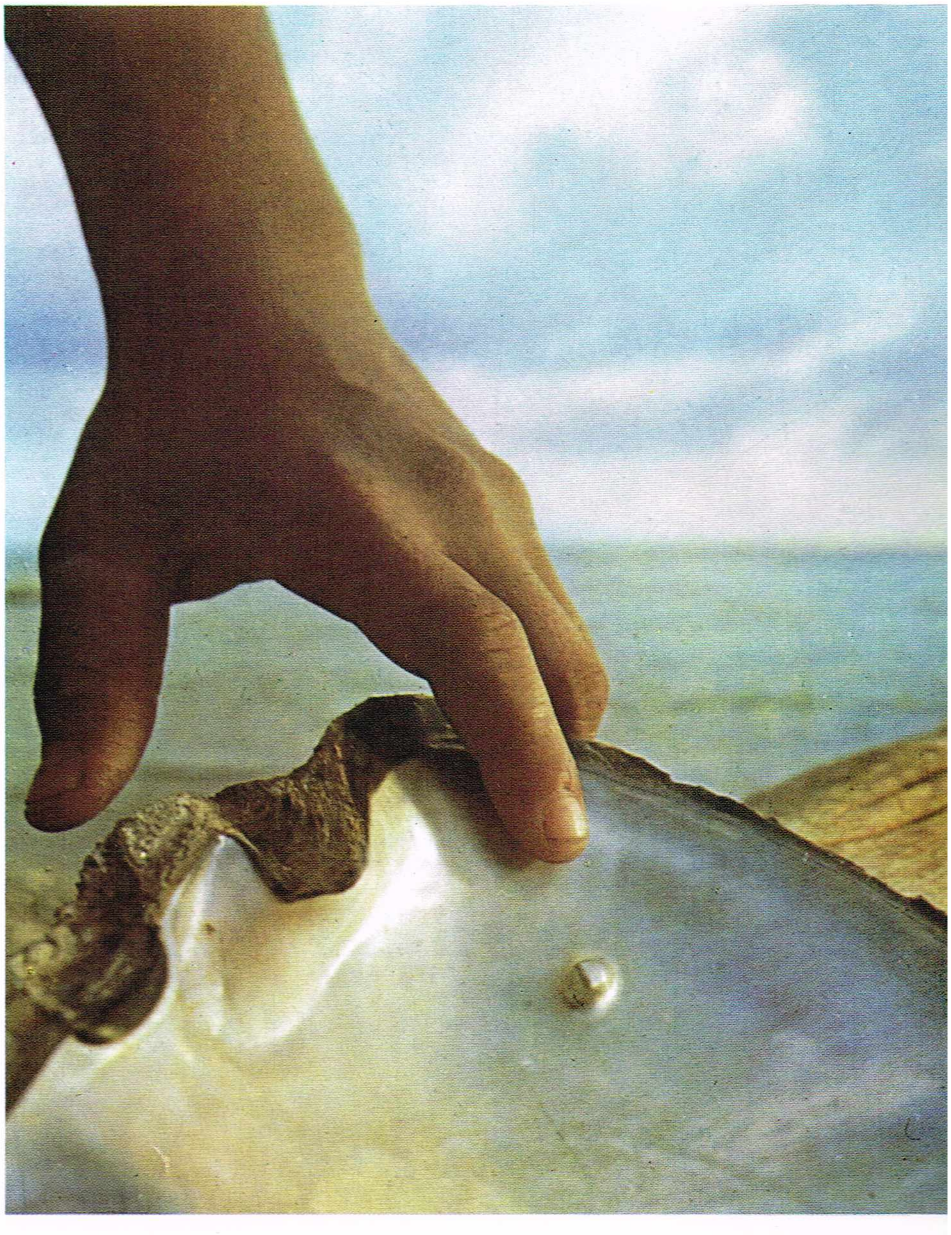

Valve d'une huître perlière dans laquelle s'est formée une perle.

les recherchèrent, tout comme les Grecs et les Romains qui les consacrèrent à Vénus. En France, c'est dans les édits de Philippe le Bel qu'elles sont pour la première fois mentionnées.

Pour avoir de la valeur, une perle doit être — selon les termes du métier — lumineuse et brillante, et elle doit avoir de l'« orient », c'est-à-dire un reflet nacré; ce sont la brillance et l'orient qui déterminent l'« eau » de la perle. De plus, il lui faut être parfaitement sphérique; les perles « baroques », c'est-à-dire de forme irrégulière, sont beaucoup moins chères, à égalité de grosseur, que les régulières. Enfin, le poids entre pour beaucoup dans

P. Martini

P. Martini

La perle naturelle (à droite) se distingue de la perle artificielle (à gauche) par la chaude couleur inimitable de son orient.

l'évaluation et est mesuré en « grains » (de 0,051 84 g) et en « carats » (de 0,242 g).

Il exista en France, jusqu'à la fin du XVIII[e] siècle, une merveilleuse collection de perles, celle de la Couronne, commencée — à ce qu'on dit — par François I[er]; elle fut évaluée, en 1791, à environ 1 000 000 de francs de l'époque, chiffre véritablement fabuleux. Elle disparut dans les convulsions de la Révolution, mais plusieurs pièces échurent plus tard à de riches familles d'Europe, notamment chez les boyards russes. C'est par exemple en Russie qu'échoua la plus belle, la « Reine des perles », évaluée à 200 000 francs, acquise par les Zosima, et qui reçut le nouveau nom — bien mérité — de « la Pèlerine ». Une partie de la collection fut par la suite rachetée ou reprise par Napoléon I[er] et Napoléon III; la chute définitive de l'Empire la fit mettre à l'encan et la fit disperser, cette fois-ci sans espoir de retour.

De nos jours, les plus beaux ensembles se trouvent aux États-Unis d'Amérique ou sont encore aux mains d'anciens maharadjahs hindous. Celui de Lahore possède, par exemple, un collier de sept rangées de perles, toutes très grosses, entre autres merveilles. Mais le plus beau joyau du genre est sans doute « la Croix du Sud » : il s'agit de neuf perles, réunies naturellement l'une à l'autre en formant une croix parfaite (sept constituent la hampe et deux forment les branches); ce bijou a été découvert en Australie par un certain Clark, qui le brisa malencontreusement en le maniant; on réussit ensuite à les réajuster si habilement que les traces de la réparation sont invisibles.

La plus grosse perle du monde est certainement la « Perle d'Asie », en forme de larme, et qui pèse 605 carats. A cause de sa forme et de son irrégularité, ce n'est pas un joyau, mais un objet de collection; son eau est très belle et elle a une énorme valeur.

Deux pêcheurs remontant un filet chargé d'huîtres perlières, près de l'atoll de Rai-Roa, en Polynésie.

F. Quilici

La pêche aux perles

Depuis des siècles, la pêche des huîtres perlières se fait à la main : d'agiles et résistants plongeurs (et plongeuses, au Japon) vont au fond de la mer, armés d'un couteau et d'un filet; ils coupent le byssus grâce auquel les Mollusques sont attachés aux rochers, puis mettent leur récolte dans le filet, généralement remonté à l'aide d'un câble dans une barque.

Le métier de pêcheur de perles n'est pas sans risques; outre le danger constant d'être dévoré par les requins, le plongeur peut se trouver bloqué dans les profondeurs pour une cause quelconque. En outre, lorsque la remontée est trop rapide, ce qui arrive parfois, l'homme est sujet à des hémorragies et à des embolies dangereuses ou même mortelles, du fait de la décompression brutale : en effet, les plongées se font plus souvent qu'il ne le faudrait à plus de 10 m (la descente est effectuée grâce au poids d'une grosse pierre). Enfin, tôt ou tard, s'il n'abandonne pas le métier à temps, le plongeur est victime de diverses affections : emphysèmes, embolies, vieillissement prématuré, etc.

Perles de culture

En raison des risques que présente la pêche des perles sauvages, les hommes ont, depuis longtemps, tenté de susciter artificiellement la production de perles par les Mollusques. Ainsi les Chinois introduisaient, dans la coquille des moules de rivière, des figurines d'étain, représentant par exemple des bouddhas, afin qu'elles se couvrissent de nacre. Vers 1920, le Japonais Mikimoto perfectionna la technique.

Se fondant sur les études de son compatriote, le professeur Mishukawa, il mit au point un système pour forcer les huîtres à produire des perles en tout point semblables à celles qui sont naturelles, d'une forme et d'une eau parfaites. Pour ce faire, on élève normalement des huîtres jusqu'à l'âge de trois ans, comme pour les espèces comestibles; puis on les prélève des bassins et on leur fait subir une opération. On choisit dans ce dessein des spécimens qui seront des « donneurs » et, après leur avoir ôté une valve, on coupe le tissu sécréteur de leur manteau en nombreux petits morceaux, sur lesquels on place une petite sphère de nacre ou encore de verre ou de porcelaine; les morceaux sont ensuite réunis de manière à former un petit sac, à l'intérieur duquel se trouve la « graine » de nacre. Puis, par une délicate opération, on greffe ces sacs sur le manteau d'exemplaires intègres, dont on a ouvert de force les valves, en faisant bien attention à ne léser aucun organe interne. Enfin, les Mollusques ainsi opérés sont remis en mer.

En général, la greffe réussit parfaitement : il se développe, à partir des kystes artificiels, des perles qui grossissent d'autant plus qu'on laisse plus vieillir les huîtres « porte-greffons ». Mais c'est très généralement au bout de sept ans que les huîtres sont repêchées par des femmes spécialisées, les « filles de la mer ». Les perles artificielles produites de cette façon, lorsqu'elles sont assez grosses, sont en tout point semblables aux naturelles : seul le stimulus initial de leur formation est donc artificiel.

La seule manière de reconnaître avec certitude qu'une perle est cultivée est de l'examiner aux rayons X qui permettent de voir à l'intérieur le noyau nacré initial, alors que les perles naturelles possèdent en leur milieu un parasite minuscule, généralement un Ver, Cestode ou Trématode.

Pour certains, les perles obtenues par la méthode de Mikimoto sont de « fausses perles ». Il n'en est rien. Ce sont bien de vraies perles. A côté de ces perles cultivées, l'homme est effectivement capable de réaliser des perles artificielles. Diverses méthodes permettent de les obtenir. Ces perles sont en général des boules de verre enduites d'une substance appelée essence d'Orient et qui provient des écailles de l'ablette et du hareng.

Selon la tradition, c'est un fabricant de chapelets parisien qui, en 1680, découvrit cette technique, et d'une façon bien inattendue. Il remarqua que l'eau dans laquelle sa servante lavait des ablettes devenait brillante. Il eut alors l'idée d'enduire les grains de ses chapelets de la substance en question. Les Animaux participent donc aussi, mais d'une manière plus réduite, à la fabrication des fausses perles.

LES FRUITS DE MER

On donne l'appellation, plus gastronomique que scientifique, de « fruits de mer » à tous les organismes marins comestibles qui ne nagent pas, mais qui rampent sur les fonds ou y sont fixés. On doit donc littéralement les récolter, comme les fruits, pour les consommer. Ils constituent pour les amateurs le fin du fin de l'art culinaire.

Dans leur grande majorité, les fruits de mer sont des Mollusques (Lamellibranches ou Bivalves, et Gastéropodes) ; mais on y compte également des Échinodermes (oursins et holothuries) et des Tuniciers (ascidies).

LA PÊCHE DES FRUITS DE MER

Pour récolter les fruits de mer, les méthodes diffèrent beaucoup selon les espèces et les usages locaux. Le moyen industriel est la pêche au filet ou chalut, qui prend toute la flore et toute la faune du fond, jusqu'aux soles. Ce système provoque de gros dégâts, car il équivaut à un véritable labourage des fonds. On a bien cherché depuis quelque temps à concilier l'approvisionnement des marchés et la protection des organismes marins, mais aucune solution n'a encore été apportée.

Le chalut est un filet long de plusieurs mètres, en forme de sac, dont l'embouchure est pourvue, vers le bas, de plombs qui le font s'enfoncer et traîner, et dont le haut est muni de flotteurs qui le tiennent ouvert. Sur les côtés, deux tiges soutiennent l'ouverture ; elles sont reliées à deux câbles de traction. Le filet est traîné par un ou deux bateaux ; dans le premier cas, afin d'empêcher que les deux câbles ne s'emmêlent et ne se rapprochent, ce qui fermerait l'ouverture, le système comprend deux « divaricateurs », qui les écartent ; dans le second cas, cet artifice n'est pas nécessaire, puisque les câbles sont tenus séparés par les deux bateaux, qui en tirent chacun un.

En frottant le fond, le chalut recueille tous les corps mobiles qu'il rencontre ; les plus petits s'échappent à travers les mailles (généralement larges de 2 cm), alors que les plus gros sont ramassés pour être ensuite ramenés à la surface. Là, on effectue une sélection grossière de la pêche, rejetant tout ce qui n'est pas comestible ; le reste va sur les marchés. Ce système présente des inconvénients : le filet peut s'accrocher et se déchirer ; il peut aussi subir les assauts des dauphins qui se jettent sur son contenu appétissant, mais ce n'est pas une raison pour les tuer. Afin d'éviter tout cela, les filets sont pourvus de cordes destinées à les soulever et à les décrocher, ainsi que d'autres filets — plus robustes et à mailles plus larges — destinés à les protéger contre les dauphins (on appelle donc ces filets des « dauphiniers » ou « dauphinières »).

On utilise aussi des dragues, des nasses et des bordigues (nasses perfectionnées) ; les unes sont immergées sur les fonds sablonneux pour être fixées par des pieux, les autres sont mobiles et remontées en temps opportun. On emploie également des sortes de râteaux, également traînés au fond, qui agrippent avec leurs dents toutes les coquilles qui s'y trouvent. Nous rappellerons à ce propos que nombre de Mollusques ne s'appuient pas sur le sable, mais s'y enfoncent, en creusant à l'aide de leur « pied », pour ne laisser dépasser que les extrémités de leurs siphons. Les plongeurs sous-marins le savent bien, qui attrapent de nombreuses prises à la vue des petits trous de ces siphons... mais qui peuvent se piquer douloureusement aux piquants venimeux de divers Poissons fouisseurs.

On pratique aussi la pêche à la main sur les fonds peu profonds, notamment celle des huîtres et des moules, lesquelles se fixent dans leur âge juvénile sur des supports fixes, pour ne plus en bouger de leur vie (généralement), souvent grâce à une touffe de filaments appelés byssus. Mais ces Mollusques, comme on le sait, sont l'objet d'un élevage intensif : l'ostréiculture dans le cas des huîtres et la mytiliculture dans le cas des moules.

R. Maltini - P. Solaini

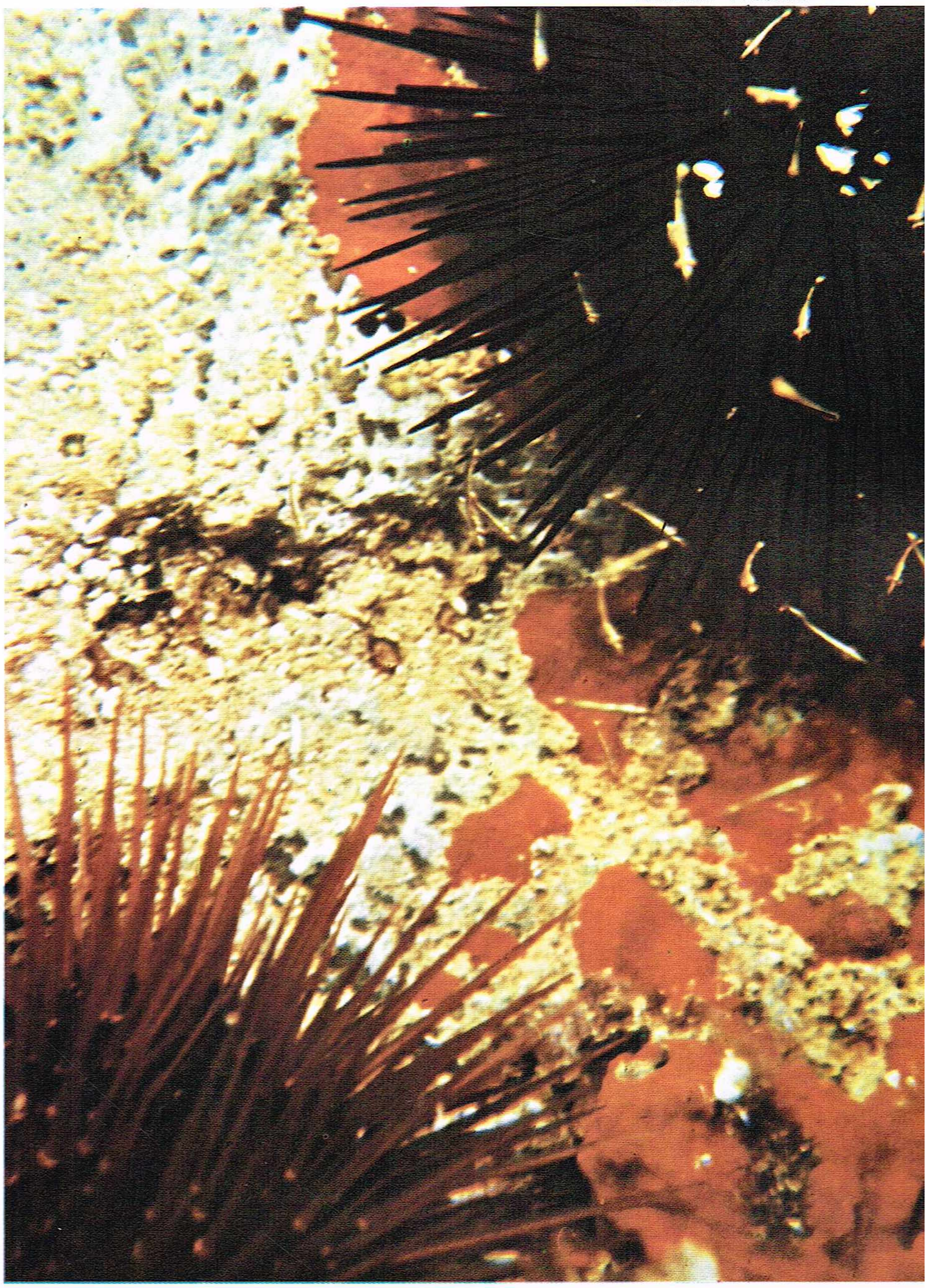

***Paracentrotus lividus*, l'oursin le plus apprécié par les consommateurs.**

Lorsqu'on cueillera soi-même ces Bivalves, on évitera d'en capturer dans des eaux polluées — ce qui est malheureusement de plus en plus le cas —, car ils transmettent de graves maladies, comme l'hépatite virale et la typhoïde. L'une des premières précautions est de rejeter tous les individus dont les valves restent ouvertes quand on les

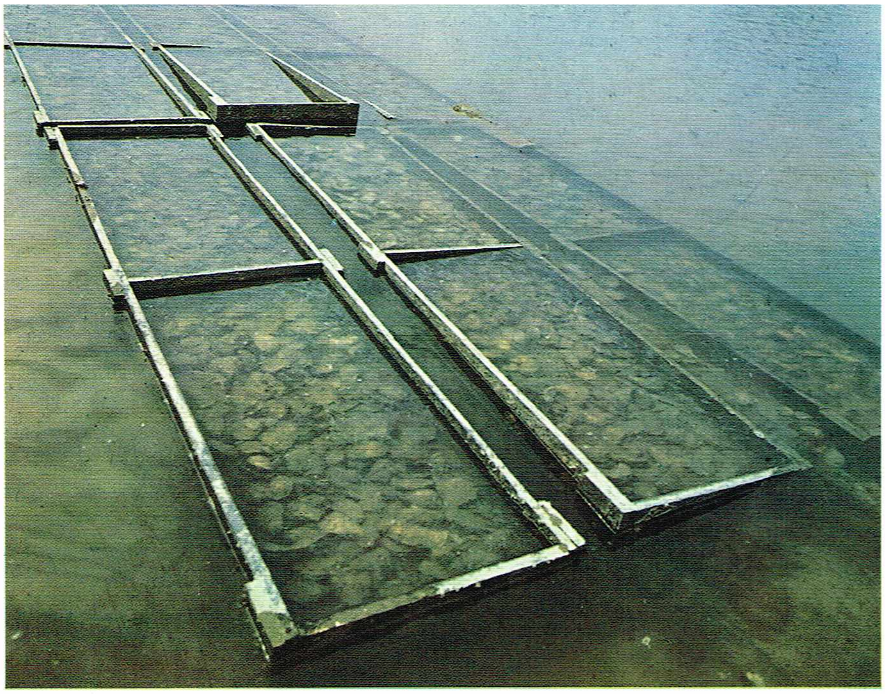

R. Maltini - P. Solaini

Culture d'huîtres dans un parc à huîtres.

touche. En effet, vivants, les Mollusques referment fermement leur coquille au moindre attouchement, alors que celle-ci s'ouvre passivement à la mort de l'Animal.

QUELQUES FRUITS DE MER

Parmi les Échinodermes, on consomme seulement dans nos pays les oursins ; ce sont leurs glandes génitales que l'on mange, de préférence au printemps, quand les Animaux sont matures : elles sont de couleur jaune-orangé. On se sert, pour les pêcher, de filets traînés, ou de nasses, ou bien encore — quand ils sont cachés dans des cavités qu'ils creusent bien souvent eux-mêmes — de bâtons ou de cannes fourchues. Lorsqu'on les manie, il faut faire très attention à ne pas s'enfoncer sous la peau leurs piquants, car ceux-ci, se fragmentant très facilement, provoquent parfois des abcès. L'espèce la plus appréciée est l'oursin ordinaire (Paracentrotus lividus), *dont la couleur varie du violacé au brun verdâtre ; on l'ouvre avec un couteau dans sa largeur, pour en recueillir, à l'intérieur, dans la moitié supérieure, les cinq gonades bien visibles, disposées radialement, et entourées par la partie terminale de l'intestin.*

En Afrique et en Australie, mais surtout en Extrême-Orient, on apprécie beaucoup les holothuries (des genres Holothuria *et* Stichopus), *dont on fait le mets appelé localement « trepang ». L'holothurie, éviscérée, est séchée au soleil, coupée en minces bandelettes, et soumise à d'autres traitements, qui varient selon les pays et sont bien souvent secrets. On obtient ainsi un produit qui, comme les Champignons séchés, doit être réhydraté avant d'être cuisiné. Les cuisiniers chinois sont passés maîtres en l'art de confectionner de succulents potages au trepang. Mais l'holothurie doit être accompagnée d'épices et de sauces très relevées, car elle est absolument fade. Il existe aussi des holothuries en Méditerranée, mais elles ne sont consommées que par les pêcheurs, et localement : en effet, il est difficile d'en vendre sur les marchés, en raison de leur mauvaise conservation. Il y a bien des conserves d'holothurie, mais elles ne se sont pas encore imposées dans le commerce.*

Les Tuniciers, Animaux vaguement apparentés aux Vertébrés inférieurs, comptent seulement, dans nos régions, une espèce comestible, très riche en iode, donc peu appréciée à cause de son goût, le vioulet ou figue de mer (Microcosmus sulcatus), *nommé par les Italiens « uovo di mare » ou « œuf de mer », qui vit attaché aux objets submergés des fonds sableux ; on le consomme cru, après en avoir ôté la coriace tunique externe.*

Plusieurs espèces de Mollusques Gastéropodes sont communément consommées. Parmi les plus savoureuses, nous citerons la patelle ou bernique (Patella coerulea), *à coquille conique en forme de chapeau chinois ; elle adhère à l'aide d'une robuste ventouse aux rochers littoraux, ce qui oblige à la décoller à force avec un petit levier. Les murex (et surtout le* Murex brandaris *ou rocher épineux), à la coquille pourvue de grosses épines, sont également appréciés sur les côtes méditerranéennes : c'est eux qui fournissent la pourpre. D'autres excellents Gastéropodes sont les ormeaux ou oreilles de mer (genre* Haliotis), *dont la coquille est perforée de cinq ou six trous pour le passage des tentacules et qui habitent les rochers, et les « escargots » à ombilic (genre* Natica *ou* Neverita) *qui vivent sur les fonds sablonneux peu profonds.*

En grande majorité les fruits de mer sont cependant des Mollusques Bivalves, comme nous l'avons dit, c'est-à-dire pourvus d'une coquille en deux pièces ou valves. Nous citerons parmi eux les moules (genre Mytilus) *et les huîtres (genres* Ostrea *et* Gryphaea), *désormais élevés à l'échelle industrielle. Pour leur part, les moules commencent à être très vendues en boîtes. La coquille Saint-Jacques ou peigne (genre* Pecten), *délicate aussi bien crue que cuite, peut très bien aussi être conservée. Les pétoncles ou* Chlamys, *proches mais plus petits, donnent de remarquables fritures.*

On trouve communément sur les fonds sableux les coques (genre Cardium) *et les clovisses ou palourdes (genre* Tapes), *de saveur très fine ; la praire* (Venus verrucosa), *dont la coquille est faite de lames concentriques rugueuses et parallèles au bord, est excellente, crue ; la vénus (genre* Venus) *est moins savoureuse, quoiqu'on la fasse parfois passer pour la palourde. Les couteaux* (Solen vagina, *droit, et* Ensis ensis, *courbe), très allongés (ils mesurent 12 ou 13 cm de longueur pour environ 2 cm de largeur), ont très bon goût crus : on les pêche en versant du sel sur leur trou, ce qui les fait sortir.*

Les écueils portent les arches de Noé (Arca diluvii *ou* noae) *et les barbues* (Arca barbata), *à coquille gibbeuse caractéristique, plutôt indigestes mais savoureuses, et les lithodomes ou dattes de mer* (Lithodomus lithophagus). *Ces Bivalves forent, à l'aide de la sécrétion d'acides, les pierres où ils se fixent et d'où on les extrait de force en brisant la roche.*

A gauche, oursins ouverts pour montrer l'intérieur de l'Animal ; à droite, palourdes, appelées ainsi que les moules, oursins, et bien d'autres « fruits de mer ».

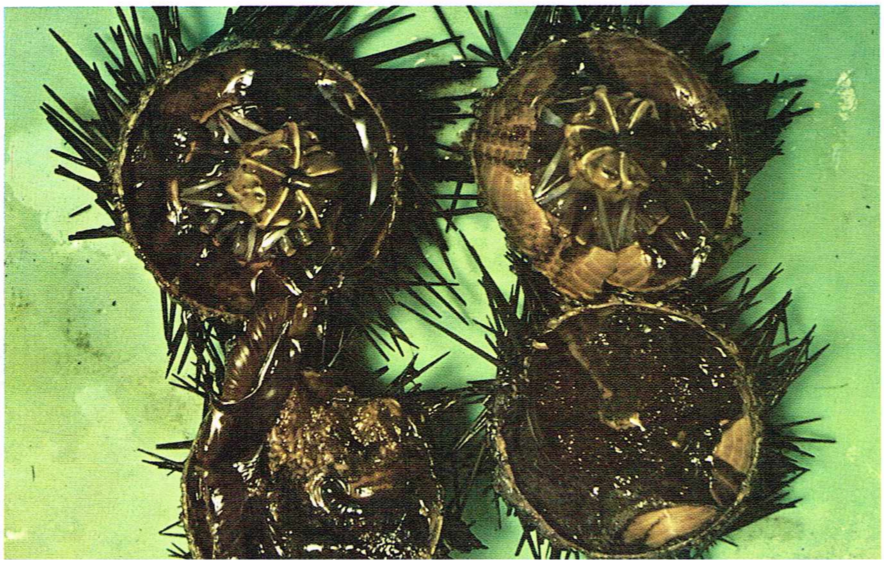

G. Relini

P. Martini

L'ÉLEVAGE DES MOULES

Sur les rochers que la marée a découverts, voici des paquets de moules, agglutinées par grappes. Elles sont fixées à l'aide d'un byssus, touffe de filaments sécrétée par une glande particulière sous l'aspect d'un liquide qui durcit ensuite.

La coquille d'une moule se compose de deux valves, ce qui est le propre des Mollusques de la classe des Lamellibranches ou Bivalves, à laquelle appartiennent également les huîtres. Extérieurement, les valves de la moule sont noir violacé : chacune est attachée à l'autre par un crochet situé à sa pointe antérieure ; les deux crochets forment une charnière.

Sur leur face intérieure, les valves sont couvertes de nacre. A leurs deux extrémités se remarquent les empreintes des muscles, qui les unissent l'une à l'autre. Grâce à ces muscles, la moule peut maintenir sa coquille fermée.

L'ÉLEVAGE DES MOULES

Les moules sont appréciées des gourmets depuis les débuts de l'histoire, mais l'idée de les élever pour les manger est relativement récente. Alors que l'ostréiculture, ou élevage des huîtres, remonte à l'Antiquité, celui des moules, ou mytiliculture, n'a débuté qu'au Moyen Age.

Il est difficile de donner une date précise, car les origines de cette pratique sont plus ou moins légendaires. Vers 1235, une barque ayant à son bord trois Irlandais aurait fait naufrage dans la baie de l'Aiguillon, en Vendée. Il n'y eut qu'un survivant : le patron de l'embarcation, un certain Patrice Walton.

Il demeura dans la région et, pour subsister, tenta de capturer des Oiseaux à l'aide de filets tendus entre des piquets. A sa grande surprise, il remarqua que ces derniers se couvraient de moules. Le naufragé mobilisa alors les habitants de la côte : des centaines de pieux furent bientôt piqués aux alentours, et Walton répandit de jeunes moules tout autour. Telle fut la naissance, si l'on en croit la tradition, de la mytiliculture.

La moule a pour avantage d'être (relativement) bon marché. Cela est dû au fait que l'Animal se reproduit bien plus facilement et rapidement que l'huître, grossit aussi plus vite, et peut donc donner d'importantes récoltes annuelles. En outre, il lui faut moins de soins, ce qui réduit son coût de production. On la consomme de préférence cuite — ce qui réduit les risques d'empoisonnement ou d'infection — mais elle peut être mangée crue, surtout sous certaines de ses formes, comme les grosses moules d'Espagne. Mais elle n'est pas plus exposée à la pollution que l'huître, car celle-ci reste en bassins clos. La production des moules augmente sans cesse, à raison de centaines de milliers de quintaux par pays producteur.

La mytiliculture ne consiste pas, comme on pourrait le penser, en la capture des Animaux qu'on nourrirait ensuite en captivité, mais en l'exploitation rationnelle de bancs de moules croissant librement. L'intervention humaine se limite à favoriser artificiellement leur survivance et leur reproduction. Les avantages de l'élevage par rapport à la pêche libre sont une plus grande quantité et une meilleure qualité des produits, plus gros et plus savoureux quand ils proviennent d'élevages.

Les espèces communément élevées dans nos régions sont la moule de la Méditerranée (Mytilus galloprovincialis), mais surtout la moule ordinaire (Mytilus edulis), de préférence sur les côtes de l'océan Atlantique et de la Manche : elle est ainsi élevée en divers points des côtes de Bretagne et de Charente-Maritime.

A. Margiocco

Détail d'un groupe de moules de l'espèce la plus communément recherchée.

S.E.F.

Des grappes de moules sont retirées de la mer et nettoyées avant la mise en vente.

Pour créer un élevage, ou parc, on choisit une anse côtière, de faible profondeur, le plus loin possible des sources de pollution, à eaux limpides, et à l'abri des tempêtes. Comme les moules préfèrent les eaux de salinité faible, il est bon que se trouve à proximité une embouchure de cours d'eau. Il faut aussi qu'il y ait à proximité abondance de moules, ce qui garantit le renouvellement des individus. Enfin, les conditions naturelles doivent être appropriées.

On plante alors, comme l'avait fait Walton, à intervalles de quelques mètres, des pieux — de préférence en châtaignier ou en chêne — en longues rangées parallèles; pour plus de solidité, on les place parfois en V renversés en les attachant pour cela deux à deux. On étend entre les poteaux, à la fin de l'automne, de vieilles cordes de chanvre, où s'attacheront les petites larves de moules; en effet, ces dernières atteignent leur maturité sexuelle de novembre à février, et déversent alors dans la mer leurs produits sexuels. Il y a donc fécondation externe.

Les œufs donnent des larves ciliées, pourvues de deux expansions en ailes, et nommées véligères; les véligères se déplacent dans l'eau à la recherche d'un support, pendant quelques jours. Une fois fixées, elles se transforment en de petites moules à coquille très tendre et grisâtre, et sécrètent par une glande spéciale le byssus de fixation. Après environ deux mois, elles mesurent 1 cm de longueur et ont l'aspect caractéristique de l'espèce, à coquille foncée et résistante.

Les véligères s'accrochent en grand nombre aux cordes immergées, et, au début du printemps, celles-ci sont recouvertes d'une multitude de petits individus. On les distribue alors dans le parc. Après avoir retiré les cordes anciennes et éventuellement d'autres objets destinés à attirer les larves, on tend sur les pieux, à 1 m environ au-dessus du niveau de l'eau, de gros câbles, en formant des carrés ou chambres, éventuellement avec des cordes traversières. On attache à tous ces cordages d'autres morceaux de cordes végétales, mais neuves, qui pendent librement, mais au moins à 1 m au-dessus du fond, pour les protéger des prédateurs venus du fond. Sur la partie immergée des cordes, on fixe des morceaux d'anciens cordages, chargés de petites moules, pour permettre aux juvéniles de s'installer. Ces derniers, en effet, étant trop nombreux, cherchent à avoir de l'espace, ce qu'ils font en se déplaçant le long des câbles nouveaux; ils se meuvent à l'aide du pied, qui fait se détacher le byssus pour en sécréter par la suite un neuf, à l'endroit choisi.

A la fin de l'été, quand la place se fait rare en raison de la croissance des individus, des grappes de ces Mollusques sont retirées de la mer; des individus sont détachés de force et sont insérés entre les spires de nouvelles cordes, au préalable légèrement détordues avant d'être relâchées pour serrer les Animaux et les retenir jusqu'à ce qu'ils aient de nouveau sécrété un byssus dans la mer.

C'est généralement vers l'âge de quatorze à quinze mois que les moules atteignent la bonne taille; on retire donc alors les grappes, et on en détache les moules; elles sont alors nettoyées des Animaux qui s'y sont incrustés (Balanes, Serpulidés, Bryozoaires) et de leur vase, pour enfin être vendues. Comme les moules peuvent survivre assez longtemps hors de l'eau, elles sont en mesure de voyager loin. En effet, dès qu'elles se sentent hors de l'élément liquide, elles serrent fermement leurs valves, ce qui leur fait conserver de l'eau à l'intérieur de la coquille et les isole totalement, même en cas de lavages répétés à l'eau douce.

LES ENNEMIS DES MOULES

Bien que les moules n'aient pas autant besoin de soins que les huîtres — comme nous l'avons dit — il convient de veiller sur elles. D'abord, il faut éloigner les prédateurs des parcs; pour ce faire, on met à sec ces derniers durant une journée : les moules n'en pâtissent pas, pour la raison invoquée plus haut, mais au contraire les prédateurs — principalement les murex et les astéries ou étoiles de mer — meurent ou sont obligés de s'en aller. En outre, on enlève les individus morts, c'est-à-dire ceux dont les valves sont ouvertes, et les autres organismes étrangers, surtout des Ascidies, qui font des ravages parmi les larves à l'époque de la reproduction.

Un problème plus compliqué est posé par des Poissons, dorades et autres, qui engloutissent les moules juvéniles peu après leur fixation aux cordages. On remédie partiellement à ce danger en cherchant à faire fixer le plus tôt possible les larves, afin d'avoir à la fin du printemps des individus déjà bien développés et bien protégés par la coquille; c'est effectivement lors des mois les plus chauds que ces voraces Poissons apparaissent en grand nombre dans les élevages.

Naturellement, il n'est pas possible de déterminer dans l'absolu l'époque précise de la reproduction des moules, qui est variable. Cependant, en mettant à l'eau le plus tôt possible les câbles, pour la capture des larves, on aura les plus grandes chances de ne pas voir s'appauvrir l'élevage.

Une moule de la Méditerranée ouverte, pour montrer la partie comestible du Mollusque.

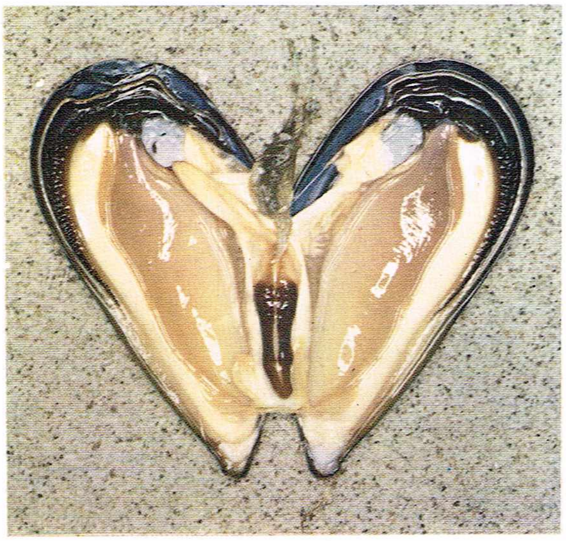
G. Mazza

LES MÉDUSES

Échouée sur la grève, une masse informe et gélatineuse attire l'attention des baigneurs, qui bien vite s'en détournent avec dégoût : il est vrai qu'une fois échouée, une méduse n'est pas très attirante. Elle a une tout autre allure quand elle évolue en pleine mer, gracieuse ombrelle qui vogue entre deux eaux, et souvent près de la surface.

En voyant des méduses pour la première fois, on peut se demander s'il s'agit bien d'Animaux. C'est qu'elles appartiennent à l'un des embranchements d'Invertébrés les plus simples, les moins évolués : celui des Cnidaires, qui groupe également les actinies, ou anémones de mer, les coraux et les hydres.

Typiquement, une méduse se compose, à la partie supérieure, d'une vaste ombrelle, d'où pend un manubrium, sorte de trompe à l'extrémité de laquelle s'ouvre l'orifice buccal. Au bord de l'ombrelle se trouvent généralement des tentacules, qui peuvent cependant manquer, comme, du reste, le manubrium. Il y existe aussi parfois un « voile » qui ondule avec élégance au moindre mouvement. Des organes sensoriels s'observent sur le pourtour de l'ombrelle.

Malgré leur beauté et leur élégance — elles semblent en effet voler — les méduses sont voraces. Elles ingèrent leurs proies dans leur vaste cavité gastrique pour les digérer ; les déchets non absorbés sont rejetés par la bouche elle-même qui fait fonction d'anus.

En fait, la méduse ne constitue souvent qu'un épisode dans le cycle vital d'un Cnidaire. Les membres de l'embranchement se présentent soit sous la forme « méduse », soit sous la forme « polype », sorte de petit sac ouvert vers le haut et fixé à un support.

Certains Cnidaires n'existent que sous l'aspect du polype, les actinies par exemple, d'autres uniquement sous le type méduse. Mais chez la plupart, on observe une alternance de générations entre les deux stades.

C'est le cas, par exemple, chez les acalèphes, les grosses méduses les plus classiques. Leur cycle commence par un polype, qui se divise transversalement comme une pile d'assiettes : chacune de celles-ci devient une petite méduse qui se libère et grandit...

Elle possède des glandes génitales, qui permettent une fécondation externe. L'œuf donne une larve ciliée, la planula, qui se fixe et se transforme en polype. Le cycle est ainsi bouclé.

LES « ORTIES DE LA MER »

Comment se fait-il que des Animaux aussi fragiles, qui se liquéfient facilement au soleil, puissent capturer des proies plus robustes qu'eux, tels les Poissons ? On s'en rend compte immédiatement lorsqu'on a le malheur de se faire douloureusement piquer par un organisme de cette sorte, en le touchant par mégarde ou par ignorance. En effet, les méduses et les polypes sont pourvus d'innombrables cellules urticantes, disposées surtout sur les tentacules, qui sécrètent un venin pouvant paralyser et tuer des proies assez grosses, et même provoquer des troubles chez l'homme, parfois graves.

Ces cellules urticantes, ou cnidoblastes ou encore nématoblastes, sont pourvues chacune d'une ampoule à venin dans laquelle baigne un filament enroulé en spirale [1].

Il y a en outre, extérieurement, une formation sensorielle semblable à un court poil, le cnidocil. Quand ce dernier ressent un stimulus quelconque, il provoque la dévagination du filament urticant : la méduse est donc entourée

1. Naturellement proportionné à la taille de la cellule, ce qui fait que la longueur du filament varie de 50 µ à 1 mm ; le cnidoblaste est long tout au plus de 0,25 mm.

R. Maltini - P. Solaini

La méduse constitue sans aucun doute l'un des groupes les plus intéressants des Animaux marins ; on la voit ici sous son aspect délicat et inoffensif.

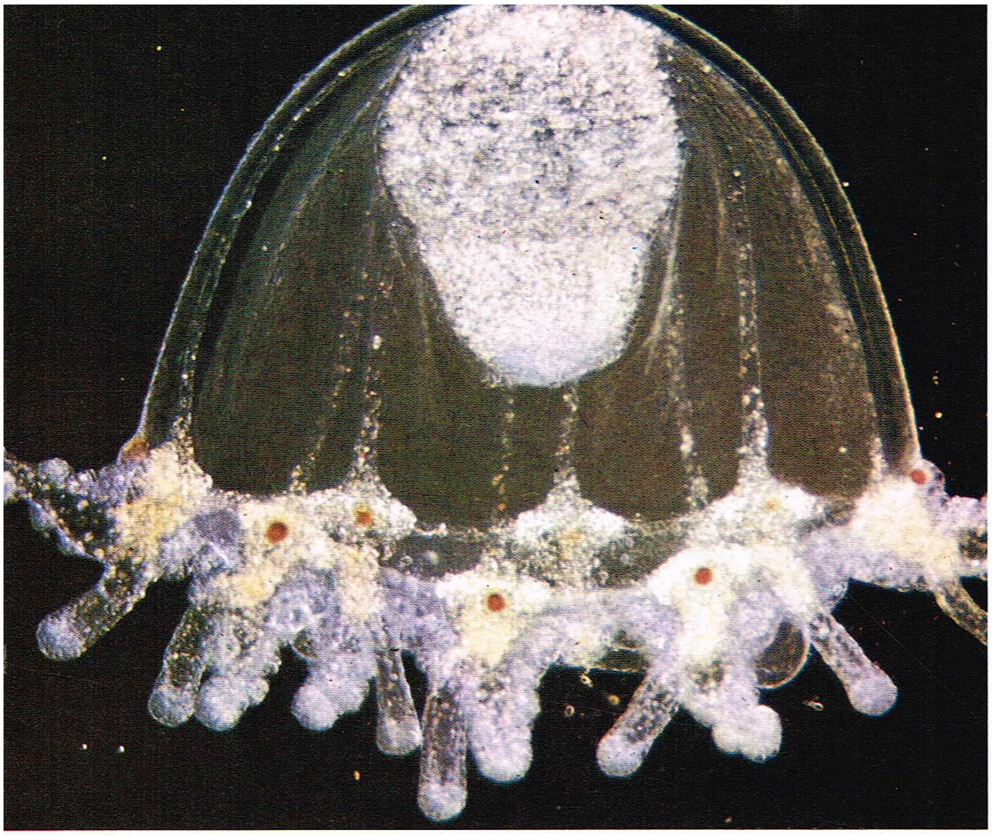

G. Mazza

Cette méduse cache sous sa transparence absolue des armes efficaces constituées par des cellules urticantes disposées sur ses tentacules.

tout entière par un invisible réseau d'innombrables filaments venimeux.

Mais il ne semble pas que la stimulation du cnidocil soit l'unique cause de la dévagination du filament : celle-ci peut en effet avoir lieu même sans aucun stimulus local, à la suite d'une réponse coordonnée de tout l'organisme. Le mécanisme de mise en action des cnidoblastes paraît lié à des modifications au niveau de leur membrane cellulaire, avec pour conséquence une augmentation de la pression hydrostatique; il se produit un gonflement de tout l'appareil, qui, au moindre choc, explose littéralement en chassant son venin.

Heureusement, il n'y a pas toujours danger pour l'homme, car la piqûre est souvent fort minime et provoque au maximum une légère sensation de brûlure. Mais il est des cas où la toxine de l'Animal pénètre dans l'organisme, donnant lieu à des œdèmes, des érythèmes et des symptômes généraux. Sur les neuf mille espèces environ de méduses, une soixantaine seulement sont dangereuses pour l'homme; notons que la plupart d'entre elles n'habitent pas les mers d'Europe ou y sont très rares. Le venin des Cnidaires a été étudié par de nombreux auteurs; on l'obtient grâce à l'action de décharges électriques ou par l'extraction du contenu des cnidoblastes.

Dans son milieu ambiant, la méduse provoque l'émerveillement par sa beauté et ses mouvements qui rappellent ceux de la danse.

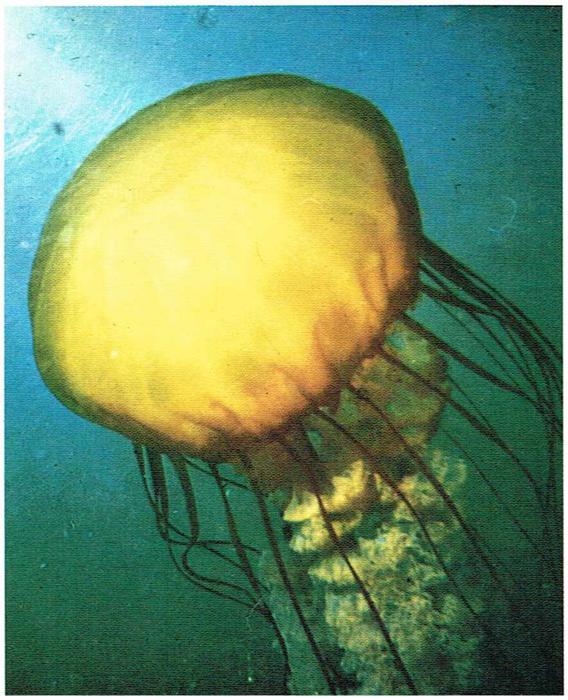

R. Ames

ALBUM DE FAMILLE DES MÉDUSES

Il existe dans la Méditerranée diverses méduses de l'ordre des Acalèphes. La plus dangereuse est la grosse rhizostome (Rhizostoma pulmo), *dont l'ombrelle est dépourvue de tentacules et dont le manubrium se termine par huit appendices; les plus gros exemplaires, d'un diamètre de 20 cm, provoquent un œdème très désagréable; le venin est beaucoup plus dangereux quand il pénètre par les muqueuses et notamment la conjonctive. La* Chrysaora hyosciella, *assez grosse (d'un diamètre de 15 cm), présente aussi quelque danger; elle a un long manubrium et vingt-quatre tentacules; son ombrelle est jaunâtre avec seize rayons bruns caractéristiques. Mais le géant du groupe, c'est* Cyanea capillata, *dont l'ombrelle atteint 3 m et les tentacules 40 m, ce qui en fait l'un des plus grands Animaux connus!*

L'acalèphe brillante (Pelagia noctiluca) *forme fréquemment de grands bancs dans les mers profondes. Plus petite que les précédentes, elle est caractérisée par sa luminescence rose violacé, qu'on remarque la nuit, surtout en hiver. Il est très dangereux de tomber dans les bancs qu'elle forme, à cause des innombrables piqûres dont on peut être victime. De rares acalèphes vivent en eau douce.*

Les mers de l'Australie occidentale connaissent de très dangereuses invasions de Méduses, après les premières pluies estivales. Alors, d'innombrables spécimens de Chironex fleckeri *et de* Chiropsalmus quadrigatus *se pressent près des côtes, surtout lorsque le temps est beau et quand souffle le vent du nord. Cela semble dû à des variations de la salinité et de la température de la mer, qui poussent ces Animaux vers les plages, alors qu'ils sont normalement pélagiques.*

La première de ces deux espèces est sans doute la plus dangereuse. Lorsqu'elles ont touché la peau d'un infortuné baigneur, celle-ci rougit d'abord, puis se décolore localement, parfois pour plusieurs années; le sujet ressent de plus des démangeaisons. L'endroit blessé par Chironex fleckeri *est rapidement atteint d'érythème et d'œdème, avec formation de phlyctènes, sortes de vésicules pouvant atteindre une hauteur de 5 cm, et nécrose conséquente, parfois jusqu'aux tissus sous-cutanés; la guérison est lente et laisse des cicatrices indélébiles. Quand la quantité de venin est quelque peu importante, il y a collapsus, c'est-à-dire diminution de l'énergie du cœur, suivi par un blocage cardiaque.*

Heureusement, nous ne connaissons rien de semblable sur les plages de la Méditerranée et de l'océan Atlantique, ainsi que sur les côtes de la Manche et de la mer du Nord. Toutefois, la physalie (Physalia physalis) *provoque de fort douloureuses piqûres. Elle appartient à la classe des* Siphonophores, *organismes coloniaux qui dérivent en pleine mer, attachés à un flotteur plein d'air, ou pneumatophore. En dessous, pendent des polypes à fonctions variées. Les uns président à la digestion, d'autres encore à la préhension, et d'autres enfin à la reproduction. La physalie provoque parfois la noyade de la personne touchée, à cause de la forte douleur qui aboutit à l'évanouissement; bien que les effets ne soient pas toujours aussi graves, ils peuvent être aussi impressionnants que ceux que produisent les méduses australiennes. Les propriétés urticantes des physalies leur ont valu des appellations martiales : galère, frégate, vaisseau de guerre portugais ou hollandais, etc. Elles forment parfois des bancs de plusieurs millions de sujets, qui s'étirent sur des dizaines de kilomètres...*

Les physalies ont été à l'origine d'une importante découverte médicale, celle de l'anaphylaxie. C'est au cours d'une croisière sur le yacht du prince de Monaco que C. Richet et P. Portier, en 1902, montrèrent que le venin de ces méduses sensibilise l'Animal ou l'homme qui l'a reçu; aussi la seconde injection a-t-elle des effets beaucoup plus violents que la première. C'est, en quelque sorte, le contraire de la vaccination.

LES TERMITES

Parmi les Insectes qui ont évolué au cours des âges vers un perfectionnement de la vie sociale, les plus anciens sont les Termites ; ce sont de vrais « fossiles vivants », dont l'apparition remonte à l'Éocène, soit à 70 millions d'années. Les Termites sont aussi appelés vulgairement fourmis blanches, bien qu'ils n'aient rien à voir avec les véritables fourmis, sinon parfois une vague ressemblance.

Leur vie dans les ténèbres perpétuelles et leur parfaite organisation communautaire ont intéressé depuis longtemps les biologistes, mais bien des aspects de leur vie sont encore inconnus, surtout parce qu'il est très difficile de les élever en laboratoire, ce qui a été réalisé seulement pour les formes les plus primitives qui constituent de petites colonies dans le bois.

ORGANISATION D'UNE TERMITIÈRE

Toutes les espèces de Termites sont sociales, mais on s'est rendu compte que la complexité est très différente pour l'organisation des diverses communautés. Chacune d'entre elles est formée d'un ou de plusieurs couples fertiles, constitués d'un roi et d'une reine, dont le rôle est uniquement la procréation. On sait que les femelles de Termites sont très fécondes : chez certains genres, par exemple le Bellicositermes ou Termite belliqueux, qui peuvent vivre à l'état adulte durant plusieurs dizaines d'années, le nombre des œufs pondus atteint des millions, ce qui dépasse la fécondité de tout autre Insecte.

Le roi et la reine passent toute leur vie dans une chambre royale, située généralement dans la partie la plus centrale de la termitière. La reine devient une sorte d'énorme boudin, bourré d'œufs, incapable de remuer, quelque trente mille fois plus volumineux que les autres Termites. Le roi rampe sur ses flancs. Au fur et à mesure que la reine pond les œufs, ceux-ci sont enlevés par les ouvrières, qui sont des individus stériles aussi bien mâles que femelles, et portés dans d'autres chambres où seront élevées les larves. Ce sont en effet les ouvrières qui ont pour charge d'organiser le nid, et qui fabriquent les termitières, énormes constructions visibles dans les pays chauds et atteignant parfois 6 m de hauteur pour un diamètre de plusieurs dizaines de mètres. Ces constructions se font à l'aide de petits bouts de bois mastiqués, ensalivés, et parfois mélangés de sable ou d'argile.

Par rapport à leurs architectes, les termitières sont des édifices colossaux. Cathédrales et pyramides ne sont, toutes proportions gardées, rien à côté d'elles, et ce sont des monuments hauts comme des montagnes que l'homme devrait construire pour rivaliser avec les Termites.

L'observation des Termites a conduit le professeur Grassé à émettre la théorie de la stigmergie (du grec στίγμα, piqûre, et ἔργον, travail). Au cours de la construction de la termitière, le Termite est guidé par son propre travail : les piliers sur lesquels il est juché le stimulent pour la poursuite de son œuvre d'architecte.

Les ouvrières sont en outre chargées de maintenir l'uniformité de l'atmosphère à l'intérieur du nid, et en particulier l'humidité, laquelle doit être toujours élevée ; pour ce faire, elles ont recours à divers artifices, par exemple creuser de profondes galeries dans le sol afin d'atteindre une nappe phréatique, ou bien humecter de salive les parois des galeries.

Les ouvrières vont par ailleurs à la recherche de la nourriture — qui est presque toujours du bois, et en tout cas uniquement des matières cellulosiques. Elles se déplacent dans des tunnels souterrains ou superficiels ; ces derniers sont cependant recouverts par la même matière que celle dont est fabriqué le nid, de sorte que les Termites ne sortent jamais à la lumière solaire.

A. Margiocco

Certains individus présentent des caractères particuliers : ce sont les soldats qui ont pour rôle de défendre la termitière contre les incursions d'autres Insectes.

Enfin, les ouvrières ont pour tâche de nourrir les rois et les reines, ainsi que les stades juvéniles des diverses castes, grâce à une nourriture prédigérée, qui est régurgitée de l'intestin antérieur, ou, en certains cas, émise par l'intestin terminal. De cette manière, les juvéniles se voient aussi transmettre en même temps les Protozoaires Flagellés symbiotiques qui existent dans le tube digestif de nombreux Termites, et qui leur sont absolument nécessaires pour pouvoir digérer le bois.

G. Mazza

Ci-dessus, une termitière ; certaines de ces constructions atteignent parfois 6 m de hauteur. Ci-dessous, la reine avant la ponte des œufs.

Çà et là dans la termitière, et surtout à la périphérie, on remarque des individus à caractères particuliers : ils ont une grosse tête, avec une paire de mandibules pointues si développées que l'Insecte ne peut s'alimenter (souvent, leur tête est aussi grande que le reste du corps), ce qui l'oblige à se faire nourrir par les ouvrières. Il s'agit d'une autre caste d'individus stériles, les soldats. Ceux-ci, comme l'indique leur nom, ont pour rôle de défendre la termitière contre les incursions d'autres Insectes (en particulier des fourmis), ce qu'ils font à l'aide de leurs mandibules et de leur tête, laquelle peut servir à fermer temporairement les trous pouvant s'être formés dans le nid.

Chez certaines espèces de Termites, les soldats ont une tête en forme de poire prolongée à l'avant par une « canule ». Ils sont dits nasutés. Bien qu'ils soient dépourvus de mandibules, ils sont néanmoins redoutables car ils projettent une sorte de résine sur leurs ennemis. On les a comparés à des seringues à injection vivantes.

Ajoutons que les termitières hébergent, en plus des Termites, toutes sortes d'autres Animaux : des mouches, des Coléoptères, et jusqu'à des Oiseaux...

Une fois par an apparaissent dans la colonie des individus ailés ; dès qu'ils ont atteint l'âge adulte, ils abandonnent la termitière par des orifices pratiqués par les ouvrières dans les parois. Ces Insectes ailés — qui sont des mâles et des femelles fertiles — s'envolent en grand nombre ; après un bref voyage, ils redescendent à terre, où ils forment des couples destinés à créer de nouvelles sociétés, et perdent alors leurs ailes.

Il peut se faire que le roi ou la reine d'un nid, ou même les deux, meurent ; en ce cas, la communauté risquerait de périr si les ouvrières n'avaient la possibilité d'élever à tout moment des juvéniles pour en faire des adultes fertiles prenant la place des individus sexués morts. Ces individus particuliers, que l'on reconnaît à des différences morphologiques par rapport aux véritables rois et reines, sont nommés rois et reines de substitution ou de complément.

Mais comment peut-il se faire que naissent des individus des différentes castes en des proportions déterminées, pour maintenir l'équilibre de la termitière ? La question est bien difficile à résoudre, mais on sait aujourd'hui, après avoir écarté la thèse de la différenciation dès le stade de l'œuf, qu'il s'agit d'une différenciation due à des facteurs externes comme la nourriture, et surtout l'ingestion de substances spéciales produites par les Termites eux-mêmes, les phéromones ou hormones externes. C'est ainsi qu'a lieu la régulation sociale de la termitière, c'est-à-dire le maintien d'un rapport déterminé dans les quantités d'individus des différentes castes présentes.

Certains Termites « cultivent » des Champignons. Les loges de leurs termitières renferment des meules constituées de boulettes de bois mâché. Sur ces meules se développent des Champignons qui poussent jusqu'à la paroi de la termitière et, parfois même, la transpercent et émergent à l'extérieur.

Les Termites ne paraissent pas manger les Champignons, mais ils ont avec eux des relations très subtiles. Dans les meules, le mycélium, c'est-à-dire l'ensemble des filaments du Champignon, dégrade la lignine, le constituant principal du bois : il se dégage ainsi de la cellulose, dont s'enrichit la meule.

Les Termites peuvent alors se nourrir de cette cellulose, mais pour la digérer, ils ont besoin de Bactéries qui vivent dans leur intestin.

LES TERMITES EUROPÉENS

Des Termites vivent en Europe, et spécialement en Italie, en Espagne et dans le midi de la France ; Pietro Rossi, naturaliste toscan du XVIII^e^ siècle, décrivit le premier l'une des espèces italiennes et françaises, le Reticulitermes *ou* Termes lucifugus, *vulgairement Termite lucifuge, et fit aussi diverses observations sur la vie de l'Insecte : « Il habite au mois de juin en sociétés, dans des troncs pourris d'arbres forestiers, où j'ai pu voir vivre de nombreux individus ailés en même temps que la masse des individus aptères. » Il existe une autre espèce de nos régions, mais moins commune, le* Calotermes flavicollis *ou Termite à cou jaune.*

Ce dernier constitue des colonies peu nombreuses (il s'agit au maximum de quelques milliers d'individus), qui vivent habituellement dans les parties nécrosées des arbres ou, plus rarement, dans le bois d'œuvre ; en tous les cas, seules les parties au-dessus du niveau du sol semblent attaquées. On rencontre fréquemment plusieurs nids dans un seul tronc : on a trouvé douze couples reproducteurs dans un platane, à Naples. Cette espèce ne présente pas d'ouvrières, dont les fonctions sont remplies par les juvéniles de tous âges. Le couple royal provient des individus ailés qui essaiment au mois de septembre.

Le Termite lucifuge, au contraire de l'espèce précédente, forme des colonies souterraines très peuplées, dans les futaies et dans le bois enterré, d'où les adultes essaiment au printemps. Tous ces individus féconds sont cependant perdus, ce qui fait que les reproducteurs observés sous nos climats sont des rois et des reines de substitution.

Les Termites se répandent vite en Europe méridionale, mais ils restent heureusement encore localisés. En France, il en est arrivé au XVIII^e^ siècle sans doute par des navires, dans la région de La Rochelle et de Rochefort, où ils causent parfois de gros dégâts. Le Termite lucifuge s'attaque au bois d'œuvre, pouvant provoquer, sans qu'on s'en doute jusqu'au moment de l'accident, l'effondrement des maisons. Il en est parvenu jusqu'en Ile-de-France, où certains quartiers de Paris sont menacés, notamment dans le centre et dans le XVI^e^ arrondissement ; assez récemment, un gros arbre d'une avenue s'est effondré à cause des Termites. Le Termite à cou jaune s'attaque plutôt aux vieux oliviers. Il est difficile de lutter contre les Termites, leur activité étant silencieuse et insaisissable ; lorsqu'on a pu les détecter à temps, l'un des meilleurs moyens de lutte consiste en un traitement au chlore gazeux, par des équipes spécialisées, des nids localisés.

I.G.D.A.

LES VERS A SOIE

Trente siècles avant Jésus-Christ, on exploitait déjà le miel produit par les abeilles ; les procédés étaient toutefois entièrement empiriques, et l'on ne disposait pas des techniques élaborées actuelles. A peu près à la même époque, on fabriquait des étoffes de soie dans la lointaine Chine, ce qui prouve qu'on avait découvert la façon d'élever le Ver à soie.

Si l'on considère que le bombyx du mûrier (Bombyx mori)*, papillon de la famille des Bombycidés et dont la chenille produit la soie, n'existe plus sous sa forme naturelle d'origine (sans doute, en son temps, au fin fond de l'Asie), on se rend compte de toute l'œuvre de sélection dont a pu être l'objet ce papillon de la part des Chinois.*

UN PEU D'HISTOIRE

De longues recherches sur l'origine du bombyx du mûrier ont montré que celui-ci doit descendre d'un papillon sauvage, *Theophila mandarina,* lui aussi de l'Extrême-Orient. En effet, le bombyx du mûrier se croise avec lui.

Des histoires plus ou moins légendaires sur la découverte de la soie et sur son utilisation ont été rapportées par les écrivains de l'ancienne Chine. Ce serait l'impératrice Si-Lin-Tchi qui aurait élevé pour la première fois l'Insecte, il y a environ 2 800 ans, soit vers 2600 av. J.-C., et qui aurait découvert la méthode pour filer la soie tirée des cocons. Les dames de la Cour auraient suivi l'exemple de la souveraine ; l'élevage nouveau se serait alors rapidement répandu en Chine et, comme les gouvernants d'alors purent constater quelle source de richesse constituait le commerce des soieries, ils édictèrent de très sévères lois — qui prévoyaient la peine de mort — pour quiconque répandrait hors de l'Empire les secrets de la sériciculture (c'est ainsi que l'on nomme l'élevage du Ver à soie).

De ce fait, la production de soie resta le monopole des Chinois durant plus de 2 000 ans, puis sa technique, au III^e siècle av. J.-C., se répandit au Japon et en Inde, pour n'arriver en Europe que beaucoup plus tard. En effet, les Romains utilisaient — et appréciaient au plus haut point — la soie, qui leur parvenait par le commerce avec l'Orient, mais ne savaient pas la fabriquer. C'est seulement au VI^e siècle de notre ère que deux moines du mont Athos apportèrent de Perse en Grèce — en les cachant dans un bambou creux — des œufs de bombyx du mûrier et des graines de mûrier (dont les feuilles servent de nourriture au Ver à soie).

On put alors entreprendre en Occident l'élevage du Ver à soie, qui se répandit ensuite largement par l'intermédiaire des Arabes dans leur vaste empire. La sériciculture passa par la suite de la Sicile et du Mezzogiorno italien — où l'avaient importée les Musulmans — au reste de l'Italie, puis, vers la fin du XIII^e siècle, en France, dans le Midi et dans la vallée du Rhône. En 1 601, Olivier de Serres fit planter aux Tuileries 20 000 pieds de mûriers à l'intention des Vers. Le climat parisien dut convenir à l'espèce, puisque Ernesta Grisi, la compagne de Théophile Gautier, l'élevait encore près de Montrouge.

Mais c'est surtout dans la région méditerranéenne que prospéra la sériciculture, dont l'apogée se situa vers 1850. Ensuite, les magnaneries — c'est le nom des élevages de Vers à soie — périclitèrent : actuellement, il en subsiste quelques-unes dans la région du Gard. Les principales nations productrices de soie sont, dans l'ordre, le Japon, la Chine et l'U.R.S.S.; les marchés de soie les plus importants sont Canton, Yokohoma et Kobé.

Au siècle dernier, les magnaneries souffrirent d'une maladie, la pébrine, provoquée par un Protozoaire (animalcule à une cellule) du groupe des Sporozoaires, le *Nosema.* Ses spores envahissent le Ver, qui se couvre de taches noires.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

On voit ici sortir de leurs cocons des Vers à soie du type bombyx du mûrier, papillons blanchâtres au vol lent et pesant.

C'est Pasteur lui-même qui fut chargé de lutter contre la pébrine. Hélas, le grand homme ne connaissait rien aux Insectes, et ce fut Fabre qui l'initia à l'entomologie. Pasteur comprit alors ce qu'il fallait faire. Les spores du parasite gagnant les œufs du bombyx, il suffisait de séparer les œufs sains des œufs malades et d'éliminer ces derniers. C'est ainsi que la pébrine fut jugulée.

LE CYCLE ET L'ÉLEVAGE

Le bombyx du mûrier adulte est un papillon trapu, blanchâtre, à ailes petites par rapport à la taille et le poids du corps, et donc incapable de voler. La vie de

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Cocon ouvert pour montrer l'intérieur où se transforme la chrysalide.

l'adulte est très brève. Chaque femelle pond en moyenne de 450 à 500 œufs (les « graines », comme on les appelle), qui sont collés les uns aux autres par une substance mucilagineuse à un support fourni par l'éleveur : il s'agit habituellement d'un petit sac de papier ou de toile.

Les œufs proviennent d'établissements spécialisés, pour éviter la propagation de la pébrine et d'autres maladies, ainsi que pour assurer, par le contrôle des croisements, l'homogénéité du point de vue génétique. Le choix se porte sur les papillons qui éclosent des cocons considérés comme les plus sains et les plus riches en soie.

La ponte a généralement lieu à la fin de juin ou au début de juillet, et les œufs sont conservés jusqu'au printemps suivant dans des locaux spéciaux, où ils connaissent une période d'estivation, en passant d'une température de 24 °C à 30 °C en juillet à environ 22 °C à 24 °C à la mi-septembre, époque à laquelle commence le passage à un refroidissement progressif. Les œufs sont ensuite conservés à la température de 10 °C à 12 °C durant une période préhivernale, puis sont portés à une température d'hibernation de 2 °C à 3 °C. Ce dernier stade, qui dure de quatre-vingt-dix à cent jours, est nécessaire pour que le développement embryonnaire puisse se réaliser complètement.

A peu près un mois après le début de l'élevage, commence la phase dite de la « période d'incubation », pendant laquelle les œufs sont portés d'abord graduellement à 15 °C, puis, par des accroissements quotidiens d'environ 1 °C, à 22 °C, température à laquelle débutent les éclosions.

Les larves, blanchâtres et peu actives, mesurent au plus 3 mm de longueur à la naissance. Elles se développent rapidement (en trente jours ou un peu plus) et passent par cinq stades, séparés par quatre mues, pour atteindre une longueur moyenne de 80 mm et un poids de 4 à 5 g. Elles se nourrissent uniquement de feuilles des mûriers, aussi bien du blanc (Morus alba) *que du noir* (Morus nigra) *; on a fait des expériences d'élevage avec d'autres plantes, mais les résultats ont été très décevants, quand ils n'ont pas été nuls.*

Les larves sont très voraces ; on a calculé que, pour amener au terme de leur croissance un nombre d'entre elles correspondant à 30 g d'œufs (un gramme d'œufs contient en moyenne de 1 400 à 2 000 unités), il faut environ 1 200 kg de feuilles de mûriers, dont environ 700 kg pour le dernier stade seulement.

La sériciculture s'effectue dans des locaux bien aérés : il faut environ 100 m³ d'espace pour 30 g d'œufs de bombyx. L'élevage commence au début du mois de mai. Les Vers sont normalement nourris sur des cailloutis où l'on pose une couche de feuilles de mûriers, finement triturées pour les premiers âges, puis de moins en moins par la suite, pour arriver à l'administration de feuilles entières à la fin.

Lorsqu'elles sont matures, les larves — jusqu'alors à moitié endormies sur leurs lits de feuilles — se mettent à ramper activement. Cette phase, dite de la « sortie aux bois » par les sériciculteurs, indique que les larves ressentent le besoin de former leur cocon ; on leur facilite la tâche en disposant verticalement des rameaux de diverses plantes, sur lesquels les Vers se mettent à tisser un entrelacs de fils de soie, qui deviendra peu à peu — pendant les jours suivants — un cocon parfait, à l'intérieur duquel a lieu la transformation en chrysalide.

Au bout de deux semaines, le nouvel adulte éclôt. Mais comme, sauf dans le cas des élevages en vue de la reproduction, le papillon endommage le cocon quand il en sort, on empêche son « éclosion » par ébouillantage dans de l'eau à la température de 80 °C à 85 °C.

Le cocon a une forme et une taille qui varient selon les races ; il est habituellement oblong, parfois rétréci à sa partie médiane, et de couleur blanche, jaune pâle ou dorée ; en certains cas, il est rose ou même verdâtre. Il est formé par un fil continu d'une longueur de 300 m à 1 500 m (et même parfois de 3 000 m) ; on a récemment amélioré le rendement en longueur, à la suite de recherches réalisées au Japon.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Des rameaux sont disposés verticalement et les larves y tissent un entrelacs de fils de soie qui deviendra le cocon.

QU'EST-CE QUE LA SOIE ?

La partie extérieure du cocon, qui est constituée par des fils lâches disposés irrégulièrement, forme avec une autre couche plus interne la bourre de soie. La partie médiane est la bave de soie pouvant être filée en même temps que celle d'autres cocons (car chacune est très et même trop fine) pour faire le fil de soie grège (ou brute), que l'on tisse ensuite, tel quel ou après diverses transformations et teinture.

Le rendement moyen de 30 g d'œufs de bombyx du mûrier est d'environ 60 kg à 65 kg de cocons (le maximum est égal au double), avec un rendement en soie de 1/9 à 1/10 du poids.

Pour obtenir le fil de soie à partir du cocon, l'« ébouillantage » dont nous avons parlé plus haut est absolument nécessaire, car la chrysalide est ainsi tuée — ce qui évitera la sortie du papillon adulte — et surtout parce que l'un des constituants non utiles de la soie est éliminé (voir l'explication plus loin), grâce à l'addition à l'eau chaude d'une base forte.

Les races de bombyx du mûrier communément élevées dans nos régions n'ont qu'une seule génération par an ; on élève toutefois en Orient des races qui se reproduisent plusieurs fois chaque année.

La soie dont est formé le cocon est sécrétée par la paire de glandes labiales ou séricigènes que possède la larve. Ces glandes sont constituées par une zone sécrétrice, formée par deux longs tubes fins, suivie par une zone médiane, ou réservoir, d'un diamètre nettement supérieur et où s'accumule la soie d'abord liquide. Celle-ci passe ensuite par deux canalicules antérieurs, ou canaux excréteurs, qui se réunissent à la partie sommitale du labium inférieur pour former un unique canal très court débouchant dans la filière.

Le fil de soie est constitué par la coalescence des deux baves, provenant chacune d'une glande, fusionnant dans le dernier tronçon du canal commun, en passant dans une sorte de filière. Là, les baves sont comprimées entre le plafond chitinisé du canalicule et un gonflement musculeux.

Le liquide soyeux se solidifie au contact de l'air et forme un fil d'un diamètre de 15 à 20 μ, léger mais résistant (un fil d'un mètre de longueur supporte un poids de 10 g). Observé dans sa section, ce fil est constitué par deux zones : l'une externe, d'un diamètre de 0,2 mm à 0,25 mm — constituée de séricine — et l'autre interne — constituée de fibroïne. Ces deux matières sont des substances protéiques complexes. La première se dissout dans les solutions alcalines bouillantes, alors que la seconde ne subit pas cette dissolution ; on met donc à profit ces propriétés pour procéder au « dégommage » du cocon, c'est-à-dire à l'isolement de la fibroïne ; cette dernière est ensuite filée, puis tissée : c'est la soie.

LES ABEILLES

L'abeille est l'un des rares Invertébrés à avoir été véritablement domestiqués. Plusieurs peintures rupestres datant de la fin de la préhistoire montrent que sa domestication était déjà ébauchée vers 6000 av. J.-C.; elle ne fut achevée qu'en Égypte, autour de 2600 av. J.-C.

L'apiculture gagna ensuite la Grèce et Rome : hôte de l'Hymette, montagne de l'Attique, l'abeille fut chantée par Virgile, qui lui consacra un chant des Géorgiques. *L'hydromel, boisson faite de miel et d'eau, était alors très prisé.*

Bien d'autres civilisations élevèrent également les abeilles, notamment les pays musulmans, les peuples d'Afrique et les Amérindiens : le miel abondait sur le grand marché de Mexico.

Mais depuis des siècles, l'abeille a aussi retenu l'attention des savants. Ce fut Réaumur qui élucida les grandes lignes de sa biologie. Peu après, le Genevois François Huber effectua des constatations d'autant plus remarquables qu'il était aveugle. En 1901, l'écrivain belge Maurice Maeterlinck publiait sa Vie des abeilles, *où figurent des idées intéressantes. Au cours des dernières décennies, ce sont surtout les travaux de l'Autrichien Karl von Frisch, prix Nobel 1973, qui ont retenu l'attention ; on lui doit la découverte de la fameuse « danse » des abeilles, dont nous reparlerons.*

UNE VIE SOCIALE COMPLEXE

Les abeilles sont des Hyménoptères de la famille des Apidés. Le genre Apis *comprend 4 espèces, dont les noms scientifiques sont* dorsata, florea, indica *et* mellifera *ou* mellifica. *Les trois premières espèces, asiatiques, sont surtout répandues en Inde. L'A.* dorsata *et l'A.* florea *fabriquent des nids à un seul rayon, suspendus aux arbres; ces nids sont gigantesques chez la première espèce (atteignant 2 m), très petits chez la seconde (de 15 à 20 cm). On a tenté de domestiquer aussi l'A.* dorsata, *mais sans succès; c'est une espèce très agressive. L'A.* indica *construit des nids à plusieurs rayons dans des trous d'arbres et de rochers.*

L'unique abeille actuellement utilisée pour l'élevage est l'A. mellifica, *dont les différentes sous-espèces sont répandues en Europe, en Asie et en Afrique. Plusieurs d'entre elles, qui sont distribuées, dans la nature, en Europe et en Asie occidentale, ont été introduites par l'homme dans d'autres continents, en particulier en Amérique du Nord.*

Les abeilles comptent au nombre des Insectes sociaux les plus évolués. Leurs sociétés sont constituées par des individus de trois castes : les mâles féconds, les femelles fécondes ou reines, et les ouvrières stériles (qui sont cependant des femelles). Il n'y a qu'une reine par ruche; elle est plus grande que les autres individus, surtout du fait du développement de son abdomen. Fécondée une seule fois au cours du vol nuptial, elle passe ensuite sa vie à pondre des œufs.

Les mâles, ou faux-bourdons, apparaissent seulement à des périodes déterminées de l'année, à la fin du printemps et en été, et vivent peu de temps; on les distingue facilement à leur forme trapue et à leurs gros yeux.

Les ouvrières, comme nous l'avons dit, sont des femelles stériles, et non des individus des deux sexes comme chez les termites. Ce sont elles qui effectuent tous les travaux nécessaires à la vie de la ruche.

Une société d'abeilles est donc constituée par une seule reine féconde, par des milliers d'ouvrières (dont le nombre atteint facilement 50 000 et jusqu'à 70 000 ou même 100 000 au moment de l'essaimage), et — pendant une brève période à la belle saison — par des faux-bourdons.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Les abeilles comptent au nombre des Insectes sociaux les plus évolués.

Les abeilles vivent dans des nids constitués par des rayons, c'est-à-dire par des séries d'alvéoles hexagonaux disposés sur les deux faces d'une surface verticale. Les rayons naturels sont placés dans des sites tels que des creux d'arbres.

En apiculture, les rayons sont placés chacun par l'apiculteur dans un châssis rectangulaire, et sont constitués par une feuille de cire sur laquelle sont estampées de petites cavités; celles-ci constituent la base des futurs alvéoles que construiront les ouvrières.

Sur les rayons, on observe — surtout à la fin du printemps — des alvéoles beaucoup plus grands que les autres, où sont élevées de nouvelles reines. Ces dernières proviennent de larves qui, pendant tout leur développement, sont nourries par les ouvrières avec de la gelée royale, sécrétée par leurs glandes pharyngiennes.

Quand une nouvelle reine est formée, elle va tuer dans leurs cellules les autres reines non encore écloses qui pourraient être ses rivales. Alors, l'ancienne reine part en général avec un nombre voulu d'ouvrières, pour former ce qu'on appelle l'essaim; c'est ainsi que se multiplie ordinairement — par essaimage — une société d'abeilles. La reine nouveau-née sort elle aussi de la ruche, mais pour accomplir son vol nuptial. Quand elle a été fécondée par

Archives P 2

Archives B

L'apiculteur vient d'enfumer la ruche afin de pouvoir procéder à la récolte du miel. Ci-contre, les ouvrières sont chargées de la nutrition des larves. En bas, vue en coupe longitudinale de deux aspects de la larve au cours de son développement. A droite de la photo, la forme de la future abeille commence à se dessiner.

un mâle, elle rentre dans la ruche et commence à pondre des œufs (à raison d'un par alvéole), en commençant par les zones centrales des rayons du milieu; les œufs peuvent être fécondés à son gré (par les spermatozoïdes qu'elle a emmagasinés dans son corps), donnant alors des femelles, ou non, donnant en ce cas des mâles.

LES OUVRIÈRES AU TRAVAIL

Les ouvrières, qui vivent de 4 à 6 semaines pendant la belle saison, effectuent divers travaux. Pendant une période d'environ deux semaines, elles restent à l'intérieur de la ruche et se chargent du nettoyage, de la construction des rayons, et enfin de la nourriture des larves ainsi que de la reine; cette dernière, en effet, n'a pas le temps de s'alimenter elle-même.

Les ouvrières nourrissent toutes les larves, durant les trois premiers jours qui suivent l'éclosion, avec de la gelée royale; puis, ce régime spécial n'est prolongé que pour les larves destinées à devenir des reines, alors que les autres sont alimentées seulement avec du miel et du pollen.

Les abeilles les plus vieilles, qui ont plus de 15 à 20 jours, deviennent des butineuses, c'est-à-dire qu'elles sortent à la recherche du nectar et du pollen, et même de l'eau et du propolis, substance résineuse avec laquelle elles bouchent les fentes de la ruche.

Les butineuses sucent le nectar des fleurs ou d'autres substances sucrées, grâce à leur appareil buccal pourvu d'une longue ligula. Les liquides pénètrent dans l'intestin antérieur, plus précisément dans une dilatation spéciale, la bourse à miel, où le nectar subit une première transformation en vue de devenir du miel; puis le produit est régurgité par les ouvrières, une fois revenues à la ruche, pour être emmagasiné enfin dans des alvéoles semblables à ceux où sont élevées les larves, mais placés généralement dans des zones périphériques.

Le pollen dont l'abeille se charge inconsciemment (mais est-ce bien inconscient?) en entrant dans les fleurs est récolté par les pattes postérieures, de conformation spéciale : en effet, les tibias de ces pattes sont aplatis et creusés d'une concavité appelée corbeille, entourée par des poils serrés, où le pollen est accumulé par suite des mouvements d'une partie distale de la patte, la brosse, qui possède quelques soies.

Archives B

UNE DANSE QUI EST UN LANGAGE

Karl von Frisch, comme nous l'avons dit, a découvert un véritable langage chez les abeilles. Pour cela, il lui a suffi d'une montre, d'une règle, d'un rapporteur, de coupelles et, bien sûr, d'une ruche. Il est parvenu à reconnaître individuellement ses abeilles en marquant leur dos d'une goutte de peinture.

Les sources de nourritures mises à la disposition de celles-ci étant des coupelles de sirop, von Frisch remarqua que lorsqu'une abeille revenait de l'une d'elles, distante de moins de cinquante mètres de la ruche, elle exécutait sur un rayon une ronde circulaire; à chaque tour, elle changeait de sens.

Les autres ouvrières la suivent alors et sentent l'odeur de la nourriture dont est imprégnée l'informatrice, puis elles s'envolent dans toutes les directions; comme les coupes de sirop ne sont pas loin, elles les trouvent sans difficulté.

Le problème se complique lorsque la nourriture est plus éloignée. Dans ce cas, les abeilles utilisent une danse dite frétillante, car elles agitent en même temps leur abdomen. L'ouvrière décrit deux demi-cercles dont le diamètre est commun : celui-ci fait un certain angle avec la verticale, car cette danse se déroule dans un plan vertical.

Or, cet angle est égal à celui que fait la direction de la source par rapport au soleil, à partir de la ruche bien entendu. Voilà pour la direction de la nourriture.

Reste à indiquer la distance à laquelle elle se situe. L'informatrice la communique en dansant plus ou moins rapidement. Si elle effectue dix tours en quinze secondes, c'est que la coupe se trouve à cent mètres; si elle n'en fait que six, c'est qu'elle est à cinq cents mètres.

En fait, ce n'est pas tant la distance que l'abeille apprécie, mais l'effort nécessaire pour la parcourir; ainsi, si elle doit voler vent debout pour atteindre la nourriture, elle indiquera une distance plus forte que le trajet réel.

Selon von Frisch, les abeilles ont donc un véritable langage, l'un des plus évolués du monde animal. Toutefois, ces dernières années, ses thèses ont été discutées. Il n'est pas question de nier la valeur informatrice de la danse : en l'observant, un homme peut découvrir le point qu'elle indique; mieux encore, et c'est un comble, il y arrive parfois avant les abeilles...

Ce qui est en cause, c'est l'importance que celles-ci accordent à la danse. Pour certains spécialistes, l'odeur de la source de nourriture est suffisante; la preuve est qu'un sirop inodore n'attire guère d'abeilles... La question en est là. Même si sa portée est à nuancer, la danse frétillante conserve un intérêt capital.

L'APICULTURE

Comme nous l'avons dit, l'exploitation des abeilles, ou apiculture, est très ancienne. Mais on n'a découvert des méthodes rationnelles que récemment, compte tenu de la difficulté d'extraire le miel sans avoir recours au sacrifice, au moins partiel, des abeilles; cela était dû au fait que les rayons étaient fixes.

L'une des principales découvertes de l'apiculture a donc été l'invention de la ruche à rayons mobiles, dont les premières applications systématiques remontent aux XVIIIe et XIXe siècles. Les ruches modernes, qui permettent d'extraire le miel sans nuire à leurs habitantes, sont constituées par deux séries superposées de rayons verticaux et mobiles; ceux de la partie supérieure — généralement de taille réduite — constituent les rayons dont on récolte le miel.

Les abeilles nous donnent principalement leur miel, qui est encore l'un des principaux ingrédients utilisés en confiserie; en second lieu, on exploite la cire. Depuis quelques années, on a commencé à récolter aussi le pollen et la gelée royale, aliments reconstituants de haute valeur.

Aujourd'hui, l'apiculture ne sert plus seulement pour les productions dont nous venons de parler, mais aussi pour l'activité pollinisatrice des abeilles. On sait en effet que, pour différentes raisons, comme la mise en culture quasi totale des sols et l'emploi à grande échelle d'insecticides très toxiques, le nombre des Insectes pollinisateurs a beaucoup diminué, ce qui a compromis la production de diverses cultures fourragères et fruitières puisque la fécondation des fleurs dépend de ces petits collaborateurs.

On a donc pensé à installer des ruches d'abord en Amérique, puis en Europe, à proximité des cultures en fleurs, ce qui a donné des résultats très satisfaisants. A titre d'exemple, des expériences effectuées avec des cultures de luzerne et de trèfle ont permis d'augmenter la production de 3 à 6 fois.

Enfin, les abeilles interviennent en médecine : des injections sous-cutanées de venin d'abeille associé à la novocaïne sont efficaces contre l'arthrite; quant au miel, il a une action antibactérienne.

SAUTERELLES, GRILLONS ET CRIQUETS

Les invasions de Criquets constituent l'un des pires fléaux naturels qui frappent encore de nos jours certaines régions de la terre. Après le passage des nuages formés par ces Animaux (et qui comptent parfois des centaines de millions d'individus), il ne reste pratiquement rien.

Dès l'Antiquité, l'apparition des vols de Criquets a été considérée comme une calamité; il nous suffira de rappeler que selon ce que nous dit la Bible dans l'Exode, la huitième plaie qui aurait frappé l'Égypte pharaonique fut la venue de ces Insectes (sous la XIXe dynastie, soit entre 1300 et 1200 av. J.-C.).

Les Criquets appartiennent à l'ordre des Orthoptères : celui-ci est divisé en deux sous-ordres, les Ensifères, à longues antennes filiformes pouvant dépasser en longueur le corps, et les Cœlifères, à antennes au contraire courtes, assez grosses, et à segments bien distincts. Les premiers comprennent les Sauterelles et les Grillons, les seconds, les Criquets ou Acridiens.

SAUTERELLES ET GRILLONS

Les Ensifères sont presque toujours de grande taille, et leurs couleurs vont du vert brillant au vert-brun. Les femelles ont un long « ovipositeur » en forme de sabre (d'où le nom donné au groupe qui vient du latin ensis, *épée), avec lequel elles pondent leurs œufs dans des Végétaux ou dans le sol.*

Parmi les nombreuses espèces observées dans nos campagnes, la principale est la sauterelle verte (Locusta, ou Tettigonia viridissima) *longue de 3,5 mm, que l'on entend chanter sur les arbres et les arbustes, le soir et la nuit, à la fin de l'été. Le jour, elle se trouve dans les herbes et se nourrit de diverses plantes, même cultivées, et parfois de graines, en particulier celles des capsules des Caryophyllacées; à l'occasion, elle mange aussi des larves et des Insectes à divers autres stades.*

On trouve plus fréquemment en montagne le dectique verrucivore (Decticus verrucivorus), *plus petit, qui vit dans les pâturages, et qui peut être dangereux quand il se reproduit en grand nombre. Quant au milieu cavernicole, on y rencontre certaines formes ressemblant à première vue à de grosses Araignées, comme les Dolichopodes, Insectes dépigmentés, aptères, et à antennes très développées : celles-ci peuvent mesurer de quatre à sept fois la longueur du corps.*

Chez les Grillons, l'un des plus connus est le grillon champêtre, Gryllus campestris, *long de 2 cm, qui vit dans les prés, où il creuse des galeries d'une longueur de 30 à 50 cm, se terminant par une chambre; celle-ci sert de refuge à l'Insecte en cas de danger, pendant l'hiver et durant les jours de mauvais temps. Les adultes, noirâtres et trapus, sortent de mai à juillet. A cette époque, les mâles émettent leur chant, qui est obtenu par frottement de l'aile antérieure droite, tenue un peu au-dessus de la gauche, et dont le bord interne, dentelé, provoque la vibration des membranes tendues entre les grosses nervures de l'autre aile. Le son est très aigu, car il se forme sous les ailes soulevées et le corps une chambre de résonance, ce qui donne une note unique et répétée environ deux cents fois par minute.*

Le grillon domestique, ou « cri-cri » (Gryllus domesticus), *est plus rare que naguère dans les maisons et les fournils; il faut cependant noter qu'il regagne actuellement du terrain, et a même investi certaines stations du métro parisien... Il est plus petit et plus fin que le précédent, a des ailes complètement développées et est coloré en brun jaunâtre. Il se nourrit de pain, de pâtes alimentaires, de fruits et de divers autres aliments des maisons. Dans le sud de l'Europe, il a été en grande partie supplanté par le grillon de Dalmatie,* Gryllomorpha dalmatina, *de taille et de couleur semblables, mais facile à reconnaître car il est aptère.*

Les Grillons ont connu la faveur de nombreux peuples. Les Provençaux les gardaient dans des « cages à cri-cris » pour le plaisir de les entendre. Les Chinois les enferment dans des gourdes qu'ils attachent à leurs ceintures, et ils organisent même des combats de Grillons, le vainqueur étant celui qui renverse son adversaire sur le dos... Les petits combattants sont dopés au piment rouge et ont droit à des obsèques officielles.

G. Mazza

Le criquet migrateur, *Locusta migratoria,* une des espèces les plus répandues en Europe.

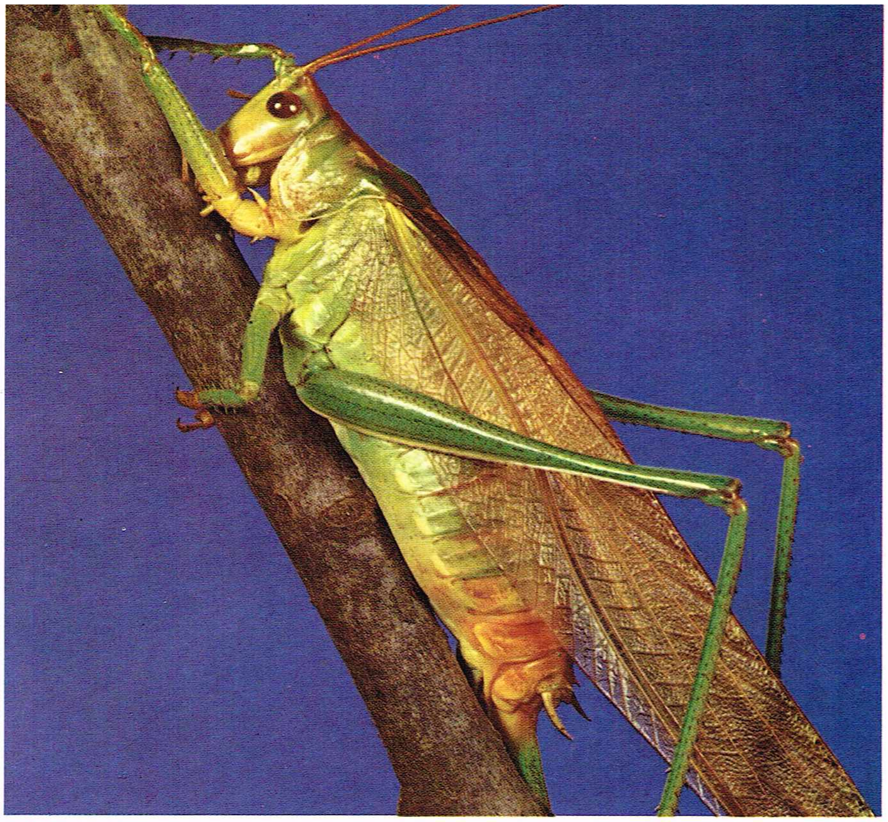

E.P.S.

Tettigonia viridissima, que l'on nomme communément la sauterelle verte.

C'est parmi les Ensifères que se range la courtilière (Gryllotalpa vulgaris), *appelée aussi « taupe-grillon » et dont les caractères morphologiques diffèrent beaucoup de ceux des autres membres du groupe. Elle a subi de nombreuses modifications dues à ses mœurs souterraines : ainsi, ses pattes antérieures sont fouisseuses et lui servent à creuser des galeries dans lesquelles elle vit et se reproduit. On l'observe surtout dans les sols légers et riches en humus. Les imagos apparaissent à la fin du printemps, et les femelles pondent des œufs (au nombre de deux cents à trois cents) dans un terrier constitué par une cavité située à une profondeur d'environ 10 à 20 cm et de la grosseur d'un petit œuf.*

La courtilière se nourrit principalement d'Animaux du sol (Insectes, Vers), mais elle provoque de gros dégâts sur les plantes, car, creusant des galeries en tous sens près de la surface, elle coupe un grand nombre de racines et ronge les tubercules et les rhizomes. La courtilière est, en conséquence, peu aimée : dans certaines régions, assure-t-on, un cavalier descend de cheval pour l'écraser...

Le grillon champêtre, _Gryllus campestris,_ long de 2 cm, vit dans des galeries qu'il creuse dans les prés.

I. Bucciarelli

LES CRIQUETS

Ce sous-ordre comprend les espèces les plus nuisibles du point de vue économique. Certaines ne forment pourtant pas de gros essaims.

Tel est le cas du criquet marocain, Dociostaurus maroccanus, *qui a provoqué autrefois de grands dommages dans le sud de l'Europe; on en a encore noté une grande invasion en Sardaigne, au cours de l'année 1946. Ces invasions risquent beaucoup moins de se renouveler, étant donné que les lieux où il se reproduit massivement, constitués par de vastes surfaces incultes à sol compact, ont disparu en grande partie avec leur mise en culture.*

En effet, cette espèce, ainsi que d'autres, pond les œufs à l'intérieur du sol, dans des oothèques, après avoir fait un trou à l'aide des valves de l'ovipositeur, en en cimentant les parois avec la sécrétion des glandes, qui sert aussi à fermer l'orifice de ponte. Le sud de l'Europe héberge aussi le criquet italien, Calliptamus italicus.

La situation est autrement grave dans les pays de la zone intertropicale, où, malgré les progrès de la lutte antiacridienne, coordonnée par l' « Anti Locust Research Center » de Londres, se produisent encore des invasions périodiques et massives.

Le problème posé par les Criquets dépend du fait que certaines espèces, dont les plus importantes sont le criquet migrateur, Locusta migratoria, *le criquet pèlerin,* Schistocera gregaria, *et quelques autres, peuvent devenir grégaires dans des conditions déterminées.*

A la suite de facteurs complexes, génétiques et écologiques, les individus, qui vivent isolément (phase solitaire), produisent au bout de quelques générations une phase grégaire, laquelle retourne ensuite à la forme solitaire.

Les individus des deux phases diffèrent par leurs caractères morphologiques et biologiques. Il peut y avoir une génération de la forme solitaire pour deux ou trois de la forme grégaire.

UNE LUTTE MONDIALE

Les foyers « grégarigènes » voient naître des larves qui tendent à former des hordes, lesquelles se déplacent d'abord en marchant, et toujours dans la même direction. Rien ne les arrête, ni les cours d'eau, qu'elles peuvent traverser en constituant des radeaux de plusieurs milliers d'individus se tenant les uns les autres, ni d'autres obstacles naturels. Pendant leur développement, elles parcourent de 3 à 20 km, se nourrissant de tous les Végétaux qu'elles trouvent sur leur passage. Plus elles sont nombreuses, et plus elles font de chemin.

Une fois l'état adulte atteint, ces masses s'envolent en formant de gigantesques nuages qui s'abattent de temps à autre sur le sol, où ils détruisent toutes les plantes. Ces déplacements se font habituellement contre le vent, presque toujours le jour, et à une grande vitesse, qui peut atteindre 50 km à l'heure, avec des variations en fonction de la température (lorsque les températures sont hautes, la vitesse augmente) et du vent. Ces nuages évoluent à faible altitude mais montent parfois jusqu'à 150 m : les satellites artificiels permettent de les déceler. Des avions déversent massivement des insecticides sur les vols repérés.

S'il est vrai que les invasions de Criquets sont l'un des pires fléaux pour l'agriculture de certains pays, les populations indigènes mangent depuis longtemps ces Insectes. L'espèce la plus largement utilisée pour l'alimentation est le criquet pèlerin, que certains peuples africains, depuis les Arabes jusqu'aux Hottentots, considéraient comme un don providentiel; ils s'en nourrissaient après l'avoir fait rôtir et lui avoir ôté ailes et pattes. Les voyageurs du siècle dernier ont raconté que la saveur de cette nourriture riche en matières grasses fait penser aux petits Crustacés ou aux Poissons grillés.

Il existe bien d'autres Criquets, par exemple, les Oedipoda, dont les ailes postérieures sont rouges ou bleues suivant l'espèce. Tous ces Insectes ont de nombreux ennemis naturels, depuis les cigognes jusqu'à une mouche, dont les larves dévorent leurs œufs.

LES INSECTES MIMÉTIQUES

En visitant les salles des musées exposant des Insectes, on est frappé par l'extrême diversité de leur morphologie — parfois bizarre —, de leurs dessins et de leurs couleurs, et on est amené à se demander quelle en est la signification biologique. En de nombreux cas, il n'y a pas de réponse valable ; en d'autres, par contre, on aboutit à la conclusion que certaines structures et couleurs rendent les Insectes « mimétiques ».

La ressemblance qu'ont entre elles des espèces différentes — parfois de groupes très distincts et à comportements souvent antagonistes — a reçu des explications très diverses et très controversées de la part des biologistes ; c'est normal, si l'on considère que de nombreux cas de mimétismes de ce genre ne sont qu'apparents et ne résistent pas à un examen poussé. Mais tout autre est le camouflage, à savoir la ressemblance de l'Insecte avec son milieu naturel, que l'on qualifie d'homomorphisme et d'homochromisme selon qu'il y a similitude de formes ou de couleurs.

FAUSSES FEUILLES ET BATONS DU DIABLE

Parmi les colorations cryptiques, tout le monde connaît bien celles des Lépidoptères ou Papillons et des Orthoptères qui simulent des feuilles.

Chez les Papillons, il n'est pas d'exemple plus parfait d'imitation de ce type que celui qu'on observe pour certaines espèces de Nymphalidés de la région indomalaise appartenant au genre Kallima. *L'Insecte est mimétique lorsqu'il se pose sur une branche et que, fermant ses ailes l'une contre l'autre, il en montre seulement la face inférieure. Les ailes sont arrondies sur les côtés, pointues à la partie antérieure, et prolongées postérieurement en une brève queue qui, appuyée à la branche, ressemble à un pétiole.*

Ces ailes ont des couleurs et des dessins variables ; leur aspect de feuilles sèches est dû à leur teinte brun grisâtre et à la présence d'une raie foncée médiane qui fait penser à la nervure centrale ; en outre, le bord est blanc, ce qui donne du relief, et des dessins obliques simulent très bien des nervures secondaires. La touche finale est donnée par une tache blanche semi-transparente, en raison de l'absence d'écailles, qui évoque une érosion d'un limbe foliaire. Le mimétisme avec le milieu, quand l'Animal est au repos, se retrouve chez de nombreux Papillons de nos régions, par exemple les vanesses, dont la face inférieure des ailes évoque l'écorce ou les feuilles sèches.

Parmi les Noctuidés, les espèces du genre Catocala, *posées, montrent seulement leurs ailes antérieures, de couleur gris marbré très mimétique sur les écorces ; leurs ailes postérieures, rouges ou bleues avec des bandes noires, restent alors cachées.*

Chez les Géométridés, nombreuses sont les espèces mimétiques et, en certains cas, les formes elles-mêmes mimétiques dans le cadre d'une même espèce : c'est ainsi que Biston betularia *a une forme* carbonaria *complètement noire (alors que le type est marbré blanc et noir) qui disparaît à la vue lorsqu'elle est posée sur les écorces ou autres substratums noircis par les fumées dans les zones industrielles. Cette variété mélanique est plus fréquente, en effet, dans ces régions, mais sa pigmentation est d'origine génétique.*

Il est d'autres Insectes bien connus pour leur mimétisme, les phyllies (Phyllium) *de la région indo-australienne, appartenant à l'ordre des Phasmoïdés, donc proches parents des Sauterelles ; on les nomme aussi localement « insectes-feuilles ». Ce sont des Insectes très aplatis ; leur abdomen peut atteindre des dimensions de 5 cm*

E.P.S.

***Un Insecte mimétique, l'Orthoptère* Microcentrum rhombifolium.**

sur 3 cm, en raison des expansions latérales du tégument. Certaines espèces possèdent de grandes tegminae *(singulier :* tegmina*) qui, par leur conformation (présence de carènes en forme de nervures) et par leur couleur d'un beau vert uniforme, les rendent pareilles en tout point à des feuilles.*

Il existe aussi chez nous, tout au moins dans le Midi, des phasmes très mimétiques, vulgairement appelés « bâtons du diable ». Nous citerons surtout le bacille de

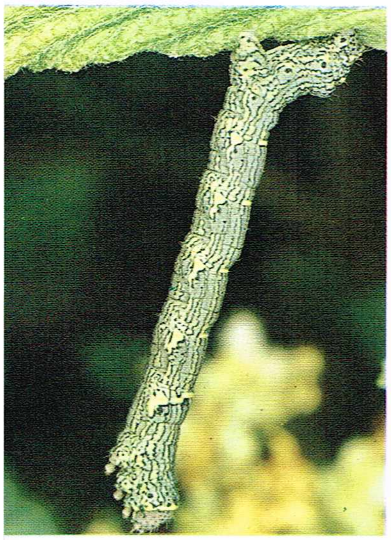

I. Bucciarelli

I. Bucciarelli

Deux exemples de chenilles** (à gauche, un Géométridé ; à droite,* **Addistis tamaricis), se confondant avec les branches sur lesquelles elles vivent.*

Rossi (Bacillus rossii) *et* Clonopsis gallica. *Ces deux espèces ont un corps de forme allongée, caractéristique, parfois très mince (d'un diamètre de quelques millimètres, alors que sa longueur est de 10 cm en certains cas). Elles sont parfaitement dissimulées entre les ramifications des arbustes dont elles mangent les feuilles.*

Certains phasmes exotiques poussent encore plus loin la ressemblance avec des branches de Végétaux, même dans les plus petits détails, grâce à des lobes, des piquants, etc., situés sur le corps et les pattes, imitant des fragments de divers Végétaux, dont les Lichens. Naturellement, le camouflage est rendu plus parfait du fait de l'immobilité dans laquelle se figent les Insectes quand ils se sentent menacés.

DES RAFFINEMENTS EXTRAORDINAIRES

Un autre groupe du monde des Insectes imite de façon peut-être plus parfaite les petits rameaux des plantes qui leur servent de supports ; ce sont les chenilles des Géométridés, des Lépidoptères, dont le nom familial est dû à leur mode spécial de cheminement (elles « arpentent » le substratum en rassemblant puis en détendant leurs extrémités, à cause de leur manque de fausses pattes à la partie médiane de l'abdomen). Plusieurs espèces de ce groupe sont brunes et présentent des protubérances simulant des excroissances des écorces ou des bourgeons ; ces larves ont l'habitude, au repos, de s'attacher à un rameau seulement par les pattes de l'extrémité de l'abdomen et de garder leur corps rigide et droit, donc selon un angle aigu par rapport à la petite branche, comme un jeune jet. Diverses espèces des genres Selenia *et* Boarmia *habitant l'Europe présentent ces caractéristiques.*

La mante-fleur ou gongyle présente un mimétisme véritablement diabolique : sa tête simule une fleur, portée par une tige qui n'est autre que son thorax très allongé. Abusé par les apparences, un Insecte ne tarde pas à se poser sur la « fleur ». Aussitôt, les pattes ravisseuses de la mante s'en emparent. Quand souffle le vent, elle oscille lentement pour mieux tromper ses futures victimes.

On connaît aussi des homochromies plus compliquées, comme dans le cas de l'« ombre opposée ». Ce phénomène existe surtout chez les Vertébrés et est fondé sur le fait que, lorsqu'un corps est intensément éclairé, les couleurs de la partie frappée par les rayons lumineux apparaissent éclaircies, alors que celles de la partie opposée semblent plus foncées. Ce principe est appliqué chez les Animaux qui ont le corps divisé longitudinalement en deux parties pigmentées différemment (en général, la partie supérieure est plus colorée que la partie inférieure) : quand la lumière les touche, les deux teintes tendent à devenir semblables, et l'Animal se confond avec le substratum, surtout si celui-ci est de la même couleur.

On a observé des cas de ce genre chez les Insectes, par exemple chez les larves du sphinx du peuplier, vert pâle sur le dessus, passant graduellement au vert foncé en dessous. Or, ces larves s'agrippent habituellement aux rameaux à l'aide de leurs pattes postérieures et en position renversée ; en conséquence, elles présentent à la lumière la plus intense leur zone inférieure, plus pigmentée : de la sorte, elles sont bien peu visibles, leur relief disparaissant au maximum.

Bon nombre d'Insectes, surtout à l'état larvaire, ont un véritable camouflage qui consiste pour eux à se couvrir de poussière ou de leurs propres excréments mêlés à des débris provenant du milieu ou des exuvies ; cela a notamment lieu chez les Coléoptères Chrysomélidés et les Névroptères Chrysopidés.

Dernier type de camouflage : celui des tipules, sortes de moustiques aux pattes démesurées. Quand on fait mine de les saisir, elles oscillent très rapidement sur leurs pattes et, du coup, disparaissent totalement sous le nez de leur ennemi sidéré...

Autres exemples de camouflage : à gauche,* Homocoryphus nitidulus** ***sur des Graminées ; à droite, le phasme **Clonopsis gallica***, **présentant une forme de brindille.***

I. Bucciarelli

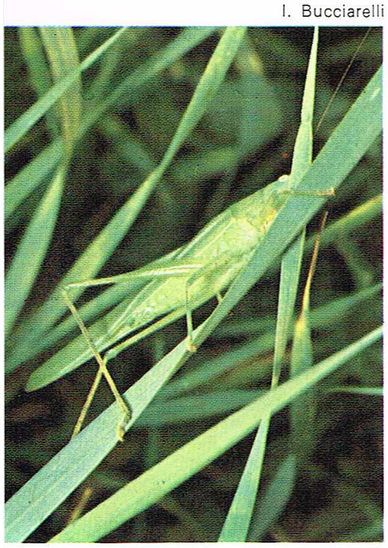

I. Bucciarelli

SOSIES ET FAUX FRÈRES

Le deuxième type de mimétisme est celui qui unit deux espèces. On en distingue plusieurs variantes, dénommées d'après les naturalistes qui les ont décrites. Il y a d'abord le mimétisme batésien. Par exemple des mouches de Bornéo ressemblent à s'y méprendre à des guêpes de la même île. Les premières sont inoffensives, alors que les secondes sont venimeuses. Les Oiseaux qui évitent de s'attaquer aux guêpes épargnent, du même coup, les mouches. Autrement dit, les mouches profitent de cette ressemblance.

Le mimétisme mullérien est encore plus subtil. Des Papillons d'espèces différentes se ressemblent curieusement : or, elles ont toutes un goût désagréable. Une telle similitude a son intérêt. Les prédateurs de ces Insectes, qui sont des Oiseaux, apprennent peu à peu à les éviter : cependant, quelques Papillons sont forcément tués au cours de cet apprentissage.

Si plusieurs espèces non comestibles se ressemblent, l'Oiseau doit seulement apprendre à en reconnaître une : il épargnera ensuite les autres, en les confondant avec la première. En définitive, plus les espèces « amères » seront nombreuses à se ressembler et plus les pertes de chacune seront limitées.

Le troisième type de mimétisme entre espèces est le mimétisme « agressif » ou peckhamien. C'est un peu le thème du loup dans la bergerie, mais le loup serait déguisé en agneau. Par exemple, des Diptères, les bombyles, profitent de leur similitude avec les abeilles pour s'introduire frauduleusement dans leurs nids et y déposer leurs larves, qui s'y nourriront de pollen.

En définitive, le mimétisme constitue l'une des armes les plus efficaces dans la dure lutte pour la vie, qui ne connaît nulle trêve.

LES POISSONS D'ÉLEVAGE

Depuis l'Antiquité, les hommes, désireux d'avoir à leur disposition, sans avoir à les pêcher, des Poissons comestibles, les élèvent dans des bassins. Sait-on d'ailleurs que le mot piscine vient du latin piscis, *Poisson ? En effet, les Romains appelaient* piscinae *les bassins où ils gardaient leurs Poissons.*

Cet élevage des Poissons, ou pisciculture, se réduisit, durant des siècles, à un simple « alevinage », méthode qui consiste à transporter les alevins (jeunes Poissons) et à les lâcher dans les étangs que l'on veut peupler en Poissons.

Au XVIII^e^ siècle, la méthode de la fécondation artificielle révolutionna la pisciculture. On presse les flancs des Poissons mâles pour qu'ils éjectent leur laitance, c'est-à-dire leur sperme, et on en fait autant avec les femelles pour qu'elles émettent leurs œufs. Ensuite, la laitance et les œufs sont mélangés avec une spatule.

La pisciculture présente actuellement divers aspects. La « cypriniculture » est l'élevage de la carpe et de quelques autres Cyprinidés, comme la tanche. La « trutticulture » s'adresse aux truites, saumons et Poissons apparentés. L'aquaculture, ou mariculture, est une nouveauté : c'est l'élevage de Poissons marins, bars, turbots ou soles par exemple ; en plein essor au Japon, l'aquaculture commence à apparaître sur les côtes d'Europe.

Mentionnons encore l'élevage des Poissons mangeurs de larves de moustiques, les gambusies, que l'on importe dans les régions où sévit le paludisme. Quant à l'aquariophilie, elle est dépourvue de tout but utilitaire : c'est l'élevage des Poissons d'aquarium, extrêmement variés ; le plus classique d'entre eux est le poisson rouge, variété du carassin ordinaire ; il appartient, comme la carpe, à la famille des Cyprinidés.

LA CARPE

La carpe est le type de la famille des Cyprinidés, Poissons au corps ovale et à une seule nageoire dorsale ; leur bouche, parfois entourée de barbillons, n'a pas de vraies dents, mais seulement des dents « pharyngiennes » situées dans le fond de la bouche. Les Cyprinidés habitent les eaux douces des régions basses : on les appelle vulgairement « Poissons blancs ».

De très nombreuses espèces vivent en Europe : citons le carassin, le barbeau, le goujon, la tanche, le vairon, la bouvière, le rotengle, le gardon, le chevaine, la vandoise, la brême, l'ablette, etc.

La carpe (Cyprinus carpio) *fréquente à l'état naturel les étangs et les lacs peu profonds et chauds, riches en végétation aquatique, ainsi que les canaux et les anses tranquilles des rivières de plaine. Elle a une prédilection pour les zones à fond vaseux, plutôt que pour les eaux rapides et limpides. Ses bonds hors de l'eau — les sauts de carpes — sont bien connus.*

Pour chercher sa nourriture, elle plonge sa bouche dans la vase, et capture des Vers et des Mollusques ; elle ne dédaigne pas les détritus organiques de tout genre. Sa bouche, aux lèvres charnues et protractiles, est pourvue de quatre barbillons pendant de la lèvre supérieure, qui font fonction d'organes tactiles, surtout pour la recherche des aliments.

La carpe, à l'état naturel, présente toute une diversité de couleurs, et la gamme de sa livrée est encore plus vaste en élevage. Elle est normalement brune sur le dos, gris jaunâtre sur les flancs avec des reflets dorés, et est tachetée de foncé sur ses écailles ; elle peut présenter des dominantes très nettes, ce qui fait qu'il en existe des formes dites carpe verte, carpe rose, carpe bleue et carpe dorée. Ces couleurs dominantes peuvent être conservées dans les élevages, grâce à la sélection artificielle.

T. Mondi

La carpe présente toute une diversité de couleurs ; c'est un Poisson d'élevage très recherché.

Grâce à celle-ci, l'élevage produit diverses variétés de carpes, qui ont non seulement de belles couleurs, mais aussi et surtout sont appréciées pour leur chair ; ce sont celles que les carpiculteurs de l'Europe centrale appellent carpes nobles. Il s'agit d'individus qui, par rapport aux spécimens sauvages, atteignent une taille et un poids importants, ont une tête réduite, et présentent un tronc très musclé, donc fort charnu.

Aux qualités que nous venons de citer s'ajoutent des modifications de la forme et de la disposition des écailles ; ainsi, à côté de la carpe commune d'élevage, entièrement couverte d'écailles, mais améliorée par les pisciculteurs pour la forme et la qualité de la chair, on compte la carpe à miroir, et la carpe cuir (ou carpe nue).

Chez la première de celles-ci, les flancs, le dos et le ventre portent seulement quelques écailles, beaucoup plus grandes que chez la carpe commune, alors que de vastes régions de ses flancs sont totalement nues. C'est pourquoi cette variété a reçu le nom de carpe à miroir, à cause de ses grandes et brillantes écailles. La carpe cuir

A. Margiocco

Les tanches se plaisent particulièrement dans les fonds vaseux et calmes des étangs.

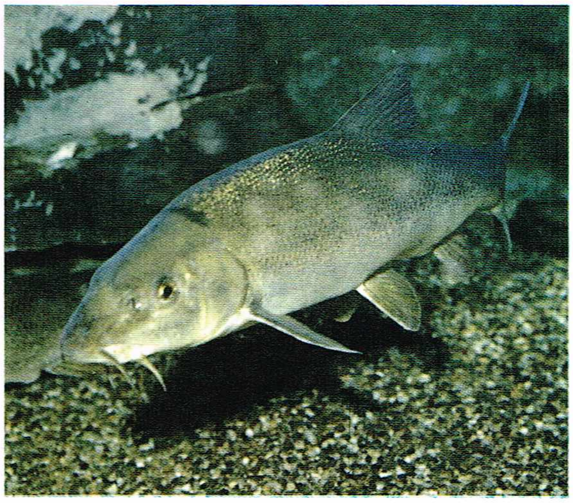

A. Margiocco

Le barbeau, bien qu'il soit moins recherché que la carpe et la truite, est aussi un Poisson d'élevage.

a le corps presque totalement dépourvu d'écailles : seules certaines d'entre elles restent aux points d'attache des nageoires.

La carpe est facile à élever : nous n'en voulons pour preuve que son introduction dans les rizières d'Italie, où elle trouve de la nourriture en abondance et la température idéale pour sa croissance. Sa reproduction est annuelle et s'effectue à la fin du printemps ou au début de l'été, quand la température du bassin où elle vit dépasse 20 °C. Les femelles pondent un très important nombre d'œufs (jusqu'à 150 000 par kg de poids corporel) ; ils sont transparents et leur diamètre ne dépasse pas 1,5 mm : ils s'attachent aux objets immergés. Cette fécondité est un grand avantage pour l'éleveur, outre le peu d'exigence en oxygène de ce Cyprinidé, qui peut vivre dans des eaux longtemps stagnantes. Les œufs donnent des alevins moins d'une semaine après la ponte. Ceux-ci ne mesurent guère plus d'un centimètre à la naissance ; mais ils doublent de longueur en quelques jours, se mettent à chasser activement les organismes microscopiques des eaux de l'élevage et croissent pendant tout l'été. Ils connaissent une sorte de léthargie hivernale, au fond de bassins spéciaux d'hivernage, puis recommencent à grossir au printemps et pendant l'été suivants ; enfin, étant devenus des alevins du deuxième été, ils servent à ensemencer de nouveaux bassins d'élevage.

La taille moyenne des carpes est de 25 à 50 cm ; toutefois, ce n'est pas là une longueur maximale en captivité : les femelles reproductrices atteignent pour leur part une longueur de 50 à 80 cm, pour un poids de 4 à 15 kg. La longévité des carpes, souvent exagérée (à Fontainebleau, par exemple...), ne paraît pas dépasser quarante-sept ans, la moyenne étant de vingt ans.

La truite arc-en-ciel est la variété de truite la plus répandue dans les élevages.

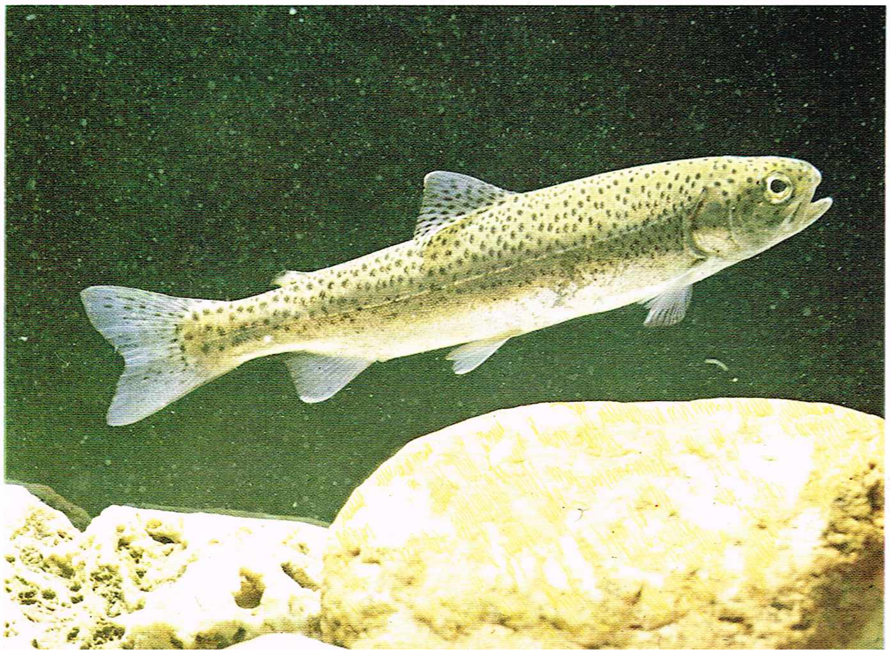

G. Mazza

LA TRUITE

L'élevage de la truite se fait selon des méthodes qui diffèrent totalement de celles de la carpiculture. La truite appartient, comme le saumon, à la famille des Salmonidés. Cette famille, qui groupe encore l'omble chevalier, l'ombre et le lavaret, se caractérise par la petitesse des écailles, l'absence de barbillons et la présence d'une seconde nageoire dorsale.

La truite autochtone en Europe est la truite de rivière (Salmo trutta), *beau Poisson long de 50 à 85 cm, aux taches noires, rouges ou bleues : son aspect est en effet variable.*

Contrairement à la plupart des Poissons d'eau douce, la truite se reproduit au cours de l'hiver. Ce fait a une signification biologique précise, liée aux nécessités respiratoires de l'espèce, surtout pendant la période de reproduction : en effet, lorsque la température est basse, la teneur de l'eau en oxygène est maximale.

Les œufs de la truite, volumineux (ils mesurent 0,5 cm de diamètre), sont pondus sur les graviers du fond ; ils contiennent une grande quantité de matières de réserve et sont toujours pondus en nombre inférieur à celui des œufs de la carpe (soit de 500 à 2 000 par kg de poids corporel de la femelle).

L'éclosion a lieu, dans les conditions naturelles, au bout d'environ deux mois : les alevins naissent à peu près inertes, transparents, et possèdent encore un volumineux sac vitellin, qui leur sert, au début, à se nourrir.

Le principe de la « trutticulture » est le suivant. Des truites mâles et femelles sont capturées, puis leurs produits génitaux sont mélangés selon le procédé que nous avons décrit. Les œufs fécondés sont ensuite placés dans des boîtes en matière plastique percées de trous, au nombre de deux mille par boîte.

Ces boîtes sont enfouies dans les frayères naturelles : ainsi, quand les alevins en sortent, ils se trouvent dans des conditions écologiques favorables. Ces boîtes sont appelées « boîtes Vibert » du nom de l'ingénieur des Eaux et forêts qui les inventa. Elles sont transportées par avion à travers le monde et utilisées pour le repeuplement en truites.

La même méthode est appliquée aux saumons et aux brochets. On a introduit en Europe la truite arc-en-ciel (Salmo irideus) *des États-Unis, à livrée chatoyante ; des boîtes pleines d'œufs de cette espèce ont été déposées dans des rivières d'Europe, mais les truites arc-en-ciel ainsi importées finissent par se volatiliser.*

La trutticulture aboutit parfois à des pratiques regrettables. Des rivières ou des bassins bourrés de truites sont mis à la disposition de « pêcheurs » qui les capturent à qui mieux mieux. Ils sont sûrs d'éviter la bredouille, mais où est le sport ?

LES POISSONS MIGRATEURS

Lorsque passent dans le ciel les vols d'Oiseaux migrateurs, on ne pense guère que le même phénomène a lieu, presque selon les mêmes modalités, sous la surface de la mer et des cours d'eau.

Là, des bancs de Poissons, encore plus serrés que les troupes d'Oiseaux, se déplacent le long de chemins fixés depuis des siècles, poussés par un besoin impérieux, celui de la reproduction.

LE THON

Le thon (Thynnus thynnus) *se trouve normalement éparpillé, dans les profondeurs et au large, par exemple en Méditerranée. Au printemps, il se rassemble avec ses pareils et, après un voyage très rapide, réapparaît le long des côtes de l'Afrique du Nord, de la Sicile, de la Sardaigne et du sud de l'Italie.*

La surface de la mer fourmille alors d'individus sexuellement mûrs qui sont appelés justement, à cause de la vitesse de leurs déplacements, des « thons de course »; ceux-ci font de rapides incursions vers la côte. C'est sans doute le besoin de chaleur, lors de la maturité sexuelle des Animaux, qui provoque ces déplacements en masse vers les eaux superficielles et côtières : là, en effet, ces Poissons trouvent la température idéale pour leur reproduction : de 18 à 20 °C.

Les thons adultes sont particulièrement agités, comme c'est le cas pour presque tous les Poissons pendant la période qui précède la ponte ; en outre, ils ne se nourrissent presque pas.

Les œufs ayant été pondus et fécondés le long du littoral, pendant toute la seconde moitié de l'été, les thons, fatigués, vont ensuite au large, s'isolent et disparaissent en profondeur.

LE HARENG

Le hareng (Clupea harengus), *autre Poisson migrateur, est abondant dans les mers d'Europe septentrionale. Son comportement est très proche de celui du thon. Parmi ses différentes races, celle de la mer du Nord parcourt graduellement cette mer, du nord au sud, du printemps à l'automne, en allant, pour s'y reproduire, près des côtes méridionales de la péninsule Scandinave.*

Les jeunes refont à l'envers le chemin qu'ont fait leurs parents, en regagnant le Nord, à plus de 1 000 km.

L'ANGUILLE

Les migrations de l'anguille (Anguilla anguilla) *sont bien différentes de celles du thon et du hareng, qui n'abandonnent jamais la mer pendant toute leur vie. Elle naît en pleine mer, pénètre dans les cours d'eau, les remonte, y devient adulte, puis redescend en mer pour s'y reproduire.*

Tout le monde connaît l'anguille, ne serait-ce que pour la saveur de sa chair. Elle a une tête petite et une grande bouche armée de dents robustes. Une longue nageoire parcourt presque en entier son dos et son ventre. Son corps très allongé, un peu comme celui d'un serpent, est entièrement couvert de minuscules écailles visqueuses, qui ne se développent complètement qu'à l'âge de six ans. L'anguille a une distribution très vaste, de l'Afrique du Nord aux eaux froides du nord de l'Europe.

Jusqu'au début du siècle, on ne savait pas où l'anguille se reproduisait. C'est le Danois J. Schmidt qui reconstitua patiemment le chemin suivi par les jeunes anguilles, en

G. Costa

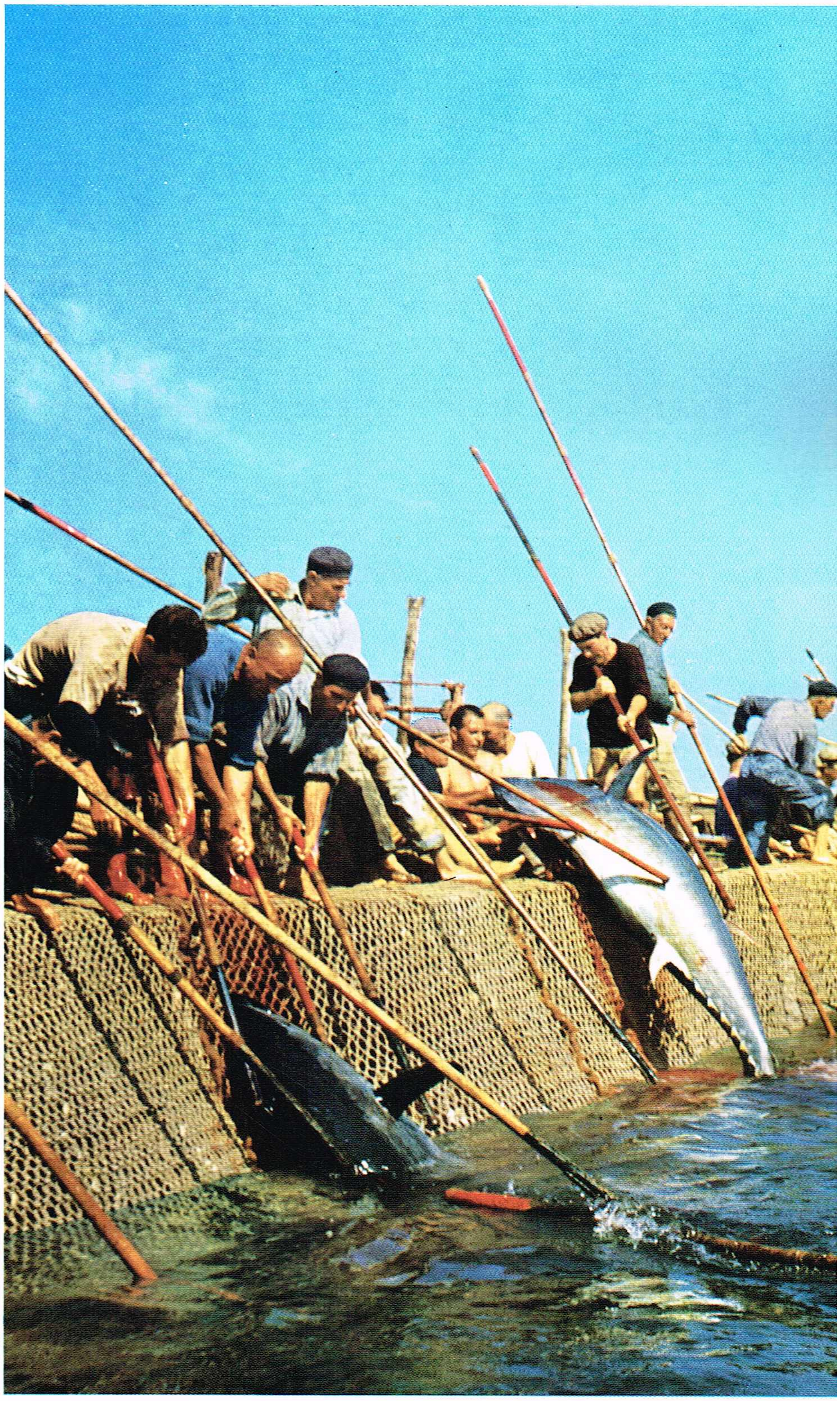

Une des phases de la pêche au thon le long des côtes en Méditerranée.

A. Margiocco

Un groupe d'anguilles; leur tête est petite et leur corps allongé comme celui d'un serpent.

effectuant de nombreuses pêches dans l'océan Atlantique, depuis l'Europe jusqu'à l'Amérique, pour trouver des spécimens de plus en plus petits.

C'est ainsi qu'il découvrit que les larves éclosaient de l'œuf en un point très proche des côtes américaines, dans la mer des Sargasses, au sud-est des îles Bermudes : elle est ainsi nommée parce qu'elle est encombrée d'Algues appelées sargasses.

C'est donc dans la mer des Sargasses que les adultes se rendent, se reproduisent et meurent. C'est de là que partent de petites larves, en forme de feuilles de saule, presque totalement transparentes, les leptocéphales (ce qui signifie « à tête mince »). Les leptocéphales sont entraînés par le Gulf Stream, et, après un voyage d'environ trois ans à travers l'océan Atlantique, à raison de 7 à 8 km par jour, touchent aux côtes européennes, après avoir peu à peu grossi.

Ce sont alors de petits Poissons cylindriques, longs de 8 à 10 cm. On les nomme civelles ou piballes. Les civelles arrivent donc sur les côtes atlantiques de l'Europe, et une partie gagnent même la Méditerranée par le détroit de Gibraltar. Elles deviennent, après s'être abondamment nourries, des anguilles « de montée », qui ont pris une couleur sombre : elles franchissent en masse les estuaires des fleuves, pour se rendre dans les eaux douces. On en pêche alors une certaine quantité.

Les anguilles remontent donc les rivières, irrésistiblement poussées à passer les obstacles naturels les plus difficiles : elles n'hésitent même pas à sortir de l'eau et, traversant les prés humides pendant la nuit, à se rendre dans les mares, les étangs et les marais. Si un barrage se dresse sur leur route, elles grimpent sur ses parois en s'y collant.

Ayant atteint leur longueur maximale, la même force qui les avait poussées à gagner les cours d'eau les ramène de nouveau en automne à la mer. Cette impulsion migratoire est due, chez l'anguille, comme chez les autres Poissons migrateurs, à l'action de la thyroïde, glande qui sécrète une hormone stimulante.

Pendant la descente vers la mer, l'anguille adulte acquiert sa livrée nuptiale : son dos, vert grisâtre, prend une teinte métallique, et son ventre passe du gris jaunâtre à l'argenté. C'est ce qui fait qu'on l'appelle alors anguille argentée.

Ayant redescendu les rivières jusqu'aux côtes où elles étaient arrivées toutes jeunes, les anguilles, désormais adultes, gagnent l'océan et nagent vers la mer des Sargasses. Elles s'y reproduisent et, vraisemblablement, y meurent.

Si l'anguille est empêchée d'effectuer sa migration, l'activité de sa thyroïde cessant au bout d'un certain temps, elle continue à grossir démesurément; ce phénomène est exploité à des fins commerciales : les anguilles femelles, mises en viviers et destinées à la consommation, atteignent une taille énorme.

LE SAUMON

Les voyages du saumon, qu'il soit européen ou américain, se font en sens exactement inverse de celui que suit l'anguille, bien que ce soit pratiquement selon les mêmes modalités. Le saumon passe lui aussi de la mer aux rivières, stimulé par la sécrétion interne de sa thyroïde.

Le saumon naît et grandit dans les eaux fraîches, limpides et bien oxygénées des torrents de montagne. Quand sa thyroïde commence à fonctionner, le Poisson s'abandonne à la force du courant et, passant des torrents aux rivières de plaine, arrive en mer encore jeune. Il s'éloigne ensuite à des centaines de kilomètres du littoral et, après environ un an de séjour en mer, s'étant nourri activement, il devient adulte.

En automne et en hiver, les saumons adultes, véritables géants pesant parfois plus de 10 kg, reviennent à l'embouchure des fleuves. Le besoin d'eau douce les pousse à monter le plus possible en amont; ils sautent à rebours les cascades, insouciants de la force des courants, et négligeant totalement de se nourrir. Après bien des fatigues et des dangers, ils retrouvent très exactement les zones des torrents de montagne où ils sont nés. Les adultes se reproduisent donc où ils ont vu le jour. Dans certaines régions, des « ascenseurs » ont été établis pour les aider à franchir des barrages.

La plupart des saumons, épuisés par le voyage de remontée et par la ponte des œufs, meurent ensuite. Mais les plus robustes arrivent à résister et retournent en pleine mer, où ils recouvrent leurs forces, et se préparent à un nouveau voyage en vue d'une nouvelle saison de reproduction. Le saumon de l'Atlantique (Salmo salar), *par exemple, peut effectuer sa migration trois ou quatre fois dans sa vie, à des intervalles de deux ans.*

UNE ORIENTATION PRODIGIEUSE

Comment les Poissons migrateurs s'orientent-ils? La question n'est que partiellement résolue. Dans le cas du saumon, c'est l'odorat qui intervient. En effet, des saumons auxquels on a bouché les narines ne parviennent pas à retrouver leur torrent natal et tournent en rond, désemparés.

C'est donc une substance odorante qui les guide : mais celle-ci est-elle sécrétée par les saumons eux-mêmes, ou est-elle minérale? La question reste posée. En tout cas, l'odorat de ces Poissons est remarquable : ils réagissent lorsque 40 l d'eau de leur rivière sont versés dans un vivier de 1 800 l!

Toutefois, cet odorat est-il suffisant quand le saumon croise en pleine mer? Peut-il lui permettre de retrouver, depuis le lointain cercle polaire, la « bonne » embouchure de la côte basque? Toutes les hypothèses sont envisagées, depuis le rôle de la température jusqu'à celui du soleil en passant par l'action des courants. Peut-être des « corridors » chimiques existent-ils dans les océans et facilitent la tâche des saumons.

Le problème est le même pour l'anguille. Son odorat est également prodigieux, de l'ordre de celui du chien. Si l'on diluait, dans une masse d'eau cinquante-huit fois plus grande que celle du lac de Constance, une quantité de parfum de rose équivalant à un dé à coudre, une anguille le sentirait... Mais dans quelle mesure son odorat peut-il lui servir pour trouver la mer des Sargasses ou les côtes européennes? Il est encore impossible de répondre.

LES POISSONS D'AQUARIUM

De tous les Poissons d'aquarium, le plus banal est le poisson rouge (Carassius auratus), *qui est une variété domestique du carassin ordinaire. Ce sont les anciens Chinois qui l'ont élevé les premiers, parvenant, au prix d'une patiente sélection, à obtenir de bizarres variétés : queue-de-voile, yeux télescopés.*

En Grèce, le poisson rouge fut consacré à Aphrodite : son autre nom de cyprin doré vient d'ailleurs de Κύπρις, *surnom de cette déesse de l'amour. La vogue de ce Poisson se répandit au XVII*e *siècle à travers l'Europe. Ajoutons que plusieurs contes des Mille et Une Nuits le mettent en scène.*

L'aquariophile débute parfois par quelques poissons rouges, mais souvent veut ensuite peupler son aquarium d'espèces plus originales. Il est impossible de les citer toutes, mais certaines méritent une mention spéciale. Par exemple, le Danio rerio (Brachydanio rerio) *: ce petit Poisson, long de 3 à 4 cm, présente des bandes longitudinales blanches et noires alternant, ce qui l'a fait aussi appeler poisson-zèbre. C'est une espèce qui se reproduit facilement en captivité. On n'oubliera pas cependant que, lorsque la femelle a l'abdomen tout rond, il est temps de l'isoler dans un autre récipient en verre, avec deux ou trois individus du sexe mâle.*

On pourra alors observer la ponte de minuscules œufs, qui tombent entre les feuilles des plantes aquatiques du fond. Après avoir ôté les reproducteurs du bac où on les avait isolés, il n'y a plus qu'à attendre deux jours pour voir naître les alevins, qui seront au nombre de 150 à 200 au bout de quatre jours, nageant et commençant à se nourrir des micro-organismes présents dans l'eau.

LE COMBATTANT SIAMOIS ET LE GUPPY

L'aquarium abritera peut-être un spécimen de mâle de Betta splendens, *le célèbre combattant siamois, originaire du Siam, qui possède de larges et longues nageoires colorées. Il est impossible de garder deux mâles de cette espèce dans le même aquarium, car l'un des deux serait immanquablement destiné à être tué par l'autre. Au Siam, ces Poissons servent à des combats où l'on engage les paris. Mais un aquariophile normal est en même temps un protecteur de la nature, et il ne pourrait se repaître de spectacles cruels. On pourra toujours montrer à ses amis amusés comment le combattant se rue sur sa propre image, quand on lui présente contre une glace de l'aquarium un petit miroir. Quant à la femelle du* Betta, *elle est moins jolie que le mâle et par conséquent moins demandée.*

Mais, si le mâle fait sortir des bulles d'air de sa bouche, cela veut dire qu'il a le mal d'amour. Il sera alors bon de lui procurer une femelle, prête à pondre, et de mettre le couple dans un bac à part, sans aucun autre Poisson, bien entendu. On assistera en ce cas à un curieux spectacle : le mâle prépare un nid à la surface de l'eau, en émettant par la bouche d'innombrables petites bulles d'air entourées d'une sécrétion muqueuse particulière. C'est sous ce nid que le mâle fait la cour à sa compagne et l'entoure de temps en temps de son propre corps en lui pressant légèrement l'abdomen, de façon à lui faire pondre quelques œufs, fécondés ensuite en tombant au fond. Les parents recueillent alors les œufs avec leur bouche et les introduisent dans le nid flottant. Enfin, le mâle chasse la femelle, et dès lors, jour et nuit, il veille sur le nid en produisant de nouvelles bulles pour remplacer celles qui disparaissent peu à peu.

On trouve aussi fréquemment dans les aquariums le guppy (Lebistes reticulatus), *espèce dont le mâle, plus petit que la femelle, est très coloré et présente une*

D. Faulkner

Les aquariophiles reproduisent souvent avec beaucoup d'exactitude les milieux dulçaquicoles ou saumâtres, d'après des observations *in situ*. Ci-dessus : groupe de barbiers *(Anthias sp.)*, espèces originaires des océans Indien et Pacifique (dans leur partie tropicale) et de la mer Rouge.

grande variété de dessins, tandis que la femelle est à peu près non pigmentée. Alors que la majeure partie des autres espèces est ovipare (c'est-à-dire que leurs femelles pondent des œufs), cette espèce est ovovivipare : les femelles conservent les œufs fécondés dans leur abdomen et mettent directement au monde des alevins. La nourriture de la mère doit donc être abondante, afin qu'elle ne mange pas ses propres petits dès qu'ils naissent.

LE TÉTRODON VERT ET LE NÉON

Le tétrodon vert (Tetraodon fluviatilis) *est un intéressant et sympathique Poisson d'aquarium, de couleur jaune canari, avec de nombreuses taches noires. Quand il a peur, il se gonfle et devient rond comme une balle ; on peut le faire gonfler en l'ôtant avec un filet de l'aquarium et en le posant délicatement sur la paume de la main : immédiatement, le Poisson se gonfle démesurément, au point que, remis dans l'eau, il flotte l'abdomen tourné en haut jusqu'à ce qu'il ait éliminé l'air qu'il*

C. Bevilacqua

C. Bevilacqua

A gauche : cyprin doré *(Carassius auratus)*, le plus répandu des Poissons d'aquarium. A droite : le combattant siamois *(Betta splendens)*, originaire de la Thaïlande, est remarquablement beau.

avait avalé, avec un léger sifflement, pour recommencer à nager en équilibre hydrostatique.

Parmi les petites espèces, qui ont pour seul inconvénient de ne pouvoir cohabiter avec de trop gros Poissons qui les dévoreraient, nous citerons le néon (Hyphessobrycon innesi). *Le nom vulgaire de cette espèce vient de ce qu'il semble luminescent : cela est dû à une bande longitudinale bleue qu'il porte et qui reflète fortement la lumière, ainsi qu'à la couleur rouge vif du quart inféro-postérieur de son corps.*

Il est des Poissons qui vivent continuellement au fond, où ils se nourrissent de détritus et de particules alimentaires que n'ont pas mangées d'autres pensionnaires : c'est ce qui les fait nommer fouilleurs. Nous citerons parmi eux le Corydoras agassizi, *de livrée bleu acier, avec des dessins rappelant ceux de la peau du léopard. Ce fouilleur passe la journée à fouiller dans les gravillons, à la recherche de nourriture : c'est un très utile collaborateur pour l'aquariophile, étant donné qu'il ingère bien des détritus qui sans cela, se décomposant, pourraient polluer l'eau.*

Le scalaire (genre Pterophyllum), *au corps aplati latéralement et aux longues nageoires, est l'un des hôtes les plus majestueux des aquariums. Il est rayé de barres sombres verticales. Il est si peu épais qu'il devient presque invisible lorsqu'il est vu de face...*

L'AQUARIUM TROPICAL

Les Poissons tropicaux marins sont aussi fort intéressants, mais nous avons évité d'en parler, du fait qu'il faut d'abord avoir, pour les élever, une bonne expérience des Poissons d'eau douce.

Nous indiquerons toutefois de quelle façon on doit préparer un aquarium tropical. En premier lieu, il faut un petit aquarium peu encombrant ; ensuite, si l'on désire en posséder un plus grand, le premier sera toujours utile comme bac de reproduction ou d'élevage des alevins.

Sur le fond, on disposera une couche de 5 à 10 cm de sable grossier, bien lavé. On y posera quelques pierres (galets, schistes, etc.), puis on remplira d'eau l'aquarium. Ensuite des plantes aquatiques seront fixées au fond, par leurs racines, et on laissera reposer le tout pendant au moins 8 à 10 jours : ainsi, d'éventuels parasites des Poissons auront le temps de mourir. L'aquarium, sans autres accessoires, doit être installé en un endroit où il recevra une quantité suffisante de lumière, indispensable pour les plantes aquatiques. Durant l'hiver, il doit être rapproché d'un radiateur de chauffage central, par exemple, de manière que la température de l'eau soit toujours de 20 à 25 °C. Malgré la simplicité d'une telle installation, on peut élever des Poissons robustes ou peu sensibles aux variations de température et d'oxygénation.

On administrera tous les jours aux pensionnaires la quantité voulue de nourriture (notamment des daphnies séchées), qui devra être mangée en l'espace de 10 à 15 mn ; puis on ôtera avec un siphon en verre l'éventuel excédent d'aliments. Il ne faut jamais donner de pain aux Poissons.

Par la suite, on pourra introduire de nouvelles espèces ; mais quand le nombre de Poissons augmente et quand on acquiert des espèces plus délicates, il convient d'acheter d'autres accessoires.

Si la température extérieure n'est guère constante et risque de subir des baisses subites, il est bon d'installer un thermorégulateur pour stabiliser la température de l'eau. Si le nombre de Poissons est excessif, l'oxygène atmosphérique absorbé par l'eau et celui qui est fourni par les plantes ne suffisent pas ; en ce cas, on achètera à peu de frais un vibrateur qui fait à la fois fonctionner un oxygénateur et un filtre de purification de l'eau (à charbon de bois et résine filtrante).

Si les plantes ont tendance à mourir à cause du manque d'insolation, on placera devant l'aquarium une lampe qui, à la fois, stimulera la croissance des Végétaux et donnera un éclairage du plus bel effet.

L'aquarium constituera, pour son propriétaire, une initiation à l'écologie, dont les lois — et notamment la notion d'équilibre biologique — s'imposeront peu à peu.

A gauche : un scalaire *(Pterophyllum scalare)* mélanique ; avec ses nageoires et sa queue en forme de voiles, c'est un des plus élégants Poissons d'aquarium ; il est très variable, et l'on élève le plus souvent ses variétés zébrées en hauteur. A droite : xipho, ou porte-glaive *(Xiphophorus helleri)*, mâle.

C. Bevilacqua

C. Bevilacqua

LES GALLINACÉS DOMESTIQUES

« Nous devons un coq à Asclépios. Eh bien ! ne l'oubliez pas et payez ma dette. » Tels furent les derniers mots de Socrate après qu'il eut bu la coupe de ciguë. Que voulait dire par là le philosophe à Criton ? Il est difficile de le savoir, car, tout au long de son histoire, le coq a été mêlé à des traditions occultes. Chez les Grecs justement, il était associé à Hermès Trismégiste, qui n'était autre que le dieu égyptien Thot. Or, Hermès passe pour être le fondateur de l'alchimie, science hermétique s'il en est.

Les mystérieux pouvoirs attribués au coq se retrouvent dans le Hamlet de Shakespeare. C'est le chant du coq qui, sur la terrasse d'Elseneur, fait disparaître le fantôme du père de Hamlet, et Shakespeare a prêté ces mots à Horatio : « J'ai ouï dire que le coq — la trompette du matin — de son gosier aigu au son strident, éveille le dieu du jour, et qu'à son signal, soit dans l'onde ou le feu, soit dans la terre ou l'air, les esprits errants qui extravaguent retournent dans leur sphère » (trad. d'E. Morand et M. Schwob, Gallimard, 1950).

Quant au fameux coq gaulois, il a suscité bien des discussions. Pour certains, il n'aurait été qu'un jeu de mots : Gallus, en latin, signifie à la fois coq et gaulois. En fait, diverses découvertes archéologiques prouvent que le coq habitait bel et bien les villages gaulois.

Mais c'est en Asie sud-orientale que commence l'histoire du coq domestique : il descend du coq sauvage dit bankiva, qui fut domestiqué vers 2500 av. J.-C. par la civilisation de l'Indus. A partir de là, il se répandit à la fois vers la Chine et vers l'Europe, où il s'implanta véritablement au VIe siècle av. J.-C.

On peut d'ailleurs observer chez les poules domestiques, et c'est là l'héritage d'un passé de liberté, une prédilection pour les bois. Chacun sait qu'elles aiment passer la nuit en boule, sur les arbres bas, quand il leur arrive de s'échapper, et ont tendance à former des sociétés où un seul mâle domine tous les autres individus.

Le mâle du bankiva, comme au reste le coq domestique, défend au péril de sa vie le territoire, contre d'autres groupes ou d'autres mâles intrus, en utilisant son éperon, qui est une arme terrible.

Le dimorphisme sexuel, comme chez tous les Galliformes, est très accentué. La poule est plus petite que le mâle ; sa queue est simple et horizontale ; elle ne possède pas d'éperons ; enfin, sa crête et ses barbillons sont peu développés.

Le mâle, par contre, possède un plumage aux éclatantes couleurs ; sa crête et ses barbillons sont très développés, ainsi que ses éperons ; il ne se fait d'ailleurs pas faute de montrer ses attributs au cours de la parade nuptiale, quand il étend et agite bruyamment ses ailes, gratte le sol de ses pattes et tourne impétueusement autour de la femelle. La danse nuptiale est une forme rituelle du comportement, qui est restée inchangée, malgré la domestication.

Un groupe de poules et de coqs est une société avec ses lois, sa hiérarchie rigide, et cette société est d'autant plus stable et équilibrée qu'on y introduit moins d'éléments extérieurs. Dans ces conditions d'équilibre, le rendement du poulailler est même plus élevé. On s'est aperçu en ce cas que les poules pondent plus.

Le coq qui se montre le plus fort après plusieurs combats est habituellement le plus vieux, car il a l'expérience de la lutte, et il domine tous les autres coqs et poules. Mais chez les femelles elles-mêmes, le pouvoir est inégalement réparti : l'une d'entre elles a la prédominance sur toutes les autres et exerce une sorte de droit de becquée, c'est-à-dire le droit de les attaquer à coups de bec ; en outre, elle a une absolue préséance pour la prise de nourriture. C'est la

S. Prato

On remarque la majesté de ce coq hollandais au plumage sombre avec une touffe blanche sur la tête.

E.P.S.

Ci-dessus, une race de dindons à plumage complètement blanc.

« hiérarchie du becquetage ». La dernière femelle dans l'ordre hiérarchique est attaquée par toutes les autres; entre celle-ci et la reine du poulailler existe une série de poules dont l'autorité va croissant, chacune dominant celle qui a un grade inférieur et étant dominée par celle qui lui est supérieure dans l'échelle hiérarchique.

Ainsi, un vulgaire poulailler est un excellent domaine d'étude du comportement social des Animaux.

Les longs siècles d'élevage ont abouti, du fait de la sélection opérée par l'homme, à la création de variétés ou de races diverses, provenant du Gallus gallus *sauvage. Ces variétés diffèrent par la taille, la livrée et la morphologie externe en général.*

Nous citerons, entre autres, la race Leghorn ou Livournaise et la Wyandotte, chez qui dominent les formes blanches, l'Andalouse, à plumage généralement gris bleuté, la Plymouth Rock, tachetée, la Padouane, dont le coq est caractérisé par la possession d'une énorme touffe de plumes sur la tête, moins développée chez la femelle, la Houdan, à cinq doigts par patte, etc. Mais les coqs les plus extraordinaires sont sans doute ceux du Japon, chez lesquels la queue atteint 6 m de long.

Groupe de dindons d'Amérique du Nord bien reconnaissables à la façon dont les mâles ouvrent leur queue en éventail.

E.P.S.

LA PINTADE

La pintade (Numida meleagris) *est originaire d'Afrique : elle fut importée en Grèce au Ve siècle av. J.-C. Les peuples européens la délaissèrent ensuite, et ce sont les navigateurs portugais qui la réintroduisirent au XVIe siècle. Le mot pintade vient d'ailleurs du mot portugais* pintado, *poule peinte.*

Tout le monde connaît la petite tête de la pintade et son long cou dépourvus de plumes et colorés en bleu. La tête est surmontée d'un étui corné, formant comme un petit casque. Les narines sont pourvues de fins appendices charnus et bruns. Le chant de cet Oiseau — si l'on peut dire que c'est un chant — est un cri insistant et monotone, qui sert dans la nature de défense contre les prédateurs (panthère, caracal, chacal, etc.).

C'est un Oiseau grégaire, aussi bien naturellement qu'à la basse-cour : la pintade forme des groupes d'une centaine de têtes, des deux sexes, qui pâturent à découvert pendant le jour et qui se réfugient dans les broussailles à la nuit. Quand les troupes sont perturbées, elles s'envolent à faible hauteur, en émettant leur cri rauque.

A l'époque de la reproduction, les troupes se dissolvent, et il se forme des couples : ce sont donc, à la différence des poules, des Oiseaux monogames; les femelles creusent alors de petits trous dans le sol, où elles pondent de 5 à 8 œufs chacune. L'incubation est de 20 à 25 jours.

La sélection a également abouti à la création de races de pintades domestiques, mais qui diffèrent peu de la souche sauvage : nous citerons entre autres la variété blanche, dont le plumage est presque totalement blanc.

LE DINDON

Remarquablement adapté à la domesticité, le dindon (Meleagris gallopavo) *est répandu dans le monde entier. Il vit à l'état sauvage au Mexique et aux États-Unis. C'est un très gros Oiseau, surtout en ce qui concerne les mâles qui peuvent atteindre plus de 1 m de longueur et avoir une envergure de 1,50 m.*

Le dindon doit son nom à l'ancienne confusion entre l'Amérique et l'Inde. Comme les Indiens ou le « cochon d'Inde », il est en fait originaire d'Amérique. Il y fut domestiqué par les Indiens bien avant l'arrivée des Espagnols. L'Europe ne le connut qu'au XVIe siècle : le premier couple de dindons fut celui qui fut offert au pape en 1523; le premier dindon mangé en France le fut lors du mariage de Charles IX, en 1571.

Nous ne décrirons pas en détail cette espèce, universellement connue; on sait que, chez elle, le dimorphisme sexuel est accentué. Le dindon a conservé en captivité la pratique de la danse nuptiale.

Quand les premiers colons arrivèrent en Amérique du Nord, ces Oiseaux peuplaient les forêts — et particulièrement les chênaies — par troupes de centaines de têtes, mâles et femelles mélangés tout au moins au printemps et en été. En automne et à la fin de l'hiver, les individus des deux sexes se séparent pour former des groupes distincts — les femelles emmènent avec elles leurs petits — et se rendent vers le sud à la recherche de lieux plus favorables à leur subsistance.

La saison des amours, à la fin de l'hiver, est marquée par des luttes acharnées entre mâles; les rivaux, la queue déployée en éventail, les ailes ouvertes et traînant sur le sol, le cou replié en arrière, et les caroncules en érection, se battent, souvent jusqu'à la mort de l'un des combattants. Le vainqueur s'approprie alors un certain nombre de femelles. Les gros œufs, pondus en grand nombre, éclosent après quatre semaines d'incubation.

Notons que la domestication a beaucoup moins provoqué de polymorphisme (c'est-à-dire variété d'aspects) chez le dindon et la pintade que chez le coq. Ajoutons que le terme de poule est attribué à certaines autres femelles de Gallinacés (ou Galliformes); poule faisane, poule de bruyère (femelle du tétras ou coq de bruyère)...

LES MIGRATIONS DES OISEAUX

La vaste plaine serait bien triste, en cette journée d'automne, sans les corbeaux qui y pâturent et les petites bandes d'alouettes qui filent vers le sud.

Soudain, dans le ciel gris de pluie, un spectacle splendide nous fait dresser la tête : une formation d'oies sauvages, dessinant un V impeccable, cingle vers le midi. Nous percevons fort bien leur incessant bavardage tandis que la troupe disparaît dans la brume.

De tous temps, les migrations des Oiseaux ont excité la curiosité des hommes. Où diable se réfugiaient les hirondelles après leur disparition à l'automne ? Ne s'enfouissaient-elles pas dans la vase des étangs ? Pourtant, dès une époque reculée, des idées plus justes s'étaient manifestées. On lit, par exemple, dans la Bible : « Même la cigogne connaît dans les cieux sa saison. »

Si nous considérons l'Europe occidentale, nous pouvons y distinguer, du point de vue des migrations, plusieurs catégories d'Oiseaux. Certains ne se déplacent pas ou à peine : ce sont les sédentaires, comme le moineau, la pie, les perdrix, les chouettes.

Les migrateurs partiels sont les espèces dont une partie de l'effectif est sédentaire alors que l'autre (celle qui vit le plus au nord) est migratrice : le rouge-gorge et le héron cendré sont dans ce cas.

Les hôtes d'été sont sans doute les plus « classiques » des migrateurs : ils nous reviennent d'Afrique à chaque printemps, nichent en Europe et repartent à l'automne pour hiverner au-delà de la Méditerranée. On a reconnu là les hirondelles, les martinets, le coucou, le rossignol, la cigogne, etc.

Inversement, les hivernants ne visitent l'Europe de l'Ouest qu'à la mauvaise saison, après s'être reproduits en Scandinavie ou dans le nord de l'U. R. S. S. Il s'agit d'oies et de cygnes sauvages, de pluviers, de certaines grives, etc.

Autre catégorie : celle des Oiseaux de passage qui traversent deux fois nos régions, au printemps vers le nord, et à l'automne vers le sud. De nombreux petits Échassiers (bécasseaux, chevaliers, etc.) sont dans ce cas, ainsi que la grue cendrée.

Enfin, il existe des hivernants d'août... Le fait a de quoi surprendre. Moins si l'on pense que les saisons de l'hémisphère austral sont à l'inverse des nôtres. Et c'est ainsi que des Oiseaux de mer, pétrels et puffins, venus des îles de l'Atlantique Sud viennent hiverner — en plein été — au large de l'Europe.

Techniques d'étude

Les migrations sont étudiées par observation directe dans les cols de montagne, les îles, sur les côtes, etc. Des stations spécialisées ont été ainsi installées aux endroits les plus favorables, en Camargue et à Ouessant.

De plus la méthode du baguage a beaucoup fait progresser nos connaissances sur le sujet : elle consiste à placer à la patte de l'Oiseau une bague en aluminium avec un matricule. Si le sujet bagué est retrouvé, vivant ou mort, on connaîtra le chemin qu'il a parcouru, à condition, toutefois, que la personne qui l'a trouvé renvoie la bague.

Les bagues découvertes en France, qu'elles soient françaises ou non, doivent être adressées au Muséum de Paris (55, rue Buffon - 75005 Paris) qui conserve des fichiers qui permettent de savoir où ont été bagués les spécimens porteurs de bagues françaises. Les bagues étrangères sont retransmises à leurs pays respectifs.

C'est grâce au baguage qu'a été vérifiée la fidélité de certains Oiseaux à leur site de nid : hirondelles et martinets, par exemple, reviennent plusieurs années de suite au même nid.

C. Bevilacqua

La cigogne blanche est l'un des Oiseaux migrateurs les plus caractéristiques.

Autre fait curieux : les migrations en boucle. Un petit Passereau insectivore, le gobe-mouches noir, est rare en France lors de son passage printanier, alors qu'il est très commun à la fin de l'été et à l'automne. L'explication est très simple : le gobe-mouches effectue une migration en boucle.

L'hirondelle est l'Oiseau migrateur qui annonce l'arrivée du printemps.

Les causes des migrations

Les raisons qui poussent les Oiseaux à partir ne sont pas aussi simples à définir qu'il le semblerait. Prenons l'exemple du martinet noir, véritable flèche vivante qui cingle dans le ciel de nos villes. Il nous quitte dès la fin du mois d'août alors qu'il fait encore chaud et que les Insectes sont toujours abondants.

Nourriture et température sont donc insuffisantes pour expliquer le départ des migrateurs. D'ailleurs, certains retrouvent dans l'hémisphère austral un climat comparable à celui qu'ils ont quitté dans les régions boréales. L'alimentation a néanmoins un rôle plus important : certaines espèces, strictement insectivores, sont obligées de partir lorsque les Insectes se raréfient. D'autres, plus éclectiques, changent de régime et se rabattent sur les graines ou les baies.

Mais, en réalité, c'est au niveau des glandes endocrines qu'il faut chercher le véritable déterminisme des migrations. On avait d'abord cru que le rôle principal revenait aux glandes génitales : il n'en est rien, car des Oiseaux castrés migrent normalement, et, au contraire, les espèces sédentaires ont un cycle sexuel comparable à celui des migratrices.

En réalité, c'est l'hypophyse, glande suspendue au cerveau, qui a le rôle déterminant. Elle est sous l'influence de l'hypothalamus, partie de l'encéphale sensible aux variations de la lumière. Ces variations (par exemple, le raccourcissement des jours à la fin de l'été) influent sur l'œil, qui agit sur l'hypothalamus, qui, lui-même, régit l'hypophyse. A son tour, celle-ci stimule les glandes génitales et la thyroïde.

De plus, lorsque l'Oiseau aura ainsi été mis dans une disposition prémigratoire, des facteurs externes (nourriture, température, rassemblement de ses congénères) l'inciteront encore davantage à partir.

L'aigrette, une autre espèce migratrice.

L'orientation des migrateurs

A première vue, l'orientation des Oiseaux migrateurs tient du prodige. Certains, après avoir abattu des milliers de kilomètres au-dessus des vagues, retrouvent un îlot perdu en plein océan.

De très nombreuses expériences ont permis d'élucider en grande partie cette énigme. Le principal guide des voyageurs diurnes, c'est le soleil. Par exemple, les étourneaux en cage se placent dans la bonne direction quand le ciel est dégagé. Au contraire, par temps couvert, ils se disposent d'une manière irrégulière.

Un autre type d'expérience est aussi significatif. Si des goélands sont lâchés à une certaine distance de leur habitat normal, 65 % peuvent trouver du premier coup la bonne direction par temps clair, contre 40 % par temps nuageux.

Des étourneaux qui avaient été éclairés avec de la lumière artificielle selon un rythme ayant six heures d'avance sur la lumière naturelle prirent à leur lâcher une direction à 90° de la normale. Or, 90° sont le quart d'un cercle (360°) comme six heures sont le quart d'une journée ; l'« horloge interne » de ces Oiseaux avait été déréglée.

L'orientation sur le soleil pose toutefois quelques difficultés. Le mouvement apparent qu'il décrit au cours de la journée en est une. Si un Oiseau gardait toujours le même angle de vol par rapport au soleil, il ne parviendrait jamais au but. Il lui faut donc faire une correction de cet angle.

Et quand le ciel est couvert ?... Les Oiseaux utilisent alors des repères visuels, comme les côtes, les vallées, les lacs, les montagnes, etc. Ils se guident sur eux jusqu'à la prochaine éclaircie ; quand le soleil revient, ils corrigent, s'il le faut, leur trajectoire.

La nuit, ce sont les étoiles qui constituent le principal repère des migrateurs. Des expériences plutôt extraordinaires ont été opérées à ce sujet au planétarium de Brême. Des fauvettes placées sous un ciel artificiel correspondant à l'époque de leur départ prirent la bonne direction... Peut-être certaines espèces peuvent-elles utiliser aussi le champ magnétique terrestre. Diverses expériences sont assez significatives à cet égard, mais la controverse reste vive sur cette question.

Les invasions d'Oiseaux

A côté des migrations classiques, il faut dire un mot des invasions d'Oiseaux. Il s'agit de déplacements massifs, se reproduisant à intervalles irréguliers et généralement sans retour.

Le jaseur boréal est un coutumier de ce genre d'invasions. C'est un Passereau un peu plus gros qu'un moineau, au plumage brun rosé, huppé, avec les ailes tachées de rouge. Il niche dans le nord de la Scandinavie et hiverne près de la Baltique.

Certaines années, les jaseurs envahissent des pays beaucoup plus méridionaux, comme la France et l'Italie. Ils apparaissent surtout dans les sorbiers ou autres arbustes à baies. Jadis, ces exodes de jaseurs impressionnaient vivement les foules, qui accusaient ces inoffensifs Oiseaux d'annoncer la guerre ou la peste.

C'est surtout, semble-t-il, la raréfaction de la nourriture qui est à l'origine de ces invasions. De même, quand les lemmings se font rares, les chouettes harpongs, à la splendide livrée blanche, glissant sur leurs ailes ouatées, mettent cap au sud.

LES OISEAUX DE VOLIÈRE ET DE CAGE

La volière est une grande cage, destinée à certains Oiseaux comme les faisans, les cailles, les perroquets, etc. En raison de ses dimensions, elle permet aux Oiseaux une plus grande liberté de mouvements, condition essentielle pour qu'ils se reproduisent. En outre, elle protège ses hôtes des Animaux prédateurs et peut abriter aussi de petites espèces, comme les Passereaux.

Une volière doit avoir un volume de 40 m³ pour les paons, de 24 m³ pour les faisans et de 6 m³ pour les cailles, par exemple. Sa hauteur standard doit être de 2 m, de manière que les Oiseaux, en volant vers le haut, ne puissent acquérir trop de vitesse et se blesser contre le toit. La structure fondamentale est toujours la même : les deux tiers de la surface sont occupés par la cage, et le reste par un abri en maçonnerie, qui sert aux Oiseaux en cas de pluie ou de vent. En outre, il faut disposer d'un local chauffé l'hiver.

En ce qui concerne le peuplement, on n'oubliera jamais de ne pas trop charger la volière, car les mâles se battent souvent. En règle générale, il ne doit pas y avoir plus de 7 ou 8 Oiseaux, par exemple un couple ou un groupe d'une grande espèce (faisans, paons, etc.), un couple d'espèces moyennes (colombes, tourterelles ou perroquets) et quelques couples de Passereaux exotiques.

LES FAISANS

On nomme communément faisans des Gallinacés asiatiques de la famille des Phasianidés, au plumage brillant. Le faisan de chasse est le plus simple à élever, mais on ne le fait habituellement pas, car on fait plutôt un croisement entre trois races : le Phasianus colchicus colchicus, *de Transcaucasie, le* P. c. torquatus, *de Chine orientale, et le* P. c. mongolicus, *de Mongolie. Étant donné qu'il est devenu très difficile de trouver des spécimens de race pure, on n'élève plus ces Oiseaux que pour la chasse. Le faisan est si bien implanté en Europe qu'il fait véritablement partie de sa faune.*

On recherche beaucoup pour les volières les faisans à queue longue comme le faisan vénéré (Syrmaticus reevesi), *au plumage blanc, noir et doré, et dont le mâle atteint une longueur de 2,10 m ; il doit donc disposer de beaucoup d'espace.*

Le faisan doré (Chrysolophus pictus) *et le faisan de lady Amherst* (Chrysolophus amherstiae) *blanc, noir et vert sont très beaux, mais malheureusement souvent croisés entre eux. Le faisan argenté* (Lophura nycthemera), *au ventre noir et au dos blanc, est élevé en Chine depuis l'Antiquité.*

Tous les faisans se nourrissent de graines (blé, chanvre, millet, orge et maïs), de pâtées pour faisans — toutes préparées — et surtout de beaucoup de verdure. Les accouplements ont lieu au printemps ; puis les femelles pondent de 6 à 15 œufs ; la couvaison dure, selon les espèces, de 21 à 26 jours.

LES PAONS

Les paons sont des hôtes très appréciés des volières, bien qu'ils soient mieux dans un parc. L'espèce la plus résistante est le paon bleu (Pavo cristatus), *originaire de l'Inde septentrionale, avec ses variétés blanches, bleues, tachetées et à ailes noires. Les plus appréciés sont les paons blancs et ceux à ailes noires. Le paon spicifère* (Pavo muticus), *de Malaisie, à huppe droite, est plus délicat. Ces deux espèces supportent mal le froid, ce qui fait qu'il faut les abriter dans un local chauffé durant l'hiver. En général, les mâles s'accouplent chacun avec plusieurs femelles, au nombre de 2 à 4. La couvaison dure 28 jours et les petits grandissent lentement.*

T. Catarisano

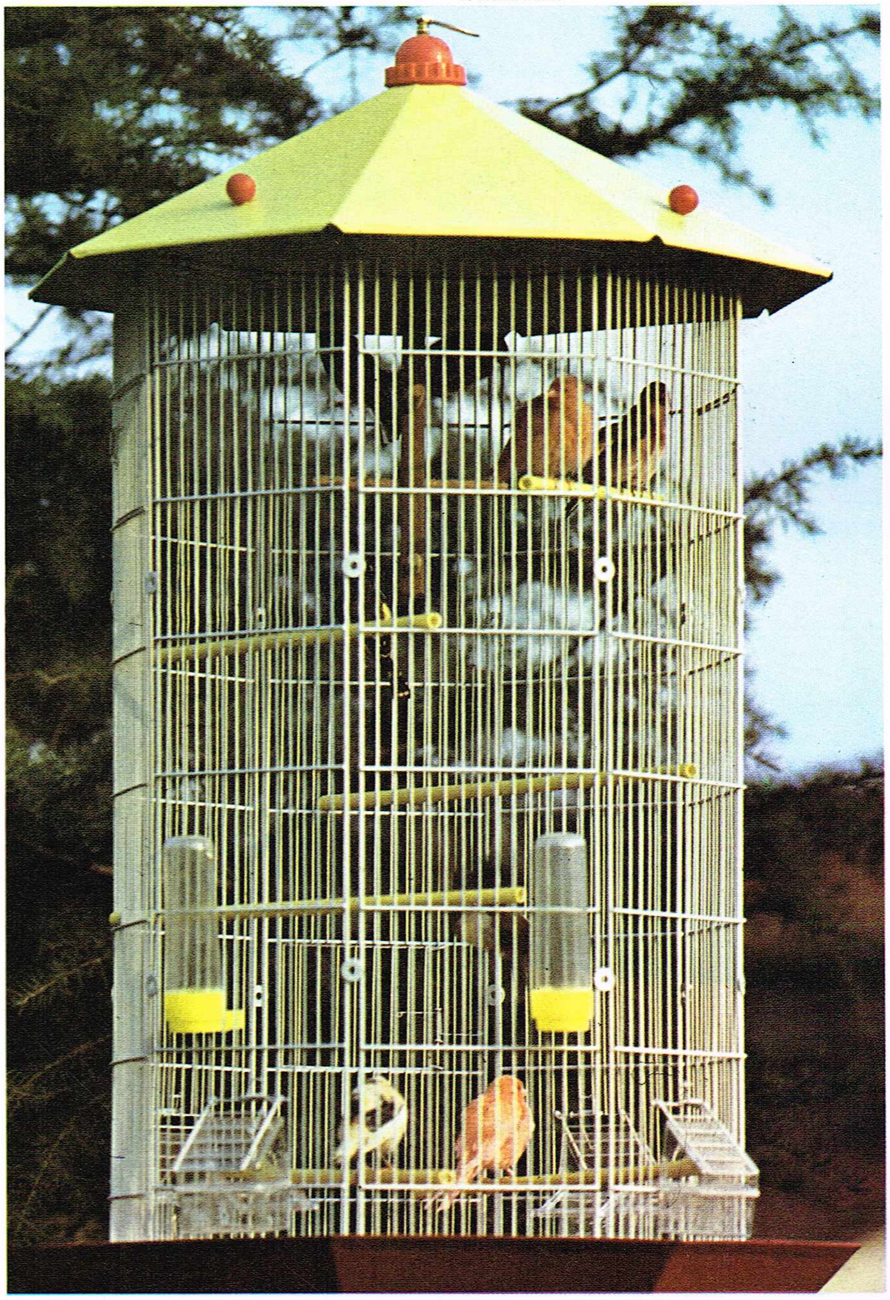

Une volière pour les Oiseaux de petite taille, tels que les canaris, les bengalis, etc.

LES CAILLES

Les cailles sont aussi souvent élevées en volière. Il en existe plusieurs espèces : la caille naine (Coturnix *ou* Exalfactoria chinensis), *la caille des blés* (Coturnix coturnix) *qui vit à l'état sauvage en Europe, le colin de Gambel* (Lophortyx gambeli *ou* californica) *et, un peu à part, le colin de Virginie* (Colinus virginianus). *Les deux derniers ont besoin de perchoirs, alors que les deux autres ne s'en*

C. Bevilacqua

Un faisan mâle *(Phasianus colchicus).*

servent pas. Il convient de prévoir dans la volière des zones herbeuses avec des buissons, où les femelles font leur nid et couvent pendant 17 à 23 jours. Les cailles sont nourries avec des provendes en pâtée (larves de fourmis) et de petites graines (blé, pavot, millet).

COLOMBES ET TOURTERELLES

Les colombes et les tourterelles sont un vaste groupe d'Oiseaux cosmopolites, comprenant une dizaine de genres. Les espèces exotiques souffrent beaucoup du froid, ce qui fait qu'il faut les mettre en hiver dans de grandes cages, dans des locaux chauffés ; leurs dimensions minimales doivent être de 1 m sur 50 à 75 cm de hauteur. Toutes les colombes exotiques ont besoin de caissettes à bords bas pour nicher. Parmi les espèces étrangères, nous citerons la tourterelle striée (Geopelia striata) *— de l'Inde — la colombe passérine* (Columbigallina passerina) *— dont les mâles font une cour caractéristique aux femelles — et la très belle colombe poignardée* (Gallicolumba luzonica) *— des Philippines, qui doit son nom vulgaire à la tache rouge sang de sa poitrine.*

LES CANARIS

Le canari (Serinus canarius canarius) *ou serin des Canaries a été introduit en Europe au XV^e siècle par le baron français Jean de Béthencourt. Il est originaire de l'île de Madère et des îles Canaries. Les amateurs l'ont vite apprécié pour son chant agréable.*

Sa livrée, originellement vert, jaune et gris, est aujourd'hui presque exclusivement toute jaune, en Europe. La variété de cette couleur a été obtenue par sélection, en exploitant une mutation spontanée, c'est-à-dire un changement de couleur imprévu et qui était héréditaire.

A l'état naturel, toutefois, le canari présente toujours son plumage primitif. La sélection a également modifié certains autres de ses caractères comme sa taille, sa forme et la disposition de ses plumes, ce dont nous ne parlerons pas ici.

A Madère et aux Canaries, c'est-à-dire dans son milieu naturel, il présente un dimorphisme sexuel — phénomène que l'on observe chez beaucoup d'Oiseaux — c'est-à-dire une différence assez importante dans l'aspect extérieur entre les mâles et les femelles. Le mâle a ainsi une livrée à dominante verte avec des nuances et de petites taches grises, ainsi qu'une tendance à passer au jaune plus ou moins vif sur la tête et le dos ; la femelle a le dos gris-brun, avec des bandes noires, la tête vert jaunâtre, et la poitrine et la gorge jaune doré.

En mars, chaque couple construit alors sur un arbre peu élevé un nid fait de ramilles et de crins, où la femelle pond 5 œufs vert bleuté, qu'elle couve durant 2 semaines.

A la fin de la saison de reproduction, qui compte jusqu'à 4 couvées, les couples se défont, pour former de petites troupes errant dans les forêts, les champs et les jardins de leurs îles d'origine, et se nourrissant de graines, de fruits ainsi que de bourgeons.

LES PASSEREAUX

De nombreuses autres espèces de Passereaux peuvent être élevées en cage ou en volière. Il faut absolument s'abstenir de mettre en cage les espèces d'Europe : la plupart sont d'ailleurs protégées par la loi, et leur détention est interdite.

Parmi les espèces exotiques, certaines sont devenues véritablement « domestiques », c'est-à-dire qu'elles se reproduisent en captivité depuis des générations. Aussi n'est-il plus nécessaire de les capturer dans leur milieu naturel. C'est le cas du moineau du Japon, du diamant mandarin (dont existent déjà 200 variétés), du calfat blanc, etc.

Comme autres espèces appréciées, citons la foule remuante des astrilds ou bengalis, le cou-coupé, le franciscain ignicolore (dont le mâle est rouge et noir), les veuves à queue interminable, etc. Les colibris eux-mêmes s'élèvent bien en volière, à condition de les nourrir d'eau sucrée : précisons qu'il ne s'agit pas de Passereaux, mais de parents des martinets.

Et n'oublions pas le mainate, gros étourneau asiatique, qui parle à merveille, aussi bien ou même mieux que les perroquets. Ceux-ci feront, avec les perruches, l'objet de notre prochain article.

Le paon *(Pavo cristatus)* est un des plus élégants et des plus grands Oiseaux de volière.

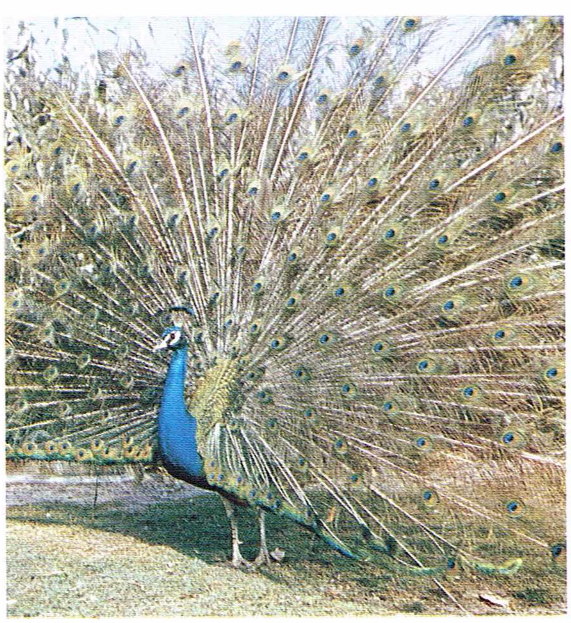

C. Bevilacqua

Les perroquets, avec leur livrée multicolore, sont particulièrement indiqués pour l'élevage en volière.

C. Bevilacqua

LES PERROQUETS ET LES PERRUCHES

Il est impossible de parler, même très brièvement, de toutes les espèces de perroquets, qu'on classe dans la famille des Psittacidés et dans l'ordre des Psittaciformes, ces deux termes dérivant du nom savant du genre le plus commun, Psittacus.

Les perroquets sont des habitants typiques des forêts tropicales et équatoriales, surtout en Amérique du Sud, en Australie et en Océanie ; ils sont moins nombreux en Afrique et en Asie méridionale. Ils habitèrent l'Europe à l'ère tertiaire.

Ce sont des Oiseaux à plumage vivement coloré, au bec très recourbé. Leurs pattes courtes et robustes sont pourvues de doigts nettement préhensiles, qui leur sont très utiles pour s'accrocher aux branches. Ils ne construisent jamais de vrais nids, leurs femelles pondant dans des trous d'arbres, plus rarement sur le sol. Les poussins naissent nus.

LE NESTOR ET LES CACATOÈS

Le nestor ou kéa (Nestor meridionalis), *qui habite la Nouvelle-Zélande, diffère par son régime de tous les autres perroquets ; c'est en effet un carnivore. Il a un peu l'aspect d'un Rapace : ses doigts sont armés de fortes griffes ; ses ailes sont longues et pointues ; son plumage n'est pas de vives couleurs comme chez les autres perroquets, mais uniformément olivâtre, ce qui le rend particulièrement mimétique. Il s'attaque aux moutons, dont il déchire le dos avec son bec et ses griffes. Ce comportement n'a forcément pu apparaître qu'après l'introduction des moutons en Nouvelle-Zélande : le kéa s'est donc montré un parfait opportuniste.*

Les cacatoès ont au contraire un beau plumage. Ils sont doux et faciles à dresser. Leur nom vulgaire rappelle leur cri, qui est à peu près un « kakatoua-kakatoua ». Ils habitent les broussailles dans une grande partie de l'Australie. Leur plumage est généralement blanc ; ils possèdent une belle touffe de plumes jaunes ou rouges sur la tête. Ils grimpent agilement aux arbres, où ils passent la nuit. Ils se tiennent, pendant une grande partie du jour, à terre, où ils recherchent, pour se nourrir, des graines, des bourgeons, des pousses, des bulbes et des tubercules, qu'ils tirent au besoin du sol en creusant avec leur bec. Comme la plupart des perroquets, ils nichent dans les trous d'arbres, qu'ils peuvent agrandir de leur bec. La parade du mâle est prolongée. Les deux parents participent à la couvaison et à l'élevage des petits.

Les cacatoès apprivoisés aiment la présence de l'homme et sont affectueux envers les enfants ; ils sont toujours vifs et curieux, mais deviennent parfois agressifs. Leur principal défaut est de lancer fréquemment, surtout lors des changements de temps, des cris assourdissants.

LES ARAS ET LE PERROQUET GRIS

On voit toujours, dans les volières des zoos, quelques aras, bien qu'ils deviennent de plus en plus rares et chers. La plus grande espèce peut mesurer un mètre de longueur. Les Oiseaux sont faciles à reconnaître, même par des profanes : ils ont un bec très grand et robuste, comprimé latéralement, à mandibule supérieure longue, courbe et pointue à l'extrémité ; leurs joues sont nues et colorées. Ce sont des Oiseaux d'Amérique centrale et du Sud, qui vivent par groupes peu importants ou par couples, dans les grandes forêts, de préférence à proximité des cours d'eau. Aux heures chaudes du jour, ils sommeillent sur les branches, la tête cachée sous l'aile ; c'est seulement à la tombée de la nuit qu'ils vont se nourrir, de fruits, de graines et de bourgeons. Ils forment rarement des troupes nombreuses. Ils nichent dans des trous d'arbres, et, bien qu'étant normalement pacifiques, ils défendent furieusement leurs couvées, surtout contre les singes.

Les aras sont faciles à apprivoiser et apprennent à reconnaître leur maître. On ne les met pas en cage, car ils pourraient abîmer leur plumage, mais sur des perchoirs, auxquels une de leurs pattes est liée par une chaînette.

C. Bevilacqua

Les aras comptent parmi les plus colorés, les plus beaux et les plus grands des perroquets ; on voit ici un ara rouge *(Ara macao)*, originaire d'Amérique centrale.

E.P.S.

On nomme communément perruches de petits perroquets, qui portent sur le dessus des stries légèrement marquées; ces Oiseaux sont adaptés à la vie en cage.

Nous citerons parmi eux l'ara bleu (Ara ararauna), *l'ara macao* (Ara macao), *du Mexique, au plumage rouge et bleu, l'ara à ailes vertes* (Ara chloroptera) *et l'ara hyacinthe* (Andorynchus hyacinthinus), *du Brésil, le plus rare et le plus beau, avec sa livrée bleu foncé.*

Les meilleurs perroquets parleurs sont l'amazone à front bleu (Amazona aestiva), *longue de 40 cm, y compris la queue, et le perroquet gris* (Psittacus erithacus)*; ces Oiseaux sont plus petits que les cacatoès et les aras. Ils s'adaptent très bien à la captivité, à tous les climats et à tous les régimes, ce qui en fait des Oiseaux de cage idéals.*

L'amazone à front bleu, répandue du Brésil à l'Argentine, a un plumage vert, avec le front bleu et la gorge et les joues jaune vif.

Les amazones constituent de très importantes troupes, qui se désagrègent lors de la formation des couples pour la reproduction. Elles se nourrissent de fruits et de graines; arboricoles par excellence, elles grimpent très facilement, s'aidant de leur bec qui fait en quelque sorte fonction de troisième patte.

Le perroquet gris (ou ara) a une livrée moins belle, mais quand même très élégante. Il est tout gris, avec la queue écarlate. Il habite l'Afrique occidentale. Vif et doux, aimant son maître, il est intelligent et très bon imitateur; il vit très longtemps en captivité. C'est de tous les perroquets le meilleur parleur.

L'Afrique héberge encore les inséparables ou agapornis, petits perroquets remarquables par leur fidélité conjugale : mâle et femelle dorment serrés dans leur nichoir.

LA PERRUCHE ONDULÉE

Nous terminerons par la perruche ondulée (Melopsittacus undulatus), *originaire d'Australie, l'Oiseau de cage le plus populaire avec le canari. Comme pour ce dernier, la sélection des éleveurs a abouti à la création de variétés de toutes les couleurs, différant beaucoup de la livrée originelle, où domine le vert, avec de jolies stries noires ondulées à la partie supérieure du corps (d'où le nom de l'espèce). La sélection, pour aboutir au résultat que l'on sait, a exploité les mutations de couleurs qui apparaissent par hasard dans les élevages. On a séparé, en les faisant se reproduire à part, les individus qui présentaient des modifications héréditaires de la teinte du plumage; c'est ainsi qu'il existe des perruches bleues, lilas, blanches, jaunes et cendrées.*

La perruche ondulée imite peu la parole humaine; elle est néanmoins intelligente, affectueuse et facile à élever sous tous les climats; elle s'est répandue comme Oiseau de cage dans le monde entier.

En Australie, qui est son pays d'origine, elle forme des troupes qui restent toujours homogènes, même quand les couples se reproduisent, c'est-à-dire d'octobre à décembre. Cet Oiseau abandonne la forêt où il habite pour chercher sa nourriture, mais seulement le matin et le soir, c'est-à-dire aux heures les moins chaudes de la journée, poussant des cris très aigus, que tous les amateurs de perruches connaissent bien.

Les femelles pondent de quatre à six œufs blanchâtres, dans les trous d'arbres (en cage, elles le font dans de petites caisses spéciales) et les couvent durant une vingtaine de jours, sans l'aide des mâles, lesquels se contentent de faire bonne garde à côté du nid. Les deux parents se chargent de nourrir les petits pendant environ un mois, période à la fin de laquelle, enfin emplumés, ils s'en vont librement à la recherche de leur nourriture.

Tous les perroquets sont de gracieux et sympathiques compagnons, mais ils peuvent être fort dangereux pour l'homme. Mis à part les antipathies qu'il leur arrive de ressentir vis-à-vis d'une personne, il leur arrive assez souvent de transmettre une maladie fréquemment mortelle si elle n'est pas soignée, la psittacose.

Le virus de cette affection (ultra-virus selon les uns, rickettsie selon les autres) provoque chez l'homme une bronchite ou une broncho-pneumonie ressemblant à la tuberculose et des troubles intestinaux, accompagnés d'une fièvre élevée (40 °C) et de prostration; on contracte la psittacose en respirant des poussières d'excréments ou de cadavres d'Oiseaux infectés, et l'incubation est de huit jours. Mais cette maladie est maintenant facilement combattue par certains antibiotiques comme l'auréomycine et les tétracyclines.

LE CASTOR ET LES AUTRES MAMMIFÈRES AQUATIQUES

Le castor est le plus gros Rongeur européen. Cet intéressant Animal mesure en effet 1,20 m de longueur, dont 35 cm pour la queue. Il pèse jusqu'à 38 kg. Le castor est trapu, d'autant plus que la partie postérieure de son corps est la plus développée. Ses pattes sont très courtes, les antérieures l'étant encore plus que les postérieures, dont cinq doigts sont reliés par une large membrane natatoire.

La tête de l'Animal est robuste ; ses minuscules oreilles, velues intérieurement et extérieurement, peuvent être rabaissées sur la tête, de manière à empêcher l'entrée de l'eau dans le conduit auditif. Le nez peut aussi être parfaitement fermé. La petite bouche est armée d'incisives très coupantes, qui permettent à l'Animal de ronger un arbre d'une circonférence d'un mètre en deux ou trois nuits. Chez les castors la queue a un aspect caractéristique : de section circulaire à la racine, elle s'aplatit à mi-longueur pour prendre l'aspect d'une robuste spatule, plate et écailleuse.

Tout le monde connaît la fourrure de castor. Elle est constituée par une bourre très douce, haute tout au plus de 2 cm, grise à la base et brune à l'extrémité, et d'où font saillie quelques poils beaucoup plus longs.

LE RETOUR DU CASTOR

Le castor d'Europe était autrefois répandu à travers presque toute l'Europe, dans les bois proches des rivières ou des lacs. La chasse sans frein qui lui fut faite pour sa fourrure ainsi que les importantes destructions de son milieu naturel — dues directement ou non à l'homme — ont provoqué un déclin rapide de l'espèce. L'Animal se limita à certains territoires de la péninsule scandinave, à la Pologne et à la Russie (d'où provient la majeure partie des peaux), au bassin inférieur de l'Elbe, au haut Danube et au Rhône. On le rencontre également en Sibérie.

Au cours des dernières années, des castors ont été réintroduits dans diverses régions d'Europe, et le plus souvent avec succès. En France, les réimplantations du castor ont été faites sous l'égide de M. Bernard Richard, grand spécialiste de cet Animal.

Et c'est ainsi qu'il y a maintenant des castors en Bretagne, dans le val de Loire, en Alsace, etc. L'espèce a été aussi réintroduite en Suisse, et l'on projette de la réacclimater dans la région parisienne, où la Bièvre a gardé l'ancien nom du castor. Toutefois, c'est dans la vallée du Rhône que les castors demeurent le plus nombreux : leur effectif « français » est d'environ un millier de sujets.

Outre cette espèce (Castor fiber), *il existe un castor américain ou du Canada* (Castor canadensis), *qui habite l'Amérique du Nord. Les deux espèces ne présentent pas de différences importantes, mis à part certaines caractéristiques du crâne, leurs mœurs étant semblables.*

Ostman - P. R. Johanson

Le castor d'Europe *(Castor fiber)* est bien connu comme modificateur de l'aspect des forêts, lorsque les cours d'eau qui traversent celles-ci sont habités par l'Animal.

DES MŒURS PASSIONNANTES

Le castor est surtout célèbre pour ses travaux. Dans les zones où il n'est guère dérangé par l'homme, il vit en colonies plus ou moins importantes. Sa nourriture est principalement constituée par des écorces d'arbres, des feuilles et des ramilles. Pour se procurer sa subsistance, il abat un grand nombre d'arbres, en les rongeant à la base à l'aide de ses robustes incisives.

Une fois à terre, les troncs sont dépouillés par l'Animal de leurs branches, puis taillés en morceaux d'un ou deux mètres de longueur. Les pieux ainsi préparés servent à la construction des barrages et des tanières du castor, dont l'habileté est vraiment exceptionnelle. Les demeures du castor consistent en une ou plusieurs galeries qui débouchent sous l'eau (mais ont une cheminée d'aération) et qui convergent vers une chambre centrale tapissée de copeaux de bois. Des huttes sont édifiées dans certaines régions.

Dans la chambre, toujours parfaitement sèche puisque son fond permet à l'eau de s'écouler, toute la famille se rassemble ; la femelle s'y réfugie parfois aussi au moment de la mise bas. En ce cas, elle accumule au fond de la chambre des matériaux plus doux. La gestation, qui dure environ quatre mois, aboutit à la naissance d'un à six petits, aux yeux fermés, et velus.

Au bout d'un mois, les jeunes sont en mesure d'abandonner leur refuge et de suivre leur mère pour de brèves promenades au-dehors ; ils atteignent leur maturité sexuelle vers trois ans.

Ostman - J. R. Simon

On voit ici un castor rongeant un jeune tronc de bouleau.

régularisèrent le cours des torrents, en faisant cesser les crues subites et en faisant même surgir des pièces d'eau qui servirent à l'irrigation de terres auparavant incultes. C'est là l'un des quelques exemples d'exploitation intelligente des bienfaits de la nature par l'homme. Le castor est à peu près le seul Animal qui soit capable de modifier un paysage...

Dans d'autres endroits, les castors ont été exterminés ou survivent péniblement. Comme nous l'avons dit, ils ont été beaucoup chassés, non seulement pour leur fourrure, mais aussi pour une substance particulière, le castoréum, qu'ils produisent par deux glandes situées à proximité des gonades. Cette matière, d'odeur pénétrante et désagréable, a été considérée comme une panacée et coûtait très cher.

Un des aspects les plus cocasses des mœurs des castors est le rôle de leur queue. Contrairement à la croyance populaire, elle ne leur sert pas du tout de truelle, mais a bien d'autres usages : elle est à la fois réserve de nourriture (car elle peut se vider de la graisse qu'elle contient), contrepoids (quant le castor se tient debout), voiture d'enfants (car les jeunes s'y accrochent), gouvernail durant la nage, etc.

LES BARRAGES

En amont et en aval de ce qu'on peut considérer comme l'habitation proprement dite, les castors construisent des barrages, qui ont pour but de régulariser le débit des eaux des torrents, quand celui-ci est sujet à d'importantes variations ; en ce qui concerne les barrages d'aval, ceux-ci servent à faire monter le niveau de l'eau lorsque le torrent est en période d'étiage. Les barrages et les habitations sont, comme nous l'avons dit, construits très ingénieusement. Faits de troncs et de branches entrelacés, ils sont très solides, bien qu'ils laissent passer beaucoup d'eau par leurs interstices. Cet inconvénient est pallié par l'introduction de boue et de terre dans les fentes.

Le maintien en état de ces constructions demande de la part de l'Animal une activité constante et très fatigante, qui devient frénétique lors de la mauvaise saison et des grandes pluies, car l'accumulation d'eau fait fortement pression contre les barrages. L'habileté des castors à fabriquer des barrages a même été exploitée par l'homme, comme nous allons le voir.

En Amérique du Nord, l'Animal avait presque disparu à cause de la chasse dont il avait été victime. C'est alors qu'on interdit sa chasse, sous peine de lourdes amendes. En peu de temps, le nombre des castors augmenta, et il fut possible de transférer quelques colonies dans des torrents de montagne qui, pendant les périodes de crue, provoquaient d'importants dommages aux champs environnants et en aval. Les résultats furent remarquables : en effet, les castors, transportés dans de nouveaux milieux, construisirent comme à l'accoutumée des barrages, qui

La loutre du Canada *(Lutra canadensis)* a les mêmes mœurs que la loutre d'Europe *(Lutra lutra).*

C. Bevilacqua

LA LOUTRE

Le loutre d'Europe (Lutra lutra) *est un gracieux et élégant carnivore de la famille des Mustélidés qui atteint une longueur de 1,20 m, dont environ 45 cm pour la queue. Son corps est fuselé et aplati, son museau est large, ses oreilles petites. Ses pattes sont palmées, et sa queue est longue. La loutre fréquente les eaux douces, et surtout celles qui sont très poissonneuses, car elle se nourrit essentiellement de Poissons, bien qu'elle ne dédaigne pas les œufs d'Oiseaux et les Oiseaux aquatiques eux-mêmes. On la trouve parfois sur les côtes marines. Elle installe, sur les rives des rivières et des torrents, des tanières, simples trous ou parfois vrais terriers, auxquels elle accède par une galerie dont l'ouverture se trouve sous l'eau. Le tunnel aboutit à une chambre tapissée d'herbes et toujours sèche, d'où part une galerie secondaire faisant fonction de cheminée d'aération.*

La loutre était jadis considérée comme nuisible, à cause de la grande quantité de Poissons qu'elle dévore. En réalité, elle ne provoque pas de dégâts importants, si l'on tient compte de la taille et du nombre de pièces qu'elle tue ; malheureusement, l'homme a une fâcheuse tendance à tenir pour nuisibles beaucoup d'Animaux, alors qu'ils sont indispensables pour l'équilibre écologique. Le cas de la loutre est typique à cet égard, étant donné qu'elle se nourrit de Poissons qui sont la plupart du temps malades ou débilités : elle participe de ce fait à la sélection naturelle.

Donc, la loutre peut être considérée comme un nettoyeur des cours d'eau, car elle évite la propagation d'épizooties nuisibles aux Poissons. En Pologne, par exemple, les loutres ont été presque complètement exterminées ; les pêcheurs, qui avaient d'abord favorisé leur destruction, ont été les premiers à se rendre compte qu'ils avaient commis une monumentale erreur. Effectivement, ces carnivores ayant disparu des cours d'eau, les Poissons malades ont été à l'origine de la diffusion de toutes sortes de maladies, qui sont devenues épidémiques. De même, en France, la loutre est devenue une rareté : précisons qu'elle est, comme le castor, légalement protégée.

DE LA CROSSOPE AU VISON

Les eaux douces européennes hébergent bien d'autres Mammifères. Nous nous contenterons de les citer rapidement. Chez les insectivores, deux espèces : la crossope ou musaraigne aquatique et le desman, à petite trompe, propre aux Pyrénées. Du côté des Rongeurs, outre le castor, nous trouvons par ordre de taille : le campagnol amphibie, communément appelé « rat d'eau », le surmulot ou rat d'égout, qui pullule dans les villes, le rat musqué, introduit à partir de l'Amérique du Nord et fort indésirable, et le ragondin, d'origine sud-américaine.

Parmi les carnivores, en plus de la loutre, il faut mentionner le putois et surtout le vison, encore plus aquatique : rare en France, il ne subsiste plus guère qu'en Normandie, dans le val de Loire et le Sud-Ouest.

L'OURS ET LES MAMMIFÈRES MONTAGNARDS

Peut-on sauver les derniers ours bruns (Ursus arctos) *de France ? Ils ne sont plus qu'une quinzaine, retranchés dans la partie occidentale des Pyrénées. Le gros problème, c'est de modérer l'ardeur destructice des bergers, qui les accusent, parfois avec juste raison, parfois à tort, de tuer leurs brebis.*

Un écologiste de Pau, M. Tanguy Le Gac, propose la création d'un fonds « d'intervention éco-pastoral » qui pourrait verser de généreuses indemnisations aux bergers victimes de l'ours. Ainsi le dernier grand fauve de France serait sauvé de la disparition.

L'ours brun s'est déjà éteint dans le Massif central et le Jura au siècle dernier, et dans les Alpes françaises vers 1937. Près de 200 spécimens subsistent en Italie, dans les Abruzzes et le Trentin, en Espagne, et surtout en Europe orientale (la Roumanie et la Yougoslavie en possèdent chacune environ 800) et en U.R.S.S.

L'espèce a disparu d'Afrique du Nord, ce qui fait que l'Afrique ne compte plus aucun ours. En Amérique vivent des ours assez voisins, comme le grizzly, qui n'a pas toujours bon caractère, et l'énorme kodiak, des îles du Pacifique Nord, qui atteint 3 m de haut. L'ours qui mendie de la nourriture dans les parcs nationaux américains est le baribal ou ours noir : c'est lui que l'on voit à Thoiry.

LA VIE DE L'OURS

L'ours brun vit dans les forêts les plus touffues, mais où existent aussi des clairières et où se trouve une végétation basse qui lui fournit les baies dont il se nourrit. Il recherche aussi les grottes et les anfractuosités de rochers, pour y passer le jour et pour se réfugier éventuellement durant l'hiver.

L'ours brun est surtout actif de nuit, mais aussi à l'aube et au coucher du soleil. Comme nous l'avons dit, il se nourrit de fruits — et surtout de baies — mais il est à peu près omnivore. Si son territoire de chasse, plus ou moins vaste, comporte des torrents, il y pêche des Crustacés et des Poissons. Dans les zones où l'espèce est encore abondante, la rareté de la nourriture le fait rechercher les petits Rongeurs ; quand cette source de subsistance se tarit elle aussi, il s'attaque alors à des daims et à des sangliers.

Il lui arrive même, nous l'avons dit, de manger des moutons et des veaux, non seulement au pâturage, mais aussi dans les bergeries et les étables. Par ailleurs, il se contente généralement de ce que lui offre la forêt, où il recherche tout particulièrement les nids d'abeilles sauvages, qu'il sait trouver même sur les arbres, et les nids de fourmis, dont il mange, presque sans en laisser, les adultes et les pupes.

Au cours de l'été, l'ours brun entre en rut. Les femelles, après une gestation d'environ 6 mois, mettent au monde de 2 à 5 petits, qui ne sont pas plus gros que des rats. La mise bas a lieu en plein hiver, lorsque les mâles sont en léthargie, dans une confortable tanière, revêtue d'herbes et de feuilles sèches. La mère allaite ses petits, ceux-ci ne sortent pas de leur tanière natale avant le début du printemps. Ils restent avec leur mère pendant tout l'été et l'automne, et passent ensuite l'hiver dans le même abri. Au printemps suivant, c'est la mère elle-même qui se charge de chasser ses enfants si ceux-ci ne sont pas déjà partis, car ils sont désormais capables de se suffire à eux-mêmes.

LA MARMOTTE

Beaucoup plus commune que l'ours dans nos régions, la marmotte (Marmota marmota) *constitue même de très importantes populations dans les Alpes, entre 1 500 m et 3 000 m d'altitude ; c'est l'un des plus intéressants Rongeurs de la faune européenne. On la rencontre aussi dans les Carpates. Mais, partout, son milieu caractéristique est celui des éboulis et des zones sans végétation, qui reçoivent durant le jour le maximum de soleil. Elle a une prédilection pour les endroits isolés, loin des habitations ; mais, quand elle n'est pas perturbée, elle peut s'approcher jusqu'à quelques dizaines de mètres des hameaux. Dans certains parcs nationaux, on peut facilement l'admirer au petit matin, dans les rochers, faisant entendre par moments des sifflements aigus. Les marmottes pullulent dans le parc de la Vanoise, où on peut en voir 15 dans un rayon de 100 m...*

La marmotte est un gracieux Animal, d'environ 70 cm de longueur, dont 18 cm pour la queue. Elle semble, à première vue, lente, mais elle est en réalité agile et peut se déplacer très rapidement.

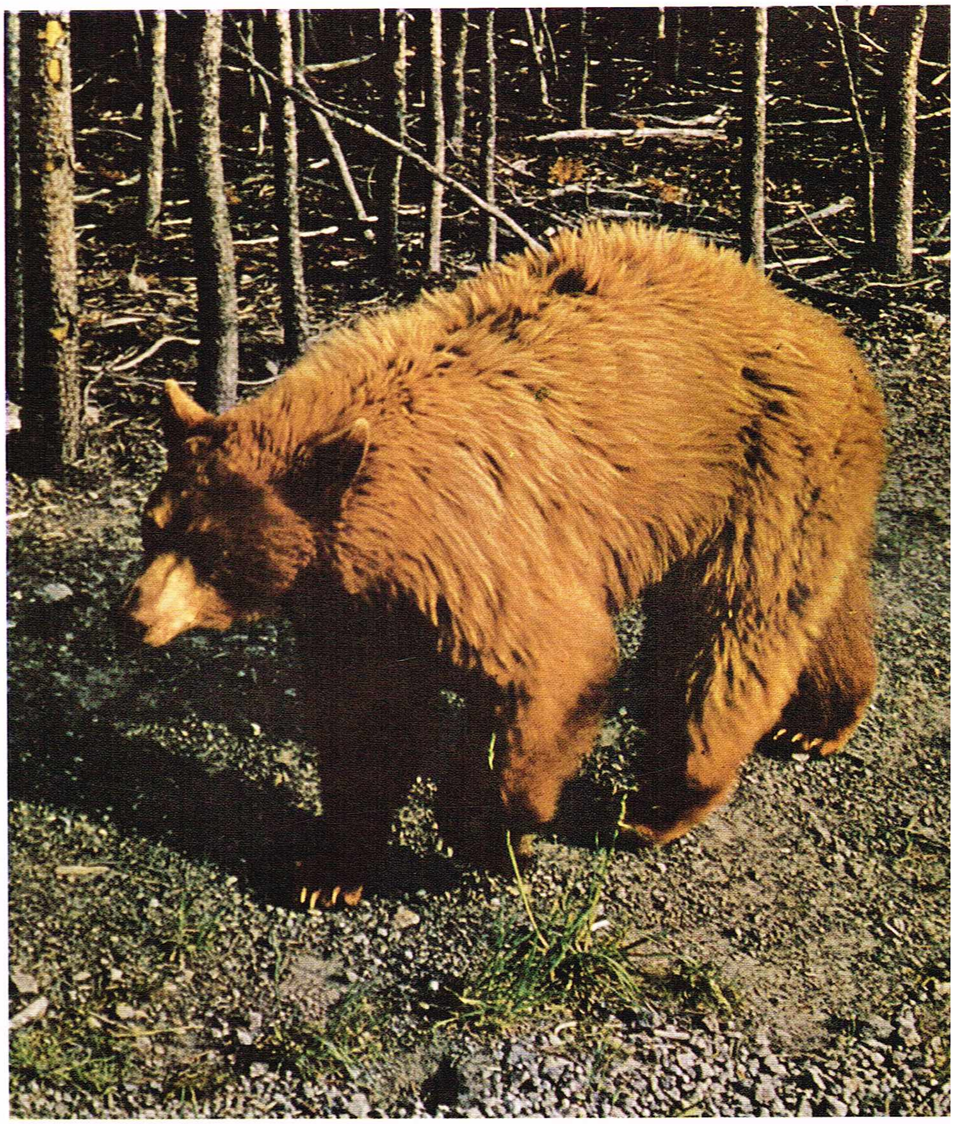

Un Animal qui, dans les montagnes de la péninsule italienne, est désormais limité à peu d'exemplaires : l'ours brun.

S. Mc Cutcheon

Une rencontre romantique à la lisière d'un bois.

Pendant l'été, la marmotte creuse dans ses lieux préférés une tanière, reliée à l'extérieur par plusieurs galeries situées à différentes profondeurs. Le Rongeur se rend dans sa demeure centrale par ces tunnels, d'où il peut éventuellement fuir en cas de danger. Au matin, la marmotte sort de sa tanière et, toujours en éveil, après avoir observé les environs, va chercher de la nourriture. Son alimentation consiste essentiellement en herbes alpines, qu'elle coupe très rapidement grâce à sa robuste denture. Elle se nourrit également de racines et, souvent, comme la nourriture se fait rare, elle se contente d'herbes sèches. Pendant ses repas, qu'elle consomme assise sur ses pattes postérieures, en une attitude caractéristique, elle ne cesse jamais de surveiller les alentours, et, quand elle ressent un danger quelconque, elle émet un sifflement aigu, qui alerte toute la colonie, laquelle se réfugie immédiatement dans les tanières.

UN ANIMAL HIBERNANT

Ses accouplements ont lieu au début du printemps ; au bout d'une gestation d'environ 6 semaines, la femelle met au monde de 2 à 4 petits, qui restent généralement dans la nature jusque tard en été. Les marmottes adorent jouer : elles se culbutent, se mordillent, se frottent le museau...

La marmotte, que l'on voit ici dans son attitude caractéristique, vit dans les rochers des hautes cimes des Alpes.

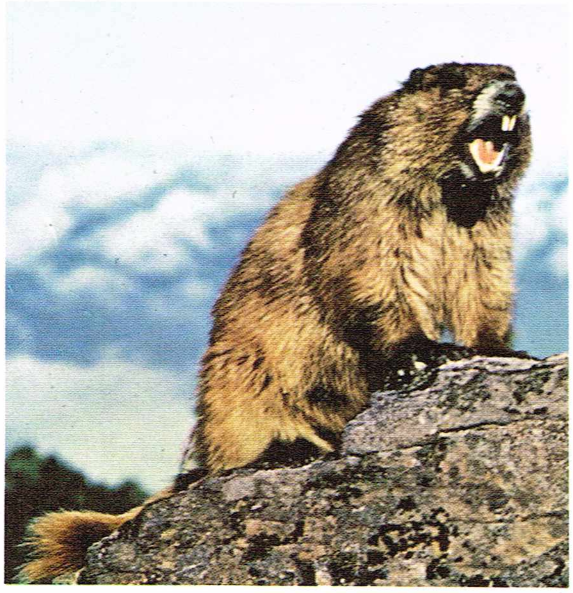

Ostman - R. e J. Spurr

A l'approche de la mauvaise saison, la marmotte redevient très active, pour préparer ses quartiers hivernaux. La tanière est alors aménagée pour que l'Animal puisse y passer le long hiver. Parfois, c'est la demeure estivale qui sert de nouveau ; dans d'autres cas, de nouveaux souterrains sont creusés par l'Animal, à moindre altitude. La tanière hivernale, de toute façon, est toujours spacieuse, étant donné qu'elle abrite de nombreux individus. Une longue galerie, parfois ramifiée, aboutit à une vaste chambre tapissée de foin bien sec, que les Animaux ont pris soin d'accumuler à la bonne saison. Lorsque survient le froid, les marmottes rentrent dans leur demeure, dont elles ferment l'accès sur une grande longueur avec des pierres, de la terre et du foin. De la sorte, l'entrée d'air froid est empêchée, la température restant constante intérieurement.

Dans ce chaud milieu, les marmottes entrent en léthargie, étroitement serrées les unes contre les autres, pour passer toute la mauvaise saison. Durant la période de léthargie, toute l'activité organique de l'Animal se trouve ralentie, la bête étant parfaitement immobile, au point de donner l'impression d'être morte. Sa température interne baisse beaucoup, de même que son rythme respiratoire. Pendant cette période, la marmotte ne se nourrit pas et utilise donc les réserves de graisse qu'elle a accumulées au beau temps. C'est pour cela qu'au moment du réveil, l'Animal est très maigre et a besoin de se nourrir abondamment.

C'est lorsqu'elle sort de sa tanière au printemps que la marmotte, très affaiblie, est le plus vulnérable pour ses prédateurs, dont le principal est l'aigle. Il n'est pas rare d'observer, dans les zones où abondent les marmottes, un aigle qui s'envole, tenant dans ses serres une victime surprise avant d'avoir pu rentrer dans son abri, ou loin de celui-ci.

D'AUTRES MAMMIFÈRES MONTAGNARDS

Les grandes chaînes de montagnes du globe ont chacune des Mammifères particuliers. En Europe, outre l'ours brun et la marmotte, ce sont le chamois, le bouquetin, le lièvre variable (qui devient blanc l'hiver). L'Himalaya héberge divers Ruminants à allure de chèvre, comme le sérow, et aussi le petit panda, l'ours à collier, des singes (les semnopithèques montent jusqu'à 4 000 m) et le sympathique yack (qui atteint 5 800 m).

La cordillère des Andes possède, comme espèces typiques, le lama et ses parents (alpaca, vigogne, guanaco), le chinchilla, presque exterminé pour sa fourrure, et d'autres Rongeurs.

Il est moins évident que les hauts sommets d'Afrique équatoriale aient une faune mammalienne : il faut pourtant mentionner des rats, de petites antilopes (céphalophes), les damans (à allure de Rongeurs mais cousins des éléphants !) et le gorille de montagne ; un squelette de panthère a même été découvert à 5 000 m d'altitude sur le Kilimandjaro !

LA BELETTE, LA MARTRE ET LA FOUINE

J. Markham

La martre *(Martes martes)* est un Mustélidé largement répandu en Europe ; elle vit dans les forêts de haute futaie et dans les maquis denses.

Si les grands Carnivores sont devenus rares en Europe occidentale, de nombreuses espèces de plus petite taille se sont fort bien adaptées aux transformations que l'homme a fait subir au milieu naturel. Elles se rangent dans la famille des Mustélidés.

Nous avons déjà fait connaissance avec l'une d'elles, la loutre. Dans cet article et le suivant, nous allons nous intéresser aux autres. Et d'abord, le plus petit des Carnivores d'Europe : la belette (Mustela nivalis). *Elle ne mesure qu'une vingtaine de centimètres, plus une courte queue de 6 cm. Son pelage est brun dessus, avec le ventre blanc jaunâtre : la ligne de démarcation entre les deux teintes, sur les flancs, est nette.*

La belette a une silhouette très allongée : son corps est porté par de petites pattes. Elle apparaît parfois en un éclair, avant de disparaître sous une haie ; il faut se garder de la confondre avec l'hermine, qui a la même allure générale, mais est plus grande et a une queue plus longue.

UN VRAI PETIT FAUVE

Il existe d'ailleurs une concurrence écologique entre la belette et l'hermine. La première occupe surtout les plaines cultivées, où la seconde est moins abondante. En montagne, c'est au contraire l'hermine qui domine, bien que la belette monte parfois assez haut. Dans les régions méditerranéennes, l'hermine est absente : aussi les belettes peuvent-elles manger ses proies. Résultat : elles sont nettement plus grandes que leurs congénères plus septentrionales.

Les victimes habituelles de la belette sont les campagnols : en détruisant ces indésirables Rongeurs, qui tendent actuellement à proliférer, elle se rend donc utile à l'agriculture ; de ses canines pointues, elle leur perce habilement la nuque.

Il est curieux de constater que, lorsque les campagnols sont nombreux, les belettes abondent également. Celles-ci sont en effet, grâce à un mécanisme mal élucidé, plus fécondes lors de pullulations de Rongeurs. Mais elles s'attaquent aussi aux Oiseaux et même aux lièvres, aux lapins et aux rats, pourtant beaucoup plus gros qu'elles.

La belette grimpe et nage peu. La mise bas a lieu dans un trou de souris ou dans un tronc creux. Il y a généralement deux portées par an, de quatre à huit jeunes chacune. En dépit de son abondance, la belette n'a pas livré tous ses secrets : son organisation territoriale et sa vie sociale sont encore mal connues.

L'ENNEMIE DES ÉCUREUILS

La martre (Martes martes) *est un fort bel Animal dont le milieu naturel est la forêt, spécialement celle de conifères. Les nouvelles la concernant sont plutôt réjouissantes : après s'être raréfiée, la martre tend à regagner ici et là du terrain.*

Longue de 45 cm, avec une queue de 30 cm, la martre a une fourrure brune et une poitrine jaune caractéristique. Sa queue est touffue. Elle peut peser près de 2 kg. De mœurs farouches, la martre évolue agilement dans les grands arbres : elle y fait des bonds impressionnants. Elle est surtout crépusculaire et se cache le jour dans un trou d'arbre ou un vieux nid. La nuit, elle fait parfois des trajets d'une dizaine de kilomètres, tantôt à terre (ou l'on peut repérer ses traces dans la neige), tantôt dans les arbres.

La proie favorite de la martre est l'écureuil; elle est le seul Carnivore capable de le capturer dans les arbres. Son régime est par ailleurs assez varié. En Suède, les martres consomment en hiver : 51 % d'écureuils, 21 % de petits Mammifères, 18 % d'Oiseaux, 10 % divers. Les Insectes, le miel, les baies, les œufs figurent à son menu.

En avril, la femelle met bas de trois à six jeunes, dans un nid d'Oiseau ou un trou quelconque. Les martres, comme beaucoup d'autres Mammifères, limitent leur domaine au moyen de sécrétions odorantes de leurs glandes anales.

En France, l'espèce est surtout abondante dans les forêts de la moitié orientale du pays : elle semble atteindre 2 000 m en montagne. Si la martre est assez prospère à notre époque, c'est qu'on ne s'intéresse plus guère à sa fourrure : les élevages de visons rendent sa capture sans intérêt. C'est dans la taïga sibérienne que vit une proche parente de la martre, célèbre pour sa fourrure : la zibeline (Martes zibellina) *; jadis, elle habitait la Scandinavie.*

DES FOUINES EN VILLE

La fouine (Martes foira) *ressemble beaucoup à la martre, mais s'en distingue par sa bavette qui est blanche et non jaune. Le reste de son pelage est brun foncé. Elle mesure 45 cm, avec une queue de 25 cm.*

De mœurs surtout nocturnes, c'est une très bonne grimpeuse : elle est capable d'escalader une façade à l'aide des plantes grimpantes, et même de monter sur la croix de fer surmontant un clocher.

La fouine habite des milieux très variés. A la campagne, elle s'installe dans un arbre creux, un tas de fagots ou un hangar. Elle s'habitue en effet très bien au voisinage des hommes, trop bien même car il lui arrive de faire des incursions dans les poulaillers.

Et il se produit alors — pas toujours mais quelquefois — un curieux phénomène : la fouine tue toutes les poules qui se trouvent dans le poulailler, pour n'en manger qu'une seule. C'est là l'une des rares entorses à la loi selon laquelle les Animaux ne tuent que pour se nourrir.

Il semble que la fouine soit affolée par les battements d'ailes des poules qu'elle-même terrorise, et les tue par panique. De plus, l'odeur du sang excite fortement les Carnivores. Le régime de l'espèce comprend encore de petits Rongeurs, des œufs et des fruits : cerises, pommes et poires.

La fouine pénètre volontiers dans les villes : elle est même le seul Carnivore d'Europe qui se soit adapté à la vie citadine. On la signale jusque dans la banlieue parisienne; des fouines habitaient encore, il n'y a pas si longtemps, un terrain vague proche de la Chambre des députés à Paris : les constructions les ont chassées. Ces fouines des villes vont se nourrir dans les poubelles.

En dépit de sa relative abondance, la fouine ne se voit pas facilement car elle passe en général en un éclair. Elle se signale plutôt par ses traces, ses excréments et ses cris : le plus fréquent est un chuintement saccadé. Dans les vieilles maisons, on risque aussi d'entendre les bruits de ses bonds et de ses courses.

La femelle met bas de deux à quatre jeunes, le plus souvent au printemps. Sa vie sociale est mal connue : on voit donc combien d'études nécessitent encore nos Mammifères indigènes.

Jadis, les fourreurs recherchaient le pelage de la fouine : heureusement pour elle, elle est très difficile à prendre au piège. Au Moyen Age, avant l'implantation du chat en Europe, la fouine était élevée dans les campagnes en vue de la destruction des Rongeurs.

DES MANGEURS D'ŒUFS

Nous ferons connaissance, dans notre prochain article, avec d'autre membres de la famille des Mustélidés : l'hermine, le putois, le furet et le blaireau.

Ces petits Carnivores — comme d'ailleurs d'autres Animaux — sont des amateurs d'œufs. Et c'est pour l'observateur de la nature un petit jeu que d'identifier l'espèce qui a mangé l'œuf dont il trouve les débris.

Bien sûr, des coquilles cassées peuvent être tombées d'un nid après l'éclosion des jeunes, mais dans d'autres cas, un prédateur est passé par là. Un petit orifice, c'est la signature d'une hermine ou d'une belette qui a gobé l'œuf. Une grande ouverture aux bords déchiquetés, sur le côté de l'œuf, est le signe du putois. Une ouverture assez semblable, mais plus petite : c'est une fouine. Mais celle-ci (comme le surmulot) a aussi l'habitude de rassembler des œufs sans les casser.

Le blaireau et le hérisson réduisent les coquilles en miettes. L'écureuil les fend en deux. La pie et le geai « piochent » les œufs à coups de bec, la première sur le côté, le second au gros bout : il en résulte un petit orifice.

N'en déduisons pas que ces Animaux sont « nuisibles » : ce sont des prédateurs qui jouent un rôle irremplaçable dans les équilibres naturels. Jadis persécutés, les petits Carnivores sont aujourd'hui davantage respectés; il est désolant de les voir encore figurer dans des tableaux de destruction de « nuisibles » ou dans les « foires aux sauvagines ».

La belette *(Mustela nivalis)* est un petit Mustélidé doté d'un exceptionnel instinct de chasse.

J. Markham

DE L'HERMINE AU BLAIREAU

T. Okapia

L'hermine (*Mustela erminea*) dans sa livrée hivernale, toute blanche, sauf la pointe noire de la queue.

Un Animal au corps fluet qui traverse le chemin, porté par de courtes pattes : c'est une hermine, le plus visible de nos Carnivores, en raison de son abondance et de ses mœurs en partie diurnes. L'hermine (Mustela erminea) *est un peu plus grande que la belette. Elle a une longueur d'environ 40 cm, dont environ 15 cm pour la queue. Sa livrée hivernale est différente de sa robe estivale. En hiver, l'hermine devient toute blanche, à l'exception de l'extrémité de la queue, qui est noire. En été, sa livrée est brun roussâtre, assez semblable à celle de la belette. Comme cette dernière, c'est une chasseresse très habile, qui n'a pas peur de proies plus grandes qu'elle. La tactique de chasse de l'hermine consiste en une attaque par surprise, presque toujours couronnée de succès. Quand la proie est un Mammifère ou un Oiseau, elle lui saute à la gorge ou à la nuque pour la saigner. Lorsque la victime est de petite taille, elle est dévorée, alors que, dans le cas précédent, l'hermine se contente d'en sucer le sang. L'hermine capture non seulement des rats, souris, mulots et campagnols, mais aussi des lièvres, des lapins de garenne, ainsi que des Oiseaux sauvages et domestiques, aussi bien de petite que de grande taille.*

Elle attrape les Passereaux avec une habileté extraordinaire. La femelle met bas, en avril, de quatre à neuf jeunes. L'hermine se dresse souvent sur ses pattes de derrière, pour observer les environs ; elle grimpe à l'occasion. L'hermine était jadis très recherchée pour sa fourrure : comme il en fallait des centaines de spécimens pour faire un seul manteau, on imagine les destructions qui en furent faites...

LE PUTOIS

Le putois (Mustela putorius) *est surtout connu pour sa mauvaise odeur, qui provient d'une sécrétion produite par des glandes spéciales. Cette substance sert à l'Animal de moyen de défense, et rend même souvent insupportable la présence d'un individu mort.*

Le putois est beaucoup plus grand que l'hermine et la belette ; il peut atteindre au maximum de sa croissance 35 cm de longueur, plus 15 pour la queue. Sa douce

A. Margiocco

Ci-dessus, le putois *(Mustela putorius)* chasse ses proies, non seulement au bord des eaux douces, mais aussi dans les poulaillers et les clapiers.

Ci-dessous, le blaireau *(Meles meles)* est le plus grand Mustélidé de la faune occidentale.

Titus

fourrure est très foncée sur les parties inférieures du corps, alors qu'elle est de couleur rouille sur les flancs ; un « masque » blanc caractéristique orne sa face. Cet Animal est assez répandu dans toute l'Europe, surtout au bord des eaux douces : il y chasse les Poissons et les grenouilles, mais capture aussi des proies terrestres.

LE FURET

Le furet (Mustela furo) *est utilisé dans certaines régions pour la chasse au lapin. On le lâche dans un terrier dont les issues sont surveillées par les chasseurs. C'est en fait une forme albinos du putois : il a un pelage jaunâtre et les yeux rouges.*

Son origine est mystérieuse : pour les uns, le furet nous vient d'Afrique du Nord, pour d'autres, du Moyen-Orient. Il arrive parfois que des furets domestiques prennent la clef des champs : ils s'y croisent avec des putois, pour donner un produit hybride, le furet putoisé, au pelage intermédiaire.

Le thème de la chasse au furet a été magistralement exploité par l'écrivain animalier Louis Pergaud dans son récit l'Exécution du traître. *Il imagine que le putois, la belette, la fouine et la martre veulent en finir avec Jaunissard, le furet. Pour eux, celui-ci est un traître, un vendu, qui collabore avec l'homme, et donc les prive de nourriture. Le putois le surprend au cours de sa chasse et l'exécute.*

Un autre proche parent du putois est le vison (Mustela lutreola). *Long de 34 cm, avec une queue de 14 cm, il a un pelage châtain uni ; seuls son museau et son menton sont blancs. Il hante marais et cours d'eau, où il plonge avec habileté grâce à ses palmures. Il se nourrit de grenouilles et de Rongeurs, et s'attaque même au rat musqué.*

Le vison était autrefois répandu en France : actuellement, il subsiste surtout dans le bassin de la Loire et dans le Sud-Ouest. Les fourrures de vison viennent de l'espèce américaine, qui fait l'objet d'un élevage assez important.

LE BLAIREAU

Le blaireau (Meles meles) *est un Mustélidé nettement différent de ceux dont nous avons parlé jusqu'ici. Cette espèce, encore assez commune dans toute l'Europe, est de grande taille et massive. Le blaireau atteint en effet une longueur de 70 cm, plus 20 cm pour la queue, et peut peser 20 kg.*

Sa fourrure, dont on utilisait surtout les longs poils de la queue pour faire des « blaireaux » à raser et des pinceaux d'excellente qualité, est grisâtre sur le dessus et sur les flancs, et noire à la poitrine, au ventre et aux pattes ; deux larges bandes noires courent sur les deux côtés de la tête, donnant au blaireau un faciès caractéristique.

Cet Animal possède de très robustes griffes fouisseuses. En effet, pendant le jour, il se réfugie dans une tanière, qu'il creuse au pied d'un rocher, à laquelle il accède par une longue galerie. D'autres tunnels partent d'une chambre centrale, dans différentes directions. Ces souterrains servent d'issues de secours.

Le blaireau recherche notamment les rabouillères pour dévorer les lapereaux. Toutes sortes d'Animaux, de l'escargot à la vipère, figurent à son menu. En outre, quand il en a la possibilité, il exploite les vergers et les vignobles.

La femelle met bas, vers février, deux ou trois jeunes, qui resteront deux mois dans leur terrier natal. La reproduction du blaireau présente des modalités curieuses, étudiées par R. Canivenc. La gestation de la femelle dure environ un an : en fait, l'œuf ne s'implante dans la paroi de l'utérus qu'au bout de dix mois, c'est le phénomène de la nidation retardée. A peine la femelle a-t-elle mis bas qu'elle s'accouple à nouveau.

Il existe bien d'autres Mustélidés à travers le monde. Le glouton (Gulo luscus), *qui vit en Scandinavie, a un peu une allure d'ourson : il chasse les rennes à l'affût. La mouffette ou skunks* (Mephitis mephitica), *à livrée noir et blanc, habite l'Amérique du Nord.*

Enfin, le ratel (Mellivora capensis) *d'Afrique tropicale se singularise par son pelage bicolore, noir dessous et blanc dessus, et ses mœurs : ce mangeur de miel se fait guider jusqu'aux nids d'abeilles par un Oiseau, dénommé pour cette raison l'indicateur.*

L'ÉCUREUIL ET LES PETITS RONGEURS

C'est toujours une joie que de voir un écureuil s'aventurer agilement jusque sur les rameaux les plus fins des arbres. On peut réussir à l'apprivoiser, mais il est beaucoup moins remarquable en captivité, loin de son milieu naturel, c'est-à-dire les forêts de châtaigniers, de chênes, de hêtres et surtout de Conifères, sapins et pins.

Largement répandu, et par conséquent adapté à des climats variés, l'écureuil préfère les forêts sèches et de haute futaie, surtout lorsqu'il peut y trouver en abondance des graines et des fruits secs. Il fait toutefois des incursions dans les jardins et les vergers proches des bois, pour y faire sa cueillette. L'écureuil d'Europe (Sciurus vulgaris) *est un arboricole parfait. En effet, il pèse tout au plus 250 g à l'âge adulte, sa colonne vertébrale est très souple, et ses pattes — pourvues de robustes griffes — lui permettent de s'agripper solidement aux troncs et aux branches. Ses pattes postérieures, plus longues et plus robustes que les antérieures, lui permettent de sauter d'une branche à l'autre. Sa queue, qui est toute touffue et porte de longs poils, sert de balancier. Ce gracieux Animal n'est jamais en repos, si ce n'est pour manger. Il est toujours en train d'aller de bas en haut des arbres, et réciproquement, faisant aussi de courts trajets à terre, où il avance par bonds en s'arrêtant brusquement de temps en temps ; il est difficile à attraper, aussi bien pour l'homme que pour les Animaux.*

Son agilité lui permet d'échapper facilement à ses ennemis, qui sont notamment les renards et les Rapaces. Il est, toutefois, fréquemment la proie de la martre, aussi rapide que lui pour grimper aux arbres et très bonne chasseresse. Dans certains pays, il va manger dans la main des promeneurs : ce n'est pas encore, hélas ! le cas en France.

LE REPAS DE L'ÉCUREUIL

Tout le monde a vu, au moins en photographie, un écureuil en train de manger. Agrippé par ses pattes postérieures à une branche, le corps droit, les yeux fixes et les oreilles tendues pour écouter les moindres bruits, il tient sa nourriture entre ses pattes antérieures, depuis les pommes de pin qu'il épluche avec sa bouche pour en retirer les graines, jusqu'aux bourgeons, aux pousses tendres, à l'écorce verte, aux graines et aux Champignons.

Cependant, il est surtout friand de noisettes et de noix : il les porte à la bouche, les tourne et les retourne, leur enlève la coque après l'avoir fait éclater avec ses dents, et en absorbe la graine oléagineuse. Mais cet Animal n'est pas toujours aussi innocent qu'il le paraît, car c'est aussi un prédateur d'œufs et d'oisillons.

Tout le monde connaît son habitude d'accumuler des réserves de nourriture pour la mauvaise saison. Il cache ses provisions dans des trous et des fentes naturels ou creusés par l'Animal, à terre ou dans les arbres, en des lieux abrités : il accumule des fruits (notamment des baies) et des graines. Il les consomme lors des jours de mauvais temps, quand il ne peut pas sortir de son refuge. Mais ses provisions ne lui sont pas toujours suffisantes en hiver, et, en outre, il oublie souvent où il les a mises... Dans les régions les plus septentrionales d'Europe, ce Rongeur effectue de véritables migrations en automne, fuyant au sud devant le froid.

L'un des plus intéressants aspects des mœurs de l'écureuil est la construction de son nid. En réalité, il possède habituellement plusieurs habitations, au nombre de trois ou quatre en moyenne. Certaines ne sont que des abris temporaires, une autre est sa demeure principale, où il passe les nuits et l'hiver, et où il se reproduit. Il utilise ingénieusement les nids abandonnés par les pies et

J. Markham

Le repas de l'écureuil : attentif aux moindres bruits, agrippé sur ses pattes postérieures, il tient sa nourriture entre ses pattes antérieures.

d'autres Oiseaux, et les aménage à sa façon. Bien souvent, il s'installe dans les trous d'arbres : il les élargit avec ses dents, les revêt de mousse ou d'autres matériaux doux, et les protège contre le milieu extérieur. Enfin, il peut construire un nid de toutes pièces, à l'aisselle d'une branche d'arbre.

Le nid principal est préparé au printemps, lorsque approche le moment des amours. La constitution des couples n'est pas du tout pacifique, puisqu'elle est toujours précédée par de cruelles luttes entre mâles, pour la conquête d'une seule femelle, laquelle s'unit avec le vainqueur de la bataille ; le couple reste uni pendant toute la saison de reproduction. Les femelles mettent bas deux portées annuelles, l'une au printemps, et l'autre en été, avec au total six jeunes par an environ. La durée de la gestation est d'environ un mois et demi.

Le cycle génital de l'écureuil est très curieux, puisque — cas unique dans la faune française — le repos sexuel du mâle a lieu en été. La pleine activité génitale de celui-ci survient donc en hiver. La gestation se situe entre février et juin. Toutefois, la femelle ne présente pas de phase de repos total. Il y a donc, chez l'écureuil, une dissociation entre les cycles des deux sexes.

LE HAMSTER DORÉ

Depuis une vingtaine d'années, un autre Rongeur est devenu le « chouchou » de bien des familles : le hamster doré (Mesocricetus auratus). *Bien dodu, l'œil vif, il amuse petits et grands par ses pitreries : un vrai clown en cage.*

Sait-on que tous les hamsters élevés à travers le monde sont cousins ? Ils descendent tous d'une même femelle gravide capturée en Syrie vers 1935. Cette femelle présentait une anomalie : elle avait un pelage anormalement rouge. Ce spécimen « érythrique » est l'ancêtre des milliers de hamsters élevés aujourd'hui en captivité. Des spécimens blancs ou isabelle s'observent aussi dans les élevages.

Le pelage du hamster doré est donc roux vif, mais il est noirâtre sur le crâne et blanc au ventre. Nez et pattes sont roses, comme la très courte queue : 1 à 2 cm pour une longueur corporelle de 15 à 18 cm.

Tranquillement assis sur son séant, le hamster grignote sa nourriture, à l'aide de ses pattes antérieures. On trouve dans le commerce toutes sortes de friandises à son intention : croquettes, sandwiches, granulés, etc.

Cette espèce a la particularité de posséder de vastes abajoues dans lesquelles elle emmagasine sa nourriture : ce sont des prolongements de la cavité buccale qui pénètrent jusqu'à mi-hauteur de la cage thoracique.

Le hamster est de mœurs surtout nocturnes ; il dort souvent dans la journée, replié en boule ou allongé sur le dos, les yeux cachés derrière de petites fentes obliques. A l'occasion, il souffle, émet des cris rauques ou grince des dents.

Il ne faut pas confondre le hamster doré, espèce aujourd'hui vraiment domestique, avec son parent le grand hamster (Cricetus cricetus), *plus gros et au ventre noir, qui vit dans les steppes et les collines d'Europe centrale ; en France, il n'habite guère que l'Alsace.*

Bien qu'on ne l'aime guère dans les habitations à la campagne, la souris est néanmoins un petit Animal sympathique.

A. Margiocco

A. Margiocco

Par sa forme svelte, le loir rappelle un peu l'écureuil ; son pelage est soyeux et brun clair.

SOURIS ET RATS

La souris grise (Mus musculus) *nous est aussi familière, bien qu'actuellement, il ne soit pas fréquent de la trouver dans un appartement citadin, car la gent trotte-menu, en général, ne vit plus que dans les sous-sols, les greniers et les égouts.*

Ainsi le rat d'égout ou surmulot (Rattus norvegicus) *sort rarement pendant le jour de ses refuges ; il préfère chasser la nuit ; c'est un très important prédateur, comme on le sait, et il provoque même des dégâts parmi les poussins, les poules, les lapins et les porcelets nouveau-nés. Le surmulot peut en outre transmettre par ses puces et ses poux ou ses déjections de graves maladies comme la peste et la spirochétose ictéro-hémorragique.*

Très répandus dans les villes, les surmulots sont l'objet d'une lutte acharnée : la dératisation emploie surtout aujourd'hui des anticoagulants, produits que les rats absorbent et qui provoquent chez eux des hémorragies. Le rat noir (Rattus rattus) *a les oreilles et la queue plus grandes que le surmulot ; il est aussi moins citadin.*

La souris, plus sympathique, provoque beaucoup moins de dégâts. On la trouve encore fréquemment dans les maisons de campagne, où elle est cependant victime des chats et des pièges. Très rapide, elle court par à-coups, se levant parfois sur ses pattes postérieures, afin d'évaluer rapidement la situation.

Elle n'est guère moins prolifique que le surmulot : après vingt jours de gestation, la femelle met au monde jusqu'à sept petits, qui deviennent adultes en un peu plus d'un mois. Elle peut faire jusqu'à dix portées par an !... C'est justement parce qu'elle se reproduit activement qu'on ne l'aime guère dans les habitations, où il suffit toutefois d'un peu d'ordre et de propreté pour lui rendre la vie difficile.

Les souris blanches ou albinos, à yeux rouges, élevées en cage, sont une variété domestique de la souris grise. Il leur faut pour nourriture un peu de lait et quelques friandises qu'elles viennent prendre bien vite dans la main de leur maître. Malheureusement, elles sentent plutôt mauvais.

L'ordre des Rongeurs, le plus important, par le nombre des espèces, de la classe des Mammifères, compte bien d'autres représentants en Europe. Il n'est pas possible de les citer tous ici. Nous avons déjà parlé longuement du castor et de la marmotte.

Le loir se rapproche de l'écureuil par ses mœurs arboricoles ; son nom est, à la campagne, souvent attribué à tort à son parent le lérot, reconnaissable aux bandeaux noirs qui barrent ses yeux. Les campagnols comptent de très nombreuses espèces : ce sont de petits Rongeurs à museau arrondi, sujets à des pullulations périodiques. Le mulot se reconnaît à ses grandes oreilles et à sa longue queue.

Et puis, il y a les intrus, les envahisseurs, originaires d'autres continents : le rat musqué nord-américain et l'énorme ragondin sud-américain que l'on vend dans certaines boucheries parisiennes. En Grande-Bretagne, l'écureuil gris d'Amérique du Nord a refoulé l'écureuil européen. Comme quoi il ne faut jamais se hasarder à introduire des espèces étrangères, sauf sérieuse étude préalable.

LES RENARDS

Proches parents du chien et du loup, les renards peuplent l'Europe, l'Asie, l'Afrique et l'Amérique. Ce sont, eux aussi, des Carnivores, de la famille des Canidés.

Parmi leurs nombreuses espèces, la plus connue est le renard roux de nos régions (Vulpes vulpes). *C'est l'un des Carnivores les plus populaires, surtout en raison de la ruse qu'on lui prête avec une certaine exagération : le* Roman de Renart *et les* Fables *de La Fontaine sont là pour le prouver...*

Il s'agit toutefois d'un très bel Animal, élégant et fort agile. Un spécimen adulte mesure 70 cm, plus la longue queue de 45 cm.

Sa fourrure, dense et douce, est roussâtre aux parties supérieures, alors que les parties inférieures, les lèvres et les joues sont blanchâtres. Ses oreilles et la base de ses pattes sont noirâtres. La queue est blanche ou blanchâtre à l'extrémité. La couleur de la livrée varie selon les individus, et même, en certains territoires, les renards présentent une livrée constante, différente de celle de spécimens provenant d'autres endroits, ce qui fait que certains auteurs considèrent l'existence de plusieurs sous-espèces. On nomme renards charbonniers des spécimens noirâtres.

LES MŒURS DU RENARD

Le renard ne forme pas des groupes importants, mais vit isolément ou par couples. Dans son territoire de chasse, qui peut être très étendu, il se creuse un confortable terrier, avec une spacieuse chambre, et parfois des locaux secondaires. Il parvient dans la chambre centrale par une galerie, d'où partent d'autres tunnels en différentes directions, qui constituent une série d'issues de secours. Le renard reste dans son terrier pendant les jours d'orage, durant la mauvaise saison et, pour les femelles, au moment de la mise bas. Il est intéressant d'observer que les renards peuvent aussi bien creuser leur propre tanière qu'utiliser des terriers déjà existant. Le blaireau est presque toujours, qu'il le veuille ou non, exproprié par le renard ; celui-ci cherche d'abord à le déloger, et, lorsqu'il n'y réussit pas par des moyens habituels, il le fait fuir en laissant à l'entrée de sa demeure ses excréments et son urine, dont l'odeur est nauséabonde.

Pendant la nuit, et même durant le jour, le renard chasse tout ce qu'il peut trouver : sa gloutonnerie est sans limites. Bien que sa nourriture soit constituée essentiellement par les rats et souris de toute sorte, il ne dédaigne pas les Insectes, notamment les scarabées et les sauterelles. Il chasse aussi des Mammifères de taille importante ; dans les zones où il y en a, il cherche à capturer les petits des chevreuils et des biches, bien que les mères puissent parfois le mettre à mal. Les lièvres et lapins de garenne lui échappent difficilement. Il n'hésite même pas à dévorer l'un de ses congénères quand il le rencontre pris au piège ou gravement blessé. Il lui arrive aussi de pêcher des Poissons et des Crustacés dans les torrents. En outre, il pénètre dans les jardins et les vergers, pour y manger des fruits, surtout des baies et du raisin, donnant ainsi raison à La Fontaine !

Il se rend indésirable lorsqu'il pénètre dans les locaux où l'on élève les Animaux de basse-cour. Il attaque alors les poules, les lapins et les pigeons. Il arrive même à voler des Animaux domestiques en plein jour et devant les yeux de leur propriétaire. C'est ce qui fait qu'il est l'un des Animaux les plus chassés, à l'aide de pièges, de collets et d'appâts empoisonnés. Pourtant, l'espèce ne semble pas près de s'éteindre.

Le cri du renard est un bref aboiement qui se termine par un fort jappement : quand l'Animal se sent en danger, il émet un grondement sourd ou un véritable hurlement.

Photo Research International - J. Burton

Le renard roux ressemble beaucoup au chacal et à certains Canidés, famille dont il fait partie.

L'époque des amours se situe à la fin de l'hiver. Alors, les mâles d'une même zone se battent férocement pour se disputer les femelles, et se font parfois de graves blessures.

Environ neuf semaines après l'accouplement, la femelle met bas de trois à huit petits, qui sont aveugles durant une douzaine de jours. Après la mise bas, la mère reste dans sa tanière, le père pourvoyant à la nourriture de sa nombreuse famille. A peu près vingt jours après la naissance, les petits peuvent sortir, et se postent devant la tanière, en l'attente de la nourriture que leur apportent leurs parents, qui chassent frénétiquement aux alentours. Ceux-ci capturent des rats, des Oiseaux, des grenouilles et des Insectes, de préférence vivants, afin que la progéniture s'habitue à attraper seule, un jour, ses proies.

Il est très difficile de découvrir une famille entière de renards, étant donné que les renardeaux sont soigneusement protégés de tout danger et que la mère les emmène immédiatement dans le terrier au moindre bruit. Mais il arrive que les renardeaux soient découverts quand, attendant leurs parents chargés de les nourrir, ils commencent à se lamenter.

A la fin de juillet, les renardeaux, désormais robustes, commencent à accompagner leur mère dans ses sorties,

T. Okapia

On ne peut s'empêcher d'être attendri par l'expression timorée de ce renardeau.

S. Prato

Ci-dessus, le renard du désert ou fennec, aux grandes oreilles et au pelage couleur sable.

et apprennent rapidement à chasser, en vue de devenir tout à fait indépendants.

On peut essayer d'élever en captivité de jeunes renards capturés, mais on n'y réussit pas toujours, car l'Animal reste souvent sauvage et son odeur est fréquemment insupportable.

LE RENARD BLANC ET LE FENNEC

Le renard blanc (Alopex lagopus) *et le fennec* (Fennecus zerda) *sont proches de notre renard, bien qu'on les ait classés dans deux genres différents.*

Le renard blanc ou polaire, ou encore arctique, habite uniquement les zones polaires d'Amérique, d'Europe et d'Asie. Il est plus petit que le renard roux et présente une livrée différente selon la saison. Durant le court été arctique, sa fourrure est en effet gris brunâtre, alors que son poil devient tout blanc pendant l'hiver, ce qui permet à l'Animal de se confondre parfaitement avec la neige. A la différence du renard roux, le renard arctique vit en petites troupes, qui cherchent leur nourriture pendant le jour et même la nuit. Il se nourrit de Rongeurs, de petits Oiseaux, d'œufs, et de tout ce qu'il peut trouver à manger, y compris les excréments humains. Alors que le renard roux fuit l'homme, cette espèce n'a pas peur d'entrer dans les cabanes à la recherche de nourriture. Son plus grand ennemi est toujours le chasseur : en effet, on en capture un bon nombre à l'aide de pièges, car sa fourrure est très recherchée. On élève artificiellement ce renard, pour répondre à la demande croissante de la pelleterie. La majeure partie des peaux provient des élevages de Russie septentrionale et de l'Alaska.

Le fennec ou renard du désert n'a pas une belle fourrure. C'est par ailleurs un très gracieux Animal, aux grandes oreilles et au pelage couleur sable. Il habite le Sahara. Surtout actif pendant la nuit, il chasse essentiellement des gerboises et autres Rongeurs. Il ne dédaigne pas les petits Oiseaux, leurs oisillons et leurs œufs, ni les petits lézards. Les ennemis de ce gracieux habitant du désert sont, plutôt que l'homme, les Rapaces et certains Carnivores.

Ci-dessous, un renard blanc dans sa livrée hivernale.

S.E.F.

LE RENARD ET LA RAGE

Au cours des dernières années, les renards ont beaucoup fait parler d'eux à propos de la rage. Un jour de 1968, un renard enragé fut capturé en Lorraine. Ce fut le signal de l'alerte. Venant de l'Est, l'épidémie de rage, véhiculée pour une bonne part par les renards, s'étendit à travers le nord-est de la France.

Actuellement, la rage, progressant au rythme de 10 à 20 km par an, atteint la région parisienne et la Bourgogne. Faut-il donc, pour enrayer son avance, exterminer les renards ? Certainement pas. Une destruction exagérée de ceux-ci aurait pour conséquence une multiplication de petits Rongeurs, qui risqueraient de devenir des vecteurs de rage beaucoup plus difficiles à surveiller. De plus, les renards d'Europe centrale, plus dangereux, auraient tendance à combler la place laissée vide.

Une méthode plus souple a d'ailleurs été mise au point en Allemagne : elle consiste à vacciner les renards à leur insu, en déposant à l'entrée de leur terrier des appâts contenant du vaccin...

Pour en savoir plus sur les mœurs et les déplacements des renards, les zoologistes ont entrepris leur étude au moyen de la biotélémétrie. Les spécimens capturés sont munis d'un collier de bonze, pesant 100 g et pourvu d'un émetteur de radio et d'une antenne. Les renards sont ensuite relâchés : leurs moindres déplacements sont connus grâce à un poste récepteur. Maître Goupil peut chasser, manger, dormir, vagabonder à sa guise : l'antenne l'espionnera sans relâche...

LE CHEVAL

Le cheval est l'aboutissement d'une longue évolution, puisque ses ancêtres remontent à l'Éocène, c'est-à-dire il y a 60 à 70 millions d'années. Les chevaux se sont donc graduellement perfectionnés pendant cette longue période. Les étapes de leur évolution sont bien connues, grâce aux fossiles (restes de crânes, de dentures et de pattes des représentants des diverses espèces).

Le premier Équidé que nous connaissions était un petit Animal, de la taille d'un chien et possédant des pattes à quatre ou cinq doigts, probablement armés de griffes; c'était un habitant des forêts, qui devait se nourrir tout particulièrement des feuilles des arbrisseaux.

La taille des chevaux, après ce petit Équidé de l'Éocène nommé Eohippus, *s'accrut peu à peu. De la taille d'un chien, ils passèrent à celle du mouton, avec le* Mesohippus *de l'Oligocène; ce dernier connut un milieu naturel nouveau, à savoir d'immenses prairies ou des steppes, et subit toutes sortes de modifications structurales. Les pattes de cet Animal appuyaient essentiellement à terre par le doigt du milieu, le premier et le cinquième doigt ayant disparu, tandis que le deuxième et le quatrième étaient réduits à peu de chose et ne touchaient plus terre : la course devenait ainsi plus facile et plus rapide. La denture s'était aussi adaptée à un nouveau régime alimentaire, constitué d'herbes des prairies au lieu des feuilles de buissons.*

Au Pliocène, le genre Hipparion, *de taille encore plus grande, peuplait pratiquement toutes les terres alors émergées, de l'Asie occidentale à l'Europe, à l'Afrique, et à l'Amérique du Nord et du Sud. Ce fossile avait encore des pattes à trois doigts, dont seul le médian, comme chez le* Mesohippus, *touchait encore terre.*

Les membres et les dents du genre suivant, le Pliohippus, *avaient le même aspect que ceux du cheval actuel; l'Animal avait à peu près la taille d'un zèbre et habitait, au Pliocène, l'Amérique du Nord. Le genre* Equus, *le cheval, apparut donc en Amérique. Il émigra dans l'Ancien Monde et s'éteignit dans le Nouveau Monde où les colons européens le réintroduisirent.*

On voit ici un pur-sang à robe alezane; on saura que la couleur de la robe et les taches blanches apparaissant éventuellement sur le front et sur les pattes des chevaux font l'objet d'une nomenclature spéciale.

LE CHEVAL ACTUEL

Chez nos chevaux, le pied n'est donc représenté que par un doigt, le troisième, fort modifié, dont la dernière phalange porte un ongle très développé, en forme de sabot. Il ne possède plus que des vestiges infimes des deuxième et quatrième doigts, c'est-à-dire deux petits ongles pointus, dont la présence n'est toutefois pas constante, au-dessus du sabot. Nous ne décrirons pas, même brièvement, la morphologie externe du cheval domestique, que tout le monde connaît. Nous ferons seulement remarquer que sa denture est celle d'un herbivore : elle peut être dépourvue de canines chez les mâles, et elle n'en possède jamais chez les femelles; il existe, entre les incisives et les prémolaires, un espace vide, la diastème, où l'on insère le mors.

Les dents subissent une usure continue, mais croissent aussi continuellement, à partir de la racine; leur degré d'usure permet de donner avec une certaine approximation l'âge d'un individu.

Existe-t-il encore des chevaux qui n'aient pas été réduits à la domestication? Malgré la chasse intense qui lui fut faite à la fin du siècle dernier et au début du présent siècle, on trouve encore aujourd'hui à l'état sauvage le cheval de Prjewalski, qui doit son nom à celui de l'officier russe qui le découvrit en 1879. Cet Animal vit dans le Gobi et l'Altaï, par petites troupes que dirige un vieux mâle : au total, cette forme ne compte plus que quelques dizaines d'exemplaires sauvages; d'autres survivent dans les zoos, où leur reproduction est assurée.

C'est d'un type certainement très voisin de ce cheval que dérive notre Equus caballus *domestique; il ne faut pas le confondre avec les chevaux redevenus sauvages après une longue cohabitation avec l'homme, comme il en existe en certaines zones d'Amérique du Nord, en Camargue, dans les Pyrénées, etc.*

Le cheval de Prjewalski n'a ni l'élégance ni la taille d'un beau cheval arabe. Il est haut tout au plus de 1,50 m au garrot; sa silhouette est trapue, et sa tête est très grande; il possède de petites oreilles; sa crinière est longue et hérissée, de même que sa queue; enfin, sa robe est brun clair.

Malheureusement, il est des victimes dans la famille des chevaux, à cause de la chasse à outrance faite par l'homme : c'est ainsi que fut abattu, également en 1879, le dernier représentant du tarpan, cheval sauvage des steppes russes méridionales, à peu près de la même taille que le cheval de Prjewalski, mais plus élégant et à livrée d'un beau gris. Le tarpan a été « recréé » par des croisements entre races domestiques.

On trouve encore à l'état sauvage, en Europe, un cheval que certains auteurs font descendre directement des chevaux préhistoriques, mais qui est plus probablement un type redevenu sauvage : le cheval de Camargue, le célèbre « Crin-Blanc » qui habite, comme on le sait, le delta du Rhône; il est agile, puissant et de couleur gris cendré; il forme des bandes que guide un mâle, le long des étendues sablonneuses, à la limite de la mer. Nous ne le décrirons pas, car il a été montré de nombreuses fois au cinéma et à la télévision.

P. Martini

Ci-dessus, deux chevaux camarguais.

L'HISTOIRE DU CHEVAL

Quelle est l'histoire de la domestication du cheval? L'homme le connaissait déjà bien dès la préhistoire, tout au moins en Europe. Cela nous est prouvé par les peintures rupestres qui le représentent sur les parois des grottes. Il s'agissait peut-être de chevaux de taille plus réduite que celle des races actuelles, et ce sont seulement les bonnes conditions d'élevage — et surtout la nourriture abondante et saine — qui en firent accroître la taille et la force. Les hommes préhistoriques chassèrent les chevaux, dont les ossements s'amoncelèrent au célèbre ossuaire de Solutré, près de Mâcon. La domestication du cheval s'est produite dans les steppes d'Eurasie entre l'Ukraine et la Mongolie, aux alentours de 4000 avant J.-C. Certains peuples d'Europe centrale, tels les Germains, firent du cheval un Animal sacré; ils en élevaient des exemplaires à robe blanche dans les forêts dédiées à leurs divinités, et ils leur faisaient traîner les chars sacrés ou les sacrifiaient lors de cérémonies religieuses, en tirant souvent des présages de l'examen de leurs entrailles.

Le cheval est l'un des Animaux qui tiennent le plus de place dans les croyances et les traditions populaires. Que l'on pense à Pégase, à Bayard, le cheval des quatre fils Aymon, à la déesse-jument Epona des Celtes, à l'hippogriffe, etc. Les chevaux noirs ou blêmes annonçaient la mort, alors que le cheval blanc était symbole d'amour et de lumière.

Les utilisations du cheval sont innombrables. Durant des siècles, l'histoire, a-t-on pu dire, s'est faite à cheval. Au siècle dernier, des chevaux furent employés dans les mines, ainsi qu'Émile Zola le raconte dans Germinal : *certains vécurent plus de vingt ans sous terre, sans jamais remonter.*

C'est seulement au cours des derniers siècles qu'on a introduit dans les élevages équins la pratique de l'hybridation entre races différentes, orientales et occidentales, qui ont donné les nombreuses variétés actuelles de chevaux domestiques; on importe encore aujourd'hui des chevaux pur-sang arabes, afin d'améliorer ou de régénérer les races actuelles.

Il est difficile de délimiter avec précision les différentes variétés de chevaux existant de nos jours, justement parce que les nombreux métissages ainsi que la sélection artificielle en élevage ont abouti à la naissance de groupes très hétérogènes selon les pays.

LES RACES

On classe habituellement les chevaux en trois grandes catégories :

1° Les variétés dolichomorphes, représentées par des formes élancées et élégantes, rapides à la course, nerveuses, et toutes d'origine orientale, directement ou non; ce sont les races qui servent pour les courses, par exemple la race berbère et celle des pur-sang anglais.

2° Les variétés mésomorphes, le plus souvent métissées, robustes, mais également toujours harmonieuses, puissantes et rapides; on les utilise pour le trait léger; nous citerons parmi elles les races anglo-normandes, les races anglo-arabes et les poneys; ces derniers font aujourd'hui la joie des enfants dans les poney-clubs.

3° Les variétés brachymorphes, dont la souche originelle habitait l'Europe occidentale; elles comprennent des formes dont les muscles sont très développés et les pattes puissantes et trapues. Ces variétés sont remarquables pour les gros travaux, surtout agricoles, notamment du fait de leur caractère assez doux. Nous citerons parmi elles les races belge, bretonne et « shire ».

Le cheval arabe, champion par excellence, présente toute une série de caractères bien particuliers. Sa tête est petite. Ses petits yeux sont foncés. Il possède de petites oreilles mobiles. Son museau est charnu. Son cou, long et arqué, est porté par un corps déprimé, étroit du dos, mais large de la poitrine et de la croupe. Il a les cuisses fines. Il possède une crinière peu abondante, alors que sa queue est touffue, épaisse à la base et fine à l'extrémité. On comprend très bien que les peuples arabes et particulièrement les tribus bédouines tiennent en haute estime le cheval, si l'on pense aux conditions auxquelles cet Animal est soumis : comme il s'agit de peuples nomades, élevant du bétail dans des régions steppiques — ce qui les oblige à se déplacer continuellement — ils ont trouvé dans le cheval un compagnon fidèle et indispensable.

Le pur-sang anglais n'est pas aussi beau que son congénère arabe, mais est beaucoup plus rapide, et par conséquent plus apprécié pour le sport. Assez pur, du fait qu'il dérive du croisement — réalisé au XVIII^e siècle — entre des étalons arabes et des chevaux anglais, sa descendance est toujours bien connue, d'après l'arbre généalogique de chaque individu. Grâce à la sélection, on a pu obtenir des poulains de plus en plus rapides, mais moins élégants. Leur maigreur excessive en fait souvent des Animaux mal proportionnés, mais les qualités en course des « trois-ans » anglais sont vraiment remarquables, puisqu'ils accomplissent 850 m à la minute.

Notons surtout que le cheval, après une éclipse due au machinisme, connaît un renouveau extraordinaire : l'équitation, les concours hippiques, les randonnées équestres, le polo, les poney-clubs sont là pour le prouver. Le cheval intervient même dans la rééducation des handicapés.

Ci-dessous : l'homme utilise depuis fort longtemps le cheval comme bête de somme, de trait, et pour la plupart des travaux agricoles, pour lesquels on en a sélectionné des races spéciales.

M. Pedone

LE CHAT

Le chat est entré dans la vie de l'homme dès l'Antiquité. Il a été, semble-t-il, domestiqué par les Égyptiens, qui vénéraient la déesse chatte Bastet et qui momifiaient les chats après leur mort.

C'est justement en examinant les momies de chats égyptiens qu'on a pu préciser l'origine de nos chats domestiques, que l'on considère comme dérivant du chat ganté (Felis libyca), *qui habite encore actuellement l'Afrique et l'Asie. C'est une espèce qui mesure 50 cm de longueur, plus 25 cm pour la queue ; le poil de son dos et de ses flancs est jaune-roux et son ventre est blanc ; son dos, sa queue et ses pattes sont marqués de bandes plus ou moins foncées. Selon des travaux récents, une autre race asiatique aurait participé à la genèse du chat domestique.*

Les Égyptiens commencèrent à élever rationnellement les chats, pour ne pas avoir à en capturer des spécimens sauvages, et opérèrent ainsi une sélection artificielle, contribuant donc à la création des différentes variétés que nous connaissons aujourd'hui. Ils les utilisèrent pour la chasse aux Oiseaux d'eau dans les marais de papyrus. Une preuve de l'origine orientale du chat serait sa prédilection pour la chaleur.

Le chat a perdu, par suite de sa domestication, une partie de son caractère sauvage et de son agressivité, qui sont par ailleurs communs à tous les représentants de la famille des Félidés, à laquelle il appartient. Aimant se cacher, prédateur habile, il ne supporte pas le collier et aime la liberté des jardins et de la campagne. Il n'est même pas rare qu'il retourne à l'état sauvage : on appelle haret le chat redevenu sauvage.

LE CHAT SAUVAGE

On ne doit pas le confondre avec le véritable chat sauvage (Felis sylvestris), *aussi gros qu'un renard, et pesant de 5 à 8 kg. Cet Animal est facile à reconnaître à sa fourrure fauve et abondante et à sa queue annelée. On le rencontre encore dans presque toute l'Europe. En France, il est plus abondant qu'on ne le croit généralement : on le trouve en Lorraine, en Morvan, en Bourgogne, etc.*

Chaque individu chasse et vit isolément. Les couples se forment uniquement au moment de la reproduction, et pendant le temps nécessaire au sevrage de la progéniture. Le milieu du chat sauvage est la forêt (il grimpe très bien), mais il va aussi dans les champs. La mise bas a lieu dans un trou d'arbre, un fagot, des ronces, voire une cabane... La technique de chasse du chat sauvage est classique pour un Félidé : il se déplace silencieusement, rampant à terre, et saute sur sa proie.

Il a une préférence pour les lièvres et les lapins de garenne, les mulots, les campagnols et les autres petits Mammifères. Il lui arrive de s'attaquer à des petits de chevreuils et à des faons ; naturellement, il ne dédaigne pas les Oiseaux, y compris les Oiseaux aquatiques, et pêche très habilement les Poissons. Sa férocité a été très exagérée : en fait, l'homme le terrorise, et il n'est pas impossible de l'apprivoiser.

LE CHAT DOMESTIQUE

Revenons-en au chat domestique. Ses mœurs sont particulièrement intéressantes pendant la période des amours, soit essentiellement deux fois par an, en février et à la fin de juin. Les femelles font alors un concert nocturne, d'une voie aiguë et modulée, pour appeler à distance les mâles, généralement plus discrets. Peu après l'appel de la femelle, le mâle répond d'une voix profonde et va conquérir sa compagne ; il doit parfois livrer de furieux combats pour la posséder.

C. Dani

Le chat « domestique » est en fait le moins servile des Animaux domestiques. On voit ici un magnifique et jeune persan chinchilla.

Le langage du chat n'est pas seulement vocal : il comprend encore des signaux visuels (mouvements de la face, de la queue, des oreilles, etc.), des sécrétions odorantes (pour marquer le « territoire ») et le ronronne-

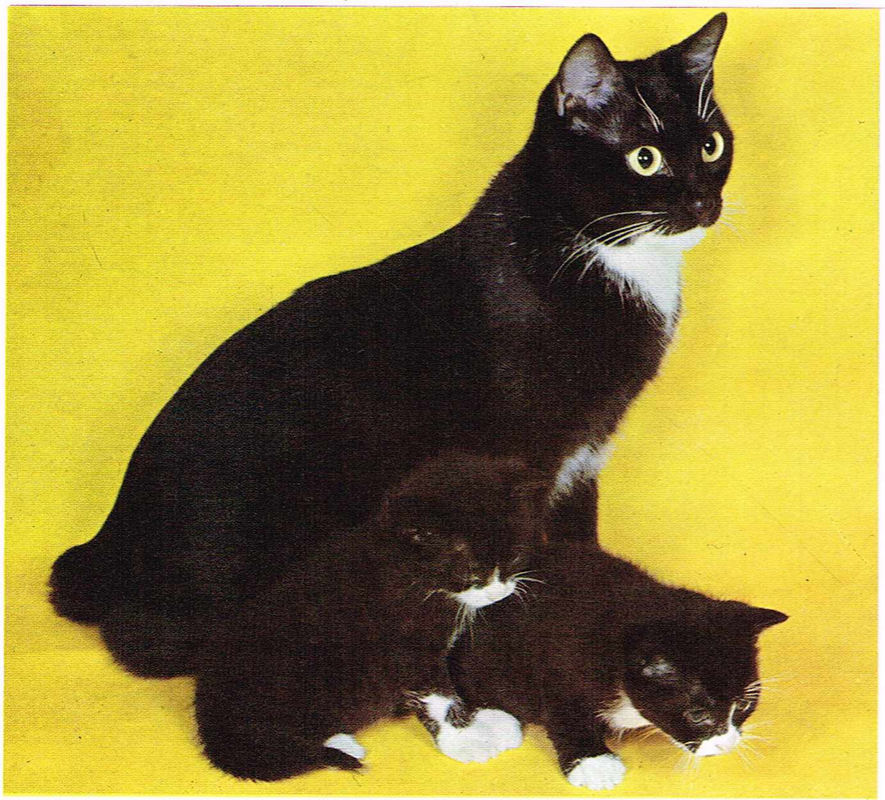

C. Dani

Ci-dessus : chatte européenne tachetée noir et blanc, avec ses chatons.

ment; sans doute produit par les cordes vocales, c'est une manifestation d'euphorie et aussi de soumission à l'égard de la mère ou du maître.

Lors de la mise bas, la chatte recherche un lieu caché, loin de l'homme ; à la campagne, elle préfère généralement les fenils. Chaque portée est en moyenne de cinq ou six petits, après une gestation assez longue, qui dure de cinquante-cinq à soixante-cinq jours. Tout le monde sait la tendresse avec laquelle la mère soigne ses chatons, alors que le matou s'en désintéresse. La femelle, ayant confiance en ses maîtres, rapporte un beau jour, un par un, ses petits, qu'elle transporte dans sa bouche. Les chatons apprennent à se déplacer, à faire des bonds et à se jeter sur tout ce qui se déplace. La mère offre sa queue à leurs petits coups de patte et les laisse monter sur son dos. Après quelque temps, elle éveille chez eux l'instinct de la chasse, en leur apportant une souris vivante, en observant leurs réactions et en les encourageant de la voix.

Le chat chasse surtout pendant la nuit; il faut dire qu'il est très bien adapté pour ce faire. En effet, tous ses sens sont très développés, et sa vue est exceptionnelle. Ses pupilles sont, comme celles de tous les Félidés, très dilatables, lui permettant de percevoir le plus petit rayon de lumière : elles ont leur fenêtre qui s'ouvre au maximum dans l'obscurité ; elles sont seulement fendues (verticalement) au minimum lorsqu'il fait grand jour, c'est-à-dire le matin. Ce mécanisme visuel particulier, qui s'est perfectionné au cours de l'évolution des Félidés, est un bon exemple d'adaptation anatomique aux nécessités précises de la prédation.

Comme presque tous les félins, le chat a des griffes rétractiles, qui ne touchent pas terre quand le chat se déplace silencieusement ; quand il est bien disposé, il fait « patte de velours », mais les sort lorsqu'il attaque.

Le chat fut introduit en Europe dès l'Antiquité, mais son rôle y demeura longtemps obscur ; d'autres Carnivores, comme la genette, étaient utilisés pour la destruction des Rongeurs. Et puis, ses mœurs crépusculaires, sa prétendue hypocrisie, ses allures énigmatiques valurent au chat d'être considéré comme un Animal diabolique.

Et ce fut pour lui la sombre période du Moyen Age : des milliers de chats furent brûlés vifs lors des réjouissances populaires, ou jetés du haut des cathédrales, ou encore enterrés vivants... C'est seulement vers le XVII^e^ siècle que le chat prit la place de choix que nous lui connaissons aujourd'hui.

LES RACES FÉLINES

Il existe une grande variété de races félines, semblables les unes aux autres du point de vue anatomique, mais différant beaucoup par le type et la livrée, ainsi que par le caractère et les mœurs. Il n'est cependant pas toujours facile de définir avec précision les caractères d'une race. Cela est dû à la grande liberté avec laquelle cet Animal s'accouple au cours de ses vagabondages nocturnes. En règle générale, on considère habituellement des races à poil long et des races à poil court.

Parmi les chats à poil court, il convient de citer en premier lieu notre humble mais gracieux chat tigré, dit tabby ou encore « chat de gouttière ».

Ses principaux caractères anatomiques sont un corps plus court que celui des autres races, une grosse tête assez large et un cou court et massif. Toutefois, c'est son pelage qui le distingue de tous les autres. Sa livrée varie beaucoup selon les individus, mais est souvent grise, brune ou rousse, et striée de bandes transversales plus foncées. Mais il peut présenter bien d'autres couleurs, être tout blanc, tout noir, noir et blanc, tout gris, gris et blanc, blanc et roux, tricolore (blanc, noir et roux), « écaille » de tortue, etc.

Les nouveau-nés du chat européen, comme ceux des autres races, naissent aveugles et édentés. C'est seulement à deux mois que poussent leurs dents de lait, remplacées ensuite par la dentition définitive, avec au total trente dents (dont quatre canines pointues et développées), dont des molaires à surface occlusale hérissée de protubérances pointues.

Notre chat est un Animal vif, intelligent et agréable : ceux qui prétendent qu'il est plus attaché à sa maison qu'à ses maîtres ignorent l'attachement que le chat montre à l'homme lorsqu'il est traité avec affection. Cela vaut encore plus pour les femelles dont on accepte les jeunes à la maison, et pour les chats mâles « coupés ».

La nourriture du chat est à base de viande, de bœuf ou de cheval ; il lui faut aussi du Poisson ; la rate et le mou sont peu nourrissants et très difficiles à digérer pour lui. On complétera ce régime par un peu d'œuf cru ou cuit, un peu de foie et des légumes cuits (ceux-ci pour les sels minéraux qu'ils contiennent). Des aliments tout préparés sont maintenant en vente dans le commerce.

LE SIAMOIS ET LE PERSAN

Le siamois est aussi un chat à poil court ; il est fin, élégant et fier. Importé en Grande-Bretagne au siècle dernier, puis répandu dans toute l'Europe, ce chat est remarquable par sa belle couleur crème plus ou moins clair, avec des taches brun foncé sur son museau pointu, sur sa queue, sur ses oreilles et à ses pattes ; il a de très beaux yeux généralement bleus. Bien qu'assez réservé et un peu sauvage, le siamois aime beaucoup l'homme ; il montre une grande sensibilité aux compliments et aux caresses, et devient même jaloux quand son maître s'occupe d'un autre Animal ou, pire encore, d'un autre chat.

Quoique la couleur de sa livrée soit très semblable à celle du siamois, le chat birman est classé dans les races à poil long. Il a pour caractéristiques un nez camus, l'extrémité des pattes gantée de blanc, un corps plus robuste et une tête ronde.

Nous terminerons par la plus belle des races à poil long, la plus recherchée, et peut-être aussi la plus délicate à élever, le chat persan, jadis appelé angora. Il a le corps massif, les pattes courtes et la tête ronde. Sa grosse queue se termine par un beau panache de poils. Sa livrée peut être très variée, de l'argenté au crème, au gris bleuté (on la dit improprement bleue), au café au lait, au blanc, au « smoke », au noir et à toute sorte de variétés multicolores, tortue (c'est-à-dire crème, noir et roux), chinchilla (c'est-à-dire à poils blancs à la base et ombrés à l'extrémité) et marbrée (c'est-à-dire brune avec de grandes ombres noires).

Le persan est considéré, mais souvent bien à tort, comme un chat paresseux, peu intelligent et très vaniteux ; il est en tout cas l'orgueil des expositions félines.

LE CHIEN

E. Lessing - Magnum

De l'énorme saint-bernard au minuscule chihuahua, les races de chiens actuelles sont d'une immense diversité. Pourtant, elles se rangent toutes dans une seule et même espèce, le chien domestique Canis familiaris. *Mais ont-elles toutes le même ancêtre sauvage ? La question reste posée.*

La famille des Canidés, qui comprend, outre le chien, le loup, le chacal, le renard, etc., semble descendre d'un Carnivore de l'Oligocène, c'est-à-dire de l'ère tertiaire : le Cynodictis. *C'est ensuite, au Pliocène, qu'apparaît le genre* Canis, *qui regroupe le chien et le loup.*

Au cours de l'ère quaternaire, certains Canidés vont se rapprocher peu à peu d'un nouveau venu sur la planète, un Mammifère glabre et bipède : l'homme. Une sorte de symbiose va s'établir entre ces animaux et lui.

Mais ces Canidés sont-ils loups, chacals ou autres ? Il semble bien que plusieurs espèces aient contribué à la genèse du chien domestique. C'est ce que l'on déduit de diverses découvertes paléontologiques et archéologiques.

Depuis toujours, le chien est étroitement mêlé à la vie de l'homme. Ci-dessus, détail d'un manuscrit du Xe siècle dans la cathédrale de Gérone en Espagne.

UNE ORIGINE COMPLEXE

Dans le nord de l'Europe, et spécialement à Maglemose, au Danemark, ont été trouvés les restes de deux sortes de chiens, qui vécurent tous deux voici 9 000 ans environ. Le premier avait la poitrine large, le museau court et les membres effilés : c'est le chien des tourbières, proche du chacal, et qui devait ressembler au samoyède actuel.

Ce « petit maglemosien » s'oppose au « grand maglemosien », qui, au contraire, descend vraisemblablement du loup. Ce chien de forte taille, aux mâchoires puissantes et au museau pointu, se retrouve dans les villages lacustres de la région alpestre.

Ces races étaient-elles déjà domestiques ? Un indice le laisse penser. Les ossements des gisements préhistoriques danois montrent des traces de dents de chiens :

Marka

ceux-ci les rongeaient donc, et avec une fréquence telle qu'il ne pouvait s'agir de chiens sauvages.

Il est même possible de retracer le processus par lequel le chien est devenu domestique. C'est au célèbre éthologiste autrichien Konrad Lorenz que l'on doit une telle interprétation. Au cours de la préhistoire, des bandes de Canidés sauvages se seraient peu à peu rapprochées des tribus humaines pour profiter de reliefs de leurs chasses.

Au bout de quelque temps, les hommes auraient délibérément abandonné des restes de gibiers aux chiens. Ceux-ci auraient alors compris qu'il était de leur intérêt que les chasseurs capturassent beaucoup d'animaux. Et, un beau jour, voici qu'une horde de chiens encercle un renne, ou un cheval, et le met à la merci des hommes. Ceux-ci les récompensent en leur donnant des charognes particulièrement copieuses.

A ce stade, les chiens sauvages sont devenus des chiens de chasse. Un tel processus n'a rien d'invraisemblable. De nos jours encore, les Pygmées d'Afrique centrale chassent avec la coopération d'un chien demi sauvage, le basenji, qui leur rabat le gibier, mais conserve sa liberté.

DE LA PRÉHISTOIRE A L'HISTOIRE

Cependant, pour devenir véritablement domestiques, les Canidés de la préhistoire devaient franchir une étape de plus : la pénétration dans les demeures humaines. On peut imaginer qu'un jour, une fillette de l'époque néolithique a recueilli une jeune chienne perdue. Elle l'a rapportée chez elle, dans un village sur pilotis, et, après avoir vaincu les réticences de sa famille, l'a élevée.

Là encore, il s'agit d'un processus très plausible qui s'observe lui aussi chez les peuples actuels dits « primitifs ». Ceux-ci adoptent volontiers de jeunes animaux; les Australiens notamment gardent chez eux de jeunes dingos, les chiens sauvages de leur pays, qui, devenus adultes, prendront la clef des champs.

Le chien ne fut pas seulement domestiqué en Europe, mais aussi en Afrique. Deux types peuvent être distingués sur les célèbres fresques de Tassili, au Sahara. Le premier est un lévrier; le second, plus bas sur pattes, est un grand chien à tête large et au nez court.

Lorsque l'histoire commence au Proche-Orient, la place du chien y est d'emblée importante, de la Mésopotamie à l'Égypte. Les Sumériens possédaient des dogues, qui se répandirent ensuite à travers le monde : ils sont représentés sur des bas-reliefs.

Pour leur part, les Égyptiens élevèrent le chien au rang de divinité. Seth, le lévrier à queue fourchue, était honoré dès 4240 environ avant J.-C. Quant à Anubis, il est difficile de dire s'il s'agissait d'un chien ou d'un chacal. Les races canines des Égyptiens étaient déjà variées puisque leurs stèles et leurs sculptures représentent des lévriers, des dogues et même des bassets, issus d'une des plus anciennes mutations (variations héréditaires) dont l'histoire ait gardé le souvenir.

Canis dingo, le dingo, chien sauvage vivant en Australie.

MÉTIERS DE CHIENS

Au cours des siècles, le chien a été employé par l'homme à des tâches très diverses : pas moins d'une trentaine de « métiers » de chiens peuvent être dénombrés. Il y a bien sûr les chiens de chasse, que l'on répartit en chiens d'arrêt, chiens couchants, terriers et chiens courants. Puis les chiens de garde et de défense, souvent utilisés par la police ou les douaniers : les chiens de ces derniers font la guerre à ceux des contrebandiers...

Les chiens de berger aident à la garde des troupeaux; les chiens de mer — le terre-neuve essentiellement — sauvent les naufragés; en montagne, c'est le saint-bernard qui secourt les voyageurs égarés.

Et puis, voici les chiens de trait et de traîneau, les chiens de course (lévriers qui s'affrontent sur les cynodromes), les chiens de cirque, de music-hall, de cinéma...

Les chiens d'aveugle apportent une aide inappréciable à leurs maîtres. Les chiens truffiers sont chargés de trouver les truffes. Les chiens de guerre sont parfois obligés de sauter en parachute; jadis, on les affublait de masques à gaz. Les chiens de combat devaient s'affronter en luttes sanglantes. Quant à l'emploi des chiens dans les laboratoires, il suscite des controverses.

Plus récemment, sont apparus les chiens géologues, capables de déceler des minerais enfouis dans la terre, et les chiens chercheurs de drogue : ce sont des labradors qui détectent la drogue dans les valises, les malles, les colis; le service des douanes de l'aéroport d'Orly en utilise désormais. Et n'oublions pas Laika, la petite chienne cosmonaute de Spoutnik II.

Mais la fonction la plus insolite jamais dévolue à un chien, c'est tout bonnement la royauté... Au XI^e siècle, le roi de Norvège, désireux de se venger de ses sujets qui l'avaient évincé, leur laissa le choix, pour lui succéder, entre un esclave et un chien.

Ils choisirent ce dernier. C'était un dogue, qui monta sur le trône sous le nom de Saur I^er. Il fut dès lors traité en roi : il avait une cour, une garde, des officiers. Lorsqu'il pleuvait, les courtisans prenaient dans leurs bras Sa Majesté canine pour qu'elle ne se mouillât point les pieds! Saur fut, hélas! tué par un loup. Un mausolée fut élevé en son honneur.

Même s'ils n'ont pas connu une semblable destinée, tous les chiens ont droit à notre amitié et à notre estime. Nous ferons connaissance, la semaine prochaine, avec leurs multiples races.

LE CHIEN

S. Prato

Ci-dessus, un groupe de cockers ; il existe une grande variété dans la couleur de leur robe. Ci-dessous, le boxer fauve, excellent chien de défense.

Il est très difficile de classer les innombrables races de chiens. Nous adopterons ici une classification fondée à la fois sur leur aspect et sur leur utilité.

Les bergers, primitivement employés à la garde des troupeaux, ont une forte taille : le plus courant est le berger allemand, mais il y a aussi ceux de Belgique, le briard, le picard, etc. Le komondor a un étrange aspect avec sa fourrure blanche et hirsute. Le colley ou berger d'Écosse a belle allure avec son museau effilé et ses yeux en amande. Les bouviers, comme celui des Flandres, gardent les bovins.

Les chiens de garde sont des animaux très impressionnants. Le dogue allemand ou danois peut être dangereux ; les dogues de Bordeaux et celui d'Angleterre ont une grosse tête plissée. Parmi les chiens de défense, on classe le boxer, devenu très populaire, le dobermann, à pelage noir et feu, l'airedale à poil broussailleux et le schnauzer géant qui porte moustaches.

DU SAINT-BERNARD AU COCKER

Les chiens de sauvetage sont entourés d'une auréole de légende. Le saint-bernard, énorme chien alpestre, a sauvé de multiples alpinistes en difficulté ; le chien des Pyrénées lui ressemble beaucoup. Le terre-neuve, à pelage noir, nage à merveille et peut secourir des noyés. Les chiens de trait : esquimau, samoyède, husky, sont fort utiles aux populations arctiques.

On peut répartir les chiens de chasse en plusieurs catégories. Les terriers, à l'origine, poursuivaient renards ou blaireaux sous terre. Le fox-terrier, aux hautes pattes, est le plus connu. Le bedlington-terrier ressemble à un petit agneau. Et il y a encore le bull-terrier, le cairn-terrier, le gentil terrier écossais, le skye-terrier, dont les poils tombent jusqu'à terre, etc. Le basenji, ou terrier du Congo,

S. Prato

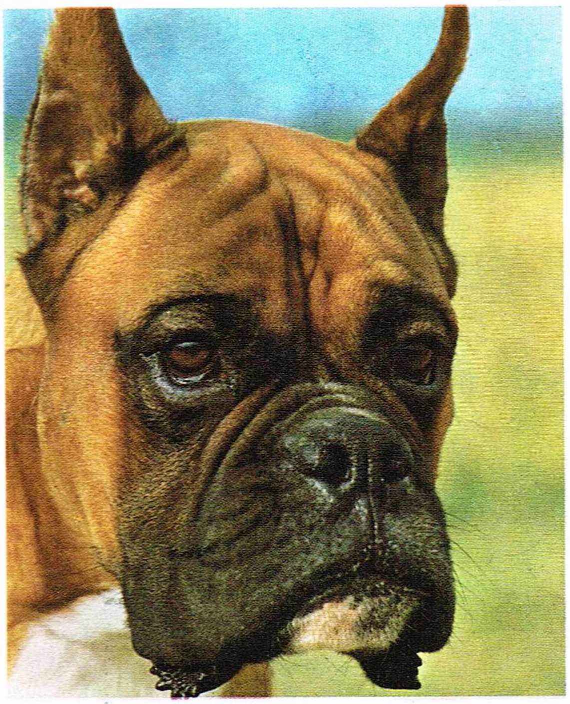

S. Prato

Chien de chasse à poil ras et oreilles pendantes, le braque allemand est un excellent chien d'arrêt.

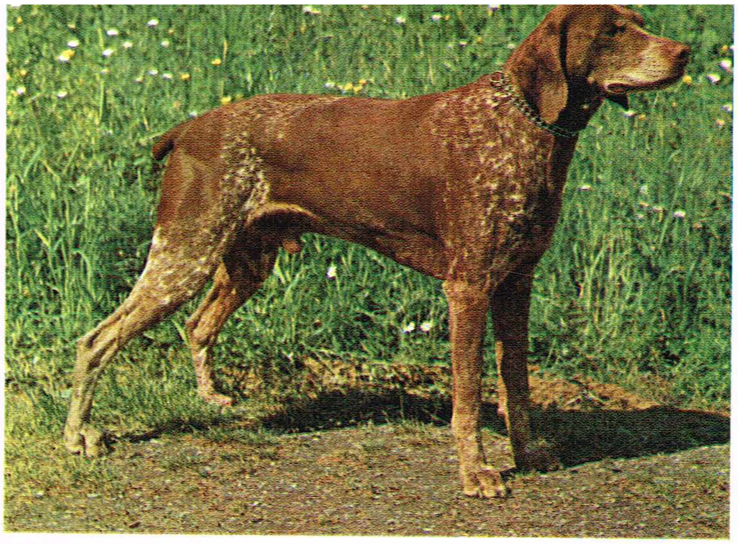

S. Prato

Parmi les chiens d'arrêt, on trouve aussi le braque français de type léger.

n'aboie jamais. Très populaire aujourd'hui, le teckel s'apparente aux terriers.

Les chiens courants poursuivent le gibier à la course. Le chien de saint Hubert a de longues oreilles tombantes. Le grand bleu de Gascogne, le « chien français » (souvent tricolore), l'épagneul allemand, le spitz ou loulou finlandais, l'amusant basset artésien normand, aux pattes torses, le beagle entrent dans cette catégorie.

Au contraire, les chiens d'arrêt marquent le pas devant le gibier. Ce sont les différents braques (dont le beau braque de Weimar, à livrée gris argent), le podenco d'Ibiza, originaire des Baléares, les épagneuls breton, français et picard, le griffon français, le pointer au poil ras et lustré et les divers setters. D'autres chiens de chasse rapportent le gibier : ce sont les retrievers, dont le plus connu est le labrador.

Un petit groupe voisin comprend le populaire cocker anglais et le curieux cocker américain, à l'abondant pelage soyeux, et divers épagneuls d'Outre-Manche, dont l'épagneul d'eau irlandais, à la fausse allure de caniche.

CHIENS DE COMPAGNIE

Celui-ci prend place dans la catégorie des chiens de compagnie. Il présente trois variétés : le nain, le moyen et le géant. Le loulou de Poméranie doit à son pelage touffu son allure sympathique. Le dalmatien, à livrée pointillée de noir, a connu une grande vogue voici quelques années : il a malheureusement tendance à être un peu « caractériel ».

Le pékinois au museau épaté est un des plus amusants chiens de compagnie.

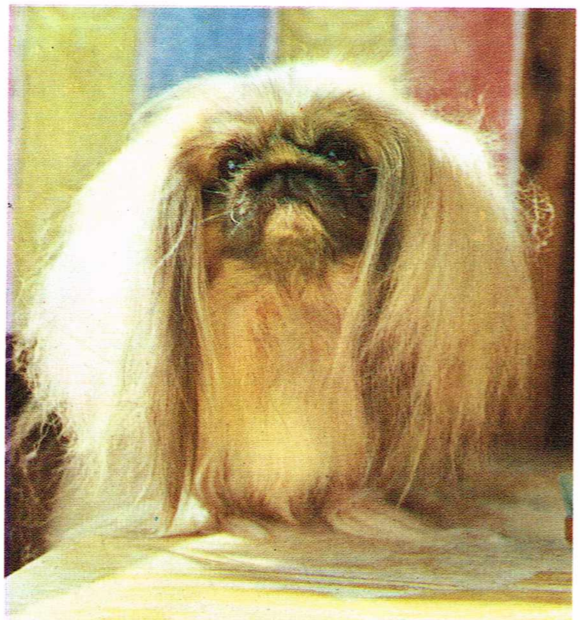

S. Prato

Les pinschers, le schnauzer nain, le schipperke sont moins fréquents. Le bouledogue, à la face écrasée, doit son existence à une mutation particulière.

Les bichons sont d'adorables créatures, véritables boules de poils blancs. Le chihuahua, qui paraît originaire du Mexique, est le plus petit de tous les chiens : il connaît actuellement une certaine faveur. Le chow-chow a fière allure avec sa toison épaisse : croisé avec le wolf-spitz, il a donné la dernière race canine reconnue à ce jour, l'eurasier, aux remarquables qualités psychologiques ; le pékinois au museau épaté est toujours en vogue, alors que le carlin a connu son heure de gloire au siècle dernier. Lhassa apso, épagneul japonais, et yorkshire terminent la série des chiens de compagnie.

Les lévriers sont des chiens splendides, juchés sur de hautes pattes. Le lévrier anglais peut montrer sa vélocité dans les cynodromes. Lévrier afghan, à l'abondant pelage blond, sloughi du Sahara, malheureusement menacé de disparition, saluki du Proche-Orient, lévrier russe ou barzoï sont des races magnifiques. Et il y a aussi la levrette, ou petit lévrier italien, et les lévriers écossais, irlandais, espagnol...

LES CHIENS SAUVAGES

Il existe également, à travers le monde, de nombreux types de chiens sauvages. En Asie, des chiens dits parias rôdent aux abords des villes, mais ils ne sont qu'à demi sauvages. L'Australie est le domaine du dingo, un Canidé à pelage jaunâtre. Les dholes de l'Asie méridionale et les lycaons ou cynhyènes africains sont de redoutables chasseurs. Le chien viverrin de l'Asie orientale a une curieuse allure de raton laveur. Originaire de Chine et de Sibérie orientale, il a été introduit en Russie d'Europe, d'où il a envahi la Scandinavie, l'Allemagne, les Pays-Bas, etc. Selon certaines informations, il aurait pénétré dans l'est de la France.

LE CHENIL INFERNAL

Les chiens, on s'en doute, interviennent dans d'innombrables mythes, légendes et traditions. Ainsi, le thème du chien gardien des Enfers se retrouve dans de nombreuses civilisations. Chez les Grecs et les Romains, c'était bien sûr Cerbère, le molosse à trois têtes qui ne laissait passer que les morts : Hercule parvint à le capturer vivant.

Chez les Égyptiens, le dieu Anubis conduisait les âmes des morts vers leur domaine : il avait une tête de chien ou de chacal. En Inde, les terribles Sârameyâu, à la peau mouchetée et aux dents rougeâtres, avaient la même mission.

L'Europe germanique a aussi son chien infernal : Garm, animal monstrueux, au poitrail maculé de sang. Il est intraitable envers les morts, sauf ceux qui se sont montrés très charitables de leur vivant : leurs offrandes se retrouvent alors dans leurs mains. Apaisé par ce pourboire, Garm les laisse passer. Ce molosse périra lors du fameux crépuscule des dieux.

Ce sont des légendes de ce genre qui ont inspiré à Conan Doyle le fameux Chien de Baskerville, *chef-d'œuvre du roman policier.*

LES SINGES

Le monde des singes est d'une très grande variété. Un premier groupe, particulièrement remarquable par la diversité des formes et des couleurs, habite l'Amérique tropicale. Ce sont les platyrhiniens, c'est-à-dire les singes à nez aplati et à narines écartées.

Les plus petits sont les ouistitis, dont l'espèce la plus connue porte des « pinceaux » de poils blancs de chaque côté de la tête. A leur voisinage se classe le singe-lion, ainsi nommé parce qu'il a une belle crinière dorée. Les tamarins sont pourvus de moustaches ou d'un toupet blanc; dans ce dernier cas, on les nomme les pinchés. Le douroucouli ou nyctipithèque est de mœurs crépusculaires; les callicèbes ou titis lui ressemblent. Les ouakaris ont une allure unique avec leur face rouge vif et leur pelage roux. Avec leur chevelure hirsute, les sakis ont un aspect également étrange.

Encore appelé singe-écureuil, le saïmiri a une face blanche avec le museau noir; ses pattes sont rousses. Les sajous ou capucins sont reconnaissables au toupet de poils qu'ils portent sur la tête.

HURLEURS ET ATÈLES

La queue de ces singes est plus ou moins préhensile. Elle l'est encore plus chez les suivants, pour lesquels elle fait fonction de cinquième main : les hurleurs, au pelage roux ou noir, doivent leur nom aux hurlements qu'ils poussent, grâce à la caisse de résonance qu'ils possèdent dans la gorge; on les nomme encore alouates.

L'appellation de singes-araignées que l'on donne aux atèles est significative : ce sont de grands singes dégingandés, très agiles dans les arbres, et qui n'ont pas de pouce. Le lagotriche est assez semblable, mais est doté d'un beau pelage laineux. C'est en Amazonie que ces divers singes demeurent le plus abondants.

L'Ancien Monde est au contraire le domaine des catarhiniens, c'est-à-dire des singes à narines rapprochées, séparées par une mince cloison cartilagineuse. Leur queue n'est jamais prenante. On les divise en « inférieurs » et « supérieurs », ou anthropomorphes.

Parmi les premiers, voici d'abord les nombreux semnopithèques d'Asie. Le plus connu est le langur ou entelle, singe sacré de l'Inde, à la face noire et à pelage clair. Sur les hauts plateaux chinois, vit le splendide rhinopithèque de Roxellane, au nez retroussé et à l'épaisse toison dorée. Bornéo est le domaine du singulier nasique, au nez étrangement développé, et qui nage parfois jusqu'en pleine mer. Quant au douc du Vietnam, on ne sait trop s'il a survécu à la guerre.

Les colobes africains sont de proches parents des semnopithèques. Le plus beau est le guéréza à pelage panaché noir et blanc, hélas recherché par les fourreurs; il plane littéralement d'arbre en arbre. Le colobe bai a un faciès extraordinaire et une livrée jaune ou rousse.

DES CERCOPITHÈQUES AUX BABOUINS

Les nombreuses espèces de cercopithèques sont parfois groupées sous la dénomination de singes verts, en raison de la teinte olivâtre de certains d'entre eux; ce sont des singes africains, plutôt petits, à longue queue. Le cercopithèque de Brazza a une allure vénérable avec sa grande barbe blanche; le moustac a la face bleutée, le cercopithèque à tête de hibou a la sienne barrée d'une ligne verticale blanche; le talapoin, très petit, habite les

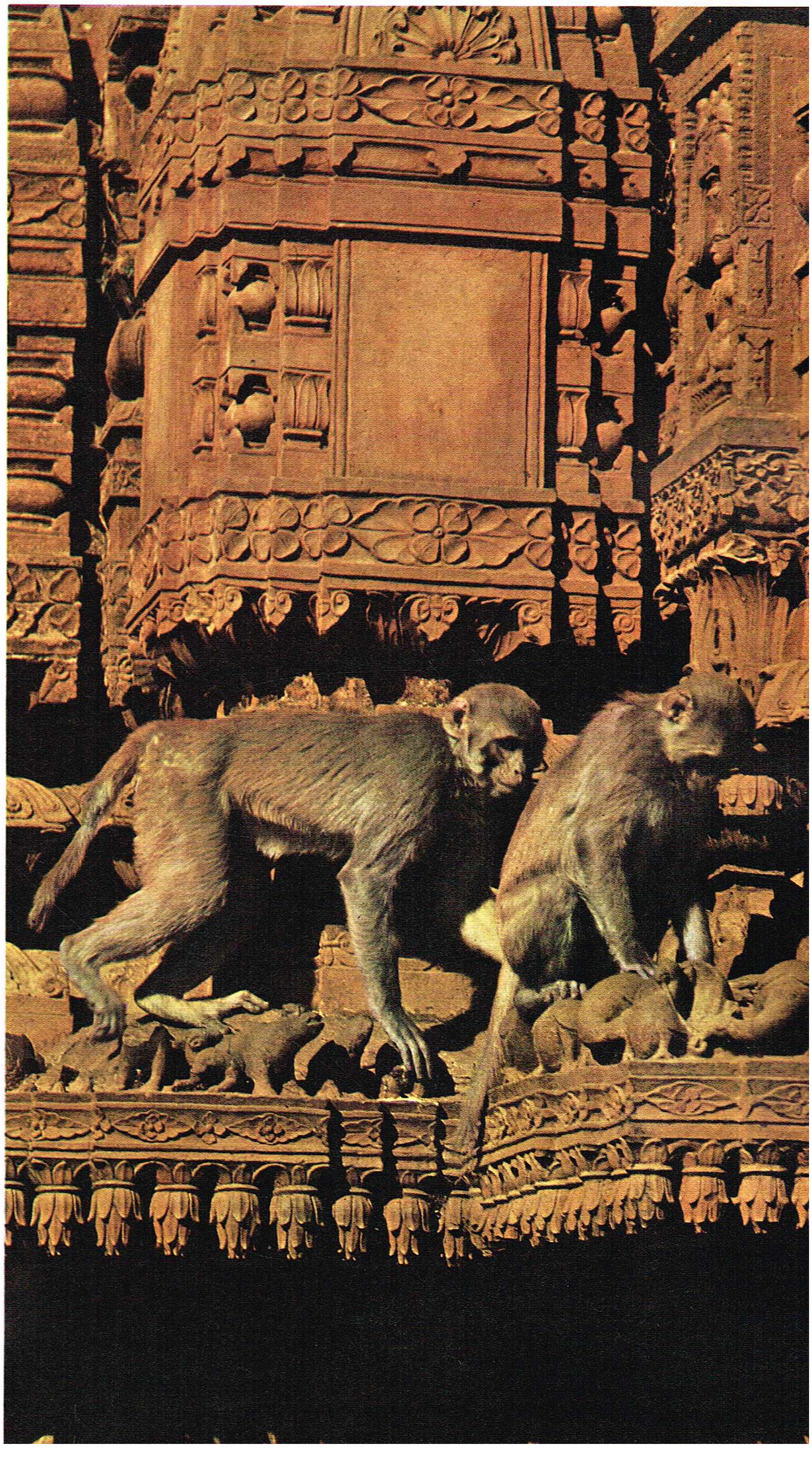

Macaca mulatta , plus connu sous le nom de singe rhésus, qui servit en laboratoire à déterminer notamment les facteurs Rhésus de l'homme.

A. Margiocco

E.P.S.

Archives P2

Le babouin *(Papio papio)* est l'une des espèces les plus communément élevées en captivité.

Le cercopithèque diane *(Cercopithecus diana)* s'adapte facilement aux habitudes de l'homme.

mangroves littorales. Et il y a encore le hocheur, le mone, le tantale, etc.

En marge des cercopithèques se rangent le patas ou singe rouge ainsi que les cercocèbes ou mangabeys, à pelage terne et silhouette svelte. Ces singes sont également africains.

Les macaques sont les plus trapus, avec la queue courte. Leur pelage est généralement brunâtre. Tous sont asiatiques, sauf le magot, localisé au Maroc, en Algérie et sur le rocher de Gibraltar, où il a été réintroduit. Le célèbre macaque rhésus vit dans les villages de l'Inde. L'espèce japonaise a une vie sociale développée. Le macaque ouanderou de Ceylan porte une imposante crinière. Des macaques montent à de hautes altitudes dans l'Himalaya. Le cynopithèque est une sorte de macaque au pelage noir, propre aux Célèbes.

Hardis, effrontés, querelleurs, les cynocéphales ou babouins, singes à museau de chien, font partie du paysage africain.

L'hamadryas est pourvu d'une belle crinière : il habite l'Éthiopie et l'Arabie ; c'était le singe sacré des Égyptiens. Le mandrill des forêts ouest-africaines est l'un des singes les plus extraordinaires avec son nez rouge et ses joues bleues. Le drill des mêmes régions a une énorme tête avec un museau noir ; le plus grand des cynocéphales est le gélada d'Éthiopie ; son mode de vie paraît se rapprocher de celui des premiers hommes. Les babouins vivent selon une stricte hiérarchie : leurs callosités fessières jouent un grand rôle dans leur vie sociale.

Pongo pygmaeus, l'orang-outan, dont le nom malais signifie « homme de la forêt ».

Archives P2

PARENTS DE L'HOMME

Avec les anthropomorphes (on disait autrefois anthropoïdes), nous franchissons un nouveau degré de l'évolution ; cette fois, nous atteignons les parents les plus proches de l'homme dans la nature actuelle.

Leurs bras démesurés donnent aux gibbons de l'Asie du Sud-Est une agilité déconcertante dans les arbres ; sur terre, ils arrivent à faire quelques pas en situation bipède, en utilisant leurs bras comme balanciers. Le plus grand est le siamang de Sumatra, dont les cris portent à plusieurs kilomètres.

C'est également à Sumatra, et aussi à Bornéo, que vit l'orang-outan. On tente aujourd'hui de sauver de la disparition ce grand singe roux, dont la face se garnit, avec l'âge, de bourrelets graisseux ; il a beaucoup souffert des trafics pour les zoos et les laboratoires.

Le gorille, le plus imposant des singes, a beau avoir un aspect effrayant, il est en réalité timide et craintif. Son pelage est noir. Il en existe deux races, le gorille de côte, localisé au Gabon et au Cameroun, et le gorille de montagne, qui vit sur la bordure orientale de la cuvette congolaise. Ce dernier est le plus grand et le plus menacé.

Alors que les anthropomorphes précédents sont exclusivement forestiers, le chimpanzé habite également la savane. Il est répandu dans toute l'Afrique tropicale ; un type très particulier, et de petite taille, le chimpanzé nain, vit dans les forêts au sud du Congo.

De tous les animaux, le chimpanzé est certainement le plus intelligent. Dans certaines régions, il « pêche » les termites en enfonçant des brindilles dans les termitières. Des spécialistes de psychologie animale ont réussi à engager un véritable dialogue avec le chimpanzé, grâce à diverses méthodes : langage des sourds-muets, clavier relié à un petit ordinateur, jetons de couleur, etc. Des chimpanzés sont parvenus à composer de petites phrases.

Peut-on encore découvrir des singes inconnus à notre époque ? Ce n'est pas impossible. Le semnopithèque doré de l'Inde n'a été connu qu'en 1955. Des espèces ignorées se cachent peut-être encore au fin fond de l'Amazonie.

Un dernier point : n'ayez pas de singe chez vous. Il ne vous vaudrait que des désagréments : morsures, saletés, maladies... Les singes sont faits pour vivre dans la nature, pas en appartement.

LA BIOLOGIE

Bien que la notion de vie soit familière et semble aisément perceptible à la plupart d'entre nous, les phénomènes vitaux, quant à eux, apparaissent comme extrêmement complexes. Nous nous proposons donc d'effectuer de façon simple une approche des « choses de la vie ». Nous nous attacherons à vous familiariser avec les mécanismes de la croissance, de la reproduction des êtres vivants et de leurs rapports avec l'environnement.
Nous nous préoccuperons notamment de l'homme : de ses origines, de sa physiologie, des diverses races qui peuplent la Terre, et de l'énorme impact humain sur le milieu, si important que les problèmes de défense de l'environnement sont un souci pour chacun d'entre nous.

LA VIE

Il est sans doute facile pour chacun de nous, dans le cadre de la vie de tous les jours, d'opérer une distinction entre êtres vivants et êtres inanimés, car celle-ci est fondée sur des critères de perception immédiate. Les considérations concrètes qui nous permettent de reconnaître dans la nature qui nous environne ce que l'on pourrait appeler les « propriétés vitales » s'imposent avec évidence lorsqu'on envisage un animal qui se meut, se nourrit et, d'une manière générale, possède une activité semblable à celle de l'homme.

Il n'est pas très difficile non plus de reconnaître une vie moins semblable à la nôtre, comme dans le cas d'un végétal qui forme des fleurs et des fruits, ou même de certains coquillages très durs, immobiles, accrochés à la roche au point de se confondre apparemment avec elle; il est évident que, dans ce dernier cas, la notion de vie découlera d'une observation plus approfondie, car elle n'est pas aussi évidente et immédiatement compréhensible que pour les végétaux ou les animaux plus évolués. Ce qui est important à souligner est que la notion de vie nous est tellement familière qu'elle nous paraît élémentaire, générale, immédiatement perceptible.

Et pourtant le mécanisme de la vie est beaucoup plus complexe qu'on ne pourrait le penser à première vue : définir un être vivant comme un être qui naît d'un autre semblable à lui-même, grandit, se nourrit et « métabolise » les aliments pour en tirer l'énergie nécessaire, se reproduit, vieillit et meurt, n'est certes pas erroné, mais cette définition ne fournit pas l'explication des mécanismes intimes qui font qu'un ensemble moléculaire (à quoi, au fond, se ramène l'homme) manifeste une activité vitale.

AUX FRONTIÈRES DE LA VIE

Après la découverte des virus, le problème de la distinction entre êtres vivants et non vivants est devenu encore plus complexe.

Le virus, extrait des cellules du corps de son hôte, se présente essentiellement comme quelque chose d'inanimé, dépourvu des propriétés de s'accroître, de se reproduire, de respirer, de se nourrir; dans certaines conditions, il cristallise une sorte de substance chimique certainement non vivante. Mais la structure d'un virus comprend une molécule d'acide nucléique, autour de laquelle est enroulée en spirale une protéine : c'est la présence de cette molécule d'acide nucléique qui conduit à attribuer au virus une sorte de vie.

Effectivement, si le virus cristallisé est placé dans l'eau, il reconquiert rapidement sa forme virulente, et, réintroduit dans l'hôte, il pénètre dans les cellules de ce dernier; ici l'acide nucléique entreprend un processus de duplication tout à fait semblable à celui des cellules vivantes, processus qui s'opère naturellement aux dépens de la cellule hôte, tandis qu'en même temps se forme une quantité de protéines virales suffisante pour entourer toutes les molécules d'acide nucléique issues de la duplication des virus qui ont pénétré dans la cellule. Les virus nés de ce processus sortent de la cellule hôte et se dirigent de différentes manières vers une autre cellule, où ils donnent naissance à un nouveau processus de duplication.

Ces différents phénomènes permettent de considérer le virus comme un être vivant. Certes, sa reproduction se fait aux dépens d'un hôte, auquel il emprunte les substances chimiques qu'il ne possède pas lui-même,

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Ce foisonnement de fleurs et de verdure symbolise la vie, une vie silencieuse et immobile, mais abritant néanmoins des phénomènes merveilleux.

D. Faulkner

Ces Poissons qui nagent témoignent sans aucun doute de la complexité des phénomènes physiques, chimiques, dynamiques, écologiques et physiologiques qui caractérisent le monde animal.

à cause de son extrême simplicité, et dont il est obligé d'exploiter le milieu cellulaire pour rendre possible la replication de l'acide nucléique; ce fait doit être attribué essentiellement à sa structure particulièrement simple, qui lui interdit de posséder un grand nombre des activités typiques d'une véritable cellule.

Ces observations démontrent à l'évidence que le principe vital réside dans l'acide nucléique, sans lequel aucune forme de vie, même très rudimentaire, ne peut exister.

Le passage du « non-vivant » (par exemple un cristal de sucre) au « vivant » (par exemple une Bactérie) se produit à travers des formes intermédiaires tellement semblables les unes aux autres qu'il nous est presque impossible d'établir une frontière nette entre le monde animé et le monde inanimé.

LES ORIGINES DE LA VIE

C'est là l'un des plus grands problèmes de la biologie, en raison de ses implications philosophiques et religieuses. Pour se faire une idée, approximative, certes, mais cohérente et acceptable, de la manière dont la vie prit naissance, il faut remonter très loin dans le temps, au moment où notre planète n'était qu'un amas de matériaux inorganiques aux formes diverses et où la matière organique, premier pas vers la formation d'un être vivant, n'existait pas encore.

L'oxygène, principal composant de l'atmosphère terrestre telle que nous la connaissons aujourd'hui, est, nous le savons, produit surtout par la respiration des végétaux autotrophes; donc, à l'origine, du fait de l'absence de toute forme de vie végétale, il n'était pas présent dans l'atmosphère. Par conséquent, en raison de l'absence de cette atmosphère, qui joue actuellement un rôle de filtre à l'égard du rayonnement ultraviolet, ce dernier pouvait atteindre la surface de la terre et fournir de l'énergie aux différents éléments.

Cette énergie leur permit de se combiner entre eux de manière à produire une molécule organique simple, susceptible à son tour, toujours grâce à l'énergie du rayonnement ultraviolet, de se combiner avec d'autres éléments, ou d'autres molécules identiques, pour former des complexes organiques plus perfectionnés.

Étant donné que toutes les molécules de substances organiques utiles ou même indispensables à la vie présentent une asymétrie caractéristique, il a fallu élaborer une hypothèse acceptable sur les conditions de milieu dans lesquelles a dû se former la première molécule asymétrique, point de départ de toutes les autres molécules de plus en plus complexes : on admet que la formation de cette première molécule est due à une réaction survenue dans des zones saumâtres riches en carbonates.

Ainsi se seraient formées, il y a environ 4 milliards d'années, dans les mers d'alors, froides et saumâtres, exposées au rayonnement ultraviolet, donc dans un milieu plus favorable que tout autre aux synthèses chimiques, d'énormes quantités de matières organiques, dont l'organisation de plus en plus complexe et perfectionnée se rapprochait progressivement d'une structure vivante; c'est de cette manière que se formèrent les enzymes, responsables des premiers processus de fermentation en l'absence d'air, et l'acide adénosine-triphosphorique, indispensable pour la synthèse des acides nucléiques.

Avec l'apparition de l'acide adénosine-triphosphorique, le milieu devint favorable à la vie, mais il ne contenait pas encore de matière vivante : grâce à un tel milieu, la première molécule d'acide nucléique qui se forma put opérer facilement sa duplication.

La première duplication de l'acide nucléique marque l'apparition de la vie sur notre planète, mais l'être vivant n'est pas encore formé.

Très vraisemblablement, le premier être vivant apparu sur la Terre devait avoir une structure semblable à celle d'un virus, mais, au lieu de se reproduire, comme celui-ci, à l'intérieur d'une cellule, il se reproduisit dans un milieu environnant organique; ce dernier finit peut-être par former un tout avec le virus, se liant intimement à celui-ci pour constituer une cellule primordiale, dans laquelle l'acide nucléique du virus forma le noyau. A partir de ce moment, les êtres vivants connurent une évolution aux mécanismes de plus en plus complexes, jusqu'à assumer les formes de vie que nous observons aujourd'hui.

LES SYNTHÈSES EN LABORATOIRE

L'explication du mécanisme de la vie que nous venons de décrire était à peine élaborée que les savants s'appliquèrent à synthétiser en laboratoire un acide nucléique capable de replication et susceptible de fournir, placé dans un milieu adapté, un virus synthétique.

A ce jour, on a assisté, en effet, à la synthèse partielle d'un virus en laboratoire, mais ce résultat a été obtenu en mélangeant une fraction protéique et une fraction d'acide nucléique extraite d'autres virus; on est donc parti de substances tirées d'un être vivant et non produites artificiellement en laboratoire.

Bien que d'un très grand intérêt scientifique, ces expériences n'ont pas atteint le but qu'elles se proposaient et qui consistait, entièrement en laboratoire, à essayer de produire un être vivant, même très simple, en partant de substances indiscutablement non vivantes.

Les tentatives faites pour la réalisation synthétique d'une molécule d'acide nucléique n'ont jamais abouti. On n'a pas davantage réussi à synthétiser ce qu'on peut considérer comme le précurseur des acides nucléiques, l'acide adénosine-triphosphorique; cela s'applique aussi aux enzymes, indispensables aux processus vitaux.

Lorsque l'homme réussira à synthétiser en laboratoire une molécule d'acide nucléique capable de duplication, il aura alors créé réellement quelque chose de vivant à partir de la matière inanimée, mais il sera encore loin de pouvoir réaliser dans une éprouvette une véritable cellule ou, encore moins, un être vivant, fût-il doué d'une structure extrêmement simple, comme une Algue ou un animal d'une simplicité comparable. Il en sera au moins aussi éloigné qu'il l'est actuellement de la synthèse des acides nucléiques capables d'« autoreproduction ».

LA CELLULE

Jusqu'à la seconde moitié du XVII^e siècle, les savants pensèrent que la composition intime de tout être vivant, animal ou végétal, résultait d'un ensemble compact de différentes substances ; ils étaient loin de penser qu'il pût exister une unité fonctionnelle de base commune à tout être vivant, depuis la plus petite Bactérie jusqu'aux végétaux les plus évolués et jusqu'à l'homme.

Ce fut le botaniste anglais Hooke qui, le premier, en 1665, alors qu'il observait des coupes de liège au microscope, découvrit et examina la structure de cette unité fonctionnelle, connue aujourd'hui sous le nom de cellule. Cependant Hooke, interprétant sa découverte de manière erronée, attribuait aux éléments cellulosiques, qui ne sont en réalité qu'une structure de soutien des cellules, des propriétés fonctionnelles, et appelait « alvéoles » les zones apparemment vides délimitées par les parois. C'est grâce à des études plus poussées et à des appareils plus perfectionnés que l'on devait constater plus tard que ces « alvéoles » étaient véritablement l'unité vivante.

LA STRUCTURE CELLULAIRE

La structure de la cellule est commune à tout être vivant, végétal ou animal ; il existe cependant de profondes différences, tant en ce qui concerne la taille que la composition, entre les cellules végétales et les cellules animales, ainsi qu'entre les cellules les plus simples et les plus complexes.

Pour étudier la composition de cette unité fonctionnelle, nous imaginerons une cellule type, n'existant pas dans la nature : elle est formée par un amas de protoplasme délimité à l'extérieur par une membrane et contenant des éléments non vivants, comme le paraplasme, et des appareils vivants, comme le chondriome, l'appareil de Golgi, les vacuoles, les plastes (ceux-ci ne sont présents que dans les cellules végétales), l'ergastoplasme, et enfin le noyau, structure très complexe qui revêt une énorme importance pour toutes les activités cellulaires, notamment pour la reproduction.

Les êtres les plus simples ne sont composés que d'une seule cellule : ce sont les Protozoaires (amibe, paramécie, etc.), les Bactéries, certains types de Champignons et d'Algues. Mais, chez la plupart des êtres vivants, les cellules sont assemblées pour former les tissus des organes. Dans ce cas, la structure de chaque cellule qui participe à la formation de ce tissu pluricellulaire est spécialement adaptée à l'accomplissement d'une fonction particulière. Par exemple, une cellule glandulaire de n'importe quelle glande humaine produit une sécrétion spécifique, véhiculée par le sang, toujours chimiquement conforme aux besoins de l'organisme.

La composition chimique de la cellule varie naturellement du règne animal au règne végétal et d'un type cellulaire à l'autre. Schématiquement, la composition chimique typique d'une cellule animale est la suivante : eau, 80 % ; protéines, 10 % ; lipides, 2 % ; sels organiques, 1,5 % ; substances organiques diverses, 1,5 %.

Mais voyons plus en détail la structure d'une cellule : la membrane qui entoure le protoplasme (cytoplasme + noyau) est constituée, d'après des observations faites au microscope électronique par Robertson, par une double couche de substances protéiques que sépare une couche intermédiaire de lipides. Cette paroi est continue et présente une perméabilité sélective, c'est-à-dire permettant le passage des substances utiles à la cellule en fonction de ses besoins vitaux et la sortie des substances de rejet.

A l'intérieur de l'enveloppe constituée par la membrane, nous trouvons le protoplasme, composé, comme nous l'avons dit, du cytoplasme et du noyau. Le cytoplasme est formé d'une substance fondamentale, le hyaloplasme, qui paraît vide, et par des inclusions. A sa partie centrale, mais parfois aussi au contact de la paroi plasmatique, le cytoplasme est traversé par un ensemble de membranes formant des vésicules et des tubules aux formes sinueuses, ensemble qui prend le nom de réticulum endoplasmique. Ce réticulum peut être « lisse » ou présenter de minuscules formations granulaires (150 Å de diamètre ;

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

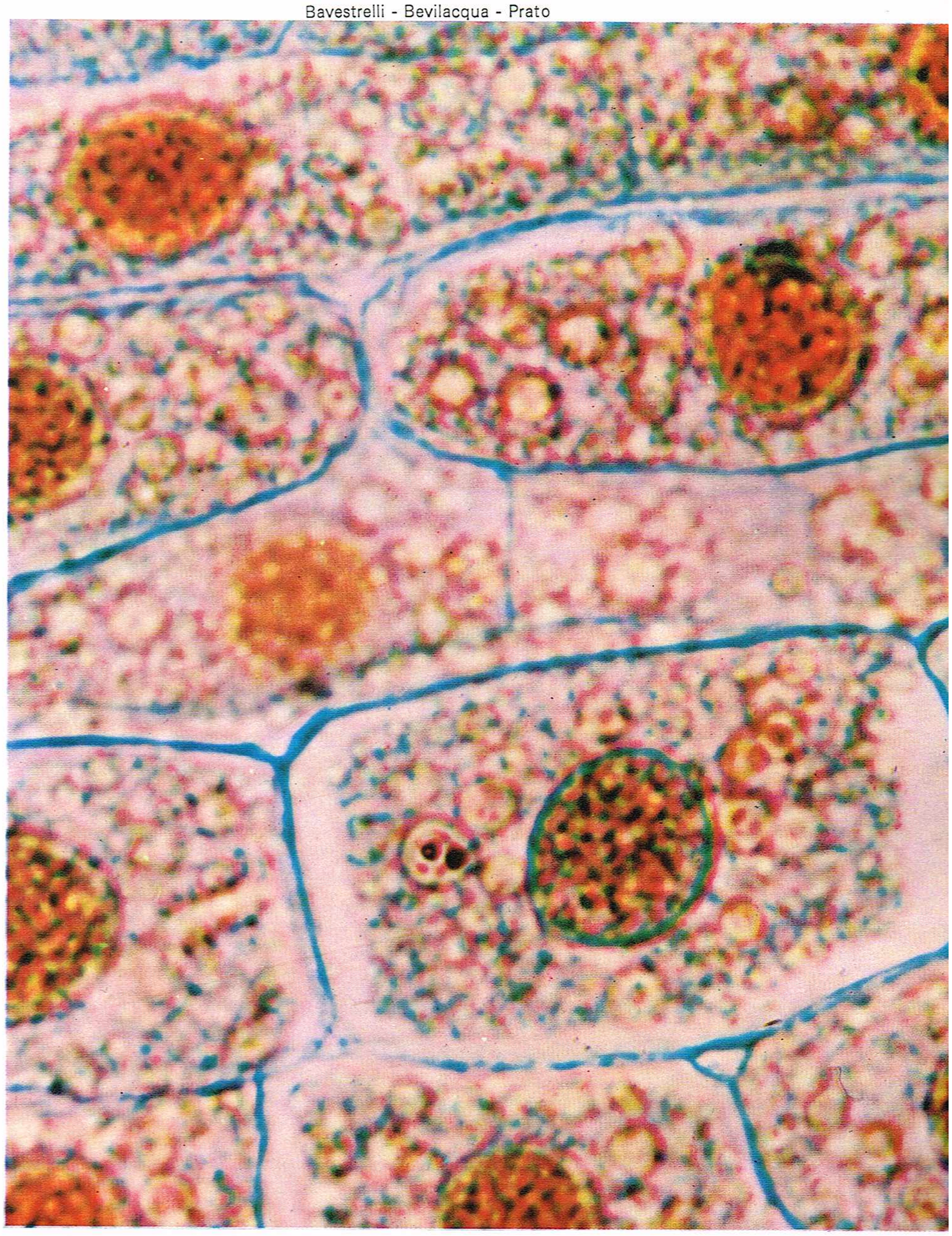

Ces cellules peuvent être comparées aux éléments d'une mosaïque ou aux briques d'un mur ; en effet, elles forment, de la même manière, les tissus animaux et végétaux. Sur la photo : un exemple de méristème (× 250 × 3,5).

G. Frezzato

Cellules épithéliales humaines, cultivées *in vitro;* la préparation a été colorée à l'orange d'acridine. La microphotographie a été exécutée sous excitation en lumière ultraviolette, qui a provoqué une fluorescence rouge pour l'ARN et jaune pour l'ADN.

1 angström = 1 dix-millième de millimètre), les ribosomes ou grains de Palade, contenant de l'acide ribonucléique; le réticulum endoplasmique et les ribosomes jouent donc un rôle important dans la synthèse des protéines.

L'observation au microscope électronique montre habituellement près du noyau un système d'écailles superposées; cet ensemble est appelé « appareil de Golgi », du nom du savant qui le découvrit. Sa fonction est encore discutée aujourd'hui, mais on admet que les vésicules de l'appareil de Golgi peuvent entrer en communication avec le réticulum endoplasmique.

Un rôle très important pour l'activité métabolique de la cellule est dévolu aux mitochondries, centres de la respiration cellulaire, dont le nombre et la répartition sont variables et la structure assez complexe. On peut présenter schématiquement la mitochondrie comme un bâtonnet plus ou moins trapu ou arqué, comportant une double paroi qui délimite une chambre externe (comprise entre les deux parois) et une chambre interne. La paroi interne présente des digitations qui cloisonnent la chambre interne. Les phénomènes chimiques qui se déroulent au niveau de la mitochondrie sont des phénomènes d'oxydation de l'adénosine-diphosphate en adénosine-triphosphate, avec accumulation d'énergie, susceptible d'être restituée lors du passage inverse de l'adénosine-triphosphate en adénosine-diphosphate. On donne le nom de chondriocontes aux mitochondries filamenteuses.

LE NOYAU

Le noyau est sans conteste la structure la plus importante de la cellule. Observé pour la première fois par Félix Fontana en 1780, il a fait par la suite l'objet d'études très minutieuses; aujourd'hui, on peut affirmer qu'il s'agit d'une structure constante de la cellule, bien qu'elle soit absente chez les virus comme chez les globules rouges des Mammifères et des Oiseaux. Chaque cellule comprend généralement un seul noyau, quoique certaines soient pourvues de plusieurs noyaux; les dimensions du noyau sont telles que le rapport entre la masse de la cellule et la masse du noyau est constant.

Le noyau est délimité par une membrane; celle-ci est interrompue par des pores de grandeur comprise entre 400 et 700 Å, dont le nombre varie selon le type de cellule. La membrane nucléaire, qui fait défaut chez les Bactéries et les Algues, est sous la dépendance du réticulum endoplasmique, auquel elle s'unit au moment de la reproduction cellulaire. Cette description de la structure du noyau s'applique au noyau au repos; à la phase de division cellulaire, ou mitose, l'aspect du noyau change totalement, puisque la membrane disparaît et que les chromosomes s'individualisent.

Le noyau est constitué par un suc nucléaire qui renferme les chromosomes. Ceux-ci feront l'objet de notre prochain article. Disons tout de suite que leur importance est considérable, car l'hérédité repose sur eux.

Les chromosomes se présentent sous forme de bâtonnets. Ils ont d'habitude un aspect coudé, dû à leur division en deux bras se réunissant au niveau d'un centromère. Chaque chromosome est fait d'un chromonéma, finement enroulé en hélice, et d'une matrice, qui l'enveloppe. Le chromosome est constitué de molécules d'acide désoxyribonucléique (ADN), qui ont la forme, désormais célèbre, d'une double hélice.

Enfin, le noyau renferme des nucléoles, petites masses spongieuses, sans membrane.

Poursuivons notre description d'une cellule animale typique. Dans de très nombreuses cellules, on note, près du noyau, une structure qui revêt une grande importance au moment de la division cellulaire, tandis qu'elle reste au repos dans la cellule interphasique : cette structure est le centrosome. C'est une masse de cytoplasme qui contient un petit cylindre appelé centriole.

Citons les vacuoles, qui sont des cavités du cytoplasme, présentant souvent, chez de nombreux Protozoaires, une communication avec l'extérieur par l'intermédiaire d'un cytostome, la « bouche » de la cellule. Les vacuoles jouent un rôle dans l'alimentation cellulaire; elles sont parfois isolées et contiennent des substances de réserve (lipides) ou de rejet. Chez les organismes monocellulaires, des vacuoles pulsatiles peuvent jouer un rôle aussi dans la motilité. Les substances de réserve et de rejet, qu'elles se trouvent réunies à l'intérieur des vacuoles, ou qu'elles restent extérieures, prennent la dénomination générale de paraplasme.

La description de la structure cellulaire que nous venons de faire s'applique, comme nous l'avons dit, à une cellule animale typique. D'ailleurs, les différences entre une cellule animale et une cellule végétale typiques ne sont pas, le plus souvent, très importantes; mentionnons, par exemple, que les cellules végétales sont pourvues d'une membrane de cellulose ou de pectine, située extérieurement à la paroi cellulaire que nous venons de décrire, souvent de dimension importante, et capable de s'épaissir par accumulation de substances diverses (lignine, subérine, etc.), en rapport avec la fonction typique de la cellule.

A l'intérieur de la cellule végétale, on trouve en outre des inclusions cytoplasmiques caractéristiques, les plastes, en plus des inclusions communes aux cellules animales. Les plastes se distinguent en chloroplastes, contenant la chlorophylle, amyloplastes (amidon), chromoplastes (pigments), lipoplastes et protéoplastes (graisses et protéines).

Rappelons qu'il y a encore quelques années, une controverse assez vive s'est développée à propos de l'existence d'une structure nucléaire dans les Bactéries et dans certaines Algues; récemment, on a conclu à l'existence, dans la cellule de la Bactérie, de corps nucléoïdes pourvus de chromosomes, pratiquement analogues à un véritable noyau ne comportant pas de membrane.

En dépit des dimensions microscopiques des cellules, les biologistes parviennent à expérimenter sur elles à l'aide d'instruments miniaturisés : pipettes, aiguilles, scalpels. Ils permettent toutes sortes d'opérations : piqûres, greffes, sections, ponctions, etc.

Grâce à un microcrochet de verre, on peut extraire le noyau d'une amibe maintenue entre les deux branches d'une microfourche de même matière. De la microchirurgie en somme, qui exige un doigté peu commun...

LES CHROMOSOMES

Pendant la division cellulaire, après l'apparition de la membrane nucléaire, des organites particuliers apparaissent à l'intérieur de la cellule ; ce sont des chromosomes, présents dans toutes les cellules vivantes, à l'exclusion des globules rouges ou hématies du sang des Mammifères, qui ne possèdent pas de noyau. pas de noyau.

Ces organites ont grossièrement la forme de bâtonnets plus ou moins allongés, certains étant extrêmement courts ; ils présentent une constriction bien visible, appelée centromère ; c'est justement autour de cette constriction que s'articulent les mouvements du chromosome au moment de la division cellulaire. Un chromosome peut présenter plusieurs constrictions ; dans tous les cas, une seule joue le rôle de centromère, les autres étant des constrictions secondaires.

On peut classer les chromosomes en quatre groupes selon la position du centromère :

a) chromosomes télocentriques, *lorsque le centromère se trouve situé à l'extrémité du chromosome ;*

b) chromosomes acrocentriques, *lorsque le centromère est très proche d'une des extrémités du chromosome, le partageant ainsi en deux bras nettement inégaux, appelés télomères ;*

c) chromosomes sub-métacentriques, *lorsque l'inégalité entre télomères n'est pas très marquée ;*

d) chromosomes métacentriques, *lorsqu'on peut admettre avec une bonne approximation que le centromère se trouve au milieu du chromosome.*

Les constrictions secondaires du chromosome le divisent également en deux parties, l'une contenant le centromère, l'autre non ; ces constrictions sont parfois très importantes, au point d'isoler pratiquement la partie dépourvue de centromère, partie que, dans ce cas, on désigne du terme de satellite.

La présence des satellites ainsi que la position du centromère sont d'une grande utilité pour reconnaître les chromosomes homologues dans les préparations microscopiques d'individus de la même espèce.

LA STRUCTURE DES CHROMOSOMES

Les controverses nombreuses qui se sont développées dans le passé à propos de la structure interne des chromosomes se poursuivent encore aujourd'hui, malgré les importantes découvertes effectuées grâce au microscope électronique.

Il y a encore quelques années, on décrivait les chromosomes comme un ensemble de filaments (le chromonéma) constitués essentiellement d'acide désoxyribonucléique (ADN), plongeant dans une matrice et délimités par une membrane externe.

Pour certains spécialistes, les chromosomes seraient formés de deux filaments principaux, appelés chromatides, constitués à leur tour par des filaments de plus en plus petits jusqu'à la molécule d'ADN.

Les deux chromatides se séparent au moment de la division cellulaire et migrent chacune dans une des cellules filles issues de la cellule mère, pour reconstituer dans chacune d'elles un chromosome entier. Les chromatides sont enroulées en spirale ; il s'agit d'une double spiralisation, l'une au pas très serré, l'autre au pas plus large.

La spiralisation secondaire, c'est-à-dire celle au pas plus serré, n'est pas homogène et présente des parties plus serrées et d'autres plus lâches. A cause d'une telle différence, les parties de filament où la spirale est plus dense, appelées chromomères, apparaîtront plus foncées sur une préparation convenablement colorée, tandis que les autres seront moins colorées.

La molécule d'ADN, qui est à la base de la structure du chromosome, est très complexe ; pour simplifier, on peut

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Fragment de tissu végétal, dont les cellules se présentent à différents moments de la reproduction ; dans quelques-unes, les chromosomes sont nettement visibles (× 400 × 4 ; coloration de contraste).

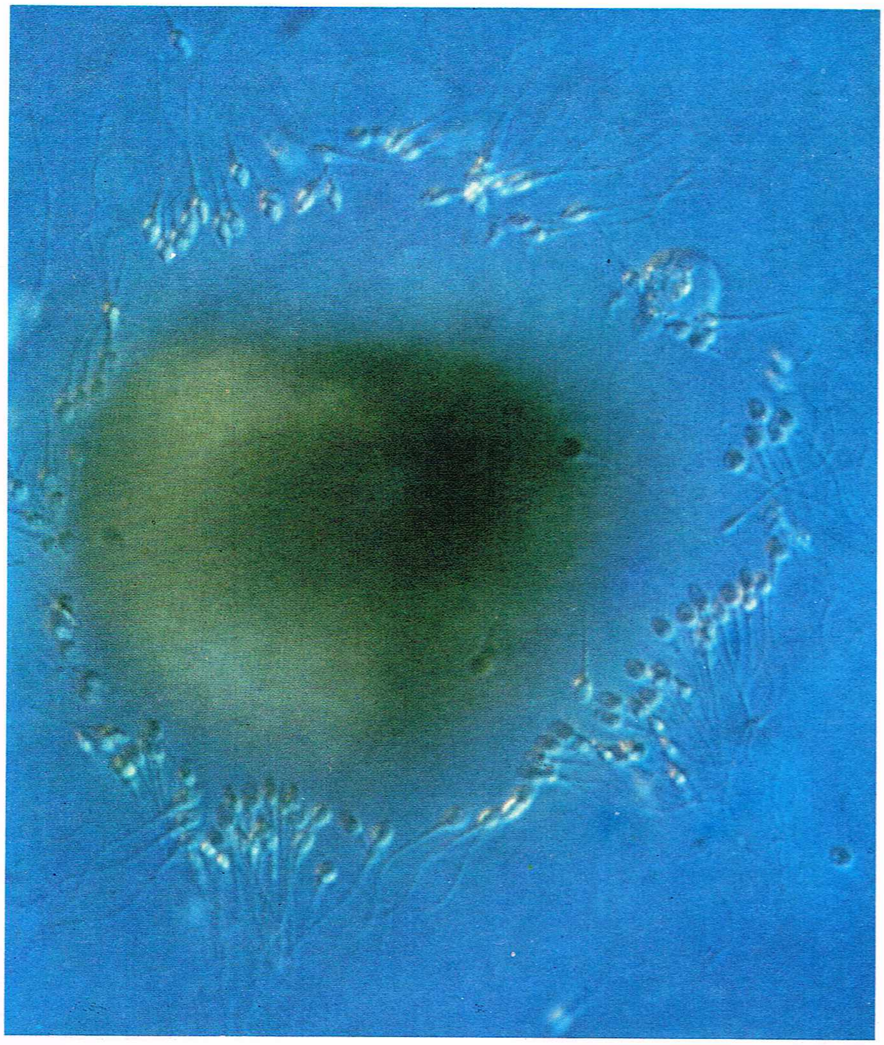

Les gamètes sont les cellules qui assurent la conservation de l'espèce. L'illustration montre une cellule œuf de rat entourée de spermatozoïdes.

l'imaginer sous une forme qui rappelle avec une approximation suffisante une échelle de corde enroulée sur elle-même comme une hélice, de manière à former une spirale au pas assez large. C'est pour cela qu'on lui donne classiquement l'appellation de « double hélice ».

Dans cette échelle imaginaire, les montants seraient formés par un sucre particulier, le désoxyribose, associé au phosphore, et les traverses par des bases complexes constituées d'adénine et thymine, guanine et cytosine, reliées par paires à chaque marche.

Dans ces structures extrêmement complexes, il ne faut pas confondre la spirale moléculaire de l'ADN avec les spirales formées par les chromatides, ces dernières apparaissant formées, comme nous l'avons dit, de filaments d'un ordre supérieur à la molécule et composés d'un nombre élevé de molécules.

INDIVIDUALITÉ DES CHROMOSOMES

L'observation des chromosomes en tant qu'organites cellulaires bien apparents n'est possible qu'au moment de la mitose ou division cellulaire ; dans la cellule au repos, les chromosomes ne sont pas observables, car le noyau qui les contient apparaît formé d'une substance filamenteuse enroulée sur elle-même de manière désordonnée et subdivisée en zones plus ou moins facilement colorables par les colorants biologiques.

En réalité, les chromosomes conservent intacte leur individualité, même pendant la période de repos cellulaire, bien que cela n'apparaisse pas facilement à l'observateur. A la fin de la division cellulaire, les chromosomes commencent à se « déspiraliser » et semblent plus allongés et plus minces, superposés les uns aux autres et entrelacés, mais toujours distincts, comme des bouts de fil mélangés entre eux.

Des phénomènes chimiques surviendraient alors pour rendre réfractaires aux colorations les parties du chromosome supposées porteuses des caractères héréditaires de l'espèce ; en revanche, les parties génétiquement inactives ne subissent pas de changements et prennent la coloration, même pendant la phase de repos du noyau. On appelle euchromatine la fraction qui ne se colore pas dans l'interphase (ou phase de repos), et hétérochromatine la portion qui prend la coloration.

LE CARYOTYPE

L'équipement chromosomique présent dans les cellules de tout individu et transmis aux descendants par la reproduction prend le nom de caryotype.

Limitons-nous à l'étude du caryotype de l'homme : il est composé d'un nombre pair de chromosomes (c'est-à-dire d'un nombre diploïde, 2 n), qui sont identiques par paires. Les chromosomes d'une même paire sont dits chromosomes homologues : ils sont parfaitement identiques tant par leur forme (ils sont superposables) que par leur structure interne (disposition des bases dans l'ADN).

Toutes les cellules du corps humain sont diploïdes, à l'exception des cellules reproductrices (ovules et spermatozoïdes), qui sont haploïdes (n), car elles ne contiennent qu'un seul élément de chacune des paires de chromosomes homologues. Ainsi, dans l'œuf ou zygote résultant de l'union de l'ovule et du spermatozoïde, et par conséquent dans toutes les cellules de l'organisme qui en dériveront, se trouvera reconstitué le nombre de 2 n chromosomes, identique à celui du père et de la mère. Si les cellules reproductrices étaient elles aussi diploïdes, on assisterait à un doublement du nombre des chromosomes à chaque génération.

Par exemple, pour l'homme, qui possède 46 chromosomes (23 paternels et 23 maternels) issus des cellules haploïdes reproductrices, ce nombre sera conservé à l'infini pour toutes les générations à venir, car chaque individu, parvenu à la maturité sexuelle, produit à son tour, dans les organes appropriés, ce type de cellules haploïdes, afin d'éviter une augmentation chromosomique vertigineuse.

Ainsi chaque espèce maintient dans le temps les caractéristiques qui lui sont propres et c'est seulement dans des cas exceptionnels que peut se produire une mutation dans l'équipement chromosomique ; elle s'accompagne le plus souvent de manifestations pathologiques. Rappelons à cet égard que le mongolisme est dû justement à la présence d'un chromosome surnuméraire sur la paire 21.

LES CHROMOSOMES SEXUELS

Nous venons de dire que l'équipement chromosomique de chaque individu est formé de paires de chromosomes homologues parfaitement identiques entre eux ; cependant il existe chez tout individu un couple particulier de chromosomes, dits chromosomes sexuels. Dans l'espèce humaine, que nous choisissons comme exemple car elle a fait l'objet des études les plus poussées, à côté des 22 paires de chromosomes homologues on trouve une vingt-troisième paire qui diffère selon les sexes.

En effet, chez la femme, la vingt-troisième paire est formée de deux chromosomes sub-métacentriques assez grands (chromosomes « X ») parfaitement identiques ; chez l'homme, au contraire, la vingt-troisième paire est hétérogène, formée d'un seul chromosome sub-métacentrique de grande taille (« X ») couplé avec un chromosome très petit acrocentrique (chromosome « Y »).

Le sexe des enfants sera déterminé par l'union d'une cellule haploïde « X » de la mère avec une cellule haploïde paternelle qui pourra contenir soit un chromosome « X », soit un chromosome « Y ». La rencontre d'un ovule « X » avec un spermatozoïde « X » donnera naissance à un individu femelle « XX », tandis que la rencontre avec un spermatozoïde « Y » donnera naissance à un individu mâle « XY ». Les deux éventualités possèdent des chances égales de se produire, ce qui assure un parfait équilibre entre les deux sexes et sauvegarde, à terme, les possibilités de reproduction.

LA RESPIRATION CELLULAIRE

On distingue habituellement dans un organisme complexe, comme celui de l'homme ou de tout autre animal doté d'un appareil respiratoire, deux types de respirations : la respiration externe et la respiration interne.

On entend par respiration externe l'ensemble des phénomènes qui se déroulent dans les alvéoles pulmonaires et qui aboutissent à la fixation sur l'hémoglobine du sang de l'oxygène contenu dans l'air inspiré et au rejet dans l'air alvéolaire du gaz carbonique fixé sur l'hémoglobine.

La respiration interne, en revanche, se produit au niveau cellulaire. Elle constitue la véritable respiration, au cours de laquelle s'effectuent les échanges énergétiques de l'organisme : elle existe chez les animaux les plus simples, unicellulaires ou pluricellulaires, tandis que la respiration externe, pulmonaire ou branchiale, n'est qu'un approvisionnement en comburant (oxygène), s'accompagnant de l'expulsion des produits de rejet de l'organisme (gaz ou anhydride carbonique).

Les processus de respiration cellulaire se déroulent dans toutes les cellules de l'organisme et durant toute la vie de l'individu selon des modalités qui varient du règne animal au règne végétal ; il y a lieu de distinguer, en outre, les êtres anaérobies (comme un grand nombre de Bactéries et des parasites internes comme le ténia) et les êtres aérobies, selon qu'ils n'utilisent pas ou qu'ils utilisent l'oxygène pour leur activité métabolique.

La différence essentielle entre végétaux et animaux réside dans le fait que les premiers sont pour la plupart autotrophes, c'est-à-dire capables de puiser dans le milieu extérieur des substances inorganiques et de les transformer, grâce à l'énergie solaire, en substances organiques ; ce sont donc des organismes producteurs, tandis que les seconds sont des organismes consommateurs, car ils utilisent les substances organiques élaborées par les végétaux, dont ils se nourrissent soit directement, soit par l'intermédiaire d'animaux herbivores. Ainsi les végétaux sont assimilés et dégradés au cours du métabolisme animal pour être réduits à nouveau à l'état de substances inorganiques qui seront à nouveau assimilées par les végétaux.

C. Bevilacqua

Un bois de jeunes arbres feuillus de la zone tempérée : c'est au niveau des feuilles que s'accomplissent la photosynthèse et la respiration, phénomènes qui sont à la base des échanges énergétiques.

LA RESPIRATION CHEZ LES VÉGÉTAUX

Dans l'organisme végétal, l'échange énergétique se produit selon deux processus : le premier, la photosynthèse, ou assimilation chlorophyllienne, transforme l'énergie solaire en énergie chimique, mise en réserve dans les molécules d'hydrate de carbone, ou glucide, que le végétal élabore à partir de l'eau et du gaz carbonique ; ce processus exige la présence d'un pigment vert, la chlorophylle. Le second processus, la respiration cellulaire, transforme l'énergie chimique ainsi obtenue en d'autres formes d'énergie, nécessaires à la plante pour croître et se reproduire. Cette transformation s'opère par destruction des molécules de substances organiques élaborées au cours de la photosynthèse.

Dans l'organisme animal, on observe uniquement le second de ces processus, car l'énergie chimique nécessaire à la respiration cellulaire est fournie par les aliments.

La réaction de base de la respiratoin cellulaire d'un organisme aérobie est la dégradation du glucose en gaz carbonique et en eau, selon un processus d'oxydation répondant à la formule suivante :

$$C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2 = 6\ CO_2 + 6\ H_2O.$$

Cette réaction libère 690 000 calories. Elle comporte des étapes intermédiaires très importantes : dans un premier temps, la molécule de glucose est scindée en deux molécules d'acide lactique, qui, grâce à la présence d'oxygène (O_2), est oxydé en acide pyruvique ; celui-ci, à son tour, sous l'action d'enzymes particulières, subit de nombreuses transformations intermédiaires qui s'achèvent par la production d'anhydride carbonique (CO_2).

L'ensemble de ces réactions chimiques constitue le cycle de Krebs, ou cycle de l'acide tricarboxylique.

A l'inverse, dans les réactions anaérobies, où l'oxygène fait défaut, l'énergie produite par la dégradation du glucose n'est que de 56 000 calories ; en effet, seule la première partie des réactions décrites a lieu, et le glucose est transformé simplement en acide lactique :

$$C_6H_{12}O_6 = 2\ C_3H_6O_3.$$

Ce dernier ne peut pas être oxydé en acide pyruvique.

N. Myers

Chez les animaux, l'énergie chimique nécessaire à la respiration provient des aliments; pour les herbivores, ces derniers sont constitués directement par les végétaux, qui ont édifié leurs substances à partir de l'eau du sol, du gaz carbonique de l'air et de l'énergie solaire.

Les organismes qui ont une existence strictement anaérobie ne sont pas nombreux, comme nous l'avons dit. En revanche, on connaît de très nombreux êtres, qui, bien qu'essentiellement aérobies, ont la possibilité de survivre pour un temps limité dans des conditions anaérobies, en produisant de l'acide lactique qu'ils dégraderont massivement en CO_2 dès qu'ils se trouveront à nouveau en présence d'O_2.

LA RESPIRATION CHEZ LES DIFFÉRENTS ORGANISMES ANIMAUX

Une respiration cellulaire de ce type s'observe aussi chez les animaux supérieurs et chez l'homme, dans les fibres musculaires. Le muscle peut travailler pendant un certain temps en l'absence d'oxygène, grâce à l'énergie produite par la dégradation du glucose en acide lactique. Lorsque l'acide lactique dépasse une certaine quantité, la fatigue apparaît et le muscle a besoin, pour pouvoir se contracter à nouveau, d'une période de repos, pendant laquelle il paie ce qu'on appelle la « dette d'oxygène »; il oxyde alors en CO_2 tout l'acide lactique et se retrouve ainsi prêt à reprendre son travail. La cellule musculaire est débarrassée ensuite de l'anhydride carbonique par le sang, qui le transporte aux poumons, où il le cède à l'air alvéolaire en échange de l'oxygène, nécessaire aux cellules pour poursuivre leur activité métabolique.

Cependant, l'utilisation directe de l'énergie produite par l'oxydation du glucose ne constituerait pas le mécanisme le mieux adapté au fonctionnement cellulaire : en effet, si les circonstances exigeaient une dépense immédiate de grandes quantités d'énergie, les cellules ne seraient pas en mesure de la fournir si elles devaient oxyder sur-le-champ tout le glucose; dans d'autres cas, un dosage minutieux de l'énergie peut se révéler opportun, dosage qu'il serait difficile d'obtenir directement à travers les différentes étapes de l'oxydation du glucose.

Section transversale d'une feuille d'hellébore noir au niveau d'un stomate; celui-ci apparaît comme une petite bouche capable de s'ouvrir et de se fermer et pourvue d'une chambre sous-stomatique (× 300 × 1,5).

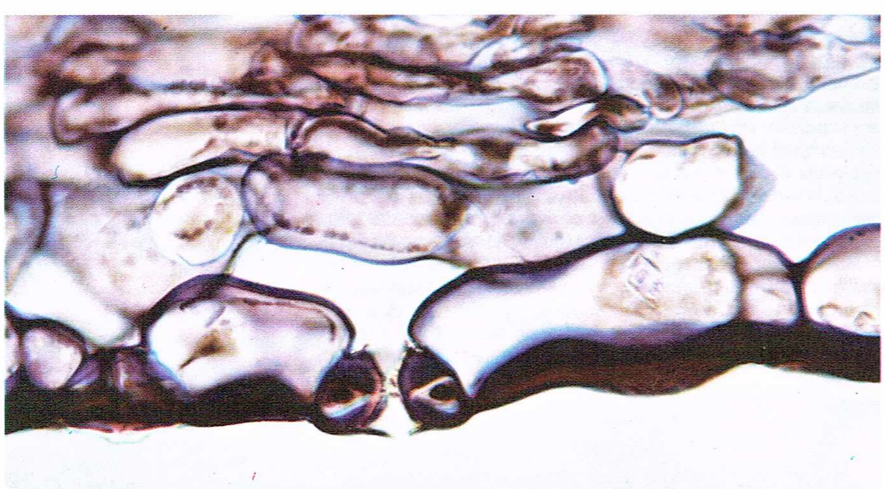

C. Bevilacqua

C'est pourquoi chaque cellule possède des réserves d'énergie utilisables, dans la quantité voulue, au moment où le besoin s'en fait sentir. Ces réserves sont constituées par la liaison chimique qui fixe une molécule de phosphate inorganique à la molécule de l'adénosine diphosphate (ADP), qui se transforme ainsi en adénosine triphosphate (ATP).

Le processus de phosphorylation de l'adénosine diphosphate :

$$\text{ADP} + \text{P}_i + \text{énergie} = \text{ATP},$$

exige approximativement 23 000 calories, qui sont intégralement restituées lors du processus inverse :

$$\text{ATP} = \text{énergie} + \text{P}_i + \text{ADP}.$$

On estime que l'oxydation complète d'une molécule de glucose jusqu'à la transformation en gaz carbonique et eau développe l'énergie nécessaire pour transformer 32 molécules d'ADP en ATP, tandis que la réaction anaérobie de transformation du glucose en acide lactique ne fournit que l'énergie suffisant à la phosphorylation de 2 molécules d'ADP.

OXYDATION ET RÉDUCTION

Naturellement, nous avons présenté les réactions chimiques et les phénomènes de la respiration cellulaire dans leur forme la plus élémentaire : un exposé plus complet imposerait que l'on prît en considération toutes les réactions de réduction qui se produisent simultanément aux réactions d'oxydation, ainsi que l'action des très nombreux catalyseurs qui interviennent dans chaque réaction.

On peut dire brièvement que chaque phénomène d'oxydation s'accompagne toujours d'un phénomène correspondant de réduction ou enlèvement d'oxygène; en effet, si nous admettons que l'oxydation n'est pas tant un passage d'oxygène d'une molécule à une autre qu'un passage d'électrons d'une molécule de forme plus réduite, c'est-à-dire plus riche en électrons, vers une autre molécule plus oxydée, c'est-à-dire plus pauvre en électrons, il apparaît clairement que, pendant que la première molécule perd des électrons, donc qu'elle s'oxyde, la seconde, simultanément, les acquiert et se réduit.

Ainsi, la dégradation d'une molécule de glucose en CO_2 et H_2O comporte dans la cellule un grand nombre de passages d'électrons des substances plus réduites vers d'autres substances plus oxydées, passages qui sont favorisés par la présence de nombreuses enzymes; parmi elles, rappelons la déshydrogénase, capable de céder des électrons, les cytochromes, systèmes oxydo-réducteurs réversibles, et les oxydases, qui favorisent la cession d'électrons directement à l'oxygène.

Ces différents phénomènes se déroulent au niveau d'organites cellulaires, appelés chondriosomes, sur la membrane desquels seraient localisées les substances nécessaires pour la respiration cellulaire, tandis que la matrice, située à l'intérieur, aurait pour tâche d'évacuer les différentes substances et de fournir aux enzymes présentes sur les membranes des composés auxiliaires appelés coenzymes.

En particulier, c'est sur les membranes externes des mitochondries que se dérouleraient les processus d'oxydation qui fournissent les électrons et que seraient catalysées toutes les réactions de synthèse grâce auxquelles l'ATP fournit de l'énergie; sur les membranes internes, en revanche, se trouvent les particules destinées au transport des électrons, transport qui s'effectue à travers toute une chaîne de complexes chimiques qui conduisent à la synthèse de l'ATP.

On est parvenu à ces conclusions grâce à une intéressante expérience : en bombardant par les ultrasons les mitochondries, on a observé que, tandis que la fonction de transport des électrons se poursuivait régulièrement, les autres fonctions étaient rapidement inhibées.

Aujourd'hui on a pu recueillir aussi des données quantitatives relativement précises sur la respiration cellulaire grâce à l'emploi de microrespiromètres, appareils complexes qui permettent de relever les quantités d'oxygène utilisées et de CO_2 expulsées par une cellule à la suite d'un travail déterminé; ces données permettent de calculer la quantité de glucose dégradée et, par conséquent, les calories produites.

SENSIBILITÉ CELLULAIRE ET TROPISMES

La faculté de percevoir des stimulations provenant du milieu extérieur n'est certainement pas l'apanage des seuls organismes évolués; même les êtres les plus simples, comme une Algue unicellulaire ou une amibe, possèdent la capacité de percevoir de tels stimuli et de répondre à ces derniers par des réactions adaptées aux circonstances.

De même qu'il existe une échelle d'organisation depuis les êtres unicellulaires jusqu'aux plus évolués, de même la sensibilité aux sollicitations internes ou externes varie, le plus souvent, en fonction du rapport entre la taille et la complexité du corps d'une part et les capacités de perception d'autre part.

Si l'Algue unicellulaire marine a seulement à « connaître » du milieu environnant la température, la pression, la luminosité, la salinité, en revanche, un habitant de la forêt, comme un gorille ou un boa, doit être capable de percevoir l'état de ses propres organes, de voir les corps environnants, d'entendre les sons, de distinguer les saveurs, de coordonner les mouvements pour pouvoir cueillir la noix de coco et la reconnaître comme fruit comestible, dans le cas du premier, ou reconnaître et capturer une proie dans le cas du second.

Chez les animaux supérieurs, la fonction de perception appartient aux cellules sensorielles et au système nerveux, plus ou moins développé selon le degré d'évolution; en revanche, chez les végétaux, supérieurs ou inférieurs, et chez les animaux inférieurs, il n'existe pas de système nerveux, les différentes cellules étant dotées d'une sensibilité propre. Nous allons traiter uniquement de la sensibilité du protoplasme cellulaire, donc des organismes unicellulaires et des organismes pluricellulaires les plus simples.

A. Sella

Une feuille de *Drosera rotundifolia* : il s'agit d'une minuscule plante insectivore dont les tentacules se courbent sur leur proie grâce à la sensibilité des cellules qui constituent la feuille même.

LES MÉTHODES DE RECHERCHE

Les études relatives à la sensibilité cellulaire sont uniquement de nature expérimentale et les conclusions auxquelles elles ont permis d'aboutir au terme de nombreux essais et sur la base de résultats concordants peuvent être considérées suffisamment conformes à la réalité.

Ainsi on a pu affirmer l'existence d'une sensibilité de la cellule aux variations d'intensité des stimuli extérieurs en constatant, pour une cellule donnée, un rapport toujours identique entre stimulus et réaction.

Une expérience très connue concerne certains Protozoaires et certaines Algues unicellulaires : placés dans une coupe contenant de l'eau et présentant des zones diversement éclairées, ces êtres migrent des zones moins éclairées vers les zones plus claires et s'arrêtent dans la zone de luminosité la plus favorable à leur existence; de même, une paramécie, Protozoaire cilié, placée dans un champ électrique, migre toujours vers le pôle positif, montrant ainsi qu'elle est parfaitement capable de percevoir la différence de potentiel électrique qui existe d'un point à l'autre du champ.

Les observations faites directement dans la nature sont très nombreuses : particulièrement intéressantes sont celles relatives aux migrations du plancton, tant marin que d'eau douce, et qui ont montré que le plancton est sensible aux variations lumineuses; ainsi il remonte à la surface seulement au crépuscule, car la lumière incertaine le rend beaucoup moins visible aux animaux qui s'en nourrissent.

On peut donc affirmer que la nature a, d'une certaine manière, conditionné les perceptions et les réactions de ces organismes pour les rendre aptes à reconnaître certaines conditions du milieu, comme les différences d'intensité lumineuse, et cela toujours en vue d'assurer leur survie et en l'absence de toute forme de volonté cons-

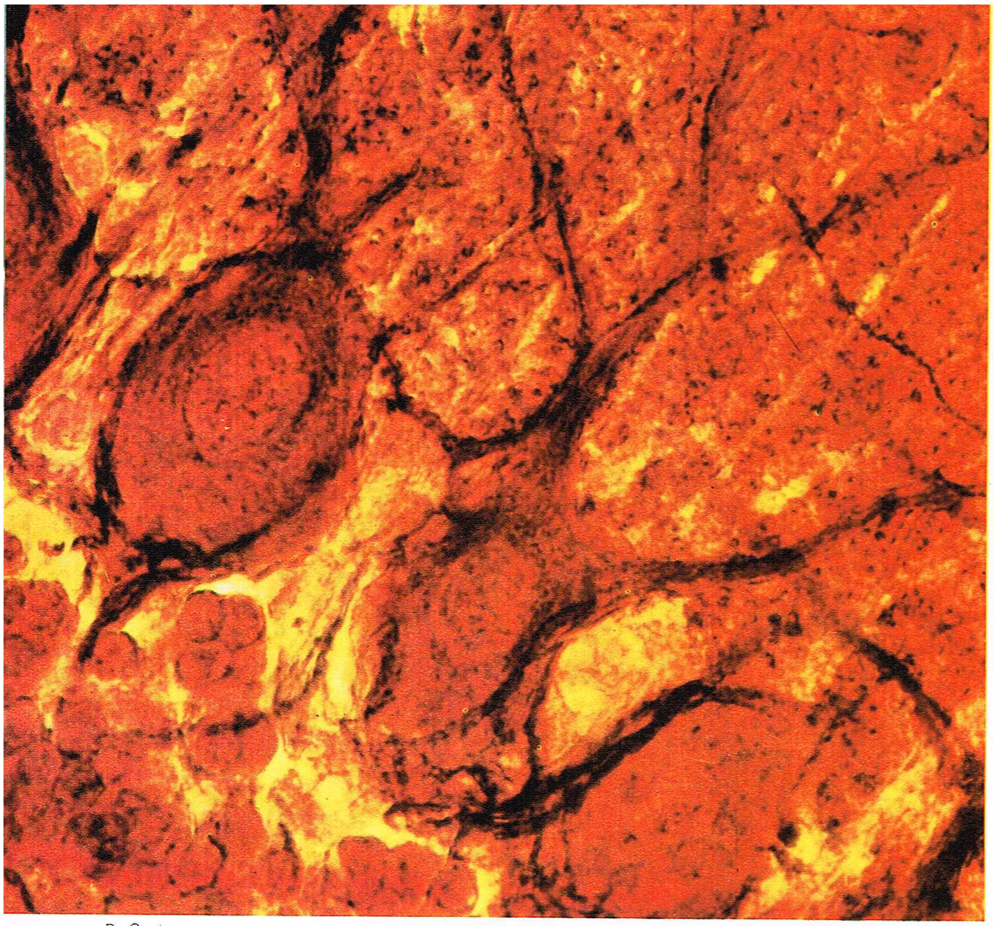

P. Castano

Cellules nerveuses du cervelet (cellules de Purkinje) avec leurs noyaux et leurs dendrites ; elles constituent le plus merveilleux exemple de sensibilité et de conductibilité du protoplasme.

ciente ; tous ces processus sont réglés par des phénomènes purement mécaniques, sous la dépendance de réactions chimiques.

LES STIMULI ET LEUR CONDUCTION

Les stimuli qu'une cellule est susceptible de percevoir sont essentiellement de nature thermique, chimique, lumineuse, mécanique et électrique.

Chaque cellule répond à ces stimuli toujours d'une manière spécifique, soit pour s'en éloigner, soit pour s'en approcher ; ces réponses sont des contractions, des émissions lumineuses, la sécrétion de substances capables de neutraliser le stimulus, l'émanation de légères décharges électriques. Ce qu'il importe de souligner est que chaque cellule de même type réagit de manière identique lorsqu'elle reçoit le même stimulus : inversement, deux cellules différentes, même si elles sont apparemment très semblables, présentent des réactions souvent très dissemblables, révélant ainsi l'existence de différences importantes au niveau du protoplasme.

Un autre fait caractéristique est que la cellule possède un seuil très précis d'excitabilité, toujours constant pour chaque stimulus et pour chaque type de cellule.

Si, par exemple, on pique avec une aiguille microscopique la paroi d'une cellule, d'abord légèrement, puis en augmentant progressivement la pression, on notera que la cellule reste dans un premier temps parfaitement inerte, puis se contracte subitement pour éloigner sa paroi de l'aiguille ; si l'on poursuit en pénétrant dans la paroi, la contraction n'augmente pas : ainsi la réaction est totale dès que le stimulus atteint le seuil.

Le problème de la conductibilité du protoplasme, c'est-à-dire du mode de perception du stimulus dans la zone de stimulation et du mode de propagation de l'effet produit dans toute la cellule, et souvent même dans les cellules voisines, sans diminution d'intensité, a fait l'objet de nombreuses hypothèses : les unes envisageaient cette conductibilité comme un phénomène d'oxydation, d'autres se référaient à des transformations chimiques en chaîne, de différente nature. La plus probable est la théorie moderne dite des impulsions. D'après cette théorie, la conductibilité du protoplasme serait due à une série d'impulsions, de type probablement analogue aux impulsions électriques, transmises de proche en proche.

On distingue aussi dans les différents organismes unicellulaires et dans de nombreux organismes pluricellulaires inférieurs des zones particulières de la cellule ou des régions du corps de l'animal ou du végétal qui sont particulièrement sensibles à une stimulation donnée ; il existe, par exemple, chez l'Algue unicellulaire Euglena viridis, *une tache de pigment sensible aux variations lumineuses (photorécepteur) ; en effet, la structure chimique du pigment varie en fonction de l'intensité de la lumière.*

LES TROPISMES

Par les termes de tropisme, tactisme ou taxie, on désigne les réactions obligatoires, qu'il s'agisse d'attraction ou de répulsion, qui font suite à la stimulation d'une cellule et qui révèlent la perception du stimulus de la part du protoplasme.

Les tropismes — thermotropisme (réaction à la chaleur), chimiotropisme (réaction à des substances chimiques), phototropisme (réaction à la lumière) — sont dits positifs lorsque le mouvement de la cellule s'effectue vers le stimulus, négatifs dans le cas contraire ou lorsque apparaissent des signes de souffrance.

Ainsi on parle de chimiotropisme positif dans le cas de la paramécie, qui s'approche des bulles d'air que l'on introduit dans l'eau où elle vit ; on parle au contraire de chimiotropisme négatif lorsque cette même paramécie fuit devant une goutte de substance vénéneuse.

Pour plus de précision, il faut ajouter que les réactions obligatoires qui consistent en un mouvement de la cellule sont appelées topotaxies, tandis que le terme de tropisme englobe aussi les réactions qui s'effectuent sans déplacements (contractions, émission de lumière, etc.).

Tindbergen distingue les topotaxies en clinotaxies et tropotaxies : les premières sont les réactions à des stimuli diffus (odeurs, salinité), les secondes à des stimuli provenant d'une direction bien déterminée (lumière).

Un cas tout à fait remarquable s'observe chez certains êtres qui réagissent au rayonnement lumineux par un mouvement qui les porte à présenter à la lumière leurs récepteurs lumineux toujours selon le même angle (ménotaxie) : ainsi, un de ces animaux, exposé à un faisceau de rayons lumineux parallèles, se déplace en zigzag suivant une certaine inclinaison qui reste constante, et jamais parallèlement aux rayons.

On peut pratiquement affirmer que toute la vie aquatique inférieure est réglée essentiellement par des tropismes qui poussent les larves à une profondeur plus ou moins grande selon l'espèce (bathytropisme), ou dans des zones de salinité différente, de telle sorte que les larves des êtres qui, à l'état adulte, sont liés aux substrats (par exemple les coraux), vont se fixer dans les zones où l'adulte trouvera les conditions de vie optimales.

Dans un grand nombre de cas, même l'accouplement n'est qu'un phénomène de chimiotropisme positif : les individus d'un sexe répandent dans l'eau des substances chimiques qui attirent irrésistiblement les individus du sexe opposé.

Nous venons de parler essentiellement des êtres unicellulaires et pluricellulaires inférieurs ; il existe cependant de très nombreux cas de tropisme même chez les Insectes, surtout chez les larves, et aussi chez d'autres animaux relativement complexes et évolués.

Ces derniers possèdent un système nerveux simple, excluant tout mouvement volontaire ou conscient ; en effet, la vie de ces êtres est presque totalement dirigée par les tropismes.

Rappelons, en guise d'exemple, les blattes et les larves des Diptères, qui fuient systématiquement la lumière, ou encore la larve du papillon Portesia chrysorrhea, *qui manifeste un phototropisme positif lorsqu'elle est en période de croissance et monte vers la lumière au sommet des arbres, dont les feuilles constituent sa nourriture. Puis, une fois la croissance achevée, elle présente un phototropisme négatif et descend à nouveau vers le sol, où elle se transforme en chrysalide. C'est aussi vers la terre que s'oriente la forficule, ou perce-oreille : on parle alors de géotropisme.*

LES ENZYMES

Les enzymes sont des protéines qui présentent la propriété particulière de jouer le rôle de catalyseurs dans des réactions chimiques déterminées ; celles-ci mettent toujours en cause des substances organiques, soit à l'intérieur, soit à l'extérieur d'organismes vivants. Ces réactions sont indispensables au cycle biologique et à la physiologie du monde vivant. Notons que les enzymes étaient jadis appelées diastases. Les enzymes sont synthétisées au niveau de la cellule par les différents organismes vivants comme toutes les autres protéines ; leur action catalysante, qui peut s'exercer tant à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'organisme producteur, tend à rendre possibles, à une température et à une pression compatibles avec la vie, de nombreuses réactions qui exigeraient en laboratoire des pressions et des températures très élevées.

Les enzymes servent aussi à accélérer certaines réactions qui, en leur absence, se produisent trop lentement pour que les produits qui en résultent soient utiles à l'organisme. Si en effet, pour citer un exemple, il fallait une semaine pour dégrader entièrement en glucose l'amidon ingéré par l'absorption d'une pomme de terre, on comprend facilement que, dans ces conditions, aucun organisme ne pourrait faire face aux exigences d'énergie en cas de besoin.

Le terme d'enzymes par lequel on désigne actuellement ces protéines — terme qui signifie « à l'intérieur du levain » — est dû à Kühne ; auparavant, Pasteur les avait appelées « ferments » et les distinguait en « ferments organiques », situés à l'intérieur de la cellule, tant chez les organismes supérieurs que chez les micro-organismes, et en « ferments solubles », situés à l'extérieur des cellules, dans le suc intestinal et dans les sécrétions glandulaires en général.

Étant des protéines, les enzymes sont formées de chaînes d'acides aminés. Elles se divisent en deux grands groupes : les enzymes constituées de protéines simples, dans lesquelles le « groupement actif » de l'enzyme est étroitement lié à celle-ci, à tel point que si on l'en détache, l'enzyme est inactivée et perd le pouvoir de catalyser la réaction correspondant à sa spécificité ; les enzymes constituées de protéines conjuguées, c'est-à-dire de protéines formées d'un groupement « prosthétique » non spécifique (qui comprend lui-même des molécules variées) et de la protéine proprement dite. Dans ce cas, le groupement prosthétique se confond, dans la quasi-totalité des cas, avec le groupement actif de l'enzyme et prend le nom de coenzyme, tandis que la protéine est appelée apoenzyme. L'enzyme active résulte donc de l'union du coenzyme et de l'apoenzyme.

Très souvent, les groupements prosthétiques contiennent une ou plusieurs molécules de vitamines, substances particulières que l'organisme n'est pas capable de synthétiser et qu'il doit puiser dans les aliments ingérés. Cela démontre à quel point un manque de vitamine peut être grave ; en effet, une telle carence nuirait à la synthèse de certaines enzymes et, par conséquent, empêcherait ou ralentirait toute une chaîne de réactions indispensables au fonctionnement normal de l'organisme. Aujourd'hui on connaît environ 700 enzymes, dont quelques-unes sont communes à tous les êtres vivants, d'autres sont propres aux organismes végétaux et d'autres encore aux organismes animaux.

Naturellement, l'équipement enzymatique des individus varie selon les espèces et dépend aussi du type d'alimentation et des différentes fonctions physiologiques. Enfin, dans chaque organisme, la distribution des enzymes dans la cellule varie selon les tissus et les organes : on trouve certaines enzymes dans la salive (ptyaline), d'autres dans le suc pancréatique (lipases, amylases), d'autres dans le suc gastrique, etc. Notons encore qu'à l'intérieur de la cellule les enzymes ne sont pas libres dans le protoplasme, mais sont contenues dans des organites spéciaux, les lysosomes et les microsomes.

P. Castano

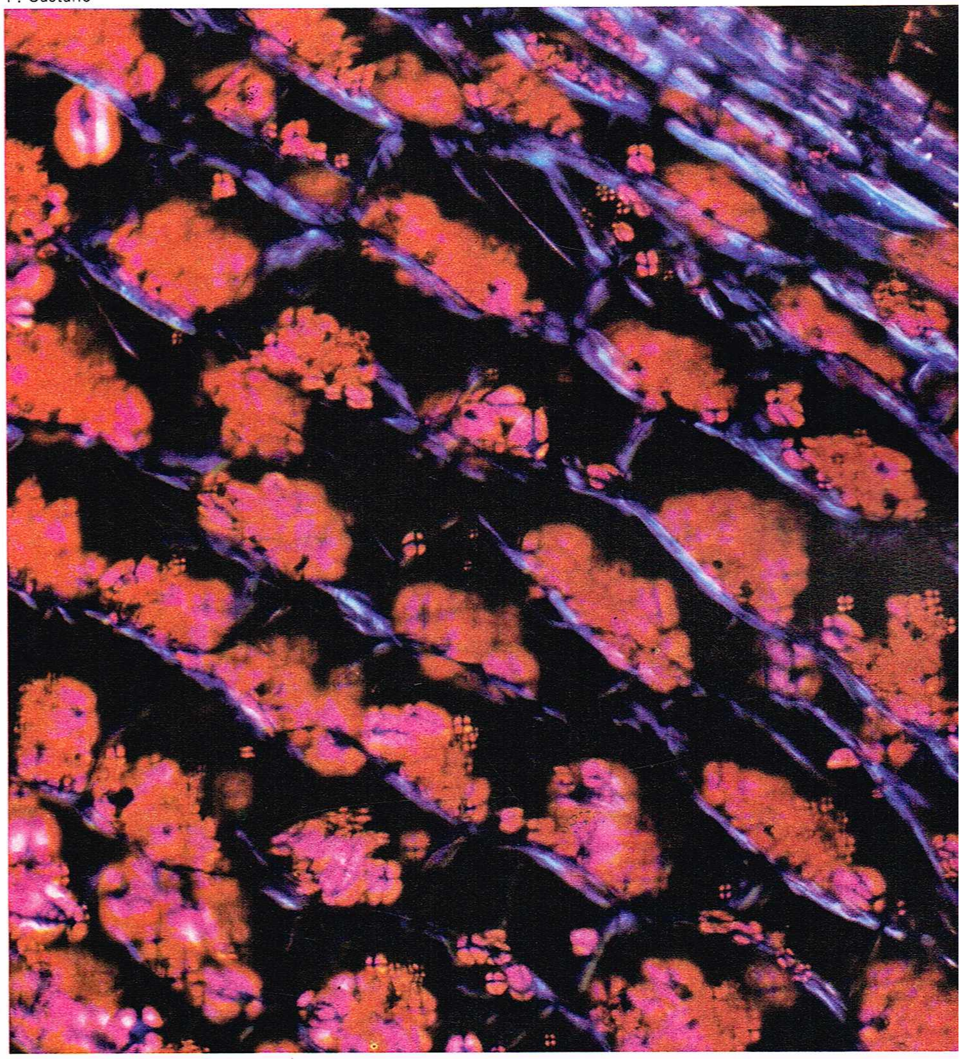

Fragment de tubercule de pomme de terre observé en lumière polarisée : on remarque les nombreux grains d'amidon qui constituent un matériel de réserve pour la plante et un aliment à haut pouvoir énergétique pour l'homme après l'intervention d'enzymes de dégradation spécifiques.

PROPRIÉTÉS DES ENZYMES

Il est évident que, puisqu'il s'agit de protéines, les enzymes possèdent les mêmes propriétés que les protéines dépourvues de pouvoir catalysant ; en particulier, elles sont dénaturées, c'est-à-dire précipitées irréversiblement, par la chaleur au-dessus de 60 °C, par les acides et par les bases fortes. Un des caractères particuliers des enzymes, caractère qui les distingue des autres catalyseurs, est leur spécificité, tant à l'égard du groupement chimique qu'à l'égard du substrat. Cette spécificité peut être absolue ou relative, c'est-à-dire moins exclusive.

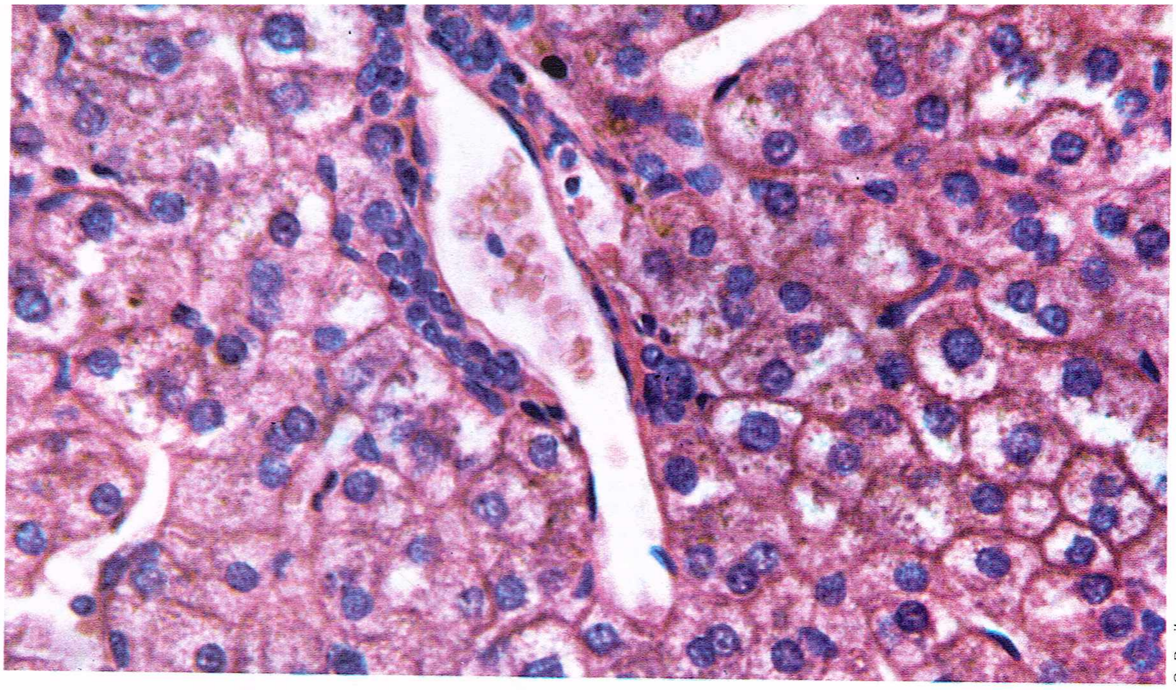
C. Bevilacqua

Section d'un fragment de foie ; outre les cellules hépatiques, on voit une branche de la veine porte. Cette volumineuse glande des organismes animaux élabore des enzymes qui revêtent une importance déterminante dans les phénomènes de la digestion (× 400 × 2) [coloration de contraste].

Ainsi une enzyme peut attaquer seulement un ou, au plus, un petit nombre de groupements ou de liaisons chimiques bien déterminés, et reste parfaitement inactive à l'égard des autres ; par exemple, l'éthanol-déshydrogénase, que l'on trouve dans le foie de cheval, agit sur les alcools ; les amylases attaquent les polysaccharides, la pepsine les liaisons peptidiques, tandis que la trypsine, qui a une spécificité relative, agit aussi bien sur les liaisons peptidiques que, bien que plus lentement, sur les esters.

Souvent, outre la spécificité à l'égard d'un groupe chimique, l'enzyme présente aussi une spécificité de substrat, qui limite l'activité de l'enzyme à un seul, ou à un tout petit nombre de composants du groupe ; il en est ainsi pour certaines aminodécarboxylases, qui n'ont pas le pouvoir de décarboxyler tous les acides aminés, mais seulement quelques-uns d'entre eux.

MODE D'ACTION DES ENZYMES

Le mécanisme d'action des enzymes est assez complexe et implique toujours un abaissement de la différence de niveau énergétique existant entre les molécules normales et les molécules « activées », c'est-à-dire celles présentant une énergie suffisante pour entrer dans la réaction. L'abaissement de la différence de niveau énergétique peut s'obtenir de deux manières : soit en élevant le niveau énergétique de tout le système, ce qui comporte une action énergique, que l'on peut obtenir, par exemple, par chauffage ou par augmentation de la pression, soit en abaissant le niveau énergétique des molécules activées, c'est-à-dire en faisant en sorte que la molécule ait besoin de moins d'énergie pour devenir active.

Les enzymes agissent habituellement en abaissant le niveau énergétique des molécules activées ; à cet effet, elles se lient chimiquement aux molécules à activer, donnant ainsi naissance à un composé intermédiaire, à basse énergie d'activation, qui entre facilement dans la réaction. Une fois achevées toutes les réactions nécessaires, l'enzyme se sépare des molécules des composés issus de la réaction, reprenant ainsi une forme libre et redevenant capable d'agir dans un nouveau processus.

On comprend donc facilement que la vitesse de la réaction enzymatique dépend en grande mesure de la concentration de l'enzyme ; en effet, plus le nombre de molécules d'enzyme est élevé, plus nombreuses seront les molécules de substrat qui s'associeront à l'enzyme et entreront rapidement en réaction. La concentration du substrat influe aussi considérablement sur la rapidité de la réaction enzymatique : en effet, lorsqu'il existe peu de moles (mole = molécule-gramme) de substrat par rapport au nombre de moles de l'enzyme, un grand nombre de celles-ci resteront inactives. Donc l'activité enzymatique sera inférieure au pouvoir enzymatique normal, ce qui aura pour conséquence de réduire la vitesse de réaction. Si l'on augmente la quantité de substrat, toutes les moles de l'enzyme seront utilisées et la vitesse de réaction augmentera, l'enzyme opérant au maximum de ses possibilités. Si l'on augmente encore les moles de substrat, on observe que la vitesse de réaction augmente elle aussi jusqu'à un certain niveau, pour rester ensuite constante, quelle que soit la quantité de substrat ajoutée.

Ce phénomène s'explique par le fait que lorsque toutes les moles de l'enzyme sont liées au substrat et participent à la réaction, l'addition d'une nouvelle quantité de substrat ne peut avoir aucun effet, puisqu'il n'existe plus d'enzyme libre disponible. La courbe qui représente ce phénomène (équation de Michaélis et Menten) a donc une forme logarithmique.

Il est évident que la température et le pH ont également une influence sur la vitesse de réaction enzymatique, puisque chaque enzyme possède un pH et une température assurant un résultat optimal : la température ne doit jamais dépasser 60 °C, sous peine de dénaturation de l'enzyme.

L'enzyme, comme nous l'avons déjà dit, peut être inactivée par une température élevée, par les acides et les bases fortes, mais son action peut aussi se trouver inhibée pendant un certain temps et ne se rétablir que lorsque l'agent inhibiteur aura été éliminé. Les inhibiteurs sont des composés chimiques qui se lient à l'enzyme et l'empêchent d'exercer ses fonctions ; ce sont souvent les produits de la réaction enzymatique qui jouent le rôle d'inhibiteur lorsqu'ils atteignent une certaine concentration. Ce mécanisme d'inhibition a pour effet d'empêcher que l'enzyme ne produise de nouvelles quantités de composé inhibiteur, qui pourraient atteindre parfois des concentrations trop élevées et nuisibles à l'organisme.

Les inhibiteurs peuvent être plus ou moins spécifiques, c'est-à-dire agir sur une seule ou sur plusieurs enzymes.

A l'inverse des inhibiteurs, il existe des activateurs enzymatiques, constitués de différentes substances, elles aussi plus ou moins spécifiques, qui augmentent considérablement l'activité de l'enzyme et qui, dans certains cas, sont même indispensables pour en permettre l'action, comme les cations de magnésium pour la pyruvico-oxydase, le manganèse pour différentes peptidases, le zinc pour l'anhydrase carbonique.

Pour ce qui est de la capacité des organismes de synthétiser les enzymes utiles à leur métabolisme, il faut noter que cette capacité est étroitement dépendante de facteurs génétiques et se transmet par l'hérédité ; cependant, chaque fois que l'organisme se trouve obligé d'utiliser des substances dont la dégradation fait intervenir une enzyme non inscrite dans le génotype de l'individu, ce dernier peut acquérir la capacité de la synthétiser, dans la nécessité d'assurer sa survie. Toutefois ce phénomène se rencontre plus souvent chez les organismes inférieurs et il est très rare, sinon impossible, chez les organismes supérieurs.

L'OSMOSE

L'osmose constitue un des principaux phénomènes indispensables à la vie, tant dans le monde végétal que dans le monde animal : il s'agit d'un mécanisme particulier d'absorption et d'élimination de l'eau et des sels à travers des membranes semi-perméables.

Ce phénomène, qui détermine la plupart des échanges nutritifs des cellules vivantes, se produit mécaniquement, sans l'intervention active de la cellule, donc sans dépense d'énergie ; il est sous la dépendance de la pression que les molécules d'une solution exercent sur la membrane cellulaire, qui joue le rôle de membrane semi-perméable ; cette pression est la pression osmotique.

Les premières études sur la pression osmotique ont été effectuées par le botaniste Pfeffer, qui fit des expériences intéressantes sur les cellules des racines de Tradescantia, Curcuma, Begonia *et d'autres plantes. On sait que ces cellules sont entourées d'une paroi de cellulose, une sorte d'appareil de soutien pour la cellule, cette dernière étant munie à son tour d'une paroi cellulaire normale.*

On connaît également la structure du cytoplasme, qui donne à celui-ci l'aspect d'un liquide aqueux contenant en solution certains colloïdes (substances à aspect gélatineux) ainsi que du glucose et des sels. Les rapports des concentrations du cytoplasme et des liquides extérieurs peuvent être de trois types : 1) la concentration en sels du liquide externe est égale à celle du cytoplasme ; dans ce cas, la solution dans laquelle baigne la cellule est dite isotonique *avec le cytoplasme ; 2) la concentration en sels dans la solution extérieure à la cellule est plus élevée que la concentration du cytoplasme ; dans ce cas, la solution externe est dite* hypertonique *par rapport au cytoplasme ; 3) la concentration saline de la solution externe est plus faible que la concentration du cytoplasme : dans ce cas, la solution externe est* hypotonique *par rapport à la solution cellulaire.*

Si nous plaçons une cellule de racine de Tradescantia *dans une solution isotonique, l'observation microscopique ne montrera aucun changement, car aucun échange ne se produit entre la cellule et la solution extérieure ; si, à l'inverse, nous plaçons la même cellule dans une solution hypotonique, on notera un passage massif d'eau de la solution extérieure vers la cellule, qui se gonflera. Le phénomène contraire se produit lorsqu'on place la cellule dans une solution hypertonique : l'eau sortira rapidement de la cellule, dont la concentration est inférieure, et passera dans la solution de plus forte concentration ; de ce fait, le protoplasme se réduira par déshydratation.*

L'utilisation de membranes semi-perméables artificielles, par exemple de la Cellophane pour les pressions faibles, a fourni des données précises sur la pression osmotique : rappelons seulement qu'une solution de saccharose à 1 % provoque une pression osmotique de 2/3 d'atmosphère.

A la suite de tous ces travaux, Van't Hoff formula la loi qui porte son nom : des volumes égaux de solutions de différentes substances, dans un même solvant, à la même température, et ayant la même pression osmotique, contiennent un nombre égal de molécules dissoutes.

En conclusion, à cause de la pression osmotique qui agit sur une membrane semi-perméable, l'eau passe de la solution moins concentrée vers la solution plus concentrée, jusqu'à ce que les deux solutions deviennent isotoniques.

LA PLASMOLYSE

L'expérience citée de l'immersion d'une cellule de racine de Tradescantia *dans une solution hypertonique met en lumière l'important phénomène de la plasmolyse ; ce phénomène provoque dans la cellule végétale une diminution du volume du protoplasme, qui se détache de la paroi cellulosique, à laquelle il reste uni seulement par quelques brides cytoplasmiques.*

C. Bevilacqua

Filaments pluricellulaires d'une *Tradescantia* : dans la majorité des cellules, on observe le cytoplasme en partie détaché des parois sous l'effet du phénomène de plasmolyse.

En effet, l'eau sort de la cellule placée dans une solution hypertonique et le cytoplasme se réduit, tandis que le cadre cellulosique ne change pas ; on constate ainsi une différence entre les dimensions de la cellule et de l'enveloppe cellulosique qui auparavant coïncidaient parfaitement.

Si la durée de la plasmolyse n'est pas trop prolongée, on peut faire revenir la cellule à ses dimensions normales en la plaçant dans de l'eau distillée ou dans un milieu hypotonique ; on assiste alors au phénomène inverse : l'eau passe du milieu hypotonique vers l'intérieur de la cellule, qui reprend ses dimensions normales.

Il arrive parfois que la cellule revienne à ses dimensions normales, tout en restant dans un milieu hypertonique ; ce phénomène, assez singulier, est dû au fait que la cellule, pour se défendre contre la plasmolyse, commence à élaborer des substances salines qui augmentent la pression osmotique du milieu cellulaire, rendant ainsi

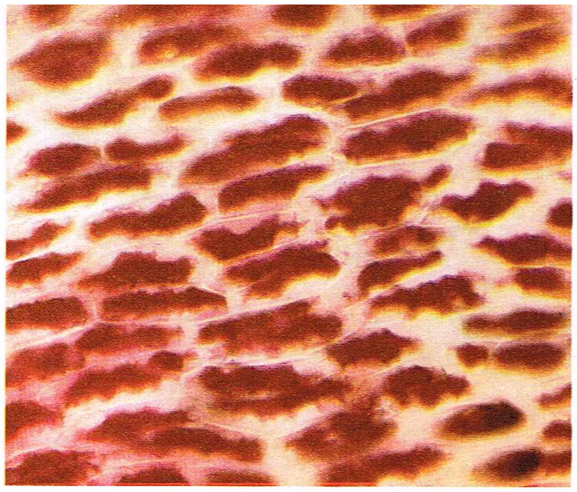

A gauche : cellules d'un tissu végétal à l'état normal ; à droite : les mêmes cellules ayant subi la plasmolyse, provoquée par une solution de chlorure de sodium (× 250 × 1,5) [coloration de contraste].

moins grande la différence de concentration entre milieux extérieur et intérieur ; il s'ensuit la pénétration d'une certaine quantité d'eau et, bien que faible, celle-ci est suffisante pour donner à la cellule un aspect moins « rabougri ».

En outre, une petite partie des sels dissous dans le milieu hypertonique parvient lentement à pénétrer dans la cellule, élevant encore sa pression osmotique et provoquant une pénétration ultérieure d'eau.

Le terme de plasmolyse s'applique aussi au phénomène inverse de celui que nous venons de décrire et qui consiste en la rupture de la paroi plasmatique, et même de l'enveloppe cellulosique, à cause du gonflement excessif de la cellule, gonflement qui se produit lorsque la cellule, placée en milieu hypotonique, absorbe une quantité d'eau excessive, attirée par la pression osmotique du cytoplasme, supérieure à la pression du liquide extérieur.

Même dans ce cas, du moins tant que la rupture des parois ne s'est pas produite, la cellule a la possibilité de revenir à l'état normal si on la place en milieu hypertonique de manière à provoquer la sortie de l'eau en excès.

Le règne animal nous offre aussi des exemples de phénomènes analogues à ceux observés chez les végétaux. Rappelons à ce propos que la paroi cellulaire des globules rouges du sang fonctionne comme une membrane semi-perméable lorsque le globule rouge est placé dans l'eau distillée ou dans une solution hypertonique.

Ainsi, en faisant tomber des gouttes de sang dans l'eau, on note que celle-ci rougit uniformément à cause de l'hémoglobine libérée par les érythrocytes qui éclatent sous l'effet de l'excès d'eau absorbée du milieu hypotonique.

Les globules rouges se trouvent donc suspendus, en même temps que les autres éléments figurés du sang, dans une solution physiologique à 0,91 % de chlorure de sodium ; cette solution doit être donc parfaitement isotonique avec leur cytoplasme, car des concentrations salines supérieures provoqueraient une déshydratation importante du globule rouge, qui prendrait un aspect rabougri.

Les phénomènes dont nous venons de parler sont largement exploités en laboratoire pour les techniques de culture in vitro *; dans de nombreux cas, les cellules à examiner sont laissées tout d'abord pendant un certain temps dans une solution hypotonique, soigneusement dosée, afin de rendre les cellules plus turgescentes, donc plus facilement observables.*

L'IMPORTANCE DE L'OSMOSE POUR LA VIE

On sait que la vie, du moins telle qu'elle existe sur notre planète, est étroitement liée à l'eau, aucun organisme ne pouvant survivre en l'absence absolue d'eau.

L'eau est absorbée par les cellules par osmose, proportionnellement aux quantités de sels dissous dans le protoplasme.

Depuis les Bactéries et les Protozoaires, qui, étant unicellulaires, sont en rapport osmotique direct avec l'eau, qui en constitue le milieu vital, jusqu'aux végétaux supérieurs, qui absorbent l'eau du sol par osmose par l'intermédiaire des cellules de la racine, et aux animaux supérieurs, chez lesquels ce processus est, à première vue, moins évident, l'eau est toujours présente.

L'eau ingérée par l'animal, qu'elle soit libre ou liée aux aliments, est absorbée par les villosités intestinales, passe dans la lymphe et, à travers les capillaires lymphatiques, dans les espaces cellulaires des tissus, d'où, enfin, elle est absorbée par osmose par chaque cellule.

RÉGULATION OSMOTIQUE

Le problème des échanges d'eau entre milieu externe et milieu interne ne se pose pas pour les animaux qui vivent sur la terre ou dans l'air. En revanche, ce problème revêt une très grande importance pour les animaux qui vivent dans un milieu liquide, car ils pourraient perdre ou absorber continuellement de l'eau, soit à travers les téguments, soit à travers les branchies, selon que le milieu externe est hypertonique ou hypotonique par rapport au milieu interne.

Les Invertébrés marins présentent habituellement des liquides internes isotoniques avec l'eau de mer et, partant, ne sont sujets ni à des pertes d'eau, ni à des absorptions massives à partir du liquide extérieur. La concentration saline dans les liquides internes de ces animaux n'est pas constante, mais varie dans certaines limites en fonction des variations du milieu.

Les Vertébrés, et quelques rares Invertébrés, ont au contraire une concentration saline des liquides internes assez constante, et donc relativement indépendante de celle du milieu extérieur, grâce au pouvoir de régulation osmotique qui leur permet de contrôler activement les échanges d'eau. Notons, par exemple, que, parmi les Poissons téléostéens, il existe des espèces d'eau douce et des espèces d'eau marine, mais tous sont capables de maintenir constante la concentration saline de leurs liquides internes, en dépit de la différence considérable des deux milieux. Les premiers vivent dans un milieu hypotonique et possèdent des reins capables d'éliminer l'énorme excédent d'eau introduit par osmose ; les seconds doivent au contraire retenir le plus d'eau possible et possèdent des reins capables d'éliminer peu d'eau et beaucoup de sels par une urine presque solide.

En outre, ces Poissons présentent des revêtements muqueux importants, qui empêchent les échanges osmotiques par voie cutanée. C'est le cas de l'anguille, qui passe sans dommage du milieu marin au milieu fluvial : si elle était dépourvue d'un revêtement muqueux, elle ne serait pas capable de supporter ces différences de salinité.

La régulation osmotique est une condition essentielle de survie pour tous les organismes qui vivent dans l'eau ; c'est le cas notamment des méduses : ici *Cladonema radiatum*.

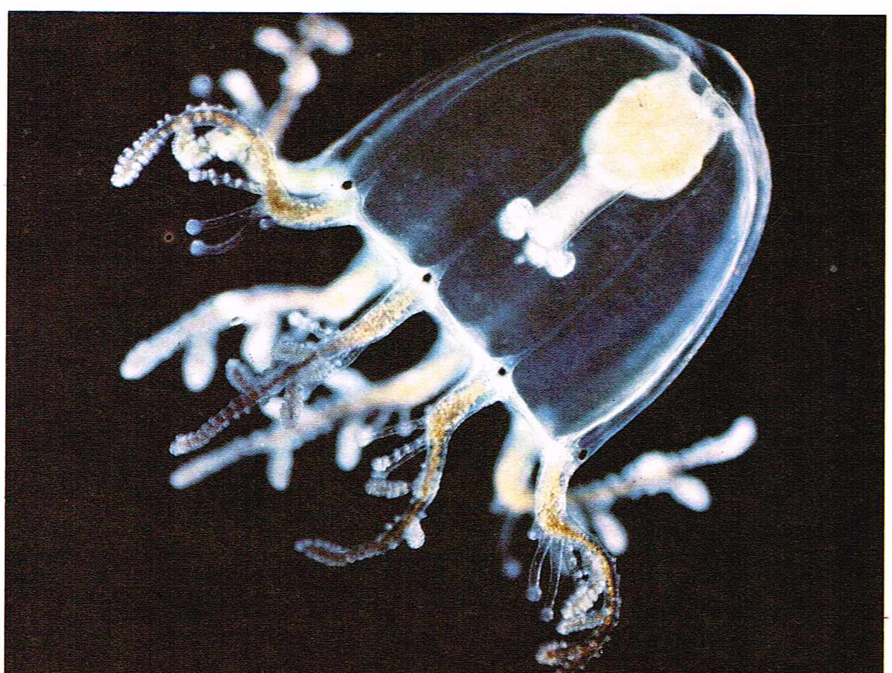

MITOSE ET AMITOSE

C. Bevilacqua

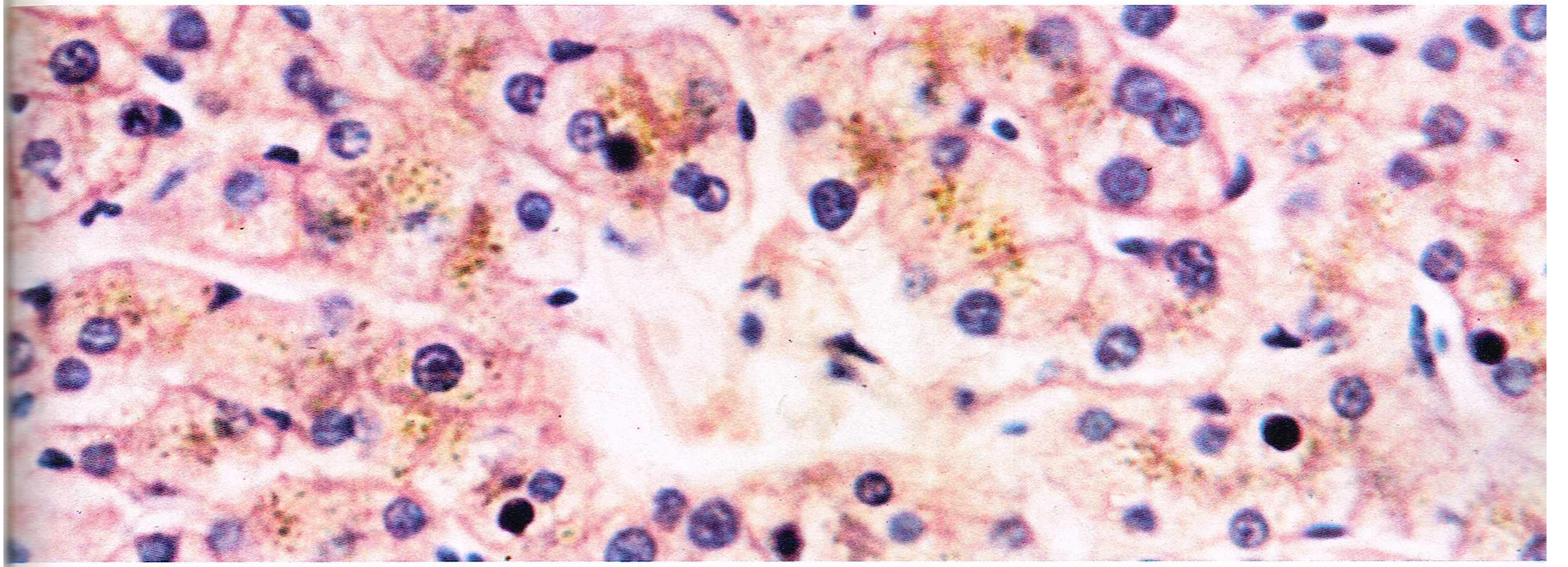

Fragment de foie vu au microscope; il est constitué d'un très grand nombre de cellules, les cellules hépatiques, qui se reproduisent par mitose.

Il est bien connu que chaque cellule dérive d'une cellule semblable, que les êtres unicellulaires se multiplient, avec ou sans accouplement, par scission en deux ou plusieurs parties de la cellule initiale, que l'homme lui-même, dans sa complexité, est formé d'un ensemble de cellules dérivées par divisions successives d'une cellule unique, l'œuf.

Si nous nous penchons maintenant sur les modalités de division des cellules, nous observerons qu'il existe deux types de reproduction cellulaire : le premier, direct, et appelé amitose, *est très rare ; le second, indirect, est désigné sous le nom de* mitose *et s'observe chez la quasi-totalité des organismes végétaux et animaux.*

L'amitose est un processus très simple, un peu imparfait, auquel la nature a rarement recours : les cellules filles qui naissent d'une division amitotique ne sont parfaitement égales ni entre elles, ni avec la cellule mère. Si, par hypothèse, on envisageait ce mode de reproduction pour les cellules de la peau chez l'homme, il s'ensuivrait, comme on peut facilement le comprendre, un défaut de continuité très préjudiciable du tissu cutané.

L'amitose se déroule selon un processus très simple : la cellule qui va se diviser s'étire lentement, pendant que le noyau, qui s'est placé entre-temps au centre de la cellule (s'il était excentrique), subit lui aussi une élongation. Il apparaît ensuite un étranglement central qui donne au noyau et à la cellule en général une forme caractéristique « en biscuit » ; cet étranglement s'accentue ensuite dans le noyau jusqu'à la coupure de ce dernier en deux parties qui s'éloignent l'une de l'autre ; lorsque les deux noyaux se sont séparés, tout le cytoplasme se divise à son tour selon les mêmes modalités jusqu'à ce que les deux cellules filles soient parfaitement individualisées.

La division par amitose est très connue chez les amibes, et se produit aussi, de manière différente, dans le macronucléus des Protozoaires Ciliés ou Infusoires. Rappelons que ces organismes possèdent deux noyaux : un micronucléus, qui joue un rôle dans la reproduction et se divise par mitose, et un macronucléus, à rôle nutritif, et qui se divise précisément par voie directe. Les cellules des tumeurs et des cicatrices des animaux supérieurs se divisent aussi par amitose.

L'APPAREIL MITOTIQUE

La mitose, appelée aussi caryocinèse, est un phénomène beaucoup plus complexe que celui que nous venons de décrire. Il intéresse pratiquement toute la cellule du fait que les éléments nucléaires envahissent une bonne partie du cytoplasme. L'appareil mitotique y joue un rôle très important. Cet appareil est un ensemble d'organites cellulaires qui normalement ne sont pas visibles dans la cellule au repos, et qui deviennent observables uniquement au cours de la division cellulaire ; cependant, il a été possible d'observer l'appareil mitotique dans certaines cellules au repos et l'on a pu décrire un certain nombre de structures différenciées. Au centre, on trouve un centriole, ou même très souvent deux centrioles, à tel point que certains auteurs pensent que le double centriole est la règle. Autour du centriole existe une région dite centrosome, entourée à son tour d'une bande plus dense, la centrosphère, d'où se détache une couronne de rayons appelée aster ou astrosphère. La structure du centriole a été minutieusement étudiée au microscope électronique : il apparaît formé d'un petit cylindre vide, doté intérieurement d'une paroi très épaisse, où l'on reconnaît de nombreux tubules de dimensions fort réduites, unis entre eux par paires ou par triplets.

LA MITOSE

*Avant de décrire schématiquement les différentes phases de la division mitotique, rappelons brièvement le processus très important de la duplication de l'*ADN *(acide désoxyribo-nucléique) des chromosomes, phénomène qui se produit pendant l'interphase, c'est-à-dire lorsque la cellule est au repos.*

Il est facile de comprendre que si l'ADN contenu dans les chromosomes ne subissait pas cette duplication avant la division cellulaire, les cellules filles seraient porteuses de chromosomes contenant la moitié de l'ADN ou bien la moitié du nombre initial de chromosomes ; dans un

G.S. Giacomelli

Un très petit fragment, ne comprenant que six cellules, de l'extrémité végétative de l'ail : les principales phases de la mitose sont nettement visibles.

cas comme dans l'autre, ils ne seraient pas identiques à ceux de la cellule mère. Si une division de ce type se perpétuait, la quantité d'ADN diminuerait en l'espace de quelques reproductions, ce qui serait tout à fait contraire à l'équilibre caractéristique des processus naturels.

La molécule d'ADN se fissure longitudinalement en deux parties, dont chacune reconstitue l'autre moitié de la molécule non pas identiquement à elle-même mais à la moitié qui s'est détachée, de telle manière que les deux nouvelles molécules sont parfaitement identiques à la molécule initiale.

Donc, au début de la division cellulaire, chaque chromosome contient un nombre double de filaments d'ADN. On peut schématiquement reconnaître dans la mitose cinq, ou, selon certains auteurs, quatre phases : la prophase, la métaphase, l'anaphase et la télophase.

Au cours de la prophase, *les chromosomes, tout en demeurant encore à l'intérieur du noyau, qui conserve sa membrane et sa structure, commencent à devenir visibles sous forme de longs filaments enchevêtrés, qui s'individualisent lentement et se raccourcissent par spiralisation. A ce moment, chaque chromosome est formé de deux parties non encore visibles, les deux chromatides. Chacune de ces parties contient une quantité d'ADN égale à celle d'un chromosome normal interphasique ; il convient en effet de se rappeler que la duplication de l'ADN s'est déjà produite et que, de ce fait, chaque chromosome en porte une quantité double.*

Au cours de la métaphase, *le nucléole est encore visible, et les centrioles, qui, s'étant préalablement dédoublés, sont maintenant au nombre de quatre, migrent par paires vers les pôles de la cellule.*

Dans un premier temps, le nucléole et la membrane nucléaire disparaissent, tandis que les centrioles, qui se trouvent aux pôles opposés de la cellule, sont reliés par les fibres du fuseau mitotique, *c'est-à-dire par de minces fibrilles qui s'étirent par paires ou par groupes d'un centriole à l'autre, ou d'un centriole aux chromosomes, donnant lieu à la formation d'une figure fusiforme, à l'intérieur de laquelle le cytoplasme apparaît clair et dépourvu de mitochondries. Les chromosomes sont alors bien individualisés et se disposent de manière ordonnée autour des fibres du fuseau mitotique.*

Puis les centrioles ainsi que les fibres du fuseau deviennent nettement visibles tandis que les chromosomes se disposent tous sur un plan médian perpendiculaire à la ligne joignant les deux centrioles ; leur centromère (c'est-à-dire le sommet de l'angle que forme chacun), relié aux centrioles par les fibres chromosomiques, est tourné vers le centre du fuseau mitotique et les télomères (autrement dit leurs parties terminales) vers l'extérieur.

La figure caractéristique qui résulte de cette disposition des chromosomes est appelée plaque équatoriale ; *du point de vue expérimental, elle revêt une grande importance, car en observant la cellule de l'un des deux pôles au cours de la métaphase, on peut examiner parfaitement les chromosomes afin d'en connaître la forme et le nombre. Ces deux éléments sont très importants tant pour la classification de l'individu à qui appartient la cellule examinée, que pour la découverte d'éventuelles anomalies, c'est-à-dire de la présence de chromosomes en surnombre ou ayant une forme aberrante, comme cela se produit, par exemple, dans les cas de mongolisme, chez l'homme.*

*La métaphase s'achève lorsque les centromères des chromosomes, qui se sont déjà dédoublés au cours de l'interphase, commencent à se séparer. L'*anaphase *débute lorsque les deux centromères sont nettement séparés. A ce moment, le chromosome tout entier commence à se scinder dans le sens longitudinal depuis le centromère jusqu'au télomère, jusqu'à ce que les deux chromatides, transformées maintenant en véritables chromosomes, soient devenues totalement indépendantes l'une de l'autre. Les fibres du fuseau commencent alors à se raccourcir, entraînant vers le centriole les chromosomes fils, attachés par leur centromère aux fibres chromosomiques ; de la sorte, une moitié de chacun des chromosomes existant dans la cellule avant la division va vers un pôle, l'autre moitié vers le pôle opposé de la cellule.*

C'est alors que commence la télophase, *au cours de laquelle se produit la division du cytoplasme au niveau du plan médian, appelé plan équatorial. Pendant que se produit, avec une certaine lenteur, ce phénomène de division du cytoplasme, les chromosomes, situés toujours à proximité des centrioles où ils ont migré durant l'anaphase, se déspiralisent, deviennent longs et minces et s'enchevêtrent les uns avec les autres au point de perdre leur identité propre, tandis qu'autour d'eux se forme une membrane nucléaire et que le nucléole réapparaît ; pendant ce temps, les centrioles reprennent l'aspect d'appareils mitotiques, tel que nous l'avons décrit plus haut. Après la division totale du cytoplasme, les deux cellules filles peuvent être considérées comme achevées et leur noyau présente exactement l'aspect du noyau normal interphasique.*

Selon la nature du tissu, les cellules qui se sont ainsi formées peuvent présenter une nouvelle duplication de l'ADN et amorcer une nouvelle mitose, ou bien élaborer des substances de nature diverse, comme la sécrétion des cellules glandulaires. Quant aux causes qui, à un moment donné, conduisent une cellule à la duplication de son ADN et à sa scission, aucune des nombreuses hypothèses formulées par les chercheurs ne s'est révélée satisfaisante : les unes soutiennent que le phénomène de la duplication de l'ADN est sans motif, les autres attribuent le phénomène de division à l'augmentation excessive du volume de la cellule sans une augmentation corrélative de sa surface.

GÉNÉTIQUE ET CARACTÈRES HÉRÉDITAIRES

I.G.D.A.- C. Dani

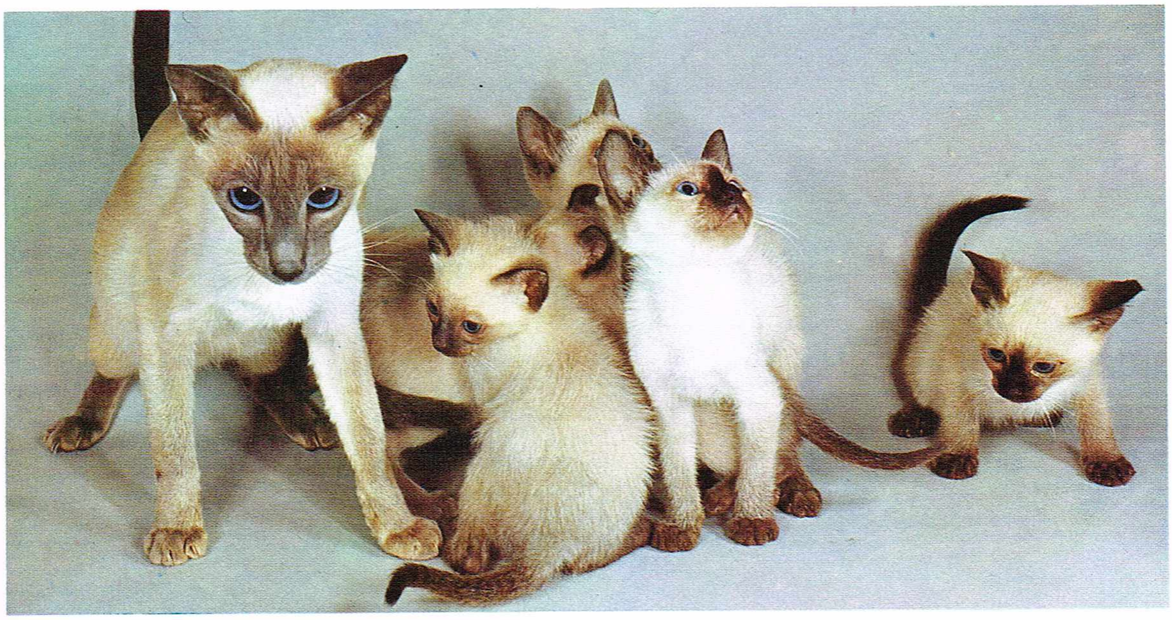

D'après la loi de la transmission des caractères héréditaires, les descendants conservent les caractéristiques des géniteurs. On voit, ci-dessus, une portée de chatons siamois, tous remarquablement semblables à leur mère.

Après avoir démontré l'absence de tout fondement à la théorie de la génération spontanée, même pour les êtres les plus simples, les savants qui soutenaient que tout être vivant est engendré par un être semblable se trouvèrent devant l'immense problème de la détermination des règles de transmission des caractères héréditaires. Il était certes évident qu'un chat donne naissance à un chat, une fourmi à une fourmi, un couple de chats siamois à un chat siamois, des parents blonds à un enfant blond (sauf exceptions).

Mais le nombre très élevé des caractères transmissibles par les géniteurs à leurs « produits » et la constatation du fait que la transmission peut s'opérer en sautant une ou plusieurs générations imposaient une analyse très minutieuse des lois de l'hérédité, analyse qui se révéla dès le début extrêmement difficile.

La génétique, science qui étudie les règles de la transmission des caractères héréditaires, reconnaît à juste titre pour père le moine autrichien Gregor Mendel (1822-1884), premier savant qui se consacra activement à cette branche de la biologie.

LES LOIS DE MENDEL

Mendel découvrit les trois lois fondamentales de la génétique et c'est sur la base de ces lois que tous les autres savants fondèrent leurs recherches, ce qui aboutit à une connaissance de plus en plus précise du mécanisme de l'hérédité.

Mendel opéra selon une méthode entièrement expérimentale sur des variétés de pois présentant au plus haut degré le pouvoir de se croiser entre elles : elles ne différaient les unes des autres que par un petit nombre de caractères bien apparents. Il décida de croiser opportunément ces variétés et limita au début son étude à un seul caractère, afin de déterminer le mécanisme de transmission aux générations successives.

Il réalisa donc l'hybridation d'un pied de pois à fleurs blanches avec un pied à fleurs rouges et obtint, à la première génération (F_1), des plantes possédant toutes des fleurs rouges : c'est la loi de l'uniformité des hybrides de la première génération.

Ceux-ci, croisés à leur tour entre eux, produisirent (F_2) 25 % de pieds à fleurs blanches et 75 % de pieds à fleurs rouges : en fait, les 2/3 de ces 75 % possèdent, à l'état « caché », le caractère blanc ; il en était de même des F_1.

Mendel réalisa également un grand nombre d'autres expériences portant sur d'autres caractères (pois à grains lisses ou ridés, jaunes ou verts) et parvint à la conclusion générale que, dans chaque couple de caractères appelés allèles, l'un des deux est dominant, c'est-à-dire qu'il apparaît chez tous les hybrides de première génération, « masquant » l'autre caractère caché, récessif, qui réapparaît cependant chez 25 % des individus de la deuxième génération.

La troisième loi de Mendel concerne la ségrégation des gènes ; ces derniers, qui sont les parties des chromosomes supportant les caractères héréditaires, n'étaient pas connus de Mendel, qui en devina seulement la présence. Chaque couple de caractères allèles est formé de deux gènes qui siègent sur chacun des chromosomes homologues. Le nombre des caractères transmissibles est très élevé : certains n'apparaissent pas extérieurement chez l'individu, car, étant récessifs, ils sont effacés par le caractère dominant normal.

La loi de la ségrégation des gènes définit la possibilité que possède un caractère de se transmettre comme caractère pur, indépendamment des autres. Ainsi, Mendel, en croisant des pois à fleurs blanches avec des pois à fleurs rouges, obtint à la première génération des hybrides rouges et aucune fleur de teinte intermédiaire, et, à la deuxième génération, des fleurs rouges et blanches dans un rapport défini.

Cependant, dans certains cas, on peut avoir une première génération d'hybrides de couleur intermédiaire ; par exemple, en croisant des mufliers (ou gueules-de-loup) rouges avec des mufliers blancs, on obtient à la génération

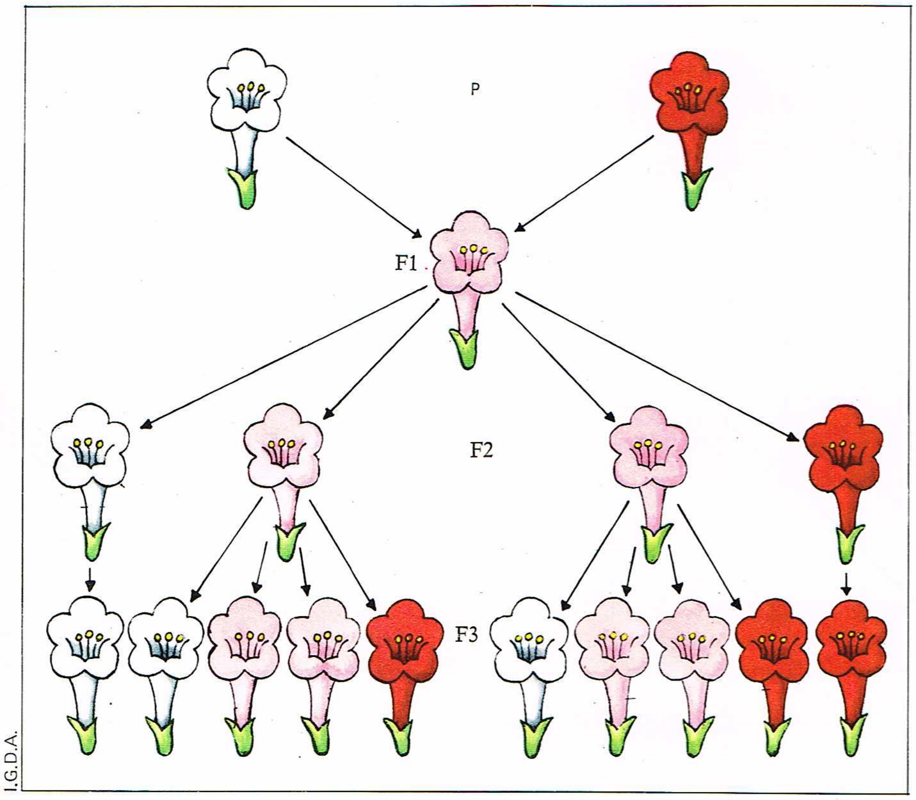

Ci-dessus : illustration d'une des lois de Mendel par l'hybridation des fleurs de belles-de-nuit *(Mirabilis jalapa)*; p, individus originels; F_1, F_2, F_3, trois générations d'hybrides.

F_1 uniquement des fleurs roses, tandis qu'à la génération F_2 on a 25 % de fleurs rouges, 50 % de fleurs roses et 25 % de fleurs blanches ; cela se produit non en contradiction avec la loi de ségrégation des gènes, mais en raison de l'absence de dominance de l'un ou l'autre des gènes.

Les trois lois de Mendel constituent, comme nous l'avons dit, les bases de la génétique moderne ; voici maintenant un rappel sommaire de quelques données mises en évidence par les théories les plus récentes et qui illustrent le mécanisme de transmission d'un gène.

Chez l'homme, on le sait, chaque cellule comprend 44 chromosomes répartis en paires identiques, et deux autres chromosomes, les chromosomes sexuels, identiques chez les filles (XX), et différents chez les garçons (XY). Sur chaque paire de chromosomes homologues, il existe des couples de gènes, dont chacun est porteur d'un caractère donné. En réalité, le phénomène est beaucoup plus complexe que ne l'indique notre exposé élémentaire, mais il est utile de raisonner sur un schéma simplifié, plus facile à appliquer aux différents cas, tout en étant assez proche de la réalité.

TRANSMISSION DE GÈNES NORMAUX

Si l'on prend en guise d'exemple la couleur des yeux, nous aurons deux gènes, dont un qui détermine la couleur foncée de l'iris, et que nous désignerons par la lettre A ; celui-ci est dominant par rapport au gène a, récessif, qui détermine la couleur claire de l'iris. Si chacun des deux chromosomes homologues comporte un gène A, l'individu sera homozygote AA et aura des yeux foncés ; si, au contraire, on est en présence de deux gènes aa, l'individu sera encore homozygote pour le caractère récessif et aura les yeux clairs.

Dans le cas de l'individu possédant un gène A et un gène a, nous aurons un hétérozygote aux yeux foncés, car la couleur foncée est dominante, mais il pourra transmettre à ses descendants le gène a caractéristique des yeux clairs.

Lors de la formation dans l'organisme des cellules sexuelles, contenant chacune la moitié (n) *des chromosomes des cellules ordinaires* (2 n), *les deux chromosomes homologues se séparent et par conséquent chacun des gamètes ne conserve qu'un seul des deux gènes détenus par l'individu. Si les parents sont tous les deux AA, on aura nécessairement des gamètes et, bien sûr, des enfants AA ; ce même phénomène se produit évidemment aussi dans le cas de parents tous les deux aa.*

Si, à l'inverse, un des parents est AA et l'autre aa, les gamètes qui s'uniront porteront chacun un gène différent et les enfants seront tous hétérozygotes Aa.

Les cas les plus intéressants s'observent à la deuxième génération. En effet, si un individu Aa s'unit à un autre individu Aa, tous les deux aux yeux sombres, mais porteurs du gène a, on aura 25 % d'enfants aux yeux clairs, issus de la rencontre des gamètes a, 25 % d'enfants aux yeux sombres AA et enfin 50 % d'enfants Aa, qui seront eux aussi hétérozygotes.

En revanche, si le parent Aa s'unit avec un homozygote aa, 50 % des enfants seront Aa, et les 50 % restants aa ; si ce même parent Aa est couplé avec un homozygote AA, on aura 50 % d'enfants Aa et 50 % AA. On appelle génotype la garniture chromosomique d'un individu et phénotype l'aspect extérieur de celui-ci.

Sur ce mécanisme de base interfèrent des phénomènes d'interaction entre gènes de dominance incomplète ou bien des phénomènes liés au fait que les caractères sont déterminés par deux ou plusieurs couples de gènes ; cela explique l'apparition de toutes les formes intermédiaires (yeux gris, verts, marron), toujours conformément à la loi de la ségrégation des gènes.

LES GÈNES LÉTAUX ET LES MUTATIONS

C'est d'après ce même mécanisme que se transmettent aussi de nombreuses maladies de caractère héréditaire, comme la thalassémie ou maladie de Cooley, qui intéresse les globules rouges : les individus sains ont, pour ce gène, le génotype homozygote TT, tandis que les individus tt ne sont pas viables et meurent dans la première enfance. Les individus hétérozygotes Tt, le gène T des globules rouges normaux étant dominant, seront en parfaite santé, mais ils pourront avoir des enfants non viables de l'union avec un autre individu Tt.

Il existe aussi des gènes « sublétaux », comme le gène du rétinoblastome, une maladie des yeux, qui est dominant et provoque la maladie, presque toujours mortelle, chez les individus hétérozygotes Aa ; les individus normaux présentent le génotype aa. L'apparition d'un gène létal dominant est due à une mutation, c'est-à-dire à la transformation qui se produit dans le chromosome au niveau du gène considéré. Ces transformations sont toujours très complexes et souvent insuffisamment élucidées : elles peuvent être dues à des causes internes ou à des facteurs externes. On sait, par exemple, que les rayons X et les rayons ultraviolets sont responsables de mutations, bien qu'on ne puisse encore préciser la nature et l'importance de ce phénomène.

L'HÉRÉDITÉ LIÉE AU SEXE

L'étude de la transmission des gènes qui siègent sur les chromosomes sexuels est très importante en génétique. Étant donné que le sexe de l'homme est déterminé par la présence de deux hétérochromosomes (un chromosome X et un chromosome Y), tandis que chez la femme les deux chromosomes sont identiques XX, il est évident qu'un gène situé sur le chromosome Y sera transmis uniquement aux mâles, alors qu'un gène porté par le chromosome X ne sera représenté qu'une seule fois chez les mâles.

Ce mécanisme se complique du fait que le père transmet le chromosome X aux filles et le chromosome Y aux garçons, tandis que la mère transmet un chromosome X tant aux garçons qu'aux filles.

Ainsi, dans le cas du gène du daltonisme, qui se trouve sur le chromosome X, toutes les filles seront porteuses de ce gène à l'état hétérozygote Dd si le père est daltonien, tandis que tous les garçons seront sains ; si, au contraire, c'est la mère qui est daltonienne, tous les garçons seront daltoniens (du fait qu'ils possèdent un seul gène d sur le chromosome X) et toutes les filles hétérozygotes Dd.

LES MUTATIONS

Archives P2

Les enfants aux yeux bleus naissent de deux individus qui portent tous les deux le gène « yeux bleus ».

Lors de la reproduction cellulaire, chaque chromosome du noyau se divise en deux et, de ce fait, chacun des gènes qu'il porte reproduit exactement une réplique de lui-même destinée au chromosome en voie de formation. Dans la plupart des cas, ces copies sont parfaitement identiques au gène originel; cependant, il peut arriver que, sous l'influence de facteurs externes ou internes, un gène ne produise pas une copie parfaitement identique et que des différences apparaissent par rapport au modèle.

Ce phénomène, extrêmement important en génétique, prend le nom de mutation génique; il peut survenir dans n'importe quelle cellule en voie de reproduction, dans un organisme animal ou végétal, et à n'importe quel stade de développement.

Outre les mutations géniques, qui peuvent intéresser un ou plusieurs gènes, toujours isolément considérés, il existe aussi des mutations chromosomiques qui intéressent un chromosome tout entier; en effet, il arrive qu'un chromosome, au lieu de se diviser en deux, subisse un processus de « triplication », qui engendre trois chromosomes; il peut arriver aussi que la duplication ne se produise pas du tout, ou qu'un chromosome perde une de ses parties ou même qu'il échange une partie avec un autre chromosome.

Ces différents cas ne sont cités qu'à titre d'exemple, car ils sortent du sujet que nous nous proposons de traiter ici : les mutations géniques proprement dites.

Comme nous l'avons dit, une mutation génique peut survenir à tout moment de la vie d'un organisme et dans toute cellule capable de se reproduire; les cellules nerveuses d'un homme adulte, qui ont perdu la faculté de se reproduire, ne sont pas susceptibles de présenter un tel phénomène, à moins que n'apparaisse un état pathologique ou une stimulation externe particulière imposant à la cellule une mitose forcée.

L'examen des différents cas dans lesquels une mutation peut se produire nous montre que celle-ci peut intéresser n'importe quelle cellule somatique, c'est-à-dire non génitale; dans ce cas, les cellules qui dériveront de celle-ci par mitoses (ou divisions) successives, présenteront le nouveau caractère. Il en est ainsi d'une tache de couleur différente sur le pétale d'une fleur, phénomène constaté fréquemment.

La mutation peut intéresser aussi une cellule embryonnaire : dans ce cas, toute la partie de l'organisme issue de cette cellule portera le caractère mutant; un tel individu est dit « mosaïque », en raison de l'hétérogénéité de son lot de chromosomes (génotype).

Les plus importantes des mutations sont celles qui surviennent chez le gamète mûr, c'est-à-dire le spermatozoïde ou l'ovule. Si la mutation est compatible avec la vie, le gamète engendrera un être qui présentera un gène mutant dans toutes ses cellules.

Si le gène mutant est récessif par rapport au gène normal, l'individu qui naîtra sera extérieurement normal et le caractère mutant restera latent; à l'inverse, si le caractère mutant est dominant, l'anomalie sera apparente chez le nouveau-né. Le problème de la dominance ou de la récessivité d'un gène mériterait un certain développement; nous nous contenterons de rappeler brièvement le cas d'une mutation survenue en Angleterre, vers la fin du dix-huitième siècle, dans un troupeau de brebis : le berger Seth Wright constata qu'un couple d'ovins parfaitement normaux avaient donné naissance à un agneau curieux, présentant des pattes très courtes et tordues, mais par ailleurs parfaitement sain. Cet agneau fut utilisé comme reproducteur et tous les petits engendrés par lui conservèrent ce même caractère singulier, considéré comme très intéressant par les bergers car ces ovins étaient incapables de s'enfuir en sautant par-dessus les enceintes en pierre qui étaient alors en usage.

LES MUTATIONS CHEZ L'HOMME

Chez l'homme aussi, des mutations apparaissent avec une certaine fréquence; il est évident que dans ce domaine il n'est pas possible de se servir de certains moyens d'étude utilisés habituellement chez les animaux ou les végétaux, parmi lesquels, très important, le croisement entre frères et sœurs, qui permet de mettre en évidence les caractères récessifs.

En raison de cette impossibilité de procéder par voie expérimentale dans le cas de l'homme, les mutations ne peuvent être observées que lorsqu'elles surviennent spontanément, c'est-à-dire dans les deux cas généraux de gènes dominants qui provoquent des anomalies graves ou des maladies héréditaires, ou bien dans le cas de gènes récessifs qui se manifestent lorsque des enfants naissent de deux individus qui portent tous les deux un gène mutant, par exemple celui de l'albinisme; dans ce cas, le gène mutant apparaîtra chez 25 % des enfants.

A propos de l'albinisme, rappelons qu'il s'agit d'une mutation génique entraînant pour l'individu la perte de la capacité de synthétiser la mélanine, pigment responsable de la coloration de la peau, des yeux, des cheveux. Cette mutation apparaît spontanément avec une fréquence de l'ordre de 28 par million de gamètes chez les individus issus de parents normalement pigmentés; sa transmission héréditaire s'opère comme pour un gène récessif normal. D'autres mutations également récessives sont la cécité totale pour les couleurs, dont le taux de fréquence est toujours de 28 par million, l'idiotie amaurotique infantile et l'ichtyose (11 par million) et la microphtalmie (15 par million).

Parmi les mutations dominantes que l'on rencontre chez l'homme, les plus connues sont l'achondroplasie, une sorte de nanisme non létal (42 cas par million de gamètes), l'anomalie de Pelger (80 cas), l'aniridie (5 cas), le rétinoblastome (semi-létal, 23 cas).

L'hémophilie, enfin, est une mutation récessive fort connue, liée au sexe et portée par le chromosome X : elle provoque l'incoagulabilité du sang exposé à l'air. Cette maladie apparaît chez les individus mâles, chez lesquels la présence d'un seul chromosome X permet au gène de se manifester, bien qu'il soit récessif.

LES MUTATIONS PROVOQUÉES

En 1927, Muller, étudiant la possibilité de provoquer artificiellement des mutations géniques, nota que quelques Insectes, les drosophiles ou mouches du vinaigre, présentaient, après irradiation par les rayons X, des mutations avec une fréquence beaucoup plus élevée que les sujets non irradiés. A la suite de cette expérience et d'expériences ultérieures, on put attribuer aux rayons X et à d'autres rayonnements ionisants un grand pouvoir en tant qu'agents « mutagènes ».

Altenburg observa que les rayons ultraviolets avaient la même action, mais elle est cependant limitée par leur faible pénétration, surtout chez les animaux; en revanche, leur pouvoir est important sur les grains de pollen, beaucoup plus exposés.

Diverses substances chimiques peuvent avoir aussi une action mutagène : par exemple l'ypérite, l'éthylméthane, et même la formaldéhyde, douée de pouvoir mutagène chez la drosophile par voie orale mais non par injection.

MUTATIONS, ÉVOLUTION, SÉLECTION

Les mutations ont une très grande importance biologique. Pour beaucoup de spécialistes, elles sont le « moteur » unique de l'évolution. Pour d'autres, elles sont insuffisantes, et ils citent en exemple des organismes, comme la drosophile, qui mutent beaucoup sans vraiment évoluer, parce que les mutations brassent des caractères sans en apporter de nouveaux. Dans cette optique, la formation de nouveaux gènes serait nécessaire à l'évolution.

De plus, dans les conditions naturelles, les mutations ont peu de chances de persister : le mutant, étant le plus souvent unique, doit fatalement s'accoupler avec un sujet normal : si le caractère apparu est récessif, il risque de disparaître.

Tout autres sont les conditions de vie des plantes cultivées et des animaux domestiques : l'homme peut avoir avantage à conserver des mutations à intérêt économique, ornemental ou autre. Pour cela, il croise entre eux des individus atteints de la mutation. C'est ainsi qu'ont survécu jusqu'à notre époque le teckel, la poule à cou nu, le pigeon culbutant, le poisson rouge queue-de-voile, etc.

Ces animaux n'auraient aucune chance de persister à l'état sauvage. Alors que la sélection naturelle entraîne la survivance du plus apte, la sélection artificielle provoque souvent la survivance du plus inapte.

L'EMBRYON

Tout être vivant à nombreuses cellules, qu'il soit animal ou végétal, dérive d'une cellule unique, issue de l'union de deux cellules sexuelles ou gamètes, le spermatozoïde, mâle, et l'ovule, femelle ; cette cellule initiale est appelée œuf ou zygote. Il existe donc nécessairement une période plus ou moins longue, durant laquelle ce zygote se divise et s'accroît pour former les structures qui permettront au nouvel être de vivre dans le milieu extérieur et de posséder les caractéristiques externes et internes de son espèce.

Cette période, qui correspond au développement embryonnaire, s'appelle l'embryogenèse (ou ontogenèse). Elle diffère de manière très importante d'un groupe à un autre ; cependant, le schéma de base du développement embryonnaire des êtres les plus divers se présente essentiellement de manière uniforme.

Observons tout d'abord les stades de développement des végétaux, en prenant comme exemple un végétal supérieur, comme un pommier ou un poirier. Nous constaterons que le zygote commence par se segmenter : dans l'embryon pluricellulaire ainsi formé, on peut distinguer différents groupes de cellules. Chacun donnera naissance à un organe de la future plante. Cet embryon se trouve dans la graine ; pour germer, c'est-à-dire pour achever son développement et donner naissance à la plante, il faut qu'il soit placé dans un milieu favorable.

L'existence d'une période de vie latente entre la maturation de la graine, c'est-à-dire entre le moment où la graine est prête à germer si on la place dans le sol, et le moment où elle se retrouve dans la terre, n'est pas typique des végétaux, mais s'observe aussi chez les animaux. En effet, si l'on rencontre des végétaux dont la graine à peine mûre germe à l'intérieur de l'ovaire de la fleur, on connaît, à l'inverse, certains animaux, notamment des Mollusques, dont la larve, qui n'est autre chose qu'un embryon particulier vivant à l'état libre, continue à errer dans la mer pendant des périodes de durée variable, et ne se fixe qu'après avoir trouvé un substrat parfaitement adapté à sa vie : elle prend alors sa forme adulte et édifie sa coquille.

LE DÉVELOPPEMENT EMBRYONNAIRE CHEZ LES ANIMAUX

Avant d'aborder une description plus détaillée de l'embryogenèse animale, précisons qu'il n'existe pas d'animal dont le développement embryonnaire puisse fournir un exemple susceptible de s'appliquer à tous les autres organismes.

Dans tous les cas, ce que nous avons dit à propos du développement embryonnaire végétal demeure valable pour le développement animal, qui comprend schématiquement quatre stades : 1) division du zygote ; 2) segmentation ultérieure des deux cellules filles pour former un ensemble géométrique de cellules, dont chacune est déjà destinée à donner naissance à un organe donné ou à un groupe d'organes ; 3) migration des cellules qui prennent, les unes par rapport aux autres, la disposition qu'elles auront dans l'organe qui en résultera ; 4) mitoses (c'est-à-dire divisions) successives et formation des différents tissus, jusqu'à ce que tous les organes et l'embryon lui-même soient complètement formés et prêts à voir le jour.

Ces quatre stades sont appelés : segmentation, gastrulation, organogenèse et histogenèse.

Avant d'entreprendre la description des principaux stades du développement embryonnaire des Mammifères, précisons encore qu'un grand nombre d'animaux n'offrent pas à la naissance le même aspect qu'ils auront à l'âge adulte. C'est le cas de la grenouille qui naît sous forme de têtard, des papillons qui naissent sous forme de chenilles multicolores, et de beaucoup d'autres animaux qui connaissent un état de vie larvaire avant de devenir adultes.

Les larves, comme nous l'avons dit, peuvent être comparées à des embryons particuliers, capables de vivre dans le milieu extérieur et d'en tirer les aliments nécessaires à leur développement.

Chez les organismes larvaires, on observe une période de développement embryonnaire proprement dit, de

C. Bevilacqua

Groupe d'œufs d'amphioxus vus à fort grossissement.

courte durée, qui se déroule à l'intérieur de l'œuf, d'où sortira un organisme encore nettement rudimentaire; celui-ci se nourrit assez activement et, après un certain temps, se transforme en adulte à la suite d'une métamorphose, qui peut être rapide ou progressive, au cours de laquelle se produit une sorte de dégénérescence de nombreux tissus larvaires (histolyse), suivie de la formation d'autres tissus et, avant tout, des organes reproducteurs. Les animaux dont nous traiterons ne présentent pas de stade larvaire et connaissent un développement direct.

Dans l'œuf d'un Mammifère, après la première division du zygote, les cellules filles se divisent à leur tour en quatre cellules, dites blastomères; *celles-ci entrent rapidement en mitose pour former d'autres blastomères semblables, jusqu'à atteindre le stade de la* morula, *cette dernière étant constituée d'un amas à peu près sphérique de cellules assez semblables, qui la fait ressembler à une petite mûre, d'où son nom.*

On assiste ensuite à la formation d'une cavité centrale, appelée blastocèle, *due au fait que les cellules s'éloignent progressivement du centre de la sphère tout en continuant de se multiplier; l'embryon prend alors le nom de* blastula *et la paroi de cellules, disposées maintenant en une seule couche, qui entoure la cavité prend le nom de* blastoderme.

LA FORMATION DES ORGANES

Après la formation de la blastula, commence le processus très important de la gastrulation, *au terme duquel la paroi, formée d'un seul feuillet de cellules, se trouvera doublée d'un deuxième feuillet.*

Le processus de la gastrulation est très simple : un des pôles de la blastula, le pôle végétatif, s'invagine et efface progressivement la cavité du blastocèle, les cellules venant s'adosser contre la partie interne du blastoderme du pôle opposé, le pôle animal.

*Ainsi se forme une sorte de demi-sphère à double paroi, dont les bords libres se rapprochent de plus en plus, délimitant une cavité interne, l'*archentéron, *ou intestin primitif, qui communique avec l'extérieur par une petite ouverture, le* blastopore.

Les deux feuillets, externe et interne, de la gastrula sont appelés respectivement ectoderme primitif et endoderme primitif : ils formeront les deux feuillets définitifs, ectoderme *et* endoderme, *entre lesquels s'interposera ultérieurement un troisième feuillet, le* mésoderme, *formé par des cellules provenant des deux feuillets primitifs.*

On assiste ensuite à des phénomènes très complexes qui se déroulent au niveau du mésoderme, à l'intérieur duquel se creusent des cavités, tandis que l'embryon s allonge dans le sens antéro-postérieur.

A l'extrémité antérieure apparaît une zone particulière, dite plaque médullaire, qui se déprime pour former la gouttière médullaire, puis le canal médullaire qui contient la moelle épinière. Sous la face ventrale de ces formations s'édifie la corde dorsale, ébauche de la colonne vertébrale. A ce stade, l'intestin, situé ventralement, est cylindrique et présente une large cavité; à côté de lui on trouve les somites, massifs qui résultent de la division du mésoderme.

A partir de ce stade, la formation des organes suit un processus qu'il serait trop long d'expliquer; précisons simplement que l'extrémité céphalique de la moelle épinière s'élargit et forme l'encéphale, tandis que de la partie restante de la moelle épinière se détachent les nerfs spinaux. L'intestin primitif se développe jusqu'à former l'appareil digestif et ses glandes annexes; à l'intérieur du mésoderme se creusent des petits cordons d'où proviendront les vaisseaux sanguins et le cœur, qui est tout simplement un vaisseau profondément modifié. A partir des somites se formeront tous les muscles.

Une fois tous les organes parfaitement formés et les poumons prêts à fonctionner, le fœtus quitte le milieu utérin et affronte le milieu extérieur. Dès la première respiration, les poumons, jusque-là flasques, se gonflent, et très rapidement l'individu pourra se nourrir de manière autonome.

Nous citerons, pour conclure, quelques études concernant le développement embryonnaire; l'une des plus importantes, relative à la capacité de régulation de l'œuf fécondé, s'appuie sur des expériences tendant à élucider la question de l'homogénéité de l'œuf. Si l'œuf est homogène, le fait d'en enlever une partie avant le début du développement devrait laisser intactes les possibilités de constitution d'un individu entier; si, au contraire, il n'est pas homogène, l'ablation d'une partie devrait aboutir au défaut de formation des organes correspondant à la partie enlevée.

Les résultats diffèrent selon l'animal considéré : les œufs de Mammifères se sont révélés capables de régulation, c'est-à-dire capables, bien que mutilés, d'aboutir à la formation d'un embryon entier.

L'un des aspects les plus curieux et les plus intéressants de l'embryogenèse est que celle-ci rappelle l'évolution passée de l'espèce en question. Ainsi, l'embryon humain a des caractères de Poisson. C'est ce que l'on appelle la loi biogénétique fondamentale, qui se traduit par la formule : l'embryogenèse récapitule la phylogenèse.

Il ne faut certes pas trop généraliser cette loi, mais elle est néanmoins un guide précieux pour les biologistes.

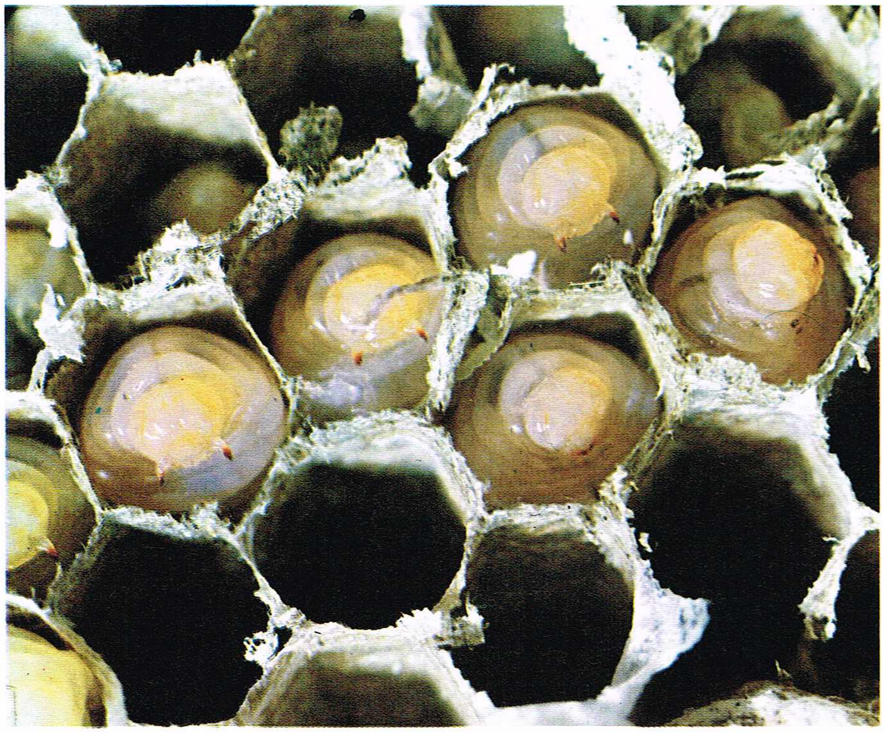

D. Giussani

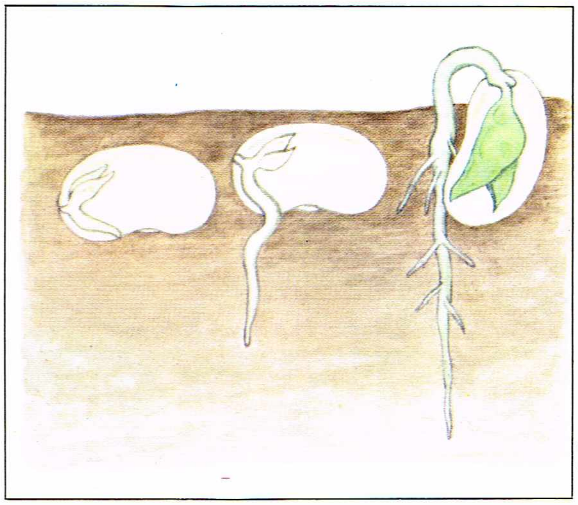

I.G.D.A.

A gauche, détail d'un nid souterrain de guêpe; chaque alvéole contient une larve, c'est-à-dire un organisme issu de l'œuf, au moment des premières phases de développement.
A droite, trois étapes de la germination d'une graine de haricot; on a enlevé un des cotylédons pour rendre visibles les parties de l'embryon. Celui-ci est une plantule en miniature dans laquelle on distingue une radicule (la future racine) et une plumule (le futur bourgeon terminal).

LES GAMÈTES

Tous les êtres vivants, ou presque, proviennent chacun d'un œuf. Celui-ci, encore appelé zygote, est une cellule qui se divisera pour en donner deux, puis quatre, etc., jusqu'à reconstituer un individu entier de l'espèce en cause : c'est l'embryogenèse, que nous avons décrite dans le précédent article. Par malheur, le terme d'œuf est aussi donné à la formation pondue par beaucoup d'animaux, et qui contient un embryon développé.

L'œuf véritable provient de la fusion de deux cellules génitales, l'une mâle et l'autre femelle, qui s'unissent au cours d'un processus appelé fécondation. Celle-ci peut se dérouler dans les voies génitales de la femelle, lors d'un accouplement ou copulation : c'est la fécondation interne, de règle chez les Mammifères, les Oiseaux, les Insectes, etc. Chez les groupes aquatiques au contraire, la fécondation est externe et a lieu dans l'eau. Le principe est identique, quoique selon des modalités très différentes chez les végétaux, comme nous le verrons.

Les cellules génitales portent le nom de gamètes. Le gamète femelle est l'ovule (souvent improprement appelé œuf), cellule de forme arrondie. Le gamète mâle est le spermatozoïde.

Chez la plupart des animaux, le spermatozoïde possède une « tête » (en fait son noyau) suivie d'une « queue », long filament (plus exactement un flagelle) qui lui permet de se déplacer à une grande vitesse. Les spermatozoïdes sont en effet contenus dans un liquide, le sperme ou semence (laitance des Poissons), où ils abondent. Il existe aussi des spermatozoïdes sans flagelle chez certains vers (némathelminthes), des Arthropodes, etc.

Les végétaux aussi, depuis les plus simples jusqu'aux plus complets, parvenus à la période de reproduction, produisent des gamètes, à savoir des oosphères (femelles) et des anthérozoïdes (mâles). Les premières sont contenues dans un organe femelle, appelé archégone chez les Mousses ou les Fougères, et ovaires chez les plantes à fleurs, les autres dans un organe mâle, appelé anthéridie chez la Fougère mâle, et anthère chez les plantes supérieures ; dans cet organe se forme le pollen des fleurs.

La présence de cellules reproductrices ne fut décelée avec certitude que grâce au microscope. Les premiers savants qui observèrent ces cellules se divisèrent bientôt en deux camps : ceux du premier groupe, les « ovistes », affirmaient que tout le matériel nécessaire à la reproduction se trouvait dans l'œuf et que la fonction du spermatozoïde se limitait à l'activation de l'œuf, qui, ainsi stimulé, entamait son développement ; les représentants du deuxième groupe, les « animalculistes », appelés ainsi du terme d'« animalculus » attribué au spermatozoïde à cause de ses mouvements visibles au microscope, soutenaient au contraire que tout le matériel héréditaire était porté par le spermatozoïde, auquel l'œuf ne fournissait que les éléments nutritifs nécessaires à son développement.

En 1694, un savant, dont l'imagination devait être au moins égale à son amour de la science, crut reconnaître dans la tête, c'est-à-dire dans la partie renflée d'un spermatozoïde, l'image d'un homme pelotonné, qu'il s'empressa de baptiser « homunculus ». Bien entendu, cette découverte inespérée donna une nouvelle vigueur à la cote des animalculistes. De leur côté, les ovistes ne désarmèrent pas et s'empressèrent de découvrir à leur tour cet imaginaire « homunculus », non dans le spermatozoïde, mais dans l'ovule, et accusèrent les animalculistes de s'être lourdement trompés en prenant une structure insignifiante du spermatozoïde pour l'« homunculus » de l'œuf ; la dispute ainsi rebondissait.

Le perfectionnement ultérieur des microscopes balaya ces hypothèses fantaisistes et permit de démontrer l'inexistence de ce prétendu « homunculus ». On en vint ainsi à la conclusion exacte que ni l'œuf ni le spermatozoïde ne sont séparément les dépositaires de tout le matériel héréditaire, mais que l'un et l'autre de ces éléments ne sont que des cellules spécialement élaborées en vue de la reproduction et contribuent dans une égale mesure à la formation du nouvel individu.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Ovule dans un ovaire de Mammifère : il s'agit du gamète femelle, dont la fécondation constitue le point de départ du développement d'un nouvel individu (× 250 × 4,5) [coloration de contraste].

LA FORMATION DES GAMÈTES

Chez les êtres unicellaires à reproduction sexuée, tout l'individu subit au moment de la reproduction des transformations appropriées pour devenir un gamète apte à

Archives Longo

Nid de merle noir *(Turdus merula)*. L'œuf résulte de l'union d'un gamète femelle (ovule) et d'un gamète mâle (spermatozoïde).

s'unir avec un autre gamète de la même espèce, identique à lui-même (isogamie), ou différent (hétérogamie), selon les espèces considérées.

En revanche, chez les êtres pluricellulaires, il faut se rappeler qu'il existe des cellules somatiques, qui constituent le corps de l'individu, et des cellules germinales, contenues dans des organes spéciaux, destinées à la reproduction.

La principale différence entre les gamètes et les cellules somatiques réside dans le nombre différent de chromosomes contenus dans leurs noyaux respectifs : en effet, les cellules germinales contiennent la moitié des chromosomes des cellules somatiques; on dit qu'elles ont un nombre « n » de chromosomes et on les appelle « haploïdes ».

On comprend facilement les raisons de cette différence : pour pouvoir donner naissance à un nouvel individu, la cellule germinale doit s'unir à une autre cellule germinale appartenant à un individu de sexe différent; au sommet de la fécondation, les deux cellules se complètent pour former une cellule unique.

Donc, si les deux gamètes étaient porteurs d'un nombre diploïde de chromosomes (2 n), caractéristique des cellules somatiques, l'œuf ou zygote, c'est-à-dire la cellule issue de la fécondation, aurait, par addition des chromosomes des deux gamètes, un équipement « tétraploïde » de « 4 n » chromosomes. Il s'ensuivrait que tout individu issu d'un tel zygote aurait également un équipement tétraploïde. Or, sachant que le nombre de chromosomes est toujours constant pour chaque espèce, on conclut facilement qu'une telle hypothèse ne peut pas se vérifier, car, à chaque génération, le nombre de chromosomes doublerait et on finirait par avoir des individus avec des milliers de chromosomes. De plus,

Les Insectes *pronuba* (sur la photo un bourdon) sont les transporteurs naturels des gamètes mâles des phanérogames, c'est-à-dire des grains de pollen des fleurs « entomophiles », fécondateurs des ovules destinés à devenir des graines.

I. Buciarelli

puisque le rapport entre le noyau contenant les chromosomes et le cytoplasme doit demeurer constant, de tels individus seraient formés de cellules énormes, dont les nouvelles dimensions modifieraient complètement toute la structure du corps.

Pour éviter une telle dégénérescence, les cellules germinales présentent, dès le début de leur vie, une division réductionnelle particulière, la méiose, grâce à laquelle le patrimoine diploïde de la cellule mère se divise en deux patrimoines « haploïdes » chez les cellules filles.

Les cellules présentant ce type de division ne sont pas des cellules somatiques indifférenciées, mais bien plutôt des cellules spéciales qui, dès les premières divisions de l'œuf fécondé, migrent dans les organes destinés à les recevoir, où elles se reproduisent et se transforment jusqu'à la maturité.

LA MÉIOSE

La méiose comprend deux mitoses ou divisions cellulaires qui, à partir d'une cellule diploïde, aboutissent à quatre cellules haploïdes, et, plus précisément, à quatre spermatides pour l'individu mâle et à un ovule et trois « globules polaires » pour la femelle, au moins chez les animaux supérieurs.

La première des deux divisions présente une prophase très particulière, subdivisée en un certain nombre de temps; dans un premier temps, le leptotène, *les chromosomes apparaissent allongés, minces et séparés les uns des autres; dans le deuxième temps, le* zygotène, *les chromosomes homologues s'apparient; suit le troisième temps, dit* pachytène, *durant lequel les chromosomes homologues, toujours appariés, se raccourcissent et grossissent.*

A la fin de ce stade, on assiste, dans la spermatogenèse, au stade immédiatement suivant de diplotène, *tandis que dans l'ovogenèse, on note, avant le diplotène, une période de repos, durant laquelle se produisent dans la cellule différentes transformations internes qui la rendront apte à sa fonction reproductrice.*

Au cours du diplotène, chacun des deux chromosomes homologues se fissure, ce qui donne lieu à l'apparition d'une figure particulière appelée tétrade, formée de l'ensemble des quatre chromatides. Même après ce dernier stade, on note, dans l'ovogenèse, une autre période d'accroissement et de remaniement des structures internes, avant que la division ne se poursuive.

Le stade final de la prophase méiotique est celui de la diacinèse, *au cours duquel les tétrades présentent des formes assez trapues et sont disséminées sans ordre dans le noyau. Suit la métaphase, au cours de laquelle chacun des chromosomes homologues migre vers un pôle de la cellule; la division cellulaire se poursuit ensuite normalement comme une mitose.*

D'après ce que nous venons de dire, on peut noter que les chromosomes ne se sont pas dupliqués et que les constituants de chaque couple de chromosomes homologues migrent chacun dans une cellule différente, ce qui aboutit à la réduction de moitié du patrimoine chromosomique des cellules filles. La deuxième division méiotique est, en revanche, une mitose normale, avec duplication des chromosomes.

Dans la spermatogenèse ou formation du spermatozoïde, la cellule qui entre en méiose est appelée spermatocyte de premier ordre, tandis qu'à la fin de la première division les deux cellules filles sont appelées spermatocytes de deuxième ordre; à la fin de la deuxième division, les cellules filles sont dites spermatides. Ces derniers subissent différentes modifications internes et externes, sans se diviser ultérieurement, et ne prennent le nom de spermatozoïdes qu'après avoir acquis totalement le pouvoir de fécondation.

Dans l'ovogenèse ou formation de l'ovule, l'ovocyte qui entre en méiose se divise d'abord en un ovocyte de deuxième ordre et en une cellule atrophique très petite, le globule polaire de premier ordre; puis, à la deuxième division, l'ovocyte II se divise à nouveau en une cellule œuf proprement dite et un globule polaire de deuxième ordre; à son tour, le globule polaire de premier ordre peut se diviser en deux globules polaires de deuxième ordre, dépourvus de tout pouvoir de reproduction. Parvenu à ce point, l'ovule est prêt à être fécondé par un spermatozoïde.

LA RÉGÉNÉRATION

Bruce Coleman - J. Burton

La régénération : le lézard *(Lacerta vivipara)* est capable de régénérer sa queue si celle-ci est coupée accidentellement.

Les phénomènes de régénération qui se produisent dans le monde végétal sont universellement connus et on les considère comme naturels; on n'est nullement étonné de voir un arbre auquel on a coupé une branche la régénérer en peu de temps. De même, tout le monde sait qu'une branche cassée peut, si elle est convenablement enterrée, devenir une bouture et produire de nouvelles racines. En revanche, les phénomènes de régénération que l'on constate dans le monde animal étonnent davantage : pourtant, le lézard régénère sa queue tronquée, la grenouille, après amputation, forme de nouvelles pattes, ou encore la petite hydre d'eau douce, une fois coupée en cinquante morceaux, reconstitue autant d'hydres entières.

Si, par exemple, nous observons un animal très caractéristique à cet égard, l'étoile de mer, nous verrons que non seulement le bras tronqué est rapidement régénéré, mais que ce bras est parfaitement capable de régénérer l'animal tout entier; ce dernier sera pendant un certain temps très disproportionné et présentera une forme en comète, avec un bras de dimension normale et les quatre bras régénérés beaucoup plus petits.

UN SINGULIER SYSTÈME DE DÉFENSE

Chez de nombreux animaux, la possibilité de régénération est en même temps un moyen de défense. Un exemple classique de ce phénomène nous est fourni par le lézard. On sait, en effet, que ce petit Reptile, s'il est saisi par la queue par un ennemi quelconque, se coupe lui-même l'appendice caudal à l'aide d'une très violente contraction musculaire, échappant ainsi à son adversaire. La queue repoussera en peu de temps, redonnant à l'animal son aspect habituel.

Ce phénomène porte le nom d'autotomie, c'est-à-dire mutilation volontaire d'une partie de soi-même, et se rencontre chez de nombreux animaux peu évolués, comme les étoiles de mer, déjà citées, qui abandonnent facilement leurs bras emprisonnés ou blessés, ou comme les crabes, qui abandonnent de même leurs pattes à l'agresseur, ou bien encore comme les ophiurides (animaux semblables aux étoiles de mer), dont il suffit de toucher un bras pour que l'animal s'en détache précipitamment. Parmi tous les cas d'autotomie, un des plus singuliers et des plus intéressants est celui des holothuries, autres Échinodermes, à la forme grossièrement allongée : ces Invertébrés, lorsqu'ils se sentent en danger, expulsent tous leurs viscères, qu'ils régénèrent ensuite en peu de temps. C'est le processus d'éviscération.

Tous les exemples cités montrent que ces phénomènes de régénération, qui intéressent des parties du corps perdues volontairement ou par accident, se produisent uniquement chez des animaux appartenant à des groupes dans l'ensemble peu évolués et qui, de ce fait, présentent une plus grande simplicité de structure et une moindre spécificité des cellules des différents tissus. La régénération existe pourtant, nous l'avons vu, chez des Reptiles.

En revanche, les Mammifères et les Oiseaux ont perdu l'essentiel des possibilités de régénération et, s'ils subissent une mutilation quelconque, ils ne peuvent généralement opposer comme seul remède qu'une cicatrisation aussi rapide que possible.

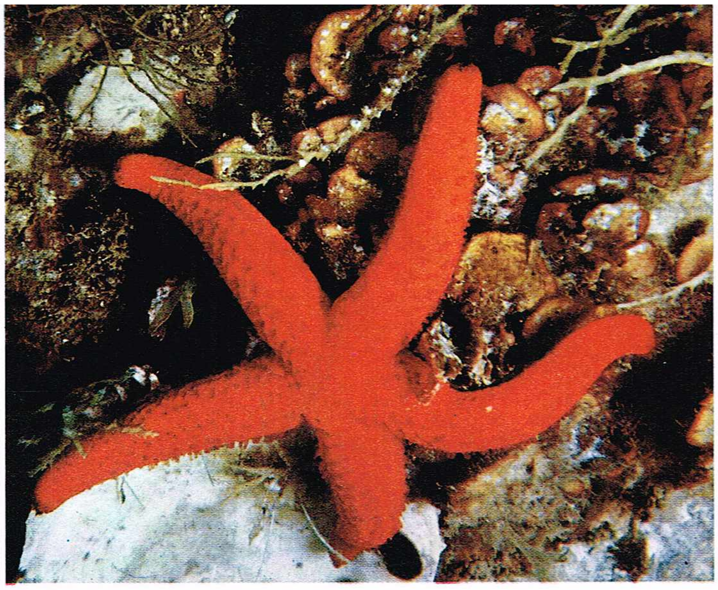

R. Maltini - P. Solaini

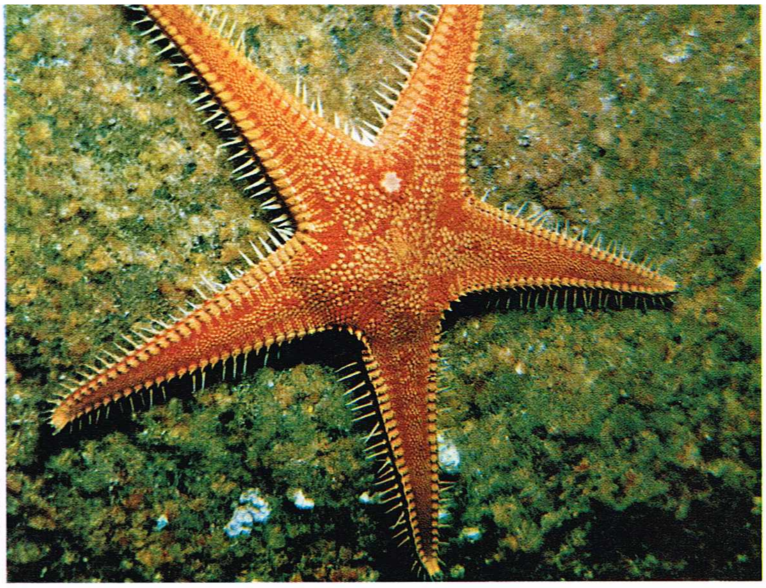

M. Cavallero.

Ci-dessus, deux étoiles de mer : *Echinaster sepositus* (à gauche) et *Astropecten auranticus ;* on sait que ces Echinodermes sont capables de régénérer leurs bras amputés.

LES EXPÉRIENCES SUR LA RÉGÉNÉRATION

Une des expériences les plus intéressantes relatives à la régénération remonte à 1798 : Lazzaro Spallanzani observa qu'après avoir tronqué la tête d'un escargot, l'animal reconstituait intégralement une nouvelle tête avec toutes ses structures, comme l'appareil buccal, les centres nerveux, des yeux, etc.

Ce phénomène, largement vérifié par les contemporains de Spallanzani, suscita d'interminables polémiques non seulement parmi les savants, mais aussi parmi les philosophes. Ces derniers voyaient chanceler les fondements de toute la métaphysique, qui faisait résider l' « âme » dans la tête, c'est-à-dire dans le cerveau. Le problème posé était extrêmement ardu : fallait-il considérer qu'une nouvelle âme venait remplacer l'âme disparue à la suite de la coupure de la tête, ou bien fallait-il considérer comme erronée toute la doctrine antérieure ?

Les amis des bêtes ne manquèrent pas d'intervenir dans ce débat, pleurant hautement sur le massacre dont étaient victimes ces pauvres bêtes et demandant l'interruption immédiate des expériences, indépendamment de toute considération sur les résultats.

On sait aujourd'hui avec certitude que les animaux capables de régénérer les parties lésées sont nombreux, à condition que soient conservés certains tissus, dont les cellules, pas très spécialisées, pourront être le point de départ de la régénération de l'organe amputé.

*Un exemple curieux nous est fourni par l'*Alpheus*, crabe qui possède une paire de pinces asymétriques, l'une étant de grande dimension, l'autre plus petite. Si l'on ampute l'animal de la grande pince, on assiste alors à un phénomène singulier : la petite pince, restée indemne, s'accroît jusqu'à atteindre les dimensions de la pince amputée, tandis que le moignon régénère une petite pince.*

En ce qui concerne les possibilités de régénération chez les Vertébrés, possibilités qui étonnent d'autant plus que l'animal est plus évolué structuralement, citons encore Spallanzani, qui, après une série importante d'expériences, constata chez le triton la régénération des quatre pattes, de la queue, des mâchoires et des yeux. Étonné par les possibilités de ce petit animal, Spallanzani essaya d'amputer à nouveau les membres régénérés et observa la régénération répétée du même membre, sans aucune déformation de sa structure.

Chez les Reptiles, les possibilités de reconstitution des membres amputés sont considérablement réduites, et seuls le lézard et l'orvet sont capables de régénérer la queue, qui parfois repousse anormale, double ou triple.

DES POISSONS AUX PLANAIRES

On a observé dans certains cas des phénomènes de régénération même chez les Poissons, mais seulement pour les nageoires ; comme on le voit, chez ces animaux, les propriétés de régénération d'organes amputés ont perdu une grande partie de leur importance. Ces propriétés seront pratiquement totalement absentes chez des animaux plus évolués, qui conservent partiellement ce pouvoir pour quelques organes internes, comme l'ont montré certaines expériences effectuées sur le foie de lapin ou sur les glandes salivaires. Ajoutons que la régénération d'une patte aurait été observée chez l'opossum. Notons enfin qu'il n'est pas très rare que des enfants ayant subi une « amygdalectomie » aient reconstitué leurs amygdales.

Après l'amputation, la régénération débute par la formation d'un petit blastème, c'est-à-dire un groupe de cellules qui jouent le rôle de « bourgeon » pour l'organe qui doit se reconstituer. Ce blastème peut être formé de cellules ayant une origine très différente de celles qui ont donné naissance à l'organe lors du développement embryonnaire ; n'ayant pas subi de différenciation trop marquée, lesdites cellules ont conservé la propriété de donner naissance à différents types de tissus.

A cet égard, un exemple curieux nous est fourni par une ascidie, Clavelina lepadiformis*, qui peut se reconstituer en entier à partir du seul appareil branchial, selon un processus particulier.*

L'appareil branchial, isolé de l'animal, se différencie dans un premier temps en se réduisant à un amas presque sphérique de cellules plus ou moins uniformes : à ce stade d'homogénéité, très semblable à un stade de développement embryonnaire, fait suite une différenciation progressive des différentes parties, jusqu'à la reconstitution de l'individu entier. Cela se passe un peu comme si, revenant en arrière dans le temps, les cellules de l'organe isolé récupéraient les possibilités de développement qui sont propres à l'œuf.

Chez les planaires, qui sont des vers plats, d'eau douce pour la plupart, la reconstitution des organes amputés s'effectue à partir de cellules particulières qui prennent le nom de néoblastes ; ces cellules présentent la possibilité de migrer dans n'importe quelle partie de l'organisme, là où leur présence est rendue nécessaire, comme s'il s'agissait de responsables des réparations accourant dans les zones sinistrées.

On pense que cet appel est véhiculé par une hormone sécrétée au niveau de la blessure ; l'hormone, entrée dans la circulation, parvient avec une certaine rapidité jusqu'aux néoblastes : ceux-ci, à leur tour, mettent dix jours à parcourir un dixième du corps du ver en direction de la zone d'appel.

Chez les planaires, la rapidité de la régénération de la tête diminue quand la section transversale est pratiquée de plus en plus loin, vers la queue. En effet, la régénération dépend du « gradient axial » de l'animal : on appelle ainsi la variation du métabolisme cellulaire le long d'un axe.

Si l'on isole un court fragment de planaire, qui ne comporte donc qu'une faible partie de gradient axial, on constate parfois l'apparition de deux têtes, une à chaque section. C'est le phénomène d'hétéromorphose, due à la faible polarité de la portion isolée.

Dernière remarque importante : la régénération se rencontre surtout chez les animaux qui présentent de la reproduction asexuée. Les deux phénomènes ne sont d'ailleurs pas sans rapport.

LA SÈVE ET LE SANG

Le passage des organismes simples à des êtres vivants plus complexes et l'accroissement des dimensions du corps ont entraîné l'apparition de structures de plus en plus complexes. Dès lors, les besoins nutritionnels ne pouvaient plus être satisfaits par le simple transport des liquides du milieu environnant vers l'intérieur de l'organisme, transport assuré par un système de canalicules semblable à celui que présentent les éponges. Des organes spéciaux sont devenus nécessaires pour assurer le transport et l'assimilation des éléments nutritifs.

C'est ainsi que se développent chez les animaux un appareil respiratoire, un appareil digestif et un appareil circulatoire ; nous n'envisageons ici que ce dernier. A l'intérieur de cet appareil circule un liquide, le sang, capable de transporter l'oxygène et les substances métabolisées à toutes les cellules de l'organisme, quelles que soient la taille et la complexité de celui-ci. Les végétaux aussi possèdent un appareil circulatoire, composé de deux systèmes principaux de conduction, l'un ascendant, qui a pour rôle de porter la sève brute aux feuilles, l'autre descendant, qui transporte la sève élaborée à toutes les cellules.

Celles-ci l'utilisent tant pour la production de l'énergie nécessaire aux différentes fonctions du végétal que pour le stockage des substances organiques dans des organes de réserve. Le système circulatoire diffère considérablement du monde végétal au monde animal ; mais, si l'on fait abstraction de la composition chimique du liquide, la différence la plus importante réside dans le fait que chez les animaux le sang circule sous l'impulsion d'un organe propulseur, le cœur ; lorsque le cœur est absent, comme chez les animaux les plus simples, la circulation est assurée par les mouvements de l'animal et l'action de muscles situés au contact des vaisseaux ; en revanche, chez les végétaux, où il n'existe ni organe propulseur ni mouvements, l'ascension de la sève obéit à un ensemble de phénomènes physiques très complexes.

T. Sacco

L'exubérance des plantes, qui s'épanouit dans la beauté de leurs feuilles, de leurs fleurs et de leurs fruits, est due à la sève nourricière qui monte des racines. La photo nous montre une belle graminée aux tiges relativement grêles *(Gynerium argenteum)*.

LA SÈVE ET SA CIRCULATION

On sait que les végétaux puisent dans le sol, grâce à leurs racines, l'eau, des sels minéraux et différentes substances contenant, outre les quatre éléments indispensables C, N, H, O, certains autres éléments nécessaires à la vie du végétal, comme le soufre, le phosphore, le potassium, le calcium, le fer et le magnésium, ainsi que d'autres éléments moins nécessaires, comme le zinc, le bore, le manganèse, le cuivre, le chlore et le molybdène.

D'autres éléments encore contribuent à rendre plus actifs les processus vitaux ; ce sont l'aluminium, le silicium, le fluor, le brome, l'iode et le césium. On pensait autrefois que les différents sels de ces éléments étaient absorbés en même temps que l'eau par un simple phénomène de diffusion ; on sait aujourd'hui que leur absorption se fait indépendamment de celle de l'eau, qui est réglée par les lois de l'osmose. Disons que, en substance, ce sont les lois de la perméabilité qui régissent l'absorption des sels par la plante et que, par conséquent, l'absorption dépend de l'état de la membrane et du cytoplasme des cellules des racines ; cet état est lui-même sous la dépendance des conditions physiologiques générales du végétal.

Le transport de l'eau et des éléments dissous par la sève brute depuis les racines jusqu'aux feuilles se fait dans les vaisseaux du bois : c'est du moins l'opinion classique qui est peut-être à nuancer. Rappelons que le « bois » est un ensemble de vaisseaux qui existe même chez les plantes herbacées.

La sève brute doit vaincre de nombreuses forces qui s'opposent à son ascension : la force de gravité, le frottement des colonnes d'eau contre les parois des vaisseaux, ainsi que la résistance opposée par quelques couches minces de cellules qui se trouvent à l'intérieur du vaisseau. Tous ces obstacles n'empêchent pas la sève brute de monter dans les vaisseaux ; sa vitesse ascensionnelle est très variable (1 à 4 mètres à l'heure chez le hêtre, 20 à 45 mètres à l'heure chez le chêne, davantage chez les lianes). La pression hydrostatique qu'elle doit surmonter peut atteindre 0,70 atmosphère, chez le mélèze, et même des valeurs supérieures dans des arbres comme le séquoia, dont la hauteur peut dépasser 100 mètres.

Cette difficile ascension est assurée essentiellement par trois forces : la pression radiculaire, la force aspirante des feuilles, la cohésion de l'eau.

La première, dont le mécanisme n'est pas très bien connu, s'exerce de bas en haut, et se manifeste, par exemple, dans le phénomène des « pleurs » : lorsqu'on coupe une plante immédiatement au-dessus de la racine, des gouttelettes de sève sourdent du moignon demeuré enterré. Cette pression radiculaire serait due aux diffé-

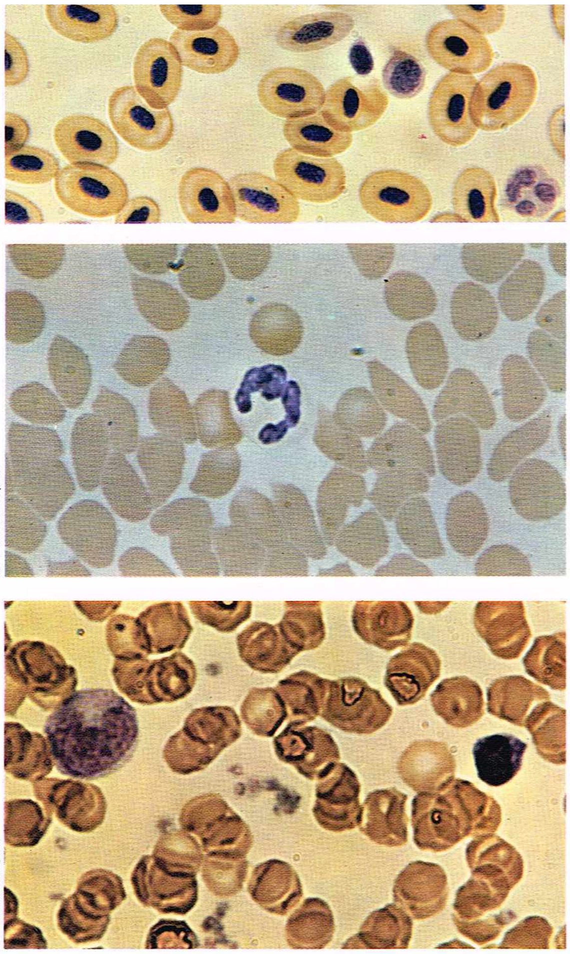

C. Bevilacqua

C. Bevilacqua

C. Bevilacqua

Trois images de corpuscules présents dans le sang. En haut : sang de grenouille, dans lequel sont visibles des hématies et trois leucocytes ; au milieu : sang humain, dans lequel sont visibles des hématies et un granulocyte neutrophile ; en bas : sang humain montrant des hématies, un gros monocyte doté d'un noyau lobé, un lymphocyte et de nombreuses plaquettes (× 1 000 ; coloration de contraste).

rences de tension en oxygène des diverses parties de la racine (la résistance que les parois lui opposent).

La deuxième force est une conséquence directe de la transpiration des feuilles. Une cellule qui perd de l'eau par transpiration appelle l'eau de la cellule sous-jacente, laquelle, à son tour, n'étant plus saturée, aspire l'eau de la cellule située au-dessous d'elle et ainsi de suite. La troisième force est la force de cohésion des molécules d'eau, qui tend à les maintenir liées dans les colonnes ascendantes.

Les substances nutritives, une fois la sève élaborée, sont transportées à travers un autre système de vaisseaux, les vaisseaux criblés, qui constituent le liber, dans toutes les parties de la plante à une vitesse trop élevée pour que ce phénomène puisse être considéré comme un simple phénomène de diffusion : son déroulement implique donc la présence de forces actives.

Ce mécanisme, plutôt complexe, est le même qui permet, dans deux osmomètres reliés par un tube, une circulation continue de liquide depuis l'osmomètre contenant la solution la plus concentrée vers celui où la solution est moins concentrée.

Naturellement, les conditions physiologiques dans lesquelles ce phénomène se déroule dans la plante sont beaucoup plus complexes et présentent d'autres aspects que nous ne développerons pas ici ; nous nous contenterons de ce schéma simplifié.

La vitesse d'écoulement des substances organiques est beaucoup plus lente que celle de la sève brute (entre 50 cm/h et 1 à 2 m/h), mais elle est suffisante pour alimenter au rythme voulu toutes les cellules de la plante.

LE SANG

Bien que d'aspect homogène, le sang est en réalité constitué d'une partie liquide, le plasma, et d'une partie formée de cellules et de fragments de cytoplasme. Le plasma est un liquide de couleur jaunâtre qui contient des sels dissous dans l'eau (le chlorure de sodium y prédomine), des protéines en solution (albumines et globulines, parmi lesquelles le fibrinogène), et différentes substances en suspension. Les cellules du sang sont les érythrocytes (hématies ou globules rouges) et les leucocytes (globules blancs), tandis que les fragments cytoplasmiques sont les plaquettes, qui jouent un rôle très important dans la coagulation.

Les érythrocytes, qui ont la forme de disques biconvexes chez les Mammifères et les lamproies, et une forme ellipsoïdique biconvexe chez les autres Vertébrés, sont d'une couleur jaune olivâtre lorsqu'ils sont observés isolément et rouge lorsqu'ils sont nombreux et qu'ils ont tendance à s'empiler, comme c'est le cas dans la circulation ; ils sont dépourvus de noyau chez la plupart des Mammifères et l'homme adulte et leur durée de vie, toujours chez l'homme, est d'environ 120 jours ; on en dénombre environ 5 millions par mm^3 de sang.

Ces cellules sont extrêmement importantes, car elles sont porteuses d'une protéine complexe, l'hémoglobine (de nature légèrement différente d'une espèce à l'autre), qui possède la propriété d'établir des liaisons stables avec l'oxygène. L'hémoglobine des érythrocytes se charge d'oxygène dans les capillaires pulmonaires, oxygène qu'elle prend dans l'air alvéolaire pour le céder ensuite aux différentes cellules selon un processus dans lequel les pressions partielles de l'oxygène et du gaz ou anhydride carbonique, présents dans le sang et dans le liquide interstitiel, jouent un rôle très important.

Pourquoi l'hémoglobine est-elle contenue dans les globules rouges et non pas simplement dissoute dans le plasma ? La question a fait l'objet de nombreuses études. Les réponses apportées sont de plusieurs ordres : en premier lieu, si l'hémoglobine était dissoute dans le plasma, elle envahirait les tissus et s'éliminerait dans les urines, comme cela survient dans la fièvre hémoglobinurique du bétail, affection provoquant la dissolution des érythrocytes et due à un parasite ; en deuxième lieu (et ce fait est beaucoup plus important), la quantité d'hémoglobine que le plasma pourrait contenir en solution saturée, serait de loin inférieure à celle contenue dans les globules rouges.

Les érythrocytes, après avoir cédé l'oxygène aux tissus, se chargent d'anhydride carbonique, grâce à l'intervention d'une enzyme qu'ils contiennent, l'anhydrase carbonique ; l'anhydride carbonique est ainsi véhiculé jusqu'aux poumons, où il sera éliminé avec l'air expiré.

Les leucocytes, au nombre de 7-8 000 par mm^3 de sang chez l'homme, se divisent en plusieurs groupes : les lymphocytes, les monocytes et les granulocytes (subdivisés à leur tour en neutrophiles, basophiles et éosinophiles en fonction d'une réaction de coloration) ; leur forme, leurs dimensions et leur fonction sont différentes : les monocytes, par exemple, « phagocytent » les Bactéries mais ne les tuent pas, comme le font, en revanche, les granulocytes neutrophiles, qui engagent avec la Bactérie un véritable combat ; celui-ci s'achève par leur destruction ou la destruction de la Bactérie. Les lymphocytes ont aussi une action antibactérienne, non pas en tant que phagocytes, mais comme producteurs d'anticorps.

Les plaquettes, enfin, sont des éléments dépourvus de noyau qui possèdent la propriété de s'agglutiner et d'adhérer aux parois des vaisseaux au niveau des lésions que ceux-ci pourraient présenter, jouant ainsi le rôle de tampon sur la blessure ; en outre, elles contribuent à la formation de la thromboplastine, catalyseur qui agit sur la prothrombine présente dans le sang pour la transformer en thrombine, laquelle, à son tour, catalyse la transformation du fibrinogène sanguin en fibrine.

Les Vertébrés possèdent un second liquide circulatoire, la lymphe, qui circule dans un système lymphatique. Sa composition est assez semblable à celle du plasma ; elle contient surtout des lymphocytes, et quelques autres globules blancs. La lymphe intervient dans la défense de l'organisme contre les microbes.

Il existe, chez la plupart des Invertébrés, des liquides comparables au sang. Celui des Annélides est de couleur variable, et contient parfois de l'hémoglobine. Celui des Arthropodes renferme divers types de cellules sanguines. Quant au sang de l'amphioxus, petit animal marin prototype des Vertébrés, il ne possède, fait curieux, ni globules, ni pigments.

LA VIE AU RALENTI

La vie animale évoque avant tout la rapidité, la mobilité, le mouvement. Pourtant, en diverses occasions, cette vie si exubérante semble s'arrêter pour prendre l'inquiétante immobilité de la mort.

Dormir sept mois sur douze, c'est un sort qu'envieraient bien des spécimens de l'espèce humaine. C'est ce que fait le loir, l'un de nos plus gracieux Rongeurs. En fait, le terme « dormir » n'est pas tout à fait exact. Il s'agit du phénomène d'hibernation, sorte d'engourdissement dans lequel tombent de nombreux Mammifères durant l'hiver.

L'HIBERNATION

Certaines espèces, comme l'ours brun, le blaireau et le castor, ne sont que de « faux hibernants » : leur activité générale ne subit qu'une réduction passagère et irrégulière.

Au contraire, le loir est un vrai hibernant : il en est de même de la marmotte, du hamster, du hérisson, des chauves-souris.

Malgré les apparences, l'engourdissement de ces Mammifères n'est pas forcément lié au froid. Certes, l'abaissement de la température extérieure joue un rôle important, mais la raréfaction de la nourriture intervient aussi.

Le Mammifère hibernant passe donc l'hiver immobile, bien à l'abri dans sa cachette. Sa température interne s'abaisse de façon notable ; son métabolisme, c'est-à-dire l'ensemble des processus qui se déroulent dans les cellules, se réduit considérablement ; la fixation d'oxygène tombe, chez la marmotte, au vingtième de son taux normal.

Pendant longtemps, l'hibernation des Oiseaux a été considérée comme une fable. Pourtant, on connaît maintenant chez eux des faits qui s'y rattachent. Ainsi, les jeunes martinets noirs, lorsque les parents sont partis chasser les Insectes loin des nids, entrent en léthargie. Leur température passe de 38° à 25°. Leur état comateux peut durer une vingtaine de jours : il prend fin dès le retour des adultes.

L'hibernation est encore plus totale chez un engoulevent des États-Unis. Rappelons que les engoulevents sont de lointains parents des martinets, aux mœurs crépusculaires. Les capacités de cette espèce n'ont été découvertes qu'en 1946, mais les Indiens les connaissaient depuis longtemps et avaient même surnommé cet Oiseau le « dormeur ».

Cet engoulevent passe tout l'hiver totalement immobile, dans une cavité rocheuse, la tête vers le bas. Son œil ne réagit même pas si on l'éclaire avec une lampe électrique...

L'engourdissement hivernal est fréquent chez les autres Vertébrés. Reptiles et Amphibiens se groupent souvent dans une même cachette. Les grenouilles s'enfoncent dans la vase et entrent en léthargie. L'activité de la plupart des Insectes se ralentit de même durant la mauvaise saison.

Les Insectes nous offrent un autre type de vie latente : la nymphose, c'est-à-dire le stade intermédiaire entre la larve et l'état adulte. Les nymphes, qui ont des noms variés suivant les groupes (pupes des mouches, chrysalides des papillons, etc.), sont immobiles et ne s'alimentent pas ; leur respiration est réduite. Pendant la nymphose, les tissus larvaires sont détruits, d'autres, au contraire, sont édifiés.

DE L'HYPNOSE A L'ENKYSTEMENT

La léthargie peut aussi avoir, chez les animaux, une cause inattendue : l'hypnose. Au XVII^e^ siècle, déjà, le Père A. Kircher était parvenu à hypnotiser une poule en l'allongeant sur une table et en traçant un trait à la craie à partir de son bec : l'Oiseau était alors « prisonnier » du trait... Un cheval auquel on caresse le front, une dinde balancée de haut en bas, un écureuil saisi brusquement puis relâché lentement peuvent aussi entrer en hypnose. Des cirques ont même présenté un numéro d'hypnose de crocodiles.

Des phénomènes assez proches se rencontrent en pleine nature. Certains Oiseaux, les sarigues, des Insectes comme les phasmes, « font le mort » à l'approche d'un ennemi ; mais cette catalepsie leur est parfois fatale, leur adversaire en profitant pour les croquer...

Autre cas de catalepsie : celui du chien d'arrêt ; lorsqu'il a décelé une proie, il demeure figé sur place, l'une de ses pattes antérieures pliée au niveau du carpe, durant

Bruce Coleman

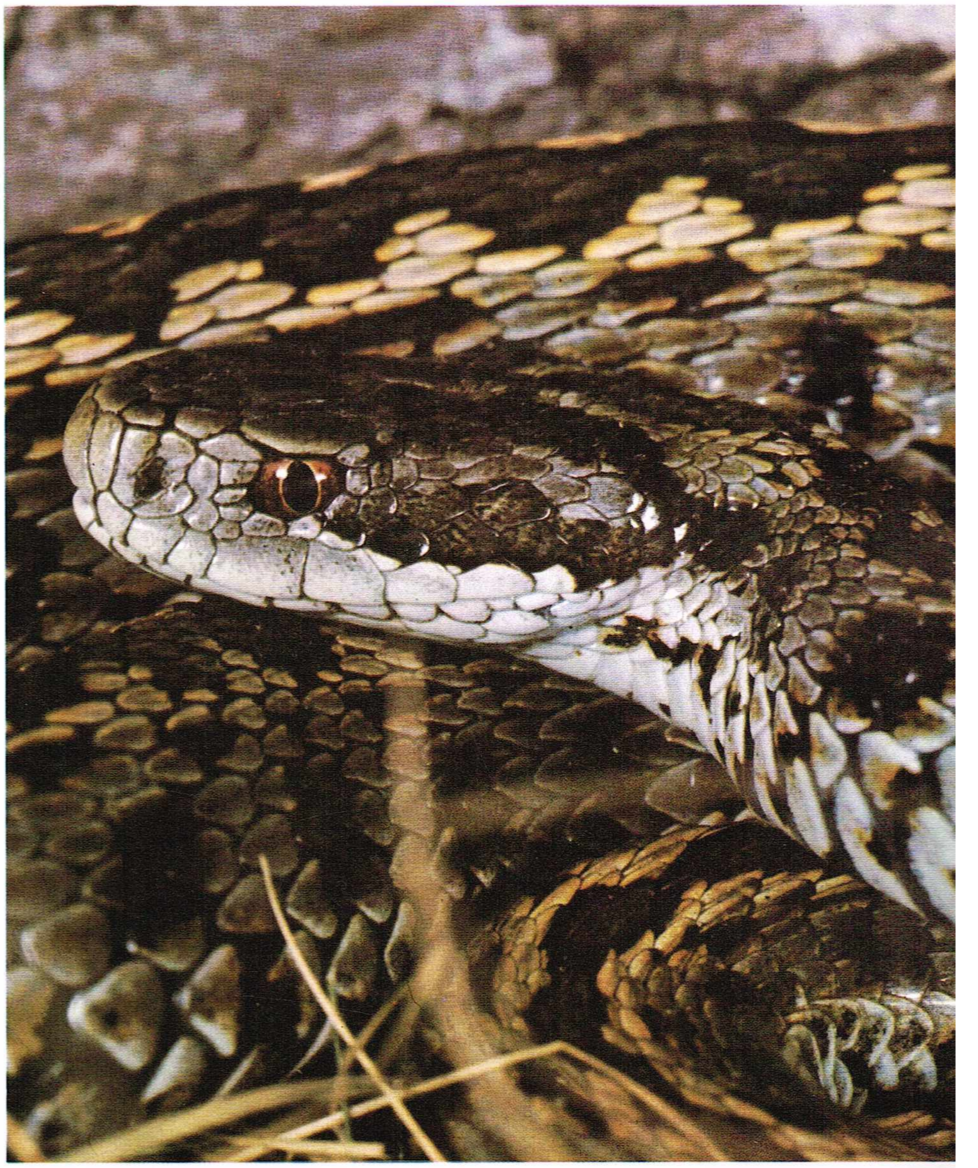

La vipère *Orsini*, comme la plupart des serpents des zones tempérées, entre dans une période de léthargie hivernale.

Un exemple de Mammifères qui tombent en léthargie : la taupe.

plusieurs minutes. Les chiens couchants, quant à eux, se plaquent au sol à l'approche du gibier.

De très nombreux Invertébrés présentent ce qu'on appelle des « formes de résistance », autre phénomène de vie latente, chaque fois que les conditions du milieu dépassent les limites de tolérance de l'animal. Il n'est pas rare d'observer des stades progressifs de ralentissement des phénomènes physiologiques ; l'activité normale demeure lorsque les conditions extérieures sont favorables ; elle est partiellement réduite lorsqu'elles le sont moins (par exemple, l'animal ne se reproduit plus), et pratiquement supprimée dans les cas les plus défavorables.

On trouve des « formes de résistance » chez les Protozoaires ; bien que ces derniers aient besoin d'un milieu liquide, ils parviennent néanmoins à survivre durant un temps assez long sur un substrat sec, en se transformant en spores ou en subissant un processus d'enkystement.

Les spores ont la propriété de résister à des températures beaucoup plus élevées et beaucoup plus basses que celles compatibles avec la vie du Protozoaire dont elles sont issues. Cette survie est possible grâce à l'arrêt de toute activité physiologique, tandis que demeure la possibilité pour la spore de se transformer à nouveau en Protozoaire aussitôt que les conditions ambiantes redeviendront favorables et l'humidité suffisante.

Il en est de même en cas d'enkystement : l'animal se déshydrate presque complètement et devient inactif ; il peut ainsi résister à la sécheresse à l'intérieur de certaines limites qui sont cependant assez larges. En présence d'eau d'un pH et d'une salinité appropriés, le kyste se réhydrate et le Protozoaire recommence à vivre.

Certains Invertébrés, les Rotifères et les Tardigrades, peuvent aussi se transformer facilement en kystes : les premiers, qui vivent dans les mousses humides et sur les lichens, se réduisent à un état de vie latente lorsque leur substrat vital se dessèche ; les seconds subissent ce phénomène lorsque la vase des canaux et des gouttières ou le terreau dans lequel ils vivent s'assèche. A l'état de kystes, ils sont capables de résister même plusieurs mois.

Les œufs du Crustacé Artemia salina *peuvent survivre à l'état desséché pour reprendre vie au bout de dizaines d'années : on les a même vendus à l'intention des enfants sous le nom de « poudre de vie »...*

Les Éponges présentent des formes de résistance connues sous le nom de « gemmules », qui se développent à l'intérieur du corps de l'Éponge lorsque les conditions deviennent défavorables ; dans la gemmule sont pour ainsi dire inscrites toutes les cellules qui serviront à reconstituer l'Éponge. Protégée par une enveloppe résistante, elle est ainsi capable de résister dans un milieu défavorable.

LE CAS DES PARASITES

Les parasites présentent des formes particulières de vie latente ; leur activité physiologique ne pouvant s'exercer que dans un organisme hôte, ils doivent, pour survivre, subir une transformation opportune lors du passage d'un hôte à l'autre ou lorsqu'ils se trouvent dans l'attente d'être ingérés par un organisme leur offrant un milieu favorable.

La douve du foie, par exemple, se transforme, à un certain moment de son cycle de développement complexe, en cercaire, forme particulière qui vit à l'état libre dans l'eau. La cercaire se fixe bientôt sur les feuilles et sur les tiges de certaines plantes aquatiques et s'y enkyste, dans l'attente qu'un mouton l'introduise, avec l'herbe, dans son appareil digestif : c'est là que le kyste se transforme en douve adulte, capable de se reproduire.

Un phénomène analogue est observé chez le ténia ou ver solitaire, dont la forme larvaire, le cysticerque, se fixe aux muscles du porc et y reste inchangée jusqu'à ce que l'homme l'absorbe. Une fois dans l'appareil digestif humain, le cysticerque produit l'animal adulte.

Comme dernier exemple, enfin, nous citerons le Nématode parasite Trichinella spiralis, *dont l'adulte bourgeonne dans l'intestin de l'hôte de très nombreuses larves qui vont s'enkyster dans les muscles de l'hôte, par exemple dans le diaphragme du rat, d'où elles peuvent passer dans le porc pour s'y transformer en individu adulte, lequel se reproduit et bourgeonne de nouvelles larves ; celles-ci s'enkystent dans les muscles du porc et l'ingestion de la viande infestée provoquera chez l'homme l'apparition du parasite. Comme on le voit, les formes d'enkystement sont fréquentes chez les vers parasites.*

LA VIE LATENTE CHEZ LES VÉGÉTAUX

La graine des végétaux constitue l'un des exemples les plus connus de la vie latente : il s'agit d'un corpuscule de forme et dimensions diverses, apparemment sans vie, qui peut généralement résister durant très longtemps dans des conditions qui seraient absolument incompatibles à la survie de la plante dont il est issu, et cela tout en conservant la possibilité de germer dès que les conditions redeviendront favorables.

Cette aptitude de la graine à survivre dans les conditions les plus diverses sans manifester une quelconque activité physiologique assure d'une part la diffusion de l'espèce, la graine pouvant être emportée très loin par les moyens les plus variés, et d'autre part, la conservation même de l'espèce ; ainsi, une crue ou un incendie peut provoquer la destruction de nombreuses plantes, mais aussi bien l'eau, dans le premier cas, que le vent, dans le second, sont susceptibles de transporter ailleurs les graines.

Les végétaux inférieurs, les Cryptogames, qui ne produisent ni fleurs ni graines, émettent des spores ; cependant, celles-ci n'ont pas la même résistance que les graines.

Dans certaines espèces, en effet, la spore peut rester très longtemps en suspension dans l'air avant de retomber sur le sol et de germer. Dans d'autres espèces, en revanche, le temps de survie de la spore est court et celle-ci meurt si elle ne rencontre pas tout de suite un terrain favorable.

Il existe chez les végétaux d'autres formes de résistance, telles que les propagules des mousses, qui sont néanmoins relativement fragiles, et les sclérotes des Champignons : ces derniers, protégés par une enveloppe très dure et très résistante, sont capables de survivre dans les conditions les plus difficiles.

Il convient, enfin, de mentionner le pollen, qui n'est pas à proprement parler une forme de résistance, mais qui renferme un gamète (cellule sexuelle) mâle ; emporté pendant longtemps au gré des vents, il se montre apte, du moins dans certaines espèces, à résister à des conditions précaires et conserve le pouvoir de féconder la première fleur de son espèce sur le pistil de laquelle il se posera.

Mais ce sont sans doute les Bactéries qui battent tous les records de vie latente. Récemment, des chercheurs américains ont découvert dans le sous-sol de l'Antarctique des Bactéries vieilles de 10 000 ans à près d'un million d'années. Ils ont pu les ranimer et elles se sont même multipliées dans un milieu de culture adéquat. Des Bactéries encore beaucoup plus anciennes, trouvées dans des mines de sel, auraient de même « ressuscité ». Il faut toutefois se méfier de certaines exagérations en ce domaine.

Les problèmes de la vie latente et de la survie passionnent en tout cas les biologistes. Qu'en sera-t-il demain pour notre espèce ? Aux États-Unis plusieurs personnes récemment décédées ont été congelées dans l'espoir d'une hypothétique résurrection...

LA VOIX DES ANIMAUX

L'homme, être capable de raisonnement, exprime sa pensée à l'aide de la parole. A mesure que ses connaissances et son expérience s'étendent, le langage se perfectionne et l'expression écrite ou orale prend une importance croissante. La communication verbale est rendue possible par l'aptitude que l'homme présente à articuler des sons à l'aide de la langue, sons produits par des replis cutanés situés à la partie supérieure des voies respiratoires, les cordes vocales, dont les mouvements et la tension sont réglés par des muscles appropriés.

Indépendamment de la signification des sons émis, la voix elle-même, par ses diverses inflexions, renseigne sur l'état émotionnel de la personne qui parle. De plus, un regard, un geste, une moue complètent le langage parlé. Mais, si la parole n'appartient qu'à l'homme, placé au sommet de l'échelle animale, les autres animaux utilisent eux aussi l'émission de sons comme moyen, sans doute très élémentaire, de communication. Les animaux aussi communiquent entre eux, et de façons très diverses. On ne peut en effet imaginer une société animale, ou même simplement une famille dont les membres ne se comprendraient pas : ce serait une vraie tour de Babel.

Aussi est-on amené à parler du « langage des animaux ». En fait, c'est un peu exagéré. Chez la plupart des espèces, il s'agit seulement de signaux ou de codes, qui s'appliquent à la situation présente et manquent d'abstraction et de symbolisation.

La danse de l'abeille serait pourtant un véritable langage : on sait que l'abeille informe, grâce à elle, ses congénères de la distance à laquelle se situe une source intéressante de nourriture.

Mieux encore, depuis une date récente, des biologistes ont entamé un véritable dialogue avec le chimpanzé. En effet, grâce au langage des sourds-muets, ou en assemblant des jetons de couleurs, ou encore en tapant sur un clavier, des chimpanzés parviennent à composer de petites phrases. Et n'oublions pas l'extraordinaire dialogue, fondé sur des sons celui-là, que l'homme commence avec le dauphin.

Le « langage » des animaux — employons quand même ce terme — comprend des signaux de types très variés. Il en est de tactiles, comme les frottements de nez des Rongeurs et les jeux d'antennes des fourmis. D'autres sont visuels : postures des Oiseaux, mimiques du chat, des singes, etc. D'autres, fort importants, sont olfactifs : de nombreux Insectes sociaux, et aussi des Mammifères, sécrètent à l'extérieur des hormones odorantes, les phéromones, qui jouent un grand rôle dans leur biologie.

CRIS ET CHANTS DES OISEAUX

Et puis, il y a donc, bien sûr, des signaux auditifs. C'est tout de suite aux Oiseaux que l'on pense à cet égard. Leurs émissions vocales sont produites par un organe qui leur est propre : la syrinx. Formée de membranes vibratoires, elle se situe à la bifurcation des deux bronches.

Il faut faire une nette distinction entre les cris et le chant. Les premiers sont poussés par le mâle comme par la femelle et les jeunes, et à toute époque de l'année. Ils ne sont généralement pas très mélodieux mais ont des significations fort diverses.

Ainsi, chez la poule domestique, une dizaine de cris ont été identifiés : cri d'alarme, cri de ponte, cri de menace, cri d'appel, cri de défense, gloussement, piaillement, etc.

Chez les corbeaux, existe un cri d'effroi, destiné à inciter les congénères à fuir devant un danger. Il signifie à peu près : « Sauvez-vous, il y a un danger. » Il a eu une application économique inattendue. Les agronomes l'enregistrent sur bande magnétique, puis le diffusent par haut-parleur à intervalles réguliers. En entendant ce « message », les corbeaux finissent par abandonner les lieux, en général un champ où leur abondance les rendait indésirables.

Le chant est, au contraire, le propre du mâle, à quelques exceptions près. Il n'est vraiment mélodieux que chez les passereaux, dont certaines espèces sont réputées à cet égard : le merle noir, dont le chant retentit jusqu'au

Archivio Longo

Le rouge-gorge, comme bien d'autres Oiseaux, émet un chant très harmonieux.

Bruce Coleman - F. Erize

Les gros Mammifères, ici un couple d'éléphants de mer, possèdent des voix extrêmement diverses, dont l'intensité n'est pas toujours en rapport avec leur taille. La voix, moyen de séduction, leur permet aussi d'exprimer la douleur, la colère, l'agressivité, etc.

cœur de nos villes, la grive musicienne et, bien sûr, le rossignol.

L'Oiseau qui chante cherche à affirmer sa présence dans son « territoire », c'est-à-dire la surface qu'il considère comme sa propriété, au moins vis-à-vis de ses congénères.

INSECTES MUSICIENS

Les signaux acoustiques ont aussi une grande importance dans la biologie des Insectes « musiciens », autrement dit les criquets, les sauterelles, les grillons et les cigales.

La façon dont « chantent » ces divers Insectes est très variable. Les criquets frottent les cuisses de leurs pattes postérieures sur le bord de leurs élytres, qui sont leurs ailes antérieures durcies.

Au contraire, les sauterelles frottent l'archet (autrement dit la nervure crénelée) de leur élytre gauche contre le miroir, sorte de surface lisse entourée d'un cadre, de leur élytre droit.

Le chant du grillon, lui, peut s'entendre jusque dans nos maisons... et dans les stations du métro parisien. Cet Insecte possède deux élytres identiques : chacun est doté d'un archet et d'une chanterelle, qui est en quelque sorte la « corde » de l'instrument. L'archet de l'élytre droit frotte la chanterelle de l'élytre gauche, et vice versa.

Quant aux cigales, elles présentent, suivant l'espèce, deux types d'appareils. Il peut s'agir d'un double tambour, formé d'une membrane élastique vibrante, et situé à la face inférieure du thorax. C'est en somme une caisse de résonance. Chez d'autres cigales, le thorax et l'abdomen sont creusés d'une vaste cavité qui joue le même rôle.

La signification du chant des Insectes est également variable. Il peut servir à effrayer un ennemi, à défendre le territoire, à garder le contact avec les congénères. Mais surtout, ce chant intervient dans le rapprochement des sexes : les femelles de sauterelles sont attirées par la stridulation des mâles.

DU CHAT AUX CHAUVES-SOURIS

Le langage vocal des Mammifères présente, on le sait, une immense diversité. Celui des singes a été très étudié. On est ainsi parvenu à déchiffrer la signification des cris du lagotriche ou singe laineux d'Amérique du Sud. Chez lui, « Iolk » est un cri de bienvenue ; « Ooh-ooh », une invitation au jeu ; « Argck-argck » est agressif.

Le langage du chat est fort subtil en raison du dédoublement de ses cordes vocales. Il comprend plus de 65 sons différents. Le chat miaule, bien sûr, mais son répertoire comprend aussi des roucoulements, des grognements, des grondements, des « cris de guerre » qui évoquent les jappements du chien... Le feulement amoureux... et nocturne est bien connu.

Et puis, il y a le ronronnement, dû, semble-t-il, à une contraction des cordes vocales. De prime abord, il semble être une manifestation de bien-être, d'euphorie.

La réalité est sans doute plus complexe. Le ronronnement, selon des travaux récents, serait un comportement infantile qui persisterait à l'état adulte. Les observations faites par le professeur B. Condé, de l'université de Nancy, sont, à cet égard, significatives : de jeunes chats sauvages ronronnent avec leur mère durant l'allaitement ; s'ils sont très tôt confiés à une chatte domestique, ils ronronnent de même avec elle. S'ils sont nourris au biberon par un homme, c'est avec lui qu'ils ronronnent.

Autrement dit, le ronronnement est une conséquence de l'imprégnation par la mère, ou l'être qui en tient lieu. Le chat adulte qui ronronne en présence de son maître (dans la mesure où le chat peut avoir un « maître », ce que d'aucuns contestent !) lui témoigne donc sa soumission. Il ronronne par exemple pour lui demander de la nourriture.

Parfois aussi, les chats ronronnent lorsqu'ils se trouvent dans une situation difficile, après un accident ou lors d'une maladie : c'est leur façon d'appeler leur maître au secours.

Le langage félin se compose encore de mimiques de la face (75 expressions ont été décelées), de mouvements du corps (comme le « gros dos ») et de la queue. De plus, le chat marque les frontières de son territoire avec sa salive, son urine, ou des sécrétions odorantes de ses glandes.

Le langage du chat est donc composé de toute une gamme de signaux d'ordres très variés. Il en va de même pour le chien et bien d'autres animaux. Aux hommes, qu'ils soient psychologues ou simples curieux, de savoir les comprendre.

Une difficulté surgit à propos des sons : l'oreille humaine est seulement sensible aux sons de fréquence comprise entre 16 et 1 600 Hz, c'est-à-dire dans un intervalle beaucoup plus restreint que celui de nombreux animaux. Ainsi, nous ne percevons que les sons émis par un certain nombre d'animaux, et n'entendons pas ceux émis par d'autres.

Ainsi, les chauves-souris s'orientent grâce à l'émission de sons non audibles pour l'homme, des ultrasons, qui sont réfléchis par les obstacles qu'ils rencontrent sur leur trajectoire. L'efficacité du « radar » ou, mieux, du sonar, de ces animaux est notablement supérieure à celle de l'appareil construit par l'homme sur le même principe : en effet, les chauves-souris sont capables de voler entre des obstacles très rapprochés et de capturer en plein vol des Insectes de très petite taille.

Le fait que de nombreux animaux peuvent communiquer entre eux par l'émission de sons non perceptibles par l'homme ouvrira sans doute, une fois que les instruments techniques appropriés seront mis au point, un nouveau champ de recherches et permettra notamment d'expliquer certains comportements qui paraissent incompréhensibles.

LES ÊTRES VIVANTS ET LE MILIEU

T. Sacco

Un groupe d'indigènes au marché de bananes d'Arusha, en Tanzanie. La population du globe est divisée en races et sous-races, dont les caractéristiques sont en partie déterminées par l'influence du milieu et se transmettent selon la loi de transmission des caractères héréditaires.

L'influence du milieu, ou de l'environnement, comme on dit plus volontiers aujourd'hui, sur l'évolution des êtres vivants est très importante ; l'aspect que nous offrent aujourd'hui la flore, la faune et l'homme lui-même dérive pour une bonne part de l'influence du milieu dans lequel les différents organismes ont vécu depuis l'origine de la vie.

Certes, tout être vivant adopte comme habitat celui dont les conditions (température, taux d'oxygène, lumière, humidité, etc.) lui sont le plus favorables, mais le milieu exerce à son tour une action indiscutable sur le plan de la sélection naturelle des caractères, déterminant ainsi les particularités propres à chaque espèce.

Prenons l'exemple de la longueur des membres (bras, jambes, mains et pieds) des Esquimaux : ils sont nettement plus courts que chez les populations des zones tempérées et chaudes, ce qui est dû à la rigueur du climat ; en effet, les membres offrent une surface importante de déperdition de chaleur et, par conséquent, leur réduction diminue cette déperdition.

Autrefois, sous l'influence de Lamarck, de nombreux savants considéraient que les caractères acquis par un individu au cours de son existence étaient transmissibles comme les caractères héréditaires. Ainsi — croyait-on — un homme qui avait acquis une musculature puissante par un travail physique intense pouvait transmettre ce caractère à ses descendants ; de même, les membres courts des jeunes Esquimaux auraient été dus à un processus analogue.

Une telle interprétation du mécanisme héréditaire est tout à fait erronée : un caractère acquis, sous l'effet du milieu ou du mode de vie, par un individu au niveau de son phénotype (ou aspect extérieur) ne s'inscrit pas dans son génotype (ou patrimoine chromosomique) et encore moins dans celui de ses enfants. Les phénomènes

Marka

Ci-dessus : les Pinnipèdes des mers polaires possèdent sous leur peau épaisse une couche importante de graisse et présentent d'autres caractéristiques les rendant aptes à vivre dans les eaux glaciales.

qui sont à l'origine de l'évolution sont d'une tout autre nature.

Le problème de l'adaptation au milieu passionne biologistes et écologistes. La plupart des animaux paraissent en effet morphologiquement adaptés au milieu qu'ils habitent. Toutefois, il est des exceptions à cette règle. Ainsi, les espèces migratrices fréquentent, au cours de leurs déplacements, des régions d'aspects variés.

L'ours blanc, qui vit sur les côtes des mers arctiques et nage très bien, a une morphologie peu différente de celle des ours montagnards. De petits Rongeurs, comme les campagnols, sont de très bons fouisseurs : ils n'ont pourtant pas les adaptations de la taupe par exemple.

Mais souvent au contraire, l'adaptation des animaux à leur milieu et à leur genre de vie est si poussée qu'elle entraîne le phénomène de convergence. Autrement dit, des espèces de groupes très différents, mais menant une existence comparable, finissent par se ressembler. Ainsi, les thons, les requins, les dauphins, les ichtyosaures (Reptiles de l'ère secondaire) ont la même silhouette hydrodynamique.

De même, les membres antérieurs en pelle de la taupe se retrouvent chez le notorycte, ou « taupe marsupiale » d'Australie. Mieux encore, divers Insectes ont aussi des pattes antérieures en pelle. Le plus connu est la courtilière, d'ailleurs appelée pour cette raison « taupe-grillon ». C'est aussi le cas d'un coléoptère du Brésil et d'un orthoptère australien.

LA SÉLECTION NATURELLE

La sélection naturelle a pour effet de préserver, dans un milieu donné, les individus les plus aptes à y vivre et d'éliminer les autres.

Ainsi, le jeune Esquimau, né avec des membres longs, courra un risque de congélation dès les premières années de sa vie ; même si ce risque est évité, son existence d'adulte sera rendue plus précaire par le fait qu'il souffrira davantage du froid. Incapable de résister longtemps au froid, sa chasse sera moins fructueuse et ses enfants, moins bien nourris, succomberont plus nombreux.

Les survivants seront désavantagés à leur tour par la longueur de leurs membres ; leur descendance s'éteindra et les individus aux membres courts deviendront plus nombreux.

Un autre facteur important de sélection lié au milieu est la plus ou moins grande abondance de la nourriture. Les animaux vivant dans des régions où la nourriture abonde seront plus grands, plus forts et plus prolifiques que ceux qui vivent dans les zones plus pauvres ; ces derniers s'éteindront peu à peu à cause de la dénutrition.

Ainsi, par exemple, les rats seront beaucoup plus nombreux et plus robustes dans les endroits où la nourriture est abondante ; ils y attireront des renards, des rapaces et d'autres animaux qui se nourrissent de rats. La population croîtra donc considérablement, jusqu'au moment où, la nourriture venant à manquer, les rats mourront ou migreront ailleurs, entraînant à leur suite les animaux dont ils constituent la principale source alimentaire.

Mais les tentatives de migration pourront se heurter à la résistance opposée par les animaux qui occupent les zones limitrophes ; dans ce cas, l'espèce confinée dans un territoire pauvre en nourriture s'éteindra ou bien modifiera ses exigences alimentaires de manière à les rendre compatibles avec les possibilités offertes par le milieu. Il s'ensuivra une transformation pouvant aboutir à l'apparition d'une espèce sensiblement différente de l'espèce primitive.

L'évolution de l'espèce humaine a été également influencée par des phénomènes de cette nature, mais ceux-ci étaient plus manifestes autrefois qu'aujourd'hui. Les groupes humains vivant dans une région donnée, riche en nourriture et surtout en gibier, devenaient plus robustes et se montraient plus prolifiques, constituant une ethnie forte et nombreuse, qui allait bientôt déborder des limites territoriales et occuper les contrées habitées par des populations moins nombreuses, mal nourries et peu combatives. Ces dernières étaient bientôt soumises et, assimilées par les envahisseurs, perdaient tout caractère ethnique distinctif.

LES FACTEURS LIÉS AU MILIEU

On range habituellement parmi ces facteurs certaines maladies infectieuses capables de décimer en peu de temps des populations entières, comme le choléra, le typhus, le paludisme, la dysenterie, la tuberculose, la variole, etc. La présence des agents responsables de ces maladies dans un secteur écologique où vit une population humaine modifie de manière considérable l'évolution de celle-ci, la rendant plus faible que les populations voisines et limitant l'accroissement démographique à cause de la forte mortalité infantile : on estime que, dans les pays sous-développés, un enfant sur trois meurt encore aujourd'hui de ces maladies.

Une caractéristique importante liée à l'influence du milieu est la pigmentation de la peau, phénomène facilement observable chez l'homme. Une forte pigmentation, due à l'abondance de mélanine dans le derme, constitue un écran très efficace contre le rayonnement ultraviolet qui pourrait provoquer la mort des cellules superficielles ou des mutations dans les cellules moins directement exposées.

C'est pourquoi la pigmentation de la peau est beaucoup plus importante chez les populations qui vivent sous un climat où le rayonnement solaire est intense que chez les populations vivant dans des régions moins ensoleillées où, au contraire, l'exposition au rayonnement ultraviolet est utile. En effet, la lumière solaire catalyse dans la peau la transformation de l'ergostérol en vitamine D, indispensable à la formation et à la croissance des os.

On assiste à un « ajustement » progressif de la pigmentation, tel que la quantité de rayonnement absorbé soit optimale pour la production de la quantité voulue de vitamine D. Le milieu exerce, en outre, une influence importante pour la persistance ou la disparition des mutations génétiques. Prenons le cas de la thalassémie, affection caractérisée par une déformation des globules rouges : cette maladie héréditaire provoquée par une mutation exerce une influence très défavorable sur l'évolution de la population atteinte, car les individus homozygotes (c'est-à-dire possédant en double le gène responsable) meurent jeunes et les hétérozygotes (qui n'ont qu'un gène muté) présentent un aspect (hypertrophie des os crâniens) et une faiblesse de constitution physique qui font que les femmes les épousent moins volontiers ; aussi sont-ils condamnés à s'éteindre. En revanche, dans les endroits infestés par le paludisme, les individus hétérozygotes atteints de thalassémie présentent une immunité à l'égard du paludisme ; ainsi, la mutation génétique responsable de la thalassémie tend à se perpétuer.

On peut s'attendre en tout cas à des discussions passionnées entre biologistes au sujet de l'influence du milieu sur les êtres vivants. En U.R.S.S., le problème a même pris une dimension politique avec l'affaire Lyssenko. En France, certains biologistes ont tenté de moderniser le lamarckisme : ainsi, selon P. Wintrebert, le gène pourrait être assimilé à un anticorps qui réagirait à l'égard du milieu.

SYMBIOSE ET COMMENSALISME

La nature nous offre de nombreux exemples d'organismes d'espèces différentes, parfois même très éloignées dans la classification, qui s'associent afin de tirer un avantage réciproque de leur vie commune et de réaliser ainsi les conditions optimales d'existence. Parfois, cette association est tellement intime que l'on considère ces organismes comme formant un tout indépendant : il en est ainsi pour les lichens.

Dans certains cas, un seul des deux organismes tire profit de cette association, tandis que le second n'en éprouve ni avantage ni inconvénient.

Précisons que lorsque l'association se révèle avantageuse pour les deux partenaires, on parle de mutualisme, *ou symbiose véritable ; lorsque l'association se réduit à l'utilisation commune des ressources alimentaires, à l'avantage de l'un des organismes mais sans lésion pour l'autre, elle prend le nom de* commensalisme ; *lorsque, enfin, il s'agit uniquement de l'utilisation simultanée du même espace d'habitation, ce phénomène prend le nom de* neutralisme.

Citons encore un dernier type de symbiose connu sous l'appellation de symbiose physiologique héréditaire. *Il s'agit d'une forme de symbiose qui associe certains animaux avec des Champignons et des Bactéries et qui se réalise par l'intermédiaire des œufs de l'animal.*

C. Bevilacqua

Les lichens constituent l'exemple le plus classique de symbiose entre deux végétaux ; ils sont formés par l'association d'une Algue et d'un Champignon.

SYMBIOSE ENTRE VÉGÉTAUX

En premier lieu, la symbiose peut se réaliser entre deux végétaux différents, comme dans le cas des lichens ou des mycorhizes, organismes mixtes formés de la symbiose entre Champignons et racines d'orchidées ou de certains arbres ; dans d'autres cas, il s'agit de l'association d'une plante supérieure et d'une Bactérie, comme cela se produit entre les racines des légumineuses et la Bactérie Rhizobium.

Le cas des lichens est le plus typique : ils sont formés de l'association d'une Algue verte (Chlorophycée), ou parfois bleue (Cyanophycée), et d'un Champignon, habituellement un Ascomycète : les deux partenaires tirent un avantage réciproque de leur cohabitation. L'Algue est protégée par le Champignon, qui l'enveloppe et lui fournit de l'eau, ce qui lui permet de se développer plus activement que si elle était libre.

Les lichens se rencontrent sur les murs, les écorces des arbres, les rochers, et même le verre. En Laponie, ils constituent la nourriture principale des rennes. On extrait de certains des colorants.

Ces curieux organismes sont extrêmement résistants, notamment vis-à-vis du froid et de la dessiccation. Aujourd'hui cependant, ils souffrent de la pollution.

Cellules des nodosités (sortes de tubercules sur les racines) d'une légumineuse ; outre le cytoplasme et le noyau, on voit, dans de nombreuses cellules, les Bactéries symbiotes *(Rhizobium leguminosarum)* fixatrices d'azote (× 350 × 1,5, coloration de contraste).

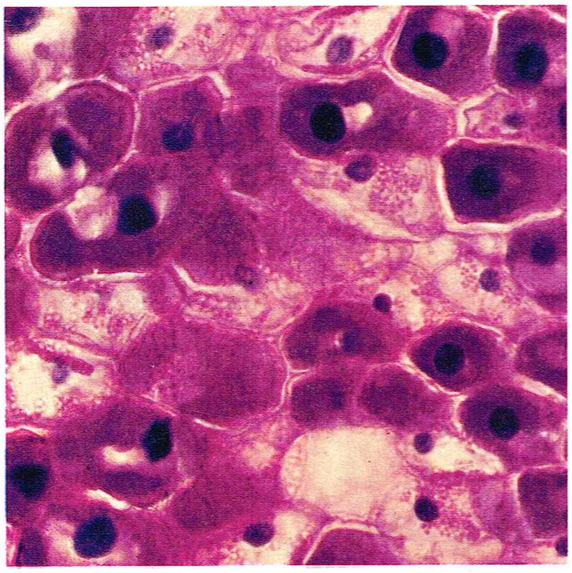

P. Castano

SYMBIOSE ENTRE VÉGÉTAUX ET ANIMAUX

Les cas de symbiose entre végétaux et animaux sont également très nombreux : rappelons les associations symbiotiques de certaines Algues unicellulaires, zoochlorelles et zooxanthelles, avec des Protozoaires (amibes, radiolaires, etc.), des Spongiaires, des Cnidaires et d'autres animaux.

Les Algues, par le jeu de l'assimilation chlorophyllienne, fournissent des substances nutritives à l'hôte qui accepte leur présence. Et n'oublions pas les Bactéries qui vivent dans l'intestin de certains animaux et qui, loin d'être pathogènes, s'avèrent d'une grande utilité pour l'animal. Ainsi, la « flore » bactérienne du tube digestif de l'homme comprend de très nombreuses espèces, dont beaucoup présentent une utilité certaine pour la fonction digestive.

Un cas singulier de symbiose existe entre un Insecte diptère du genre Phorbia, *dont les larves vivent dans les pommes de terre, et une Bactérie qui produit une sorte de moisissure. La Bactérie vit dans l'intestin du Diptère, donc en contact avec ses excréments ; au moment de la ponte, les œufs de l'Insecte, souillés d'excréments, entraînent la Bactérie qui se fixe sur la*

pomme de terre et, grâce à la moisissure qu'elle produit, la rend comestible pour les larves à peine écloses.

Un autre exemple de symbiose nous est offert par les Insectes xylophages qui possèdent dans leur tube digestif des Bactéries capables de rendre digestibles certaines substances; sans les Bactéries, celles-ci ne pourraient être utilisées par l'Insecte.

Rappelons, enfin, que les phénomènes de luminescence de certains Poissons et de quelques Céphalopodes semblent être dus à la présence de Bactéries symbiotiques, qui produisent des substances luminescentes ou phosphorescentes.

ASSOCIATIONS ENTRE ANIMAUX

Les associations entre animaux sont infiniment nombreuses et variées. C'est ainsi que les fourmilières et les termitières hébergent, en plus de leurs hôtes normaux, des locataires plutôt insolites. Un curieux Reptile sans pattes, l'amphisbène, les occupe régulièrement, d'où son nom de « roi des fourmis ».

Il existe de même des araignées dites myrmécophiles (amies des fourmis) et termitophiles : certaines sont aveugles. Les redoutables fourmis légionnaires ont pour commensaux des Coléoptères du groupe des staphylins, qui présentent un stupéfiant mimétisme morphologique : ils ressemblent à s'y méprendre aux fourmis... Ils ont une tête étroite aux longues antennes, un corps effilé et des pattes allongées. Ces staphylins sont très bien tolérés par les fourmis.

Les Oiseaux nous offrent de non moins curieux exemples d'associations. Ainsi, les moineaux domestiques, les populaires « pierrots », nichent souvent dans les branchages des nids de cigogne, de héron ou même de grand rapace. On a aussi vu des mésanges nidifier dans un nid d'épervier...

Une telle confiance s'explique doublement. D'abord, les rapaces ne chassent pas dans leur territoire de nidification; ensuite, ils constituent une excellente force de dissuasion à l'égard des prédateurs tentés de s'attaquer aux Oiseaux.

Diverses espèces de perruches, perroquets, pics et martins-pêcheurs nichent dans des nids de guêpes, fourmis ou termites occupés par leurs hôtes. Les Insectes, là encore, supportent très bien la présence des Oiseaux, même si ceux-ci les gobent parfois. De telles cohabitations s'observent dans toutes les régions tropicales, de l'Amérique à l'Australie. Certains Oiseaux ne nichent même que sur des nids d'Insectes.

Autre association très curieuse, et encore mal élucidée : celle qui unit un petit Poisson marin, l'amphiprion, à une actinie ou anémone de mer. C'est un spectacle visible dans certains aquariums, par exemple au Palais de la découverte à Paris.

Ce rhinocéros porte sur son dos des buphages ou pique-bœufs, sortes d'étourneaux qui le débarrassent de ses parasites.

N. Myers

Bruce Coleman - J. Burton

Les termites parviennent à « digérer » d'énormes quantités de bois grâce à la présence dans leur tube digestif de Bactéries ou de Protozoaires spécialisés.

L'amphiprion est encore appelé poisson-clown, en raison de sa livrée bigarrée, jaune avec deux bandes blanches. Il demeure presque constamment au voisinage de son « actinie » : il se frotte à ses tentacules, qui sont pourtant urticants.

Comment donc l'amphiprion résiste-t-il au venin de sa partenaire? On suppose que sa peau est enduite d'un mucus, qui viendrait d'ailleurs de l'actinie elle-même; à force de la caresser, le Poisson finirait par s'en recouvrir.

L'association est bénéfique aux deux espèces. L'amphiprion paraît manger les déjections de l'anémone de mer; en contrepartie, il la nettoie des déchets qui la couvrent et la défend même contre les tortues de mer.

Toujours dans le monde marin, de petits crabes vivent à l'intérieur des coquilles de moules : on en trouve parfois en les dégustant.

Revenons aux Vertébrés supérieurs pour découvrir des associations parfois très subtiles.

A Bornéo, une perdrix à huppe rouge, le roulroul, vit en compagnie d'un sanglier. Elle court autour de ce vorace porcin et profite des morceaux de fruit qui tombent de sa gueule pendant sa mastication : elle prend même des morceaux sur ses lèvres et se pose quelquefois sur son dos... Les roulrouls servent aussi de sentinelles au sanglier et suppléent à sa vue médiocre.

Des Oiseaux africains, apparentés aux pics, doivent à leurs mœurs extraordinaires les noms d'indicateurs et de guide-miel. Ils mangent la cire des abeilles sauvages — ce qui est déjà insolite — mais ne sont pas capables de fracturer leurs nids. Aussi ont-ils mis au point, au cours de leur évolution, un procédé astucieux.

L'indicateur commence par repérer un ratel, sorte de blaireau au pelage blanc dessus et noir dessous, et attire son attention par des cris. Pour comprendre l'intérêt de l'opération, il faut savoir que le ratel a un furieux faible pour le miel...

Ensuite, volant d'arbre en arbre, l'indicateur guide le carnivore vers un nid d'abeilles, principalement par ses cris, car il est presque toujours hors de la vue du ratel. Arrivé au but, celui-ci saccage le nid pour en dévorer le miel, puis l'indicateur mange la cire et les larves qu'il convoitait.

Cette association est l'une des plus poussées du monde animal : le ratel répond d'ailleurs à l'Oiseau par des grognements. L'indicateur s'est aussi adapté aux hommes et les conduit de même vers les abeilles. Les Hottentots prennent les devants, en signalant leur présence à l'Oiseau.

Mais comment sont apparus, au cours de l'évolution, tous ces phénomènes de symbiose, de commensalisme, de cohabitation? Dans la plupart des cas, il est bien difficile de répondre...

LES MÉTAMORPHOSES

La formation d'un nouvel individu se fait, dans le règne animal, selon des modalités très diverses. La reproduction sexuée, *qui fait intervenir deux cellules germinales, les gamètes, est la plus répandue. Les gamètes, mâle et femelle, fusionnent en une cellule unique, l'œuf ou zygote. A peine formé, le zygote commence à se segmenter, c'est-à-dire à se diviser en de nombreuses cellules qui formeront les tissus et les organes de l'individu adulte.*

L'œuf peut donner naissance à un embryon assez semblable à l'adulte, ou bien à un embryon de forme très différente de l'adulte ; dans ce dernier cas, le nouvel organisme s'appelle larve.

Le passage de l'état larvaire au stade adulte est appelé métamorphose ; *le phénomène de la métamorphose, dont les modalités et les stades sont très divers, se rencontre dans des groupes très éloignés les uns des autres, comme les Plathelminthes (vers plats), les Crustacés (écrevisse, crabe), les Insectes (abeilles, papillons, etc.), les Amphibiens (grenouilles, etc.).*

LA GRENOUILLE

La métamorphose de la grenouille est la plus facile à suivre car ses larves, ou têtards, sont très répandues dans les petits ruisseaux, les petites mares et les lacs, bien qu'il soit rare de pouvoir assister à leur développement complet. La grenouille pond dans l'eau où elle dépose une très grande quantité d'œufs. Ceux-ci sont réunis par une substance gélatineuse et se présentent sous forme de grappes. La conservation de l'espèce exige que les œufs soient pondus en très grand nombre, car les petits qui en sortiront sont des proies faciles pour les prédateurs.

Lorsque le temps est favorable, les œufs fécondés commencent à se segmenter ; au quatrième jour, l'embryon, devenu désormais une larve, commence à bouger dans l'œuf ; au cinquième-sixième jour, l'œuf se fend et en sort le têtard, long d'environ 1 mm : celui-ci présente des organes déjà assez bien différenciés. En effet, si on l'observe à la loupe, on peut distinguer la bouche, les yeux et des appendices latéraux, qui sont les ébauches des branchies.

Commence alors la vie libre de la larve ; très rapidement, celle-ci s'accroît, sa tête devient plus grosse et la queue s'allonge. Vers le treizième-quatorzième jour, les poumons sont formés et, par conséquent, les branchies externes régressent, et sont remplacées par des branchies internes protégées par un opercule.

Au bout d'un mois, la croissance se ralentit et lorsque l'animal a atteint la longueur de 6-7 cm, les pattes sont parfaitement développées (les postérieures poussent avant les antérieures), mais la queue persiste toujours, plus longue que le corps, haute et étroite : elle sert à l'animal pour nager. A partir de ce moment commence la résorption progressive de la queue et, au quatrième mois, la larve ressemble à un adulte en miniature, chez lequel les poumons ont remplacé les branchies internes.

Cette longue période de transformations semble reproduire la lente évolution qu'ont subie les organismes vivants en passant du milieu aquatique au milieu terrestre, voici environ 300 millions d'années.

De nombreux spécialistes pensent que l'embryogenèse, c'est-à-dire le développement de l'embryon, représente un « résumé » de la phylogenèse (ou évolution des espèces). Le passage de la grenouille de l'état larvaire à l'état adulte s'effectue sous le contrôle d'une hormone sécrétée par la glande thyroïde de l'animal ; au cours de ce processus on assiste à la disparition de certains organes, comme les branchies et la queue, et à l'édification d'organes nouveaux, les membres et les poumons. Le processus de destruction s'appelle histolyse.

I. Bucciarelli

Ci-dessus : tous les Insectes que l'on désigne communément sous le nom général de guêpes appartiennent, en réalité, à de nombreuses espèces d'Hyménoptères vespidés (sur la photo : *Polistes gallicus*). Comme tous les Insectes, elles sont le résultat de métamorphoses plus ou moins complexes qui débutent dans l'œuf.

Comme on le voit, lors du passage de la vie aquatique à la vie amphibie, les organes qui ne sont plus nécessaires à l'organisme adulte pour vivre dans le nouveau milieu sont remplacés par d'autres.

I. Bucciarelli

I. Bucciarelli

Ci-dessus : deux moments de l'éclosion d'une libellule, ***Ischnura elegans,*** qui nous permettent de voir comment l'Insecte abandonne la dépouille à l'intérieur de laquelle s'est opérée sa métamorphose.

LES PLATHELMINTHES

Certains Plathelminthes parasites nous offrent un exemple d'évolution des formes larvaires différente de celle des têtards. Les larves de ces vers vivent non pas libres mais sont parasites d'autres animaux et ne peuvent se développer qu'en présence de ces derniers. De nombreuses espèces sont des parasites de l'homme et d'autres Vertébrés. La grande douve, par exemple, est un Trématode qui, à l'état adulte, vit en parasite dans les canalicules biliaires du mouton. Ses œufs, expulsés en même temps que les excréments du mouton, se développent dès que le hasard les met en présence d'eau. L'embryon donnera une première larve appelée miracidium. *Cette larve peut être avalée par un « escargot d'eau », la limnée; de l'appareil digestif de ce petit Mollusque, elle ira se fixer dans sa cavité pulmonaire, puis dans son hépato-pancréas, qui est une grosse glande digestive.*

Là, la larve grandit et se transforme en un organisme différent, appelé rédie. *Puis, à la suite d'une autre transformation, celle-ci se transforme en une* cercaire. *Celle-ci est capable de se déplacer librement dans l'eau et abandonne la limnée pour passer sur les feuilles de plantes qui poussent près de l'eau (surtout du cresson), où elle s'enkyste, c'est-à-dire s'entoure d'une coque destinée à la protéger contre les agressions du milieu. Elle demeurera ainsi jusqu'à ce qu'un autre mouton l'avale avec les feuilles, lui donnant la possibilité de se « réveiller » de cet état de vie latente et d'achever son cycle : elle atteint alors l'état adulte, parvient à la maturité sexuelle et se reproduit. Les œufs émis entament alors un nouveau cycle.*

Le ver solitaire ou Taenia se développe à travers trois états larvaires; la viande de porc infestée peut le transmettre à l'homme.

Les Amphibiens (sur la photo : grenouille verte, ***Rana esculenta***) subissent eux aussi des métamorphoses dans lesquelles on peut reconnaître trois étapes : œuf, têtard, adulte.

J. Six

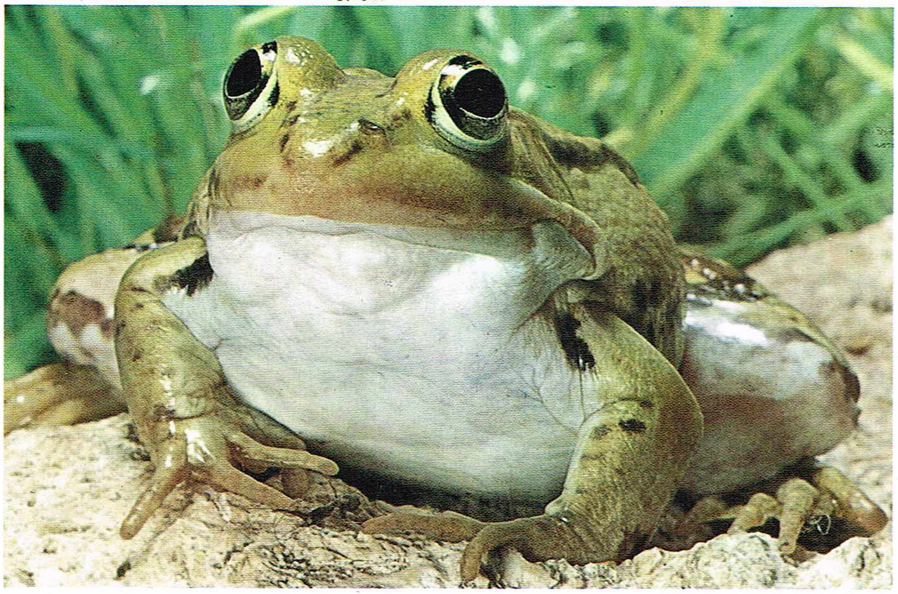

LES INSECTES

Chez les Arthropodes, et notamment chez les Insectes, le développement indirect est très répandu, mais on observe également toutes les situations intermédiaires jusqu'aux formes de développement presque direct; ces dernières sont dites amétaboles *(sans métamorphoses), tandis que les formes aux métamorphoses les plus complètes sont dites* holométaboles*; il existe des degrés intermédiaires.*

On sait que les Insectes pondent un grand nombre d'œufs, lesquels, dans un milieu favorable, se développent pour donner un embryon plus ou moins complet; c'est ici que commence la vie de la forme larvaire. Le milieu, notamment la température et l'humidité, joue un rôle déterminant dans le développement des larves : les grandes invasions d'Insectes, de criquets notamment, si néfastes pour les cultures, sont dues précisément aux conditions particulièrement favorables de certaines années. Les larves d'Insectes sont généralement de grandes dévoreuses de feuilles et, plus généralement, de matières organiques, qu'elles émiettent à l'aide de leurs puissantes mandibules.

Les abeilles sont des Insectes sociaux par excellence; une seule femelle, la reine, qui se distingue par sa grande taille, assure la reproduction. Elle est fécondée une seule fois durant toute sa vie, qui dure en moyenne quatre ans, au cours du vol nuptial. Elle pondra des œufs depuis le moment de sa fécondation jusqu'à sa mort; ces œufs qui sont déposés dans des cellules construites par les ouvrières, qui sont des abeilles stériles.

Au bout de quatre jours environ, naît une petite larve, vermiforme, qui mange les provisions contenues dans la cellule et attend d'être nourrie. L'existence de soins parentaux constitue une différence importante par rapport aux formes de vie larvaires que nous avons vues précédemment. La petite larve s'accroît sans subir de mues, de telle sorte que vers le sixième ou septième jour son corps remplit toute la cellule.

C'est à ce moment que les ouvrières qui la nourrissaient rabattent avec leurs mandibules les bords de la cellule et scellent la fermeture à l'aide d'une sécrétion cireuse. Les cellules ainsi fermées ne sont pas abandonnées, mais sont en quelque sorte « couvées », puisque les ouvrières les recouvrent à tour de rôle. Pendant ce temps, à l'intérieur des cellules, les larves s'entourent d'un mince voile soyeux et subissent une première métamorphose qui les transforme en nymphes, caractérisées par la présence d'une ébauche d'ailes. Au vingt et unième jour, l'Insecte présente les caractères de l'adulte. Sitôt née, l'abeille « s'ébroue » et est nettoyée par les nourrices qui continuent de l'alimenter; dès qu'elle est capable de se mouvoir (au bout de 2 ou 3 heures), elle se mêle aux autres abeilles et commence immédiatement à travailler.

LARVES EN TOUS GENRES

Les larves des Insectes sont extrêmement variées d'allures. Les plus connues sont, bien sûr, les chenilles des papillons, parfois vivement colorées ou alors poilues et urticantes. Et il y a encore les asticots des mouches, les larves coureuses de certains Coléoptères, le ver blanc du hanneton, les larves aquatiques des libellules, etc.

Et l'on n'en finirait pas de citer tous les types de larves du monde animal, de la planula des cnidaires au leptocéphale de l'anguille. Celle-ci est en effet l'un des rares Poissons à présenter des métamorphoses : son leptocéphale, à l'allure de feuille transparente, avait d'abord été pris pour une espèce particulière. Une telle erreur, bien excusable, est survenue plusieurs fois dans les annales de la zoologie.

LOCOMOTION ET MOUVEMENTS CHEZ LES ANIMAUX

Les formes de vie « mobiles » se rencontrent tant dans le règne végétal que dans le règne animal. Les mécanismes locomoteurs les plus simples sont ceux des organismes unicellulaires : chez les Phytoflagellés (végétaux) et les Zooflagellés (animaux), le déplacement de la cellule (qui constitue à elle seule l'organisme) est obtenu par les battements du ou des flagelles dont ils sont pourvus. De la même manière, les Ciliés (Protozoaires) se déplacent dans l'eau en agitant les cils dont ils sont partiellement ou totalement couverts.

La locomotion de l'amibe (Amoeba proteus), *Protozoaire d'eau douce, est encore plus élémentaire. L'amibe émet des pseudopodes, qui ne sont que des expansions de la cellule ; lorsqu'un pseudopode a atteint un point solide, il s'y accroche et entraîne toute la cellule.*

Chez les organismes pluricellulaires, la locomotion s'effectue selon des modalités multiples. Chez les lombrics, ou vers de terre, le déplacement s'effectue selon un mécanisme fort simple. Le ver contracte quelques segments de la portion antérieure de son corps, ce qui entraîne le décollement des segments situés immédiatement derrière ; ceux-ci, libérés partiellement du frottement contre le sol, se contractent à leur tour, entraînant les segments situés en arrière.

Ainsi, une onde de contraction traverse tout le corps. Les petites soies que l'on remarque sur le corps de l'animal servent à le maintenir ancré au sol, au niveau des anneaux antérieurs, afin que ceux-ci ne glissent pas au moment de la contraction des anneaux suivants. La sangsue, ver appartenant également aux Annélides, se déplace en prenant appui sur le sol par son extrémité antérieure pourvue d'une ventouse et en tirant tout le corps qui s'incurve, et rapproche son extrémité postérieure, également pourvue d'une ventouse.

LA LOCOMOTION CHEZ LES INVERTÉBRÉS

Bien qu'ils soient dépourvus de véritables membres, de nombreux Invertébrés présentent une locomotion très active. Les méduses, par exemple, se déplacent en expulsant de l'eau de leur ombrelle, ce qui, par réaction, provoque une poussée. Le déplacement de la seiche (Sepia officinalis) *et de la pieuvre ou poulpe* (Octopus vulgaris) *est de même fondé sur le principe de la réaction : l'eau est expulsée avec force de la cavité du manteau. Le mouvement est facilité, chez la seiche, par de petites expansions du manteau, ou nageoires latérales, et, chez le poulpe, par des tentacules capables de se contracter. Les calmars vont si vite qu'ils décollent parfois de la surface de la mer...*

Les Gastéropodes marins se déplacent généralement comme les Gastéropodes terrestres, dont l'escargot nous fournit une illustration : il glisse sur le sol à l'aide de son pied musculeux qui présente des ondes de contraction assez semblables à celles du lombric, pied qui est « lubrifié » par une sécrétion muqueuse. Les Lamellibranches, c'est-à-dire les Mollusques à coquille bivalve, sont également pourvus d'un pied ; ils s'en servent non pour glisser, mais plutôt comme d'un levier, ce qui les fait avancer en sautillant. Leurs déplacements sont faibles, mais suffisants pour leurs besoins.

Le mode de déplacement des oursins est tout à fait singulier : leurs « pieds ambulacraires » s'accrochent aux substrats comme autant de ventouses dans un mouvement de succession rapide qui fait avancer l'animal. Ces pieds, répartis sur tout le corps, comportent à leur base des ampoules qui permettent d'en régler la longueur. Des piquants, dont un grand nombre sont articulés sur le squelette externe des oursins, servent de point d'appui

Bruce Coleman - J. Burton

Les Primates possèdent des membres dont les aptitudes au mouvement sont très proches de celles de l'homme ; de plus, l'opposabilité du pouce et du gros orteil permet au singe de se servir des pieds comme des mains.

Bruce Coleman - H. Schultz

Bien qu'ils possèdent un squelette osseux, les serpents (ci-dessus : un boa du Brésil), dépourvus de membres, rampent sur le sol et grimpent sur les arbres par des mouvements de contorsion de leur corps allongé.

rigide contre le substrat et concourent ainsi à la réalisation du mouvement.

LA LOCOMOTION CHEZ LES ARTHROPODES

Les Arthropodes présentent des membres articulés, constitués schématiquement des segments suivants : coxa, trochanter, fémur, tibia, tarse *et* prétarse; *chaque segment ressemble à un tube creux formé d'épiderme sclérosé, à l'intérieur duquel sont logés des muscles moteurs. Quelques saillies internes, appelées apodèmes, permettent l'insertion des muscles. Les membres sont utilisés comme des leviers.*

Il est intéressant d'observer comment se déplacent les Crustacés. Squilla mantis, *appelée communément cigale de mer, possède des membres abdominaux étalés dont elle se sert comme de rames à plat sur l'eau pour obtenir une poussée en avant. Les écrevisses présentent un mécanisme de marche analogue à celui que l'on retrouve chez les Arthropodes terrestres. Le corps de l'animal est maintenu soulevé de terre par les pattes abdominales qui, en même temps, assurent la locomotion : pour réaliser le mouvement, le corps n'est soutenu que par quelques pattes, tandis que les autres s'avancent sur le substrat.*

Parmi les Arachnides, les araignées nous offrent l'exemple le plus remarquable de coordination, notamment celles qui chassent à l'affût. L'une d'elles se met aux aguets, avance très précautionneusement en tenant la tête baissée le plus possible, puis, arrivée près de la proie, elle bondit soudainement et attrape la mouche par ses pattes antérieures, tout en lui injectant du venin dans la tête pour l'immobiliser. Ensuite elle revient tranquillement vers son nid en se soulevant le plus possible sur les pattes afin de mieux transporter sa proie.

LA LOCOMOTION CHEZ LES VERTÉBRÉS

Selon les milieux dans lesquels les Vertébrés se déplacent, on distingue les modes de locomotion suivants : dans l'eau, la nage; sur la terre ferme, la reptation, la marche, la course, le saut; dans l'air, le vol.

Si l'on regarde nager un Poisson dans un bassin d'eau de faible profondeur, on note que son mouvement est sinueux : il avance en contractant les muscles latéraux du tronc, et l'onde de contraction parcourt alternativement le flanc droit et le flanc gauche. La poussée est proportionnelle à la longueur du corps et au nombre d'ondes de contraction. Les nageoires symétriques des Poissons servent uniquement pour des déplacements de faible amplitude et jouent surtout un rôle dans le maintien de l'équilibre du corps.

Si l'on excepte le cas des serpents, la locomotion terrestre des Vertébrés est réalisée surtout à l'aide des mouvements des membres. Il est aisé d'étudier le mouvement des serpents en observant un Reptile de désert; les empreintes laissées sur le sable montrent que le principe de déplacement est identique à celui des Poissons : les ondes de contraction parcourent le corps, qui, dans ce cas, prend appui sur le sable.

On retrouve ce mouvement ondulatoire chez les salamandres (Amphibiens urodèles) et les lézards (Reptiles). En effet, ces animaux se déplacent également grâce à des mouvements ondulatoires du tronc, les pattes antérieures et postérieures ne servant que de points d'appui. Dans l'exécution du mouvement, les ceintures pectorale et pelvienne (bassin) subissent un mouvement d'inclinaison de sens opposé : lorsque la courbure du corps tourne sa concavité vers la droite, la ceinture scapulaire s'incline vers la droite et la ceinture pelvienne vers la gauche; à la phase suivante du mouvement, c'est l'inverse qui se produit. Il s'ensuit que les pattes antérieures et postérieures se déplacent selon un mouvement alterné : la patte antérieure droite et la patte postérieure gauche avancent simultanément, et, au mouvement suivant, il en est de même pour la patte antérieure gauche et la patte postérieure droite.

A cause de la rapidité du mouvement, cette alternance de phases n'est guère perceptible chez les lézards, mais on peut parfaitement l'observer chez les Mammifères. Ces derniers, à la différence des Reptiles et des Amphibiens, ont leur tronc décollé du sol et, par conséquent, la reptation du ventre n'intervient pas dans la réalisation du mouvement. Si l'on observe un Mammifère d'en haut, on remarque parfaitement les oscillations en sens inverse des ceintures scapulaire et pelvienne.

La différence essentielle par rapport aux mouvements des Reptiles qui rampent sur le ventre réside dans le fait que les membres ne servent pas seulement de point d'appui, mais aussi, du moins en ce qui concerne les membres postérieurs, de propulseurs. Lorsqu'un Mammifère marche au pas, le temps durant lequel les membres reposent sur le sol est de loin supérieur à celui durant lequel ils sont soulevés; une accélération importante du rythme ambulatoire transforme la marche en course (trot ou galop).

Celle-ci se caractérise par une augmentation considérable du temps durant lequel les membres sont décollés du sol. Un des temps de la course voit les quatre membres décollés simultanément; dans le cas du galop, l'animal prend appui alternativement sur les membres antérieurs et postérieurs. De rares Mammifères, tels les ours, marchent l'amble; ils déplacent alternativement leurs pattes de droite, puis celles de gauche.

La station debout des bipèdes a déterminé la spécialisation de la partie terminale du membre postérieur ou inférieur (c'est-à-dire le pied), qui supporte entièrement le poids du corps. L'homme est le seul bipède véritable : les singes sont quadrupèdes; seuls, certains, comme les gibbons, peuvent effectuer quelques pas debout.

La marche de l'homme se caractérise elle aussi par une inclinaison du bassin lorsque la jambe gauche est soulevée et inversement; l'atténuation de l'oscillation est due à la flexibilité du pied. C'est d'abord le talon qui appuie sur le sol, puis toute la plante du pied et ensuite le corps se soulève en prenant appui sur la pointe du pied et surtout sur le gros orteil : cette dernière phase du mouvement s'accompagne d'une poussée en avant du corps.

Un certain nombre des Mammifères se sont adaptés à la vie aquatique, et particulièrement les Pinnipèdes (phoques), les Siréniens (lamantin) et les Cétacés. Ils ondulent dans le sens vertical, bien que quelques-uns, comme la loutre, puissent se tordre en tire-bouchon.

La marche des Oiseaux est variable suivant les groupes. Leurs membres antérieurs sont, comme chacun sait, transformés en ailes. A moins qu'elles n'aient régressé, comme chez l'autruche et les manchots, elles permettent à la plupart de voler admirablement.

Le vol des Oiseaux est beaucoup étudié. L'aile se déplace dans un fluide, l'air, et subit de sa part une poussée : celle-ci est la résultante de deux forces distinctes, une force ascensionnelle et une force de résistance à la progression. Normalement, le vol de l'Oiseau est battu : l'aile effectue un mouvement tournant autour de l'épaule; d'abord presque verticale, elle s'abaisse vers l'avant et le bas, pour ensuite repartir vers l'arrière.

L'HOMME PRÉHISTORIQUE

L'homme n'a acquis son aspect actuel qu'à travers une longue et complexe série de transformations évolutives commencée à l'ère tertiaire et appelée l'hominisation.

Un ordre de Mammifères primitifs, les insectivores, représentés de nos jours par les taupes et les hérissons, donne naissance aux primates. Le « chaînon » intermédiaire devait avoir l'allure des actuelles musaraignes arboricoles de l'Asie du Sud-Est.

Les premiers primates furent des parents des lémuriens que nous connaissons aujourd'hui, à Madagascar surtout. Ensuite se différencièrent les singes, dont l'évolution aboutit aux anthropomorphes : gorille, orang-outan et chimpanzé.

Cependant, la paléontologie nous révèle qu'au cours du Miocène et du Pliocène, plusieurs types de primates présentent une évolution qui les situe sur la lignée de l'homme. Leurs canines se réduisent; leur arcade dentaire s'arrondit. Il s'agit de l'oréopithèque d'Italie, du ramapithèque d'Eurasie, du kényapithèque africain et de l'énorme gigantopithèque asiatique.

LES AUSTRALOPITHÈQUES

Le plus intéressant de ces primates est le kényapithèque, car il est vraisemblablement l'ancêtre des australopithèques. Ceux-ci sont les premiers véritables hommes. Leur nom rappelle qu'ils ont d'abord été trouvés en Afrique australe (et non en Australie); à l'époque, ils étaient considérés comme des singes (pithêkos en grec) *; aujourd'hui, on tend à les appeler plutôt australanthropes* (anthrôpos *signifie homme*).

Au cours des dernières décennies, de nombreux australopithèques ont été découverts en Tanzanie, au Kenya et en Éthiopie par les missions des paléontologistes anglais L. Leakey et français Y. Coppens.

Plusieurs types peuvent en être distingués. L'australopithèque robuste avait une mâchoire puissante et de fortes molaires, bien aptes à briser les fruits et les graines dont il devait faire son menu. Il mesurait 1,50 m.

L'australopithèque gracile était plus petit (1 à 1,20 m); ses dents latérales, moins développées, trahissent un régime davantage omnivore. Ces deux primates vécurent entre 10 et 2 millions d'années avant notre ère.

En leur compagnie, vers 3 millions d'années, apparaît un « troisième homme », l'Homo habilis, *encore plus proche de nous. Haut de 1,30 m, il avait une capacité cérébrale de 800 cc (contre 550 cc seulement chez les australopithèques); sa bipédie est plus parfaite.*

Si ces primates sont considérés comme des hommes, c'est parce qu'ils sont les auteurs de la plus ancienne « industrie » connue : des outils en pierre ou en os taillés, découverts dans la vallée de l'Omo en Éthiopie. C'est aussi chez eux qu'apparaît la chasse.

L'HOMO ERECTUS

Australopithèques et Homo habilis *constituent donc la première étape de l'humanité. La seconde correspond à l'*Homo erectus, *l'homme à station parfaitement érigée, inventeur du feu.*

Il a peuplé, au cours du dernier million d'années, diverses régions d'Europe, d'Afrique et d'Asie. Les principaux représentants de cette espèce sont le pithécanthrope de Java, le sinanthrope de Chine, l'atlanthrope

C. Bevilacqua

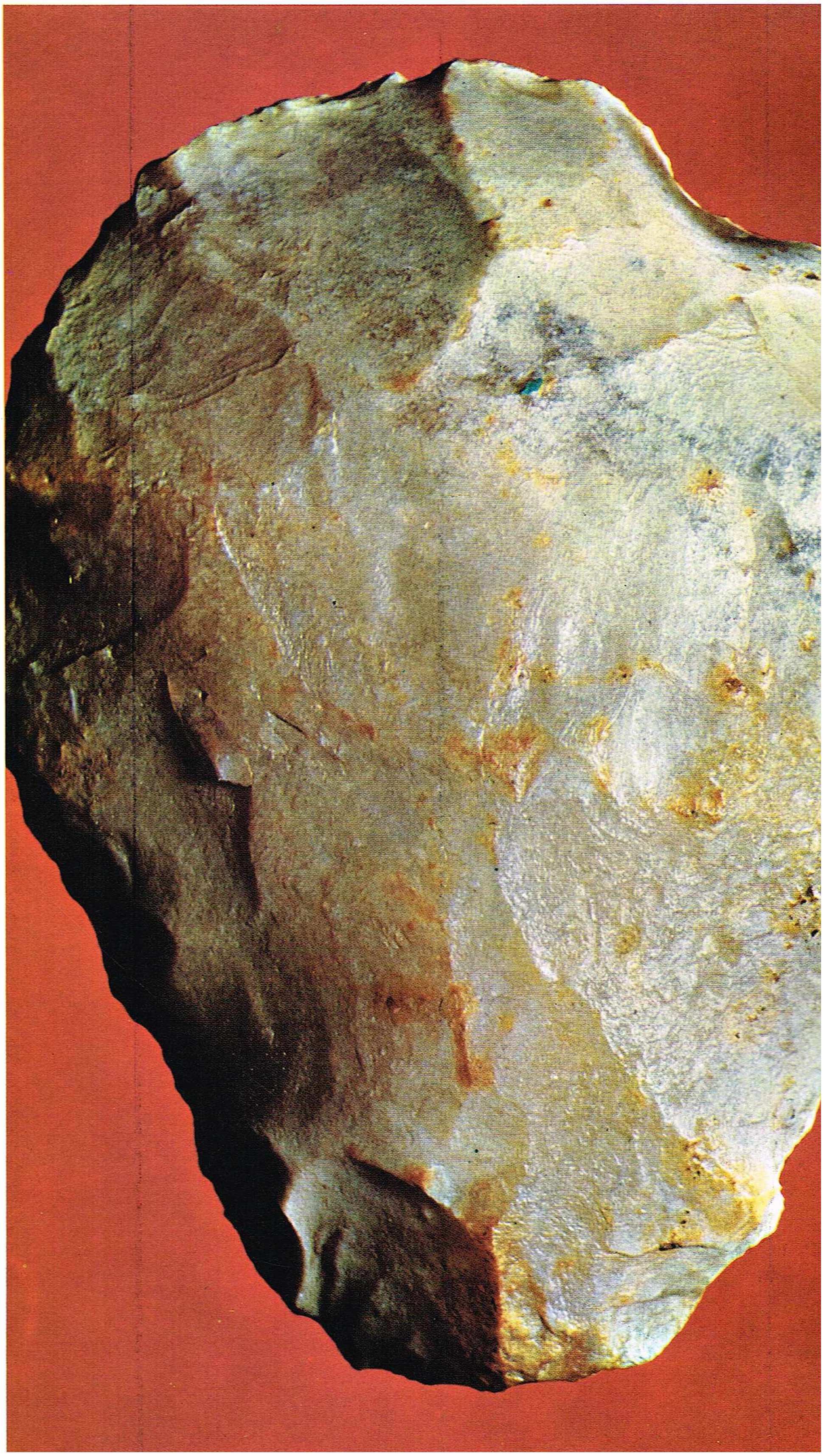

Ci-contre : silex taillé du type biface (c'est-à-dire taillé sur ses deux faces), à la fois arme et instrument de travail de l'homme préhistorique (musée d'Histoire naturelle, Vérone).

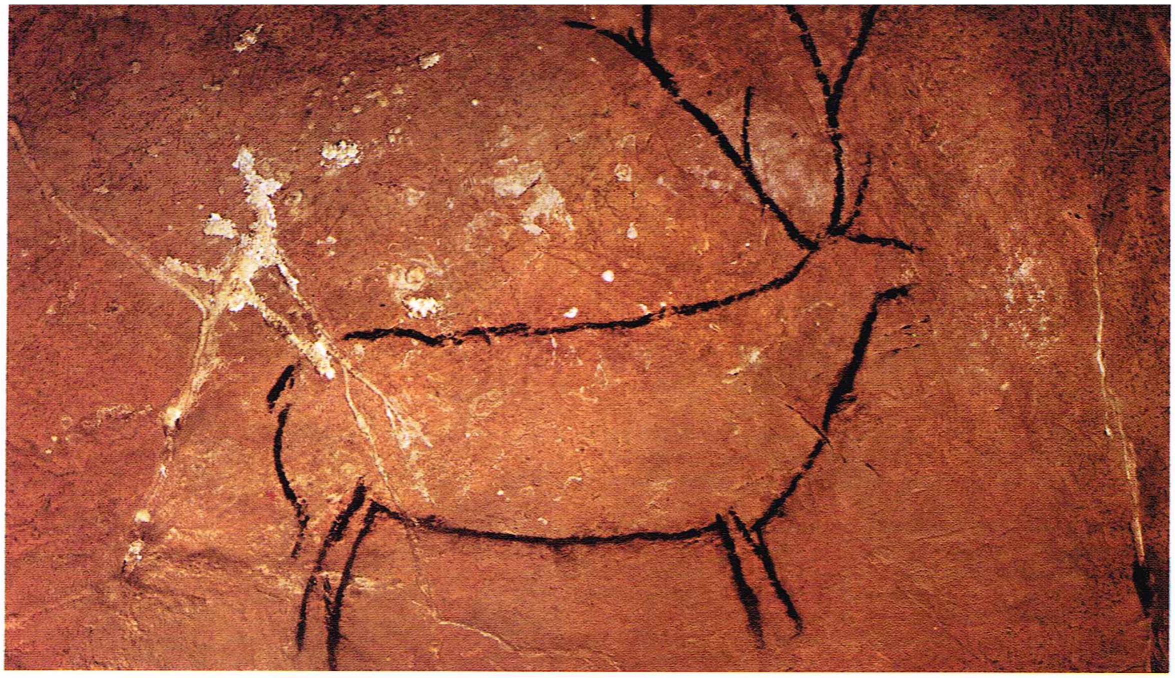

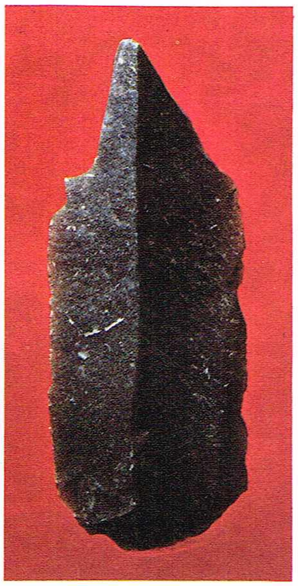

C. Bevilacqua

Ci-dessus : exemple de l'art pictural du passé ; époque préhistorique : cerf en style III (vers 1500 av. J.-C.), incision de la grotte de Las Chimeneas.

A gauche : instrument de travail de la période magdalénienne, servant d'un côté de burin, de l'autre de grattoir (musée d'Histoire naturelle, Vérone).

d'Algérie, l'homme du Mauer ou de Heidelberg (Allemagne), celui de Tatavel (France), etc.

*De taille moyenne ou grande (1,60 à 1,80 m), l'*Homo erectus *avait un squelette assez semblable au nôtre, mais son crâne conservait des caractères primitifs : arcades sourcilières en visière ; allongement de la boîte crânienne (dolichocéphalie), prognathisme (mâchoires qui « avancent »), etc. Sa capacité crânienne était de 850 à 1 200 cc.*

L'HOMO SAPIENS

*L'*Homo erectus *est l'ancêtre de l'*Homo sapiens, *l'homme « qui sait » (plutôt que l'homme sage), espèce à laquelle nous appartenons. Elle est apparue voici peut-être une centaine de milliers d'années, après avoir été précédée par des types intermédiaires.*

Certains des Homo sapiens *fossiles étaient assez différents de nous : ils constituent une race particulière, l'homme de Néanderthal, du nom du site allemand où a été trouvé leur premier représentant. Jusqu'à une date récente, cet homme de Néanderthal était considéré comme une espèce particulière : on considère aujourd'hui que c'est simplement un cas extrême de la marge de variation des* Homo sapiens.

Il a peuplé tout l'Ancien Monde : en France, le célèbre homme de la Chapelle-aux-Saints (Corrèze) appartient à ce type.

Les caractéristiques principales des Néanderthaliens sont : un crâne aplati et allongé, un front fuyant se terminant par une « visière » supra-orbitaire très saillante, une face très large aux pommettes aplaties, un nez et des orbites très larges. Les dents sont semblables à celles de l'homme d'aujourd'hui, à l'exception des molaires, beaucoup plus grandes ; le thorax est étroit et profond, et le bassin étroit et long. La capacité crânienne était déjà importante et variait de 1 400 à 1 730 cc, tandis que la taille était d'1,60 m environ.

L'homme de Néanderthal a officiellement disparu, sans doute plus tardivement qu'on ne croit. Pourtant, la découverte aux États-Unis en 1968 d'un homme velu conservé congelé par un forain fait penser que cette race pourrait subsister, dans des secteurs peu connus d'Asie. Cette trouvaille alimente en tout cas de vives discussions parmi les spécialistes.

*Quant à l'*Homo sapiens *proprement dit, il a conquis peu à peu la terre entière. Il a atteint l'Amérique, par l'Asie, voici quelque 50 000 ans. Au cours de la préhistoire, il s'est différencié en plusieurs types, nommés pour la plupart d'après les sites français où ont été découverts les premiers spécimens.*

Les caractéristiques communes aux types de Combe-Chapelle, Grimaldi et Cro-Magnon sont : un crâne étroit de grande capacité (jusqu'à 1 590 cc), une face haute et étroite, une taille moyenne, un bassin haut et étroit, semblable à celui de certaines populations noires actuelles. Les types de Brno et Predmost, en revanche, ont une taille plus élevée (1,67 m chez l'homme) et un crâne dolichocéphale d'environ 1 500 cc, 100 cc de moins que le crâne du type Chancelade retrouvé en Dordogne et appartenant à un individu de sexe masculin de petite taille, avec une face large, des pommettes saillantes, des orbites hautes et des arcades sourcilières à peine marquées. La capacité crânienne peut atteindre 2 000 cc chez notre espèce.

VERS L'HISTOIRE

On constate chez les Homo sapiens *fossiles une nette évolution culturelle, comme l'atteste leur coutume d'ensevelir les morts en même temps que des objets d'ornement et des objets symboliques ; ils croyaient sans doute à la survie de l'esprit et avaient l'habitude de placer à côté du mort des vases contenant de l'ocre rouge, qui, d'après eux, était destinée à redonner de la couleur au corps comme si le sang y circulait encore.*

Ces hommes nous ont laissé des vestiges intéressants de leur art : ce sont des signes symboliques dessinés à côté de figures humaines se rapportant probablement à des rites magiques destinés à favoriser la chasse ou la fécondité.

Certaines de leurs œuvres d'art, comme les fresques rupestres de Lascaux (Dordogne) et d'Altamira (Espagne), sont justement célèbres. Ces hommes peignaient à l'aide de matières variées : ocres, limonites, hématites, oxydes de manganèse, etc.

Les périodes auxquelles vécurent tous les types humains que nous avons évoqués constituent le Paléolithique. De 4000 à 2000 av. J.-C., c'est le Néolithique qui lui succède. Il est caractérisé par les débuts de la culture des céréales, de la poterie, du tissage, du polissage de la pierre. Les hommes délaissent les grottes pour se grouper en villages, parfois sur pilotis. La domestication des animaux, déjà commencée au Paléolithique, avec le chien, le mouton et la chèvre, s'amplifie avec la conquête de nouvelles espèces à travers le monde. C'est aussi l'âge des mégalithes : menhirs et dolmens.

En définitive, les hommes passent alors d'une économie « prédatrice », caractérisée par la chasse, la pêche, la cueillette et le ramassage, à une économie de production, reposant sur l'agriculture et l'élevage : c'est la révolution néolithique.

L'ensemble du Paléolithique et du Néolithique constitue la préhistoire.

Au Néolithique fait suite la protohistoire ou âge des métaux, qui comprend successivement le Chalcolithique, marqué par l'apparition du cuivre, l'âge du bronze et enfin l'âge du fer. Ensuite, c'est l'histoire qui commence.

LES RACES HUMAINES

La notion de race a, au cours des siècles, alimenté de nombreuses discussions, qui durent encore. On s'est demandé en combien de races il fallait diviser l'espèce humaine actuelle, l'Homo sapiens, pour, finalement, en arriver à contester la notion même de race.

Il est certes manifeste que les représentants de notre espèce ne sont pas tous semblables extérieurement : un Norvégien, par exemple, est fort différent d'un Pygmée africain.

Toutefois, si l'on considère les populations qui habitent les régions comprises entre la Scandinavie et le Congo, il apparaît que des intermédiaires existent entre ces deux types extrêmes.

LA NOTION DE RACE

De plus, à notre époque, les facilités de déplacement et les immigrations ont accéléré les métissages, c'est-à-dire les unions entre deux individus de races différentes. Aussi trouverait-on fort difficilement des représentants des « races pures » sur lesquelles les racistes avaient échafaudé leurs théories.

Néanmoins, pour des raisons de commodité, on continue à admettre qu'il existe des races humaines. Celles-ci sont généralement réparties en quatre « grand-races » : la grand-race australoïde, la grand-race blanche, la grand-race jaune et la grand-race noire.

Nous allons, dans cet article, décrire les différentes races qui se rangent dans les deux premières de ces grand-races, réservant les Jaunes et les Noirs pour le prochain article.

La grand-race australoïde ne comprend que quelques dizaines de milliers de sujets, localisés en Australie et en Asie méridionale. Cette grand-race possède des caractères qui la situent assez nettement à l'écart des autres : front fuyant, arcades sourcilières très fortes, racine du nez enfoncée. La peau est brune, les cheveux ondulés, le crâne généralement allongé.

Cette grand-race comprend trois races : la race australienne correspond aux aborigènes d'Australie ; la race tasmanienne, un peu différente, est éteinte depuis 1877 ; la race vedda enfin, aux cheveux longs et de petite taille, est surtout représentée par les Vedda de Ceylan et quelques petites populations dispersées de l'Inde aux Célèbes.

DES NORDIQUES AUX AÏNOUS

La grand-race blanche a évidemment une répartition beaucoup plus vaste : l'Europe, l'Asie occidentale et l'Afrique du Nord surtout. Au cours des temps historiques, elle s'est répandue à travers le monde, dans les deux Amériques notamment.

Elle comprend de nombreuses races. La race nordique peuple le nord de l'Europe, de la Flandre à la Scandinavie ; elle est de grande taille, avec des cheveux clairs et des yeux bleus ou gris. Plus au nord est localisée la race lapone, de petite taille, à peau jaunâtre, corps trapu et crâne large. La race alpine est répandue non seulement dans les Alpes, mais aussi à l'ouest jusqu'en Bretagne et à l'est jusqu'en Ukraine. Elle se caractérise par une taille plutôt faible, une peau assez sombre, des cheveux bruns, un crâne élargi.

La race est-européenne ou est-baltique occupe une grande partie de la Russie d'Europe, de la Finlande et de la Pologne. Elle a la peau claire, le crâne large, les pom-

T. Poggio

Les différentes populations se distinguent entre elles par leurs usages particuliers et leurs traditions vestimentaires. La photo montre une femme en costume de la région de Banat (village de Chizatan, en Roumanie).

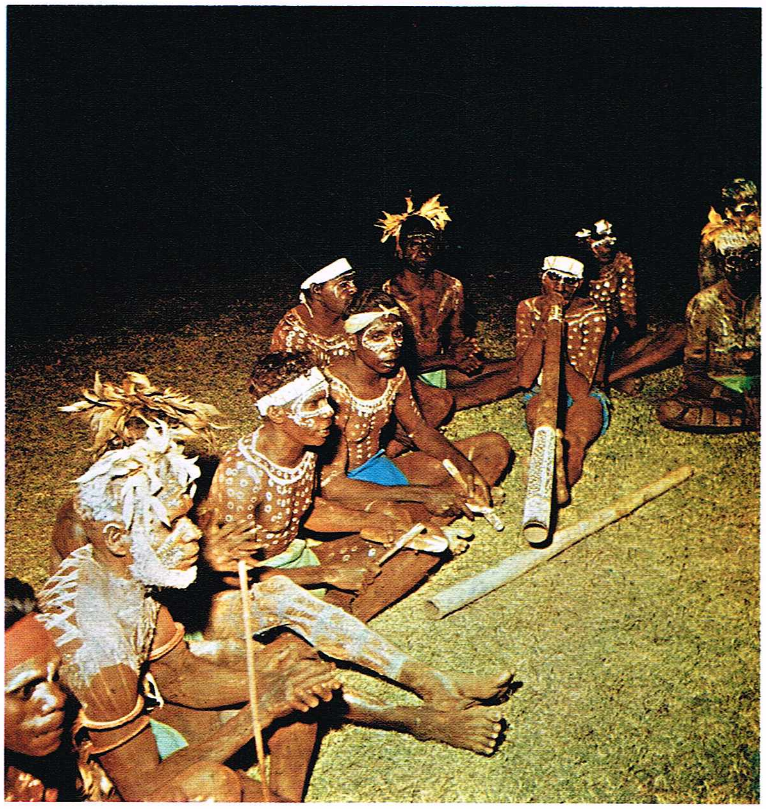

Australiens durant une cérémonie rituelle.

mettes proéminentes. Les Balkans sont le domaine de la race dinarique à tête haute et long nez; son crâne est large avec l'occiput plat; sa pilosité est forte.

L'Asie Mineure, le Caucase, le Liban sont peuplés par la race anatolienne ou arménoïde. Elle a le crâne élargi, le visage allongé, le nez très long à racine remontant jusqu'au front. Les Kurdes s'y rattachent, ainsi qu'une partie des Juifs.

La race méditerranéenne occupe de vastes surfaces dans le sud-ouest de l'Europe et le nord de l'Afrique. Elle constitue à elle seule un ensemble assez complexe, dont les caractères généraux sont une peau assez pigmentée, des cheveux noirs et ondulés, un nez droit et saillant. Le crâne est de forme variable, le plus souvent allongé.

On distingue dans cette race trois types principaux. La « sous-race » ibéro-insulaire occupe l'Espagne, le sud de la France, la Grèce; c'est elle qui montre le fameux profil grec. La sous-race atlanto-méditerranéenne a presque la même répartition; elle est plus robuste; les Basques en font partie. La sous-race saharienne, qui correspond aux Touareg, est de taille plus élevée que les précédentes.

Rentrent encore dans la race méditerranéenne : les Guanches des Canaries disparus; les Arabes et Berbères du Maghreb; les Égyptiens, dont le type physique n'a pas varié depuis l'époque pharaonique, etc.

La race touarienne est répandue en Asie centrale; elle comprend les Turkmènes, les Kirghiz, les Tadjiks, etc. Elle a le crâne large et des pommettes saillantes; les yeux étirés la rapprochent des jaunes.

La race sud-orientale occupe le Proche-Orient. Elle englobe les Sémites, c'est-à-dire une grande partie des Juifs et les Arabes d'Arabie, Jordanie, Yémen, etc. Apparentée à la race méditerranéenne, elle est plus grande avec la peau plus sombre.

L'Iran, l'Afghanistan, dans le nord de l'Inde, sont le domaine de la race indo-afghane, à peau très claire et cheveux ondulés. Elle correspond vaguement aux anciens « Aryens » et paraît être à l'origine des Tziganes.

Enfin, la race aïnou se situe géographiquement très à l'écart des autres races blanches, puisqu'elle occupe uniquement l'île d'Hokkaïdô. C'est une race de faible taille, trapue, à pilosité assez forte et au crâne large. On estime que ces Blancs japonais sont les survivants d'une population blanche qui aurait jadis peuplé la Sibérie.

EXPANSION ET RACISME

Il peut être intéressant de voir plus en détail le cas de la France. Sa population est un mélange de Nordiques, d'Alpins et de Méditerranéens. Les premiers dominent dans le Nord, la Normandie, l'Alsace, la région parisienne; les seconds, dans les Alpes, les Ardennes, le Massif central, la Bretagne; les derniers, dans les régions méridionales. Des Dinariques peuvent se rencontrer en Savoie.

Comme nous l'avons dit, des représentants de ces diverses races à l'état pur sont rarissimes, voire inexistants. Plus récemment et dans des proportions limitées, se sont ajoutés à la population française des éléments arménoïdes (Juifs), sud-orientaux (Juifs), méditerranéens (Arabes), indo-afghans (Tziganes), etc.

Depuis l'époque coloniale, les Blancs se sont massivement installés dans diverses régions du monde. Au Canada et dans la plus grande partie des États-Unis, les Nordiques sont dominants; au Canada français, les Alpins sont les plus nombreux. Dans le sud des États-Unis, les immigrants sont les plus variés : Méditerranéens, Est-Européens, Arménoïdes, Sud-Orientaux (Israélites), Dinariques.

En Amérique latine, il s'agit essentiellement de Méditerranéens, à savoir des Espagnols et des Portugais. Les Nordiques constituent la majorité des immigrants en Australie, Nouvelle-Zélande et Afrique australe. Dans certaines régions, et notamment en Amérique du Sud, les colonisateurs blancs se sont métissés avec les populations indigènes.

La notion de race blanche, on le sait, a été abusivement exploitée par les théoriciens racistes. Déjà, les anciens Grecs considéraient les autres peuples comme des « barbares » et interdisaient toute union avec eux. Par la suite, le racisme s'intensifia lors de la conquête de l'Amérique par les Espagnols : les massacres d'Indiens provoquèrent une réaction courageuse de la part du missionnaire B. de Las Casas.

En 1853, J. de Gobineau publiait son Essai sur l'inégalité des races humaines; à l'aide d'arguments pseudo-scientifiques, il cherchait à prouver que toutes les qualités étaient réunies chez d'antiques habitants de la Perse, les Aryens. Ses théories furent reprises par les nazis qui assimilèrent ces prétendus Aryens aux Allemands et à la race nordique.

On sait à quoi aboutirent ces thèses que condamnent formellement tous les anthropologistes.

Vieil aborigène d'Australie.

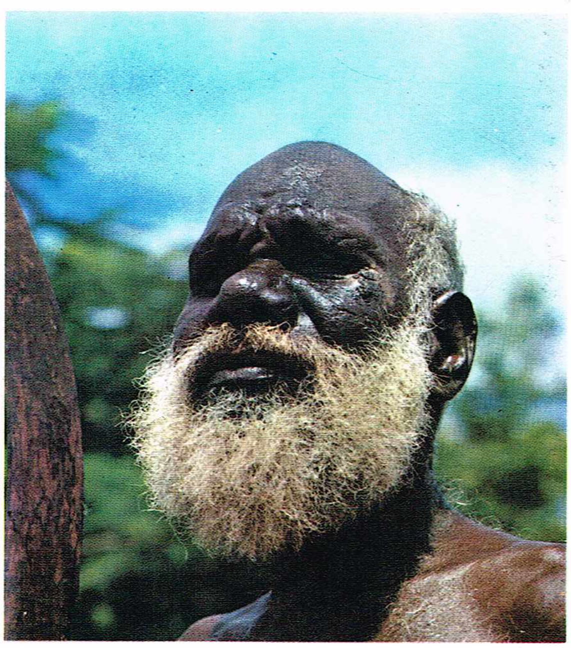

LES RACES HUMAINES

Après les grand-races australoïde et blanche, objets de notre précédent article, la troisième grand-race est la grand-race jaune. Ses principaux caractères sont la peau jaune ou brunâtre, les yeux souvent bridés, les cheveux noirs et lisses, les pommettes saillantes, le nez large. Répandue en Asie orientale, dans toute l'Amérique et dans de nombreuses îles du Pacifique, la grand-race jaune est évidemment divisée en nombreuses races.

LA GRAND-RACE JAUNE

La race nord-mongole comprend les Toungouses, Samoyèdes, Kalmouks, etc., du nord de l'Asie, de taille assez petite et au crâne large. La race centro-mongole est plus grande et a le crâne moins large : elle inclut une bonne partie des Chinois, Tibétains, Birmans, ainsi que les Coréens.

La race sud-mongole, petite et au crâne de forme intermédiaire entre les précédentes, occupe aussi la Chine méridionale, avec un débordement sur l'Indochine (Khmers, Thaïs, etc.) et le Japon : les Japonais descendent d'envahisseurs venus d'abord d'Indonésie, puis de Corée et de Chine ; ils s'apparentent surtout aux Sud-Mongols.

La race paléosibérienne se divise en deux populations, l'une à l'ouest de la Sibérie, et l'autre à l'est ; elles sont séparées par la race nord-mongole. Ses caractères « jaunes » sont peu marqués ; la taille est petite.

L'Amérique arctique, de l'Alaska au Groenland, est le domaine de la race esquimaude, de petite taille, aux fortes mâchoires, au crâne de forme variable. Les Jaunes d'Amérique, Esquimaux et Amérindiens, sont tous originaires d'Asie : ils ont gagné l'Amérique en passant de Sibérie en Alaska.

La race amérindienne — les « Indiens » d'Amérique — s'est ainsi répandue du Canada à la Terre de Feu. Elle présente des caractères variés qui nécessitent sa division en plusieurs sous-races. La sous-race nord-atlantique, assez grande, comprend les Iroquois et les Sioux, qui ont fait rêver nos imaginations d'enfants ; la sous-race nord-pacifique correspond aux Indiens des montagnes Rocheuses ; ceux d'Amazonie, Jivaros par exemple, forment la sous-race sud-atlantique ; la sous-race sud-pacifique est constituée par les descendants des Aztèques et des Mayas. Enfin, deux autres sous-races correspondent aux Patagons et aux Fuégiens de la Terre de Feu, qui sont en voie de disparition.

Également diversifiée, la race indonésienne peuple le Sud-Est asiatique. Ses caractères « jaunes » sont atténués : les yeux sont peu bridés, les cheveux ondulés, la taille petite, le crâne large. Indonésiens, Malais, Philippins font partie de cette race, de même, sans doute, que les Moïs du Vietnam. Bon nombre de Malgaches se rattachent plus ou moins à cette race, qui a jadis envahi Madagascar.

La race polynésienne enfin est aussi une race jaune « atténuée » : elle a une grande taille, la peau brunâtre, le visage ovale. Si les jolies vahinés de Tahiti en sont les représentantes les plus connues, cette race comprend aussi les Maoris de Nouvelle-Zélande, les habitants des Hawaii, de l'île de Pâques, etc.

LA GRAND-RACE NOIRE

Quatrième grand-race : la grand-race noire. Elle habite l'Afrique tropicale et diverses régions d'Asie méridionale et d'Océanie. Son caractère le plus marquant est évidemment sa pigmentation foncée, mais elle présente aussi

M. Leigheb

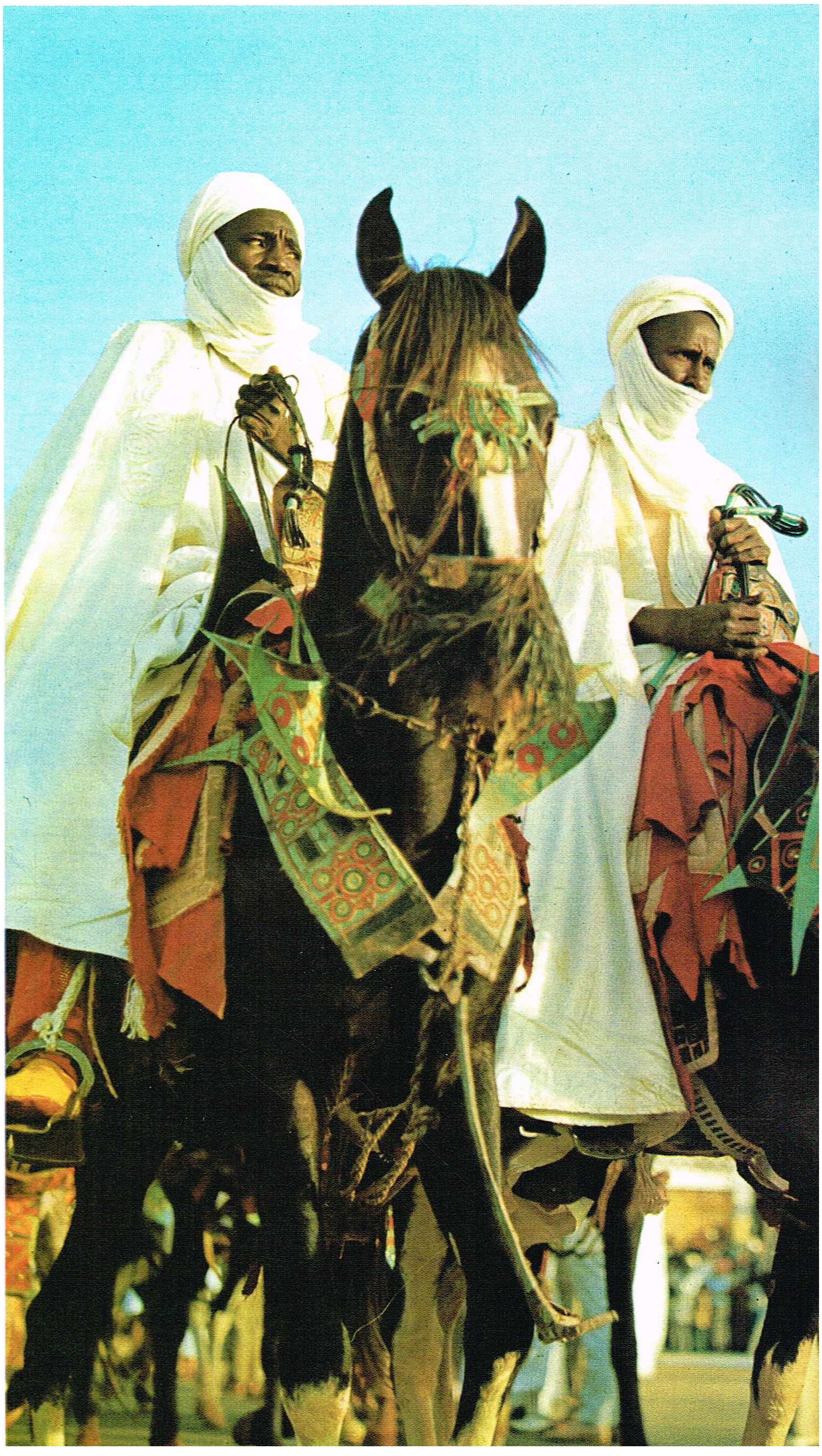

Groupe de cavaliers et danseurs « djerma », du territoire du Niger, exemples de type négroïde.

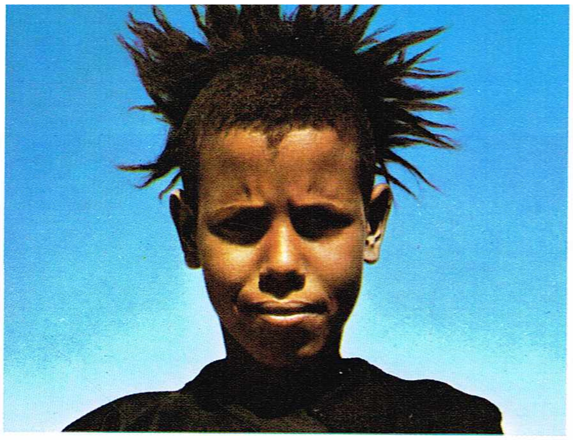

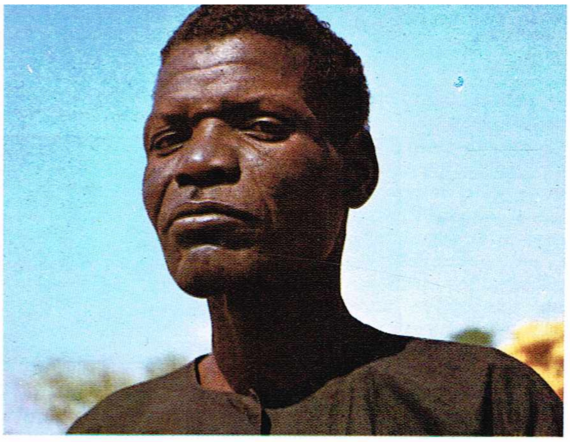

Ci-dessus, à gauche : enfant d'une tribu nomade du Niger septentrional. A droite : jeune homme de Serrère, dans le Sénégal. Ces deux exemples sont des spécimens de la grand-race noire.

souvent du prognathisme (autrement dit, des mâchoires qui « avancent ») et des lèvres épaisses.

La race mélano-africaine occupe presque toute l'Afrique au sud du Sahara ; elle a les cheveux crépus et le nez épaté. On la divise en plusieurs sous-races. La sous-race soudanaise, répartie du Sénégal au Soudan, a les jambes longues : elle comprend les Saras, les Haoussas, les Ouolofs. La sous-race guinéenne, qui vit le long du golfe de Guinée, est plus trapue, avec les jambes plus courtes.

Les jambes sont au contraire très longues chez la race nilotique, de la vallée du Nil : c'est chez elle que l'on rencontre les plus grands hommes de la Terre : jusqu'à deux mètres. Localisée à l'Afrique centrale, la sous-race congolaise a un tronc robuste et une grande bouche. Enfin, la sous-race sud-africaine ou zambésienne comprend les Bantous, Cafres et Basoutos.

La race éthiopienne semble issue d'un ancien métissage entre Noirs et Méditerranéens : elle a la peau brune et le nez droit ; elle ne montre pas de prognathisme. Elle occupe l'Éthiopie et les régions voisines ; les Peuls, qui se sont répandus jusqu'à l'Atlantique, s'y rattachent.

Les Pygmées africains, localisés en divers points de l'Afrique centrale, forment la race négrille. Sa petite taille est évidemment son caractère principal (1,37 à 1,61 m) avec des membres inférieurs courts et un crâne large.

Plus au sud, la race khoisan réunit les Hottentots et les Boschimans d'Afrique australe, qui sont en quelque sorte intermédiaires entre les Noirs et les Jaunes. Des premiers, ils ont les cheveux crépus et le prognathisme ; des seconds, la peau jaunâtre et les pommettes saillantes. La taille est faible. Les femmes présentent des fesses particulièrement adipeuses : cette stéatopygie a fait la célébrité de la « Vénus hottentote ».

La race mélano-hindoue habite l'Inde péninsulaire et Ceylan : ce sont les Dravidiens, aux cheveux bouclés et au prognathisme très réduit. Ils semblent apparentés aux Méditerranéens et aux Vedda.

Les Pygmées asiatiques constituent la race négrito, localisée à trois secteurs de l'Asie du Sud-Est : les Philippines, la Malaisie et les îles Andaman. Le prognathisme est peu marqué, le crâne un peu élargi.

Enfin, la race mélanésienne correspond aux Noirs d'Océanie : Papous de Nouvelle-Guinée, Canaques de Nouvelle-Calédonie, habitants des Fidji, des Nouvelles-Hébrides, etc. Ils ont les arcades sourcilières proéminentes, le crâne allongé, les cheveux abondants. La taille est variable : les Tapiros néo-guinéens sont des Mélanésiens pygmées.

LE MÉTISSAGE

Des Noirs habitent également les Amériques, mais seulement depuis la « traite des Noirs » : il s'agit de Noirs d'origine africaine qui constituent maintenant une bonne part de la population des États-Unis, des Antilles et du Brésil.

De nombreuses races ou sous-races sont actuellement en voie d'extinction. Les Tasmaniens ont déjà disparu. Bon nombre de ces populations en déclin se trouvent confinées dans des îles : Vedda de Ceylan, Négritos des Andaman, Fuégiens de la Terre de Feu, Aïnous d'Hokkaïdo.

Nous avons vu que le métissage avait une importance de plus en plus grande dans le monde moderne. Il semble avoir eu, au cours de l'histoire, une influence bénéfique : le contact de deux races, ou plus, a manifestement un effet catalyseur sur les qualités psychiques. Par exemple, les anciens Égyptiens étaient des Méditerranéens quelque peu teintés de sang asiatique ; les Grecs — en dépit de leur aversion pour les « Barbares » — étaient métissés avec des Nordiques, des Alpins, des Sémites ; les Arabes furent brassés avec des Noirs et des Espagnols.

Inversement, les races « pures » isolées, repliées sur elles-mêmes, ne tardent pas à montrer des signes de dégradation : ainsi, les squelettes des Vikings qui vécurent au Groenland, coupés du monde, dénotent, selon J. Ruffié, une grande pauvreté physiologique.

Ci-dessous, à gauche : un « Peau-Rouge » sioux, exemple de la diversité de la grand-race jaune.
A droite : les Esquimaux des régions arctiques du Canada appartiennent aussi à la grand-race jaune.

LE SYSTÈME CIRCULATOIRE

Tous les tissus de l'organisme humain doivent être approvisionnés de façon permanente en aliments et en oxygène; cela permet aux cellules qui les composent d'exercer leur activité métabolique, qui se traduit par la transformation des aliments fournis en constituants cellulaires et en énergie.

La fonction d'apporter à toutes les cellules l'oxygène et les aliments nécessaires est remplie essentiellement par le sang, qui irrigue toutes les parties de l'organisme, y compris les cellules les plus éloignées.

Le sang circule dans un système de vaisseaux qui s'étend dans toutes les parties du corps et dont le cœur, organe de propulsion de la circulation, est le point de départ.

De gros vaisseaux transportent une grande quantité de sang d'un point à l'autre de l'organisme (par exemple du cœur à la tête ou à l'intestin) : il s'en détache des ramifications plus ou moins nombreuses destinées chacune à irriguer des régions déterminées; ces ramifications se subdivisent à leur tour en rameaux de plus en plus fins, jusqu'aux terminaisons ultimes qui sont les capillaires sanguins, dont le diamètre ne dépasse pas parfois 7 microns (millièmes de millimètre). Le rôle des capillaires est de transporter le sang jusqu'au niveau des cellules.

STRUCTURE DES VAISSEAUX SANGUINS

Du point de vue de leur structure, les vaisseaux se divisent en deux grandes catégories : les artères, qui transportent du sang oxygéné du cœur aux différentes parties du corps, et les veines, qui ramènent le sang vers le cœur; notons cependant que les artères pulmonaires qui transportent du cœur vers les poumons le sang périphérique, donc appauvri en oxygène, ont elles aussi la structure des artères, de même que les vaisseaux qui transportent du sang oxygéné des poumons aux cœur, les veines pulmonaires, ont la structure typique des veines.

Les différences existant entre la structure des artères et celle des veines sont en rapport direct avec les fonctions différentes remplies par ces deux types de vaisseaux. Les artères reçoivent le sang envoyé par le cœur sous une certaine pression et le transportent vers les tissus. Les veines, en revanche, reçoivent le sang des capillaires artériels ou le recueillent au niveau des espaces tissulaires et, réunies en gros vaisseaux, le transportent vers le cœur; au cours de ce transport, le courant sanguin ascensionnel doit vaincre la force de pesanteur.

Cela est réalisé non plus par l'impulsion donnée au courant circulatoire par le « moteur » cardiaque ni par une contractilité propre des vaisseaux, mais par d'autres facteurs : mouvement des viscères et contraction des muscles adjacents, lois physiques de l'hydrodynamique, et enfin ouverture et fermeture de valvules spéciales.

Les artères sont de gros vaisseaux élastiques et contractiles. Ils sont constitués de trois tuniques concentriques. La tunique externe, ou adventice, formée d'un tissu conjonctif riche en fibres élastiques. La tunique moyenne, ou média, beaucoup plus épaisse que la précédente, est composée de fibres élastiques et de fibres lisses : les proportions respectives de ces deux types de fibres varient en fonction du calibre de l'artère, les fibres élastiques étant beaucoup plus abondantes dans les artères de gros calibre, telle l'aorte, tandis que la média des artérioles ne comprend pratiquement que des fibres lisses. La tunique interne, ou intima, enfin, formée de tissu conjonctif élastique, est tapissée d'un endothélium (tissu fait de cellules aplaties), qui se trouve directement en contact avec le sang.

Les artères occupent toujours une position profonde dans le corps, ce qui les met à l'abri des chocs superficiels qui pourraient en provoquer la section : à cause de sa

Ci-dessous : graphes d'enregistrement des potentiels d'action du nerf de Héring et de la pression artérielle de l'artère fémorale.

A. Rizzi

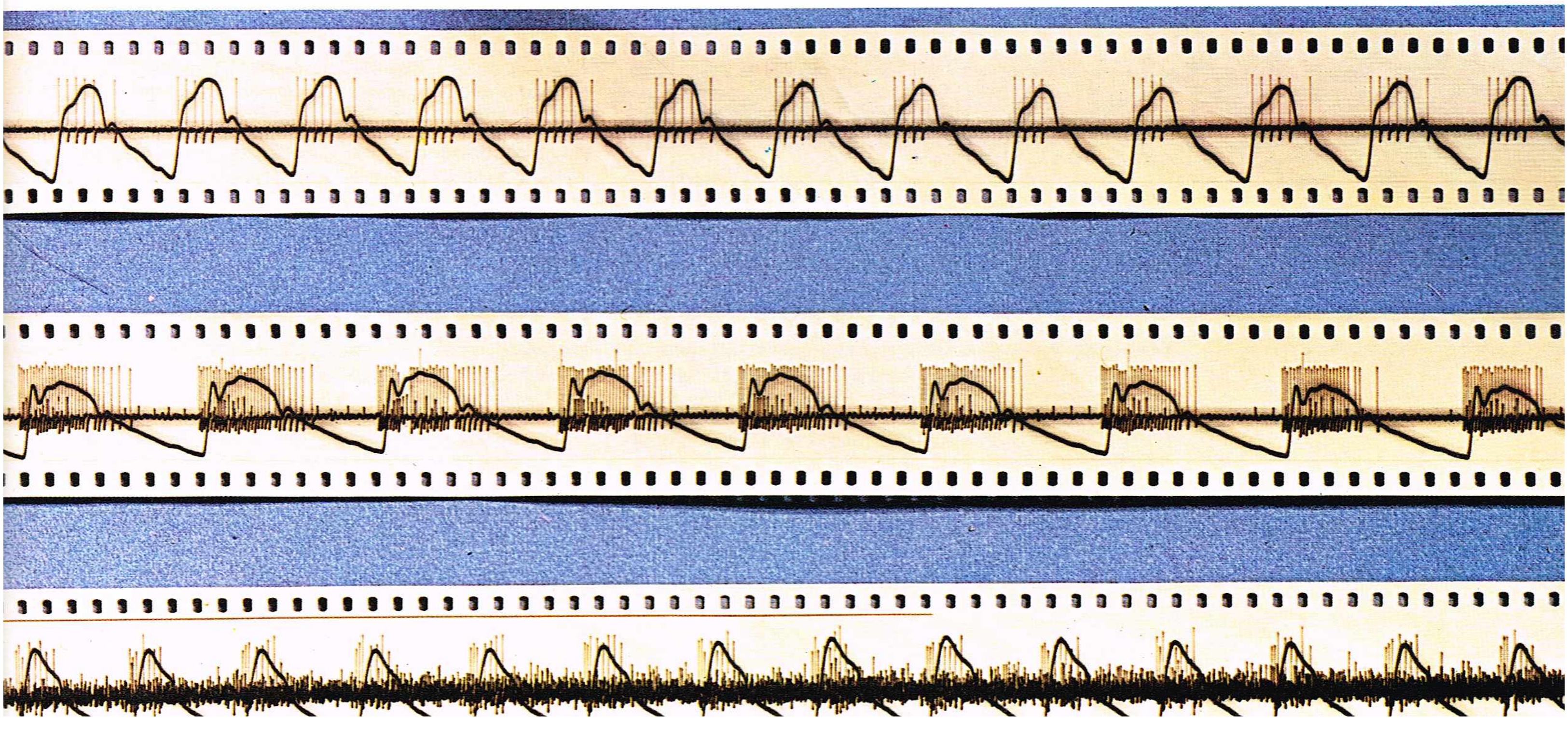

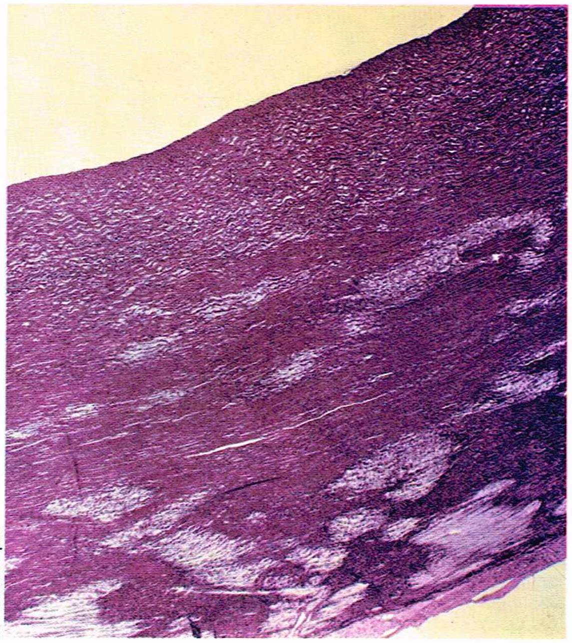

C. Bevilacqua

Ci-dessus : fragment d'une coupe transversale de l'aorte montrant les trois tuniques qui en constituent la paroi (× 18 × 1,5, coloration de contraste).

structure, une artère sectionnée resterait béante, d'où risque d'hémorragie totale, favorisée par les pulsations artérielles.

La structure des veines n'est pas fondamentalement différente de celle des artères ; elle comporte aussi trois tuniques, mais celles-ci sont beaucoup plus minces que dans le cas des artères.

Les veines se présentent comme des vaisseaux dotés d'une paroi mince, presque transparente, de couleur bleuâtre ; elles sont beaucoup moins élastiques que les artères et infiniment moins contractiles ; quelques-unes sont très superficielles et parfaitement visibles.

A la différence des artères, dont la lumière, c'est-à-dire la cavité, est toujours libre, les veines présentent sur leur paroi interne des valvules, réparties par paires.

Ces valvules, qui présentent grossièrement la forme d'une poche, s'ouvrent pour laisser passer le flux sanguin et se referment ensuite rythmiquement afin d'empêcher que le sang ne reflue vers le bas, comme le voudrait la loi de la pesanteur.

LE CŒUR

Le cœur est un muscle creux divisé en quatre cavités : deux supérieures appelées oreillettes, deux inférieures, appelées ventricules. Chaque oreillette communique directement avec le ventricule correspondant par l'intermédiaire d'une valvule : la valvule tricuspide, à droite, la valvule mitrale, à gauche.

Les deux oreillettes et les deux ventricules ne communiquent pas entre eux, mais sont séparés par une cloison complète. Cette séparation se justifie par le fait que la partie gauche du cœur ne contient que du sang artériel, tandis que la droite contient uniquement du sang veineux.

Un mélange éventuel des deux sangs aurait des conséquences désastreuses, car le sang artériel recevrait les déchets véhiculés par le sang veineux.

Le cœur est le point d'arrivée des gros troncs veineux et le point de départ des gros troncs artériels qui iront se ramifier dans tout l'organisme. L'oreillette droite reçoit la veine cave supérieure et la veine cave inférieure, qui amènent le sang provenant de tout l'organisme ; du ventricule droit part l'artère pulmonaire, qui se divise immédiatement en deux branches, droite et gauche, qui portent le sang veineux aux poumons où il sera oxygéné ; l'oreillette gauche reçoit les veines pulmonaires, qui amènent le sang oxygéné provenant des poumons ; du ventricule gauche se détache l'aorte, qui portera le sang oxygéné dans tout l'organisme.

Le cœur est intérieurement tapissé par un endothélium et entouré extérieurement par le péricarde, sorte de sac formé de deux feuillets glissant l'un sur l'autre, dont la cavité virtuelle est remplie d'un liquide, le liquide péricardique.

Le feuillet externe de péricarde, fibreux, est solide, tandis que le feuillet interne, directement en contact avec le cœur, est une membrane séreuse (c'est-à-dire qui sécrète un liquide analogue à la lymphe).

GRANDE CIRCULATION ET VAISSEAUX PRINCIPAUX

La circulation sanguine débute au ventricule gauche, au moment où le sang est propulsé dans l'aorte. Immédiatement après sa sortie, l'aorte émet deux artères collatérales de calibre beaucoup plus réduit : les artères coronaires droite et gauche, qui assurent, par leurs ramifications, l'irrigation du muscle cardiaque.

Dans sa première portion, l'aorte forme un arc, l'arc aortique, qui lui permet d'enjamber la bronche gauche ; elle devient ensuite rectiligne et chemine parallèlement à la colonne vertébrale.

Du sommet de l'arc aortique se détachent, à gauche, la carotide gauche et la sous-clavière gauche, à droite, un court tronçon artériel, le tronc brachio-céphalique, qui se divise aussitôt en deux branches, la carotide droite et la sous-clavière droite.

Les artères carotides droite et gauche se divisent à leur tour chacune en deux branches, externe et interne, et vont irriguer les organes du cou et de la tête. Parmi les principales artères de ces régions, rappelons la branche frontale et la branche pariétale de la carotide externe et les artères occipitale, auriculaire, ophtalmique, maxillaire externe, sans oublier toutes les nombreuses artères cérébrales destinées au cerveau.

Les sous-clavières se dirigent vers les bras et prennent une nouvelle dénomination selon les régions qu'elles parcourent (artère humérale, cubitale, radiale, palmaire et artères collatérales pour les doigts).

Revenons à l'aorte et notons que, dans la portion thoracique de celle-ci, se détachent les artères intercostales, œsophagiennes et bronchiques, tandis que la partie abdominale donne naissance aux artères diaphragmatiques et au tronc cœliaque, qui se divise bientôt dans les artères gastrique, hépatique et splénique (qui va à la rate) ; au niveau de la quatrième vertèbre lombaire, l'aorte se divise dans les deux artères iliaques, se subdivisant à leur tour chacune en artère iliaque interne et artère iliaque externe, la première destinée aux organes du bassin, la seconde destinée aux membres inférieurs, où elles forment les artères fémorale, poplitée, tibiale, péronière, pédieuse, et collatérales des orteils.

A l'intérieur des différents organes, toutes ces artères donnent naissance à de nombreuses ramifications se terminant dans de très nombreux capillaires. Le système veineux reproduit assez fidèlement le système artériel. Les capillaires veineux se réunissent en veinules et celles-ci vont constituer des veines de calibre de plus en plus grand ; les veines sous-clavières, qui proviennent des membres supérieurs, et les veines jugulaires, provenant de la tête, se réunissent pour former la veine cave descendante qui aboutit à l'oreillette droite ; les veines iliaques, provenant des membres inférieurs, se réunissent pour former la veine cave ascendante, dans laquelle débouchent les veines mésentériques, rénales, hépatiques et la veine gastrique ; la veine coronaire draine la circulation du myocarde.

Il convient de réserver une mention particulière à la circulation porte, formée par les capillaires qui drainent le sang veineux, riche en substances nutritives, des parois intestinales et se réunissent pour former la veine porte qui aboutit au foie, où elle se résout à nouveau en un réseau de capillaires ; ceux-ci confluent pour former la veine sus-hépatique, qui se jette dans la veine cave ascendante.

Un mot, pour finir, à propos de la « petite circulation » : elle comprend les deux artères pulmonaires qui partent du cœur et aboutissent aux poumons, où elles se résolvent en un dense réseau de capillaires ; le sang veineux qu'elles ont véhiculé jusqu'aux poumons y subit l'oxygénation et est drainé par un nouveau réseau de capillaires, dont la réunion formera les veines pulmonaires qui ramènent le sang vers le cœur.

LE SYSTÈME LYMPHATIQUE

Le sang ne quitte normalement jamais le très dense réseau de capillaires dans lequel il circule et qui constitue un système rigoureusement clos : les échanges nutritifs s'accomplissent à travers la paroi très mince des capillaires. Le liquide qui en filtre, la lymphe, se rassemble dans les espaces qui séparent les vaisseaux des cellules et joue le rôle d'intermédiaire dans les échanges de matériaux entre le sang et les cellules. Celles-ci empruntent à la lymphe des matériaux et y rejettent leurs déchets.

Nous allons voir la structure du système lymphatique de l'homme. La lymphe est ensuite recueillie dans des culs-de-sac qui se trouvent dans ces espaces et qui constituent les origines des capillaires lymphatiques : ceux-ci convergent vers des vaisseaux dont le calibre augmente progressivement pour déboucher enfin dans deux canaux lymphatiques principaux, la grande veine lymphatique et le canal thoracique.

La grande veine lymphatique a un trajet court : elle recueille la lymphe provenant de la région de la tête, de la moitié droite du cou et du thorax, du bras droit, et se jette dans la veine sous-clavière droite, près de la confluence de celle-ci avec la veine jugulaire interne droite.

Le canal thoracique prend naissance d'une formation volumineuse, la citerne de Pecquet, qui se trouve dans la région abdominale ; il chemine au-devant de la colonne vertébrale et débouche dans la veine sous-clavière gauche, à la confluence de celle-ci avec la veine jugulaire interne gauche, après avoir drainé la lymphe provenant de toute la partie inférieure et de la partie gauche du corps.

Aboutissent également à la citerne de Pecquet, en cheminant sur le mésentère (repli du péritoine), tous les vaisseaux chylifères provenant des villosités intestinales et qui renferment la fraction grasse du chyle, le contenu liquide de l'intestin.

Les vaisseaux lymphatiques ne sont pas cylindriques mais noduleux, ou plutôt en forme de chapelet ; ils ont une paroi constituée de trois tuniques : la tunique externe, conjonctive ; la moyenne, élastique et musculaire ; et enfin l'interne, constituée par un endothélium, tissu aux cellules aplaties. Ces vaisseaux sont cloisonnés par de très nombreuses valvules, destinées à empêcher le reflux de la lymphe ; à la différence des vaisseaux sanguins, ils sont incolores.

LA LYMPHE

La lymphe est un liquide clair, opalin, capable de coaguler, mais plus lentement que le sang ; elle contient des protéines, des sels, des lipides, du cholestérol et des lécithines.

Cette composition est sujette à de nombreuses variations, dépendant du moment physiologique et de la partie du corps dont la lymphe provient : la lymphe provenant du foie, par exemple, contient 6 % de protéines, tandis que celle qui vient des membres n'en contient que 2 % ; la lymphe du canal thoracique présente, peu après les repas, un aspect laiteux, et elle est très riche en graisse.

Toute la lymphe qui filtre à travers les capillaires sanguins n'est pas recueillie par les capillaires lymphatiques ; en réalité, on observe entre le sang et les tissus un échange constant de liquides, et seulement une partie de ces derniers, le surplus non utilisé, est drainée par les capillaires et entre dans la circulation lymphatique.

La formation de la lymphe n'est pas, comme on pourrait le croire, un phénomène simple, mais dépend d'un grand nombre de phénomènes physiques complexes. En premier lieu, le phénomène de la filtration, qui règle le passage de l'eau et des substances qu'elle porte en solution à travers une membrane, passage qui obéit aux différences de pression qui s'exercent sur les deux faces de la membrane.

En deuxième lieu, il faut considérer l'influence du degré de perméabilité des membranes à travers lesquelles s'effectue le passage du liquide ; il existe, en effet, des membranes semi-perméables qui laissent passer uniquement l'eau, et des membranes perméables uniquement à certains ions (atomes ayant gagné ou perdu des électrons).

Interviennent aussi des phénomènes de diffusion, sous la dépendance de la pression hydrostatique et de la

C. Bevilacqua

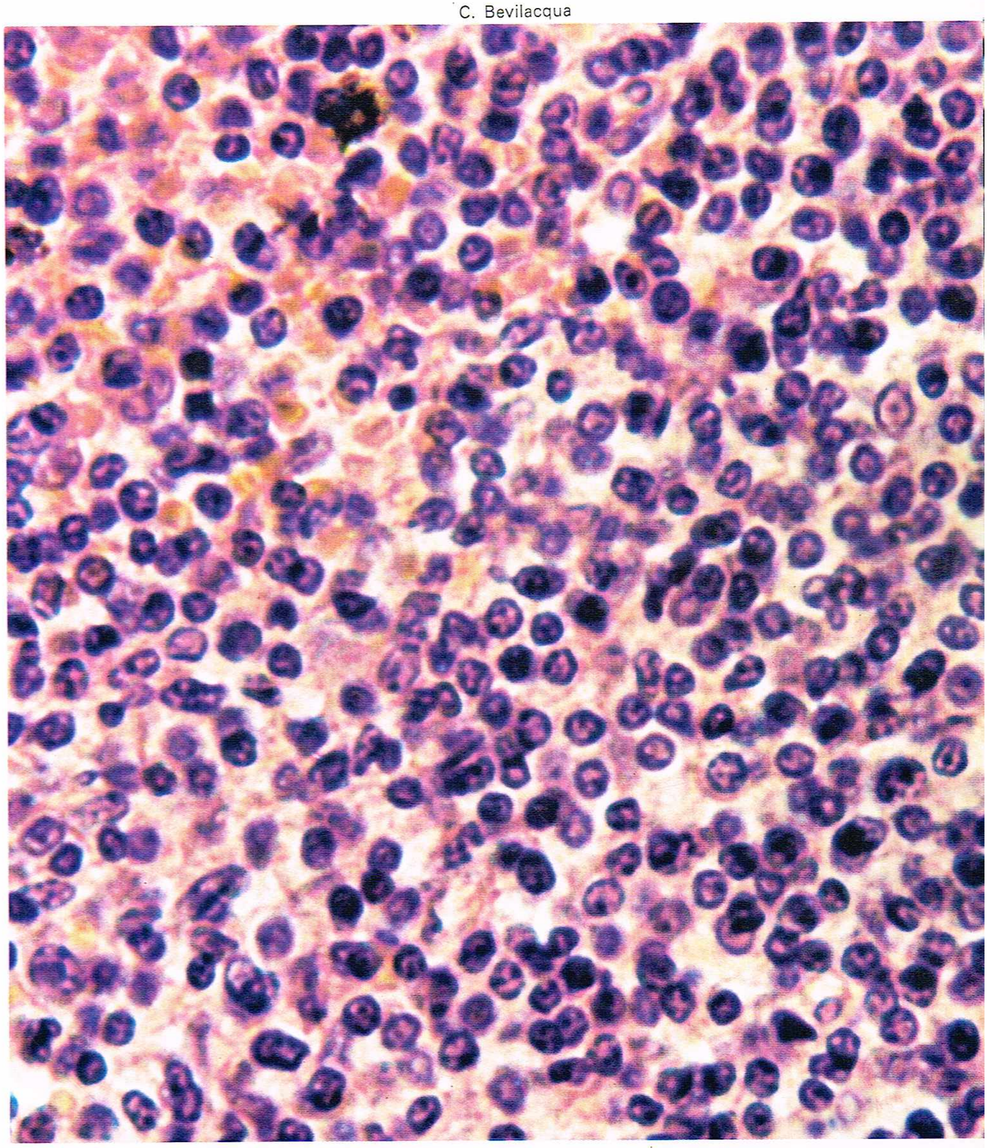

Section de la pulpe rouge de rate, organe hématopoïétique de la vie embryonnaire ($\times$ 250 $\times$ 4 ; coloration histologique de contraste).

pression osmotique. La pression hydrostatique provoque le passage des substances dissoutes du sang vers la lymphe, tandis que la pression osmotique, moins élevée dans la lymphe, assure le passage de ces mêmes substances vers le sang, dans lequel règne une pression osmotique supérieure.

Ainsi, le liquide interstitiel n'est pas uniquement réabsorbé par les capillaires lymphatiques qui le « pompent » sous l'effet de la pression osmotique, mais aussi par les capillaires sanguins.

La filtration agit dans le sens contraire à celui de la pression osmotique, favorisant la sortie de liquide des capillaires sanguins vers les espaces interstitiels.

La formation de la lymphe est donc essentiellement un processus physico-chimique de filtration et d'omose, processus dans lequel interviennent comme agents régulateurs la pression sanguine, le degré de perméabilité de l'endothélium des capillaires et l'activité métabolique des cellules des tissus.

Un autre problème très important concerne le mécanisme suivant lequel ce liquide progresse dans les capillaires, puis dans les vaisseaux de plus grand calibre, réalisant ainsi une circulation en l'absence de tout organe propulseur.

L'expérimentation pratiquée chez l'animal a montré que lorsque celui-ci est absolument immobile, en anesthésie profonde, la circulation lymphatique s'arrête, mais que le plus petit mouvement, actif ou passif, est suffisant pour rétablir une circulation lymphatique même très lente.

On voit donc que la lymphe progresse sous l'influence de facteurs d'ordre essentiellement mécanique qui diffèrent selon les régions du corps : par exemple, au niveau des membres, ce sont les contractions musculaires et les mouvements en général qui favorisent la circulation lymphatique; dans le thorax, ce sont les mouvements respiratoires et les pulsations des gros vaisseaux; dans l'abdomen, les contractions des muscles abdominaux, les mouvements du tube digestif et les mouvements du corps provoquant un déplacement des viscères; au niveau de la tête et du cou, les pulsations des artères cérébrales et l'aspiration thoracique, car, à chaque inspiration, il se crée dans le thorax une pression négative qui provoque la dilatation des gros vaisseaux proches du cœur, parmi lesquels se trouvent justement la grande veine lymphatique et le canal thoracique; à l'inverse, à chaque expiration, il se crée une pression intra-thoracique positive entraînant une compression des vaisseaux, ce qui permet la progression de la lymphe.

Ces observations soulignent l'un des intérêts de l'exercice physique; en effet, puisque celui-ci favorise la circulation lymphatique, il active en même temps tous les phénomènes métaboliques qui s'y rattachent, avec comme résultat une meilleure assimilation des substances nutritives et une élimination plus efficace des déchets.

LES GANGLIONS LYMPHATIQUES

Sur le trajet des vaisseaux lymphatiques, à des intervalles plus ou moins réguliers, on rencontre de petits organes de forme grossièrement ovoïde et d'un diamètre variant entre 1 mm et 1 cm : on les appelle ganglions lymphatiques. Chaque ganglion est constitué par un segment pelotonné du vaisseau lymphatique et par un tissu conjonctif particulier, le tissu lymphoïde, qui l'entoure.

On évalue à environ 700 les ganglions lymphatiques présents dans le corps humain; ils sont disséminés dans toutes les régions du corps, mais sont plus particulièrement abondants dans le mésentère, dans l'aine, sous les aisselles et sur les faces latérales du cou. Les ganglions lymphatiques jouent un rôle très important dans la dynamique de la circulation lymphatique à un double titre; d'une part, ils constituent des réservoirs à lymphe lorsque celle-ci est particulièrement abondante (c'est le cas notamment des ganglions mésentériques qui stockent, après chaque repas, la lymphe provenant des vaisseaux chylifères); d'autre part, chaque ganglion ralentit à son niveau le courant lymphatique.

Ce ralentissement a pour résultat de faire séjourner la lymphe dans le ganglion le temps nécessaire à son épuration; il est dû au fait que le nombre de vaisseaux qui aboutissent au ganglion est supérieur au nombre de ceux qui en partent. Il est facile de comprendre que si par exemple, cinq vaisseaux afférents déversent la lymphe dans le ganglion alors que le nombre des vaisseaux efférents n'est que de deux, il se produira un ralentissement de la circulation au niveau du ganglion.

Les ganglions lymphatiques constituent des centres de désintoxication parmi les plus remarquables de l'organisme : en filtrant la lymphe, ils la débarrassent des germes, des substances toxiques et des particules étrangères dont elle s'est chargée au niveau des tissus. Là ne s'arrête pas leur fonction, car les ganglions lymphatiques sont susceptibles de détruire les germes grâce aux granulocytes (cellules au noyau lobulé) et aux macrophages (cellules de forte taille) de l'endothélium; ces cellules sont en effet capables de phagocyter, c'est-à-dire de « digérer », les germes.

En outre, les ganglions lymphatiques envoient dans la circulation les lymphocytes, globules blancs présents non seulement dans la lymphe mais aussi dans le sang et qui jouent un rôle très important dans les processus de suppuration des blessures, dans les infections, etc.

Lorsque ces barrières naturelles se révèlent insuffisantes pour retenir les micro-organismes et les toxines et que ces corps passent dans la circulation sanguine, des phénomènes septicémiques et toxémiques (dus à la présence de toxiques) apparaissent.

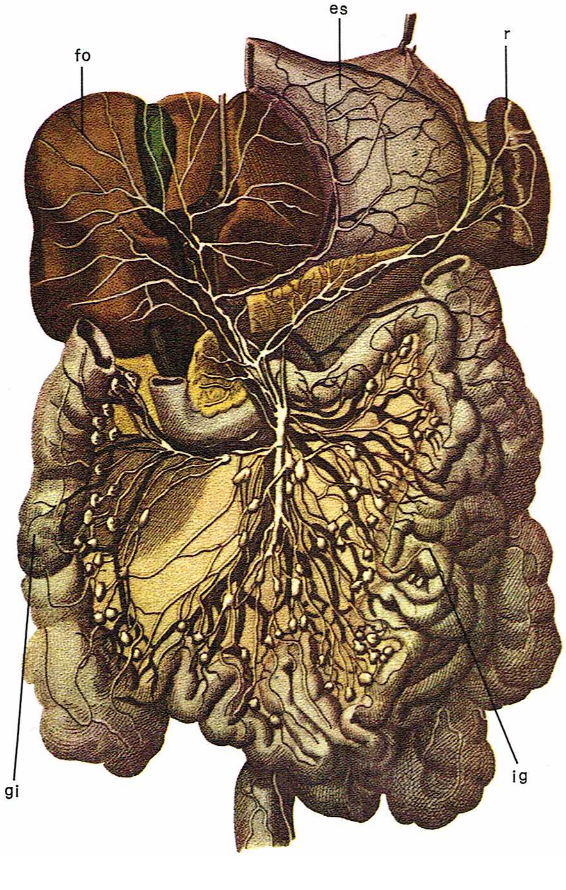

I.G.D.A.

A gauche : représentation semi-schématique des ganglions lymphatiques et des vaisseaux lymphatiques du foie, de la rate, de l'estomac et de l'intestin; fo, foie; es, estomac; r, rate; gi, gros intestin; ig, intestin grêle. Ci-dessous : représentation schématique de la structure d'un ganglion lymphatique en coupe transversale; cf, capsule fibreuse; sp, sinus périphérique; fl, follicule lymmphatique; vle, vaisseau lymphatique efférent; vla, vaisseau lymphatique afférent.

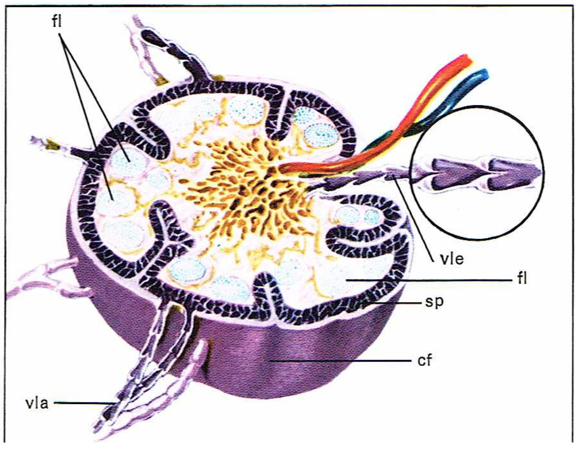

I.G.D.A.

LA RESPIRATION

La respiration est un échange gazeux entre le milieu extérieur et l'organisme : celui-ci y puise l'oxygène qui lui est nécessaire et y rejette le gaz carbonique (ou anhydride carbonique).

On distingue une respiration externe, comprenant une inspiration et une expiration qui se traduisent par une fixation d'oxygène par le sang et une élimination de gaz carbonique ; une respiration interne, qui a lieu entre le sang et les cellules, celles-ci puisant l'oxygène dans le sang artériel et y rejetant le gaz carbonique ; enfin, une respiration à l'intérieur des cellules, qui permet à celles-ci de dégrader le glucose afin de produire l'énergie nécessaire à la vie : cette dégradation se réalise grâce à l'oxygène, utilisé comme combustible, et elle se termine par l'élimination du gaz carbonique.

MÉCANIQUE DE LA RESPIRATION

Voyons comment se présente la respiration chez l'homme. D'un point de vue purement mécanique, le fonctionnement du poumon est très semblable à celui d'un soufflet ; en effet, les poumons se gonflent par inspiration d'air et se dégonflent par expulsion de celui-ci. La première de ces deux phases est active chez l'homme, puisque l'expansion pulmonaire est réalisée par élargissement de la cage thoracique et soulèvement des côtes sous l'action des muscles superficiels de la paroi antérieure du thorax, des muscles intercostaux (situés entre les côtes) et des muscles scalènes (dans le cou), ainsi que par l'abaissement du diaphragme ; la deuxième phase, l'expiration, est passive, la cage thoracique revenant à ses dimensions initiales par simple relâchement des muscles qui s'étaient précédemment contractés.

En moyenne, l'homme effectue environ 16 mouvements respiratoires par minute et la femme 14. Chaque mouvement respiratoire permet l'introduction dans les poumons d'environ 500 cm³ d'air, qui constituent le volume courant. La capacité totale du poumon étant de l'ordre de 5 000 cm³, la différence est constituée par : 1 500 à 2 000 cm³ de volume de réserve inspiratoire, correspondant au volume d'air qui peut être introduit dans le poumon par une inspiration forcée et qui s'ajoute au volume courant ; 1 500 cm³ de volume de réserve expiratoire, volume pouvant être émis par une expiration forcée après une expiration normale ; 1 000-1 500 cm³ de volume résiduel, qui demeure en permanence dans les poumons.

Le total formé par le volume courant, le volume de réserve inspiratoire et le volume de réserve expiratoire, constitue la capacité vitale du poumon. Rappelons, enfin, que par ventilation pulmonaire on entend le volume d'air inspiré et expiré à chaque minute. Si on considère que des 500 cm³ d'air inspirés seulement 350 arrivent jusqu'aux alvéoles et que l'air vicié, formé par le volume résiduel et le volume de réserve expiratoire, correspond à un volume de 2 500 cm³ le rapport entre ces deux grandeurs $\frac{350}{2\,500} = 0{,}14$ *nous donne le coefficient de ventilation pulmonaire. Celui-ci indique que sur 100 cm³ d'air présents dans le poumon, seulement 14 sont renouvelés.*

LA FONCTION RESPIRATOIRE DU SANG

Le volume d'oxygène contenu dans 100 ml de sang artériel est d'environ 20,3 ml, dont 20 ml sont liés à l'hémoglobine, le pigment rouge des hématies ou globules rouges : elle est ainsi oxydée en HbO_2 *; le reste, 0,3 ml, est dissous dans le plasma. Dans un même volume de*

C. Bevilacqua

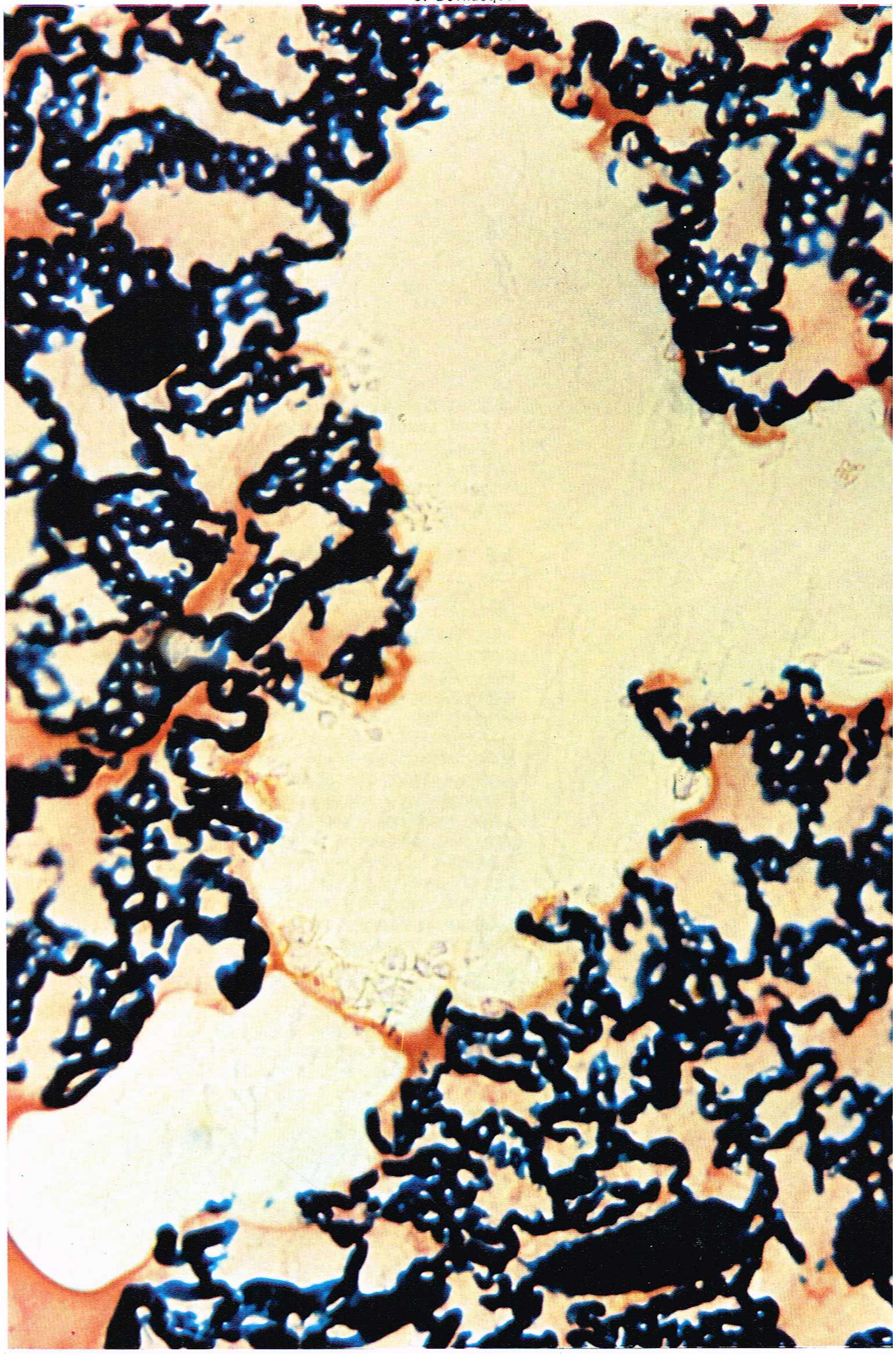

Cette illustration montre quelques cloisons interalvéolaires de poumon humain. Le réseau capillaire a été mis en évidence grâce à l'injection d'un colorant bleu (× 100 × 4,5).

sang veineux, on trouve, en revanche, 15,3 ml d'oxygène, dont 15,2 ml liés à l'hémoglobine et 0,1 dissous.

Le rapprochement de ces chiffres montre que le sang artériel devient veineux en perdant 5 ml d'oxygène par 100 ml de sang. On note aussi que la quasi-totalité de l'oxygène contenue dans le sang est liée à l'hémoglobine pour former l'oxyhémoglobine, corps dans lequel la liaison de l'oxygène est instable et réversible et que l'on indique, de ce fait, par l'équation suivante : $Hb + O_2 \rightleftharpoons HbO_2$.

Par capacité totale du sang en oxygène, ou pouvoir oxyphorique, on entend le volume d'oxygène qui se trouve lié à l'hémoglobine lorsque celle-ci est complètement saturée.

On sait que, pour le sang humain, le pouvoir oxyphorique est un peu supérieur à 20 ml par 100 ml de sang, d'où l'on déduit que toute l'hémoglobine de sang artériel est saturée par l'oxygène, tandis que le sang veineux contient une fraction d'hémoglobine non saturée.

La quantité d'oxygène qui se fixe à l'hémoglobine dépend directement de la pression partielle de l'oxygène : dans les poumons, l'air inspiré contient de l'oxygène à une pression partielle élevée (100 mm de mercure), tandis que la pression partielle d'oxygène n'est que de 30 à 40 mm de mercure dans le sang veineux. Cela permet de comprendre facilement que l'oxygène se fixe rapidement sur l'hémoglobine jusqu'à saturation à peu près complète du pigment respiratoire : le produit qui en résulte est l'oxyhémoglobine.

A l'inverse, la pression partielle d'oxygène dans les tissus n'est que de 30 mm de mercure alors qu'elle est de 95 à 100 mm dans le sang artériel ; aussi, l'oxygène se détache de l'hémoglobine et passe dans les tissus.

Ainsi, grâce à ce mécanisme, l'oxygène est transporté depuis les poumons jusqu'aux cellules, où il sera utilisé. Nous allons maintenant examiner de quelle manière, toujours par l'intermédiaire du sang, est éliminé le gaz carbonique.

LE TRANSPORT DU GAZ CARBONIQUE

A l'inverse de ce qui se passe pour l'oxygène, la pression partielle de gaz carbonique dans les tissus est beaucoup plus élevée que dans le sang artériel (environ 50 mm de mercure contre 40 mm pour le sang) ; cette différence de pression explique la propriété que possède le gaz carbonique de passer dans le sang, lequel cède simultanément de l'oxygène, se transformant ainsi en sang veineux.

Arrivé aux poumons, le sang veineux présente une pression partielle de gaz carbonique d'environ 46 mm de mercure, alors que la pression partielle de ce gaz dans l'air alvéolaire n'est que de 40 mm de mercure ; cette différence entraîne le transfert du gaz carbonique du sang dans l'air alvéolaire, avec lequel il sera éliminé lors de l'expiration ; dans le même temps, le sang fixe de l'oxygène et devient artériel.

Il nous reste à envisager comment le gaz carbonique est transporté par le sang ; ce mécanisme de transport est beaucoup plus complexe que celui que nous avons observé pour l'oxygène et exige une explication plus détaillée.

Avant tout, une petite fraction de gaz carbonique se dissout dans le plasma, à raison de 3 volumes % (phénomène que nous avons déjà noté pour l'oxygène), cependant qu'une fraction pratiquement négligeable se transforme, en s'hydratant lentement, en acide carbonique H_2CO_3, acide très instable, qui se combine au sodium présent dans les protéinates et les phosphates du sang.

Négligeons ces quantités infimes et constatons que la plus grande partie du gaz est transportée par le sang sous des formes chimiques diverses, issues de transformations complexes.

En simplifiant, on peut dire que le gaz carbonique pénètre presque en totalité dans les globules rouges, où il sera soumis à deux processus différents : une petite fraction se fixe directement à l'hémoglobine réduite (celle-ci ayant cédé l'oxygène aux tissus) et est transportée sous forme de carbamine à raison de 3,82 volumes %.

La fraction restante de gaz carbonique s'hydrate en acide carbonique H_2CO_3 sous l'action d'un catalyseur, l'anhydrase carbonique, qui permet à cette réaction, normalement assez lente, de se produire en un temps compatible avec la durée de la circulation sanguine.

L'acide carbonique ainsi formé réagit avec le potassium, qui se trouve lié à l'hémoglobine réduite, en donnant du bicarbonate de potassium $KHCO_3$, qui se dissocie immédiatement en ions K^+ et HCO_3^-. Rappelons que les ions sont des atomes qui ont gagné ou perdu des électrons.

Ensuite les ions HCO_3^- sortent du globule rouge, à l'intérieur duquel ils sont remplacés par des ions Cl^- qui y pénètrent : cela entraîne une augmentation de la quantité de chlore à l'intérieur du globule et une diminution dans le plasma, dans lequel, en revanche, s'accumule une quantité considérable de bicarbonate de soude.

Le mécanisme de transport du gaz carbonique que nous venons de décrire est, quantitativement, le plus important ; au terme de ce processus, ce gaz se trouve présent à raison de 13,6 volumes % dans le globule rouge, sous forme de bicarbonate de potassium, et à raison de 33,05 volumes % dans le plasma, sous forme de bicarbonate de sodium, ce qui donne un total de 46,65 % sur les 53,5 volumes % transportés globalement par le sang veineux.

Lorsque le sang veineux parvient aux alvéoles pulmonaires, le gaz carbonique, sous l'effet de la différence de pression partielle, passe du sang dans l'air alvéolaire, parcourant en sens inverse le schéma de réactions que nous venons de décrire et qui aboutit à la libération du gaz.

Il est intéressant de noter que le temps nécessaire pour que soit atteint l'équilibre gazeux entre le sang et l'air alvéolaire est d'une seconde à peine, et cela grâce à l'énorme surface respiratoire des alvéoles pulmonaires : on estime, en effet, que la surface totale développée des alvéoles pulmonaires et des capillaires qui les entourent atteint 200 m² environ.

Le transport du gaz carbonique par le sang veineux est facilité par le fait que l'hémoglobine réduite, c'est-à-dire privée de l'oxygène qu'elle a cédé aux tissus, possède une bien plus grande capacité de fixer le gaz carbonique que l'hémoglobine oxydée ; on a pu déterminer expérimentalement que, sous la pression de CO_2 régnant dans l'organisme, le sang veineux contenant de l'hémoglobine réduite est capable de fixer 6 volumes % de plus que le sang artériel riche en oxyhémoglobine.

Ci-dessous : coupe transversale de muqueuse nasale, où l'on voit l'épithélium vibratile et la couche superficielle riche en glandes (× 100 × 1,4 ; coloration de contraste). A droite : préparation histologique de pharynx foetal (× 250 × 1,3 ; coloration de contraste).

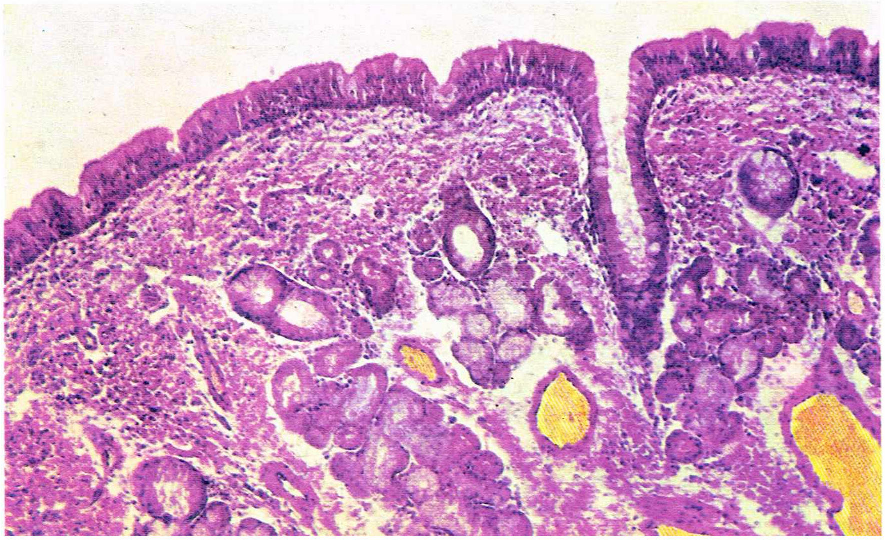

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

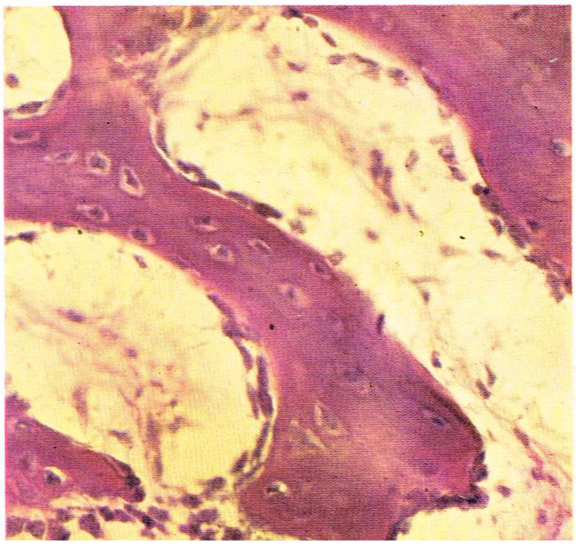

P. Castano

LA PEAU

La peau et ses structures annexes jouent un rôle bien plus important que celui de simple revêtement du corps.

En premier lieu, la peau est une surface de protection ; bien qu'elle paraisse, du moins chez l'homme, mince et fragile, elle est en réalité formée de plusieurs couches de cellules, dont la plus externe présente une kératinisation plus ou moins accentuée selon les contraintes mécaniques qu'elle supporte. La kératinisation est l'imprégnation par une substance, la kératine, qui donne un aspect de corne.

Ainsi, par exemple, l'épithélium (tissu de revêtement) de la plante des pieds est beaucoup plus kératinisé que celui de l'abdomen. En outre, la peau peut être considérée dans son ensemble comme un organe sensoriel d'une extrême importance, car elle contient tous les récepteurs des diverses sensibilités : tactile, thermique et douloureuse.

Chez les Vertébrés homéothermes, c'est-à-dire « à sang chaud », donc aussi chez l'homme, la peau participe à la régulation nerveuse réflexe de la température du corps, puisque c'est essentiellement à son niveau que se produit la dispersion de la chaleur.

Non moins importante est la fonction excrétoire et sécrétoire de la peau, dévolue respectivement aux glandes sudoripares et aux glandes sébacées. Enfin, la peau joue un rôle non négligeable, reconnu depuis peu, dans le domaine de l'immunologie, c'est-à-dire la résistance aux microbes et substances étrangères. L'immunité réalisée localement sur une surface cutanée s'étend souvent à tout l'organisme.

Certains exemples de ce phénomène sont fort connus, tels la cutiréaction à la tuberculine, destinée à révéler l'existence éventuelle d'une infection tuberculeuse dans l'organisme.

L'allergologie (étude des allergies) aussi s'adresse à la peau pour identifier les agents responsables des phénomènes allergiques : pollens, poils ou plumes, produits alimentaires. Cette recherche s'effectue en injectant sous la peau une petite quantité de la substance suspecte. En cas de réaction positive, on observe la formation d'une papule caractéristique : l'agent allergène (c'est-à-dire qui produit l'allergie) est ainsi identifié et l'on pourra alors mettre en œuvre un traitement désensibilisant.

LA SUEUR

La sueur est le produit des glandes sudoripares ; celles-ci, formées de minuscules tuyaux pelotonnés, sont logées dans le derme et envoient leurs canaux excréteurs à la surface.

La sueur est composée de 98 % à 99 % d'eau et, pour le restant, de sels minéraux et de composés organiques, parmi lesquels l'urée, l'acide urique, de nombreux acides gras, l'ammoniaque et l'acide lactique. Ce dernier n'est présent dans la sueur qu'à l'occasion d'un travail musculaire intense.

Il est important de noter que, en cas de mauvais fonctionnement rénal, la sueur supplée dans une certaine mesure à la fonction défaillante du rein en éliminant plus abondamment les déchets organiques. Le contenu en eau de la sueur est, en revanche, en rapport avec la régulation de la température : l'eau qui se trouve à la surface de la peau provoque en s'évaporant sous l'effet de la chaleur un abaissement considérable de la température de la peau, conformément à une loi physique bien connue. Dans les pays chauds ou en cas de travail musculaire très intense, la quantité de sueur peut atteindre 15 l. par jour, ce qui s'accompagne d'une diminution du volume des urines. Rappelons que l'évaporation d'1 g d'eau entraîne la déperdition de 500 petites calories.

La régulation nerveuse de la transpiration est assurée par le système sympathique généralement sous l'effet d'une augmentation de la température du sang ; en particulier, on a pu constater qu'une augmentation de la température du sang circulant dans le cerveau provoque la transpiration. Cela se produit également si l'on réchauffe artificiellement le sang qui passe dans la carotide et qui se dirige vers le cerveau, même si la température du corps demeure normale.

Ce phénomène est dû au fait que le sang réchauffé excite les centres nerveux qu'il irrigue, lesquels envoient aux glandes sudoripares des influx qui commandent la

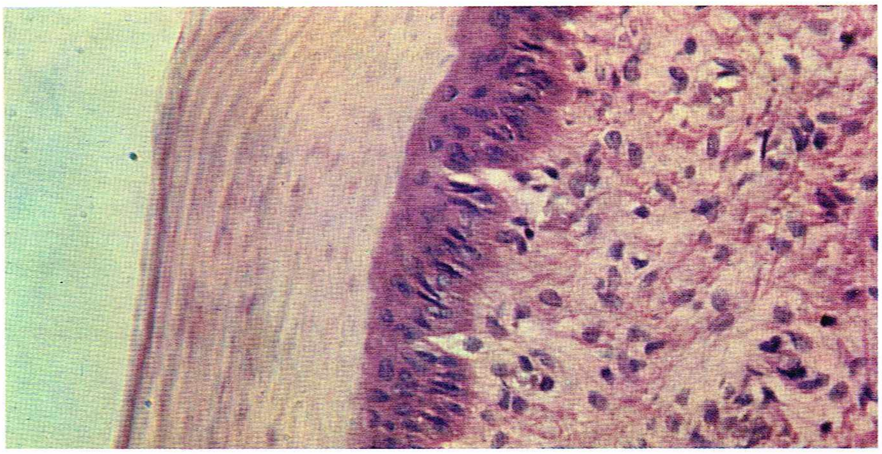

C. Bevilacqua

Coupe longitudinale d'un ongle sur laquelle on distingue la lamelle unguéale, la matrice unguéale et la couche de derme sous-jacente (× 400 × 1,3 ; coloration de contraste).

A gauche : follicule pileux sectionné obliquement au niveau du bulbe pileux (× 250 × 1,2 ; coloration de contraste). A droite : glande sudoripare (400 × 1,2 ; coloration de contraste).

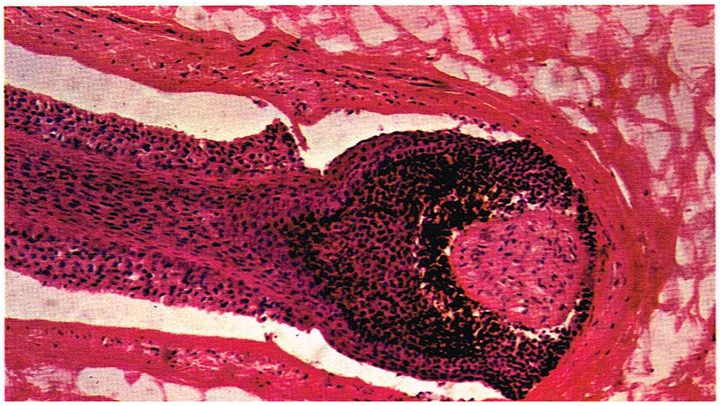

C. Bevilacqua

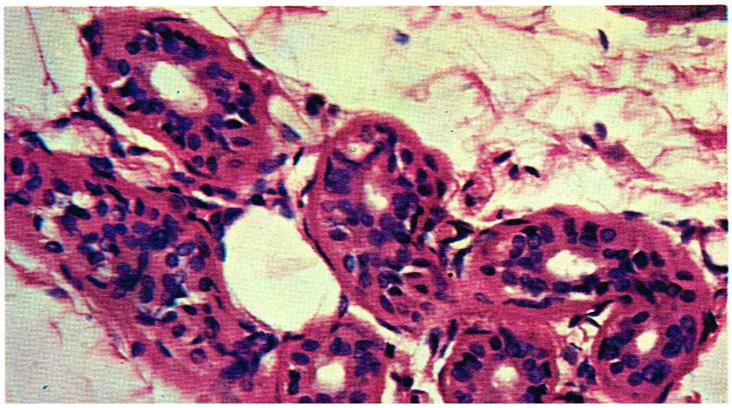

C. Bevilacqua

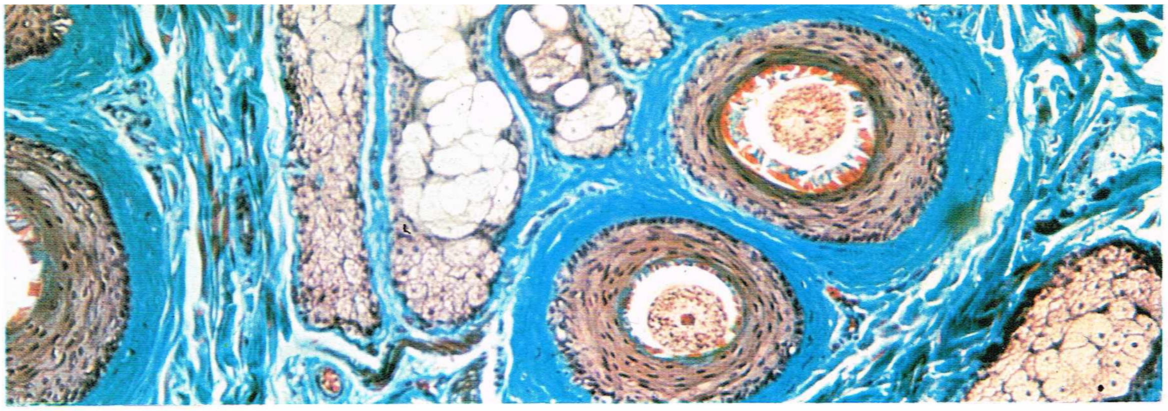

Coupe transversale de cuir chevelu montrant les follicules pileux et les formations glandulaires annexes (× 100 × 2 coloration de contraste).

mise en route du processus de refroidissement. Notons, enfin, que les centres nerveux préposés à la régulation de la sécrétion sudorale peuvent être excités par d'autres facteurs que la chaleur, tels que la peur, l'anxiété et des émotions diverses. On obtient alors ce qu'on appelle la sueur encéphalique.

Echappe, en revanche, à l'activité glandulaire, la respiration insensible, c'est-à-dire les échanges gazeux qui se font à travers la peau.

STRUCTURE DE LA PEAU, DES POILS ET DES GLANDES SÉBACÉES

La peau des Mammifères est constituée de deux couches principales : l'épiderme, en contact avec l'air, et le derme, couche profonde en contact avec le tissu conjonctif sous-cutané.

L'épiderme comprend à son tour cinq couches. La couche cornée, la plus externe, est formée d'un épithélium kératinisé qui perd en surface sa structure cellulaire et ne présente que des lamelles cornées élastiques et résistantes dépourvues de noyaux. La couche claire, située sous la précédente, est appelée ainsi à cause de sa transparence caractéristique. La couche granuleuse est formée de cellules riches en granules de kérato-hyaline, substance graisseuse qui assouplit la kératine.

La couche épineuse comprend de nombreux points de jonction entre les différentes cellules, au niveau desquels se trouveraient des fibrilles de soutien, destinées à renforcer la cohésion entre les cellules. Enfin, au contact du derme, on trouve la couche basale, à partir de laquelle se forment les nouvelles cellules destinées à renouveler les couches supérieures au fur et à mesure qu'elles s'usent. Les cellules les plus profondes de cette couche contiennent le pigment qui donne à la peau sa coloration.

Le derme est formé d'un tissu conjonctif fibreux assez élastique et contenant, au voisinage de l'épiderme, des papilles auxquelles aboutissent de nombreux filets nerveux ainsi que les vaisseaux sanguins destinés à assurer la nutrition des couches épidermiques qui, comme tous les épithéliums, ne sont pas vascularisées.

Ces papilles dermiques déterminent à la surface de l'épiderme de petites saillies, dont la répartition est caractéristique pour chaque individu et qui sont parfaitement visibles, par exemple, au niveau des bouts des doigts. Ce sont les empreintes digitales — où elles sont plus nombreuses en raison de l'abondance des filets nerveux conducteurs des sensations tactiles, thermiques, etc.

Les poils sont des structures cornées produites par la couche basale de l'épiderme : ils naissent d'un bulbe pileux contenant la papille du poil, les capillaires sanguins et les terminaisons nerveuses; le bulbe pileux est logé dans une dépression de la couche basale qui pénètre profondément dans le derme et que l'on appelle follicule pileux.

A chaque follicule pileux sont annexés un muscle horripilateur et une glande sébacée. Le muscle horripilateur ou érecteur du poil provoque par sa contraction le redressement du poil et repousse vers la surface l'orifice de la glande sébacée annexe, ce qui donne lieu au phénomène bien connu de la « chair de poule » ou horripilation. Les muscles érecteurs du poil sont uniformément répartis, sauf au niveau des poils des cils, des sourcils, des aisselles et du pubis.

Ces muscles sont innervés par le système sympathique : les influx nerveux qui en provoquent la contraction peuvent être d'origine cérébrale, comme lorsque l'horripilation est due à des représentations psychiques telles que la peur, l'anxiété, etc., ou bien venir de la moelle épinière, par arc réflexe. Dans ce dernier cas, la stimulation cutanée est transmise directement à la moelle, d'où part la réponse qui provoquera la contraction des muscles.

Les glandes sébacées, qui sont du type à grappe simple, sécrètent le sébum, substance destinée à protéger l'épiderme du dessèchement et à lubrifier le poil. Chimiquement, le sébum comprend plusieurs constitutants : on y trouve de nombreux glycérides, des acides gras, du cholestérol, des phosphatides et une grande quantité d'eau.

La sécrétion sébacée, qui semble indépendante du système nerveux central, est continue, mais devient plus intense en cas de vasodilatation (dilatation des vaisseaux) cutanée.

Les ongles sont également des productions cornées annexées à l'épiderme ; de forme lamellaire chez l'homme, ils sont logés dans un pli du derme, appelé sillon unguéal. Leur face inférieure repose sur le « lit de l'ongle » et leur partie postérieure, appelée racine de l'ongle et indispensable à la vie de celui-ci, est le siège d'un processus constant de multiplication.

LES EFFETS DE LA LUMIÈRE SUR LA PEAU

La peau est le siège d'un certain nombre de processus chimiques provoqués par l'action de la lumière solaire ; celle-ci joue le rôle de catalyseur dans plusieurs de ces processus, ou bien fournit uniquement l'énergie nécessaire à leur déroulement. Ce sont surtout des radiations lumineuses n'entrant pas dans le spectre visible (leurs longueurs d'onde étant trop petites ou trop grandes pour être perçues par l'œil) qui interviennent dans ces phénomènes : rayons ultraviolets et rayons infrarouges.

La lumière exerce directement sur la peau une action facile à constater ; en effet, une exposition trop prolongée aux rayons solaires provoque un érythème (rougeur de la peau) qui, sauf en cas de véritable brûlure, augmente la pigmentation de la peau ; celle-ci exerce un effet protecteur en cas de nouvelle exposition.

Dans ce domaine, l'action des rayons ultraviolets est particulièrement intense ; non seulement ils sont susceptibles de provoquer un érythème localisé, s'accompagnant souvent de fièvre, mais ils peuvent être à l'origine de phénomènes se manifestant dans un deuxième temps tels qu'hypertension artérielle et ralentissement de la respiration.

Les rayons ultraviolets, d'une longueur d'onde comprise entre 313 et 256 millimicrons, jouent un rôle très considérable dans la prévention du rachitisme. En effet, ces rayons ont la propriété d'activer la transformation d'un stérol (alcool d'un type particulier) en vitamine D_3 ; celle-ci est en partie stockée dans la peau et en partie utilisée par l'organisme, surtout au niveau des tissus de soutien, dont elle stimule la croissance. Cette action revêt un intérêt tout particulier dans le cas de régimes qui manquent de vitamine D.

Notons que ce type de rayonnement est très peu pénétrant (0,5 mm), car il est en grande partie réfléchi par la couche cornée de l'épiderme ; aussi seule une faible fraction de ces rayons parvient dans la zone active de la peau.

En outre, la présence dans l'air de trop grandes quantités de vapeur d'eau, de poussières et de fumées provoque la formation d'un écran pratiquement impénétrable au rayonnement ultraviolet : c'est là l'un des aspects préoccupants de la pollution de nos villes.

LES MUSCLES

Organes actifs du mouvement, les muscles constituent un ensemble complexe de leviers dont les parties mobiles sont les éléments squelettiques, les points d'appui les articulations, et la résistance, variable, le corps à déplacer ou le poids à soulever.

Il existe chez les Vertébrés deux types de tissus musculaires. Le tissu musculaire lisse ne renferme que des fibres lisses, composées de fibrilles (ou myofibrilles) non segmentées : ce tissu se rencontre dans les muscles liés à la vie végétative (parois du tube digestif, de l'utérus, etc.).

Le tissu musculaire strié, que l'on observe dans les muscles des membres, est constitué de fibres faites de fibrilles striées. Chacune de ces fibrilles est composée de « disques » sombres, contractiles, alternant avec des « disques » clairs, non contractiles.

Le point d'application de la force agissante du muscle est le point d'attache du tendon à l'os. Ainsi, lorsque nous soulevons un poids, notre bras agit comme un levier dont le pivot est situé au niveau du coude ; la force agissante est représentée par le biceps (qui s'insère sur un os de l'avant-bras, le radius) et la force résistante par la main qui tient le poids ; la tête se comporte aussi comme un levier, le pivot étant représenté par l'articulation occipito-atlantoïdienne (c'est-à-dire l'articulation entre le crâne et la colonne vertébrale), la force agissante par le muscle de la nuque et la force résistante par le poids de la tête, qui aurait tendance à tomber en avant.

Un autre exemple de levier nous est fourni par le mouvement qui soulève le corps sur la pointe des pieds : dans ce mouvement, la résistance est représentée par le poids du corps, le pivot par l'articulation entre le métatarse et les premières phalanges des orteils, la force agissante par les muscles jumeaux du mollet et par le muscle soléaire insérés sur le calcanéum, l'os du talon. Les tendons sont des cordons de tissu conjonctif fibreux, tissu formé par une substance fondamentale qui contient de très nombreuses fibres étroitement associées en faisceaux rectilignes ou croisés, s'unissant d'un côté au muscle et de l'autre à l'os ; ils offrent une très grande résistance à la traction et jouent passivement un rôle purement mécanique.

Bien qu'elles apparaissent intimement liées entre elles, il n'y a pas de continuité entre les fibres collagènes du tendon et les fibres musculaires : c'est uniquement par le périmysium, membrane qui entoure le muscle, que celui-ci est en continuité avec les fibres tendineuses.

LA PHYSIOLOGIE DE LA CONTRACTION MUSCULAIRE

Le muscle se contracte en réponse aux influx nerveux de nature chimique qui lui parviennent par l'intermédiaire des nerfs moteurs, dont la connection avec le muscle a lieu au niveau d'une zone particulière, la plaque motrice. En y aboutissant, ils perdent leur gaine de myéline (la substance qui les entoure) et subissent une très fine arborisation.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

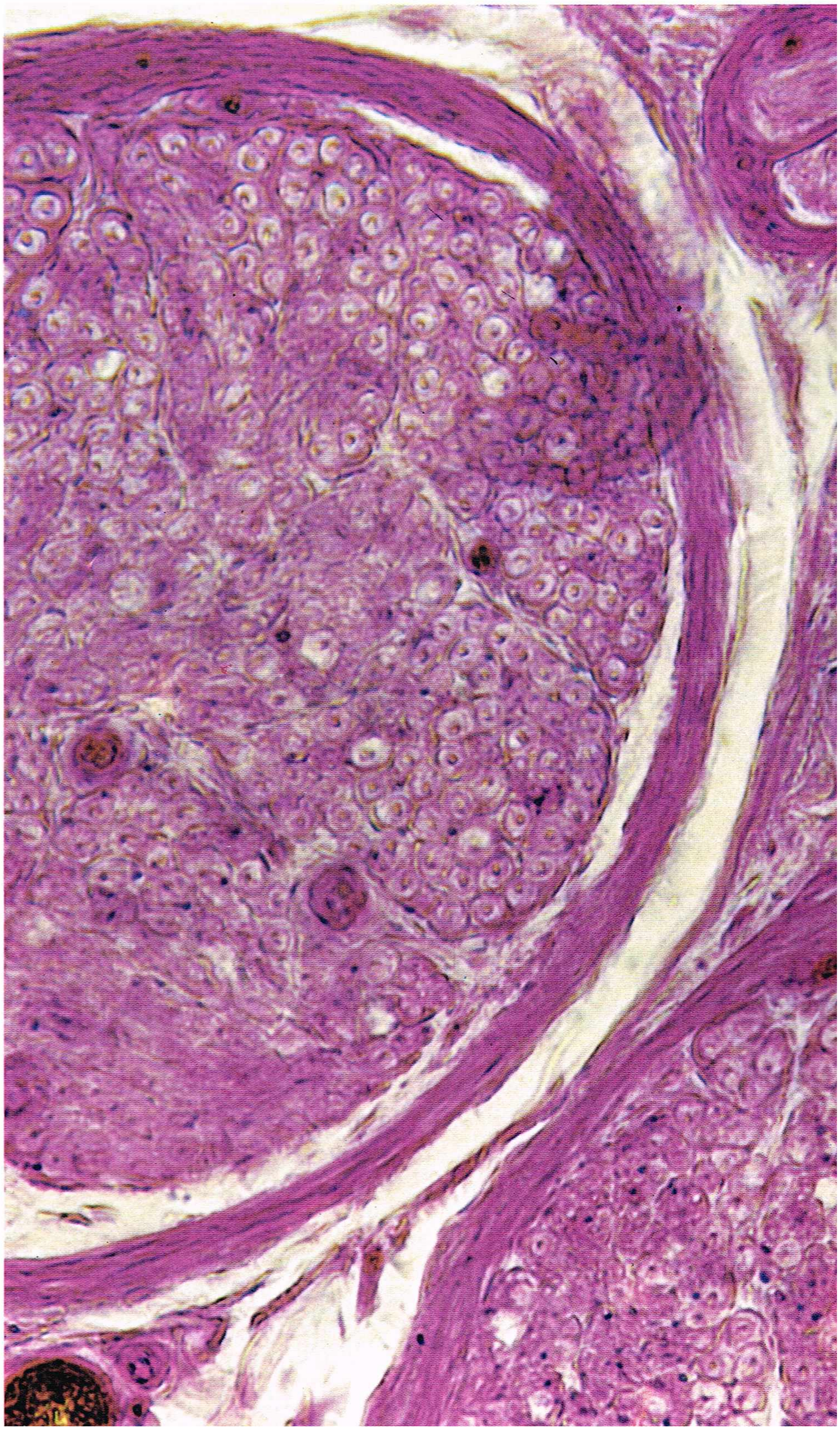

Coupe transversale de deux faisceaux du nerf sciatique. On sait que l'innervation d'un muscle est indispensable à sa contraction et que l'interruption des fibres nerveuses d'un muscle strié entraîne non seulement une paralysie flasque, mais aussi une atrophie et la dégénérescence des fibres musculaires (observation au microscope optique ; coloration de contraste).

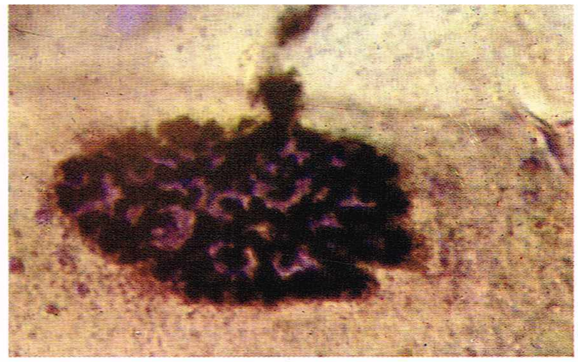

A gauche : coupe transversale d'un fragment de prostate : outre l'épithélium prismatique et la tunique conjonctive, on voit les faisceaux de la musculature lisse (× 400 × 2,3 ; coloration de contraste).
A droite : photographie microscopique exceptionnelle, à moyen grossissement, de la plaque motrice d'un faisceau de fibres musculaires (coloration de contraste).

La contraction musculaire ne se produit pas simultanément dans tout le muscle : elle se propage comme une onde à partir de la plaque motrice. On appelle excitabilité d'un muscle la capacité de celui-ci à répondre à une stimulation électrique : on considère qu'un muscle est d'autant plus excitable que la stimulation minimale nécessaire (stimulus-seuil) pour le faire réagir est plus faible. L'excitabilité varie d'un muscle à l'autre ; elle a une valeur plus faible pour les muscles lisses que pour les muscles striés. La contraction musculaire se réalise essentiellement selon deux modalités : isotonique et isométrique.

La contraction isotonique se vérifie lorsque le muscle est libre de se raccourcir. Pour la déceler expérimentalement, on suspend à un fil un muscle de grenouille fraîchement prélevé sur l'animal et maintenu en solution physiologique ; on fixe un poids à l'autre extrémité, et on envoie une stimulation électrique au muscle : celui-ci se contracte, se raccourcit en augmentant de volume et soulève le poids.

Dans la contraction isométrique, le muscle est fixé par ses deux extrémités et ne peut donc se raccourcir sous la stimulation électrique, ni changer de volume : dans ce cas, on constate une augmentation de sa tension, ce qui traduit l'effort accompli par le muscle pour se raccourcir librement.

Dans la contraction isotonique, on distingue plusieurs phases successives immédiatement après la stimulation : durant la première phase, très courte (0,004 s), phase de latence, le muscle reste inerte pour se relâcher ensuite pendant un temps très bref (détente précontractile) ; survient ensuite la phase de contraction, qui s'accompagne de raccourcissement ; la contraction augmente jusqu'à un maximum et régresse ensuite durant la phase de relâchement. Dans la contraction isométrique, on distingue également une phase de latence et un relâchement précontractile, mais la phase de relâchement qui suit ne répond plus à une courbe presque parabolique (comme dans la contraction isotonique) ; en particulier, on n'observe pas une pointe suivie d'un abaissement progressif jusqu'à la valeur initiale, mais plutôt un tracé en plateau, la courbe atteignant un certain niveau et s'y maintenant pendant un temps donné (phase de tension), pour décroître ensuite beaucoup plus rapidement que dans le cas de la contraction isotonique.

L'expérience a également montré que si l'on envoie au muscle deux stimulations telles que la seconde parvienne à la plaque motrice avant que la contraction provoquée par la première stimulation ne soit épuisée, les deux contractions s'additionnent ; si, par exemple, la deuxième stimulation parvient au moment où la première contraction est à son point maximum, on obtient un renforcement de la contraction avec un raccourcissement total du muscle pratiquement deux fois plus important que dans le premier cas. Une troisième stimulation envoyée au moment de l'effet maximal de la deuxième provoque un nouveau raccourcissement, bien moindre toutefois que le raccourcissement consécutif à la deuxième stimulation. Des stimulations ultérieures provoqueront des raccourcissements toujours plus faibles, jusqu'à ce que le muscle atteigne le maximum de ses possibilités et ne se raccourcisse plus ; à ce point, les impulsions successives n'auront d'autre effet que de maintenir le muscle en état de contraction maximale permanente. On donne à ce phénomène le nom de tétanos physiologique, pour le distinguer du tétanos pathologique, maladie caractérisée précisément par des contractions musculaires spasmodiques.

Un muscle isolé, soumis expérimentalement à une stimulation électrique, commence, après un certain nombre de contractions, à donner des signes de fatigue, décelables par un allongement du temps de latence et de la durée des contractions, cependant que l'on observe simultanément une diminution de l'intensité des contractions, qui, au début, allaient croissant. Ce phénomène s'observe également sur les muscles étudiés in vivo, *où son apparition est même plus précoce que dans le cas du muscle isolé. Cela provient du fait que la fatigue survient au niveau des connections entre muscle et nerf de la plaque motrice beaucoup plus tôt qu'au niveau des fibres musculaires ; la fatigue des cellules nerveuses centrales se manifeste, elle, encore plus tôt.*

La fatigue dépend essentiellement de deux facteurs : en premier lieu, la consommation des substances qui se trouvent au niveau du muscle et qui fournissent l'énergie nécessaire à la contraction ; en second lieu, l'accumulation dans le muscle de produits de déchet issus de ces mêmes réactions. Laissé au repos, le muscle fatigué se restaure lentement en oxydant une grande partie des substances de rejet, qui se trouvent ainsi éliminées, et en reconstituant les substances énergétiques qui permettront les contractions ultérieures ; en outre, le muscle élimine les déchets.

Avec ou sans oxygène, le muscle peut se contracter tant en aérobiose, c'est-à-dire en présence d'oxygène, qu'en anaérobiose, c'est-à-dire en l'absence d'oxygène. La contraction aérobie comporte deux phases, dont la première, anaérobie, est une simple scission de substances complexes en d'autres plus simples, telles que la scission du glycogène en acide lactique ; la deuxième phase, aérobie, voit l'oxydation d'une partie de l'acide lactique et du glycogène. Cela explique pourquoi l'activité musculaire exige la présence de glucides (sucres) et d'oxygène.

En ce qui concerne la consommation d'oxygène, on a pu mesurer que, chez l'homme au repos, la ventilation pulmonaire, c'est-à-dire le volume d'air inspiré et expiré par minute, est d'environ six litres, avec une consommation d'oxygène de 250 ml par minute, tandis qu'à l'occasion d'un travail musculaire intense, la consommation d'oxygène augmente proportionnellement à l'intensité du travail jusqu'à ce que l'apport d'oxygène équilibre exactement les besoins physiologiques. Il convient cependant de noter que, tandis que l'accélération de l'approvisionnement en oxygène s'instaure lentement, les besoins en oxygène se font sentir, en revanche, dès la première contraction. Par conséquent, le muscle se contracte pendant un certain temps en anaérobiose, puisant l'énergie nécessaire dans des réactions autres que d'oxydation, et contracte une « dette d'oxygène ». Lorsque le travail musculaire s'arrête, la demande d'oxygène par l'organisme ne revient pas immédiatement aux valeurs des conditions de repos, mais demeure élevée pendant un certain temps encore : le muscle paie alors sa « dette d'oxygène », c'est-à-dire réalise les réactions chimiques qu'il n'avait pu accomplir au départ, faute d'oxygène.

A cet égard, on distingue une « dette d'oxygène » à l'égard de l'acide lactique, qui définit la quantité d'oxygène nécessaire au muscle pour éliminer l'acide lactique qui s'est formé, et une « dette d'oxygène » indépendante de l'acide lactique, relative aux quantités d'oxygène nécessaires pour la dégradation des autres composés qui ont participé aux transformations intervenues durant la contraction.

LA FONCTION DU REIN

Les reins sont deux organes d'une structure très complexe ; ils sont situés dans la région abdominale, de part et d'autre de la colonne vertébrale, et ont approximativement la forme d'un haricot dont le hile (creux) est tourné vers l'intérieur.

En coupe longitudinale, le rein présente une zone externe, ou zone corticale, formée d'une substance granuleuse de couleur jaune-rougeâtre, riche en vaisseaux sanguins, et une zone plus interne, concentrique à la première, la zone médullaire, de structure fibreuse, dans laquelle se remarquent des formations striées coniques, dont la base est tournée vers la zone corticale : ce sont les pyramides de Malpighi, dont le nombre varie de 8 à 15.

A la partie interne de la zone médullaire, dans la région proche du hile, on note une cavité, le bassinet, d'où se détache l'uretère, canal destiné au transport de l'urine depuis le rein jusqu'à la vessie. Du hile se détachent non seulement l'uretère, mais aussi la veine rénale ; à son niveau, pénètre l'artère rénale.

Le sommet des pyramides de Malpighi, appelé papille rénale, est arrondi, lisse, criblé de petits trous, à travers lesquels le liquide excrété par le rein est déversé dans le bassinet, puis dans l'uretère.

Enfin, entre les pyramides de Malpighi, on observe des prolongements de la substance corticale qui s'insinuent entre la substance médullaire, prolongements appelés colonnes de Bertin ; de même, la substance médullaire remplit les rayons médullaires à l'intérieur de la substance corticale.

STRUCTURE DU REIN

A cette structure macroscopique correspond une structure microscopique beaucoup plus complexe et extrêmement importante du point de vue de la fonction du rein.

La substance corticale renferme un grand nombre de canalicules sinueux appelés tubes urinifères : chacun d'eux prend naissance dans une sorte de cupule, la capsule de Bowman, dans laquelle est enchâssé un peloton de vaisseaux sanguins, le glomérule de Malpighi, dont nous aurons l'occasion de parler plus loin. De la capsule de Bowman se détache le tube contourné de premier ordre, qui, après un trajet irrégulier, devient soudain plus grêle et rectiligne, plongeant dans la substance médullaire, dans laquelle il forme une anse, l'anse de Henlé ; la portion ascendante de l'anse retourne dans la partie corticale, où elle se poursuit dans le tube contourné de deuxième ordre, plus gros et pelotonné.

De nombreux tubes contournés de deuxième ordre vont confluer, après une « portion intercalaire », dans le tube de Bellini, sorte de collecteur qui, en même temps que les autres collecteurs de même type, débouche dans des canaux de calibre croissant, pour aboutir enfin à l'un des trous de la papille rénale.

Le sang est acheminé par l'intermédiaire de l'artère rénale, qui pénètre au niveau du hile et se subdivise peu après en plusieurs artères de calibre plus petit ; celles-ci, parvenues au niveau de la ligne de jonction entre substance médullaire et substance corticale, forment les « artères arquées », qui, à leur tour donnent naissance aux artères interlobulaires, de calibre toujours plus réduit, d'où se détachent enfin les artérioles afférentes (leur diamètre est d'environ 0,003-0,004 mm).

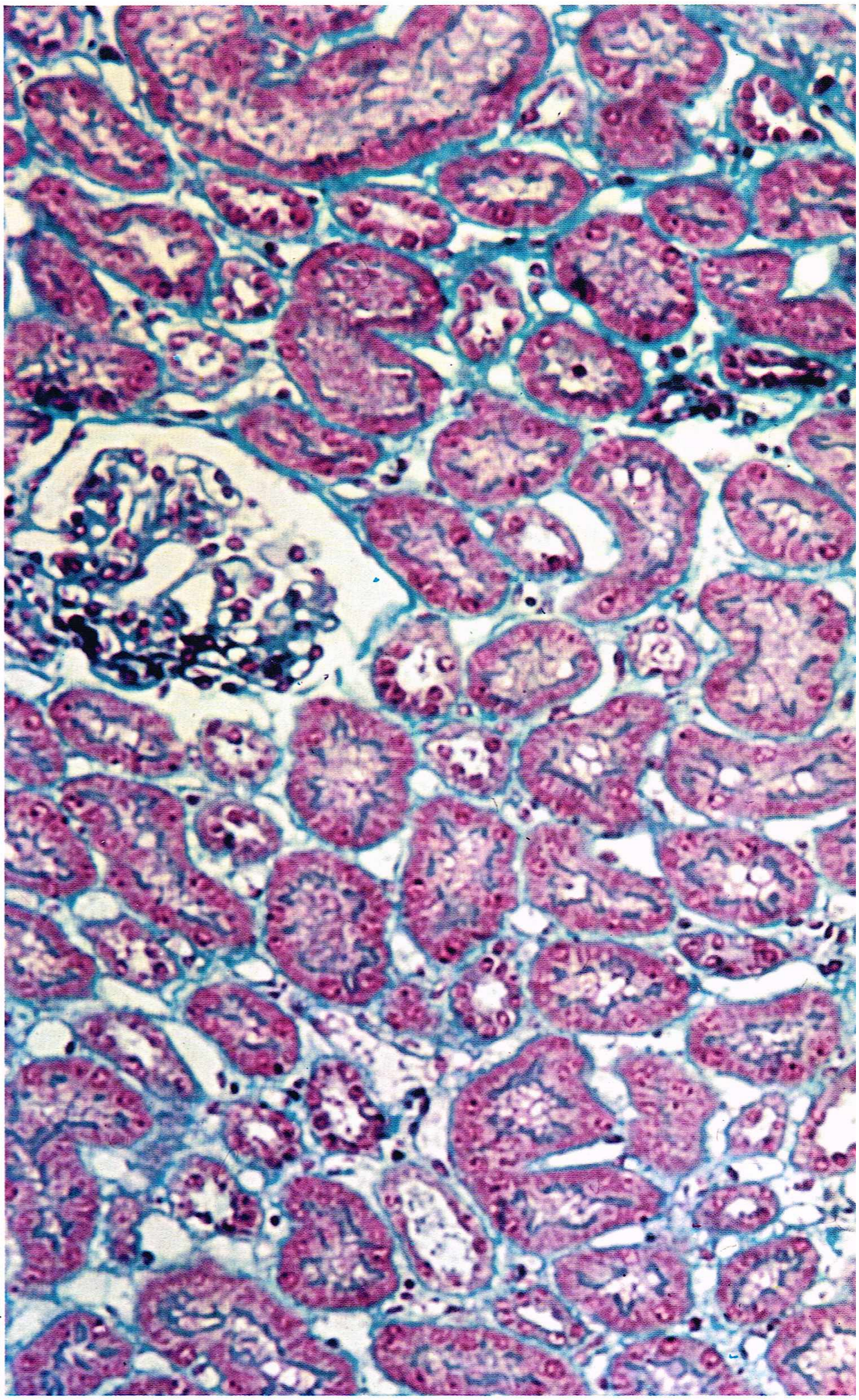

C. Bevilacqua

Photographie microscopique de tissu rénal : on y distingue quelques glomérules délimités par la capsule de Bowman et d'innombrables tubules plus ou moins dilatés, tantôt transversaux, tantôt obliques, tantôt longitudinaux (× 100 × 3,5 ; coloration de contraste).

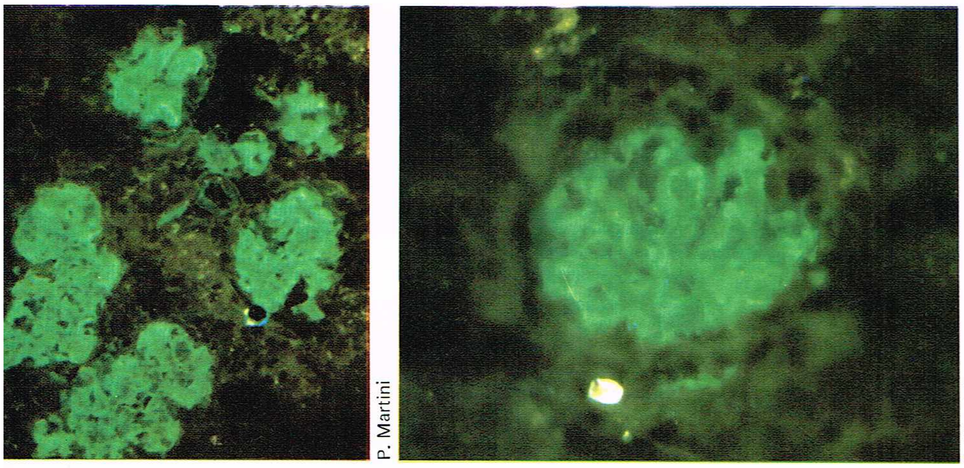

P. Martini

P. Martini

Deux exemples d'application des anticorps fluorescents; les glomérules rénaux se détachent par fluorescence dans le tissu rénal.

Celles-ci pénètrent dans la capsule de Bowman où elles se capillarisent en formant un peloton de vaisseaux sanguins connu sous le nom de glomérule de Malpighi, dont nous avons déjà parlé. Les capillaires qui forment le glomérule de Malpighi confluent à nouveau en une artériole efférente, plus petite que l'artériole afférente ; à peine sortie de la capsule de Bowman, l'artériole efférente se capillarise à nouveau pour irriguer le territoire entourant le tube urinifère.

Une fois les échanges nutritifs réalisés, le sang artériel devient veineux, et le réseau capillaire des veinules conflue pour donner naissance à la veine rénale, qui sort au niveau du hile et se jette dans la veine cave ascendante.

En comparant la structure macroscopique du rein avec sa structure microscopique, nous observons que les tubes contournés, les capsules de Bowman et les très nombreux vaisseaux sanguins correspondent aux granulations jaune-rougeâtre de la zone corticale, tandis que la zone médullaire est formée par les pyramides de Malpighi, le tube de Bellini et les collecteurs qui s'y déversent.

LE REIN ORGANE D'ÉPURATION

Le rein a pour fonction essentielle de débarrasser le sang de toutes les substances de rejet qui seraient nuisibles à l'organisme si elles n'étaient pas éliminées; l'urine contient, dissous dans l'eau (95 %), outre des sels comme le chlorure de sodium et de potassium, des phosphates de calcium, d'ammonium, de magnésium, du sulfate et du bicarbonate de calcium, d'autres substances organiques comme l'urée (produit principal de la transformation des protéines), l'acide urique et ses urates de sodium, de potassium et d'ammonium, la créatinine, l'acide hippurique en petite quantité, des oxalates, de l'ammoniaque, et deux pigments, l'urochrome et l'urobiline, qui donne à l'urine sa couleur caractéristique.

Un sujet sain élimine environ 1 000 à 1 500 cm^3 d'urine par 24 h ; laissée à l'air libre, l'urine fermente sous l'action d'une bactérie (Micrococcus ureae) *qui scinde l'urée en trois composés plus simples, l'eau, l'anhydride carbonique et l'ammoniaque, dont les deux premiers sont immédiatement utilisables par les végétaux pour la production de nouvelles substances organiques (elles serviront à l'alimentation des organismes animaux) : ainsi fonctionne le cycle biologique.*

Le mécanisme de production d'urine par le rein est très complexe et a fait l'objet de longues controverses ; nous essaierons d'en donner une description simplifiée.

Au niveau du glomérule de Malpighi, le sang est obligé de ralentir considérablement son cours à cause de la réduction du calibre (donc du débit) de l'artériole efférente ; ainsi, pendant que le sang traverse lentement le glomérule, on voit filtrer, à travers la paroi des capillaires et la paroi de la capsule de Bowman, un liquide pratiquement identique — abstraction faite des protéines — au plasma ; ce liquide ira se déverser dans cette même capsule de Bowman et dans le tubule rénal. En effet, des mesures de concentration moléculaire et de conductibilité électrique ont démontré que le filtrat glomérulaire (produit obtenu par filtration) correspond exactement au plasma sans protéines.

L'absence de protéines est due au fait que le seuil de filtration du glomérule est atteint par les substances dont le poids moléculaire est d'environ 68 000-70 000, ce qui exclut le passage des substances protéiques de poids moléculaire supérieur. Le passage d'albumine, protéine possédant le poids moléculaire le plus faible, est alors l'indice d'un état inflammatoire du rein (néphrite).

Le liquide que nous retrouvons dans la capsule de Bowman est donc composé en grande partie d'eau, contenant en solution de l'urée, du chlorure de sodium et du glucose, entre autres.

Sachant que le rein filtre environ 1 300-1 400 cm^3 de sang par minute et que l'émission d'urine ne dépasse pas 1 500 cm^3 par jour, sachant aussi que le glucose présent dans le filtrat de la capsule de Bowman est absent dans les urines (sauf dans certains états pathologiques), on doit en déduire qu'au niveau des tubules rénaux se produisent des transformations du liquide, opérées par l'activité de ces mêmes tubules.

En effet, 99 % de l'eau filtrée par le glomérule sont réabsorbés par les tubules, tandis que le 1 % restant entrera dans la composition de l'urine.

Le glucose présent dans le filtrat est réabsorbé par un processus à peu près identique ; mais la réabsorption ne pourra être complète que si le taux de glucose dans le sang ne dépasse pas 180 mg par 100 g de sang.

Au-delà, on assiste au passage du glucose dans les urines (glucosurie), comme cela se produit dans le diabète, maladie dont la caractéristique fondamentale est justement une hyperglycémie. C'est par le même processus de filtration que sont éliminées les substances de déchet comme l'urée et la créatine : grâce à l'activité sécrétoire des tubules rénaux, ces corps passent des capillaires veineux qui entourent les tubules à l'intérieur de ces derniers, pour être éliminés dans l'urine.

Celle-ci, enfin, après avoir atteint sa composition définitive selon les processus que nous venons de décrire, sourd par les petits trous de la papille rénale et se déverse dans le bassinet puis dans l'uretère ; de là elle passe dans la vessie, puis est évacuée à travers l'urètre par contraction de la vessie.

L'expérience suivante nous fournit une preuve supplémentaire de l'intense activité d'épuration exercée par le rein : si l'on injecte dans la circulation sanguine de l'urine à raison de 30-50 cm^3 par kg de poids du sujet d'expérience, celui-ci meurt à cause de la haute toxicité de l'urine. Au filtrat du glomérule, semblable au plasma, s'est donc ajoutée une quantité de substances toxiques suffisamment importante pour lui conférer une action mortelle.

Une phase de la détermination de l'uricémie (taux d'acide urique dans le sang).

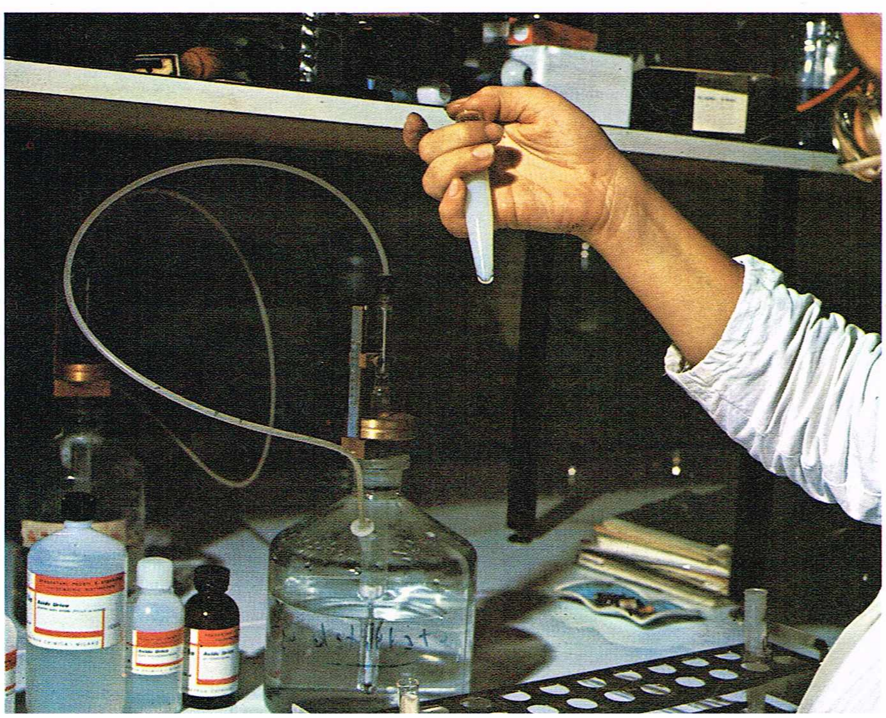

P. Martini

LES POLLUTIONS ET LA NATURE

Voici peu d'années encore, le mot d'écologie était connu des seuls spécialistes. Il ne s'agissait alors que de la science des rapports entre les êtres vivants et leur milieu. Aujourd'hui, l'écologie est devenue en quelque sorte l'instrument d'une alternative, d'une transformation de notre civilisation.

Il suffit de regarder la première page des journaux ou d'écouter la radio pour se rendre compte de l'importance prise par le problème de la défense de l'environnement, autre mot aujourd'hui en vogue.

Les premières craintes de voir se multiplier les causes de pollution se manifestaient il y a peine dix ans, et voici que dès aujourd'hui la nature porte les traces évidentes des meurtrissures que nous lui infligeons dans l'air, dans le sol et dans les eaux. Les progrès de la chimie ont entraîné une très large diffusion des matières plastiques dans les emplois les plus divers, à commencer par les films cellulosiques qui enveloppent la plupart des articles vendus dans les supermarchés.

Les ménagères elles-mêmes ont volontiers troqué les plats ou couvercles en faïence ou en émail contre des objets en matière plastique, et sans doute pas à l'avantage de l'hygiène. Le plastique a envahi aussi l'automobile dans des applications très diverses, y compris la réalisation de carrosseries. Le caractère pratique des objets en plastique, leur faible coût de production font que trop souvent on sous-évalue ou l'on passe sous silence les dangers d'une aussi large diffusion, à commencer par les fumées toxiques rejetées par les cheminées des usines qui les fabriquent.

Ces fumées industrielles, les gaz d'échappement des voitures, les fumées domestiques et un certain nombre d'autres émanations gazeuses forment souvent le fameux « smog » qui non seulement obscurcit et salit nos villes, mais, en outre, se dépose dans les poumons des hommes et des animaux, où il forme une couche grasse chargée de particules nocives tant en raison de leur nature chimique que de leur forme; en effet, ces particules se présentent souvent comme des cristaux pointus, susceptibles de provoquer des lésions au niveau des tissus.

LA NATURE EN DANGER

Pour la satisfaction de ses besoins, l'homme n'hésite pas à transformer la nature en épuisant ses réserves et en modifiant profondément l'équilibre biologique. Ainsi, par exemple, l'emploi d'insecticides toujours plus puissants dans la lutte contre certains Insectes entraîne en même temps la disparition d'autres espèces auxquelles les premiers servaient de nourriture; ces espèces étaient les antagonistes naturels d'autres parasites qui se trouveront ainsi libres de proliférer. Ainsi s'instaure un cercle vicieux qui aboutit à une perturbation de l'équilibre naturel et des mécanismes délicats qui le régissent.

L'emploi d'hormones dans l'élevage des poulets ou dans la culture des fleurs procure sans doute de plus grands profits à l'agriculteur ou au commerçant mais entraîne aussi des inconvénients, présents et futurs, pour la santé de l'homme.

ÉLIMINATION DES DÉCHETS ET POLLUTION

Les engrais et les désherbants empoisonnent le sol; les détergents non biodégradables (c'est-à-dire qui ne peuvent être détruits par les Bactéries) polluent les eaux et les terrains; les émanations des usines polluent l'air.

Pour détruire les déchets, on crée de nouvelles causes de pollution, comme les fumées des incinérateurs ou les produits utilisés pour l'épuration de l'eau des fleuves, dont le résultat le plus certain est de polluer aussi l'eau de la mer.

La mer, elle aussi, atteint à de nombreux endroits un inquiétant niveau de saturation en produits nocifs. Sur les côtes de Camargue, on voit se déposer une sorte d'écume toxique; au large des petites baies de la Ligurie flottent des nappes de pétrole; les oiseaux de mer

S. Prato

Vue aérienne d'un quartier résidentiel d'Auckland (Nouvelle-Zélande). On remarquera dans cette ordonnancement le souci évident de la création d'espaces verts.

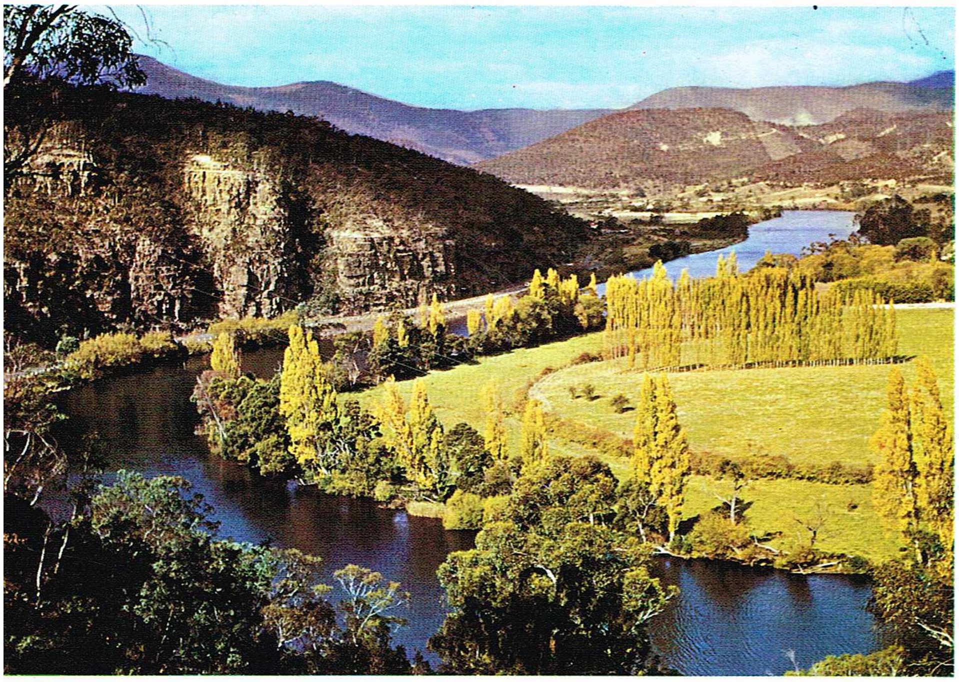

Australian News and Information Bureau

Paysage de Tasmanie ; même dans les dernières terres conquises, l'homme civilisé implante son agriculture intensive, ouvre des routes pour ses automobiles, amorçant ainsi le processus des déséquilibres biologiques et de la pollution.

meurent englués par milliers dans le mazout rejeté en mer par les pétroliers... Récemment, les pêcheurs ont barré le port de Deauville pour protester contre la pollution de la baie de Seine, qui fait mourir les Poissons.

LA DÉGRADATION ÉCOLOGIQUE

On pourrait continuer de citer des exemples par centaines, dont les moins spectaculaires ne sont pas les moins graves. Que l'on pense, par exemple, à la disparition des Algues d'un lac : il s'agit là d'un phénomène qui passe inaperçu pour la plupart, et pourtant ces Algues sont des êtres autotrophes, capables, autrement dit, de transformer les substances inorganiques en substances organiques, qui constitueront la nourriture des animaux plus petits dont s'alimentent les Poissons, et ainsi de suite.

Les animaux, de leur côté, émettent dans l'eau leurs déjections organiques, que certaines Bactéries transforment en composés inorganiques, utiles aux Algues. Or, si les Algues disparaissent, attaquées par des déchets nuisibles et non biodégradables, avec elles disparaissent les producteurs de substances organiques et d'oxygène : d'où la mort des animaux et des Bactéries qui se nourrissaient de leurs déjections, lesquelles rendaient possible à leur tour l'alimentation d'autres végétaux. Ainsi toute vie disparaîtrait de ce lac, et il serait très difficile de le repeupler.

Il suffit donc de la disparition d'une ou deux espèces végétales, bien représentées et actives, pour entraîner une telle catastrophe. Qu'adviendrait-il si un tel phénomène se produisait dans la mer, aboutissant à la stérilisation de cette source inépuisable d'organismes vivants, siège d'incessantes transformations chimiques qui permettent de purifier tous les déchets ?

La pollution de l'air n'est pas moins inquiétante : des fumées noires et épaisses empêchent le soleil de venir purifier l'air des villes, déjà appauvri de par l'insuffisance des espaces verts.

Et que dire des atteintes dont font l'objet les produits alimentaires et des graves conséquences qu'elles entraînent, tels que troubles métaboliques, risques de cancer et même, probablement, risques génétiques !

Le sol, inondé d'engrais chimiques, n'est pas davantage épargné.

De toutes parts, le danger nous guette.

L'HEURE DU CHOIX

Les écologistes, les protecteurs de la nature ne sont pas d'accord entre eux sur la façon de sauver ce qui peut l'être encore. Certains refusent de politiser leur lutte : ils pensent que les progrès techniques joints à des réglements draconiens doivent suffire. Ils mettent en avant le principe « pollueur-payeur ».

En France, par exemple, des « Agences de Bassin » perçoivent des redevances auprès des industriels pollueurs. Le résultat est une légère baisse de la pollution des eaux douces.

D'autres mouvements pensent qu'il faut aller plus loin. Groupés en innombrables associations (celle des Amis de la Terre *est particulièrement puissante), appuyés par de nombreux journaux ou bulletins, ils proposent des solutions plus révolutionnaires. René Dumont s'est fait leur porte-parole au cours de la campagne présidentielle de 1974.*

A l'automobile, progrès devenu source de nuisances, ces écologistes préfèrent les transports en commun ou la bicyclette. Ils prônent l'agriculture biologique, sans engrais ni pesticides. Ils font une intense propagande en faveur des énergies solaire et éolienne, et militent vigoureusement contre l'énergie nucléaire, aux conséquences lourdes de risques...

Les jeunes sont à la pointe du mouvement écologique. Peut-être plus conscients que leurs aînés des dangers qui pèsent sur notre planète, ils sauront redresser à temps la situation : car sauver la nature et l'environnement, c'est aussi sauver l'homme.

Deux spectacles désolants : déboisement mécanique (ci-dessous) et installations industrielles en pleine campagne (tours de réfrigération des centrales électriques à Lardarello en Toscane). Souvent, ce n'est pas la première installation qui est nuisible, mais la concentration d'industries qu'elle entraîne nécessairement.

T. Poggio

T. Poggio

LA GÉOLOGIE

L'homme primitif recherchait déjà dans les roches et les minéraux les matériaux nécessaires à la fabrication des armes et des ustensiles de sa vie quotidienne.
Nous sommes toujours tributaires des multiples ressources du règne minéral, éléments indispensables à notre civilisation. Notre vie matérielle nécessite toujours plus de métaux, de matériaux de construction, de sources d'énergie, sans oublier l'eau, ce bien si précieux. Il n'est jusqu'à notre goût du beau qui ne trouve à se satisfaire, les minéraux et les roches étant utilisés dans un but décoratif tant dans le domaine des gemmes que dans celui de la gravure, de l'architecture, etc.
Ce sont tous ces matériaux utiles ou agréables à l'homme qui font l'objet des pages qui vont suivre.

LES MÉTAUX UTILES

Les expressions « métal utile », « métal précieux », « métal noble » font partie du langage courant; or les critères d' « utilité » d'un métal sont difficilement définissables, puisque aujourd'hui presque tous les métaux, à l'état pur, en alliages ou sous forme de composés variés trouvent des applications dans des emplois courants ou scientifiques.

Pour qu'un métal soit largement utilisé, il faut qu'il présente certaines propriétés physiques et mécaniques, et qu'il soit facile à extraire, à traiter et à travailler. En fait, la plus ou moins grande abondance d'un métal dans la nature joue surtout sur son prix, beaucoup plus que sur la diffusion de son emploi. La notion « d'utilité » dépend donc aussi de l'évolution de la science et de la technique.

LE FER ET SES ALLIAGES

Le fer est le métal de loin le plus connu et le plus largement utilisé depuis des temps immémoriaux. De tous les métaux lourds, il est le plus abondant dans la croûte terrestre et aussi le moins cher, bien que le prix de certains de ses alliages soit comparable à celui de l'or. On le trouve rarement à l'état d'élément, presque exclusivement dans certaines météorites appelées « sidérites »; on a découvert quelques petits gisements de fer natif d'origine terrestre dans les régions arctiques, surtout au Groenland.

En revanche, le fer est très répandu sous forme d'oxydes, d'hydroxydes, de carbonates, de sulfures, de phosphates et de silicates; les minerais exploitables sont en nombre limité; ce sont essentiellement certains oxydes, les oxydes hydratés et le carbonate de fer.

Le plus important des oxydes ferriques est l'hématite (Fe_2O_3), appelée aussi oligiste lorsqu'elle se présente en cristaux; on la rencontre aussi en masses d'aspect terreux, partiellement hydratées, d'une couleur ocre rouge. Les gisements d'hématite sont très nombreux.

Les limonites ont une composition variable; elles sont formées d'oxyde ferrique (Fe_2O_3), diversement hydraté, de couleur jaune ou brune (« ocre jaune »). On trouve en Lorraine des gisements où abonde une variété de limonite connue sous le nom de « minette » de Lorraine, particulièrement riche en phosphore. Celui-ci en complique le traitement métallurgique, ce qui n'a pourtant pas empêché la naissance d'une florissante industrie sidérurgique.

Un autre oxyde de fer très important est la magnétite (Fe_3O_4) : d'un noir brillant, elle possède des propriétés magnétiques (« aimant naturel »); la magnétite est également très répandue et forme d'importants gisements, dont les plus célèbres sont ceux de Kiruna et de Gällivare, en Suède, qui fournissent un minerai très pur. Ils ont contribué à la prospérité industrielle de la Suède.

Le carbonate de fer ($FeCO_3$), ou sidérite, ou fer spathique, moins répandu, est également utilisé pour l'extraction du fer : on en trouve en Italie, dans certaines localités des Alpes. C'est de ce minerai que provenait le fer utilisé pour la fabrication des armes qui rendirent si célèbres les armuriers italiens.

Les marcassites et pyrites sont des sulfures de fer (FeS_2) également très répandus, employés surtout pour la production d'acide sulfurique; on les utilise aussi pour la fabrication de la fonte, mais celle-ci est habituellement de qualité médiocre à cause du soufre qu'elle contient et qui la rend très cassante.

Outre ceux que nous venons de citer, les principaux gisements de fer européens se trouvent dans la Ruhr, en Haute-Silésie (Allemagne), en Espagne septentrionale, en U.R.S.S. (Ukraine, Oural) et en Grande-Bretagne. Mais aujourd'hui, les plus grands producteurs de fer sont les U.S.A. qui possèdent de riches gisements en

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

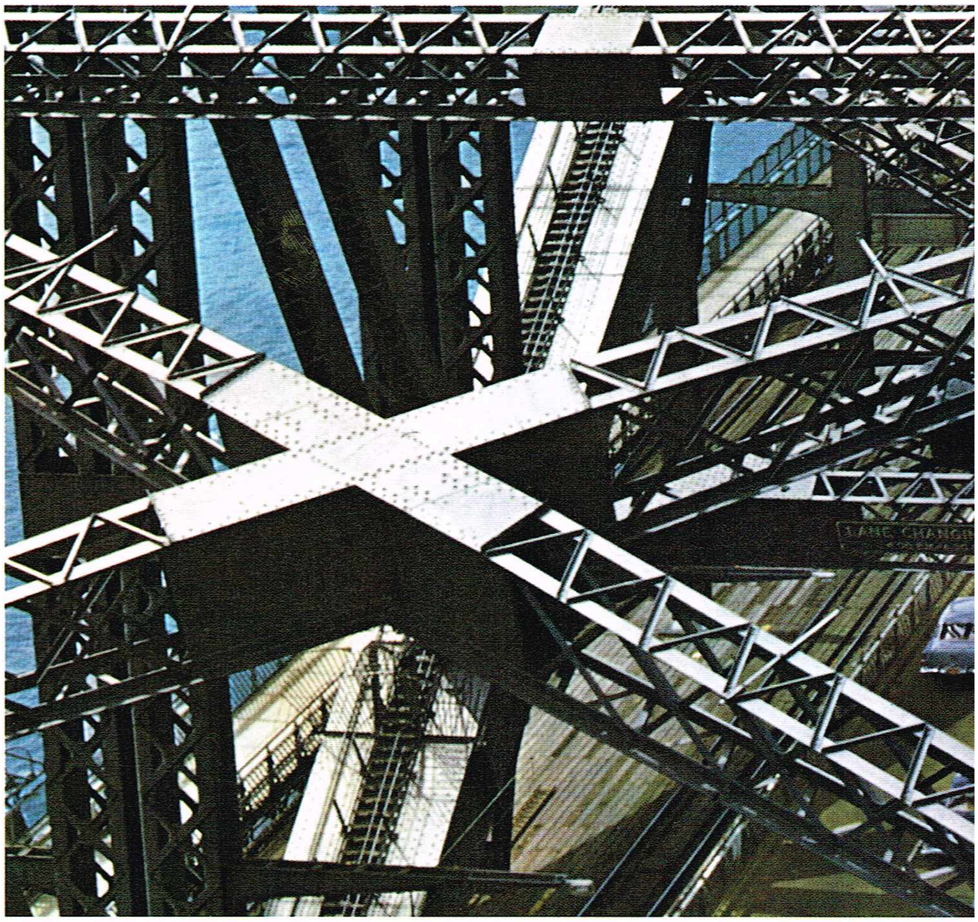

L'ossature du grand Pont de Sydney, en Australie, constitue un exemple éloquent de l'utilité du fer et de l'acier.

différents points de leur territoire, notamment près du lac Supérieur; c'est grâce à ces gisements qu'a pu se développer la grande industrie sidérurgique américaine. Des dépôts très importants existent aussi au Brésil et au Venezuela.

Les emplois du fer sont extrêmement nombreux; il est généralement utilisé sous forme d'acier, très résistant aux déformations mécaniques. D'autres éléments que le fer entrent dans la composition d'un grand nombre d'aciers et leur confèrent des propriétés particulières de résistance, de dureté, d'élasticité, d'inoxydabilité. L'acier est utilisé dans la construction de navires, d'automobiles, de rails, de véhicules de chemin de fer, de ponts, d'immeubles, d'armes et de blindages, ainsi que dans de très nombreuses applications particulières.

De nombreux métaux sont alliés au fer pour la production des aciers : le manganèse sert à augmenter la dureté; ses principaux minerais exploités industriellement sont : les oxydes de manganèse : pyrolusite (MnO_2), hausmannite (Mn_3O_4) et braunite (Mn_2O_3); l'oxyde hydraté : Mn_2O_3, H_2O et le carbonate : rhodocrosite ($MnCO_3$). Les principaux pays producteurs sont l'U.R.S.S., l'Inde, l'Afrique du Sud et la Côte-d'Ivoire.

Le chrome renforce la résistance mécanique des aciers et les rend moins facilement oxydables; le seul minerai de chrome exploité est la chromite (FeO, Cr_2O_3),

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

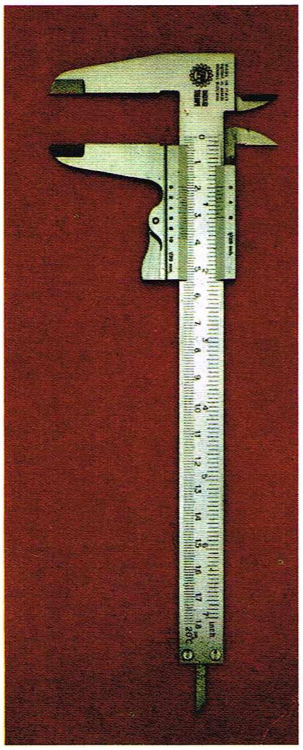

Pied à coulisse fabriqué en acier au nickel-chrome.

dont les principaux gisements se trouvent en U.R.S.S., en Turquie, en Afrique du Sud, en Rhodésie, à Cuba et dans de nombreux autres pays.

Le molybdène et le tungstène entrent principalement dans la fabrication d'aciers spéciaux très durs et dans celle d'autres alliages, également très durs. Le molybdène peut se trouver sous forme de molybdates, mais le seul minerai industriellement utilisé est le sulfure de molybdène (MoS_2) ou molybdénite, que l'on trouve surtout en Australie, aux États-Unis, au Canada et en Norvège. Le tungstène est extrait à partir de certains tungstates, dont les principaux sont la scheelite, $CaWO_4$, la wolframite, (Fe, Mn)WO_4, et la stolzite, Pb, WO_4; les principaux pays producteurs sont la Chine, les U.S.A., les deux Corées et le Portugal.

Le vanadium est lui aussi très employé, surtout dans les aciers pour outils; on le trouve dans la nature sous forme de vanadinite (chlorovanadate de plomb), de patronite (sulfure), de carnotite (qui est un vanadate d'uranium et de potassium), utile aussi comme minerai d'uranium, et de roscoélite, silicate de vanadium et d'aluminium. Les principaux producteurs sont l'Afrique du Sud et le Pérou.

Le niobium et le tantale servent également dans la production de certains aciers spéciaux; on les rencontre souvent associés, formant des niobates et des tantalates (principalement dans l'euxénite et dans le polycrase). Les principaux producteurs sont le Nigeria pour le niobium, le Congo et le Brésil pour le tantale.

Le cobalt et le nickel sont aussi utilisés dans les aciers ainsi que dans d'autres types d'alliages, le second, en particulier, associé au chrome dans les aciers inoxydables. Les plus importants minerais de cobalt sont la smaltite ($CoAs_2$) et la cobaltite (CoAsS); il est également extrait de minerais d'autres éléments où il apparaît comme un composant secondaire. Les principaux pays producteurs sont le Zaïre et le Canada.

Le nickel se trouve dans de nombreux sulfures, arséniures et antimoniures (millerite, nickelite, gersdorffite, breithauptite, chloantite et ullmanite), et dans un silicate, la garniérite, dont les seuls gisements exploitables sont situés en Nouvelle-Calédonie. Toutefois, une bonne partie de la production provient de minerais d'autres éléments, en particulier à Sudbury au Canada. La métallurgie du nickel est assez complexe.

L'ALUMINIUM

Un autre métal, aujourd'hui très utilisé, principalement sous forme d'alliages, est l'aluminium. Il est fort abondant dans la croûte terrestre puisqu'il entre dans la composition d'un très grand nombre de silicates (feldspaths, kaolin, argiles, leucite, micas), dont il est difficile à extraire.

On obtient l'aluminium à partir des oxydes et des hydroxydes. Le corindon (Al_2O_3), en raison de sa très grande dureté, est employé comme abrasif; certaines variétés de ce minéral, limpides et contenant des traces d'impuretés qui le colorent, sont des gemmes de grande valeur comme le rubis et le saphir. Le principal minerai est la bauxite; c'est un mélange d'hydroxydes d'aluminium (diaspore et hydrargillite) et d'espèces minérales variées. La métallurgie de l'aluminium n'est pas aussi simple que celle du fer : elle nécessite l'emploi de fours électriques et de la cryolithe (Na_3AlF_6). C'est un minéral assez rare dont le seul gisement important est celui d'Ivigtut au Groenland. Il est utilisé comme fondant et permet d'abaisser la température de fusion du minerai. On le produit aujourd'hui artificiellement à partir de la fluorite (CaF_2).

La production industrielle de l'aluminium a débuté en France et en Amérique vers 1886. Elle s'est accrue à un rythme très rapide. Les alliages d'aluminium se prêtent à de nombreuses applications car ils sont mécaniquement très résistants et plus légers que les alliages du fer. Ils ont un rôle très important dans la construction aéronautique, en raison de leur faible densité (en particulier le Duralumin), et dans l'industrie électroménagère, la fabrication des machines à écrire, d'ustensiles de cuisine, d'accessoires sportifs, pour ne citer que quelques exemples.

Les dépôts de bauxite sont très nombreux; il en existe d'importants en France (Provence) ainsi qu'en Europe centrale (Hongrie, Roumanie, Yougoslavie); d'autres, très riches, existent aux États-Unis, en Indonésie, au Brésil, en Guyane, au Surinam, en U.R.S.S. et à la Jamaïque qui est l'un des principaux producteurs de ce minerai.

La ductilité du plomb (son aptitude à être étiré) permet de fabriquer des tuyaux à usages industriels ou domestiques.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

LE CUIVRE

Le cuivre est lui aussi très utilisé, soit pur, soit sous forme d'alliages (laiton et bronze). On peut le trouver à l'état natif, en quantités importantes, près du lac Supérieur (U.S.A.) et au Chili, ou sous forme de sulfures (chalcosite, bornite), de sulfures doubles (chalcopyrite) et d'oxydes (cuprite). Enfin, il existe d'autres minéraux « cuprifères » comme la malachite et l'azurite (carbonates basiques), le chrysocolle et le dioptase (silicates) qui ne sont employés que comme pierres ornementales.

Les principaux producteurs de cuivre sont les U.S.A., l'U.R.S.S., la Zambie, le Chili, le Canada et le Zaïre. Il est possible d'exploiter des gisements à faible teneur comme ceux de pyrite cuprifère du Rio Tinto en Espagne. Au cours de la purification électrolytique du cuivre, les résidus livrent des métaux rares ou précieux dont ce traitement constitue la source principale.

AUTRES MÉTAUX UTILES

Le zinc qui est utilisé soit à l'état pur, soit allié au cuivre dans le laiton, se trouve sous forme de sulfure, la blende (encore appelée sphalérite), qui apparaît souvent en cristaux d'une grande beauté, de carbonate (smithsonite) et de silicate (calamine). La blende est très souvent associée à la galène (sulfure de plomb).

Les principaux producteurs de zinc sont : les U.S.A., le Canada, l'Australie, le Mexique, suivis d'autres pays tels que l'Italie (gisements de Sardaigne et des Alpes).

Le plomb est utilisé pour fabriquer des plaques d'accumulateurs, des tuyaux, des projectiles pour la chasse, des alliages spéciaux, des caractères typographiques... mais il n'a pas d'application mécanique car c'est un métal mou. Le principal minerai de plomb, et le seul traité industriellement, est la galène qui contient souvent de petites quantités d'argent.

Les U.S.A., l'U.R.S.S., le Mexique et l'Australie en sont les plus grands producteurs.

L'étain est un métal dont l'emploi est très ancien; il est utilisé principalement sous forme d'alliage (bronze et alliages antifriction); il est extrait de la cassitérite (SnO_2) qui n'est pas très abondante. Les principales mines sont celles de Malaisie, d'Indonésie, de Bolivie, du Nigeria, de Thaïlande et de Chine. En Italie, des gisements exploités dans l'Antiquité, mais aujourd'hui sans importance industrielle, se situent en Toscane; il en est de même des gisements de Bretagne.

Le magnésium, le béryllium et le bore méritent également quelques lignes. Le premier est surtout utilisé en alliage, comme l'aluminium, en raison de sa faible densité. Le béryllium et le bore entrent dans la composition de différents alliages de fer, de cuivre, d'aluminium, le béryllium leur conférant une dureté remarquable. Il s'obtient à partir du béryl, dont les variétés, émeraude et aigue-marine, sont des gemmes de grande valeur.

Enfin, nous évoquerons le titane qui se trouve dans la nature essentiellement sous forme d'oxydes (rutile, anatase et brookite). Le rutile est un composant accessoire de nombreuses roches mais ses gisements d'importance industrielle ne se trouvent qu'au Brésil et en Australie. Quelques titanates (ilménite, perowskite et titanite) sont aussi exploités industriellement en Norvège, en Inde et au Brésil. Le métal doit être obtenu pur, sous atmosphère d'argon, faute de quoi sa fragilité le rend inutilisable. Son abondance et ses caractéristiques techniques (légèreté, très haute résistance mécanique même à haute température) lui confèrent une importance considérable dans la métallurgie moderne ainsi que dans la construction spatiale, qu'il soit pur ou allié à d'autres éléments.

LES MÉTAUX PRÉCIEUX

Beaucoup de métaux doivent leur prix élevé à leur rareté; il en est ainsi, par ordre de prix croissant, du mercure, du rhénium, du radium. Mais, lorsqu'on parle de « métaux précieux », on se réfère à quelque chose d'autre que le simple prix. En effet, cette notion se rattache à celle de bijoux, de monnaies, d'objets finement travaillés, où l'habileté de l'artisan compte au moins autant que le prix de la matière.

D'ailleurs, les métaux qu'on qualifie de précieux, c'est-à-dire l'argent, l'or, le platine (et les cinq éléments de la famille du platine) présentent une ductilité (aptitude à être étiré) et une malléabilité qui les rendent particulièrement aptes au travail de l'artiste. Ils sont encore appelés « métaux nobles ».

L'or et l'argent, dont les minerais sont faciles à reconnaître et à traiter, étaient utilisés dès la plus haute Antiquité pour la fabrication de pièces de monnaie; ils jouèrent ainsi un rôle considérable dans le développement des échanges commerciaux et, aujourd'hui encore, l'or constitue des « réserves » qui garantissent la valeur des monnaies émises par les États.

L'ARGENT

On peut le trouver à l'état natif, plus ou moins pur; les principales impuretés sont constituées par des particules de cuivre, d'or, de mercure, d'antimoine. Mais il existe aussi de nombreux minerais d'argent : à côté de l'argentite, qui est le plus important des sulfures d'argent, répondant à la formule Ag_2S, il existe beaucoup d'autres sulfures et sulfosels à partir desquels on extrait le métal (rappelons la stromeyerite, la miargyrite, la pyrargyrite, la stéphanite, la polyargyrite, la proustite). Plus rare est le chlorure d'argent, AgCl, ou cérargyrite.

Les tétraédrites contiennent aussi de l'argent; en outre, il est extrait de la galène (PbS) qui en contient de faibles quantités, généralement de l'ordre de 1 pour mille, ou parfois, mais rarement, 1 pour cent.

Les principaux gisements exploités dans l'Antiquité étaient ceux d'Asie Mineure, d'Attique (Grèce), et d'Espagne. Au Moyen Age, à partir du XIe siècle, les mines de Saxe et du Harz, en Allemagne, et les mines hongroises connurent une grande activité. Au XVIe siècle, après la découverte de l'Amérique, la plus grande partie du métal provenait des très riches gisements de l'Amérique Centrale et de l'Amérique du Sud, et plus tard des gisements de la partie sud-occidentale des États-Unis.

Les procédés par lesquels le métal est extrait de ces minerais sont essentiellement semblables à ceux utilisés dans le cas de l'or; les minerais sont traités par le mercure et le fer, ce qui donne lieu à la formation de l'amalgame d'argent. Ils sont ensuite distillés afin d'éliminer le mercure. L'argent, concentré dans le résidu, est purifié par électrolyse. Ce traitement est appelé « amalgamation ».

Enfin, les résidus de l'amalgamation sont traités par une solution de cyanure de sodium : celui-ci entraîne l'argent en solution, que l'on précipite à nouveau par le zinc métallique et que l'on purifie.

Des quantités non négligeables d'argent, contenues sous forme d'impuretés dans les minerais de cuivre, sont récupérés dans les résidus de la purification électrolytique du cuivre.

Le prix de l'argent a beaucoup varié dans le temps; dans la Rome antique, il correspondait à un douzième du prix de l'or; à la fin du XIXe siècle, son prix n'était plus que le trentième de celui de l'or, pour descendre à un quarantième, il y a quelques années (c'est-à-dire environ 200 francs le kilo). Mais aujourd'hui la valeur de l'argent remonte, du fait notamment des nombreux emplois que ce métal trouve en électronique.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Argent natif. Cagliari (Musée d'Histoire naturelle de Milan).

L'argent utilisé dans la fabrication des monnaies, des bijoux et autres objets (couverts, coupes, plateaux) contient généralement un faible pourcentage d'autres métaux, notamment de cuivre, qui lui confèrent une plus grande dureté; la composition des alliages est exprimée en « millièmes ». L'argent est en outre utilisé pour « argenter » des objets constitués de métaux plus communs.

Au cours de la dernière guerre mondiale, l'argent connut une utilisation singulière aux États-Unis; en effet, en raison de la rareté du cuivre, les Américains employèrent l'argent pour fabriquer des câbles électriques. L'industrie photographique fait une large utilisation de sels d'argent dans la préparation d'émulsions pour films.

L'OR

L'or, métal précieux par excellence, se trouve principalement à l'état natif dans des roches cristallines très riches en quartz ou dans des sables « aurifères » (sous forme de paillettes ou de pépites) qui proviennent de la désagrégation de ces roches sous l'action des agents atmosphériques.

Mais il existe aussi de nombreux minerais d'or, à partir desquels le métal est extrait; les principaux sont des tellurures (sylvanite, calavérite et nagyagite) et certains séléniures. En outre, d'importantes quantités d'or sont obtenues à partir des résidus du raffinage électrolytique du cuivre.

L'or fut abondamment utilisé par certains peuples de l'Antiquité : les découvertes archéologiques ont mis au jour d'importants trésors comprenant des objets en or, le plus célèbre d'entre eux étant celui découvert dans la tombe du pharaon Toutankhamon. Un seul des sarcophages contenant la momie du roi, tout en or et en émail, pèse 600 kilos. Les principaux gisements de l'Antiquité étaient ceux de Nubie (Afrique septentrionale), d'Asie Mineure et de l'Inde; les Romains exploitèrent les gisements d'Espagne, du Portugal et de la Gaule.

Au Moyen Age, les gisements les plus exploités furent ceux de Bohême et de Transylvanie (Europe Centrale). Après la découverte de l'Amérique, c'est le Nouveau Continent qui devint le principal producteur d'or. Les Espagnols exploitèrent les mines d'Amérique Centrale et d'Amérique du Sud, notamment celles du Pérou. D'autres gisements importants furent découverts au XIX^{e} siècle dans le Colorado et en Californie (États-Unis); c'est vers ces gisements que se produisit la « ruée vers l'or ». Par la suite, on trouva aussi de l'or en Alaska, en Australie et dans le Transvaal. Les mines de l'Oural, en U.R.S.S., fournissent aussi d'importantes quantités d'or.

En 1972, la production mondiale (U.R.S.S. et pays socialistes exclus) a été de 40 000 milliers d'onces-fines (l'once-fine valant 31 grammes), dont 31 370 provenant de la République Sud-Africaine, 2 235 du Canada, 1 500 des États-Unis et 700 du Ghana. L'or natif est extrait par des procédés d'amalgamation et de cyanuration, analogues à ceux appliqués pour l'obtention de l'argent.

Les roches siliceuses contenant le métal natif doivent être préalablement broyées; en revanche, les sulfures, les tellurures et les séléniures doivent être enrichis par flottation. Pour être intéressant à exploiter il suffit qu'un minerai contienne 10 grammes d'or à la tonne s'il s'agit d'une roche et 3 grammes seulement s'il s'agit de sable.

Dans les riches gisements du Transvaal, le métal et sa gangue se trouvent sous forme de filons qui dépassent rarement l'épaisseur d'un mètre, mais longs de plusieurs kilomètres. On fait sauter la roche à la dynamite, et les fragments, subdivisés en parcelles de la grosseur d'un poing, sont introduits dans des broyeurs spéciaux dont les pilons travaillent dans de vastes bacs à eau. Le sable issu de ce traitement est entraîné par l'eau et glisse sur des plaques de cuivre amalgamé. Le mercure retient l'or sous forme d'amalgame. Les plaques sont ensuite raclées et l'amalgame soumis à distillation; en fin d'opération, le mercure est recyclé. L'or ainsi obtenu contient jusqu'à 15 % d'argent.

La boue demeurée au fond des bacs des concasseurs est traitée à froid par une solution diluée de cyanure de sodium pendant quelques jours; l'or, passé en solution, est ensuite précipité par le zinc. Le métal est purifié par « coupellation », mais l'argent ne peut être éliminé que par quartage : cette opération consiste à ajouter de l'argent jusqu'à obtention d'un alliage constitué pour 3/4 d'or et pour 1/4 d'argent. Cet alliage peut être attaqué par l'acide nitrique (ou sulfurique chaud), qui dissout l'argent et laisse l'or comme résidu.

L'or est ensuite affiné par électrolyse; ce procédé permet d'atteindre une pureté supérieure à 99,98 %. Dans les résidus de l'électrolyse on peut récupérer du platine, de l'iridium, du rhodium et du ruthénium.

Comme l'argent, l'or est aussi généralement employé en alliage avec d'autres métaux, qui le rendent plus dur. La composition des alliages est exprimée en carats : l'or « 24 carats » est le métal pur. Les alliages habituellement utilisés contiennent 18 ou 14 parts (en poids) d'or sur 24 parts d'alliage. Aujourd'hui, on exprime aussi la composition de l'alliage en millième.

L'or blanc, utilisé en bijouterie et en prothèse dentaire, contient souvent du nickel. La dorure d'objets constitués par des métaux non précieux est une pratique assez répandue.

LE PLATINE

Le platine est généralement accompagné de cinq autres métaux, tous très rares et fort chers, dont l'emploi est pratiquement limité au domaine de la technologie et des instruments scientifiques. Ces métaux sont : le ruthénium, l'osmium, le rhodium, l'iridium et le palladium.

On les trouve tous à l'état natif, formant entre eux des alliages. Le platine, qui est de loin le plus abondant des six, a été également trouvé dans certaines météorites. Il se concentre dans les magmas basiques tels que ceux qui donnent naissance à des roches riches en olivine dénommées « dunites ».

Le seul gisement d'origine primaire d'une certaine importance est celui du district de Prétoria (Afrique du Sud), où le métal est contenu dans le silicate orthonolite, les principaux dépôts exploités étant généralement d'origine alluviale.

Le platine fut découvert en 1735 dans des minerais aurifères de la Colombie et fut identifié comme métal en 1750; son nom dérive du mot espagnol plata *qui signifie « argent », auquel le platine ressemble par la couleur. Les autres métaux furent séparés et identifiés entre 1803 et 1804, sauf le ruthénium, qui ne fut découvert qu'en 1845.*

D'importants gisements de platine furent découverts dans l'Oural en 1822; ces gisements fournirent jusqu'en 1912 90 % et même plus de la production mondiale. A l'origine, le platine était peu apprécié, à tel point qu'il fut utilisé par des faussaires pour reproduire des pièces de monnaie en or. Ce n'est que par la suite que les emplois du platine connurent une grande extension et que son prix augmenta jusqu'à dépasser celui de l'or.

On exploita alors les gisements de Colombie, et, par la suite, on en découvrit d'autres, très riches, dans le Transvaal (minerai : sperrilite, $PtAs_2$). Les minerais habituellement exploités sont les sables platinifères, dans lesquels le métal se trouve sous forme de pépites, et les roches à olivine; les sables exploitables contiennent de 2 à 5 grammes de platine par tonne. Le métal brut contient environ 80 % de platine, 10 %, ou moins, des autres métaux de la famille du platine, ainsi que de faibles quantités d'or, de fer et de cuivre.

Pendant longtemps, les principaux producteurs furent l'U.R.S.S. et la Colombie; la production canadienne était également importante, provenant essentiellement du raffinage du cuivre et du nickel. Aujourd'hui, la République Sud-Africaine fait aussi partie des principaux producteurs.

Le platine, dont le prix a atteint jusqu'à huit fois celui de l'or (il est actuellement environ le triple), est un métal ductile et malléable, qui peut être travaillé par battage; il est employé en joaillerie, en prothèse dentaire, dans la fabrication de récipients et creusets de laboratoire, pour la confection d'électrodes spéciales; finement subdivisé (mousse de platine), il est utilisé comme catalyseur.

La séparation du platine d'avec les autres métaux de la famille est longue et complexe; ces derniers présentent aussi un intérêt considérable. L'osmium est le plus dense des éléments connus. Le rhodium, que l'on trouve aussi dans les sables aurifères du Mexique et d'Amérique du Sud, est utilisé pour réaliser la protection, par dépôt électrolytique, d'objets en argent, pour fabriquer des couples thermo-électriques destinés à la mesure de températures élevées et, en alliage avec le platine, comme catalyseur pour la production d'acide nitrique à partir de l'ammoniaque.

L'iridium, allié au platine, sert à fabriquer des capsules et des creusets de laboratoire, puisqu'il possède la propriété de conférer une dureté considérable au platine; on l'emploie aussi dans la fabrication d'électrodes.

Le palladium est un catalyseur qu'on utilise dans les réactions d'hydrogénation : finement subdivisé, il peut absorber de grandes quantités d'argent.

Par leurs emplois multiples et par leur rareté, les métaux de la famille du platine sont au moins aussi précieux que le platine lui-même.

L'URANIUM

Cet élément (symbole U), qui possède le comportement caractéristique des métaux, était, voici seulement quelques décennies, presque inconnu de tous ceux qui s'intéressaient directement à la chimie, bien que sa découverte ne soit nullement récente. Cela tient au fait que les principales applications de l'uranium n'ont été découvertes que ces trente dernières années.

Ces applications sont tellement importantes que le mot d'uranium est, aujourd'hui, sur toutes les lèvres, lié aux craintes et aux espoirs de l'humanité. Au fur et à mesure que l'on découvrait les applications pratiques de l'uranium, l'intérêt suscité par ce métal augmentait, à tel point qu'il y a à peine vingt ans, on parlait d'une « fièvre de l'uranium », comme on avait parlé autrefois d'une fièvre de l'or.

Cet élément est beaucoup plus répandu qu'on ne le croit : sa teneur moyenne est d'environ 4×10^{-6} %; *il est contenu surtout dans les roches acides (les roches d'origine profonde, riches en silice), où il apparaît dans les minéraux accessoires; il est plus rare dans les roches basiques telles que les basaltes et les gabbros.*

Sa teneur dans la lithosphère est donc supérieure à celle du cadmium, du bismuth, du mercure et de l'argent, qui sont généralement considérés comme plus courants. Cependant, en dépit de cette relative abondance, l'extraction de l'uranium présente des difficultés considérables car les gisements riches sont rares; aussi exploite-t-on des gisements ne contenant qu'un pour mille ou moins d'uranium, à condition toutefois qu'ils soient très étendus.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Un minerai riche en uranium : l'uraninite (cristaux). Monts d'Uluguru, Tanzanie (Londres, British Museum, 1958.581).

LES MINERAIS DE L'URANIUM

Les principaux minerais exploités sont la pechblende *(U_3O_8), dont les gisements les plus importants se trouvent au Canada, au Congo, dans l'Utah (U.S.A.) et en Bohême; et la* carnotite, *vanadate d'uranium abondant surtout dans la partie ouest des U.S.A. (Utah et Colorado). Le coût d'extraction de l'uranium à partir du vanadate se trouve fortement réduit car le vanadium est vendu à un prix fort élevé aux industries de l'acier.*

Un autre minerai qui se prêterait à une exploitation intéressante est l'autunite, constituant accessoire de certaines roches; ce phosphate d'uranium est malheureusement trop rare. Enfin, l'uranium est présent dans de nombreux minerais contenant des terres rares, puisqu'il appartient au même groupe dans le système périodique des éléments, possède des propriétés chimiques semblables et a la possibilité d'occuper la même place dans la structure de certains minéraux.

L'URANIUM SOURCE D'ÉNERGIE

L'uranium fut découvert dans la pechblende, où il apparaît sous forme d'oxyde, par Martin Heinrich Klaproth en 1789 et fut identifié aux métaux en 1841 par Eugène Melchior Péligot. Pendant longtemps, il n'eut aucune utilité industrielle, mais joua un rôle considérable dans la découverte d'importants phénomènes naturels, en premier lieu celui de la radio-activité par Antoine Henri Becquerel en 1896 et Marie Curie en 1898, puis celui de la « fission nucléaire » par Otto Hahn, en 1939; l'étude de ces phénomènes devait conduire à l'exploitation d'une nouvelle source d'énergie.

C'est seulement à la suite de cette dernière découverte, suivie d'applications militaires pour la production d'armes redoutables, et d'applications pacifiques pour la production de très grandes quantités d'énergie, que l'on prit la mesure exacte de l'importance de l'uranium; les anciens gisements connus se révélèrent alors tout à fait insuffisants.

Les plus célèbres étaient les gisements de pechblende de Joachimsthal (Jachymov), en Bohême, sur lesquels avaient travaillé les Curie; mais ces gisements étaient situés en territoire allemand et la course aux armes nucléaires battait son plein. Aussi la nécessité se fit sentir d'en trouver d'autres. On exploita alors les gisements de Shinkolobwe (au Katanga, à l'époque colonie belge), très riches et contenant de nombreux minerais d'uranium, se présentant en beaux cristaux de teintes très vives.

L'exploitation fut si intensive qu'en dépit de leur richesse, ces gisements sont aujourd'hui fortement appauvris. En 1945, le Congo exportait 10 000 tonnes de minerai par an, dirigé essentiellement vers les États-Unis et la Grande-Bretagne.

La plupart des grandes puissances établirent des règlements très sévères pour l'exploitation des gisements d'uranium (qui furent tous nationalisés), règlements inspirés d'impératifs militaires et politiques encore plus qu'économiques. Dans le même temps, on favorisait la recherche de nouveaux gisements et la mise au point de méthodes de prospection plus efficaces; parmi celles-ci, rappelons l'emploi du compteur de Geiger et Müller et l'utilisation de la fluorescence des composés d'uranium, qui apparaît lorsque l'on éclaire avec des lampes à argon ou à mercure les minéraux mis en solution acide.

En 1930, d'imposants gisements de pechblende étaient découverts sur les rives du lac de la Grande Ourse, au Canada; ils devinrent propriété de l'État en 1944 en même temps que les autres gisements cana-

diens. Mais la véritable « fièvre de l'uranium » éclata vers 1948 et connut son point culminant avec la découverte de nouveaux et très importants gisements, au nord de Vancouver, dans la Colombie britannique (Canada). D'autres sites exploitables furent découverts en U.R.S.S., en Australie, en Afrique et même en Europe; quelques-uns se trouvent aussi en Italie, dans la région de Coni, mais ils sont d'importance secondaire. En France les gisements se situent dans les massifs anciens de Bretagne et du Centre (Limousin).

Aujourd'hui, en raison de son rôle considérable, l'uranium est extrait aussi à partir de minerais pauvres, tels que les roches phosphatées, où il apparaît comme un sous-produit d'autres minerais; à cet effet, on traite les roches avec de l'acide nitrique et on extrait le nitrate d'uranyle qui se forme à l'aide de l'éther sulfurique (= oxyde d'éthyle).

Parmi les plus récentes découvertes et utilisations scientifiques relatives à l'uranium, rappelons que celui-ci permet de déterminer, avec une bonne approximation, l'âge des roches, donc la période à laquelle s'est produite la solidification d'une partie de la croûte terrestre. En effet, l'uranium est un élément radio-actif qui se transforme lentement en plomb à travers une série de produits intermédiaires, dont l'un des plus importants est l'hélium. En étudiant des roches n'ayant pas subi de phénomènes secondaires susceptibles de modifier leur composition chimique, et en déterminant dans celles-ci le rapport entre la quantité d'uranium et de plomb ou d'hélium, on obtient des indications sur l'âge des échantillons.

PROPRIÉTÉS CHIMIQUES ET ISOTOPES DE L'URANIUM

L'uranium est un métal qui ressemble à l'acier par son aspect et son éclat mais relativement ductile et malléable; finement divisé, il manifeste une réactivité chimique considérable. Ses propriétés sont semblables à celles des éléments du III^{e} groupe du système périodique, mais il peut présenter des nombres d'oxydation différents de ceux-ci, parmi lesquels le nombre + 6, qui est remarquablement stable; dans ce cas, il montre des propriétés assez semblables à celles du chrome, du molybdène et du tungstène.

L'uranium est obtenu à partir de la pechblende par traitement à l'acide nitrique, puis purification du nitrate d'uranyle ainsi obtenu par l'éther sulfurique, calcination en trioxyde, suivie de réduction par l'aluminium ou le calcium métallique à haute température; on peut également l'obtenir à l'état pur par électrolyse d'un de ses fluorures. Sa densité est 19,04 et son point de fusion 1 132 °C.

L'uranium naturel est un mélange de trois isotopes dont les nombres de masse sont respectivement 234, 235 et 238, contenus dans les pourcentages suivants : 0,006 le premier, 0,72 le deuxième et 99,27 le troisième. Tous les trois sont radio-actifs et émettent des particules « alpha »; leur période de désintégration est très longue (l'U^{238} possède la demi-vie la plus longue, suivi par l'U^{235} et l'U^{234}).

De ces trois isotopes, le plus important est l'U^{235}, qui peut subir le processus de « fission » sous l'action de neutrons « thermiques » et peut, par conséquent, servir de combustible nucléaire. Aujourd'hui, des réacteurs spéciaux utilisent aussi comme combustible l'U^{238}, dont l'importance n'est pas due à ce seul emploi; en effet, l'U^{238} se transforme en un isotope du plutonium (Pu^{239}), très employé dans la fabrication d'armes nucléaires.

Puisque l'isotope le plus important de l'uranium n'est présent qu'en très faible pourcentage dans l'uranium naturel, il a fallu, pour obtenir des combustibles nucléaires utilisables, mettre au point des méthodes d'enrichissement permettant de concentrer l'isotope de masse 235. Cette opération est pratiquée sur l'uranium naturel, l'isolement de l'isotope n'étant ni nécessaire ni utile.

Les méthodes utilisées sont toutes extrêmement coûteuses. L'une des plus importantes consiste à transformer l'uranium métal en hexafluorure d'uranium facilement gazéifiable, et à faire diffuser ce gaz à travers des parois poreuses; le fluorure de l'isotope le plus lourd diffuse plus lentement, ce qui provoque l'enrichissement du mélange gazeux dans les autres isotopes. Toutefois, pour chaque passage, l'enrichissement est extrêmement faible. A Oak Ridge (U.S.A.), où ce procédé fut industrialisé, on utilise des milliers de cloisons poreuses et de pompes pour recycler le gaz, obligeant celui-ci à traverser des dizaines de milliers de mètres carrés de surface poreuse. On obtient ainsi un enrichissement en l'isotope voulu, pouvant atteindre 7 %.

A partir de 1941, Lawrence utilisa le « cyclotron » pour obtenir des isotopes de l'uranium pratiquement purs; le rendement de cette méthode était, au début, d'environ 9 mg par an. En raison de l'énorme importance prise par l'uranium, cinq grandes sociétés américaines mirent en commun leurs moyens pour créer un grand laboratoire à Clinton; la quantité d'uranium 235 produite par ce laboratoire de 1943 à 1945 fut de l'ordre de plusieurs kilogrammes. Aujourd'hui, cette méthode, trop coûteuse pour l'exploitation pacifique de l'énergie nucléaire, est abandonnée.

UTILISATION DE L'URANIUM

Avant la découverte de la fission nucléaire, l'uranium n'était qu'un sous-produit de l'extraction du radium. Il était utilisé en photographie, dans l'industrie chimique comme catalyseur de certaines réactions, et surtout, sous forme d'uranate de sodium, pour donner aux verres, aux émaux et aux porcelaines une belle coloration jaune vif résistant bien à la cuisson (jaune d'uranium). D'infimes quantités d'oxyde d'uranium (de l'ordre de 0,06 pour mille) étaient suffisantes pour obtenir une coloration assez intense.

Par la suite, l'uranium devint le produit principal et le radium fut relégué à un rôle tout à fait secondaire. De ses anciens emplois, l'uranium n'a conservé que celui de colorant pour les céramiques, mais toute son importance actuelle vient du fait qu'il est une source d'énergie prodigieuse, malheureusement pas toujours utilisée dans des buts pacifiques.

L'énergie provenant de l'uranium peut être employée de deux manières différentes. La première consiste à réaliser le dégagement instantané de toute l'énergie disponible; c'est ce qui se produit dans les « bombes atomiques » et provoque les terribles effets destructeurs que l'on sait. Les deux bombes atomiques lancées en 1945 sur Hiroshima et Nagasaki ont entraîné la mort de plus de 150 000 personnes, auxquelles il faut ajouter les victimes des radiations dont les effets s'étalent dans le temps.

Le deuxième type d'utilisation est fondé sur la libération « contrôlée » de l'énergie de fission; cela se réalise dans les « réacteurs nucléaires » : la chaleur ainsi dégagée est utilisée pour produire de la vapeur servant à fournir l'énergie électrique. Pour avoir une idée des énormes quantités d'énergie engendrées, il suffit de penser que moins de 500 grammes d'uranium entièrement fissionné libèrent environ 10 000 kilowatts-heures. C'est ce même type de production qui est utilisé pour la propulsion des navires, notamment celle des sous-marins atomiques. Récemment, le sous-marin américain « Triton », doté de deux moteurs à combustion nucléaire, a accompli le tour de la Terre en immersion.

La production d'énergie à partir de combustibles nucléaires, nécessitant des investissements très onéreux, a subi, jusqu'à ces deux dernières années, une très forte concurrence de la part des combustibles pétroliers. La tendance actuelle, par suite des augmentations successives subies par les hydrocarbures, lui est d'autant plus favorable que des progrès très récents ont permis de mieux rentabiliser le coût des réacteurs.

L'uranium s'impose désormais dans des applications de toute première importance : des villes entières peuvent aujourd'hui être éclairées et chauffées par l'énergie nucléaire, comme nous le montre l'exemple de Farsta, ville de 70 000 habitants de la banlieue de Stockholm. En outre, de nombreux problèmes scientifiques ont pu être résolus grâce à la radio-activité de cet élément.

A côté des perspectives qui s'offrent à l'utilisation pacifique de l'énergie nucléaire, subsiste malheureusement le risque tragique d'une guerre nucléaire, qui aurait pour conséquence l'anéantissement de l'humanité. Contre ce danger ne cessent de s'élever les mises en garde des savants du monde entier.

LE RADIUM

Le radium (dont le nom dérive d'un mot latin signifiant rayon) est un élément chimique appartenant au deuxième groupe de la classification périodique des éléments. Il est radio-actif et c'est précisément en raison de cette propriété que le radium a acquis une si grande importance, surtout au début de ce siècle, au moment où l'étude du phénomène de la radio-activité franchissait une étape décisive.

Le radium, produit de la désintégration de l'uranium, est très rare dans la nature. De ce fait, mais aussi parce qu'il est très difficile de l'obtenir pur, il a perdu aujourd'hui une grande partie de son importance pratique ; il est désormais remplacé dans la plupart de ses applications par des éléments radio-actifs dits « artificiels ».

Cependant, l'histoire du radium est sans aucun doute d'un grand intérêt, car la découverte de cet élément est l'un des jalons les plus importants dans le progrès scientifique moderne.

La radio-activité fut découverte en 1896 par Becquerel alors qu'il étudiait certains composés de l'uranium. Ensuite, on s'aperçut que la pechblende (minerai uranifère) de Joachimsthal en Bohême, bien que ne contenant que 50 % d'uranium, émettait des radiations environ cinq fois plus « fortes », ou mieux plus intenses, que celles émises par l'uranium pur. On en conclut logiquement que ce minerai contenait un ou plusieurs éléments inconnus, plus « radio-actifs » que l'uranium.

LA DÉCOUVERTE DU RADIUM

En 1898, Pierre et Marie Curie démontrèrent que cette radio-activité élevée était due à un autre élément, qu'ils appelèrent précisément « radium » et qu'ils isolèrent sous forme de bromure. Sachant qu'une tonne de pechblende contient à peine un quart de gramme de radium, on peut mesurer toute la difficulté de la tâche des Curie. Il leur fallut justement mille kilogrammes de minerai pour obtenir le premier dixième de gramme de radium pur, sur lequel ils purent étudier les propriétés de cet élément.

Pour l'époque, le résultat atteint par les Curie était incontestablement exceptionnel, d'autant plus que la seule méthode d'analyse suffisamment sensible dont ils disposaient était la mesure de l'« activité » des préparations, et que la méthode de purification du radium qu'ils ont mise au point est, avec de légères retouches, suivie encore aujourd'hui.

Le radium, qui, comme nous l'avons dit, est l'un des produits de la désintégration de l'uranium, se trouve associé à celui-ci, dans ses minerais, dans un rapport presque constant qui s'explique par le fait qu'il s'établit un équilibre radio-actif ; en effet, la demi-vie du radium étant très brève en regard de celle de l'uranium (qui est de 4,5 milliards d'années), la quantité totale de radium présente à tout moment dans l'écorce terrestre est déterminée par comparaison entre le radium qui se forme à chaque instant à partir de l'uranium et le radium qui disparaît du fait qu'il se désintègre spontanément.

Les plus riches minerais d'uranium contiennent environ une part de radium pour 3 400 000 parts d'uranium, c'est-à-dire environ un gramme de radium pour quatre tonnes de minerai. On exploite cependant des minerais dont la teneur en radium n'est que d'un gramme pour trois cents tonnes, d'autant plus qu'aujourd'hui, cet élément est considéré comme un sous-produit de l'uranium.

Le minerai broyé est traité avec un mélange d'acide nitrique et d'acide sulfurique ; à la solution ainsi obtenue, on ajoute du baryum, très semblable chimiquement au radium et qui pour ainsi dire l'« entraîne » avec lui dans les différentes transformations chimiques. Cela est indispensable, sinon les précipités contenant du radium seraient si peu abondants qu'il serait impossible de les recueillir.

Le traitement par les acides entraîne, en solution, l'uranium du minerai, tandis que le radium, le baryum et la silice demeurent dans le précipité, les deux premiers sous forme de sulfates. On filtre alors le précipité et on le fait bouillir avec de la soude caustique pour éliminer partiellement la silice et les sels de plomb, toujours présents en même temps que l'uranium. Les sulfates de baryum et de radium ainsi que la silice restante sont traités à l'autoclave avec du carbonate de sodium ;

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Pechblende contenant de la curite (France), qui est l'un des minerais uranifères les plus riches en radium (musée civil d'Histoire naturelle, Milan).

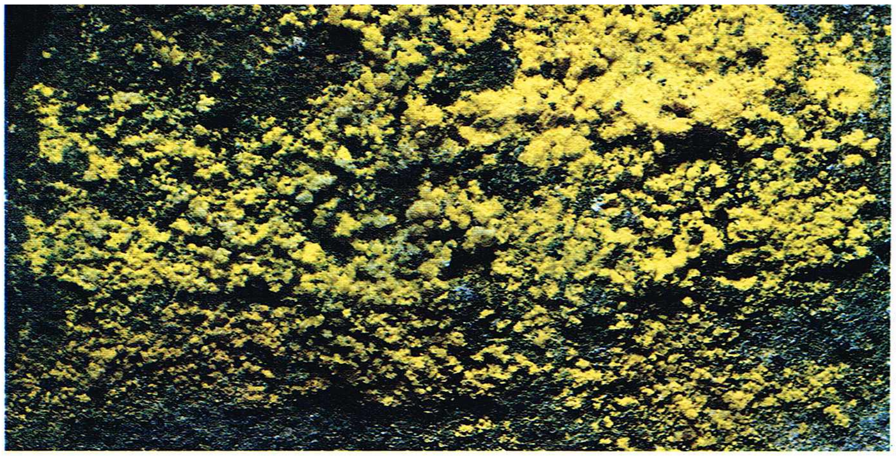

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Un minerai radio-actif, l'uranopilite.

le baryum et le radium passent alors sous forme de carbonates et peuvent être dissous dans l'acide chlorhydrique, tandis que la silice insoluble est éliminée par filtration.

Souvent, pour obtenir une purification plus poussée des éléments, on les précipite de nouveau en sulfates et on refait un traitement en autoclave. Au mélange de chlorures de baryum et radium obtenu après ces passages, on ajoute de l'acide bromhydrique, ce qui provoque la formation des bromures des deux éléments. On les fait cristalliser, de manière fractionnée, en jouant sur le fait que la solubilité du bromure de radium est inférieure à celle du bromure de baryum.

Le mélange de bromures ne contient alors que quelques parties par million de radium ; après dix cristallisations, on parvient à quelques parties par mille de radium. Il est donc évident qu'il faut un nombre énorme de cristallisations pour obtenir des sels de radium d'une pureté de 95 à 99 %, qui sont les sels utilisés. A tout cela, il convient d'ajouter que la manipulation de matériaux radio-actifs exige des précautions particulières ; cela explique pourquoi le radium est si onéreux : en 1954 en effet, cet élément valait aux U.S.A. de 16 à 21,5 dollars le milligramme.

Certains autres minerais exigent un traitement différent de celui que nous venons de décrire ; la principale nouveauté est que l'on effectue la cristallisation fractionnée des chromates des deux éléments plutôt que celle des bromures, cristallisation qui peut être remplacée partiellement par l'emploi de résines échangeuses de cations.

Le radium pur est un métal blanc, brillant, obtenu par électrolyse du chlorure fondu ; sa densité est voisine de 5 ; il fond à 960 °C. Il réagit violemment avec l'eau, comme les métaux alcalino-terreux. Ses composés confèrent une coloration rouge vif à la flamme. Ils sont en outre phosphorescents et, en petites quantités, rendent phosphorescentes d'autres substances. Le symbole chimique du radium est Ra.

L' « activité » du radium est très intense ; le bromure pur est environ un million de fois plus actif que l'uranium ; mais, malgré cela, l'élément ne perd que 1 % environ de son activité tous les 25 ans. Les isotopes du radium aujourd'hui connus sont nombreux, le principal est le Ra^{226}*, qui est précisément l'isotope possédant la demi-vie la plus longue (1 590 ans environ). Par émission de particules* alpha, *il se transforme en* radon *(gaz noble) dont la demi-vie est très courte (4 jours environ).*

Dans les premiers temps des recherches sur les éléments radio-actifs, on donnait le nom de « radium » à divers produits de la désintégration du radium et on les distinguait par les lettres de l'alphabet (par exemple : « radium C », « radium F », etc.). Il s'agit en réalité d'éléments chimiques tout à fait différents, n'ayant avec le radium qu'une origine commune.

La quantité totale de radium isolée dans le monde entier, à la fin de 1939, dépassait sensiblement 300 grammes ; actuellement, on l'estime à plus d'un kilogramme. Avant la guerre, les principaux détenteurs de radium en Europe étaient la ville de Vienne et l'Académie des sciences de Paris. La production moyenne annuelle pour la période qui a suivi la dernière guerre mondiale peut être estimée à environ 30 grammes : cette production est destinée essentiellement à des emplois médicaux. Le principal producteur actuel est le Canada qui exploite les minerais du lac de la Grande Ourse. En outre, une certaine quantité de radium (évaluée aux U.S.A. à 200 grammes) fait l'objet de « prêts » contre paiement.

Toutefois, la production de radium ne tend pas à augmenter car, par rapport au début du siècle, la situation envers les éléments radio-actifs a profondément changé : en effet, en 1934 ont été découverts les premiers éléments radio-actifs artificiels, et plus tard la fission nucléaire. Cela a conduit à la synthèse d'éléments artificiels obtenus à moindre prix, pouvant remplacer le radium pratiquement dans tous ses emplois.

L'efficacité de ces nouveaux éléments (ou mieux, des isotopes radio-actifs) n'est pas inférieure à celle du radium : le type de particules émises est le même et seule varie l'énergie d'émission.

Si l'uranium n'était à l'origine qu'un sous-produit du radium et ne trouvait que peu d'applications pratiques, la situation est aujourd'hui inversée ; l'uranium est devenu le produit principal, tandis que le radium est peu à peu délaissé.

EMPLOIS DU RADIUM

C'est presque par hasard que fut découverte la principale utilisation pratique du radium : son utilisation en thérapeutique.

En manipulant des matériaux radio-actifs, Becquerel subit des « brûlures », provoquées par l'absorption d'une dose trop forte de radiations. Le terme de « brûlures » est tout à fait inexact, mais il était utilisé autrefois pour indiquer globalement les effets nuisibles des radiations sur l'organisme humain.

Les premières expériences de radiothérapie avaient déjà été faites avec les rayons X, découverts par Röntgen en 1895. L'accident survenu à Becquerel, et d'autres considérations, conduisirent les chercheurs à étudier de nouvelles sources de radiations et en particulier le radium. L'emploi de ce dernier, limité initialement au traitement de certaines maladies de la peau, fut étendu ensuite au traitement des tumeurs, soit par applications externes, soit par introduction d'aiguilles de métal dans la partie malade.

Mais il fallut faire de nombreuses tentatives pour parvenir à des résultats satisfaisants et s'attacher le concours de nombreux chercheurs pour perfectionner les techniques d'utilisation, surtout en ce qui concerne le dosage des radiations et la manière de les « filtrer », c'est-à-dire d'éliminer les radiations les plus dangereuses. En effet, l'exposition excessive à une source de radiations peut se révéler très dangereuse et entraîner des accidents pouvant parfois être mortels. Aussi, de sérieuses précautions s'imposent pour l'emploi des sources radio-actives et notamment du radium, qui peut être fixé de façon durable par les os.

Le radium connaît aujourd'hui d'autres emplois en tant que source de radiations, et à cet effet, on le trouve dans le commerce sous ampoules scellées. On utilise aussi son produit de désintégration, le radon, *que l'on comprime dans de petites capsules.*

Le radium est utilisé en particulier dans les radiographies industrielles, presque toujours sous forme de sulfate, pratiquement insoluble. On le place généralement dans de petits cylindres en argent, étanches aux gaz (pour éviter leur diffusion), ou dans de petites sphères, enfermées à leur tour dans des récipients en aluminium ou en acier. La quantité d'élément présente dans chaque récipient varie de 25 milligrammes à 1 gramme. A cause de leur coût élevé, les récipients ne sont généralement pas vendus mais loués.

En mélangeant de très petites quantités de radium au sulfure de zinc, on obtient une peinture phosphorescente pour les aiguilles de montres ou pour les inscriptions que l'on veut rendre lisibles dans le noir. Le mélange radium-béryllium est une source modérément intense de neutrons, qui trouve des emplois en laboratoire et même dans la recherche de gisements d'huiles minérales.

Tous les autres emplois du radium et même une partie de ceux que nous venons d'énumérer sont réalisés aujourd'hui à l'aide d'autres éléments radio-actifs. Mais il ne faut pas oublier le rôle que le radium a joué dans l'évolution des connaissances en matière de radio-activité et de physique nucléaire ; ce rôle apparaît d'autant plus précieux et irremplaçable que la quantité de métal disponible est aujourd'hui encore très réduite.

MINÉRAUX ET ROCHES DÉCORATIFS

Les minéraux et roches utilisés dans un but décoratif, tant dans le domaine des gemmes et des pierres dures, de la gravure sur pierres fines, en architecture, ou plus simplement encore pour la fabrication de petits objets d'art, sont très nombreux : aussi nous ne pourrons en évoquer ici que quelques-uns, choisis parmi les plus remarquables. Tout d'abord, laissons volontairement de côté les pierres précieuses proprement dites, dont la valeur est si élevée qu'elles ont un rôle dépassant celui de simples objets « décoratifs ».

De même, nous nous contenterons de rappeler rapidement les nombreuses variétés de roches, telles que les marbres, certains calcaires colorés, les granites, les quartzites, l'albâtre, le travertin, etc., choisis pour rehausser la beauté des bâtiments.

C'est le cas de quelques marbres, contenant de petites quantités de pyrite qui en soulignent le raffinement et qui en font des pierres ornementales. Certains calcaires, comme ceux que l'on trouve à Raibl (Italie), contiennent de la blende rouge, qui leur confère un aspect tout à la fois étrange et agréable. Les granites et les quartzites doivent souvent leurs qualités décoratives aux oxydes métalliques ou aux petits cristaux de minerais métallifères qu'ils contiennent en tant qu'impuretés, par exemple le quartz et le porphyre quartzifère des carrières de Cuasso al Monte en Lombardie qui renferment des lamelles brillantes de molybdénite.

Rappelons enfin que l'on considère généralement comme objets décoratifs certaines cristallisations de minéraux plutôt communs, mais présentant de jolies formes ; tels, les cristaux de quartz, relativement fréquents dans les Alpes, remarquables par leur forme et leur transparence. Leur beauté peut d'ailleurs être rehaussée par des inclusions d'aiguilles cristallines de rutile.

Un autre minerai dont les cristaux ou concrétions sont très répandus est le carbonate de calcium, surtout dans l'une de ses variétés, l'aragonite. Il en est de même pour le soufre et le gypse.

Ajoutons à cette liste les oxydes de fer, parmi lesquels la magnétite, qui possède la propriété d'être un aimant naturel, et l'hématite, de couleur caractéristique formant de très beaux cristaux, dont certains agrégats, appelés « roses de fer », sont très appréciés des collectionneurs. Ce minerai, lorsqu'il est compact, sert aussi à la fabrication d'objets d'ornement, tels que bibelots, boutons de manchette, etc.

Un autre minerai de fer très connu et fort répandu est la pyrite. Elle se présente en cristaux bien différenciés, affectant les formes les plus diverses, notamment celle du cube.

LES PIERRES DURES

Il s'agit de minéraux, parfois métallifères, à mi-chemin entre les simples pierres décoratives et les pierres précieuses ou semi-précieuses. En font partie différentes variétés de silice (l'agate, l'onyx, le jaspe, l'opale), qui sont utilisées non seulement comme gemmes (par exemple, dans les camées), mais aussi dans l'art de la mosaïque. Depuis la Renaissance, cet art connaît une grande faveur en Italie, notamment à Florence. Les tableaux, les panneaux décoratifs, les pièces de mobilier faites de mosaïque sont très appréciés ; ils tirent leur valeur autant de la beauté et du prix des pierres que de l'habileté de l'artiste.

D'autres éléments, fort nombreux, qu'on ne peut classer dans aucune des catégories précédemment citées, se prêtent parfaitement à la fabrication d'objets d'ornement : tels, la malachite, le lapis-lazuli, la turquoise, le jade, la chrysocolle.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Coupe sculptée façonnée dans une turquoise de Perse de dimensions exceptionnelles, enchâssée dans une monture en or sertie de gemmes. Art byzantin des Xe et XIe siècles (Venise, Trésor de Saint Marc).

La malachite, qui a connu de larges applications en Russie dans l'art ornemental, est un carbonate basique de cuivre. Se présentant rarement en cristaux, elle se trouve en revanche couramment sous forme d'incrustations, de concrétions compactes à structure concentrique, de stalactites, de masses arrondies, mamelonnées ou réniformes ; elle est souvent associée à l'azurite et à la cuprite.

Caractérisée par sa couleur verte, elle provient de l'oxydation superficielle des gisements de cuivre, en particulier par suite des diverses réactions qui s'opèrent quand les sulfures de ce métal entrent en contact avec des eaux contenant du bicarbonate de calcium. On la trouve dans des gisements assez riches en Sibérie (ils ont été exploités surtout au cours de la seconde moitié du siècle dernier) ; on connaît aussi d'autres gisements en France (Chessy), dans l'Arizona, au Katanga, en Rhodésie, au Chili et en Australie.

On a conservé le souvenir de ces blocs exceptionnels de malachite provenant des mines de l'Oural, dont certains, pesant plus de 50 tonnes, servirent à fabriquer les colonnes de la cathédrale Saint-Isaak, à Léningrad.

On peut admirer de nombreux objets en malachite au musée des Offices et au musée du Vatican à Rome. La malachite est encore travaillée de nos jours. En raison de sa fragilité, les pertes lors de la taille sont assez importantes et peuvent représenter 30 % de la quantité initiale du matériau : ceci contribue à augmenter le prix des objets réalisés (bibelots, cendriers, etc.).

La chrysocolle, souvent associée à la malachite, puisqu'elle provient elle aussi de l'altération de minerais de cuivre par l'action des eaux contenant de la silice, est de couleur bleue et possède un éclat satiné. C'est un silicate hydraté de cuivre, constituant un minerai d'importance modeste de ce métal dans les gisements du Chili, de l'Oural et du Zaïre. On l'utilise parfois comme pierre ornementale, mais elle est moins appréciée.

DU JADE AUX TURQUOISES

Le terme de jade, pierre fine assez réputée, sert à désigner divers minéraux assez semblables par leur composition (ce sont tous des silicates) et par leur aspect.

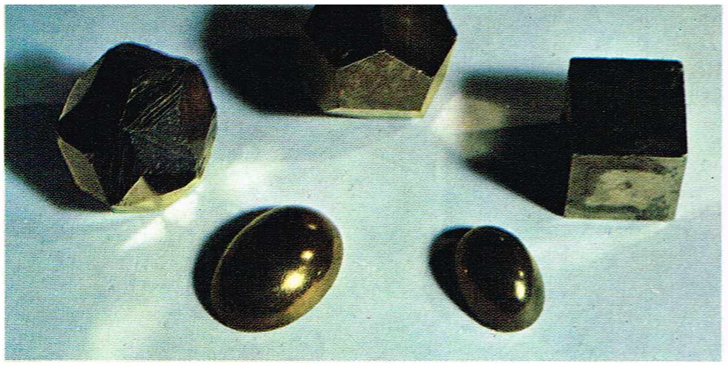

Ci-dessus : cristaux de pyrite (île d'Elbe) et cabochon de pyrite (collection Schubnel). A droite : camée et cabochon en malachite de Sibérie, et cabochon en azurite de l'Arizona (collection Joz-Roland, Paris).

Connu dès l'époque préhistorique, le jade servait alors surtout, en raison de sa dureté, à la fabrication d'outils de travail. Les minéraux ainsi désignés sont la néphrite, silicate de calcium et de magnésium (du groupe des amphiboles), et la jadéite, silicate de sodium et d'aluminium (du groupe des pyroxènes) : leur dureté varie de 6,5 à 7 (elle est donc supérieure à celle du verre).

A l'état pur, les deux minéraux sont blancs, translucides; lorsqu'ils contiennent des impuretés (le plus souvent des traces de fer et de chrome), ils acquièrent une coloration verte, brune, violette, bleue, jaune, rougeâtre, grise et même noire.

Les principaux gisements de néphrite se rencontrent en Asie centrale; pendant des siècles, ils furent la principale source d'approvisionnement des artisans chinois. La Sibérie possède aussi des gisements d'un intérêt considérable.

En revanche, la jadéite utilisée par les Chinois provenait de Birmanie; il existe aussi des gisements au Japon et en Amérique (Guatemala, Californie, Wyoming, Alaska, Colombie britannique). Les jades (c'est-à-dire les objets taillés dans le jade) les plus célèbres proviennent de Chine, où le travail y est très répandu; aujourd'hui, le jade est façonné aussi dans d'autres pays. Le travail de la pierre s'effectue à l'aide de sables abrasifs quartzeux ou de corindon (actuellement, de carborundum, qui est un abrasif de synthèse); par ce traitement long et laborieux, on obtient des objets de grande valeur, d'un poli extraordinaire.

La variscite, phosphate hydraté d'aluminium, de couleur vert pâle, se trouve en nodules ou en incrustations. Elle ressemble au jade, et, comme celui-ci, est façonnée en Orient (surtout en Chine) pour fabriquer des statuettes et des amulettes.

Un autre phosphate basique d'aluminium, assez agréable d'aspect par sa couleur bleu azur et son éclat vitreux, est la lazulite, que l'on trouve souvent en masses de dimensions modestes. Répandue dans différentes régions du monde, elle est utilisée comme gemme; il ne faut pas la confondre avec la lazurite, plus connue sous le nom de lapis-lazuli.

La rhodochrosite, minerai de manganèse, est également utilisée pour la fabrication d'objets d'ornement, tels que des cendriers. Elle se présente en masses parfois considérables, d'aspect uni ou, assez souvent, veiné. Comme son nom l'indique, elle est d'un beau rose tirant sur le rouge, avec d'agréables reflets.

Cristal de lazurite dans sa gangue. Afghanistan (collection de minéralogie de la faculté des sciences de Paris).

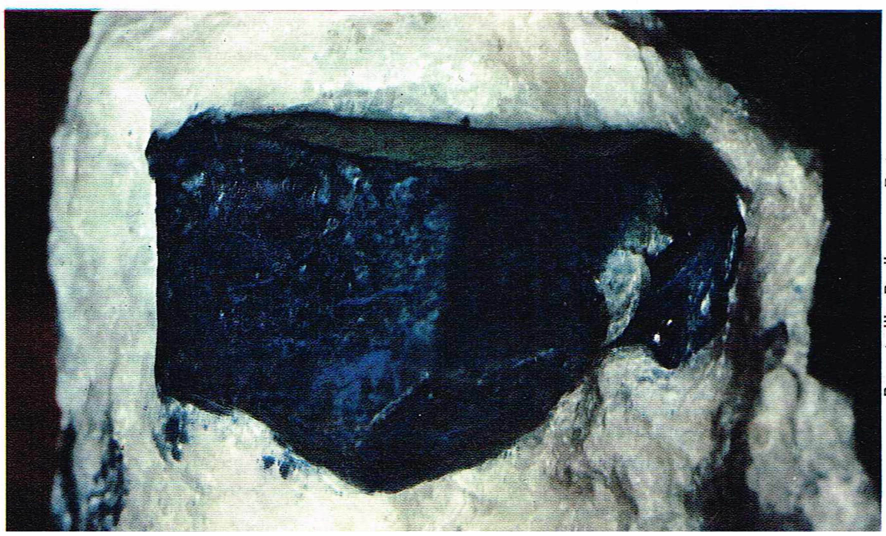

Nous avons déjà cité le lapis-lazuli : c'est un minéral connu depuis la plus haute Antiquité, utilisé dans les mosaïques et dans la fabrication d'objets d'ornement. La fameuse et splendide mosaïque en lapis-lazuli, connue sous le nom d'étendard d'Ur, découverte dans les fouilles effectuées en Mésopotamie, remonte à plus de 4 000 ans.

Le lapis-lazuli est un aluminosilicate complexe de sodium, d'une belle couleur allant du bleu azur au bleu foncé, que l'on trouve en cristaux ou en masses compactes. Le lapis-lazuli naturel est en fait un mélange de lazurite, d'haüynite et de sodalite; il contient, de plus, différents minéraux, tels que des cristaux de pyrite, qui en rehaussent la beauté.

Pendant des siècles, il a constitué la matière première d'où était extrait le bleu outremer, dont tirèrent parti les peintres les plus célèbres des siècles passés; ce pigment, autrefois très cher, est aujourd'hui produit artificiellement.

Durant des milliers d'années, l'Afghanistan a fourni des échantillons de lapis-lazuli se prêtant parfaitement à la fabrication de gemmes (il est probable que les Anciens les ont confondus avec les saphirs moins transparents). On connaît également des lapis-lazulis en Sibérie, au Chili, en Californie, à Madagascar et au Brésil. En dehors des mosaïques, le lapis-lazuli sert à fabriquer des épingles, des bagues et des bracelets.

La turquoise est un autre minéral connu depuis des temps très anciens. Elle constituait l'un des principaux ornements de joaillerie de l'ancienne Égypte, comme le prouvent les nombreux objets en turquoise trouvés dans les fouilles. Les Égyptiens l'extrayaient du Sinaï, mais c'est de Turquie qu'elle fut pour la première fois importée en Europe, comme l'indique son nom qui signifie « originaire de Turquie ». La turquoise est un phosphate hydraté d'aluminium et de cuivre; c'est ce dernier qui lui donne sa couleur. Le minerai forme de petites veines et des nodules dans des roches éruptives trachytiques fortement altérées.

La turquoise possède une coloration vert clair (parfois bleue) très agréable. Elle est sensible à l'eau et exige donc beaucoup de précautions, surtout lorsqu'elle est montée en bagues. Elle est surtout employée en joaillerie et connaît une grande faveur, notamment en Orient. Les mines persanes de Nishapur, très riches, ont été exploitées durant de nombreux siècles. Elle fait toujours l'objet de transactions actives en Égypte. De nombreuses mines de turquoise existent aussi en Amérique, notamment au Mexique, au Nouveau-Mexique, en Arizona, en Californie et au Nevada. Chez les Aztèques, la turquoise n'était pas utilisée en bijouterie, mais pour les objets d'usage courant, en raison de sa dureté.

Il existe aussi une « turquoise d'os » qui ressemble par son aspect extérieur à la turquoise minérale; en réalité, il s'agit d'os et de dents fossiles colorés en bleu par le phosphate de fer.

Les obsidiennes, autre matériau très employé par les Indiens d'Amérique, servaient à fabriquer les objets utiles, y compris les armes : ce sont des verres d'origine volcanique, que l'on trouve parfois en lame très dure et très coupante.

Un autre matériau très curieux, également de nature vitreuse, utilisé parfois pour la fabrication d'objets décoratifs, est celui que constituent les tectites, cailloux dont l'origine est vraisemblablement météorique; ils sont disséminés sur une étroite bande de la surface terrestre; en Europe, on en trouve uniquement en Tchécoslovaquie.

Parmi les nombreuses autres variétés de minéraux susceptibles de servir de pierres décoratives, rappelons la calamine, bleue et compacte, l'olivénite et l'albâtre.

GRAPHITE ET DIAMANT

Le graphite et le diamant ont un aspect et des propriétés si différentes qu'on pourrait les croire tout à fait dissemblables. En réalité, ils représentent les deux aspects du carbone pur, à l'état natif. L'un et l'autre, mis à part les impuretés qu'ils renferment, ont pour seul constituant le carbone : leurs propriétés, et les divers emplois qui en découlent, sont déterminés uniquement par l'arrangement des atomes de carbone dans le réseau cristallin des deux minéraux.

Dans le graphite, les atomes de carbone sont disposés aux sommets d'hexagones réguliers, jointifs entre eux, formant une succession de plans parallèles empilés les uns sur les autres. La distance qui sépare les plans consécutifs est supérieure à celle qui relie entre eux les atomes formant les hexagones; en outre, les liaisons atomiques entre ces différents plans sont plus fragiles. Il en résulte que le graphite se clive facilement, surtout lorsqu'il se présente en larges cristaux aplatis, connus dans les pays anglo-saxons sous le nom de « flocons de graphite ».

En revanche, dans le diamant, les atomes de carbone sont situés au centre et aux sommets de tétraèdres réguliers, chaque sommet constituant le centre du tétraèdre voisin. Ainsi, tous les atomes de carbone sont parfaitement équidistants et unis par des liaisons fortes et identiques. Cette disposition confère au diamant des propriétés particulières, notamment, sa dureté extrême : c'est le minéral le plus dur qui existe. A la différence du graphite, ses plans de clivage forment un octaèdre. Les propriétés chimiques et physiques de ces deux corps sont totalement différentes.

C. Bevilacqua

Cristaux bruts de diamants (collection De Beers). Échantillon de graphite (musée d'Histoire naturelle de Milan).

LE GRAPHITE

Le graphite est un solide gris foncé ou noir, gras au toucher, très tendre; il est bon conducteur de la chaleur et de l'électricité. Traité par l'acide nitrique concentré et par le chlorate de potassium, il se transforme en oxydes graphitiques, jaunes, qui conservent une structure hexagonale. On peut le trouver en gros cristaux, lamellaires et aplatis, mais, le plus souvent, il se présente en masses compactes, d'aspect terreux.

On pense que le graphite s'est formé sous l'influence de phénomènes ayant intéressé des roches qui possédaient une concentration élevée en carbonates; on le trouve parfois disséminé dans les roches, mais les gisements les plus faciles à exploiter sont les gisements proches des zones de contact entre les veines ou les dykes d'origine magmatique et les roches carbonatées préexistantes.

Les gisements les plus riches sont ceux de Madagascar (qui fournissent du graphite en « flocons ») et ceux de l'île de Ceylan (graphite amorphe). Beaucoup d'autres gisements de moindre importance existent en différents pays; les États-Unis en possèdent quelques-uns, faiblement exploités. En Italie, certaines vallées alpines fournissent des quantités appréciables de minerai, de pureté médiocre.

Environ 70 % de la production annuelle de graphite naturel sont constitués par du minerai de peu de valeur, utilisé comme pigment noir, ou comme élément de fonderie. Le graphite de meilleure qualité, comme celui de Madagascar, est utilisé dans certains alliages métalliques, et le graphite de Ceylan, pour fabriquer les balais des moteurs électriques.

En raison de son onctuosité, le graphite trouve de très larges applications comme lubrifiant, en suspension dans des huiles minérales ou dans des corps appelés « autolubrifiants ». Enfin, une bonne partie du graphite extrait annuellement ou produit artificiellement sert de matériau réfractaire, car il a la propriété de résister à des températures très élevées. Pour ce même motif, et parce qu'il est conducteur de l'électricité, on l'utilise comme électrodes dans les lampes à arc et dans les fours électriques, tant dans la métallurgie des aciers que dans celle de l'aluminium. Ces industries sont de grandes consommatrices de graphite.

Le graphite naturel n'est pas assez abondant pour tous ces usages; de plus, il ne convient pas parfaitement pour certains d'entre eux; aussi lui préfère-t-on un type de graphite produit artificiellement en chauffant le coke dans des fours électriques spéciaux, en dehors du contact de l'air, pour en empêcher la combustion. Ce procédé, connu sous le nom de procédé Achesom, permet en outre de donner au matériau les formes les mieux adaptées aux différents besoins.

Un autre type de matériau à base de graphite était très répandu aux États-Unis; on l'obtenait en déposant du noir de fumée sur des supports spéciaux, ce qui permettait d'obtenir un enduit de graphite non poreux qui était utilisé surtout dans l'industrie chimique. Mais c'est dans la fabrication de mines de crayon que le graphite trouve son meilleur usage. Autrefois en graphite naturel, les mines de crayon sont obtenues, aujourd'hui, artificiellement.

Enfin, le graphite a trouvé un emploi très important dans la technologie nucléaire comme « modérateur » de neutrons. Dans cette application, le graphite doit être très pur; souvent, d'ailleurs, il est remplacé par d'autres

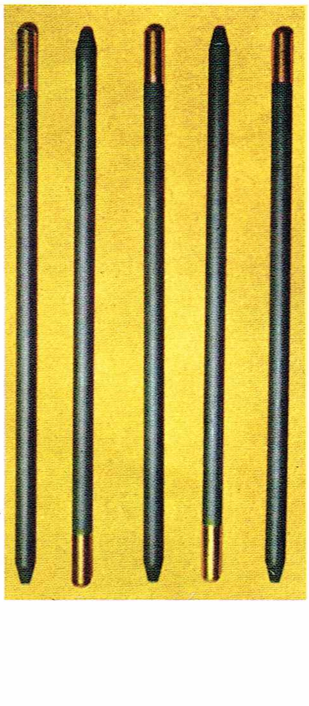

C. Bevilacqua

C. Bevilacqua

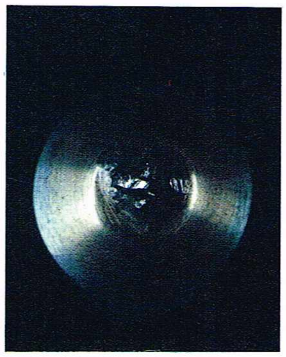

Diamant industriel monté sur un support (vue latérale et vue plongeante).

matériaux. Rappelons toutefois que la pile atomique de Fermi était formée de couches superposées d'uranium et de graphite.

LE DIAMANT

Le graphite est la phase stable du carbone élémentaire à la température ordinaire, tandis que le diamant en est la phase instable. Ce dernier est rare dans la nature car les conditions qui favorisent sa formation (température et pression très élevées) sont exceptionnellement réalisées. Mais en réalité, la vitesse avec laquelle le diamant se transforme en graphite est tellement faible qu'on peut la considérer comme nulle ; elle ne devient appréciable qu'au-dessus de 1 000 °C. Le diamant se présente en cristaux cubiques, dodécaédriques, et surtout octaédriques, les faces étant légèrement incurvées.

Lorsqu'il est pur, le diamant est limpide et possède un indice de réfraction élevé. C'est un mauvais conducteur de la chaleur et de l'électricité ; il se dilate très peu sous l'effet de la chaleur, et ne perd pas sa dureté (propriétés très appréciées dans l'industrie). Soumis à un flux intense de radiations, le diamant devient vert ; on peut le rendre à nouveau incolore en le chauffant.

A l'air, le diamant brûle sans laisser de résidu et se transforme en dioxyde de carbone ; fortement chauffé en dehors du contact de l'air, il passe, comme nous l'avons déjà dit, à l'état de graphite. Il n'est pas attaqué même par les oxydants les plus énergiques. On trouve souvent dans la nature des diamants contenant des impuretés, responsables de diverses colorations allant du jaune au noir.

Par sa rareté et par ses magnifiques reflets (« feux »), le diamant est l'une des pierres précieuses les plus appréciées, et cela depuis les temps les plus anciens. Les gisements les plus célèbres furent ceux de l'Inde et de Bornéo, exploités depuis longtemps. Ils sont aujourd'hui presque épuisés, après avoir fourni des pierres d'une très grande beauté et de dimensions appréciables. En 1720, d'autres gisements importants furent découverts au Brésil, et ce pays domina le marché mondial des diamants jusqu'en 1870.

En 1867, un enfant du nom d'Erasmus Jacob trouva un étrange « caillou » près du fleuve Orange en Afrique du Sud. Il joua avec l'objet pendant plus d'un an, jusqu'au jour où un colon, intrigué, le fit analyser et évaluer : il s'agissait d'un diamant de plus de 21 carats, qui fut vendu à l'époque au prix de 500 livres sterling (le carat équivaut à 0,2 gramme).

Ainsi, ce fut presque par hasard que débuta la période la plus faste pour la recherche des diamants. Bientôt d'autres découvertes eurent lieu, avant même que ne commencent les premières prospections sérieuses. Celles-ci aboutirent à la découverte de mines diamantifères, qu'on appela « pipe mines » à cause de leur forme caractéristique de cheminées, due à l'origine volcanique de la roche diamantifère. En peu de temps, l'Afrique du Sud devint le premier producteur mondial de diamants ; très purs, les diamants sud-africains ont une grande valeur. C'est en Afrique du Sud, près de Lichtenburg, que se trouve la mine la plus riche jamais découverte : son exploitation commença en 1920, et, de 1926 à 1928, elle fournit pour trois millions de carats. Par la suite, la production baissa rapidement.

Outre les « pipes », l'Afrique du Sud possède d'importants gisements diamantifères le long des plages qui bordaient autrefois l'Atlantique et qui font partie aujourd'hui de l'arrière-pays ; une partie des pierres qui en proviennent sont particulièrement adaptées aux travaux de joaillerie, puisque la perte à la taille n'est que de 5 %. Dans ces alluvions les diamants, qui résistent très bien à l'altération, proviennent du démantèlement de « pipes » diamantifères sous l'action de l'érosion.

Beaucoup d'autres pays d'Afrique sont devenus aujourd'hui des producteurs de diamants ; en 1907, des régions diamantifères furent découvertes au Congo belge (dans le Kasaï) et furent exploitées à partir de 1912 ; en 1917, l'Angola commença à extraire des diamants. Enfin, en 1919, fut découverte la principale mine du Congo, près du fleuve Bushimaie, dont 96 % de la production est constituée par des diamants à usage industriel. Au début de la Seconde Guerre mondiale, cette mine avait fourni, à elle seule, plus de dix millions de carats.

En 1940 fut découverte la plus vaste « pipe » d'Afrique, d'une surface plus étendue que celle de toutes les mines sud-africaines ; elle se trouve à Mwaoui, en Tanzanie, et sa découverte est due à un géologue canadien, qui en demeura propriétaire pendant très longtemps.

A partir de 1930, d'autres gisements diamantifères furent découverts en Sierra Leone, en Côte-de-l'Or (aujourd'hui le Ghana) et en Afrique équatoriale et occidentale française ; mais les diamants qui en proviennent ont une faible valeur. Il existe, enfin, d'autres régions diamantifères, exploitées encore aujourd'hui ; en Australie, au Venezuela, en Guyane britannique et en U.R.S.S. (Oural) ; elles sont beaucoup moins étendues que celles que nous venons de citer.

Le terrain diamantifère le plus connu, celui de l'Afrique du Sud, est appelé dans le langage minier « Blue Ground » à cause de sa couleur bleue : c'est une brèche volcanique formée de « kimberlite » (roche ultra-basique riche en olivine). Elle se désagrège à l'air. Les pierres sont obtenues de manière assez simple : le minerai est convenablement concassé, et un courant d'eau en entraîne la fraction la plus légère. Le résidu, qui représente environ 1 % du total, toujours entraîné par l'eau, passe sur des surfaces planes enduites de graisse (en général, de la vaseline). Les diamants sont retenus par cette graisse, que l'on fait ensuite fondre ; certaines gemmes n'ont pas d'affinité pour la graisse et doivent être soumises préalablement à un traitement spécial.

La valeur commerciale des diamants ne dépend pas seulement du poids, mais, surtout, de la pureté et de l'« eau » (c'est-à-dire la transparence). Aussi, un grand nombre sont inutilisables en joaillerie. Un autre élément déterminant de la valeur d'une pierre est la taille. La pierre brute est préalablement dégrossie, puis taillée à facettes ; celles-ci sont ensuite polies à l'aide de poudre de diamant, seul abrasif utilisable.

Grâce à sa dureté, le diamant trouve bien des applications en dehors de la joaillerie. Les pierres impures, appelées « bort », sont utilisées comme « diamants industriels », notamment comme abrasifs et dans la fabrication de différents outils de coupe et de forage.

La quantité de pierres utilisées dans l'industrie dépasse, en poids, et de loin, celles qui sont utilisées comme gemmes ; en 1961, la production mondiale de diamants fut pour la première fois supérieure à 33 millions de carats (c'est-à-dire 6 600 kilogrammes), dont une bonne moitié vendue pour des utilisations industrielles à trois dollars le carat. Le principal producteur des diamants industriels est, aujourd'hui, le Zaïre.

Les tentatives faites pour obtenir artificiellement des diamants furent nombreuses : la plus fameuse est celle du chimiste français Moissan, qui utilisa du carbone pur, dissous dans du fer fondu, à la température de l'arc électrique. Dans la masse, rapidement refroidie, furent trouvés des cristaux possédant toutes les propriétés du diamant.

La validité de cette expérience, qu'il n'a pas été possible de reproduire, est fortement contestée. On peut supposer que Moissan, savant au-dessus de tout soupçon, a été trompé par l'un de ses assistants, qui aurait introduit des éclats de diamant dans le mélange.

L'expérience fut à nouveau tentée par la suite, en utilisant, comme solvant du carbone, le silicate de magnésium, dont la composition est proche de celle des roches diamantifères. Mais c'est seulement le 15 février 1955 que les techniciens de la société américaine General Electric Company réussirent à obtenir synthétiquement des diamants, petits et relativement impurs, donc utilisables uniquement pour l'industrie. Et pourtant, même pour un résultat aussi modeste, ces techniciens durent se placer dans des conditions, de température et de pression, très particulières : la pression dépassait 100 000 atmosphères (correspondant à une profondeur de plus de 500 kilomètres dans la croûte terrestre), et la température était supérieure à 2 500 °Celsius, conditions qu'il fut nécessaire de maintenir pendant plusieurs heures.

Malgré les difficultés qu'il faut surmonter pour effectuer la synthèse du diamant, plusieurs brevets ont été déposés au cours de ces vingt dernières années et la production de diamant artificiel est aujourd'hui une réalité. Mais il est difficile de connaître le chiffre exact de carats de diamants synthétiques placés sur le marché international.

CINABRE ET MERCURE

Le cinabre est un minerai assez peu répandu dans la nature : il s'agit du sulfure de mercure, HgS. C'est le seul minerai à partir duquel on extrait industriellement le mercure métal. Le cinabre est connu depuis longtemps à cause de sa belle couleur rouge-vermeil, avant même que le métal qu'il contient soit devenu important sur le plan technique.

Finement broyé, et souvent incorporé dans l'huile, il est utilisé comme pigment, surtout dans la fabrication des peintures. Mais le produit naturel contient fréquemment des impuretés qui lui donnent une couleur brune, avec des reflets de plomb ; aussi lui préfère-t-on un produit synthétique, connu sous le nom de « vermillon », dont la couleur est plus brillante, probablement à cause de la plus grande pureté que permet la sublimation (passage de l'état solide à l'état gazeux) d'un mélange de soufre et de mercure.

Comme nous venons de le dire, le cinabre n'est pas très répandu : il n'existe, en quantités exploitables, que dans quelques endroits de la croûte terrestre. Il se présente le plus souvent en masses compactes, granuleuses ou terreuses, accompagné, comme dans les mines d'Idrija, de substances bitumineuses ; on le trouve plus rarement sous forme de cristaux (ils sont rhomboédriques). Par ailleurs et enfin, le cinabre contenant parfois des gouttelettes de mercure élémentaire, les alchimistes ont longtemps spéculé sur cette particularité.

Les principaux gisements exploitables industriellement sont ceux d'Almadén, près de Cordoue, en Espagne, connus et exploités depuis l'Antiquité. Ils sont remarquablement riches, et on trouve justement dans leur minerai quelques gouttes du métal.

Les gisements d'Idrija ont commencé à être exploités à partir du XVI^{e} siècle ; après avoir appartenu à l'empire austro-hongrois, ils passèrent, après la Première Guerre mondiale, à l'Italie, qui devint alors le principal producteur de mercure du monde. Aujourd'hui, ils appartiennent à la Yougoslavie.

Depuis 1850, on exploite aussi ceux, moins riches, du mont Amiata, en Toscane, dont le minerai contient en moyenne 1 % de mercure ; ils assurent aujourd'hui la quasi-totalité de la production italienne. Il faut rappeler, enfin, les gisements du Nevada et de la Californie (U.S.A.) : celui de New-Almaden, dont le minerai contient de 5 à 12 % de mercure, et celui de New-Idrija.

D'autres petits gisements sont exploités au Mexique, au Pérou, au Japon, en Chine. La quasi-totalité du mercure mondial provient de ceux que nous venons de citer : elle a rarement dépassé les 10 000 tonnes par an.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Échantillon de cinabre sur une gangue rocheuse provenant du val de Loibi (musée d'Histoire naturelle de Milan).

L'HISTOIRE DU MERCURE

Le mercure était connu, depuis l'Antiquité, des Chinois et des Indiens ; on en a même retrouvé dans des tombeaux égyptiens érigés environ 15 siècles avant J.-C. Il est probable qu'il avait alors plus de signification symbolique ou magique que d'utilisations pratiques.

Chez les Romains, le mercure était connu sous le nom d'hydrargyrium, terme dérivé du grec signifiant « vif-argent » ; en effet, il possède un bel éclat métallique lorsqu'il est pur, et il peut former de petites gouttelettes arrondies qui « roulent » très vite lorsqu'on les laisse tomber sur une surface, comme on peut le constater lorsqu'on casse accidentellement un thermomètre.

Au Moyen Age il reçut son nom actuel, dérivé de la planète Mercure, mais son symbole chimique Hg vient de son ancien nom.

Le mercure fascina les alchimistes, et cela ne surprend pas si l'on considère ses propriétés tout à fait singulières. En effet, il possède une densité élevée (13,6 fois celle de l'eau), et c'est le seul métal liquide à la température ambiante. A cause de ces propriétés, il fut longtemps considéré comme le « principe » de tous les métaux, et l'on prétendit même qu'il pouvait se transformer spontanément en or.

Cette opinion trouvait alors quelque fondement car il contient très souvent, à l'état d'impuretés, des métaux précieux, et même de l'or, impuretés très difficiles à supprimer. En outre, le mercure a la propriété caractéristique de former des « amalgames » avec beaucoup de métaux, notamment avec l'or. Seuls les progrès enregistrés dans la connaissance approfondie des propriétés chimiques de l'élément parvinrent à détruire les légendes dont il était entouré.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

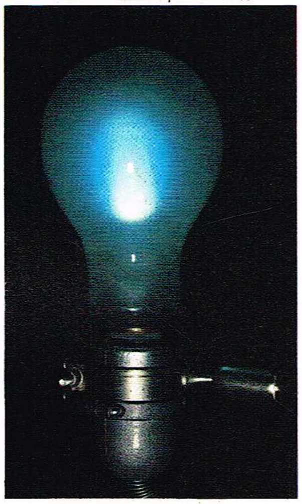

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Le mercure natif se rencontre assez rarement : la photo ci-dessus permet de voir des gouttelettes de mercure sur un échantillon de minerai provenant de Lucques (musée d'Histoire naturelle de Milan).
Ci-contre : lampe à vapeurs de mercure, utilisée pour produire une lumière riche en radiations ultraviolettes.

PROCÉDÉS D'OBTENTION ET EMPLOIS DU MERCURE

Le mercure est obtenu à partir du cinabre par « grillage » en présence d'air. Son point d'ébullition n'étant que de 360 °C, il est facile d'en réaliser la distillation, mais les pertes sont assez importantes, car il est difficile de condenser entièrement les vapeurs de mercure.

On le purifie soit par une nouvelle distillation, soit en faisant tomber les gouttelettes de mercure à travers une solution d'acide nitrique dilué, ou encore en oxydant les impuretés au moyen de l'air chaud.

Le travail du mercure est très dangereux à cause de la toxicité élevée de ses vapeurs, susceptibles de provoquer, même à une faible concentration (par exemple, 0,15 mg par m^3 d'air), des intoxications chroniques très longues à soigner. Même à la température ordinaire, en raison de sa tension de vapeur, cet élément peut provoquer des troubles graves et impose, de ce fait, des précautions particulières — malheureusement souvent négligées — dans les locaux où l'on traite le mercure.

Cela, ainsi que la rareté du métal, explique le prix assez élevé du mercure.

Le mercure est mis généralement dans le commerce dans des récipients en fer (il ne donne pas d'amalgame avec ce métal), d'une contenance de 34,5 kg, selon une vieille mesure espagnole. Il se conserve également dans des flacons de grès ou de polyéthylène. Les 2/3 de la production annuelle servent à fabriquer des appareillages électriques, des dispositifs électrolytiques et des instruments; le reste est utilisé aux fins les plus diverses, d'où le nom de « métal aux mille usages », donné au mercure. Il est aussi employé pour l'extraction de métaux nobles. Parmi les propriétés caractéristiques du mercure, rappelons encore son inaltérabilité à l'air, sauf à chaud et après un temps d'exposition très long, sa faible solubilité dans les acides, sauf dans l'acide nitrique concentré, qui est un oxydant actif.

Par sa propriété de se dilater considérablement sous l'effet de la chaleur, le mercure trouve un emploi dans la fabrication des thermomètres; cette même propriété est utilisée dans les thermo-régulateurs, qui permettent de maintenir à une température constante des récipients chauffés électriquement; ils jouent le rôle d'interrupteurs de courant en intervenant lorsque la température dépasse une valeur donnée.

Tout le monde connaît aussi l'utilisation du mercure dans les baromètres qui donnent la mesure de la pression atmosphérique, et dans les lampes à mercure qui émettent une lumière intense ainsi que des radiations ultraviolettes permettant des applications scientifiques, industrielles et thérapeutiques.

L'étalon de « résistance » électrique, l'ohm, a été réalisé à l'aide du mercure qui, comme la plupart des métaux, est un bon conducteur de l'électricité.

Le mercure est également utilisé dans les soupapes de régulation pour les hautes pressions, dans les redresseurs de courant, dans les chaudières et les turbines destinées à travailler à des températures très élevées, cet emploi étant toutefois limité par la forte toxicité des vapeurs.

Il est également employé dans les « pompes à diffusion », qui permettent de réaliser un vide très poussé; enfin, son utilisation dans les laboratoires scientifiques est fréquente.

Parmi les composés du mercure, rappelons avant tout les amalgames : de nombreux éléments, ou leurs sels, réagissent vivement, à la température ordinaire, avec le mercure pour donner des composés « intermétalliques », c'est-à-dire possédant les propriétés physico-chimiques des alliages; ces amalgames, le plus souvent fragiles, apparaissent généralement comme des solides, sauf lorsque le mercure se trouve en proportion nettement prédominante, auquel cas ils sont liquides.

Certains sels de mercure trouvent des applications dans l'analyse chimique; ainsi, l'iodomercurate de potassium, utilisé comme réactif très sensible révèle la présence d'ammoniaque dans les eaux, et détermine si celles-ci sont potables ou non : des quantités même très faibles d'ammoniaque sont mises en évidence par une intense coloration jaune-orangé.

Enfin, le fulminate de mercure, obtenu à partir du nitrate mercurique que l'on fait réagir avec l'alcool éthylique (éthanol), possède la propriété d'exploser violemment sous l'action d'un choc et, de ce fait, sert comme explosif d'amorçage dans les détonateurs.

Autrefois, le mercure servait aussi dans la fabrication de miroirs, aujourd'hui très recherchés à cause de leur rareté; mais cette méthode est maintenant abandonnée au profit d'autres procédés moins dangereux, qui permettent d'obtenir des miroirs plus lumineux et au pouvoir réfléchissant supérieur. Les composés du mercure connaissent aussi des applications importantes dans l'industrie pharmaceutique, pour la préparation de désinfectants, de diurétiques et de fongicides. Le chlorure mercureux, Hg_2Cl_2, connu sous le nom de calomel, était jadis largement employé comme laxatif. Le chlorure mercurique, $HgCl_2$, est un désinfectant énergique, utilisé en pastilles ou en solution alcoolique très diluée; il est connu sous le nom de sublimé corrosif.

Un autre désinfectant, moins énergique, est le mercurochrome, composé organique du mercure. Certaines préparations mercurielles sont des diurétiques remarquables.

Quelques maladies de la peau sont traitées à l'aide de pommades contenant du mercure finement broyé, de l'oxyde mercurique, de l'oléate de mercure; l'emploi de dérivés mercuriels dans le traitement des maladies vénériennes est aujourd'hui largement dépassé, au profit de produits nouveaux dont l'efficacité est plus grande et les effets secondaires moindres.

Rappelons enfin les nombreuses et importantes utilisations du mercure dans les installations pour électrolyse, au premier rang desquelles il convient de citer, en raison de leur diffusion, les installations pour la production de la soude caustique et du chlore, qui utilisent comme cathode le mercure (par exemple dans les cellules électrolytiques « De Nora »).

Certaines piles sèches ont comme composants le zinc et le mercure, leurs oxydes et l'hydroxyde de potassium. Enfin, il existe deux systèmes de référence, largement utilisés en électrochimie, à base de mercure ou de l'un de ses composés.

La « pile Weston », constituée d'électrodes de cadmium et de mercure, de leurs sulfates respectifs et d'eau, engendre une force électromotrice constante et connue, ce qui en fait une « pile-étalon ».

Le deuxième est l'électrode au calomel, constituée de mercure et de calomel solide et d'une solution de chlorure de potassium de concentration rigoureusement définie. On l'utilise comme électrode de référence dans les mesures électrochimiques (par exemple dans les pH-mètres) à la place de l'électrode à hydrogène, beaucoup plus difficile à manier.

LES PIERRES DE CONSTRUCTION

Deux millions trois cent mille blocs de granite et de calcaire ont été nécessaires pour la construction de la pyramide de Chéops. Cent mille hommes y ont travaillé pendant 20 ans, traînant sur des plans inclinés d'énormes blocs de pierre, arrachés aux carrières de granite d'Assouan et aux flancs calcaires des montagnes de Mokattam. Cette masse de pierres occupe, sur une surface de 54 300 m², un volume de 521 000 m³. Aujourd'hui encore, la pyramide de Chéops est la plus grande construction en pierres du monde.

Quel exemple pourrait mieux illustrer l'importance de la pierre dans le domaine de la construction, dès la plus haute antiquité ?

L'histoire nous a d'ailleurs légué d'autres exemples d'utilisation des roches : les dolmens et les menhirs, en France et en Angleterre, formés par d'énormes pierres grossièrement travaillées ou utilisées à l'état brut ; les nuraghi de Sardaigne et les murs cyclopéens de la Grèce préhistorique, construits avec un sens très poussé de l'architecture, à l'aide de blocs superposés calés par de petites pierres tenant lieu de mortier ; les temples mégalithiques de l'île de Malte, qui témoignent déjà de l'utilisation du ciseau dans un but décoratif.

Plus tard, de nouveaux matériaux, plus nobles, furent utilisés par les Grecs, en particulier le marbre de Paros à la blancheur éclatante, qui servit à la construction du Parthénon, le grès et le calcaire, dans l'Italie méridionale, où le marbre était plus rare. De leur côté, les Romains utilisèrent le tuf, le travertin et la pierre volcanique qui, très résistante, servit à paver leurs célèbres routes.

Peu à peu, les techniques de travail de la pierre se perfectionnèrent et l'utilisation des pierres de construction s'affina. On en vint alors à distinguer différentes catégories de pierres, qui restent valables encore aujourd'hui : le ballast, utilisé pour la construction de murs et de jetées, pour l'empierrement des routes, la confection des voies ferrées, etc. ; les moellons, provenant de grès et de calcaires plus faciles à travailler, utilisés pour la construction de murs de façade ; les pierres de taille de tous types (calcaires, grès, granites, syénites, gneiss), servant pour des constructions diverses (habitation, ouvrages d'art et monuments) ; les pierres destinées au pavage des routes (grès et granites) ; les pierres ornementales, faciles à tailler et à polir.

La brique puis le ciment remplacèrent peu à peu la pierre dans la construction des structures porteuses des bâtiments, et leur emploi, plus aisé, est aujourd'hui généralisé. Mais la pierre, si elle sert toujours à l'empierrement des routes, demeure surtout le matériau noble par excellence qui pare les églises, les palais, les temples et les belles façades des bâtiments.

De nos jours on bâtit fort peu de maisons entièrement en pierres. Leur usage est principalement réservé à l'édification des fondations de maisons particulières, à la restauration de constructions anciennes et chaque fois que l'imposent des mesures destinées à la protection des sites.

L'utilisation de la pierre dans un but essentiellement décoratif se développa à partir de la Renaissance : les exigences devinrent de plus en plus raffinées et conduisirent à rechercher des matériaux toujours plus nobles,

Les pyramides d'Égypte (ci-dessous, la pyramide de Chéops, à Gizeh) nous offrent l'un des exemples les plus grandioses d'utilisation des pierres de construction.

C. Bevilacqua

comme la fameuse pierre de Florence (variété de marbre) des monuments toscans, le marbre de Carrare, les granites de l'Italie septentrionale, le travertin des carrières du Latium, ainsi qu'un grand nombre d'autres variétés de marbre, de calcaire et d'albâtre. Même la malachite a été utilisée comme pierre à bâtir, par exemple pour la cathédrale Saint-Isaak à Leningrad.

Il serait impossible d'énumérer tous les types de pierre de construction, car, pratiquement, toutes les roches ont été utilisées à cet effet.

QUALITÉS DES PIERRES DE CONSTRUCTION

Nous envisagerons plutôt les caractéristiques techniques des pierres de construction, c'est-à-dire les propriétés qui rendent une pierre plus ou moins adaptée à tel ou tel emploi. Les propriétés à considérer sont très nombreuses : masse volumique ; perméabilité à l'air et à l'eau ; dureté ; facilité de façonnage ; résistance à l'usure et aux agents chimiques ; élasticité ; compacité ; comportement vis-à-vis des variations de température et conductibilité thermique.

Pour les pierres ornementales, on tient compte de la facilité de polissage et de taille ; pour les pierres de maçonnerie, la plus ou moins grande adhérence des mortiers de chaux et de ciment mérite également attention.

La masse volumique de la pierre doit son importance au fait qu'elle intervient dans tous les calculs relatifs à la structure d'un bâtiment. Voici quel est le classement des pierres par ordre de poids croissant : les tufs (légers), les travertins, les calcaires tendres (de poids moyen), les calcaires compacts, les dolomies, les diorites et les syénites (denses), les basaltes, les serpentines, les amphibolites (très denses).

La perméabilité revêt aussi une certaine importance, car elle détermine la plus ou moins grande résistance d'une pierre à l'action des agents atmosphériques ; parmi les pierres perméables on trouve les grès tendres, la craie et certaines roches volcaniques, tandis que les grès homogènes, les calcaires durs, les roches endogènes (ou éruptives) massives telles que les granites et les basaltes sont peu perméables.

L'échelle de porosité croissante s'établit ainsi : granites et calcaires saccharoïdes (marbre de Carrare, par exemple), calcaires massifs, pierres de Florence, calcaires tendres et travertins, tufs, pierres ponces.

Plus une roche est perméable, plus elle est hygroscopique, c'est-à-dire plus elle absorbe d'eau, dont on connaît le rôle en tant qu'agent de dégradation. Mais les roches poreuses ont l'avantage d'être plus légères, ce qui montre que bien souvent les qualités des pierres peuvent paraître contradictoires.

Une autre propriété importante à considérer est la résistance des pierres aux conditions climatiques. Ainsi, l'albâtre ne peut être utilisé à l'extérieur des bâtiments, puisqu'il est dissous par l'eau. Les calcaires peuvent être attaqués par des eaux carbonatées ainsi que par l'acide sulfurique, souvent présent dans les eaux (et dans les fumées de combustion de nombreuses substances). La présence de pyrite dans les roches se révèle nuisible, puisque celles-ci se transforment peu à peu en limonite, provoquant la désagrégation de la pierre.

Les roches feldspathiques tendent à se transformer en argiles, plus ou moins lentement selon les climats. Les roches poreuses, qui absorbent de l'eau, résistent très mal sous les climats où se succèdent des phénomènes de gel et de dégel, puisque la glace, qui a un volume supérieur à celui de l'eau, tend à les désagréger (de telles pierres sont dites « gélives »).

LES PIERRES LES PLUS RÉSISTANTES

Pour les motifs que nous venons d'exposer, les roches qui présentent une texture compacte microcristalline, offrent la plus grande résistance ; les roches poreuses ou même schisteuses sont plus fragiles puisque les plans de schistosité constituent des points d'attaque pour les agents de désagrégation.

Le climat exerce une influence considérable sur la durée d'un matériau rocheux : le marbre de Carrare, par exemple, se révèle très résistant sous les climats chauds et secs, tandis qu'il s'altère rapidement en pays froids et humides, car, bien que compact, il peut être attaqué par les eaux carbonatées. La pierre de Florence résiste bien lorsqu'elle est exposée à l'ouest ou au sud-ouest, tandis que sa résistance est mauvaise sur les façades exposées au nord.

Les roches les plus résistantes aux agents atmosphériques sont les porphyres quartzifères, mais ceux-ci sont difficiles à travailler ; viennent, ensuite, les granites, les syénites, les calcaires et les travertins. Les grès ont une tenue variable suivant la nature du matériau cimentant les grains, les quartzites sont particulièrement solides.

La résistance aux agents chimiques est une autre propriété souvent exigée des roches utilisées dans la construction. Nous avons déjà vu que les calcaires sont facilement attaqués par les acides, même de force moyenne, tandis que les ardoises et certains schistes argileux (qui étaient utilisés dans l'industrie chimique), de même que les basaltes, résistent très bien aux acides forts.

La compacité est une qualité indispensable pour une pierre à bâtir destinée à supporter une certaine charge : une bonne pierre ne doit ni s'écraser facilement ni se déformer à la compression. A cet égard, les meilleures roches sont celles constituées de silicates, suivies par celles formées de carbonates.

Les grès, trop friables, sont exclus de certains emplois. Les roches à grain fin sont les plus compactes. Les roches présentant des strates de matériaux différents ne peuvent être utilisées qu'en les appareillant de telle sorte que la stratification soit perpendiculaire à la charge, faute de quoi il y aurait un risque sérieux de dislocation. Quant aux propriétés mécaniques, les roches, en raison de leur structure, sont généralement assez peu élastiques et résistent mal à la traction.

La dilatation à la chaleur et la conductibilité thermique sont des propriétés qu'il convient de prendre en considération ; les roches bonnes conductrices de la chaleur conviennent pour des travaux de maçonnerie à l'intérieur des bâtiments, car elles permettent un bon chauffage des locaux. Au contraire on utilise de préférence des matériaux ayant des qualités d'isolant thermique pour édifier les murs de façades. Il faut, de plus, éviter le risque de dilatation sous l'effet de la chaleur ; aussi, près des cheminées, utilise-t-on des roches réfractaires, que l'on emploie aussi pour le revêtement de certains fours.

Pour les pierres à bâtir, il est important de tenir compte aussi de l'adhérence qu'elles offrent aux liants habituels, c'est-à-dire aux mortiers de chaux et de ciment. L'adhérence est meilleure pour les matériaux poreux ; en revanche, l'adhérence est mauvaise lorsque la pierre est recouverte d'une patine argileuse, d'autant plus que l'argile est assez inerte au point de vue chimique. Les roches acides (qui contiennent de la silice) offrent une meilleure prise à la chaux (qui est basique) que les roches de nature alcaline, telles que les calcaires.

Une roche qui se délite en plaques présente un intérêt considérable comme matériau de revêtement ; ce caractère est dû soit à la stratification de la roche, soit à sa schistosité, soit encore à la présence de fissures.

Enfin, la facilité de façonnage et surtout de polissage est une qualité de première importance pour les roches décoratives ; à cet égard, une roche moins réputée, mais facile à polir, peut avoir plus de valeur qu'une autre, plus belle et plus appréciée, mais se prêtant mal au polissage.

L'une des caractéristiques les plus importantes des roches décoratives est la couleur ; il en est de monochromes (comme les marbres de Carrare et de Paros, complètement blancs) et de polychromes, comme la plupart des marbres, des calcaires, des granites, des serpentines. La polychromie est due à la présence d'impuretés ou au fait que la roche est constituée de minéraux variés. Certains de ceux-ci jouent un rôle particulièrement important dans la coloration des roches : la chlorite et l'olivine les colorent en vert, parfois assez intense, la biotite et la hornblende en noir.

Les couleurs peuvent passer avec le temps ; par exemple, certains marbres noirs peuvent devenir peu à peu grisâtres, des calcaires, auxquels des impuretés de fer donnent une coloration jaune ou rouge, peuvent de même perdre la vivacité de leur coloration initiale et, partant, leur valeur décorative.

LES MARBRES

Par opposition avec les autres pierres utilisées pour la construction qu'ils dénommaient lapis, *les Romains appelaient* marmora *tous les matériaux qui, faciles à tailler et à polir, étaient aptes à être utilisés dans un but ornemental. Aujourd'hui encore, on appelle très souvent « marbres » des roches qui n'ont aucun rapport, ni par leur composition, ni par leur mode de formation, avec le véritable marbre.*

Les marbres, au sens strict, sont des calcaires cristallins. Ce sont d'anciens calcaires sédimentaires, transformés sous l'action de la pression et d'une élévation de température (métamorphisme), qui ont recristallisé en perdant presque complètement leur structure sédimentaire originelle. Les marbres proprement dits ont une structure granulaire très fine, qui rappelle celle du sucre : c'est la structure dite « saccharoïde ».

Les fossiles sont très rares dans les marbres, et, lorsqu'ils existent, ils s'y présentent en mauvais état de conservation. Un marbre tout à fait pur doit être constitué uniquement de carbonate de calcium; à l'analyse chimique on trouve alors une teneur de 56 % en oxyde de calcium et de 44 % en anhydride carbonique. Mais en réalité, tous les marbres contiennent, en plus de la calcite, des composants accessoires, caractéristiques du sédiment originel ou du type de métamorphisme subi par celui-ci.

Les minéraux accessoires les plus fréquents sont le quartz, l'albite, le mica, le graphite, disséminés ou concentrés en lits (à la suite de phénomènes de dynamométamorphisme, c'est-à-dire dus à l'action de la pression). En revanche, les marbres issus du métamorphisme de contact ou de profondeur (il y a dans ce cas action de la chaleur et de la pression et possibilité d'apports chimiques) contiennent d'autres minéraux : ceux qui dérivent de la dolomite contiennent de la brucite, de la forstérite, du périclase et du diopside; en outre, on y trouve des pyroxènes, des amphiboles, des humites, des wernérites, des spinelles, de l'épidote.

Ces minéraux accessoires proviennent en grande partie de la transformation de sables, d'argiles, de matériaux organiques, etc., présents dans le calcaire d'origine; ils se trouvent emprisonnés dans le marbre au cours du métamorphisme. De nombreux minéraux peuvent se former sous l'action de la chaleur liée au métamorphisme qui entraîne l'élimination de l'anhydride carbonique. L'oxyde de calcium apparaît alors en excès et peut se recombiner avec la silice empruntée aux sables pour donner des silicates.

Les marbres exploités commercialement (la dénomination de « marbres » s'appliquant couramment à certains calcaires n'ayant subi aucun métamorphisme, comme des calcaires fossilifères) ont une densité d'environ 2,70 et résistent à une température supérieure à 1 000 °C (aussi les utilise-t-on pour des constructions destinées à résister aux incendies). Lorsqu'ils sont employés en atmosphère sèche, ils possèdent une durabilité remarquable, notamment à cause de leur faible porosité. Ils résistent moins bien en présence d'humidité et se laissent attaquer par les acides, même faibles; ils donnent alors lieu à un dégagement vigoureux d'anhydride carbonique; la mousse et les bulles de gaz qui s'échappent lors de cette réaction, par exemple sous l'action de l'acide chlorhydrique, permettent de distinguer facilement les calcaires des autres roches.

C. Bevilacqua

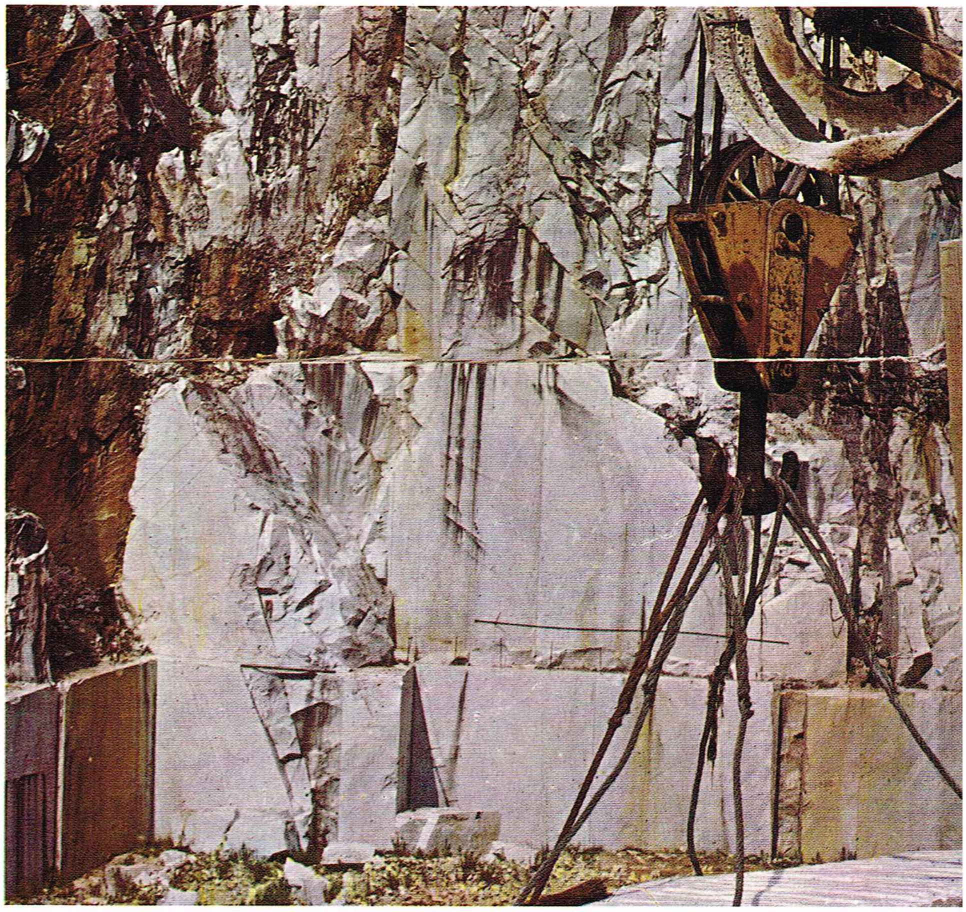

Carrière de marbre dans les environs de Massa (Toscane); c'est de cette région que proviennent les marbres les plus célèbres du monde.

LES CARRIÈRES ET LES DIFFÉRENTES VARIÉTÉS DE MARBRES

Les carrières de marbre sont très nombreuses tant en Europe que sur les autres continents. La France, la Belgique, l'Angleterre et l'Espagne en fournissent d'appréciables quantités. L'Uruguay exporte de nombreuses variétés de marbres colorés; on le trouve aussi en abondance en Inde, en Afrique, ainsi qu'aux U.S.A., notamment dans les monts Appalaches, et au Canada. Mais l'un des plus grands producteurs de marbre du monde, et cela depuis l'Antiquité, reste l'Italie; les marbres italiens sont parmi les plus employés et les plus appréciés, notamment ceux qui proviennent de la région de Carrare dans les Alpes Apuanes : les très nombreuses carrières de ce secteur fournissent depuis plus de vingt siècles un marbre de très grande qualité.

Le marbre « blanc », le plus répandu, est d'une couleur blanche tendant au gris bleuté, avec des veinures grises. Le marbre « statuaire », très blanc et facile à travailler, est largement employé dans la sculpture, mais résiste assez mal aux agents atmosphériques. La blancheur et l'homogénéité sont les principales qualités que doit présenter un marbre destiné à l'art statuaire; il ne faut pas que les blocs contiennent des noyaux plus durs, noyés dans la pâte de fond, ni d'autres inclusions.

Le « bardiglio » est un marbre veiné ou tacheté, de couleur nettement gris bleuté, due à des impuretés charbonneuses présentes dans le calcaire originel. Au contact des roches environnantes, les fentes de certains marbres ont été comblées par des solutions ferrifères, ce qui a

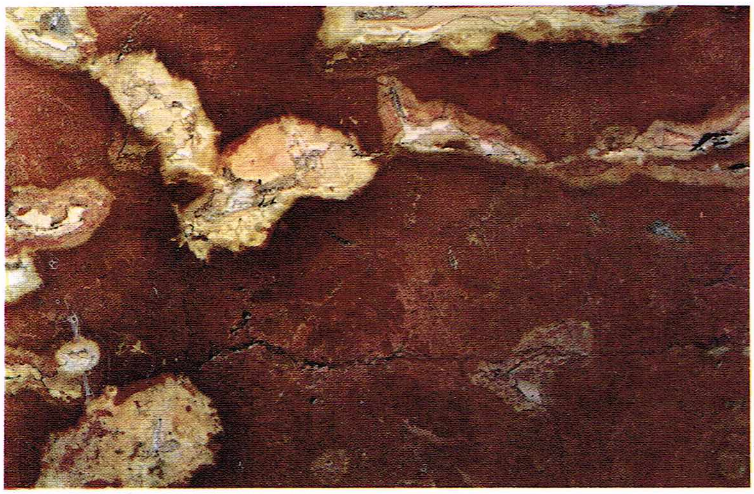

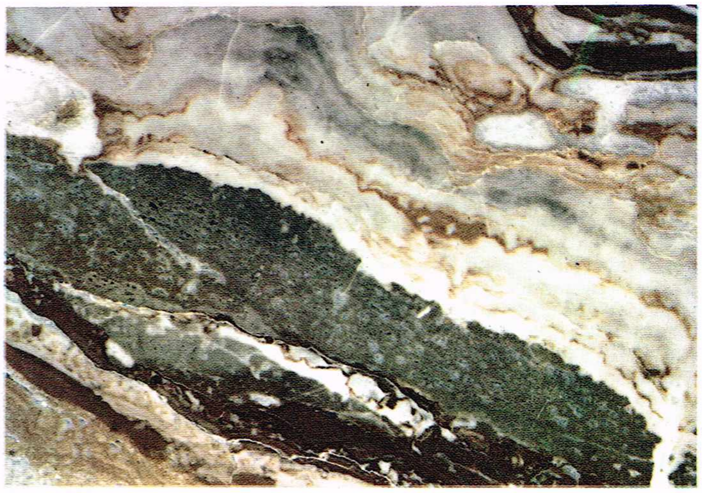

Quelques variétés de marbre. A gauche : marbre rouge de Vitrolles (France) [musée d'Histoire naturelle de Milan] ; à droite : marbre polychrome ramagé rouge.

donné naissance à des marbres bréchiformes, à des cipolins, et aux bardiglios fleuris ou tigrés, répandus surtout dans la plaine de la Versilia.

Les « bardiglios » varient beaucoup d'une carrière à l'autre, comme varient les dénominations qui les désignent ; les plus connus sont le « bardiglio commun » gris-bleu d'azur, le « bardiglio foncé », franchement gris-bleu, et le « bardiglio clair ». Le « bardiglio cappella » et le « bardiglio impérial », aux couleurs sombres, sont également réputés.

Le marbre statuaire offre aussi certaines variétés, parmi lesquelles le « piastriccia », qui présente des veinures verdâtres sur un fond blanc.

Le « paonazzo » est très élégant avec son fond jaune clair veiné de violet et de vert.

L' « arabescato », variété fort appréciée, a un fond clair et des taches de couleur gris cendré, tandis que le « fior di pesco » présente un fond blanc avec des veines rouge violacé.

Les « cipolins » offrent une grande variété de teintes et de dessins : ils proviennent de différentes localités des Alpes Apuanes ; il s'agit en général de pierres formées d'une pâte à fond blanc, jaune verdâtre, tendant parfois vers le cendré, avec des bigarrures verdâtres dues à la présence de chlorite.

Les Alpes Apuanes produisent aussi d'importantes quantités de brèches constituées d'éléments de marbre assez grands, cimentés par de la calcite non métamorphisée. Leur diversité est liée tant à la tonalité du marbre qu'à celle de la pâte qui est le plus souvent d'une teinte rouge ou brune, due à des impuretés de fer.

La richesse de l'Italie ne se limite pas aux très nombreux gisements de la région de Carrare et il est impossible de citer ici toutes les carrières de marbre et de pierres marbrières exploitées sur le reste du territoire.

EXTRACTION ET UTILISATIONS DES MARBRES

Depuis très longtemps, les marbres sont utilisés comme pierres de construction et de décoration : tels, les monuments grecs, faits de marbre, et en tout premier lieu, le Parthénon d'Athènes avec ses frontons sculptés. C'est le marbre éclatant de Paros qui a servi à son édification. Ce matériau était extrait dans l'une des îles de l'archipel grec. Ce marbre fut aussi très largement employé par les Romains, qui en furent les plus grands utilisateurs de l'Antiquité. En effet, en raison de l'immense étendue de leur empire, ils édifièrent leurs monuments en utilisant les matériaux les plus divers que l'on pouvait trouver sur place ; mais — c'est vrai notamment pour les monuments de Rome — ils employèrent très souvent, pour les décorer, du marbre qu'ils faisaient venir de très loin.

De nos jours, le marbre est encore très largement employé dans l'architecture et même dans la décoration intérieure d'appartements luxueux. Il se prête aux emplois les plus divers : revêtement de murs et de sols, habillage de baignoires, dessus de meubles, etc.

L'extraction des marbres se fait généralement à ciel ouvert ; les carrières souterraines sont rares et ne sont exploitées que lorsqu'elles recèlent des matériaux de grand prix, en raison du coût élevé de leur extraction. Lorsque les gisements se trouvent, comme c'est souvent le cas, sur des pentes très abruptes, il n'est possible de les exploiter qu'en les aménageant en gradins, en forme d'amphithéâtre. L'extraction du marbre se fait alors par gradins successifs. Le matériau est scié à l'aide d'un fil métallique hélicoïdal et on se sert d'explosifs pour dégager les blocs déjà sciés.

Le fil hélicoïdal est une tresse de fil métallique formant une boucle sans fin qui est entraînée par un jeu de poulies à la vitesse de 5 à 6 mètres/seconde. On l'amène à glisser, en lui faisant exercer une certaine pression, sur le matériau à couper. Un dispositif verse sur ce fil un mélange de sable et d'eau, coulant goutte après goutte. Le pouvoir abrasif du sable entraîné par le fil réalise la coupe proprement dite. Avec ce système, et grâce à un jeu savant de progression et d'abaissement des poulies, on peut pousser la coupe jusqu'à une profondeur de quelques dizaines de mètres.

Les blocs ainsi découpés et détachés doivent être transportés jusqu'aux lieux de finition et d'utilisation, souvent à travers des terrains malaisés ; jadis, on les faisait rouler, mais ce système endommageait beaucoup le matériau. Aujourd'hui, on utilise des sortes de traîneaux, mus généralement à la main ; dans quelques rares cas, il est possible d'employer des traîneaux mécaniques, des plans inclinés, des téléphériques et des voies ferrées spéciales, comme on en voit dans les environs de Carrare.

La finition, le sciage des blocs en plaques et toutes les autres opérations sont aujourd'hui presque totalement automatisés : ainsi, l'emploi de châssis multilames permet d'obtenir plusieurs plaques simultanément. Pour la finition, on emploie des fraises, des raboteuses et des lustreuses. Le personnel affecté à ces travaux est hautement spécialisé ; surtout dans la région des Alpes Apuanes, on rencontre encore fréquemment des tailleurs de pierre et des modeleurs, dont le métier, vieux de plusieurs siècles, demeure irremplaçable.

Les pertes au cours des différentes opérations d'extraction et de finition représentent environ la moitié de la production des carrières ; aussi, pour faire face au coût élevé du marbre, on s'efforce aujourd'hui de trouver de nouveaux débouchés aux divers déchets provenant des marbreries. Les fragments de marbre sont utilisés pour fabriquer des « pierres artificielles » ; la poudre est vendue comme abrasif et trouve aussi un emploi dans l'industrie des savons. Les fragments les plus petits sont utilisés comme ballast, ou dans la fabrication de dallages composites. Finement broyés, on les emploie, dans l'agriculture, pour le traitement du sol et dans l'industrie des poudres à blanchir.

Le marbre aujourd'hui n'a rien perdu de son ancienne importance ; bien au contraire, on constate une augmentation du nombre de carrières exploitées et une diversification des emplois de ce matériau.

TRAVERTINS ET TUFS

Ce sont des roches de composition et d'origine totalement différentes, mais qui connaissent des emplois communs. Dès l'Antiquité, ce furent les deux matériaux les plus utilisés dans la construction, en Italie centrale et méridionale ainsi qu'en Sicile : en effet, les murs de la Rome antique furent, à l'origine, construits en tuf, et de nombreux monuments de la Ville éternelle sont en travertin ou habillés de travertin. Tous deux se prêtent parfaitement à la coupe et au façonnage, et sont particulièrement abondants dans le Latium et en Campanie.

LE TRAVERTIN

Très répandue comme pierre de construction, cette roche est couramment utilisée pour le revêtement des sols et des murs.

Son nom dérive du latin lapis tiburtinus, *qui signifie « pierre de Tivoli » (c'est en effet près de cette localité que se trouvaient les principales carrières de travertin). C'est un calcaire d'origine chimique, provenant de la précipitation, en milieu continental, d'eaux riches en carbonates. Les travertins se sont formés par accroissement progressif de dépôts calcaires au voisinage des sources et des cascades ; le mouvement tourbillonnant des eaux, en ces lieux, favorise en effet l'élimination de l'anhydride carbonique dissous, ce qui provoque, en conséquence, la précipitation du carbonate de calcium ; ils se forment aussi sur le fond des bassins alimentés par des eaux calcarifères, toujours sous l'action d'un appauvrissement des eaux en anhydride carbonique, mais dû cette fois à l'activité biologique (photosynthèse des Algues vertes). Dans ce dernier cas, les dépôts se présentent en couches très régulières, ce qui permet d'y tailler sans difficultés, à l'aide du fil hélicoïdal, des blocs aux dimensions voulues.*

Le travertin possède une structure caractéristique dite « vacuolaire », car il présente de nombreuses cavités résultant de la disparition de la matière organique provenant de mousses et d'autres végétaux restés prisonniers du calcaire au cours de sa précipitation. De ce fait le travertin a une masse volumique relativement faible. Les vacuoles peuvent être très nombreuses, la pierre semble alors spongieuse (« pierre éponge ») ; mais il arrive aussi que les vacuoles soient presque totalement absentes, ce qui donne à la roche un aspect compact, laissant souvent apparaître des signes évidents de stratification. La couleur varie du blanc jaunâtre au blanc rougeâtre : elle dépend de la présence d'impuretés, notamment d'oxydes de fer.

En dépit de sa porosité, le travertin résiste très bien aux agents atmosphériques, et c'est à cela que l'on doit la conservation d'une grande partie des monuments romains.

Les carrières de travertin de Rapolano et de Serra di Rapolano (Sienne) sont très connues ; elles fournissent un matériau très peu stratifié, poreux, offrant une très bonne résistance mécanique ; il est en général presque blanc, mais on en connaît des variétés de teinte foncée (travertin ancien, travertin sombre et travertin veiné).

D'autres carrières, en Toscane (Chiusidino, près de Sienne), fournissent une variété jaune et une variété rosée ; on en trouve également dans la région de Pistoia.

Le travertin est également exploité dans les Marches et en Ombrie (province de Pesaro, de Pérouse et surtout de Terni), mais les principaux gisements sont toujours ceux du Latium, près de Tivoli. Ils ont produit (et continuent de produire) une grande partie des matériaux utilisés par les bâtisseurs romains. Cette roche se rencontre également en France où elle n'a cependant pas un développement comparable. Toutefois le travertin de Sézanne (Marne) est très renommé dans le milieu des paléobotanistes ; il a en effet fourni de remarquables empreintes de végétaux, d'âge oligocène.

C. Bevilacqua

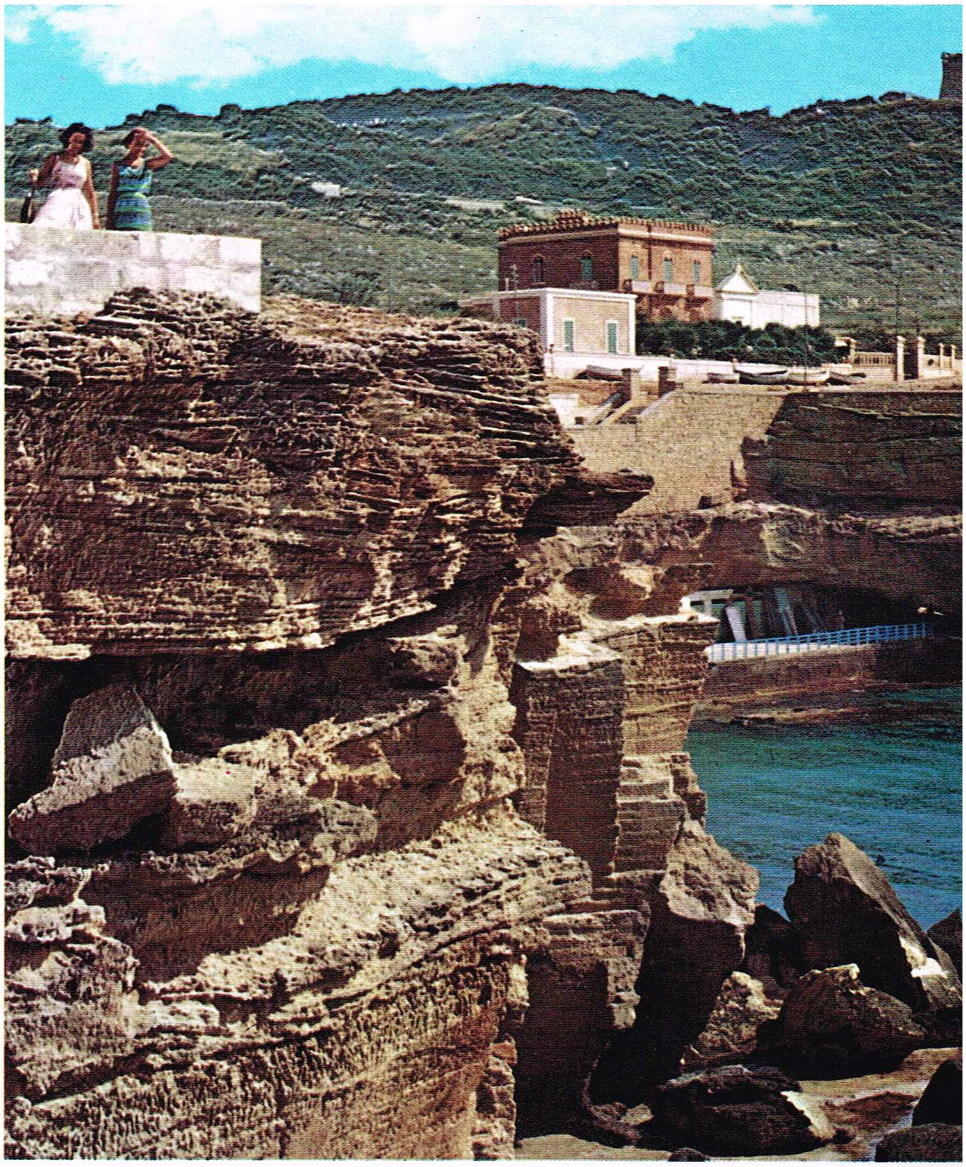

Anciennes carrières de tuf à Santa Cesarea Terme (Pouilles).

D'autres travertins se forment, en couches épaisses, dans le voisinage des geysers, ils peuvent aussi se déposer dans des fontaines pétrifiantes.

LES TUFS

Beaucoup plus divers par leur composition et leur origine, les tufs, quand ils ne sont pas calcaires, sont liés à des phénomènes volcaniques. Ce sont, alors, des roches pyroclastiques, c'est-à-dire des roches formées de débris projetés par les explosions volcaniques qui après s'être déposés à plus ou moins grande distance du lieu de l'éruption ont subi une cimentation. Ainsi, les dépôts volcaniques incohérents deviennent des roches plus ou moins compactes, formées de cristaux, de verres volca-

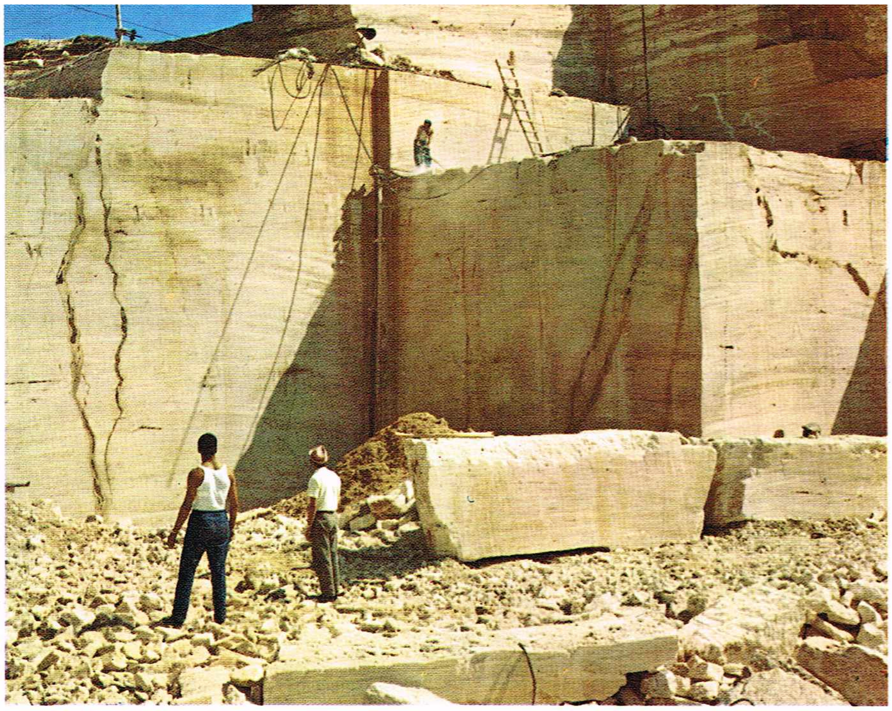

C. Bevilacqua

Ci-dessus : une carrière de travertin près d'Ascoli (Marches). On distingue parfaitement la stratification régulière de la roche.
Buste monumental en tuf volcanique à Ahu-Akivi dans l'île de Pâques (Pacifique méridional).

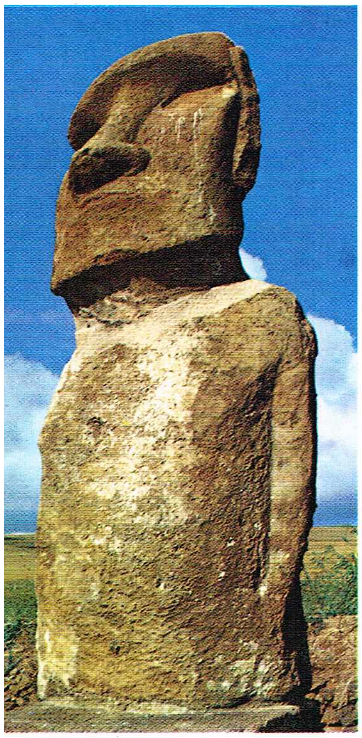

C. Bevilacqua

niques et de débris rocheux préexistants, contenant parfois des fossiles. On comprend donc aisément les raisons pour lesquelles les tufs ont une composition chimique et une structure très différentes selon les lieux et selon les types de lave dont ils sont issus. On adopte d'ailleurs à leur égard une classification fondée sur la nature du magma dont ils proviennent, et qui permet de distinguer les tufs rhyolitiques, les tufs andésitiques, les tufs trachytiques et les tufs basaltiques.

Ce sont des roches très hétérogènes, constituées de fragments de dimensions variables : les cinérites ou tufs cinéritiques sont formés de granules d'une taille inférieure à deux millimètres; lorsque les granules mesurent de 2 à 30 millimètres, on a les tufs proprement dits; au-delà de 30 millimètres, ce sont les tufs bréchiformes. Il existe, en outre, des cinérites, c'est-à-dire des dépôts de matériau volcanique (cendres fines) d'origine détritique, mêlés à des sédiments d'une autre origine, contenant souvent un grand nombre de coquillages marins. Enfin, les « ignimbrites » ou « tufs soudés », proviennent des « nuées ardentes » qui se forment parfois le long des flancs des volcans au moment des éruptions.

Un autre mode de classement des tufs se fonde sur leur teneur en verre volcanique ; le verre volcanique est un matériau non cristallin : né à très haute température, il a subi un refroidissement rapide au cours de l'éruption, empêchant la cristallisation de ses constituants. Les verres volcaniques, divisés en acides et basiques, ont une composition très diverse. En fonction de la quantité de verre par rapport au matériel cristallin qu'ils contiennent, les tufs sont donc classés en quatre groupes : tufs vitreux, contenant plus de 75 % de verre; tufs vitro-cristallins, de 50 à 75 %; tufs cristallino-vitreux, de 25 à 50 %; et tufs cristallins, lorsque la teneur en verre est inférieure à 25 %.

Les tufs présentent souvent une nette stratification; mais ils diffèrent des dépôts de sédiments détritiques car leur stratification provient d'éruptions successives et non d'une action de classement opérée par les agents de transport : aucun classement n'est décelable dans les tufs. Le seul type de différenciation que l'on puisse rencontrer est lié au fait que ce sont les matériaux les plus grossiers donc les plus lourds qui tombent le plus près du conduit volcanique ayant émis des projections, les autres débris s'étageant sur une distance de plus en plus grande au fur et à mesure que leur masse diminue.

En outre, le vent transporte sur une plus grande distance les fragments vitreux, poreux, et laisse retomber plus vite les cristaux les plus denses; cependant des changements dans la direction des vents peuvent créer d'importantes exceptions à cette règle.

Enfin, les tufs englobent des fragments plus gros, provenant de bombes volcaniques, et, souvent, des fossiles, dont l'importance est loin d'être négligeable; en effet, ces fossiles, dérivés de fragments animaux et végétaux emprisonnés lors de la retombée du matériau volcanique, permettent de dater avec une remarquable précision les éruptions qui ont donné naissance aux tufs.

La structure caractéristique des tufs est la structure « cinéritique » ou « vitro-clastique ». Elle est déterminée par la fraction vitreuse, qui apparaît subdivisée en fragments allongés ou incurvés, parfois striés longitudinalement. Le verre volcanique basique est isotrope et incolore, le verre acide a une coloration variant du jaune pâle au brun. Les cristaux sont idiomorphes (de forme polyédrique naturelle) et l'on suppose qu'ils étaient déjà formés dans le magma, au moment de l'éruption. Par suite du violent refroidissement et des chocs subis, ils apparaissent fracturés, broyés, et souvent sur leur surface adhère une substance vitreuse. Les fragments de roche, moins fréquents que le verre et les cristaux, dérivent surtout de roches éruptives acides ou métamorphiques arrachées, durant l'éruption, aux parois et au fond du conduit volcanique.

Très souvent, les tufs apparaissent métamorphosés; ceci est dû à leur porosité, donc à leur facilité d'absorber l'eau et les solutions, mais aussi, et surtout, à la nature, souvent instable, tant du verre volcanique que des cristaux présents dans la roche; il s'agit, en effet, de composés formés à très haute température et soumis ensuite à un brusque refroidissement, les figeant dans des conditions physico-chimiques particulières. Un refroidissement lent aurait permis à ces substances de s'adapter progressivement aux conditions extérieures; ceci n'ayant pas eu lieu, on peut observer que de nombreuses substances constituant ces roches ne sont pas stables à froid et tendent à se transformer dès que possible : ainsi l'altération des tufs s'accompagne souvent de la « dévitrification » des verres volcaniques.

Les tufs riches en feldspaths se transforment assez facilement en substances argileuses : ce phénomène s'accompagne d'un dépôt, dans leurs cavités, de silice hydratée, sous forme de calcédoine ou d'opale. Parfois, les tufs peuvent subir un processus de silicification plus profond et devenir compacts et semblables aux rhyolites ou aux jaspes.

Les tufs vitreux, acides ou basiques, sont caractérisés par la présence de très petits fragments de verre à arêtes coupantes, cimentés par un matériau vitreux. Très répandus, ils dérivent surtout du matériau volcanique qui obstruait la cheminée avant l'éruption : aussi les fragments ont-ils des formes et des dimensions irrégulières. Les verres basiques et les roches qui en dérivent sont très répandus, notamment dans les volcans des îles Hawaii; l'écume des magmas basaltiques forme un verre particulièrement poreux, connu sous le nom de « réticulite ». Les tufs palagonitiques sont également remarquables par leur abondance en verres basiques (la « palagonite » provient de l'hydratation du verre basaltique primitif, appelé sidéromélane, qui est noir, brun foncé ou vert olive; le nom de palagonite dérive de Palagonia, localité de Sicile) : ces tufs ont généralement une agréable couleur jaune or.

Les tufs cristallins sont formés essentiellement de lapilli cristallins, c'est-à-dire de cristaux qui, déjà présents dans le magma, ont été projetés au loin lors de l'éruption; effectivement, certains lapilli sont des cristaux parfaitement reconnaissables d'augite, d'olivine, ou de leucite (tufs de Vésuve), rompus ou fracturés de différentes manières.

En Italie, les tufs sont très répandus, notamment dans les régions du Centre et du Sud, où les volcans, parmi lesquels certains sont encore en activité, sont nombreux.

En France, on rencontre en abondance des « pépérites » d'âge oligocène; elles sont formées de granules de verre, dispersés dans un ciment calcaire. Elles ont pris naissance lorsque des laves encore en fusion sont arrivées au contact de boues calcaires sur les fonds de certains lacs.

En ce qui concerne les utilisations des tufs, on sait que, du fait de leur altérabilité, seuls les plus compacts et les plus résistants sont utilisés dans la construction. Bien que peu résistants, ils offrent certains avantages, comme celui de se laisser couper facilement. Ils conviennent tout spécialement pour la construction d'habitations dans les climats chauds, car ils conservent la chaleur en hiver et assurent une agréable fraîcheur l'été.

LES GRANITES

Roches d'origine profonde, riches en silice, les granites sont très abondants dans la croûte terrestre, où on les trouve en masses de très grandes dimensions, formant parfois de véritables massifs montagneux. Leurs caractéristiques minéralogiques et leur composition chimique varient peu, même lorsqu'il s'agit de granites provenant de régions fort éloignées les unes des autres. Matériaux de construction et de décoration remarquables, très abondants et d'un prix abordable, les granites offrent un grand intérêt.

D'origine italienne, le mot « granite » n'était pas employé par les Romains, qui appelaient « syénites » les roches granitiques égyptiennes, utilisées dès l'époque des pharaons. Ce mot d'ailleurs évoque l'aspect grenu de ces roches, qui, en effet, sont constituées de grains de minéraux de couleurs variées. Le langage courant comme le langage commercial, négligeant délibérément la composition chimique des roches d'aspect grenu, appellent granites toutes les roches d'origine profonde (souvent, d'ailleurs, les gabbros, les diabases et les anorthites sont appelés « granites noirs »). Toutefois, la plupart du temps les matériaux vendus sous ce nom sont de véritables granites.

STRUCTURE ET COMPOSITION DES GRANITES

Les granites sont constitués essentiellement de feldspaths (potassiques, sodipotassiques ou calcosodiques), de quartz, de quelques minéraux ferromagnésiens (micas, amphiboles, etc.) et d'un certain nombre de minéraux accessoires. On les classe en granites alcalins, lorsqu'ils contiennent uniquement des feldspaths alcalins (c'est-à-dire potassiques tels que le microcline ou sodiques tels que l'albite), et en granites calco-alcalins ou normaux lorsqu'ils contiennent aussi des plagioclases calcosodiques (oligoclase par exemple). Les granites normaux sont à leur tour subdivisés en plusieurs catégories.

Les granites sont généralement blancs ou tachés de gris sur fond blanc ; quelques-uns présentent une coloration rose ou rouge-brun, avec de petites taches noires, la coloration rose étant souvent due à la présence d'orthose teintée par de l'hématite. Les granites les plus répandus sont de teinte claire, la granulation étant très variable d'un type à l'autre. Du point de vue de la structure on distingue : la structure grenue normale où les différents grains minéraux ont sensiblement la même dimension (3 à 5 mm environ) ; la structure microgrenue avec des grains plus petits, si fins qu'ils sont parfois microscopiques ; la structure pegmatitique où les différents cristaux sont très développés (plusieurs dizaines de centimètres). Enfin, les granites présentent très souvent une structure porphyrique, dans laquelle les cristaux de feldspaths potassiques bien formés, ayant une taille de l'ordre de quelques centimètres, sont noyés dans une pâte de fond à grains beaucoup plus fins : un exemple particulier de cette structure est le granite de Port-d'Or dans les Pyrénées, qui présente des cristaux idiomorphes pouvant atteindre trente centimètres de longueur.

Une structure très remarquable bien que peu fréquente est celle du type « rapakivi » (du nom de la roche scandinave dans laquelle elle fut observée) : elle est caractérisée par la présence de gros cristaux de feldspaths de forme ovoïde présentant des zones concentriques roses au centre et pâles à la périphérie.

En ce qui concerne la composition chimique, les composants essentiels des granites sont le quartz, les feldspaths potassiques et les plagioclases, les micas, c'est-à-dire la biotite et la muscovite, plus rarement les amphiboles et les pyroxènes. Parmi les minéraux accessoires le plus

C. Bevilacqua

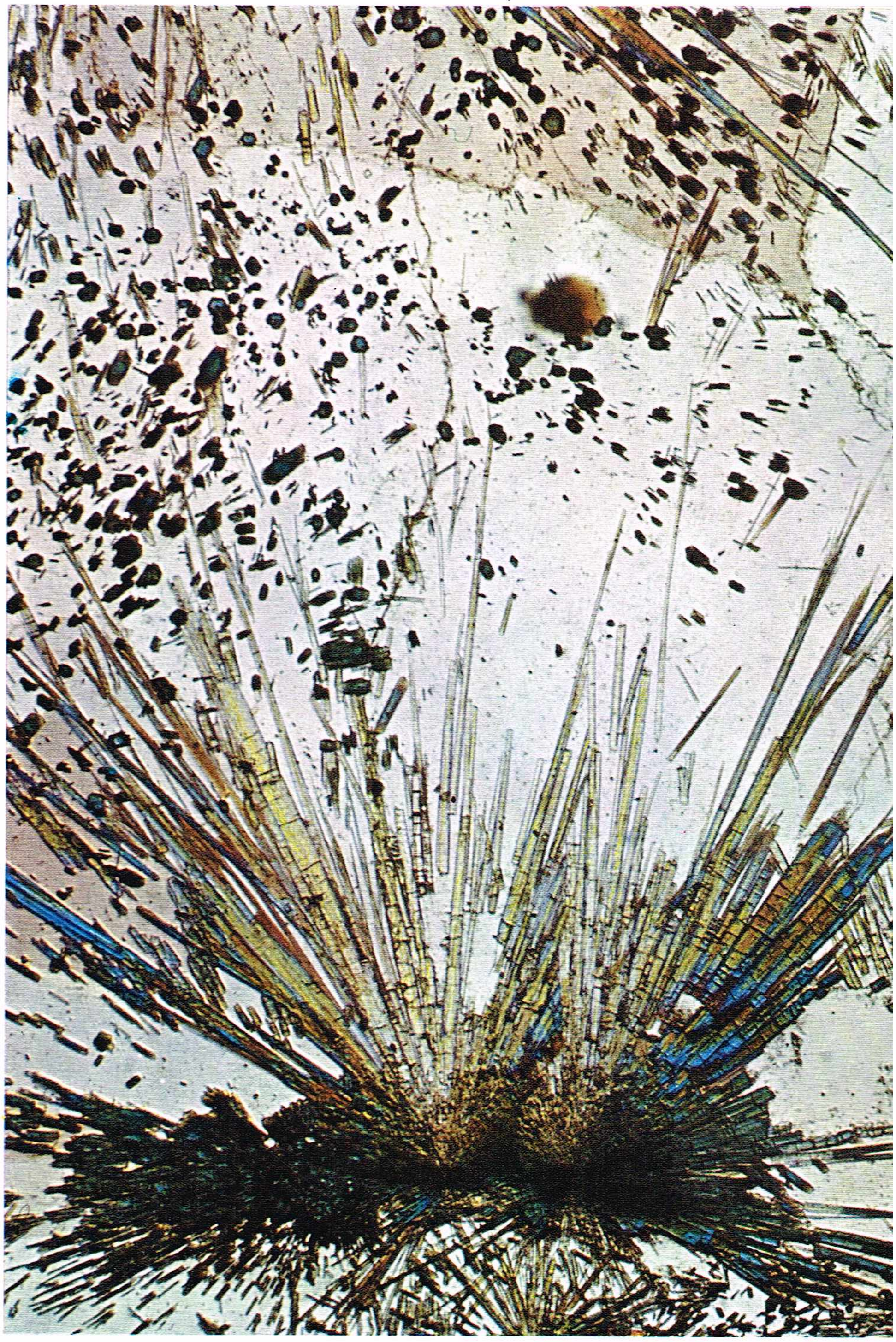

Une variété particulière de granite, la luxulyanite (Luxulyan, Cornouailles) ; dans cette lame mince, photographiée au microscope polarisant (18 × 5), on distingue les groupements très caractéristiques de cristaux rayonnants (musée d'Histoire naturelle de Milan).

souvent rencontrés citons la magnétite, le zircon, l'apatite et, moins fréquemment, la pyrite, la titanite, l'ilménite, des granules de tourmaline et certains minéraux d'origine pneumatolytique (c'est-à-dire des minéraux formés durant la phase ultime de la cristallisation du magma ; ils sont riches en éléments volatils, tel est le cas de la topaze et de l'apatite). On constate souvent la présence de certains minéraux secondaires, comme la zoïsite, la clinozoïsite et la chlorite.

Les granites affectent dans la croûte terrestre pratiquement toutes les formes sous lesquelles peut se présenter un corps rocheux d'origine profonde. La forme la plus fréquente est le batholite : on qualifie ainsi une masse en forme de dôme recoupant comme à l'emporte-pièce les roches encaissantes ; elle est enracinée en profondeur. Parmi les formes injectées, les filons-couches, les dykes, les apophyses et les laccolites sont très fréquents.

L'origine des granites fut l'un des problèmes les plus discutés de la pétrographie : de nombreuses hypothèses furent émises à ce sujet. Des tentatives de synthèse, couronnées de succès, permettent de penser aujourd'hui que dans de nombreux cas le granite est le terme ultime auquel aboutissent les sédiments argileux lorsqu'ils sont soumis à un métamorphisme très intense. Les opinions relatives à leur âge ont également évolué avec les progrès de la connaissance.

En effet, après avoir longtemps cru que les granites étaient les roches les plus anciennes du globe, on s'est aperçu qu'ils s'étaient formés à diverses périodes durant les temps géologiques, et que leur formation coïncidait avec les principales orogenèses (périodes d'édification des chaînes de montagnes). Cependant, les granites précambriens sont les plus nombreux et, d'après certains auteurs, représentent les neuf dixièmes des granites présents sur le globe.

PRINCIPAUX TYPES DE GRANITES

Les granites de la série normale, ou calco-alcalins, sont subdivisés en : granites hololeucocrates, *composés uniquement de quartz et de feldspaths ;* granites à biotite, *très communs, ils sont roses ou bleuâtres ;* granites à muscovite, *fortement alumineux ;* granites à deux micas, *très répandus dans la nature. De plus on connaît des* granites à hornblende, *des* granites à diopside et à augite, *des* granites à hypersthène.

Les granites normaux sont les granites les plus répandus ; parmi ceux-ci, les granites à un seul mica dominent nettement : le plus connu en Italie est celui de Baveno (lac Majeur), formé d'orthose rose, d'oligoclase blanc, de quartz incolore et de biotite noire qui donne à la roche une teinte gris rosé d'un effet très agréable et recherché. On l'extrait des flancs du mont Camoscio devenu célèbre par la découverte, dans ses grottes, de nombreux minéraux bien cristallisés, présentant un remarquable intérêt scientifique.

Parmi les granites connus, le granite rose d'Assouan était déjà employé dans l'Antiquité par les Égyptiens ; il existe encore une ancienne carrière, où l'on peut voir un obélisque presque complètement détaché du reste de la roche, mais abandonné par suite d'une fracture. C'est de l'ancien nom de la ville d'Assouan, alors appelée Syène, que dérive le terme de syénite, utilisé dans l'Antiquité pour désigner le granite. Le granite fut aussi utilisé dans la construction des pyramides, en blocs de très grandes dimensions, magnifiquement équarris ; les Romains en firent aussi un large usage.

On trouve de nombreuses roches granitiques en Europe : en Forêt-Noire, dans les Vosges, dans les Fichtelgebirge, en Écosse et en Scandinavie, d'où provient le « granite rouge de Suède ».

Les granites composés de deux micas sont moins abondants que les précédents : certaines variétés comme le granite de San Fedelino (composé de grains blancs et gris, assez foncé), près de Novate Mezzola en Lombardie, sont largement employées pour le pavage des routes.

On rencontre aussi en Bretagne un granite renfermant des cristaux microscopiques de cordiérite ; c'est le granite d'Huelgoat. Ce même minéral constituant des nodules apparaît dans le granite des Cévennes.

Les granites amphiboliques sont plus rares ; ils constituent une phase de transition vers les diorites ; c'est à ce type que se rattache la variété rapakivi.

Les granites pyroxéniques sont très rares ; on en connaît des affleurements en Russie (dans l'Oural), dans les Vosges et dans le Harz. Des granites contenant de l'hypersthène existent en Norvège et près de Madras, en Inde.

Bien qu'ils soient moins répandus que les granites normaux, on trouve des granites alcalins, en quantités considérables, dans le massif du Pelvoux (Dauphiné) et en Corse. Ils sont également abondants dans le sud de la Norvège, en Afrique septentrionale et orientale, à Madagascar et dans certains États des U.S.A.

Un granite particulier est la luxulyanite, provenant de Cornouailles ; il est très riche en tourmaline, associé à la cassitérite, à la topaze et à la wolframite, minéraux qui sont tous d'origine pneumatolytique.

Il convient de mentionner aussi le greisen, que l'on trouve dans l'Erzgebirge de Saxe-Bohême, et qui est formé presque exclusivement de quartz et de mica, tandis que le feldspath, qui s'y trouvait à l'origine, a subi des actions pneumatolytiques qui l'ont transformé en muscovite et en mica fluoré ; ce dernier aussi contient de la topaze, de la wolframite, de la cassitérite, de la tourmaline, de la fluorite, de l'apatite et du rutile, tous d'origine pneumatolytique.

UTILISATIONS DU GRANITE

Les multiples avantages qu'ils présentent : compacité, résistance aux agents atmosphériques, faible perméabilité à l'eau, très grande longévité, auxquels s'ajoute la beauté des diverses variétés, font que les granites sont extraits et utilisés depuis des temps très anciens tant pour la construction et le pavage, que pour la décoration, puisqu'ils se laissent facilement couper en plaques et polir.

D'ailleurs l'existence en de nombreux endroits de très grosses masses de granite permet l'extraction de blocs immenses, susceptibles de satisfaire à toutes les exigences architecturales.

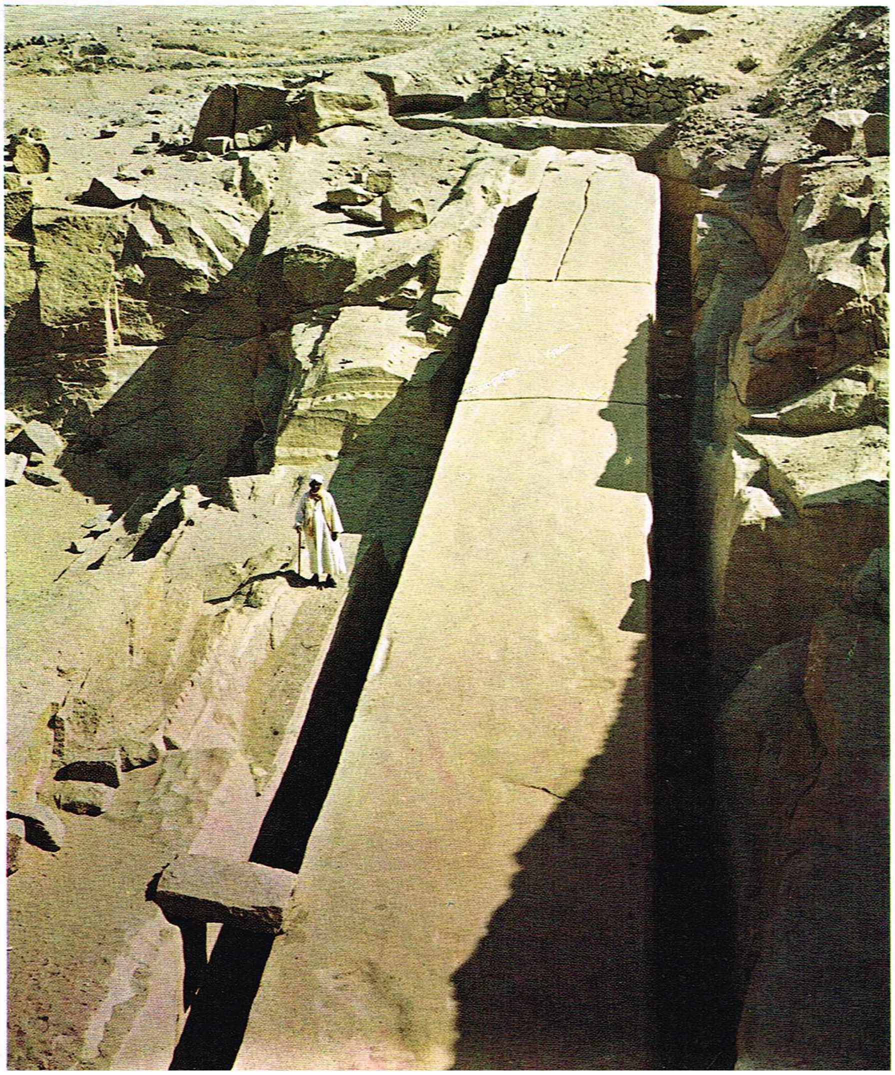

C. Bevilacqua

Obélisque taillé dans les carrières de granite d'Assouan (Égypte) ; ce grand monolithe est resté inachevé à cause de la présence d'une fracture.

LES CALCAIRES FOSSILIFÈRES

Parmi les nombreuses roches calcaires présentes dans la croûte terrestre, une place très importante est occupée par les calcaires fossilifères ou « organogènes », formés sous l'action d'êtres vivants ou par suite de l'accumulation d'organismes animaux et végétaux. De tels calcaires se forment encore de nos jours, surtout dans les mers tropicales, où prospèrent des colonies de coraux de dimensions considérables. Dans le langage courant et commercial, on les désigne aussi sous le nom de marbres.

Les organismes vivants jouent un rôle de tout premier plan dans la formation de ces roches : par leur présence, ils provoquent la précipitation de différents sels dissous dans l'eau — carbonates de calcium et de magnésium, sulfate et phosphate de calcium — sels qu'ils fixent dans leurs carapaces ou leurs coquilles. Dans les mers chaudes, ces phénomènes sont encore plus actifs ; à cause de la température, ces eaux sont appauvries en carbonate de calcium et plus riches en sulfate de calcium.

Les organismes responsables de la fixation du carbonate de calcium sont, par ordre d'importance : les algues calcaires, les Foraminifères, certains Mollusques, les Coraux, les Échinodermes, les Éponges, les Crustacés, les Annélides et les Bryozoaires.

Quant à la précipitation du carbonate de calcium, elle est souvent imputable aux nombreuses algues vertes, qui, en absorbant au cours de leurs processus vitaux le dioxyde de carbone dissous dans les eaux, provoquent une diminution de la solubilité du carbonate de calcium. Le carbonate de magnésium, plus soluble que le précédent, ne précipite qu'en faibles quantités.

On peut diviser les calcaires d'origine organogène en plusieurs groupes, en fonction des conditions de formation et des processus subis ultérieurement.

CALCAIRES RÉCIFAUX

Ils proviennent directement de l'activité d'organismes, tels que les coraux, qui vivent en colonie et sécrètent des édifices tenant lieu tout à la fois de squelette et d'habitat. Il s'agit, en général, d'ouvrages formés à la base d'un « noyau » d'une autre roche, sur lequel les organismes marins se sont fixés ; cette roche est constituée de différentes couches de matériau poreux et stratifié, provenant en partie de la démolition, sous l'action des eaux, de sa propre masse.

Les calcaires récifaux sont donc caractérisés par un échafaudage de squelettes calcaires, dont les vides ont été remplis par de la calcite fibreuse ou concrétionnée, au sein de laquelle on trouve souvent des fossiles isolés. Un exemple imposant de récifs est celui de la Grande Barrière corallienne au large des côtes australiennes.

Les calcaires récifaux, poreux à l'origine, peuvent le devenir davantage par suite de la dissolution d'une partie des squelettes (formés d'aragonite) sous l'action de la turbulence des eaux. En raison de cette structure poreuse, mais aussi de la grande quantité de matière organique qu'ils ont contenue, ces calcaires constituent un terrain favorable à l'accumulation d'hydrocarbures, d'asphaltes, de bitumes, etc. Ils sont utilisés comme pierres ornementales, dénommées « pierres coralliennes » ou « pierres étoilées », car elles se présentent avec un fond clair portant des taches jaunes en forme d'étoiles, dues aux anciennes colonies coralliennes.

C. Bevilacqua

Parmi les calcaires fossilifères, un intérêt scientifique considérable s'attache aux calcaires qui présentent des empreintes complètes de grandes dimensions, très appréciés pour leur valeur décorative (musée d'Histoire naturelle de Milan).

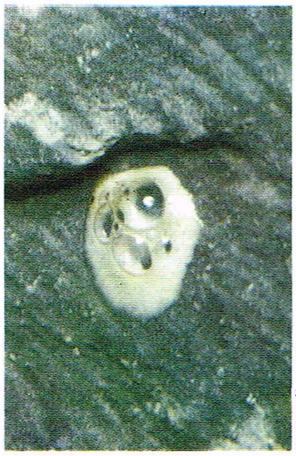

C. Bevilacqua

CALCAIRES DE BIOSTROME OU LUMACHELLE

On appelle biostromes des roches calcaires, plus ou moins dolomitisées, qui se distinguent des précédentes par des squelettes d'organismes non organisés en colonies (bien qu'il s'agisse le plus souvent d'organismes sédentaires), et par leur structure en strates superposées. La stratification est généralement peu marquée, en raison de la porosité de la roche et de la présence de vides clastiques.

Les calcaires de biostrome présentent des types très variables tant par leurs structures que par la diversité des organismes qui ont contribué à leur formation et que l'on retrouve à l'état fossile.

Un premier type est caractérisé par l'abondance de coquilles de Mollusques ; à cause de cela, on l'appelle calcaire « coquillier » ou « lumachelle ». Il s'agit souvent de Mollusques assez gros (des huîtres par exemple), cimentés par des fragments plus petits de coquilles calcaires. Ce type de roche est généralement dur, bien que poreux. Une variété très grossière que l'on trouve en Provence est la roche « à Rudistes », c'est-à-dire formée des restes de grands Lamellibranches qui proliférèrent au Crétacé ; cette roche est parfois considérée comme un calcaire de bioherme.

D'autres calcaires sont assez répandus, tels les calcaires à Ammonites et à Trilobites et les calcaires à encrines, dont le grain est très grossier, puisque les plaques de Crinoïdes (de l'embranchement des Échinodermes), assez épaisses, ne laissent que peu de place pour les sédimentations plus fines.

LES CALCAIRES PÉLAGIQUES

Ces calcaires sont eux aussi constitués de squelettes fossiles (partiellement redissous dans les eaux) d'organismes marins, comme les Foraminifères, les algues planctoniques et les Céphalopodes. Ils comprennent essentiellement des fossiles de petite taille. Ils ne sont pas très répandus et sont caractéristiques des mers profondes.

AUTRES CALCAIRES FOSSILIFÈRES

La craie est un calcaire blanc ou jaunâtre, souvent farineux, au grain fin et uniforme, entrecoupé de fossiles. Elle n'a pas subi de modification sous l'action des eaux, puisqu'elle a précipité sous forme de calcite et non d'aragonite, plus soluble. La craie est composée d'une fraction organogène constituée de plaquettes microscopiques qui formaient le test (carapace) de petits organismes ayant proliféré dans les mers crétacées (il s'agit de coccolithophoridés) ; ces éléments constituent la quasi-totalité de la roche ; il s'y ajoute des spicules d'éponges siliceuses, des rognons de silex et des minéraux détritiques.

C'est une roche très répandue dans le Bassin parisien (Champagne) et dans les îles Britanniques ; elle est utilisée industriellement pour le nettoyage des métaux et du verre « blanc d'Espagne » et pour la fabrication de petits bâtonnets utilisés par les écoliers.

Les calcaires sapropéliques et carbonés sont imprégnés de matériaux organiques divers (connus sous le nom de sapropèle), qui se sont déposés sur les fonds des lacs et des mers intérieures, aux eaux peu turbulentes. Ils contiennent souvent des traces de fossiles divers et présentent une coloration noirâtre (pâlissant à l'air) sur les surfaces fraîchement cassées.

Les calcaires carbonés, noirs, pulvérulents, rappellent les précédents, mais contiennent aussi de la pyrite, ce minéral étant caractéristique des milieux sédimentaires réducteurs.

Les calcaires bitumineux, habituellement noirâtres, sont riches en hydrocarbures denses, provenant probablement de la dégradation de matériaux organiques. Sous l'effet d'un choc, ils dégagent une odeur désagréable.

L'imprégnation est parfois particulièrement forte ; on trouve ainsi en divers lieux des gisements de calcaires bitumineux d'une certaine importance, du point de vue industriel, puisqu'on peut en tirer par distillation des hydrocarbures.

Les calcaires lacustres sont des roches assez peu répandues ; pauvres en argile et en matériaux clastiques (c'est-à-dire provenant des débris de roches préexistantes), ils contiennent un petit nombre d'organismes : algues, Gastéropodes et Ostracodes. Souvent, on y trouve des algues entières fossilisées, ayant échappé à l'action de démolition due au transport par les eaux. Les calcaires lacustres à Ostracodes présentent un certain développement, leur structure est variable, puisque les modes de fossilisation de ces organismes ont été nombreux. Il existe enfin quelques calcaires lacustres dont la structure est très fine, ils proviennent probablement de la précipitation physico-chimique du carbonate de calcium.

Un autre type de calcaire apparaît comme un terme de transition entre les roches d'origine chimique ou biochimique et celles d'origine détritique. Il s'agit de sédiments constitués de matériaux provenant de la démolition de roches préexistantes dont les fragments ont été mélangés avec du calcaire résultant de la précipitation du carbonate de calcium, dissous dans les eaux marines, qui forme un ciment ; ces calcaires contiennent aussi des fossiles. Nous en rappellerons les principales subdivisions, fondées sur les dimensions des fragments calcaires. Les calcaires bréchiques sont des roches détritiques, formées à plus de 50 % de fragments d'un diamètre supérieur à 2 mm. Il existe ainsi des calcaires bréchiques d'origine organique, appelés « coquines » : ils proviennent de la démolition de récifs formés de coraux et d'algues et soumis à un transport plus ou moins long. La « coquine » est utilisée, notamment en Amérique centrale, comme pierre de construction, lorsque les fragments sont bien cimentés et la roche compacte.

Les calcarenites sont constituées, pour au moins 50 % de leur masse, de fragments d'un diamètre compris entre 1/10 de mm et 2 mm ; ils sont essentiellement formés de sables calcaires. Les calcarénites provenant de calcaires organogènes sont appelées « biocalcarénites » ; les plus importantes sont les calcarénites oolithiques, caractéristiques des mers chaudes, peu profondes et peu agitées. Toutes les calcarénites sont associées à des grès quartzeux. Les calcaires microgranuleux ont un grain très fin : ils résultent de la consolidation de boues calcaires, d'origine, pense-t-on, bactérienne, ou provenant de la démolition de fossiles de plus grandes dimensions. Une variété très connue est le calcaire lithographique de Solenhofen (Bavière), de couleur gris jaunâtre, utilisé encore aujourd'hui pour les estampes lithographiques de qualité.

Ainsi les calcaires fossilifères peuvent servir de pierres de construction car ils se laissent tailler et polir aisément. Ils sont, en outre, très utilisés dans les cimenteries. Ils sont enfin très recherchés en décoration pour leurs couleurs belles et variées et leurs motifs rendus originaux par les restes fossiles.

C. Bevilacqua

Les calcaires sont facilement attaqués par les acides, notamment par l'acide chlorhydrique, donnant lieu à un phénomène d'effervescence, caractérisé par la formation de petites bulles d'anhydride carbonique, comme on le voit sur le calcaire saccharoïde (photo du haut). Ci-contre : un bel exemple de calcaire portant des empreintes fossiles de coquilles (musée d'Histoire naturelle de Milan).

LA CHAUX ET LE GYPSE

La chaux (produite par calcination du calcaire) et le plâtre (obtenu par chauffage modéré du gypse) sont des matériaux très importants dans l'industrie du bâtiment; aussi sont-ils produits en très grande quantité. L'une et l'autre de ces substances sont des composés du calcium.

Très répandu dans la nature, le calcium se trouve essentiellement sous forme de silicates; mais il peut aussi se présenter sous forme de sulfates plus ou moins hydratés, ou donner lieu à la formation de grandes masses de roche calcaire, qui constituent parfois de véritables chaînes montagneuses. Les Dolomites, qui sont formées de carbonates de calcium et de magnésium, ainsi que les Alpes Apuanes, où on trouve de grandes quantités de carbonates de calcium pratiquement purs et microcristallins, en fournissent deux exemples.

Lorsqu'il se présente ainsi, le carbonate de calcium est utilisé directement comme pierre de construction ou comme matériau de décoration (marbre blanc de Carrare).

Pour obtenir la chaux, on utilise des calcaires moins purs, qui contiennent souvent de petites quantités de magnésium et de fer; des calcaires de ce type existent en grande quantité à la surface de la Terre, ce qui rend leur extraction aisée et peu coûteuse.

Le gypse est un sulfate de chaux qui renferme de l'eau. S'il existe de nombreux petits gisements, il en est, par ailleurs, de très importants, où le gypse est souvent présent en même temps que d'autres sels et du soufre. Puisque le sulfate de calcium est l'un des sels contenus en solution dans l'eau de mer (bien que dans une proportion inférieure à celle du chlorure de sodium), on est conduit à penser que ces gisements proviennent de l'évaporation ayant affecté d'anciens bassins fermés, qui contenaient des eaux fortement chargées en sels.

LA CHAUX

On utilise, pour produire de la chaux, des calcaires impurs peu aptes à fournir des matériaux de construction tant à cause de leur friabilité que de leur aspect.

Le calcaire est traité dans des fours spéciaux, appelés « fours à chaux », construits de manière à permettre un traitement du matériau en continu et souvent même la récupération des gaz de combustion. Ces fours sont généralement assez grands : huit à dix mètres de hauteur et deux à trois mètres et demi dans leur partie la plus large. Le matériau brut, après avoir été concassé, est introduit par le haut en même temps que le charbon : la chaux est extraite à la partie inférieure du four.

Le charbon, en brûlant, se transforme en produits gazeux et en chaleur qui décomposent le carbonate de calcium pour former de l'oxyde de calcium, c'est-à-dire de la « chaux vive » qui se présente comme un solide blanc et compact.

Cette réaction est commune à de nombreux carbonates, mais elle se produit à des températures variables, dépendant de la nature des éléments qui constituent ces composés. Dans un four à chaux, le charbon remplit un double rôle : d'une part, sa combustion permet d'obtenir l'élévation de température nécessaire, d'autre part, il est à même de réagir avec l'anhydride de carbone qui provient de la décomposition de carbonate.

En effet, la réaction de dissociation est la suivante :

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 \nearrow ;$$

tandis que le charbon réagit avec l'anhydride carbonique conformément à l'équation :

$$C + CO_2 \rightarrow 2\,CO.$$

P. Martini

Un four à chaux d'autrefois; aujourd'hui, la chaux est préparée selon des techniques totalement différentes, mais toujours à partir des mêmes roches.

En additionnant membre à membre ces deux réactions, on obtient la réaction globale qui se produit dans un four à chaux, soit :

$$CaCO_3 + 2\ C \rightarrow CaO + 2\ CO \nearrow.$$

La chaux vive ainsi obtenue est plus ou moins pure : cela dépend du matériau brut dont elle provient. Comme elle fond à une température très élevée, elle peut être utilisée comme matériau réfractaire, c'est-à-dire capable de résister à la chaleur; c'est ainsi qu'on s'en sert pour réaliser les revêtements de fours sidérurgiques (revêtements basiques).

Toutefois, au contact de l'air, la chaux tend à absorber de l'anhydride carbonique et même l'humidité atmosphérique, de ce fait elle se désagrège lentement, en formant une très fine poussière. C'est pour cela qu'on utilise de préférence comme matériau réfractaire la dolomite « cuite », mélange d'oxydes de calcium et de magnésium qui se désagrège moins facilement à l'air; mais en revanche, ce produit n'est pas apte à remplir le même rôle que la chaux dans la construction.

En dehors de son emploi en tant que réfractaire, la chaux est très largement utilisée dans le bâtiment et dans l'industrie chimique; dans ces deux cas, elle est employée sous forme de chaux « éteinte »; on appelle ainsi l'hydroxyde de calcium, obtenu en traitant la chaux vive par l'eau, selon la réaction :

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca\ (OH)_2.$$

Cette réaction se produit avec un fort dégagement de chaleur.

La « chaux éteinte » est très peu soluble dans l'eau. Du point de vue chimique, elle donne une réaction fortement basique. Elle est souvent utilisée, dans l'industrie et dans l'agriculture, sous forme d'une suspension aqueuse, appelée « lait de chaux » en raison de son aspect trouble et de sa couleur blanchâtre. La chaux éteinte représente la base la moins chère, ce qui explique son très large emploi en chimie.

Dans le bâtiment, la chaux, éteinte et mélangée intimement au sable, donne un mortier, que l'on utilise pour assurer la cohésion des pierres et des briques dans les ouvrages maçonnés. L'emploi du mortier de chaux est très ancien et remonte sans doute aux Romains, qui étaient passés maîtres dans la construction d'édifices en briques.

Après sa mise en œuvre, le mortier durcit en un temps variable; en réalité, bien que le mortier soit déjà remarquablement dur au bout de quelques jours, la période de durcissement se prolonge pendant un temps très long Ce phénomène, appelé « prise », est d'autant plus marque que le mur est plus ancien.

Chimiquement, la prise correspond à la réaction qui s'effectue entre la chaux éteinte et l'anhydride carbonique présent dans l'air, avec élimination d'eau :

$$Ca\ (OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O.$$

Cela explique pourquoi l'humidité suinte des murs récemment bâtis.

La chaux qui contient de l'oxyde de magnésium (c'est-à-dire qui provient de la cuisson de la dolomie) est appelée « chaux maigre » (par opposition à la « chaux grasse » formée d'oxyde de calcium presque pur); elle s'éteint plus difficilement et est moins adaptée aux ouvrages de maçonnerie.

Enfin, en faisant cuire des marnes plutôt que des calcaires, on obtient un type particulier de chaux, capable de faire prise même sous l'eau : c'est la « chaux hydraulique », proche du ciment par sa composition, mais plus riche en oxyde de calcium.

LE GYPSE

Le gypse, ou sulfate de calcium bihydraté :

$$CaSO_4,\ 2\ H_2O,$$

se rencontre dans la nature, comme nous l'avons vu, en gisements bien localisés, souvent très étendus; en outre, il existe de nombreux terrains riches en gypse qui apparaissent presque blancs. La variété limpide de gypse (dont les plus beaux cristaux sont maclés en fer de lance ou en queue d'aronde) était anciennement appelée sélénite*; on trouve aussi à l'état naturel du sulfate de calcium anhydre, appelé* anhydrite *($CaSO_4$).* L'albâtre gypseux*, translucide, est utilisé comme pierre ornementale.*

Par chauffage, le gypse perd une partie de son eau et se transforme en plâtre; à environ 120 °C, il perd une seule molécule d'eau pour donner le semi-hydrate*; à une température un peu plus élevée, il se transforme en anhydrite. En chauffant davantage, c'est-à-dire au-delà de 500 °C, on obtient une forme d'anhydrite appelée « plâtre calciné », incapable de se réhydrater.*

Le semi-hydrate et l'anhydrite trouvent des emplois dans le bâtiment et dans la statuaire; en présence d'eau, ils se réhydratent rapidement et durcissent en conservant la forme qu'on leur a donnée. Certaines qualités de plâtre font prise en un peu plus d'une demi-heure.

La production de plâtre est essentielle et ne cesse de se développer, en raison de l'extension croissante des emplois de ce matériau. Ainsi, en chauffant l'anhydrite à plus de 1 000 degrés Celsius, il perd une partie de son anhydride sulfurique (SO_3) et se transforme en un anhydrite basique *capable de faire prise, ce qui permet de l'utiliser comme matériau pour dallage, soit sous forme de « plâtre à daller », résistant aux agents atmosphériques, soit comme sous-couche pour la pose de revêtements de sols.*

Le gypse, chauffé dans des fours spéciaux avec la silice, donne un silicate de calcium *qui trouve des applications dans l'industrie du ciment. En effet, on assiste à une généralisation de l'emploi de ce produit comme ralentisseur de prise dans les ciments; l'intérêt d'obtenir un ralentissement de la prise réside dans le fait que ce phénomène s'accompagne d'un intense dégagement de chaleur, susceptible de compromettre la solidité de certains grands ouvrages de béton, comme les barrages, en provoquant l'apparition de fissures.*

Enfin, un type d'anhydrite capable d'absorber l'humidité est utilisé en granulés comme déshydratant bon marché pour les gaz contenant des traces d'humidité. Il est généralement additionné de petites quantités de chlorure de cobalt, ce corps ayant la propriété d'être bleu lorsqu'il ne contient pas d'eau et rose lorsqu'il est hydraté; il constitue donc un excellent indicateur en permettant d'évaluer l'efficacité du déshydratant.

Le plâtre est très largement utilisé dans la fabrication, par moulage, de petits objets décoratifs, tels que des statuettes. Il connaît aussi certains emplois particuliers, surtout en œnologie pour acidifier les vins.

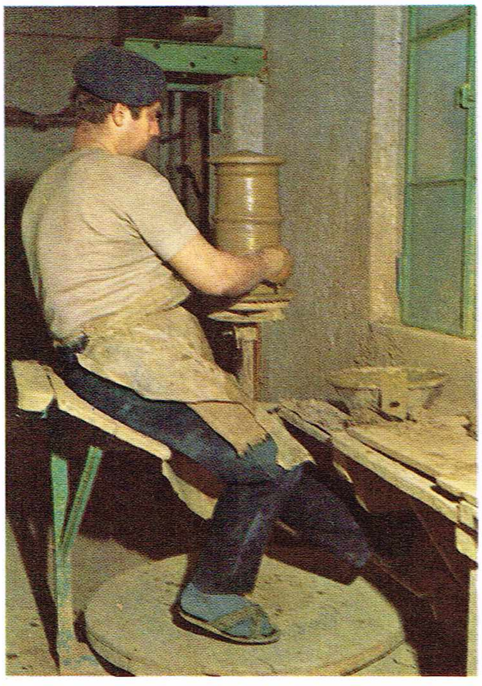

P. Martini

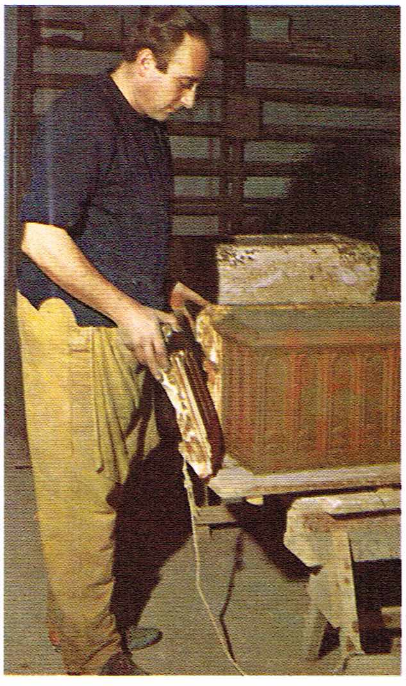

P. Martini

A gauche : le plâtre est utilisé par les céramistes pour la fabrication de moules; l'illustration montre un tour de potier. A droite : un moule en plâtre pour la fabrication de vases en terre cuite.

L'AMIANTE ET LES MICAS

Les micas et l'amiante sont des minéraux intéressants non seulement en raison de leur abondance dans la nature (les micas sont les composants accessoires de nombreuses roches, tandis que l'amiante est relativement plus rare), mais aussi parce qu'ils illustrent parfaitement l'influence que peut avoir la structure des minéraux sur leurs propriétés (c'est-à-dire le mode d'arrangement des atomes).

Voici quelques décennies encore, ils étaient considérés comme des curiosités naturelles sans grand intérêt pratique. Aujourd'hui, grâce aux progrès de la science et de la technique, on a su leur trouver des applications nombreuses et souvent insoupçonnées, conséquence directe des propriétés que leur confère leur structure : il s'agit, pour les micas, de la facilité avec laquelle ils se clivent en plaques, d'assez grandes dimensions, et pour l'amiante, de sa nature fibreuse.

L'AMIANTE

On appelle ainsi une variété fibreuse de serpentine, connue aussi sous le nom d'asbeste. La serpentine comprend un ensemble de silicates, antigorite et chrysotile surtout, souvent associés, qui possèdent des propriétés analogues, bien que le premier soit de structure lamellaire et le deuxième typiquement fibreux. L'amiante proprement dit est une variété de chrysotile, à fibres très longues ; c'est un inosilicate, c'est-à-dire qu'il possède une structure formée par des rangées de tétraèdres, chacun d'entre eux comportant un atome de silicium en son centre et quatre atomes d'oxygène disposés à ses sommets.

C'est à cette disposition des tétraèdres, formant des chaînes parallèles, qu'est dû le caractère fibreux du chrysotile. Les fibres atteignent souvent une longueur de plusieurs décimètres ; très flexibles, elles peuvent être tissées.

La formule chimique du chrysotile est $Mg_6(OH)_8Si_4O_{10}$; assez souvent, le magnésium est partiellement remplacé par de petites quantités de fer ou de nickel. Sa dureté, variable de 2,5 à 5, est le plus souvent voisine de 4 ; dans les variétés fibreuses, le poids spécifique est d'environ 2,2. En général, la couleur de l'amiante (on précise « amiante de serpentine », pour ne pas le confondre avec une variété moins répandue et de composition différente) est blanche avec de légers reflets verdâtres. L'amiante est infusible à la flamme ; mais il est attaqué par l'acide chlorhydrique concentré. Son importance industrielle découle essentiellement du fait que ses fibres, flexibles, peuvent être tissées, ce qui permet la confection de tissus incombustibles et isolants utilisés pour fabriquer des gants et des combinaisons de protection. Il entre en outre dans la fabrication de matériaux divers, tels que l'amiante-ciment que l'on façonne en tubes et en plaques, planes ou ondulées, qui sont employées dans le bâtiment, pour réaliser des couvertures, des cloisons et des gaines. L'amiante est également utilisé dans l'industrie automobile pour réaliser certains éléments des systèmes de freinage.

Les gisements d'amiante exploités industriellement sont nombreux : la province du Québec, au Canada (Sherbrooke, Thedford Mines et Black Lake), fournit la plus grande partie de la production mondiale, puis viennent l'U.R.S.S. (dans l'Oural), la République sud-africaine et certains États des U.S.A. L'Italie possède aussi quelques gisements d'amiante ; certains, ceux de Balangero dans le Piémont, fournissent un matériau à fibres trop courtes pour être tissé. En revanche, on trouve de l'amiante à fibres longues dans les serpentines du Val Malenco et du Val Lanterna, près de Sondrio, où le minéral est contenu dans des lithoclases (fentes dans la roche) de puissance (c'est-à-dire d'épaisseur) et d'extension variables.

Il existe une deuxième variété d'amiante, connue sous le nom d' « amiante d'amphibole » ou « amiante bleu du Cap » (l'Afrique du Sud possédant de vastes gisements). Il s'agit d'une variété fibreuse de riebeckite, appelée crocidolite : c'est un silicate de sodium et de fer. Elle se distingue de l'amiante de serpentine par ses caractéristiques optiques et aussi par le fait que, ne contenant pas d'ions oxhydryles, elle ne perd pas de poids au chauffage.

Une importante carrière d'amiante (Blue Asbestos Pty. Ltd.) en Australie occidentale.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

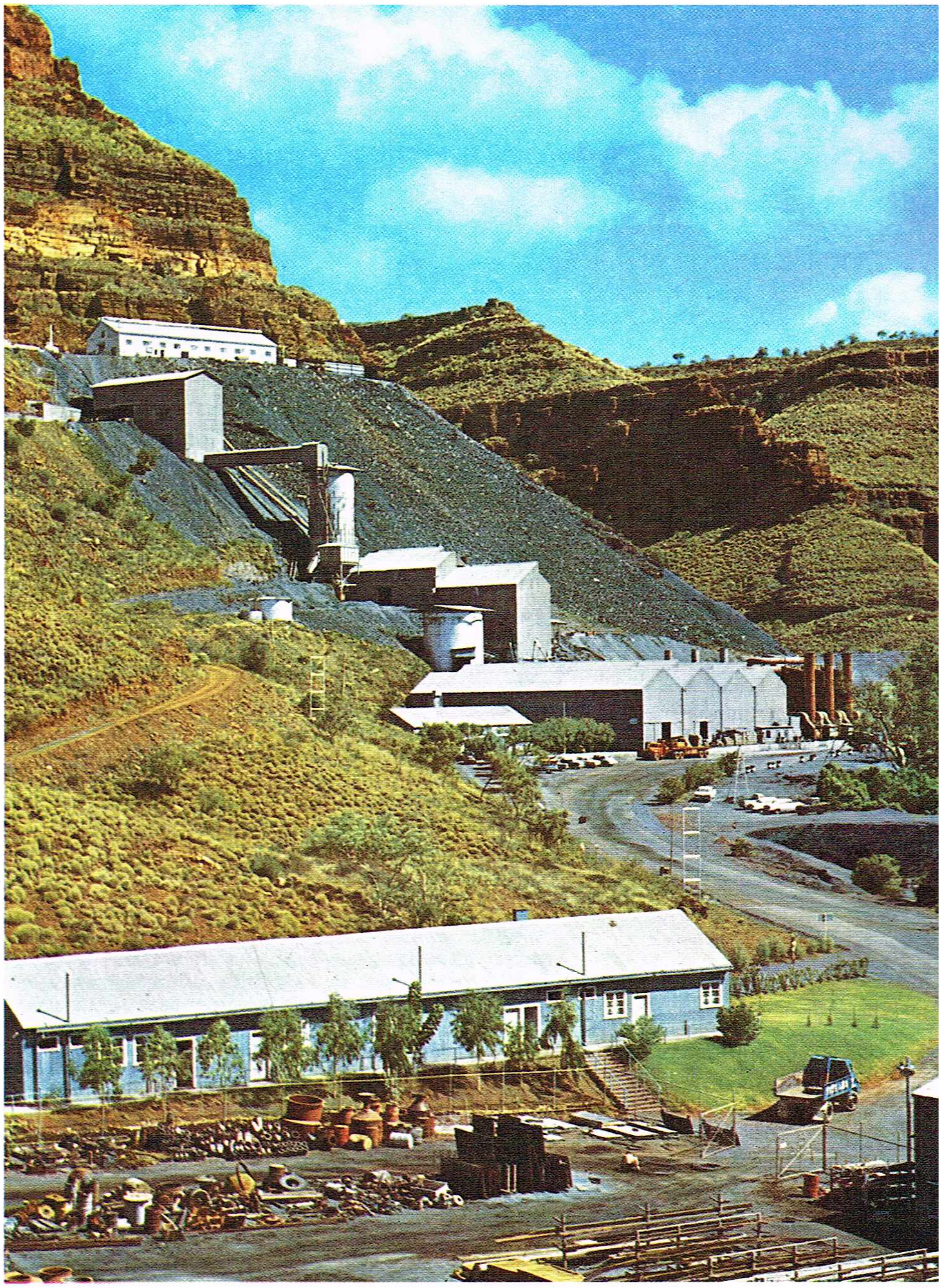

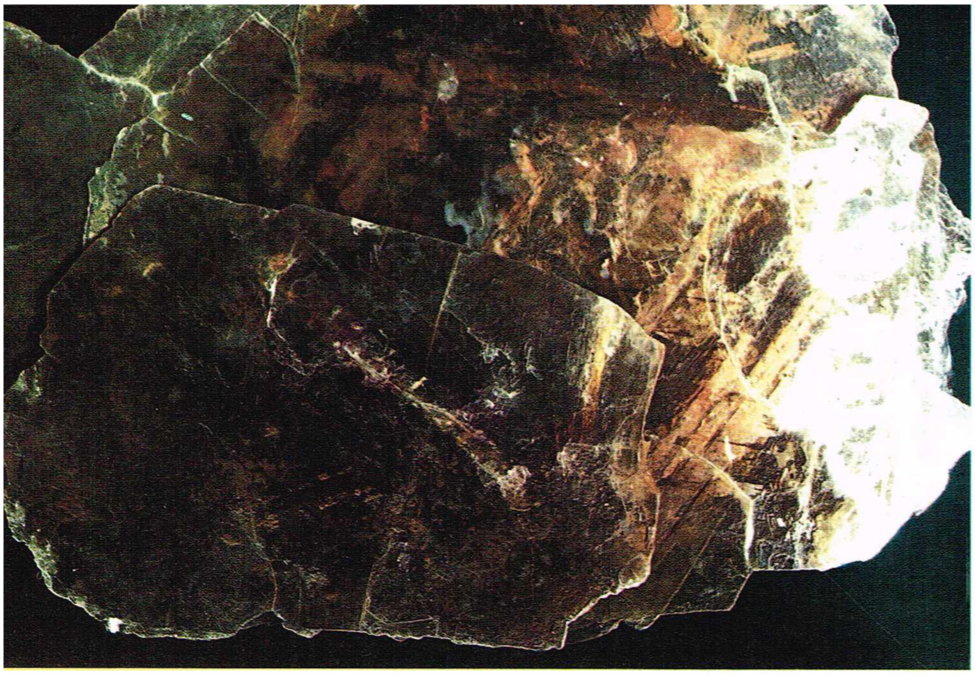

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Échantillon de mica : muscovite. Érythrée (musée d'Histoire naturelle de Milan).

Les lames transparentes et incombustibles de mica sont utilisées, entre autres, pour fabriquer des garnitures de portes de poêles et de fours.

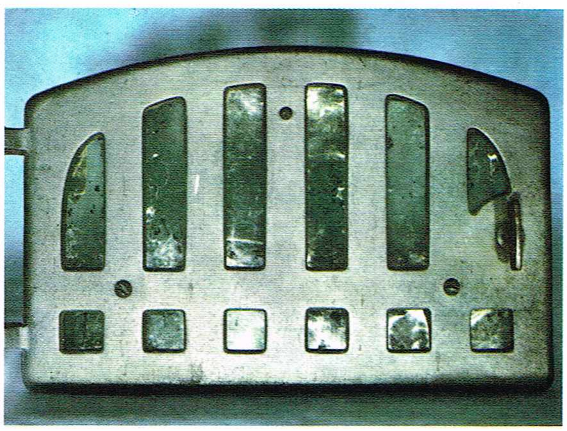

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

LES MICAS

Ce groupe comprend un assez grand nombre de minéraux qui constituent les composants accessoires de certaines roches, comme les granites, qui peuvent contenir un ou deux micas (biotite et muscovite), et les micaschistes, où ils sont plus importants. Dans les granites, les micas apparaissent sous forme de grains de teinte foncée aux reflets très vifs ; ainsi la biotite se présente souvent sous forme de petites taches presque noires.

Les micas sont des phyllosilicates d'aluminium et de métaux alcalins (lithium, sodium et potassium), de magnésium et de fer ; ils contiennent souvent des groupes oxhydryles (OH) et des anions de fluor (F). Leur structure est caractérisée par la juxtaposition de feuillets parallèles, constitués d'un assemblage plan de tétraèdres formés d'atomes de silicium et d'atomes d'oxygène. Les différentes couches de tétraèdres sont reliées entre elles par des liaisons bien moins fortes que celles qui s'exercent, dans un même feuillet, entre les tétraèdres placés sur le même plan. Par conséquent, les micas se présentent en lamelles ou en empilements de lamelles, et manifestent une nette tendance à se laisser cliver.

Les micas cristallisent dans le système monoclinique en formant des cristaux lamellaires. Ces lamelles, de forme hexagonale, sont parfois empilées les unes sur les autres, et prennent l'aspect de cristaux prismatiques hexagonaux aux contours souvent irréguliers. Néanmoins, la technique des « figures de percussion » nous montre que leur symétrie véritable n'est pas hexagonale : en effet si l'on place sur une lamelle de mica une pointe en acier chargée d'une certaine masse, on voit se former une sorte d'étoile caractéristique, formée de six segments issus du même point ; elle ne possède pas une symétrie hexagonale vraie, puisque deux de ses rayons (les deux opposés) sont plus longs que les quatre autres. Ce test confirme la symétrie monoclinique, pseudo-hexagonale, de ces minéraux.

Les dimensions des lamelles varient de quelques centièmes de millimètre à plus d'un mètre de « diamètre » ; ces dernières étant les plus recherchées sur le plan technologique.

Les micas sont classés en plusieurs groupes. En fonction des éléments chimiques qu'ils contiennent, on distingue :

— le groupe (ou la série) de la muscovite (dit également : groupe des micas alumino-potassiques) comprenant : la paragonite (qui contient du sodium), la muscovite (contenant du potassium), la margarite (qui est calcique), l'éphésite (renfermant du sodium et du calcium) et la roscoélite (qui est potassique et dans laquelle l'aluminium est remplacé par le vanadium). Tous contiennent des groupes oxhydryles. A ce groupe appartient aussi la glauconite ;

— le groupe (ou la série) de la biotite qui comprend la phlogopite, la biotite, la sidérophyllite, le lépidolite (ce dernier contient du lithium, qui est un élément assez rare dans la nature), la zinnwaldite, la seybertite et le lépidomélane. Ces minéraux forment le groupe des micas ferro-magnésiens.

Il existe un autre groupe de minéraux que l'on appelle à tort « micas » : ce sont des minéraux radioactifs, qui comportent principalement des phosphates et des arséniates d'uranium, d'origine secondaire (c'est-à-dire provenant de l'altération d'autres minéraux). Ils sont caractérisés par une structure lamellaire rappelant celle des micas. Les principaux représentants de ce groupe sont l'autunite et la torbernite ; ceux-ci, lorsqu'ils se trouvent en concentrations suffisantes, peuvent constituer d'intéressants minerais d'uranium.

Les micas abondent dans de nombreuses roches magmatiques, sédimentaires (muscovite presque uniquement) et métamorphiques de la lithosphère. Ils sont particulièrement fréquents dans les pegmatites (roches qui se sont formées à un stade particulier de la consolidation des magmas granitiques) ; c'est dans ces roches qu'on trouve les cristaux les plus gros ; leur taille peut atteindre plusieurs décimètres carrés. Si de tels cristaux ont pu se former, c'est grâce aux conditions physiques et chimiques réalisées lors de la mise en place et du refroidissement de ces roches, et notamment à l'action de vapeurs fortement chargées en éléments chimiques volatils tels que le fluor et l'eau.

L'étude du mode de formation de ces minéraux dans la nature a conduit à la synthèse d'un type de mica, la phlogopite, que l'on est capable d'obtenir en lames de plus de 100 cm^2.

Les emplois des micas sont étroitement liés à leur structure cristalline et à leur composition chimique : on les utilise pour protéger les cadrans d'instruments scientifiques. Leur dureté est très faible, au point qu'ils peuvent être rayés à l'ongle ; ils ont un poids spécifique toujours inférieur à 3 et des teintes variables selon leur composition chimique. On connaît en effet des micas incolores et transparents (propriété qui est commune à tous lorsqu'ils sont en lames très minces), des micas de teinte jaune clair, brune, verte, rose, et même noire.

Ils résistent remarquablement à la chaleur, ce qui permet de les utiliser pour faire des fenêtres dans les portes des fours ; ils sont, en outre, de très bons isolants électriques.

Bien que ces minéraux soient répandus, les gisements exploitables, contenant des cristaux de taille suffisante, sont peu nombreux. Les principaux se trouvent dans les massifs pegmatitiques, où le magma granitique constitue des filons : les roches de Vohitrosi, dans l'île de Madagascar, contiennent de la phlogopite en quantité et sont, de ce fait, très exploitées.

La muscovite, importante par ses propriétés d'isolant électrique, est extraite surtout en Sibérie, en Australie, en Inde, en Afrique, à Madagascar, aux États-Unis et au Canada.

Le lépidolite est aussi un mica très important ; il constitue l'un des minerais de lithium les plus souvent exploités pour l'extraction de ce métal alcalin fort rare.

On en trouve dans l'île d'Elbe.

LES ARGILES

On appelle communément « argiles » des roches plastiques, se laissant facilement modeler lorsqu'elles sont mouillées. Il s'agit, en général, de roches riches en minéraux argileux et pauvres en calcaires. Les géologues, cependant, rassemblent sous le nom générique d'« argile » différentes espèces minérales présentant, entre elles, des analogies structurales et chimiques qui confèrent à ces substances des propriétés similaires.

Les roches composées essentiellement de minéraux argileux peuvent être classées en deux groupes selon qu'elles sont meubles ou consolidées. En effet lorsque les minéraux argileux se forment, on a affaire à des fragments de très petite taille. Ces éléments sont susceptibles de subir un transport et une accumulation sous l'action du vent ou des eaux sans qu'intervienne aucun phénomène de cimentation. Cependant des transformations peuvent intervenir ultérieurement : c'est ainsi que certaines roches argileuses, qui ont subi des processus métamorphiques, deviennent compactes et schisteuses et se laissent facilement cliver en lames; on les appelle « schistes argileux ».

Il existe en outre des roches argileuses qui contiennent une certaine proportion de calcaire ; selon le pourcentage de carbonate, on les appelle argiles marneuses, marnes, marnes calcaires *et* calcaires marneux. *Elles trouvent d'importantes applications dans l'industrie du ciment.*

De nombreuses roches argileuses renferment des impuretés d'un grand intérêt; par exemple, certains schistes argileux présentent une proportion considérable de substances utiles (hydrocarbures); des argiles contiennent des pourcentages élevés d'oxydes de fer (latérites); d'autres, pour des motifs divers, se sont enrichies en alumines et constituent des dépôts d'aluminium exploitables industriellement : ce sont les bauxites.

Les propriétés chimiques et physiques des argiles dépendent essentiellement des minéraux argileux et éventuellement des impuretés qu'elles contiennent; elles peuvent aussi varier avec la granulométrie (c'est-à-dire la dimension des grains) du matériau, généralement très fine, puisque les particules argileuses ont une taille de l'ordre de quelques millièmes de millimètre.

Les argiles proviennent de l'altération des feldspaths qui constituent une large part des différentes roches d'origine profonde, et qui sont très facilement transformés : soit sous l'action de facteurs climatiques (quand les roches qui les contiennent sont proches de la surface du sol), soit en profondeur, sous l'action de solutions chaudes issues des magmas. De ce fait, les argiles peuvent contenir des impuretés provenant des roches qui leur ont donné naissance. Les plus importantes de ces impuretés sont : le quartz, l'opale (silice amorphe) et la calcédoine (silice cristallisée), la calcite, le gypse, l'anhydrite, le sel gemme, la pyrite, la marcassite, les feldspaths et les micas.

L'étude physico-chimique des argiles s'est révélée particulièrement difficile, de même que l'étude purement minéralogique et pétrographique, les granules étant de très petite dimension et intimement mélangés. Leur structure et leurs propriétés n'ont pu être mises en évidence que grâce aux rayons X et à deux méthodes particulières qui sont : l'analyse thermique différentielle et l'analyse thermo-pondérale.

Dans la première on mesure en continu la température de l'échantillon placé dans un four dont la température croît régulièrement. Cette méthode permet de repérer des anomalies thermiques qui accompagnent des transformations de structure; la seconde méthode permet d'enregistrer les variations de masse que subit un échantillon lorsqu'il est chauffé.

La classification des argiles est basée sur des critères qui tiennent compte de leur structure et de leur composition. On distingue, ainsi, différents groupes :

— Groupes des allophanes *: mal connu, ce groupe renferme des matériaux proches de la kaolinite par leur composition mais qui apparaissent amorphes aux rayons X.*

— Groupe de la kaolinite, *comprenant aussi la dickite, la nacrite, et l'anauxite (qui est une kaolinite contenant un excès de silice). La kaolinite est particulièrement importante en raison des nombreux emplois auxquels se prête le* kaolin. *Ce dernier, lorsqu'il est pur, contient 46,54 % de silice, 39,50 % d'alumine et 13,86 % d'eau.*

*— Groupe de l'*halloysite *(minéral découvert dans les environs de Liège, en Belgique) : pendant longtemps, ce nom a été donné à divers minéraux. Le gisement où elle fut découverte pour la première fois n'existant plus, il est impossible aujourd'hui de connaître avec précision la*

C. Bevilacqua

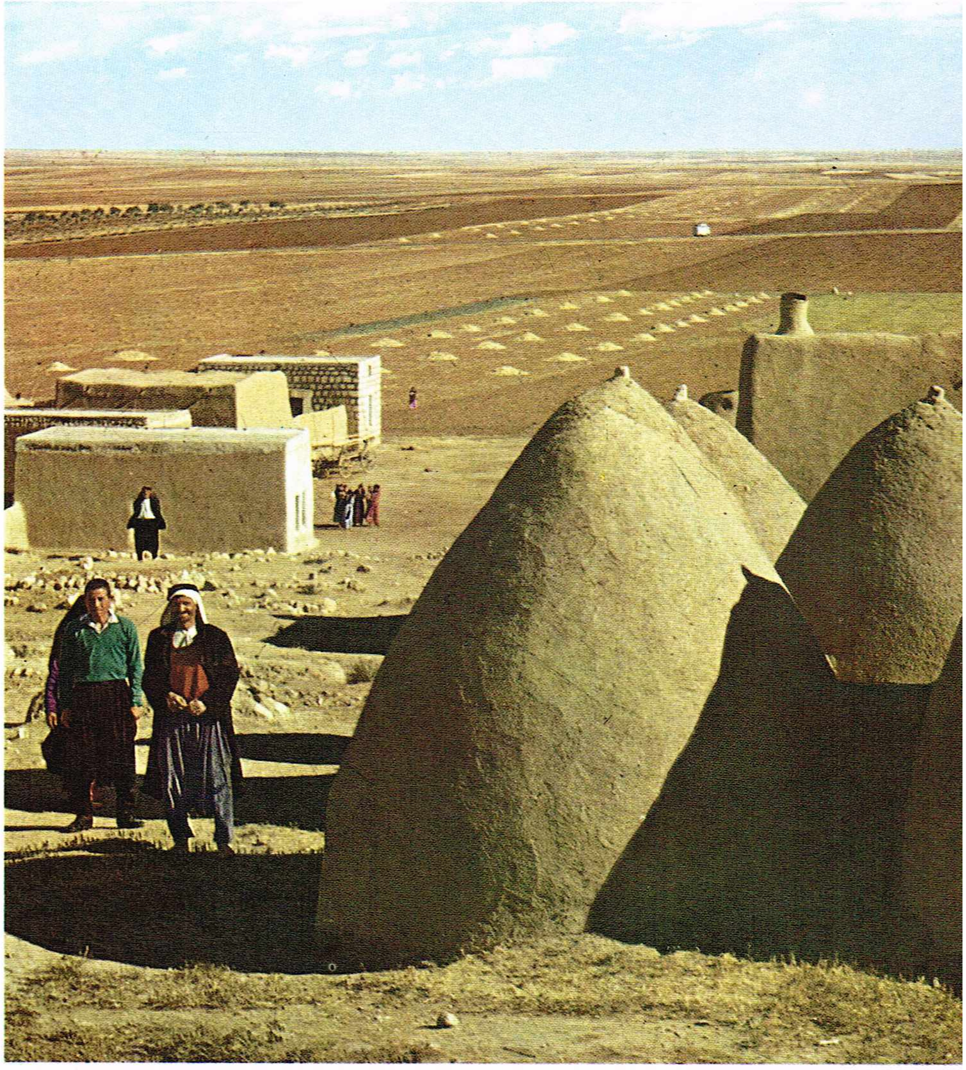

Dans certains pays de la Méditerranée orientale, l'argile est utilisée dans la construction d'habitations typiques de forme conique, appelées « trullos »; ici un village de « trullos » en Syrie.

C. Bevilacqua

Échantillon d'argile rouge contenant des cristaux de gypse, provenant d'Espagne (musée d'Histoire naturelle de Milan).

composition de l'halloysite d'origine. C'est pour cela qu'en 1950, les chercheurs se sont mis d'accord pour attribuer le nom d'halloysite à tous les minéraux présentant les mêmes caractéristiques que celles figurant dans la description de l'halloysite originelle.

Il en existe essentiellement deux types, dont la composition est donnée respectivement par les deux formules suivantes : $Si_2 Al_2 O_5 (OH)_4$ et $Si_2 Al_2 O_5 (OH)_4, 2 H_2O$. Ce deuxième minéral, par chauffage à une température peu élevée (environ 70 °C), perd de l'eau et se transforme en un minéral moins hydraté.

— Groupe de la montmorillonite : la structure des argiles de ce groupe a exigé de longues études ; elle est aujourd'hui bien connue. Ces argiles connaissent des applications techniques importantes, car leur réseau cristallin peut « accueillir » un volume considérable de molécules étrangères. En plus de la montmorillonite, ce groupe comprend la beidellite, la nontronite, l'hectorite et la saponite.

Pour terminer, rappelons qu'il existe le groupe de l'illite, qui possède quelques affinités de structure avec les micas.

FORMATION DES ARGILES

Le mode de formation des argiles et les phénomènes qui président à leur accumulation peuvent servir de base à une autre classification dans laquelle on distingue les types d'argiles suivants :

— Les argiles « résiduelles » : ce sont les argiles qui sont restées dans le lieu même de leur formation ou qui ont subi un transport très court. Formées par altération d'autres roches, elles présentent une composition variable selon les conditions de formation. Dans certains cas, la silice a pu être emportée tandis que les autres composés sont demeurés comme résidus. On observe alors la formation de dépôts de latérites, de bauxites et de diaspore (minerai d'aluminium) qui revêtent une grande importance pratique. L'argile « réfractaire », utilisée pour la fabrication de matériaux résistant aux températures élevées, peut avoir la même origine ; on la trouve, par ailleurs, dans des dépôts fluviatiles et lacustres. Dans ce cas, le composant principal est la kaolinite, très intéressante sur le plan technologique.

— Les argiles « transportées » : elles se subdivisent à leur tour en nombreux sous-groupes, en fonction de l'agent qui en a opéré le transport.

— Les argiles « glaciaires » sont les produits les plus fins issus de l'érosion due aux glaciers ; elles ont une composition relativement homogène, surtout en ce qui concerne leur teneur en calcaire. Si d'autres phénomènes ne sont pas intervenus, après l'érosion glaciaire, les granules ne sont pas séparés en fonction de leurs dimensions.

— Les argiles « fluviatiles » se trouvent dans des dépôts formés de granules de dimensions très proches, mais irrégulièrement répartis et souvent mêlés à des cailloux, des grès et des sables. Les dépôts ont une forme « lenticulaire », c'est-à-dire ressemblant à une lentille ; ils peuvent avoir des dimensions assez importantes et renferment souvent de la kaolinite presque pure et des détritus quartzeux. Sous les climats arides, les argiles fluviales sont souvent très riches en carbonates.

— Les argiles « lacustres calcaires » sont constituées de granules très fins et contiennent essentiellement de la calcite et de l'illite.

— Les argiles « marines » sont très répandues. Elles varient considérablement tant en ce qui concerne leur composition que leur structure. On les trouve souvent en couches très régulières, généralement de couleur bleuâtre.

— Rappelons enfin les argiles « lagunaires » toujours associées à des dépôts salins ; elles sont dues à l'évaporation des eaux, dans des bassins fermés, riches en sels. Les bancs d'argile sont très étendus horizontalement et alternent avec des couches de sel ou de gypse. Souvent, ces argiles contiennent des cristaux de minéraux tels que des gypses.

EMPLOIS DES ARGILES

Les argiles servent à de nombreux usages que l'on peut classer en deux groupes : le premier comprend les emplois qui ne nécessitent aucun traitement des minéraux ; le second, tous les usages qui font appel à des transformations qui s'obtiennent par cuisson. Ainsi, les roches argileuses très compactes, qui contiennent beaucoup de quartz, sont utilisées comme « pierres à aiguiser » : la plupart de ces roches proviennent d'Allemagne et d'Italie (on en trouve dans les environs de La Spezia).

Autre utilisation importante : les roches argileuses, et notamment les schistes argileux, sont employés pour la confection de couvertures de bâtiments. On utilise à cet effet les « ardoises », schistes argileux qui se laissent facilement cliver en plaques dont on apprécie la légèreté (les moins épaisses pèsent de 12 à 15 kg le mètre carré) ; ces ardoises résistent très bien aux agents atmosphériques et sont imperméables. De couleur gris fer, elles apparaissent noires lorsqu'elles sont polies ; les plans de clivage offrent un éclat soyeux.

Certains types d'ardoises servent à la fabrication de tableaux noirs.

Toutes les ardoises, bien qu'apparemment homogènes, sont formées en réalité de granules de quartz, de feldspaths, de minéraux de magnésium et de fer, de particules de charbon et de calcite, tous ces composants étant cimentés entre eux par des minéraux argileux.

Les gisements les plus importants sont : en France, ceux d'Angers, de Charleville, de Cherbourg, de Grenoble, de Brive et de Redon ; en Grande-Bretagne, ceux du pays de Galles. En Italie, on en trouve en Ligurie et dans de nombreuses vallées alpines.

Les argiles connaissent aussi d'importantes applications industrielles ; finement subdivisées, elles peuvent absorber de grandes quantités de gaz ou de liquides. Aussi sont-elles utilisées comme « terre à foulon » pour dégraisser la laine et comme « terre à blanchir » pour absorber les impuretés dispersées dans les liquides. Elles servent surtout à la purification des huiles minérales et végétales.

Enfin, les argiles sont utilisées comme matériau inerte dans la fabrication du caoutchouc, du papier et des savons. La bentonite, qui est la plus importante de ces argiles dites « smectiques », est extraite dans les très vastes gisements du Wyoming, aux États-Unis. On en trouve aussi en Italie. Son pouvoir absorbant à l'égard des liquides est très élevé ; il est dû surtout à la présence de montmorillonite. Comme on le voit, les applications industrielles des argiles sont nombreuses et importantes.

C'est également à la présence d'argiles qu'est dû le pouvoir absorbant des sols ; ces matériaux, en effet, ne se contentent pas d'absorber l'eau, mais ils fixent aussi les sels indispensables au développement des végétaux et les engrais ; ils jouent donc, en agriculture, un rôle d'une importance primordiale.

LES TERRES COLORÉES

Bien que de nombreuses grottes présentent un grand intérêt scientifique, les plus célèbres sont certainement celles d'Altamira (Espagne) et de Lascaux (France). Leur célébrité est due à la présence sur les parois et les plafonds de remarquables peintures rupestres d'âge préhistorique.

Il s'agit d'images d'animaux ou de scènes de chasse, formant des fresques qui ont probablement été peintes dans un but propitiatoire. Peu de couleurs, savamment assemblées, donnent un relief particulier à ces représentations.

Ces peintures nous apprennent que l'homme préhistorique connaissait, déjà, des « terres » colorées qu'il a su utiliser habilement; parmi celles-ci figuraient des substances qui lui ont permis d'obtenir du blanc et du jaune, du rouge et de l'ocre. Il faut ajouter à cette liste l'emploi du noir, mais cette couleur ne provenait probablement pas d'une véritable terre colorée, car les minéraux qui se prêtent à la préparation de peintures noires sont assez rares, alors qu'il est facile d'employer des substances produites artificiellement.

La connaissance des terres colorées, transmise de génération en génération (les Égyptiens, les Grecs, les Romains, les Indiens les utilisèrent avec art), s'enrichit peu à peu de nouvelles matières : parmi celles-ci on peut citer : le cinabre, l'azurite, la malachite, l'orpiment.

Pendant longtemps, les composés minéraux furent les seuls matériaux colorants dont disposassent les peintres. Il faut d'ailleurs remarquer le singulier contraste qui apparaît entre la perfection très vite atteinte sur le plan artistique et la lenteur des progrès effectués dans la connaissance des matières colorantes.

C'est, en effet, au XVIIe siècle seulement que commencèrent à apparaître des couleurs obtenues par traitement chimique de certains éléments. Aujourd'hui, les colorants de ce type sont beaucoup plus employés que les minéraux; et on ne doit attribuer le nom de « terres colorées » qu'aux substances que l'on trouve dans la nature.

On donne le nom de « pigments » aussi bien aux couleurs minérales qu'à celles obtenues par précipitation chimique. Ce sont des poudres insolubles dans les liquides qui ne leur servent que de « véhicule ». Le pouvoir colorant des pigments provient de ce qu'ils peuvent être uniformément étalés sur les surfaces à traiter ou intimement mélangés aux matières solides à colorer. Les véhicules habituels des pigments sont les huiles et l'eau. Les peintures apparaissent donc comme des suspensions de pigments dans un fluide approprié, lequel, en s'évaporant, laisse une surface recouverte uniformément de pigment. L'insolubilité à l'eau et l'inaltérabilité aux agents atmosphériques sont les principales propriétés que doit posséder un pigment.

Les substances solubles dans l'eau ou dans d'autres solvants sont appelées « colorants »; ce sont généralement des produits de synthèse.

Il existe donc deux catégories de pigments : ceux que l'on trouve dans la nature et ceux que l'on obtient par traitement chimique de certains produits naturels. Nous traiterons surtout ici des composés naturels, que nous classerons en fonction de la couleur; mais nous ne pourrons pas passer sous silence les composés synthétiques actuellement employés.

Il existe par ailleurs quelques pigments d'origine végétale (par exemple, l'indigo, utilisé en Inde depuis les temps les plus anciens) et des « laques », obtenues à partir de colorants solubles traités par certains sels métalliques; les laques sont souvent stables et insolubles.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

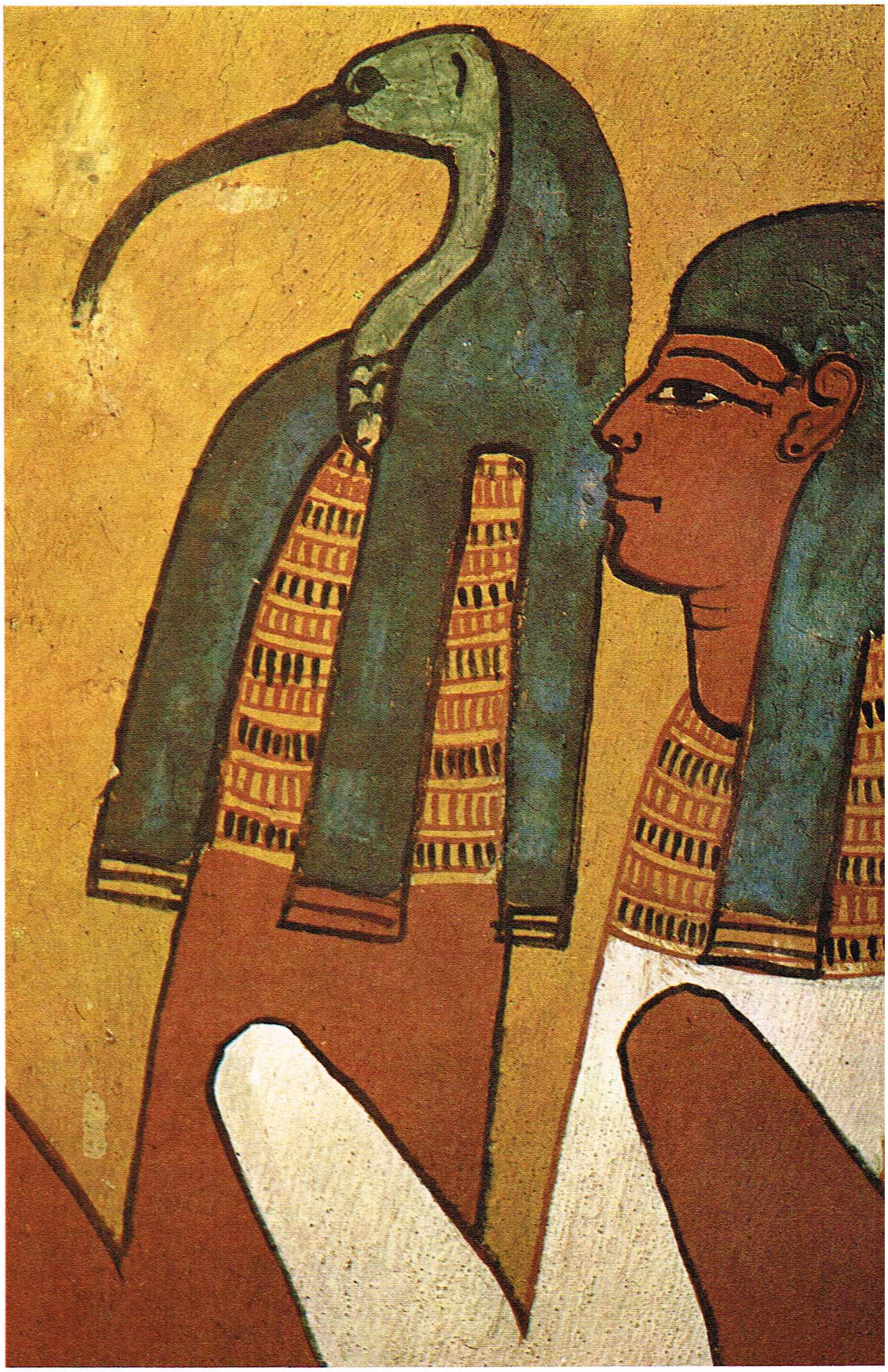

Peintures murales de la nécropole thébaine de Deir el Médine (détail du plafond de la tombe de Sennedjen) ; cette ancienne peinture a été réalisée à l'aide de terres colorées.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Mélangées à la chaux, les terres colorées égayent les façades des maisons des pays chauds; sur la photo : petites maisons de San Miguel de Allende (Mexique).

LES DIFFÉRENTES COULEURS

Autrefois, le blanc était obtenu à partir de la chaux; il s'agissait donc d'une couleur peu coûteuse et facile à préparer. L'emploi de la chaux dans le blanchiment des murs, même de nos jours, est encore très répandu, surtout dans les régions chaudes. Mais la chaux n'est pas très durable, notamment en raison du fait qu'elle est soluble dans l'eau; aussi faut-il la renouveler souvent.

Les pigments blancs utilisés aujourd'hui sont plus solides que la chaux. De plus ils sont très nombreux. Parmi les principaux on peut citer : le « blanc fixe » (sulfate de baryum) qui est insoluble et inaltérable; l'oxyde de zinc qui forme le « blanc de zinc »; le sulfure de zinc, qui, mélangé au sulfate de baryum, constitue le « lithopone », lequel a un remarquable pouvoir couvrant. En outre, on fabrique depuis des siècles le blanc de céruse, qui est un carbonate basique de plomb, dont le défaut est d'être fortement toxique, ce qui justifie la réglementation de son emploi. L'oxyde de titane (blanc de titane), le titanate de plomb et l'oxyde d'antimoine ont un usage plus récent.

Les jaunes étaient obtenus surtout à partir de la limonite, matériau friable, qui contient un mélange d'oxydes de fer, généralement hydraté. La limonite est très répandue et constitue un important minerai de fer; en tant que pigment elle est connue sous le nom d'« ocre jaune », mais ce terme d'ocre est également employé pour des matériaux de couleur plus foncée et même rouge.

L'orpiment fournissait aussi une belle couleur jaune aux nuances variées; il s'agit d'un sulfure d'arsenic, peu répandu, donc relativement cher.

Aujourd'hui, on utilise de nombreux pigments jaunes, tels que le « jaune de Kassel » (oxychlorure de plomb), le « jaune de cadmium » (sulfure de cadmium) insoluble et peu altérable, les chromates de zinc et de plomb, aux nuances orange. Pour colorer en jaune les céramiques, on utilise des uranates de sodium qui, même en très faible quantité, donnent une coloration très vive.

Les rouges connus dans l'Antiquité étaient fort nombreux : l'« ocre rouge », très employée, est une variété terreuse, souvent impure, d'hématite : il s'agit d'un oxyde de fer pouvant former des cristaux, gris foncé et brillants, qui sont utilisés parfois dans un but ornemental. L'hématite, qui est aussi l'un des principaux minerais de fer, est très répandue; on la prépare aujourd'hui artificiellement pour servir de pigment. Le « cinabre » (sulfure de mercure et seul minerai exploitable de cet élément) était lui aussi très employé; il est connu sous le nom de « vermillon », d'une magnifique couleur rouge foncé. Il est insoluble et inaltérable. Comme l'ocre rouge, le vermillon est préparé, aujourd'hui, artificiellement sous une forme plus pure.

La découverte du « minium », mélange d'oxydes de plomb, a été plus tardive. Il est utilisé dans les peintures antirouille. On emploie aussi le séléniure de cadmium, (rouge de cadmium), quelques pigments organiques ou végétaux et les molybdate et tungstate de plomb, dont la couleur tire sur l'orange.

Les couleurs brunes étaient obtenues surtout à partir d'ocres foncées (qu'on prépare aujourd'hui artificiellement avec des oxydes de fer), comme la « terre de Sienne », dont le nom évoque le lieu d'origine. En chauffant ce produit, on obtient la « terre de Sienne brûlée », de couleur plus foncée et plus rougeâtre.

Certaines variétés d'ocre, contenant du manganèse, sont appelées « terres d'ombre »; elles sont très foncées. Le « brun Van Dyck », fort employé par les peintres, contient des impuretés bitumineuses qui lui donnent des tons gris très foncés.

Les bleus et les verts étaient plus difficiles à obtenir, à cause de la rareté des composés naturels susceptibles de fournir ces teintes. Le « bleu outremer », connu depuis longtemps, était préparé à partir des lapis-lazulis, silicates peu abondants, donc très chers (il fut utilisé avec parcimonie dans les peintures antiques et les ouvrages particulièrement luxueux). Au XVIII^e siècle, on découvrit les composés cyanés du fer, obtenus à partir de déchets organiques (« bleu de Prusse » et « bleu de Berlin »), et les composés du cobalt (« bleu de cobalt ») : leur prix est bien inférieur à celui du bleu outremer, que l'on sait aujourd'hui produire artificiellement.

Les verts et les verts-bleus étaient préparés à partir de la malachite et de l'azurite, qui sont des carbonates de cuivre, rares et coûteux; en outre, la malachite s'altère assez facilement. On utilisait également la glauconite, convenablement broyée. Il existe, aujourd'hui, de nombreux verts, utilisés tant comme pigments que comme colorants pour les céramiques. Ils sont formés de composés de chrome et d'oxydes de chrome. On emploie, en outre, mais avec beaucoup de précautions à cause de leur toxicité, le « vert de Paris », le « vert de Scheele » et le « vert de Schweinfurt », qui sont à base de cuivre et d'arsenic.

Certains composés organiques, les « phtalocyanines », permettent aujourd'hui de préparer des pigments bleus et verts, qui sont cependant assez altérables.

En ce qui concerne les couleurs noires, utilisées depuis très longtemps, il faut signaler que, en réalité, elles ne sont pas d'origine minérale. En effet, elles sont préparées à partir de charbon (surtout le charbon d'os) ou du noir de fumée. On utilise parfois le graphite, surtout pour les teintures industrielles; il donne un gris plomb mat.

C'est le noir de fumée qui se prête le mieux à la préparation de couleurs pour la peinture et même à la fabrication d'encre, notamment parce qu'il se présente sous forme de poussière impalpable. On le prépare aujourd'hui en faisant brûler des huiles minérales ou des gaz naturels à l'abri de l'air. Une méthode curieuse, mais toujours employée, permet, dans les pays islamiques, de l'obtenir à partir des très nombreuses lampes à huile qui brûlent dans toutes les mosquées. L'huile, dans laquelle plonge une mèche, ne brûle pas complètement, et le noir de fumée se dépose sur une surface froide située à la partie supérieure des lampadaires.

Suivant qu'ils sont destinés à la préparation d'émaux, de laques ou de peintures, les terres colorées et les pigments sont soumis à des traitements différents que les progrès constants permettent d'améliorer; mais par suite de besoins toujours croissants, il est de plus en plus nécessaire de produire artificiellement de nouveaux agents colorants qui, fabriqués industriellement, supplantent et remplacent les pigments naturels.

Il n'en demeure pas moins vrai que les terres colorées ont eu une très grande importance dans l'histoire de la peinture et qu'aujourd'hui encore, sur les marchés des villes d'Orient, il n'est pas rare de trouver, à côté des différentes épices, de petits tas de terres colorées.

L'ALBATRE

On désigne sous le nom d'albâtre deux espèces minérales de composition différente : l'une est une variété de gypse, l'autre, un carbonate de calcium. Tous deux sont compacts et translucides. C'est probablement à cause de leurs caractéristiques optiques que ces deux minéraux sont désignés par le même terme. Toutefois des dénominations plus précises permettent de les différencier, on parle ainsi de « l'albâtre gypseux », et de « l'albâtre calcaire » ou « albâtre oriental » ; enfin leurs variétés sont connues sous diverses appellations.

L'albâtre est un matériau utilisé dans la construction ou dans certaines productions artisanales ; cependant, sa diffusion demeure pratiquement limitée aux régions où se trouvent des carrières d'une certaine importance. C'est là une observation qu'on peut faire à propos de tous les matériaux de construction, exception faite de quelques-uns qui, par leurs propriétés particulières, connaissent une très large diffusion.

On voit, par exemple, que dans les pays nordiques, où les forêts abondent, le bois est le matériau le plus utilisé pour la construction des maisons, tandis que dans d'autres régions, riches en pierres de construction ou en argiles, les maisons sont bâties en moellons ou en briques. Ainsi, l'emploi de l'albâtre est surtout limité à certaines régions des Apennins, au centre et au sud de l'Italie. L'albâtre est recherché pour sa couleur agréable, ainsi que pour la facilité avec laquelle il peut être extrait, pour sa mise en œuvre aisée et pour sa faible densité.

L'ALBATRE GYPSEUX

Variété de gypse blanc, microcristallin, d'aspect compact, et très tendre, il se laisse rayer à l'ongle. Il existe quelques variétés de coloration rose ou présentant un aspect zoné où se mêlent plusieurs couleurs. Il est particulièrement abondant en Émilie, en Sicile, en Toscane et dans le Piémont ; l'Angleterre en possède également d'importants gisements.

L'albâtre gypseux est surtout utilisé pour la fabrication artisanale de vases et de statuettes. Il est assez peu employé comme matériau décoratif sur les façades des bâtiments du fait de son assez grande altérabilité aux intempéries. On le vend parfois sous le nom de « marbre florentin ».

L'albâtre gypseux était déjà connu des Étrusques, qui exploitaient quelques-unes des nombreuses carrières toscanes. On le trouve en masses arrondies, microcristallines, le plus souvent de forme ellipsoïdale, ne dépassant presque jamais 300 kg ; ces masses alternent dans des couches de gypse avec l'argile.

La variété la plus estimée est l' « albâtre blanc » de la vallée du Marmolaio ; le « blanc veiné » et le « gris bardiglio » sont moins appréciés. L'albâtre « agate » de Volterra (ville dans laquelle s'est développé un important artisanat local et où existe même une école où l'on apprend à travailler ce matériau) est renommé.

L'ALBATRE CALCAIRE

Plus répandu et plus apprécié que le précédent, l'albâtre « oriental » ou « calcaire » est constitué de carbonate de calcium microcristallin. Il provient des grands dépôts naturels d'aragonite (variété de carbonate de calcium), qui se sont formés sous l'action des eaux qui circulent dans des terrains calcaires.

Chacun sait en effet que les eaux de pluie et de ruissellement provoquent sur les massifs calcaires une érosion importante qui agit non seulement en surface, mais également en profondeur où se succèdent des phénomènes de dissolution (entraînant la formation de cavités très vastes) et de dépôt (qui se manifestent par l'apparition de concrétions d'une très grande beauté).

C. Bevilacqua

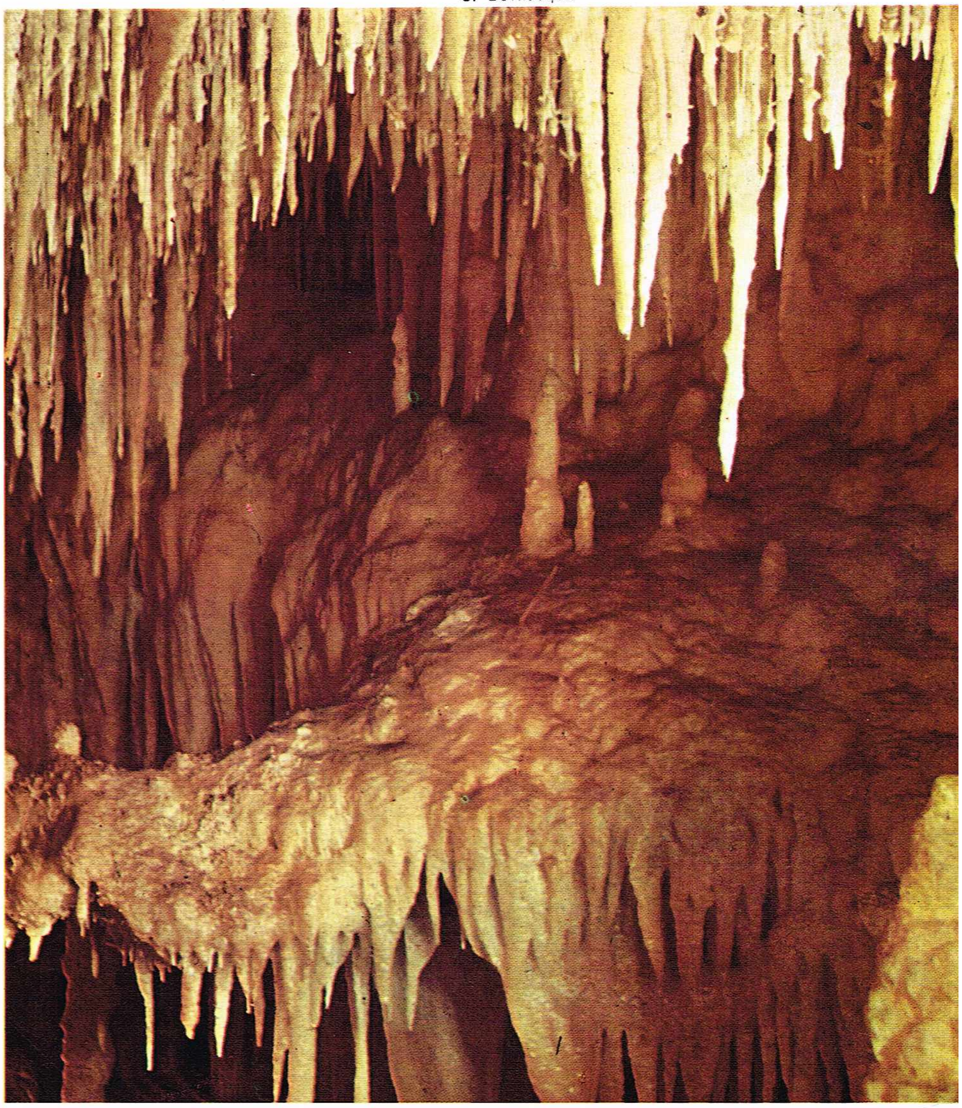

Un bel exemple de stalactites et de stalagmites dans les grottes de Castellana (Bari).

Les stalactites et stalagmites qui se forment ainsi peuvent remplir totalement des cavités souterraines, donnant lieu à la formation de bancs d'albâtre calcaire d'une grande épaisseur.

Ce type d'albâtre est dit « oriental » du fait qu'il était connu en Orient bien avant d'être utilisé en Europe ; il en est même fait mention dans l'Ancien Testament. Il est habituellement jaune ou de tons plus sombres, pouvant aller jusqu'au marron, sans que cela nuise à sa beauté. Il se présente en blocs formés de zones concentriques, alternativement claires et foncées, ressemblant à l'onyx : on l'appelle alors « onyx des grottes ».

Il existe, par ailleurs, des dépôts superficiels de carbonate de calcium, généralement blancs ou jaune clair ; ils sont souvent assez étendus, comme ceux de Pamukkale,

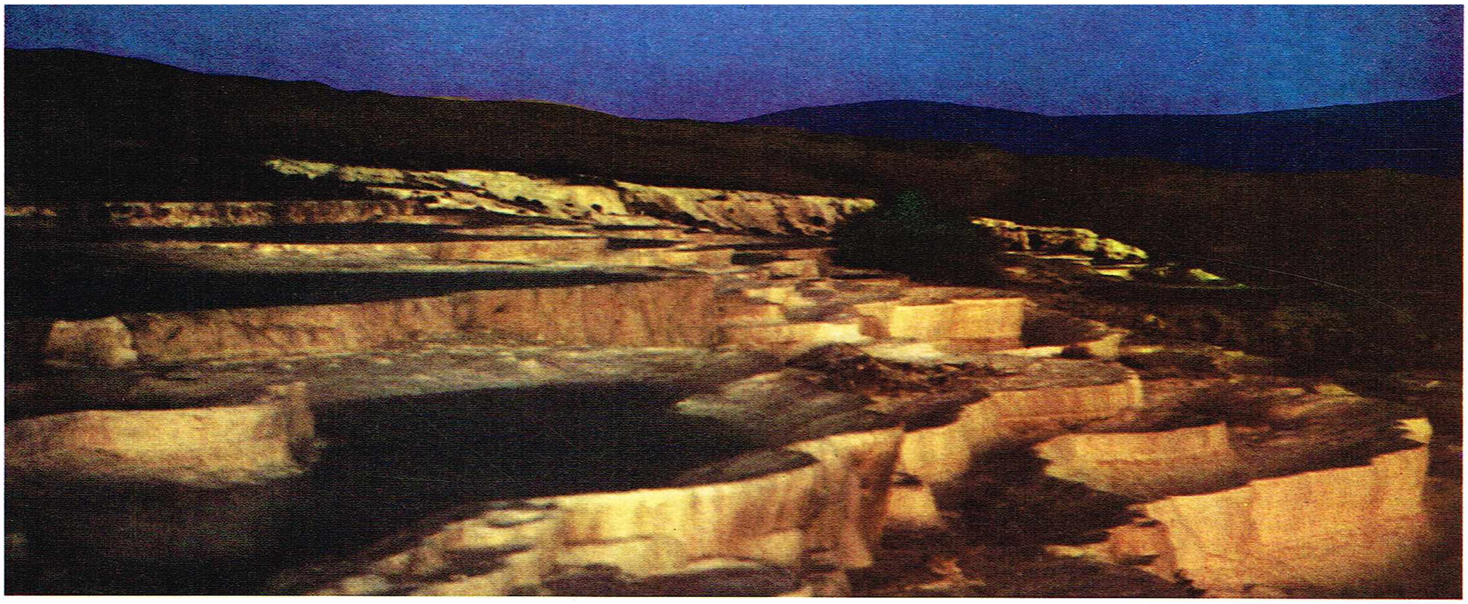

C. Bevilacqua

Le magnifique spectacle qu'offrent au coucher du soleil les terrasses calcaires près des sources thermales de Pamukkale (anciennement Hiérapolis), en Turquie.

en Turquie (l'ancienne ville thermale d'Hiérapolis). Ici, le matériau a été transporté à la surface par les eaux thermales qui, en s'évaporant, ont donné lieu à la formation de terrasses singulières; celles-ci prennent, dans certaines conditions de lumière, les colorations les plus étranges.

Il convient maintenant de dire un mot sur le transport du carbonate de calcium par les eaux et sur sa sédimentation. Le carbonate de calcium est très peu soluble (environ 13 mg par litre d'eau); toutefois, sa concentration peut augmenter considérablement dans les eaux qui contiennent du gaz carbonique dissous. Tel est le cas de la plupart des cours d'eau et des eaux de pluie.

L'accroissement de la solubilité résulte de la formation de bicarbonate de calcium, selon la réaction :

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \rightleftarrows Ca\,(HCO_3)_2.$$

A froid, cette réaction est déplacée vers la droite, tandis qu'à chaud, ou par suite de l'évaporation de l'eau qui contient le bicarbonate en solution, elle se déplace vers la gauche.

Ainsi, l'eau, en s'évaporant, provoque le dépôt de concrétions de carbonate de calcium, dont les plus connues sont les stalactites et les stalagmites.

Dans le Karst (plateau calcaire de l'Istrie) des conditions idéales pour la formation d'albâtre calcaire ont été réalisées, de sorte qu'il en existe de nombreuses carrières près de Trieste, à Duino, à Aurisina, Vigliana et Sgonigo. Cette variété d'albâtre est communément appelée « stalactite ». Il se présente avec des colorations diverses, jaune, rouge ou jaune-orangé, qui dépendent des impuretés présentes, notamment des sels ferriques qui sont généralement abondants dans les terrains calcaires.

Les stalactites et les stalagmites se forment dans la nature de manière presque continue, au gré des saisons, ce qui peut provoquer le remplissage complet des grottes par du carbonate de calcium et la constitution de dépôts très étendus.

Ci-contre : ancien vase à parfum en albâtre, Pasiade (Londres, British Museum).
Ci-dessous : un très beau jeu d'échecs en albâtre.

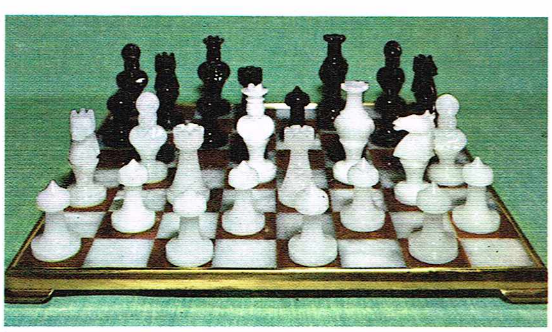

C. Bevilacqua

Parmi les plus importants, citons les dépôts anglais du Durham et du Northumberland, qui contiennent aussi du minerai de plomb, et les grottes du Derbyshire et de l'île de Skye. Au Mexique, on trouve de vastes gisements, fournissant un matériau qu'on appelle « onyx mexicain » à cause des zones concentriques fortement contrastées qu'il présente. Enfin, il existe des carrières aux États-Unis (à Luray et Carlsbad); ainsi que dans l'archipel grec; dans le Harz (en Allemagne); en France, où il existe de nombreuses grottes célèbres à bien des titres (Lascaux, Les Eyzies, l'aven Armand, etc.); en Yougoslavie, à Postojna, où les grottes ont été aménagées (avant même la Première Guerre mondiale) pour accueillir des visiteurs.

L'albâtre fut employé dès les temps les plus anciens, notamment par les Romains qui s'en servirent comme matériau de décoration et pour fabriquer de très grands sarcophages.

L'albâtre calcaire est moins soluble que l'albâtre gypseux; il est aussi plus dur et plus résistant; on l'utilise donc de préférence dans la construction; ainsi il en a été fait un grand usage dans l'édification de la basilique de Saint-Pierre de Rome. On s'en sert pour en faire des revêtements, des mosaïques en pierre, et des vitraux de cathédrale.

En vue de ses différentes utilisations, l'albâtre est coupé en plaques d'épaisseur variable, que l'on polit ensuite; les plaques sont taillées de manière à obtenir le meilleur effet décoratif.

Dans les constructions anciennes, on utilisait généralement les matériaux des carrières les plus proches; ainsi, la carrière du Circeo, déjà connue des Romains (elle était constituée d'un banc assez étendu ayant une épaisseur de cinq mètres environ), a fourni l'albâtre jaune aux reflets sombres, tirant sur le marron, qui a servi à confectionner les vitrages des fenêtres de l'abbaye de Casamari, dans le Latium. La pierre grise de ce monument sévère s'accorde parfaitement avec la lumière dorée qui filtre à travers les plaques d'albâtre. L'effet est tout à fait extraordinaire.

Les carrières de Montalcino, près de Sienne, connues depuis le IV^e siècle, ont fourni l'albâtre employé pour la construction de l'abbaye de S. Antimo à Montalcino, du dôme de Sienne et de celui d'Orvieto.

Il existe, enfin, une carrière d'albâtre à Latronico, en Lucanie, connue depuis le XVI^e siècle et utilisée pour des monuments locaux; elle fournit un matériau blanc veiné de gris. Toutes ces carrières sont exploitées par intermittence, lorsque la demande est suffisamment importante. Celle-ci est aujourd'hui assez faible, car d'autres matériaux concurrencent fortement l'albâtre dont l'emploi se limite désormais à la fabrication artisanale de petits objets.

L'albâtre, matériau assez humble parmi les pierres d'ornement, a cependant acquis une assez grande réputation en raison des emplois qu'il a trouvés lors de la construction des plus grandioses monuments sacrés et grâce surtout à l'habileté des artisans qui l'ont travaillé.

Sa renommée est due aussi aux magnifiques jeux de lumière qu'il permet et qui frappent d'étonnement toute personne qui visite une grotte à stalactites et stalagmites.

LES CÉRAMIQUES ET LES BRIQUES

Parmi les matériaux couramment utilisés dans l'industrie du bâtiment les argiles occupent une place de toute première importance ; en effet il s'agit là de la matière première à partir de laquelle sont fabriqués les produits qui sont quotidiennement mis en œuvre par le maçon, comme le ciment, la brique et la tuile. Ce ne sont pourtant pas là les seuls emplois des minéraux argileux qui entrent dans la fabrication des produits céramiques et des matériaux réfractaires.

D'une façon générale, la transformation permettant de changer la matière friable et incohérente qu'est l'argile, en produit solide et inaltérable, est réalisée par cuisson. Cependant le matériau ainsi obtenu varie avec la composition minéralogique de la roche employée et suivant le mode de cuisson.

On distingue, en effet, des argiles « grasses » et des argiles « maigres » : les premières sont relativement pauvres en sable, tandis que les autres en contiennent des quantités relativement importantes.

Les principales propriétés des argiles dont il faut tenir compte au moment de la cuisson sont le durcissement, le retrait et la fusibilité. Mais il faut aussi prendre en considération la plasticité, c'est-à-dire l'aptitude de l'argile humide à se laisser modeler, puisque, dans un premier temps, le matériau fait l'objet d'un façonnage destiné à donner aux objets la forme voulue. La plasticité est d'autant plus grande que la teneur en minéraux argileux est plus élevée et la teneur en sable plus faible ; les argiles les plus plastiques sont donc les argiles grasses.

Les différentes phases du travail de l'argile sont : l'émiettage, effectué à l'aide de brise-mottes, qui réduit le matériau en une fine poussière et peut servir à homogénéiser les matériaux, surtout si on doit mélanger plusieurs produits, le pétrissage à l'eau, le façonnage, le séchage à l'air et enfin la cuisson. Pendant la cuisson, le matériau perd son eau et se transforme en subissant un durcissement considérable : l'argile cuite n'est plus plastique. Pour éviter qu'elle ne devienne poreuse à la cuisson, il faut utiliser des mélanges de composition spéciale et opérer à des températures convenables.

La cuisson provoque en outre un certain retrait, c'est-à-dire une diminution de volume, dû à la perte d'eau et au nouvel arrangement que prennent les particules du minéral. Le retrait dépend donc de la composition et de l'humidité du matériau, ainsi que de la température de cuisson ; le phénomène du retrait a une importance considérable dans l'industrie céramique. En effet, si les matériaux ordinaires subissent un retrait d'environ 5 à 10 % du volume initial, les matériaux plus plastiques auxquels s'adresse précisément l'industrie céramique, subissent un retrait pouvant atteindre 15 %.

On évite en partie cet inconvénient en ajoutant à la pâte un corps « maigre » tel que du quartz ou de l'argile déjà cuite.

Enfin, il faut tenir compte de la fusibilité du matériau soumis à cuisson ; plus l'argile est pure, plus elle fond difficilement : elle est donc plus réfractaire ; ainsi le kaolin pur dont la teinte est blanche même après cuisson ne fond qu'à une température très élevée. Inversement, la présence d'impuretés abaisse le point de fusion ; c'est la raison pour laquelle les matériaux contenant des oxydes de calcium, de fer et de magnésium ne se prêtent pas à la fabrication d'éléments réfractaires. Toutefois, une teneur élevée en alumine (oxyde d'aluminium) rend l'argile très réfractaire.

Il faut noter encore à propos des impuretés que contiennent les argiles que la présence de certains métaux donne aux produits cuits une couleur particulière : le fer colore les poteries en rouge, le manganèse en brun. C'est

C. Bevilacqua

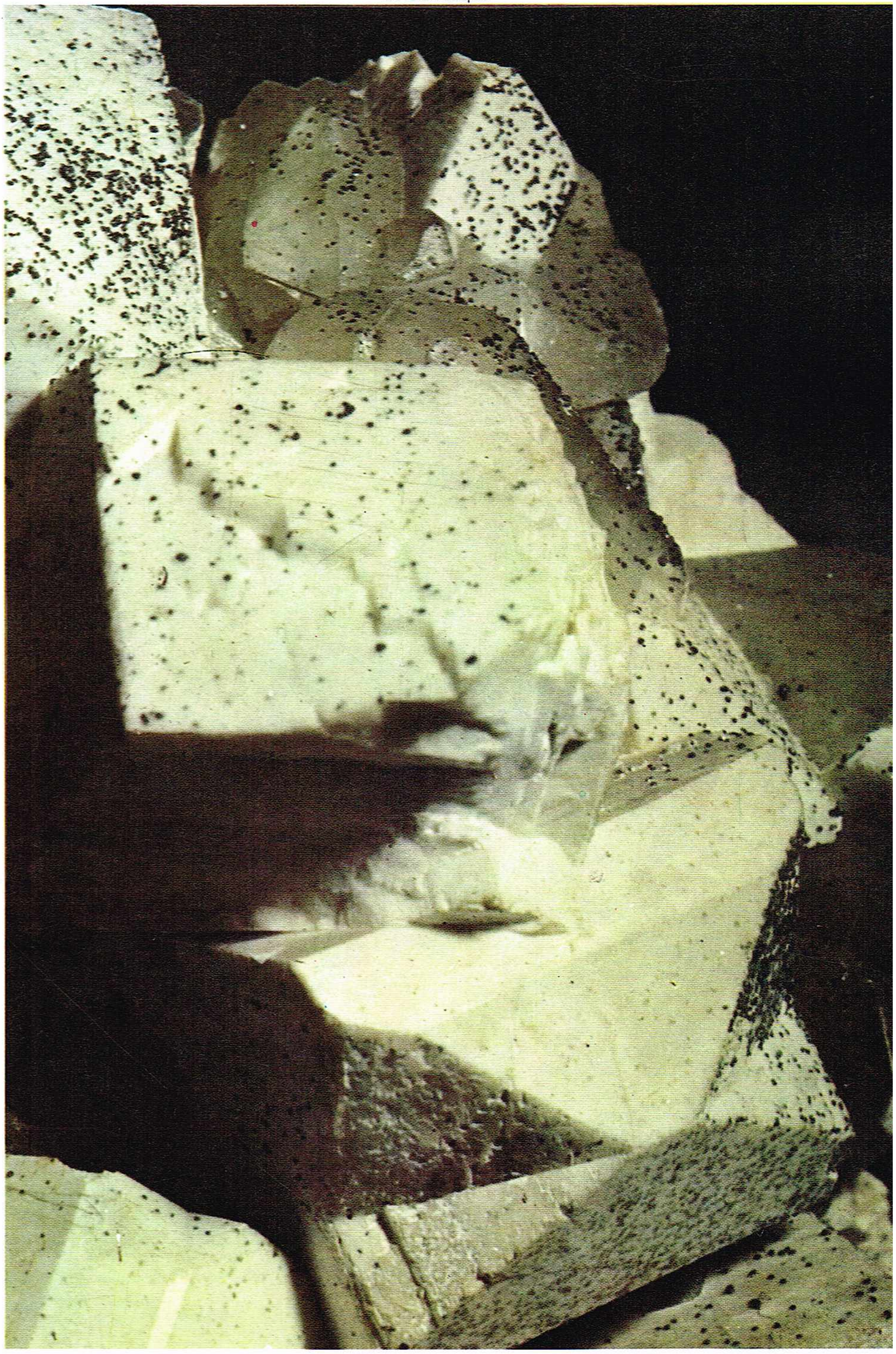

Macles d'orthose. Baveno (lac Majeur). L'orthose est un des principaux représentants de la famille des feldspaths, elle est utilisée dans la production des porcelaines.

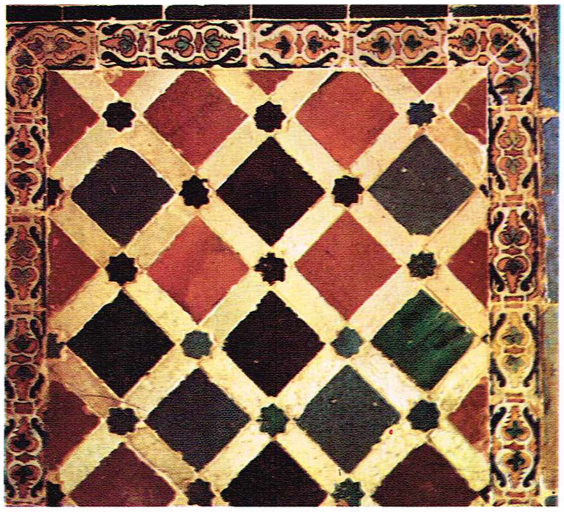

A gauche, carrelage polychrome du patio de Las Roncellas dans l'Alcazar de Séville. A droite : ange et sujets en terre cuite peinte (artisanat de Metepec, Mexique).

ainsi que des argiles manganifères sont utilisées pour la fabrication de tuiles dont l'aspect sombre est très apprécié.

Employés dès la plus haute antiquité, les matériaux argileux ont permis le développement d'une industrie très spécialisée qui met en œuvre des techniques hautement élaborées. Des soins particuliers sont apportés tant pour la préparation des pâtes que pour leur cuisson et les méthodes sont sensiblement différentes selon qu'il s'agit de produire des briques, des réfractaires, des céramiques, des grès, des faïences ou des porcelaines.

La fabrication des briques ordinaires comprend les quatre opérations suivantes :

— *la préparation de la pâte qui nécessite en général l'adjonction d'un dégraissant tel que du sable ou du quartz pulvérisé,*
— *le façonnage réalisé par pressage à l'aide de machines,*
— *le séchage qui peut se faire dans des chambres spéciales ou par passage dans des tunnels où l'humidité et la température sont contrôlées en permanence,*
— *la cuisson qui est effectuée dans de grands fours continus à une température de 900 °C.*

Les briques réfractaires sont préparées selon des procédés analogues, mais en utilisant des matériaux plus purs, donc moins fissiles. Pour rendre ces produits plus compacts et pour éviter qu'ils ne subissent des variations trop importantes de volume à une température élevée, on mélange aux matériaux des argiles déjà cuites.

LES PORCELAINES

Les porcelaines méritent une mention particulière, puisqu'elles constituent l'un des matériaux les plus appréciés pour la fabrication de la vaisselle, les récipients de laboratoire, les éléments sanitaires, les isolateurs électriques, etc. Du point de vue chimique, ces matériaux sont constitués essentiellement d'alumine et de silice, avec de petites quantités de potassium.

On les obtient en chauffant à une température élevée (de 1 400 °C à 1 500 °C) des mélanges formés de deux parties de kaolin pur à grain fin, une partie de feldspath et une partie de quartz. Cela donne les porcelaines dures appelées également porcelaines feldspathiques ; en utilisant moins de kaolin, on obtient les porcelaines tendres, tandis qu'en diminuant la quantité de feldspath on obtient les porcelaines destinées aux laboratoires de chimie (car le feldspath incorporé à la pâte joue le rôle de fondant).

L'émail qu'on utilise pour recouvrir la surface des porcelaines — et qui doit lui aussi subir la cuisson — ne diffère pas beaucoup de ces dernières par sa composition. Les principales propriétés d'un émail doivent être l'élasticité, la dureté, une faible fusibilité ; de plus il ne doit pas former de bulles à la cuisson. L'émail doit en outre avoir le même coefficient de dilatation que le matériau à émailler ; autrement dit, il doit subir les mêmes variations de volume en fonction de la température.

La cuisson des porcelaines se fait en deux temps : une première cuisson permet d'éliminer l'eau présente dans le kaolin et provoque le durcissement des objets. Pour les porcelaines dures cette cuisson appelée « dégourdi » se fait vers 1 000 °C, alors que la température requise pour la porcelaine tendre est de 1 250 °C. On obtient ainsi le « biscuit », c'est-à-dire une porcelaine poreuse : après émaillage on effectue une deuxième cuisson à 1 400 °C dans le cas des porcelaines dures et seulement 1 000° pour les porcelaines tendres.

Dans la porcelaine, il se forme après cuisson un nouveau minéral, la mullite (3 Al_2O_3, 2 SiO_2). Il représente 25 % de la pâte, tandis que 75 % des matériaux sont vitreux. Compacte et blanche, la porcelaine se distingue des autres produits céramiques par son aspect translucide, c'est-à-dire par sa demi-transparence à la lumière.

Les porcelaines orientales, dont les plus célèbres sont les chinoises et les japonaises, sont plus tendres et contiennent moins de kaolin dans leur pâte ; elles sont plus compactes et fondent plus facilement, exigeant donc une température inférieure pour leur cuisson. Inventée par les Chinois, la porcelaine semble avoir été introduite en Europe à l'époque des Croisades. Des indications fournies par Marco Polo sur la composition de la pâte, la découverte de gisements de kaolin et les progrès réalisés dans le domaine des hautes températures ont permis à partir du XVII^e siècle la création de très nombreuses manufactures en Angleterre, en Allemagne, aux Pays-Bas, en France, en Italie et au Portugal (parmi les plus célèbres il faut citer les manufactures de Sèvres et de Limoges).

LES CÉRAMIQUES, LE GRÈS ET LA FAIENCE

Les faïences sont des produits très connus dont l'apparence n'est pas sans évoquer la porcelaine ; toutefois elles sont fabriquées avec du kaolin moins pur, et contiennent plus de quartz, ainsi qu'une certaine quantité de calcaire ; elles sont cuites à des températures souvent inférieures ; elles ne sont pas translucides et présentent une structure poreuse à grain plus gros. Recouvertes d'un émail mat ou brillant, elles sont utilisées pour la fabrication d'assiettes. La vaisselle de Faenza est particulièrement célèbre ; c'est d'ailleurs du nom de cette ville que vient le terme de faïence.

Les majoliques sont des poteries peintes avec des émaux métalliques, fabriqués à base de bioxyde d'étain. Elles présentent souvent une assez grande valeur artistique et commerciale. Après l'Orient, l'Europe a vu surgir des manufactures célèbres de produits céramiques dans de nombreuses localités : Capodimonte et Faenza, en Italie, Delft, en Hollande ; d'autres fabriques existent en Angleterre, en Allemagne et en France.

Citons, enfin, d'autres produits céramiques se prêtant plus ou moins bien à la fabrication d'objets d'art, mais qui ont une grande importance en raison de l'usage très courant dont ils sont l'objet. Le plus connu est le grès. C'est un produit qui a des propriétés intermédiaires entre les faïences et les porcelaines. Cuit à une température élevée, il est utilisé principalement pour fabriquer des tuyaux, des siphons, des raccords, des appareils sanitaires, des récipients pour l'industrie chimique (car il a une excellente résistance aux agents chimiques), des conduites d'égout ainsi que des carreaux pour revêtements de sol et de mur.

Enfin il convient de rappeler que, de nos jours encore, des céramistes de talent travaillent sans cesse à la mise au point de nouvelles pâtes avec lesquelles ils réalisent des œuvres d'une très grande beauté.

LES SABLES

Les sables sont des roches sédimentaires, incohérentes, formées de très petits fragments de minéraux.

On observe une très grande diversité dans la couleur des sables : celle-ci est habituellement claire (blanc, beige, rose ou jaune) quand il s'agit de sable siliceux, même si celui-ci renferme des fragments de calcaire ou de feldspaths; elle peut, toutefois, être gris foncé et même noire lorsque le sable est riche en minéraux sombres, comme c'est le cas sur les plages de la mer Tyrrhénienne.

Les sables proviennent de la désagrégation de différents types de roches qui ont été soumises à l'action érosive des agents atmosphériques. Ceux-ci provoquent essentiellement la fragmentation; les eaux de pluie exercent une action dissolvante sur certains minéraux dont la disparition rend la roche friable ; le gel et le soleil par suite de la dilatation ou de la contraction qu'ils entraînent rompent les masses rocheuses ; le vent enfin, sous l'impact des poussières qu'il véhicule, joue le rôle d'abrasif, tandis que les eaux des torrents font s'entrechoquer les galets qui encombrent leur lit et que les glaciers agissent à la manière d'un broyeur.

Il résulte de ces diverses actions une lente destruction des matériaux qui constituent les roches, dont seuls sont épargnés les minéraux les plus durs et ceux qui résistent le mieux à l'effet dissolvant des eaux. Ainsi le quartz, qui possède une grande dureté et qui est peu soluble, résiste très bien aux phénomènes d'altération ; comme, de plus, c'est un élément majeur de nombreuses roches, il constitue la part la plus importante des sables. Parmi les nombreux autres minéraux qui peuvent se trouver mêlés au quartz, on peut citer : la muscovite, les feldspaths et la dolomite, ainsi que des minéraux lourds tels que le zircon, la monazite, le rutile, l'ilménite et l'hématite.

Les sables feldspathiques sont assez rares, car ces minéraux sont facilement altérables; la présence de feldspaths dans un sable est la preuve que l'érosion et le transport ont été très limités; les dépôts qui sont les plus riches sont ceux qui se trouvent dans des zones protégées des régions montagneuses. Les micas et les minéraux « lourds » sont présents en plus ou moins grande quantité selon leur abondance dans la roche dont sont issus les sables. On trouve aussi dans les sables des fragments de roches, souvent siliceuses, et des restes organiques tels que des coquilles d'animaux marins (surtout siliceuses ou calcaires).

En revanche, si l'on excepte les argiles et la glauconite, les minéraux « autigènes », c'est-à-dire nouvellement formés, sont assez rares dans les sables et dans les roches gréseuses. Les éléments détritiques étant de taille très variable, on réserve le nom de sable à ceux dont les dimensions sont comprises entre un dixième de millimètre et deux millimètres; ceux qui sont plus petits constituent les pélites, ceux qui sont plus grossiers forment les graviers et les cailloutis.

D'après leur composition, on distingue : les sables quartzeux, les sables calcaires (les uns et les autres sont souvent impurs), les sables feldspathiques, les sables quartzo-argileux et argilo-feldspathiques (contenant parfois des fragments de roche). Les plus répandus sont de loin les sables quartzeux, puis les sables calcaires; ces derniers sont caractérisés par la coloration variable que leur confère la présence d'impuretés. En revanche, les sables provenant de roches basiques sont rares; ils sont habituellement très sombres et se rencontrent sur les plages situées dans des régions volcaniques (il y en a près d'Agde dans le Languedoc).

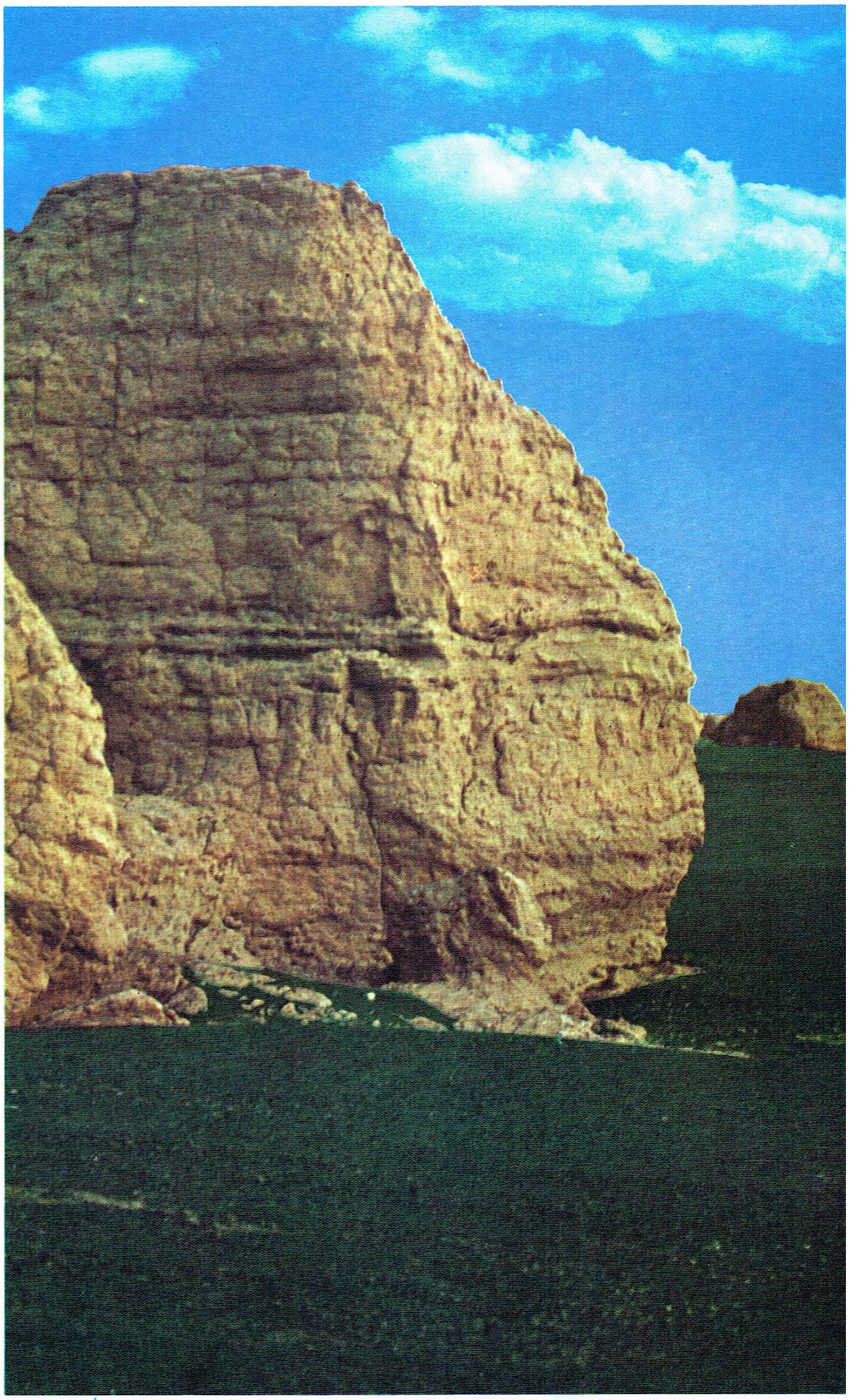

Formations rocheuses dans le désert des environs de Zahédan (Iran).

Si l'on tient compte du mode de formation des dépôts de sable, on distingue essentiellement des dépôts éluviaux, dus à l'accumulation sur place des matériaux provenant de la désagrégation des massifs rocheux, et des dépôts alluviaux qui résultent du transport qui peut s'effectuer sur de très longs parcours.

Parmi ces derniers on reconnaît : des dépôts morainiques, dus à l'action des glaciers (existant surtout dans les pays nordiques et les régions montagneuses) ; des dépôts fluviatiles (habituellement situés dans les méandres des cours d'eau) ; des dépôts lacustres (occupant souvent l'emplacement de lacs asséchés et fournissant un sable de très bonne qualité) ; des dépôts éoliens, dus à l'action du vent (formant d'immenses étendues dans les déserts ou dans des régions autrefois désertiques), et des dépôts littoraux formant les deltas et les plages.

Notons tout de suite que le sable, matériau incohérent que le vent et les eaux déplacent très facilement, acquiert une certaine cohésion lorsqu'il est mouillé. Quand il est sec, le sable se laisse facilement modeler par le vent qui le répand sur de vastes contrées et forme des dunes empêchant toute culture. Ce phénomène revêt une ampleur considérable dans les déserts des régions sahariennes, que les Arabes appellent « ergs ». La formation de ces immenses étendues de sable s'opère avec une incroyable rapidité, sous l'action des écarts très importants de température entre le jour, très chaud, et la nuit, souvent très froide, qui font « exploser » les roches avec un bruit ressemblant à des coups de feu.

C'est ainsi que, des grands massifs rocheux qui affleuraient sur toute la surface de ce territoire, il ne reste aujourd'hui que quelques « îlots » formés de roches plus résistantes (ces îlots sont les massifs du Tibesti et du Tassili) ; les roches, en se brisant en blocs de différentes dimensions, donnent lieu à la formation de « hamadas » ou déserts de pierre. Sous l'action de cours d'eau à caractère torrentiel, et sous celle des vents, s'effectue une séparation des fragments ; les grains les plus fins et les plus légers sont emportés tandis que subsistent sur place les éléments grossiers.

Le vent est sans conteste le grand façonneur du visage du désert : c'est lui qui est le responsable de la formation des dunes, amoncellements de sable offrant aux vents dominants leur flanc le plus incliné. Elles sont disposées en demi-cercles successifs, de telle sorte que, au sommet d'une colline, correspond, dans le demi-cercle suivant, un creux. Poussées par les vents, les dunes se déplacent et envahissent les oasis, étouffant la végétation déjà si réduite.

Exemple de « plage noire » à Praia a Mare, sur les côtes de Calabre.

C. Bevilacqua

Le problème que pose la fixation des dunes a une importance vitale ; aussi, dans de nombreuses régions, a-t-on envisagé différentes solutions, qui consistent surtout à planter des arbustes capables de résister à des conditions aussi rigoureuses. Peu à peu, ces arbustes fixent les dunes par leurs racines et assurent la formation d'une couche d'humus apte à recevoir des cultures.

LES DIFFÉRENTS TYPES DE SABLES

Le plus répandu est le sable constitué de quartz presque pur : il est de couleur blanche, parfois légèrement coloré par des impuretés dont les principales sont les oxydes de fer. Il existe un type particulier de sable siliceux, blanc et très fin, formé de squelettes siliceux de végétaux et d'animaux marins, comme les diatomées et les radiolaires ; une variété est connue sous le nom de « tripoli » ou « farine fossile ». Capables d'absorber de grandes quantités de liquides, ces sables connaissent des emplois particuliers, notamment comme filtres. En outre, on les utilise dans l'industrie chimique et dans la fabrication des explosifs (la « farine fossile » sert à préparer la dynamite).

Les autres sables siliceux, lorsqu'ils sont particulièrement purs, sont largement employés dans la fabrication du verre ; l'industrie métallurgique les utilise pour réaliser les moules dans lesquels est coulée la fonte ; ils servent en outre pour filtrer les eaux, et comme abrasifs (car le quartz est un minéral d'une remarquable dureté).

Les sables calcaires, également très répandus, présentent des colorations diverses. Le sable qui provient de la démolition des récifs coralliens et qui forme les plages des mers tropicales, célèbres par leur blancheur, est un type particulier de sable calcaire, remarquable par sa pureté.

Les sables feldspathiques, formés généralement de grains plus grossiers que les sables siliceux, ont une coloration rose ; on les voit souvent près des roches granitiques partiellement érodées par les eaux. Lorsqu'ils sont purs, on les utilise dans la fabrication des céramiques. Les roches basiques forment des sables riches en composés de fer et de magnésium, ce qui leur confère une coloration grise, souvent foncée ; ils peuvent contenir des éléments très recherchés, comme le titane ou d'autres éléments encore plus rares.

EMPLOIS DES SABLES

Tous les types de sables peuvent servir de matériau inerte pour la préparation de mortier de chaux ou de ciment. Mais on utilise surtout le sable de rivière, qu'un tamisage préalable a séparé en plusieurs qualités selon la grosseur des grains. Mis dans des sacs, le sable permet de construire rapidement des digues de fortune contre la crue des fleuves ou des remparts de protection contre les explosions.

On lui connaît quelques emplois curieux dans le passé. Ainsi, avant l'apparition du papier buvard, du sable très fin était utilisé pour sécher l'encre ; il servait aussi dans des sabliers employés pour mesurer le temps. L'industrie du verre l'utilise aujourd'hui pour dépolir le verre et l'industrie métallurgique s'en sert dans un type particulier de traitement des surfaces, appelé sablage. Enfin, le sable est largement utilisé dans la construction des routes, et, répandu sur le verglas, il facilite la circulation automobile en hiver.

Enfin, il ne faut pas oublier certains emplois thérapeutiques du sable : les bains de sable chaud se sont révélés efficaces dans le traitement de certaines affections ostéo-articulaires.

On sait aussi que certains sables sont susceptibles de contenir des minéraux précieux, or, platine ou différentes pierres précieuses. Ces sables sont transportés par les rivières qui naissent de massifs montagneux particulièrement riches en ces minéraux. Ainsi, à Ceylan et en Birmanie, les sables recèlent parfois des gemmes, telles que saphirs et rubis. Les gens qui s'adonnent à la recherche de ces minéraux connaissent très bien les anses des fleuves où le courant est susceptible de déposer le précieux butin ; le sable est lavé dans des récipients spéciaux, bas et larges, appelés « batées », qui permettent de séparer les minéraux en favorisant l'élimination des matériaux les plus légers.

EAUX MINÉRALES ET EAUX THERMALES

Les eaux qui jaillissent du sol sont remarquables, et dès l'Antiquité l'intérêt qu'elles représentent pour l'homme s'est fait ressentir. En effet, dans la Gaule conquise par les Romains, des sources ont été captées, alimentant des établissements réservés aux soins du corps (à Luxeuil-les-Bains, existent dix-huit sources salines et chaudes et les ruines d'une ville gallo-romaine).

On désigne couramment sous le nom d'« eau minérale » toutes les eaux qui sourdent du sous-sol. Cependant, si ce terme reflète bien leur provenance, une comparaison rapide entre les différentes sources montre qu'il existe de très grandes variations, physiques ou chimiques.

LES PROPRIÉTÉS DE L'EAU

L'eau est le solvant de nombreuses substances : quantité de sels et divers gaz peuvent se dissoudre dans l'eau. Ce pouvoir varie, cependant, en fonction de la température et de la pression ; la solubilité des sels est plus grande à chaud, tandis que celle des gaz augmente avec la pression. La présence de certains gaz favorise également la dissolution de quelques sels ; ainsi le carbonate de calcium est plus soluble dans les eaux chargées de dioxyde de carbone.

Enfin, l'eau, chimiquement pure, manifeste une grande agressivité à l'encontre des composés minéraux ; pour cette raison elle n'existe pas dans la nature. L'eau de pluie même, bien que résultant d'une distillation naturelle, n'est pas totalement dépourvue de substances étrangères, puisque, en se condensant, elle se charge de gaz pris dans l'atmosphère. Par ailleurs, après une chute de pluie, tandis qu'une partie de l'eau ruisselle le long des pentes et va grossir le cours des rivières, une autre pénètre dans le sol et migre en profondeur en imbibant les roches poreuses jusqu'à ce que l'étanchéité d'une couche de terrain l'arrête. Il se forme alors une nappe aquifère.

Quand les formations géologiques sont entaillées par des vallées sur les flancs desquelles affleurent des roches imperméables que surplombent des terrains poreux, on rencontre des sources réparties au long du contact entre les deux types de roches.

L'eau qu'elles fournissent est généralement froide. Elle contient en solution des gaz atmosphériques (c'est-à-dire de l'oxygène, de l'azote et du dioxyde de carbone) ainsi que des ions empruntés aux roches placées au contact de la nappe ; il s'agit le plus souvent de calcium et de magnésium.

La quantité de sels dissous peut varier dans de larges proportions puisqu'en moyenne le résidu sec pour un litre est compris entre 1 et 25 décigrammes. Ainsi, certaines eaux plus « dures » que d'autres déposent, par chauffage, des encroûtements sur les parois des récipients.

Quand les eaux météoriques ne rencontrent en circulant dans le sol que des roches pauvres en éléments solubles, elles sont presque dépourvues de minéralisation ; on les appelle alors « eaux oligo-minérales ».

Dans certains cas, en raison de la structure des couches géologiques (c'est-à-dire leur géométrie), l'eau en s'infiltrant dans le sol s'y trouve emprisonnée, formant alors des nappes captives, exploitées soit par puits, soit par forage ; quelquefois ces puits jaillissent spontanément (puits artésiens).

Enfin, l'eau des nappes souterraines peut rencontrer dans le sol des roches qui constituent de gigantesques filtres déterminant leur parfaite limpidité.

Toutes ces eaux, dites « minérales », reçoivent des qualifications diverses selon les substances qu'elles renferment :

L' « Old Faithful Geyser », célèbre soufflard situé dans le parc national de Yellowstone (Wyoming, U.S.A.).

— les eaux salines contiennent du chlorure de sodium ;
— les eaux amères, des sels de magnésium ;
— les eaux sulfureuses, du dioxyde de soufre ;
— les eaux acidulées, du dioxyde de carbone ;
— les eaux ferrugineuses, des sels de fer.

Il existe par ailleurs un nombre important de sources jaillissantes qui se distinguent des précédentes par leur minéralisation souvent forte et leur température élevée. Les eaux qu'elles fournissent, appelées « eaux thermo-minérales » ou « thermales », sont souvent captées soit pour l'énergie qu'elles permettent de recueillir, soit en raison de leurs propriétés thérapeutiques.

CONSTITUANTS ET TEMPÉRATURE DES EAUX

Comme les eaux minérales, les eaux thermales contiennent des sels et des gaz en solution. Les anions les plus fréquemment rencontrés dans les eaux thermales sont les ions : chlorure, bromure, sulfate, hydrogéno-carbonate, iodure et fluorure. Quant aux cations, on note la présence presque constante de sodium et fréquente de magnésium, de potassium, de lithium, de calcium, de fer, de strontium et d'aluminium. Signalons en outre la présence de substances particulières telles que l'acide borique, qui est exploité en Toscane en raison de son abondance dans l'eau des soufflards, et la silice colloïdale qui produit des dépôts auprès de nombreuses sources et geysers. Les gaz que l'on rencontre habituellement sont : le dioxyde de carbone, le sulfure d'hydrogène, l'azote et sous forme de traces les gaz rares (hélium, néon, argon, krypton), le méthane et l'hydrogène. L'extrême abondance du dioxyde de carbone est pour le moins singulière ; ainsi la source de Boussange, près de Vichy, a un débit de 800 litres de ce gaz à la minute pour 200 litres d'eau.

Parlons maintenant de la chaleur des eaux thermales. Certaines sources jaillissent à une température élevée ; ainsi à Chaudes-Aigues (Cantal) l'eau atteint 81 °C, tandis qu'aux États-Unis, dans le parc de Yellowstone, de nombreux geysers projettent par intermittence des jets d'eau bouillante.

Le « Monarch Geyser », cratère du « Norris Geyser Basin », parc national de Yellowstone (Wyoming, U.S.A.).

S.E.F

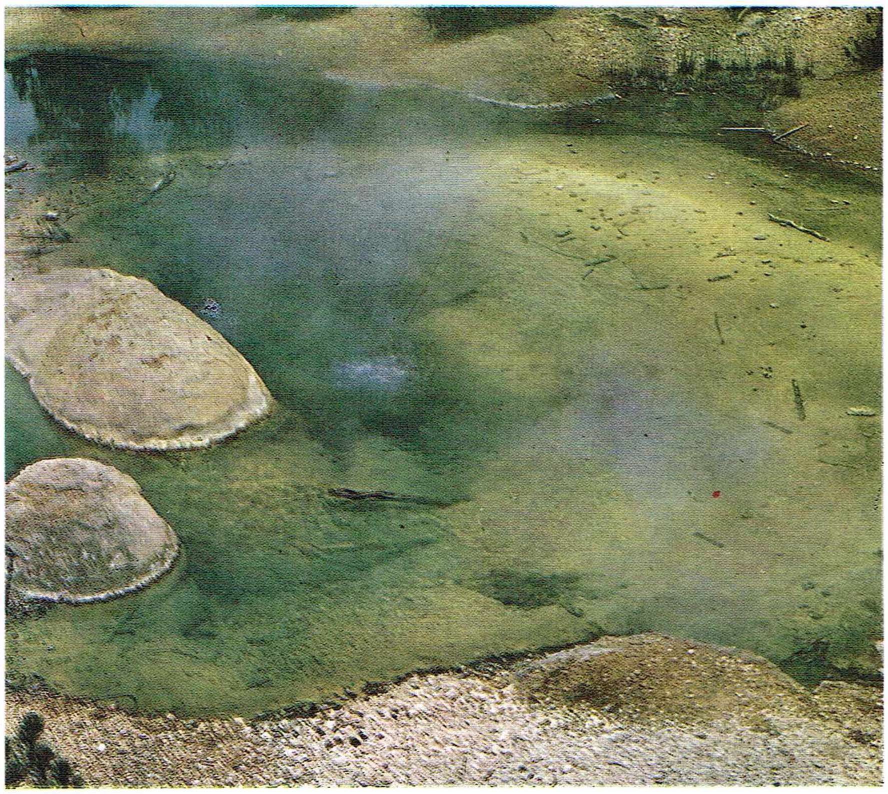

On sait que les mesures effectuées dans le sous-sol, notamment dans les puits de mines et dans les forages font apparaître une augmentation progressive de la température à mesure que la profondeur s'accroît. C'est le « gradient géothermique ». Toutefois, la variation n'est pas la même en tout lieu ; elle est plus faible dans les zones tectoniques anciennes qu'à proximité des aires volcaniques récentes ou des jeunes chaînes de montagnes. En moyenne ce gradient est de 1 °C pour 30 mètres, ses valeurs extrêmes sont de l'ordre de 1 °C pour 10 mètres et 1 °C pour 80 mètres.

Par ailleurs, l'activité volcanique, en faisant circuler à travers l'écorce terrestre des masses de roches très chaudes, peut, au voisinage des conduits empruntés par la lave, provoquer un réchauffement important des roches. De même l'accumulation de matériaux radioactifs, comme cela vient d'être mis en évidence au Gabon, réalise parfois de véritables réacteurs nucléaires naturels qui dégagent dans leur voisinage une grande quantité de chaleur. On peut donc penser que l'eau des sources thermales est une eau d'origine météorique, qui en circulant dans l'écorce terrestre a pu emprunter aux roches qu'elle traverse l'énergie nécessaire pour se réchauffer.

Dans le cas où l'échauffement est seulement dû au gradient géothermique, il faut que l'eau puisse s'enfoncer à une profondeur de l'ordre de 2 000 à 3 000 mètres. Elle est alors capable de se minéraliser au contact des roches. Cependant il faut que la remontée se fasse rapidement, sinon lors de la traversée de terrains de plus en plus froids, au voisinage de la surface, elle perdrait sa chaleur et se déminéraliserait.

Une autre difficulté concerne les causes qui permettent à l'eau, bien que soumise à l'action de la pesanteur, de remonter. Il faut, en effet, deux cheminements distincts : l'un, pour la descente ; l'autre, pour la montée. Venant de grande profondeur, l'eau ne parvient en surface que si les pertes de charge qui résultent du freinage sur les parois du chenal sont compensées par les forces mises en jeu. Or celles-ci sont déterminées par : la différence de densité entre le fluide froid et le fluide chaud, l'action pressante exercée par la vapeur formée par suite du réchauffement et le poids de la colonne d'eau froide. En tout état de cause le point d'émergence de la source doit donc se situer à une cote inférieure à celle de la zone de pénétration des eaux superficielles.

Ainsi l'hypothèse de l'origine météorique des sources thermales n'est pas très satisfaisante. Une autre théorie fait intervenir l'existence d'une eau qui aurait son origine dans les magmas profonds et que l'on appelle « eau juvénile ».

Cette eau apparaît comme le résultat de réactions qui ont lieu au cours des phénomènes de différenciation magmatique. Pour certains scientifiques, l'hydrogène proviendrait même de la matière constituant le noyau de la Terre, qui par suite d'une oxydo-réduction intervenant au niveau des roches de l'écorce terrestre profonde formerait de l'eau. La présence d'eau dans les produits rejetés par les volcans lors des éruptions (il peut y avoir jusqu'à 75 % de vapeur d'eau dans les gaz volcaniques) ainsi que les jaillissements qui se produisent lors de certaines éruptions attestent l'existence de l'eau juvénile.

Il devient dans ce cas plus facile d'expliquer la minéralisation des eaux thermales.

Il est donc logique de penser que, sous l'action de la pression qui règne dans les chambres magmatiques profondes, la vapeur d'eau tente de s'échapper, en migrant à la faveur des zones de faiblesse qui affectent la couverture, entraînant avec elle une partie des éléments présents (fluor, bore, chlore, soufre, lithium, strontium, sodium, potassium).

L'hypothèse d'une origine magmatique des eaux thermales s'accorde mieux avec la forte minéralisation qui les caractérise.

C'est en définitive une origine mixte qui semble devoir être retenue.

Cependant une telle conclusion ne doit pas apparaître comme définitive. D'autres études portant sur la teneur en certains isotopes des éléments contenus dans les eaux et les gaz sont nécessaires : elles fourniront ainsi des informations nouvelles sur la circulation des eaux dans le sol.

L'ASTRONOMIE - LA PHYSIQUE DU GLOBE

On considère l'astronomie comme la plus ancienne des sciences. Elle fut, dès ses débuts, pratique et utilitaire, liée à la résolution de certains problèmes en rapport avec les nécessités de la vie de chaque jour, comme l'établissement de calendriers, la mesure du temps, ainsi que nous le verrons dans les pages qui suivent. Naguère science d'observation, l'astronomie s'est enrichie de branches nouvelles, dont la radio-astronomie qui fera l'objet d'une de nos rubriques.
Nous verrons également que l'envoi d'engins spatiaux est bénéfique à l'astronomie, à la météorologie et que les photos prises à partir des satellites artificiels permettent de mieux connaître la Terre. Notre Terre, où se posent de délicats et permanents problèmes d'énergie ou de ressources, que nous évoquerons.

L'OBSERVATION ASTRONOMIQUE ET LES INSTRUMENTS DE L'ASTRONOMIE

L'observation du ciel a constitué pour l'homme, depuis les temps les plus reculés, un aspect très important de son activité spéculative, et constitue aujourd'hui un domaine important de la recherche scientifique. Ce type de recherche a presque toujours été lié à la résolution d'une série de problèmes concrets (établissement du calendrier, mesure du temps, prévision de phénomènes), en rapport direct avec les nécessités de la vie quotidienne ; songeons par exemple à l'agriculture et au besoin absolu de connaître le mécanisme des saisons pour les semailles ou les récoltes, à l'élevage, au commerce, et aux premiers trafics maritimes, qui supposaient la possibilité de s'orienter d'après la position des étoiles. D'autres motivations, telles que le désir de puissance, ne sont pas étrangères à cette recherche : imaginons le prestige que pouvait procurer la prévision d'un phénomène aussi terrifiant qu'une éclipse de Soleil.

Les chroniques chinoises racontent que, durant le règne de Yao (XXIVe siècle av. J.-C.), on sélectionnait des spécialistes pour l'observation systématique des phénomènes célestes, le critère de sélection reposait sur une certaine prédisposition scientifique, et sur l'acuité visuelle. En effet, l'œil nu a été le premier instrument de l'observation astronomique et l'est demeuré jusqu'à la construction de la première lunette. Instrument qui est d'ailleurs d'une perfection étonnante, puisque, avec le concours de simples appareils de relevé des positions, comme la sphère armillaire et l'astrolabe, il a permis de reconnaître dans le ciel les planètes du système solaire jusqu'à Saturne, les constellations du zodiaque, de définir la position d'un grand nombre d'étoiles, et surtout de tirer de ces observations une série impressionnante de données : détermination (assez précise) de l'année tropicale, phases de la Lune, repérage des étoiles variables, mise en évidence de l'obliquité de l'écliptique, mesure du rayon terrestre et découverte de la précession des équinoxes. Cette liste n'est d'ailleurs pas limitative et ne concerne que les découvertes les plus spectaculaires.

LA SPHÈRE ARMILLAIRE ET L'ASTROLABE

Instruments d'astronomie très anciens, demeurés en usage jusqu'au XVIIe-XVIIIe siècle, on les utilisait pour déterminer la position des astres par la mesure de leur ascension droite, de leur déclinaison et de leur hauteur. La sphère armillaire était déjà connue à l'époque d'Ératosthène (IIIe siècle av. J.-C.). Constituée par des cercles métalliques concentriques portant une graduation, inscrits les uns dans les autres, quelques-uns fixes (représentant l'équateur, l'écliptique et un méridien), d'autres mobiles, l'armille permettait d'obtenir les coordonnées astronomiques des corps célestes.

Plus simple et plus maniable, l'astrolabe, de fabrication arabe, remonte probablement au IXe siècle ; l'exemplaire le plus ancien, qui date de l'an 912, est conservé à Paris. Il permettait la mesure de la hauteur d'un astre en le visant à travers une alidade tournant autour de l'axe passant par le centre du disque qui constitue le corps de l'instrument (disque portant sur le bord une graduation en 360°). Sur la face opposée à celle qui porte l'alidade, un système de lames (une pour chacune des latitudes géographiques établies) représentait la projection stéréographique des cercles de la sphère céleste, tandis qu'un deuxième disque tournant, dans lequel on avait percé la projection des étoiles les plus brillantes, permettait de

Mount Wilson and Palomar Observatories

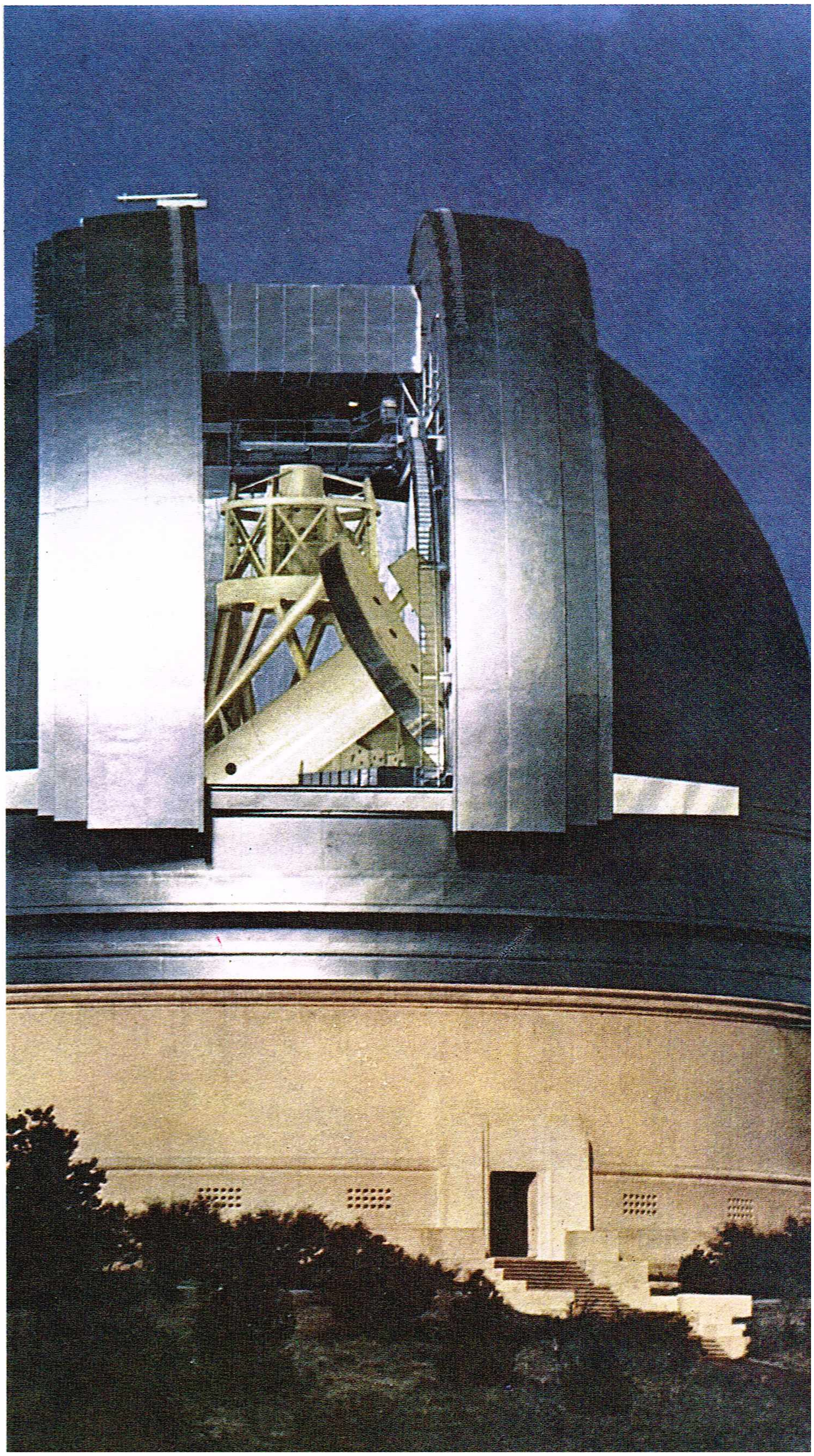

La coupole du télescope Hale du mont Palomar, dont le réflecteur mesure 5 mètres de diamètre (copyright du California Institute of Technology).

reproduire assez fidèlement l'aspect de la sphère céleste au-dessus de l'observateur. Un perfectionnement considérable fut introduit plus tard par l'Arabe Al-Zarqâlî, qui, vers l'an 1070, fabriqua un astrolabe universel ne comportant qu'une seule lamelle, valable pour n'importe quelle latitude.

L'astrolabe permettait, une fois connue la position des étoiles, de résoudre rapidement les problèmes d'orientation. Aussi fut-il utilisé comme instrument de navigation jusqu'au XVIII^e^ siècle, avant d'être remplacé par le sextant.

LA LUNETTE DE GALILÉE ET LE TÉLESCOPE

L'invention de la lunette astronomique transforma profondément la vision du ciel. En 1609, Galilée, qui taillait lui-même les lentilles, réussit, après plusieurs tentatives, à réaliser une lunette capable de grossissements voisins de 30 fois. Dirigé vers le ciel, son instrument lui permit de découvrir les quatre principaux satellites de Jupiter. En 1611, Kepler publiait dans son Dioptrica *la théorie géométrique des lentilles, contribuant ainsi à dissiper la méfiance qui entourait tout instrument optique.*

Une limitation importante de la lunette astronomique était la présence d'aberrations chromatiques. Newton remplaça alors l'objectif par un miroir parabolique réfléchissant et construisit, en 1672, un remarquable instrument astronomique : le télescope à réflexion.

Plusieurs télescopes furent alors créés : certains étaient dotés de miroirs de grand diamètre, tel celui réalisé par Herschel en 1785, dont le miroir mesurait 122 cm de diamètre et le tube 12 mètres de long; mais une telle complexité, jointe au médiocre pouvoir réfléchissant des métaux employés, freina momentanément la généralisation du télescope. L'introduction des doublets achromatiques, qui résolvaient partiellement le problème de l'aberration chromatique des lentilles, éclipsa ainsi pendant quelque temps le télescope à réflexion. Plus tard, la difficulté de construire des lentilles de grand diamètre et les progrès accomplis dans la réalisation de grands miroirs paraboliques en verre revêtus d'un dépôt métallisé firent opter définitivement pour le télescope à réflexion.

Voyons maintenant comment fonctionne un télescope. Le rayonnement lumineux émis par un objet céleste est reçu par le miroir concave à profil parabolique et concentré en son foyer, où il peut être recueilli sur une plaque photographique. Plusieurs systèmes permettent de réaliser la vision directe. Le système conçu par Cassegrain consiste en un petit miroir convexe, de forme parabolique, qui concentre l'image agrandie vers le milieu du miroir plus grand, où est pratiquée une ouverture. Là l'image est recueillie par un oculaire normal. On peut aussi dévier l'image latéralement, à l'aide de miroirs plans (système Newton et Coudé), et l'observer à l'extérieur du tube, qui constitue le corps de l'instrument. Cette solution est particulièrement appropriée pour l'examen spectroscopique, qui exige des installations fixes de dimensions considérables.

Dans tous les grands télescopes modernes, le tube est remplacé par un treillis métallique monté sur un support. Dans le grand télescope « Hale » du mont Palomar, entré en service en 1948, le support peut tourner dans un sens, tandis que le bâti métallique constituant le tube peut tourner dans l'autre sens à l'intérieur d'un support. En combinant les deux rotations, il est possible d'explorer tous les points de la voûte céleste à travers l'ouverture de la coupole, également mobile, et de suivre les astres dans leur mouvement.

Le télescope Hale, avec les 5,08 mètres de diamètre de son miroir et ses 16,8 mètres de longueur focale, fut pendant plus d'un quart de siècle le plus grand télescope du monde. Mais il vient d'être détrôné par un télescope soviétique, installé dans le Caucase et mis en service en 1974. Doté d'un miroir de 6 mètres de diamètre et d'une longueur focale de 24 mètres, ce télescope a la particularité d'être placé sur un support alt-azimutal. Un ordinateur imprime au télescope, par l'intermédiaire de moteurs asservis, de petits mouvements en hauteur et en azimut, qui, judicieusement combinés, permettent à l'instrument de rester pointé sur l'objet céleste choisi. C'est cette particularité qui a permis la construction d'un télescope aussi gigantesque.

Le télescope de 102 cm de diamètre de l'observatoire astronomique italien de Merate (Côme).

M. Pedone

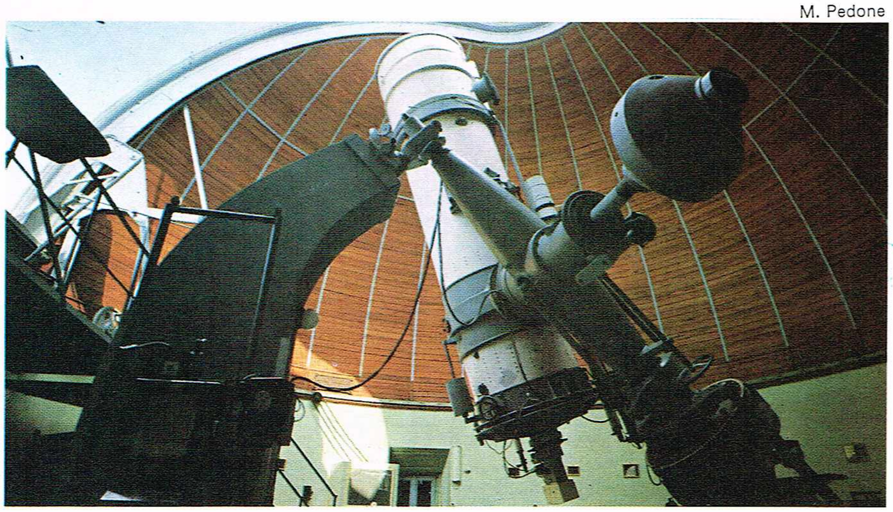

L'OBSERVATOIRE ASTRONOMIQUE

L'invention de la lunette astronomique et du télescope a modifié radicalement l'organisation de l'observatoire astronomique. Auparavant, lorsque l'œil était l'unique instrument d'observation, les observatoires étaient placés au sommet de grandes bâtisses. Le problème est aujourd'hui beaucoup plus complexe : il faut choisir un site qui soit à une certaine altitude, et où l'atmosphère soit peu turbulente, afin d'éviter les effets perturbateurs dus aux vents locaux ou aux grandes masses d'air qui circulent à haute altitude; les observatoires doivent aussi être éloignés des villes, afin d'éliminer les inconvénients résultant de la pollution atmosphérique.

Aujourd'hui, l'observation astronomique se divise en deux branches essentielles : l'astrométrie et l'astrophysique. Cette dernière étudie la structure, la composition et l'évolution des corps célestes par les techniques de l'observation optique, photographique et spectrographique; elle a reçu une nouvelle impulsion avec l'apparition d'un nouveau type d'instrument : le radiotélescope, qui a donné naissance à une nouvelle branche de l'astronomie : la radio-astronomie.

L'astrométrie, pour sa part, s'attache à déterminer la position et le mouvement des astres, avec en sous-produit la mesure précise du temps et certaines études géophysiques (mouvements de l'axe de rotation terrestre, variations de la vitesse de rotation, etc.).

Enfin, il nous faut dire un mot des satellites artificiels, dont l'emploi en astronomie a débuté le 7 décembre 1968 avec la mise en orbite du satellite américain OAO II (Orbiting Astronomical Observatory, *observatoire astronomique orbital); circulant sur une orbite terrestre, à environ 800 kilomètres d'altitude, un satellite de ce type peut accomplir toute une série d'observations et de mesures, en s'affranchissant des effets perturbateurs de l'atmosphère terrestre. On mesure l'importance de cet avantage si l'on songe qu'à l'observatoire du mont Palomar, dix ou quinze nuits par an seulement sont considérées comme parfaites pour l'observation optique et photographique du ciel.*

En outre, les satellites artificiels constituent le premier pas vers la réalisation de ce que de nombreux astronomes ont souhaité après les succès de l'ère spatiale, c'est-à-dire la possibilité d'étudier le cosmos à partir d'observatoires extra-atmosphériques. En effet, un instrument automatique n'est pas en mesure, et ne le sera sans doute pas avant longtemps, de remplacer l'homme, puisqu'il ne peut étudier que des phénomènes connus et prévus. Seul l'homme possède la faculté d'interpréter ce qu'il observe et d'exploiter au mieux les avantages offerts par les satellites artificiels. Les très nombreuses données que ceux-ci permettront de recueillir élargiront ainsi de manière importante le champ de nos connaissances sur l'Univers.

LES INSTRUMENTS DE LA RADIOASTRONOMIE

Science très jeune, la radioastronomie s'est déjà révélée comme un formidable moyen d'investigation pour la connaissance de la nature et de l'évolution de l'Univers; elle a enregistré au cours des vingt années de son développement une série impressionnante de succès, jusqu'aux récentes découvertes des quasars et des pulsars.

La radioastronomie est née presque par hasard, grâce à l'habileté d'un technicien et à la passion d'un radioamateur. Karl Jansky, ingénieur américain d'origine polonaise, fut chargé par la compagnie Bell Telephone *d'étudier l'origine des bruits de fond émis sur la longueur d'onde de 14,6 mètres, bruits qui perturbaient les circuits téléphoniques transocéaniques. En 1932, Jansky découvrit que ceux-ci venaient d'une région bien précise de la voûte céleste, correspondant à la constellation du Sagittaire. Dans un premier temps, du fait que la source radio se déplaçait d'est en ouest au cours de la journée, Jansky avait supposé que les bruits provenaient du Soleil, erreur due aussi au fait que ses premières observations avaient été effectuées au mois de décembre, époque où le Soleil se trouve justement projeté sur la constellation du Sagittaire. La découverte faite par Jansky, à savoir que les astres rayonnaient non seulement dans la bande dite « visible », mais aussi en radio, infiniment plus vaste que la fenêtre optique (de 1 mm à 50 m de longueur d'onde au lieu de l'intervalle d'un millier d'angströms dans le visible), fut longtemps ignorée et sous-estimée.*

Grote Reber, radioamateur américain, accorda en revanche à cette découverte toute l'attention qu'elle méritait; il fabriqua en effet un paraboloïde de 9 m de diamètre, qu'il installa dans son jardin, et, à partir de 1937, entreprit une exploration radio du ciel, notant minutieusement l'origine des « bruits » enregistrés. En 1940, grâce à des observations faites sur la longueur d'onde de 187 cm, il réussit à dessiner la première carte radio de la Galaxie. Naturellement, les observations de Reber manquaient de précision; le pouvoir séparateur d'un radiotélescope est en effet donné, comme pour le télescope optique, par le rapport entre la longueur d'onde et les dimensions de l'antenne, rapport qui fournit la mesure, en radians, de l'angle minimal sous lequel deux objets peuvent être « séparés ». Le pouvoir séparateur d'un radiotélescope, qui travaille sur des longueurs d'onde très grandes par rapport aux télescopes optiques, est donc nettement inférieur; en revanche, le radiotélescope permet d'explorer beaucoup plus en profondeur, justement en raison de la grande longueur d'onde des radiations qu'il capte.

La radioastronomie commença à s'affirmer dès la fin de la Seconde Guerre mondiale et conduisit en 1951 à cette très importante découverte que fut la réception de la raie 21 cm émise par l'hydrogène neutre à basse température. La découverte de ce rayonnement permit alors d'étudier la structure générale de la Galaxie, puisque l'hydrogène est le principal constituant du gaz interstellaire, et d'évaluer la densité de ce dernier sur la base de l'intensité de la radiation; enfin, il fut possible de mesurer la vitesse radiale des nuages de gaz en observant le décalage par effet Doppler des émissions enregistrées.

DU PARABOLOIDE DE REBER AUX RADIOTÉLESCOPES MODERNES

On assista ensuite à une intensification des études et des recherches pour construire des radiotélescopes de plus en plus puissants. En 1957, entrait en service Mark I, le célèbre radiotélescope de Jodrell Bank, installé dans la

Archives Radaelli

Le radiotélescope de Parkes, Australie, dont le paraboloïde orientable mesure 64 mètres de diamètre.

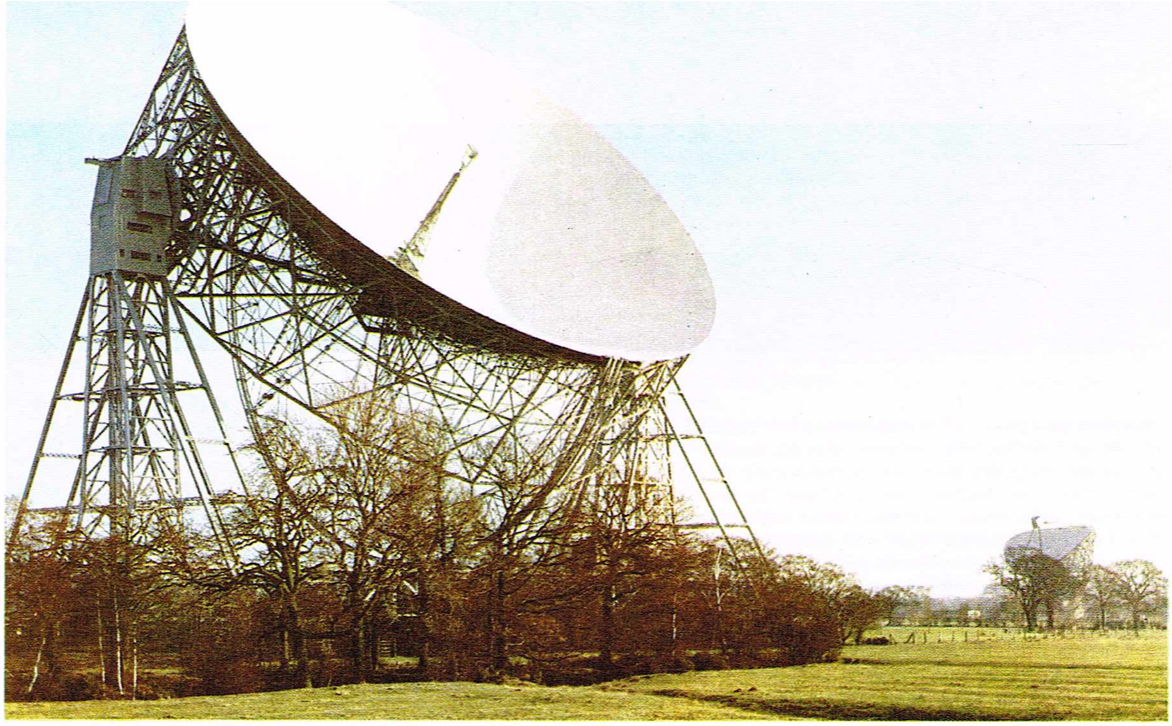

Mark I, le grand télescope anglais de Jodrell Bank, dont la popularité est due au rôle joué par cet instrument dans le domaine de l'exploration spatiale ; en effet, ce radiotélescope peut suivre les sondes spatiales et capter leurs signaux.

campagne du Cheshire, au sud de Manchester. Le réflecteur parabolique, qui mesure 76 mètres de diamètre, est constitué par des lamelles d'acier soudées ; sa surface, d'environ 8 000 m^2, permettrait à 20 000 personnes de s'asseoir dans l'immense cuvette. Quant au poids, il atteint 2 000 tonnes avec les structures.

Dans les paraboloïdes à surface compacte, pour la réception des hautes fréquences, il ne faut pas que les défauts de surface soient supérieurs à 1/16 de la longueur d'onde des radiations à recevoir. Pour les paraboloïdes à surface discontinue (paraboloïdes à grillage), les mailles ne doivent pas être espacées de plus de 1/8 de longueur d'onde, ce qui impose évidemment un certain nombre de difficultés de construction.

Au nombre des plus grands télescopes paraboliques à surface discontinue, on compte ceux de Bonn en Allemagne fédérale (100 mètres de diamètre), de Green-Bank, Virginie occidentale (92 mètres de diamètre), de Parkes, Australie (64 mètres de diamètre), et de Stanford, Californie (48 mètres de diamètre) ; tous sont de construction récente.

Pour les radiotélescopes de dimensions plus réduites, il est possible d'adopter un montage équatorial, comme pour les télescopes optiques, montage qui permet la rotation d'est en ouest autour d'un axe parallèle à l'axe de rotation terrestre. C'est le cas, par exemple, pour les deux plus petits radiotélescopes de Green-Bank, de 42 et 25 mètres de diamètre.

Pour les radiotélescopes de grandes dimensions, il existe plusieurs systèmes de visée : des structures fixes et une antenne focale, mobile, offrant la possibilité d'explorer seulement un secteur de la voûte céleste (c'est le cas du radiotélescope de Nançay, en France) ; structures tournantes autour d'un axe horizontal reposant sur deux appuis, qui, à leur tour, peuvent se mouvoir sur un rail circulaire (radiotélescope de Jodrell Bank et de Stanford) ; structure totalement fixe, comme dans le grand radiotélescope d'Arecibo (Porto Rico), le plus grand du monde, dont le paraboloïde à mailles repose sur une cuvette naturelle de 300 mètres de diamètre (8 hectares !) ; dans ce cas, c'est la rotation terrestre qui assure un « balayage» naturel du ciel.

Enfin, il existe le radiotélescope du type croix de Mills, du nom de son inventeur. Deux rangées d'antennes sont disposées dans les directions est-ouest et nord-sud ; grâce à des dispositifs qui permettent de passer une centaine de fois par seconde de la liaison en phase à la liaison en opposition de phase des deux rangées d'antennes et des circuits amplificateurs, on obtient la modulation de la puissance que l'objet céleste envoie dans le carré formé par l'intersection des deux bras d'antennes ; un détecteur spécial identifie les sources ayant les mêmes fréquences que la perturbation de la liaison.

Avec les radiotélescopes de Mills, comme celui qui est installé à Medicina, près de Bologne (Italie), on obtient un pouvoir séparateur égal à celui d'un paraboloïde ayant pour diamètre la longueur des deux rangées d'antennes orientées, mais une surface efficace moindre (la surface géométrique n'étant pas la même).

Avec de plus puissants instruments, il est aujourd'hui possible d'explorer l'Univers jusqu'à environ 8 milliards d'années-lumière, distance pour le moins vertigineuse quand on songe qu'une année-lumière équivaut à 10 000 milliards de kilomètres...

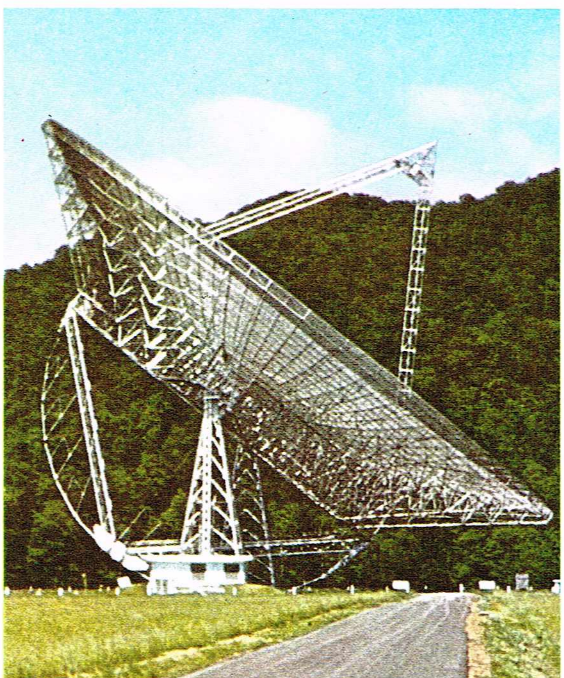

Le radiotélescope de Green-Bank, Virginie occidentale, ayant un diamètre de 90 mètres. C'est le plus grand radiotélescope installé à Green-Bank par le National Radio Astronomical Observatory (N.R.A.O.).

LA MESURE DU TEMPS

Le temps régit toutes les activités de l'homme, aussi bien sa vie familiale et sociale que son activité scientifique et technique. Dès l'Antiquité, des exigences de caractère tant religieux que pratique amenèrent l'homme à élaborer des systèmes permettant de situer dans une échelle de temps naturelle le « moment » et la « durée » de certains phénomènes ou événements. Toutes les techniques et méthodes élaborées par la suite, et même de nos jours, n'ont d'autre but que de préciser ces deux aspects essentiels de la notion de temps.

Pour établir la durée d'un phénomène, il faut avant tout disposer d'une « unité de temps », qui satisfasse aux deux conditions suivantes : être rigoureusement constante et parfaitement reproductible. La détermination du moment auquel un phénomène se produit exige quelque chose de plus, car elle suppose la reproduction continue et constante d'un intervalle de temps, permettant d'établir une relation entre deux événements non simultanés.

Le phénomène naturel qui satisfait le mieux à cette exigence est celui des mouvements de rotation et de révolution de la Terre autour du Soleil. Ces mouvements déterminent les phénomènes apparents du lever et du coucher du Soleil, c'est-à-dire l'alternance jour-nuit, et le phénomène tout aussi évident de la succession des saisons et des années.

LA DÉTERMINATION ASTRONOMIQUE DU TEMPS

Ce sont donc ces phénomènes qui, dès l'Antiquité, ont fourni une échelle naturelle du temps, susceptible de constituer le fondement d'une « chronologie » universelle.

Parmi les instruments capables de réaliser en pratique une telle chronologie, le gnomon *est certainement le plus ancien. Constitué essentiellement d'un objet vertical (simple bâton ou obélisque) projetant l'ombre solaire sur un plan horizontal, il permettait en effet de déterminer durant le jour ce qu'on appelait le « temps solaire vrai ». Les Chinois l'utilisaient déjà sous la dynastie Yao, environ 24 siècles av. J.-C., tandis que dans l'Égypte ancienne, vers le XV*e *siècle av. J.-C., le gnomon était utilisé pour la mesure du temps et la constitution du calendrier. Plus tard, vers la moitié du VI*e *siècle av. J.-C., son emploi fut introduit en Grèce par les Babyloniens, et s'étendit à tout le bassin méditerranéen. Les* cadrans solaires *que l'on voit encore de nos jours sur quelques vieux édifices, et qui comportaient un bras incliné, dirigé suivant l'axe de rotation de la Terre, furent les successeurs naturels du gnomon. L'introduction des lignes horaires, tracées de différentes manières sur la surface de projection du bras, permit ensuite de déterminer l'heure solaire aux différentes périodes de l'année avec une remarquable précision.*

En même temps, se développaient les sphères armillaires, *destinées surtout à permettre la détermination du temps avec la précision rendue possible par la connaissance du mouvement apparent du Soleil et des étoiles ; il s'agissait de systèmes compliqués de cadrans de forme sphérique, munis de cercles métalliques gradués, orientés dans les plans horizontal, équatorial et écliptique. Elles étaient déjà largement utilisées à Alexandrie du temps d'Ératosthène (III*e *siècle av. J.-C.), mais furent ensuite progressivement remplacées en tant qu'instruments de mesure du temps, surtout après l'introduction des lunettes astronomiques (1609), par les* cadrans muraux. *Ceux-ci étaient constitués par un quart de cercle métallique gradué, de dimensions considérables (2 à 6 m de rayon), et fixés à une paroi verticale. Plus tard, avec les cadrans muraux méridiens, rigoureusement orientés dans la direction nord-sud (début du XVII*e *siècle), les mesures de temps furent exclusivement fondées non plus sur la détermination du temps solaire, mais sur celle du temps sidéral, basé sur le mouvement des étoiles. Dans ce cas, le temps solaire était déterminé, indirectement mais avec une plus grande précision, sur la base des observations stellaires et de la connaissance du mouvement du Soleil par rapport aux étoiles. Un nouveau perfectionnement fut introduit plus tard (1689) par Römer, qui inventa un instrument semblable au cadran mural, mais de dimensions plus réduites, reposant sur un axe fixe tournant dans la direction est-ouest. Cet* instrument méridien, *perfectionné par la suite, représenta pendant plus de deux siècles le système le plus précis pour la détermination d'une échelle de temps astronomique (sidéral et solaire) ; aussi, surtout après l'introduction du micromètre impersonnel, conçu par Repsold en 1889, la précision intrinsèque dans les mesures de temps atteignit un ordre de grandeur de quelques dixièmes à quelques centièmes de seconde.*

A. Rizzi

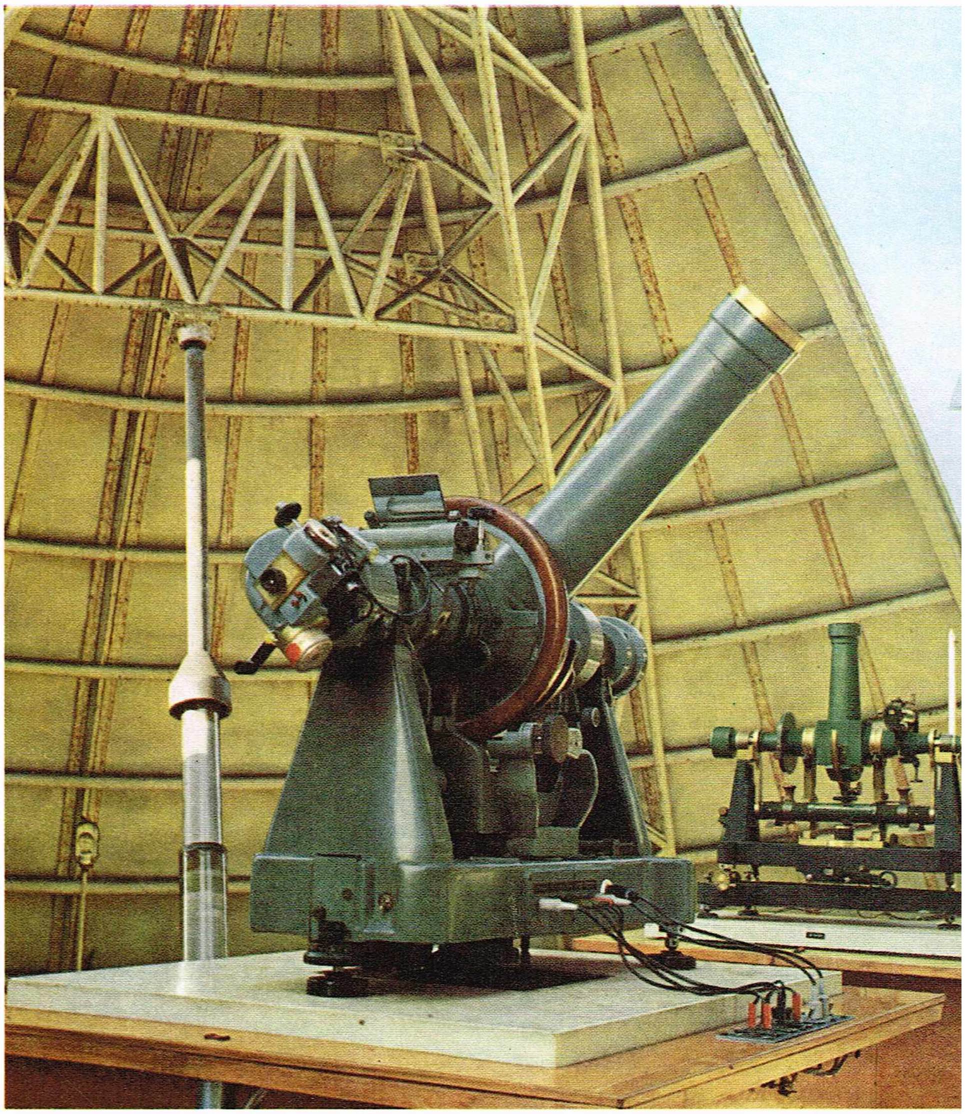

L'instrument des passages de l'observatoire Brera (Milan), utilisé dans les observations astrométriques et pour la détermination du temps local.

C. Bevilacqua

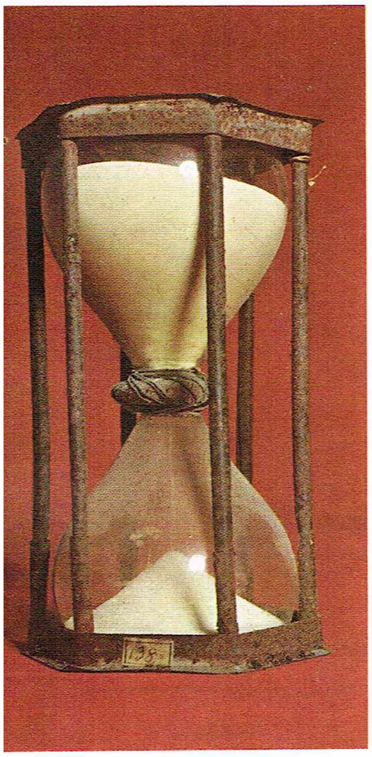

C. Bevilacqua

Un autre progrès fut réalisé en 1929 avec l'entrée en service, à l'observatoire de Washington, du premier tube photographique zénithal *(PZT), constitué d'un objectif de 30 cm de diamètre et de 5 m de distance focale, solidaire d'un support horizontal placé à 2,5 m au-dessus d'un miroir formé par la surface d'un bain de mercure. Dans cet instrument, les rayons lumineux provenant d'une étoile zénithale, après avoir traversé l'objectif et avoir été réfléchis par le bain de mercure, impressionnaient une plaque photographique. Un tel résultat est également obtenu avec l'*astrolabe de Danjon *(1953), constitué d'un objectif vertical qui reçoit les rayons lumineux d'une étoile, soit directement par réfraction à travers un prisme sous un angle de 60°, soit indirectement, après réflexion sur un bain de mercure. Les précisions intrinsèques que l'on obtient avec ces instruments sont de l'ordre de 4 millisecondes.*

Grâce à l'emploi d'horloges de stabilité élevée, on a mis en évidence depuis quelques décennies des variations périodiques et irrégulières dans la rotation de la Terre, variations suffisamment importantes pour mettre en échec le postulat de constance de cette rotation.

C'est pourquoi le Comité international des poids et mesures décida, en 1956, d'abandonner l'ancienne définition de l'unité de temps, la seconde rotationnelle, égale à 1/86 400 du jour solaire moyen, pour adopter une nouvelle définition, fondée sur la connaissance rigoureuse de la durée de révolution de la Terre autour du Soleil : l'année tropique.

L'échelle de temps fondée sur cette nouvelle définition est appelée temps des éphémérides. *Avec l'introduction de cette échelle, théoriquement uniforme, le temps astronomique peut être défini à long terme à mieux que quelques dixièmes de seconde.*

Ci-dessus : sphère armillaire d'Adam Herildt (1648) ; la Terre, au centre, est en malachite (London British Museum of Sciences).
Ci-contre : sablier du XVIIe siècle ; les deux capsules en verre sont assemblées par un tortillon de papier (Florence, musée d'Histoire de la science).

A. Rizzi

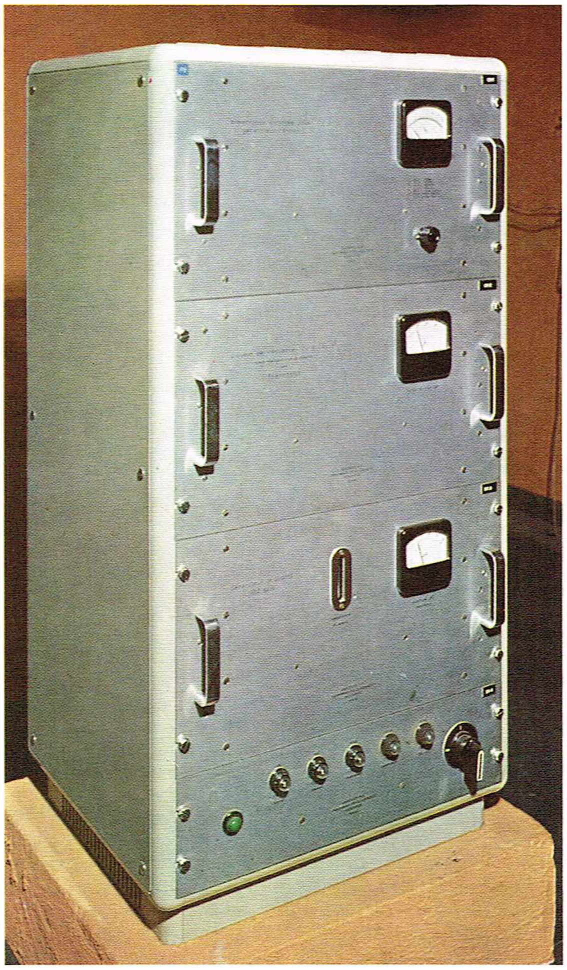

Horloge à quartz (observatoire de Brera, Milan).

LA CONSERVATION DU TEMPS

Toutefois, même cette nouvelle définition rencontra dans son application pratique d'importantes difficultés, notamment à cause des complications liées à la déduction d'une unité de temps accessible aux mesures physiques de durée et de fréquence. En effet, parallèlement au développement des techniques pour la détermination du temps, on a créé des instruments capables de conserver l'unité de temps pendant des périodes aussi longues que possible. Avec les anciens sabliers et clepsydres *qui, dans leurs très nombreuses et ingénieuses versions, résolurent le problème de la mesure des durées, on peut dire que durant plus de deux millénaires la précision de la mesure d'un intervalle était assez faible. On peut admettre que l'erreur relative commise dans ces mesures, jusqu'à la fin du XIIIe siècle, se maintint autour de 0,1 à 0,01 %. Au début du XIVe siècle, les premières horloges mécaniques firent leur apparition. Mues par des poids et réglées par des balanciers rudimentaires, elles demeurèrent pratiquement inchangées jusqu'au milieu du XVIIe siècle, c'est-à-dire jusqu'à la découverte par Galilée, en 1656, de la loi d'isochronisme du pendule. L'horloger turinois Camerini et l'opticien hollandais Huygens réalisèrent, simultanément, les premières pendules ; la précision dans les mesures d'intervalles atteignait alors quelques dizaines de secondes par jour. Les progrès réalisés pendant presque 3 siècles sur les pendules astronomiques portèrent cette précision à quelques centièmes de seconde. Enfin, vers 1930, les premières horloges à quartz, basées sur des principes tout à fait différents, permirent une précision d'environ 5 ms par jour.*

Depuis cette date, l'évolution des techniques pour la conservation du temps ne connut aucune pause. En 1949, la première horloge atomique *entre en service au National Bureau of Standard de Washington. La précision relative dans la mesure du temps et des fréquences est portée ainsi à 0,001 %. Alors que l'horloge à quartz est constituée d'un circuit oscillant stabilisé utilisant les caractéristiques piézo-électriques d'un cristal de quartz, et soumise par conséquent à de nombreux effets secondaires, l'horloge atomique permet l'accrochage de la fréquence d'une horloge à quartz à la fréquence constante d'inversion de la molécule d'ammoniaque.*

En 1955, entre en service une nouvelle horloge atomique au césium, fabriquée au National Physical Laboratory de Teddington. Un jet d'atomes de césium est soumis à un champ magnétique non uniforme, qui fait dévier les atomes de niveaux énergétiques W1 et W2 dont les moments magnétiques sont différents. Grâce à l'interposition d'un écran naturel, on favorise le passage des seuls atomes de niveau W2 dans un guide d'onde où ces atomes réagissent entre eux avec une fréquence engendrée par une horloge à quartz, convenablement multipliée jusqu'à atteindre la valeur de 9,192 631 770 GHz, caractéristique de la fréquence liée au niveau W2. Si cette fréquence ne présente pas la valeur indiquée ci-dessus, l'irradiation ne se produit pas et les atomes, en passant à travers un deuxième champ magnétique, sont déviés et arrêtés par l'écran ; dans le cas contraire, ils poursuivent leur trajectoire rectiligne jusqu'à atteindre un récepteur qui enregistre leur énergie. L'horloge au césium permit, dès le début, une précision relative de l'ordre de 10^{-10}, donc 10 000 fois supérieure à celle des premières horloges atomiques. Mais, au cours des dix dernières années, on a construit des horloges au césium encore cent fois plus stables ; par ailleurs, avec des horloges fondées sur le principe des masers à l'hydrogène, il semble possible de multiplier encore par 1 000 cette précision.

Ainsi, en 1968, on en vint à une nouvelle modification de la définition de l'unité de temps, fondée cette fois-ci sur le nombre d'oscillations de la fréquence de résonance de l'atome de césium 133. Avec cette nouvelle définition, la mesure du temps est donc fondée sur une unité de temps physique, tandis que l'unité de temps astronomique (T.E.) continue naturellement à jouer un rôle important dans les domaines de la navigation, de la géodésie spatiale, ou de la radio-astronomie.

LA PHOTOGÉOLOGIE

La propriété que possède la photographie de reproduire fidèlement les détails, reçoit des applications dans de très nombreux domaines. Ainsi, a-t-on réussi à mettre au point des techniques de mesure portant sur la photo elle-même, à transposer les données obtenues sur les cartes (photogrammétrie), ou à reconnaître et interpréter la géologie d'une région (photogéologie).

Le premier pas de la photogrammétrie en tant que science fut accompli le jour où il devint possible de construire, par ce moyen, des cartes topographiques de régions inaccessibles. Cette technique se développa surtout à partir de la Première Guerre mondiale, parallèlement au développement de l'aéronautique. Après le conflit, le perfectionnement des appareils photographiques, du matériel photosensible et des méthodes d'interprétation a élargi les possibilités de la photographie aérienne à d'autres domaines.

Aujourd'hui, les nouvelles techniques de relèvement à distance grâce aux avions à réaction et aux satellites artificiels permettant de couvrir de vastes régions entraînent de nouveaux perfectionnements du matériel photographique, qui est devenu plus complexe. Exploitant le fait que les diverses longueurs d'onde du spectre électromagnétique (depuis les longueurs très courtes des rayons gamma à celles relativement longues utilisées par le radar) mettent en évidence, selon des particularités propres à chacune, certaines caractéristiques du sol, du sous-sol, de la végétation, etc., on a mis au point des appareils à plusieurs objectifs et des pellicules spéciales qui permettent de réaliser des photographies simultanées d'une région, comportant un grand nombre d'informations et de détails. Dans certaines limites, ces données peuvent être interprétées automatiquement par des ordinateurs, ce qui permet aux spécialistes une lecture plus complète de la photo aérienne. Toutes les informations que l'on peut tirer des photographies aériennes sont utilisables non seulement pour la construction de cartes topographiques et planimétriques précises, mais aussi pour l'étude de problèmes touchant à la géographie, au génie civil, à l'étude et à l'utilisation du sol, à l'analyse de la répartition de la végétation, à l'archéologie et, d'une manière générale, à toutes les sciences de la Terre. Dès le début, les géologues virent dans la photographie aérienne un moyen de faire des relevés rapides, économiques et indépendants des conditions locales, géographiques, climatologiques, voire politiques. Le développement de l'étude géologique de la surface de la Lune (sélénologie) grâce aux données transmises à terre par les sondes spatiales nous offre une nouvelle preuve des immenses possibilités de la photographie aérienne.

La photogéologie constitue ainsi non seulement le moyen de mener à bien l'étude de régions inaccessibles ou difficilement accessibles, mais offre en outre, au géologue, la possibilité de faire son travail plus facilement et de manière plus économique. Il faut souligner toute l'importance que revêt la photogéologie pour la construction de cartes géologiques, la reconnaissance et la reconstitution des structures topographiques, ou l'interprétation des aspects morphologiques dans le but de découvrir de nouvelles ressources naturelles (gisements miniers, gisements d'hydrocarbure, nappes aquifères, etc.), permettant de faire face aux besoins créés par l'accroissement de la population mondiale et le développement industriel.

N.A.S.A.

Les photographies prises à partir des satellites artificiels ou sondes spatiales sont un instrument précieux pour la photogéologie ; l'illustration reproduit l'embouchure du Colorado dans le golfe de Californie.

L'EXPLORATION PHOTOGÉOLOGIQUE

On distingue une photogéologie quantitative *et une* photogéologie qualitative. *La première suppose l'emploi de techniques photogrammétriques ; elle trouve des applications dans le calcul des épaisseurs des couches géologiques, de leur immersion et de leur inclinaison, ainsi que dans la définition des glissements de failles, l'orientation des axes de glissement, ou les dimensions des corps cristallins, éléments qui permettent une reconstitution précise des structures ou une évaluation correcte des gisements miniers. En utilisant des instruments photogrammétriques, on peut en outre transposer sur une base topographique les données tirées de l'examen photogéologique, dessiner en détail les limites des structures, ou encore construire*

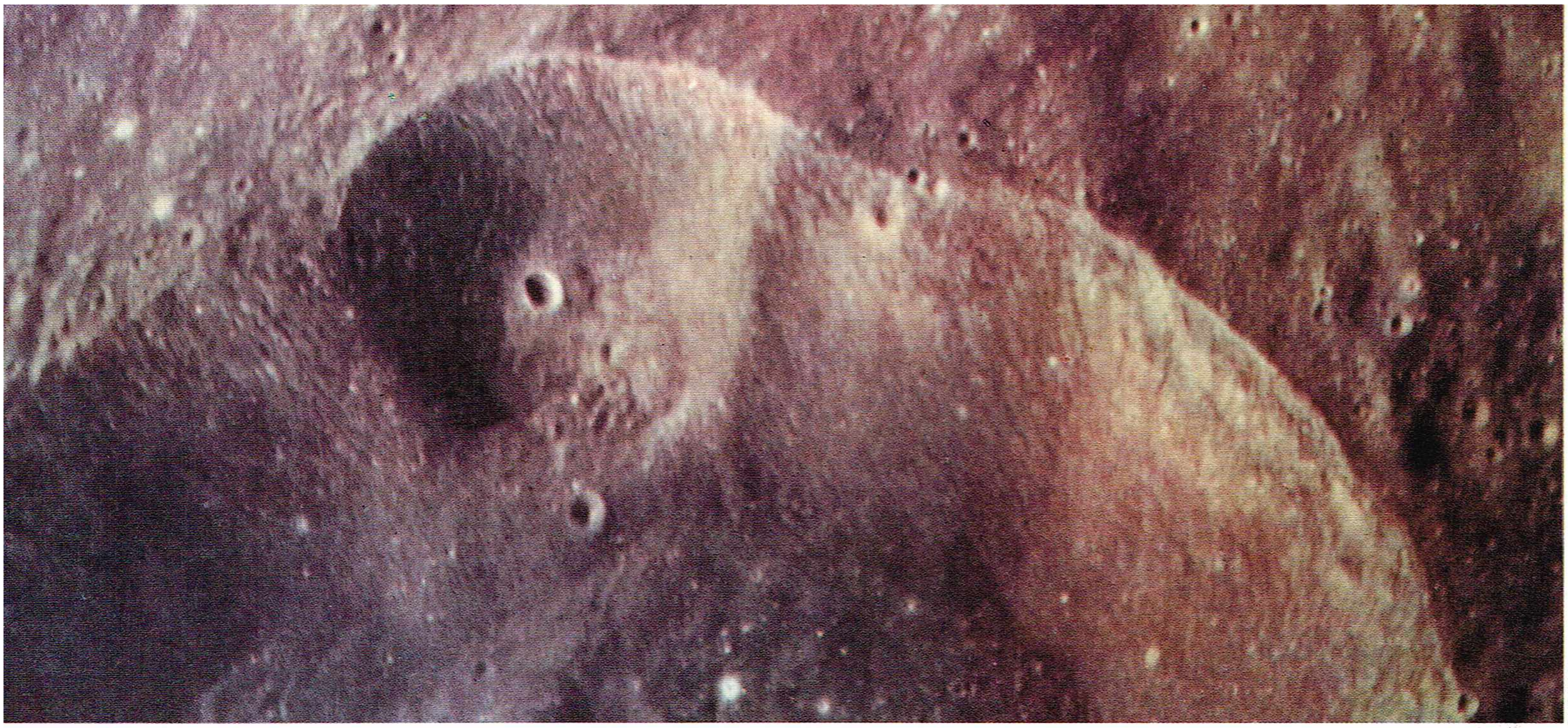

Détail de la surface lunaire photographiée par Apollo-8 en orbite autour de la Lune ; ce type de photographie a donné un rapide essor à la sélénologie, ou étude géologique de la surface lunaire.

les cartes des isospisses *(lignes qui relient entre eux les points correspondant à une même épaisseur) dans les régions où les formations géologiques sont bien visibles. Quant à la photogéologie qualitative, elle trouve des applications dans l'étude, l'examen et l'interprétation des configurations géologiques et géomorphologiques des différentes régions.*

L'exploration qualitative est complexe, puisque, sur une photographie aérienne, tous les éléments qui composent le tableau géologique sont présents simultanément. Parmi les principaux citons l'aspect et la répartition des affleurements, les détails structuraux, la morphologie, le réseau hydrographique, la glaciologie, la végétation et le sol, ainsi que certains aspects liés à l'activité humaine, comme l'utilisation des terrains et la répartition des habitations, qui ont parfois une signification géologique. Ces différents éléments sont liés par des corrélations étroites, puisque la surface a été modelée par l'action de facteurs interdépendants comme le vent, l'eau, le gel, la pluie ou la couverture végétale sur les roches ; il appartient au photogéologue d'attribuer à chacun d'entre eux son juste rôle. Aussi, une interprétation photogéologique correcte implique-t-elle la connaissance des notions de base de sciences telles que la géographie physique, la climatologie, l'écologie végétale et la pédologie, sans oublier la géologie et la géomorphologie. En effet, l'interprétation des photos aériennes peut concerner des domaines d'application très divers, dans chacun desquels les différents éléments revêtent une signification particulière ; par conséquent, il appartient au photogéologue de définir chaque fois quels sont les éléments significatifs pour la construction, par exemple, de cartes de gisements miniers, pour la prospection pétrolière, le génie civil, l'hydrogéologie, l'agrogéologie, les cartes géologico-structurales, etc.

Lorsque les conditions géologiques d'une région se reflètent dans l'adaptation de la topographie au type de roche et à la structure, l'identification et l'interprétation de certains éléments ne présentent aucune difficulté particulière. Les exemples les plus évidents nous sont offerts par la coïncidence de dorsales montagneuses ou de reliefs avec des anticlinaux et des dômes, de même que la coïncidence de vallées ou de dépressions avec des synclinaux et des bassins, ou encore d'escarpements avec des lignes de faille ; par ailleurs, les plaines côtières sont parfaitement reconnaissables, de même que les reliefs filoniens, les cônes de cendres et les plateaux couverts de lave, lorsque leur forme originelle n'a pas été altérée par les agents atmosphériques, effacée par l'érosion, ou recouverte par d'autres matériaux. Dans de tels cas, il faut recourir à un examen attentif d'autres facteurs, comme les différences de ton sur la photographie, l'aspect général et la position par rapport aux autres configurations géologiques ou topographiques. Dans d'autres cas — et cela se rencontre très fréquemment — les conditions géologiques ne coïncident pas avec la morphologie de la surface, et les unités lithologiques ; par ailleurs les structures peuvent se développer à travers différentes formes topographiques, donnant lieu à des combinaisons multiples, voire à l'inversion du relief (anticlinaux à l'emplacement de vallées et synclinaux à l'emplacement des sommets). On peut apporter de nombreux exemples de ce phénomène, comme les affleurements en V d'une couche ou d'une unité rocheuse inclinés qui coupent une vallée fluviale ou les affleurements en V ou en U inversés qui se produisent lorsque l'intersection intéresse une dorsale montagneuse. D'autres exemples nous sont fournis par les traces irrégulières d'un glissement à faible angle d'inclinaison dans une zone montagneuse, ou le développement enchevêtré de l'affleurement de sédiments presque horizontaux dans l'aire d'un plateau profondément entaillé. Dans ces cas, les tons de la photographie, la végétation, les sols prennent une importance relativement grande, puisque c'est essentiellement à travers ces facteurs que les couches, les failles, les roches magmatiques, les contacts, les discordances peuvent être identifiés. Dans de nombreuses zones, bien que le substrat rocheux soit ou bien exposé, ou bien très proche de la surface, les détails de la structure ne peuvent facilement être identifiés. Les zones à marnes et argiles, parvenues au stade de la maturité, couvertes d'une dense végétation et intéressées par un système fluvial aux ramifications nombreuses, posent souvent des problèmes d'interprétation. Il faut alors porter une attention particulière aux formes topographiques, aux caractéristiques du réseau hydrographique, aux tons de la photographie, aux types de végétation. La connaissance des conditions structurales du substrat est fondamentale dans la géologie du pétrole, dans la prospection minière, et utile dans l'étude des gisements de charbon et la détection des eaux souterraines. Même les matériaux non consolidés doivent être identifiés sur la base de nombreux critères ; aux précédents, il convient d'ajouter la reconstitution de la morphologie originelle ainsi que de la morphologie érodée ou altérée, la position par rapport aux autres éléments topographiques et géologiques. Aux matériaux superficiels, qui constituent le « sol », s'intéressent principalement la pédologie et le génie civil, qui ont pour objectif principal de localiser convenablement les matériaux de construction et de choisir les endroits appropriés pour la construction de routes, d'immeubles, de barrages, d'aéroports, de tunnels ou de réservoirs. Pour la pédologie et l'agrogéologie, qui classent les différents types de sol en productifs et non productifs, l'interprétation de la photographie aérienne ne concerne qu'accessoirement la géologie du substrat, l'intérêt essentiel se portant sur les caractéristiques des matériaux non consolidés de la surface.

L'ASTRONAUTIQUE ET L'ASTRONOMIE

L'astronautique est née le 4 octobre 1957, avec le lancement de Spoutnik I, *premier satellite artificiel de la Terre. Les progrès en la matière furent ensuite extrêmement rapides, pour des raisons d'ailleurs plus politiques que scientifiques. Quoi qu'il en soit, le 12 avril 1961, le vaisseau spatial* Vostok I *emportait dans l'espace le premier cosmonaute : Youri Gagarine. A ce jour, à l'occasion de 59 missions effectuées dans le cadre des programmes* Vostok, Voskhod, Soyouz, Saliout, Mercury, Gemini, Apollo et Skylab, *121 hommes se sont ainsi rendus dans l'espace. Le record actuel de durée d'une mission spatiale revient à l'équipage de la troisième mission* Skylab, *avec 84 jours. Mais la plus importante expérience, au moins sur le plan historique, fut sans conteste celle qui vit le débarquement des premiers hommes sur la Lune ; c'était le 20 juillet 1969, à l'occasion de la mission* Apollo XI, *avec Neil Armstrong et Edwin Aldrin.*

LA CONQUÊTE DE LA LUNE

Auparavant, bien entendu, un certain nombre de sondes automatiques furent envoyées en éclaireurs. La série débuta avec Luna II *qui, en septembre 1959, devint le premier objet, construit de main d'homme, à percuter la Lune. Le mois suivant,* Luna III *nous faisait ensuite découvrir l'autre face de notre satellite naturel, jusqu'alors inconnue. Puis les sondes* Ranger VII, VIII *et* IX *(juillet 1964 à mars 1965) furent lancées vers l'astre pour s'y écraser, non sans avoir auparavant retransmis des vues télévisées de plus en plus rapprochées du sol. Avec* Luna IX *(février 1966) et* Surveyor I *(juin 1966) débute ensuite une série d'atterrissages en douceur qui permirent à la fois de déterminer la nature et la structure du sol lunaire, et l'aspect de ses paysages. A la même époque, avec* Luna X *(mars 1966) et* Lunar Orbiter I *(août 1966), débutait un programme de satellisations autour de la Lune, dans le but de procéder à des mesures sur son environnement et d'établir une cartographie détaillée de ses deux hémisphères. Cette étude préliminaire par sondes automatiques fut complétée par deux missions de reconnaissance pilotées en décembre 1968 et mai 1969* (Apollo VIII *et* X), *avant le débarquement d'*Apollo XI *dans la Mer de la Tranquillité, presque exactement dix ans après le premier impact de* Luna II.

*Il y eut, au total, six missions d'atterrissage, d'*Apollo XI *(juillet 1969) à* Apollo XVII *(décembre 1972) ; rappelons que la mission n° XIII se limita à un survol de l'astre, par suite d'une avarie grave survenue pendant le voyage Terre-Lune. A l'occasion des autres missions, les astronautes ont installé des stations scientifiques automatiques qui fonctionnent toujours, et nous permettent ainsi de continuer à étudier la Lune à distance. En outre, ils ont pris un très grand nombre de photographies et rapporté près de 400 kg d'échantillons du sol ; leur analyse a révélé que les roches lunaires s'apparentaient à nos basaltes, que la Lune n'avait jamais connu la moindre forme de vie et que l'astre s'était formé en même temps que la Terre, il y a 4 milliards 700 millions d'années.*

DE MERCURE A SATURNE

Parallèlement à cette exploration de la Lune, des sondes automatiques de plus en plus perfectionnées ont exploré l'espace interplanétaire et les planètes voisines. Vénus fut survolée pour la première fois en décembre 1962 (Mariner II), *Mars en juillet 1965* (Mariner IV), *Jupiter en décembre 1973* (Pionnier X) *et Mercure en avril 1974* (Mariner X). *Comme la Terre et la Lune, Vénus et Mars ont également été dotées de satellites artificiels ; en outre, des sondes ont atterri à leur surface. Par ces robots*

E.P.S.

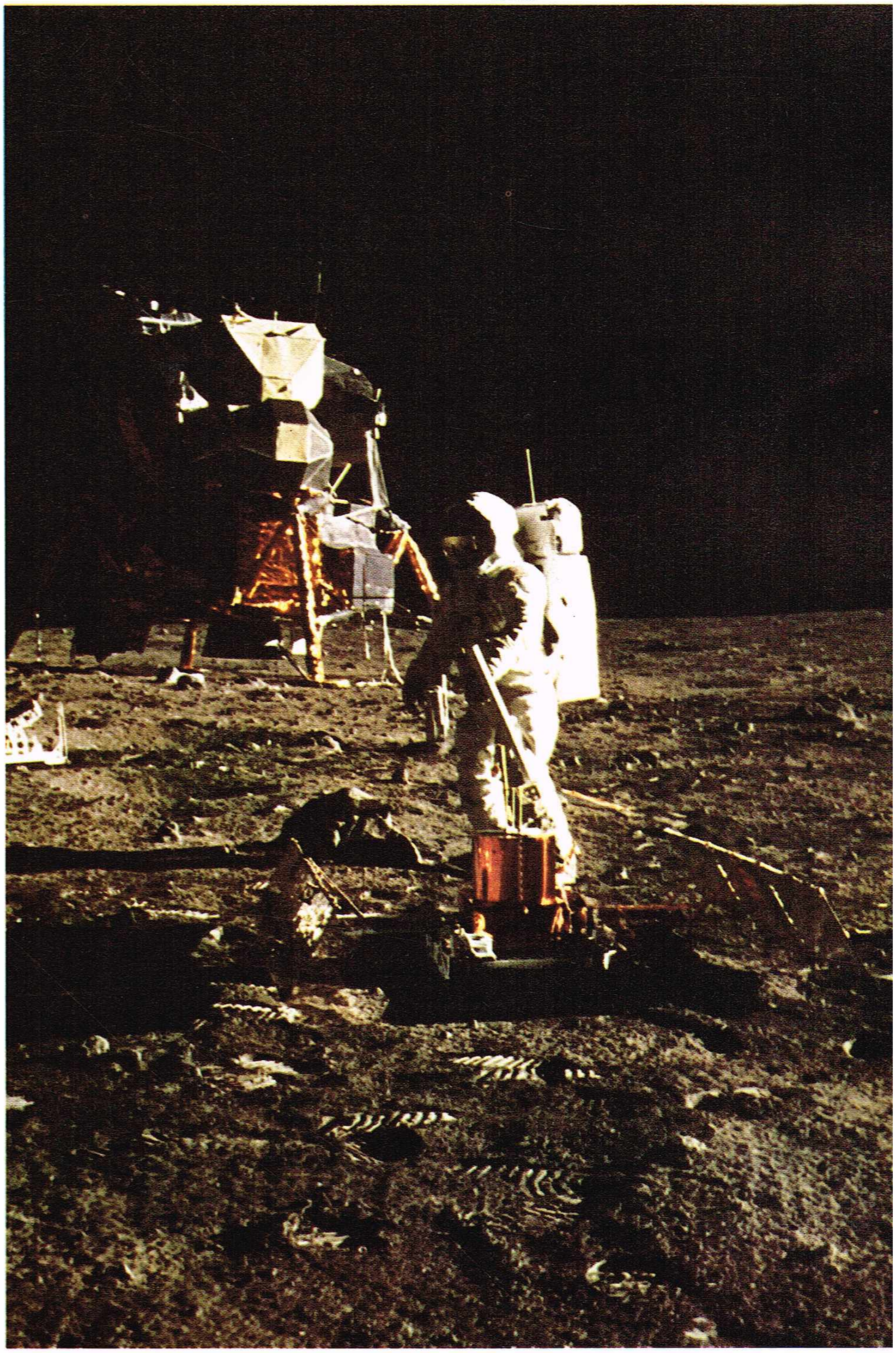

Edwin Aldrin en train de mettre en place le sismomètre sur la surface lunaire (au fond, on distingue parfaitement le drapeau américain et le module lunaire). La conquête de la Lune a rendu encore plus étroit le rapport existant entre les entreprises spatiales et l'astronomie.

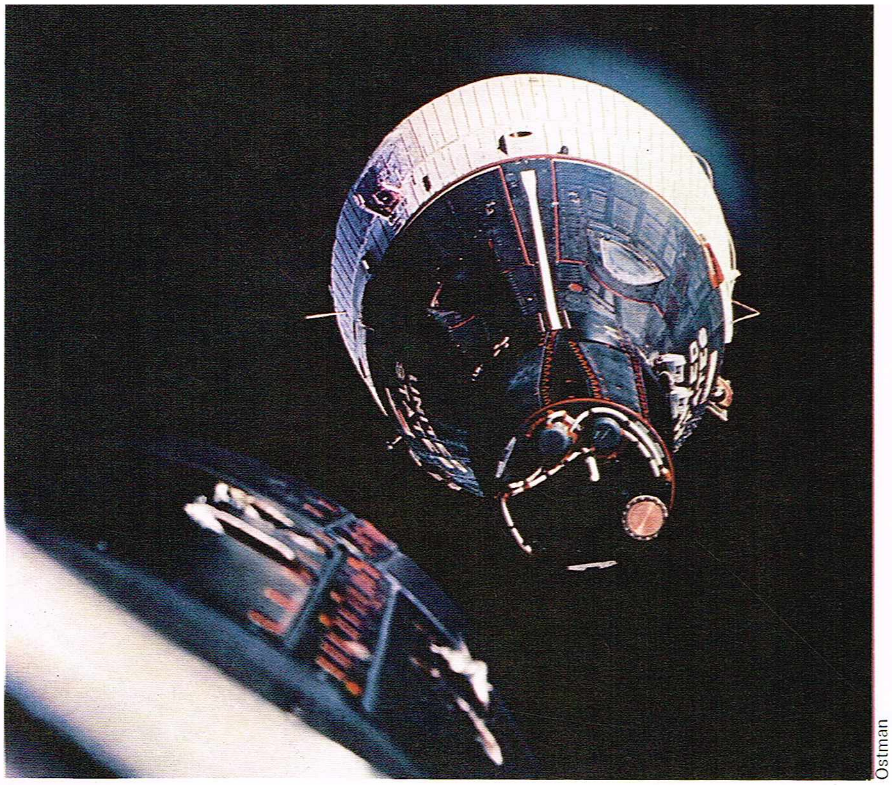

Gemini VI et Gemini VII lors du premier rendez-vous spatial réussi (photo de gauche).

Saturne V, la gigantesque fusée qui a envoyé Apollo XI sur la Lune, est transportée vers la tour de lancement sur une plate-forme mobile.

interposés, nous en avons appris plus sur les planètes, en quelques années, qu'en plusieurs siècles d'astronomie traditionnelle. La prochaine à être conquise sera Saturne, qui entrera dans le champ de la caméra de Pionnier XI *en septembre 1979. Vers la même époque, devrait avoir lieu le premier rendez-vous entre une sonde spatiale et une comète. Signalons enfin que* Pionnier X*, après avoir survolé Jupiter au terme d'un voyage d'un milliard de kilomètres, a reçu un supplément de vitesse lui permettant d'échapper à l'emprise du Soleil. Pour la première fois, un objet humain quitte ainsi le système solaire pour se diriger vers les étoiles.*

LA GRANDE FAMILLE DES SATELLITES

Au 1er janvier 1976, très exactement 8 527 satellites avaient été envoyés dans l'espace, à l'occasion de 1 578 lancements. Il faut préciser que chaque lancement entraîne la mise en orbite de plusieurs « objets » : charge utile proprement dite (parfois multiple puisque certains satellites sont lancés par groupes de 8), dernier étage de la fusée porteuse, cône protecteur, accessoires divers. Précisons toutefois que plus de la moitié de ces satellites est aujourd'hui retombée, par suite du freinage atmosphérique qui se fait sentir jusque vers 3 000 km d'altitude ; or très peu de satellites circulent à une distance supérieure. La plupart des objets qui gravitent autour de la Terre sont ainsi condamnés à se désagréger dans l'atmosphère à plus ou moins brève échéance. Presque tous les satellites se regroupent en familles patronymiques, la liste complète de celles-ci ne comportant pas moins de 200 noms. Précisons enfin que les États-Unis et l'Union soviétique ne sont plus les seuls pays à pouvoir lancer des satellites. Le « club spatial » compte aujourd'hui quatre autres membres : la France (depuis novembre 1965), le Japon, la Chine et la Grande-Bretagne. Un certain nombre d'autres pays, dont l'Allemagne, l'Italie, les Pays-Bas et l'Espagne, possèdent également des satellites, mais en confient le lancement à des fusées américaines. Tous ces satellites artificiels, sondes planétaires et vaisseaux spatiaux ont permis un grand nombre de découvertes et de progrès, dans les domaines les plus variés. La technologie, par exemple, s'est profondément améliorée, du fait des contraintes imposées par la résolution de problèmes complexes (en électronique par exemple) ou la mise au point de matériaux particuliers (alliages résistants et réfractaires, lubrifiants spéciaux, etc.). La biologie et la médecine, grâce aux vols humains dans ce milieu très particulier qu'est l'espace, ont reçu un apport qui n'est pas négligeable. La géophysique, c'est-à-dire la connaissance de notre propre planète et de son environnement, a également progressé de façon spectaculaire grâce aux satellites artificiels ; citons, entre autres, la découverte des ceintures de radiations Van Allen, l'aspect piriforme du globe terrestre, la présence d'une vaste enveloppe d'hydrogène entourant notre atmosphère, etc. Les satellites artificiels offrent en outre un nombre considérable d'applications pratiques, notamment dans le domaine des télécommunications, de la météorologie, de la navigation, de la géodésie, ou pour le recensement des ressources terrestres, sans oublier la surveillance militaire. Quant à l'astronomie, elle a évidemment bénéficié en tout premier lieu des possibilités offertes par les engins spatiaux : observation du ciel en dehors du filtre atmosphérique, étude des astres in situ*.*

L'astronautique a également soulevé des problèmes de droit international, notamment en ce qui concerne la souveraineté d'un pays sur les astres explorés, et introduit dans le langage courant une foule de néologismes : alunissage, fiabilité, etc.

PERSPECTIVES

Comme on le voit, après moins de deux décennies de conquête spatiale, le bilan est impressionnant. On remarquera aussi que l'astronautique s'est essentiellement caractérisée, jusqu'à maintenant, par une série de grandes « premières » et d'expériences spectaculaires. Depuis quelques années, toutefois, un changement de tendance apparaît, et l'on s'oriente de plus en plus vers une astronautique « utilitaire ». La mise en orbite des stations spatiales Saliout *et* Skylab*, en 1971 et 1973, a constitué le prélude à une astronautique opérationnelle. A partir de 1980, aux États-Unis, des navettes spatiales récupérables remplaceront les classiques fusées à « emballage perdu ». Ces avions-fusées auront une charge utile de 30 tonnes et pourront être réutilisés cent fois, ce qui permettra de diviser par dix le coût du kilogramme satellisé. Ces navettes seront en outre d'une grande souplesse d'utilisation et pourront emporter des passagers non entraînés. Les astronautes, au sens où nous l'entendons aujourd'hui, auront disparu.*

Peut-être verrons-nous également, vers la fin de la prochaine décennie, l'installation de bases scientifiques permanentes sur la Lune, dans le cadre d'une coopération internationale, à l'image de ce qui se passe pour l'Antarctique. Quant aux réalisations plus ambitieuses, comme le voyage de l'homme sur Mars, elles ne semblent guère envisageables avant la décennie 1990-2000, essentiellement pour des raisons financières.

LA PRÉVISION MÉTÉOROLOGIQUE

LE PROBLÈME DE LA PRÉVISION DU TEMPS

La météorologie est une science particulièrement complexe car les facteurs qui caractérisent l'état de l'atmosphère à un moment donné sont très nombreux et très variables dans le temps et dans l'espace.

Les lois qui régissent leurs variations sont connues; pour la plupart, ce sont celles de la mécanique des fluides et de la thermodynamique, mais le problème posé est singulièrement compliqué du fait que l'air, qui contient une quantité variable de vapeur d'eau, est astreint à s'écouler autour du globe dont la rugosité est variable (mer, relief terrestre) et en rotation autour d'un axe, ce qui introduit des paramètres supplémentaires, eux-mêmes variables. Par ailleurs il n'est pas exclu que des facteurs extérieurs à la basse atmosphère, les seuls pris en considération jusqu'ici, n'aient pas, à plus ou moins longue échéance, des répercussions, d'ailleurs mal connues, sur les couches proches du sol et dont dépend directement le temps qu'il fait.

Le premier problème qu'il convient de résoudre est celui de la circulation générale de l'atmosphère, c'est-à-dire de l'ensemble des mouvements qui animent l'océan aérien, à l'échelle du globe.

Tout découle, en effet, de ces mouvements qui mettent en contact les masses d'air d'origines et de caractéristiques différentes : température, humidité, vitesse, stabilité. De ces contacts résultent les perturbations atmosphériques : pluies, tempêtes, orages... Ces « masses d'air » sont de vastes ensembles de particules d'air séjournant dans les régions froides (polaires ou arctiques) ou chaudes (équatoriales, tropicales) du globe et qui acquièrent une humidité plus ou moins forte selon qu'elles se déplacent ensuite au-dessus des mers ou des continents. Ces mouvements étant déterminés, il convient de déceler les phénomènes qu'ils provoquent et de prévoir leurs trajectoires et leur évolution.

LES MESURES : L'OBSERVATION MÉTÉOROLOGIQUE

Pour établir la climatologie d'un site, d'une région ou d'un pays, c'est-à-dire pour définir les valeurs moyennes des divers facteurs qui caractérisent le temps (température, humidité, vent, pluie, insolation...) ainsi que leurs valeurs extrêmes, les fréquences, les écarts possibles aux valeurs normales, il convient de disposer de nombreuses mesures effectuées à l'aide d'un matériel précis et standardisé, permettant de comparer les résultats. Il en va de même pour l'établissement d'une vue générale des conditions météorologiques sur des régions de grande étendue à un moment donné car l'atmosphère forme un tout. Ceci constitue l'« état initial », point de départ des raisonnements et des calculs aboutissant à la prévision. La grande variabilité des phénomènes exige que cet état initial soit reconsidéré fréquemment, toutes les 3 ou 6 heures selon l'échelle de l'étude.

Les mesures sont effectuées, au niveau du sol, dans quelque 8 000 stations d'observation où les météorologistes relèvent les valeurs des facteurs précédemment énumérés. En mer, des navires météorologiques et des navires marchands spécialement équipés assurent également des observations. Ce réseau, encore très insuffisant, est complété par des stations automatiques installées dans les sites d'accès difficile, et par des bouées. L'Organisation météorologique mondiale a lancé une vaste opération visant à parfaire et à compléter ce réseau, notamment dans les pays insuffisamment équipés.

Archives Radaelli

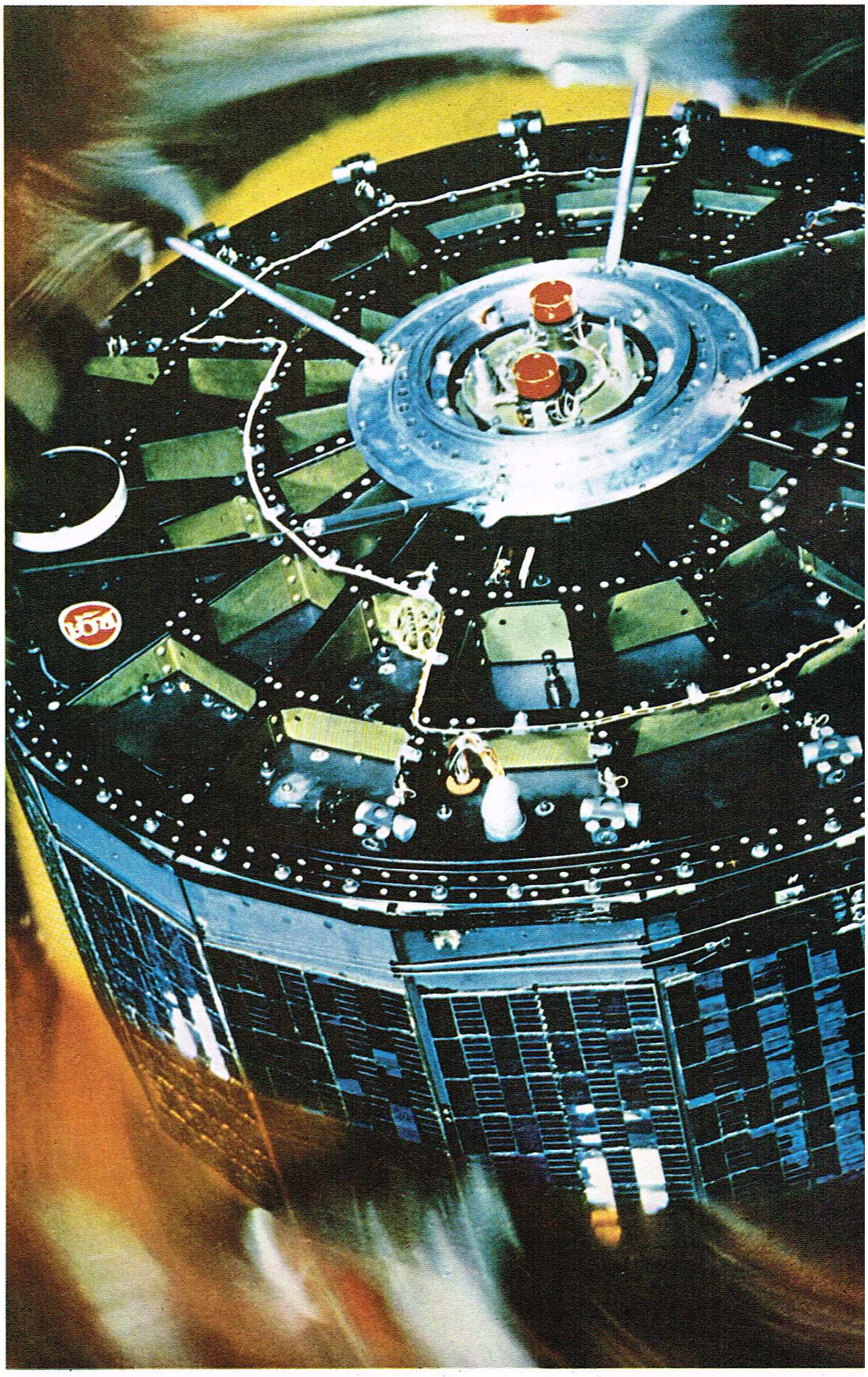

Le satellite météorologique américain Tiros I.

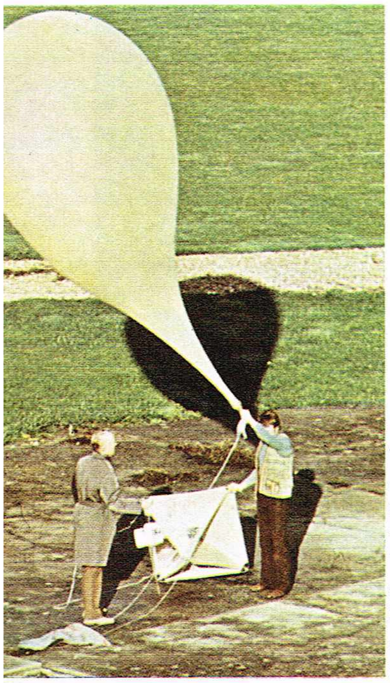

Photo Météorologie Nationale

EN ALTITUDE

La connaissance des conditions atmosphériques au niveau du sol ne suffit pas à définir l'état de l'atmosphère dont les caractéristiques, dans une épaisseur d'au moins 20 à 30 km, sont interdépendantes. On est donc conduit à y pratiquer des sondages à l'aide de ballons emportant, dans une nacelle de faibles dimensions, un poste météorologique réduit et un émetteur léger transmettant automatiquement à la station de lancement les valeurs de la pression, de la température et de l'humidité dans les couches traversées, jusqu'à 20 à 25 km d'altitude. Par ailleurs, un réflecteur métallisé, également emporté par le ballon-sonde, permet de suivre au radar la trajectoire du ballon, ce qui donne la direction et la vitesse du vent aux divers niveaux.

LE RADAR MÉTÉOROLOGIQUE

En plus de son utilisation pour la mesure du vent, le radar est employé au repérage à distance des masses nuageuses importantes contenant de grosses gouttelettes d'eau ou de la neige.

Le radar est en outre précieux pour la détection des cyclones tropicaux qu'il permet de déceler et de suivre plusieurs heures avant qu'ils n'atteignent les régions menacées.

LES SATELLITES MÉTÉOROLOGIQUES

La météorologie spatiale est née aux U.S.A. en 1960 avec le lancement expérimental d'un premier satellite spécialisé appelé Tiros. *Depuis 1966, avec les séries* Nimbus, Essa, Itos *et les satellites russes* (Cosmos), *l'exploitation de la météorologie satellitaire est devenue opérationnelle. La France a été l'un des premiers pays à utiliser cette technique nouvelle grâce à la création, en 1963, du Centre d'études météorologiques spatiales de Lannion.*

Les satellites ont pour principal objectif de transmettre aux stations de réception, au moment du passage de l'engin à proximité, des images filmées et stockées de la couverture nuageuse. L'orbite, située à environ 200 km d'altitude, est décrite en 90 mn. Un autre type de satellites placés à 36 000 km d'altitude tourne à la même vitesse angulaire que la Terre, c'est-à-dire qu'ils paraissent immobiles. Les images qu'ils transmettent autorisent une surveillance permanente des nuages sur environ un tiers du globe car l'utilisation de la technique des rayons infrarouges rend possible l'obtention des images durant la nuit. Cette technique donne en outre de précieuses indications sur la température des couches nuageuses, du sol et de la mer.

Lancer d'un ballon-sonde avec la petite nacelle aux instruments (photo du haut).
Partie des installations du calculateur de la Météorologie nationale.

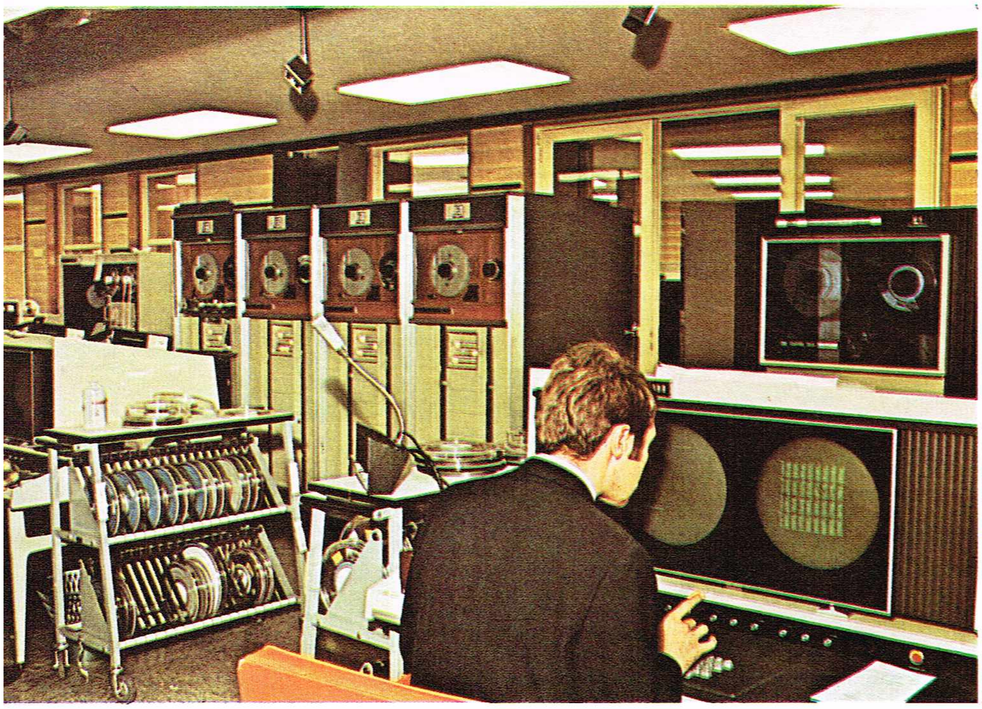

Photo Météorologie Nationale

LA PRATIQUE DE LA PRÉVISION DU TEMPS

Toutes les données recueillies ainsi qu'il vient d'être dit sont échangées rapidement grâce à un réseau international de télécommunications.

Ces données sont portées sous forme symbolique sur des cartes géographiques : cartes de pression, de température, de nuages, de masses d'air... Les contours des divers phénomènes : zones de hautes et de basses pressions, de hausses ou de baisses de pression, zones de pluie ou d'averses, d'orages, de brouillard... sont tracés à l'aide des renseignements pointés, ce qui donne finalement des représentations parlantes — du moins pour le spécialiste — de l'atmosphère dans son ensemble à un moment donné.

Il reste au prévisionniste à extrapoler l'évolution des phénomènes en tenant compte des lois et règles qui régissent la vie de l'atmosphère et aussi de l'expérience concernant les évolutions constatées dans des situations comparables.

Cependant, l'application des lois nécessite un nombre considérable de données et les moyens de les prendre toutes en considération, autrement dit de les faire entrer dans les équations complexes à résoudre rapidement. Aussi, jusqu'à ces dernières années, la prévision du temps est-elle restée qualitative, d'où ses lacunes, ses imprécisions et ses erreurs.

L'apparition des moyens de calcul numérique puissants et rapides a permis, dans une certaine mesure, de sortir de l'impasse.

Les données reçues, au lieu d'être transformées en images, sont confiées au calculateur qui, grâce à des programmes préétablis, en tire, lui aussi, une image, mais calculée, de l'atmosphère. Il s'agit d'une image chiffrée, encore très incomplète car elle ne donne que les grands traits de la circulation générale de l'atmosphère où viennent se former et se déplacer les perturbations. La machine, compte tenu des modèles d'évolution qui lui ont été fournis et qui sont les résolutions des équations appropriées, calcule ensuite l'image future, jusqu'à 72 heures d'échéance, de ces grands courants aériens. Grâce à des tables traçantes, le prévisionniste dispose enfin de documents dessinés, comparables à ceux établis précédemment à la main. Cependant il lui reste à les interpréter, à leur ajouter les phénomènes qui doivent y prendre naissance, compte tenu de tous les éléments complémentaires dont il dispose : masses d'air, mouvements de l'air à plus petite échelle, relief..., directement responsables du beau ou du mauvais temps en tel ou tel point.

L'UTILISATION DES PRÉVISIONS MÉTÉOROLOGIQUES

Il apparaît, d'après ce qui précède, que la prévision du temps reste encore une simple probabilité : l'énoncé de la solution la plus probable d'un problème fort complexe. Si, dans certaines situations, bien nettes et bien établies, les chances de réussite peuvent atteindre 90 %, il est des cas, au contraire, où les deux ou trois « solutions possibles » ont autant de chances de se réaliser les unes que les autres. D'autre part, la densité du réseau d'observation et les réactions locales du relief, ou même simplement de la couverture terrestre, font qu'il n'est pas possible d'entrer dans le détail et de dire, par exemple, qu'une averse tombera à telle heure, dans telle ville.

Enfin, en l'état actuel des méthodes de prévision, il est impossible de prévoir à plus de quelques jours d'échéance le temps qu'il fera. Tous les services météorologiques du monde sont d'accord sur ce point et un centre européen de prévision, doté de calculateurs très puissants, vient d'être créé dans le but de rechercher et de tester des méthodes de prévision à échéance allongée. Son ambition ne dépasse pas à l'heure actuelle 5 à 10 jours.

Quoi qu'il en soit, dans leur état actuel, les prévisions météorologiques rendent des services inestimables dans toutes les branches de l'activité humaine.

LA CONSERVATION DU SOL

Les actions chimiques et physiques des agents atmosphériques décomposent les roches de la surface terrestre, provoquant leur désagrégation en particules; l'ensemble de celles-ci, de nature et de caractéristiques différentes, constitue ce que l'on appelle habituellement le sol, c'est-à-dire la couche superficielle meuble qui a comme base (à une profondeur variable) la roche inaltérée et sur laquelle se développe la couverture végétale.

En observant les matériaux transportés par un cours d'eau, ceux qui sont retenus au niveau des digues, ou bien ceux qui vont former les deltas, nous nous apercevons qu'il ne s'agit pas de limons à proprement parler; une grande partie de cette boue était à l'origine partie constituante d'un sol d'où elle a été arrachée, sol dans lequel la végétation plongeait ses racines. Ce fait n'est pas toujours apparent, car l'action érosive, c'est-à-dire le décapage des formations meubles superficielles, ne se manifeste que sur une longue période; en effet, la couverture végétale défend, par ses feuilles et ses racines, l'intégrité du sol en place qui la porte, limitant au maximum la quantité de particules emportées par les eaux de ruissellement. Mais, si cette couverture fait défaut, l'érosion devient dangereuse; on est en présence d'une érosion accélérée, *qui intéresse les zones environnantes : il n'est que de voir les effets néfastes de l'érosion intéressant une aire montagneuse sur la plaine affectée aux cultures.*

L'homme est donc obligé de conserver le sol là où il existe, en empêchant que les agents de l'érosion le détruisent et l'emportent. Naturellement, on ne peut que limiter les effets de ce phénomène en utilisant les techniques appropriées. Bien que les méfaits de l'érosion n'aient attiré l'attention des pouvoirs publics que dans les dernières décennies, le problème n'est pas nouveau. Les déserts de la Chine septentrionale, de l'Iran, de l'Irak et de l'Afrique du Nord n'ont pas été, comme l'histoire nous le montre, toujours des déserts. Ils le devinrent, au cours de la période relativement courte de l'époque historique, à cause du décapage progressif et continu du sol qui les recouvrait. Théâtre de gloire et de prospérité, Carthage apparaît aujourd'hui comme une simple étendue de sable; la cause doit en être recherchée dans l'épuisement du sol, l'abandon des cultures et des terres, phénomènes qui ont favorisé l'avance du désert, et non pas uniquement dans les conséquences des guerres puniques. En Chine, de très vastes régions ressemblent à de véritables champs de bataille ravagés par une guerre dévastatrice; c'est la guerre engagée (et perdue) par l'homme contre les forces de la nature qui, après l'abandon des cultures, ont très vite creusé de profonds ravins. Mais, lorsqu'il n'abandonne pas, l'homme peut remporter la bataille de la conservation du sol, comme le prouve l'État d'Israël, qui transforme le désert en champs cultivés.

L'accroissement constant de la population mondiale interdit de différer davantage la solution de ce problème. Il revêt une particulière gravité dans les régions les plus pauvres, où, si l'on veut vaincre la faim, il faut gagner de nouvelles terres à l'agriculture.

En Italie aussi, le dépeuplement des régions montagneuses, associé à un déboisement tout à fait irrationnel, pose le problème de la conservation du sol en termes d'urgence, comme l'ont démontré les désastres de la Toscane et du Trentin en 1966, et du Piémont en 1968. D'après les estimations de Paserini, les pertes annuelles de sol végétal provenant de l'érosion par l'eau des formations argileuses, qui constituent environ 80 % de la surface agricole du pays (6 milliards d'ha), varient d'un minimum de 1 000 m³/km² à un maximum de 6 400 m³/km² en passant par des pointes de l'ordre de 11 000 m³/km².

Il faut déplorer que de telles données proviennent uniquement d'études fragmentaires, conduites en dehors de tout programme d'ensemble, même au niveau régional; cette situation est d'ailleurs commune aux autres pays, à l'exception des U.S.A., où on s'est attaqué rationnellement à la résolution de ce problème grâce à la création, dès 1953, du Soil Conservation Service *(en Italie, un organisme d'État est installé à Florence depuis 1953,* l'Institut expérimental pour l'étude et la défense du sol, *mais son action est loin d'être à la mesure des véritables besoins). Nous sommes donc en présence d'un problème qui est devenu politique.*

Nous allons nous efforcer de brosser maintenant un tableau assez complet des études de base qui visent à la sauvegarde du sol. Il faut seulement signaler que le vent qui arrache des particules fines à la surface du sol peut être aussi un agent important de l'érosion qui est alors dite éolienne. Ses causes et ses effets ne sont pas traités ici.

M. Pedone

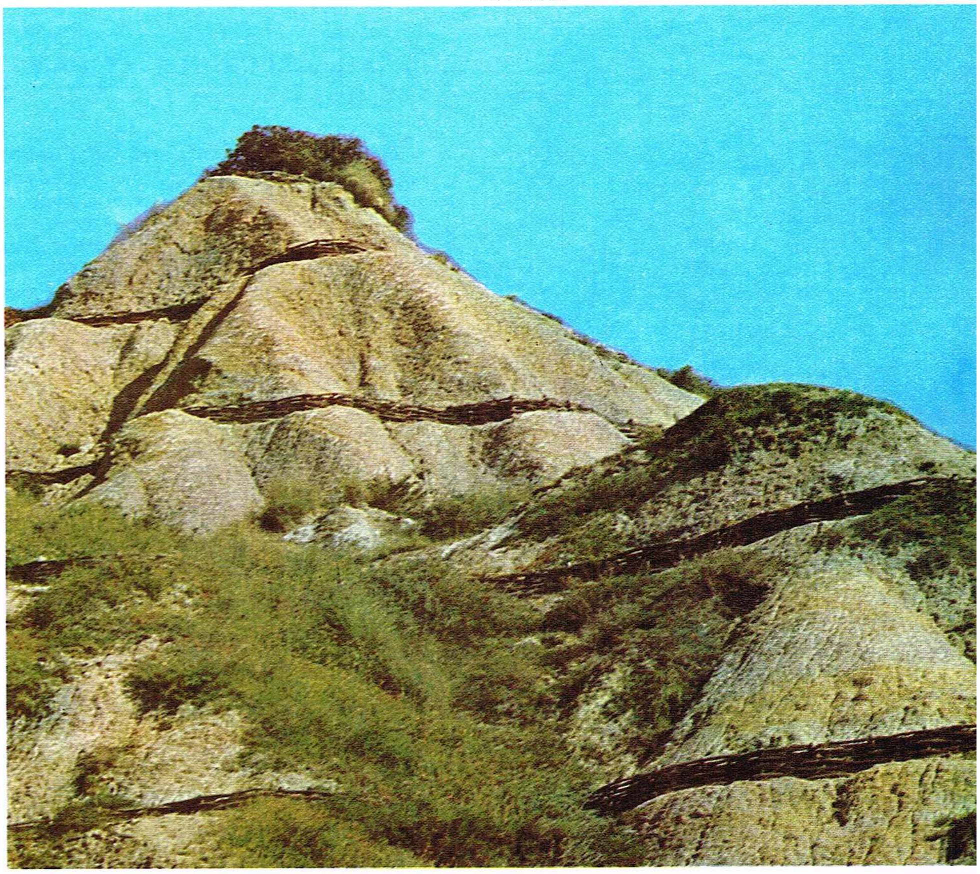

Différents systèmes de défense ont été mis au point contre le phénomène de l'érosion; la photo montre un paysage calabrais, où le flanc de coteau est ceinturé par des barrières en bois tressé, destinées à empêcher les coulées boueuses.

L'ÉTUDE DES COURS D'EAU

Il convient avant tout d'étudier les cours d'eau, notamment dans leurs sections montagneuses. Puisqu'il s'agit de prévenir les dommages causés par les inondations, l'étude doit porter sur les crues et les facteurs connexes : précipitations de la région, lit de la rivière,

caractéristiques du bassin hydrographique. Les « critères géométriques » de celui-ci sont à prendre en considération : forme et dimensions, structures géologiques et topographiques, température et position par rapport aux vents dominants. Un tel examen, associé à celui des précipitations moyennes, conduit à la détermination du temps que l'eau de pluie met pour atteindre le cours d'eau. Il est évident que cela dépend des caractéristiques des terrains et des roches qui constituent le bassin, ainsi que de la couverture végétale.

Un tel examen permet de déterminer quelle quantité de précipitations un cours d'eau peut accueillir tout au long de son parcours et d'élever, si nécessaire, cette capacité par des ouvrages hydrauliques appropriés.

L'ÉROSION DANS LES SOLS ET DANS LES MASSES ROCHEUSES AMEUBLIES

Celle-ci a une action en moyenne 20 fois supérieure à ce qu'elle est dans les roches compactes. Cette action conditionne directement aussi bien la productivité du sol que l'apport de fragments solides aux cours d'eau. On y distingue trois temps : le premier va du moment où la pluie commence à tomber au moment où des rigoles commencent à s'écouler le long de la pente ; dans cet intervalle, l'érosion est due uniquement au choc des gouttes de pluie sur le sol ; c'est l'effet de battance. Au temps suivant, on assiste à l'entraînement des particules par les innombrables rigoles qui se creusent, s'élargissent et confluent vers le bas : c'est le ravinement. Cette action est prédominante, et demeure même la seule effective au cours du troisième temps, lorsque la pluie a cessé.

Donc, pour qu'il y ait érosion, il faut que la pluie soit capable de séparer les particules du sol, puis que l'eau d'écoulement ait la force de les entraîner. Les spécialistes parlent du « pouvoir de désagrégation et de transport » de l'agent érosif. Ce pouvoir n'est pas facile à déterminer, puisqu'il dépend de trois facteurs éminemment variables d'un point à un autre : la nature du sol, le comportement de la pluie, la couverture végétale. Toutefois, une étude minutieuse des propriétés physico-chimiques du sol, de la stabilité de ses agrégats, de sa capacité à absorber l'eau et de sa situation topographique (exposition, pente, etc.) permet déjà de prévoir de manière satisfaisante son aptitude à se laisser éroder.

Sur des roches particulières, comme l'argile ou les roches cimentées par un matériau facilement solubilisable, l'action érosive peut aboutir à la longue à la séparation non plus de simples particules, mais de blocs entiers. C'est le phénomène des éboulements, qui constitue un chapitre important de l'étude de la conservation du sol. Dans de tels phénomènes, outre la nature de la roche, intervient la disposition des versants par rapport aux couches géologiques.

Paysage typique d'érosion par ravinement dans la région d'Atri (Abruzzes).

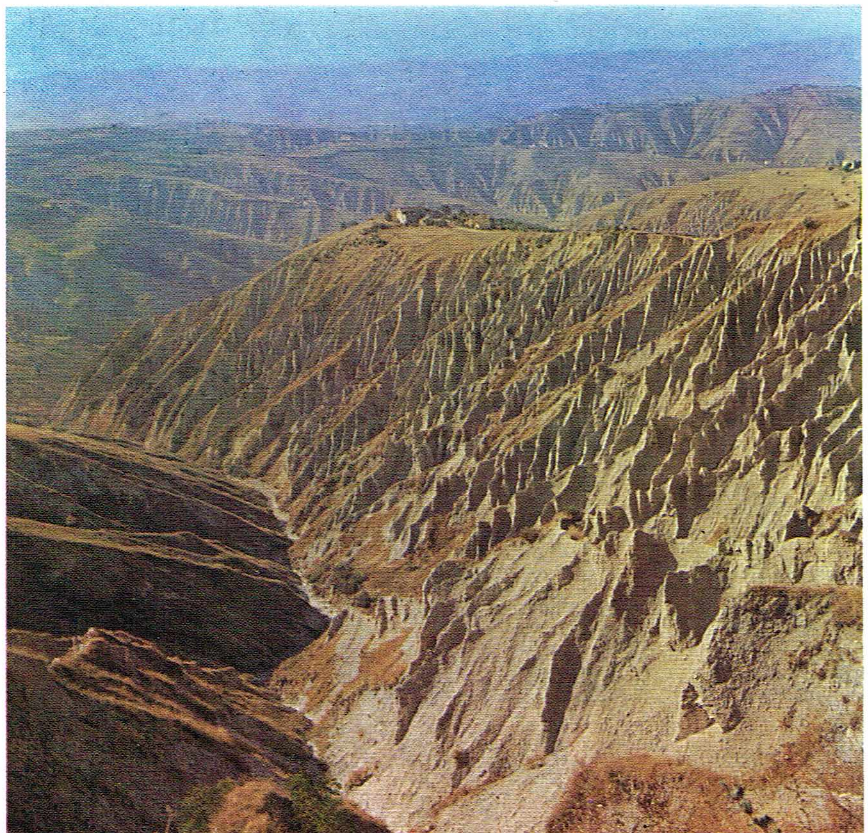

Archives I.G.D.A.

L'ÉROSION DU SOL EN ITALIE

L'Italie offre des exemples malheureusement trop éloquents de l'action de l'érosion. A l'appauvrissement et au décapage de la terre arable, d'où découlent d'importants dommages économiques, s'ajoutent les inondations fréquentes, le comblement des bassins lacustres et des lits des fleuves. Les rivières suspendues sont une caractéristique commune aux plaines, depuis la plaine du Pô jusqu'aux îles ; l'exemple le plus typique en est donné par les torrents calabrais, dont les lits surplombent des champs cultivés et des centres habités, provoquant des catastrophes chaque fois que les précipitations dépassent certains maximums ; de même, de nombreux centres urbains situés sur des hauteurs ont une position rendue précaire par l'érosion accélérée qui déchausse la base des fondations. Quelles en sont les causes ? Il faut d'abord citer la nature des terrains : la fin du Tertiaire et le début du Quaternaire ont vu la division en panneaux et le soulèvement de la chaîne des Apennins ; par ailleurs, ces segments sont essentiellement constitués par des terrains de nature peu cohérente (argiles) ou rendus tels par les fractures subies.

A ces causes fondamentales, il faut ajouter les tremblements de terre, l'ensoleillement élevé, l'abandon des terres, les pointes très importantes qu'on constate dans les précipitations et enfin l'intervention de l'homme, le déboisement incessant des coteaux pour étendre les pâturages ou les zones de culture.

TERRASSEMENT, BOIS ET DIGUES

Toute intervention tendant à la conservation du sol doit tenir compte du fait que les déséquilibres font partie d'un cycle géo-morphologique naturel ; aussi, leur action ne peut être que contrôlée et retardée. Il faut intervenir aussi précocement que possible et non pas uniquement lorsque le déséquilibre s'est déjà réalisé. Cela exige la coopération de nombreux techniciens et l'établissement d'un programme, dont l'unité minimale considérée doit être un bassin hydrographique dans sa totalité. En général, on a recours à des remèdes indirects : le terrassement, le reboisement et la construction de digues, avec des bassins de retenue.

Le type de terrassement varie selon la nature du terrain et sa pente ; aux terrasses dont le rôle est de freiner l'érosion en ralentissant le ruissellement, on associe des canaux d'évacuation, en vue de permettre l'écoulement des eaux superflues à travers des parcours obligatoires.

La fonction essentielle de la couverture forestière est de retarder l'écoulement des eaux de pluie et d'agir comme filtre ; car les arbres favorisent la pénétration de l'eau dans le sol en l'ameublissant et évitent que cette eau ne se charge de boue. On obtient ainsi un double résultat : la conservation de la terre et la purification de l'eau. Mais, une fois un terrain déboisé, l'érosion accélérée s'installe et le reboisement devient très difficile.

Il convient ici de dissiper une confusion que l'on fait souvent entre l'action des arbres dans la conservation du sol et une éventuelle action dans la régulation des grandes crues. Il est évident que la couverture végétale ne peut rien à l'égard de précipitations de grande abondance et des crues qu'elles provoquent ; le ruissellement est ralenti mais non diminué en importance. Mais elle freine considérablement le décollement des particules de terrain. On peut affirmer que la forêt évite, en cas de crue, une trop grande turbidité des eaux, comme cela se produit lorsque le terrain est nu.

Enfin, en ce qui concerne la plaine, la défense du sol tend essentiellement à empêcher les inondations, en endiguant convenablement les eaux superficielles. Les ouvrages d'endiguement doivent être souvent complétés par des bassins de retenue tout le long du cours du fleuve, bassins qui ont, entre autres rôles, celui de décanter les eaux et d'éviter ainsi (ou plus précisément de retarder) l'élévation du lit du fleuve au-dessus de la plaine.

L'ÉNERGIE SOLAIRE

Le Soleil émet sans cesse la stupéfiante quantité d'énergie de 3,79 × 10^{23} kW, c'est-à-dire près de 400 000 milliards de milliards de kW ; un tel chiffre dépasse ce que notre imagination est capable de concevoir. Une partie de cette énergie se déverse sur la Terre avec une intensité considérable. Durant la période d'exposition au Soleil, chaque mètre carré de terrain reçoit environ 2 chevaux-vapeur, puissance énorme si l'on pense que les trains les plus importants sont mus par une énergie de 5 000 ch. De telles puissances se déversent pendant de nombreuses heures sur la surface terrestre, donnant lieu à un « transfert » permanent d'énormes quantités d'énergie entre le Soleil et la Terre ; les effets qui en résultent sont à la base de phénomènes fondamentaux concernant la surface de notre planète et, par conséquent, les conditions d'existence de l'homme.

L'énergie solaire, qui se déploie sur les mers, les fleuves, les lacs et les surfaces couvertes de végétation, provoque l'évaporation d'énormes quantités d'eau ; la vapeur s'élève à plusieurs kilomètres d'altitude et se rassemble en nuages qui se condensent ensuite pour donner des pluies. Or, ce sont justement les précipitations (pluie et neige) qui conditionnent le milieu naturel existant à la surface de la planète.

La vie des plantes est rendue possible par l'énergie solaire : la photosynthèse chlorophyllienne permet aux organismes végétaux de fixer le carbone, l'oxygène, l'azote, l'hydrogène et d'élaborer les molécules complexes que l'on trouve dans le tronc, les fruits, les graines. Sans énergie solaire, il n'y aurait pas de plantes, et la vie ne serait pas possible sur la planète.

DES MIROIRS PARABOLIQUES AUX FOURS SOLAIRES

Directement ou indirectement, l'homme utilise de mille façons l'énergie solaire : il se nourrit de graines et de fruits, tire de l'énergie électrique des cours d'eau, utilise sous différentes formes le bois et les fibres végétales, brûle le charbon (constitué de plantes minéralisées), et extrait le sel des eaux de mer en provoquant l'évaporation de celles-ci sous l'action du Soleil, dans les salins.

Depuis longtemps les savants de tous les pays étudient la possibilité d'utiliser directement l'énergie solaire ; des expériences en ce sens se poursuivent depuis plusieurs dizaines d'années dans différents pays. Les obstacles qui s'opposent au développement des installations visant à utiliser l'énergie solaire sont tous d'ordre économique. Les quantités globales d'énergie qui parviennent à la surface terrestre sont énormes, mais réparties sur de vastes surfaces ; il est donc nécessaire, pour en envisager une utilisation pratique et économique, de réaliser la concentration de cette énergie. L'élément de base d'une installation solaire est donc, généralement, un miroir quasi parabolique, capable de concentrer sur une surface restreinte toute l'énergie qu'il reçoit. Ce système a permis de construire dans le passé des générateurs d'énergie électrique, d'actionner des machines à vapeur, dont la chaudière était chauffée par un miroir parabolique. Mais les rendements étaient loin d'être satisfaisants, puisque, avec des miroirs ayant plusieurs centaines de mètres carrés de surface, on n'obtenait que quelques chevaux de puissance ; de plus, ces miroirs n'étaient utilisables que

Grand miroir parabolique du four solaire d'Odeillo-Font-Romeu dans les Pyrénées-Orientales. C'est la plus importante réalisation de ce type : disposant d'une puissance thermique d'environ 1 000 kW, ce four solaire est utilisé pour la cuisson de matériaux ultra-réfractaires (2 à 3 tonnes par jour).

C.N.R.S.

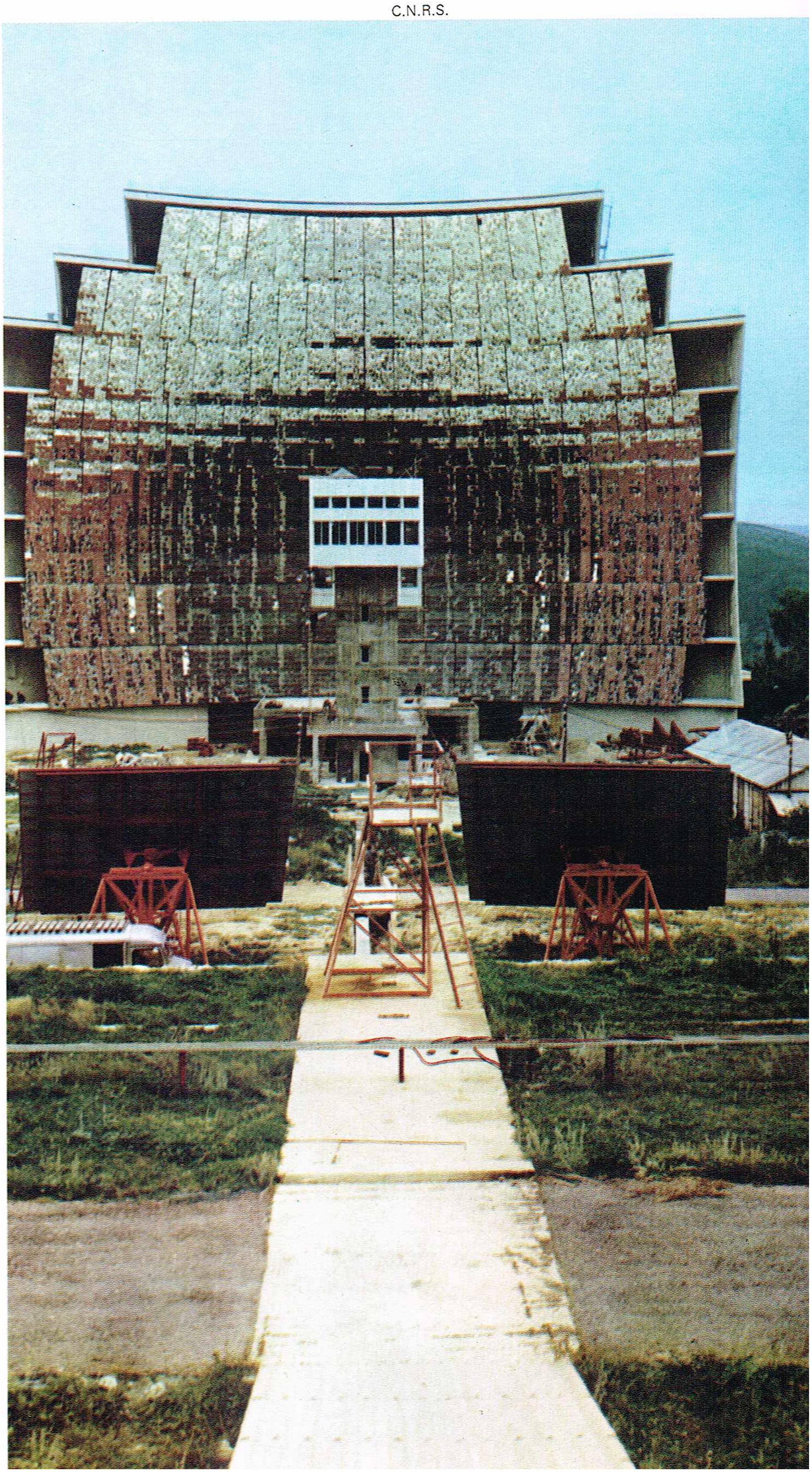

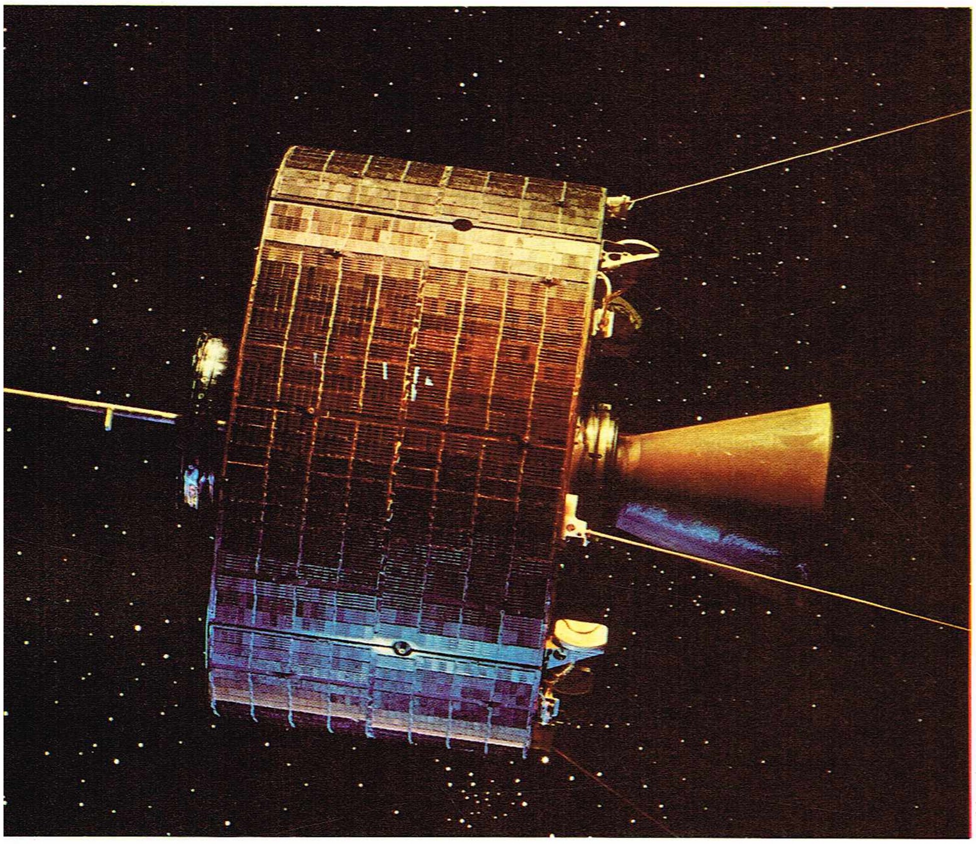

Archives Radaelli

Oso II (Orbiting Solar Observatory), satellite de la N.A.S.A. pour l'étude du Soleil; la surface extérieure est recouverte de cellules solaires destinées à la production de l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement des appareils de bord.

par temps dégagé et uniquement à raison de quelques heures par jour. Le coût d'installations de ce genre, les frais d'exploitation et d'entretien, font que le prix de revient de ce type d'énergie est bien supérieur à celui de l'énergie électrique.

Plus intéressantes sont les installations répondant à une autre formule, dans lesquelles on se limite à chauffer, à l'intérieur de caissons très vastes, peints en noir, des quantités plus ou moins grandes d'eau, que l'on porte ensuite à une température élevée en utilisant les moyens conventionnels; dans certains cas, on peut obtenir une économie de combustible suffisamment importante pour que ces installations deviennent rentables.

Les serres, dont l'emploi s'étend et dont la structure se perfectionne progressivement, constituent un cas particulier. Une serre est formée de structures recouvertes d'un matériau transparent, verre ou matière plastique, protégeant les cultures. L'énergie du Soleil traverse ces couvertures et chauffe le terrain sous-jacent. La chaleur ainsi produite reste, du moins partiellement, à l'intérieur de la serre puisque l'air ne peut pas circuler. En particulier, l'air qui se réchauffe au contact du sol et qui aurait tendance à monter ne peut s'en échapper et se disperser dans l'atmosphère.

Les expériences que l'on effectue actuellement avec les « fours solaires » sont fort intéressantes. Ces installations comportent un ou plusieurs miroirs, qui concentrent l'énergie du Soleil à l'intérieur d'une zone circonscrite, convenablement protégée, où l'on peut atteindre une température proche de 4 000 °C; à cette température, tous les corps solides passent à l'état liquide ou gazeux. On espère obtenir grâce aux fours solaires des températures encore supérieures, mais à l'intérieur d'espaces très réduits, qui permettront d'effectuer des études sur la matière aux hautes températures. Réaliser de telles températures avec les méthodes conventionnelles de chauffage, par combustion ou par arc électrique, présente des difficultés technologiques considérables, justement à cause du fait que tous les corps solides se liquéfient.

Parmi les réalisations les plus récentes, signalons le four solaire d'Odeillo-Font-Romeu, dans les Pyrénées-Orientales, à l'intérieur duquel on fait cuire quotidiennement deux ou trois tonnes de matériaux ultra-réfractaires. Ce four comporte un grand miroir parabolique constitué par 3 500 petits miroirs (la construction d'un miroir parabolique d'un seul bloc ayant les mêmes dimensions serait d'un coût prohibitif et atteindrait les limites des possibilités technologiques actuelles). La puissance thermique maximale est d'environ 1 000 kW. En plus du miroir parabolique, l'installation comprend un miroir plan qui dirige vers le miroir parabolique les rayons solaires reçus par les 65 petits miroirs qui le composent, et que des servomécanismes orientent constamment vers le Soleil. Cette structure à deux miroirs a été adoptée pour rendre l'orientation des pièces mobiles plus simple et pour allonger le temps d'utilisation.

LES CELLULES SOLAIRES

Le problème de l'utilisation de l'énergie solaire s'est posé en termes tout à fait nouveaux avec l'avènement de l'ère spatiale, ce type d'énergie étant tout à fait approprié pour alimenter les appareils de bord des satellites et sondes destinés à demeurer très longtemps en activité. Pour cette application, le coût des dispositifs passe au second plan, puisque ce qui importe le plus, c'est la réduction de l'encombrement et du poids, la facilité de pose, et la durée de fonctionnement. Après quelques années d'expérience, on peut considérer que le choix s'est fixé désormais sur les « cellules solaires », que l'on place à l'extérieur du satellite, soit sur le corps même, soit sur des panneaux que celui-ci met automatiquement en position une fois sur orbite, et que les appareils de bord maintiennent toujours orientés de manière à recevoir perpendiculairement ou presque les rayons du Soleil. Les éléments actifs de ces cellules solaires sont de petits granules de silicium très pur, qu'on a exposés sur une partie de leur surface à des vapeurs de bore. Cette surface est donc « souillée » par un certain nombre d'atomes de bore. Les granules sont ensuite fixés par la partie « propre » à une plaque de métal, ou simplement métallisée, donc conductrice de l'électricité, et forment ainsi une « cellule » de quelques centimètres carrés.

Lorsque les photons, c'est-à-dire les « grains » de lumière, abordent le granule, ils sont absorbés en surface et confèrent aux électrons présents une quantité d'énergie supplémentaire, jusqu'à ce qu'ils acquièrent une énergie suffisante pour se « détacher » de la zone comportant des impuretés de bore, et se transporter dans la zone sous-jacente de silicium pur. Si les deux zones sont insérées dans un circuit, celui-ci est parcouru par un courant électrique, chaque granule engendrant un courant de très faible intensité. Le courant ne devient appréciable que si les plaquettes, ou cellules, sont reliées en série et en parallèle par centaines ou par milliers.

La durée de vie de ces cellules solaires est très longue; le premier satellite artificiel à les utiliser fut Vanguard I, *lancé en 1958; la puissance développée était extrêmement modeste (à peine 1/600^e^ de watt), mais elle s'accrut rapidement : les photo-cellules de* Mariner IV, *par exemple, développaient deux cents watts et celles des gigantesques* Proton, *disposées sur 4 panneaux d'environ un mètre carré chacun, fournissaient plusieurs kilowatts.*

Les cellules solaires peuvent être utilisées directement pour alimenter les appareils de bord sans l'intervention d'accumulateurs chimiques. Mais il est généralement préférable de les utiliser pour recharger des batteries d'accumulateurs de type conventionnel. Ainsi, lorsque les appareils de bord absorbent peu d'énergie, les batteries solaires sont suffisantes, tandis que dans les périodes de forte consommation, les batteries chimiques contribuent à les alimenter; ces dernières sont ensuite rechargées durant les périodes où l'énergie absorbée est inférieure à celle engendrée par les batteries solaires. Dans d'autres cas, on peut disposer de deux groupes de batteries, qui, commutés par un dispositif automatique, sont mises alternativement en charge et en service pour alimenter les appareils de bord. Récemment, une automobile électrique a été mise au point, dont les accumulateurs sont chargés par des batteries solaires; son autonomie est toutefois très limitée. Il s'agit d'une simple curiosité technique, dépourvue de toute utilité pratique et destinée uniquement à servir de démonstration.

LES RESSOURCES OCÉANIQUES

Dans leur immense étendue, les océans constituent une formidable réserve de ressources vivantes, énergétiques et minérales. Couvrant 71 % de la surface de la planète, les océans représentent 360 millions de kilomètres carrés (les terres immergées couvrent 150 millions de km^2) pour un volume de 1 300 millions de km^3.

L'augmentation prévisible de la population mondiale — dans 30 ans, le globe comptera quelque 7 milliards d'hommes —, l'accroissement des besoins qui en résultera, le surencombrement des terres émergées, la boulimie de la société industrielle dévoreuse d'énergie et de matières premières incitent les nations industrialisées à prospecter et mettre en valeur les immenses ressources océaniques.

La prise de conscience des perspectives économiques offertes par les possibilités du monde sous-marin a donné aux recherches une nouvelle dimension et conduit à considérer l'océan comme un volume et une épaisseur, et non plus seulement comme une surface. La science et la technique ont ainsi développé toutes sortes de recherches et de réalisations afin d'exploiter les immenses ressources marines.

LES RESSOURCES VIVANTES

Connue depuis l'aube de l'histoire, la pêche est pratiquée selon les techniques les plus variées, dans toutes les mers du monde, et fait aujourd'hui appel aux techniques les plus modernes.

Actuellement chaque année 70 millions de tonnes de poissons — 2 à 3 % de la production alimentaire mondiale — sont pêchées dans le monde. Parmi les productions annuelles les plus importantes, on trouve celles du Japon et du Pérou (10 millions de tonnes de poissons chacun), de l'Union soviétique (environ 7 millions de tonnes de poissons), de la Chine (6,8 millions de tonnes), de la Norvège (3 millions de tonnes), des États-Unis (2,7 millions de tonnes). Au niveau européen, l'ensemble de la Communauté économique européenne est largement importateur de poisson, et le déficit de la balance européenne du commerce extérieur des produits de la mer dépasse largement l'équivalent de 3 milliards de francs. Ainsi la production annuelle italienne ne dépasse-t-elle pas 200 000 tonnes, la production française 700 000 tonnes.

L'accroissement mondial du rendement de la pêche dans la dernière décennie est dû à l'amélioration des équipements, notamment à l'emploi de sondes électroniques qui permettent de localiser le poisson et de pratiquer une pêche intensive. Mais cet accroissement ne va pas sans provoquer un certain danger pour les ressources vivantes des océans.

La situation de cette exploitation est paradoxale. En effet les quantités pêchées dans le monde n'atteignent pas encore l'optimum des possibilités de capture estimées aujourd'hui aux environs de 100 millions de tonnes. Or l'on assiste à la disparition de certaines populations de poissons : anchois au large du Pérou, hareng de la mer du Nord, thons de l'Atlantique ou du Pacifique Nord.

Aussi, afin de préserver le capital de ressources vivantes des océans, un double effort de rationalisation des méthodes de pêche et de diversification des techniques de développement, la recherche de nouvelles zones de production (Caraïbes, Antarctique) sont-ils aujourd'hui entrepris.

A. Perceval

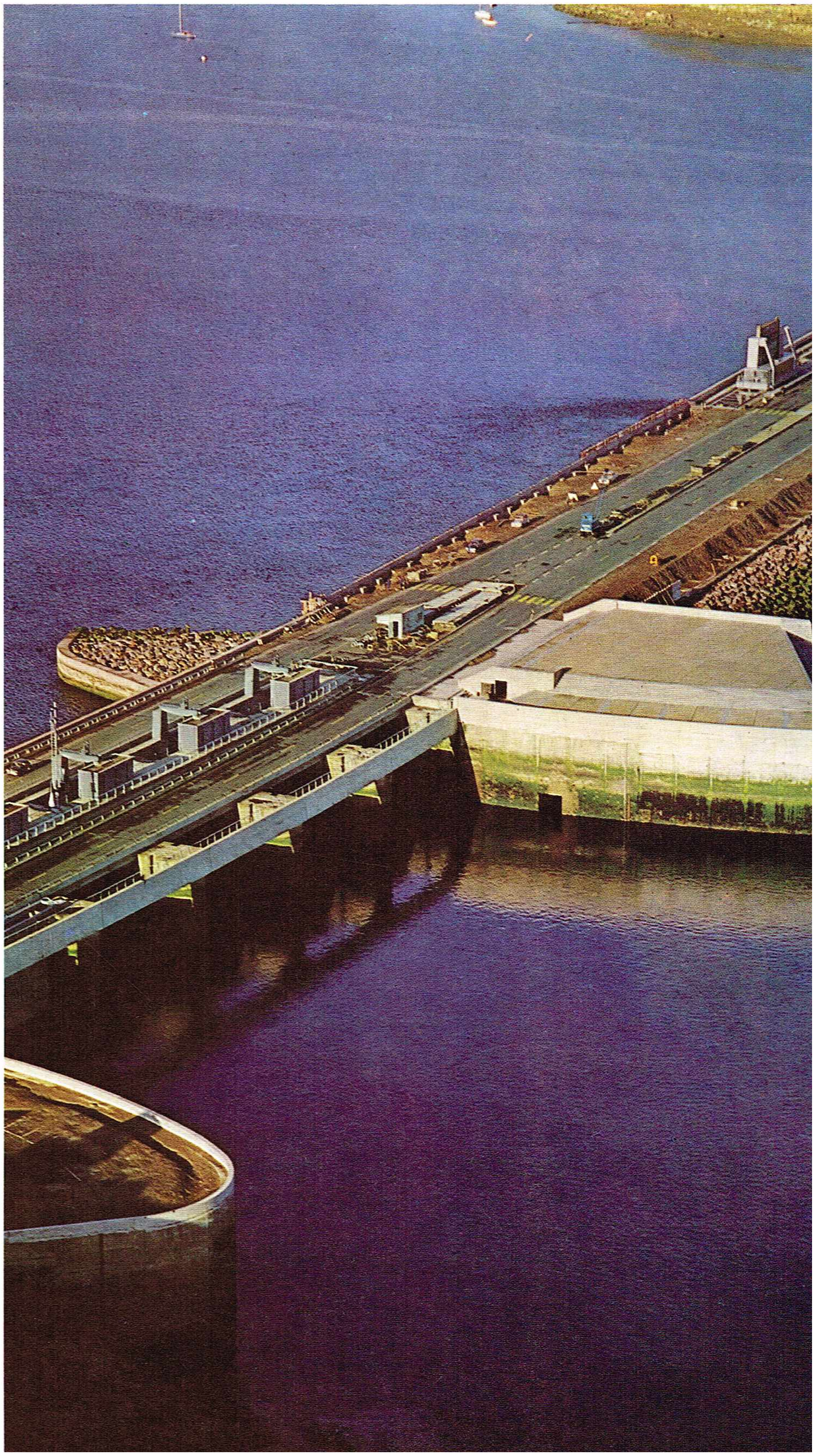

La digue sur l'estuaire de la Rance (Côtes-du-Nord). La centrale marémotrice de la Rance, qui exploite le mouvement des marées, esr capable de produire 550 millions de kWh d'électricité par an.

Ostman-H. Fristedt

Bateaux pour la pêche à la morue, à Lofoten (Norvège). La pêche avec une production mondiale annuelle dépassant les 50 millions de tonnes, constitue la principale forme d'exploitation des ressources marines.

LES ALGUES

La mer ne renferme pas que des espèces animales, elle contient aussi une multitude de produits végétaux aptes à la consommation ou à l'utilisation industrielle, parmi lesquels les algues. En Extrême-Orient, depuis des siècles, on utilise les algues comestibles. Ainsi au Japon la culture d'algues rouges, dont la consommation dépasse celle du poisson ou de la viande, occupe-t-elle 300 000 personnes. Ces algues sont cultivées dans de véritables prairies que les marées couvrent et découvrent.

Des installations pour le traitement des algues ont également été créées en France, en Espagne, aux États-Unis, aux îles Canaries, au Chili, au Canada, au Brésil, en Indochine. Elles sont utilisées dans un nombre infini d'emplois : industrie alimentaire, industrie du verre, du savon, des détergents, des lubrifiants, des produits pharmaceutiques, des produits de beauté, des produits textiles, dans l'agriculture, dans la pâtisserie (agar-agar), dans l'industrie papetière, dans la floriculture, dans l'industrie chimique. Mais un grand avenir semble réservé à une algue microscopique monocellulaire, Chlorella, *capable d'absorber 30 fois plus d'énergie solaire que le blé, de multiplier son poids par 8 en l'espace de 24 heures et de donner plus de 60 tonnes de récolte par hectare, fournissant ainsi d'énormes quantités de protéines et de graisses.*

Le plancton *(ensemble de matière organique formé d'algues microscopiques, de petits animaux, au total plus de 500 000 êtres en suspension dans un litre d'eau de mer) constitue une autre ressource alimentaire importante (300 g par m³ d'eau). Les premières industries destinées à exploiter le plancton sont nées en Thaïlande et aux États-Unis.*

L'AQUACULTURE OU ÉLEVAGE DES ANIMAUX MARINS

Bien que les possibilités océaniques soient grandes pour « fabriquer » des matières consommables par l'homme, cette fabrication est lente, et ne peut répondre seule aux besoins alimentaires de l'humanité. Aussi de nombreux pays, le Japon, les États-Unis, le Canada, les pays européens travaillent-ils à la mise au point de méthodes d'élevage d'animaux marins permettant de contrôler totalement un cycle complet de production de protéines. Sur une production annuelle mondiale de 70 millions de tonnes de poissons, on peut estimer à 15 % la contribution de l'aquaculture, essentiellement mollusques en espaces clos. L'aquaculture en milieu fermé permet de contrôler à tous les stades le développement des individus.

Ainsi les résultats obtenus en France en matière d'aquaculture, notamment dans le cadre du Centre océanologique de Bretagne situé près de Brest, et du Centre océanologique du Pacifique à Tahiti, portent-ils sur la reproduction et le grossissement de plusieurs espèces, et incitent-ils à passer progressivement du stade expérimental au stade de la production industrielle.

LES RESSOURCES MINÉRALES OCÉANIQUES

Tous les minéraux pratiquement existent dans l'eau de mer. Dans un seul kilomètre cube d'eau de mer (l'océan représente 1 milliard 375 millions de km³) on trouve en solution 35 millions de tonnes de sel, 66 000 tonnes de brome, 50 tonnes d'iode, 3 tonnes d'étain, 1 tonne de titane, 4 kilos d'or et de l'uranium.

Aussi la production marine de sel représente-t-elle 30 % de la production totale, celle de brome 70 % et celle de magnésium 60 % de la production mondiale.

De plus l'investigation des richesses des plateaux continentaux commence. Des gisements diamantifères sous-marins sont exploités depuis quelques années en Afrique du Sud : leur production est sur le point de dépasser celle des gisements terrestres. En Alaska, on extrait de l'or des fonds de la mer, en Malaisie de l'étain, au Japon (baie de Tokyo) du fer.

Mais les ressources minérales océaniques qui sont actuellement l'enjeu de la plus vive compétition mondiale, sont les dépôts de nodules polymétalliques des grands fonds marins. Concrétions noirâtres, de forme sphérique, situées à des profondeurs de 1 000 à 4 000 mètres, les nodules polymétalliques sont constitués pour la plupart d'oxyde de manganèse et de fer, avec des teneurs parfois intéressantes de cuivre, de nickel, de cobalt et autres minerais. On estime généralement que les réserves totales du seul océan Pacifique sont de l'ordre de 1 600 milliards de tonnes de nodules polymétalliques.

Plusieurs pays se sont déjà engagés sur le chemin de l'exploration et de la préparation à l'exploitation de ces ressources, par l'intermédiaire de consortiums internationaux notamment. En France, le Centre national pour l'exploitation des océans, le Commissariat à l'énergie atomique, la Société métallurgique le Nickel, les Chantiers de France Dunkerque mènent en commun des travaux dans ce domaine.

LES RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES DES OCÉANS

L'océan constitue, en outre, une gigantesque réserve d'énergie.

Les gisements de pétrole en mer entrent déjà pour près de 20 % dans la production mondiale de brut. En 1980, ils fourniront 25 à 30 % de la consommation mondiale de pétrole, estimée à 4,2 milliards de tonnes. D'après une étude effectuée par les Nations unies, les réserves de pétrole en mer représentent 300 milliards de tonnes, soit environ quatre fois les réserves terrestres. Les réserves prouvées s'élèvent à 18 milliards de tonnes et représentent 22 % des réserves totales.

Dès 1864, le premier puits de pétrole était foré à El Santo (côte péruvienne). A partir de 1918, les forages se sont multipliés en Californie, dans le golfe du Mexique — au Venezuela —, dans le golfe Persique, en mer du Nord, en mer Caspienne.

L'exploitation n'intéresse encore que des tranches d'eau d'une profondeur inférieure à 200 mètres, mais les programmes à court terme visent les tranches de 500 à 600 mètres pour les forages d'exploration et de 300 à 400 mètres pour l'exploitation dans les zones calmes.

En 1960, les États-Unis et le Venezuela fournissaient 90 % de la production de pétrole « offshore », aujourd'hui, ils n'en fournissent plus que la moitié, les deux tiers restant proviennent du Moyen-Orient, le golfe Persique offrant aux pétroliers des conditions d'environnement favorables. Les gisements de la mer du Nord produisent 2 millions de tonnes par an et pourraient en produire près de 250 dans les années à venir.

LES MOYENS DE L'EXPLORATION SOUS-MARINE

Bien qu'il ait réussi à débarquer sur la Lune et à envoyer des sondes d'exploration sur Vénus et vers Mars, l'homme est loin d'avoir exploré totalement le globe terrestre. Le fond des mers et les eaux profondes offrent en particulier aux chercheurs un prodigieux champ d'investigation, qu'il s'agisse de la faune et de la flore sous-marines, de la structure géologique des fonds océaniques, des caractéristiques hydrologiques des masses et des courants marins, ou de l'étude des villes englouties et des navires naufragés qui renseignent les archéologues sur les civilisations passées. C'est à cette investigation que se consacre l'océanologie.

1° Les moyens de surface : les navires-laboratoires

Les grandes campagnes à la mer menées par les navires océanographiques apportent ainsi à la communauté scientifique des éléments de connaissance nécessaire à l'exploration et à l'exploitation des ressources océaniques.

Les navires de recherches océanographiques conçus comme des supports d'instrumentation sont dotés de moyens de navigation leur permettant de se situer avec la plus grande précision tant à la surface que par rapport au fond : navigation par satellites, radiolocalisation, sonars, émetteurs et récepteurs acoustiques. Ils sont par ailleurs munis de moyens de traitement rapide des informations permettant sondages, mesures et prélèvements. Ainsi, des instruments portés par des bouées à ancre fixe ou mobile permettent-ils de mesurer la vitesse et la direction des courants aux différentes profondeurs, et les caractéristiques physiques de l'eau. Ce type de navire est en outre muni d'une série de sondeurs à écho, qui permettent de dessiner le profil du fond marin. La structure des couches profondes est étudiée grâce à des gravimètres maintenus à une faible distance du fond ou posés sur le fond, magnétomètres à protons, émetteurs de signaux acoustiques à basse fréquence, recueillis par des hydrophones. Un tel navire-laboratoire dispose aussi d'appareils photographiques, capables de travailler sous l'eau; il peut prélever des échantillons d'eau ou, à l'aide de filets spéciaux, de plancton à différentes profondeurs; il peut plonger des thermomètres pour mesurer la température du fond, des bennes pour prélever des échantillons superficiels, et des « carottiers » pour les prélèvements profonds. Ces instruments, constitués d'un tube doté d'une série d'organes perforateurs, permettent de prélever des échantillons cylindriques, ou « carottes », qui aident à déterminer de manière précise la structure géologique du plancher océanique.

Telles sont les caractéristiques des immenses navires « Académiciens » soviétiques comme des petits navires de recherche, d'observation et de soutien (N. O. R. O. I. S.) français ou des navires américains mus par propulseurs cycloïdaux.

Les observations directes sont effectuées par des hommes-grenouilles qui, équipés d'appareils respiratoires à air ou à oxygène, peuvent opérer jusqu'à 80 mètres, ou par des scaphandriers, qui peuvent descendre à plus de 300 mètres. Ainsi une équipe de plongeurs de la Compagnie maritime d'expertises C. O. M. E. X. française a-t-elle récupéré en juin 1975 à la profondeur de 326 mètres en zone arctique du matériel pétrolier de grande valeur endommagé par la tempête.

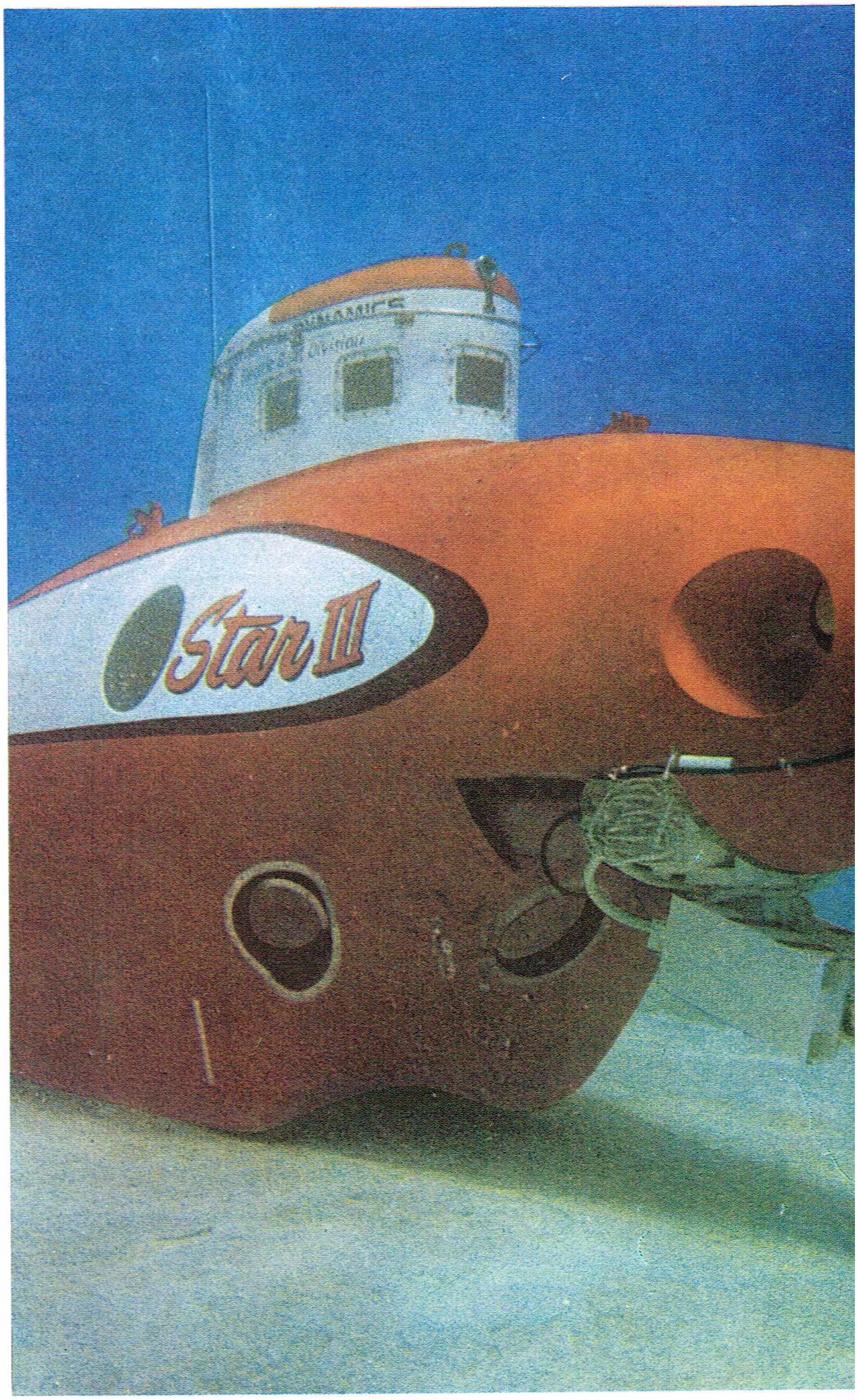

Le *Star III*, l'un des nombreux engins mis au point aux États-Unis pour l'exploration sous-marine; il est capable de descendre à 600 m de profondeur avec un équipage de 2 hommes.

2° Pénétration de l'homme dans le milieu marin à bord d'engins submersibles

Certains des engins sous-marins capables d'effectuer directement des explorations à différentes profondeurs sont télécommandés et automatiques, fonctionnant sans équipage, par exemple les Rum (Remote Underwater Manipulator), *les* Mobut (Mobile Ocean Bottom Observation) *et les* Curv (Controlled Underwater Research Vehicle).

D'autres, de petites dimensions et prévus pour de faibles profondeurs, transportent un ou deux hommes-grenouilles munis d'un équipement sous-marin conventionnel (comme les engins italiens Cosmos, *les français* Scooter, *les américains* Pegaso).

Toutefois, les modèles les plus intéressants sont ceux qui permettent le transport d'un équipage dans des conditions de pression et de température normales.

De tels engins sont dotés d'appareils de photo et de caméras, dispositifs extérieurs qui, actionnés par les membres de l'équipage, permettent des opérations plus ou moins complexes, comme l'utilisation d'instruments de mesure, de bouteilles de prélèvement, de bennes, etc. On divise habituellement ces engins en trois groupes, selon qu'ils opèrent à une profondeur faible (environ 500 m), moyenne (jusqu'à 1 000-1 500 m) ou à des profondeurs supérieures (2 000 à 12 000 m et même plus).

Au premier groupe appartiennent par exemple les Star *de la General Dynamics, dont le premier descend jusqu'à 60 m, le deuxième jusqu'à 360 et le troisième jusqu'à 600, ainsi que le petit biplace* Asherad, *le plus facile à transporter, et le* Beaver IV *qui, à la différence des précédents, possède deux bras de manœuvre extérieurs assez complexes, capables d'accomplir des manipulations d'une grande précision.*

Pour des profondeurs moyennes, il existe par exemple le complexe Deep Quest, *transportant trois unités, dont une remplaçable.*

*La gamme des engins pour les grandes profondeurs est encore plus vaste; elle comprend, entre autres, l'*Aluminault, *destiné aux recherches minéralogiques et pétrolières, à 4-6 places, deux bras de travail extérieurs, capable de descendre jusqu'à 4 500 m, le* Deep-Sub-Rescue, *destiné à remonter à la surface l'équipage de sous-marins bloqués au fond; il peut descendre jusqu'à 1 800 m et transporter jusqu'à 24 hommes. Très perfectionné du point de vue technique est le* Trieste II, *capable de descendre, avec trois hommes d'équipage, au-dessous de 10 000 m; il comporte deux bras de travail extérieurs, trois caméras, des réservoirs d'eau, d'air et d'essence, pour les manœuvres d'immersion et d'émersion, et possède une autonomie de 10 heures.*

Un « scooter » sous-marin à hélice, qui permet aux hommes-grenouilles de se déplacer rapidement.

V. de Sanctis

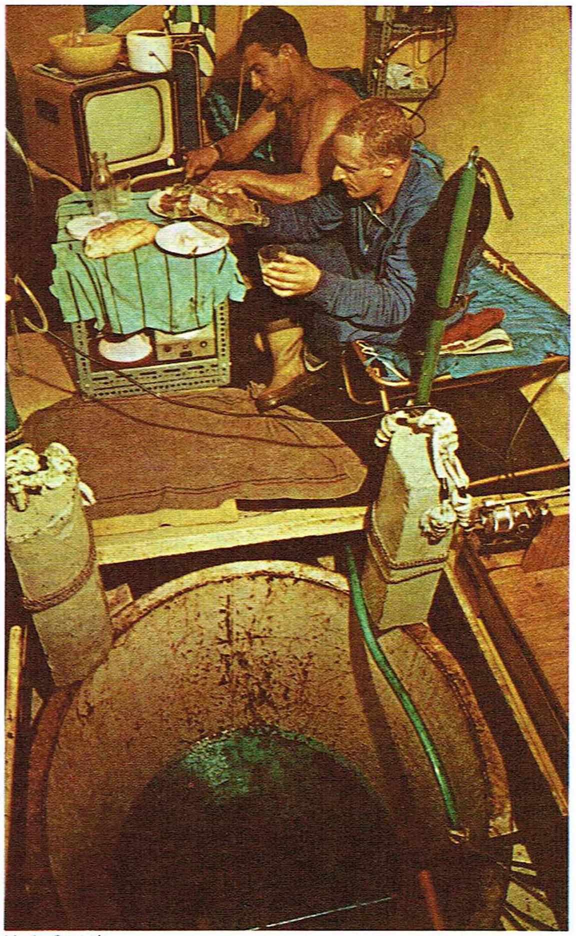

V. de Sanctis

Deux océanographes dans leur « maison sous la mer ».

L'opération franco-américaine F. A. M. O. U. S. (French American Mid Oceanic Undersea Survey) d'exploration par submersible d'une partie de la dorsale médio-atlantique au cours des étés 1973 et 1974 est un exemple de l'utilisation de submersibles et de sous-marins profonds pour la recherche océanographique.

Du côté français, le bathyscaphe « Archimède » capable de descendre à 11 000 mètres de profondeur, et la soucoupe plongeante « Cyana », petit sous-marin d'intervention autonome plongeant depuis le navire de soutien « Le Noroit », participaient aux deux phases de l'opération. Du côté américain, a participé à la deuxième phase de l'opération, la seule phase franco-américaine, au cours de l'été 1974, le submersible « Alvin ». Cette opération qui a permis de vérifier et compléter au large des Açores, à trois mille mètres sous la surface de l'océan, une théorie géophysique fondée sur des mesures effectuées jusqu'à présent depuis la surface, et de mettre en évidence le processus de formation de dépôts minéraux d'origine hydrothermale, a permis en outre de tester une nouvelle technologie. L'utilisation de submersible capable de photographier, de prélever et de réaliser de véritables coupes géologiques a, en effet, permis de vérifier « sur le terrain » des hypothèses géophysiques formulées depuis la surface.

La réalisation d'engins plus grands et plus complexes, destinés à demeurer sur le fond pendant de longues périodes et à permettre à un équipage (qui peut être relayé) d'effectuer des travaux de plus longue durée, fait par ailleurs l'objet de recherches.

Appartiennent à cette catégorie les maisons sous la mer *du commandant Cousteau, expérimentées à des profondeurs croissantes, de 11 à plus de 50 m, et les* Sealab *américains, dont la version III, dotée d'une autonomie de 1 500 heures, permet à un équipage de 8 hommes, séjournant dans une atmosphère d'azote, d'hélium et d'oxygène, d'effectuer des opérations longues et complexes à une profondeur maximale de 180 m.*

LA CHIMIE

L'homme ne se contente pas d'utiliser les substances naturelles ; il a appris, au cours des temps, en perfectionnant sans cesse sa connaissance de la matière, à transformer cette dernière pour obtenir des produits susceptibles de satisfaire ses besoins économiques, toujours plus nombreux et diversifiés.

C'est ainsi que la chimie joue un grand rôle dans le monde moderne. Qui peut ignorer aujourd'hui la prépondérance de la pétrochimie, l'importance dans notre vie des matières plastiques, des fibres synthétiques, etc. ?

Nous ne pouvons évoquer ici toutes les applications de la chimie, lesquelles sont innombrables, aussi avons-nous choisi de ne retenir que quelques exemples caractéristiques.

LA PÉTROCHIMIE

Définie comme la chimie dérivant du pétrole brut et des gaz naturels, la pétrochimie a, en deux décennies, conquis la quasi-totalité de la chimie organique industrielle. Alors qu'en Europe, au début des années 50, la part du pétrole et des gaz naturels dans la chimie organique était d'environ 5 %, elle atteint actuellement un chiffre voisin de 95 %. La production mondiale de produits pétrochimiques est de 85 millions de tonnes par an et le nombre de ces produits atteint plusieurs milliers. Ces chiffres attestent l'extraordinaire développement pris par la pétrochimie dont le taux moyen annuel de croissance a été de 15 % entre 1950 et 1970. La pétrochimie est devenue une branche prépondérante de l'industrie chimique qui se caractérise par un niveau élevé de technicité et une perpétuelle évolution. Elle doit son développement spectaculaire au fait qu'elle a bénéficié des techniques de production en très grands tonnages qui caractérisent la technologie pétrolière. Les traitements en continu, l'augmentation de la taille des unités productrices, l'automatisation à toutes les étapes de la fabrication et du conditionnement ont contribué à abaisser progressivement les prix de revient tout en améliorant la qualité des produits. Parmi toutes les industries de « première transformation », c'est-à-dire destinées à traiter un produit brut en vue soit de la production du produit fini qui sera utilisé tel quel, soit d'autres produits destinés à subir des traitements ultérieurs, la pétrochimie est celle qui a connu l'histoire la plus complexe et les innovations les plus nombreuses.

En effet, ce que l'on demande à l'industrie de l'acier, par exemple, ce sont des alliages légèrement différents, des profilés de formes et de dimensions variables, mais tout cela ne modifie pas profondément les techniques de production. L'industrie du ciment fournira des ciments aux caractéristiques diverses, mais toujours à l'intérieur d'une gamme limitée. Quant aux industries qui produisent, par exemple, de l'acide sulfurique, de l'ammoniac, des nitrates, de la soude, etc., leur activité devient certes de plus en plus importante, mais ce que l'on attend d'elles, c'est une plus grande pureté des produits et une amélioration de la technologie tendant à réduire les coûts de production.

Les choses diffèrent pour la pétrochimie, car la demande des divers produits issus de la distillation du pétrole a subi des variations profondes et tout donne à penser que la diversification se poursuivra encore dans les prochaines années. Pendant longtemps, les produits les plus recherchés de la distillation du brut ont été les essences ordinaires, adaptées aux besoins des moteurs automobiles, et les essences dites d'aviation, plus légères, adaptées aux moteurs à piston utilisés par l'industrie aéronautique. Le kérosène, fraction de la distillation qui suit les essences dans l'ordre des « températures » d'ébullition croissantes, était largement utilisé, mais dans des applications relativement limitées : lampes et réchauds « à pétrole », très employés avant l'extension de l'électrification, ce qui lui a valu le nom de pétrole lampant.

Les huiles pour moteurs Diesel faisaient l'objet d'une demande fort réduite, en raison du nombre très modeste des moteurs de ce type ; moins importants encore étaient les produits plus lourds, comme le fuel domestique, car le charbon occupait une place prépondérante aussi bien dans l'industrie que dans l'économie domestique. Quant aux fractions plus légères, qui se dégagent spontanément à l'extraction (gaz de tête) et que l'on recueille dans les différentes phases de distillation ainsi qu'à l'occasion des traitements successifs, leur valeur commerciale était autrefois pratiquement insignifiante.

SEID

Sphère pour le stockage d'oléfines liquides. Les oléfines appartiennent au groupe des composés aliphatiques, dont l'élément de base est le méthane.

Ainsi, pendant de longues années, l'effort des spécialistes se dirigea vers la production du produit le plus demandé : l'essence, en soumettant les huiles intermédiaires issues de la première distillation à des traitements ultérieurs faisant appel aux techniques du cracking, thermique ou catalytique, qui consistent à « casser » une partie des molécules complexes typiques des huiles moyennes en molécules plus petites, caractéristiques des essences. Ces efforts donnèrent des résultats de plus en plus intéressants, à tel point que le rendement en essences atteignit 40 % environ en poids du brut. Pendant ce temps, l'emploi du kérosène baissait dans des proportions considérables, tandis que la demande de fuel pour diesel (gas-oil) et de fuel de chauffe (emplois industriels) croissait considérablement. Cette situation, stabilisée vers les années quarante, subit une série de changements fondamentaux, consécutifs à différentes causes économiques et technologiques ; il s'ensuivit une véritable révolution sur le plan commercial, bouleversant la

demande des divers types d'hydrocarbures dérivés du pétrole.

Tout d'abord, la diffusion rapide de l'avion comme moyen de transport, plutôt que d'agir sur la demande d'essence « avion », provoqua une augmentation spectaculaire de la demande de kérosène, augmentation qu'il était impossible de prévoir quelques années auparavant; en effet, l'aviation délaissait le moteur à piston pour adopter les turboréacteurs, qui fonctionnent précisément au kérosène. Dans le même temps, dans les domaines maritime et ferroviaire, le moteur Diesel de moyenne et de grande puissance supplantait la machine à vapeur, amplifiant encore la demande de gas-oil. Simultanément, le chauffage domestique se transformait, passant, en l'espace de quelques années seulement, de l'utilisation du charbon au gas-oil domestique. En outre, la demande d'hydrocarbures légers est devenue d'un seul coup infiniment plus importante, non seulement par suite de l'extension du marché des gaz liquéfiés aux emplois domestiques, mais surtout en raison du fait que l'industrie des matières plastiques en exige des quantités de plus en plus importantes comme matières premières.

Les essences auto, bien que produites en quantité suffisante, ont dû suivre par leur qualité l'évolution rapide des moteurs automobiles dont le taux de compression augmentait sans cesse. Une véritable « course à l'octane » s'est instaurée dans les milieux pétroliers, qui a favorisé l'évolution d'une technique ayant pour but d'augmenter la teneur en aromatiques des essences : il s'agit du reforming catalytique. Enfin, les progrès réalisés dans les moteurs ont nécessité des progrès parallèles dans les huiles lubrifiantes extraites des fractions lourdes du pétrole brut.

L'ensemble des opérations physiques et chimiques par lesquelles le pétrole brut est transformé en gaz liquéfiés, essences, kérosène, gas-oil, huiles lubrifiantes, etc., constitue le raffinage du pétrole.

La pétrochimie, qui, au départ, du pétrole et des gaz naturels conduit aux matières plastiques, aux fibres synthétiques, aux caoutchoucs synthétiques, aux détergents, aux pesticides, etc., s'est développée après le raffinage. En Europe, son développement a commencé pendant et après la Seconde Guerre mondiale et elle a rapidement supplanté la carbochimie qui ne pouvait suivre le développement rapide de la demande. La concurrence de la pétrochimie vis-à-vis de la carbochimie a eu deux raisons majeures : d'une part, le charbon ne pouvait plus fournir les intermédiaires de base à des prix compétitifs, d'autre part, la cokéfaction se développait à un rythme beaucoup plus lent que celui de la chimie organique.

Le procédé de base de la pétrochimie est le steam-cracking (craquage à la vapeur) qui, à partir d'une fraction de distillation du pétrole brut appelée naphta fournit de l'éthylène, du propylène, du butadiène et d'autres oléfines à quatre et à cinq atomes de carbone, ainsi qu'une essence à haut indice d'octane. Par ailleurs, le reforming catalytique, utilisé en raffinage pour préparer des essences, peut aussi servir à la préparation d'aromatiques : benzène, toluène et xylènes essentiellement. Les oléfines du steam-cracking et les aromatiques du reforming constituent les intermédiaires de première génération de la pétrochimie. A partir de ceux-ci, par des transformations chimiques portant sur des tonnages parfois énormes, on synthétise des intermédiaires de seconde génération, tels le styrène, le chlorure de vinyle, le cyclohexane ou l'acide téréphtalique. Ces intermédiaires de seconde génération conduisent à des produits finis : polystyrène, polychlorure de vinyle, Nylon, Tergal, etc. A ce stade, on n'est pas encore au niveau du produit de consommation et de très nombreuses transformations chimiques ou physiques sont nécessaires avant d'arriver aux pneus, aux fibres synthétiques ou aux détergents.

Ainsi, du brut au produit fini, les transformations chimiques sont nombreuses. Chaque étape doit se faire avec le rendement le meilleur et le prix le plus bas. Pour atteindre ces buts, la production en continu portant sur des volumes de plus en plus importants devient nécessaire. C'est ainsi qu'en 1950, une installation de steam-cracking produisait annuellement 30 000 tonnes d'éthylène alors que les derniers steam-crackers construits en Europe ont une capacité dépassant 500 000 tonnes. Il en est de même pour les produits de seconde génération : l'oxyde d'éthylène, par exemple, à partir duquel on fabrique un antigel, le glycol et qui entre dans la constitution des fibres polyester, était vers 1960 synthétisé dans des unités productrices annuellement de 30 à 40 000 tonnes; la production des installations actuelles dépasse 200 000 tonnes par an. Le progrès de la pétrochimie a consisté en outre à réduire le nombre des étapes nécessaires à la synthèse des produits les plus importants. C'est ainsi que l'acrylonitrile, monomère d'une fibre textile synthétique, nécessitait autrefois pour sa fabrication trois étapes à partir de l'éthylène et l'emploi d'acide cyanhydrique; actuellement, un procédé en une seule étape permet de l'obtenir à partir de propylène, d'oxygène et d'ammoniac.

Outre les problèmes de prix de revient, la pétrochimie a dû faire face à une diversification sans cesse croissante de la demande, résoudre des problèmes de pollution, remplacer les détergents non biodégradables par des formules ne produisant plus de mousse dans nos rivières. Un des domaines qui attestent le dynamisme de l'industrie pétrolière est celui des protéines alimentaires.

Montécatini-Edison

Installation pour la production de l'urée, substance organique employée comme engrais, comme aliment du bétail et comme matière première pour la production de certaines matières plastiques.

DU PÉTROLE AUX PROTÉINES ALIMENTAIRES

Deux installations entièrement nouvelles, l'une à Lavéza, près de Marseille, l'autre en Écosse, dans la raffinerie de Grangemouth, utilisent des processus de type biologique : elles transforment des hydrocarbures en protéines alimentaires destinées à l'alimentation du bétail. Ces installations, très importantes (celle de Lavéza peut produire 4 000 tonnes de concentré protéique par an), sont les premières d'une série qui connaîtra une large diffusion dans le monde entier.

Chacune de ces deux unités utilise des matières premières et des procédés différents. Dans les usines de la région de Marseille, le matériau de départ est le gas-oil; celui-ci est transformé en concentré protéique avec un rendement de 10 %. Le second procédé a pour point de départ un groupe d'hydrocarbures appelés « paraffines normales » obtenus en soumettant à des traitements particuliers certaines fractions intermédiaires de la distillation du brut. La transformation, réalisée toujours par un processus biologique, est totale et très peu coûteuse; les opérations les plus onéreuses sont celles qui ont trait à la transformation des fractions intermédiaires du distillat en « paraffines normales ». Il est probable que le procédé qui utilise directement le gas-oil comme matière de base pourra être appliqué prochainement à des fractions plus lourdes du distillat, tandis que les « paraffines normales » susceptibles d'être transformées en protéines seront obtenues à des coûts moindres, même à partir de fractions plus légères.

D'autres groupes de spécialistes travaillent à la réalisation de protéines à partir du méthanol. L'impulsion à ces recherches et aux technologies nouvelles qu'elles ont engendrées a été donnée par le problème angoissant de la sous-alimentation dans le monde. La sous-alimentation dont souffre la majorité de la population mondiale est non seulement quantitative mais aussi qualitative, puisque ce sont surtout les protéines qui font défaut, c'est-à-dire les principes alimentaires destinés à l'édification des tissus et au maintien de leur intégrité, protéines que l'on trouve dans la viande, le poisson, les œufs, le fromage, le lait et dans certains produits végétaux.

La rareté de ces aliments tient à leur coût de production élevé, et pour abaisser celui-ci, il faut réduire considérablement le prix des aliments pour le bétail. On voit immédiatement tout l'intérêt qui s'attache à la production abondante et bon marché de protéines à partir du pétrole, qui serviront à enrichir et à équilibrer l'alimentation du bétail. Cette nouvelle source de demande de produits pétroliers, pour la satisfaction de laquelle on fera appel à des fractions légères et moyennes de la distillation du brut, impose à l'industrie pétrochimique un motif supplémentaire d'adaptation et confirme le bien-fondé des options qui ont conduit à la création d'installations souples, seules capables de satisfaire à une demande aussi diverse qu'imprévisible.

EMPLOIS INDUSTRIELS DES MATIÈRES PLASTIQUES

L'emploi des matières plastiques pour les usages les plus divers continue de s'étendre dans tous les pays. Il apparaît sans cesse des familles nouvelles de matériaux, la production globale augmente rapidement, et, chaque jour, on étudie des possibilités nouvelles d'utilisation présentant un intérêt certain sur les plans technique et économique. L'utilisation des matières plastiques dans l'industrie automobile a connu une progression particulièrement rapide, que l'on peut illustrer par la comparaison entre deux voitures de même marque, par exemple la Fiat 1100 et la Fiat 124 : la Fiat 1100, de 1952, comportait 1,1 kg de matières plastiques, soit 0,13 % en poids et 0,6 % en volume ; la Fiat 124, qui pèse seulement 30 kg de plus, contient 31,147 kg de matières plastiques, soit 3,78 % en poids et 15,7 % en volume.

Dans le domaine des appareils électroménagers, le phénomène présente une ampleur tout à fait comparable. Dans les réfrigérateurs modernes, l'espace compris entre la cuve de l'appareil et son habillage métallique extérieur ou entre les faces interne et externe de la porte est rempli de résine expansée sous forme de mousse solide (polystyrène ou polyuréthanne), qui joue le rôle d'isolant thermique ; la cuve elle-même est souvent en matière plastique. Dans tous les autres appareils électroménagers, il y a également utilisation accrue des matières plastiques : bien des pièces qui étaient à l'origine métalliques sont aujourd'hui en Nylon, en polypropylène, en PVC ou en résines phénoliques (urée, mélamine).

La gamme des matières plastiques continue de s'étendre grâce à la découverte de substances nouvelles. Ainsi, dans la Fiat 124, on compte dix types de matières plastiques différentes : chlorure de polyvinyle, résines phénoliques, polyuréthannes, polystyrènes, résines cellulosiques, méthacrylates, polyamides, polypropylène, polyéthylènes, polyacétales. Quelques-unes de ces résines sont d'origine relativement récente ; il en est ainsi du polypropylène, matériau utilisé pour la fabrication du ventilateur principal, du ventilateur de l'installation de chauffage, de son boîtier et de la canalisation d'air chaud ; le polyuréthanne expansé est utilisé pour le rembourrage des coussins.

Du point de vue de la production quantitative, on note d'assez grandes disparités entre les différentes matières plastiques. Ainsi, la production française a été en 1974 de 2 600 000 tonnes, dont, en milliers de tonnes : chlorure de polyvinyle, 621 ; polyéthylène (haute et basse densité), 906 ; polystyrène (standard et choc), 189 ; phénoplastes, 86 ; aminoplastes, 215 ; polyesters, 75 ; polyuréthannes 104.

Le polychlorure de vinyle (PVC) est utilisé par exemple pour confectionner un revêtement spécial appelé similicuir, qui trouve de larges applications dans l'industrie automobile pour l'habillage des sièges de voitures, dans l'industrie de l'ameublement pour recouvrir des divans et des fauteuils, en maroquinerie, etc. Les emplois de ce matériau sont d'une très grande diversité : l'industrie électrique l'utilise pour réaliser l'isolation de câbles électriques à basse et moyenne tension, l'agriculture pour l'irrigation et le drainage (les canalisations en PVC sont de plus en plus répandues), l'industrie du bâtiment pour les gouttières, les tuyaux de descente, les canalisations d'égout, les revêtements de sol ; l'industrie chimique emploie un grand nombre de récipients en polychlorure de vinyle ou comportant des revêtements de ce matériau. Dans le domaine agricole, une application récente et intéressante de ce matériau est constituée par les silos en matière plastique, formés de feuilles flexibles en PVC renforcées d'une armature métallique ; ces silos, qui permettent le stockage d'un volume considérable de grains, de paille, etc., sont démontables et n'occupent alors que très peu de place. Le polyéthylène connaît des emplois aussi nombreux et aussi variés. Il se prête parfaitement à la fabrication de récipients inaltérables aux agents chimiques (acide sulfurique, insecticides, etc.) et pouvant contenir des produits alimentaires très divers sans se combiner avec ces derniers. Les récipients en polyéthylène présents sur le marché sont en nombre incalculable, depuis le grand bidon hermétique pour les produits chimiques jusqu'aux bouteilles et flacons contenant des détergents, du savon, du talc, des produits pharmaceutiques ou d'autres produits d'emploi ménager. Des kilomètres carrés de polyéthylène en feuilles sont employés par les horticulteurs pour la fabrication de serres d'un coût très modéré et présentant en outre l'avantage d'être démontables. Le polyéthylène est également utilisé pour la réalisation de canalisations pour le transport de l'eau potable, canalisations dont la section peut atteindre 200 mm.

A. Rizzi

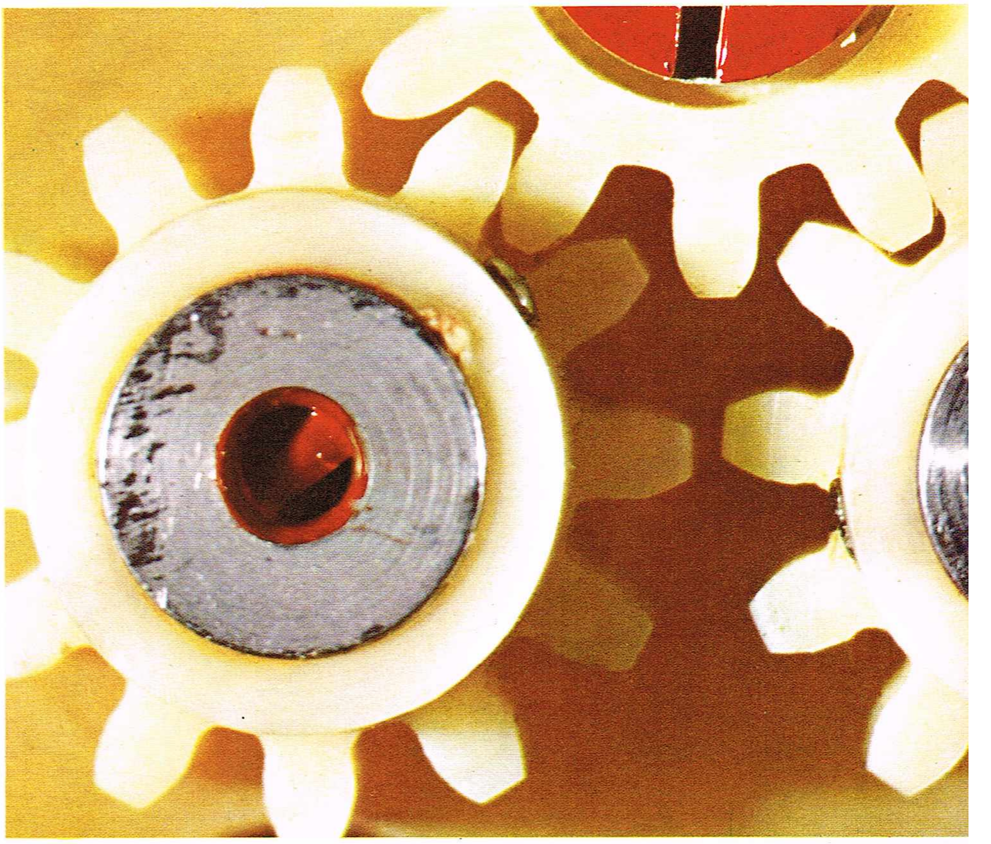

Engrenages en matière plastique. Les progrès réalisés dans les applications technologiques des matières plastiques ont rendu possible ce type d'utilisation.

LE POLYSTYRÈNE

Le polystyrène et ses copolymères sont utilisés pour la fabrication d'emballages destinés à l'industrie alimentaire, de récipients légers de toutes formes et de toutes dimensions, de panneaux d'isolation phonique, de stratifiés décoratifs, d'éléments d'appareils électroménagers en tout genre, d'assiettes, de bols, de tasses, de verres

C. Bevilacqua

Serres pour la protection des pépinières. Cette photo illustre l'un des aspects de l'emploi des matières plastiques dans l'agriculture.

aux couleurs très gaies, de pièces d'automobile, de boîtiers pour toutes sortes d'appareils, comme les machines à calculer, de flotteurs pour les filets de pêche, de bouées, de balises flottantes et d'une infinité d'autres objets dont l'énumération serait extrêmement longue.

Le polystyrène, par ses excellentes caractéristiques mécaniques et électriques ainsi que par son coût très modéré, trouve aussi un très large emploi dans l'industrie électrique et mécanique, et même dans l'industrie des peintures.

Les résines phénoliques, produites sous forme de poudres à mouler, permettent la fabrication d'une multitude d'objets divers dont on dit habituellement qu'ils sont en « bakélite ».

Avec des résines à base de mélamine, on fabrique des assiettes, des couverts, des stratifiés, ces derniers présentant souvent une structure à double couche, l'une formée de mélamines, l'autre de résines phénoliques. On en fait aussi des appareils électriques pour circuits à basse tension. Les résines à base d'urée connaissent des emplois à peu près analogues. Un vaste domaine d'emplois nouveaux s'ouvre au polystyrène, domaine qui s'élargit très rapidement. A la température ambiante, les résines à base de polystyrène sont fluides et présentent une viscosité assez faible ; l'addition d'un catalyseur provoque leur polymérisation à la température ambiante. Elles se prêtent ainsi à des fabrications par moulage à froid ou par application sur des coquilles spéciales. On les utilise habituellement mélangées à du quartz en poudre ou à des fibres de verre, ce qui leur confère une résistance mécanique plus grande. On s'en sert pour la fabrication des coques de petites embarcations, de couvertures légères en tout genre pour le bâtiment ainsi que d'isolants pour l'industrie électrique, et, sous forme de feuilles très minces, pour la fabrication de condensateurs électriques et d'autres composants électroniques. Les polyesters renforcés aux fibres ou à la toile de verre permettent la réalisation d'éléments de grandes dimensions, tels que containers, autoclaves et même wagons frigorifiques. On peut trouver surprenant le fait que plus de la moitié en poids de la production mondiale de Nylon 66 (il s'agit d'une résine polyamide) soit utilisée pour la fabrication d'éléments mécaniques, engrenages, frettes, supports, poulies, ventilateurs et même éléments de séparation intercalés entre les tronçons de rail et destinés à maintenir la continuité mécanique tout en réalisant une discontinuité électrique sûre. On peut charger le Nylon à la fibre de verre afin d'augmenter ses qualités mécaniques ; on peut aussi lui appliquer des traitements thermiques, qui, en provoquant un nouvel arrangement des chaînes moléculaires qui en constituent la structure, contribuent à en améliorer les caractéristiques. Le Nylon et bien d'autres polyamides sont utilisés pour les emplois les plus divers : vis spéciales pour assurer l'isolation électrique des pièces des machines textiles, cheveux de poupée, cordage de raquette de tennis, filets de pêche, brosses, et ainsi de suite.

Les résines cellulosiques, bien qu'elles aient perdu leur importance d'autrefois (le Celluloïd fut la première des matières plastiques), trouvent encore de nombreuses applications. L'acétate de cellulose constitue encore de nos jours la pellicule de support pour la surface sensible en cinématographie et en photographie. On l'utilise aussi pour recouvrir certaines pièces métalliques (poignées, volants, etc.), pour confectionner des talons de chaussures, des peignes, des boutons, des montures de lunettes, etc.

Les résines acryliques comprennent plusieurs groupes de matières plastiques, polymères et copolymères de l'acide acrylique et méthacrylique. La caractéristique essentielle de ces matériaux est leur exceptionnelle transparence et la facilité avec laquelle ils se laissent colorer en teintes vives et brillantes. Pour cette catégorie de matière plastique aussi, les emplois sont très variés : couverts, récipients, panneaux décoratifs d'intérieur ou de façade de vitrine, coquilles pour les feux de position, etc.

LE POLYPROPYLÈNE

Le polypropylène, découvert par Natta, est l'une des matières plastiques les plus récentes et dont l'avenir s'annonce le plus brillant. Le polypropylène présente des caractéristiques tout à fait remarquables : densité faible (0,9), résistance à des températures supérieures à celles des autres résines thermoplastiques, grande résistance mécanique et chimique, propriétés diélectriques parfaites. Il se prête au moulage par injection à chaud, au formage sous vide ou sous pression ; il peut aussi être extrudé et réduit à une feuille mince et transparente. On l'emploie actuellement pour la fabrication de récipients à fermeture hermétique destinés à contenir des produits alimentaires, de filets de pêche et de filets pour la cueillette des fruits, de sacs industriels, de bassins, de canalisations et de récipients pour l'industrie chimique, de socles pour machines textiles, de différentes pièces utilisées par l'industrie électronique et par d'autres industries, enfin pour réaliser une plastification très résistante des couvertures de livres et de revues.

Les résines époxydes, qui possèdent des caractéristiques mécaniques et électriques et un pouvoir d'adhésion supérieurs à ceux de toutes les autres matières plastiques, sont utilisées par l'industrie électrique pour la fabrication de gaines isolantes, de transformateurs de mesures, de fourreaux isolants noyés dans le ciment et susceptibles de supporter de fortes charges mécaniques. Ces résines peuvent être chargées au quartz, au kaolin, au talc, au carbonate de calcium, ce qui permet de réaliser des mélanges aux caractéristiques particulières. Utilisées comme peintures, elles réalisent un revêtement parfaitement adhérent, souple et mécaniquement résistant ; enfin, elles sont utilisées, surtout dans l'industrie aéronautique, pour souder de manière rapide et tout à fait sûre des éléments métalliques. Pour en réaliser la polymérisation, il faut, le plus souvent, soumettre le mélange à un cycle de chauffage.

UNE RÉSINE EXCEPTIONNELLE

Le polytétrafluoroéthylène est une résine thermoplastique qui se ramollit à 327 °C, tandis que la quasi-totalité des autres résines thermoplastiques se ramollit entre 120 et 130 °C ; en outre, il présente des caractéristiques exceptionnelles de non-adhérence et de résistance chimique. On l'utilise dans l'industrie électrique pour des pièces appelées à supporter une température supérieure à 300 °C, dans l'industrie chimique et dans l'industrie alimentaire, surtout pour l'emballage ou le transport de matériaux visqueux et fortement adhérents (mélasses, miel, sucre caramélisé et autres produits semblables). L'industrie des ustensiles de cuisine en a fait une application intéressante en tant que revêtement (Teflon) de poêles ou de casseroles qui permettent la cuisson des aliments sans emploi de matières grasses et sans que ces mêmes aliments attachent au fond du récipient.

L'ACIDE SULFURIQUE DANS L'INDUSTRIE CHIMIQUE

L'acide sulfurique est indiscutablement l'une des substances chimiques les plus importantes, en raison du nombre et de l'extrême variété d'emplois qu'il possède. On peut dire qu'il n'existe pas aujourd'hui une seule usine chimique qui n'utilise l'acide sulfurique, à tel point qu'il semble possible d'apprécier les conditions économiques d'un pays d'après sa consommation d'acide sulfurique.

Dans la nature, l'acide sulfurique n'est présent à l'état libre que dans l'eau de certains fleuves sud-américains, mais, heureusement pour la vie des animaux et des plantes, à une concentration très faible. Donc, par suite de sa rareté dans la nature et des immenses besoins mondiaux, une importante industrie s'est développée pour la production de cet acide. Elle utilise comme matière première le soufre ou ses composés, comme les blendes et les pyrites, très répandues dans les roches de la lithosphère.

La fabrication industrielle de l'acide sulfurique n'a débuté qu'au XVI^{e} siècle, en Bohême; il était alors connu sous le nom d' « huile de vitriol » ou d' « acide vitriolique »; on le préparait en faisant réagir à chaud le sulfate ferreux heptahydraté (« vitriol vert ») avec la silice présente dans le sable auquel le sulfate était mélangé : au cours de cette réaction, le fer se fixait sous forme de silicate, et il y avait libération d'acide sulfurique.

FABRICATION INDUSTRIELLE

C'est au XVIII^{e} siècle, et plus précisément vers 1740, que sont réalisées les premières installations capables de produire de l'acide sulfurique à des conditions économiques avantageuses. En Angleterre, par exemple, on préparait l'acide sulfurique en faisant brûler, en présence d'eau, un mélange de nitrate de potassium (salpêtre) et de soufre dans des récipients de verre. Ce procédé fut amélioré grâce à l'emploi de l'air comme oxydant à la place du salpêtre, puis grâce au remplacement des récipients en verre, très fragiles, par des « chambres de plomb », de dimensions beaucoup plus importantes. Cela a donné son nom au procédé qui fut employé jusqu'à nos jours. Dans le procédé qui utilise les chambres de plomb, on recourt aux oxydes d'azote pour transformer l'anhydride sulfureux en anhydride sulfurique; ce dernier est mis au contact de l'eau pour donner l'acide correspondant. Dans les meilleures conditions, on utilise 500 kg de pyrites et 4 kg d'acide nitrique pour produire une tonne d'acide sulfurique à 64 %. Actuellement, l'industrie utilise le procédé par contact, dont l'origine remonte à 1831 : l'oxydation de l'anhydride sulfureux en anhydride sulfurique est réalisée grâce à l'emploi d'un catalyseur constitué par du platine finement divisé, supporté par des masses incandescentes de porcelaine. En 1875, des brevets sont déposés simultanément en Allemagne et en Grande-Bretagne, prévoyant l'emploi du pentoxyde de vanadium au lieu du platine comme catalyseur.

USAGES INDUSTRIELS

Les usages de l'acide sulfurique dans l'industrie sont en rapport avec les propriétés physiques et chimiques de ce corps. L'acide sulfurique se comporte comme un acide fort, un déshydratant et un oxydant. Ses propriétés corrosives sont bien connues : ni les tissus organiques, ni les fibres naturelles ne résistent à l'acide sulfurique, qui les détruit rapidement. Sa toxicité est élevée : l'inhalation de vapeurs concentrées peut entraîner la perte de connaissance et de sérieuses lésions au niveau des voies

Montecatini - Edison

Tours de séchage et d'absorption dans une usine de production d'oléum, mélange d'acide sulfurique et disulfurique, employé pour la fabrication de colorants et d'explosifs.

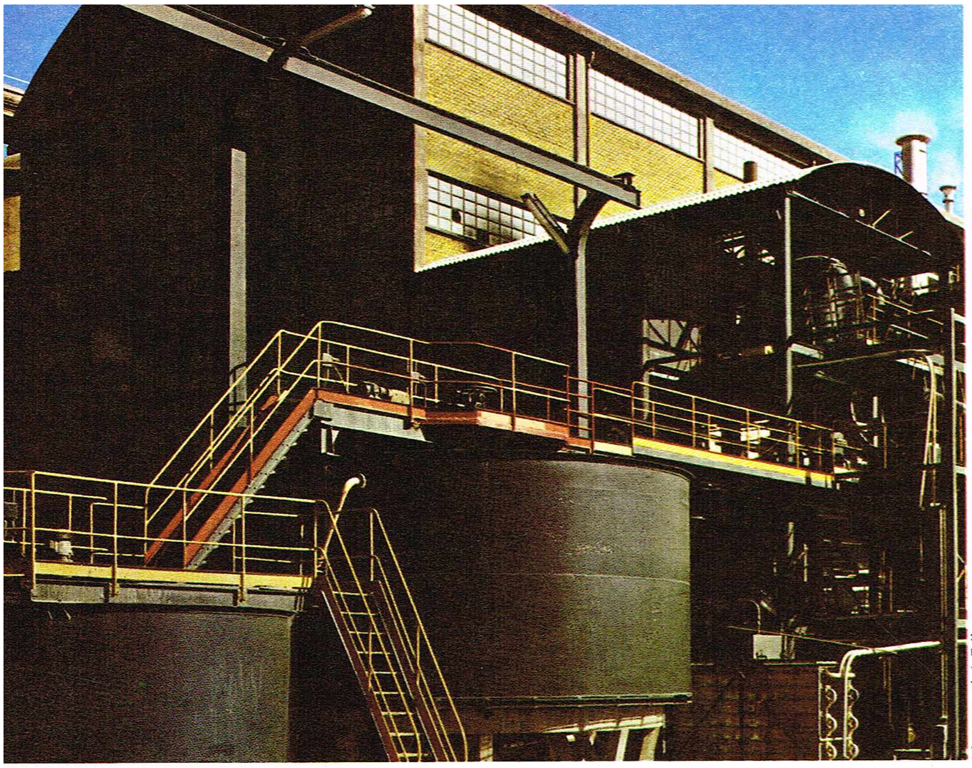

Montecatini-Edison

Installation pour la concentration de l'acide sulfurique.

respiratoires. Des projections d'acide sulfurique sur les yeux peuvent provoquer la perte de la vue ; l'ingestion d'acide sulfurique est généralement mortelle.

L'acide sulfurique, H_2SO_4, est un acide peu volatil (en effet, il bout au-dessus de 300 °C), doué d'une grande réactivité chimique. De ce fait, il est employé par l'industrie de la chimie minérale pour préparer les acides plus volatils à partir des sels correspondants. Ainsi, c'est à partir de l'acide sulfurique qu'on prépare les acides nitrique, chlorhydrique, fluorhydrique et phosphorique. Mais le plus gros débouché de l'acide sulfurique (plus de 50 %) est l'industrie des engrais, tels que le sulfate d'ammonium et les superphosphates, que l'on obtient par action directe sur le minerai d'apatite.

Dans l'industrie des métaux, l'acide sulfurique est utilisé pour le décapage (pickling) *de pièces, qui sont ainsi débarrassées de leur couche superficielle de rouille ou d'oxydes, immédiatement avant d'être soumises à des opérations de zingage, d'étamage ou simplement de peinture.*

Plus de 10 % de l'acide fabriqué est employé comme électrolyte dans les batteries d'accumulateurs. L'industrie de la chimie organique s'en sert pour la production de l'alcool éthylique, de l'alcool isopropylique, du phénol et de bien d'autres composés, dont les détergents. On l'utilise en outre comme catalyseur dans l'hydrolyse de l'amidon en glucose ; l'industrie pétrochimique s'en sert dans les réactions de polymérisation et d'alcoylation qui permettent d'augmenter l'indice d'octane des essences.

L'acide sulfurique est un déshydratant très efficace : son affinité pour l'eau est démontrée par le fort dégagement de chaleur qui se produit lors du mélange de ces deux substances. Dans certaines conditions, on assiste même à un début d'ébullition de la solution. En conséquence, il faut procéder avec d'extrêmes précautions, en versant l'acide dans l'eau sous agitation, et jamais l'inverse, afin d'éviter des projections dangereuses.

En tant que déshydratant, l'acide sulfurique est utilisé pour le séchage de n'importe quel type de gaz, à condition que celui-ci ne réagisse pas avec l'acide. Le gaz et l'acide sont mis en contact dans des tours remplies de matériaux réfractaires, afin de rendre l'opération aussi efficace que possible.

L'industrie de la chimie organique l'emploie comme déshydratant pour la préparation de l'éther diéthylique, appelé pour cette raison éther sulfurique, et la production de nombreux esters, dont la nitroglycérine.

L'acide sulfurique se comporte comme un oxydant à l'égard de l'acide fluorhydrique et de l'acide bromhydrique, avec production de brome et de fluor. L'acide sulfurique est également employé pour fixer un groupement sulfoné à de nombreuses molécules organiques. Les produits qui en résultent sont des intermédiaires pour la synthèse d'autres composés, ou bien sont employés à des usages particuliers. Comme exemples de la première utilisation, citons les acides anthraquinone-sulfoniques et alizarine-sulfoniques, utilisés comme intermédiaires par l'industrie des colorants ; dans la deuxième catégorie, on citera les sulfates d'alkyle, issus de la réaction entre l'acide sulfurique et un alcool aliphatique à longue chaîne, et les acides alkylbenzène-sulfoniques. Les substances appartenant à ces deux catégories possèdent des propriétés détersives remarquables et, à ce titre, trouvent un large emploi dans l'industrie des détergents, notamment pour les usages ménagers.

L'acide sulfurique est, en outre, utilisé par l'industrie des matières plastiques, des fibres synthétiques, du papier, et par beaucoup d'autres.

L'acide sulfurique est largement employé par l'industrie des engrais artificiels. Par exemple, avec l'acide phosphorique, il sert à la fabrication des superphosphates. Ci-dessous : une installation de production de superphosphates par voie thermique.

Montecatini-Edison

USAGES DES RADIO-ISOTOPES

En raison de leurs caractéristiques, et notamment de leur durée de vie moyenne, les radio-isotopes artificiels trouvent de nombreuses applications dans l'industrie, dans l'agriculture, dans l'étude des eaux souterraines et l'identification de leur parcours, en botanique et en médecine. En fait, leurs possibilités ne dépendent que de l'imagination et du génie inventif de l'homme.

Le domaine spatial utilise largement les radio-isotopes comme sources d'énergie : des générateurs d'énergie électrique du type SNAP (Systems for Nuclear Auxiliary Power) ont équipé et équipent encore un grand nombre d'engins spatiaux, habités ou non, fournissant l'énergie nécessaire au fonctionnement des nombreux appareils destinés à enregistrer des données scientifiques de manière continue. Le matériau actif de ces générateurs, plutonium 238, curium 244, ou prométhéum 147, fournit, à cause de sa désintégration naturelle, la chaleur dont une partie est transformée en énergie électrique par des séries de couples thermoélectriques. Les puissances électriques développées vont de quelques dizaines à quelques centaines de watts tout au plus, mais, capables de fonctionner sans entretien pendant plus d'un an, ces générateurs peuvent servir à l'alimentation en électricité d'installations qui ne sont pas constamment surveillées : bouées, phares automatiques.

Un emploi particulièrement intéressant du plutonium 238, conçu d'après le même principe, est celui des stimulateurs d'organes et notamment des stimulateurs cardiaques. Des générateurs à base de plutonium remplaceront progressivement les batteries chimiques actuellement utilisées.

APPLICATIONS INDUSTRIELLES

Dans l'industrie, les applications des radio-isotopes sont nombreuses et très diverses. La gammagraphie *est une technique qui consiste à effectuer la radiographie d'une pièce métallique, même de forte épaisseur, en utilisant des rayons gamma, beaucoup plus pénétrants que les rayons X. Lorsqu'il s'agit de pièces massives, on utilise un dispositif semblable à la bombe au cobalt employée en médecine. On dispose la pièce à examiner entre la bombe et une plaque radiographique ordinaire; on réalise ainsi une radiographie aux rayons gamma qui permet de déceler d'éventuels défauts internes de la pièce (cavités, criques, irrégularités dans la cristallisation). Si la pièce est creuse, la méthode à appliquer est plus délicate : on place la source radio-active à l'intérieur de la pièce, et on place autour d'elle trois, quatre plaques et même plus. On obtient ainsi des gammagraphies des différentes portions des parois. Dans de nombreuses installations industrielles, il est souvent indispensable de s'assurer de la parfaite étanchéité de certains compartiments ou tubulures, notamment de déceler immédiatement d'éventuelles fuites de liquide au niveau des assemblages à joints. L'utilisation de très petites doses de* radio-éléments *dans les sections intéressées, jointe à la mise en place d'un certain nombre de compteurs Geiger dans les zones névralgiques, c'est-à-dire là où les fuites risquent de se produire, permet de résoudre parfaitement ce problème. Toute fuite, si minime soit-elle, est immédiatement signalée par le compteur Geiger, alors qu'il serait impossible de la déceler par n'importe quelle autre méthode. Une méthode semblable est employée pour détecter des fuites dans les canalisations d'eau et les oléoducs enterrés.*

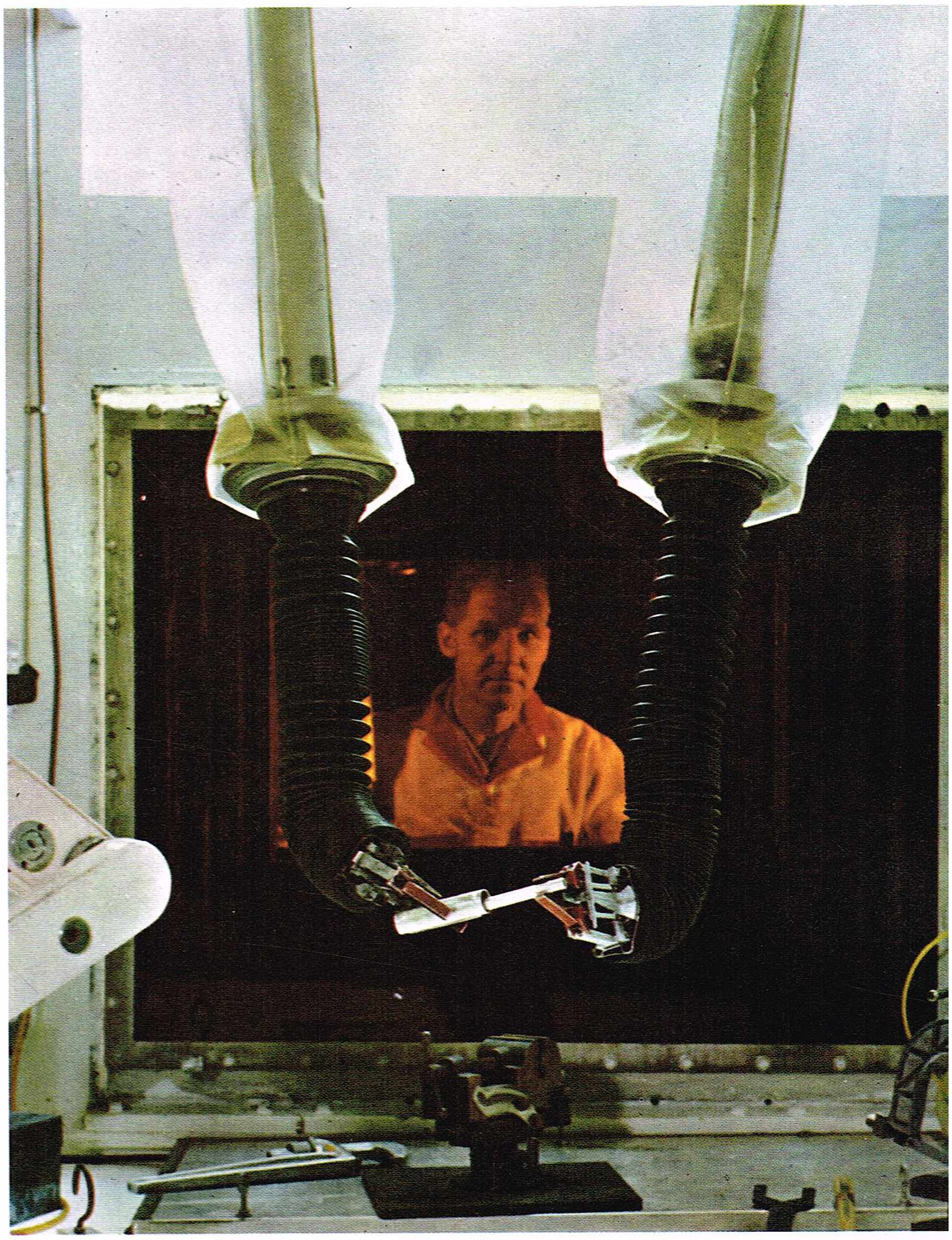

Archives Radaelli

Intérieur d'une « cellule chaude »; l'opérateur peut travailler à l'abri d'un lourd écran de protection en actionnant des manipulateurs mécaniques.

Dans les laboratoires expérimentaux de l'industrie automobile, on effectue couramment des tests d'usure destinés à contrôler le comportement de certains éléments métalliques et l'efficacité des différentes huiles de graissage. Ces tests peuvent faire appel aux radio-éléments; une application typique en est le contrôle des segments élastiques, réalisés avec un alliage contenant de très faibles quantités de fer 59. Précisons que l'isotope radio-actif d'un élément donné se comporte, du point de vue chimique, de manière tout à fait identique à celle des isotopes naturels de ce même élément. Dans le cas

des segments élastiques, on réalise des segments radio-actifs exactement équivalents, à tous points de vue, aux segments normaux. En faisant fonctionner un moteur pendant un certain temps, on constate que les segments, sous l'effet de l'abrasion, perdent de très fines particules, que l'on retrouve dans l'huile de graissage. La mesure de la radio-activité de l'huile permet d'apprécier l'usure plus ou moins rapide des segments. Un système semblable peut être appliqué à la mesure très précise de l'usure d'innombrables organes mécaniques tels que roulements à billes, engrenages, dispositifs d'encliquetage et toutes sortes de pièces en mouvement.

L'industrie utilise les radio-isotopes artificiels pour la réalisation de différents dispositifs de mesure, appelés jauges. Par exemple, si l'on veut mesurer par un système non destructif l'épaisseur d'un matériau mince produit selon un processus continu (papier, feuilles ou ruban de matière plastique, feuilles métalliques), on dispose, à la sortie de la machine, une source radio-active et un compteur Geiger de telle manière que le faisceau de rayonnement émis par la source traverse le matériau débité par la machine et aille frapper le compteur. Étant donné que l'absorption du rayonnement est proportionnelle à l'épaisseur du matériau traversé, le compteur donnera, de manière continue, une indication inversement proportionnelle à l'épaisseur de la feuille ou du ruban. Il sera même possible, au moyen d'un système dit de feed-back, de relier le compteur avec un dispositif de réglage de l'épaisseur du film, de manière à obtenir une correction automatique des défauts d'épaisseur.

Les radio-isotopes ont également pour effet d'ioniser l'air qui les entoure et de le rendre ainsi meilleur conducteur de l'électricité. Cela permet de construire des anémomètres qui rendent des services précieux chaque fois qu'il y a lieu de mesurer des déplacements lents d'air ou de gaz (dans les zones profondes des mines, dans les différentes parties d'un navire, dans de nombreuses installations industrielles). L'anémomètre consiste en une cage métallique formée d'un grillage à larges mailles; cette cage a la grosseur d'une orange et porte en son centre une petite source radio-active. A côté de celle-ci est placée une électrode sphérique de faible diamètre (une tête d'épingle) reliée à une pile, la deuxième électrode de celle-ci étant connectée à la cage. On a ainsi un circuit électrique qui se ferme lorsque l'air contenu dans la cage est rendu conducteur par la source radio-active. Un galvanomètre branché sur le circuit mesure l'intensité du courant qui le parcourt. Si l'air ambiant est immobile, ce courant atteint une intensité maximale; si l'air se déplace, il entraîne depuis l'intérieur de la sphère une quantité plus ou moins importante d'air ionisé, donc conducteur, tandis que la source radio-active met un certain temps pour ioniser l'air qui a remplacé le premier. L'intensité du courant qui parcourt le circuit permet de mesurer des courants gazeux de très faible vitesse (quelques dizaines de centimètres par seconde ou même moins).

RADIO-ISOTOPES TRACEURS

Les radio-isotopes sont utilisés comme « traceurs » pour effectuer toute une série de mesures en botanique et en agronomie. On peut, par exemple, contrôler l'action d'un anticryptogamique ou d'un insecticide préalablement marqué avec des éléments radio-actifs, dont il sera possible de suivre la migration au moyen d'un compteur Geiger ou de radiographies. Cela permet de vérifier, en particulier, si le produit demeure sur les feuilles ou s'il est lessivé ou encore s'il est absorbé par celles-ci. De même, si l'on applique des engrais marqués à différents stades de la croissance d'un plant de riz ou de blé (jeune plant, floraison, etc.), les radiographies peuvent aider à déterminer le moment où il convient d'employer les engrais pour obtenir le rendement maximal.

En médecine, on se sert des traceurs pour l'exploration fonctionnelle et le repérage topographique : ainsi, lorsqu'on administre à un malade de l'iode radio-actif dilué dans de l'eau et que l'on place un « détecteur » contre sa gorge, les électrons émis par l'iode radio-actif sont enregistrés sur le papier photographique du détecteur, ce qui permet de se faire une idée du fonctionnement de la glande thyroïde.

Archives Radaelli

**La variété des chrysanthèmes appelés « Masterpièces », de couleur rose, peut donner naissance, par mutation spontanée, à la variété reproduite ci-dessus et appelée « Bronze Masterpièces ».
Cette dernière peut être obtenue avec une fréquence très nettement supérieure si l'on soumet la variété « Masterpièces » à un traitement radio-actif. Si on irradie aussi la variété « Bronze Masterpièces », il est possible de voir réapparaître la variété rose originelle.**

Une application récente est la radurisation qui consiste à exposer pendant un court laps de temps des matériaux à l'action d'une source radio-active très énergique, en leur faisant ainsi absorber des doses très élevées de rayonnement. Une dose de 10 000 à 500 000 rads permet, par exemple, de conserver la viande destinée à l'alimentation pendant une période très longue, à une température de — 2 ou — 3 °C : les rayons gamma n'altèrent pas la viande, mais inhibent le développement d'insectes, de larves et de différents micro-organismes. Un traitement analogue est utilisé pour les œufs cassés, destinés à la confection de gâteaux ou de pâtes. Les oignons, les pommes de terre, traités avec des doses beaucoup plus faibles de rayonnement gamma, peuvent être conservés longtemps sans qu'ils germent.

Il est également possible, toujours au moyen d'une source radio-active très énergique, d'obtenir certaines modifications dans la structure de différentes matières plastiques, en particulier le polythène : c'est ainsi qu'on provoque le phénomène de la réticulation par rayonnement, qui élève considérablement le point de fusion et renforce les caractéristiques mécaniques de ces matériaux. Dans le domaine de l'industrie chimique, on obtient des résultats tout à fait remarquables en soumettant au rayonnement des associations bois-résines, des fibres textiles artificielles et naturelles et divers autres matériaux en vue de provoquer des réactions de types très divers (synthèse, polymérisation, réticulation, sulfoxydation).

Un des domaines les plus intéressants auxquels s'étend l'utilisation des radio-isotopes est la protection de l'environnement, notamment la lutte contre la pollution. Non seulement on peut utiliser les rayonnements pour l'analyse de l'air et de l'eau afin de découvrir des traces de substances toxiques ou nuisibles difficiles à détecter d'une autre façon; mais les traceurs peuvent aussi donner des indications précises sur l'accumulation ou la concentration de certaines substances telles que les pesticides dans les organismes végétaux et animaux, et éventuellement dans les organes du corps humain.

Il est indéniable que les radio-isotopes sont des éléments dangereux, mais la technologie a mis au point des dispositifs pour la manipulation, le stockage et le transport sans risque de ces substances. Leur utilisation s'est révélée un instrument très important au service de l'humanité. Il ne faut pas perdre de vue ces avantages si l'on veut faire le bilan du bien et du mal dont est responsable l'atome.

LES MATIÈRES PLASTIQUES DANS L'INDUSTRIE ALIMENTAIRE

La découverte des matières plastiques a provoqué sinon une véritable révolution, du moins des changements technologiques très profonds dans de nombreux secteurs de l'industrie alimentaire. Ces changements ont été progressifs et cela a sans doute contribué à les faire accepter par les consommateurs, qui auraient repoussé une modification trop brutale de leurs habitudes.

Voici encore dix ou quinze ans, les produits alimentaires étaient présentés soit en vrac, soit dans des boîtes métalliques ou des récipients en verre. On utilisait aussi des récipients en carton paraffiné, comme les petits pots à miel ou à confiture. Dans les charcuteries, le commerçant enveloppait les achats de la clientèle dans du papier huilé, ayant subi un traitement particulier le rendant partiellement imperméable ; le charcutier lui-même recevait ses produits dans des récipients métalliques, dans des vases en terre cuite ou dans des baquets.

LA RÉVOLUTION DES EMBALLAGES ALIMENTAIRES

Aujourd'hui, l'énorme diffusion des emballages fermés a modifié profondément les habitudes du commerce alimentaire. La plupart des produits autrefois présentés en vrac arrivent chez le revendeur dans des emballages hermétiques, presque tous en matière plastique. Biscottes, pain en tranches, pâtes, etc., sont contenus dans des sachets transparents portant les indications de la marque, la composition du produit, etc. Les matériaux que l'on emploie pour la confection de ces sachets sont constitués le plus souvent par de minces feuilles en résine cellulosique (Cellophane), en polystyrène ou en polypropylène. Le polystyrène se prête à la fabrication d'emballages rigides transparents et de plus doués d'une certaine résistance mécanique. Presque tous les produits alimentaires sont susceptibles d'être présentés sous emballage plastique : salade russe, pâté de foie, gâteaux, produits de confiserie, plats cuisinés à consommer froids ou chauds, etc. ; la plupart des préparations culinaires conservent dans leur emballage la forme qui leur a été donnée au moment de leur élaboration. Les avantages que de tels emballages offrent pour le public sont évidents ; ainsi, dans le cas de poulets crus ou cuits, de tranches de viande ou de poisson présentées sous emballage transparent en papier cellulosique ou en polystyrène, les consommateurs peuvent voir la marchandise qu'ils achètent, la choisir et même, dans une certaine mesure, la manipuler, dans le respect absolu des règles d'hygiène.

Une autre matière plastique qui a pris une grande importance est le polyéthylène, avec lequel on réalise des emballages incomplètement transparents et relativement déformables. Ce matériau se prête à la confection d'emballages destinés à contenir les produits les plus divers : lait, produits surgelés, sardines à l'huile, légumes en vinaigrette, tranches de jambon, de saucisson, saucisses, etc. Pratiquement il n'existe aucune limite à l'utilisation du polyéthylène dans la confection d'emballages alimentaires, emballages dont les mérites sont un prix de revient très bas et une étanchéité parfaite. Certains types de polyéthylène servent à confectionner des feuilles qui, soumises pendant quelques instants à un chauffage modéré, subissent un rétrécissement important, qui leur fait épouser la forme des produits qu'elles enveloppent. Des emballages de ce type sont utilisés,

Les matières plastiques ont résolu le problème du conditionnement des aliments pour les astronautes.

P. R. L.

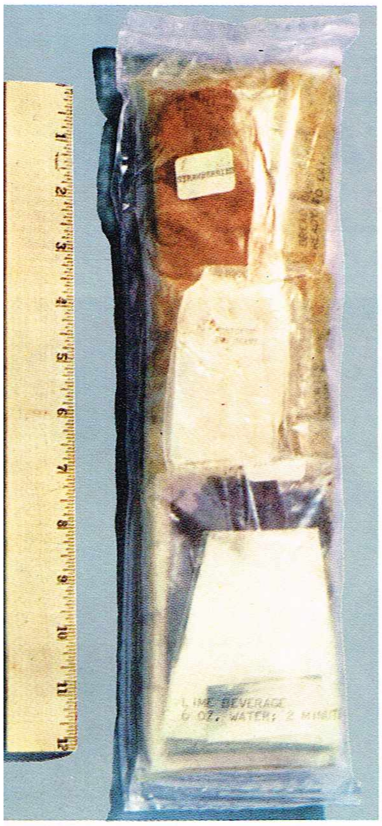

Montecatini-Edison

par exemple, pour la présentation de tranches de viande, de morceaux de fromage, de poissons congelés mis sous enveloppe avant la congélation, d'agrumes en chapelets de quatre ou six pièces, et pour toutes sortes de produits.

A tous ces avantages, il faut ajouter ceux du transport, du stockage, et de toutes les manipulations qu'ont à supporter les produits tout le long de la chaîne de distribution. En outre, l'emballage hermétique permet une conservation plus facile et plus longue dans les réfrigérateurs et même dans les placards à provisions. Cela permet à la ménagère d'augmenter la quantité et la variété de ses achats et de disposer ainsi d'une large gamme de produits pour réaliser un menu familial plus diversifié, sans avoir à consacrer trop de temps à cette tâche. Il s'agit là d'une innovation considérable par ses conséquences, car on assiste à une véritable modification des habitudes de vie tant à l'intérieur qu'à l'extérieur de la maison. Les bouteilles de lait ainsi que les pots de yaourt en verre ont presque complètement disparu, ce qui a supprimé la corvée des retours des emballages vides. Le lait est maintenant livré le plus souvent en bouteilles plastiques ou en berlingots de carton recouverts de polyéthylène et les yaourts en petits pots en polystyrène. La matière plastique utilisée dans l'industrie alimentaire a rendu possible le self-service dans les supermarchés et la distribution d'aliments et de boissons par des appareils automatiques, opérations qu'on aurait difficilement imaginées auparavant, en raison notamment des risques de contamination des denrées. Les machines automatiques qui distribuent des boissons chaudes ou froides fournissent le récipient correspondant, dont le coût ne doit pas dépasser quelques centimes, ce qui est possible grâce aux produits en polystyrène. La même remarque vaut pour les distributeurs de sandwichs, de gâteaux, etc., qui n'ont pu s'implanter que grâce aux emballages automatiques protégeant les aliments des risques de contamination et assurant une plus longue conservation. Des machines de ce type sont devenues un élément familier de l'équipement des bureaux, des usines, des gares et de presque tous les lieux publics.

Cette évolution présente donc des avantages indiscutables pour les consommateurs, mais les modifications qu'elle a entraînées sont encore plus importantes pour les industriels.

Dans un établissement de ramassage et de distribution de lait d'il y a dix ou quinze ans, une place très importante était occupée par les installations de lavage et de stérilisation de bouteilles, par les autoclaves et les appareils annexes, par les bassins de rinçage, par les générateurs de vapeur, les appareils de séchage, etc. Après avoir été soumises à toutes ces opérations préalables, les bouteilles devaient être acheminées, dans une atmosphère stérile, vers les installations de remplissage et de capsulage automatiques, prévues pour des récipients strictement standardisés au point de vue forme, dimensions, poids, et qui, de plus, devaient présenter une certaine résistance mécanique, qui en faisait par conséquent des objets assez fragiles. Aujourd'hui, de telles installations sont remplacées par des machines tout à fait différentes, qui produisent un tube continu en polyéthylène ou en carton recouvert de polyéthylène; des dispositifs spéciaux coupent le tube en éléments à la dimension voulue; ceux-ci sont remplis puis scellés à chaud et enfin acheminés vers les locaux de stockage, pour passer ensuite dans le cycle de distribution. Au niveau de la distribution, les transformations sont également très importantes, en raison de la relative déformabilité des emballages, de leur plus faible résistance mécanique, donc de leur moindre fragilité.

Les emballages en matière plastique protègent très efficacement les aliments contre l'humidité. Sachets contenant des aliments pour astronautes, conservés sous vide.

P.R.I.

LE TUBE CONTINU

L'élément le plus important de cette installation est la machine qui produit le tube continu : le matériau plastique sort d'une bouche circulaire d'un diamètre approprié, à l'intérieur de laquelle est entretenu un courant d'air qui permet de maintenir « gonflé » jusqu'à refroidissement le tube, qui pourra alors être enroulé sur une bobine par longueurs de plusieurs centaines de mètres. Ces bobines passent ensuite dans des rotatives spéciales qui impriment, régulièrement espacées, les diverses inscriptions destinées à désigner la marchandise. Après quoi, les bobines sont placées sur une machine qui assure de manière entièrement automatique les opérations suivantes : remplissage, séparation des éléments remplis, scellage à chaud, acheminement vers les ateliers d'emballage et d'expédition. Ainsi, les usines équipées pour le conditionnement des aliments dans des bouteilles ou des pots de verre à fermeture hermétique ont été obligées de renouveler entièrement leurs équipements. Avant l'arrivée des matières plastiques dans le domaine alimentaire, il n'était pas pensable de pouvoir commercialiser des conditionnements ne contenant que très peu de marchandises, par exemple quelques tranches de charcuterie pour un poids total d'une centaine de grammes. Pour réaliser cela à un coût acceptable, il faut disposer d'une installation entièrement automatique, où la charcuterie est coupée en tranches et mise sous emballage pratiquement sans utilisation de main-d'œuvre; en outre, le remplissage des emballages (obtenu à partir du tube continu) doit se faire sous vide, pour que le conditionnement occupe le plus faible volume possible, et que le produit ait la plus longue durée de conservation. Ainsi, la technique du vide est largement utilisée par la nouvelle industrie alimentaire.

Le processus de fabrication d'emballages en polystyrène, minces mais suffisamment rigides pour conserver leur forme, se déroule ainsi : une feuille de matériau, chauffée, est engagée entre les rouleaux d'une machine spéciale, portant l'un en relief et l'autre en creux l'empreinte que l'on désire donner à la feuille; celle-ci, à la sortie des rouleaux, est découpée automatiquement en éléments possédant la forme voulue; après remplissage, ces éléments sont dotés d'un fond et d'un couvercle et scellés à chaud. L'ensemble des opérations se déroule de manière continue.

Cette transformation profonde des anciennes méthodes ménagères ou artisanales permet de réaliser un abaissement considérable des coûts de production et assure une conservation parfaite des aliments, surtout à l'intérieur de bacs réfrigérants, dans lesquels ils peuvent séjourner pendant plusieurs semaines sans subir la moindre altération.

Les aliments surgelés sont contenus dans des enveloppes totalement ou partiellement en plastique; par exemple, les légumes et les mollusques sont enfermés dans des sachets en polyéthylène à fermeture hermétique; les poissons et les poulets également dans des sachets en polyéthylène mais que l'on fait adhérer aux produits par rétrécissement à chaud; les produits présentés en boîtes de carton sont enfermés dans un sachet de polyéthylène, ou bien la boîte elle-même est entièrement recouverte de ce matériau.

Pour les boîtes à fermeture plus où moins hermétique, couramment employées pour conserver les aliments au réfrigérateur, on utilise surtout le polyéthylène, le polystyrène et le polypropylène. En ce qui concerne le conditionnement des boissons, vin, eau minérale, les bouteilles en verre ont dû céder une partie de leur marché aux bouteilles en matière plastique — essentiellement en polychlorure de vinyle — dont la consommation en France dépasse 100 000 tonnes par an pour les bouteilles d'eau minérale. Cependant, il ne semble pas que dans ce domaine la matière plastique soit destinée à se substituer totalement au verre, c'est ainsi que le conditionnement du vin en bouteilles de P.V.C. ne constitue qu'une faible partie, le reste étant encore réservé au verre.

FIBRES TEXTILES ARTIFICIELLES ET SYNTHÉTIQUES

Les expressions « fibres textiles artificielles » et « fibres synthétiques » sont aujourd'hui aussi répandues que l'est l'usage de ces nouveaux matériaux qui permettent de fabriquer les tissus les plus divers : velours, tissus d'ameublement, étoffes pour l'habillement, fils textiles pour bonneterie, etc. Souvent, on obtient d'excellents résultats en utilisant des tissus mixtes, dans la composition desquels entrent des fibres naturelles (coton, lin, laine) et des fibres artificielles de nature diverse. Ces dernières sont désignées essentiellement par leur nom commercial, aussi, l'utilisateur qui entend parler de Nylon, de Tergal, de Rilsan, de Crylor, etc., ne peut pas toujours reconnaître la « famille » chimique à laquelle appartiennent les différentes fibres.

Une première classification permet de distinguer les fibres artificielles des fibres synthétiques proprement dites. Les fibres artificielles sont obtenues à partir des molécules complexes de certains polymères naturels : en revanche, on considère comme fibres synthétiques celles qui sont véritablement des produits de synthèse, issues de la polymérisation d'un monomère. Un monomère est une molécule relativement simple, qui, dans des conditions données, se « polymérise », les monomères se soudant bout à bout de manière à constituer une longue chaîne de molécules identiques, appelée « polymère ». Un exemple typique de ce processus est fourni par les fibres de polypropylène, que l'on obtient par polymérisation du propylène, dont la formule est assez simple (formule brute C_3H_6 et formule développée $CH_2 = CH—CH_3$). Les fibres de polypropylène sont commercialisées en Angleterre sous les noms d'Ulstron et Propylex et en Italie sous le nom de Meraklon.

Du point de vue chimique, les fibres synthétiques peuvent être classées en fibres de polymérisation et fibres de polycondensation. La polymérisation conduit à la réalisation d'un polymère, par la soudure bout à bout de plusieurs monomères ; dans la polycondensation, les molécules de monomères se soudent également entre elles, mais le processus se caractérise par la libération de molécules simples de différente nature (le plus souvent, l'eau).

LES FIBRES ARTIFICIELLES

Les fibres artificielles ont fait leur apparition presque un demi-siècle avant les fibres synthétiques. En 1891, en France, après une longue période de recherches scientifiques et technologiques, on entreprit la fabrication de la « soie artificielle », obtenue à partir d'une solution de nitrocellulose extrudée à travers une filière de verre comportant des orifices extrêmement fins. Quelques années plus tard, ce procédé fut amélioré par Bemberg, qui réalisa la rayonne cupro-ammoniacale ou rayonne Bemberg, que l'on continue encore de produire, surtout en Italie et en Allemagne. Vers 1900, on mit au point, en Angleterre, un procédé assez complexe, mais très économique, qui, partant de la cellulose de la pâte de bois, permet d'obtenir ce qu'on appelle des fils de viscose, avec lesquels on réalise des tissus de faible coût mais dotés néanmoins de bonnes caractéristiques. Vers 1920, on mit au point un autre procédé, dit à l'acétate de cellulose, qui permet d'obtenir, toujours à partir de la pâte de bois, des filés et des tissus peu onéreux se prêtant à toute une série d'utilisations.

La fibre de verre, appartenant aux fibres artificielles, connaît de nombreux emplois industriels, mais elle ne se prête pas à la fabrication d'étoffes pour l'habillement. Un certain nombre d'autres fils, obtenus à partir de protéines animales (caséine) ou végétales (globulines extraites des arachides), présentent un intérêt industriel,

Rhodiacetate

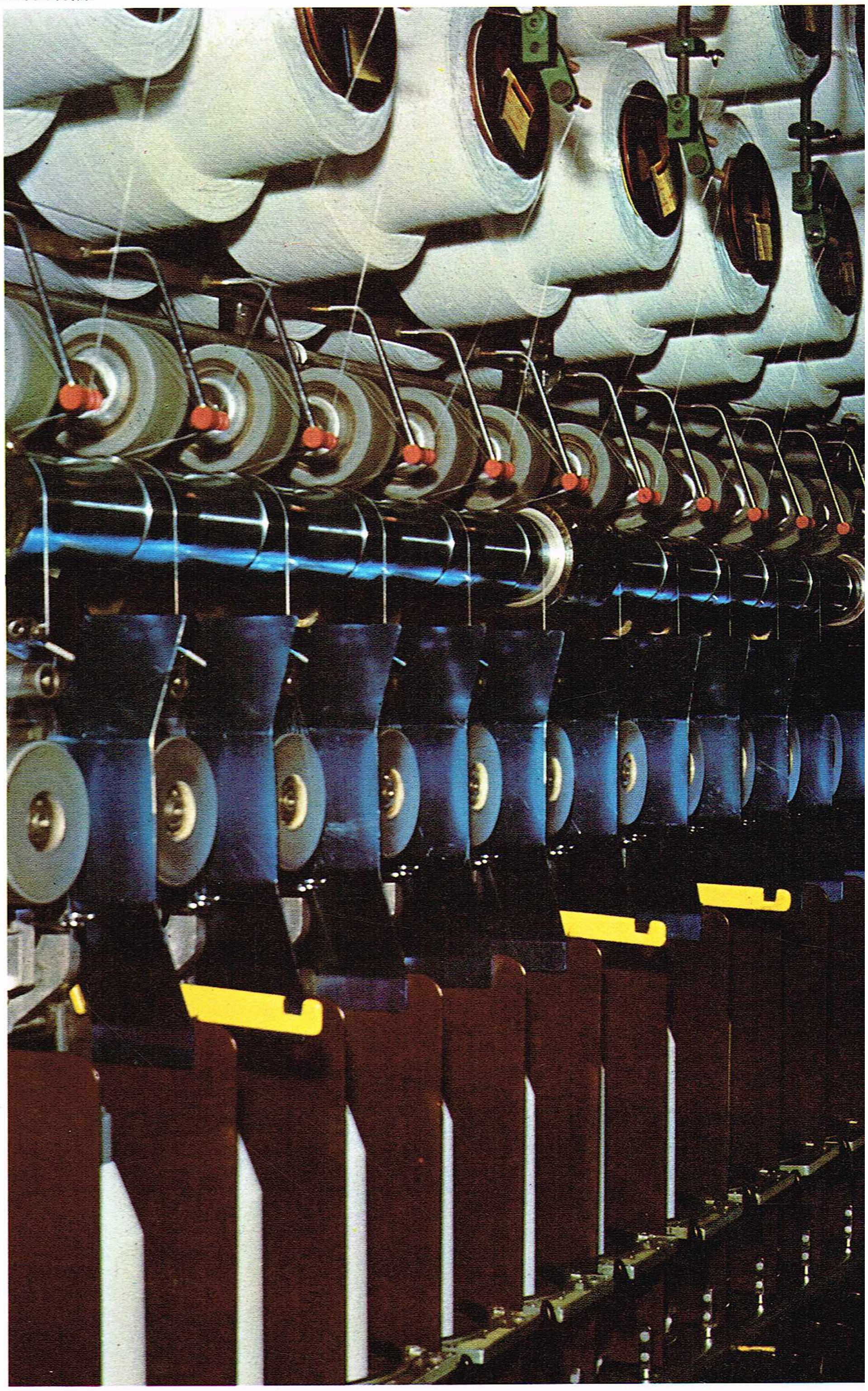

Étirage de fils de polyamide.

mais d'importance secondaire. La fibre obtenue à partir de la caséine connut son moment de célébrité vers 1940, tandis que certaines fibres provenant des globulines des arachides sont toujours commercialisées dans certains pays.

PRINCIPALES FIBRES SYNTHÉTIQUES

La première fibre synthétique est, dans l'ordre chronologique, le Nylon 6-6 qui appartient aux fibres polyamides, et entre dans la catégorie des fibres de polycondensation. Comme dans presque tous les processus de fabrication, on obtient d'abord le polymère à l'état solide ; celui-ci, porté à la température convenable, peut être extrudé à travers les orifices d'une filière, fournissant ainsi directement des fils que l'on soumet à différents traitements jusqu'à l'obtention du produit apte au tissage.

D'autres fibres polyamides sont obtenues par des processus plus ou moins semblables à celui du Nylon 6-6 ; elles sont commercialisées sous des noms divers (à titre d'exemple, le Perlon, de production allemande, le Delfion et le Lilion, de production italienne). Comme matières premières, on peut utiliser des substances telles que l'huile de ricin, à partir desquelles, au moyen de traitements appropriés, on obtient le monomère se prêtant à la polycondensation qui fournira la fibre.

Autre famille de fibres de polycondensation : les fibres polyesters. Le Terylene, anglais, le Tergal, français, et le Terital, italien, sont parmi les plus connus. Un troisième groupe de fibres de polycondensation est constitué par les fibres de polyuréthannes.

Les fibres de polymérisation sont encore plus nombreuses. Les fibres polyvinyliques (résultant de la polymérisation du chlorure de vinyle, lui-même obtenu par l'action du chlore et de l'oxygène sur l'éthylène) occupent une place très importante, sous des noms commerciaux divers (Rhovyl, Clevyl, Movil, etc.). Le Vinyon est obtenu par polymérisation d'un mélange de chlorure de vinyle et d'acétate de vinyle ; dans ce cas, on parle de copolymère, mais une telle substance peut résulter aussi de différentes associations de monomères.

Il existe aussi une nombreuse famille de fibres polyacryliques, issues de la polymérisation de l'acrylonitrile et que l'on appelle habituellement fibres acryliques. Appartiennent à ce groupe l'Orlon, de fabrication américaine, le Crylor, de fabrication française, le Dralon en Allemagne, etc. Chimiquement proches des fibres polyvinyliques, le Velon et le Saran sont obtenus par polymérisation du chlorure de vinylidène. On assiste également à l'essor d'autres fibres synthétiques de polymérisation obtenues à partir de l'éthylène (fibres polyéthyléniques) et du propylène (fibres polypropyléniques).

Du point de vue quantitatif, les fibres synthétiques occupent la deuxième place de la production mondiale de textiles, immédiatement après le coton. Mais, alors qu'on ne peut prévoir une augmentation sensible de la production de coton, l'accroissement de la production des fibres artificielles est très rapide, et, dans quelques années, elles occuperont la première place. Du point de vue économique, les progrès en cours dans le domaine de la production des fibres textiles artificielles promettent une réduction sensible et progressive des coûts, en même temps que les matières utilisables deviennent de plus en plus nombreuses. L'industrie des fibres textiles artificielles, qui se développe parallèlement à celle des matières plastiques, est étroitement liée à la pétrochimie, dont elle utilise largement les produits.

Installation pour la production de fibres polyesters. Ces fibres sont particulièrement aptes à fournir, par mélange avec des fibres naturelles telles que le coton et la laine, des fils mixtes remarquablement résistants et infroissables.

Rhodiacetate

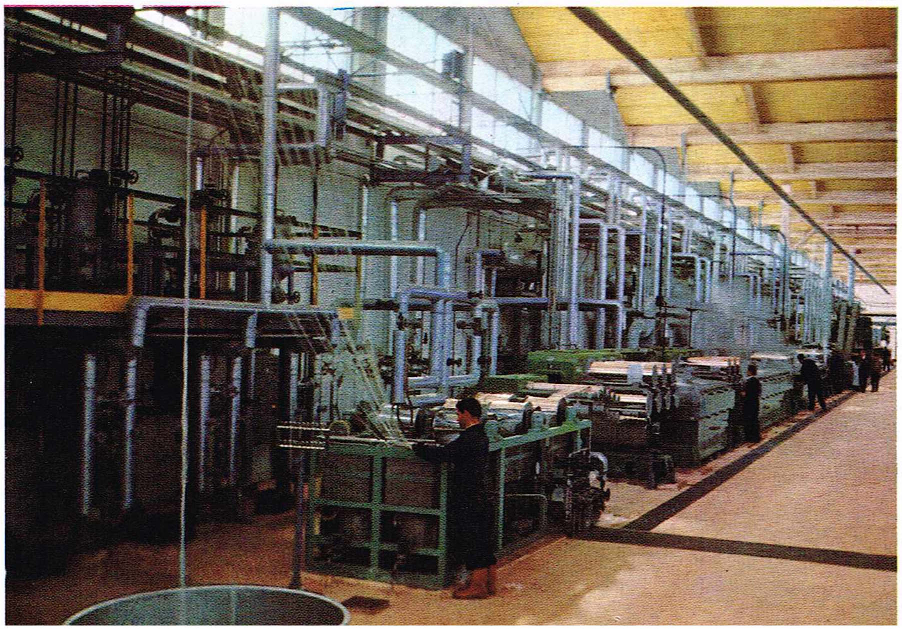

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

Les fibres textiles artificielles présentent des propriétés très intéressantes par rapport aux fibres naturelles. Deux caractéristiques sont à prendre en considération lorsqu'on les étudie : la ténacité et l'allongement. La ténacité est la charge (en grammes) qui provoque la rupture à la traction d'un fil de un denier. Le denier, vieille unité de mesure encore en usage dans l'industrie textile, représente le poids (en décigramme) de 900 mètres de fil. De ce point de vue, les fibres synthétiques se montrent égales, et souvent même supérieures, aux fibres naturelles. La plus tenace des fibres naturelles, le chanvre, présente des valeurs de 6-8, tandis que le meilleur coton et le meilleur lin ont une valeur toujours inférieure à 6. Le Nylon dépasse nettement 8, les fibres polyesters ont des valeurs voisines de 4, les fibres propyléniques des valeurs voisines de 5. En revanche, les valeurs de la soie se situent entre 3 et 5 et celles de la laine entre 1 et 1,7. L'allongement donne la mesure de l'élasticité ; il exprime, en pourcentage, l'augmentation de longueur que peut subir un échantillon de fil à l'intérieur de ses limites d'élasticité. De ce point de vue, la laine et la soie présentent des valeurs élevées : 28-50 % pour la laine, 13-20 % pour la soie. Les fibres végétales naturelles ont, par contre, des valeurs très faibles : 5-7 pour le coton, 2-3 pour le lin et le chanvre. Les fibres acryliques, avec des valeurs de 20-30, se situent à mi-chemin entre la soie et la laine, les fibres polyamides (30-40) et les fibres polyesters (35-42) sont très proches de la laine, tandis que les fibres de polypropylène, avec des valeurs de 70-90, sont nettement supérieures à toutes les autres fibres.

Autre propriété très importante des fibres synthétiques : leur très faible aptitude à absorber et à retenir l'eau ou d'autres liquides. Ainsi, il est beaucoup plus facile de détacher et de laver les tissus en fibres synthétiques. Quant aux fibres polyesters, elles se prêtent parfaitement à une utilisation en mélange avec des fibres naturelles (laine et coton). Dans ces types de tissus, la fibre naturelle pallie en partie les inconvénients résultant de la faible affinité de la fibre synthétique pour l'humidité (le fait, en particulier, que, absorbant peu la transpiration, la fibre synthétique peut se révéler peu hygiénique) ; de son côté, la fibre synthétique diminue le temps de séchage, rend les tissus pratiquement infroissables et supprime totalement ou partiellement le repassage.

Les fibres synthétiques sont cependant moins résistantes à la chaleur que les fibres naturelles, végétales ou animales. D'une manière générale, la plupart se plastifient vers 120 °C, ce qui impose des précautions particulières lors du repassage. Par ailleurs, toujours dans le domaine de l'habillement, notamment en bonneterie, les fibres synthétiques ne feutrent pas sous l'effet de la transpiration ou des lavages répétés, inconvénient typique de la laine. En raison de leur grande stabilité chimique, elles peuvent même être lavées avec des produits très actifs sans subir de dommages. En ce qui concerne les propriétés tinctoriales des fibres synthétiques, les problèmes ont finalement été résolus en mélangeant des pigments colorés dans la masse plastique avant l'extrusion. Aujourd'hui ces difficultés sont entièrement surmontées, et certains tissus en fibres synthétiques peuvent même être colorés par impression.

La capacité de production des fibres chimiques a été pour l'ensemble du monde de 11,5 millions de tonnes en 1973 (7,7 millions de tonnes pour les fibres synthétiques et 3,8 millions de tonnes pour les fibres artificielles). Cette même année, la production de fibres naturelles était de 14,4 millions de tonnes (coton + laine).

GAZ DE PÉTROLE LIQUÉFIÉS

Les gaz de pétrole liquéfiés, désignés commercialement par le sigle G.P.L., ont acquis au cours des trente dernières années une importance considérable. Il s'agit du propane, du butane, de leur mélange et des gaz oléfiniques (propène et butène) qui les accompagnent.

Ces gaz (propane et butane) accompagnent le pétrole brut extrait du sol; autrefois, on les brûlait à la tête de puits afin d'éviter les dangers d'incendie qu'ils auraient constitués si on les avait laissés « libres ». Ces gaz « associés » au brut n'avaient aucune valeur commerciale. Depuis un demi-siècle, cette pratique n'a plus cours et tous les champs pétrolifères sont dotés d'installations de captage des gaz associés qui sont transportés, par gazoducs, vers les sites industriels utilisateurs.

Les U.S.A. ont mis en service depuis plus de trente ans un réseau très dense de distribution, qui transporte les gaz des champs pétrolifères du sud vers les centres industriels du nord. La quantité la plus importante de gaz de pétrole liquéfiables ne provient pas des champs pétrolifères mais des raffineries. On sait que les essences utilisées par les moteurs automobiles doivent posséder certaines qualités antidétonantes, exprimées par l'indice d'octane; les moteurs modernes exigent des essences à indice d'octane élevé. Aussi est-il nécessaire de soumettre l'essence obtenue par distillation du brut au processus dit de reforming, au cours duquel se forment d'importantes quantités d'hydrocarbures en C_3 et C_4. Au total, la quantité de gaz de pétrole liquéfiables obtenue aujourd'hui au cours du reforming de l'essence varie de 12 à 15 % en poids de la charge traitée. Cette même quantité est d'environ 2,3-2,4 % (toujours en poids) du total du pétrole brut soumis au raffinage. On a donc été amené à étendre considérablement les emplois de ces combustibles et à perfectionner les systèmes d'approvisionnement et de distribution.

E.P.S.

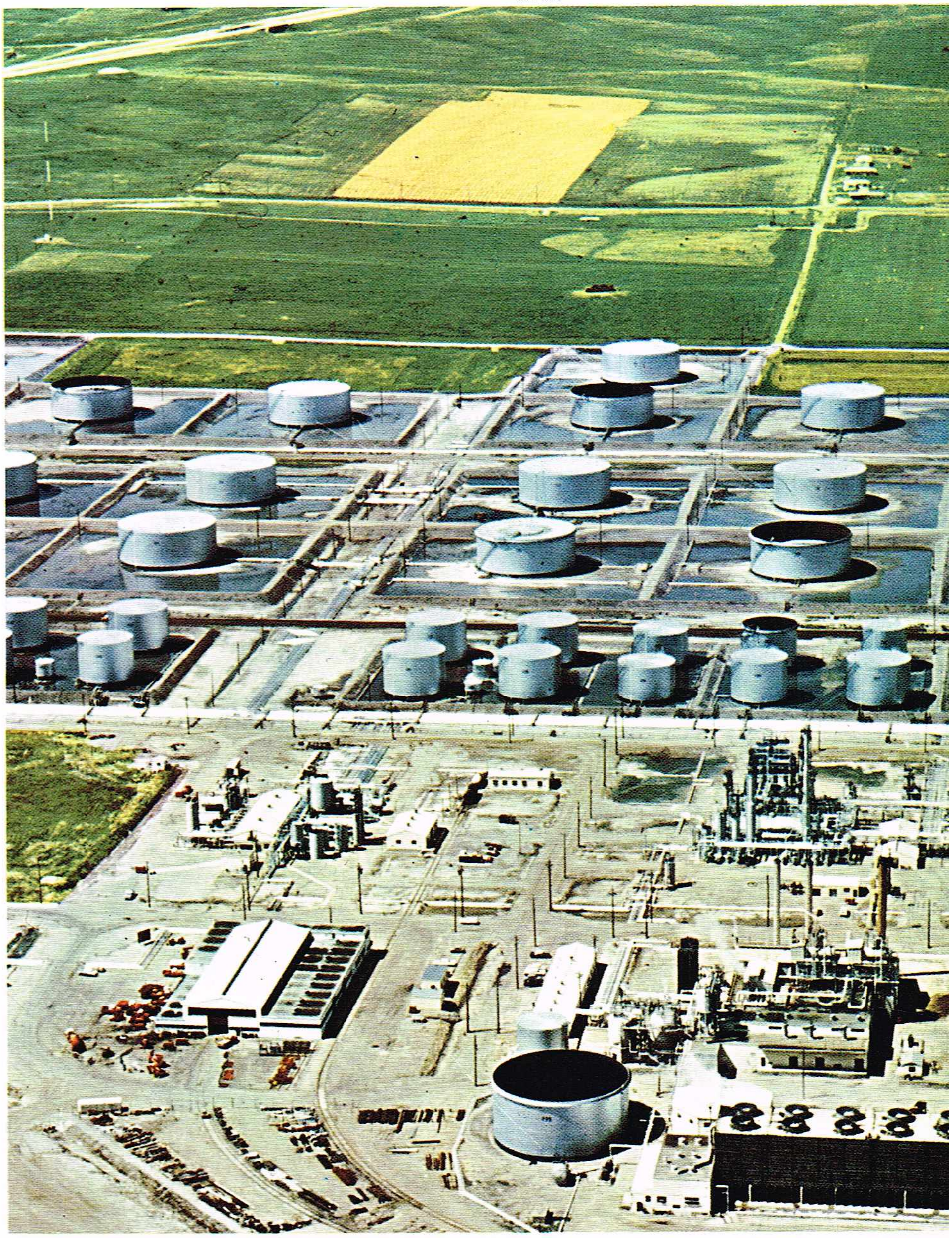

La raffinerie de Mandan (Dakota du Nord, U.S.A.). Les gaz de pétrole liquéfiés (G.P.L.) proviennent pour l'essentiel du processus de reforming des essences.

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

Les G.P.L. présentent des caractéristiques techniques très intéressantes : en premier lieu, ils ont un pouvoir calorifique inférieur de l'ordre de 10 000 kcal/kg. En second lieu, il est possible de les maintenir à l'état liquide à la température ambiante, en les soumettant à des pressions relativement faibles (environ 3,5 atmosphères pour le butane, environ 10,5 pour le propane), ce qui n'exige pas l'emploi de récipients particulièrement robustes et lourds pour leur transport et leur stockage.

La consommation de G.P.L., en France, qui était très réduite en 1950 (116 000 tonnes), est montée, en 1960, à 893 000 tonnes et n'a cessé d'augmenter, doublant presque tous les cinq ans, pour atteindre 2 600 000 tonnes en 1975.

Cette évolution se poursuivra encore pendant plusieurs années à la faveur des nouvelles utilisations dans le domaine industriel et de l'augmentation des capacités de production des raffineries.

La difficulté de séparer les hydrocarbures légers ayant 2 à 4 atomes de carbone conduit à admettre la commercialisation de gaz qui ne sont pas parfaitement purs au sens chimique du terme. Ainsi le butane commercial est défini comme un mélange d'hydrocarbures constitué principalement de butanes et de butènes et pouvant renfermer du propane en faibles proportions. Le propane commercial est composé dans la proportion de 90 % environ de propane et de propène et, pour le surplus, d'éthane, d'éthylène, de butanes et de butènes.

On conçoit que pour des raisons de sécurité et pour assurer le bon fonctionnement des installations domestiques ou industrielles utilisant ces gaz, on soit amené à fixer des spécifications limitant en fait la teneur dans le gaz des produits trop légers ou trop lourds.

Ainsi la tension de vapeur à 50 °C est limitée à 7,5 bars pour le butane et à 19,3 bars pour le propane. La température de 50 °C a été choisie comme correspondant à la température maximale que peut atteindre une bouteille exposée au soleil. Cette limitation correspond pour le propane à 7 molécules pour 100 d'éthane et pour le butane à 30 molécules pour 100 de propane. En ce qui

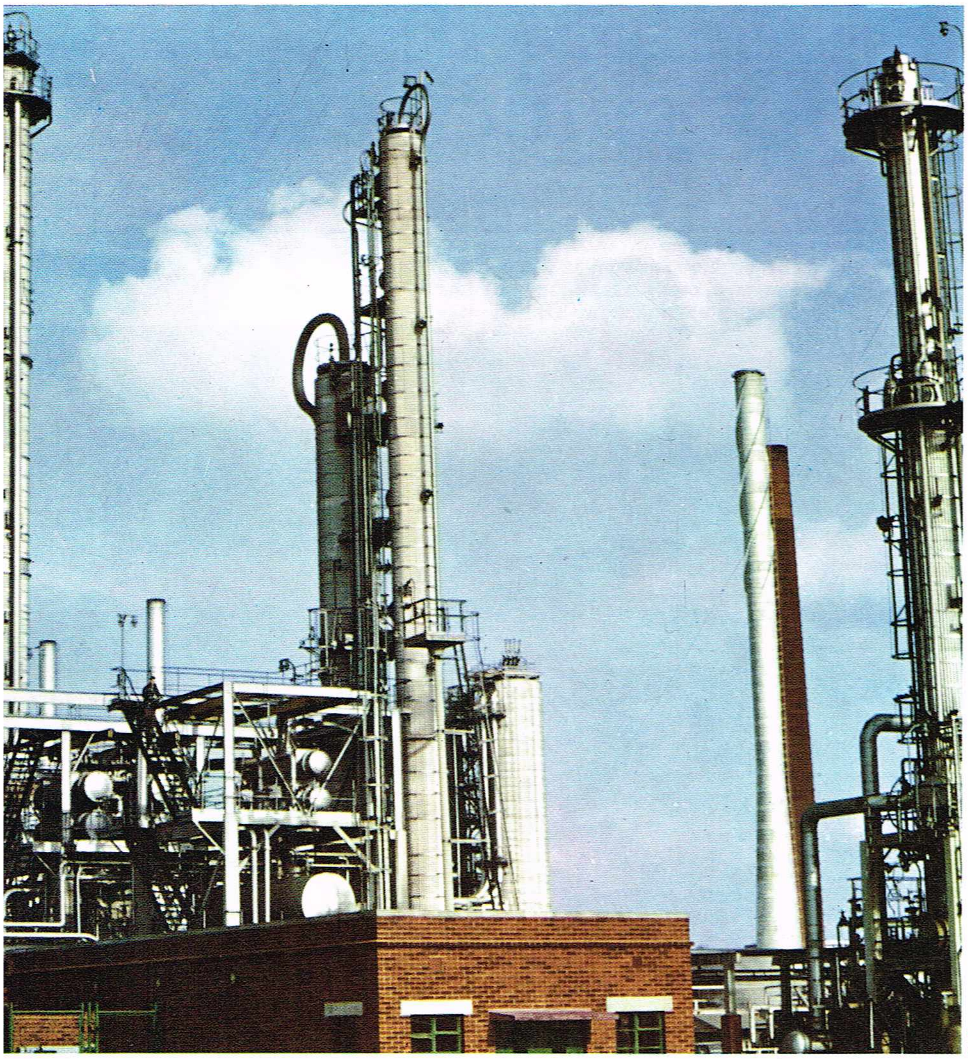

Usine de production des hydrocarbures en C_3 et C_4, qui entrent dans la composition des G.P.L.

concerne la teneur en composés lourds, le butane commercial ne doit pas laisser de résidu liquide supérieur à 5 % lorsqu'on l'évapore à + 1 °C alors que pour le propane, ce résidu doit être inférieur à 2 % à — 38 °C. Cette spécification limitant la teneur en composés liquides lourds assure à l'usager la possibilité d'utiliser intégralement le gaz liquéfié de la bouteille sans craindre la présence en fin d'utilisation d'un résidu invaporisable qui, s'accumulant après chaque recharge, causerait des difficultés multiples à l'utilisation.

De même les G.P.L. ne doivent pas contenir d'eau qui constitue un liquide non vaporisable à la température d'emploi et qui, par ailleurs, risque de former des cristaux de glace à basse température. En ce qui concerne les mercaptans malodorants, aucune spécification ne prévoit leur élimination puisqu'ils permettent de déceler la fuite éventuelle de ces gaz. On limite simplement à un très bas niveau (0,005 % en masse pour le propane) la teneur en soufre pour des raisons de pollution.

PRINCIPALES RÈGLES DE SÉCURITÉ

Le respect de quelques règles très simples permet une utilisation domestique sans risques des G.P.L. Lorsque les circonstances le permettent, il est préférable de placer la bouteille à l'extérieur, ce qui, en cas de fuites dues à l'usure ou aux mauvaises connexions du raccord, empêche le gaz de se répandre à l'intérieur de l'habitation. La quasi-totalité des accidents enregistrés dans l'utilisation des bouteilles de G.P.L. est imputable à des fuites à l'extérieur de la bouteille (raccord, brûleur, etc.) ou à des fausses manœuvres au moment du remplacement d'une bouteille vide. Les explosions de bouteilles sont des accidents inexistants dans les conditions normales d'utilisation.

Le transport des G.P.L. par camions-citernes pourrait également être une source importante de danger en cas d'accident de la circulation. En fait ces accidents sont extrêmement rares, cependant l'augmentation constante de la consommation de G.P.L. a conduit, pour des raisons de sécurité et d'économie, à l'abandon progressif de ce type de transport et à son remplacement par un système de transport par gazoducs. Les établissements industriels, grands et petits, constituent, sur le plan quantitatif, la clientèle la plus importante : une usine de moyenne dimension équipée pour utiliser les G.P.L. comme source de chaleur consomme à elle seule autant que la population d'une région assez étendue.

UTILISATION INDUSTRIELLE DES G.P.L.

Il n'y a pratiquement pas de limites, sinon économiques, à l'emploi industriel des G.P.L., et cela en raison des avantages importants qu'ils offrent : ils possèdent un pouvoir calorifique élevé, une composition constante et facilement contrôlable ; ils ne contiennent que des quantités négligeables de composés soufrés ; ils permettent un contrôle facile de la combustion et ne laissent de dépôt goudronneux ou résineux ni dans les canalisations, ni dans les brûleurs.

Pour une installation industrielle consommant une certaine quantité de G.P.L., on ne saurait se contenter des simples bouteilles de 5 ou 10 kilos, suffisantes pour les emplois domestiques : des récipients beaucoup plus importants sont nécessaires, soit isolés, soit reliés en batterie. Pour une consommation dépassant deux kilogrammes par heure environ, il faut réchauffer le gaz liquéfié afin de compenser la chaleur que celui-ci absorbe en s'évaporant. Ce phénomène se produit aussi en utilisation domestique, mais à une échelle beaucoup plus réduite, et l'air ambiant suffit à apporter la chaleur nécessaire. Les installations de type industriel comportent souvent des dépôts de gaz d'une capacité allant de quelques dizaines à plusieurs centaines de m³ ; les récipients sont alors toujours munis de dispositifs de pompage, de soupapes de sécurité, de systèmes de circulation, de compteurs ; ils sont reliés, le plus souvent, à un réseau de distribution.

Un emploi intéressant des G.P.L. concerne la traction automobile, pour les véhicules utilisés en ville. Ce type d'utilisation comporte un certain nombre d'inconvénients : nécessité d'installer une bouteille à bord et d'en assurer le réapprovisionnement selon des modalités particulières ; diminution de la puissance développée par le moteur, conçu pour fonctionner à l'essence ; reprises beaucoup moins énergiques. En revanche, le moteur connaîtra une longévité nettement supérieure et exigera un entretien fort réduit ; en outre, les moteurs équipés en G.P.L. émettent des gaz d'échappement « propres », c'est-à-dire ne contenant que de très faibles quantités de CO et des traces minimes de tous ces composants chimiques polluants qui sortent des tuyaux d'échappement des véhicules à essence et à gas-oil.

Les G.P.L. connaîtront également de plus larges emplois en agriculture, notamment pour le chauffage des serres. Pour les mêmes motifs d'économie et de commodités d'emploi, leur usage ira en augmentant pour le chauffage de grands ensembles industriels et urbains.

Dans le domaine industriel, les G.P.L. trouvent d'excellents débouchés dans les papeteries, les fabriques de céramique et de verre, les fonderies, les usines affectées aux très nombreux traitements thermiques des métaux, etc. Dans ce domaine, la diffusion des G.P.L. s'étendra parallèlement à l'amélioration des conditions d'approvisionnement et à la transformation progressive des installations conçues pour fonctionner avec un combustible d'un autre type.

Enfin, le propane s'implante dans un emploi particulier, celui de la coupe à la flamme de barres métalliques, plaques de tôle, etc., emploi pratiquement réservé jusque-là au chalumeau oxyacétylénique. De nombreux spécialistes n'hésitent pas à affirmer, chiffres à l'appui, que la coupe au chalumeau oxypropanique est nettement plus économique, et ce dans 90 % des cas.

LE LABORATOIRE DE CHIMIE

Voici encore quelques années, l'occupation essentielle du chimiste consistait à synthétiser de nouveaux composés à partir de composés connus, et le laboratoire de chimie avait un équipement très simple, qui se réduisait essentiellement aux appareils en verre, tels ballons, burettes, éprouvettes, verres à pied, béchers, colonnes, etc.

Au fur et à mesure que les connaissances techniques et scientifiques (surtout dans le domaine de la physique et de l'électronique) progressaient et que l'intérêt du chimiste s'étendait à d'autres domaines, comme celui de la structure des molécules, de la cinétique des réactions, de l'emploi des isotopes radioactifs, des appareils nouveaux sont apparus, afin de rendre la recherche plus rapide et plus aisée : ce sont les chromatographes pour la séparation des mélanges de substances, les spectrophotomètres dans le visible et dans l'infrarouge, les spectromètres de résonance magnétique nucléaire, les spectrographes de masse et d'absorption atomique.

Le chimiste est appelé presque quotidiennement à réaliser des séparations et des identifications de substances tant liquides que solides en mélanges. Pour la séparation des liquides, la distillation fractionnée est toujours très employée, surtout si on travaille sur des quantités relativement importantes de substances. La séparation se fonde sur le fait que chaque composé possède son propre point d'ébullition, mesuré au moyen d'un thermomètre, plongé dans les vapeurs en équilibre avec le liquide. Une fois séparés, les différents composés sont identifiés grâce à leurs propriétés physiques, chimiques et spectroscopiques.

Cette méthode était difficilement applicable à la séparation de très petites quantités de mélanges liquides. Aujourd'hui, le problème a été résolu grâce à la séparation par chromatographie en phase gazeuse.

Ce principe est aisé à comprendre en observant ce qui se passe lorsqu'un mélange de substances, dispersé dans un courant de gaz inerte (habituellement l'azote, l'hydrogène ou l'hélium) appelé « gaz porteur », est introduit au sommet d'une colonne de métal ou de verre contenant une substance appropriée (en général un liquide à point d'ébullition très élevé, appelé « phase stationnaire ») absorbée sur un solide inerte qui lui sert de support. Les substances en mélange se partagent de manière inégale entre le courant de gaz inerte et la phase stationnaire et sortent séparément de la colonne. Les fractions faiblement retenues par la phase stationnaire sortent en tête, suivies de celles qui le sont davantage.

CHROMATOGRAPHIE EN PHASE GAZEUSE

L'appareil est constitué par une colonne comportant au sommet une zone d'injection, par laquelle on introduit le mélange dans la chambre de vaporisation à travers une membrane en caoutchouc. Le gaz porteur véhicule le mélange vaporisé dans la colonne, placée dans une enceinte thermostatisée (four) qui peut être chauffée jusqu'à 300-350 °C et même davantage. Un détecteur est placé à la sortie de la colonne ; selon le type d'appareil, ce détecteur sera un thermistor, un catharomètre ou un détecteur à ionisation de flamme ou à capture d'électrons. Le signal électrique provenant du détecteur est transmis à un enregistreur. En l'absence de signaux émanant du détecteur, c'est-à-dire lorsque aucune substance ne sort de la colonne, la plume trace une ligne horizontale (ligne de zéro ou ligne de base) ; *lorsqu'une substance sort, la plume trace un pic, dont l'aire est généralement proportionnelle à la quantité de substance.*

Le temps qui s'est écoulé entre l'introduction de l'échantillon et l'apparition du sommet du pic est appelé temps de rétention *et indiqué par Rf. Chaque substance possède un temps de rétention caractéristique, reproductible dans les mêmes conditions d'utilisation de l'appareil, et cela permet d'identifier une substance en mélange avec d'autres en connaissant le Rf d'un échantillon pur de cette substance. Cet appareil est très utile dans l'analyse des essences et des mélanges d'hydrocarbures en général, des essences parfumées et des arômes naturels, des huiles comestibles, etc.*

Quelques appareils dans un laboratoire de chimie.

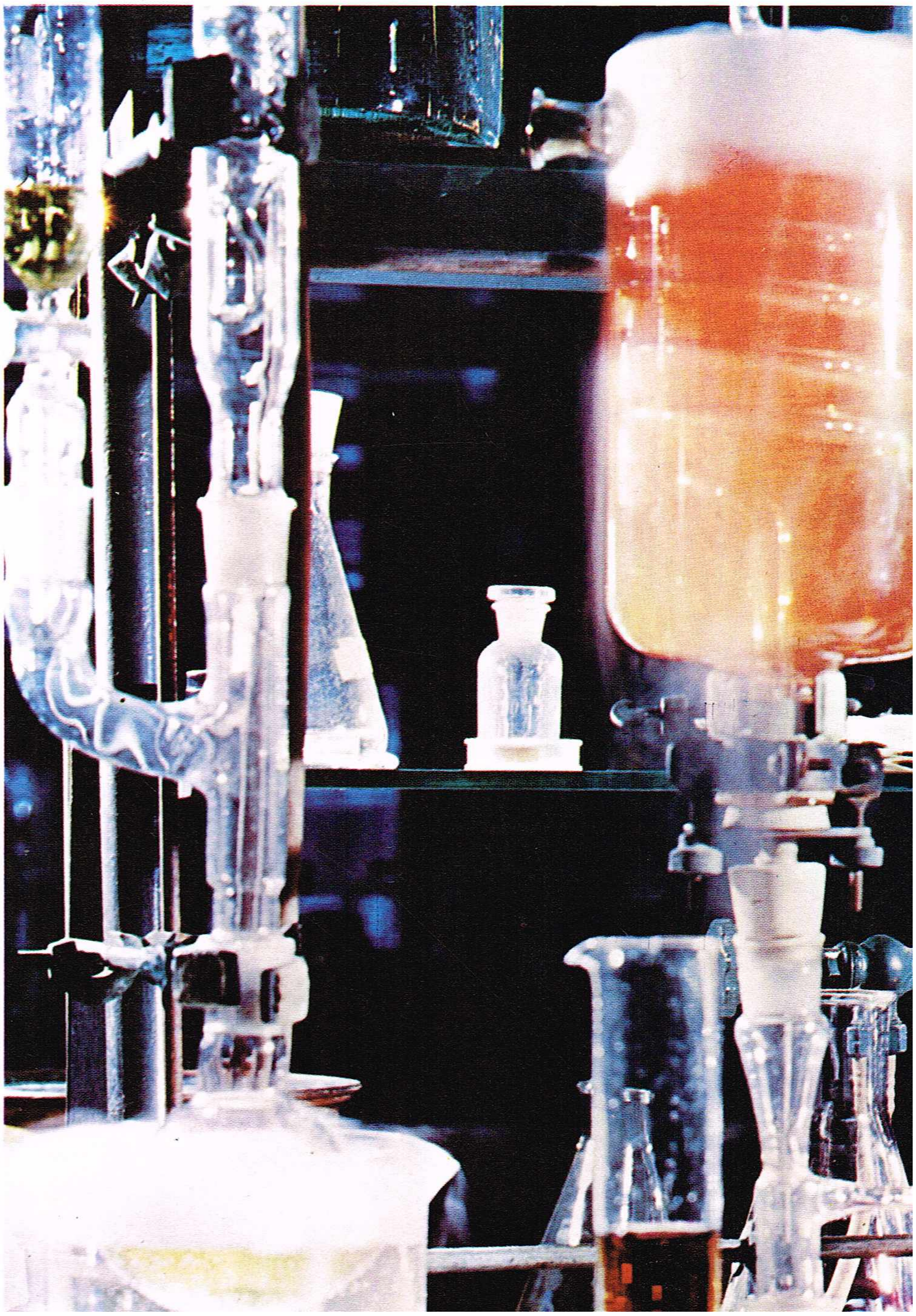

Farmitalia

CHROMATOGRAPHIE EN COLONNE OU SUR PLAQUE

Pour la séparation de mélanges solides on recourt très souvent à la chromatographie en colonne ou sur plaque, selon que l'on dispose de beaucoup ou de peu de substances. Les principes de la séparation sont identiques à ceux de la chromatographie en phase gazeuse, sauf qu'ici la phase stationnaire est constituée par un support solide (« absorbant ») et la phase mobile par un solvant liquide.

Dans la technique de la séparation en colonne, le mélange des substances est dissous dans un solvant et introduit au sommet d'une colonne de verre contenant la phase stationnaire (alumine, farine fossile, silice, amidon, etc.); en introduisant un solvant approprié, on recueille les substances séparées à la sortie de la colonne.

Dans la chromatographie en couche mince, on enduit une lame de verre (plaque) d'une légère couche d'absorbant solide et on dépose à la base de la couche une goutte de solution (tache), puis on place verticalement la plaque dans une cuvette contenant un liquide (éluant). L'éluant monte par capillarité dans la couche absorbante et entraîne les substances contenues dans la goutte de solution à des hauteurs différentes, réalisant ainsi leur séparation. Après avoir vaporisé sur la plaque avec un révélateur approprié (acide sulfurique concentré à 120°), on voit apparaître des taches sombres aux endroits où se sont localisées les différentes substances.

LES SPECTROPHOTOMÈTRES

L'appareil le plus utilisé est le spectrophotomètre dans l'ultraviolet et dans le visible. Cet instrument est fondé sur le principe de l'absorption d'une ou plusieurs radiations visibles ($\lambda = 4\,000$-$7\,000$ Å) ou ultraviolettes ($\lambda = 2\,000$-$4\,000$ Å) par les électrons des chromophores d'une substance (doubles liaisons, cycles aromatiques, groupes carbonyles ou nitriles, etc.). Schématiquement, un spectrophotomètre UV est constitué par une source qui émet un rayonnement, lequel traverse une solution de l'échantillon placée dans une cuvette de quartz, par un prisme, qui analyse et sépare le faisceau en radiations isolées, par une cellule photoélectrique, qui mesure l'intensité des radiations sortant de l'échantillon et la compare avec celle d'une radiation qui traverse un témoin. Outre la détermination qualitative, la spectrophotométrie UV permet aussi la détermination quantitative, puisque chaque substance, à l'état pur, absorbe un certain type de radiations et avec une intensité bien déterminée (coefficient d'absorption). En comparant cette absorption avec celle d'un mélange, on peut calculer le pourcentage de la substance considérée présent dans le mélange. La spectrophotométrie UV trouve de très nombreuses applications dans le domaine des matières colorantes, le contrôle de la production, l'analyse de mélanges complexes de médicaments. Les instruments les plus récents analysent en continu de nombreux échantillons, et les résultats sont transcrits sous forme numérique par un calculateur électronique.

Dans la spectrophotométrie infrarouge (IR), l'absorption des radiations IR ($\lambda = 2$-$20\ \mu$) provoque des élongations des liaisons et des déformations des angles de celles-ci dans la molécule. Le spectrophotomètre est constitué par une source de rayons IR (un filament incandescent), qui traversent l'échantillon placé dans une cellule de chlorure de sodium parfaitement transparente. Les rayons IR sont ensuite analysés par un prisme (ou, mieux, par un réseau) et leur intensité est mesurée par comparaison avec un rayon qui n'a pas traversé l'échantillon. Le spectre IR se présente comme une série de pics correspondant à chaque longueur d'onde pour laquelle il y a eu absorption. Il existe des zones du spectre où il y a des absorptions caractéristiques de certains groupements, comme les doubles liaisons entre 6 et 6,5 μ, les groupes carbonyles entre 5 et 6 μ, les oxhydryles vers 3 μ, et ainsi de suite, tandis que, dans la zone comprise entre 8 et 12 μ, souvent appelée région « empreinte digitale », on observe un certain nombre de pics d'absorption caractéristiques de la substance analysée. En pratique, on utilise rarement les longueurs d'onde mais les fréquences de radiation. Le spectrophotomètre IR sert à identifier les groupes chimiques présents dans une molécule et à vérifier l'identité d'une substance inconnue.

En raison de leur maniement très simple, de leurs larges possibilités d'application et de leur prix relativement bas, les spectrophotomètres UV et IR connaissent une grande diffusion.

Un chromatographe en phase gazeuse.

Farmitalia

LE SPECTROSCOPE DE RMN

Les principes de la spectroscopie RMN sont assez complexes. Considérons néanmoins un atome (par exemple H^1, F^{19}, P^{13}) possédant un noyau avec un moment de spin (un mouvement de rotation autour d'un axe, comme celui de la Terre) plongé dans un champ magnétique (dit « principal »). Supposons que la rotation s'effectue dans le sens des aiguilles d'une montre. Si on crée un champ magnétique (dit « auxiliaire ») dans une direction perpendiculaire à celle du mouvement initial, le noyau absorbera de l'énergie (résonance) et tournera dans la même direction mais en sens contraire. Pour une certaine valeur du champ magnétique principal, chaque noyau a sa propre valeur de champ auxiliaire auquel se produit le phénomène de résonance et cela permet de différencier les divers noyaux. Mais il est possible d'opérer une différenciation même entre noyaux du même type, puisque la résonance dépend de l'environnement chimique de chaque atome.

Considérons, par exemple, un atome d'hydrogène dans une molécule de méthane CH_3-H, de benzène et d'un aldéhyde $R-C(=O)-H$. Les trois atomes ont des environnements chimiques très différents et présentent effectivement une résonance à des champs différents. Ainsi, non seulement il est possible de savoir si une substance contient des atomes de H^1, F^{19}, etc., mais aussi de connaître le « type » de ces atomes. Ces informations sont très importantes pour le chimiste, à tel point qu'on peut affirmer que le spectromètre de RMN est sans aucun doute l'appareil le plus utile dans un laboratoire de recherches.

LE SPECTROGRAPHE DE MASSE

Le spectrographe de masse sert à mesurer les masses des ions positifs. Lorsqu'une molécule d'une substance est bombardée par des électrons possédant une énergie suffisante, il se forme un ion positif qui se fragmente ensuite en de nombreux autres ions positifs. Ils subissent une accélération de la part d'un champ électrique, et sont déviés dans leur trajectoire par un champ magnétique et enregistrés. Certains instruments comportent un enregistreur à plume semblable à celui d'un chromatographe. Dans les appareils plus récents, le signal aboutit à un galvanomètre à miroir, qui subit un déplacement angulaire proportionnel à l'intensité du courant. Un pinceau lumineux frappe le miroir et se réfléchit sur un papier photosensible sur lequel il trace le spectre des masses et de l'abondance des ions. L'appareil comporte une source d'électrons et une pompe à vide.

La spectrométrie de masse permet de déterminer exactement *la masse moléculaire d'une substance par l'intermédiaire de la masse de l'ion correspondant; les autres méthodes (cryoscopique, osmométrique, etc.) ne donnent qu'une valeur approchée de la masse moléculaire.*

LES CAOUTCHOUCS SYNTHÉTIQUES

*On appelle caoutchoucs synthétiques toutes les substances à structure macromoléculaire qui ont des propriétés élastiques analogues à celles du caoutchouc naturel extrait de l'*Hevea brasiliensis *et que l'industrie chimique produit pour remplacer celui-ci dans ses multiples applications.*

Ces composés, appelés élastomères, *doivent posséder certaines propriétés mécaniques; ainsi, soumis à des forces de traction relativement faibles, ils doivent pouvoir supporter des allongements importants sans se rompre; lorsque l'action de ces forces cesse, ils doivent reprendre rapidement leur forme et leur dimension initiales. En outre, ils ne doivent présenter aucune distension, même lorsque la sollicitation mécanique est appliquée pour une période longue ou de manière répétée.*

En ce qui concerne leur structure, les caoutchoucs synthétiques, comme le caoutchouc naturel, sont constitués de très longues chaînes, disposées le plus souvent en spirales entrelacées. Ces chaînes se déroulent progressivement lorsque la matière est soumise à un étirement et subissent un allongement dans la direction de la force qui provoque la déformation. Ces phénomènes se produisent sans qu'il y ait rupture des liaisons qui unissent les chaînes entre elles, de telle sorte que les molécules dont est constitué le matériau élastique, au lieu d'atteindre et de conserver un nouvel arrangement, tendent à reprendre leur disposition spatiale primitive.

DIPENTÈNE ET ISOPRÈNE

*La nécessité de recourir à une substance synthétique susceptible de remplacer le caoutchouc naturel se fit sentir vers 1910, lorsque la demande en caoutchouc, résultant du développement de l'industrie automobile, se révéla nettement supérieure aux disponibilités du marché. Naturellement, le premier moyen mis en œuvre pour remédier à cette situation fut l'extension des plantations d'*Hevea brasiliensis, *plante tropicale qui fournit ce précieux matériau.*

Cette solution s'étant révélée nettement insuffisante, des recherches sur la structure du caoutchouc s'intensifièrent durant la Première Guerre mondiale. En effet, le blocus imposé par les Alliés obligea l'Allemagne à forcer la production industrielle de caoutchoucs synthétiques.

Dès le début du XIX^e siècle, des chimistes illustres, tels que Dumas, Liebig et Dalton, se consacrèrent à l'étude de l'huile obtenue par distillation destructive du caoutchouc. Mais ce furent Faraday, en 1826, et Grenville Williams, en 1860, qui les premiers isolèrent quelques-uns des composants les plus importants de ces huiles, respectivement le dipentène *et l'*isoprène, *deux hydrocarbures non saturés.*

En 1889, G. Bouchardat découvrit qu'en traitant l'isoprène par l'acide chlorhydrique on obtient une masse solide, élastique, aux propriétés semblables à celles du caoutchouc, et que, en soumettant ce produit à la distillation destructive, on obtient de nouveau l'isoprène.

LES PREMIERS PRODUITS SYNTHÉTIQUES

En revanche, un autre produit fit l'objet d'une production à l'échelle industrielle, le méthylcaoutchouc, *obtenu par polymérisation du diméthyl 2,3-butadiène, substance de structure semblable à celle de l'isoprène, dont elle ne diffère que par la présence d'un radical méthyle supplémentaire, ce qui lui a valu son nom. Au cours de la Première Guerre mondiale, la production de méthylcaoutchouc atteignit en Allemagne 2 000 tonnes, mais elle fut inter-*

Titus

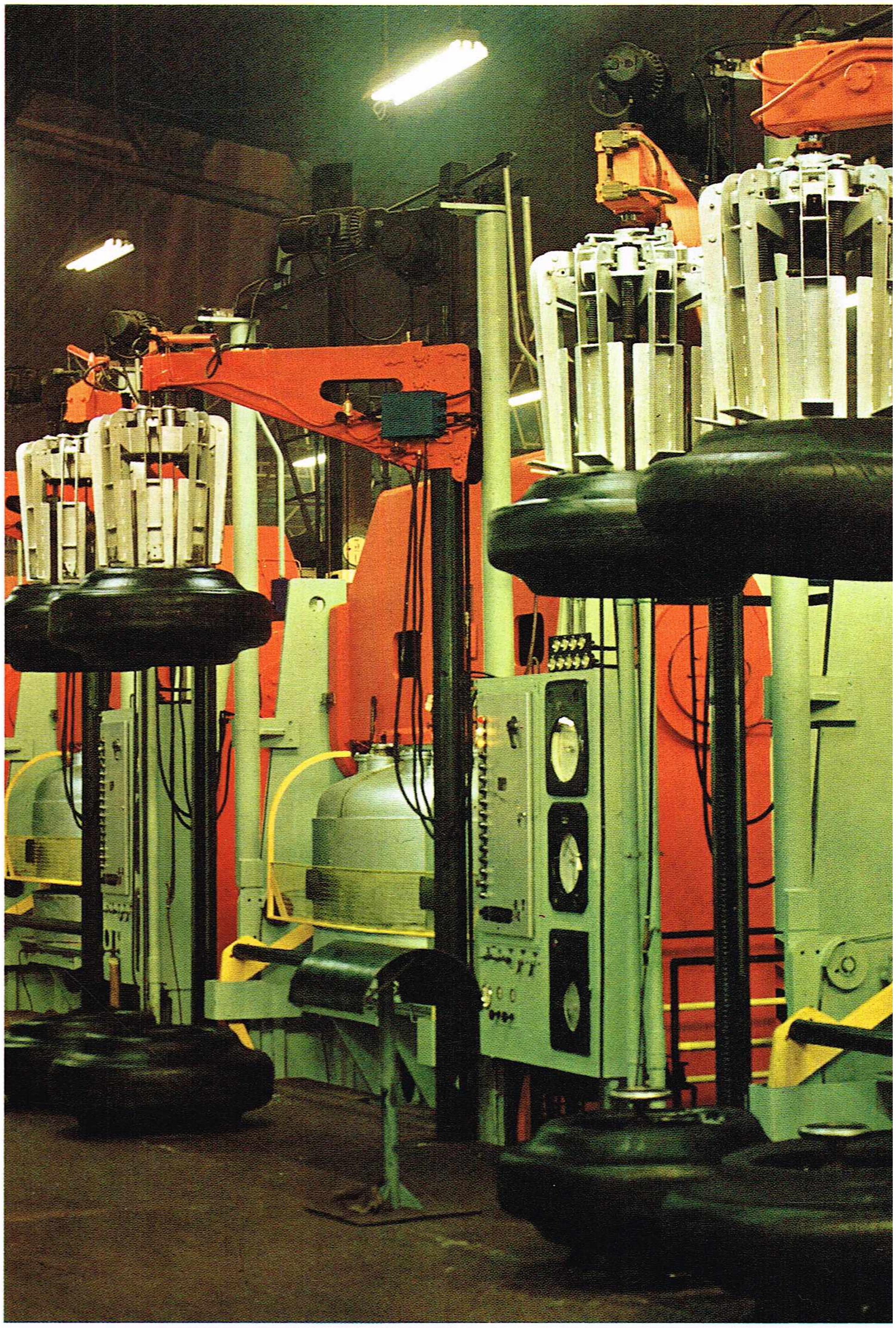

Une batterie de vulcaniseurs automatiques pour pneumatiques (établissements CEAT, Turin). En raison de leur résistance élevée à l'usure, les caoutchoucs synthétiques trouvent un très large emploi dans la production de pneumatiques.

Titus

Installation automatique pour la production de mélanges de gommes naturelle et synthétique.

rompue à la fin du conflit à cause de l'intérêt relativement faible de cette « gomme méthylique », tant sur le plan du prix de revient que sur celui des propriétés mécaniques.

En 1925, on assista à une nouvelle montée des prix du caoutchouc naturel, ce qui favorisa le développement d'un autre élastomère de synthèse, le polybutadiène.

Le butadiène diffère de l'isoprène par l'absence de groupement méthyle, il présente sur celui-ci l'avantage d'un prix de revient inférieur, étant facilement extractible des produits du steam-cracking. Le premier polybutadiène commercial fut produit par I. G. Farben en Allemagne en 1926 sous le nom de Buna. Il s'agissait d'un produit obtenu par polymérisation du butadiène par le sodium d'où son nom (Butadien-Natrium). Depuis, le nom de Buna est resté pour désigner des caoutchoucs synthétiques allemands non polymérisés par le sodium. Les premiers Buna avaient des propriétés mécaniques médiocres et la polymérisation était lente et difficile. Une amélioration importante à la technologie d'origine fut apportée grâce à la polymérisation en émulsion : le monomère est dispersé dans l'eau grâce à un agent tensioactif et sa polymérisation est initiée par des composés divers tels que les peroxydes.

Par ailleurs, les propriétés mécaniques des polybutadiènes furent améliorées par une technique nouvelle, la copolymérisation (polymérisation effectuée sur un mélange de deux monomères en proportions variables et non sur un seul monomère). Parmi ces copolymères, I. G. Farben développa vers 1930 les copolymères de butadiène et d'acrylonitrile (perbunan ou Buna N) et de butadiène et de styrène (Buna S). Le premier a des propriétés excellentes de résistance aux solvants, à l'abrasion et aux agents atmosphériques, ce qui a assuré son développement dans les tuyauteries affectées à la manipulation d'hydrocarbures (essences, gas-oil, etc.) ; le second se révéla excellent en particulier pour la fabrication des pneumatiques.

Aux États-Unis, durant la dernière guerre mondiale, on développa, pour faire face au manque de caoutchouc naturel, un copolymère butadiène/styrène de composition voisine de celle du Buna S des Allemands. Ce caoutchouc synthétique produit par la Rubber Reserve Company, organisme gouvernemental, était désigné par le sigle G.R.S. (Government Rubber Styrene), il est encore fabriqué actuellement sous le sigle S.B.R. (Styrene Butadiene Rubber) depuis que les brevets U.S. sont tombés dans le domaine public. C'est le principal élastomère de synthèse actuellement consommé dans le monde. Il sert essentiellement à la fabrication des pneus de voitures automobiles.

Dès les années 1930, on s'aperçoit que si les polymères et copolymères de l'isoprène et du butadiène comportent des doubles liaisons, la présence de celles-ci n'est pas nécessaire pour leur propriétés élastiques. Ainsi, les Thiokols, caoutchoucs synthétiques à base de soufre furent produits dès 1927 simultanément aux U.S.A. et en Allemagne (sous le nom de perdurène).

Les premiers Thiokols se caractérisaient par une odeur désagréable (inconvénient vite pallié), mais présentaient des qualités indéniables : résistance aux solvants, longue durée, faible perméabilité à l'air et aux gaz en général, excellente résistance aux agents chimiques. Bien que la réaction qui permet d'obtenir ces gommes soufrées fût connue depuis plus d'un demi-siècle (il s'agit pratiquement de la condensation d'une dichloroparaffine avec des polysulfures), ce n'est qu'en 1930 que les premiers produits firent leur apparition sur le marché. Certains dérivés dichlorés des hydrocarbures, tel le dichloro 1, 2 éthane, étant d'un coût peu élevé, on continue de réaliser encore la synthèse de polymères soufrés.

A peu près à la même époque, aux U.S.A. en 1931, fut découverte par Du Pont la synthèse du Néoprène, élastomère chloré résultant de la polymérisation du chloroprène (chloro 2 butadiène). Ce premier produit fut suivi de toute une série de dérivés dont un certain nombre montrèrent d'excellentes qualités de résistance aux agents atmosphériques et chimiques.

Un autre élastomère de synthèse très important est le polyisobutylène. Il résulte de la polymérisation de l'isobutène à basses températures en présence de catalyseurs acides. Ses propriétés (imperméabilité absolue et parfaite résistance aux agents de corrosion) en font un matériau précieux pour la réalisation de gaines isolantes pour câbles souterrains et sous-marins. On l'utilise aussi comme adhésif. Copolymérisé à très basse température en présence de 2 à 4 % d'isoprène, l'isobutylène fournit le caoutchouc butyl dont la qualité primordiale est une parfaite étanchéité aux gaz qui lui vaut d'être utilisé dans la fabrication des chambres à air.

Il existe aussi des caoutchoucs de silicone, *dans lesquels les chaînes sont formées non pas d'atomes de carbone, mais exclusivement de motifs moléculaires où alternent des atomes de silicium et d'oxygène. Leurs caractéristiques mécaniques ne sont pas exceptionnelles, mais elles se révèlent inertes chimiquement ; leur flexibilité demeure inchangée dans un intervalle étendu de températures (de — 100 à + 310 °C). Leurs emplois (gaines de câbles, joints à haute ou basse pression, instruments chirurgicaux, etc.) sont justement en rapport avec cette importante propriété.*

Les polyuréthannes *offrent des qualités appréciables, telles que dureté, résistance mécanique, ténacité aux contraintes de rupture. Les* polymères fluorés *se comportent remarquablement à l'égard des huiles et des solvants ; en outre, ils présentent une résistance élevée à la traction et ne subissent pas de phénomènes de relaxation appréciables, même lorsqu'ils sont maintenus pendant longtemps à des températures voisines de 200 °C.*

Les produits les plus modernes sont obtenus grâce à l'emploi de catalyseurs stéréospécifiques permettant de synthétiser des polymères à structure ordonnée et parfaitement régulière, alors que les polymères que nous venons de décrire ont des chaînes dépourvues de régularité. Ainsi à partir d'isoprène on a pu fabriquer le polyisoprène cis 1,4 qui est la réplique exacte du caoutchouc naturel. De même, le polybutadiène cis 1,4 est un excellent élastomère stéréorégulier. Enfin, par copolymérisation de l'éthylène et du propylène par des systèmes catalytiques voisins, on fabrique industriellement un nouveau caoutchouc synthétique (E.P.D.M.) qui allie à d'excellentes propriétés mécaniques un coût relativement bas.

LA POLLUTION DE L'EAU

Le problème de la pollution de l'eau, étroitement lié à celui de l'approvisionnement en eau douce à usages domestique et industriel, devient de plus en plus grave dans les pays développés. « Consommer » de l'eau, signifie en fait la transformer en eau de rejet, chargée de déchets domestiques ou industriels.

Lorsqu'il s'agit d'eau de rejet d'origine domestique, riche en produits organiques à différents stades de putréfaction, le problème admet un certain nombre de solutions qui font appel essentiellement à des processus naturels. En effet, il suffit de faire séjourner ces eaux dans des bassins contenant des bactéries actives pour que celles-ci transforment progressivement les substances en cours de putréfaction en composés de plus en plus simples, tels que nitrates, nitrites et ammoniac. Après cette phase, l'eau, bien qu'elle ne soit pas encore rendue potable, peut être déversée sans risques dans les cours d'eau qui sillonnent la campagne et où la purification s'achève, grâce notamment aux échanges qui se produisent entre l'eau et l'oxygène atmosphérique; les résidus azotés ont un effet fertilisant pour les algues et les végétaux terrestres.

On évalue à environ 150 litres par habitant et par jour la quantité d'eau transformée en eau de rejet; c'est une quantité importante, mais ces eaux admettent un traitement biologique de purification qui se révèle efficace.

Donc, jusqu'ici, on ne peut parler de véritable pollution; les eaux-vannes d'origine domestique et rurale peuvent être éventuellement épandues dans les champs, où elles exercent un effet fertilisant et où les processus biologiques caractéristiques des fosses septiques peuvent se dérouler ou s'achever de manière assez semblable à l'intérieur du sol. Les effets néfastes d'un tel procédé se limitent au dégagement d'odeurs nauséabondes et aux risques de propagation de certaines infections intéressant l'appareil digestif; mais ce danger est réduit et contrôlable.

La véritable pollution est provoquée par le déversement direct dans les canaux, les rivières, les lacs, des eaux de rejet chargées de déchets qui ne peuvent pas être dégradés par des processus biologiques naturels entraînant la décomposition des résidus organiques. Ces substances polluantes proviennent essentiellement de l'industrie; le développement croissant de l'industrie aggrave d'année en année le problème de la pollution des eaux.

Mais même les eaux ménagères sont devenues beaucoup plus polluantes qu'autrefois à cause de l'emploi intensif de détergents. Certains de ceux-ci ne sont pas dégradés par les micro-organismes et se retrouvent inchangés dans les eaux des rivières où ils se rassemblent en surface et provoquent l'apparition de mousses plus ou moins abondantes. On dit que ces détergents ne sont pas biodégradables. Dans de nombreux pays des mesures ont été prises pour limiter l'emploi de ces produits. C'est ainsi qu'en France il est interdit depuis 1970 de vendre des agents détergents si leur taux de biodégradation est inférieur à 80 %.

LA RESPONSABILITÉ DE L'INDUSTRIE DANS LA POLLUTION DES EAUX

La pollution par les eaux usées domestiques et les eaux-vannes n'est certes pas la plus importante. Il faut reconnaître que l'emploi sans cesse croissant des engrais et des pesticides de toutes sortes contribue aussi à la pollution des eaux. Mais c'est surtout l'industrie dont les rejets causent les problèmes les plus graves. Pendant de nombreuses années, au début du développement industriel, les fleuves et les cours d'eau ont constitué sinon le meilleur moyen, au moins le moyen le moins onéreux de se débarrasser des déchets de toutes natures. A cette époque, le faible développement de l'industrie faisait que la concentration à laquelle se trouvaient les impuretés déversées dans les eaux fluviales ne constituait pas, en général, un réel danger pour les êtres vivants de nos rivières. La progression industrielle dans un grand nombre de domaines a fait que certains produits toxiques rejetés dans l'eau ont fini par atteindre puis dépasser le seuil de concentration à partir duquel les animaux et les plantes aquatiques sont mis en péril.

En fait, si la pollution industrielle constitue un problème plus complexe que la pollution domestique et urbaine, en raison, en particulier, de la grande diversité des rejets de l'industrie, ce problème n'est pas sans solutions. Les industriels eux-mêmes, sans attendre une contrainte légale, remédient le plus possible aux inconvénients que leur activité peut avoir sur l'environnement. Les nouveaux procédés proposés par les sociétés d'engineering tiennent compte des problèmes de protection de l'air et de l'eau.

Installation d'épuration des eaux noires dans les Établissements Italsider de Bagnoli.

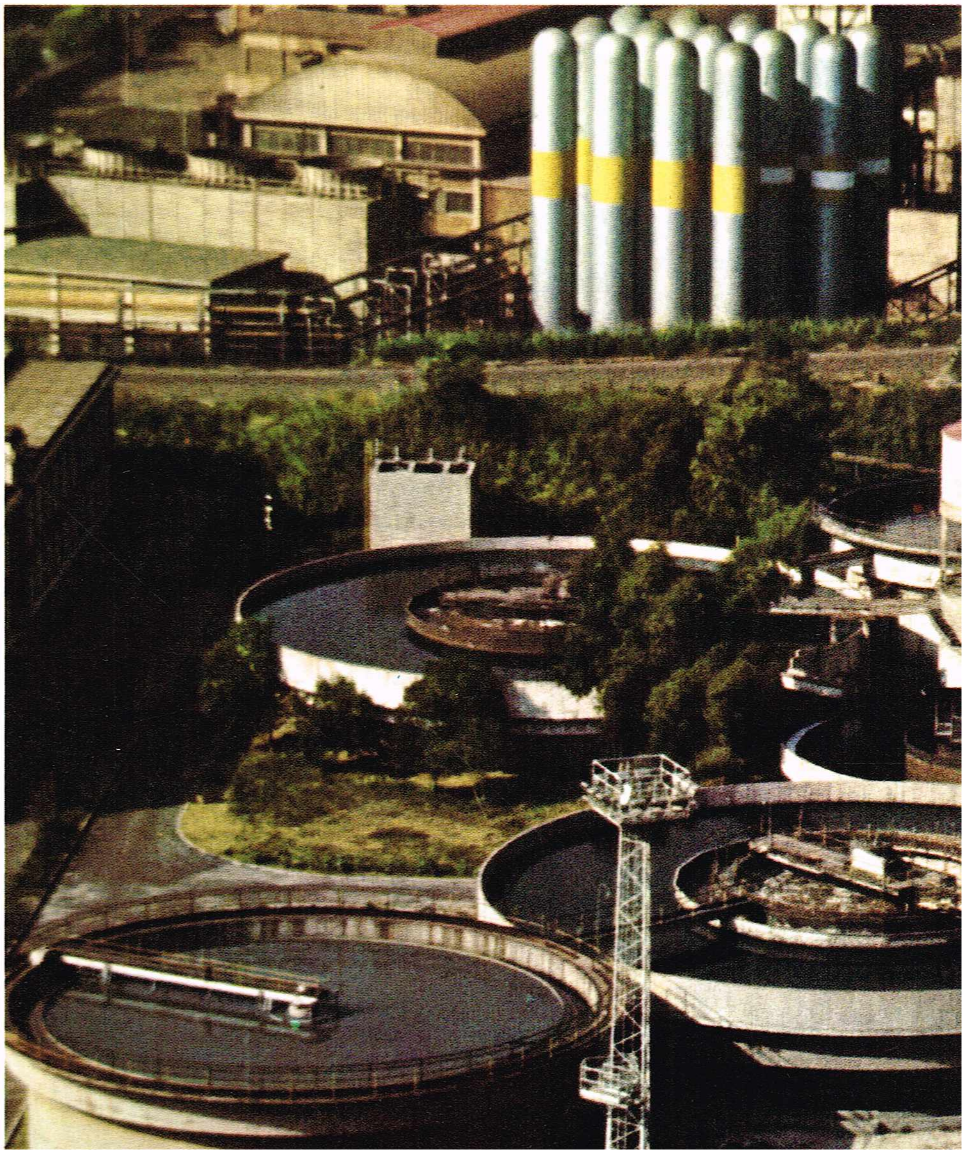

T. Vallini

Devant la grande diversité de composition des eaux résiduaires industrielles, on peut tenter un classement en quatre catégories selon qu'elles comportent des matières solides en suspension ou en émulsion, ou bien qu'elles présentent en solution des substances toxiques susceptibles de nuire à l'équilibre biologique des eaux réceptrices, ou encore que les composés qu'elles renferment sont fermentescibles, donc éliminables par voie biologique. Enfin une quatrième catégorie comprend les eaux chargées de substances radioactives ou de certains composés toxiques particuliers. A chacune de ces catégories d'eaux industrielles correspondent des modes de traitements appropriés.

Il serait hors de propos de dresser ici la liste des principales industries polluantes. Parmi celles qui rejettent surtout des composés organiques, on peut citer les brasseries et les distilleries qui, outre les désinfectants et détergents utilisés pour le lavage des bouteilles, déversent des eaux renfermant des résidus de houblon, des sulfates et un fort pourcentage de substances organiques putrescibles. Les industries laitières et fromagères rejettent des eaux fortement chargées en hydrates de carbone et en détergents et qui sont habituellement très alcalines. Les industries de la viande (abattoirs, ateliers de traitement des déchets animaux, etc.) déversent du sang, des aliments partiellement digérés, des poils, des morceaux de chair, etc. Les industries alimentaires, comme les conserveries, rejettent aussi un grand nombre de substances polluantes.

D'autres industries rejettent des eaux résiduaires à caractère essentiellement minéral, il s'agit par exemple des mines, des traitements de minerais, des industries métallurgiques et des industries chimiques minérales. Ainsi, l'industrie métallurgique, selon les branches d'activité, rejette dans ses eaux des cyanures, des phénols, des huiles, des acides forts, des oxydes métalliques, le tout en quantités énormes.

Enfin certaines industries rejettent à la fois des composés organiques et minéraux. Ainsi, les tanneries déversent dans les eaux des fragments putrescibles de tissus animaux, de sulfure de sodium, des composés du chrome, de la chaux, des graisses, des colorants, des détergents, etc. Les composés du chrome peuvent constituer un sérieux problème car ils sont très stables et peuvent s'infiltrer dans le sol et contaminer les nappes phréatiques. C'est ainsi qu'en Italie, les tanneries de Brianza ont provoqué la pollution de toute une série de puits alimentant en eau potable l'agglomération milanaise jusqu'à une profondeur supérieure à 50 mètres, obligeant la cité à faire des forages à plus de 200 mètres après avoir condamné les puits pollués. L'industrie textile décharge elle aussi des tonnes de substances polluantes et consomme d'énormes quantités d'eau atteignant, dans le cas de la rayonne, 1 000 mètres cubes par tonne de produit fini. A ce sujet, les papeteries sont, aussi, grandes consommatrices d'eau, ainsi que l'industrie de l'aluminium. Le raffinage du pétrole, autrefois grand consommateur d'eau de refroidissement, a très fortement diminué cette consommation par l'emploi d'aéroréfrigérants (refroidissement par l'air ambiant grâce à d'immenses ventilateurs).

La pollution par les hydrocarbures pétroliers, pour spectaculaire qu'elle soit en mer à la suite d'accidents de navires, est peu importante au niveau des raffineries qui sont soumises à une limitation sévère de leurs rejets. Par contre, une pollution permanente et insidieuse, difficilement soumise à un contrôle, peut exister par le rejet volontaire ou non d'huiles de vidange de voitures.

Il est impossible de poursuivre jusqu'à son terme l'énumération des pollutions industrielles, cependant les quelques exemples qui viennent d'être cités pourraient déjà donner l'impression d'une situation alarmante. Il n'en est rien pour deux raisons.

D'une part, la technique moderne permet de lutter contre la pollution de l'eau. D'autre part, une législation se met progressivement en place pour limiter les abus et aider à la mise en œuvre de solutions techniques.

Bien que depuis longtemps la loi sur les établissements classés relative aux « établissements dangereux, incommodes ou insalubres » constitue la charte fondamentale de toutes nuisances industrielles, on a dû, le 16 décembre 1964, promulguer une loi qui prévoit dans ses grandes lignes la politique de l'eau.

La mission d'assurer à tous les utilisateurs l'approvisionnement en eau, tant en qualité qu'en quantité, est du ressort des Agences de bassins, au nombre de six. Pour disposer des moyens nécessaires aux études et aux travaux, on a institué des redevances de pollution qui s'ajoutent aux redevances de consommation. La redevance de pollution est calculée en fonction de la quantité de polluants rejetés en tenant compte du taux de matières en suspension et de la demande en oxygène des eaux rejetées.

Le plus grand problème de la pollution des eaux n'est pas d'ordre technique mais humain. Il faut que chacun prenne conscience de l'importance vitale qui réside dans la conservation d'eaux douces absolument nécessaire au maintien de la vie sur notre planète.

Installation de clarification et de filtrage des eaux à usage industriel.

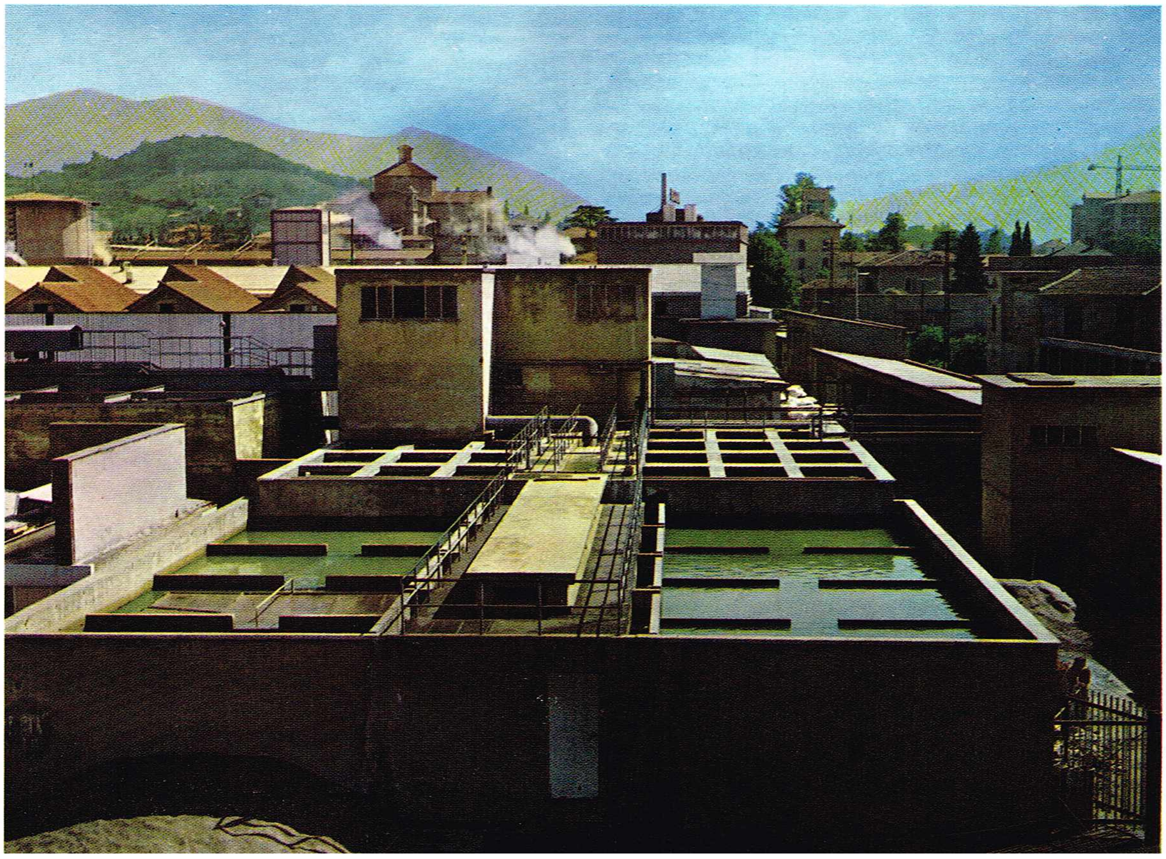

Caser

LA PHYSIQUE

L'image traditionnelle de la physique était celle d'une science strictement définie et typiquement théorique. Aujourd'hui, on ne saurait nier que la physique se développe en relations étroites avec de nombreuses inventions techniques : il en est ainsi à notre époque pour la T.S.F., la télévision, les ultra-sons, le radar, le laser, etc.
Mais les plus marquantes sont dues à la physique atomique.
Les domaines de recherche sont désormais multiples : physique nucléaire, astrophysique, électronique, supraconductivité, etc. Nous nous limiterons cependant à citer quelques réalisations récentes de grande importance.

LES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES

L'intuition d'une structure discontinue de la matière remonte aux anciens Grecs et précisément à Démocrite, qui conçut les atomes comme les derniers constituants, indivisibles, de la matière. Hypothèse philosophique au moment où elle fut formulée (Ve siècle av. J.-C.), elle ne reçut sa confirmation scientifique que bien des siècles plus tard, avec l'apparition et le développement de la chimie comme science. Dès le siècle dernier, on sait que l'atome est la plus petite unité d'un élément, qu'il possède à peu près les mêmes dimensions pour tous les éléments et qu'un ensemble d'atomes identiques ou différents constitue une molécule, celle-ci étant à son tour l'élément de base de toute substance. Mais on devait bientôt découvrir que l'atome lui-même est constitué d'électrons et de protons. Ces particules furent alors considérées comme les éléments indivisibles de la matière.

*L'*électron*, découvert à la fin du siècle dernier comme constituant commun des atomes, fournissait l'élément de liaison entre atomes de substances différentes ; le nombre d'électrons présents dans un atome rendait compte des propriétés chimiques de l'élément. La structure atomique a été mise en évidence par une brillante expérience de Rutherford (1911). Celui-ci conclut que l'atome est constitué d'un centre matériel lourd, appelé* noyau*, autour duquel gravitent les électrons. Ce système est comparable à un système planétaire en miniature, dont les équations, énoncées un an plus tard par Bohr, constituèrent le point de départ de la mécanique quantique. Le noyau de l'atome le plus léger fut appelé* proton*. Les valeurs de la charge* e *et de la masse* m *de l'électron furent mesurées par J.J. Thomson en 1897. En étudiant les rayons cathodiques, Thomson découvrit que ceux-ci étaient constitués de particules chargées négativement, qu'il appela* électrons*. La mesure de leur charge et de leur masse, ou mieux du rapport* e/m*, fut réalisée grâce à l'étude des déviations que ces particules subissent sous l'action d'un champ électrique et d'un champ magnétique.*

En effet, un champ électrique dévie ou accélère les électrons. Sous l'action d'un champ électrique, donc d'une tension dite accélératrice, les électrons acquièrent une vitesse v *liée à la tension* U *par la relation*

$$eU = \frac{1}{2} mv^2 \qquad (1)$$

On peut alors dévier la trajectoire des électrons par un autre champ électrique E *perpendiculaire au premier. Et, en appliquant un champ magnétique* B *dirigé perpendiculairement au champ* E*, on peut annuler la déviation produite par ce dernier. L'application simultanée des deux champs conduit à l'équilibre des deux forces, électrique et magnétique, c'est-à-dire* $e \cdot E = B \cdot e \cdot v$*. Cette relation permet de calculer la vitesse* v *nécessaire pour obtenir une trajectoire rectiligne,* $v = \frac{E}{B}$*. Donc* E *et* B *étant connus on peut obtenir la vitesse* v *et enfin à partir de la relation (1), le rapport* $\frac{e}{m} = \frac{E}{2\,U \cdot B^2}$.

Les valeurs obtenues par Thomson ne sont pas très éloignées de celles, plus précises, mesurées aujourd'hui.

$$\frac{e}{m} = (1{,}759\,2 \pm 0{,}005)\ 10^7 \text{ u.e.m.}$$

Thomson tenta aussi de mesurer directement la charge électrique en faisant condenser la vapeur d'eau sur les ions de manière à obtenir un nuage, dont il déterminait la charge électrique. Mais pour avoir une mesure précise

Archives Radaelli

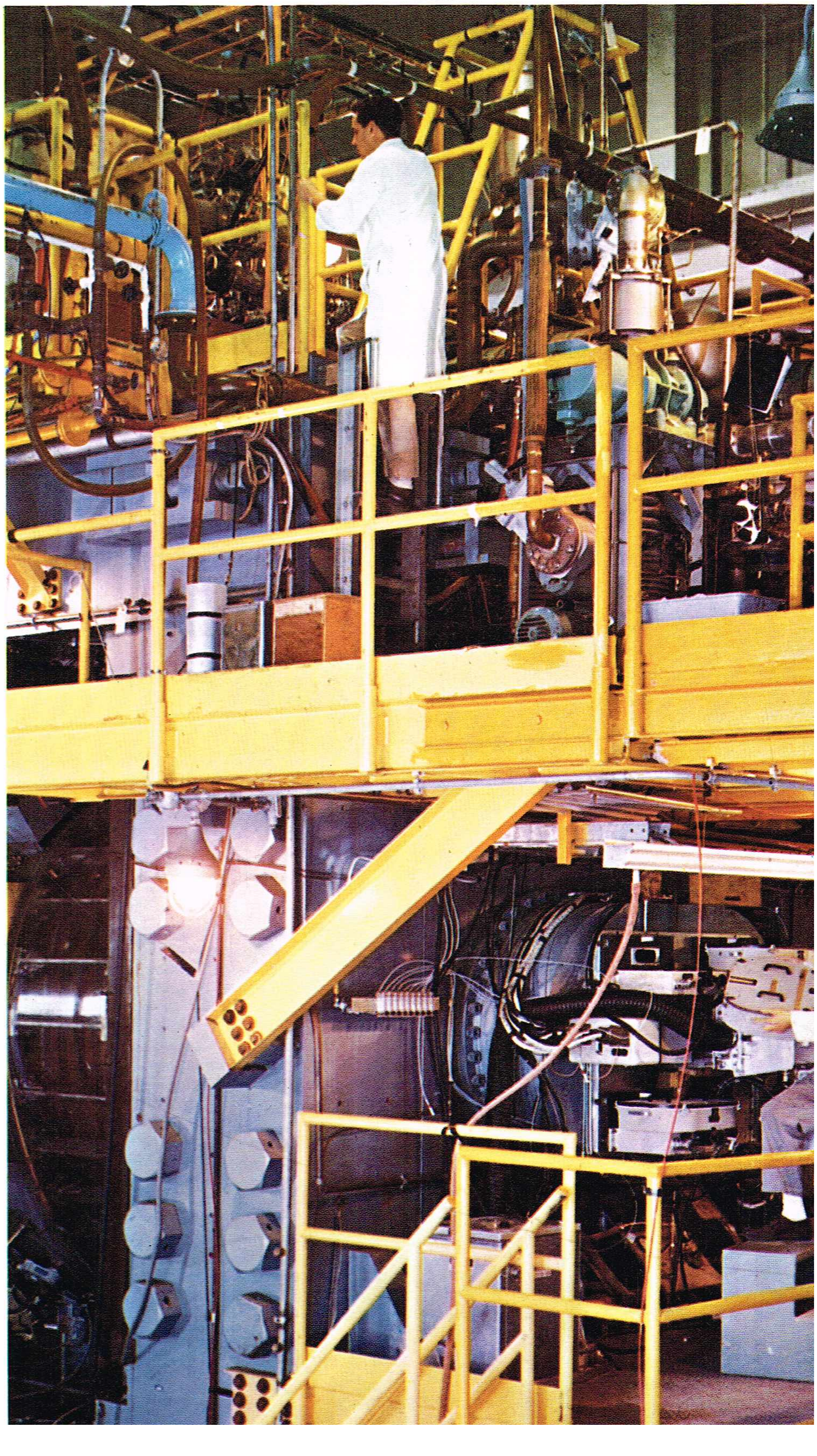

Une chambre à bulles à hydrogène.

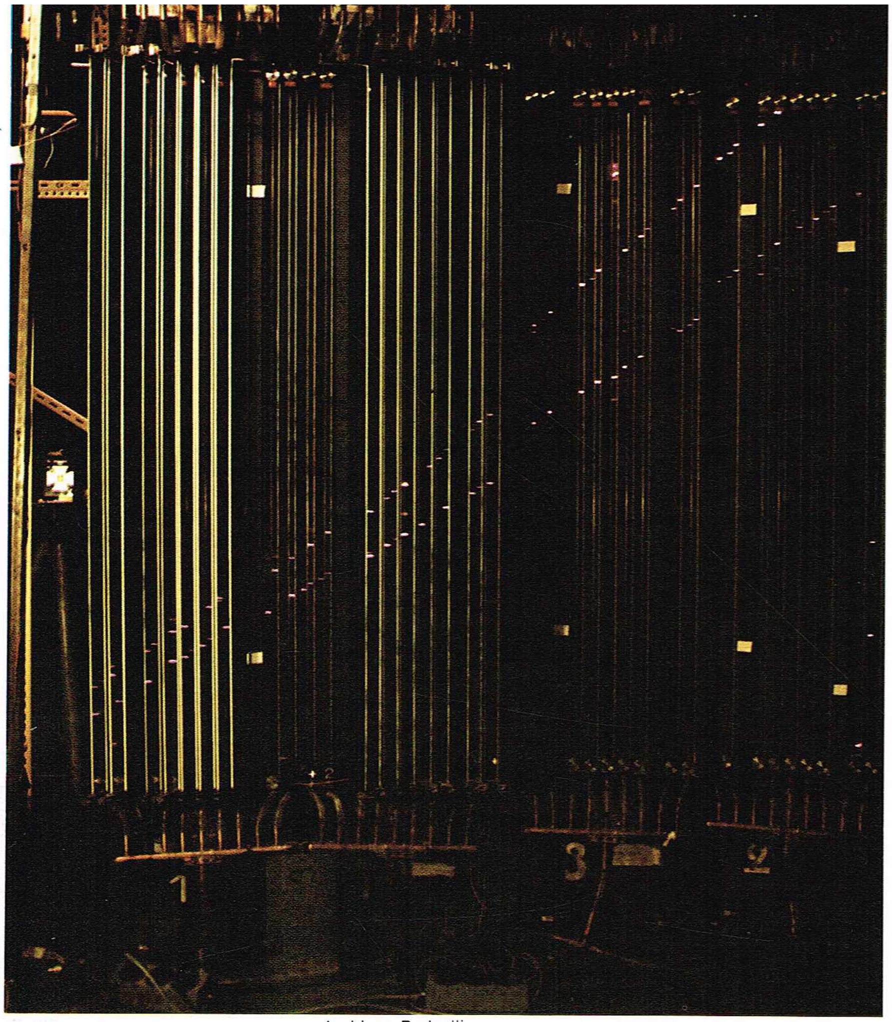

Archives Radaelli

Expérience sur les neutrinos, effectuée au CERN à l'aide d'un système de chambre à étincelles.

de la charge de l'électron, il faudra attendre les expériences effectuées par Millikan entre 1909 et 1917; celui-ci obtint une valeur assez précise :

$$e = (4{,}802\,5 \pm 0{,}000\,4)\ 10^{10}\ \text{u.e.s.}$$

Dans cette mesure, l'erreur la plus forte est liée à l'erreur avec laquelle est connu le coefficient η *de viscosité de l'air.*

LA DÉCOUVERTE DU NEUTRON ET DU POSITON

Ainsi, il y a cinquante ans, on ne connaissait que deux particules élémentaires et l'idée que toute la matière de l'univers fût constituée par ces deux seules particules était fortement séduisante, en dépit du fait qu'on s'expliquait difficilement pourquoi le proton était beaucoup plus lourd que l'électron.

La découverte du neutron, *c'est-à-dire d'une particule électriquement neutre, découverte réalisée en 1932 par le physicien anglais Chadwick, fut accueillie avec un grand enthousiasme par les physiciens et les chimistes de l'époque, car cette particule, ou mieux, son existence réelle, permettait d'élucider complètement la structure atomique des éléments et justifiait la valeur élevée des poids atomiques de certaines substances. On savait désormais qu'en bombardant une cible constituée par le béryllium avec des particules alpha de la radio-activité naturelle, on obtenait un rayonnement ionisant capable d'expulser des protons des substances hydrogénées frappées par le rayonnement. Pour en déterminer la nature et l'énergie, Chadwick mit au point une expérience dans laquelle il se servait de plutonium radio-actif comme source de particules alpha; dans ces conditions, la cible de béryllium émettait un rayonnement inconnu, que Chadwick étudia à travers les effets que ce dernier provoquait à son tour sur une cible de paraffine. En mesurant l'énergie des protons émis par la paraffine, on peut remonter à l'énergie du rayonnement incident. En posant le principe de la conservation de l'énergie dans les deux réactions séparément, Chadwick parvint à la conclusion que le béryllium émettait une particule matérielle. Il répéta l'expérience avec d'autres matériaux et observa l'émission d'atomes de recul, dont il mesura l'énergie. En comparant la vitesse des protons émis par la paraffine avec celle des atomes de recul d'azote, il obtint une première estimation de la valeur de la masse du neutron par rapport à la masse du proton. En effet, le rapport entre les vitesses est donné par* $\frac{v_p}{v_n} = \frac{M + 14}{M + 1} = 7$ *d'où l'on obtient* $M = 1{,}15$. *Ainsi le neutron venait s'ajouter au nombre des particules élémentaires connues jusqu'alors. Mais au cours de cette même année 1932, Anderson découvrit une autre particule, de masse égale à celle de l'électron et de charge positive. Cette découverte confirma la thèse du physicien Dirac, qui, dès 1926, en avait prévu l'existence; dans sa théorie, Dirac tenait compte aussi bien de la physique relativiste que de la mécanique quantique. Ce qui rendait difficile l'acceptation d'une telle théorie était l'hypothèse qu'elle postulait, selon laquelle à chaque particule correspond une « antiparticule », de charge égale et de signe opposé. On comprend donc tout l'intérêt que suscita l'observation expérimentale d'Anderson, qui révélait l'antiparticule de l'électron, c'est-à-dire l'*électron positif *ou* positon. *En fait, la théorie de Dirac prévoyait une antiparticule même pour le proton, mais l'existence de l'*antiproton *ne devait être mise en évidence que bien des années plus tard, précisément en 1955, par un groupe de physiciens américains, parmi lesquels Emilio Segrè, d'origine italienne.*

MÉSON, PION ET « RÉSONANCES »

Vers le milieu du XIXe siècle, les savants avaient renoncé à l'idée d'une force de contact et l'avaient remplacée par celle d' « action à distance », et donc par la notion de champ de forces. La théorie quantique avait expliqué les forces électriques et magnétiques par un échange incessant de photons, qui sont les quanta du champ électromagnétique. On ne savait rien sur la force très énergique qui maintient assemblés dans le noyau les protons et les neutrons. Yukawa imagina que cette force pouvait provenir d'une nouvelle particule faisant l'objet d'un échange continu entre les neutrons et les protons du noyau. Cette notion de force d'échange pourrait être illustrée par la comparaison avec deux chiens qui se disputent le même os. Celui-ci est saisi alternativement par l'un et l'autre, les deux chiens restant ainsi indissolublement liés. La particule responsable de cette force devait avoir une masse intermédiaire entre celle du proton et celle de l'électron; elle fut donc appelée méson. *Nous savons aujourd'hui que cette particule est définie comme le quantum du champ nucléaire, qu'elle existe et qu'elle a été observée expérimentalement pour la première fois en 1947 par les physiciens Lattes, Occhialini et Powell lors de l'étude du rayonnement cosmique. Ils l'appelèrent méson* π *ou* pion *et purent en mesurer avec précision la masse, qui est égale à 273 fois la masse de l'électron.*

L'étude sur le rayonnement cosmique avait fourni, dans les années postérieures à 1930, la principale source pour l'analyse des particules élémentaires. Aujourd'hui on en connaît un si grand nombre que l'on préfère supprimer le qualificatif « élémentaires ». En outre, on a observé que certaines de ces particules sont stables, tandis que d'autres se désintègrent en un temps plus ou moins court. On connaît aujourd'hui tout un ensemble de particules à vie très courte, que l'on appelle « résonances ». La première particule de ce type fut observée par Enrico Fermi alors qu'il étudiait l'évolution de la section de choc, c'est-à-dire la probabilité d'interaction entre un méson π *et un proton en fonction de l'énergie de la particule incidente. Le méson et le proton s'unissent pour former presque une particule de masse fixe (*N^**). Après cette première particule, on découvrit un nombre incalculable de résonances semblables, ce qui donna naissance au problème, toujours actuel, de leur classification. L'étude des désintégrations et des interactions des différentes particules a ouvert un domaine nouveau dans la recherche de la structure ultime de la matière. Une analyse systématique n'a été possible que grâce à l'avènement des accélérateurs de particules, qui fournissent en abondance la matière première.*

LES ACCÉLÉRATEURS DE PARTICULES

La découverte de la radioactivité naturelle allait permettre d'étudier la structure de l'atome. En effet, pour étudier le noyau de l'atome, il n'est pas possible d'employer la lumière visible, mais il faut utiliser un rayonnement de longueur d'onde beaucoup plus courte. Les substances radioactives émettent un rayonnement dont la longueur d'onde λ a été déterminée par de Broglie; cette relation s'exprime sous la forme : $\lambda = h/p$, où h est la constante de Planck et p la quantité de mouvement de la particule considérée. En 1919, Rutherford réalisa la première réaction nucléaire dans l'expérience suivante : sous l'action des particules provenant d'une source radioactive naturelle de polonium, un atome d'azote se transforme en oxygène avec libération d'un proton observé grâce à la scintillation produite sur un écran fluorescent, selon la réaction : $N_7^{14} + He_2^4 \rightarrow O_8^{17} +$ proton.

On sait que les particules émises par les sources naturelles ont des énergies bien déterminées mais peu élevées. Il était logique de se demander quels seraient les effets si on disposait d'un projectile ayant une énergie supérieure. C'est ainsi que les physiciens entreprirent d'étudier les moyens permettant d'accélérer les particules observées dans la radioactivité naturelle afin d'étudier les effets produits par leurs collisions. Entre-temps, les savants avaient découvert le rayonnement cosmique; pendant longtemps, les recherches tendant à obtenir des particules d'énergie très élevée demeurèrent liées à l'étude du rayonnement cosmique. Mais les particules provenant de l'espace sont peu nombreuses, d'énergie très variable et, surtout, présentent d'importantes modifications (durée de vie limitée). Pour une étude systématique des collisions entre particules et matière, il était nécessaire d'en disposer d'un nombre élevé, douées toutes de la même énergie. C'est ainsi que naquirent les premiers accélérateurs, beaucoup plus simples que les appareils d'aujourd'hui. On songea tout d'abord à plonger dans un champ électrique, les particules ionisées fournies par la nature. L'accélération résultante γ est fonction du champ électrique E, de la charge q et de la masse m de la particule; la formule s'exprime :

$$\gamma = q \cdot E/m.$$

L'exemple le plus simple d'accélérateurs est constitué par le tube à rayons X, construit par Crookes en 1895. Il s'agit d'une ampoule de verre dans laquelle on a pratiqué le vide, contenant deux électrodes métalliques; l'une, la cathode, émet des électrons par effet thermo-électronique. Les deux électrodes étant reliées aux pôles d'une source de haute tension, les électrons émis sont repoussés par la cathode (pôle négatif) et attirés par l'anode (pôle positif) sous l'effet du champ électrique. Plus la tension appliquée entre anode et cathode est élevée, plus grande sera la vitesse acquise par les électrons. Pour calculer leur énergie cinétique, il suffit de se rappeler la relation $e \cdot V = \frac{1}{2} mv^2$ où m est la masse de la particule (électron), v sa vitesse, V la tension appliquée et e la charge électrique de l'électron. Si, par exemple, la différence de potentiel dans le tube est de 10 kV, les électrons auront une vitesse de

$$6 \cdot 10^9 \text{ cm/s}.$$

On adopte un système d'unités pratique en se référant directement à l'énergie de la particule : l'unité d'énergie choisie est l'électron-volt (eV), qui correspond à l'énergie acquise par une particule ayant la charge d'un électron lorsqu'elle est accélérée sous une tension de un volt. Cette unité est égale à $1,6 \cdot 10^{-19}$ joule; on emploie surtout ses multiples, qui sont le keV = 10^3 eV, le MeV = 10^6 eV et le GeV = 10^9 eV (ou BeV).

Archives Radaelli

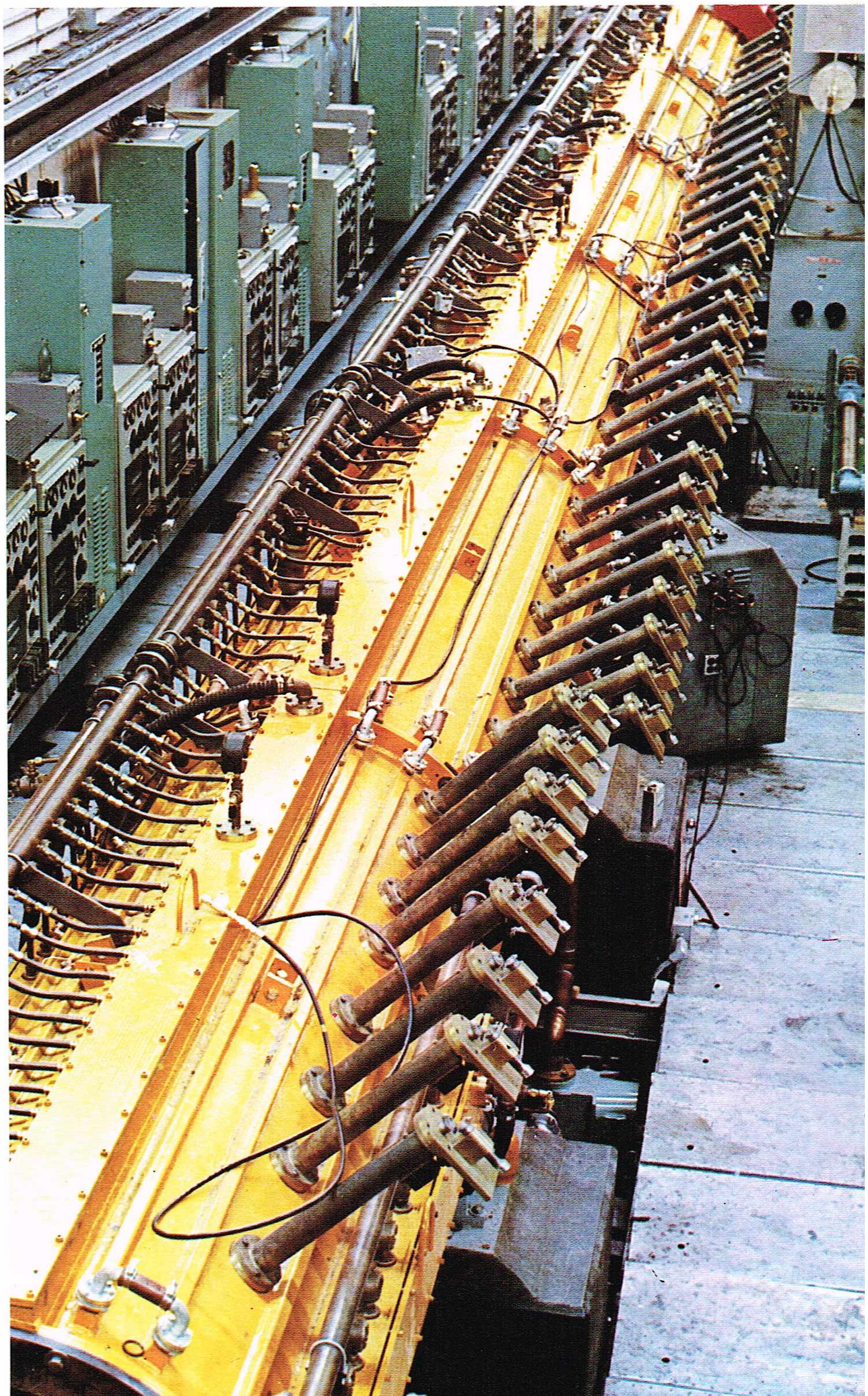

L'accélérateur linéaire de Brookhaven (U. S. A.).

L'ACCÉLÉRATEUR DE COCKCROFT-WALTON

Le premier accélérateur digne de ce nom est entré en service en 1932 ; il est dû à Cockcroft et Walton. Puisqu'il n'existe pas dans la nature de protons rapides, les chercheurs réalisèrent l'accélération des protons produits en laboratoire, suivant le même principe que l'accélération des électrons dans le tube à rayons X. On applique une différence de potentiel entre deux électrodes et les particules ionisées subissent alors une accélération directement proportionnelle à la tension appliquée. Surgit donc le problème de construire des générateurs de tensions particulièrement élevées et d'un emploi aisé. L'appareil doté de ces propriétés fut conçu et construit par Robert Van de Graaff à l'université de Princeton, vers 1930. Cockcroft et Walton réussirent à surmonter la difficulté qui consistait à obtenir une tension continue élevée, en réalisant un multiplicateur de tension, constitué d'un réseau de redresseurs et de condensateurs convenablement reliés. Ainsi la tension totale à la sortie était beaucoup plus élevée que celle provenant du transformateur d'alimentation.

En 1932, l'accélérateur des deux physiciens anglais entra en service : des protons provenant d'une source d'ions étaient accélérés sous un potentiel de 700 kV en acquérant ainsi une vitesse correspondant à une énergie cinétique de 700 keV. Cette énergie étant suffisante pour provoquer une réaction nucléaire, ces deux savants furent les premiers à obtenir une fission nucléaire artificielle. En effet, le noyau de lithium constituant la cible fut scindé en deux noyaux d'hélium, libérant globalement une énergie de 17 MeV.

Aucune limite ne semblait exister au potentiel applicable ; mais, lorsqu'on tenta d'augmenter la tension au-dessus de 4-5 millions de volts, il se produisit des décharges prématurées, qui, en abaissant brusquement la tension, rendirent impossible le fonctionnement de l'appareil. Un autre inconvénient résidait dans la difficulté de réaliser un isolement satisfaisant des condensateurs, isolement nécessaire pour atteindre des potentiels plus élevés. On songea alors à accélérer les particules par étapes successives plutôt que d'un seul coup, cette dernière solution exigeant une tension trop élevée. Avec un tel système, chaque accélération requiert une tension moindre, ce qui permet de surmonter les difficultés techniques rencontrées précédemment.

LA NOTION D'ACCÉLÉRATIONS SUCCESSIVES

Pour rendre compréhensible la notion d'« accélérations successives », on peut comparer la particule ionisée qui traverse un certain champ électrique à une bille roulant le long d'un plan incliné : plus la dénivellation entre le départ et l'arrivée est grande, plus la vitesse acquise par la bille sera élevée. Si nous divisons la piste en plusieurs sections, nous pouvons imprimer à la bille des accélérations répétées. Mais, l'accélération totale que la bille peut subir reste étroitement limitée par la dénivellation totale de la piste. Une division de la piste avec dénivellations puis remontées ne procure aucun avantage, puisque les montées ralentissent de nouveau la bille, dont la vitesse finale dépend encore de la dénivellation totale. En revanche, si on dispose d'une piste mobile, c'est-à-dire constituée par plusieurs sections horizontales susceptibles de s'élever et de s'abaisser rythmiquement, on obtient un gain important d'efficacité. En effet, la bille se déplace toujours soit en descente, soit horizontalement. Pendant son mouvement horizontal, la section correspondante s'élève tandis que la section horizontale suivante s'abaisse : la bille passe ainsi d'une section à la suivante toujours en descendant et peut par conséquent être accélérée d'une manière continue. Elle est remontée à nouveau par le déplacement de la section horizontale tout entière et donc sans perte d'énergie cinétique. La hauteur de la piste correspond à la tension appliquée et les sections mobiles à des électrodes dont la tension varie rythmiquement, ce qui s'obtient au moyen de générateurs de tensions alternatives. Pour que le système fonctionne réellement, il faut réaliser une synchronisation entre le déplacement de la bille et le mouvement des sections : si toutes les sections s'élèvent et s'abaissent selon le même rythme, la bille doit demeurer le même temps dans chaque section. Puisque la bille voit sa vitesse augmentée pendant son parcours, il faut prévoir des sections proportionnellement plus longues. La construction d'un dispositif fonctionnant selon ce principe supposait la solution de deux types de difficultés : imposer à tout le système de conserver le rythme correct et faire en sorte que la bille débute sa course au moment opportun ; ces difficultés furent surmontées et on aboutit à l'accélérateur linéaire ou linac. La technique de cet accélérateur à impulsions a été appliquée avec succès aux électrons et aux protons, et il semblait qu'il n'y aurait pas de limites à l'énergie réalisable par ce dispositif. Cependant, pour atteindre des énergies très élevées, il faut disposer d'accélérateurs de plus en plus longs, ce qui crée des problèmes techniques et des difficultés liées à l'encombrement de l'appareil.

Détail de l'accélérateur de Cockcroft-Walton.

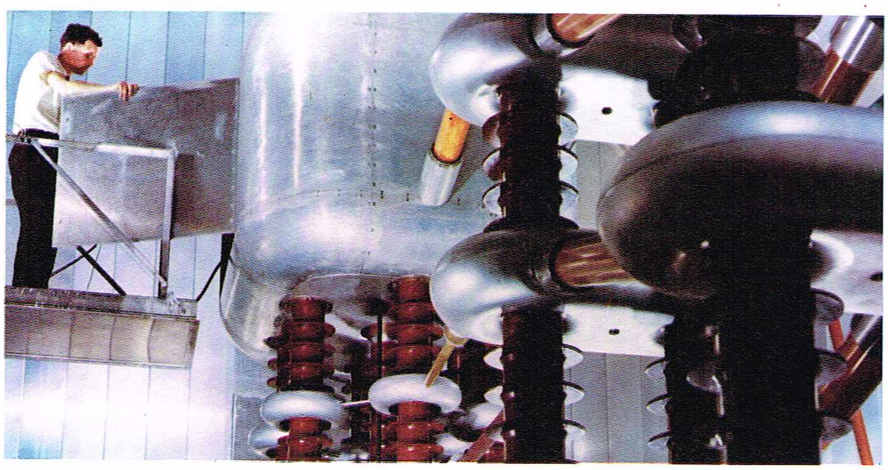

Archives Radaelli

LE CYCLOTRON DE LAWRENCE

Pendant que Cockcroft et Walton réalisaient l'accélération de particules selon un parcours rectiligne, Lawrence, en 1929, proposa un accélérateur à parcours circulaire. Ce fut le premier appareil qui réussit à accélérer des particules lourdes (énergie acquise 20-30 MeV). Le cyclotron fonctionne selon le principe qu'une particule de masse m et de charge e qui se déplace dans un champ magnétique B à la vitesse v normale à ce champ décrit un cercle de rayon r tel qu'il existe un équilibre entre la force de Lorentz due au champ magnétique et la force centrifuge. A ce système est applicable la relation $e \cdot v \cdot B = m\frac{v^2}{r}$*, que l'on peut également écrire* $\frac{B \cdot e}{m} = \frac{v}{r} = \omega$ *(ω : vitesse angulaire). Si le champ magnétique est constant, si la masse et la charge des particules demeurent constantes, la vitesse angulaire ω sera, elle aussi, constante et indépendante du rayon et de la vitesse des particules. Il s'ensuit que, si la vitesse v augmente, le rayon r de l'orbite augmentera proportionnellement, tandis que le temps nécessaire pour décrire une orbite restera constant. Lawrence eut l'idée de placer entre les pôles d'un électro-aimant deux électrodes creuses en forme de D, mises dos à dos, auxquelles il appliqua une tension alternative. La particule émise par une source, au centre, parcourt un demi-cercle dans le premier D, puis est accélérée sous l'action du champ électrique agissant entre les deux D et parcourt alors un autre demi-cercle de rayon légèrement plus grand. A chaque passage entre les deux électrodes, elle reçoit une impulsion et se déplace donc toujours plus rapidement, en décrivant une spirale s'élargissant vers l'extérieur.*

Après les premières réalisations expérimentales du cyclotron, on se rendit compte qu'une limite existait à l'augmentation de l'énergie, due à la variation de la masse des particules accélérées, conformément aux principes de la physique relativiste.

Aujourd'hui, on a vaincu cette difficulté et on est capable d'obtenir, à l'aide de synchro-cyclotrons, des énergies qui paraissent fabuleuses, de l'ordre de 30 GeV. Mais on songe déjà à la construction d'accélérateurs capables d'atteindre des énergies de 300 GeV, afin de vérifier les théories sur les interactions des particules à très haute énergie.

LES RÉACTEURS NUCLÉAIRES

Les réacteurs nucléaires sont les sources d'énergie caractéristiques de l'ère atomique. Le début de cette ère nouvelle se situe au 2 décembre 1942, lorsque Enrico Fermi réalisa la première réaction nucléaire en chaîne contrôlée en utilisant une pile atomique, prototype des réacteurs nucléaires. L'énergie atomique puise sa source dans les forces qui maintiennent, assemblés dans le noyau, les protons et les neutrons ; ces forces, très considérables, sont responsables de la stabilité des noyaux. La masse d'un noyau, composée de neutrons et de protons, devrait être égale à la somme des masses de ses différentes particules. Puisque cela ne se vérifie pas, il s'ensuit que le défaut de masse est compensé par une certaine énergie, d'après l'équation d'Einstein $E = mc^2$. *En effet, la formation d'un atome lourd à partir de deux atomes légers donne lieu à une libération d'énergie. Ce processus, appelé* fusion, *se produit de manière habituelle dans le Soleil et les autres étoiles. De manière analogue, lorsqu'on provoque la désintégration artificielle de certains atomes lourds, on aboutit à la formation d'éléments plus légers, processus qui s'accompagne aussi d'une libération d'énergie.*

Ce phénomène, appelé fission, *se produit lorsqu'on fournit au noyau une énergie d'excitation suffisante pour vaincre les forces d'attraction et donner naissance à deux noyaux distincts. L'énergie critique de fission peut être formée, par exemple, par l'absorption d'un neutron de la part du noyau ; l'interaction entre le neutron et le noyau dépend de l'énergie des neutrons et de l'élément lui-même. Lorsqu'une fission se produit dans une certaine masse de matériaux fissiles, tous les neutrons émis sont à leur tour capturés par d'autres noyaux, ce qui donne lieu à la libération d'autres neutrons. Leur nombre croît à l'infini et le processus prend le nom de réaction en chaîne. Si le phénomène se produit sans contrôle, on aboutit à une explosion nucléaire ; en revanche, dans un réacteur, le phénomène est contrôlé et maintenu à l'intérieur des limites voulues. Mais, en pratique, il y a toujours une certaine perte de neutrons, qui ne donnent pas lieu à fission ; si les pertes sont élevées, la réaction en chaîne ne peut pas se produire. Elles sont dues généralement à une fuite de neutrons hors du système ou à leur capture soit par le matériau fissile, soit par des impuretés. Pour réaliser une réaction en chaîne auto-entretenue dans un système donné, il faut prendre en considération : 1) les dimensions du système, qui déterminent les pertes de neutrons à sa périphérie ; 2) les impuretés présentes ; 3) la répartition des énergies neutroniques ; 4) la variation des sections de choc du matériau fissile avec l'énergie des neutrons, de manière à pouvoir déterminer la probabilité de fission et d'autres réactions.*

RÉACTEURS RAPIDES ET RÉACTEURS THERMIQUES

Les réacteurs sont caractérisés par le combustible, *le* réfrigérant *et le* modérateur *qu'ils utilisent. Le combustible peut être constitué soit par l'uranium naturel, soit par l'uranium enrichi en son isotope* ^{235}U *ou en plutonium. La chaleur engendrée par un réacteur est dissipée par un réfrigérant, qui circule dans le cœur du réacteur. La répartition de la chaleur décroît axialement et radialement depuis le centre ; sa production se poursuit même après l'arrêt du fonctionnement et ce phénomène est dû au processus de désintégration radio-active des produits de fission. Comme réfrigérant, on peut utiliser l'eau tant sous pression que bouillante, l'eau lourde, les gaz présentant, en raison de leur faible densité, une section de choc d'absorption petite, des liquides organiques ou des métaux à l'état liquide. Lorsqu'on fait fonctionner un réacteur, l'uranium s'échauffe et il devient donc nécessaire de le chemiser pour éviter qu'il*

Archives Radaelli

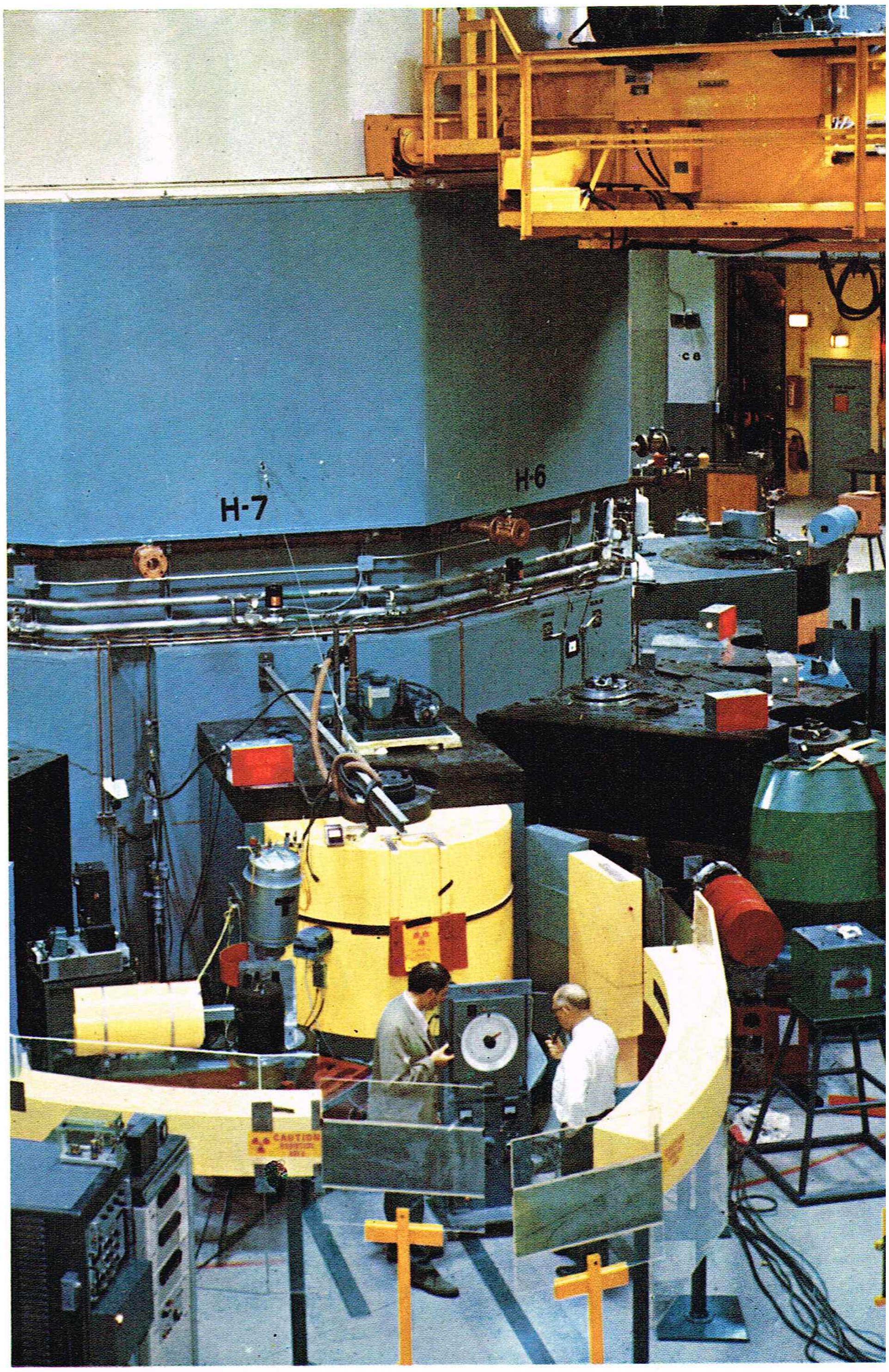

Plate-forme expérimentale du réacteur de recherche HFBR (high flux beam research reactor) du laboratoire de Brookhaven.

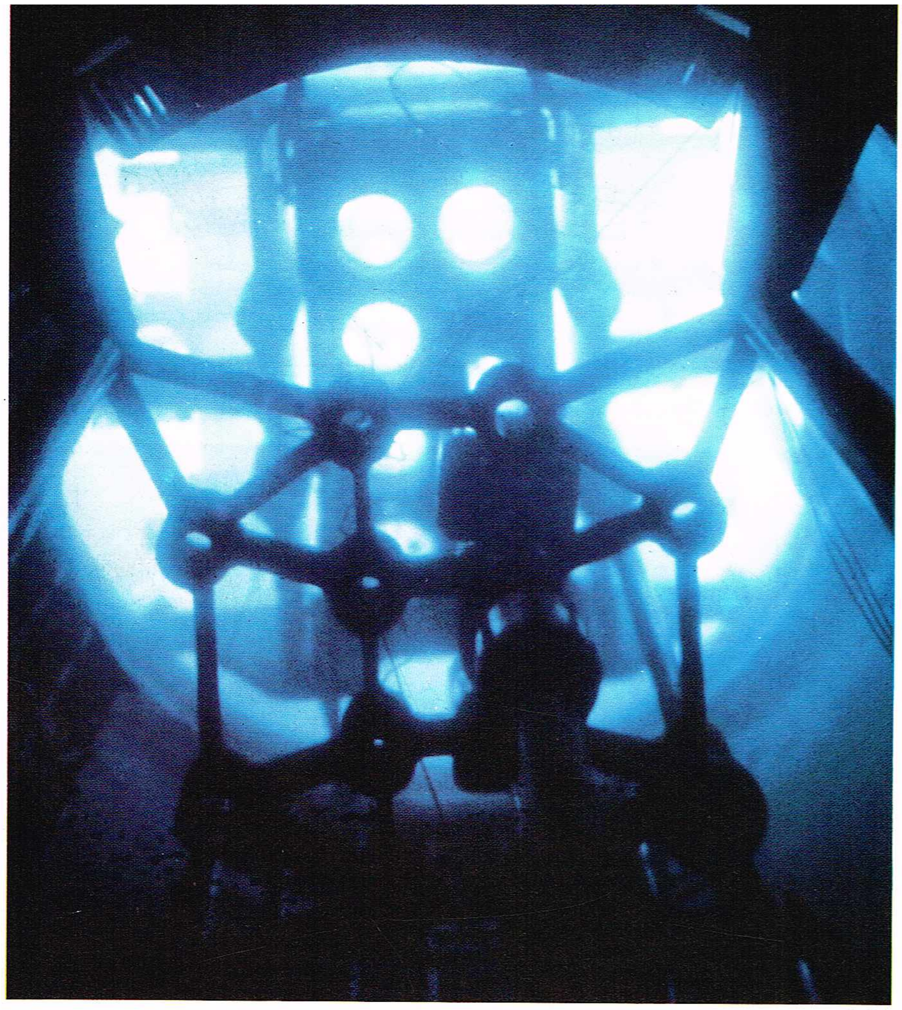

P.R.I.
Cœur du réacteur à piscine d'Oak Ridge (Tennessee).

réagisse chimiquement avec le réfrigérant et aussi pour empêcher que les produits de fission qui se forment à la surface de l'uranium finissent, à cause de leur énergie cinétique, dans le fluide réfrigérant, en le rendant radio-actif. A cette fin, on peut utiliser l'aluminium, le magnésium, le zirconium ou le béryllium.

Les réacteurs se distinguent en rapides *ou* thermiques *suivant l'énergie d'un neutron. Dans les premiers, la réaction en chaîne est entretenue par les neutrons rapides libérés par la fission elle-même ; dans les seconds, on exploite la propriété que possède le ^{235}U de subir plus facilement la fission sous l'action des neutrons lents que des neutrons rapides. On introduit alors des substances (modérateurs) qui ralentissent la vitesse des neutrons libérés. Les substances employées comme modérateurs sont l'eau, l'eau lourde, le graphite ou le béryllium. Si le combustible et le modérateur sont mélangés en solution de manière homogène, les réacteurs sont dits* homogènes *; si, en revanche, le combustible est sous forme de barres, que l'on plonge dans une cuve contenant le liquide modérateur ou dans une matrice de graphite, ils sont dits* hétérogènes.

On dit qu'un réacteur fonctionne en régime stationnaire lorsque le nombre des neutrons produits est égal au nombre des neutrons absorbés, augmentés de ceux qui s'échappent. Pour chaque neutron absorbé dans le combustible, il se libère en moyenne un neutron qui vient s'ajouter à ceux perdus par le réacteur. Soit P *la probabilité qu'un neutron ne s'échappe pas ; dans ce cas, la condition pour que la réaction en chaîne se poursuive est* $kP = 1$*, où* k *est le facteur de multiplication des neutrons, c'est-à-dire le rapport entre les nombres de neutrons libérés par une fission et des neutrons ayant provoqué celle-ci. Si* k *est égal ou à peine supérieur à l'unité, la réaction en chaîne est possible, si* k *est inférieur même de peu à l'unité, la réaction s'épuise. La valeur de* k *est déterminée par la nature du combustible, les proportions du modérateur et même la disposition du matériau. Pour un réacteur de dimensions finies, la probabilité* P *est inférieure à l'unité et donc, pour que la réaction en chaîne se poursuive, il est nécessaire que* P *soit supérieur d'une valeur minime et* k *supérieur à 1. Les neutrons s'échappent vers l'extérieur, mais l'absorption qui conduit à la fission et à la production de neutrons se produit à l'intérieur du réacteur. Le nombre de neutrons perdus dépend donc de la surface externe, tandis que le nombre de neutrons libérés dépend du volume. Pour réduire les pertes au minimum, il est nécessaire de diminuer le rapport entre la surface et le volume ; cela peut s'obtenir en augmentant les dimensions du réacteur. La dimension critique est celle pour laquelle la probabilité* P *a une valeur suffisante pour que le produit* kP *soit égal à l'unité. Puisque le rapport entre la surface et le volume dépend de la forme géométrique, la probabilité* P *sera déterminée par la forme du réacteur. Pour un volume donné, c'est la sphère qui présente le rapport minimal entre surface et volume ; donc, c'est dans un réacteur sphérique qu'on aura les pertes les plus faibles. On peut diminuer la perte de neutrons en entourant le réacteur d'un* réflecteur *convenable, c'est-à-dire d'un matériau (en général le même que celui du générateur) renvoyant au réacteur une partie des neutrons qui s'échappent. Le facteur* k *dépend aussi du combustible et du modérateur ; c'est pourquoi, une fois fixée la forme géométrique, les dimensions critiques ne sont pas constantes, mais varient avec la nature et la structure du système combustible-modérateur. Par exemple,* k *augmente lorsqu'on emploie un combustible enrichi ; par conséquent, les dimensions critiques d'un réacteur à uranium enrichi seront plus faibles que celles d'un réacteur de forme identique mais à uranium naturel. Le produit* kP *est appelé facteur effectif de multiplication ; il représente le nombre moyen de neutrons thermiques qui demeurent dans le réacteur et sont disponibles pour l'absorption à chaque fission. La régulation de la multiplication d'un neutron dans un réacteur thermique est obtenue grâce à l'utilisation de barres de contrôle ; la densité des neutrons diminue rapidement à cause de leur capture par les barres, qui sont en cadmium ou en bore, éléments qui possèdent une grande section de choc de capture pour les neutrons lents. Pour éteindre le réacteur, on introduit les barres de contrôle afin d'absorber les neutrons en plus. Le système perd des neutrons plus rapidement qu'il ne s'en forme par fission et la réaction en chaîne s'arrête.*

RÉACTEURS DE PUISSANCE ET CONVERTISSEURS

Les réacteurs sont employés comme générateurs de chaleur et servent pour le chauffage de fluides, la production de vapeur ou même la production d'énergie électrique (dans ce cas, on les appelle réacteurs de puissance*), pour la propulsion de bateaux, d'avions et d'engins spatiaux. Par ailleurs, on peut exploiter les radiations nucléaires qu'ils produisent ; dans ce cas, ils sont employés pour des recherches scientifiques et techniques, pour la production de radio-isotopes artificiels et de matériaux fissiles. Il existe enfin un type de réacteurs dans lequel le rayonnement produit est utilisé pour la production de combustible nucléaire : on les appelle* convertisseurs ou enrichisseurs.

Le premier réacteur de puissance a été réalisé à Calder Hall, en Angleterre, et l'installation, comportant un modérateur à graphite et un réfrigérant à gaz, est entrée en service en 1956. En France, on a construit à Marcoule des réacteurs d'uranium enrichi qui concilient à la fois production d'énergie et production de matière fissile (plutonium).

L'énergie obtenue grâce aux processus de fusion est étudiée dans les machines thermonucléaires. Les réactions capables de la produire sont les réactions thermonucléaires. Dans ces conditions, la matière se trouve à l'état de plasma, quatrième état de la matière défini par la physique moderne. La première tentative (couronnée de succès) visant à produire de l'énergie au moyen d'une réaction thermonucléaire eut lieu le 1er novembre 1952, lorsque les savants de Los Alamos réussirent à faire exploser la première bombe thermonucléaire sur un atoll corallien de l'océan Pacifique ; ce résultat fut obtenu en comprimant et chauffant à une température d'une centaine de millions de degrés une quantité convenable d'hydrogène au moyen d'une explosion nucléaire à fission.

Les choses se compliquent pour des réactions de fusion contrôlées. En 1954, à Harwell, quelques savants songèrent à construire une machine capable d'atteindre le seuil des températures thermonucléaires et susceptible de permettre la résolution de différents problèmes, comme le chauffage, le stockage et la stabilité du combustible.

LES CENTRALES THERMONUCLÉAIRES

Lorsque, en mai 1955, la première centrale électrique nucléaire entra en service près de Moscou, on crut qu'elle marquait l'avènement des centrales électriques alimentées par un combustible nucléaire et que les centrales électriques de type conventionnel (hydro-électriques et thermo-électriques) allaient disparaître en l'espace d'une génération. Nombreux étaient ceux qui pensaient que les centrales nucléaires allaient permettre de voir baisser le prix du kilowatt-heure. Mais la réalité ne fut pas conforme à ces prévisions.

La centrale soviétique, centrale pilote de dimensions réduites et d'une puissance d'environ 5 000 kW, constitua certes un précieux terrain d'études et d'expériences pour les physiciens, les chimistes et les ingénieurs, mais elle demeura longtemps unique pour différentes raisons, dont la plus importante était le coût de production, qui ne descendit jamais au niveau prévu. En outre, les installations pour la préparation du combustible nucléaire en quantité importante exigeaient des investissements très supérieurs aux prévisions et des temps de mise en service beaucoup plus longs. Les dispositifs de contrôle automatique indispensables au fonctionnement de ces centrales, délicats et complexes, exigèrent plusieurs années d'études. Les réacteurs disponibles ne se révélèrent pas adaptés à une installation simple ou à une régulation impliquant des passages fréquents entre puissances de régime très différent. Ainsi, les spécialistes durent étudier et expérimenter des réacteurs, des systèmes de refroidissement et de régulation, des dispositifs de sécurité entièrement nouveaux. En somme, le passage de l'installation réalisée en laboratoire de la centrale pilote de faible puissance à la grande installation capable de fonctionner à un régime économiquement concurrentiel se révéla beaucoup plus long et complexe qu'on ne l'avait cru.

L'ACCROISSEMENT DE LA PRODUCTION CHARBONNIÈRE ET LE « BOUM » DU PÉTROLE

Dans le même temps, des éléments nouveaux influençaient la production des combustibles conventionnels. Dans les dix années qui suivirent la Seconde Guerre mondiale, on assista à une augmentation colossale de la production d'acier, provoquant une très forte demande de charbon.

L'exploitation minière connut une nouvelle impulsion, qui eut pour résultat une réduction du coût du produit et l'arrivée sur le marché d'importantes quantités de charbon dont la qualité était impropre aux emplois de la sidérurgie. En outre, un très grand nombre d'installations à charbon de moyenne et de petite puissance furent transformées dans le but d'utiliser le mazout, tandis que baissait fortement la demande en charbon par les chemins de fer, en cours d'électrification ou de « diésélisation ». Ainsi, la centrale thermique de type conventionnel, alimentée par une chaudière fonctionnant au poussier de charbon, resta vite le seul débouché du charbon.

L'expansion extraordinaire du pétrole, due à la découverte de gisements nouveaux, et au développement prodigieux de la pétrochimie, mit sur le marché des quantités croissantes d'un sous-produit à haut pouvoir calorifique, le fuel, qui trouve aujourd'hui son principal usage dans les grandes centrales thermiques. Ces deux facteurs contribuèrent de manière déterminante à ralentir la diffusion des centrales à combustible nucléaire, en dépit des progrès importants réalisés dans ce domaine.

Archives Radaelli

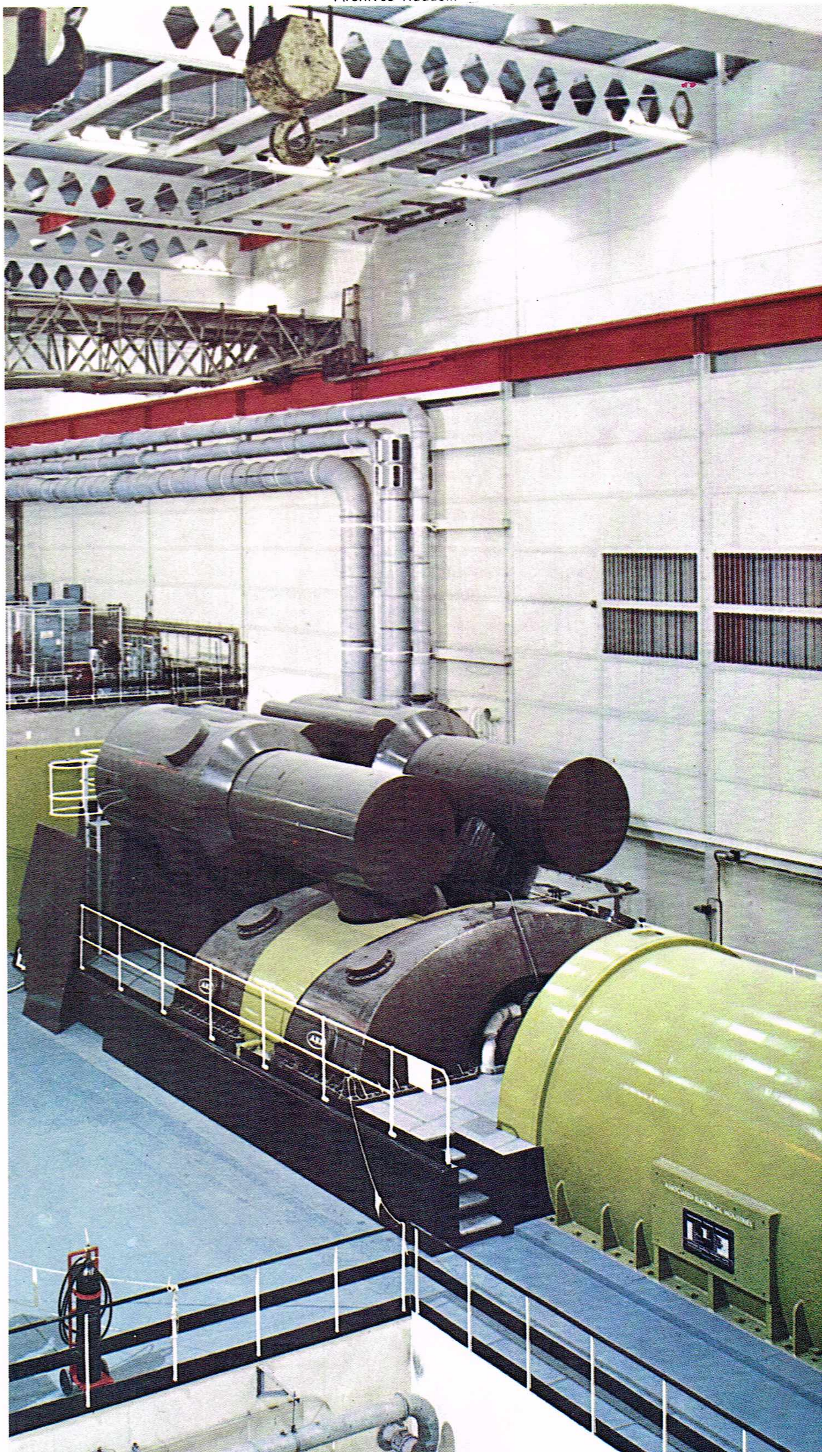

Salle des turbines de la centrale thermonucléaire de Winfrith (Grande-Bretagne).

LES AVANTAGES DES CENTRALES THERMONUCLÉAIRES

Actuellement, un certain équilibre s'est établi, du point de vue économique, entre centrales thermiques de type conventionnel et centrales à combustible nucléaire. Les facteurs qui militent en faveur de la centrale à fuel ou à charbon sont le coût du combustible et celui de l'installation (chaudières, turbines, installations électriques, dispositifs de régulation), dont la fabrication a bénéficié de procédés de standardisation qui en ont sensiblement abaissé le prix de revient. Mais, il faut fournir à la centrale thermique conventionnelle d'énormes quantités de combustible qu'elle brûle tous les jours. Aussi une centrale thermique doit-elle avoir une grande puissance pour être rentable et posséder des installations de très grande capacité pour son approvisionnement. Si elle fonctionne au charbon, elle consomme chaque jour le tonnage transporté par deux ou trois charbonniers (si elle est desservie par un port) ou par une vingtaine de trains de marchandises, si elle est dans l'arrière-pays, et exige d'énormes installations pour les opérations de chargement, déchargement et tri du charbon. Si elle fonctionne au fuel, les problèmes de stockage et de transport sont moins complexes mais pas moins impressionnants ; elle doit en effet posséder d'immenses réservoirs, reliés à un oléoduc ou à un port où puissent accoster des pétroliers. Les centrales qui fonctionnent au méthane ou autres combustibles gazeux doivent être munies de gazomètres et alimentées par un gazoduc. En outre, les centrales thermiques, par les fumées qu'elles dégagent et la grande quantité des sous-produits de la combustion, provoquent la pollution atmosphérique. Au contraire, la centrale nucléaire est tout à fait indépendante et entièrement « propre ». Un seul camion de tonnage moyen suffit à lui apporter le combustible qui lui permettra de fonctionner pendant plusieurs années. La centrale ne dégage ni fumée ni produit de scories d'aucune sorte ; elle n'a besoin ni d'aire de stockage ni de raccordements spéciaux aux systèmes de transport. Elle peut, par conséquent, être installée à proximité des zones où sera utilisée l'énergie produite, ce qui réduit au minimum le réseau des conducteurs électriques. Quant au danger que constituerait une centrale de ce type, celui-ci est absolument inexistant : un réacteur nucléaire ne comporte aucun danger d'explosion et même le plus grave des accidents n'aurait comme conséquence que l'arrêt des réactions en chaîne et non l'accélération de ces réactions jusqu'à l'explosion. Quant au risque de dissémination de matériaux radio-actifs, celui-ci est rendu impossible par la structure des installations ; en effet, tous les organes contenant ou pouvant contenir du matériau radio-actif sont enfermés dans des récipients métalliques ou en béton armé.

COMPÉTITIVITÉ DE LA CENTRALE NUCLÉAIRE

De nos jours, les centrales thermonucléaires coexisten, avec les centrales conventionnelles ; dans certains cas elles sont compétitives sur le plan économique, dans d'autres non.

Ainsi, la Grande-Bretagne a déjà installé de nombreuses centrales nucléaires qui doivent lui permettre de faire face à ses besoins croissants en énergie. Les mines de charbon anglaises, exploitées depuis très longtemps, sont en partie épuisées, et d'un fonctionnement trop coûteux. Les sources d'approvisionnement en combustible liquide sont très éloignées des îles Britanniques, alourdissant le coût du transport. L'industrie pétrochimique est bien développée, mais une grande partie du fuel obtenu comme sous-produit des différents processus est utilisée par d'innombrables industries en voie d'expansion. Si le climat des îles Britanniques est assez humide, en revanche, les massifs montagneux sont modestes et les cours d'eau encore plus ; donc, aucune des conditions pour le développement de centrales hydro-électriques ne se trouve réunie.

Les deux principales puissances industrielles, l'Union soviétique et les États-Unis, disposent, en revanche, de ressources colossales en combustible ; les cours d'eau et les bassins immenses les incitent à développer leurs centrales hydro-électriques et thermo-électriques et à ne réaliser qu'un nombre limité de centrales nucléaires.

La France se trouve dans une situation intermédiaire entre celle de la Grande-Bretagne, qui privilégie la centrale nucléaire, et celles des États-Unis ou de l'Union soviétique, plus favorables aux centrales conventionnelles.

Dans notre pays, l'énergie hydro-électrique a une place importante mais insuffisante, et les sites favorables à la création de barrages sont presque tous exploités.

Quant aux importations de pétrole, la remontée des prix fait que le nucléaire devient compétitif.

Après Marcoule, Chinon, Saint-Laurent, Bugey 1, les centrales de Fessenheim en Alsace et Bugey 2 et 3 près de Lyon vont être mises en service.

Les partisans de ces centrales considèrent que « face aux puissances pétrolières, l'indépendance de l'Europe passe par le nucléaire ».

Le réacteur rapide de Dounreay (Grande-Bretagne).

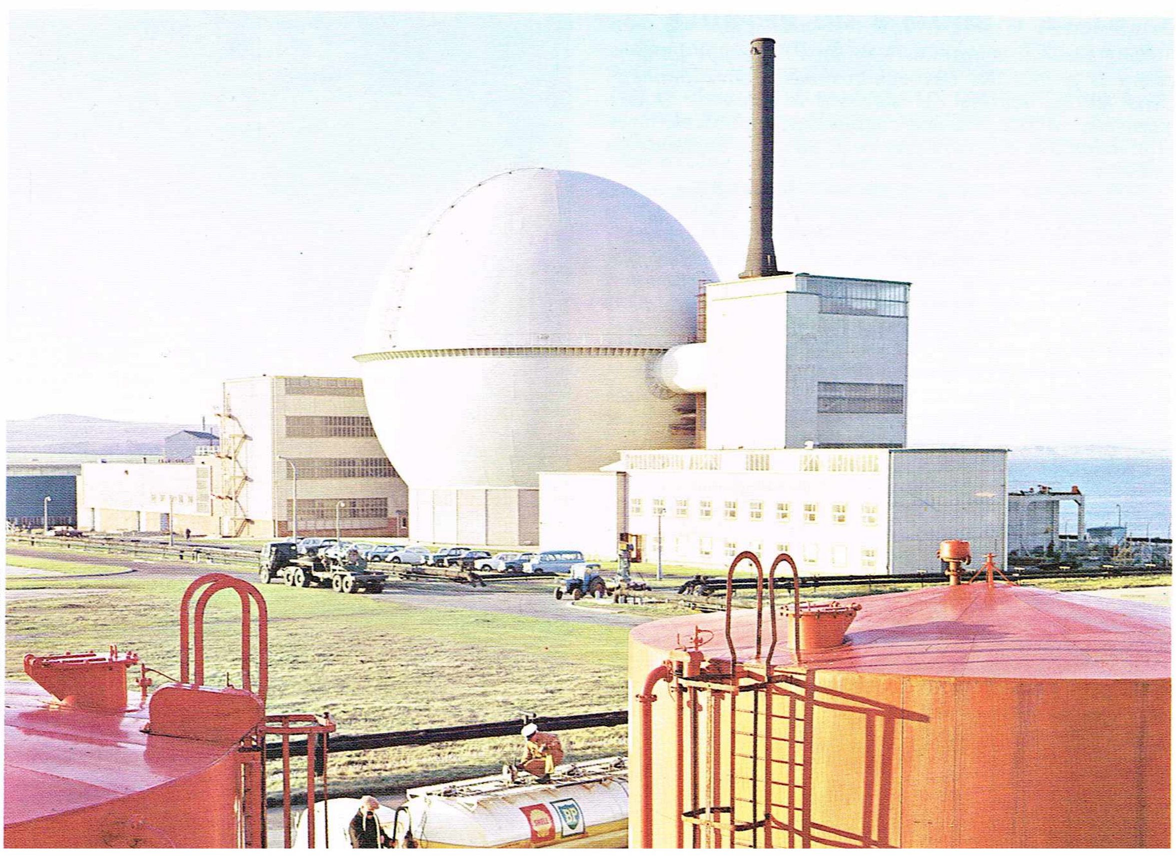

Archives Radaelli

LA PROPULSION NUCLÉAIRE

En règle générale, tout système capable de fournir de l'énergie de manière contrôlée peut être utilisé pour la propulsion d'un engin mobile, qu'il soit à usage terrestre, naval, aérien ou même spatial; cependant il existe des limites techniques et économiques aux possibilités de réalisation et d'application.

En ce qui concerne les applications de l'énergie nucléaire fournie par des réacteurs, les premières limites résident dans les dimensions importantes des réacteurs nucléaires actuels par rapport à la puissance qu'ils sont capables de fournir. En d'autres termes, un réacteur, conçu comme élément de base d'un système moteur, offre un rapport poids-puissance nettement défavorable par rapport aux moteurs thermiques de type conventionnel (à explosion, à turbines à gaz, etc.). Si, dans une centrale nucléaire, cela a peu d'importance, car il s'agit alors d'installations fixes, en revanche, des difficultés sérieuses surgissent lorsqu'il faut concevoir un véhicule à propulsion nucléaire qui doit transporter une véritable centrale pour produire l'énergie nécessaire au fonctionnement du moteur proprement dit.

LE « SAVANNAH » ET LE « LÉNINE »

La propulsion nucléaire a été utilisée dans le domaine naval à des fins à la fois expérimentales et militaires. Jusqu'à ce jour, il n'existe que deux navires civils équipés d'un tel système propulseur : le Savannah *américain et le brise-glace soviétique* Lénine. *Du point de vue expérimental, l'un et l'autre représentent un remarquable succès, car ils ont permis la mise au point d'un nouveau type d'appareil propulseur, éprouvé sur une période suffisamment longue. La phase expérimentale achevée, le* Savannah *a été désarmé, son exploitation étant plus onéreuse que celle d'un bateau-cargo conventionnel. Le* Lénine *est encore en service, mais aucune autre unité de ce type n'a été construite; sa caractéristique la plus intéressante, liée précisément à son principe de propulsion, réside dans le fait que ce bateau est capable d'accomplir les parcours les plus longs sans avoir besoin de s'approvisionner en carburant, à l'inverse des brise-glace munis d'un moteur thermique traditionnel. Ces navires ont une progression très lente, puisqu'ils doivent, avec leur proue, rompre la banquise et broyer la glace; l'appareil moteur doit donc être très puissant, ce qui entraîne une consommation de combustible élevée, si bien qu'ils sont suivis habituellement d'un bateau-citerne transportant du carburant pour leur approvisionnement. En revanche, le* Lénine *peut se passer de cette unité, puisqu'il n'a besoin de se réapprovisionner en combustible nucléaire que tous les deux ou trois ans.*

L'énorme autonomie que permet un système de propulsion à énergie nucléaire a conduit à envisager l'utilisation de celui-ci dans les sous-marins. On ne connaît pas exactement le nombre de sous-marins atomiques en service ou en construction, mais on possède divers renseignements sur leurs performances. Ils peuvent parcourir, sans escale, une distance de cinq à dix fois la circonférence terrestre et naviguer pendant environ deux ans. Des sous-marins américains de ce type sont passés à plusieurs reprises sous la calotte glaciaire arctique. De tels engins, dotés de missiles à moyenne portée, pouvant transporter une tête nucléaire, ont modifié la stratégie mondiale, puis qu'ils sont capables d'intervenir dans des zones très éloignées de leur base, de manière absolument imprévisible, puisqu'il est pratiquement impossible de détecter un sous-marin naviguant à une centaine de mètres de profondeur. Cependant, la mise au point de missiles balistiques intercontinentaux a rendu discutable l'utilité stratégique des sous-marins à propulsion nucléaire.

Le sous-marin à propulsion nucléaire, *Alexander Hamilton,* de la marine américaine.

Archives Radaelli

AUTRES PROJETS D'APPLICATIONS DE LA PROPULSION NUCLÉAIRE

La propulsion nucléaire terrestre posant des problèmes difficiles à résoudre, aucune réalisation de prototypes n'a été entreprise ; ils existent uniquement à l'état de projets ou de plans.

Citons un projet de convoi ferroviaire utilisant un réacteur nucléaire pour produire la vapeur destinée à actionner une turbine couplée à un alternateur, les moteurs de traction étant électriques. Ce projet prévoit une puissance à l'essieu de l'ordre de dix mille chevaux, puissance qui excède largement les besoins nécessaires en matière de chemin de fer; de plus, l'ensemble moteur occupe les deux tiers du volume global du convoi; la place disponible restante ne présente alors aucun intérêt économique.

La situation est tout à fait différente quant à l'utilisation de l'énergie nucléaire dans le domaine spatial. En effet, elle constitue une solution du plus grand intérêt, dans l'optique de l'exploration systématique de l'espace. Cependant l'image du vaisseau cosmique entraîné par des propulseurs nucléaires vers des mondes lointains appartient et appartiendra encore longtemps à la science-fiction.

Pour mouvoir un engin dans l'espace, il faut qu'une certaine quantité de matière, sous forme de gaz (ou d'ions), soit éjectée à grande vitesse par l'appareil propulseur. Pour obtenir ce résultat, il est nécessaire de produire à bord l'énergie utile pour communiquer la vitesse voulue au matériau gazeux à éjecter. L'engin spatial doit donc comporter un générateur capable de fournir cette quantité d'énergie et ce matériau. Dans la fusée à propulsion chimique, ces fonctions sont associées : le combustible et le comburant réagissent entre eux et donnent naissance à une certaine quantité d'énergie sous forme de chaleur, qui est utilisée pour accélérer et éjecter à grande vitesse les produits de combustion.

Mais, dans les missiles chimiques, il existe des limites théoriques qui ne pourront jamais être dépassées. En effet, en utilisant l'oxygène et l'hydrogène, la quantité d'énergie dégagée est de 3,59 kilocalories par gramme de « mélange » brûlé. En employant des composés du fluor, on obtient environ 4 kilocalories par gramme. Si l'on pouvait utiliser l'oxygène ou l'hydrogène non à l'état moléculaire mais à l'état atomique, on pourrait obtenir 11 kilocalories par gramme. Dans de telles conditions, la vitesse d'expulsion des gaz est relativement faible : une vitesse de 5 kilomètres/seconde semble être l'extrême limite. Il sera très difficile d'aller au-delà, car cela entraînerait, dans les chambres de combustion, des températures et des pressions incompatibles avec les structures constituant l'appareil propulseur de la fusée.

LES MOTEURS IONIQUES ET A PLASMA

On peut cependant imaginer un appareil moteur de type « physique », mû par une source d'énergie différente capable d'accélérer un flux de matière, sous forme de gaz ionisé ou de plasma, à des vitesses sensiblement supérieures. En utilisant un moteur simple, la vitesse d'éjection du gaz peut atteindre environ 20 km/s. Avec des moteurs plus complexes, il est possible d'augmenter davantage l'état d'ionisation du gaz chauffé et de l'accélérer à plus de cent kilomètres par seconde. Ainsi, utilisé pour la propulsion d'un engin spatial, ce moteur pourrait éjecter dans l'unité de temps, à poussée égale, une quantité de matière beaucoup plus faible qu'une fusée de type chimique. L'énergie électrique nécessaire pour chauffer, ioniser et accélérer le jet de plasma devra cependant être fournie par une centrale installée à bord, d'un poids et d'un encombrement modérés et capable de fournir une puissance importante.

Les moteurs ioniques et les moteurs à plasma sont actuellement en cours d'étude et d'expérimentation (les satellites soviétiques du type Yantar *les utilisent depuis quelques années déjà pour les changements d'orbite et d'orientation).*

Mais des difficultés technologiques limitent à environ un kilogramme la valeur de la poussée que ces moteurs sont capables de développer, pour un poids de plusieurs kilos, sans compter celui de la source d'énergie électrique. Il est donc inconcevable, pour le moment, de songer à les utiliser comme moteurs principaux d'un « navire » cosmique. Il est cependant possible de les employer comme moteurs auxiliaires, en les alimentant, éventuellement, à l'aide de batteries solaires.

Le problème, bien que complexe sur le plan de la réalisation, est théoriquement parfaitement défini. Si la propulsion chimique se heurte à certaines limites, il ne semble pas impossible de réaliser dans l'avenir des appareils propulseurs de type électrique (à ions ou à plasma) de puissance suffisante, alimentés par des centrales nucléaires. Mais pour atteindre un tel résultat, il faudrait augmenter de plusieurs millions de fois la poussée de ce type de moteur, et réduire d'autant le poids de la centrale électrique à combustible nucléaire associée. Dès à présent, des études se développent dans différents pays.

Le *« Savannah »*, premier navire marchand à propulsion nucléaire : lancé en juillet 1959, et désarmé en février 1967 à cause du coût élevé de son exploitation.

P.R.I.

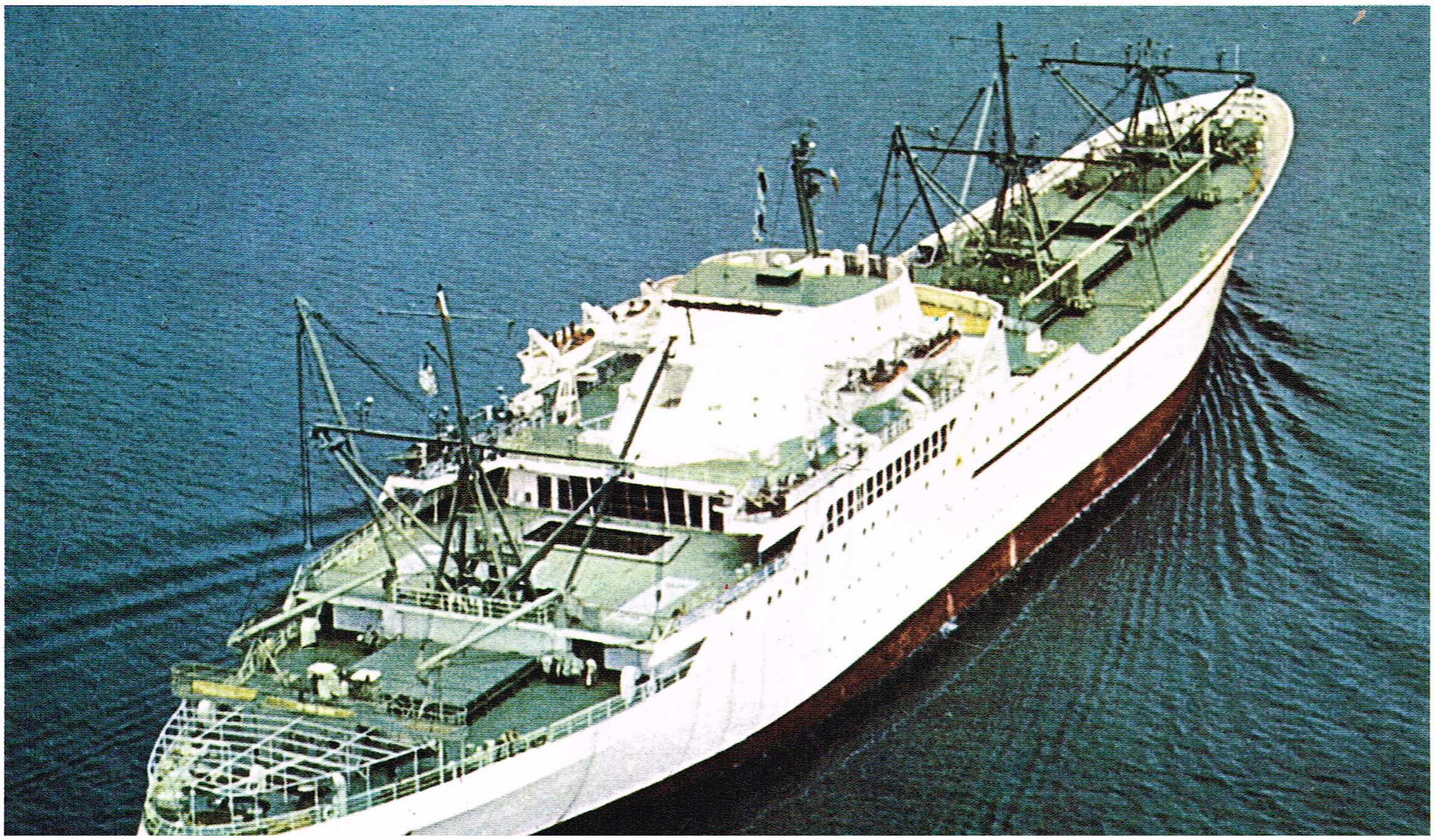

MINIATURISATION ET MICROMINIATURISATION

Société générale des semi-conducteurs

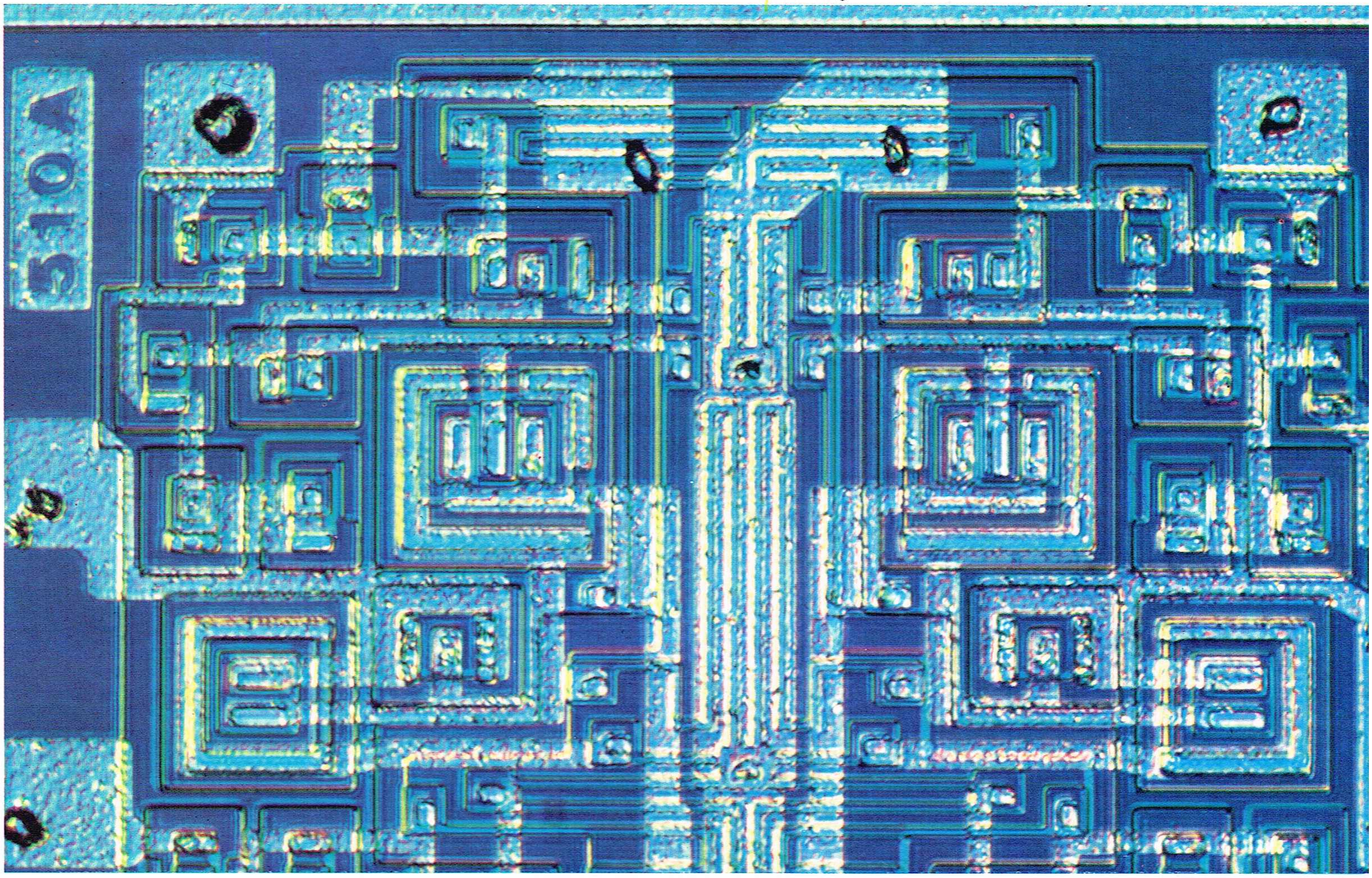

Circuit intégré de type digital pour calculateur de type logique.

Dès avant 1939, des procédés nouveaux dits de « miniaturisation » et visant à donner aux composants les plus petites dimensions possibles sont apparus dans l'électrotechnique et surtout dans l'électronique.

Au temps des premiers récepteurs radio, immédiatement après la guerre 14-18, une « lampe thermo-ionique » avait les dimensions d'une bouteille d'un demi-litre, un condensateur normal était gros comme une savonnette et les bobines avaient des dimensions respectables. Au moment du grand essor de la T. S. F., vers 1935, ces dimensions s'étaient déjà fortement réduites : une lampe n'avait plus qu'une dizaine de centimètres de hauteur et quatre ou cinq de diamètre, un condensateur avait la taille d'une fusette, les résistances dites « chimiques » avaient quelques millimètres de diamètre et quelques centimètres de longueur.

Pendant la guerre, la taille des composants subit une nouvelle réduction et, peu de temps après la fin du conflit, on vit apparaître les premières lampes « miniatures », d'une longueur de quatre ou cinq centimètres et d'un diamètre de deux centimètres; celles-ci permirent l'avènement du téléviseur. S'il avait fallu utiliser, pour la fabrication de ce dernier, les lampes d'avant-guerre, on aurait eu des appareils aux dimensions absolument inacceptables. Les autres composants essentiels de l'électronique voyaient, eux aussi, leur taille se réduire : de nouveaux films en matière plastique (P. C. V., polystyrène) et de nouveaux procédés de métallisation permirent d'obtenir des condensateurs toujours plus petits; de nouveaux mélanges et des techniques inédites pour la fixation des bornes des conducteurs entraînèrent une importante réduction des dimensions des résistances, tandis que les bobines, constituées désormais de fils très minces et soigneusement calibrés, n'avaient plus, même dans les téléviseurs, que les dimensions d'une boîte d'allumettes.

Dans le même temps, la taille des composants subissait une forte réduction : les relais téléphoniques, dans les centraux automatiques, devenaient extrêmement petits, et tous les appareillages, y compris ceux de l'électronique dite de puissance (télérupteurs, contacteurs, interrupteurs), voyaient leurs dimensions réduites au moins de moitié. Cette course à la réduction intéressait aussi le domaine des appareils de grande puissance, favorisée par la découverte de matériaux nouveaux, en particulier des isolants plus efficaces (peintures, vernis, rubans de verre, lamelles magnétiques à cristaux orientés, etc.).

LE CIRCUIT IMPRIMÉ ET LE TRANSISTOR

Un élément d'une extrême importance apparut il y a une vingtaine d'années : le circuit imprimé. C'est un support isolant, grand à l'origine comme une page de livre, et sur lequel on reproduit, par un procédé photographique ou d'autres techniques, un circuit constitué par une mince lamelle de cuivre, obtenu grâce à un « dessin » comportant des pleins et des vides. Aux endroits voulus, on soude les connexions des différents composants (résistances, condensateurs, etc.) ; on remplace ainsi un circuit formé d'un châssis, de câbles et de supports isolants par une « plaquette » équipée de tous ses composants et se terminant par une ou plusieurs connexions. Le gain de place et l'abaissement des coûts sont considérables. La découverte des semi-conducteurs donna une impulsion encore plus énergique à la miniaturisation ; en effet, le transistor, beaucoup plus petit qu'une diode ou une triode de caractéristiques analogues, dégage peu de chaleur. Par conséquent, il devient possible de réduire encore plus les dimensions de l'ensemble, car il exige un système d'alimentation moins puissant.

Tout en conservant ses caractéristiques de base le circuit imprimé devint apte à recevoir pratiquement tous les composants électroniques (sauf, bien entendu, les condensateurs, les potentiomètres et les haut-parleurs). Ce fut la naissance des petits appareils portatifs : « transistors », tourne-disques, téléviseurs à piles, etc. Mais la grande « révolution » entraînée par la miniaturisation a intéressé surtout le secteur industriel.

L'électronique industrielle et le secteur des télécommunications se sont enrichis d'une multitude de composants à semi-conducteurs, de condensateurs microscopiques (à film métallisé de polypropylène ou de maylar) et de résistances dont la taille minuscule ne permet même pas l'inscription d'une indication lisible, à tel point qu'il faut les reconnaître par des bandes de couleur.

Dans le domaine de l'électronique industrielle, les plaquettes à semi-conducteurs et éléments miniaturisés ont proliféré à très grande vitesse, réduisant considérablement les dimensions des différents appareillages.

Dans le domaine des télécommunications, la miniaturisation a permis, par exemple, de réduire dans la proportion de dix à un les dimensions des centraux téléphoniques, de rendre infiniment moins encombrants les systèmes radar, les relais radio, etc. Les calculateurs électroniques ont bénéficié, eux aussi, d'une réduction considérable.

Simultanément, les semi-conducteurs de puissance remplaçaient, dans les appareils de forte puissance, les encombrantes lampes redresseuses à vapeurs de mercure et rendaient compétitifs, dans un grand nombre d'applications, les moteurs à courant continu, munis d'un système de régulation permanente de la vitesse, par rapport aux moteurs à courant alternatif, à vitesse constante, dotés de variateurs de vitesse mécaniques.

La miniaturisation a été rendue possible par les progrès de l'industrie. Pour obtenir les matériaux convenant à la réalisation des semi-conducteurs (des impuretés accidentelles n'y peuvent être présentes que dans la proportion d'environ une pour dix millions), il faut des appareillages d'une conception entièrement nouvelle, hermétiquement fermés, de telle sorte que le matériau ne se trouve jamais en contact avec l'opérateur avant l'achèvement du traitement et la pose d'une couche de protection. Pour fabriquer des films isolants d'une épaisseur de quelques centièmes de millimètre, d'autres machines complexes sont nécessaires, de même que pour réaliser la métallisation des semi-conducteurs, qui doit être exécutée sous vide, à une température rigoureusement contrôlée et selon des procédés absolument inédits.

Un exemple saisissant de microminiaturisation ; des milliers de circuits intégrés, employés dans les plus récents calculateurs électroniques IBM ; le bout de crayon permet, par comparaison, d'en apprécier la taille.

I.B.M.

DE LA MINIATURISATION A LA MICROMINIATURISATION

La technique de ces dernières années a largement dépassé le stade de la miniaturisation pour entrer dans celui de la microminiaturisation, caractérisée par la réalisation de composants de dimensions encore plus réduites. Voici deux ou trois ans, pour montrer au public les performances que cette technologie nouvelle était capable d'accomplir, on a réalisé des récepteurs radio dont les dimensions (en ne tenant pas compte de l'écouteur et d'un petit condensateur variable) étaient celles d'un timbre-poste, avec une épaisseur de deux millimètres. Le stade du circuit imprimé comportant des soudures à l'étain au niveau des connexions des différents composants était ainsi dépassé. Le circuit de l'appareil était formé par un mince support isolant, sur lequel on avait « rapporté » successivement des couches micrométriques de matériaux métalliques divers en reproduisant sur chacune des « dessins » bien définis au moyen de caches comportant des vides et des pleins différemment disposés. Deux couches micrométriques de nickel et de chrome formaient les résistances ; trois couches superposées d'aluminium et d'oxyde d'aluminium les condensateurs ; un très mince réticule d'or les connexions. En des points précis étaient soudés des microtransistors et des microbobines, opération exécutée au laser, sous vide, au moyen de manipulateurs micrométriques motorisés et sous contrôle microscopique.

C'était la naissance du « circuit intégré » ; les dimensions de ce dernier subirent ensuite une réduction encore plus poussée, tandis que sa structure s'enrichissait progressivement de nouveaux composants, notamment des semi-conducteurs. Il existe aujourd'hui dans le commerce des circuits intégrés dont la taille ne dépasse pas celle d'un bouton et qui comportent une dizaine de fils de sortie ; ce sont des dispositifs capables de remplir (à un niveau de puissance très inférieur, mais avec une égale précision) les mêmes fonctions qui étaient assurées, voici peu d'années seulement, par une plaquette au format d'une carte postale et au poids de vingt ou trente grammes au moins et, il y a vingt ans, par une plaque d'un poids de un à deux kilos.

On emploie toujours des plaquettes, car, pour nombre de fonctions, il est exigé des puissances qui excluent le recours aux circuits intégrés, mais une même plaquette peut porter un nombre considérable de circuits intégrés, outre des composants de plus grande puissance, et assumer des fonctions très complexes en dépit de son volume très réduit et de son poids absolument négligeable. Mais alors — se demandera-t-on —, vu l'énorme diffusion de la microminiaturisation dans le domaine de l'électronique industrielle, des télécommunications, des calculateurs électroniques, que se passe-t-il lorsqu'un microcomposant se détériore ? Bien sûr, il est impossible d'effectuer une réparation, même en disposant des moyens très perfectionnés d'un laboratoire bien équipé. La solution adoptée est tout autre : les diverses fonctions assurées par l'appareil électronique dans son ensemble sont matériellement regroupées dans une plaquette spéciale qui commande des circuits d'alerte, qui, au moyen de témoins lumineux ou autres, signalent la fonction défaillante. Il est ainsi possible de localiser la panne et d'y remédier en remplaçant la plaquette ou tout le panneau défectueux par une pièce de rechange. Le laboratoire décidera ensuite s'il convient ou non de réparer la pièce détériorée en fonction du coût de l'intervention.

Il est à peine nécessaire de souligner l'importance de la microminiaturisation dans le domaine spatial et dans celui de la recherche.

LES SEMI-CONDUCTEURS

Dans les progrès extraordinaires accomplis par l'industrie, l'électronique a joué et continue de jouer un rôle de premier plan. La découverte et l'introduction d'éléments miniaturisés ont permis à l'électronique de se répandre dans toutes les branches d'activité, abaissant les coûts de production, et améliorant les performances et la qualité. Ce mouvement de transformation a débuté avec la découverte du « transistor » due aux Américains John Bardeen et Walter Brattain, tous deux prix Nobel de physique et attachés aux laboratoires de la société Bell Telephone ; cette découverte constituait l'aboutissement d'études et d'expérimentations entreprises dix ans plus tôt par le physicien américain William Shockley ; c'était en 1948.

Le mot « transistor » provient de la contraction de deux vocables anglais : transfer *et* resistor *; en effet, cet élément fondamental de l'électronique constitue un compromis entre un « conducteur »* (transfer) *et une « résistance »* (resistor). *Ce fut le début de l'ère des « semi-conducteurs », qui allaient remplacer les lampes thermo-électroniques dans la fonction d'amplification des signaux électriques et ce, grâce à leur structure moléculaire très particulière.*

Le phénomène de conduction et d'amplification est dû au déplacement d'électrons libres sous l'influence d'une excitation électrique, qui contrôle ce déplacement. Une des propriétés des semi-conducteurs est d'assurer la conduction de signaux électriques de très faible intensité, alors que les lampes thermo-ioniques exigeaient une intensité relativement plus élevée ; en outre, en raison de la simplicité de sa structure et du mode de conduction, un transistor a une durée de vie exceptionnelle, ce qui l'oppose encore aux tubes à vide (lampes), à usure rapide. Les semi-conducteurs sont sensibles aux variations de température ; en effet, si les électrons libres sont facilement excités par des signaux électriques de faible intensité, ils le sont tout autant, à cause précisément de leur très grande mobilité, par les variations de température.

Chaque type de transistor se caractérise par un intervalle de température (indiqué par un minimum et un maximum) à l'intérieur duquel il fonctionne correctement ; cet intervalle fait partie des spécifications signalées par les fabricants. En dehors de cet intervalle, outre le mauvais fonctionnement, on risque la détérioration définitive de l'élément.

TRANSISTORS AU GERMANIUM ET AU SILICIUM

Les « dispositifs à l'état solide » sont constitués généralement de germanium ou de silicium. Les caractéristiques des premiers sont : faible tension d'alimentation, gain élevé d'amplification aux basses températures, plus grande mobilité des électrons libres (trois fois supérieure à celle du silicium), donc meilleur rendement aux fréquences de travail élevées ; les caractéristiques des seconds : hautes températures de travail (plus de 200 °C, deux fois supérieures à celles du germanium), permettant de véhiculer, à taille égale, une plus grande puissance, grande stabilité de fonctionnement pour des courants de faible intensité.

Pour modifier la conductivité et donc le comportement d'un cristal semi-conducteur, on le soumet à un traitement appelé « dopage » qui consiste à introduire, dans le cristal, des impuretés d'autres substances (arsenic ou indium, selon la nature du cristal à modifier), augmentant le nombre d'électrons libres, donc la conductibilité ; celle-ci sera négative (semi-conducteurs de type N) si l'impureté est constituée par un corps « donneur » d'électrons, ou positive (semi-conducteurs de type P) dans le cas d'un corps « accepteur » d'électrons et qui, de ce fait, crée des « trous » dans les liaisons électroniques de covalence. Tous les transistors comportent des zones de dopage différentes selon la fonction qu'ils doivent accomplir : la conductivité résulte de la possibilité, pour les électrons libres, de changer de zone, en franchissant une « barrière », sous l'effet d'une influence extérieure, telle une tension électrique, une variation de température.

S.G.S.

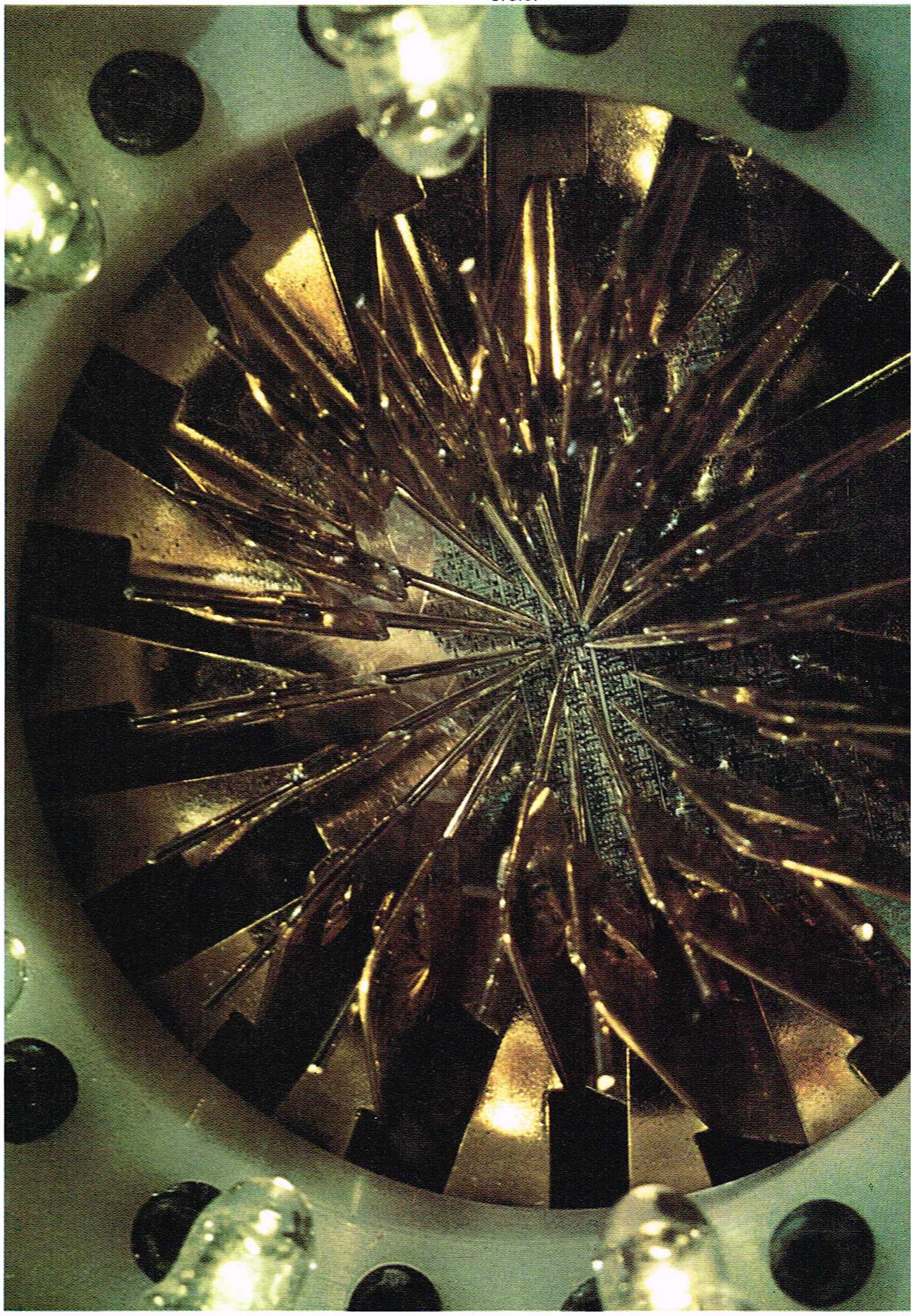

Contrôle électrique automatique de circuits intégrés.

La production des semi-conducteurs à l'échelle industrielle a débuté en 1954 ; puis les techniques de fabrication se sont perfectionnées, entraînant une amélioration des performances. Des méthodes de fabrication « à jonction », on est passé au procédé dit « planar », rendu possible par l'introduction du silicium, procédé qui a marqué la première étape dans la réalisation des circuits imprimés, d'abord simples puis de plus en plus complexes. Le transistor a remplacé complètement les lampes radio dans les circuits électroniques, car il facilite la réalisation des circuits d'un encombrement réduit (circuits imprimés), avec suppression des connexions par câbles (une des causes de pannes) ; en outre, puisque les tensions d'alimentation sont considérablement réduites, on a pu diminuer notablement l'encombrement des alimentations et abaisser dans une égale proportion les coûts de production.

On peut affirmer que toute l'électronique moderne repose sur l'emploi des semi-conducteurs, depuis les instruments de télécommunications jusqu'aux ordinateurs.

Tous les appareils électroniques ont vu leur taille décroître progressivement, et, pour s'en convaincre, il suffit de comparer un récepteur radio d'avant-guerre avec un « transistor » de poche d'aujourd'hui.

S.G.S.

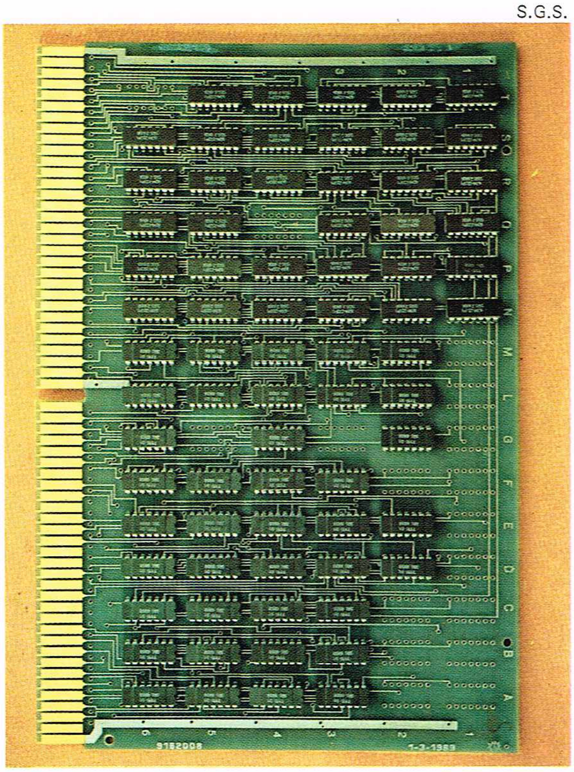

Ci-dessus : plaquette de circuit imprimé pour calculateur électronique, contenant 73 circuits intégrés.

LES CIRCUITS INTÉGRÉS

L'avènement des circuits intégrés a eu des répercussions encore plus importantes que la découverte du transistor.

Introduits dans l'électronique pour donner une solution plus radicale au problème de la miniaturisation, les circuits intégrés sont d'un intérêt incomparable. Non seulement ils peuvent remplacer les transistors et les autres composants employés jusqu'à présent (résistances, condensateurs, bobines, diodes) dans les circuits, mais ils permettent des applications qui n'étaient pas envisageables avec les transistors. Le principal inconvénient que présentent les appareillages complexes comportant un grand nombre de composants réside dans la fréquence des pannes de fonctionnement ; or, le circuit intégré a pratiquement supprimé cet inconvénient, car chaque élément assure, à lui tout seul, les fonctions qui étaient précédemment dévolues parfois à un millier de composants.

Actuellement, les circuits fabriqués en micro-électronique sont divisés en quatre catégories : monolithiques, hybrides à chips, hybrides à couches épaisses, hybrides à couches minces. Les circuits monolithiques (ou circuits intégrés), qui sont l'évolution directe des transistors planars, sont constitués par un cristal de silicium unique (d'où le qualificatif de « monolithiques ») ; les différents composants actifs (transistors et diodes) et passifs (résistances, condensateurs et impédances) sont formés selon un processus de diffusion progressive et subissent un traitement de métallisation, qui assure leur connexion. Cette technique permet une production massive et à faible coût.

Les circuits hybrides à chips sont constitués par la réunion d'éléments actifs et d'éléments passifs dans une enveloppe unique, connectés entre eux au moyen de fils capillaires en or. Cette technique permet des réalisations très variées et un coût acceptable pour les petites séries, mais trop élevé pour les séries importantes.

Les circuits hybrides à couches épaisses sont réalisés selon une technique qui utilise un procédé sérigraphique à l'aluminium sur un support de céramique pour la connexion des éléments passifs, opération suivie par la soudure des éléments actifs (on peut, si on le désire, introduire des circuits intégrés monolithiques). Cette technique permet de réaliser n'importe quel circuit électronique transistorisé. Les circuits à couches minces diffèrent des précédents par le fait qu'ils sont réalisés sur verre ou céramique, en opérant sous un vide poussé ; dotés de caractéristiques de fonctionnement exceptionnelles, ces circuits exigent cependant l'emploi de machines très sophistiquées pour leur fabrication. Ils sont sans doute appelés à connaître un très grand développement.

Tous les composants employés dans les circuits transistorisés ne peuvent être reproduits avec les mêmes dimensions dans les circuits intégrés ; par conséquent, la technique des circuits intégrés ne s'applique pas à tous les composants existants (par exemple, une résistance de plus de 10 millions d'ohms ne peut être reproduite dans aucun type de microcircuit). Cela a amené les ingénieurs à modifier radicalement, dans bien des cas, leurs projets, pour tenir compte des limites imposées par les caractéristiques des circuits intégrés ; en particulier, on a réduit au minimum indispensable le nombre d'éléments passifs dans les circuits intégrés, que l'on a remplacés par des éléments actifs dans les fonctions qu'ils assuraient.

Pour finir, et à titre de curiosité, signalons que, dans un volume d'un décimètre cube, peuvent prendre place trois composants d'un téléviseur normal, ou une centaine de transistors, ou un millier de circuits intégrés monolithiques, ou, enfin, des dizaines de millions de circuits tout récemment mis au point, dits LSI (Large Scale Integration = intégration à grande échelle). Si l'on pense que le même volume peut contenir presque dix milliards de cellules du cerveau humain, on mesure tout à la fois les progrès rapides de la technique et le chemin qui s'ouvre encore devant elle.

Accroissement de la couche épitaxiale sur les tranches de silicium monocristallin destinées à la réalisation de circuits intégrés.

S.G.S.

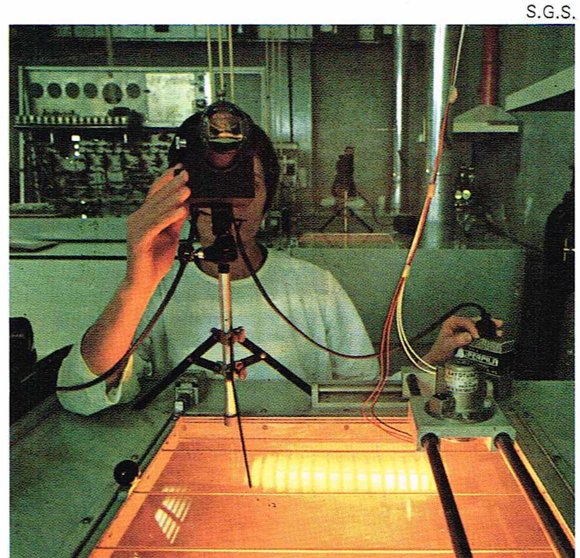

LES ORDINATEURS

Le calculateur électronique ou ordinateur est un dispositif qui réalise des opérations logiques avec ou sans l'intervention de l'homme. La diffusion des ordinateurs est devenue, au cours des dernières années, très rapide : il suffit de penser qu'un seul existait en 1945, 30 000 en 1965, 85 000 en 1975. La caractéristique essentielle de ce type particulier de machine consiste à élaborer des informations. Elles constituent les éléments d'échange indispensables à toute communication entre les hommes, ou entre l'homme et la machine. L'une des tâches typiques d'un calculateur est l'exécution d'opérations arithmétiques ; c'est pour effectuer ces opérations que naquirent les premières machines à calculer, depuis le boulier japonais jusqu'au calculateur à roues de Pascal. Ce dernier était une machine à engrenages semblable à un tachymètre.

Plus tard, Leibniz perfectionna la machine de Pascal et la rendit capable d'effectuer des multiplications, des divisions et même des extractions de racines. Mais le vrai précurseur des calculateurs électroniques modernes fut Charles Babbage. Vers 1840, il entreprit de construire le premier calculateur, mais il ne put mener à bien son entreprise, faute de moyens techniques. La « machine analytique » de Babbage est très importante, car elle renferme les principes fondamentaux de fonctionnement qui sont à la base des ordinateurs modernes : l'introduction des données au moyen de fiches perforées, l'unité de calcul, la mémoire d'accumulation, l'impression mécanique, la programmation, le contrôle séquentiel du programme, etc.

Après l'échec de Babbage, qui ne put réaliser une machine capable d'effectuer de manière rapide et sûre les opérations prévues dans un programme, il s'écoula plusieurs années avant l'avènement des dispositifs électromécaniques (relais) et électroniques (lampes, semi-conducteurs) qui permirent la construction de calculateurs élaborés. Le calculateur à relais était mille fois plus rapide que la machine de Babbage, le calculateur à lampes mille fois plus rapide que le précédent et le calculateur à semi-conducteurs (l'ordinateur moderne) encore mille fois plus rapide. Nous disposons donc aujourd'hui de machines douées d'une vitesse de fonctionnement environ mille millions de fois supérieure à celle des machines mécaniques.

LE LANGAGE DE L'ORDINATEUR

Un ordinateur est constitué par un ensemble d'unités ou organes : l'unité d'entrée et de sortie, l'unité de calcul, l'unité de mémoire et l'unité de contrôle. La première permet la communication de l'ordinateur avec l'homme ou une autre machine ; la deuxième effectue les différentes opérations de calcul prévues ; la troisième est chargée de conserver les instructions du programme, la dernière enfin gère et contrôle toutes les précédentes selon les instructions du programme.

Pour communiquer avec un ordinateur, il faut parler « son langage » ; celui-ci, appelé langage de base, *consiste en une série d'instructions codées, qui correspondent chacune à une certaine opération du calculateur. Ces langages, difficiles à manier, sont différents pour chaque type de machine. Il est donc nécessaire de disposer de langages plus simples et plus courts, de telle sorte qu'une seule instruction puisse commander à la machine de réaliser plusieurs opérations. Parmi ces langages symboliques, les plus connus sont le Fortran* (Formula Translation), *l'Algol* (Algorithmic Language), *le Cobol* (Common Business Oriented Language).

A. Rizzi

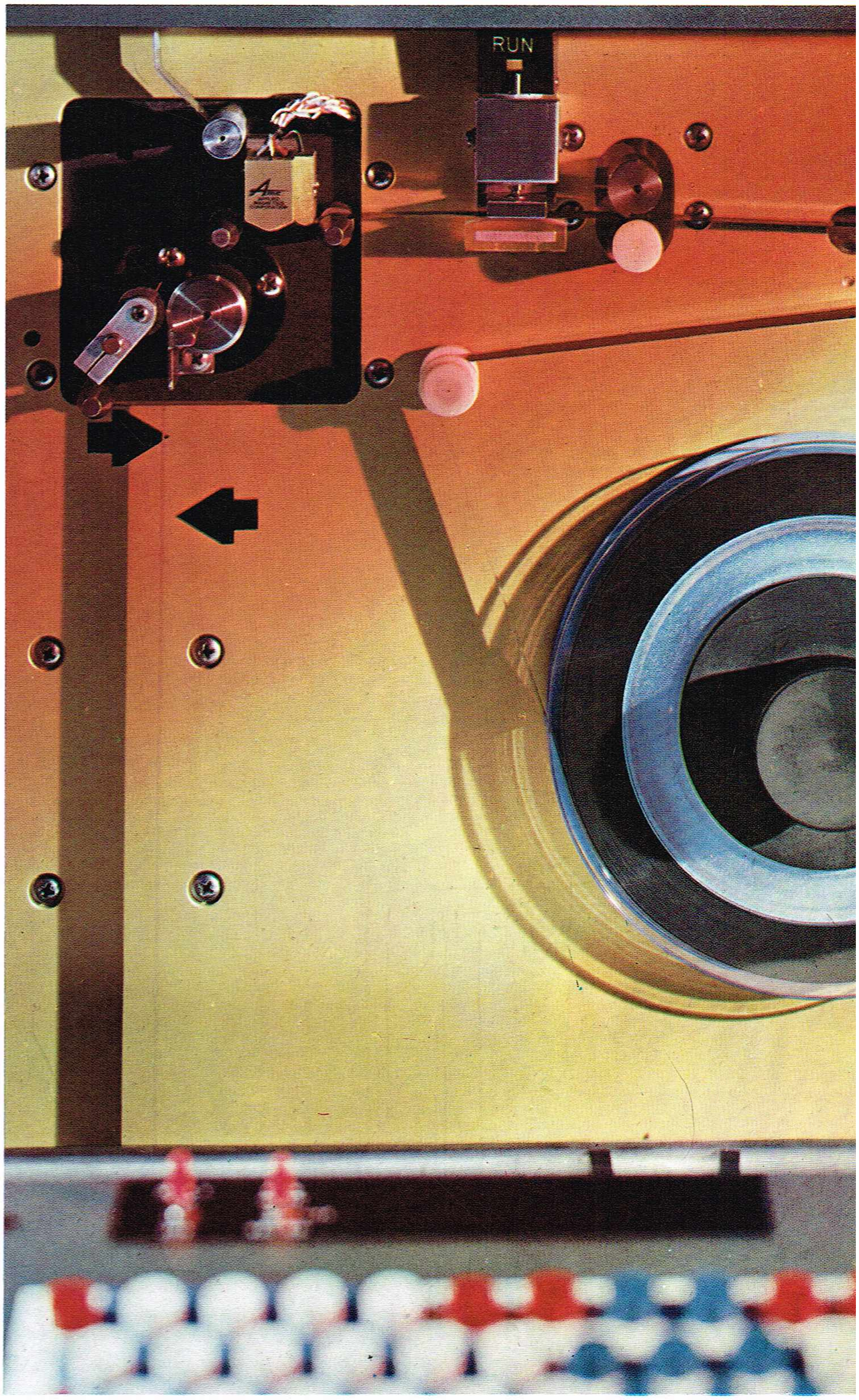

Détail d'un calculateur électronique.

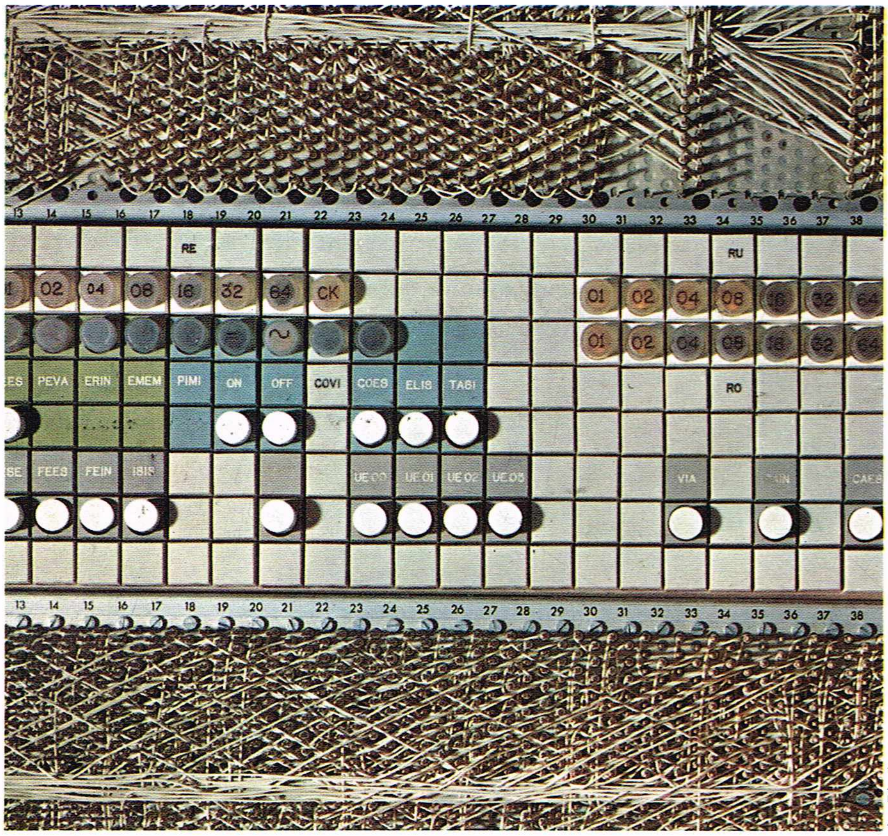

A. Rizzi

Ci-dessus : intérieur d'un ordinateur.
Ci-contre : détail d'un modèle tridimensionnel de la pression acoustique créée par la prononciation du mot « five ». Les chercheurs d'IBM étudient la manière de programmer les ordinateurs à l'aide de la voix humaine. Dans ces recherches, la visualisation des éléments phonétiques joue un rôle primordiale.

Pour passer de ces différents langages au langage de base de chaque ordinateur, il est nécessaire de disposer d'un programme dans le langage de base de la machine (compilateur) capable de traduire en langages symboliques les programmes étudiés.

Au moyen de simulations et de programmes convenables, on peut utiliser les ordinateurs pour en mettre d'autres au point. On examinera toutes les solutions possibles et, seulement lorsqu'on aura trouvé une solution satisfaisante, on procédera à la construction du nouvel ordinateur.

Olivetti

Ordinateur et sa périphérie : au centre de l'illustration, on voit l'unité imprimante.

APPLICATIONS DES ORDINATEURS

Les ordinateurs ne permettent pas simplement de résoudre des systèmes d'équations, mais aussi d'effectuer les opérations les plus diverses : calculer et enregistrer les salaires, programmer des réservations (sur avions, trains, etc.) ; mettre à jour minute par minute la comptabilité d'une banque ou d'une bourse de valeurs ; contrôler et régler les processus de fabrication ; établir l'inventaire des textes d'une bibliothèque et en permettre la consultation rapide ; effectuer des sondages d'opinion sur un échantillon significatif, afin de déterminer, par exemple, les tendances politiques ou les tendances de la consommation ; contrôler et diriger des systèmes de défense militaire ; composer certains types de musique ; réaliser des graphiques ou des dessins, etc. Les calculateurs peuvent servir aussi à régler les feux de signalisation dans le trafic urbain ou à programmer le trafic aérien.

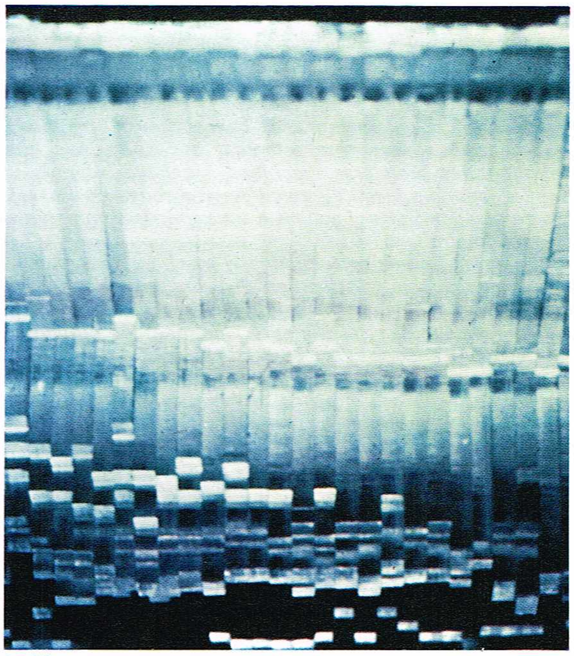

I.B.M.

Devenues très nombreuses, les applications des ordinateurs sont aujourd'hui déterminantes pour tout progrès tant scientifique que technologique. Ils ont permis d'apporter une solution à des problèmes scientifiques fondamentaux dans des domaines qui ne se limitent plus à l'astronomie, aux mathématiques et à la physique. Ils ont permis la mise au point de processus d'automation, la réalisation de programmes spatiaux (calcul des trajectoires, guidage de missiles, des satellites artificiels, des sondes, des capsules spatiales, calcul de l'angle de rentrée, etc.) ; ils rendent d'énormes services dans la planification économique, l'établissement de projets et la construction d'avions, de moteurs, de digues, d'immeubles, de ponts, etc. Ils connaissent aussi des applications très intéressantes en médecine et leur emploi progresse chaque jour dans le domaine de la traduction automatique.

Les ordinateurs pourront remplir un rôle très important dans la programmation de l'instruction à l'échelle internationale. Dans un avenir proche, chaque étudiant pourra suivre un cours individuel, qu'il lui sera possible de moduler en fonction de ses propres capacités : c'est le domaine de l'enseignement programmé.

Il est aisé de comprendre quelle peut être l'importance de ces machines dans le domaine politique et social. La multiplication rapide des ordinateurs et l'accroissement impressionnant de leur puissance et de leur rapidité font de ces machines des instruments capables d'entraîner des modifications sociologiques et mentales profondes, grâce notamment à l'accumulation et à l'interprétation des très nombreux messages qui s'échangent entre l'homme et la machine, ou entre les différentes machines.

INFORMATIQUE ET AUTOMATISATION

P.R.I.

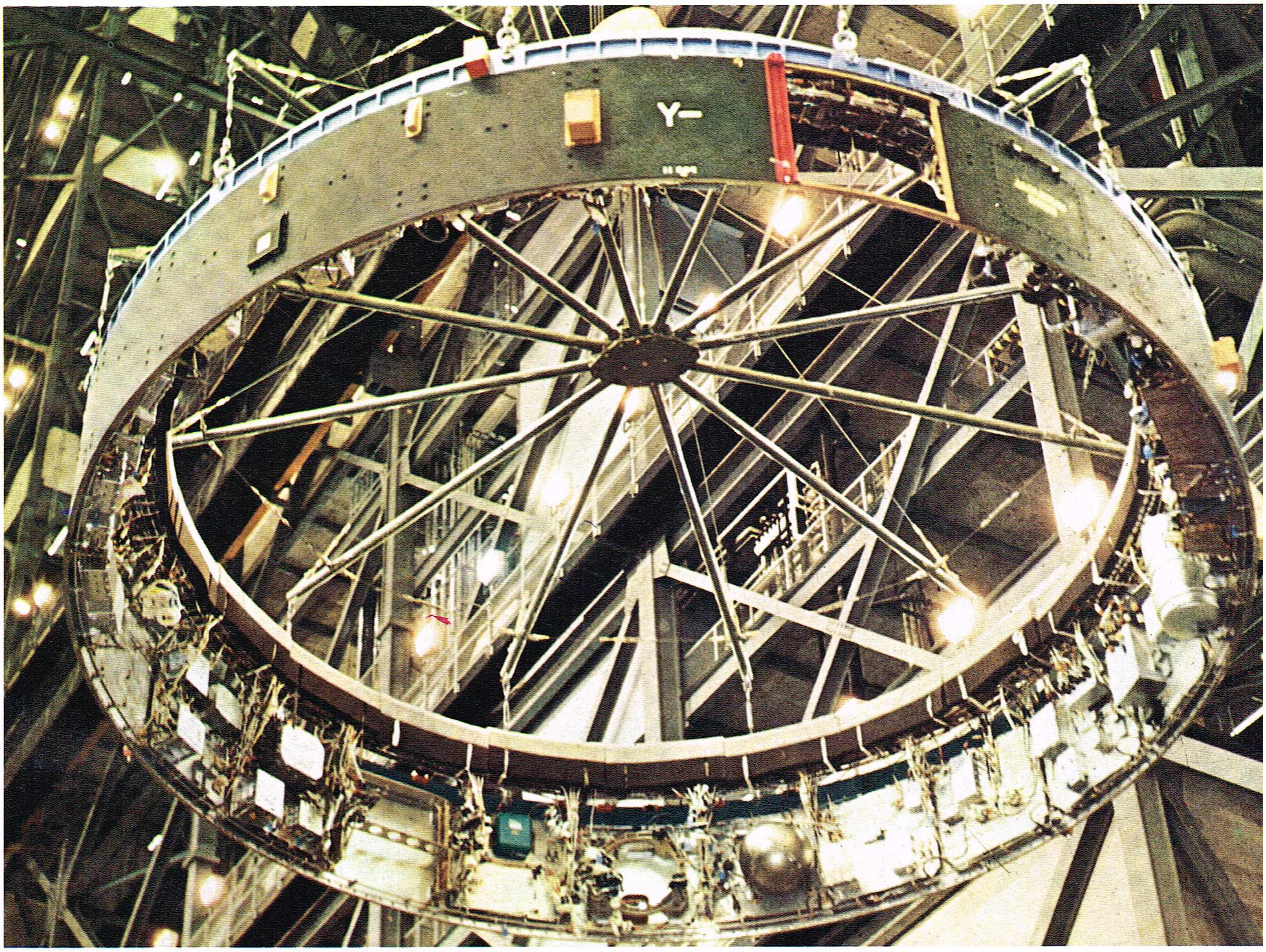

L'anneau de la fusée Saturne V où est installé le calculateur électronique de la capsule Apollo.

Avant de décrire les résultats obtenus grâce à l'automatisation, il est bon de préciser le sens du mot « information ». En effet, dans le langage technique, ce terme indique la transmission d'un point à un autre et d'une personne à une autre d'une ou de plusieurs données nécessaires à la personne à qui elles sont transmises pour accomplir une action déterminée. Ces informations sont parfois rassemblées et traitées par une machine, et dans les cas les plus complexes par un ordinateur ; mais, au départ et à l'arrivée des informations, il existe toujours deux personnes ou deux groupes de personnes. Bien souvent, la machine est utilisée pour en stocker un nombre important et pour les communiquer, groupées et ordonnées, lorsque cela est nécessaire, selon un programme préétabli.

Prenons l'exemple simple d'une information ne faisant intervenir aucune machine : un ingénieur remet le plan d'une pièce à la personne chargée de son exécution. Dans ce cas, il y a transmission d'une information sans aucune modification. Le plan porte l'indication du matériau à employer, les opérations à effectuer, les dimensions de la pièce, les tolérances admises, en un mot toutes les informations nécessaires pour que l'exécutant puisse la réaliser.

Mais il est d'autres cas où une phase intermédiaire plus ou moins complexe s'impose dans la transmission des informations. Citons pour exemple la gestion des stocks dans un magasin de pièces détachées. Chaque jour, des pièces sont vendues et expédiées : les bons de sortie sont communiqués à un centre comptable qui groupe les différentes données relatives au mouvement des stocks. Ces informations prennent place à côté de celles que le centre possède déjà, par exemple le coût de chacune

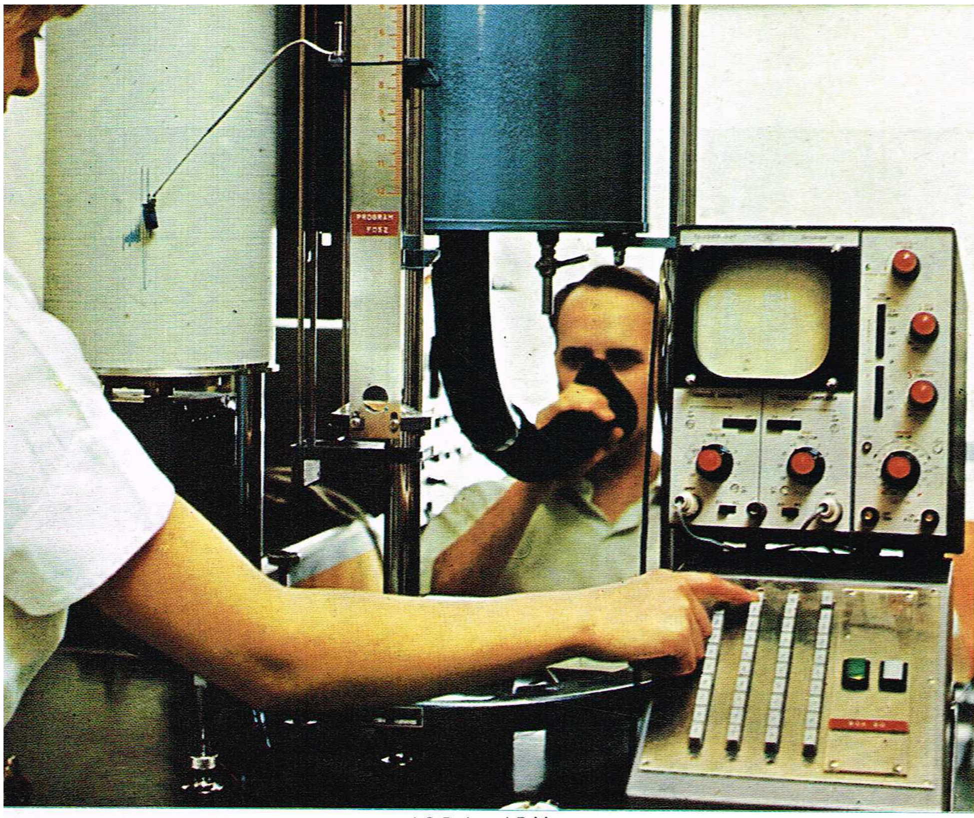

I.G.D.A. - I.B.M.

Exemple d'application médicale de l'informatique : dans un hôpital, à Copenhague, les examens sont analysés par un ordinateur IBM 1800.

des pièces en stock. En fin de semaine, ou en fin de mois, toutes les informations sont traitées, et on obtient des données quantitatives concernant la gestion des stocks, en particulier la valeur globale des sorties, ventilée par article ou groupe d'articles, ou bien d'autres informations présentant un intérêt statistique. A partir de ces informations, des données sont dégagées, intéressant d'autres services de l'entreprise.

Toute la comptabilité des grosses entreprises est aujourd'hui tenue par des systèmes informatiques de ce type, qui font parfois intervenir des ordinateurs de grande puissance. C'est ainsi que l'on procède à l'établissement des paies : les informations dont l'ordinateur dispose sont le taux horaire pour chaque ouvrier, l'incidence des charges, les éléments permettant de calculer le montant des retenues ; on obtiendra ainsi le compte exact qui doit être réglé à chaque ouvrier. A côté des informations stockées en mémoire, l'ordinateur reçoit des données spécifiques qui n'ont pas à être mémorisées : tels le nombre des heures supplémentaires, effectuées par chaque ouvrier, les éléments pour calculer la rémunération du travail au rendement. A partir des informations mémorisées et des informations spécifiques communiquées au fur et à mesure, l'ordinateur établit la feuille de paie, avec tous les éléments de la rémunération. Ce document permet au caissier d'effectuer le paiement et à l'ouvrier d'avoir un bulletin de salaire parfaitement détaillé.

L'informatique constitue aujourd'hui l'instrument de base pour une gestion moderne de l'entreprise : elle permet d'effectuer de manière rapide et sûre la ventilation des coûts, le calcul des prix de revient, l'établissement des bilans.

L'AUTOMATISATION DANS LES BIBLIOTHÈQUES

Une technique semblable est souvent employée pour stocker, classer et ordonner des documents, livres ou ouvrages. Une bibliothèque de documentation technique ou scientifique (dans une grande entreprise, dans un institut universitaire, dans un hôpital) reçoit périodiquement des publications spécialisées (volumes, monographies, articles publiés dans différentes revues). Le bibliothécaire doit les analyser toutes et les ficher, c'est-à-dire établir, pour chacune d'elles, une note résumant les caractéristiques : auteur, éditeur, date de la publication, titre, sujet traité, caractère plus ou moins spécialisé de l'exposé, etc. La fiche est alors communiquée à un centre qui en codifie les données, c'est-à-dire les transcrit sur une fiche perforée, à laquelle on donne le même numéro de référence qu'à la fiche d'origine ; cette dernière est archivée.

Dans les centres de documentation importants, la fiche perforée est traitée par un ordinateur qui mémorise les données qu'elle contient. Le lecteur qui se rend à la bibliothèque pour se documenter fournit un certain nombre de renseignements au bibliothécaire : auteurs ayant traité tel sujet, publications s'y référant, période de parution, pays d'origine, etc. Le bibliothécaire rédige alors une demande et la communique au service de classement des fiches. S'il s'agit d'un centre peu important, on utilise une trieuse pour sélectionner les fiches correspondant aux publications désignées par le lecteur. Cette opération demande quelques minutes ou quelques heures selon le nombre de fiches. Le numéro d'ordre des fiches sélectionnées permet au bibliothécaire de retrouver dans les archives les fiches d'origine qui indiquent, entre autres, la place occupée par les publications dans la bibliothèque (compartiment, rayon, volume, etc.).

Dans les centres importants, le travail de sélection est confié à un ordinateur qui, en utilisant les informations stockées dans sa mémoire, fournit directement un tableau numérique des fiches bibliographiques recherchées ; on procède alors de la même manière pour rechercher la publication dans la bibliothèque. Mais, avec l'ordinateur, la sélection est très rapide et ne demande que quelques minutes. Aujourd'hui, même des centres peu importants peuvent avoir recours aux services d'un ordinateur auquel ils sont reliés par des téléscripteurs. L'ordinateur peut même se trouver dans une ville différente et être relié à plusieurs centres ; il est interrogé directement à partir d'un terminal, par un système comparable à celui du téléphone.

AUTRES APPLICATIONS DE L'AUTOMATISATION

Dans le domaine de l'enregistrement et de l'exploitation statistique des données, l'automatisation offre d'immenses possibilités, tel le cas d'un nouveau médicament mis à la disposition des hôpitaux, des dispensaires et des médecins, dont on désire tester l'efficacité et la tolérance. Le centre informatique recueille toutes les sources d'informations, les transpose sur des fiches perforées (codage) et les met en mémoire dans l'ordinateur. A tout moment et en quelques minutes, la machine pourra fournir les données statistiques issues du traitement de toutes les informations déjà reçues.

Une application analogue concerne l'étude statistique de l'état sanitaire d'une population scolaire : on communique à l'ordinateur les éléments transmis par les services de santé sur les manifestations de maladie observées par les médecins responsables : affections rhumatismales, tuberculose, rachitisme, hypothyroïdie. Le centre informatique peut alors effectuer des études statistiques comparatives, entre certaines régions (en tenant compte de différents paramètres) et leurs situations économiques respectives, pour obtenir ainsi des indications précieuses sur les mesures à prendre dans le domaine de la prévention, de l'hygiène et de l'assistance.

Aux U S A, la lutte contre la criminalité met à profit également les services de l'informatique. En effet, on a pu établir un code permettant de classer les empreintes digitales en fonction de leurs caractéristiques ; avec un tel classement, il est rare de trouver plus d'une dizaine d'empreintes par million présentant des caractéristiques identiques. L'analyse portera alors sur cet échantillon, qui sera comparé avec les empreintes des personnes fichées par les services de police.

L'armée utilise aussi l'informatique pour la sélection des recrues, des militaires de carrière ou des réservistes, en fonction des besoins du service. Chaque personne qui accomplit son service militaire est fichée sur la base de ses caractéristiques psychiques et physiques, de ses aptitudes, de sa formation scolaire, de son expérience professionnelle. Toutes ces données peuvent être facilement et très rapidement analysées à l'aide de l'ordinateur, en vue, par exemple, d'effectuer la présélection d'une équipe destinée à une mission particulière. La sélection définitive, portant sur un nombre restreint de personnes, permettra alors de constituer directement l'équipe.

L'INFORMATIQUE MÉDICALE

« Informatique médicale », « médecine informatique », « application de l'informatique à la médecine »... quel que soit le vocabulaire choisi, il y a toujours quelque chose de choquant dans l'association de ces deux mots : médecine et informatique. *Le premier évoque en effet une science très humaine, très personnalisée, le deuxième une technique rigoureuse et impersonnelle.*

Cette impression n'est d'ailleurs pas ressentie seulement par le public mais aussi par de nombreux médecins. En France, seules quelques équipes hospitalières de pointe s'intéressent aux possibilités de l'informatique et à son application dans le domaine de la médecine.

LA GESTION HOSPITALIÈRE

La gestion d'un hôpital présente de nombreux points communs avec celle d'un hôtel : gestion des « lits », du personnel, de la restauration, de la lingerie, des stocks, de la comptabilité, etc. La seule différence est que ces aspects de l'industrie hôtelière se compliquent à l'hôpital : les lits ne sont pas « banalisés » (répartis en services spécialisés, ils ne peuvent être occupés par n'importe quel malade), la restauration est en grande partie diététique, la circulation du linge pose le grave problème de la stérilisation, la comptabilité est alourdie par les rapports avec la Sécurité sociale, les mutuelles, l'état civil (morts, naissances).

Ce sont précisément là des domaines où l'informatique doit pouvoir rendre de grands services, mais nous ne considérerons pas cette application, de pure gestion, comme spécifiquement médicale.

LES DOSSIERS MÉDICAUX

Quand un médecin ouvre le dossier d'un nouveau malade, il note d'abord les renseignements de base nécessaires concernant le sujet : son nom, son adresse, son âge, son pays d'origine, son métier, la composition de sa famille, son hérédité s'il y a lieu, les opérations subies, les maladies antérieures, etc.

Par la suite, à chaque consultation, sont notés brièvement les troubles qui amènent le malade à consulter, les résultats de l'auscultation, le traitement prescrit, les résultats des analyses demandées (de la simple analyse de routine aux indications d'une radiographie ou d'un électrocardiogramme par exemple).

Peu à peu le médecin possède un dossier concernant le passé médical du sujet et permettant de le connaître et de le « suivre » efficacement.

Au début du siècle encore, on consultait presque uniquement le médecin de famille. Le dossier n'avait donc pas à être transmis. Puis peu à peu apparaissent trois évolutions très nettes dans la vie médicale :

— Les malades qui, autrefois, redoutaient tant l'hôpital, y vont de plus en plus volontiers. De plus, les hôpitaux étant généralement spécialisés, un malade peut avoir séjourné dans plusieurs hôpitaux différents.

— La consultation chez le spécialiste, qui n'était demandée que dans les cas très graves et sur indication du généraliste traitant, est devenue habituelle. Les malades vont même consulter directement un spécialiste, ayant fait eux-mêmes un diagnostic... qui ne s'avère pas toujours exact.

— Les malades ne restent plus forcément attachés de longues années à leur médecin. Ils en changent plus souvent qu'autrefois.

Il s'ensuit que les malades ont des « bribes » de dossier chez des médecins généralistes, des spécialistes, et dans divers hôpitaux (tout le monde sait, par exemple, les difficultés que l'on rencontre pour transférer un dossier d'un hôpital à un autre).

Il apparaît nécessaire que ces dossiers soient d'une part regroupés, d'autre part accessibles à tout médecin qui aurait besoin de les consulter.

C'est ici que l'informatique intervient efficacement; à titre d'exemple, citons l'Unité de recherches statistiques de l'Inserm (Institut national de la santé et de la recherche médicale) qui a mis au point un programme appelé Pastis, capable de traiter un nombre illimité de dossiers sur 2 000 caractéristiques.

Un dossier unique, complet et accessible facilitera *à l'évidence le travail du médecin, mais il aura un autre usage : faire progresser* la recherche *et* la prévention médicales. *En effet il est indispensable à notre époque*

Assistance publique - Département audio-visuel

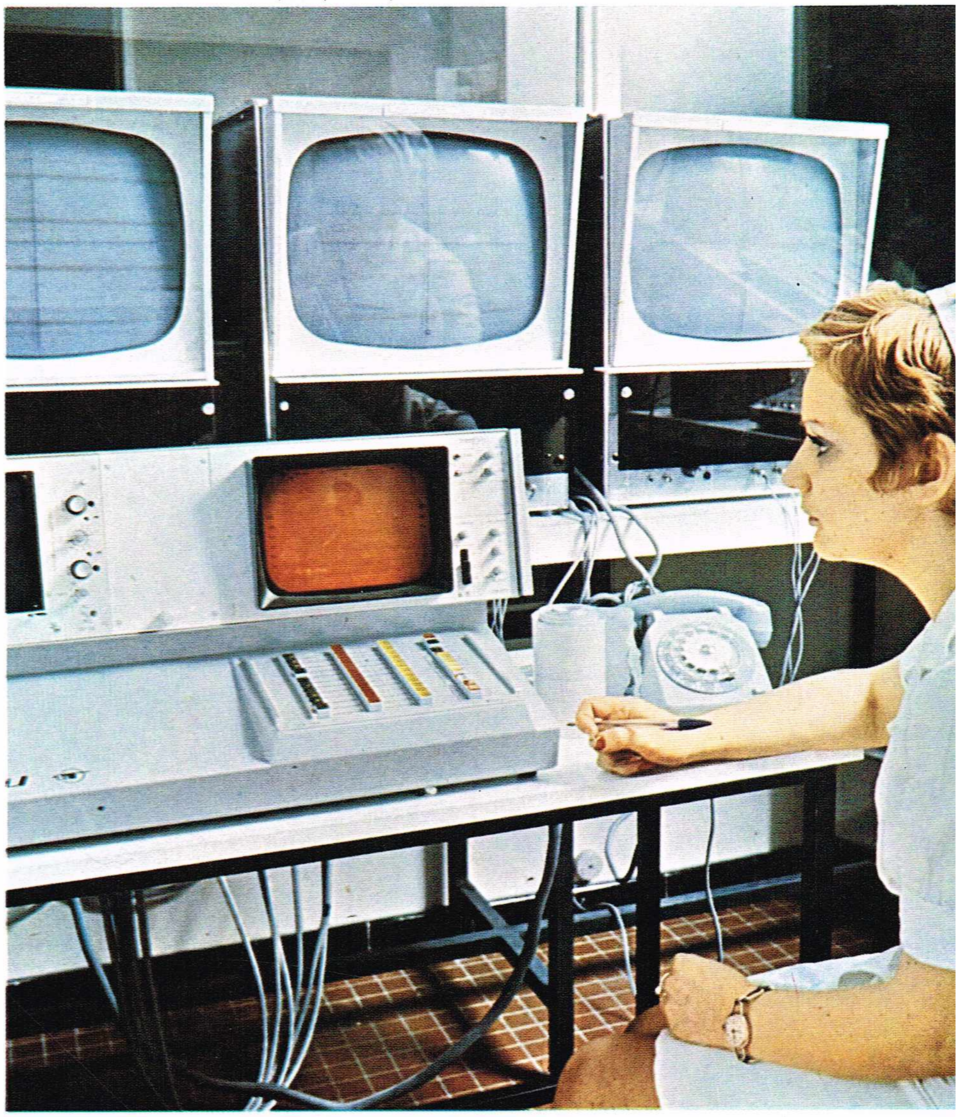

Boxe de réanimation de chirurgie cardiaque (hôpital de la Pitié, clinique chirurgicale du professeur Cabrol).

d'établir des statistiques, concernant les épidémies par exemple ou les résultats de vaccination, de regrouper en vue de la recherche les cas semblables et les résultats des divers traitements expérimentés. Bien sûr, il existe des revues médicales, mais sait-on qu'il paraît dans le monde quelque 1 000 articles médicaux par jour ouvrable ?

L'informatique est parfaitement outillée pour résoudre ces problèmes dans l'ordre pratique. Mais ici se pose déjà un problème d'ordre humain : que devient le secret professionnel ? Est-il possible que tout ce qui concerne notre santé puisse être ainsi « mis en fiche » et accessible sinon à tous, du moins à beaucoup ?

Par ailleurs, pour automatiser les données, il faut obliger tout médecin à se conformer à des règles très strictes dans la codification et la transmission de ces données. Tous les médecins n'acceptent pas volontiers l'idée de ces contraintes.

SURVEILLANCE AUTOMATISÉE

Les malades pour lesquels on a conçu le système de surveillance sont les malades graves qui demandent une surveillance de tous les instants : blessés en état de choc, difficultés respiratoires ou cardiaques menaçant la vie, opérés récents d'interventions majeures. De grands progrès ont été faits dans ce domaine, surtout en cardiologie.

Comme pour tout problème d'informatique, trois étapes sont à parcourir :

— le recueil des données,
— le traitement des données,
— la lecture et l'interprétation des résultats.

Actuellement, la difficulté majeure se rencontre dans la première étape : l'acquisition des données. Il n'est pas simple d'enregistrer des valeurs physiologiques, et qui plus est de façon continue.

Si pour l'électrocardiogramme les capteurs sont simples (il s'agit de prises de potentiels électriques, l'appareillage reste extérieur au malade et peut être supporté de façon continue sans léser les tissus), comment prélever, sans léser, des valeurs telles que débit urinaire, composition chimique du sang (oxygène, gaz carbonique), volume plasmatique et globulaire ?

De nombreuses recherches sont faites actuellement concernant les capteurs, en particulier dans les services de pointe de réanimation.

Il faut ensuite traiter ces données, mais ici, le malade n'étant plus en jeu, le problème n'est pas très différent de ceux que l'on rencontre dans les domaines non médicaux.

Enfin, il faudra lire et interpréter les résultats : c'est à ce stade que l'informatique va vraiment aider à surveiller le malade. Il va être demandé à la machine non seulement de lire et d'interpréter les résultats mais de signaler les anomalies.

Poste de surveillance dans un service de réanimation cardio-vasculaire à l'hôpital de la Pitié. Un ordinateur peut mettre en mémoire les caractéristiques principales de chaque sujet.

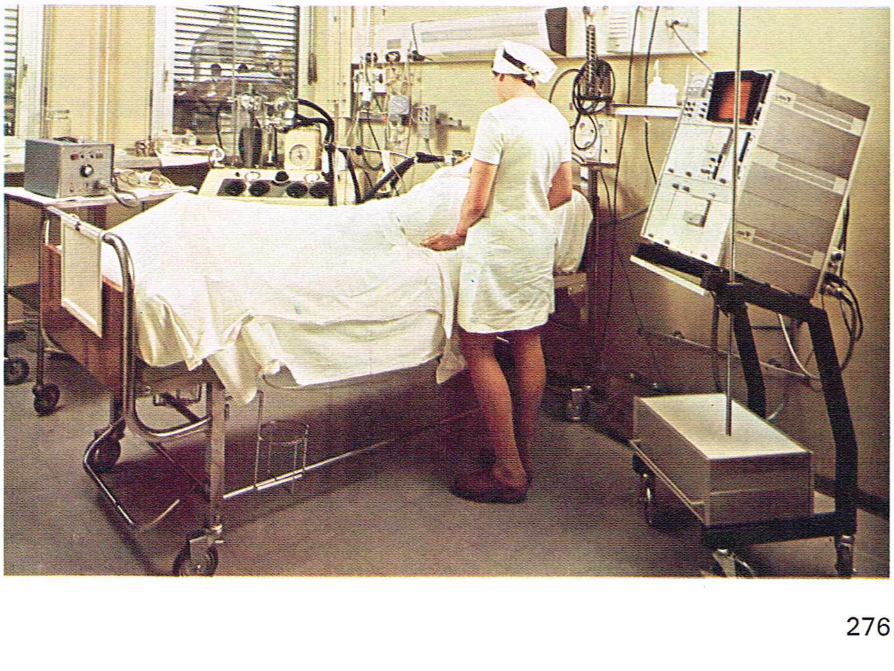

Assistance publique - Département audio-visuel

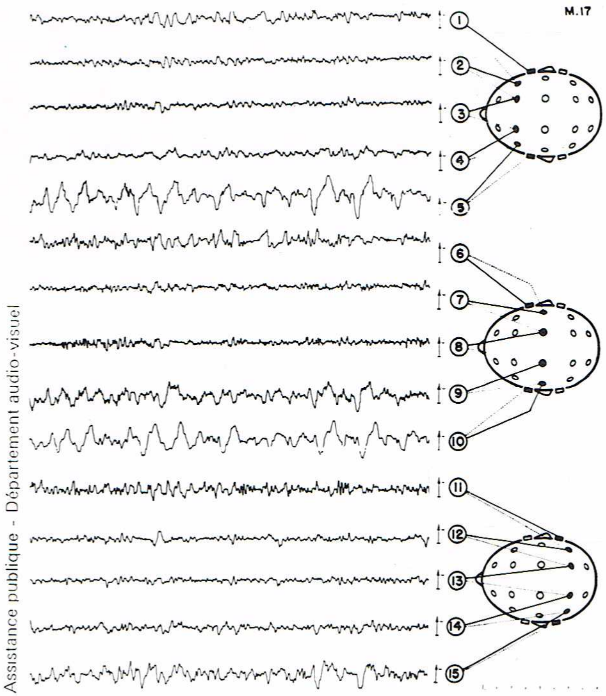

Assistance publique - Département audio-visuel

Électro-encéphalogramme : un ordinateur peut composer les signaux reçus à un E.E.G. normal et signaler les anomalies graves.

Prenons l'exemple de l'électrocardiogramme. Les ondes recueillies vont être automatiquement comparées à un tracé normal. Toute anomalie importante sera détectée et déclenchera un signal d'alarme appelant l'infirmière au chevet du malade.

On voudrait aller plus loin et demander à la machine non seulement de donner l'alerte, mais de donner des ordres de soins (véritables soins automatiques). Par exemple il n'est pas impossible d'envisager un réglage automatique du débit d'une perfusion d'une solution médicamenteuse en fonction des données physiologiques recueillies.

LE DIAGNOSTIC AUTOMATIQUE?

L'ordinateur est-il capable de faire un diagnostic ? Cette question peut paraître a priori choquante. Nous savons, certes, que le diagnostic médical est le fruit de démarches logiques sûres, appuyées sur un vaste savoir, mais beaucoup pensent qu'il y entre une part de connaissance humaine directe du malade, certains parlent d'intuition.

Pourtant un ordinateur doit pouvoir reproduire tout raisonnement ; pourquoi pas le cheminement logique qui amène le médecin au diagnostic ?

La recherche dans ce domaine est amorcée. Mais nous n'en sommes encore qu'aux balbutiements et le terme de diagnostic assisté (par l'ordinateur) est généralement adopté.

Il est certain que l'informatique va bouleverser professionnellement les méthodes médicales. Curieusement, comme le fait remarquer l'équipe ADIN (Association pour le développement de l'informatique à la faculté Necker), ce sont les malades qui ressentiront le moins visiblement les changements à venir ; qu'un ordinateur soit présent ou non derrière un système de surveillance, que le diagnostic soit assisté ou non, cela n'a pas pour le malade de conséquences médicales perceptibles.

Par contre le médecin, lui, dont l'acte est souvent solitaire, « devra apprendre à dialoguer avec des systèmes conçus par d'autres et pour cela se plier à l'utilisation d'un langage médical rénové et normalisé. Moyennant quoi ils verront sans doute augmenter leurs moyens d'action actuellement limités par la spécialisation et par la coupure entre le praticien et l'hôpital ».

MACHINES-TRANSFERTS ET UNITÉS AUTOMATIQUES

L'automatisation connaît aujourd'hui de très nombreuses applications ; elle tire son origine des études systématiques qui furent accomplies, dans les années vingt, par une grande fabrique d'automobiles afin d'éviter l'entassement désordonné de pièces semi-ouvrées entre une machine et une autre et le trajet trop long que devait parcourir chaque pièce pour subir les différentes opérations d'usinage. En premier lieu, on eut soin de disposer rationnellement les machines, pour que le trajet soit le plus court possible. Au stade suivant, on réalisa la synchronisation des différentes opérations, ce qui nécessita la création de machines d'une conception nouvelle ; ainsi, le temps d'usinage de chaque pièce aux différents postes de travail était le même et on évitait l'accumulation de pièces en attente.

Ensuite, on mit au point des dispositifs de transfert mécanique des pièces d'un poste de travail au suivant. Enfin, on réalisa la synchronisation de toutes les opérations, usinage et transfert, si bien que la pièce brute, introduite au début de la chaîne, en sortait entièrement finie. Telles sont les origines de la chaîne de transfert, aujourd'hui largement répandue dans les fabrications mécaniques de grande série, par exemple la fabrication des moteurs d'automobiles, des compresseurs pour les réfrigérateurs, des machines à coudre, etc.

LA CHAINE DE TRANSFERT

Il ne faut pas confondre la chaîne de transfert avec la chaîne de montage où ce sont les ouvriers qui, placés le long de cette chaîne, effectuent une série d'opérations manuelles (un exemple typique est l'assemblage des postes de radio et de télévision) ; dans la chaîne de transfert, toutes les opérations sont automatiques, le rôle de l'homme se limite au simple contrôle technique, confié à un personnel spécialisé.

Le perfectionnement systématique des chaînes de transfert donna lieu à une amélioration progressive des techniques, grâce à la réalisation de dispositifs automatiques isolés ou groupés : dispositifs à fonctionnement électrique, pneumatique, oléodynamique et mécanique.

Des progrès très importants furent accomplis dans la période après-guerre ; on assista à une évolution vers une automatisation à peu près totale des unités de transfert. Une réalisation mémorable a marqué l'histoire de cette évolution, au début des années cinquante : l'U.R.S.S. construisit une fabrique de pistons pour moteurs d'automobiles entièrement automatique : les pièces brutes étaient introduites en début de chaîne, et en sortaient complètement finies, contrôlées et conditionnées en vue de l'expédition. La production était de quelques milliers d'unités par jour, tandis que le personnel de fabrication était réduit à cinq hommes. Mais des considérations à caractère économique vinrent modérer l'enthousiasme soulevé par de telles réalisations. En effet, pour concevoir une chaîne de transfert de grandes dimensions, il faut au moins un an d'études ; la réalisation et la mise au point demandent au moins une autre année. Donc, le coût des opérations préparatoires est toujours élevé. En outre, une chaîne de transfert est « rigide », car elle n'accepte pas de modifications (dans le mode de fabrication) de la pièce pour laquelle elle a été conçue (forme ou matériau utilisé) ; il s'ensuit que les grandes chaînes de transfert ne sont économiquement avantageuses que pour des productions de très grande série et seulement si les pièces ne subissent aucune modification pendant au moins cinq ans.

I.G.D.A.-FIAT

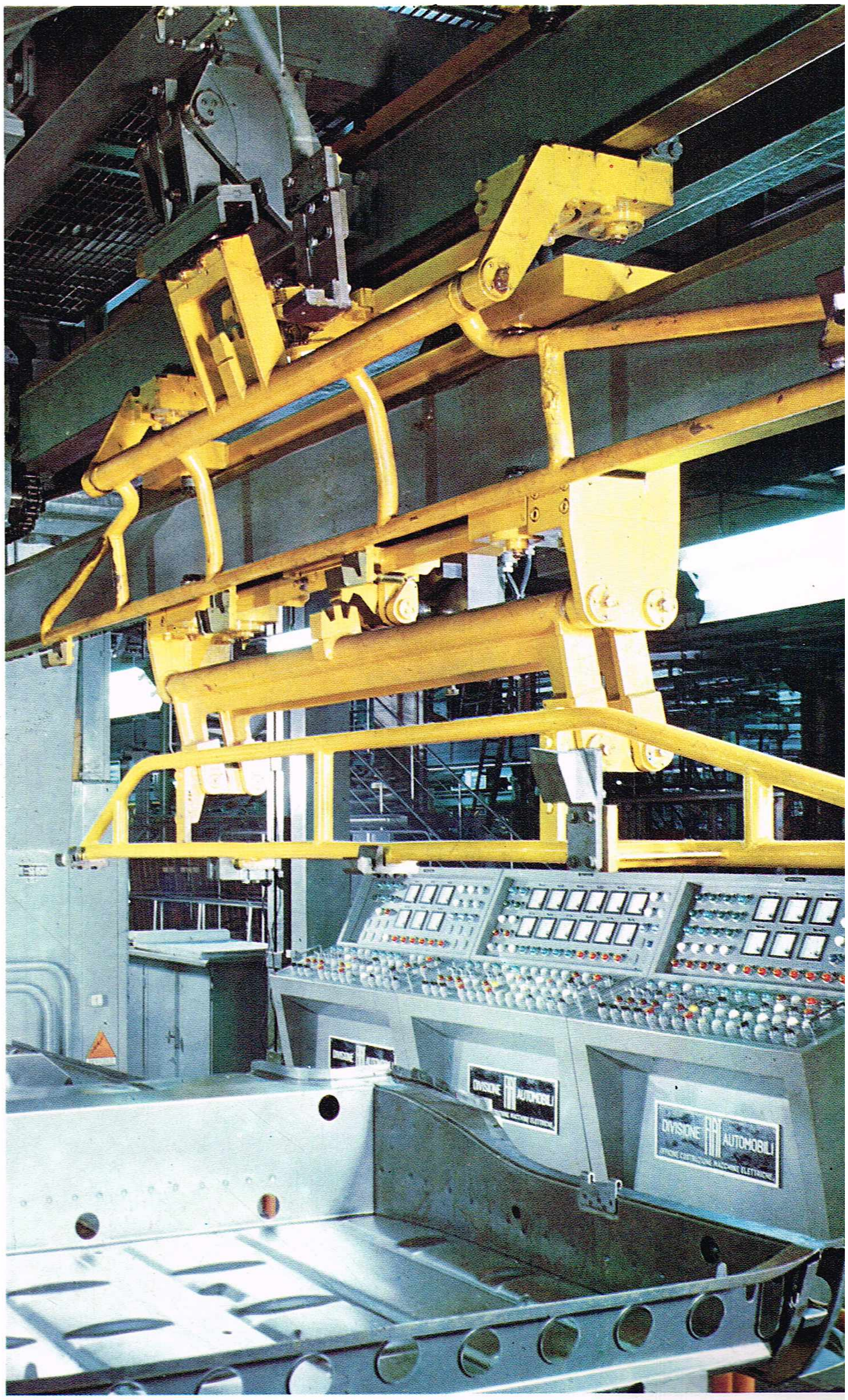

Machine-Transfert automatique pour la soudure par points du plancher de la Fiat 124 (Établissement Fiat-Mirafiori).

L'AUTOMATISATION FLEXIBLE

L'automatisation se développa à un rythme de plus en plus rapide dans de nombreux domaines. C'est ainsi que furent mises au point les machines dites flexibles, comportant de 5 à 10 postes de travail placés autour d'une table circulaire afin d'effectuer facilement les différentes opérations d'usinage sur une pièce, installée au centre sur un plateau support éventuellement tournant. Ces unités de travail peuvent être dissociées, ce qui permet de passer, en deux ou trois jours, à l'usinage d'une pièce différente ; elles se révèlent donc tout à fait adaptées aux séries ne dépassant pas quelques dizaines de milliers d'exemplaires, que ces séries soient uniques ou renouvelables au bout d'un certain temps. Ce type d'unités constitue l'un des résultats les plus intéressants dans le domaine de l'automatisation flexible.

La technique, de plus en plus avancée, des systèmes de régulation et de contrôle, dont le développement fut favorisé par les chaînes de transfert en général, contribua au perfectionnement des machines-outils isolées, qui bénéficièrent d'une automatisation croissante. C'est ainsi qu'on construisit des tours équipées de tourelle revolver, des perceuses multiples, des fraiseuses spéciales à fonctionnement entièrement automatique, exigeant seulement le chargement de la pièce brute et l'enlèvement de la pièce finie. Pour les tours fabriquant des pièces à partir d'une barre ou d'un tube, on a mis au point un système d'approvisionnement automatique, sans grande difficulté technique. La machine coûte quelques millions ; elle peut être adaptée en deux ou trois heures au travail de telle ou telle pièce, et un seul opérateur suffit pour surveiller le fonctionnement de quatre ou cinq unités. L'automatisation a gagné rapidement d'autres domaines ; elle permet la mise en route, la régulation et le contrôle d'installations soit peu importantes, comme le chauffage central domestique, soit complexes et de grandes dimensions, comme un laminoir, une papeterie ou une raffinerie.

Le fonctionnement de ces installations est assuré par des dispositifs automatiques de différents types, mécaniques, oléodynamiques, pneumatiques ou électroniques. La dernière décade a vu un développement impressionnant de ces dispositifs (surtout électroniques) qui ont bénéficié des progrès réalisés dans le domaine de la miniaturisation et qui sont désormais employés dans la régulation d'installations très importantes. Envisageons, à titre d'exemple, le dispositif électrique et électronique de régulation, de commande et de contrôle d'un grand laminoir moderne. Ce système est logé dans un certain nombre de consoles métalliques, hautes d'environ deux mètres et profondes d'environ un mètre, qui, disposées sur une même ligne, occuperaient une longueur d'une cinquantaine de mètres. On trouve à l'intérieur de ces consoles, reliés par un enchevêtrement de fils de différentes grosseurs, des centaines d'instruments de mesure et d'appareils (interrupteurs, transformateurs, relais, contacteurs, compteurs, etc.) et au moins un millier de modules électroniques à circuit imprimé, comportant chacun un grand nombre de composants (condensateurs, résistances, transistors, microbobines). Quelques-uns de ces composants électroniques, comme les circuits intégrés, constituent les plus récentes acquisitions dans le domaine de la miniaturisation ; de la taille d'un bouton, ils renferment cependant de très nombreux composants (résistance, transistors, petits condensateurs, etc.) sous un volume très réduit.

En dépit de cette miniaturisation, le contrôle d'une installation aussi imposante est facile et sûr, son fonctionnement étant rarement sujet à des pannes. Il est du reste facile de les détecter et de réparer, puisque l'ensemble de contrôle comporte des circuits spécialement affectés à la détection des pannes et à leur signalisation au moyen de signaux acoustiques et optiques. Le système défectueux est remplacé par un élément de réserve, toujours disponible. L'élément responsable est ensuite envoyé au laboratoire pour sa réparation. Une expérience maintenant très large permet d'affirmer que les pannes, même dans les microcircuits ou les microcomposants les plus complexes, sont extrêmement rares.

Façonnage automatique des tablettes de chocolat.

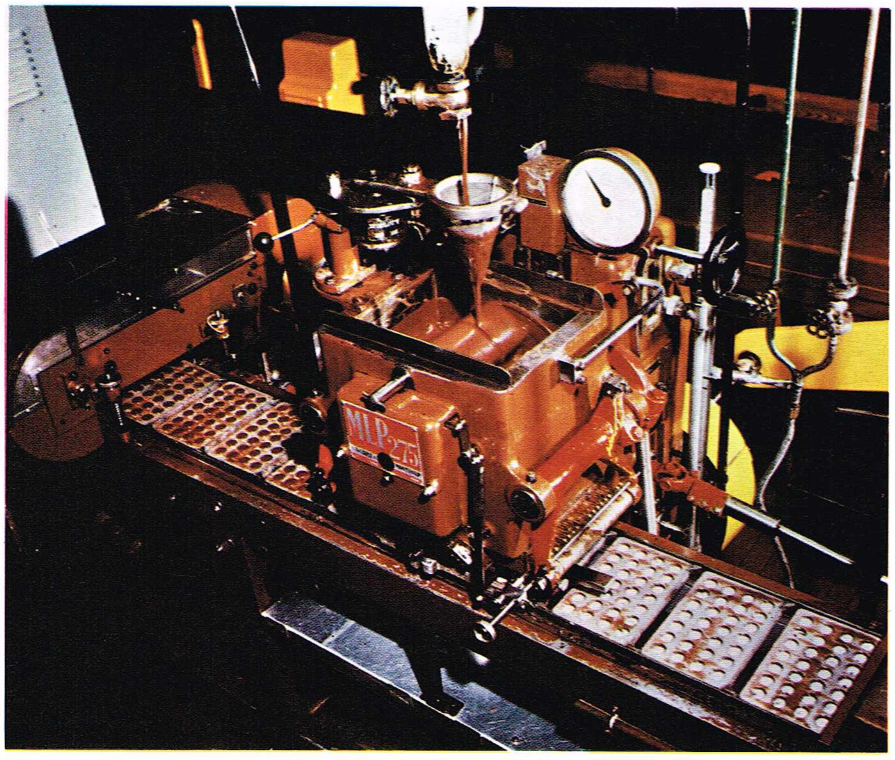

MOTTA

LES MACHINES A CONTROLE NUMÉRIQUE

L'automatisation des machines-outils tend à adopter de plus en plus, dans une nouvelle série d'applications, une technique qui utilise des fiches, des bandes perforées ou des bandes magnétiques pour communiquer à un ordinateur données, chiffres et programmes. C'est ainsi qu'il est devenu possible d'asservir une machine-outil ou un certain type d'installation à un dispositif de commande centralisée, qui lui impose l'exécution d'un programme de travail déterminé (séquence de mouvements, d'opérations, de traitements, etc.), selon le programme inscrit sur une fiche ou une bande perforée, ou encore enregistré sur une bande magnétique.

On peut, par exemple, équiper des fraiseuses avec de tels dispositifs : on met au point une machine pour l'usinage de plusieurs séries de pièces présentant une certaine similitude entre elles, et il suffit de passer d'une série à l'autre en changeant simplement la fiche perforée ou la bande magnétique. L'adoption de dispositifs de commande et de contrôle automatiques permit de réaliser des machines spéciales capables à la fois de percer, de fileter, d'aplanir, de fraiser, d'aléser, opérations exécutées par une série d'outils disposés sur une tourelle revolver. Ces machines sont munies d'un plateau porte-pièce mobile, commandé lui aussi par l'ensemble régulateur, qui assure la mise en place et le maintien de la pièce pendant l'usinage. Ensuite, la succession des différentes opérations se fait automatiquement, la fiche ou la bande perforée assurant la coordination de tous les déplacements de la pièce avec la rotation de la tourelle revolver qui la positionne en face de l'outil prévu. La vitesse et le mouvement de ce dernier sont aussi commandés automatiquement.

Des machines de ce genre, dites « à contrôle numérique », sont aujourd'hui les éléments essentiels du progrès technologique ; en effet, une seule unité peut effectuer un nombre élevé d'interventions différentes, qui exigeraient par ailleurs de nombreuses machines. Ainsi, même un nombre réduit d'unités, convenablement utilisées, permettent des productions importantes. Mais, pour que ces machines apportent des avantages économiques intéressants, il est indispensable de consacrer des études extrêmement poussées à leur conception et à la mise au point des programmes de travail ; de même, il faut modifier un certain nombre d'habitudes, changer et normaliser la forme des pièces, adopter de nouvelles méthodes de cotation des plans de construction, etc. Le coût d'un tel bouleversement est difficilement prévisible.

LES RAYONS X

Dans l'histoire des sciences, il n'est probablement pas de chapitre qui, mieux que celui des rayons X, illustre l'importance de la recherche pure pour les « retombées » pratiques qui peuvent en découler. Trois mois à peine après la découverte fortuite de Rœntgen, les rayons X trouvaient leur première application médicale dans un hôpital de Vienne lors d'une intervention chirurgicale. Et pourtant, au cours de ses expériences sur les tubes à vide et les anneaux d'induction, jamais Rœntgen ne se serait douté qu'il allait aboutir à une découverte aussi féconde pour la santé des hommes. En dehors des sciences appliquées, physiques et biologiques, les rayons X ont très largement contribué à la connaissance de la structure moléculaire et atomique de la matière et du mécanisme d'interaction entre le rayonnement et la matière.

Les rayons X nous fournissent une sorte de « supermicroscope » qui nous permet de « voir » non seulement les atomes, mais aussi leur arrangement dans les cristaux et même l'intérieur de l'atome. A ce titre, la découverte de Rœntgen mérite d'être rangée parmi celles qui ont marqué la naissance de la physique moderne, c'est-à-dire de la physique atomique et moléculaire qui étudie la structure intime de la matière et la nature de ses constituants les plus simples, les atomes, les noyaux et les particules subatomiques.

En 1895, Rœntgen (prix Nobel de physique en 1901), n'était pas en mesure de donner une explication complète de la nature des rayons X. Il était en effet occupé à étudier le passage d'une décharge électrique dans les gaz raréfiés et achevait l'examen des rayons émis dans ces conditions (appelés rayons cathodiques), étude qui allait aboutir à la détermination de la charge et de la masse des constituants atomiques tels que le proton et l'électron. Sur l'écran fluorescent employé pour la détection des rayons cathodiques, Rœntgen observa une luminosité verdâtre même lorsque le tube à vide de décharge était recouvert d'un papier noir. L'origine d'un tel phénomène était liée à l'existence de rayons bien différents des rayons cathodiques; il les appela rayons X *pour souligner leur nature inconnue.*

Différentes expériences le conduisirent à décrire les propriétés de ces rayons en termes purement qualitatifs : les rayons X sont invisibles; ils se propagent en ligne droite, ne sont déviés ni par les champs électriques ni par les champs magnétiques et par conséquent ne possèdent aucune charge électrique; ils traversent la matière, opaque à des radiations intenses; impressionnent la plaque photographique; provoquent la fluorescence de certains composés chimiques; ionisent les gaz qu'ils traversent et sont diversement absorbés par les différents corps. Ils sont produits chaque fois qu'un faisceau de rayons cathodiques rapides frappe une cible solide. Une partie de l'énergie cinétique des électrons qui constituent les rayons cathodiques est dissipée sous forme de chaleur, tandis qu'une faible fraction produit les rayons X.

NATURE DES RAYONS X

Elle peut être aujourd'hui clairement expliquée en termes d'ondes électromagnétiques; les rayons X occupent une bande étroite dans l'échelle des ondes électromagnétiques qui comprennent les ondes radio, les radiations visibles, les rayons ultraviolets, les rayons γ. Leur longueur d'onde est comprise approximativement entre 0,1 Å et 100 Å.

Pour comprendre leur nature, il faut se rappeler le modèle de l'atome de Bohr, selon lequel les électrons sont disposés autour du noyau sur des orbites que l'on peut, en première approximation, considérer comme circulaires. Les électrons occupent ces orbites à partir de la plus interne, puis se répartissent sur les orbites plus périphériques; par conséquent, le nombre d'orbites complètes dépend du nombre d'électrons de l'atome. Lorsqu'on fournit suffisamment d'énergie à un atome, un électron peut

Chambre à quatre foyers de Guinier, montée sur un générateur de rayons X.

A. Rizzi

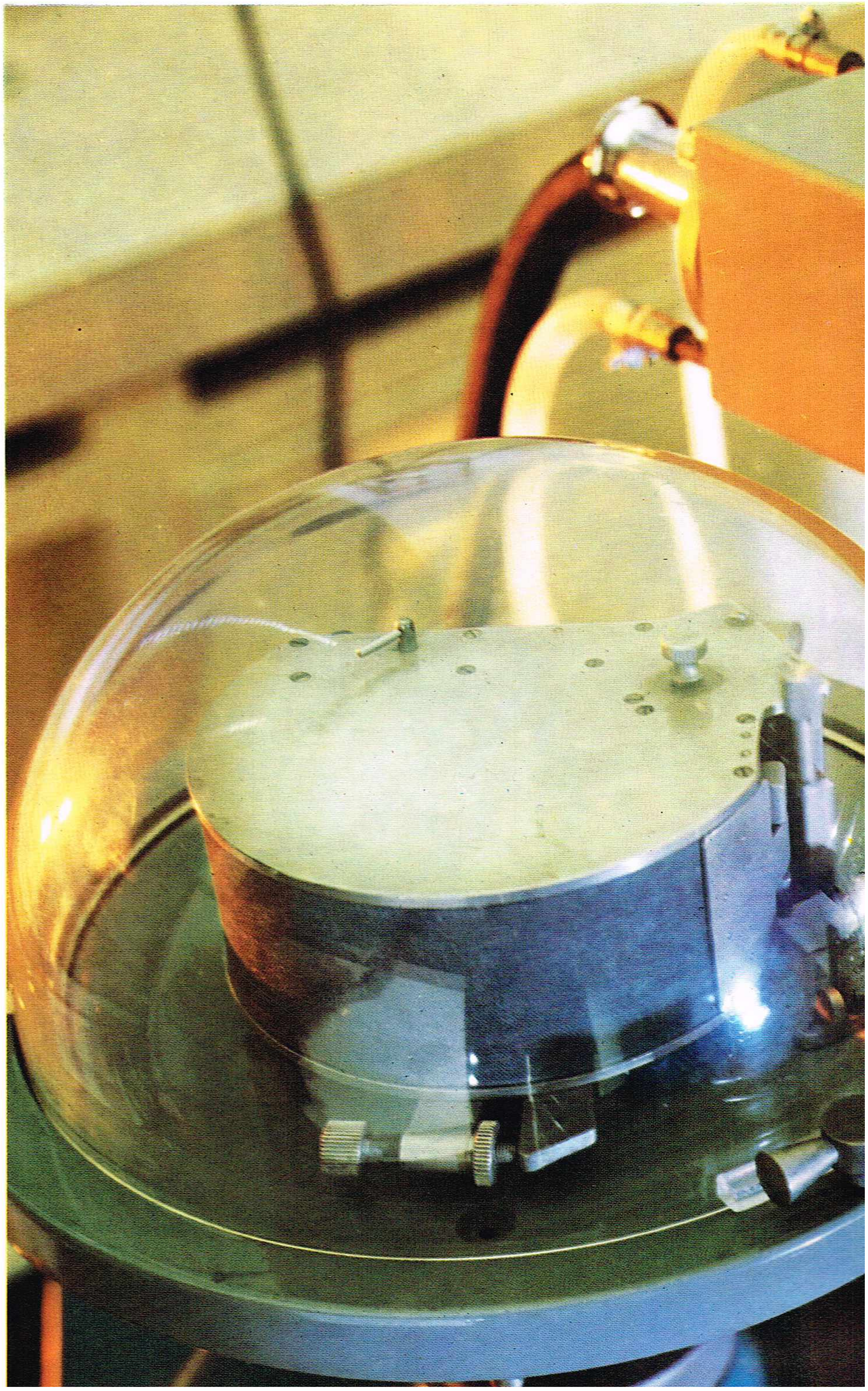

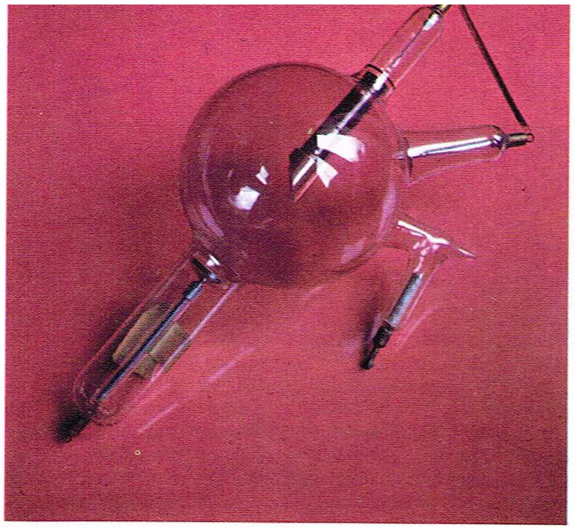

Un des premiers tubes à rayons X. En bas, tubes à rayons X à anode fixe pour faibles et moyennes puissances.

être expulsé d'une des orbites les plus internes; l'atome se trouve alors dans un état excité. Un électron des orbites plus externes vient occuper la place laissée libre par le premier; ce passage ramène l'atome à son état fondamental et donne lieu simultanément à l'émission d'une certaine quantité d'énergie $h\nu$ sous forme d'une radiation de fréquence ν, qui dépend des différentes orbites intéressées, et précisément de la différence d'énergie de liaison de ces mêmes orbites $E_1 - E_2 = h\nu$ (h est la constante de Planck).

L'analyse spectroscopique fournit donc une raie caractéristique dans le spectre des rayons X. Puisque les électrons constituant l'atome ne peuvent pas passer tous indifféremment d'une orbite à une autre, le spectre rayons X d'un élément est formé uniquement d'un petit nombre de raies. Un fait remarquable est que, selon la nature de l'atome frappé, on a un spectre différent de rayons X, ce qui permet de reconnaître le corps examiné par la position de ses raies caractéristiques. L'analyse spectrale est un moyen simple et sûr d'identification d'un élément, car le nombre et la répartition des raies dépendent du nombre atomique, c'est-à-dire du nombre de charges élémentaires positives contenues dans le noyau, comme le démontra Moseley en 1913.

Le tube à vide pour la production des rayons X est constitué par une ampoule de verre dans laquelle on pratique un vide très poussé; l'ampoule comporte à ses extrémités deux électrodes, entre lesquelles on maintient une différence de potentiel élevée. L'électrode négative (cathode) émet des électrons par effet thermo-ionique, électrons qui, sous l'effet d'un champ électrique, viennent frapper une cible (anticathode), constituée généralement d'un matériau de poids atomique élevé. La vitesse, et donc l'énergie avec laquelle le flux électronique frappe la cible, dépend de la tension appliquée.

Les propriétés des rayons X, intensité et dureté, dépendent de la tension appliquée au tube et du matériau dont est constituée l'anticathode. Un examen minutieux de la composition spectrale des rayons X nous montre qu'ils sont formés de deux types de radiations :

— des raies (monochromatiques) caractéristiques du métal choisi pour anticathode;

— un fond continu qui ne dépend que du voltage.

La longueur d'onde minimale λ_m de ce fond continu est donnée par : $\lambda_m . V = 12\,340$, où λ est en angströms et V en volts.

Quand on sait l'ordre de grandeur de la longueur d'onde des rayons X, on comprend sans peine combien il est difficile d'observer des phénomènes de diffraction. On en obtient cependant à l'aide de réseaux beaucoup plus fins que ceux employés pour la lumière. C'est à Laue que l'on doit les premières figures de diffraction en disposant un cristal sur le trajet d'un faisceau de rayons X. Laue démontra que la figure obtenue ne pouvait provenir que de la diffraction d'un ensemble de centres de diffraction disposés selon une structure cubique.

En employant différentes substances cristallines, on observe que les figures de diffraction obtenues sont liées à la disposition des atomes et à la position des plans cristallins. Les travaux de Laue et Bragg sont à l'origine d'une technique aujourd'hui fort répandue pour l'identification des substances cristallines. Cette technique repose sur le fait que chaque substance donne à l'analyse aux rayons X une figure de diffraction caractéristique, résultant de la structure du cristal; il est en outre possible, en présence d'un mélange de plusieurs substances, d'identifier les diverses figures par comparaison avec les diffractogrammes fournis par des substances connues.

Une telle méthode présente l'avantage d'éviter la destruction de la substance, comme cela se produit avec l'analyse chimique. Des substances différentes possédant la même structure cristalline donnent, aux rayons X, des diffractogrammes semblables, mais avec de légères différences en ce qui concerne l'espacement et l'intensité des lignes, dues aux différences de taille des atomes du cristal.

QUELQUES APPLICATIONS DES RAYONS X

Il existe bien d'autres applications des rayons X. Citons, par exemple, l'analyse des matériaux bruts et des produits finis. En métallographie, les rayons X servent à révéler des états de tension interne ou des ruptures de continuité à l'intérieur des produits finis. La radiographie est un procédé courant pour le contrôle des soudures et des fusions.

Mais c'est en médecine que les rayons X trouvent leur principale utilité. On distingue deux utilisations essentielles : le diagnostic radiologique et la radiothérapie. La radioscopie et la radiographie sont deux techniques fondées sur les différences de transparence des tissus de l'organisme aux rayons X. Les images sont reçues sur des substances sensibles aux rayons X (écran ou plaque photographique). Ainsi le squelette est observable dans des conditions de contraste idéales pour déceler des fractures, des malformations osseuses ou toute autre lésion.

Lorsque les différences de transparence des tissus ne permettent pas d'obtenir une image suffisamment nette, on administre au patient, par voie orale ou par injection intraveineuse, des substances dites « de contraste », facilitant l'exploration dans les organes.

Quant à la radiothérapie, elle est fondée sur la propriété des rayons X d'être ionisants et de provoquer la mort ou l'arrêt de prolifération des cellules malignes; aussi les emploie-t-on efficacement pour détruire les tissus malades.

A. Rizzi

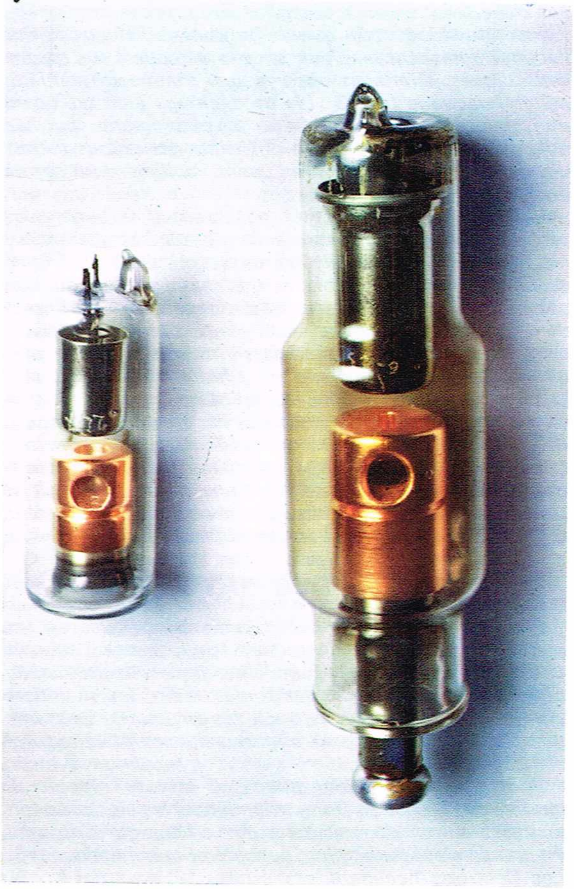

APPLICATIONS DU LASER

Dix ans après sa naissance, le laser connaît déjà une production en série et des applications très larges, allant de l'industrie à la médecine. Il y a seulement quelques années, les modèles de laser étaient peu nombreux, mais aujourd'hui on a mis au point des modèles aux caractéristiques bien définies, qui permettent des utilisations plus vastes dans des domaines nouveaux, dont quelques-uns sont déjà explorés à fond.

Parmi ces modèles, on trouve le laser de type « solide » à rubis ou à néodyme, et de type « gazeux », au néon, argon, azote, anhydride carbonique. D'une manière générale, les lasers à gaz sont à rayonnement continu, tandis que les lasers à cristal émettent des impulsions de durée très courte (de l'ordre de la microseconde ou même de la nanoseconde) qui peuvent être répétées à des intervalles rapprochés. Les lasers à gaz sont couramment utilisés pour réaliser des opérations d'alignement; ils émettent un rayon intense, continu, très mince, au diamètre pratiquement inchangé, qui constitue un axe d'alignement immatériel et précis. C'est ainsi que, en utilisant des dispositifs très simples, on peut aligner d'une manière rapide des machines de grandes dimensions, opération qui, sans ce système, exigerait beaucoup plus de temps et des moyens beaucoup plus complexes. Un tel procédé est employé pour les machines-outils depuis plusieurs années déjà; l'application la plus significative dans ce domaine a été l'alignement des différents éléments qui constituent l'accélérateur linéaire de Standford, réalisé avec une tolérance d'un demi-millimètre sur une longueur d'environ trois kilomètres. Jamais avec les moyens conventionnels, on n'aurait pu réaliser une telle opération avec une aussi grande précision. Le laser est aussi couramment employé pour réaliser des alignements dans les grands ouvrages de génie civil, comme, par exemple, le creusement de tunnels.

LE LASER DANS LA MINIATURISATION ET EN MÉDECINE

Le laser joue désormais un rôle décisif dans le domaine de la miniaturisation, c'est-à-dire pour la construction de circuits miniaturisés, de circuits intégrés, de microcomposants de type électrique, électronique ou mécanique. Les montres, ainsi que de nombreux instruments de précision, exigent l'emploi de « rubis » comme coussinets pour recevoir des axes d'un diamètre de plus en plus réduit, afin de réduire au minimum les frottements. Pour forer ces rubis, on emploie des lasers à impulsion, d'un maniement très simple et d'un coût assez réduit, capables de fonctionner pendant des années pratiquement sans entretien; c'est pour ce motif que le prix des rubis pour l'horlogerie et les micro-appareils a connu une baisse très considérable. La même technique sert à réaliser des filières pour le tréfilage et le calibrage des fils métalliques très minces employés par l'électronique et l'électrotechnique miniaturisées.

Dans le domaine des fibres textiles artificielles, on emploie des filières comportant des trous multiples, espacés et calibrés avec précision. Ces filières coûtent aujourd'hui beaucoup moins cher qu'autrefois, parce que le forage est exécuté au laser. Dans le domaine de la miniaturisation, le laser trouve bien d'autres applications, même dans des ensembles industriels qui travaillent en grande série. En employant une impulsion laser soigneusement dosée, ou une série d'impulsions, on peut réaliser sur n'importe quel type de métal une microsoudure régulière et sûre, même dans une production de série, puisqu'on est

I.G.D.A.-Rizzi

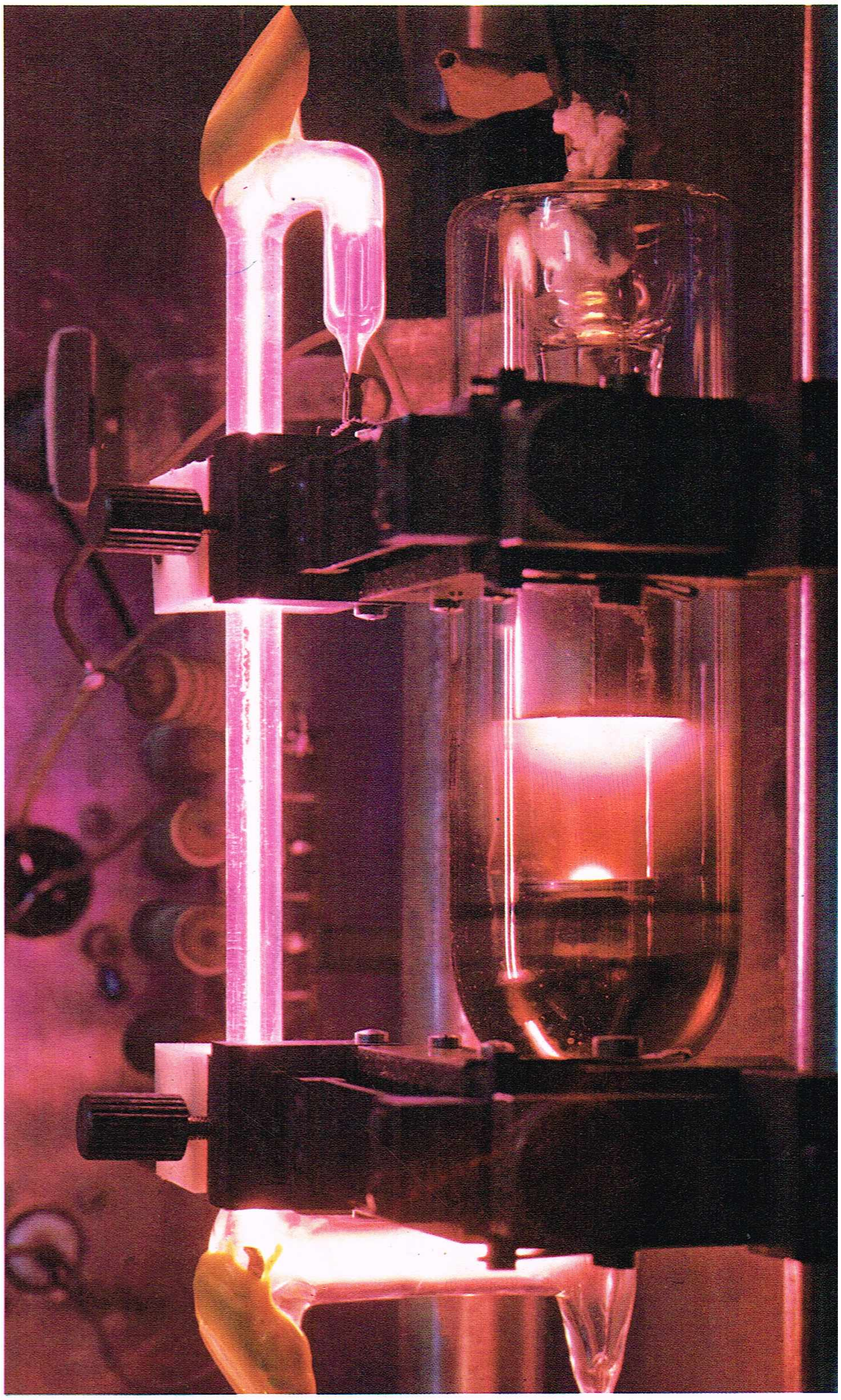

Laser au néon stabilisé en fréquence (Laboratoires CISE, Segrate).

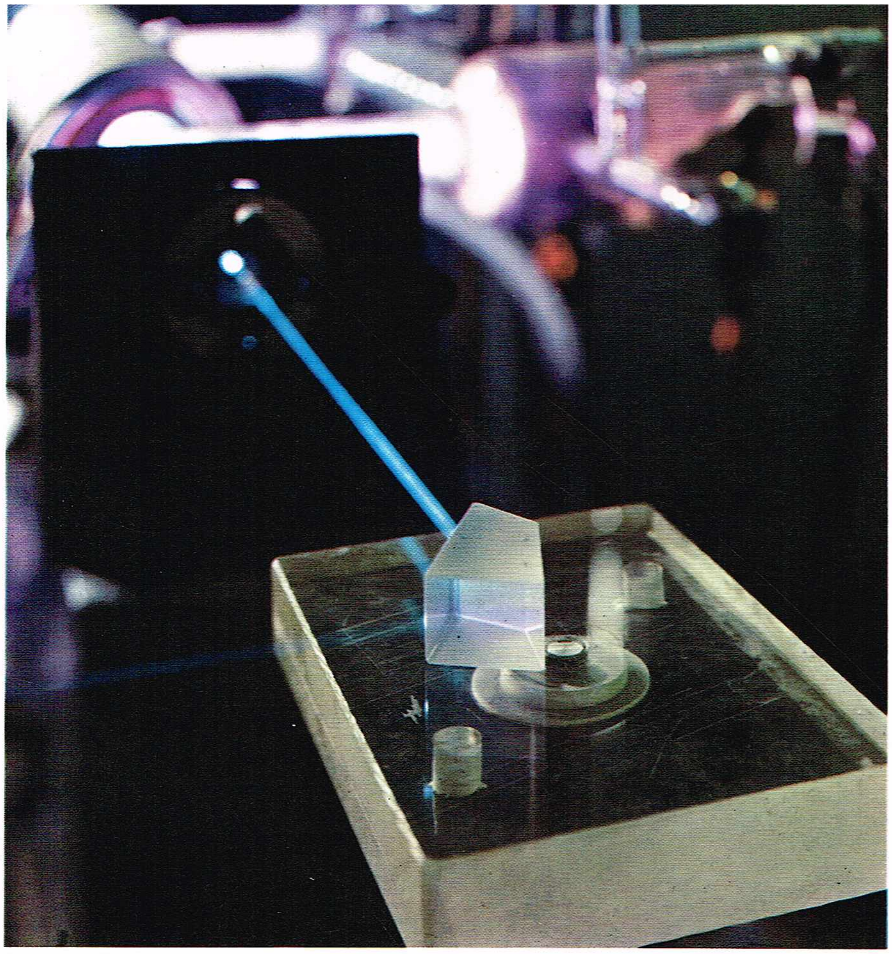

I.G.D.A. - Rizzi

Laser à argon ionisé; détail du prisme qui dévie et décompose le faisceau laser (Laboratoires CISE, Segrate).

capable d'adapter l'impulsion d'une manière parfaite aux situations les plus diverses. Tous les conducteurs à la sortie des microcomposants électroniques, microrelais, semi-conducteurs, condensateurs, etc., sont soudés à l'élément actif du composant à l'aide du laser. Celui-ci est également employé dans certains types de circuits intégrés pour réaliser des microcoupes et pour étalonner avec le maximum de précision la pièce achevée. Dans la pratique de la micromanipulation, le laser est souvent associé au microscope, ce qui permet à l'opérateur, en se servant de systèmes de déplacement micrométriques et de repères optiques, de placer les pièces à souder ou à travailler avec une extrême précision et de voir directement les résultats de son travail au laser. On tend aujourd'hui à réaliser des lasers plus puissants, à fonctionnement continu ou intermittent, afin de pouvoir appliquer une telle technique à des pièces de plus grande taille et d'obtenir la fusion ou la sublimation des métaux d'une manière plus efficace que ne le permettent les lasers actuels.

Le laser a été également adopté dans les interventions chirurgicales, surtout au niveau de l'œil; un exemple typique d'application est celui du traitement du décollement de la rétine, que l'on réalise avec des microcautérisations obtenues en employant un laser à impulsion; on a également tenté de traiter certaines tumeurs superficielles avec ce même moyen, et on étudie actuellement la possibilité d'employer le laser comme microscalpel hémostatique.

Le laser à impulsion permet d'effectuer des recherches biologiques sur des tissus et des organismes vivants, recherches qu'il ne serait pas possible d'effectuer à l'aide du seul microscope. Le rayon laser peut être focalisé sur des zones très petites, d'un diamètre de l'ordre du micron; il devient ainsi possible d'agir au niveau de la cellule et même des constituants cellulaires, par exemple sur un chromosome. Ces interventions sont effectuées sous le contrôle direct, visuel, du chercheur.

La possibilité de focaliser le rayon et d'en concentrer l'énergie sur une zone très réduite et pendant un temps extrêmement court, ce qui évite la diffusion de la chaleur autour du point d'impact, est une donnée capitale tant pour les applications technologiques que médicales et biologiques.

LES APPLICATIONS FUTURES DU LASER

Dans un proche avenir, le laser connaîtra de nouvelles applications. Un rayon émis par un laser au néodyme permet une visibilité sous l'eau d'environ un kilomètre, tandis que les sources lumineuses conventionnelles ne permettent de voir qu'à quelques mètres. Il est déjà possible, à bord d'un avion, de détecter des zones de turbulence atmosphérique à une distance considérable, par ciel serein. Des études d'une importance capitale sur le comportement du plasma, impossibles à effectuer avec les moyens classiques, ont pu être entreprises grâce au laser. Des appareils télémétriques au laser réalisent des mesures très précises sur terre, dans l'atmosphère et dans l'espace.

Il est très vraisemblable que le laser connaîtra des applications très intéressantes dans le domaine des télécommunications. Un rayon laser présente simultanément toutes les caractéristiques d'un rayon optique et d'une perturbation électromagnétique, bien que de fréquence extrêmement élevée; il se prête donc à être « modulé » ou « manipulé » de différentes manières, lui faisant jouer en quelque sorte un rôle d'« onde porteuse », capable d'acheminer des informations. Un rayon laser même de faible puissance est « visible » sur une très longue distance, car son rayon augmente très peu en s'éloignant de la source qui l'a engendrée. Par conséquent, la dispersion est faible et cette propriété favorise, à l'instar de ce qui existe en matière de transmissions radio, les transmissions par laser de directivité rigoureuse et peu sujettes à perturbation. On a pu diriger un rayon laser sur la Lune et le capter après réflexion.

Il y a tout lieu de penser que le laser connaîtra aussi d'intéressantes applications en chirurgie dentaire. En effet, en se servant de rayons lasers partiellement focalisés, il est possible de « vider » une carie sans chauffer le tissu environnant; dans la cavité ainsi nettoyée, le laser permettra de faire fondre de la porcelaine ou des métaux très résistants en vue de son obturation. Des expériences sont en cours pour traiter les caries superficielles en faisant fondre la couche superficielle de l'émail dentaire de manière à combler et recouvrir la cavité.

Dans le domaine spatial, les liaisons laser s'imposeront de plus en plus, compte tenu de la distance croissante atteinte par les engins cosmiques, car le rayon laser, en raison de sa directivité très précise, permet d'envoyer toutes sortes de messages sur des distances cosmiques. Dans bien d'autres domaines, le laser pourrait remplacer les dispositifs existants et le seul obstacle qu'on rencontre est lié au coût; celui-ci se réduira progressivement à mesure que les emplois du laser s'étendront et s'intensifieront.

Laser à argon ionisé; le faisceau émis est renvoyé par un prisme vers l'observateur (Laboratoires CISE, Segrate).

I.G.D.A. - Rizzi

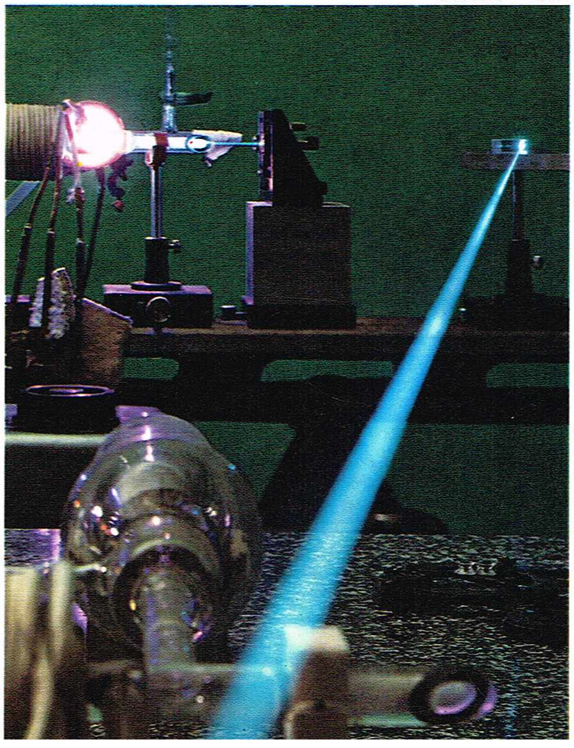

SATELLITES DE TÉLÉCOMMUNICATIONS

L'emploi de ces satellites a été récemment vulgarisé, à l'occasion des liaisons directes de télévision. Cette réalisation spectaculaire de la technique moderne a permis à des centaines de millions de personnes de suivre « en direct » la descente des premiers cosmonautes sur le sol lunaire. Cependant, ce n'est pas tant leur intérêt comme relais de transmission des émissions de télévision qui explique l'existence et la multiplication prochaine de ces satellites, que l'augmentation continue et rapide des communications intercontinentales sur longue distance.

De nos jours, il serait difficile, sinon au prix de difficultés techniques énormes et de dépenses colossales, de se dispenser des satellites artificiels pour réaliser les télécommunications sur grande distance, dont le nombre croît au rythme d'environ 20 % par an. En effet, le progrès exige des liaisons à grande distance de plus en plus nombreuses pour canaliser le flot de communications.

Les moyens classiques, téléphone et radio, ne sont plus capables de faire face à une tâche aussi imposante. Aux débuts de la téléphonie, un câble simple ne pouvait véhiculer qu'une seule conversation, alors qu'un câble multiple pouvait en transmettre simultanément une vingtaine. Après la Première Guerre mondiale, on vit la naissance des câbles coaxiaux et le début des communications téléphoniques sur des fréquences porteuses. Cette technique consiste à « moduler » une radiofréquence suivant un procédé emprunté à la technique radio et à la « démoduler » à l'arrivée, éventuellement après amplification. L'installation se complique du fait qu'il faut disposer de centrales spéciales pour engendrer les fréquences porteuses, les moduler au départ et les démoduler à l'arrivée, ainsi que de câbles d'un type particulier et très coûteux. Mais il devient possible de faire passer à travers un seul câble un nombre important de conversations simultanées (1 000 à l'aller et 1 000 au retour) sans interférer l'une avec l'autre.

Ce procédé permit de réaliser des progrès considérables et de renforcer de manière impressionnante les réseaux téléphoniques nationaux et internationaux, mais il se révéla limité face à l'augmentation des télécommunications sur longue distance. Les dix dernières années ont vu la diffusion des téléscripteurs : mais ces derniers ont besoin eux aussi de câbles téléphoniques pour véhiculer les impulsions nécessaires au codage des lettres frappées sur la bande de papier par l'appareil récepteur.

A PEINE 3 000 CANAUX DISPONIBLES

Les ondes hertziennes possèdent la caractéristique d'être réfléchies par la ionosphère sans déformations importantes; il est ainsi possible de recevoir une transmission émise par une station qui demeure « cachée » par la courbure terrestre. En utilisant une double ou une triple réflexion par la ionosphère, il est même possible de réaliser des liaisons entre localités situées aux antipodes. La fameuse expérience de Marconi, qui réalisa la première liaison radio Europe-Australie, en est une illustration historique.

Mais même les transmissions radio subissent les effets de l'« embouteillage » dû à la multiplication des communications. Deux transmissions radio interfèrent, c'est-à-dire se brouillent réciproquement, si les fréquences utilisées diffèrent entre elles de moins de 10 000 périodes (10 kilohertz). Puisque la bande des « ondes moyennes » est réservée aux émissions radio normales, on ne peut utiliser, dans le domaine des ondes courtes, que des fréquences allant d'environ 1 500 000 cycles (1,5 mégahertz) à environ 30 000 000 de cycles (30 mégahertz). Les fréquences

Archives Radaelli

Le satellite Intelstat II, placé sur une orbite synchrone ; il joue le rôle de station réceptrice et émettrice de signaux télévisuels, téléphoniques et télex.

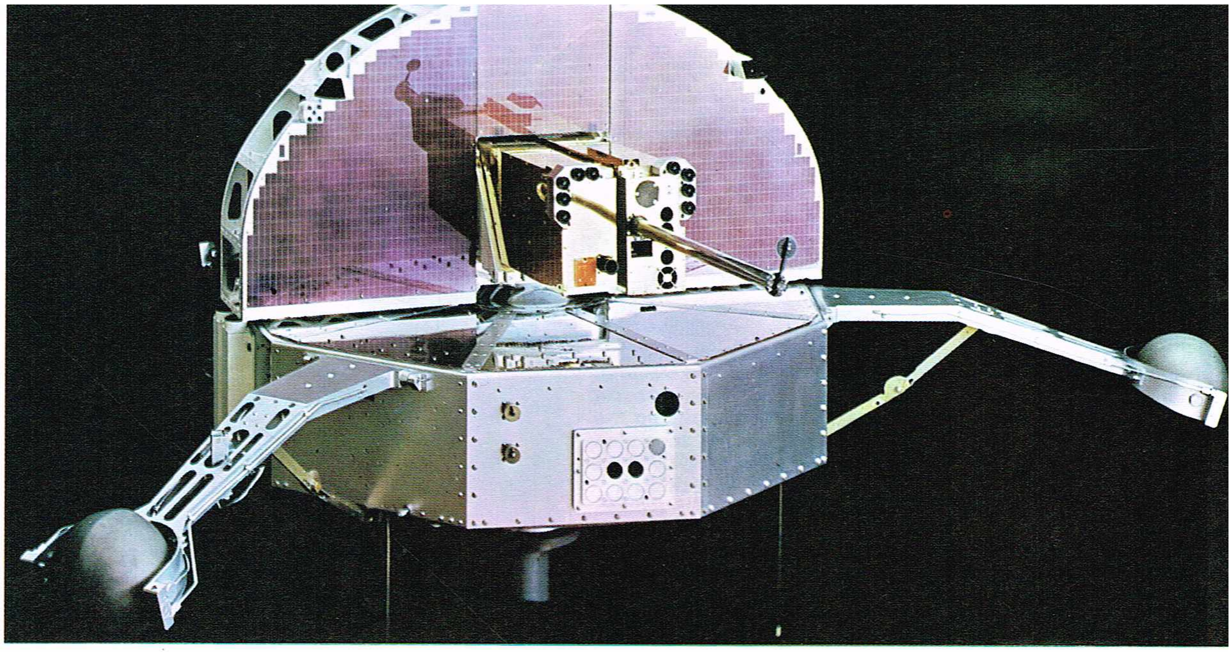

Archives Radaelli

Satellite de télécommunications Telstar II. Les Telstar ont permis de réaliser les premières liaisons de télévision par satellite entre l'Amérique et l'Europe.

supérieures à 30 mégahertz ne sont pas utilisables pour des liaisons terrestres, car elles « trouent » la ionosphère, c'est-à-dire la traversent sans être réfléchies. La nécessité d'utiliser des fréquences échelonnées de 10 en 10 kilohertz réduit donc le nombre de fréquences disponibles à environ 3 000. Les « canaux » disponibles (un canal définit une bande de fréquence de 10 kilohertz « occupée » complètement par une émission radio) pour les transmissions à longue et moyenne distance sont donc au total 3 000, et c'est par ces canaux que devraient être acheminées les « transmissions à ondes courtes » d'intérêt public, les radiocommunications des navires, des avions, ainsi que toutes les communications radiotéléphoniques sur longue distance et intercontinentales. Le développement croissant des communications et l'augmentation des navires et des avions ont fait que ces 3 000 canaux sont devenus notoirement insuffisants.

LE SATELLITE « STATIONNAIRE »

Le satellite artificiel de télécommunications apporte une solution nouvelle à ce problème. Un satellite artificiel voyage sur une orbite située en dehors de l'atmosphère : il est dit « stationnaire » si sa révolution correspond à 24 heures. Un satellite de ce type, placé sur une orbite à une altitude d'environ 36 000 kilomètres, demeure toujours au-dessus de la même localité terrestre. A bord d'un satellite de télécommunications se trouve une station-relais, dérivée de celles qu'on emploie en télévision, capable de recevoir un signal transmis sur une fréquence donnée et de le retransmettre après l'avoir porté sur une fréquence différente, afin d'éviter des interférences entre la transmission à l'arrivée et la transmission au départ.

Un tel satellite est relié, de manière permanente ou intermittente, avec deux stations très éloignées, situées soit sur le même continent, soit sur deux continents différents. Les stations terrestres que le satellite emploie, tant en transmission qu'en réception, possèdent des antennes directionnelles, c'est-à-dire capables de diriger un faisceau d'ondes avec une précision suffisante; il s'agit en somme de la même technique que dans les « ponts-radio ».

Si l'on dispose d'une station-relais à bord d'un satellite situé en dehors de la ionosphère, les fréquences utilisables sont supérieures à 30 mégahertz, c'est-à-dire capables de traverser dans les deux sens la ionosphère sans distorsion. La bande de fréquence ainsi disponible devient donc très vaste : en utilisant simplement une bande de 30 à 60 mégahertz, on disposerait d'autant de canaux que ceux qui s'étagent sur la bande entière des ondes courtes. Puisque les fréquences utilisables avec les satellites artificiels s'étendent jusqu'à 10 000 mégahertz et au-delà, les canaux disponibles sont au nombre de plusieurs dizaines de milliers.

Le nombre des satellites de télécommunications qu'il est possible de mettre en orbite est élevé; en outre, sur chacun d'eux, il est possible d'installer des appareils complexes, capables d'opérer sur différentes fréquences, de telle sorte qu'un seul satellite peut acheminer simultanément 10 000 télécommunications différentes et même plus.

« VIE ACTIVE » ET COUT D'UN SATELLITE

Chaque satellite, surtout s'il est du type « stationnaire », est facilement maintenu en liaison avec deux stations terrestres grâce à une orientation convenable de leurs antennes à la forme parabolique si caractéristique. Le satellite est muni lui aussi d'antennes de forme parabolique, d'un diamètre plus petit, et d'un dispositif d'orientation commandé par des gyroscopes ou de petits moteurs-fusées. Le point servant de référence à l'orientation du satellite peut être l'horizon terrestre, le Soleil, une étoile : l'intervention du dispositif d'orientation peut être soit automatique, soit asservie à un ordre provenant de la Terre. Les antennes de bord des satellites peuvent être comparées à un parapluie, dans lequel le tissu de soie serait remplacé par une trame de minces fils métalliques : cette sorte de parapluie, qui demeure fermé lors de la traversée de l'atmosphère, s'ouvre une fois que le satellite s'est stabilisé en orbite et prend sa forme parabolique caractéristique, la plus apte à permettre l'émission d'un faisceau d'ondes avec une faible dispersion.

Ces satellites artificiels n'ont pas une vie illimitée. Les systèmes d'orientation et les appareillages radio exigent une puissance importante qui ne pourra pas être indéfiniment fournie par les cellules solaires dont ils sont équipés : les gaz nécessaires au fonctionnement du dispositif d'orientation, lorsque celle-ci utilise des moteurs-fusées, finissent par s'épuiser : enfin, les composants électroniques s'usent au bout d'un certain nombre d'heures de fonctionnement. Actuellement, la « vie active » d'un satellite artificiel est de l'ordre de quelques mois. Mais le coût de sa mise en orbite est relativement réduit, puisqu'on peut utiliser un missile de faibles dimensions, à propergol solide, lancé d'un cosmodrome secondaire.

Satellite ATS B (Applications Technology Satellite B). Il fut réalisé par la NASA pour servir de laboratoire spatial aux techniques les plus avancées dans le domaine des communications spatiales, de la photographie spatiale, de la météorologie, etc.

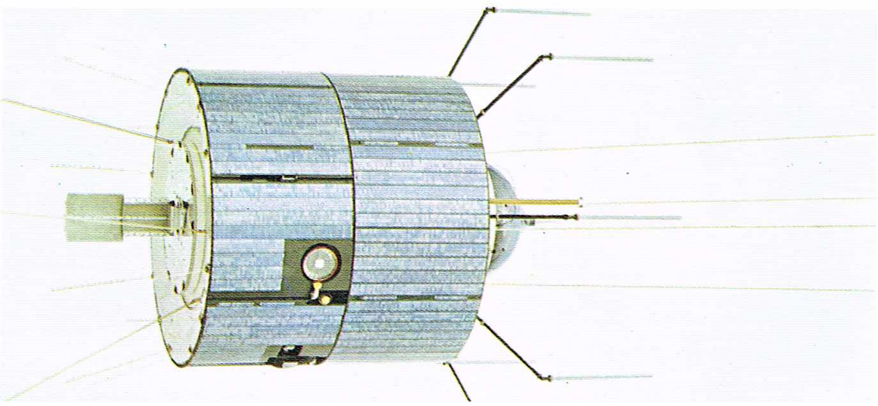

Archives Radaelli

LES MISSILES TACTIQUES

Les missiles ou fusées sont sujets à de nombreux articles dans la presse, non seulement à l'occasion des entreprises spatiales, mais aussi lors des conflits armés et du maintien de l'équilibre militaire entre les différentes puissances.

Certaines expressions sont ainsi entrées dans le langage courant, presque toutes sous forme de traductions de termes anglo-saxons, dont la signification n'est pas toujours très explicite, comme missiles air-air, missiles balistiques *ou* missiles sol-sol.

La caractéristique essentielle d'un missile consiste en un système de propulsion à réaction, entièrement autonome, c'est-à-dire n'utilisant aucun élément contenu dans l'atmosphère. Pour réaliser ce type de propulsion, le missile transporte un « propergol » constitué soit de deux liquides, qui, en se mélangeant dans les chambres de combustion, réagissent chimiquement et donnent naissance à des gaz et à de l'énergie calorifique, soit par un mélange solide homogène de plusieurs composants qui, une fois mis à feu, continue à « brûler » (même dans le vide ou sous l'eau) suivant une réaction équivalente aux propergols liquides. Un système de ce type peut servir à la propulsion d'un avion, mais il est surtout utilisé pour porter à une vitesse importante et dans un temps très court une « charge utile ». Dans le cas de missiles vecteurs de grandes dimensions, utilisés dans les entreprises spatiales, cette charge est constituée par une capsule ou une sonde spatiale ou tout autre engin d'études. En revanche, dans le cas des missiles tactiques, en principe de dimensions beaucoup plus réduites, la charge utile est formée d'une certaine quantité d'explosif (bombe thermonucléaire par exemple) ou par une tête perforante, qui, grâce à la vitesse très élevée acquise par le projectile, alliée à une charge de poudre, est capable de traverser d'épais blindages.

Les emplois militaires des missiles sont plus anciens qu'on pourrait le penser : on employait déjà des missiles non seulement en Extrême-Orient, qui fut sans doute le lieu de naissance de la pyrotechnie, mais aussi en Europe, pendant toute la période de la Renaissance. En effet, à cette époque, des fusées rudimentaires mais de dimensions notables furent utilisées, lors des sièges des villes fortifiées ; ces fusées permettaient de lancer des projectiles de toute nature sur les assaillants. Il s'agissait de gros tubes métalliques remplis de poudre noire et munis d'une tête explosive ; ces « missiles » étaient extrêmement imprécis et explosaient souvent sur leur affût ou immédiatement après leur lancement. Ils furent progressivement abandonnés, car l'artillerie proprement dite se développait, grâce aux progrès de la métallurgie.

L'ÉVOLUTION DE LA SCIENCE DES MISSILES

Au cours de la Seconde Guerre mondiale, on assista au développement des missiles tactiques. Les Américains et les Soviétiques intensifièrent pendant toute la durée du conflit l'emploi de missiles antichars, lancés par un affût tubulaire léger et facilement transportable. Le « bazooka » américain et le « fusil antichar » soviétique exploitaient l'un et l'autre la caractéristique essentielle de la fusée : son accélération extrêmement rapide. Un projectile de ce type est capable de perforer le blindage d'un char en liquéfiant partiellement le métal de la zone d'impact.

Les Soviétiques employèrent les célèbres « katiouschka », missiles de moyenne portée dotés de têtes explosives, lancés par salves de cinq à sept à l'aide de tubes spéciaux transportés à dos d'homme, traînés par des véhicules légers, ou montés sur des engins automoteurs à chenilles. Ces armes avaient une puissance de feu exceptionnelle et

Titan II **: un des plus puissants missiles balistiques intercontinentaux.**

Archives Radaelli

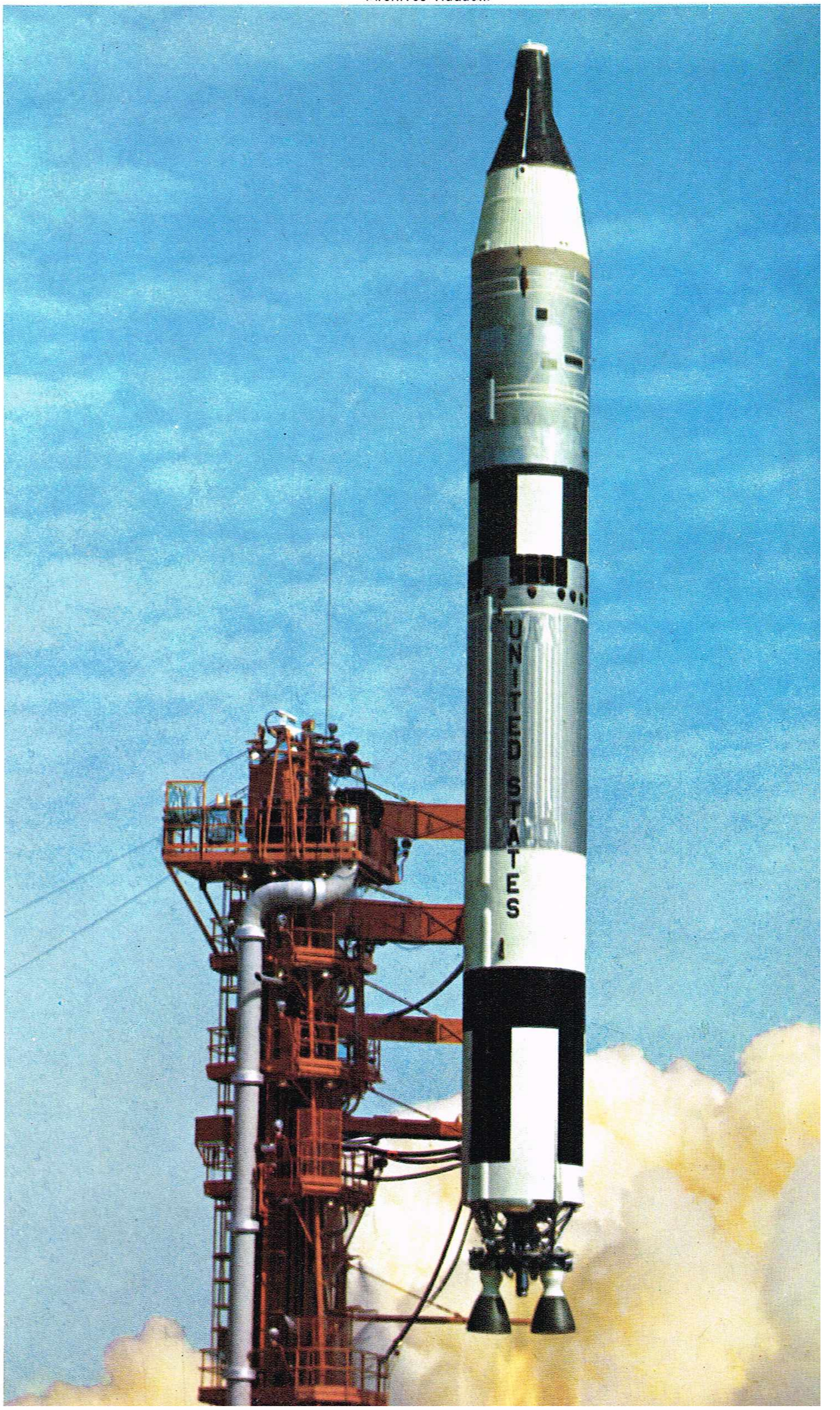

constituaient un appoint très utile à l'artillerie traditionnelle. Dans les deux dernières années du conflit, des unités légères de la marine soviétique et américaine furent équipées de rampes de lancement de missiles à la place des canons classiques de petit et moyen calibre. Vers la fin du conflit les Allemands utilisèrent contre le territoire britannique les V 2, missiles de grande taille capables de transporter environ une tonne d'explosif à une distance de 100 à 200 kilomètres. Ce type d'armement a bénéficié de perfectionnements nombreux au cours des vingt dernières années et a démontré, dans divers conflits, sa redoutable efficacité.

De leur côté, les gros missiles dérivés des V 2 connurent aussi des perfectionnements notables et donnèrent naissance à la génération des missiles balistiques intercontinentaux, capables de transporter à une distance de 6 à 7 000 kilomètres une tête chargée d'un explosif de type nucléaire d'un poids de plusieurs tonnes; la précision atteinte est de l'ordre de 10 à 20 kilomètres. Leur rayon d'action et leur énorme pouvoir destructeur ont valu aux missiles intercontinentaux le nom d'« arme absolue ». Les plus grandes puissances disposent aujourd'hui de missiles capables d'atteindre une cible choisie après avoir parcouru une trajectoire quelconque, susceptible d'être modifiée à volonté pendant le vol et souvent très éloignée de la trajectoire directe. Il est ainsi devenu pratiquement impossible d'interposer des systèmes de surveillance ou de défense entre les zones de lancement (plus ou moins universellement connues) et les cibles présumées. En outre, on est parvenu à installer des missiles avec leur rampe de lancement, sur des satellites artificiels, ce qui permet d'atteindre n'importe quel point du globe par un simple ordre radio envoyé du sol. La prolifération de ces armes de plus en plus dangereuses a amené Soviétiques et Américains à rechercher un accord en vue de leur limitation ; en effet, toute défense semble désormais impossible et, d'autre part, cette course aux armements est ruineuse pour l'équilibre économique des différents pays.

Missile sol-air *« Hawk »*, lancé depuis une base mobile.

Archives Radaelli

MISSILES DE MOYENNES ET PETITES DIMENSIONS

Des missiles à courte portée, pouvant être lancés par des rampes très légères, ont souvent remplacé les mortiers de tranchée, à cause d'une efficacité tout aussi grande pour une maniabilité bien supérieure. Ces missiles sont dits sol-sol, puisqu'ils sont lancés depuis une rampe terrestre vers une cible également terrestre. Il existe une large gamme de missiles sol-sol, avec des portées allant de quelques centaines de mètres à plusieurs dizaines ou même plusieurs centaines de kilomètres et capables de transporter une charge utile de quelques kilogrammes à quelques tonnes. Les rampes de lancement de ces missiles peuvent être installées sur des bases fixes ou sur des engins mobiles. Les grands défilés militaires ont rendu familière l'image de ces missiles sol-sol. Ces derniers ont fait aussi rapidement leur entrée dans la marine militaire : de nombreux croiseurs sont maintenant dotés de rampes de lancement à la place des classiques canons. Ils ont reçu l'appellation de missiles sol-sol, bien qu'étant utilisés sur mer.

Les missiles sol-air sont des missiles antiaériens, expédiés depuis une base terrestre contre des avions en vol. Ces missiles sont très efficaces contre les avions de bombardement ou de transport qui, à cause de leur grande taille, ne sont ni très maniables ni très rapides, donc incapables de changer facilement d'altitude ou de cap. Certains missiles sol-air sont pourvus d'un radar et d'un dispositif de guidage automatique ; ils sont alors capables d'atteindre leur cible, même si celle-ci modifie sa route. L'efficacité de ces missiles a rendu discutable l'utilité des bombardements massifs, les pertes en avions étant trop importantes.

En revanche, les missiles sol-air (comme du reste l'artillerie antiaérienne conventionnelle) sont moins efficaces contre les avions légers de combat et de chasse, beaucoup plus petits et extrêmement mobiles. Ces mêmes avions, qui étaient dotés antérieurement de petits canons à tir rapide, habituellement fixes, sont équipés aujourd'hui de missiles ; ils sont généralement installés sous les ailes. Les avions de combat destinés à attaquer des objectifs terrestres sont armés de missiles air-sol, tandis que les avions de chasse, propres au combat aérien, transportent des missiles air-air. En général, les missiles air-sol sont de plus grande taille et possèdent un pouvoir destructeur supérieur à celui des missiles air-air ; en effet, un projectile de calibre réduit est suffisant pour endommager irrémédiablement un avion.

Pratiquement, tous les missiles air-air, air-sol, et sol-sol de petites et moyennes dimensions utilisent des propergols solides qui présentent l'avantage d'un transport, d'un stockage faciles et d'une utilisation rapide. Pour les missiles sol-air, lancés le plus souvent à partir de bases fixes, on peut employer du propergol liquide, en donnant toutefois la préférence à des matériaux faciles à stocker et à manipuler (par exemple l'acide nitrique et des mélanges d'hydrocarbures). Pour les missiles sol-sol de grandes dimensions, on tend aujourd'hui à réaliser des propergols solides en blocs, de taille croissante, afin d'éliminer le problème du stockage et de réduire au minimum les manœuvres préparatoires. Les missiles balistiques intercontinentaux continuent cependant à utiliser des propergols liquides à cause de leur rendement supérieur et de la difficulté à réaliser des propergols solides en blocs de grande taille ; en outre, les propergols liquides permettent de diriger les missiles de manière plus précise. En effet, une fois mis à feu, le propergol solide continue à brûler jusqu'à épuisement, ce qui rend impossible une éventuelle correction de trajectoire par modification de la poussée, opération facile à réaliser avec un missile à propergol liquide. Les experts militaires discutent sur les diverses possibilités des missiles, sur l'opposition missiles-artillerie conventionnelle, sur la concurrence du missile à moyenne portée face aux grands bombardiers et, d'autre part, sur la vulnérabilité des avions de guerre, en général, par rapport aux missiles antiaériens modernes. Les opinions sont diverses et controversées, mais les progrès incessants dans ce domaine font pencher la balance vers cette arme nouvelle, sans pour autant songer à éliminer les engins classiques comme le canon et le mortier.

LES BARRAGES

Les barrages sont des ouvrages de maçonnerie, destinés à réaliser des bassins de retenue d'eau. On distingue les barrages maritimes, pour la protection des côtes ou des ports contre les vagues, et les barrages de vallées pour créer des plans d'eau destinés à l'irrigation ou à la production d'énergie électrique, assurant aussi la protection contre les inondations et la régulation des cours d'eau.

Les digues maritimes reposent sur une fondation obtenue en immergeant au fond de la mer des morceaux de roche ou des blocs de ciment spécialement fabriqués pour résiter à l'usure de l'eau ; très vite, ces éléments se stabilisent sous l'effet combiné du poids et de la pression hydrostatique et forment une large base possédant une résistance suffisante pour supporter le poids des superstructures. Sur cette base, on ancre la partie en élévation du barrage, qui sera construite en maçonnerie ou en béton et aura des parois le plus souvent verticales.

Le problème de la construction des barrages de retenue pour la création de plans d'eau artificiels dans les vallées est généralement beaucoup plus complexe ; ces plans d'eau constituent des réservoirs pour la production d'énergie hydro-électrique ou pour l'irrigation, voire pour ces deux fonctions à la fois. Dans ce cas, l'eau exerce sa poussée uniquement sur une face de l'ouvrage ; le principal problème qui se pose est donc celui de la résistance à la pression, qui peut atteindre des valeurs énormes lorsque le barrage est très haut (la hauteur des barrages dépasse parfois une centaine de mètres). Les principaux types de barrages sont les barrages-poids, les barrages-voûtes, les barrages à contreforts et les barrages à voûtes multiples.

Le barrage de Hoover Dam sur le Colorado (U. S. A.).

E. P. S.

N. Cirani

Un exemple de barrage-voûte sur le lac de Fedaia, dans les Alpes Tridentines. Dans la plupart des cas, ces barrages sont construits en béton armé.

LES BARRAGES-POIDS ET LES BARRAGES-VOUTES

Le barrage-poids a une section verticale de forme à peu près triangulaire ou trapézoïdale à paroi aval inclinée et une section horizontale rectiligne ou, souvent, courbe. Ce type de barrage est en équilibre statique sous l'action de deux facteurs principaux : la poussée hydrostatique due au volume de l'eau retenue (poussée qui croît du haut vers le bas, avec une résultante horizontale), et le poids de la structure (force résultante verticale) ; par conséquent, un tel barrage doit présenter une très grande épaisseur, du moins à sa base. Mais il faut aussi tenir compte de l'action de la glace et, surtout, des effets des sous-pressions, qui constituent un danger insidieux et redoutable. En effet, les infiltrations d'eau sous les fondations du barrage créent une pression parasite s'exerçant vers le haut ; celle-ci a un effet équivalent à une diminution du poids du barrage et trouble par conséquent l'indispensable équilibre entre le poids de l'ouvrage et la pression de l'eau retenue. Cette action dépend de la nature plus ou moins perméable du terrain. La fondation doit reposer sur une couche de roche suffisamment compacte pour offrir la résistance et l'imperméabilité nécessaires ; la roche peut être consolidée par injection de mortier de ciment sous forte pression. Le barrage est édifié soit en maçonnerie avec des blocs de roche soigneusement ourdés, soit en béton coulé. Afin de ne pas contrarier les phénomènes de dilatation et de retrait qui font varier le volume de la construction, phénomènes dus aux variations thermiques au moment de la prise, on prévoit des joints de dilatation et de retrait.

Lorsque le terrain de base n'offre pas une stabilité et une consistance suffisantes, on adopte un autre type de barrage, le barrage-voûte. Il s'agit d'une structure à coupe horizontale curviligne (convexité amont), qui transmet, sous forme de poussées, aux deux parois latérales l'effort exercé par la pression des eaux, de la même manière qu'une voûte classique transmet aux pieds-droits les charges verticales qui s'exercent sur elle. Dans le cas des barrages-voûtes, une étude attentive de la nature des terrains dans lesquels sont ancrées leurs extrémités est nécessaire ; il faut que ceux-ci soient aptes à supporter la poussée qui s'exerce sur eux, le fond n'ayant à supporter que le poids de la structure et quelques actions accessoires. Dans la grande majorité des cas, les barrages-voûtes sont réalisés en béton.

AUTRES TYPES DE BARRAGES

Un système dérivé du précédent est celui du barrage à contreforts et à voûtes multiples. Il consiste en une série de contreforts verticaux, d'épaisseur croissante vers la base ; sur la face amont de ceux-ci s'appuie une série de voûtes, légèrement inclinées vers l'aval et présentant une convexité amont, comme dans le cas précédent. Ces voûtes transmettent aux contreforts les poussées hydrostatiques de l'eau. Il est donc nécessaire que ceux-ci soient ancrés sur un terrain compact, de nature très uniforme et résistante, pour empêcher d'éventuels glissements, qui pourraient provoquer des déséquilibres graves et même la ruine de l'ouvrage. Les structures et contreforts sont généralement en béton armé. Les barrages de ce type, comme toutes les structures à voûtes, en raison de la poussée qu'ils exercent sur les points d'ancrage, peuvent être dangereusement affaiblis par un affaissement même léger de ces derniers ; l'usage de multiples précautions dans l'étude du terrain et dans l'exécution de l'ouvrage est donc indispensable. Les voûtes entre les contreforts sont parfois remplacées par des plaques en béton armé, surtout lorsque les intervalles sont faibles. Dans ce cas, la structure travaille statiquement comme celle d'un plancher reposant sur des poutres.

Un problème important que l'on rencontre dans la construction des barrages est celui des évacuateurs de crues ; en effet, bien que les dimensions soient largement calculées, un barrage peut se révéler insuffisant pour contenir l'eau amenée par les grandes crues. L'eau ne doit pas dépasser un certain niveau, au-dessus duquel se trouve le couronnement libre du barrage ; pour cela, elle doit pouvoir s'écouler librement à travers une série d'orifices spéciaux appelés déversoirs, que l'on ménage latéralement. Les dimensions de ces orifices sont calculées de manière à permettre l'évacuation du débit de la plus grande crue (dite crue catastrophique) enregistrée dans le passé pour le cours d'eau considéré. En plus des déversoirs, un barrage comporte un ou plusieurs évacuateurs de fond ; ils sont constitués par des tubes qui traversent la base du barrage et sont munis de vannes commandées par un mécanisme approprié. Ces évacuateurs sont mis en service pour faire baisser le niveau des eaux et peuvent même permettre de vider éventuellement le bassin.

La construction d'un barrage est régie par des règlements très rigoureux, amplement justifiés par les risques énormes que comporte la rupture de l'ouvrage. Tous les facteurs susceptibles d'influer sur la stabilité du barrage, comme le poids de la structure en béton, les efforts de nature thermique auxquels elle est soumise, la poussée hydrostatique sur le parement amont, la pression interstitielle, la poussée de la glace sur le couronnement, l'action des forces sismiques dans les zones volcaniques, sont donc sérieusement vérifiés à l'étude de manière à éviter tout accident, et la surveillance reste constante durant les travaux jusqu'à la réalisation finale.

Vue du barrage-poids du Bull Shoal Reservoir, dans l'Arkansas (U. S. A.).

Grant Heilman

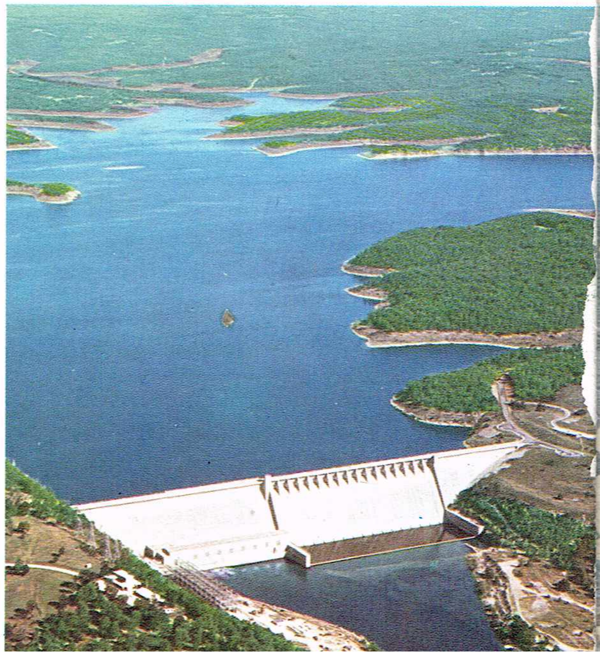

ENCYCLOPÉDIE DES SCIENCES

ASTRONOMIE
PHYSIQUE DU GLOBE

GRANGE BATELIÈRE

GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

ASTRONOMIE

—

PHYSIQUE DU GLOBE

GRANGE BATELIÈRE, ÉDITIONS ATLAS, PARIS - ÉDITIONS KISTER, GENÈVE
ÉDITIONS ÉRASME, BRUXELLES-ANVERS

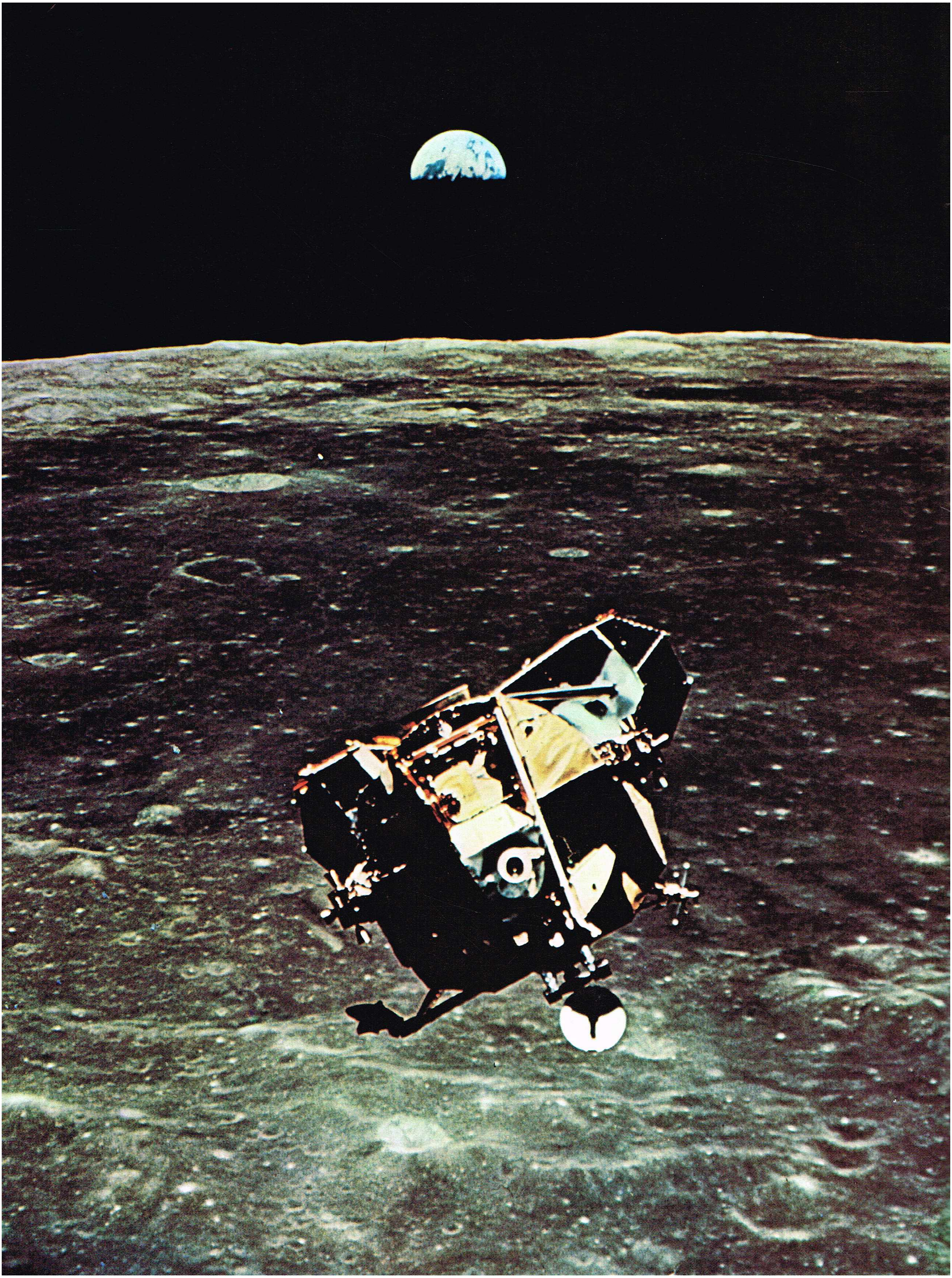

Publiée sous le haut patronage de :
Messieurs les professeurs :
Jean DORST, membre de l'Institut,
Charles FEHRENBACH, membre de l'Institut,
Roger HEIM, membre de l'Institut,
Monsieur l'amiral André JUBELIN,
Messieurs les professeurs :
Pierre LÉPINE, membre de l'Institut,
Louis LEPRINCE-RINGUET, de l'Académie française,
Jean-François LEROY, professeur au Muséum national d'histoire naturelle,
Henri NORMANT, membre de l'Institut,
Monsieur Jacques PICCARD, docteur ès sciences h.c.

Ont collaboré à ce volume :

Ch. FEHRENBACH, pour l'astronomie.
C. de BÉNAZÉ, pour les généralités sur la physique du globe,
la séismologie, la gravimétrie, le géomagnétisme,
la prospection géophysique.
H. MONGE, pour la géodésie.
L. LAPOINTE, pour la topographie.
D. CRÉMONT, pour la photogrammétrie.
R. CUÉNIN, pour la cartographie.
C. FONS, pour la météorologie et la climatologie.
C. BENOIT, pour les océans; océanographie, océanologie.

Les schémas portant la référence Richard Colin
ont été réalisés d'après des croquis fournis par les auteurs.

Réalisation	IDÉES ET ÉDITIONS 16, avenue de Friedland, 75008 Paris
Comité de direction	Simone DEVAUX, Uberto TOSCO.
Rédaction	Patrick PHLIPONEAU, Françoise MENU, Marie-Noëlle PAILLETTE, Vanina DORÉ, Monique LIONS-GENTIL.
Recherche de l'illustration	Mathilde RIEUSSEC.
Mise en pages	Tito TOPIN et Serge BROCHE.
Illustrations techniques	Richard COLIN.
Coordinateur des dessins	Mario LOGLI.
Fabrication	Sylvia COLIN, Jocelyne DUCHESNE, Jocelyne TÉPÉNIER.

Dans ce volume :

L'ASTRONOMIE

LA PHYSIQUE DU GLOBE

Mount Wilson and Palomar Observatories

L'ASTRONOMIE

GÉNÉRALITÉS SUR L'ASTRONOMIE

▲ *L'astronomie est considérée comme la plus ancienne des sciences; un grand nombre de « systèmes du monde » ont été édifiés à travers les âges, mais c'est à des hommes tels que Copernic, Kepler, Galilée et ensuite Newton que l'on doit le système définitif de l'Univers du système solaire et de la Voie lactée. Ici, la galaxie NGC 7331 dans la constellation de Pégase.*

Historique

L'astronomie est considérée par tous comme la plus ancienne des sciences. En effet, dès l'aube de la civilisation, l'homme a été frappé par l'aspect changeant du ciel : l'alternance des jours et des nuits, les phases de la Lune, les constellations variables suivant les saisons, le lever et le coucher des astres, la présence ou l'absence de l'étoile du Berger, l'apparition des comètes.

Il a essayé de comprendre la succession de ces phénomènes et de les expliquer. C'est ainsi qu'un grand nombre de « systèmes du monde » plus ou moins ingénieux et compliqués furent édifiés et, sous l'influence des civilisations et des religions, élevés en dogmes. Il fallut attendre le XVI^e siècle avec Copernic, Kepler, Galilée et ensuite Newton pour arriver à un système qui est maintenant définitif, au moins pour l'Univers du système solaire et de la Voie lactée. Cependant, même au XX^e siècle, la science de l'Univers dans son entier, ou cosmologie, est loin d'être arrivée à un état satisfaisant.

Science d'observation au début, elle devint vite une science de déduction car les hommes reconnurent, sans les comprendre, des périodicités qui leur permirent de prédire avec plus ou moins de succès les phénomènes. Certains sont rares et souvent compliqués, notamment les éclipses de Soleil dans une région donnée de la Terre, ou l'apparition des comètes. Il fallut attendre de disposer des relations écrites d'anciennes observations pour en déduire des lois, et ce n'est qu'au début des Temps modernes qu'on établit un système simple du monde représentant la réalité avec une grande précision.

Naturellement, la cause profonde et le pourquoi de cet Univers étrange dans lequel nous vivons ne sont pas encore connus. Nous savons que tout notre système solaire et notre Voie lactée s'expliquent si l'on admet, d'une part, que les lois profondes, l'attraction universelle, la nature de la matière et les lois du rayonnement électromagnétique s'appliquent à tout l'Univers et, d'autre part, que le monde est tel qu'il est. Il reste à connaître comment il était au « début des temps » — si cette notion a une signification. A ce sujet les idées divergent, et il est difficile d'envisager ce qu'il sera dans un temps très éloigné.

Science d'observation, l'astronomie fut dès le début une science extrêmement pratique et utilitaire. La relation entre la position plus ou moins élevée dans le ciel du Soleil et les saisons apparut rapidement. Le retour des saisons, si essentiel pour l'agriculteur, le berger et le chasseur, amena assez rapidement les hommes à déterminer la longueur de l'année en jours. Le cycle lunaire est moins important pour les peuples habitant loin d'un grand océan, mais la régularité du retour des phases de la Lune permit de diviser l'année en mois; toutefois, du fait que l'année ne comprend pas un nombre exact de mois, de grandes difficultés apparurent, et les civilisations développèrent des solutions diverses pour leurs calendriers.

La prédiction astronomique devint encore plus importante lorsque l'on associa, tout à fait à tort, des événements terrestres à des configurations célestes : par exemple, les éclipses de Soleil ou les apparitions de comètes à la mort des rois ou à des cataclysmes terrestres. Comme on ne savait pas que ces coïncidences étaient fortuites, la pure science d'observation devint rapidement une science divinatoire. Mais il faut reconnaître que les connaissances astronomiques se développèrent à cause de ces besoins astrologiques. En fait, jusqu'à la Renaissance, l'astrologie était, comme l'alchimie, une science qui ne se distinguait guère de l'astronomie. Ainsi, Kepler fit encore des horoscopes pour gagner sa vie (mais nous avons de bonnes raisons de penser qu'il n'y croyait pas).

L'utilité pratique de l'astronomie devint de plus en plus importante lorsque les besoins des voyages et de la navigation amenèrent les hommes à mesurer les dimensions de la Terre et à dresser des cartes. Le lever des cartes et la navigation entraînèrent automatiquement la nécessité de connaître l'heure avec précision. On se rend mal compte aujourd'hui de ces besoins ; si les divers pays développèrent, à partir du XVII^e^ siècle, des institutions spéciales pour la détermination des longitudes sur terre et en mer, cela fut plus pour développer leur commerce et la navigation que pour la beauté de l'astronomie. Ainsi, le Danois O. Roemer découvrit en 1676 à l'Observatoire de Paris que la lumière se propageait avec une vitesse non infinie, parce que J.-B. Cassini, alors directeur de l'Observatoire, lui demanda d'établir des tables précises des éclipses et des passages des satellites de Jupiter. L'observation de ces phénomènes était alors une des seules méthodes pour déterminer le temps dans une échelle absolue et, par la comparaison avec le temps local, déterminer les longitudes. Le problème du « transport de l'heure » fut résolu plus tard par l'invention du chronomètre à ressort spiral qu'il est facile de transporter. La radiotélégraphie donna une solution définitive au XX^e^ siècle.

Les anciens navigateurs étaient obligés de faire le point en mer par l'observation directe des astres. Si cette navigation astronomique est aujourd'hui pratiquement abandonnée, il ne faut pas oublier que ces progrès sont dus aux découvertes de l'astronomie et de la physique. Ainsi, la prévision des marées n'est possible qu'à l'aide de tables de la Lune ; le lancement des satellites nécessite la connaissance exacte des lois de l'astronomie. Les méthodes de navigation marine ou aérienne par inertie et maintenant celles de la localisation des navires à l'aide des satellites artificiels découlent des lois de l'astronomie.

▼ *A gauche, un portrait de l'astronome polonais* Nicolas Copernic. *A droite, sculpture égyptienne représentant le dieu lunaire Thot (Paris, musée du Louvre).*

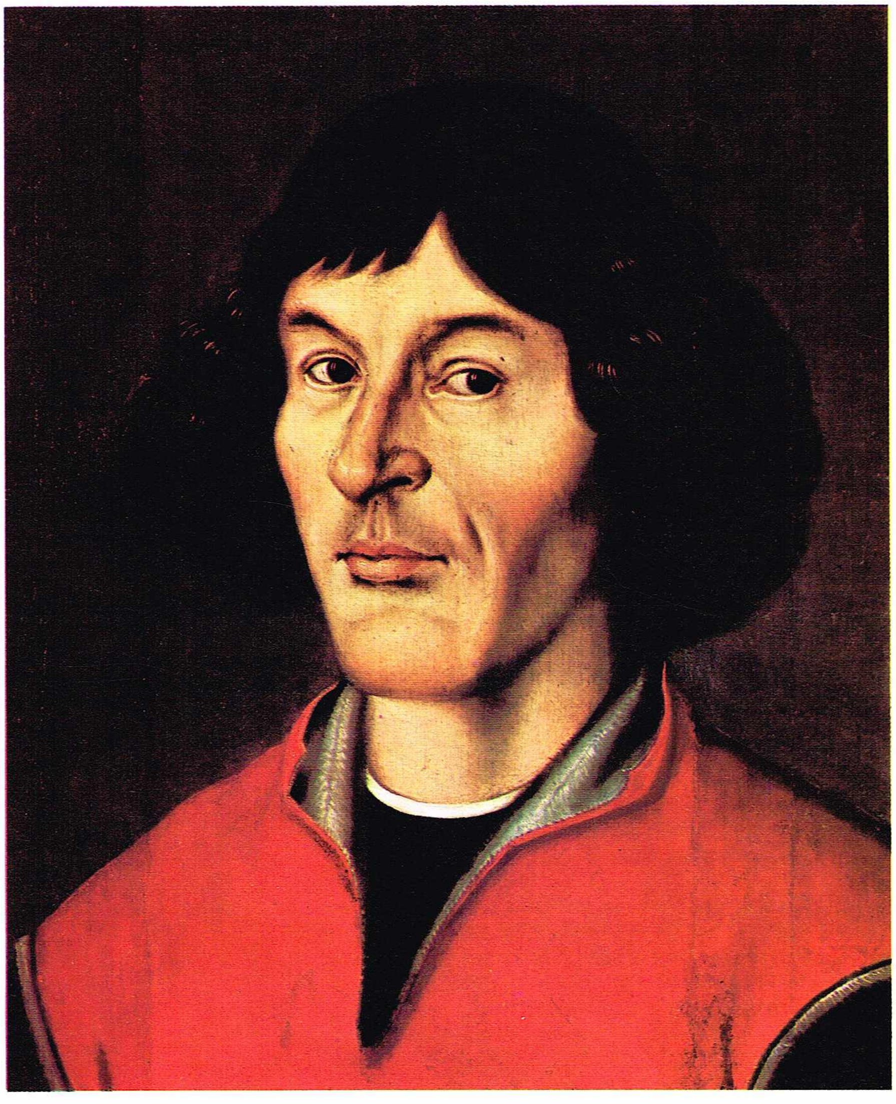

Lauros - Giraudon

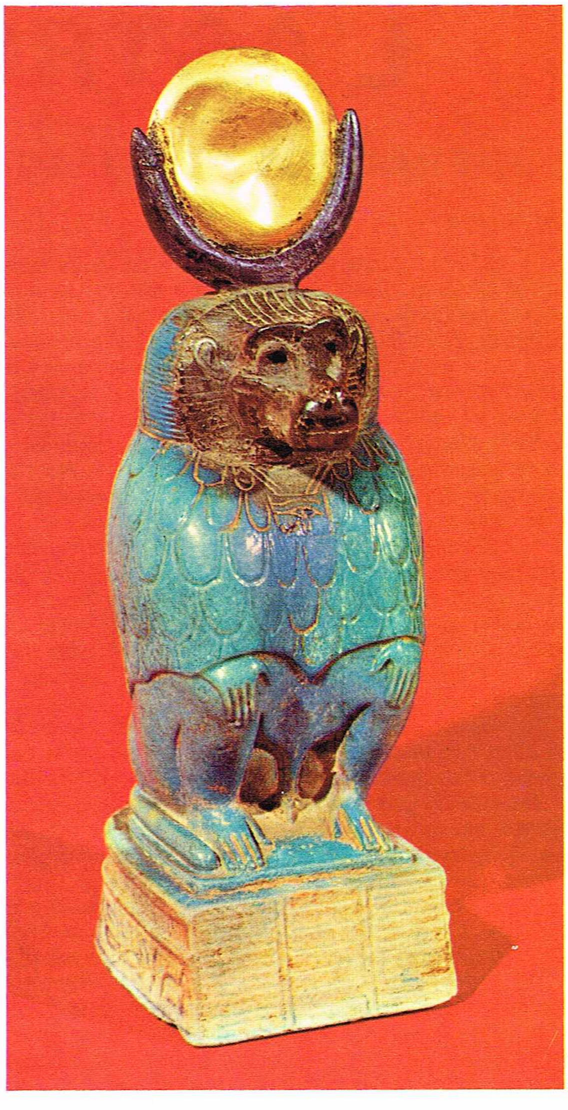

Ciccione

Cependant, cette façon de plaider la cause de l'astronomie moderne est bien mauvaise car on peut dire, sans contradiction possible, que toute la science est fille de l'astronomie. Les principes de l'inertie, la loi de l'attraction universelle, fondement de toute la mécanique, sont des découvertes d'astronomes. L'équivalence de l'énergie et de la matière découverte par Einstein est une conséquence de la loi de la Relativité, un des fondements de l'astronomie. La structure atomique, identique dans tout l'Univers, la découverte de l'hélium dans le Soleil, l'idée que la chaleur du Soleil est de l'énergie nucléaire résultent d'observations astronomiques. L'expérience montre que des découvertes astronomiques inattendues comme celle des naines blanches, étoiles cent mille fois plus denses que le Soleil dont la masse spécifique est sensiblement celle de l'eau, ont incité les physiciens à étudier cet état de la matière, qu'on nomme maintenant de la matière dégénérée, et dont la connaissance est fondamentale dans l'étude du noyau atomique.

De nouvelles énigmes, les quasars et les pulsars, que nous décrirons plus loin, ne seront résolues que par de nouvelles découvertes en physique. Il est donc impossible de nier cette utilité fondamentale de l'astronomie. Le magnifique laboratoire d'observation que constitue le ciel est le guide indispensable, le garde-fou des théoriciens imaginatifs : le monde est tel qu'il est, et les théories doivent se plier à cette réalité.

La reconnaissance de ces possibilités ne fut pas immédiate et même de grands esprits pensèrent que la connaissance de l'Univers nous serait à jamais voilée. Auguste Comte lui-même posait des barrières insurmontables pour l'astronomie. En 1835, il écrivait : « En astronomie, on se limitera toujours à la connaissance des phénomènes géométriques et mécaniques que les mathématiciens se chargeront de rassembler en des théories générales. Toute tentative pour sortir de ce domaine naturel sera vaine... Seuls les corps que notre vision a la possibilité d'explorer au loin pourront être étudiés en ce qui concerne leurs dimensions et leurs mouvements qui constituent, à notre avis, leur seul réalité existentielle... Mais nous ne pourrons jamais savoir quelles sont leur composition chimique ni leur structure minérale. » Pourtant, la branche de l'astronomie qui fut plus tard appelée l'astrophysique existait déjà. En 1802, le physicien anglais W. H. Wollaston, observant le Soleil à travers un prisme devant lequel il avait placé une plaque percée d'une fente, avait remarqué dans la bande colorée ainsi obtenue, que nous nommons aujourd'hui un spectre, un certain nombre de raies obscures, parallèles à la fente. C'étaient les raies produites par les éléments chimiques présents dans l'atmosphère du Soleil. L'Allemand J. Fraunhofer, recommençant quelque temps plus tard cette expérience pour son compte, compta 576 raies. Il dessina en 1815, pour la première fois, le spectre solaire et découvrit en 1817 que les spectres des étoiles différaient les uns des autres, alors que ceux des planètes et de leurs satellites étaient identiques à celui du Soleil.

Plus tard, des branches nouvelles de l'astronomie se développèrent : la radioastronomie, l'astronomie des rayons X et γ, l'astronomie de l'infrarouge, etc. L'astronomie, naguère science d'observation, s'est même transformée ces derniers temps en une véritable science expérimentale. Des sondes explorent le système solaire et analysent le sol de la Lune et des planètes et en ramènent des échantillons. Enfin, les astronomes et les biologistes peuvent aborder avec de nouveaux outils l'un des problèmes les plus passionnants : celui de la pluralité des mondes habités, que Fontenelle avait déjà évoqué en 1686.

La lumière et les ténèbres

Dès qu'ils cherchèrent à comprendre la nature des phénomènes, les hommes s'émerveillèrent de l'existence de la lumière et des ténèbres, bien avant celle des corps célestes. En effet, que sont la lumière et les ténèbres, le jour et la nuit ? Il nous semble maintenant évident que le Soleil est la source de la lumière et de la chaleur, mais il n'en fut pas toujours ainsi. On croyait jadis que la lumière avait été créée dès l'origine, avant toute chose ; le Soleil n'était pas considéré comme la cause de la luminosité du ciel. On pensait qu'il était en quelque sorte encastré sur le fond lumineux du jour, ajoutant seulement son éclat à celui du ciel. On en voulait pour preuve qu'il fait jour même lorsque le Soleil est caché par les nuages et qu'il existe une lumière zodiacale. Au IV^e^ siècle après J.-C. encore, saint Ambroise écrivait : « On ne doit pas oublier que la lumière du jour est une chose et que celle du Soleil, de la Lune et des étoiles en est une autre, le Soleil et ses rayons donnant simplement de l'éclat à la lumière diurne. En effet, avant la naissance du Soleil régnait le jour, mais sans avoir la splendeur que devait lui conférer celui-ci. »

De manière analogue, les ténèbres n'étaient pas considérées comme une simple absence de lumière, mais comme une réalité active, génératrice d'esprits et de démons. Les ténèbres étaient une vapeur noire montant le soir des profondeurs de la Terre. La survivance de ces croyances de la lumière et des ténèbres et de leur indépendance du Soleil, de la Lune et des étoiles a marqué la pensée humaine presque jusqu'à nos jours. On comprend ainsi l'ancienne terreur des éclipses, dont on rendait responsable non pas la Lune, mais le dragon des ténèbres et du Mal : il s'agissait d'une tragédie cosmique et spirituelle. Mais, malgré la mythologie et les conceptions animistes de la nature, le long et sinueux chemin que devait parcourir la science astronomique s'ouvrait devant les hommes.

Étoiles, planètes et comètes

Le lever et le coucher réguliers du Soleil, les phases de la Lune et la lumière zodiacale ont certainement été les phénomènes qui ont le plus impressionné les premiers observateurs du ciel. Ceux-ci remarquèrent aussi les étoiles qui se déplacent d'est en ouest comme le Soleil et la Lune, mais ne changent pas de positions relatives. Les étoiles apparaissaient réunies en groupes ou figures. Les Babyloniens furent les premiers à diviser la voûte céleste en constellations, selon les figures que reprirent les Égyptiens et les Grecs.

▶ Pages suivantes, représentation, à gauche, des constellations de l'hémisphère boréal entre la déclinaison + 20° et le pôle Nord (en haut) et des constellations de la zone équatoriale entre l'équateur et les déclinaisons + 30° et − 30° (en bas) ; à droite, en haut, les constellations de l'hémisphère austral entre la déclinaison − 20° et le pôle Sud ; en bas, les constellations de la zone équatoriale entre l'équateur et les déclinaisons + 30° et − 30°.

LES CONSTELLATIONS DANS L'HEMISPHERE BOREAL, DE LA DECLINAISON + 20° AU POLE NORD.

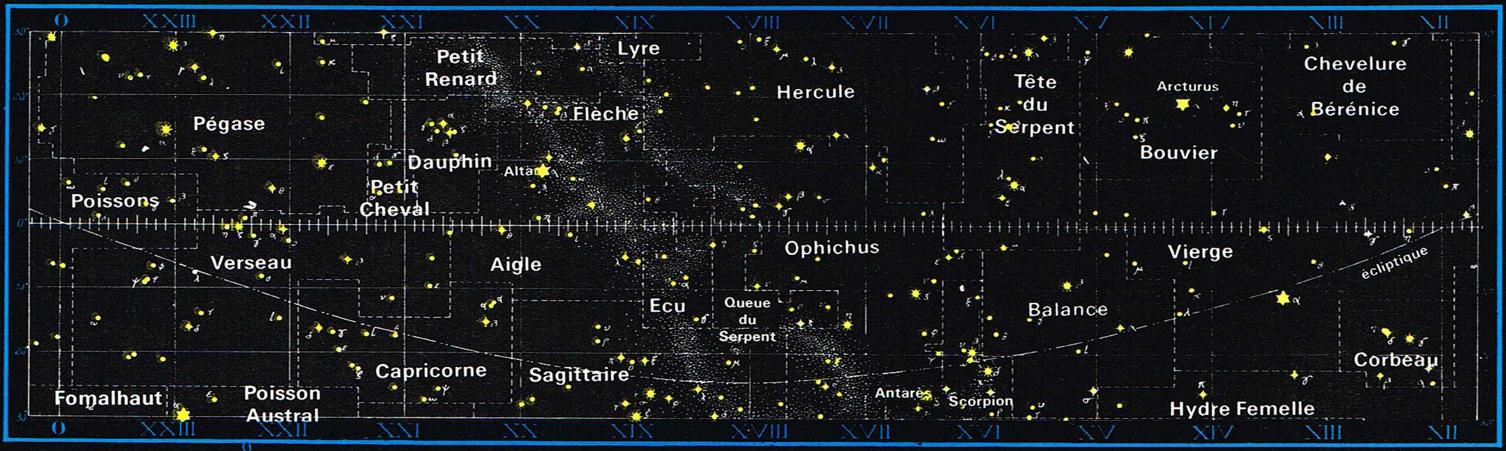

LES CONSTELLATIONS DE LA ZONE EQUATORIALE JUSQU'AUX DECLINAISONS + OU – 30°.

I.G.D.A.

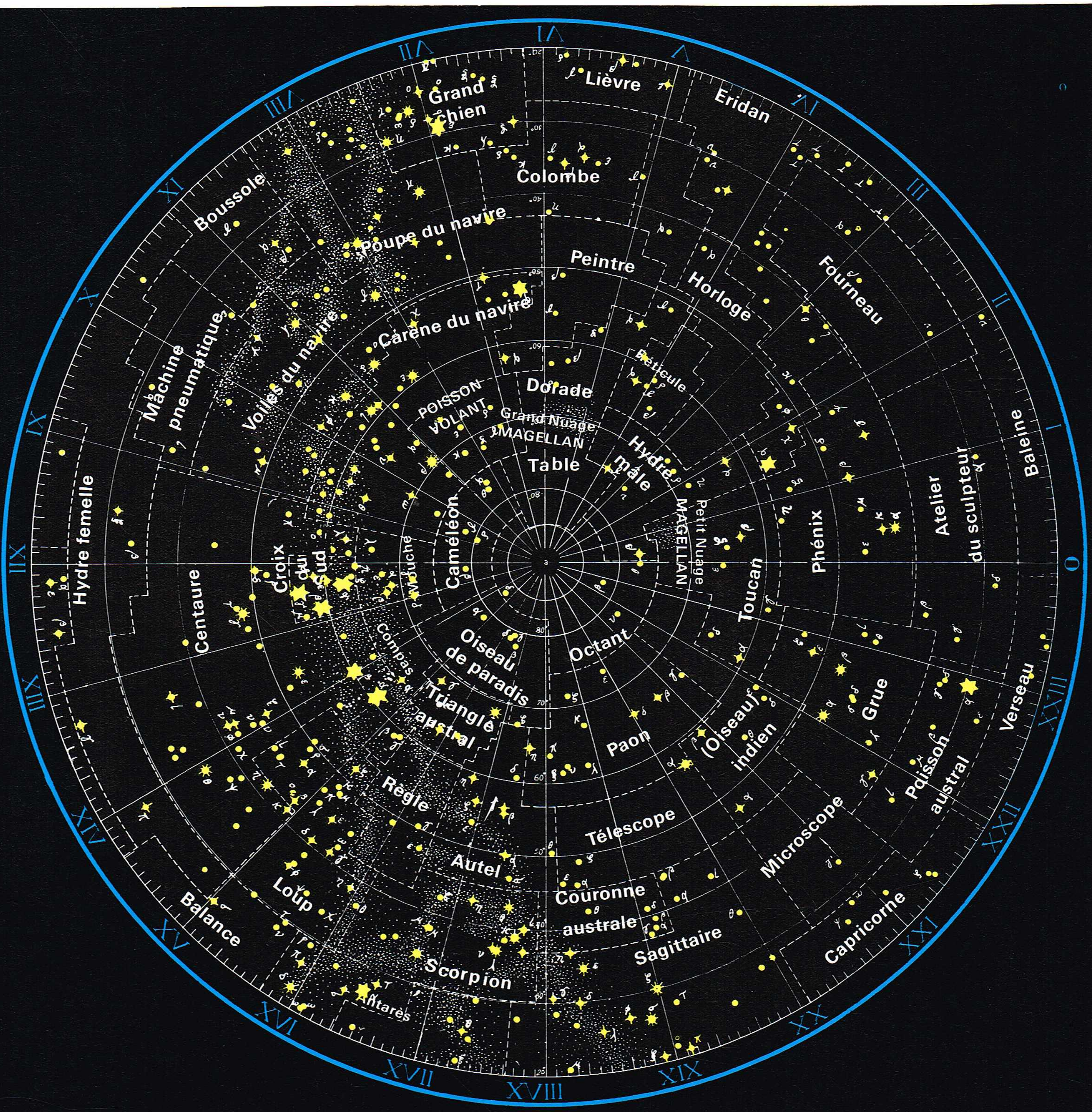

LES CONSTELLATIONS DE L'HEMISPHERE AUSTRAL DE LA DECLINAISON – 20° AU POLE SUD

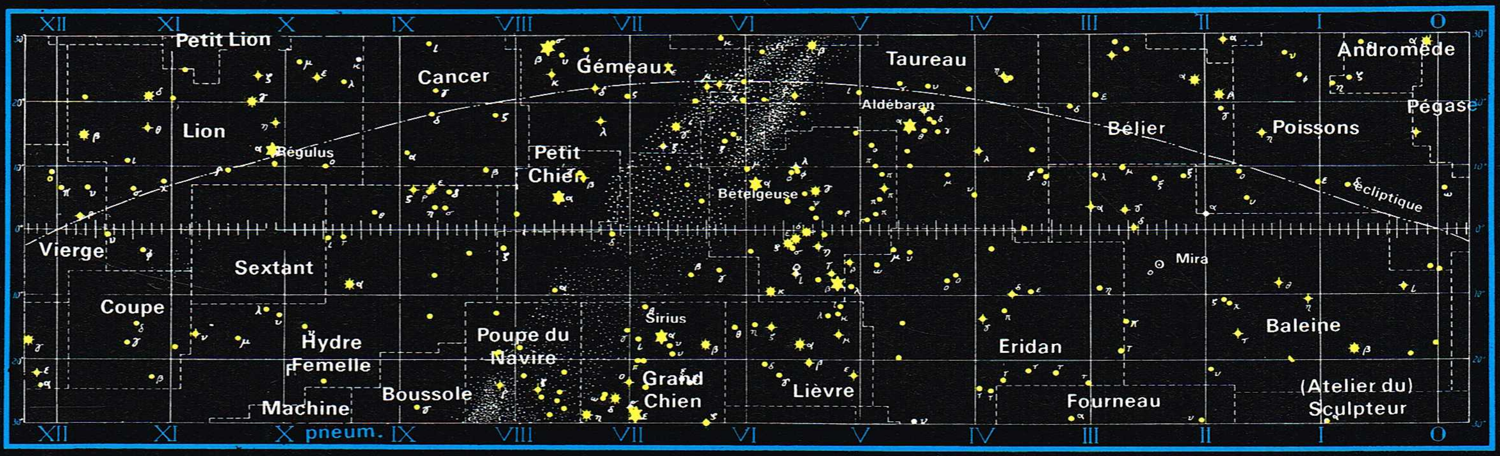

LES CONSTELLATIONS DE LA ZONE EQUATORIALE JUSQU'AUX DECLINAISONS + OU – 30°

L'astronomie moderne a gardé ces constellations, qui restent utiles pour désigner simplement une étoile. En principe, l'étoile la plus brillante d'une constellation est indiquée par la lettre alpha (α), la seconde par bêta (β) et ainsi de suite. Les étoiles variables sont désignées par des majuscules simples ou doubles, par exemple R ou RS. Ces lettres sont suivies du nom de la constellation en latin au génitif. Les noms des constellations sont souvent abrégés par trois lettres. Les étoiles brillantes ont souvent des noms propres anciens, venant de l'Antiquité ou du monde arabe. Ainsi, Véga est α Lyrae ou plus simplement α Lyr ; Deneb est α Cyg. Pour éviter toute confusion, l'Union astronomique internationale a codifié cette désignation en définissant rigoureusement les constellations ; elles sont limitées sur la sphère céleste par des arcs de cercle tracés de façon à garder aux étoiles le plus grand nombre possible de noms traditionnels. Certaines constellations ont été supprimées, d'autres ont été ajoutées, notamment dans le ciel austral. Naturellement, les constellations, à côté de cet aspect historique et de la commodité de langage qu'elles introduisent, n'ont aucune valeur scientifique et représentent un héritage respectable d'un passé ancien. Nous ne dessinons plus sur nos cartes célestes ces belles figures allégoriques qui illustraient les cartes anciennes.

Parmi toutes ces étoiles, cinq ne pouvaient être attribuées à des constellations, car elles se déplaçaient parmi elles. Les Grecs les nommèrent asteres planetai, *c'est-à-dire étoiles errantes, ou planètes. L'histoire ne nous a pas transmis dans quel ordre elles furent découvertes. On pense que Mercure a été découvert après Vénus et Jupiter, qui sont les plus brillantes. Combien de siècles a-t-il fallu pour reconnaître que la Vénus vespérale, ou Vesper, est le même astre que la Vénus matutinale, ou Hesperos ? Les Anciens réalisèrent donc que les cinq planètes : Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne étaient des astres différents des étoiles. Nous savons aujourd'hui qu'il s'agit de corps célestes tournant autour du Soleil comme le fait la Terre.*

D'autres phénomènes apparaissaient sur la sphère céleste : des étoiles filantes qui parcouraient le firmament en l'espace de quelques secondes, certaines pouvant être très brillantes ; des astres, quelquefois très brillants, présentant une grande chevelure, d'où leur nom de comètes (du grec kometes *qui signifie chevelu), apparaissaient et restaient visibles pendant quelques jours ou semaines en se déplaçant parmi les constellations. Pendant toute l'Antiquité, les étoiles filantes, les météores et les comètes furent regardés comme des phénomènes liés au monde sublunaire changeant, c'est-à-dire à la Terre. C'est partiellement vrai pour les étoiles filantes et les météores, mais les comètes gravitent comme les planètes autour du Soleil.*

Le zodiaque

*Les hommes s'aperçurent assez vite que les planètes et la Lune, dans leurs courses, ne s'éloignaient guère du chemin suivi par le Soleil dans son mouvement apparent. Les astronomes appelèrent ce grand cercle l'*écliptique *parce que c'est aussi le lieu géométrique des éclipses de Lune (nous verrons que c'est aussi le plan qui contient l'orbite réelle que décrit la Terre autour du Soleil). Les Anciens nommèrent* zodiaque *la zone de la sphère céleste s'étendant de 8,5° de part et d'autre de l'écliptique et ils la divisèrent en douze parties égales, ou signes. Le premier signe commence au point vernal, qui est à l'endroit où se trouve le Soleil à l'équinoxe de printemps lorsqu'il passe de l'hémisphère Sud à l'hémisphère Nord. Ils donnèrent aux signes du zodiaque le nom des constellations avec lesquelles ils coïncidaient. Lorsque le zodiaque fut adopté, environ 1000 ans avant J.-C., ces constellations étaient dans l'ordre : le Bélier, le Taureau, les Gémeaux, le Cancer, le Lion, la Vierge, la Balance, le Scorpion, le Sagittaire, le Capricorne, le Verseau et les Poissons.*

En raison du phénomène de la précession des équinoxes, le point vernal se déplace dans le sens rétrograde de 50'',26 par an, de sorte qu'il effectue un tour complet en 25 800 ans. Il résulte de ce mouvement qu'actuellement le point vernal n'est plus dans la constellation du Bélier mais au milieu de la constellation des Poissons. Néanmoins, on dira que le Soleil entre dans le signe du Bélier. Le point vernal est toujours représenté par la lettre γ (gamma) qui est la déformation du signe Bélier ♈. Cependant, on se demande quelle peut être la signification de ce langage.

C'est également cette ancienne division du zodiaque en signes, *ou* maisons, *qui explique le nom des tropiques du Cancer et du Capricorne. Ce sont les points de la Terre où le Soleil est au zénith en été et en hiver. A ces époques, le Soleil est dans les constellations des Gémeaux et du Sagittaire et non dans celles du Cancer et du Capricorne, comme il y a 3 000 ans.*

Il est difficile, sinon impossible, d'observer le passage du Soleil parmi les constellations qui ne sont pas visibles, à cause de l'éclat du Soleil. Tout au plus peut-on constater qu'une étoile cachée par l'éclat solaire redevient visible le matin un peu avant le lever du Soleil. Les Égyptiens avaient aussi constaté que l'étoile Sirius, qu'ils appelaient Serepedet (Sothis pour les Grecs), redevenait visible le matin juste avant le lever du Soleil, peu de temps après le début de la grande crue du Nil. Ce phénomène est appelé le « lever héliaque de Sirius ». La crue du Nil est liée à l'année solaire et la coïncidence avec le lever héliaque était fortuite. Aujourd'hui, du moins avant la construction du barrage d'Assouan, les crues du Nil ont lieu deux mois avant le lever héliaque.

Le mouvement des astres

Lorsqu'on regarde le ciel la nuit, on constate qu'une étoile comme Sirius se lève vers l'est, décrit une courbe qui l'élève dans le ciel et qu'après une course de près de 10 heures sous nos latitudes, elle se recouche à l'ouest. Un examen plus attentif montre que la trajectoire apparente de cette étoile est un cercle de la sphère céleste.

Si l'on examine sous nos latitudes une étoile située vers le nord, on constate que le cercle qu'elle décrit ne coupe plus l'horizon ; une photographie, facile à faire, montre que toutes les étoiles décrivent des cercles centrés sur un point sensiblement situé près de l'étoile Polaire, α UMi. Comme les constellations ne changent pas d'aspect, tout se passe comme si elles étaient dessinées sur la sphère céleste et que celle-ci tournât de l'est vers l'ouest. Cette sphère théorique porte le nom

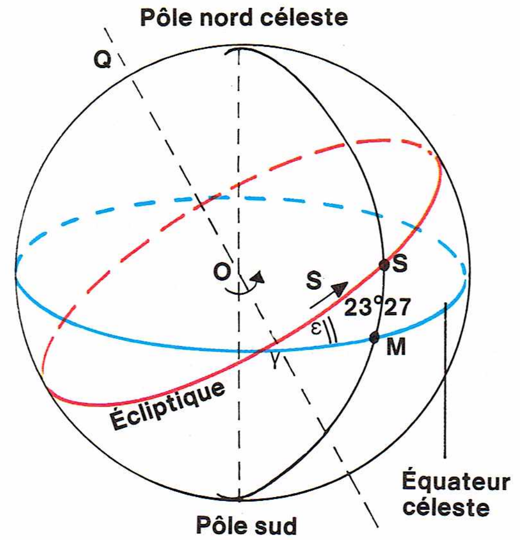

Richard Colin

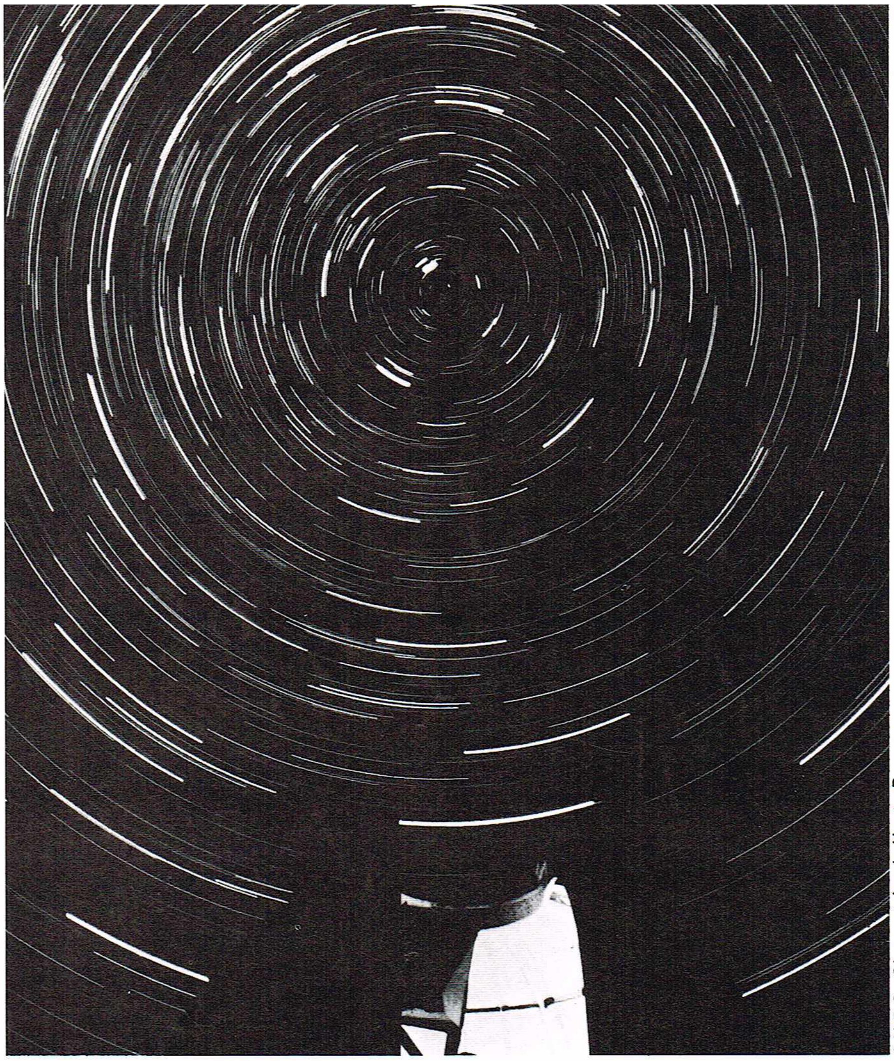

C.N.R.S., Observatoire de Haute-Provence

▲ *A gauche, représentation schématique du mouvement du Soleil : O, observateur; S, soleil; γ, point vernal; Q, pôle de l'écliptique; γM, ascension droite du Soleil; MS, déclinaison du Soleil. A droite, les étoiles décrivent des arcs de cercle centrés sur un même point : le pôle. Les traces des étoiles éloignées du pôle sont longues, celles du voisinage sont courtes. Mais toutes les étoiles ont décrit la même fraction du cercle : exactement la seizième partie, ce qui correspond à une pose d'environ une heure et demie. Au premier plan, illuminée, la coupole de 120 cm de l'Observatoire de Haute-Provence.*

de sphère des étoiles, *ou* sphère des fixes. *Si, avec nos moyens actuels, nous déterminons sur une montre ordinaire l'heure du lever d'une étoile, par exemple Sirius, nous constatons que de jour en jour ce lever a lieu chaque jour plus tôt d'environ 4 minutes, exactement 3 minutes 56 secondes. On peut donc dire que la sphère des fixes fait un tour en 24 heures moins 3 minutes 56 secondes, soit en 23 heures 56 minutes 4 secondes. Il s'agit du* jour des étoiles, *ou* jour sidéral. *Nous savons aujourd'hui que c'est, en fait, la sphère des étoiles qui est fixe et que c'est la Terre qui tourne autour de sa ligne des pôles d'ouest en est avec cette période de 23 heures 56 minutes 4 secondes.*

Examinons maintenant une planète comme Jupiter. Pour des observateurs peu attentifs, il se lève et se couche comme une étoile, mais si l'on y regarde de plus près, on constate que Jupiter n'est pas, au contraire des étoiles, piqué sur la sphère des fixes mais qu'il se déplace parmi les étoiles. Ce mouvement est dirigé vers l'est, et en une année, Jupiter se déplace ainsi de 30°, mais ce mouvement n'est pas régulier; au moment où Jupiter est le mieux visible, culminant à minuit vers le sud, son mouvement est dirigé vers l'ouest. On dit que la planète est en mouvement rétrograde. Ce mouvement se ralentit ensuite pendant 60 jours jusqu'à s'annuler. Jupiter est alors stationnaire parmi les étoiles; puis, pendant 280 jours, il se déplace parmi les étoiles, vers l'est, de plus en plus rapidement; il disparaît d'ailleurs dans les lueurs du crépuscule pour réapparaître ensuite le matin à l'aurore. Il devient stationnaire et commence à rétrograder pour boucler en 398,9 jours le cycle que nous avons décrit. Sur une carte céleste, la trajectoire de Jupiter est une courbe compliquée qui se répète tous les 13 mois dans une autre constellation. Il en est de même pour les autres planètes. L'explication de ce mouvement a posé aux Anciens des problèmes ardus qu'ils ont résolus avec plus ou moins de bonheur. Nous l'expliquerons par le mouvement relatif de la Terre sur son orbite et de la planète sur la sienne.

Le mouvement de la Lune est à la fois plus complexe et plus simple. Plus simple car le mouvement de la Lune parmi les étoiles est toujours dirigé vers l'est. Il est d'ailleurs très rapide : la Lune se déplace en moyenne de son diamètre en une heure, soit environ 13° en un jour. Il en résulte que d'un jour à l'autre, la Lune se lève et se couche en moyenne 49 minutes plus tard. Mais ce mouvement est en fait complexe, car il n'est pas uniforme; les Anciens l'avaient déjà observé. Après avoir fait le tour de la sphère céleste en 27 jours 8 heures, la Lune n'occupe plus exactement la même place parmi les étoiles. Sa trajectoire ne se boucle pas sur elle-même. Nous savons aujourd'hui que la Lune tourne autour de la Terre en un mois, mais que le plan de l'orbite n'est pas fixe.

*Comme nous l'avons déjà signalé, il est difficile d'observer le mouvement du Soleil au milieu des constellations. On peut néanmoins déterminer ce mouvement, et on constate alors que le Soleil décrit parmi les étoiles un grand cercle : l'écliptique, et qu'il retrouve rigoureusement sa place près des mêmes étoiles après 365 jours 6 heures 9 minutes 10 secondes. Cette trajectoire, inclinée de 23° 27' sur l'équateur, est l'écliptique, et la période citée est l'*année sidérale *qui est la période de révolution de la Terre autour du Soleil quand on prend pour repère les étoiles. Ce mouvement du Soleil, que nous décrirons avec plus de détails, le fait passer successivement par les constellations zodiacales que nous avons citées précédemment. Vers le 21 mars, début du printemps, le Soleil passe de l'hémisphère austral à l'hémisphère boréal. Il est alors au point vernal, qui se trouve actuellement dans la constellation des Poissons.*

Le système des sphères cristallines et Copernic

Les Anciens expliquaient les mouvements des étoiles fixes et des planètes au moyen de sphères. Selon eux, les étoiles étaient fixées sur une sphère tournant autour de deux pôles diamétralement opposés ; cette conception, pour inexacte qu'elle fût, était un grand progrès par rapport à la précédente, qui supposait la Terre plate et indéfinie. En effet, il fallait non seulement considérer que la Terre était située à l'intérieur de la sphère des étoiles fixes, mais aussi supposer l'existence d'autres sphères situées à l'intérieur de la première. Ces sphères étaient mises en action par des mécanismes complexes permettant de reproduire les mouvements du Soleil et des planètes. Les Anciens ne pouvaient concevoir que les corps célestes fussent isolés les uns des autres. Ignorant les lois de la gravitation universelle, ils étaient convaincus que des corps isolés seraient immanquablement tombés sur la Terre. Il fallait donc supposer que les astres étaient fixés sur des sphères cristallines, dont les mouvements entraînaient ceux des planètes. Les mouvements des planètes étant complexes, les mécanismes devenaient de plus en plus compliqués au fur et à mesure que les observations devenaient plus précises.

C'est en 1543, année de la mort de Copernic, que fut publié le De revolutionibus orbium coelestium, *œuvre maîtresse du grand astronome polonais. L'ancienne conception* géocentrique *était remplacée par un système* héliocentrique *et par l'hypothèse, nouvelle, du double mouvement de la Terre, c'est-à-dire de rotation sur elle-même et de révolution autour du Soleil. Cette théorie fut conçue par Copernic dès 1515 et publiée sous forme d'un commentaire dès 1530. Elle se heurta immédiatement à d'importantes oppositions, pour des motifs aussi bien religieux que scientifiques. On objecta que si la Terre tournait autour du Soleil, elle devait occuper, à six mois d'intervalle, des positions très distantes l'une de l'autre, du double de la distance moyenne de la Terre au Soleil. Comment n'avait-on jusqu'alors jamais observé aucun changement dans la perspective des étoiles fixes ? Trois siècles devaient s'écouler avant que l'astronome allemand Friedrich Wilhelm Bessel réussît à mesurer cet « effet de parallaxe », qui, même pour les étoiles les plus proches, est tellement petit qu'il avait échappé jusque-là à l'observation.*

▼ Le zodiaque de Dendera, représentation égyptienne du temple d'Hator, à Dendera (époque de Tibère). Le cercle zodiacal n'est pas disposé comme dans la représentation égyptienne des constellations, mais à la façon grecque (musée du Louvre).

Ciccione

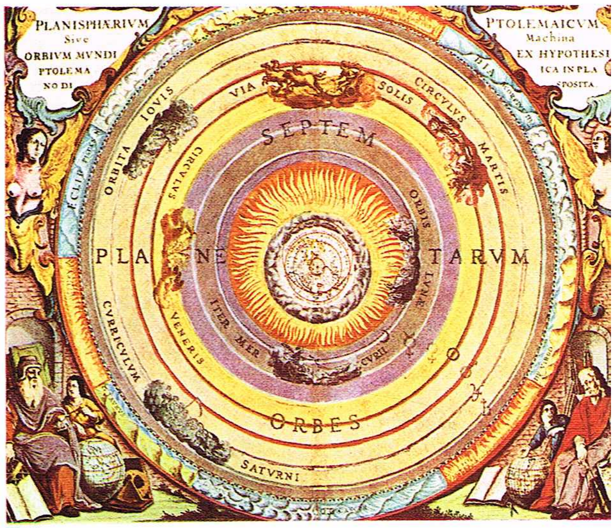

Titti

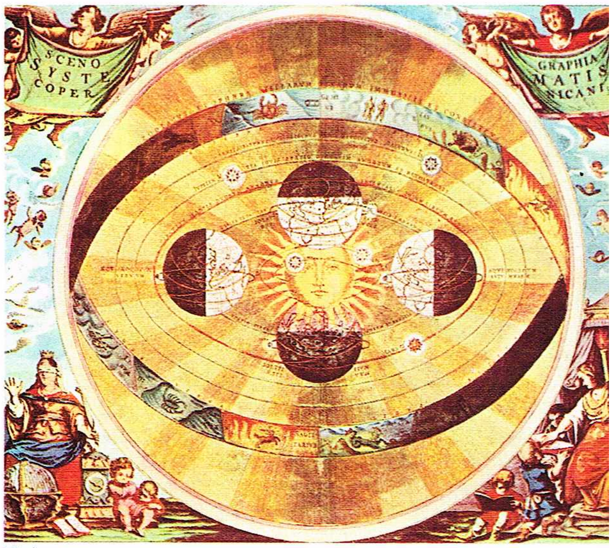

Titti

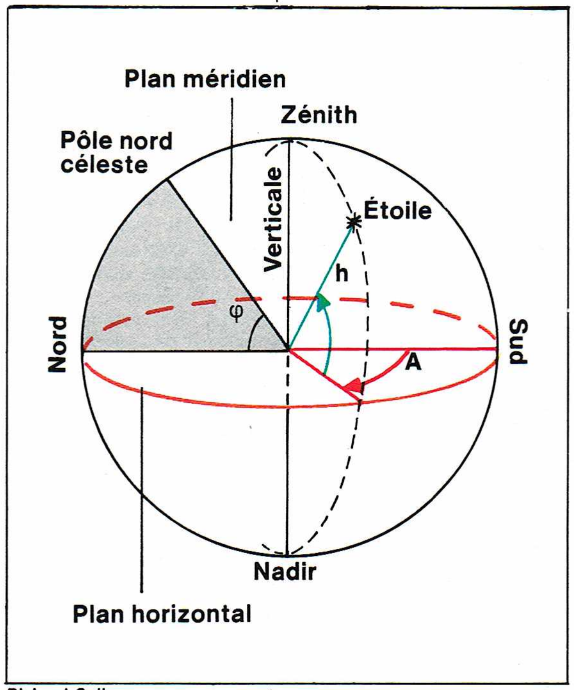

Richard Colin

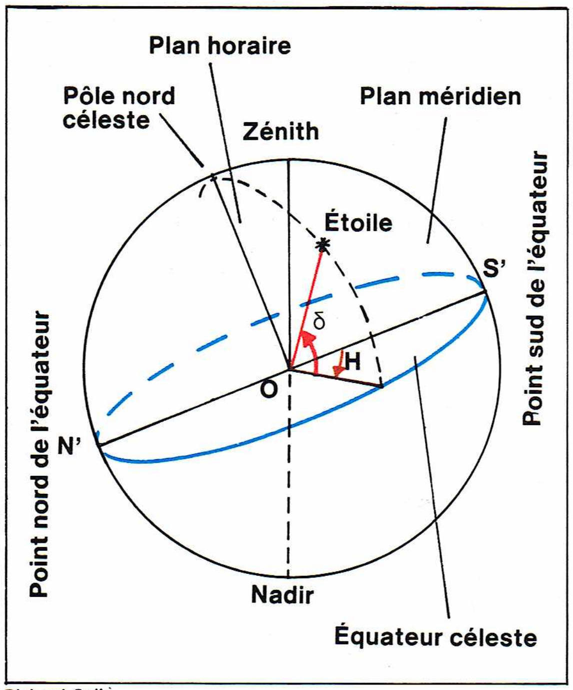

Richard Colin

◀ *A gauche, représentation graphique des coordonnées horizontales d'une étoile : A, azimut ; h, hauteur ; φ, latitude du lieu. A droite, représentation graphique des coordonnées horaires d'une étoile : H, angle horaire ; δ, déclinaison.*

Les systèmes de coordonnées

Pour étudier les phénomènes célestes avec précision, il est essentiel de mesurer la position des étoiles sur la sphère céleste. Pour cela, il est nécessaire de commencer par définir les grandeurs mesurables.

Les coordonnées horizontales

Le premier système de coordonnées utilisé est le système des coordonnées horizontales. Dans ce système, les éléments de référence sont le *plan horizontal* et la *verticale*. La sphère céleste a, par définition, un rayon égal à l'unité de longueur, et son centre est l'observateur que l'on représente par un point. La verticale coupe cette sphère au *zénith* et au *nadir*. Le plan qui contient la verticale et le *pôle céleste,* point autour duquel tournent les étoiles, est le *plan méridien,* les points S et N sont le sud et le nord. L'angle que fait la direction du pôle Nord avec le point N porte le nom de *latitude* φ du lieu. Les deux coordonnées d'une étoile sur la sphère céleste sont l'*azimut* A et la *hauteur* h. Un théodolite mis correctement en station donne directement la valeur de ces deux angles. Au cours du mouvement diurne, les deux valeurs varient, la hauteur étant maximale lorsque l'étoile est dans le plan méridien.

Les coordonnées horaires

Un autre système de coordonnées est le système de coordonnées horaires. Dans ce système, une des coordonnées ne varie pas en fonction du temps. Le plan principal de ce système est le plan perpendiculaire à la ligne des pôles. Ce plan est parallèle à l'équateur terrestre ; son intersection avec la sphère céleste est l'*équateur céleste*. Les deux coordonnées de ce système sont l'*angle horaire* H compté à partir du point sud de l'équateur, et la *déclinaison* δ. Un demi-plan passant par l'axe du monde (axe joignant les deux pôles célestes) et une étoile est le *plan horaire* de cette étoile ; il coupe la sphère céleste selon un demi-cercle, appelé *cercle horaire* de l'astre. Au cours du mouvement diurne, la déclinaison δ ne varie pas et on peut alors dire que c'est l'étoile qui, piquée sur la sphère céleste, parcourt un arc de cercle parallèle à l'équateur céleste ; par contre, l'angle horaire augmente avec le temps de façon uniforme, à tel point qu'il peut servir à mesurer ce temps. Si l'astre observé est le Soleil, l'angle horaire du Soleil est le *temps solaire* (local vrai). Si c'est une étoile, l'angle horaire sera un *temps sidéral ;* il est essentiel de choisir une étoile de référence ; en fait, c'est une étoile fictive, l'intersection du plan de l'écliptique avec l'équateur céleste, ou point vernal γ. C'est l'endroit où est le Soleil à l'équinoxe de printemps. Le temps sidéral est l'angle horaire de ce point vernal. Les angles horaires et, par conséquent, les temps pourraient être mesurés en degrés et minutes. On sait qu'on a préféré diviser la circonférence en 24 parties, qui sont les heures.

Une heure équivaut à 15°. Il est 1 heure de temps solaire lorsque l'angle horaire du Soleil est de 15° (ou 1 heure). Cette division en 24 heures a été adoptée pour conserver l'ancienne habitude de diviser le jour civil en 24 heures.

La division sexagésimale des degrés et des heures n'est pas très pratique, mais il semble difficile de la réformer.

Rappelons la signification de minute, seconde et anciennement tierce : ce sont les divisions minute, seconde, etc., du degré. Nous ne devrions pas dire minute de temps, d'arc, mais minute d'heure, de degré...

Coordonnées équatoriales

Les astronomes ont introduit un troisième système. La coordonnée H est remplacée par l'angle α mesuré à partir du point vernal ; on le compte d'ailleurs dans le sens opposé à l'angle horaire. Cet angle est l'*ascension droite* α. L'étoile qui est au méridien a une ascension droite α égale au temps sidéral. Notons que ce système de coordonnées est très voisin du système des coordonnées terrestres utilisées par les géographes. Le système des *latitudes* et *longitudes géographiques* a

◀ *Page ci-contre, à droite l'Univers : conception de Ptolémée, géocentrique (en haut), et copernicienne, héliocentrique (en bas), selon deux estampes du XVII^e siècle.*

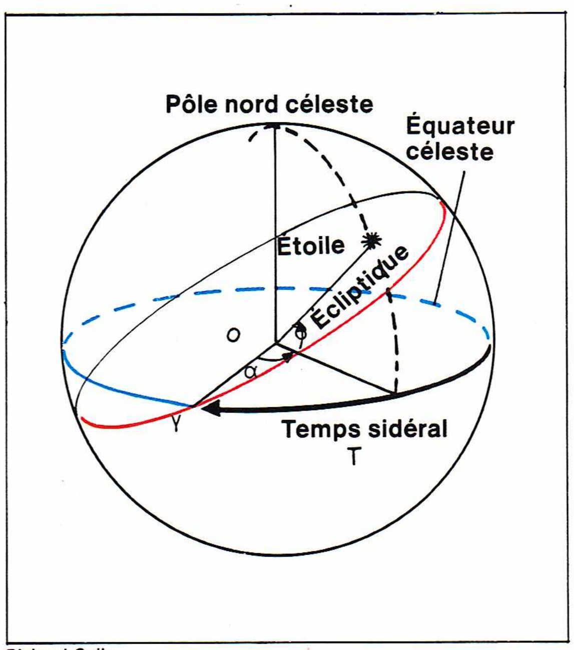

Richard Colin

◀ *Représentation graphique des coordonnées équatoriales : γ, point vernal ; α, ascension droite ; T, temps sidéral.*

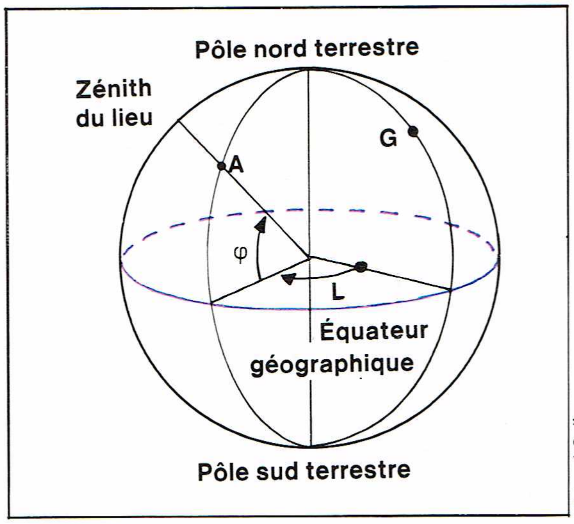

▶ *Système de coordonnées terrestres utilisées par les géographes : G, Greenwich ; φ, latitude ; L, longitude. La verticale du lieu indiqué par la direction du zénith ne passe pas rigoureusement par le centre de la Terre. A l'échelle de notre figure, la différence n'est pas visible.*

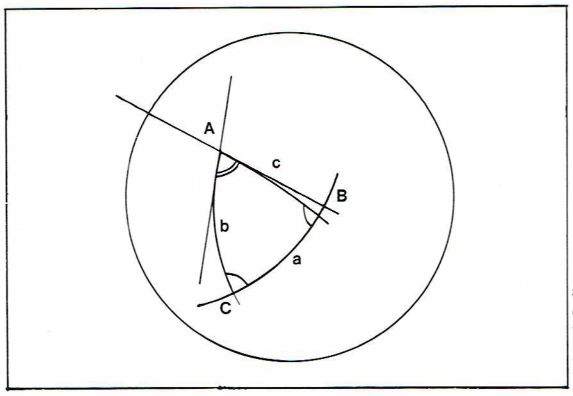

▶ *Définition graphique des éléments d'un triangle sphérique : A, B, C, angles ; a, b, c, côtés.*

pour plan principal l'équateur terrestre et la ligne des pôles lui est perpendiculaire. On choisit comme méridien origine le méridien qui passe par l'observatoire de Greenwich. La latitude φ d'un lieu sera sa distance angulaire à l'équateur ; elle est égale à la hauteur du pôle au-dessus de l'horizon. La longitude est l'angle que fait le méridien local avec celui de Greenwich. On le mesurera en degrés, minutes et secondes ou en heures, minutes et secondes. On indiquera si le lieu est à l'est (E) ou à l'ouest (W) de Greenwich. Cette longitude est égale à la différence des temps locaux (il s'agit du temps local du lieu d'observation moins le temps local correspondant au méridien de Greenwich). Ainsi, l'Observatoire de Paris a la longitude L = 2° 20′ 14″ E ou 9 minutes 20,9 secondes E, et la latitude φ = 48° 50′ 11″.

L'introduction des systèmes de coordonnées sur la sphère a posé le problème des calculs géométriques sur cette sphère, ou *trigonométrie sphérique,* c'est-à-dire la mesure des triangles sphériques. On nomme ainsi la figure de la sphère obtenue en joignant trois sommets ABC situés sur la sphère par trois arcs de grands cercles, c'est-à-dire de cercles ayant leur centre au centre de la sphère. On nomme les segments AB, BC et CA côtés du triangle sphérique, et on introduit la notion d'angles au sommet. Par exemple, en A, les tangentes aux arcs AB et AC forment un angle que l'on désigne par la lettre A. Dans un triangle, il y a six éléments : trois côtés et trois angles. On démontre qu'il suffit d'en connaître trois pour pouvoir calculer les trois autres. Ces calculs sont aisés grâce à l'introduction des fonctions sinus, cosinus et tangentes des angles.

La trigonométrie sphérique est essentielle pour les pratiques de l'astronomie, de la géodésie, de la géographie et de la navigation astronomique.

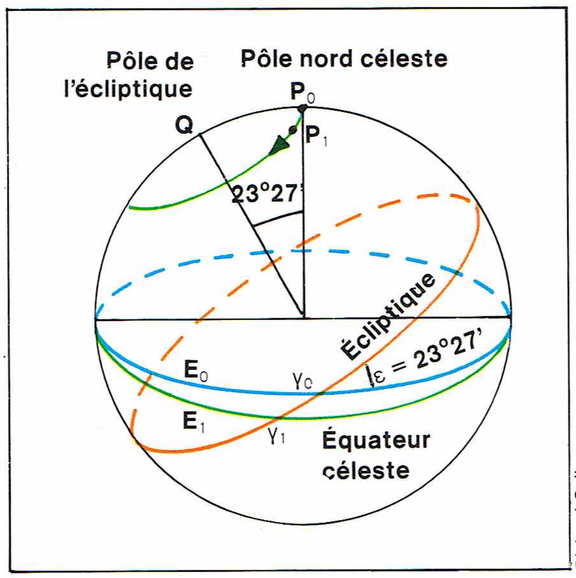

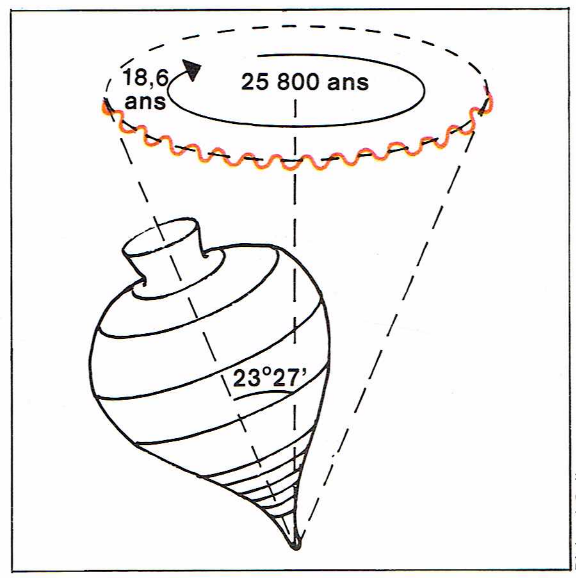

▶ *A gauche, représentation graphique de la précession des équinoxes : à l'instant t_0 le pôle est en P_0 et l'équateur en E_0 ; à l'instant t_1, le pôle est en P_1 et l'équateur en E_1. Le point vernal passe de γ_0 à γ_1, ce phénomène est la* précession des équinoxes. *A droite, représentation du phénomène de* nutation. *Le changement de direction de l'axe de la Terre qui cause la précession des équinoxes peut être comparé au mouvement de l'axe de rotation de cette toupie. L'oscillation de 17″,2 d'amplitude a une période de 18,60 ans.*

La précession des équinoxes

Nous avons choisi précédemment (coordonnées horaires) la position de l'écliptique et de l'équateur terrestre à un moment donné ; ces deux plans font entre eux un angle ε = 23° 27′. L'observation a montré qu'au cours des temps la position de l'écliptique sur la sphère des étoiles et l'inclinaison ε ne varient pratiquement pas. Mais le pôle de l'équateur P décrit autour du pôle de l'écliptique Q un cercle de 23° 27′ de rayon ; la durée de la révolution est de 25 800 ans. De ce fait, le point vernal se déplace de 50″,26 sur l'écliptique dans le sens rétrograde. C'est cet important phénomène, découvert depuis plus de 2 000 ans, que l'on appelle la précession des équinoxes.

Les coordonnées α et δ d'une étoile varient au cours du temps. La nature physique de ce phénomène est maintenant bien expliquée par la théorie développée par le mathématicien français Poisson. On peut considérer la Terre comme une toupie appuyée sur un plan horizontal, mais dont l'axe de rotation fait avec la verticale un angle fixe de 23° 27′. Cet axe décrit ainsi en 25 800 ans un cône dans le sens rétrograde.

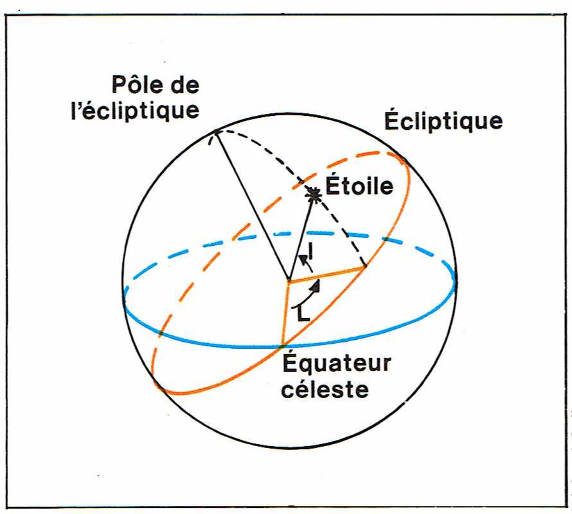

▶ *Représentation graphique des coordonnées écliptiques : γ, point vernal ; L, longitude ; l, latitude.*

L'origine de ce mouvement est due à l'influence de l'attraction du Soleil et de la Lune sur le renflement équatorial de la Terre. Celle-ci n'est, en effet, pas sphérique mais aplatie. Le rayon polaire mesure 1/298 de moins que le rayon équatorial. En fait, le phénomène est un peu plus compliqué. Au mouvement général de précession s'ajoute une petite oscillation de 17″,2 d'amplitude et ayant une période de 18,60 ans. En même temps, l'inclinaison de l'écliptique oscille avec la même période et une amplitude de 9″,2. Ce phénomène est également expliqué par l'influence de la Lune et du Soleil sur le renflement équatorial terrestre. Il porte le nom de *nutation*.

Les coordonnées écliptiques

Le système de coordonnées écliptiques est utile surtout pour les astres du système solaire. La *longitude* et la *latitude écliptiques* sont comptées dans un système ayant l'écliptique pour plan principal et le point vernal pour origine.

Dans ce système, une étoile a une latitude constante, mais sa longitude augmente de 50″,26 par an puisque le point vernal se déplace de cette quantité par an dans le sens rétrograde. D'ailleurs, le phénomène fut découvert de la façon suivante par Hipparque : la position du Soleil parmi les étoiles, observée par Timocharis en 273 avant notre ère, était en désaccord avec ses propres observations exécutées vers l'an 129 avant J.-C.; la longitude de l'étoile Spica (α Vir) avait augmenté de 2° en 144 ans.

Le mouvement diurne

Il est nécessaire de donner quelques précisions sur le mouvement apparent des étoiles sur la sphère céleste. Au cours du mouvement diurne, une étoile décrit un cercle comme celui indiqué sur la figure ci-dessous. On constate que les étoiles proches du pôle (en fait celles pour lesquelles $\delta > 90° - \varphi$) ne se couchent jamais : elles sont circumpolaires. Celles de la calotte opposée ne se lèvent jamais et ne peuvent être observées de ce point de la Terre. Seules celles qui sont situées dans la zone intermédiaire $(90° - \varphi) > \delta > -(90° - \varphi)$ se lèvent et se couchent. Cela est naturellement valable pour n'importe quel astre (nous examinerons plus loin le cas du Soleil).

Actuellement, le pôle céleste est très près de l'étoile α UMi (la Polaire) et celle-ci décrit un très petit cercle de 51′ de rayon. Du fait de la précession des équinoxes, il n'en a pas toujours été ainsi et il y a 12 000 ans le pôle n'était pas très éloigné de Véga (α Lyrae). Les hommes de l'Age de la pierre pouvaient voir certaines constellations australes, même de nos latitudes; naturellement, d'autres leur étaient cachées.

La réfraction atmosphérique

Les rayons lumineux provenant des astres traversent l'atmosphère terrestre et y subissent une déviation

COORDONNÉES	Nomenclature	Origine	Sens de Mesure	Remarques
HORIZONTALES	Azimut A Hauteur h	Plan Fondamental : horizon du lieu. Cercle vertical origine : méridien du lieu.	A compté de 0 à 360° dans le sens rétrograde h compté de 0 à +90° au-dessus horizon et 0 à −90° au-dessous horizon.	Coordonnées des astres variables en fonction du temps.
HORAIRES	Angle horaire H Déclinaison δ	Plan Fondamental : équateur. Grand cercle origine : méridien du lieu.	H compté de 0 à 24 h dans le sens rétrograde δ compté de 0 à +90° dans l'Hémisphère Nord et de 0 à −90° dans l'Hémisphère Sud.	Coordonnées horaires L'angle horaire est mesuré en heures, minutes, secondes. Il varie pour un astre en fonction du temps. La déclinaison d'une étoile est fixe.
ÉQUATORIALES	Ascension droite α Déclinaison δ	Plan Fondamental : équateur. Plan origine : grand cercle passant par le pôle et le point γ.	α compté de 0 à 24 h dans le sens direct δ compté de 0 à +90° dans l'Hémisphère Nord et de 0 à −90° dans l'Hémisphère Sud	Les coordonnées α et δ d'une étoile ne varient pas au cours du temps. Elles sont indépendantes du lieu d'observation.
ÉCLIPTIQUES	Longitude écliptique L Latitude écliptique l	Plan Fondamental : l'écliptique. Plan origine : grand cercle passant par le pôle de l'écliptique et le point γ.	Longitude comptée de 0 à 360° dans le sens direct. Latitude comptée de 0 à +90° vers le Pôle écliptique Nord et de 0 à −90° vers le Pôle écliptique Sud.	Système de coordonnées fixes, comme les coordonnées équatoriales. La latitude du Soleil est pratiquement égale à zéro, sa longitude augmente en moyenne d'un peu moins de 1° par jour.

◀ *Tableau récapitulatif* **des différents systèmes de coordonnées.**

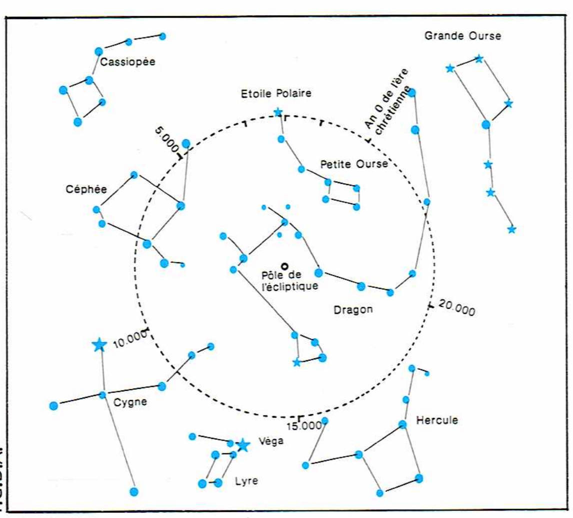

I.G.D.A.

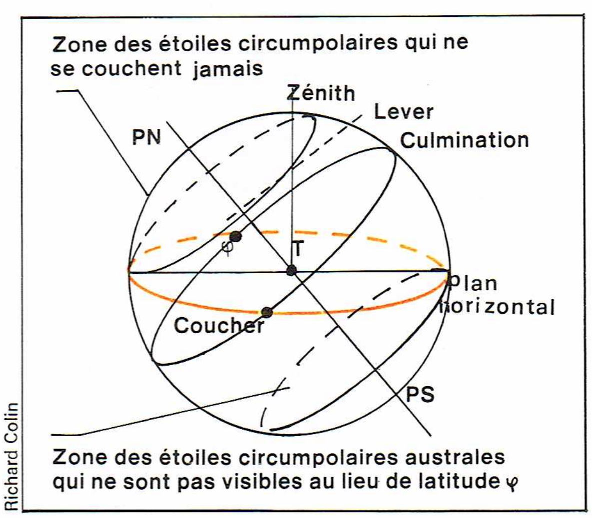

Richard Colin

◀ *A gauche, sous l'effet du déplacement du pôle céleste provoqué par la précession des équinoxes, l'étoile Polaire était, vers 3000 av. J.-C., α Dragon; aujourd'hui, c'est α Petite Ourse; dans 12000 ans, ce sera Véga (α Lyre). A droite, le mouvement diurne des étoiles : φ, latitude du lieu.*

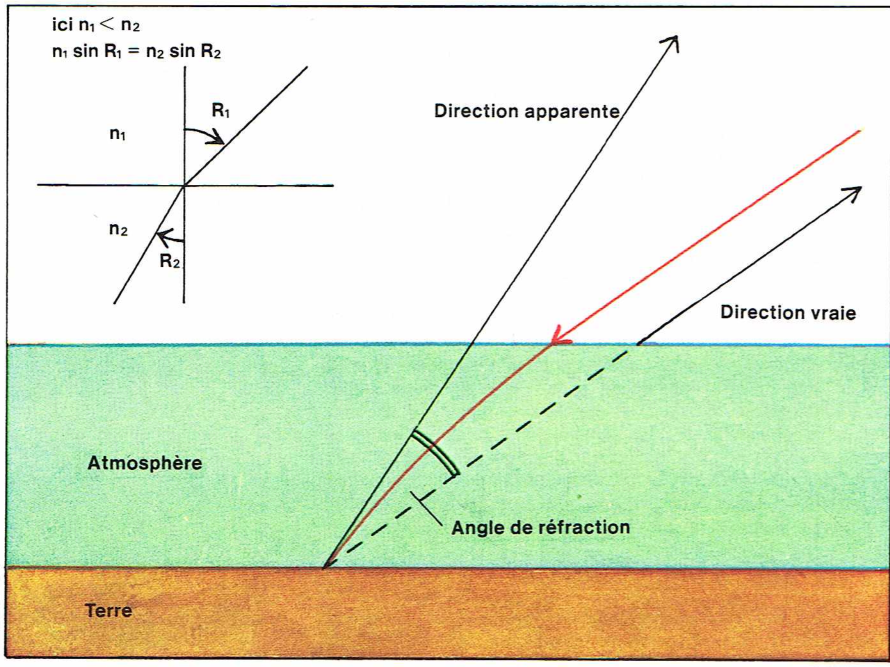

Richard Colin

▲ *Représentation schématique du phénomène de réfraction atmosphérique.*

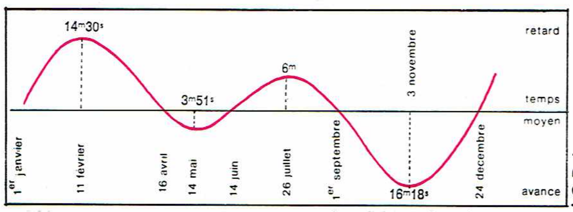

I.G.D.A.

▶ *Représentation schématique des valeurs de l'équation du temps aux différentes époques de l'année.*

ainsi qu'une absorption. Si l'atmosphère est calme, la déviation obéit à des lois très simples que l'on nomme *réfraction atmosphérique :* la direction de l'astre reste dans le plan vertical passant par le zénith mais elle est rapprochée de ce zénith d'un petit angle R qui dépend de la distance angulaire au zénith (distance zénithale, Z). Dans les conditions normales (P = 760 mm de mercure, t = 0 °C), cette réfraction, pour les distances zénithales Z, prend les valeurs R suivantes :

Z =	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
R =	0″,0	16″,2	34″,8	60″,3	1′44″	3′42″	37′36″.

La réfraction est très gênante pour les mesures de précision car toutes les mesures de distances zénithales, et par conséquent de déclinaisons, doivent être corrigées de la réfraction dont la valeur précise dépend à la fois de la température et de la pression au sol, mais aussi un peu de la couleur de l'étoile.

Lorsque l'atmosphère n'est pas très stable, les images des étoiles bougent au foyer des lunettes et des télescopes et deviennent floues dans les grands télescopes. Cette scintillation et cette turbulence sont des effets très gênants, qui limitent la finesse des images télescopiques et la puissance des grands instruments.

La réfraction avance le lever et retarde le coucher des astres et notamment du Soleil. Ainsi sous la latitude de 45°, la journée est allongée de 6 minutes aux équinoxes et de 8 minutes aux solstices. Mais pour des points de plus haute latitude, cet effet est beaucoup plus grand.

Le temps

Le temps solaire vrai

Nous avons vu que l'angle horaire du Soleil, c'est-à-dire l'angle dont le Soleil a dépassé le méridien local, est le temps vrai local. Ce temps présente un très grand défaut : il n'est pas uniforme. En effet, le Soleil décrit l'écliptique en un an, d'un mouvement qui n'est pas uniforme : on constate, et la théorie de Newton l'explique très bien, que le mouvement du Soleil est un peu plus rapide en hiver, lorsque la distance Soleil-Terre est minimale. Même si le mouvement sur l'écliptique était uniforme, l'ascension droite du Soleil n'augmenterait pas de façon continue car la projection du Soleil sur l'équateur produit elle aussi une distorsion de ce mouvement. Le calcul permet d'évaluer la différence entre le temps solaire moyen T_m et le temps solaire vrai T_v : $E = T_m - T_v$. Cette différence est l'équation de temps. L'écart est important : il est de 14 minutes 22 secondes le 11 février, de — 16 minutes 23 secondes le 4 novembre.

L'observation du temps solaire vrai permet d'obtenir un temps solaire moyen uniforme : il suffit de lui ajouter l'équation du temps. L'heure moyenne ainsi définie est une heure locale qui ne sera la même que pour tous les points situés sur le même méridien terrestre.

Les fuseaux horaires

Lorsque le Soleil est situé dans le méridien origine (à Greenwich), il est midi solaire vrai à Greenwich. A Varsovie, dont la longitude est L = 21° E, ou encore 1 h 24 mn (1 h = 15°), le Soleil a dépassé le méridien de 21°, ou 1 h 24 mn ; il est donc à Varsovie 1 h 24 mn de temps local. Au même moment, il sera 11 h 24 mn à Lisbonne et 7 h 46 mn du soir à Pékin. Cette existence d'heures locales différentes, entre villes différentes, est devenue intolérable dès le fonctionnement du chemin de fer et les sociétés qui assuraient le service des trains furent amenées à uniformiser l'heure. Cette situation devint légale. Ultérieurement, on divisa toute la Terre en zones de 15° de large, nommées *fuseaux horaires.* Le premier fuseau est centré sur le méridien 0°, celui de Greenwich. Lorsque l'on passe d'un fuseau à l'autre vers l'est, on augmente l'heure d'une heure. Au contraire, lorsqu'on va vers l'ouest, on la diminue d'une heure. En procédant ainsi, on se heurte à une difficulté sérieuse car, suivant le sens du déplacement vers l'est ou l'ouest, on aboutit, au méridien opposé, à une date différente d'un jour. Il faut effectivement changer de date sur une ligne qui, heureusement, est en plein océan Pacifique. Les bateaux et avions qui passent cette ligne de changement de date doivent diminuer la date d'un jour lorsqu'ils vont de l'ouest vers l'est et l'augmenter dans l'autre sens. On a adapté les fuseaux horaires ainsi que la ligne de changement de date aux limites géographiques des pays, pour uniformiser les heures dans des régions géographiques ou des États. On est aussi convenu d'augmenter l'heure solaire de 12 heures pour changer de date à minuit. La très grande majorité des pays a adopté ce système ; quelques pays ont introduit des corrections de 20 ou 40 minutes. D'autres pays décalent leur heure : c'est le cas de la France qui ajoute une heure, pour essayer de recentrer l'activité journalière du pays sur le Soleil et d'éviter ainsi des dépenses inutiles d'énergie.

Le temps universel

On est aussi convenu d'adopter comme temps universel, TU, le temps moyen du méridien de Greenwich. La dénomination TMG est erronée car elle correspond à un temps décalé de 12 heures. Le comptage des heures de 0 à 24 heures s'introduit de plus en plus ; seuls quelques pays anglo-saxons utilisent le décompte en deux fois 12 heures, ce qui ne va pas sans mal. La seconde de temps moyen est définie comme la 86 400e partie du jour solaire moyen.

Cette définition ancienne doit être améliorée car la rotation de la Terre n'est pas constante mais varie un peu. Les variations peuvent être classées en trois catégories : un ralentissement lent de la rotation de la Terre, une fluctuation d'assez grande amplitude mais lente, et une fluctuation saisonnière très petite. Le ralentissement de la rotation peut être mis en évidence par une accélération apparente du mouvement du Soleil, des planètes et de la Lune. Pour la Lune, le phénomène est un peu plus complexe. La mécanique céleste permet de calculer ces mouvements avec précision, et l'on constate que le Soleil réel est en avance sur le Soleil « calculé » d'une quantité qui a atteint un peu moins de 3′ d'arc en mille ans, légère accélération qui s'explique par une augmentation de la durée de la rotation de la Terre. Cet effet paraît très petit mais l'effet cumulatif a été de 3 heures en 20 siècles. A cet effet principal, s'ajoute une variation irrégulière qui nécessite une correction du temps terrestre. Nulle vers 1710, elle était de + 25 secondes en 1780, de nouveau nulle en 1860, puis négative avec une valeur de l'ordre de — 25 secondes entre 1900 et 1940. La théorie exacte de cet effet n'a pas pu être faite mais on sait qu'il est d'origine météorologique : le moment d'inertie de la Terre est, en effet, lié à la répartition des

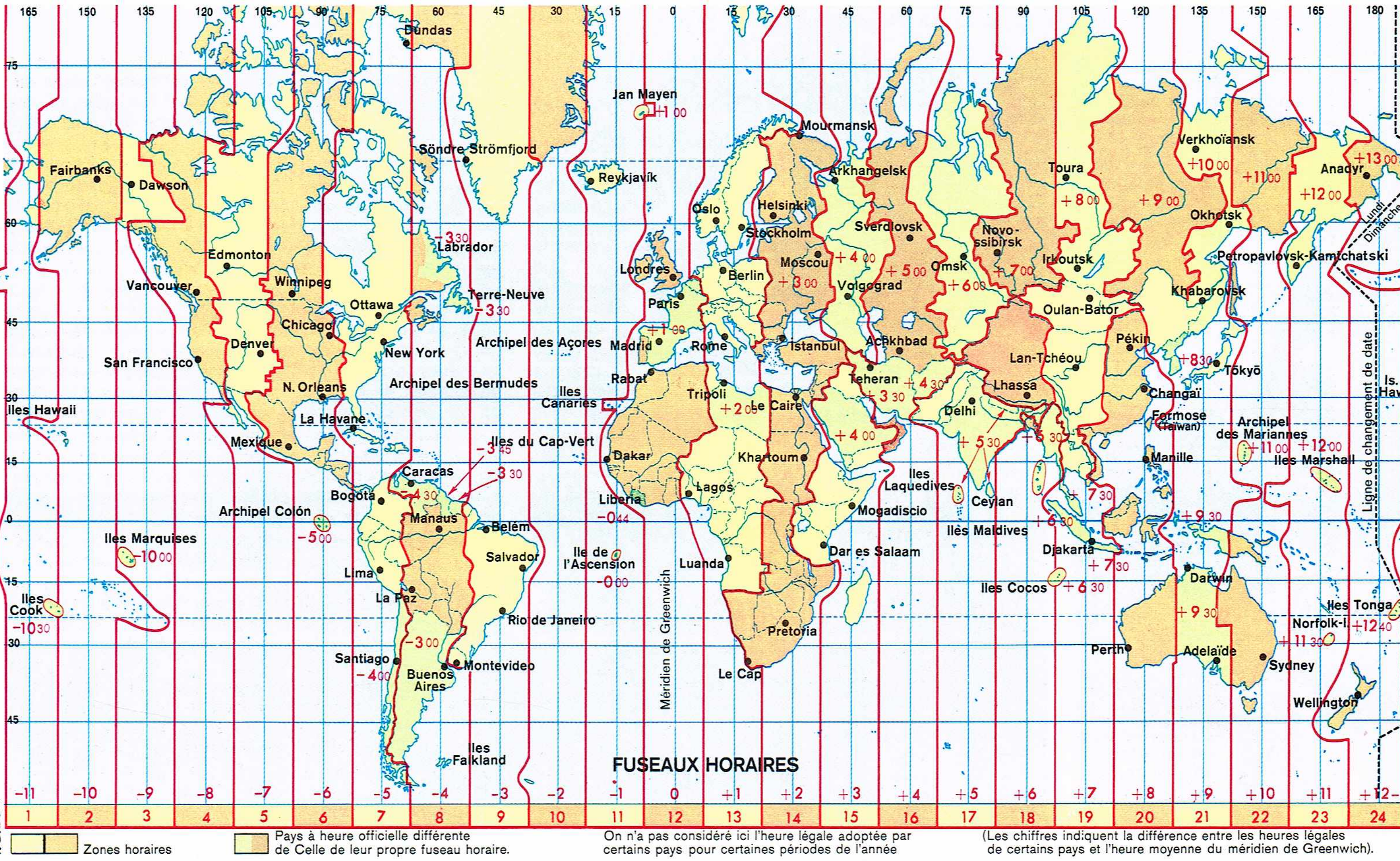

▲ ***Fuseaux horaires et ligne de changement de date.***

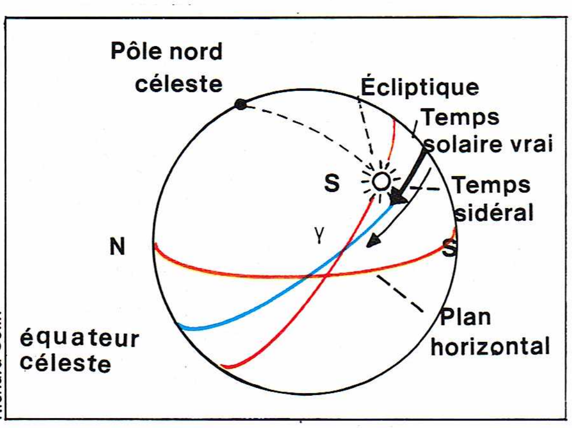

◀ ***Représentation schématique du* temps sidéral *et du* temps solaire vrai.**

glaces polaires. Une toute petite correction analogue, variant entre + 3/100 de seconde en mai et — 3/100 de seconde en octobre, a été mise en évidence en 1937.

On comprend que dans ces conditions, il n'est pas possible de définir une unité de temps, comme la seconde, par la 1/86 400e partie du jour solaire moyen.

Le temps des éphémérides — Le temps atomique

Devant ces difficultés, on a décidé d'introduire une ou plutôt deux nouvelles définitions du temps. La mécanique céleste permet de prévoir avec une très grande précision la position de la Terre sur son orbite, alors qu'elle ne permet pas de prévoir la rotation de la Terre car celle-ci est perturbée par des effets météorologiques. Dans les équations de la mécanique céleste figure le temps t, le temps des mécaniciens, que nous nommerons temps des éphémérides (TE). Ces équations permettent de calculer avec une grande précision l'époque des phénomènes astronomiques. Par exemple, on calculera à quelle époque TE le Soleil a la déclinaison 0°, c'est-à-dire quand il est au point vernal γ. Si l'on observe ce passage, on connaîtra à ce moment le temps des éphémérides TE et on le repérera sur une pendule. Les mêmes tables permettent de calculer l'époque correspondante pour l'année suivante. L'intervalle entre ces deux passages est l'année tropique. On peut la mesurer à 0,1 seconde près, soit avec une précision de l'ordre de 3 milliardièmes pour la seconde. On obtient une précision un peu plus grande en faisant le même calcul pour la Lune, qui se déplace treize fois plus vite, et cela malgré l'extrême complication des tables lunaires. On pense que la seconde des éphémérides est déterminée à 10^{-9} (au milliardième près). Rappelons que l'année tropique est un peu variable et que, par conséquent, la seconde doit être définie comme une fraction donnée de l'année tropique telle qu'elle était à un moment donné. La seconde des éphémérides est définie comme la fraction 1/31 556 925,974 7 de l'année tropique pour 1900, janvier 0 à 12 heures TE. Ce nombre a été fixé pour que cette seconde soit égale à la vieille définition de la seconde de TU. L'époque origine est en fait le 31 décembre 1899 à 12 h TU.

Cette définition a été possible parce que, simultanément, les physiciens ont fait de grands progrès dans la construction des horloges. Après l'horloge à quartz, qui donnait une précision de l'ordre de 10^{-9}, on a pu mesurer les temps d'oscillations des molécules et ensuite des atomes et compter le nombre qui a lieu en une seconde. L'horloge la plus perfectionnée est l'horloge à césium, où l'oscillation correspond à la transition de deux états fondamentaux de cet atome.

On a ainsi constaté qu'une seconde de temps des éphémérides correspond à n = 9 192 631 770 oscillations avec une précision de 20 oscillations; l'imprécision provient de la définition du temps TE. Par définition, la seconde TAI (temps atomique international) est celle qui correspond exactement à ce nombre n d'oscillations. Des mesures ultérieures ont confirmé ces résultats, et la comparaison des indications d'horloge situées en des points différents du globe (en tenant compte des durées de transmission des signaux) a montré que la seconde TAI est connue à 10^{-13} près, c'est-à-dire 10 000 fois mieux que la seconde TE. On peut écrire :

$$TE = TAI + 32{,}180 \text{ s}$$

la valeur de 32,180 provient du choix de l'origine des deux temps. Naturellement, il est essentiel de continuer

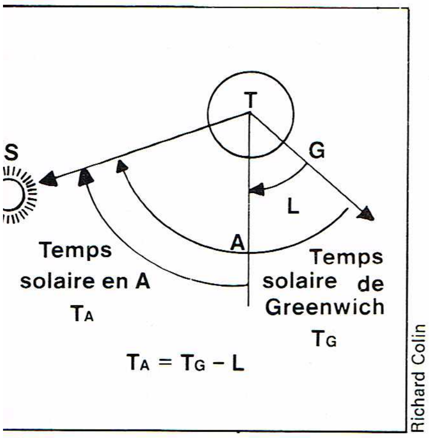

▲ *Variation du temps solaire avec le lieu d'observation : A, lieu d'observation; G, se trouve sur le méridien de Greenwich; L, longitude de A; S, Soleil. Les droites représentées sont dans le plan de l'équateur et correspondent aux grands cercles passant par G, A et S.*

à observer TE et TAI pour vérifier que la mécanique céleste est correcte et que la constance de TAI est bien assurée.

Cependant, cela ne résout pas toutes les difficultés. Les astronomes observent TU par le passage du Soleil ou des étoiles au méridien (voir la partie consacrée aux instruments et à la lunette méridienne). Ils le corrigent des effets très petits dus au mouvement du pôle terrestre; ils obtiennent ainsi une première approximation nommée TU1. La différence TU1 — TE ou TU1 — TAI (à une constante près) représente les inégalités du mouvement de la Terre, saisonnières et séculaires. En corrigeant le temps de la variation saisonnière, on obtient un nouveau temps nommé TU2; jusqu'en 1972, on divisait l'année correspondante en 365 × 86 400 secondes; or, comme l'année tropique n'a pas une durée constante, les secondes ainsi obtenues ne sont pas des secondes égales à celles de TE et TAI. Cette divergence est extrêmement gênante pour de nombreuses applications technologiques, notamment pour les systèmes modernes de navigation aérienne. Aussi vient-on de décider de diffuser des secondes de TAI et d'ajouter et de retrancher éventuellement des secondes à l'année pour l'ajuster à l'année vraie. On s'arrange pour que l'écart entre le temps diffusé et le temps solaire moyen ne soit jamais supérieur à 0,7 seconde et on indique par un code la grandeur de la correction. Dans ces conditions, le spécialiste dispose d'une échelle de temps atomique avec des secondes exactes. Il connaît le temps solaire moyen à 0,1 s près et on lui indique ultérieurement les corrections à 0,001 s près. Ce système paraît satisfaire toutes les demandes; il sert, notamment, à l'étalonnage précis des fréquences. Le seul problème est la datation des événements qui se passent dans la seconde supplémentaire. Le dernier jour de l'année pourra mesurer 86 401 ou 86 399 secondes au lieu de 86 400. C'était le cas du 31 décembre 1973 qui avait 86 401 secondes.

Le temps sidéral

Rappelons que le jour sidéral est le temps qui sépare deux passages successifs du point vernal au méridien du lieu d'observation. Tous les problèmes que nous avons examinés pour le temps solaire et dus à l'irrégularité de rotation de la Terre se posent à nouveau. On définira un temps sidéral moyen, etc.; mais ce qui est essentiel, c'est qu'une année tropique vaut 365,242 19 jours solaires moyens. Pendant cette année tropique, par suite de sa révolution autour du Soleil, le mouvement de la Terre par rapport aux étoiles vaut exactement un jour de plus, de sorte qu'une journée sidérale vaut :

$$\frac{365{,}242\ 19}{366{,}242\ 19} = 84\ 164{,}09 \text{ s TAI.}$$

La différence de 235,91 s = 3 mn 55,91 s est celle que nous avons signalée précédemment.

▶ *Tableau récapitulatif des différentes définitions du temps.*

Définitions du temps	
Temps solaire vrai T_v	Angle dont le Soleil a dépassé le méridien du lieu ou angle horaire du Soleil. Ce temps ne varie pas de façon uniforme.
Temps solaire moyen T_m	Temps solaire local corrigé des inégalités du mouvement apparent du Soleil. S'obtient en ajoutant l'équation du temps au temps solaire vrai. $T_m = T_v + E$
Temps universel TU	Temps solaire moyen de Greenwich augmenté de 12 heures.
Temps légal TL	TU ± n heures suivant le fuseau horaire (éventuellement temps d'été). A Paris en 1975 n = 1 pour toute l'année, mais à partir de 1976 n = 2 en été. (Le fuseau horaire demanderait n = 0).
Temps des éphémérides TE	C'est un TU amélioré, celui-ci présentant encore de petites fluctuations, il est contrôlé par les observations et calculs astronomiques.
Temps atomique international TAI	Il est basé sur les oscillations atomiques.
On s'est efforcé d'obtenir l'égalité des TE et TAI; en fait, les temps sont décalés : TE = TAI + 32,180 s. La seconde est définie astronomiquement comme une fraction de l'année tropique pour 1900, mais la nouvelle définition est rattachée à un nombre d'oscillations d'une pendule au césium. Il y a pratiquement identité entre la définition astronomique de la seconde et la nouvelle définition des physiciens.	
Temps sidéral	C'est l'angle horaire du point vernal γ. Il permet de calculer l'heure de passage des étoiles au méridien ($T_s = \alpha$). Le jour sidéral vaut 84 164,09 s TAI.

▼ *Cette suite de 24 photographies assemblées montre le remarquable phénomène du « Soleil de minuit » (chaque bande correspond à une photographie prise à chaque heure à partir de 6 heures du matin, au même endroit). L'objectif, d'abord orienté à l'est, puis au sud (hauteur maximale du Soleil au-dessus de l'horizon), et ensuite, peu à peu, vers l'ouest et le nord, a décrit en 24 heures une rotation complète permettant d'embrasser tout l'horizon du lieu. Une telle photographie ne peut être réalisée qu'en un lieu situé au-delà du cercle polaire.*

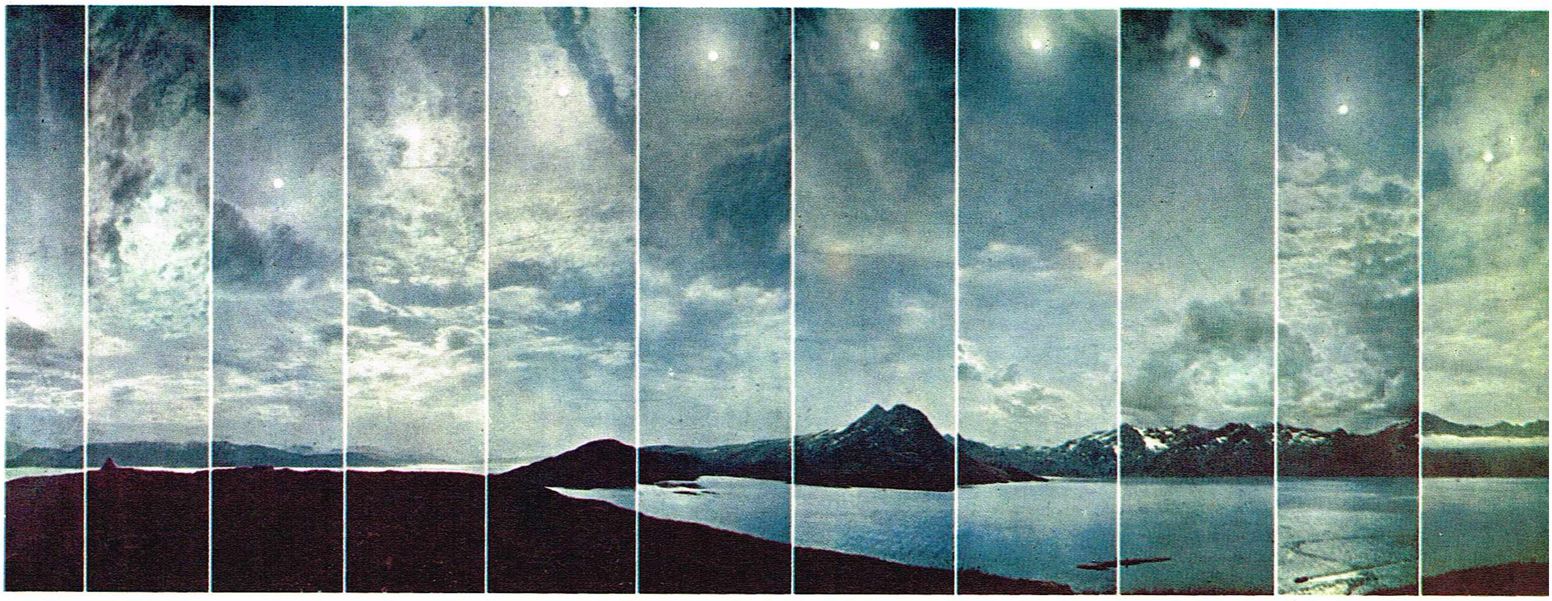

Les cadrans solaires

Comme l'ombre portée par un objet se déplace en même temps que le Soleil, il est facile d'imaginer des dispositifs qui permettent de repérer l'heure solaire. Ces instruments sont des cadrans solaires.

Lorsque la surface est horizontale et que l'on mesure la longueur de l'ombre portée, on a affaire à un *gnomon*. Par extension, la *gnomonique* est l'art de construire des cadrans solaires.

Le modèle le plus simple est constitué par un stylet, fixé à un mur vertical et orienté est-ouest. Le stylet est parallèle à l'axe du monde, son ombre sur le mur est toujours une droite passant par le point de fixation du stylet, cette droite étant verticale à midi vrai local puisque le Soleil est alors dans le plan méridien qui contient à la fois le stylet et la verticale. Il est facile de construire ou de calculer les angles de l'ombre portée pour 1, 2, 3 heures avant ou après le méridien. On matérialise les lignes correspondantes et on marque par des chiffres les heures ainsi lues. L'ombre du bout du stylet dessine une ligne horizontale aux équinoxes, et deux arcs d'hyperboles situés au-dessus de cette droite pour l'hiver et en-dessous pour l'été.

Dans la construction des cadrans solaires, l'imagination n'a pas eu de limites et les modèles sont aussi variés que leurs devises. On a construit des cadrans solaires de poche qui servaient avant l'invention des montres : ils ne donnaient que l'heure locale vraie, à condition de les orienter exactement.

La forme et les pôles de la Terre

La forme de la Terre

Les astronomes grecs de l'Antiquité avaient déjà réalisé que la Terre était ronde. Ératosthène détermina en Égypte, vers 250 avant J.-C., le diamètre de la Terre en observant simultanément l'ombre portée du Soleil à Syène et à Alexandrie; il en déduisit que la circonférence de la Terre était de 250 000 stades, valeur que Hipparque porta à 252 000 et qui correspond à une valeur de l'ordre de 40 000 km en admettant pour valeur du stade 160 m. Il fallut attendre le XVIII^e siècle pour réaliser que la Terre est un ellipsoïde aplati. L'Académie des sciences de Paris organisa, au début du XVIII^e siècle, deux expéditions à des latitudes différentes. En 1735, La Condamine et Bouguer mesurèrent la longueur du degré au Pérou. C'est la distance de deux points situés sur le même méridien mais dont la latitude diffère de 1°. Maupertuis fit la même mesure en 1736 en Laponie. Ces mesures montrèrent un aplatissement de l'ordre de 1/300, c'est-à-dire que le rayon polaire vaut environ 299/300 du rayon équatorial.

Ces mesures ont été reprises, et actuellement on sait que le géoïde terrestre est sensiblement un ellipsoïde de révolution ayant un rayon équatorial de 6 378,160 km et un aplatissement de 1/298,25. En chaque point de la Terre, la verticale est très sensiblement perpendiculaire à cet ellipsoïde, les légères variations locales ne dépassant pas 15 à 20″. Une des tâches importantes de la géodésie est de faire correspondre les points de ce géoïde avec les points géographiques de la Terre. Remarquons qu'en un point de la Terre, la verticale et la direction du centre de la Terre ne sont pas confondues. La différence est maximale à la latitude 45°, où elle vaut environ 11′,5.

L'étude de la trajectoire des satellites artificiels a montré que la forme générale de la Terre est un peu moins régulière qu'on ne le pensait; elle présente une petite pointe de 50 m au pôle Nord et un creux de l'ordre de 100 m dans l'océan Indien, mais ces écarts sont faibles si on les compare aux 21 km de différence des rayons polaires et équatoriaux.

Le mouvement du pôle

Un point important est de savoir si le pôle de rotation se déplace sur le géoïde terrestre par rapport aux continents. Des mesures très précises de latitude de nombreux observatoires, répartis sur la Terre, montrent que le pôle n'est pas absolument fixe mais se déplace sur la Terre; la courbe de ce déplacement, ou *polhodie* (c'est-à-dire chemin du pôle), est une courbe bouclée d'une dizaine de mètres de diamètre et dont une boucle est décrite sensiblement en 427 jours. A cet effet principal s'ajoutent d'ailleurs un petit mouvement annuel et un déplacement très lent. Euler, en supposant la Terre rigide, avait prévu ce mouvement par le calcul mais avec une période de 305 jours; la différence s'explique par l'élasticité de la Terre. Le mouvement systématique depuis 80 ans est de 11 cm/an. Si ce mouvement continuait avec sa vitesse actuelle, il serait négligeable car il n'atteindrait que 11 km en 100 000 ans. Néanmoins des observations géologiques et paléontologiques récentes semblent indiquer un lent déplacement du pôle terrestre sur la Terre.

Naturellement, ce mouvement affecte un peu les longitudes et les latitudes des observatoires : le méridien de Greenwich peut avoir une longitude de 0,003 s. Ces calculs montrent l'extrême degré de précision atteint par les observations astronomiques.

Le mouvement du Soleil et les saisons

Le lever et le coucher du Soleil

Réexaminons le mouvement du Soleil sur la sphère des étoiles fixes et commençons cette étude au moment où le Soleil est au point γ, intersection de l'équateur céleste avec l'écliptique; la déclinaison du Soleil est nulle; le Soleil se lèvera exactement à l'est et accomplira sa course qui l'amènera en 6 heures au méridien; il se recouchera 6 heures plus tard; la journée sera égale à 12 heures comme la nuit. Nous sommes à l'*équinoxe* du printemps et cette égalité des nuits et des jours se réalisera en tous les points du globe terrestre.

▼ **Horloge solaire** ***d'E. C. G. Stockert, en usage en Allemagne, à la fin du XVIII^e siècle.***

C. Bevilacqua

Archives I.G.D.A.

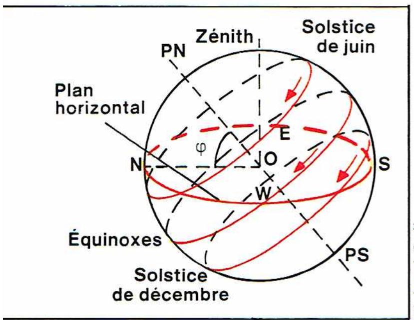

Richard Colin

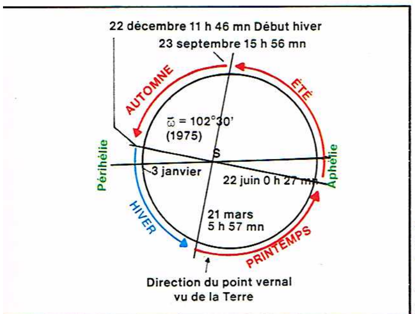

Richard Colin

▲ *En haut, mouvement diurne du Soleil en fonction des saisons : E, est; O, ouest; N, nord; S, sud. Ci-dessus, schéma explicatif de l'*inégalité des saisons *(l'excentricité de l'orbite a été exagérée).*

Quelques jours plus tard, le Soleil se sera déplacé sur l'écliptique et se trouvera dans l'hémisphère boréal; sa déclinaison sera positive, la durée du jour aura augmenté pour les lieux de l'hémisphère Nord et cet allongement du jour sera de plus en plus prononcé. Vers le 21 juin, le Soleil sera au haut de sa course, sa déclinaison sera de 23° 27′ et sous les latitudes de la France, le jour mesurera 16 heures pour 8 heures de nuit. Mais les nuits sont encore plus longues pour des latitudes plus élevées et, au-delà du cercle polaire, le Soleil deviendra circumpolaire : il sera toujours levé. C'est le jour polaire avec son « Soleil de minuit »; naturellement, le Soleil sera plus élevé dans le ciel à midi qu'à minuit. Pendant cette période, le Soleil sera invisible pour les points situés au-delà du cercle polaire austral, où régnera la nuit polaire. Remarquons qu'à l'équateur, les nuits mesurent 12 heures toute l'année.

Le lever du Soleil est précédé par l'aurore et son coucher est suivi par le crépuscule. Cette lumière provient de l'éclairement des hautes couches de l'atmosphère par les rayons du Soleil. On admet que la nuit est complète lorsque le Soleil est situé à 18° au-dessous de l'horizon; la durée entre le coucher et ce moment porte le nom de *crépuscule astronomique;* le *crépuscule* est dit *civil* lorsque la dépression du Soleil n'est que de 6°. Ces durées de crépuscule sont très variables avec la latitude et la saison.

A l'équateur, la durée du crépuscule est courte et varie peu avec la saison — pratiquement 23 minutes pour la durée du crépuscule civil et 1 heure 15 minutes pour le crépuscule astronomique. Par contre, pour les latitudes plus élevées, les variations saisonnières sont importantes. A 45° de latitude, si la durée du crépuscule civil ne varie qu'entre 30 et 35 minutes, la durée du crépuscule astronomique est de 1 heure 40 minutes aux équinoxes mais de 1 heure 50 minutes en hiver et de 2 heures 35 minutes en été. Au-delà de 48° de latitude, la nuit n'est jamais complète en été, car le Soleil n'est jamais situé à 18° au-dessous de l'horizon, même à minuit.

Les saisons

Lorsque le Soleil est situé dans l'hémisphère Nord, c'est l'été pour cet hémisphère, et l'énergie reçue par une surface donnée de la Terre est maximale; le jour est plus long et le Soleil, plus haut dans le ciel, envoie des rayons presque perpendiculaires à midi. L'existence des saisons est donc liée à l'inclinaison de l'écliptique sur l'équateur. La valeur actuelle de 23° 27′ diminue un peu en fonction du temps; les valeurs que l'on peut calculer pour une dizaine de milliers d'années sont :

Époque	*Inclinaison* ε
— 2000	23° 56′
0	23° 42′
2000	23° 26′
4000	23° 11′
6000	22° 57′

La faible amplitude de ces variations dans le temps indique que le climat n'a pas beaucoup changé. Il n'est pas possible d'extrapoler ces valeurs pour des époques très éloignées dans le temps car les données d'observation sont insuffisantes.

Par convention, le printemps commence au moment du passage du Soleil au point vernal, c'est-à-dire à l'équinoxe situé vers le 21 mars; l'été lorsque le Soleil atteint sa plus grande hauteur dans le ciel, ce solstice se place vers le 22 juin; puis l'automne commence à l'équinoxe d'automne, vers le 23 septembre, et l'hiver au solstice d'hiver, vers le 22 décembre. Le cycle complet d'équinoxe à équinoxe porte le nom d'*année tropique*. Sa valeur de 365,242 198 8 jours est la période qui commande le retour des saisons; elle a donc une importance essentielle.

L'*année civile* devrait être exactement égale à cette période. Les calendriers successifs ont essayé de réaliser des années civiles qui en moyenne sont égales à cette période. L'année moyenne vaut 365,25 jours dans le calendrier julien et 365,242 5 jours dans le calendrier grégorien. C'est à cause de cet ajustement successif de l'année civile à l'année tropique que la date des débuts de saison varie d'une année à l'autre; elle augmente sensiblement d'un quart de jour tous les ans, mais elle recule de trois quarts de jour toutes les années bissextiles.

La Terre ne décrit pas autour du Soleil une trajectoire circulaire mais une ellipse; ce mouvement est régi par les lois de Kepler. La distance minimale a lieu vers le 3 janvier : c'est à ce moment que le mouvement de la Terre est le plus rapide. Par contre, c'est au début de juillet que la distance est maximale : le mouvement est alors le plus lent. L'orbite terrestre étant peu aplatie, les variations de distances sont assez modestes ($\pm$ 1,7 %), mais la non-uniformité du mouvement entraîne une inégalité de longueur des saisons :

	1950	1975
Printemps	92,81 jours	92,77 jours
Été	93,62 jours	93,65 jours
Automne	89,82 jours	89,83 jours
Hiver	89,00 jours	89,00 jours

L'orbite de la Terre tourne dans son plan, de sorte que le point de distance minimale (le *périhélie*) fait un tour en 21 000 ans par rapport au point vernal; ainsi, il y a 10 000 ans, l'été était la saison la plus courte. On a essayé d'expliquer des variations de climat par ce déplacement mais les résultats ne sont pas concluants. L'observation a montré que l'année tropique mesurée en unités de temps de la mécanique n'est pas constante.

Actuellement, alors que le jour moyen s'allonge de 0,001 64 s par siècle, l'année tropique se raccourcit de 0,53 s par siècle. L'écart est faible mais c'est cette variation qui a obligé les astronomes et les physiciens à définir la seconde par une fraction de l'année tropique pour 1900.

L'année sidérale et l'année anomalistique

Nous avons indiqué que le point vernal se déplace dans le sens rétrograde de 50″,26 par an. Par conséquent, pour que le Soleil retrouve la même place par rapport aux étoiles, il lui faudra encore parcourir ces 50″,26; la période de retour auprès des mêmes étoiles, ou *année sidérale,* est donc plus longue de 20 mn 24 s. Elle vaut 365,256 366 jours.

Lorsqu'ils expliquaient les crues du Nil par le lever héliaque de Sirius, les anciens Égyptiens adoptaient cette période pour les crues du Nil, alors qu'elles sont évidemment liées à l'année des saisons, c'est-à-dire à l'année tropique. C'est ce qui explique le décalage actuel entre les inondations et le lever de Sirius.

En étudiant les saisons, nous avons indiqué que le périhélie de l'orbite de la Terre se déplace dans le sens direct d'une petite quantité, qui est de 11″,63 par rapport aux étoiles et donc de 61″,89 par rapport au point vernal. Le retour de la Terre par le périhélie porte le nom d'*année anomalistique;* sa valeur est de 365,259 641 jours.

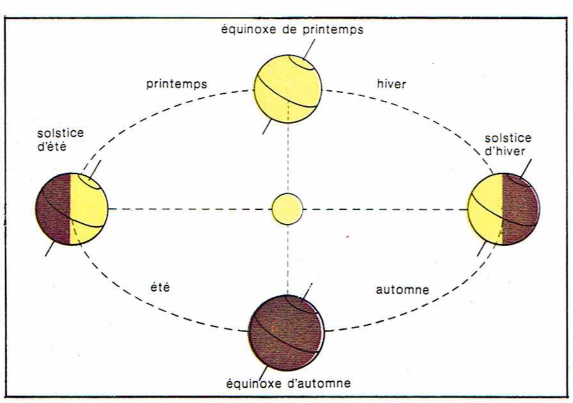

I.G.D.A.

▶ *La conséquence de la révolution de la Terre autour du Soleil et de l'inclinaison de l'axe terrestre sur le plan de l'écliptique est la succession des saisons (ce schéma en montre le mécanisme pour notre hémisphère boréal).*

Les calendriers et la chronologie

Le calendrier julien

Le calendrier romain était à l'origine peu rationnel. Il montre que la connaissance astronomique des Romains était assez médiocre : ainsi, l'année avait 10 mois et comportait 304 jours.

Dès les VII[e] et VI[e] siècles avant J.-C., on s'aperçut qu'une telle année n'était pas utilisable et, sous Numa Pompilius ou peut-être plus tard sous Tarquin, on ajouta deux mois : janvier et février. Cette réforme fut très approximative car six mois avaient 29 jours, alors que les six autres en comptaient 30. Cette année de 354 jours était une année lunaire de 12 $\times$ 29,5 jours et elle ne

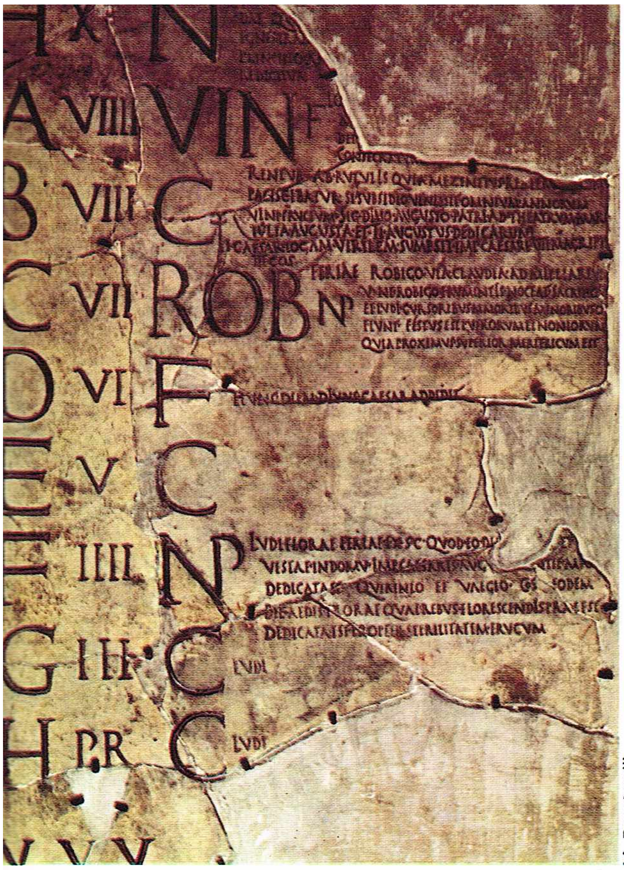

M. Pucciarelli

◀ *Détail du mois d'avril dans le calendrier romain, établi selon les tables de Préneste (musée national de Rome).*

correspondait pas aux saisons. Le décalage de 11,25 jours devait être corrigé : tous les deux ans, on intercalait un mois supplémentaire *(mercedonius)* de 22 ou 23 jours, pour rétablir des dates fixes pour les saisons et donc pour les semailles et les moissons. L'année avait en moyenne 365 jours. En raison de superstitions et d'intrigues politiques, la fixation des mois intercalaires fut très souvent différée; le désaccord entre le calendrier et la Lune, mais surtout le Soleil, devint flagrant. Le calendrier était en avance de 117 jours en 190 avant J.-C. et de 72 jours en 168 avant J.-C. A l'aide d'intercalations on rétablit l'ordre vers 120 avant J.-C. Cependant, par suite de nouvelles négligences, l'écart était de nouveau de 90 jours au temps de Jules César. Celui-ci, conseillé par l'astronome Sosigène d'Alexandrie, promulgua en 46 avant J.-C. une réforme qui établit l'année de 365,25 jours. L'année julienne comprend trois années de 365 jours et une année abondante de 366 jours. Le jour additionnel résulte de l'intercalation d'un jour après le sixième jour avant les ides de mars, le 24 février, d'où le nom d'année bissextile pour cette année abondante. Désormais, l'équinoxe a lieu le 25 mars; le premier mois est janvier; l'ordre des mois est gardé mais le neuvième mois s'appelle septembre (c'est-à-dire septième mois !). La durée des mois est arbitraire et s'explique par des superstitions (le mois néfaste de février n'a que 28 jours), et le mois d'Auguste (août) doit être aussi long que celui de Jules César (juillet).

Pour rétablir les saisons, Jules César intercala 90 jours à l'année 46 avant J.-C., qui porte depuis le nom d' « année de la confusion ». Le calendrier julien fut adopté, notamment par l'Église catholique, et subsista jusqu'au XVIe siècle où une nouvelle réforme s'imposa. En effet, on s'aperçut que la valeur choisie par Sosigène pour l'année tropique et adoptée dans le calendrier julien n'était pas exacte. En 325 après J.-C., le concile de Nicée adopta une règle pour la détermination des fêtes pascales : cette règle était fondée sur l'opinion que l'équinoxe de printemps tombait tous les ans le 21 mars, ce qui était justement le cas l'année du Concile.

Le calendrier grégorien

On se rendit compte plus tard que l'équinoxe continuait à avancer : le 20 mars, le 19 mars, etc. (Jules César l'avait fixé au 25 mars), à raison de 3/4 d'heure en moyenne tous les quatre ans. En 1582, année de la réforme grégorienne, l'équinoxe tombait le 11 mars au lieu du 21. Le pape Grégoire XIII décida de supprimer l'avance de dix jours sans modifier l'ordre des jours de la semaine : ainsi, le lendemain du jeudi 4 octobre 1582 fut le vendredi 15 octobre. En France, la correction eut lieu sous le règne de Henri III : le 20 décembre 1582 succéda au 9 décembre de la même année. Pour introduire un calendrier plus juste, on décida qu'il y aurait seulement 99 années bissextiles au lieu de 100 pendant une période de 400 ans. Par conséquent, toutes les années séculaires sont communes, c'est-à-dire de 365 jours, à l'exception de celles dont le millésime est un multiple de 400. Ainsi, 1700, 1800 et 1900 ont été des années communes, alors que 2000 sera bissextile.

Cependant, l'année grégorienne, qui contient en moyenne 365,242 5 jours, n'est pas encore parfaite car elle est trop longue de 0,000 3 jour par rapport à l'année tropique, ce qui fait que le calendrier grégorien sera en avance d'un jour au bout de 3 000 ans. Il est impossible et inutile de chercher à obtenir une exactitude absolue, car ni la révolution, ni la rotation de la Terre ne sont constantes comme nous l'avons déjà indiqué. L'année tropique diminue légèrement chaque année, l'accumulation des raccourcissements atteignant 3 jours en 10 000 ans. En second lieu, la rotation de la Terre se ralentit du fait des frottements continuels des marées sur la surface solide de la planète, ce qui aboutit à un retard de 2 jours tous les 10 000 ans. En conclusion, les imperfections du calendrier grégorien et les mouvements quelque peu irréguliers de la Terre contribuent à faire avancer la date de l'équinoxe de 10 jours en 10 000 ans. Il sera toujours possible d'effectuer des décalages, comme le fit Grégoire XIII.

Calendriers divers

Nous avons déjà vu que c'est l'année tropique qui conditionne le retour des saisons. Mais si ce retour des saisons est éternel, son début est d'observation difficile car il n'est pas net et est soumis aux fluctuations météorologiques. Les peuples bons observateurs ont pu déterminer cette période. Les peuples plus primitifs ont été frappés surtout par les phases de la Lune, et la période correspondante de la lunaison de 29,5 jours a été vite déterminée. La valeur exacte de cette période, nommée révolution synodique, est de 29,530 588 1 jours. De nombreux peuples ont imaginé des calendriers lunaires. Malheureusement, une année ne contient pas un nombre exact de lunaisons; la valeur la plus approchée, qui est de $12 \times 29{,}530\,6 = 354{,}37$ jours, est en défaut de 11 jours sur l'année tropique.

Les civilisations qui ont adopté ce calendrier verront donc le début de l'année se déplacer par rapport aux saisons : de tels calendriers sont donc très peu propices pour régler la vie des hommes. C'est le cas du calendrier musulman qui correspond à des années de 354 ou 355 jours. Dans un cycle de 30 années, 19 années communes mesurent 354 jours et 11 années abondantes 355 jours, ce qui correspond en moyenne à des années de 354,37 jours. 30 années musulmanes valent 10 631 jours et 360 lunaisons 10 631,01 jours. L'accord est excellent. Les douze mois de l'année ont alternativement 29 et 30 jours; seul le dernier mois a 29 jours dans les années normales et 30 dans les années abondantes. Dans ce calendrier, les phases de la Lune se placent les mêmes jours du mois. Comme 354 et 355 ne sont pas des multiples de 7, les jours de la semaine changent d'une année à l'autre. De plus, les saisons se décalent de 10,875 jours et se replacent à la même époque du calendrier, à peu près tous les 33 ans.

Les Juifs ont aussi adopté un calendrier lunaire avec des mois de 29 ou 30 jours mais ils corrigent ce calendrier en ajoutant de temps en temps un mois supplémentaire de 29 jours. Il existe donc des années communes de 353, 354 et 355 jours et des années de 13 mois, dites *années embolismiques,* de 383, 384 ou 385 jours. Le cycle total est de 19 ans dont 7 années à 13 mois. Avec une telle année, comme la correction des décalages se fait après deux ou trois ans, on rattrape ainsi les saisons dont le début se place sensiblement à la même période du calendrier (à une dizaine de jours près).

Il n'est pas question de passer en revue les nombreux calendriers; signalons que le calendrier maya est de 365 jours décomposés en 18 mois de 20 jours et 5 jours supplémentaires situés à la fin de l'année; à ce système se superpose une autre numérotation en cycle de 260 jours. Cela permet de reconnaître sans ambiguïté, dans une période de 52 ans (73 cycles de 260 jours), un jour désigné dans les deux systèmes.

Les peuples utilisant les calendriers lunaires ont fixé le début de leurs mois soit d'après des calculs astronomiques, soit d'après la première apparition du croissant de Lune. La fixation du début de l'année ne va pas sans

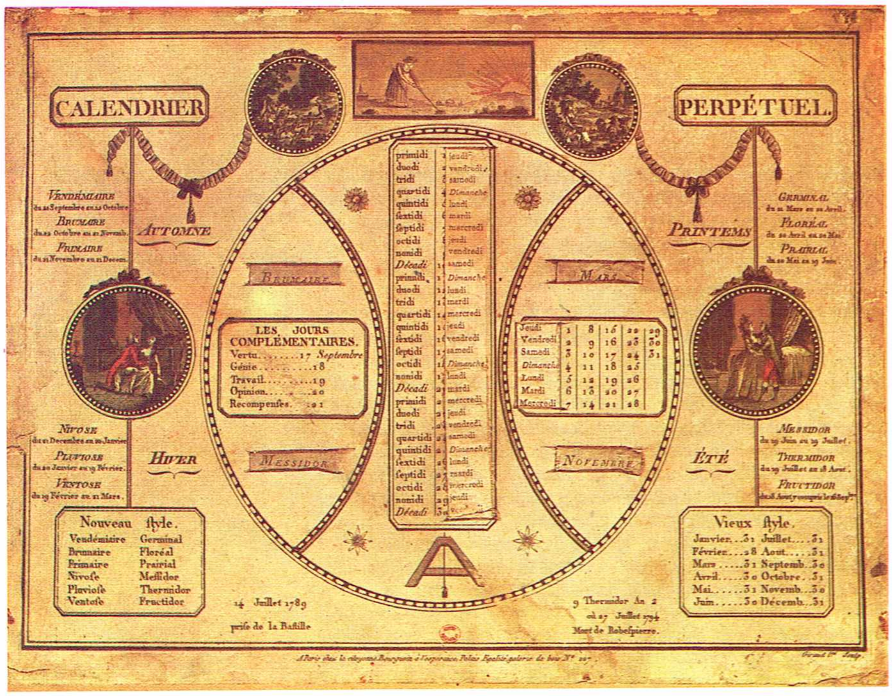

Bulloz

▲ ***Reproduction d'un calendrier révolutionnaire, le calendrier perpétuel (musée Carnavalet, Paris).***

discussions, notamment chez les Juifs, où des dissidences religieuses sont nées de ces controverses.

La division de l'année en semaines de 7 jours provient du calendrier juif et trouve probablement son origine dans la captivité de ce peuple à Babylone. Le nombre 7 est un nombre magique; il est, d'autre part, la meilleure approximation des quatre phases de la Lune dont la durée moyenne est de 7,38 jours. Les noms que nous attribuons actuellement aux jours sont dérivés de l'association que les Romains ont établie avec les noms des planètes, qui étaient en même temps pour certaines les noms de leurs dieux. Dans la désignation française, on voit bien la correspondance :

lundi	Lune
mardi	Mars
mercredi	Mercure
jeudi	Jupiter
vendredi	Vénus

Le samedi, *Saturday* en anglais, correspondait à Saturne. Le nom français doit être associé au *sabbat* des Israélites. Le dimanche, qui a son étymologie dans le *domenica* des Italiens, porte le nom du Soleil dans les langues anglaise et allemande *(Sunday, Sonntag)*. Cette semaine de 7 jours n'existait pas chez les Romains, dont le mois était divisé par les *calendes*, les *ides* et les *nones*. Les divisions étaient différentes chez les Grecs, qui ignoraient les calendes : d'où notre expression de renvoyer une affaire aux « calendes grecques »...

La date de Pâques

L'année du calendrier grégorien a été universellement admise pour le calendrier civil du monde entier; les calendriers religieux (musulmans, juifs, coptes, orthodoxes, etc.) continuent à régir les fêtes religieuses. Le calendrier grégorien est solaire dans son essence, mais les fêtes religieuses de l'Église catholique et de la plupart des Églises de la Réforme sont de deux sortes. Celles qui sont à dates fixes sont des fêtes d'institution récente : Noël le 25 décembre, l'Assomption le 15 août et l'Épiphanie le 6 janvier. Les autres fêtes, liées à la Passion et à la Résurrection du Christ, sont fixées d'après la date de Pâques. La fête de Pâques est célébrée le 1er dimanche qui suit la pleine Lune tombant immédiatement après l'équinoxe de printemps. La détermination de la date de Pâques nécessite donc un calcul très précis de l'équinoxe, opération difficile il y a quelques siècles et qui montre la valeur des règles fixées par le concile de Nicée en 325 après J.-C.

Ces prédictions sont basées sur deux faits : le jour de semaine du 1er janvier définit les jours de semaine de tous les jours de l'année; la lettre dominicale D est un code qui donne la date du 1er dimanche de l'année. D'autre part, l'âge de la Lune le premier jour de l'année porte le nom d'épacte E. D'une année à la suivante, l'Épacte augmente en général de 11.

A l'aide de ces deux données, on peut calculer la date de Pâques qui est fixée au « 1er dimanche qui suit la 14e nuit de la lunaison tombant le 21 mars ou immédiatement après ».

▼ ***Une clepsydre : horloge qui, chez les Anciens, servait à mesurer le temps et dont le principe est lié à l'écoulement de l'eau à travers un petit orifice.***

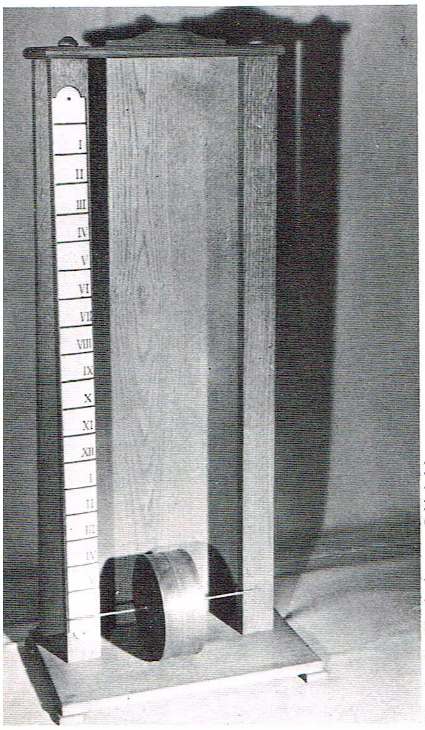

Musée des Techniques, C.N.A.M.

Le concile de Nicée et la réforme grégorienne ont indiqué le mode de calcul qui permet de déterminer D et E. Il est très compliqué et il serait oiseux de le détailler.

La date de Pâques ainsi calculée est celle du comput; elle peut différer exceptionnellement d'un mois avec celle qui correspond à la définition initiale. C'est naturellement celle du comput qui est retenue. La date de Pâques peut varier entre le 22 mars et le 25 avril suivant la position de la nouvelle Lune de l'équinoxe.

La fixation de la fête de Pâques à un certain dimanche de mars est à l'ordre du jour depuis de nombreuses années, mais elle se heurte à deux obstacles : d'une part, des objections religieuses, il est vrai de moins en moins fortes, et d'autre part, la difficulté de faire adopter cette réforme par tous les pays à la fois.

La réforme du calendrier

Une réforme plus générale du calendrier est aussi à l'ordre du jour; la plus simple est de diviser l'année en quatre trimestres de 91 jours avec deux mois de 30 jours et un de 31 jours. A la fin de l'année, on place un jour et deux pour les années bissextiles, sans leur affecter de jour de semaine. Un tel calendrier devrait aussi comporter une date de Pâques fixe; les nombres 91 et 364 étant divisibles par 7, tous les jours de l'année auraient toujours les mêmes jours de semaine. D'ailleurs, janvier, avril, juillet et octobre présenteraient la même succession de jours; il en serait de même pour février, mai, etc. Les jours de fête fixes seraient toujours le même jour de semaine. La régularité serait très grande sans changer la semaine et sans qu'il soit nécessaire de changer les noms des mois. D'autres proposent 2 mois de 28 jours et un de 35 par trimestre.

Une réforme beaucoup plus révolutionnaire était celle du calendrier républicain, qui avait aboli les semaines et avait institué douze mois égaux (Vendémiaire, Brumaire, Frimaire, Nivôse, Pluviôse, Ventôse, Germinal, Floréal, Prairial, Messidor, Thermidor, Fructidor). Chaque mois était divisé en trois décades de dix jours nommés primidi, etc., jusqu'à décadi. L'année commençait a l'équinoxe d'automne le 22 septembre. Ce calendrier n'a été utilisé en France que pendant treize ans, du 22 septembre 1792 au 1er janvier 1806, date à laquelle l'ancien calendrier a été rétabli.

La chronologie

La chronologie est l'art de dater un phénomène céleste, terrestre ou historique dans une échelle de temps. C'est une science difficile lorsqu'il s'agit de situer des phénomènes anciens. En effet, la division du jour en 24 heures égales est assez récente. Les Anciens divisaient souvent le jour et la nuit en six ou douze parties égales, les heures de nuit étant plus courtes en été que les heures de jour. La division du temps se faisait à l'aide de la *clepsydre*, dont le principe est lié à l'écoulement de l'eau à travers un petit orifice — une sorte de sablier où le sable est remplacé par l'eau; certaines clepsydres étaient très perfectionnées. Le début du jour était tantôt à midi, tantôt le soir; en général, nous ne savons pas. Cette indétermination est souvent négligeable car, le plus souvent, on ne sait pas rétablir le jour et même l'année. Actuellement, il est admis que la journée commence à minuit moyen (seul le jour julien commence à midi).

Période julienne

C'est l'érudit français J. Scaliger qui jeta, en 1583, la base d'un système dans lequel on repère toutes les dates. Il considéra le nombre d'années obtenu en multipliant 28 par 15 et par 19, ces nombres représentant les périodicités du comput : cycle solaire, induction et nombre d'or. Cette période est de 7 980 ans. L'origine est fixée à l'année 4712 ou 4713 avant J.-C. (en effet, dans la notation avant et après J.-C., l'année 0 n'existe pas).

Dans cette échelle, l'année 1974 sera $1974 + 4713 = 6687$. L'année adoptée est l'année julienne de 365,25 jours. Le 1er janvier, le nombre de jours écoulés sera $6\,686 \times 365{,}25 = 2\,442\,061{,}5$. On arrondit à l'unité, et il faut retrancher les dix jours de la réforme grégorienne ainsi que les trois jours non bissextiles des années 1700, 1800, 1900; on obtient ainsi, pour le 1er janvier 1974 à midi, le nombre de jours juliens écoulés de 2 442 049. Les jours juliens sont comptés à partir de midi.

Fixer une date très ancienne dans la chronologie est difficile car le compte des ans et des jours a souvent été mal fait. Lorsqu'on a la chance d'avoir pour repère un événement astronomique : éclipse de Soleil ou de Lune, on peut s'assurer de la rigueur de la datation.

Nous avons vu que l'allongement séculaire de la durée du jour nécessite une correction de près de 3 heures au début de l'ère chrétienne et de 38 minutes au X^e siècle. Ces décalages peuvent avoir une grande importance sur le lieu de visibilité d'une éclipse de Soleil. Il ne faut pas l'oublier lorsque l'on fait des études de chronologie.

L'astrologie

L'astrologie a occupé l'esprit de l'homme depuis l'Antiquité. A l'époque où l'on assimilait les planètes aux dieux, il était naturel de penser que les astres pouvaient déterminer la destinée des nations et des individus.

Cette vieille croyance n'a aucun fondement et avec l'astronome Bailly, président de l'Assemblée constituante (1780), nous pouvons dire : « L'astrologie est la plus longue maladie qui ait affligé la raison. » Laplace disait de l'astrologie : « Elle s'est maintenue jusqu'à la fin de l'avant-dernier siècle (le XVII^e siècle), époque à laquelle la connaissance généralement répandue du vrai système du monde, l'a détruite sans retour. » Malheureusement, ce diagnostic n'est pas encore vrai maintenant.

Pourquoi pensons-nous que l'astrologie est une pseudoscience dont l'absurdité est reconnue par tout esprit raisonnable ? Il est certain que le Soleil et la Lune ont une grande influence sur la Terre. Le Soleil est la source de toute l'énergie terrestre. C'est lui qui détermine l'alternance des jours et des nuits, le passage du printemps à l'été, l'automne et l'hiver. Ce sont la rotation de la Terre et sa révolution autour de l'astre central qui expliquent tous ces phénomènes. C'est le Soleil qui entretient la vie sur Terre. C'est l'énergie du Soleil qui produit la pluie, les orages, les aurores polaires, les perturbations des communications radiotélégraphiques. Il s'agit là de phénomènes connus et dont l'étude est l'un des objets principaux de l'astronomie et de la géophysique. La Lune a une influence moindre ; cependant, avec le Soleil, elle produit les marées, et les habitants des côtes de l'Océan savent qu'il s'agit là de phénomènes importants pour la vie de l'homme.

Ces effets du Soleil et de la Lune, les « Grands Luminaires » des astrologues, sur la Terre et sur les hommes sont évidents. Mais n'existe-t-il pas d'autres influences du Soleil, de la Lune, des planètes et des étoiles ? N'existe-t-il pas des rayonnements inconnus pouvant exercer des influences bénéfiques ou néfastes ? Les astronomes n'ont-ils pas récemment découvert les émissions radio et X du Soleil et des étoiles ? Il ne serait pas scientifique de nier ces possibilités. Toutefois, toutes les tentatives d'établir des corrélations entre la position des astres et des événements humains tels que les guerres, les épidémies, etc., ont échoué.

On sait que le Soleil présente de temps en temps des taches et que leur nombre varie avec une période d'environ onze ans. On a également essayé de trouver des corrélations entre des phénomènes économiques et politiques et le cycle solaire. On en a même annoncé, mais elles ne résistent pas à des tests de statistique sérieux. Aucune des relations que certains médecins croient avoir mises en rapport avec le cycle solaire n'existe. La vérification de nombreuses corrélations a été tentée sans parti pris et en toute honnêteté. La mise en évidence d'une telle relation serait une découverte importante, mais le raisonnement statistique devrait être irréfutable et ne comporter aucune faute de logique. Pour le moment, aucune corrélation de ce type n'est établie. Il en est de même pour l'influence de la Lune. Par exemple, on sait que dans la pensée populaire, la « Lune rousse » (le clair de Terre sur la Lune) provoque la gelée. Il n'en est rien : par ciel découvert, la Terre se refroidit beaucoup, ce qui provoque la gelée. Naturellement, on apercevra, pour la même raison, le soir, le fin croissant de la Lune et toute la Lune éclairée. La Lune rousse est un bon indicateur, mais n'est pas la cause du gel.

Avant de poursuivre l'étude de l'astrologie, fixons les idées par quelques ordres de grandeur.

Le Soleil est l'astre qui nous envoie le plus d'énergie et qui exerce la plus grande attraction newtonienne sur nous. L'énergie reçue de la Lune est 400 000 fois plus faible que celle reçue du Soleil, et Vénus, la planète la plus brillante, nous envoie un milliard de fois moins d'énergie que le Soleil. L'étoile la plus brillante, Sirius, nous envoie 13 milliards de fois moins d'énergie que le Soleil et 33 000 fois moins que la Lune. En ce qui concerne les autres rayonnements (infrarouges, rayons X, γ, corpusculaires), la situation est analogue.

L'attraction newtonienne de la Lune est 175 fois plus faible que l'attraction solaire et celle de Jupiter 50 000 fois plus faible. L'étoile dont l'attraction est probablement la plus forte n'exerce qu'une force cent mille millions de fois plus petite que celle du Soleil. L'attraction de toute notre Voie lactée est égale à seulement 30 milliardièmes de celle du Soleil.

Si les statistiques valables n'ont pu mettre en évidence aucune corrélation entre les phénomènes solaires ou lunaires et la destinée individuelle des hommes, il est logique qu'aucune relation n'ait jamais été mise en évidence avec la situation des planètes ou des étoiles dans le ciel... Alors, pourquoi fait-on des horoscopes depuis des millénaires ?

L'astrologie connut son apogée dans les régions méditerranéennes. Les Sumériens la pratiquaient il y a plus de 5 000 ans, mais ce furent les Babyloniens qui la perfectionnèrent. Outre les sept planètes (comprenant le Soleil et la Lune), ils connaissaient 270 étoiles et constellations, les signes du zodiaque et les comètes. Des prêtres faisaient leurs observations à partir des tours-observatoires de Ninive et de Borsippa et en tiraient des prédictions pour le roi et le destin du pays. Ce n'est que plus tard que furent établis des horoscopes des individus du commun.

Ces horoscopes sont encore aujourd'hui faits d'après des règles qui, tout en variant d'un astrologue à l'autre, n'ont rien de scientifique. Ces règles sont d'ailleurs issues du *Quatrième Livre* de Claude Ptolémée. Ce dernier grand astronome grec est aujourd'hui considéré plutôt comme un encyclopédiste génial qu'un savant véritable. Son *Almageste* a été le seul grand traité d'astronomie valable pendant quatorze siècles, et auquel les astrologues se réfèrent souvent.

Claude Ptolémée codifia l'astrologie selon quatre canons de base :

— Les planètes, y compris le Soleil et la Lune, possédaient des attributs (elles étaient chaudes ou froides, mâles ou femelles) et exerçaient des influences (physiques, physiologiques et psychiques). Le Soleil, la Lune, Jupiter ainsi que Vénus étaient généralement considérés comme bénéfiques, alors que Mars et Saturne étaient réputés néfastes.

— Les signes du zodiaque avaient des vertus propres, bonnes ou mauvaises, liées aux quatre éléments et aux quatre humeurs (sang, bile, bile noire et phlegme) ; ils étaient, en outre, associés à une planète législatrice, avec laquelle ils étaient en harmonie et en résonance.

— Les douze « maisons » (cases de 15° de longitude) correspondaient aux signes du zodiaque de même nom et à leurs planètes législatrices.

Ciccione

▲ ***Détail du « kudduru » (pierre servant de borne) en marbre noir, de l'époque Melishipak II (Suse, 1200 av. J.-C.). On observe dans le haut certains motifs astrologiques babyloniens : le Capricorne et les figures représentant la Lune, le Soleil et Vénus sont des symboles de divinités correspondantes (musée du Louvre).***

— Les « aspects » (qui sont des configurations du ciel) étaient représentés par les positions des astres les uns par rapport aux autres, comme la conjonction, le sextile, la quadrature, le trigone et l'opposition, certaines étant favorables et d'autres défavorables.

Depuis les anciens Grecs jusqu'à Galilée, les principales formes astrologiques furent : le système des interrogations, pour satisfaire aux nécessités courantes, le système des élections pour déterminer le moment propice à une entreprise et l'horoscope pour connaître le futur des personnes et des peuples. L'Église catholique condamna l'astrologie, mais de nombreux papes consultèrent des astrologues, et les nommèrent même professeurs à la Sapienza de Rome. L'Humanisme et la Renaissance tinrent en grande estime l'astrologie : beaucoup y virent non un système déterministe et un appauvrissement de la liberté humaine mais, au contraire, un enrichissement face à l'obscurantisme de la théologie médiévale.

Ptolémée eut des successeurs. Encore au XVII[e] siècle, de grands astronomes, notamment Kepler, firent des horoscopes. Mais il suffit de citer ce grand savant pour savoir qu'il n'était pas dupe. Parlant de l'astrologie qui le faisait vivre, il disait : « De quoi vous plaignez-vous, philosophe trop délicat, si une fille que vous jugez folle soutient une mère sage mais pauvre ? »

Signalons que d'importants chefs nazis croyaient à l'astrologie et que, pendant la dernière guerre, certains hommes politiques de Washington demandèrent leur avis à des astrologues.

Il n'est pas dans nos intentions d'aborder plus en détail les méthodes pour tirer les horoscopes; d'ailleurs, les devins ne sont pas d'accord entre eux. Par exemple, ils vous font naître sous le signe du Lion et vous attribuent toutes les qualités légendaires et combien illusoires attribuées à cet animal, alors qu'en fait, lorsque vous naissez, c'est la constellation de l'Écrevisse qui culmine et qui devrait déterminer votre avenir. Certes, il y a deux mille ans, c'était bien le Lion qui était dans le signe du zodiaque de ce nom et, à la rigueur, on aurait pu alors admettre cette relation... mais aujourd'hui, où la précession des équinoxes a déplacé les signes de 45° ? Cependant, la précession des équinoxes est ignorée par les devins. Ceux qui en ont entendu parler parlent de rémanence, mais alors, si on les croit, tous les horoscopes de Ptolémée étaient faux car la rémanence d'une autre constellation aurait alors dû jouer.

L'astrologie, comme l'alchimie, ne pouvait que mourir, pour laisser la place à la science expérimentale, à ses concepts plus clairs et à ses résultats contrôlables. Elle a vu s'écrouler le système sur lequel elle prétendait établir ses prévisions. La Terre n'était plus qu'une planète. La découverte d'Uranus, de Neptune et de Pluton porta encore un coup à l'astrologie, puisque celle-ci, qui les ignorait, n'en avait pas tenu compte. Mais pourquoi perdre notre temps... Plaignons les pauvres dupes de ces charlatans qui gagnent assez bien leur vie au point de se payer des ordinateurs pour faire plus sérieux et mieux tromper leurs contemporains. Or, il existe des textes légaux qui interdisent leur métier.

Saint Augustin disait : « Il n'y a pas d'art divinatoire. C'est par hasard qu'on prédit vrai. » Ainsi, même les astrologues n'ont pas le privilège de toujours se tromper... Les lois du hasard ne le leur permettent pas !

La mécanique et la mécanique céleste

C'est grâce à l'astronomie que les lois du mouvement et de l'équilibre des corps matériels ont été comprises et qu'une doctrine d'ensemble de mécanique rationnelle a pu être édifiée. La mécanique céleste est une partie essentielle de cette doctrine car les lois de la mécanique s'appliquent aux objets célestes dans des conditions de simplicité et de rigueur. La mécanique des objets terrestres est régie par les mêmes lois, mais des phénomènes accessoires et complexes (frottement, résistance de l'air) sont difficiles à formuler et, de ce fait, les lois de la mécanique rationnelle ne paraissent pas s'appliquer.

La mécanique céleste est née des travaux de Galilée, des observations de l'astronome danois Tycho Brahé et de la découverte par Kepler de ses fameuses lois des mouvements planétaires. Mais c'est la contribution de Newton qui fut essentielle : c'est lui qui a formulé les grands principes de la mécanique. Ses successeurs et continuateurs ont été nombreux et l'école française a été particulièrement brillante à la fin du XVIII[e] siècle et pendant tout le XIX[e] siècle.

Les grands principes de la mécanique peuvent être considérés comme des axiomes non démontrables per-

▼ *A gauche, cette table, tirée du* **Mysterium cosmographicum** *(1596), représente la première tentative de Kepler pour rationaliser les orbites des planètes en introduisant une relation avec les cinq polyèdres réguliers (cube, tétraèdre, dodécaèdre, icosaèdre, octaèdre). A droite, table tirée de* **Compost et Kalendrier de bergers** *(Paris, 1499), montrant la position du zodiaque dans le corps humain et les influx bénéfiques, indifférents et néfastes qui lui correspondent; cela est un exemple des errements de recherches astrologiques de la Renaissance (Bibliothèque nationale, Paris).*

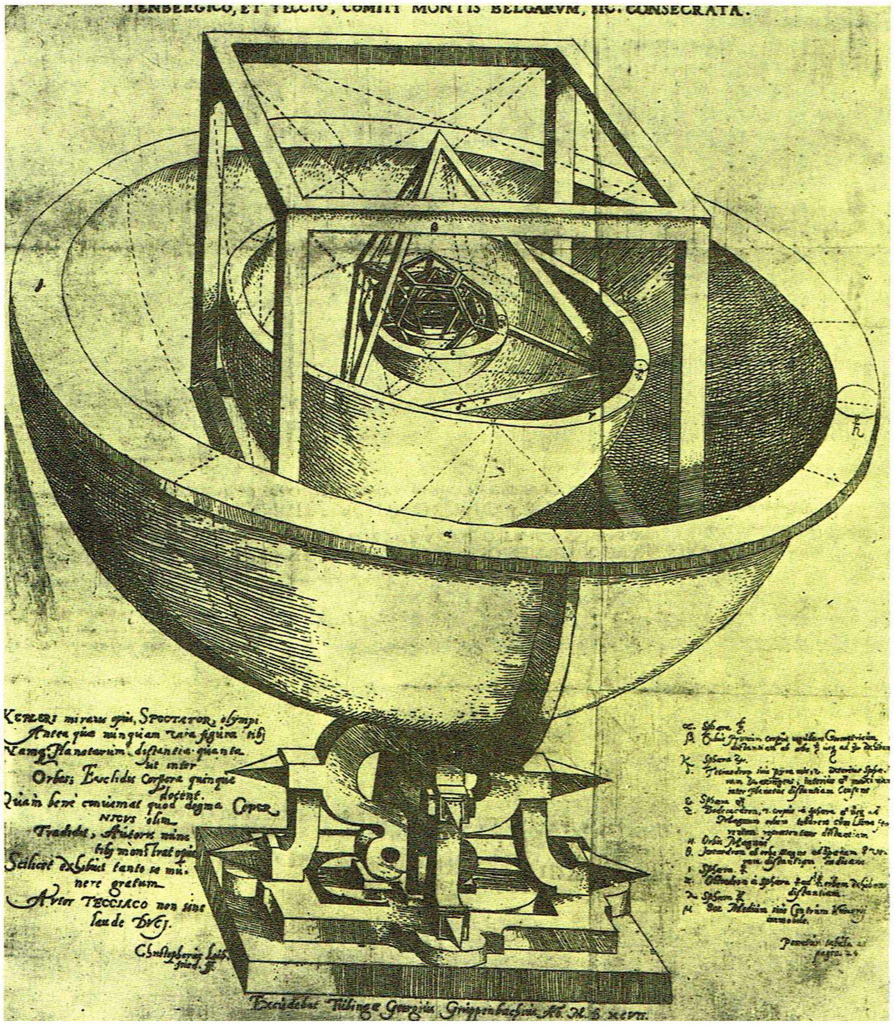

F. Arborio Mella

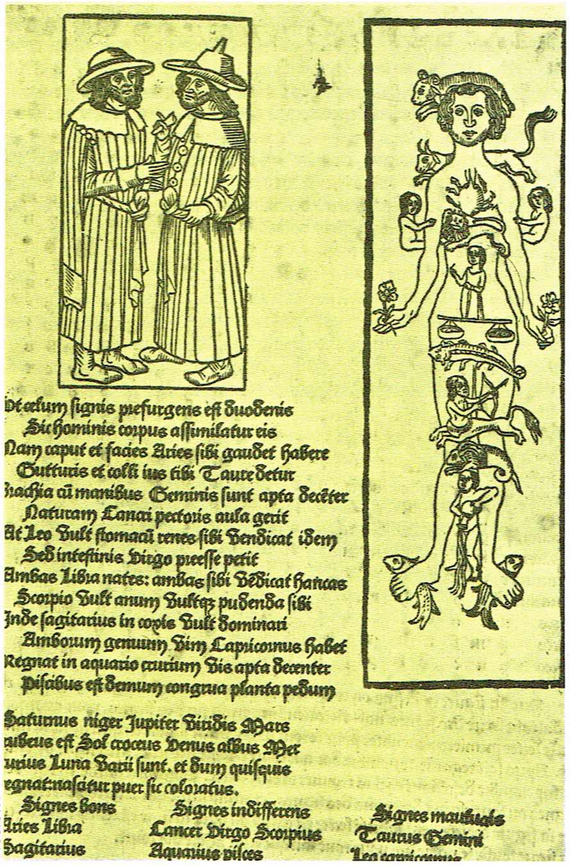

Ciccione

mettant d'édifier un corps de doctrine logique et cohérent et de prévoir les lois du mouvement. On a pris l'habitude de diviser cette mécanique en trois parties. La *statique* étudie les lois de l'équilibre des systèmes. La *cinématique* est l'étude des mouvements et des trajectoires lorsqu'on ne s'intéresse pas à la cause de ces mouvements. La *dynamique* étudie les mouvements des corps soumis à des forces.

En cinématique, on définit la *forme* et la *nature des trajectoires*. La définition des formes est un pur problème de géométrie qui peut être résolu par diverses branches des mathématiques : géométries pure, descriptive ou analytique, mais elle introduit des notions supplémentaires, notamment celles de *vitesse* et d'*accélération*. La notion de vitesse, qui s'exprime par la longueur de trajectoire parcourue pendant l'unité de temps, est maintenant entrée dans le domaine de la vie courante. Une vitesse s'exprimera pour le mobile considéré en kilomètres par heure ou mètres par seconde, selon les habitudes. Une vitesse peut varier en fonction du temps : il faut alors introduire la notion de « taux de variation de la vitesse », ou accélération. Celle-ci s'exprimera en diverses unités, par exemple m/s^2. Ainsi une automobile dont la vitesse aura varié de 0 à 10 m/s en 10 secondes aura une accélération de 1 mètre par seconde par seconde (1 m/s^2). Ces notions, comme d'ailleurs certaines notions de géométrie, ont nécessité l'introduction du calcul différentiel (Newton, Leibniz, etc.), qui permet de définir et de calculer la vitesse et l'accélération, même lorsque ces grandeurs sont variables.

On remarquera que la vitesse d'un mobile est toujours tangente à la trajectoire, mais il n'en est pas de même pour l'accélération.

Les principes de la mécanique

Ces grandeurs étant définies, revenons aux trois grands principes, ou axiomes, de la mécanique.

— Lorsqu'un point matériel n'est soumis à aucune action extérieure, son mouvement est rectiligne et uniforme, c'est-à-dire que la vitesse est constante en direction et en grandeur. Son accélération est nulle et sa vitesse peut l'être aussi.

— L'effet qui peut changer ce mouvement porte le nom de *force*. Lorsqu'une force est appliquée à un point, le mouvement de ce point change et il subit une accélération proportionnelle à cette force et on associe à ce point matériel une quantité nommée sa masse *m*, telle qu'on a l'égalité : $F = m \cdot \gamma$ où F est la force appliquée et γ l'accélération qui est créée. On remarquera que le premier principe résulte du second lorsque $F = 0$.

— Le troisième principe est relatif à la dynamique des systèmes. Il indique, notamment, que lorsque dans un système un point est soumis à une force de la part d'un autre point, ce dernier est soumis à une force égale et opposée. C'est le *principe de l'action et de la réaction*, qui est souvent mal compris. Par exemple, lorsque nous circulons en automobile, nous appliquons une force à ce véhicule, son origine est dans le moteur, mais une force identique sera appliquée par la voiture sur la route (et en partie aussi sur l'air). C'est cet effet qui explique le mouvement des fusées : on expulse un gaz qui est éjecté mais ce gaz exerce une force identique sur le corps de fusée qui est accéléré dans la direction opposée. Cette propulsion peut être utilisée dans le vide. Accessoirement, le troisième principe permet aussi de prévoir la *composition des forces* et, éventuellement, leur *décomposition*.

La loi de Newton

A ces trois principes, qui s'appliquent quelle que soit l'origine des forces, Newton a ajouté en 1687 la *loi d'attraction universelle* entre des points matériels ; c'est une loi supplémentaire, indépendante des principes cités et qui est suffisante pour expliquer les lois des mouvements des planètes telles que Kepler les avait énoncées. Elles ont permis à Newton de prévoir de nombreux autres phénomènes importants.

Lois de Kepler. Grâce aux excellentes observations faites par Tycho Brahé, à la fin du XVI^e^ siècle, Kepler énonça, en 1609, les deux premières lois et, en 1619, la troisième.

1^re^ loi : les planètes décrivent des orbites elliptiques dont le Soleil occupe un foyer.

2^e^ loi, ou *loi des aires :* le rayon vecteur balaye des aires proportionnelles au temps.

3^e^ loi : les carrés des temps des révolutions sont proportionnels aux cubes des grands axes.

L'énoncé de ces lois est purement cinématique. Mais elles résultent immédiatement des principes de la mécanique de Newton lorsqu'on suppose que deux corps célestes C_1 et C_2 de masse m_1 et m_2 s'attirent en fonction du carré inverse de leur distance *r*, c'est-à-dire que le corps C_1 est soumis à la force $F = k\,\frac{m_1\,m_2}{r^2}$ dirigée vers le corps C_2. Celui-ci sera soumis à la même force mais dirigée vers le corps C_1. Sous l'effet de ces forces, les corps prennent, d'après le second principe, des accélérations très différentes :

$$\gamma_1 = \frac{k\,m_2}{r^2} \qquad \gamma_2 = \frac{k\,m_1}{r^2}$$

k est une constante dont la valeur numérique dépend essentiellement des unités choisies pour *m* et *r*. Cette constante est universelle, c'est-à-dire qu'elle a la même valeur dans tout l'Univers. On remarquera que d'un point de vue philosophique la masse d'attraction n'est pas la même que la masse d'inertie définie par $F = m \cdot \gamma$. En fait, l'expérience montre qu'elles sont identiques, ce qui a un sens physique caché mais essentiel.

La nature formelle de la loi d'attraction permet la déduction logique, purement mathématique, d'un certain nombre de lois.

— Newton a pu montrer, et cela se démontre maintenant dans tout cours de mécanique élémentaire, qu'une sphère homogène de masse M attire un point extérieur comme si toute la masse M était concentrée au centre de la sphère.

— Si l'on néglige les masses des planètes devant celle du Soleil (ce qui est légitime avec une bonne approximation), en tout point de l'espace, l'accélération que subit un point matériel est dirigée vers le centre du Soleil et a une valeur définie, indépendante de la masse du point. On dit en mécanique que la force à laquelle est soumis ce point est une force centrale et qu'elle dépend d'un potentiel. On démontre que, dans ce cas, la trajectoire de ce point est une courbe plane, décrite suivant la loi des aires. On démontre ainsi partiellement la première loi de Kepler et, dans son ensemble, la deuxième. Pour ces démonstrations, on n'a pas eu besoin de faire appel à la loi du carré inverse de la distance, mais la loi d'attraction de Newton est nécessaire pour expliquer la nature elliptique des orbites ainsi que la troisième loi de Kepler.

Un raisonnement assez simple permet d'ailleurs de retrouver la loi de Newton grâce à l'assimilation de l'accélération de la Lune à celle de la pesanteur. Une légende veut que Newton trouvât sa loi en observant la chute d'une pomme et en comparant cette chute au mouvement de la Lune. Sans insister sur cette anecdote, montrons quel fut le raisonnement de Newton. En unités modernes, on sait que sur la surface de la Terre, lorsqu'on lâche un corps, il tombe de 490 cm pendant la première seconde. En l'absence de force extérieure, la Lune devrait, d'après le premier principe, continuer son mouvement en ligne droite avec la même vitesse. En fait, la Lune tourne autour de la Terre sur un cercle de 384 000 km de rayon ; en une seconde, elle aura parcouru environ 1 km sur son orbite, mais elle se sera éloignée de la tangente d'une quantité très facile à calculer par la géométrie et qui est de 1,35 mm. En comparant cette distance à celle parcourue par un objet tombant sur la Terre dans le même temps, on trouve que le rapport est de 3 630, valeur égale au carré du rapport du rayon de l'orbite lunaire et du rayon de la Terre ($60{,}27^2 = 3\,632$). Cette valeur était déjà très bien connue du temps de Newton. La découverte géniale de Newton n'était pas uniquement cette constatation mais sa généralisation à tout l'Univers et l'étude mathématique du mouvement des planètes qu'il fit en admettant cette loi.

Le mouvement des planètes

Indiquons quelques-uns des résultats de la mécanique céleste newtonienne. On retrouve l'ensemble des lois de Kepler mais en précisant pour la troisième loi la valeur de la constante de proportionnalité. Cette constante est proportionnelle à la somme des masses du Soleil et de la planète. On constate donc que cette valeur n'est constante que dans la mesure où l'on peut négliger la masse de la planète devant celle du Soleil. Naturellement,

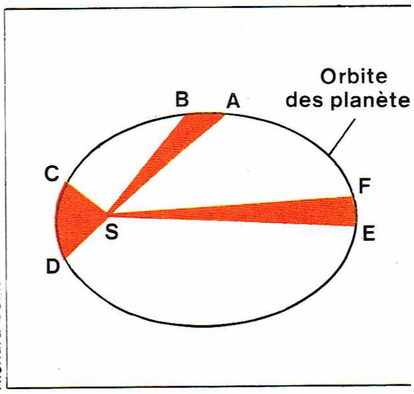

▲ ***Le mouvement elliptique des planètes et la loi des aires. Les arcs AB, CD, EF étant parcourus dans le même temps, les aires orangées sont égales entre elles.***

▶ ***Une vue complète du continent africain sur cette photographie de la Terre prise par les astronautes d'Apollo 17 au cours de leur retour de la Lune.***

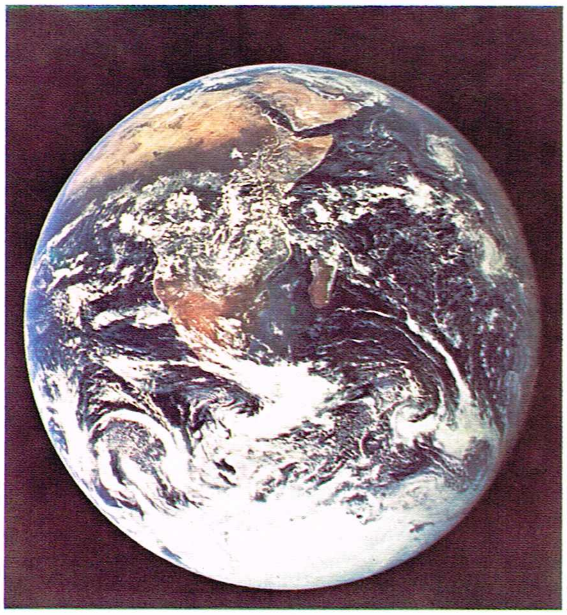

U.S.I.S.

pour des calculs précis en astronomie de position, on n'a pas recours à cette simplification. La valeur de la constante de proportionnalité dépend essentiellement des unités choisies.

On choisit souvent les unités suivantes : pour unité de longueur le demi grand axe (a) de l'orbite terrestre, pour unité de temps, l'année et pour unité de masse, celle du Soleil. On trouve alors pour toutes les planètes (en négligeant leurs masses) :

$$a^3/T^2 = 1$$

T étant la période de révolution de la planète autour du Soleil.

Grâce à cette loi, il est possible de déterminer le demi grand axe pour n'importe quelle planète dont on connaît la période de révolution. Ainsi, pour Jupiter, T = 12 et un calcul simple donne a = 5,24 car $5{,}24^3 = 12^2$.

▼ ***Vue arrière de Gemini 6 photographiée par les astronautes W. Schirra et T. Stafford depuis leur capsule Gemini 7.***

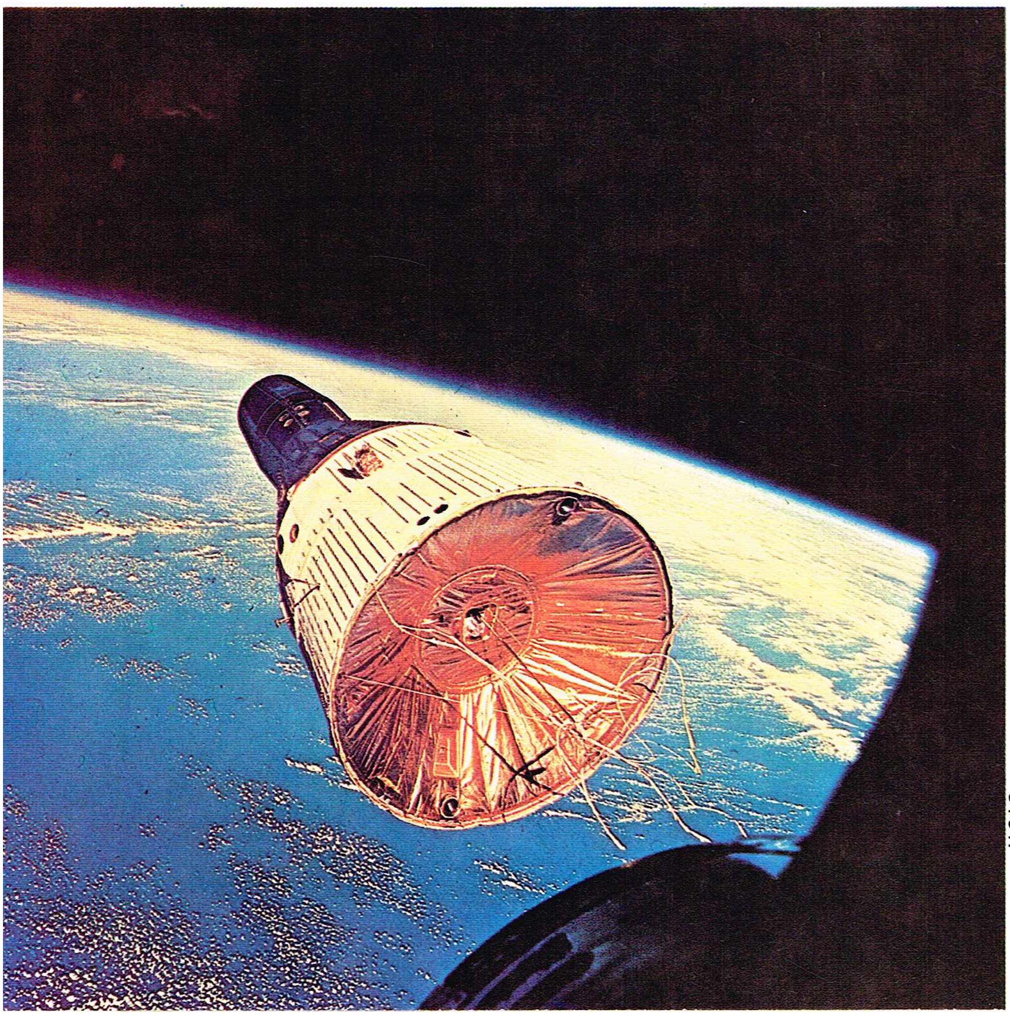

U.S.I.S.

Le centre de gravité

En fait, il résulte des principes de la mécanique que lorsqu'on considère une planète, celle-ci ne tourne pas autour du centre du Soleil mais le Soleil et la planète tournent autour du centre de gravité du système. La notion de *centre de gravité* est une notion fondamentale. Dans le cas simple qui nous intéresse, la masse du Soleil étant sensiblement 300 000 fois supérieure à celle de la Terre, le centre de gravité est situé extrêmement près du centre du Soleil. Le centre de gravité G divise la distance Soleil-Terre en deux segments inversement proportionnels aux masses. On trouve que ce centre de gravité est situé à 450 km du centre du Soleil, valeur inférieure à 1/1 000 du rayon solaire. Il n'en est pas de même pour le centre de gravité du système Terre-Lune, qui est situé assez loin du centre de la Terre, à 0,74 rayon terrestre de ce dernier dans la direction de la Lune. Ce fait produit des effets nettement observables lorsque l'on étudie de façon précise le mouvement des planètes.

La masse de la Terre

A la surface de la Terre, l'attraction g est donnée par la formule :

$$g = \frac{k\,m}{R^2}$$

m étant la masse de la Terre et R son rayon. La valeur de g est bien connue : en négligeant sa variation avec la latitude (effet dû à la fois à l'aplatissement terrestre et à la rotation de la Terre) et en prenant pour unité le centimètre et la seconde, $g = 980$.

Si l'on connaissait k en unités de la physique, on pourrait, à l'aide de cette formule, calculer la masse de la Terre en grammes ou encore sa masse spécifique en divisant cette masse par le volume de la Terre. La détermination de k nécessite des expériences de physique très délicates. Par exemple, on peut mesurer avec précision l'attraction exercée par une sphère dense sur une petite sphère suspendue à une balance de torsion. Mais la sensibilité doit être très grande car les attractions sont extrêmement petites, de l'ordre du 10 millionième de l'attraction terrestre. Il n'est pas question de discuter ici ces mesures : la valeur de $k = 6{,}67 \cdot 10^{-8}$ correspond à une masse spécifique de la Terre de 5,52 g/cm³.

Le mouvement parabolique

Le mouvement circulaire est un cas particulier du mouvement elliptique avec une excentricité nulle, mais l'autre cas limite est la parabole (e = 1). Newton a établi les lois de ce mouvement, où la troisième loi de Kepler est remplacée par une autre loi. On sait que la grande majorité des comètes décrit des orbites paraboliques. Le même calcul permet aussi de prévoir les mouvements hyperboliques qui, en fait, ne sont pratiquement pas observables dans notre système.

La mécanique céleste permet d'établir un certain nombre de lois de mouvement qui découlent de la loi de Newton. Sans insister sur les détails, signalons que lorsqu'en un point de l'espace on se donne la vitesse d'un mobile, sa trajectoire future autour du point d'attraction, Soleil ou planète, est complètement définie. Elle peut être calculée et on peut donc prévoir les positions ultérieures de l'astre. On peut aussi démontrer que la nature de l'orbite (cercle, ellipse ou parabole) est définie par la valeur numérique de la vitesse; elle est indépendante de la direction de cette vitesse. Ainsi, à l'endroit où se trouve la Terre, la vitesse circulaire autour du Soleil est de 29,8 km/s et la vitesse parabolique est la valeur précédente multipliée par $\sqrt{2}$, soit 42,1. C'est la vitesse qu'il faut donner à un vaisseau spatial, lancé de la Terre, pour qu'il s'échappe du système solaire.

La vitesse d'un satellite terrestre rasant la Terre (c'est pratiquement le cas des premiers satellites lancés) est de 7,9 km/s. Cette valeur multipliée par $\sqrt{2}$, soit 11,2 km/s, est la vitesse nécessaire pour qu'un corps lancé par fusée s'échappe de la Terre.

Les satellites artificiels

Ces considérations ont une grande importance pour les expériences spatiales. Nous comprenons que la trajectoire d'un satellite est complètement définie après le lancer et nous pouvons la calculer quand nous connaissons, en un point donné, la vitesse en grandeur et direction. Les satellites artificiels, qu'ils circulent autour de la Terre, de la Lune ou de Mars, obéissent aux lois de la gravitation. La mécanique céleste permet donc de calculer

la période du satellite terrestre circulant à l'altitude zéro : elle est de 84,4 minutes. Suivant la troisième loi de Kepler, plus le satellite sera éloigné, plus sa période sera longue. Pour la distance au centre de la Terre de 6,62 rayons terrestres ou 42 200 km, cette période est égale à la période de rotation terrestre, et le satellite, placé dans le plan de l'équateur de la Terre, restera donc au-dessus du même point : il sera *géostationnaire*. On connaît son utilisation possible comme satellite de communication. Dans le cas de la Terre, ces trajectoires sont fortement perturbées à cause de petites forces dues à l'aplatissement de la Terre, aux chocs des molécules résiduelles de la haute atmosphère et à l'action du rayonnement solaire (lumière et vent solaire). On sait que ces actions se traduisent à la fin par le retour du satellite sur le sol, après un temps d'autant plus long que le satellite a une plus grande altitude.

Les perturbations

Les lois de Kepler sont valables lorsque l'attraction du Soleil est seule en cause. Certes, cette attraction est prédominante, mais dans le cas général il faut tenir compte de l'attraction de tous les corps célestes. Ainsi, la Terre est attirée non seulement par le Soleil mais aussi par toutes les autres planètes et notamment par la plus massive, Jupiter. On peut, dans ce cas, écrire les équations du mouvement mais, même dans le cas où il n'y a que trois corps, il n'est pas possible par des calculs simples d'obtenir le mouvement de ces trois corps. Ce n'est qu'au début de ce siècle qu'on a pu donner une solution mathématique, mais elle n'est pas utilisable. Heureusement, si la solution algébrique n'est pas possible, on peut calculer des solutions aussi approchées qu'on le veut. On a ainsi pu montrer que l'ellipse décrite par la Terre autour du Soleil n'est pas invariable dans l'espace. Son périgée tourne de 11″ par an, c'est-à-dire qu'il fait, par rapport aux étoiles, un tour en 110 000 ans. D'autres petits mouvements résultent aussi de ces calculs.

L'astre dont le mouvement est le plus perturbé est la Lune : l'attraction principale est exercée par la Terre mais l'effet du Soleil n'est pas négligeable et, de ce fait, l'orbite de la Lune tourne et se déplace très rapidement. A cet effet, s'ajoute d'ailleurs une autre cause. Nous avons indiqué que Newton avait démontré que l'attraction d'une sphère uniforme (ou d'une sphère formée par des couches concentriques uniformes) était identique à l'attraction ponctuelle créée par la masse de la sphère concentrée en son centre. Ce n'est pas le cas de la Terre, qui est aplatie et dont le rayon polaire est plus petit que le rayon équatorial de 1/298. De ce fait, l'attraction que subit la Terre de la part du Soleil et celle que subit la Lune de la part de la Terre sont beaucoup plus complexes. A cause de l'égalité de l'action et de la réaction dans le système Lune-Terre, la Terre subit donc une force perturbatrice. L'étude de ce mouvement peut être complètement traitée par la mécanique céleste. Ce sont les grands mathématiciens, parmi lesquels il faut citer Euler, Laplace et Poisson, qui ont résolu ce problème. Ils ont ainsi expliqué les phénomènes assez complexes de la précession et de la nutation que nous avons déjà signalés. Comme ce sont à la fois la Lune et le Soleil qui agissent, on nomme ce phénomène la *précession luni-solaire*.

La théorie d'Einstein

Un problème important s'est posé aux mécaniciens : est-ce que les mouvements célestes sont parfaitement expliqués par la loi de Newton ou bien observe-t-on de faibles différences? On a d'abord constaté que les prévisions étaient excellentes mais que l'accord ne devenait parfait que si l'on admettait que la rotation de la Terre n'est pas uniforme : cela a obligé les chercheurs à redéfinir le temps. Le temps des éphémérides est le temps qui donne un accord parfait pour toutes les observations : il ne s'agit pas d'une remise en cause de principe car ce sont les mouvements de tous les corps célestes qui sont en accord en définissant un seul temps, d'ailleurs identique à celui des physiciens : le *temps atomique*. Nous verrons que seule une petite rotation de l'orbite de Mercure n'est pas expliquée par la loi de Newton.

On sait que la loi de Newton a été remplacée au début de ce siècle par la théorie d'Einstein. En 1905, la *théorie de la relativité restreinte* a été introduite pour expliquer que la vitesse de la lumière est un invariant par rapport à deux systèmes de référence en mouvements relatifs. Cette théorie restreinte a été vérifiée par de nombreuses expériences; elle entraîne que la masse est une fonction de la vitesse. Cette théorie n'entraîne pas de modification pour le mouvement des planètes car les vitesses de ces corps sont tellement petites comparées à celle de la lumière que, pour la Terre, la modification de masse n'est que de 5 milliardièmes. En 1916, Einstein a énoncé la *théorie de la relativité généralisée,* qui introduit la notion d'espace-temps et qui montre qu'une masse introduit une courbure de l'espace-temps. La théorie de la relativité généralisée introduit en astronomie quelques conséquences vérifiables : d'abord, une masse comme le Soleil doit dévier la lumière. Différentes mesures ont été tentées pendant des éclipses de Soleil et les résultats ont été positifs bien qu'un peu imprécis. La seconde conséquence est l'explication du petit mouvement du périhélie de Mercure, signalée par Le Verrier.

Cette vérification de la théorie d'Einstein est importante mais elle n'est pas cruciale car d'autres petits effets peuvent l'expliquer; cependant, l'introduction d'un effet pour expliquer un seul phénomène n'est pas satisfaisante du point de vue de la logique scientifique. D'autant plus que la validité de la théorie d'Einstein ne fait plus de doute pour aucun physicien. La loi de Newton reste une excellente approximation pour les mouvements des corps ayant des petites vitesses par rapport à celle de la lumière, c'est-à-dire tous les corps du système solaire.

Gravité et accélération

A l'ère spatiale, la notion d'apesanteur est devenue familière. Mais cette notion est moins simple qu'on ne le pense en général.

Tout corps, et, notamment, l'homme, est soumis à l'attraction terrestre; chaque gramme de notre corps est ainsi attiré par une force de 981 dynes ou anciennement 1 gramme-force. L'expérience montre qu'une accélération est ressentie comme une attraction négative. Un homme en chute libre subit à la fois la pesanteur et l'accélération : il paraît soumis à la force $F - m\gamma$ qui est nulle. Il est en quelque sorte en apesanteur. Un mobile sur une orbite circulaire est soumis à une accélération dirigée vers le centre et à une force apparente dirigée vers l'extérieur. Ceci explique le nom de force centrifuge donnée souvent à cette force. Un astronaute dans une capsule spatiale est soumis à une attraction terrestre sensiblement égale à la pesanteur; ainsi, à 200 km d'altitude, elle est de 921 unités contre 981 au sol; mais, comme il circule sur une trajectoire circulaire de rayon 6 578 km, il est soumis à une force centrifuge qui, par gramme de matière, vaut exactement 921 unités. Ainsi, l'astronaute est toujours soumis à l'attraction de la Terre mais celle-ci est compensée par la force centrifuge; il est en apesanteur apparente avec toutes les conséquences que nous connaissons.

Rappelons que pendant le lancer de la fusée, l'astronaute est soumis à une très forte accélération, difficile à supporter; elle est de même nature que celle à laquelle est soumis un aviateur faisant une ressource à grande vitesse et à petit rayon de courbure; cette ressource peut d'ailleurs détruire l'avion à cause de cette accélération centrifuge. A la vitesse de 1 000 km/h et pour un rayon de 500 m, la force centrifuge vaut seize fois la pesanteur, on dira 16 g.

La masse des planètes

Il est possible de déterminer la masse *m* des planètes qui ont des satellites en utilisant la troisième loi de Kepler. Pour le mouvement, on a en effet $a^3/T^2 = m$ où *a* est le demi grand axe de l'orbite exprimé en unités astronomiques et T la période de révolution du satellite. La Lune tourne autour de la Terre en 27,32 jours à une distance de 384 000 km. Si l'on convertit ces deux valeurs en ans et en unités astronomiques on trouve $a = \frac{1}{390}$ et $T = \frac{1}{13{,}37}$. Un calcul simple donne alors la masse de la Terre $m = \frac{1}{330\,000}$ masse solaire. La valeur réelle est un peu différente, car il faut tenir compte du fait que l'orbite de la Lune est perturbée : $1/m = 332\,960$. Avec la valeur de la masse terrestre, déterminée par les expériences d'Eötvös, on détermine aussi la masse du Soleil, qui est de $2 \cdot 10^{27}$ tonnes.

La détermination de la masse des planètes n'ayant pas de satellites, comme Mercure et Vénus, était très dif-

ficile et ne pouvait guère être effectuée que par la détermination des perturbations très faibles que ces planètes exercent sur les autres corps du système solaire. En fait, les masses de ces planètes ne sont bien connues que depuis que des vaisseaux spatiaux les ont approchées. En étudiant leurs mouvements, on obtient la valeur du champ de gravité de ces planètes et donc leurs masses.

Le calcul de la position d'une planète ou de la Lune

Sans entrer dans le détail, indiquons comment on calcule la position d'une planète ou de la Lune à un moment donné.

Les calculs se font dans le système des coordonnées écliptiques dont le plan principal est l'écliptique. On considère un système de coordonnées attaché à ce plan. L'origine est le centre du Soleil et l'axe des x passe par le point vernal ; cela définit aussi la position de l'axe des y ; l'axe des z est perpendiculaire à l'écliptique. Le plan de l'orbite de la planète, qui passe aussi par le Soleil, coupe le plan de l'écliptique suivant une droite appelée *ligne des nœuds ;* l'inclinaison de l'orbite sera mesurée par l'angle dièdre i des deux plans. On doit aussi connaître la forme, les dimensions et la position de l'orbite dans ce plan. La période est naturellement connue ainsi que le moment où la planète se trouve au périgée. A l'aide de ces données, il est possible de calculer, à un moment donné, la position exacte de la planète dans son plan en direction et en distance. Un calcul géométrique simple donne ensuite les trois coordonnées x, y, z de la planète. Le même calcul, d'ailleurs simplifié, sera fait pour la position de la Terre au même moment. Ces coordonnées sont X, Y, Z. On démontre que les coordonnées relatives de la planète par rapport à la Terre sont x — X, y — Y et z — Z. Ces coordonnées permettent ainsi de calculer la distance et la direction géocentriques de la planète.

Indiquons que les astronomes ont l'habitude de faire leurs calculs dans un système de coordonnées rectangulaires équatoriales pour lequel l'axe des x est aussi l'axe Oγ, mais pour lequel l'axe des y est contenu dans le plan de l'équateur et l'axe des z est l'axe polaire. On passe de l'un à l'autre par une rotation de $\varepsilon = 23° 27'$ autour de l'axe commun des x. Ce système permet un calcul plus facile de l'ascension droite et de la déclinaison.

Les formules nécessaires à ces calculs, longues à écrire, sont en fait très simples. Leur calcul s'effectue par ordinateur. Les résultats de ces calculs sont établis quelques années à l'avance par les grands centres de calcul (Bureau des longitudes en France et des Instituts analogues en Allemagne, aux États-Unis et en U.R.S.S.). Ils sont publiés sous forme d'éphémérides, utiles aux astronomes mais aussi aux navigateurs. Les calculs sont réalisés avec une très grande précision, de l'ordre d'une fraction de seconde d'arc. Les calculs pour les planètes sont effectués pour chaque jour et, pour la Lune, de trois en trois heures. Pour cette dernière, ils sont d'ailleurs très complexes, car la position de notre satellite sur son orbite nécessite des formules comprenant près de 1 500 expressions trigonométriques.

Ces mêmes éphémérides donnent aussi les positions des satellites de Jupiter, calculées par une méthode analogue. Elles donnent aussi les positions précises des étoiles en tenant compte du mouvement des plans principaux, précession et nutation.

A l'heure de l'ordinateur, la confection des programmes une fois faite et contrôlée, le calcul est très rapide. On n'admirera jamais assez la somme de travaux exécutés par les astronomes avant l'existence des machines à calculer, lorsque la table de logarithmes était le seul outil de calcul. Aujourd'hui, il est possible d'effectuer ces calculs plus rapidement que l'astre ne se déplace, même lorsqu'il s'agit d'un satellite terrestre qui tourne autour de la Terre en une heure et demie.

La détermination des orbites

Le problème inverse, celui de la détermination de l'orbite d'un astre dont on connaît des positions observées, est beaucoup plus difficile. Cette difficulté provient du fait que l'observation ne nous donne que la direction de l'astre (par exemple, l'ascension droite et la déclinaison) mais non la distance de l'astre. On montre que trois observations sont suffisantes si l'astre n'est pas trop près de l'écliptique, sinon il en faut quatre.

C'est Laplace qui, le premier, a montré qu'on pouvait obtenir une solution algébrique lorsque les positions observées ont été faites à des époques voisines. Mais la précision de cette méthode laisse souvent à désirer. Pour des positions également espacées, Gauss a indiqué une méthode algébrique approchée faisant intervenir les six coordonnées observées. Dans le cas d'une comète pour laquelle on admet *a priori* que l'orbite est parabolique, Olbers a indiqué une modification de la méthode de Gauss qui est plus simple et plus expéditive. Il n'est pas question d'exposer ici ces méthodes, qui sont très complexes. Il suffit de savoir qu'elles sont efficaces et qu'il est ultérieurement possible d'améliorer ces orbites en confrontant les écarts entre l'éphéméride provisoire et les coordonnées observées. L'Union astronomique internationale effectue ces calculs dès la découverte d'un nouvel astre ; les positions prévues sont suffisantes pour suivre l'astre et corriger rapidement l'orbite ainsi que les prévisions.

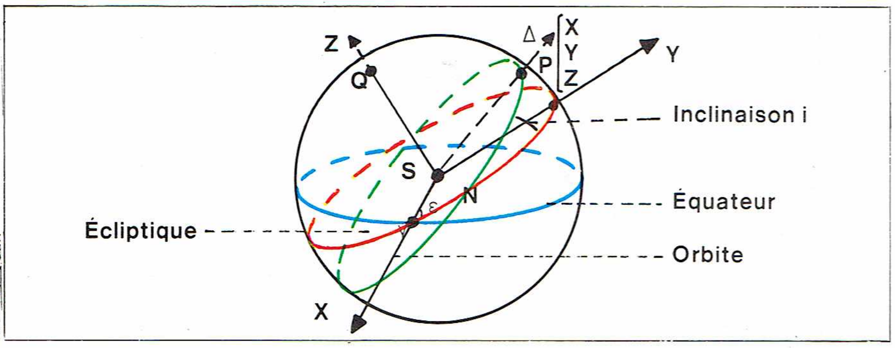

Richard Colin

▲ *Ci-dessus, calcul de la position d'une planète par rapport au Soleil : γ, point vernal ; N, nœud de l'orbite de la planète (intersection avec l'écliptique) ; X, Y, Z, coordonnées de la planète ; distance de la planète.*

▼ *Ci-dessous, pendant le lancer de la fusée, l'astronaute est soumis à une très forte accélération, difficile à supporter. Ici, Saturne 1B lors de la mission Apollo 7, le 11 octobre 1968.*

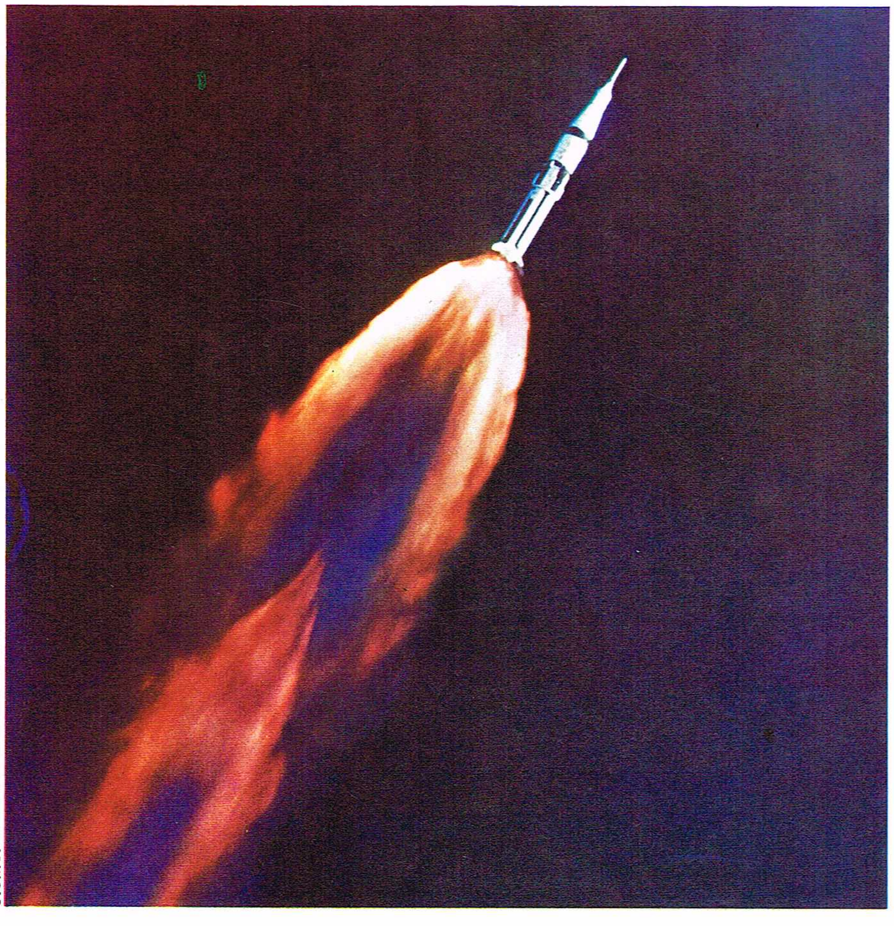

U.S.I.S.

Radiations et instruments

Radiations

Depuis la plus haute antiquité jusqu'au début du XVII^e siècle, toutes les observations étaient faites à l'œil nu. L'invention des lunettes et télescopes fut une révolution essentielle. Mais jusqu'à la fin du XIX^e siècle, la lumière visible et l'œil sont les seuls moyens de connaître les mouvements et la composition des astres.

A la fin du XIX^e siècle et au XX^e siècle, d'autres récepteurs sont introduits : la plaque photographique et la cellule photo-électrique. Le domaine spectral est étendu à l'ultraviolet et à l'infrarouge. La période actuelle est dominée par la détection des radiations du domaine des ondes hertziennes (radioastronomie) et l'observation à partir d'engins spatiaux (astronomie spatiale). Nous pouvons aujourd'hui étudier les astres depuis le domaine des rayons gamma et X jusqu'aux ondes hertziennes et aussi observer les radiations corpusculaires.

Les instruments de la première période étaient rudimentaires et les résultats obtenus en sont d'autant plus admirables. L'introduction de la lunette et les premières observations astronomiques de Galilée en 1610 ouvrirent une nouvelle ère. Néanmoins, les progrès furent lents et ce n'est qu'à la fin du XVIII^e siècle qu'on commença à s'intéresser à l'étude physique des astres, à la rotation des planètes, à la mesure de l'éclat des étoiles et de sa variation. Il fallut attendre le XIX^e siècle pour qu'on fît l'analyse de la lumière ; bien que commencée par Newton, cette analyse ne devint une science qu'avec Wollaston, Fraunhofer et les nombreux spectroscopistes du dernier siècle. Les instruments sont devenus meilleurs et plus grands ; la construction de grands télescopes, en métal d'abord, en verre argenté ensuite, a augmenté les moyens techniques de l'astronomie.

La troisième ère commence avec l'introduction de la photographie et son application à l'astronomie en 1840 (daguerréotypie de la Lune par W. Draper). Les récepteurs physiques : cellules photo-électriques, radiomètres, ne datent que des années 1920. Au cours de cette époque, l'astronomie s'est développée avec une rapidité étonnante. La détection du rayonnement radioélectrique de la Voie lactée (K. Jansky, 1931), puis du Soleil (vers 1940), est suivie par la naissance d'une nouvelle astronomie et par son développement prodigieux. L'extension du domaine des ondes lumineuses à l'infrarouge, puis à l'ultraviolet, de plus en plus loin jusqu'au domaine des rayons X et γ est un résultat des recherches spatiales. Parallèlement, on a mis en évidence des radiations corpusculaires : rayons cosmiques et vent solaire.

La lumière est un rayonnement électromagnétique. Elle est constituée par un champ magnétique alternatif, couplé avec un champ électrique de même fréquence et dont les directions sont perpendiculaires. Ces deux champs se propagent avec une vitesse très grande qui est de 299 793 km/s.

Une radiation électromagnétique est dite monochromatique lorsqu'elle correspond à une seule fréquence. Ainsi, la lumière jaune du sodium est sensiblement monochromatique (en fait, elle correspond à deux fréquences voisines) ; un poste de radiotélégraphie émet un champ électromagnétique de fréquence définie.

On nomme *longueur d'onde* la longueur que parcourt le rayonnement pendant une de ces oscillations. Cette notion est très utile car il est en général facile de la matérialiser par des expériences d'optique. Ainsi, la raie rouge du krypton a une longueur d'onde dans le vide de 0,605 780 211 micromètre (μm). Les physiciens utilisent aussi d'autres unités : le nanomètre (1 nm = 10^{-9} m) et l'angström (1 Å = 10^{-10} m). La radiation précédente a ainsi des longueurs d'onde de 605,780 2 nm ou 6 057,802 1 Å.

La *fréquence* de cette radiation est de $N = 4{,}948\,87 \cdot 10^{14}$ oscillations par seconde ou 494 887 milliards de hertz.

Dans un milieu comme l'eau ou l'air, la fréquence reste constante mais la vitesse de propagation est divisée par un nombre *n*, qui porte le nom d'*indice de la matière*. Cet indice dépend d'ailleurs de la fréquence de la radiation. Pour l'eau, $n = 1{,}33$ et la vitesse de propagation est de l'ordre de 225 000 km/s ; la longueur d'onde de la raie du krypton, si l'on pouvait la mesurer dans l'eau, serait de l'ordre de 0,455 μm.

L'œil humain a une sensibilité maximale pour la radiation de longueur d'onde : 555 nm (0,555 μm). Cette radiation

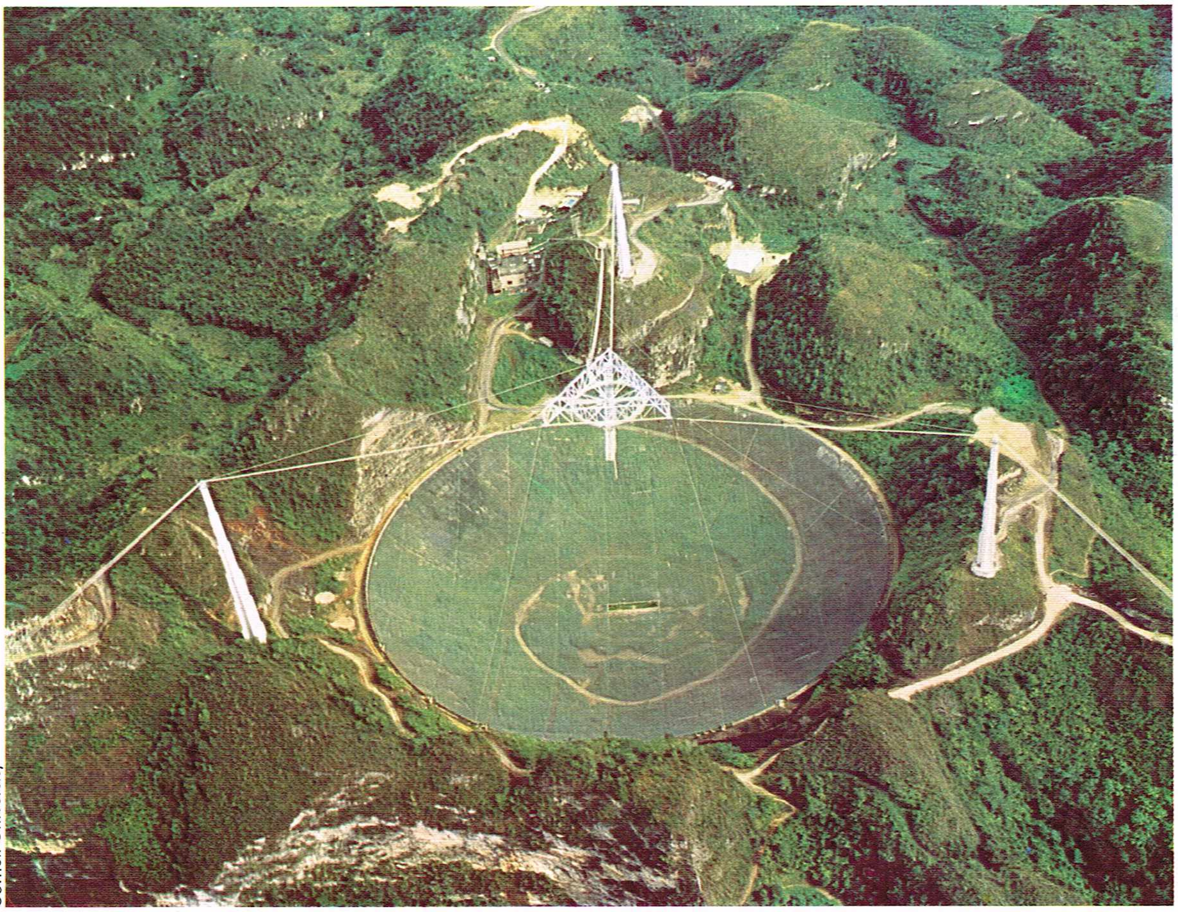

Cornell University

◀ ***Vue aérienne du radiotélescope d'Arécibo (Porto Rico).***

est verte. Les radiations comprises entre 0,4 μm (400 nm) et 0,8 μm (800 nm) sont perçues par l'œil, mais celui-ci est très peu sensible pour les radiations extrêmes. L'œil est caractérisé par sa courbe de sensibilité, qui est une courbe en cloche. Nous nommons ultraviolettes les radiations dont les longueurs d'onde sont inférieures à 0,4 μm et infrarouges celles supérieures à 0,8 μm.

Nous connaissons aujourd'hui d'autres récepteurs : d'abord, la *plaque photographique,* qui, dans sa forme originale, n'était sensible qu'aux radiations violettes et ultraviolettes. Il est maintenant possible de rendre la plaque sensible à d'autres radiations, jusqu'à l'infrarouge proche de 1,1 μm. De nombreux nouveaux récepteurs ont été introduits depuis une cinquantaine d'années; le plus important est la *cellule photo-électrique,* dont il existe de nombreux types et dont les sensibilités peuvent aller de l'ultraviolet à l'infrarouge lointain.

Mais le domaine des radiations que l'on peut étudier depuis le sol est limité à cause de l'atmosphère terrestre. Celle-ci ne laisse passer aucune radiation de longueur d'onde plus courte que 0,31 μm, qui correspond à l'ultraviolet. Pour observer en dessous de ce domaine, il faut disposer les instruments à bord d'un vaisseau spatial. L'absorption de l'atmosphère est due à la molécule d'ozone O^3 et, pour les plus courtes longueurs d'onde, à l'azote N^2. Il existe aussi une forte absorption dans l'infrarouge. Ce sont les molécules de la vapeur d'eau et, à un moindre degré, du gaz carbonique qui créent ces absorptions. Si un certain nombre de domaines restent observables de la Terre, l'observation est fortement améliorée en haute altitude dans les climats secs ou à partir de ballons; mais là encore les vaisseaux spatiaux sont plus efficaces.

Au-delà de 1 mm de longueur d'onde, l'atmosphère est pratiquement transparente et les observations dans le domaine des ondes hertziennes y sont faciles.

La polarisation de la lumière

Les deux champs magnétique et électrique qui constituent la lumière sont perpendiculaires à la direction de propagation : on dit que la *vibration* est *transversale*. Il en résulte que la lumière peut être *polarisée*. On nomme ainsi la radiation électromagnétique pour laquelle le champ électrique est fixe dans l'espace (par conséquent aussi le champ magnétique qui, lui, est perpendiculaire). Dans la lumière naturelle, le plan de polarisation change de façon aléatoire et permanente : aucun plan de l'espace n'est privilégié. Indiquons que le son correspond à la propagation d'une onde de pression de l'air, mais cette onde n'est pas transversale et le phénomène de la polarisation n'existe pas pour le son.

Si les rayonnements corpusculaires qui proviennent du Soleil ne sont pas directement observables de la Terre, on constate leurs effets secondaires. Il en est de même du rayonnement cosmique, qui est constitué par des particules, en grande majorité des protons, c'est-à-dire des atomes d'hydrogène ionisés qui pénètrent dans notre atmosphère avec des vitesses pouvant atteindre des fractions importantes de la vitesse de la lumière. Ces particules produisent de fortes ionisations en cascade d'où leur nom de « gerbes ».

Instruments utilisés en astronomie

Les instruments d'astronomie de position

Dans l'Antiquité, les instruments principaux étaient le *gnomon,* qui permettait d'étudier le mouvement du Soleil par la mesure de la longueur de l'ombre portée, et les *alidades,* c'est-à-dire des mires de visée qui étaient souvent couplées en compas. Ces instruments permettaient de mesurer l'angle entre les directions de deux astres qu'on nomme distance angulaire, et aussi la hauteur d'un astre au-dessus de l'horizon. Des modèles perfectionnés sont l'*astrolabe* et la *sphère armillaire*.

En l'absence de toute optique, seules des visées successives des astres étaient possibles. La précision était limitée mais des astronomes de grande classe, comme Tycho Brahé, ont réalisé des observations excellentes. Son instrument était du type astrolabe. C'était un grand quart de cercle de laiton disposé dans le plan du méridien; cet instrument fut la première édition sans optique de la lunette méridienne. Il permettait de déterminer simultanément l'heure de passage et la distance zénithale de l'astre et, par conséquent, l'ascension droite et la déclinaison. La précision était de l'ordre de 1′ d'arc, ce qui correspond sensiblement au pouvoir séparateur de l'œil et aussi à l'imprécision de la réfraction atmosphérique, alors mal connue. Nous verrons l'importance considérable qu'ont eu les mesures de la position de Mars pour la découverte des lois de Kepler et donc de l'attraction universelle. Tycho Brahé, excellent observateur et disposant de moyens puissants, n'était pas un grand théoricien et lui-même n'avait pas adopté le système de Copernic, mais son système, plus complexe, n'était pas faux. La précision des mesures a été dépassée seulement à Greenwich par Flamsteed, mais après que l'optique eut été introduite en astronomie.

L'invention des *lunettes* date de la fin du XVIe siècle. Il semble maintenant établi que c'est le Napolitain J.-B. della Porta qui fit les premières lunettes : un instrument daté de 1590, probablement de sa fabrication, a été décrit par des lunetiers hollandais qui le copièrent (ultérieurement, on leur en attribua l'invention). Vers 1609, Galilée apprit l'existence de ces lunettes et en fabriqua un exemplaire de ses propres mains. Le génie de Galilée fut d'en faire un instrument scientifique et de le pointer sur les astres. Il découvrit en 1610 les cratères de la Lune, les phases de Vénus, le disque de Jupiter et ses quatre plus gros satellites. Il vit que Saturne était accompagné de quelque chose, qu'il prit pour des satellites et qu'il ne découvrit plus quelques années plus tard. L'anneau qu'il avait entrevu était alors vu par la tranche et disparaissait à l'observation.

Ces difficultés montrent que ces lunettes, qui grossissaient entre 3 et 30 fois, étaient de qualité médiocre. Cela était dû à diverses causes : les objectifs étaient formés d'un seul verre biconvexe et donnaient des images fortement irisées à cause de l'aberration chromatique. La lunette de Galilée avait un oculaire divergent. Cette disposition avait l'avantage de montrer l'image à l'endroit, ce qui était important pour les utilisations militaires mais très secondaire pour l'astronomie. Ce type de lunette, qui n'est plus guère utilisé que comme jumelle de théâtre, nécessite qu'on applique l'œil le plus près possible du verre de l'oculaire. Elle n'a pas de champ. L'oculaire a été, par la suite, remplacé par un verre convergent, ce qui a permis d'augmenter le champ et de disposer un réticule dans le plan focal de l'objectif : les mesures de direction peuvent ainsi être de haute précision. Les astronomes n'utilisent plus que des oculaires convergents qui renversent les images; les bonnes lunettes terrestres comportent des systèmes redresseurs à lentilles ou prismes.

▼ *Cette horloge solaire comporte un gnomon (ou tige) dont l'ombre se projette à l'intérieur d'un quart de sphère gradué, permettant de déterminer l'heure par son ombre (Milan, musée des Sciences et des Techniques).*

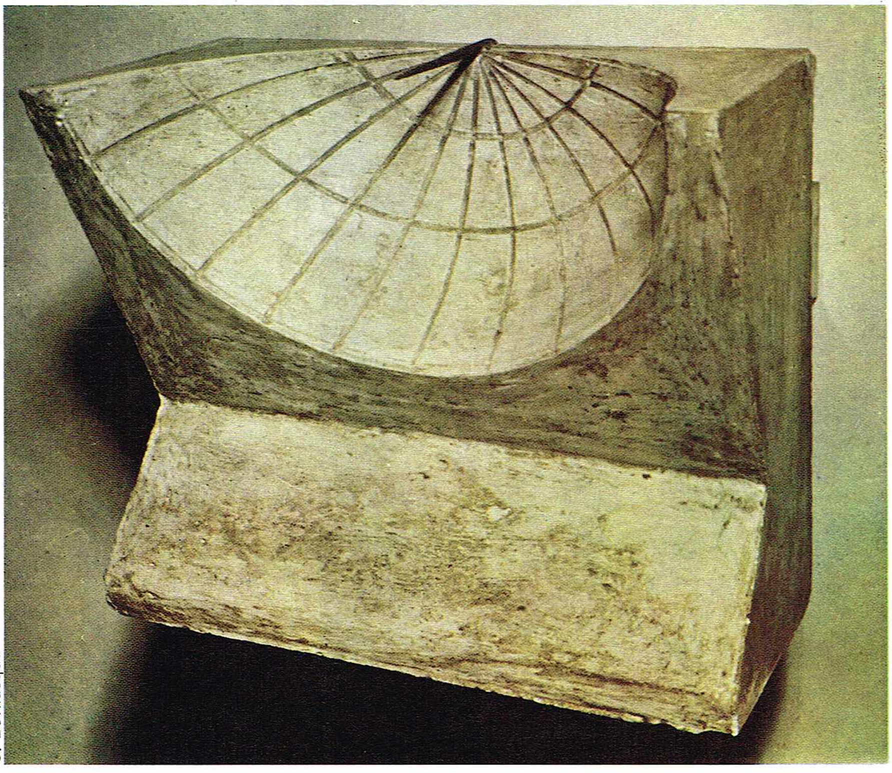

C. Bevilacqua

C. Bevilacqua

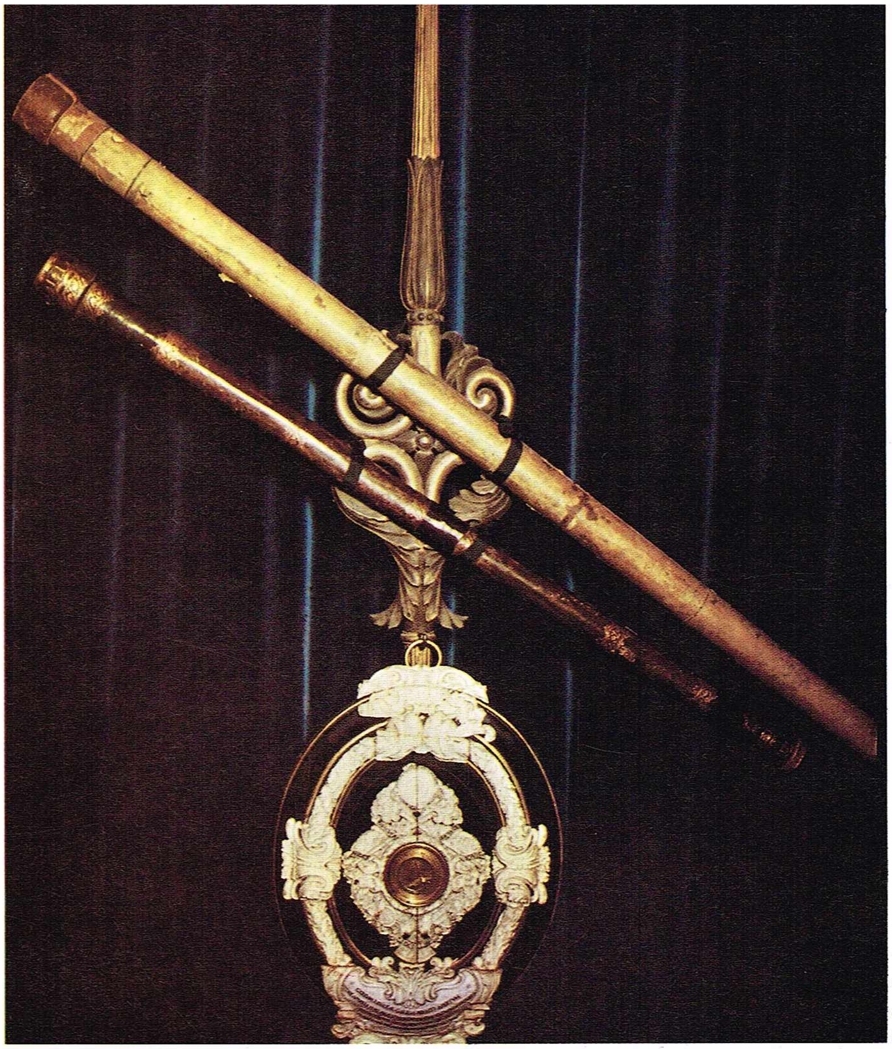

C. Bevilacqua

▲ *En haut, à gauche, un astrolabe arabe de la première moitié du XIVᵉ siècle. A droite, les lunettes astronomiques de Galilée (Florence, musée de Physique et d'Histoire naturelle).*

Les premières lentilles présentaient un certain nombre de défauts, dont le plus important était le chromatisme ; les images étaient irisées. On pensait qu'il n'était pas possible de corriger ce défaut, et il était difficile de fabriquer de grands objectifs, de sorte qu'on s'intéressa de plus en plus aux télescopes dont le principe est identique à celui des lunettes : l'objectif est remplacé par un miroir.

Les théodolites, les lunettes méridiennes et les astrolabes

Le *théodolite* est un instrument d'astronomie de position qui permet de déterminer directement les azimuts et les distances zénithales. Cet instrument comporte une petite lunette astronomique dont l'axe est défini par le centre de l'objectif et par un petit réticule situé dans le plan focal. Un axe perpendiculaire à l'axe optique peut tourner autour de deux tourillons solidaires d'une fourche. Le premier axe est horizontal. La fourche tourne autour d'un axe vertical. A chaque axe sont fixés des cercles gradués de précision, sur lesquels on lit directement les hauteurs et les azimuts. Des niveaux de précision permettent de rendre les deux axes horizontaux et verticaux. De nombreuses précautions sont nécessaires à la fabrication et à la mise en station de cet appareil. Un bon théodolite donne normalement une précision de l'ordre de quelques secondes d'arc. L'observation d'une étoile ou du Soleil permet la mise en station en azimut. Naturellement, les distances zénithales doivent être corrigées de la réfraction. Le théodolite permet d'obtenir facilement la valeur exacte de la latitude.

La *lunette méridienne* est un théodolite ne comportant pas de rotation autour de l'axe vertical. Ses tourillons sont supportés par deux piliers en maçonnerie ou en métal, très solides; par réglage, les tourillons sont exactement dirigés est-ouest. Cet instrument permet de déterminer l'heure du passage de l'étoile et sa déclinaison. La précision qu'il permet d'obtenir est considérable, de l'ordre de 0″,1 ou mieux. Mais la mesure doit être corrigée de nombreux effets : erreur de graduation du cercle, erreur d'orientation est-ouest, erreur de perpendicularité des axes, etc. Le moment du passage est repéré par des micromètres impersonnels et quelquefois photo-électriques. Le passage est enregistré directement sur la pendule.

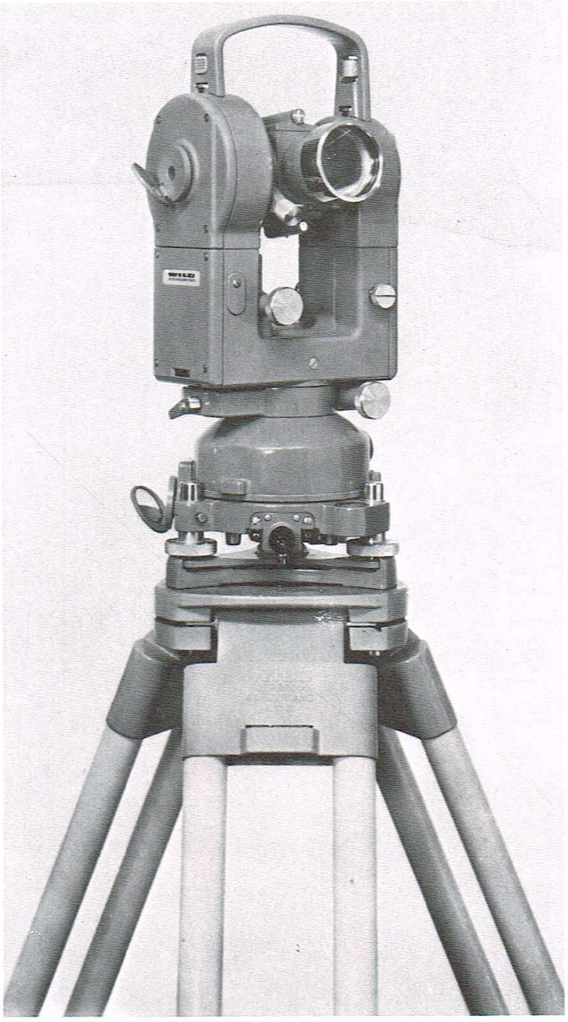

Wild - Paris

◀ *Un théodolite moderne avec collimation automatique du cercle vertical et lecture numérique des 2 angles.*

▶ *Télescope ou réflecteur de Newton (Londres, British Museum of Sciences).*

C. Bevilacqua

L'observation du Soleil donne sa déclinaison et, sauf aux équinoxes, cette valeur permet de calculer l'ascension droite du Soleil. Comme nous l'avons vu, le temps sidéral est égal à cette ascension droite. L'observation du Soleil permet donc de connaître comment marche l'horloge sidérale de l'observatoire et de corriger sa lecture. La nuit, le même instrument permet d'observer les étoiles et d'établir des catalogues stellaires de précision.

Lorsque le problème principal est la détermination de l'heure et de la latitude en vue d'étudier la rotation de la Terre et la position du pôle céleste, deux instruments plus précis, mais d'usage plus limité, sont employés : la *lunette zénithale,* qui permet l'observation du passage de certaines étoiles par le zénith, et l'*astrolabe à prisme.* Cet instrument, dont le type le plus perfectionné est dû à A. Danjon, permet d'observer avec précision le moment où une étoile est située à 30° du zénith.

Les télescopes et les lunettes modernes

On a assisté au cours des temps à des choix divers : tantôt ce fut le télescope et tantôt la lunette, ou réfracteur, qui l'emportèrent. Newton lui-même croyait qu'il n'était pas possible de construire des lentilles achromatiques ; il décida donc, comme certains de ses contemporains, notamment Gregory en Angleterre et Cassegrain en France, de construire des télescopes. En fait, le principe était connu depuis 1637 (Mersenne). Newton en réalisa un de sa main en 1672, qui n'avait que 37 mm de diamètre utile et permettait de grossir 38 fois. On voit qu'il s'agissait d'un instrument bien modeste. La découverte par Dollond, en 1752, de la possibilité d'utiliser des lentilles achromatiques redonna la première place aux lunettes.

Au cours du XIX^e siècle, les deux types d'instruments furent construits et utilisés simultanément. De la lunette de Dorpat, de 24 cm de diamètre, construite par Fraunhofer, on passa en 1897 à celle de Yerkes, de 102 cm de diamètre. Mais celle-ci était la dernière car on ne pouvait pas couler des disques de verre de qualité plus grands et, d'autre part, l'achromatisme résiduel ainsi que l'absence de champ ne permettaient pas d'adapter ces instruments à la photographie.

Les premiers télescopes du XVIII^e siècle avaient des diamètres de 15 cm (celui de Hadley en 1720) ; mais en 1789 le télescope de W. Herschel mesurait 122 cm. A cette époque, les difficultés venaient de la nature du bronze du miroir, très dilatable et mauvais réflecteur, ainsi que des flexions du miroir sous son propre poids. Un grand progrès a été accompli par Léon Foucault qui présenta en 1857 une note à l'Académie des sciences sur la construction de miroirs en verre argenté. Il indiqua, presque en même temps, la méthode d'examen de la qualité des miroirs, test remarquable par sa simplicité et qui est toujours utilisé. Steinheil, qui ne publia pas ses travaux, avait fait des essais analogues. Le grand miroir de 80 cm de diamètre installé en 1858 à l'Observatoire de Marseille fut, par sa conception (miroir en verre, support pneumatique du miroir, monture à fourche), le premier instrument moderne. Il avait un champ très faible, ce qui n'était pas gênant à cette époque où l'observation était visuelle. Ce miroir, qui devait en principe être parabolique, présentait un résidu d'aberration sphérique que Foucault avait corrigé par l'oculaire.

Au début du XX^e siècle, avec les besoins de l'astrophysique, de nombreux télescopes de 150, puis de 250 cm de diamètre, furent construits. Ces instruments présentaient toujours un champ très faible ; il en fut encore ainsi du grand télescope Hale de 508 cm de diamètre du mont Palomar mis en service en 1948. La nécessité d'agrandir le champ des télescopes apparut de plus en plus et la grande découverte de B. Schmidt en 1929 donna une solution excellente à ce problème. Le miroir est sphérique et le tube fermé par une lame asphérique située au centre de courbure du miroir ; elle corrige l'aberration du miroir. Le champ de bonne définition de ces instruments est excellent et les photographies obtenues avec le télescope de Schmidt du mont Palomar (diamètre de la lame : 120 cm) représentent un progrès extraordinaire sur les vieilles photographies de la carte du ciel.

Au début de ce siècle, K. Schwarzschild avait indiqué la possibilité de construire des télescopes Cassegrain à grand champ, en déformant le miroir principal de

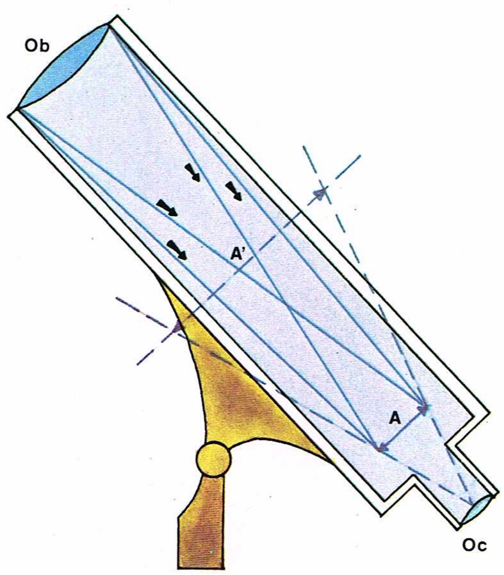

▶ *Schéma d'une lunette astronomique : l'objectif* Ob *donne, d'un objet situé à l'infini, une image réelle renversée* A, *dont l'oculaire* Oc *donne une image virtuelle, agrandie, en* A'.

Richard Colin

manière à dépasser le stade parabolique et en le combinant à un miroir hyperbolique plus déformé. En 1922, H. Chrétien reprit cette idée et fit réaliser le premier télescope de ce type par Ritchey (d'où le nom de *Ritchey-Chrétien* donné à cet instrument). Il constitue une excellente solution au problème de l'agrandissement du champ. Ce type a été adopté pour les deux télescopes de 4 m de Kitt Peak (États-Unis) et Tololo (Chili), pour le télescope européen au Chili (3,60 m) et le télescope anglo-australien (4 m). Malheureusement, cette solution n'a été retenue ni pour le télescope de 3,60 m France-Canada-Hawaii, ni pour le télescope de 6 m de Selentchouk (U.R.S.S.).

Pourquoi cette course au grand diamètre ? La réponse est évidente : c'est la recherche du grand pouvoir collecteur. L'énergie reçue est proportionnelle à la surface du miroir. Mais cette façon de voir est un peu simpliste. La théorie des grands instruments montre que la puissance des grands télescopes n'est proportionnelle qu'au diamètre et non à son carré. Elle est, d'autre part, inversement proportionnelle au diamètre de l'image qu'ils donnent. Cette dernière est limitée par la qualité du télescope et de son site.

La théorie vibratoire de la lumière montre que la finesse de l'image obtenue est d'autant plus grande que le diamètre de l'instrument, supposé parfait, est plus grand. Avec un instrument de 13 cm de diamètre, on peut séparer des images d'étoiles distantes de 1″. Avec un diamètre de 26 cm, la limite est de 0″,5, etc. Cela n'est vrai que si l'optique et le site sont parfaits : l'expérience a montré que pour des diamètres dépassant 50 ou 80 cm les images sont rarement meilleures que 1″. Une étude détaillée de ce phénomène montre que c'est la qualité du miroir et surtout l'agitation atmosphérique qui brouillent les images. Des recherches importantes sur la qualité des miroirs, des montures, des coupoles ont été entreprises ; la recherche des sites est un problème primordial. Il est certain qu'un télescope de 4 m donnant une image de 1″ n'est pas plus efficace qu'un télescope de 2 m donnant des images de 0″,5 ou un télescope de 6 m avec des images de 1″,5.

Ces limitations s'appliquent à la découverte et à l'étude des galaxies ou des étoiles les plus faibles mais aussi à l'étude détaillée de la lumière des étoiles brillantes. A égalité de magnitude limite, c'est le télescope donnant les plus fines images qui l'emporte en qualité.

Le miroir d'un télescope parabolique doit être réalisé avec une très grande précision. Lord Rayleigh a montré que lorsque l'onde lumineuse réfléchie par le miroir s'éloigne d'une onde sphérique de plus d'un quart de la longueur d'onde, l'image est entachée de défauts. En fait, le miroir peut être considéré comme parfait lorsque sa surface ne diffère pas d'un paraboloïde de plus d'un dixième de longueur d'onde, soit de 0,05 μm pour les miroirs optiques. Cette tolérance est extrêmement petite : 1/20 000 de millimètre, et ceci pour des miroirs qui atteignent maintenant 4 ou 5 m de diamètre. Les tolérances sont identiques pour les miroirs qui ont des formes plus compliquées, hyperboliques ou encore plus complexes, comme dans le cas du télescope de Ritchey-Chrétien.

Trois problèmes se posent : comment obtenir cette précision, comment la contrôler, comment la conserver ?

Depuis le milieu du dernier siècle, tous les miroirs de télescope sont taillés en verre. La taille se fait par usure du verre avec une poudre abrasive de corindon ou même de diamant. Par frottement de l'une contre l'autre, deux surfaces entre lesquelles on a disposé l'abrasif mouillé se transforment en surfaces sphériques qui s'appliquent rigoureusement. L'usure est due à l'enlèvement du verre par éclatement ; on diminue la taille de ces éclats en choisissant des abrasifs ayant des grains de plus en plus fins. On obtient ainsi une surface de plus en plus douce, mais toujours diffusante et d'aspect blanchâtre. On obtient un poli fin en remplaçant l'abrasif par des oxydes de fer (rouge d'Angleterre) ou de cérium. Dans ces conditions, les petits creux qui subsistent se remplissent de verre ; ce procédé, encore incomplètement compris, est certainement chimique.

Le contrôle du miroir sphérique obtenu peut être fait par divers procédés dont le plus ancien a été indiqué par L. Foucault vers 1850. Ce test par une lame de couteau est d'une simplicité et d'une élégance extrêmes.

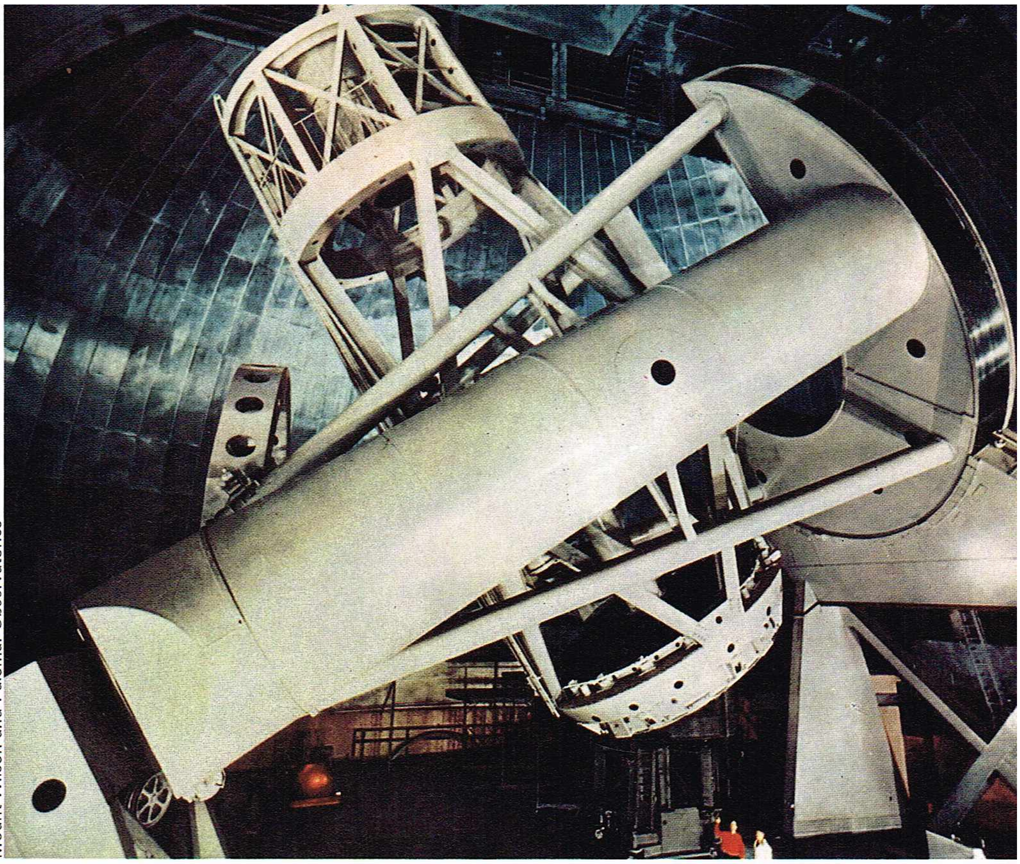

Mount Wilson and Palomar Observatories

▲ *Le télescope Hale, de l'Observatoire du mont Palomar, aux États-Unis, qui possède un miroir d'un diamètre de 5 m (copyright du California Institute of Technology and Carnegie Institution of Washington).*

▼ *La coupole du télescope Hale de l'Observatoire du mont Palomar.*

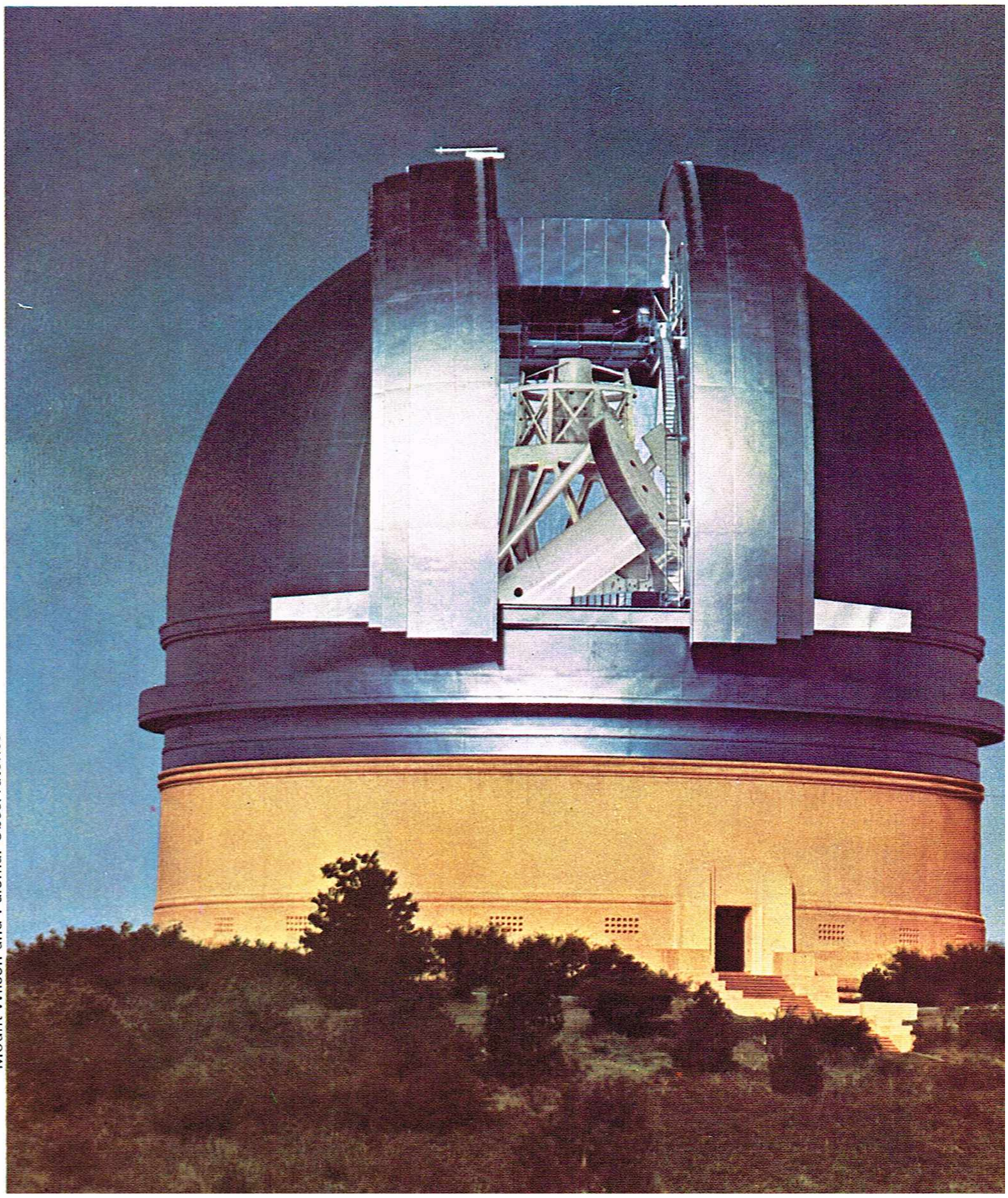

Mount Wilson and Palomar Observatories

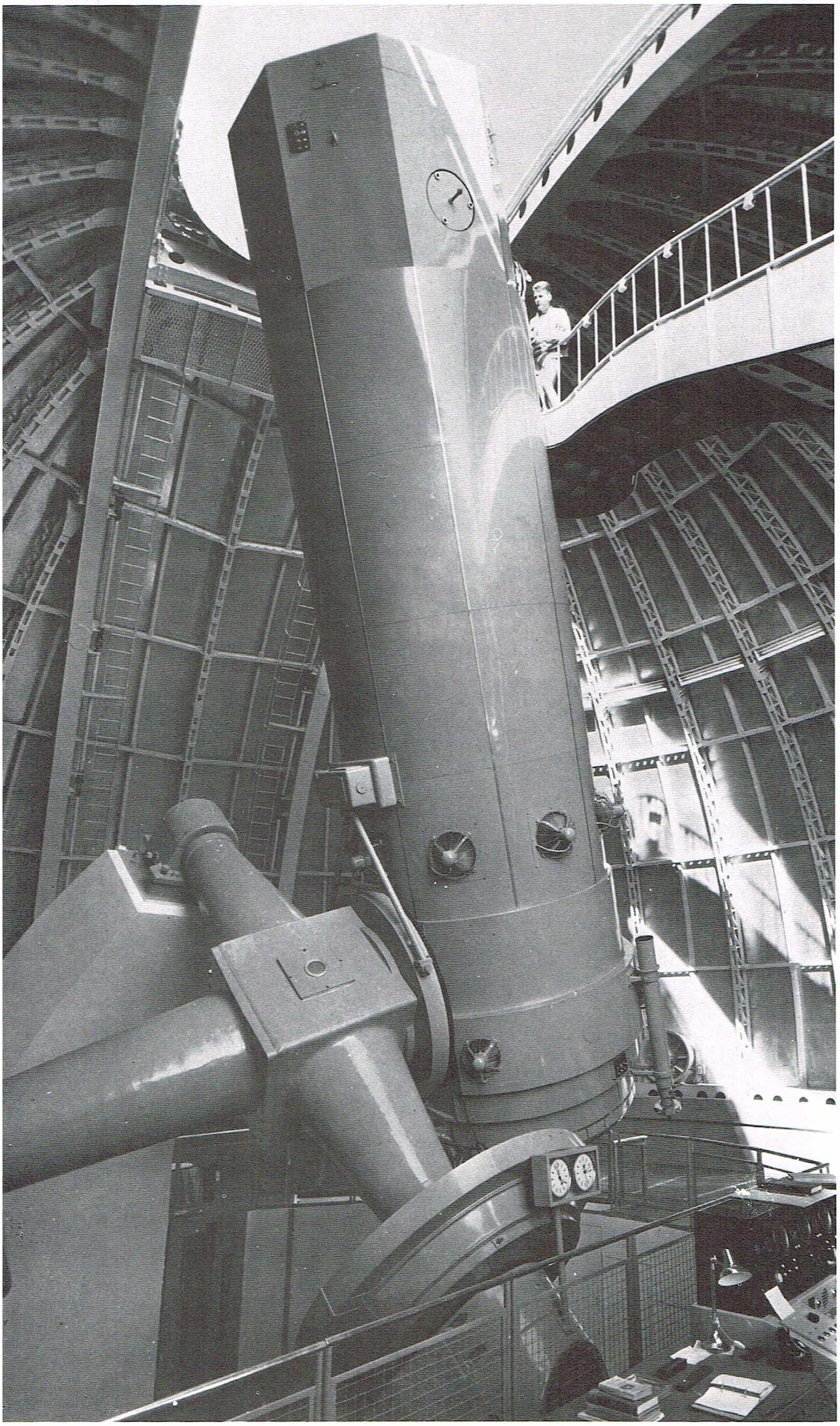

C.N.R.S. - Observatoire de Haute-Provence

▲ *Vue d'ensemble du grand télescope de l'Observatoire de Haute-Provence (diamètre : 1,93 m). La monture est une monture de type anglais à contrepoids. Des miroirs auxiliaires permettent les observations aux quatre combinaisons optiques différentes : foyers direct, Newton, Cassegrain et Coudé. Le pointage de l'instrument se fait d'un tableau de bord avec une très grande précision. L'entraînement est contrôlé par un dispositif électronique.*

On place une source ponctuelle au centre du miroir et l'image de retour se forme à côté de l'objet ; on coupe cette image ponctuelle par une lame de couteau derrière laquelle on place l'œil. Dans ces conditions, l'observateur voit les défauts du miroir et il peut apprécier des défauts de l'ordre du dixième de longueur d'onde. L'opticien peut se servir de cette observation pour retoucher localement le miroir. Cependant, ce procédé n'est pas très satisfaisant car les retouches locales ne sont jamais très réussies. Un opticien de talent préfère agir sur l'outil qui sert à la taille et le modifier par divers artifices.

De très grands progrès ont été accomplis, sous l'impulsion d'A. Couder, par l'emploi d'outils d'usure flexibles. Il est maintenant possible d'obtenir directement des miroirs éloignés de la sphère (parabolique, Ritchey-Chrétien). Toutefois, dans ce cas, le contrôle devient plus difficile ; la méthode de Foucault est encore applicable avec certaines modifications. Une autre méthode, développée par Hartmann, donne des mesures quantitatives.

Le contrôle des miroirs convexes, qui ont quelquefois 2 m de diamètre, est très difficile : il est souvent plus difficile d'obtenir un bon miroir secondaire de 1 à 2 m de diamètre que le miroir principal de 4 m. En outre, lorsque le miroir est obtenu avec cette précision, il faut que sa forme soit conservée dans le télescope. Il y a deux difficultés : les déformations thermiques et les flexions.

Le coefficient de dilatation du verre est relativement élevé, et une variation de température de 1° rend le miroir mauvais. Ce problème a été résolu d'abord par l'utilisation de la silice fondue, dont le coefficient de dilatation est beaucoup plus petit, et maintenant surtout par des verres modernes à coefficient de dilatation nul (fabriqués sous divers noms commerciaux aux États-Unis et en Allemagne). L'utilisation de ces verres constitue un progrès considérable et facilite aussi les tests pendant la taille.

La seconde difficulté est la déformation du miroir par sa flexion. Pour diminuer ces effets, on donne au miroir une grande épaisseur mais, dans ces conditions, un miroir de 360 cm de diamètre et de 50 cm d'épaisseur pèse de 10 à 15 tonnes et fléchit néanmoins. Pour annuler ces flexions, on dispose le miroir dans un barillet. Dès 1850, Foucault avait indiqué et réalisé un miroir reposant sur des coussins à air qui appuient sur le dos du miroir de façon à contrecarrer la pesanteur. Une autre solution est d'appuyer sur le dos du miroir avec des contrepoids dont l'effet est maximal lorsque l'axe optique est vertical et nul lorsque le télescope pointe l'horizon. Mais pour les grands miroirs, il faut aussi compenser les forces latérales en poussant et en tirant sur la tranche du miroir. Des dispositifs analogues sont nécessaires pour les miroirs secondaires. On conçoit que les télescopes ainsi réalisés soient des instruments lourds et complexes, pesant des centaines de tonnes, alors que la seule surface utile est la couche de quelques grammes d'aluminium, qui est disposée sur le miroir mais dont il faut conserver la forme.

Les miroirs récemment réalisés aux États-Unis, en France et en Grande-Bretagne ont une précision inespérée. On pense que, grâce aux excellents sites, aux États-Unis, au Chili et à Hawaii, on obtiendra des images d'une grande finesse qui permettront de dépasser largement les résultats, déjà extraordinaires, obtenus avec le télescope de 5 m du mont Palomar.

Naturellement, on a appliqué à ces télescopes toutes les perfections mécaniques et électroniques possibles. Les flexions sont compensées et le pointage, le guidage ainsi que l'exploitation des résultats sont réalisés avec des ordinateurs.

Quelles sont les limites de ces grands télescopes ? En photographie, en photométrie, le télescope du mont Palomar permet de photographier des étoiles de magnitude 23 à 24, c'est-à-dire 10 millions de fois moins brillantes que les étoiles les plus faibles visibles à l'œil nu. Le télescope de Schmidt de 120 cm de lame du mont Palomar permet d'atteindre la magnitude 22. Dans le premier cas le champ n'est que de quelques minutes d'arc, alors qu'il est de plusieurs degrés pour le second. Mais le télescope de Schmidt classique n'est pas adapté à d'autres recherches que la photographie, essentiellement avec filtre ou prisme.

Ces lunettes et télescopes peuvent servir directement à l'inspection visuelle des images d'objets ayant une surface sensible : planètes, nébuleuses, amas stellaires. Comme il n'y a de science que par la mesure, ces appareils sont équipés de nombreux instruments auxiliaires. On a employé des *micromètres à fils,* permettant de mesurer la distance angulaire et la position dans le ciel des étoiles doubles, des *photomètres visuels,* permettant de mesurer l'éclat des étoiles, etc. Dans les observatoires modernes, presque toutes ces mesures sont faites à l'aide de plaques photographiques, de cellules et de récepteurs divers.

La plaque photographique

Malgré un certain nombre d'imperfections, la plaque photographique est restée un accessoire indispensable à l'astronomie. Elle sert non seulement à enregistrer les images stellaires mais aussi les spectres et les figures d'interférence. Au cours des cent dernières années, le domaine de réponse spectrale et la sensibilité ont été fortement étendus. Mais les défauts initiaux subsistent : la granularité de l'émulsion et la faible précision des mesures de photométrie, qui atteint très difficilement 2 %. La déformation au cours du développement de la gélatine introduit une imprécision des mesures de position. La grande sensibilité de la plaque photographique provient du fait qu'il est possible d'exposer la plaque pendant longtemps. Alors que l'œil n'enregistre les photons que pendant 1/25 de seconde, la mémoire effaçant automatiquement l'image pour en recevoir une nouvelle (ce qui nous permet de regarder les écrans de cinématographie et de télévision), la plaque peut enregistrer la lumière pendant des temps très longs (en astrophysique, des poses photographiques de plusieurs heures sont courantes). Malheureusement, seuls les premiers photons sont efficaces de sorte que la plaque présente un défaut de sensibilité pour les longues poses. Il est possible de diminuer cet effet défavorable par des procédés divers, notamment par le chauffage des plaques. Quoi qu'il en soit, il faut environ 1 000 photons pour obtenir un grain photographique développé; ce rendement est très médiocre.

Aussi a-t-on essayé par divers procédés de l'améliorer. La technique qui donne le plus de résultats est celle qui a été introduite par A. Lallemand : la caméra électronique. L'image stellaire est reçue sur une cathode disposée dans le vide. Cette cathode a la propriété d'émettre des électrons lorsqu'elle est touchée par des photons. Une optique électronique redonne une image de la cathode sur une plaque photographique. Mais les électrons sont accélérés et le rendement total du système est beaucoup plus grand que pour la plaque. Les propriétés photométriques ainsi que la granulation sont bien supérieures. Un gain total de 20 à 50 est normal dans le bleu ; il est supérieur dans le rouge. L'appareil est compliqué du fait qu'il faut disposer, dans un tube à vide poussé, à la fois une photocathode très sensible à toutes les impuretés et une plaque photographique qui est une source d'impuretés. On a résolu le problème en refroidissant la plaque à la température de l'air liquide; on refroidit aussi la cathode pour éviter les émissions d'électrons secondaires. Cette technique a été modifiée de diverses manières pour éviter la reconstruction de la caméra électronique à chaque changement de plaque. Ainsi, dans certaines réalisations, la plaque est remplacée par un écran fluorescent que l'on photographie, ou sur lequel on applique une plaque par l'intermédiaire de fibres de verre. On gagne en sensibilité sur la plaque ordinaire mais on perd tous les avantages de l'électronographie.

On effectue les mesures sur des plaques photographiques ou électroniques pour déterminer les coordonnées des étoiles et leur éclat. Les calculs sont maintenant exécutés par des ordinateurs qui peuvent être connectés directement sur les instruments de mesure. On obtient ainsi les coordonnées célestes (α, δ) et les magnitudes des astres. Des mesures de ce type sont exécutées depuis 1880 pour dresser un atlas du ciel (Carte du ciel).

Le photomètre

La photométrie de précision s'effectue maintenant à l'aide de cellules photo-électriques : la lumière de l'astre à mesurer, isolée par un petit diaphragme, est projetée par une petite lentille à l'intérieur de la cellule. Un filtre coloré adapte la sensibilité spectrale de l'ensemble. Le courant électrique ainsi créé, très faible, doit être amplifié : en général, une première amplification est faite à l'intérieur de la cellule elle-même (cellules à multiplicateurs d'électrons). Ce courant est enregistré par un micro-ampèremètre ou mieux reçue directement dans l'ordinateur. La précision atteinte est bien meilleure que 1 %; elle est limitée par l'agitation et les fluctuations de la transparence de l'atmosphère terrestre. L'absorption de cette atmosphère est d'ailleurs délicate à déterminer : sa mesure doit être faite chaque nuit, et seules les nuits très transparentes sont utilisables. Pour atteindre des étoiles faibles, il faut enregistrer les photons reçus pendant des temps très longs, qui peuvent atteindre deux à trois heures pour les étoiles les plus faibles, même avec un très grand télescope.

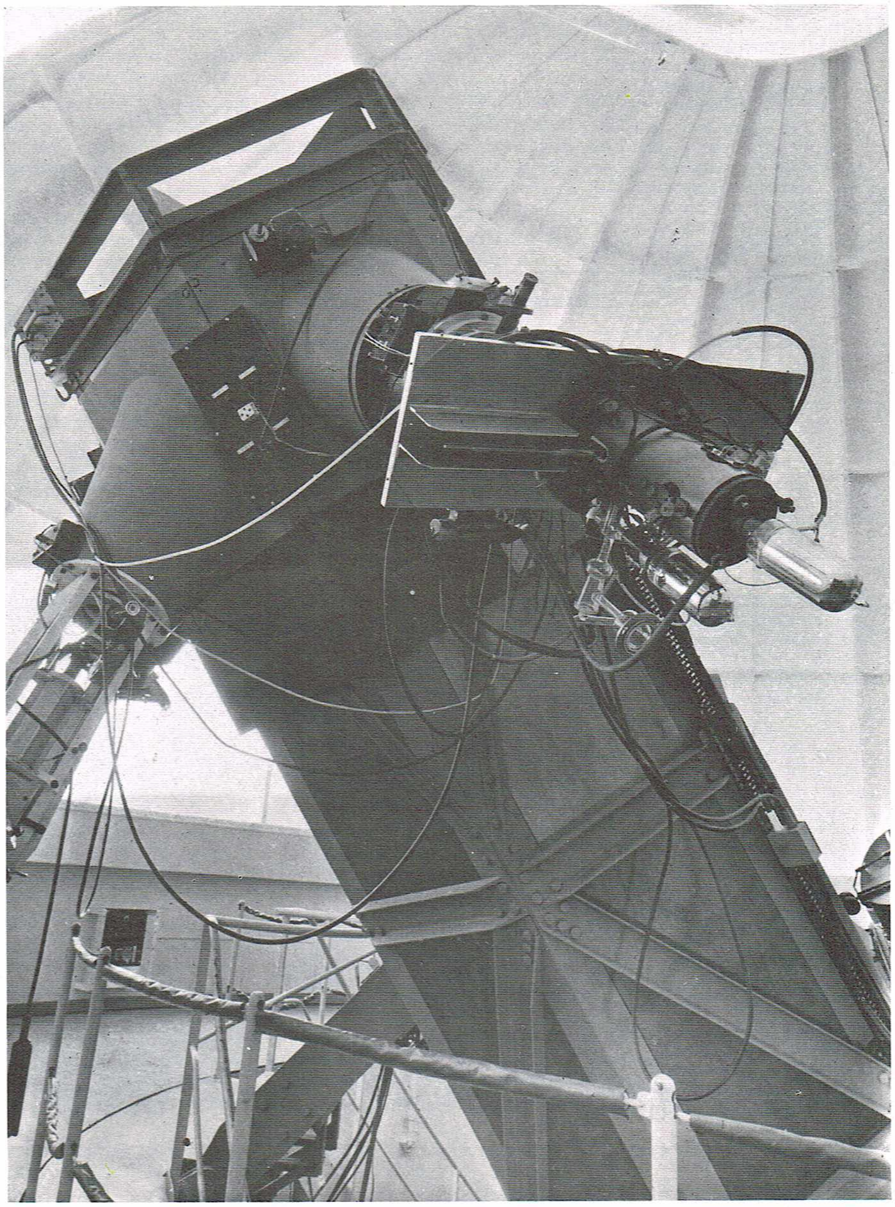

C.N.R.S. - Observatoire de Haute-Provence

▲ ***Convertisseur d'image d'A. Lallemand monté sur le télescope de 120 cm de l'Observatoire de Haute-Provence.***

Les spectrographes

Comme nous l'avons déjà indiqué, la lumière est constituée par des radiations de fréquences diverses, que nous classons de l'ultraviolet au rouge en passant par toutes les couleurs de l'arc-en-ciel : violet, indigo, bleu, vert, jaune, orange et rouge, les longueurs d'onde variant de 0,4 μm à 0,8 μm. La décomposition est faite par le spectrographe. Cet instrument est constitué par une fente fine sur laquelle on projette l'image donnée par le télescope de l'astre à étudier. La lumière qui diverge à partir de la fente est rendue parallèle par un objectif nommé collimateur; elle tombe ensuite sur un prisme qu'elle traverse. A la sortie, les faisceaux, de longueurs d'onde diverses, sont dispersés, les radiations violettes étant beaucoup plus déviées que les radiations rouges.

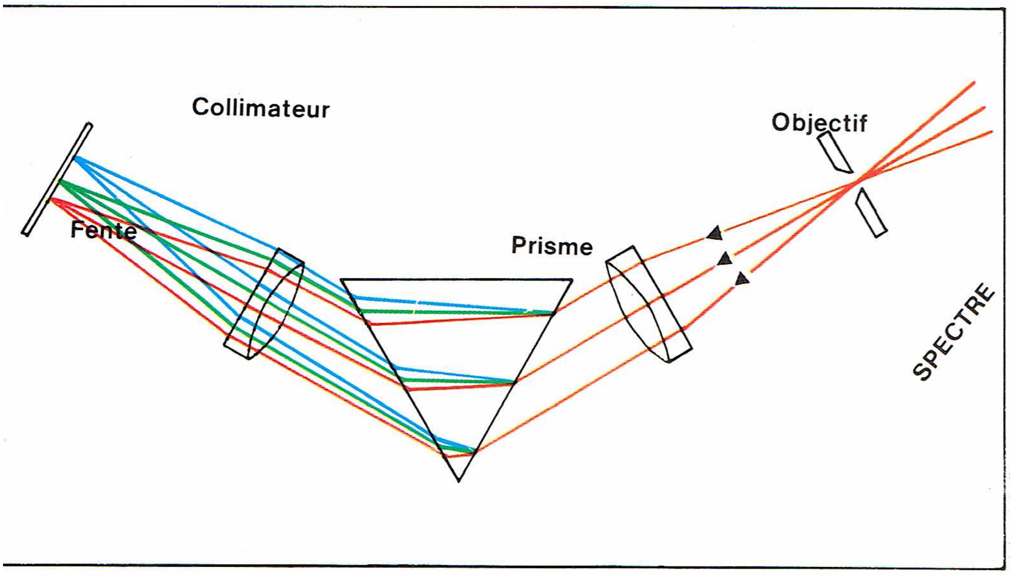

Richard Colin

▼ *Ci-dessous schéma du spectrographe coudé du télescope de 193 cm de l'Observatoire de Haute-Provence (C.N.R.S.).*

Ci-dessous, au centre, le spectrographe au foyer coudé du télescope de 193 cm. C'est un instrument de grande dimension, pesant environ 2 tonnes. Il comprend deux réseaux de 15 sur 20 cm comportant 240 000 traits pour le plus dispersif, et cinq chambres photographiques. Il existe 14 combinaisons possibles entre les réseaux et les chambres; le passage de l'une à l'autre demande quelques secondes.

Un objectif reprend la lumière qui sort du prisme, et dans son plan focal se forme ce qu'on nomme le spectre optique de la source. Si la source ne comprend qu'une radiation, on observe uniquement une raie ayant la couleur de la source. Cette raie est une image de la fente. Le spectre doit être considéré comme la juxtaposition côte à côte de toutes les images monochromatiques de la fente, classées par ordre croissant de longueurs d'onde. Il est possible d'éclairer une partie de la fente par une source terrestre, ce qui permet de comparer le spectre stellaire avec un spectre de laboratoire. Le spectre de comparaison que l'on utilise est l'arc au fer ou des tubes de décharges divers (néon, argon, etc.). Les longueurs d'onde de ces raies ont été déterminées avec précision par les physiciens. La mesure du spectre obtenu fournit ainsi les longueurs d'onde des raies stellaires.

On constate que les spectres des astres sont de deux types bien différents. La très grande majorité des étoiles montre un spectre continu sillonné de raies obscures, nommées raies d'absorption; le spectre du Soleil est de ce type. Les nébuleuses présentent, en général, des raies brillantes assez analogues au spectre des tubes luminescents contenant de l'hydrogène, du néon, etc.

La spectrographie astronomique a fait de très grands progrès depuis que l'on dispose de réseaux de diffraction. Ces réseaux, dont les premiers ont été tracés au début de ce siècle par Rowland aux États-Unis, sont maintenant fabriqués commercialement. Un réseau est constitué par un disque de silice sur lequel on a déposé une couche d'aluminium. Celle-ci est rayée par un diamant qui y trace des sillons équidistants, au nombre de plusieurs centaines par millimètre. Pour les réseaux modernes, ces sillons ont un profil déterminé. Des réseaux ayant une partie rayée mesurant 200 à 300 mm sont maintenant communs. Ils peuvent comporter plus de 300 000 traits parallèles. Une étude montre que ces réseaux permettent de construire des spectrographes donnant des spectres beaucoup plus lumineux que ceux obtenus avec des prismes. Elle montre aussi que la luminosité augmente avec la dimension des réseaux. Ces instruments, très grands et très lourds, ne peuvent être installés qu'à poste fixe dans un laboratoire situé au sud du pilier du télescope. C'est un système de miroirs qui amène la lumière depuis le miroir principal (foyer Coudé). Ces grands instruments sont utilisés surtout pour l'étude détaillée des spectres d'étoiles relativement brillantes. Ils montrent quelquefois des dizaines de milliers de raies d'absorption qu'il est possible de mesurer avec précision.

On essaye de plus en plus, et quelquefois avec des succès considérables, de remplacer l'enregistrement photographique par un enregistrement photo-électrique. On utilise de nombreux instruments qui sont soit des spectrophotomètres, soit des interféromètres dont certains sont basés sur l'analyse mathématique de Fourier et qui ont permis d'obtenir des spectres infrarouges d'une qualité inespérée.

Pour les étoiles faibles et surtout les nébuleuses gazeuses et extragalactiques, on ne peut obtenir de grandes dispersions car ces astres ne nous envoient pas assez de lumière. On construit pour les étudier de petits spectrographes donnant des spectres qui ne mesurent que quelques millimètres de long et que l'on enregistre à l'aide de la caméra électronique ou de tubes-images.

Le prisme objectif

Le spectrographe à fente est un instrument très précis mais la quantité de lumière transmise au récepteur est très petite à cause, notamment, de la finesse inévitable de la fente. Depuis le début de ce siècle, on utilise un autre instrument : le prisme objectif, constitué par un prisme disposé devant un objectif photographique ou devant la lame d'un télescope de Schmidt. Dans ces

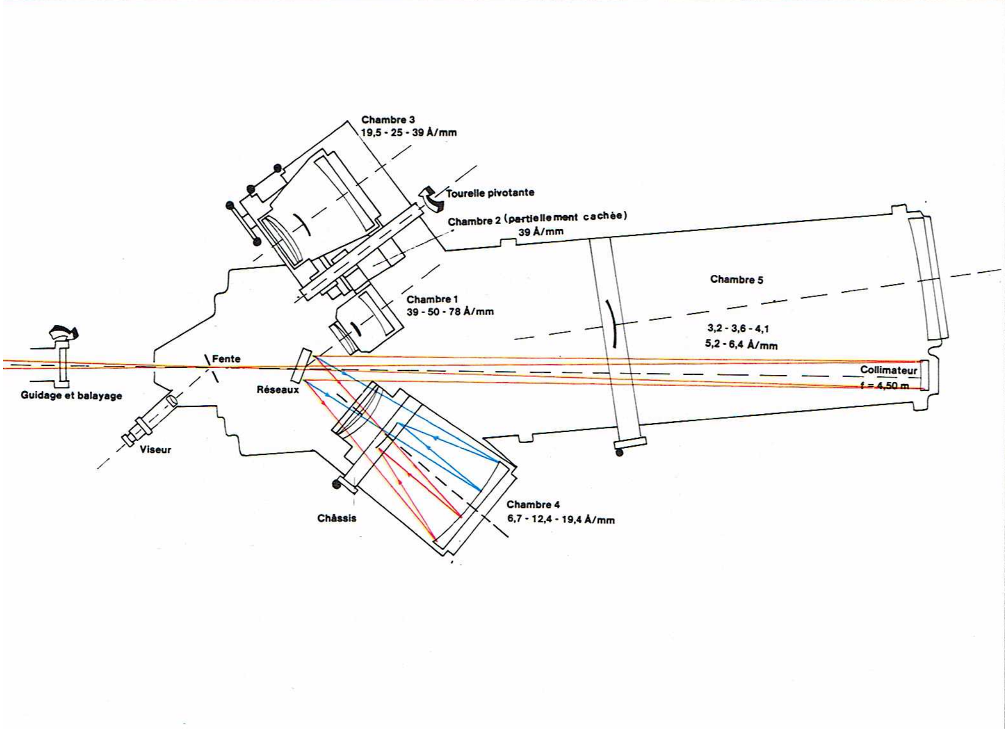

Redessiné Richard Colin

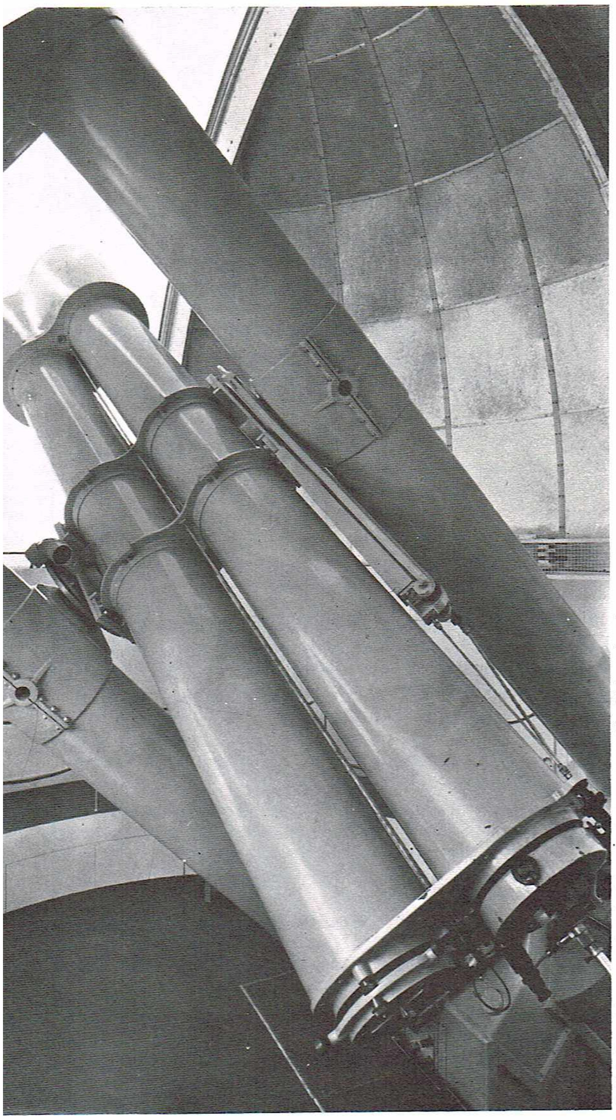

C.N.R.S. - Observatoire de Haute-Provence - Ch. Fehrenbach

conditions, chaque image stellaire est remplacée par un spectre. Cet instrument, très lumineux, permet d'obtenir en même temps les spectres de milliers d'étoiles. Les spectres, moins nets, ne peuvent pas être étalonnés en longueurs d'onde. Cet instrument, sous une forme spéciale, composé de deux prismes et à vision directe, permet néanmoins de reconnaître les étoiles à grandes vitesses radiales et même de mesurer ces vitesses (prisme objectif à champ normal de Fehrenbach).

Revenons à la description des spectres. Si l'on projette sur la fente du spectrographe l'image d'une source chauffée comme un filament de lampe ou l'intérieur d'un four, on constate la présence de toutes les radiations et l'on a affaire à un spectre continu. Son étude est maintenant bien faite, et la répartition de l'intensité de la lumière dans le spectre permet de déterminer la température de la source. Une source froide a son maximum d'émission dans le rouge; elle est située pour T = 3 000 °K vers 1,1 μm, et pour T = 6 000 °K à 0,55 μm.

Le spectre de la lumière émise par une flamme ou un gaz incandescent est tout à fait différent. Ainsi, dans le domaine visible, la flamme du gaz dans laquelle on a mis un peu de sodium, sous forme de sel de cuisine, devient jaune. Le spectrographe montre que la flamme émet deux raies dont les longueurs d'onde, très voisines,

◀ ***Grand prisme objectif à champ normal de 40 cm de diamètre. L'un des tubes est une lunette de guidage de 26 cm de diamètre, l'autre comprend un objectif photographique devant lequel est disposé un prisme composé en Flint et Crown Baryum pour la mesure des vitesses radiales des étoiles.***

◀ ***Page ci-contre, en haut, représentation schématique d'un* spectrographe à prisme.**

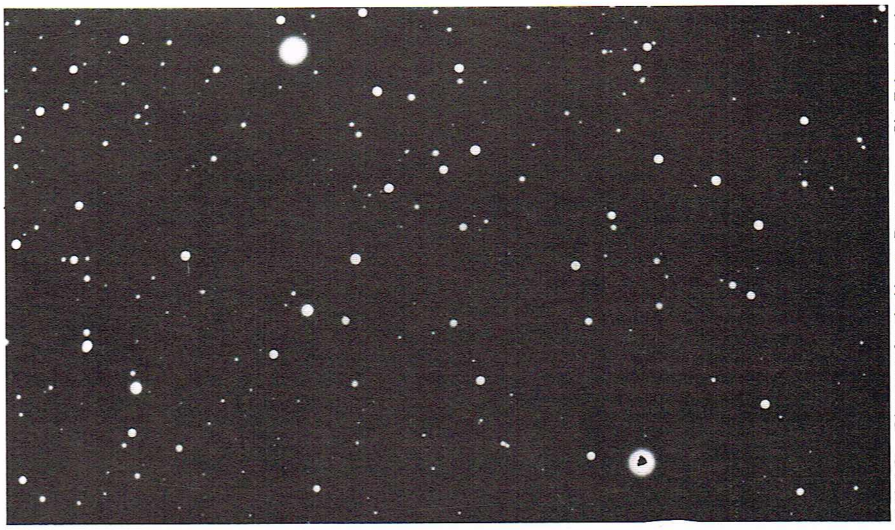

C.N.R.S. - Observatoire de Haute-Provence - Ch. Fehrenbach

▲ ***Ci-dessus, photographie directe d'un champ stellaire dans la constellation d'Orion. Les deux étoiles sont ζ et ε Ori.***

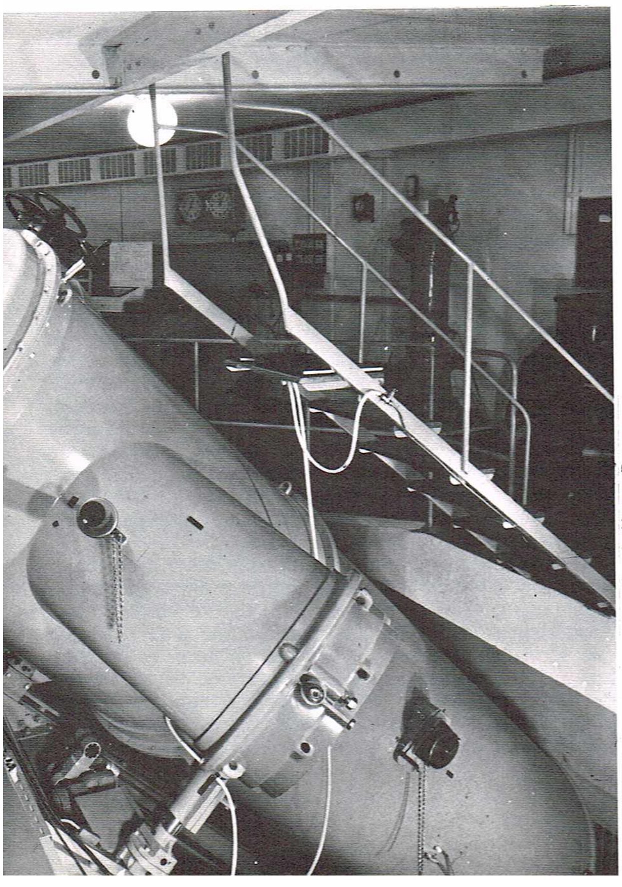

C.N.R.S. - Observatoire de Haute-Provence

▼ ***Photographie de ce même champ, mais prise à l'aide du petit prisme objectif. L'image des étoiles brillantes est remplacée par un spectre (le violet à gauche, le bleu à droite). Les raies noires montrent la présence de certains corps, notamment de l'hydrogène.***

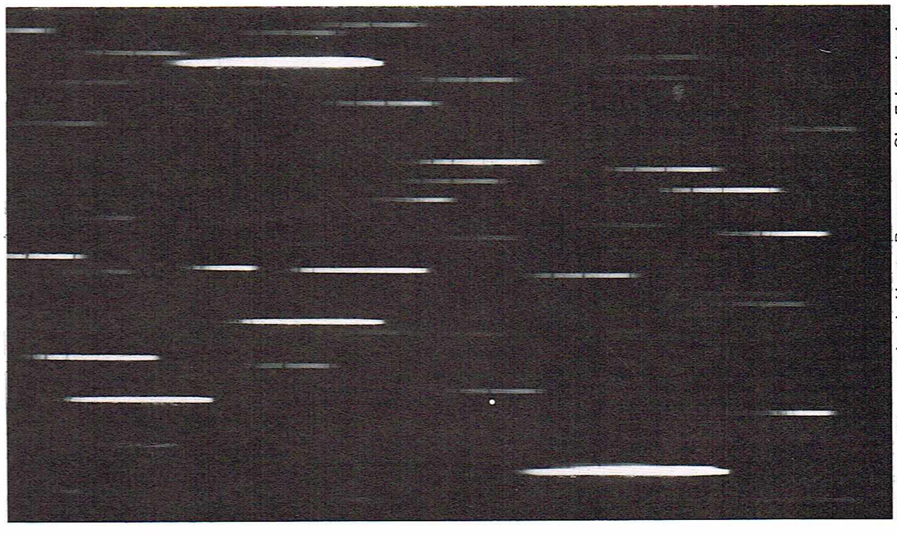

C.N.R.S. - Observatoire de Haute-Provence - Ch. Fehrenbach

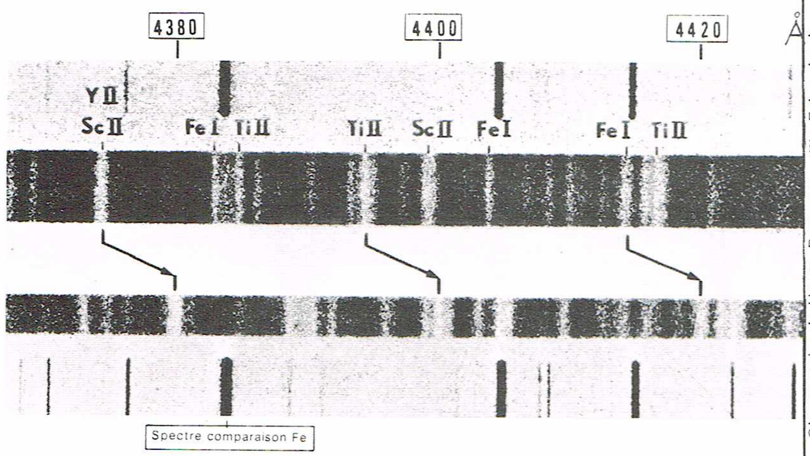

C.N.R.S. - Observatoire de Haute-Provence - Ch. Fehrenbach

▲ *Montage de deux spectres : une étoile de la Galaxie, en haut, et une étoile du Grand Nuage de Magellan, en bas. Sur le premier spectre, les raies du fer de l'étoile sont légèrement déplacées vers les petites longueurs d'onde (vers la gauche du cliché), sur le second spectre, elles sont nettement déplacées vers les grandes longueurs d'onde (vers la droite du cliché). Ce déplacement est dû à la vitesse radiale.*

▶ *En haut, représentation schématique d'un radiotélescope ; le rayonnement hertzien, capté et concentré sur l'antenne par le réflecteur parabolique, arrive à l'enregistreur. Au-dessous, principe de fonctionnement d'un interféromètre stellaire ; les radiations lumineuses émises par une étoile sont captées et focalisées par une série de miroirs, le résultat étant identique à celui qu'on obtiendrait si les deux miroirs qui recueillent les radiations étaient les éléments d'un unique grand réflecteur parabolique.*

sont très bien connues. Il s'agit là d'un cas simple. L'arc au fer présente des centaines, voire des milliers de raies, mais toutes à des places bien définies dans le spectre et toutes caractérisées par leur longueur d'onde. Chaque atome est caractérisé par un spectre bien défini, que le chimiste utilise pour identifier les éléments.

Depuis les mémorables expériences de Kirchhoff et Bunsen, on sait produire des spectres à raies d'absorption ; il suffit que les rayons provenant de la source à spectre continu traversent une flamme de sodium, ou un tube fluorescent, pour voir apparaître des raies d'absorption exactement aux mêmes endroits où se formaient les raies d'émission des atomes de sodium de la flamme. Le spectre du Soleil est de ce type ; nous verrons qu'il faut supposer qu'il existe, autour du Soleil, une sorte d'atmosphère gazeuse qui produit les raies d'absorption.

L'effet Doppler-Fizeau

Une longueur d'onde correspond à une fréquence N bien définie, et nous pouvons supposer que l'observateur qui reçoit la lumière monochromatique d'un atome reçoit par seconde ces N trains d'ondes. Ces ondes nous arrivent à la vitesse de la lumière (300 000 km/s). Si l'observateur va au-devant de la source avec une vitesse V, il recevra plus d'ondes. Le nombre d'ondes reçues est augmenté de $n = \frac{V}{c}$ (c étant la vitesse de la lumière), comme le montre un raisonnement simple. Cela provoque une diminution de longueur d'onde. On a pris l'habitude de compter les vitesses positivement lorsque la source s'éloigne. Cette vitesse s'appelle la vitesse radiale, car il s'agit de la projection de la vitesse sur le rayon lumineux. Avec ces conventions, l'augmentation de la longueur d'onde est donnée par la formule

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{V}{c}.$$

Le raisonnement montre que l'effet est le même si la source ou l'observateur s'éloignent. Cependant, la formule citée n'est qu'une première approximation, suffisante sauf pour les nébuleuses extragalactiques lointaines : la formule véritable est alors donnée par la théorie de la Relativité :

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{1 + \frac{V}{c}}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}.$$

Les radiotélescopes

Pour l'observation des ondes hertziennes, on utilise des télescopes analogues aux télescopes optiques ; mais, naturellement, le récepteur disposé au foyer est un petit dipôle dont on mesure la tension par des dispositifs électroniques. De nombreuses améliorations ont été réalisées sur ces récepteurs, et l'on utilise maintenant des amplificateurs à maser, extrêmement sensibles.

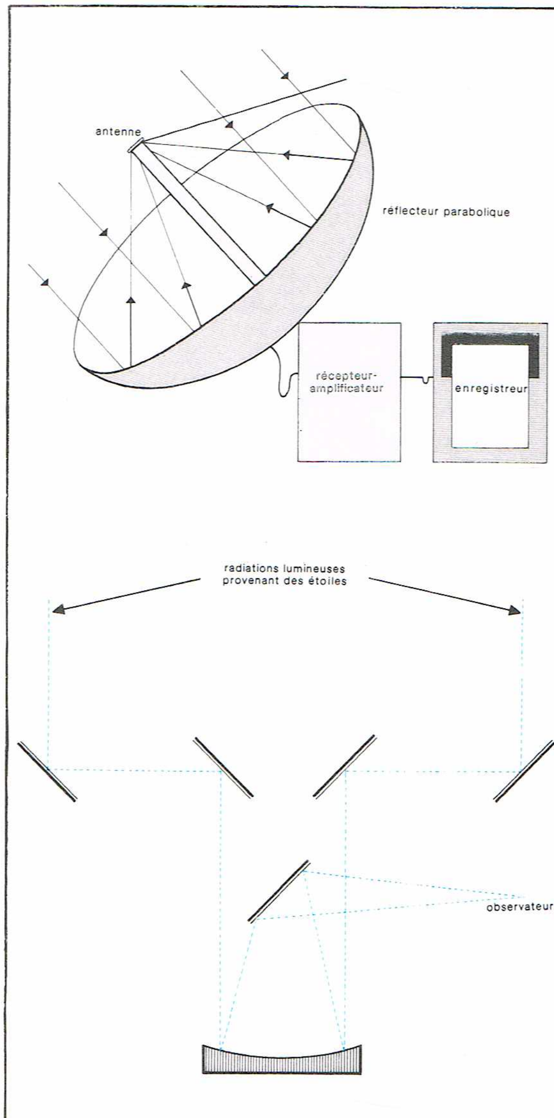

I.G.D.A.

La grande difficulté de ces instruments provient de la nature même du rayonnement électromagnétique ; nous avons indiqué qu'un télescope de 13 cm de diamètre donnait des images de 1″ d'arc de diamètre. En fait, la formule véritable, établie depuis plus de 150 ans par la théorie de la diffraction, est :

$$\rho = \frac{1{,}22\,\lambda}{D}$$

de sorte qu'on peut dire que le pouvoir séparateur de 1″ correspond à un télescope dont le diamètre est de 250 000 longueurs d'onde (en effet, la longueur d'onde effective de la lumière visible est de 0,55 μm). Pour obtenir le même pouvoir séparateur avec des ondes de 1 m de longueur d'onde, il faudrait donc un télescope de 250 km de diamètre, ce qui est irréalisable. Inversement, un bon télescope de 50 m de diamètre ne permettra d'obtenir que des images de 5 000″ ou 1°,4. Avec ce télescope, on ne pourra pas constater que le Soleil a un diamètre apparent. Naturellement, la précision des positions mesurées sera aussi très médiocre. Ces circonstances ont rendu, au début, les identifications des sources radios avec les sources optiques très difficiles.

Mais grâce aux grandes possibilités de la radio-électricité, on a trouvé des méthodes pour améliorer considérablement le pouvoir séparateur. La première solution a consisté à construire des interféromètres et plus tard des séries de télescopes disposés en ligne et agissant comme des réseaux. Par exemple, 20 ou 30 récepteurs de 10 m de diamètre, disposés sur une ligne, permettent d'augmenter le pouvoir séparateur comme si le télescope avait pour diamètre la base complète. L'interconnexion

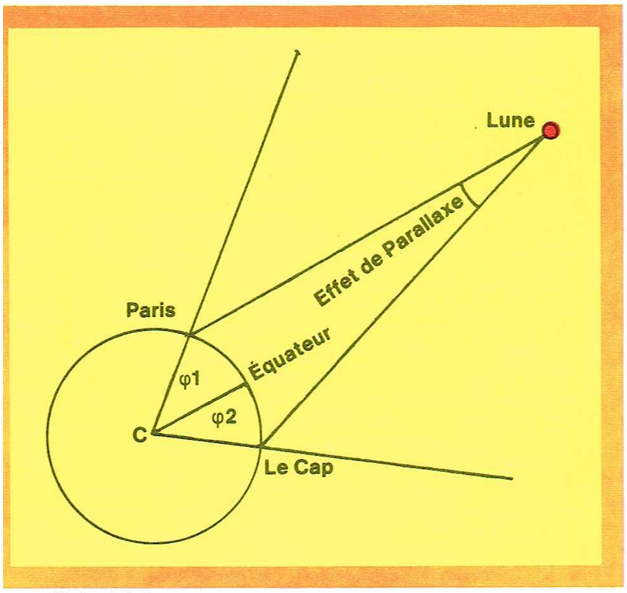

Richard Colin

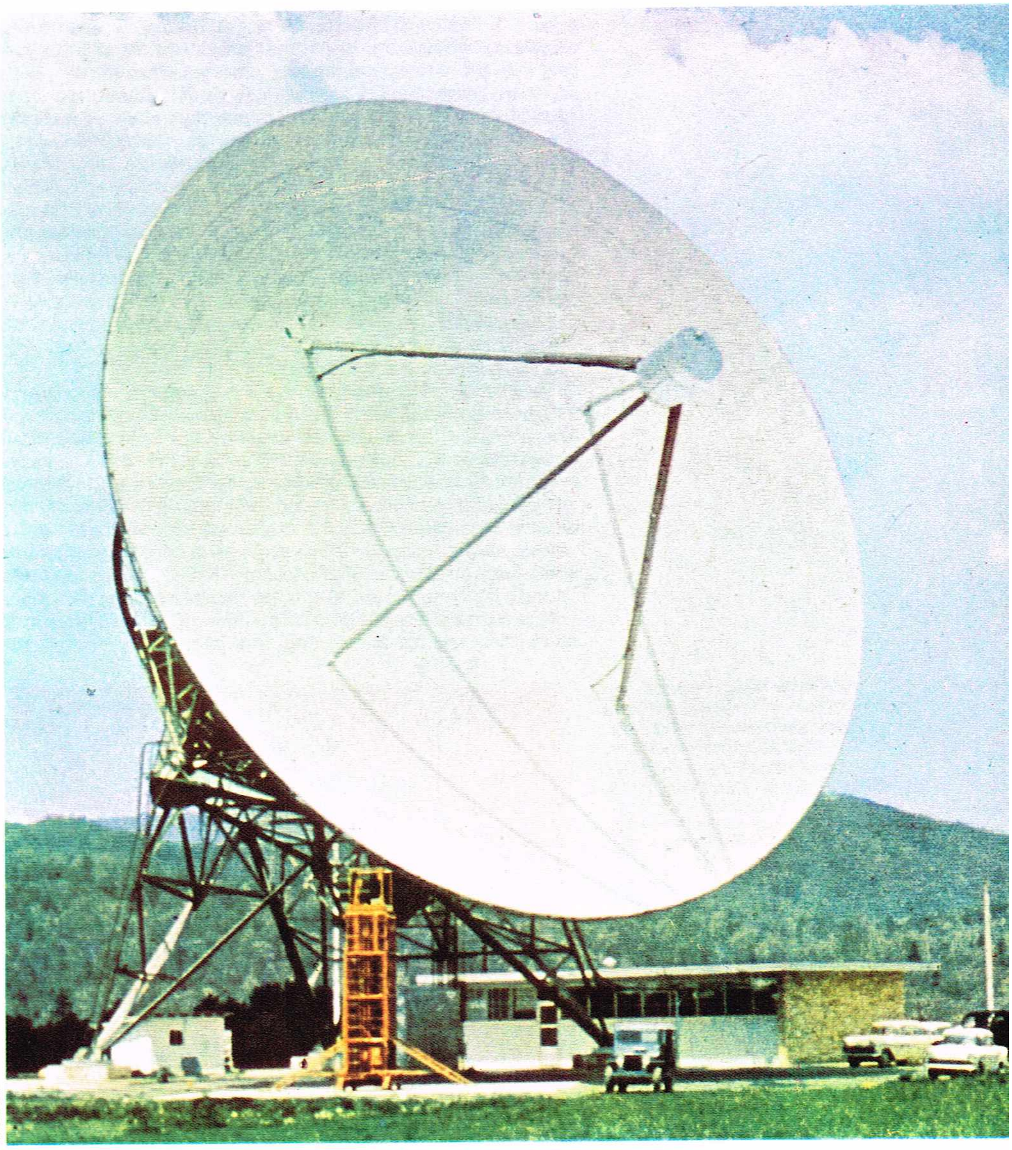

Radaelli

des récepteurs peut être réalisée avec des câbles coaxiaux de même longueur, de sorte que l'addition des signaux se fait en phase. Cette possibilité n'existe que très difficilement en optique. Plus tard, on a disposé les récepteurs en croix pour obtenir le même pouvoir séparateur dans deux directions.

Mais l'amélioration la plus importante a été celle mise au point par M. Ryle, prix Nobel de physique en 1974 avec Hewish. Cette fois, le récepteur de base est fixe et on peut lui associer un récepteur susceptible d'occuper par rapport à lui toutes les positions possibles de façon à couvrir une très grande surface. On mélange les deux signaux et on enregistre l'intensité et la différence de phase. Puis le calcul, effectué par un très gros ordinateur, permet de reconstituer le signal. En optique, cette opération se fait automatiquement avec le télescope. Il n'est pas possible d'indiquer ici les très nombreux dispositifs utilisés. Il suffit de disposer le récepteur sur une base est-ouest et de se servir ensuite du mouvement de la Terre pour couvrir, aussi, en 6 heures d'observation, la direction perpendiculaire. Le déphasage permet ainsi d'examiner un champ assez considérable. Cette synthèse d'ouverture a permis maintenant d'atteindre des pouvoirs séparateurs de l'ordre de 20″ ainsi que des localisations, et peut-être même plus précises qu'en optique. Nous verrons plus loin les résultats extraordinaires obtenus grâce à ces techniques.

La distance de la Lune et du Soleil

Deux observateurs situés en deux points éloignés de la Terre ne verront pas la Lune dans la même direction. Dans le cas général, on nommera *parallaxe* l'angle que font ces deux directions. De façon plus précise, la parallaxe de la Lune est l'angle sous lequel on voit le rayon équatorial de la Terre lorsqu'on est placé au centre de la Lune.

Un observateur placé sur la surface de la Terre ne verra pas la Lune dans la même direction qu'un observateur fictif situé au centre de notre planète. L'effet est maximal lorsque la Lune est située à l'horizon pour l'observateur situé sur la surface. Il est alors égal à la parallaxe lunaire. L'effet varie avec le mouvement diurne ; il est nul lorsque la Lune est au zénith. Cette variation au cours du jour explique pourquoi l'on parle de parallaxe diurne.

D'après ce qui précède, on comprend qu'il est possible de mesurer la parallaxe de la Lune en déterminant simultanément la distance zénithale ou la déclinaison de la Lune en deux points de la Terre aussi éloignés que possible. Si les lieux sont à la même longitude terrestre, les calculs seront facilités.

La mesure a été faite avec précision, en 1752, par Lalande, qui observait à Berlin, et par La Caille au Cap. La valeur qu'ils ont obtenue (57′11″) est très voisine de la valeur maintenant admise : 57′2″,6. A cette valeur correspond la distance moyenne D = 60,27 rayons terrestres, ou 384 404 km. Cette mesure a été confirmée

▲ A gauche, représentation schématique de la parallaxe de la Lune. A droite, radiotélescope Howard R. Tatel, de 25 m, du National Radio Astronomy Laboratory de Green Bank (États-Unis).

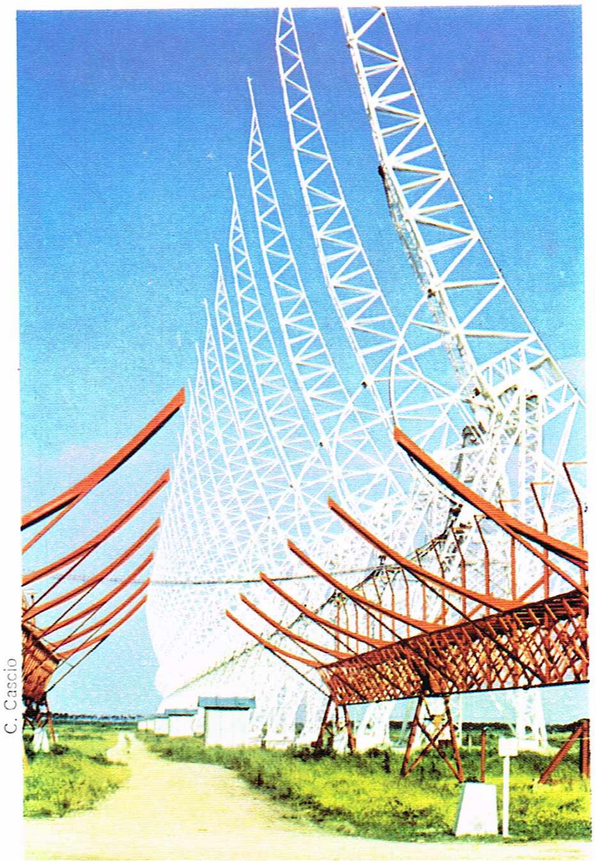

C. Cascio

◄ Radiotélescope, Croce del Nord, près de Medicina (province de Bologne, Italie).

par une mesure directe. On a, en effet, déposé sur la Lune des réflecteurs, constitués par des prismes renvoyant la lumière dans la direction d'où elle provenait. Cette lumière était constituée par de brefs éclairs de laser focalisés par de grands télescopes. On observe la durée du trajet aller et retour qui est un peu supérieure à 2 secondes. Il est possible de mesurer ce temps avec une précision telle que la distance peut être calculée à 20 cm près. Cela ne permet pas de connaître la distance de la Lune avec une précision aussi bonne car la localisation du réflecteur n'est pas assez bien connue; néanmoins, la distance obtenue est plus précise que les anciennes valeurs. On pense observer les variations de distances très petites. Elles seront du plus haut intérêt pour l'étude du mouvement de la Lune et des lois fondamentales de la physique.

Les considérations que nous venons de développer sont naturellement valables pour d'autres astres du système solaire. La mesure est imprécise pour le Soleil, dont la parallaxe est de l'ordre de 9″. Mais en 1931, la petite planète Éros était très proche de la Terre, à une distance que l'on a pu calculer avec précision en unités astronomiques (environ 0,17 unité astronomique). On a mesuré sa parallaxe : à la valeur de 52″ correspond une parallaxe solaire de 8″,794 et de 149 600 000 km pour l'unité astronomique. On a pu aussi mesurer le temps d'écho d'une émission radar sur Vénus, et la valeur de la parallaxe solaire a été ainsi confirmée.

▶ *Représentation schématique des orbites de la Terre, d'Éros et de Mars, montrant la proximité d'Éros de la Terre en 1975.*

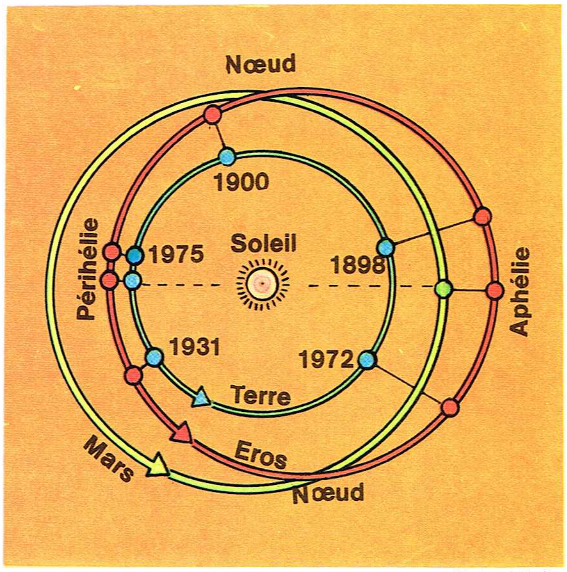

Richard Colin

▼ *A gauche, représentation graphique de la notion de vitesse relative : $\vec{V}_S$, vitesse du Soleil; $\vec{V}_E$, vitesse de l'étoile; $\vec{V}$, vitesse relative étoile-Soleil; à droite, projection de la vitesse relative étoile-Soleil : 1, sur le rayon lumineux (vitesse radiale V_r); 2, sur le plan tangent au ciel, V_t vu sous l'angle μ (mouvement propre).*

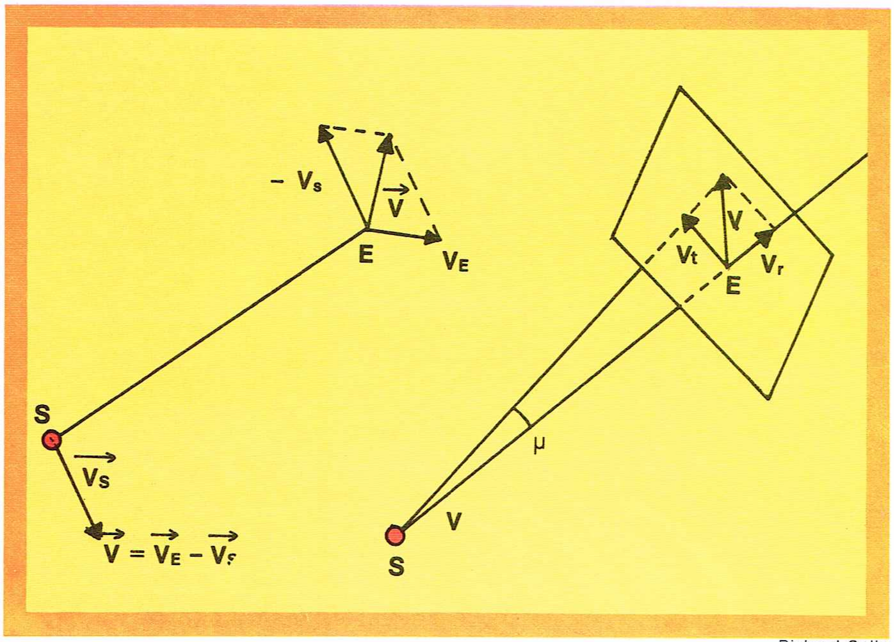

Richard Colin

La position et la distance des étoiles

Les catalogues d'étoiles, les mouvements propres

Un catalogue d'étoiles est une liste d'étoiles qui donne leurs positions dans le ciel avec une indication de leurs éclats. L'idée de dresser de tels catalogues est très ancienne : en 129 avant J.-C. Hipparque en a terminé un qui comprenait 850 étoiles (et non 1 080, comme on le dit souvent). On pense que cette idée lui est venue cinq années plus tôt, lorsqu'il a observé une étoile nouvelle.

C'est en comparant ses positions avec quelques-unes indiquées par Timocharis d'Alexandrie, 150 années plus tôt, qu'il découvrit la précession des équinoxes. Ce catalogue a été très utile à Ptolémée et, au XVIII[e] siècle, à Halley. Cet ancien catalogue donnait les positions en longitude et latitude écliptiques. Les catalogues modernes les donnent en ascension droite et déclinaison qui sont les résultats immédiats des observations.

On distingue les catalogues suivant leur but; ceux qui donnent les positions avec une très grande précision sont nommés *catalogues fondamentaux.* Ils ne contiennent qu'un nombre relativement faible d'étoiles, mais celles-ci sont observées par de nombreux observateurs à des intervalles réguliers et avec la plus grande précision possible. L'étude des variations de ces coordonnées permet de déterminer les mouvements fondamentaux des plans de référence, c'est-à-dire la précession des équinoxes et la nutation.

Celles-ci déterminées, on peut s'affranchir pour chaque étoile de ces mouvements et on constate alors que les étoiles ont elles-mêmes des petits mouvements qu'il est possible d'assimiler à des petites variations uniformes en ascension droite et déclinaison. La variation par an porte le nom de *mouvement propre* de l'étoile. Avec les méthodes de dépouillement normalement utilisées, la moyenne des mouvements propres du catalogue est nulle. Les mouvements propres sont toujours très petits, en général de quelques centièmes de seconde par an. Cet effet s'explique par le mouvement relatif du Soleil et de l'étoile. On a l'habitude de projeter cette vitesse relative sur la direction de l'étoile (on nomme cette quantité *vitesse radiale*) et sur le plan tangent au ciel. Le mouvement propre sera calculé en divisant le trajet annuel par la distance de l'étoile.

Les premiers catalogues précis de position remontent à la première moitié du XVIII[e] siècle. Celui de Lalande comprenait 47 000 étoiles, celui de Bessel 62 000. Ils furent complétés vers 1850 par le catalogue d'Argelander, qui avait pour but de faire l'inventaire des étoiles jusqu'à la magnitude 9; il porte le nom de B.D. *(Bonner Durchmusterung).* Ces observations ont été étendues à l'hémisphère austral par le catalogue dressé à Cordoba en Argentine (C.D.) et par le catalogue photographique du Cap (C.P.D.). Mais ces catalogues sont plutôt des index que des catalogues précis. Les étoiles de ces trois catalogues ont été observées par dix-huit observatoires.

Le *catalogue de l'Astronomische Gesellschaft* (A.G.) contient 146 000 étoiles boréales et 129 000 étoiles australes. La précision est de l'ordre de 0″,6. La réobservation de ce catalogue est en cours et permettra de déterminer des mouvements propres de toutes ces étoiles. La carte photographique du ciel, entreprise sur la proposition de l'Observatoire de Paris, devait comprendre toutes les étoiles jusqu'à la magnitude 14. Ce travail n'est pas achevé et il ne le sera pas : il existe deux millions d'étoiles plus brillantes que la 14[e] magnitude.

Les catalogues fondamentaux (FK1 à FK4) ne contiennent que quelques milliers d'étoiles (le FK3 en contient 1 587), mais elles ont été observées avec toute la précision possible. Ce sont ces catalogues qui définissent les systèmes de coordonnées des autres catalogues. Le *catalogue N30 de Morgan,* qui contient 5 268 étoiles, est de la même classe. Le *General Catalogue de Boss* comprend 33 342 étoiles. Il n'est pas réduit aux FK mais à une liste préliminaire de 627 étoiles; il est un peu moins précis. Le *catalogue du Smithsonian Astrophysical Observatory* (S.A.O.) réunit en un seul catalogue les informations prises dans tous ceux que nous avons cités. Il contient les données pour 259 000 étoiles. C'est une compilation et non un catalogue au sens noble du terme car ses indications ont des valeurs variables suivant leur origine.

L'établissement de ces catalogues est essentiel : il constitue une documentation dont la valeur augmente avec le temps et qui permettra certainement des découvertes importantes lorsque les étoiles seront réobservées et que l'on obtiendra des mouvements propres de plus en plus précis. Actuellement, l'erreur sur ces mouvements est de l'ordre de 0″,01 par an. Les mouvements propres sont en général de quelques centièmes de seconde par an. Mais on connaît de nombreuses étoiles à très grands mouvements propres : l'étoile de Barnard a un mouvement de 10″,3 par an, celle de Kapteyn de 8″,8. Il s'agit d'étoiles faibles de magnitude 9 qui sont des étoiles naines blanches très rapprochées. D'importantes listes d'étoiles à grands mouvements ont été établies, notamment par Luyten. Le *catalogue de Schorr* (E.B.L., c'est-à-dire *Lexique de mouvements propres*) contient ces mouvements pour 100 000 étoiles.

Naturellement avec le développement de l'astrophysique, des catalogues de nombreuses autres données ont été établis. Le *catalogue des types spectraux de Harvard,* nommé H.D. en l'honneur de Henry Draper, contient 225 000 types spectraux d'étoiles jusqu'à la 9e ou 10e magnitude. Il a été complété par de nombreux compléments et près de 500 000 types spectraux sont catalogués.

Le *catalogue des étoiles variables de Kukarkin,* édité à Moscou, contient dans son édition de 1971 le nom, la position et le type de variation de 20 437 étoiles variables. A cette liste, il faut ajouter plus de 6 000 étoiles dont on suppose qu'elles sont variables. Le *catalogue des vitesses radiales de Wilson* comprend les vitesses radiales de 15 106 étoiles. Il est actuellement complété, et le nouveau catalogue contiendra environ 40 000 valeurs.

Il existe des catalogues de tous les types d'étoiles, amas, amas globulaires et, naturellement, de nébuleuses extragalactiques. Des catalogues photométriques, de parallaxes, etc., enrichissent les bibliothèques de données de plus en plus nombreuses. Un problème de stockage et de dépouillement se pose : actuellement, des efforts sont faits pour l'établissement d'un centre de données stellaires ayant pour mission de centraliser les données et de les communiquer à la demande.

La distance des étoiles

Lorsque l'observateur terrestre se déplace avec la Terre en décrivant l'orbite terrestre, dont le rayon mesure 150 millions de kilomètres, il change de point de vue et il est facile de montrer que toute étoile décrit sur la sphère céleste une très petite ellipse. Le demi grand axe de cette ellipse porte, nous l'avons vu, le nom de parallaxe. Il est facile de comprendre que cette parallaxe est l'angle sous lequel on verrait, depuis l'étoile, la distance Terre-Soleil : elle est donc inversement proportionnelle à la distance de l'étoile.

Depuis le XVIIe siècle, de nombreux astronomes ont essayé de déterminer des parallaxes. La première, celle

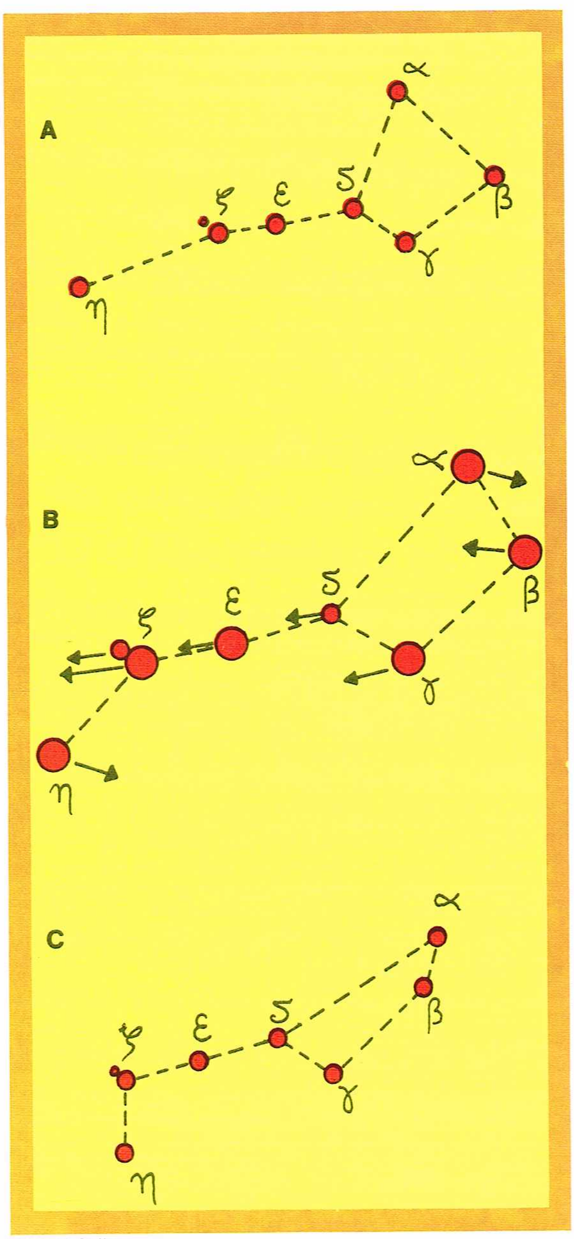

Richard Colin

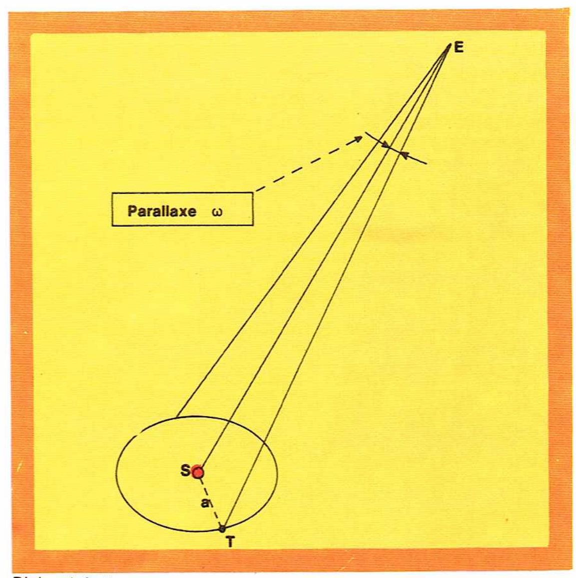

Richard Colin

◀ *Ci-contre, à gauche, sur la figure du milieu (B), est représenté l'aspect actuel de la Grande Ourse. Les flèches indiquent les mouvements propres des diverses étoiles et l'aspect de ces constellations il y a 1 000 siècles (A) et dans 1 000 siècles (C). A droite, la parallaxe ω est l'angle sous lequel on voit de l'étoile* E *le demi grand axe de l'orbite terrestre* a.

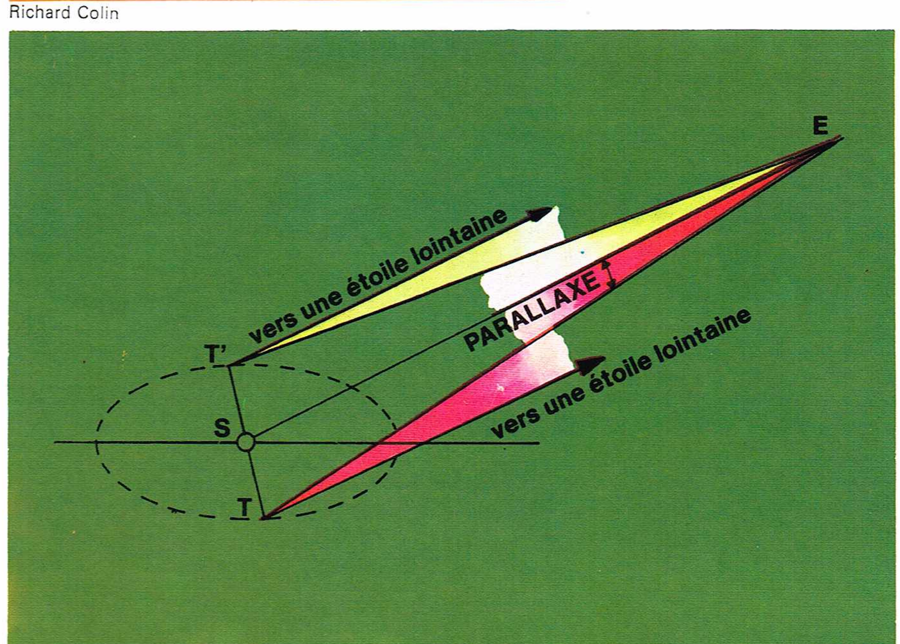

Richard Colin

▼ *La direction apparente d'une étoile varie lorsqu'on prend pour repère la direction d'une étoile lointaine.*

▶ *Le Soleil est l'étoile la plus proche de la Terre : il est situé à 150 millions de km; la constante solaire est l'énergie qui arrive par minute sur 1 cm² de surface terrestre (elle est de 2 cal · mn⁻¹ · cm⁻²).*

de 61 Cyg, fut déterminée en 1838 par Bessel. Le principe des mesures est simple : il suffit d'étudier le mouvement de l'étoile par rapport aux étoiles faibles lointaines, donc immobiles. L'observation a montré que la plus grande ellipse mesurée a un demi grand axe de 0'',75. De cette étoile, α Centauri, et de son compagnon, Proxima Centauri, l'unité astronomique (c'est-à-dire la distance Terre-Soleil) est vue sous un angle de 0'',75. Notons qu'un angle de 1'' est très petit; c'est l'angle sous lequel on voit une bille de 1 cm de diamètre placée à 2 km, exactement à 206 265 fois son diamètre.

Les distances stellaires sont très grandes, et l'on est convenu de prendre pour unité de distance celle de l'étoile à partir de laquelle l'unité astronomique est vue sous un angle de 1''. Cette distance vaut donc 206 265 × 150 millions de kilomètres. Cette distance de $30{,}9 \cdot 10^{12}$ kilomètres (30 000 milliards de kilomètres) est le *parsec*. On utilise quelquefois une autre unité : l'*année de lumière*, qui est le chemin parcouru par la lumière en un an. On calcule facilement que 1 parsec = 3,26 années de lumière. Même le parsec est une trop petite distance : on utilise souvent le *kiloparsec* et le *mégaparsec*, qui valent respectivement mille et un million de parsecs.

L'aberration

Ce phénomène est dû au fait que la lumière se propage avec une vitesse finie, de sorte que lorsque le message lumineux nous arrive, l'astre n'est plus à l'endroit où il se trouvait à l'émission. C'est O. Rœmer qui a constaté cet effet, en 1676, en observant les éclipses des satellites de Jupiter. Le but du travail qui lui avait été confié par le directeur de l'Observatoire de Paris, Cassini, était pratique : les éclipses des satellites de Jupiter se déroulent rapidement et leur observation permet de connaître le temps absolu; la comparaison avec le temps local permet de déterminer la longitude. Ces données étaient nécessaires pour établir la Carte de France.

Rœmer établit ses tables en observant les éclipses au moment où Jupiter était en opposition géocentrique, c'est-à-dire au moment où la distance Terre-Jupiter était minimale. Ces observations lui permirent de prévoir les éclipses au moment de la conjonction de Jupiter avec le Soleil : il constata que les éclipses se déroulaient bien comme prévu mais avec un retard de l'ordre de 20 mn. O. Rœmer comprit que ce retard provenait du fait qu'au moment de la conjonction Jupiter était nettement plus éloigné de la Terre. La différence des distances est égale au diamètre de l'orbite terrestre. Le temps que met la lumière pour parcourir l'unité astronomique, 8 minutes, valeur améliorée par Rœmer lui-même, s'appelle le *temps d'aberration*. Il correspond à la distance Terre-Soleil exprimée en minutes de lumière.

A l'époque de Rœmer, on connaissait déjà assez bien la distance du Soleil et il put déterminer la vitesse de propagation de la lumière; son nombre en unités modernes est voisin de la valeur actuellement admise. La valeur précise est 299 793 km/s, et le temps d'aberration est de 499,01 s.

Les astronomes tiennent compte de cette aberration dans leurs calculs des positions des corps du système solaire.

Les positions calculées sont datées en tenant compte du temps d'aberration. L'aberration existe aussi pour le Soleil, qui s'est déplacé de 20'',5 lorsque nous l'observons à sa place apparente. Il n'est pas possible d'observer cette aberration car nous ne connaissons pas la place réelle du Soleil.

L'aberration existe aussi pour les étoiles. La lumière venant d'une étoile mettra un certain temps t pour nous parvenir. Ce temps t est la distance de cette étoile exprimée en années de lumière. Si l'étoile a une certaine vitesse propre par rapport à l'observateur terrestre, l'étoile se sera déplacée de $V \cdot t$ lorsque nous la verrons dans sa position apparente. La distance angulaire sera obtenue en divisant ce déplacement par la distance; on constate que le temps s'élimine. Pour V = 15 km/s, on trouve $\varepsilon = \frac{1}{20\,000}$ soit 10''. Mais ce déplacement constant ne sera pas observable car nous ne connaissons pas la place géométrique de l'étoile.

La vitesse qui intervient dans cette théorie est la vitesse relative observateur-étoile. Le mouvement de la Terre sur son orbite entraîne une aberration variable et donc observable : l'étoile apparente est déplacée de la quantité $\frac{V}{c}$ dans la direction du mouvement de la Terre. La théorie doit être élaborée en appliquant le principe de la Relativité. La théorie complète montre qu'une étoile située au pôle de l'écliptique décrit sur le ciel un cercle de 20'',496 de rayon, alors qu'une étoile située dans le plan de l'écliptique décrit une petite droite de 2 × 20'',496 de long. Pour les latitudes intermédiaires, l'étoile décrit une ellipse. L'étoile apparente est déplacée dans le sens de la vitesse de la Terre, alors que la parallaxe déplace l'étoile dans une direction du Soleil qui fait avec la précédente un angle droit. De plus, le déplacement de parallaxe varie avec l'étoile et il est toujours très petit.

Remarquons aussi que toutes les étoiles voisines dans le ciel, qu'elles soient proches ou lointaines, sont soumises à la même aberration. Ce phénomène change seulement la distance angulaire d'étoiles très éloignées sur la sphère céleste. C'est Bradley qui découvrit cet effet, en 1726, en cherchant à mettre en évidence la parallaxe de l'étoile γ Dra. Il trouva un déplacement de l'ordre de 20'', perpendiculaire à celui qu'il cherchait. La valeur moderne due à l'observation directe est de 20'',48. Elle permet de calculer avec précision la vitesse de la Terre sur son orbite : on trouve 29,77 km/s. Avec cette valeur, on peut calculer la valeur de l'unité astronomique; on trouve 149,5 millions de kilomètres, ce qui est en excellent accord avec d'autres déterminations.

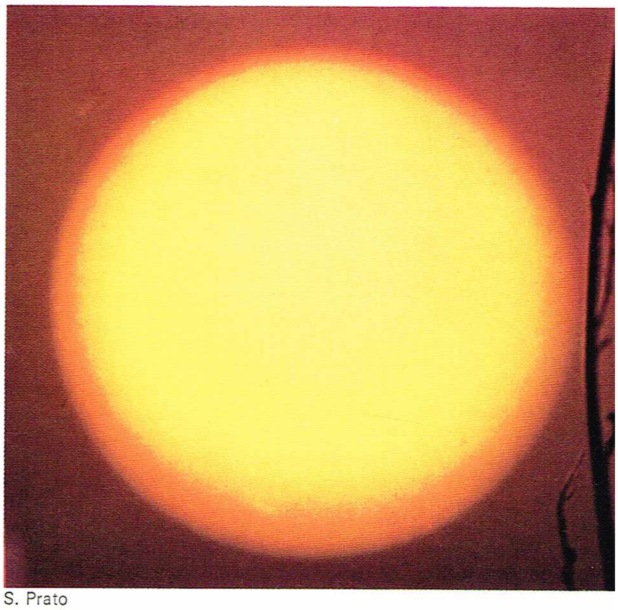

S. Prato

LE SOLEIL

Le Soleil est pour les habitants de la Terre l'astre le plus important : dispensateur de la lumière et de la chaleur, il est la source qui entretient la vie sur notre planète.

Notre connaissance physique du Soleil est assez récente. Nous savons aujourd'hui que le Soleil est une étoile parmi la centaine de milliards qui peuple notre Voie lactée. La distance et les dimensions du Soleil ne sont connues avec exactitude que depuis quelques siècles. Les Grecs pensaient que le Soleil était situé à 6 500 km et qu'il avait un diamètre de l'ordre de 50 à 60 km. Au IIIe siècle, Aristarque estimait sa distance à environ 1 million de kilomètres. Tous ces nombres sont très fortement sous-estimés. La mesure directe de la distance du Soleil est très difficile et, comme nous l'avons déjà indiqué, les dimensions du système solaire sont fixées lorsque l'on connaît une distance. C'est la distance à la petite planète Éros qui a permis une des meilleures mesures. Récemment, les résultats ont été confirmés par la mesure directe de la distance de Vénus à la Terre par radar. Le Soleil est situé, en moyenne, à 150 millions de kilomètres (le demi grand axe de l'orbite terrestre mesure exactement $149{,}6 \cdot 10^6$ km).

Le Soleil est sphérique; son diamètre apparent, vu de la Terre, est voisin de 1/2° (32′). Son diamètre est donc sensiblement égal à 1/100 de sa distance, soit exactement 1 392 000 km ou 109 diamètres terrestres.

La masse de la Terre a été mesurée directement. Elle est la fraction 1/332 958 de celle du Soleil. Il en résulte que le Soleil a sensiblement une masse de $2 \cdot 10^{27}$ tonnes. Mais sa densité moyenne est relativement faible : 1,41 contre 5,52 pour la Terre; elle est à peine supérieure à celle de l'eau, qui est de 1.

Remarque sur les valeurs numériques des données physiques dans le système solaire

Certaines données ont une précision remarquable : ce sont en général toutes les périodes des mouvements étudiés depuis la plus haute antiquité, comme l'année tropique, le mois lunaire et la durée de rotation de la Terre. Mais la mise en évidence de petites irrégularités de rotation de la Terre a nécessité des définitions nouvelles des secondes, et les périodes exprimées dans ces nouvelles unités changent. Pour cette raison, les astronomes ont adopté des systèmes d'unité cohérents, tels qu'une modification ultérieure des unités fondamentales affecte ces données de façon calculable. Les unités fondamentales sont définies en même temps et elles ne sont modifiées qu'après un accord international.

D'autres données sont imprécises, souvent à cause de la difficulté des mesures. Ainsi comment déterminer le diamètre et l'aplatissement du disque de Neptune, qui ne mesure que 2″, c'est-à-dire 50 μm dans le plan focal d'une grande lunette de 10 m de distance focale? Comment définir la période de la comète de Halley, dont le mouvement est perturbé à chaque passage près de Jupiter? Comment même connaître la masse du Soleil avec une précision extrême? L'observation donne le rapport de la masse du Soleil à celle du système Terre-Lune, mais le rapport de la masse de la Lune à celle de la Terre n'était connu qu'à 2 ou 3 °/₀₀ près.

Le lecteur ne sera donc pas surpris de constater des différences entre les données de cette Encyclopédie avec d'autres ouvrages. En principe, nous avons essayé d'adopter soit les données fondamentales de l'Union Astronomique Internationale (U.A.I.) quand elles sont définitives, soit les dernières valeurs améliorées. Par exemple suivant les auteurs, on trouve pour la masse du Soleil les valeurs 332 945, 332 958 et même 333 442 masses terrestres. La valeur que nous adoptons, 332 958, est celle de l'U.A.I. qui a l'avantage d'être dans un système cohérent, mais elle est un peu erronée depuis que les satellites artificiels ont permis de mieux déterminer le rapport des masses Terre/Lune (81,35).

L'énergie solaire

Le Soleil émet continuellement de l'énergie. Les mesures faites sur Terre montrent qu'une surface de 1 cm^2 placée à la distance Terre-Soleil reçoit 2 calories par minute (mesure supposée faite en dehors de l'atmosphère). Le calcul de l'énergie totale rayonnée par le Soleil est effectué facilement si l'on considère que chaque centimètre carré de la sphère de 150 millions de kilomètres de rayon enveloppant l'orbite terrestre reçoit cette énergie. Celle-ci est considérable : $3{,}9 \cdot 10^{33}$ ergs/s. Il est difficile de la comparer à une énergie ayant une signification pour nous. Elle correspond à l'explosion, toutes les secondes, de 100 milliards de bombes nucléaires correspondant à une mégatonne de TNT. L'énergie reçue toutes les secondes par la Terre correspond encore à 50 de ces bombes.

Si l'on assimile le Soleil à un corps incandescent (les physiciens disent un corps noir), on peut calculer que le Soleil doit avoir une température de 5 800 °K (degrés Kelvin) pour rayonner l'énergie précédente. On n'a jamais constaté de variation du débit d'énergie depuis qu'on le mesure avec précision; il est certain, d'après la géologie, que ce débit n'a pas beaucoup changé au cours des temps. Peut-être de petites variations séculaires expliquent-elles les glaciations terrestres.

Les aspects du Soleil

Il est dangereux de regarder le Soleil à l'œil nu et encore plus dangereux avec un instrument. Mais il est possible de projeter l'image sur un écran. L'image du Soleil ainsi obtenue n'est pas uniforme. On constate d'abord que le centre est environ deux fois plus brillant que le bord, lequel est net; le petit brouillage que l'on observe souvent est dû à l'agitation de l'atmosphère terrestre. On constate aussi très souvent l'existence de *taches noires* sur le Soleil. Ces taches sont quelquefois isolées, mais le plus souvent elles apparaissent par paires ou par groupes. En plus de ces taches noires, on voit de larges régions un peu plus claires, appelées des *facules*. De plus, sur d'excellentes images, toute la surface du Soleil a l'aspect d'un gâteau de riz, d'où le nom de *grains de riz* donné à cette floculation.

Les taches solaires

Une tache présente une partie centrale, l'*ombre*, entourée d'une partie plus brillante, la *pénombre*. Lorsqu'une tache est visible près du bord du Soleil, elle présente l'aspect d'une dépression. La dimension des taches est très variable, mais elle dépasse très souvent le diamètre de la Terre et certaines ont des diamètres de plusieurs centaines de milliers de kilomètres. Cela a été le cas en 1947, année où la surface tachée du Soleil mesurait plusieurs millions de km^2. Les taches solaires ne paraissent noires que par contraste. Elles sont encore très chaudes; leur température est, en effet, de l'ordre de 4 000 à 5 000 °K et leur brillance est encore égale au tiers de celle du Soleil.

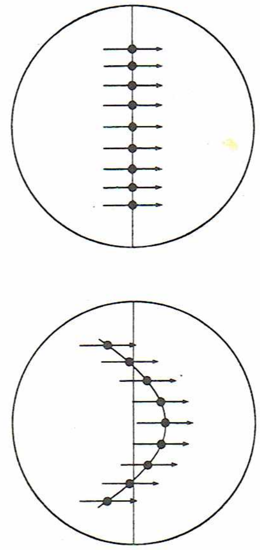

I.G.D.A.

▲ ***En marge, ces deux dessins montrent schématiquement la rotation différentielle du Soleil, les taches qui étaient alignées le long d'un méridien (en haut) occupent après une rotation complète une ligne courbe (en bas), les taches équatoriales ayant tourné plus que les taches polaires.***

▼ *Deux séries de photographies prises jour après jour; on voit de toute évidence la rotation du Soleil.*

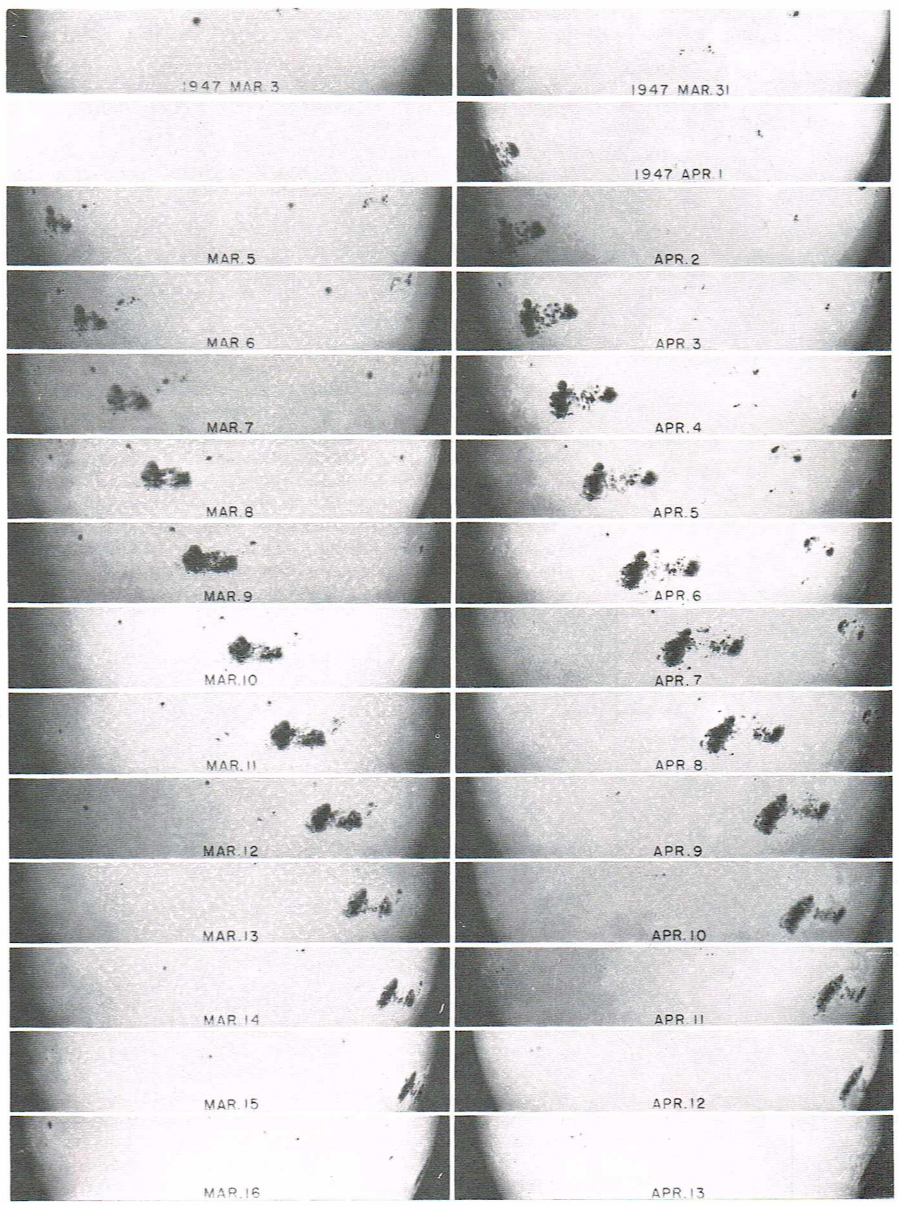

Mount Wilson and Palomar Observatories

Mount Wilson and Palomar Observatories

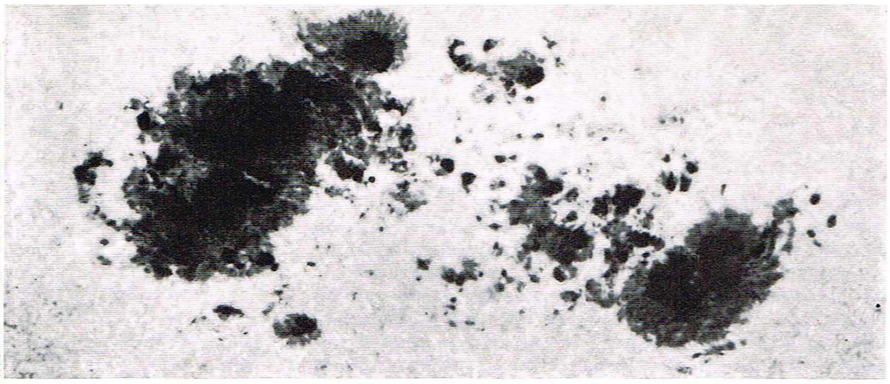

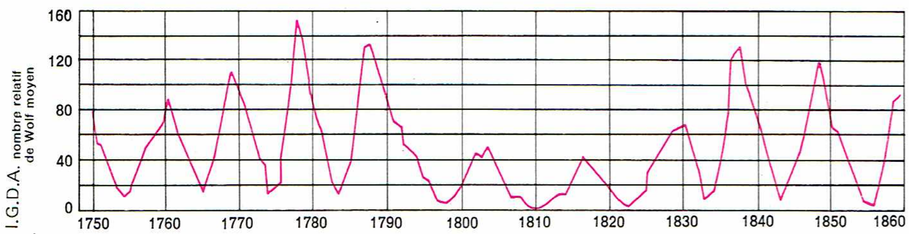

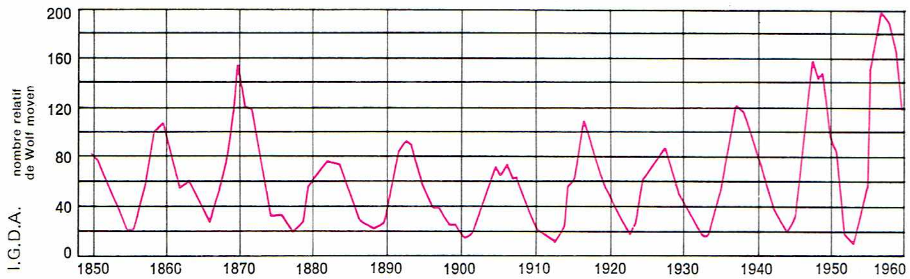

▲ ***En haut, cette grande tache correspond à l'agrandissement d'une des photographies précédentes de la série de droite (celle du 7 avril 1947, Observatoires du mont Wilson et du mont Palomar).***

Ci-dessus, représentation graphique du cycle undécennal de l'activité solaire, en fonction du nombre moyen des taches observées annuellement.

▶ ***Page ci-contre, en bas, photographie du Soleil obtenue le 21 août 1973, 90 minutes après le début d'une éruption, par la première mission Skylab à l'aide du spectrohéliographe ultraviolet du « Naval Research Laboratory ». Cette reproduction (coloriée artificiellement en laboratoire) met en évidence une proéminence en lumière de l'hélium ionisé à λ = 304 Å.***

Une observation précise des taches montre qu'elles se déplacent vers l'ouest et disparaissent sur le bord. La période apparente du Soleil est de l'ordre de 27 jours. Mais comme l'observateur terrestre se déplace, la vraie période de rotation par rapport aux étoiles est de 25,4 jours. L'axe de rotation est incliné de 7° 15′ sur l'écliptique. Un examen attentif montre que la période varie avec la distance des taches à l'équateur solaire. De 25,4 jours, elle passe à 28 jours pour des régions situées à 45° de latitude. Le Soleil ne tourne donc pas comme un solide mais comme un fluide.

Le nombre de taches varie fortement d'une année à l'autre. Les observations permanentes du Soleil depuis le XVIII^{e} siècle ont montré que ce nombre était cyclique : la période est en moyenne de 11,0 années mais elle n'est pas constante ; elle a varié entre 9 et 13 ans (on cite même des valeurs extrêmes de 7,3 et 15,0 ans). Le dernier maximum de taches a eu lieu en 1973, et nous sommes entrés dans le 21^{e} cycle historique. Le rapport entre le maximum et le minimum du nombre de taches est de l'ordre de 20. On constate qu'au début du cycle les taches apparaissent vers 30° de latitude et, au fur et à mesure que naissent de nouvelles taches, elles sont plus rapprochées de l'équateur mais cessent d'apparaître à la latitude de 5°. Les deux zones situées entre 5° et 30° de latitudes nord et sud sont appelées *zones royales*.

L'étude du spectre des taches montre qu'elles sont le siège de champs magnétiques très intenses, pouvant atteindre 1 000 à 2 000 gauss. Lorsque les taches se groupent par deux, on constate que la polarité des taches est opposée entre les deux groupes. De plus, pour un hémisphère solaire, d'un cycle au suivant, la polarité de la première tache passant au méridien solaire n'a pas le même signe. On en conclut que le vrai cycle solaire est de 22 ans. La durée de vie des taches est variable : entre quelques jours et une centaine de jours.

On sait aujourd'hui que les taches sont liées à des *tourbillons* qui se forment à l'intérieur du Soleil. Ceux-ci naissent vers les latitudes de 30° et se déplacent vers l'équateur. Lorsque ces tourbillons percent la surface solaire, ils produisent deux groupes de taches de polarité opposée : d'un cycle au suivant, le sens de rotation des tourbillons change.

Les *facules* sont des émissions de gaz qui se produisent près des taches et se déplacent sous l'action du champ magnétique des taches. Lorsqu'elles sont vues près du bord du Soleil, elles sont observables comme des protubérances que l'on peut photographier et cinématographier. Certaines ont des dimensions de l'ordre de 100 000 km.

Les *grains de riz* sont aussi des tourbillons mais se produisant à la surface du Soleil. Ils ont environ 1 000 kilomètres de côté et autant d'épaisseur ; ils évoluent en quelques minutes.

Par très beau temps, on observe sur le bord du Soleil de petits jets de gaz qui se produisent au milieu des grains de riz.

Les taches et les protubérances sont l'aspect le plus visible et le plus facilement observable de l'activité solaire. En fait, toute l'atmosphère solaire est le siège de grandes formations transitoires ; les centres d'activités peuvent couvrir des zones considérables et durer des jours ou des mois. Leur fréquence et leur importance sont variables, avec des maximums et des minimums variant à peu près avec la période undécennale des taches. Du point de vue visuel, un centre d'activité est caractérisé par un groupe de taches situé dans la photosphère et par des facules situées dans les zones plus hautes.

Les groupes de taches sont fréquemment séparés par des filaments, visibles sur le disque, et par des protubérances, visibles au bord ; dans l'un et l'autre cas, il s'agit de longues *langues de gaz* d'une hauteur de 5 000 km, pouvant atteindre une altitude de 100 000 km et même plus, et une longueur de 200 000 km. Ce sont des condensations relativement froides (20 000 °K) situées au-dessus de la chromosphère. Elles peuvent être stables pendant quelques mois, avec des périodes d'activité intense susceptibles de durer quelques heures, pendant lesquelles elles éjectent de la matière à une vitesse considérable ; celle-ci peut atteindre ou dépasser la vitesse d'évasion propre au Soleil (c'est-à-dire 620 km/s).

Enfin, durant la vie d'un centre d'activité, on observe des dizaines d'*éruptions chromosphériques,* dont la durée moyenne est d'environ une demi-heure. Ces éruptions peuvent être observées avec divers instruments, dont le plus perfectionné est le *spectro-héliographe de Lyot.* On peut aussi les étudier avec des *filtres interférentiels,* qui laissent seulement passer une bande restreinte du spectre solaire. On a observé des éruptions occupant 5/1 000 de la surface visible du Soleil.

A ces éruptions sont associées des *protubérances* d'évolution très rapide (moins d'une heure) correspondant à de très violentes expulsions de matière. Ces expulsions sont accompagnées d'intenses émissions de rayons ultraviolets et de rayons X, et d'émissions hertziennes. Elles correspondent aussi à un accroissement du rayonnement cosmique. Les particules de moindre énergie atteignent la Terre environ deux jours plus tard. Elles sont des sortes de bourrasques qui accompagnent le vent solaire continu.

La composition du Soleil

L'analyse de la lumière du Soleil par le spectrographe permet de mettre en évidence de nombreux faits, que nous pouvons seulement résumer. Le spectre continu du Soleil correspond bien à une température voisine de 5 800 °K. Mais il est sillonné de nombreuses raies d'absorption. Ces raies peuvent être identifiées avec les raies de très nombreux atomes et de quelques molécules. Une théorie ancienne indiquait que le spectre continu était formé dans une partie interne du Soleil, nommée *photosphère.* L'absorption a lieu dans une atmosphère située au-dessus de celle-ci. Cette atmosphère, qui peut être aperçue pendant les éclipses de Soleil, apparaît colorée, d'où son nom de *chromosphère.*

Approximativement, on peut dire que la lumière continue provient d'une couche de 400 km d'épaisseur, relativement dense, et que l'absorption des raies a lieu

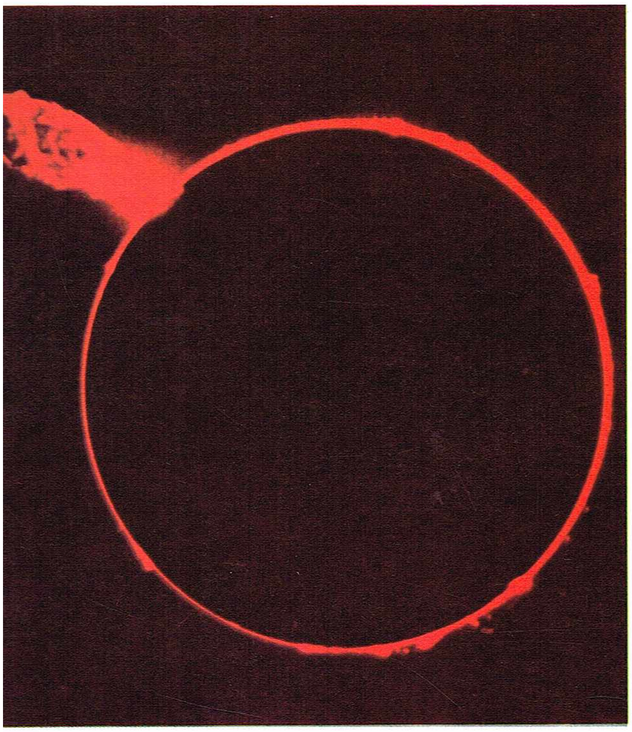

D'après son spectre, le Soleil peut être classé comme une étoile normale de la série principale et de classe spectrale G2. Comme toutes les étoiles de ce type, elle montre le spectre de quelques molécules stables, comme les molécules CH, CN et TiO.

Le Soleil : une pile atomique

Avant de décrire les parties extérieures du Soleil, il est nécessaire d'indiquer comment est produite l'énergie solaire. La température superficielle du Soleil est, on l'a vu, de 5 800 °K; mais cette température augmente vers l'intérieur en même temps que la pression, et il est possible de calculer que la température au centre doit être de l'ordre de 14 millions de degrés et la pression de 200 milliards de bars (ou atmosphères). La masse volumique au centre est de l'ordre de 100 g/cm³. (Ces valeurs sont incertaines et dépendent du modèle physique adopté. A titre d'exemple, un modèle récent donne les valeurs suivantes : 15 millions de degrés, 340 milliards de bars et 160 g/cm³.)

Dans ces conditions de température, les mouvements des atomes sont très violents et les chocs nombreux : les noyaux d'hydrogène peuvent réagir entre eux. La réaction la plus importante est la réaction de fusion : 4 noyaux d'hydrogène ou protons s'agglomèrent et donnent naissance à 1 noyau d'hélium. Il se trouve que la masse de ce noyau (4,001 49) est inférieure à la masse des 4 protons (4 × 1,007 27 = 4,029 08 en nouvelles unités atomiques pour lesquelles un atome de $_{12}C$ = 12,000 0). La différence est transformée en énergie suivant la loi d'Einstein qui établit l'équivalence matière-énergie. Le calcul montre que toute l'énergie émise par le Soleil correspond à une consommation de 600 millions de tonnes du combustible hydrogène par seconde. Quantité considérable, certes, mais petite par rapport à la masse du Soleil, qui contient assez d'hydrogène pour pouvoir rayonner au taux actuel pendant 90 milliards d'années. Indiquons que l'âge actuel du Soleil est estimé à 5 ou 6 milliards d'années. Ces réactions thermonucléaires ne se passent qu'au centre du Soleil et l'énergie émise est formée essentiellement

◄ *La chromosphère, visible seulement au début et à la fin d'une éclipse totale de Soleil, a une hauteur de 10 000 km environ; elle est le siège de très importants phénomènes, notamment les spectaculaires protubérances, dont l'illustration donne un exemple.*

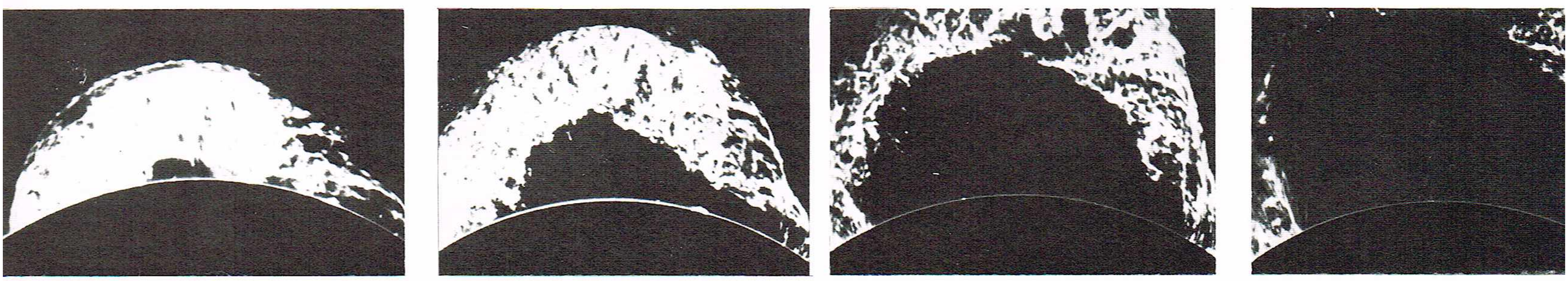

▼ *Ces quatre photographies montrent l'évolution de l'imposante protubérance solaire du 4 juin 1946; il s'est écoulé, entre les première et quatrième photographies, exactement une heure (Observatoire de Yerkes).*

dans une couche extérieure très ténue de 10 000 km d'épaisseur. En fait, la réalité est plus complexe : toutes les couches du Soleil contribuent à l'émission et à l'absorption, mais l'absorption des raies atomiques est plus intense dans les couches extérieures. Le Soleil est une sphère gazeuse dont l'opacité augmente avec la profondeur. On peut expliquer par là le contraste entre le centre et le bord : la lumière du centre solaire provient d'une couche plus profonde et donc plus chaude que celle du bord.

Les raies d'absorption les plus intenses du Soleil sont dues aux atomes de calcium, de magnésium et d'hydrogène.

Une analyse détaillée du spectre solaire montre que la matière solaire est composée d'environ 80 % d'hydrogène et 20 % d'hélium. Les autres atomes ne constituent que des sortes d'impuretés et représentent moins de 1 %. Parmi ces derniers les plus abondants sont l'oxygène, le carbone, l'azote, le soufre, le fer, le magnésium, etc. Le néon est assez abondant. Les autres éléments n'apparaissent que comme traces, mais plus de 60 éléments stables de la classification de Mendeleïev ont été découverts dans le Soleil. Depuis que le spectre a été étudié à l'aide d'engins spatiaux, cette liste a été étendue de 3 100 Å (UV) jusqu'à quelques Å (rayons X). Dans ce cas, le spectre solaire normal à raies d'absorption est remplacé par un spectre d'émission analogue au spectre des étoiles B à émission. On a ainsi détecté des atomes qui manquaient et mis en évidence des degrés d'ionisation très élevés. L'hydrogène émet une raie extrêmement intense : la raie *Lyman* α, située à 1 216 Å. La structure de cette raie est complexe, et elle montre que l'espace interplanétaire contient aussi de l'hydrogène. Signalons que l'hélium n'apparaît pas en absorption dans le spectre visible, mais seulement en émission dans les protubérances. Il a d'ailleurs été découvert sur le Soleil (du grec *hêlios*), d'où son nom.

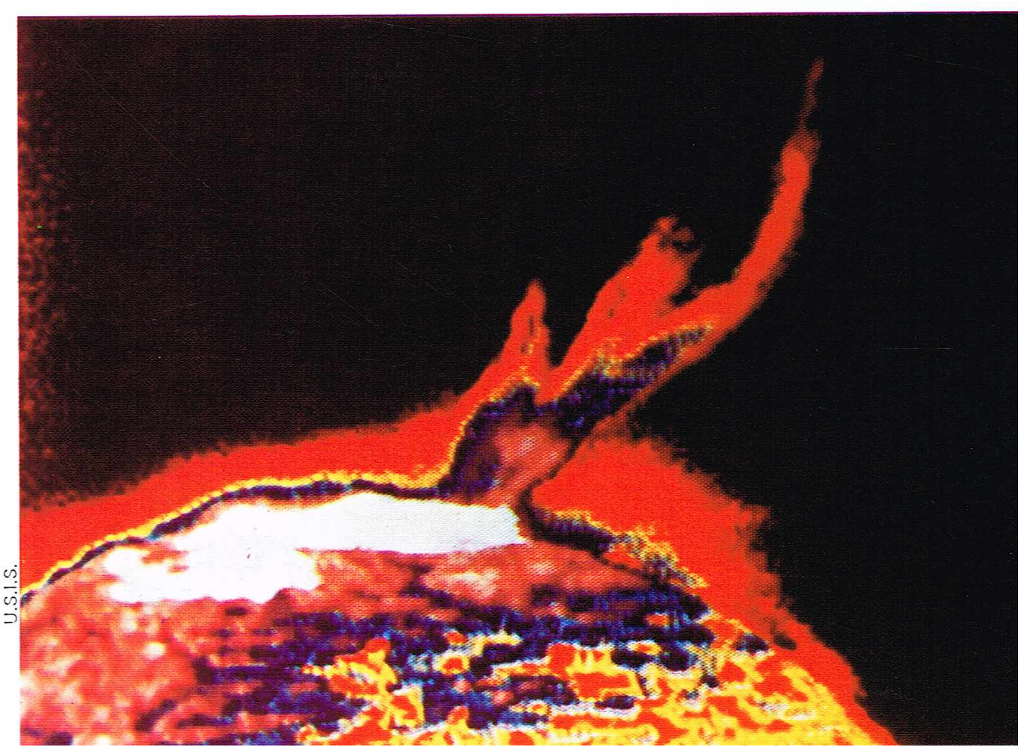

U.S.I.S.

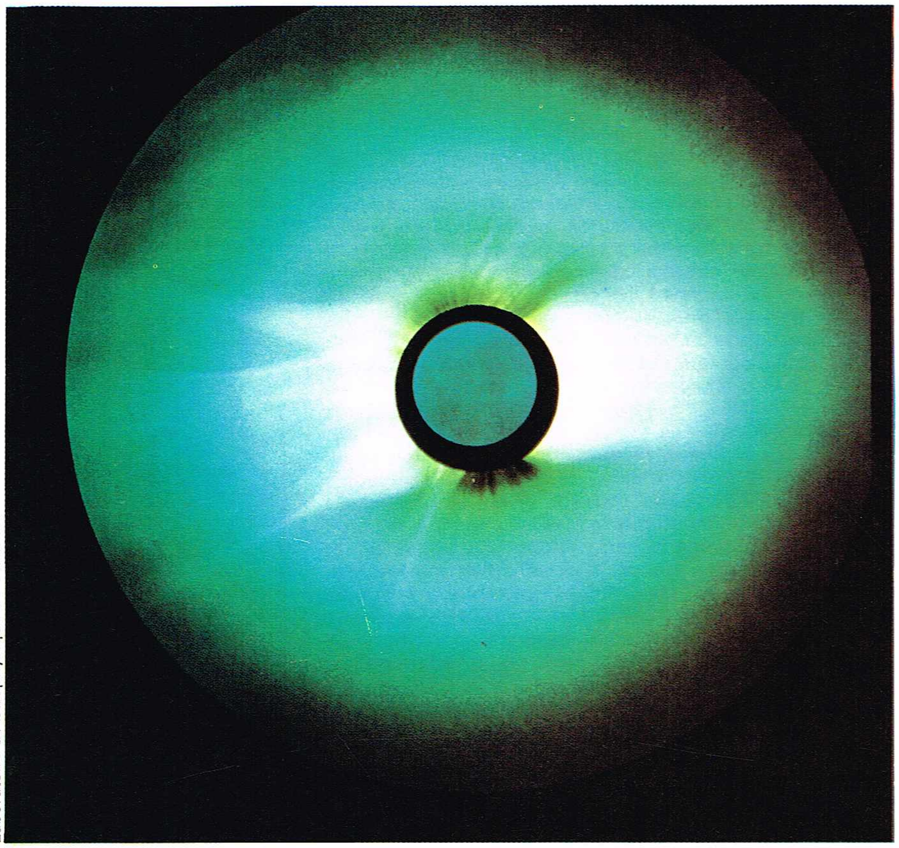

Laboratoire d'Astrophysique du C.N.R.S.

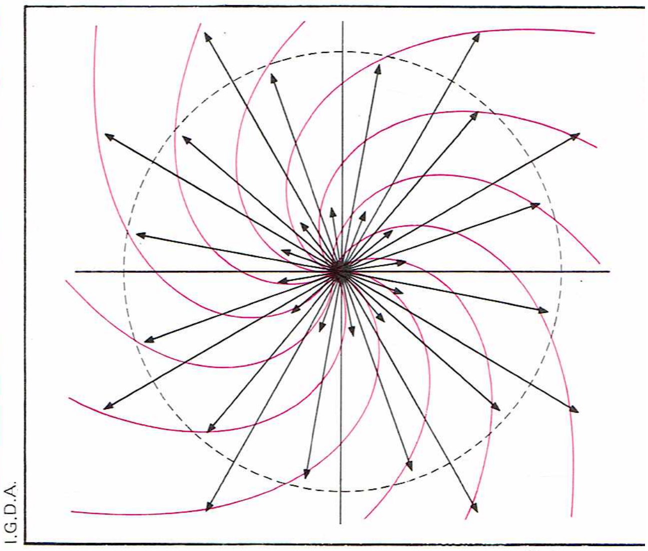

I.G.D.A.

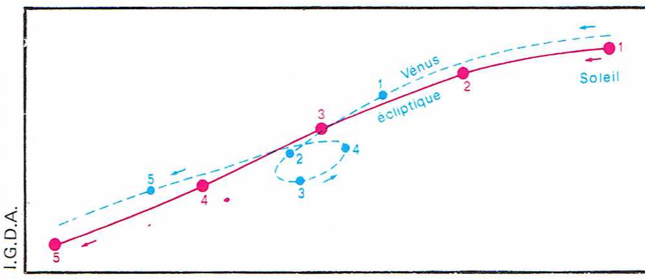

I.G.D.A.

▲ *Ci-dessus, photographie de la couronne solaire observée à Moussoro (Tchad) pendant l'éclipse totale de Soleil, le 30 juin 1973 à 12 h 14 mn T.U. (observateurs : J. Fagot et S. Koutchmy).*

de rayonnement γ et X comme celui des bombes atomiques à hydrogène. Heureusement, les couches extérieures du Soleil nous protègent de ce rayonnement par un procédé de transfert que nous comprenons bien : l'énergie est transformée en un rayonnement lumineux qui nous est bénéfique.

La couronne solaire

Pendant les éclipses de Soleil, la Lune cache complètement celui-ci de sorte que nous avons la possibilité de voir, sans être éblouis, les parties externes du Soleil. On constate que le Soleil est entouré d'une sorte de couronne de lumière blanche parcourue de jets et comprenant souvent des arcs. Cette couronne est circulaire et étendue pendant les maximums d'activité solaire ; elle est, au contraire, plus petite et aplatie vers les pôles aux minimums. Sa brillance ne représente qu'un millionième de celle du Soleil ; c'est pourquoi on ne peut l'observer, en dehors des éclipses, qu'avec le coronographe conçu par B. Lyot.

Le spectre de la couronne est assez compliqué. On l'explique en supposant que celle-ci contient des poussières qui diffusent la lumière solaire sans la transformer ; elle contient aussi des électrons à grandes vitesses diffusant la lumière solaire, mais en rendant floues les raies d'absorption solaires. La couronne de poussières est quelquefois nommée *couronne F*, celle des électrons *couronne K*. Il existe, enfin, des atomes émettant des raies qui ont été très longtemps mystérieuses. Nous savons maintenant, grâce au physicien suédois B. Edlen, qu'il s'agit d'atomes de fer, de nickel, etc., qui ont perdu un nombre considérable d'électrons (entre dix et vingt). Ces raies ne peuvent être observées au laboratoire : d'une part, il serait difficile d'arracher de tels nombres d'électrons de ces atomes stables, d'autre part, ces raies ne peuvent être émises que dans un vide très poussé. C'est pour cette raison qu'elles sont dites *raies interdites* (sous-entendu dans les conditions normales du laboratoire).

Tous ces phénomènes s'expliquent si l'on admet que la couronne solaire est formée de matière très diluée mais dont l'agitation thermique correspond à une température de l'ordre de 1 à 2 millions de degrés. On ne comprend pas encore bien quel est le mécanisme qui alimente cette agitation. Il est toutefois certain qu'elle vient du Soleil.

Cette nature de la couronne a été confirmée par la mise en évidence du rayonnement radioélectrique du Soleil. En période normale, ou calme, l'émission hertzienne du Soleil est assez faible ; elle se produit dans le plasma de la couronne solaire par l'émission de freinage des électrons. Le Soleil radioélectrique a un diamètre nettement plus grand que le Soleil visible : pour les radioastronomes, le Soleil est représenté par la couronne solaire. De temps en temps, on observe des émissions de courte durée mais qui peuvent être mille fois plus intenses que le Soleil calme. Ces émissions ou sursauts se forment au-dessus des taches solaires ; celles-ci fonctionnent comme des émetteurs radioélectriques. Enfin, les grands sursauts, encore mille fois plus intenses, correspondent à de l'éjection de matière à des vitesses de l'ordre de 1 000 km/s. Ces jets de matière excitent la couronne. On sait aujourd'hui que le rayonnement radio provient d'une couche d'autant plus profonde que sa longueur d'onde est plus petite. Il est donc possible de suivre les jets de matière dans leur ascension dans l'atmosphère solaire. Ils seront d'abord détectés par les ondes courtes, puis par des rayonnements ayant des longueurs d'onde de plus en plus grandes. La matière éjectée pénètre ensuite dans l'espace interplanétaire et peut parvenir à la Terre. Elle produit alors de nombreuses perturbations, notamment des aurores polaires.

En plus de ces émissions sporadiques et très dangereuses pour les astronautes, il existe une émission continuelle de matière soufflée par le Soleil. Cette émission constitue le *vent solaire*. Il a été mis en évidence par les sondes spatiales. Si notre atmosphère nous protège de ce vent, la Lune, en revanche, est bombardée continuellement. Le vent solaire a aussi une grande action sur les comètes.

Grâce à la recherche spatiale, on a pu suivre la couronne jusqu'à une distance de plusieurs rayons solaires ; on pense que la lumière zodiacale en est une extension. Les observations effectuées à bord des vaisseaux Apollo et Skylab ont aussi permis de trouver des sources de rayons X situées dans la couronne et s'expliquant par l'interaction entre le plasma, à 2 millions de degrés, et les jets de matière. Pendant les périodes de grande activité, les émissions de rayons X peuvent être considérables. On observe alors également le spectre d'atomes de fer, de nickel, etc., ayant perdu jusqu'à trente électrons.

LE SYSTÈME SOLAIRE

Autour du Soleil gravitent un certain nombre d'astres et d'objets plus petits : d'abord, les neuf planètes et leurs satellites, puis les petites planètes qui circulent entre Mars et Jupiter. Les comètes, plus ou moins brillantes, décrivent des orbites diverses. Enfin, nous savons que de nombreuses météorites, des poussières, des molécules et des atomes peuplent l'espace interplanétaire. Ce sont les lois de la gravitation qui gouvernent les mouvements de ce système, mais nous savons aujourd'hui que ces forces ne sont pas les seules : les rayons cosmiques, le vent solaire, les champs magnétiques ont aussi une influence, en général extrêmement petite, sinon négligeable.

Quels sont les confins du système solaire ? Est-ce l'orbite de Pluton ou une planète transplutonienne (planète X) ? Les astronomes pensent qu'il existe une *ceinture de petits corps célestes* se trouvant entre 10 000 et 100 000 unités astronomiques, à peu près à mi-chemin entre le Soleil et l'étoile la plus voisine, Proxima Centauri. La nature de cette ceinture est fort discutée ; selon les uns, sa masse serait des milliers de fois supérieure à celles des autres planètes, alors que pour d'autres, la masse ne serait que de l'ordre de celle de la Terre. Quoi qu'il en soit, on pense que la ceinture est le réservoir des comètes.

La description générale des planètes

Les planètes sont au nombre de neuf. Leurs distances au Soleil varient de 0,4 à 40 unités astronomiques (de 60 à 60 000 millions de kilomètres). La répartition de ces planètes ne s'est pas faite au hasard : les plans de leurs orbites sont presque confondus. L'orbite la plus inclinée, celle de Mercure, a seulement une inclinaison de 7° par rapport à l'écliptique, mais comme elle est très proche du Soleil, on peut dire que le système des planètes est un système très plat ; les excentricités des orbites sont petites, sauf pour Mercure (0,205) et surtout pour Pluton (0,249). La plupart des satellites de planètes ont aussi des orbites parallèles à l'écliptique.

Il existe, entre les dimensions des orbites, une relation empirique décrite par la *loi de Titius-Bode*. Ajoutons au demi grand axe de l'orbite de Mercure, qui est de 0,4 unité astronomique, successivement les nombres obtenus en multipliant 0,3 par 1, puis 2, 4, 8, 16... Les résultats ainsi obtenus sont en excellent accord avec les valeurs observées. Cependant, il manque une planète pour la valeur 8, c'est-à-dire pour 2,8 unités astronomiques, et la valeur 38,8 ne correspond pas à Neptune mais à Pluton. Cette relation est inexpliquée, mais très intéressante car elle a été établie avant la découverte des petites planètes dont la plus brillante, Cérès, a une orbite ayant un demi grand axe de 2,77 correspondant à la lacune de 2,8.

Malgré de nombreuses recherches, on n'a pas découvert de planète plus proche que Mercure, bien qu'on ait déjà donné un nom (Vulcain) ! On n'a pas non plus découvert de planète transplutonienne ; la planète X, annoncée récemment, n'a pas été confirmée.

Les conditions d'observation des planètes

Les conditions d'observation des planètes à partir de la Terre varient suivant la position relative du Soleil, de la Terre et de la planète. C'est pour cette raison qu'elles peuvent être classées, selon qu'elles ont une orbite située à l'intérieur ou à l'extérieur de celle de la Terre, en planètes inférieures ou internes (Mercure et Vénus) et en planètes supérieures ou externes (de Mars à Pluton).

Pour simplifier l'exposé, on supposera que les orbites de planètes sont circulaires et confondues avec le plan de l'écliptique. Cette approximation est suffisante, sauf dans le cas de Mars. Rappelons que toutes les planètes, y compris la Terre, tournent dans le même sens.

Deux configurations sont très importantes : ce sont celles où le Soleil, la Terre et la planète observée sont alignés. On nomme *conjonction héliocentrique* le cas où, vues du Soleil, la Terre et la planète sont situées du même côté, et *opposition héliocentrique* le cas où ces deux planètes sont situées de part et d'autre du Soleil.

Prenons, pour simplifier, le cas de Jupiter, dont la période de révolution est de douze ans. Après une révolution d'un an, lorsque la Terre aura repris sa position initiale, Jupiter aura accompli un certain parcours. Pour rattraper la planète et être en conjonction, il faudra à la Terre un certain temps. Le temps qui sépare ces deux conjonctions successives porte le nom de *révolution synodique ;* celle-ci a une importance considérable pour la périodicité des conditions d'observation de la planète. Dans le cas présent, on voit que l'ordre de grandeur de cette révolution synodique est de 1 an 30 jours ; le calcul exact se fait par la formule :

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}$$

où S est la révolution synodique de la planète de période T, et T_0 est la période de la Terre. On trouve ainsi S = 398,9 jours.

Entre la conjonction et l'opposition héliocentriques s'écoule naturellement une demi-révolution synodique.

Le mouvement apparent des planètes inférieures

Considérons d'abord le cas des deux planètes inférieures, Mercure et Vénus. On a l'habitude de repérer la position de ces deux planètes par rapport au Soleil. Repartons de la conjonction héliocentrique. Dans ce cas, la planète est exactement dans la direction du Soleil, mais plus proche de nous que celui-ci. On dit que la planète est en *conjonction géocentrique inférieure.* Si, comme nous l'avons supposé, le plan de l'orbite est confondu avec l'écliptique, la planète se détache sur le Soleil et cela se répétera à chaque révolution synodique. En fait, il n'en est rien car les deux orbites de Mercure et Vénus sont inclinées sur l'écliptique et le passage sur le Soleil n'a lieu que lorsque la planète est, aussi, près de la ligne d'intersection des plans déterminés par l'écliptique et l'orbite de la planète. Il est possible d'établir des périodicités pour ces retours. On remarquera qu'il s'agit de la recherche d'intervalles de temps qui sont à la fois des multiples de S et de T.

Indiquons les dates des derniers passages. Pour Mercure, les passages ont eu lieu en novembre 1940, 1953, 1960 et 1973 et en mai 1957 et 1970 ; ils se répéteront sensiblement 46 ans plus tard. Les prochains passages se produiront en novembre 1986, 1993 et 1999, mais les deux derniers passages auront lieu au bord extrême du Soleil. Les passages de mai 2003 et 2016 seront mieux placés. Pour Vénus, les passages sont plus rares ; les derniers ont eu lieu en juin 1761 et 1769 et en décembre

◀ *Page ci-contre, à droite, en haut, figuration schématique du vent solaire. Les flèches représentent les trajectoires des particules du vent solaire ; les lignes de force du champ magnétique sortant de la surface du Soleil ont des trajets en spirale à cause de la rotation du Soleil. La circonférence en tireté représente l'orbite de la Terre. En bas, dans le cas d'une planète inférieure (Vénus sur ce schéma), les stations et les rétrogradations peuvent donner lieu à une boucle apparente.*

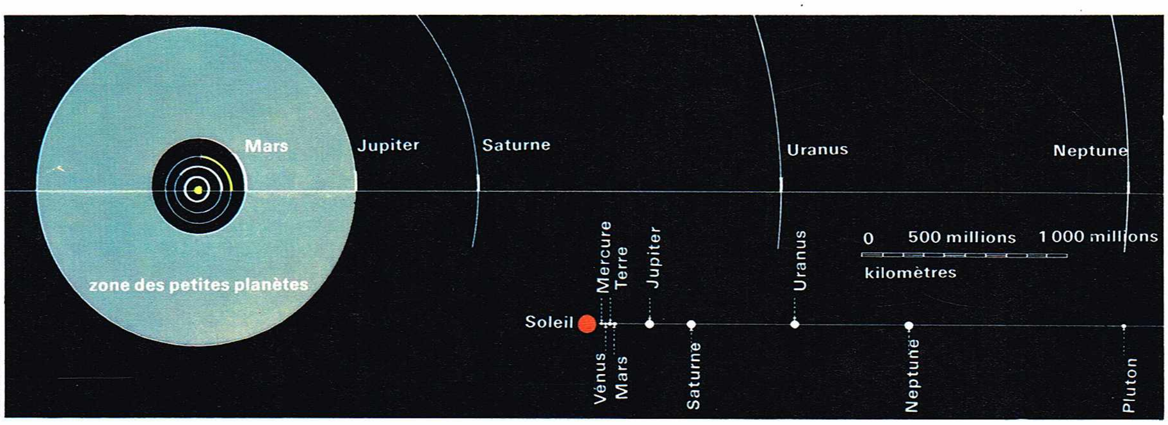

I.G.D.A.

◀ *Le système solaire : autour du Soleil (en rouge), sont tracées, dans l'ordre, les orbites de Mercure, de Vénus et de la Terre (en jaune), puis de Mars, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune ; on a indiqué, sur les orbites de chaque planète, le trajet parcouru durant une révolution complète de Mercure.*

1874 et 1882, et les prochains auront lieu en juin 2004 et 2012 ; la périodicité est de 243 ans. Ces passages ne sont plus que des curiosités astronomiques, mais leur observation a eu une importance considérable.

Au moment de la conjonction inférieure, la distance Terre-planète est minimale et la planète a un diamètre angulaire maximal. La planète tourne vers la Terre sa face non éclairée ; elle n'est donc pas visible. A cause du mouvement relatif de la Terre et de la planète, celle-ci se déplace vers l'ouest et sa direction s'éloigne de celle du Soleil. Elle se lève donc avant le Soleil : c'est une étoile du matin. Observée avec une lunette, elle apparaît comme un fin croissant. Elle s'éloigne de plus en plus du Soleil ; le croissant devient de moins en moins fin et le diamètre apparent de la planète diminue. Néanmoins, l'éclat augmente car la surface visible est plus grande. Ces phénomènes continuent jusqu'à ce que l'angle entre la direction du Soleil et celle de la Terre vue de la planète soit de 90°. A ce moment, la planète est à sa plus grande distance angulaire du Soleil : on dit qu'elle est à l'*élongation*. La planète est exactement éclairée à moitié, comme la Lune au dernier quartier. A partir de ce moment, la position apparente de la planète se rapprochera du Soleil, et son éclat diminuera. Elle passera ensuite derrière le Soleil : ce sera la *conjonction supérieure ;* son diamètre angulaire sera minimal. Elle réapparaîtra quelques jours plus tard comme étoile du soir, elle s'éloignera jusqu'à l'élongation orientale, et, une révolution synodique après le début de notre description, elle sera de nouveau en conjonction inférieure.

Nous indiquerons la succession de ces événements en deux tableaux : l'un relatif à Mercure, l'autre à Vénus.

▼ *Ci-dessous, tableau et schéma du mouvement de Mercure ; en bas, ceux de Vénus.*

MERCURE

	Conjonction inférieure CI	Elongation occidentale EW	Conjonction supérieure CS	Elongation orientale EE	Conjonction inférieure CI
Époques en jours	0	21,6	58,0	94,3	115,9
Diamètre apparent	11"	7"	5"	7"	11"
Magnitude	+2,8	−0,3	−1,7	−0,3	+2,8

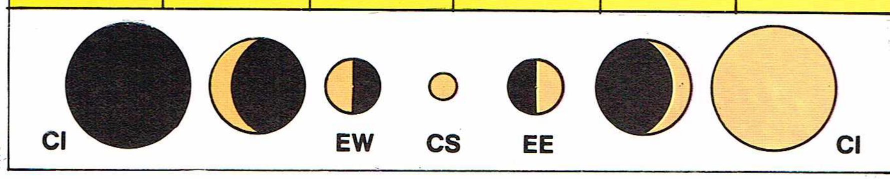

Richard Colin

VENUS

	Conjonction inférieure CI		Elongation occidentale EW	Conjonction supérieure CS	Elongation orientale EE		Conjonction inférieure CI
Époques (en jours)	0		71	292	513		584
Diamètre apparent	61"		25"	10"	25"		61"
Magnitude	−3,0	−4,3	−4,0	−3,5	−4,0	−4,3	−3,0
Epoque maximum d'éclat (en jours)		36				548	

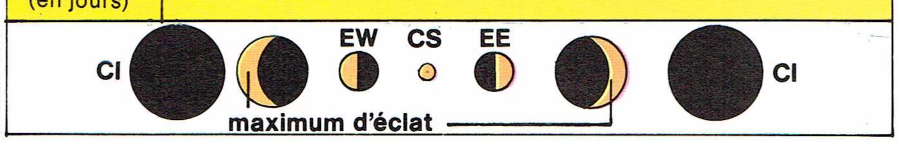

Richard Colin

Le mouvement apparent des planètes supérieures

Décrivons par exemple le cas de Jupiter dont l'orbite est sensiblement circulaire et peu inclinée sur l'écliptique. Commençons encore l'étude au moment de la conjonction héliocentrique. La Terre est située entre le Soleil et Jupiter ; il s'agit donc d'une *opposition géocentrique* et la distance Terre-planète est minimale, son diamètre angulaire maximal. La planète nous montre la face éclairée et passe au méridien à minuit. Les conditions d'observation sont les meilleures. Dans le cas de Jupiter, le diamètre angulaire est de 47″ et la magnitude, qui est une échelle de brillance que nous définirons plus loin, est de — 2,4. Cette planète est plus brillante que Sirius. Comme la vitesse sur son orbite (13,2 km/s) est plus petite que celle de la Terre (30 km/s), le mouvement relatif la déplace vers l'ouest. Ce mouvement, rétrograde par rapport aux étoiles, continue pendant un certain temps (60 jours dans le cas de Jupiter) ; puis elle s'immobilise par rapport aux étoiles : elle est « stationnaire ». Le mouvement reprend ensuite vers l'est ; quelques jours plus tard, sa direction est située à 90° de celle du Soleil (87 jours après l'opposition dans le cas de Jupiter). La planète présente alors une petite phase : elle est « gibeuse » ; cet effet, peu sensible pour Jupiter, est par contre très apparent pour Mars. Après une demi-révolution synodique, la planète disparaît derrière le Soleil ; sa distance à la Terre est maximale et son diamètre minimal (pour Jupiter le diamètre angulaire est de 31″, et la magnitude — 1,6). La planète réapparaît à l'ouest du Soleil comme étoile du matin de mieux en mieux visible ; elle se déplace en sens direct jusqu'à la station, suivie d'un mouvement rétrograde jusqu'au-delà de l'opposition. Ce mouvement de la planète par rapport aux étoiles est très grand ; dans le cas de Jupiter, l'arc de rétrogradation mesure 10°. Naturellement dans la réalité, il faut tenir compte de l'inclinaison de l'orbite. De ce fait, la planète décrit des arcs non superposés qui peuvent se boucler.

Dans le cas de Mars, l'excentricité de l'orbite est considérable et les oppositions qui se suivent sont très différentes. Les oppositions qui ont lieu lorsque la planète est au périhélie sont les plus intéressantes. Ce fut le cas de celles de 1956, 1971 et ce sera aussi le cas de celles de 1986 et 1988. Pour ces oppositions, l'image de la planète sera assez grande, de l'ordre de 27″ (magnitude — 3,1). A ces oppositions, la planète est bien visible dans l'hémisphère austral. Aux oppositions de 1965, 1968 et 1975 la planète était à une distance beaucoup plus grande. Ce sera également le cas des oppositions de 1978, 1980 et 1982. La planète a alors un diamètre de l'ordre de 15″ et une magnitude entre — 1 et — 2. Les prochaines oppositions favorables auront lieu en juillet 1986 et septembre 1988. La planète, bien observable dans l'hémisphère austral, aura un diamètre de l'ordre de 25″ et une magnitude de — 3. L'opposition de 1984 n'est pas encore très favorable.

Les caractéristiques physiques des planètes

L'observation permet de déterminer le diamètre des planètes par la mesure de leur diamètre apparent. Pour les planètes qui ont des satellites, c'est-à-dire toutes sauf Mercure et Vénus, on détermine également les masses. Pour ces deux planètes, les masses, mal connues jusqu'en 1974, ont été précisées par les recherches spatiales. Nous connaissons donc actuellement les rayons, masses et densités de toutes les planètes.

Les planètes terrestres et les planètes géantes

Les planètes du système solaire sont si différentes qu'on les classe en trois familles : les planètes terrestres, les planètes géantes et les petites planètes, ou astéroïdes.

Les *planètes terrestres* (Mercure, Vénus, la Terre et Mars) sont petites ; elles tournent relativement lentement et ne présentent pas d'importantes sources internes de chaleur ; par ailleurs, elles tournent comme des solides et sont accompagnées ou non par quelques satellites. En outre, elles diffèrent considérablement les unes des autres. La Terre est la seule qui possède de grandes étendues d'eau et de l'oxygène atmosphérique.

Les *planètes géantes* (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune) sont semblables (densité et composition) au Soleil.

Les *petites planètes,* ou *astéroïdes,* minuscules et très nombreuses, circulent entre Mars et Jupiter.

Pluton est une planète peu connue et assez différente des autres astres du système solaire.

L'observation des planètes

Rappelons encore les difficultés d'observation de ces astres. Avant l'ère spatiale, si on excepte la Lune, les détails que nous pouvions voir ou photographier sur les planètes étaient extrêmement grossiers. Dans les meilleures conditions, on pouvait voir des détails de l'ordre de 50 à 100 km sur Mars et de 1 000 km sur Jupiter.

Les planètes ne sont pas lumineuses par elles-mêmes : la lumière qu'elles diffusent est de la lumière solaire réfléchie. En fait, le phénomène est plus compliqué. L'énergie rayonnée par le Soleil est surtout du rayonnement lumineux, avec un maximum d'énergie situé dans le vert. A la distance où est la Terre, le rayonnement reçu est de 2 cal/mn/cm^2 ou 1,4 million d'ergs/s/cm^2. Une partie de ce rayonnement est renvoyée par la planète (par son atmosphère ou la surface de son sol). On nomme *albédo* (A) cette proportion; c'est donc un nombre compris entre 1 et 0 et qui, nous le verrons, est beaucoup plus grand pour les planètes qui ont des atmosphères. Pour la Lune et Mercure, l'albédo est 0,06; pour la Terre, Jupiter et Saturne, il est compris entre 0,4 et 0,8. La partie absorbée vaut (1 — A), et c'est cette énergie qui réchauffe l'atmosphère et le sol de la planète ou du satellite. Les lois de la physique permettent de calculer la température d'équilibre. L'énergie reçue pour une même surface de la planète est inversement proportionnelle au carré de la distance au Soleil. Par contre, la quantité rayonnée (dans l'infrarouge) est proportionnelle à la température absolue élevée à la puissance 4 : T^4.

De ces deux lois il résulte que la température d'une planète est inversement proportionnelle à la racine carrée de la distance de la planète au Soleil, c'est-à-dire que $T = \frac{K}{\sqrt{a}}$ (où K est une constante de proportionnalité qui vaut environ 290).

Comme la température d'équilibre de la Terre est de 290 °K (c'est-à-dire 17 °C), une planète, située à la distance de 4 unités astronomiques, aura une température deux fois plus petite, c'est-à-dire égale à 145 °K ou — 128 °C. On trouve ainsi les températures suivantes : + 185 °C pour Mercure, — 146 °C pour Jupiter et — 227 °C pour Pluton. Dans ces calculs, on n'a pas tenu compte de l'albédo de ces planètes, qui est différent de celui de la Terre. On a aussi admis qu'il n'y a pas de source d'énergie dans la planète, ce qui, on le sait depuis peu de temps, n'est pas vrai pour Jupiter.

La spectrographie permet de compléter ces résultats. Nous avons vu que la lumière de la planète est de la lumière solaire diffusée, mais elle traverse nécessairement deux fois une certaine épaisseur de l'atmosphère planétaire; dans ces conditions, les molécules gazeuses produisent un spectre de raies d'absorption. On a ainsi pu identifier de nombreuses molécules et donc analyser l'atmosphère d'un certain nombre de planètes et de satellites. Nous examinerons ces résultats pour chacune des planètes. Naturellement, il faut éliminer les raies dues à l'atmosphère terrestre.

L'atmosphère des planètes

La physique nous apprend que la température d'un objet est due à l'agitation de ses molécules pour les gaz, et à la vibration des atomes pour les solides. Un gaz est constitué par un nombre très grand de molécules qui s'entrechoquent de façon permanente; toute son énergie est représentée par la somme des énergies vives des molécules qui le forment. La loi des gaz parfaits permet de calculer les vitesses de ces molécules. On montre que cette vitesse croît avec la température du gaz et qu'elle est d'autant plus grande que la molécule est plus petite (plus précisément V est proportionnelle à $\sqrt{\frac{T}{m}}$). A la température ambiante (300 °K), une molécule d'oxygène, qui a une masse de 32, a une vitesse de 500 m/s. Une molécule d'hydrogène, de masse 2, a une vitesse quatre fois plus grande (2 km/s). Mais à une température de 1 200 °K, toutes ces valeurs sont multipliées par 2.

Ces vitesses sont considérables, et le choc des molécules sur des parois constitue la pression. C'est aussi en raison de la valeur importante de cette vitesse que les atmosphères des planètes peuvent s'évaporer. Nous avons vu qu'un mobile lancé à la surface d'une planète avec une vitesse supérieure à la vitesse parabolique s'éloigne définitivement. Pour la Terre, cette vitesse est de 11,2 km/s. Elle est beaucoup plus grande que la vitesse des molécules gazeuses de notre atmosphère, de sorte que l'atmosphère de la Terre est stable. Mais on comprend que la Lune n'ait pas d'atmosphère : en effet, la vitesse d'évasion de la Lune est beaucoup plus petite (2,4 km/s) et donc encore nettement supérieure aux vitesses des molécules à la température de 300 °K. L'atmosphère devrait être stable; mais les vitesses d'agitation que nous avons données ne sont que des vitesses moyennes; de nombreuses molécules peuvent dépasser cette vitesse moyenne, et donc dépasser la vitesse d'évasion et s'échapper.

Il résulte de ces faits que les planètes volumineuses et froides doivent avoir une atmosphère : c'est le cas de Jupiter et de Saturne. Les planètes ou satellites petits et chauds, c'est-à-dire proches du Soleil, ont perdu leurs atmosphères : c'est le cas de la Lune et de Mercure. D'après la masse d'une planète et sa distance au Soleil, un calcul permet de déterminer assez nettement si une planète a une atmosphère. On trouve ainsi que Vénus doit avoir une atmosphère; par contre, le cas de Mars est douteux. L'observation confirme ces résultats, montrant ainsi que l'explication est bonne.

▼ A gauche, fonction de phase. Lumière diffusée par une planète, ou la Lune, dans la direction formant l'angle α avec la direction du Soleil. Remarquer la grande différence entre Vénus qui réfléchit 60 % de la lumière pour α = 0 et la Lune qui ne réfléchit que 11 %. A droite, par suite de la combinaison des mouvements de révolution de la Terre et d'une planète supérieure, le mouvement de cette dernière par rapport aux étoiles fixes n'est pas toujours direct, mais à certaines époques la planète s'arrête (stations) ou son mouvement peut même s'inverser (rétrogradations).

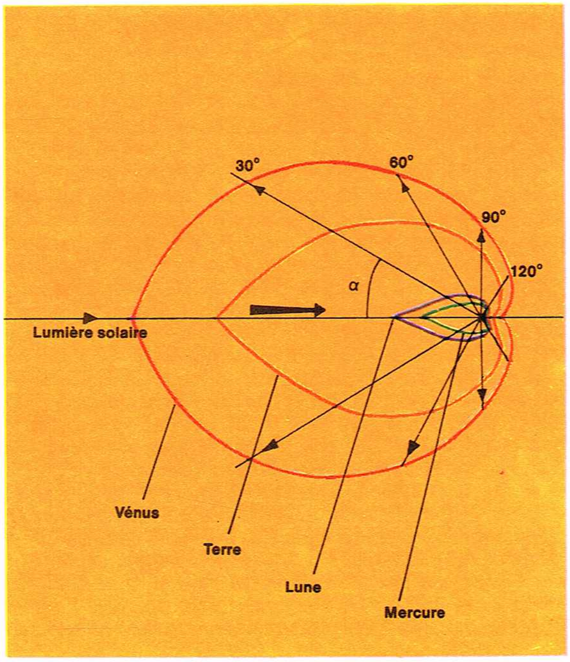

Richard Colin

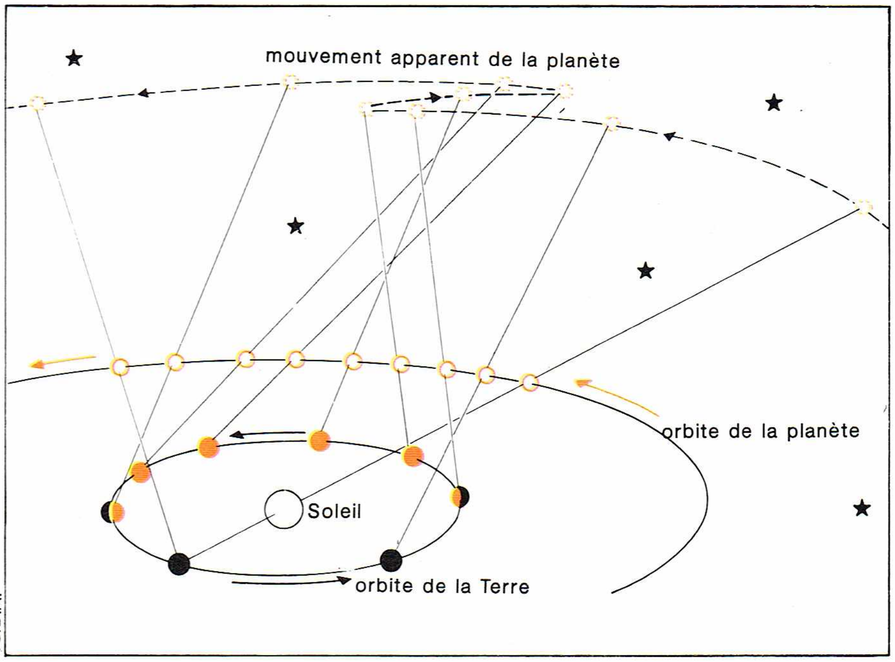

I.G.D.A.

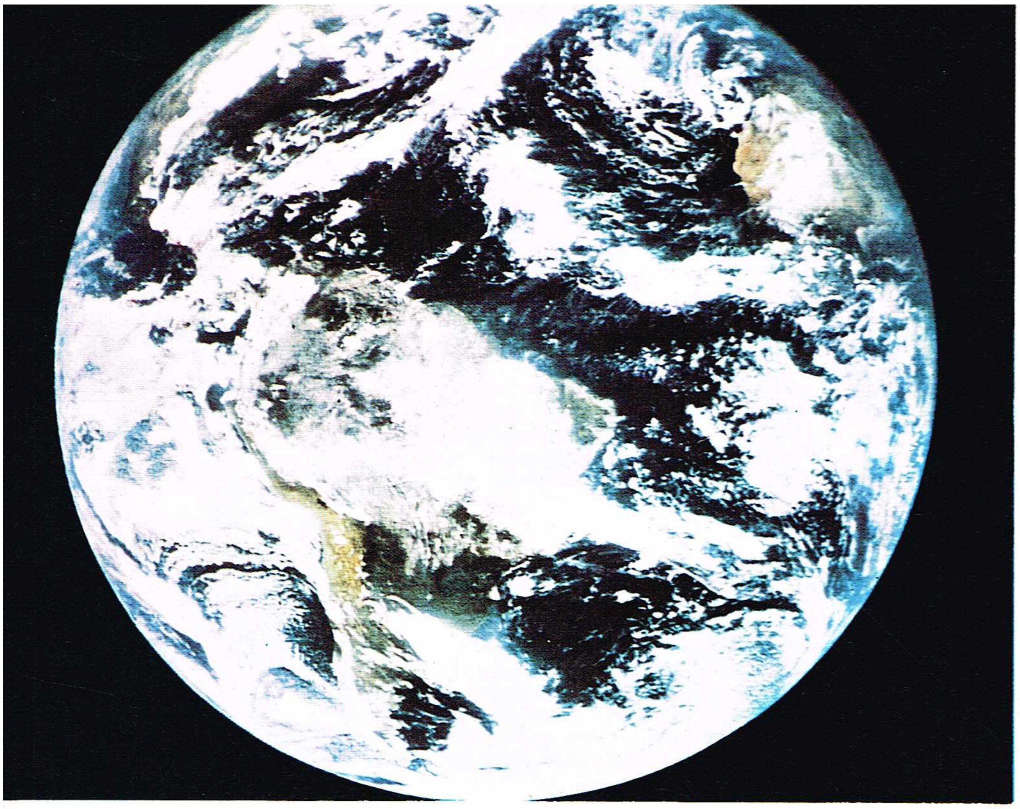

Associated Press

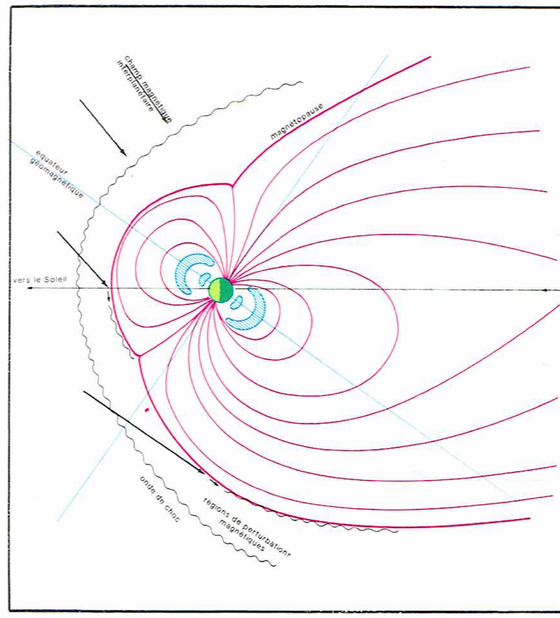

I.G.D.A.

▲ *A gauche, la Terre photographiée par le satellite américain « ATS 111 », le 10 novembre 1967, à une altitude d'environ 37 000 km. On peut voir l'Amérique du Sud, des parties de l'Amérique du Nord, de l'Afrique, de l'Europe et du Groenland ; l'Antarctique est couvert de nuages.*

▶ *A droite, en haut, représentation schématique de la magnétosphère terrestre. Le champ magnétique terrestre est limité vers l'extérieur par le vent solaire (ligne renforcée). Les lignes plus fines représentent les lignes de force du champ magnétique terrestre. La ligne ondulée représente le front de l'onde de choc du vent solaire avec le champ magnétique terrestre. On observera que le champ terrestre est symétrique par rapport au plan de l'équateur magnétique terrestre dans la partie interne, alors que dans la partie externe, l'influence du vent solaire tend à la rendre symétrique par rapport au plan de l'orbite de la Terre. Les zones hachurées en bleu représentent les ceintures de Van Allen.*

La Terre

Nous commencerons l'étude du système solaire par une brève description de la planète où nous vivons et par son satellite naturel, la Lune.

La Terre, comme les autres planètes, parcourt depuis des milliards d'années son orbite autour du Soleil, et continuera, selon toute vraisemblance, à le faire pendant des milliards d'années encore, sans changements appréciables. C'est le Soleil, mille fois plus lourd que toutes les planètes réunies, qui retient celles-ci comme prisonnières et régit tout le système solaire. S'il existait une autre étoile voisine, c'est-à-dire si le Soleil appartenait à un système binaire, ou si les planètes avaient des masses beaucoup plus importantes, les orbites des planètes subiraient de continuelles variations, et la vie telle que nous la connaissons sur la Terre serait difficile à imaginer. En effet, chaque planète passerait tantôt trop près, tantôt trop loin du Soleil. Les variations de température seraient considérables et il n'y aurait pas de succession régulière de saisons.

La forme de la Terre et le champ magnétique

Nous avons déjà décrit la forme de la Terre, son aplatissement, ses petites bosses supplémentaires. L'aplatissement général est expliqué par la rotation mais nous ne connaissons pas la raison des petites déformations. L'intérieur de la Terre, sans être totalement rigide, serait légèrement plastique.

La Terre possède un champ magnétique qui, à sa surface, varie beaucoup d'un point à l'autre du globe. En première approximation, il peut être décrit par un dipôle magnétique situé à l'intérieur de la planète. L'axe de ce dipôle perce la Terre près du pôle Nord au point de latitude 78°,5 et de longitude 69° O. A ce champ se superpose un champ complémentaire non symétrique ; les pôles magnétiques Nord et Sud réels ne sont donc pas exactement opposés. Loin de la Terre, c'est le champ du dipôle qui prédomine. Son intensité varie peu avec l'altitude. Il vaut 0,45 gauss au sol.

L'axe de symétrie du champ géomagnétique n'est par conséquent pas confondu avec l'axe de rotation de la Terre.

Le champ magnétique terrestre n'est pas constant mais varie avec le temps de deux façons. On observe une fluctuation lente et graduelle, la *variation séculaire*, qui provient probablement de modifications survenant à l'intérieur de la Terre ; et une *fluctuation rapide*, qui dure quelques heures ou quelques jours et qui est d'origine solaire.

Il est maintenant certain que le champ magnétique terrestre a souvent changé de sens au cours des temps préhistoriques. Les pôles avaient alors sensiblement les positions actuelles, mais le pôle situé dans la terre de Baffin était alternativement un pôle Sud et un pôle Nord.

CONSTITUANTS PERMANENTS	
Constituant	% en volume
Azote (N_2)	$78{,}110 \pm 0{,}004$
Oxygène (O_2)	$10{,}953 \pm 0{,}001$
Argon (Ar)	$0{,}934 \pm 0{,}001$
Néon (Ne)	$(18{,}18 \pm 0{,}04) . 10^{-4}$
Hélium (He)	$(5{,}24 \pm 0{,}004) . 10^{-4}$
Krypton (Kr)	$(1{,}14 \pm 0{,}01) . 10^{-4}$
Xénon (Xe)	$(0{,}087 \pm 0{,}001) . 10^{-4}$
Hydrogène (H_2)	$0{,}5 . 10^{-4}$
Méthane (CH_3)	$2 . 10^{-4}$
Oxyde azoteux (N_2O)	$(0{,}5 \pm 0{,}1) . 10^{-4}$

CONSTITUANTS VARIABLES	
Constituant	% en volume
Eau (H_2O)	de 0 à 7
Anhydride carbonique (CO_2)	de 0,01 à 0,1
Ozone (O_3)	de 0 à 0,01
Anhydride sulfureux (SO_2)	de 0 à 0,0001
Peroxyde d'azote (NO_2)	traces

On supposait naguère que le champ magnétique, comme le champ de gravitation, s'étendait indéfiniment dans l'espace en diminuant d'intensité graduellement avec la distance. S. Chapman et V.C.A. Ferraro suggérèrent, en 1931, que, pendant les fortes variations ou tempêtes magnétiques, des nuages de particules chargées provenant du Soleil pouvaient entourer la Terre et enfermer le champ magnétique de la Terre dans une enveloppe. On a découvert ensuite que ce phénomène n'est pas occasionnel, mais constant, du fait que le Soleil émet continuellement un plasma, nommé vent solaire, doué de propriétés magnétiques. Il en résulte que du côté éclairé de la Terre, le champ magnétique est limité à la distance de 10 rayons terrestres, soit environ 64 000 km. Du côté non éclairé, il s'étend comme la queue d'une comète, à une distance considérable qui dépasse l'orbite de la Lune. Cette région a reçu les noms de *magnétosphère* ou de *cavité géomagnétique*. En fait, la magnétosphère est encore un peu plus complexe. Le vent solaire, qui a des vitesses de 350 à 700 km/s, perturbe, quand il l'atteint, la zone extrême de la magnétosphère, en provoquant une sorte de ressac.

Nous pouvons donc distinguer trois régions : l'espace interplanétaire, où le champ est relativement stable, une zone de transition, où existe une turbulence magnétique créée par l'interaction entre le vent solaire et la magnétosphère, et, enfin, la cavité géomagnétique. De plus, on observe à l'intérieur de la magnétosphère deux ceintures de radiations, découvertes par Van Allen grâce aux renseignements donnés par les fusées puis les satellites. Le champ magnétique terrestre agit comme une sorte de piège magnétique pour les rayons cosmiques et les particules chargées qu'expulse le Soleil, et il les capte dans deux zones, où elles se maintiennent longtemps avant de se décharger pour créer des aurores polaires.

La ceinture interne est située à une altitude moyenne de 3 000 km au-dessus de l'équateur géomagnétique. La ceinture externe, beaucoup plus grande, a une altitude de 18 000 km et enveloppe presque complètement la Terre, il subsiste deux larges couloirs situés aux pôles magnétiques terrestres.

L'atmosphère de la Terre

La Terre est entourée d'une atmosphère qui a une importance capitale pour le développement de la vie. Nous avons vu pourquoi cette atmosphère est stable. Elle ne constitue qu'un millionième de la masse terrestre. Néanmoins, elle a une masse de $5{,}3 \cdot 10^{15}$ tonnes. Elle est surtout composée d'azote (78 % en volume), d'oxygène (20,9 %) et d'argon (0,9 %). Les autres composants, plus rares, sont la vapeur d'eau dont la proportion est variable, le gaz carbonique (0,1 %), puis, par ordre d'abondance, les autres gaz rares : le néon, l'hélium, le krypton et le xénon. On observe aussi des traces d'hydrogène et d'autres éléments; on constate aussi des quantités variables de poussières et des molécules organiques. La pression normale au sol est de 760 mm de mercure ou 1 013 millibars. La pression diminue sensiblement selon une loi exponentielle; elle est de 260 mm à 10 km, de 60 mm à 20 km.

Si l'atmosphère avait la même densité à toute altitude, elle aurait une épaisseur de 8 km. La variation de la température avec l'altitude est assez compliquée. On distingue cinq ou six couches du sol jusqu'à ses confins. La *troposphère* s'étend du sol à 13 km et la température varie de la valeur au sol de l'ordre de 20 °C en moyenne à — 60 °C. Puis la température augmente de nouveau jusqu'à 30 km d'altitude, où elle atteint — 20 °C : cette zone s'appelle la *stratosphère*. La température baisse de nouveau dans la *mésosphère*, où elle atteint — 90 °C à 80 km. La *thermosphère*, qui s'étend jusqu'à 400 km d'altitude, a une température très variable qui dépend de l'activité solaire. Dans les deux dernières régions, on trouve, à partir de 60 km d'altitude, différentes couches contenant des ions et nommées *couches ionosphériques*.

Du point de vue de la composition, l'atmosphère est divisée en deux grandes zones.

— Jusqu'à 400 km, la composition est pratiquement la même qu'au niveau de la mer. Dans cette zone, ou *homosphère*, il y a un mélange continuel des divers composants. Elle contient une zone où sont concentrées des molécules d'ozone, qui sont constituées par trois atomes d'oxygène. Ces molécules absorbent les rayons ultraviolets solaires.

— Au-dessus de cette zone à composition uniforme, il existe une zone où les mélanges sont peu importants et où la composition change avec l'altitude. On assiste à un début de stratification; les molécules les plus légères deviennent relativement plus abondantes; en montant, on trouve de l'oxygène mono-atomique, puis de l'hélium et de l'hydrogène.

Si l'atmosphère est essentielle à la vie, elle est extrêmement gênante pour l'observation astronomique. Les observations de directions précises sont difficiles en raison de la réfraction atmosphérique. La turbulence brouille les images astronomiques. L'atmosphère rend les observations photométriques imprécises dans le visible, empêche toute observation dans l'ultraviolet et la rend difficile dans l'infrarouge.

De plus, l'atmosphère supérieure est le siège de très nombreuses émissions de *lumière parasite*. En temps normal, le ciel nocturne émet de façon permanente des radiations dues aux atomes d'oxygène, d'azote, de sodium, aux molécules OH qui se trouvent à des altitudes de 60 à 500 km. Durant le jour, les atomes, bombardés par le rayonnement solaire, sont excités; ils reviennent

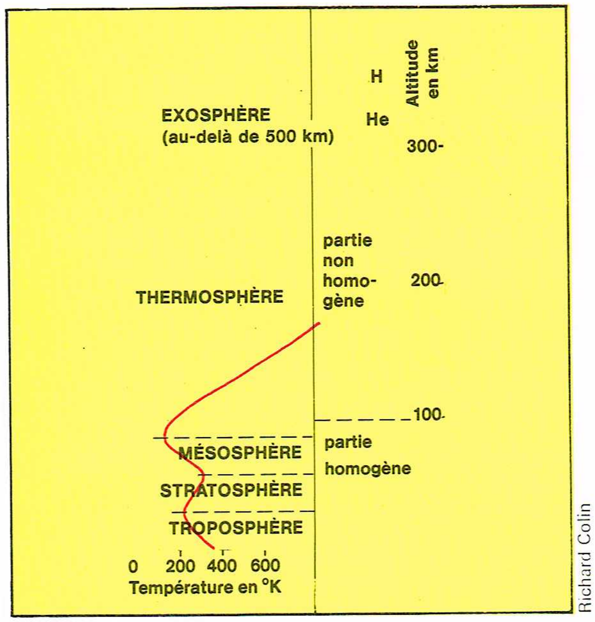

◀ *L'atmosphère terrestre.*

pendant la nuit à l'état non excité, en émettant alors de la lumière. Toute la Terre est entourée d'un halo d'hydrogène qui émet la raie ultraviolette Lyman α. Ces émissions, auxquelles s'ajoute la lumière zodiacale, limitent très fortement les possibilités des télescopes terrestres.

A haute latitude, on observe souvent des *aurores polaires*, qui peuvent être très brillantes; elles se manifestent par des draperies ou des arcs auroraux très intenses, de couleur verte ou rouge. Leur éclat varie continuellement; elles peuvent durer des secondes ou des heures. Elles sont produites par des particules chargées électriquement, d'origine solaire. Elles pénètrent soit directement, soit par l'intermédiaire des zones de Van Allen et s'enroulent autour des lignes du champ magnétique pour pénétrer dans l'atmosphère terrestre par les deux pôles. Elles empêchent toute observation astronomique sérieuse.

Pour toutes ces raisons, l'observation spatiale, en satellites ou à partir de la Lune, permet d'obtenir des renseignements nouveaux d'une très grande importance.

Physique du globe terrestre

Il est nécessaire de donner quelques détails sur la physique du globe terrestre bien que ce sujet soit traité dans la partie consacrée à la physique du globe. Cette description est, en effet, essentielle pour montrer combien notre planète est différente des autres.

Un observateur placé sur la Lune ou une autre planète remarquera d'abord l'importante couverture nuageuse qui s'étend en moyenne au-dessus de 50 % de la surface terrestre. Ces nuages, très blancs, sont noyés dans la lumière bleuâtre réfléchie par les molécules de la haute atmosphère. Ils sont éternellement changeants et l'observateur pourra remarquer la circulation générale liée à la mousson ainsi que le développement de grands cyclones. Dans les déchirures de ces nuages, il apercevra les mers et les continents. Les mers couvrent 71 % de la surface du globe. On sait que leur profondeur moyenne est de 3,6 km et qu'elles représentent plus de 1/1 000 du volume de la Terre et environ 1/5 000 de sa masse. Elles n'ont d'analogue sur aucune autre planète du système solaire. L'observateur distinguera aussi les calottes polaires et observera leur variation saisonnière, mais sans assister à la disparition estivale, comme sur Mars, dont les calottes sont très différentes.

Les montagnes sont faciles à distinguer, avec des couches de neige variables selon les saisons. L'absence de cratères est remarquable. Nous n'en connaissons que quelques-uns et ils sont relativement petits. Quelques volcans éteints ou en activité seront bien visibles, de même que les grands fleuves et des vallées. Mais la Terre apparaîtra en général désertique, et il faudra de bonnes mesures pour apercevoir et reconnaître la végétation; cependant, un observateur placé sur la Lune pourra reconnaître les grandes villes et d'autres indices de la civilisation humaine.

◀ **Page ci-contre, en bas, tableaux récapitulatifs de la composition de l'atmosphère terrestre d'après l'Annuaire du Bureau des longitudes.**

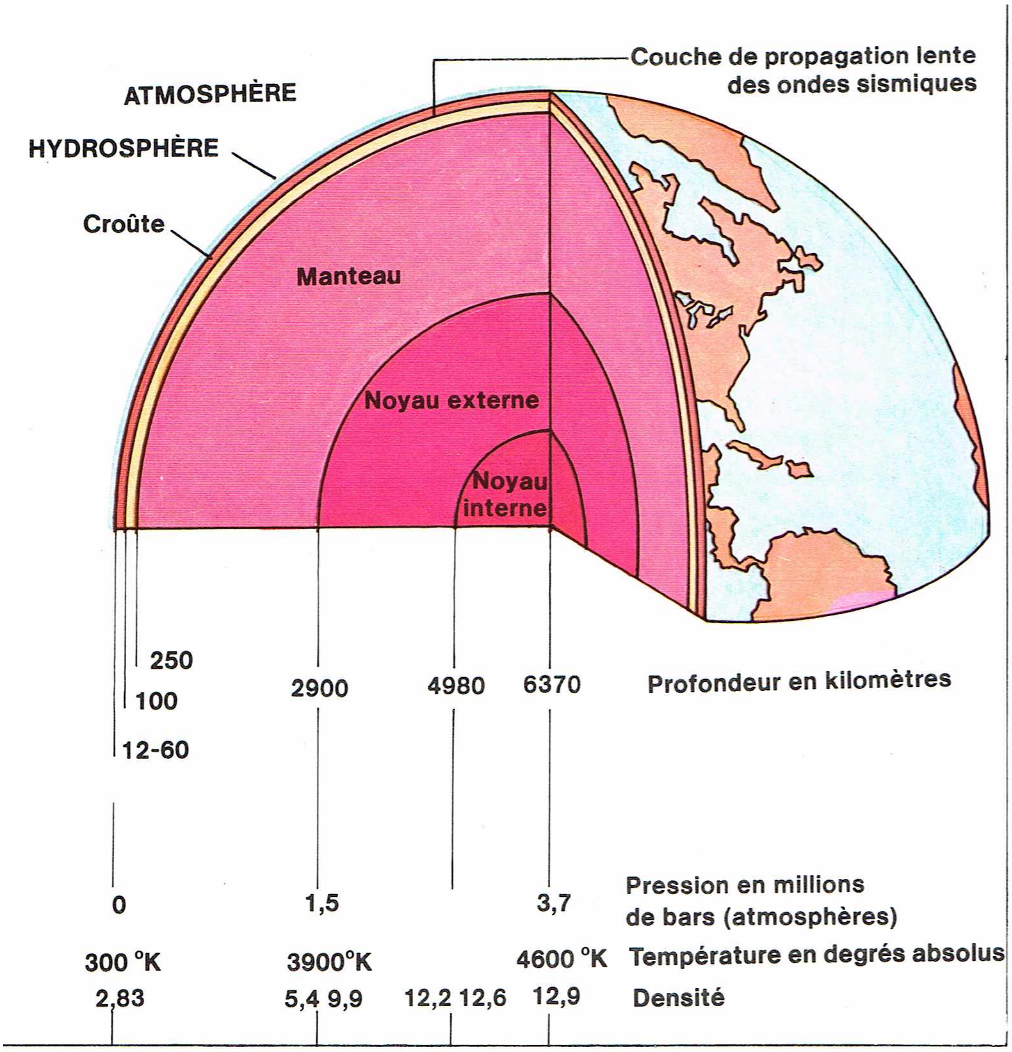

Richard Colin

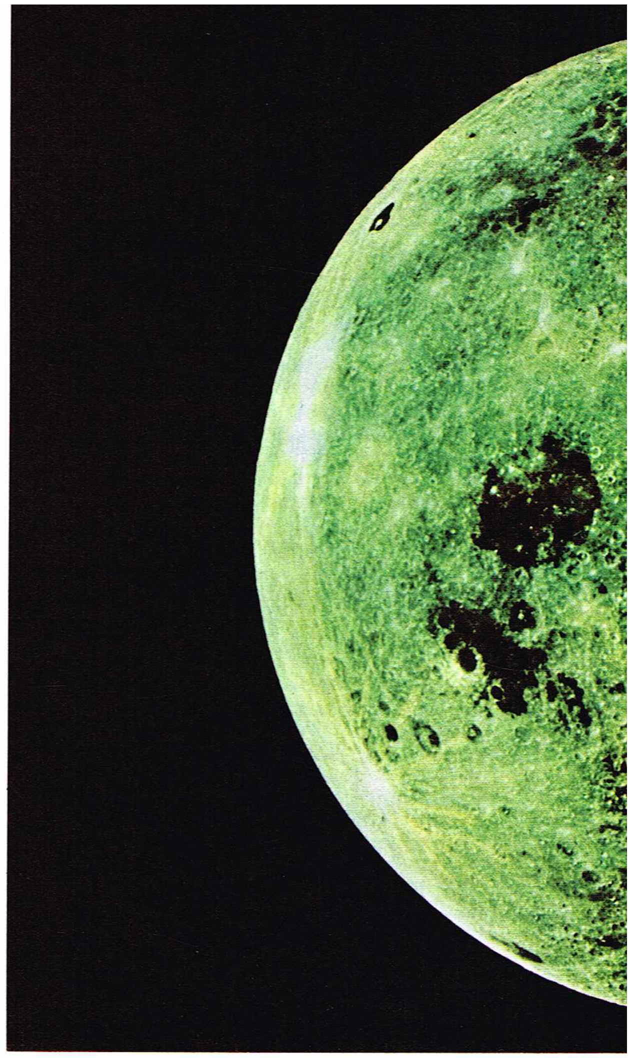

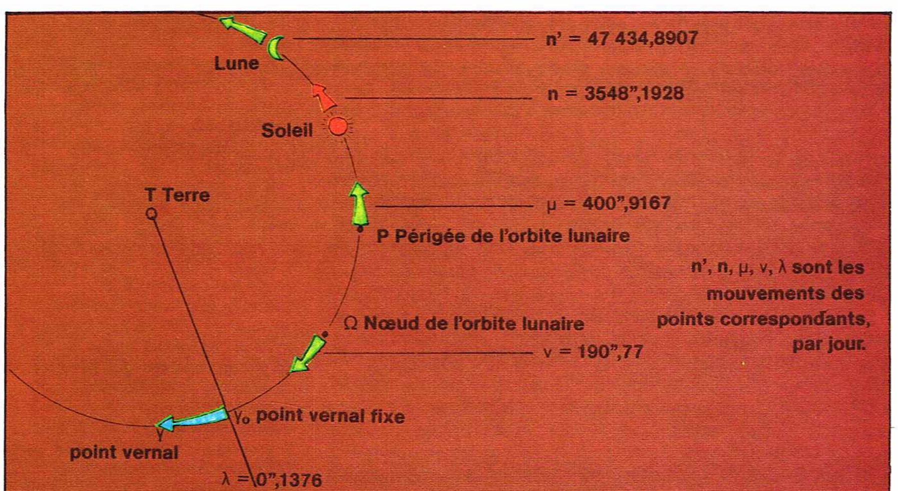

Définitions et valeurs des différentes révolutions lunaires

Période	Révolution	
de retour au point vernal fixe γ	sidérale	$S = \frac{N}{n'} = 27{,}321\,6609$ jours
de deux conjonctions avec le Soleil	synodique ou lunaison	$L = \frac{N}{n' - n} = 29{,}530\,5881$ jours
de passage par le nœud de l'orbite Ω	draconitique	$D = \frac{N}{n' + \nu} = 27{,}212\,22$ jours
de passage par le périgée P	anomalistique	$A = \frac{N}{n' - \mu} = 27{,}554\,5502$ jours
de passage par le point vernal mobile γ	tropique	$T = \frac{N}{n' + \lambda} = 27{,}321\,5816$ jours

N est le nombre des secondes correspondant à 360°
N = 360 x 3600 = 1 296 000

Richard Colin

La constitution physique du globe lui-même est difficile à observer de l'extérieur; les géophysiciens ont d'ailleurs eu beaucoup de mal à se faire une idée de la constitution du globe terrestre.

Une couche extérieure de 50 km d'épaisseur est formée dans sa partie supérieure par une *croûte* constituée d'eau, de sédiments, notamment de grès (densité moyenne = 2,8), dont l'épaisseur varie entre 5 et 10 km. La partie plus profonde est granitique. La faible densité de cette zone s'explique par l'abondance des oxydes peu denses de silicium, d'aluminium et de magnésium.

Sous cette couche se trouve le *manteau*, constitué lui aussi par des roches, mais dont la température est plus élevée, variant de 1 500 °K à 3 000 °K. Cette dernière valeur est atteinte dans la partie interne du manteau dont la profondeur est estimée à 3 000 km. Les roches qui constituent le manteau sont plastiques pour des déformations lentes. Leur densité est de 5,6 dans la partie profonde. L'augmentation de densité par rapport à celle de la couche précédente s'explique à la fois par la pression, qui est de l'ordre d'un million d'atmosphères, et par une plus grande richesse en fer.

Ce manteau recouvre le *noyau*, constitué de fer, allié avec du nickel et probablement avec quelques autres atomes, comme le soufre et le silicium. Ce noyau, dont le diamètre total est de 7 000 km, est liquide dans sa partie supérieure; seul le noyau central, de 2 800 km de diamètre, est solide. La température au centre est de l'ordre de 5 000 °K, la pression de 3,6 millions d'atmosphères, et la densité est voisine de 13. Toutes ces valeurs sont conjecturales; elles résultent de calculs de modèles du globe terrestre construits pour expliquer la propagation des ondes sismiques. Le pourcentage total de fer est estimé à 38 %. Signalons que tous les géophysiciens ne sont pas d'accord sur la nature ferreuse du noyau terrestre. On n'a, en effet, pas besoin de cet élément pour expliquer le magnétisme. L'intérieur de la Terre étant plus chaud que la surface, il existe un petit flux de chaleur de l'intérieur vers l'extérieur; mais il est en fait très petit et ne vaut que 1/20 000 de l'énergie reçue par le Soleil pour la même surface.

Par sa constitution physique, ses océans, son atmosphère, par la vie qui s'y est développée, notre planète est un astre unique du système solaire.

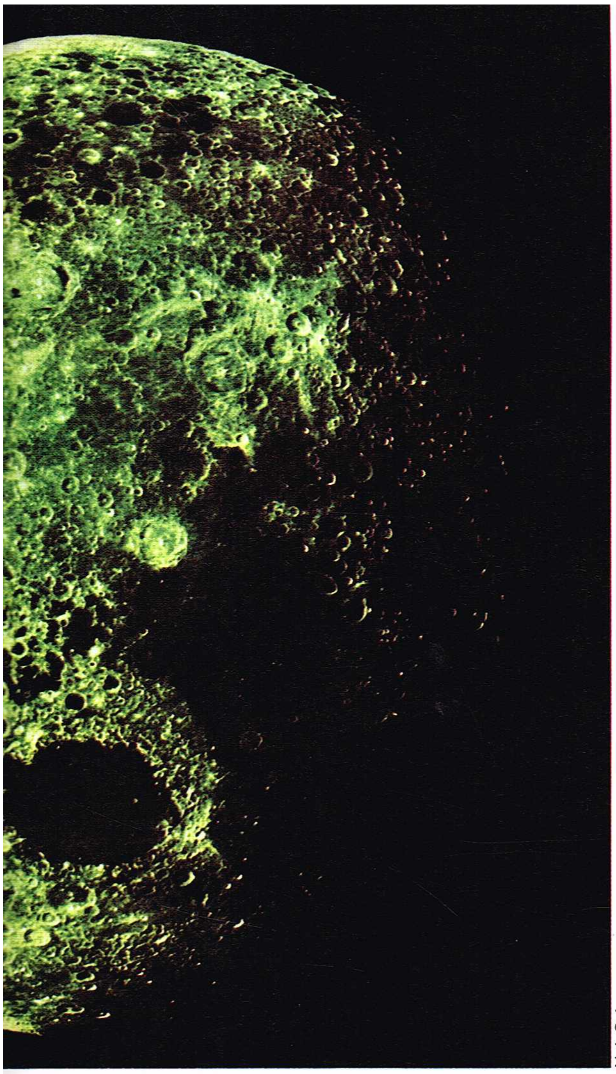

N.A.S.A.

La Lune

Le mouvement et les éclipses

Le mouvement de la Lune est régi par l'attraction de la Terre; mais en raison de la grande masse du Soleil, l'attraction solaire n'est pas négligeable et produit d'importantes perturbations du mouvement de notre satellite. Le calcul précis de la position de la Lune est un problème ardu mais bien résolu depuis le début du XIXe siècle. Les noms de très grands mathématiciens du XVIIIe siècle sont associés à ces calculs : Clairaut, d'Alembert, Euler. La période finale de ces recherches fut ouverte par Laplace et couronnée par la publication, en 1857, des tables de Hansen puis, en 1919, de celles de Brown. Depuis que l'on tient compte des irrégularités de la rotation de la Terre, ces tables représentent les positions de la Lune avec grande précision. Si la Lune décrivait une orbite circulaire, contenue dans le plan de l'écliptique, la longitude serait proportionnelle au temps, la latitude toujours nulle et la distance de la Lune constante. Mais comme le mouvement est complexe, à ces valeurs constantes ou uniformément variables il faut ajouter des termes périodiques, ou inégalités. Pour atteindre toute la précision voulue, les tables de Brown tiennent compte de 1 500 inégalités.

L'orbite lunaire, considérée à un moment donné, est une orbite elliptique dont l'excentricité moyenne est de 0,054 9; cette orbite est inclinée en moyenne de 5° 9′ sur l'écliptique. Elle est décrite, par rapport aux étoiles, en 27,321 66 jours. C'est la *révolution sidérale*, qui n'a pas une importance capitale. Par contre, la période de retour en conjonction avec le Soleil, période qui gouverne les phases de la Lune, est essentielle. Elle est évidemment supérieure à la révolution sidérale car le Soleil se déplace dans le même sens. Appelée la *révolution synodique*, elle est de 29,530 588 jours.

Comme nous l'avons déjà indiqué, le demi grand axe de l'orbite lunaire mesure 384 400 km. Le mouvement de la Lune est elliptique et obéit aux lois de Kepler. Au minimum de distance, ou périgée, la distance à la Terre, réduite de 5,49 %, est de 363 000 km; elle est de 405 500 km à l'apogée. A cause de cette ellipticité, le mouvement de la Lune sur son orbite n'est pas uniforme : la Lune est tantôt en avance, tantôt en retard de 6° 17′ sur son orbite. Cet écart correspond au mouvement de la Lune en 11 heures et demie. Il s'agit là de la plus grande des inégalités; elle n'est pas due à des perturbations.

Les perturbations du mouvement de la Lune

Ces perturbations sont nombreuses, et seules les principales seront évoquées ici.

Si l'on examine celles qui influencent le mouvement de la Lune dans son orbite, on observe d'abord une accélération du mouvement de la Lune. Cet effet est très petit, il avait néanmoins été détecté par Halley en 1693. L'effet observé est de 12″,4 par siècle. La théorie, ébauchée par Laplace en 1787, et complétée par Adams en 1853, explique la moitié de l'effet; le reste est dû au ralentissement de la rotation de la Terre qui produit une augmentation de la longueur du jour. Du fait de cette accélération, la Lune s'approche actuellement de la Terre mais la théorie complète montre que ce phénomène n'est que passager, et que dans 24 000 ans, elle s'éloignera. La variation est d'ailleurs très petite : à peine 2 m par siècle.

Le grand axe de l'orbite lunaire, qu'on repère par la ligne des apsides qui joint les deux sommets de l'ellipse, tourne de 6′40″ par jour dans le sens direct, et fait un tour complet en 8 ans et 310 jours. De ce fait, la Lune passe par le périgée, qui correspond au minimum de distance, tous les 27,554 5 jours. D'autre part l'orbite lunaire se déforme périodiquement et cela entraîne des variations du mouvement et des distances. Les phénomènes les plus importants sont connus depuis longtemps. Le premier effet a probablement été découvert par Ptolémée. C'est l'*évection* qui a une période de 31,812 jours et produit un écart de 1° 19′ sur le mouvement uniforme de la Lune, ce qui fait qu'elle est en avance ou en retard de 2 h 20 mn sur son orbite. L'autre effet important est la *variation* dont la période est la demi-révolution synodique, soit 14,77 jours, qui a été découverte en 1582 par Tycho Brahé. Elle produit dans les octants, c'est-à-dire à mi-chemin entre les Pleines et Nouvelles Lunes et les quartiers, des avances et des retards de la Lune de 72 minutes sur son orbite.

Naturellement, la distance Terre-Lune varie aussi avec les mêmes périodes que les inégalités du mouvement de la Lune. La valeur moyenne de cette distance est de 60,3 rayons terrestres. Par suite de tous les effets, elle varie entre 56,0 et 63,7 rayons terrestres.

Déplacement du plan de l'orbite lunaire

A cause des perturbations, le plan de l'orbite tourne dans l'espace de sorte que son intersection avec l'écliptique ou *ligne de nœud* fait un tour en 18,60 ans dans le sens rétrograde. La période de retour de la Lune par le nœud est importante car nous verrons qu'elle gouverne, avec la révolution synodique, la périodicité des éclipses, d'où son nom de *révolution draconitique :* dans d'anciennes mythologies, les dragons mangeaient le Soleil au moment des éclipses. Sa valeur est de 27,212 22 jours.

En plus de ce mouvement continu, le plan de l'orbite oscille un peu. L'inclinaison de l'orbite lunaire, qui est en moyenne de 5° 9′, varie entre 5° 0′ et 5° 18′, avec une période de 173 jours, qui est la période de retour du Soleil par le nœud de l'orbite lunaire.

La masse de la Lune

Les lois de Kepler régissant le mouvement de la Terre autour du Soleil s'appliquent en réalité au mouvement du centre de gravité du système Terre-Lune. C'est autour de ce point que la Lune décrit son orbite, et la Terre elle-même décrit une orbite semblable mais réduite en dimension dans le rapport de la masse de la Lune à celle de l'ensemble Terre-Lune. Ce mouvement produit un effet analogue à la parallaxe diurne, sa valeur maximale est sensiblement égale aux deux tiers de la parallaxe. L'effet est observable pour le Soleil, dont le passage au méridien est en avance ou en retard d'environ 0,43 seconde sur la position moyenne. La période du phénomène est la révolution synodique. La mesure de cet écart a permis de calculer la masse de la Lune, qui est la fraction 1/81 de celle de la Terre. Le centre de gravité est situé à 4 688 km du centre de notre planète : il est donc encore à l'intérieur de la Terre.

Notons que la masse de la Lune a été déterminée avec plus de précision par l'observation des petites planètes. La valeur plus précise ainsi obtenue du rapport de la masse de la Terre à celle de la Lune est de 81,45. Les satellites artificiels qui décrivent des orbites autour de

◀ Page ci-contre, à gauche, coupe schématique de la Terre montrant les diverses couches. Nous avons indiqué la pression, la température et la densité à diverses profondeurs (d'après J. Wyllie). Au centre, la Lune photographiée par les astronautes de la capsule spatiale américaine Apollo 8 (Noël 1968). On voit nettement (en bas, au centre) la Mer des Crises et le cratère Langrenus (au centre); en traçant une droite imaginaire passant à peu près par ces deux points de la surface lunaire, on délimite la zone de gauche qui est une partie de la face cachée de la Lune.

◀ Page ci-contre, en bas, le mouvement de la Lune : schéma et tableau donnant les définitions et les valeurs des différentes révolutions lunaires : S est la projection du Soleil sur l'orbite lunaire; γ_0 et γ sont les projections du point vernal fixe et mobile sur l'orbite lunaire; P, périgée de la Lune sans direction du sommet de l'orbite; Ω, intersection de l'orbite avec l'écliptique.

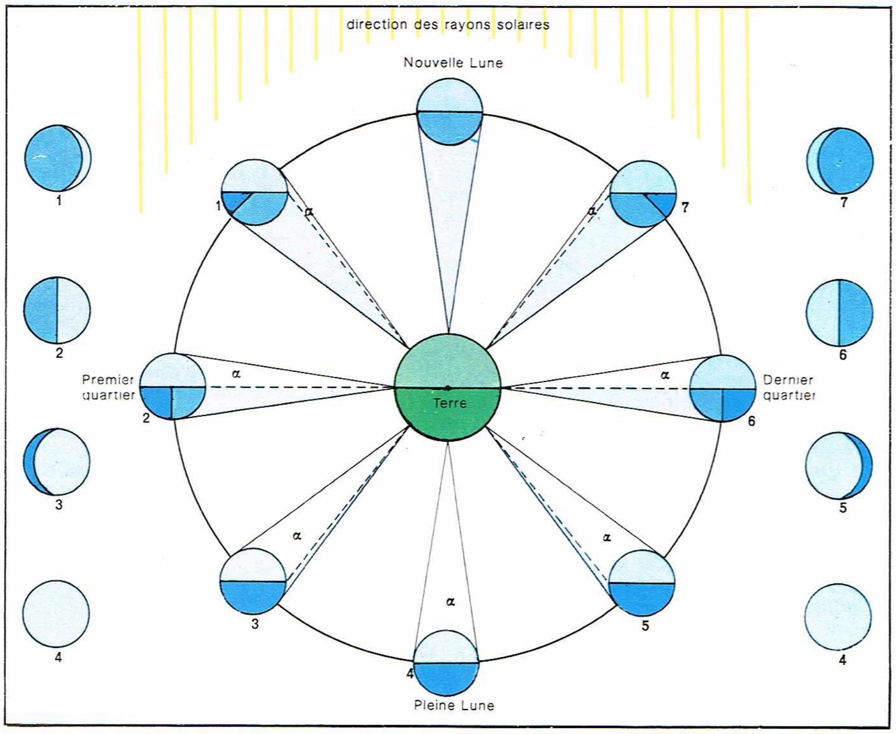

I.G.D.A.

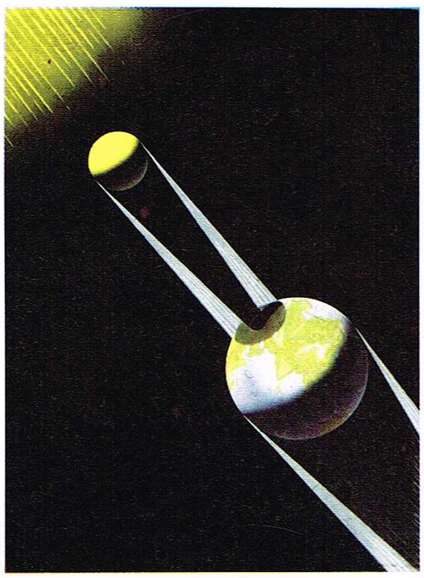

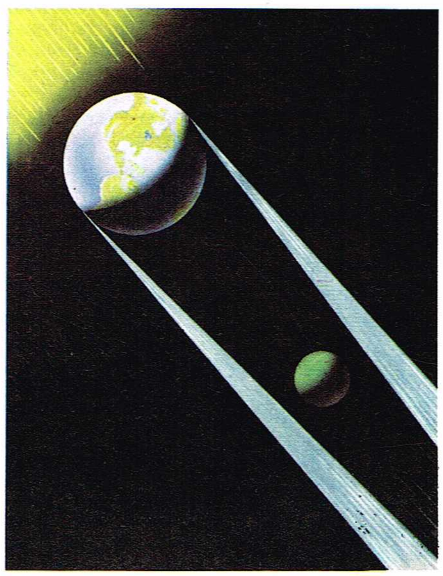

I.G.D.A.

la Lune ont permis la détermination d'une valeur encore plus précise : 81,301 ± 0,003. La densité moyenne de la Lune (3,34) est nettement inférieure à celle de la Terre (5,52). Elle montre que la composition moyenne de la Lune est différente de celle de notre planète.

Les phases de la Lune

On dit que la Lune est nouvelle (NL) lorsqu'elle a la même longitude que le Soleil. La Lune et le Soleil sont alors en conjonction géocentrique. Si à ce moment la Lune est sur l'écliptique, c'est-à-dire à un de ses nœuds, il y a éclipse de Soleil. Lorsque la différence de longitude entre la Lune et le Soleil est égale à 90°, on est au premier quartier (PQ) ; la Lune est alors visible le soir à l'ouest après le coucher du Soleil et se présente comme une demi-Lune dont la partie éclairée est tournée vers ce dernier. Lorsque la différence de longitude atteint 180°, on est à la pleine Lune (PL) : il y a opposition géocentrique de la Lune et du Soleil. Il peut y avoir également éclipse de Lune. Au dernier quartier, la Lune est visible le matin à l'est. Après une révolution synodique de 29,55 jours, nous revenons à la conjonction (NL).

La partie éclairée par le Soleil est très brillante, mais on peut aussi apercevoir, surtout après la NL, le reste de la Lune qui est éclairée par la Terre. Remarquons que pour les PL d'hiver, la Lune est haute dans le ciel. Sa déclinaison maximale peut atteindre

$$23^\circ\,27' + 5^\circ\,18' = 28^\circ\,45'.$$

C'est l'inverse pour les PL d'été, pour lesquelles la Lune est assez basse sur l'horizon ; sa déclinaison minimale peut alors atteindre $-23^\circ\,27' - 5^\circ\,18' = -28^\circ\,45'$.

Les éclipses de Lune

Il y a éclipse de Lune et de Soleil lorsque ces deux astres sont rigoureusement alignés avec la Terre. Il y a éclipse de Lune lorsque la Terre passe exactement entre le Soleil et la Lune, qui disparaît dans le cône d'ombre.

Précisons les conditions de l'éclipse. Les cônes d'ombres et de pénombres sont les deux cônes qui enveloppent le Soleil et la Terre. Sur un plan perpendiculaire à la direction Soleil-Terre et situé à la distance de la Lune, se dessinent deux cercles : le cercle intérieur correspond à l'ombre, et le second à la pénombre. Il est possible de calculer les diamètres de ces deux cercles. Ils dépendent, évidemment, de la distance de la Lune à la Terre et aussi un peu de celle du Soleil. Pour la distance moyenne, on trouve les dimensions suivantes exprimées en diamètres lunaires :

diamètre du cercle d'ombre	2,657
diamètre du cercle de pénombre	4,706

Le cercle d'ombre est beaucoup plus grand que le diamètre de la Lune, et l'éclipse peut être totale. Si la Lune passe dans le cercle d'ombre, l'éclipse est une éclipse par l'ombre. Il existe également des éclipses par le Soleil et la Lune, qui disparaît dans le cône d'ombre.

Dans le cas d'une éclipse centrale, où la Lune passe par le point central, le mouvement est de 0,991 diamètre lunaire par heure.

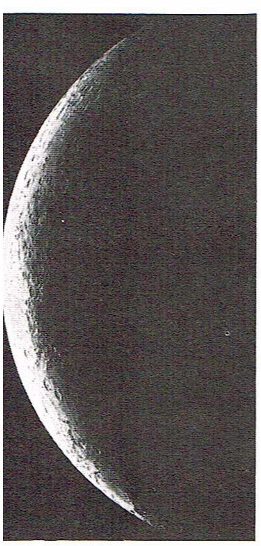

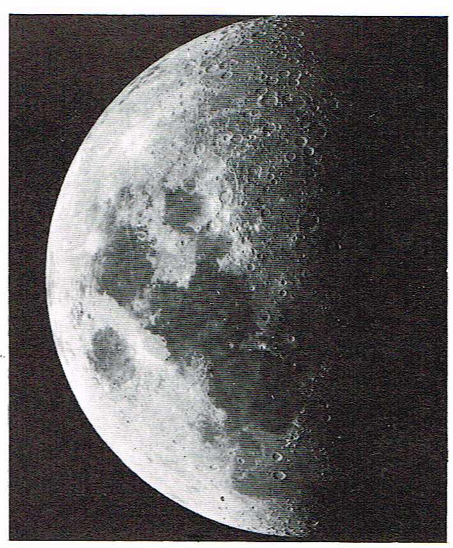

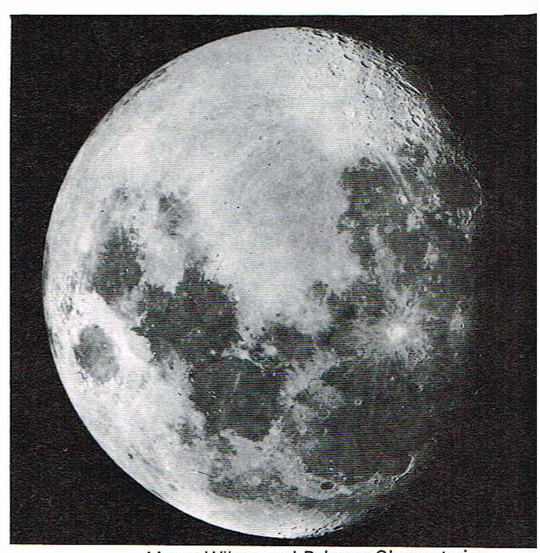

Mount Wilson and Palomar Observatories

On en déduit les durées suivantes :

durée de l'éclipse	5 h 48 mn
durée de la totalité	1 h 42 mn

Dans le cas où la Lune est à son apogée ou à son périgée, ces durées sont changées mais non de façon considérable.

Le phénomène de l'éclipse est fortement perturbé par l'existence d'une atmosphère autour de la Terre. Les rayons qui rasent le sol de la Terre sont déviés d'un angle supérieur à 72'; ceux qui traversent l'atmosphère à une certaine altitude le sont moins. Tous ces rayons éclairent fortement la zone d'ombre. Ils donnent une lumière fortement rougie.

Il faut aussi noter que les conditions météorologiques sur la Terre influencent le phénomène. On s'est même servi de cette lumière pour étudier l'atmosphère terrestre.

Les éclipses de Soleil

Une éclipse de Soleil a lieu lorsque la Lune passe exactement devant le Soleil. On peut faire un calcul analogue au précédent en considérant les cônes circonscrits au Soleil et à la Lune et le plan perpendiculaire à la direction Soleil-Lune passant par la Terre. On constate que les conditions sont très différentes; notamment, le cône d'ombre a son sommet tout près de la Terre. On prend pour plan de référence le plan tangent à la Terre du côté de la Lune, et les calculs sont effectués pour les cas extrêmes où la Lune est à son minimum (périgée) ou à son maximum de distance (apogée). On trouve les résultats suivants :

	Périgée	*Moyenne*	*Apogée*
Diamètre du cercle d'ombre	262	— 25	— 314 km
Diamètre du cercle de pénombre	6 576	6 872	7 164 km

Ces chiffres sont indicatifs; ils varient d'une éclipse à l'autre.

Dans le cas de l'éclipse au périgée, l'éclipse est totale dans un cercle de 262 km de diamètre. Pour une éclipse à l'apogée, on trouve des valeurs négatives, ce qui signifie que l'éclipse n'est pas totale mais annulaire : la Lune est trop éloignée pour cacher entièrement le Soleil, qui apparaît comme un anneau brillant entourant la Lune.

Naturellement, ces cercles d'ombre et de pénombre se déplacent dans le plan de référence. Au minimum de distance, leur vitesse est de 1 037 m/s. Mais l'observateur terrestre, entraîné par la Terre, se déplace dans le même sens. Dans le cas où cet observateur a la Lune au zénith, cette vitesse est de 427 m/s et le déplacement relatif de 610 m/s; la totalité dure 430 secondes. C'est l'éclipse la plus longue possible. Ce fut le cas de celle du 30 juin 1973. On entrevoit la possibilité de suivre l'ombre en avion; la vitesse nécessaire est de 2 200 km/h soit Mach 2. Cette observation a été faite à bord de l'avion Concorde et l'éclipse a pu être étudiée pendant plus d'une heure. La carte (p. suivante) donne les régions du globe où l'éclipse était visible; la petite bande centrale correspond au mouvement du cône d'ombre.

L'intérêt des éclipses de Lune est considérable pour l'étude de l'environnement solaire : couronne, ondes radio, effet Einstein, etc. Nous en avons déjà parlé.

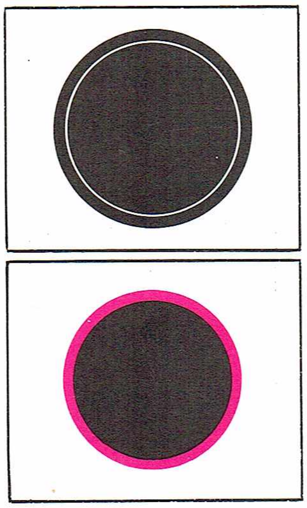

▲ ***En marge, schéma montrant les diamètres apparents de la Lune et du Soleil au moment d'une éclipse totale du Soleil (en haut) et d'une éclipse annulaire (en bas).***

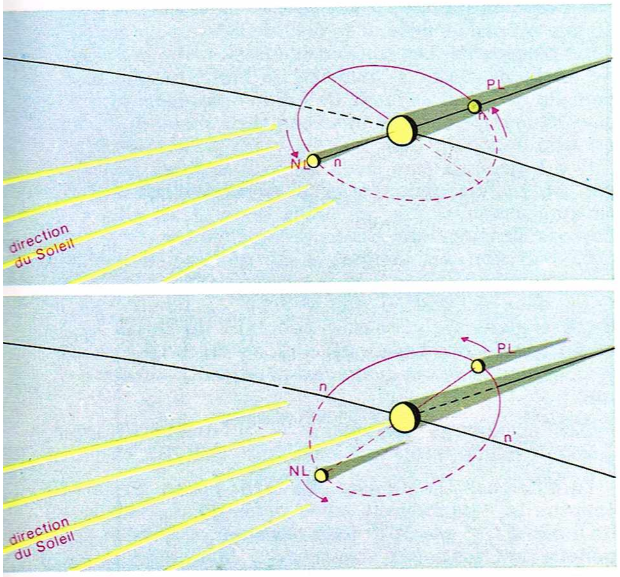

◀ ***Page ci-contre, en haut, les phases lunaires sont dues au mouvement de la Lune autour de la Terre; les différentes positions de la Lune sont indiquées par la suite de chiffres de 1 à 7; l'angle α est celui sous lequel on voit la portion de la face lunaire tournée vers la Terre et éclairée par le Soleil (le secteur angulaire en bleu ciel représente le reste de la superficie de l'hémisphère lunaire qu'on peut entrevoir du fait de la lumière cendrée). Page ci-contre, au centre, représentation des éclipses de Soleil, à gauche, et de la Lune, à droite.***

◀ ***Ci-contre, les éclipses de Soleil et de la Lune peuvent seulement avoir lieu aux époques où la ligne des nœuds de l'orbite lunaire coïncide avec la direction du Soleil : éclipse de Soleil au moment d'une Nouvelle Lune (NL), en haut, et éclipse de Lune au moment d'une Pleine Lune (PL), en bas, sont indiquées.***

▼ ***De gauche à droite, sur ces deux pages, une séquence de 8 photographies montrant la Lune à 3, 5, 8, 11, 17, 20, 23 et 26 jours après la Nouvelle Lune (Observatoires du mont Wilson et du mont Palomar).***

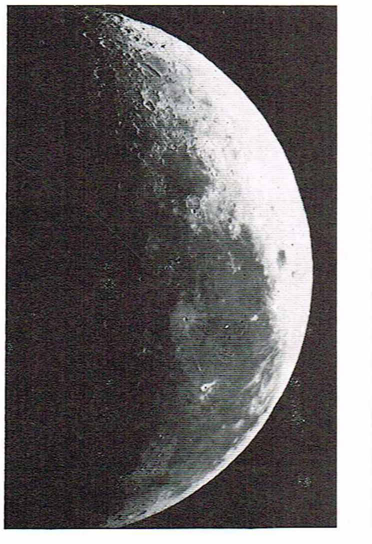
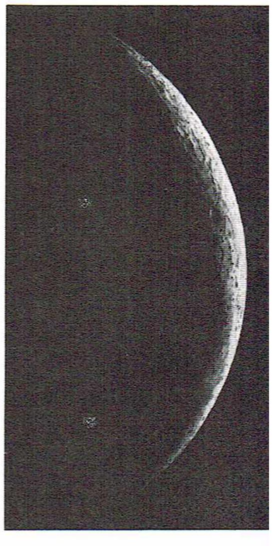

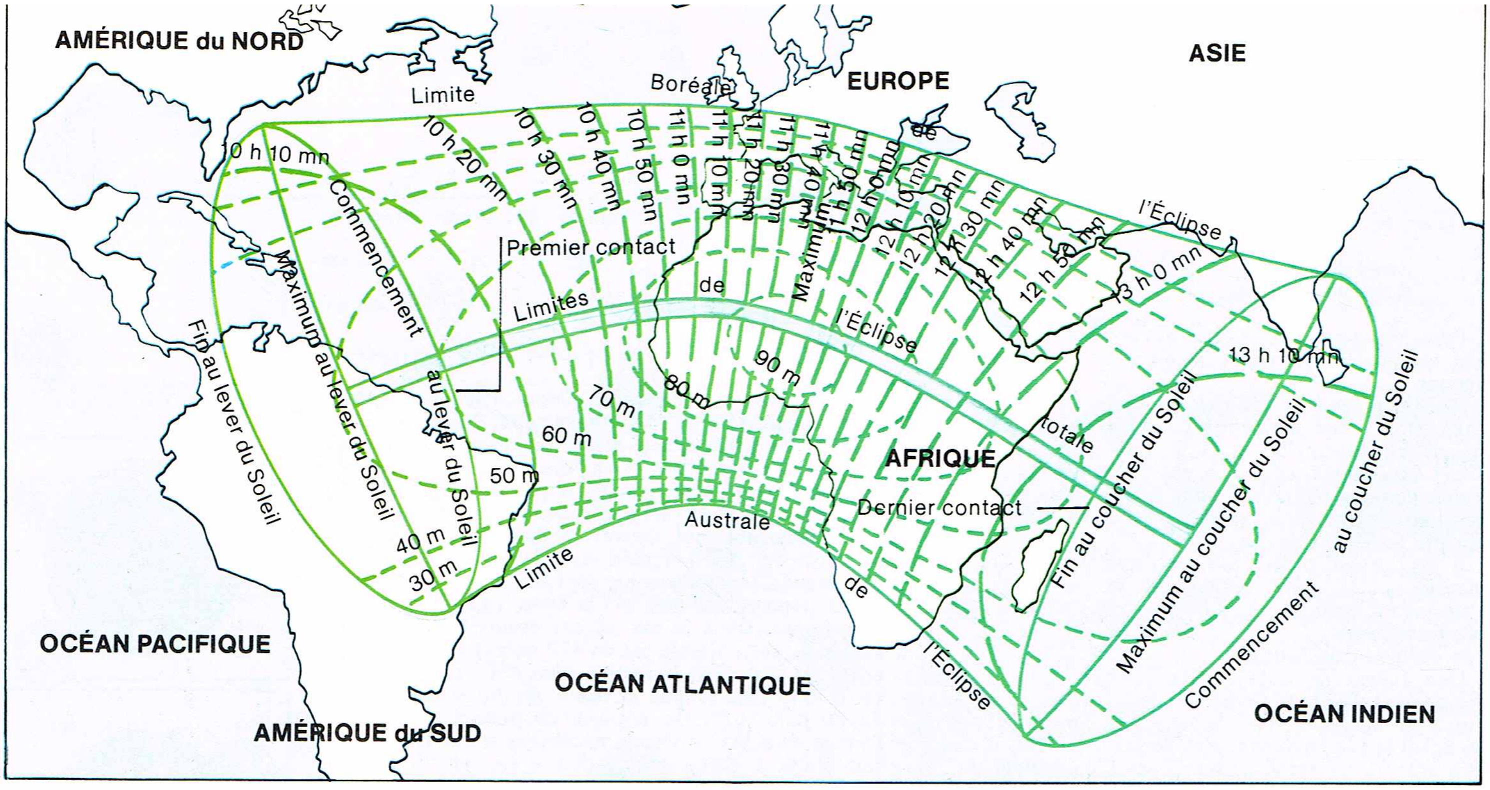

Richard Colin

▲ *Carte des régions d'où était observable l'éclipse totale du Soleil du 30 juin 1973. L'éclipse n'était totale qu'à l'intérieur de la petite bande allant du nord de l'Amérique du Sud à l'océan Indien en traversant le continent africain.*

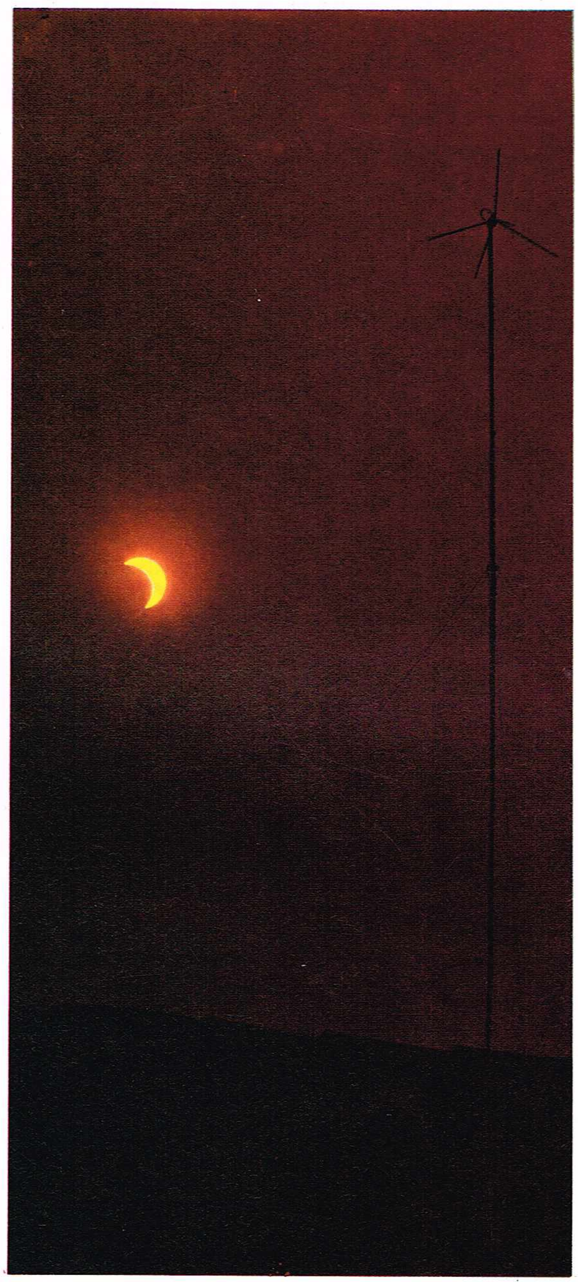
M. Pedone

▶ *Éclipse de Soleil photographiée à Milan (Italie) en 1961.*

La fréquence et la périodicité des éclipses — Le saros

Supposons qu'une éclipse centrale de Soleil ait eu lieu. Cela veut dire qu'à la conjonction, la Lune était aussi au nœud de l'orbite. Une demi-révolution synodique plus tard a lieu la pleine Lune, et le nœud de l'orbite n'a pas beaucoup bougé; il y a éclipse de Lune parce que l'orbite est peu inclinée. Il en était de même pour la pleine Lune précédente. Les suites d'éclipses : partielle de Lune — totale de Soleil — partielle de Lune, ou l'inverse : partielle de Soleil — totale de Lune — partielle de Soleil sont fréquentes. Mais le mouvement du nœud de l'orbite est trop important pour que les séries continuent.

Il y a généralement deux ou trois éclipses de Soleil par an, parfois quatre et plus rarement cinq (1935). Chaque année, il y a au moins deux et au plus cinq éclipses de Lune, dont deux par la pénombre.

La prévision des éclipses a été grandement facilitée par l'existence d'une période de répétition, le *saros*. Entre deux éclipses, il doit y avoir un nombre entier de révolutions synodiques — condition de PL ou NL — et un certain nombre de révolutions draconitiques (D) — condition de retour au nœud de l'orbite. Or, on constate que :

223 révolutions synodiques = 6 585,321 15 jours,
242 révolutions draconitiques = 6 585,356 70 jours.

La différence est si petite que pratiquement toutes les éclipses se reproduisent après cette période du saros de 6 585 ou 18 ans et 11 jours. La chance veut que cette période soit aussi très voisine de 239 révolutions anomalistiques (6 585,537 45) et ne diffère pas beaucoup de 18 révolutions de la Terre, de sorte que d'autres inégalités du mouvement de la Lune se reproduisent aussi.

Remarquons toutefois que le saros vaut un nombre entier de jours plus 1/3 de jour, de sorte que les éclipses du saros suivant sont observables à 120° à l'ouest des précédentes. Par exemple, l'éclipse totale du 9 juillet 1945 a été observée en Suède et celle du 20 juillet 1963 au Canada, alors que celle du 31 juillet 1981 sera vue en Sibérie et celle du 11 août 1999 en France et en Allemagne.

Naturellement, à cause des petits décalages, il y a des variations systématiques d'un saros à l'autre, et petit à petit les éclipses se décalent. On comprend l'importance du saros pour la prévision des éclipses dans les temps anciens.

On remarquera aussi l'intérêt prodigieux des éclipses pour la chronologie. Une liste des éclipses a été calculée pour les années 1207 avant J.-C. à 2161 après J.-C. par Oppolzer. Le nombre moyen d'éclipses par saros est de 43 éclipses de Soleil et de 41 éclipses de Lune. En 1975, on a observé : le 11 mai une éclipse partielle de Soleil, le 25 mai une éclipse totale de Lune, le 3 novembre une éclipse partielle de Soleil et les 18-19 novembre une éclipse totale de Lune.

La nature physique de la Lune

L'observation de la Lune à partir de la Terre avec les télescopes optiques ou radioastronomiques a fourni un très grand nombre de renseignements, dont la plupart ont été confirmés au cours des dix dernières années grâce à l'exploration spatiale. Celle-ci a ouvert une ère nouvelle d'un intérêt prodigieux pour notre connaissance du monde lunaire.

Commençons par résumer les données anciennes. On connaît avec précision la distance, les dimensions et la masse de la Lune. Sa distance moyenne est de 384 400 km. Elle a un diamètre de 3 476 km, environ le quart de celui de la Terre. Elle est très sensiblement sphérique. Sa masse est la fraction 1/81,3 de celle de la Terre de sorte que sa densité n'est que de 3,36, valeur nettement inférieure à celle de la Terre (5,52).

La Lune n'est pas lumineuse par elle-même ; elle réfléchit la lumière solaire. Dans l'échelle stellaire, sa magnitude est de — 12,7 (pleine Lune), ce qui correspond à 31 000 fois l'éclat de Sirius. L'éclairement donné par la pleine Lune est de 0,2 lux, c'est-à-dire 400 000 fois moindre que celui donné par le Soleil. Mais cette lumière est plus rouge que celle du Soleil, et les roches lunaires ont une couleur rougeâtre. Son éclairement varie beaucoup avec la phase, nettement plus que la surface apparente. Ainsi, aux quartiers, l'éclairement produit par la Lune est réduit dans le rapport du tiers, alors que la surface visible est égale à la moitié. Cet effet provient des propriétés diffusantes de la surface lunaire ; la lumière est d'ailleurs légèrement polarisée. On en déduisait, avant l'exploration de la Lune, qu'elle est recouverte d'une couche de poussières. On a essayé de préciser l'épaisseur de cette couche par des mesures des échos de radar réfléchis par la Lune ; en effet, s'il y a une couche de poussières, on doit observer deux échos sur les surfaces supérieure et inférieure de la couche. Les résultats étaient imprécis et donnaient des valeurs variant entre quelques décimètres et quelques mètres. C'était une des grandes inconnues au moment de l'atterrissage du premier homme.

Le rayonnement solaire réchauffe le sol lunaire. De ce seul fait, la Lune rayonne une certaine énergie dont l'intensité maximale est située dans le domaine de l'infrarouge et se superpose au spectre solaire réfléchi. Pour une température de 300 °K, le maximum a lieu pour la longueur d'onde de 10 μm. C'est la mesure de ce rayonnement infrarouge qui permet de déterminer la température du sol lunaire.

La lumière solaire diffusée par la Lune, hormis son changement de couleur, ne présente aucune absorption supplémentaire, ce qui confirme l'absence de toute atmosphère autour de la Lune. D'ailleurs, il arrive assez souvent que notre satellite passe devant des étoiles, et l'on constate que ces occultations sont très brusques, ce qui montre qu'il n'y a pas d'atmosphère. Toutes ces données ont été confirmées par les observations spatiales directes.

Avec une lunette ou un télescope, on voit de nombreux détails : des régions sombres assez uniformes, dénommées malencontreusement « mers », des chaînes de montagnes et surtout des cratères. On observe aussi des traînées blanchâtres, souvent très longues, qui traversent montagnes et cratères. Les grands instruments permettent d'apercevoir des cassures ou rainures à parcours anguleux.

Les premiers observateurs ont donné aux détails lunaires des noms, souvent poétiques : Mers de la Sérénité, de la Tranquillité, etc. Ils ont transporté les noms des montagnes terrestres sur la Lune : les Alpes, les Apennins, etc. Enfin, ils ont dédié les cratères aux grands astronomes du passé : Copernic, Ptolémée, Alphonse (il s'agit d'Alphonse le Sage, roi de Castille et astronome), etc. Cette nomenclature est historique et vénérable mais on a jugé nécessaire de l'étendre aux cratères de la face arrière, ce qui est fort contestable.

Les *mers* sont d'énormes dépressions, de couleur foncée, qui couvrent près de 40 % de la surface visible ; les plus grandes sont aussi appelées des *océans*. Sur leur bord, et surtout au bord de la Mer des Pluies, on observe des golfes et des chaînes de montagnes ; celle des Apennins est la plus caractéristique. Toute la surface lunaire, et en particulier la moitié australe du disque, est parsemée de cirques, ou *cratères ;* ceux-ci existent aussi dans les mers. On connaît des cratères de toute taille. Les plus grands dépassent 100 km de diamètre (le cirque Clavius atteint 220 km). Au télescope, on en aperçoit d'assez petits mesurant quelques centaines de mètres. Mais l'observation spatiale a permis d'en découvrir de toutes les dimensions : de 1 m, de 10 cm, et même des microscopiques. Les cratères présentent souvent des pics centraux. On voit fréquemment de petits cratères secondaires au fond des grands cratères, même sur les bords et sur les pics centraux.

Les *montagnes* sont élevées. D'ailleurs, en règle générale, le relief lunaire, par rapport aux dimensions du globe, est beaucoup plus important que celui de la Terre. Les fonds des cratères sont souvent situés à plusieurs centaines de mètres en dessous du niveau du sol environnant ; les cimes atteignent 8 200 m pour les monts Leibnitz. On observe, en divers lieux, des crevasses, des stries et des traînées rectilignes ; des rayons brillants partent des cratères Tycho et Copernic. Ils peuvent atteindre des longueurs de 2 500 km. Il s'agit probablement de dépôts superficiels de matériaux éjectés au moment de la formation de ces cratères. A la suite des alunissages, on a résolu le problème de la consistance et de la nature de la surface lunaire, tout au moins pour certaines régions. La couche de poussière est mince et le sol, bien que meuble, peut supporter le poids des astronautes et de leurs véhicules. C'est un sol granuleux et rendu compact par

▼ ***Photographie de la Lune obtenue par les astronautes d'Apollo 10 : on observera notamment le principal cratère, Bruce, d'environ 6 km de diamètre (en bas, à droite), et la topographie très accidentée (en haut) de la surface, accentuée par le faible éclairement du Soleil.***

U.S.I.S.

I.G.D.A.

▲ *Photographie de la face visible de la* Lune *: 1, Mer de la Fécondité; 2, Mer des Crises; 3, Mer de la Tranquillité; 4, Mer de la Sérénité; 5, Mer des Vapeurs; 6, Mer des Pluies; 7, Mer des Nuages; 8, Mer des Humeurs; 9, Océan des Tempêtes; 10, Mer du Froid; 11, cratère Tycho Brahé; 12, cratère Ptolémée; 13, cratère Langrenus; 14, cratère Archimède; 15, cratère Ératosthène; 16, cratère Copernic; 17, cratère Clavius; 18, cratère Kepler; 19, cratère Aristarque; 20, chaîne des Apennins; 21, Caucase; 22, Alpes (Observatoires du mont Wilson et du mont Palomar).*

▼ *Le grand cratère Copernic (Observatoires du mont Wilson et du mont Palomar).*

Mount Wilson and Palomar Observatories

les impacts du rayonnement solaire; il est parsemé de détritus de roches, de cailloux et de petits cratères, même dans les zones les moins accidentées.

Les analyses du sol lunaire ont permis de montrer la nature basaltique des mers, alors que les régions plus élevées seraient composées de roches moins ferreuses et moins denses. Orbiter 5 a montré l'existence de cinq grosses masses denses sous la surface de cinq mers circulaires (Mer des Pluies, Mer de la Sérénité, Mer des Crises, Mer du Nectar et Mer des Humeurs). On a donné le nom de *mascons* à ces concentrations de masses. Un sixième mascon semble se trouver entre *Sinus Aestum* et *Sinus Medii,* et un septième probablement sous la Mer Orientale. On a récemment découvert cinq autres mascons. La nature de ces concentrations de masses n'est pas expliquée.

L'autre face de la Lune

Comme nous l'avons expliqué, l'observation de la Lune à partir de la Terre permet d'observer 59 % de la surface, dont une partie, située près des bords, est assez mal connue. Les hommes pensaient que l'autre face nous serait à jamais cachée et, pour certains, cela était devenu un dogme.

On sait que l'observation spatiale a permis de connaître cette face aussi bien que celle qui est toujours tournée vers la Terre. La face arrière de la Lune est plus accidentée que la face visible. Les mers sont peu abondantes. L'engin spatial soviétique Lunik III a montré trois mers auxquelles on a donné les noms de Mer de Moscou, Mer Australe et Mer des Rêves. Les magnifiques photographies obtenues ensuite par les engins américains ont montré la présence de nombreux cratères, dont aucun n'est aussi grand que le cirque Tycho Brahé. Il existe, par contre, de nombreuses dépressions qui diffèrent des mers parce qu'elles sont plus claires et parsemées de cratères. La dissymétrie de la Lune est certaine; son centre de gravité est déplacé de 2 km vers la Terre.

La vie sur la Lune

Sur la Lune, dépourvue d'atmosphère et soumise à de fortes variations de température, on ne pourrait vivre que sous des coupoles ou dans le sous-sol afin d'être protégé contre les météorites et le vent solaire. La température y est d'ailleurs assez basse. Les astronautes ont pu marcher dans leurs scaphandres sur la Lune et se promener en véhicules spéciaux. Ils ont vu un paysage gris jaunâtre. Le Soleil est très lumineux, dans un ciel noir rempli d'étoiles qui ne scintillent pas. La Voie Lactée ressemble à un vaste fleuve de faible luminosité. La Terre présente des phases, de la même façon que la Lune. Les étoiles traversent lentement le ciel, en 14 jours terrestres. Les constellations sont les mêmes, mais le pôle Nord de la Lune est voisin de l'étoile Zêta du Dragon.

La température de la Lune change en fonction de la latitude : près des pôles et le long du terminateur (ligne qui sépare la zone éclairée de la zone obscure), la température moyenne est d'environ — 50 °C, alors qu'elle atteint + 110 °C dans la zone équatoriale, lorsque le Soleil est au zénith. En outre, comme il n'y a pas d'atmosphère pour transférer la chaleur d'un endroit à un autre, un astronaute, pendant le jour lunaire, est soumis à de grands écarts de température, de + 110 °C sous le Soleil, à — 100 °C à l'ombre d'une roche. L'absence d'atmosphère est également un problème pour les véhicules qui doivent être mus par l'électricité. Le choix des matériaux est délicat: les matières plastiques et certains métaux deviennent fragiles ou se décomposent, ou bien encore s'évaporent dans le vide. Les lubrifiants à base de matières grasses s'évaporent, alors que ceux qui contiennent du graphite nécessitent de l'humidité qui n'existe pas. L'absence de couches de gaz absorbés par les métaux oblige à effectuer des soudures à froid. Les communications sont difficiles car il n'y a pas d'ionosphère réfléchissante; aussi faut-il avoir recours à des transmissions hertziennes en ligne droite, ce qui entraîne des complications si l'on pense qu'un homme d'une taille de 1,80 m disparaît derrière la courbure de l'horizon lunaire à 3 km de distance. La solution la plus efficace a été la retransmission des communications par la Terre. Les montagnes apparaissent encore plus imposantes du fait de la relative proximité de l'horizon.

Le sol lunaire est granuleux, tourmenté, caillouteux et plein de cratères. Quand le Soleil se lève ou se couche, la lumière ou les ténèbres sont subites. Les ombres sont démesurément allongées. Les ombres portées des grands cratères sont bien visibles dans un télescope et permettent

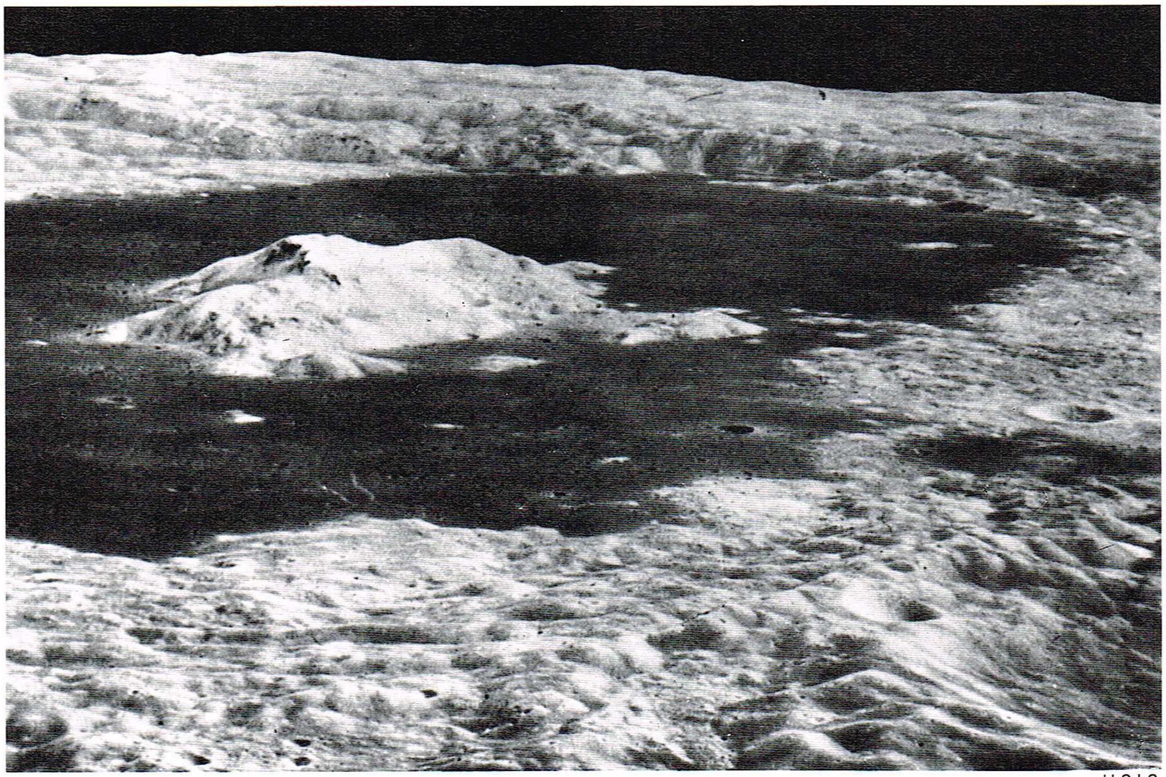

◀ *Photographie du cratère Tsiolkowsky, dont le diamètre est d'environ 240 km. Cette photographie a été prise d'une altitude de 100 km à partir d'Apollo 15. On remarquera le pic central.*

U.S.I.S.

de déterminer leur altitude. Du fait de l'absence d'atmosphère, les changements de la température superficielle des roches sont très rapides.

La Terre, vue de la Lune, est un très beau spectacle. Placé sur la face cachée, un observateur ne peut jamais voir notre planète, dont il pourrait ignorer l'existence! S'il est placé, au contraire, au centre de la face qui est tournée vers nous, la Terre sera pour lui sensiblement au zénith. Mais la libration qui nous a permis d'étudier les 6/10 du globe lunaire se traduit maintenant par un lent mouvement de la Terre. Celle-ci se déplace à l'intérieur d'un grand rectangle mesurant environ 16° en longitude et 14° en latitude. Les oscillations en longitude et en latitude ont respectivement des périodes de 27,55 jours et de 27,21 jours. Au cours des temps, la Terre occupe n'importe quelle place dans ce rectangle ; elle y décrit une sorte de courbe bouclée *(courbe de Lissajous)*. Le diamètre de la Terre vu de la Lune est environ 4 fois plus grand que le diamètre apparent de la Lune pour nous. Naturellement, notre planète présente des phases qui varient avec la période synodique, le mois lunaire de 29,55 jours. L'éclairement donné par la Terre est beaucoup plus important que le clair de Lune : la Terre a un diamètre apparent beaucoup plus grand et elle réfléchit mieux la lumière solaire que ne le fait la Lune. Au maximum, cet éclairement est environ 80 fois plus grand. La lumière est vert bleuâtre. On observe bien ce type d'éclairement à partir de la Terre surtout lorsque la Lune présente un fin croissant : il s'agit de la « lumière cendrée ».

Quand il y a une éclipse de Lune pour les Terriens, sur la Lune, on voit la Terre éclipser le Soleil. La surface lunaire prend alors une couleur cuivrée, parce que l'atmosphère de la Terre arrête les rayons bleus et violets, alors qu'elle laisse passer le rouge et l'orangé. En quelques minutes, la température de notre satellite descend de 65 °C.

La Lune et l'ère spatiale

Les observations rapprochées de la Lune par les divers engins spatiaux soviétiques et américains ont ouvert une ère nouvelle dans notre connaissance du monde lunaire. Il n'est possible ici que de rappeler les dates principales.

Le 7 octobre 1959, le vaisseau spatial soviétique Lunik a pris et retransmis des photographies de la face arrière de la Lune. Ces observations furent suivies par les photographies d'une netteté extraordinaire transmises par les Rangers, lancés à partir de 1964 par les Américains. Puis a atterri sur la Lune la série des Surveyors qui ont transmis des images directes; puis en 1966, les Lunar Orbiters américains permirent une photographie très précise de

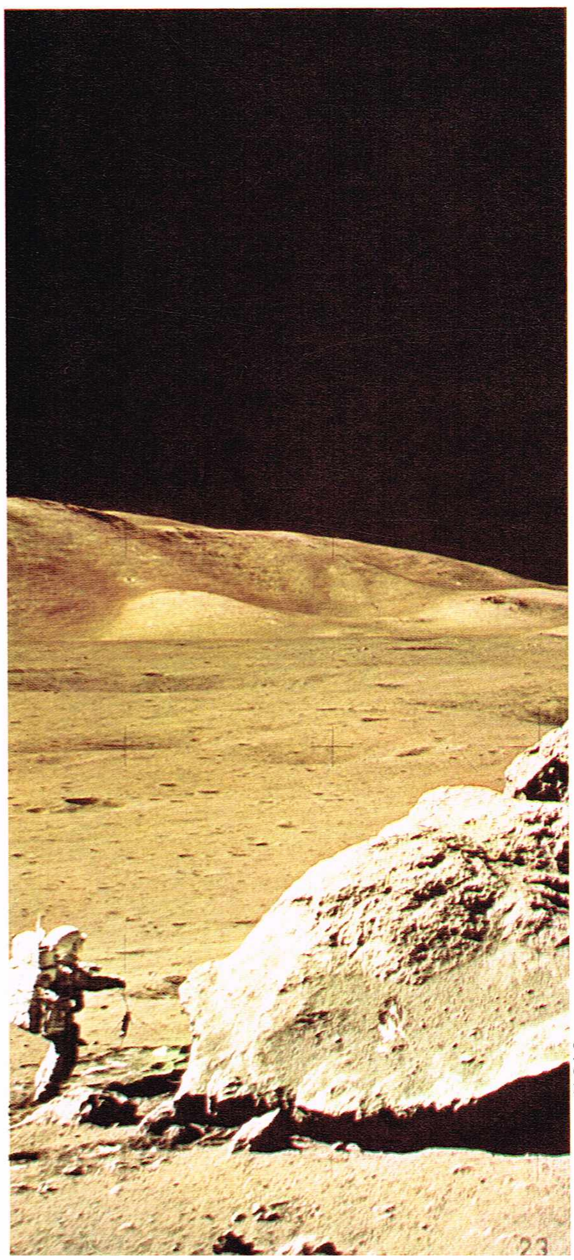

U.S.I.S.

◀ *Ce panorama de la Lune a été photographié par la mission Apollo 17 commandée par G. Cernan, au cours de la troisième exploration en véhicule. On observe l'un des explorateurs portant un gnomon pour l'orientation des échantillons photographiés; on remarque également un énorme bloc erratique éclaté.*

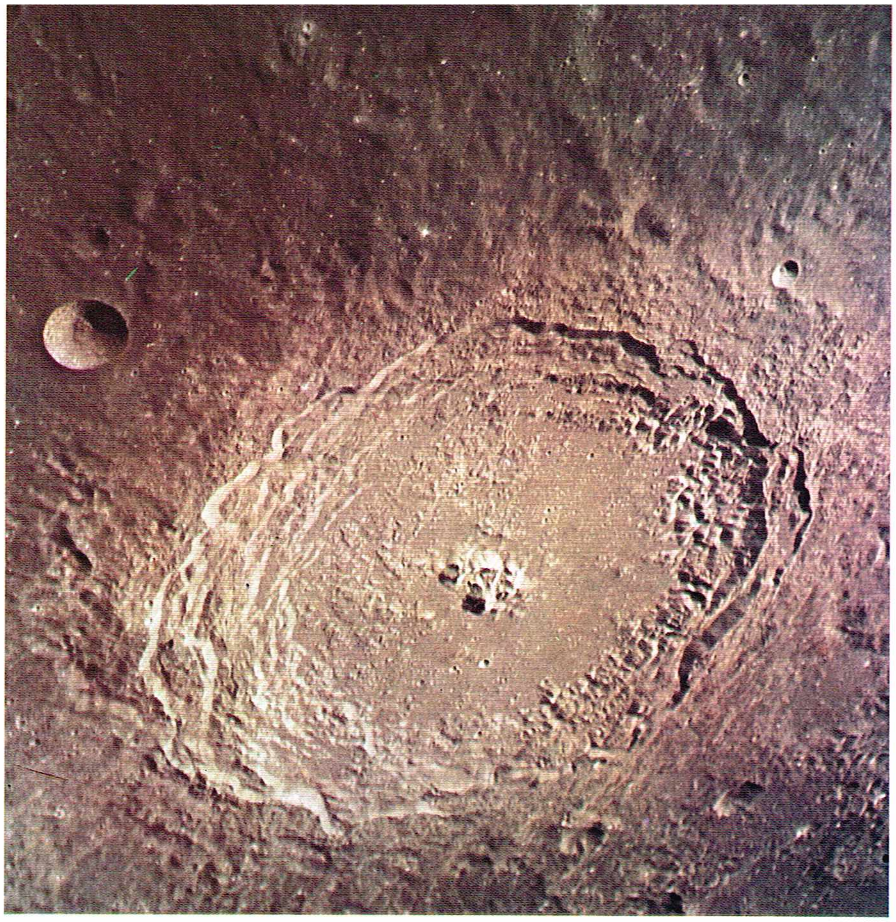

N.A.S.A.

▲ ***Le cratère Langrenus :** la photographie a été prise par les astronautes d'Apollo 8 pendant qu'ils tournaient autour de la Lune.*

toute la Lune. Mais la date la plus importante est celle du 20 juillet 1969, où le vaisseau Apollo 11 déposa les premiers hommes, Armstrong et Aldrin, sur la Lune; six autres missions Apollo suivirent, dont seule la mission Apollo 13 eut des difficultés. Six équipages ont passé en tout 12 jours et 11 heures sur la Lune. Ils ont parcouru 96,5 km en 3 jours et effectué 9 heures de déplacement à pied ou en véhicule. En même temps, les Soviétiques firent atterrir Luna 16 et Luna 20 et purent aussi ramener des échantillons lunaires, grâce à une manœuvre complètement automatique.

La moisson de résultats est extraordinaire et nous ne pouvons donner que les résultats essentiels.

Les roches lunaires

Au cours des six missions Apollo, les astronautes américains ont ramené 386 kg de roches lunaires qu'ils ont ramassées sur la Lune, détachées de rochers ou même prélevées par carottage. Les sondes automatiques soviétiques, de leur côté, ont permis la récolte de 150 g d'échantillons. Ces échantillons n'ont pas été prélevés sur les roches en place mais sur la couche complexe, nommée régalithe, due aux remaniements de la surface supérieure.

La partie exposée des rochers a subi, pendant des millions ou des milliards d'années, le bombardement du vent solaire. L'érosion correspondante a arrondi les angles et emprisonné des atomes dont l'étude a pu être faite. Ces roches ont également subi l'impact de micrométéorites; elles présentent de petits cratères et des billes de verre, probablement créés aussi par l'impact de ces petits projectiles.

On peut classer ces échantillons en divers groupes : des basaltes, des roches reconstituées ou brèches, des petites sphères de verre et des poussières très fines dues à la décomposition des roches précédentes. A ces constituants principaux il faut ajouter des roches plus rares, analogues aux anorthoses de la Terre et des échantillons riches en potassium, phosphore, métaux et terres rares.

Un des résultats les plus nets est la détermination de la nature de coulées de *laves basaltiques* des « mers ». Ces basaltes sont semblables aux basaltes terrestres mais en diffèrent par une plus grande richesse en fer; ils sont également plus pauvres en silicium. Fondus, ils sont plus fluides que les laves terrestres et ont pu couler sur des centaines de kilomètres en couches assez minces. L'âge de leur formation est estimé à 3,7 milliards d'années. On pense qu'ils ont coulé par les orifices produits par la chute de météorites. Ces roches sont remarquables par l'absence d'eau et l'absence d'ions ferriques, ce qui montre qu'elles ont été produites en milieu réducteur.

Les *brèches* sont des associations de divers minéraux qui résultent de l'agglomération de roches brisées, puis comprimées et réassociées. Même les poussières contiennent des microbrèches.

Les *verres,* incolores ou colorés du jaune d'or au rouge et au noir, ont des compositions analogues aux basaltes riches en titane, qui avaient été la surprise des échantillons d'Apollo 11. Ces billes présentent des diamètres allant de quelques microns à 2 mm; des morceaux de verre peuvent avoir des volumes de l'ordre du centimètre cube. Les verres représentent la moitié des échantillons ramenés par les astronautes d'Apollo 11. La datation des brèches a donné des époques de formation plus anciennes que celles des basaltes, de l'ordre de 4,6 milliards d'années, dont l'explication est difficile.

Certains fragments rapportés par les astronautes d'Apollo 11 étaient blancs et avaient une nature spéciale; formés de minéraux, de feldspaths plagioclases, d'olivine et de pyroxène, ils n'ont d'analogues sur la Terre que quelques gros blocs d'anorthose trouvés dans des dépôts cambriens terrestres très anciens.

L'analyse détaillée des échantillons a montré la présence de 3 minéraux abondants (le pyroxène, le plagioclase et l'olivine), de 27 minéraux moins abondants, connus sur la Terre, allant de l'ilménite dans le quartz aux métaux purs (cuivre, fer, etc.), au rutile, etc., de 3 minéraux nouveaux inconnus sur la Terre (l'*armacolite* nommé en l'honneur des trois premiers astronautes, la *tranquillityite* ramassée dans la Mer de la Tranquillité et un minerai analogue à la *pyromanganite,* mais où le fer a remplacé le manganèse).

Parmi les roches ramenées par les astronautes d'Apollo 12 figuraient un certain nombre de masses amorphes ayant l'aspect de morceaux de caramel mou recouverts de poussières. L'analyse montra une prédominance importante du potassium (K), des terres rares (en anglais *rare earth elements* ou REE) et du phosphore (P). On les nomma pour cela des *kreeps.* Ils semblent provenir de l'explosion, il y a 3,7 milliards d'années, de couches situées en dessous des coulées de basalte. Ils sont radio-actifs et on a pu les mettre en évidence par leur rayonnement γ.

Une autre surprise a été de constater que ces roches étaient magnétiques. On pense que la Lune avait, dans les temps anciens, un champ magnétique.

L'installation de sismographes a permis de constater l'existence d'une couche rigide de 60 km d'épaisseur disposée sur un manteau de 1 000 km d'épaisseur, lui-même rigide. A l'intérieur existe un noyau fondu car il amortit beaucoup les ondes sismiques. La nature de ce noyau, fer ou roches, n'est pas connue; sa température est de 1 500 °K. Les tremblements de Lune, si l'on excepte les ondes dues à l'impact de météores, semblent se produire sur la discontinuité manteau-noyau, alors que les tremblements de Terre sont superficiels.

On a analysé les gaz inclus dans les roches : ils sont probablement d'origine solaire et dus au bombardement par les particules du vent solaire. Ils recouvrent d'ailleurs les roches lunaires d'une atmosphère très ténue d'hélium et d'argon. Les 3 000 atomes/cm^3 correspondent à une pression se chiffrant à beaucoup moins d'un millionième de millionième de millimètre de mercure (10^{-12} mm de Hg).

L'ensemble de ces résultats montre que la Lune n'est pas l'astre mort que l'on imaginait, qu'elle est chaude à l'intérieur et qu'elle a subi de nombreux réarrangements. Mais en raison de l'absence d'eau et d'atmosphère véritable, les phénomènes sont très différents des phénomènes terrestres.

Les sélénologues ont essayé de décrire l'histoire de notre satellite. Voici une des images qu'ils proposent : la Lune s'est formée, il y a environ 4,7 milliards d'années, par un mécanisme encore inconnu, soit par condensation à partir de la matière initiale du système solaire, soit par capture. On admet aujourd'hui que c'est l'hypothèse de la formation simultanée de la Terre et de la Lune qui est la plus vraisemblable.

Résumons une des descriptions possibles de la formation du système solaire sans oublier, toutefois, qu'il s'agit d'une hypothèse. Le Soleil, dont l'âge est estimé à 5 milliards d'années, était déjà né, mais caché à l'intérieur de sa nébuleuse primitive de poussières et de gaz, particulièrement dense dans le plan de l'écliptique. Ce nuage arrêtait tout rayonnement solaire à peu de distance du Soleil.

Du fait de la très basse température qui régnait dans l'espace, sans doute de l'ordre de — 260 °C, la vapeur d'eau, le gaz ammoniac, l'azote, l'anhydride carbonique, l'oxyde de carbone et le méthane se condensaient en poussières de neige et de glaces; celles-ci, à leur tour, formaient de grandes condensations, des sortes d'embryons de planètes. Il régnait, dans ce milieu, une grande turbulence et des masses de plus en plus grandes se formaient, se fractionnaient et s'accumulaient de nouveau. Petit à petit, certaines masses se sont agglomérées en de plus grosses masses et l'énergie de gravitation libérée lors de cette condensation les échauffait de plus en plus, provoquant l'évasion des substances les plus légères et les plus volatiles mais en laissant les matières pierreuses et métalliques. Ainsi, pendant des dizaines de millions d'années, la Terre s'est condensée jusqu'à ce que le Soleil commençât à être visible.

La Lune s'est formée simultanément soit comme une autre planète, capturée ensuite par la Terre, soit directement, comme satellite. F. Whipple imagine que la Terre avait un anneau semblable à celui qui entoure encore aujourd'hui Saturne et que la Lune serait due à la condensation de cet anneau. Le noyau de la Lune se serait ensuite réchauffé par suite de la désintégration d'éléments radioactifs; il est probable qu'elle ne s'est pas réchauffée suffisamment pour produire un noyau ferreux comme celui de la Terre.

Les grosses masses, plus ou moins condensées, continuèrent à tomber sur la Lune pendant des centaines de millions d'années en créant d'innombrables cratères. Entretemps, la chaleur interne augmentait et faisait fondre une couche superficielle de 400 km d'épaisseur. Pendant cette période critique, les grandes dépressions, ou « mers », le fond de nombreux cratères, les vallées et les fractures les plus profondes se remplirent de lave. Mais cette période, relativement brève, fut suivie d'une période de mouvements tectoniques produisant des affaissements, des élévations et des fentes. Le bombardement météoritique a fortement diminué d'intensité et il semble que depuis 3 milliards d'années il se soit stabilisé. Seul, le cratère Tycho se serait formé il y a 900 millions d'années.

Mercure, Vénus et Mars semblent avoir été soumis aux mêmes bombardements; la Terre probablement aussi, mais l'érosion par le vent et l'eau a tout effacé.

L'action des volcans est certaine en différentes régions de la Lune, mais beaucoup de cratères, surtout les plus grands, ont été provoqués par des chocs de météorites. La chute de météorites est aussi observée sur la Terre. Cependant, sur notre planète, les phénomènes géologiques les ont érodés et détruits; seuls sont encore visibles les plus récents. Les pics centraux que présentent de nombreux cratères lunaires sont moins élevés que les bords des cirques eux-mêmes. Selon d'anciennes théories, ces pics centraux seraient produits par la chute des débris formés par l'impact de la météorite et qui s'accumulent, pour une simple raison géométrique, au centre. Selon C.P. Kuiper, les pics centraux se seraient formés pendant la période où la Lune était encore partiellement fondue : l'impact de la météorite créait une cavité au centre de la surface d'où sortait la lave qui formait les pics centraux. Les cratères formés avant et après cette période ne devraient donc pas présenter de pics centraux.

Les « mers » furent également produites, toujours durant la même période, par suite du choc de grandes météorites qui brisèrent la croûte en provoquant des sorties abondantes de lave.

▼ Le cratère Goclenius dans la Mer de la Fécondité. Ce cratère a un diamètre de 65 km, et il est parcouru par des crevasses; les cratères du fond sont Colomb, Magellan A et B et Gutenberg (Apollo 8, 24-25 décembre 1968).

U.S.I.S.

▶ ***Représentation schématique de l'avance séculaire du périhélie de* Mercure *(dont l'orbite autour du Soleil est indiquée en rouge).***

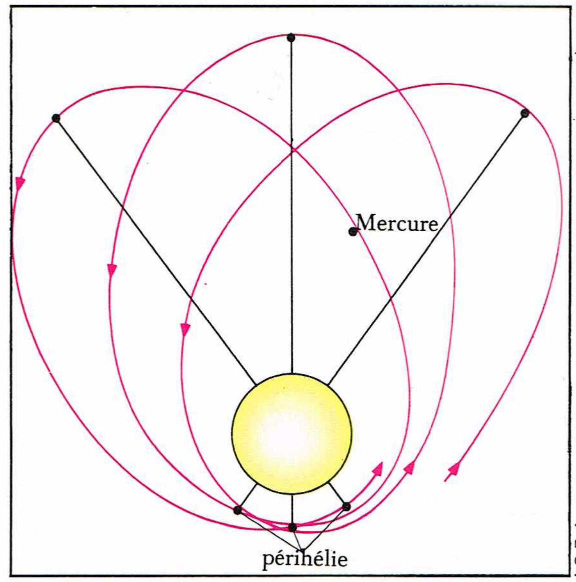

La récente découverte de noyaux denses, ou mascons, sous la surface de certaines mers lunaires semble renforcer l'hypothèse météoritique de la formation de la surface lunaire. Toutefois, on a observé de nombreux autres indices qui contrediraient au moins partiellement cette théorie. Par exemple, certaines crevasses semblent être d'anciens fleuves lunaires. Cela prouverait que la Lune aurait non seulement présenté une activité volcanique mais, au moins pendant une courte période, également contenu de l'eau. Cette hypothèse, émise pour la première fois en 1876 et reprise par W.H. Pickering en 1905, est acceptée à notre époque par H.C. Urey et d'autres spécialistes; mais elle paraît infirmée par l'analyse chimique des roches lunaires.

La publication des résultats des analyses des roches lunaires et des innombrables documents est à peine commencée. Il y aura des résultats inattendus : ainsi, on a mis en évidence des traces de composés carbonés et parmi eux des amino-acides, c'est-à-dire les composants typiques de la vie. Sept échantillons de roches ramassés lors de l'expédition d'Apollo 14 montrent environ 100 millionièmes de carbone et on a mis en évidence de la glycine, des acides aspartique et glutamique. La molécule la plus abondante, la glycine, est présente à 0,2 nanomolécule par gramme d'échantillon. Cette proportion est évidemment très faible; naturellement, de nombreuses précautions ont été prises pour vérifier qu'il n'y a pas eu de contamination par les astronautes. Il n'est pas sûr que ces molécules soient d'origine biotique. Mais elles sont d'un intérêt prodigieux.

Mercure

Des deux planètes inférieures (Mercure et Vénus), Mercure est la plus proche du Soleil et la plus petite : elle a un diamètre de 4 878 km, c'est-à-dire à peine une fois et demie celui de la Lune. Sa masse représente 0,0554 fois celle de la Terre. Son orbite, très inclinée sur le plan de l'écliptique (7° 00'), est très elliptique (e = 0,205 6) ; la distance de l'astre au Soleil varie de 46 millions de kilomètres au périhélie à environ 70 millions de kilomètres à l'aphélie; la valeur moyenne est d'environ 58 millions de kilomètres, soit 0,4 unité astronomique.

Le périhélie de Mercure tourne de 570" par siècle dont seulement 530 sont expliquées par la théorie de Newton. La différence, exactement de 42",5 ± 0,9 par siècle, a pu être expliquée par la théorie de la Relativité généralisée. Toutes les autres explications avancées, notamment celle de l'existence d'une planète plus proche du Soleil, Vulcain, n'ont pas été confirmées. Cette planète n'a jamais été découverte.

Nous avons déjà expliqué les conditions générales d'observation d'une planète inférieure. Dans le tableau ci-dessous sont indiquées les valeurs moyennes des paramètres principaux.

▼ ***Tableau des valeurs moyennes des paramètres principaux définissant les conditions d'observation de* Mercure *(planète inférieure).***

MERCURE					
	CS Conjonction supérieure	EE Élongation orientale (Est)	CI Conjonction inférieure	EW Élongation occidentale (Ouest)	CS Conjonction supérieure
Temps en jours	0	36,4	58,0	79,80	115,9
Diamètre apparent	5"	7"	11"	7"	5"
Magnitude	− 1,7	− 0,3	+ 2,8	− 0,3	− 1,7

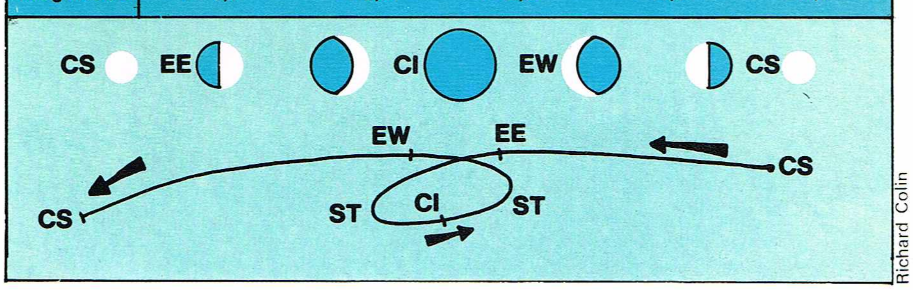

La planète n'est observable qu'à l'aube ou au coucher du Soleil et il faut attendre les époques d'élongation maximale (l'élongation est la distance angulaire entre le Soleil et la planète) qui ont lieu six fois par an, à raison de trois élongations orientales et trois élongations occidentales. Les époques pendant lesquelles l'écliptique forme le plus grand angle avec l'horizon sont les plus favorables. C'est seulement alors que le Soleil se trouve assez bas sous l'horizon, immédiatement après le coucher ou avant le lever de la planète. Les époques les plus favorables pour observer Mercure sont les élongations qui ont lieu le soir, en avril et mai, après le coucher du Soleil, ainsi qu'en septembre et octobre, le matin, avant l'aube. Les élongations maximales du tableau ci-contre, en bas, sont les valeurs moyennes, mais elles varient beaucoup avec la position de la planète sur l'orbite. L'élongation est de 28° quand Mercure est au maximum de distance du Soleil (aphélie). On peut alors observer la planète pendant une heure comme une étoile de première grandeur. Par contre, la distance angulaire au Soleil n'est que de 18° quand elle coïncide avec le périhélie.

Naturellement, Mercure présente des phases. A la conjonction inférieure, il est très proche de la Terre, mais nous présente sa face non éclairée. C'est à ce moment qu'il peut passer sur le disque du Soleil. Son diamètre angulaire est alors maximal (de l'ordre de 11"). Mais la planète n'est pas observable. A la conjonction supérieure, nous voyons la face éclairée, mais le diamètre angulaire n'est que de 4",5 et il disparaît dans le rayonnement solaire. On ne peut donc étudier Mercure que pendant des phases partielles. Les conditions sont si difficiles que Copernic n'a jamais pu l'apercevoir.

Des observations visuelles au télescope, les astronomes avaient déduit que Mercure tournait sur son axe en 88 jours, temps égal à celui qu'il met à accomplir une révolution autour du Soleil, et qu'il tournait donc toujours la même face vers le Soleil. De récentes observations hertziennes, à l'aide du grand radiotélescope d'Arecibo (Porto Rico) ont abouti à des conclusions différentes. Les astronomes ont envoyé des signaux de radar sur Mercure et ils ont observé deux échos secondaires déplacés en fréquence de part et d'autre du signal de retour principal. Ces échos s'expliquent si on admet d'une part que la planète tourne et que d'autre part, elle comporte des montagnes. Les flancs des montagnes situées sur un bord s'approchent, celles de l'autre bord s'éloignent. Les premières montagnes renvoient une onde de fréquence légèrement augmentée par effet Doppler Fizeau, les secondes une onde de fréquence diminuée. On a ainsi montré que Mercure tourne dans le même sens que la Terre avec une période de rotation de 59 jours. Ces résultats ont été confirmés par les observations spatiales faites en 1973-1974. Le sens de la rotation est le même que celui de la révolution.

Pour calculer la durée du jour de Mercure, il faut tenir compte de la vitesse angulaire due à la rotation de période R = 59 jours et de la vitesse angulaire corres-

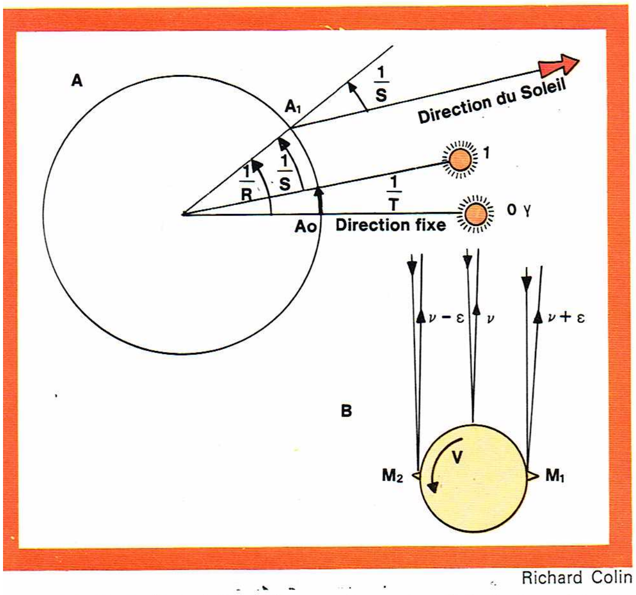

Richard Colin

pendant à la révolution autour du Soleil de période T = 89 jours. Ces vitesses angulaires sont 1/R et 1/T et on obtient la durée du jour par la formule :

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{R} - \frac{1}{T}$$

qui est analogue à celle qui permet de calculer les durées des révolutions synodiques. Avec les valeurs R = 59 et T = 89, on trouve S = 179 jours terrestres, ou 2 révolutions ou années de Mercure. Cela signifie que le Soleil brille en un point de la surface mercurienne pendant une période de temps égale à environ 89 jours terrestres et qu'il est couché pendant une nuit de 89 jours terrestres. La planète reçoit la lumière solaire sur toute sa surface et il n'existe pas de côté situé toujours dans l'ombre.

Au périhélie, Mercure reçoit onze fois plus de rayonnement par unité de surface que la Terre. La température atteint sa valeur maximale : le calcul donne 330 °C mais les mesures environ + 420 °C. L'étain et le plomb seraient liquéfiés. A l'aphélie la température est de + 290 °C, le rayonnement solaire étant alors seulement quatre fois plus important que celui qui arrive sur Terre. La température moyenne du côté éclairé est d'environ + 340 °C. Les astronomes du radio-observatoire de Parkes en Australie estiment à environ 0 °C la température de la partie nocturne.

L'observation télescopique et photométrique de cette planète laissait prévoir qu'elle devait ressembler à la Lune, avec des montagnes, des mers et des cratères. On observe, depuis la Terre, des taches assez caractéristiques, que l'on retrouve sur tous les dessins de Mercure effectués depuis un siècle, notamment par Schiaparelli, Antoniadi, Lyot et Dollfus.

Notre connaissance de Mercure a été complètement renouvelée grâce à l'engin spatial américain Mariner 10, lancé le 3 novembre 1973 du Cap Kennedy et qui, après avoir étudié Vénus, s'est approché, fin mars 1974, de Mercure. Il a pris plus de 2 000 photographies, transmises à la Terre par télévision depuis une distance de 145 millions de kilomètres. Le satellite, qui avait été conçu surtout pour l'étude de Vénus, s'est approché à 750 km mais il était alors au-dessus de la face non éclairée. Les photographies les plus rapprochées ont été obtenues avec un télescope Cassegrain de 150 cm de distance focale, mais d'une distance nettement plus grande. Le vidicon de la caméra de télévision mesure 9,6 × 12,5 mm et comprend 700 lignes de 832 éléments. La durée de transmission d'une image était de 42 secondes.

Les photographies ont confirmé que Mercure ressemble étrangement à la Lune. Ces documents, qui ne couvrent que 25 % de la surface de Mercure, ont été complétés par une seconde série obtenue en septembre 1974 lorsque Mariner 10 s'est approché une seconde fois de Mercure dans d'excellentes conditions, ce qui a permis de couvrir 12 % de surface de plus, surtout près du pôle Sud. La troisième approche de Mercure a eu lieu le 16 mars 1975 à 22 h 38 TU, la distance minimale était de 320 km. 300 nouvelles photographies à grande résolution ont été transmises. A cause de difficultés rencontrées avec l'orientation de l'antenne, le nombre d'informations transmises a dû être réduit au cinquième (22 000 bits par seconde au lieu de 117 000). Plutôt que d'altérer la qualité des transmissions, les responsables ont préféré réduire la surface des vues transmises. Dans ces conditions, les détails les plus fins étaient de 500 m alors qu'ils étaient de 1 000 m en septembre 1974. A cause de ces difficultés techniques, la surface de Mercure photographiée n'a pas été considérablement augmentée.

Une découverte importante est la mise en évidence certaine d'un champ magnétique propre à Mercure. Il est environ 50 fois plus faible que le champ magnétique terrestre et mesure entre 350 et 700 gammas contre 30 000 à l'équateur terrestre. Mais ce champ produit une magnétopause autour de Mercure, et il n'est certainement pas dû au vent solaire. On pense qu'une couche extérieure de 500 à 600 km d'épaisseur est formée par des silicates. Par sa constitution, Mercure est beaucoup plus voisin de la Terre que ne l'est la Lune.

Lorsque l'on regarde pour la première fois des photographies de Mercure, la similitude entre Mercure et la Lune est frappante : et même lorsqu'on sait qu'on examine des images de Mercure, on a des difficultés à croire

◀ ***Schéma A,* Mercure :** ***le Soleil est au zénith en A_0, à l'époque T_1 le Soleil s'est déplacé en 1 et l'observateur en A_1. Les flèches sont les vitesses angulaires (fraction de révolution par jour). On vérifie que*** $\frac{1}{S} = \frac{1}{R} - \frac{1}{T}$.
Schéma B,* Mercure :** ***changement de la fréquence ν par la réflexion sur des flancs de montagnes en M_1 et M_2. $\varepsilon = \nu \cdot \frac{V}{c}$, ***où V est la vitesse de rotation.***

▼ ***Montage photographique montrant la position de Mariner 10 dans l'espace devant* Mercure *en septembre 1974.***

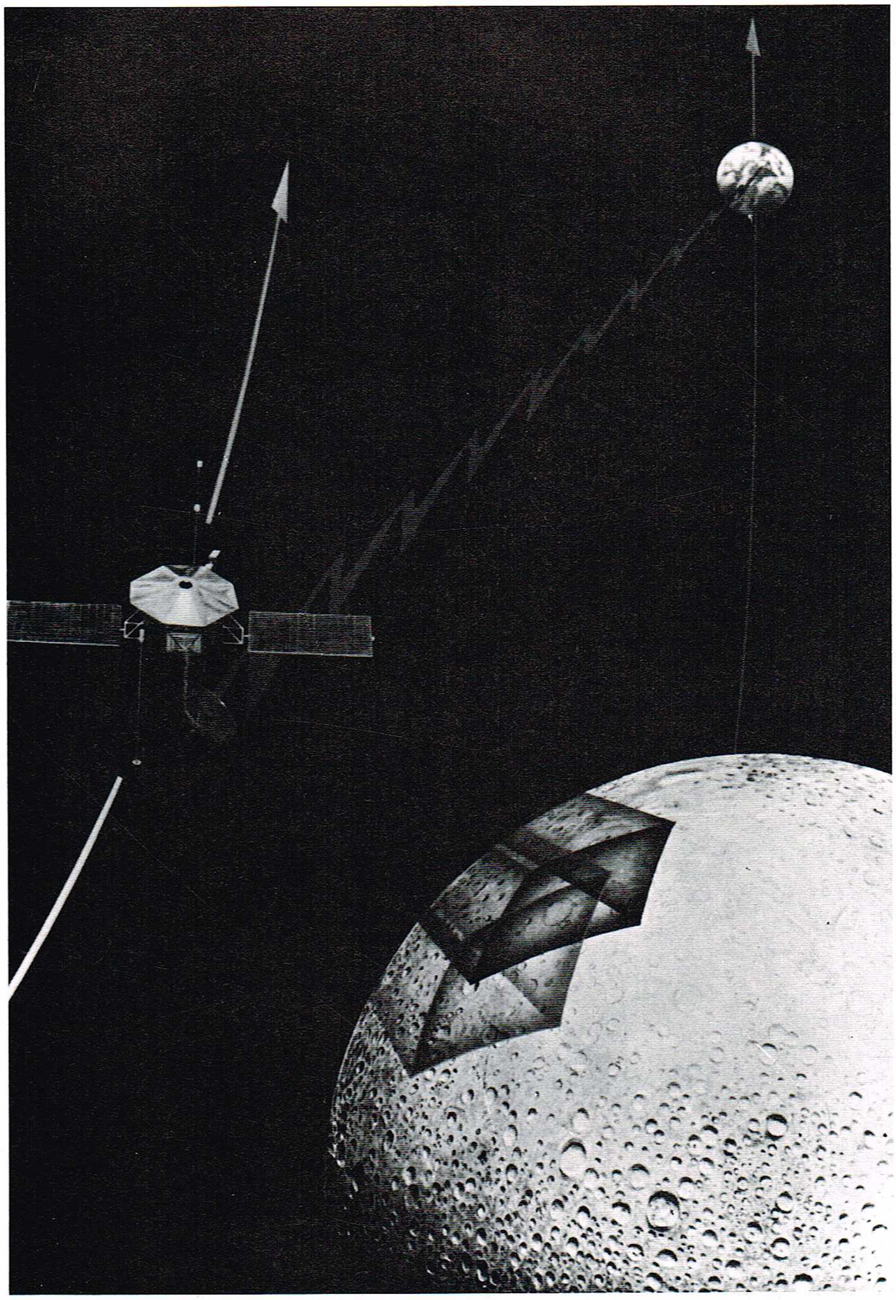
U.S.I.S.

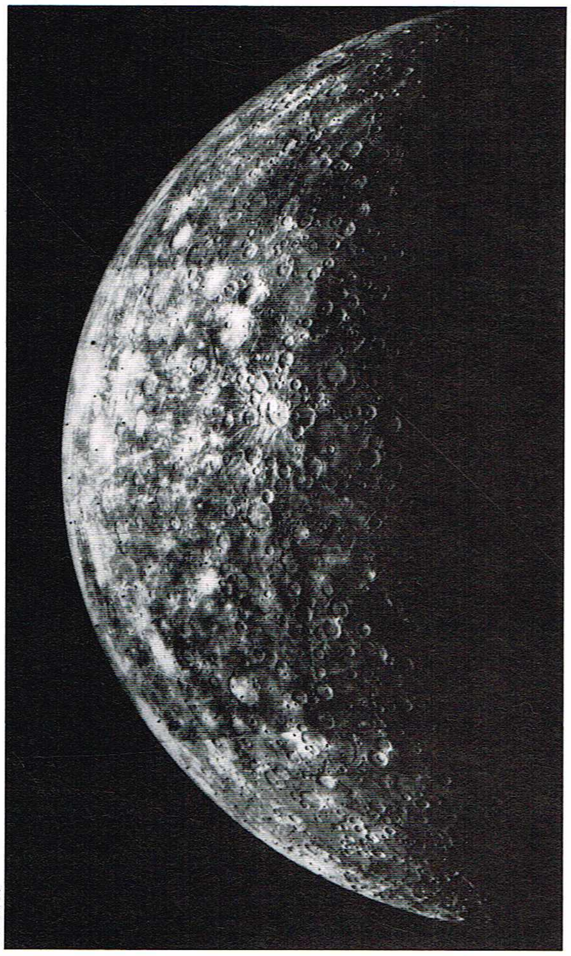

U.S.I.S.

▶ *Photographie composite de Mercure obtenue à partir de 9 clichés pris à une distance de 233 000 km le 29 mars 1974, six heures avant que Mariner 10 se trouve à la distance minimale de la planète. Cette partie de Mercure est recouverte d'un très grand nombre de cratères, dont certains atteignent 200 km de diamètre.*

que ce ne sont pas des images de la Lune. Mais il y a des différences : les surfaces, peu accidentées, analogues aux mers lunaires, existent, mais elles sont plus petites et moins nombreuses. Cependant, il ne faut pas oublier qu'en 1975, nous ne connaissons qu'un peu plus du tiers de la surface, et de grandes régions de la Lune, comme la face arrière, sont dépourvues de mers. Les chaînes de montagnes de Mercure paraissent moins nombreuses.

Les cratères couvrent pratiquement toute la surface explorée. Les plus grands ont moins de 100 km de diamètre et les plus petits mesurent 500 à 1 000 m, ce qui est la limite de résolution des images actuelles. Quelques cratères présentent, comme ceux de la Lune, des traînées blanches convergentes vers leurs centres ; c'est le cas d'un beau cratère de 80 km de diamètre sur lequel se superpose un cratère de 40 km, plus jeune (les deux présentent des pics centraux). Les cratères de Mercure de mêmes dimensions paraissent moins profonds que ceux de la Lune. Ils montrent moins de matière éjectée. Les pics centraux sont plus fréquents et les bords présentent souvent une sorte de terrasse intérieure.

Il existe sur Mercure des petits sillons, mais ils sont beaucoup plus rares que sur la Lune et ne présentent pas les tracés en zigzag des sillons lunaires.

Les structures les plus caractéristiques de Mercure sont des escarpements longs et très profonds. L'un d'eux, situé près du pôle Sud, a 300 km de long et présente probablement des différences d'altitude de 3 000 m entre les bords. Il s'agit probablement de failles d'origine tectonique. Il est possible que ces accidents soient en relation avec une formation très importante, nommée bassin des Chaleurs et située à l'antipode, et qui est peut-être le lieu d'impact d'une très grosse masse.

L'aspect général de Mercure montre qu'il n'y a pas d'érosion par le vent et que cette planète n'a probablement pas eu d'atmosphère depuis des milliards d'années.

Les très nombreuses et belles photographies transmises par Mariner 10 sont admirables et constituent une réalisation scientifique et technique à laquelle aucun astronome ne pouvait rêver lorsqu'il regardait Mercure avec les plus grands télescopes terrestres et qu'il le dessinait avec beaucoup d'application.

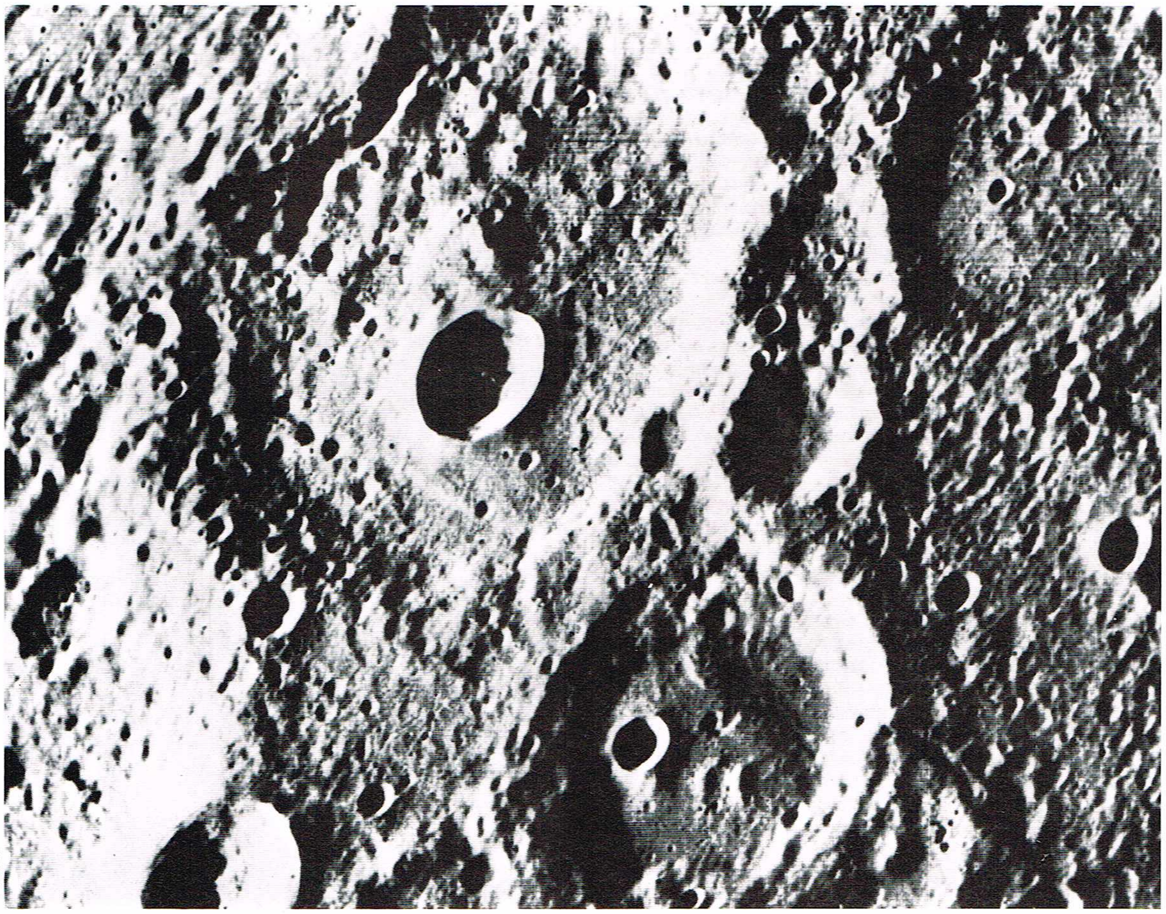

U.S.I.S.

▶ *Photographie obtenue par Mariner 10 à 20 700 km de distance d'une région de Mercure comportant des vieux cratères de moyennes dimensions. Leurs bords montrent de nombreux petits cratères qui sont probablement des impacts secondaires. Le cratère près du centre du cliché dont les bords sont très nets a un diamètre d'environ 20 km.*

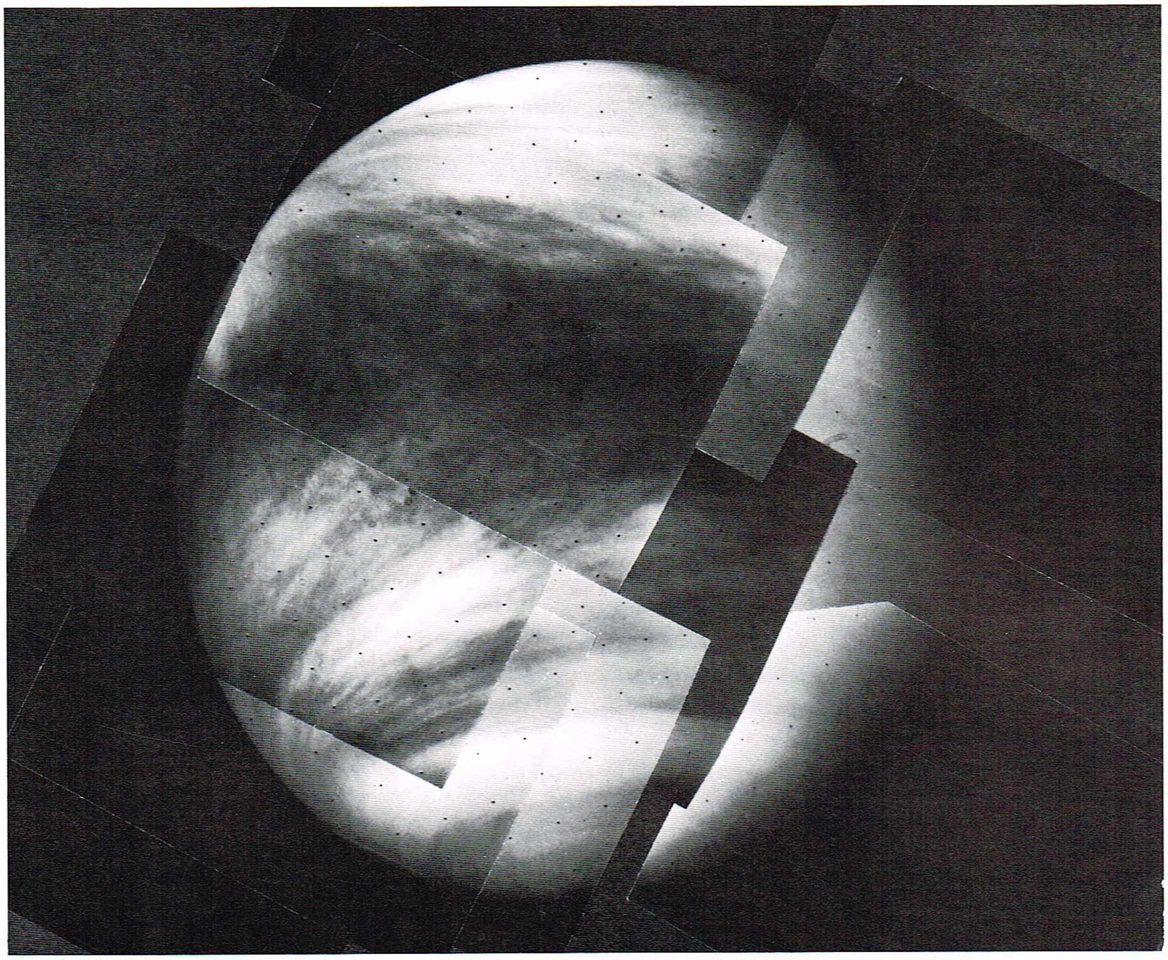

U.S.I.S.

◀ ***Photographies composites de** Vénus **prises par les caméras de télévision, de Mariner 10 en ultraviolet, le 6 février 1974, de 21 h à 21 h 30 mn T. U., alors que le vaisseau spatial était à 845 000 km de la planète.***

Vénus

La planète Vénus est la belle étoile du soir ou du matin, nommée encore étoile du berger. Elle est, après le Soleil et la Lune, l'astre le plus brillant du firmament. Nous savons aujourd'hui que Vénus est une planète qui tourne autour du Soleil à la distance de 0,72 unité astronomique ou 108 millions de kilomètres. Sa durée de révolution sidérale est de 225 jours. Son orbite est presque circulaire : l'excentricité de son orbite n'est que de 0,006 8, de sorte que sa distance au Soleil ne varie que de 109 à 107 millions de kilomètres. Cette orbite est inclinée de 3° 24' sur l'écliptique.

Nous avons déjà décrit le mouvement apparent des planètes inférieures. Rappelons les données pour Vénus.

Au moment de la conjonction inférieure, Vénus est à son minimum de distance de la Terre (41 millions de kilomètres). Son diamètre apparent est alors maximal (63''), mais elle présente la face non éclairée vers la Terre et sa surface éclairée n'est pas visible ; nous ne l'apercevons pas, mais elle peut se détacher sur le Soleil lorsque la conjonction a lieu au moment où la planète est près de l'intersection du plan de l'orbite avec l'écliptique ; les passages de Vénus sont peu fréquents. Les derniers ont eu lieu en 1874 et 1882 ; les prochains se produiront en 2004 et 2012.

Ces passages ont eu une importance très grande dans l'histoire de l'astronomie : on avait espéré s'en servir pour la détermination de la distance du Soleil. En effet, le passage n'a pas lieu exactement au même point du disque solaire pour des observateurs très éloignés sur la Terre. Halley avait indiqué la possibilité de déterminer la parallaxe par la mesure des durées des transits, observés en deux points éloignés de la Terre. Des observations furent organisées pour les passages de 1761 et 1769 ainsi que pour ceux de 1874 et 1882. Mais elles échouèrent, car le passage de Vénus ne présenta pas du tout la netteté escomptée : un peu avant le passage, on constata que Vénus était entourée d'une auréole et qu'au contact, elle formait une sorte de goutte d'eau du côté du Soleil. Les astronomes expliquèrent correctement ces effets par l'existence d'une atmosphère autour de Vénus.

Après la conjonction, Vénus est visible comme astre du matin. Elle montre alors des phases : elle présente d'abord un petit croissant, puis revêt l'aspect d'un quartier de Lune. A ce moment, elle paraît, pour un observateur terrestre, à la plus grande distance angulaire du Soleil. Cette élongation a lieu 71 jours après la conjonction. Vénus est alors située à une distance angulaire de 46° du Soleil et se lève plusieurs heures avant celui-ci. Son diamètre angulaire est de 25''. Ensuite, la planète s'éloigne de plus en plus de la Terre pour atteindre la distance de 257 millions de kilomètres ; le diamètre n'est plus que de 10''. Elle disparaît derrière le Soleil dans les lueurs du crépuscule. On assiste ensuite à l'apparition vespérale de la planète, qui accomplit le cycle symétrique pour revenir en conjonction inférieure après 584 jours, durée qui représente la révolution synodique.

▼ ***Tableau des valeurs moyennes des paramètres principaux définissant les conditions d'observation de** Vénus.*

VÉNUS

	CS Conjonction supérieure	EE Élongation orientale (Est)	ME Maximum d'éclat	CI Conjonction inférieure	ME Maximum d'éclat	EW Élongation occidentale (Ouest)	CS Conjonction supérieure
Temps en jours	0	221	256	292	328	363	584
Diamètre apparent	10"	25"		61"		25"	10"
Magnitude	– 3,5	– 4,0	– 4,3	– 3,0	– 4,3	– 4,0	– 3,5

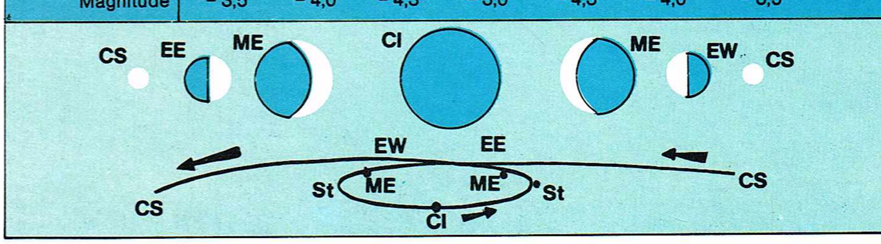

Richard Colin

Vénus est toujours difficile à observer : lorsqu'elle est proche elle est mal éclairée, et lorsqu'elle est bien éclairée elle est lointaine. Son observation près du coucher ou du lever est difficile car la planète est basse sur l'horizon, et en plein jour l'observateur est gêné par la lumière solaire et une atmosphère terrestre en général plus turbulente. Il n'est donc pas surprenant que nos connaissances de Vénus par l'observation directe aient donné peu de résultats. Celle-ci a néanmoins permis de mettre en évidence des taches un peu plus sombres, qui ont été interprétées comme des nuages. On a hésité très longtemps sur la période de rotation de Vénus, et cette question n'a été définitivement résolue que par l'observation spatiale.

La proportion de lumière solaire réfléchie par Vénus, ou albédo, est beaucoup plus grande que pour Mercure ou la Lune (voisine de 0,72). Cette différence s'explique par l'existence d'une atmosphère autour de Vénus.

L'étude de la lumière de Vénus au spectrographe a donné des résultats intéressants. On observe la lumière solaire réfléchie et on peut déterminer avec précision la vitesse d'éloignement ou d'approche de la planète. Cette valeur permet, à son tour, de déterminer avec précision en fin de compte les dimensions du système solaire, c'est-à-dire la valeur de l'unité astronomique.

L'analyse spectroscopique montre la présence des bandes d'absorption de la molécule de gaz carbonique, laquelle est très abondante; les spectres obtenus par transformée de Fourier sont parmi les meilleurs que nous connaissions concernant cette molécule. Cette méthode, appliquée en 1969 à l'Observatoire de Haute-Provence par P. Connes, a montré en plus la présence de la molécule d'oxyde de carbone (CO) et des traces des molécules d'acide chlorhydrique (ClH) et fluorhydrique (FH). Ces spectres sont si précis qu'ils mettent en évidence les isotopes $_{35}Cl$ et $_{37}Cl$ dans la même proportion que pour le chlore terrestre.

▼ Durant le vol, les panneaux solaires de 265 cm d'envergure de Mariner 10 sont dirigés vers le Soleil, mais ils peuvent être partiellement détournés lorsque l'engin est trop près du Soleil. Les deux caméras de télévision sont montées sur une plate-forme orientable suivant deux axes (photographie « Jet Propulsion Laboratory »).

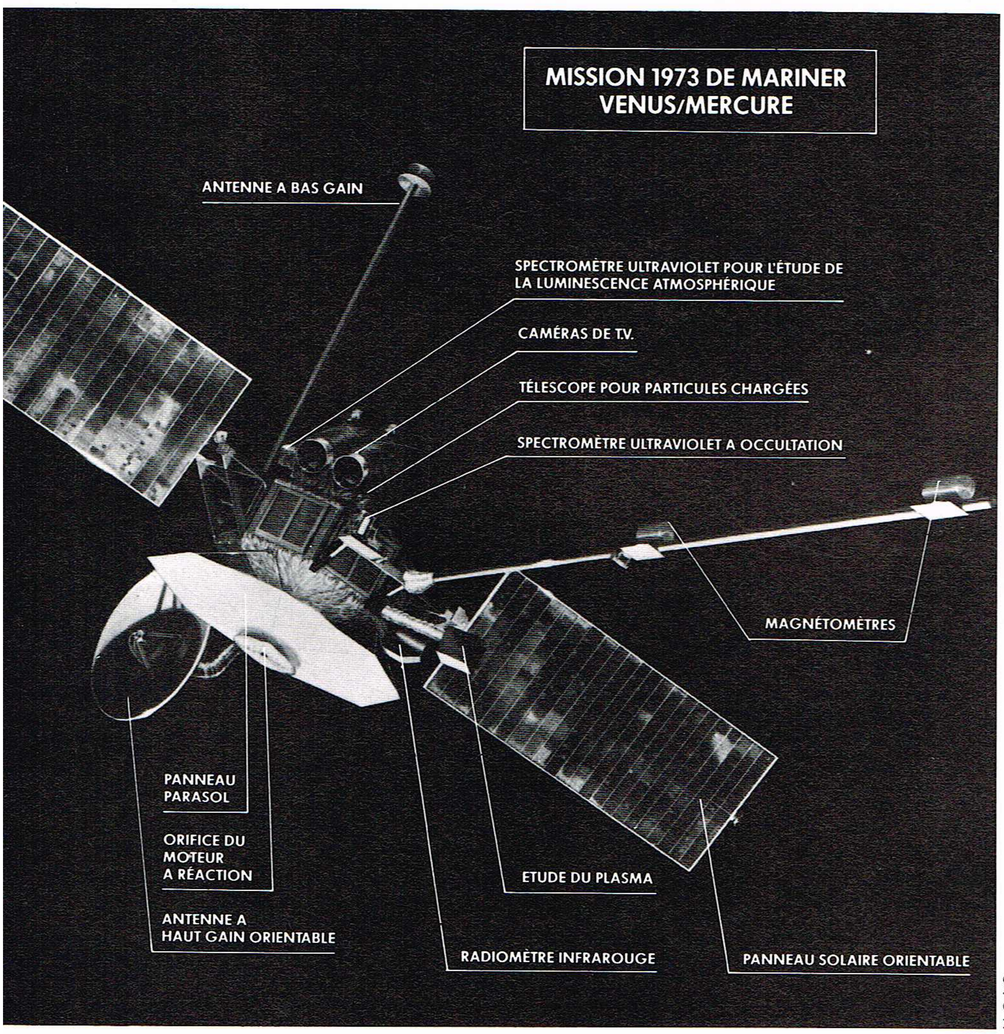

U.S.I.S.

On a pu envoyer des ondes radioélectriques sur Vénus et observer des échos de radar. Cela a permis de déterminer l'unité astronomique par la mesure du trajet aller-retour de l'écho. Une analyse détaillée de l'écho a permis de détecter sur Vénus des montagnes de 3 à 4 km de haut. Le radar a aussi permis de détecter un grand cratère de 160 km de diamètre et de 500 m de profondeur, dont l'origine (volcanique ou météoritique) est inconnue.

Ces mesures ont enfin permis de préciser un point important : la rotation de Vénus. Comme nous l'avons déjà indiqué, nous n'apercevons que l'atmosphère supérieure de Vénus et la détermination de la période de rotation du globe a été longtemps impossible. Divers raisonnements, qui se sont révélés faux, indiquaient que Vénus tournait toujours la même face vers le Soleil. Le radar a montré que la rotation de Vénus était très lente, mais rétrograde; la période de rotation est de 243 jours. Comme dans le cas Mercure la formule

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{R} - \frac{1}{T}$$

permet de calculer la durée du jour de Vénus. Mais la rotation de Vénus étant rétrograde, R est négatif et

$$\frac{1}{S} = -\frac{1}{243} - \frac{1}{225}$$

on trouve la valeur S = —116,8 jours terrestres ou sensiblement une demi-année de Vénus. La valeur négative veut dire que le Soleil se déplace pour l'observateur vers la gauche, c'est-à-dire vers l'est. Le Soleil se lève à l'ouest et se couche à l'est. L'inclinaison de l'axe de rotation sur l'orbite n'est que de 3°, et il n'y a pas de saisons sur Vénus.

Notre connaissance de Vénus a été complètement renouvelée par la recherche spatiale. La compétition entre les États-Unis et l'Union soviétique a été très fructueuse. Les États-Unis ont envoyé en 1962 leur sonde Mariner 2, qui s'approcha le 14 décembre 1962 à 35 000 km de la planète. Cette expérience fut répétée par Mariner 5 le 19 octobre 1967, et surtout par Mariner 10 le 5 février 1974. Les Soviétiques, de leur côté, ont fait atterrir des sondes. Le premier succès fut celui de Vénus 4, qui pénétra dans l'atmosphère de Vénus : un parachute s'ouvrit à 58 km d'altitude mais l'instrument cessa de fonctionner à 28 km, où la pression était de 20 atmosphères. En 1969, Vénus 5 et 6 s'enfoncèrent un peu plus. Le 15 décembre 1970, la capsule Vénus 7 toucha le sol mais l'émission radio cessa immédiatement. Enfin, Vénus 8 atterrit le 22 juillet 1972 et permit une très bonne étude de la planète.

Vénus 9 le 22 octobre 1975 et Vénus 10 le 25 octobre 1975, deux sondes soviétiques, ont atterri sur Vénus. Elles ont pu transmettre de très bonnes photographies du sol de Vénus. Les engins ont fonctionné pendant 1 heure, ce qui est remarquable dans les conditions de pression et de température de Vénus. Les résultats sont tout à fait inattendus. En effet, les photographies transmises par Vénus 9 montrent un paysage avec des roches arrondies de 30 à 40 cm de diamètre et projetant des ombres très nettes. L'existence de roches est surprenante car on pensait que la surface de Vénus était peu rugueuse, les détails étant effacés par l'érosion. Les ombres portées par le Soleil sont aussi une surprise car on pensait que les rayons solaires ne pouvaient atteindre le sol à travers une atmosphère très dense. La région visitée par Vénus 10 est moins accidentée. On pense qu'elle doit être plus vieille que la première région photographiée. Quoi qu'il en soit la surprise est totale et nous sommes loin de bien connaître notre planète voisine.

Ces instruments ont transmis les pressions et les températures pour diverses altitudes; ils ont aussi effectué l'analyse chimique de l'atmosphère par des procédés d'absorption : absorption du gaz carbonique (CO_2) par la soude (NaOH), de l'oxygène par le phosphore blanc, de l'eau par un desséchant ($CaCl_2$). Ces résultats ne sont pas précis mais ils montrent que l'atmosphère est pratiquement du gaz carbonique pur :

CO_2 : 97 % $\pm$ 4; O_2 : 0,1 %; H_20 : 6 à 10 mg par litre.

La température varie beaucoup avec l'altitude. A l'endroit où la pression est de 0,6 atmosphère, la température est de 25 °C; à 18 atmosphères elle est de 280 °C, et à 27 atmosphères de 320 °C; au sol, la pression est

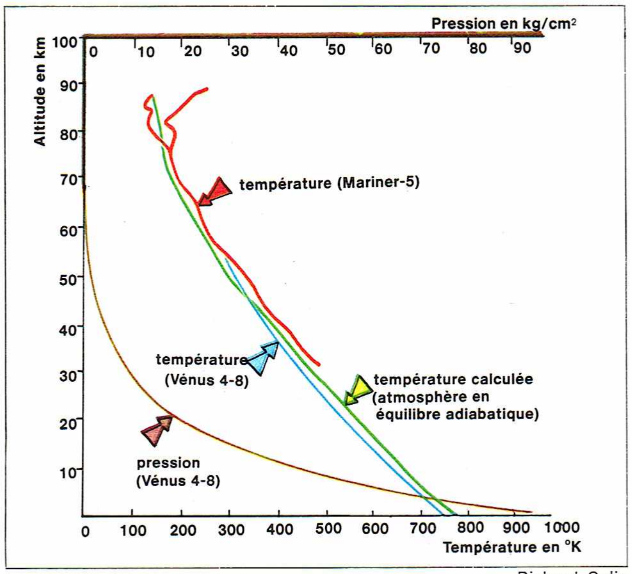

Richard Colin

◀ *Variation de la pression et de la température dans l'atmosphère de* Vénus *en fonction de l'altitude. La courbe en vert donne le profil moyen des températures mesurées par Mariner, d'une part, et les sondes soviétiques, d'autre part. La courbe en noir donne les valeurs de la pression obtenues par les sondes soviétiques Vénus 4 et 8 (échelle logarithmique). Selon les mesures de Vénus 8, la température à la surface est de 743 ± 8 °K et la pression de 93 ± 1,5 km/cm².*

de 95 atmosphères et la température de 530 °C ; le plomb y est fondu. La dernière sonde a permis de faire une analyse du sol, qui paraît dur et dont la radio-activité est très comparable à celle du sol terrestre.

Les résultats obtenus par les sondes Mariner et particulièrement par Mariner 10, le 5 février 1974, sont très importants. Ils montrent en détail la structure de la couche de nuages de Vénus. Dans la région équatoriale et jusqu'à des latitudes de 45°, on observe des couches de nuages très contrastés dans la lumière ultraviolette alors qu'ils sont pratiquement invisibles dans la lumière ordinaire. Ces nuages ont une structure en V déjà observée de la Terre par les astronomes, notamment ceux du pic du Midi. Ces nuages tournent très vite dans le sens rétrograde avec une période de l'ordre de 4 jours. A 6 km au-dessus de cette couche, existent quelques nuages diffus très légers. La structure de cette atmosphère correspond bien à la théorie élaborée par G. Hadley en 1735 pour expliquer les alizés terrestres.

La partie externe de l'atmosphère est ionisée ; elle contient essentiellement de l'hydrogène, avec très peu de deutérium et des traces d'hélium. L'oxygène est mis en évidence par la raie d'émission très intense située vers 1 304 Å. Il existe une émission d'origine inconnue vers 1 000 Å. La présence de l'oxygène, qui est si peu abondant dans l'atmosphère même, pose quelques problèmes.

Vénus a un champ magnétique très faible, inférieur à 0,05 % du champ terrestre. L'interaction entre le vent solaire et cette planète est donc différente ; aussi ce n'est pas la magnétosphère mais l'ionosphère de Vénus qui porte ombre pour les ondes hertziennes.

Les résultats définitifs des explorations de Vénus ne sont pas encore publiés. Il faudra certainement réviser les valeurs actuellement admises pour le diamètre (12 100 km), la masse (0,81 masse terrestre) et la densité (4,86) un peu plus petite que celle de la Terre.

Le monde de Vénus est étrange. Une atmosphère extrêmement dense exerce une pression de 95 atmosphères au niveau du sol. L'épaisseur de cette atmosphère est considérable : à 65 km d'altitude, la pression est encore de 1 atmosphère. Au sol, la température est de 530 °C et cette température ne semble pas varier avec la latitude (elle serait la même aux pôles et à l'équateur). L'atmosphère contient des nuages dont l'altitude est estimée à 50 km. Leur nature n'est pas connue ; ils sont entraînés par des vents extrêmement violents de l'ordre de 400 km/h en haute altitude. L'atmosphère est composée essentiellement de gaz carbonique avec diverses impuretés, d'oxyde de carbone, d'un peu d'eau, et des gaz ClH et FH. La haute atmosphère, riche en hydrogène, contient aussi de l'oxygène atomique et un peu d'hélium. La nature des nuages est inconnue. On parle d'eau mais aussi d'acide sulfurique !

Cette planète est bien différente de l'image un peu optimiste que l'on s'en faisait lorsqu'on y supposait la vie possible.

Mars

La planète Mars est l'astre qui intéresse le plus les hommes depuis un siècle. En effet, cette planète est celle qui ressemble le plus à la Terre, et c'est sur elle que nous avons le plus de chances de rencontrer des êtres vivants et peut-être même des êtres semblables à l'*Homo sapiens*. Nous allons voir que ces espoirs paraissent maintenant déçus car les conditions sur Mars sont assez différentes de celles de notre planète.

Mars a un rayon équatorial de 3 380 km et son aplatissement n'est pas très grand (1/192), de sorte que le rayon polaire mesure 18 km de moins que le rayon équatorial. Mars est beaucoup plus petit que la Terre, dont le rayon est de 6 378 km. Son volume n'est que de 15 % de celui de la Terre et sa densité (3,97) est nettement inférieure à celle de notre globe (5,52).

Mars tourne autour du Soleil en 687 jours, mais sa période de retour en conjonction avec la Terre (révolution synodique) est de 780 jours, de sorte que les bonnes conditions d'observation ne se réalisent que tous les 2 ans et 2 mois.

L'orbite de Mars est extérieure à celle de la Terre : on dit que Mars est une planète extérieure. Le demi grand axe de son orbite est de 1,52 unité astronomique, soit

▼ *La planète* Mars *(copyright du California Institute of Technology).*

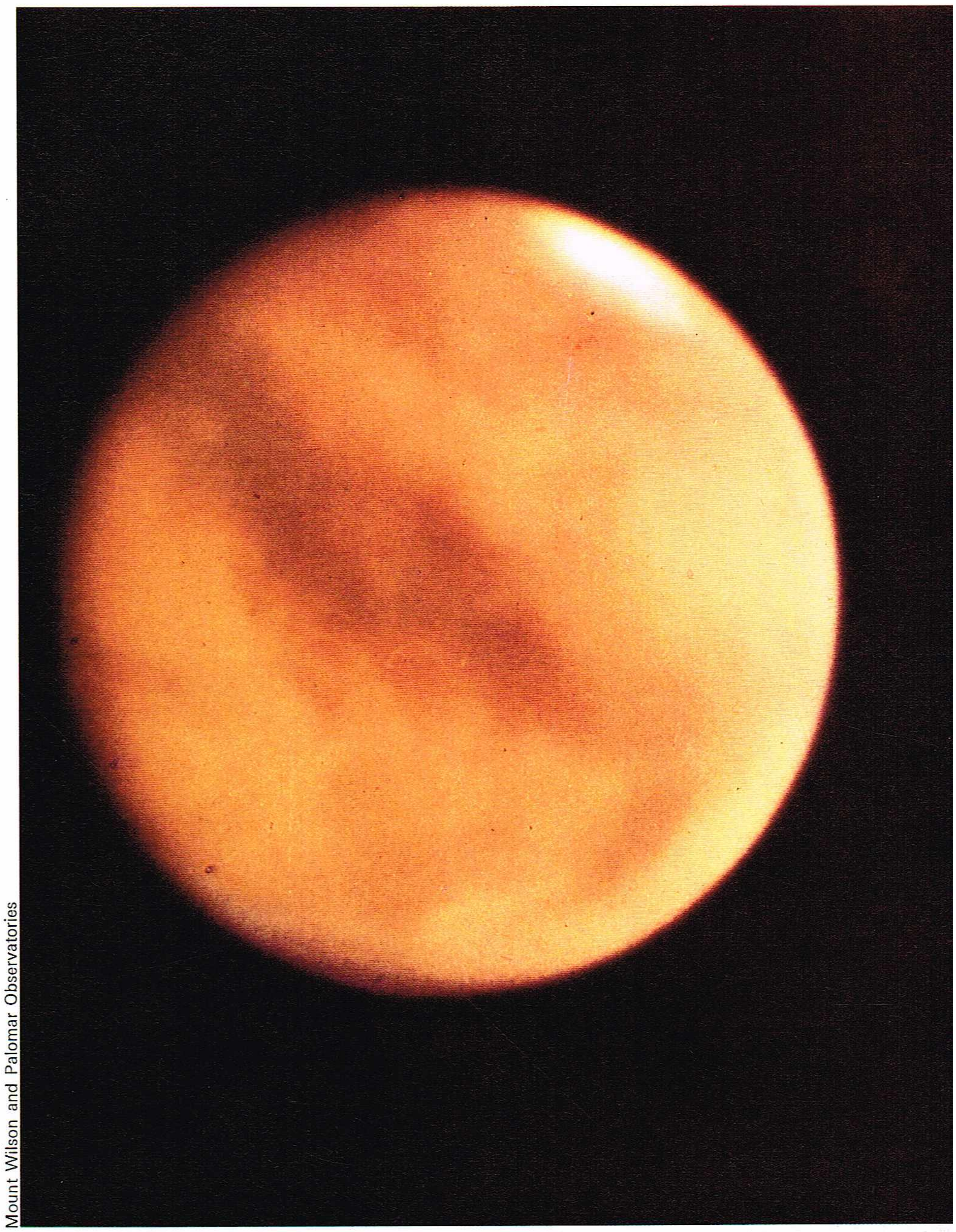
Mount Wilson and Palomar Observatories

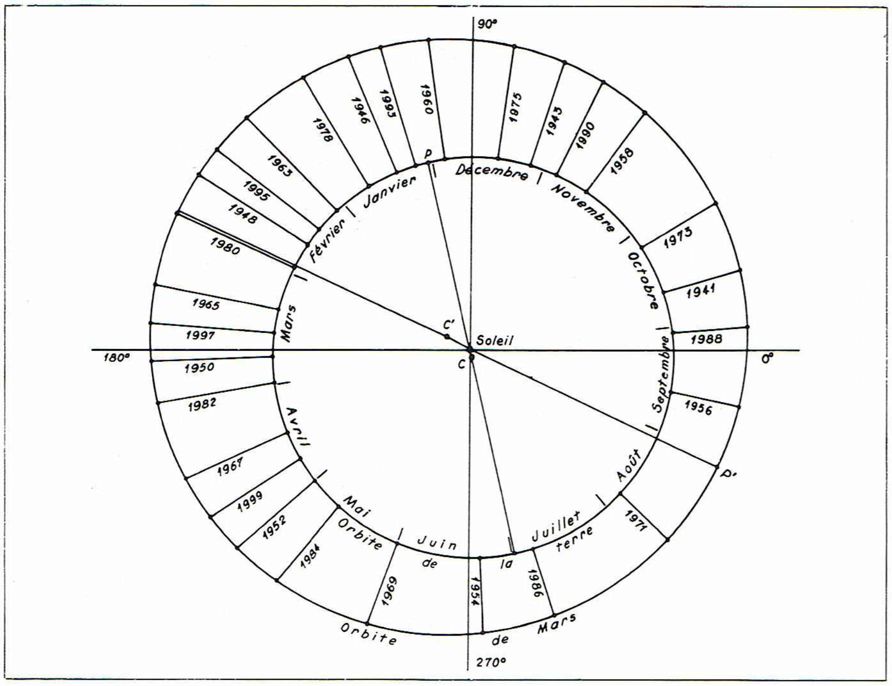

d'après A. Danjon

▲ *Position relative des orbites de la* Terre *et de* Mars. *Les dates sur les droites indiquent les années des oppositions géocentriques de Mars : C, centre de l'orbite terrestre; C', centre de l'orbite de Mars.*

▼ *A gauche, changements dans* Solis Lacus : *à gauche, dessin du 11 août 1924; à droite, dessin du 15 novembre 1926 (d'après A. Danjon). A droite, photographie de Mars lors de l'opposition de 1926 (Lick Observatory).*

228 millions de kilomètres, et celle-ci est très excentrique : la distance au Soleil varie entre 207 millions de kilomètres au périhélie et 249 millions à l'aphélie. La distance à la Terre à l'opposition est donc aussi très variable. Lorsqu'à l'opposition Mars est au périhélie, sa distance est de 57 millions de kilomètres et son diamètre apparent de 25''. Aux oppositions aphéliques, la distance de Mars est de 100 millions de kilomètres et son diamètre apparent de 14''. Les oppositions périhéliques sont donc infiniment plus favorables pour l'observation. Les dernières oppositions favorables ont eu lieu en 1954, 1956 et 1971; les prochaines se situeront en 1986 et 1988. A ces oppositions, Mars est situé au sud de l'équateur, dans le ciel austral, et l'observation est beaucoup plus favorable dans l'hémisphère Sud.

Aux oppositions, Mars présente la face éclairée par le Soleil. Aux quadratures, qui se placent sensiblement 106 jours avant et après les oppositions, il a un diamètre angulaire nettement plus petit (10'') et montre un aspect gibbeux, semblable à celui de la Lune trois jours avant ou après la pleine Lune. Aux oppositions favorables, il est très brillant, sa magnitude est de — 2,8, mais il reste petit : les plus fins détails observables de la Terre dans des conditions parfaites sont de l'ordre de 50 à 100 km.

Mars tourne autour d'un axe incliné de 23° 59' sur son orbite. La durée de révolution sidérale est de 24 h 37,4 mn. Ces deux valeurs sont très voisines de celles de la Terre. Un calcul montre que la durée du jour solaire sur Mars est de 24 h 39,66 mn et il y a 668,6 jours solaires dans l'année martienne. Du fait de l'inclinaison de son axe polaire, Mars présente des saisons très analogues à celles de la Terre, mais elles sont très inégales en raison de la forte excentricité de l'orbite; l'hémisphère Sud reçoit nettement plus d'énergie que l'hémisphère Nord bien que l'été boréal soit plus court.

La reconnaissance de la nature physique du sol et de la composition de l'atmosphère de Mars a été, depuis plus de cent ans, un des éléments les plus intéressants de l'astronomie. L'observation directe de Mars a montré un certain nombre de détails. Cette planète présente des calottes polaires; la calotte polaire Nord est maximale au moment de l'hiver boréal de Mars et disparaît ensuite graduellement. C'est la calotte polaire Sud qui croît ensuite pour atteindre son maximum à l'hiver austral. Ces calottes ressemblent, à première vue, aux calottes polaires de la Terre, bien qu'elles paraissent plus variables en étendue.

D'autre part, il existe un certain nombre de détails sombres qui se détachent sur une image à dominante rougeâtre. Ces détails sont fixes et permettent de mesurer la rotation de Mars qui tourne comme un solide. Il a été possible de dresser une carte détaillée de ces taches, que l'on avait tendance à assimiler à des continents. On leur a donné des noms : les régions les plus nettes sont la Grande Syrte et Sinus Sabaeus.

Deux phénomènes compliquent ces observations : d'une part, à certaines périodes, les contrastes diminuent et les détails disparaissent complètement pendant des périodes plus ou moins longues. Nous savons aujourd'hui que ces détails sont alors cachés par des tempêtes extrêmement violentes de sables ou de poussières qui remplissent l'atmosphère.

Un autre phénomène apparaît nettement : la variation de couleur. Certaines régions changent de teinte. On a essayé d'assimiler ces changements aux variations des couleurs dues à une végétation. Une autre hypothèse était celle d'un changement de couleur de roches en fonction de l'état hygrométrique.

Vers la fin du XIX^{e} siècle l'existence d'une vie sur Mars était admise par de nombreux astronomes, et des observations très curieuses parurent confirmer ce fait : les *canaux de Mars*. En 1864, l'Anglais W.R. Dawes observa que de nombreuses mers se terminaient par des parties effilées, d'où partaient de longs bras minces; ceux-ci, qui traversent les continents, semblent joindre les mers entre elles. Le père Secchi, astronome au Vatican, qui avait observé la planète au moment de l'opposition de 1859, donna à ces formations le nom de canaux, le mot italien désignant plutôt un isthme (canal d'Otrante...).

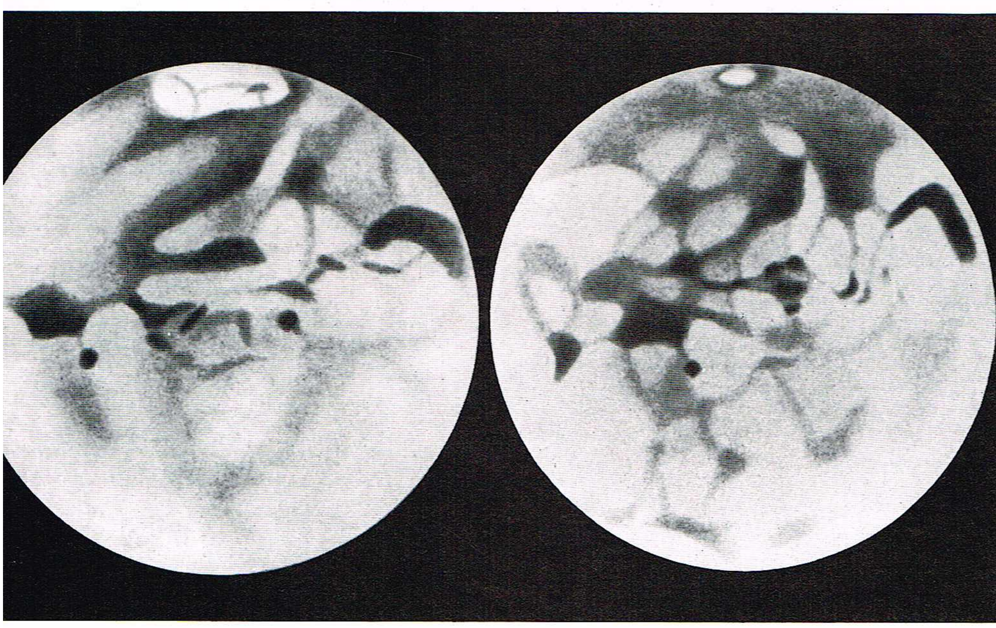

dessin A. Danjon (Observatoire de Strasbourg)

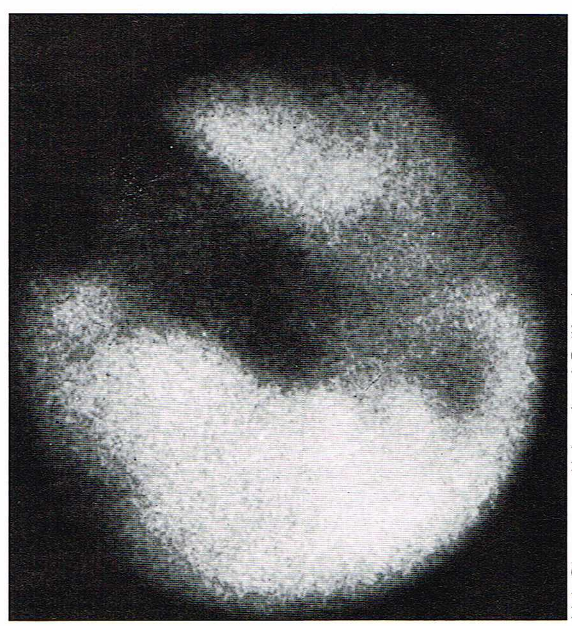

Lick Observatory University of California

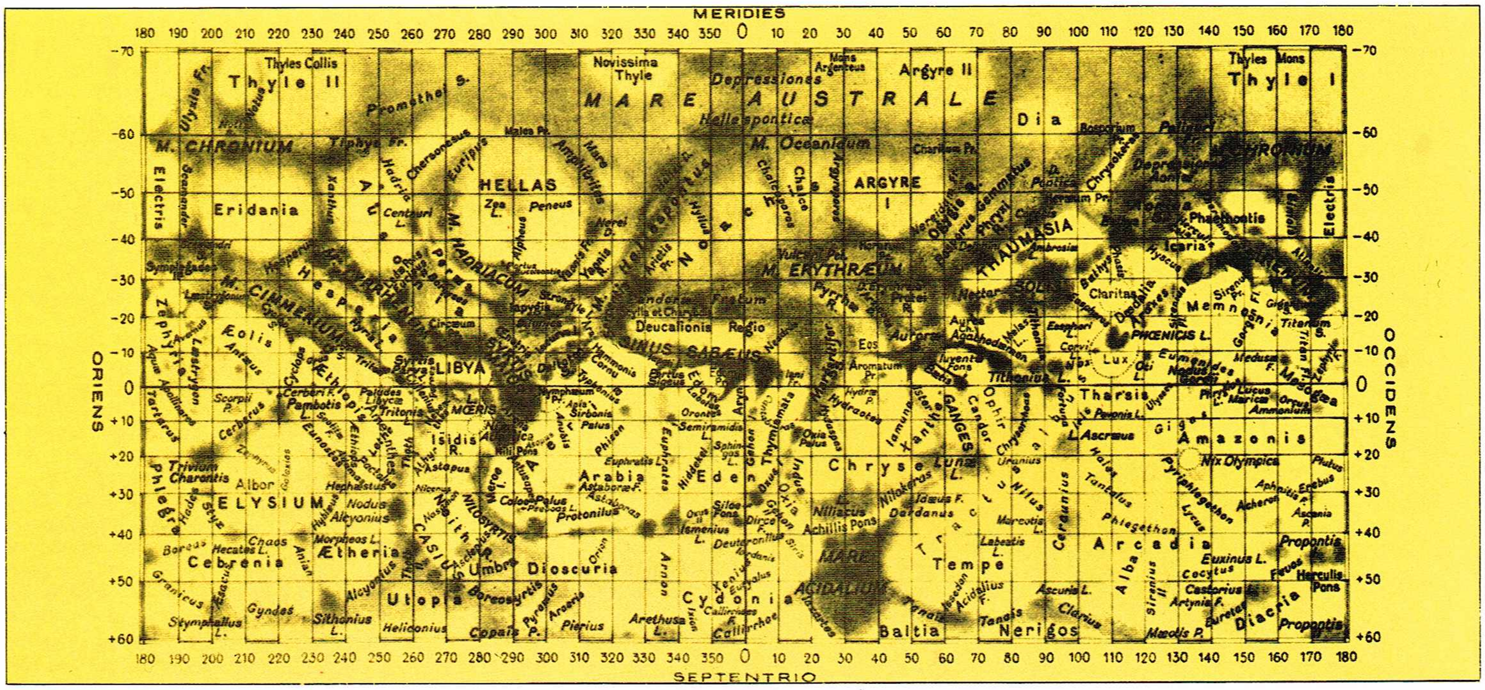

U.S.I.S.

Schiaparelli observa en 1879 que les canaux paraissaient se dédoubler. L'Américain Lowell confirma l'existence des canaux et leur gémination; il découvrit, en outre, d'autres détails, comme les oasis, petites taches rondes et foncées, où les canaux se croisent. Il ne douta pas de l'existence de ce qu'il voyait et supposa même que ces canaux étaient artificiels et avaient été construits par les Martiens. On assista, dès lors, à des explications plus fantaisistes les unes que les autres. Certains pensaient que ces canaux servaient aux Martiens pour amener l'eau des calottes polaires vers les régions équatoriales désertiques.

Dès la fin du XIX^{e} siècle, l'existence des canaux était niée par d'excellents observateurs qui se servaient des meilleures lunettes de cette époque. Mais jusqu'à ces dernières années, certains astronomes continuaient encore à croire aux canaux. Les clichés spatiaux obtenus très récemment ont définitivement résolu le problème. Les canaux n'existent pas; tout au plus trouve-t-on des alignements de cratères ou de détails foncés qui peuvent suggérer l'existence des canaux proposés à la fin du siècle dernier.

La température et l'atmosphère de Mars

Les observations spectrographiques ont permis de déterminer la température de la surface de Mars et de montrer que les pôles sont nettement plus froids (—70 °C) que la zone équatoriale (0 °C). Ces températures moyennes doivent, toutefois, fortement varier en raison de l'excentricité de l'orbite.

La recherche d'une atmosphère a été difficile; dès les premières mesures, on s'aperçut qu'elle devait être très ténue. La présence de la vapeur d'eau fut très longtemps controversée : annoncée par les uns, elle était presque immédiatement démentie par d'autres. La difficulté provenait de la présence de la vapeur d'eau dans l'atmosphère terrestre. Mais en se servant du déplacement des raies par effet Doppler, il est aujourd'hui possible d'observer certaines raies de la vapeur d'eau. L'existence a d'ailleurs été confirmée par les derniers Mariners, qui ont permis d'observer les raies d'émission infrarouges dues à la vapeur d'eau (à 29 et 50 μm). Le constituant le plus important de l'atmosphère est le gaz carbonique CO_2, trouvé par son spectre d'absorption du proche infrarouge. On a déduit de ces observations une pression atmosphérique de 60 millibars ou 45 mm de Hg, c'est-à-dire la pression terrestre à 22 km d'altitude. L'observation spatiale a confirmé l'existence de CO_2, mais la pression barométrique est encore plus faible.

Une ère nouvelle dans l'étude de Mars

La sonde spatiale américaine Mariner 4 a passé, après un vol de plus de 500 millions de kilomètres, le 15 juillet 1965, à 10 000 km de Mars et a renvoyé 22 photographies qui ont montré l'existence de cratères sur cette planète. L'atmosphère est bien composée de CO_2, mais la pression n'était que de 8 millibars (pression atmosphérique terrestre à 40 km d'altitude). D'autres sondes ont été lancées avec succès : Mariner 6 et 7 (février et mars 1969), qui ont gravité autour de Mars, et Mariner 9 (mai 1971). Actuellement, la plus grande partie de la planète a été couverte par des milliers de photographies à moyenne ou haute résolution et on peut en dresser une carte extrêmement détaillée.

Indiquons qu'en 1971, les Soviétiques ont lancé des sondes spatiales sur Mars; cependant, les résultats américains ont été beaucoup plus importants. Nous allons les résumer, car il faudrait un livre entier pour décrire tout ce que nous savons.

▲ ***Planisphère de* Mars *par E. Antoniadi d'après ses observations à la Grande Lunette de Meudon.***

▼ ***Photographie d'une partie de la surface de* Mars*, transmise lors de l'arrivée de Mariner 4, les 14 et 15 juillet 1965.***

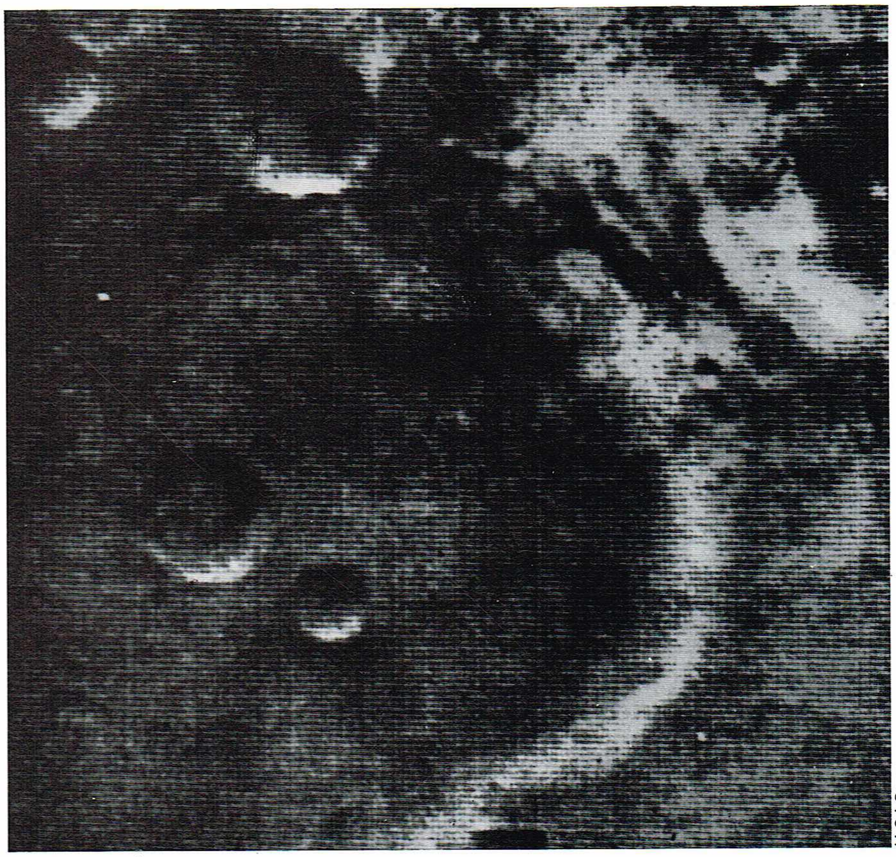

U.S.I.S.

U.S.I.S.

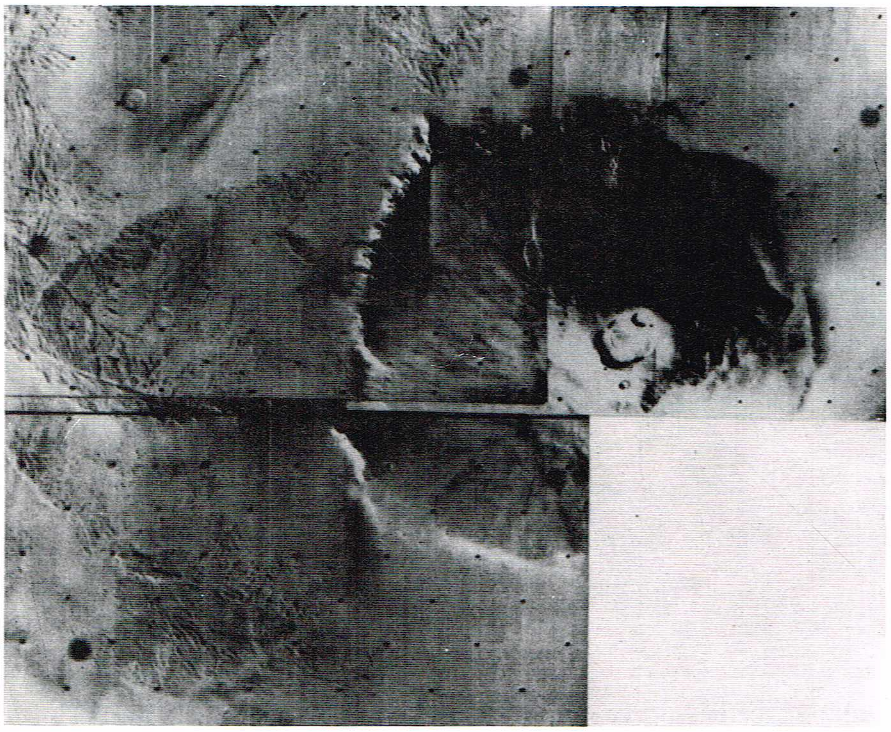

▲ *Ce montage de trois vues de* Mars, *prises par Mariner 9 fin janvier 1972, montre l'énorme complexe volcanique* Nix Olympica *qui n'était connu jusqu'alors que comme une simple surface circulaire brillante. Le diamètre total du volcan est de 500 km et la caldeira centrale mesure 65 km; l'altitude au-dessus du sol de Mars est estimée à 6 km (N.A.S.A.).*

▼ *Photographie obtenue par Mariner 9 de la partie est de la fissure* Tithonius Lacus *sur Mars. Un spectromètre ultraviolet a mesuré la pression atmosphérique de CO_2 sur la planète, ce qui a permis de tracer le profil de la vallée. Cette fissure a une profondeur double de celle du Grand Canyon du Colorado (N.A.S.A.).*

U.S.I.S.

Les vaisseaux Mariner 6, 7 et 9 ont permis, en juillet et août 1969, de préciser la nature de l'atmosphère de Mars. Mariner 9 est devenu, le 14 novembre 1971, après une correction de trajectoire, le premier satellite artificiel de Mars.

La pression atmosphérique est de 8,3 millibars et la hauteur de l'atmosphère de 12 km (les nombres correspondants de la Terre sont de 1 030 mb et 8 km). La plus grande partie de cette atmosphère est constituée de gaz carbonique dont la proportion est certainement supérieure à 90 % et peut-être égale à 100 %. L'azote n'a pas été mis en évidence. La présence de l'argon est soupçonnée depuis quelques années. Elle semble se confirmer. Au début de 1975, on estime qu'il y a 30 % en volume d'argon dans l'atmosphère de Mars. Il existe des traces d'oxyde de carbone et de vapeur d'eau.

La température au sol est de 230 °K (— 43 °C) à l'équateur. La variation de la température avec l'altitude était différente en 1967 et 1971. Mais les conditions étaient très particulières cette dernière année, où des tempêtes de sable avaient lieu : en effet, pendant que Mariner 9 s'approchait de Mars, on a observé de la Terre un effacement général des détails et, effectivement, au début, les images obtenues par Mariner montraient le même phénomène; une mesure de la couleur a montré qu'il s'agissait probablement de poussières de sable.

Mariner 9 a montré l'existence de nuages à très haute altitude, ressemblant à nos nuages nacrés; ils sont d'ailleurs striés par des ondulations. La partie la plus haute de l'atmosphère de Mars est luminescente comme l'atmosphère terrestre et montre les raies d'émission de l'oxygène atomique et de l'hydrogène (Lyα) ainsi que de CO^+ ionisé. Mars n'a pas de champ magnétique mesurable mais une ionosphère située à 120 km d'altitude.

Les calottes polaires

Les calottes polaires montrent des dépôts blancs disparaissant rapidement au Soleil. Les pentes des cratères qui restent à l'ombre restent également blanches, alors que les autres deviennent rapidement foncées. La température de ces dépôts est de 140 °K, soit —133 °C, ce qui correspond à la température de sublimation du gaz carbonique dans les conditions de Mars. Il semble donc que les calottes polaires soient couvertes de neige carbonique dont l'épaisseur maximale est estimée à quelques centimètres. Mais cette conclusion est encore contestée par certains.

La topographie de Mars

Le relief de Mars est relativement plus accidenté que celui de la Terre. On y observe trois types de relief : des cratères, des volcans et des fissures.

Le nombre de *cratères* est considérable. Les plus grands ont des diamètres supérieurs à 100 km (*Nodis Gorderi* a 130 km). Ils sont moins nombreux que ceux de la Lune mais, en moyenne, sur une surface de 1 000 × 1 000 km, on observe 100 cratères de 10 km de diamètre et 250 000 de 10 m. Leur relief est moins prononcé que celui des cratères lunaires et ils paraissent érodés, probablement par le vent.

L'existence de *volcans* est certaine. Le plus grand correspond à un détail, nommé déjà vers 1880, *Nix Olympica*. Il s'agit d'une grande montagne ronde de 500 km de diamètre à la base et s'élevant à 6 km au-dessus de la plaine voisine. Elle contient plusieurs cratères volcaniques, dont le plus important a 65 km de diamètre; il n'est d'ailleurs pas central. Cet ensemble est beaucoup plus important que celui des îles Hawaii, dont l'arc mesure seulement 225 km. Sa nature volcanique ne fait pas de doute; le sol a d'ailleurs une température supérieure de 7 °C à la température moyenne.

Enfin, des *lignes très longues et sinueuses* font penser à des canyons. Le plus important est *Tithonius Lacus,* dont la longueur est de 500 km. La distance entre les bords de la vallée atteint 100 km et la profondeur est de 3 000 m. L'origine de ce canyon n'est pas connue; il contient des cratères dont l'origine paraît volcanique. Une vallée très sinueuse, de 400 km de long et de quelques kilomètres de large, existe dans *Mare Erythraeum.* Son aspect est analogue à celui d'un ancien fleuve terrestre : peut-être y a-t-il eu de l'eau dans les temps anciens?

La vie existe-t-elle sur Mars? Les hommes et des animaux supérieurs ne pourraient y subsister à cause de la température, de la pression, et de l'absence d'eau. Mais on peut imaginer que des Algues et des Bactéries

puissent y vivre. Pour le moment, nous n'avons aucune indication sur l'existence d'une telle vie. L'observation du spectre d'une certaine *chlorophylle a* été annoncée, mais ces observations n'ont pas été confirmées. Des expériences spatiales avec atterrissage, comme celle déjà réussie par les Soviétiques mais dont le système de transmission n'a malheureusement pas fonctionné, pourraient donner des renseignements.

En résumé, si notre connaissance du monde de Mars a été considérablement augmentée par la recherche spatiale, tous les problèmes ne sont pas encore résolus.

Les satellites de Mars : Phobos et Deimos

Mars est accompagné de deux petits satellites, découverts en 1877 par Hall, et que l'on peut voir dans un grand télescope quand la planète est proche de l'opposition.

Phobos, le satellite le plus proche de la planète, à qui l'on attribuait un diamètre d'environ 12 km, se trouve à 9 380 km du centre de Mars (5 930 km de sa surface), autour duquel il tourne en 7 h 39 mn. La période de rotation martienne est de 24 h 36 mn. Phobos, qui accomplit un peu plus de deux tours autour de la planète lorsque celle-ci effectue une rotation, se lève à l'ouest et se couche à l'est. Sa période synodique est de 11 h 07 mn ; il se lève et se couche deux fois par jour.

Deimos se trouve à 23 500 km du centre de Mars et a une période de 30 h 18 mn. Il se lève normalement à l'est et progresse très lentement vers l'ouest, où il se couche 2 jours et 17 heures plus tard. Sa révolution synodique est de 5 j 10 h 8 mn.

Ces deux satellites ont pu être photographiés par Mariner 9, qui a même pu photographier l'ombre portée de Phobos sur le sol de Mars. Ces photographies montrent qu'il s'agit de sortes de gros cailloux irréguliers de couleur très foncée, parsemés de cratères. Ils ne réfléchissent que 5 % de la lumière qu'ils reçoivent. Phobos a une forme irrégulière. Il mesure environ 26 km sur 21. Il comprend une douzaine de cratères, dont quelques-uns atteignent 1 500 m de diamètre. Deimos, un peu plus régulier, a sensiblement 13 km de diamètre et comprend deux cratères de 1 500 m de diamètre. Deimos a une surface plus lisse que Phobos. Ces satellites sont très foncés, ce qui explique pourquoi les astronomes avaient sous-estimé leurs dimensions.

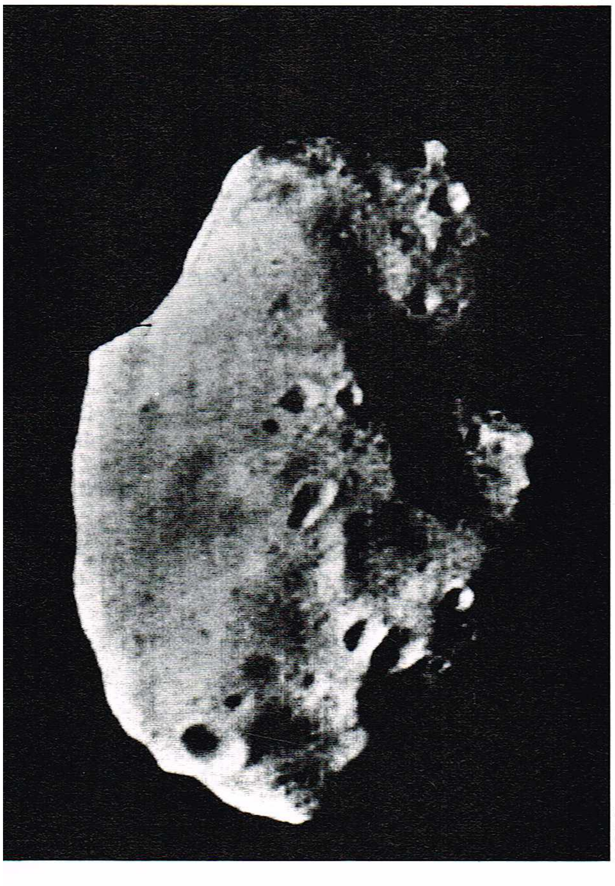

U.S.I.S.

Jupiter

Les quatre grosses planètes : Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune, diffèrent totalement des quatre planètes moyennes, et elles constituent des mondes étranges que nous commençons seulement à connaître grâce aux progrès des observations depuis le sol et dans l'espace.

Jupiter est de loin la mieux connue de ces planètes, et nous la décrirons en détail. Son orbite a un demi grand axe de 5,2 unités astronomiques, soit 778 millions de kilomètres. La période de révolution sidérale est de 11 ans 315 jours. L'orbite est trois fois plus excentrique que celle de la Terre ($e = 0{,}048\,5$) de sorte que la distance de Jupiter au Soleil varie de 740 millions de kilomètres au périhélie où il était en 1975, à 815 millions de kilomètres à l'aphélie où il sera en 1981.

▼ *A gauche, photographie de* **Phobos,** *satellite de Mars, obtenue par Mariner 9, le 29 novembre 1971, à une distance de 5 540 km seulement. On aperçoit environ une douzaine de petits cratères et un plus grand à droite. A droite, photographie du pôle Sud de* **Jupiter** *obtenue par Pionnier 11 en 1974 : on observera la grande tache rouge, découverte par Hooke en 1664.*

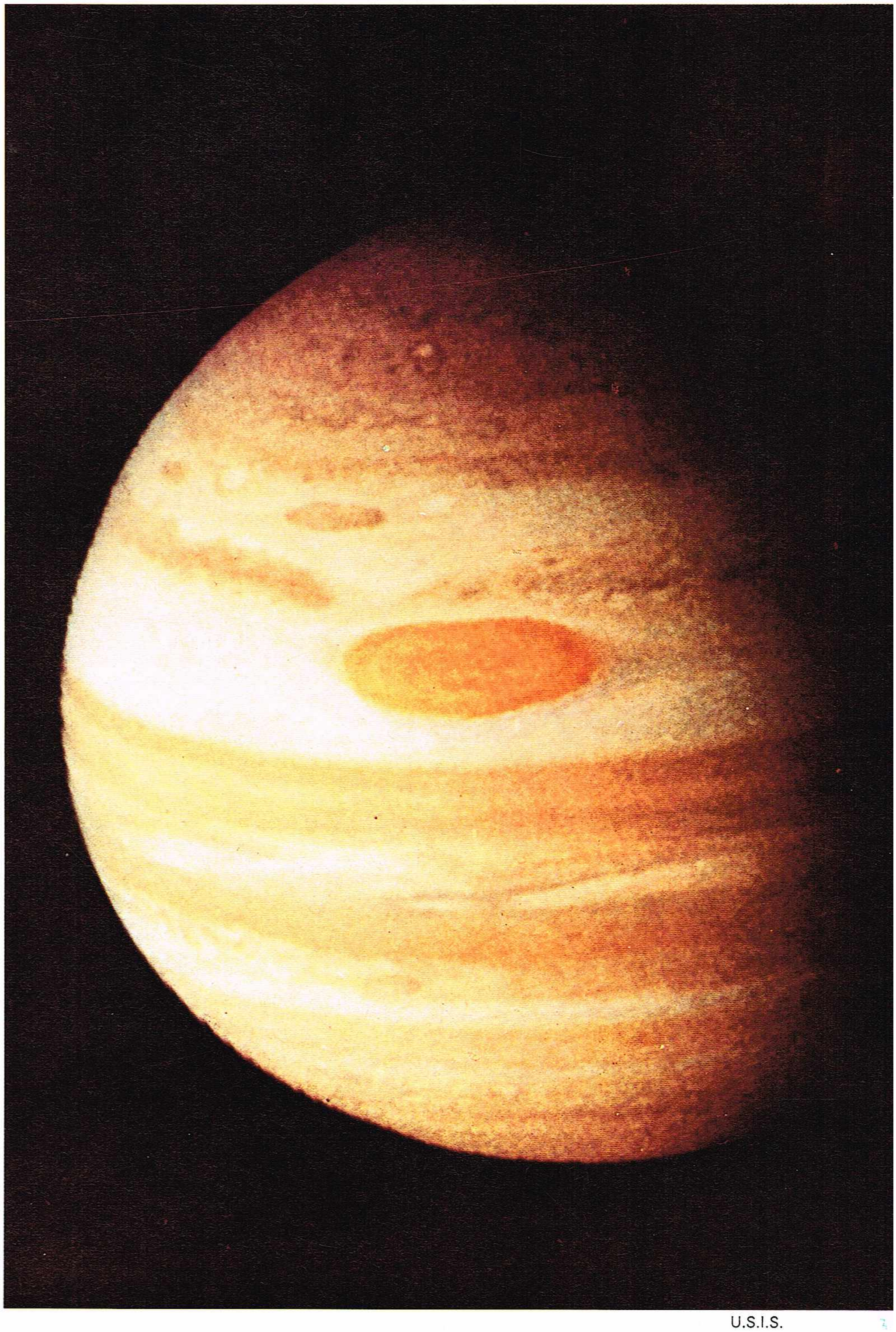

U.S.I.S.

JUPITER							
	C Conjonction géocentrique	QW Quadrature ouest	St Station	O Opposition géocentrique	St Station	QE Quadrature est	C Conjonction géocentrique
Époque en jours	0	113	140	200	260	287	400
Phase	0	11°		0		11°	0
Diamètre apparent	31"	37"		45"		37"	31"
Magnitude	− 1,3	− 1,6		− 2,1		− 1,6	− 1,3

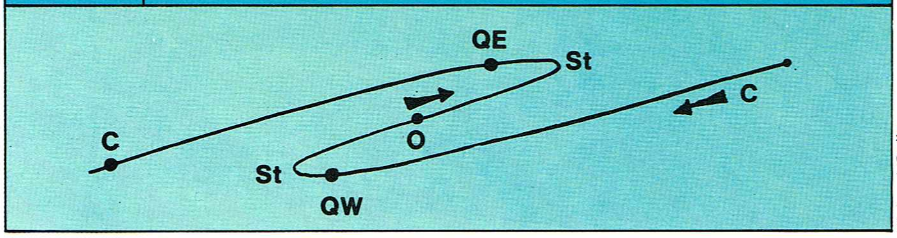

Richard Colin

▲ *Tableau et schéma donnant les valeurs moyennes des paramètres principaux caractérisant la situation de Jupiter pour un observateur terrestre.*

Jupiter se présente comme un ellipsoïde aplati, de couleur bleuâtre, présentant un certain nombre de bandes plus sombres dont l'aspect change d'année en année. Une tache elliptique rouge attire l'observateur lorsqu'elle se trouve sur la face visible. Les bandes obscures définissent un équateur. Le globe est aplati dans le sens des pôles. Cet aplatissement est assez grand : 1/16,7. Le rayon équatorial de l'ellipsoïde visible est de 11,23 rayons terrestres ou 71 600 km; le rayon polaire ne mesure que 67 300 km. Le diamètre apparent de Jupiter varie à l'opposition entre 50" (périhélie) et 44" (aphélie). A la conjonction, ce diamètre est de l'ordre de 32". Jupiter n'est pas lumineux par lui-même. On voit toujours sa face éclairée mais, à la quadrature, une petite phase est visible.

La masse de Jupiter est de 318 masses terrestres; sa densité est assez petite : 1,31 contre 5,52 pour la Terre.

L'observation des détails de Jupiter montre que cette planète tourne rapidement, mais la période de rotation varie avec les détails observés. Jupiter ne tourne pas comme un solide. Les points situés à 10° de latitude ont une période de 9 h 50 mn 30 s, et ceux situés à plus de 10° de latitude, de 9 h 55 mn 40 s. Des sources radioélectriques liées à Jupiter ont une période légèrement différente de cette dernière valeur. C'est cette rotation rapide (la vitesse circonférentielle est de 13 km/s) qui explique l'aplatissement de Jupiter. L'axe de rotation de Jupiter est presque normal à l'orbite, et l'angle d'inclinaison n'est que de 3° 4'. On ne peut donc pas parler de saisons sur Jupiter. C'est un abus de langage de parler de bandes tropicales. La bande équatoriale est claire, elle est bordée par deux bandes foncées et étroites situées aux latitudes de 9°, puis des bandes larges vers 20° sont limitées par des bandes obscures étroites à 30°. La tache rouge a une latitude sud de — 23°; elle mesure actuellement 32 000 km en longitude et 12 000 en latitude. Cette tache a été découverte en 1664 par Hooke; elle varie en couleur et en dimensions; elle mesurait 38 500 km sur 13 800 à son maximum d'étendue en 1884. Elle participe en gros à la rotation de 9 h 55 mn de période, mais elle subit une sorte de dérive dans un sens ou dans l'autre par rapport à cette rotation. Elle est comme un îlot flottant sur sa bande blanche. La couleur a varié du rouge vif (en 1880 et 1932) au rose (en 1951). Elle est actuellement (1975) très nette. L'exploration spatiale a montré qu'elle s'élevait d'environ 8 km au-dessus de la région environnante.

▼ *Représentation schématique de la* **magnétosphère** *de Jupiter d'après les observations des Pionniers 9 et 10.*

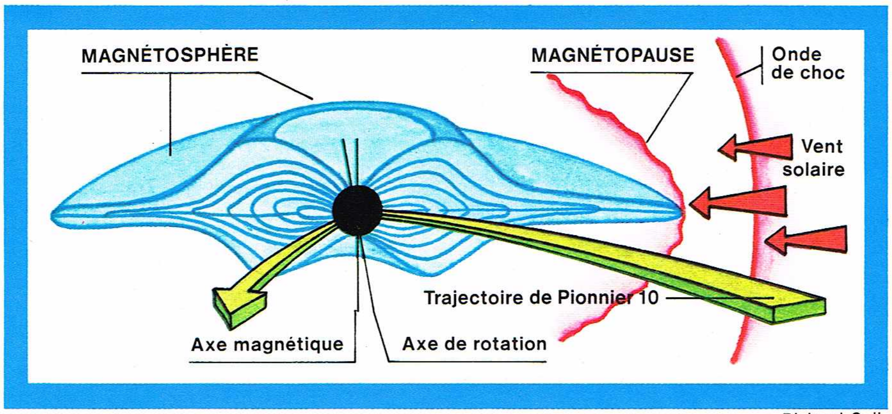

Richard Colin

L'atmosphère de Jupiter

Le spectre visible de Jupiter montre de fortes bandes d'absorption, surtout dans le rouge. Wildt a pu, en 1931, identifier l'origine de ces bandes qui sont dues à l'absorption par les molécules de méthane CH_4 et d'ammoniac NH_3. L'hydrogène moléculaire a pu être identifié plus récemment. En 1974, on a aussi découvert des traces d'éthylène et d'acétylène. Les rayons qui sont diffusés par Jupiter ont traversé une épaisseur d'atmosphère de 50 km d'hydrogène, de 38 m de méthane et de 12 m d'ammoniac, ces gaz étant ramenés aux conditions au sol de l'atmosphère terrestre. La proportion d'hydrogène est donc considérable; on a pu récemment mettre en évidence le deutérium par le composant CH_3D, analogue au méthane (CH_4), où l'un des atomes d'hydrogène a été remplacé par du deutérium (D). Il semble que l'abondance en deutérium soit identique à celle de la Terre; il en serait de même pour l'abondance de l'isotope 13 du carbone. L'atmosphère de Jupiter contient aussi de l'hélium en proportion importante, ainsi que de la vapeur d'eau. Il n'est pas possible d'indiquer le nombre de molécules par cm^3 car le phénomène de diffusion de la lumière dans l'atmosphère de Jupiter est compliqué.

La proportion du nombre des molécules estimées est donnée par le tableau ci-dessous :

H_2	He	H_2O	CH_4	NH_3
2 500	600	5	3	0,3

Avant de décrire un modèle de la constitution de Jupiter, indiquons deux résultats essentiels obtenus ces dernières années. On connaît parfaitement l'énergie reçue par Jupiter du Soleil, et on calcule que la température d'équilibre de cette planète devrait être de l'ordre de 105 °K (— 168 °C), compte tenu du fait que seule 55 % de l'énergie est absorbée. Or, la température est nettement plus élevée, et on constate que l'énergie rayonnée par Jupiter est le double de l'énergie reçue; il doit donc exister une source de chaleur dans Jupiter.

D'autre part, Jupiter a un champ magnétique relativement intense de 4 gauss, soit 10 fois le champ magnétique terrestre; cette valeur est considérable si on considère que le rayon de Jupiter est dix fois celui de la Terre. Des mesures très récentes montrent que les pôles magnétiques sont situés à 10° des pôles de rotation, et la ligne des pôles magnétiques passe à 8 000 km du centre de Jupiter. Le sens du champ est opposé à celui de la Terre.

Ce champ entraîne l'existence d'une magnétosphère et d'une ceinture de particules extrêmement importante. Ce sont les sondes spatiales américaines Pionnier 10 et 11 qui ont permis de photographier Jupiter à des distances d'un million de kilomètres et ont ramené des vues extraordinaires, montrant des phases importantes et explorant le pôle Nord de Jupiter. C'est Pionnier 10 qui a pénétré dans l'onde de choc qui résulte de l'interaction du vent solaire avec la magnétosphère; jusqu'à 35 rayons joviens, la magnétosphère est entraînée par la rotation de Jupiter. A 3 rayons, la concentration des particules est extraordinaire : en effet, par seconde, chaque centimètre carré reçoit 500 millions de particules d'énergie supérieure à 3 milliards d'électrons-volts; pour des énergies dix fois supérieures, le nombre d'impacts est encore de 4 millions. Ce bombardement était si intense pour Pionnier 10 qu'on a préféré changer le vol de Pionnier 11 pour diminuer son trajet dans l'enveloppe de particules.

U.S.I.S.

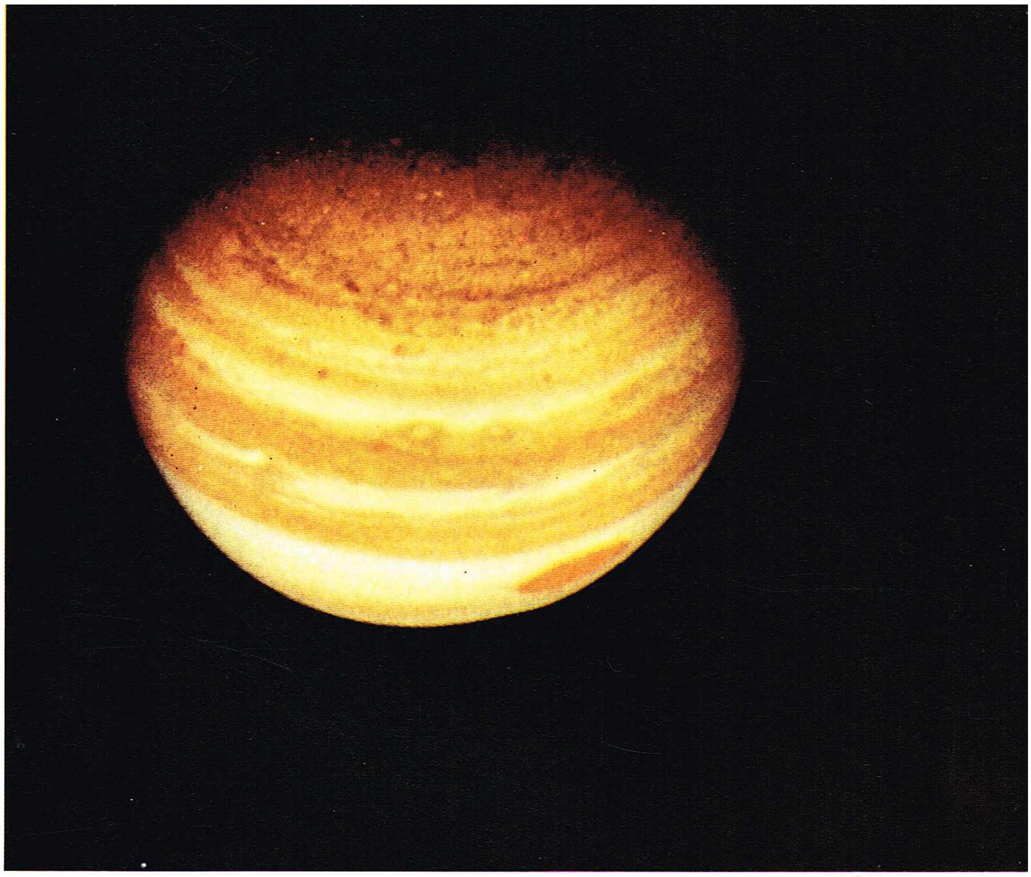

U.S.I.S.

▲ *A gauche vue de la grosse tache rouge obtenue par Pionnier 11 à une distance de 400 000 km, égale à la distance Terre-Lune. La tache mesure 48 000 km en longitude et 16 000 en latitude (N.A.S.A.). A droite, vue de Jupiter prise par Pionnier 11 à une distance de 1,2 million de km de la planète, à la latitude 50° au nord. Le pôle Nord est au sommet, grossièrement sur le cercle (N.A.S.A.).*

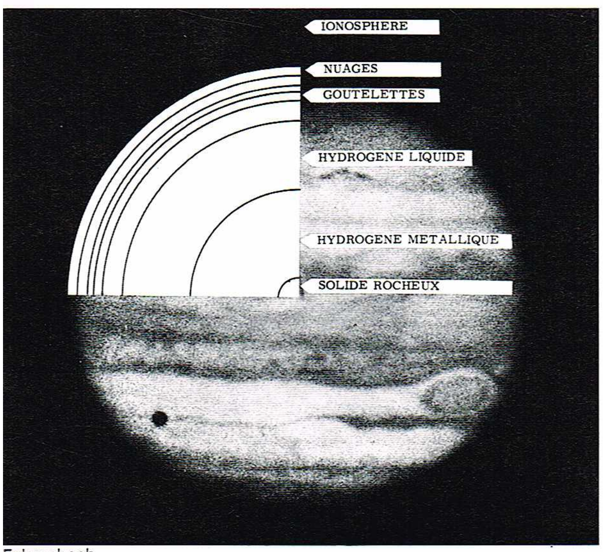

Fehrenbach

◀ *Montage schéma-photographie montrant la structure interne de Jupiter.*

Ce satellite a permis aussi de mettre en évidence de l'hélium. La présence de cet élément est importante pour comprendre la physique de Jupiter. On a pu également faire des mesures de pression et de température dans l'atmosphère : il y a une couche d'inversion de température vers la pression 1 bar, et vers l'intérieur, la température augmente.

Divers modèles de la structure de Jupiter ont été proposés. Ils sont en 1975 encore tout à fait conjecturaux. On ne sait pas s'il existe ou non un petit noyau central de roches. La partie interne de Jupiter est formée par de l'hydrogène, à la pression de 100 millions d'atmosphères. La température serait de l'ordre de 30 000 °K. Cet hydrogène, mélangé avec de l'hélium, serait dans un état voisin de l'état métallique. La température est nettement trop faible pour que des réactions nucléaires puissent produire l'énergie émise par Jupiter. Celle-ci serait due à la perte d'énergie potentielle de particules attirées par le centre. Une contraction de Jupiter de 1 mm par an suffirait à expliquer l'énergie supplémentaire émise. On pense que les nuages de Jupiter sont formés de cristaux d'ammoniac ou de cristaux constitués par un mélange de gaz sulfureux, d'eau et d'ammoniac.

La nature et la vraie structure de la *tache rouge* restent une énigme ; cela pourrait être un tourbillon lié à une structure sous-jacente mais il est difficile de comprendre la stabilité de ce tourbillon depuis plus de 300 ans. D'autres taches plus petites et fugitives ont été observées.

Le voile sur Jupiter commence à peine à se lever. Qu'allons-nous encore découvrir ?

Les satellites de Jupiter

Galilée a découvert en 1610 les quatre gros satellites qui ont été numérotés suivant leur distance à la planète. Ce sont **I Io, II Europe, III Ganymède, IV Callisto.** Ils ont des diamètres analogues à celui de la Lune, et Pionnier 9 a permis de déterminer les masses de ces satellites. Il semble que I et II soient nettement plus denses que III et IV. Nous résumons ci-dessous les données relatives à ces quatre satellites :

Satellites de Jupiter	Période	Rayon de l'orbite	Rayon de la planète	Masse volumique
I Io	1 j 18 h,5	422 000 km	1 829 km	3,48 g/cm³
II Europe	3 j 13 h,2	671 000 km	1 550 km	3,07 g/cm³
III Ganymède	7 j 3 h,7	1 070 000 km	2 635 km	1,94 g/cm³
IV Callisto	16 j 16 h,5	1 883 000 km	2 500 km	1,65 g/cm³

Ces satellites sont très brillants et peuvent être vus, même avec une jumelle. Avec de grands télescopes, on peut observer leur diamètre apparent. B. Lyot a observé des taches sur Ganymède. Pionnier 10 a permis de photographier ce satellite et montre des détails, notamment une région polaire australe claire. Ganymède est plus grand que la Lune et présente une tache foncée qui ressemble à une mer lunaire.

On sait l'importance qu'ont eue ces satellites pour la découverte de la propagation de la lumière par O. Roemer : ces satellites peuvent être éclipsés par Jupiter, et on

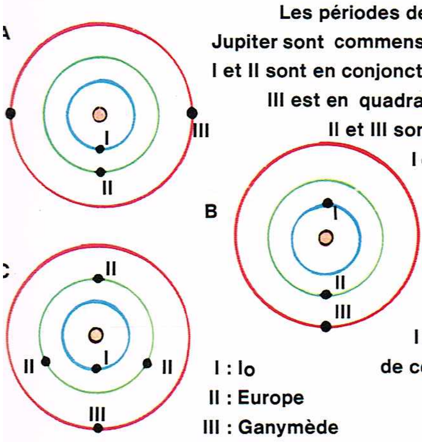

Les périodes des 3 satellites de Jupiter sont commensurables : lorsque I et II sont en conjonction jovicentrique, III est en quadrature (A) ; lorsque II et III sont en conjonction, I est en opposition (B) ; lorsque I et III sont en conjonction, II est soit en opposition avec I et III, soit à ± 60° de cette direction (C).

I : Io
II : Europe
III : Ganymède

Richard Colin

◀ **Jupiter** *: les périodes des trois premiers satellites sont reliées entre elles de sorte que seules les configurations représentées ici sont possibles.*

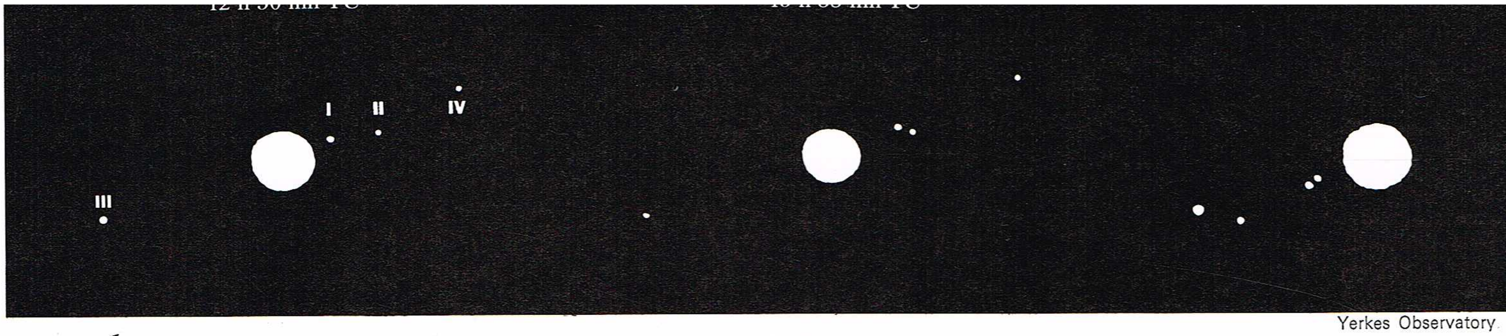

Yerkes Observatory

▲ *Ces trois photographies, prises successivement, montrent le mouvement de révolution des principaux satellites de Jupiter (I, Io; II, Europe; III, Ganymède; IV, Callisto) autour de la planète. Les deux premières photographies ont été prises le même jour, la troisième quelques jours plus tard (Observatoire Yerkes).*

U.S.I.S.

▶ *Cette photographie composite en couleurs de Ganymède, satellite de Jupiter, a été prise le 10 décembre 1973 par Pionnier 10. Elle montre la région polaire Nord en haut où l'on voit une région sombre qui paraît ressembler à une mer lunaire. Le diamètre de ce satellite est de 5 300 km environ.*

▼ *La planète Saturne avec son anneau caractéristique (copyright du California Institute of Technology).*

peut observer leur passage sur le disque et les ombres portées. Signalons qu'il existe un couplage entre les mouvements des satellites I, II et III, de sorte qu'ils ne peuvent jamais être éclipsés tous les trois, ni passer simultanément sur le disque.

Le satellite Io circule nettement à l'intérieur de la magnétosphère, et on constate qu'il est accompagné d'une importante enveloppe d'hydrogène. On y a d'ailleurs constaté l'existence des raies d'émission du sodium.

Ces quatre gros satellites, dits anciens ou galiléens, circulent dans des orbites sensiblement confondues avec le plan de l'orbite de Jupiter.

On connaît actuellement neuf autres satellites. Le satellite **V** est très proche de Jupiter; sa période est voisine de 12 heures; il est très petit, son diamètre est de l'ordre de 200 km; il a été découvert par Barnard en 1892.

Les huit autres peuvent être groupés en deux familles.

Les satellites, **VI**, **VII** et **X** ont été découverts en 1904, 1905 et 1938, et **XIII**, en 1974. Les trois premiers ont des diamètres respectivement de 140, 10 et 12 km et les plans de leur orbite sont inclinés de 28° sur l'équateur de Jupiter; leurs périodes sont de 250, 260 et 260 jours.

Enfin, les quatre autres satellites, **XII**, **XI**, **VIII** et **IX**, ont des mouvements rétrogrades avec des périodes voisines de 2 ans; leurs diamètres sont de l'ordre de 20 km.

Tous ces satellites sont difficiles à observer. Leurs magnitudes sont de l'ordre de 13 pour V et VI, mais de 18 à 19 pour les autres.

En septembre 1974, un nouveau satellite, XIII, de 20e magnitude, a été découvert. Il fait partie de la deuxième famille (VI, VII et X) : son inclinaison sur l'équateur de Jupiter est 28°,8, sa période de 210,6 jours. Il est petit, son diamètre est de l'ordre de 8 km.

Saturne

L'étrange monde de Saturne est une merveille du ciel. Cette planète est entourée d'un anneau qui se présente sous un aspect variable suivant la position de la planète sur son orbite.

Saturne tourne autour du Soleil en 29,46 ans sur une orbite inclinée de 2°,5 sur l'écliptique. L'excentricité de cette orbite de 9,54 unités astronomiques est assez grande : $e = 0{,}056$, de sorte que sa distance au Soleil varie entre 10,07 et 9,00 unités astronomiques (entre 1,506 milliard de kilomètres et 1,347 milliard de kilomètres).

Il est constitué par un globe très aplati ayant un rayon équatorial de 60 400 km ou 9,47 rayons terrestres et un rayon polaire de 54 500 km. Sa masse est de 95,4 masses terrestres de sorte que sa densité moyenne de 0,7 est inférieure à celle de l'eau.

L'aspect du globe de Saturne est assez analogue à celui de Jupiter; il présente des bandes, mais elles sont peu contrastées, et de temps en temps seulement la bande équatoriale présente une tache blanche qui a permis de déterminer la période de rotation qui est de l'ordre de 10 heures à l'équateur. Il est certain que les conditions physiques du globe de Saturne sont très analogues à celles de Jupiter. Il semble que Saturne ait aussi une source de chaleur intérieure, mais, à l'inverse de Jupiter, le champ magnétique paraît faible. Il faudra attendre les résultats de la sonde Pionnier 11, actuellement en route pour Saturne qu'elle atteindra en septembre 1979, pour être fixé.

Mount Wilson and Palomar Observatories

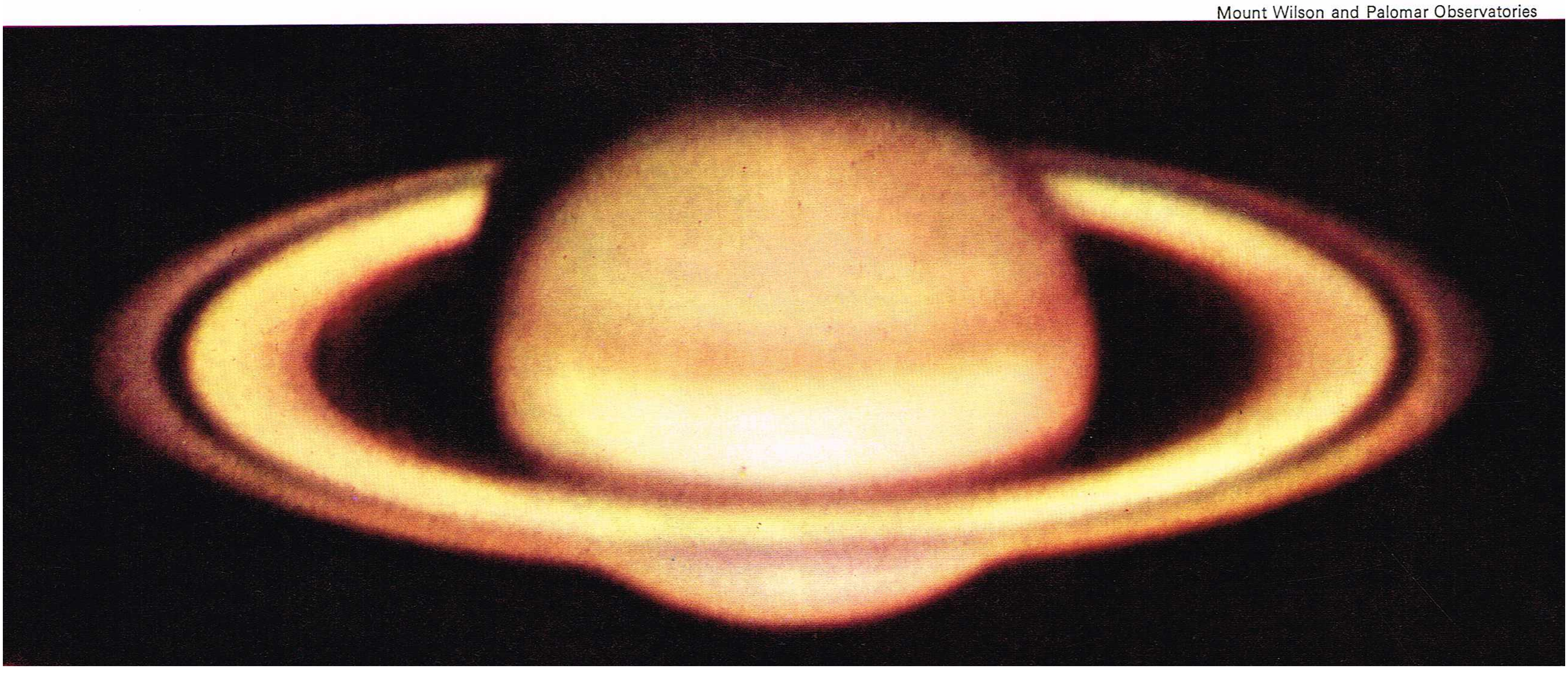

Les composants atmosphériques de Saturne sont très probablement les mêmes que ceux de Jupiter, mais la température mesurée de — 200 °C est telle que l'on n'a pu détecter avec certitude l'ammoniac NH_3 ; ce corps doit être à l'état solide.

Les anneaux de Saturne

Dans le plan équatorial de Saturne existe un anneau très mince et présentant des séparations qui le divisent en fait en trois anneaux. Un anneau intérieur, très peu lumineux, nommé *anneau de crêpe,* a un rayon intérieur de 72 000 km et s'étend jusqu'à 89 000 km. Il est difficile à observer. Ensuite, l'anneau disparaît sur un intervalle de 1 000 km. L'*anneau B,* très brillant, va de 90 000 à 116 000 km. Une séparation très nette, dite *division de Cassini,* le sépare de l'anneau extérieur ou *anneau A,* moins brillant, et qui s'étend jusqu'à 137 000 km.

L'anneau est très mince : lorsqu'on le voit par la tranche, il disparaît et son épaisseur est évaluée à 10 km. Un anneau si mince ne pourrait subsister s'il était solide ; il est formé par un ensemble de petits satellites, tournant autour de Saturne suivant les lois de l'attraction newtonienne. L'analyse spectroscopique montre bien que l'anneau ne tourne pas comme un solide.

L'axe de rotation de Saturne fait avec l'orbite de Saturne un angle de 26°,7. Au cours du mouvement orbital, ce plan reste parallèle à lui-même : c'est une conséquence des lois de la mécanique céleste. Il existe certainement un petit effet de précession, comme pour la Terre, mais nous pouvons le négliger. Un observateur placé au centre du Soleil occuperait des positions différentes par rapport au plan équatorial de la planète, suivant la position de Saturne sur son orbite. La position du plan équatorial de Saturne dans l'espace est telle qu'en 1967, le Soleil était situé dans le plan équatorial ; il passait dans l'hémisphère Sud. Cette date est l'équivalent de notre équinoxe d'automne. A ce moment, un observateur, placé sur le Soleil, ne verrait plus l'anneau de Saturne. Le phénomène ne serait pas très différent pour un observateur terrestre. Actuellement, en 1975, un quart de période de révolution plus tard, un observateur terrestre peut voir l'anneau à son maximum d'ouverture, alors qu'en 1967, il était invisible. A partir de 1975, il va devenir de plus en plus mince pour disparaître en 1981. Ensuite, nous le verrons par la face nord ; le maximum de visibilité aura lieu en 1990 et nous aurons bouclé la boucle en 1997.

Naturellement, pour un observateur terrestre, il faut tenir compte du mouvement orbital de la Terre. Au moment de la disparition des anneaux, le phénomène se complique. La Terre et le Soleil ne se trouvent pas simultanément dans le plan de l'anneau, de sorte que de complexes phénomènes d'ombres portées, parfaitement prévisibles, se passent.

On sait que Galilée n'avait pas reconnu en 1610 la nature des anneaux et avait été surpris de ne pas revoir en 1613 les deux satellites qu'il pensait avoir identifiés en 1610. En 1613, l'observateur terrestre, situé dans le plan de l'anneau, ne pouvait l'apercevoir. Comme nous l'avons indiqué, on peut observer les ombres portées des anneaux sur le globe et du globe de Saturne sur l'anneau ; cette dernière ombre n'est observable que loin de l'opposition.

La dimension des satellites qui forment les anneaux n'est pas connue. On a longtemps supposé qu'ils étaient formés de glace. Mais des spectres infrarouges ont montré l'existence de bandes d'absorption qui sont identiques à celle de la glace d'ammoniac (1969).

Les autres satellites

En plus de ces anneaux, Saturne comprend une dizaine de satellites : 9 ont des orbites bien connues, le dixième, Thémis, découvert en 1900, a été perdu depuis, mais un nouveau, Janus, a été découvert en 1966 par Dollfus. Le plus important est Titan dont le diamètre est de 4 880 km ; il est nettement plus grand que la Lune. Il a une atmosphère contenant du méthane. Son orbite est contenue pratiquement dans le plan des anneaux et sa période de révolution est de 15,945 jours ; il circule à 1,222 million de kilomètres du centre de Saturne. Il est facilement observable ; sa magnitude à l'opposition est de 8,3. Les autres satellites, sauf Phœbé (IX) et Japet (VIII), circulent dans le plan des anneaux.

Les deux satellites les plus proches sont **Janus** et **Mimas.** Janus a une période de 18 h, une magnitude de 14, un diamètre estimé à 300 km et une orbite très proche de la limite extérieure de l'anneau ; il en est de même de Mimas, dont la période est de 22 h, et à sa magnitude 12 correspond un diamètre de 600 km. Les autres satellites ont des magnitudes comprises entre 10 et 11 et circulent plus près que Titan ; leurs diamètres ont des valeurs comprises entre 600 et 1 400 km **(Rhéa). Hypérion** est très faible (magnitude 14,5) et a une orbite un peu plus grande que celle de Titan. Sa période est de 21,28 jours. **Japet** a une orbite inclinée de 15° sur le plan des anneaux ; sa période est de 79,9 jours. Il est trois fois plus éloigné que Titan. Enfin, **Phœbé,** découvert en 1898, a une orbite inclinée de 30° sur le plan des anneaux. Sa période est de 550 jours et son mouvement est rétrograde. C'est peut-être une petite planète capturée par Saturne ; son diamètre est faible : 200 km.

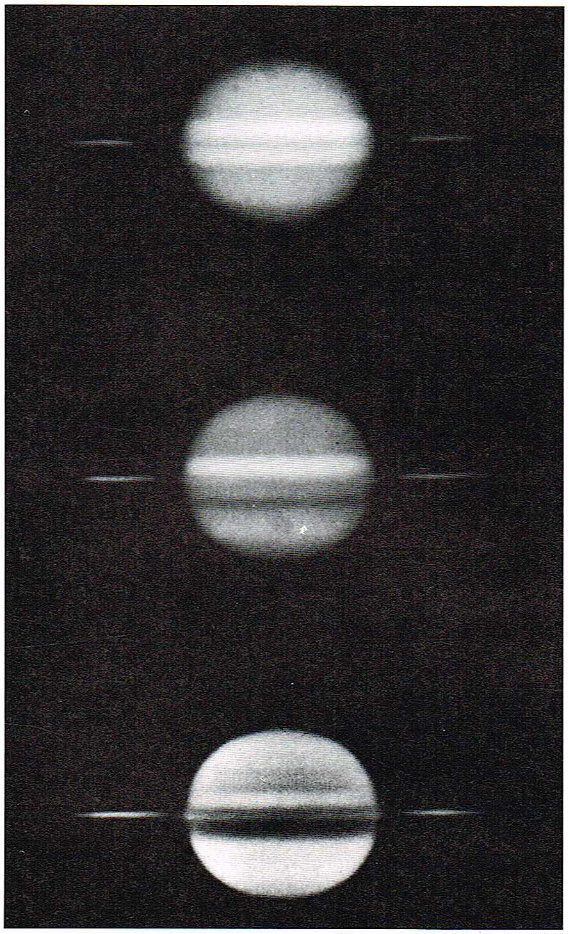

Observatoire du pic du Midi

◄ *Photographie* **de Saturne** *les 19 et 20 septembre 1966 au moment de la disparition des anneaux vus par la tranche : en haut, avec un filtre jaune, pose 1/2 s ; au milieu, avec un filtre bleu-violet, pose 4 s ; en bas, filtre ultraviolet, pose 10 s (Observatoire du pic du Midi).*

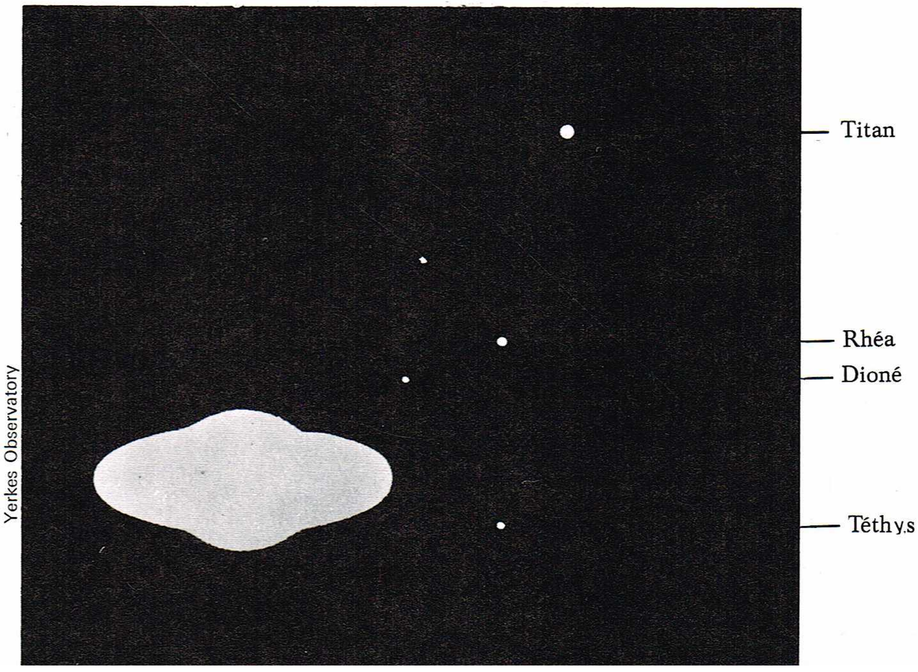

Yerkes Observatory

▼ **Saturne** *et quatre de ses satellites (Titan, Rhéa, Dioné et Téthys) sur une photographie exécutée par Kuiper, le 24 mars 1948. Le long temps d'exposition nécessaire pour faire apparaître les satellites a abouti à une surexposition de la planète et de ses anneaux (Observatoire Yerkes).*

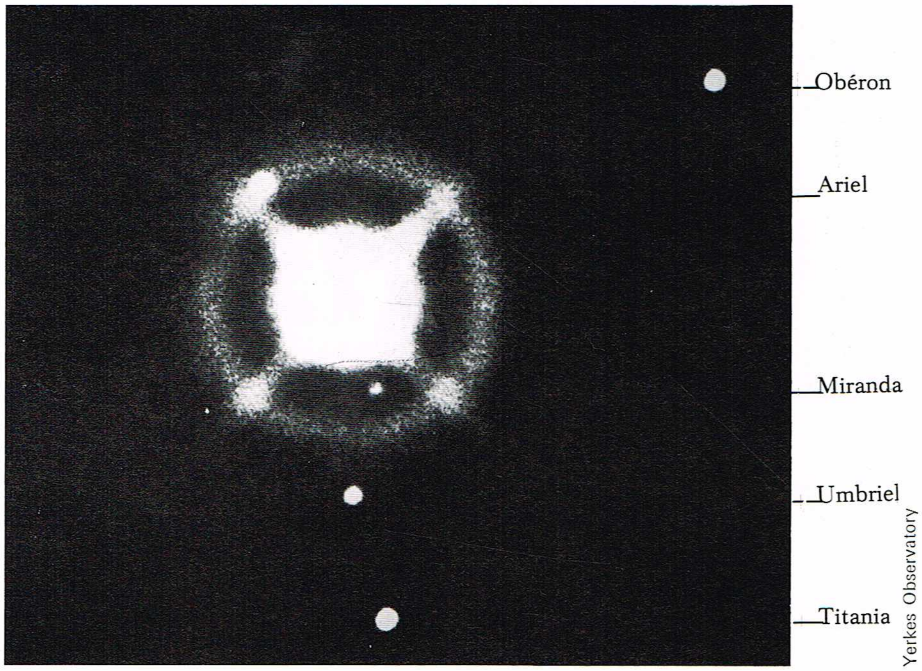

▲ Uranus *et ses cinq satellites (Obéron, Ariel, Miranda, Umbriel et Titania). Miranda a été découvert par Kuiper le 15 février 1948, en examinant le négatif original de cette photographie (Observatoire Yerkes).*

Uranus

La planète Uranus a été découverte par hasard en 1781 par W. Herschel. Elle circule en 84,01 ans autour du Soleil sur une orbite de 19,2 unités astronomiques de rayon. L'excentricité de l'orbite est $e = 0{,}047$. Uranus a l'aspect d'un petit disque sensiblement rond (aplatissement 1/33) de 4" de diamètre angulaire. Le disque d'Uranus est verdâtre, aucun détail sûr n'est observable. Son rayon est de 25 400 km et sa densité de 1,3. Mais Uranus a une atmosphère d'hydrogène, d'hélium et de méthane. Sa température, de 55 °K, ne semble pas indiquer de source de chaleur interne. C'est à peu près tout ce que nous savons sur cette grande planète qui doit être analogue à Saturne et à Jupiter. On estime sa période de rotation à 10 h 48 mn.

Les satellites d'Uranus

Uranus a 5 satellites, dont 2 furent découverts en 1787 par W. Herschel. Ils ont des magnitudes voisines de 14, et leurs diamètres sont évalués à environ 900 km. Le plus brillant, **Titania,** tourne en 8,7 jours autour de sa planète, et son diamètre est estimé à 1 000 km ; **Obéron** a une période de 13,5 jours.

Mais la très grande originalité de ces satellites, comme celle des deux satellites plus faibles, découverts en 1851, est le fait qu'ils ont des orbites pratiquement perpendiculaires au plan de l'orbite d'Uranus. Le satellite **Miranda** est très faible (magnitude 17) ; il est très voisin de la planète et sa période est de 1,4 jour.

▼ *Orbite de* Pluton *vue en perspective :* NN, *ligne de nœuds;* A, *aphélie;* P, *périhélie;* α, *angle formé par le plan de l'orbite avec le plan de l'écliptique (soit environ 17°).*

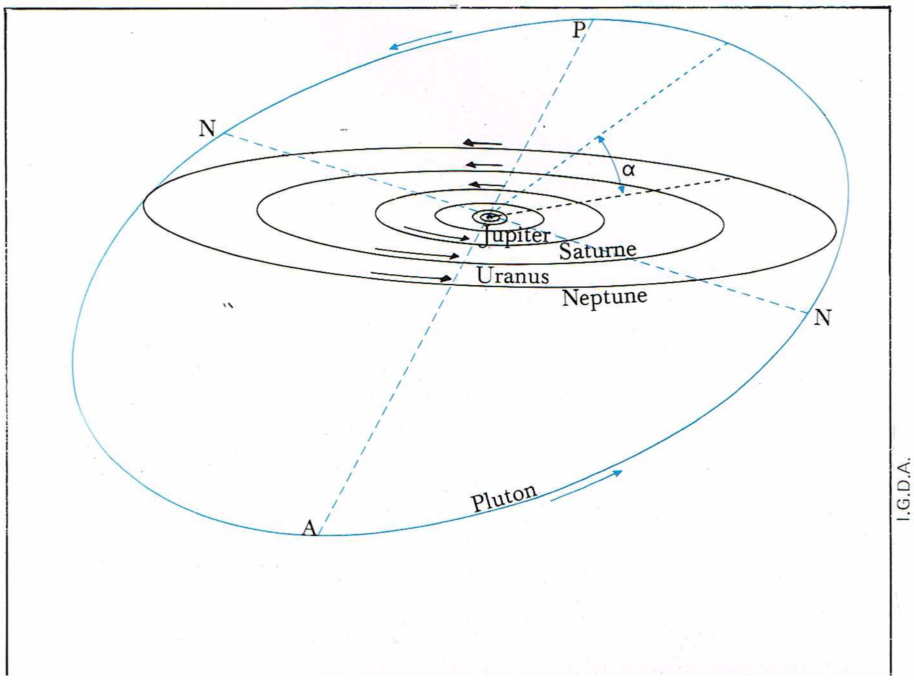

Neptune

Cette planète, prévue par le calcul par Le Verrier et par Adams, a été découverte par Galle le 23 septembre 1846 ; elle a une orbite pratiquement circulaire située à 30,06 unités astronomiques. Sa période de révolution est de 164,79 ans. C'est un astre de 8e grandeur et montrant un petit disque de 2" de diamètre angulaire, sensiblement rond. Son diamètre est estimé à 44 000 km. C'est donc une planète analogue à Uranus dont elle présente tous les caractères : atmosphère de méthane, température calculée de 45 °K. On estime sa période de rotation à 15 h 48 mn.

Les satellites de Neptune

Neptune a deux satellites. **Triton,** de magnitude 13,5, a une trajectoire inclinée de 141° sur son orbite, c'est-à-dire que son plan ne fait qu'un angle de 39°, mais son mouvement est rétrograde. Sa période est de 5,88 jours. Il a un grand diamètre estimé à 4 000 km. **Néréide,** très faible, avec une magnitude de 19,5, n'a été découvert qu'en 1949 par Kuiper. Elle est éloignée de la planète. Son orbite est très excentrique ($e = 0{,}76$), de sorte que sa distance au centre de Neptune varie entre 10 millions et 1,3 million de kilomètres. Son mouvement est direct, sa période de 360 jours, et son diamètre voisin de 200 km.

Pluton

Vers 1914, l'astronome américain Lowell avait prédit l'existence d'une planète transneptunienne pour expliquer des perturbations du mouvement d'Uranus qui ne pouvaient être expliquées par l'attraction de Neptune. Une recherche faite en 1919 avait été infructueuse, et c'est Tombaugh qui découvrit la planète en 1930, à 6° de la position prévue par P. Lowell. Mais s'agissait-il bien de la planète prévue par Lowell ? Pluton semblait si petit que l'on se posa immédiatement beaucoup de questions à son sujet ; elles ne sont pas encore résolues. Un célèbre expert en mécanisme céleste, E. W. Brown, a qualifié la découverte de tout à fait fortuite.

Sauf pour les éléments de l'orbite, nous connaissons peu de chose de Pluton. Cette planète, qui se trouve en moyenne à 39,5 unités astronomiques du Soleil, décrit en 248 ans une orbite à la fois très excentrique ($e = 0{,}250$) et très inclinée, de 17° par rapport à l'écliptique. A cause de cette orbite très anormale, Pluton peut être très éloigné de l'écliptique, bien au-delà du zodiaque. D'autre part, à l'aphélie, dont le dernier remonte au 12 juillet 1866, Pluton se trouve à environ 50 unités astronomiques du Soleil. Au périhélie (le prochain aura lieu le 12 septembre 1989), il est pratiquement à la même distance du Soleil que Neptune, à 30 unités astronomiques. En fait, entre 1979 et 1998, Neptune sera la planète connue la plus lointaine du système solaire. Mais les orbites de ces deux planètes ne se recoupent pas, à cause de leur inclinaison différente sur l'écliptique, et les deux planètes ne pourront se rapprocher à plus de 385 millions de kilomètres.

La période de rotation de Pluton serait de 6,4 jours. On ne connaît bien ni sa masse, ni son diamètre. On croyait à l'origine que Pluton était très petit. En 1950, Kuiper, travaillant au mont Palomar, évalua le diamètre de Pluton à environ la moitié (soit 0,46) de celui de la Terre, avec une masse représentant le dixième de celle de la Terre.

Des mesures plus récentes (1965) semblaient confirmer les résultats de Kuiper. Mais comment une planète aussi petite pourrait-elle seule produire les perturbations observées dans les mouvements d'Uranus et de Neptune ? Pour tourner la difficulté, il fallait considérer la densité de Pluton comme 10 fois supérieure à celle de la Terre, c'est-à-dire 3 fois celle de l'or. Il y a quelques années, on proposa une autre explication des observations de Kuiper : la surface de Pluton, gelée, réfléchirait la lumière du Soleil comme un miroir convexe, de sorte qu'on mesurerait non pas le véritable diamètre de la planète, mais celui de sa brillante tache centrale, bien inférieur à celui de la totalité du disque.

Une autre hypothèse, séduisante, est que les perturbations d'Uranus et de Neptune ne seraient pas provoquées par Pluton, mais par une planète éloignée supplémentaire, inconnue, la *planète X*. En 1846, immédiatement

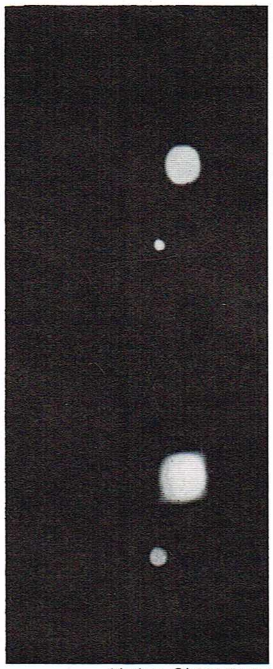

Yerkes Observatory

◀ **Neptune** ***et ses deux satellites, Triton et Néréide (ce dernier indiqué par la flèche); à droite, détail montrant Neptune et Triton photographiés à un intervalle de 12 mn, le 24 février 1949 (Observatoire Yerkes).***

après la découverte de Neptune, Le Verrier avait déjà indiqué que la nouvelle planète subirait des perturbations, et montrerait ainsi l'existence d'une planète plus lointaine, et ainsi de suite, jusqu'aux limites de l'hypothétique nuage contenant 100 milliards de comètes, situé à 150 000 unités astronomiques, et dont nous parlerons plus loin.

Finalement, on semblait voir percer, en 1968, les mystères de la masse et de la densité de Pluton, en analysant les perturbations des mouvements de Neptune de 1846 à 1968, et en trouvant pour Pluton plusieurs masses possibles. La valeur de 0,18 masse terrestre est celle qui convient le mieux si l'on considère les perturbations de Neptune. En 1965, on a observé l'occultation d'une étoile de 15^{e} magnitude par Pluton. On en a déduit un diamètre de 6 400 km et une densité égale à 1,4 fois celle de la Terre.

En conclusion, Pluton ne serait pas plus gros que Mars mais serait deux fois plus dense.

On a cherché des satellites de Pluton, avec les plus grands télescopes, notamment celui du mont Palomar, mais sans résultat. S'il en existe, ils doivent être plus faibles que la magnitude 22, à moins qu'ils ne soient très proches de la planète.

Pour conclure, Pluton ressemble beaucoup aux planètes terrestres, aussi bien par ses dimensions que par sa masse. Son orbite excentrique, l'inclinaison du plan de l'orbite font penser que Pluton est plutôt un satellite échappé d'une autre planète. Certains spécialistes (comme Lyttleton) pensent qu'à l'origine Pluton était un satellite de Neptune, et qu'il s'en serait éloigné par l'action de Triton. Simultanément, le mouvement orbital de Triton, d'abord direct, serait devenu rétrograde. Selon d'autres astronomes (Kuiper et Rabe), par contre, Pluton proviendrait d'une partie des matériaux de la protoplanète qui donna naissance à Neptune.

Les petites planètes

La loi de Titius-Bode indiquait une lacune dans la série des planètes entre Mars et Jupiter pour la distance de 2,8 unités astronomiques. Cette lacune a été comblée par la découverte en 1801 de **Cérès** dont le demi grand axe de l'orbite est de 2,767 unités astronomiques; puis furent découvertes **Pallas, Junon** et, en 1807, **Vesta,** dont le demi grand axe est d'ailleurs nettement plus petit (2,361). Un cinquième astéroïde fut découvert en 1845, **Astrée,** puis les découvertes s'accélèrent, surtout

Mount Wilson and Palomar Observatories

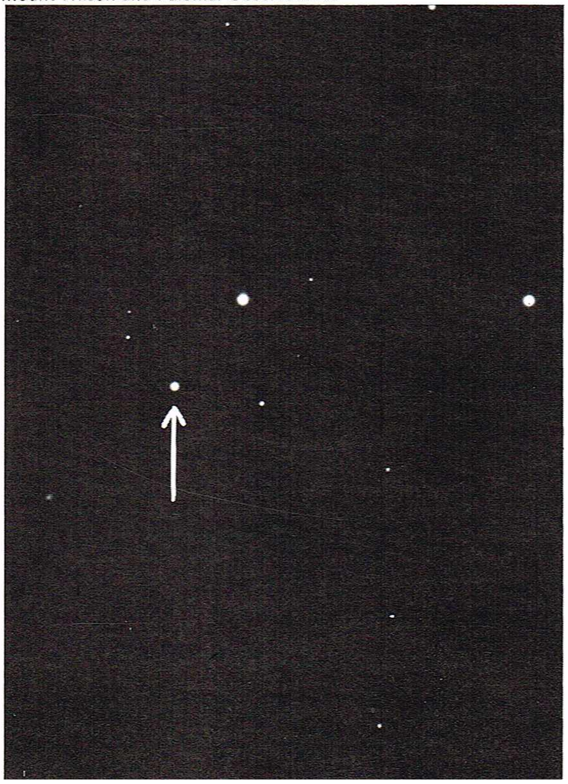

Mount Wilson and Palomar Observatories

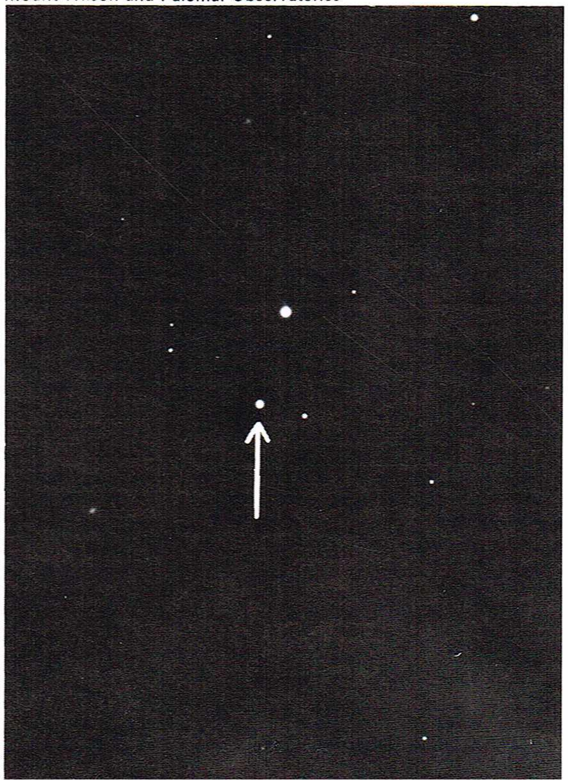

◀ ***Mouvement de Pluton par rapport aux étoiles, déterminé grâce à deux photographies effectuées à 24 h d'intervalle (Observatoires du mont Wilson et du mont Palomar).***

Le plus grand est Cérès dont le diamètre est de 1 000 km et qui ne réfléchit que 8 % de la lumière solaire ; viennent ensuite Pallas (550 km, 10 %), Vesta (520 km et 25 %). C'est à cause de ce grand albédo que Vesta est la petite planète la plus brillante. De nombreux astéroïdes ont des diamètres compris entre 200 et 100 km. Les plus faibles, détectés avec le télescope de Schmidt du mont Palomar, ont des diamètres de l'ordre de 2 km.

La détermination de la masse des astéroïdes est très difficile. Dans deux cas, des petites planètes se sont assez rapprochées pour que la déformation de leurs orbites ait permis d'évaluer leurs masses. Les densités sont donc mal connues. Celle de Cérès est estimée à 2,5. Toutes les petites planètes ont de petites masses. La plus grande, Cérès, a une masse égale à 1/5 000 de la masse terrestre, et l'ensemble des astéroïdes, en tenant compte de toute la poussière des petites planètes invisibles, ne doit pas dépasser 1/2 000 de la masse de la Terre ou 6 % de celle de la Lune.

L'étude récente de la lumière réfléchie par Vesta et par Junon montre une bande d'absorption située vers 0,95 μm, analogue à celle des météorites chondritiques. La plupart des astéroïdes sont très foncés et peuvent être comparés à du noir de fumée.

Un grand nombre de petites planètes ont des éclats variables avec des périodes comprises entre 2 et 20 heures ; ces astéroïdes ne sont pas sphériques et ils tournent. Le cas le plus étrange est celui d'**Hector** pour lequel on a proposé une forme de barre de 100 km de long et 19 km de diamètre. Peut-être Hector est-il formé par deux astéroïdes tournant autour de leur centre de gravité commun ?

L'étude statistique des orbites des astéroïdes donne des résultats très intéressants : le plus grand nombre de petites planètes a des demi grands axes de 2,7 ou 3,1 unités astronomiques. Si l'on étudie la fréquence de leur répartition en fonction de la période, on constate qu'il n'y a pas de petites planètes ayant des périodes égales à 1/2, 3/7, 2/5 et 1/3 de celle de Jupiter. Il s'agit là d'un phénomène de résonance. Jupiter a dû éliminer par son action perturbatrice les astéroïdes de ces orbites.

Les petites planètes peuvent être groupées en familles qui circulent sur des orbites voisines comme si elles provenaient de la désintégration d'une même petite planète initiale.

Un groupe de 15 planètes circule sur l'orbite de Jupiter mais à 120° de longitude de part et d'autre de Jupiter.

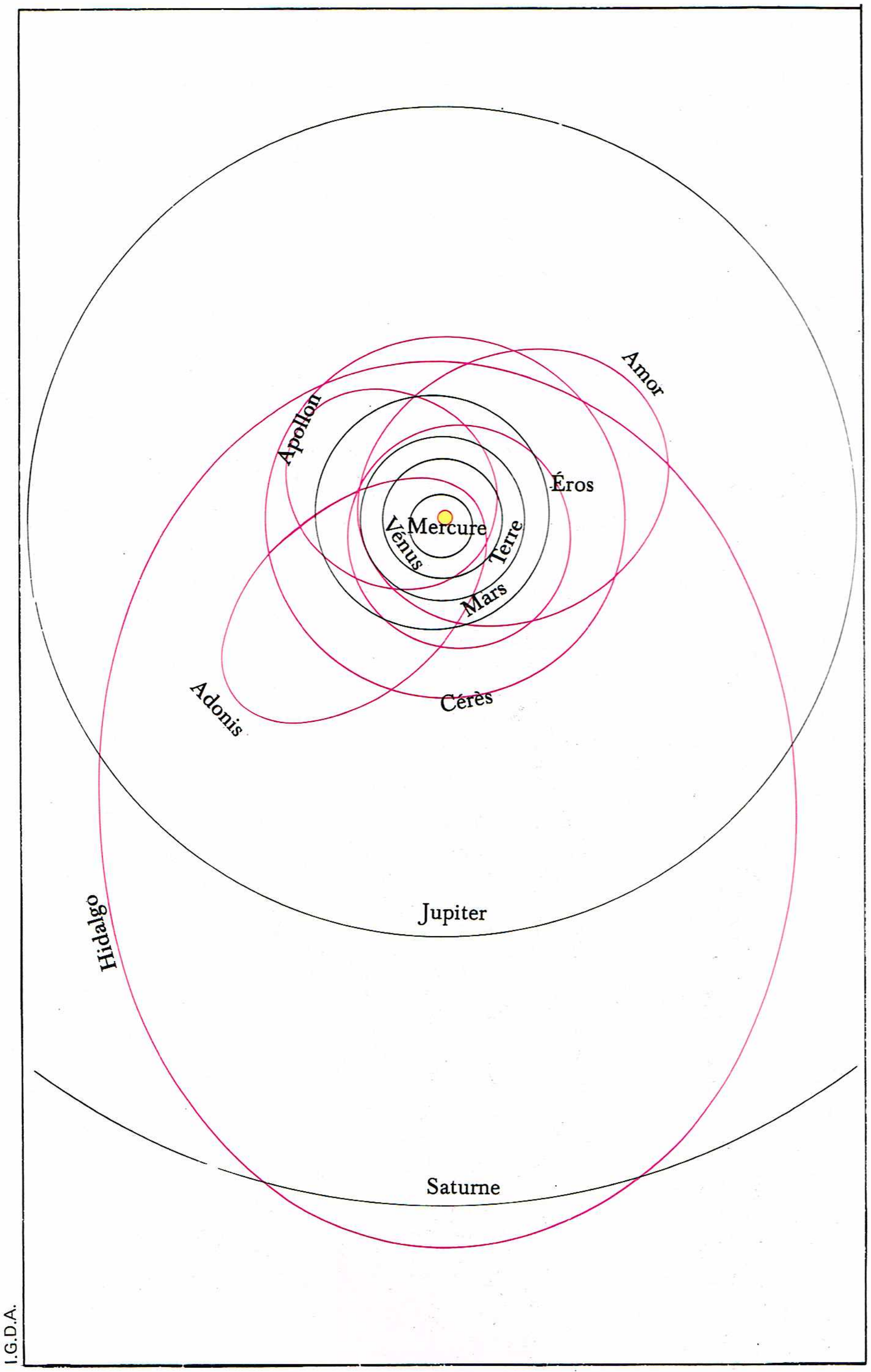

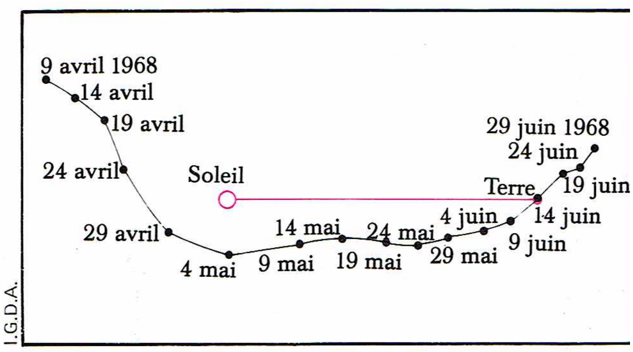

▲ A gauche, schéma des orbites très excentriques de certaines petites planètes.

A droite, positions relatives du **Soleil**, *de la* **Terre** *et de la petite planète* **Icare** *vers le passage au périhélie le 4 mai 1968. L'aspect un peu curieux de cette courbe provient du fait qu'on a représenté la position d'Icare par rapport à la ligne de référence Soleil-Terre supposée fixe. Le minimum de distance Terre-Icare a eu lieu le 15 juin (7 millions de km environ).*

après l'introduction par Wolf, en 1891, de la photographie comme moyen de recherche.

Le nombre d'astéroïdes découverts visuellement est de 317. Actuellement, le nombre de petites planètes qui ont des orbites assez bien connues pour être désignées par des noms ou des numéros est de 1 796. 24 sont plus brillantes que la magnitude photographique 11 ; à l'opposition géocentrique, la plus brillante est Vesta avec une magnitude 6,8. Le nombre des petites planètes a encore beaucoup augmenté depuis que de puissants moyens ont été utilisés, et on estime à 500 000 le nombre de petites planètes plus brillantes que la magnitude 21,2.

La photométrie permet de déterminer leurs dimensions. L'éclat d'une petite planète dépend de deux facteurs : de sa surface qui diffuse et de la proportion de lumière réfléchie ou albédo. Les petites planètes émettent aussi un rayonnement infrarouge dû à leur température. La combinaison de ces deux données a permis de déterminer à la fois le diamètre et l'albédo pour quelques astéroïdes.

Lagrange avait indiqué que des objets situés en ces deux points devaient avoir des orbites stables. On a décidé de donner à ces planètes les noms des guerriers grecs et troyens : **Hector, Achille, Patrocle, Agamemnon,** etc. En principe, les planètes situées au point de Lagrange en avant-garde sur Jupiter sont les planètes grecques, les autres les planètes troyennes; mais la règle n'a pas été respectée : Hector s'est glissé parmi les Grecs et Patrocle parmi les Troyens.

Quelques petites planètes ont des orbites très excentriques : **Hidalgo** est la seule qui dépasse, à son aphélie, l'orbite de Jupiter. C'est peut-être une ancienne comète. D'autres s'approchent beaucoup de la Terre au périhélie. **Éros** a servi à la détermination de la parallaxe du Soleil. **Icare, Hermès** et 1685 **Toro** peuvent s'approcher à 10 millions de kilomètres de la Terre. En 1936, Adonis s'approcha successivement à 2 millions de kilomètres de Vénus, de la Terre et ensuite de Mars. En 1933, Hermès s'approcha encore plus près de la Terre, à environ

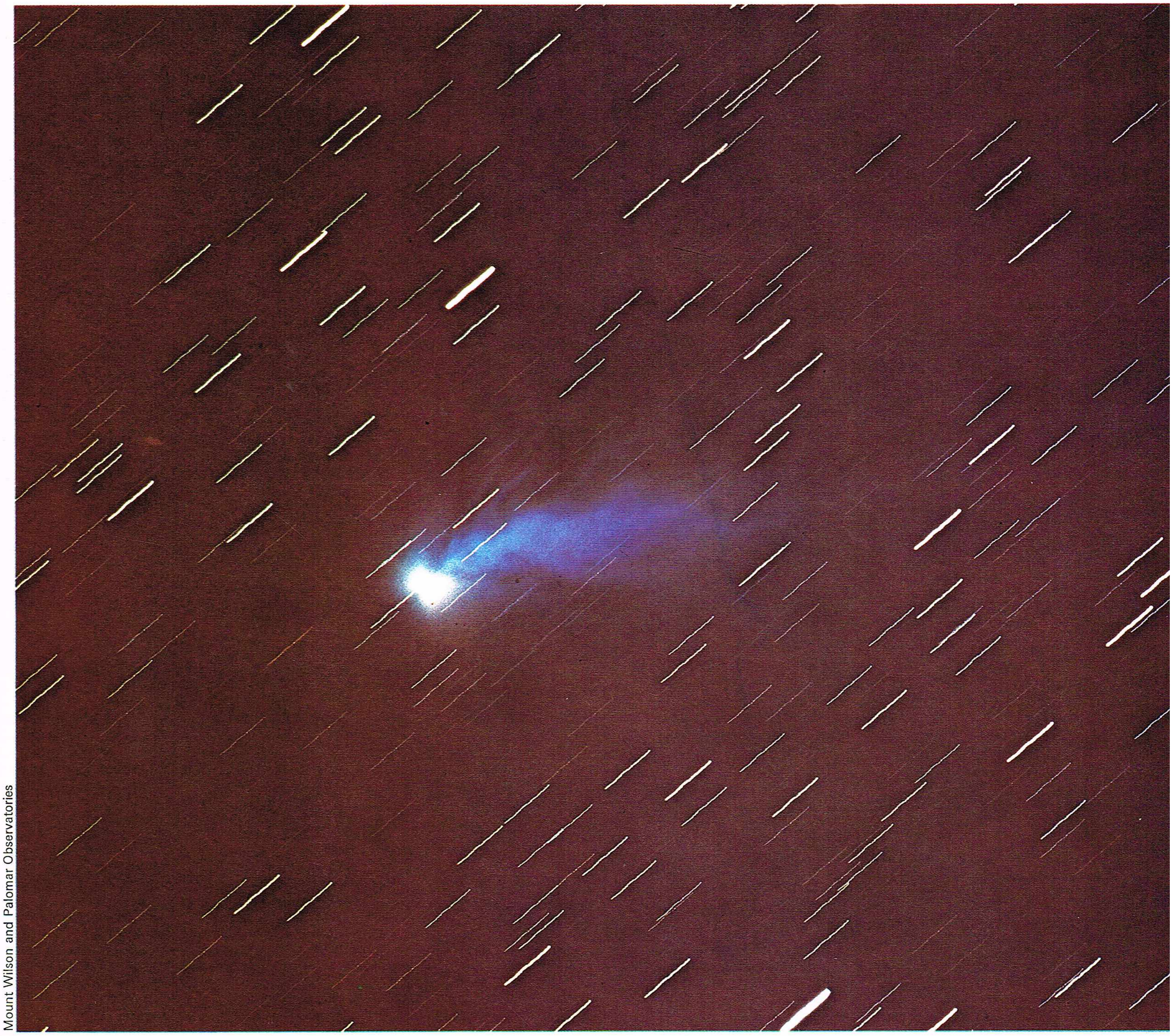

Mount Wilson and Palomar Observatories

▲ ***La comète Humason, photographiée en 1961 (copyright du California Institute of Technology).***

776 000 km, c'est-à-dire deux fois la distance de la Terre à la Lune. Hermès peut même s'approcher jusqu'à 355 000 km de nous.

Walter Baade découvrit, en 1949, une petite planète qu'il baptisa **Icare**; il la réobserva en 1950 et 1952, ce qui permit de déterminer une bonne orbite, et nous ne risquons plus de la perdre, comme il arrive souvent pour des astéroïdes peu observés. Ce corps est passé le 14 juin 1968 à environ 6 800 000 km de la Terre.

Quelle est l'origine de cet anneau de petites planètes? Sont-elles dues à l'explosion d'une planète circulant entre Mars et Jupiter ou bien, pour une raison quelconque, la masse diffuse du protosoleil n'a-t-elle pas pu se condenser?

Il est probable que certaines petites planètes peuvent s'approcher encore plus de la Terre qu'Hermès; certaines ont peut-être touché la Terre comme météorites. Leur étude est à l'ordre du jour. On fait des plans pour en photographier à l'aide d'engins spatiaux.

Les comètes

Une belle comète, visible à l'œil nu, présente un *noyau* d'aspect stellaire, entouré d'un *halo* ou *coma* dont s'échappe une *queue* très longue. Dans les cas les plus spectaculaires, elle peut s'étendre de l'horizon au zénith. Ces apparitions imprévisibles ont de tous temps frappé les hommes.

Les chroniques anciennes sont pleines de relations de comètes; la nature de ces phénomènes n'était pas connue; ils étaient souvent associés à des événements de la vie des hommes, et on leur prêtait, en général, un effet maléfique : pestes, guerres, mort de grands hommes; quelquefois on les liait aussi à des événements heureux, comme la qualité du vin; les vins de la Comète, comme celui de 1910, étaient réputés; inutile de dire que ces associations sont fausses et que les coïncidences sont fantaisistes, mais ces superstitions du Moyen Age sont loin d'être oubliées.

Lorsqu'une comète brillante se trouve dans le ciel, elle est en général observable pendant plusieurs jours et quelquefois plusieurs mois. Ce n'est donc pas un phénomène éphémère comme un météore ou une aurore polaire, et néanmoins, les Anciens ont pensé que les comètes se situaient dans l'atmosphère terrestre. La raison de cette attribution était philosophique : pour les Anciens, le monde sublunaire était formé de quatre éléments changeants : la terre, l'eau, l'air et le feu. Comme la comète a un éclat très variable, elle ne pouvait être que sublunaire et ne pouvait pas faire partie de la sphère de l'éther inchangeable et incorruptible. Les comètes étaient donc pour les Anciens des exhalaisons de la Terre et non des astres.

Quelques philosophes de l'Antiquité, tels Apollonios et Sénèque, avaient bien essayé d'interpréter les comètes comme des astres, mais leurs idées ne furent pas acceptées, et pour l'Antiquité et le Moyen Age, la nature atmosphérique des comètes ne faisait pas de doute. Il fallut attendre le XVIe siècle pour que cette notion fût revue.

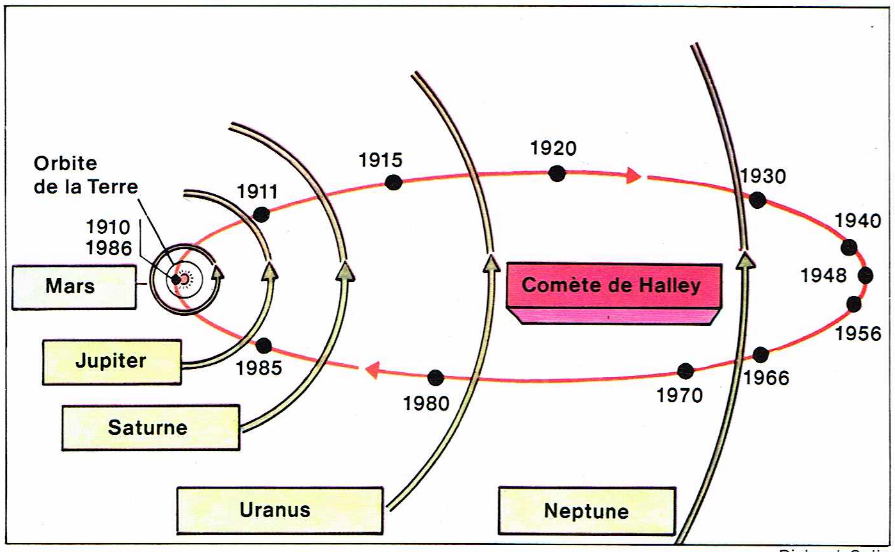

Richard Colin

▲ *L'orbite de la* comète de Halley.

Regiomontanus décrivit le mouvement des comètes sur la sphère céleste et Apian montra la relation avec le Soleil : la queue est toujours dirigée à l'opposé de la direction du Soleil, comme si celui-ci soufflait sur la comète. Enfin, Tycho Brahé observa la belle comète de 1577 et essaya de déterminer sa distance. Il montra qu'elle était plus éloignée que la Lune.

Les comètes sont donc des astres au même titre que les planètes, et elles décrivent des orbites ; mais elles ne pouvaient, dans l'idée de l'époque, que décrire des cercles, et, à cause de cette erreur, il ne fut pas possible d'expliquer leur mouvement.

C'est à Newton que nous devons la solution de ce problème qu'il exposa dans les *Principia,* en même temps que les lois de Kepler des planètes. Les planètes décrivent des orbites elliptiques si peu aplaties qu'elles sont pratiquement des cercles. Newton essaya d'expliquer l'orbite de la comète de 1680 par une ellipse aplatie. L'orbite qu'il trouva était si allongée qu'il n'était pas possible de la distinguer d'une parabole. Or, les *Principia* montrent que les mouvements paraboliques et même hyperboliques étaient possibles.

Les orbites des comètes

Le calcul des orbites paraboliques est d'ailleurs plus simple, et, en collaboration avec Newton, son ami, Halley calcula, en 1705, les orbites paraboliques de 24 comètes pour lesquelles il disposait de bonnes observations. La parabole est une courbe plane ; le Soleil est situé au foyer. La dimension de la parabole est caractérisée par la distance du sommet au foyer, la *distance périhélique*. Lorsque la comète est en ce point, sa vitesse orbitale est maximale. Cette distance périhélique peut être très petite.

On constate que, pour les comètes, la situation du plan des orbites est beaucoup plus variée que pour les planètes dont les orbites sont presque confondues avec le plan de l'orbite terrestre ou écliptique. Les astronomes caractérisent la situation du plan de la comète par la direction de l'intersection avec l'écliptique, l'inclinaison des deux plans et ils donnent la date du passage de la comète au périhélie.

Halley constata avec surprise que les éléments des comètes de 1531, 1607 et 1682 étaient pratiquement identiques. Tout se passait comme si les paraboles étaient confondues en taille et situation. Il constata aussi que les intervalles entre les apparitions étaient de 76 et 75 ans. Halley en déduisit que les trois comètes étaient un seul astre décrivant non pas une parabole, comme il l'avait d'abord supposé, mais une ellipse allongée. La comète n'est visible que près de son passage au périhélie, et elle disparaît faute de lumière lorsqu'elle est loin du Soleil. Halley indiqua que la comète observée en 1456 était encore la même comète, et il prévit son retour pour 1758.

On constate, à l'énoncé de ces données, que la périodicité de la comète ne parait pas tout à fait constante. Elle a varié de 76 ans 62 jours à 74 ans 323 jours entre les trois apparitions. Ce désaccord, loin de contredire l'explication de Halley, est en réalité une magnifique confirmation de la loi de Newton : les écarts de période constatés s'expliquent par l'attraction qu'exerce Jupiter sur la comète lorsque ces deux astres sont voisins, et il est possible de calculer cet effet de perturbation. C'est un problème difficile, résolu par le grand mathématicien français Clairaut. Grâce à ses travaux, Lalande a prévu le passage au périhélie de la comète de Halley le 15 avril 1759. Effectivement, la comète fut retrouvée. Elle passa au périhélie 33 jours avant la date prévue. La différence de date provient du fait que la masse de Jupiter n'était pas assez bien connue au XVIIIe siècle. Ni Newton, ni Halley ne vécurent assez longtemps pour voir ce retour qui fut un triomphe de la mécanique céleste. Il est juste que cette comète, par exception, porte le nom du calculateur et non du premier découvreur, d'ailleurs inconnu, car la comète de Halley peut être suivie dans les vieilles chroniques jusqu'au Ve siècle avant Jésus-Christ, et nous possédons des observations assez précises pour 30 passages ; l'accord entre les observations et les calculs est aussi bon qu'on peut l'espérer pour de si vieilles observations.

Cette comète réapparaîtra en 1986 ; elle passera au périhélie le 9 février, et la prévision sera exacte à quelques minutes près. Malheureusement, ce passage de la comète sera beaucoup moins intéressant pour nous car la Terre sera mal placée par rapport à la comète alors que la situation était privilégiée en 1910.

La comète de Halley a actuellement une période de 77 ans ; à son minimum de distance du Soleil, elle est à 0,58 unité astronomique (87 millions de kilomètres) ; la distance maximale est de 35,5 unités astronomiques (5,3 milliards de kilomètres) ; elle est située alors au-delà de l'orbite de Neptune.

Si les belles comètes sont rares, il existe par contre de très nombreuses comètes faibles, à peine visibles à l'œil nu ou seulement visibles dans des télescopes. Avant l'invention des lunettes, seules les grandes comètes étaient découvertes. Le nombre des découvertes annuelles augmente rapidement avec les perfectionnements techniques : grandes lunettes binoculaires et surtout photographie à grand champ. Actuellement, on découvre environ 8 à 10 comètes par an.

Le découvreur peut donner son nom à la comète, et certains de ces chercheurs sont particulièrement acharnés. Le record est détenu par Pons qui en découvrit 28 en 27 ans. Il était à ses débuts concierge à l'observatoire de Marseille, et il termina sa carrière comme directeur des observatoires de Lucques et de Florence. Une rare application lui permit une belle carrière.

Baldet, en 1962, et Porter, en 1967, ont établi des catalogues relatant toutes les observations de comètes jusqu'à trois millénaires avant notre ère.

Si l'on tient compte du fait que plusieurs comètes ont été mentionnées plusieurs fois, on dénombre environ 1 600 comètes entre la première observation sûrement rapportée, en 613 avant Jésus-Christ, et 1965. Au taux actuel des découvertes, ce nombre aurait été voisin de 20 000. Nos connaissances sur un grand nombre de ces comètes sont naturellement souvent très restreintes ; ainsi, sur ces 1 600 comètes, 566 seulement ont des orbites déterminées.

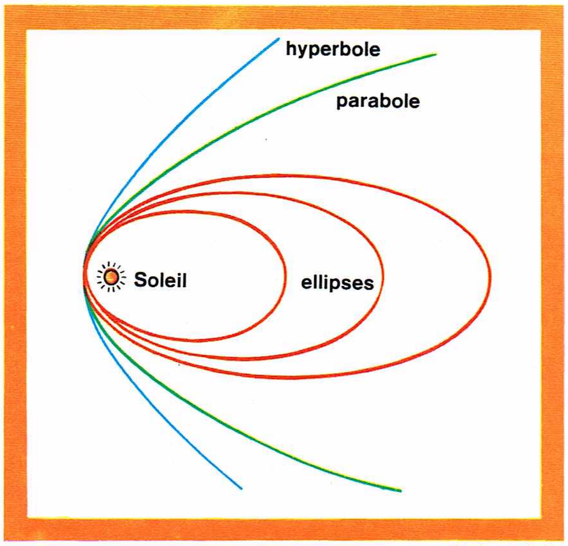

Richard Colin

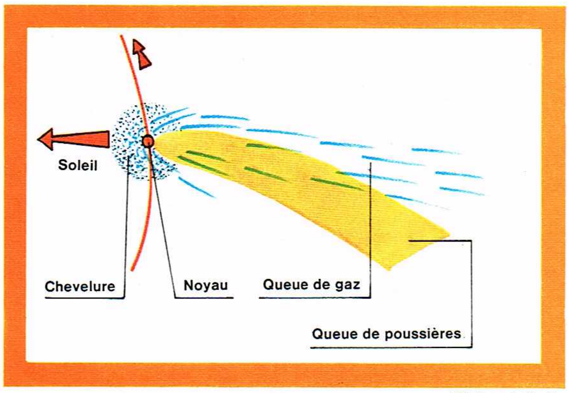

Richard Colin

◀ A gauche, représentation graphique des orbites cométaires. A droite, représentation schématique des diverses parties d'une comète.

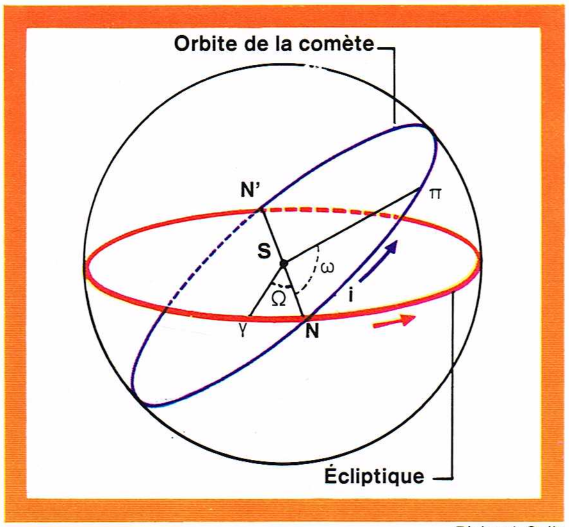

Richard Colin

◀ Représentation schématique de la position du plan d'une orbite cométaire sur la sphère céleste par rapport à l'écliptique :
S, Soleil; γ, point vernal; NN', ligne des nœuds; π, périhélie; i, inclinaison; Ω, longitude du nœud; ω, angle de position du périhélie.

En incluant les orbites des comètes découvertes récemment, on trouve, pour 619 comètes : 68 hyperboles, 327 paraboles et 224 ellipses. Mais, en fait, la plupart des ellipses sont à très longue période et ne diffèrent guère d'une parabole et seules environ 95 comètes à période inférieure à 165 ans ont des orbites nettement elliptiques. Les orbites paraboliques ou quasi paraboliques sont donc dominantes et comprennent 84 % de toutes les comètes. Le nombre d'orbites hyperboliques est extrêmement faible et, en fait, aucune hyperbole nettement différente de la parabole n'est connue. On pense que les 68 comètes hyperboliques sont en réalité des comètes qui, à l'origine, étaient paraboliques et dont l'orbite a été légèrement changée par l'attraction de Jupiter. Cette constatation est intéressante car la mécanique céleste montre que tout astre provenant de l'espace interstellaire et attiré par le Soleil décrit une orbite hyperbolique; inversement, toute comète hyperbolique s'échappera définitivement du système solaire. L'absence de toute comète nettement hyperbolique montre que les comètes ont toujours fait partie du système solaire et qu'il n'y a pratiquement pas de connexion entre le système solaire et les systèmes stellaires proches. Nous reviendrons sur ce problème lorsque nous étudierons l'origine des comètes.

Étudions rapidement l'orientation des orbites dans l'espace. Pour les 500 comètes paraboliques ou à longue période, on constate que l'inclinaison des plans des orbites sur le plan de l'écliptique est tout à fait quelconque et on peut dire que les orbites des comètes sont réparties au hasard et qu'elles ne font pas partie du système des planètes. En effet, si c'était le cas, ces comètes circuleraient dans des plans sensiblement confondus avec le plan de l'écliptique.

La situation est différente pour les 224 comètes périodiques. 18 ont des périodes comprises entre 27 et 165 ans. Quelques-unes d'entre elles sont très intéressantes, comme celle de Halley, mais leur nombre est trop petit pour permettre une statistique significative. On peut néanmoins dire que la répartition de leurs orbites les rapproche du groupe des comètes paraboliques.

Par contre, les 77 comètes à période inférieure à 18 ans forment un groupe à part.

Leurs orbites sont très allongées; aussi, à l'aphélie, ces comètes sont-elles souvent très voisines de l'orbite de Jupiter. Ces comètes ont des orbites peu inclinées sur l'écliptique; elles ont donc plus de chances de s'approcher de Jupiter. On pense que ces comètes faisaient partie, à l'origine, des groupes précédents, et par hasard, elles sont passées si près de Jupiter que leur orbite a été déformée au point de leur donner leur forme actuelle. Ces comètes tournent de très nombreuses fois autour du Soleil et les matières volatiles qu'elles contiennent sont dispersées; lorsqu'elles s'approchent du Soleil, ces comètes perdent leurs queues. A la fin, on ne peut plus les distinguer de certaines petites planètes.

Celle qui a la plus courte période est la comète Encke, avec une période de 3,33 ans. Elle a été découverte, comme de nombreuses autres comètes, par Pons. La comète Encke a encore une chevelure bien développée et une petite queue, mais on assiste déjà à sa diminution et il est probable que, d'ici quelques siècles, nous ne pourrons plus la distinguer d'une petite planète.

Étude physique des comètes

Une belle comète comporte un noyau. Ce noyau est pratiquement stellaire et on n'a jamais pu en déterminer avec exactitude le diamètre. Ce noyau est certainement la partie la plus importante de la comète, et c'est la seule partie visible lorsque la comète est éloignée du Soleil. On pense aujourd'hui que ce noyau est un rocher ou un conglomérat de rochers probablement liés par de la glace. Ce noyau mesure probablement quelques dizaines de kilomètres de diamètre. Cette dimension peut paraître très grande, mais, à l'échelle du système solaire, il s'agit d'un corps céleste d'une extrême petitesse; ces noyaux sont si petits qu'il n'a pas été possible jusqu'à présent de déterminer leur masse.

Ce noyau réfléchit la lumière du Soleil, mais l'éclat dû à cette lumière réfléchie est très faible. Lorsque la distance au Soleil est grande, c'est la seule lumière émise par la comète, et celle-ci devient tout à fait invisible même avec de grands instruments. Ainsi, la comète de Halley, qui sera visible en 1986, ne pourra être photographiée avec le télescope du mont Palomar qu'à partir de 1983. Lorsque la comète se rapproche du Soleil, la quantité de lumière reçue devient plus importante, et la comète devient progressivement plus brillante. Ce n'est que lorsqu'elle s'approche à une distance de 2 à 3 unités astronomiques que l'on constate la naissance d'une chevelure autour du noyau. Ce phénomène s'explique par le mécanisme suivant : la lumière solaire absorbée réchauffe le magma de roches et de glace que constitue le noyau, des molécules s'évaporent et forment un halo autour de ce noyau. Cette émission de gaz est très visible lorsqu'on photographie une comète avec un grand instrument.

Lorsque la comète s'approche encore plus du Soleil, non seulement les molécules émises sont plus nombreuses mais des petites poussières sont arrachées du noyau et augmentent le halo. Les molécules sont en général décomposées : les molécules d'eau donnent de l'oxygène, des radicaux OH et de l'hydrogène; les molécules carbonées se décomposent en C_2, C_3, CN, etc. Ces molécules sont excitées par le rayonnement solaire et peuvent être mises en évidence par les magnifiques spectres d'émission.

▶ *Photographie de la* comète MRKOS 1957 d *prise avec le petit télescope de Schmidt de l'Observatoire de Haute-Provence, le 22 août 1957 à 21 h 30 mn. On remarquera la queue très tourmentée due aux ions repoussés par le Soleil et la queue diffuse due aux poussières. (La partie de la chevelure est surexposée.)*

C.N.R.S. - Observatoire de Haute-Provence

▶ *Photographie de la* comète Bennett 1969 i *prise le 1er avril 1970 au télescope de Schmidt de l'Observatoire de Haute-Provence.*

C.N.R.S. - Observatoire de Haute-Provence

▼ *A gauche,* comète Kohoutek 1973 f*; spectres obtenus au télescope de 120 cm. Dispersion originale 67 Å. mm⁻¹ : a, partie visible et rouge, le 19 janvier 1974; b, partie ultraviolette, le 17 janvier 1974. Ces spectres à petite dispersion montrent la plupart des molécules de comètes. A droite, distances auxquelles on observe les diverses molécules.*

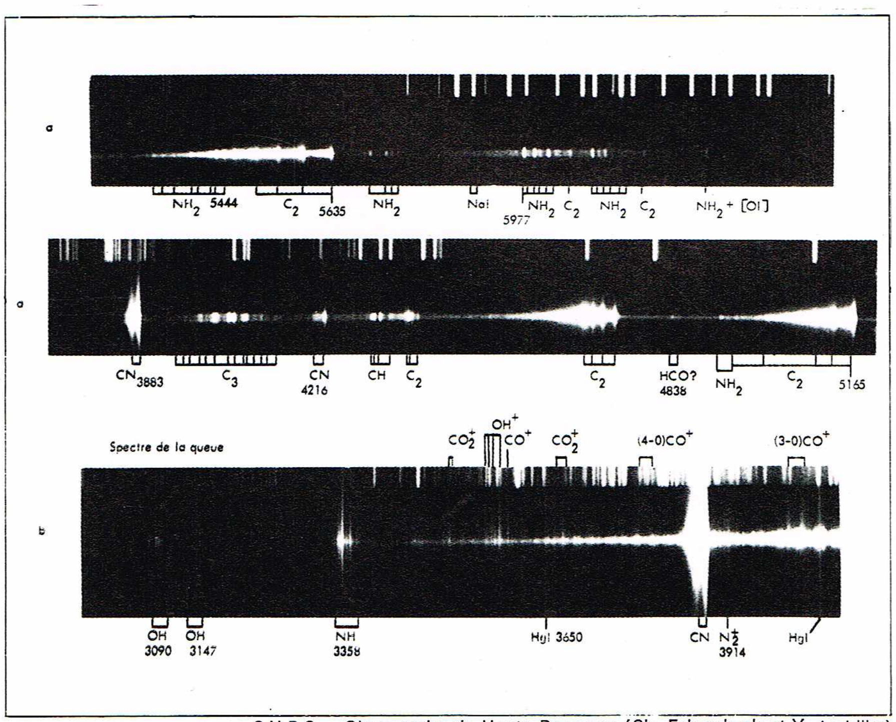

C.N.R.S. -- Observatoire de Haute-Provence (Ch. Fehrenbach et Y. Andrillat)

L'interaction entre les poussières, les molécules et le rayonnement solaire est très compliquée et nous n'y voyons relativement clair que depuis peu de temps. La décomposition des molécules est faite à la fois par le rayonnement ultraviolet et par le vent solaire. Les molécules du halo sont décomposées par ce rayonnement matériel et subissent une *ionisation :* la comète s'entoure d'un grand halo d'hydrogène qui a été découvert, grâce aux satellites artificiels, pour les comètes Bennett et Encke. Les molécules, et particulièrement les molécules ionisées, sont repoussées par le vent solaire et forment alors une magnifique queue, sensiblement opposée à la direction du Soleil. C'est la partie la plus spectaculaire de la comète. Naturellement, l'ionisation et l'émission dépendent essentiellement de l'importance du vent solaire. Elles dépendent aussi de la quantité de gaz

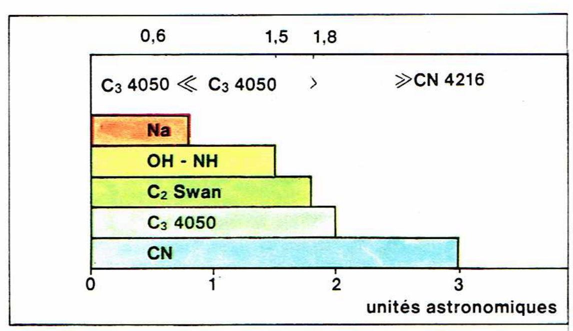

Richard Colin

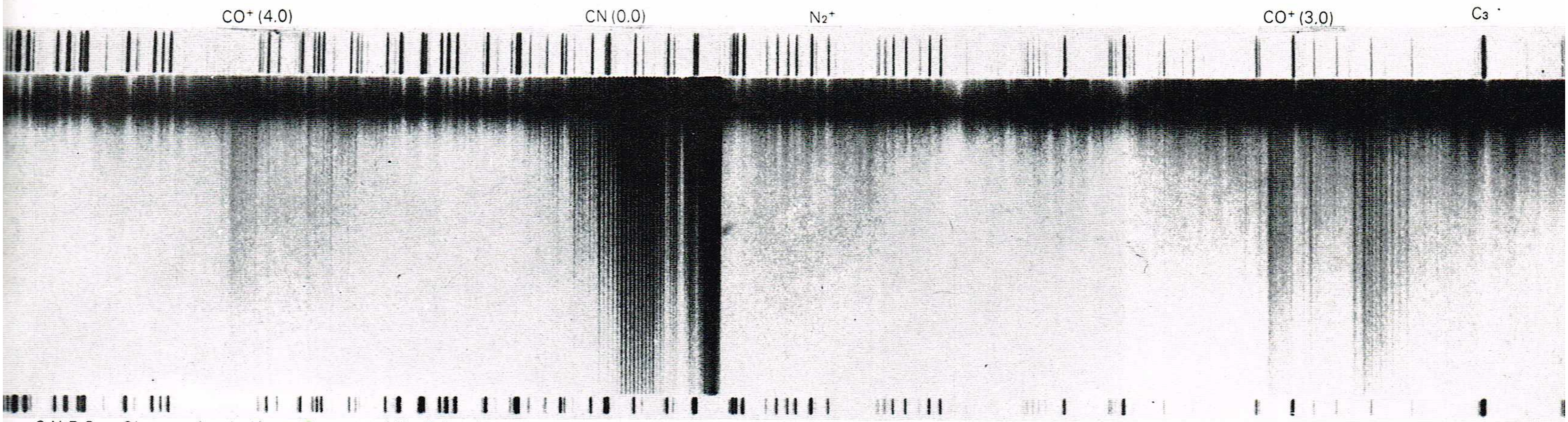

C.N.R.S. - Observatoire de Haute-Provence (Ch. Fehrenbach)

émise par la comète. Cette émission est discontinue et le vent solaire souffle par rafales; la quantité d'atomes émis par le Soleil peut varier beaucoup avec son activité.

Ces deux effets expliquent la structure et l'évolution très rapide des queues de molécules. D'une comète à l'autre, l'aspect est très différent et, d'un jour à l'autre, une comète peut montrer un aspect très variable. Si l'on veut faire une étude dynamique des queues de comètes, il est essentiel de les photographier de façon continue, ce qui n'est réalisable que si l'on observe de tous les observatoires possibles. Il faut ensuite comparer les clichés. C'est ainsi qu'on a pu mesurer la vitesse de propagation des ions dans les queues et qu'on a pu expliquer avec beaucoup de détails ces mécanismes complexes.

L'examen des photographies de comètes montre que certaines d'entre elles comportent en plus de cette queue tourmentée une queue plus diffuse et souvent courbe. On sait maintenant que cette partie de la queue est formée de poussières qui diffusent la lumière solaire. Cette queue est courbe et déplacée par rapport à la queue de gaz, dans le sens du mouvement; son aspect, en général, s'explique bien si l'on admet que les poussières sont éjectées du noyau avec une petite vitesse et seulement soumises à la gravitation et à la pression de radiation. Ces causes varient peu et la queue de poussières est stable.

Les queues de comètes peuvent être immenses. Les plus grandes comètes, comme celles de 1843 et de 1910 ou la comète de Halley, ont eu des queues mesurant 300 millions de kilomètres, soit le diamètre de l'orbite terrestre. Le halo d'hydrogène est encore plus grand.

Ces queues peuvent parfois être assez intenses pour être visibles en plein jour. Néanmoins, la quantité de matière répandue dans ces queues est extrêmement petite. Aussi la densité est-elle si faible que le passage de la Terre à travers la queue d'une comète passe complètement inaperçu aux habitants de la Terre. En 1910, la Terre est ainsi passée dans la queue de la comète de Halley; le phénomène avait été prévu et on n'a rien observé, même pas une nuit un peu plus claire. Les craintes exprimées par certaines prédictions se sont révélées non fondées; en effet, le cyanogène C_2N_2 est toxique mais la comète contient non pas cette molécule mais le radical libre CN qui n'a donc pas empoisonné la Terre. D'ailleurs, la masse totale de gaz de la queue est négligeable vis-à-vis de l'atmosphère terrestre.

Par contre, si le noyau de la comète lui-même rencontrait la Terre, nous assisterions à un phénomène grandiose qui pourrait être cataclysmique pour une grande région. On pense que la météorite de Toungouska qui est tombée en 1908 en Sibérie et dont on n'a pas trouvé de traces était une tête de comète qui a rencontré par hasard la Terre. Le lieu de rencontre était une région inhabitée de la Sibérie. La forêt sibérienne a été abattue sur une surface correspondant à deux départements français. Ce phénomène s'est manifesté aussi sur toute la Terre par l'apparition d'une grande lueur nocturne qui dura plusieurs nuits. Localement, le phénomène a été cataclysmique mais, à l'échelle de la Terre, le phénomène n'était pas important.

Disons encore quelques mots sur la chimie des comètes. Les molécules qu'on trouve près du noyau sont essentiellement des molécules contenant les quatre atomes :

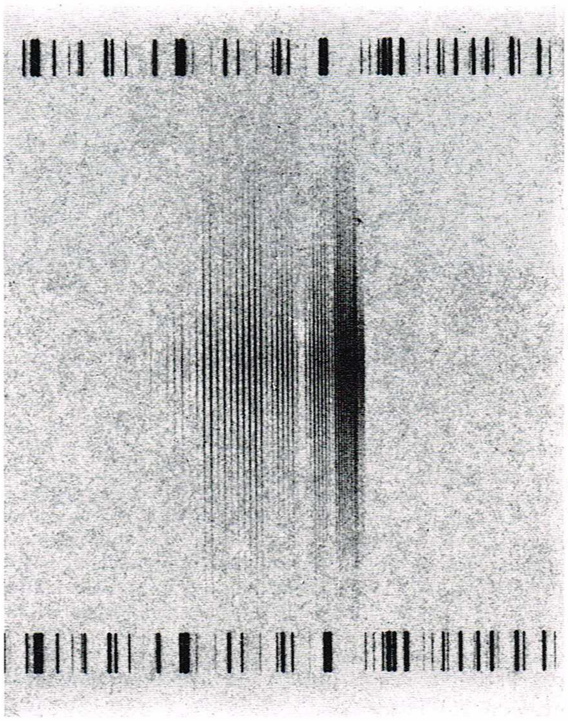

C.N.R.S. - Observatoire de Haute-Provence (Ch. Fehrenbach)

carbone, oxygène, azote, hydrogène; les plus importantes sont les molécules C_2, C_3, CN, CH, OH, NH et NH_2. Il est possible de mettre en évidence ces molécules avec beaucoup de précision grâce à la spectroscopie. Alors que les atomes émettent des raies isolées, les molécules émettent des systèmes de bandes. Avec les anciens spectrographes, ces bandes avaient des aspects diffus mais caractéristiques des molécules. En fait, ces bandes sont formées de milliers de raies qu'on ne peut séparer en raies individuelles que depuis quelques années grâce à des spectrographes puissants. Les astronomes ont pu expliquer en grand détail la structure de ces bandes, et ils peuvent en déduire les conditions d'excitation, la nature des chocs et la pression dans les queues de comètes. Ces calculs sont aujourd'hui possibles grâce à des ordinateurs puissants. Les queues de comètes contiennent, en plus des molécules précédentes, des molécules ionisées comme CO^+, CO_2^+, N_2^+ et OH_2^+.

Lorsque la comète est proche du Soleil, des émissions atomiques ont aussi lieu. Les plus intéressantes sont celles dues à l'oxygène, visibles dans le rouge. Ces raies de l'oxygène ne peuvent être émises que dans des conditions de vide très poussé, et on les observe dans la luminescence du ciel nocturne; elles augmentent fortement en intensité pendant les aurores polaires. Ces raies sont aussi émises par les comètes. Il est évidemment difficile, *a priori*, de distinguer ces raies des raies émises par la haute atmosphère terrestre. Cette séparation peut être faite aujourd'hui, car les raies sont légèrement déplacées par l'effet Doppler-Fizeau dû au mouvement relatif de la comète par rapport à la Terre.

▲ **Comète Bennett :** ***un spectre de la région 3750-4050 Å, montre les bandes des molécules de la chevelure de CN, C_3 ainsi que les bandes de la queue CO^+ et N^{2+}. La partie du bas est le spectre de la lumière solaire réfléchie par le noyau.***

◀ **Comète Kohoutek :** ***la bande violette (0, 0) de CN vers 3 883 Å sur un cliché à moyenne dispersion (7 Å. mm^{-1}). On remarquera que la bande est résolue en nombreuses raies qui correspondent toutes à des états de rotation de la molécule CN.***

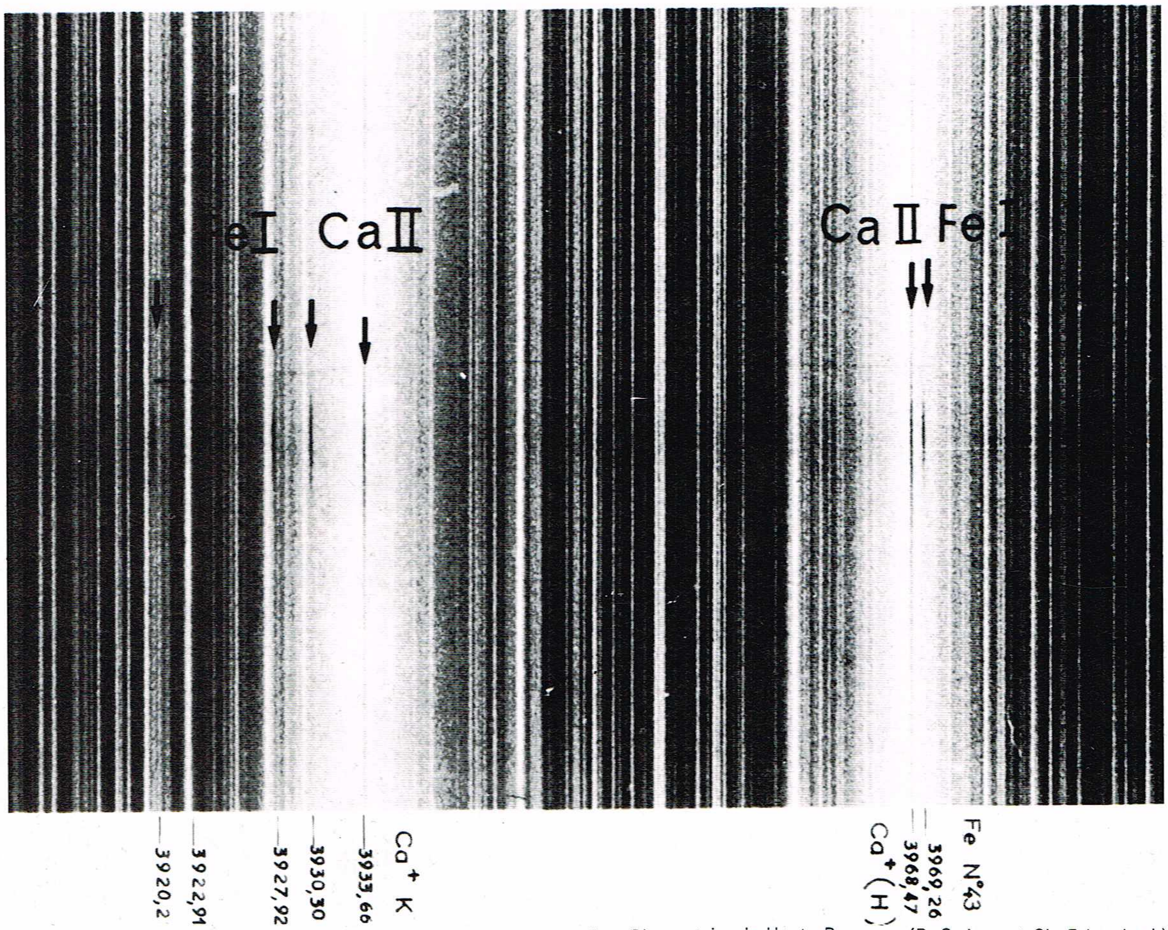

C.N.R.S. - Observatoire de Haute-Provence (P. Swings et Ch. Fehrenbach)

▲ **Comète Ikeya Seki 1965 f.** *Partie d'un cliché pris le 21 octobre 1965 en 5s de pose à 15 h 30 mn T.U. avec le spectrographe coudé du télescope de 193 cm de l'Observatoire de Haute-Provence; dispersion originale : 4 Å. mm⁻¹. Ce cliché a été pris en plein jour. Les émissions en noir sur le cliché et indiquées par des flèches sont dues à la comète; elles se superposent à la lumière solaire diffusée par l'atmosphère terrestre. Les raies en absorption intense sont les raies K et H du spectre solaire.*

Lorsque la comète s'approche du Soleil, les atomes isolés qui sont arrachés des poussières émettent à leur tour des raies. Ces observations ont été faites au début du siècle visuellement mais elles étaient contestées. Elles ont été confirmées par les belles comètes de ces dernières années. Les raies de sodium peuvent être très intenses. si la comète s'approche encore plus du Soleil, les raies du calcium, du fer et du magnésium sont émises à leur tour. La comète Ikeya Seki de 1965 s'est approchée à près de 1 million de kilomètres du Soleil. On peut dire qu'elle est presque entrée dans l'atmosphère solaire. Malgré cela, on a pu la suivre, grâce aux spectro-héliographes, jusqu'au bord du Soleil, et on a aussi montré l'existence des raies d'émission.

Lors de ses passages près du Soleil, la comète est plus ou moins débarrassée d'une grande quantité de gaz et elle doit avoir une brillance plus faible après le passage. Pour une comète périodique, ce dégazage doit affaiblir petit à petit la comète dont la queue et la coma diminuent jusqu'à disparaître. Les comètes sont donc des astres passagers. Celle de Halley est observée depuis plus de 2 000 ans sans qu'on ait signalé une variation importante de sa brillance, mais cette comète ne s'approche pas beaucoup du Soleil, et 2 000 ans sont une courte période dans l'échelle astronomique.

Beaucoup de comètes ont diminué d'éclat; certaines disparaissent. C'est le cas de la comète de Biela qui a montré d'abord une forte activité, puis le noyau s'est divisé en deux. Il est probable qu'elle s'est ensuite décomposée de plus en plus en poussières gravitant sur l'orbite de la comète primitive. Il se trouve que la Terre passe au mois de novembre tout près de son orbite, et on constate alors que le ciel est parcouru de très nombreuses étoiles filantes dont la relation avec la comète est certaine. Le mouvement de ces météores le prouve. Si la Terre passe près du maximum de densité de ces particules, ce qui est le cas tous les 33 ans, les météores deviennent si nombreux qu'on peut parler de pluie d'étoiles filantes. De nombreux essaims de météorites ont ainsi pu être mis en relation avec des comètes connues.

L'origine des comètes

Nous avons parlé de la désintégration, c'est-à-dire de la mort des comètes; on peut se demander quelle est leur *origine*.

Rappelons les résultats essentiels : en grande majorité, les comètes ont des orbites pratiquement paraboliques; ces comètes sont donc très éloignées du Soleil lorsqu'elles sont à leur maximum de distance mais elles ne viennent pas des autres systèmes stellaires.

On a pu montrer que de nombreuses comètes paraboliques avaient, avant de s'approcher de Jupiter, des périodes de l'ordre de quelques millions d'années. Ceci a permis à Oort d'admettre que le réservoir de comètes était situé entre 25 000 et 200 000 unités astronomiques, distance considérable et d'un ordre de grandeur voisin de la distance de l'étoile la plus proche, située à 250 000 unités astronomiques.

Les futures comètes seraient de plus ou moins gros blocs de rochers, mélangés de glace et de gaz absorbés. A la distance considérée, aucune évaporation n'a lieu car le Soleil n'a l'apparence que d'une étoile comme Arcturus, et ces blocs doivent subsister des milliards d'années. Par suite de l'attraction des étoiles, les orbites de ces petits astres sont perturbées et, de temps en temps, suffisamment pour que le bloc pénètre vers le centre du système solaire et devienne une belle comète. D'autres blocs s'éloignent définitivement de notre système.

Pour expliquer le nombre des comètes observées, il faut que le réservoir soit bien rempli : de l'ordre de 100 milliards de blocs. C'est un grand nombre, mais la masse totale de ce système ne représente que 3/100 de la masse terrestre si ces blocs mesurent 500 m de diamètre. Les comètes elliptiques, apparentées à Jupiter, résultent de la capture de certaines comètes par Jupiter. On peut ainsi expliquer la nature un peu spéciale de leurs orbites.

Mais comment ce réservoir de planètes s'est-il formé? Oort montre que ces blocs ne peuvent pas résulter de l'accrétion de matière interstellaire, et il suggère un mécanisme : les petites planètes qui circulent entre Mars et Jupiter proviendraient de la rupture d'une grosse planète. Oort imagine l'explosion de la façon suivante : la plus grande partie, environ 97 % de la masse, a été expulsée définitivement du système solaire, et 3 % ont alimenté le réservoir de comètes dont viennent de temps en temps les grandes et les petites comètes, et aussi les météores. Naturellement, la théorie d'Ort n'est qu'une hypothèse, mais elle permet d'établir des relations intéressantes entre divers corps du système solaire et elle explique beaucoup d'effets.

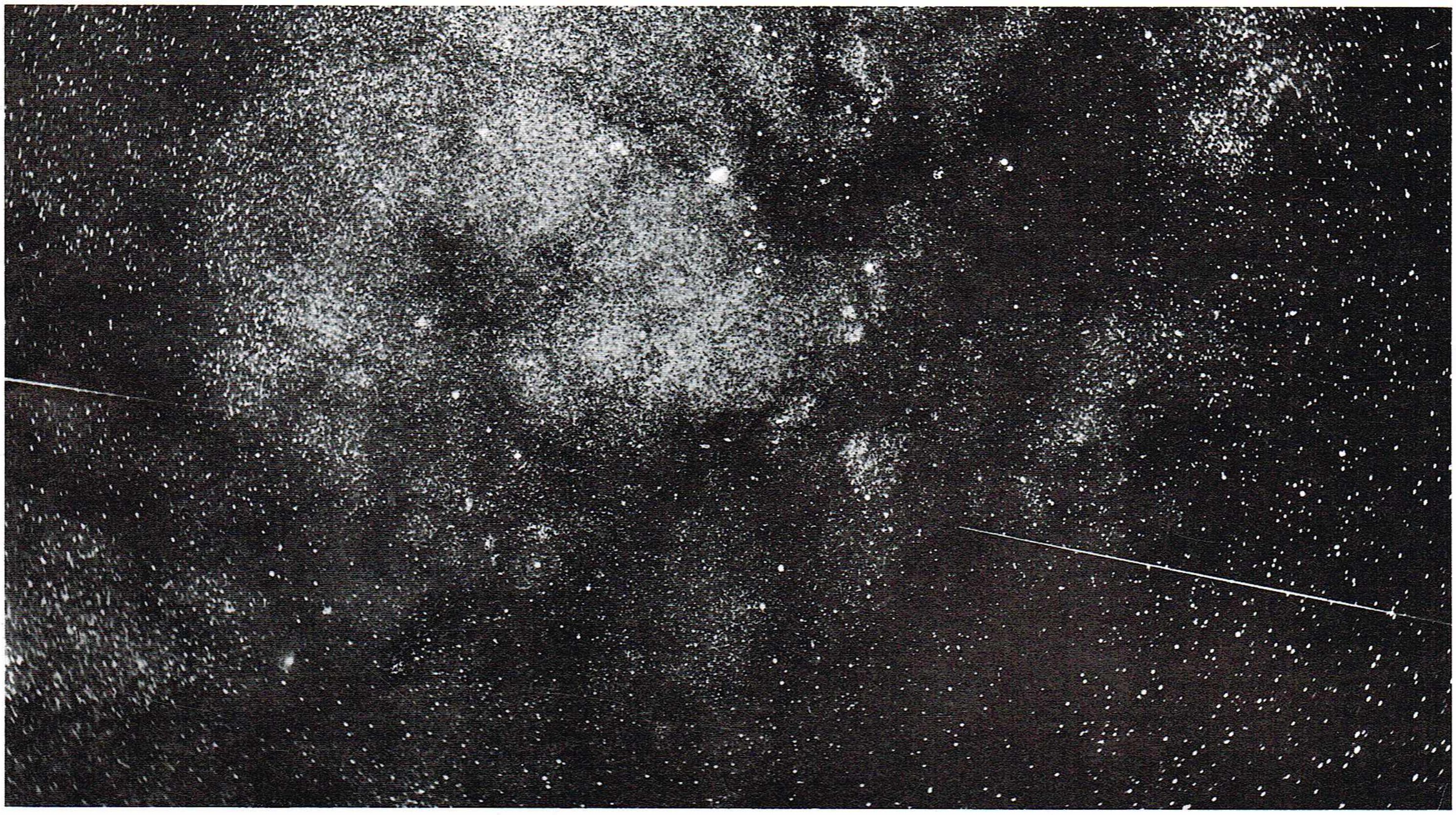

▲ *Trace d'une météorite devant un nuage stellaire de la constellation du Bouclier (Scutum).*

Les météores, les météorites

Les étoiles filantes sont ces traînées lumineuses qui traversent le ciel en quelques secondes comme si tout à coup une étoile s'était mise en mouvement rapide. Il ne faut pas confondre ces astres avec les satellites artificiels, mais la distinction est facile car la durée du phénomène est en général beaucoup plus courte pour une étoile filante. Il peut d'ailleurs arriver qu'un satellite termine sa carrière comme une lente météorite, lorsque, après de nombreuses révolutions, il pénètre dans l'atmosphère. Nous utiliserons le mot de *météore* pour le phénomène lumineux, quel qu'en soit l'éclat, et le nom de *météorite* pour la particule qui pénètre dans l'atmosphère.

Indiquons que le nombre de météores est plus grand dans la seconde partie de la nuit. Cet effet s'explique par le fait que la Terre tourne autour du Soleil et balaie en quelque sorte l'espace, ce qui produit la fréquence privilégiée indiquée. Ce nombre est aussi plus grand en automne qu'au printemps.

Nous savons aujourd'hui que les météores sont dus à des particules plus ou moins grandes qui pénètrent dans l'atmosphère terrestre en venant de l'espace extraterrestre. Le nombre des traînées observables varie : il est de l'ordre de 5 à 10 par heure en temps normal mais il peut être quelquefois plus grand, et on peut même assister à une vraie pluie.

Une observation précise des météores montre qu'on peut les classer en deux groupes : les *météores sporadiques* et les *radiants de météores*. Dans le second cas, on observe de nombreux météores qui paraissent provenir du même point du ciel. Le nombre d'étoiles filantes peut être si considérable qu'on peut parler de pluie d'étoiles filantes. Le 12 novembre 1833, on observa en Amérique du Nord des milliers de météorites provenant d'un point de la constellation du Lion. On les nomma les Léonides, et on estima le nombre de météorites visibles d'un seul point à plus de 100 000 pour cette seule nuit. Certaines laissaient des traînées.

Les étoiles filantes sont nommées sporadiques lorsqu'on ne peut les ramener à un radiant connu. Elles apparaissent au hasard. L'existence d'un radiant s'explique si l'on admet que toutes les trajectoires correspondent à des météorites animées de mouvements parallèles. Le radiant indique la direction d'où proviennent les météorites ; c'est un effet de perspective qui semble les faire partir de ce point, nommé, en perspective, *point de fuite*. Dans le cas des Léonides de 1833, il a été possible de montrer que ces météorites se déplaçaient exactement sur la trajectoire de la comète de Tempel (1866 I). Nous pouvons donc admettre que les particules qui forment cet essaim circulent sur l'orbite de cette comète, dont elles se sont probablement détachées. La Terre passe tous les ans, le 16 novembre, au point d'intersection de l'orbite terrestre avec l'orbite de la comète. C'est à ce moment qu'on observe les Léonides ; les années normales, le nombre des météorites visibles à l'œil nu n'est que d'une quinzaine par heure.

Le nombre de particules est très variable sur la trajectoire : en 1833, on est passé en un point de forte concentration ; comme la comète de Tempel a une période de 33 ans, la pluie de 1866 a été aussi abondante, mais celles de 1899 et de 1932 ont été peu nettes.

On connaît plus d'une dizaine de radiants ; un des plus connus est celui des Perséides qui est visible en août pendant quatre à cinq jours avec un maximum le 11 août où l'on observe une cinquantaine d'étoiles filantes à l'heure. La vitesse de ces météorites est assez grande : près de 60 km/s. Elles sont liées à la comète 1862 III (Swift-Tuttle). On n'a pas pu trouver pour tous les radiants de relations entre les essaims et des comètes. Il est probable que de nombreuses étoiles filantes sporadiques correspondent à des radiants peu fournis.

La détermination des trajectoires des météorites et notamment de leur vitesse est très importante. L'estimation directe à l'œil de cette vitesse s'est révélée très difficile et a mené à un certain nombre de conclusions qui se sont révélées fausses, lorsque des mesures valables furent faites, soit par photographie, soit par radar. La mise en service de télescopes de Schmidt, très ouverts, spécialement destinés à l'observation de météorites (Baker-Super-Schmidt), a permis de détecter de nombreux météores beaucoup plus faibles que ceux qui sont observables à l'œil nu. Ces instruments permettent aussi de mesurer les vitesses ; pour cela, on dispose devant l'objectif des obturateurs qui transforment la trajectoire en pointillé. L'installation simultanée de deux chambres de Schmidt à 50 ou 100 km de distance permet d'obtenir une trajectoire réelle dans l'espace avec

Essaims météoriques associés à des comètes

Essaim	Date max.	Radiant α (°)	Radiant δ (°)	V_1 km.s^{-1}	Comète associée	Nombre à l'heure	Durée en jours
Lyrides	21 IV	274	+ 34	48	1861 I.	12	2,3
η Aquarides ..	4 V	336	0	64	P/Halley ?	20	18
β Taurides	28 VI	87	+ 23	31	P/Encke.	30	14
Draconides ...	28 VI	215	+ 55		P/Pons-Winnecke.	50 (1916)	
Perséides	11 VIII	46	+ 58	60	P/Swift-Tuttle.	50	5
Draconides (Giacobinides).	9 X	262	+ 54	23	P/Giacobini-Zinner.	20 000 (1933)	
Orionides	20 X	95	+ 15	66	P/Halley.	25	8
S Taurides ...	5 XI	53	+ 14	28	P/Encke.	15	(30)
Andromédides (Bielides)	14 XI	24	+ 44	16	P/Biela.	5 000 10 000 (1872-1885)	0,2
Léonides	16 XI	152	+ 22	72	P/Tempel-Tuttle.	10 000 (1833)	4
Ursides	22 XII	217	+ 76	34	Tuttle, 1939 X	15	2,2

Richard Colin

▲ *Tableau des essaims météoriques associés à des comètes.*

des vitesses précises. La trajectoire que parcourt la météorite reste visible pendant un certain temps comme un petit tube d'air ionisé qui réfléchit aussi les impulsions des radars. Il a été possible d'observer ainsi les météorites, non seulement la nuit, mais aussi en plein jour, et on a considérablement augmenté le nombre des radiants connus. Certains de ces radiants diurnes correspondent à la seconde intersection de l'orbite d'une comète, la première intersection correspondant à un radiant nocturne.

Il est aussi possible de mesurer par radio la vitesse du météore, avec une grande précision. Si l'on établit un faisceau radioélectrique contenu dans un plan vertical, on n'observera le faisceau de retour que si une météorite le traverse perpendiculairement, mais on constate alors que l'intensité du retour est oscillante. Ce phénomène est analogue à la diffraction des ondes par une arête (Fresnel); la fréquence des oscillations permet une mesure précise de la vitesse.

La vitesse d'une météorite est la résultante de la composition de la vitesse de la Terre sur son orbite (qui est de 30 km/s) et de la vitesse propre de la météorite sur son orbite. A cette vitesse, il faut ajouter l'augmentation de vitesse due à l'attraction terrestre. Si la météorite venait de l'espace sidéral, la vitesse serait supérieure à 42 km/s, qui est la vitesse parabolique à l'endroit du système solaire où se trouve la Terre. Un calcul montre que, par suite des combinaisons de vitesses, la vitesse d'une météorite, qui a toujours fait partie du système solaire, est comprise entre 11 et 72 km/s. Naturellement, le calcul permet, si l'on connaît la valeur de la vitesse et son orientation, de connaître la vitesse propre de la météorite et de déterminer sa trajectoire. On a constaté que toutes les météorites, pour lesquelles on dispose de mesures, ont toujours appartenu au système solaire. Le nombre d'observations est déjà relativement grand, et les météorites d'origine sidérale sont donc inexistantes ou très rares.

La luminescence des météorites s'explique par deux phénomènes. L'énergie vive de la particule animée d'une vitesse comprise entre 11 et 72 km/s est considérable; la vitesse est très largement supersonique; une onde de choc se forme devant la météorite, et on assiste à une forte ionisation de l'air à très basse pression de la haute atmosphère. Le nombre d'ions formés est de l'ordre de 10 000 milliards pour une météorite visible à l'œil nu. Il y a transfert de chaleur à la météorite qui s'échauffe et rayonne. Nous observons donc simultanément le spectre continu du corps échauffé et le spectre de raies des gaz de l'atmosphère terrestre et des atomes émis par la météorite.

On peut montrer par le calcul qu'il suffit qu'une météorite ait un diamètre de 1/10 de millimètre pour qu'elle devienne visible à l'œil nu; une météorite de 1 cm de diamètre sera aussi brillante que Vénus, et une de 20 cm de diamètre aura l'éclat de la pleine Lune. Pour une si grande météorite, on assiste à de nombreux phénomènes accessoires : le bruit dû à l'onde de choc, une forte traînée persistante qui peut subsister pendant plusieurs minutes et qui se déforme à cause des vents de très haute altitude, et quelquefois l'explosion dans la basse atmosphère. En général, les météorites apparaissent à des altitudes supérieures à 200 km et atteignent leur maximum d'éclat vers 80 ou 100 km suivant la masse et la vitesse de la météorite. Les plus grosses atteignent les basses couches de l'atmosphère, et les très grosses peuvent arriver jusqu'au sol, produisant alors des cratères plus ou moins considérables. On peut alors ramasser des morceaux et les étudier.

Le nombre de météorites visibles en un point de la Terre n'est pas très considérable, mais un observateur ne peut voir qu'une petite partie de l'atmosphère terrestre, et il faut tenir compte de ce fait pour faire l'estimation totale des météorites qui atteignent la Terre. Le nombre de météorites brillantes est assez petit. On pense qu'une météorite de l'éclat de la pleine Lune est observée tous les trois ou quatre jours sur la Terre entière. Lorsqu'on passe aux météorites plus faibles, le nombre augmente rapidement; il croît à peu près d'un facteur 3 par magnitude, et l'on estime qu'un million de météores aussi brillants que Sirius sont observés toutes les vingt-quatre heures.

On estime que la masse des météorites donnant des phénomènes visibles à l'œil nu et atteignant la Terre est de 10 t par jour. On estime la masse totale, poussière comprise, à 1 000 t par jour, masse considérable, mais négligeable vis-à-vis de la masse de la Terre. En 1 milliard d'années, la Terre ne reçoit au taux actuel que un vingt-millionième de sa masse.

Chute de grosses météorites

La chute d'une météorite est un phénomène grandiose : la trajectoire lumineuse, le son, souvent l'explosion, les particules qui s'échappent de la météorite, la traînée persistante sont très impressionnants. De nombreuses chutes ont été signalées dans les chroniques anciennes. Il n'est pas rare que deux ou trois météores brillants apparaissent simultanément.

Dans un certain nombre de cas, on a recherché et retrouvé les débris provenant d'une chute. La chute de L'Aigle, dans le département de l'Orne, en 1803, est célèbre car elle a permis de confirmer définitivement l'origine extra-terrestre des météorites.

Les météorites moyennes sont freinées par l'atmosphère terrestre et atteignent souvent le sol avec une vitesse relativement petite. On peut les ramasser; elles sont souvent encore chaudes, mais il peut arriver qu'elles se couvrent de glace lorsque la chaleur superficielle s'est dégagée, car l'intérieur est très froid. Ces météorites, suivant leur nature, sont de forme irrégulière, mais l'aspect conique prédomine. Elles sont couvertes d'une couche foncée fondue, montrant nettement des formes aérodynamiques.

Les très grosses météorites ont une énergie vive si considérable que leur freinage par l'atmosphère est négligeable, et elles provoquent de vraies explosions au moment de la chute, créant des cratères profonds et démolissant tout à l'entour. La grosse météorite de Toungouska du 30 juin 1908 a ainsi abattu des arbres sur une région de Sibérie correspondant à la superficie de deux départements français. La chute fut enregistrée par de nombreuses stations sur toute la Terre, et une nuit claire suivit la chute. Une expédition scientifique soviétique a exploré cette région mais n'a pas trouvé de météorite. On pense qu'elle était pierreuse.

Une seconde chute eut lieu en Sibérie le 12 février 1947 à Sikhote-Aline dans la province maritime de l'U. R. S. S. près de la mer du Japon. De nombreuses études de cette chute ont été faites par les savants soviétiques. La très grosse météorite a explosé dans l'atmosphère terrestre et a produit plusieurs centaines de cratères sur une surface de 2 km². Le plus grand cratère mesurait 26 m de diamètre. Les plus gros débris avaient une masse de plusieurs tonnes, et on récupéra 23 t de météorites. La masse totale fut estimée à 70 t, et la trajectoire était très elliptique : à son aphélie, la météorite était dans l'anneau des petites planètes, correspondant à une orbite typique d'astéroïde. La météorite était du type fer-nickel, ce qui facilita la récupération des éclats par des méthodes magnétiques.

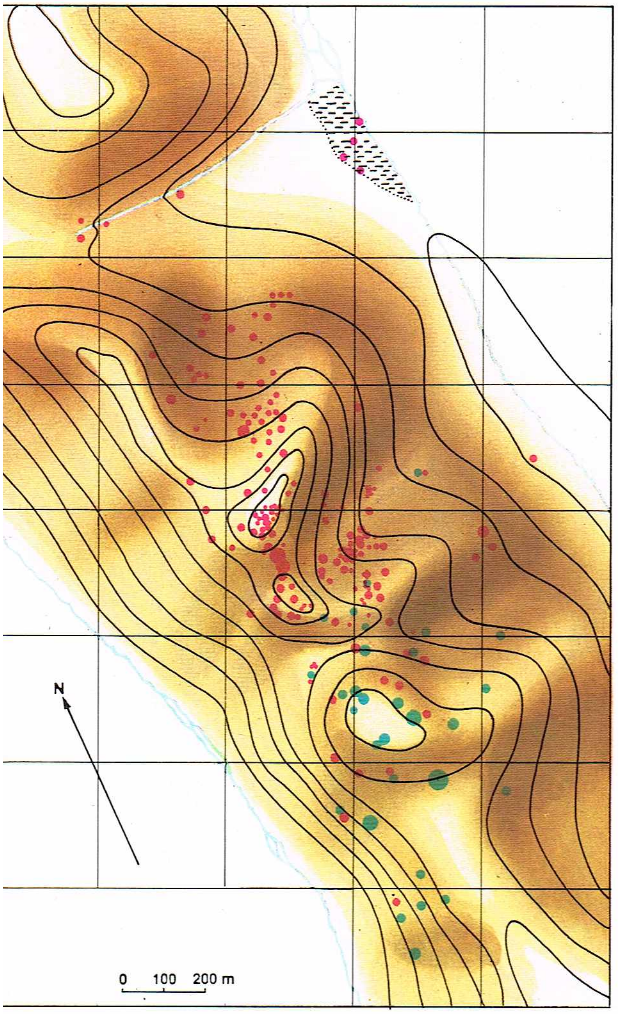

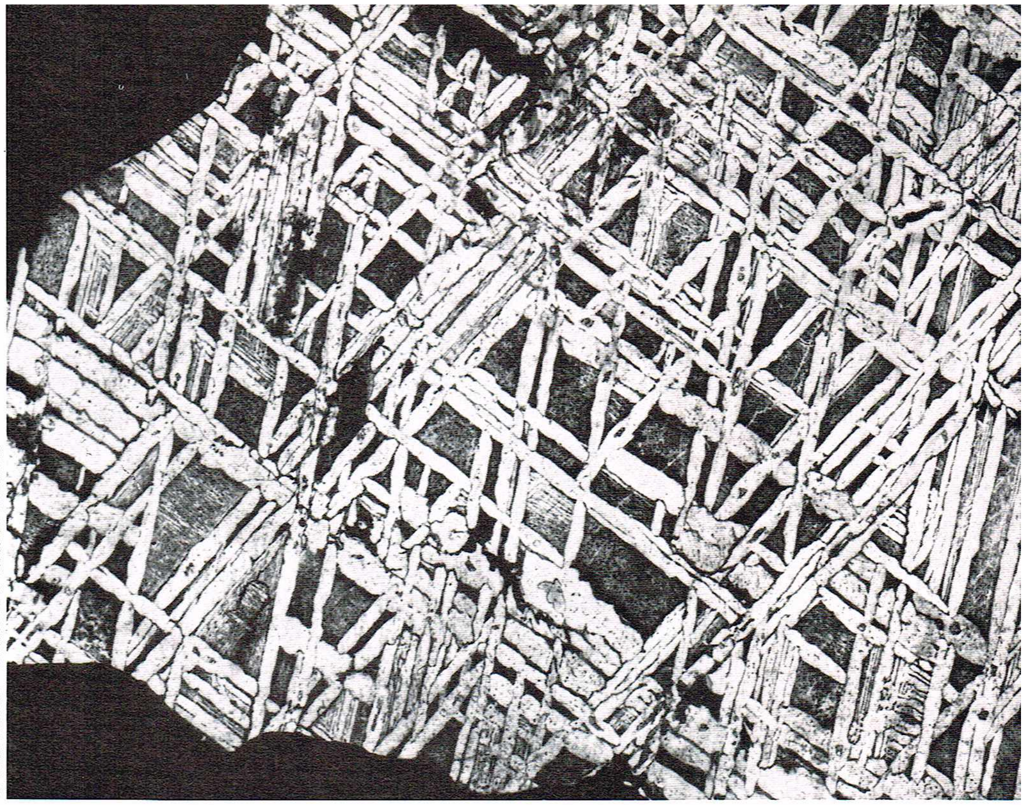

R. Kandaroun - Muséum d'histoire naturelle

Le fameux Meteor Crater en Arizona (États-Unis) mesure 1 200 m de diamètre, et le fond est situé à 60 m au-dessous de la plaine environnante. Les parois du cratère circulaire s'élèvent à 200 m au-dessus du fond. De nombreux fragments de météorites, dont le plus lourd a une masse de 650 kg, ont été trouvés et la masse récupérée dépasse 30 t. On estime à 1 000 t la masse de la météorite dont la plus grande partie a été dispersée; il ne semble pas que de gros fragments soient enterrés dans le cratère même. La chute a dû se passer il y a 50 000 ans. On connaît un certain nombre d'autres cratères d'origine météorique. On a retrouvé sur toute la Terre environ 1 400 météorites, dont certaines sont très grosses et pèsent des centaines de kilogrammes. Le record revient à une météorite de 35 t; elle a été trouvée au Groenland et se trouve maintenant au musée à New York. Une autre, dont la masse est estimée à 100 t, existe à Hobe, dans le Sud-Ouest africain.

Nature des météorites

Les **météorites** sont de trois types : les météorites ferreuses, les météorites pierreuses et les météorites mixtes.

— Les *météorites ferreuses,* constituées de fer et de nickel à l'état métallique, sont de vrais échantillons d'acier inoxydable, et certaines, comme celles qu'on a retrouvées au Groenland, ont servi à la fabrication d'ustensiles et d'armes. Ces alliages contiennent environ 90 % de fer, 9 % de nickel et 0,5 % de cobalt. Le reste est formé d'éléments comme le phosphore, le chrome, etc. Lorsqu'on les scie et les polit, ces météorites montrent une structure curieuse étudiée par Widmanstätten et qui s'explique par une cristallisation pendant des durées très longues. On n'observe pas cette structure sur des aciers préparés au four. La reconnaissance des météorites métalliques est donc facile à cause de cette structure.

◀▲ A gauche, plan du lieu de chute d'une pluie de météorites en Sibérie orientale (Sikhote-Aline). En rouge, les différents fragments; en vert, les cratères météoriques; on observe la forme elliptique de la surface de chute (d'après Krinov). Ci-dessus, structure lamellaire (grandeur nature) dite de Widmanstätten dans le fer (alliage de fer et de nickel) de Tamentit (attaque à l'acide picrique). Collection du Muséum national d'histoire naturelle.

◀▼ Ci-contre, une croûte de fusion noirâtre recouvre partiellement cet aérolithe tombé en 1883 à Alfianello près de Brescia (Italie). Ci-dessous, fossettes sur la croûte de la météorite Henbury (Londres, British Museum).

C. Bevilacqua

▶ *Page ci-contre, en haut, région d'Orion montrant les 3 étoiles brillantes ζ, ε, δ (le Baudrier) et, en bas, la grande nébuleuse d'Orion. En bas, tableau de l'échelle des magnitudes.*

— Les *météorites pierreuses* — c'est le groupe le plus important — contiennent de nombreux nodules, essentiellement d'olivine et de pyroxène. On les nomme aérolithes ou encore chondrites (les chondres sont de petits globules). Elles contiennent 36 % d'oxygène, 25 % de fer, 18 % de silice et 14 % de magnésium. Ce sont des sortes de silicates. Ces météorites sont blanches à l'intérieur, mais elles sont entourées d'une croûte noire de 2 ou 3 mm d'épaisseur. Leur composition n'est pas très éloignée de celle de la couche supérieure de la Terre. Il est difficile de les retrouver quand elles sont anciennes.

— Enfin, on connaît des *météorites intermédiaires,* contenant du fer et des roches.

La chute de pierres provenant du ciel a été assez difficile à admettre, surtout après les progrès de l'astronomie au XVIIIe siècle. Cette origine céleste, défendue notamment par Gladny, fut démontrée sans aucun doute après la belle chute de 1803 de L'Aigle, étudiée par l'Académie des Sciences de Paris.

Signalons enfin la présence d'un type très spécial de sphérules rondes ou elliptiques dont l'origine extraterrestre paraît sûre : ce sont les **tectites** trouvées sur de grandes surfaces, notamment en Australie et en Tchécoslovaquie.

Deux météorites tombées récemment ont été étudiées avec beaucoup de soin, notamment par les équipes qui s'étaient préparées pour l'étude des roches lunaires.

Une météorite est tombée le 14 novembre 1968 à Alandroal au Portugal ; elle pesait 25,2 kg et était ferreuse ; elle ne présentait pas les figures de Widmanstätten, ce qui a fait un moment douter de sa nature météoritique, mais son origine a été ultérieurement confirmée, et on a obtenu un âge très court de 33 millions d'années par les dosages d'isotopes de l'argon. Tout se passe comme si cette météorite s'était détachée de l'intérieur d'une météorite plus grande il y a 33 millions d'années.

L'autre météorite est connue sous le nom de météorite Allende parce qu'elle est tombée le 8 février 1969 à Pueblito de Allende au Mexique. C'est une météorite chondritique d'un type très rare, formée de sphérules claires (des chondres) peu fusibles dans un magma noir de composés carbonés fusibles. Elle pesait 350 kg et a été étudiée avec grand soin, notamment au California Institute of Technology. Les inclusions claires sont riches en métaux réfractaires, calcium, aluminium, thorium, titane, uranium, et ressemblent beaucoup aux brèches lunaires. Il est certain que cette météorite a subi des transformations nombreuses.

Signalons enfin que les météorites de ce type, notamment celle de Murchison, tombée le 28 septembre 1969 en Australie, contiennent des combinaisons organiques comme des hydrocarbures et même des amino-acides. Ces acides ont été identifiés au nombre de 18, dont 6 sont des amino-acides qui existent dans les protéines terrestres, mais aucun n'est optiquement actif, c'est-à-dire qu'ils sont des mélanges d'acides dextrogyres et lévogyres, alors que tous les acides organiques d'origine biologique sont lévogyres. Les 12 autres acides n'existent pas dans les protéines. Les auteurs de cette excellente étude ont pu conclure que ces composés organiques ne sont pas d'origine biologique, et qu'ils ont été formés par synthèse directe comme celle qu'on peut réaliser au laboratoire par des procédés purement chimiques et physiques.

Origine des météorites

Rappelons la liaison certaine des radiants avec les comètes et le fait que les météorites ont sans doute toutes leur origine dans le système solaire. Leur composition est celle que nous devrions observer si une planète comme la Terre explosait. Ceci nous amène à penser que les météorites ont la même origine que les petites planètes circulant entre Mars et Jupiter ou encore que les comètes. La question de l'éclatement d'une planète entre Mars et Jupiter est très controversée, et on pense aujourd'hui que cette matière n'a pas pu se condenser à cause des effets de marée de Jupiter. L'étude des météorites a un grand intérêt pour notre connaissance du système solaire.

Une question connexe est celle de savoir si la fréquence des chutes a varié au cours des temps. Le nombre de météorites trouvées dans les glaces polaires et les sédiments semble indiquer que la fréquence actuelle est relativement grande. On n'a notamment pas retrouvé de grandes météorites dans les gisements de charbon, malgré la grosse quantité de charbon exploité.

De petites pierres à l'aspect vitreux, les *tectites,* qu'on trouve sur la Terre en diverses régions posent un problème non résolu. Les plus caractéristiques sont les *australites,* trouvées en grande quantité en Australie. Elles ont la forme de petits boutons de verre foncé de 10 à 20 mm de diamètre. On peut expliquer leur forme par l'échauffement d'une petite sphère de pierre pendant son passage dans l'atmosphère. On pense que les australites ont un âge de l'ordre de quelques milliers d'années. Elles sont réparties sur une surface elliptique de plusieurs centaines de kilomètres carrés.

On connaît d'autres tectites moins régulières comme celles de Bohême, nommées *moldavites,* d'autres au Texas, etc. Ces dernières ont un âge estimé à 50 millions d'années, et elles ont été érodées.

On connaît actuellement une dizaine de zones de chutes; les dates de ces chutes se répartissent en 4 époques assez nettement définies. Les plus âgées sont celles des États-Unis (Texas, Géorgie). Un fait surprenant est l'absence de tectites dans tous les terrains sédimentaires, et il ne semble pas y avoir eu de chute dans une longue période allant du début des âges géologiques, c'est-à-dire il y a 3,5 milliards d'années, aux chutes du Texas (50 millions d'années).

L'origine des tectites est très discutée : pluie de météorites pour les uns, objets éjectés par la Lune et tombés sur la Terre pour d'autres, enfin débris dus à l'abrasion par choc de matériel du noyau de comètes rasant l'atmosphère terrestre. D'autres chercheurs pensent que les tectites ont une origine terrestre : retombées sur la Terre de morceaux de lave éjectés à haute altitude par des éruptions volcaniques. Actuellement, les tectites posent un grand problème astronomique et géologique.

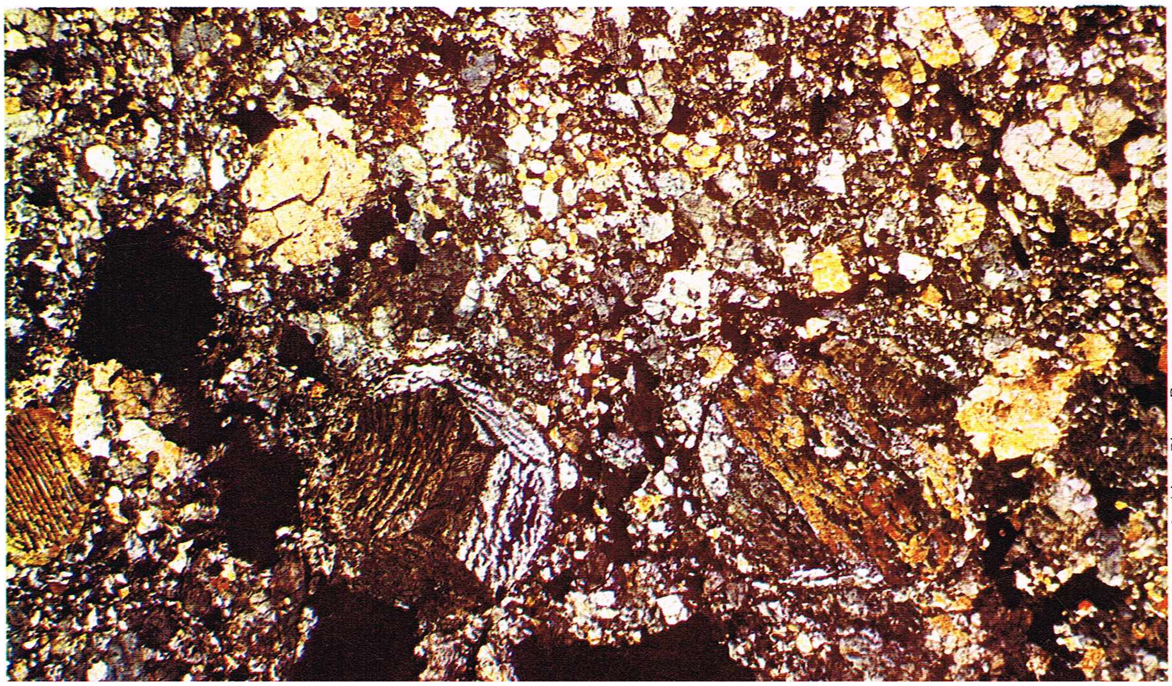

Archives Photo B

▶ *Aspect microscopique d'une chondrite (Ergheo) [lame mince entre nicols croisés].*

C.N.R.S. - Observatoire de Haute-Provence

LES ÉTOILES

Nous avons déjà décrit le ciel constellé d'étoiles; nous allons maintenant examiner ces astres du point de vue de leur nature et de leur constitution physique. Le concept que notre Soleil est une étoile parmi celles qui parsèment la voûte céleste est assez récent, et il n'a pu être établi que par des mesures précises.

L'examen à l'œil nu nous montre que les étoiles diffèrent par leur éclat : la plus brillante est Sirius, d'autres sont à peine visibles. Depuis la plus haute antiquité, on les a classées par *grandeur :* les plus brillantes étant de première grandeur, et celles qui sont tout juste visibles à l'œil nu de sixième.

Avec la naissance de la science exacte, il a fallu remplacer cette notion subjective par des mesures physiques. Aujourd'hui, on nomme *éclat stellaire* l'éclairement donné par l'étoile sur une surface perpendiculaire aux rayons qu'elle nous envoie. Cet éclat pourrait être mesuré en lux dans l'échelle des physiciens. En fait, l'étoile la plus brillante, Sirius, donne un éclairement de 5 millionièmes de lux, et cette unité n'est pas pratique, d'autant plus qu'il serait très difficile de faire cette mesure directement dans cette unité.

On a introduit la notion de *magnitude* qui est définie dans le tableau ci-contre.

Échelle des Magnitudes

Magnitude	**− 25**	**− 20**	**− 15**	**− 10**	**− 5**	
Éclat	**10 milliards**		**1 million**	**10 000**	**100**	
	− 26,7 Soleil		**− 14,7 1 lux**	**− 12,7 Lune**	**− 4,1 Vénus au maximum**	
Magnitude	**0**	**5**	**10**	**15**	**20**	**25**
Éclat	**1**	**1/100**	**1/10 000**	**1 millionième**		**1 dix milliardième**
	− 1,5 Sirius	**6 œil nu**		**15 étoile vue au télescope de 2 m**		**23 limite actuelle de la photographie**

Lorsque l'éclat est divisé par 100 la magnitude augmente de 5

On constate que, lorsque l'éclat est divisé par 100, la magnitude augmente de 5. Cette échelle peut être prolongée des deux côtés. Du point de vue mathématique, l'échelle des magnitudes comparée à celle des éclats est une échelle logarithmique. Le point zéro de cette échelle est défini par l'adoption arbitraire de la magnitude d'une étoile ou mieux d'une série d'étoiles standard. Aujourd'hui, l'étoile fondamentale est une petite étoile bleue située près du pôle Nord et dont la magnitude est par définition 7,139. L'échelle de magnitude reste subjective car elle dépend de la courbe de sensibilité chromatique de l'œil; ces magnitudes sont dites visuelles.

On imagine facilement d'autres systèmes de magnitudes, par exemple, celui qu'on obtient en employant la plaque photographique. La définition de l'échelle reste la même, et par convention on a encore donné la même magnitude photographique $m_p = 7{,}139$ à l'étoile standard. On comprend que, en mesurant dans ces échelles la magnitude d'une étoile rouge, dont l'éclat rouge est plus grand que l'éclat bleu, la magnitude bleue sera plus grande.

La différence entre la *magnitude photographique* et la *magnitude visuelle* est un indice de couleur. Même l'inspection à l'œil nu permet de réaliser que les étoiles ont des couleurs différentes. Ainsi β Ori (Rigel) est une étoile très bleue, dont l'indice de couleur est négatif (— 0,05), tandis que α Ori (Bételgeuse) est une étoile rouge (indice + 1,85). Nous avons déjà indiqué que ces mesures sont faites avec des photomètres et que l'on tient compte, dans la réduction des mesures, de l'absorption atmosphérique. Les astronomes utilisent actuellement au moins une dizaine d'échelles correspondant à des filtres différents.

On peut exprimer dans l'échelle des magnitudes l'éclat de n'importe quel astre. Ainsi le Soleil a un éclat apparent de — 26,7, la Lune de — 12,7; Vénus a son maximum d'éclat : — 4,1, Sirius — 1,47. L'étoile la plus faible visible à l'œil nu a la magnitude 6. On a pu photographier des étoiles jusqu'à la magnitude + 23.

Éclats et magnitudes absolues

L'éclat d'une étoile, c'est-à-dire l'éclairement que donne l'étoile, dépend de deux facteurs : de son éclat intrinsèque et de sa distance. Si l'on veut comparer vraiment deux étoiles, il faut s'affranchir de l'effet de distance. Pour cela, on calcule l'éclat ou la magnitude qu'aurait l'étoile si elle était située à une distance type. La distance type est celle de 10 parsecs; rappelons que le parsec vaut 30 860 milliards de kilomètres. L'éclat ou la magnitude qu'aurait l'étoile si elle était placée à 10 parsecs est calculé à l'aide de la loi de diminution de l'éclairement avec la distance (carré inverse de la distance). Indiquons les valeurs des différences entre la *magnitude apparente m* et *absolue* M, en fonction de la distance D; cette quantité (*m* — M) est le *module de distance*.

(D)	1	10	100	1 000	10 000
(*m* — M)	— 5	0	+ 5	+ 10	+ 15

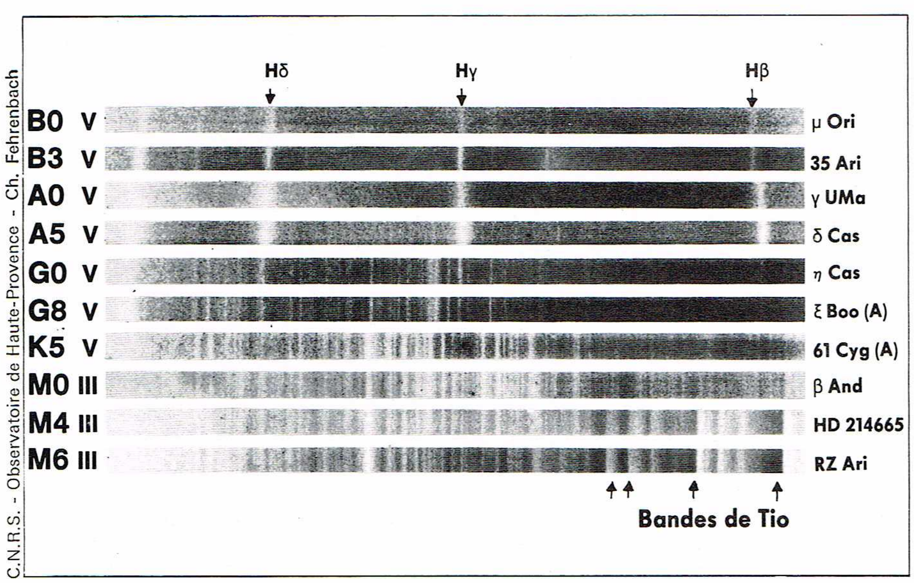

▼ *Classification spectrale : l'intensité des raies de l'hydrogène augmente du type spectral B à A où elle présente un maximum; elle décroît ensuite progressivement. A partir du type F, de nombreuses raies d'atomes neutres apparaissent. Pour les étoiles de type M, les plus froides, les bandes moléculaires de l'oxyde de titane sont bien développées.*

Dans cette échelle, le Soleil a une magnitude absolue + 4,7, valeur d'une étoile moyenne. L'étoile la plus brillante connue a une magnitude de — 9, et les plus faibles sont les naines blanches (M = 15).

En général, les étoiles ont des éclats constants, mais des mesures précises montrent que certaines sont variables, et nous examinerons les causes de ces variations.

Spectres stellaires

En étudiant le Soleil, nous avons décrit le spectre solaire qu'on obtient en analysant la lumière du Soleil à l'aide du spectrographe. 99,9 % des étoiles présentent des spectres analogues. Ils sont formés par un fond continu, comme celui que donne un corps incandescent, sillonné par une multitude de raies d'absorption plus ou moins fortes. Le millième d'étoiles qui reste présente, en plus, des raies d'émission plus ou moins nombreuses.

Depuis le début du XX[e] siècle, les astronomes se sont occupés de classifier ces spectres. Après une période de tâtonnements, une classification a été universellement adoptée : c'est celle qui résulte des travaux des astronomes de Harvard (États-Unis), qui ont classé près de 300 000 étoiles. Ils avaient d'abord introduit la série A, B ... S. Cette série a été ultérieurement bouleversée et simplifiée. La série définitive O, B, A, F, G, K, M, est une classification par température décroissante. Il s'agit sensiblement de la température de la chromosphère où les raies d'absorption sont produites. Il est possible d'identifier les éléments qui produisent les raies.

Indiquons que les étoiles de type O montrent les raies des atomes fortement ionisés, notamment l'hélium ionisé, le carbone, le silicium plusieurs fois ionisés. Ces étoiles ont des atmosphères très chaudes, dont les températures sont comprises entre 50 000 et 100 000 °K; à ces températures, les chocs entre les atomes sont très violents, de sorte que la majorité des atomes est ionisée.

Les étoiles B sont moins chaudes, et on voit apparaître les raies de l'hélium neutre et de l'hydrogène. Cet état de la matière correspond à des températures de 20 000 °K.

Les étoiles A, très nombreuses, présentent surtout les raies de l'hydrogène, mais les raies de métaux commencent à apparaître. Leur température est estimée à 10 000 °K.

Les types spectraux suivants : F, G, K, montrent de plus en plus de raies métalliques et les premières molécules stables apparaissent. Le Soleil, dont la température est de l'ordre de 6 000 °K, a un type spectral G.

Les étoiles M sont froides et de nombreuses bandes des molécules d'oxyde de titane TiO y apparaissent.

Quelques étoiles à raies d'absorption n'entrent pas dans cette classification. Il s'agit d'étoiles froides : d'une part, les étoiles classées S, où l'oxyde de titane est remplacé par des oxydes de zirconium et de lanthane, et d'autre part les étoiles carbonées, classées R et N ou encore C, montrant les bandes de molécules carbonées CN et C_2.

Les astronomes ont raffiné cette première classification en subdivisant chaque classe en 10 sous-classes, de sorte qu'une étoile A0 suit une étoile B9. On s'est ensuite aperçu qu'il était possible de préciser la classification suivant la luminosité des étoiles. Nous en dirons quelques mots ultérieurement.

D'après la description très sommaire que nous avons donnée des spectres, on pourrait être amené à penser que les étoiles peuvent différer par leur composition : étoiles à hélium, à hydrogène et étoiles à métaux. En fait, l'étude de l'émission de la lumière dans les atmosphères stellaires montre que toutes les étoiles ont sensiblement la même composition : environ 80 % d'hydrogène, 19 % d'hélium et une petite partie, inférieure à 1 %, d'autres atomes; les différences d'apparences s'expliquent presque totalement par la différence de température des atmosphères. Seules les étoiles carbonées sont riches en C et les étoiles S sont moins riches en titane que les étoiles M. En fait, des analyses précises récentes montrent que certaines étoiles sont plus riches en baryum, d'autres en europium, etc., mais il s'agit de détails, et l'image simple proposée reste valable.

Nous avons indiqué que certaines étoiles présentaient aussi des raies d'émission : il s'agit d'étoiles entourées d'enveloppes, et leur étude est intéressante. Mais elles sont rares et nous en citerons quelques-unes quand nous parlerons des étoiles variables.

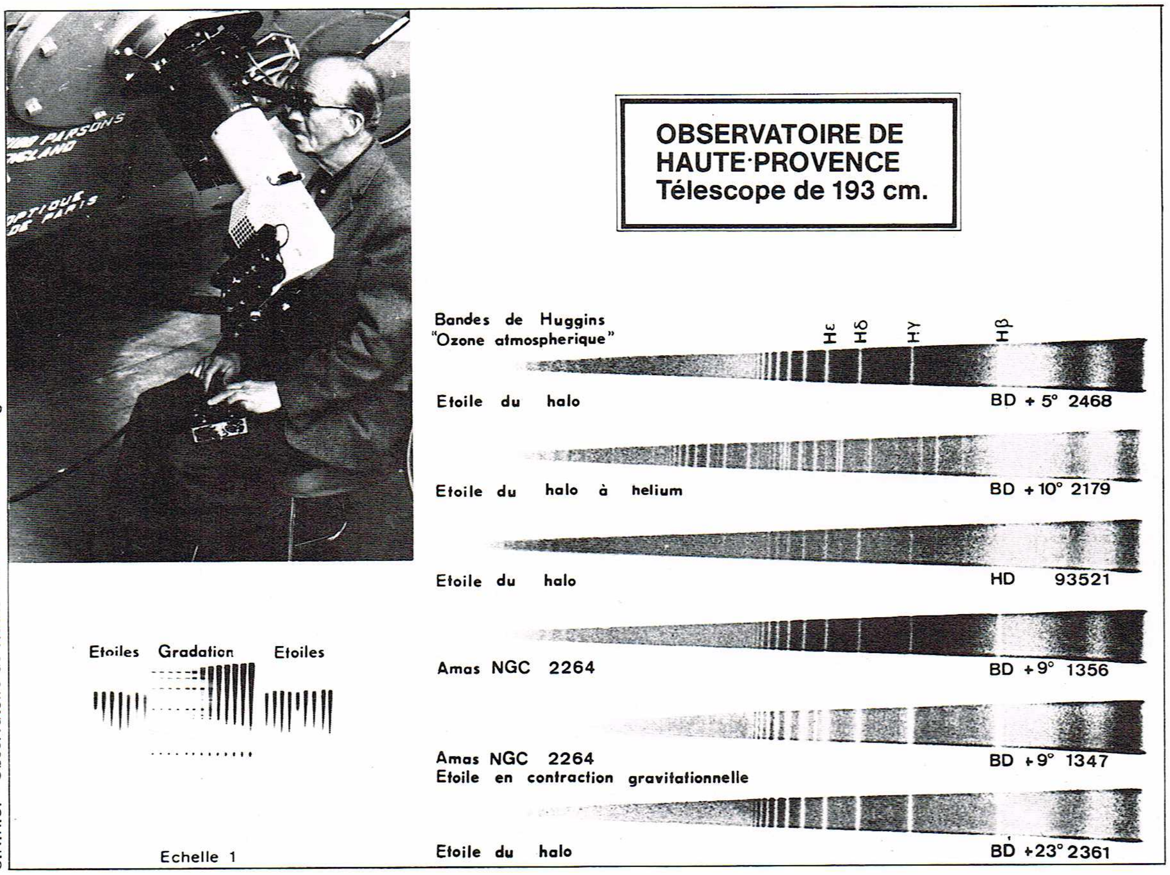

C.N.R.S. - Observatoire de Haute-Provence - D. Chalonge

◀ *Spectrographe ultraviolet à petite dispersion installé au télescope de 193 cm de l'Observatoire de Haute-Provence et série de spectres obtenus avec cet instrument. Domaine spectral de 3 100 à 6 500 Å; dispersion originale de 220 Å · mm⁻¹.*

Les étoiles naines et les étoiles géantes

Nous avons indiqué comment on peut caractériser l'éclat intrinsèque d'une étoile par sa magnitude absolue. Un diagramme dû à Russell et Hertzsprung permet de résumer notre connaissance dans ce domaine. Ces deux astronomes ont eu l'idée, il y a un peu plus de cinquante ans, de tracer un diagramme où l'on porte le type spectral en abscisse et l'éclat ou la magnitude absolue en ordonnée. Sur un tel graphique, on constate que les étoiles ne se placent pas n'importe comment, mais qu'on peut distinguer plusieurs domaines. La diagonale où est placé notre Soleil correspond à des étoiles, anciennement nommées naines, maintenant étoiles de la série principale. Pour les étoiles de type avancé, G, K, M, on constate qu'il existe un autre groupe : les géantes. Il existe aussi des supergéantes. Elles sont nommées ainsi du fait que ces étoiles sont très volumineuses. Sur notre graphique, on devrait les nommer lumineuses et superlumineuses.

Les géantes de type G sont 100 fois plus lumineuses que notre Soleil qui est aussi de type G. Les supergéantes de ce type sont 500 000 fois plus lumineuses que le Soleil.

Enfin, dans la partie gauche en bas du schéma, se placent quelques étoiles blanches et très peu brillantes, en fait 100 000 fois moins que les étoiles blanches normales. On les nomme des *naines blanches.* Nous aurons l'occasion d'étudier Sirius B qui se place en cet endroit.

Pour terminer l'étude des étoiles normales, indiquons que l'on peut déterminer les masses et les diamètres des étoiles par diverses méthodes.

Les masses sont accessibles par l'étude des mouvements des étoiles doubles. Elles varient assez peu d'une étoile à l'autre, les plus massives ont des masses de l'ordre de 150 masses solaires, les moins massives de l'ordre de 1/15 de masse solaire. Si l'on excepte les naines blanches,

Classes spectrales	Températures superficielles en °K	Couleur	Caractéristiques spectrales
Classes principales :			
O	35 000-30 000	blanc-bleu	prédominance des raies de l'hélium
B	30 000-15 000	blanc-bleu	raies de l'hélium et de l'hydrogène
A	environ 10 000	blanc	prédominance des raies de l'hydrogène
F	environ 7 000	blanc-jaunâtre	raies de l'hydrogène et de métaux ionisés
G	environ 6 000	jaune	raies de l'hydrogène et de métaux neutres et ionisés
K	environ 5 000	orangé	métaux neutres, prédominance des raies du calcium neutre et ionisé
M	environ 3 000	rouge-orangé	prédominance des bandes de l'oxyde de titane
Étoiles froides rares :			
S	3 000-2 000	rouge	prédominance des bandes de l'oxyde de zirconium
R, N ou C	3 000-1 500	rouge	prédominance des bandes des composés carbonés

◀ *Tableau des différentes classes spectrales et de leurs caractéristiques.*

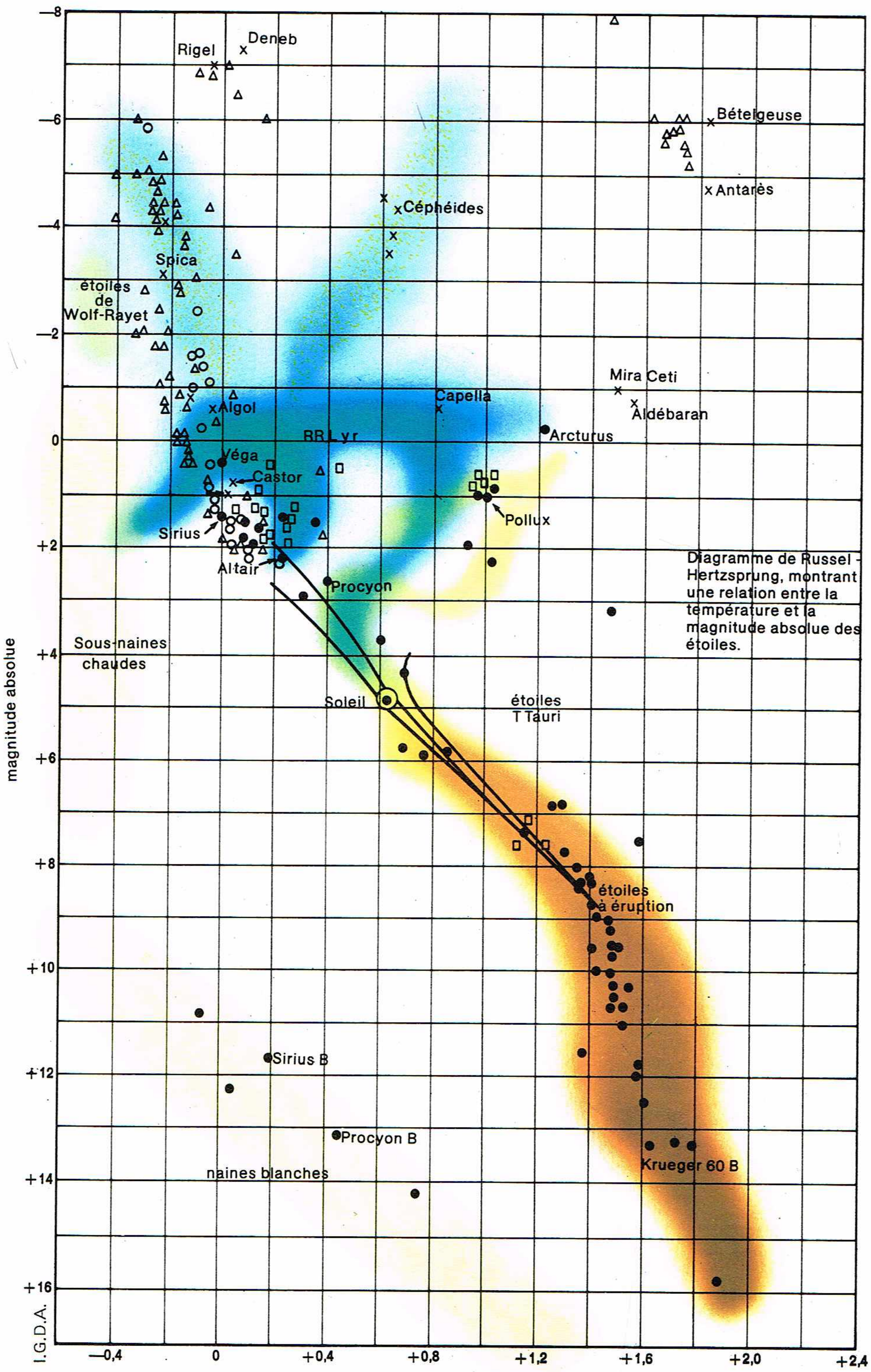

▲ *Les cercles pleins représentent les étoiles proches du Soleil (distances inférieures à 60 années de lumière); les cercles indiquent les étoiles de l'amas des Pléiades; les triangles indiquent les étoiles des amas de Persée (h et χ Persée); les carrés indiquent les étoiles de l'amas des Hyades; enfin, les croix représentent certaines étoiles brillantes ou particulières.*

on constate que ce sont les étoiles les plus lumineuses qui sont les plus massives, et les plus faibles les moins massives.

La mesure directe du diamètre des étoiles supergéantes est possible par les méthodes interférométriques, surtout depuis qu'on leur applique des techniques de synthèse d'ouverture, ce qui permet de combiner la lumière de télescopes éloignés et de s'affranchir de l'agitation atmosphérique.

Un autre procédé de mesure du diamètre est l'étude des étoiles doubles à éclipses qui sont des astres rapprochés qui s'éclipsent mutuellement dans leur mouvement orbital. On constate que les diamètres des étoiles varient beaucoup. En prenant celui du Soleil pour unité, on trouve que, pour la série principale, les valeurs varient entre 10 et 1/10. Mais les supergéantes peuvent avoir des diamètres de 1 000. Les naines blanches ont des diamètres de l'ordre de 1/100.

Pour terminer, décrivons quelques étoiles typiques. Le Soleil, étoile normale de type G2, de la série principale, a un diamètre de 1,4 million de kilomètres, une température superficielle de 5 800 °K et une densité moyenne de 1,4. Une étoile bleue de la série principale, comme Sirius, de type spectral A0, a un diamètre de 2,5 diamètres solaires, une température de 10 000 °K et une densité de l'ordre de 0,25. Une étoile froide, de la même série principale, avec une température de surface de l'ordre de 3 500 °K, a un diamètre de 0,1 diamètre solaire et une densité de 50. Une supergéante, comme Antarès ou Bételgeuse, a un diamètre de 1 000 diamètres solaires. Jupiter pourrait circuler complètement à l'intérieur de cette étoile. Cette étoile a une masse de 20 masses solaires, de sorte que la masse volumique moyenne n'est que de l'ordre de un dix-millionième de gramme par centimètre cube. Par contre, le compagnon de Sirius, une naine blanche, a une température de 10 000 °K, et son diamètre n'est que de 1/50 de diamètre solaire. 1 cm^3 de la matière stellaire a une masse de 130 kg, soit 6 000 fois la densité du platine.

Comme pour le Soleil, l'énergie des étoiles provient de réactions nucléaires. La température et la pression au centre sont considérables, et, dans ces conditions physiques, la réaction de condensation de l'hydrogène en hélium avec perte de masse explique le rayonnement émis par les étoiles. Le taux d'émission varie beaucoup avec la température intérieure des étoiles; il est très grand pour les étoiles bleues qui se transforment rapidement en étoiles rouges, de sorte que toutes les étoiles bleues que nous observons sont très jeunes. Par contre, l'évolution des étoiles froides de la série principale est très lente.

Nous ne savons pas exactement à quelle phase de l'évolution se placent les naines blanches, mais elles sont considérées souvent comme étant le dernier stade de l'évolution, et on pense que la réaction principale de condensation de l'hydrogène est terminée par épuisement des noyaux d'hydrogène et qu'alors d'autres réactions nucléaires ont lieu. Nous reviendrons sur cette question lorsque nous parlerons des amas stellaires.

Les étoiles doubles

Lorsque l'on regarde le ciel, même avec une petite lunette, on s'aperçoit que des étoiles qui semblent uniques sont en réalité constituées par deux astres rapprochés. Ce sont des *étoiles doubles;* il existe aussi des *étoiles triples* et d'autres *multiples.* On pourrait penser que ces étoiles sont rapprochées par les effets de la perspective, mais un calcul de statistique montre que cette probabilité est très faible. En fait, dans leur très grande majorité, les étoiles sont des couples situés à la même distance de l'observateur et elles sont donc liées physiquement. Si l'on repère avec soin la position relative des deux étoiles, on s'aperçoit, après un certain temps, que l'une des étoiles a bougé par rapport à l'autre.

La mesure de ces mouvements se fait avec divers instruments, dont le plus ancien est le *micromètre à fil;* la *photographie* peut être aussi utilisée. On a pris pour habitude de nommer A l'étoile la plus brillante, et B la plus faible. On mesure l'angle que fait AB avec la direction du nord. Cet angle est compté en degrés dans le sens direct. La distance AB est mesurée en secondes d'arc.

Par exemple, l'étoile β Cyg est une belle étoile double constituée par une étoile jaune de magnitude 3,2, accompagnée par une étoile bleue plus de dix fois plus faible ($m = 6{,}3$). L'angle de position est actuellement de 55°, et la distance angulaire de 35″. La variation de ces éléments est très lente.

Une étoile double très classique est ξ Boo découverte par Struve et nommée d'après son catalogue Σ 1888. Elle est formée par deux étoiles de magnitude 4,6 et 6,9 dont la distance est de l'ordre de 7″, et l'angle de position de 350°. Cette distance croît actuellement. L'orbite apparente est une ellipse qui est décrite en 150 ans. L'étoile est passée par son périastre en 1909 et elle sera à son maximum de distance en 1984.

Cette orbite est une ellipse décrite suivant la loi des aires, mais on constate que l'étoile A n'occupe en général pas le foyer de l'ellipse. Ceci s'explique facilement si

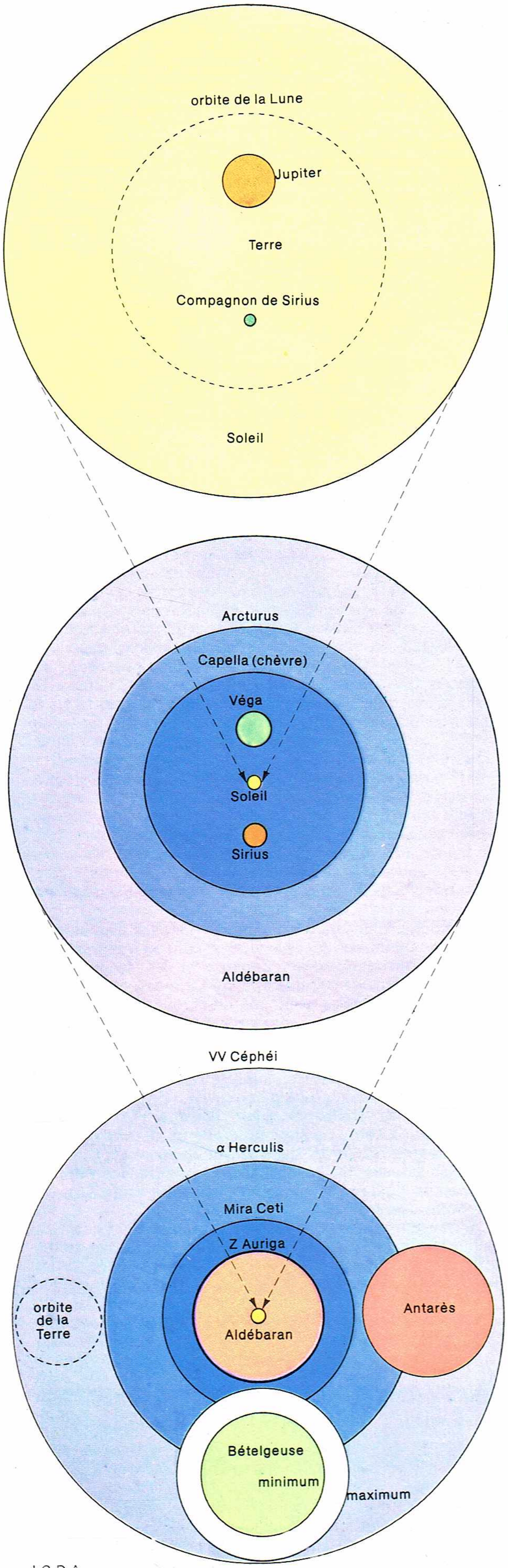

I.G.D.A.

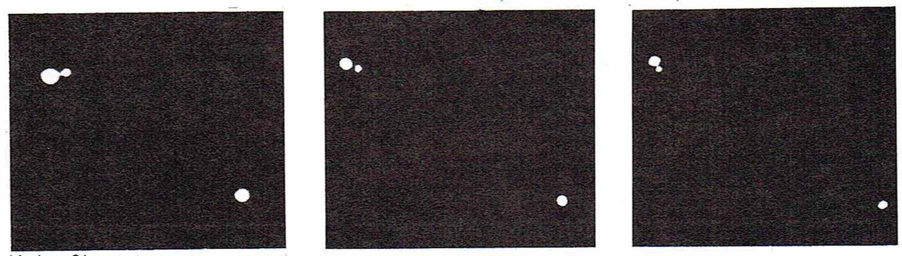

Yerkes Observatory

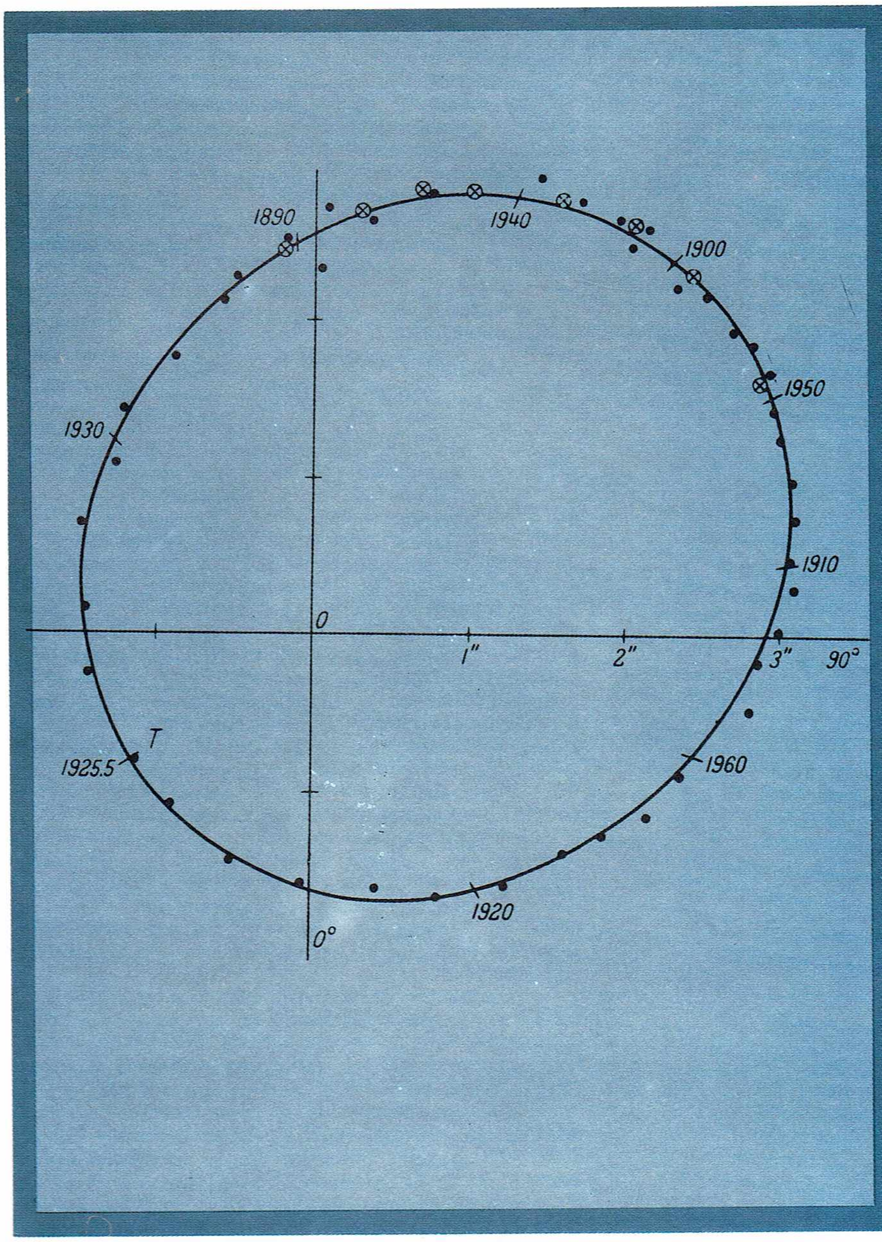

d'après Strand

◀▲ *Ci-contre, comparaison des dimensions des étoiles avec la Terre et le Soleil; en haut, le diamètre du Soleil est égal à 109 fois celui de la Terre; au centre, le diamètre d'Aldébaran est égal à 36 fois celui du Soleil; en bas, le diamètre de VV Cephei est égal à 25 fois celui d'Aldébaran, c'est-à-dire 1 260 fois celui du Soleil et plus de 130 000 fois celui de la Terre.*

Ci-dessus, en haut, l'étoile binaire Krueger 60 est un exemple d'étoile double visuelle. Ces trois photographies prises en 1908, 1915 et 1920 montrent nettement le mouvement des deux étoiles rapprochées qui constituent l'étoile binaire (Observatoire Yerkes).
En bas, orbite de l'étoile Krueger 60 qui est une étoile double formée de deux étoiles de magnitude m_A = 9,87 et m_B = 11,45. La période est de 44,78 ans. L'orbite est moyennement excentrique, e = 0,409, et le demi grand axe est de 2,40''. Sa distance au Soleil est de 3,94 pc, la somme des masses calculée avec ces éléments est de 0,42 masse solaire, valeur faible qui s'explique par le fait que l'étoile principale a le spectre M3. L'orbite, ici représentée, comprend à la fois des observations visuelles et photographiques.

l'on admet que le mouvement réel est bien un mouvement régi par la loi d'attraction de Newton avec l'étoile A au foyer de l'ellipse, mais que le plan de l'ellipse n'est pas situé dans le plan tangent au ciel. Il n'a d'ailleurs aucune raison de l'être, et, dans cette projection, le foyer n'est pas conservé.

Lorsqu'un astronome a observé une étoile double, il doit résoudre un problème de géométrie pour trouver la position de l'orbite dans l'espace. Les étoiles doivent parcourir l'ellipse réelle en suivant les lois de Kepler. Notamment, l'étoile A doit être au foyer de l'ellipse décrite par l'étoile B. De ces mesures et calculs, on déduit la période du mouvement et le demi grand axe de l'orbite, exprimé en secondes d'arc. Ainsi, pour l'étoile ξ Boo, dont la période est de 150 ans, on a trouvé que l'orbite avait une inclinaison de 140° sur le plan tangent à la sphère céleste, un demi grand axe de 4,9'', et qu'elle était très excentrique ($e = 0{,}5$), de sorte qu'à l'apoastre, la distance des étoiles est trois fois plus grande qu'au périastre.

Si la distance de l'étoile double à l'observateur est connue, on déduit facilement du demi-axe *a* apparent la valeur du demi grand axe (A) en unités astronomiques. En fait, il suffit de multiplier le demi grand axe *a* exprimé en secondes d'arc par la distance en parsecs. La troisième loi de Kepler fournit ensuite la somme des masses des étoiles du système. Il suffit de diviser le cube de A par le carré de la période exprimée en années :

$$M = \frac{A^3}{T^2}.$$

Dans le cas de ξ Boo, la distance est de 9,3 parsecs (30 années de lumière), et le demi grand axe vaut 45,6 unités astronomiques. La somme des masses est égale à 4,2 masses solaires.

Naturellement, chaque étoile tourne autour du centre de gravité du système. Il est possible de déterminer ce centre par l'étude du mouvement des deux étoiles par rapport à celles du champ. La détermination des masses stellaires par l'étude des étoiles doubles est la meilleure méthode que nous connaissions. Nous en avons déjà utilisé les résultats.

Nous connaissons plusieurs dizaines de milliers d'étoiles doubles visuelles; elles sont nommées par des lettres désignant l'astronome qui les a découvertes, suivies chacune d'un numéro d'ordre, ainsi Σ 431 est la 431[e] étoile découverte par W. Struve. C'est encore l'étoile 40 de la constellation de Persée.

L'observation de ces couples a montré que les périodes sont toujours longues, allant de quelques années à plusieurs siècles. A cause de la troisième loi de Kepler, une étoile à courte période a forcément une orbite très petite, et il arrive souvent qu'on observe des étoiles si serrées qu'il faut de très grands instruments pour les voir séparées.

De nombreuses étoiles ne peuvent pas être séparées, mais il est possible d'observer de tels couples à l'aide du spectroscope. En effet, la vitesse de ces deux étoiles sur leurs orbites peut être assez grande. Si nous projetons l'image d'une telle étoile double, non séparée, sur la fente du spectroscope, nous observons les spectres des deux étoiles, mais décalés par l'effet Doppler-Fizeau, l'un vers le rouge et l'autre vers le bleu. Ce décalage varie avec la période de la révolution des étoiles A et B autour du centre de gravité. On a ainsi découvert des milliers d'*étoiles doubles* dites *spectroscopiques*. Elles ne diffèrent des précédentes que par leurs périodes qui sont petites. Il est également possible de déterminer, par l'étude des variations de vitesse radiale, les orbites de ces étoiles et d'en déduire, sinon les masses elles-mêmes, du moins une fonction définie de ces masses.

Nous connaissons des étoiles doubles spectroscopiques ayant des périodes de quelques heures et dont les orbites sont si petites qu'elles sont comparables aux diamètres des étoiles. Si le plan de l'orbite a une orientation convenable, il peut alors arriver que l'une des étoiles éclipse l'autre. Effectivement, nous connaissons de nombreuses étoiles doubles de ce type : elles sont nommées *étoiles doubles à éclipses*. On comprend que la durée de l'éclipse dépende du rapport du diamètre de l'étoile au diamètre de l'orbite. Grâce à ce fait, on a pu mesurer

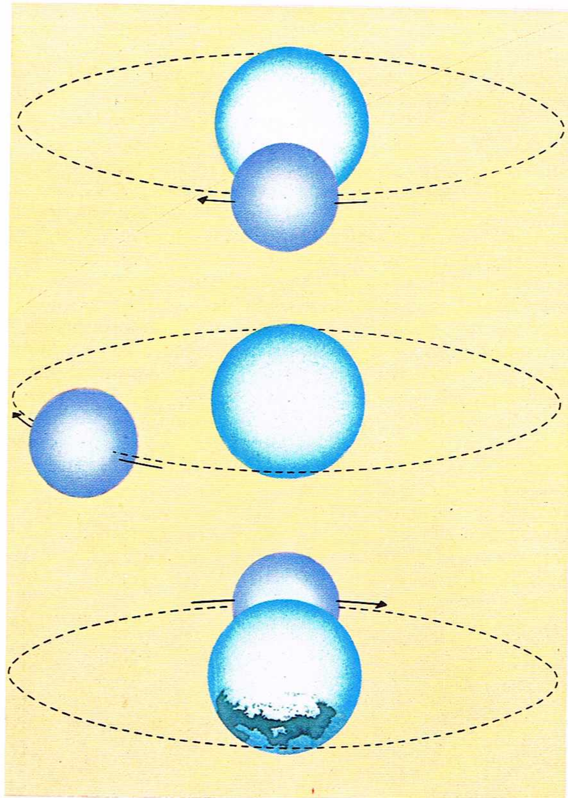

▶ ***Explication de la variation de luminosité d'une étoile double à éclipses du type d'Algol; de haut en bas : le système lors du minimum principal, le système en dehors des éclipses et le système au minimum secondaire.***

I.G.D.A.

le diamètre d'un certain nombre d'étoiles doubles à éclipses. Certaines de ces étoiles sont si rapprochées qu'elles sont presque en contact, et les étoiles sont souvent déformées par des effets de marée.

Les étoiles doubles sont très nombreuses : on estime que 25 % de toutes les étoiles sont doubles. On a pu montrer que cela provient du fait que, lorsque la matière se condense en étoiles, il n'y a équilibre que quand les masses sont assez petites, sinon la matière se condense en étoiles doubles ou multiples.

L'étude des étoiles doubles, soit par l'observation directe, soit à l'aide du spectrographe ou du photomètre, a permis une récolte très abondante de résultats concernant les masses, les rayons et les densités des étoiles. Elle est le fondement sur lequel est bâtie toute l'astrophysique des étoiles.

A titre d'exemple, décrivons le *système de Sirius*. La duplicité de cette étoile a été découverte par le calcul lorsqu'en 1834, W. Bessel s'est aperçu que Sirius se déplaçait sur la sphère céleste d'un mouvement non

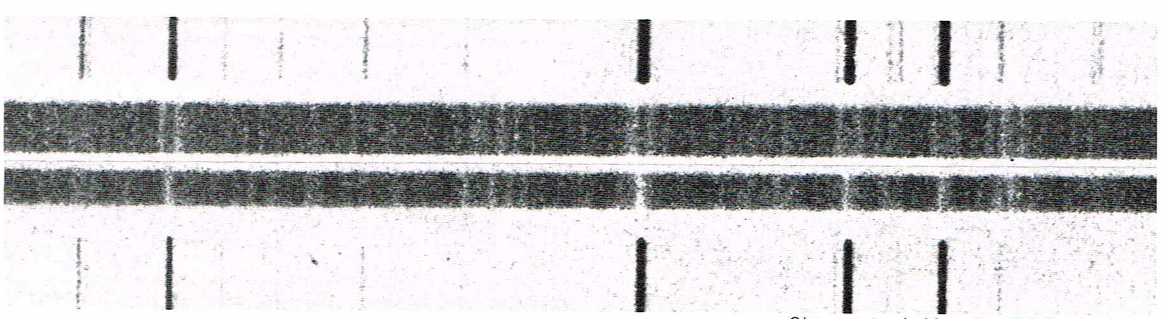

▶ ***L'étoile HD 6980 est une double spectroscopique formée par deux étoiles G0 assez semblables au Soleil et qui tournent autour du centre de gravité en 26 jours. Les vitesses radiales oscillent avec une amplitude de ± 48 km/s. Le spectre du haut correspond au maximum d'écart des deux composantes qui sont confondues dans le spectre du bas.***

Observatoire de Marseille; E.S.O. - M. Imbert

uniforme sur une trajectoire sinueuse. Ce n'est que le 31 janvier 1862 qu'Alvan Clarke aperçut le compagnon de Sirius avec la lunette de 46 cm que son père venait d'achever pour l'observatoire de Dearborn (États-Unis). La distance du compagnon, nommé maintenant Sirius B, était de 10'' d'arc. Il était bien à l'endroit prévu par Bessel. Le mouvement orbital a une période de 50 ans. Le demi grand axe est de 7,6'', mais l'excentricité est assez grande (e = 0,58), de sorte qu'aux maximums des distances apparentes qui ont eu lieu en 1869, 1919 et 1969, la distance est de 12''. La distance de Sirius est de 2,67 parsecs.

Ces éléments permettent de calculer la masse des deux étoiles. On trouve pour Sirius A 2,3 masses solaires, et pour Sirius B, 1,0 masse solaire. On pensait que la différence d'éclat provenait du fait que Sirius B était beaucoup plus froid que Sirius A. Ce fut une grande surprise lorsqu'en 1914, W. S. Adams put établir que la température de B était voisine de celle de A ; et la différence d'éclat montrait que son diamètre devait être seulement 1/80 de celui de A. Cette étoile est relativement massive, et la densité de Sirius B a la valeur extraordinaire de 175 000. Le compagnon tourne autour de l'autre étoile à peu près à la distance d'Uranus. Il est constitué par une matière extrêmement dense : les noyaux des atomes sont beaucoup plus rapprochés que dans la matière normale. La théorie d'Einstein a pu expliquer cet état spécial de la matière ; elle est dite *matière dégénérée*. La densité électronique sur Sirius B est très grande, et les raies spectrales sont très larges ; elles sont d'ailleurs déplacées vers les grandes longueurs d'onde par l'effet Einstein, ce qu'Adams paraît avoir vérifié. Cette étoile est la première naine blanche connue.

L'étoile Mizar ou ζ UMa est une étoile double formée par deux étoiles bleues de magnitude de 2,4 et 4,0. La séparation actuelle de ces deux étoiles est de 14,5''. Elle varie très peu, car la période, encore mal connue, est très grande. Cette étoile est intéressante car la plus brillante est elle-même une double spectroscopique ayant une période de 20,53 jours.

Donnons encore quelques renseignements sur une célèbre étoile, β Per ou Algol, découverte comme étoile variable en 1669, mais probablement déjà observée comme telle par les Arabes, le nom Algol voulant dire le diable ou l'esprit changeant. C'est une double spectroscopique dont la période est de 2,867 jours. Elle atteint la magnitude 2,2 au maximum et 3,5 au minimum. L'étude précise de l'orbite a été faite, et on a trouvé que la distance des deux étoiles est de 6,8 unités astronomiques. L'étoile brillante est du type spectral B8, sa masse est 4,7 masses solaires et son rayon 2,6 rayons solaires, l'étoile secondaire, de type G0, a une masse de 1,0 masse solaire et un rayon de 2,9 rayons solaires. On observe deux éclipses : celle de l'étoile B8 par l'étoile faible et froide correspond au minimum principal de 3,3, mais, lorsque l'étoile G0 est éclipsée par l'étoile B8, le minimum est à peine visible, l'éclat de l'étoile ne diminue que de 5 %. L'éclipse n'est d'ailleurs pas totale, l'inclinaison de l'orbite n'est pas exactement de 90°.

Les étoiles doubles à éclipses ont un très grand intérêt pour notre connaissance des étoiles. En plus des valeurs des masses et des rayons stellaires qu'elles permettent de mesurer, elles sont souvent le siège de phénomènes complexes : allongement des étoiles, obscurcissement centre-bord, échange de matière entre les étoiles. Aussi les étoiles doubles à éclipses sont-elles l'objet de nombreuses études.

Les étoiles variables

On connaît environ 50 000 étoiles dont l'éclat est variable. Nous avons déjà examiné les étoiles doubles à éclipses, qui ne sont pas vraiment des étoiles variables ; les autres ont des éclats intrinsèques variables.

Un catalogue des étoiles variables est tenu à jour par les astronomes soviétiques de Moscou. On classe les étoiles par *constellations*. En effet, suivant une vieille habitude, les étoiles variables sont désignées par des lettres majuscules suivies du nom de la constellation : S Cyg, T Cyg... Z Cyg, suivi de RR, RS, etc., jusqu'à ZZ, suivi de V 343 Cyg. Le catalogue indique les coordonnées des étoiles et le type de leur variation.

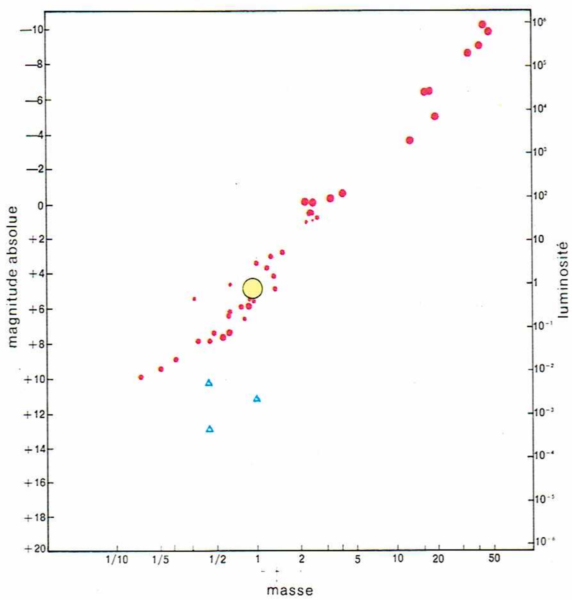

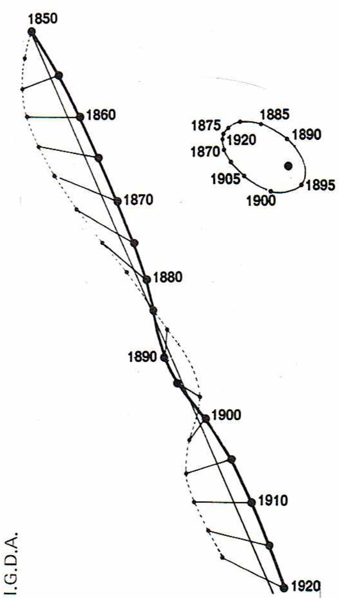

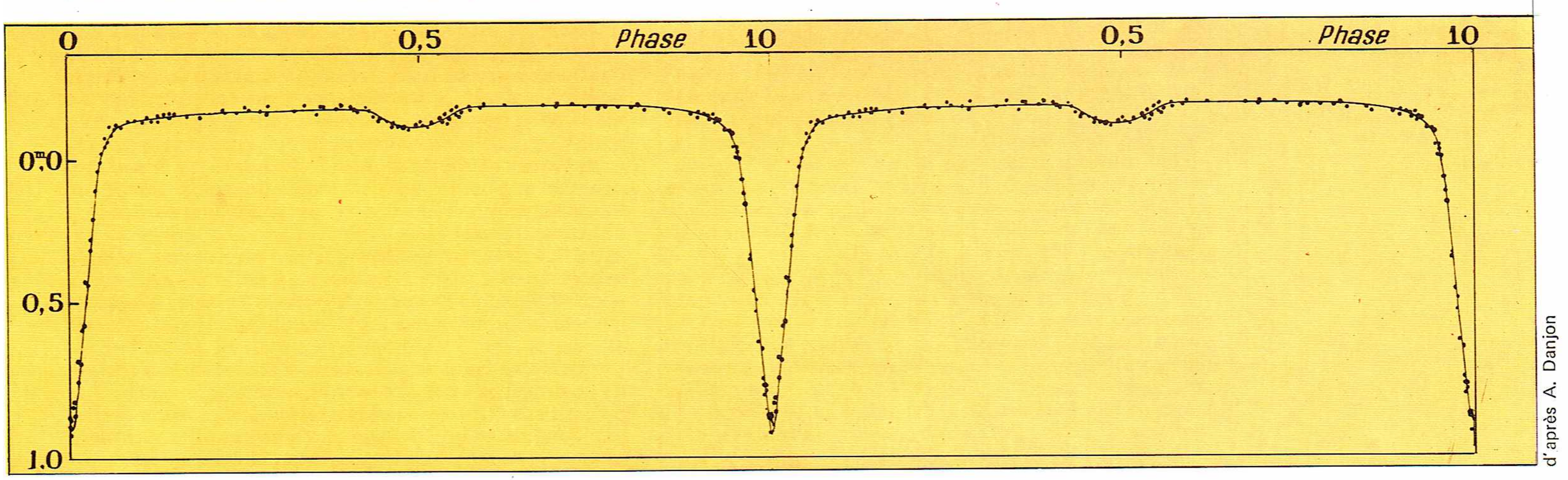

▲ En haut, à gauche, relation entre la masse et la luminosité des étoiles. La masse et la luminosité du Soleil ont été prises comme unités (le Soleil est représenté par le grand cercle jaune du centre). Seules quelques naines blanches n'obéissent pas à cette relation et sont représentées sur le diagramme par des triangles bleus.

En marge, mouvement de Sirius et de son compagnon ; ce dernier a un trajet sinueux assez accentué, le barycentre du système décrit une ligne droite. Le petit dessin du haut montre le mouvement relatif du compagnon autour de Sirius.

Ci-dessus, courbe de lumière d'Algol observée visuellement en 1928 par A. Danjon. La période est de 2,87 jours. La courbe de lumière est représentée à partir du minimum principal qui correspond à l'éclipse de l'étoile lumineuse par le compagnon moins lumineux (aspect du haut de la figure page 94, en haut).

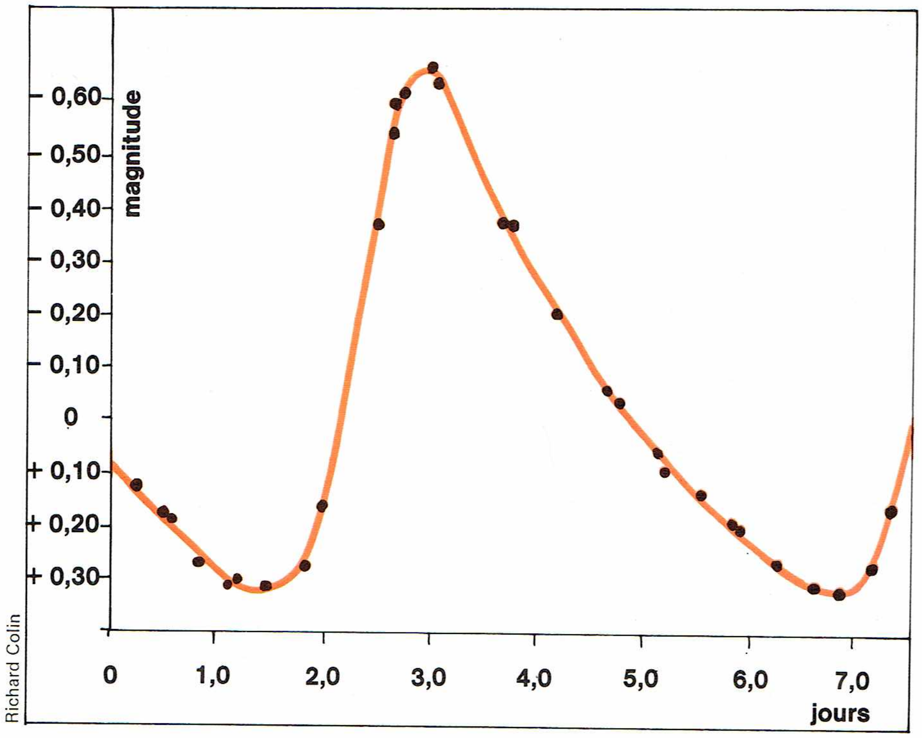

▲ *La courbe de lumière de δ Céphée est très bien déterminée, comme le montre le graphe ci-dessus (d'après P. Guthnick).*

▼ *Ce diagramme (A) montre simultanément la variation du type spectral indiqué par des lettres et le diamètre d'une Céphéide au cœur d'une période de pulsation. Les variations de diamètre indiquées en B sont schématiques; la variation réelle totale n'est que de l'ordre de 12 %. Au maximum d'éclat, la température est de l'ordre de 6 800 °K et de 5 800 °K au minimum.*

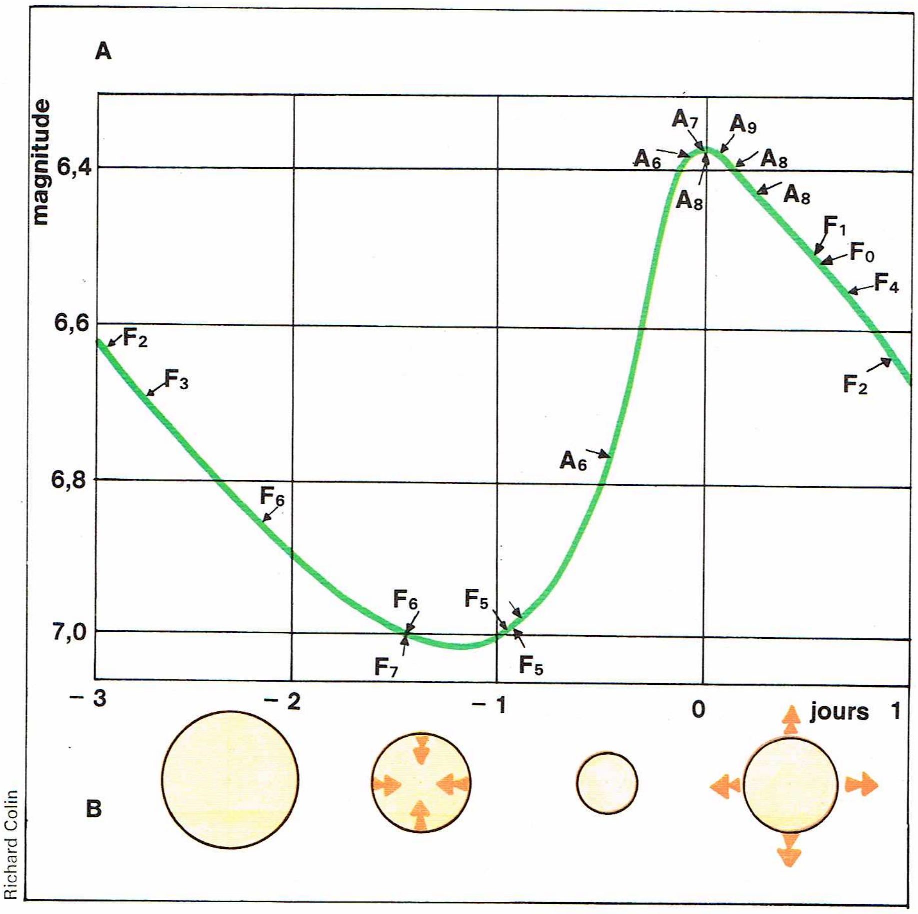

Les étoiles à éclipses déjà étudiées représentent 18,8 % des étoiles, les étoiles pulsantes 20,6, les étoiles à longue période 36,2, les étoiles variables irrégulières et diverses 10,0, les étoiles explosives 5,5, les étoiles temporaires (novae, supernovae) 1,2, les étoiles de type encore inconnu 7,7. Nous allons passer ces types en revue.

Les étoiles pulsantes ou Céphéides

L'étoile δ Céphée a donné son nom à ce type d'étoiles. Elle est connue comme étoile variable depuis la fin du XVIIIe siècle, et sa variation a été suivie depuis cette époque. A son maximum, elle a la magnitude 3,78. Elle baisse assez lentement pour atteindre son minimum de 4,63; elle est alors 2,2 fois moins brillante. Elle remonte ensuite assez rapidement à son maximum. La période de cette oscillation est de 5,366 306 jours. La variation est très régulière et se poursuit indéfiniment; la période a diminué seulement de 23 secondes depuis 1785. L'éclat maximal n'a pas changé. Au cours de la variation d'éclat, on constate une variation du type spectral, et donc de la température. L'étoile présente aussi des variations de vitesses radiales.

Une discussion précise de ces mesures montre que toutes ces variations s'expliquent si l'on admet que le diamètre de l'étoile varie d'environ 12 %. Pendant la dilatation, la partie qui tourne sa face vers l'observateur s'approche de nous et la vitesse radiale est négative, et c'est l'inverse pendant la contraction. La dilatation s'accompagne de refroidissement, de sorte que le maximum d'éclat a lieu avant le maximum de diamètre, lorsque la température est maximale. La théorie complète a été établie dès 1925 par Jeans, et elle représente bien les phénomènes; cependant, il subsiste encore quelques difficultés de détail.

δ Céphée a un type spectral variable entre F4 au maximum et G6 au minimum d'éclat. Sa distance est assez mal connue; on l'estime à 400 parsecs (ou 1 300 années de lumière), de sorte que l'éclat intrinsèque (— 3,5) correspond à une supergéante.

Nous connaissons plusieurs milliers d'étoiles analogues: leurs périodes sont comprises entre 2 et 80 jours, et leurs types spectraux entre F et K. Des étoiles à période inférieure à un jour existent aussi. Nous savons qu'elles font partie d'une classe un peu différente.

Relation période-luminosité

En 1912, une astronome américaine, Miss Leavitt, a étudié les étoiles variables de type Céphéide dans le Petit Nuage de Magellan. Cette nébuleuse est une galaxie analogue à notre Voie Lactée; beaucoup plus petite et relativement voisine, elle est située à 52 000 parsecs (ou 170 000 années de lumière) et contient un certain nombre de Céphéides. Miss Leavitt fit la constatation que les étoiles les plus brillantes avaient les plus longues périodes. La relation est très précise. C'est Shapley qui comprit qu'il s'agissait d'une relation entre la période et l'éclat intrinsèque de l'étoile. Tout comme la période d'un pendule augmente avec sa longueur, la période d'une étoile augmente avec son éclat. La théorie de Jeans a confirmé ces résultats.

Cette relation a une très grande importance, car, une fois étalonnée en éclats absolus, il suffit de mesurer la période d'une Céphéide pour obtenir son éclat absolu et, par comparaison avec l'éclat apparent, la distance de l'étoile.

Les Céphéides sont d'excellents indicateurs de distance; ce sont elles qui ont, en fait, permis de mesurer les distances dans l'Univers extragalactique. Indiquons toutefois que l'étalonnage en magnitudes absolues a été difficile et que, pendant une cinquantaine d'années, on s'est servi d'une fausse échelle de distance. Il a fallu, vers 1950, multiplier les anciennes distances par un facteur compris entre 2 et 3. Aujourd'hui, nous savons que les étoiles de période 100 jours ont un éclat de 120 000 Soleils (M = — 8); celles de 1,5 jour n'ont qu'un éclat de 500 Soleils (M = — 2).

En établissant cette échelle, on s'est aperçu que les étoiles ayant des périodes comprises entre quelques heures et un jour ont toutes un éclat de 100 Soleils. Ces étoiles sont un peu différentes des Céphéides normales. On les nomme des étoiles pulsantes d'amas globulaires, ou du type RR Lyrae, car cette étoile est de ce type. Elles sont très abondantes dans les amas globulaires. Nous savons que la vraie différence entre les deux types

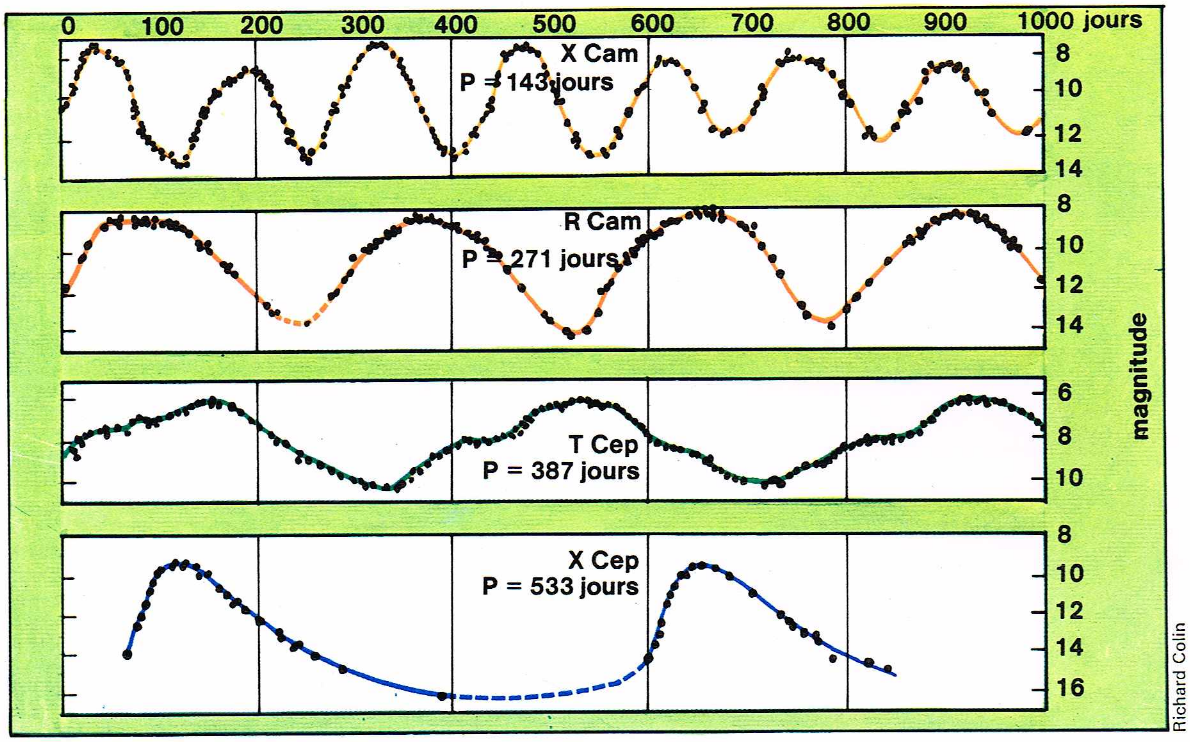

◀ ***Courbes de lumière de quatre étoiles variables à longues périodes, dont les périodes sont comprises entre 143 et 533 jours (d'après L. Campbell et L. Jacchia).***

est due au fait que les Céphéides sont des étoiles jeunes (on dit encore de population I), et les RR Lyrae des étoiles très âgées (ou de population II). Les Céphéides sont concentrées dans les bras de notre Galaxie, les RR Lyrae dans les amas vieux, au centre de la Galaxie et dans le halo qui entoure notre Voie Lactée. Des Céphéides classiques, de période 1 jour, seraient environ six fois plus brillantes que les RR Lyrae.

Il est possible de reconnaître les Céphéides dans un grand nombre de spirales extérieures, ce qui permet de déterminer la distance de ces nébuleuses.

Les étoiles variables à longues périodes

L'étoile type est *Omicron Ceti*, encore nommée *Mira Ceti*, c'est-à-dire la Merveilleuse de la Baleine. Sa variation est connue depuis la fin du XVIe siècle. C'est une étoile très rouge de classe M. Elle varie avec une période 331,6 jours. Sa variation n'est pas vraiment régulière. La période fluctue un peu autour de 330 jours, mais surtout les maximums et les minimums qui se suivent ne se ressemblent pas. Sa magnitude maximale peut être comprise entre 2,0 et 4,9; au minimum, la magnitude oscille entre 8,6 et 10,1. L'éclat entre les extrêmes varie dans le rapport de 1 à 1 800.

En même temps que le changement d'éclat, on observe des variations de type spectral et de vitesse radiale. Les bandes d'oxyde de titane, toujours visibles, sont très intenses au minimum. La variation d'éclat dans l'infrarouge est assez faible. On observe, pendant la croissance de l'éclat, de fortes raies d'émission de l'hydrogène et, plus faiblement, du fer et du silicium, dues à une enveloppe qui entoure l'étoile. Cette enveloppe a un diamètre qui varie avec le temps, de sorte que les étoiles du type Mira Ceti sont des étoiles pulsantes.

Mais le phénomène est beaucoup plus compliqué. On a la certitude que les raies d'émission sont produites dans une couche plus profonde que celle qui contient, à côté de nombreux atomes, des molécules, et notamment celles de TiO. L'analyse détaillée du spectre d'émission montre que certaines raies, notamment quelques raies de l'hydrogène, manquent. Cette absence peut s'expliquer de la façon suivante : si l'émission provient d'une couche profonde, elle doit traverser les couches externes qui absorbent la lumière. En présence d'atomes et de molécules, cette absorption est sélective : une raie qui coïncide exactement avec une raie d'absorption de TiO ou de calcium ionisé [Ca II] ne passera pas. C'est notamment le cas de la raie 3970 de l'hydrogène qui est absorbée par la très large raie 3968,5 du calcium ionisé qui s'étend sur une dizaine d'angströms.

Mira Ceti est une étoile supergéante environ 500 fois plus brillante que le Soleil; son rayon moyen est de 400 rayons solaires; c'est une des plus grandes étoiles que nous connaissions.

Mira Ceti a un petit compagnon qui présente lui-même un spectre un peu curieux.

Nous connaissons de très nombreuses étoiles analogues à Mira Ceti : au moins 5 000 étoiles du catalogue d'étoiles variables de Kukarkin sont de ce type. Leurs périodes sont comprises entre 50 et 600 jours, avec une fréquence maximale entre 200 et 400 jours (68 %).

Toutes les étoiles de type Mira Ceti sont des étoiles froides comme Mira elle-même, mais on peut les classer en deux groupes : les étoiles riches en oxygène qui montrent très fortement les bandes de TiO (type spectral M) ou ZrO, LaO, etc. (type spectral S), ainsi que des étoiles riches en carbone que nous avons déjà classées en étoiles carbonées C (ou R et N). Les étoiles à bandes d'oxyde sont les plus fréquentes. On compte 86 % d'étoiles M, 5 % d'étoiles S et 1 % d'étoiles K. Les 8 % qui restent sont des étoiles carbonées.

Il est intéressant de constater que les variations lumineuses de toutes ces étoiles sont assez voisines. Importante dans le domaine visible, la variation d'éclat est assez faible dans l'infrarouge; cela est dû au fait que les bandes carbonées sont comme celles de TiO, surtout développées dans le visible. La variation énergétique totale est faible, et la magnitude bolométrique, qui mesure le débit total d'énergie, est presque constante.

Aux étoiles de type Mira Ceti, il faut ajouter des étoiles de même type mais ayant des variations beaucoup moins régulières. Elles sont environ deux fois moins abondantes que les étoiles du type Mira Ceti. La cause de leur variation est identique, mais les pulsations sont encore moins régulières.

Les étoiles de type R CBr (R Coronae Borealis)

L'étoile R CBr est en général une étoile de magnitude 5,8. Elle reste à cet éclat pendant de longues périodes, puis décroît brusquement; son éclat peut alors être divisé par 4 000 (magnitude > 14,8). Elle remonte ensuite à son éclat original. La variation est sans aucun doute liée à une absorption de la lumière. On a pensé assez longtemps qu'il s'agissait de passage de nuages interstellaires devant l'étoile. Les études modernes ont montré que ces nuages doivent être éjectés par l'étoile. Au début de la diminution d'éclat, le spectre ne varie pas, mais ensuite apparaissent des raies d'émission, et notamment des raies identiques à certaines raies de la couronne solaire. Il est très probable que ces raies sont émises par la partie très

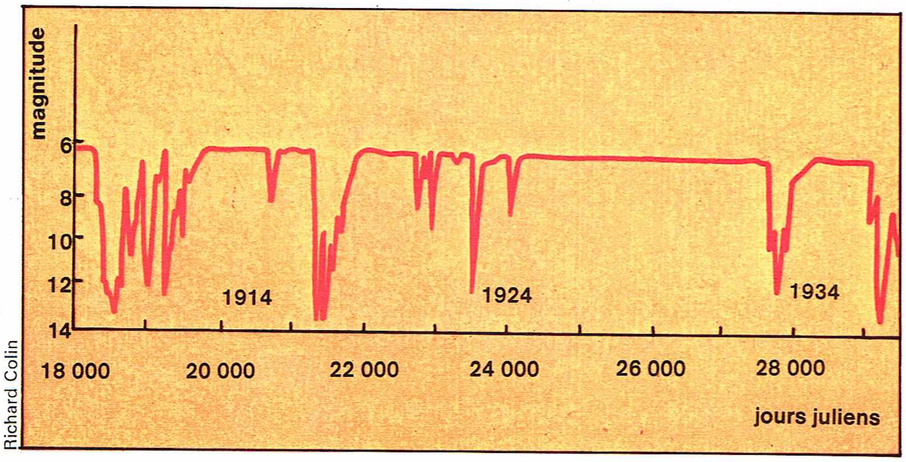

▲ *Courbe de lumière de R. Coronae Borealis. La magnitude de cette étoile est en général de 6, mais son éclat peut être divisé presque par 1 000 (magnitude 13). Elle reprend ensuite son éclat initial.*

extérieure de l'atmosphère stellaire, et elles deviennent visibles lorsque l'étoile centrale ne nous gêne pas, tout comme nous pouvons apercevoir les raies coronales du Soleil pendant une éclipse. Ensuite la matière absorbante, probablement des poussières, disparaît, soit qu'elle s'échappe dans l'espace, soit qu'elle retombe sur l'étoile, et tout rentre dans l'ordre; l'étoile a de nouveau son éclat normal et son spectre habituel.

Les étoiles à variations rapides

Un type important d'étoiles variables est constitué par les étoiles du type AE Aqr, étoiles de type G à K naines dont l'éclat peut augmenter en quelques minutes de 30 ou 40 %, pour redevenir ensuite normal.

Ces étoiles, nommées encore « Flare Stars » dans la littérature anglaise, sont extrêmement nombreuses. Les astronomes arméniens, en collaboration avec ceux du Mexique, ont trouvé des dizaines d'étoiles de ce type dans les Pléiades. Il s'agit probablement d'étoiles présentant des éruptions dans leur atmosphère, analogues aux éruptions solaires, mais beaucoup plus intenses.

Les étoiles variables liées à des nébulosités

Une petite nébuleuse, découverte par l'astronome Hubble et qui porte son nom, est très curieuse. Quelquefois cette nébuleuse est invisible; d'autres jours, elle a l'aspect d'un petit triangle avec une petite étoile à l'un des sommets. On ne sait pas exactement si nous observons tout simplement la lumière stellaire d'une étoile variable diffusée par une nébuleuse; celle-ci ne deviendrait visible que lorsque l'étoile est brillante; mais on peut aussi se demander si, au contraire, la nébulosité a une action importante sur le mécanisme des variations d'éclat.

▼ *La petite nébuleuse est associée à R Mon, étoile variable du type T Tauri. La nébulosité est également variable, et on a bien l'impression que c'est l'onde lumineuse qui se propage dans la nébuleuse.*

C.N.R.S. - Observatoire de Haute-Provence

Herbig et Haro ont découvert deux ou trois autres étoiles variables liées à des nébulosités; on se demande si, dans ces cas, on n'a pas affaire à des étoiles en formation.

Un autre groupe d'étoiles variables associées à des nébulosités est formé par les étoiles T Tauri, d'après le nom de la première découverte qui se trouve dans les Pléiades, au milieu des nébulosités qui existent dans cet amas. Depuis, on a découvert des dizaines d'étoiles de ce type, à la fois dans la nébulosité des Pléiades et dans la nébuleuse d'Orion. Ces étoiles ont des spectres de type G, K et quelquefois M; on peut, grâce à la localisation de la nébuleuse, connaître leur distance et donc leur éclat intrinsèque. On constate que ces étoiles sont des étoiles naines de la série principale. Mais leurs spectres présentent des caractéristiques inhabituelles pour des étoiles de ce type. Les raies K et H du calcium et d'autres raies sont en émission. L'éclat et l'intensité des raies d'émission changent de façon permanente. Ces étoiles sont surtout abondantes dans les nébuleuses gazeuses, et, d'autre part, la plupart des autres étoiles liées à ces nébulosités sont aussi variables. Il n'y a pas de doute possible, la variation d'éclat est liée à l'interaction entre ces étoiles et la nébulosité. Ces étoiles absorbent probablement la matière interstellaire de façon irrégulière.

Autres étoiles variables

Il existe de très nombreuses autres étoiles variables, dont certaines posent des problèmes très difficiles à résoudre. Certaines étoiles comportent simultanément le spectre d'une étoile froide à oxyde de titane ou à molécules carbonées et le spectre d'une étoile chaude. On pense, mais on n'en est pas sûr, qu'il s'agit de l'association de deux étoiles et qu'on assiste à des échanges de matière entre elles, d'où le nom d'*étoiles symbiotiques* qu'on leur donne quelquefois.

Cette interaction entre les étoiles et l'espace interstellaire, dans un sens ou dans l'autre, soit par éruption ou explosion, soit par absorption, est toujours la cause de variations d'éclat. Il en est de même de l'échange de matière entre deux étoiles; nous en avons déjà vu des exemples en étudiant les étoiles doubles. Nous reviendrons sur cette question en étudiant les sources de rayons X.

Il n'est pas possible d'étudier tous ces astres, mais nous consacrons deux chapitres importants aux étoiles explosives : *novae* et *supernovae.*

Les étoiles temporaires

L'apparition soudaine sur le firmament d'une étoile dont l'éclat peut atteindre et même dépasser celui des plus brillantes est un événement qui a toujours frappé l'imagination des hommes. L'observation d'un astre de ce type par Tycho Brahé en 1572 et par Kepler en 1610 a fait l'objet de nombreuses publications et notamment du traité *De nova stella* qui a donné le nom à ces astres. Nous savons aujourd'hui que l'on peut classer ces étoiles en deux catégories : les *novae proprement dites* et les *supernovae*, les étoiles de Tycho Brahé et de Kepler faisant d'ailleurs partie de cette seconde classe.

Les novae

Relatons l'apparition d'une nova classique comme celle qui apparut en 1918 dans la constellation de l'Aigle et qui est nommée Nova Aql 1918. Elle fut découverte le 8 juin 1918 aux Indes par un amateur, G. N. Bower. Elle était alors de première grandeur. Il signala son observation, et, quelques heures plus tard, son éclat avait encore augmenté : elle était alors de magnitude — 1,1 et presque aussi brillante que Sirius. Cette étoile n'était pas sortie du néant, car il fut possible de la retrouver sur de nombreux clichés de la magnifique collection de photographies de l'observatoire Harvard (États-Unis). Sur 30 clichés, pris entre 1888 et 1918, c'était une étoile un peu variable entre les magnitudes 10 et 11. Un cliché du 5 juin 1918 la montre encore de magnitude 10,5, mais, le 7 juin à 19 heures, elle avait la magnitude 6,6; en deux jours, son éclat avait été multiplié par 40. Entre la valeur normale 10,5 et le maximum — 1,1 l'augmentation d'éclat était de 50 000. Il s'agissait donc d'une vraie explosion. Après le maximum, la magnitude a diminué de 0,27 magnitude par jour de façon assez uniforme jusqu'au 24 juin, où l'étoile atteignit la magnitude 3. Puis l'allure du phénomène a changé, on a assisté à des oscillations d'éclat, et l'étoile atteignit un maximum secondaire le

2 juillet; jusqu'au 10 septembre, on compta huit oscillations d'amplitude de plus en plus faibles. L'étoile fut alors tout juste visible à l'œil nu. A partir de ce moment, l'éclat a diminué progressivement. Il atteignait la magnitude 5,6 le 19 décembre 1918, la magnitude 10 à la fin de 1921 ; en 1926, l'étoile avait repris apparemment son stade précédant l'explosion : elle était de magnitude 10,8. Depuis cette époque, la « postnova » oscille de nouveau entre les magnitudes 10,5 et 11 comme le faisait la « praenova ».

Naturellement, on entreprit une étude spectrale de cette étoile comme on l'avait déjà fait pour un certain nombre d'autres novae. On trouva qu'au moment de l'explosion, le spectre des novae est celui d'une étoile supergéante présentant les raies d'absorption de ce type d'étoiles. Mais les raies sont très fortement déplacées vers le violet. Tout se passe comme si, au moment de l'explosion, l'atmosphère de l'étoile était expulsée avec une vitesse de l'ordre de 1 000 km/s. Telle est bien l'explication du phénomène de nova. L'atmosphère expulsée s'étend autour de l'étoile, alors que l'étoile revient lentement à son état initial. La lumière émise par l'étoile traverse la nébulosité en expansion. Le spectre montre ainsi les raies d'absorption déplacées vers le violet. Le spectre de la nébulosité elle-même se manifeste par de fortes raies d'émission de l'hydrogène et d'atomes métalliques ionisés, etc. Les oscillations d'éclat correspondent à des oscillations du plasma. Au fur et à mesure de son expansion, la matière émise devient de moins en moins dense et les conditions deviennent celles qui existent dans une nébuleuse gazeuse : on voit alors apparaître les spectres caractéristiques de ces nébuleuses.

Il était important de rechercher la nébulosité elle-même. Cette recherche fut couronnée de succès pour la Nova Per 1901, non sans d'ailleurs quelques péripéties. La nébulosité, annoncée dès août 1901, était due à des réflexions parasites sur des plaques dont l'antihalo était défectueux. Cependant, cette fausse observation alerta les astronomes du monde entier, et une vraie nébulosité fut observée en 1902 ; elle ne correspondait pas encore à la matière éjectée mais à la diffusion de l'onde lumineuse par la matière interstellaire. La vraie nébulosité ne fut découverte qu'en 1916 ; elle mesurait 5'' en 1919. Le taux d'expansion angulaire est actuellement estimé à 0,4'' par an. On connaissait par ailleurs le taux d'expansion linéaire, qui est de 1 200 km/s, soit 38 milliards de kilomètres ou 252 unités astronomiques par an. Il en résulte que la distance de l'étoile est de 630 parsecs.

Cela permet de déterminer son éclat intrinsèque qui était de 200 000 Soleils (magnitude absolue — 8,5), et, avant et après l'explosion, l'étoile avait sensiblement l'éclat du Soleil. Ces valeurs permettent de calculer l'énergie émise pendant l'explosion ; elle correspond à environ 1/10 000 de l'énergie intrinsèque de l'étoile. On montre que l'enveloppe expulsée a aussi une masse de l'ordre de 1/10 000 de la masse de l'étoile. L'explosion d'une nova n'est donc pas, à l'échelle de l'étoile, un phénomène cataclysmique. On a beaucoup de raisons de penser que le phénomène de nova peut être récurrent : la même étoile peut exploser plusieurs fois ; cela a été certainement le cas pour la Nova CrB qui a explosé en 1866 et en 1946.

RS Oph a explosé de nombreuses fois. De plus, nous connaissons des étoiles subissant de petites explosions

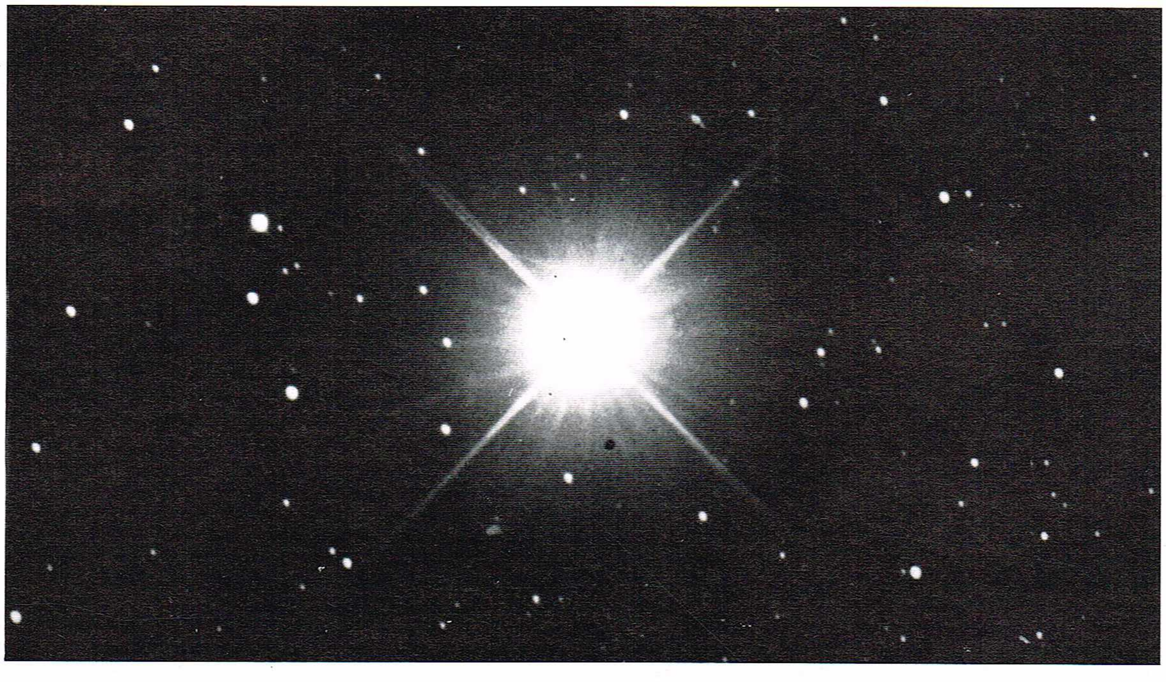

C.N.R.S. - Observatoire de Haute-Provence

C.N.R.S. - Observatoire de Haute-Provence

◀ *La* Nova Herculis 1934, *photographiée avec un télescope de 80 cm de diamètre le 31 janvier 1935 (en haut) près de son maximum (40 jours après) et le 22 août 1935 (en bas) pendant le déclin. La première photographie de l'étoile est très surexposée et les rayons de feu qui s'en échappent sont dus à la diffraction par le support du miroir secondaire, et par des poussières.*

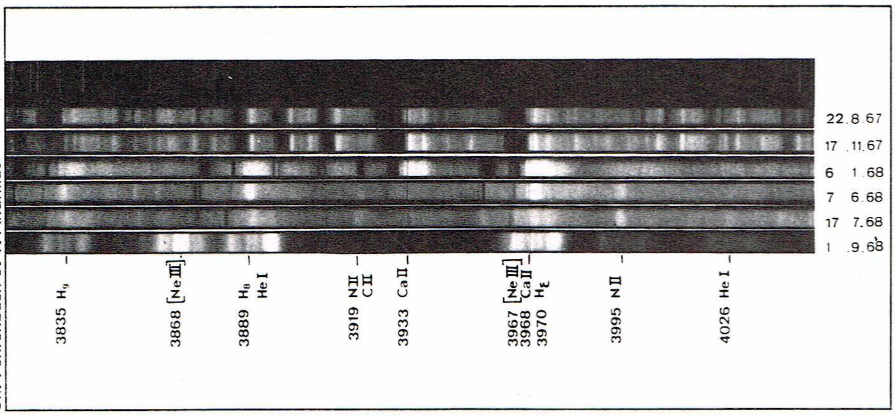

C.N.R.S. - Observatoire de Haute-Provence - Ch. Fehrenbach et Y. Andrillat

▲ *Clichés à moyenne dispersion montrant très nettement l'évolution du spectre de* Nova Delphini 1967. *Les spectres du haut montrent les fortes raies d'absorption (en noir) déplacées vers le violet qui correspondent à l'enveloppe éjectée par l'explosion. Les spectres du bas correspondent au stade nébulaire. C'est en fait le spectre de la nébulosité qui est autour de l'étoile.*
▼ *On a reporté, sur cette photographie de la partie centrale de la grande nébuleuse d'Andromède, les novae observées dans cette galaxie. Elles sont nettement concentrées vers le centre de la nébuleuse.*

Ch. Fehrenbach

que nous nommons des *novoïdes,* comme SS Cyg qui explose plusieurs fois par an.

La fréquence des explosions des novae est relativement grande : on estime que, dans notre Galaxie, 50 explosions ont lieu tous les ans. On ne les trouve pas toutes à cause de leur situation derrière des nuages obscurs. Comme à leur maximum les novae sont très brillantes (elles luisent comme 600 000 Soleils), il est possible de les détecter dans des galaxies lointaines. Dans celle d'Andromède, on peut en trouver une vingtaine par an : elles sont alors de quinzième grandeur, ce qui correspond à une distance de l'ordre de 600 000 parsecs pour cette nébuleuse.

Tout comme les Céphéides, les novae permettent de déterminer les distances des nébuleuses extragalactiques.

Le mécanisme des explosions n'est pas connu dans le détail mais on pense qu'il correspond à une accélération temporaire des réactions nucléaires qui ont lieu dans toutes les étoiles comme dans notre Soleil. La pile atomique stellaire explose et envoie une onde de choc qui, lorsqu'elle arrive à la surface de l'étoile, expulse l'atmosphère stellaire, et nous pouvons apercevoir pendant un certain temps des parties plus chaudes de l'étoile.

Les supernovae

En 1885, apparut une étoile nouvelle dans la nébuleuse d'Andromède. On pensait qu'elle avait à son maximum la magnitude 7,2. Avec la valeur actuellement admise de 670 000 parsecs, on trouve que cet astre avait à son maximum une magnitude de — 16,9, ce qui correspond à 1 000 ou 2 000 fois l'éclat d'une nova classique ou à celui de 400 millions de Soleils. A l'époque de la découverte de cette étoile, nommée S And, on n'avait pas d'idées précises, et l'assimilation ultérieure de S And avec une nova classique donnait à la nébuleuse d'Andromède une distance inadmissible de 15 000 parsecs. On ne put résoudre ce problème que vers 1925 en réalisant qu'il s'agissait d'une étoile plus lumineuse.

Depuis on a observé un certain nombre d'astres de ce type, que l'on nomme des supernovae. On a établi leurs courbes de lumière. On constate qu'on peut les classer en deux types : les plus brillantes, dites de *type I* (S Andromède est de ce type), et celles de *type II,* environ 50 fois moins brillantes. Les courbes de lumière, surtout celles du type I, sont beaucoup plus régulières que celles des novae. L'explosion et le déclin sont beaucoup moins rapides.

Les spectres de ces supernovae sont difficiles à interpréter; on pense que l'expulsion de la matière a lieu avec des vitesses de 10 000 à 50 000 km/s, et de ce fait, les spectres de raies ne sont plus reconnaissables.

Le phénomène d'explosion de ces astres est cataclysmique ; ainsi une supernova dans une petite nébuleuse, IC 4182, était nettement plus brillante que toute cette galaxie, et on a estimé qu'elle rayonnait comme 4 milliards de Soleils. On pense aujourd'hui que l'on a assisté à l'explosion totale de l'étoile.

F. Zwicky entreprit, en 1937, une recherche systématique des supernovae, en photographiant avec le télescope de Schmidt des champs de nébuleuses. Il en découvrit plus de 50, et il calcula que la fréquence est de l'ordre de 1 supernova par galaxie tous les 350 ans; cette fréquence est donc de 10 000 à 20 000 fois plus faible que celle des novae, mais elle est suffisante pour que l'on puisse s'attendre à l'apparition de supernovae galactiques.

En fait, nous connaissons trois apparitions de ce type. Les deux étoiles nouvelles de Tycho Brahé et de Kepler sont des supernovae. L'étoile nouvelle observée par Tycho Brahé dans la constellation de Cassiopée a été décrite dans l'ouvrage *De nova stella* (1573), avec des indications si précises qu'il a été possible de les traduire en magnitudes modernes. W. Baade s'est ainsi aperçu que la courbe de lumière était identique à celle d'une supernova de type I. Il en est de même de l'étoile de Kepler.

Lorsque les astronomes ont disposé, au cours de ce siècle, de moyens puissants, ils ont recherché les nébulosités éjectées par l'explosion de ces supernovae. La recherche a été couronnée de succès pour la Nova de Kepler, bien que la nébulosité soit très faible.

Mais une autre supernova est encore plus célèbre. Son apparition a été observée le 4 juillet 1054 de notre ère; elle a été signalée par le mathématicien impérial

C.N.R.S. et I.A.P. Liège

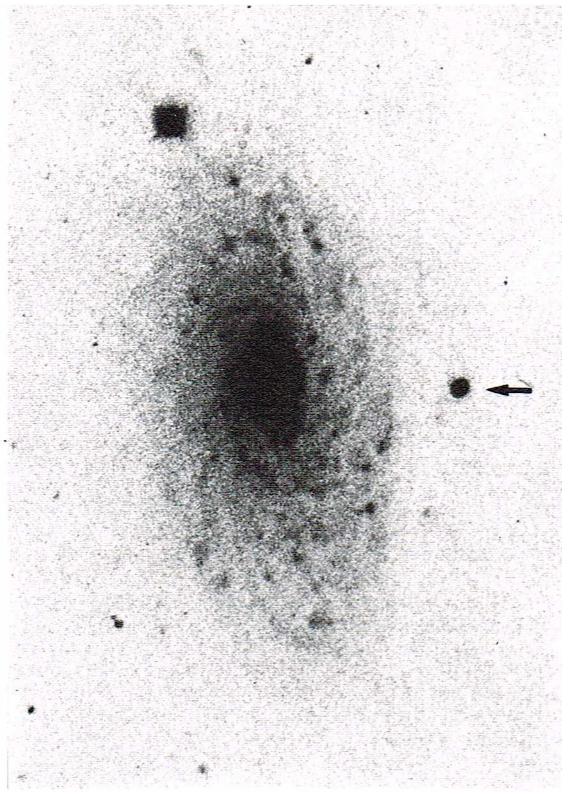

C.N.R.S. et I.A.P. Liège

◀ *A gauche, la* **nébuleuse NGC 5055** *dans les Chiens de Chasse : photographie reproduite de l'atlas des nébuleuses de Hubble. A droite, la même* **NGC 5055** *photographiée avec le grand télescope de Schmidt de l'Observatoire de Haute-Provence (C.N.R.S. - université de Liège), le 25 mai 1971 : la position de la supernova est indiquée par la flèche (elle était inexistante sur la photo de gauche).*

chinois, Yang Wei-lek, qui donnait sa position dans la constellation du Taureau. Or, il existe dans cette constellation une petite nébuleuse de forme bizarre, nommée nébuleuse du Crabe. Cette nébuleuse est d'un très grand intérêt à de nombreux points de vue ; c'est en effet une source radioélectrique intense, et sa lumière est polarisée. Sa partie centrale rayonne par les mêmes mécanismes que les électrons des grands synchrotrons. En comparant deux clichés pris à quelques dizaines d'années d'intervalle, W. Baade montra que cette nébuleuse est bien le résidu de l'explosion de la supernova de 1054. Il montra aussi qu'au taux de l'expansion actuelle, la nébuleuse a dû se former au XI[e] siècle de notre ère, ce qui correspond bien à l'observation du mathématicien chinois.

Quel est le mécanisme de l'explosion ? Nous sommes amenés à penser qu'il s'agit d'un phénomène réellement cataclysmique. L'étoile est vraiment détruite. Zwicky indiqua qu'au cours de cette explosion, il devait rester une étoile résiduelle très dense, du type naine blanche, ou encore plus dense. Baade proposa dans le cas de la nébuleuse du Crabe deux petites étoiles possibles comme le résidu de l'explosion. La question en était là quand un phénomène tout à fait nouveau fut découvert.

Les pulsars : des étoiles à neutrons

En 1967, les radioastronomes de Cambridge, dirigés par A. Hewish, ont découvert des astres émettant à des intervalles de l'ordre de la seconde des éclats dans le domaine des ondes hertziennes.

Une comparaison très simple est celle qu'on peut faire avec un phare de navigation maritime, avec cependant deux différences : l'impulsion est observée dans le domaine des ondes radioélectriques, et les périodes de ces « phares » sont voisines de la seconde. Celle du premier astre découvert était de 1,337 3 seconde. Cette découverte est d'ailleurs un peu due au hasard.

Nous savons que les étoiles scintillent : ce phénomène est provoqué par la turbulence des couches d'air de notre atmosphère. Au cours de leur trajet dans l'espace interstellaire, les rayons lumineux ne subissent pas de fluctuation, car l'espace est suffisamment vide pour qu'il n'y ait, dans le domaine visible, aucune interaction entre la matière et la lumière. Les théories électromagnétiques montrent que, pour les ondes hertziennes, les atomes résiduels sont assez nombreux pour qu'il y ait interaction ; si donc ces atomes sont animés de mouvements turbulents, on doit s'attendre à des fluctuations d'intensité pour les astres émettant des radiations hertziennes. Pour rechercher cette scintillation, A. Hewish enregistra le rayonnement de quelques radioétoiles. Il choisit pour cela, entre autres, une petite source située dans la constellation de Vulpecula. A son grand étonnement, il constata que cette source avait en général un rayonnement très faible mais que, exactement chaque 1,337 3 seconde, elle émettait un éclair d'assez grande énergie durant 4/100 de seconde.

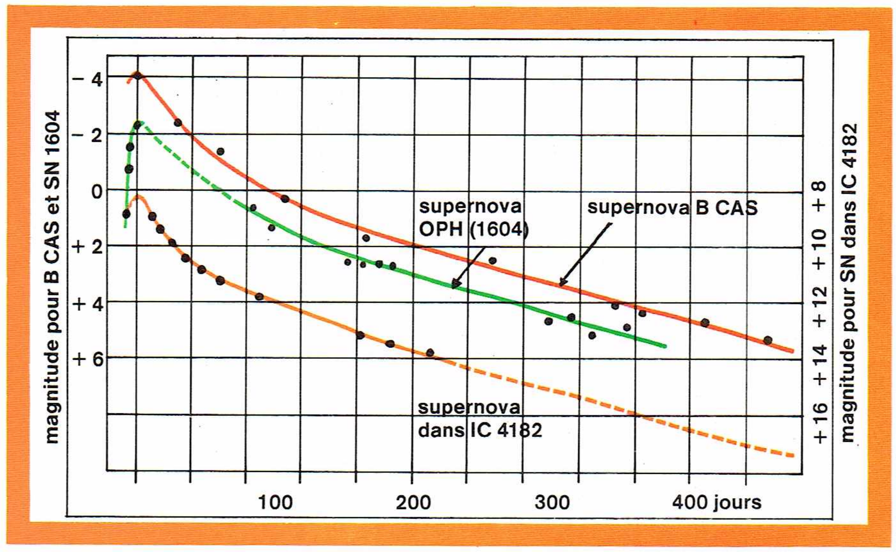

Richard Colin

▲ *Courbe de lumière de la* **supernova de type I** *dans la petite nébuleuse IC 4182 et dessins des courbes de lumière des* **supernovae de Kepler** *(OPH 1604) et de* **Tycho Brahé** *(B Cas en 1572) reconstitués par W. Baade d'après leurs cahiers d'observations.*

▼ *Impulsions hertziennes du* **pulsar CP 0808** *avec deux échelles de temps ; la période est 1,292 23 s (d'après Radio Astronomical Observatory, University of Cambridge).*

Ce résultat était si surprenant qu'A. Hewish commença par douter de ses observations. Il fit de nombreux contrôles et essais et ne publia ses résultats que trois mois après sa découverte.

Pourquoi ces doutes ? Une raison essentielle était la rapidité de la pulsation. Les astronomes sont habitués à des périodes de l'ordre de l'année et ne s'étonnent pas du milliard d'années. Des phénomènes ayant une période de l'ordre de la seconde ne peuvent être associés qu'à des astres à la fois très petits et très massifs, difficiles à imaginer. La découverte d'A. Hewish fut confirmée, dès sa publication, par d'autres astronomes qui découvrirent de nouveaux astres de ce type, auxquels on donna le nom de pulsars (contraction de pulsating stars). Actuellement, on en connaît une cinquantaine dont les périodes sont comprises entre 0,033 et 3,7 secondes.

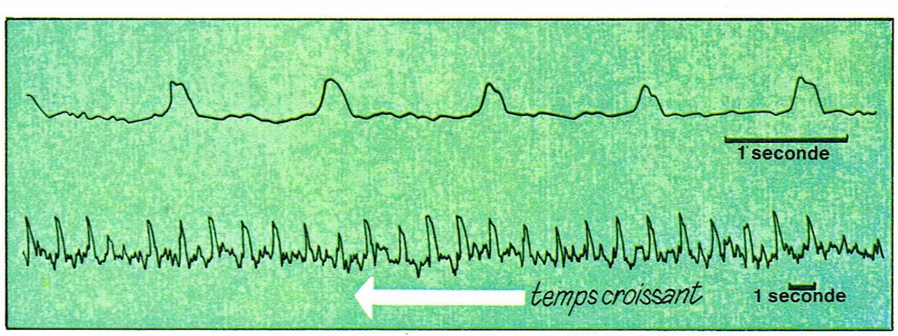

Richard Colin

Quelle est la nature de ces pulsars ? Ces sources sont-elles proches ou lointaines ? Émettent-elles dans le domaine des ondes lumineuses ?

L'observation dans le domaine des ondes hertziennes permet une évaluation très grossière de leurs distances. La vitesse de propagation des ondes varie, d'ailleurs extrêmement peu, avec la fréquence des ondes hertziennes. On estime qu'il y a environ 1 électron par centimètre cube dans l'espace entre les étoiles ; les théories de la physique (théorie de Lorentz) permettent de calculer la vitesse de propagation dans ce plasma. L'observation montra effectivement un décalage des impulsions dans le temps avec la fréquence des ondes, et on a ainsi obtenu des estimations de distances qui placent les pulsars à des milliers d'années de lumière. Ils sont donc situés en dehors du système solaire, mais ils font partie de notre univers local, la Galaxie. D'autres études, notamment la reconnaissance de la raie de 21 cm de l'hydrogène en absorption, confirment ces résultats.

Les observations ultérieures montrèrent aussi que les phénomènes n'avaient pas la simplicité idéale qu'on leur avait attribuée. La nature des éclats pouvait varier au cours du temps, soit d'un éclair à l'autre, soit petit à petit ; entre les éclats principaux, on observe aussi des éclats secondaires. On constata également que la période de tous ces pulsars, que l'on regardait d'abord comme des étalons de temps, changeait, à vrai dire lentement, mais de façon nettement mesurable grâce aux techniques modernes des pendules atomiques. A cette variation lente se superposent de temps en temps de petits changements brusques de période.

Les théoriciens se passionnèrent pour ce problème et proposèrent d'abord d'identifier ces étoiles aux naines blanches. Mais il apparut rapidement que ces étoiles n'étaient pas assez petites ni assez denses pour tourner avec des périodes de quelques secondes. On pensa alors à des astres encore plus petits et plus massifs, et l'on se rappela que le physicien soviétique Landau avait prévu l'existence d'étoiles beaucoup plus condensées et formées seulement de neutrons, et que Zwicky avait proposé que ces astres fussent considérés comme les ultimes résidus des explosions des supernovae.

Naturellement, l'identification d'un des pulsars avec une étoile observable dans le domaine de l'optique constituerait un pas essentiel dans notre connaissance. De nombreux astronomes s'acharnèrent donc sur ce problème, on annonça même des résultats positifs, mais ils se révélèrent faux. Ces observations sont très difficiles parce que ni l'œil ni la plaque photographique ne permettent l'enregistrement de phénomènes si rapidement changeants. Des techniques photoélectriques très avancées et l'emploi d'ordinateurs permettent seuls d'aborder ce problème. Il fut résolu dans des conditions presque inespérées lorsqu'on s'aperçut qu'un pulsar, d'ailleurs de très courte période (de l'ordre de 1/30 de seconde), était situé dans la constellation du Taureau, au beau milieu de la nébuleuse du Crabe qui est le résidu de l'explosion de la supernova des chroniques chinoises.

En 1969, les astronomes de l'observatoire Steward, à Tucson (États-Unis), identifièrent optiquement le pulsar en appliquant une technique très ingénieuse de télévision. Ils imaginèrent de n'observer la nébuleuse que pendant de très courts intervalles de temps espacés exactement de 0,033 seconde, période du pulsar. En faisant cette observation à diverses phases, ils purent annoncer ce résultat magnifique : l'une des étoiles que Baade avait proposées comme résidu de l'explosion de 1054 émettait des éclats lumineux de même période que les éclats hertziens. Cela précisa un certain nombre de propriétés de ce pulsar : sa distance de 6 000 années de lumière était bien établie, et l'identification avec une étoile à neutrons était pratiquement sûre.

A côté des protons qui sont les noyaux des atomes d'hydrogène, et qui portent une charge positive, il existe des particules analogues mais non chargées, les neutrons. A cause de cette absence de charge, les neutrons ne se repoussent pas, et les théoriciens ont imaginé qu'il pouvait exister de gros agglomérats de neutrons extrêmement denses : les *étoiles à neutrons*.

La description de la nébuleuse du Crabe doit être complétée. En effet, l'observation en satellite a montré que cette nébuleuse est une source intense de radiations dans le domaine des rayons X. Plus récemment, on a pu montrer que ce rayonnement était aussi partiellement modulé avec la périodicité de 0,033 seconde.

En faisant la somme des connaissances actuellement acquises, les astronomes ont pu proposer des modèles du pulsar et de la supernova dont elle est le résidu. Certes, ces modèles sont encore imparfaits, il est même possible qu'ils soient faux sur certains points, mais nous pouvons néanmoins en décrire un.

On sait qu'à l'intérieur des étoiles les températures sont de l'ordre de 20 millions de degrés et que leur énergie est produite par des réactions nucléaires dont le processus le plus important est la réaction de transformation de l'hydrogène en hélium. Lorsque tout l'hydrogène est brûlé, cette réaction cesse.

Si l'étoile est petite, c'est-à-dire si elle a une masse inférieure à 2 fois la masse solaire, elle se condense en une naine blanche, petite étoile 10 000 fois moins lumineuse que le Soleil, mais très dense. Ceci sera probablement le sort ultime du Soleil.

Par contre, si l'étoile est plus grande, le phénomène de condensation ne peut pas avoir lieu, car la naine blanche formée aurait une masse trop grande pour être stable et, par conséquent, exploserait. Une grande partie de la masse de l'étoile est expulsée pour former une enveloppe qui s'étend avec des vitesses de quelques dizaines de milliers de kilomètres par seconde. Nous observons ces résidus sous la forme de nébulosités. La nébuleuse du Crabe, la belle Dentelle du Cygne et une nébuleuse dans Vela sont des résidus de ces explosions de supernovae. En même temps, une partie de l'étoile se condense en une étoile extrêmement petite qui n'occupe plus qu'un volume ayant une dizaine de kilomètres de diamètre. Il s'agit là d'un phénomène cataclysmique qui se manifeste par une très forte émission de rayonnement. Au moment de l'explosion, la supernova ainsi formée rayonne comme 10 milliards de Soleils.

Ces explosions, ainsi que l'étoile à neutrons formée, doivent obéir aux lois générales de la physique, mais la physique classique est une première approximation qui ne s'applique pas à la matière très condensée et aux champs magnétiques intenses. Seules les théories modernes de la Relativité peuvent décrire la matière sous cette forme. Ces lois sont assez compliquées à formuler, et nous ne pouvons indiquer ici que certains résultats.

Pendant la condensation, la rotation de l'étoile s'accélère considérablement : il y a conservation du moment cinétique. Cet effet est bien connu : lorsqu'un patineur veut accélérer sa rotation, il rapproche les bras de son corps, et immédiatement sa giration augmente, et la période de rotation diminue. Dans le cas de l'étoile à neutrons de la nébuleuse du Crabe, pour un diamètre de 10 km, la période de rotation résiduelle serait de 1 millième de seconde. En fait, la période résiduelle est de 3 centièmes de seconde, car une partie du moment de rotation est dissipée en même temps que la matière qui explose.

Le champ magnétique de l'étoile avant l'explosion doit être comparable au champ magnétique du Soleil, c'est-à-dire de l'ordre de 1 gauss. Les physiciens ont montré que, pendant cette contraction, le champ magnétique est aussi condensé. Ce phénomène est maintenant bien connu, et on dit couramment que, dans ces conditions, le champ magnétique est « gelé » dans la matière. Dans le cas de l'étoile à neutrons, le champ magnétique serait de l'ordre de 1 000 milliards de gauss. La masse volumique de la matière serait $5 \cdot 10^{14}$ g/cm^3, ou 500 millions de tonnes par centimètre cube. Cette matière est encore plus étrange que la matière dégénérée des naines blanches. Ces étoiles à neutrons sont des sortes de gros noyaux atomiques. Elles sont stables parce que les particules condensées ne sont plus électrisées mais neutres.

Les théoriciens se sont évidemment beaucoup occupés des conditions physiques du « monstre » que constitue, du point de vue de la physique classique, l'étoile à neutrons. Le champ magnétique « gelé » est entraîné dans la rotation de l'étoile, et nous avons affaire à une sorte de très grosse dynamo. Si, pour une raison quelconque, de la matière s'échappe de l'étoile, elle va être accélérée par cette machine électrique et repoussée de l'étoile centrale par le champ magnétique avec des vitesses approchant celle de la lumière. Ces électrons relativistes se répandent dans l'espace, rejoignent et réagissent sur la matière éjectée des milliers d'années plus tôt lors de

l'explosion de la nova. On peut ainsi aujourd'hui expliquer le rayonnement de la partie centrale de la nébuleuse et des filaments de la nébuleuse du Crabe.

Jusqu'à ces dernières années, on ne comprenait pas comment une étoile classique pouvait engendrer ces phénomènes. Le rayonnement émis dans ces conditions n'est pas un rayonnement thermique ordinaire, mais il est analogue à celui qu'on observe dans les synchrotrons, d'où l'appellation de *rayonnement synchrotron*. Un électron relativiste dont la vitesse est voisine de celle de la lumière, placé dans un champ magnétique, s'enroule autour des lignes de force de ce champ et émet des radiations dans tous les domaines spectraux depuis les rayons γ jusqu'aux ondes hertziennes. C'est un rayonnement de ce genre que l'on a observé dans la partie centrale de la nébuleuse du Crabe, et ce rayonnement est polarisé, comme l'indique la théorie. La partie pulsée du rayonnement n'est qu'une petite partie de l'énergie dissipée de façon permanente, et on l'évalue à 1/1 000 de l'énergie totale. Naturellement, les lois de la conservation de l'énergie s'appliquent, et la perte d'énergie du pulsar doit se traduire par un ralentissement de son mouvement et, par conséquent, par l'augmentation de sa période. On pense qu'à sa naissance, le pulsar du Crabe avait une période de l'ordre du centième de seconde. Actuellement, la valeur en est 0,033 seconde, et le taux de croissance de cette période est de 1,3 centième en 1 000 ans. Dans 100 000 ans, sa période pourrait dépasser la seconde. Ce résultat est intéressant, car la supernova du Crabe est une des plus récentes de notre Galaxie, et cela explique que sa période soit aussi la plus courte.

Il est évident que de nombreux détails doivent être précisés ou mieux définis. Ainsi on ne comprend pas pourquoi nous n'observons pas de pulsars avec des périodes supérieures à 3,7 secondes.

L'explication des éclats eux-mêmes n'est pas facile. On a proposé le modèle suivant : la lumière et les radiations magnétiques s'échappent plus facilement dans la direction des pôles magnétiques. Si l'axe de rotation et l'axe magnétique ne sont pas confondus, comme c'est aussi le cas pour la Terre, l'étoile est une sorte de phare dont le faisceau balaye le ciel avec la période du pulsar, et ses éclats ne sont observables que si l'observateur est dans la zone balayée. C'est le cas de l'observateur terrestre pour la nébuleuse du Crabe. En fait, nous observons aussi une impulsion secondaire qui est probablement due au deuxième pôle. Quelquefois, on propose de compliquer ce modèle simple de dipôle magnétique par l'existence de taches sur le pulsar. Un pulsar n'est donc observable que dans une partie de l'espace. En se fondant sur le modèle du Crabe, on a montré que seulement un pulsar sur trente est observable depuis la Terre. Les autres, tout en existant, ne nous éclairent pas. On peut ainsi expliquer l'absence de pulsar dans certains résidus de supernovae.

On comprend mal les petits sauts brusques de période qui semblent certains. Des théoriciens ont proposé l'explication suivante : les étoiles à neutrons sont entourées d'une croûte comparable à la croûte terrestre. Cette couche est très mince mais très dense et très rigide. Lorsque la période augmente, elle subit des réarrangements qui se traduisent par des sortes de « tremblements d'étoile ». Le moment d'inertie de l'étoile se modifie aussi, et cela entraîne un changement de la période à cause du principe de la conservation du moment de rotation.

Nous avons décrit le pulsar de la nébuleuse du Crabe en détail, parce qu'il est l'astre le mieux connu. Son observation détaillée a été réalisée depuis le début du siècle. C'est la plus forte source radio de notre Galaxie; c'est l'étoile à rayons X la plus intense. Nous connaissons son spectre, son âge, sa distance et la polarisation de son rayonnement. La nébuleuse du Crabe avec son pulsar est un vrai présent céleste fait aux astronomes et aux physiciens.

Il est probable que les autres pulsars sont aussi intéressants du point de vue physique, mais nous sommes mal situés par rapport à eux, à la fois dans l'espace et dans le temps. Ces pulsars, au nombre d'une cinquantaine, sont surtout concentrés vers le plan de la Voie Lactée, ce qui confirme leur appartenance à notre système. Les étoiles bleues dont ils résultent probablement ont aussi la même répartition.

La découverte des pulsars faite en 1967 et annoncée en 1968 et les nombreux résultats très rapidement accumulés dans les quatre années suivantes, constituent une révolution non seulement pour l'astronomie mais pour la physique. Les théoriciens doivent approfondir et perfectionner leurs théories pour comprendre un ensemble de phénomènes relatifs à cette matière extrêmement condensée, placée dans les champs magnétiques eux-mêmes extraordinaires. C'est une matière que nous pouvons encore difficilement imaginer. Cette découverte est une nouvelle étape dans la connaissance humaine de ces phénomènes. Ces résultats justifient les efforts considérables que de nombreux pays font pour l'observation du ciel.

Les amas stellaires

Dans quelques régions du ciel, les étoiles sont groupées en si grand nombre que leur accumulation ne peut pas être due au hasard. Ces ensembles portent le nom d'*amas stellaires*. Un amas bien connu est l'amas des Pléiades dont les étoiles les plus brillantes sont visibles à l'œil nu. On parlait de 7 étoiles mais, même à l'œil nu, on en compte 9 ou 10, et avec une petite lunette des dizaines.

Deux amas visibles à l'œil nu, mais sans qu'on puisse séparer les étoiles à l'œil, sont situés dans la constellation de Persée; on les désigne par les noms de h Per et χ Per. L'examen attentif et surtout la photographie ont permis de découvrir des centaines d'amas de ce type. Ils comportent de nombreuses étoiles mais la concentration n'est pas très forte; on les nomme *amas ouverts* pour les distinguer d'un autre type composé par des milliers d'étoiles groupées en globules, d'où leur nom d'*amas globulaires*. Ceux-ci se distinguent des premiers par de nombreux caractères, et nous les étudierons à part.

Les amas ouverts

Donnons quelques renseignements sur un amas typique : celui des Pléiades. L'étoile la plus brillante est Alcyone, de magnitude 2,9 et de type spectral B8; la plus bleue est Électra, de type B5; elle est un peu plus faible (magnitude 3,8). Dans l'ensemble du champ autour de ces étoiles, on peut photographier des milliers d'étoiles. Naturellement, toutes ne font pas partie de l'amas. Pour faire le tri, on mesure les mouvements des étoiles par la comparaison de clichés anciens, et éventuellement on mesure aussi les vitesses radiales. Seules sont retenues comme membres probables les étoiles qui ont le même mouvement. Une étude de 3 000 étoiles a permis de n'en retenir que 291 dont 190 sont situées à moins de 1° du centre de l'amas.

▼ *Les deux* amas h et χ Per, *situés dans la constellation de Persée sont visibles à l'œil nu comme deux taches laiteuses. Ils contiennent de nombreuses étoiles bleues ainsi que des supergéantes rouges. Ils ont environ 50 années de lumière de diamètre et sont situés à 2,3 kiloparsecs de distance (7 500 années de lumière). Chaque amas contient environ 300 étoiles photographiables.*

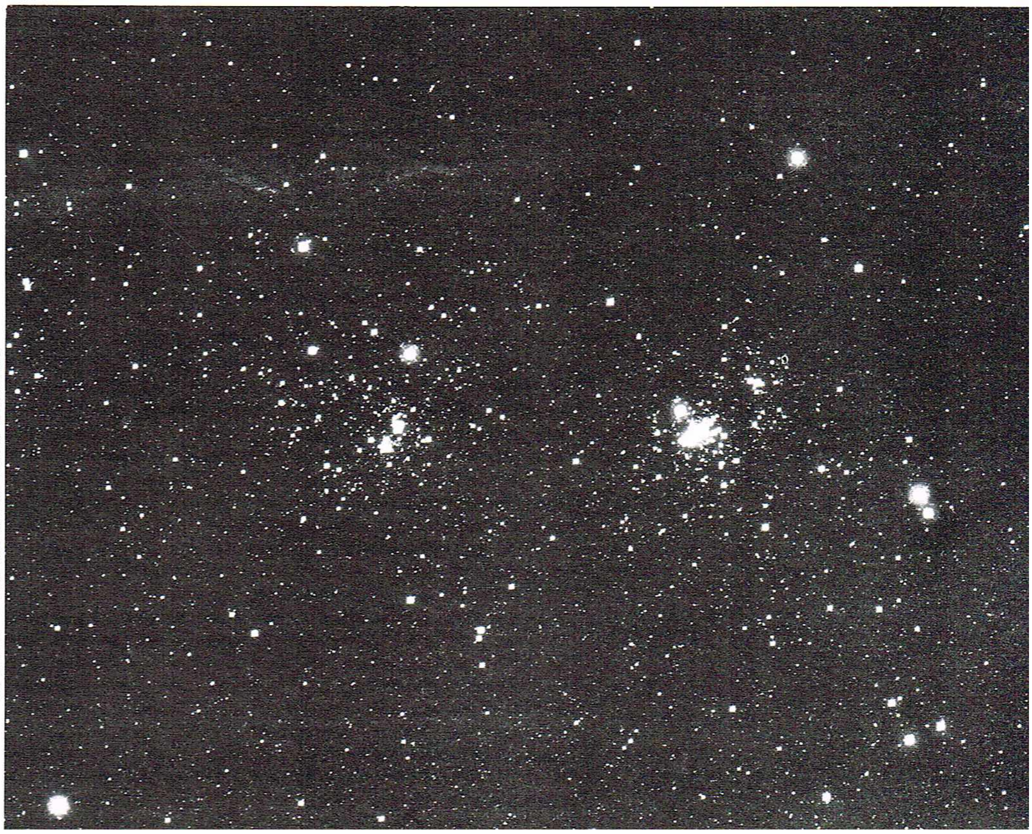

C.N.R.S. - Observatoire de Haute-Provence

Mount Wilson and Palomar Observatories

▲ **Amas ouvert des Pléiades dans la constellation du Taureau (California Institute of Technology).**

On pense que l'amas est formé d'au moins 400 étoiles qui sont contenues à l'intérieur d'une sphère de 4 parsecs (ou 12 années de lumière) de diamètre. La distance moyenne entre les étoiles est de 0,4 parsec (ou 1,2 année de lumière). La densité stellaire est 100 fois plus forte que dans le voisinage solaire. Mais la distance entre les étoiles reste considérable : si une étoile était représentée par une balle de tennis, l'étoile la plus proche serait située à 500 km. Ces étoiles ne sont pas réunies au hasard. On constate une relation précise entre leurs températures et leurs éclats. On sait que l'on peut représenter cette relation par le diagramme de Russell-Hertzsprung, où l'on porte le type spectral en abscisse et la magnitude en ordonnée. Les étoiles se placent dans une partie plus restreinte du plan que pour des étoiles quelconques. Dans le cas des Pléiades, toutes les étoiles se placent sur la diagonale des étoiles de la série principale, sauf deux ou trois étoiles qui sont des naines blanches.

On est amené à penser que toutes ces étoiles ont été formées simultanément. La comparaison entre les diagrammes de divers amas montre des différences marquées. Ainsi, si les Pléiades ne comprennent pas d'étoiles très bleues, ni d'étoiles géantes rouges, il en est tout à fait autrement pour les amas de Persée, qui sont riches en étoiles bleues et contiennent quelques étoiles géantes rouges.

Mount Wilson and Palomar Observatories

▼ ***Région centrale de la grande nébuleuse d'Orion (NGC 1976 = M42), qui est l'exemple d'une nébuleuse gazeuse liée à une association stellaire; la lumière de la nébuleuse est provoquée par le rayonnement d'étoiles situées à l'intérieur de l'amas, notamment par l'étoile sextuple θ Ori (California Institute of Technology).***

Les astrophysiciens théoriciens peuvent expliquer cette différence par l'évolution des amas. Il n'est pas possible de donner des explications détaillées sur ce fait. Mais on montre que les étoiles se forment par condensation à partir des molécules et des grains de poussières du milieu interstellaire. Lorsque la masse condensée est importante, des réactions nucléaires puissantes se déclenchent au centre des étoiles les plus grosses qui sont très brillantes et très chaudes (c'est-à-dire bleues), mais elles perdent beaucoup d'énergie et, de ce fait, évoluent rapidement. Un amas vieux n'en contiendra plus. C'est le cas des Pléiades dont l'âge est estimé à 60 millions d'années, alors que les amas de Persée n'ont qu'un âge de 10 millions d'années. L'amas le plus vieux que nous connaissions est l'amas M67 dont l'âge est estimé à 4 milliards d'années. Les amas globulaires sont encore plus âgés.

Le nombre d'amas connus est de l'ordre de 800. Ils sont tous rapprochés du Soleil, mais cela est dû au fait qu'il est difficile de reconnaître les amas lointains. On pense que notre Galaxie en contient plus de 20 000. Tous ces amas sont situés près du plan de la Voie Lactée, et ils forment un système très plat, lié aux bras de la Galaxie. Ils sont souvent associés aux poussières et atomes interstellaires à partir desquels les étoiles se sont formées. Signalons que, dans de nombreux amas, on a pu constater la présence d'étoiles doubles et de naines blanches.

On constate qu'en plus des amas proprement dits, il existe des groupes d'*étoiles associées* qui, souvent, entourent les amas. On reconnaît ainsi les associations O, ainsi nommées parce qu'elles contiennent des dizaines d'étoiles jeunes de type O ; elles sont souvent localisées dans les bras de la Galaxie et sont quelquefois des extensions d'amas classiques.

Les *courants stellaires* sont des groupes d'étoiles se déplaçant sur des trajectoires parallèles avec des vitesses égales ; mais, à l'inverse des amas, ces groupes sont répartis sur de grandes surfaces du ciel. Les étoiles d'un courant peuvent d'ailleurs être utilisées pour la mesure des distances stellaires.

Les amas globulaires

L'observation d'un amas globulaire à l'aide d'un grand télescope ou simplement l'examen d'une photographie montrent un aspect magnifique. Des milliers d'étoiles peuvent y être reconnues, et les plus brillantes sont nettement rouges. Dans l'hémisphère Nord, les plus beaux amas sont ceux d'Hercule (M13) et celui des Chiens de Chasse (M3). Dans l'hémisphère Sud, ω Cen est visible à l'œil nu comme une petite tache laiteuse, et, avec des jumelles, on observe des étoiles sur une surface de 15′ de diamètre. Ces amas sont en général sphériques, bien que certains montrent un petit aplatissement. Le nombre d'étoiles qu'on peut observer dépend essentiellement de la puissance de l'instrument. Avec un télescope de 2 m de diamètre, on en observera quelques milliers ; mais l'examen de photographies et des calculs d'éclat montrent qu'un amas contient un nombre d'étoiles de l'ordre de 100 000 à 10 millions. Ces astres sont donc très différents des amas ouverts. La mesure des couleurs des étoiles montre l'absence quasi totale d'étoiles bleues et la présence de nombreuses étoiles rouges. Le diagramme de Russell-Hertzsprung a un aspect très différent de celui des étoiles du voisinage solaire. On a introduit, il y a quelques dizaines d'années, la notion de *population*, les étoiles du voisinage solaire étant de *population I* et celles des amas globulaires de *population II*. Nous savons aujourd'hui que cette distinction est réelle mais qu'elle s'explique par le fait que les étoiles de population II sont des étoiles très vieilles qui ont épuisé une grande partie de leur combustible hydrogène. On a pu calculer que l'âge des amas globulaires est de l'ordre de 10 milliards d'années et démontrer que les étoiles bleues qui ont pu exister au début se sont toutes transformées en étoiles rouges. Ces amas ne contiennent pas de matière interstellaire.

Les amas globulaires ont des diamètres compris entre 10 et 20 parsecs (30 et 60 années de lumière) et des masses de l'ordre de 200 000 Soleils. On peut montrer que la moitié de la lumière d'un amas globulaire provient des étoiles brillantes rouges qui ne représentent que 5/1 000 de sa masse alors que les étoiles faibles, très nombreuses, représentent les 2/3 de sa masse mais ne contribuent que pour 1/10 000 à sa luminosité. Malgré

les apparences, la distance moyenne des étoiles au centre de l'amas est assez grande. On compte qu'il y a 50 étoiles dans un cube de 1 parsec de côté (ou 3,3 années de lumière), de sorte que la distance entre les étoiles est de l'ordre de 50 000 unités astronomiques. Cet espace est donc relativement vide, et, comme il n'y a pas de poussières, il est possible de reconnaître des galaxies lointaines à travers les amas globulaires.

On a reconnu, dans de nombreux amas, des étoiles variables et particulièrement des étoiles pulsantes, du type RR Lyrae. Dans l'amas des Chiens de Chasse (M3), on en a reconnu 187; d'autres sont peu riches : ainsi l'amas d'Hercule n'en contient pas. Ces étoiles servent à déterminer la distance des amas globulaires; en leur absence, on utilise des méthodes indirectes.

On connaît environ 120 amas globulaires, et leur nombre total doit être de l'ordre de 500, car de nombreux amas sont cachés par les phénomènes d'absorption dans la Voie Lactée.

Les distances des amas globulaires sont en général assez grandes : 8 000 parsecs ou 25 000 années de lumière pour l'amas d'Hercule, et même 200 000 années de lumière pour le plus lointain, un petit amas globulaire situé dans le Cocher.

A l'inverse des amas ouverts qui sont concentrés vers le plan de la Voie Lactée, les amas globulaires forment un système presque sphérique dont le centre est confondu avec le centre de notre Galaxie. C'est d'ailleurs grâce à cette répartition que l'on a pu reconnaître pour la première fois la position de ce centre qui est situé à 30 000 années de lumière du Soleil dans la direction du Sagittaire. Tout le système a un diamètre de l'ordre de 100 000 années de lumière et forme le *halo galactique*. La concentration des amas globulaires est importante vers le centre de la Galaxie, mais il en existe aussi, loin du centre et loin du plan de la Voie Lactée. Il a été possible de reconnaître des amas globulaires dans la nébuleuse d'Andromède et dans les Nuages de Magellan, mais il est alors difficile de résoudre les amas en étoiles.

Les nébuleuses gazeuses et l'espace interstellaire

L'observation visuelle et surtout la photographie nous révèlent un certain nombre d'astres diffus, de structure plus ou moins compliquée, et que l'on nomme des *nébuleuses*.

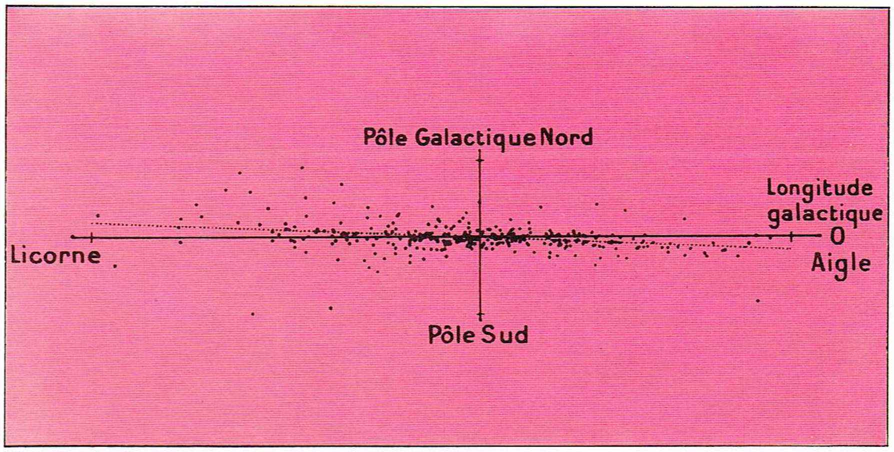

Ch. Fehrenbach

▲ *Répartition des* amas ouverts *dans la Galaxie. Ce graphique montre que les amas sont situés tout près du plan de la Voie Lactée.*

On les classe en deux grandes catégories. Les *nébuleuses* qui ont souvent une *structure spirale ou elliptique* et sont toujours situées loin du plan de la Voie Lactée; ces astres sont les galaxies, que l'on peut souvent résoudre en étoiles. Nous les étudierons dans un chapitre spécial. Nous allons ici nous intéresser à des *nébuleuses à structure diffuse* (filaments ou taches), qui sont souvent situées près de la Voie Lactée. Ces astres font partie de notre système local, la Galaxie.

Ces nébuleuses sont de plusieurs types; c'est l'étude de leur lumière par le spectrographe qui permet de les classer en *nébuleuses gazeuses à émission, nébuleuses diffuses* ayant des spectres analogues à ceux des étoiles et *nébuleuses obscures*.

Les nébuleuses gazeuses

Les *nébuleuses gazeuses* proprement dites donnent des spectres de raies tout à fait analogues à ceux des tubes fluorescents à hélium, hydrogène, etc. La nature gazeuse de ces astres ne fait pas de doute.

Une des plus remarquables est la nébuleuse d'Orion qui est située en dessous du Baudrier d'Orion (sa position est $\alpha = 5$ h 35 mn, $\delta = -5°$). C'est déjà un très bel objet lorsqu'on l'observe avec une jumelle; il a d'ailleurs été découvert au début du XVII[e] siècle à Aix-en-Provence par N. Peiresc. Cette nébuleuse s'étend sur plus de 1° et

▼ *A gauche,* amas d'Hercule *(M 13) : la photographie, avec une durée de pose de 90 minutes, de cet amas globulaire montre les parties externes. Masse de l'amas : 200 000 Soleils; distance : 8 kiloparsecs (25 000 années de lumière). A droite, le même amas globulaire d'Hercule, moins exposé pour montrer la partie centrale.*

C.N.R.S. - Observatoire de Haute-Provence

C.N.R.S. - Observatoire de Haute-Provence

C.N.R.S. - Observatoire de Haute-Provence - Ch. Fehrenbach

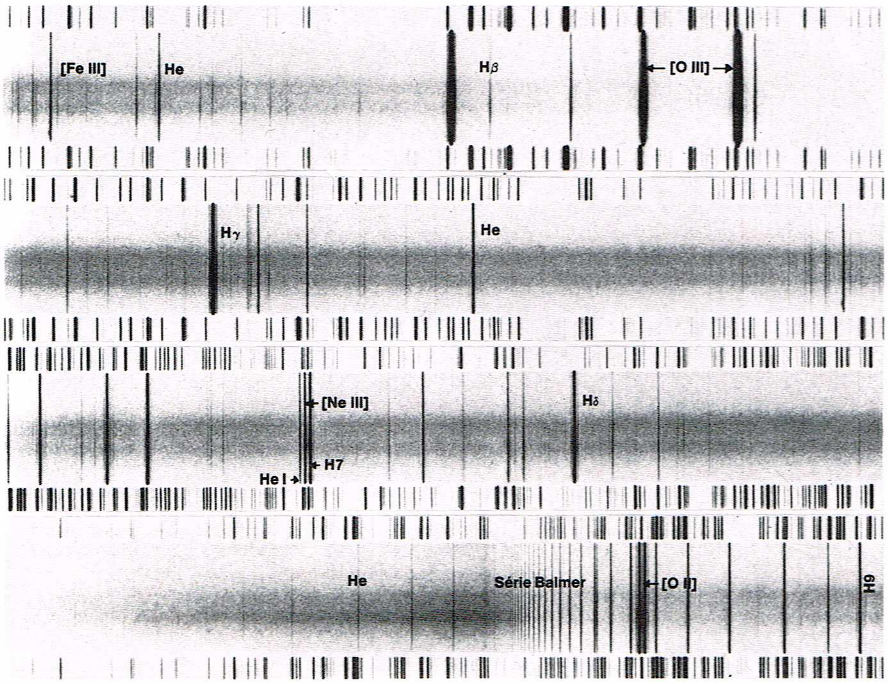

C.N.R.S. - Observatoire de Haute-Provence
Ch. Fehrenbach

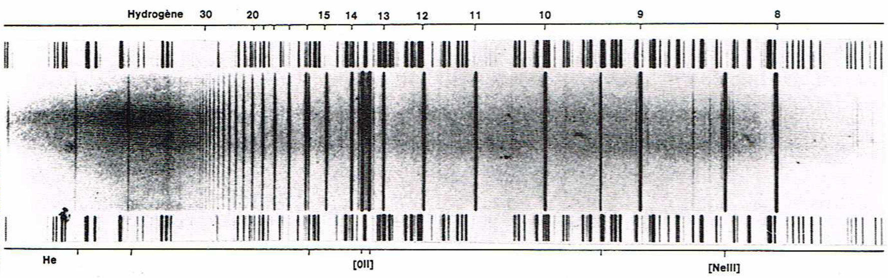

▲ *En haut, spectre de la partie centrale de la nébuleuse d'Orion montrant les nombreuses raies d'émission.*
En haut, à droite, les deux raies intenses sont les raies nébulaires 5 007 et 4 969 Å dues à l'oxygène ionisé [O III], la raie suivante est Hβ (4861).
Ci-dessus, spectre de la nébuleuse d'Orion : les nombres indiqués pour les raies de l'hydrogène sont ceux qui correspondent au numéro du niveau initial; le niveau final est toujours 2. (Voir le schéma des niveaux ci-dessous.) Nous indiquons aussi les atomes responsables d'autres raies.
▼ *Schéma des transitions de l'hydrogène qui permet d'expliquer tout le spectre de cet atome dans les nébuleuses gazeuses.*

Richard Colin

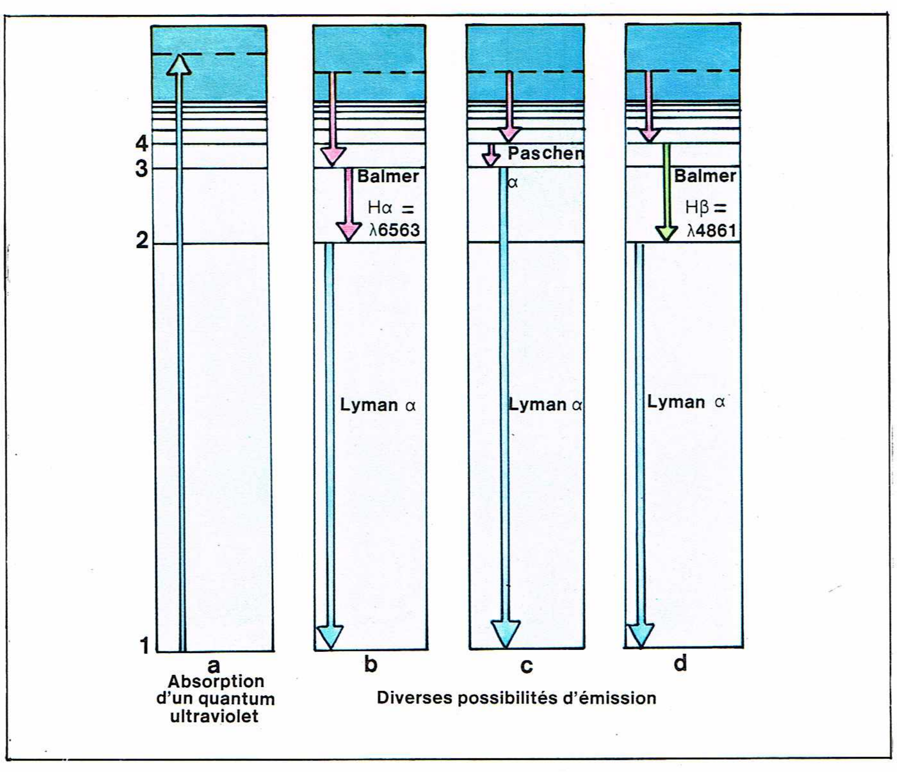

a une couleur bleuâtre très typique. La photographie y montre de nombreuses étoiles et notamment une étoile sextuple θ Orion, qui est située dans sa partie la plus lumineuse. L'ensemble a l'aspect d'un grand oiseau à ailes déployées, avec de nombreuses structures lumineuses, mais aussi des régions obscures.

L'analyse de son spectre a donné un nombre considérable de renseignements sur la nature de la matière nébulaire. L'identification de certaines raies a posé des problèmes ardus qui ont été résolus seulement vers 1930. On a pu identifier, dans la seconde moitié du XIXe siècle, les éléments suivants : l'hydrogène, puis l'hélium, le carbone, l'azote, l'oxygène, le néon ainsi que le magnésium et le silicium pour ne parler que des principaux. Ces atomes sont plus ou moins ionisés, ce qui montre que le milieu est fortement agité en raison de sa température. Les raies ainsi identifiées sont normalement observées dans les sources de laboratoire mais un certain nombre de raies, les plus intenses, situées dans le bleu-vert (ce qui explique la couleur de la nébuleuse), ne sont observées dans aucune source terrestre. Ces raies ont d'abord suggéré l'existence d'un nouvel élément, le *« nébulium »*, dont on a essayé de découvrir les propriétés. Mais les progrès accomplis dans l'étude des atomes ne permettaient pas de prévoir un tel atome : toutes les cases de la classification périodique de Mendeleïev étaient occupées. C'est I. Bowen, plus tard directeur de l'Observatoire du mont Palomar, qui a identifié ces raies. Les deux raies situées à 4 959 et 5 007 Å sont dues à l'atome d'oxygène doublement ionisé; d'autres raies sont dues à l'azote, au néon, etc. Ces raies inobservables au laboratoire sont dites *raies interdites*.

Le mécanisme d'excitation des atomes et d'émission des raies est maintenant bien connu. Sans entrer dans les détails, indiquons que tous les phénomènes d'émission sont provoqués par l'étoile multiple θ Orion. Cet ensemble est constitué par des étoiles de type spectral O émettant un fort rayonnement ultraviolet. Celui dont la longueur d'onde est plus petite que 900 Å est assez énergétique pour arracher l'électron qui gravite normalement autour de l'atome d'hydrogène. Ce phénomène est l'*ionisation*. La matière se transforme en un plasma contenant des protons et des électrons. Certains de ces électrons sont recapturés par les protons, pour reformer des atomes d'hydrogène. Chaque atome ainsi formé est plus ou moins excité; mais il se désexcite spontanément en passant successivement à des états d'énergie plus petits. À chaque passage correspond l'émission d'une raie. Normalement, les états électroniques des atomes sont si instables que le phénomène de désexcitation se fait dans des temps qui se mesurent en microsecondes. Les mécanismes d'émission sont les mêmes pour les autres atomes : He, O, etc.

En plus de ces *états normaux* (l'état fondamental d'énergie minimale stable et les états excités très instables), certains atomes possèdent des configurations électroniques presque stables; on dit *métastables*. Un atome dans cet état a une durée de vie qui peut se chiffrer par une grande fraction de la seconde et quelquefois par des durées encore supérieures. Le passage d'une telle configuration à l'état fondamental ne se fait donc qu'après un temps relativement long. En fait, au laboratoire, bien avant ce passage spontané, l'atome subit des chocs d'autres atomes, et l'émission spontanée ne peut avoir lieu. Les transitions, dites « interdites », à partir d'états métastables ne sont donc possibles que dans un vide très poussé, où les chocs sont très rares, de sorte que l'émission spontanée a le temps de se faire.

L'étude de ces nébuleuses montre qu'en plus de ces atomes isolés, elles contiennent des molécules et des poussières. Les parties obscures des nébuleuses gazeuses s'expliquent par l'absorption de la lumière par des particules de poussière. Ces particules sont très petites; on estime leur diamètre à 1/10 000 mm, ce qui explique le fait qu'elles absorbent plus fortement la lumière bleue que la lumière rouge. Ces particules associées aux nébuleuses gazeuses peuvent d'ailleurs se trouver loin d'étoiles excitatrices; on n'aperçoit alors que l'effet d'absorption sur les étoiles situées derrière elles, et on parle de *nébuleuses d'absorption*.

On a de plus mis en évidence de nombreuses molécules. Les astronomes opticiens avaient, dès 1931, détecté la présence des molécules simples CN et CH, mais un

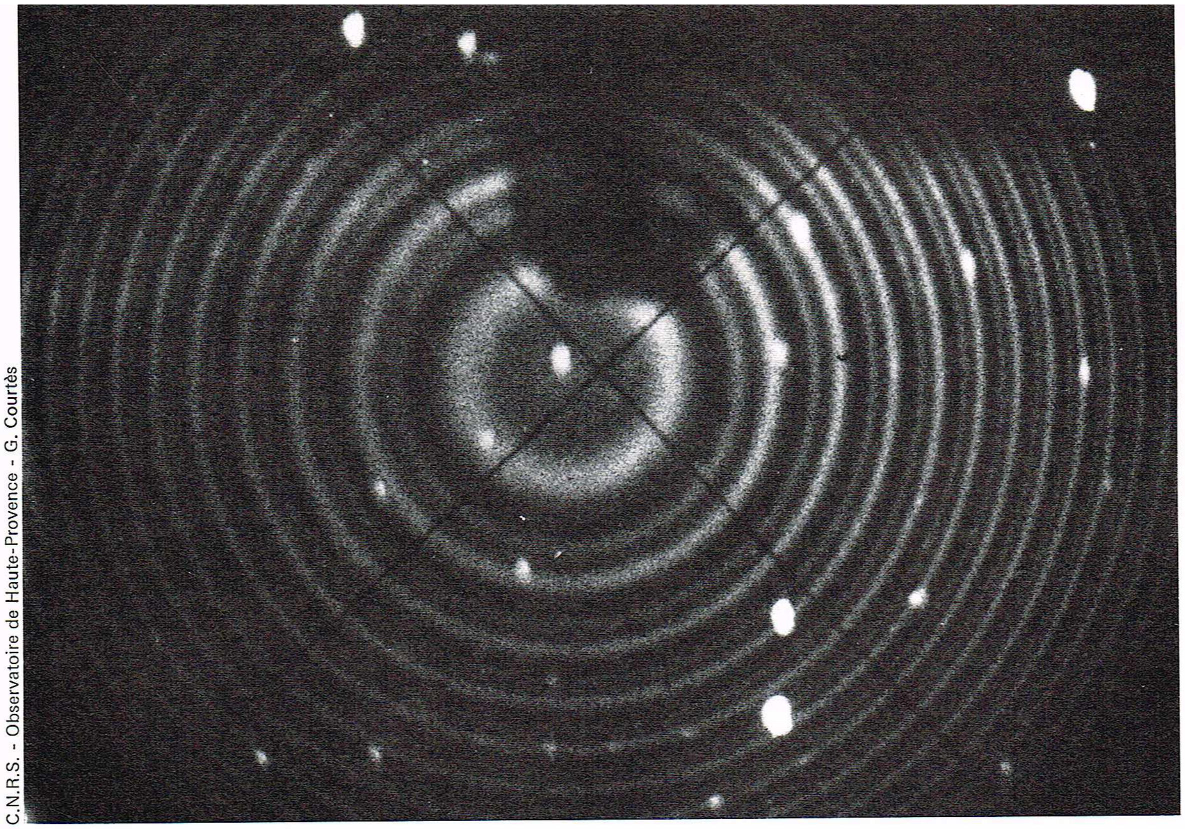

C.N.R.S. - Observatoire de Haute-Provence - G. Courtès

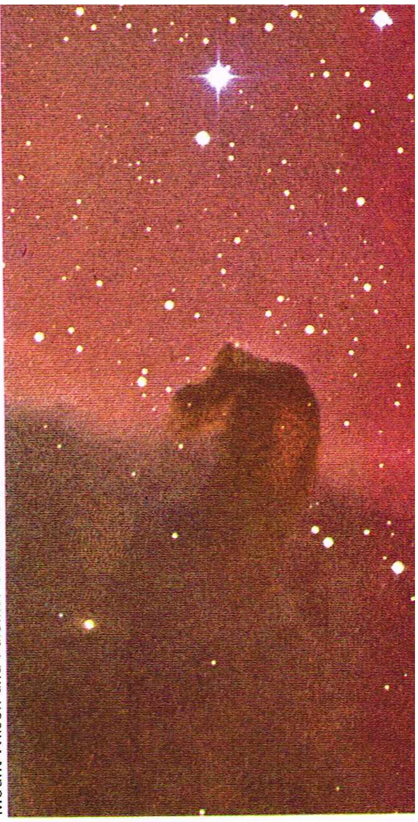

Mount Wilson and Palomar Observatories

▲ *A gauche, un interféromètre de Fabry-Perot, disposé devant un télescope, permet de détecter les raies de l'hydrogène qui donnent des anneaux d'interférence. Ici une partie du cliché dans la nébuleuse de la Tête de Cheval.*
A droite, la nébuleuse de la Tête de Cheval, dans la constellation d'Orion, est un remarquable exemple de nébuleuse obscure associée à des nébulosités d'émission (California Institute of Technology).

grand progrès a été accompli, depuis une dizaine d'années, par les radioastronomes qui ont détecté plus de 25 molécules différentes.

La radioastronomie s'est révélée comme une méthode extrêmement puissante pour l'exploration des nébuleuses gazeuses, même lorsqu'elles sont peu denses. Le plasma constitué par le milieu gazeux émet des radiations du domaine des ondes hertziennes qui sont dues au freinage des électrons dans ce milieu. On observe aussi, depuis quelques années, des transitions discrètes tout à fait analogues aux raies optiques des atomes. La radiation la plus importante est une raie interdite de l'hydrogène neutre. Dans son niveau fondamental, où l'orbite de l'électron autour du proton est la plus petite, l'atome d'hydrogène existe sous deux formes. Sans entrer dans le détail, indiquons que ces deux états correspondent aux deux cas où la rotation du noyau et celle de l'électron (spin en anglais) sont parallèles et antiparallèles. Ces niveaux sont très voisins et le niveau supérieur est presque stable : sa durée de vie se chiffre en années. La transition correspond à une raie de 21 cm de longueur d'onde qui a été prédite par Van de Hulst en 1941 et observée dès 1945. Cette raie a été l'outil par excellence pour étudier notre Voie Lactée. Nous verrons que cette raie a permis d'explorer notre système jusqu'à ses confins. Pour cette raison, des moyens très importants ont été créés par de nombreux pays, et ces instruments ont permis de mettre en évidence d'autres radiations, notamment des raies de longueur d'onde de 18 cm. Ces émissions sont expliquées par des raies de la molécule d'oxhydryle OH.

On connaît aujourd'hui plus de 600 sources contenant cette molécule ; une des plus importantes est la nébuleuse d'Orion. Devant ces résultats, une équipe, dirigée par Townes, prix Nobel de physique pour l'invention du maser, s'attaqua au problème des molécules dans l'espace. Il calcula les longueurs d'onde des raies qui pouvaient être émises ou absorbées par les molécules formées par des combinaisons des atomes H, C, N, O et S. Il tenta de les observer. La récolte fut magnifique : d'abord la molécule CO, puis celle d'aldéhyde formique furent détectées, puis une quinzaine d'autres molécules comme l'alcool méthylique, l'acide cyanhydrique, l'eau, l'ammoniac, ensuite des molécules plus complexes comme la formamide H_2NCOH (en 1971), et enfin des molécules sans hydrogène ou sans carbone, comme CS, SiO, SH_2. La molécule d'hydrogène H_2 ne fut découverte qu'en 1970 à l'aide du satellite OAO-2. Actuellement, plus de 25 molécules sont connues.

Avant de revenir sur l'interaction si importante entre les étoiles et les nébuleuses gazeuses, décrivons rapidement l'ensemble des nébuleuses gazeuses.

Ces nébuleuses sont très nombreuses : à côté de très grandes, comme celle d'Orion ou celle qui entoure l'étoile η Carinae, il y en a de très petites. Le mécanisme d'excitation par les étoiles chaudes associées explique l'émission de la plupart de ces nébuleuses, mais quelques autres doivent être regardées comme les résidus d'explosion de novae et de supernovae. Nous les avons déjà décrites.

Toutes les nébuleuses gazeuses sont situées près du plan de la Voie Lactée. Elles sont si nombreuses que, par endroits, elles sont contiguës, et des photographies, faites avec la lumière de l'hydrogène, montrent la structure générale de la Voie Lactée. Nous savons aujourd'hui que ce sont ces nébuleuses qui dessinent avec les étoiles jeunes les bras de notre Galaxie. Ces nébuleuses correspondent à des régions où la densité en matière est assez grande ; en fait, tout l'espace entre les étoiles contient des atomes, des molécules et des grains de poussières, mais la densité y est plus faible, et surtout le mécanisme d'émission n'a pas lieu lorsqu'il n'y a pas d'étoiles très chaudes.

Donnons pour terminer une description plus détaillée de la nébuleuse d'Orion. Autour de l'étoile sextuple θ Orion, existe une région où l'hydrogène est ionisé et où nous observons la nébuleuse optique dont le diamètre est de l'ordre de 20 années de lumière. Autour de cette région, existe une vaste sphère d'hydrogène neutre dont la masse est estimée à 100 masses solaires. Le diamètre de cette source est de 40 années de lumière. Les molécules d'oxyde de carbone (CO) ne sont observables que dans une sphère de 30 années de lumière de diamètre. Dans la nébuleuse, on observe un certain nombre de sources infrarouges entourées des molécules plus ou moins complexes que nous avons décrites. On estime la masse totale de la nébuleuse, y compris les grains de poussières, à 1 000 masses solaires. Dans la partie centrale, on estime le nombre d'atomes à 600/cm³. Nous verrons que, dans l'espace interstellaire normal, ce nombre n'est que de 1.

On pense que les étoiles se forment à partir de la matière interstellaire qui se condense. Un mécanisme possible est que les atomes et les molécules, qui se heurtent avec les grains de matière, s'y agglutinent. Dans les régions denses, les grains de plus en plus gros s'attirent entre eux, l'ensemble se condense, et l'énergie de gravitation échauffe l'ensemble pour former une *proto-étoile*. Celle-ci s'échauffe de plus en plus jusqu'au moment où la température est suffisante pour déclencher la réaction de fusion 4H → He : c'est la naissance d'une *vraie étoile*.

Nous avons vu que le mécanisme inverse se passe lorsque l'étoile explose. De plus, nous connaissons des étoiles qui émettent continuellement de la matière. Ces étoiles sont entourées d'enveloppes. On en connaît de nombreux types : les plus froides sont des étoiles B à enveloppes qui présentent des raies d'émission dans

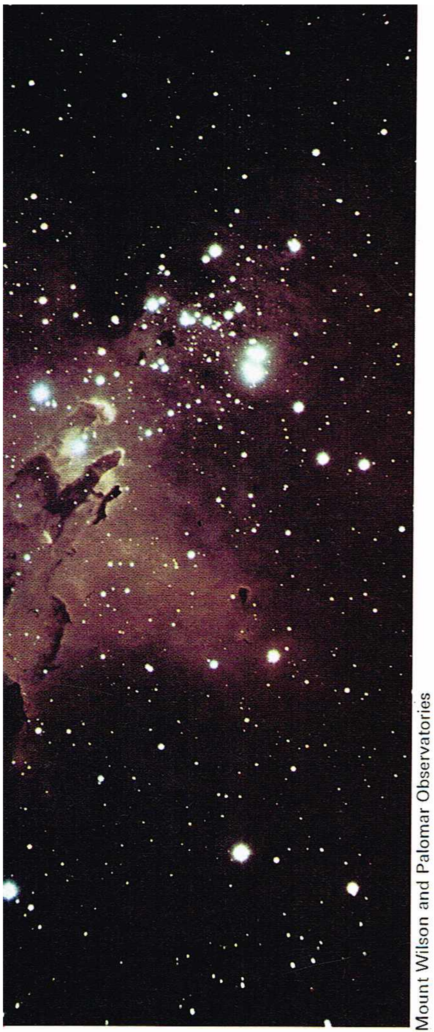

Mount Wilson and Palomar Observatories

leur spectre. Les étoiles de Wolf-Rayet, qui sont des étoiles très chaudes, émettent de la matière ionisée. Leurs nébulosités sont très peu étendues, et on ne peut les photographier, mais elles se manifestent par leurs spectres qui sont typiques et présentent des raies d'émission très larges.

Les nébuleuses planétaires

Des astres beaucoup plus voisins des nébuleuses gazeuses sont les *nébuleuses planétaires,* ainsi nommées à cause de leur aspect. Elles présentent souvent de petits disques qui les font ressembler à des planètes comme Uranus ou Neptune. Elles n'ont aucune relation avec les planètes. Ces petites nébuleuses ne sont pas toutes rondes, certaines ont des structures très curieuses, en anneaux ou en diabolo. On y distingue toujours une étoile centrale chaude, souvent de type O ou B, quelquefois de Wolf-Rayet. On connaît plusieurs centaines de ces nébuleuses; leurs spectres ne sont pas très différents de ceux des nébuleuses diffuses. Mais à cause du grand voisinage de l'étoile, la température de la matière est très élevée et la densité en électrons très forte.

Tout amateur d'astronomie connaît la belle nébuleuse annulaire de la Lyre dont le diamètre apparent est de 72'', ce qui correspond à un diamètre réel de 0,5 année de lumière. La nébuleuse, dite du Hibou à cause de son aspect, a un diamètre apparent 3 fois plus grand et une dimension réelle de 1,5 année de lumière.

Les premières nébuleuses ont été reconnues à l'œil, et le catalogue de Messier en contient un certain nombre : parmi elles, la belle nébuleuse annulaire de la Lyre (M57), celle du Diabolo (Dumbbell [M27]), située dans le Petit Renard (Vulpecula), qui est avec Hélix une des plus étendues que nous connaissions : elle a plus de 14' de diamètre.

Les grands télescopes et surtout la photographie ont permis d'allonger cette liste; des recherches systématiques ont été faites par la photographie en isolant avec un filtre les raies d'émission nébulaires; dans ces conditions, les astres qui présentent cette émission ressortent sur les clichés. Actuellement, le catalogue de Perek et Kohoutek (1964) contient 1 036 objets, mais il est certain que le nombre des nébuleuses planétaires de notre Galaxie est beaucoup plus grand, de nombreuses nébuleuses étant cachées par des nuages absorbants; on estime leur nombre réel à 50 000.

Mount Wilson and Palomar Observatories

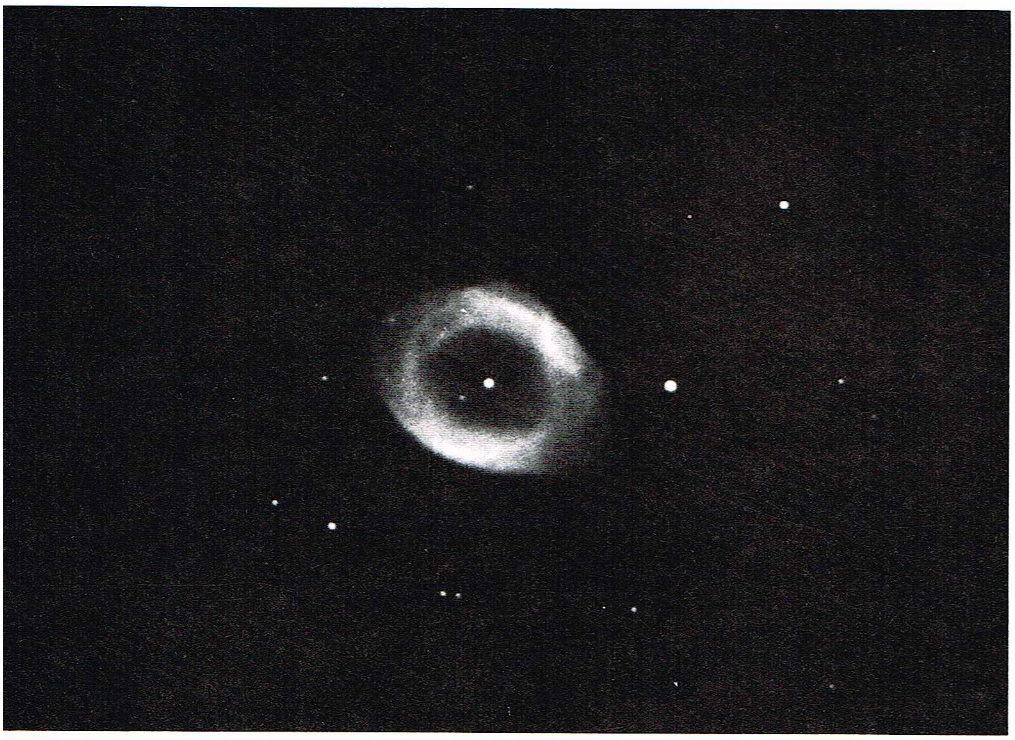

▲ *En haut, à gauche, la nébuleuse gazeuse dans la constellation du Bouclier (Scutum) [NGC 6611 = M16], exemple de nébuleuse diffuse associée à des groupes d'étoiles brillantes.*
A droite, nébuleuse Trifide de la constellation du Sagittaire (NGC 6514 = M20), magnifique exemple d'association de nébulosités obscures et lumineuses (California Institute of Technology).

▲ *Ci-dessus, la nébuleuse annulaire de la Lyre (NGC 6720 = M57) exemple typique de nébuleuse planétaire, photographiée au télescope de 1,93 m de l'Observatoire de Haute-Provence.*

Ces nébuleuses ne sont pas uniformément réparties sur le ciel; elles montrent une forte concentration vers le plan de la Voie Lactée et, dans celui-ci, vers le centre de notre système dans le Sagittaire. Mais la concentration n'est pas aussi grande que celle des étoiles O et B ou des nébuleuses gazeuses. Il s'agit d'une population de disque intermédiaire. Une zone d'absence dans une certaine région du Sagittaire est expliquée par l'absorption par des nuages de poussières; les nébuleuses visibles de part et d'autre sont lointaines.

Il est très difficile de déterminer la distance des nébuleuses planétaires : la mesure des parallaxes, même pour celles qui ont des étoiles centrales très nettes, montre que ces objets sont lointains mais elle ne permet pas de préciser la distance. Quelques nébuleuses sont associées avec des astres connus; c'est notamment le cas d'une nébuleuse planétaire située dans l'amas globulaire M15, mais dans ce cas, il s'agit d'un astre un peu particulier, et la valeur de sa magnitude absolue n'est pas significative.

On connaît aussi quelques nébuleuses planétaires contenant comme étoile centrale une étoile double. On peut alors estimer leurs distances. Mais ces valeurs non plus ne sont pas caractéristiques.

Les autres méthodes, fondées sur certaines hypothèses sur les mouvements propres, ne s'appliquent pas. La seule tentative ayant donné quelques indications valables est fondée sur la mesure du flux total de la nébuleuse dans la raie verte H β de l'hydrogène, mais il faut alors admettre une certaine masse pour la nébuleuse. Tous ces résultats sont donc discutables, de sorte que les distances des nébuleuses planétaires sont très incertaines, mais nous savons que toutes sont lointaines; des valeurs de quelques centaines de parsecs sont typiques pour les plus brillantes. On admet une distance de 700 parsecs ou 2 000 années de lumière pour la nébuleuse annulaire

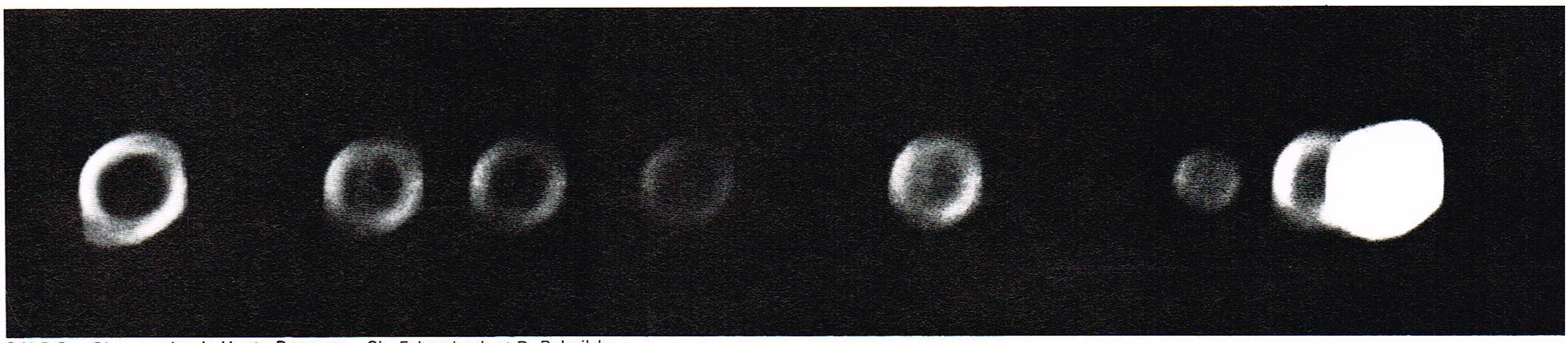

C.N.R.S. - Observatoire de Haute-Provence - Ch. Fehrenbach et D. Belorilzky

▲ *Spectre de la nébuleuse de la Lyre pris en ouvrant la fente du spectrographe au maximum. Chaque radiation monochromatique donne une image qui varie avec l'atome. On remarquera notamment l'image très petite (vers la droite) due à l'atome d'hélium ionisé (raie 4686).*

de la Lyre et de 200 parsecs pour celle du Petit Renard (Dumbbell) qui est avec Hélix l'une des plus proches. Les nébuleuses faibles sont souvent situées à plusieurs milliers de parsecs.

L'analyse de la lumière des nébuleuses planétaires donne des renseignements d'un très grand intérêt. La partie dominante du spectre de la nébuleuse elle-même est un spectre de raies d'émission, mais on observe aussi un faible spectre continu superposé. L'explication du spectre d'émission qui est très semblable aux spectres des grandes nébuleuses gazeuses a présenté les mêmes difficultés; en effet il comporte des raies bien connues au laboratoire comme celles de l'hydrogène avec la série de Balmer, visible du rouge à l'ultraviolet, les séries de Paschen, de Brackett, dans l'infrarouge. Les autres éléments sont essentiellement l'hélium neutre et ionisé qui émet de nombreuses raies, mais les atomes d'oxygène et d'azote plus ou moins ionisés sont aussi visibles, ainsi que le néon, le fer, le nickel, etc. Mais, comme dans l'espace interstellaire, ce sont les raies dites interdites dues aux atomes deux ou trois fois ionisés de l'oxygène, du néon, et deux fois ionisés de l'argon qui sont très intenses. Dans certaines nébuleuses, les raies interdites de [O III] situées à 5 007 et 4 959 Å sont 20 fois plus intenses que la raie de l'hydrogène voisine, H β, située à 4 861 Å.

Nous avons déjà parlé du mécanisme d'émission de ces raies, inobservables au laboratoire, et nommées pour cela *raies interdites*. Mais nous allons revenir sur cette question dans le cas des nébuleuses planétaires où le mécanisme est particulièrement net, sinon simple.

La source d'énergie de toutes les nébuleuses planétaires est la radiation émise par leur étoile centrale. En effet, la plupart des nébuleuses planétaires montrent en leur centre une étoile, souvent très bleue, et dont le rôle est essentiel. Ainsi, si l'observation à l'œil avec un télescope modeste ne montre aucune étoile centrale dans la nébuleuse annulaire de la Lyre, la photographie la révèle facilement; on estime sa magnitude bleue à 14,6. Sa couleur est très violette, de sorte que, dans le visible, l'étoile a une magnitude de 16, ce qui explique la difficulté que nous avons à l'observer à l'œil. Même les noyaux stellaires les plus brillants sont plus faibles que la 10^{e} magnitude, valeur atteinte pour NGC 6210; mais certaines nébuleuses, comme NGC 3132, ne semblent pas montrer, même avec les plus grands télescopes, de noyau; cependant on a des raisons de penser que, même dans ce cas, une étoile très chaude doit exister au centre de la nébuleuse; elle doit être cachée par de la poussière qui entoure l'étoile.

Les mesures de température des étoiles centrales ont donné des valeurs supérieures à 30 000 °K et souvent des valeurs même supérieures à 100 000 °K. Expliquons le mécanisme d'émission dans un cas précis et relativement simple, celui de la nébuleuse annulaire de la Lyre qui a, dans le domaine visible, l'aspect d'un anneau allongé mesurant 75 secondes d'arc sur 50″ et dont la partie centrale est plus obscure. L'étoile centrale a une température de 70 000 °K. Dans ces conditions, le maximum d'émission énergétique a lieu dans l'ultraviolet lointain vers 450 Å, et pratiquement toute l'énergie est émise entre 300 et 1 500 Å. Or, nous savons qu'un atome d'hydrogène touché par de la lumière de longueur d'onde inférieure à 912 Å est ionisé : il se transforme en un proton et un électron. L'énergie nécessaire pour arracher un premier, puis un second électron à l'atome d'hélium est encore plus grande, mais l'étoile de 70 000 °K

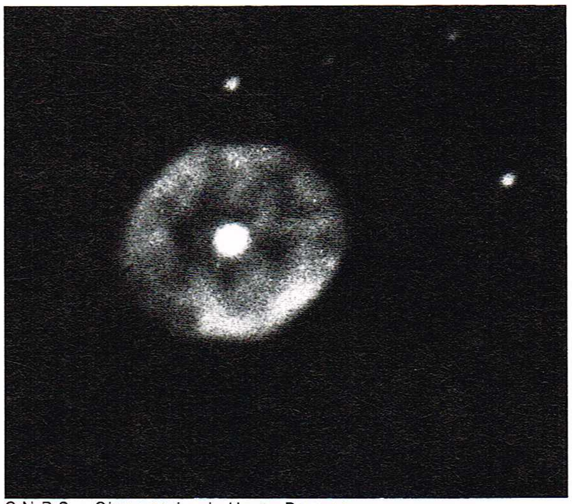

C.N.R.S. - Observatoire de Haute-Provence

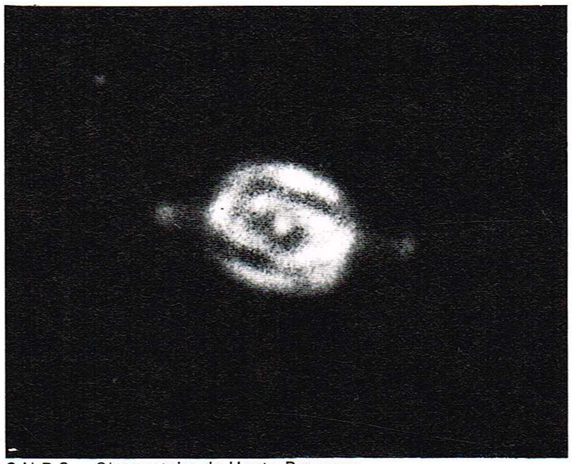

C.N.R.S. - Observatoire de Haute-Provence

C.N.R.S. - Observatoire de Haute-Provence

◀ *Trois photographies de nébuleuses planétaires, de haut en bas : NGC 1501 à structure presque sphérique; NGC 7009 dite « Saturne » à cause de son aspect et NGC 6543. Ces trois photographies ont été groupées pour mieux faire apparaître les appendices.*

est assez chaude pour émettre un rayonnement de longueur d'onde inférieure à 250 Å.

Si l'étoile est entourée d'un nuage de gaz contenant à la fois de l'hélium et de l'hydrogène, l'ionisation de l'hélium sera totale uniquement dans le voisinage de l'étoile; plus loin, il n'y aura plus assez de photons énergétiques. Pour l'hydrogène, les photons d'énergie suffisante sont beaucoup plus nombreux, de sorte que l'ionisation pourra se faire dans une sphère beaucoup plus grande. Nous comprenons ainsi que l'image de la nébuleuse de la Lyre obtenue avec les raies de l'hélium ionisé soit considérablement plus petite que l'image donnée par les raies de l'hydrogène. Les images de la nébuleuse que nous observons ne sont pas des images de la répartition de la matière mais de la partie de l'espace où ont lieu les ionisations.

Ce mécanisme, suggéré par B. Strömgren, explique les raies d'émission des atomes de l'hydrogène, de l'hélium, de l'oxygène, etc. Dans le milieu matériel, que l'on nomme maintenant un *plasma*, existent de nombreux atomes ionisés, surtout des protons, des particules α (c'est-à-dire des noyaux d'hélium), quelques atomes d'oxygène, etc. Ces atomes recaptent des électrons, et, par transitions successives, ces électrons vont des orbites supérieures à des orbites moins énergétiques, en émettant successivement toutes les raies caractéristiques de ces atomes. Les transitions non quantifiées et le freinage des électrons expliquent d'autre part le fond continu.

Le mécanisme d'émission des raies interdites est maintenant complètement compris. Redonnons très sommairement l'explication des raies du « nébulium ». Elles proviennent de la transition à partir d'un état métastable de l'atome d'oxygène deux fois ionisé. Cette ionisation se fait par l'action du rayonnement ultraviolet de l'étoile, mais l'atome ionisé formé est normalement à l'état fondamental, et il suffit d'une énergie assez faible, mesurée par l'énergie qu'il faut donner à un électron pour élever son potentiel de 2,5 volts (énergie de 2,5 électron-volts). Un électron ayant une vitesse de 938 km/s possède cette énergie. Il s'agit là d'une vitesse plutôt modeste, qui correspond à une température du milieu de 20 000 °K. Nous comprenons que le mécanisme d'excitation a lieu souvent, et beaucoup d'atomes d'oxygène vont être élevés à ce niveau excité, nommé ^{1}D. Les transitions se font alors spontanément à deux niveaux inférieurs ^{3}D pour donner les deux raies nébulaires 5 007 et 4 959 Å. Indiquons que la durée de vie du niveau ^{1}D est de 48 secondes. Cette durée de vie, très longue à l'échelle astronomique, explique pourquoi ces raies ne sont pas émises au laboratoire, où de nombreux chocs désexcitent les atomes avant que l'émission spontanée ait lieu. Les autres raies interdites sont expliquées de la même façon.

Mais l'explication des intensités relatives nécessite des calculs précis. Ils sont d'ailleurs en accord avec les observations. Précisons quelques données : les atomes d'hydrogène sont 1 000 fois plus abondants que ceux d'oxygène. Mais l'intensité des raies émises par l'hydrogène n'est pas plus grande parce que le mécanisme de recapture de l'électron par l'atome d'hydrogène ionisé ou proton est très peu fréquent : un proton peut vivre de 10 à 20 ans avant la capture de l'électron, mais ensuite la cascade de l'électron d'un niveau à l'autre qui produit l'émission des raies ne demande que des microsecondes. L'excitation des états métastables est beaucoup plus fréquente : on estime qu'en moyenne, une excitation a lieu toutes les secondes. Le niveau d'excitation des nébuleuses est très variable; on distingue : les nébuleuses peu excitées présentant des raies de l'oxygène une fois ionisé [O II], beaucoup plus intenses que les raies de l'oxygène deux fois ionisé [O III]; celles d'excitation moyenne présentant surtout les raies nébulaires 5 007 et 4 959 Å; puis les nébuleuses très excitées montrant les raies de néon 4 fois ionisé [Ne V]. D'après ce que nous avons déjà dit, cet état d'excitation varie avec l'endroit de la nébuleuse.

Les spectres à très grande résolution dévoilent d'autres détails d'un grand intérêt : on constate que les raies sont doubles et montrent que les nébuleuses planétaires sont en expansion. Ainsi les raies de la nébuleuse NGC 7662 sont-elles des raies dédoublées qui s'expliquent par une expansion de 29 km/s, alors que les parties internes ont des vitesses beaucoup plus petites. Ces expansions paraissent très grandes, mais une vitesse de 10 km/s ne correspond qu'à une expansion de 2 unités astronomiques par an, et, à la distance admise pour la nébuleuse NGC 7662 (1 000 parsecs), la vitesse de 29 km/s ne correspond qu'à 0,006 seconde d'arc par an, donc très difficile à observer; ce qui explique en partie pourquoi il n'est pas possible de l'utiliser pour la mesure de la distance; d'autre part, nous ne savons pas si ce n'est pas la dimension de la région excitée qui augmente aux dépens de la partie encore neutre.

Naturellement, toutes les nébuleuses n'ont pas des structures aussi simples que la nébuleuse annulaire de la Lyre. Il y a souvent une stratification de la matière et des inégalités de distribution. On pense aujourd'hui que les nébuleuses planétaires correspondent à un degré avancé de l'évolution des étoiles qui se fait avec une expulsion de matière, beaucoup moins violente que pour les novae et supernovae. Cette matière peut être expulsée symétriquement comme pour la nébuleuse de la Lyre ou en pointes, en tore. Sous l'action d'un champ magnétique extérieur, la matière expulsée peut dessiner des hélices ou d'autres figures curieuses. L'expulsion de la matière se voit très bien sur certaines photographies de la nébuleuse Hélix NGC 7293 dans le Verseau où on voit un grand nombre de jets pointés vers le centre. Ils commencent sur un point lumineux comme si la matière ou les protons émis par l'étoile étaient soufflés à partir de ce point lumineux.

A cause de ces inégalités de répartition et de tous ces phénomènes annexes, les nébuleuses planétaires ont souvent des formes curieuses. Telle la fameuse nébuleuse NGC 7009, située aussi dans le Verseau, qui est quelquefois nommée Saturne car elle présente une structure qui simule l'anneau de Saturne, bien qu'en fait sa structure soit très différente. Autour de l'étoile centrale, on distingue deux enveloppes dont une est terminée par deux condensations.

Les nébuleuses planétaires sont aussi des sources radioélectriques, à vrai dire assez peu intenses. On a montré que toute l'émission provient de l'énergie émise par un électron lorsque celui-ci est freiné, quand il passe près d'un proton. Il n'y a pas émission du type synchrotron comme pour les nébulosités qui entourent les novae et surtout les supernovae.

Quelle est la relation des nébuleuses planétaires avec les étoiles? Nous avons déjà indiqué que les nébuleuses planétaires résultent de l'évolution définitive des étoiles de masse intermédiaire. Cette évolution doit être très rapide pour expliquer la faible abondance des nébuleuses planétaires. Les étoiles de population I ou II pourraient subir cette évolution, ce qui expliquerait leur répartition dans la Voie Lactée et aussi la présence d'une nébuleuse planétaire dans un amas globulaire. Dans cette vue, les nébuleuses planétaires sont des sortes de scories stellaires, encore lumineuses avant leur extinction totale.

L'espace interstellaire

Pour terminer, donnons une description sommaire de l'espace entre les étoiles : *l'espace interstellaire*. Cet espace n'a pas une densité uniforme : on y observe des nuages de quelques années de lumière de diamètre, de sorte qu'un rayon lumineux provenant d'une étoile en rencontre en général plusieurs. La lumière subit dans cet espace l'absorption par les grains de poussières qui produit un petit changement de la couleur de l'étoile. On peut dire qu'en moyenne, dans l'espace, l'absorption est de 1 magnitude pour un parcours de 1 000 parsecs ou 3 000 années de lumière. Cette absorption est faite par les particules de 0,1 micron de diamètre. Mais il est probable qu'il existe aussi des grains plus gros, probablement même des masses de l'ordre du kilogramme ou plus, mais leur nombre est certainement extrêmement petit.

Dans l'espace moyen, il y a environ 1 atome d'hydrogène par centimètre cube. Les autres atomes sont très rares.

Le nombre d'atomes par mètre cube d'espace est le suivant :

H	O	Ca	Na	K	Ti	Molécule	He
1 million	1 000	100	60	4	1	1	inconnu

Ces nombres paraissent très grands, mais il n'en est rien. Dans l'air, à la pression normale, il y a 30 millions d'atomes dans un cube de 1 micron de côté.

Les atomes isolés représentent la plus grande partie de la matière répartie; on estime que la masse des particules est 200 fois plus petite, et celle des grosses particules analogues aux météorites encore 2 fois plus petite. La densité moyenne de la matière est très faible. Entre les nuages interstellaires, il y a environ 10 mg de matière dans un cube de 1 000 km de côté. Avec cette donnée, nous pouvons calculer la masse répartie entre les étoiles. Le volume interstellaire est si immense qu'on aboutit à un résultat un peu surprenant : la matière diffuse entre les étoiles a une masse du même ordre que la masse des étoiles : dans notre Galaxie, il y a environ 100 milliards d'étoiles, et la masse de la matière non condensée est du même ordre que celle de ces étoiles.

Quelles sont les conditions physiques dans cet espace interstellaire? Si nous y placions un petit objet, il recevrait, en l'absence d'étoiles proches, une énergie très petite qui est celle diffusée par l'ensemble des étoiles de la Voie Lactée; l'objet s'échaufferait, si l'on peut employer ce mot, car la température n'atteindrait que 4 °K, soit — 269 °C. Il rayonnerait dans le domaine des ondes millimétriques.

Un atome isolé aurait normalement cette température, mais il pourrait absorber les rayonnements de façon sélective. Il serait excité et même il pourrait être ionisé. Dans ces conditions, la température des atomes peut être de 10 000 °K, et ceux-ci peuvent absorber la lumière. Ils se manifestent par des raies « interstellaires » qu'on observe dans le spectre des étoiles lointaines. Ces résultats sont surprenants. Il existe dans l'espace interstellaire des corpuscules d'énergies très différentes : il n'y a pas équilibre de température, car les chocs sont très rares; on estime qu'en moyenne, un atome d'hydrogène en rencontre un autre tous les 12 ans; par contre, il rencontrera une particule toutes les 15 minutes. En tous les cas, cette fréquence est insignifiante, il n'y a pas équilibre, et la notion même de température disparaît.

La physique de cet espace où l'équilibre thermique n'est pas réalisé, où se produisent des phénomènes insolites comme l'émission des raies interdites, est un laboratoire extraordinaire pour la physique.

Les sources astronomiques de rayons X

La détection de sources X à partir de fusées et de ballons a été entreprise en 1960 et elle a été immédiatement couronnée de succès par la découverte, en 1962, d'une source dans le Scorpion; la source a été nommée Sco X1. En 1967, une série de 30 sources discrètes était cataloguée, mais les positions observées étaient très imprécises à cause de la difficulté de repérer ces sources pendant des vols plus ou moins courts. Cette difficulté est aussi liée à la nature même des rayons X, pour lesquels il est très difficile, sinon impossible, de construire l'équivalent d'un télescope. On put néanmoins très rapidement montrer que l'une des sources situées dans le Taureau est liée à la nébuleuse du Crabe, le résidu de l'explosion de la supernova des chroniques chinoises (1054 après J.-C.).

Le vrai départ de ces recherches date de décembre 1970 avec le lancement du satellite Explorer 42 près de la côte du Kenya, qui a fonctionné pendant plus de 3 ans; le nom Swahili de Uhuru a été donné à ce satellite. En 1974, un catalogue de 161 sources a été dressé; la précision des positions est de l'ordre de 1 à 2', ce qui est une prouesse remarquable. Le domaine spectral allait de 2 000 à 20 000 eV (soit 6 à 0,6 Å). On estime que toutes les sources intenses du ciel sont actuellement connues. La plus intense (Sco X1) est située dans le Scorpion; une source dans le Sagittaire et la nébuleuse du Crabe sont environ 10 fois moins intenses.

Si l'on porte ces sources sur une carte céleste, on constate que nombre d'entre elles sont voisines du plan de la Voie Lactée et que la concentration vers le Sagittaire est importante. De nombreuses sources sont donc galactiques. Mais il existe aussi des sources situées loin de la Voie Lactée, qui sont liées à des galaxies extérieures. On estime actuellement que 40 % des sources X sont extragalactiques.

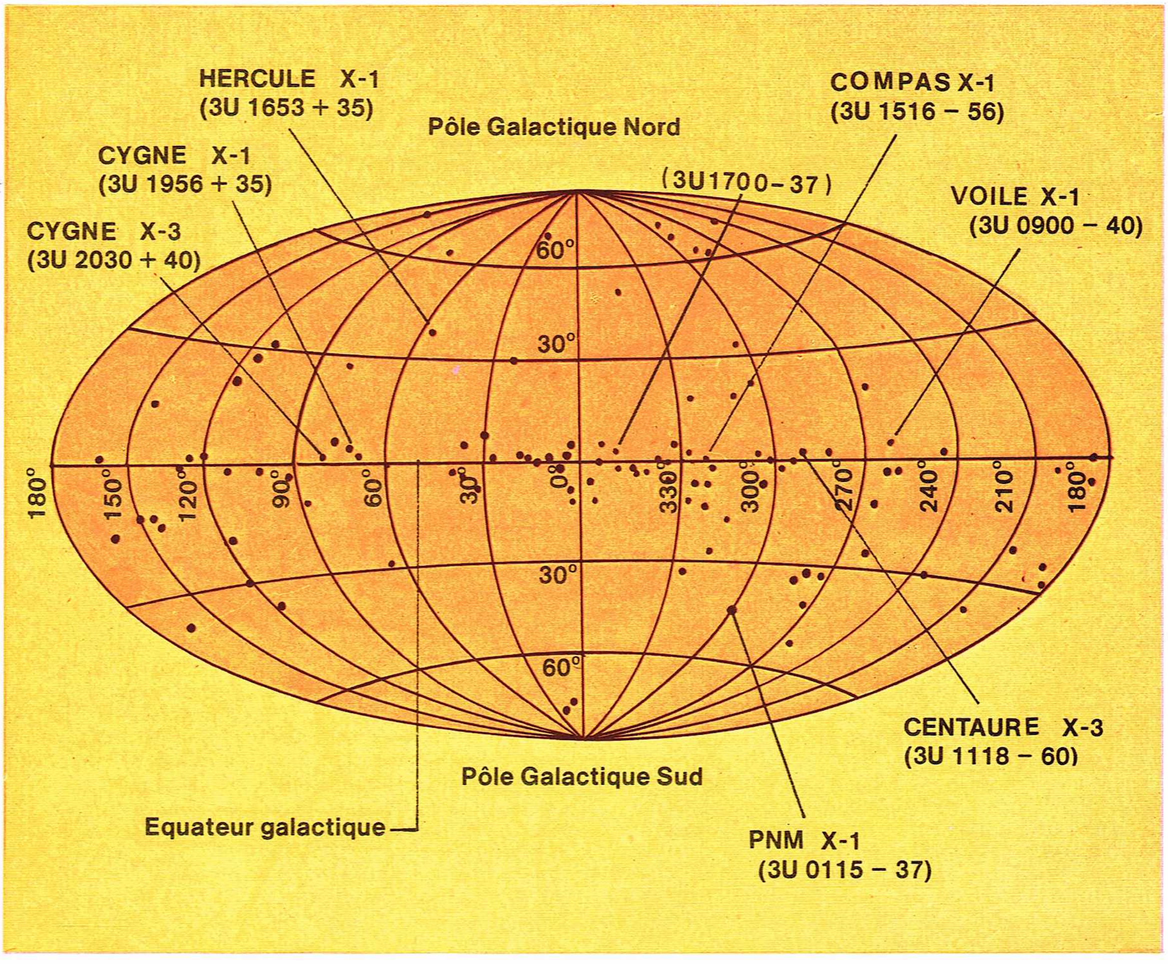

Richard Colin

◀ *Répartition des sources à rayons X sur la sphère céleste. Les coordonnées choisies sont les coordonnées galactiques. De nombreuses sources sont concentrées vers le plan de la Voie Lactée (d'après Ch. Ryter).*

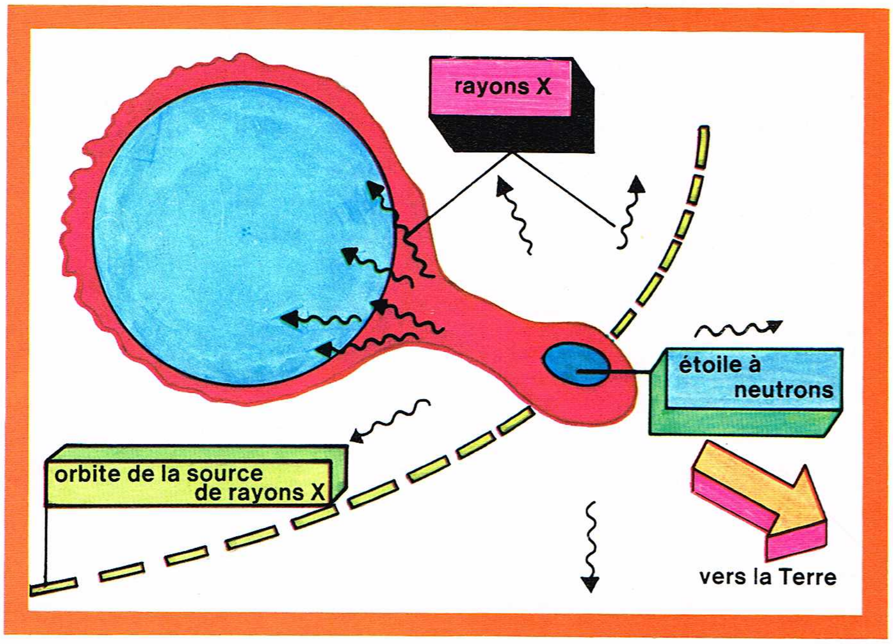

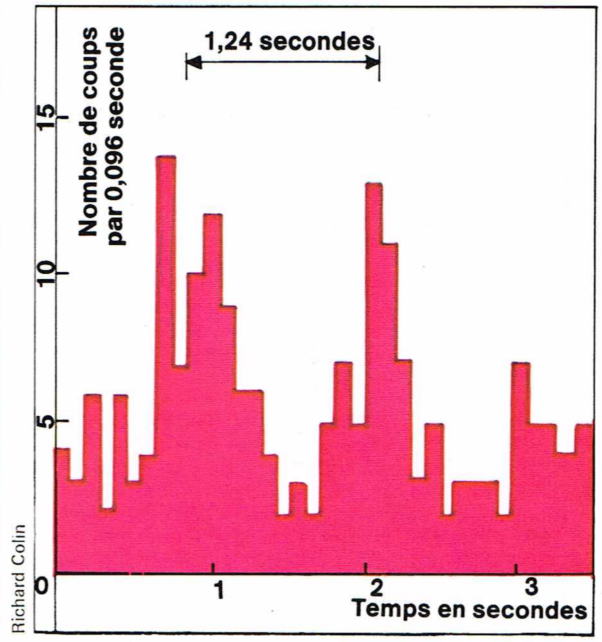

▲ *A gauche, schéma illustrant le processus d'accrétion de matière expliquant le rayonnement de certaines étoiles binaires (d'après Ch. Ryter). A droite, courbe montrant, en février 1972, la variation de l'émission X de la source Hercule X1 avec la période de 1,24 seconde (Observatoire Uhuru).*

Nous avons déjà indiqué qu'il a été possible d'identifier la source du Taureau avec la nébuleuse du Crabe. Des identifications analogues ont été possibles dans quelques cas, notamment lorsque les émissions sont variables dans le temps.

La source 3 U 09 00 40, située à 9 h 00 d'ascension droite et à 40° de déclinaison, a une période de 8,7 jours; dans son voisinage se trouve l'étoile HD 77581, de période très voisine, qui est une double spectroscopique connue depuis 1956. On reprit immédiatement une étude plus approfondie de cette étoile, et l'on montra que cette étoile est aussi une variable à éclipses et que les trois périodes des variations de l'éclat optique, de la vitesse sur l'orbite et de l'éclat des variations de la source X sont identiques à 8,95 jours. Ce fait rend l'identification absolument certaine.

L'étoile optique est une étoile double formée par une étoile principale chaude de type spectral B0, ayant un rayon de 22 millions de kilomètres, c'est-à-dire de 31 rayons solaires. L'étoile secondaire a une masse 12 fois plus petite, et elle tourne autour du centre de gravité du système sur une orbite ayant 36 millions de kilomètres de rayon. L'étoile secondaire est donc extrêmement proche de l'étoile principale, et celle-ci est très fortement déformée : elle présente une pointe dirigée vers l'étoile secondaire, et il y a presque contact entre les deux étoiles. Cette figure d'équilibre est prévue par la théorie (modèle de Roche).

La matière de l'étoile principale s'échappe de ce renflement, et elle est attirée par le compagnon. Si celui-ci était une étoile normale, comme le Soleil, l'énergie libérée par l'attraction d'un proton serait assez petite et produirait des radiations optiques ordinaires. Si l'étoile secondaire est une étoile à neutrons, l'énergie libérée est 50 000 fois plus grande que celle qui est libérée par l'attraction de cet atome par le Soleil. Si l'étoile secondaire est un trou noir, l'attraction libère une énergie encore 10 fois plus grande, et dans ces deux cas, l'énergie est émise sous forme de rayons X.

Actuellement, nous ne savons pas à quel type d'astre nous avons affaire. Des calculs théoriques montrent que, si la masse de l'étoile principale est supérieure à 35 masses solaires, l'étoile secondaire est un trou noir. Mais cette masse n'est pas connue avec précision. Pour une masse plus petite, le compagnon serait seulement une étoile à neutrons.

La variation de la source X s'explique simplement par le fait qu'une fois par révolution le compagnon passe derrière l'étoile principale : c'est une étoile à éclipses, analogue aux étoiles à éclipses optiques.

Une autre source, Her X1, est extrêmement curieuse et pose encore de nombreux problèmes. Cette source est modérément intense, mais ses émissions X sont modulées avec une période de 1,24 seconde et, de plus, l'émission cesse chaque 1,70 jour. Ce phénomène peut s'expliquer si l'on suppose que cette étoile X est un pulsar animé d'une rotation de période 1,24 seconde. Ce pulsar tourne autour du centre de gravité d'un système dont l'étoile principale est une étoile variable connue depuis 1936 : HZ Her, dont la période optique a été déterminée ultérieurement; elle est bien de 1,70 jour. Le phénomène est encore plus compliqué car l'émission X présentant la double périodicité de 1,24 seconde et 1,70 jour est modulée avec une nouvelle période de 35 jours. Les émissions X ne sont observées que pendant 13 jours de ce cycle de 35 jours. Cette dernière anomalie n'est pas encore expliquée. Il est certain que de nombreuses sources X sont aussi des étoiles doubles. On est convaincu de la duplicité pour 5 sources, dont 1 est située dans le Petit Nuage de Magellan (SMC X1). Mais toutes les sources ne sont pas de ce type.

Dans le Grand Nuage de Magellan, on connaît 4 sources X. La grande nébuleuse d'Andromède est aussi une source X; son intensité peut être expliquée si l'on admet qu'elle contient autant de sources discrètes que notre Galaxie. Un programme d'observations pour localiser ces sources est en préparation.

Mais il existe des sources extragalactiques qui doivent être expliquées autrement. Il en est ainsi de la source Centaurus A qui est située dans la très énigmatique galaxie NGC 5128. Cette galaxie est aussi une source radioastronomique très intéressante : le noyau est une source radio, mais la galaxie elle-même est accompagnée de deux sources situées à 5' de part et d'autre de ce noyau. Vu la distance de la galaxie, la distance réelle des sources est considérable : plusieurs dizaines de milliers de parsecs. On pense que ces sources ont été expulsées du noyau de la galaxie; il semblerait que la source X soit associée au noyau. Il existe quelques autres sources de ce type, notamment NGC 4151, qui est 20 fois plus lumineuse dans le domaine des rayons X que NGC 5128.

Enfin, l'amas des nébuleuses extragalactiques de Persée, un groupe de 500 galaxies, est environ 10 à 100 fois plus lumineux dans le domaine des rayons X que ne le laisse prévoir l'ensemble des galaxies. Parmi celles-ci existe une galaxie anormale, NGC 1275, qui a été le lieu d'une gigantesque explosion, connue depuis longtemps par les études radio et optique. Mais l'émission paraît s'étendre sur une zone de plus de 1/2 degré de diamètre. On ne connaît pas la cause de l'émission : on pense à l'interaction de la matière intergalactique attirée par ces galaxies, ou même à l'interaction des photons correspondant à la radiation cosmique de 3 °K, avec des électrons accélérés par un champ magnétique. Celui-ci n'aurait pas besoin d'être intense. Il ne s'agit en fait que de tentatives d'explication. Il est sûr que l'astronomie des rayons X, maintenant à peine âgée de 10 ans, ouvre de nouveaux horizons sur notre Univers.

Les astres infrarouges

La répartition en fonction de la longueur d'onde de l'énergie émise par un corps chauffé est régie par des lois bien connues depuis le début du XX^{e} siècle. Si l'on représente l'émission par centimètre carré et par intervalle de longueur d'onde, on obtient une courbe en cloche nommée loi de Planck d'après le nom du physicien allemand qui a trouvé cette loi. On sait, c'est une connaissance d'ailleurs plus ancienne que la loi elle-même, que le produit de la longueur d'onde du maximum par la température du corps est une constante. On a sensiblement, si T est exprimé en degrés Kelvin et λ en micromètres :

$$\lambda_m \cdot T = 3\,000.$$

Pour le Soleil, dont la température est 6 000 °K, ce maximum est situé à 0,5 μm. Pour une étoile à 3 000 °K, il sera à 1 μm, et, pour une étoile à 300 °K, à 10 μm.

La détection d'étoiles dans l'infrarouge doit donc nous permettre de trouver des astres très froids. Mais si l'énergie émise à chaque longueur d'onde par un corps augmente beaucoup avec la température, en fait l'énergie totale est proportionnelle à la puissance 4 de la température, c'est-à-dire que 1 cm^2 de surface chauffée à 6 000 °K émet $2^4 = 16$ fois plus d'énergie que la même surface chauffée à 3 000 °K, de sorte que la chance de trouver des étoiles infrarouges est très faible, d'autant plus que nos récepteurs sont très peu sensibles.

Au-delà de 1 μm, la plaque photographique n'est plus sensible, et les seuls récepteurs sont des cellules à sulfure de plomb pour le domaine spectral voisin, et ensuite des récepteurs qui fonctionnent comme des thermomètres. Ces récepteurs doivent être refroidis pour éviter les émissions parasites qui domineraient les courants à mesurer. Ces parasites sont liés aux propriétés physiques de ces récepteurs. Pour le domaine situé vers 1 ou 2 μm, on refroidit le récepteur à — 195 °C avec de l'azote liquide, mais, pour les domaines plus lointains, il faut refroidir les récepteurs vers — 271 °C à l'hélium liquide.

Mais deux autres difficultés sont à vaincre : le télescope (son miroir et ses parois) a normalement une température de 20 à 30 °C, c'est-à-dire de 300 °K, et émet beaucoup d'énergie vers 10 μm. On s'en affranchit en modulant la source céleste par oscillation du miroir secondaire, ce qui permet d'amplifier seulement cette source mais non l'émission parasite. Enfin, comme nous l'avons déjà indiqué, l'atmosphère terrestre est très absorbante dans l'infrarouge : cependant il y a des *domaines de transparence* ou *fenêtres* entre 1 et 5 μm. Un examen de toute la sphère céleste effectué dans ce domaine a permis de détecter de nombreuses étoiles. Il n'y a aucune surprise : la plus brillante est Bételgeuse, étoile supergéante ayant une température de 3 000 °K ; le second astre est R Dorade, une étoile variable connue du ciel austral, tout juste visible à l'œil nu et qui est aussi brillante que Bételgeuse dans l'infrarouge parce que sa température n'est que de 2 000 °K. Parmi les 10 étoiles les plus brillantes figurent quelques étoiles rouges brillantes et des étoiles variables connues.

La recherche des étoiles dans le domaine des ondes de 20 μm a été très difficile. Les recherches à partir du sol, même en haute montagne dans des sites particulièrement favorables comme au Mauna Kea à 4 200 m d'altitude

Les 10 astres infrarouges les plus intenses (domaine des ondes de 20 μm)

Astres	Flux	Diamètre en "	Température en °K
1 η Carinae	40	6	250
2 Nébuleuse Oméga	35	500	250
3. Nébuleuse d'Orion	25	100	100-500
4 IRC 10216	10	2	500
5 VY CMa	5	< 2	500
6 G 333, 6-0, 2	3	30	200
7 Centre de la Galaxie	2	40	200
8 N ML Cyg	2	< 2	500
9 IRC 10420	2	< 2	250
10 W	2	100	150-350

▲ ***Tableau des 10 astres infrarouges les plus intenses (domaine des ondes de 20 μm).***

C.N.R.S. - Observatoire de Haute-Provence

◀ ***Photographie de la nébuleuse d'Orion obtenue à l'aide d'un interféromètre avec un filtre à bande passante de 4 Å centré sur Hα.***

sur l'île de Hawaii, n'ont pas été couronnées de succès. Ce ne sont que les observations en ballon, en avion et en fusée qui ont permis de détecter un grand nombre de sources, qui ont été cataloguées par les astronomes du California Institute of Technology et portent le nom de sources IRC. Bien que la précision des positions ne soit pas considérable, on a pu identifier les sources les plus brillantes.

Les résultats étaient assez étonnants. L'astre le plus brillant est une étoile célèbre, η Carinae ; viennent ensuite la nébuleuse Oméga, la nébuleuse d'Orion, ou plus exactement des sources étendues liées à ces nébuleuses, puis la source IRC $+$ 10216.

La comparaison de l'émission des divers domaines spectraux a permis de montrer que ces sources ont des températures comprises entre 200 et 500 °K, c'est-à-dire environ — 70 et $+$ 230 °C. Le fait qu'on ait pu détecter des sources de ce type montre *a priori* qu'il s'agit de sources ou d'étoiles très volumineuses. C'est d'ailleurs ce que confirme l'observation : en effet, 6 des 10 sources les plus brillantes ont des diamètres angulaires notables.

Examinons trois cas typiques paraissant correspondre à trois types de sources.

η Carinae est une étoile célèbre qui a explosé en 1843 ; à cette date, son éclat rivalisa avec celui de Sirius, l'étoile la plus brillante du ciel. Depuis, l'éclat de l'étoile a baissé, et actuellement elle est à peine visible à l'œil nu. Il s'agit de l'explosion d'une nova ou même d'une supernova autour de laquelle on observe une nébulosité en expansion. Dans le domaine infrarouge, la dimension de la source atteint 1″ à 2 μm et 3″ à 20 μm. On peut estimer que la source a un diamètre de 12 000 unités astronomiques à 20 μm ; ce diamètre ne serait que de 4 000 unités astronomiques à 2 μm. On pense que l'étoile centrale a une luminosité de 2 millions de Soleils, avec une température de l'ordre de 10 000 °K. Cette étoile est entourée d'un nuage de poussières ayant des dimensions de l'ordre de 1 μm, de sorte qu'il absorbe pratiquement toute l'énergie de l'étoile, et qu'il s'échauffe en atteignant une température de 450 °K vers 2 000 unités astronomiques et de 250 °K à 6 000 unités astronomiques du centre. Nous observons une enveloppe de poussière dont la température diminue avec la distance à l'étoile centrale.

La source 10216 est de même nature, mais son diamètre apparent, variable avec la longueur d'onde, est plus petit, et l'étoile centrale paraît être une étoile carbonée froide.

La plupart des autres sources sont manifestement associées à des nébuleuses gazeuses, quelquefois visibles optiquement et quelquefois cachées par l'absorption interstellaire. Mais dans tous les cas, les astres sont visibles dans le domaine des ondes hertziennes. L'explication de ces sources doit être analogue à celle des sources précédentes. Toutefois, pour l'une des sources associées à la nébuleuse d'Orion, on se demande si on n'est pas en présence d'une proto-étoile, c'est-à-dire d'une étoile en formation par condensation gravitationnelle.

Une source présente un intérêt particulier : c'est celle qui se trouve dans le Sagittaire et qui est manifestement associée au centre galactique. On sait que les noyaux des galaxies extérieures comme la nébuleuse d'Andromède sont des sources sensiblement ponctuelles : il doit en être de même pour le centre de notre propre Galaxie mais la source est cachée par l'absorption interstellaire. Cependant elle est détectable vers 2 μm, et on pourrait alors l'expliquer par l'émission infrarouge de millions d'étoiles; mais comme l'émission augmente encore vers 20 μm et que le maximum paraît situé à 50 μm, l'explication doit être différente. Le centre de notre Galaxie est une source radioélectrique double, associée à de nombreuses molécules que nous avons décrites. La source infrarouge est quadruple, mais sa structure est encore mal connue. Nous ne savons pas si l'émission infrarouge est due à l'émission par des particules de poussières échauffées à 200 °K ou bien s'il s'agit d'une émission particulière du type synchrotron. Il est trop tôt pour trancher. Des mesures vers 100 μm et 1 mm s'imposent avant de conclure.

On constate que les résultats obtenus pour ces sources infrarouges nous posent des problèmes nouveaux. D'autre part, nous connaissons aussi autour d'étoiles chaudes des enveloppes de poussières, qui rediffusent de l'énergie : le maximum est situé normalement dans le bleu ou l'ultraviolet, mais elles émettent aussi des radiations infrarouges, et un second maximum est situé vers des longueurs d'onde de quelques micromètres. Nous observons de plus en plus ces interactions essentielles entre les étoiles et le milieu interstellaire.

La vie et la mort des étoiles

Nous avons vu que toute l'énergie émise par le Soleil a une origine nucléaire et provient de la transformation de 4 atomes d'hydrogène en 1 atome d'hélium, réaction qui a lieu dans la partie centrale du Soleil et qui produit de l'énergie parce que l'atome d'hélium a une masse inférieure à celle des quatre protons à partir desquels il est formé. La différence entre les masses se transforme, selon la théorie d'Einstein, en énergie sous forme de rayonnement γ dense, c'est-à-dire d'un rayonnement électromagnétique qui est transformé en rayonnement lumineux normal par le mécanisme du transfert de l'énergie. Les couches successives du Soleil absorbent le rayonnement et réémettent un rayonnement plus doux.

Il reste néanmoins une énigme à résoudre pour le Soleil. Les réactions nucléaires, qu'elles soient les réactions de combustion directe de l'hydrogène ou que ce soit le cycle plus complexe de Beethe, produisent des *neutrinos*. Ces particules sont dénuées de masse et de charge, mais elles ont néanmoins un mouvement de rotation ou spin. A cause de leur absence de masse et de charge, les neutrinos ne réagissent que très difficilement avec la matière, et ils peuvent passer à travers des épaisseurs énormes sans être absorbés. Ils peuvent ainsi traverser toute la matière du Soleil et aussi celle de la Terre sans que leur nombre diminue de façon appréciable. On connaît néanmoins des mécanismes d'absorption mais ils sont tous très peu efficaces. Le nombre de neutrinos reçu par la Terre et provenant du Soleil est considérable; chaque centimètre carré de la surface terrestre reçoit par seconde du Soleil : 1/30 de calories, c'est-à-dire 420 millions de milliards de photons ($4{,}2 \cdot 10^{17}$), mais aussi un nombre de neutrinos de 60 milliards.

Les neutrinos sont absorbés lorsqu'ils heurtent des noyaux de Cl^{37}, et ils forment alors des atomes d'argon A^{37} qui sont radio-actifs avec une période de 35 jours. Cette radio-activité permet de les détecter. Mais l'expérience est très difficile, car la réaction est très peu efficace et, d'autre part, nous connaissons d'autres réactions nucléaires qui produisent aussi de l'argon A^{37}. Pour cette raison, R. Davis a tenté l'expérience sur une cuve de 610 tonnes de perchloréthylène, un détergent bon marché, beaucoup plus facile à manipuler que le chlore. Cette cuve de 400 m^3 était enterrée à 1 500 m de profondeur dans une mine d'argent désaffectée dans le Dakota du Sud. Après des expositions de 35 jours, on extrayait l'argon par entraînement avec de l'hélium, technique souvent utilisée en physique nucléaire. La durée de vie de 35 jours ne permet pas d'accumuler plus d'atomes A^{37}, même si l'on expose la cuve plus longtemps.

Comme dans toute expérience, il y a des causes d'erreur, et l'expérience a montré que le nombre de réactions observées était de l'ordre de grandeur de cette erreur et environ 6 fois plus petit que la plus petite valeur attendue. En effet, suivant le cycle de réaction nucléaire admis, le nombre de neutrinos efficaces dans la réaction est un peu différent. Ce désaccord entre la théorie et les mesures pose aux astrophysiciens une énigme fondamentale : y a-t-il erreur de la théorie ou erreur dans les expériences? Actuellement nous ne le savons pas.

Quels sont les processus stellaires correspondants ? Pour étudier cette question, il est nécessaire de reparler des atomes et des réactions nucléaires. Prenons un atome relativement simple, comme l'atome de carbone $_6C^{12}$. Il est formé par un noyau autour duquel tournent 6 électrons. L'ensemble est neutre, de sorte que le noyau doit contenir 6 particules chargées positivement; en fait, il s'agit de 6 protons. Dans le cas actuel, ce noyau est complété par 6 neutrons. Les protons et les neutrons ont sensiblement la même masse. Le symbole $_6C^{12}$ résume cette constitution, d'ailleurs de façon redondante, car le fait qu'il y ait 6 protons dans le noyau montre qu'il s'agit d'un atome de carbone ; en effet, la nature chimique de l'atome est définie par les 6 électrons périphériques qui sont équilibrés par les 6 protons. Il existe un autre atome de carbone, $_6C^{13}$, qui

contient un neutron de plus dans son noyau, mais c'est aussi du carbone comme l'est aussi l'isotope instable $_6C^{14}$. Cet atome a la même masse (ou très sensiblement) que l'atome $_7N^{14}$ qui est l'atome normal d'azote : il contient dans son noyau 7 protons et donc 7 électrons périphériques.

Nous savons aujourd'hui que les noyaux sont extrêmement petits. Les atomes ont des diamètres de l'ordre de l'angström (Å), c'est-à-dire du 1/10 000 de micron; les noyaux ont des diamètres variant de 1,2 à 6,0 millionièmes d'angström. Le noyau peut être très valablement comparé à notre Soleil qui occupe lui aussi une place infime dans notre système solaire : un diamètre de 6/100 d'unité astronomique dans un système de 80 unités astronomiques de diamètre (diamètre de l'orbite de Pluton).

Le noyau est donc extrêmement dense; nous savons que les électrons sont fixés aux atomes par l'attraction électrostatique de Coulomb. Cette liaison est très faible : pour arracher un électron de l'atome de carbone, il suffit de lui appliquer une différence de potentiel de 11,3 volts. On dit que l'énergie de liaison de ce premier électron est de 11,3 électrons-volts (11,3 eV).

Il existe une force de liaison qui lie entre eux les nucléons, c'est-à-dire les protons et les neutrons. Ni la nature de cette force ni même la loi mathématique de sa variation avec la distance ne sont encore connues, mais l'attraction est très grande pour les petites distances et devient négligeable même aux distances atomiques. Aux distances nucléaires, elle dépasse considérablement les effets électriques, ce qui explique pourquoi les protons chargés positivement ne se repoussent pas et restent liés dans le noyau.

L'énergie de liaison d'un nucléon est considérable : environ 1 million de fois supérieure à l'énergie de liaison des électrons. C'est cette grande valeur de l'énergie qui explique la stabilité des noyaux atomiques dans les conditions de température que nous savons réaliser ou qui se produisent spontanément dans les réactions chimiques.

L'ensemble des atomes naturels va de l'atome d'hydrogène à celui d'uranium.

Le neutron pourrait être considéré comme le premier atome de la série, de numéro atomique 0, mais il n'est pas stable à l'état libre, et il se convertit spontanément en un proton et un électron. Sa durée de vie est de 12 minutes.

L'uranium a le nombre atomique A = 92. Il existe sous deux formes isotopiques naturelles $_{92}U^{238}$ et $_{92}U^{235}$, toutes les deux radio-actives avec des périodes de 4,5 milliards et 760 millions d'années. L'isotope $_{92}U^{234}$ ayant une période plus courte (250 000 ans) existe aussi à l'état de traces dans les minerais. Tous ces atomes se décomposent spontanément. On sait qu'on peut accélérer la décomposition et produire ainsi de l'énergie nucléaire soit sous forme utilisable, soit sous forme de la bombe à uranium à base d'U^{235}. Il existe dans la nature d'autres éléments radio-actifs comme le radium et le thorium. On sait que les physiciens ont pu produire actuellement tous les éléments jusqu'à l'élément 103, le lawrencium. Tous les éléments plus lourds que l'uranium sont radio-actifs.

L'observation montre que les isotopes stables ont un nombre de protons, c'est-à-dire d'électrons de valence, sensiblement égal au nombre des neutrons; ce dernier nombre est un peu plus grand pour les atomes lourds; l'uranium U^{235} contient 92 protons pour 147 neutrons. On sait aussi que l'énergie de liaison des nucléons passe par un maximum pour le fer Fe^{56}, où elle atteint 8,8 méga-électrons-volts (8,8 MeV) par nucléon, alors qu'elle n'est que de 7,1 MeV pour l'hélium, et elle décroît de nouveau au-delà du fer.

Il est aujourd'hui possible de faire de la chimie nucléaire en bombardant des noyaux d'atomes par des particules, surtout des neutrons; on peut aussi produire de nouveaux isotopes, en général instables, s'ils n'existent pas déjà dans la nature.

Nous n'aborderons pas ici le problème important de la quinzaine de particules élémentaires trouvée par les physiciens soit dans la nature, soit dans les accélérateurs de particules; rappelons tout de même la difficulté rencontrée par le fait qu'on n'a pas trouvé de neutrino d'origine solaire.

Production d'énergie dans le Soleil

Avant d'aborder le problème de la formation des éléments dans l'Univers, donnons quelques compléments sur la production de l'énergie dans le Soleil. Comme nous le savons maintenant avec certitude, c'est la réaction globale :

4 protons → un hélion + 2 neutrinos + énergie

qui explique la formation de l'énergie dans la partie centrale du Soleil. Cette énergie solaire est évaluée à 26,2 MeV par *hélion* formé (on nomme ainsi l'atome d'hélium ionisé; cette particule porte aussi quelquefois le nom de *particule* α).

La réaction qui a lieu effectivement dans le Soleil est la réaction directe décrite par le tableau ci-dessous.

C'est la première réaction de formation directe d'un deutérium qui est la plus longue et qui conditionne la production d'énergie qui se fait dans la partie centrale où la température est estimée à 13 millions de degrés pour une masse volumique de 100 g/cm³.

On a cru assez longtemps que, dans le Soleil, la réaction était la réaction plus compliquée donnée par le cycle de Beethe, où la capture des protons est faite successivement par des noyaux de C^{12}, C^{13}, N^{14}, O^{15}, N^{15}, mais où ces atomes se retrouvent à la fin de la réaction et ne servent que de catalyseurs. Cette réaction qui nécessite la présence de C^{12} se produit dans des étoiles plus chaudes que le Soleil. Le bilan est pratiquement identique à celui de la réaction directe, bien que les deux neutrinos qui s'échappent aient une énergie un peu différente dans les deux réactions.

Formation d'une étoile

Examinons maintenant la formation d'une étoile. N'oublions pas que la description que nous allons donner nécessite un certain nombre d'hypothèses initiales que nous devons admettre. Nous pouvons ensuite confronter nos résultats avec l'observation.

Supposons qu'à l'origine, une certaine masse d'hydrogène isolée existe dans notre Galaxie. Donnons-nous la masse de cette bulle et examinons ce qu'elle va faire : la physique montre qu'elle va se contracter sous l'action de la gravitation et libérer ainsi une certaine énergie. La masse d'hydrogène va s'échauffer. Il se forme ainsi une proto-étoile dont le centre peut s'échauffer jusqu'à atteindre une température de l'ordre de 10 ou 20 millions de degrés. Dans ces conditions, la réaction nucléaire de formation de l'hélium peut s'amorcer. Cette contraction est, à l'échelle astronomique, très rapide : on l'estime à quelques milliers

▼ ***Tableau : en haut, réaction de fusion de l'hydrogène; en bas, fusion de l'hydrogène par la réaction de Beethe (catalyse).***

Réactions de fusion de l'hydrogène

Réaction	Produits	Énergie	Durée
$_1H^1 + {_1H^1} \rightarrow {_1D^2}$	$+\beta^+ + \nu$	1,44 Mev	(14×10^9 années)
$_1D^2 + {_1H^1} \rightarrow {_2He^3}$	$+\gamma$	5,49 Mev	(6 secondes)
$_2He^3 + {_2He^3} \rightarrow {_2He^4}$	$+ {_1H^1} + {_1H^1} + \gamma$	12,85 Mev	(10^6 années)

Fusion de l'hydrogène par la réaction de Beethe (catalyse)

Réaction	Énergie	Durée
$_6C^{12} + {_1H^1} \rightarrow {_7N^{13}} + \gamma$	1,95 Mev	(1.3×10^7 années)
$_7N^{13} \rightarrow {_6C^{13}} + \beta^+ + \nu$	2,22 Mev	(7 minutes)
$_6C^{13} + {_1H^1} \rightarrow {_7N^{14}} + \gamma$	7,54 Mev	(2.7×10^6 années)
$_7N^{14} + {_1H^1} \rightarrow {_8O^{16}} + \gamma$	7,35 Mev	(3.2×10^8 années)
$_8O^{16} \rightarrow {_7N^{15}} + \beta^+ + \nu$	2,71 Mev	(82 secondes)
$_7N^{15} + {_1H^1} \rightarrow {_6C^{12}} + {_2He^4} + \gamma$	4,96 Mev	(1.1×10^5 années)

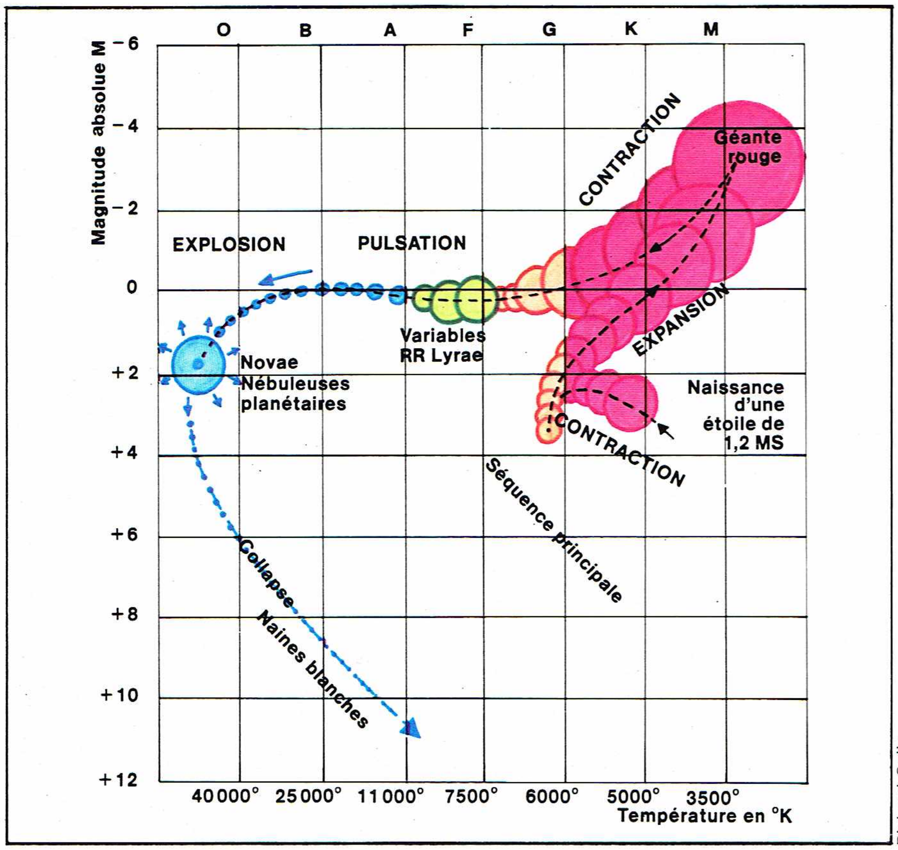

Richard Colin

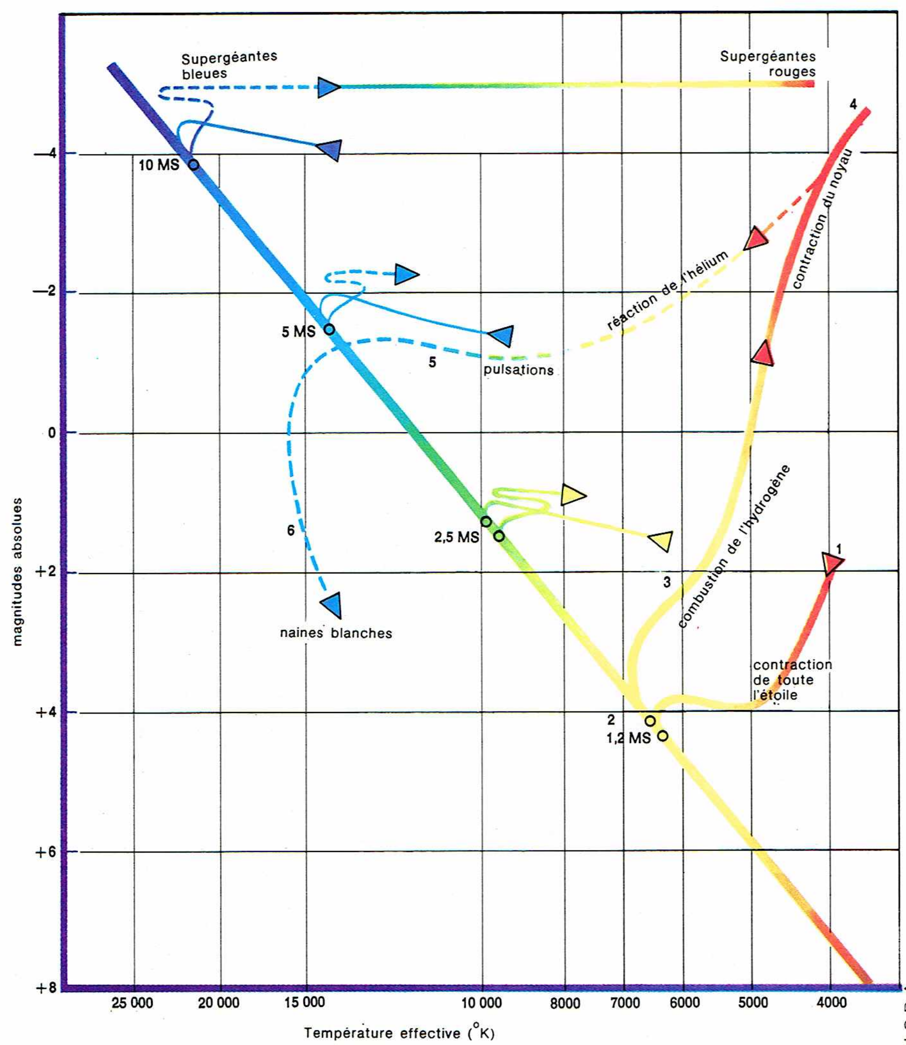

I.G.D.A.

d'années. Les proto-étoiles sont donc à un moment donné très rares, ce qui explique qu'on ne les observe pas et que nous ne les voyons pas figurer dans le diagramme de Russell-Hertzsprung. On pense que l'étoile se place à la fin de cette contraction sur la série principale. Nous avons représenté le parcours hypothétique de l'étoile pendant cette condensation par la ligne pointillée de la figure ci-contre.

Lorsque l'étoile est placée sur la séquence principale, elle y demeure longtemps, presque jusqu'à la transformation de tout son hydrogène en hélium. L'étoile y reste des milliards d'années. Pour les étoiles massives, une nouvelle réaction s'amorce avant la fin de la combustion de tout l'hydrogène. Deux hélions s'agglomèrent pour former un noyau de béryllium Be^8 qui, à son tour, capture un autre hélion pour former un noyau de carbone C^{12}. L'énergie dégagée dans ces réactions est très importante.

Un calcul précis de la production de l'énergie, de sa transmission à travers l'atmosphère stellaire est possible à chaque instant. Il est aussi possible de calculer l'éclat intrinsèque de l'étoile et son type spectral ou sa couleur équivalente et de placer l'étoile dans le diagramme de Russell-Hertzsprung. On peut ainsi tracer les lignes que suivent les étoiles dans ce diagramme. Si l'on tient compte des temps pendant lesquels chaque étoile stationne en divers points du diagramme, on peut calculer l'accumulation des points, c'est-à-dire le diagramme lui-même. On retrouve assez bien le diagramme des amas globulaires qui sont donc nés dès le début de la formation de notre Galaxie.

Naturellement, l'évolution ne s'arrête pas, et avec la production de carbone, ce sont les éléments plus lourds qui se forment à leur tour. Les calculs de cette phase ne sont pas encore au point. On pense que l'étoile repasse par la ligne de la séquence principale et qu'elle se transforme ensuite en naine blanche.

Le calcul montre que la contraction de la partie centrale est accompagnée, pour les étoiles massives, d'une dilatation de l'extérieur et de l'éjection d'une quantité importante de matière. Cette matière contient maintenant de l'hélium et des atomes lourds, de sorte que l'espace interstellaire se peuple de ces atomes.

La condensation peut recommencer à partir de ce mélange ; les étoiles de seconde génération ainsi formées sont les étoiles récentes de population I. La grande différence provient de la présence du carbone dans le mélange initial ; il en résulte que, pour les étoiles massives, la température centrale devient assez importante pour déclencher le *cycle du carbone,* qui est un grand générateur d'énergie, ce qui explique la présence des étoiles O et B très chaudes parmi les étoiles de population I alors qu'elles n'existent pas pour les étoiles de première génération. Ces étoiles consomment leur énergie en très peu de temps ; elles sont donc très jeunes, de l'ordre de 30 à 50 millions d'années, et, comme elles évoluent très vite, elles ne sont jamais nombreuses à un moment donné de l'évolution de la Galaxie.

On a calculé aussi pour ces étoiles les diagrammes de Russell-Hertzsprung avec les lignes que décrit chaque étoile. On peut étalonner ces lignes en âges, et c'est la comparaison de ces diagrammes théoriques avec les diagrammes observés qui a permis la détermination des âges des amas stellaires de population I. Ici encore l'évolution ultérieure est mal connue ; on pense que les étoiles peuvent passer par le stade de supernova en laissant pour résidu une étoile dégénérée et en produisant une émission considérable de matière. Il y a donc une nouvelle régénération de la matière interstellaire, et le cycle peut recommencer.

Notre Soleil est une étoile de population I qui s'est donc condensée à partir de la matière contenant de l'hélium, du carbone, etc. Elle est actuellement, et depuis probablement 5 milliards d'années, sur la série principale dont elle s'éloigne insensiblement, mais les durées de l'évolution stellaire se chiffrent par milliards d'années.

D'après notre schéma d'évolution des étoiles de population II et I, on s'attend à une différence de composition chimique des atmosphères de ces deux types d'étoiles : les étoiles anciennes, formées à partir de l'hydrogène, doivent contenir beaucoup moins d'éléments lourds, notamment de métaux, que les étoiles de formation récente de population I qui, elles, sont formées à partir d'un milieu interstellaire contenant déjà des métaux. Les astrophysi-

ciens ont l'habitude de caractériser cette richesse en métaux par la détermination de la proportion : métaux/hydrogène. La détermination spectroscopique de ce rapport est difficile, et les résultats sont encore imprécis, mais il semble bien établi que les étoiles récentes sont plus riches en métaux que les étoiles anciennes.

Un problème important est la nucléosynthèse des éléments lourds. Les réactions normales sont la capture des hélions par les noyaux déjà formés; on ne devrait ainsi retrouver dans le mélange que des atomes de nombre atomique 4, 8, 12, etc. Nous avons déjà vu que certains atomes comme N^{14}, O^{16}, etc., se forment par capture de protons. Mais cette capture est difficile à cause d'un effet accessoire dû aux charges des noyaux. La capture des neutrons est beaucoup plus facile, mais ils sont instables et la formation de certains atomes ne peut s'expliquer que si des sources de neutrons existent dans certaines étoiles. On peut imaginer de telles sources.

On a trouvé dans quelques étoiles du technétium $_{43}Tc$, élément radio-actif de période 2 millions d'années. Nous assistons donc à sa création récente. On essaye aussi d'expliquer certaines supernovae par la présence de californium, mais cette théorie est fort discutée.

L'évolution stellaire peut être illustrée par l'exemple de l'étoile *FG Sagittae* qui n'est peut-être pas classique, car son évolution est beaucoup plus rapide que celle qui est prévue par la théorie. Cette étoile est connue depuis de nombreuses années comme une étoile variable, mais elle a attiré l'attention des astronomes de Lick depuis 1958, et son étude a été poursuivie par Herbig et Boyarchuk d'abord, puis par Langer, Kraft et Anderson. C'était en 1894 une étoile faible de magnitude 13,6. Mais en 1955, elle avait la magnitude 10,5 et le type spectral B4. Elle était devenue une supergéante. Son éclat a continué à augmenter d'environ 0,2 magnitude par an, et son type spectral devint B9 en 1960, A3 en 1965 où sa magnitude était de 9,7, puis A7 en 1967, et atteignit même F6 en 1972 (magnitude 9,6). Il semble donc que cette étoile décrive une des trajectoires d'évolution du diagramme Russell-Hertzsprung. Ce qui est surprenant, c'est la rapidité. Comme nous devions nous y attendre, cette évolution était accompagnée de l'éjection d'une enveloppe entre 1960 et 1965. Mais la photographie montre aussi une enveloppe ancienne ayant un âge de l'ordre de 6 000 ans.

Ce qui est intéressant, c'est l'apparition dans le spectre de FG Sag des raies des éléments lourds yttrium, zirconium, cérium et lanthane dont la proportion a augmenté depuis 1967; ces éléments sont 25 fois plus abondants que dans l'atmosphère solaire. Ils pourraient être de formation récente et résulter de la capture de neutrons par les éléments du groupe du fer qui sont assez abondants.

On propose pour ces étoiles le *modèle* suivant : dans une partie centrale de l'étoile existe une couche où a lieu la réaction de combustion de l'hélium, où la température serait de l'ordre de 100 millions de degrés K. Au-dessus de cette couche existe une seconde couche où l'hydrogène brûle, et la température est de l'ordre de 10 à 20 millions de degrés. S'il existe des instabilités dans la couche interne, du carbone, formé par la combustion de l'hélium, est projeté vers la couche où brûle l'hydrogène. Il se forme alors de l'azote N^{13} qui se transforme par radio-activité en carbone C^{13}, qui réagit à son tour avec l'hélium pour former de l'oxygène O^{16} et des neutrons. Cette source fournit les neutrons qui sont capturés par les éléments du groupe du fer. On explique ainsi dans ce modèle la création si difficile à comprendre des éléments lourds. L'éjection des enveloppes est liée aux instabilités constatées.

Cycle d'évolution des étoiles

Comme nous l'avons indiqué, le *cycle d'évolution* dépend essentiellement de la masse de matière qui se contracte. En conclusion d'un colloque récent sur cette question, on peut grouper les étoiles d'après cette masse et indiquer les évolutions suivantes :

— Les *étoiles très légères* (dont la masse initiale est inférieure à 1/10 de masse solaire) se contractent sans que jamais leur température intérieure ne puisse atteindre la valeur critique de l'ordre de 10 millions de degrés où l'hydrogène se consume pour se transformer en hélium. Ces étoiles ne sont jamais très lumineuses et ne sont pratiquement pas observables, mais néanmoins, on pense qu'elles existent.

— Les *étoiles de la seconde classe* sont celles qui, au cours de leur évolution, atteignent le stade de la combustion de l'hélium. Il s'agit d'étoiles relativement légères. On admet que leurs masses sont inférieures à 4 masses solaires. Mais cette valeur est incertaine. Notre Soleil fait partie de ce type d'étoiles. On pense qu'après un assez long stationnement près de la branche principale du diagramme de Russell-Herzsprung, elles s'en détachent pour ensuite évoluer rapidement vers le stade de géantes rouges. Puis l'évolution est assez incertaine; certaines étoiles redeviennent des étoiles plus chaudes et seraient soumises à des pulsations; elles éjecteraient de la matière en formant des nébuleuses planétaires. Le stade final serait celui de naines blanches.

— Les *étoiles moyennement massives* (entre 4 et 8 masses solaires) atteignent, après le stade de la combustion de l'hydrogène, celui de la combustion de l'hélium et ensuite celui de la combustion du carbone à l'intérieur d'un noyau dégénéré. Ce qui se passe après n'est pas certain : d'après certains théoriciens, ces grosses masses exploseraient pour donner des supernovae avec éjection de matière et formation d'une étoile à neutrons. Selon d'autres, la fin serait la même, mais la durée de l'évolution serait beaucoup plus longue, car l'étoile se refroidit en perdant de nombreux neutrinos qui emmènent de l'énergie.

— Pour les *étoiles hypermassives* (ayant des masses supérieures à 10 masses solaires), la théorie est très imparfaite. On pense, résultat curieux, que ces étoiles ne sont pas explosives, que le cycle du carbone se passe dans un noyau central non dégénéré et que le stade final est un trou noir.

Il est inutile de dire que ces théories ne sont actuellement que des images imparfaites, mais elles donnent des idées importantes bien qu'elles nécessitent encore de nombreuses observations et de nombreux calculs.

Toutes ces théories sont très difficiles à de nombreux points de vue : les calculs sont difficiles à mettre en équation et à exécuter et de nombreuses valeurs des constantes nucléaires sont très mal connues. Mais la théorie est aussi difficile parce que nous connaissons insuffisamment les propriétés de la matière aux hautes pressions et températures. L'hydrodynamique de ces milieux est encore une science débutante. Quelles sont les conditions du mélange de la matière à l'intérieur des étoiles? Peut-on négliger la turbulence? Comment se fait le transfert d'énergie? Il est donc normal que la théorie soit imparfaite, mais les grandes lignes de l'évolution stellaire sont comprises.

C.N.R.S. - Observatoire de Haute-Provence

▲ Nébuleuse NGC 7635 montrant le résidu d'une explosion d'étoile; l'étoile est trop faible actuellement pour être identifiée avec certitude.

◀ Page ci-contre, en haut, représentation graphique de l'évolution d'une étoile de masse 1,2 masse solaire (d'après D. Menzel). En bas, schéma de l'évolution (1, 2, 3, 4, 5 et 6 sont les étapes de cette évolution) d'une étoile ayant une masse de 1,2 masse solaire (1,2 MS) dans le diagramme Russell-Hertzsprung. On indique aussi l'évolution d'étoiles ayant des masses de 2,5, 5 et 10 masses solaires (respectivement 2,5 MS, 5 MS et 10 MS). On indique également la couleur et par conséquent la température de l'étoile pendant son évolution.

▲ *Photographie composite de la Voie Lactée. Ce montage de 14 clichés de 60 degrés de champ chacun montre notre Galaxie (la Voie Lactée) telle qu'elle apparaîtrait à un observateur, situé dans notre système solaire, qui ne percevrait que faiblement la lumière provenant des étoiles mais serait en revanche particulièrement sensible à la lumière issue des grands nuages de matière ionisée de l'espace interstellaire. Ces nuages brillants, constitués principalement par de l'hydrogène, s'étendent le long de la Voie Lactée depuis la constellation de l'Aigle (à gauche) jusqu'à celle du Cygne (à droite). On remarque la grande inhomogénéité de leur structure : nuages intenses d'apparence grossièrement circulaire, nuages diffus très étendus, nuages d'aspect filamentaire. Leur température est voisine de 6 000 °K, leurs distances varient de quelques centaines à plus de 6 000 années de lumière. Certains sont totalement masqués à la vue de l'observateur par de la poussière absorbante (zones sombres).*

LES GALAXIES

La Voie Lactée ou Galaxie

La Voie Lactée est la bande laiteuse bien visible en été qui traverse les constellations du Sagittaire, de l'Aigle et du Cygne. En automne, on la voit dans Cassiopée, Persée, le Cocher où elle est d'ailleurs moins brillante. En hiver, elle passe près d'Orion, traverse la Licorne et la Poupe. Naturellement, elle se prolonge dans l'hémisphère austral où elle est très brillante. Elle passe par la Voile, la Carène, la Croix du Sud, le Centaure, la Règle, le Scorpion, elle rejoint le Sagittaire où elle est particulièrement brillante. Nous verrons que le centre de notre système est situé dans cette direction.

L'examen de la Voie Lactée avec des instruments de plus en plus puissants montre qu'elle se résoud en étoiles extrêmement nombreuses. Parmi ces étoiles existent de nombreuses nébuleuses gazeuses et des nuages absorbants. Une étude détaillée de la Voie Lactée montre qu'elle occupe un grand cercle de la sphère céleste, incliné de 63° sur l'équateur céleste. Ce cercle galactique peut être tracé à la fois à l'aide des étoiles brillantes, des étoiles faibles, des nébuleuses, mais aussi par l'émission des raies de la radioastronomie : ondes continues de 1 m ou raie de 21 cm de l'hydrogène neutre. Une étude détaillée de la répartition des étoiles sur le ciel montre un certain nombre de faits intéressants.

Les étoiles brillantes sont plus nombreuses vers le plan de la Galaxie. Ainsi, sur une même surface, il y a trois fois plus d'étoiles dans le plan galactique qu'au pôle. Mais cette concentration augmente beaucoup avec la magnitude : pour la magnitude 10, elle est de 5, pour la magnitude 15 de 14 et pour la magnitude 21 de 62. Le nombre total d'étoiles plus brillantes que la magnitude 21 par degré carré est de 100 000 dans le plan galactique, alors qu'il n'est que de 1 600 au pôle galactique. Le nombre total d'étoiles dont la magnitude est inférieure à une valeur donnée augmente rapidement. Lorsqu'on passe de la magnitude 2 à 3, le nombre est multiplié par 2,8 ; lorsqu'on passe de 10 à 11, le rapport est 2,7 ; il devient 2,3 entre 15 et 16, et seulement 1,7 lorsqu'on passe de 20 à 21. Un calcul relativement simple montre que ce rapport serait de 3,98 si tout l'espace était uniformément rempli d'étoiles identiques. Cela n'est donc pas le cas, et, lorsqu'on atteint la magnitude 21, on commence à s'approcher des limites de notre système, la Voie Lactée. Un paradoxe amusant résulte d'un calcul analogue : si l'espace était uniformément rempli d'étoiles, le ciel serait éblouissant, il aurait une température de 6 000 °K, température moyenne des étoiles, ce qui confirme que le système des étoiles n'est pas infini.

La concentration des étoiles vers le plan de la Voie Lactée, la diminution de l'augmentation du nombre d'étoiles avec la magnitude font penser que notre système est analogue à l'une des nombreuses nébuleuses spirales que nous pouvons photographier. La photographie composite de notre Voie Lactée est d'ailleurs étrangement semblable à certaines nébuleuses extragalactiques vues par la tranche. Cela nous amène à prendre ces nébuleuses comme modèles de notre système, la Galaxie.

Les étoiles du voisinage solaire

Avant d'étudier dans son ensemble notre système, étudions d'abord les étoiles voisines du Soleil, ce qui nous donne des indications sur le peuplement en étoiles de la Galaxie en ce point particulier, endroit où se trouve notre Soleil.

Limitons l'étude à une petite sphère entourant le Soleil, à l'intérieur de laquelle on a des chances d'observer toutes les étoiles. On a ainsi fait la statistique de toutes les étoiles situées dans une sphère de 5 parsecs (16,5 années de lumière) de rayon. Dans ce volume, on a détecté 48 étoiles, dont 23 étoiles isolées, 11 étoiles doubles et 1 étoile triple (40 Eri). Aucune de ces étoiles n'est une étoile variable. Dans cette sphère, le nombre d'étoiles est de 0,094 étoile par parsec cube. Comme beaucoup de ces étoiles sont moins massives que le Soleil, la masse volumique est estimée à 0,057 masse solaire par parsec cube. Rappelons que la matière non condensée en étoiles est probablement du même ordre. Parmi ces étoiles, il n'y a aucune géante (la plus proche géante est Arcturus dont la distance est de 11 parsecs). Par contre, il y a 5 naines blanches. Il est fort probable que nous ne connaissons pas, même dans ce volume réduit, toutes les naines blanches.

On peut faire une étude analogue pour la sphère de 10 parsecs de rayon (33 années de lumière) ; le nombre d'étoiles devrait être multiplié par 8, mais en fait l'augmentation est plus petite, de l'ordre de 4. Notre connaissance du peuplement, même dans le voisinage du Soleil, est donc très fragmentaire.

Le mouvement du Soleil dans la Galaxie

Des résultats importants ont été obtenus par l'étude du mouvement apparent des étoiles proches du Soleil. On connaît actuellement la vitesse radiale d'environ 20 000 étoiles. Un examen montre que 95 % de ces étoiles sont des astres relativement proches. On trouve que les vitesses radiales de la majorité de ces étoiles sont assez faibles, comprises, pour fixer les idées, entre + 50 et — 50 km/s. Un examen plus attentif montre que les vitesses radiales des étoiles situées dans la constellation d'Hercule sont négatives ; leur valeur moyenne est de — 20 km/s. Par contre, celles de la constellation située à l'opposé, la Colombe, ont une valeur moyenne de + 20 km/s. Cet effet s'explique très bien si l'on admet que, par rapport aux étoiles proches, le Soleil se déplace vers un point de la constellation d'Hercule avec une vitesse de 20 km/s. Ce point est l'*apex solaire*.

Ce résultat est confirmé par le fait que sur le grand cercle situé à mi-distance de l'apex et de l'antapex, les vitesses radiales sont nulles et les mouvements apparents des étoiles sur la sphère céleste dirigés vers l'antapex avec une valeur de 0",04 par an pour des étoiles situées à 100 parsecs (330 années de lumière). Ce mouvement est le mouvement du Soleil par rapport à l'ensemble des étoiles proches. Si l'on répète le calcul en ne s'adressant qu'à des astres

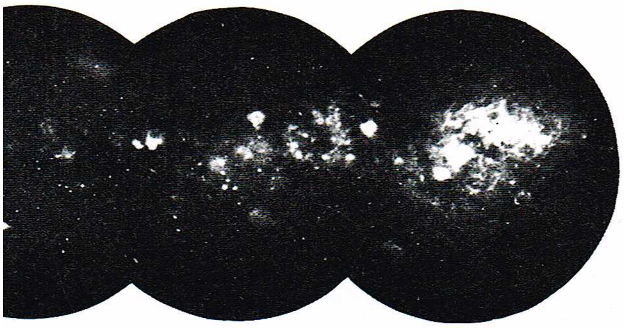

Observatoire de Haute-Provence et
Observatoire européen austral (J.-P. Sivan)

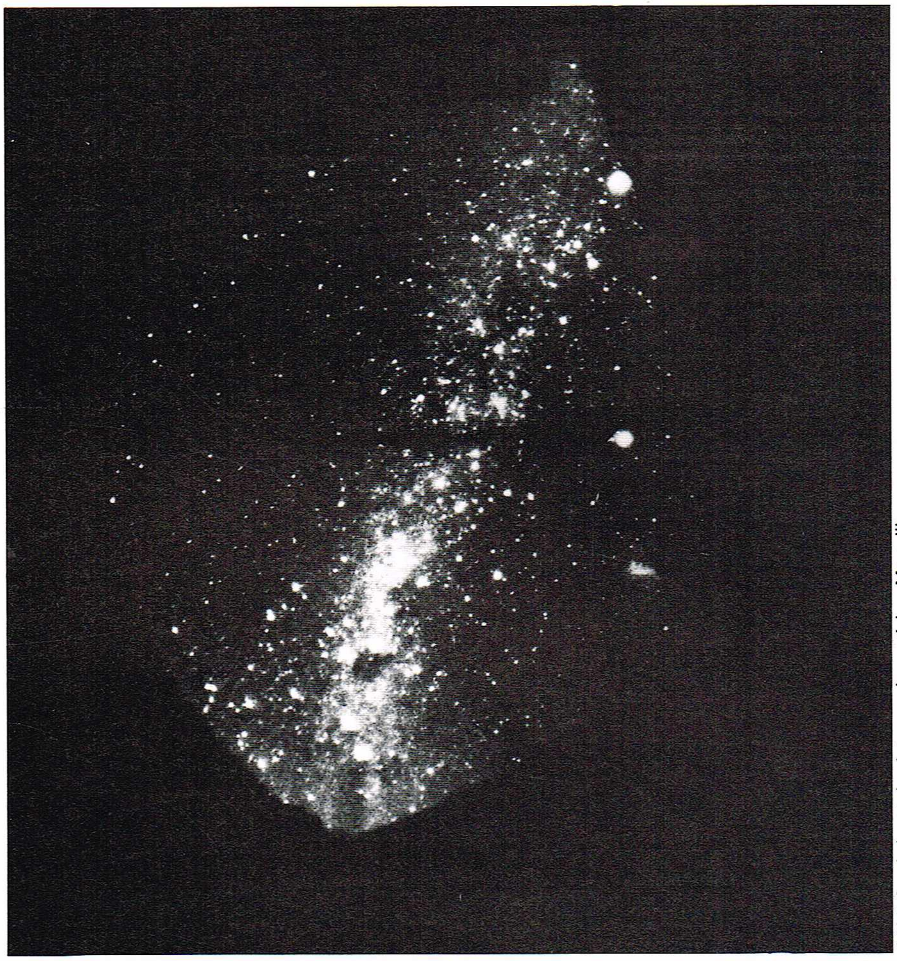

C.N.R.S. - Laboratoire Astronomie spatiale - Marseille

▲ ***Photographie à grand champ du ciel dans un miroir concave montrant la Voie Lactée dans l'hémisphère Sud.***

▼ ***Représentation schématique de la Voie Lactée.***

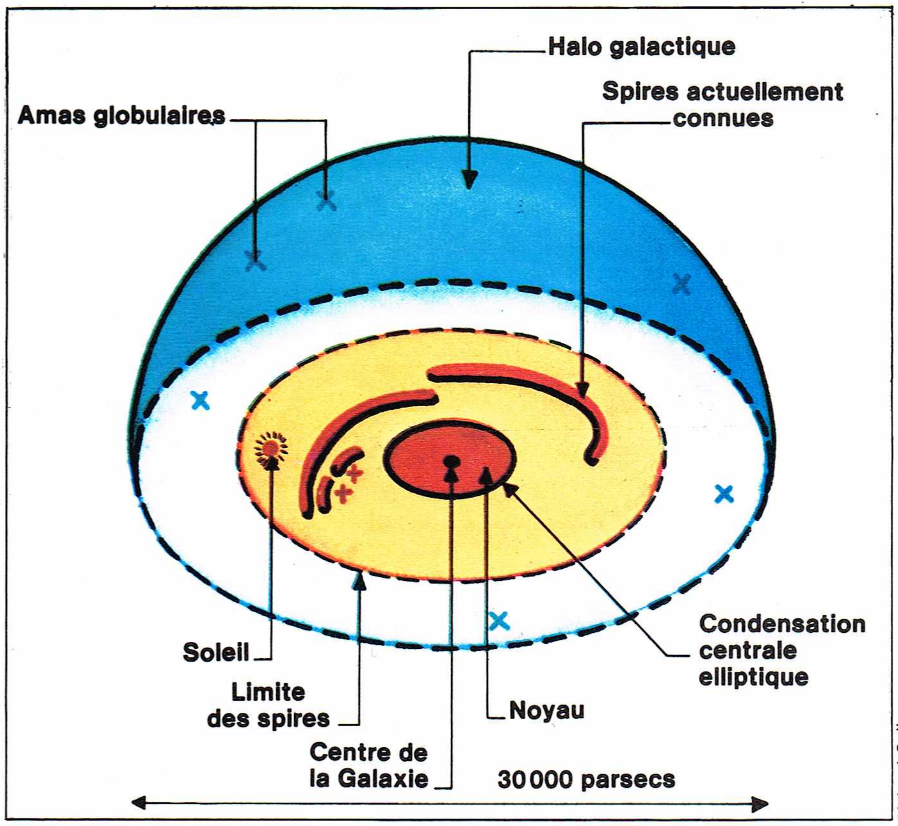

Richard Colin

éloignés, Céphéides, RR Lyrae, amas globulaires, etc., le résultat est très différent. On trouve un apex très différent et une valeur de la vitesse beaucoup plus grande. Cet effet s'interprète par le mouvement de l'ensemble des étoiles proches du Soleil, une sorte de groupe local, vers un point de la Voie Lactée situé dans la constellation du Cygne, sensiblement à 90° de la constellation du Sagittaire. La valeur de la vitesse est mal définie, car l'échantillon des astres est réduit; elle est de l'ordre de 250 km/s. Nous reviendrons sur ces faits.

La Galaxie

Comme nous l'avons déjà indiqué, l'idée que l'ensemble de notre Voie Lactée est une nébuleuse spirale, analogue à la grande nébuleuse d'Andromède ou à celle de la Chevelure de Bérénice, s'est imposée. Cette hypothèse a été vérifiée par de nombreuses observations. Nous avons déjà indiqué que notre système est limité dans l'espace et qu'il est plat. Des études statistiques précises ont montré qu'à 1 000 années de lumière au-dessus du plan galactique, dans le voisinage du Soleil, la densité stellaire est divisée par quatre. Mais l'épaisseur dépend du type d'étoiles considéré, aussi parle-t-on de systèmes plus ou moins plats. Le système le plus plat est celui des étoiles chaudes et des nébuleuses gazeuses associées. Le système des amas ouverts est aussi plat. Pour ces astres, le nombre est réduit par quatre à 350 années de lumière. Par contre, comme nous l'avons vu, le système des amas globulaires, celui des RR Lyrae, est presque sphérique. A 20 000 années de lumière au-dessus du plan de la Voie Lactée, il y a encore des amas globulaires.

Décrivons la Galaxie telle que nous nous la représentons actuellement. Un *noyau* central, très lumineux, mais invisible optiquement à cause de l'absorption interstellaire, est situé dans la constellation du Sagittaire. Les radioastronomes l'observent facilement et ont déterminé ses coordonnées avec une grande précision. Ce noyau est d'ailleurs double. Il est bien situé dans le plan de la Voie Lactée. Le Soleil, situé à 33 000 années de lumière (10 000 parsecs) de ce point, tourne autour de ce centre, avec une vitesse située dans le plan de la Galaxie. La vitesse est rétrograde (sens des aiguilles d'une montre). Sa valeur est estimée à 216 km/s. La localisation du centre est confirmée par le fait que le système des amas globulaires et celui des novae sont centrés sur le même point, ce qui a permis la première détermination grossière de ce centre. Remarquons que les valeurs de la distance du Soleil au centre de la Galaxie et de la vitesse de rotation des étoiles dans le voisinage solaire ne sont pas encore bien établies. Certains astronomes proposent 9 000 parsecs pour la distance et 250 km/s pour la vitesse. Ces valeurs ne changent pas beaucoup les masses et les périodes de révolution que nous indiquerons plus loin.

Autour du noyau existe, comme dans la plupart des galaxies extérieures, une *condensation centrale elliptique* dont l'épaisseur est estimée à 12 000 années de lumière (4 000 parsecs), et le diamètre au double. Cette partie centrale doit contenir une très grande partie de la masse de la Galaxie. Elle contient beaucoup d'étoiles anciennes, de

population II, dont la découverte a permis à Baade de confirmer la distance du centre au Soleil à 10 000 parsecs.

Le mouvement du groupe stellaire local est perpendiculaire à la direction du centre de la Galaxie. Ce groupe local exécute donc une rotation autour de ce centre. Avec les données que nous venons d'indiquer, il est possible de calculer la période de ce mouvement. Il suffit de diviser la longueur de la circonférence décrite par le groupe local, exprimée en kilomètres, par la vitesse 216 km/s. On trouve une période de 280 millions d'années. Si l'on peut admettre que ce mouvement est keplérien, c'est-à-dire que la masse peut être considérée comme concentrée au centre de la Galaxie, on trouve une masse de 110 milliards de Soleils. En fait, des études ultérieures ont montré que cette approximation n'est pas mauvaise ; au moins 3/4 de la masse sont concentrés dans la condensation centrale.

Naturellement, la Galaxie n'est pas un solide, et elle ne tourne pas comme un solide. Il en résulte que les étoiles ont des mouvements relatifs par rapport au Soleil. Il est important de déterminer comment varie la vitesse en fonction de leur situation. Un modèle simple a été introduit par J. Oort qui suppose qu'en chaque point de la Galaxie, les étoiles sont animées d'un mouvement de rotation autour du centre avec une vitesse qui n'est fonction que de la distance au centre. En d'autres termes, la vitesse est perpendiculaire à la direction au centre et n'est fonction que de la distance R au centre. Avec ce modèle, il est facile de calculer la vitesse d'une étoile par rapport au Soleil.

Oort a montré que les étoiles situées à une distance r donnée du Soleil, par exemple à 1 000 parsecs (3 300 années de lumière), ont des vitesses radiales nulles dans quatre directions : la direction du centre de la Galaxie et son opposé ainsi que dans la direction à 90° qui est la direction du mouvement et son opposé. Dans les octants, vers 45, 135, 225 et 315°, les vitesses radiales oscillent entre des valeurs $\pm Ar$, où A est la constante de Oort qui vaut 15 km/s pour $r = 1\,000$ parsecs. La théorie permet d'en déduire une indication importante sur la loi des vitesses de rotation. Mais il est encore plus important de déterminer cette loi elle-même. Cela est possible grâce à la radioastronomie. Si l'on observe dans une direction donnée, on mesure la vitesse radiale de tous les nuages d'hydrogène situés dans cette direction. On observe un certain nombre de maximums. La valeur la plus extrême correspond au nuage situé sur la perpendiculaire menée du centre de la Galaxie à la direction de visée. Le calcul permet de déduire de ces valeurs la courbe de rotation pour tous les points plus proches du centre galactique que le Soleil. Cette courbe peut être extrapolée à l'aide d'un modèle pour les distances plus grandes. Une fois cette courbe connue, il est possible de déterminer la distance des nuages d'hydrogène et de tracer les bras de la Galaxie. Malheureusement, l'opération est délicate. Elle a pu être résolue récemment, en 1975, de façon élégante, en révisant la loi de rotation par la mesure des distances des étoiles associées aux nébuleuses.

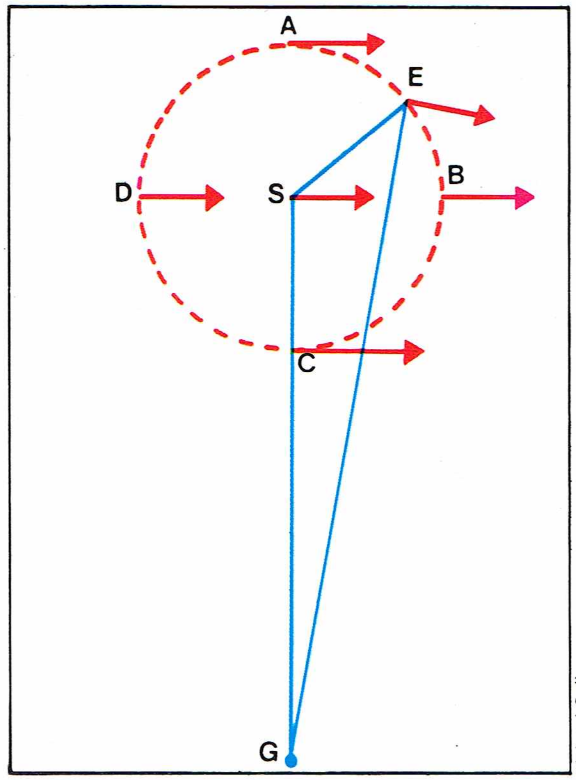

Richard Colin

▶ *Représentation schématique de la rotation de la Galaxie. Les étoiles A, B, C, D, E et le Soleil S sont animés d'un mouvement de rotation autour du centre de la Galaxie G. Il est possible sur ce graphique de se rendre compte que les étoiles en A, B, C, D sont immobiles dans le sens du déplacement radial (B et D vont aussi vite que S ; A, C et S ont des vitesses perpendiculaires aux lignes de visée). Ce n'est pas le cas pour l'étoile E qui a donc une composante radiale de la vitesse.*

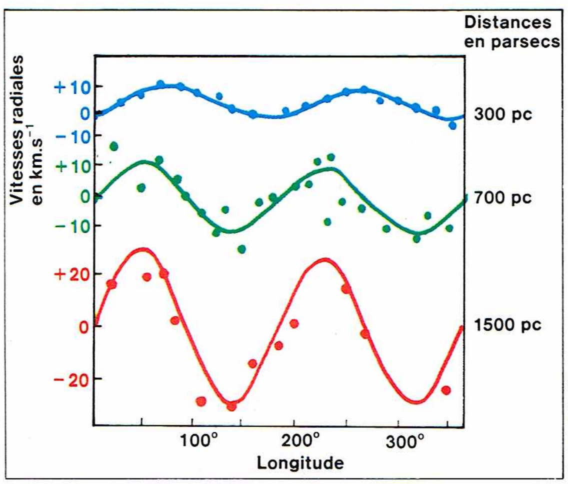

Richard Colin

▶ *Sur ce graphique, on a reporté les vitesses radiales de trois groupes d'étoiles : le premier situé à 300 pc, le second à 700 pc, le troisième à 1 500 pc. La rotation différentielle est bien visible. Ce graphique permettait de trouver une constante de A de 19 km · s⁻¹ pour 1 kpc (la valeur admise est maintenant 15).*

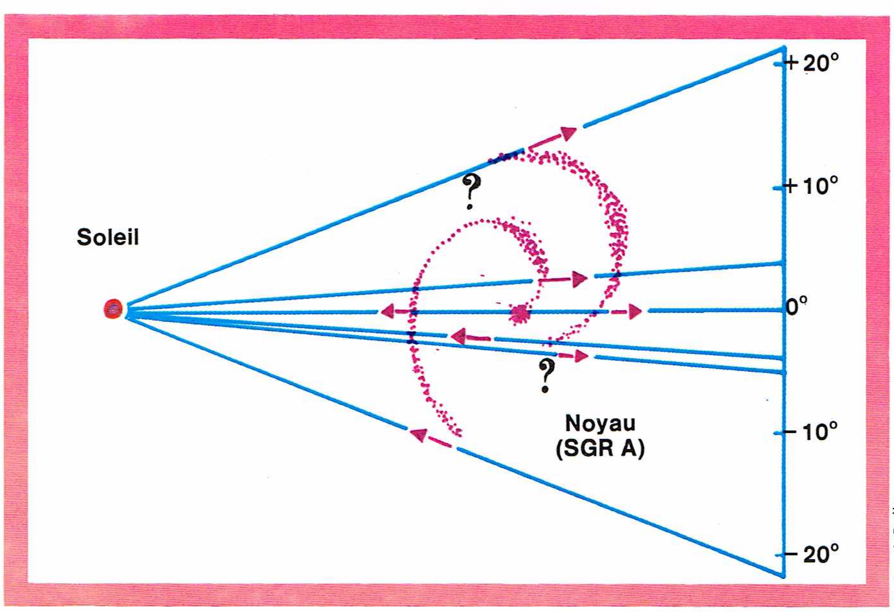

Richard Colin

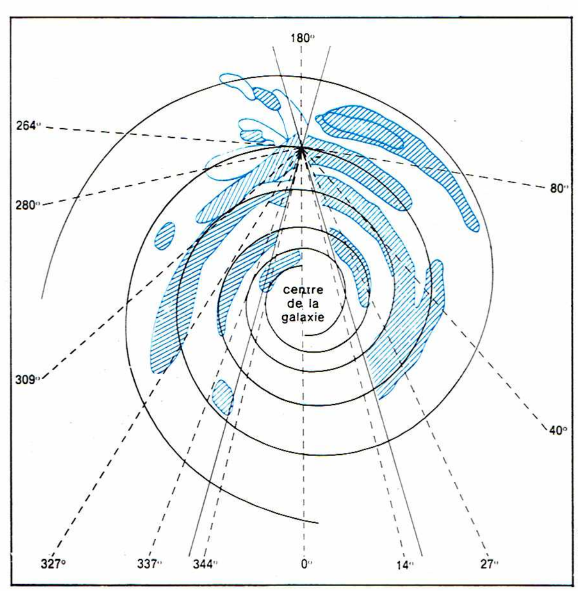

I.G.D.A.

▼ *A gauche, schéma de la partie interne de la Galaxie montrant deux bras situés à 3 000 parsecs du centre et en mouvements rapides. A droite, représentation des bras spiraux de notre Galaxie, d'après les observations effectuées avec la raie de 21 cm de l'hydrogène. Le Soleil se trouve à environ 9 kiloparsecs du centre de la Galaxie, près du bras d'Orion ; le bras de Persée est à l'extérieur et celui du Sagittaire vers le centre ; autour du centre galactique se trouve un bras qui est en expansion.*

Donnons encore quelques détails sur le *centre galactique* qui est la source radioastronomique Sgr A. On a pu montrer que cette source est entourée de nuages de gaz, de poussières et surtout de molécules. C'est d'ailleurs dans cette source que l'on a reconnu le plus grand nombre de molécules. La partie centrale, à l'intérieur du bulbe, contient probablement des bras en rotation rapide et en expansion, avec des vitesses de l'ordre de 100 km/s. On assiste à une sorte d'éjection de matière du centre galactique, et l'on ne comprend pas bien son origine ; on a cru y voir une confirmation de la *théorie de la création continue* de Hoyle.

La détermination de l'âge de la Galaxie est difficile. On estime l'âge à 15 milliards d'années, et l'on suppose que la partie plate, constituée par les bras, s'est condensée il y a 10 milliards d'années, mais qu'elle a laissé subsister des astres résiduels : amas globulaires, étoiles RR Lyrae, étoiles vieilles diverses qui forment le *halo galactique,* qui est une sorte de grand ellipsoïde de révolution de plus de 30 000 parsecs ou 100 000 années de lumière de diamètre et de 80 000 années de lumière d'épaisseur. En dehors du plan galactique, la densité est extrêmement faible. Il paraît contenir quelques petits nuages d'hydrogène à grande vitesse. Le système du halo ne participe pas à la rotation générale, et de ce fait, les astres du halo ont souvent de grandes vitesses radiales par rapport au Soleil.

D'après ce que nous savons, notre Galaxie n'est pas exceptionnelle. Son diamètre de 100 000 années de lumière, sa masse de 110 milliards de Soleils, sa luminosité estimée, de l'extérieur, à celle de 12 milliards de Soleils sont des valeurs rencontrées pour beaucoup d'autres galaxies : la nébuleuse d'Andromède par exemple a un diamètre de 80 000 années de lumière, une masse de 300 milliards de Soleils et sa luminosité est estimée à celle de 17 milliards de Soleils. La courbe de rotation est analogue.

Notre Galaxie, parmi les milliards qui peuplent l'Univers, est vraiment quelconque ; elle n'est ni la plus grande, ni la plus petite et sa forme est classique. Sa position au milieu d'un amas local de galaxies ne peut pas être localisée dans l'Univers. L'homme n'est pas le centre de l'Univers ; il en est de même de la Terre et du Soleil, et même de la Galaxie où il se trouve.

Les deux Nuages de Magellan

On désigne sous le nom de Nuages de Magellan deux taches laiteuses visibles à l'œil nu et qui apparaissent comme deux lambeaux détachés de la Voie Lactée. Cette apparence n'est d'ailleurs, comme nous le verrons, pas fausse : les deux Nuages sont de petites galaxies satellites de la nôtre.

Leur nom traditionnel est dédié à la mémoire de Magellan qui les a forcément observés lors de ses voyages d'exploration dans l'hémisphère austral. Mais, selon les traditions, les peuples navigateurs de la mer Rouge, ancêtres

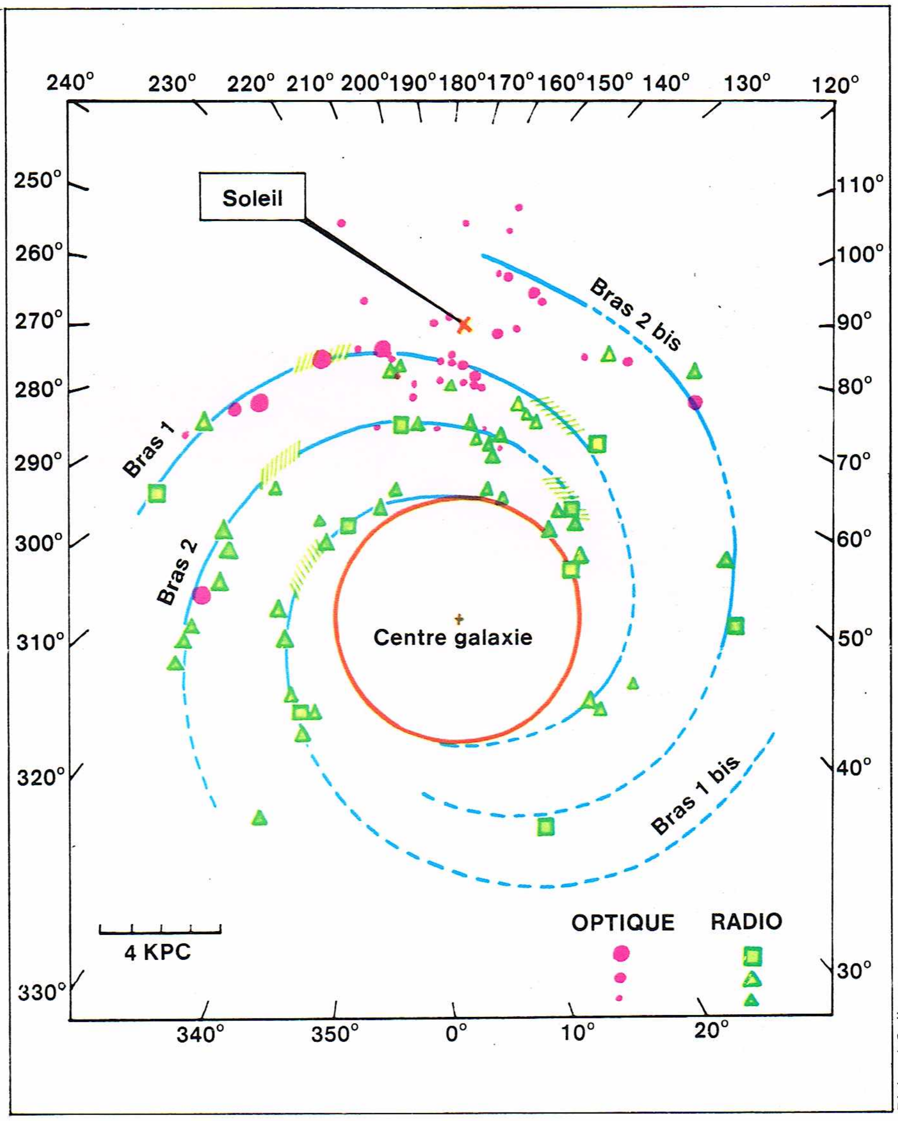

▲ ***Structure spirale de notre Galaxie. En traits continus : les bras spiraux déterminés par les régions d'hydrogène observées optiquement ou par radio ; en traits discontinus : leurs symétriques. Les zones hachurées correspondent aux maximums d'intensité du continuum radio de l'hydrogène neutre (Yvonne Georgelin - Observatoires de Marseille et de Haute-Provence).***
▼ ***Courbe d'égale intensité radioélectrique de la Galaxie et quelques sources radioastronomiques.***

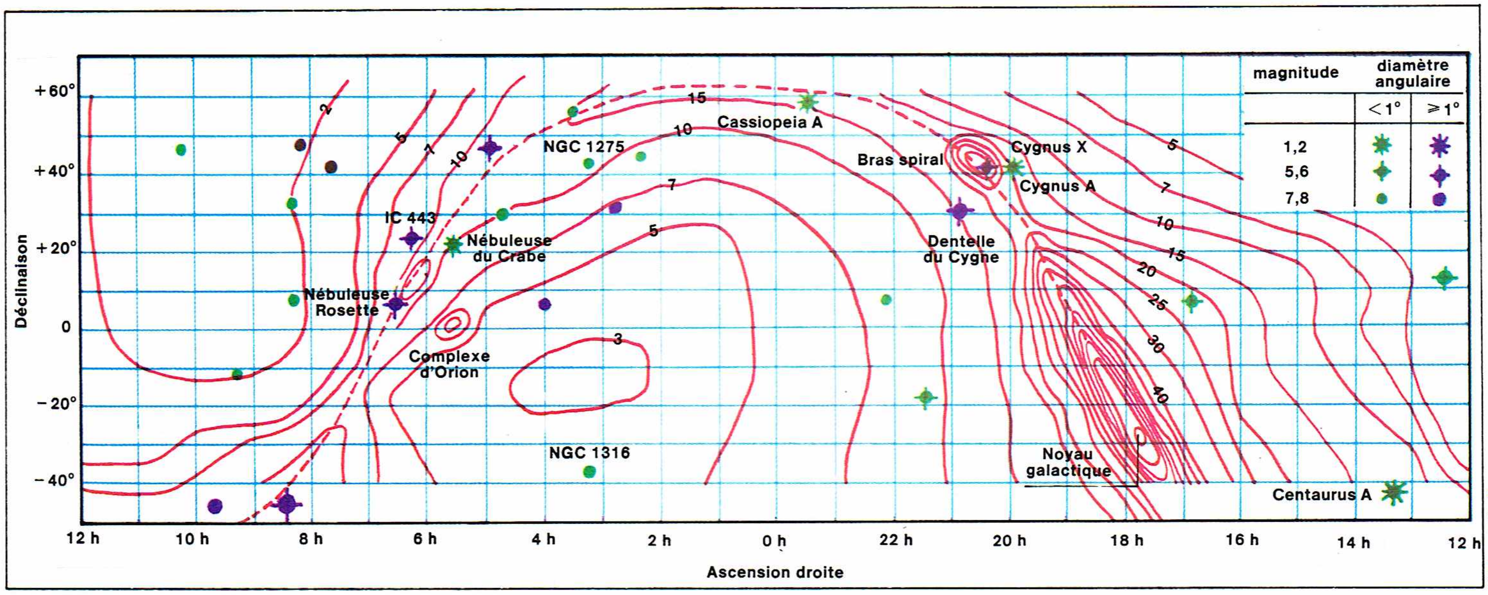

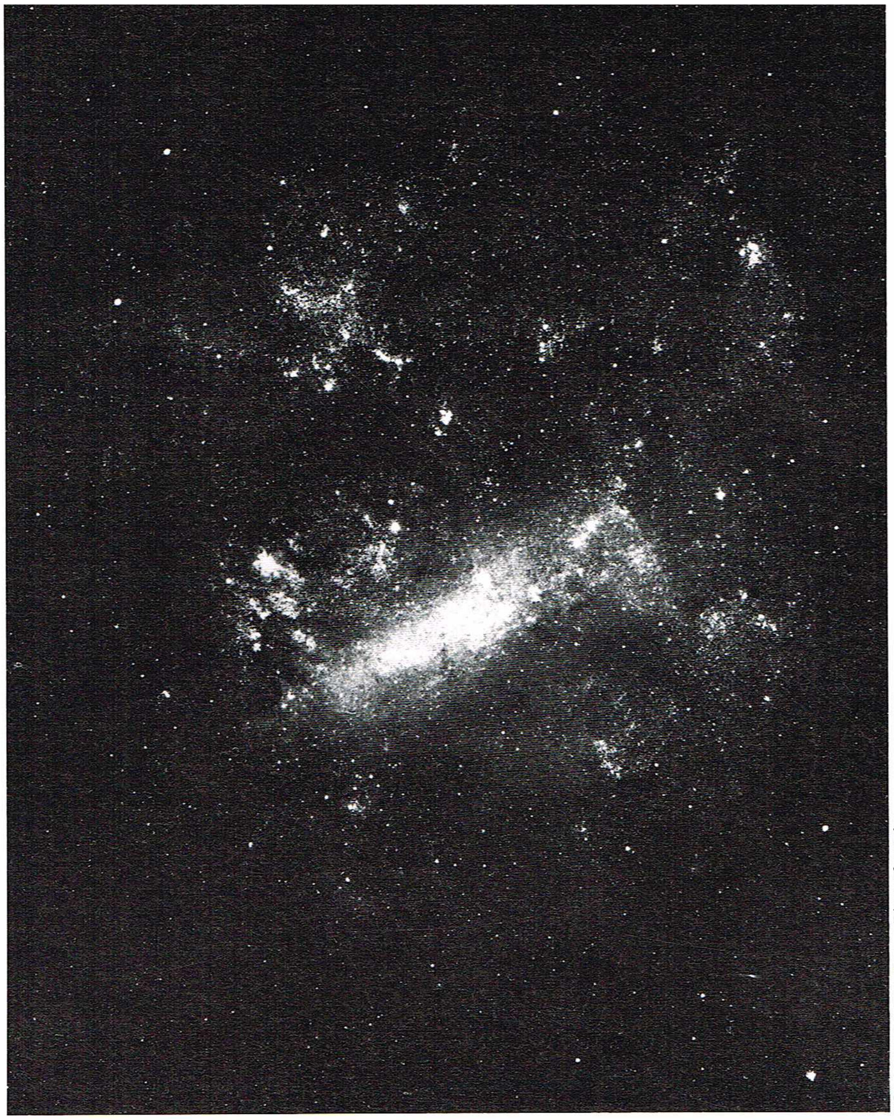

Observatoire Bayden - Bloemfontein

▲ *Photographie d'ensemble du Grand Nuage de Magellan montrant bien la barre centrale et les nuages stellaires.*
▼ *Histogramme des vitesses radiales des étoiles d'une petite partie des étoiles du Grand Nuage de Magellan. La bosse correspondant à 26 km · s⁻¹ représente les étoiles galactiques; la bosse correspondant à 311 km · s⁻¹ représente les étoiles du GNM.*

des Arabes actuels, ont aussi observé les deux Nuages. Le Grand Nuage peut être vu jusqu'à la latitude de + 25°, c'est-à-dire de régions comme la mer Rouge. Le Petit Nuage est plus près du pôle Sud, et il n'est visible que de régions plus méridionales. Il y a 3 000 ans, par suite de la précession des équinoxes, le pôle Sud était situé au milieu du Petit Nuage, et cet astre a servi aux navigateurs qui allaient vers le sud depuis la mer Rouge.

Le Grand Nuage de Magellan

Le Grand Nuage de Magellan (GNM) est bien visible à l'œil nu, situé à 5 h 30 mn d'ascension droite et — 68° de déclinaison; c'est une constellation qui culmine au mois de décembre lorsque la constellation d'Orion est, pendant l'été austral, presque au zénith. A l'œil nu, son diamètre angulaire est de l'ordre de 5°, sa brillance est très voisine de celle de la Voie Lactée. La photographie avec un petit instrument montre une structure assez irrégulière. Une partie centrale assez floue s'étend sur 3° de longueur et fait penser à la barre d'une spirale barrée, d'où son nom de la « Barre ». Mais il faut beaucoup d'imagination pour voir les bras de spirales qui devraient s'en échapper. Les photographies avec de grands instruments révèlent de très nombreuses étoiles, des amas, des nébuleuses gazeuses, tout à fait analogues aux astres de notre Voie Lactée. On peut reconnaître notamment de nombreuses étoiles supergéantes bleues, quelques étoiles supergéantes rouges qui sont les étoiles les plus brillantes de cette galaxie.

La détermination précise de la distance du Grand Nuage a été difficile; seule la méthode photométrique peut être appliquée. Il faut pour cela mesurer l'éclat apparent d'astres dont les propriétés spectrales ou photométriques permettent de déterminer l'éclat absolu. La détermination de la magnitude apparente ne présente pas de difficultés majeures, encore faut-il corriger ces valeurs de l'absorption dans notre Galaxie, qui n'est d'ailleurs pas très grande. Par contre, la détermination de l'éclat intrinsèque (magnitude absolue) de ces astres pose des problèmes, car cette mesure doit être faite sur des étoiles de notre Galaxie. Rappelons que la différence entre la magnitude apparente et la magnitude absolue, ou *module de distance,* est l'indicateur de distance. Pour le Grand Nuage, ce module *m* — M vaut 18,6 (si l'on a eu soin de corriger les mesures de l'absorption dans la Voie Lactée) ; la distance correspondante est de 52 000 parsecs ou 172 000 années de lumière. Lorsque cette valeur est connue, le Grand Nuage peut servir aisément à la détermination de la magnitude absolue de n'importe quel astre qu'on peut y découvrir. Il suffit de retrancher à cette magnitude la valeur 18,9 (et non 18,6, car on tient ainsi compte de l'absorption galactique).

L'étoile la plus brillante du Grand Nuage est une étoile de type spectral A0 et de magnitude apparente 9,2; sa magnitude absolue est — 9,7 (le Soleil a une magnitude absolue de 4,7) ; un calcul aisé montre que l'étoile considérée brille comme 600 000 Soleils. C'est l'étoile non explosive la plus brillante que nous connaissions. Il y en a eu aussi probablement dans notre Galaxie, mais il est pratiquement impossible de les reconnaître, car on ne connaît pas leurs distances.

Cette étude des étoiles est d'ailleurs assez rapidement limitée, car une étoile comme notre Soleil, située dans le Grand Nuage, a une magnitude apparente de 23,6 et n'est actuellement observable avec aucun des instruments en service dans l'hémisphère Sud. Si on limite l'étude aux étoiles plus brillantes que la magnitude 12,5, on doit pouvoir reconnaître toutes les étoiles plus brillantes que la magnitude absolue — 6,4, c'est-à-dire 25 000 fois plus brillantes que notre Soleil. La reconnaissance de ces étoiles n'est pas aisée. En effet, en dépit du fait que le Grand Nuage de Magellan est situé à 30° au-dessous du plan de la Voie Lactée, le nombre des étoiles de notre Galaxie dans cette direction est encore très grand.

La voie royale pour faire le tri est la mesure de la *vitesse radiale* des étoiles. En effet, le Grand Nuage de Magellan s'éloigne de nous avec une vitesse de 250 km/s. Il s'agit de la vitesse relative de l'observateur, car celui-ci est entraîné par le mouvement de rotation de la Galaxie ; il se trouve que ce mouvement, dont la vitesse est de l'ordre de 220 km/s, est sensiblement dans la direction opposée à celle du Grand Nuage, de sorte que la plus grande partie de la vitesse s'explique par la rotation galactique. Mais cela n'enlève rien à la valeur du critère, car les étoiles du voisinage solaire participent aussi à la rotation galactique, sauf les étoiles du halo galactique et celles de population II qui ne participent pas à la rotation ; ainsi quelques étoiles de ces types peuvent-elles se faufiler parmi les étoiles du Grand Nuage de Magellan. Une étude plus détaillée des étoiles à grande vitesse permet de faire le tri définitif.

Comme il s'agit de reconnaître des centaines d'étoiles parmi des milliers d'étoiles galactiques, la méthode classique du spectrographe à fente est un travail très laborieux. La mesure de ces vitesses radiales avec le prisme objectif de Fehrenbach est aisée et a permis de faire le tri suivant : parmi plus de 5 000 étoiles examinées, on a trouvé 600 étoiles du GNM et une quarantaine d'étoiles à grande vitesse de notre Galaxie. Ces dernières ont des spectres et

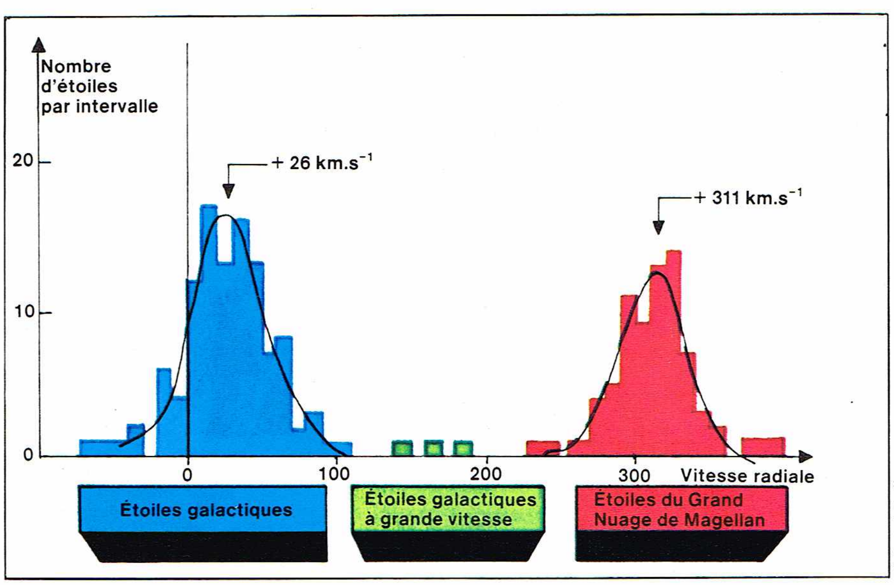

Richard Colin

des couleurs un peu différents de ceux des supergéantes du Nuage ; elles présentent un très haut intérêt pour l'étude de la Galaxie. Les études ont été faites dans le cadre de l'Observatoire européen ; les clichés, pris en Afrique du Sud, puis au Chili, ont été dépouillés en France. En même temps, une classification des étoiles supergéantes a été faite à l'Observatoire américain de Tololo (Chili). L'accord entre les deux déterminations est excellent, sauf pour une trentaine d'étoiles qui sont des étoiles à types spectraux un peu différents de ceux des supergéantes normales de notre Galaxie ; ils ont été ignorés par les astronomes américains.

L'étude de ces astres a d'abord montré que les étoiles géantes du Grand Nuage ne sont pas essentiellement différentes de celles de la Galaxie. La recherche et même l'étude des étoiles galactiques sont bien plus difficiles, car elles sont situées partout dans la Voie Lactée, à des distances inconnues, et souvent elles sont affaiblies par l'absorption.

Les étoiles normales du GNM se placent bien dans le diagramme de Russell-Hertzsprung dans la région des supergéantes, mais elles n'y forment pas une famille bien définie comme le font les géantes ou les étoiles de la série principale. Les plus lumineuses sont des étoiles bleues et rouges ; les étoiles violettes (O et B) sont moins lumineuses. On a l'impression qu'il s'agit d'un mélange d'étoiles plus ou moins jeunes mais dont les âges s'échelonnent entre quelques millions et 1 milliard d'années.

Il est très important d'étendre cette étude à des astres plus faibles lorsque nous disposerons d'instruments plus puissants. Par nécessité, à cause du nombre gigantesque d'étoiles, on limitera l'étude à quelques régions. L'étude détaillée de la répartition des étoiles dans ce diagramme donnera alors une idée précise de l'âge de cette galaxie.

Le Grand Nuage contient tous les astres particuliers de notre Galaxie. Parmi les étoiles, on a trouvé naturellement les étoiles variables : les plus fameuses sont les Céphéides ; c'est d'ailleurs leur étude dans le Petit Nuage qui a permis à Miss Leavitt de découvrir l'importante *relation période-luminosité* qui est confirmée dans le GNM où les Céphéides de la plus longue période ont des magnitudes apparentes de 10 à 11, alors que les plus rapides se situent vers 17 à 18. C'est dans le GNM que l'on a mis définitivement en évidence que les étoiles RR Lyrae, situées vers la magnitude 18,5 à 19, y forment une famille séparée de celles des Céphéides normales. On a trouvé dans le GNM un certain nombre d'étoiles nouvelles ; ces novae ont des magnitudes de l'ordre de 10 à 11 ; elles sont donc semblables aux novae galactiques ; depuis que des moyens puissants surveillent le ciel austral, on en trouve toutes les années.

Nous ne pouvons faire la liste de toutes les étoiles particulières découvertes dans le GNM ; signalons les étoiles à atmosphères étendues qui présentent les raies interdites du fer et de nombreux autres atomes, les étoiles de Wolf-Rayet qui sont au nombre d'une quarantaine et que l'on peut classer en étoiles à carbone ou à azote comme dans notre Voie Lactée. Nous connaissons plusieurs dizaines de nébuleuses planétaires.

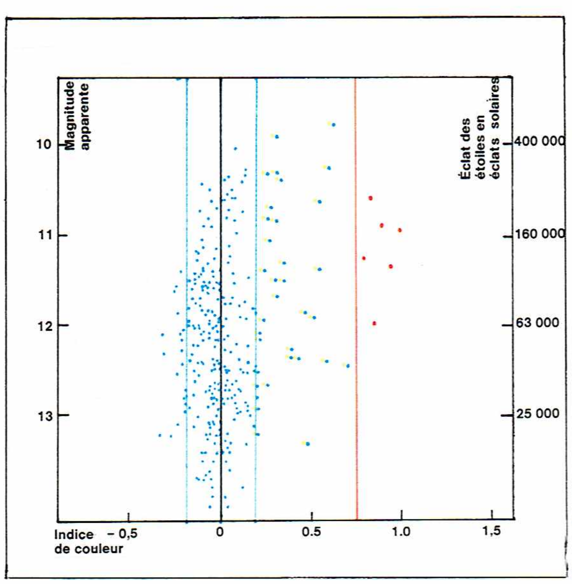

Richard Colin

◄ *Diagramme des couleurs (Russell-Hertzsprung) des étoiles les plus brillantes du GNM. La plupart des étoiles brillantes sont bleues mais il existe des étoiles rouges. Ces étoiles ont des éclats compris entre 500 000 et 25 000 éclats solaires (Observatoires de Marseille et de Haute-Provence ; E.S.O.).*

Il existe des amas stellaires ouverts. Vu la distance du GNM, ils sont petits et peu apparents, sauf ceux qui sont noyés dans une nébuleuse comme l'ensemble d'étoiles qui entoure 30 Dorade. Cette nébuleuse est très brillante et plus étendue que la nébuleuse d'Orion qui entoure l'étoile multiple θ Orion. Ces nébuleuses du GNM ont des spectres très analogues, sinon identiques. De nombreuses autres nébuleuses gazeuses ont été découvertes dans le Grand Nuage.

Celui-ci contient aussi un grand nombre d'amas globulaires qui ont des dimensions de l'ordre de 40″ et des magnitudes de l'ordre de 11. Il est possible de les résoudre en étoiles, et même de mesurer la couleur des étoiles. Un certain nombre de ces amas globulaires sont identiques à ceux de notre Galaxie et doivent être considérés comme des amas de population II. Mais il existe aussi des amas contenant de nombreuses étoiles bleues : ces amas posent encore un grand problème aux astrophysiciens.

L'espace entre les étoiles du GNM est rempli, comme le milieu interstellaire galactique, d'atomes et de poussières. On y a mis récemment en évidence des molécules complexes. La nature de toutes ces particules : poussières, atomes, molécules, est identique à celle des particules de notre Galaxie. Elles émettent des radiations dans le domaine des ondes hertziennes : raies de 21 cm de l'hydrogène neutre et spectre continu dû au freinage des électrons. Cela a permis aux radioastronomes de tracer des isophotes qui sont d'ailleurs plus étendues que la contrepartie optique, et elles montrent une liaison avec le Petit Nuage. Aucun pont, entre le GNM et notre Galaxie, n'a été mis en évidence avec certitude ni par l'optique, ni par la radioastronomie. Un long filament qui traverse tout le ciel et passe par le GNM ne paraît pas être un tel pont.

▼ *Isophotes radio du Grand Nuage de Magellan (d'après McGee et Milton).*

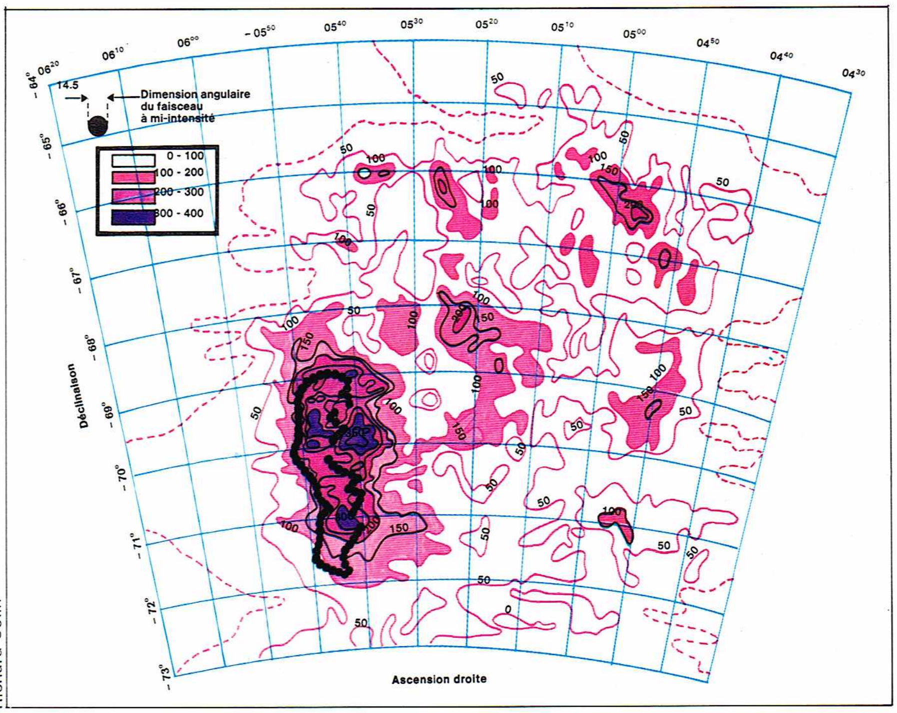

Richard Colin

La situation du GNM dans l'espace pose quelques problèmes. Le centre de gravité de la figure optique ne paraît pas bien coïncider avec le centre de gravité radio. Ces deux centres sont situés dans la Barre. Celle-ci est relativement pauvre en étoiles supergéantes et pourrait être riche en étoiles vieilles de population II. Le reste de la nébuleuse est probablement plan. Mais, si nous connaissons assez bien l'intersection de ce plan avec le plan du ciel (la direction de l'intersection est sensiblement nord-sud), l'inclinaison du plan est très mal connue. On admet en général une valeur de l'ordre de 30°. La limite extérieure apparente du GNM étant sensiblement circulaire, l'ensemble est ainsi en réalité assez peu allongé : les dimensions sont estimées à 7 000 sur 6 000 parsecs. Naturellement, cet ensemble n'est pas immobile ; les étoiles doivent décrire des orbites autour du centre de gravité, et la mesure des

Observatoire Bayden - Bloemfontein

Mount Wilson and Palomar Observatories

vitesses stellaires permet de déterminer, par l'application de la loi de Newton, la masse du Grand Nuage. Mais cette détermination n'est pas très précise, car la courbe de rotation du GNM est plus ou moins mal définie, les étoiles ayant des dispersions de vitesses considérables. Quoi qu'il en soit, la masse généralement admise est de 10 milliards de masses solaires, dont environ la moitié est condensée en étoiles brillantes, le reste en poussières, gaz et étoiles peu lumineuses, naines blanches, etc.

Le GNM est donc une galaxie beaucoup plus petite que la nôtre, 5 fois plus petite par ses dimensions linéaires, 10 fois par sa masse, 5 fois par son éclat. Elle n'a pas de noyau central ; si la Barre peut être assimilée à une barre de nébuleuse de classe SBc, les bras de spirales ne peuvent pas être tracés, seules quelques associations plus ou moins diffuses peuvent être dessinées.

Par sa distance à notre Galaxie, 52 000 parsecs du Soleil et aussi du centre de la Galaxie, on peut considérer le GNM comme une galaxie satellite de la nôtre.

Le Petit Nuage de Magellan

Le Petit Nuage de Magellan est un autre compagnon de notre propre Galaxie. Le Petit Nuage est nettement plus petit que le GNM : situé à 63 000 parsecs, il n'a qu'un diamètre de 3 000 parsecs ; sa masse et sa luminosité sont 5 fois plus petites que celles du GNM. Sa structure est très irrégulière, et il contient beaucoup moins de matière interstellaire que le GNM. A cause de sa moindre richesse, il a été moins étudié, bien qu'à part les nébuleuses gazeuses il contienne des astres aussi intéressants que le GNM.

Notre Galaxie avec ses satellites, les deux Nuages de Magellan, est donc un astre assez semblable à la nébuleuse d'Andromède qui a aussi deux compagnons mais elliptiques.

Les nébuleuses extragalactiques

Les nébuleuses gazeuses font partie de la Voie Lactée, et nous avons étudié leur nature. Les nébuleuses extragalactiques sont au contraire des systèmes lointains, analogues à notre Voie Lactée. Elles sont de formes variées, mais, en général, elles sont floues avec quelquefois un noyau central. Certaines nébuleuses présentent aux grands instruments une structure en spirale, qui se révèle avec beaucoup de netteté par la photographie. Ces astres sont essentiellement formés d'étoiles qu'on peut séparer par la photographie pour les plus grandes ; pour les autres, le spectre est un spectre continu à raies d'absorption comme celui des étoiles. Certaines nébuleuses ont l'aspect de fuseaux avec noyau et condensation centrale, comme celle de la Chevelure de Bérénice, d'autres sont irrégulières comme les deux Nuages de Magellan.

Ces nébuleuses sont réparties sur tout le ciel, mais on ne les trouve pas près du plan de la Voie Lactée dont l'absorption empêche de voir celles qui sont situées dans cette direction. On a adopté pour tous ces astres le nom de **galaxies.**

Trois galaxies sont visibles à l'œil nu. La nébuleuse d'Andromède est une spirale de 2° de diamètre apparent, dont on perçoit déjà la forme avec une paire de jumelles ; elle a une magnitude globale de 3,5. Dans l'hémisphère austral, le Grand et le Petit Nuage de Magellan que nous avons déjà décrits sont des astres visibles à l'œil.

Une trentaine de nébuleuses extragalactiques sont plus brillantes que la magnitude 9. Mais nous verrons que les galaxies faibles sont extrêmement nombreuses. On a l'habitude de désigner ces astres, comme d'ailleurs les nébuleuses gazeuses, par leur numéro de catalogue. Ainsi la grande nébuleuse d'Andromède sera encore désignée par M31 car c'est la 31^{e} nébuleuse dans le Catalogue de Messier, ou NGC 224 car elle a ce rang dans le New General Catalogue de Dreyer.

Les photographies réalisées grâce aux grands télescopes permettent de reconnaître dans les nébuleuses proches un grand nombre de détails. Dans les bras des spirales, on reconnaît des étoiles, des amas stellaires, des nébuleuses gazeuses analogues à celles de notre Galaxie. Dans les nébuleuses irrégulières, ces astres se trouvent disséminés dans toute la galaxie.

La reconnaissance d'étoiles variables a une importance particulière. Rappelons que de nombreuses Céphéides ont été découvertes dans les deux Nuages de Magellan ; leur étude a montré qu'il existe une relation précise entre la

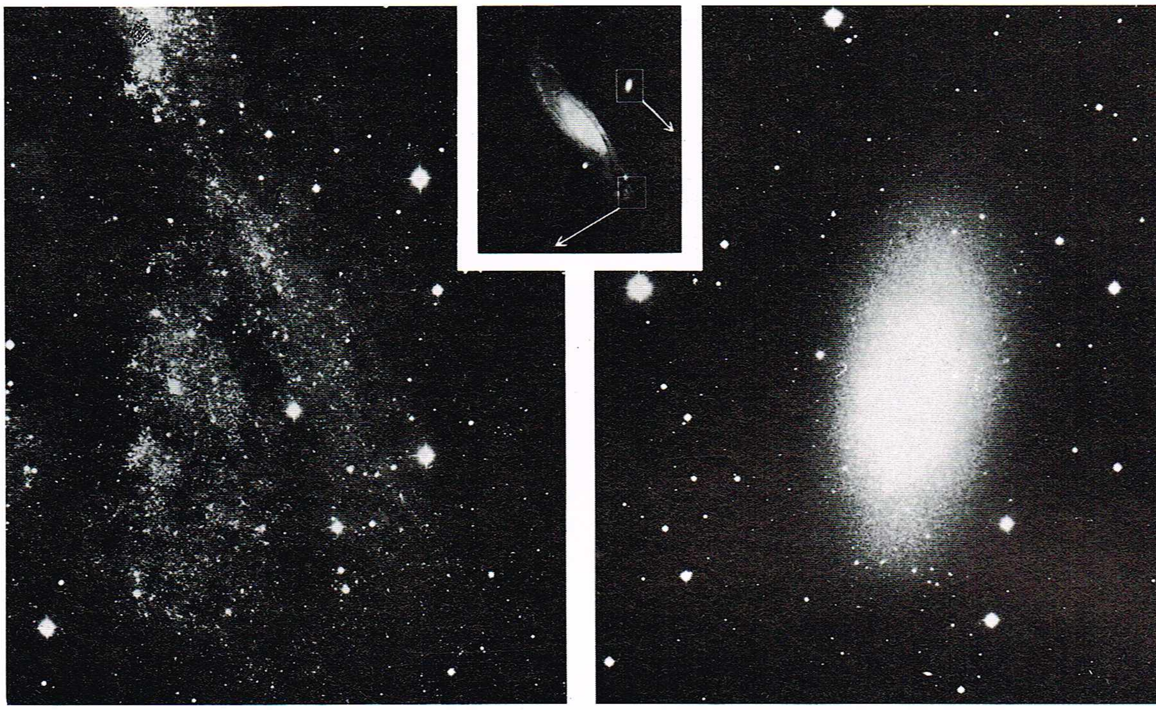

Mount Wilson and Palomar Observatories

◀ *Deux détails de la galaxie d'Andromède. A gauche, une photographie obtenue en lumière bleue montre de nombreuses étoiles qui sont de population I (géantes et supergéantes). A droite, la nébuleuse elliptique NGC 205, qui est très probablement un compagnon de la grande spirale d'Andromède. Cette photographie a été obtenue en lumière jaune. Les étoiles de cette nébuleuse sont de population II. Les étoiles lumineuses distribuées presque uniformément sur les deux photographies appartiennent toutes à la Voie Lactée (Observatoires des monts Wilson et Palomar).*

période et l'éclat intrinsèque des Céphéides. Ces mêmes astres ont été aussi découverts dans la nébuleuse d'Andromède. On a déterminé leurs périodes et, par conséquent, leurs éclats intrinsèques. La comparaison de ces grandeurs avec les éclats apparents permet de déterminer la distance de la nébuleuse. Cette détermination n'a pas été sans difficultés, car, à l'origine, la relation période-luminosité des Céphéides était mal étalonnée. On peut considérer que cette question est maintenant résolue.

On obtient ainsi pour la nébuleuse d'Andromède la valeur de 23,8 pour la différence entre la magnitude apparente et la magnitude absolue, c'est-à-dire le module de distance. Cette valeur permet le calcul de sa distance, qui est de 570 000 parsecs ou 1,8 million d'années de lumière. On admet actuellement une valeur un peu plus grande, entre 650 000 et 700 000 parsecs. Cette valeur est confirmée par l'éclat apparent des étoiles les plus brillantes, qui ont la magnitude 15. Les novae les plus rapides ont aussi des magnitudes de cet ordre.

On a aussi reconnu des astres de diamètre angulaire non négligeable, de magnitude voisine de 16, qui sont très certainement des amas globulaires. On sait que S Andromède est une supernova qui, à son éclat maximal, était de magnitude 7,2, ce qui correspond à une supernova de type I (magnitude absolue — 16,6).

On distingue nettement les bras spiraux de la nébuleuse d'Andromède, bien qu'elle se présente vue aux trois quarts. On y reconnaît des nuages d'absorption. Grâce à la connaissance de sa distance, il est possible de calculer son diamètre qui est de l'ordre de 20 000 parsecs pour la partie brillante, mais on reconnaît encore des objets appartenant à la nébuleuse à des distances de 15 000 parsecs du centre. De sorte que le diamètre total, de l'ordre de 30 000 parsecs, est comparable à celui de notre Galaxie ; il en est de même pour son éclat total qui est celui de 20 milliards de Soleils (magnitude — 21,1). Elle est donc environ 1,7 fois plus brillante que notre Galaxie. Il a été possible de mesurer la vitesse radiale du centre de la nébuleuse. On trouve qu'elle s'approche avec une vitesse de 270 km/s (VR = — 270 km/s). Une grande partie de cette vitesse est expliquée par la vitesse du Soleil autour de la Galaxie. La vitesse propre de la nébuleuse est de — 100 km/s. Un autre résultat de ces mesures est la constatation que la nébuleuse a un mouvement de rotation comme notre Galaxie, et il a été possible de déterminer la courbe de rotation ; on en déduit, par l'application des lois de Kepler, une masse de 320 milliards de Soleils, soit 3 fois la masse de notre Galaxie.

Le noyau de la nébuleuse d'Andromède est un astre ayant probablement un petit diamètre apparent, de magnitude 6. Il est entouré d'une condensation elliptique mesurant 3 × 2 kiloparsecs, soit 10 000 × 6 000 années de lumière. Cette condensation est constituée par des étoiles de population II, comme le montre d'ailleurs la grande fréquence des amas globulaires. W. Baade y a découvert des géantes rouges, de magnitude M_v = — 3,5, caractéristiques des étoiles d'amas globulaires. Il n'a pas été possible d'y découvrir des étoiles pulsantes RR Lyrae, ce qui est normal, car elles seraient de magnitude 23,5 à 24. Elles sont trop faibles pour nos moyens actuels.

La nébuleuse d'Andromède est entourée, comme la nôtre, d'un halo galactique. Elle est observable par la radioastronomie qui montre le noyau central et l'émission hertzienne due au gaz interstellaire.

Dans la suite de cet exposé, nous utiliserons comme unité de distance le *mégaparsec* (Mpc) qui vaut 1 million de parsecs ou 3,27 millions d'années de lumière.

Dans une sphère de 1 Mpc, nous connaissons au moins 16 galaxies, peut-être 20, qui forment l'*amas local de galaxies*. Cet amas est bien limité dans l'espace, car on ne

◀ *Page ci-contre, en haut, le Petit Nuage de Magellan est beaucoup moins étendu que le Grand Nuage de Magellan et a une structure très irrégulière. L'amas d'étoiles, en haut à droite, ne fait pas partie du Petit Nuage mais est l'amas globulaire galactique, 47 Tucan, un des plus lumineux du ciel. En bas, la nébuleuse d'Andromède (NGC 224 = M31), galaxie spirale normale, d'un type analogue à celui de notre Voie Lactée. Elle appartient au groupe local de 17 galaxies ; ces dernières sont à l'intérieur d'un ellipsoïde ayant 2,5 millions d'années de lumière de plus grand diamètre (California Institute of Technology).*

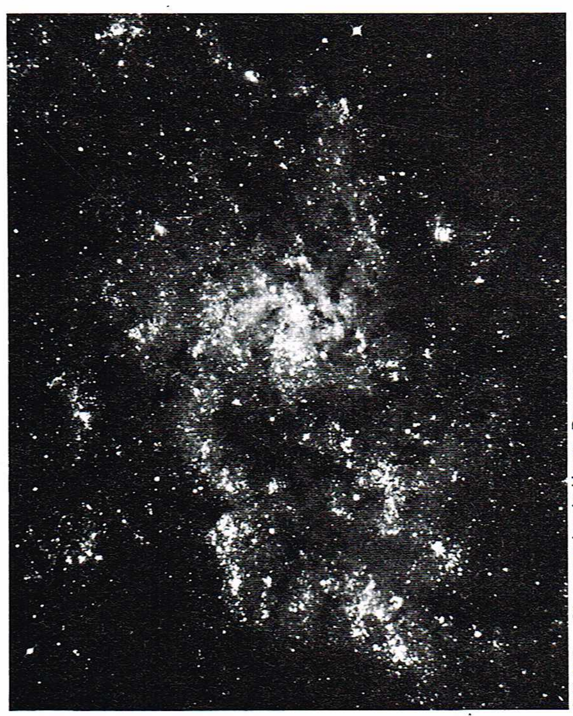

C.N.R.S. - Observatoire de Haute-Provence

◀ *La grande nébuleuse spirale M33 (NGC 598). Elle fait partie du groupe local ; elle est située à 2,2 millions d'années de lumière. La structure spirale, bien que nette, est assez lâche.*

▶ *La galaxie spirale, de type SC, NGC 598 (= M33) dans le Triangle (California Institute of Technology).*

▶ *Page ci-contre, galaxie spirale NGC 253 du Sculpteur (California Institute of Technology).*

Mount Wilson and Palomar Observatories

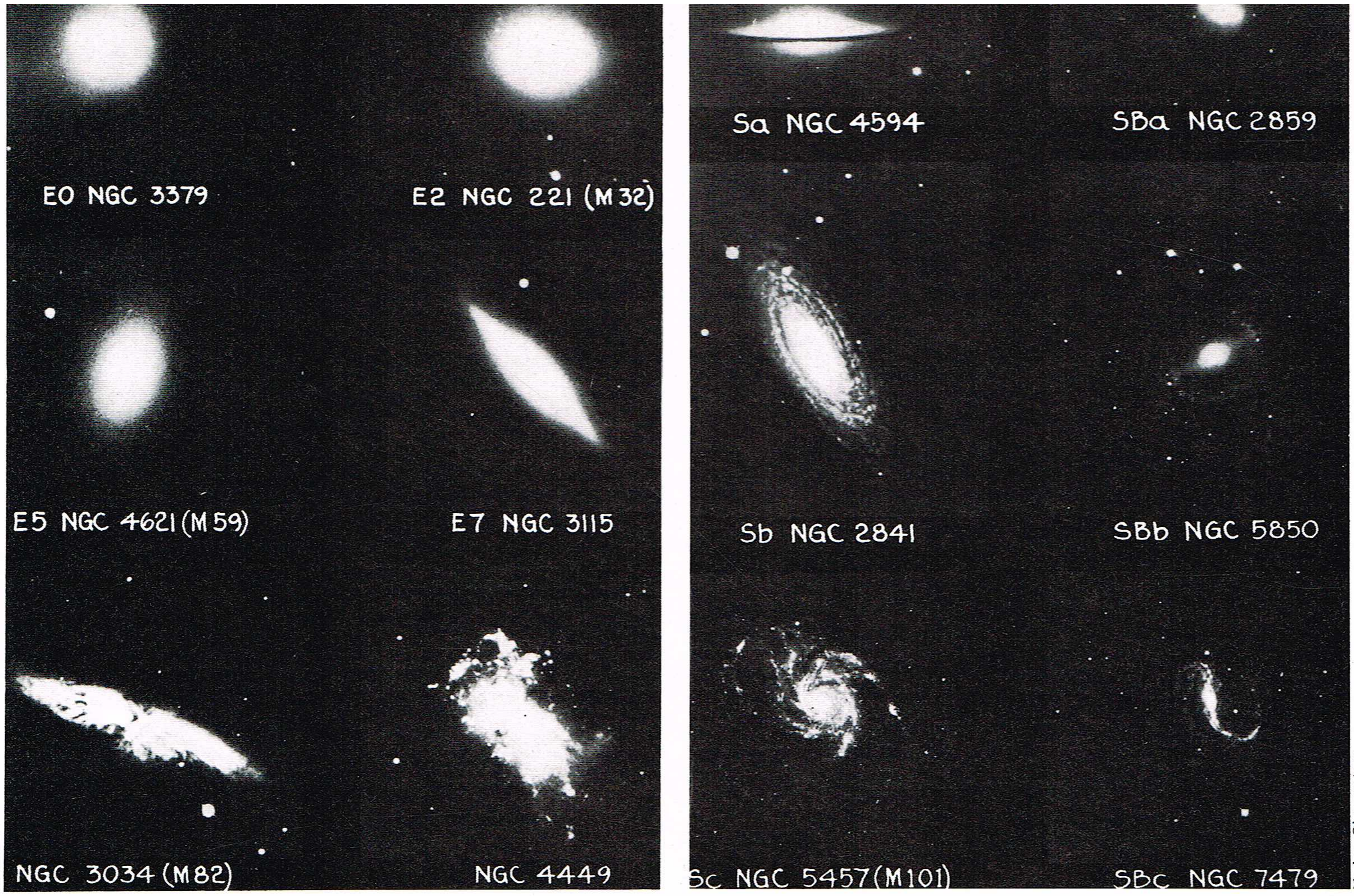

Yerkes Observatory

▲ *Planche de gauche, les quatre nébuleuses du haut sont des nébuleuses elliptiques; les deux du bas sont irrégulières. Planche de droite, six nébuleuses spirales : les trois de gauche sont de la classe S et les trois de droite des nébuleuses SB ou barrées. Les classes indiquées sont celles de la classification de Hubble (Observatoire de Yerkes).*

▼ *Schéma de la classification des galaxies d'après Hubble; le stade S0, ajouté ultérieurement, représente un type intermédiaire entre les nébuleuses elliptiques et les nébuleuses spirales (Observatoire de Yerkes).*

connaît aucune galaxie dont la distance serait comprise entre 1 et 2 Mpc. La nébuleuse d'Andromède est la plus brillante, vient ensuite la Galaxie; les plus petites, comme une nébuleuse située dans le Lion, ou NGC 147 située dans le Fourneau, ont des éclats 250 fois plus petits que notre Galaxie et des masses 1 000 fois plus petites.

Une autre belle nébuleuse du groupe local est celle du Triangle (M33), dont la magnitude apparente est 5,8; elle a une structure spirale assez lâche autour d'un noyau ponctuel. Elle n'a pratiquement pas de condensation centrale; sa masse est sensiblement celle du Grand Nuage : 10 milliards de masses solaires; elle est située pratiquement à la même distance que la nébuleuse d'Andromède (2,4 millions d'années de lumière). Mais son diamètre n'est que de 18 000 années de lumière (au lieu de 100 000 pour la Galaxie).

La grande nébuleuse d'Andromède est accompagnée par deux nébuleuses qui en sont en quelque sorte des satellites. Il s'agit de deux objets elliptiques : M32 ou NGC 221, de magnitude 8,2, peu allongé, situé à 24′ du centre de la nébuleuse d'Andromède, et NGC 205, situé à 38′ et nettement plus allongé; il a sensiblement le même éclat que NGC 221, sa plus grande dimension est de 2 300 parsecs (7 500 années de lumière) contre 1 000 parsecs pour NGC 221. Ces galaxies sont donc petites et leurs masses sont environ 60 fois plus petites que celle de la nébuleuse principale. Ces objets sont bien des compagnons de la grande nébuleuse, comme le montre la mesure de leurs distances. Mais leurs distances réciproques sont difficiles à déterminer, car on ne connaît pas leur situation relative dans l'espace. Si l'on admet que NGC 205 est dans le plan de la nébuleuse principale, mais cette hypothèse est discutable, on trouve une distance de 27 kiloparsecs. Il faut considérer ces galaxies comme des objets réduits à leurs condensations centrales, sans bras. Elles sont formées d'étoiles de population II. W. Baade a pu les résoudre en étoiles.

On connaît d'autres nébuleuses elliptiques : on y distingue de nombreux astres flous qui sont probablement des amas globulaires.

En dehors du groupe local, on connaît 18 galaxies plus brillantes que la magnitude 9; 14 de ces astres sont des spirales, 3 sont elliptiques et 1 est irrégulier. En moyenne, ces nébuleuses ont des éclats et des masses analogues à notre Galaxie, et les variations de l'une à l'autre ne sont pas considérables.

Avant d'entreprendre une classification des galaxies, nous devons décrire une nébuleuse d'un type spécial : la petite galaxie NGC 7479; il s'agit bien d'une spirale, mais les bras ne s'échappent pas d'un noyau central, mais d'une barre. On nomme ces galaxies, spirales barrées. On en connaît plusieurs centaines présentant nettement des barres.

Toutes les galaxies peuvent être classées dans le schéma proposé par Hubble qui distingue les spirales S et les spirales barrées SB. A ces lettres, on ajoute les minuscules a, b ou c suivant l'importance du noyau central. Les *elliptiques* sont nommées E0 à E7 en passant des *sphériques* aux *elliptiques allongées*.

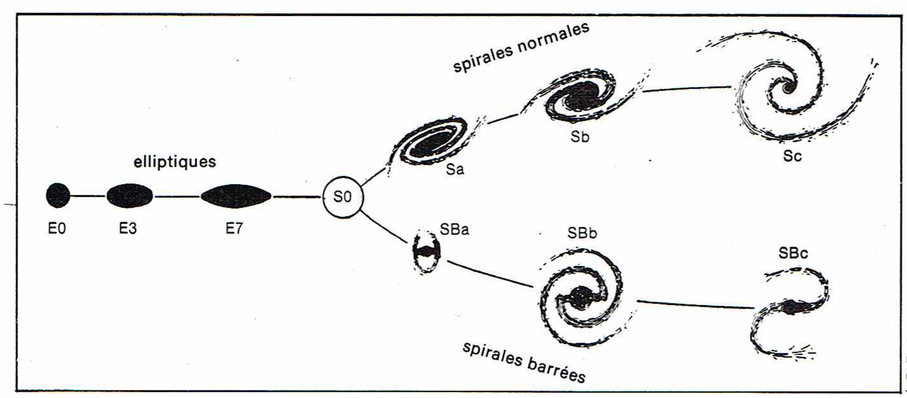

I.G.D.A.

Le nombre de galaxies

La répartition des galaxies sur le ciel montre que ces astres sont plus abondants au pôle galactique et absents dans le plan de la Voie Lactée. Cet effet est tout simplement dû à l'absorption provoquée par les poussières de notre système, et l'on pense qu'en fait la répartition est isotrope. D'ailleurs, récemment, on a trouvé, près de la Voie Lactée, des galaxies fortement rougies par l'absorption interstellaire. Dans toute statistique, il faut tenir compte de ce fait. Le nombre de 18 galaxies plus brillantes que la magnitude 9 doit être corrigé de l'absorption dans la Galaxie; il devient alors 80. Comment le nombre de nébu-

◀ ***Groupe de nébuleuses, assez lointaines, dans le Lion.***

leuses augmente-t-il avec la magnitude ? Les mesures montrent que l'augmentation pour une magnitude est de l'ordre de 3, et non 4 comme le voudrait une répartition uniforme dans l'espace. Mais le vrai calcul doit tenir compte du rougissement dû à la récession des galaxies.

On estime le nombre de galaxies qui serait observable sur le ciel, en l'absence d'absorption, aux chiffres suivants :

Magnitude limite	9	10	15	20	21
Nombre	80	240	82 000	26 millions	800 millions

Ces nombres sont extrêmement grands, mais la densité de matière qui en résulte est très petite, car la distance des nébuleuses est considérable. On estime la masse volumique à $2 \cdot 10^{-31}$ g/cm³ ou à 0,2 g pour un cube de 100 km de côté. Cette valeur est 10 millions de fois plus petite que la masse volumique moyenne de la Galaxie ($3 \cdot 10^{-24}$ g/cm³). Celle-ci est 1 000 trillions (10^{21}) de fois plus petite que celle de l'air ($1{,}3 \cdot 10^{-3}$ g/cm³). On ne sait pas actuellement quelle est la masse volumique de la matière dans le vide intergalactique. La masse volumique de la matière dans l'Univers est si petite qu'on a pu, très sérieusement, faire d'excellentes théories de l'Univers en le supposant vide !

Les amas de galaxies

La répartition des galaxies dans l'Univers n'est pas uniforme. Nous avons déjà vu qu'une quinzaine de galaxies forment un amas local. On constate le même effet aussi dans la constellation de la Vierge. Sur une zone d'un diamètre de 12° sur le ciel, on compte plus de 2 500 galaxies relativement brillantes et dont on estime la distance à 11 mégaparsecs. Il s'agit d'un amas beaucoup plus grand que l'amas local mais la densité moyenne n'est égale qu'au double de celle de l'amas local. On compte ainsi plus d'une vingtaine d'amas sûrs. Citons celui de la Chevelure de Bérénice qui contient 1 000 galaxies ; il est situé à 70 Mpc.

Les chiffres que nous indiquons sont fondés sur l'ancienne échelle et devraient être multipliés, d'après des résultats très récents, par 1,5.

L'un des amas les plus éloignés connus, l'amas II de la Grande Ourse, contient, sur une surface égale au 1/6 de la surface apparente de la Lune, 200 galaxies de 18ᵉ grandeur.

On a essayé d'étudier la répartition vraie des galaxies dans l'espace. On a d'abord essayé de trouver des amas d'amas. On a proposé l'existence d'une *supergalaxie* de 30 Mpc de diamètre, et notre Galaxie serait au bord de ce système dont le centre serait situé dans la constellation de la Vierge. Mais ces résultats sont controversés ; d'autres astronomes trouvent une répartition uniforme des amas : il y en aurait 2 700 dans une sphère de 800 Mpc de rayon.

La récession des galaxies

Nous avons déjà indiqué que la mesure des vitesses radiales des galaxies rapprochées a permis d'étudier la rotation de ces astres et d'en déterminer les masses. Nous avons aussi indiqué qu'on obtenait les vitesses radiales des centres de ces systèmes. Ces mesures ont été faites systématiquement par l'astronome américain Hubble qui a annoncé, en 1932, que toutes les nébuleuses lointaines s'éloignaient de nous, avec des vitesses radiales d'autant plus grandes que ces galaxies étaient plus faibles. La relation est particulièrement nette si l'on considère les vitesses radiales des amas de galaxies et en prenant pour indicateur de distance la magnitude apparente de la 10ᵉ nébuleuse, ce qui permet d'éliminer les galaxies anormalement intenses ou celles qui ne font pas partie du système. On trouve ainsi les vitesses suivantes, en limitant le choix à quelques exemples :

Amas	*Vitesses radiales* en km/s	m_{10}	*Distances* en Mpc	
Vierge	1 150	9,4	8	12
Cancer	4 800	13,4	48	72
Pégase II	12 800	15,2	110	167
Gémeaux	23 300	16,7	220	330
Grande Ourse II	41 000	18,0	400	600
Hydre II	60 600	18,6	525	800

Les premières distances ont été calculées en supposant que la 10ᵉ galaxie avait une magnitude de — 20. On constatera sur ce tableau, et encore mieux sur le graphique ci-contre, que la vitesse d'expansion augmente d'après ces nombres de 106 km/s par Mpc. Cette valeur est la constante H de Hubble. Il est évident que la valeur de la constante dépend de notre échelle des distances. Il suffirait

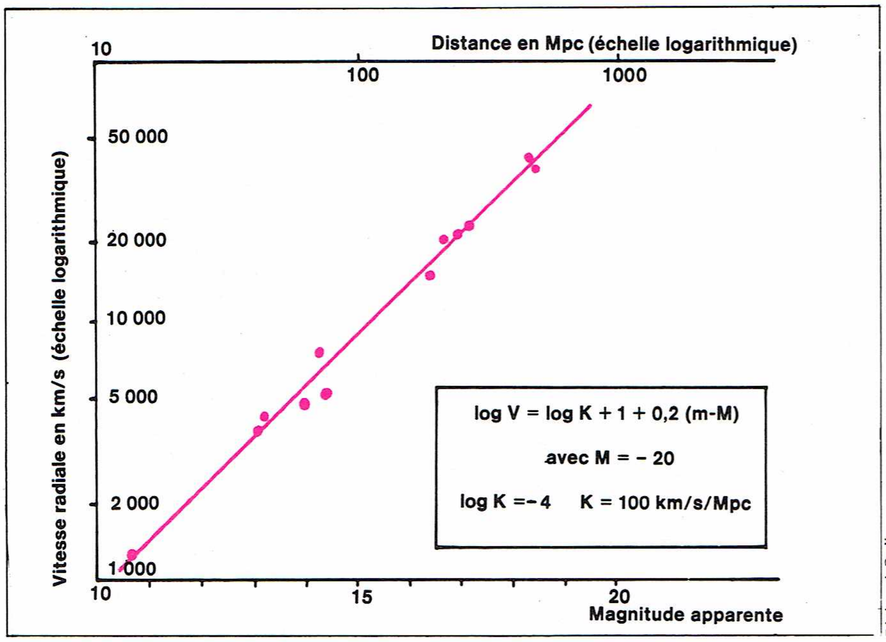

Richard Colin

▲ *Représentation graphique montrant l'augmentation de la vitesse radiale avec la distance. La ligne est une droite parce qu'on a adopté deux échelles logarithmiques.*
▼ *Relation entre le déplacement vers le rouge et la distance de quelques amas de galaxies; les distances sont indiquées en mégaparsecs : 1 mégaparsec = 1 million de parsecs = 3,26 millions d'années de lumière.*

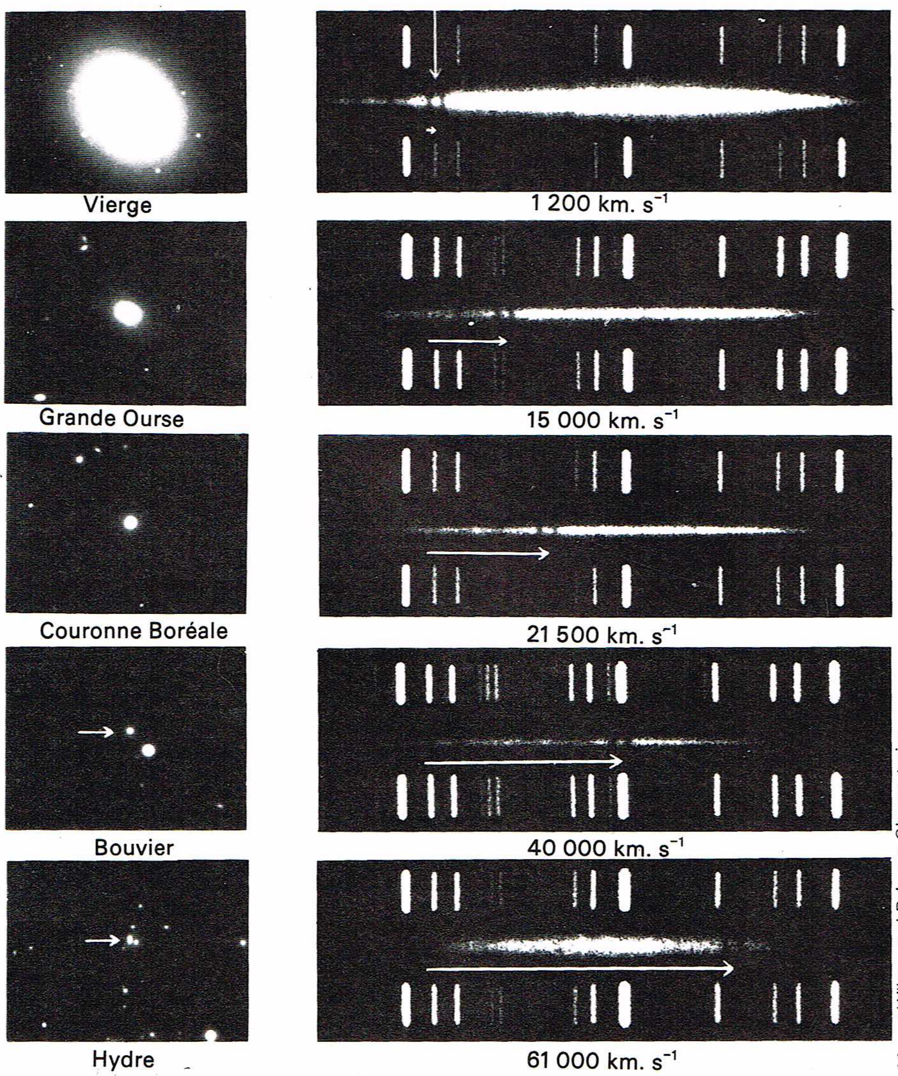

Mount Wilson and Palomar Observatories

ainsi d'admettre que la magnitude de la 10e galaxie est — 21 pour trouver les valeurs de la dernière colonne qui correspondent à une constante H = 70. Les valeurs, déterminées récemment, notamment par A. Sandage, sont encore nettement plus petites, H $\sim$ 60.

L'interprétation la plus simple de cet effet est de supposer que les déplacements spectraux vers le rouge correspondent bien à une vitesse de fuite des nébuleuses et qu'il y a par conséquent en ce moment une *expansion de l'Univers*. L'expansion est proportionnelle à la distance. Si cette vitesse n'a pas changé depuis l'origine des temps, on trouve qu'à ce moment tout l'Univers était concentré en un point. On trouve l'époque de cette explosion en divisant la valeur du mégaparsec (exprimée en kilomètres) par la constante de Hubble. Ce temps $T = \frac{1}{H}$ est le début de l'Univers. Toujours dans cette hypothèse simpliste, on trouve T = 16 milliards d'ans (pour H = 60).

Il est facile de comprendre que cette expansion n'a pas d'origine définie et qu'un observateur quelconque du système observerait la même fuite. C'est une conséquence de la géométrie élémentaire : dans une foule en voie de dispersion, chaque individu verra tous ses voisins s'éloigner de lui sans qu'il soit le centre de la dispersion.

D'après le tableau ci-dessus, remarquons tout de suite que pour l'amas le plus éloigné (Hydre II), la vitesse dépasse le 1/5 de la vitesse de la lumière, et, indépendamment de toute hypothèse cosmologique, c'est-à-dire sur la géométrie de l'Univers, la relativité indique que le déplacement spectral n'est pas proportionnel à la vitesse; mais même pour 60 000 km/s la correction n'est que de 2 %. Cependant cette correction devient rapidement considérable. Pour cette raison, pour les grandes vitesses, on a pris l'habitude de remplacer l'indication de la vitesse par le nombre Z défini de telle sorte que la longueur d'onde observée est égale à la longueur d'onde observée multipliée par (1 + Z) :

$$\lambda = \lambda_0 \ (1 + Z)$$

Il est important de mesurer les vitesses des galaxies plus lointaines pour observer la variation ultérieure de Z avec la magnitude apparente. Ces mesures deviennent de plus en plus difficiles, et c'est en découvrant des galaxies présentant des raies d'émission que l'on peut atteindre les galaxies les plus lointaines. Mais c'est la radioastronomie qui a permis l'obtention d'une moisson nouvelle de résultats.

Les quasars

L'observation du ciel dans le domaine des ondes hertziennes a permis de détecter de nombreuses sources radioélectriques. On peut les classer en diverses catégories nettement distinctes : les radiosources liées à notre Voie Lactée, qui sont pour la plupart expliquées par l'explosion de supernovae; les radiosources extragalactiques, qui sont des galaxies normales proches; des galaxies anormales, sièges d'explosions, ou, enfin, une série de sources énigmatiques : les *quasars*. Le nom de quasar vient de la contraction de « quasi stellar radiosources », sources quasi stellaires. Ces objets qui ressemblent à des étoiles sont relativement peu nombreux : on en connait actuellement une centaine. Nous étudierons tout d'abord le plus brillant.

Cette source, 3C 273, qui est la 273e du Troisième Catalogue de Cambridge, ce qui explique son nom, est une radiosource assez brillante. Elle est devenue un objet d'un très grand intérêt lorsqu'on a pu l'identifier avec une source optique. Les coordonnées du Catalogue de Cambridge étaient assez peu précises, et il fut d'abord impossible de trouver une source optique correspondante. L'identification a été possible grâce à une observation très précise de sa position, obtenue en profitant du fait que la Lune occulte cette source au cours de son mouvement. Nous observons une sorte d'éclipse de quasar, et l'heure du début et de la fin de l'occultation donne une excellente position du quasar.

Cette observation effectuée en 1963 par Hazard, Mackey et Shimmins donna, en plus de la position à 1 seconde d'arc près, un résultat inattendu : la source était double, constituée en fait par deux sources A et B, séparées de 20 secondes d'arc. Il fut facile de les reconnaître sur des clichés photographiques : la *source A*, la plus lumineuse dans le domaine radioélectrique, correspond à une petite nébulosité alors que la *source B*, quatre fois moins intense

en radio, correspond à une étoile de 13e grandeur. Schmidt obtint le spectre de l'étoile et trouva qu'il s'agissait d'un spectre continu mais présentant aussi les raies d'émission des nébuleuses gazeuses, notamment celles de l'hydrogène; ces raies sont fortement déplacées vers le rouge. On peut interpréter ce déplacement comme une vitesse d'expansion. On trouve la valeur V = 48 000 km/s. Ce déplacement représente la fraction Z = 0,16 de la vitesse de la lumière. Si l'on suppose que cette vitesse est une vitesse de récession, on trouve que ce quasar est à une distance de 500 Mpc ou 1,5 milliard d'années de lumière. Avec H = 100, l'éclat intrinsèque de cet astre est alors 100 fois supérieur à celui d'une nébuleuse spirale normale comme notre Galaxie; il rayonne comme 1 000 milliards de Soleils. Ces résultats permirent de comprendre en même temps le spectre d'un autre quasar (3C 48) dont on avait obtenu le spectre, mais dont on n'avait pas pensé que les raies pouvaient être décalées vers le rouge de plus de 42,5 % de leur valeur au repos (Z = 0,425). Cet astre a un éclat de l'ordre de 100 galaxies.

La composante radio-intense (composante A) de 3C 273, située à 20″, est à une distance de 150 000 années de lumière de la composante B dont elle aurait été éjectée, ce qui indique que cette explosion a eu lieu à une époque plus lointaine que 150 000 années, car si l'éjection avait eu lieu avec la vitesse de la lumière, le trajet parcouru serait celui que nous avons indiqué.

La structure double des radiosources extragalactiques est très fréquente, sinon générale. On a l'impression que ces astres doubles résultent de l'éjection symétrique de deux radiosources d'une galaxie initiale.

L'interprétation des quasars s'est encore compliquée lorsque Harlan Smith, de l'Observatoire McDonald, a pu montrer, grâce à de nombreux clichés anciens de l'Observatoire Harvard, que 3C 273 avait un éclat optique variable. En effet, à une diminution d'éclat lente se superposent des fluctuations irrégulières. On peut attribuer à ces fluctuations des pseudo-périodes de 1 à 10 ans. Cette constatation pose de nombreux problèmes. La source doit être très petite et mesurer au maximum 1 année de lumière de diamètre. Sans cela, les variations d'éclat seraient effacées, l'observateur recevrait simultanément la lumière correspondant à un maximum et à un minimum d'éclat. Mais ce nouvel aspect nous gêne beaucoup car nous devons maintenant supposer que le colossal rayonnement de millions de millions de Soleils provient d'un volume infime de 1 année de lumière de diamètre. Rappelons que l'étoile la plus proche du Soleil est à 4 années de lumière et que le diamètre de la Galaxie est de 100 000 années de lumière.

La liste des quasars s'est allongée. On en connaît aujourd'hui plus d'une centaine. Certains de ces astres présentent des déplacements du spectre vers le rouge tels que les longueurs d'onde des raies sont multipliées par des nombres nettement supérieurs à 2, c'est-à-dire que Z est supérieur à 1. La plus grande valeur déterminée est Z = 2,877 pour le quasar 4C 0534, dans la cosmologie du modèle d'Einstein-de Sitter dont nous parlerons plus loin. La vitesse de récession correspondante est inférieure de seulement 12,5 % à celle de la lumière, soit 262 300 km/s pour une vitesse de la lumière de 299 800 km/s.

Ces résultats sont si surprenants que l'explication des déplacements par l'expansion de l'Univers a été mise en doute, et l'on a essayé de trouver d'autres solutions. On a notamment pensé à des étoiles très massives situées dans notre Galaxie : le déplacement spectral s'expliquerait alors par celui qui a été prévu par Einstein pour des atomes émettant dans des champs gravitationnels très intenses. Mais cette hypothèse se heurte à de nombreuses difficultés, car, si l'on admet une masse raisonnable, l'astre est à une distance si petite que le quasar se trouverait alors dans le système solaire. Avec une autre hypothèse sur la masse, le quasar devrait perturber le mouvement de la Terre autour du Soleil.

Les astronomes ont pensé aussi que les quasars correspondraient à de la matière éjectée par le centre de notre Galaxie ou par une galaxie proche, mais là aussi les difficultés sont très grandes. Comment expliquer, dans ce cas, que tous ces quasars aient des vitesses d'éloignement?

L'observation de plus en plus détaillée a révélé d'autres aspects curieux; notamment, certains des quasars présentent des raies d'absorption. Quelquefois elles sont simples et voisines des raies d'émission; dans ce cas, tout peut s'expliquer par un nuage absorbant en expansion autour du quasar. Par contre, d'autres sources présentent deux ou trois systèmes de vitesses très différentes, et nous ne comprenons pas ce qui se passe. Certains spectres nécessiteraient des dizaines de systèmes. Naturellement, les hypothèses ne manquent pas, mais aucune n'est satisfaisante. On a supposé que le rayonnement des quasars au cours de son trajet dans l'espace entre les galaxies pouvait rencontrer des nuages gazeux absorbants. Mais on ne comprend alors que difficilement la finesse des raies absorbées, et la répartition de ces nuages paraît étrange.

▼ A gauche, le quasar 3 C 273, qui est une des sources extragalactiques les plus intenses que nous connaissions; ici, il a été photographié à l'aide du télescope de 5 m de diamètre du mont Palomar (Observatoire des monts Wilson et Palomar). A droite, spectre et enregistrement microphotomètre de la radiosource 3C 273. Pose de 16 heures avec un spectrographe à réseau monté sur un télescope de 120 cm de diamètre de l'Observatoire de Haute-Provence. On remarque surtout la raie Hα, large et très déplacée (fortuitement superposée à la bande d'absorption tellurique A de O_2). Hα se situe à 7 586 Å; le décalage Δλ/λ est de 0,156, ce qui correspond à une vitesse de 47 000 km · s⁻¹.

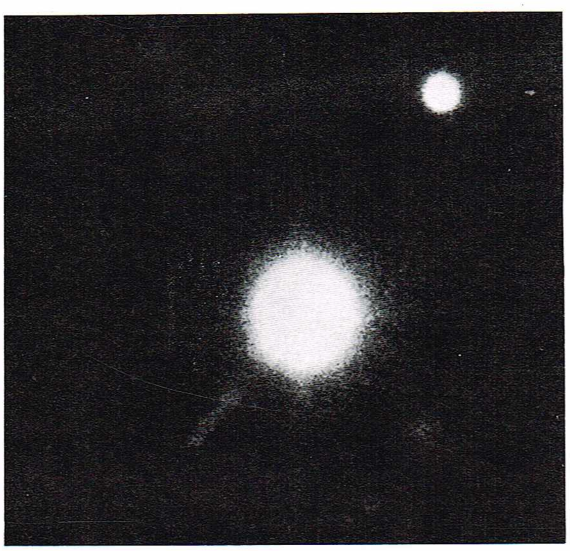

Mount Wilson and Palomar Observatories

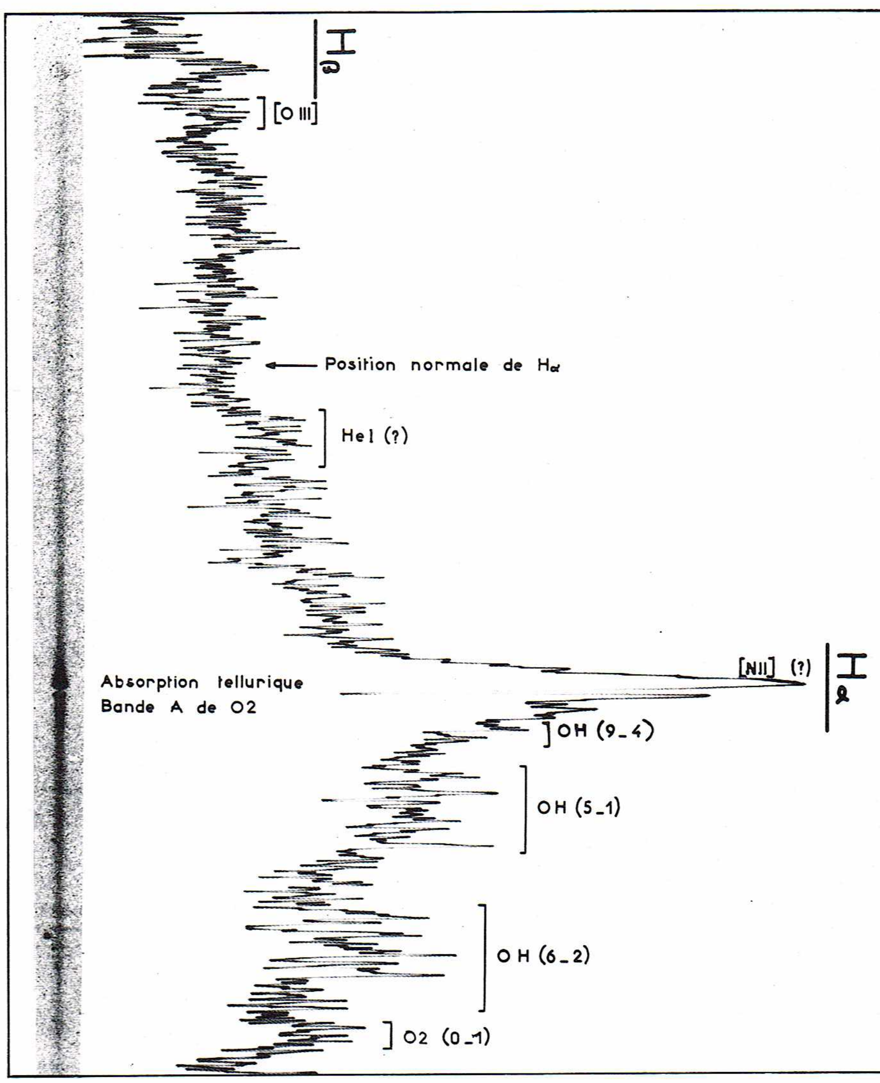

C.N.R.S. - Observatoire de Haute-Provence (Y. Andrillat)

Mount Wilson and Palomar Observatories

▲ ***La radiogalaxie NGC 5128 (Centaurus A) est l'une des premières radiosources identifiées comme étant des galaxies (Observatoires des monts Wilson et Palomar).***

Les astronomes se sont demandé si, en plus des quasars proprement dits, reconnaissables à leur rayonnement hertzien, il ne pouvait exister d'autres astres ayant les propriétés des quasars mais sans rayonnement hertzien. C'est effectivement le cas. Pour rechercher ces astres, A. Sandage s'est servi d'une propriété spécifique des quasars : la grande intensité de leur rayonnement ultraviolet. *A priori,* tout objet situé loin du plan de la Galaxie et riche en ultraviolet peut être un astre de ce nouveau type. Nous le désignons par le symbole QSO (« quasar optique »). On peut prendre des naines blanches pour des QSO mais la prise de spectres ou l'étude plus précise de la couleur de l'astre permet de les distinguer. Ces recherches ont montré que les QSO sont plus de 100 fois plus abondants que les quasars proprement dits. En se limitant à la 18^{e} magnitude, on estime le nombre de QSO à 1 source par 2 degrés carrés de ciel, c'est-à-dire à 20 000 pour le ciel entier. Compte tenu de la limite des méthodes d'observation, on arrive à la conclusion que, dans l'Univers, le nombre des QSO est de l'ordre de 1 million.

Les données d'observation sont de plus en plus nombreuses, mais les nouveaux résultats ne clarifient pas actuellement le problème. Citons quelques-uns de ces faits : sur la centaine de quasars reconnus, 60 % ont des spectres connus ; les atomes mis en évidence sont classiques : hydrogène, carbone, néon, etc., et ils sont en général très ionisés.

Au moins une dizaine de sources présentent des variations d'éclat. Plusieurs de ces objets sont doubles et même triples. Tous ces faits rattachent les quasars aux galaxies découvertes par Seyfert, caractérisées par une forte activité dans le noyau. On a suggéré que les quasars sont des galaxies en état d'explosion, des supernovae explosant en chaîne, des hyper-supernovae de type inconnu qui seraient la source du rayonnement.

Au stade actuel de nos connaissances, l'hypothèse extragalactique ou encore cosmologique des quasars est celle qui est généralement admise, mais ni le mécanisme des explosions, ni l'explication des raies d'absorption ne sont satisfaisants. Les astrophysiciens espèrent que l'étude des quasars leur permettra de mieux comprendre la structure et l'évolution de notre Univers.

Nous devons signaler une découverte récente très importante : le *rayonnement cosmologique de* 3 °K. L'observation en 1965 du satellite Echo par les ingénieurs de la Bell Corporation a montré l'existence d'un rayonnement dans le domaine des ondes centimétriques qui s'est révélé identique dans toutes les directions, c'est-à-dire isotrope. Une étude ultérieure a montré que la répartition spectrale correspond à celle d'un corps noir avec un maximum situé vers $\lambda = 1{,}1$ mm correspondant à une température de 3 °K. On admet que ce rayonnement existe dans tout l'Univers, et l'on donne une explication liée aux modèles d'Univers, d'où son nom de rayonnement cosmologique.

THÉORIES COSMOLOGIQUES

La cosmologie est le corps de doctrines qui a pour objet d'expliquer l'Univers dans son ensemble. Il doit naturellement être en accord avec les faits certains de l'observation et les expliquer.

Rappelons d'abord que la théorie de la Relativité généralisée doit être considérée comme vérifiée par l'observation. La Relativité restreinte avait permis d'établir l'équivalence entre la matière et l'énergie. La fameuse *relation d'Einstein :* $E = mc^2$, qui exprime cette équivalence est un fait acquis. De même, l'observation précise du mouvement du périhélie de Mercure, de la déviation de la lumière par le Soleil sont des faits acquis, et la théorie de la Relativité généralisée est vérifiée. Rappelons que la théorie de Newton est une première approximation de la Relativité généralisée. La formulation mathématique de cette dernière théorie dans un espace à 4 dimensions montre que la transmission instantanée des forces de gravitation n'est plus nécessaire, et la gravitation peut être regardée comme une courbure de l'espace-temps.

Il n'est pas possible de donner dans cette Encyclopédie une analyse des modèles cosmologiques proposés par des géomètres de grand talent. Indiquons que le principe de ces modèles n'est pas compliqué, mais que les calculs nécessitent des connaissances mathématiques très approfondies. Dans ces théories, on admet que l'espace est rempli de matière et d'énergie qui sont repérables par les trois coordonnées d'espace (x, y et z) et par le temps. C'est-à-dire que chaque événement est un point de l'espace à 4 dimensions : x, y, z, et une coordonnée *it,* où *i* est l'imaginaire $i = \sqrt{-1}$.

La répartition de la matière détermine la *courbure de l'espace-temps,* et, lorsqu'un point matériel se déplace, son mouvement dans l'espace à 3 dimensions est décrit par les équations d'une certaine courbe dans cet espace à 4 dimensions. Cette courbe n'est pas quelconque, mais c'est le chemin le plus court ou géodésique de cet espace.

Deux données sont essentielles pour construire ces modèles : la connaissance de la masse volumique moyenne de l'espace (on admet qu'elle est de l'ordre de 10^{-30} g/cm^3) et le signe de la courbure de l'espace. Friedmann a en effet montré que cette courbure pouvait être négative, nulle ou positive. On parle alors respectivement d'*espaces hyperboliques, euclidiens* ou *elliptiques.*

Reprenons ici la conclusion générale d'une excellente introduction à *l'Étude de la cosmologie* (H. Andrillat, A. Colin, 1970) dont la lecture est réservée à des scientifiques ayant une connaissance mathématique suffisante. Les idées simples sont les suivantes : la métrique est gravitationnelle ; la vitesse de la lumière est la même en tous lieux et temps ; les mouvements des particules libres sont des géodésiques de l'espace-temps ; l'espace est homogène, isotrope, il a la symétrie sphérique ; ses propriétés sont donc, à un instant donné, les mêmes en tout lieu et dans toutes directions.

Après la découverte de la récession des galaxies, seuls des modèles non statiques restent valables. Leur métrique la plus générale, établie par Robertson et reprise sous une forme encore plus générale par Walker, définit :

— un *temps cosmique* qui s'identifie avec le temps propre de l'observateur en tout point de l'espace ;

— un *système de coordonnées* comobile avec chaque observateur, c'est-à-dire avec chaque galaxie ;

— un *facteur de métrique :* le rayon de l'Univers, variable avec le temps (alors qu'il est constant dans les modèles statiques) ;

— le *coefficient de la courbure* négative, nulle ou positive de l'espace.

Ces modèles devraient, et ils le font, donner une parfaite représentation de l'expansion de l'Univers.

Le décalage spectral $Z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ du spectre d'une galaxie est donné par la relation simple :

$$1 + Z = \frac{R\ (t_0)}{R\ (t)}$$

R (t_0) représentant la valeur du facteur métrique (rayon de l'Univers) actuellement et R (t) la valeur du rayon de

l'Univers à l'instant t de l'émission des photons par la galaxie.

Deux types de modèles furent principalement étudiés : celui de Hoyle qui postulait l'immuabilité des lois de la physique et des densités (sa constante cosmologique n'est pas nulle) et des modèles dits à explosion initiale qui comportent un point singulier. Ce sont ces derniers modèles qui paraissent s'imposer, car eux seuls expliquent le rayonnement cosmologique de 3 °K.

Nous ne savons pas encore si l'espace est fermé sur lui-même ou ouvert, s'il est fini ou infini. Mais les spécialistes sont à peu près tous d'accord pour penser que le passé de l'expansion est fini et que l'on peut parler d'un début de l'Univers dans sa phase actuelle.

Voici un modèle d'Univers parmi ceux qu'on peut retenir comme représentatifs de la situation décrite ci-dessus : c'est un *modèle de Friedmann*, avec une constante cosmologique nulle et une pression nulle. Ces hypothèses permettent de calculer la loi de variation du rayon de l'Univers, R (t), avec le temps.

Dans les trois cas géométriques étudiés (hyperbolique, euclidien et elliptique), on assiste à une décélération de l'expansion. Avec les valeurs actuellement admises : pour la constante de Hubble

$$H = 100 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$$

et la masse volumique $\rho_0 = 10^{-29}$ g/cm³, on trouve une décélération de 0,25, et l'espace serait hyperbolique. Le test n'est pas sensible, car il dépend essentiellement de la valeur admise pour ρ_0 qui n'est connu qu'à un facteur 10 près.

Les astronomes essayent actuellement de vérifier la nature géométrique de notre Univers par diverses observations cruciales. Indiquons quelques résultats dans le cas d'Univers euclidien de Friedmann ; on trouve que le facteur de la métrique R (t) est proportionnel à la puissance 3/2 du temps :

$$R(t) = a \cdot t^{3/2}.$$

On connaît la variation actuelle de R (t) par la constante de Hubble. On en déduit qu'actuellement $t_0 = 6{,}6$ milliards d'années. On démontre ainsi qu'une galaxie présentant le décalage Z a émis son rayonnement à l'époque donnée par :

$$t = \frac{t_0^{3/2}}{(1+Z)}.$$

Les quasars actuellement observés ont bien des déplacements cosmologiques. Le rayonnement que nous avons reçu a été émis à l'époque (comptée à partir de l'origine des temps) :

$$t = \frac{t_0^{3/2}}{(1+2{,}9)} = 0{,}9 \text{ milliard d'années.}$$

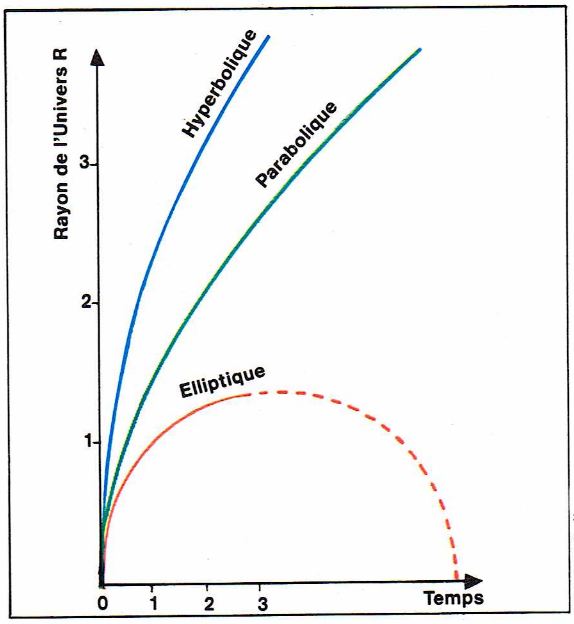

◀ *Graphique montrant la variation de rayon de l'Univers dans trois modèles : elliptique, parabolique et hyperbolique. Dans le premier modèle, le rayon R de l'Univers redevient nul, dans le second il tend vers une limite, dans le troisième il augmente indéfiniment en fonction du temps.*

Les radioastronomes espèrent atteindre Z = 8, ce qui permettrait d'explorer l'Univers depuis son plus jeune âge, c'est-à-dire depuis l'âge de 250 millions d'années jusqu'à aujourd'hui où il est âgé de 6,6 milliards d'années.

Enfin, les développements les plus récents de la Relativité générale qui ont conduit à la *théorie du trou noir* établissent plus qu'une analogie, mais bien une identité entre le modèle du trou noir et un certain modèle bien déterminé d'Univers à explosion initiale. Les spécialistes de la théorie de la gravitation n'hésitent plus à considérer ce dernier modèle comme le modèle représentatif de notre Univers. C'est, parmi les modèles de Friedmann cités plus haut, le *modèle fermé*, c'est-à-dire le *modèle à géométrie elliptique*. Il est complètement déterminé et présente donc, comme en son temps le modèle de Hoyle, l'avantage précis de devoir être à jamais confirmé ou bien globalement rejeté par les observations à venir. Dans ce modèle, l'espace est refermé sur lui-même et l'Univers géométriquement fixé à chaque instant. Son évolution temporelle le conduit actuellement, par une phase d'expansion, de la singularité du passé (explosion primordiale) vers un état d'extension maximale, d'où il rejoindra ultérieurement, par une phase de contraction, la singularité du futur (implosion finale).

La cosmologie est devenue une science, mais une science difficile que nous ne pouvons exposer ici avec plus de détails.

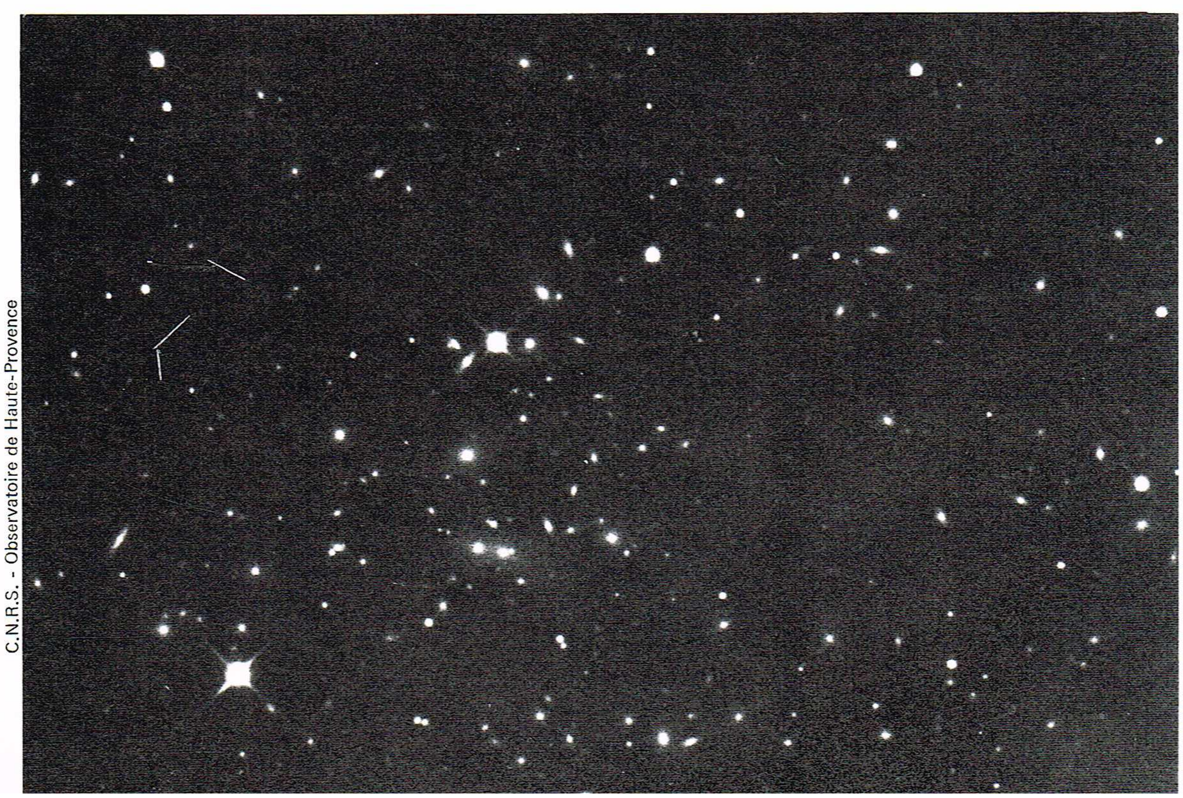

◀ *Amas de nébuleuses spirales dans la Couronne Boréale, situées à 1,1 milliard d'années de lumière (vitesse radiale voisine de 22 000 km · s⁻¹).*

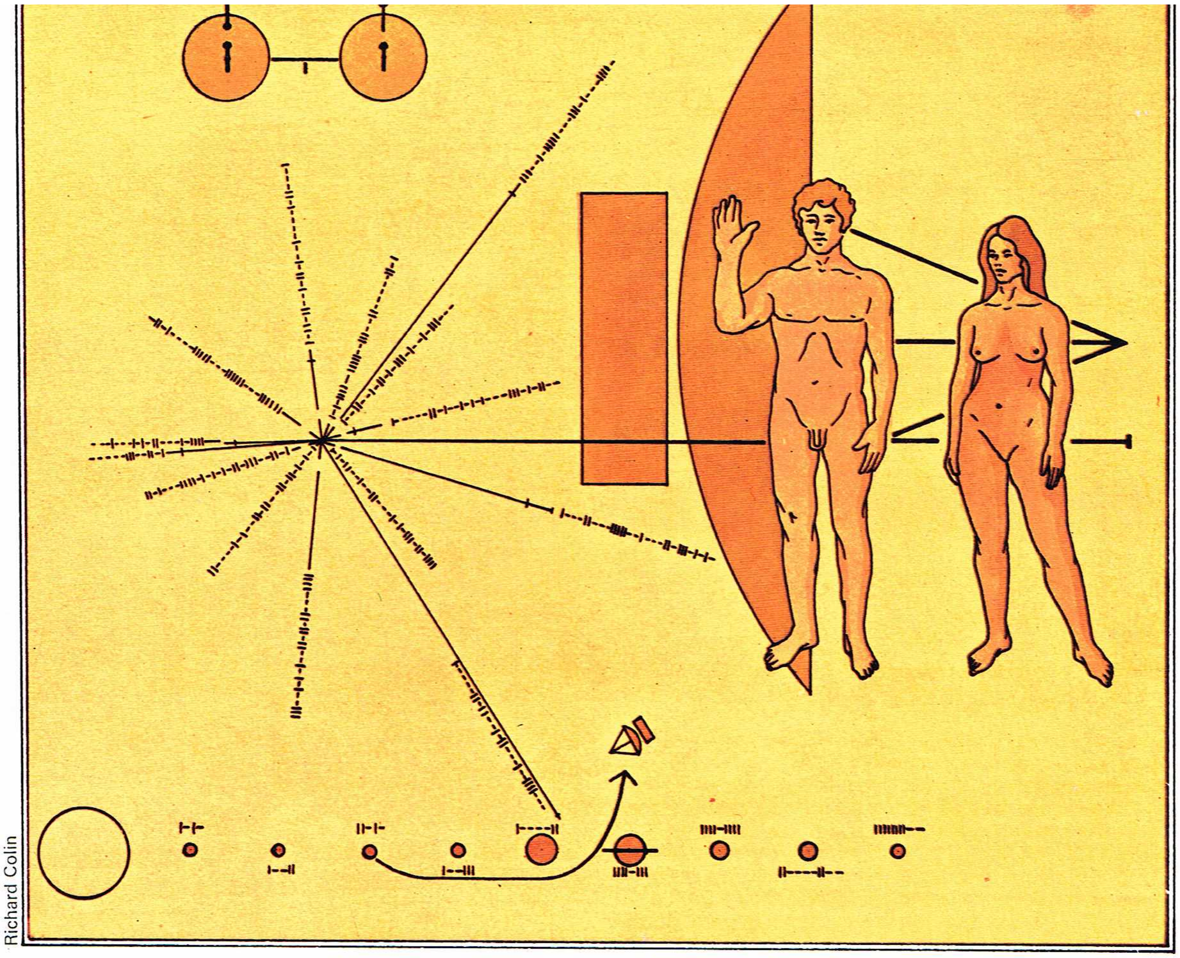

Richard Colin

▶ *Plaque en aluminium dorée mise à bord des Pionniers 10 et 11 qui vont quitter le système solaire. En haut, l'atome d'hydrogène dont l'oscillation (raie de 21 cm) est l'étalon de temps; au centre, la position du Soleil par rapport à 14 pulsars avec indication de leur fréquence; en bas, le système solaire et la trajectoire des Pionniers; à droite, deux humains, taille comparée aux engins Pionniers. Cette plaque, si elle est récupérée par des êtres intelligents, doit leur permettre de connaître l'origine et la date de son envoi à partir de la Terre. La première missive interstellaire!*

LA VIE DANS L'UNIVERS

Il n'est pas question de définir ici la vie, elle a été décrite dans de nombreux volumes de cette Encyclopédie. Rappelons tout de même quelques faits essentiels.

Toute la matière vivante de la Terre est formée des composés du carbone. Cet atome a la propriété presque unique de permettre l'édification de molécules complexes, formées essentiellement des atomes C, H, O, N, sans négliger les autres atomes qui sont aussi des composants importants de la matière vivante.

Les réactions de formation sont endothermiques et nécessitent donc un apport d'énergie extérieur qui provient du Soleil. Pour les végétaux, c'est l'assimilation chlorophyllienne qui produit des composés carbonés (hydrocarbones ou molécules plus complexes) à partir de CO_2 et en dégageant de l'oxygène. Cette réaction est possible parce que les plantes absorbent de l'énergie solaire. L'oxygène ainsi libéré est essentiel pour la respiration des animaux. Ceux-ci brûlent les molécules carbonées qu'ils tirent de leur nourriture de plantes ou d'autres animaux. L'eau joue dans toutes ces réactions un rôle essentiel au point que l'absence d'eau équivaut à l'absence de vie. Ce cycle est vraiment caractéristique de la vie sur la Terre.

Ces réactions ne peuvent avoir lieu que dans un intervalle de température assez restreint. Sur la Terre, la vie se développe pratiquement entre des températures de 0 °C et 50 °C. La vie peut subsister en dehors de ces limites, notamment vers les températures plus basses, mais elle ne peut se multiplier.

D'autres conditions sont nécessaires : les cellules vivantes sont très sensibles aux rayonnements ultraviolets, et c'est la couche d'ozone de notre atmosphère qui nous protège de ce rayonnement, comme l'atmosphère nous protège aussi des rayonnements ionisants émis par le Soleil en quantité non négligeable.

Pour les êtres vivants complexes, que nous nommons supérieurs, des conditions variables suivant les espèces sont nécessaires. Mais la vie existe dans des milieux si différents qu'on est toujours surpris par l'adaptation de la vie à des circonstances qui pourraient paraître rédhibitoires. Des Bactéries vivent dans le pétrole!

Résumons les constatations des diverses sciences. Sur la Terre, les conditions de la vie paraissent avoir existé depuis 2 à 3 milliards d'années, et par conséquent les fluctuations du rayonnement solaire n'ont pas été importantes pendant cette période. Certes, nous savons qu'il y a eu des variations de climat, mais les limites de ces variations ont été très modérées.

D'autre part, d'après les paléontologistes et les biologistes, il semble bien que toute la vie terrestre résulte du développement d'une même souche; la grande diversité est due aux temps d'évolution extrêmement longs. Mais il ne semble pas qu'il y ait eu interruption ni création multiple de la vie.

Des conditions analogues existent-elles sur d'autres corps célestes, et comment pouvons-nous les reconnaître? Pouvons-nous entrer en communication avec des êtres vivants?

Notre étude du système solaire a montré que des conditions analogues aux conditions terrestres n'existent nulle part. La Lune et Mercure sont des astres désolés, sans atmosphère, sans eau et soumis à des fluctuations de température très rigoureuses. Les molécules composées de carbone, comme celles des météorites, sont très certainement d'origine abiotique. Les grosses planètes sont très froides et nous ne pouvons y imaginer que des conditions de vie absolument sans rapport avec la vie terrestre; il en est de même pour leurs satellites qui sont trop froids.

Il reste Vénus et Mars. La vie terrestre ne pourrait y subsister sous des formes habituelles, cependant des formes de vie, bien qu'elles soient improbables, pourraient y exister. Mais il n'y a pas de Martiens et de Vénusiens analogues aux habitants de la Terre : hommes, animaux ou plantes; toutefois le dernier mot n'est pas dit sur l'existence d'une vie différente, bactérienne ou insoupçonnée, et nous attendons avec impatience les premiers atterrissages sur Mars. Quoi qu'il en soit, notre Terre est vraiment unique. C'est tout ce que nous pouvons dire.

Si la vie paraît donc unique sur la Terre, dans le système solaire, le Soleil n'est qu'un astre parmi des milliards de milliards d'autres.

Le problème de la vie dans l'Univers doit être abordé avec beaucoup de prudence. D'autant plus que les découvertes récentes ont montré que des molécules carbonées existent un peu partout dans l'Univers. Certains scientifiques pensent que la vie a été créée à partir de ces molécules et que, par conséquent, la vie doit exister en de nombreux endroits de l'Univers. D'autres font des calculs de probabilité sur ces corps habités, mais des calculs de ce type sont toujours critiquables. Posons néanmoins le problème scientifique.

Dans notre système solaire, la zone de vie est assez restreinte, située sensiblement entre les orbites de Vénus

et de Mars, c'est-à-dire entre 100 et 200 millions de kilomètres ; il y circule 3 planètes et sur l'une, la vie existe depuis 2 ou 3 milliards d'années. Les étoiles chaudes de la Galaxie sont beaucoup trop jeunes pour avoir permis le développement d'une vie comme la nôtre. Pour les étoiles les plus froides, la zone de vie est très réduite.

D'autre part, nous savons que de nombreuses étoiles sont doubles : elles ne sont pas favorables à l'existence de planètes habitées, car celles-ci circuleraient sur des orbites les amenant tantôt trop près, tantôt trop loin de leur source d'énergie, l'étoile autour de laquelle elles tournent. Tout compte fait, seul 1/1 000 des étoiles présente des conditions favorables, mais cela fait encore des centaines de millions de possibilités. De là, on conclut facilement qu'il y a des mondes habités : conclusion non scientifique, et seule l'observation de la vie peut répondre à cette question.

Quelles sont les possibilités que nous avons de reconnaître la vie dans ces systèmes ?

Et d'abord, ces étoiles ont-elles des planètes ? Même pour les étoiles les plus proches, nous constatons que les difficultés de les reconnaître sont insurmontables ou presque. L'étoile la plus proche, α Cen, qui est d'ailleurs une étoile double, est située à 270 000 unités astronomiques. La lumière met 4,3 années pour nous parvenir de cette étoile. Si cette étoile était accompagnée d'une planète comme Jupiter, celle-ci serait un astre de 22^e grandeur circulant à 4″ de cette étoile de grandeur 0, c'est-à-dire 1 milliard de fois moins lumineux que l'étoile. Un tel astre ne serait pas détectable.

Laissons α Cen qui est une étoile double et examinons un candidat plus valable, β Hyi, situé à 21 années de lumière ; le compagnon serait de 23^e grandeur, invisible avec les plus grands télescopes et situé à 0″,8 de l'étoile. Cette détection d'une planète du type jovien est donc impossible par l'observation directe. Ne parlons pas de leur étude et de la détection de la vie ou même de molécules.

Deux autres moyens existent : la détection par la diminution d'éclat de l'étoile au moment où la planète passe devant l'étoile principale ; cette éclipse correspondrait à une diminution de 1/1 000 de l'éclat pendant 1,3 jour. Voici encore une observation impossible.

Si une planète analogue à Jupiter circulait autour d'une étoile, celle-ci décrirait une orbite autour du centre de gravité du système. Pour α Cen, ce mouvement se traduirait par une petite oscillation de 4/1 000″ d'amplitude avec une période de 12 ans, soit, au foyer d'un grand télescope, un déplacement de 0,4 μm.

La recherche de corps obscurs ne permet donc de révéler que des astres beaucoup plus gros et plus éloignés que Jupiter autour de certaines étoiles, et de tels astres ont été trouvés par l'astronome Van de Kamp. Mais il ne s'agit pas de planètes analogues à celles du Soleil ; 6 sur les 20 étoiles les plus proches du Soleil auraient de tels compagnons, et il est plausible d'admettre que certaines ont aussi des planètes analogues en dimensions à celles de notre système solaire.

Nous n'avons donc pas reconnu pour le moment de systèmes solaires analogues au nôtre, mais il s'agit d'une insuffisance de nos moyens.

Examinons maintenant les possibilités de communication avec des êtres vivants au moins aussi développés que les hommes. Nous ne pouvons évidemment pas espérer entrer en communication avec des hommes du Néolithique et encore moins avec des dinosaures, des sapins ou des fougères.

Pour bien situer ce problème, rappelons combien notre système solaire est isolé dans l'espace. α Cen est situé à 4,3 années de lumière ; si nous voulions l'atteindre par un engin satellisé à partir de la Terre, avec sa vitesse d'évasion, 42 km/s, c'est-à-dire, aux moindres frais, nous mettrions 30 000 années pour l'atteindre, et dans le cas de β Hyi, la durée serait de 150 000 ans. Certes, on peut envisager, en y mettant le prix, de diminuer ce temps, mais pour atteindre α Cen en 30 ans, il faudrait une énergie environ 12 millions de fois plus grande ; cela reste dans le domaine du possible grâce à la transformation de la matière en énergie mais nous ne savons pas encore le faire avec le rendement voulu.

D'ailleurs, notre isolement est à double sens : actuellement, nous n'avons observé aucun corps céleste, ni météorite, ni comète venant sûrement de l'espace interstellaire.

Notre seul espoir est d'entrer en communication avec d'autres êtres vivants par des signaux radioélectriques. Trois problèmes se posent alors : l'énergie nécessaire pour que le signal soit reçu, la nature du signal pour qu'il soit compris (c'est tout le problème du langage) et la durée de transmission.

Sauf pour le langage, ces problèmes se posent déjà pour les ordres à donner à des satellites artificiels. Avec une antenne bien dirigée vers Pionnier 10, il fallait déjà dépenser des centaines de kilowatts. D'autre part, à cause des durées de transmission, les observateurs n'ont pas été capables de réorienter une caméra mal dirigée au moment du passage à proximité de Jupiter, car la panne, immédiatement détectée, n'était connue sur la Terre que 46 mn plus tard, et lorsque l'ordre est arrivé, encore 46 mn plus tard, l'époque de la manœuvre propice était passée.

Pour atteindre α Cen, il faudrait une énergie 3 milliards de fois plus grande, et le temps de retour serait de 9 ans. Ne parlons pas de β Hyi... Il n'est pas question d'utiliser un langage quelconque, même comme le morse, mais l'envoi d'un signal nettement rythmé, par exemple trois points à intervalle régulier ou tout ce que le jeu mathématique nous permet d'imaginer, est envisageable mais il faut 9 ans pour la réponse.

Nous pouvons imaginer le problème dans l'autre sens. Il existe peut-être des êtres vivants beaucoup plus évolués près d'une étoile de notre voisinage, et nous pouvons rêver de leurs sources d'énergie en les supposant beaucoup mieux instruits que nous. Ces êtres auront détecté qu'il existe de la vie sur Terre et ils nous enverront des messages, à nous de les écouter. Quelques essais de détection sont actuellement en cours, mais il faut des astronomes très convaincus.

Abordons rapidement le problème des objets volants non identifiés. Les scientifiques n'ont, contrairement à ce qu'on prétend, ni idées préconçues, ni surtout d'instructions d'« autorités supérieures » pour nier la réalité. Ils seraient les premiers satisfaits et heureux si un jour on leur apportait de véritables preuves scientifiques de l'existence d'un de ces objets ou, mieux, d'êtres vivants.

Le rapport Condon, du nom de ce grand physicien décédé récemment, montre bien la nature des observations : 93 % de ces objets peuvent être identifiés, 3,5 % correspondent à des escroqueries caractérisées, et seuls 3,5 % ne sont pas identifiés. Or, l'expérience montre que, lorsqu'un phénomène bien connu, comme une météorite, est observé, la proportion des gens qui affirment avoir vu une soucoupe volante est du même ordre. Ces faits et l'absence de preuves expliquent notre scepticisme. Quel serait le savant qui aurait peur de la découverte merveilleuse : celle d'un frère, même d'un frère infiniment plus instruit, plus évolué que nous ?

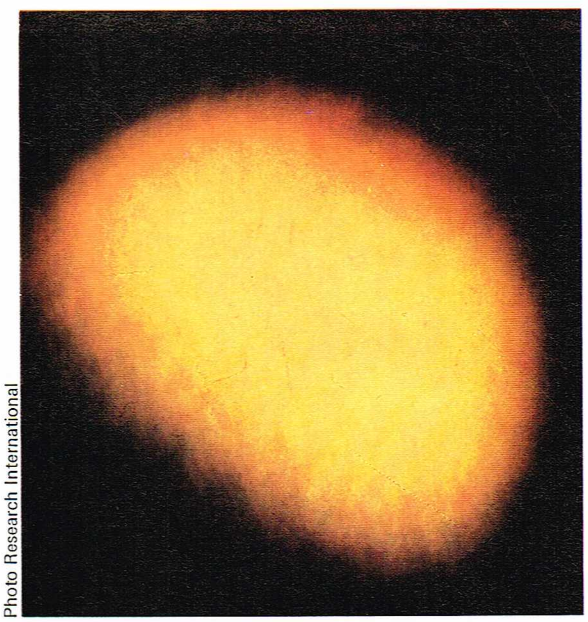

Photo Research International

◀ *La planète Vénus.*

▶ *Le radiotélescope de Stanford, en Californie ; c'est la plus grande antenne mobile en fonction aux États-Unis.*

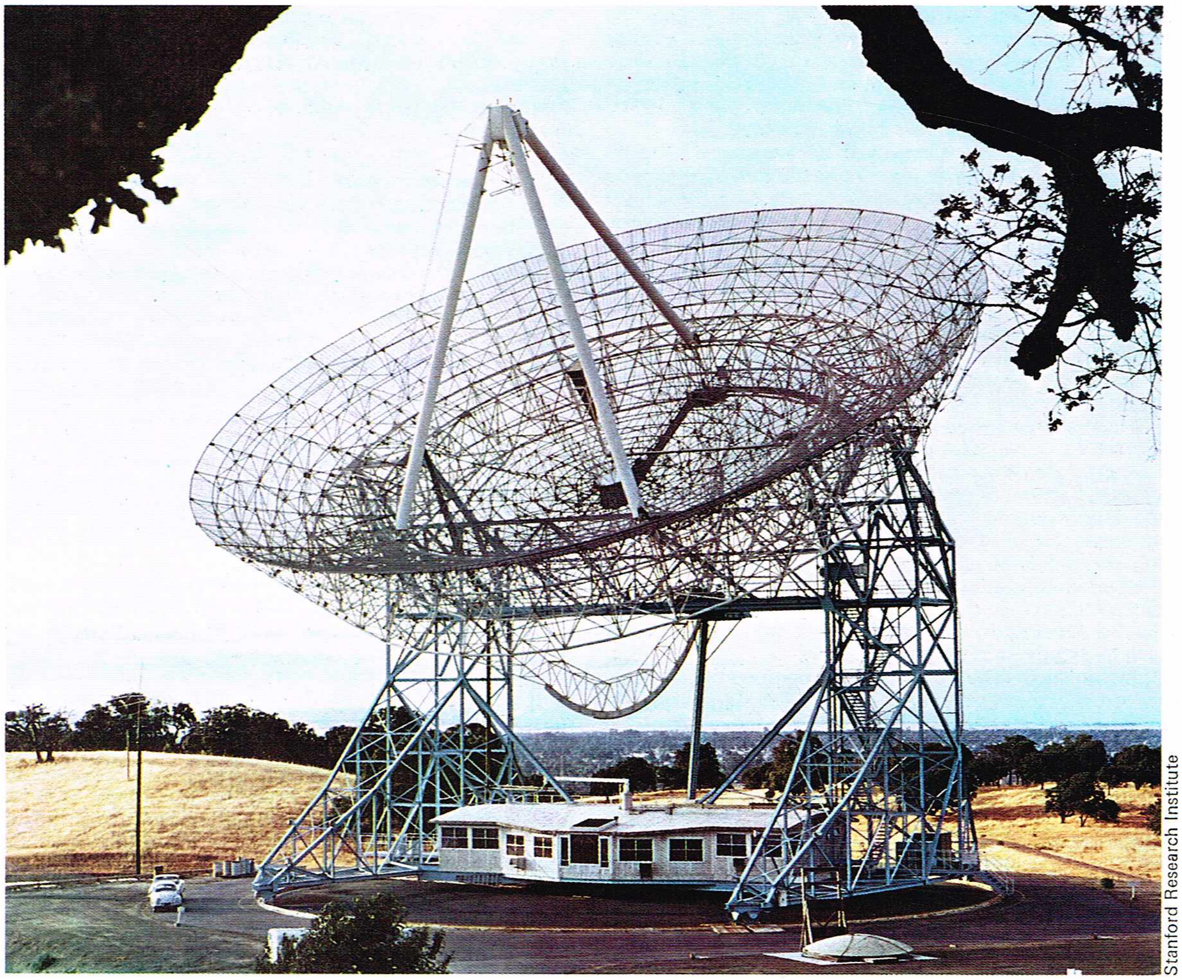

Stanford Research Institute

LES PROGRÈS RÉCENTS DE L'ASTROPHYSIQUE, PERSPECTIVES D'AVENIR

Les trente dernières années ont été marquées par des progrès extraordinaires en astronomie. Les observations ont été étendues aux ondes hertziennes, grâce aux grands récepteurs radioélectriques, et ensuite aux ondes ultraviolettes, aux rayons X et aux rayons Gamma.

Actuellement, dans le vaste domaine spectral, dont les longueurs d'onde varient de 100 m à 1 angström (c'est-à-dire à 1 dix-millionième de millimètre), le seul domaine non exploré va de 100 à 1 000 Å (0,01 à 0,1 μm), mais des observations dans ce domaine sont prévues. Au début de ce siècle, seules les radiations allant de 0,4 à 0,8 μm (4 000 à 8 000 Å) étaient accessibles à l'observation.

Quelle est la raison de ce développement et quels sont les résultats obtenus ? On peut indiquer deux causes : le développement de récepteurs sensibles à de nouveaux domaines spectraux et la possibilité d'observer en dehors de l'atmosphère terrestre qui absorbe de nombreuses radiations.

Le développement des nouveaux récepteurs a permis d'abord la détection de sources astronomiques dans le domaine des ondes hertziennes. La construction de grands paraboloïdes, d'interféromètres, d'antennes en croix et enfin des grands instruments à synthèse d'ouverture, associés avec des récepteurs de plus en plus sensibles comportant des amplificateurs à maser, a permis d'explorer le ciel dans le domaine allant de 5 mm à 10 m de longueur d'onde, où l'absorption atmosphérique n'est pas gênante. Au-dessous de ce domaine, les molécules d'eau et de gaz carbonique empêchent toute observation ; au-dessus de ces longueurs d'onde, c'est alors l'ionosphère qui est gênante.

Nous avons vu dans de nombreux chapitres les résultats extraordinaires obtenus. Il a été possible de reconnaître la structure d'ensemble de la Galaxie. L'émission continue, expliquée par les transitions libres des électrons freinés au passage près des protons, permet de reconnaître sa structure d'ensemble. La transition interdite de la raie de 21 cm de l'hydrogène a permis de détecter et de tracer les bras de la Galaxie. On a, ensuite ou simultanément, découvert des sources discrètes : le centre de la Galaxie et un certain nombre d'astres de notre Voie Lactée, notamment les résidus des explosions des supernovae et surtout les pulsars.

La découverte de galaxies qui émettent des ondes radioélectriques a permis de reconnaître des galaxies explosives lesquelles sont le siège de phénomènes d'une ampleur inimaginable qui expliquent l'existence de radiogalaxies doubles. La découverte des quasars a permis d'étendre notre connaissance de l'Univers à des distances considérables. La découverte récente d'une trentaine de molécules plus ou moins complexes et dont beaucoup contiennent les atomes C, H et O, par exemple l'alcool méthylique ou l'alcool éthylique, ouvre une ère nouvelle.

Le domaine infrarouge situé entre 0,8 μm et 1 mm est difficile à observer. Des détecteurs modernes ont permis d'étendre le domaine jusqu'à 100 μm, alors qu'auparavant la sensibilité des plaques photographiques ne permettait d'atteindre que les radiations de 1 μm. Malheureusement, notre atmosphère est très peu transparente et ne présente que quelques fenêtres dont la transparence peut être augmentée par l'observation en altitude et surtout en ballon ou en fusée. Le domaine situé vers les longueurs d'onde de 1 mm est particulièrement difficile à étudier. On a néanmoins pu mettre en évidence un rayonnement isotrope dont le maximum d'émission est situé vers 1 mm et qui correspond à un rayonnement de corps noir de 3 °K. Il est expliqué comme le rayonnement résiduel de l'explosion initiale de notre Univers.

Le domaine visible entre 0,4 et 0,8 μm, exploré par l'observation visuelle et la photographie, a été étendu jus-

que vers 0,31 μm ; au-delà de cette limite, l'atmosphère est complètement opaque à cause de l'absorption produite par les molécules d'ozone, d'oxygène et d'azote. L'observation dans l'ultraviolet plus lointain a été étendue par l'emploi de fusées; celles-ci ont donné très rapidement des résultats extraordinaires pour le Soleil dont on a mis en évidence le rayonnement jusqu'à des longueurs d'onde de 2 000 puis 1 000 Å (0,2 μm puis 0,1 μm) ; le spectre a été ultérieurement étendu à l'ultraviolet lointain, au domaine des rayons X et γ. Notre connaissance du Soleil a été complètement renouvelée : on a mis en évidence des perturbations très énergiques : on observe des atomes 15 à 25 fois ionisés qui ne s'expliquent que par des températures de l'ordre de 1 milliard de degrés. Ces régions sont situées dans la couronne solaire, et elles sont en déséquilibre thermique et émettent des rayons X et γ. L'influence de ce rayonnement sur la Terre est importante, mais encore mal connue.

Le vent solaire, émission de particules ionisées (surtout des protons et des électrons) s'échappant du Soleil à des vitesses supérieures à 600 km/s, a été trouvé, et son influence sur tous les astres du système solaire est importante.

L'exploration dans l'ultraviolet lointain de l'Univers stellaire et extragalactique a été faite. Rappelons la découverte des sources à rayons X qui sont au moins de deux natures. Dans notre Galaxie, les sources X paraissent liées à des étoiles hyperdenses : étoiles à neutrons et trous noirs qui attirent la matière avec une très grande énergie ; celle-ci est libérée sous forme de rayons X. Dans l'Univers extragalactique, des sources X ne peuvent pas être expliquées par ce mécanisme.

Seul le domaine situé entre 100 et 1 000 Å n'est actuellement pas exploré. Ce domaine a été provisoirement délaissé à la fois pour des raisons techniques et astronomiques.

— Du point de vue de la technique, il est extrêmement difficile de construire des télescopes pour ces longueurs d'onde, car la matière ne réfléchit ces rayons que sous l'incidence rasante ; d'autre part, les récepteurs sensibles dans ce domaine n'ont été mis au point que très récemment.

— L'autre raison est liée au fait que l'on pensait que l'espace interstellaire absorbe tout le rayonnement stellaire ou extragalactique de ce domaine. Si les radiations visibles sont absorbées par des particules de 0,1 à 1 μm, ce sont les atomes qui sont les principaux absorbants pour les ondes plus courtes que 0,1 μm, et l'on a calculé que l'absorption par les atomes d'hydrogène est telle qu'aucun rayonnement au-dessous de 912 Å ne doit nous parvenir. Mais ces calculs avaient été faits en admettant une densité de 1 atome d'hydrogène ionisé par centimètre cube. Dans ces conditions, il existe 3 milliards de milliards ($3 \cdot 10^{18}$) de protons dans une colonne de 1 cm^2 de section, allant de l'observateur à l'étoile la plus proche, et l'absorption est totale. Mais des résultats récents font espérer que la densité locale de l'hydrogène dans la région de l'espace où se trouve le Soleil est 100 fois plus petite, de sorte qu'on a l'espoir de trouver du rayonnement dans le domaine inférieur à 1 000 Å pour quelques-unes des 100 000 étoiles qui sont plus proches que 1 000 années de lumière. Les candidates sont les étoiles chaudes et les étoiles qui sont entourées de couronnes stellaires très chaudes analogues à la couronne solaire. On espère

▼ Une des nombreuses photographies du Soleil prises par la mission Skylab 2 (le 18 juin 1973) ; on observera les régions situées dans la couronne solaire et dont on sait qu'elles émettent des rayons X et γ (cette photo a été traitée en laboratoire par des techniques de séparation de couleurs : les régions rouges sont les régions sombres et les blanches les régions brillantes).

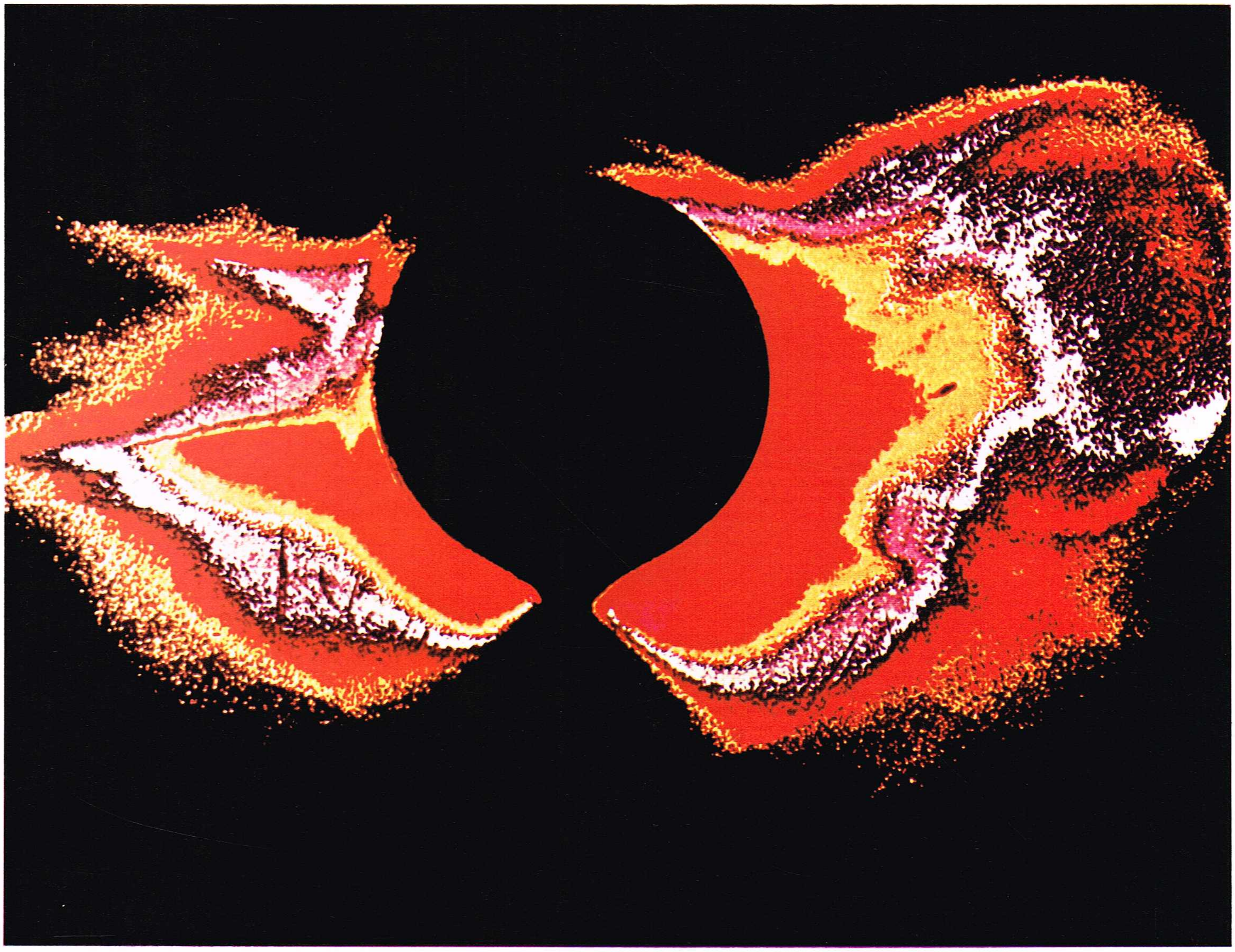

U.S.I.S.

▶ *Le lancement de Viking 1, première mission du programme d'investigation de Mars.*

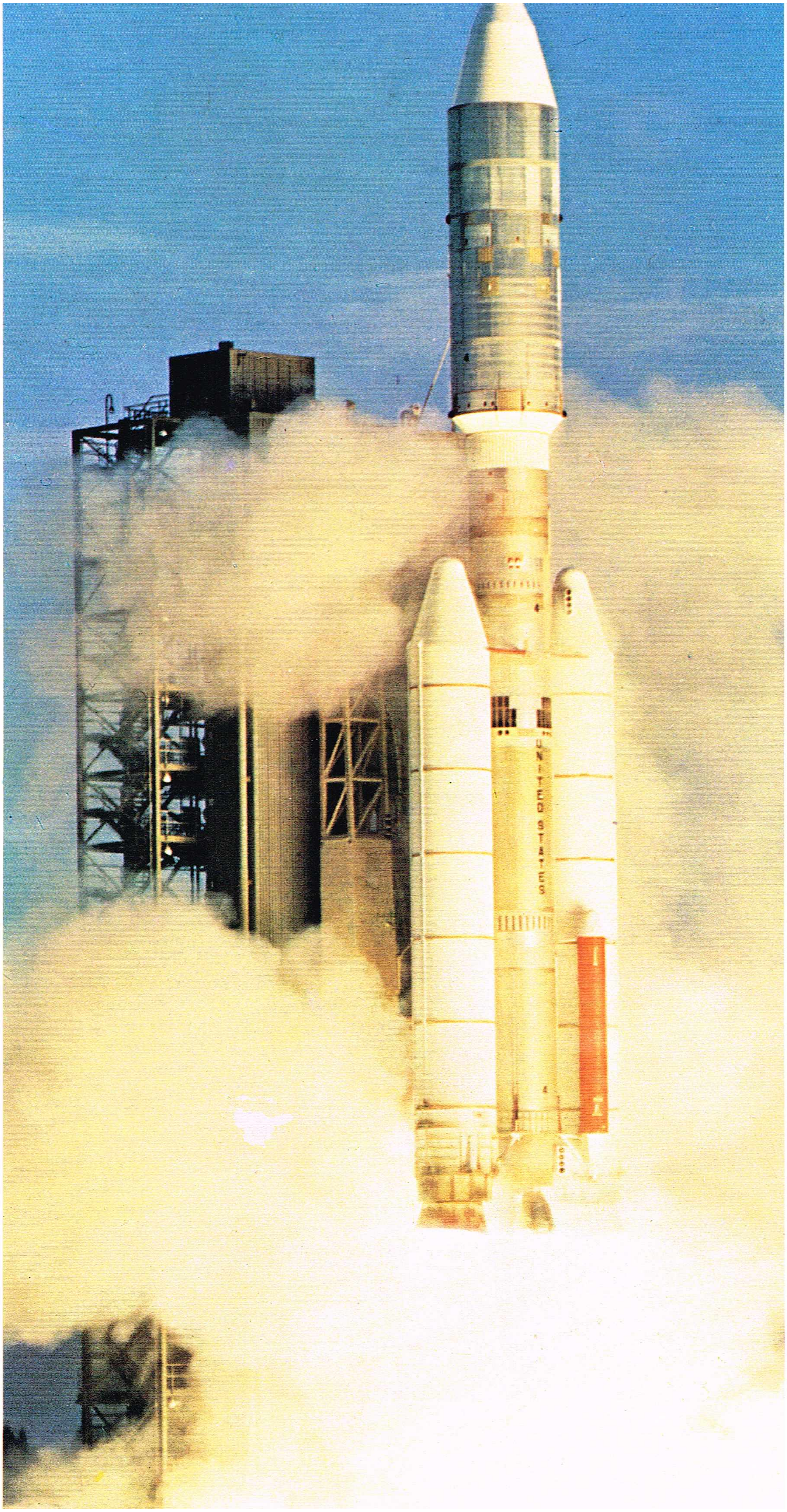

U.S.I.S.

U.S.I.S.

◀ ***Le cosmonaute soviétique A. Leonov (à gauche) et l'astronaute américain T. Stafford, commandants de Soyouz et d'Apollo, montrant, au cours de l'entraînement à Houston, la plaque commémorative de la rencontre des deux engins.***

obtenir de nouveaux résultats. L'exploration de ce domaine était prévue dans l'aventure spatiale commune États-Unis-U.R.S.S. qui prévoyait en juillet 1975 la jonction dans l'espace d'une cabine Apollo et d'un engin Soyouz.

Les découvertes astronomiques dans le domaine stellaire, galactique et extragalactique ont été nombreuses et souvent, du point de vue du physicien, étranges. La physique doit faire de grands progrès pour que nous puissions comprendre ces résultats d'observation.

L'impulsion donnée à la cosmologie pour l'interprétation des phénomènes observés à la limite de l'Univers explorable est essentielle. L'explication de la matière hyperdense : naines blanches, étoiles à neutrons et trous noirs, est aussi liée intimement à ces théories. Mais de nombreux phénomènes fondamentaux sont encore inexpliqués ou mal compris : citons le déplacement des raies spectrales des quasars eux-mêmes, mais surtout l'existence de systèmes d'absorption variés qui ont été découverts ces dernières années. La nature exacte de l'émission radioélectrique des pulsars et le ralentissement de leur rotation sont encore mal compris. Il ne s'agit pas là de curiosités ou de difficultés mineures mais de problèmes essentiels. Leur compréhension permettra à la physique de faire un pas fondamental. Les applications pratiques à la physique de la matière seront probablement très productives.

Nous ne savons naturellement pas quelles seront les découvertes que l'on fera dans le domaine de l'astrophysique stellaire, galactique et extragalactique par l'amélioration des méthodes actuelles; nous ne pouvons pas les prévoir.

Nous devons constater qu'un domaine spatial a été à peine abordé : celui de l'amélioration de notre perception des détails stellaires. Le pouvoir séparateur de nos instruments est limité sur la Terre par la turbulence atmosphérique et les variations de forme des miroirs. Ces dernières sont dues aux variations thermiques et aux déformations élastiques inévitables, car le télescope se déplace par rapport à la pesanteur terrestre. Sur le premier et le troisième point, l'astronomie spatiale paraît la solution idéale : un grand télescope, placé dans l'espace ou sur la Lune, doit permettre d'atteindre la limite de résolution théorique imposée par la nature électromagnétique des radiations lumineuses. Les déformations élastiques, dans le champ d'accélération nul des observations spatiales, sont automatiquement corrigées; il semble possible de contrôler les déformations thermiques. Dans les observations terrestres, des images de 0″,25 sont une performance qui n'est possible que dans les meilleurs sites. Cette limite ne correspond qu'à celle d'un télescope de 50 cm de diamètre ; un télescope de 3 m devrait permettre de séparer des étoiles distantes de 0″,04. La mesure de la position des étoiles aussi nettes doit permettre d'améliorer la mesure des parallaxes, surtout si le télescope est placé sur un satellite à trajectoire très éloignée du Soleil. Ces problèmes délicats seront abordés par les vaisseaux spatiaux de la seconde génération.

Les progrès dans notre connaissance du système solaire

Dans ce domaine, la recherche spatiale a été une vraie révolution et ouvre une ère nouvelle pour l'humanité.

L'homme a atterri sur la Lune, et il en a rapporté des roches; il a pu déterminer la constitution et les conditions physiques de notre satellite avec autant de précision que celles de la Terre.

L'homme a envoyé des engins spatiaux autour des quatre planètes les plus proches de la Terre et a ramené des photographies très détaillées de Mercure et de Mars. Il a pu photographier avec détail les nuages de Vénus et de Jupiter. Il a fait atterrir des sondes spatiales sur Vénus et Mars, et il a mesuré les températures et les pressions atmosphériques, et la composition de l'atmosphère de Vénus. Les sondes spatiales ont permis de mesurer directement les champs magnétiques des planètes; leur absence ou leur présence pose des problèmes encore non résolus. Un vaisseau spatial est en route pour Saturne. Après avoir placé un satellite artificiel qui tourne autour de Mars, les Américains ont commencé maintenant l'opération Viking dont la partie essentielle est l'atterrissage sur la planète d'une sonde éjectée à partir d'un nouveau satellite artificiel de Mars. Le lancement de la sonde a eu lieu le 20 août 1975; l'atterrissage est prévu pour le 4 juillet 1976.

Le problème philosophique essentiel est celui de l'existence de la vie dans le système solaire. Les expériences spatiales ont montré qu'il n'y a pas et qu'il n'y a jamais eu de vie sur la Lune. L'absence de vie est aussi très probable sinon certaine pour Mercure. Les conditions physiques sur Vénus, Jupiter et les grosses planètes sont telles que des organismes vivants analogues à ceux de la Terre ne pourraient y subsister : haute température et haute pression sur Vénus, froid et atmosphère extraordinaire pour les grosses planètes.

Seul Mars ressemble à la Terre, mais il est néanmoins très différent : un être humain ou un animal supérieur

▶ *Le véhicule Viking qui a été envoyé vers Mars, en 1975, pour y exécuter des analyses et notamment la recherche des êtres vivants.*

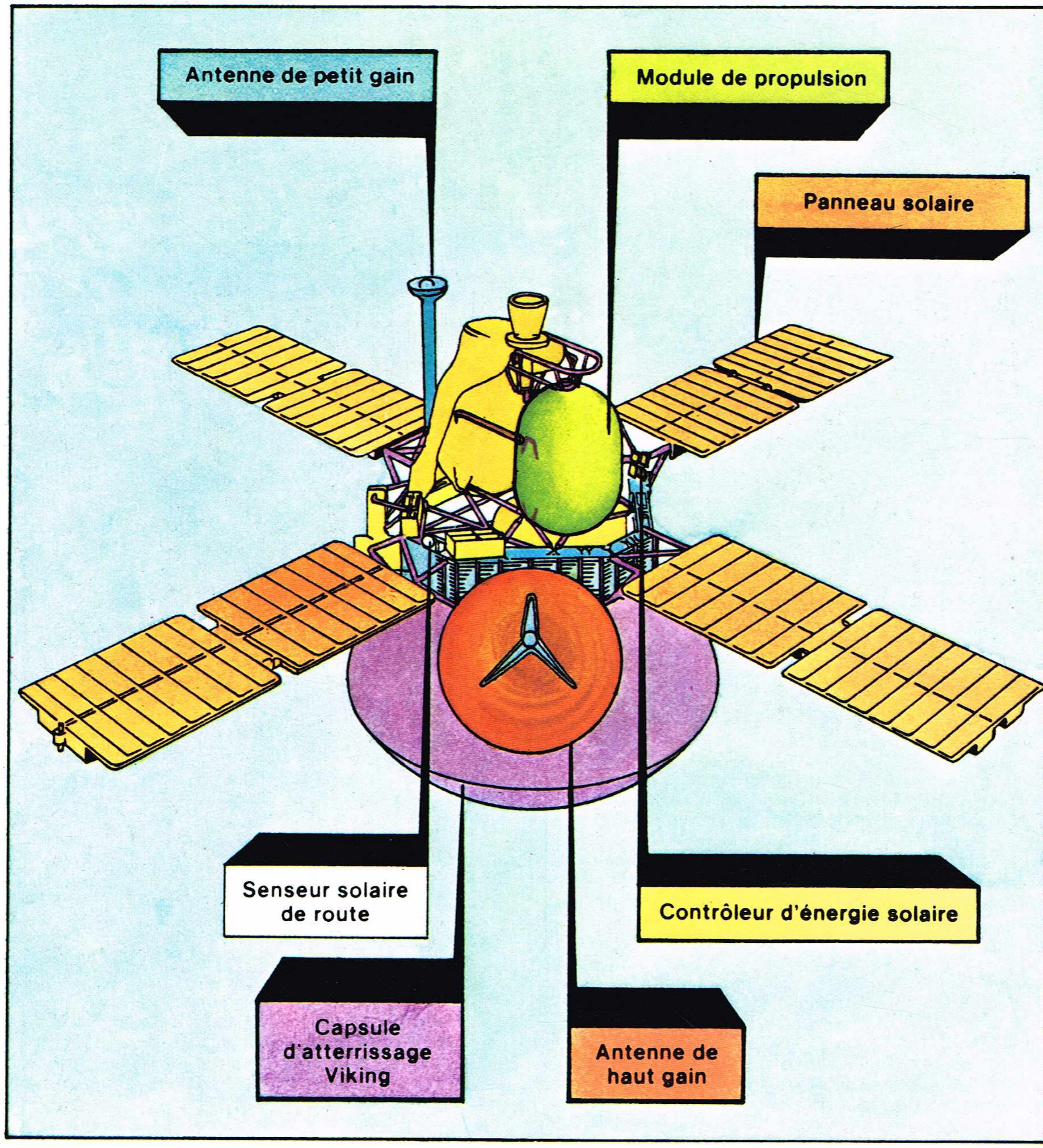

terrestre ne pourrait y subsister de façon autonome ; mais l'existence d'une vie organique peu développée, soit qu'elle soit débutante, soit qu'elle soit finissante, n'est pas exclue. L'existence de traces d'eau dans une atmosphère ténue, des érosions anciennes font penser à la présence ancienne de l'eau. On voit l'importance de l'exploration directe de Mars par des sondes et plus tard, lorsque les conditions seront mieux connues, d'un atterrissage sur Mars. Les résultats de ces expériences seront essentiels pour notre connaissance du système solaire et surtout pour l'existence d'une vie, plus ou moins organisée, ailleurs que sur la Terre. Ces résultats auront une influence essentielle sur la pensée de l'homme.

BIBLIOGRAPHIE

Traités généraux

ANDRILLAT H., *Introduction à l'étude des cosmologies,* Éd. A. Colin, 1970. - DANJON A., *Astronomie générale,* Éd. J. et R. Sennac, Paris, 1959. - DANJON A., COUDER A., *Lunettes et Télescopes,* Éd. Revue d'optique, 1935. - FLAMMARION C., *l'Astronomie populaire,* Éd. Flammarion, 1955. - HEIDMANN J., *Introduction à la cosmologie,* P.U.F., 1973. - PECKER J.C., *la Nouvelle Astronomie,* Éd. Hachette. - SCHATZMAN E., *Astronomie,* in *Encyclopédie de la Pléiade.*

Constantes et données numériques

ALLEN, *Astrophysical Quantities,* University of London, The Athlone Press, 3rd edition, 1973. - BECVAR A., *Atlas of the Heavens-II, Catalogue* 1950.0, Édition de l'Académie tchécoslovaque des sciences, Prague, 1964. - NORTON A.P., GALL I.J., *Norton's Star Atlas and Telescope Handbook,* Gall and Inglis, Edinburgh, 1969.

Dans la collection « Que sais-je ? » (P.U.F.)

N° 230 *Le Soleil* par Raymond MICHARD
N° 383 *Planètes et Satellites* par James LEQUEUX
N° 497 *L'Infrarouge* par Jean GRANIER et Paul CAILLON
N° 508 *L'Astrologie* par Paul COUDERC
N° 687 *L'Univers* par Paul COUDERC
N° 729 *Les Rayons cosmiques* par André CACHON
N° 875 *La Terre et la Lune* par Jean TAILLÉ
N° 940 *Les Éclipses* par Paul COUDERC
N° 1233 *Le Soleil et la Terre* par André BOISCHOT
N° 1236 *Les Comètes* par Jean DUFAY
N° 1237 *Les Quasars* par Philippe VÉRON
N° 1410 *La Lune* par Frantisek LINK
N° 1454 *Les Radiotélescopes* par Jacques-Émile BLUM
N° 1467 *La Photométrie* par Jean TERRIEN
N° 1473 *L'Astrophysique nucléaire* par Jean AUDOUZE
N° 1477 *L'Ionosphère* par André AUBERT

E.N.I.

LA PHYSIQUE DU GLOBE

▲ *Les prospections géophysiques représentent un des aspects les plus importants de la géophysique appliquée, leur champ d'opération s'attachant surtout à la recherche des hydrocarbures. L'illustration montre l'effet d'une charge explosive au cours d'un relevé séismique effectué au Maroc.*

La physique du globe, ou géophysique, applique les principes et les procédés de la physique à l'étude de la structure de l'ensemble du globe terrestre et des mouvements qui l'affectent. Sa principale caractéristique réside dans le fait qu'elle ne possède pas une seule méthodologie, mais qu'elle utilise des techniques très variées suivant les phénomènes dont elle s'occupe. En particulier, toutes les ramifications de la physique telles que la mécanique, l'acoustique, la thermométrie, l'optique, l'électromagnétisme et même la théorie et la technique nucléaires plus récentes trouvent une application dans la géophysique. Par ailleurs, elle s'imbrique profondément dans des sciences autonomes comme la géologie et la géographie puisqu'elle s'intéresse à la physique de la lithosphère, de l'hydrosphère et de l'atmosphère.

La géophysique est essentiellement une science expérimentale ; son développement s'effectue en fonction de la disponibilité des instruments nécessaires à l'observation et à la mesure des phénomènes. La subdivision de cette discipline en branches variées est donc une conséquence du progrès scientifique et technique, qui a permis de passer graduellement de l'observation générale des phénomènes naturels, liés à la Terre, au relevé systématique d'une quantité toujours plus grande de données en tous les points du globe.

Parmi les principales méthodes de recherche utilisées par la géophysique, citons :

— *la* séismologie, *qui étudie les séismes et la propagation de l'onde séismique ;*

— *la* gravimétrie, *qui étudie le champ de gravitation terrestre et les phénomènes corollaires ;*

— *le* géomagnétisme *et la* géoélectricité, *qui étudient respectivement les champs magnétiques et électriques terrestres ;*

— *le* paléomagnétisme, *dont les investigations remontent dans le passé, grâce aux aimantations laissées dans des roches par le champ terrestre.*

Enfin la prospection géophysique, *ou géophysique appliquée avec :*

— *la* géodésie, *qui étudie la forme de la Terre et ses techniques de représentation : topographie, photogrammétrie et cartographie ;*

— *la* météorologie, *qui étudie l'atmosphère terrestre et ses variations ;*

— *l'*océanographie, *science de la mer.*

Les buts poursuivis par la géophysique font appel aussi bien à la recherche pure qu'à la pratique. La séismologie, par exemple, peut étudier les tremblements de terre, soit à l'aide de données obtenues sur les couches plus profondes et inaccessibles du globe terrestre, soit par l'observation de l'effet destructif sur les constructions.

En pratique, les applications directes se sont séparées progressivement de la science originelle ; en effet, la complexité croissante de la technique a nécessité la formation de spécialistes, la rédaction de traités et la publication de revues spécialisées.

Néanmoins, on ne peut pas parler de séparation complète entre la science pure et l'application. Tandis que la prospection géophysique, par exemple, utilise de plus en plus les concepts, même très complexes, de la science pure, les techniques développées et mises au point pour les prospections sont souvent employées pour les recherches à caractère scientifique. Ainsi s'établit un procédé d'osmose entre les deux branches pure et appliquée.

▶ *Le tremblement de terre qui, en novembre 1755, détruisit presque complètement la ville de Lisbonne fut le premier dont les effets aient été décrits de façon assez rigoureuse.*

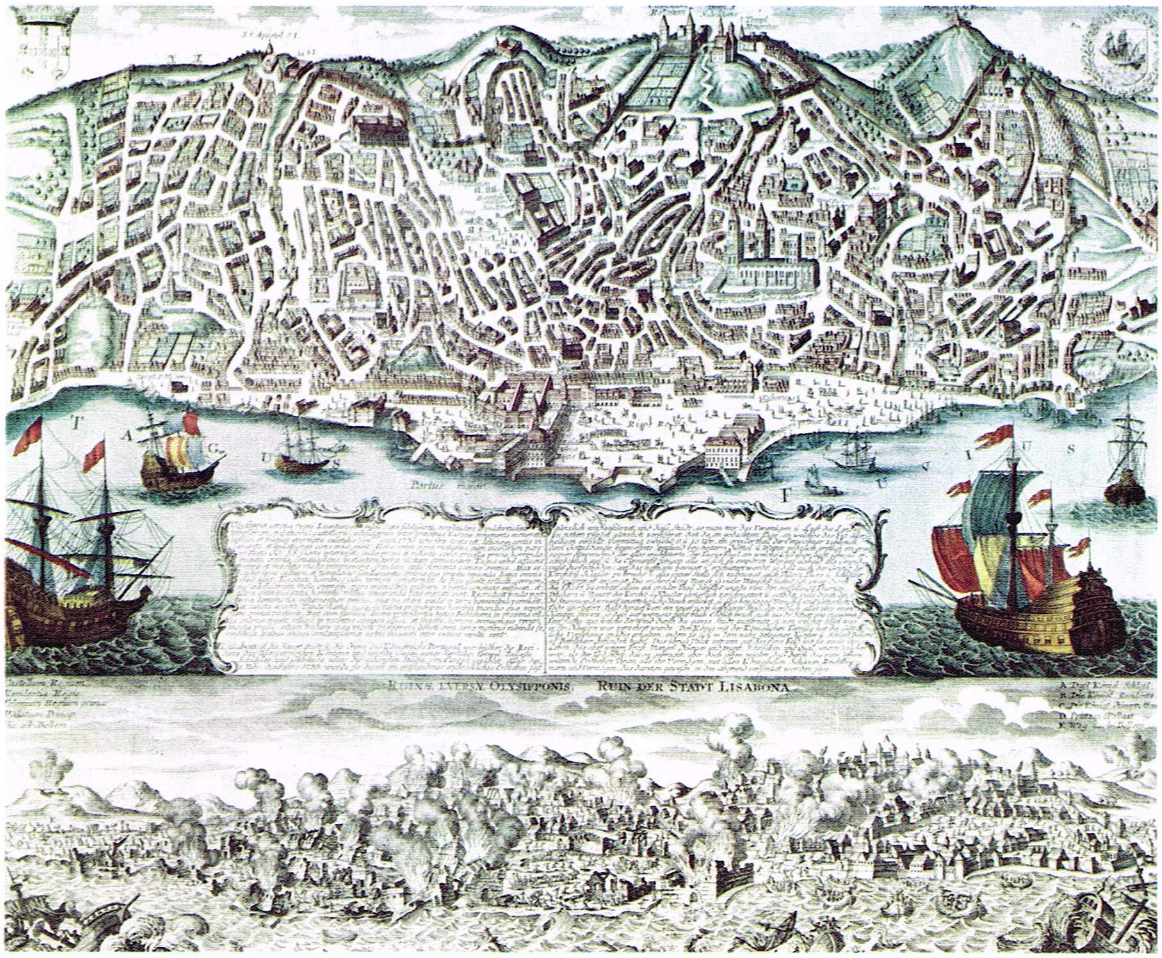

LA SÉISMOLOGIE

La définition qui indique en général cette partie de la géophysique comme la science du tremblement de terre n'est plus désormais acceptable : si la séismologie (du grec « seismos » qui signifie « ébranlement », et non « sismologie », qui dérive du mot grec « sismos » signifiant « sifflement ») est née en vue d'expliquer le phénomène catastrophique, de chercher un moyen de le prévenir qui soit susceptible de réduire les dégâts occasionnés, elle s'est révélée extrêmement utile pour étudier la structure interne de la Terre. Cette étude s'accomplit non seulement à travers l'analyse des effets causés par les phénomènes naturels, mais aussi grâce à l'utilisation de séismes artificiels (tirs d'explosifs). L'aspect de cette science est donc double : d'une part, elle s'intéresse à la cause et aux caractéristiques du tremblement de terre ; de l'autre, elle représente un moyen puissant (le plus efficace de nos jours) pour rechercher la constitution de l'intérieur de la Terre, encore si peu connue.

Les tremblements de terre sont parmi les phénomènes naturels qui impressionnent le plus l'homme. Il est donc logique que le phénomène séismique ait toujours fait l'objet d'observations : observations, cependant, limitées, il n'y a pas si longtemps encore, aux seuls aspects macroscopiques. En tant que science, la séismologie est en effet relativement récente ; on peut dire qu'elle a pris naissance avec la construction des premiers appareils capables de fournir un enregistrement permanent de la Terre, c'est-à-dire dans la seconde moitié de notre siècle.

Le premier tremblement de terre dont les effets aient été décrits de façon assez rigoureuse fut celui de Lisbonne en 1755. Une autre étape importante fut l'étude du tremblement de terre de la région de Naples en 1857 (par le séismologue anglais R. Mallet) et l'énoncé d'une échelle d'intensité des mouvements telluriques d'après Rossi et Forel, échelle complétée plus tard par Mercalli et utilisée internationalement de nos jours, après de légères modifications. Pendant ce temps, J. Milne et A. Cancani avaient construit les premiers séismographes, et venaient d'organiser les premiers observatoires permanents. Au début de notre siècle, se créèrent des organisations internationales pour l'échange des données entre les divers observatoires et la rédaction de rapports périodiques. Simultanément, la théorie de l'élasticité vint s'appliquer à la transmission de l'onde séismique. Les enregistrements, effectués avec des appareils plus perfectionnés, permirent de distinguer plusieurs phases, interprétées par la suite comme étant les arrivées de différents types d'ondes (avec une vitesse et une fréquence différentes) ou bien du même type d'onde, mais se propageant selon une autre trajectoire.

Aussi peut-on dire que la séismologie moderne a commencé peu avant la guerre de 1914-1918, avec la construction d'appareils à inscription galvanométrique de la plus haute sensibilité (par B. Galitzine) et avec la découverte du principe de discontinuité : limite de la croûte terrestre et du noyau central, repérés respectivement par Mohorovičić et Wiechert-Gutenberg.

Nature et effets des tremblements de terre

Les tremblements de terre tirent leur origine des perturbations localisées dans la zone plutôt étroite de la croûte terrestre ou au-dessous. La cause des perturbations est liée aux réajustements rendus nécessaires par les échanges de chaleur. Si cette chaleur n'appartient pas en propre au noyau, elle peut être d'origine radio-active ou chimique, ou encore résulter du frottement. Ce réajustement interne soumet l'écorce solide extérieure à un effort de tension et de compression, à un effort de cisaillement ou aux deux à la fois : il y a dislocation (faille) si l'effort dépasse la limite d'élasticité de la roche.

Dans les zones volcaniques, les tremblements de terre (localisés) sont dus à des causes mineures : mouvements souterrains du magma et éruptions accompagnées d'explosions. D'autres mouvements telluriques, encore plus localisés, peuvent être attribués à des « éclatements » de la roche consécutifs à des excavations, à des éboulements ou encore à des écroulements dans les mines.

A grande distance, la source du tremblement de terre peut être considérée comme concentrée en un point *(foyer* ou *hypocentre)*, situé plus ou moins profondément dans le sol. Le point de la surface du globe, situé sur la verticale du foyer, s'appelle *épicentre*.

Suivant la profondeur du foyer, on distingue trois catégories de tremblements de terre : superficiels (avec un foyer allant jusqu'à 60 km environ de profondeur, c'est-à-dire à l'intérieur de la croûte terrestre) ; intermédiaires (de 70 à 300 km environ) ; profonds (au-delà de 300 km). Les tremblements de terre dont le foyer atteint plus de 700 km de profondeur n'ont pas encore été enregistrés.

Un tremblement de terre n'est jamais un événement isolé ; il est précédé de secousses prémonitoires de faibles intensités, suivies en général de beaucoup de répliques avec une fréquence et une intensité décroissantes, qui continuent dans certains cas pendant des mois ou des années. Plus rarement, l'on assiste à une série de secousses d'intensités semblables : cela se produit surtout dans les régions volcaniques.

Effets primaires et secondaires des tremblements de terre

Les *effets primaires* sont les déformations et les déplacements permanents, visibles, comme les changements de cours des fleuves et des torrents, la disparition et la formation de sources.

Les *effets secondaires* macroséismiques, c'est-à-dire visibles, peuvent être *permanents* ou *temporaires*. Les premiers représentent une donnée analysable sur le plan objectif, par opposition aux seconds qui dépendent de sensations momentanées. Parmi les effets secondaires permanents, citons les éboulements, les cratères de sable (dus aux compressions et aux dilatations de la nappe aquifère), les dommages causés aux constructions, le déplacement des objets, la rupture de lignes électriques, des aqueducs, etc. Parmi les effets secondaires temporaires, citons les vibrations perceptibles par l'homme, l'oscillation d'un lampadaire, les changements momentanés de niveau dans les flaques d'eau, les raz de marée et, naturellement, toutes les sensations physiologiques, tel le bruit sourd qui précède parfois le séisme.

S. Mc Cutcheon

▲ *Ces deux photographies prises, en haut avant le tremblement de terre, en bas après la catastrophe, montrent la violence du séisme qui eut lieu en mars 1964 à Anchorage (Alaska) : le grand hôtel que l'on voit sur la photo du haut a été totalement détruit (on en aperçoit les débris à gauche sur la photo ci-dessus).*

F.S.N.

◄ *Le centre de la ville de San Francisco après le tremblement de terre du 16 avril 1906. Malgré la violence du séisme, les structures des principaux édifices construits pour lutter contre la violence du vent ont résisté ; la destruction de la ville a été surtout le fait de l'incendie qui suivit. La population eut le temps de fuir, ce qui explique le nombre relativement peu élevé de victimes.*

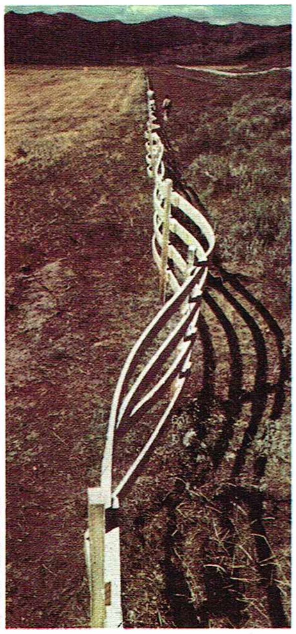

S. Mc Cutcheon

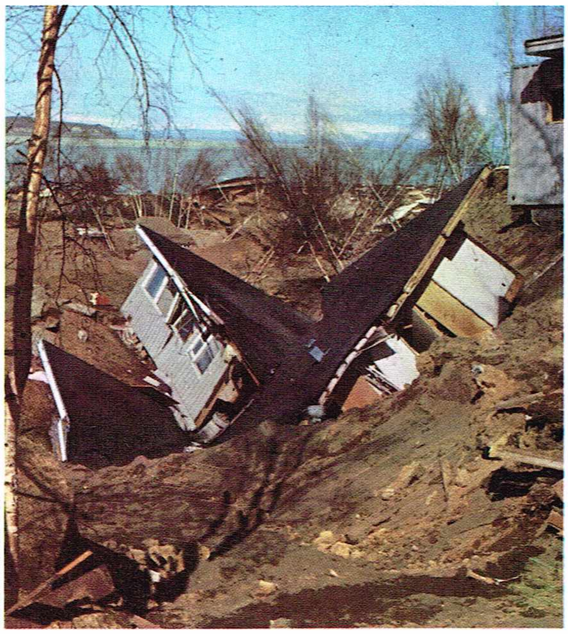

S. Mc Cutcheon

S. Mc Cutcheon

▲ ***Quelques effets particulièrement impressionnants de tremblements de terre : à gauche, la déformation d'une barrière, exemple d'effet secondaire permanent (Gallatin Country, Montana, août 1959); au centre, la destruction et l'ensevelissement d'une habitation (Quake Mar, Alaska, mars 1964); à droite, cet arbre coupé en deux par le mouvement du sol gelé est également un exemple spectaculaire d'effet secondaire permanent du mouvement séismique.***

Propagation des ondes séismiques

A partir d'une faille séismique, les ondes produites par la rupture se propagent dans toutes les directions à l'intérieur de la Terre avec une vitesse, une fréquence et une ampleur qui dépendent des propriétés mécaniques des roches rencontrées. La propagation s'effectue par ondes élastiques : une particule du sol, atteinte par l'ébranlement et déformée par lui, tend à reprendre sa forme sous l'effet des forces intermoléculaires. Le déplacement est minime, en sorte que ces forces peuvent être considérées comme proportionnelles aux déformations, autrement dit l'élasticité comme parfaite. Il apparaît donc nécessaire de rappeler quelques principes sur l'élasticité, pour comprendre les relations qui existent entre le comportement de l'onde et la nature du milieu traversé.

On définit toute contrainte sur un solide comme le rapport entre la force appliquée et l'unité de surface sur laquelle elle agit. La force peut s'exercer *perpendiculairement* ou *parallèlement* à la surface. Dans le premier cas, on obtient une *compression* (ou une dilatation, selon la direction choisie). Dans le second, la force est dite de *cisaillement*. Les forces de compression déforment le solide en le condensant; celui-ci reprend sa forme primitive au bout d'un temps plus ou moins long, après que l'action des forces a cessé. Les forces de cisaillement (ou tangentielles) entraînent, au contraire, un changement de forme sans variation de volume.

Le *module de Young* « E » (ou module d'élasticité du corps considéré) est le rapport entre la force longitudinale et la force de compression (ou de dilatation) pendant la période des déformations élastiques. Le rapport μ entre la force tangentielle et les déformations angulaires est, au contraire, la *rigidité* ou module de cisaillement.

E varie suivant le type de roche traversée (de l'ordre de 10^5 à 10^6 kg/cm^2). Les valeurs plus faibles sont caractéristiques des roches peu cohérentes, ou très altérées, qui se trouvent seulement dans les parties superficielles de la croûte terrestre.

Une autre caractéristique importante des matériaux est le rapport entre les déformations transversales et les déformations longitudinales d'un corps soumis à une force de compression (ou de dilatation). Ce rapport se calcule par le *coefficient de Poisson :* σ. Pour les roches non altérées, la valeur de σ est de l'ordre de 0,25. Enfin, le rapport entre la pression et la réduction du volume est le *module de volume* ou d'incompressibilité : K.

Ces constantes élastiques sont reliées par des relations mathématiques pour lesquelles, par exemple, connaissant le module de Young et le coefficient de Poisson, on peut déterminer la valeur du module de volume et de la rigidité :

$$E = \mu \frac{(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} \qquad \sigma = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}$$

où λ est un paramètre élastique de Lamé ($\lambda = K - \frac{2}{3}\mu$).

La propagation des ondes élastiques varie en fonction de la modalité selon laquelle toute contrainte est appliquée, et selon le type des déformations subies par les roches. Lors d'une explosion, par exemple, on assiste à une brusque augmentation de la pression, qui comprime les matériaux situés au voisinage de cette source. Après chaque compression, on enregistre une raréfaction, c'est-à-dire une déformation en sens opposé à la première (les particules du milieu traversé se dilatent). Si le milieu est homogène, la *longueur d'onde* (c'est-à-dire la distance entre deux maximums successifs de compressions ou de dilatations) est constante. La longueur d'onde est proportionnelle à la vitesse de propagation et inversement proportionnelle à la fréquence.

La source des ondes élastiques, dans le cas des tremblements de terre, est due principalement à des dislocations.

A la suite d'un ébranlement, tous les points qui amorcent leur mouvement à un moment donné sont sur une même surface qui constitue un *front d'onde*. Le front d'onde est donc une discontinuité mobile séparant une région qui subit une perturbation d'une région qui n'est pas perturbée. Il se propage de proche en proche. Perpendiculairement aux positions successives de l'onde, on peut tracer des courbes, auxquelles on attribue le nom de *rais*. Ces rais sont les trajectoires de l'énergie séismique.

Si la matière était parfaitement homogène, les rais seraient des droites issues du foyer; mais ils sont généralement courbes.

Il existe deux modes de propagation des ondes élastiques à l'intérieur d'un corps. Pour les ondes de compression (ou de dilatation), les particules atteintes s'accélèrent suivant le rai séismique, c'est pourquoi on les appelle des *ondes longitudinales*. On les désigne aussi sous le nom d'*ondes primaires* (ou ondes P), car elles arrivent les premières. Dans le cas des ondes de cisaillement, l'accélération des particules est tangente à l'onde, en étant dirigée perpendiculairement au rai; on leur attribue le nom d'*ondes transversales* ou ondes S, car elles arrivent les secondes.

En réalité, dans la roche et dans la grande partie des matériaux qui constituent la Terre, les deux modes de propagation coexistent, quelle que soit la source de l'onde élastique. Toutefois, dans un tremblement de terre tectonique, le rapport entre l'énergie qui se transmet suivant les ondes transversales et celle qui voyage selon les ondes longitudinales est beaucoup plus élevé que dans le cas d'une explosion souterraine.

Afin de connaître la vitesse de propagation des ondes, on applique les formules d'élasticité. Il faut supposer, alors, que le milieu traversé est homogène et isotrope autour du point où l'ébranlement se produit, c'est-à-dire

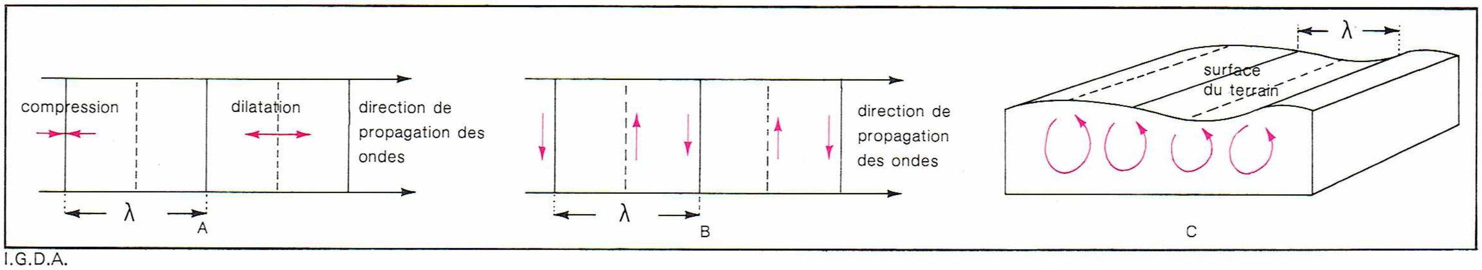

I.G.D.A.

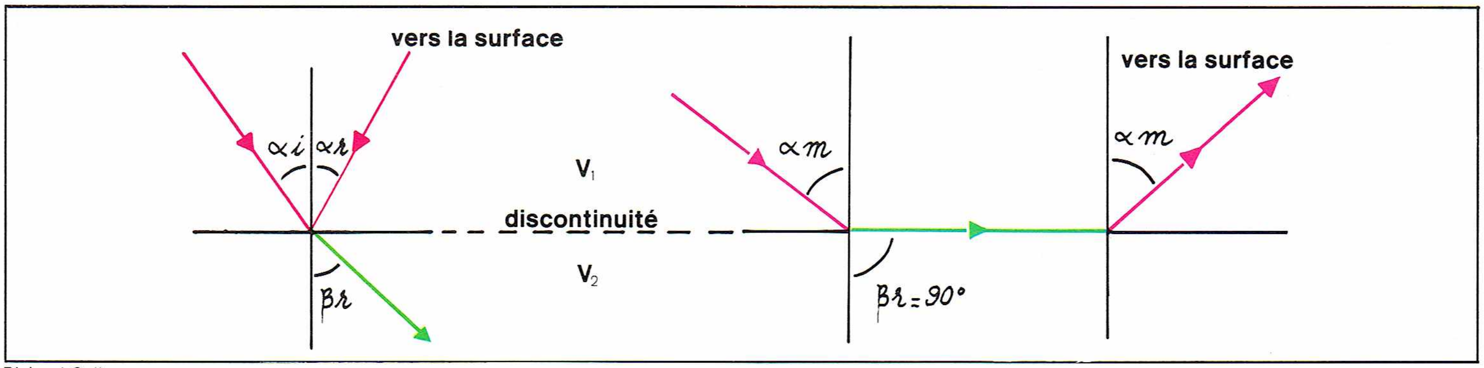

Richard Colin

qu'il possède les mêmes propriétés dans toutes les directions.

On peut ainsi calculer la vitesse des ondes P, vitesse qui dépend de la densité et du milieu considéré, et de ses coefficients d'élasticité : module de volume K et rigidité μ. Cette vitesse s'exprime par la relation :

$$V_P = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\delta}}.$$

Pour les ondes transversales, on a :

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\delta}}.$$

V_S dépend donc seulement de la rigidité μ (abstraction faite de la densité). On en déduit que, dans un milieu privé de rigidité (par exemple un fluide parfait, $\mu = 0$), l'onde S ne peut pas se propager.

Comme on l'avait indiqué auparavant, on démontre aussi que la vitesse de l'onde P est toujours supérieure à celle de l'onde S; si le coefficient de Poisson prend la valeur moyenne de 0,25 : $\frac{V_P}{V_S} = \sqrt{3}$.

Les deux types d'ondes élastiques P et S sont des *ondes de volume,* car elles pénètrent à l'intérieur de la masse rocheuse.

Envisageons le cas où une onde sphérique P, à début brusque, arrive à la surface du sol. Outre l'onde P directe, le mouvement observé en un point éloigné de cette surface comporte deux impulsions. Ce sont des *ondes* dites *superficielles,* car le déplacement du sol qui leur correspond diminue très rapidement avec la profondeur. Les plus importantes sont les ondes de Rayleigh et les ondes de Love. L'amplitude du déplacement associé à ces ondes est inversement proportionnelle à la racine carrée de la distance de la source. Leurs périodes caractéristiques sont beaucoup plus longues que celles des ondes de volume.

Les **ondes de Rayleigh** (**R**) se propagent au voisinage d'une surface libre. Les particules du milieu se déplacent dans les plans verticaux, parallèles à la direction de propagation de l'onde, en décrivant des ellipses dans le sens rétrograde. Si une couche caractéristique de basse vitesse de propagation se trouve dans la surface traversée, la vitesse de R variera avec la fréquence (ou avec la longueur d'onde) : on a alors un phénomène de dispersion.

Les **ondes de Love** (**Q**) n'existent que dans une couche superficielle à basse vitesse. Le mouvement des particules excitées est perpendiculaire à la propagation (comme pour les ondes S) mais il est polarisé dans un plan horizontal. Les ondes de Love sont des ondes dispersives, c'est-à-dire que leur vitesse de propagation dépend de la longueur d'onde. Les ondes superficielles sont un peu plus lentes que les ondes S, les ondes de Rayleigh étant légèrement moins rapides que les ondes de Love.

L'amplitude d'une onde séismique subit une atténuation avec la distance, due à l'élargissement du front d'onde (sphérique si le milieu est homogène) et ensuite à un effet géométrique. Cependant la perte d'énergie est aussi causée par la transformation partielle de l'énergie élastique en chaleur. Dans l'ensemble, on peut dire que les atténuations sont exponentielles et que les hautes fréquences décroissent beaucoup plus rapidement que les basses.

Pour comprendre le mécanisme de la transmission des ondes séismiques à l'intérieur de la Terre, qui n'est pas homogène, il est utile d'établir une analogie avec quelques principes fondamentaux d'optique.

Si le milieu est formé de plusieurs couches aux propriétés élastiques et aux densités différentes, les surfaces de séparation entre les couches constituent des discontinuités qui influencent le chemin des ondes séismiques.

Quand un front d'onde atteint une discontinuité, on peut avoir soit réflexion totale (toute l'énergie est alors renvoyée dans le milieu supérieur), soit réflexion partielle (une partie de l'énergie est réfléchie, l'autre partie est réfractée dans le milieu inférieur). L'angle de réflexion α_r est égal à l'angle d'incidence α_i; l'angle de réfraction β_r est donné par :

$$\frac{\sin \alpha_i}{\sin \beta_r} = \frac{V_1}{V_2}$$

V_1 et V_2 étant les vitesses de propagation de l'ébranlement dans les 2 milieux (figure ci-dessus).

On sait que $V_2 > V_1$ entraîne $\beta_r > \alpha_i$. Il existe une valeur limite α_m de α_i pour laquelle $\beta_r = 90°$ (au-delà, il y a réflexion totale). L'onde réfractée se déplace alors dans le milieu inférieur le long de la surface de séparation; en chaque point de celle-ci, conformément au principe de Huygens, de nouveaux fronts d'onde se forment. Le phénomène inverse va se produire : ces nouveaux fronts d'onde vont se réfracter à nouveau mais cette fois du milieu inférieur vers le milieu supérieur (angle d'émergence α_m), pouvant atteindre la surface.

L'étude des ondes séismiques est aussi bien quantitative (détermination des temps employés par les différentes phases pour arriver aux stations d'observation) que qualitative (caractéristiques des impulsions observées, à savoir : l'amplitude, la fréquence et la polarité).

Pour déterminer la position du foyer d'un tremblement de terre, il faut connaître au préalable les temps nécessaires aux premières ondes de chaque type (P, S, R, etc.) pour arriver jusqu'aux instruments d'enregistrement.

Si la vitesse de propagation à l'intérieur de la Terre était uniforme, la trajectoire correspondante serait rectiligne et le temps de parcours minimal. La vitesse de propagation

▲ En haut, mécanisme de la propagation des différents types d'ondes séismiques (les surfaces d'ondes, à grande distance du lieu d'émission, peuvent être considérées comme planes) : A, ondes longitudinales; B, ondes transversales ou de cisaillement; C, ondes superficielles de type Rayleigh; en rouge, le mouvement des particules; λ indique la longueur d'onde. Ci-dessus, représentation schématique du mécanisme de la réflexion de l'onde séismique sur une discontinuité.

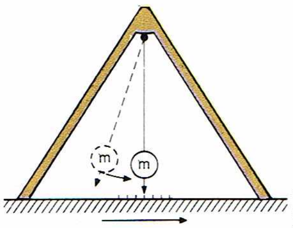

I.G.D.A.

▲ *Pendule simple permettant d'obtenir la composante horizontale du mouvement du sol : m, masse.*

des ondes internes augmente en fait avec la profondeur; la trajectoire n'est pas une droite, mais une courbe définie par la relation de Snellius :

$$\frac{r \sin \alpha}{V} = \text{constante}$$

où r est le rayon de la Terre supposée sphérique, α l'angle compris entre le rayon passant par un point quelconque de la trajectoire et la tangente menée en ce point, et V la vitesse de propagation. Pour chaque rayon, il existe une profondeur maximale de pénétration après laquelle il commence à réémerger.

Toutefois, les ondes peuvent suivre des trajets différents à travers le globe terrestre : outre les premières ondes de chaque type, on enregistre par la suite beaucoup d'arrivées « tardives ».

Lorsqu'une onde (P ou S) rencontre une surface de discontinuité, elle donne souvent naissance soit à des ondes réfléchies, soit à des ondes réfractées. C'est ainsi que les ondes P, par exemple, peuvent se réfléchir plusieurs fois à la surface de la Terre (ondes PP, PPP) ou bien se réfracter à travers le noyau central en traversant toute la Terre (onde PKP) ; par ailleurs, les ondes P peuvent se transformer, à la suite d'une réflexion ou d'une réfraction, en ondes S, ou *vice versa* (PS ou SP).

Les séismographes

Les séismographes (ou séismomètres) sont des appareils destinés à enregistrer, en fonction du temps, les oscillations dues à un tremblement de terre; l'amplitude de ces dernières dépend du mouvement du terrain.

Le procédé le plus répandu consiste à suspendre une masse reliée le moins possible à la terre, et qui, par suite de son inertie, reste sensiblement stationnaire lorsque son support est brusquement déplacé par un tremblement de terre. On enregistre, après l'avoir amplifié, le déplacement relatif de la masse par rapport à l'instrument.

▼ *Ci-dessous, séismographe horizontal permettant d'obtenir un enregistrement continu du mouvement du sol. En bas, le pendule, oscillant autour d'un axe horizontal, permet d'enregistrer la composante verticale du mouvement du sol.*

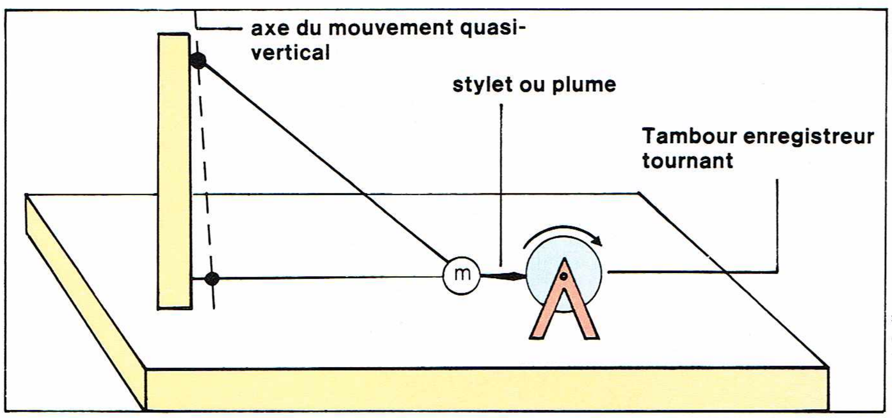

Richard Colin

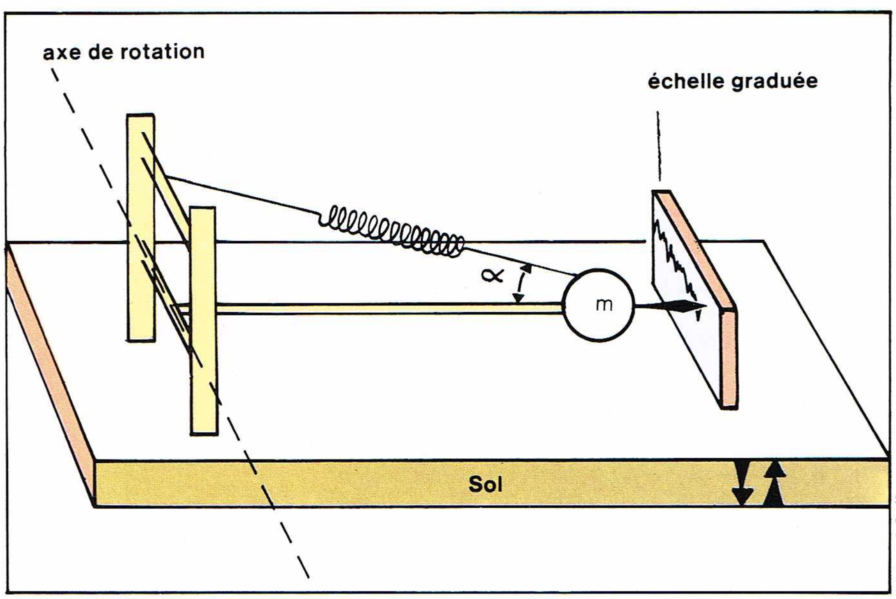

Richard Colin

Les séismographes sont en général conçus pour mesurer seulement une composante du mouvement du sol. Aussi un enregistrement complet nécessite-t-il en général trois appareils : deux pour les composantes horizontales, nord-sud et est-ouest, un pour la composante verticale.

Le type le plus simple de séismographe horizontal est un pendule qui peut osciller dans un plan vertical au début du mouvement. La masse *m* du pendule tend à rester immobile, pendant que le support se déplace. Le mouvement du sol peut être connu si l'on observe la position relative d'une aiguille placée sur *m* et d'une échelle graduée, fixée au sol. Le pendule se met ensuite à osciller. Si le support subit plusieurs déplacements, l'analyse du mouvement du pendule est complexe.

Un autre type de séismographe horizontal fréquemment utilisé possède un axe de rotation quasi vertical. En effet, si l'axe est vertical, le pendule n'a pas tendance à revenir dans sa position de repos. Tandis que si l'axe est légèrement incliné, une petite composante de la gravité agit sur le pendule, et, s'il est déplacé, il retournera lentement à sa position initiale. La sensibilité du système est fonction de l'angle de l'axe de rotation avec la verticale.

La composante verticale du mouvement peut être enregistrée par un pendule oscillant autour d'un axe horizontal. Un ressort maintient le pendule contre l'accélération de la pesanteur. On peut utiliser un ressort long et faible pour que le pendule garde une période propre longue. Le type le plus utilisé est un ressort disposé en diagonale. Si le sol se soulève, l'angle α (formé par le pendule et le ressort) diminue, et, bien que le ressort s'allonge, le moment de rappel par rapport à l'axe de rotation du pendule n'augmente presque pas. Si le sol s'affaisse, la longueur du ressort devient plus petite mais l'angle α augmente, empêchant ainsi une forte diminution du couple du ressort. Un tel système à ressort, dans lequel la force de rappel est réduite, est dit *astatisé*. De cette façon, la vitesse de retour du pendule à sa position de repos est très petite, et l'on obtient une grande sensibilité dans l'enregistrement des mouvements du sol. Néanmoins, il existe une limite à la durée des périodes libres de pendules astatiques. Lorsque la force d'astatisation est trop grande, le pendule devient instable et ne retourne pas à sa position de repos, s'il en est dévié.

La transcription des mouvements du sol peut s'effectuer en fixant un stylet ou une plume au bras du pendule ; on obtient alors un tracé sur un tambour en rotation. Toutefois, par suite de frottement entre la plume et le tambour, ce système diminue l'amplitude de l'enregistrement du mouvement relatif du sol et du pendule. Cela rend difficile l'inscription des petits mouvements. Par ailleurs, il est indispensable d'amplifier le tracé obtenu, surtout pour des séismes lointains (téléséismes) ou très petits (microséismes).

Pour pallier cet inconvénient, on obtient une amplification par enregistrement photographique. Un miroir est monté sur le séismographe, il réfléchit un rayon lumineux sur une bande de papier photographique, enroulée autour du tambour enregistreur. Lorsque ce tambour est à une distance assez éloignée du séismographe, la longueur du « bras » enregistreur peut être beaucoup plus grande que celle du pendule. En outre, l'angle de rotation du rayon lumineux est doublé par rapport à celui du miroir, ce qui donne en plus un facteur 2 d'amplification. Cependant l'électromagnétisme permet d'obtenir une amplification supérieure. Un aimant fixé à la masse d'inertie se déplace par rapport à une bobine attachée au sol (ou *vice versa*). Ce mouvement produit dans la bobine un courant électrique que l'on fait agir sur un galvanomètre dont les déviations, enregistrées photographiquement, sont amplifiées.

Les séismographes sont des appareils très sensibles qui inscrivent non seulement les secousses telluriques, mais encore celles qui résultent d'autres phénomènes (tempêtes, avalanches, trépidations des machines, etc.). Il faut donc éliminer tous les enregistrements parasitaires avant de se consacrer aux séismes eux-mêmes. Actuellement, les données obtenues par un réseau entier d'observatoires séismiques sont rassemblées dans un centre d'interprétations : elles sont transmises peu à peu sous forme de code, et le centre peut alors procéder à l'élaboration des résultats grâce à un calculateur électronique.

Un bon observatoire doit posséder au moins deux types de stations. La première doit être munie de séismo-

graphes de période longue (de quelques secondes jusqu'à 20 à 25 secondes), destinés à enregistrer des fréquences très faibles, dues à des séismes lointains ou à des microséismes. La seconde, de séismographes de période plus courte (d'environ 1 hertz), afin de pouvoir enregistrer des impulsions et des fréquences plus importantes, dues à des tremblements de terre situés non loin du lieu d'observation (à 100 km environ). Enfin, chaque station doit être dotée de trois séismographes qui enregistrent les trois composantes du mouvement.

D'après le principe de construction des séismographes, ils fournissent des inscriptions (ou séismogrammes) qui sont proportionnelles soit au déplacement, soit à la vitesse, soit encore à l'accélération du sol. Puisque ces quantités sont liées entre elles, il suffit d'en déterminer une seule pour obtenir les deux autres. Ainsi, pour un mouvement sinusoïdal, si x est le déplacement du sol par rapport à sa position de repos, f la fréquence et V la vitesse, l'accélération sera :

$$a = 2\,\pi f V$$

et le déplacement : $x = \dfrac{2\,\pi f}{V}$.

Les séismogrammes

Un séismogramme typique est une ligne irrégulière. L'écart de tout point de cette ligne à une ligne de référence est une mesure du déplacement du sol. Il comporte toujours au minimum quatre phases, correspondant à l'inscription de quatre trains d'ondes successifs : ondes primaires P, ondes secondaires S, ondes longues L et ondes « posthumes » ou répliques.

Sur le séismogramme, le mouvement débute brusquement. C'est ce que l'on appelle un « impetus » et que l'on note internationalement par la lettre *i*.

La figure ci-contre représente deux types d'enregistrement de tremblements de terre.

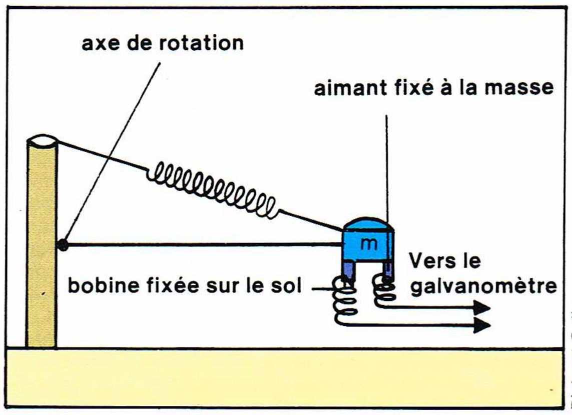

Le premier tracé reproduit la composante horizontale N.-S. d'un séisme enregistré à 1 300 km environ de l'épicentre. Au début du mouvement, les premières arrivées apparaissent nettement : ce sont les ondes P directes. Puis l'enregistrement change de caractère; l'amplitude augmente, les oscillations sont moins serrées : ce sont les ondes S. Ces dernières sont suivies de phases d'ondes d'amplitude croissante dont la période augmente jusqu'à un maximum M. Au-delà de M, la période décroît, et l'amplitude présente des battements assez réguliers qui forment la « queue » du séismogramme : c'est l'extinction.

Le second tracé a un aspect différent, il représente un séismogramme avec un épicentre situé à environ 9 600 km (composante horizontale E.-O.). L'arrivée des ondes P

▼ *Deux types d'enregistrement de tremblements de terre (voir explications dans le texte).*

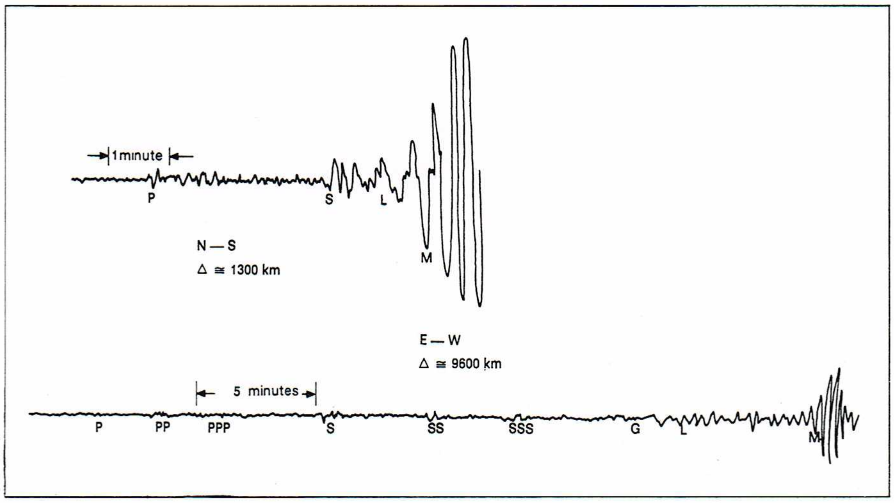

est presque illisible (effet d'atténuation avec la distance); à une certaine distance des ondes P apparaissent d'autres phases : ce sont les réflexions multiples des ondes P à la surface terrestre. L'intervalle de temps P-S est beaucoup plus grand que dans le premier enregistrement, de même que pour les autres intervalles (S-L et L-M) : cela s'explique par la diversité des vitesses de propagation des ondes. On doit aussi tenir compte de l'échelle différente des temps, c'est-à-dire de la vitesse moindre avec laquelle se déroule le papier dans le second enregistrement.

Les maximums correspondent en général aux ondes superficielles de Rayleigh.

La lecture des séismogrammes, c'est-à-dire la reconnaissance des différentes phases, nécessite une très grande expérience d'observation. Souvent, des données, interprétées d'une certaine façon sur un séismogramme particulier, sont modifiées peu à peu après l'examen des résultats enregistrés par d'autres stations.

◀ *Amplification obtenue par électromagnétisme.*

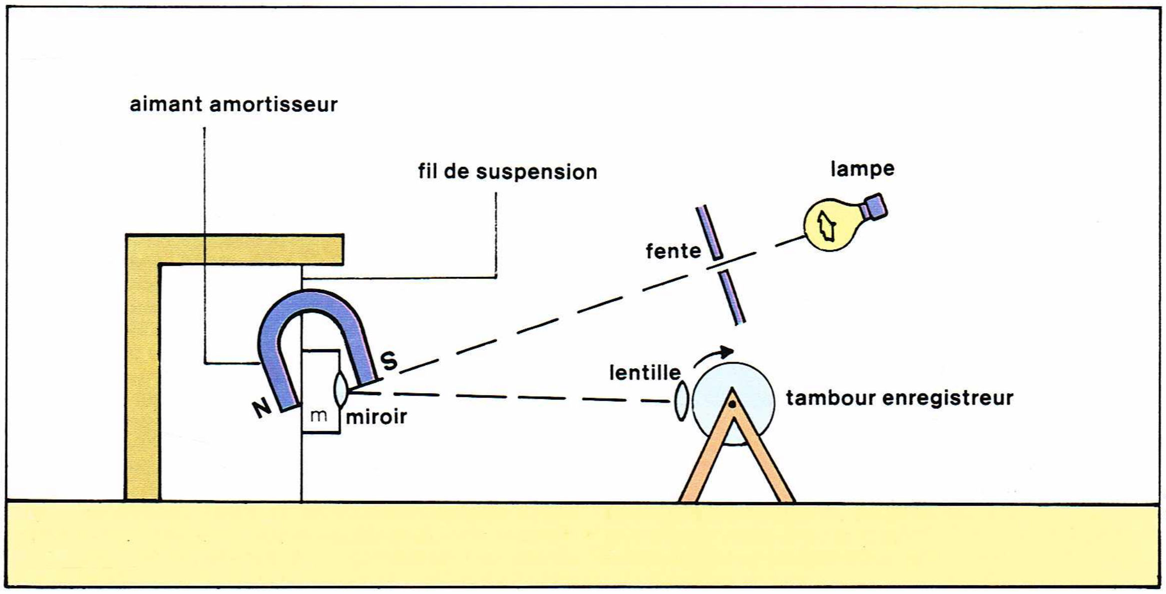

◀ *Séismographe à torsion de Wood-Anderson permettant d'obtenir un enregistrement photographique.*

▶ ***Diagramme temps-angles épicentraux : on porte en ordonnée les temps d'arrivée en différentes stations des ondes d'un même séisme, et en abscisse les distances angulaires de l'épicentre aux stations correspondantes.***

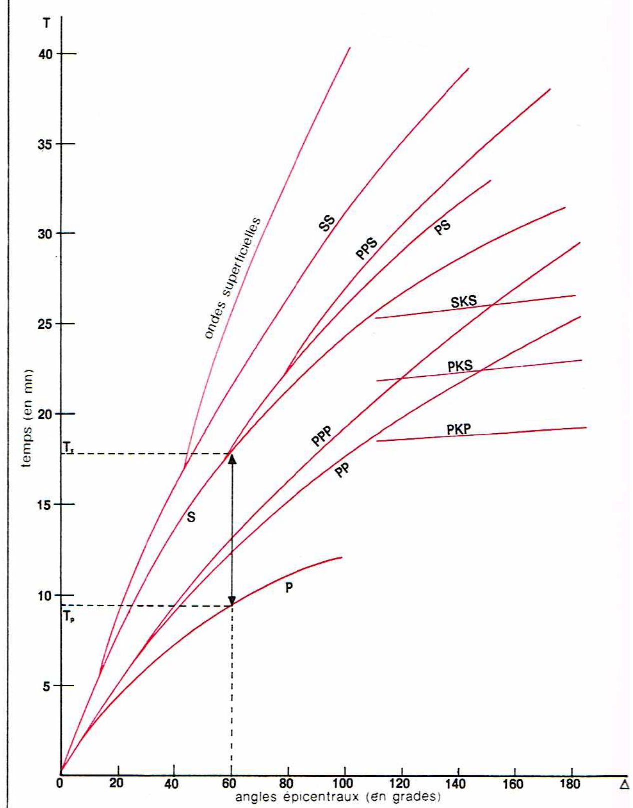

I.G.D.A.

L'analyse d'un séismogramme consiste à calculer la position de l'épicentre, à l'aide des temps de parcours des différentes phases, et à évaluer l'intensité du séisme tout en cherchant à en définir les causes. Bien que cette science soit complexe, elle est extrêmement révélatrice de la constitution interne du globe terrestre.

La position de l'épicentre peut être calculée, en première approximation, avec les enregistrements d'une seule station à trois composantes. Néanmoins, il est utile de pouvoir confronter les séismogrammes d'un même tremblement de terre, enregistrés par plusieurs stations, si l'on veut obtenir une meilleure estimation. Les interprétations sont fondées, en grande partie, sur les données expérimentales rassemblées dans les différents observatoires. Chaque station séismique importante possède une collection de diagrammes temps-distance (ou temps-angles épicentraux). Sur ces courbes de temps, encore appelées *hodochrones,* on porte en ordonnée les temps d'arrivée en différentes stations des ondes d'un même séisme, et en abscisse les distances angulaires de l'épicentre aux stations correspondantes (voir la figure ci-contre).

De tels diagrammes permettent de déterminer la distance épicentrale d'un autre séisme d'après un seul enregistrement. La première étape consiste à calculer l'intervalle de temps écoulé entre l'arrivée des ondes P et celle des ondes S ; puisque, d'après ce que l'on a vu auparavant, le rapport $\frac{V_P}{V_S}$ peut être considéré comme constant, la différence de temps $T_S - T_P$ est égale au temps observé entre P et l'instant du déclenchement du séisme. On obtient ainsi l'heure origine T_0. Une fois l'onde repérée et le temps T_0 connu, la distance approximative de l'épicentre se calcule sur les diagrammes temps-angles épicentraux.

La direction peut être déterminée (si l'arrivée des ondes P est visible sur les trois composantes : verticale, nord-sud et est-ouest) en observant le sens dans lequel le tracé s'est déplacé.

Pour ce faire, on s'appuie sur le sens du premier « impetus » (noté « i ») de la composante verticale, les séismographes verticaux étant en effet construits de façon qu'un premier impetus (tracé A, figure ci-après) :

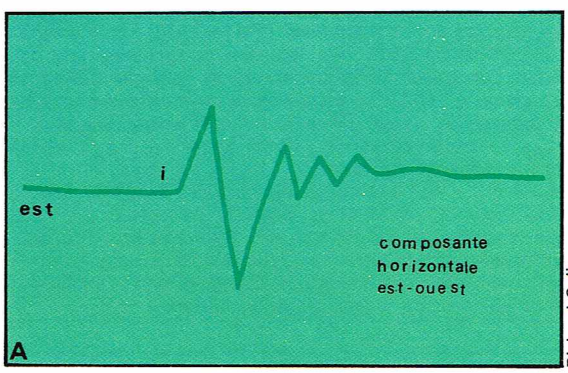

Richard Colin

traduise un mouvement initial de compression : cela signifie que l'épicentre se trouve dans la direction sud-ouest par rapport au lieu d'observation. Le sol s'est déplacé au loin de l'épicentre.

Au contraire, si le premier impetus décrit le tracé B suivant :

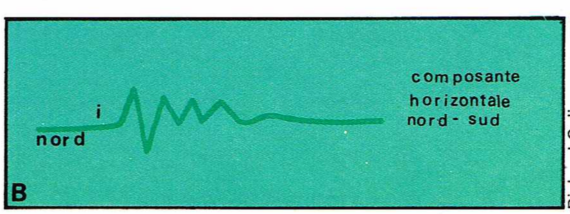

Richard Colin

il traduit une dilatation ; l'épicentre se trouve dans la direction nord-est par rapport au lieu d'observation. Le sol s'est déplacé vers l'épicentre. Cette technique d'interprétation est très approximative, surtout en raison de la difficulté à distinguer l'arrivée des ondes S ; par ailleurs, elle ne peut être appliquée que pour des angles épicentraux supérieurs à 100°.

C'est pourquoi, outre cette détermination grossière de la position de l'épicentre, on peut procéder à une interprétation plus précise en utilisant des données enregistrées par plusieurs stations.

On détermine, pour chaque station, sa distance approximative à l'épicentre, grâce aux intervalles des ondes S-P. A chaque observatoire, on trace les arcs de cercle de longueurs égales aux distances calculées ; de tels tracés s'effectuent sur un globe afin d'être le plus près possible de la réalité. Le centre de la zone délimitée par les points d'intersection des cercles tient lieu d'épicentre provisoire. Ensuite, on lit sur les diagrammes le temps P-O nécessaire pour parcourir la distance de l'épicentre provisoire à chaque station, et on le soustrait au temps observé dans les différents observatoires. La position de l'épicentre a été correctement déterminée si le temps, ainsi calculé, se révèle le même dans toutes les stations. Les écarts indiquent la correction à apporter à cette localisation.

Si le foyer est profond, les temps obtenus ne sont pas les mêmes que ceux des séismes superficiels ; les différences indiquent la profondeur h de l'hypocentre. Celle-ci est donnée (pour les tremblements de terre situés au voisinage des stations) par $h^2 = D^2 \cdot \Delta^2$ où D et Δ sont respectivement les distances hypocentrale et épicentrale. Lorsque le séisme est lointain, les premières arrivées sont faibles et difficilement identifiables. Par voie de conséquence, elles ne peuvent être utiles à la détermination de l'épicentre, aussi se sert-on des ondes successives. Toutefois, une imprécision subsiste toujours, et, dans le meilleur des cas, elle ne dépasse pas un kilomètre. La profondeur du foyer est encore plus difficile à déterminer ; pour les tremblements de terre superficiels, calculés avec le plus de facilité, l'erreur est toujours de quelques kilomètres.

Échelle de l'intensité et de la magnitude

Des renseignements sur l'*intensité* d'une secousse séismique peuvent être obtenus par les effets qu'elle produit à un endroit déterminé. Les dégâts occasionnés sont répartis selon plusieurs zones grossièrement concentriques autour de l'épicentre. L'intensité décroît de la zone épicentrale vers la périphérie : il y a donc plusieurs degrés

d'intensité pour un séisme. Aussi s'est-on efforcé d'établir une échelle internationale d'intensité qui permette à n'importe quel observateur d'indiquer le degré des effets au point d'observation.

De nombreuses échelles ont été proposées; la plus récente est celle de Medvedev-Karnik-Sponhever (MKS-1964), qui combine en les précisant l'échelle internationale de Cancani et Sieberg, et celle de Mercalli modifiée.

La détermination de l'intensité prend en considération :

I — Les types de constructions

1° Type A : maisons en argile, pisé, brique crue; maisons rurales, constructions en pierres ordinaires (galets, etc.).

2° Type B : constructions en brique, en blocs de béton; mixtes en maçonnerie-bois; en pierres appareillées.

3° Type C : constructions armées; bonnes constructions en bois.

II — Les proportions de bâtiments endommagés

1° Quelques : 5 % environ.

2° Beaucoup : 50 %.

3° La plupart : à partir de 75 %.

III — Les degrés de dommages

a) Degré 1 : fissuration et chute de petits débris de plâtres.

b) Degré 2 : fissuration des murs; chute d'assez gros débris de plâtres; chutes de tuiles; fissuration ou chute de parties de cheminées.

c) Degré 3 : lézardes larges et profondes dans les murs; chutes de cheminées.

d) Degré 4 : brèches dans les murs; effondrements partiels; destruction de remplissages ou de cloisons intérieures.

e) Degré 5 : effondrement total de la construction.

Définition des degrés d'intensité (degrés I à XII)

Degré I : secousse imperceptible à l'homme; inscrite seulement par les séismographes.

Degré II : secousse ressentie par quelques individus au repos, et surtout par ceux qui sont situés aux étages supérieurs des maisons.

Degré III : secousse ressentie par quelques personnes à l'intérieur des habitations; vibration analogue à celle que cause un camion léger; léger balancement d'objets suspendus, surtout dans les étages supérieurs.

Degré IV : séisme ressenti à l'intérieur des constructions par de nombreuses personnes, à l'extérieur par quelques personnes; vibration des fenêtres, des portes, de la vaisselle; craquement des planchers et des murs. Les liquides contenus dans des récipients ouverts s'agitent légèrement.

Degré V : ressenti par tout le monde à l'intérieur et par de nombreuses personnes à l'extérieur; réveil de nombreux dormeurs; constructions agitées d'un tremblement général; large balancement des objets suspendus; dans certains cas, les horloges à balancier s'arrêtent; les objets peu stables sont déplacés ou renversés; projection de liquides hors de récipients bien remplis. Légers dégâts de degré 1 dans les bâtiments de type A. Modification dans certains cas du régime des sources.

Degré VI : ressenti à l'extérieur et à l'intérieur par la population; chutes d'assiettes, de verres, de livres; sonneries spontanées de petites cloches. Dégâts de degré 1 dans quelques constructions de type B et dans de nombreuses constructions de type A. Petites crevasses dans les sols détrempés; éventuellement, glissements de terrain en montagne; changement de débit des sources.

Degré VII : vibration ressentie par les conducteurs d'automobiles; de grosses cloches sont mises en branle. Dommages de degré 1, dans de nombreux bâtiments de type C, de degré 2 dans de nombreux bâtiments de type B, de degré 3 dans de nombreux bâtiments de type A, de degré 4 dans quelques bâtiments de type A. Fissures en travers des routes; fissures dans les murs de pierre; joints de canalisations endommagés. Vagues sur l'eau; eau troublée par la vase mise en mouvement. Tarissement de certaines sources; variation du niveau des puits et du débit des sources.

Degré VIII : des branches d'arbres se cassent. Le mobilier, même lourd, se déplace ou se renverse. Dégâts de degré 5 à quelques bâtiments de type A, de degré 4 à de nombreux bâtiments de type A et à quelques bâtiments de type B, de degré 3 à de nombreux bâtiments de type B et à quelques-uns de type C, de degré 2 à de nombreux bâtiments de type C. Quelques ruptures de canalisations. Rotation de monuments et de statues; renversement de stèles funéraires; effondrement de murs de pierre. Petits glissements de terrain dans les ravins; crevasses de quelques centimètres de largeur. Dans de nombreux cas, changement dans le débit et le niveau d'eau des puits.

Degré IX : panique générale; dégâts considérables au mobilier. Dégâts de degré 5 à de nombreuses maisons de type A et à quelques maisons de type B, de degré 4 à de nombreuses maisons de type B et à quelques maisons de type C, de degré 3 à de nombreuses habitations de type C. Chute de monuments et de colonnes; dommages considérables aux réservoirs au sol; rupture partielle des canalisations souterraines; dans quelques cas, des rails de chemins de fer sont tordus, des routes endommagées. Projection d'eau, de sable, de boue; larges crevasses sur les pentes et les berges des rivières. Chute de rochers; nombreux glissements de terrain; grandes vagues sur l'eau.

Degré X : destruction générale des bâtiments; dégâts de degré 5 à la plupart des bâtiments de type A, à de nombreux bâtiments de type B, à quelques bâtiments de type C, de degré 4 à de nombreux bâtiments de type C. Dommages aux barrages et aux digues; dommages sévères aux ponts; lignes de chemins de fer légèrement tordues; canalisations souterraines tordues ou rompues. Le pavage des rues et l'asphalte forment de grandes ondulations. Crevasses pouvant atteindre 1 m de largeur; éboulement des terres meubles; glissements de terrain considérables; formation de nouveaux lacs.

Degré XI : dommages sévères même aux bâtiments bien construits, aux ponts, aux barrages, aux lignes de chemins de fer, aux grandes routes; canalisations souterraines détruites; déformation du terrain; nombreux glissements de terrain et chute de rochers.

Degré XII : changements de paysages; toutes les structures au-dessus et au-dessous du sol sont gravement endommagées ou détruites. La topographie est bouleversée; énormes crevasses; vallées barrées et transformées en lacs.

Publifoto

▲ Les ruines de Salaparuta, complètement détruite par le tremblement de terre qui a ravagé la Sicile en janvier 1968. Ce séisme correspond au degré IX de l'échelle Mercalli-Richter.

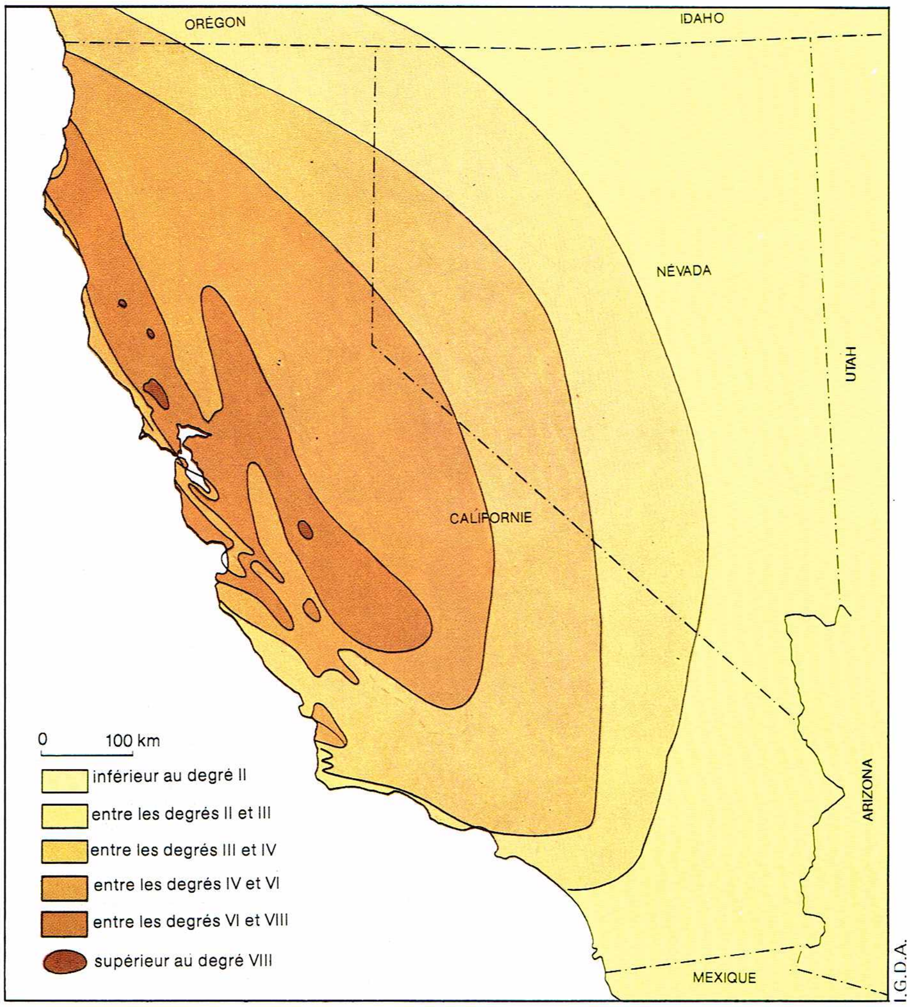

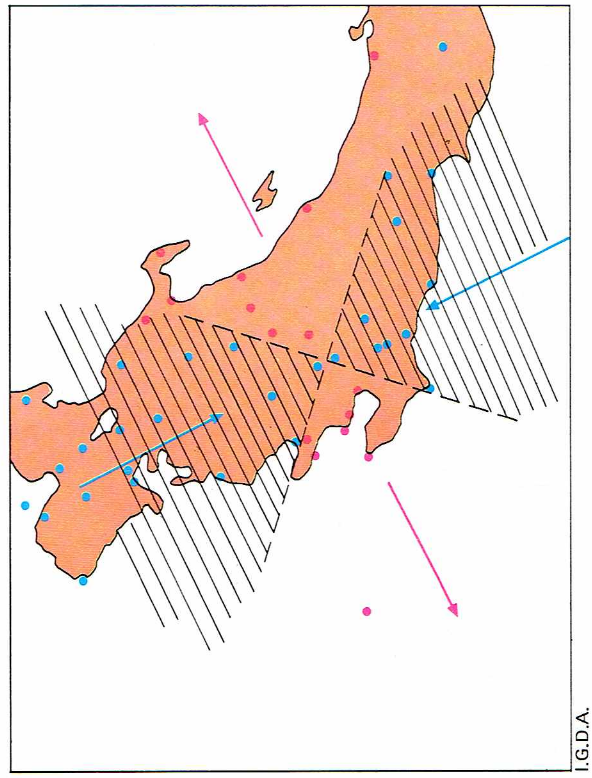

▲ A gauche, carte des isoséistes (d'après l'échelle Rossi-Forel) établie pour le tremblement de terre de San Francisco qui eut lieu en 1906. A droite, distribution en quadrant des compressions *(flèches bleues) et des* dilatations *(flèches rouges) qui ont précédé le tremblement de terre de 1931 au Japon. On notera le nombre et la répartition uniforme des observatoires (indiqués par des points bleus pour ceux qui signalèrent les compressions, et par des points rouges pour ceux qui signalèrent les dilatations).*

▶ La magnitude est liée à l'accélération et aussi à l'énergie développée par le tremblement de terre. On peut ainsi établir une relation entre la magnitude, l'intensité, l'accélération et l'énergie totale selon le tableau ci-contre.

Une fois évaluée l'intensité en chaque point de la région ébranlée, on peut grouper géographiquement les localités auxquelles on a attribué le même degré. Les courbes tracées sur une carte entre deux degrés successifs sont désignées sous le nom d'*isoséistes*. Ces derniers fournissent des renseignements sur l'origine du tremblement de terre et sur les conditions topographiques et géologiques qui ont pu accroître en certains points l'intensité des secousses. Du fait de la structure de la surface terrestre, cette région d'intensité maximale du séisme ne coïncide pas nécessairement avec l'épicentre localisé au moyen d'instruments, mais en général les deux centres ne sont pas très écartés.

Pour classer les séismes selon l'énergie libérée au foyer — et non selon leurs effets superficiels — on a cherché à définir une quantité capable d'apprécier la violence intrinsèque d'un tremblement de terre. Cette quantité, ou *magnitude*, se calcule d'après les séismogrammes, selon une méthode mise au point par le séismologue américain C. F. Richter. La magnitude se définit comme le logarithme de l'amplitude maximale, mesurée en microns et enregistrée par un séismographe ayant une période de 0,8 s, agrandissant 2 800 fois les mouvements du sol et placé à 100 km de l'épicentre.

En fait, la notion de magnitude, d'abord établie pour les séismes californiens, a été ensuite étendue aux séismes éloignés, en mesurant soit l'amplitude maximale des ondes superficielles, soit celle des ondes longitudinales et transversales (P et S).

Pour deux séismes se produisant à la même distance épicentrale Δ et auxquels correspondent des amplitudes maximales A_1 et A_2 sur les enregistrements, on obtient la différence M_1 et M_2 de leur magnitude :

$$M_1 - M_2 = \log A_1 - \log A_2.$$

D'une manière générale, une station pourra calculer la magnitude d'un séisme par la formule :

$$M = \log A + C \log \Delta + D,$$

où A est l'amplitude maximale du mouvement horizontal du sol, Δ la distance de la station à l'épicentre, les coefficients C et D dépendant en partie du sous-sol de la station.

Une autre formule, habituellement employée de nos jours, est applicable soit aux ondes de surface, soit aux ondes de volume, et fait intervenir l'amplitude A du mouvement du sol pour la période T correspondante :

$$M = \frac{\log A}{T} + f(\Delta, h) + C.$$

La relation $f(\Delta, h)$ tient compte de la profondeur du foyer et de l'absorption en fonction de la distance ; C est la correction de station. On désigne par M la magnitude calculée à partir de l'amplitude des ondes de surface, par m celle qui correspond aux ondes de volume. La formule : $m = 0{,}56\,M + 2{,}9$ sert à passer de l'une à l'autre des magnitudes.

Des paramètres permettent de relier M, l'intensité maximale, à l'épicentre I_0, à l'accélération maximale γ_0 (en cm/s²), à l'énergie E (en ergs) développée au foyer du séisme :

$$M = 1 + \frac{2}{3} I_0 \qquad \log \gamma_0 = \frac{I_0}{3} - \frac{1}{2}$$

$$\log E = 11{,}4 + 1{,}5\,M.$$

D'une manière générale, on peut dire qu'un séisme de magnitude 3 correspond à une secousse ressentie dans une zone peu étendue ; celui de magnitude 4 peut causer des dégâts légers ; les grands séismes enregistrés dans toutes les stations du globe ont une magnitude supérieure à 7. La magnitude 9 n'a jamais été enregistrée, on pense que c'était celle du séisme de Lisbonne de 1755.

Magnitude	Intensité (Mercalli)	Énergie (en ergs)	Accélération (en cm/s²)
3	3	$4 \cdot 10^{16}$	3
4	4 1/2	$1 \cdot 10^{18}$	10
5	6	$3 \cdot 10^{19}$	30
6	7 1/2	$8 \cdot 10^{20}$	100
7	9	$2 \cdot 10^{22}$	300
8	10 1/2	$6 \cdot 10^{23}$	1 000
9	12	$2 \cdot 10^{25}$	3 000

Mécanisme au foyer des tremblements de terre

D'après les enregistrements d'un grand nombre de stations, les premiers mouvements au voisinage de l'épicentre se répartissent en régions dont la forme dépend du mécanisme au foyer du séisme. On se limitera ici à l'étude des tremblements de terre les plus fréquents, c'est-à-dire à ceux qui sont dus à une fracture.

Selon les théories de l'expansion des fonds océaniques et de la dérive des continents, des morceaux de « croûte » continentale, ou plaques, se déplacent lentement à la surface du globe. Ce mouvement met en jeu des forces de frottement qui freinent les glissements.

Lorsque les tensions internes, ainsi accumulées, dépassent la limite élastique des matériaux, il y a rupture dans une petite zone de faiblesse, ou foyer du séisme, située à une profondeur variable. La propagation des ondes séismiques qui s'ensuit fait alors rejouer toute ou partie de la faille, augmentant le déplacement relatif (ou rejet) des deux compartiments qui la bornent.

Une même faille peut rejouer un très grand nombre de fois, et le rejet peut atteindre ainsi jusqu'à plusieurs dizaines, voire centaines ou milliers de mètres. La plus grande faille connue, celle de San Andreas en Californie, présente un rejet horizontal d'au moins 20 km.

Il semble que les tremblements de terre superficiels soient produits le plus souvent par le rejet d'une faille à coulissage horizontal. Pour les tremblements de terre à foyers intermédiaires et profonds, les géophysiciens s'accordent à penser qu'il s'agit plutôt de failles à rejet vertical ou oblique (vers le haut ou le bas).

Néanmoins, il est rare de trouver des traces visibles du mouvement qui est à la source d'un séisme. Aussi essaye-t-on de reconstituer le mécanisme focal sur les enregistrements et en disposant d'un modèle mathématique du séisme.

Dans le cas d'un coulissage le long d'un plan vertical, l'analyse des séismogrammes, obtenus par plusieurs stations convenablement réparties en azimut, permet de savoir dans quels quadrants, délimités par deux plans perpendiculaires, il y a eu compression et ceux dans lesquels il y a eu dilatation.

Le mécanisme d'une secousse engendrée par une explosion souterraine (par exemple nucléaire) est très différent. En effet, la source est ponctuelle, le mouvement est de compression dans toutes les directions, c'est-à-dire que l'on n'a plus à faire une distribution en quadrants.

Distribution géographique des tremblements de terre

La détermination instrumentale des épicentres a permis de préciser la répartition des tremblements de terre à travers le globe terrestre et constitue l'étude de la séismicité de la Terre.

Lorsque les épicentres de tous les séismes nettement identifiés au cours du temps sont portés sur une mappemonde, on constate que la plupart s'accumulent le long des régions plissées à l'époque tertiaire, tandis qu'ils sont exceptionnels à la surface des plates-formes continentales constituées de roches anciennes. Par ailleurs, il existe des régions non plissées et non soulevées présentant une séismicité appréciable; les plus importantes sont les régions de fracture et d'effondrement (il en est de sous-marines comme la fosse Bartlett dans les Antilles).

La principale zone séismique du monde est le cercle *circumpacifique* qui, de la Nouvelle-Zélande au Chili, suit les rivages de l'océan : on lui a attribué le surnom de « ceinture de feu du Pacifique » parce qu'il est aussi le siège de nombreux volcans. Plus de 80 % de toute l'énergie libérée par des séismes est dissipée autour de cette zone. Les séismes à foyers profonds sont situés presque exclusivement sur les côtes du Pacifique bordées de fossés, à des profondeurs de plus en plus grandes lorsqu'on passe des fossés vers le continent. Enfin, c'est dans la ceinture de feu du Pacifique que se produisent presque tous les tremblements de terre de magnitude au moins égale à 8. Sur onze séismes ayant atteint cette magnitude de 1953 à 1970, neuf ont eu lieu autour du Pacifique.

La crête médiane de l'Atlantique a aussi un caractère séismique. Elle émet une branche perpendiculaire à sa propre orientation à travers la Méditerranée et la Turquie vers le Pamir où elle se divise. La branche la plus forte suit l'Himalaya jusqu'au Siam et rejoint la ceinture du Pacifique en passant par l'Indonésie. Une autre branche s'enfonce jusqu'en Chine centrale. Cette zone méditerranéo-alpine, encore appelée *transasiatique,* est le siège de tremblements de terre à profondeur intermédiaire. Son taux de libération d'énergie par les séismes est évalué à 15 % environ. Les 5 % restants sont partagés entre les crêtes du milieu des océans et le long du grand fossé d'effondrement de l'Est africain.

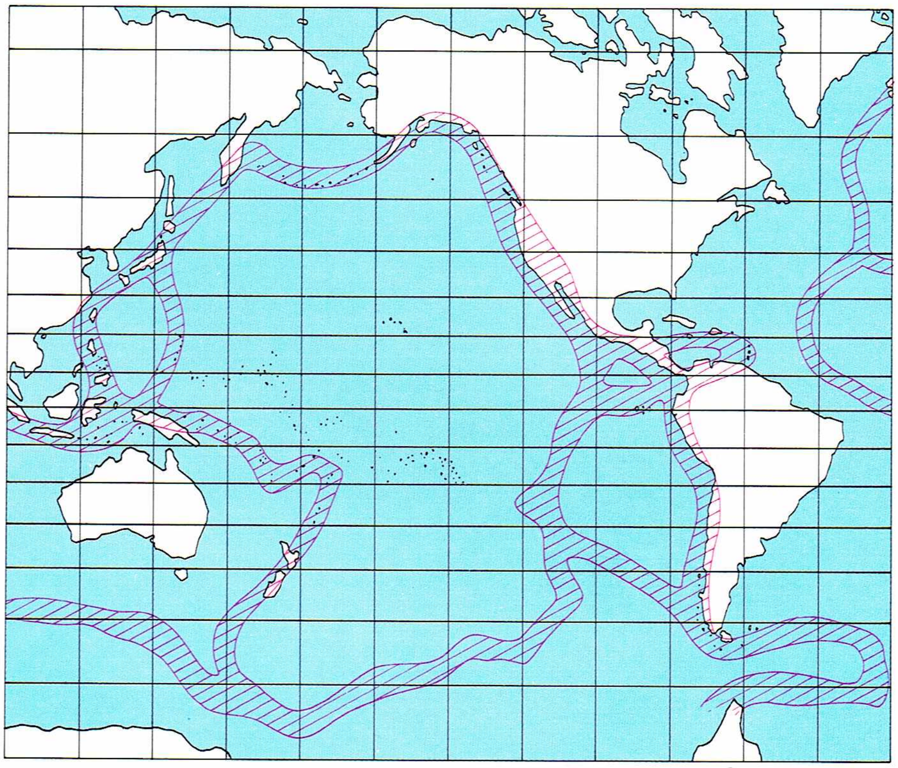

▲ ***La ceinture circumpacifique est la zone séismique où sont concentrés presque tous les tremblements de terre à foyers profonds.***

Possibilité de prévoir les tremblements de terre

Les processus naturels qui engendrent les tremblements de terre se déroulent en profondeur et sont, de ce fait, inaccessibles à l'observation directe. Il n'y a donc rien d'étonnant à ce qu'aucune méthode valable de prévision n'ait été encore mise au point. Toutefois, il convient de distinguer la prévision du *lieu* et la prévision du *moment*.

Les cartes de régionalisation séismique indiquent les endroits où peuvent survenir les tremblements de terre, mais ne donnent aucune idée du moment où ils peuvent avoir lieu. Or, c'est ce dernier problème qui fait actuellement l'objet d'études approfondies mettant en jeu, dans plusieurs parties du monde, et notamment aux États-Unis et au Japon, des techniques variées d'observation et d'approximation. Il existe en effet des appareils ultrasensibles capables de déceler, à une échelle infinitésimale, des mouvements, des tensions et autres distorsions de la croûte terrestre. Une partie du réseau de failles (dont la plus célèbre est celle de San Andreas) qui rayent le sud et l'ouest de la Californie a été placée sous surveillance. Interféromètres à laser, extensomètres et inclinomètres mesurent les déformations du sol les plus infimes. Des

▼ ***La grande faille de San Andreas en Californie, dont les mouvements sont la cause d'une grande partie de la séismicité de la zone.***

Spence Air Photos

J. R. Stacy

▲ *Une autre photographie des effets du tremblement de terre qui frappa Anchorage en mars 1964; on observera au centre de la photographie la crevasse qui sillonne le sol.*

séismomètres ultra-sensibles détectent les microséismes les plus faibles. Des magnétomètres rendent compte des plus petites variations du champ magnétique local. Au cours de ces dernières années, on a ainsi pu noter que tout séisme d'une force minimale de 6 sur l'échelle internationale était inévitablement précédé de variations du champ magnétique terrestre, sans doute à cause du déplacement de roches et de magma dans les profondeurs de l'écorce.

Certains grands tremblements de terre sont précédés de faibles secousses prémonitoires qui ont au moins le mérite, lorsqu'elles se produisent juste avant le choc initial, de permettre l'évacuation de la population.

Des expériences réalisées en laboratoire donnent des renseignements très précis sur le comportement des roches soumises à de fortes pressions, dans les instants qui précèdent leur fracture. Grâce à de telles études, les spécialistes pourront établir le schéma des microséismes susceptibles de se produire avant de fortes secousses.

Néanmoins, ce sont plutôt des recherches très localisées qui permettront peut-être un jour de prévoir les séismes. Cela nécessite, pour chaque zone, un équipement d'appareils nombreux et coûteux, capables d'enregistrer en permanence toute une série de paramètres : agitation microséismique, déformation du sol, modification du champ magnétique, résistivité électrique du sol, émanations de radon... Par ailleurs, il faudra recueillir les diverses données pendant longtemps avant d'être en mesure de les interpréter.

Les géophysiciens soviétiques (dans la région de Garm), puis les Américains (dans le nord de l'État de New York) explorent depuis ces dernières années une nouvelle méthode de prévision. Le principe de cette méthode repose sur la variation des rapports entre les vitesses des ondes P et S, d'après les enregistrements de microséismes recueillis sur un petit réseau local de séismographes. Les chercheurs soviétiques ont constaté que le rapport normal est de 1,75 près de Garm. Mais ils ont remarqué, à six ou sept reprises, que ce chiffre avait diminué d'environ 10 % pendant le mois qui précédait une secousse importante, pour remonter au-dessus de la normale 24 heures avant le choc violent. Mêmes observations dans l'État de New York, mais le temps de décroissance du rapport des vitesses P et S s'y réduit à quelques jours. Ces changements de vitesse dans la propagation des ondes séismiques peuvent s'expliquer par la modification locale des propriétés physiques des roches, où les contraintes sont en train de s'accumuler jusqu'à atteindre le point de rupture. Seulement les régions ainsi surveillées sont très petites, et l'on voit mal comment il serait possible d'équiper l'ensemble des régions séismiques habitées.

Enfin, en admettant que la prévision des séismes puisse s'effectuer dans un avenir proche, elle pourra certes aider à sauver des vies humaines, mais n'empêchera pas les dommages et les destructions. Actuellement, les chercheurs se tournent vers une nouvelle méthode fort prometteuse : les tremblements de terre préventifs. Des scientifiques américains ont réalisé une expérience qui, à une échelle réduite, se révèle efficace. L'opération consiste à injecter de l'eau en profondeur dans le sol; cette eau lubrifie les roches et provoque des glissements qui sont ressentis à la surface terrestre comme de petits tremblements. Ces secousses de faible amplitude soulagent ainsi les tensions internes et évitent des séismes dévastateurs. Il faut encore que le mécanisme de corrélation entre la pression hydrostatique et la séismicité soit suffisamment compris, avant de pouvoir appliquer cette méthode à une échelle globale.

En attendant, la vraie solution du problème est donc de bâtir de telle façon que les tremblements de terre ne représentent plus de danger. On constate que les immeubles qui résistent le mieux aux séismes sont en général les immeubles à un étage, faits de bons matériaux, ayant des murailles bien enchaînées, et dont la période naturelle de vibration ne coïncide pas avec celle des ondes principales du séisme qui provoquent la destruction.

Par ailleurs, les normes paraséismiques doivent tenir compte de l'accélération qui est bien plus capitale dans les effets des ondes séismiques que l'amplitude. Un déplacement important mais lent du terrain n'est pas ressenti et ne provoque pas de catastrophe brusque. Au contraire, des ondes à période courte (d'une ou de moins d'une seconde) peuvent avoir des effets désastreux. Elles impriment au sol de grandes accélérations, parfois supérieures à celle de la pesanteur (g = 981 cm/s^2). On commence à ressentir un séisme quand l'accélération atteint 1/1 000 de la valeur de g. Il faut donc que les constructions soient capables de résister à des accélérations horizontales égales à l'accélération de la pesanteur.

Mais il y a des obstacles entre la théorie et la pratique. Il reste encore à adapter les principes généraux de l'architecture paraséismique aux conditions locales, spécialement aux méthodes et aux matériaux de construction locaux et traditionnels. En effet, les matériaux utilisés pour la construction sont déterminés, dans une grande mesure, par les ressources naturelles et la richesse économique du pays. Seuls les pays relativement avancés ont suffisamment d'acier pour l'utiliser de façon courante dans les structures de béton armé.

La constitution interne de la Terre et de la croûte terrestre selon les données de la séismologie

La séismologie représente le moyen le plus utile pour l'étude de la structure interne de notre globe et des propriétés physiques de ses couches profondes. On a pu établir depuis plus d'une quarantaine d'années, et essentiellement grâce aux vitesses de propagation des ondes séismiques, que la Terre est constituée d'enveloppes successives dont la densité va croissant de l'extérieur vers l'intérieur.

Au centre de la Terre se trouve une sphère très dense (environ 16 g/cm) avec un rayon de l'ordre de 1 216 km. Ce noyau interne solide est entouré par une zone de transition d'un peu moins de 500 km d'épaisseur, elle-même enveloppée par un noyau externe d'environ 1 700 km d'épaisseur et ayant les propriétés d'un liquide.

A l'extérieur de ce noyau se présente le manteau, bloc solide de 2 900 km d'épaisseur, qui se rapproche à moins de 40 km de la surface de la Terre sous les continents, et à moins de 10 km sous les océans. Enfin apparaît une couronne hétérogène : l'écorce ou croûte terrestre.

Au cours de la première moitié de notre siècle, des séismologues ont dressé soigneusement les hodochrones des ondes P et S, utilisant des centaines de tremblements de terre judicieusement choisis à travers le globe. Ces courbes de temps révélèrent que la vitesse moyenne, évaluée suivant la pente, croissait avec la distance du foyer, ce qui indiquait que la vitesse des ondes augmentait avec la profondeur.

En 1906, le séismologue britannique R. D. Oldham émit le premier l'hypothèse d'une corrélation étroite entre la propagation des ondes séismiques et l'existence de discontinuités à l'intérieur de la Terre. Il expliqua le mode d'arrivée des ondes P et S par une diminution de vitesse dans les profondeurs de la Terre, obligeant les rais séismiques à s'infléchir vers le bas, évitant ainsi une partie de la structure interne (ou noyau). Bien que les calculs sur lesquels reposait son argument fussent incorrects, la conclusion générale d'Oldham fut amplement étayée par la suite. L'évidence encore plus frappante de discontinuités dans la structure terrestre fut découverte en 1909 par le Yougoslave A. Mohorovičić. Lorsqu'il traça l'hodochrone des ondes P provenant de tremblements de terre balkaniques, il s'aperçut qu'il y avait une courbure soudaine au niveau d'une distance d'environ 200 km (une distance angulaire de l'ordre de 2°). Mohorovičić expliqua cette courbure par un changement brusque des propriétés de l'intérieur de la Terre, à une profondeur d'environ 50 km.

Cela se traduisait sur les séismogrammes par l'arrivée de deux phases : la première (P, S) correspondant aux ondes qui se réfractent dans un milieu où la vitesse des ondes est supérieure ; la seconde ($\bar{P}$, $\bar{S}$) représentant les ondes qui continuent à arriver à la station, directement à travers la croûte terrestre. La vitesse longitudinale des deux phases est égale respectivement à 8,2 km/s et 5,5 km/s. Cette frontière, qui sépare la croûte superficielle du manteau, fut largement vérifiée par la suite à travers tout le globe ; on lui attribue le nom de *discontinuité de Mohorovičić* (en abrégé : le Moho). Peu après les études de Mohorovičić, Conrad enregistra une troisième phase longitudinale, notée P*, dans la partie inférieure de la croûte (à une profondeur de 17 à 25 km). Sa vitesse se situe entre celle des ondes P et $\bar{P}$, soit environ 6,3 km/s. Il interpréta la différence de vitesse entre les ondes $\bar{P}$ et P* par l'existence de deux couches principales à l'intérieur de la croûte : l'onde P* correspond à l'énergie réfractée de la couche basaltique sur le Moho, l'onde $\bar{P}$ provient des granites, c'est-à-dire de la couche solide, parfois affleurante, sur laquelle reposent uniquement des sédiments aux propriétés élastiques beaucoup plus faibles ; on la désigne souvent par le symbole P*g*.

La détection par Mohorovičić d'une première discontinuité sous la surface fut bientôt suivie par la localisation d'une deuxième, située presque à mi-chemin du centre de la Terre, et qui avait été proposée par Oldham. Des séismologues notèrent que, pour une distance de l'épicentre d'environ 100°, l'amplitude des ondes P et S s'affaiblissait et ne pouvait plus être détectée à des distances plus grandes. Après cette zone d'ombre, les phases P réapparaissaient nettement à environ 140°, mais elles avaient été retardées de près de 2 mn, de sorte que leurs durées de parcours ne coïncidaient plus avec la courbe de temps établie pour de plus courtes distances.

En 1913, B. Gutenberg, de l'université de Göttingen, établit numériquement une explication qui convenait parfaitement aux durées de parcours observées. A l'aide des courbes de temps dressées par E. Wiechert, Gutenberg calcula que les ondes P et S se propageaient respectivement avec une vitesse de l'ordre de 8,2 km/s et de 4,5 km/s sous la discontinuité de Mohorovičić ; la vitesse croissait ensuite beaucoup plus rapidement jusque vers 950 km de profondeur, puis plus lentement jusqu'à 2 900 km, profondeur à laquelle la vitesse des ondes P diminuait soudainement d'à peu près 40 %. Cette limite marque la frontière structurale entre le manteau et le noyau. Elle est connue sous le nom de *discontinuité de Gutenberg-Wiechert*. Les séismogrammes montrent que les ondes *S* peuvent voyager n'importe où au-dessus de cette frontière principale, indiquant que les matériaux du manteau doivent être rigides. Toutefois, les ondes S ne se propagent plus, sur au moins 2 000 km, sous la frontière du noyau. En conséquence, on a pu conclure que les 2 000 km externes du noyau avaient les propriétés d'un liquide.

On pourrait s'attendre à ce que la frontière entre le manteau et le noyau réfléchisse les ondes séismiques. C'est en effet ce qui apparaît nettement sur les séismogrammes. On désigne par *c* (de l'anglais core = noyau) les réflexions sur le noyau, en sorte que la réflexion directe des ondes P sur la frontière entre le manteau et le noyau se note P*c*P. En fait, lorsqu'une impulsion initiale rencontre la limite du noyau, seule une partie de son énergie se trouve réfléchie ; le reste est réfracté à l'intérieur du noyau. Au sortir de celui-ci, l'onde se divise de nouveau, une partie étant réfléchie et demeurant dans le noyau, le reste étant réfracté dans le manteau. On utilise le symbole K (de l'allemand Kern = noyau) pour les ondes transmises au travers du noyau.

Dans les années 1920, grâce à des séismographes plus perfectionnés et à une surveillance accrue des tremblements de terre, il fut possible de déterminer le départ des ondes retardées de type P à des distances angulaires situées entre 110 et 140°. A de telles distances, les ondes passaient obligatoirement à travers le noyau. On les désigna par PKP.

En 1936, la Danoise Inge Lehmann suggéra que les durées de parcours de ces ondes PKP pouvaient trouver une explication, si l'on admettait l'existence à l'intérieur du noyau de deux parties, une interne (ou graine) et une externe. Cette notion fut renforcée par Gutenberg et indépendamment par Harold Jeffreys, lorsqu'ils calculèrent les distributions de la vitesse moyenne à l'aide de l'analyse d'une multitude de séismogrammes. D'après leurs résultats, qui marquent une étape importante dans la séismologie, la vitesse des ondes P croît régulièrement dans le noyau externe jusqu'à environ 10,4 km/s ; dans le noyau interne, elle se tient aux environs de 11,2 km/s. Plus d'une trentaine d'années après la suggestion d'I. Lehmann, on réussit à localiser la frontière du noyau interne en détectant des ondes, désignées par PK*i*KP, qui avaient rebondi sur cette graine.

En comparant les impulsions relatives des ondes P*c*P et PK*i*KP, on peut calculer approximativement la densité des roches au sommet du noyau interne. Selon des estimations récentes, cette densité correspond à celle du fer lorsqu'il est soumis à la pression qui existe au centre de la Terre.

▼ ***Représentation schématique des trajets, à travers le globe, des différents types d'ondes séismiques, pour un foyer superficiel.***

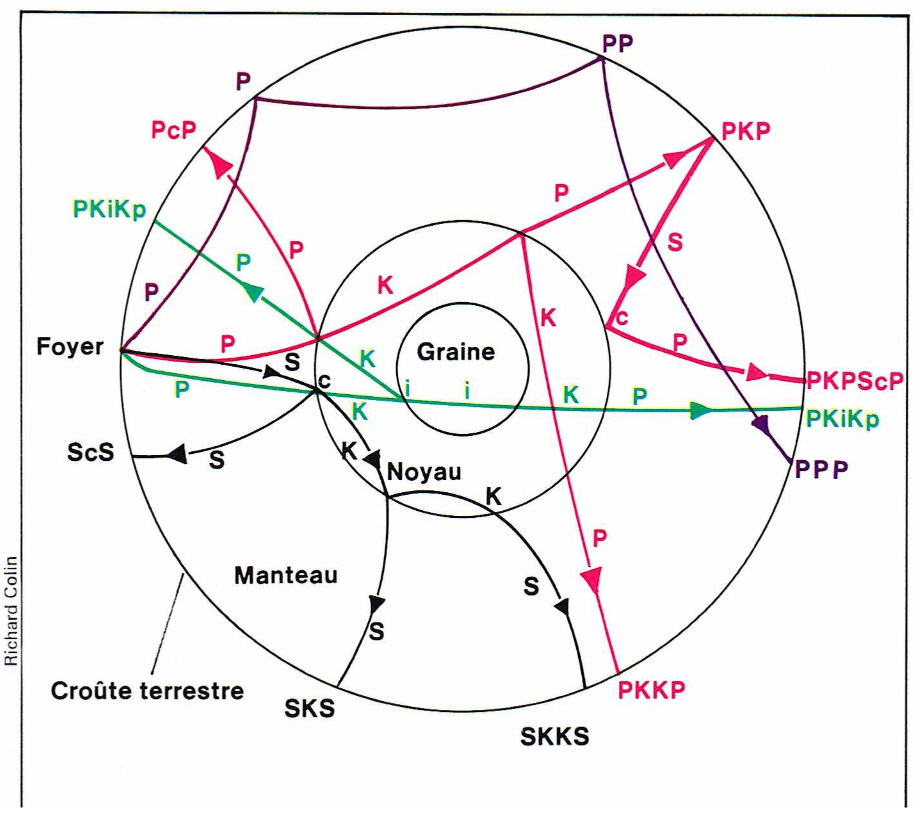

Richard Colin

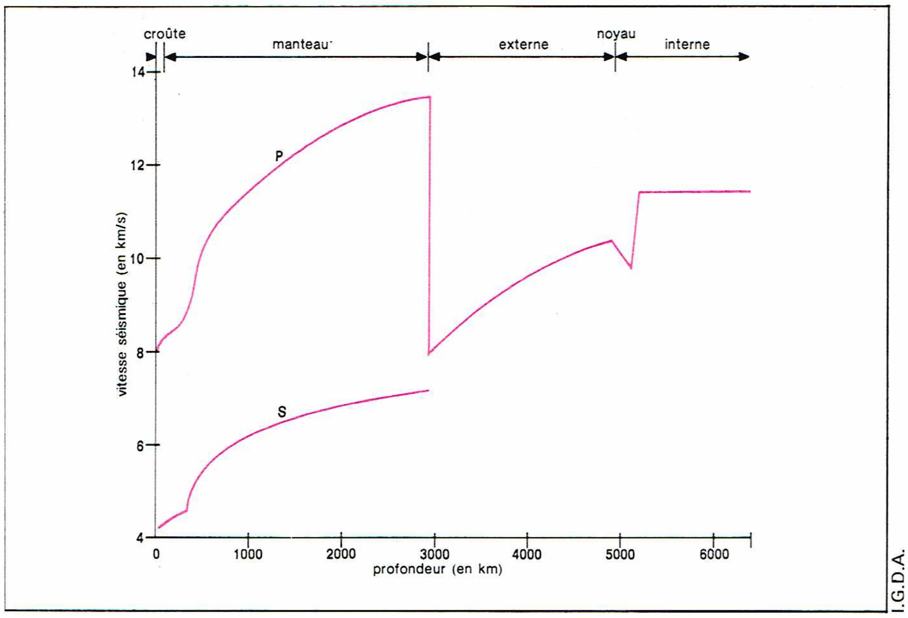

▲ ***Diagramme de la vitesse des ondes séismiques P et S à l'intérieur de la Terre.***

Apparemment, avec la découverte du noyau interne, toutes les frontières principales à l'intérieur de la Terre avaient été localisées. Cependant de nombreux séismologues furent convaincus (surtout avec l'étude de la propagation des ondes séismiques de grande longueur d'onde à travers la surface de la Terre) que la structure des quelques centaines de km supérieurs de l'enveloppe terrestre était complexe et qu'elle variait à certains endroits. Les vitesses des ondes P et S diminuaient d'une façon inexplicable, en beaucoup de régions géographiques dans une couche située au-dessous de la croûte.

Dans le premier quart de notre siècle, il a été établi que les vitesses des ondes séismiques longitudinales (V_P) et transversales (V_S) augmentent dans le manteau, en passant respectivement d'environ 8 km/s et 4,5 km/s sous le Moho à 13,6 km/s et 7,3 km/s à la frontière du noyau. Toutefois, Gutenberg suggéra en 1926 que l'accroissement régulier des vitesses séismiques avec la profondeur était interrompu dans la partie supérieure du manteau, à une distance approximative de 100 km.

Après la Seconde Guerre mondiale, les explosions artificielles ont permis une interprétation plus détaillée de la partie supérieure de l'enveloppe terrestre. Quelques explosions accidentelles importantes (comme la destruction de l'œuvre militaire de l'île de Heligoland) ont aussi procuré de nouvelles données aux séismologues, leur permettant de connaître avec précision le lieu et l'heure origine de ces séismes dont les effets vinrent s'enregistrer dans de nombreux observatoires. En 1957, date de l'Année géophysique internationale, les États-Unis et l'U. R. S. S. ont programmé une série d'explosions nucléaires souterraines, en installant un réseau plus dense de séismographes. On s'est ainsi aperçu qu'il existait une hétérogénéité importante non seulement dans la croûte, mais également dans le manteau.

En 1959, Gutenberg résuma les résultats d'investigations menées à l'aide de la propagation des ondes longitudinales et transversales. Il vérifia que la diminution de la vitesse des deux types d'onde commence en moyenne à des profondeurs de l'ordre de 50 km; les vitesses atteignent leur valeur minimale à une distance de quelque 150 km et prennent de nouveau leur valeur initiale (c'est-à-dire avant le début de la diminution) à une profondeur de 250 à 300 km. La diminution maximale dans les vitesses atteint 3 % pour les ondes P et 5 % pour les ondes S. La zone ainsi délimitée serait une couche à faible vitesse.

Une telle couche devrait être un guide d'ondes, ou canal, dans lequel toute libération d'énergie séismique serait confinée. Une petite partie de cette énergie se perdrait par réflexion et réfraction sur les hétérogénéités de la couche en la faisant vibrer; cela se répercuterait jusqu'à la surface, ce qui pourrait rendre compte de la vitesse de 5,9 à 6,5 km/s, observée pour les séismes artificiels (pour les tremblements de terre, les premières arrivées correspondent à des vitesses de 5,6 km/s). Des essais furent tentés pour repérer ces éventuelles ondes canalisées; leur présence avait déjà été signalée en 1953 par Caloi, en 1954 et 1955 par Press et Ewing; elle fut confirmée en 1961 grâce aux données recueillies par le réseau séismique de l'U. R. S. S. (Magnitsky et Khorosheva).

Néanmoins, une couche à faible vitesse limitée par des discontinuités n'est pas indispensable à la production de ce genre de phénomène. Si la vitesse possède un minimum à une certaine profondeur, toute libération d'énergie séismique aura tendance à y être canalisée. Par suite de l'accroissement de la vitesse dans les couches inférieures et supérieures, les rais séismiques reviendront vers le niveau à vitesse minimale et, après l'avoir traversé, y retourneront de nouveau.

Lors du « Projet international du manteau supérieur » (débuté en 1962 et coïncidant avec le développement rapide du réseau séismologique mondial), l'étude des oscillations libres de la terre, résultant des tremblements de terre importants aussi bien que d'ondes de surface à période longue, a permis d'affirmer l'existence de cette couche à faible vitesse dans le manteau supérieur, encore appelée *asthénosphère*.

Par la suite, de nombreux séismologues ont enregistré des variations régionales dans la position et les propriétés de cette couche. Anderson a montré, en 1967, que la diminution de vitesse dans l'asthénosphère diffère en profondeur et en intensité pour les zones océaniques et continentales, et pour les zones d'activité tectonique. Parallèlement, grâce aux courbes de dispersion obtenues par les ondes superficielles des séismes, des contrastes du même ordre ont été détectés à l'intérieur de la croûte. Ces résultats approximatifs apparaissent dans le tableau page 155, mettant en évidence différents types de croûtes.

▼ ***A gauche, variations, en km, de l'épaisseur de la croûte terrestre aux États-Unis; à droite, variations de la vitesse des ondes de compression dans le manteau supérieur.***

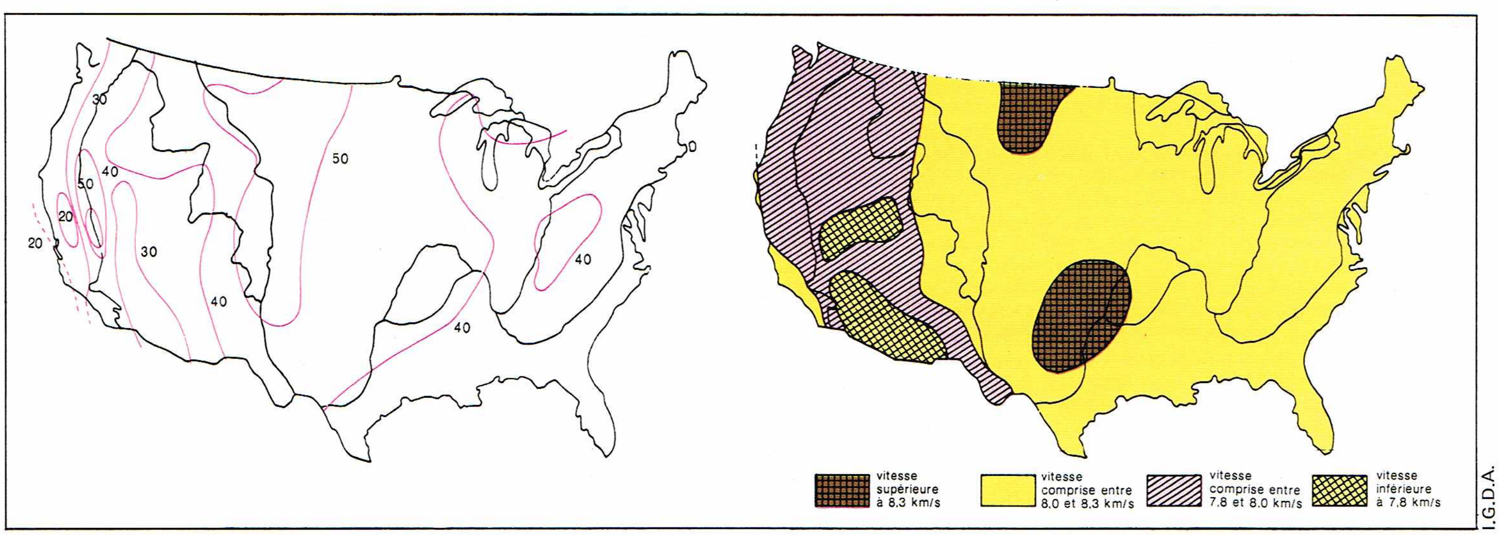

Type de croûte	Épaisseur de la croûte (km)	V_P dans le manteau supérieur (km/s)	Vitesses moyennes des ondes transversales			Caracté-ristique tectonique
			dans la croûte	dans le manteau supérieur jusqu'à 125 km	dans la croûte et le manteau supérieur jusqu'à 125 km de profondeur	
A Bouclier	35	8,3	3,72	4,70	4,42	Très stable
B Médio-continental	38	8,2	3,50	4,60	4,34	Stable
C Chaînes et bassins	30	7,8	3,27	4,40	4,11	Très instable
D Alpin	55	8,0	3,75	4,28	4,07	Très instable
E Arcs insu-laires	30	7,4 à 7,8	3,44	4,34	4,07	Très instable
F Plaine abyssale	11	8,1 à 8,2	3,80	4,48	4,45	Très stable
G Ride dorsale océanique	10	7,4 à 7,6	3,20	4,30	4,26	Instable

◀ ***Tableau récapitulatif mettant en évidence différents types de croûte et de manteau et leurs relations avec la vitesse de propagation des ondes séismiques.***

Ce tableau suggère une classification fondée sur deux types de croûte et deux types de manteau. D'après l'épaisseur des roches crustales, on peut distinguer une *croûte continentale* (de 30 à 40 km, et jusqu'à 60-70 sous les montagnes) plus épaisse que la *croûte océanique* de (10 à 15 km).

Les deux sortes de manteaux sont différenciées par leur stabilité et par les vitesses des ondes dans leur partie supérieure ; le manteau instable étant caractérisé par une couche à très faible vitesse et le manteau stable par une vitesse plus élevée des ondes P et une couche à faible vitesse moins accentuée. Cette dernière distinction traduit donc des différences de structure du manteau supérieur, non seulement entre le manteau océanique et continental, mais aussi à l'intérieur de ces deux types de manteau.

Par conséquent, si l'on emploie le terme de lithosphère pour désigner l'enveloppe solide regroupant l'écorce et une partie du manteau supérieur d'une épaisseur de 70 à plus de 100 km, il apparaît que la plupart de la surface de la Terre peut être divisée sans ambiguïté en deux structures distinctes : la lithosphère continentale (dans laquelle se rangent les types A, B, C, D, E) et la lithosphère océanique (comprenant les types F et G). La lithosphère continentale peut être subdivisée d'une part en une croûte continentale reposant sur un manteau stable (c'est-à-dire sur les types A et B), de l'autre en une croûte continentale recouvrant un manteau instable (c'est-à-dire les types C, D et E). De même pour la lithosphère océanique, selon que la croûte océanique repose sur un manteau stable (type F) ou instable (type G).

Une telle classification suggère que les blocs continentaux gardent leurs structures distinctes mais dévient les uns par rapport aux autres ou par rapport aux fonds des océans. Cette possibilité est étayée par la théorie de la dérive des continents et de l'expansion des fonds océaniques.

En première approximation, l'identification des matériaux qui constituent les diverses régions mises en évidence, peut être fournie par la variation de la vitesse des ondes P et S avec la profondeur. Ces vitesses dépendent de la densité de la matière qui les transmet, et de l'élasticité caractérisée par la rigidité et l'incompressibilité. Ces trois facteurs ne peuvent être déduits de la valeur des deux vitesses, mais une évaluation peut en être faite en tenant compte des données obtenues par la minéralogie expérimentale. En effet, ces dernières permettent d'établir des relations plus systématiques entre les variables de densité, de vitesse, de composition, de pression et de température, en ayant recours à d'autres paramètres comme la conductibilité électrique et la gravité.

En 1947, K. E. Bullen obtint d'importants résultats sur la variation de la masse volumique à l'intérieur de la Terre. Il a calculé que celle-ci s'accroît dans le manteau et passe d'environ 3,3 g/cm³ juste au-dessous de la discontinuité de Mohorovičić à environ 5,5 g/cm³ à 2 900 km de profondeur. Puis elle passe brusquement à 9,5 g/cm³ et atteint 11,5 g/cm³ à la partie inférieure du noyau extérieur. Dans le noyau interne se produit une forte augmentation. La pression a été évaluée à environ 1 million 1/3 d'atmosphères à la partie inférieure du manteau et à environ 4 millions d'atmosphères au centre de la Terre. Au terme d'un long raisonnement, Bullen arriva à la conclusion que le noyau interne se présente comme un solide. On pense qu'il contient principalement du fer et du nickel, et que le noyau externe est composé en majeure partie de fer en fusion.

D'après la localisation des foyers, la majorité des tremblements de terre est engendrée à l'intérieur de la croûte terrestre ou dans la plus haute partie du manteau supérieur, les tremblements de terre à foyers profonds (atteignant 700 km et plus) étant plus rares et se produisant principalement dans la ceinture circumpacifique. C'est pourquoi de nombreux chercheurs se sont particulièrement intéressés à la composition minéralogique des quelque 200 km supérieurs de notre globe. Les prospections séismiques ont apporté une aide considérable à la connaissance de cette partie externe de la Terre, car, la position de la source et le temps origine des explosions étant connus, elles ont permis de déterminer avec précision les temps des premières arrivées d'ondes.

Comme on l'a vu précédemment, deux ondes distinctes se propagent à l'intérieur de la croûte terrestre : les ondes P*, mettant en évidence l'existence d'une couche basaltique (leur vitesse s'échelonne entre 6,5 et 6,8 km/s), et les ondes *Pg* correspondant à une couche granitique (avec une vitesse d'environ 6 km/s). Or on n'enregistre pas d'ondes *Pg* sous les océans. C'est la raison pour laquelle, dans la plupart des modèles de la croûte, la couche basaltique comprend la partie inférieure de la croûte continentale, et s'étend sans interruption sous les océans où, puisqu'il n'y a pas de couche granitique, elle constitue la croûte entière.

En fait, la répartition des vitesses séismiques en profondeur a permis de détailler la composition de cette croûte océanique. Au-dessous des sédiments, la vitesse des ondes P (d'environ 5,07 km/s) révèle l'existence d'une *couche de transition*, d'épaisseur moyenne de 1,71 km ; puis les vitesses atteignent environ 6,69 km/s, se propageant dans la couche océanique d'une épaisseur approximative de 4,86 km. Il semble acquis de nos jours que la couche de transition se compose en surface, sur une épaisseur d'environ 500 m, de coulées de basaltes épanchés sous l'eau, avec une structure de laves en oreiller (pillow-lavas), caractéristiques des éruptions sous-marines.

Ces coulées sont, en majorité, des tholéites (basaltes subalcalins saturés, ou presque, en silice). Les basaltes sont dus à la fusion partielle des roches du manteau. Sous ces coulées de basalte, se trouvent des basaltes et gabbros avec une importante proportion de dykes

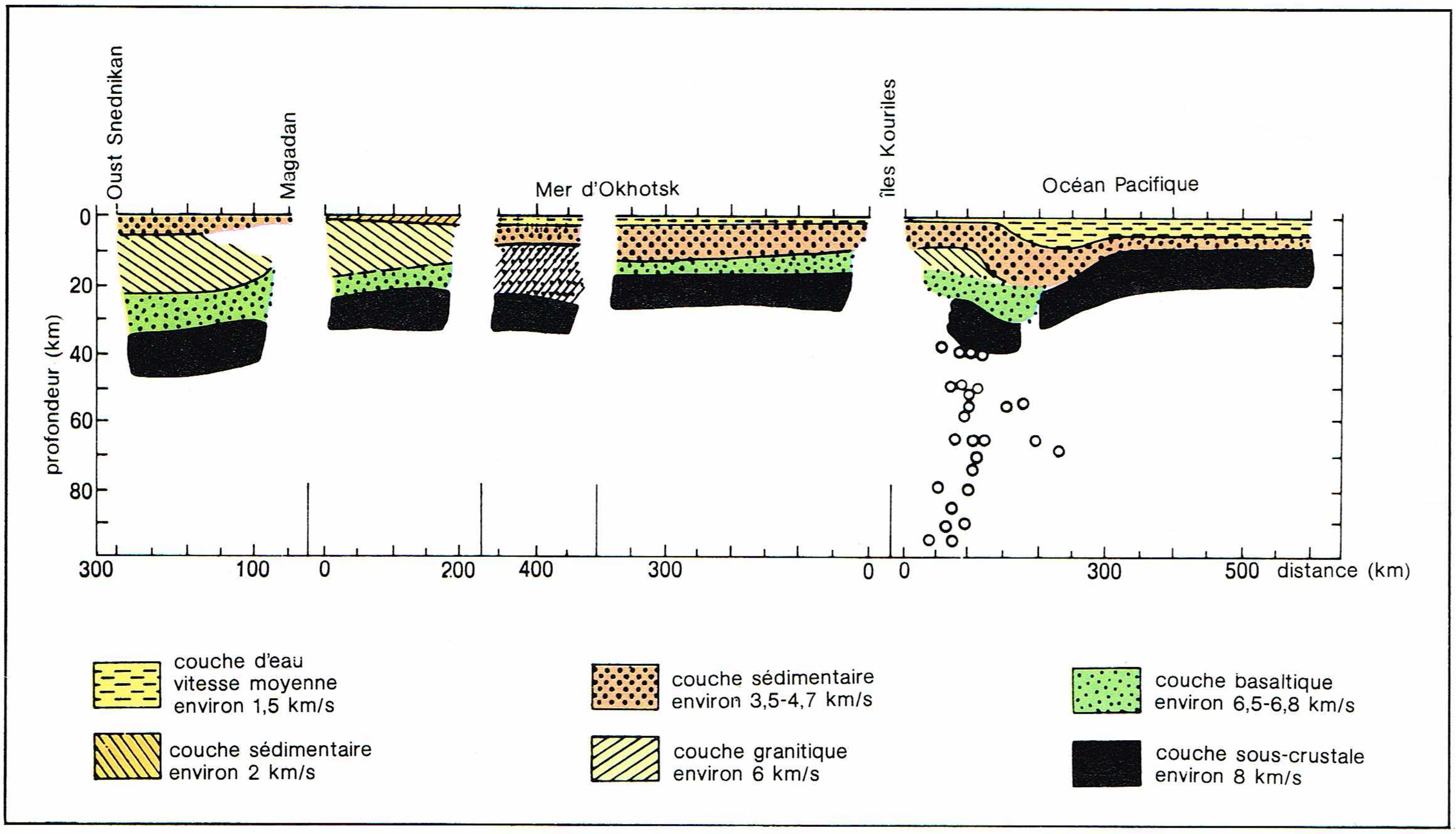

▲ Résultats d'un profil séismique à réfraction en Sibérie orientale, dans la mer d'Okhotsk et l'océan Pacifique occidental. On remarquera la différence de composition de la croûte terrestre entre la zone continentale, la zone océanique et la zone de transition. Les petits cercles indiquent les foyers du tremblement de terre.

(filons de laves injectés dans des fissures de cônes volcaniques). La base peut déjà être affectée par un léger métamorphisme (zéolite). En dessous, on trouve des gabbros qui ont subi un métamorphisme plus intense (amphibolite) et qui ont dû être formés à des températures supérieures à 400 °C. On ignore encore si ces gabbros forment la couche océanique ou s'ils font partie de la couche de transition. Suivant cette dernière hypothèse, la couche océanique serait constituée de roches péridotiques hydratées à environ 40 %.

Si l'on adopte la première de ces deux éventualités, la croûte comprend 5 km d'un matériau basaltique, obtenu par fusion partielle du manteau ; dans le second cas, seulement 2 km de basalte et 3 km de matériau du manteau.

L'étude de la croûte en Islande (qui est la représentation superficielle d'une frontière de plaques en écartement) apporte des données supplémentaires sur la question. Cette croûte atteint une épaisseur moyenne supérieure à 10 km et est uniquement constituée de basalte. Dans une zone active de 30 à 80 km de large, on trouve en surface des coulées de basalte avec une forte porosité et en conséquence une vitesse faible (de 2,75 km/s). Puis, la couche de transition s'étendant sur 2,15 km et formée de basaltes affectés par un métamorphisme zéolitique (vitesse de 5 km/s). Enfin, la couche océanique qui a une épaisseur de 5 à 13 km et semble correspondre au faciès à amphibolite (vitesse de 6,5 km/s). La correspondance entre la stratification séismique en Islande et sur les dorsales (lieux où l'écorce terrestre est engendrée en permanence par un apport de roches en fusion) suggère que la couche océanique est bien constituée par des gabbros affectés par un métamorphisme important.

La connaissance de la répartition de la vitesse séismique dans la croûte, d'une part, et des relations existant entre la vitesse et la densité pour les types de roches courantes d'autre part, permet d'évaluer la densité moyenne de la croûte continentale à environ 2,9. On a pu déduire de ces valeurs la densité moyenne la plus probable du manteau supérieur, soit 3,3 à 3,4. Cette estimation, qui s'accordait avec celle de Bullen, fut vérifiée en 1966 par Ewing, à l'aide de la propagation des ondes de surface. Par ailleurs, la vitesse des ondes P dans le manteau, immédiatement sous les régions stables et les bassins océaniques profonds, est généralement de l'ordre de 8,2 km/s. Cette propriété restreint la composition minéralogique du manteau supérieur à une combinaison d'olivine, de pyro-

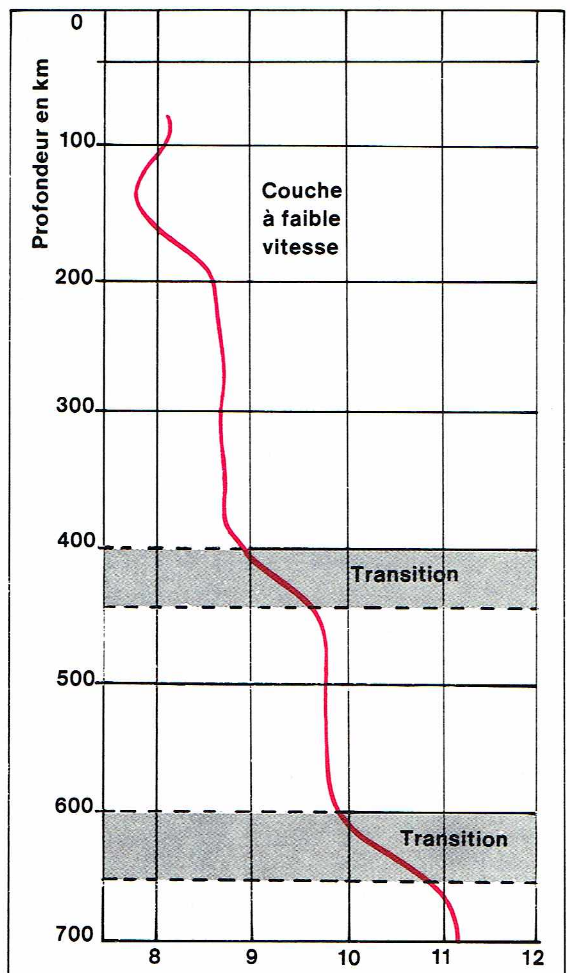

Vitesse des ondes P dans le manteau en km/s.

▶ Représentation graphique de la vitesse (en km/s) des ondes P dans le manteau.

xène, de grenat et peut-être, dans certaines régions, d'amphibole. Les deux types principaux de roches contenant ces minéraux sont des péridotites (olivine-pyroxène) et des éclogites (pyroxène-grenat). Des amphiboles peuvent aussi entrer dans la composition de ces roches. Ces relations ont donné lieu à deux hypothèses possibles sur la nature du manteau supérieur : est-il constitué de roches péridotiques ou éclogitiques?

La réponse peut être fournie par la comparaison de la densité de ces deux sortes de roches avec celle du manteau supérieur. Les densités des roches péridotiques qui pourraient entrer dans les principaux constituants du manteau supérieur se situent entre 3,25 et 3,38 avec une moyenne de 3,32. Les densités des éclogites s'échelonnent entre 3,4 et 3,65, avec une moyenne de l'ordre de 3,5 (Ringwood et Green, 1966). D'après la densité du manteau supérieur précédemment calculée, il semblerait par conséquent que l'on ait affaire à des péridotites plus ou moins serpentinisées.

Par ailleurs, la dispersion des ondes de surface a permis de rendre compte de la nature visqueuse de la couche à faible vitesse (ou asthénosphère) du manteau supérieur. Cette étude a conduit à proposer l'existence d'un fragment en fusion dans l'asthénosphère. De ce fait, une fusion partielle de péridotite pourrait être à l'origine du magma basaltique et, entre l'instant de fusion partielle et l'expulsion éventuelle du magma, une étape peut être envisagée pendant laquelle une partie existerait sous la forme de « globules » de basalte fondu. La montée de ce basalte pourrait être le facteur principal d'interaction thermique et mécanique entre le manteau et la croûte.

Pour comprendre l'interaction entre le manteau supérieur et la croûte, il est important de savoir si la densité moyenne des matériaux de l'asthénosphère est plus faible que la densité des matériaux qui la recouvrent.

En 1966, Beloussov a supposé que la fraction de volume de basalte liquide devait être de l'ordre de 10 %, ce qui abaisse la vitesse des ondes P dans l'asthénosphère d'environ 0,3 km/s et la densité de 0,1 g/cm^3. D'autres expériences sont venues confirmer cette hypothèse. Dans ces conditions, l'asthénosphère est moins dense que la lithosphère océanique. Des perturbations peuvent être expliquées au sommet de l'asthénosphère par la tendance de ses matériaux à s'élever tandis que les matériaux situés au-dessus de cette couche tendront à s'y enfoncer. Ce mouvement de subduction est à l'origine des processus internes de la Terre (séismes, plissements...) et vient renforcer la théorie de l'expansion des fonds océaniques.

Enfin, au-delà des 200 km supérieurs du manteau, la minéralogie expérimentale a permis d'attribuer les augmentations plus ou moins rapides de la vitesse avec la profondeur à une condensation de plus en plus importante de la structure cristalline.

Ces changements de phase pourraient expliquer la stratification du manteau et du noyau sans qu'il y ait de limite nette entre les subdivisions. A l'intérieur du manteau, par exemple, la variation de la vitesse en fonction de la profondeur est plus souvent graduelle que brusque. Par conséquent, il peut exister des couches dont l'existence n'est pas révélée par des ondes nettement réfléchies. Des accroissements soudains dans le taux d'augmentation de la vitesse ont été enregistrés vers 400 et 600 km de profondeur, puis peu avant le noyau, délimitant ainsi des zones de transition (voir figure ci-contre). Leurs frontières constituent des discontinuités de second ordre par rapport aux discontinuités du premier ordre qui se produisent lors d'un saut de la vitesse en fonction de la profondeur.

BIBLIOGRAPHIE

BYERLY P., *Seismology,* Prentice Hall, New York, 1942. - COULOMB J., *la Constitution physique de la Terre,* Albin Michel, Paris, 1952. - DOBRIN M. B., *Introduction to Geophysical Prospecting,* McGraw Hill, New York, 1960. - EIBY G. A., *About Eartquakes,* Harper, New York, 1957. - GUTENBERG B., *Physics of the Earth,* McGraw Hill, New York, 1939. - HOWELL B. F., *Introduction to Geophysics,* McGraw Hill, New York, 1959. - *International Dictionary of Geophysics,* Pergamon Press, Oxford, 1967. - RICHTER C. F., *Elementary Seismology,* W. H. Freeman & Co., S. Francisco, 1958.

GRAVIMÉTRIE

Le poids des objets est dû à la **force de gravité,** c'est-à-dire à la force avec laquelle la masse terrestre attire vers elle les corps qui se trouvent dans son rayon d'action.

En 1680, Newton expliqua le mouvement des planètes autour du Soleil et celui de la Lune autour de la Terre par une force d'attraction entre le Soleil et les planètes, et entre les planètes et leurs satellites. Il généralisa ensuite l'attraction de gravitation à deux masses m_1 et m_2 quelconques, érigeant cette interaction en loi universelle.

Ce dernier aspect de la gravitation se révèle fort utile à l'étude des propriétés de la Terre telles que son rayon, sa forme, sa masse et sa structure interne, et vient corroborer les notions acquises par d'autres branches de la géophysique, comme la géodésie et la séismologie.

Newton partit des lois de Kepler sur le mouvement des astres et se servit du principe de l'égalité de l'action et de la réaction pour formuler la *loi fondamentale de la gravitation.* On peut énoncer cette loi sous la forme suivante : deux points matériels quelconques exercent l'un sur l'autre des forces d'attraction directement opposées, dont l'intensité commune est proportionnelle à leurs masses m_1 et m_2 et inversement proportionnelle au carré de leur distance r :

$$F = K \frac{m_1 \times m_2}{r^2}$$

où K est la constante de la gravitation universelle. Cette formule fut vérifiée en 1798 grâce à des expériences de laboratoire effectuées par Cavendish. L'utilisation d'un dynamomètre très sensible lui a permis d'estimer la valeur de K à $6{,}673 \cdot 10^{-11}$ en unité M. K. S.

Le concept de gravité, associé aux lois de la dynamique, fournit une explication possible à la théorie actuelle de la forme de la Terre, car il s'accorde parfaitement avec les résultats de cette théorie et ceux des mesures géodésiques.

La masse de la Terre peut être obtenue si l'on connaît l'accélération de la gravité et la constante de gravitation K. Le problème serait simple si la Terre était parfaitement sphérique, mais on doit tenir compte de sa forme ellipsoïdale et de sa vitesse de rotation qui, comme on le verra par la suite, détermine les variations de la gravité. La valeur obtenue pour la masse atteint $5{,}97 \cdot 10^{27}$ g.

La densité se calcule en divisant la masse par le volume du globe, à savoir 5,517. Cette valeur est de beaucoup supérieure à celle des roches de la croûte qui tourne autour de 3,2-3,3. Comme on l'a vu précédemment, la densité augmente avec la profondeur; des calculs effectués avec l'aide des données séismologiques montrent que la densité du noyau est de 17 environ.

Variation de la gravité en fonction de la latitude

Comme, en première approximation, la Terre est un ellipsoïde de révolution, la valeur de la gravité ne peut pas être constante. Elle doit diminuer notamment avec la latitude, c'est-à-dire de l'équateur vers les pôles. L'effet de la force centrifuge, qui s'oppose à la gravité, joue également un rôle. (En fait, c'est sous l'action de sa propre force de gravitation et de la force centrifuge que la Terre prend la forme d'un ellipsoïde de révolution aplati aux pôles.) On devrait donc calculer deux valeurs de la gravité en chaque point de la surface terrestre : la valeur théorique calculée pour une Terre parfaitement homogène, ayant l'ellipsoïde de révolution comme surface externe, et la valeur réelle. La valeur théorique constitue la *gravité normale* de la Terre, elle conduit à l'équation :

$$\gamma = 978{,}049\,(1 + 5{,}288\,4 \times 10^{-3} \sin^2 \varphi - 5{,}9 \times 10^{-6} \sin^2 2\varphi)$$

où γ est l'accélération de la gravité normale, ne dépendant que de la latitude φ et exprimée en gals. Le gal est l'unité d'accélération égale à 1 cm $\cdot$ s^{-2}.

La comparaison entre les valeurs théoriques et les données expérimentales constitue l'étude du champ de gravitation terrestre, et en particulier de la forme du géoïde (voir chapitre *Géodésie*).

Mesures de la gravité

Les deux instruments classiques avec lesquels on mesure la gravité sont le *pendule* et le *gravimètre.* Le premier

P. Martini

▲ ***Aspect externe d'un* gravimètre *: c'est, avec le pendule, un instrument classique de mesure de la gravité.***

permet d'effectuer aussi bien des mesures absolues que relatives, tandis que l'on ne peut procéder qu'à des mesures relatives avec le second.

La relation qui existe entre la période T du pendule et la valeur g de la gravité s'exprime de la façon suivante :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

où L est la longueur du pendule. Les mesures absolues, qui peuvent être calculées à partir de cette formule, nécessitent l'emploi d'appareils très délicats et sont fort difficiles à obtenir. La précision est de l'ordre de 1,5 milligal ($= 1{,}5 \cdot 10^{-3}$ gal).

C'est la raison pour laquelle on procède surtout à des mesures relatives qui fournissent la différence de gravité entre une station absolue de référence et les autres. Si g_1 et g_2 sont respectivement les valeurs de la gravité en deux stations S_1 et S_2, et T_1 et T_2 les périodes correspondantes d'un même pendule en ces deux lieux, d'après la relation précédente, on voit que :

$$\frac{g_1}{g_2} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^2.$$

La détermination relative de la gravité en deux endroits est plus précise que la mesure absolue de la gravité en l'une des deux stations, puisqu'on peut confronter le rapport entre les deux valeurs de la gravité à celui établi entre les périodes. Par ailleurs, cette comparaison est indépendante de la longueur L du pendule, laquelle ne peut être déterminée avec la précision nécessaire.

Les plus célèbres mesures pendulaires absolues ont été effectuées à Postdam avec 981,263 3 gals ; à Washington avec 981,183 2 gals ; à Teddington avec 980,081 3 gals. L'erreur moyenne est de l'ordre de 1,5 milligal.

Une autre méthode, récemment introduite pour mesurer l'accélération absolue de la gravité, consiste à déterminer les temps de chute d'un corps dans le vide. Le calcul de temps si courts fut rendu possible grâce aux techniques modernes de l'électronique.

Les premières déterminations relatives furent effectuées avec des pendules ayant une demi-période d'environ une seconde et une longueur approximative d'un mètre. Par la suite, on construisit des appareils transportables, au maniement plus facile, ayant une demi-période d'une demi-seconde, et une longueur de 25 centimètres environ.

Les mesures gravimétriques en mer représentent des données scientifiques extrêmement importantes en raison des fortes anomalies enregistrées dans la plupart des bassins marins et des fossés océaniques. Mais, tandis que la terre ferme offre une plate-forme fixe aux instruments, la mer leur imprime les accélérations du mouvement ondulatoire. En général, de telles accélérations ne peuvent être distinguées de l'accélération de la pesanteur. En 1923, Vening Meinesz eut l'idée de créer un système de quatre pendules associés, permettant d'éliminer les accélérations transversales et longitudinales imposées par la mer.

Notons que, si ce système de pendule ne peut être utilisé à bord de navires, car les effets du mouvement d'ondulation sont excessifs, par contre, il devient possible d'opérer dans des sous-marins immobilisés à quelques mètres de profondeur.

On s'oriente de nos jours vers des appareils munis de plates-formes stabilisées gyroscopiquement, pouvant être utilisés sur des navires de surface (au moins par temps calme).

Les mesures gravimétriques établies avec des pendules sont des mesures dynamiques, puisqu'on observe alors le comportement des corps en mouvement. Des mesures statiques ont été obtenues peu à peu, soit en mer, soit sur la terre, grâce à des gravimètres.

Le **gravimètre** est un instrument simple, sensible et précis ; il fournit en outre des mesures très rapides, d'une minute ou deux (alors qu'une mesure pendulaire nécessite plusieurs heures).

Le principal élément d'un gravimètre est une masse suspendue à un ressort ; le poids de la masse allonge le ressort d'une longueur L, mesurée sur une échelle graduée. L'allongement est proportionnel à la gravité.

Si, en deux points différents de la Terre P_1 et P_2, on obtient de cette façon deux longueurs distinctes L_1 et L_2, on peut déduire la valeur de la différence de gravité $g_2 - g_1$ en ces points par la relation :

$$g_2 - g_1 = K\,(L_2 - L_1)$$

où K est la constante du ressort.

En pratique, on préfère chercher l'accroissement de la force élastique plutôt que la différence $L_2 - L_1$. Si le ressort s'est allongé (ou raccourci), quand on passe du point P_1 au point P_2, il suffira de faire en sorte qu'il reprenne sa longueur initiale, et de mesurer la force d'appoint nécessaire à cette opération. Un calcul assez simple donnera la variation de g.

Les gravimètres peuvent être de deux types : statique et astatique. Le *gravimètre statique* a une faible sensibilité mécanique, fondée essentiellement sur la qualité élas-

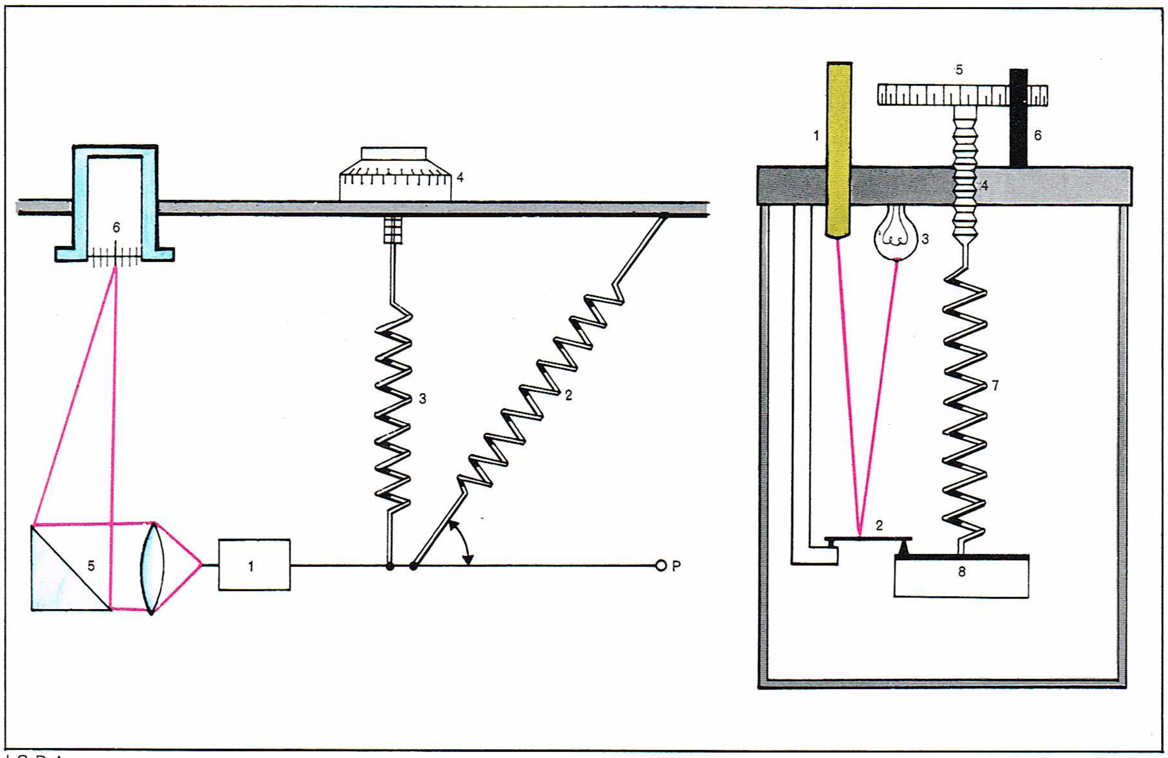

I.G.D.A.

◀ *Représentation schématique d'un gravimètre astatique, à gauche, et d'un gravimètre statique, à droite.*
Gravimètre astatique :
1, masse;
2, ressort principal;
3, ressort auxiliaire;
4, disque gradué avec une vis micrométrique;
5, dispositif optique;
6, réticule de la lunette.
La masse pivote grâce à un bras au point P et est soutenue par le ressort principal; sur le disque gradué, on lit la rotation nécessaire pour imprimer au ressort auxiliaire la torsion occurente afin que l'image de la tigelle, reliée à la masse, revienne sur une tache déterminée du réticule de la lunette.
Gravimètre statique :
1, lunette dotée d'un réticule;
2, miroir; 3, ampoule;
4, vis micrométrique;
5, disque gradué;
6, tige fixe pour la lecture des graduations du disque;
7, ressort; 8, masse.
Le disque gradué tourne jusqu'à ce que l'image du filament de l'ampoule, réfléchie par le miroir, coïncide avec un trait du réticule de la lunette; en regard de l'axe fixe, on lit directement la longueur du ressort, par laquelle on détermine la valeur de la gravité.

tique des ressorts employés; pour effectuer les lectures, il faut disposer de systèmes appropriés d'agrandissement, optiques ou électroniques. Dans le *gravimètre astatique,* le plus couramment utilisé, la sensibilité mécanique est bien plus grande, grâce à la mise en place de ressorts et d'un bras mobile, disposés de telle façon qu'ils traduisent la moindre variation de la pesanteur par un déplacement appréciable (équilibre presque indifférent). Pour un tel gravimètre, les systèmes d'observation, habituellement optiques, nécessitent des agrandissements moins importants.

L'obtention d'un gravimètre très sensible et de grande précision suppose l'intervention de plusieurs paramètres. Il faut tenir compte de la stabilité des ressorts dans le temps, des variations des constantes géométriques et élastiques du système en fonction de la température, et du changement des conditions d'équilibre avec la pression atmosphérique. C'est pourquoi l'on maintient l'appareil à température constante (avec une précision du millième de degré) en l'enfermant dans des enceintes isothermes réglées par des thermostats; on compense les variations de la pression barométrique au moment voulu, ou l'on place l'instrument dans un récipient à pression constante.

Les gravimètres astatiques peuvent être divisés en deux catégories selon leur mode de construction : ceux qui ont un ressort métallique et ceux dont le ressort est en quartz. Les premiers exigent plus de régulation thermostatique, les seconds fonctionnent correctement avec l'aide de récipients du type « vase de Dewar » et sont par ailleurs plus simples et plus légers.

En ce qui concerne les mesures en mer, on a d'abord employé des gravimètres enfermés dans des enceintes en étain et reposant sur le fond marin. A l'aide de télécommandes, des mesures gravimétriques ont pu être prises jusqu'à environ 100 m de profondeur. Par la suite, on a construit un type de gravimètre capable de flotter en surface; sa précision est moindre par rapport aux mesures effectuées à terre, en raison de l'influence des accélérations du mouvement d'ondulation de la surface. Le principe sur lequel il repose consiste à réduire le plus possible l'effet des accélérations horizontales à l'aide de suspensions, et celui des accélérations verticales, par l'élaboration des moyennes à partir d'une série de valeurs enregistrées dans un certain intervalle de temps.

Corrections de la mesure de gravité

L'étude des données gravimétriques repose sur la comparaison entre les valeurs observées et les valeurs théoriques, encore appelées normales. Les premières sont mesurées sur le terrain, dont elles reflètent les hétérogénéités topographiques, et diffèrent donc des secondes, calculées sur l'ellipsoïde de référence. Avant d'être comparées à leur valeur normale, les valeurs observées à des altitudes diverses doivent être ramenées à l'altitude zéro, c'est-à-dire à la surface équipotentielle coïncidant avec la surface d'équilibre des mers, ou géoïde.

Il est nécessaire pour cela de procéder à des corrections.

— La première correction est celle de **Faye,** encore connue sous l'appellation **correction à air libre.** Elle tient compte de l'augmentation d'intensité de la pesanteur entre l'altitude du point étudié et le niveau de la mer, en ramenant la mesure de la gravité à la surface du géoïde et en supposant donc qu'il n'y a pas de masses entre les deux. Elle s'élève environ à 0,31 milligal par mètre d'altitude.

— La seconde correction porte sur l'influence de l'attraction des masses situées au-dessus de l'ellipsoïde, et consiste à éliminer l'effet de cette tranche de terrain pour chaque valeur observée. Une telle correction nécessite l'estimation de la densité de ces masses, d'après les critères, pas toujours fiables, qui sont fournis par la connaissance géologique de la zone étudiée.

Ce procédé conduit alors à distinguer deux corrections : la première, dite **correction de Bouguer,** assimile ces masses à une plaque infinie d'épaisseur h (plateau de Bouguer) comme si la surface, au niveau de la station, était horizontale; la seconde dépend des déviations de la surface terrestre au-dessus ou au-dessous de ce plateau. La raison de cette subdivision repose sur le fait que les corrections de Bouguer, dans la majorité des cas, sont d'exécution facile et constituent la partie la plus importante. La seconde partie, dite **correction topographique,** est compliquée et relativement faible, ou négligeable, de sorte qu'elle ne réclame pas de calculs de haute précision.

Pour une densité égale à 2, la correction de Bouguer est de l'ordre de huit centièmes de milligal par mètre d'altitude.

Pour calculer la correction topographique, il est nécessaire d'effectuer un levé sommaire direct dans un rayon de 200 m puis de se servir de cartes à plus ou moins grande échelle pour des distances plus éloignées.

Anomalies gravimétriques

La différence entre les valeurs mesurées, puis réduites à l'ellipsoïde, et les valeurs normales correspondantes constitue pour les études géodésiques ce qu'on appelle l'**anomalie.**

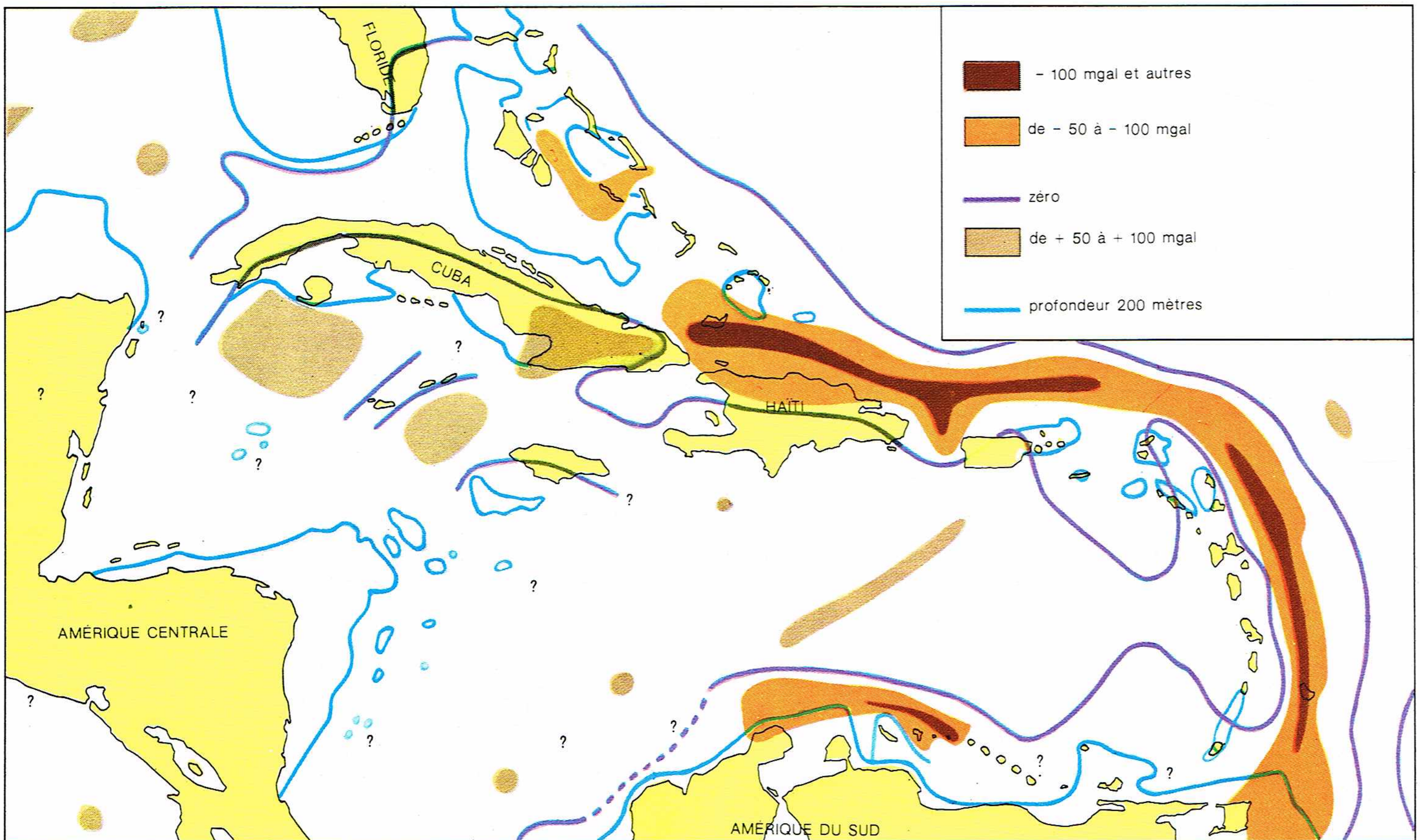

▲ *Cartes des* **anomalies isostatiques** *de la région des Antilles.*

Pour connaître la véritable allure gravimétrique d'une zone déterminée, on utilise tout un réseau de stations dont la densité varie beaucoup suivant les cas : pour les relevés de type géodésique, c'est-à-dire concernant l'étude des structures vastes et très profondes, une station par kilomètre carré doit être installée ; une station tous les dix kilomètres carrés suffira pour les structures moins profondes, ayant un intérêt secondaire.

Les valeurs correctes sont reportées au fur et à mesure sur une carte topographique, et l'on obtient un tableau de la situation en traçant les courbes d'égales valeurs d'anomalies ou **courbes isoanomales,** ou **isogammes.**

Il est évident que si la Terre était parfaitement homogène, les valeurs correctes devraient être toutes égales. En réalité, les isogammes sont presque toujours des courbes compliquées, qui reflètent la structure hétérogène de la croûte terrestre. Il y a des zones à anomalies positives et d'autres à anomalies négatives ; des anomalies d'entités différentes et de dimensions planimétriques se superposent, mettant en évidence des excès ou des déficits de densité par rapport à la valeur moyenne de la croûte, qui sont dus à la coexistence de roches de types divers. A l'intérieur de la croûte, la densité peut varier de 1,5 à 3,4. Toutefois, les plus faibles valeurs existent seulement dans des couches très superficielles ; à une certaine profondeur, la plus petite densité tourne autour de 2,6.

Outre les anomalies reflétant l'allure de la partie sédimentaire, plus superficielle, de la croûte, celles qui sont beaucoup plus fortes sont d'un très grand intérêt pour les études géodésiques. On leur attribue le nom d'*anomalies isostatiques,* et leur étude, conduite en parallèle à d'autres analyses de caractères géotechnique et séismologique, nécessite un traitement à part.

Les caractéristiques d'une carte d'**anomalies de Bouguer,** ainsi appelée parce que les valeurs mesurées ont été ramenées à l'ellipsoïde, peuvent dépendre de diverses causes géologiques. La forme de l'isogamme est importante, car les méthodes mathématiques et les informations géologiques, qui ont permis son élaboration, fournissent des renseignements très intéressants sur la structure du sous-sol.

Les isogammes peuvent être presque rectilignes (ou avec de faibles courbures), ce qui implique que les structures associées aux valeurs anormales sont très régulières, si elles sont peu profondes, ou alors qu'elles sont très profondes. A l'inverse, des isogammes accusant de fortes courbures traduisent des structures plutôt superficielles.

Généralement, tous les cas se superposent sur la même carte. En fait, il suffit d'avoir présent à l'esprit que les structures anormales importantes peuvent exister dans la surface jusqu'à plus de 40 km de profondeur. La première étape dans l'interprétation d'un relevé gravimétrique consiste à distinguer et à séparer les anomalies très localisées, et donc dues à des structures superficielles, de celles, vastes et régulières, dues à des causes profondes. Suivant les motifs de la recherche, on prend en considération les premières, jugeant les secondes comme une perturbation à éliminer et *vice versa*. Le premier cas se vérifie pour les études géologiques directes des couches plus superficielles, par exemple dans les recherches minières. Le second cas concerne les études à caractère général, relatives aux parties profondes de la croûte terrestre.

L'aspect d'une carte gravimétrique est varié et complexe. Les régions qui, après avoir été explorées par des mesures gravimétriques, n'offrent pas un panorama intéressant, reflétant la structure de la croûte terrestre, sont peu nombreuses. Malheureusement, l'interprétation des mesures ne permet pas d'obtenir des résultats quantitatifs très précis. En compensation, la carte gravimétrique est extrêmement expressive. La gravimétrie a fourni jusqu'à présent de précieux renseignements sur la structure de la croûte terrestre, s'accordant avec la théorie moderne sur la formation des chaînes de montagnes et des fosses océaniques, et sur la structure des masses continentales.

Pour fixer les idées, dressons le tableau des différentes anomalies de Bouguer, enregistrées suivant les types de croûtes (tableau page ci-contre).

Isostasie

La théorie de l'isostasie tente de fournir une explication à certaines grandes anomalies gravimétriques que l'on enregistre sur la Terre. Ces anomalies se rencontrent à proximité de chaque chaîne de montagnes et des arcs insulaires, comme ceux qui existent dans les Indes orien-

tales ou dans le golfe du Mexique. On les désigne précisément sous le nom d'**anomalies isostatiques.**

Quand on examine les anomalies de Bouguer, mesurées pour l'ensemble du globe, on observe qu'elles sont presque toujours négatives sur les terres et positives au-dessus des grands fonds sous-marins. Par conséquent, la pesanteur est inférieure à la moyenne dans les régions élevées, et elle est supérieure dans les régions océaniques. Cela signifie que sous les zones élevées, du moins jusqu'à une certaine profondeur, les roches ont une densité plus faible que sous les océans.

Plusieurs hypothèses isostatiques ont été avancées pour expliquer ce phénomène. La théorie de J. H. Pratt (1859) suppose que chaque colonne de roches à la surface de la Terre (niveau de la mer) est composée de matériaux de densité constante (ρ) égale à la moyenne des densités des différentes roches de la colonne, et qu'elle s'enfonce jusqu'à une certaine profondeur (D) de compensation. Cette densité doit être prise, pour chaque colonne, inversement proportionnelle à sa hauteur (h) au-dessus du niveau de compensation :

$$\rho\,(h + D) = \text{constante.}$$

Mais cette théorie ne tient pas compte de la répartition complexe des roches. En 1885, G. B. Airy a proposé une meilleure approximation des conditions réelles. Il a supposé qu'il existait à une certaine profondeur une surface de discontinuité dans les densités. Les blocs supérieurs de la croûte terrestre flotteraient sur un magma visqueux plus dense et s'y enfonceraient d'autant plus profondément qu'ils sont plus lourds, c'est-à-dire plus élevés.

Ces différentes tentatives, revues par W. A. Heiskanen, ont mené à la théorie finale de l'isostasie, admettant l'existence de colonnes de longueurs et de densités différentes. Cette théorie considère que la croûte terrestre (sial) est constituée de roches relativement légères (roches sédimentaires et granitiques, composées en grande partie de silice et d'alumine) et soutenue par des roches plus lourdes (sima basaltique) ; ces dernières auraient un comportement de type plastique. Il s'ensuit, d'après le principe hydrostatique d'Archimède, qu'à l'endroit où la croûte est plus épaisse (montagnes), elle pèse davantage et doit, pour se soutenir, s'enfoncer pour former « racine ». Autrement dit, le principe d'isostasie (du grec *stasis*, état, et *isos*, égal) suppose que sous une certaine profondeur de compensation, les pressions à l'intérieur de la Terre sont égales, ce qui implique que le poids de chacune des colonnes sus-jacentes de même section est le même, compte tenu de la courbure de la Terre.

On peut illustrer le concept d'isostasie en le rapprochant du phénomène familier et physiquement analogue de la glace flottant sur l'eau. En effet, pour chaque volume de glace émergeant de l'eau, il existe un volume beaucoup plus grand immergé dans l'eau ; le poids de l'eau déplacée par la partie immergée est égal au poids de la masse de glace flottante.

Par ailleurs, l'épaississement de la croûte vers le bas correspond à une substitution de masses pesantes du sima par des masses plus légères du sial et justifie, par conséquent, la présence des anomalies négatives de la gravité.

Des calculs fondés sur la théorie isostatique permettent de déterminer l'épaisseur de la croûte terrestre au-dessous des montagnes, mais le résultat n'est pas précis à cause des hypothèses de structure qu'ils sous-entendent; toutefois, on estime que cette épaisseur tourne autour de 60 km. Cette détermination s'accorde avec celle que l'on a obtenue par les données séismologiques.

Afin de vérifier l'authenticité des hypothèses de l'isostasie, les anomalies théoriques ont été calculées pour chaque région de notre globe et ont été confrontées aux anomalies qui avaient déjà été observées. Dans beaucoup de cas, l'accord a été parfaitement réalisé. Ainsi, l'absence d'anomalies isostatiques dans des régions où la sédimentation est rapide, comme les deltas du Nil, tend à prouver que la croûte s'enfonce aussi vite que les sédiments se déposent et que l'on a donc affaire à des transferts de masse sous la croûte.

Le fait que l'équilibre isostatique tende spontanément à se rétablir lorsqu'il a été perturbé rend compte de la plupart des phénomènes géologiques (comme l'érosion et la sédimentation). Mais on ne peut s'attendre à ce que cette théorie vienne confirmer en tout point les contrôles numériques effectués. Néanmoins cette dernière constatation ne doit pas nécessairement infirmer la validité du principe d'isostasie. En effet, la raison en est simple et rejoint la principale hypothèse faite, c'est-à-dire que la croûte terrestre repose sur un substrat en état d'équilibre hydrostatique. Or il n'est pas dit que l'équilibre de la croûte terrestre soit toujours du type statique et non du type dynamique.

On s'est aperçu que les calculs fondés sur l'isostasie ne justifiaient pas la présence d'anomalies gravimétriques

Tableau des différentes anomalies de Bouguer

Croûte	Anomalies (en milligal)	Remarques géologiques
Croûte continentale Bouclier	− 10 à − 30	Peu ou pas de sédiments
Médio-continentale	− 10 à − 40	Sédiments post-cambriens
Chaînes et bassins	− 200 à − 250	Volcanisme
Alpin	− 200 à − 300	Soulèvement récent rapide
Grands arcs insulaires	− 50 à + 100 sous le niveau de la mer	Fort volcanisme, plissement, faillage intense
Croûte océanique Bassins océaniques profonds	+ 250 à + 350	Sédiments minces
Médio-océanique (ride dorsale)	+ 200 à + 250	Peu de sédiments, volcanisme actif

◀ ***Tableau des différentes anomalies de Bouguer, enregistrées suivant les types de croûtes.***

▶ *Variations de la densité, de la gravité et de la pression en fonction de la profondeur, selon des données dérivées de considérations gravimétriques et séismologiques.*

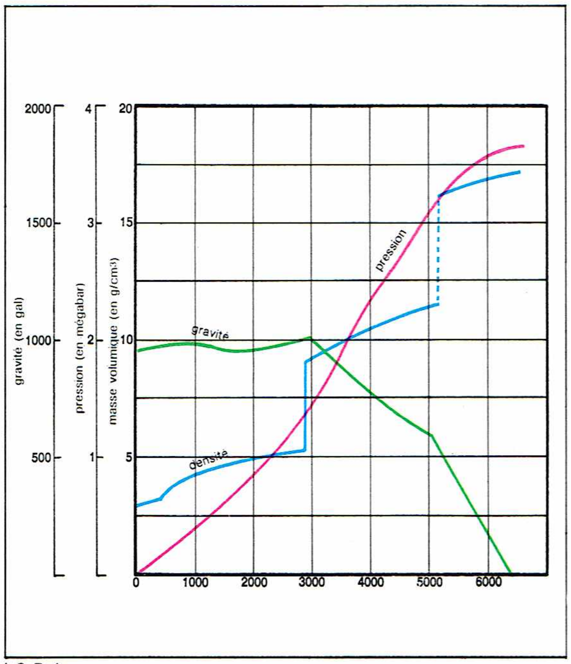

I.G.D.A. N. Cirani

▼ *Le fait que l'équilibre isostatique tende spontanément à se rétablir lorsqu'il a été perturbé rend compte de la plupart des phénomènes géologiques, et notamment de l'érosion. Ici, cette falaise près du cap de Bonne-Espérance souligne bien le tracé de l'ancien rivage.*

pour des systèmes montagneux en formation ou très jeunes. On peut expliquer ce phénomène par le fait que chaque chaîne de montagnes doit traverser, lors de sa formation, une période pendant laquelle son équilibre sera dynamique et non statique. C'est-à-dire que, durant une telle période, d'autres forces actives doivent intervenir, outre celle d'Archimède, contrebalançant la résistance due à l'attraction.

En fait, de tels écarts par rapport à la normale ont été enregistrés pour tout processus géologique en évolution, et pour les zones de déformations très récentes. Les anomalies isostatiques peuvent résulter des tensions qui s'exercent encore sur ces régions, ou bien elles peuvent être déjà en diminution par suite du réajustement isostatique. Le cas de la Scandinavie en est une bonne illustration.

Lors des glaciations quaternaires, qui remontent à plus d'une dizaine de milliers d'années, la croûte continentale s'est abaissée sous le poids de la couche de glace (épaisse de plusieurs kilomètres). Elle commença à reprendre sa position initiale après la fonte de cette couche. Les soulèvements postglaciaux de la Scandinavie, de l'Alaska, du Canada et des îles de la mer de Barents se sont effectués très rapidement, atteignant de nos jours plusieurs centaines de mètres. Le soulèvement de la Scandinavie a la forme d'un dôme s'élevant des régions périphériques de la Scandinavie vers le centre, où sa hauteur est d'environ 300 m. Le taux d'élévation a été estimé à environ 10 cm/an peu après la fonte des glaciers ; à présent, elle n'est que d'un centimètre par an au centre de cette zone. A partir d'une extrapolation de la courbe du soulèvement en fonction du temps, on s'attend encore à une remontée de 150 à 200 m. Il existe une anomalie isostatique négative de plusieurs dizaines de milligals au-dessus de la partie centrale de cette zone. Plus près du bord, les anomalies isostatiques sont positives. Par conséquent, il y a une corrélation étroite entre les mouvements actuels et le champ de gravité, et l'on peut expliquer la présence de telles anomalies par un réajustement isostatique encore en évolution.

Il s'ensuit que la théorie isostatique a seulement une valeur statique, qui est vérifiée sur la majeure partie de la surface terrestre.

L'existence de vastes anomalies ne s'associant pas à un équilibre isostatique a permis de mettre en évidence plusieurs phénomènes importants toujours en action, qui font partie des processus orogéniques. Une bande de fortes anomalies négatives a été repérée dans les Indes océaniques et orientales, et à l'intérieur de l'océan Pacifique, qui sont des zones de grande activité tectonique, due à l'existence de nombreux volcans ou à la fréquence des tremblements de terre. Ces anomalies coïncident avec la présence de fossés océaniques très profonds bordant l'alignement des îles de Sumatra, de Java et de Timor, l'ensemble de la péninsule de Kamtchatka et des îles Kouriles, ainsi que les archipels du Japon et de la Tonga.

Vening Meinesz a interprété ces anomalies par un déficit de masse dans les fossés de grande profondeur. Il a expliqué ce phénomène par l'existence, sous la croûte des fossés, de deux courants horizontaux opposés se courbant vers le bas lors de leur rencontre et entraînant dans le manteau un peu de croûte légère. En réalité, les études séismiques ont montré que ce déficit de pesanteur dans les fossés devait être attribué à l'accumulation de vases et autres dépôts légers. Mais la présence d'anomalies positives, entourant la bande d'anomalies négatives, et relativement plus faibles, donne à penser que l'équilibre isostatique est tout de même réalisé pour une grande étendue de la croûte, grâce à des courants subcrustaux.

Le géophysicien américain J. Barrell a été le premier à introduire la notion d'une lithosphère — plaque rigide et donc cassante où les séismes sont possibles, flottant sur une couche visqueuse —, afin d'expliquer que le principe de l'isostasie avait une valeur statique. On attribue actuellement l'enfoncement de la lithosphère dans l'asthénosphère à la densité plus forte de la première plaque. Dans le cas de la Scandinavie, la lithosphère continentale se réajuste par fluage en profondeur dans l'asthénosphère, depuis quelques milliers d'années, à la fonte de sa calotte glaciaire. D'après la tectonique des plaques, l'existence des fossés océaniques associés à des guirlandes d'îles est

l'expression superficielle de l'enfoncement de la lithosphère océanique sous les arcs insulaires. La friction provoque des déséquilibres qui se traduisent par des séismes localisés dans la plaque lithosphérique en train de couler dans l'asthénosphère. Du fait de l'évolution thermodynamique lente du système plaque plongeante-asthénosphère, un enfoncement continu de la plaque résulte en une évolution superficielle discontinue.

Applications de la gravimétrie aux recherches géologiques

Si l'on fait abstraction des applications à but industriel, et en particulier pour la recherche des hydrocarbures, les cartes gravimétriques peuvent être d'une aide précieuse aux études géologiques.

Une telle possibilité se fonde sur les différences de densité entre les types variés de roches. En général, les formations sédimentaires ne dépassent pas 2,66, les roches métamorphiques et ignées sont toujours supérieures à 2,65, et les roches fortement basiques atteignent 3. De telles valeurs correspondent à la partie superficielle de la croûte, c'est-à-dire celle qui intéresse précisément les études à caractère géologique.

A l'intérieur des couches sédimentaires, des différences notoires de densité peuvent exister entre les formations de sédimentation plus récentes, et donc moins compactes, et celles, plus anciennes, généralement plus lourdes. Il est possible ainsi de passer des valeurs de 1,5, ou en tous les cas de moins de 2, pour les matériaux à l'air libre, à 2,65 pour les calcaires compacts.

Les recherches géologiques qui peuvent être poursuivies à l'aide des mesures gravimétriques sont de types variés. Citons par exemple le repérage et l'étude des bassins sédimentaires, dans lesquels les terrains de remplissage ont en général une densité plus faible que celle des roches du fond. L'investigation de vastes zones dans lesquelles un soubassement est couvert de matériaux plus légers, est aussi très révélatrice; les anomalies de la gravité peuvent délimiter des zones en saillie (horst) ou en dépression (graben), et localiser les failles éventuelles associées à de telles structures. De même, les possibilités de découvrir des dômes de sel permettent souvent de repérer des gisements d'hydrocarbures, car ces derniers sont associés, dans certaines régions, aux premiers.

Si l'on passe aux anomalies de dimensions encore plus petites, on a affaire aux structures géologiques particulières, plus localisées; cela rentre davantage dans le domaine technique de la prospection géophysique.

GÉOMAGNÉTISME

Le champ magnétique terrestre

En première approximation, le champ magnétique de la Terre peut être assimilé à celui d'un dipôle situé dans le noyau du globe, mais pas exactement en son centre. L'axe magnétique passe en effet à environ 1 200 km du centre de la Terre.

On peut définir le champ magnétique en tout point de la Terre par son **intensité** et sa **direction**. Cette dernière, à son tour, peut être décomposée en deux paramètres : la *déclinaison,* c'est-à-dire l'angle horizontal entre le champ et la direction du nord géographique, et l'*inclinaison,* qui est l'angle entre le champ et l'horizontale. Il existe des cartes qui donnent la répartition sur la surface du globe de l'intensité du champ, de la déclinaison et de l'inclinaison, et qui sont mises à jour périodiquement.

Les paramètres intéressants sont reportés au fur et à mesure sur ces cartes, et l'on trace les lignes de valeurs identiques : les lignes d'égales déclinaisons sont appelées *isogones,* celles d'égales inclinaisons *isoclines.* Les lignes qui représentent les valeurs d'une des composantes du champ, ou sa valeur totale, sont dites *isodynamiques.* On utilise souvent les composantes verticale et horizontale du champ au lieu de son intensité totale, c'est-à-dire, respectivement, la projection du champ sur la direction verticale et sur le plan horizontal.

Le champ magnétique prend ses valeurs maximales à proximité des pôles et décroît à mesure que l'on se rapproche de l'équateur. L'unité de mesure adoptée est l'*œrsted* et correspond à une ligne de force par centimètre carré; comme l'œrsted représente une grande unité, on préfère souvent mesurer le champ en *gammas,* 10^5 γ équivalant à 1 œrsted. La valeur maximale du champ se situe au voisinage du pôle Sud et est de l'ordre de 0,7 œrsted (70 000 γ) ; la valeur du champ n'est que de 0,33 œrsted (33 000 γ) près de l'équateur.

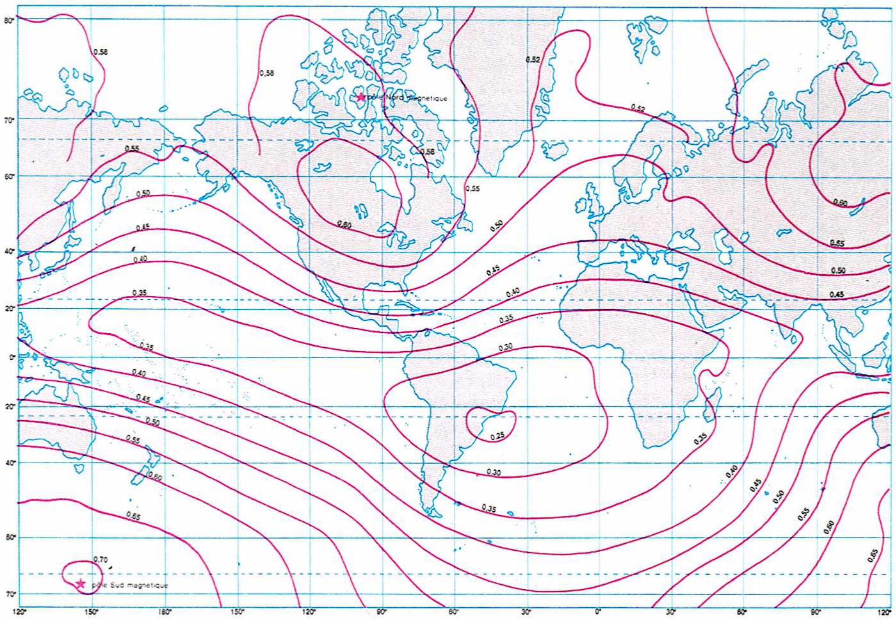

I.G.D.A.

▲ *Cartes d'égale intensité du champ magnétique terrestre (mesures en œrsteds, établies en 1945).*

Les propriétés magnétiques des roches

La description du champ magnétique terrestre, telle qu'on vient de la donner, n'a de sens que si l'on se réfère aux valeurs moyennes. En effet, s'il est vrai que la source peut être schématisée en un dipôle situé à proximité du centre de la Terre, il existe par ailleurs des irrégularités très importantes qui ont leur origine dans la croûte terrestre. Ces irrégularités sont dues aux types variés de roches qui se comportent comme de petits dipôles disposés différemment suivant les régions. Cette distinction conduit à considérer en plus du *« champ dipolaire »,* qui rend compte de plus de 90 % du champ magnétique terrestre actuel, un *« champ non dipolaire ».*

Si l'on considère ce dernier en tout point de la Terre, on peut déterminer le champ magnétique par la quantité de flux magnétique créé. Le flux B, exprimé en gauss, et le champ H sont reliés par l'équation :

$$B = \mu H$$

où μ est la perméabilité, c'est-à-dire la capacité d'un corps à faciliter le passage du flux.

Tout corps soumis à un champ magnétique tend à attirer ou à repousser le flux. Les corps qui concentrent le flux sont dits *paramagnétiques :* il y a apparition de pôles positifs aux points de sortie des lignes de force du champ ; ceux qui repoussent le flux sont dits *diamagnétiques :* ils présentent des pôles positifs aux points d'entrée des lignes de force du champ extérieur. Parmi les corps paramagnétiques, citons les métaux alcalins, le platine et le palladium, et la plupart des roches. Aux seconds corps se rattachent la majorité des gaz (sauf l'oxygène), l'eau, beaucoup de métaux et pratiquement tous les composés organiques. Dès que le champ magnétisant disparaît, ces deux types de corps perdent leur polarisation. On peut définir la *susceptibilité* (K) de ces roches, c'est-à-dire leur capacité à devenir aimantées, par le rapport de l'intensité de leur aimantation (I_m) à l'intensité du champ (H) en présence :

$$K = \frac{I_m}{H}.$$

Pour les corps diamagnétiques, K a une valeur très faible et même négligeable en prospection géophysique.

Parmi les roches dites paramagnétiques, certaines contiennent des *corps ferromagnétiques* (au sens large) comme le fer, le nickel, le cobalt et des composés comme la magnétite et la pyrrhotite. Leur perméabilité est fonction de l'intensité du champ. Si l'on place ces corps dans

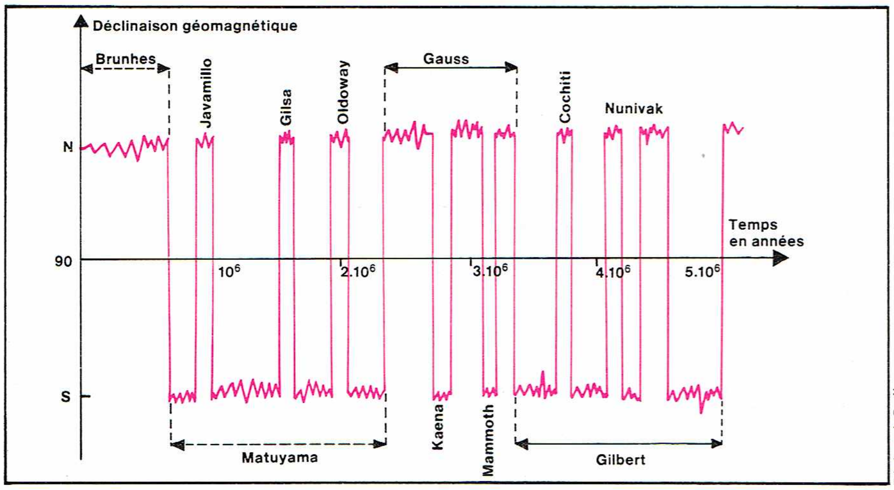

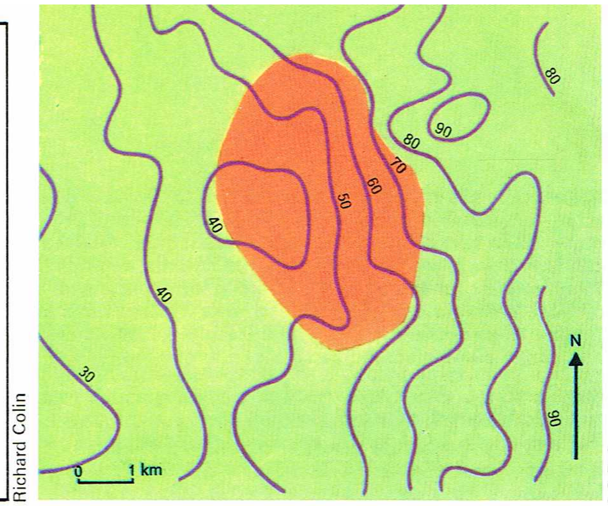

▲ *A gauche, variations du champ magnétique terrestre pour les 5 · 10^6 dernières années. A droite, carte de l'anomalie magnétique négative existant au-dessus d'un diapir de sel au Texas (en orangé). Les lignes bleues indiquent l'augmentation, vers la droite, de l'intensité de la composante verticale du champ magnétique terrestre mesuré en gammas (10^{-5} œrsted); l'irrégularité des lignes dans la zone centrale du dessin est provoquée par l'existence dans le sous-sol d'un diapir salin dont le sommet est à une faible profondeur (d'après Peters).*

un champ magnétique et que l'on ramène ensuite l'intensité du champ à zéro, une partie de l'aimantation induite subsiste : il y a *aimantation rémanente.* Les corps capables d'acquérir une telle aimantation sont dits *magnétiques.*

Les degrés de magnétisation des roches dépendent surtout de la proportion de magnétite qui entre dans leur composition. En effet, les gisements de ce minéral produisent de telles variations dans l'intensité et la direction du champ magnétique terrestre qu'une simple boussole suffit à les mettre en évidence. Les roches les plus magnétiques sont les roches ignées à composition basique comme le gabbro (susceptibilité magnétique 0,001) et le basalte (0,003) ; les granites sont moyennement magnétiques. Les roches sédimentaires comme les argiles et les calcaires se situent au bas de l'échelle.

Par conséquent, l'étude des irrégularités du champ magnétique terrestre, auxquelles on attribue le nom d'*anomalies,* par analogie avec la gravimétrie, permet d'explorer les caractéristiques de la surface de séparation entre les roches sédimentaires et le socle cristallin sur lequel elles s'appuient.

Le paléomagnétisme

L'utilisation du magnétisme rémanent des roches pour l'étude du champ géomagnétique dans le passé constitue ce qu'on appelle le *paléomagnétisme.* C'est aux scientifiques français L. Néel de l'université de Grenoble et E. Thellier de l'université de Paris, ainsi qu'au Japonais T. Nagata, que le paléomagnétisme doit son fondement physique. Vers les années 1950, les écoles britanniques dirigées par P. M. S. Blackett et S. K. Runcorn donnèrent au paléomagnétisme une valeur plus importante.

Les roches contenant des minéraux ferromagnétiques en quantité suffisante possèdent une aimantation permanente qu'elles ont acquise par un des 5 mécanismes suivants.

— Lorsqu'une roche ignée se refroidit de son point de Curie (température au-dessus de laquelle la roche perd la plus grande partie de son aimantation) à une température inférieure, elle acquiert une aimantation qui est, dans la majorité des cas, parallèle au champ ambiant. C'est l'*aimantation thermorémanente,* notée *A. T. R.*

— Les roches sédimentaires sont formées à partir de sédiments d'abord en suspension dans l'eau (de mer, de lac ou de rivière) et dont les grains s'orientent parallèlement au champ ambiant, au moment du dépôt. C'est l'*aimantation rémanente détritique.*

— Les minéraux qui subissent des modifications chimiques (métamorphisme, diagenèse...) peuvent s'orienter parallèlement au champ ambiant, après que la roche a été formée. C'est l'*aimantation rémanente chimique.*

— Lorsqu'on expose une roche à un champ magnétique pendant un temps très court, à température ordinaire, elle acquiert une *aimantation rémanente isotherme,* notée *A. R. I.*

— Enfin, si l'on place une roche pendant longtemps dans un champ magnétique, même faible, à basse température T, elle acquiert une aimantation proportionnelle à log T, appelée *aimantation rémanente visqueuse.*

Par différents procédés (démagnétisation par champ alternatif, démagnétisation thermique), on cherche à éliminer dans l'échantillon considéré les aimantations parasites (en particulier l'A. R. I. et l'aimantation rémanente visqueuse) pour étudier l'aimantation acquise lors de sa formation. On peut ainsi déterminer, sur l'échantillon préalablement orienté, la direction du champ géomagnétique qui régnait sur le globe à ce moment-là.

En prélevant des échantillons dont l'âge s'étend de 10^5 à 10^6 années et en établissant une moyenne des paramètres magnétiques mesurés, on a pu montrer que tout se passe comme si le champ magnétique terrestre avait toujours eu une géométrie dipolaire centrée sur la Terre. La mesure de la déclinaison et de l'inclinaison de l'aimantation rémanente a également permis de déterminer la position du pôle par rapport à celle du bloc sur lequel ont été prélevés les échantillons. Les résultats ont révélé que les pôles mesurés dans les roches anciennes ne correspondent pas au pôle Nord actuel. En traçant la courbe du déplacement polaire, Runcorn s'aperçut que la courbe obtenue par l'étude du « magnétisme fossile » des roches américaines s'écartait vers l'ouest de celle des roches européennes. Cette constatation ne s'accordait pas avec l'existence du dipôle géomagnétique axial. On fut donc conduit à expliquer le dédoublement des courbes de déplacement polaire par celui d'un seul continent en deux autres : l'Amérique et l'Europe. Cette découverte vint renforcer l'hypothèse de Wegener et fut le point de départ du renouveau de la théorie de la dérive des continents. Les recherches entreprises depuis dans de nombreux pays vinrent corroborer cette théorie.

Par ailleurs, les études sur le paléomagnétisme des laves récentes ont montré que le champ magnétique terrestre semblait avoir subi des « inversions » (changement de sens sans changement appréciable de direction) au cours du temps. Au début des années 1950, cette découverte fut controversée par des géophysiciens qui s'appuyaient sur le fait que certaines roches peuvent acquérir une aimantation rémanente de direction opposée à celle du champ ambiant *(phénomène d'auto-inversion).* Néanmoins, de nombreuses recherches permirent de démontrer la simultanéité des inversions du pôle magnétique terrestre à l'échelle du globe.

Quatre périodes magnétiques principales furent découvertes dans le proche passé de la Terre. Chacune avait une durée de l'ordre de plusieurs centaines de milliers d'années, ce qui laissait supposer un phénomène périodique d'inversion. En 1963, on baptisa chaque époque du nom de celui qui l'avait découverte. Il y aurait donc :

— la *période de Brunhes,* caractérisée par une polarité « normale », qui remonte de l'époque actuelle jusqu'à 700 000 ans environ ;

— la *période de Matuyama,* dite « inversée », qui s'étale de 700 000 à 2,4 millions d'années ;

— la *période de Gauss,* de 2,4 à 3,3 millions d'années, caractérisée par un retour à la normale ;

— enfin la *période inverse de Gilbert,* de 3,3 à 4,05 millions d'années.

Plus tard, on découvrit qu'il y avait eu des inversions de durée beaucoup plus courte. On les appela « événements » et on leur attribua le nom du lieu de leur découverte : événement « inverse » de Mammoth durant la période normale de Gauss, événements « normaux » de Javamillo et d'Oldoway durant la période inverse de Matuyama, et ainsi de suite.

D'une manière générale, on distingue : des *périodes normales* caractérisées par un champ de même sens que le champ actuel, et des *périodes inverses,* avec un champ de sens contraire à celui du champ actuel.

Vers 1960, des mesures du champ géomagnétique au-dessus des océans ont montré que des anomalies magnétiques s'étiraient alternativement en bandes positives et négatives, au-dessus des rides médio-océaniques. Deux jeunes chercheurs britanniques, F. J. Vine et D. H. Matthews, attribuèrent ce phénomène à la création continue de basaltes dans l'axe des rides qui, par suite de

l'écartement progressif des côtés de la ride, se seraient formées durant les périodes successives de champs « normal » et « inverse », en acquérant le champ magnétique ambiant lors de leur refroidissement. Cette hypothèse s'accorde parfaitement avec la théorie de l'expansion des fonds océaniques et les inversions du pôle magnétique.

Dès 1966, des carottages effectués dans les mers antarctiques ont révélé une succession de couches à aimantation opposée qui recoupait en tout point (pour les 4,5 millions d'années que l'on a pu ainsi explorer) la chronologie des inversions du pôle magnétique, obtenue à partir du paléomagnétisme des roches continentales. Par conséquent, chaque bande d'anomalies magnétiques correspond à la durée d'une époque déterminée, ce qui permet de les dater par comparaison avec la radiodatation de roches continentales. La vitesse d'expansion des fonds océaniques a ainsi pu être estimée à environ 1 cm/an de chaque côté de la ride. D'autre part, la description du profil magnétique sur toute la largeur de l'océan Atlantique a permis à J. Heirtzler d'établir une échelle d'inversion couvrant plus de 75 millions d'années. D'après cette échelle, les inversions sont réparties très irrégulièrement dans le temps (en moyenne une inversion tous les $4 \cdot 10^5$ années pour les derniers millions d'années) ; le rythme de ces changements est beaucoup plus lent dans le passé. Pendant le Permien par exemple, une seule inversion a été observée.

Les variations du champ magnétique terrestre

Comme on a pu le constater avec le paléomagnétisme des roches, le champ magnétique terrestre n'est pas constant. Sa valeur et sa direction sont influencées par de nombreuses causes qui ne sont pas encore toutes connues de manière satisfaisante, mais dont certaines peuvent être comprises. Il est en effet évident qu'un phénomène géologique quelconque qui provoque un changement dans l'état des choses, comme la formation d'une chaîne de montagnes ou l'intrusion de matériaux volcaniques, doit causer, au moins localement, une variation du champ magnétique.

Toutefois, il existe également des phénomènes plus généraux qui concernent tout le globe. Les variations du champ magnétique terrestre sont de trois types : une variation séculaire, des variations régulières, périodiques et de courte durée, des variations à caractères irréguliers.

Pour mettre en évidence les *variations séculaires,* on peut examiner les mesures paléomagnétiques des roches. Outre l'inversion des pôles, ces analyses montrent, par exemple, que la valeur de la déclinaison à Londres est passée d'environ 11°,5 est en 1580 à 8° est en 1600 pour atteindre la valeur de 24° ouest en 1800. D'une façon générale, on constate que le champ non dipolaire dérive vers l'ouest à la vitesse moyenne de 0°,2 de longitude par an. Il existe aussi des variations de l'intensité totale mondiale du champ dipolaire. Au cours du siècle dernier, on a en effet enregistré une décroissance d'intensité de 0,04 % par an. De tels changements, d'une année à l'autre, dans l'ensemble des champs dipolaires et non dipolaires constituent la *variation séculaire*.

Le champ magnétique terrestre subit également des *variations régulières,* de période plus courte, comme les *variations diurnes*. Leur amplitude dépend de la latitude et de l'activité solaire. Leur mode d'évolution dans le temps est fonction de la position du Soleil, c'est-à-dire, par exemple, que la valeur maximale de la variation est la même pour un temps local donné, en n'importe quel point de la Terre. C'est la raison pour laquelle les graphiques, qui représentent l'allure du champ magnétique en deux points différents du globe, sont décalés d'un intervalle de temps égal à la différence entre les heures locales. Les variations diurnes sont importantes de jour et négligeables de nuit ; les décalages sont donc étroitement liés à l'activité solaire. De plus, il existe des *fluctuations saisonnières,* avec une intensité nettement plus marquée en été qu'en hiver.

Enfin, il y a des *variations irrégulières,* pratiquement imprévisibles, que l'on appelle communément *tempêtes magnétiques*. Les variations du champ magnétique terrestre, et en particulier de sa composante horizontale, indiquent que ces orages débutent brusquement, jusqu'à des valeurs maximales, positives par rapport à la valeur normale ; puis les valeurs décroissent graduellement jusqu'à ce qu'elles deviennent relativement négatives pour ensuite revenir à la normale, mais avec beaucoup de lenteur, c'est-à-dire en un temps de plus de 50 heures. Les amplitudes de ces perturbations, qui surgissent presque simultanément sur toute la surface du globe, sont beaucoup plus importantes sous les latitudes polaires ; elles peuvent atteindre 0,02 œrsted.

Nous aborderons la raison de ces variations par la suite.

L'électricité terrestre

La Terre, soit dans sa partie solide et liquide, soit dans son atmosphère, est le siège de courants électriques, dont une grande partie sont liés aux variations du champ magnétique.

Pour la plupart des roches, la conductivité est influencée en majorité par l'eau contenue dans les pores. Si bien que les roches poreuses ont en général une conductivité plus importante que les roches compactes (ces dernières sont en grande partie des roches ignées et métamorphiques). L'eau de la mer constitue l'ensemble le plus conductif qui existe sur Terre, la valeur de la résistivité (qui est le contraire de la conductivité) est de 210 ohms.cm. Parmi les roches les plus conductibles, on trouve les argiles avec des valeurs variables de la résistivité de 200 à 10 000 ohms.m. Les valeurs de la résistivité des calcaires varient de 20 000 à 400 000 ohms.m, avec des maximums atteignant 6 000 000 et plus. Il est difficile d'attribuer des valeurs très précises, à cause de la forte influence exercée par l'eau contenue dans ces roches. Les roches ignées et métamorphiques peuvent avoir des résistivités plus grandes, mais il n'est pas possible de définir de limites.

Dans l'atmosphère, la conduction électrique dépend du degré d'ionisation, c'est-à-dire du nombre de particules chargées contenues par unité de volume. Certaines de ces particules sont des électrons libres, d'autres sont des atomes, des molécules, ou des grains de poussière ou autres agrégats colloïdaux. Ces particules peuvent être chargées aussi bien positivement que négativement, puisque, lorsqu'un électron se libère, il laisse un atome (ou molécule) porteur d'une charge globale positive. Le degré d'ionisation de l'air varie beaucoup avec l'altitude, avec l'heure et avec la latitude. L'ionisation est faible à proximité de la surface terrestre (de l'ordre de 1 million d'ions par centimètre cube). A 65 km d'altitude au-dessus de l'équateur, l'ionisation commence à augmenter. Vers 100 km on enregistre une très forte élévation qui décuple le nombre d'ions. Un phénomène similaire se vérifie à partir de 190 km d'altitude, avec un maximum à 220 km et un autre à 300 km d'altitude. Ces trois zones d'accroissement rapide de l'ionisation sont appelées respectivement couches E, F_1 et F_2; la dernière de celles-ci existe seulement de jour.

Le phénomène de l'ionisation est dû aux radiations ultraviolettes et aux rayons cosmiques provenant du Soleil. Au-dessous de 80 km, la conduction ionique prédomine, tandis qu'au-dessus de cette altitude il existe beaucoup d'électrons libres, en raison de la densité faible de l'atmosphère, et l'on a affaire à la conduction électronique.

Les relations entre les courants électriques et le champ magnétique

Les courants électriques qui existent dans l'atmosphère sont en corrélation étroite avec la position du Soleil et, en partie, avec la Lune. En effet, tous les deux produisent, grâce à l'attraction newtonienne, des « marées atmosphériques » et donc des déplacements de particules ionisées, lesquels constituent précisément des courants électriques. De plus, surtout à haute altitude, le rayonnement solaire a un effet ionisant sur les molécules contenues dans l'air. Par conséquent, la configuration des courants atmosphériques est fonction de l'heure solaire, c'est-à-dire qu'elle suit l'évolution diurne du Soleil autour de la Terre.

Par ailleurs, le champ magnétique, facilement mesurable à la surface du globe, s'étend à son intérieur et vers l'extérieur jusque très loin de la Terre. La forme de ces lignes de champ dépend de l'interaction entre le champ et le flot de plasma continu ou *vent solaire* (composé d'électrons, de protons et d'hélions, ou noyaux d'atomes d'hélium) émis par le Soleil.

Lorsque le vent solaire — bon conducteur de l'électricité — pénètre dans la zone où les effets du champ terrestre ne sont plus négligeables, ses trajectoires sont déviées. Il s'ensuit un système de courants (ou interaction

électromagnétique) qui empêchent les deux milieux de se mélanger aisément : le champ terrestre produit un courant induit dans le plasma, ce qui entraîne une induction magnétique s'opposant à l'induction terrestre. Le vent solaire presse les lignes de force du champ magnétique terrestre, qui sont comprimées du côté jour (jusqu'à 10 rayons terrestres) et étirées du côté anti-solaire (d'environ 500 rayons terrestres). Cette région ainsi délimitée constitue la *magnétosphère*. Les lignes de champ se referment sur elles-mêmes aux basses latitudes : elles traversent la surface de la Terre en deux points conjugués en partant d'un hémisphère et en revenant sur l'autre. A haute latitude, elles se brisent et ne se rejoignent plus. Elles se subdivisent alors en 2 sous-régions. Par la région du pôle, dans la direction du Soleil, le vent solaire pénètre dans la haute atmosphère et influence ainsi notre climat. Dans la direction opposée, les lignes de champ de la calotte polaire sont ouvertes et connectées au champ magnétique interplanétaire. La configuration de la magnétosphère, en cône au sommet arrondi, n'est pas statique : elle varie légèrement au rythme des journées et de façon plus importante au rythme des saisons (variations régulières). Il peut y avoir des variations irrégulières très rapides et intenses dues à des éruptions solaires.

En fait, la limite de la magnétosphère, appelée *magnétopause,* résulte de l'équilibre entre la pression cinétique du vent solaire et la pression magnétique du champ, ce champ étant à son tour dû au champ magnétique terrestre et à celui que produisent les courants électriques circulant à la surface de cette magnétopause. Des perturbations dans l'énergie du vent solaire déclenchent des tempêtes magnétiques en provoquant une différence de potentiel entre les côtés est et ouest de la face diurne de la magnétosphère. Le champ électrique ainsi formé entraîne des particules ionisées des régions externes vers les régions internes de la magnétosphère. Ce flot de plasma contourne la Terre en créant à la fois un anneau

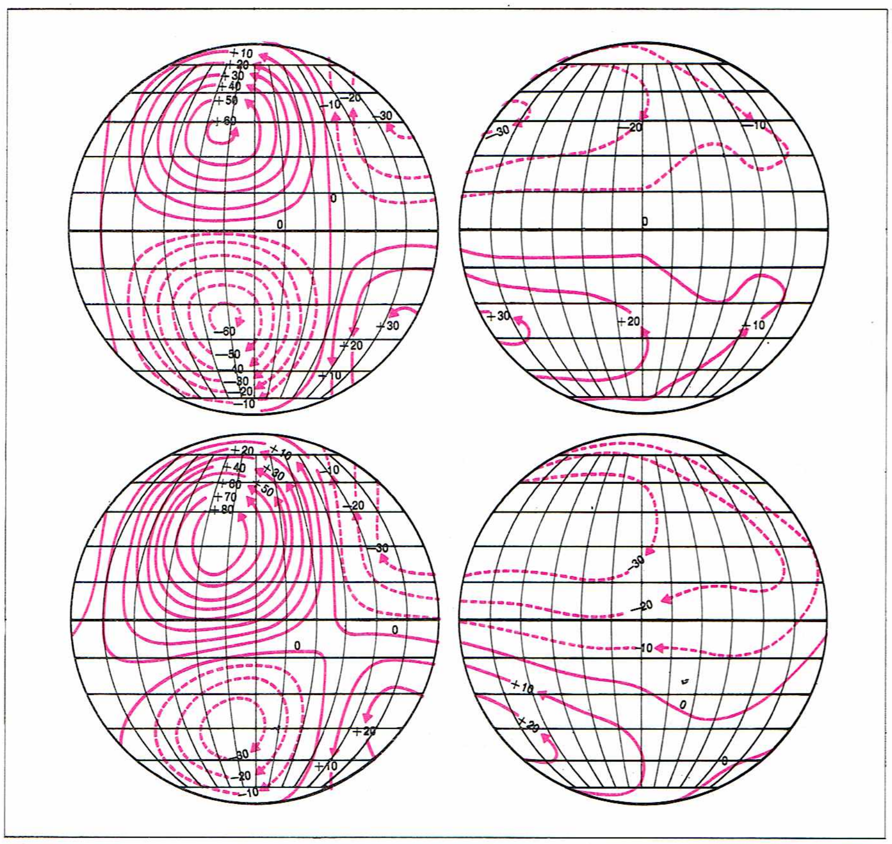

I.G.D.A.

▲ *Lignes des courants électriques dans l'atmosphère responsables des variations du champ magnétique terrestre : à gauche pendant le jour, à droite pendant la nuit; en haut à l'époque des équinoxes, en bas en juin (solstice d'été pour l'hémisphère boréal).*

▶ *Une aurore polaire photographiée par l'engin spatial « Galileo » dans la nuit du 19 janvier 1968.*

de courant électrique dans le plan équatorial et une série de courants alignés le long des lignes de force qui se referment dans l'ionosphère des régions polaires. La précipitation des particules énergétiques qui s'ensuit est à l'origine des aurores lumineuses et des perturbations ionosphériques.

Les 2/3 des variations du champ magnétique sont liés aux courants atmosphériques. Le dernier tiers est dû aux courants électriques qui circulent à la surface du sol. Ces courants telluriques suivent également l'évolution du Soleil autour de la Terre. Une telle analogie entre les courants électriques existant dans l'atmosphère et les courants telluriques suggère d'attribuer l'origine du champ magnétique à des courants électriques circulant dans le noyau constitué de fer en fusion.

Des physiciens comme W. M. Elsasser et E. Bullard ont proposé un mécanisme de dynamo auto-excitatrice : des mouvements de matière provoquent un champ électrique d'induction ; les courants électriques ainsi créés génèrent un champ magnétique selon un processus magnéto-hydrodynamique. En fait, selon cette théorie, le noyau peut être comparé à l'armature d'un générateur électrique dans laquelle se produisent des phénomènes d'auto-excitation. L'énergie nécessaire au maintien soit des mouvements de matière, soit des courants électriques, serait due aux différences de température existant entre deux points situés à l'intérieur de la Terre, elles-mêmes engendrées par les désintégrations radio-actives. Mais un tel modèle n'explique pas les inversions de polarité.

En 1958, Rikitake a constaté qu'un système double de dynamos, tel que le courant de l'une alimente le circuit de l'autre, et réciproquement, présente des variations périodiques dans le champ magnétique qu'il produit. Cela peut même conduire à des inversions de polarité. Mais cet appareillage ne rend pas compte du noyau fluide et de la force de Coriolis. Herzenberg a alors proposé un système double couplé se rapprochant plus de la réalité : deux sphères conductrices (cellules de convection) tourneraient dans une autre (noyau), également conductrice, ce qui permettrait d'associer des fluctuations d'intensité avec des basculements périodiques.

Causes du champ non dipolaire. Une autre explication des variations séculaires a amené des chercheurs comme M. Hide et M. Malin à attribuer le champ magnétique terrestre à deux origines distinctes : le champ dipolaire serait produit par le mouvement de fer en fusion dans le noyau fluide, et le champ non dipolaire par des déplacements de matière s'effectuant dans l'interface noyau-manteau. Ils ont établi l'image à un instant donné du champ non dipolaire, tel qu'il existait en 1965, en éliminant le champ dipolaire du champ magnétique terrestre total. On a ainsi une carte hypsométrique du champ non dipolaire, qui fait ressortir une série de zones à formes irrégulières. D'après eux, ce champ non dipolaire est dû aux tourbillons qui se produisent à la périphérie du noyau, et seule la forme spéciale de l'interface noyau-manteau pourrait permettre à ces tourbillons de se produire. Par conséquent, s'il existe des « bosses » à cet endroit, il en résulte une forme particulière du champ magnétique non dipolaire observé à la surface du sol.

Par ailleurs, en se fondant sur la différence entre le noyau et le manteau, on peut facilement démontrer que des ondulations d'environ 1 km de hauteur se trouvant à quelques milliers de kilomètres de profondeur devraient avoir un effet sensible, bien que non prépondérant, sur la distorsion du champ de gravitation observée à la surface de la Terre. Et si l'on admet que les deux champs, celui de gravitation et le champ magnétique non dipolaire, sont modifiés par les bosses, alors on doit s'attendre à constater un certain degré de corrélation entre les deux mesures. Selon Hide et Malin, cette corrélation existe effectivement. Avec un écart de 160° en longitude entre les deux champs, une analyse mathématique confirme que le degré de corrélation est d'environ 84 %. Pour expliquer cette différence de phase de 160°, il faut revenir au problème soulevé par les variations du champ magnétique non dipolaire. Alors que le champ de gravitation et la forme des bosses sont restés constants, le champ non dipolaire a dérivé vers l'ouest (variation séculaire). Il s'ensuit que le champ magnétique est beaucoup moins bien relié à la position des bosses que le champ de gravitation, et, en fait, l'angle de déphasage entre les deux est passé de 130° en 1850 à 160° de nos jours.

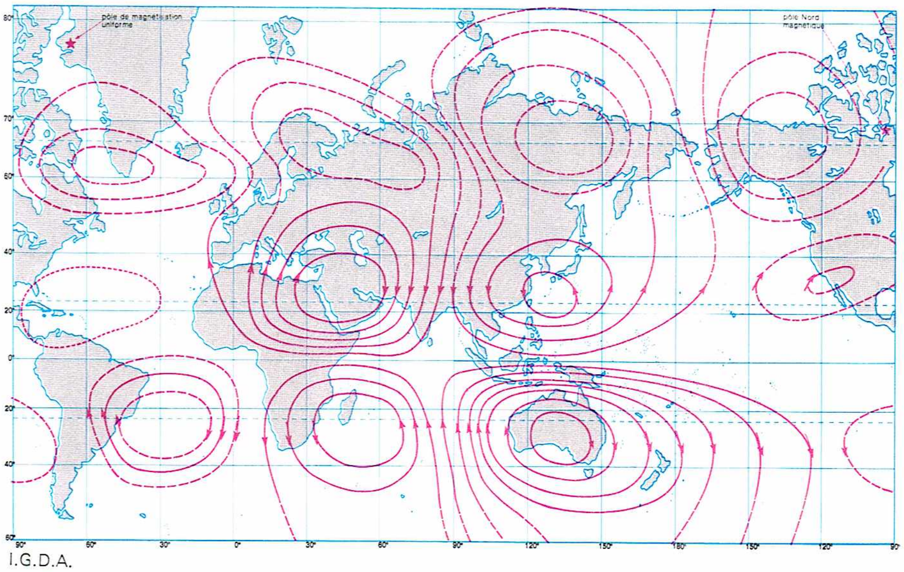

I.G.D.A.

▲ ***Circulation des courants telluriques lorsqu'il est 6 heures au méridien de Greenwich.***

▼ ***Cartes hypsométriques du champ de gravitation et du champ magnétique non dipolaire à la surface de la Terre en 1965. On constate un haut degré de corrélation entre les deux champs, quand la différence de longitude entre les deux observations est de 160°, bien que la valeur de cet angle varie au cours du temps.***

Richard Colin

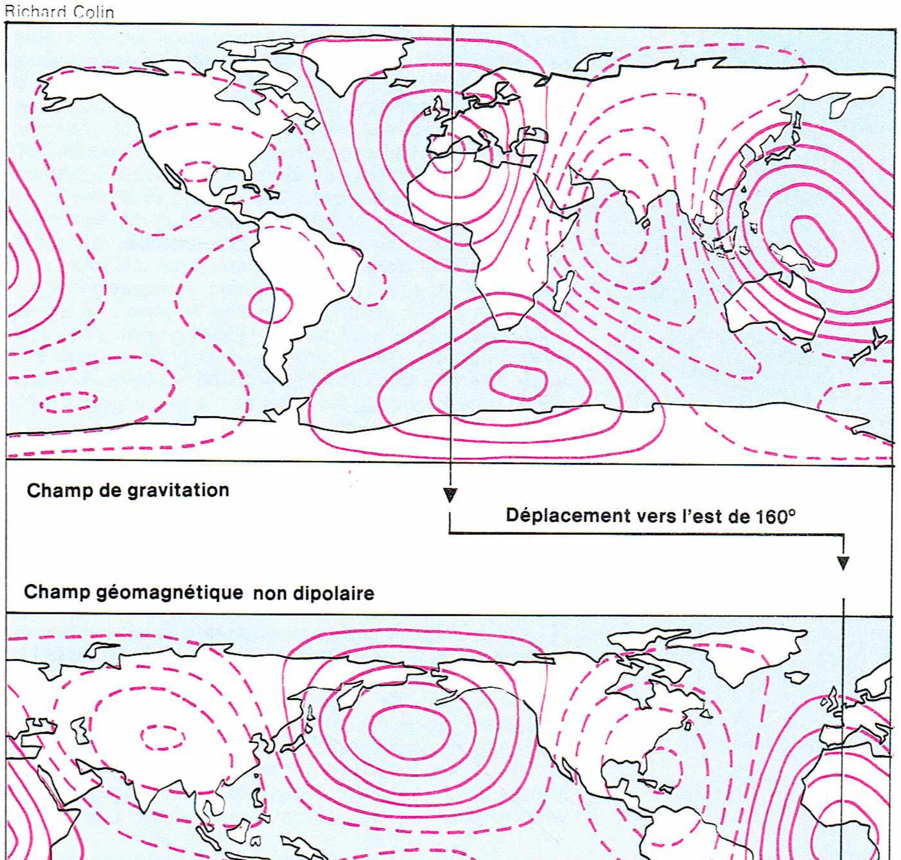

▶ *Les balances de Schmidt (à gauche) et de Haalck (à droite) sont fondées sur la mesure de la position d'équilibre d'une aiguille aimantée, laquelle est soumise à l'action du champ magnétique et à celles de forces mécaniques.*

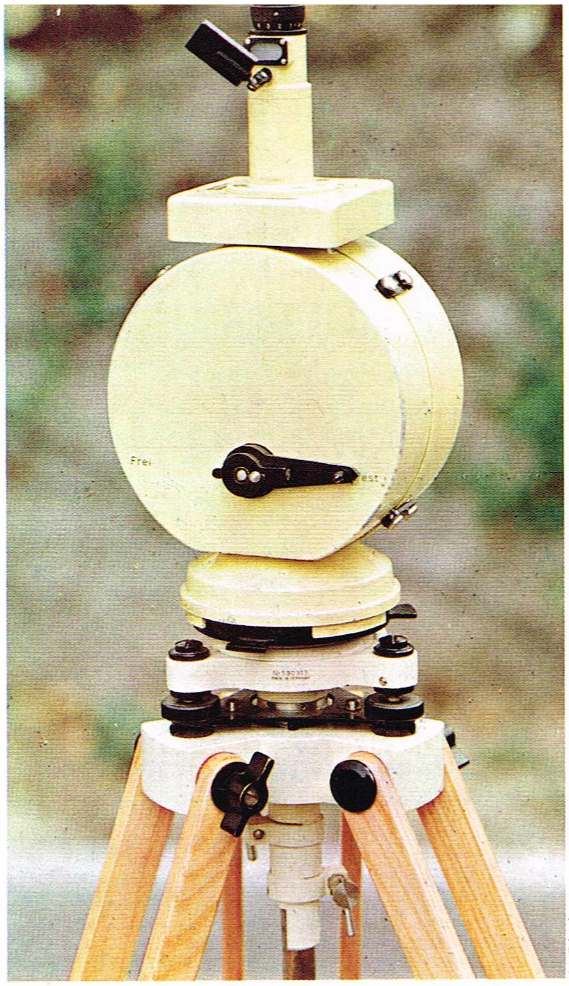

A. Rizzi

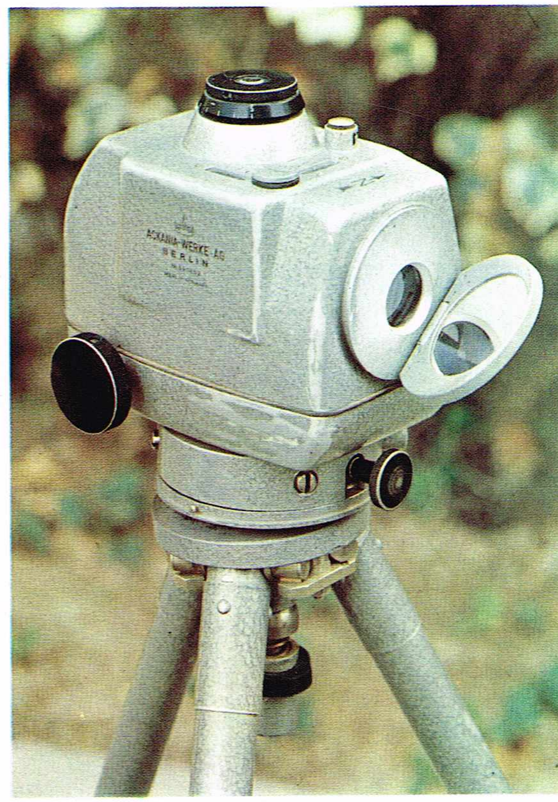

A. Rizzi

Les corrélations entre les deux champs sont généralement admises mais elles ne suffisent pas à prouver l'existence des bosses, car un processus différent pourrait fort bien affecter de la même manière les deux champs. M. A. Khan et G. P. Woollard, de l'Institut hawaïen de géophysique, pensent, par exemple, que cette corrélation pourrait provenir des anomalies thermiques dans le manteau supérieur, qui engendreraient des variations de densité et des phénomènes d'induction. Mais pour le moment, la balance penche en faveur des bosses; elles provoquent l'entraînement l'un par l'autre du noyau et du manteau, et leur permettent ainsi de tourner ensemble, autour de l'axe de rotation de la Terre, comme la jante et le pneu d'une roue de bicyclette. La partie externe du noyau ayant une vitesse angulaire plus faible que le manteau, ce découplage mécanique expliquerait la dérive vers l'ouest du champ non dipolaire. Toutefois, il est prudent de se souvenir qu'en ce qui concerne le globe terrestre, la preuve absolue de beaucoup de théories n'a pas encore pu être fournie.

Les instruments géomagnétiques et géoélectriques

On dénombre une grande quantité d'instruments géomagnétiques et géoélectriques, instruments qui ont subi des modifications importantes au cours du temps, autant du point de vue de la perfection technique que des principes de fonctionnement.

Le plus simple d'entre eux est l'**aiguille aimantée,** qui indique la direction du champ. Pour mesurer l'intensité du champ, on utilise encore ce dispositif simple : il suffit d'observer l'angle d'oscillation produit par l'aiguille lorsqu'elle est soumise simultanément à l'action du champ magnétique terrestre et à celle d'un champ artificiel de comparaison, créé par un aimant d'intensité connue. L'instrument qui a été conçu dans ce dessein est le **magnétomètre de déviation,** mais il n'est guère employé de nos jours.

D'autres types d'instruments ont été construits de façon à mesurer les valeurs absolues du champ magnétique ou bien à en déterminer les variations.

Le plus ancien est l'**inducteur terrestre,** qui consiste en une bobine animée d'un mouvement de rotation rapide, devenant ainsi le siège de forces électromotrices induites par le champ magnétique terrestre. La valeur mesurée de la tension induite est proportionnelle à l'intensité du champ et en donne donc la détermination.

Les **balances de Schmidt et de Haalck** sont fondées sur la mesure de la position d'équilibre d'une aiguille aimantée, laquelle est soumise à l'action du champ magnétique et à celle de forces mécaniques. Ces forces mécaniques sont constituées par l'unique force de gravité dans les balances du type Schmidt; tandis que, pour les balances du type Haalck, la tension élastique de torsion d'un fil en suspension intervient également. Il est nécessaire d'orienter les appareils par rapport à la direction du champ et d'adopter un système de compensation pour les changements de température. On peut alors mesurer les variations des deux composantes verticale (avec la balance de Schmidt) et horizontale (avec celle de Haalck) du champ avec une précision de l'ordre de 2 à 3 gammas.

Ces appareils ont été supplantés par trois autres types qui permettent d'obtenir des mesures plus précises et continues, de sorte qu'elles puissent être effectuées en automobile, en bateau ou en avion.

Le premier de ces instruments aérotransportables a été le **magnétomètre à induction,** d'une sensibilité de l'ordre du gamma. Il exploite les propriétés du permalloy, alliage de fer et de nickel à haute perméabilité magnétique. Le fonctionnement des circuits induits, influencé par le champ magnétique terrestre, produit des noyaux de permalloy accusant une différence de saturation. C'est ce déphasage qui permet de mesurer les perturbations magnétiques du champ total.

On obtient une sensibilité du même ordre, suffisante pour la recherche minière, avec le **magnétomètre à résonance nucléaire** (dit à protons) qui utilise le moment magnétique des noyaux d'hydrogène. Ces noyaux, contenus dans une simple bouteille d'eau, sont soumis à un champ magnétique artificiel, ayant une direction opposée à celle du champ magnétique terrestre et une intensité beaucoup plus forte. Ils prennent alors pratiquement la direction du champ artificiel. Si l'on supprime brusquement ce champ, les noyaux reviennent à leur première orientation, c'est-à-dire à celle du champ magnétique terrestre. Ce passage s'effectue selon une précession dont la période est fonction de l'intensité du champ terrestre.

Une précision supérieure peut être obtenue avec le **magnétomètre à pompage optique** (d'une sensibilité de l'ordre du 1/10 de gamma). Cet appareil utilise la mesure de chaque fréquence de résonance moléculaire, laquelle dépend de l'intensité du champ magnétique terrestre.

E.N.I.

▲ *Les méthodes de prospection géophysique permettent de déceler les hétérogénéités du sous-sol et d'en préciser la nature ou la disposition des roches. Ici, relevés séismiques de la structure tectonique sous le fond de la mer Adriatique.*

PROSPECTION GÉOPHYSIQUE

La prospection géophysique, ou géophysique appliquée, n'a guère commencé à se développer que depuis une soixantaine d'années. Ses objectifs sont les mêmes que ceux de la géologie appliquée, car elle s'intéresse également à la connaissance du sous-sol. Lorsque les problèmes, toujours posés en termes géologiques, sont soumis à la géophysique appliquée, ils ont déjà été examinés par la géologie, laquelle a tiré toutes les conclusions possibles à l'aide des données mises à sa disposition. Ces dernières résultent généralement d'observations effectuées sur la surface du terrain. Le rôle de la prospection géophysique est précisément de lever les indéterminations qui subsistent, en mesurant en surface des phénomènes qui dépendent en fait de la structure profonde du sous-sol.

Les premières tentatives de prospection géophysique furent effectuées au moyen d'instruments magnétiques, pour la mise en évidence de minéraux de fer. La recherche de pétrole donna une impulsion décisive au développement des deux méthodes principalement utilisées à cette fin, à savoir la gravimétrie et la séismologie. Ces dernières permettent, en effet, de déterminer la position dans le sous-sol des structures géologiques favorables à l'accumulation d'hydrocarbures. La prospection géophysique s'est révélée également fort utile dans d'autres domaines tels que la recherche des minéraux, l'hydrogéologie, les travaux d'urbanisme ou de génie civil, cette liste étant loin d'être exhaustive; il n'est pas jusqu'aux recherches archéologiques qui ne puissent faire appel à la géophysique.

Les méthodes de prospection géophysique permettent de déceler les hétérogénéités du sous-sol et de préciser de cette façon la nature ou la disposition des roches. S'il y a en effet des différences de densité, le champ gravitationnel doit présenter des caractéristiques anormales qui les reflètent. De même, il peut exister dans la partie superficielle de l'écorce terrestre des variations de perméabilité magnétique, de conductivité électrique ou de rigidité susceptibles d'influencer les valeurs mesurées en surface.

Les mesures effectuées à l'intérieur de la croûte, par l'intermédiaire de forages, sont dues à des *carottages géophysiques*.

On peut subdiviser les méthodes de prospection, suivant la constante physique à laquelle le prospecteur s'intéresse.

— Les *méthodes gravimétriques* étudient la répartition de la densité dans le sous-sol, par des mesures de gravité effectuées à la surface.

— Les *méthodes magnétiques* cherchent à mettre en évidence les variations de la susceptibilité magnétique des roches ou de certains minerais, à travers les mesures du champ magnétique terrestre.

— Les *méthodes séismiques* observent le mode de propagation des ondes élastiques, en étudiant la structure du sous-sol en termes de constantes mécaniques (module d'élasticité, coefficient de Poisson, module de cisaillement).

— Les *méthodes électriques* opèrent en surface en mesurant les différences de potentiels électriques, naturels ou artificiels, dans le dessein de connaître la répartition en profondeur des résistivités électriques.

— Les *méthodes radio-actives* utilisent des déterminations radiométriques.

— Les *carottages géophysiques,* avec lesquels, comme on l'a déjà vu, on effectue des mesures le long des parois des trous de sonde, permettent d'obtenir des données sur la composition des parois elles-mêmes et sur celle des formations situées à une certaine distance de ces dernières.

Toutefois il est nécessaire d'ajouter que l'étude de la répartition des paramètres physiques, déterminés dans le sous-sol, ne représente pas l'ultime but des relevés géophysiques. En effet, les résultats n'ont de sens que si les variations dans les susdites constantes correspondent aussi à des différences lithologiques, qui intéressent la recherche pour laquelle le relevé géophysique a été effectué. Par exemple, si une variation de la résistivité électrique dans la masse d'un calcaire est due à des différences d'humidité, sans influence appréciable sur les caractéristiques mécaniques de la roche, le relevé électrique ne sera utile que dans le cadre des recherches hydrologiques, pour lesquelles on désire précisément connaître l'état d'humidité de la roche.

▶ *Appareillage permettant des relevés séismiques à terre (côte de l'Adriatique).*

E.N.I.

La grande majorité des *prospections* est *indirecte*, c'est-à-dire qu'on s'efforce de faire ressortir une structure favorable à la présence de tel ou tel minéral ; pour le pétrole, par exemple, on cherche à mettre en évidence les structures susceptibles de receler des réservoirs. Si la prospection directe, reposant sur les propriétés physiques de certains minerais, soulève peu de difficultés, il n'en est pas de même de la prospection indirecte qui relève plus d'un art que d'une science. En effet, en fonction du nombre d'inconnues souvent élevé et non proportionné à la quantité des données que l'on peut retirer des mesures, l'implantation d'un sondage fait appel à l'intuition, à l'expérience et aux autres aptitudes personnelles des prospecteurs.

Des considérations d'ordre économique jouent un rôle non négligeable dans le choix des méthodes géophysiques. Pour la recherche du pétrole, par exemple, on se sert d'abord de méthodes fournissant une vue d'ensemble sur le bassin sédimentaire à prospecter, telles que l'aéromagnétisme et la gravimétrie ; l'exécution de ces simples mesures permet alors de réduire le domaine d'application des méthodes plus onéreuses, telle la séismique qui nécessite la mise en place d'un véritable dispositif expérimental. En mer, la rentabilité des méthodes est inverse : le coût de la prospection séismique est moindre par rapport à celui de la prospection gravimétrique. En effet, la première méthode n'utilise plus de matériel de forage coûteux, rendu nécessaire sur terre pour enterrer les charges explosives, et permet d'autre part d'obtenir des mesures quasi continues, les séismographes étant reliés par un câble au bateau. Par contre, la méthode gravimétrique voit son prix de revient augmenter en raison du mode de transport en mer et de la radionavigation.

Chaque relevé géophysique, qui a déjà été projeté et préparé, peut être divisé en deux phases principales : la phase des mesures et celle des interprétations.

Les données fournies par les mesures prennent rarement une signification tangible au moment de leur obtention ; elles sont d'abord rassemblées en groupes suffisamment significatifs avant d'être analysées. Toutefois, il faut attendre la fin d'un relevé complet pour pouvoir procéder à une interprétation définitive.

L'interprétation est menée selon des normes fondées sur les théories physiques ou physico-mathématiques pertinentes à la méthode utilisée. Les résultats n'ont de sens que s'ils sont traduits de nouveau en termes géologiques. Cette dernière étape, qui consiste à donner aux valeurs de certains paramètres physiques (résistivité, module élastique, etc.) une signification en termes lithologiques, s'effectue suivant des critères particuliers, strictement liés à la zone à étudier. Pour cette raison, les données d'éventuels forages viennent souvent compléter celles des prospections géophysiques. En effet, alors que les premières sont détaillées et précises, mais limitées aux terrains voisins des parois du trou, les résultats géophysiques s'étendent à toute la zone à étudier et en donnent une représentation à la fois panoramique et synthétique.

Notons enfin que la prospection géophysique s'oriente actuellement vers le dépouillement des informations par ordinateur, au détriment des dépouillements obtenus laborieusement « à la main ». Cette tendance se traduit par des possibilités nouvelles de filtrage, isolant les anomalies relatives à tel ou tel terrain, matérialisées automatiquement sous forme de documents cartographiques.

Les méthodes gravimétriques

Les notions fondamentales sur la gravité, sur ses anomalies et sur les instruments utilisés pour l'étudier ont été données dans le chapitre consacré à la gravimétrie. Nous abordons à présent les objectifs des prospections gravimétriques et les modalités pratiques d'exécution.

La prospection gravimétrique est fondée sur la mise en évidence des anomalies d'attraction de la croûte terrestre, provoquées par la présence de masses offrant un contraste de densité avec leur environnement. Les répartitions de la densité dans le sous-sol peuvent être à leur tour interprétées en termes de structures géologiques.

Le **gravimètre** est l'instrument le plus couramment employé pour effectuer les mesures en surface, surtout en raison de ses qualités de précision, de légèreté et de rapidité dans l'obtention des mesures. En effet, la précision de la mesure est actuellement voisine du milliardième de milligal, et les relevés en une station ne demandent pas plus de 2 ou 3 minutes au maximum. Toutefois le principal écueil de la méthode réside dans le fait que la valeur de l'anomalie ne dépend que de l'excès de la masse existant dans la structure géologique considérée. Car, si l'on peut calculer avec précision cet excès de masse, la dimension du phénomène géologique, responsable de l'anomalie, reste indéterminée en l'absence d'une connaissance analytique des densités. A un même excès de masse peut correspondre soit un corps très dense localisé dans un site de dimension réduite (exemple d'un amas de sulfure massif), soit un édifice important de roches pétrographi-

I.G.D.A.

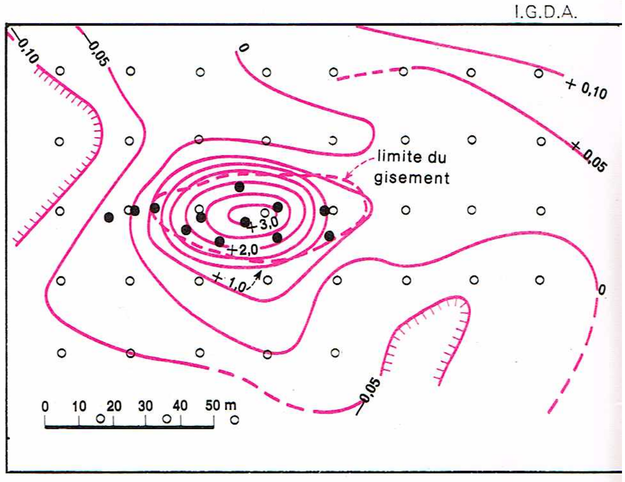

▶ *Anomalie de gravité (calculée en milligals) liée à la présence d'un gisement de chromite. Les cercles clairs indiquent la position des stations de mesure ; les cercles pleins indiquent les emplacements des sondages.*

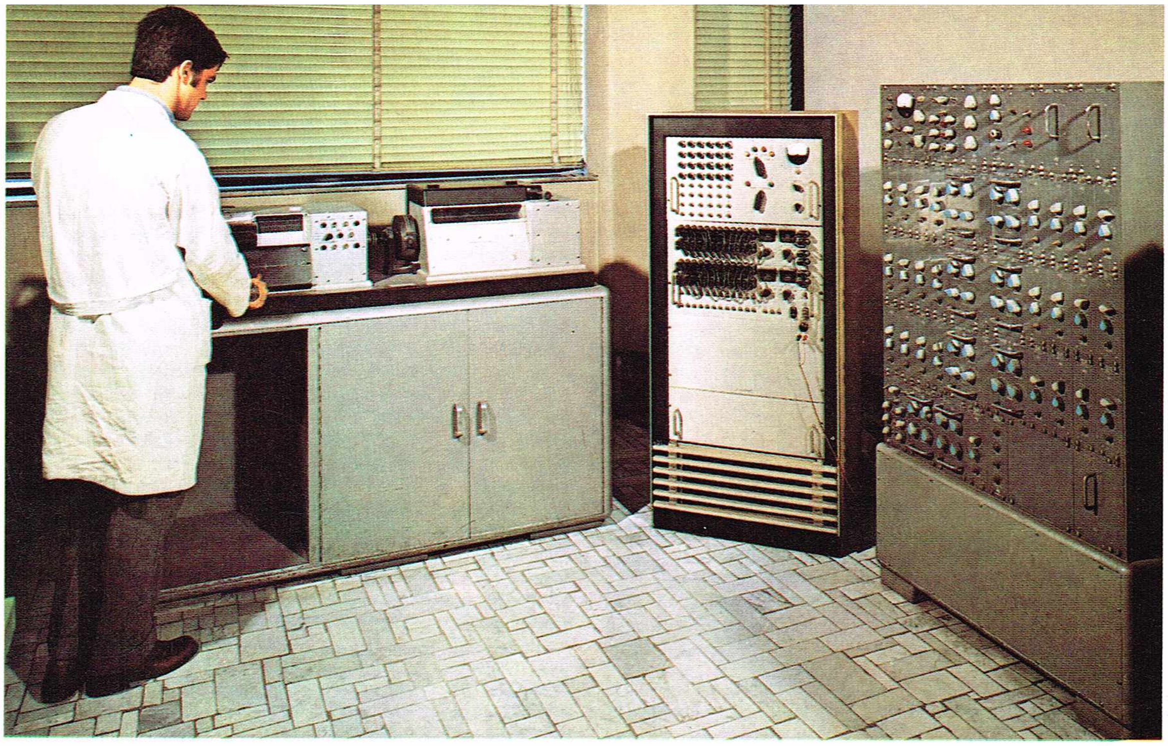

◀ ***Appareillage de restitution (play-back) des enregistrements magnétiques exécutés sur le terrain.***

E.N.I.

quement différenciées avec un faible contraste de densité (pluton basique). Par conséquent, le degré d'incertitude dans l'interprétation est fonction de la connaissance des types de roches existant dans la zone à étudier, ainsi que des valeurs respectives de la densité.

La technique d'exécution des mesures tient compte de ce que le gravimètre permet seulement de mesurer des différences de gravité entre deux stations. Cela signifie, en particulier, que, si l'on explore une zone sans précautions préalables, on court le risque d'additionner les erreurs commises dans chaque différence. Il faut donc établir un réseau reliant peu de stations, uniformément réparties dans la zone à étudier. On mesure alors les différences de gravité entre deux stations, et l'on effectue ensuite les compensations d'éventuelles petites erreurs de fermeture entre les mailles de ce réseau. De cette façon, à la fin du relevé, il ne subsistera plus d'erreur importante entre les extrémités opposées de la zone explorée.

Les valeurs obtenues ne sont pas encore directement comparables entre elles; il faut les modifier en appliquant les corrections gravimétriques. En premier lieu, les prospecteurs tiennent compte de la variation de la gravité en fonction de l'attraction de la Lune et du Soleil, en consultant les tables publiées chaque année par l'Association européenne des géophysiciens. Puis on procède aux corrections de Faye, de Bouguer, aux corrections topographiques, auxquelles on ajoute parfois la correction isostatique. La différence entre chaque valeur corrigée et les valeurs normales constitue l'*anomalie de Bouguer*. Les positions des stations et les valeurs anormales sont reportées sur une carte en traçant les lignes d'égale valeur.

Le but de toute prospection gravimétrique est donc de dresser la *carte d'anomalie de Bouguer*, mettant en évidence l'existence d'une structure particulière, insérée dans une situation géologique considérée comme normale. Le mot « anomalie » prend ainsi sa signification étymologique.

Dans la majorité des cas, lorsque l'on observe une carte de Bouguer, on se trouve devant une superposition d'anomalies plus ou moins localisées dans l'ensemble régional du champ gravitationnel. La première chose à faire est de distinguer l'effet des causes éloignées de celui des irrégularités géologiques proches. En général, l'intérêt se concentre sur les premières anomalies; mais les secondes, appelées anomalies régionales, peuvent donner des indications intéressantes aux prospecteurs. Le procédé d'interprétation des données se déroule en deux étapes. La première, de caractère physico-mathématique, consiste à calculer quelles sont dans le sous-sol les répartitions des masses qui peuvent rendre compte des anomalies choisies pour les besoins de la prospection. Les solutions possibles sont infinies du point de vue mathématique. La seconde étape réside donc dans le choix, parmi les diverses solutions, de celle qui concorde le mieux avec la situation géologique.

Les valeurs des anomalies de Bouguer sont souvent élaborées pour obtenir d'autres cartes. Telles sont, par exemple, la *carte des anomalies résiduelles*, la *carte des gradients verticaux* et celle des *dérivées secondes*. Ces quantités servent à donner des représentations particulières des résultats du relevé gravimétrique, capables de mettre en évidence certains motifs par rapport aux autres.

Dans la recherche des hydrocarbures, les relevés gravimétriques sont utilisés pour localiser les failles. Ces accidents structuraux se rapportent en général aux roches situées au fond des bassins sédimentaires, dans lesquels on effectue les recherches. La méthode gravimétrique peut appréhender également des zones moins vastes, telles que celles d'amas ou de filons de roches pesantes, liés aux gisements de minéraux (amas de sulfure, de chromite et gisements de fer), ou encore détecter des cavités (utiles aux recherches archéologiques). Dans ce dernier cas, les vides éventuels existant dans les roches se manifestent par des défauts *(anomalies négatives)* dans les valeurs de la gravité. En général, l'adjonction d'autres méthodes concourt à l'établissement d'une image plus juste des anomalies gravimétriques, ou permet une meilleure interprétation de leur cause. Toutefois il existe des problèmes spécifiques d'exploration, telle la recherche des dômes de sel qui constituent des « structures pétrolifères » privilégiées et que la méthode gravimétrique suffit à mettre en évidence.

Les méthodes magnétiques

Les méthodes magnétiques présentent beaucoup de points communs avec les méthodes gravimétriques, en ce qu'elles mesurent et étudient un champ physique naturel, c'est-à-dire le champ magnétique terrestre, afin de repérer les causes géologiques qui le perturbent. On parle également d'*anomalies* dans le cadre de ces méthodes, donnant une définition analogue à celle qui est valable pour la prospection gravimétrique.

La détermination du champ nécessite la mesure de trois composantes : verticale (Z), horizontale (H), et l'inclinaison (I). En pratique, on se contente le plus souvent de mesurer les variations de Z à partir d'un point de référence, appelé *base*, où l'anomalie a une valeur que l'on précise par la suite, au cours de la prospection. L'interprétation des données, et par conséquent la détermination des causes qui provoquent les anomalies, se heurtent à un degré d'indétermination encore plus grand que celui présenté par les méthodes gravimétriques, en raison des variations continuelles du champ magnétique terrestre. En fait, lorsque l'on mesure la variation (en fonction du temps) de la différence des valeurs du champ en deux points A et B, on ne sait pas auquel de ces deux points attribuer cette variation. Il est donc nécessaire d'utiliser deux instruments : le premier se déplace d'une station à l'autre, tandis que le second reste dans une station fixe et enregistre les variations du champ en fonction du temps. Ces dernières données sont utilisées pour apporter des corrections aux valeurs mesurées par les instruments mobiles, avec lesquels s'effectuent les relevés. Néanmoins l'existence de la station fixe peut être évitée si l'intervalle de temps entre deux mesures est assez petit. En effet, si

▶ *Page ci-contre, à gauche, en bas, schéma de propagation des rayons dans le cas où les deux couches ont une surface de discontinuité plane et parallèle : en bleu, rayon direct; en rouge, rayon réfracté; S, source; G, géophones; V_1 et V_2, vitesses dans la première et la seconde couche; α, angle critique ou limite. En haut, diagramme temps-distances (hodochrone).*

▼ *A gauche, un géophone électromagnétique ouvert. A droite, un géophone avec ses deux liaisons électriques qui, introduites dans le sol, permettent de reproduire fidèlement les mouvements du terrain.*

cette condition est réalisée, il est possible de mettre en évidence les variations du champ magnétique en répétant plusieurs mesures, au moins toutes les 10 à 12 minutes, suivant le cas. De plus, l'incertitude qui plane souvent sur l'intensité d'aimantation du champ, ne présente pas d'inconvénient grave pour l'interprétation quantitative des anomalies localisées. En effet, de telles anomalies coïncident avec des gîtes relativement superficiels qu'un sondage peu onéreux permet d'atteindre facilement. Par ailleurs, les ingénieurs géophysiciens disposent d'abaques correspondant aux différentes structures géologiques recherchées (telles les structures cylindriques rattachées aux filons), afin de préciser, à partir d'une anomalie donnée, la position et éventuellement les dimensions, le pendage, etc., d'un corps perturbateur.

Les *relevés aéromagnétiques,* effectués avec des instruments aérotransportables, ont apporté une importante contribution à la recherche d'hydrocarbures. Les avantages de cette méthode sont essentiellement la couverture systématique de grande surface en un temps très court, et l'élimination des anomalies dues à des causes superficielles. Ces méthodes aéroportées permettent d'estimer la profondeur du socle cristallin et de déterminer la forme du bassin sédimentaire qui le recouvre, grâce aux effets magnétiques du socle.

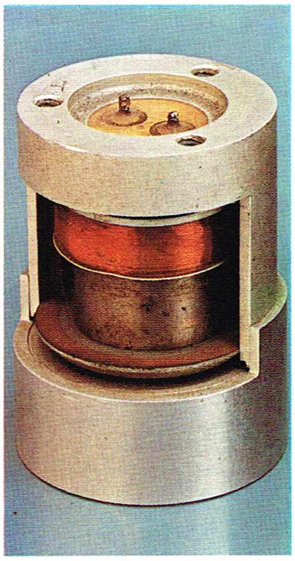

A. Rizzi

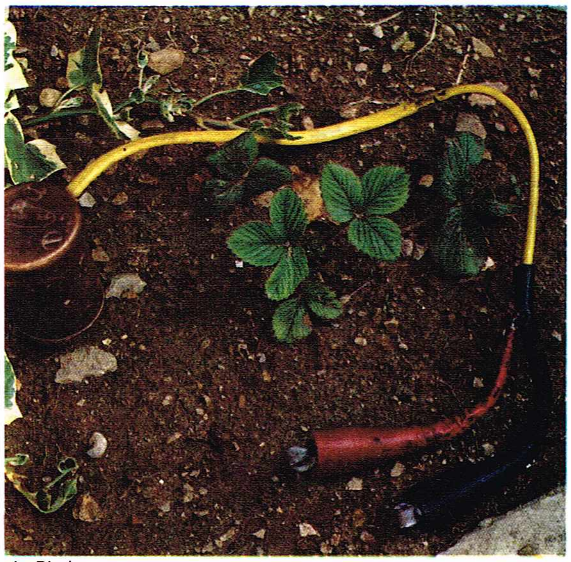

A. Rizzi

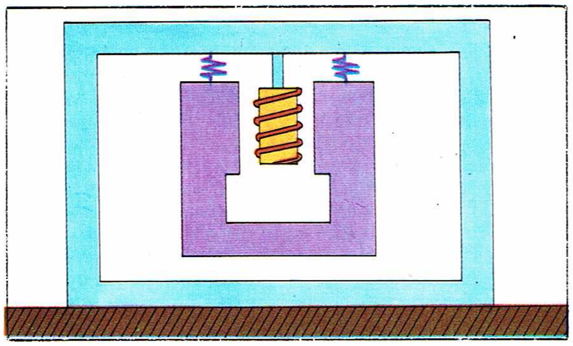

I.G.D.A.

▶ *Section schématique d'un géophone. Les vibrations de la surface du sol, sur lequel est posé l'instrument, produisent des déplacements de la bobine (en rouge) alors que l'aimant permanent (en violet) suspendu au centre par des ressorts, reste immobile. Ce déplacement crée une faible tension électrique qui est envoyée dans des amplificateurs. Ceux-ci restituent le signal, qui est alors envoyé dans un enregistreur.*

Les méthodes séismiques

Les méthodes séismiques sont fondées sur l'enregistrement d'ondes élastiques produites artificiellement de diverses manières dont la principale utilise les explosifs. Ces méthodes se différencient des deux autres décrites précédemment; en effet, ces dernières étudient des champs physiques naturels qui ne peuvent être influencés en aucun cas, tandis que les méthodes séismiques créent le champ à mesurer. De plus, la prospection séismique se subdivise, selon le type de problème à étudier, en deux types de méthodes dites à réfraction et à réflexion.

L'instrumentation adoptée se compose de trois éléments fondamentaux : le séismographe, ou géophone, l'amplificateur et l'enregistreur de type magnétique ou numérique.

Les **géophones** utilisés en prospection séismique sont de type électromagnétique. Ils sont constitués par une bobine se déplaçant dans l'entrefer d'un aimant et d'une masse suspendue à un ressort. Si le terrain se déplace assez rapidement sous l'effet des secousses séismiques, l'aimant suit le mouvement, tandis que la bobine et la masse restent immobiles par inertie : un déplacement relatif entre la bobine et l'aimant se stabilise, et par effet d'induction électromagnétique une faible tension électrique, proportionnelle à la vitesse relative entre ces deux éléments du géophone, se manifeste aux pôles de la bobine. Cette tension est envoyée dans les amplificateurs électroniques, et le signal qui sort de ces derniers est envoyé dans un enregistreur. La fidélité dans la reproduction des mouvements du terrain s'obtient en veillant à ce que la fréquence propre du géophone soit inférieure à toutes celles que l'on entend enregistrer. Les géophones sont sensibles, petits, robustes, maniables et peu onéreux. Cette dernière propriété est importante si l'on tient compte que, pour chaque enregistrement, on emploie une série de géophones, jusqu'à plusieurs dizaines, en vue d'améliorer le rapport entre le signal et le bruit de fond séismique.

Les **amplificateurs** et **enregistreurs de type magnétique,** dits **enregistreurs analogiques,** enregistrent la tension électrique fournie par le géophone, en l'ayant au préalable amplifiée et filtrée en fréquence. L'opération de filtrage facilite le passage des fréquences présentes dans les signaux utiles, en éliminant celles qui proviennent de perturbations. Pour pouvoir enregistrer la tension, il faut tenir compte de l'amplitude des signaux : comme le rapport du signal le plus petit au signal le plus grand est supérieur à 200 et que l'enregistreur magnétique usuel, du type à modulation de fréquence, accepte un rapport de 200 entre les deux signaux, on utilise un dispositif appelé « régulation automatique de gain » qui stabilise l'amplitude des enregistrements en augmentant le gain de l'amplificateur, lorsque le signal est faible et *vice versa.* Les enregistrements sont effectués sur une bande magnétique et reproduits sur un diagramme ayant en abscisse le temps et en ordonnée la distance au point de tir. Cette opération permet d'obtenir les hodochrones.

Les **amplificateurs** et **enregistreurs numériques,** ou **digitaux,** mesurent la tension électrique à intervalles réguliers et enregistrent la valeur numérique de la mesure sous forme d'un code composé d'impulsions appelées « digits ». Ce mode d'enregistrements, plus facile à traiter dans des ordinateurs, permet de diminuer l'importance de la régulation automatique de gain et donc de mesurer l'amplitude des signaux reçus.

Les *méthodes séismiques à réflexion* utilisent l'enregistrement des ondes réfléchies par les nombreuses surfaces de discontinuité existant dans le sous-sol. Le dispositif utilisé sur le terrain comprend un câble long de 400 à 1 000 m. Ce câble est étendu sur le sol et relie 24 géophones ou groupes de géophones à l'un des 24 amplificateurs auquel il transmet les signaux. Les 24 tracés qui reproduisent matériellement la sortie des amplificateurs, et donc les oscillations du terrain, paraissent alors sur les enregistrements. La dynamite qui produit les impulsions séismiques pèse habituellement quelques dizaines de kilogrammes, et les tirs s'effectuent soit dans le sous-sol à 10 ou 30 m, soit en nappe sur le sol.

Les bandes magnétiques enregistrent l'instant des explosions de la charge, l'arrivée des premières impulsions, puis toute l'énergie réfléchie par le sous-sol. Le temps écoulé entre l'instant des explosions et l'arrivée des réflexions est connu, grâce à un signal temps, avec une précision de l'ordre du 1/1 000 de seconde. Les valeurs du temps d'arrivée de chaque réflexion, mesurées sur au moins trois tracés, permettent de calculer la profondeur et le pendage des surfaces reflétantes. Habituellement, toutefois, en raison du nombre élevé des perturbations, on utilise les 24 tracés pour repérer les réflexions utiles. Une série de tirs de réflexion émis à faible distance les uns des autres fournissent une carte précise du sous-sol.

La technique de prospection à réflexion, de conception simple, peut présenter en pratique d'importantes difficultés, en raison de la complexité des signaux enregistrés, qui ne reflètent souvent qu'une petite partie des structures intéressantes. Lorsqu'on a affaire à des terrains difficiles à étudier, les principes géométriques simples qui sont à la base de la méthode ne suffisent pas toujours, et l'on doit

faire appel à des techniques interprétatives plus compliquées, tel l'enregistrement digital.

En mer, on utilise plutôt des dispositifs électriques : sparker ou boomer. Le **sparker** est constitué d'une batterie de condensateurs déchargée entre deux électrodes; l'étincelle brusque qui éclate crée une énergie acoustique qui se propage dans l'eau. Le **boomer** est une batterie de condensateurs déchargée dans une spire conductrice maintenue par des ressorts; l'énergie magnétique déforme brutalement la spire. Les signaux sont reçus sur des hydrophones à pression ou piézo-électriques, généralement placés dans des câbles hydrodynamiques, ou streamers. La pénétration varie de 30 à 600 m sous le fond, selon la puissance utilisée.

Les *méthodes séismiques à réfraction* ne sont applicables que si la vitesse séismique du terrain augmente avec la profondeur. Le cas le plus simple d'application se vérifie lorsqu'il existe une discontinuité nette entre deux couches; les ondes se propagent avec une vitesse V_1 dans la plus superficielle et avec une vitesse V_2, plus grande que V_1, dans la seconde couche.

Le principe de base de cette méthode utilise la théorie élémentaire des rayons séismiques. Quand des rayons issus de la source d'explosion S rencontrent la surface de discontinuité P, ils donnent naissance à d'autres rayons réfléchis et réfractés, dont un forme un angle égal à la valeur limite de l'angle α avec la perpendiculaire à la surface P. Il en résulte un rayon réfracté qui se propage dans le milieu à vitesse V_2, parallèlement à P. Une partie de l'énergie, qui voyage le long de la trajectoire de ce rayon réfracté, vient s'émettre vers le haut d'une façon continue et rejoint la surface.

La méthode repose essentiellement sur le fait que ces impulsions séismiques, dites impulsions réfractées, suivent un parcours géométrique (SKHG sur la figure ci-dessous) plus long que les impulsions qui relient directement le point de tir aux géophones (trajet SG) et peuvent arriver en premier. Si les géophones sont trop proches du point de tir, ce sont les impulsions directes qui arriveront les premières; par contre, si les géophones se trouvent à une certaine distance, dite *distance critique,* le phénomène d'onde réfractée se vérifiera. Cette distance est proportionnelle à la profondeur d'exploration. Cela apparaît sur le diagramme, où l'on donne les temps de propagation des premières impulsions en fonction de la distance. Le point critique se distingue par une brusque variation de pente du diagramme, appelée en terme technique *dromochrone.* La pente des deux branches du dromochrone, placées respectivement avant et après le point critique, donne les valeurs des vitesses séismiques des deux couches, si la surface de séparation est parallèle à celle du terrain.

Lorsque cette dernière condition ne se vérifie pas, que le nombre de couches est supérieur à deux ou que le terrain présente des caractéristiques variables le long du profil, il faut relever un nombre supérieur de dromochrones. Par conséquent, une prospection séismique à réfraction et son interprétation sont en général complexes.

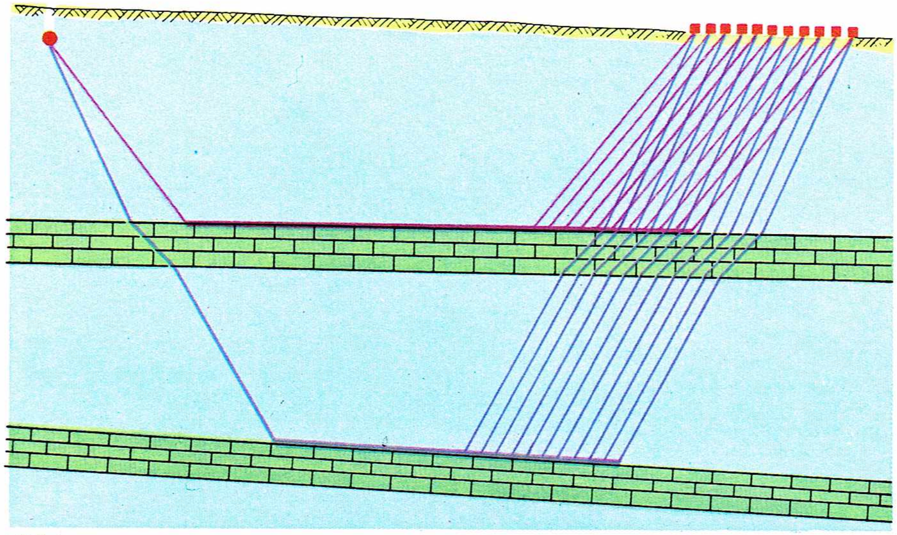

I.G.D.A.

▲ ***Parcours de l'énergie séismique issue de la source d'explosion (point rouge à gauche) jusqu'aux géophones (carrés orangés à droite), dans la méthode séismique à réfraction. En vert, des calcaires; en bleu, des argiles; en jaune, le sol (d'après Russel).***

Si l'on confronte les méthodes séismiques à réflexion et à réfraction, la première permet d'obtenir des sections de terrain dans lesquelles les structures géologiques sont délimitées avec précision, mais elle ne révèle pas la vitesse séismique des couches prises séparément; tandis qu'avec la seconde, la précision est inférieure, mais il est possible d'avoir les valeurs de la vitesse séismique et donc d'essayer de reconnaître certaines formations.

Pour les problèmes de génie civil (projet de digues, de galeries, etc.), on se sert en général de la méthode à réfraction. De même pour les études à caractère scientifique, poussant l'exploration jusqu'à quelques dizaines de kilomètres de profondeur. Dans de tels cas, la distance entre la source explosive et les géophones atteint environ 300 km. Toutefois la méthode séismique à réflexion reste de loin la plus utilisée; c'est en outre la méthode de détail par excellence de la prospection pétrolière.

Les méthodes électriques

Ces méthodes de prospection mesurent la différence de potentiel électrique existant entre divers points de la surface terrestre. Les potentiels peuvent être provoqués par des courants électriques naturels circulant dans le terrain ou artificiels. Dans le premier cas, on a affaire soit à des courants telluriques, dont on a déjà parlé, soit, plus localement, à l'effet des gisements de sulfures métalliques en état d'oxydation lente. Dans le second cas, l'introduction de courants dans le terrain s'effectue avec une modalité différente suivant les buts fixés par la prospection.

Les *méthodes des courants telluriques* consistent à déterminer, en un certain nombre de stations, l'intensité du courant qui circule à proximité de la surface. Les deux composantes du courant I s'obtiennent en mesurant les

▼ ***A droite, cheminement des lignes de flux du courant dans un milieu homogène : en haut, à l'intérieur de la Terre dans le plan vertical des électrodes; en bas, sur le plan de la surface terrestre. En bleu, les lignes de flux du courant, en rouge, les lignes équipotentielles; A et B, les deux électrodes émettant des courants dans le terrain; M et N, deux autres électrodes servant à mesurer la différence de potentiel provoquée par les courants.***

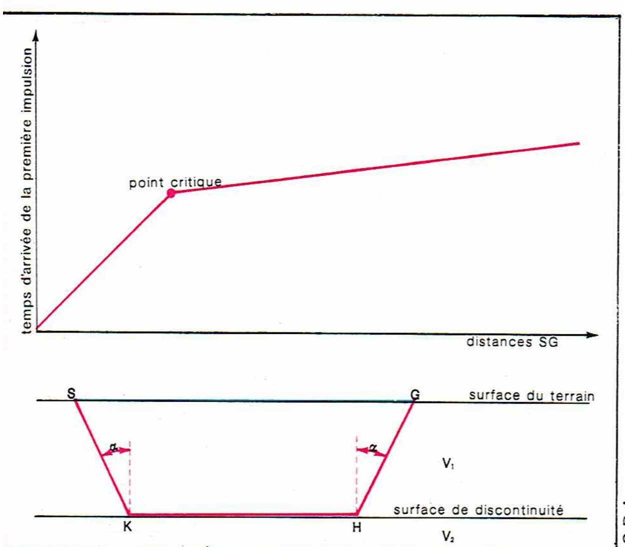

I.G.D.A.

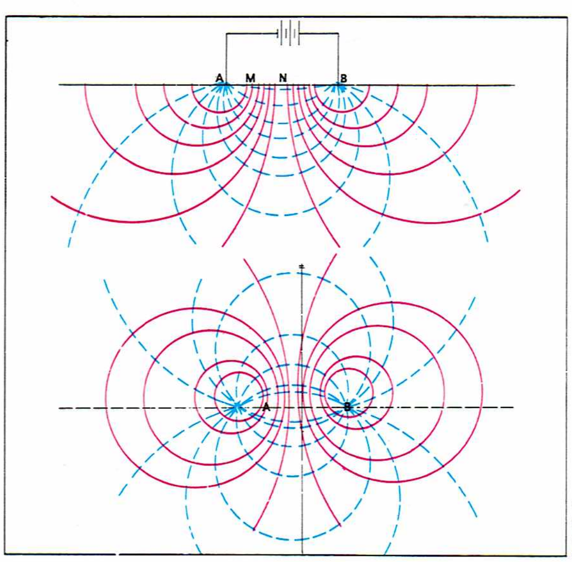

I.G.D.A.

potentiels entre deux dipôles AB et A'B', ayant le même centre O et des directions perpendiculaires. Puisque les courants telluriques varient avec le temps, les données mesurées n'ont de sens que si elles sont comparées à celles d'une station fixe. Comme toutes les méthodes d'investigation de champs naturels, celle des courants telluriques se heurte à des limites importantes.

Les techniques qui reposent sur des courants continus ou alternatifs à basse fréquence, créés artificiellement dans le terrain, sont plus efficaces. On opère d'habitude avec un minimum de quatre électrodes, c'est-à-dire avec un quadripôle. Deux électrodes (A et B) servent à émettre des courants dans le terrain, et deux autres (M et N) à mesurer la différence de potentiel provoquée par les courants. Grâce à ce quadripôle, on peut calculer la *résistivité électrique* des terrains homogènes, en mesurant l'intensité I et la différence de potentiel. En présence d'un sous-sol hétérogène, le nombre obtenu par le même calcul donne une valeur intermédiaire, ou *résistivité apparente,* entre les résistivités réelles des divers terrains compris dans un volume du sol proportionnel à la distance AB entre les électrodes.

Les explorations menées à l'aide du quadripôle peuvent être de type horizontal ou vertical. Dans le premier cas, on effectue des mesures maintenant constante la distance AB, c'est-à-dire la profondeur maximale d'exploration, en faisant varier la position du quadripôle (sondage électrique horizontal). On obtient ainsi une carte des résistivités des terrains d'égales variations d'épaisseur. Dans le second cas, la position du centre du quadripôle reste fixe, et la distance AB varie. On obtient alors une série de valeurs correspondant à des dimensions géométriques identiques mais situées à des profondeurs différentes (sondage électrique vertical). Ces données peuvent servir à déceler la présence de couches assez épaisses par rapport à leur profondeur, et à déterminer leur résistivité électrique. En pratique, de telles données s'utilisent sous forme de diagrammes : en abscisses sont reportées les distances croissantes d = AB et en ordonnées les valeurs relatives ρ_a des résistivités apparentes. L'interprétation de ces diagrammes s'opère par comparaison avec des courbes illustrant quelques cas typiques. D'habitude, on possède une collection de courbes théoriques, parmi lesquelles on choisit celle qui s'adapte le mieux au diagramme expérimental. Pour effectuer cette comparaison, il faut que les courbes théoriques, ou bien celle à interpréter, soient tracées à l'échelle bilogarithmique. Les sondages électriques verticaux ne s'utilisent que si les contrastes de résistivités entre les formations géologiques que l'on veut mettre en évidence sont suffisamment importants.

Les *méthodes électromagnétiques* sont fondées sur l'usage de courants alternatifs à fréquences relativement élevées (300 à 3 000 Hz environ) pour lesquelles les phénomènes d'induction deviennent sensibles. Ces courants circulent dans une bobine qui n'a aucun point de contact avec le terrain, et induisent dans le sol des « courants de Foucault » dont l'intensité varie avec la résistivité des roches. Les courants induits créent un champ magnétique secondaire qui modifie celui de la bobine. La structure du sous-sol peut être connue grâce aux mesures de l'amplitude et de la phase du champ électromagnétique résultant.

La détection de masses relativement conductives, et en particulier de gisements métallifères, est l'utilisation la plus courante de cette méthode. Les mesures peuvent être réalisées soit sur terre, pour la recherche de zones peu profondes d'anomalies, soit dans les airs, pour des relevés de caractère régional.

Les carottages géophysiques

Le mot *carottage* s'applique en géophysique aux mesures effectuées à l'intérieur des forages, dans le dessein de calculer les paramètres physiques (modules élastiques, résistivité électrique, perméabilité, propriétés radio-actives, etc.) des roches qui en composent les parois. Les techniques du carottage géophysique sont analogues aux techniques utilisées en surface, avec des variantes opérationnelles dues aux conditions particulières dans lesquelles s'effectuent les mesures.

Le *carottage électrique* est très utilisé au cours des forages pétrolifères, en vue de mettre en évidence les couches poreuses contenant des hydrocarbures. L'opération consiste à caler dans le trou, qui est rempli de boue

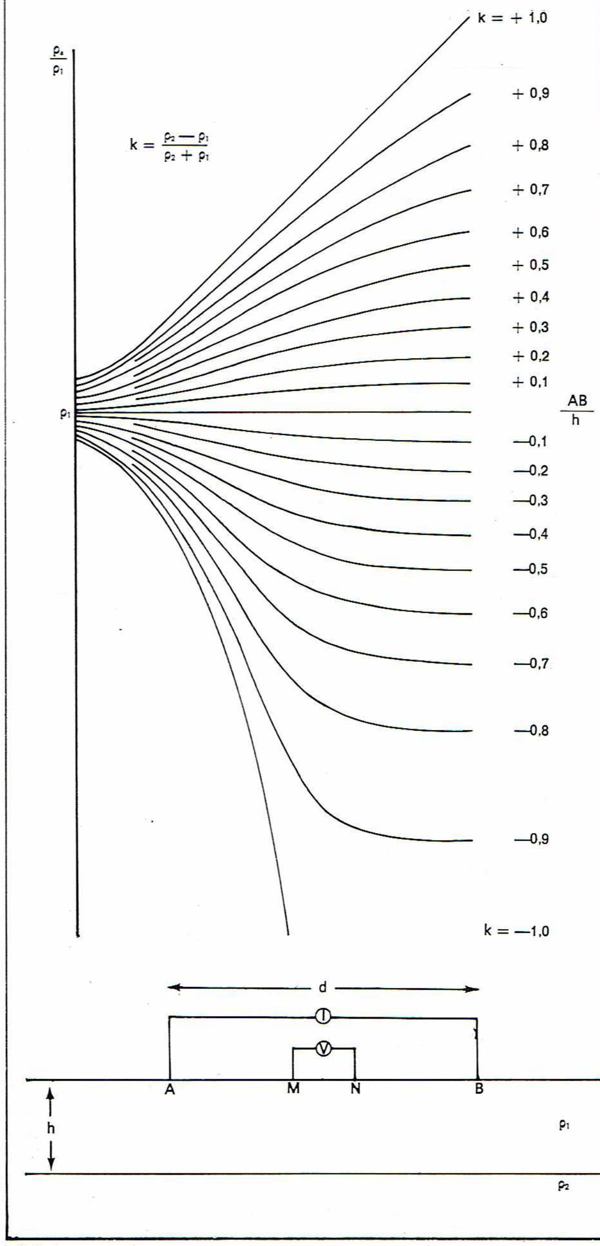

I.G.D.A.

▶ *Diagrammes théoriques de résistivité apparente dans le cas de deux couches ayant des surfaces de discontinuité plane et parallèle au terrain. En bas, section verticale :* A, B, *électrodes de courant;* M, N, *électrodes potentiométriques;* ρ_1, ρ_2, *résistivités dans la première et la seconde couche;* h, *distance entre les surfaces de discontinuité. En haut, les diagrammes : en abscisse, le rapport* AB/h, *et, en ordonnée, le rapport* $\rho_a/\rho_1 \cdot \rho_a$ *est la résistivité apparente;* $k = (\rho_2 - \rho_1)/(\rho_2 + \rho_1)$.

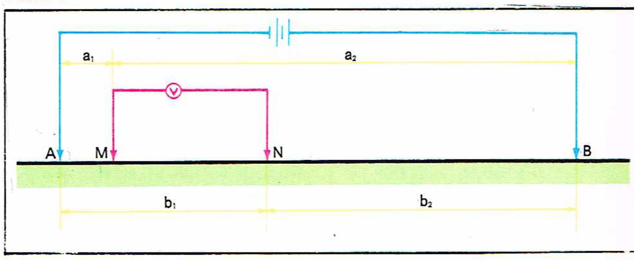

I.G.D.A.

▶ *Quadripôle formé de deux électrodes de courant* (A *et* B) *et deux électrodes potentiométriques* (M *et* N) *pour le calcul de mesures de résistivité;* a_1, a_2, b_1 *et* b_2 *sont les distances entre les deux types d'électrodes, à partir desquelles, pour un terrain homogène, on peut déduire la résistivité* ρ *de la formule*

$$\rho = \frac{2\pi V}{I} \cdot \frac{1}{\frac{1}{a_1} - \frac{1}{a_2} - \frac{1}{b_1} - \frac{1}{b_2}}$$

où V *est la différence de potentiel entre les deux électrodes potentiométriques, et* I *l'intensité du courant introduit dans le terrain par les deux électrodes* A *et* B.

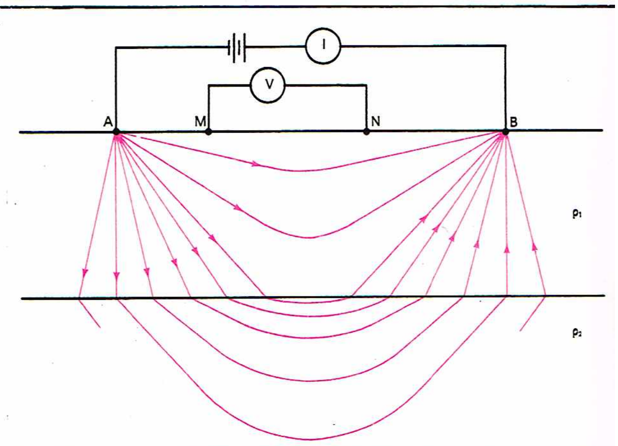

I.G.D.A.

▶ *Parcours des lignes de courant quand une couche, de résistivité plus grande, se trouve sur un fond conductible :* ρ_1, ρ_2, *résistivité de la couche et du fond* ($\rho_1 > \rho_2$)*;* A *et* B, *électrodes de courant;* M *et* N, *électrodes potentiométriques.*

de forage, un dispositif formé par plusieurs électrodes (de 2 à 4), capable d'effectuer des mesures de résistivités et de potentiels spontanés. Ces derniers se manifestent quand la boue filtre dans les formations perméables et sont dits *potentiels d'électrofiltration*. Les couches à hydrocarbures sont décelées par ces potentiels et par les hautes valeurs de la résistivité, dues à la présence de pétrole ou de méthane.

Le *carottage radio-actif* mesure les radiations émises par les roches des parois du trou, soit spontanément, soit après excitation. Le carottage neutronique est particulièrement important pour les recherches d'hydrocarbures. Il utilise une source de neutrons, et l'on mesure les radiations induites par les collisions entre ceux-ci et les noyaux atomiques de toutes les substances contenues dans les roches des parois. La radiation induite est faible en présence de nombreux noyaux d'hydrogène, et donc d'eau, ou d'hydrocarbures ; elle permet par conséquent de déterminer la porosité des roches.

Avec les *carottages séismiques*, très utilisés pour la recherche d'hydrocarbures, on mesure le module élastique et les autres paramètres liés à la propagation des ondes séismiques. Ils permettent en outre de déterminer les lois de variation de la vitesse de propagation, utiles à l'interprétation des relevés séismiques de surface. Le dispositif employé se compose d'un émetteur d'impulsion séismique à haute fréquence et d'un récepteur. Ces deux éléments sont constitués de vibrateurs piézo-électriques capables de déformations, sous l'action de fortes tensions électriques *(émetteurs)*, et de produire de faibles tensions sous l'action de pressions externes *(récepteurs)*. De tels dispositifs sont également utilisés pour étudier les propriétés mécaniques des roches des parois, dans le cadre des recherches civiles (construction de ponts, digues, etc.).

Enfin les *mesures de température* effectuées dans les trous de sondes méritent une mention particulière. Les valeurs du gradient de température, c'est-à-dire de la variation de la température en fonction de la profondeur, peuvent mettre en évidence des zones où le flux de chaleur est plus grand de bas en haut, et donc où il existe des roches très chaudes en profondeur, à cause, en général, des phénomènes volcaniques et, en particulier, de la présence d'eaux chaudes ou de vapeurs. Si ces dernières sont en quantités importantes, elles peuvent constituer une réserve d'énergie appréciable (énergie endogène).

Les carottages constituent, en définitive, un puissant moyen d'exploration qui valorise notamment les sommes dépensées pour l'exécution des puits et permet une meilleure interprétation des relevés géophysiques effectués en surface.

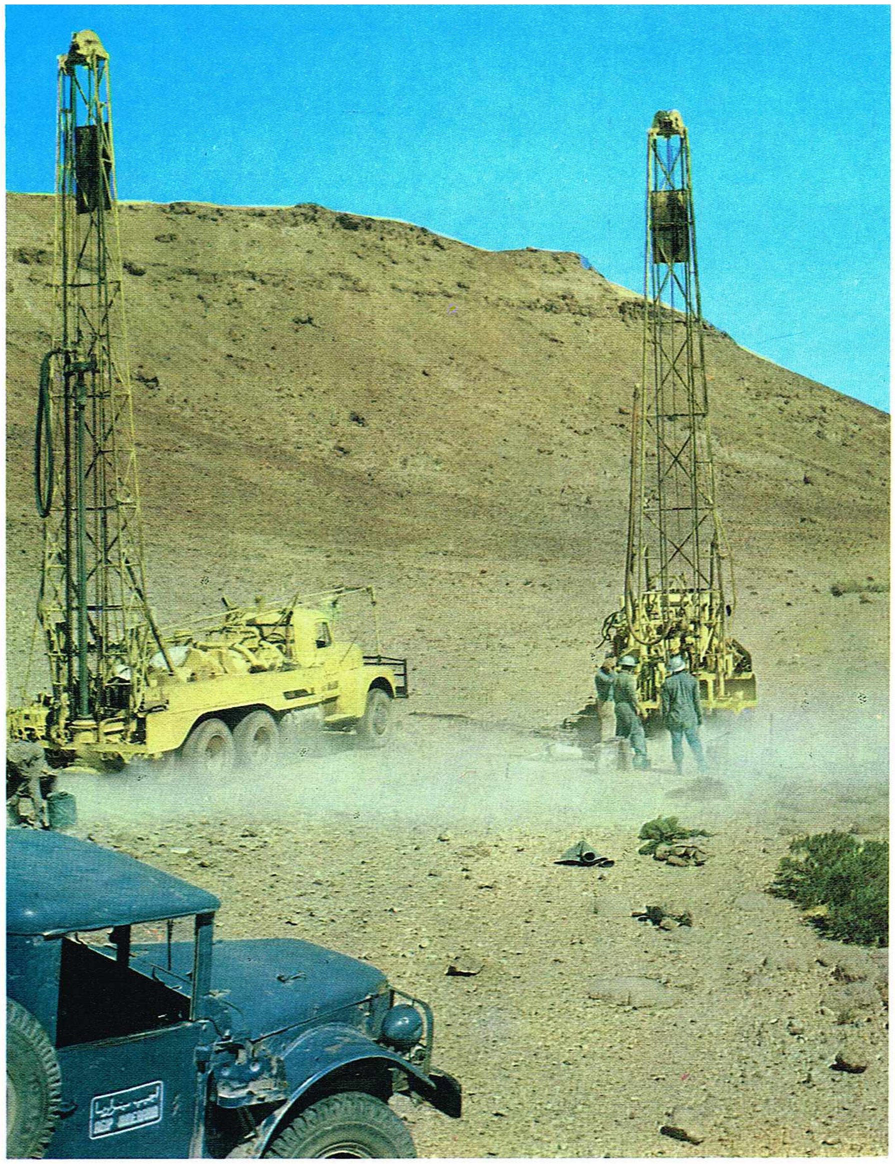

A. Rizzi

▲ ***Perforatrices utilisées pour des explorations séismiques profondes au cours d'une série de relevés exécutés au Maroc.***

▼ ***Carottage électrique à résistivité. A gauche, le dispositif de mesure calé dans le trou : A, électrode de courant (l'autre électrode B est en surface) ; M, N, électrodes potentiométriques ; ρ_1, résistivité du terrain qui entoure la couche à résistivité ρ_2, plus grande que ρ_1. A droite, le diagramme dont le maximum met en évidence la présence de la couche à plus forte résistivité.***

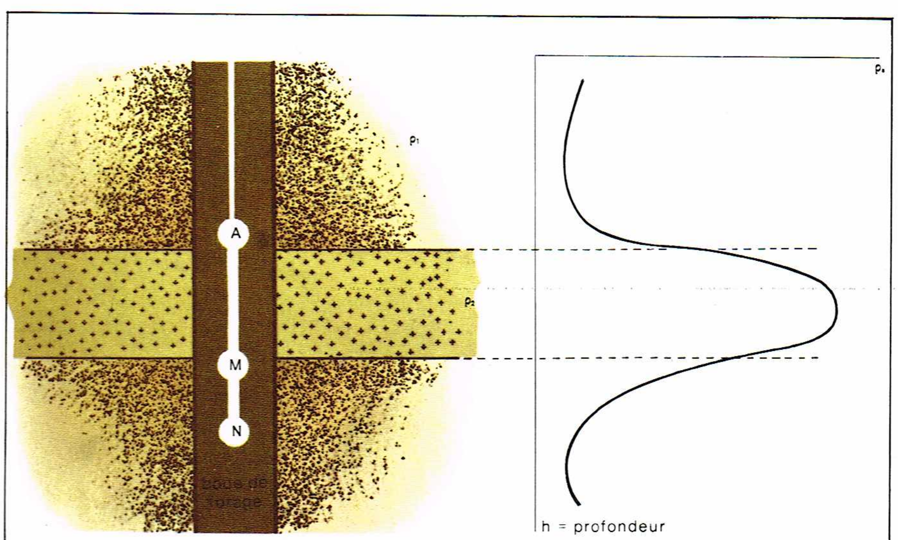

I.G.D.A.

BIBLIOGRAPHIE

AQUILINA C., *Lezioni di prospezione geofisica*, Ateneo, Roma. - BRUCKSHAW, *Magnetic Variometers*, Hilger and Watts, London. - CAGNIARD L., *Reflection and Refraction of Progressive Seismic Waves*, McGraw-Hill, New York, London, 1962. - DOBRIN M. D., *Introduction to Geophysical Prospecting*, McGraw-Hill, New York, Toronto, London, 1960. - GUTENBERG B., *Physics of the Earth's Interior*, Academic Press, New York, London, 1959. - *Handbuck der Phisike, Geophisik* 1, Springer-verlag, Berlin, Gottingen, Heidelberg. - HOWELL B. F., *Introduction to Geophysics*, McGraw Hill, New York, Toronto, London, 1959. - JAKOSKY J. J., *Exploration Geophysics*, Trija Publishing Co., Newport Beach. - LEET L. D., *Practical Seismology and Seismic Prospecting*, Appleton Century Co., New York. - *Mining Geophysics*, The Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, 1966. - MORELLI C., *Gravimetria*, Del Bianco, Udine, 1968. - PARKHOMENKO, *Electrical Properties of Rocks*, Plenum Press, New York, 1967. - *Physics and Chemistry of the Earth*, Pergamon Press, London, New York, Paris, Los Angeles. - *Physics of Geomagnetic Phenomena*, Academic Press, New York, London, 1967. - *Research in Geophysics*, The M. I. T. Press, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts. - ROTHE E. I. P., *Prospection géophysique*, Gauthier-Villars, Paris, 1950. - RUNCORN S. K., *Methods and Techniques in Geophysics*, Onterscience Publishers, London, 1966. - SOLAINI L., VECCHIA O., *Lezioni di geofisica applicata*, Tamburini, Milan. - TSUNEJI RIKITAKE, *Electromagnetism and the Earth Interior*, Elsevier Publishing Co., Amsterdam, London, New York, 1966. - VENING MEINESZ F. A., *The Earth Crust and Mantle*, Elsevier Publishing Co., Amsterdam, London, New York, 1964. - WYLLIE M. R. I., *The Fundamentals of Well Log Interpretation*, Academic Press, New York, 1963.

I.G.N.

Ballo

▲ La géodésie est la science qui étudie la forme de la Terre : à gauche, un ingénieur effectuant une mesure de distance au tellurомètre. *A droite, l'étude de la forme de la Terre et de sa configuration superficielle fut très active dès les temps les plus anciens. L'illustration reproduit la fameuse « mappemonde babylonienne », qui représente synthétiquement les connaissances géographiques des peuples mésopotamiens. Du demi-cercle, au nord, descend l'Euphrate, sur les rives duquel s'élevait Babylone; les cercles périphériques correspondent aux pays limitrophes de la Mésopotamie; le tout est entouré par le fleuve Océan, au-delà duquel se dressent sept îles, correspondant à autant de régions inconnues disposées selon la direction des vents (Londres, British Museum).*

GÉODÉSIE

Historique

La géodésie (mot dérivé du grec et composé de γῆ = terre et δαίω = je divise) est la science qui étudie la forme de la planète Terre. La géodésie recherche une formulation mathématique capable de représenter de la meilleure manière possible la forme de la Terre, et elle tend à déterminer, par des mesures appropriées et avec le maximum de précision, les paramètres numériques qui figurent dans l'expression mathématique. Tant pour parvenir à résoudre cet ensemble fondamental de problèmes que pour étendre le domaine de son intérêt scientifique et technique, la géodésie a donné naissance, durant le long cours de son développement, à de nombreuses disciplines collatérales; celles-ci, bien qu'elles soient aujourd'hui essentiellement autonomes, se sentent encore historiquement liées et dépendantes de cette science. Que l'on songe, par exemple, à toutes les opérations que nécessite le levé d'un territoire étendu, à la représentation cartographique de la région, à la théorie des erreurs d'observation, au procédé de compensation des mesures, et enfin à l'étude du comportement isostatique des continents.

La géodésie est l'une des sciences les plus anciennes, et, dès sa naissance, elle s'est développée dans deux directions fondamentales : une direction théorique et une direction pratique.

Le *but théorique,* à moyen terme, est la connaissance de la forme et des dimensions de la Terre et des propriétés de son champ de pesanteur pour l'élaboration d'hypothèses graphiques concernant l'intérieur du globe ainsi que pour le développement de mesures précises dans le domaine spatial (repérage et guidage de satellites).

Le *but immédiat* est la détermination des positions de points remarquables matérialisés de façon durable (points géodésiques et repères de nivellement) permettant l'établissement de cartes exactes et fournissant les données géométriques indispensables pour les diverses entreprises de l'ingénieur.

La géodésie s'est progressivement modifiée au cours des siècles en inventant des méthodes, des instruments de mesure et des procédés de calcul, et l'une de ses caractéristiques essentielles est la recherche de la précision maximale dans les mesures.

Antiquité et Moyen Age

La curiosité intellectuelle et les nécessités pratiques ont toujours conduit l'homme à s'intéresser au milieu dans lequel il était obligé de vivre, et, lorsque des barrières infranchissables lui fermaient la voie de la connaissance directe des mystères de la nature, le mythe intervenait très efficacement pour lever tous les doutes. En ce qui concerne la forme de la Terre, les Grecs et de nombreux peuples primitifs s'étaient construits une image issue entièrement de leur imagination et dépourvue de tout lien avec l'apparence visible. Cependant, dans toutes les civilisations, l'attention et la curiosité portées à la Terre, à sa forme, à ses rapports avec les autres corps célestes et les autres éléments, furent toujours très vives. Cette curiosité, sans supplanter le mythe, en imposant une vision expérimentale plus valable, avait permis au génie intuitif de certains hommes et au patient travail de recherche de générations entières de prêtres de s'approcher des véritables solutions et de résoudre rationnellement et expérimentalement quelques-unes des questions les plus obsédantes.

Le concept d'une Terre plate et ronde entourée par la mer, image typique du mythe grec, était sans doute répudié par la culture égyptienne. Les dimensions des temples égyptiens et même des pyramides reproduisent à l'échelle quelques-unes des dimensions du corps sphérique terrestre : ainsi, le périmètre de la pyramide de Chéops est égal à la cent vingtième partie du degré du méridien égyptien. Il apparaît non seulement que les prêtres égyptiens concevaient la Terre comme sphérique (intuition à laquelle étaient parvenus aussi Pythagore et Aristote), mais qu'ils avaient même su en mesurer les dimensions.

Malgré cela, c'est à Ératosthène (284-192 avant J.-C.), qui vécut plus d'un millénaire après, lui aussi Égyptien de naissance, que l'on attribue communément le mérite de la première mesure d'un des éléments métriques qui définissent notre planète : le *rayon de la sphère*. Son raisonnement était fort simple : lorsque les rayons du Soleil à Syène (l'actuelle Assouan) tombent perpendiculairement à l'eau à l'intérieur d'un puits vertical (donc dirigé vers le centre de la sphère terrestre), ces mêmes rayons ne tombent plus perpendiculairement à l'eau dans un puits, également vertical, construit à Alexandrie (qu'Ératosthène supposait située sur le même méridien que Syène) ; les rayons forment avec l'axe du puits d'Alexan-

drie un angle de 1/50 de 360°. La distance S entre Syène et Alexandrie était connue d'Ératosthène : la route, presque rectiligne, qui reliait les deux villes était parcourue très souvent par les caravanes qui connaissaient bien la durée du voyage et aussi bien la longueur du chemin : 5 000 stades, soit 925 km environ.

Le calcul simple d'Ératosthène fut le suivant (fig. 1) : l'angle α entre les rayons du Soleil et l'axe du puits d'Alexandrie est égal à l'angle qui intercepte l'arc de circonférence compris entre les deux villes. Donc, si R est le rayon de la sphère terrestre, sa valeur sera donnée par la relation : $R = \frac{S}{\alpha}$, où α est exprimé en radians. La valeur ainsi obtenue par Ératosthène était erronée d'environ 10 %. Aux siècles suivants, d'autres savants, utilisant des procédés très semblables à ceux d'Ératosthène, parvinrent à des valeurs plus précises dans la détermination du rayon terrestre. La valeur obtenue par les Arabes en 827 après J.-C. n'était erronée que de 3 %.

La science et la technique romaines s'étaient passionnément intéressées aux problèmes géographiques et plus spécialement aux problèmes topographiques et militaires du relèvement de zones limitées et même de territoires étendus; toutefois elles négligèrent presque totalement d'étudier la forme de la Terre, tournées qu'elles étaient surtout vers des intérêts concrets, et elles se contentèrent de reprendre aveuglément tantôt les mythes, tantôt les intuitions scientifiques grecques et égyptiennes. Le Moyen Age aussi, beaucoup plus attentif aux intérêts spirituels que matériels et entièrement consacré à l'approfondissement des problèmes de la connaissance de Dieu, négligea de se préoccuper de ce corps matériel qui soutenait les pas des pèlerins et des croisés.

Époque moderne et contemporaine

Il faut arriver à la fin du Ier siècle de l'ère moderne, au moment de la renaissance du commerce intercontinental et des expéditions de découverte et de conquête du Nouveau Monde, pour voir resurgir aussi l'intérêt pour la Terre, pour sa forme, ses dimensions et sa position dans le ciel. Ce même XVIe siècle voit aussi le début de méthodes de recherche nouvelles, tant du point de vue astronomique que du point de vue plus spécialement géodésique. A la fin de ce siècle et au début du XVIIe siècle, on adopta pour la première fois un procédé de mesure de la surface terrestre qui demeure encore de nos jours l'instrument principal de toute la géodésie pratique : la *triangulation* (nous en développerons plus loin le principe). W. Snéllius, géographe hollandais du début du XVIIe siècle, fut le premier à utiliser couramment cette méthode. Elle fut ensuite appliquée par de nombreux savants, toujours dans le dessein de parvenir à déterminer le rayon terrestre dans l'hypothèse de la sphéricité de la planète Terre. Cette hypothèse commença à vaciller lorsque, avec la découverte de la loi de gravitation universelle et les progrès de la mécanique, il fut possible à Newton de montrer par voie déductive analytique que la Terre devait avoir la forme d'une sphère aplatie aux pôles, forme très semblable à celle d'un ellipsoïde. Newton détermina également le rapport de la différence des deux demi-axes terrestres au demi-axe principal, rapport qui prend le nom d'*aplatissement*. La formulation de cette hypothèse, confirmée expérimentalement par la constatation de la variation de la pesanteur en des points différents de la Terre, eut comme conséquence la multiplication des mesures tendant à vérifier l'hypothèse et à déterminer expérimentalement la valeur de l'aplatissement.

C'est ce même but que se proposait la première grande triangulation que Jean Picard d'abord, puis Jean-Dominique et Jacques Cassini effectuèrent à travers toute la France, de Dunkerque à Perpignan, entre 1670 et 1718. A l'occasion de cette opération, on utilisa pour la première

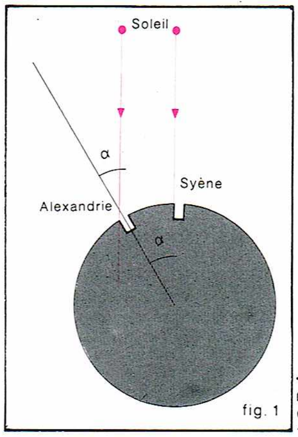

I.G.D.A.

▲ ***Fig. 1 : représentation schématique du « calcul d'Ératosthène » pour obtenir la mesure du rayon de la Terre.***

▼ ***Reproduction de la triangulation de la France exécutée par Cassini et Maraldi.***

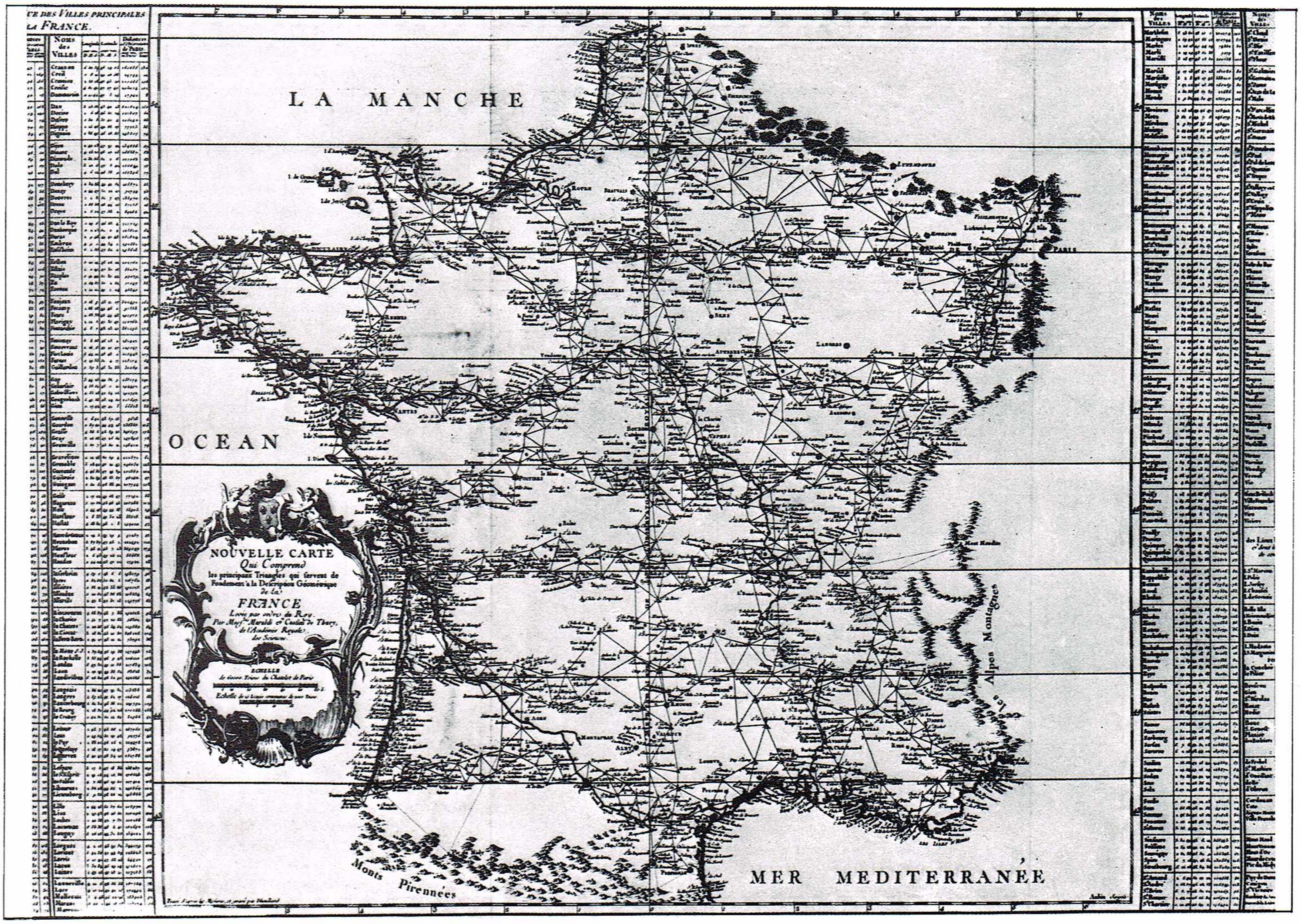

Ciccione

I.G.N.

fois des instruments à lunette munie d'un réticule. Le résultat numérique de ces mesures fut grossièrement erroné, mais il engendra une floraison d'études théoriques et de recherches expérimentales dans le domaine de la géodésie qui occupèrent tout le XVIIIe siècle et aboutirent à des résultats encore valables.

Science parmi les plus importantes du XVIIIe siècle, la géodésie s'attaqua essentiellement au problème de la mesure de l'arc de méridien. La discussion véhémente qui s'est élevée entre les partisans de l'ellipsoïde allongé suivant l'axe des pôles (cassiniens) et ceux de l'ellipsoïde aplati suivant le même axe (newtoniens) est tranchée en faveur de l'ellipsoïde aplati par les missions françaises chargées de mesurer 2 arcs de méridiens, l'un en Laponie (Maupertuis), l'autre au Pérou (La Condamine, Bouguer), par les travaux de Clairaut (1743), de Delambre et Méchain (1792-1799) qui définissent le *mètre-étalon* à partir de la mesure de la méridienne de France.

Au cours du XIXe siècle, l'Europe et beaucoup d'autres parties du monde se couvrirent peu à peu d'un dense réseau de triangles, mesurés avec de plus en plus d'exactitude, ce qui aboutit à l'établissement d'une cartographie des différentes régions, beaucoup plus fidèle et plus précise que les précédentes. En particulier, la triangulation effectuée par Gauss dans le Hanovre et celle de Bessel en Prusse méritent une mention particulière ; l'une et l'autre furent achevées dans les quarante premières années du XIXe siècle. Lors de ces triangulations, on appliqua pour la première fois la *compensation des observations* selon la *méthode des moindres carrés*. Cette même méthode de compensation, appliquée à beaucoup d'autres triangulations existantes, permit à Bessel de déterminer les *valeurs de l'aplatissement et du demi-axe terrestre principal* avec une approximation vraiment surprenante. En outre, les études théoriques sur la forme de la Terre et sur les problèmes de calcul des lignes géodésiques progressèrent au cours du XIXe siècle. On put notamment développer et approfondir la théorie analytique de Clairaut qui, dès la première moitié du XVIIIe siècle, avait démontré qu'il était possible d'obtenir la valeur de l'aplatissement terrestre par des mesures de la pesanteur effectuées en différents points disséminés sur toute la surface de la Terre.

L'étude de cette Terre commune à tous, de sa forme et de ses dimensions, fournit un des plus beaux exemples de collaboration scientifique internationale. En 1861 fut fondée l' « Association internationale pour la mesure du grade », à la constitution de laquelle contribuèrent presque toutes les nations européennes. La réunion de tous les savants et techniciens dans le domaine de la géodésie en une association unique constitua un fait nouveau dans l'histoire politique et juridique de la collaboration internationale ; de plus, elle suscita un véritable enthousiasme pour la réalisation d'entreprises grandioses, qui ne se limitaient pas au cadre étroit du territoire national, mais s'étendaient à des continents entiers et même à des ensembles de continents. Sous l'égide de cette association, les réseaux nationaux furent reliés entre eux et les procédés de mesure et de calcul uniformisés, tant dans les opérations d'astronomie géodésique que dans les triangulations, cependant que l'on assistait à la réalisation d'instruments de plus en plus précis et adaptés.

Dans toutes les parties du monde, on vit apparaître des réseaux de triangulations ; source d'informations scientifiques irremplaçables, ceux-ci permirent en outre l'édification d'une cartographie métriquement correcte, donc d'un grand intérêt pratique. Des missions scientifiques multiplièrent sur tous les continents les mesures de la pesanteur, utilisant des appareils toujours plus précis et plus perfectionnés. Ce fut précisément la possession d'une masse aussi abondante et aussi homogène d'informations qui permit à l' « Association internationale de géodésie » (c'est ainsi que fut appelée plus tard l' « Association internationale pour la mesure du grade ») de parvenir à Madrid en 1924 à la résolution d'adopter un ellipsoïde unique comme surface de référence pour tous les réseaux. On attribua à cet ellipsoïde, appelé *ellipsoïde international*, un demi-axe principal a et un aplatissement f de valeur :

$$a = 6\,378\,388 \text{ m} \pm 35 \text{ m}, \qquad f = 1/297{,}0 \pm 0{,}8.$$

Une contribution essentielle pour parvenir à cet accord et à ce résultat fut apportée par les travaux théoriques

et expérimentaux de deux savants : l'Allemand F. R. Helmert et l'Américain M. Hayford; en plus de 20 ans d'examen critique du matériel recueilli, ceux-ci parvinrent à des formulations très précises et très concordantes des paramètres dimensionnels de l'ellipsoïde terrestre.

Orientations de la recherche géodésique moderne

La recherche géodésique de tous ces siècles tendait essentiellement à déterminer la forme et les dimensions de la Terre. De la sphère d'Ératosthène à l'ellipsoïde international, le progrès a toujours eu une direction unique : perfectionner la représentation analytique de la forme de la Terre et augmenter la précision dans l'établissement de ses dimensions. Tous les savants reconnurent le même ellipsoïde international et le proposèrent seulement comme une représentation approchée de la figure de la Terre. Car au fur et à mesure qu'augmentaient la rigueur de la recherche théorique et la sensibilité des instruments de mesure, cette figure échappait de plus en plus à une formulation précise. Quelle était la surface réelle susceptible d'être prise comme figure de la Terre ? La surface physique ? Une surface idéale géométrique plus proche que toutes les autres de la surface physique ?

Déjà, du temps de Newton, on avait commencé à assimiler la surface de la Terre à une surface équipotentielle du champ de force de la pesanteur. Celle-ci n'était pas une surface réelle visible, mais plutôt une surface théorique. Par la suite, cette surface fut appelée *géoïde,* et ce terme est utilisé encore de nos jours.

Quelle est la forme réelle du géoïde ? Depuis la seconde moitié du XIX^e siècle, c'est la question que la géodésie se pose. Tout en adoptant pour les besoins pratiques l'ellipsoïde international comme surface de référence, la géodésie sait que les deux surfaces ne coïncident pas et se préoccupe de déterminer les écarts de l'une par rapport à l'autre. Les recherches que cette préoccupation a suscitées se proposent essentiellement un double but : parvenir à mesurer les écarts entre les deux surfaces par des mesures sur la surface physique de la Terre et expliquer la raison de l'existence de certaines déformations locales évidentes de la surface.

Les théories mathématiques de Stokes fournirent l'indication sur la méthode à suivre pour connaître les « ondulations » du géoïde par rapport à l'ellipsoïde. Pour cela, il est nécessaire de connaître, toujours, et d'une manière de plus en plus détaillée, les variations de la pesanteur sur la surface physique de la Terre. Les mesures de pesanteur devinrent donc l'un des secteurs dans lesquels se poursuivit la recherche géodésique au cours de la dernière période. Ces mêmes mesures de pesanteur furent très utiles aussi pour étudier, et donc pour expliquer, les déformations locales les plus apparentes du géoïde.

George Everest, géodésien anglais, fournit quelques éléments expérimentaux qui venaient confirmer les hypothèses formulées, mais non prouvées, par d'autres. Everest s'aperçut qu'au voisinage de l'Himalaya, au fur et à mesure que l'on s'approchait de la chaîne montagneuse, la direction de la verticale, c'est-à-dire la direction du fil à plomb, accusait un écart de plus en plus grand, par rapport à la direction théorique, c'est-à-dire à la direction de la normale à l'ellipsoïde. Ce fait était connu déjà précédemment : la masse des montagnes perturbe le champ gravimétrique et provoque une sorte de bombement de la surface équipotentielle. Mais le résultat inattendu fut que, une fois qu'on eut calculé la perturbation théorique, et donc la déformation du géoïde comme conséquence de l'attraction des montagnes, cette déformation se révéla beaucoup plus grande que celle que l'on avait expérimentalement mesurée. Tout se passait comme s'il existait sous la montagne un défaut de masse compensant la masse saillante.

Ainsi naquit l'*hypothèse isostatique,* ou *isostasie,* qui venait confirmer les théories intuitives de quelques savants, parmi lesquels les Américains Pratt, Airy et le Français Faye. L'hypothèse isostatique tend à expliquer certains phénomènes très apparents liés à la croûte terrestre et aide à mieux comprendre l'orogenèse des continents.

Tel a été le développement historique de la géodésie, en tant que science théorique et expérimentale, jusqu'à nos jours; mais le futur a déjà commencé. Les perspectives et les intérêts n'ont pas changé : étude de la forme et des dimensions de la planète Terre, étude du géoïde et de ses caractéristiques globales et locales. En revanche, les moyens ont presque radicalement changé. Les ondulations du géoïde peuvent être « vues » de manière beaucoup plus détaillée et sensible depuis un satellite, c'est-à-dire hors de la surface physique de la Terre. En effet, au sol, les mesures sont souvent perturbées par des phénomènes parasites locaux. Ces perturbations arrivent très atténuées sur le satellite, où les observations correspondent donc à une vue plus authentique et plus homogène du géoïde. En outre, les satellites ont permis de ne plus limiter l'observation aux seuls terres émergées, limitation qui réduisait le champ d'observation du géodésien à seulement 1/5 de la surface du globe. Les triangulations continentales sont destinées à devenir des réseaux locaux du deuxième ordre : la triangulation mondiale est en train de naître, qui enveloppera la Terre tout entière dans un réseau de triangles spatiaux et qui permettra la détermination de la forme et des dimensions du globe.

Les surfaces de référence

Le champ de pesanteur

Le champ de pesanteur résulte de l'attraction newtonienne des masses qui constituent la Terre et de la force centrifuge engendrée par le mouvement de rotation de la Terre. Rappelons que l'intensité de la force d'attraction newtonienne f_N est donnée par :

$$f_N = K \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

où m_1 et m_2 sont les masses qui s'attirent, r la distance entre les centres de gravité des deux masses et K la constante de gravitation universelle, qui tient compte des unités de mesure employées; la direction de la force est donnée par la droite qui joint les deux barycentres. L'intensité de la force centrifuge f_c, à laquelle est soumis un corps que l'on fait tourner à la vitesse angulaire ω autour d'un axe éloigné de son barycentre de la distance R, est donnée par la relation : $f_c = m_1 \omega^2 R$; la direction de cette force est la même que celle du rayon R, son sens est opposé à celui de l'axe de rotation. En tout point du champ, la force de pesanteur est le résultat de ces deux forces.

Surfaces équipotentielles et géoïde

Les mêmes forces qui engendrent le champ agissent nécessairement sur chacun des éléments de matière qui constituent la Terre. Mais ces éléments ne bougent pas, bien qu'ils soient tous soumis à la force de pesanteur, parce que la résistance et la rigidité internes d'un corps à l'état solide s'opposent à la force de la pesanteur.

On peut légitimement se demander ce qu'il adviendrait si la rigidité du corps solide n'existait pas, c'est-à-dire si toute la masse de la Terre était non pas à l'état solide, mais à l'état liquide. Les éléments de matière, soumis à la force d'attraction newtonienne et à la force d'accélération centrifuge, seraient-ils alors en mouvement incessant? Non, parce que la masse à l'état liquide se stabiliserait dans une forme particulière d'équilibre, dans laquelle la résistance à la compression, propre aux liquides, et non plus les forces de cohésion, s'opposerait à la force de pesanteur. La surface qui contient toute la masse liquide de la Terre et la sépare de la partie externe, lorsqu'elle est en équilibre et qu'il n'existe pas d'influences provenant d'autres corps ou d'autres types de mouvement du corps, a une forme et une dimension constantes. Elle est appelée *surface équipotentielle*.

Déplacer une masse sur une telle surface n'exige d'autre effort que celui de vaincre le frottement et les forces d'inertie. En effet, sur tous les points de cette surface, la force de pesanteur est dirigée normalement à la surface (s'il en était autrement, la force provoquerait nécessairement un mouvement dans la masse liquide) ; or, on sait qu'il n'y a pas de travail lorsque le mouvement est normal à la force. En supposant alors la Terre composée d'une masse à l'état liquide, sa forme serait justement celle d'une surface équipotentielle. La *verticale* dans tous les points de cette surface, c'est-à-dire la direction du fil à plomb (qui coïncide avec la direction de la force de pesanteur), serait également normale à ce que nous pourrions appeler la *surface physique de la Terre,* ou *surface de discontinuité,* ou *séparation franche,* entre la partie liquide interne et la partie aérienne externe. Les théories cosmogoniques admettent que le système solaire avec toutes ses planètes s'est formé par séparation initiale de fragments de matière à partir d'un seul et immense corps gazeux central en rotation. Ces fragments se sont

◄ ***Page ci-contre, un signal d'observation géodésique.***

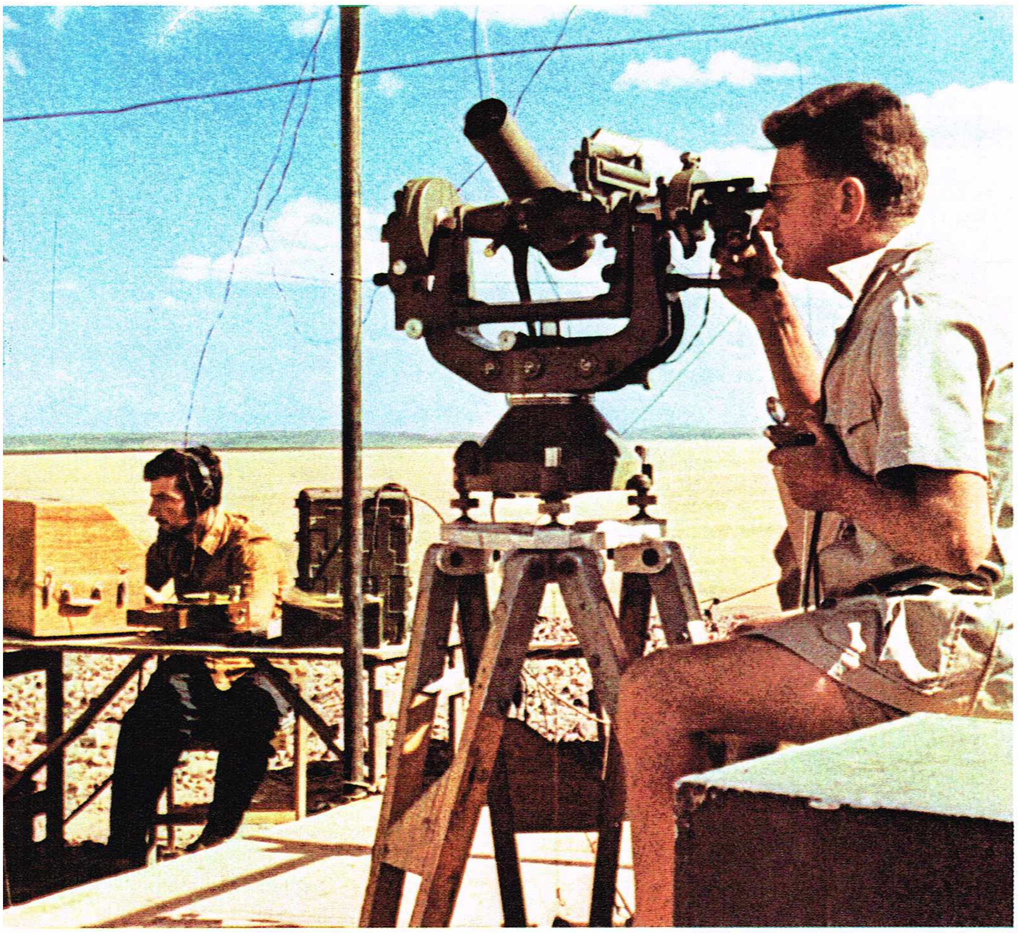

I.G.N.

▲ *Appareillage d'une station astronomique en campagne.*

progressivement condensés, et leur partie superficielle, ou croûte, a dû nécessairement passer par l'état liquide intermédiaire avant de passer à l'état solide. Tant que l'état liquide s'est maintenu, la surface de séparation entre la partie liquide et la partie gazeuse était nécessairement, à cause de l'existence du champ de force, une surface équipotentielle.

La surface topographique

Au cours des ères géologiques, la croûte terrestre a subi une série de changements évidents dans leurs aspects les plus macroscopiques : formation des plaques continentales, des fosses océaniques et des chaînes montagneuses. Ces mutations n'ont intéressé qu'une mince couche superficielle et n'ont pas été suffisantes pour bouleverser la forme de la Terre, laquelle par conséquent doit être très voisine de la surface équipotentielle du champ de la pesanteur dont nous avons parlé plus haut. Naturellement, les fractures continentales, les éventuels mouvements des continents, les fosses océaniques et les plissements montagneux ont localement altéré la forme de cette surface topographique. Les écarts entre la surface topographique et la surface équipotentielle (géoïde) peuvent atteindre près de 9 km pour les plus hautes montagnes et 11 km pour les fosses océaniques.

On pourrait être tenté d'affirmer que le géoïde coïncide avec la surface des mers et des océans. Cela n'est pas tout à fait vrai, même si en réalité la surface de l'hydrosphère est beaucoup plus semblable à la surface du géoïde que ne le sont la surface physique des continents et le fond des océans. Les marées, dues aux attractions des autres corps célestes (Soleil, Lune), les vents et les courants marins, les différences de température et de salinité perturbent l'état d'équilibre du liquide, qui, par conséquent, ne possède pas une forme constante dans le temps et ne coïncide pas non plus avec le géoïde. Donc, l'affirmation que la forme de la Terre est celle de la surface libre des océans, prolongée sous les continents, n'est pas tout à fait exacte, bien qu'elle soit très approchée.

Ellipsoïde terrestre

Vers le milieu du XVIII[e] siècle, Clairaut a montré que pour un fluide homogène ayant les dimensions et la vitesse de rotation de la Terre et soumis à sa propre attraction, la forme d'équilibre était un ellipsoïde de révolution d'aplatissement 1/232. Il avait obtenu des relations très remarquables reliant l'aplatissement f, la variation relative β de la pesanteur à sa surface et la latitude φ. La théorie de Clairaut permet de calculer la pesanteur g à la latitude φ :

$$g = g_E\,(1 + \beta \sin^2 \varphi + ...)$$

$$\text{avec } \beta = \frac{g_P - g_E}{g_E},$$

où g_P, g_E sont les valeurs de la pesanteur respectivement au pôle P et à l'équateur E

$$\text{et } \beta + f = \frac{5}{2}\,\frac{\omega^2 a}{g_E},$$

a étant le demi-grand axe de l'ellipsoïde.

En fait, l'aplatissement de l'ellipsoïde terrestre est plus faible (1/298). Cette différence s'explique en considérant l'équilibre d'une masse en rotation formée de fluides de densités différentes. Le fait que les satellites de la Terre se trouvent soumis non pas au champ de gravitation d'une masse ponctuelle ou sphérique, mais au champ de gravitation d'un ellipsoïde, entraîne que les orbites n'obéissent pas exactement aux lois de Kepler. Cet effet, déjà sensible pour la Lune, est encore plus marqué pour les satellites artificiels, plus proches de la Terre. Les inégalités qui en résultent pour leur mouvement sont beaucoup plus grandes, et leur proximité permet des observations très précises. De l'étude de leur mouvement on a tiré pour l'aplatissement la valeur 1/29 825, qui constitue à l'heure actuelle la meilleure approximation.

Toutefois, la nécessité d'adopter un ellipsoïde de calcul s'est imposée dès les débuts de la géodésie classique (XVIII[e] et XIX[e] siècle). Chaque nation a fait choix pour sa triangulation du modèle ellipsoïdique qui lui a paru, à l'époque, le mieux adapté. Le tableau ci-dessous donne quelques exemples de ces ellipsoïdes de référence nationale.

Pays	Ellipsoïde	Demi grand axe a (en m)	Aplatissement f
France	Clarke 1880	6 378 249,293	1/293,466 02
Grande-Bretagne	Airy 1830	6 377 542,178	1/299,324 96
Allemagne	Bessel 1841	6 377 397,155	1/299,152 81
Etats-Unis	Clarke 1866	6 378 206,400	1/294,978 70
U. R. S. S.	Krassovski 1940	6 378 245,000	1/298,3

Richard Colin

▶ *Tableau de quelques ellipsoïdes de référence.*

Tant que l'on cherchait à représenter une région du globe terrestre, il appartenait à chacun de choisir l'approximation qui lui paraissait la meilleure. Mais à partir du moment où l'on envisageait l'ellipsoïde comme la base d'un système de référence conventionnel, il y avait au contraire le plus grand intérêt à ce que ce système de référence fût choisi par une décision internationale. A Madrid, en 1924, l'Union géodésique et géophysique internationale (U.G.G.I.) choisissait l'ellipsoïde de Hayford.

● *Ellipsoïde de Hayford, dit international (1924)*. La valeur de *a* est tirée de l'analyse des triangulations, notamment en Amérique du Nord ; *b* provient de mesures gravimétriques ; *f* est tiré de la formule de Clairaut.

$$a = 6\,378\,388 \text{ m} \qquad f = \frac{a - b}{a} = 1/297$$

$$b = 6\,356\,911{,}946 \text{ m}$$

Pesanteur standard (en cm/s/s ou gals) :

$$g = 948{,}049\,(1 + 0{,}005\,288\,4 \sin^2 \varphi - 0{,}000\,005\,9 \sin^2 2\,\varphi)$$

● *Ellipsoïde de référence 1967*. Après l'avènement des satellites artificiels, on a défini un nouvel ellipsoïde de référence. L'analyse des trajectoires des satellites a donné très rapidement une valeur de l'aplatissement *f*. La constante (FM) de l'attraction universelle (pour la Terre) a été déterminée par des mesures directes de distances sur des satellites artificiels ou naturels (Lune). Le demi-grand axe *a* résulte d'estimations faites à partir de grandes géodésiques continentales, notamment aux États-Unis par Mme Irène Fischer de l'Army Map Service.

L'Union astronomique internationale, et à sa suite l'Union de géodésie et géophysique internationale, ont adopté les constantes suivantes :

$$FM = 398\,603 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$$

$$a = 6\,378\,160 \text{ m}, \quad \omega = 7{,}292\,115\,146\,7 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$$

et, par suite, les grandeurs dérivées :

$$f = 1/298{,}247\,167\,4 ; \; b = 6\,356\,774{,}516 \text{ m}$$

gravité standard (en gals) :

$$g = 978{,}038\,(1 + 0{,}005\,302\,4 \sin^2 \varphi - 0{,}000\,005\,9 \sin^2 2\,\varphi).$$

Le système géodésique de référence 1967 doit remplacer progressivement l'ellipsoïde de Hayford dans toutes les applications, notamment en gravimétrie. On peut considérer que le géoïde diffère de cet ellipsoïde tout au plus d'une centaine de mètres.

Les techniques de la géodésie

Astronomie géodésique et géométrie différentielle de l'ellipsoïde terrestre

Comme nous l'avons vu précédemment, l'étude théorique du champ gravitationnel terrestre a conduit les géodésiens à admettre que l'expression analytique qui représente avec une bonne approximation la surface du géoïde est l'*ellipsoïde de révolution*. La mesure des dimensions de la Terre équivaut à la mesure d'un des demi-axes de l'ellipsoïde terrestre, en général le demi-axe équatorial *a*, étant donné que l'autre est déterminable si l'on connaît l'aplatissement.

Avant de donner un aperçu du procédé de mesure de *a* et des travaux qui ont été accomplis pour parvenir à sa détermination, il est nécessaire de donner quelques indications sommaires sur deux branches de la géodésie : l'astronomie géodésique et la géométrie différentielle de l'ellipsoïde, qui ont fourni des données et des instruments analytiques très importants pour résoudre ce problème géodésique fondamental.

— L'*astronomie géodésique* est l'ensemble des procédés pratiques et théoriques qui permettent de connaître, par rapport au système de référence plus général lié aux étoiles (système propre à l'astronomie), la direction de la verticale en un point quelconque de la surface des continents ou des îles, et la direction reliant deux points intervisibles de la surface terrestre. Les deux coordonnées astronomiques qui définissent la direction de la verticale en un point, coïncidant par définition avec la normale au géoïde, sont : la *latitude astronomique* φ et la *longitude astronomique* λ (fig. 2). On appelle *latitude astronomique* l'angle que la verticale forme avec le plan équatorial ; on appelle *longitude astronomique* l'angle dièdre entre le méridien astronomique qui contient le point et le méridien fondamental de référence ; on appelle *azimut astronomique* l'angle dièdre entre le méridien astronomique qui passe par A et la section normale en A qui passe par B ; le *méridien astronomique* d'un point est le plan vertical (qui contient la verticale en un point) parallèle à l'axe polaire, tandis que la *section normale* en A est un plan vertical (qui contient la verticale en A) qui passe par le point B.

Les mesures de φ, λ et A sont effectuées à l'aide d'instruments goniométriques très complexes, faisant intervenir la visée simultanément, non seulement des points du terrain, mais aussi de groupes d'étoiles (dont il faut connaître les coordonnées astronomiques de position). Les mesures de temps (indispensables pour déterminer λ) sont aujourd'hui énormément facilitées par les transmissions radio des signaux horaires provenant des observatoires répartis en différents points de la surface terrestre, où se trouvent les horloges atomiques les plus précises. Il serait trop long d'entrer dans les détails de ces opérations et des instruments employés qui permettent de déterminer les coordonnées φ, λ et A, avec des erreurs de l'ordre de quelques dixièmes de seconde sexagésimale.

— La *géométrie différentielle appliquée à l'ellipsoïde terrestre* a permis de résoudre certains problèmes d'un grand intérêt en géodésie. Avant tout, elle a étudié les caractéristiques de la surface ellipsoïdique et le comportement sur celle-ci de ces lignes particulières appelées *géodésiques* (la géodésique entre deux points est la ligne de la surface qui possède la longueur minimale parmi toutes celles que l'on peut tracer sur la surface et qui passent par les deux points donnés). Ensuite, après avoir fixé sur l'ellipsoïde un système de référence pour les coordonnées, avec des définitions très proches de celles des coordonnées astronomiques, elle a résolu le problème

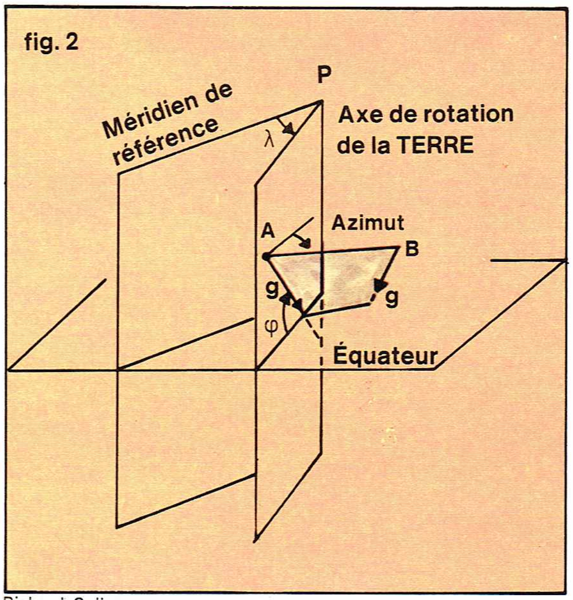

Richard Colin

◄ ***Fig. 2** : représentation schématique des coordonnées astronomiques : φ, latitude astronomique ; λ, longitude astronomique.*

▼ ***Fig. 2'** : représentation schématique des coordonnées ellipsoïdiques : φ', latitude ellipsoïdique ; λ', longitude ellipsoïdique.*

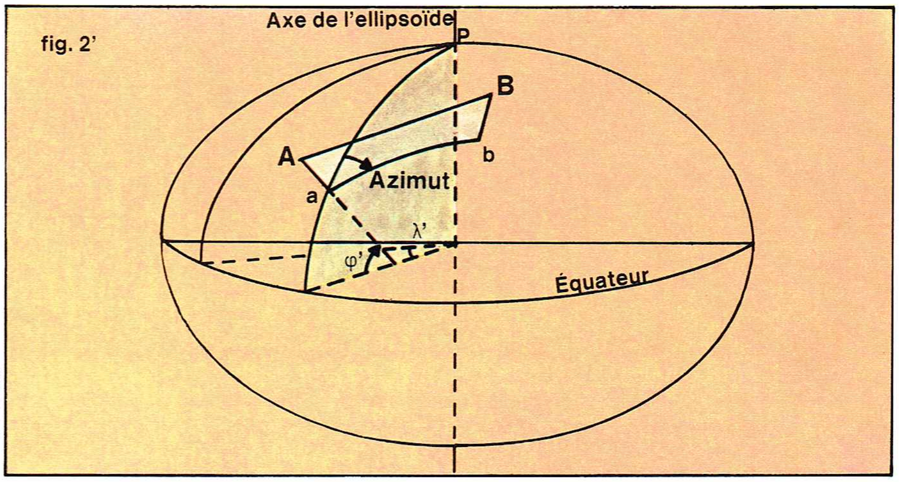

Richard Colin

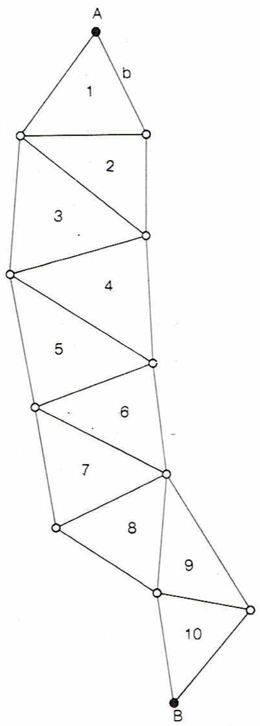

fig. 3

I.G.D.A.

▲ ***Fig. 3 : exemple schématique de triangulation géodésique sur une surface plane; en connaissant le point A, le côté b, pris comme base du premier triangle, et les deux angles à la base de ce dernier, le calcul trigonométrique permet, par des opérations successives sur les triangles construits au fur et à mesure, de déterminer la distance AB sur le plan.***

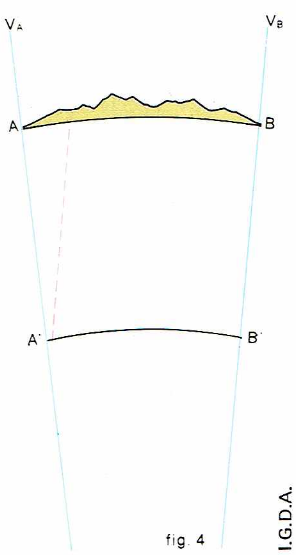

fig. 4

I.G.D.A.

complexe qui consistait à calculer les coordonnées sur l'ellipsoïde d'un point B, en connaissant les coordonnées d'un point A et les valeurs mesurées de certains éléments géométriques (fig. 2'). On appelle *latitude ellipsoïdique* φ' d'un point A de la surface de l'ellipsoïde l'angle que la normale à l'ellipsoïde passant par ce point forme avec le plan équatorial. On appelle *longitude ellipsoïdique* λ' de A l'angle dièdre que le plan méridien ellipsoïdique en A forme avec le plan méridien de référence. On appelle *azimut ellipsoïdique* de B par rapport à A l'angle dièdre A' entre le méridien ellipsoïdique passant par A et le plan normal passant par A qui contient aussi B (ou section normale).

A leur tour, les *méridiens ellipsoïdiques* sont les plans qui contiennent la normale à l'ellipsoïde en chaque point et qui sont parallèles au demi-axe polaire de l'ellipsoïde.

Puisque l'ellipsoïde terrestre est un ellipsoïde de révolution, les méridiens ellipsoïdiques contiennent tous l'axe polaire de l'ellipsoïde terrestre et appartiennent donc à ce même faisceau, tandis qu'il en est autrement pour les méridiens astronomiques, puisque le géoïde n'est pas exactement une surface de révolution. Les formules de la géométrie des surfaces permettent d'obtenir les coordonnées ellipsoïdiques φ' et λ' d'un point B, une fois connues les coordonnées φ' et λ' d'un point A et une fois mesurée la longueur de la géodésique sur l'ellipsoïde qui passe par A et B, et l'azimut de B par rapport à A. Ces formules, très simples lorsque A et B sont proches, deviennent progressivement plus complexes au fur et à mesure que la géodésique augmente. Outre le problème direct, on a résolu le problème inverse qui consistait à calculer l'azimut et la longueur de la géodésique, une fois connus φ' et λ' relatifs aux deux points A et B.

Les triangulations géodésiques

Le schéma géométrique de la *triangulation sur une surface plane* est très simple (fig. 3). Du point A part une chaîne de triangles ayant un côté commun. Mesurons, pour chacun de ces triangles, deux angles, et déterminons, en outre, le côté b, par exemple, du premier triangle. Par de simples formules de trigonométrie plane, connaissant b et deux des angles du triangle 1, on obtient tous les autres éléments du triangle 1, en particulier le côté commun avec le triangle 2. En opérant de manière identique sur le triangle 2, on obtient tous les éléments de ce dernier, dont le côté commun avec le triangle 3, et ainsi de suite jusqu'au dernier triangle. Tous les éléments des triangles sont ainsi connus et, à l'aide de ces éléments et en utilisant toujours des relations trigonométriques, on arrive à connaître la distance AB sur le plan.

Ce schéma se complique considérablement lorsqu'on le transporte du plan sur la surface de l'ellipsoïde terrestre. Du point de vue pratique, il faut avant tout préciser quels sont les éléments à mesurer; la théorie indique qu'il faut mesurer les angles entre les tangentes aux géodésiques qui, issues d'un sommet, rejoignent les deux autres sommets du triangle ellipsoïdique; le côté *b* ainsi mesuré est lui aussi une géodésique sur l'ellipsoïde, par conséquent sa longueur est celle de la géodésique correspondante qui passe par les deux sommets consécutifs.

Quelques théorèmes fondamentaux viennent aider l'opérateur des mesures, puisqu'ils démontrent que, dans un espace limité, on peut adopter des modalités d'exécution approchées très simplifiées. Le domaine de validité de ces théorèmes est de plusieurs dizaines de kilomètres d'étendue. Ils énoncent : dans un tel espace limité, un triangle ellipsoïdique peut être considéré, du point de vue pratique, comme un triangle sphérique; les angles au sommet à mesurer sont les angles dièdres entre les sections normales qui contiennent les deux autres sommets du triangle; en effet, ces angles ne diffèrent que d'une quantité négligeable des angles entre les tangentes aux géodésiques qui contiennent les mêmes points; enfin, la longueur d'une géodésique entre deux points peu éloignés de l'ellipsoïde est égale à la longueur de l'arc de section normale. La section normale est un plan qui contient la verticale au sommet considéré et passe par l'autre point.

En vertu de ces théorèmes opérationnels, les angles au sommet de la *triangulation ellipsoïdique* sont mesurés à l'aide d'un théodolite (voir le chapitre consacré à la topographie). L'axe de rotation de l'alidade coïncide avec la verticale locale passant par le sommet du triangle. La longueur de la géodésique *b* est mesurée le long de la section normale de l'ellipsoïde qui passe par les deux premiers sommets. Puisque les mesures des longueurs sont en réalité exécutées sur la surface physique de la Terre, il faudra apporter à ces mesures des corrections opportunes pour tenir compte du fait que la surface physique ne coïncide pas avec l'ellipsoïde; il faut notamment se souvenir que les verticales ne sont pas parallèles et que, par conséquent, un arc de section normale mesuré sur un terrain extérieur au géoïde est plus long que l'arc correspondant sur l'ellipsoïde terrestre (fig. 4).

Dans ce même domaine de validité des théorèmes de la géodésie opérationnelle, le calcul des éléments inconnus des triangles ellipsoïdiques peut se faire sur une sphère dont le rayon peut être déterminé en fonction de la latitude ellipsoïdique moyenne des sommets du triangle. Cette sphère est appelée *sphère locale*. Donc la triangulation ellipsoïdique peut être opérée, triangle par triangle, comme une triangulation sphérique; celle-ci, à son tour, dans la limite d'approximation des mesures, peut être transposée avec les corrections voulues (en particulier la correction de l'excès sphérique) à une triangulation plane. On parvient ainsi à connaître, comme dans le schéma plan, la longueur de l'arc de géodésie comprise entre les sommets A et B.

Les méthodes que nous venons de décrire, certes avec une grande approximation, sont celles qui ont servi au XVIII[e] siècle, au début des grands travaux géodésiques; aujourd'hui, le mode d'opérer est très différent. Notons auparavant que la triangulation géodésique s'est révélée un instrument très utile, non seulement dans la poursuite de buts hautement scientifiques, comme la détermination des paramètres de forme et des dimensions de la Terre, mais aussi dans l'acquisition de connaissances d'un grand intérêt pratique, relatives à la forme des continents, à la structure de l'orographie, ce qui a permis la construction de cartes géographiques représentant métriquement la surface physique de la Terre.

A partir du XIX[e] siècle, la géodésie s'est essentiellement employée à couvrir de triangles toute la surface des continents, afin d'en révéler la forme et les dimensions véritables. Ainsi, on a vu apparaître, surtout en Europe, les *réseaux de triangulation nationale* (fig. 5 et 6).

Le territoire de chaque nation a été recouvert en entier par des triangulations géodésiques composées d'un réseau compact de triangles ayant plus ou moins les mêmes dimensions *(triangulation à réseau)* ou de chaînes de triangles, toutes reliées entre elles *(triangulation à mailles)*. Les sommets des triangles géodésiques (ayant chacun des côtés de plusieurs dizaines de kilomètres) ont été marqués par des ouvrages maçonnés, afin de les rendre facilement repérables, puisque le réseau trigonométrique est un patrimoine commun et, en tant que tel, doit pouvoir être utilisé par tous.

On vit apparaître des organismes spéciaux qui furent chargés de l'exécution d'un tel réseau dans les limites du territoire national et dont le rôle était également de veiller à sa conservation. Cette œuvre importante obligea la technique instrumentale et opérationnelle à accomplir des progrès formidables, et, à sa suite, on assista également au renouvellement des techniques du calcul numérique.

Si l'on songe qu'une seconde sexagésimale est la trois cent vingt-quatre millième partie d'un angle droit, on a une idée de la précision des *théodolites* utilisés dès la fin de la seconde moitié du XIX[e] siècle pour les triangulations européennes : ils permettaient la mesure d'un angle avec des erreurs de l'ordre de la seconde. Les mesures actuelles de chaque angle des triangulations du réseau géodésique se font encore avec une précision du même ordre. A chaque sommet du réseau, les angles entre les directions issues de ce sommet sont mesurés un nombre considérable de fois, en appliquant des règles qui éliminent ou réduisent les erreurs instrumentales (réitération, double retournement de la lunette). Les mesures sont effectuées à des heures convenables du jour afin d'éviter l'influence perturbatrice d'une insolation importante du sol.

Nous avons déjà dit que dans les triangulations, afin de pouvoir définir les dimensions des triangles, il faut mesurer une base correspondant à un côté d'un des triangles. Dans les triangulations nationales, on augmente le nombre des bases (une dizaine dans le réseau français), et leur mesure, grâce à des instruments et des procédés appropriés (amplification de la base), atteint une précision

remarquable : les erreurs relatives ne dépassent pas 1/1 000 000. C'est précisément dans ce domaine qu'on assiste aujourd'hui à une véritable révolution; les instruments électroniques, fondés sur la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques (vitesse de la lumière), permettent de mesurer avec une relative facilité des côtés, même très longs, des triangulations. Les mesures des bases dans un réseau trigonométrique peuvent être multipliées, augmentant ainsi la rigidité du réseau de triangles et donc la précision globale dans la détermination de la position des sommets. Les réseaux des triangles dans lesquels on mesure surtout les angles se transforment en réseaux où l'on mesure des angles et des côtés. Ces nouveaux réseaux sont qualifiés de *réseaux mixtes*.

De ce que nous venons de dire (mesure de tous les angles internes de tous les triangles et mesure de plusieurs longueurs), il résulte que les mesures sont en nombre beaucoup plus grand que le nombre strictement nécessaire pour déterminer géométriquement les éléments du réseau. Ces données surabondantes peuvent donc servir pour un contrôle utile de l'exactitude des mesures exécutées (par exemple, la somme des angles internes d'un triangle doit être égale à un angle plat).

De grands mathématiciens et des géodésiens célèbres (Gauss et Bessel) introduisirent en collaboration des innovations révolutionnaires dans le calcul des réseaux et utilisèrent toutes les mesures effectuées, obtenant ainsi non seulement un contrôle des mesures, mais aussi une amélioration sensible des résultats. C'est ainsi que naquit au XIX[e] siècle, au sein de la géodésie, une science qui est devenue aujourd'hui presque indépendante, la *théorie des erreurs*.

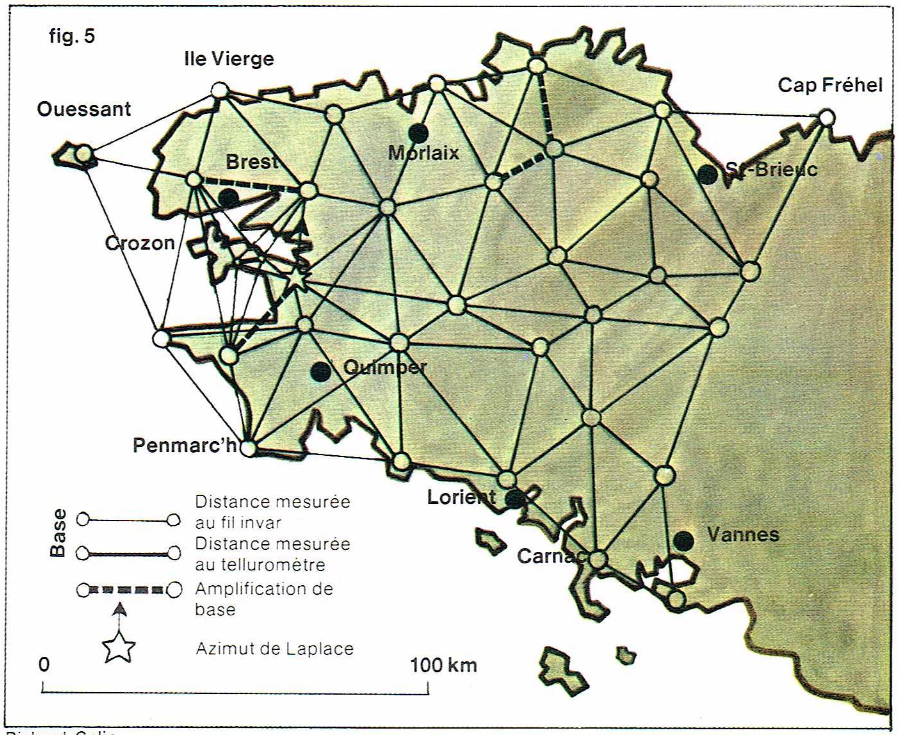

Richard Colin

▲ *Fig. 5 : un exemple de triangulation : la triangulation de la Bretagne.*

◀ *Page ci-contre, fig. 4 : représentation schématique qui illustre la nécessité de réduire à l'ellipsoïde terrestre les bases mesurées sur la surface physique de la Terre :* **A, B,** *points de la surface terrestre;* **A', B',** *points correspondants sur l'ellipsoïde;* V_A, V_B, *verticales passant par les points* **A** *et* **B.**

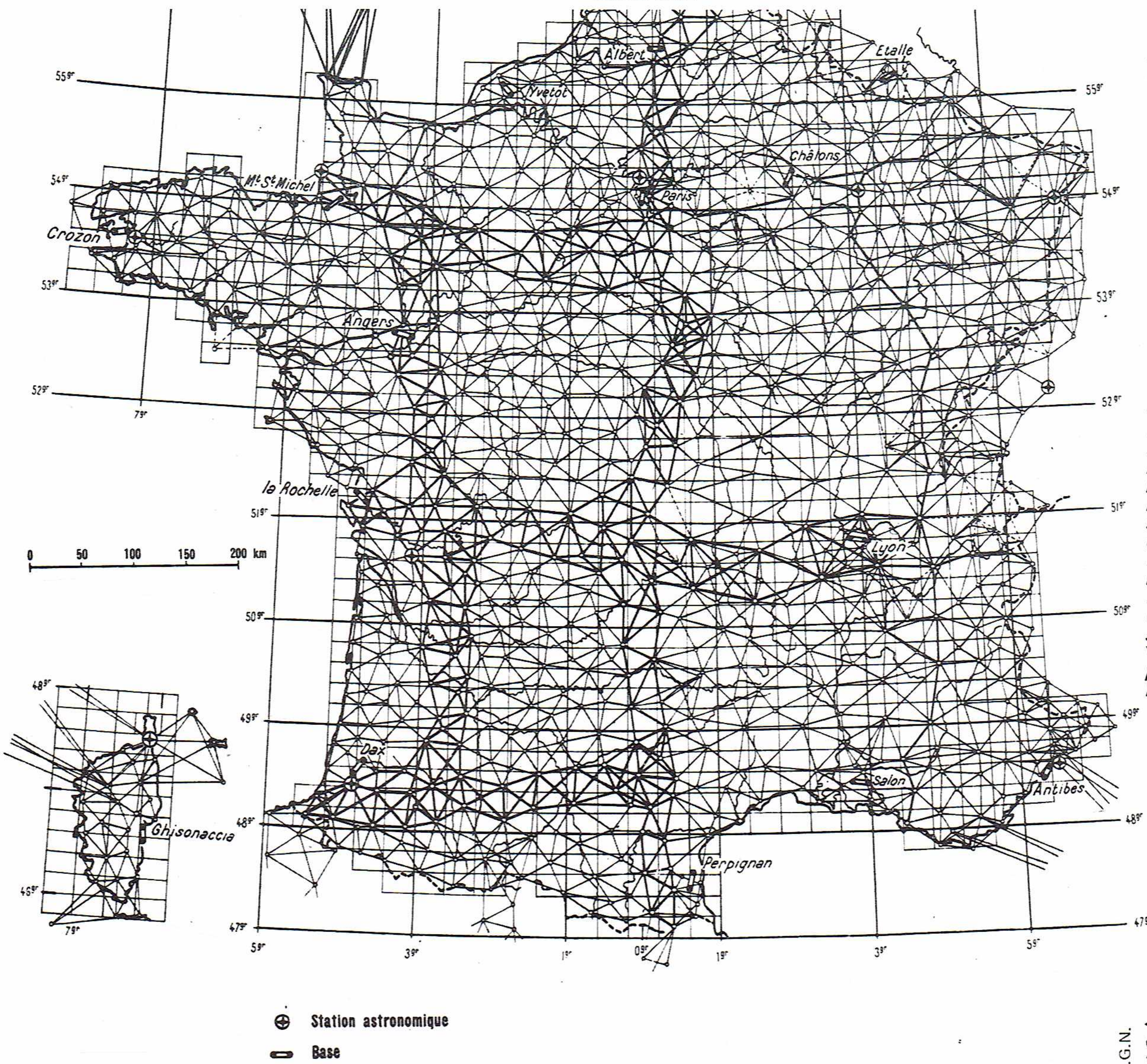

I.G.N.

◀ *Fig. 6 : réseau de triangulation de 1[er] ordre sur la France.*

La compensation des réseaux géodésiques est l'une des plus imposantes opérations de calcul entreprises au moment où les calculatrices électroniques connaissent un développement prodigieux. Le soin extrême dans l'exécution des mesures, l'étude approfondie des procédés qui réduisent au minimum les influences nuisibles, la rigueur des calculs (dont on ne se contente pas de passer minutieusement les résultats au crible, mais dont on annonce aussi le degré de fiabilité) rangent aujourd'hui les géodésiens, avec les astronomes de position, parmi les « mesureurs » les plus raffinés.

Les paramètres d'un réseau géodésique

Le calcul des coordonnées ellipsoïdiques des sommets des triangulations nationales suppose la connaissance des paramètres de l'ellipsoïde, la définition d'un point fondamental, sa mise à l'échelle et l'orientation du réseau. Le processus de détermination est le suivant : on choisit un point central du réseau qui est pris comme point fondamental de tout le réseau (pour la France, ce sommet est le Panthéon à Paris). On détermine les coordonnées astronomiques φ et λ de ce point, et l'on pose comme hypothèse que celles-ci coïncident avec les coordonnées ellipsoïdiques de ce même point. On détermine en outre l'azimut astronomique d'un côté du réseau issu du point fondamental, et l'on suppose que, pour ce point, l'azimut astronomique et l'azimut ellipsoïdique coïncident. De cette manière, le réseau est accroché à l'ellipsoïde ainsi orienté. Partant de ce point central, à l'aide des formules du transport des coordonnées sur l'ellipsoïde, on obtient les coordonnées ellipsoïdiques φ' et λ' de tous les autres sommets, utilisant comme mesure angulaire et comme longueur des côtés les valeurs compensées obtenues par les calculs de la triangulation géodésique. Les formules du transport contiennent les paramètres *a* et *f*. Pour ces derniers, on utilise des valeurs approchées, pour parvenir ensuite, comme nous le verrons, à des valeurs définitives mieux adaptées à la situation locale. Pour atteindre ce deuxième but, on détermine la latitude et la longitude astronomiques φ et λ d'un groupe d'autres sommets uniformément répartis sur le réseau. La comparaison entre les coordonnées astronomiques et les coordonnées ellipsoïdiques de ces points conduit à la détermination de ce que l'on appelle habituellement la *déviation de la verticale,* que l'on définit de la manière suivante par ses composantes sud-nord et ouest-est :

$$\xi = \varphi - \varphi' \; \eta = (\lambda - \lambda') \cos \varphi,$$

λ' et φ' étant les coordonnées ellipsoïdiques.

Cette déviation peut être due en partie aux discordances locales existant entre le géoïde et l'ellipsoïde, en partie au fait que l'on a utilisé pour définir l'ellipsoïde des paramètres insuffisamment corrigés et au fait que, à l'origine, l'ellipsoïde n'a pas été parfaitement orienté. On procède alors au calcul des corrections à apporter tant aux paramètres *a* et *f* de l'ellipsoïde qu'à son orientation itiniale, afin de rendre minime la déviation de la verticale, ou écart entre la verticale géoïdique (déterminée astronomiquement) et la normale ellipsoïdique dans tous les points où l'on a effectué les mesures astronomiques. Ces points sont appelés *points de Laplace*. Après cette adaptation du réseau sur l'ellipsoïde, les déviations de la verticale aux points de Laplace ne disparaissent pas. Les écarts résiduels sont dus essentiellement aux déformations locales du géoïde par rapport à l'ellipsoïde. Celles-ci sont, de ce fait, extrêmement intéressantes.

Actuellement, l'ère des triangulations géodésiques nationales est dépassée. Déjà depuis la fin de la Dernière Guerre mondiale, on travaille à relier entre eux les réseaux continentaux. En Europe, en particulier, la Commission géodésique internationale est en train d'achever la compensation globale de tous les réseaux jusque-là indépendants. Cette opération a exigé d'une part une révision des jonctions aux points de frontière, d'autre part un choix parmi les réseaux des chaînes les plus adaptées pour se raccorder en mailles de dimensions énormes; enfin, il a été nécessaire d'uniformiser la répartition des points de Laplace sur toute l'Europe. Il est inutile de souligner l'énormité des calculs que la compensation globale de la triangulation européenne exige. L'exécution d'un calcul qui comporte la résolution de systèmes contenant des milliers d'inconnues n'est envisageable que grâce à l'emploi des ordinateurs modernes. Quel en sera le résultat ? Toute l'Europe aura un système unique de référence et un ellipsoïde unique. Par-delà les divisions nationalistes, la science géodésique, comme toutes les sciences, conduit à l'unité.

Le réseau mondial

Cette tendance unitaire dans l'étude de notre planète vit actuellement un de ses moments les plus importants, celui de la *triangulation mondiale*. Jusqu'à présent, les triangulations qui s'étaient déployées sur le territoire national pouvaient aspirer, au mieux, à devenir des triangulations continentales, ou à la limite, intercontinentales. Cette aspiration était absurde, si l'on songe à l'exiguïté des mailles de ce réseau et donc à la fragilité de la couverture qu'il était possible d'obtenir à l'aide de la triangulation terrestre. Quoi qu'il en soit, même en situant ce projet dans le domaine du raisonnable, seulement 1/5 de la surface terrestre aurait pu être dominé par les géodésiens avec l'instrument de la triangulation terrestre. La connaissance et la détermination directe de la position réciproque des continents auraient échappé complètement au champ d'investigations.

L'ère spatiale a permis de surmonter ces difficultés qui, naguère encore, paraissaient infranchissables, et a rendu possible de concevoir et de commencer à exécuter un réseau mondial de triangulation.

— Nous exposerons ici une des techniques utilisées en géodésie spatiale géométrique : la *photographie de satellites sur fond d'étoiles*. L'hypothèse de départ est que l'astronomie de position, à travers des mesures poursuivies pendant de longues années et obtenues à partir de différents points de la surface terrestre, s'est fixé pour but de connaître les coordonnées stellaires indépendamment de la référence terrestre et avec une précision élevée. Il est donc possible, en se référant au

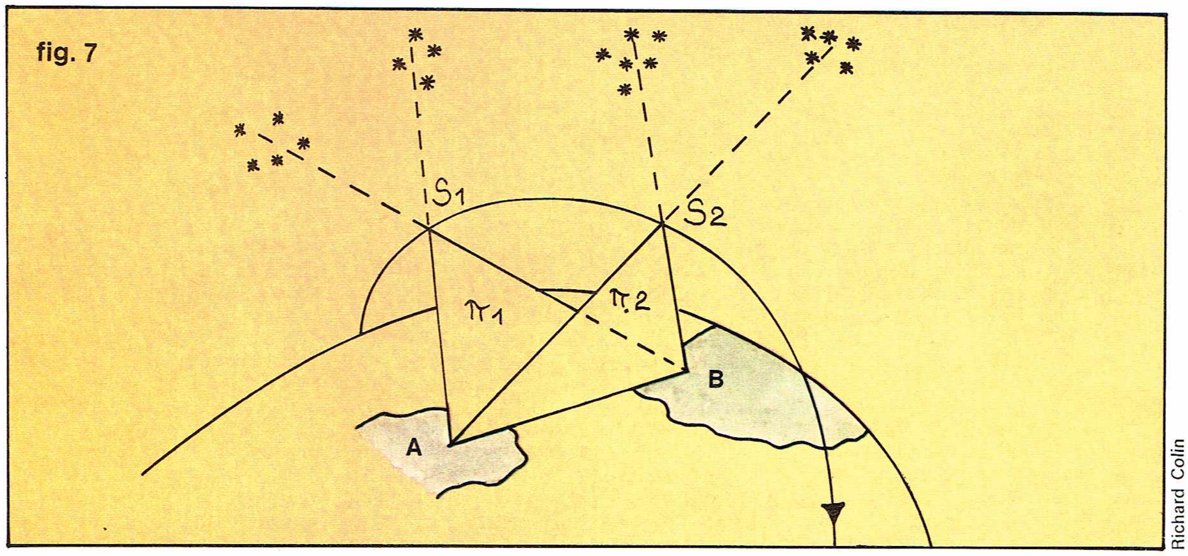

▶ *Fig. 7 : représentation graphique de la triangulation spatiale sur fond d'étoiles.*

le réseau mondial du coast and geodetic survey

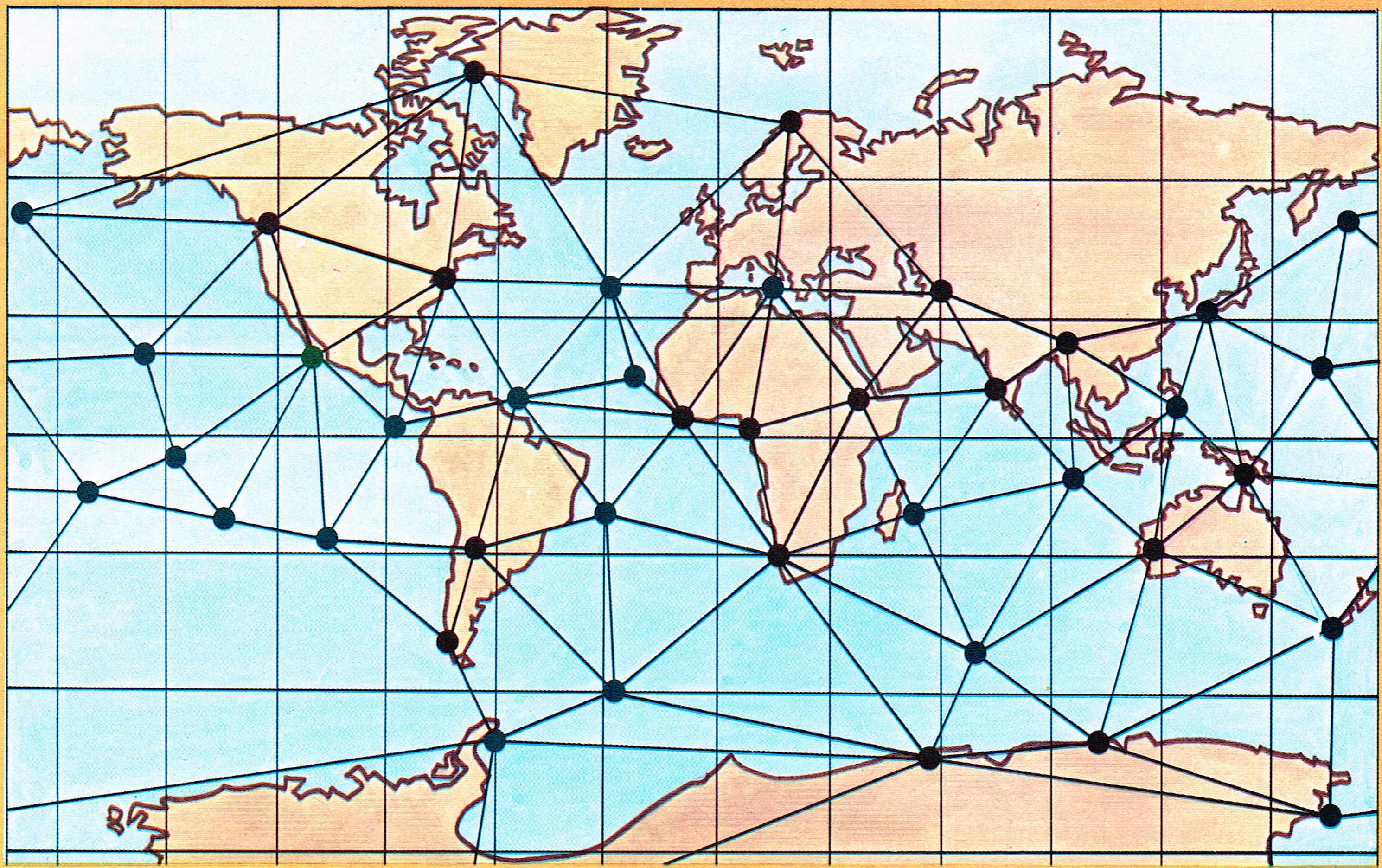

fig.8

Richard Colin

▲ ***Fig. 8 : le réseau mondial du* Coast and Geodetic Survey *par photographie sur fond d'étoiles du satellite Pageos.***

système de directions spatiales connues, représentées par les étoiles, de déterminer à partir d'un point A de la surface terrestre la direction AS_1 (fig. 7), où S_1 est un point de l'espace extérieur à la Terre, mais beaucoup plus proche des étoiles. La détermination de la direction spatiale AS_1 s'obtient en photographiant à partir de A, avec des chambres photographiques spéciales, l'objet situé en S_1, sur le fond duquel apparaît un groupe d'étoiles de direction connue. Connaissant la position relative de l'image de S_1 et des étoiles, et la distance focale de la chambre, il est possible de calculer la direction cherchée AS_1. Si l'on photographie à nouveau S_1 à partir d'un autre point B de la surface terrestre, en se servant d'un appareillage identique, on pourra déterminer, en utilisant un autre groupe d'étoiles, la direction spatiale BS_1. Les deux directions AS_1 et BS_1, qui ont en commun le point S_1, déterminent un plan, le plan π_1 (ABS_1), qui sera donc, lui aussi, de position spatiale connue. Opérons soit depuis A, soit depuis B de manière analogue, en utilisant le point spatial S_2. On obtiendra, par un procédé identique, le plan π_2 (ABS_2) de position spatiale connue. Les deux plans π_1 et π_2 se coupent le long d'une droite qui passe par A et B. Puisque les deux plans ont une position spatiale connue, la droite AB sera elle aussi spatialement déterminée par référence aux étoiles, sans qu'il soit nécessaire que les points A et B soient réciproquement visibles, et donc même lorsque la distance AB est de l'ordre de milliers de kilomètres.

Les points S_1 et S_2 situés en dehors de la surface terrestre sont matérialisés par des satellites artificiels qui, tournant à une distance moyenne du sol de plusieurs centaines de kilomètres, se trouvent en position favorable pour remplir ce rôle. Puisque le satellite tourne autour de la Terre, il est nécessaire que les déterminations A et B soient simultanées, autrement les deux directions ne se couperaient pas et, par conséquent, ne détermineraient pas un plan. La perfection technique atteinte aujourd'hui par les appareils optiques et photographiques, la facilité avec laquelle on obtient la simultanéité des deux images, la précision et la commodité dans la mesure du temps rendent suffisamment exacte la détermination de la direction axiale AB ; cependant ces mesures exigent une technique et un soin tout particuliers.

En appliquant le principe géométrique décrit et en utilisant un grand nombre de satellites passifs (réfléchissant la lumière solaire) qui sillonnent actuellement notre ciel, on a pu étudier et on est en train de réaliser un réseau de triangles qui couvre toute la surface de la Terre (fig. 8).

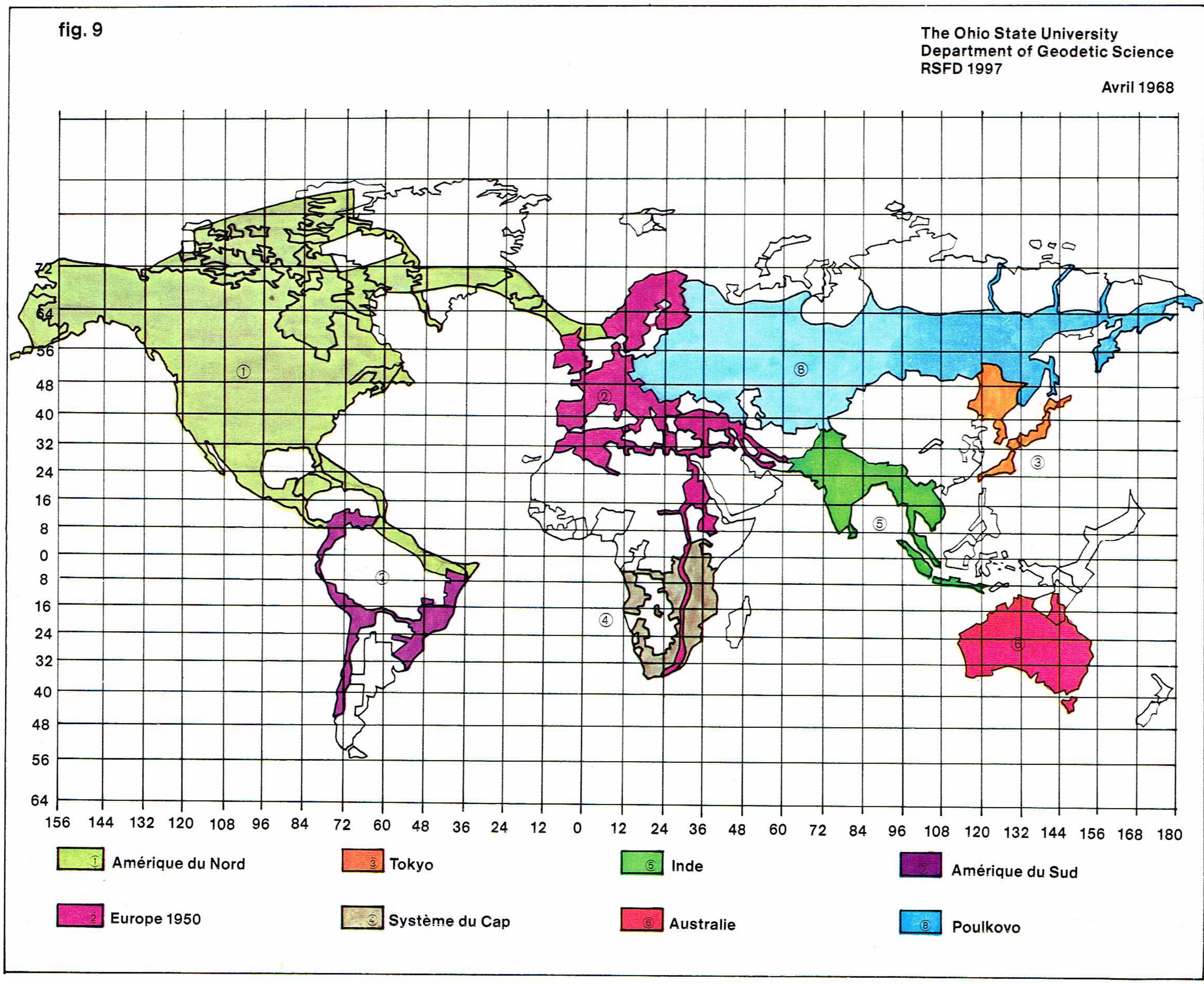

▲ *Fig. 9 : les grands systèmes géodésiques mondiaux.*

▶ *Page ci-contre, le « Geos-C » (Geodetic Earth Orbiting Satellite), un des satellites projetés par la N. A. S. A. pour des mesures géodésiques.*

▼ *Fig. 10 : représentation graphique de la* **déviation relative de la verticale,** θ. *La connaissance de cette déviation est l'une des deux méthodes qui permettent de connaître la forme du géoïde ; l'autre méthode utilise les anomalies de la gravité.*

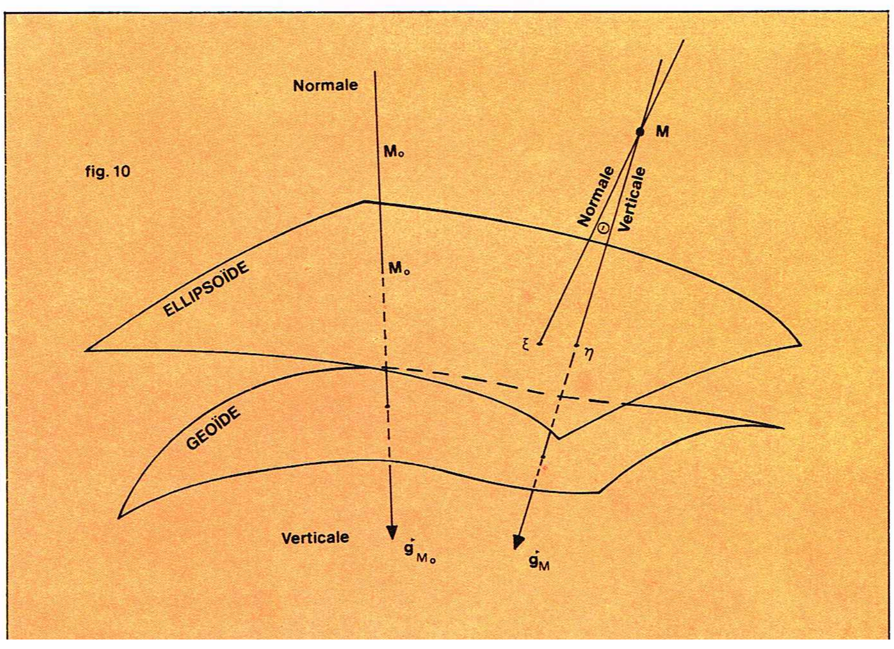

Chaque côté sera déterminé dans sa position spatiale par l'intersection stellaire obtenue grâce aux satellites, tandis que les dimensions du réseau mondial seront obtenues en utilisant les réseaux continentaux déjà existants, convenablement complétés par d'autres mesures (fig. 9).

Au terme de cette colossale opération, on sera parvenu non seulement à connaître directement la position relative des continents, mais aussi la forme de la Terre, déduite à partir d'une structure rigide qui l'enveloppe entièrement, sans qu'il soit nécessaire de recourir à aucune hypothèse de base. Bien qu'on ne s'attende pas à de grosses surprises dans les résultats, ce sera néanmoins un grand jour pour la géodésie lorsqu'on pourra achever autour de la Terre cet énorme réseau de triangles.

— Une deuxième technique consiste à faire des *mesures de distances sol-satellite par laser*. La combinaison laser et photos sur fond d'étoiles permet des réalisations efficaces. On citera comme exemples deux connexions intéressantes réalisées par la France : le rattachement des Açores au continent par Écho I et Écho II (1966), et la liaison Europe-Afrique (1969).

— Ces méthodes tendent à être supplantées par le *procédé Doppler*. Par comparaison des fréquences entre un émetteur au sol et un émetteur embarqué à bord d'un satellite, on obtient sa vitesse radiale. En intégrant celle-ci entre des positions successives du satellite, on calcule la position relative du point au sol par rapport à l'orbite du satellite. Le système Transit, mis au point et diffusé par

l'U.S. Navy, permet la détermination de position à quelques mètres près.

Détermination des écarts entre géoïde et ellipsoïde

La triangulation mondiale vise surtout à déterminer de manière directe la forme et les dimensions de la surface de la Terre, indépendamment de toute hypothèse mathématique plus ou moins valable relative à la figure géométrique de la surface équipotentielle adoptée comme représentation de la planète Terre. On peut parvenir à connaître la forme du géoïde selon deux procédés différents : le premier, dû à Villarceau (1873), utilise les *déviations de la verticale,* le second, dû à Stokes (1848), utilise les *anomalies de la gravité*. Les fondements théoriques de l'un et de l'autre sont complexes ; nous essaierons cependant de les illustrer de manière simplifiée. Nous avons dit que les triangulations permettent de déterminer les coordonnées ellipsoïdiques (λ' et φ') des sommets, une fois le réseau orienté au point fondamental, en considérant que la verticale et la normale à l'ellipsoïde coïncident en ce point et que l'azimut astronomique et l'azimut ellipsoïdique d'un des côtés issus de ce même point coïncident également. Si l'on mesure maintenant, pour l'un quelconque des sommets, les coordonnées astronomiques λ et φ, celles-ci différeront des coordonnées ellipsoïdiques des quantités :

$$\xi = \varphi - \varphi' \quad \text{et} \quad \eta = (\lambda - \lambda') \cos \varphi,$$

qui, comme nous l'avons déjà dit, constituent *les composantes des déviations relatives de la verticale.*

La déviation de la verticale est illustrée sur la figure 10, où M_0 est le point fondamental et M le sommet de la triangulation pris en considération.

Si l'on connaît les valeurs η et ξ, en pratique pour un nombre suffisant de points situés à des distances convenables, l'écart h entre le géoïde et l'ellipsoïde entre deux points M et N est donné par l'expression suivante :

$$h_M = \eta\ (\lambda_M - \lambda_N) \cos \varphi + \xi\ (\varphi_M - \varphi_N).$$

L'expression pour le calcul de h_M est valable uniquement si l'on accepte certaines hypothèses théoriques. Ce procédé, appelé nivellement astro-géodésique, permet la détermination des écarts entre l'ellipsoïde (figure connue) et le géoïde (figure inconnue). Il est fondé sur les déviations de la verticale et donc sur l'existence de triangulations de type continental. Il ne peut donc être étendu à toute la Terre, mais seulement aux continents et à des portions de continent. Les sommets sur lesquels sont déterminées les composantes de la déviation de la verticale sont en nombre très limité même sur les continents.

Le procédé qui utilise les anomalies de la gravité et la *formule de Stokes* est d'une application plus simple et sans limitation. En effet, les mesures de gravité peuvent être effectuées même sur la mer (Vening Meinesz) ; il s'agit de mesures simples et indépendantes. Expliquer comment est obtenue la formule de Stokes est une entreprise ardue, fondée sur des notions mathématiques très spécialisées.

Il suffira — pensons-nous — de donner un aperçu des fondements qu'elle suppose et de son application concrète.

Le mathématicien Dirichlet, dans la première moitié du XIX^e siècle, avait résolu le problème qui porte son nom et qui énonce qu'il est possible de déterminer un champ de forces et donc ses surfaces équipotentielles lorsque ce même champ est régulier et que, de plus, sont connues les intensités des forces du champ sur les points d'une surface connue. En appliquant cette solution générale au cas du champ des forces de pesanteur et en prenant comme surface de référence l'ellipsoïde sur lequel les valeurs de la gravité sont connues en tout point, Stokes utilisa les mesures réelles de gravité, supposées effectuées sur le géoïde, pour parvenir à la détermination des différences entre les deux surfaces, donc à l'écart N entre une surface et l'autre.

Le calcul de l'écart par la formule de Stokes exige que soit connue la valeur de l'*anomalie de la gravité* non seulement au point considéré mais aussi autour de ce point, sur une étendue de plusieurs milliers de kilomètres. En utilisant le réseau de stations où a été mesurée la gravité étendue à toute la surface terrestre, le géodésien Uotila, en 1962, a calculé grâce à la formule de Stokes les écarts entre géoïde et ellipsoïde pour toute la Terre : *géoïde*

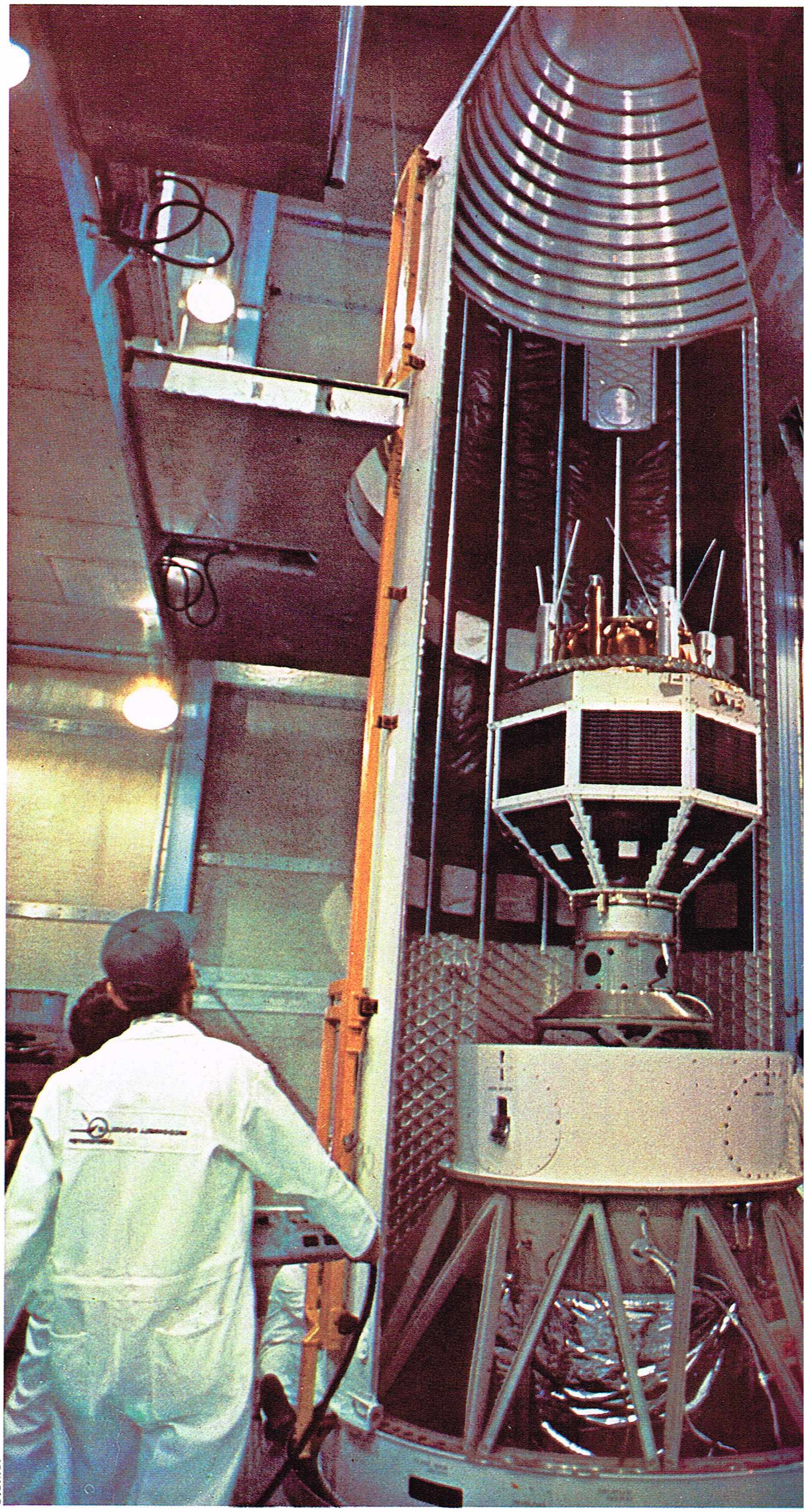

U.S.I.S.

Uotila (fig. 11). En dépit de son caractère général, ce résultat est très intéressant : on en déduit que les écarts sont toujours, en valeur absolue, inférieurs à 100 m et que sur la surface terrestre, aux alentours de l'équateur, il existe une suite de zones présentant alternativement un écart négatif et un écart positif de même importance. Récemment, le géodésien français J.-J. Levallois a donné du géoïde européen une description très détaillée en combinant les méthodes astrogéodésiques et gravimétriques (fig. 12).

L'étude minutieuse de la forme du géoïde a une importance vraiment considérable, dépassant le simple intérêt scientifique qu'offre la connaissance de la forme de la surface équipotentielle par laquelle nous définissons la Terre. En effet, puisque le géoïde est une surface équipotentielle du champ de forces de la pesanteur, dont la composante principale est donnée par l'attraction newtonienne des masses qui constituent la planète, toute altération de forme de cette surface est reliée à une perturbation de l'homogénéité, c'est-à-dire de la répartition des masses internes de la surface physique. Même s'il est possible par le calcul de déduire l'importance de la perturbation du géoïde ainsi que la forme et la position des masses qui en sont responsables, la connaissance des ondulations du géoïde constitue, elle aussi, une source d'informations très utiles sur la structure de l'écorce et des parties internes de la Terre, sur les mouvements orogéniques qui ont engendré les montagnes et les océans, sur les états d'équilibres actuels, et donc sur les efforts et sur les mouvements auxquels l'écorce est soumise encore aujourd'hui. Cette orientation de recherche de la géodésie physique est extrêmement intéressante et nous fournira sans doute des connaissances très utiles sur la nature et sur l'état de notre planète.

Enfin, la connaissance du potentiel terrestre permet de calculer les orbites de satellites avec une haute précision, et ainsi d'autoriser les liaisons géodésiques terrestres proches ou lointaines.

Les altitudes

Par les procédés de triangulation ou par les méthodes astronomiques, on peut établir la direction dans l'espace de la ligne qui, passant par le point étudié, est normale à l'ellipsoïde dans le premier cas, ou au géoïde dans le second cas, mais non la position du point sur cette droite.

On appelle *altitude* la longueur du segment qui définit la position d'un point de la surface physique sur une telle ligne et qui est comprise entre le point considéré et la surface de référence (ellipsoïde ou géoïde) choisie. La ligne sur laquelle on repère la position d'un point est la *ligne de force* du champ de pesanteur, c'est-à-dire la ligne qui a pour tangente, en chacun de ses points, la direction du fil à plomb. Généralement, cette ligne n'est pas une droite ; cependant on peut, en considérant une très faible portion de la surface physique de la Terre, la considérer comme rectiligne et coïncidant avec la normale ou verticale du point étudié. La figure 13 illustre la définition de cote orthométrique du point M, c'est-à-dire de la cote obtenue en prenant comme surface de référence le géoïde. On appelle *différence d'altitude,* ou *dénivelée,* la différence entre les altitudes de deux points de la surface terrestre.

Le problème relatif à la détermination des altitudes des points de la surface physique est double. Il faut d'une part choisir le niveau d'*altitude zéro,* d'autre part trouver une méthode pratique permettant de mesurer les dénivelées entre deux points.

▼ *Fig. 11 : le géoïde du S. A. O. (Smithsonian Astrophysical Observatory), avec indications des écarts (en mètres) entre géoïde et ellipsoïde pour toute la surface de la Terre (l'aplatissement de la surface de référence est 1/298,55).*

fig. 11

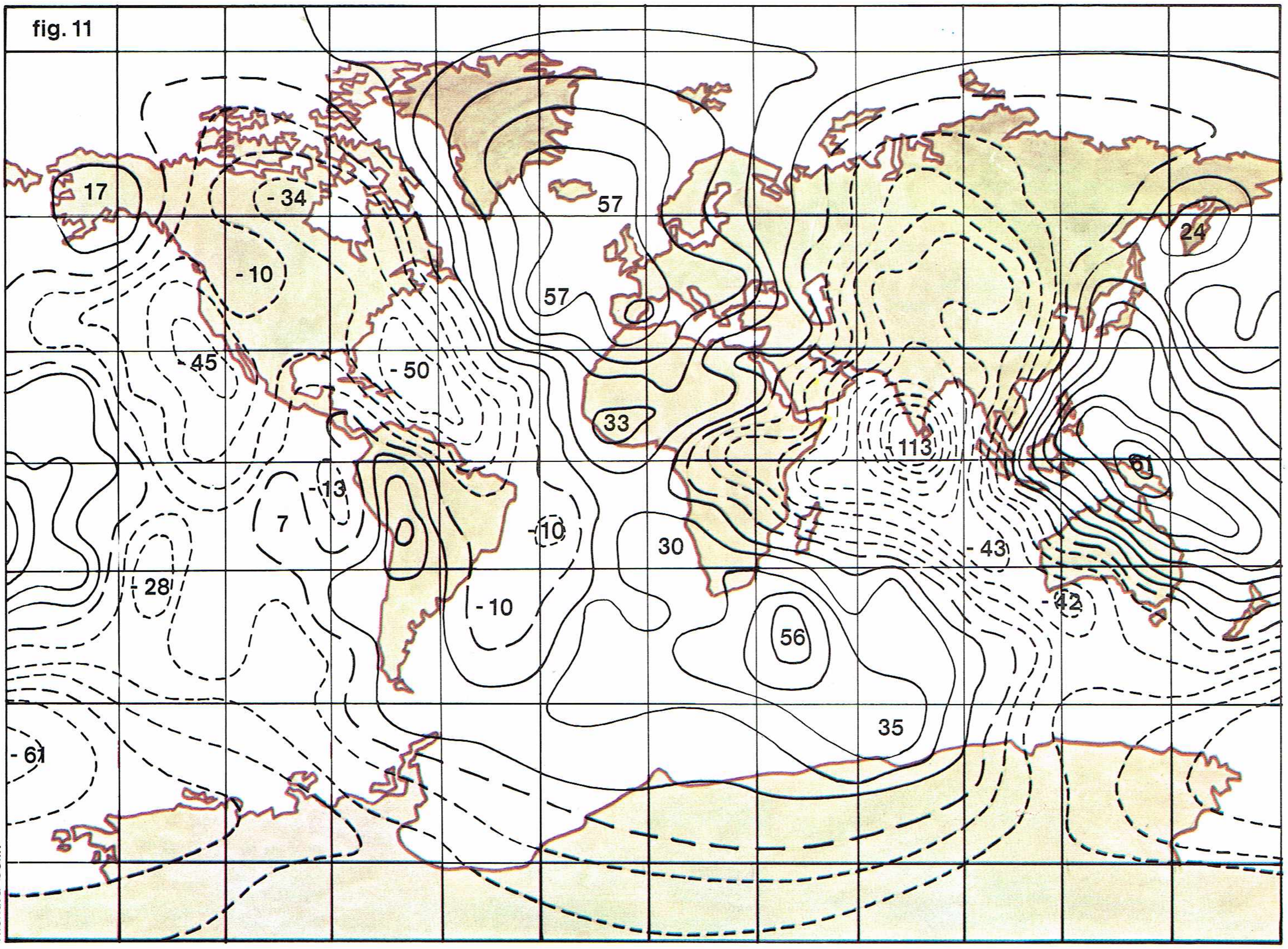

Richard Colin

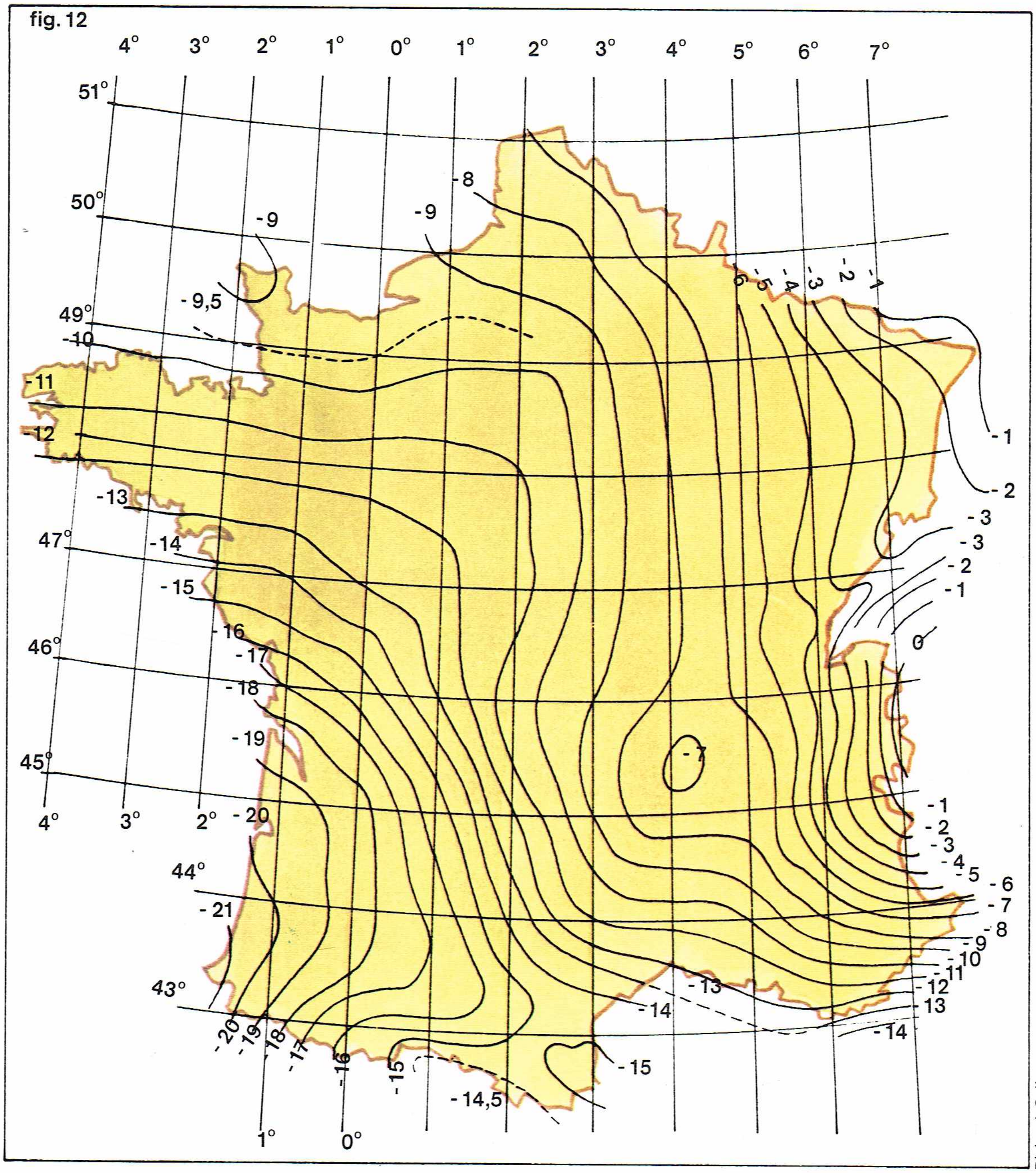

Richard Colin

◀ *Fig. 12 : le géoïde en Europe de Levallois et Monge (1973) : l'intervalle entre deux lignes successives correspond à un écart de 1 m entre géoïde et ellipsoïde.*

Altitude zéro

On a pris comme altitude zéro le niveau moyen de la mer en un lieu déterminé de la côte. On sait que le niveau de la mer n'est pas stable et qu'il subit des perturbations dues à des mouvements de différentes natures (mouvements des vagues, marées, courants, etc.) ; le niveau instantané est mesuré à l'aide des **marégraphes,** instruments de conception très simple qui enregistrent les variations de niveau de la surface libre des eaux par rapport à la côte rocheuse. La moyenne établie sur plusieurs années de toutes les positions du niveau de la surface libre de l'eau, enregistrées par un marégraphe donné, situé en un point donné de la côte, est prise comme position altimétrique zéro.

Il n'existe pas un *point marégraphique* unique pour toute la Terre, mais, en général, chaque nation qui touche à la mer a choisi son propre point zéro. Actuellement on tend, du moins en Europe, à unifier le réseau marégraphique. En France, le marégraphe de référence est situé à Marseille, mais il existe dans d'autres localités côtières environ une dizaine de marégraphes, qui, reliés au marégraphe fondamental, permettent l'étude du comportement séculaire global tant de l'écorce terrestre que de la mer.

I.G.D.A.

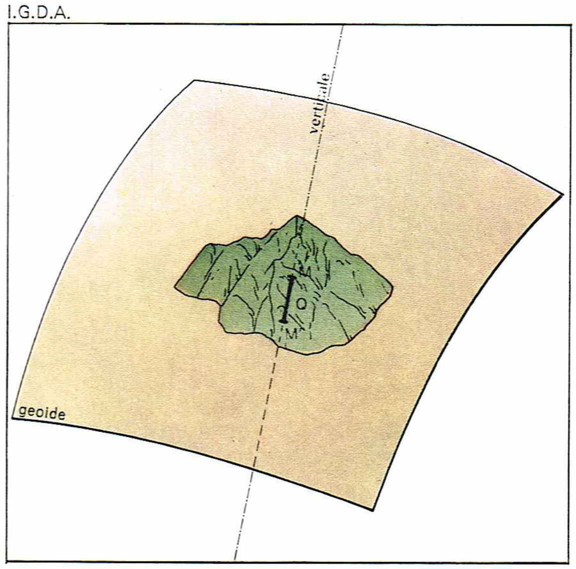

◀ *Fig. 13 : représentation de la cote orthométrique (Q), c'est-à-dire de la cote d'un point M de la surface terrestre rapporté au point correspondant M' sur le géoïde.*

▶ *Fig. 14 : nivellement trigonométrique : Q_A, Q_B, cotes rapportées à la sphère locale ; Z_A, angle zénithal.*

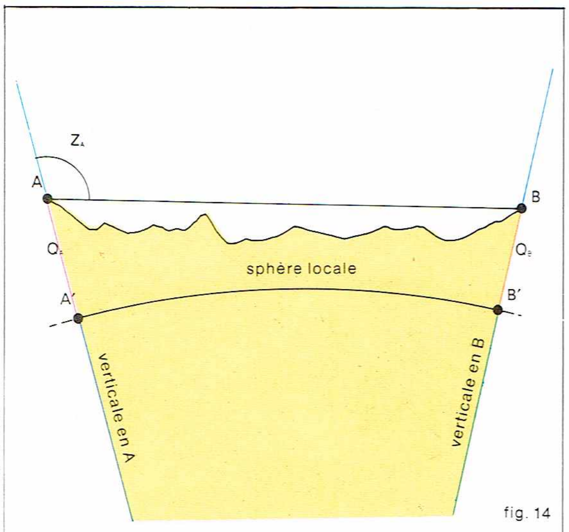

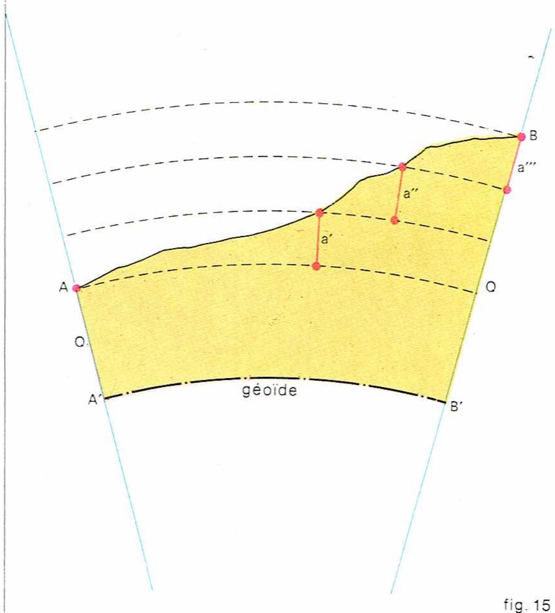

▶ *Fig. 15 : nivellement géométrique avec surfaces équipotentielles parallèles.*

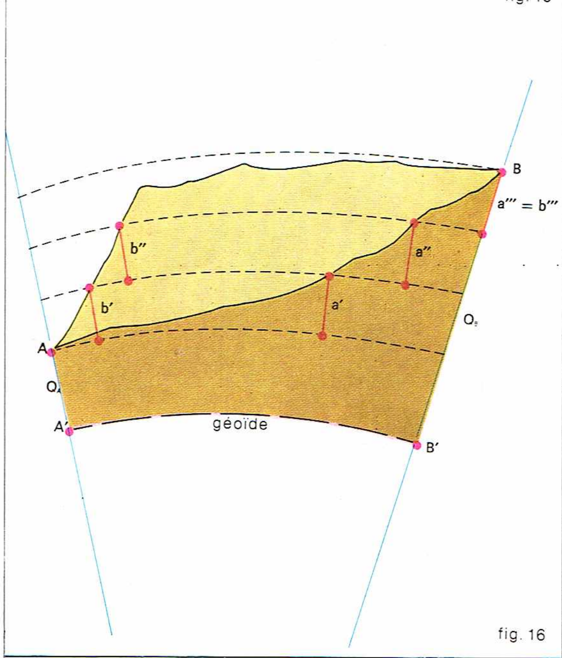

▶ *Fig. 16 : nivellement géométrique avec surfaces équipotentielles non parallèles.*

Mesure des dénivelées entre deux points de la surface physique

Cette mesure peut s'effectuer par le nivellement trigonométrique, ou par le nivellement géométrique.

— Le *nivellement trigonométrique* est fondé sur la mesure des angles zénithaux, c'est-à-dire des angles que forme la direction de visée qui joint le couple de points avec les verticales en chacun des points du couple. Sur la figure 14, la dénivelée $\Delta Q_{AB} = Q_B - Q_A$, où chaque altitude est calculée en fonction de l'angle zénithal Z_A et de la position relative des deux points sur l'ellipsoïde. Pour compliquer et augmenter l'imprécision de l'expression algébrique qui conduit au calcul ΔQ_{AB}, vient s'ajouter l'effet de la réfraction atmosphérique : à cause de la stratification de l'air, le rayon optique ne traverse pas l'atmosphère en ligne droite, mais subit une courbure variable avec les conditions météorologiques : température, pression, hygrométrie, etc. Cet effet est corrigé par l'introduction d'un *coefficient de réfraction*. Mais, étant donné l'incertitude avec laquelle on connaît la valeur de celui-ci, le nivellement trigonométrique ne permet pas de calculer les altitudes avec une précision supérieure à quelques centimètres.

— Le *nivellement géométrique* est fondé sur le principe du cumul des dénivelées élémentaires, mesurées entre points très proches, généralement à moins de 100 m. Cette méthode est mise en œuvre par l'emploi d'un **niveau**, instrument qui permet d'obtenir en chaque point de la surface physique une visée horizontale ou tangente en ce point à la surface équipotentielle. Cette horizontale intersecte les mires tenues verticalement sur les points dont on cherche la dénivelée. Celle-ci n'est autre que la différence des lectures sur ces mires. Sans nous attarder ici à décrire les modalités pratiques de ce procédé, reportons-nous à la figure 15 (laquelle montre qu'il est possible d'obtenir la différence de cote orthométrique ΔQ_{AB} comme somme des dénivelées partielles a', a'', a''', mesurées par étapes successives de nivellement).

Cotes orthométriques et dynamiques

L'égalité $\Delta Q_{AB} = Q_B - Q_A = a' + a'' + a'''$ est valable seulement dans l'hypothèse où les surfaces équipotentielles passant par A, par B, et par tous les points intermédiaires, sont parallèles entre elles et avec le géoïde de référence. Cette hypothèse, en général, n'est pas acceptable, sauf dans le cas où les points A et B seraient très rapprochés l'un de l'autre ; en réalité, les surfaces équipotentielles ne sont pas parallèles entre elles à cause de la forme du champ gravitationnel terrestre. La figure 16 est très claire à ce sujet : la somme de a', a'' et a''' ne donne pas la dénivelée $\Delta Q_{AB} = Q_B - Q_A$. C'est pourquoi le nivellement géométrique ne permet pas de calculer la dénivelée orthométrique désirée. De plus, si pour relier A à B on suivait un cheminement différent, la somme $b' + b'' + b'''$ ne serait pas égale à $a' + a'' + a'''$, inégalité qui apparaît au simple examen de la figure. On en tire une double conséquence : avant tout, que la cote orthométrique du point B ne peut être obtenue par le seul procédé du nivellement, et, en outre, qu'une ligne de nivellement fermée qui parcourt au retour un cheminement très différent de l'aller ne peut donner 0 comme somme des dénivelées partielles, mais une valeur dépendant du parcours et de la forme des surfaces équipotentielles dans la zone examinée. Il est évident que, puisque c'est le champ gravitationnel qui engendre les surfaces équipotentielles, la connaissance de ce champ est indispensable pour pouvoir corriger les données du nivellement géométrique effectué sur la surface physique et pour calculer, à partir de ces données, la *cote orthométrique* cherchée. Mais on démontre que la correction nécessaire est fonction de la variation de la force de gravité le long de la verticale des deux points A et B, jusqu'aux points correspondants sur le géoïde A' et B'. Puisqu'il n'est pas possible de connaître ces variations, sinon sur la base de certaines hypothèses sur la structure de l'écorce, il n'est pas possible non plus de mesurer de manière indépendante les dénivelées et donc l'altitude orthométrique d'un point.

On a alors introduit un nouveau type de cote qui, étant beaucoup plus liée au champ dynamique de la gravité et aux applications dynamiques de la cote d'un point, est appelée *cote dynamique* ou géopotentielle. Le raisonnement qui conduit à l'introduction et à la définition de la cote dynamique est, dans une formulation simplifiée, le suivant : nous avons déjà dit que pour déplacer (en

I.G.N.

l'absence de frottements) une masse sur une surface équipotentielle, il n'est pas nécessaire d'accomplir un travail. En revanche, il faut accomplir un travail lorsque l'on veut faire passer une masse d'une surface équipotentielle à une autre. Ce travail est exactement le même entre deux surfaces équipotentielles, quel que soit le parcours suivi pour aller de l'une à l'autre, et quelle que soit la dénivelée orthométrique entre elles.

On a alors envisagé de mesurer les cotes des points, non par des longueurs, mais par des quantités proportionnelles au travail que les forces de gravité accomplissent (ou contre lesquelles il faut accomplir un travail) pour faire passer une masse d'une surface équipotentielle à l'autre. Ce nouveau type de cote est, par définition, indépendant du parcours effectué pour aller d'un point à un autre de deux surfaces équipotentielles. Les cotes dynamiques offrent aussi un avantage sur le plan pratique; on peut les obtenir à partir d'un nivellement géométrique normal, à condition de connaître, le long de la ligne de nivellement sur la croûte terrestre, la variation des forces de gravité, que l'on mesure directement et facilement à l'aide des gravimètres.

Actuellement les réseaux de nivellement géométrique, qui constituent l'ossature fondamentale du système altimétrique de chaque pays, sont calculés de manière à obtenir des cotes dynamiques. Le *réseau altimétrique français* a son niveau de référence à Marseille et couvre, à grandes mailles, tout le territoire.

De 1857 à 1970, trois réseaux de nivellement primordial se sont succédé :

— le *réseau Bourdaloué (1857-1864)* constitua une grande première mondiale en reliant tous les nivellements régionaux et en introduisant les méthodes modernes d'observations;

— le *réseau Lallemand (1884-1892)*, appelé aussi *Nivellement Général de la France* (N.G.F.) qui, repris et vérifié, complète le précédent;

— le *réseau I. G. N. 1969 (1962-1969)*, très moderne, tant par les méthodes et le matériel utilisé que par le processus de calcul des altitudes normales.

Par ailleurs, on assiste actuellement, surtout en Europe, à un gros travail d'unification à l'échelle continentale, qui exige des mesures de raccordement supplémentaires, des analyses des réseaux existants, la réfection des parties moins précises, la définition de nouvelles dimensions des mailles et, enfin, la compensation en bloc de tous les réseaux reliés. Cette unification du référentiel altimétrique constituera aussi une aide précieuse pour connaître le comportement de l'écorce terrestre à l'échelle d'un continent.

▲ *Balise et campement de géodésie en montagne.*

BIBLIOGRAPHIE

ANNUAIRE du Bureau des longitudes 1974, Gauthier-Villars, 1974. - BOMFORD G., *Geodesy*, Oxford Press, 3rd Ed., 1971. - E. N. S. T. A., *Géodésie dynamique et spatiale*, 1973. - HEISKANEN W., MORITZ H., *Physical Geodesy*, Freemann, 1967. - JORDAN-EGGERT-KNEISSL, *Handbuch der Vermessungskunde*, J. B. Metzersche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart. - LEVALLOIS J.-J., *Géodésie générale*, Eyrolles, 1970. - MELCHIOR P., *Physique et Dynamique planétaire*, t. 1, *Géodésie et Astronomie géodésique*, Vander, 1971.

TOPOGRAPHIE

La topographie (*topos* = lieu, *graphein* = décrire) a pour but la description géométrique d'une surface terrestre. Cette science permet de représenter graphiquement une zone plus ou moins étendue selon un rapport préétabli entre les longueurs graphiques et les longueurs réelles correspondantes (échelle).

La topographie est étroitement liée à la géodésie, à la cartographie et à la photogrammétrie. De même que la cartographie, la topographie exploite les données de la géodésie relatives aux dimensions de la Terre et à sa représentation plane.

Les travaux de topographie se divisent généralement en deux phases successives. Les opérations de *levé de terrain* et les opérations de calculs et de *report graphique* sur un support plan appelé *minute de levé*.

Deux éventualités peuvent se produire :

— Les opérations topographiques sont destinées à la représentation d'une grande surface, quelques dizaines de kilomètres carrés à celle d'un pays. La représentation est faite à l'aide de *cartes* généralement en couleurs et tirées en un grand nombre d'exemplaires.

La carte issue directement des levés topographiques est dite *carte de base* à 1/25 000; on en tire, par des techniques cartographiques, des cartes dérivées à plus petite échelle (1/50 000 — 1/100 000 — 1/200 000, etc.).

— Le levé topographique intéresse une zone très limitée en surface et aboutit à une représentation du terrain sur un plan topographique à grande échelle (1/5 000 — 1/2 000 — 1/1 000) et même à très grande échelle (1/500 — 1/200 — 1/100).

Ces plans ont des finalités variées allant de la représentation d'une ville à celle d'une parcelle de terrain ou seulement d'un bâtiment. Les moyens et les méthodes topographiques utilisés sont différents suivant les deux cas envisagés, soit l'établissement d'une carte, soit l'établissement d'un plan.

Organisation générale des travaux

Dans l'hypothèse d'un levé de terrain destiné à dresser une carte topographique, les opérations sont les suivantes :

— Établissement d'un **canevas de base** appuyé lui-même sur des points géodésiques. Ce canevas comprend des points de coordonnées planimétriques (x et y) connues et d'altitude connue (z) dont la densité, variable, peut atteindre un point par kilomètre carré.

— Le canevas de base étant établi, on procède au levé en utilisant, suivant les cas, l'une de ces trois méthodes : **levé direct à la planchette** et **levé tachéométrique** (ceux-ci seront développés dans ce chapitre sous la rubrique « Méthodes générales »), et **photogrammétrie** (cette dernière méthode fera, ultérieurement, l'objet d'un chapitre distinct).

Les méthodes topographiques sont quelque peu différentes suivant la finalité des documents à établir : cartes ou plans. On peut considérer que les cartes topographiques comprises entre les échelles 1/5 000 et 1/50 000 sont tributaires de levés photogrammétriques, ou de levés à la planchette ou au tachéomètre.

Les plans à grande échelle, égale ou supérieure à 1/2 000, sont principalement dressés en faisant appel à des techniques de *levé topométrique* permettant d'aboutir à des *documents numériques*. Les plans à grande échelle sont numériques pour répondre à certaines exigences. Les points caractéristiques des parcelles doivent pouvoir être définis en coordonnées et offrir, par conséquent, une *précision indépendante de l'échelle*.

Par exemple, les plans parcellaires doivent permettre de connaître les surfaces, la position rigoureuse d'alignements, de limite de propriétés, etc. C'est la raison pour laquelle les plans à grande échelle dépendent de *techniques topométriques* qui permettent de représenter le terrain avec fidélité et rigueur à l'aide, uniquement, de *données géométriques*. Par contre, l'établissement de cartes est du domaine de la topographie qui procède par généralisation d'éléments planimétriques, par interprétation des courbes de niveau, par utilisation de signes conventionnels. Les cartes sont assujetties à la seule précision graphique, et, par conséquent, l'échelle utilisée conditionne le choix des méthodes, des modes opératoires et des instruments.

Les travaux couvrant plus de 1 000 ha, destinés à l'établissement de cartes, à partir de l'échelle du 1/10 000, sont soumis à des conditions techniques d'exécution définies par l'Institut géographique national.

En ce qui concerne les plans à grande échelle, le Service du cadastre a unifié les conditions d'établissement des levés entrepris par les services publics et locaux.

Historique de la topographie

On connaît l'existence très ancienne de tablettes et cartes rudimentaires. Les travaux des Chaldéens, des Égyptiens, des Grecs et des Romains marquent les premiers pas de la géodésie, de la cartographie et de la topographie.

A l'époque carolingienne, des descriptions détaillées de domaines apparaissent sous le nom de terriers, pouillés, polyptyques. Les documents les plus connus sont le polyptyque de l'abbaye de Saint-Germain-des-Prés (806) et celui de Saint-Rémy (845). Ces descriptions ne sont accompagnées que de croquis figuratifs. Au début du XIIe siècle, des géomètres désignés sous le nom de *sapiteurs* commencent à dresser des registres parcellaires.

L'établissement systématique de plans a été lié au perfectionnement progressif des instruments. Ce n'est guère qu'au XVIe siècle, sous Henri II, que les premiers plans apparaissent. Le roi s'opposait à l'empiétement des immeubles sur la voie publique « sans garder aucun ordre d'alignement ni mesure », et la nécessité de plans est apparue.

Henri IV, par un édit du 16 décembre 1607, soumit la construction des édifices à l'obtention d'un permis d'alignement donné par un « grand voyer ». Cet agent devait « veiller au redressement des murs où il y a plis et coudes et pourvoir à ce que les rues s'embellissent et s'élargissent au mieux que faire se pourra ».

Sous Louis XIV, les premiers plans en relief apparaissent. L'ingénieur Andréossy, aux ordres de Riquet, construit en 1665 un relief de Narbonne. Louis XIV réunit au Louvre une collection de plans-reliefs à 1/600 des places fortes qu'il avait fait construire.

Sous la Régence et sous Louis XV, les arrêts du Conseil du 17 juin 1721 et du 27 février 1765 concernent particulièrement les plans d'alignement et plans de grands chemins entièrement aux frais du roi. C'est également à cette époque que les ingénieurs Milet de Mureau (1749) et Roche-Piquet (1761) commencent à établir des plans de villes fortifiées, avec des cotes d'altitudes.

Vers 1768, le duc de Chaulnes, membre de l'Académie des sciences, invente une machine pour diviser exactement les limbes des instruments de mesure d'angle. Cette invention permet de réduire le diamètre des cercles gradués, de rendre les instruments portatifs et surtout d'adapter le vernier, inventé plus d'un siècle auparavant (1631) par Pierre Vernier.

Antoine de Chézy (1718-1798), directeur de l'École des ponts et chaussées, invente en 1797 le rodage intérieur des fioles du niveau à bulle d'air en forme de tore. Il crée le niveau à nivelle fixe dont le modèle a été légèrement modifié par d'Égault, qui lui donne son nom.

L'ingénieur géographe Michel Maissiat (1770-1822) améliore la *boussole,* la munit d'un *éclimètre* et d'un *rapporteur,* ce qui a permis les travaux de levé à la planchette.

Les premiers *levés nivelés* aboutissant à des documents précis en relief ont été faits par Pierre Antoine Clerc (1770-1830). Il établit ainsi les plans de Montmartre et de Gentilly. Les travaux de Clerc permirent au génie militaire d'établir des plans rigoureux à projection horizontale et non plus des figurations perspectives.

Parmi les topographes remarquables du XIXe siècle :

Le mathématicien Puissant (1769-1843) a publié un traité de topographie en 1807.

Le colonel Goulier (1818-1891), directeur de l'enseignement topographique à l'École de Metz, a créé ou perfectionné la plupart des instruments actuels : règle à éclimètre, alidade nivelatrice, etc. Ses études sur les levés topométriques et la tachéométrie sont très importantes.

Le colonel Laussedat (1819-1907), directeur du Conservatoire des arts et métiers, préconisa en 1851 l'emploi de la photographie pour les levés topographiques. Il est à l'origine de la phototopographie.

L'ingénieur italien Ignazio Porro donna son impulsion en France à la tachéométrie; il construisit en 1858 un photogoniomètre.

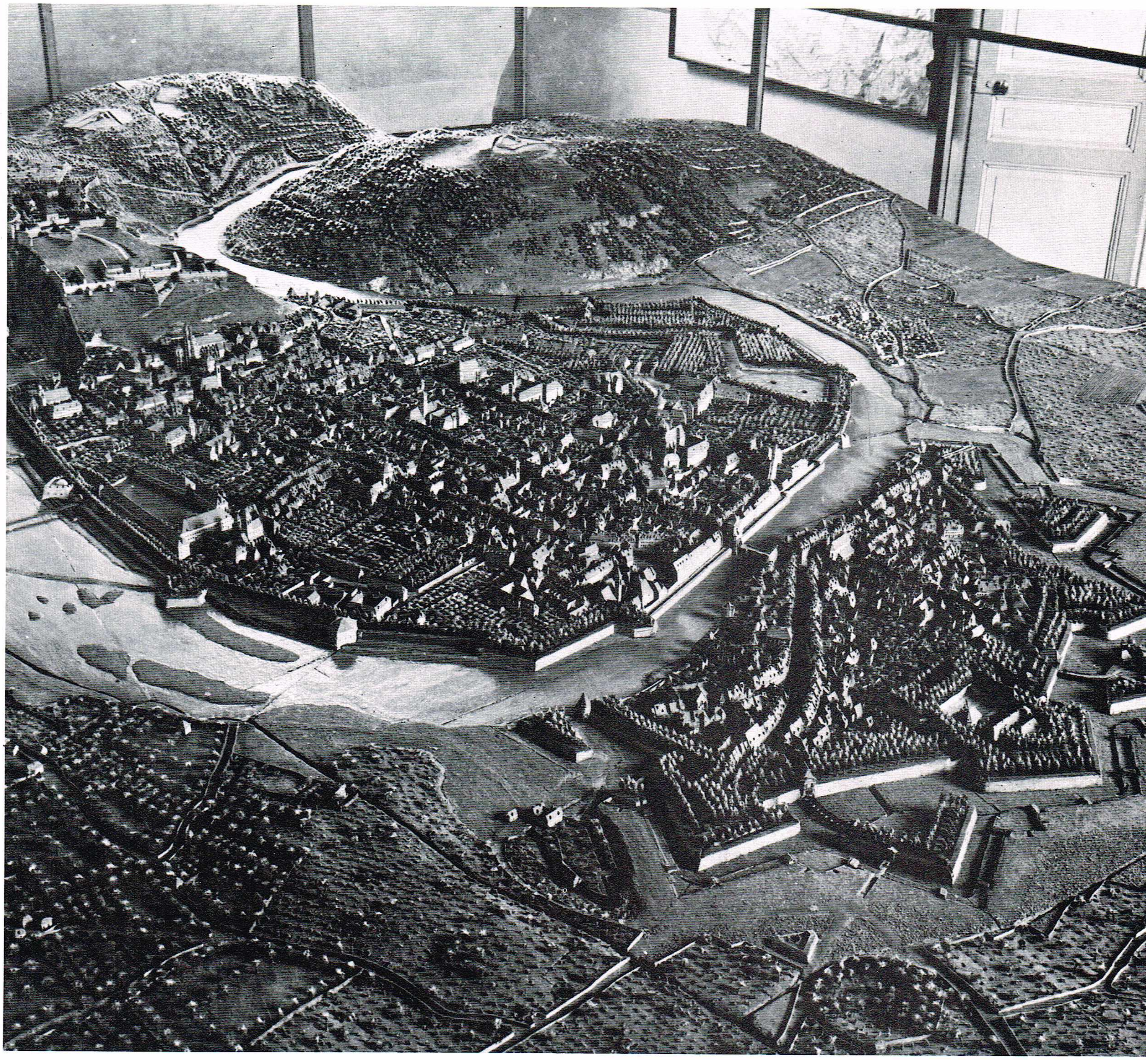

Archives Photo Paris

Adrien Bourdalouë (1792-1868) a dirigé le premier nivellement général de la France, qui comprenait un réseau de près de 20 000 km de cheminement de base. On lui doit l'unification des altitudes.

Le général Perrier (1838-1888), membre de l'Académie des sciences, contribua à augmenter la précision des instruments et des méthodes d'observation.

Vers 1900, la stéréophotogrammétrie apparaît. Elle trouve tout d'abord une solution numérique avec le stéréocomparateur du Dr Pulfrich, et ensuite une solution automatique plus efficace dans le stéréo-autographe de l'Autrichien von Orel.

Actuellement, les méthodes photogrammétriques s'appuient sur des appareils de conception géniale dus à des constructeurs tels que Poivilliers en France, Nistri et Santoni en Italie, Wild en Suisse, Zeiss en Allemagne, etc.

Au cours de la première moitié de ce siècle, un grand nombre de géographes et géomètres éminents développèrent en France les moyens et les méthodes topographiques. Parmi eux, il convient de citer :

Le général Hurault (1886-1973) qui fut directeur du Service géographique de l'Armée, puis de l'Institut géographique national.

René Danger (1872-1953) qui fonda l'ordre des géomètres français.

Henri Lafosse (1889-1959) qui fut ingénieur géomètre en chef de la ville de Paris. Il est l'auteur d'un équipement de mesure précise des distances et de nombreuses méthodes topométriques.

André Roussilhe qui contribua à la création de l'Institut de topométrie au Conservatoire national des arts et métiers et au développement de la photogrammétrie en France.

▲ ***La topographie a pour but la description géométrique d'une surface terrestre. C'est une science très ancienne qui, au XVIIIe siècle, sous Louis XV, voit apparaître les premiers plans de villes fortifiées avec des cotes d'altitude, comme ce plan-relief, vue nord-est, de la ville de Besançon et de sa forteresse.***

Les instruments topographiques

- *Les instruments anciens*

Les premiers instruments apparaissent 3 000 ans avant notre ère. Les Chaldéens mesuraient les angles à l'aide de fils et d'une arbalète appelée bâton de Jacob.

Les Égyptiens mesuraient les distances avec des cordeaux alignés sur des jalons. Le nivellement était assuré à l'aide d'une règle horizontale tendue entre deux fils à plomb ou en construisant des rigoles en argile remplies d'eau.

Les Grecs utilisèrent la chaîne et la corde divisée en ortées ou le podomètre pour la mesure des longueurs. Les angles étaient mesurés à l'aide d'une étoile ou astérisque. Le nivellement s'effectuait au niveau d'eau avec mires à voyants mobiles.

Les Romains mesuraient les angles à l'aide d'un instrument appelé *groma,* comportant fils à plomb et cercles gradués.

Au Moyen Age, les connaissances topographiques s'estompent, malgré les documents décrivant les instruments et les procédés de levés utilisés par les Anciens.

Il faut attendre le XIV[e] siècle pour voir réapparaître le bâton de Jacob, puis l'octant. Le XVI[e] siècle voit construire le théodolite et la planchette. Le XVII[e] siècle découvre la règle rigide pour la mesure des longueurs, le niveau à bulle, la lunette, le vernier. Le XVIII[e] siècle perfectionne les découvertes précédentes en créant des machines à diviser; il met au point le chronomètre. Le XIX[e] siècle, par son expansion industrielle, va permettre la construction de différents types de niveaux et de tachéomètres : à fils stadimétriques fixes et mobiles ainsi qu'à variation de pentes (Sanguet) ; on découvre la chaîne d'arpenteur, le fil métallique pour la mesure des bases géodésiques. La photogrammétrie fait son apparition.

- *Les instruments modernes*

Ils apparaissent au milieu du XX[e] siècle, les progrès spectaculaires réalisés dans toutes les branches de la science ont bouleversé la construction des instruments : le bronze, le laiton, les limbes en argent, les réticules gravés ont été remplacés par les aciers de nitruration; les limbes sont en verre, et les graduations reproduites photo-mécaniquement à partir d'un cercle-étalon parfaitement tracé.

De plus, les constructeurs d'instruments se sont mis à construire en série. Ils s'équipent de machines modernes, et, pour rentabiliser leurs fabrications, ils les banalisent : même optique sur des instruments de précisions différentes, vis calantes, mouvements de fin pointage, etc.

Enfin, les utilisateurs ont incité les constructeurs à fabriquer des instruments universels pouvant indifféremment fonctionner sous n'importe quel climat, ce qui a posé des problèmes de fiole (variation de la longueur de la bulle), de fabrication (tolérances d'usinages), de graissage, d'étanchéité de protection de l'optique.

Actuellement, avec l'apparition d'instruments entièrement automatiques, seul le pointé est encore laissé à l'opérateur : la réitération des mesures de direction, de longueur se fait automatiquement.

Cette modification de l'aspect général des instruments ne change rien à leurs principes généraux : trois axes rectangulaires. Ils sont seulement plus pratiques et plus rapides d'emploi.

- *Les organes principaux des instruments topographiques*

Goniomètre (fig. 1)

Instrument ou partie d'instrument servant à mesurer les angles horizontaux. Il se compose de :

— un socle équipé de trois vis calantes;
— un cercle portant la graduation, appelé limbe;
— un dispositif optique (microscope) pour la prise d'image des graduations sur le cercle;
— une nivelle torique;
— une lunette.

Ces éléments sont liés entre eux par deux axes :

— l'axe vertical ou axe principal qui est l'axe de rotation du cercle et du microscope;
— l'axe horizontal ou axe secondaire qui est l'axe de rotation de la lunette équipé des blocages et des fins pointages suivants : limbe autour de l'axe principal : réitération ou répétition; microscope autour du limbe; lunette.

Trépied

Le trépied n'est pas qu'un accessoire. Il assure la stabilité de l'instrument qu'il supporte, afin de permettre la grande précision des observations.

Nivelle

Pour matérialiser la verticale au point de station, on se sert d'une nivelle. La nivelle est constituée par une fiole placée dans une monture. Il existe trois sortes de fioles :

— *Fiole cylindrique* ou *torique :* le tube cylindrique en cristal est usiné intérieurement suivant un tore (fig. 2).
— *Fiole en tonneau :* le tube est usiné intérieurement suivant un cercle tournant autour d'une de ses cordes confondues avec l'axe du tube.
— *Fiole sphérique :* la calotte sphérique est usinée comme la face concave de certaines lentilles, dans une plaque de verre de forme circulaire, la cuvette inférieure étant soudée à cette plaque soit à chaud, soit chimiquement.

Lunette

Une lunette d'instrument topographique est, en général, composée d'un bloc objectif (objectif + divergente), d'un disque portant le réticule, d'un oculaire.

Principales définitions

— *Axe de visée :* c'est la droite virtuelle joignant le centre optique de l'objectif (ou encore le point nodal arrière du système centré objectif) à la croisée des fils du réticule.

◀ Page ci-contre, un **théodolite** *ancien, signé J. Dupuis mais non daté.*

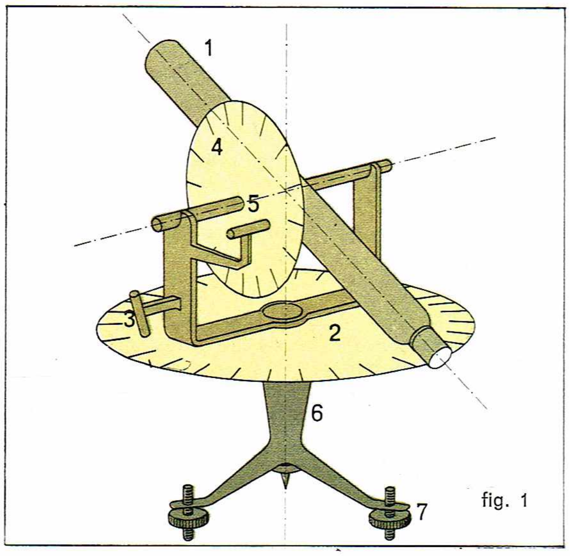

fig. 1

I.G.D.A.

◀ Fig. 1 : schéma d'un **théodolite** *: 1, lunette; 2, cercle azimutal gradué; 3 et 5, microscospe pour la lecture d'angles; 4, cercle zénithal; 6 et 7, socle équipé de trois vis calantes.*

M. Pucciarelli

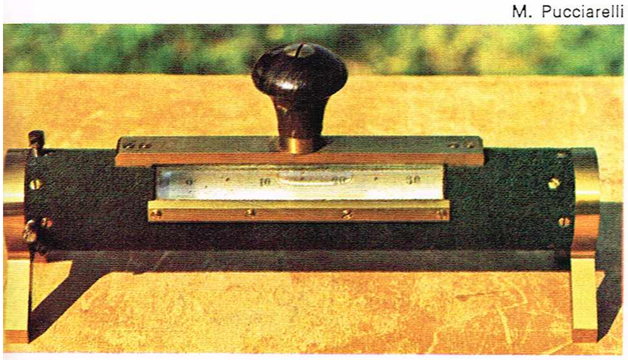

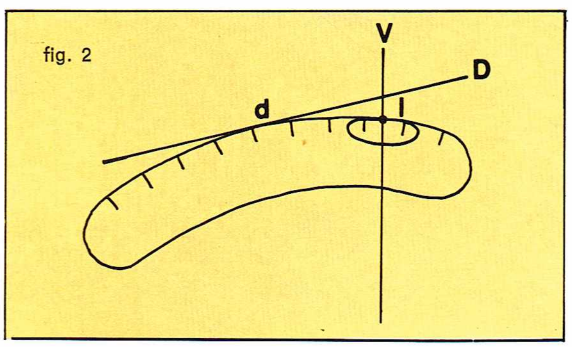

fig. 2

◀ A gauche, une **nivelle,** *instrument servant à matérialiser la verticale au point de station. A droite, fig. 2, représentation schématique d'une fiole torique contenant un liquide avec une réserve (bulle de gaz) et portant une graduation :* **d,** *division choisie pour le calage;* **D,** *directrice;* **V,** *verticale;* **I,** *lecture de bulle, correspondant au milieu de la bulle en cours de calage de l'axe principal de l'instrument.*

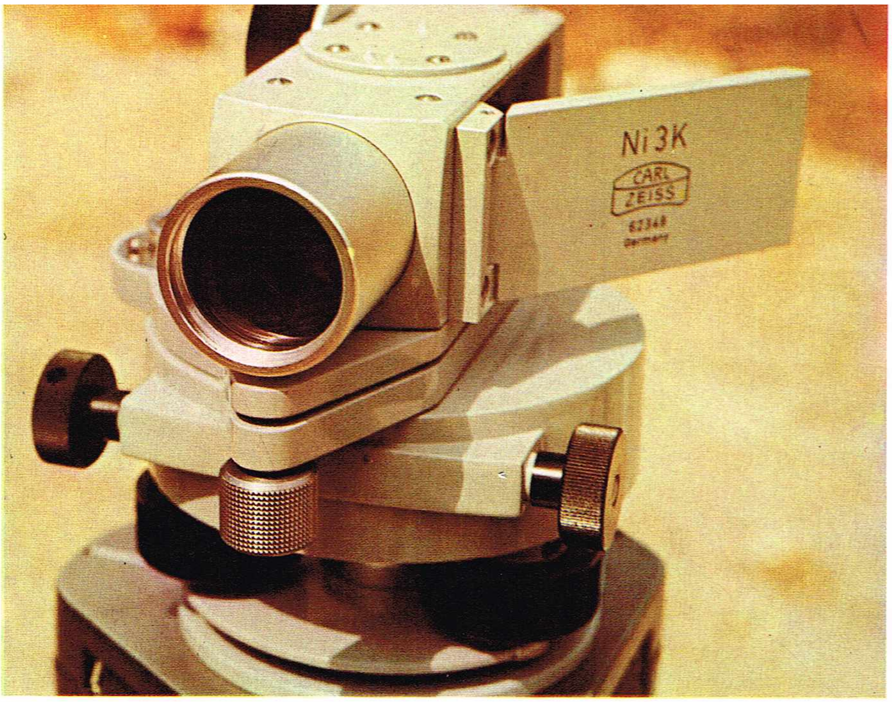

M. Pucciarelli

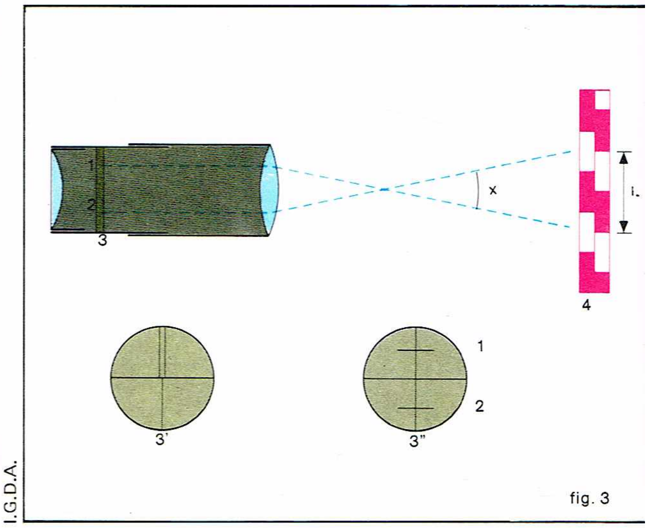

I.G.D.A.

▲ *A gauche, un* niveau bloc *: c'est un des types de niveaux servant aux opérations de nivellement direct.*
A droite, fig. 3, lunette stadimétrique et réticule : 1 et 2, traits stadimétriques du réticule (3); 3', réticule permettant uniquement le pointé; 3'', réticule muni de traits stadimétriques; 4, mire stadia; x, *angle de la parallaxe;* l_s, *portion de la mire.*
▼ *Un* gyroscope *: c'est un instrument qui fournit, en n'importe quel lieu (sauf aux pôles), en moins de 20 minutes, et quels que soient le temps et l'instant, le nord géographique (N. G.) à un centigrade près. Il n'est pas influencé par des champs magnétiques extérieurs.*

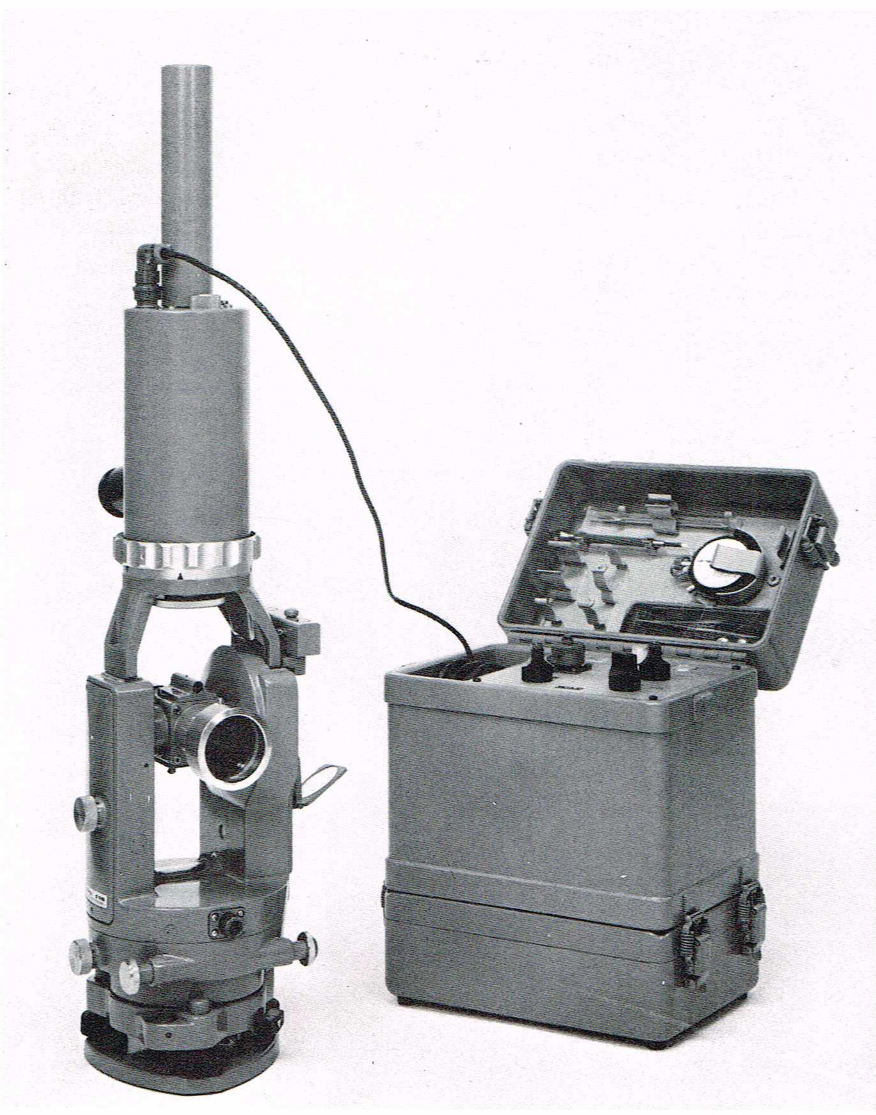

Wild

— *Réticule :* c'est un repère placé dans le plan focal de l'objectif d'une lunette réglée à l'infini, servant à exécuter les pointés. Dans les instruments très anciens — ou d'astronomie — le réticule est réalisé avec des fils d'araignée ou des fils de plastique. Dans les instruments modernes, le réticule est soit gravé au diamant ou à l'acide fluorhydrique, soit obtenu par reproduction photographique sur un disque de verre. Toutefois, l'on continue à parler des « fils » du réticule (fig. 3).

Lecture des cercles

Les cercles d'un instrument peuvent être divisés en grades ou en degrés suivant la destination de cet instrument (géodésie-astronomie). En règle générale, en Europe, les instruments destinés aux travaux topographiques sont divisés en grades, ou en subdivisions du grade.

Suivant les constructeurs, le cercle est :

— chiffré soit dans le sens de rotation des aiguilles d'une montre, soit dans le sens inverse. Avec certains instruments modernes, l'opérateur peut afficher le sens de rotation;

— équipé d'un ou deux verniers numérotés — pour les instruments à limbe en argent — et d'un microscope à une ou deux prises d'images — pour les limbes en verre.

Éclimètre

Instrument ou partie d'instrument conçu pour la mesure des angles dans le plan vertical. Il comprend :

— une lunette terrestre avec ses tourillons;

— un cercle vertical portant la graduation, centré sur les tourillons;

— un microscope pour la prise d'image des graduations du cercle;

— un dispositif de calage des axes 0-200, 100-300, du cercle gradué (nivelle des sites ou calage automatique).

Pour les opérations de nivellement direct, différents types de niveaux existent :

— niveau à nivelle réversible;

— niveau bloc;

— niveau automatique;

— niveau à laser : celui-ci est un nouvel instrument qui permet de matérialiser un plan horizontal sur une profondeur de 200 m. Grâce à une mire à voyant mobile qui détecte le pinceau lumineux, on peut déterminer la hauteur en n'importe quel point de ce plan.

Pour définir une direction, certains instruments sont munis des organes suivants :

Déclinatoire : il se compose d'une aiguille aimantée de longueur suffisante pour définir le nord magnétique, à mieux que 10 centigrades près.

Gyroscope : l'axe de rotation d'un gyroscope se place dans le plan méridien du lieu où il se trouve en station; il permet, monté sur un théodolite, d'obtenir, par un calcul très simple, le nord géographique (N. G.).

Les instruments les plus utilisés actuellement fournissent, en moins d'une heure, en n'importe quel lieu (sauf aux pôles) et quels que soient le temps et l'instant, le N. G. avec une précision allant de quelques minutes à quelques secondes sexagésimales.

Instruments de mesure des distances

Les mesures des distances peuvent s'effectuer par des méthodes directes ou indirectes.

— *Les mesures directes* sont faites en reportant matériellement sur le terrain, le long de l'alignement des deux points extrêmes, un étalon de mesure connu. Cet étalon est, en général, un ruban métallique dont la longueur varie entre 2 et 50 m et dont la précision dépend des caractéristiques de fabrication :

. rubans en acier trempé ou inoxydable. Le Service des instruments de mesure a défini 3 types de précision par le décret du 1er janvier 1946 (tableau ci-contre) ;

. ruban plastifié ;

. fil ou ruban d'acier invar géodésique (ce fil en « acier invar » comprend 30 % de nickel et 70 % de fer) ;

. compteur à fil perdu : permet, par déroulement d'un fil à coudre, de connaître la distance parcourue.

— *Les mesures indirectes des distances* consistent à mesurer, non la distance à déterminer, mais un autre élément lié à celle-ci par des formules ou des lois bien définies (voir fig. 4).

Les mesures indirectes nécessitent l'emploi d'instruments appelés *tachéomètres* munis d'organes de mesure appelés *stadimètres.* Ces tachéomètres sont complétés par l'emploi de *mires* graduées, tenues soit verticalement sur les points concernés, soit perpendiculairement à la ligne de visée.

L'emploi des stadimètres est fondé sur le *principe de Reichenbach :* pour une visée horizontale, deux lectures faites sur la mire définissent une valeur L qui, multipliée par un coefficient (en général 100), donne la distance S entre le plan de la mire et l'axe vertical de l'instrument. Pour une visée ayant un angle de pente β, il faut apporter une correction en $\cos^2 \beta$ pour obtenir la distance horizontale D.

Pour obtenir la distance horizontale, quelle que soit la pente de la visée, de nombreux constructeurs ont tenté, au début du siècle, de résoudre ce problème, soit mécaniquement, soit optiquement (Hammer, Fennel). Après la dernière guerre, le Suédois Dahl a résolu élégamment ce problème en développant les courbes de correction en $\cos^2\beta$ et $\sin\beta \cos\beta$, sur un cercle gravé. Au lieu d'utiliser des traits stadimétriques fixes découpant une certaine distance sur la mire, les intervalles des traits varient en fonction de l'inclinaison β de la lunette. Les *tachéomètres autoréducteurs* ainsi conçus permettent de lire directement sur une mire parlante verticale les distances horizontales et les différences de niveau (voir fig. 5). Ces appareils sont d'un emploi très commode mais limité au levé des détails, car la précision des mesures est de l'ordre de 10 cm pour 100 m.

Certaines mesures indirectes de distance, n'exigeant pas une grande précision, peuvent être faites avec des télémètres (voir fig. 6).

Les **télémètres** permettent d'obtenir la distance directement, sans accessoire complémentaire, soit par coïncidence de l'image (télémètres de 0,20 m à 0,80 m de base), soit par la stéréoscopie : télémètres de 1 m et au-dessus. Ces instruments sont fondés sur le principe d'une base constante définissant un triangle (la base et le point à déterminer) avec mesure de la variation d'un des angles de la base (parallaxe).

Les 3 types de précision concernant les rubans métalliques

Longueurs	Précision courante	Précision fine	Précision spéciale
50 mètres	20 mm	5 mm	erreurs maximales inférieures à la moitié des erreurs tolérées pour les mesures correspondantes de la classe fine
20 mètres	8 mm	2 mm	
10 mètres	5 mm	1,5 mm	
5 mètres	3 mm	1 mm	
2 mètres	1,5 mm	0,4 mm	

Les instruments de "précision spéciale" sont utilisés avec des dynamomètres dont la tension est définie par le constructeur.

▲ *Tableau des 3 types de précision, définis par le Service des instruments, concernant les rubans en acier trempé ou inoxydable.*

M. Pucciarelli

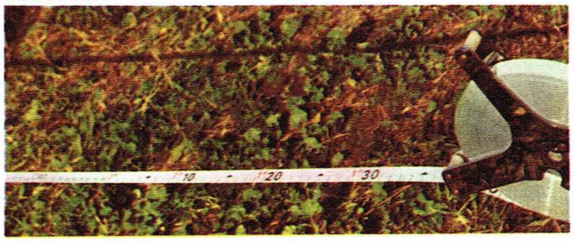

Wild-Heerbrugg

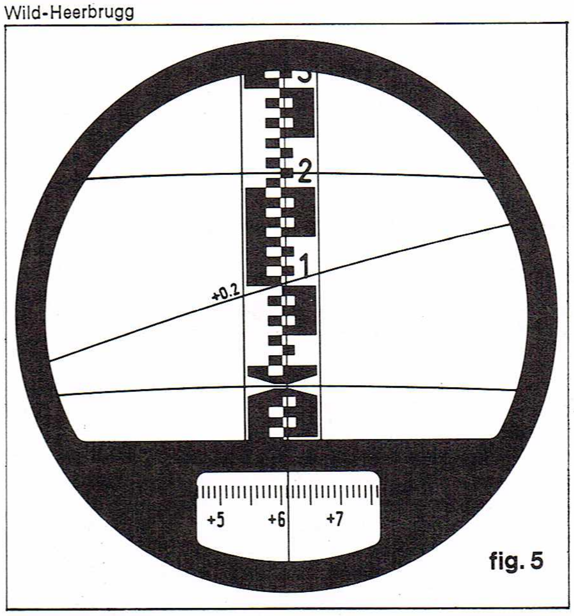

fig. 5

◀ *Ci-contre, en haut, un ruban métrique métallique. En bas, fig. 5, exemple de lecture avec un stadimètre autoréducteur : distance, 21,5 cm ; dénivelée, + 0,2 × 10,3 m = + 2,06 m ; cercle vertical, + 6,11 g.*

▼ *Fig. 4 ; principe du stadimètre à angle constant et son emploi.*

fig. 4

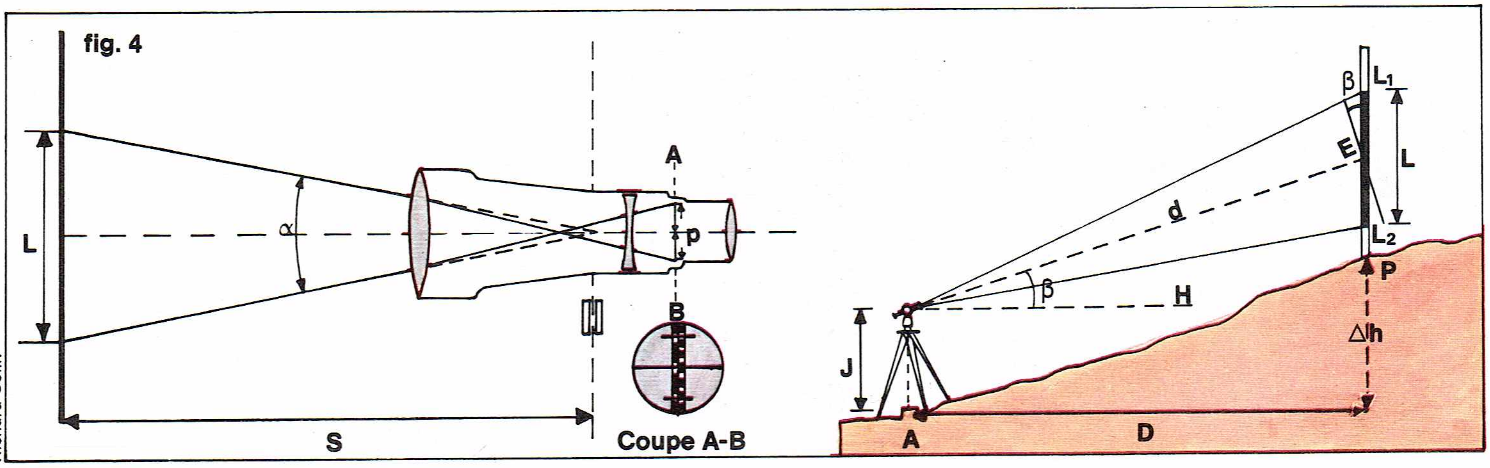

Richard Colin

▶ *Fig. 6; représentation schématique d'un* **télémètre** *: à gauche, schéma de construction; à droite, principe de mesure.*

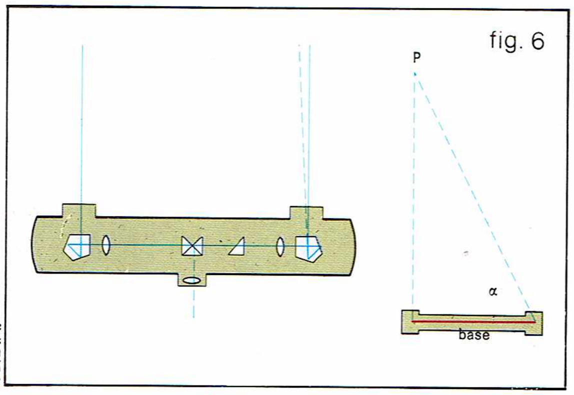

I.G.D.A.

Les **distancemètres** sont des appareils récents qui utilisent le principe de la mesure du temps que met une onde à parcourir, aller et retour, la distance à mesurer. En règle générale, l'instrument se compose d'un poste émetteur (qui émet et reçoit l'onde modulée) et d'un réflecteur (qui renvoie l'onde). Un compteur placé sur les postes émetteurs mesure le décalage entre les modulations aller et retour. Des ondes de principe très différent sont actuellement utilisées : électromagnétiques, optiques (infrarouge, laser, lampe à vapeur de mercure).

Ces instruments équipent des tachéomètres enregistrant électroniquement les valeurs mesurées : angle azimutal, angle zénithal, distance suivant la pente. Un compteur à chiffres et lettres permet d'inscrire le numéro de la station, ainsi que ceux des points visés. Comme l'opérateur ne peut plus réitérer les mesures pour obtenir une bonne précision c'est l'instrument qui s'en charge (azimut et distances).

Afin de permettre la conservation d'un trépied centré sur un point, les constructeurs ont mis au point différents dispositifs de centrage forcé. Le plus astucieux et le plus simple est le système allemand à tige et alésage de 34 mm. Ce principe fait l'objet d'une norme DIN et tous les constructeurs allemands (Est et Ouest) ont adopté ce principe.

La poursuite des vols de fusées et de satellites a fait faire, indirectement, d'énormes progrès aux instruments topographiques qui, en 20 ans, sont passés de la fabrication pratiquement artisanale à la fabrication en séries.

▼ *Le* **distancemètre** *est un appareil qui utilise le principe de la mesure du temps que met une onde à parcourir, aller et retour, la distance à mesurer.*

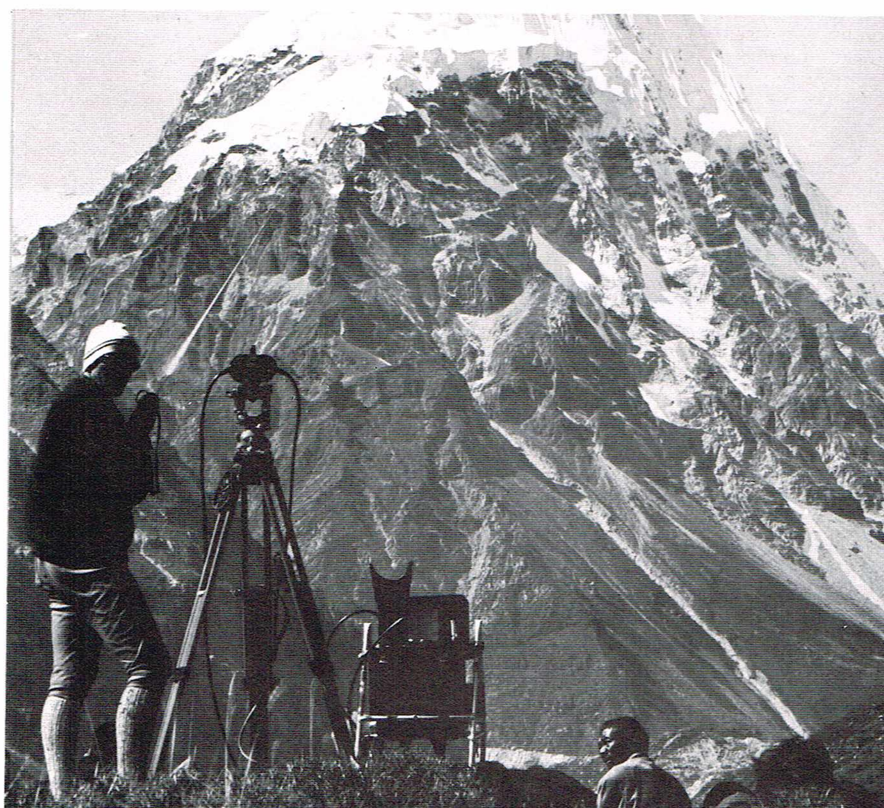

Wild-Heerbrugg

La théorie des erreurs appliquée

L'inexactitude des mesures tient à de nombreuses causes : négligences de l'opérateur, imperfection des instruments et mauvaises conditions de travail. Il est indispensable de connaître ces causes, d'analyser leurs conséquences et d'en tenir compte pour augmenter, ou simplement définir, la précision des mesures. Il faut distinguer les fautes et les erreurs proprement dites.

— Les *fautes* sont dues, le plus souvent, à l'inadvertance de l'opérateur : omission d'une portée de mesure de longueur, confusion de chiffre dans une lecture, maladresse opératoire, etc. Les fautes sont plus à craindre que les erreurs, et il est nécessaire de vérifier le plus grand nombre des opérations courantes de topographie.

— Les *erreurs* sont dues aux imperfections des instruments et des sens de l'opérateur. Elles sont inévitables, mais on peut en diminuer l'effet par le choix judicieux des instruments et des méthodes. L'étude des limites d'emploi des instruments topographiques et des méthodes opératoires dépend étroitement de la connaissance des incertitudes et erreurs sur les mesures. On distingue les erreurs systématiques et les erreurs accidentelles.

Les erreurs systématiques

Elles proviennent en général de défauts de construction ou de réglage des instruments. Elles obéissent à des lois, qui peuvent être mises en évidence. Par exemple, l'erreur de mesure de longueur causée par l'emploi d'un ruban d'acier trop court ou trop long.

Certains défauts instrumentaux introduisent des valeurs variables d'erreur systématique, par exemple l'erreur d'excentricité de l'axe principal d'un théodolite par rapport au centre du limbe gradué. Le mode opératoire devra éliminer cette erreur dont les effets se composent par voie d'addition.

Les erreurs accidentelles

Les erreurs accidentelles ne tiennent à aucune cause permanente, elles sont fortuites. Il est impossible de prévoir pour une opération isolée la valeur de l'erreur accidentelle. Pour lutter contre de telles erreurs, les observations ou mesures topographiques sont répétées un grand nombre de fois. En effet, les erreurs se produisent et se composent suivant des lois remarquables dont l'étude constitue la théorie des erreurs accidentelles.

Lorsqu'on répète la même opération de mesure un très grand nombre de fois, dans les mêmes conditions, la théorie des probabilités montre, et l'expérience permet de le vérifier, que les erreurs accidentelles produites ont les caractéristiques suivantes :

a) A toute erreur positive correspond une erreur négative sensiblement égale.

b) Les erreurs les plus petites sont les plus nombreuses.

c) Elles ne dépassent pas une certaine limite.

Si l'on porte sur un axe horizontal, en abscisses positives et négatives, des longueurs proportionnelles à la valeur des erreurs accidentelles qui se produisent quand on répète la même opération un grand nombre de fois, et si l'on porte en ordonnées des valeurs proportionnelles au nombre des erreurs égales à chaque abscisse, on obtient un histogramme en cloche appelé *courbe de Gauss*. Le calcul des probabilités permet d'établir la formule de cette courbe. Les trois propriétés énoncées apparaissent nettement sur cette courbe (fig. 7).

De l'ensemble des erreurs accidentelles produites au cours d'opérations de mesure répétées un grand nombre de fois, se dégagent un certain nombre d'erreurs caractéristiques, parmi lesquelles :

L'*erreur probable* (ep) est une erreur telle qu'il y a un nombre égal d'erreurs plus grandes et d'erreurs plus petites. Sa probabilité de dépassement est de 50 pour cent.

L'*erreur moyenne quadratique* (e. m. q.) ou écart type σ. Soit $e_1, e_2, e_3... e_n$ les valeurs des erreurs accidentelles et n le nombre de mesures. On appelle erreur moyenne quadratique, ou écart type, la quantité donnée par l'expression $\sigma = \sqrt{\frac{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 ... + e_n^2}{n}}$.

Sa probabilité d'être dépassée est égale à 32 pour 100, et on a approximativement $\sigma = 3/2$ erreurs probables. L'expression de cette erreur caractérise la précision d'une mesure.

L'*erreur maximale*. Le calcul des probabilités ainsi que l'expérience montrent que l'erreur égale à 2,7 fois l'erreur moyenne quadratique n'est dépassée qu'une fois

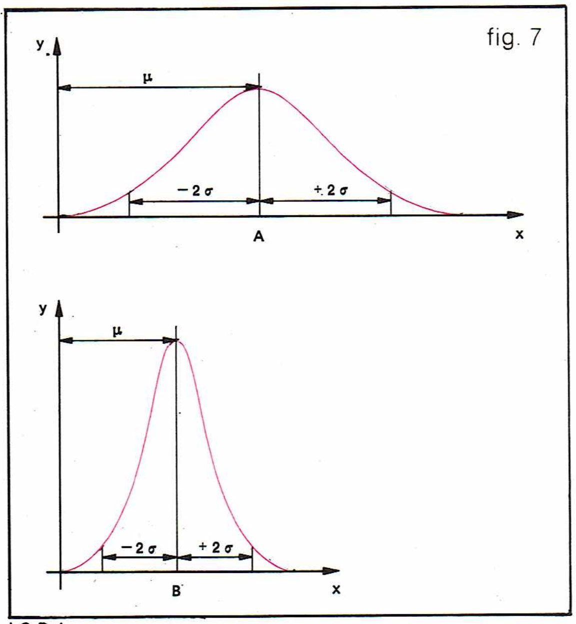

I.G.D.A.

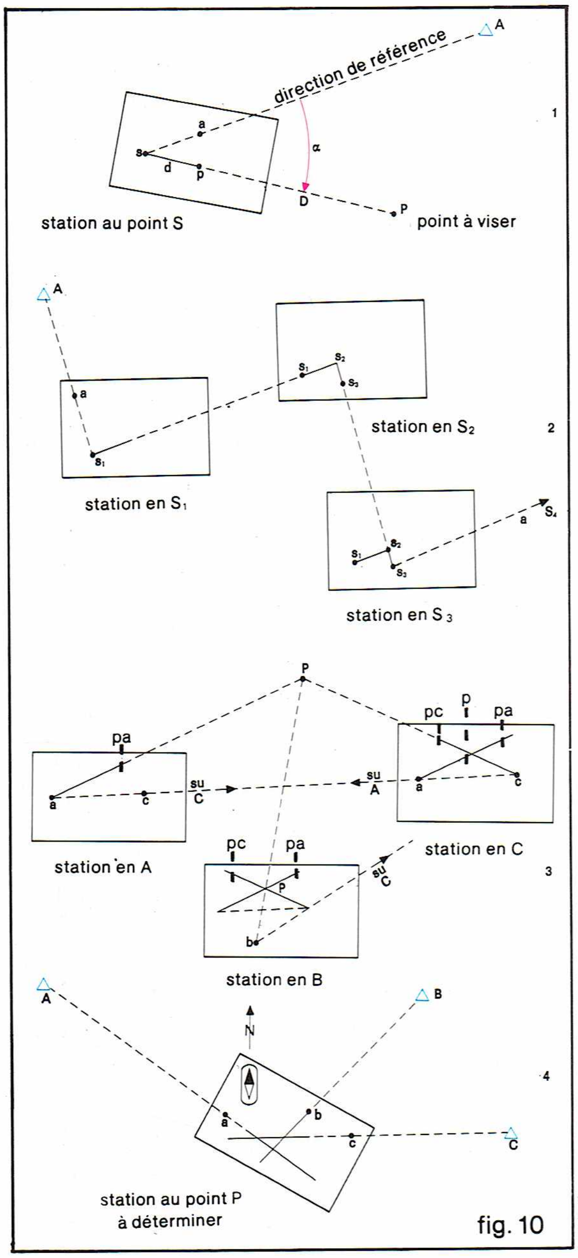

I.G.D.A.

sur cent erreurs. L'espace compris entre + 2,7 (σ) et — 2,7 (σ) est appelé *tolérance*. Les écarts hors tolérance sont considérés comme le résultat de fautes commises.

Une opération de mesure est généralement entachée de plusieurs types d'erreurs. De plus, les déterminations topographiques comportent souvent la mesure de plusieurs grandeurs.

Par exemple, la position d'un point peut être déterminée par la mesure d'une distance et l'observation d'un angle. Pour caractériser la précision de la position du point, ainsi élevé, il faudra rechercher comment se composent l'erreur commise sur la mesure de distance et celle commise sur la mesure d'angle.

La théorie des erreurs appliquée aux mesures très nombreuses permet d'atténuer les effets des erreurs accidentelles si les observations et les mesures faites sont débarrassées de toute erreur systématique. Dans ce cas, des méthodes dites de compensation sont employées.

La valeur des travaux topographiques repose sur l'analyse des erreurs mises en évidence. Ces erreurs mises en évidence doivent non seulement être inférieures aux tolérances, mais elles doivent aussi suivre la loi des erreurs, matérialisée par la courbe de Gauss, c'est-à-dire, tantôt positives et tantôt négatives, les plus nombreuses devant être les plus petites, etc. Une répartition différente montrerait que des erreurs systématiques, ou des fautes, n'ont pas été décelées, et que le résultat ne présente pas la précision désirée.

Les méthodes générales

Levé direct à la planchette

Le levé direct à la planchette (fig. 8) est en général utilisé pour la représentation du terrain à une échelle variant entre le 1/40 000 et le 1/5 000. Pour les petites échelles, son emploi est destiné à des opérations partielles, dites de complètement, destinées à combler les lacunes des levés photogrammétriques.

Le matériel nécessaire est composé d'une planche à dessin, recouverte d'un papier appelé minute, fixée sur un trépied, d'une alidade (fig. 9) qui réunit un organe de visée et une règle graduée en forme de biseau, d'un déclinatoire (aiguille aimantée) fixé sur la planchette et qui permet de l'orienter, et d'une nivelle.

Les divers modes opératoires sont les suivants (fig. 10) :

— Le *tracé d'un angle.* On met la planchette en station au-dessus d'un point au sol *S* connu. A la verticale de *S* correspond un point *s* sur la planchette. La planchette est rendue horizontale à l'aide d'une nivelle. On fait pivoter le biseau de l'alidade autour du point *s* jusqu'à ce que l'organe de visée permette de pointer *A* matérialisé par un jalon ou une mire. On trace sur la minute la visée correspondante, et on procède de même pour le point *P*. On dessine ainsi l'angle *asp* correspondant à l'angle *ASP* du terrain.

— L'*intersection* consiste à stationner un point connu *A*, à orienter la planchette, à viser un point connu *C*, choisi aussi éloigné que possible, à viser le point *P* et à tracer sur la minute de levé la direction $a\text{-}p_a$ correspondante. On opère de la même façon de la station *C*. L'intersection des droites $ap_a\text{-}cp_c$ donne le point *p* cherché. Le point *p* peut être contrôlé par une troisième visée,

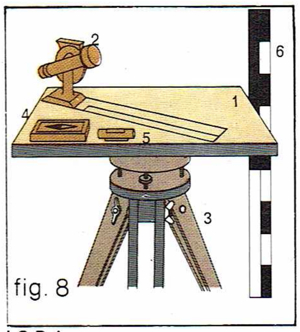

I.G.D.A.

▲ ***Fig. 8;*** ***représentation schématique d'une*** **planchette de levé :**
1, planchette à dessin;
2, alidade;
3, trépied support;
4, déclinatoire;
5, nivelle d'horizontalité;
6, mire.

◀ ***Ci-contre, en haut, fig. 7; histogramme en cloche appelé* courbe de Gauss *et qui met en évidence les 3 caractéristiques des erreurs accidentelles. Dans la courbe du bas, B, σ est plus petite parce que les valeurs de x sont concentrées autour de la moyenne; en haut, dans la courbe A, les valeurs de x sont dispersées. La surface comprise entre μ — 2 σ et μ + 2 σ est toujours égale à 95 % de la surface. En bas, fig. 10; levé graphique à la planchette :***
1, tracé d'un angle;
2, cheminement;
3, intersection;
4, relèvement.

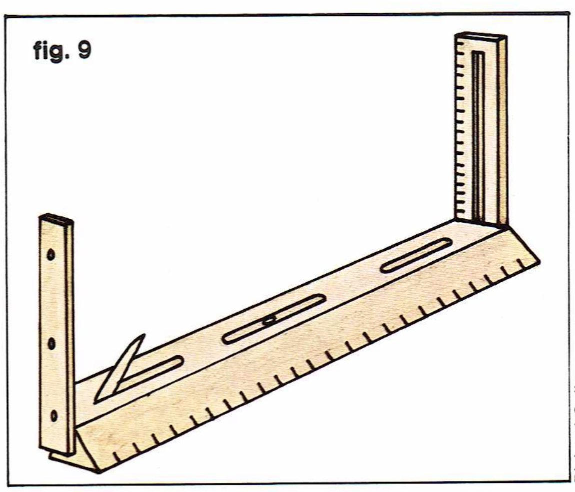

Richard Colin

◀ ***Fig. 9;* l'alidade *nivelatrice est un instrument qui comporte une règle à biseau, en bois ou en métal, permettant le tracé de la direction, deux branches verticales qui permettent la matérialisation de la visée dans l'espace, et une nivelle permettant de rendre le biseau horizontal.***

▶ *Fig. 12 ; levé tachéométrique : D, θ et φ, distance et angles ; x, y, z, coordonnées orthogonales.*

issue du point *B* par exemple. Si les trois droites convergent rigoureusement vers le même point, ce dernier est parfaitement défini. Il est normal d'augmenter la précision du point par d'autres visées si cela est possible.

L'erreur sur la position du point résulte des erreurs angulaires commises dans la détermination des directions. Ces erreurs dépendent de la longueur de chaque visée et de leur angle d'intersection. On en tient compte pour choisir le point définitif.

— Le *relèvement* consiste à stationner un point *P* du terrain, de position *p* inconnue sur la minute de levé. L'orientation de la planchette est assurée au mieux à l'aide du déclinatoire. En plaçant le biseau de l'alidade sur le point *a* connu, on vise le point *A* correspondant, et l'on trace la direction inverse *Aa* sur la minute. On opère de la même façon sur les points connus *B* et *C*. On obtient donc trois directions *Aa, Bb, Cc*. Si l'orientation de la planchette était parfaite, ces trois directions marquées en traits pleins sur la fig. 10 concourraient en un seul point, qui serait le point *p* cherché. La planchette ayant une erreur d'orientation initiale, les trois directions ne se coupent pas au même point. Le triangle ainsi formé est appelé chapeau. Si le point *P* cherché se trouve à l'intérieur du triangle *ABC*, sa position rigoureuse est assurée par construction graphique, à l'intérieur du chapeau, en tenant compte des écarts proportionnels aux longueurs des visées.

Si le point *P* est à l'extérieur du triangle *ABC*, on appliquera une deuxième fois le mode opératoire, mais en modifiant légèrement l'orientation de la planchette. On obtient ainsi, non plus un seul mais deux triangles, dits chapeaux inversés, dont on joint deux à deux les sommets homologues. On obtient finalement trois droites se recoupant au point *p* cherché.

— Pour assurer le levé des points de détail à la planchette, il est nécessaire de procéder par *cheminements*. Ces cheminements peuvent être exécutés en mode goniométrique ou en mode décliné.

En *mode goniométrique*, on met la planchette en station en S_1, puis on l'oriente sur un côté connu S_1A, on vise ensuite le point S_2, et on trace sa direction $S_1 — S_2$. Ayant mesuré la distance $S_1 — S_2$ réduite à l'horizon, on la porte à l'échelle du levé sur cette direction et on obtient ainsi le point S_2. Puis on effectue les mêmes opérations en tous les points successifs, S_2, S_3, etc.

En *mode décliné* en chaque sommet, on oriente la planchette avec la déclinatoire, on vérifie par une visée inverse sur le point précédent qu'il n'y a pas de déviation locale de l'aiguille aimantée, puis, par une visée directe sur le point suivant, on trace la direction correspondante.

L'angle de déclinaison entre le nord magnétique donné par l'aiguille aimantée et le nord de la projection employée (voir *Géodésie*) s'obtient pratiquement par des observations faites en stationnant un point d'où l'on voit un autre point de gisement connu.

Le mode décliné est plus rapide que le mode goniométrique, mais, pour une opération isolée, il est moins précis. De plus, des déviations locales de la déclinaison peuvent causer des erreurs importantes dans les opérations topographiques.

L'exploitation des stations successives des cheminements permet la représentation graphique sur la minute de tous les points caractéristiques du terrain. A chaque station et sur un rayon adapté à la portée de l'instrument

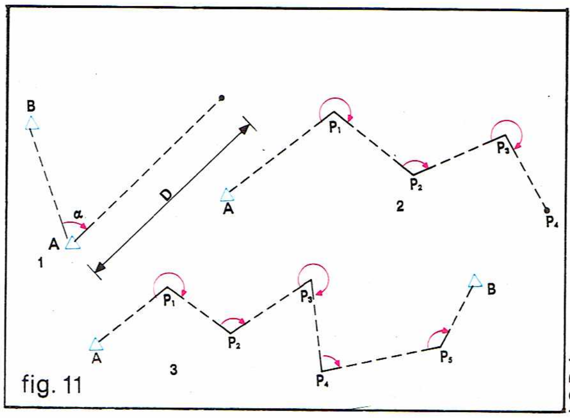

fig. 11

I.G.D.A.

▶ *Fig. 11 ; détermination planimétrique : 1, rayonnement ; 2, polygonale ouverte ; 3, polygonale fermée.*

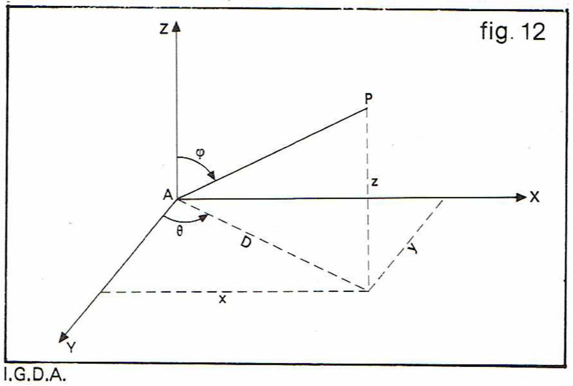

fig. 12

I.G.D.A.

de visée, tous les points sont observés en direction, en distance et en différence de niveau.

Le système *par rayonnement* (fig. 11) consiste à exécuter, à partir de chaque station, la détermination des points de détail à l'aide de coordonnées polaires graphiques. La détermination altimétrique se fait soit par lecture de l'angle de pente qui donne la différence de niveau en fonction de la distance horizontale, soit avec certains stadimètres par lecture directe de la différence de niveau.

Les points ainsi levés sont matérialisés sur la minute. Ils servent à la représentation planimétrique du terrain par signes conventionnels. Le relief du terrain est exprimé en courbes de niveau par exploitation de points cotés. Les courbes de niveau sont interprétées, entre les points connus, selon la forme naturelle du terrain. La minute de levé est ensuite mise au net, dessinée à l'encre. En cartographie, pour conserver à la minute une grande netteté, on ne porte pas sur elle tous les renseignements nécessaires à la rédaction définitive de la carte. Ces renseignements sont portés sur des calques annexes (calque d'écritures, calque de cotes d'altitude, calque des cultures et de l'hydrographie, etc.).

Levé tachéométrique

Le levé tachéométrique consiste à effectuer le levé du canevas polygonal (cheminements) et le levé des points de détail, en planimétrie et altimétrie. Les opérations sont simultanées et faites avec un seul instrument appelé tachéomètre.

Le canevas est constitué par un réseau de cheminements de polygonations appuyés sur une triangulation.

Le tachéomètre est mis en station successivement sur chaque sommet des cheminements. A chaque station, on mesure les éléments (angles et distances) qui permettront ultérieurement de calculer les coordonnées *X* et *Y* ainsi que l'altitude *Z* de chaque sommet (fig. 12). Les points de détail sont levés par rayonnement issu de chaque station. Les tachéomètres utilisés permettent non seulement d'observer les angles horizontaux et verticaux, mais également de mesurer les distances (voir *Instruments*).

La tachéométrie est un procédé de levé rapide et d'une précision suffisante pour de nombreux travaux de génie civil, et qui aboutit à l'exécution de plans à des échelles variant entre le 1/500 et le 1/2 000. Pour des échelles plus petites, il est préférable d'avoir recours au levé mixte, en utilisant la planchette pour l'exploitation des stations, surtout s'il s'agit d'un levé avec courbes de niveau.

Une équipe de levé au tachéomètre est composée des agents suivants :

— Un croquiseur, chef d'équipe qui dessine à vue le croquis du terrain, choisit les points à représenter, les indique sur le croquis et fait placer un ou des porte-mire sur chacun d'eux.

— Un opérateur qui observe avec l'appareil les mires qui lui sont présentées successivement.

— Un secrétaire qui note sur un carnet la référence de chaque point visé, les angles horizontaux et verticaux correspondants ainsi que la distance. Ces observations lui sont dictées par l'opérateur.

— Deux à quatre porte-mire, suivant le relief du terrain et les difficultés d'accès aux points.

On effectue ensuite, d'après le croquis de terrain et les éléments du carnet d'observations, le report ou dessin dans l'ordre suivant : calculs des coordonnées et altitudes des sommets de canevas ; calculs des coordonnées et altitudes de points de détail ; piquage des points sur la minute de levé à l'aide d'un coordinatographe ; complète-

ment de report graphique; inscription des altitudes; dessin de la planimétrie; expression du relief par tracé des courbes de niveau.

Les photographies aériennes permettent éventuellement d'interpoler à vue, entre des détails très voisins mis en place par des procédés topographiques rigoureux.

L'électronique joue un rôle de plus en plus considérable en topographie, dans les techniques de saisie des données sur le terrain, leur exploitation et jusqu'à l'établissement du document final, liste de coordonnées, état de surface ou même plan.

C'est ainsi que la technique du levé tachéométrique évolue vers le remplacement, dans certains cas, des tachéomètres purement optiques et mécaniques par des équipements fondés sur le principe du *géodimètre*. Rappelons qu'en 1948, le Suédois Bergstrand publiait un document sur le géodimètre utilisant des ondes lumineuses aller et retour entre deux points : la vitesse de la lumière est connue, et on en déduit la distance. Dans cet appareil, une *cellule de Kerr* transforme une oscillation électrique en modulation lumineuse.

Les appareils distancemètres les plus récents fondés sur le principe du géodimètre comportent un *appareil de visée* avec embase amovible à plomb optique et un *appareil de commande* séparé, auquel il est relié par un fil. L'appareil de visée est muni de systèmes optiques séparés pour les lunettes d'émission et de réception. A l'autre extrémité de la distance à mesurer, on place un *réflecteur* composé de plusieurs prismes.

Les radiations permettent des mesures de jour et de nuit à des portées variant entre 400 et 1 500 m, selon le nombre des prismes réflecteurs. La précision de la mesure est de l'ordre du centimètre et indépendante de la distance. Certains appareils se fixent sur un théodolite, et cette combinaison permet la mesure de distances et d'angles horizontaux et verticaux. Ces équipements sont précieux pour la réalisation des levés de type tachéométrique.

Méthode des travaux à grande échelle

Les plans à grande échelle (1/2 000 à 1/100) sont principalement dressés en faisant appel à des techniques de levé permettant d'aboutir également à la détermination de coordonnées et de surfaces précises.

Compte tenu de l'échelle du levé, de la précision à atteindre, de la densité des détails à représenter et de la finalité du document à fournir, un choix est à faire parmi les modes opératoires et les instruments à employer. Cependant la méthode générale est la suivante :

— projet du levé;

— reconnaissance du terrain aboutissant au choix des instruments et des modes opératoires;

— établissement du canevas de levé;

— levé des détails;

— exploitation des éléments de mesure (calculs, compensation, report);

— dessin final du plan et rédaction des documents annexes.

Le **projet du levé** consiste à rechercher tous les documents déjà existants, à choisir l'échelle de représentation, à étudier les précisions planimétrique et altimétrique nécessaires, à connaître les éléments à représenter, ainsi que leur degré dans le détail. L'organisation matérielle est mise au point, compte tenu des objectifs à atteindre et du temps et des moyens dont on dispose.

La **reconnaissance du terrain** est indispensable avant le choix définitif des instruments et des modes opératoires à employer. Elle permet de choisir le canevas de base le plus favorable, l'itinéraire des lignes polygonales et les caractéristiques planimétriques et altimétriques du terrain à lever. S'il s'agit d'un levé urbain, les limites de propriété, la situation des bâtiments, etc., seront examinées.

Établissement du canevas de levé

Polygonation. Si le levé doit être rattaché au système général de coordonnées, il est nécessaire de prévoir l'insertion de quelques points, bien choisis, du canevas nouveau dans le réseau géodésique existant. Le canevas nouveau est, en général, constitué d'un réseau principal de polygonation destiné à compléter le réseau géodésique existant. Ce réseau principal est souvent constitué de cheminements de 1 à 2 km de longueur reliant deux points géodésiques (fig. 11).

Les voies de communication sont favorables au tracé de ces cheminements, dont la distance moyenne entre les

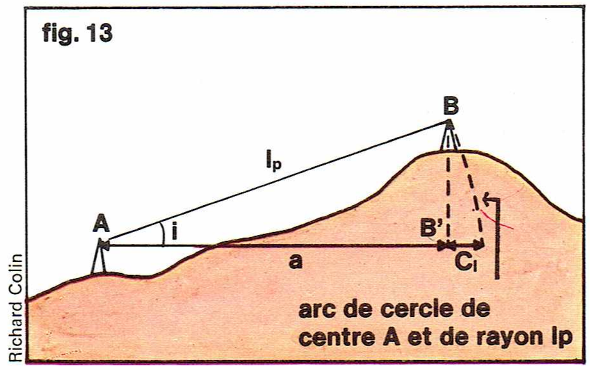

◀ *Fig. 13 ; la distance entre les points A et B ramenée à l'horizontale passant par A est a. La longueur réellement mesurée est l_p ; pour obtenir a à partir de l_p, on introduit une correction c_l.*
En effet :
$a = l_p - c_l$, $a = l_p \cos i$, *d'où*
$c_l = l_p (1 - \cos i) = 2\, l_p \sin^2 \frac{i}{2}$.

sommets visibles l'un de l'autre est de l'ordre de 200 m. Les angles de cette ligne polygonale sont observés au théodolite, suivant un mode opératoire rigoureux permettant d'éliminer l'influence des défauts instrumentaux et les erreurs accidentelles d'observation. La précision avec laquelle les angles des cheminements principaux sont déterminés, est de l'ordre de un à deux milligrades. Les sommets des cheminements sont matérialisés sur le terrain par des repères durables, sur lesquels les théodolites sont centrés avec une précision de l'ordre de quelques millimètres. Dans certains cas, le centrage des appareils est assuré de façon plus rigoureuse encore avec un dispositif de centrage forcé.

La mesure aller et retour des distances est assurée au ruban d'acier suivant l'horizontale ou la pente du terrain. Des corrections appropriées sont appliquées pour s'affranchir des erreurs systématiques (modification de la longueur du ruban due à la température, mauvaise tension du ruban, etc.) et diminuer l'influence des erreurs accidentelles (fig. 13).

Les longueurs mesurées suivant la pente sont réduites à l'horizon par l'application d'une correction donnée par la formule : $c_l = 2\, l_p \left(\sin^2 \frac{i}{2}\right)$ où c_l est la correction cherchée, l_p est la longueur mesurée suivant la pente, i est l'angle de pente.

Les altérations linéaires dues à la représentation plane ne sont pas négligeables, dans le cas de longs cheminements très éloignés du parallèle origine de la projection (voir *Géodésie*). Un tableau établi par le Service du cadastre donne, en fonction des coordonnées du cheminement, les corrections en centimètres par kilomètre à apporter aux longueurs mesurées sur le terrain. Dans le cas de la projection Lambert et sur le parallèle limite, la correction atteint 37 centimètres par kilomètre. Connaissant les coordonnées des points de départ et d'arrivée ainsi que l'orientation du premier côté (gisement de départ), des formules simples de trigonométrie permettent de calculer, de proche en proche, avec les angles et les longueurs mesurés sur le terrain, les coordonnées de chacun des sommets du cheminement polygonal. Si l'on connaît également les altitudes des points de départ et d'arrivée, ainsi que les angles de pente des divers côtés, on peut calculer les altitudes de chacun des sommets.

Finalement on obtient, pour un point *P* d'arrivée, un point *P'* légèrement différent du point connu. L'écart de position *P-P'* est appelé *écart de fermeture*. Il doit être inférieur à l'écart tolérable qui est calculé en tenant compte des erreurs moyennes quadratiques de chacune des opérations. Cet écart de fermeture est alors *compensé* de telle sorte qu'il y ait un ajustement minimal des angles et des longueurs, se traduisant par un déplacement des coordonnées brutes des sommets du cheminement. De nombreuses méthodes de compensation sont connues; la plus rigoureuse est l'application de la théorie des moindres carrés.

Le réseau principal de polygonation est utilisé afin d'appuyer un réseau secondaire destiné à assurer le levé de détails du terrain.

Le réseau secondaire comprend également des cheminements polygonaux tendus entre des points du réseau principal. Leur longueur moyenne est de l'ordre de quelques centaines de mètres. Les modes opératoires sont moins rigoureux que ceux du réseau principal. L'imprécision des angles est de l'ordre du centigrade, et les mesures des côtés au ruban d'acier ne sont plus soumises qu'à la réduction à l'horizontale.

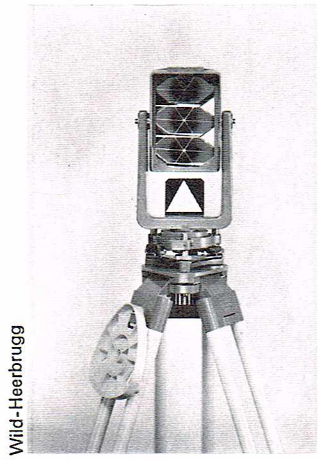

▲ *Un réflecteur à prismes ; il équipe l'appareil de visée d'un distancemètre.*

▶ *Fig. 16 ; nivellement indirect : 1, à angle zénithal unique ; 2, à angles zénithaux réciproques ; 3, illustration du calcul de la différence de niveau.*

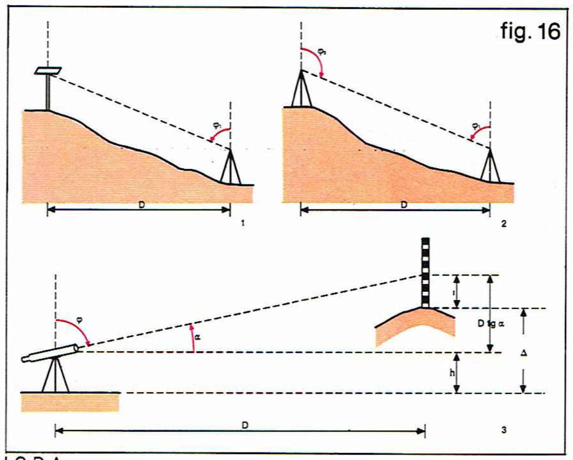

I.G.D.A.

Levé des détails

Pour greffer le levé des détails sur le réseau polygonal, on emploie divers procédés, parmi lesquels :

— Le *levé par perpendiculaires* abaissées des points à lever sur la ligne d'opération. Ce procédé exige l'utilisation d'une équerre optique (fig. 14) et la mesure d'abscisses et ordonnées.

— Le *levé par intersection* ou par *rayonnement* consiste à mesurer avec un goniomètre les angles d'une ou de plusieurs stations connues et dont l'une des directions passe par le point à déterminer.

— Le *levé par obliques latérales* est obtenu en rattachant les points de détail à une ligne d'opérations par mesure des côtés de triangles quasi rectangles. Ces triangles ont deux sommets rigoureusement alignés sur la ligne d'opération. L'un d'entre eux correspond au pied de la perpendiculaire abaissée à vue du point levé. Le 3ᵉ sommet est le point à déterminer.

L'application des modes opératoires indiqués précédemment exige d'effectuer sur place un croquis du terrain. Sur le croquis sont indiqués les lignes d'opération, les observations angulaires, les mesures linéaires et tous les détails planimétriques et altimétriques nécessaires. Un croquis clair est indispensable à l'interprétation univoque des éléments de terrain par les calculateurs et dessinateurs qui établissent le plan final.

Les méthodes de nivellement

Le nivellement consiste à déterminer la différence de niveau entre différents points du sol et à définir leur *altitude*. Le niveau moyen des mers ou niveau zéro est pris comme surface de référence pour les altitudes du réseau de nivellement général de la France (voir *Géodésie*).

La mesure d'une différence de niveau ou dénivelée peut être assurée en utilisant trois méthodes différentes : le nivellement direct ou nivellement géométrique ; le nivellement indirect ou nivellement géodésique ; et le nivellement barométrique.

Le nivellement direct

Le nivellement direct consiste à déterminer, au moyen d'un niveau placé entre deux points A et B, une ligne de visée horizontale définie par la surface d'un liquide en équilibre. Cette ligne horizontale permet de lire sur deux mires graduées tenues verticalement sur chacun des points A et B deux hauteurs de visée. La différence des deux lectures donne la différence de niveau entre les points A et B. La ligne horizontale de visée est considérée comme parallèle à la surface de niveau. L'espace compris entre les deux points observés est appelé nivelée. La longueur maximale d'une nivelée est de l'ordre de 50 m pour un nivellement correct. Si les points A et B sont trop éloignés ou si leur différence de niveau est supérieure à une longueur de mire, il est nécessaire de faire plusieurs stations, dont l'ensemble est appelé cheminement. En général, les cheminements de nivellement relient deux repères d'altitude connue. Certains cheminements peuvent atteindre plusieurs kilomètres, et parfois même plusieurs centaines de kilomètres. Le principe général de la méthode reste le même (fig. 15).

▼ *Fig. 14 ; une équerre optique servant au levé par perpendiculaires.*

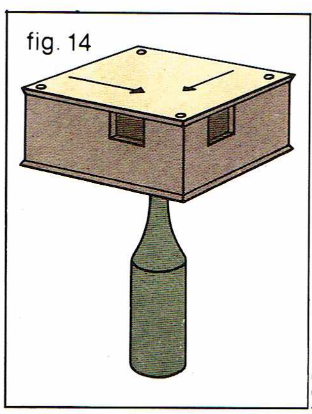

I.G.D.A.

En partant de l'altitude Z_A d'un point A, l'altitude du terme final Z_B est $= Z_A + \Delta Z$.

L'analyse de l'écart de fermeture permet la vérification de l'ensemble des observations et des calculs. Si l'écart est conforme à la composition normale des erreurs accidentelles, il est compensé proportionnellement à la valeur des dénivelées successives.

Au cours des opérations de nivellement direct, l'opérateur s'efforce de placer à vue son appareil à distance égale des mires. L'équidistance des portées permet d'éliminer certains défauts et dérèglements instrumentaux et de diminuer l'influence de quelques erreurs systématiques, parmi lesquelles :

▶ *Fig. 15 ; mesure de la dénivelée h entre les points A et B. On dispose, en A et B, deux mires verticales que l'on vise successivement avec un niveau à lunette, N, à peu près équidistant de A et de B ; les lectures a et b donnent la dénivelée par l'expression : h = a — b.*

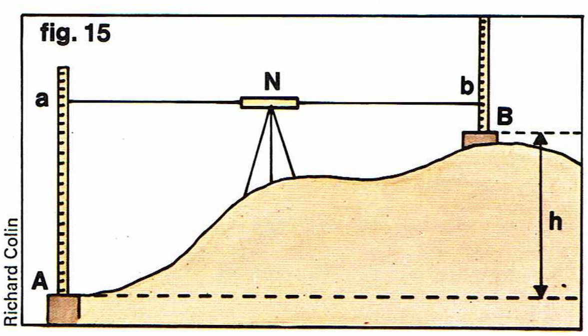

Richard Colin

— L'*erreur de courbure terrestre*. L'horizontale en un point n'est pas rectiligne mais présente une légère courbure assimilée à celle de la surface de niveau passant par l'axe optique de la lunette. L'erreur C correspond à $\frac{D^2}{2R}$, où D est la longueur de la visée et R le rayon terrestre. Pour une visée de 60 m, cette correction est de 0,3 mm. Si les portées sont égales, l'erreur de courbure s'élimine dans la différence des lectures.

— L'*erreur de réfraction*. La trajectoire d'un rayon lumineux est courbe à cause de la réfraction atmosphérique. Cette courbure est donnée par la formule :

$$K = \frac{1}{R} = \frac{1}{27\,000 \text{ km}}\left(1 + 0{,}3\,\frac{dT}{dH} \text{ degrés par 100 m}\right)$$

dans laquelle $\frac{dT}{dH}$ est le *gradient vertical de température* près du sol. T exprime la température et H l'altitude.

On estime que l'erreur de réfraction est éliminée si les longueurs des deux portées sont équidistantes et si les lectures sont faites dans un intervalle de temps très bref.

La précision du nivellement direct varie selon l'équipement utilisé et dépend de l'application minutieuse du mode opératoire. Les erreurs accidentelles qui interviennent sont l'erreur de calage de la nivelle, l'erreur de lecture sur la mire et l'erreur de verticalité de la mire. Un nivellement soigné, exécuté avec un niveau de chantier, peut être caractérisé par un écart type sur la dénivelée de l'ordre de $\pm$ 2 mm $\sqrt{n}$, n étant le nombre de stations.

Un cheminement de précision exécuté avec un niveau bloc et des mires appropriées munies d'un micromètre optique permet d'obtenir un écart type sur la dénivelée de l'ordre de $\pm$ 1 mm $\sqrt{K}$, K étant la longueur du cheminement exprimée en kilomètres.

Le réseau du nivellement général français est sous la responsabilité de l'Institut géographique national. La France est divisée en polygones de 1ᵉʳ ordre ayant en moyenne 500 km de périmètre, et dont les côtés suivent en général les voies ferrées. D'autres polygones, fondés sur les précédents, subdivisent le territoire en mailles de plus en plus petites et constituent des réseaux de 2ᵉ, 3ᵉ et 4ᵉ ordre. Les repères de nivellement sont en fonte, ils ont la forme d'une console ou d'un disque scellé contre une façade de bâtiment ou d'ouvrage d'art. L'altitude des repères est définie au millimètre près. Leur précision est caractérisée par l'erreur moyenne quadratique à craindre entre deux repères éloignés de 1 km. Cette erreur est de l'ordre de 2 mm pour les réseaux de 1ᵉʳ et 2ᵉ ordre, et atteint 1 cm pour le réseau de 4ᵉ ordre.

Le nivellement indirect

Le principe en est le suivant : un théodolite et une mire sont respectivement placés à la verticale de deux points (fig. 16). On mesure l'angle de pente α de la visée relative à un point de la mire ou l'angle complémentaire φ appelé angle zénithal. La hauteur h de l'axe optique de l'appareil et la hauteur l du point de mire sont mesurées, ainsi que la distance horizontale D séparant les deux points.

La différence de niveau entre les sols des deux points est donnée par les formules :

$$\Delta = D \operatorname{tg} \alpha + h - l \quad \text{ou} \quad D \operatorname{cotg} \varphi + h - l.$$

Si les coordonnées des deux points sont connues, la distance D est calculée. Il arrive que la différence de niveau soit déterminée par la mesure unique de l'angle φ_1 ou par deux visées réciproques donnant deux angles zénithaux φ_1 et φ_2.

L'application de ce mode opératoire permet de déterminer, par intersection, par relèvement ou par visées réciproques, la différence de niveau entre deux points.

Le mode des visées réciproques est généralement appliqué en opérations enchaînées. Ce sont alors des cheminements altimétriques, et l'observation des angles verticaux est relative à une hauteur de mire *(l)* égale à la hauteur d'appareil *(h)*. La formule précédente est alors simplifiée et devient : $\Delta = D \operatorname{tg} \alpha$ ou $D \operatorname{cotg} \varphi$.

L'angle vertical α ou φ utilisé pour le calcul correspond à l'observation moyenne des deux angles réciproques. Ainsi l'erreur de réfraction atmosphérique et l'erreur de courbure terrestre se trouvent éliminées. La combinaison de ces deux erreurs est appelée *erreur de niveau apparent*. Une formule simplifiée mais non homogène donne sa valeur en mètres :

$$E = \frac{D^2}{15},$$

D étant la distance exprimée en kilomètres.

La précision d'un nivellement indirect est bien moins grande que celle d'un nivellement direct. Elle est de l'ordre de quelques centimètres. L'instabilité de la réfraction atmosphérique en est en grande partie responsable. Le nivellement indirect ou géodésique est employé pour la détermination rapide des altitudes, en terrain accidenté ou dans des visées à grande distance (fig. 17).

Le nivellement barométrique

On sait que la pression atmosphérique, entre deux points, varie avec la différence de niveau, l'altitude de ces points, leur latitude, la température et l'état hygrométrique de l'atmosphère au moment des observations.

Une formule, dite de Laplace, permet de calculer la différence de niveau ΔZ entre deux points, connaissant leur latitude moyenne *(L)*, les températures t et t' et les pressions barométriques P et P' observées en chacun de ces points. Cette formule qui donne ΔZ en mètres est la suivante :

$$\Delta Z = 18\,336\,(1 + 0{,}002\,65 \cos 2L)\left[1 + \frac{2\,(t + t')}{1\,000}\right] \log \frac{P}{P'}.$$

Il faut donc mesurer, *au même instant*, la pression et la température en deux points. La pression atmosphérique est mesurée avec un baromètre à mercure, muni d'un vernier au 1/20 de mm. ou avec un baromètre anéroïde qui indique la pression en mm de mercure.

Il faut disposer de deux baromètres et de deux opérateurs. Dans le cas d'un cheminement barométrique, on part d'un point d'altitude connue pour se refermer sur un autre point d'altitude connue. La précision d'un nivellement barométrique est très faible. Elle est de l'ordre de plusieurs mètres. Ce procédé est utilisé pour des levés d'exploration.

Les documents topographiques

Les travaux topographiques aboutissent à l'établissement de cartes ou de plans, selon l'échelle de représentation et la surface de la zone traitée. Les différents types de documents à petite et moyenne échelle seront présentés en cartographie.

● *Les plans à grande échelle* (1/5 000 et au-dessus) sont les suivants :

— *Plans généraux*. Pour répondre aux besoins des urbanistes, une loi du 15 juin 1943 fait établir une série de fonds de plans permettant les études de projets.

Plans à 1/5 000 pour les villes importantes et servant de plans directeurs.

Plans à 1/2 000 servant de fonds de plan ou projet d'aménagement de ville.

Sur ces plans sont indiqués les corps de rues, limites de parcelles, constructions, espaces publics, voies de chemins de fer et quais, hydrographie, cotes de niveau et relief du terrain naturel.

Le levé du plan est fondé sur un canevas d'ensemble homogène et précis, le corps de rue et les parcelles sont représentés avec une précision graphique de 2/10 de mm.

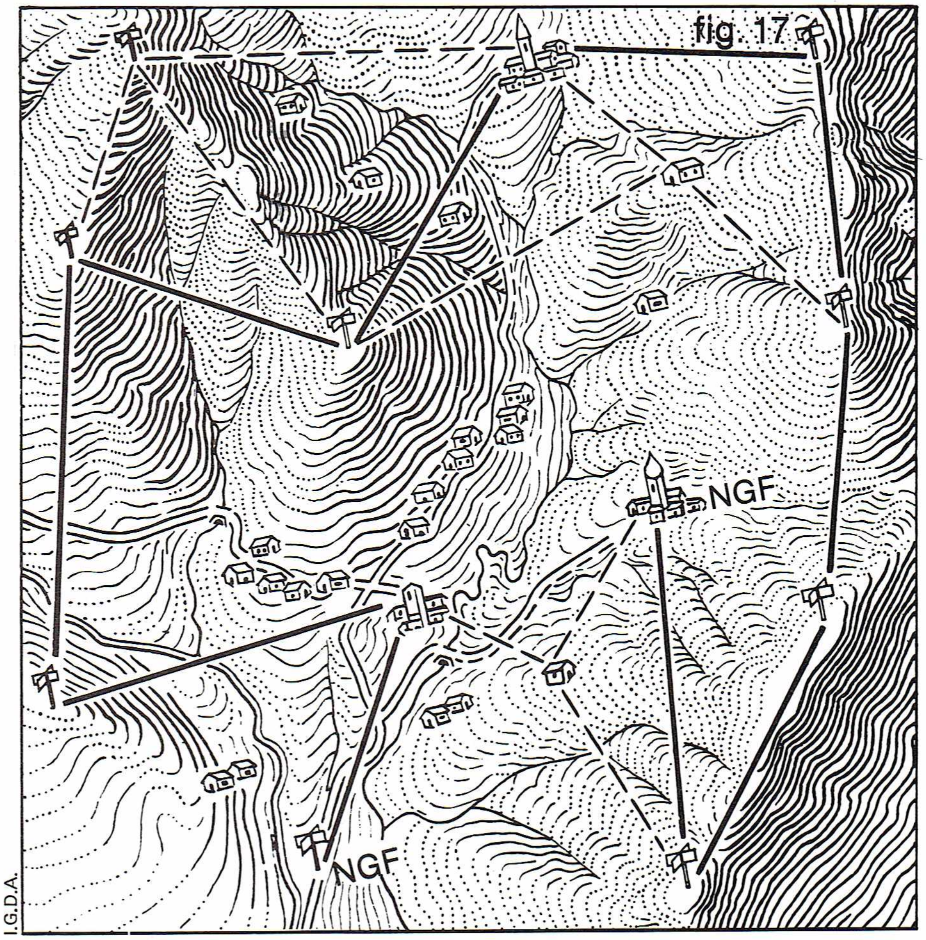

▲ ***Fig. 17 ; réseau de nivellement géodésique : une polygonale altimétrique (traits pleins) part d'un repère de nivellement (N G F) et se ferme sur un autre repère. A partir des sommets de polygonale, on exécute un nivellement par rayonnement (traits tiretés).***

A une échelle de 1/2 000, cela représente une précision réelle de 0,40 m. Ce plan est généralement présenté en deux couleurs : planimétrie en noir et altimétrie en bistre.

— *Plans parcellaires*. Les plans parcellaires à 1/500 sont utilisés pour l'étude des projets détaillés, les remembrements, les lotissements, etc. Le plan parcellaire à 1/500 comprend, en principe, tout ce qui serait vu par un observateur situé au-dessus du terrain. Les éléments représentés sont les éléments indiqués sur un plan à 1/2 000 auxquels s'ajoutent de nombreux détails pouvant être représentés à l'échelle et dont l'importance est de l'ordre du décimètre. Les murs privatifs ou mitoyens sont notés par des signes conventionnels.

Ce plan est appuyé sur un canevas rigoureux. La précision planimétrique d'un point est de l'ordre du décimètre.

— *Plans cadastraux*. Les plans cadastraux ne diffèrent des plans parcellaires que par certains caractères économiques, juridiques et administratifs. Le cadastre a pour objet la définition des limites administratives, des limites de la propriété publique et privée, des catégories de terrain imposables.

Les plans cadastraux, en France, ont été établis sous trois régimes différents : loi du 15 septembre 1807, loi du 7 août 1850, loi du 17 mars 1898. Les décrets du 4 janvier et du 30 avril 1955 ont refondu en un texte unique toutes les règles applicables aux opérations cadastrales et à la publicité foncière.

Le levé cadastral est un levé régulier satisfaisant aux tolérances générales fixées pour les levés à grande échelle. L'échelle des plans cadastraux varie entre 1/500 pour les zones à grand morcellement et 1/2 000 pour les terrains formés de grandes parcelles.

Le Service du cadastre, qui détient une cartothèque considérable de 500 000 feuilles de plans couvrant environ 50 millions d'hectares, s'oriente vers la constitution d'un *plan cadastral numérique*, ou liste de coordonnées organisées suivant une certaine forme.

Sommairement, le processus opérationnel en est le suivant :

— levé précis des détails au tachéomètre optoélectrique ;

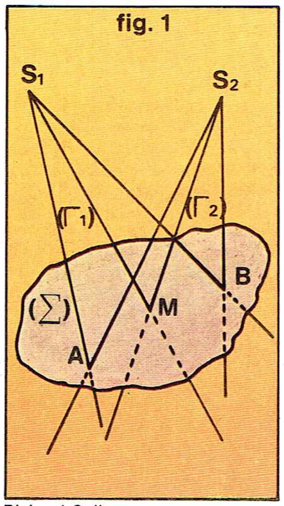

Richard Colin

▲ ***Fig. 1 ; représentation schématique des gerbes perspectives relatives à un objet.***

▼ ***Fig. 2 ; représentation schématique d'une perspective plane ou photographique : A, B, M, points de l'objet ; a, b, m, perspectives de A, B, M ; ω, point principal ; S, centre de perspective.***

Richard Colin

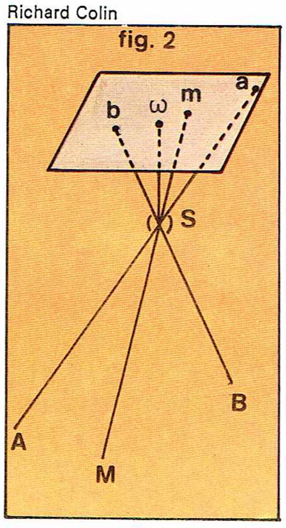

— numérisation du levé, traitée par calculatrice électronique et par exploitation du croquis de terrain et des bandes perforées directement issues du tachéomètre ;

— création, au vu du croquis de terrain, d'un fichier des ordres de dessin ;

— dessin automatique du plan, par exploitation électronique du fichier.

Ces procédés permettront également la sortie rapide, par ordinateur, de toutes les informations numériques dont on a besoin (longueurs de façades, surfaces, coordonnées, etc.).

— *Plans d'alignement.* Les communes sont dans l'obligation d'établir et de conserver les plans d'alignement de leur agglomération. L'échelle de ces plans est, en principe, le 1/200, cependant le 1/500 est adopté dans les petites villes et villages. Les plans d'alignement représentent la limite entre la propriété publique et privée, ainsi que tous les détails planimétriques situés à l'intérieur des parcelles sur une largeur variant entre 7 et 15 mètres. L'altimétrie comporte les points cotés nécessaires à l'établissement de profils en long dans les axes de voies.

— *Plans de propriétés* et *travaux particuliers.* Indépendamment des plans d'ensemble, les géomètres sont appelés à effectuer de nombreux travaux de caractère local : levé d'une propriété, tracés d'alignement, implantation de bâtiments ou d'axes de voies, levé d'architecture, etc. L'échelle des plans se rapportant à ces travaux varie entre le 1/200 et le 1/50.

L'enseignement de la topographie

La topographie est une science très ancienne qui a contribué au développement économique mondial.

Dans de nombreux domaines, l'intervention de géomètres et de topographes est nécessaire. Cette intervention touche aujourd'hui la plupart des activités d'équipement : voies de communication, équipement hydraulique, implantation de lignes électriques, prospection géologique et minière, amélioration des sols, aménagement urbain ou rural, exploitation forestière, cadastre, etc.

Pour répondre à ces besoins, il existe en France quelque 9 000 géomètres et ingénieurs qui se répartissent approximativement de la façon suivante :

— profession libérale : 3 000 ;

— secteurs public et nationalisé (I G N, Cadastre, etc.) : 5 000 ;

— entreprises de génie civil ou de travaux publics : 1 000 ;

Actuellement, la formation professionnelle est assurée de la façon suivante :

Écoles délivrant des diplômes d'ingénieur :

— École nationale des sciences géographiques de l'Institut géographique national ;

— École nationale supérieure des arts et industries de Strasbourg ;

— École spéciale des travaux publics de Paris ;

— École supérieure des géomètres et topographes du Conservatoire national des arts et métiers ;

— École des ingénieurs de la préfecture de Paris.

Depuis 1929 est institué un diplôme officiel de géomètre expert foncier D. P. L. G., délivré à la suite de deux examens, l'un préliminaire, l'autre final, ce dernier assorti d'épreuves pratiques. Ces centres de formation préparent à l'examen préliminaire et l'institut de topométrie au Conservatoire national des arts et métiers à l'examen final.

Une loi du 7 mai 1946 a institué l'Ordre des géomètres experts, qui réglemente l'exercice de la profession. L'inscription à l'Ordre est subordonnée à la possession du diplôme de géomètre expert foncier D. P. L. G.

BIBLIOGRAPHIE

D'HOLLANDER, *Topographie générale,* Eyrolles, 1971. - DUBUISSON, *Procédés et méthodes de levés topographiques aux grandes échelles,* Eyrolles, 1955. - DURBEC, *Cours de topométrie générale,* Eyrolles, 1969. - GRELAUD, *Levers ruraux et Opérations connexes,* Eyrolles, 1965. - MERLIN, *la Topographie,* Collection Que sais-je ?, n° 744, P.U.F. - OLLIVIER, *Instruments topographiques,* Eyrolles, 1955. - ROUSSILHE, *Cours de topométrie urbaine,* Eyrolles, 1969. - TATON, *Topographie souterraine,* Eyrolles, 1972. - VATAN, *Cours de tachéométrie,* Eyrolles, 1967.

PHOTOGRAMMÉTRIE

La photogrammétrie est la technique qui permet d'étudier et de définir les formes, les dimensions et la position dans l'espace des objets, en utilisant des mesures faites sur des photographies de ces objets. La photogrammétrie appartient donc à la catégorie générale des techniques de mesure ; elle associe et adapte les méthodes de ces techniques aux caractéristiques et aux ressources de la photographie.

L'intérêt essentiel de cette technique est de permettre l'enregistrement quasi instantané de l'état d'un objet à un moment donné et de laisser au photogrammètre le temps de procéder à l'exploitation des clichés dans des conditions généralement plus favorables que celles dans lesquelles seraient exécutées des mesures directes sur l'objet. En particulier, il devient possible de mesurer les formes, les dimensions et la trajectoire des objets en mouvement ; inversement, il est permis d'envisager de définir les dimensions d'un objet fixe lorsque l'observateur est lui-même en mouvement. Sous réserve que la prise de vue soit conforme aux normes qualitatives et métriques requises, la photographie constitue, à cette fin, un document d'archive très maniable, de conservation illimitée, prêt à restituer à tout instant la richesse incomparable de l'information qu'il contient. La photographie donne en effet à l'œil humain un champ physique et une amplitude de sensibilité spectrale qu'il ne possède pas, et elle lui permet de découvrir et d'analyser des phénomènes qui échapperaient à l'examen naturel.

Méthode générale de la photogrammétrie

Considérons (fig. 1) un objet quelconque limité dans l'espace par une surface (Σ), et un point S_1, extérieur à l'objet et que nous appellerons *point de vue* ou *centre de perspective.* Tout point (A, B,... M) de (Σ) définit avec S_1 une droite ou *rayon perspectif,* et l'ensemble de tous les rayons perspectifs correspondant à tous les points de l'objet constitue la *gerbe perspective* (Γ_1), le nombre d'éléments de cet ensemble pouvant être fini ou infini. La connaissance de la surface (Σ) et de la position du centre de perspective S_1 par rapport à l'objet suffit à déterminer la gerbe perspective (Γ_1) ; par contre, la connaissance de S_1 et de (Γ_1) ne suffit pas à déterminer (Σ).

Considérons maintenant un second centre de perspective S_2 différent de S_1 et la gerbe perspective (Γ_2) qui lui est associée. Chaque point M de l'objet se situe à l'intersection des deux *rayons perspectifs homologues* S_1M et S_2M ; par conséquent, il suffit de connaître la position absolue dans l'espace des centres S_1 et S_2 et l'orientation de chacun des rayons S_1M, S_2M pour déterminer la position de tout point M de (Σ) et, par suite, la surface (Σ).

Ce problème très général de l'intersection spatiale est, sur le plan théorique, relativement simple, mais son application à un grand nombre de couples de rayons homologues met en jeu un nombre considérable de paramètres que nous classerons en trois catégories :

— les *paramètres d'orientation interne* définissant, dans chaque gerbe prise isolément, l'orientation relative de chaque rayon par rapport aux autres ;

— les *paramètres d'orientation relative* d'une gerbe par rapport à la gerbe homologue, permettant de constituer un solide unique et par suite de reconstituer un modèle-objet libre dans l'espace et à une échelle arbitraire ;

— les *paramètres d'échelle, de situation* et *d'orientation* dans l'espace du solide constitué par deux gerbes homologues dont l'orientation relative est réalisée.

Les deux dernières catégories sont souvent regroupées sous l'appellation de *paramètres externes ;* elles diffèrent cependant par le fait que la détermination des paramètres d'orientation relative ne nécessite pas la connaissance d'autres données que les paramètres d'orientation interne de chaque gerbe, dès lors que les gerbes comprennent au moins 5 rayons homologues distincts. Il est aisément concevable que l'enregistrement des paramètres d'orientation interne, associé à la nécessité d'identifier parfaitement les couples de rayons homologues S_1M, S_2M, constituerait une tâche longue et fastidieuse s'il devait être fait appel eux procédés habituels de mesures d'angles.

C'est ici qu'intervient la photographie, jouant le rôle de *perspective plane* de l'objet. Plaçons en effet (fig. 2) au centre de perspective l'objectif d'un appareil photographique supposé parfait, dont le centre optique coïncide avec S et dont la distance focale a été calculée de telle sorte que les images de tous les points de l'objet soient des points sur le cliché. Les points-images a, b,...m se situant respectivement dans le prolongement des rayons SA,SB,..SM.., définissent parfaitement avec S la direction de ces rayons. Il suffira, par conséquent, de connaître la position relative de S par rapport au plan perspectif (C) du cliché pour reconstituer la gerbe. Deux éléments suffisent pour cela : ce sont la projection orthogonale $\bar{\omega}$ de S sur (C) appelée *point principal* et la distance $\overline{S\bar{\omega}}$ en grandeur et en signe ou *distance principale*. De plus, les images photographiques, par leur nature même, permettront d'identifier aisément les détails homologues, il sera même possible de réaliser cette identification en l'absence de détails caractéristiques, grâce au fusionnement binoculaire dont il sera question plus loin.

Historique

La théorie géométrique des perspectives, œuvre des mathématiciens Desargues (1593-1662) et Lambert (1728-1787), est bien antérieure à l'invention de la photographie, par Niepce et Daguerre, en 1838. Ce n'est cependant qu'en 1859 que le capitaine de génie Aimé Laussedat inventa la *métrophotographie* pour la réalisation de levés de plans. Indépendamment, l'architecte allemand Meydenbauer utilisa pour la première fois la photographie, en 1858, dans l'établissement de plans de monuments. C'est ce dernier qui donna à ces applications le nom de *photogrammétrie,* qui a subsisté. En dépit des premiers succès, le procédé restait peu précis et d'une mise en œuvre délicate, et il fallut attendre la découverte en 1878 des émulsions au gélatino-bromure d'argent, puis l'invention par Stolze, en 1892, du « repère stéréoscopique », pour résoudre les problèmes d'identification des points homologues et de précision des mesures. Le premier appareil de restitution fut l'œuvre de Deville qui l'utilisa en 1896 pour exécuter des levés topographiques au Canada, mais l'Allemand Pulfrich, avec le *stéréocomparateur* qu'il construisit en 1901, et la technique qu'il lui associa, peut être considéré comme le véritable fondateur de la photogrammétrie moderne. Sur ces bases fut développé le *stéréo-autographe* de von Orel qui résolvait parfaitement les problèmes de la *photogrammétrie terrestre* et qui fut utilisé très largement en Europe de 1908 à 1939. Parallèlement, des études furent entreprises pour appliquer aux photographies prises d'un aérostat les principes de la photogrammétrie terrestre. L'Autrichien Scheimpflug jeta, dès le début du siècle, les bases d'une technique de prise de vue et de restitution qui reste valable de nos jours, mais il fallut attendre 1930 pour voir apparaître les premiers appareils de restitution de photographies aériennes, et la méthode générale ne fut parfaitement au point qu'à la veille de la Seconde Guerre mondiale.

Depuis cette date, des progrès considérables ont été obtenus, aussi bien dans la technologie mécanique et optique des *appareils analogiques* que dans la qualité et les performances des objectifs et des émulsions photographiques. On s'attacha également à découvrir des méthodes et des procédés qui simplifièrent considérablement les déterminations des paramètres d'orientation absolue et d'échelle du modèle stéréoscopique, ce qui contribua à généraliser l'emploi de la photogrammétrie aérienne pour la cartographie du sol de notre planète. La cartographie du sol lunaire a été entreprise en adaptant ces mêmes méthodes aux conditions particulières rencontrées.

Une nouvelle ère de développement s'est ouverte depuis grâce à l'électronique et à l'informatique; les contraintes mécaniques disparaissent avec l'ordinateur; le tube cathodique avec l'analyseur et le corrélateur d'images remplaceront bientôt l'œil humain dans l'identification des points homologues des clichés. Au document graphique auquel nous sommes habitués se substitue déjà un ensemble de données numériques emmagasinées sur bandes magnétiques et pour la collecte desquelles la photogrammétrie est particulièrement bien adaptée.

Les chambres métriques de prise de vue et les émulsions

Chambres métriques

L'objectif — et, d'une manière générale, l'appareil photographique — parfait que nous avons évoqué dans une première approximation, n'existe évidemment pas. Cependant, compte tenu de l'échelle généralement très petite des clichés : 1/100 à 1/100 000 selon les applications, on conçoit aisément qu'il faut rechercher une très grande précision dans la définition des paramètres d'orientation interne de la gerbe perspective et que, par suite, l'appareil photographique d'amateur ne pourra suffire. Nous avons supposé tout d'abord que les rayons passaient par le « centre optique » de l'objectif sans être déviés; en réalité, nous utiliserons presque toujours un système centré constitué parfois d'un ensemble de 10 lentilles séparées par un diaphragme (fig. 3) duquel l'objectif donnera deux images, les *pupilles*, l'une située à l'avant, l'autre située à l'arrière de l'objectif (fig. 4). Le centre de la pupille d'entrée sera le point de convergence des rayons incidents *(P)*, le centre de la pupille de sortie celui des rayons émergents *(P')*. Tout se passe donc comme si le centre de perspective S était dédoublé, mais l'angle α que forme un rayon incident avec l'axe optique n'est généralement pas identique à l'angle α' que forme le rayon homologue émergent avec l'axe. La relation $\alpha' = f(\alpha)$ définit la distorsion radiale de l'objectif dont il faut tenir compte.

Une chambre métrique de prise de vue devra donc être conçue pour fournir la position du point principal $\bar{\omega}$, et pour garantir la valeur de la distance principale et de la distorsion, étalonnées avant et après la prise de vue. Elle est généralement constituée (fig. 5) par un bloc indéformable en alliage léger, insensible aux variations de tempé-

fig. 4

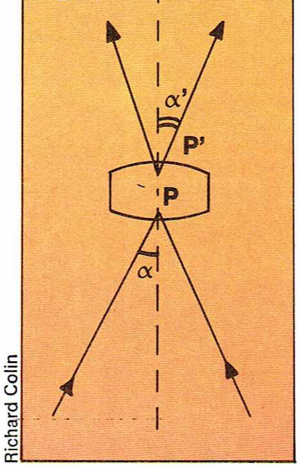

▲ *Fig. 4; schéma de la* **distorsion** *radiale d'un objectif :* *P, pupille d'entrée; P', pupille de sortie; α, angle d'incidence; α', angle d'émergence.*

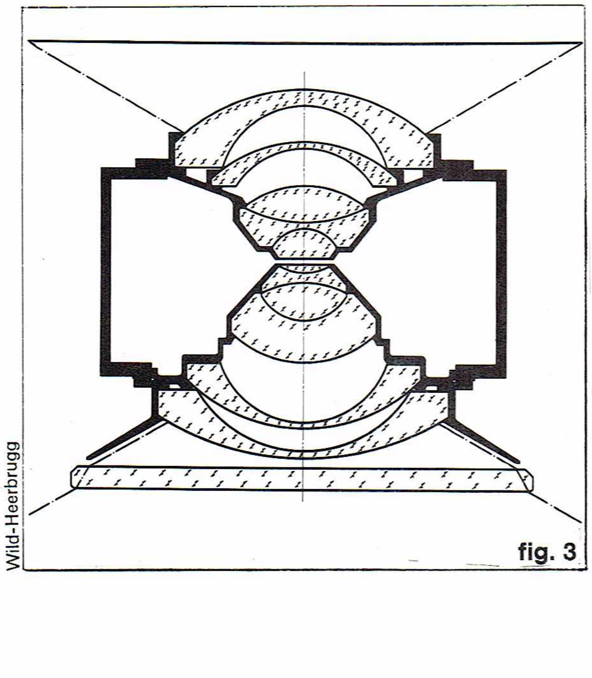

fig. 3

fig. 5

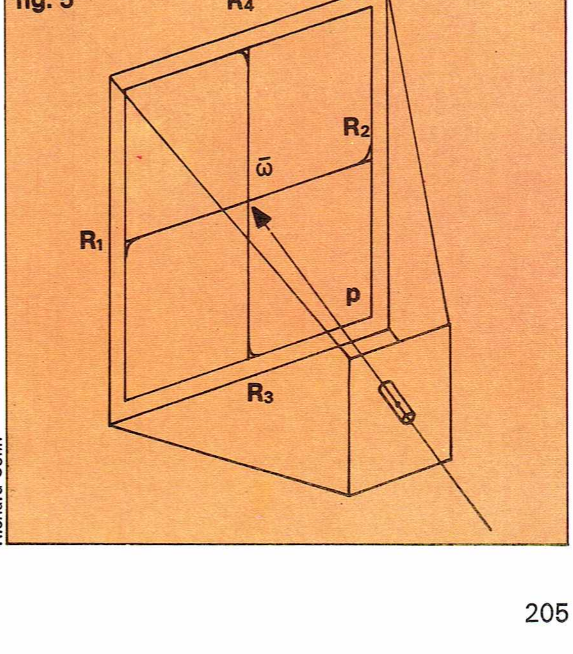

◀ *A gauche, fig. 3; schéma d'un objectif de prise de vue, de type Wild Super-Aviogon II : angle de champ, 120°; p = 88 mm (3 1/2"). A droite, fig. 5; schéma d'une chambre de prise de vue : p, distance principale; R_1, R_2, R_3, R_4, repères médians de fond de chambre; $\bar{\omega}$, point principal.*

▶ *Divers types d'appareils de prise de vue terrestre, employés par l'I.G.N.*

I.G.N.

▼ *Chambre de prise de vue aérienne, Wild RC-10.*

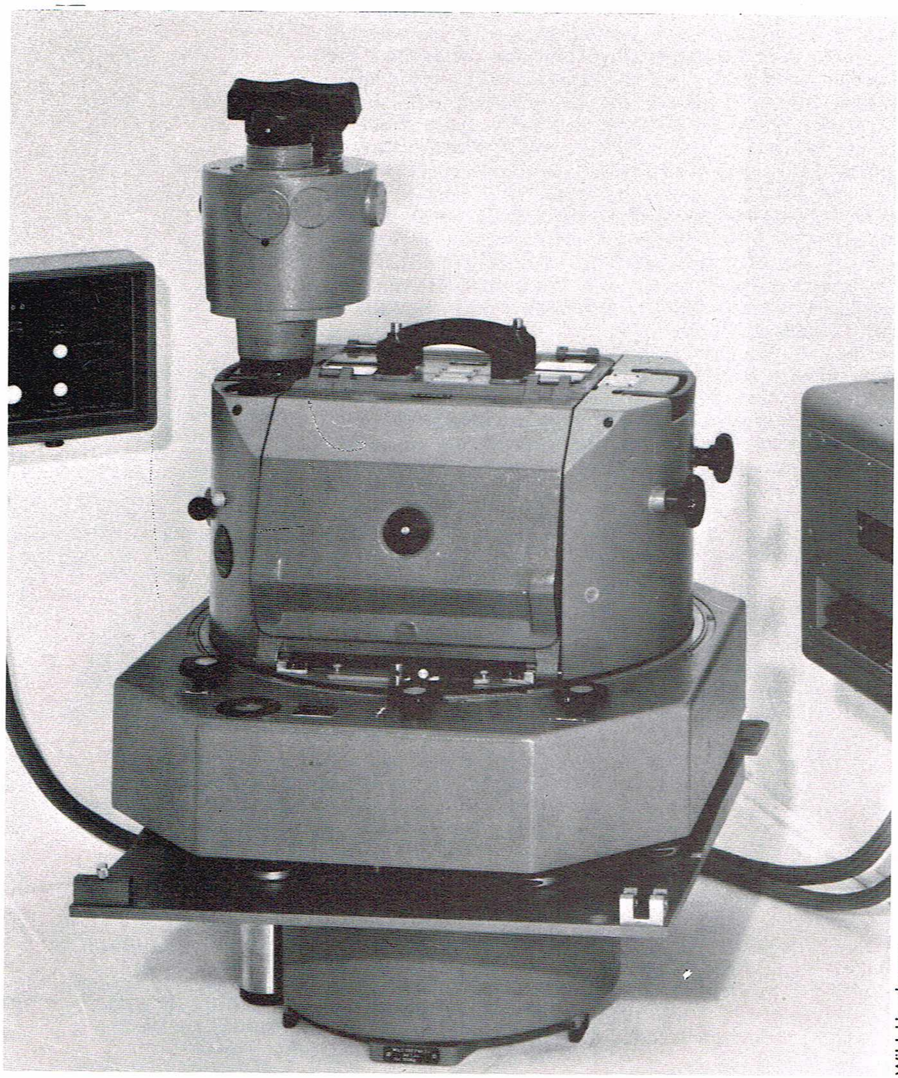

Wild-Heerbrugg

rature, dans lequel le fond de chambre sur lequel s'applique le cliché est rigoureusement plan et orthogonal à l'axe de l'objectif. Des repères fixes du fond de chambre impressionnent la surface sensible simultanément à la prise de vue, de manière à définir deux axes (R_1R_2 et R_3R_4) à l'intersection desquels se situe, par construction, le point principal $\bar{\omega}$.

Certaines chambres comportent un réseau quadrillé, gravé sur une glace servant d'appui à la surface sensible et interposée entre l'objectif et celle-ci de manière à pouvoir déceler d'éventuelles variations dimensionnelles du cliché entre l'instant de la prise de vue et son utilisation. Les objectifs utilisés font l'objet d'études spéciales ayant pour but de corriger au mieux les aberrations, de fournir des images d'excellente netteté, de posséder un champ angulaire étendu associé à une grande clarté et à une faible courbure de champ et enfin de réduire au minimum la distorsion. S'il s'agit d'une chambre métrique destinée à des applications courantes de photogrammétrie terrestre pour lesquelles le point de vue et l'objet photographié sont immobiles, il sera généralement possible d'opérer avec des temps de pose importants, ce qui permettra de diaphragmer fortement et, par suite, de mieux réaliser le stigmatisme approché. Si au contraire il s'agit d'une chambre de prise de vue aérienne, il conviendra d'utiliser des temps de pose très courts (1/500, 1/1 000 de seconde), ce qui imposera l'emploi d'une ouverture relativement grande et rendra plus difficiles la correction des aberrations et l'égalisation des éclairements dans le champ.

Émulsions

Les émulsions utilisées en photogrammétrie sont essentiellement constituées par une suspension, dans de la gélatine, d'halogénures d'argent dont la dimension des cristaux varie de 0,8 μm pour les émulsions lentes à 4 μm pour les émulsions rapides. Elles sont coulées en couches d'épaisseur calibrée soit sur une glace dont la planéité est réalisée à 10 μm près, soit sur un film de polyester qui sera appliqué sur le fond de chambre par un dispositif à succion.

Les formats des clichés sont variables, allant de 60 × 80 mm en photogrammétrie terrestre à 230 × 230 mm pour la photographie aérienne. Les distances focales des chambres sont également très variables, de 21 mm à 600 mm, pour répondre aux différentes contraintes d'échelle, de champ et de clarté propres à chaque application ; il semble néanmoins qu'une certaine normalisation

des chambres de prise de vue aérienne soit en cours dans les pays occidentaux : format 230 × 230 mm, focales 86 mm, 152 mm, 210 mm et 300 mm.

Quatre types d'émulsions sont utilisés : *panchromatique, infrarouge noir et blanc, couleurs* et *fausses couleurs,* ces deux dernières étant généralement composées de trois couches de sensibilité différente.

Des dispositifs automatiques de commande et de synchronisation du déclenchement des obturateurs, de déroulement du film ou même d'asservissement de la caméra sont disponibles. L'adjonction de filtres colorés permet d'éviter les effets néfastes des rayons de longueur d'onde parasite. Le *pouvoir résolvant* de l'ensemble objectif-émulsion caractérisant la netteté de l'image d'une chambre de prise de vue métrique varie de 5 à 20 μm.

Le fusionnement binoculaire et la stéréoscopie

Lorsqu'un observateur examine avec ses deux yeux O_1 et O_2 un détail A d'un objet (fig. 6) la ligne de fixation de chaque œil, qui peut être assimilée à l'axe optique du cristallin, passe par le détail. Deux images, a'_1 et a'_2, sensiblement identiques, se forment sur les points correspondants de la *fovéa,* sur la rétine de chaque œil. Le cerveau ne perçoit qu'une seule image du point A et des points voisins dont l'éloignement est sensiblement le même. En effet, pour un angle constant α de convergence des lignes de fixation des yeux correspondent des points homologues dans les zones rétiniennes proches de la fovéa.

Lorsqu'un point objet B, situé dans un champ voisin de celui de A, n'a pas le même éloignement, ses images b'_1 et b'_2 ne se forment pas dans des zones correspondantes. Pour rétablir le fusionnement ou correspondance, il faudrait que les lignes de fixation subissent une rotation afin de converger en B et former entre elles l'angle β. En l'absence de cette rotation des globes oculaires, le cerveau traduit les petites dissemblances des images en différences d'éloignement entre les points A et B ou ce qui revient au même, en variation de l'angle formé par les rayons visuels. Cette petite différence angulaire $p = \alpha - \beta$ est la *parallaxe stéréoscopique angulaire* qu'un observateur normal peut évaluer jusqu'à la limite de 1/20 000 de radian.

Coupons alors les gerbes des rayons O_1A, O_1B et O_2A, O_2B par un plan π théorique pour obtenir les perspectives $a_1\,b_1$ et $a_2\,b_2$; plaçons un écran E entre les 2 yeux pour séparer les 2 images et enlevons l'objet. Géométriquement, rien n'est changé aux conditions d'observation, mais la relation physiologique convergence-accommodation est détruite, car la courbure du cristallin de chaque œil devrait varier sans déplacement des lignes de fixation. Pour remédier à cela, interposons, entre chaque œil et la perspective qui lui est destinée, une lentille rejetant les images au voisinage des points A et B ; nous avons ainsi réalisé le *fusionnement stéréoscopique* et confectionné un *stéréoscope*.

Plaçons, alors dans le plan π deux petits repères circulaires r_1 et r_2 (fig. 7) solidaires d'un dispositif qui maintient constamment le parallélisme de $\overline{r_1\,r_2}$ avec $\overline{O_1\,O_2}$ et qui permet de mesurer avec précision la distance $r_1\,r_2$. Les yeux observant respectivement les images a_1 et a_2 et les points r_1 et r_2 proches de ces dernières, le cerveau interprétera r_1 et r_2 comme les images d'un point R dont l'éloignement est différent de celui de A. En déplaçant lentement r_1 et r_2 pour les amener sur, respectivement, a_1 et a_2, l'observateur aura l'impression de voir le point R flotter dans l'espace pour venir se poser sur A.

Ce *contact stéréoscopique*, que des observateurs normalement doués peuvent réaliser avec une précision de quelques micromètres, est à l'origine du développement des méthodes et des matériels de photogrammétrie.

Les stéréoscopes sont d'un usage courant, et il en existe de différents types adaptés soit à l'observation stéréoscopique des clichés aériens, soit à l'examen de photographies réalisées avec des chambres métriques terrestres ou d'amateur. L'ensemble, constitué d'un stéréoscope et d'une *barre de parallaxe* supportant les repères stéréoscopiques, équipe, sous différentes formes, tous les stéréocomparateurs et de nombreux appareils de restitution.

Il existe d'autres moyens d'obtenir artificiellement la vision stéréoscopique, le plus courant est le procédé des *anaglyphes* qui consiste à représenter en superposition les deux perspectives, dont les points principaux sont confondus, respectivement en deux couleurs complémentaires, en général l'une en rouge, l'autre en bleu-vert. Le *stéréogramme* ainsi obtenu est observé à l'aide de lunettes dont les verres sont constitués par des filtres colorés, les couleurs étant complémentaires de celles des perspectives correspondantes de manière que chaque œil ne perçoive que la perspective qui lui est destinée. Le même résultat peut être obtenu en projetant des faisceaux polarisés. On peut aussi projeter alternativement les images des deux perspectives avec une fréquence assurant la persistance des impressions lumineuses sur la rétine et occulter simultanément et alternativement le champ visuel de chaque œil afin qu'il n'observe que l'image qui lui est destinée. Ce dernier procédé permet en particulier l'observation d'images en couleurs, ce que la

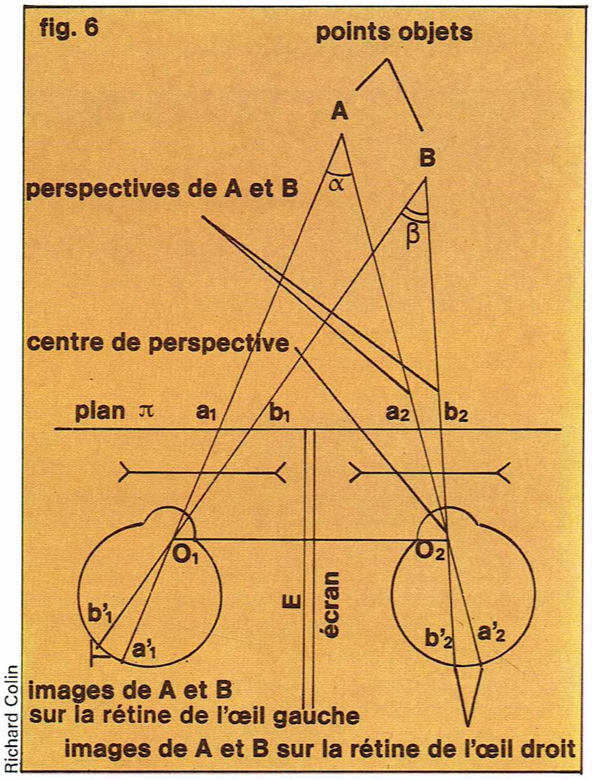

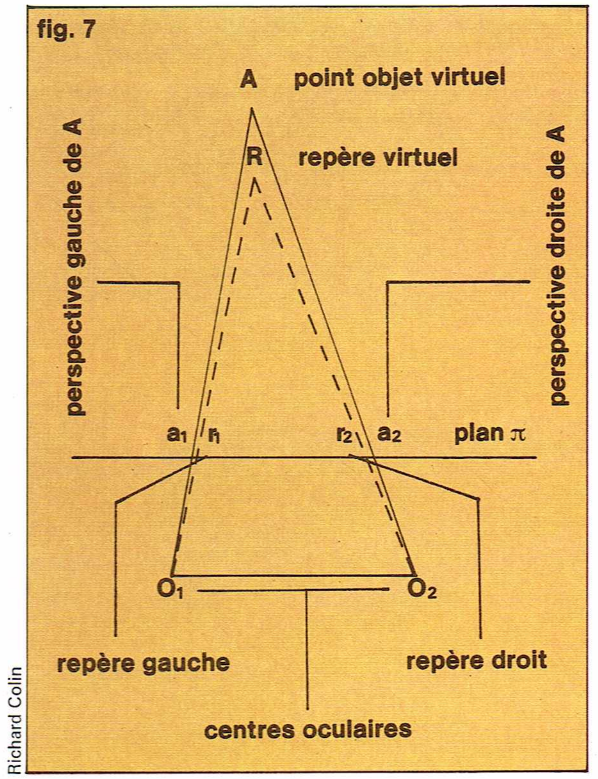

◀ *A gauche, fig. 6; représentation schématique du* **fusionnement binoculaire.** *A droite, fig. 7; illustration schématique du* **repère stéréoscopique.**

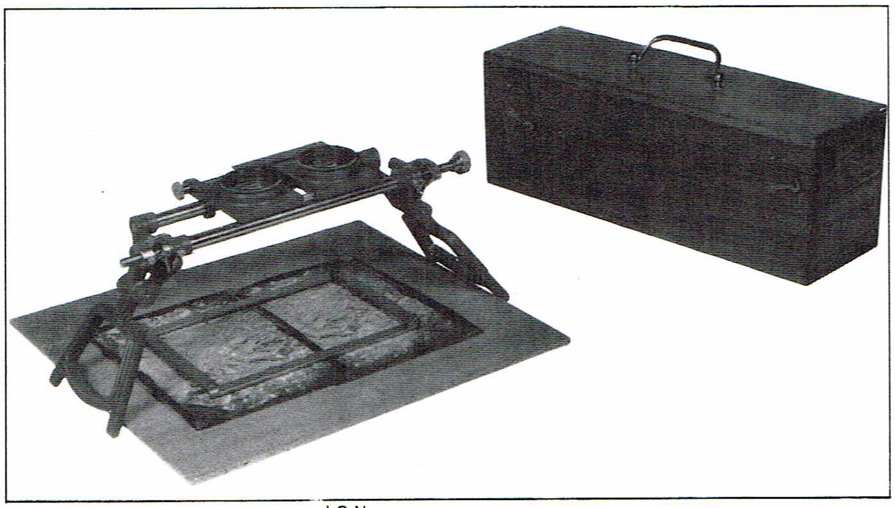

I.G.N.

▲ *Un stéréoscope : il en existe différents types adaptés soit à l'observation stéréoscopique de clichés aériens, soit à l'examen de photographies réalisées avec des chambres métriques terrestres ou d'amateur.*

▼ *Fig. 8; représentation schématique d'un stéréocomparateur : Z_1, repère stéréoscopique gauche; Z_2, repère stéréoscopique droit; X_1, coordonnée relative X du cliché gauche (constante pour un modèle donné); X_2, coordonnée relative X du cliché droit (variable); $\overline{\omega}_1$, point principal de la perspective gauche; $\overline{\omega}_2$, point principal de la perspective droite.*

méthode des anaglyphes n'autorise pas; les deux entraînent néanmoins une certaine fatigue oculaire.

Enfin, notons qu'en augmentant artificiellement la base O_1 O_2 d'observation par l'utilisation de prismes ou de miroirs, comme il en existe dans certaines jumelles, et en utilisant des instruments grossissants ayant pour effet de multiplier par un même coefficient tous les angles sous lesquels on voit les distances entre points de l'objet pris deux à deux, on recule la limite de perception naturelle du relief; on dit alors qu'il y a *hyperstéréoscopie*.

La restitution photogrammétrique

La restitution photogrammétrique est la recherche de l'ensemble des intersections dans l'espace de tous les rayons homologues de deux gerbes perspectives définies par deux clichés photographiques. Cette opération regroupe donc la définition des différents paramètres d'orientation interne et externe des gerbes perspectives; elle peut être réalisée soit par *voie analytique*, soit par *voie analogique*. Dans le premier cas, l'instrument de mesure mis en œuvre, le *comparateur*, est relativement simple, les résultats sont très précis, la méthode est universelle, mais les calculs point par point sont complexes et nécessitent généralement l'emploi d'un ordinateur. Dans le second cas, l'instrument utilisé est le *stéréorestituteur analogique*, essentiellement constitué d'organes mécaniques et optiques, de conception et de réalisation complexes pour chaque gamme d'applications, mais d'une grande souplesse d'emploi, et autorisant le tracé continu des lignes planimétriques et des courbes de niveau. Une nouvelle génération d'instruments, les *stéréorestituteurs analytiques*, associent les avantages des deux méthodes en substituant aux parties mécaniques du stéréorestituteur analogique des dispositifs électroniques et électromécaniques, permettant ainsi ! restitution de lignes continues à partir d'un calcul rapide point par point.

Richard Colin

La restitution analytique

La mise en œuvre d'une solution analytique, c'est-à-dire la détermination par le calcul des paramètres directeurs du rayon perspectif correspondant à un point du cliché, implique la mesure préalable des coordonnées de ce point dans le plan du cliché. Cette mesure s'effectue avec un **comparateur**, instrument constitué essentiellement d'un bâti sur lequel reposent un chariot porte-cliché pouvant subir une translation dans une direction déterminée C et un chariot support de l'index de lecture, pouvant subir une translation I dans une direction rigoureusement orthogonale à C. Les déplacements de ces chariots, commandés par des manivelles actionnant des vis micrométriques, sont mesurés à l'aide de codeurs électromagnétiques, avec une précision de l'ordre de 1 μm.

Dans le dessein d'améliorer la précision de la mise en superposition de l'index de lecture et du point-image, et aussi afin de faciliter l'identification des points homologues de deux clichés, on utilise le **stéréocomparateur** comprenant (fig. 8) deux chariots porte-cliché et un système binoculaire d'observation permettant d'examiner simultanément les deux clichés et de réaliser le *pointé stéréoscopique*. Les coordonnées d'un point-image, fournies dans le système de référence du comparateur et corrigées éventuellement des erreurs d'étalonnage du coordinatomètre, subissent tout d'abord une translation et une rotation pour être référées au système d'axes matérialisés sur le cliché par les images des repères de fond de chambre, dont les coordonnées ont été également mesurées au comparateur. Plusieurs corrections sont alors effectuées. Il convient tout d'abord de tenir compte des variations dimensionnelles du support du cliché en comparant la figure formée par les images des repères de fond de chambre avec celle des repères eux-mêmes; ces variations peuvent atteindre plusieurs dizaines de micromètres.

Il faut ensuite appliquer la correction de distorsion; pour cela, on utilise les résultats des mesures d'étalonnage de la chambre de prise de vue, réalisées à l'aide d'un **photogoniomètre** sur 25 points d'un réseau constitué par un quadrillage régulier, et dont l'interprétation est la suivante : on admet que la distorsion moyenne, que l'on suppose radiale, peut être représentée par la relation :

$$(p_a + dp) \operatorname{tg} \alpha = l + al^3 + bl^5$$

fig. 8

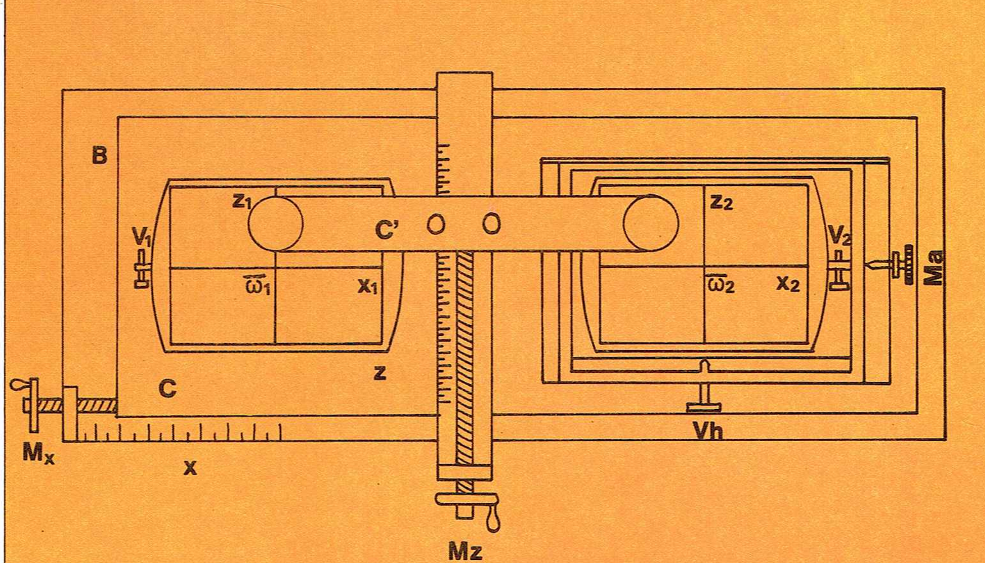

B : bâti du stéréocomparateur
C : chariot porte-clichés
C' : chariot porte-repères
V_1 : vis micrométrique de rotation du porte-cliché gauche
V_2 : vis micrométrique de rotation du porte-cliché droit
Vh : vis micrométrique de déplacement en y du cliché droit par rapport au cliché gauche
Ma : manivelle de déplacement relatif en x du cliché droit par rapport au cliché gauche
Mx : manivelle de déplacement en x du chariot porte-clichés
Mz : manivelle de déplacement en y du chariot des repères stéréoscopiques

où α est l'angle radial mesuré au photogoniomètre, p_α une valeur approchée de la distance principale, l la distance du point considéré au point principal, a et b deux coefficients inconnus et dp la correction inconnue à apporter à p_α pour obtenir la distance principale d'étalonnage. Chacun des 25 points ayant fourni une relation d'observation entre les trois inconnues dp, a et b, le système est résolu par la méthode des moindres carrés. Enfin, s'il s'agit de clichés aériens à petite échelle, il conviendra de tenir compte de l'effet de la réfraction atmosphérique.

Toutes ces corrections ayant été appliquées, un rayon SM d'une gerbe est parfaitement défini ; on connaît en effet 2 points de ce rayon (fig. 9) : le centre de perspective S situé sur la perpendiculaire au plan du cliché élevé en ϖ et à une distance $p = p_\alpha + dp$ de ce dernier, et le point perspectif m, de coordonnées x et y. Un système de paramètres directeurs dans le repère orthonormé x, y, z est $[x_m, y_m, p]$ ou encore [u, v, 1] avec $u = \frac{x_m}{p}$ et $v = \frac{y_m}{p}$, ces valeurs étant, respectivement, les tangentes des angles formés par l'axe ϖz avec les projections du rayon SM dans les plans $x\varpi z$ et $y\varpi z$.

A ce stade des opérations et moyennant la connaissance des coordonnées réelles de trois points de l'objet photographié, il peut être envisagé de mettre en place la gerbe perspective par rapport à l'objet en assujettissant chaque rayon relatif à un point connu à passer par ce point. Il suffit ensuite d'opérer de même avec la seconde gerbe pour déterminer les positions absolues de chaque couple de rayons homologues et, par suite, les coordonnées de leur intersection. Ce procédé, dit du *relèvement spatial*, et qui revient géométriquement à rechercher pour chaque gerbe l'intersection de trois tores, se traduit par la détermination des paramètres de deux translations (des centres de perspective S_1 et S_2) et de deux rotations (de chaque gerbe autour de son centre de perspective S) ; il n'est généralement utilisé que pour des applications industrielles concernant un nombre de points limité et dans lesquelles on recherche une grande précision.

La matrice rotation la plus utilisée en photogrammétrie est celle qui fait intervenir successivement les rotations élémentaires ϖ, φ, $\varkappa$ autour, respectivement, des axes O_x, O_y, O_z ; son expression complète est :

$$R = \begin{bmatrix} \cos\varphi\cos\varkappa & \sin\varpi\sin\varphi\cos\varkappa - \cos\varpi\sin\varkappa & \cos\varpi\sin\varphi\cos\varkappa + \sin\varpi\sin\varkappa \\ \cos\varphi\sin\varkappa & \sin\varpi\sin\varphi\sin\varkappa + \cos\varpi\cos\varkappa & \cos\varpi\sin\varphi\sin\varkappa - \sin\varpi\cos\varkappa \\ -\sin\varphi & \sin\varpi\cos\varphi & \cos\varpi\cos\varphi \end{bmatrix}$$

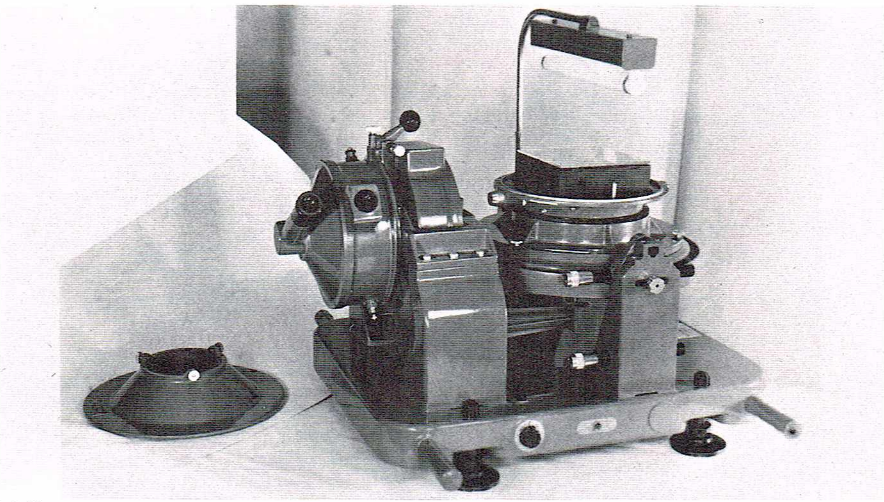

I.G.N.

▲ *Un photogoniomètre radial.*

à laquelle on substitue, si les rotations sont très petites, la matrice :

$$R(\varpi, \varphi, \varkappa) = \begin{bmatrix} 1 & -\varkappa & \varphi \\ \varkappa & 1 & -\varpi \\ -\varphi & \varpi & 1 \end{bmatrix},$$

obtenue en assimilant les sinus à l'expression de l'angle en radians et les cosinus à l'unité.

Le plus souvent, et c'est le cas dans toutes les applications cartographiques de la photogrammétrie, on recherchera tout d'abord les matrices R_1 et R_2 des rotations qu'il faut faire subir respectivement aux gerbes Γ_1 et Γ_2 pour obtenir une orientation relative correcte de ces deux gerbes. Pour ce faire (fig. 10), on placera tout d'abord Γ_1 et Γ_2 à une distance $S_1S_2 = b$ arbitraire, et on les orientera de manière que les axes S_1x et S_2x soient confondus et que les trièdres $S_1x_1y_1z_1$ et $S_2x_2y_2z_2$ se déduisent l'un de l'autre par translation. Si les gerbes étaient correctement orientées, tous les rayons homologues se couperaient dans l'espace. Considérons deux de ces rayons S_1M et S_2M et leurs projections sur les plans des xS_1z et yS_1z faisant avec l'axe des z les angles Arc tg u_1, Arc tg u_2, Arc tg v_1 et Arc tg v_2 ; nous pouvons voir que, si $u_1 = \frac{x}{z}$ est toujours différent de $u_2 = \frac{x - b}{z}$, en revanche, l'égalité $v_1 = v_2 = \frac{y}{z}$ caractérise l'intersection des deux rayons ; c'est ce critère qui sera retenu dans le calcul. Celui-ci est conduit de la manière suivante.

▼ *A gauche, fig. 9 ; schéma des paramètres directeurs d'un rayon perspectif : ϖ, point principal de la perspective ; S, centre de la perspective ; M, point objet ; m, image ou perspective de M. A droite, fig. 10 ; schéma de l'orientation relative des gerbes perspectives : S_1, S_2, centres de perspective ; b, base ; M, point objet reconstitué ; m, m', n, projections de M sur, respectivement, le plan des XZ, l'axe des Z, le plan des YZ ; u_1, v, u_2, paramètres directeurs des rayons perspectifs.*

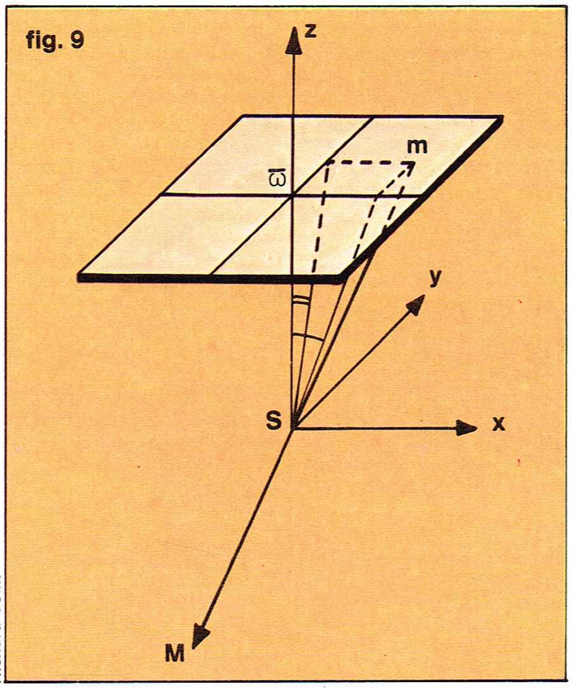

Richard Colin

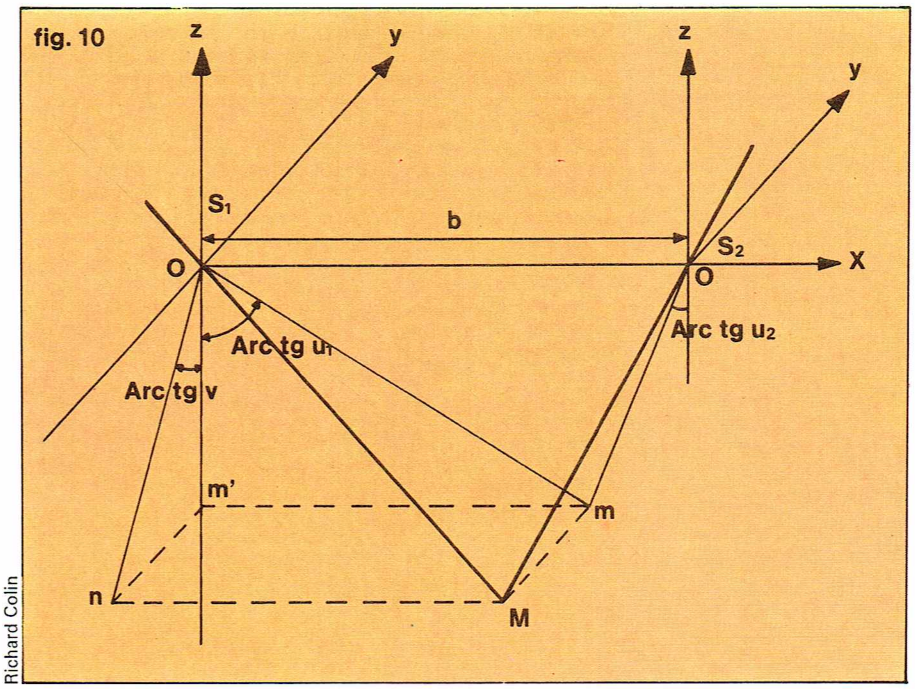

Richard Colin

En transformant le vecteur [u, v, 1] par la matrice R ($\bar{\omega}$ φ $\varkappa$) on obtient :

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\varkappa & \varphi \\ \varkappa & 1 & -\bar{\omega} \\ -\varphi & \bar{\omega} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +u & -\varkappa v & +\varphi \\ \varkappa u & +v & -\bar{\omega} \\ -\varphi u & +\bar{\omega} v & +1 \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow v' = \frac{y'}{z'} = \frac{\varkappa u + v - \bar{\omega}}{-\varphi u + \bar{\omega} v + 1}.$$

Lorsque les deux gerbes (Γ_1) et (Γ_2) ont subi respectivement les rotations ($\bar{\omega}_1$, φ_1, $\varkappa_1$) et ($\bar{\omega}_2$, φ_2, $\varkappa_2$), les paramètres initiaux v_1 et v_2 sont devenus respectivement :

$$v'_1 = \frac{\varkappa_1 u_1 + v_1 - \bar{\omega}_1}{-\varphi_1 u_1 + \bar{\omega}_1 v_1 + 1} \text{ et } v'_2 = \frac{\varkappa_2 u_2 + v_2 - \bar{\omega}_2}{-\varphi_2 u_2 + \bar{\omega}_2 v_2 + 1}$$

En remarquant que les rotations $\bar{\omega}_1$ et $\bar{\omega}_2$ s'effectuent autour du même axe des x et que, par conséquent, $\bar{\omega}_1$ a le même effet que $-\bar{\omega}_2$, il est possible de supprimer $\bar{\omega}_1$, et la relation d'observation s'écrit $v'_2 - v'_1 = 0$, soit :

$$(\varkappa_2 u_2 + v_2 - \bar{\omega}_2)(-\varphi_1 u_1 + 1) - (\varkappa_1 u_1 + v_1)(-\varphi_2 u_2 + \bar{\omega}_2 v_2 + 1) = 0$$

ou encore, en négligeant les termes du deuxième ordre :

$$(1 + v_1 v_2)\bar{\omega}_2 + u_1 v_2 \varphi_1 - u_2 v_1 \varphi_2 + u_1 \varkappa_1 - u_2 \varkappa_2 + v_1 + v_2 = 0.$$

Le calcul est effectué en utilisant 6 à 10 points bien répartis dans le *modèle stéréoscopique*, c'est-à-dire la partie commune à deux clichés formant couple et dont les axes de prise de vue sont généralement sensiblement parallèles ; il fournit des matrices R_1 et R_2 très approchées dont les éléments $\bar{\omega}_2$, φ_1, φ_2, $\varkappa_1$ et $\varkappa_2$ sont calculés par la méthode des moindres carrés. Ces valeurs, que l'on a supposées petites, sont en réalité généralement quelconques. On applique alors à chacun des deux faisceaux perspectifs la véritable rotation en utilisant la matrice complète ou encore la matrice d'Olinde Rodrigues dans laquelle $\theta = \sqrt{\bar{\omega}^2 + \varphi^2 + \varkappa^2}$, et, pour chaque couple de rayons homologues, on évalue $\lambda = p\,(v_1 - v_2)$ qui caractérise la *parallaxe linéaire transversale* ou $\Delta v = \text{Arc tg } v_1 - \text{Arc tg } v_2$ qui représente le rectiligne de l'angle dièdre formé par les plans $S_1 S_2 m_1$ et $S_1 S_2 m_2$, m_1 et m_2 étant respectivement les points images de M sur les perspectives C_1 et C_2. Si ces valeurs sont inférieures aux tolérances admises ($\lambda_1 \leqslant 20\ \mu m$ ou $\Delta v_1 \leqslant 0{,}0001$ rd), on considère que l'orientation relative est réalisée, sinon le calcul est repris avec les nouvelles valeurs u″ et v″. En général, deux ou trois itérations suffisent, à l'issue desquelles les matrices-rotations définitives sont arrêtées, pour passer au calcul des coordonnées provisoires x, y, z de tous les points du modèle dans le système arbitraire choisi et dont on connaît des coordonnées réelles X, Y, Z dans le milieu objet, rapportées à une référence absolue. L'opération suivante consiste à mettre ce modèle à l'échelle, c'est-à-dire à faire varier la base b introduite arbitrairement au début des opérations, de telle sorte qu'entre deux points connus M et P de l'objet :

$$\sqrt{(x_M - x_P)^2 + (y_M - y_P)^2 + (z_M - z_P)^2} = \frac{1}{E}\sqrt{(X_M - X_P)^2 + (Y_M - Y_P)^2 + (Z_M - Z_P)^2}.$$

Enfin, les deux gerbes perspectives constituant un modèle unique à l'échelle donnée 1/E mais libre dans l'espace, il s'agit de trouver une rotation et une translation destinées à lui donner sa position et son orientation absolue dans un système d'axes lié à l'objet. Le calcul des coordonnées spatiales des intersections de tous les couples de rayons peut alors être entrepris dans le système de référence absolu.

La restitution analogique

La restitution analytique, telle que nous l'avons décrite, ne fournissait avant la naissance des stéréorestituteurs analogiques que les coordonnées de points isolés du modèle ; elle ne permettait ni le tracé continu des lignes de l'objet, ni le tracé continu des sections de cet objet par des plans parallèles à xoy (courbes de niveau dans le cas d'une cartographie), ou par des plans parallèles à oz, ce que l'on nomme des *profils*. C'est pourquoi les constructeurs ont cherché à fabriquer des appareils analogiques dans lesquels la restitution s'effectue par voie mécanique ou optique ; ce sont ces appareils classiques qui ont été à la base du développement de la photogrammétrie. Les appareils actuels, qui font appel aux techniques les plus perfectionnées de la mécanique et de l'optique, ont atteint un tel degré de perfection qu'il ne semble plus possible d'améliorer leur précision ; il est probable que cette génération disparaîtra du marché au cours des prochaines décennies, mais, en raison de leur grande fiabilité, leur utilisation se poursuivra encore longtemps.

Un appareil analogique comportera toujours des organes correspondant aux différentes fonctions que nous avons déjà évoquées :

— des organes permettant la reconstitution des gerbes perspectives ;

— des organes permettant la reconstitution de la position dans l'espace des deux gerbes perspectives, c'est-à-dire permettant l'orientation relative des gerbes, appelée ici *formation du modèle*, la mise à l'échelle et l'orientation absolue de ce modèle ;

— un dispositif d'observation des clichés, permettant l'examen stéréoscopique d'un point quelconque commun aux deux clichés et l'exploration du modèle en relief perçu par l'observateur ;

— un mécanisme restituteur, permettant la matérialisation, à chaque instant, de deux rayons perspectifs homologues correspondant au point visé sur les clichés, et de leur intersection ;

— un dispositif de mesure des coordonnées du point d'intersection des rayons homologues, permettant de lire ou d'enregistrer (numériquement ou graphiquement) ces coordonnées.

Il existe un très grand nombre d'appareils analogiques que nous pouvons classer de différentes manières.

Tout d'abord, la façon dont sont matérialisés les rayons perspectifs reconstitués, d'une part dans l'espace-image, d'autre part dans l'espace-modèle, est tantôt mécanique, tantôt optique, ce qui conduirait à considérer quatre combinaisons. En pratique, il n'en existe que trois : les appareils à reconstitution optique de part et d'autre du centre de perspective, les appareils à reconstitution optique dans l'espace-image et à reconstitution mécanique dans l'espace-modèle, et enfin les appareils à reconstitution entièrement mécanique. La première et la seconde catégorie sont maintenant peu représentées dans la construction moderne, les principaux appareils existant sur le marché mondial appartiennent à la troisième catégorie.

Les appareils analogiques peuvent également être distingués en fonction de leur précision et de leur plus ou moins grande universalité. Certains ont été réalisés pour des conditions de prise de vue bien déterminées ou des applications particulières : c'est le cas des appareils destinés à la photogrammétrie terrestre (Wild A40, Zeiss-Terragraph, etc.) ; d'autres ont été conçus pour recevoir des clichés de différents formats, pour permettre l'introduction d'une gamme étendue de distances principales, pour faire subir aux clichés des rotations d'amplitude importante ou pour effectuer de nombreuses corrections (variation dimensionnelle des clichés, distorsion radiale et tangentielle, réfraction atmosphérique, courbure de terre). La combinaison de la plus ou moins grande universalité et de la plus ou moins grande précision conduit à classer les appareils à reconstitution rigoureuse en trois ordres ; une quatrième catégorie est généralement réservée aux appareils simplifiés.

A titre d'échantillon, nous décrirons un appareil de restitution qui a fait son apparition sur le marché en 1968, l'**autographe Wild A10** (fig. 11). Cet appareil de premier ordre, destiné avant tout aux applications cartographiques, est constitué d'un châssis robuste enveloppant le mécanisme restituteur et supportant, dans sa partie supérieure, les *chambres de restitution*. Celles-ci sont construites pour subir des rotations autour d'un *axe des abscisses* (inclinaison $\bar{\omega}$ ou site) et d'un *axe des ordonnées* (inclinaison en φ ou convergence) passant par un point fixe, le *centre de perspective* ; la rotation $\varkappa$ ou déversement s'exerce dans le plan du cliché. Dans chaque chambre de restitution, trois *colonnes à crémaillère*, solidaires de la monture inférieure, supportent un cadre sur lequel sont fixés la *couronne porte-cliché* et les *chariots* croisés du microscope d'observation. Ce dernier, qui peut par conséquent se déplacer dans deux directions rectangulaires pour l'exploration du cliché, est solidaire d'une *tige* portant, à son extrémité interne, un *manchon* monté à la cardan dans lequel vient coulisser une *tige spatiale*, elle-même tournant autour de l'axe d'un *cardan fixe*, qui

matérialise sous la chambre le centre de perspective. Tout se passe comme si le centre du cardan supérieur était le point-image, les chambres ayant été déportées de part et d'autre des tiges spatiales pour résoudre le problème de l'encombrement. A cette même fin, les cardans matérialisant les centres de perspective ont subi un décalage dans le sens des y, la chambre droite étant ainsi déplacée vers l'avant. Les *tiges spatiales* matérialisant les rayons perspectifs ne convergent donc pas en un point unique, celui-ci est dédoublé et matérialisé par deux manchons montés sur deux cardans, lesquels sont reliés l'un à l'autre par deux bras fixés au chariot des *Z*. Ce dédoublement présente d'ailleurs un autre intérêt : en effet, les deux centres de perspective étant fixes, les composantes en *X*, *Y* et *Z* de la base de prise de vue peuvent être introduites en faisant varier la position relative des deux cardans inférieurs. Le *chariot* des *Z*, entraînant ces deux cardans, se déplace en hauteur sur deux colonnes situées à l'arrière de l'appareil, elles-mêmes solidaires du *chariot des X* qui coulisse sur *deux tiges fixées sur le chariot des Y*. Ce dernier chariot se déplace en Y sur deux autres tiges fixées sur le bâti inférieur. Inversement, ces trois derniers mouvements, actionnés par des manivelles et une pédale animant des vis micrométriques, impriment aux cardans inférieurs des déplacements entraînant la rotation des tiges spatiales, lesquelles font subir à *l'index micrométrique* des translations permettant l'exploration des clichés. La distance principale p de la chambre de prise de vue est introduite en actionnant les crémaillères des colonnes supportant le cadre porte-cliché et le dispositif d'observation ; lorsque l'une des tiges est verticale, la distance entre les centres des cardans supérieurs est précisément égale à p, celle-ci pouvant varier de 86 à 305 mm. La distorsion est corrigée par l'interposition entre le cliché et l'index de lecture d'une *glace asphérique* dont la courbure de la surface inférieure a pour effet de dévier le rayon lumineux. Les clichés sont éclairés par des tubes fluorescents, sans influence thermique, les images des deux index sont renvoyées par un jeu de prismes dans les deux oculaires d'observation placés à l'avant. L'appareil comporte en outre un dispositif correcteur de la courbure de terre et de la réfraction atmosphérique, constitué par une calotte sphérique métallique placée sous le bloc restituteur et sur laquelle se déplace un galet solidaire des colonnes des Z. Les déplacements en X et Y sont transmis à un coordinatographe lumineux placé sur le côté de l'appareil et sur lequel, dans des rapports variant de 0,25 à 4, s'effectue automatiquement le tracé des lignes restituées ; ils peuvent également, ainsi d'ailleurs que le déplacement en Z, être lus sur des compteurs ou être transmis par des codeurs à des dispositifs d'enregistrement sur papier, bande perforée ou bande magnétique.

La mise en place d'un modèle stéréoscopique sur un appareil de ce type comporte sensiblement les mêmes phases que celles que l'on rencontre en restitution analytique ; elle diffère cependant de cette dernière par la substitution des opérations mécaniques aux calculs et par l'introduction de translation en Y et Z. Les rotations sont déterminées successivement en annulant la parallaxe linéaire transversale λ en 6 points caractéristiques du modèle, choisis en raison de l'effet particulier que peuvent avoir les différents paramètres sur la parallaxe en ces

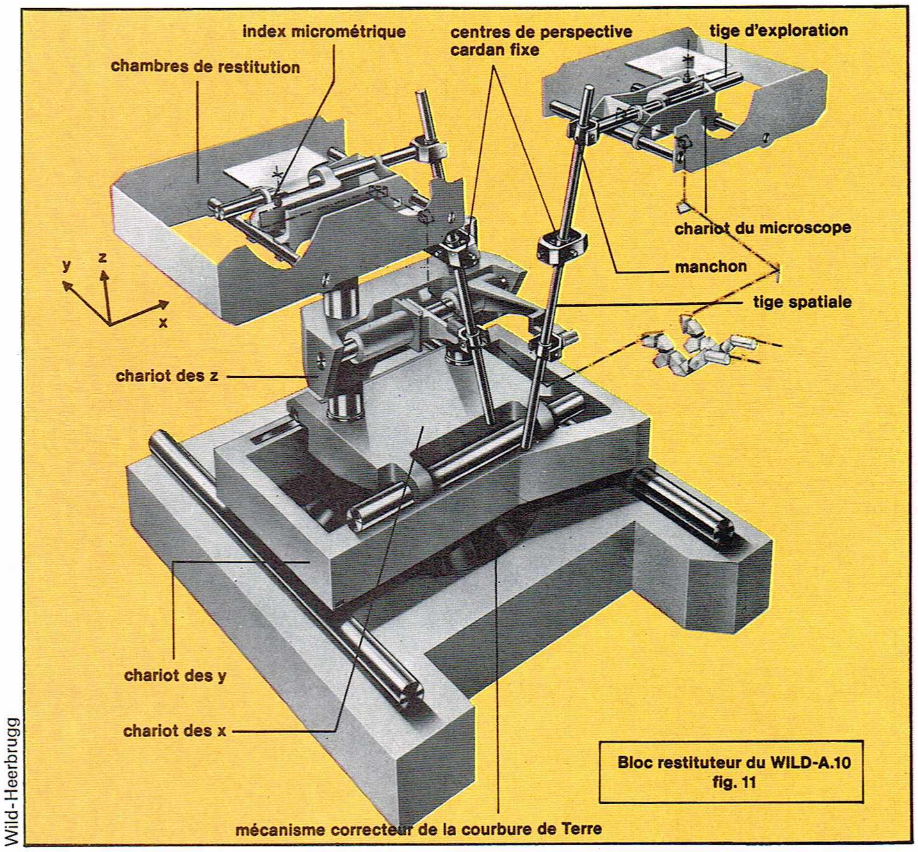

Bloc restituteur du WILD-A.10
fig. 11

Wild-Heerbrugg

▲ *Fig. 11 ;* **l'autographe Wild A-10** *à reconstitution des rayons perspectifs par des moyens entièrement mécaniques.*

points. La mise à l'échelle et l'orientation absolue du modèle nécessitent la connaissance des mêmes données externes qu'en restitution analytique et s'opèrent de la même manière, en effectuant une translation des cardans inférieurs de composantes Bx, By, Bz et en appliquant simultanément aux deux chambres une rotation de composantes ω, φ. La mise en correspondance du système de référence absolu s'effectue simplement en faisant varier la lecture de l'échelle des Z de l'appareil, et en faisant subir une rotation à la feuille de projection (ou stéréominute) placée sur le coordinatographe. Dans le cas d'un enregistrement numérique, une transformation des coordonnées X et Y est nécessaire.

Les applications de la photogrammétrie

Les applications cartographiques de la photogrammétrie

L'utilisation de la photogrammétrie dans l'établissement des levés topographiques a été à l'origine de l'essor de cette technique et représente encore actuellement 95 % de ses applications. Exploitant tout d'abord des photographies terrestres, c'est-à-dire prises de points de vue situés, par exemple, sur des sommets de montagne et dont on déterminait les coordonnées et l'orientation de référence

Wild-Heerbrugg

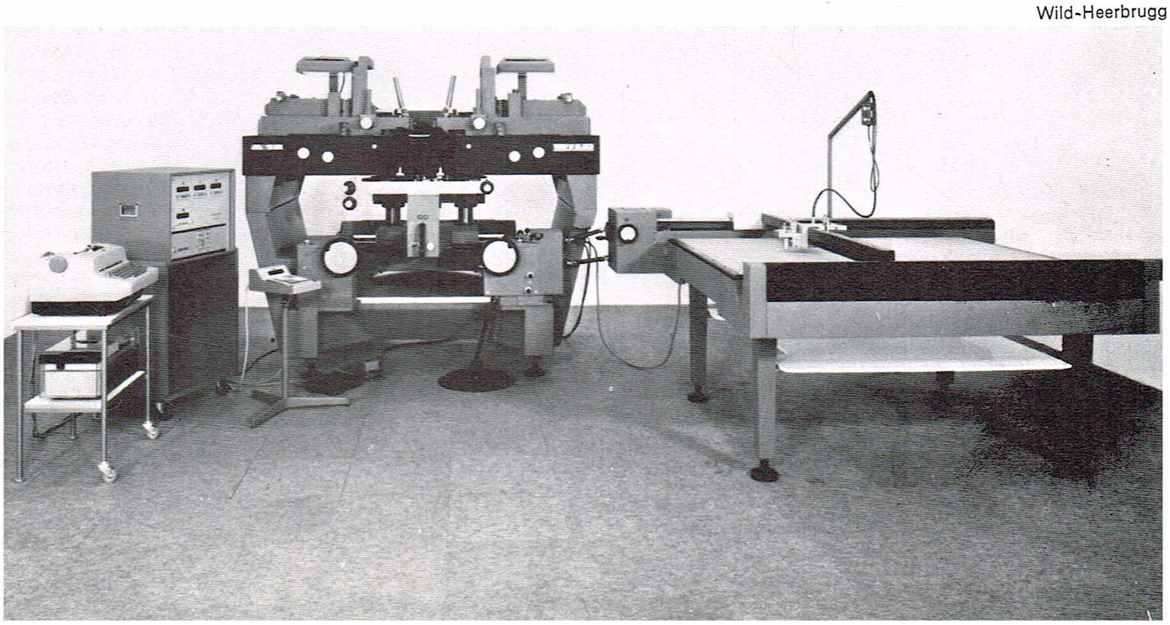

◀ *Vue d'ensemble d'un appareil de restitution analogique : au centre, l'autographe (ou bloc restituteur) relié à un coordinatographe (à droite) ; à gauche, un enregistreur de coordonnées, une perforatrice de bandes et un télétype.*

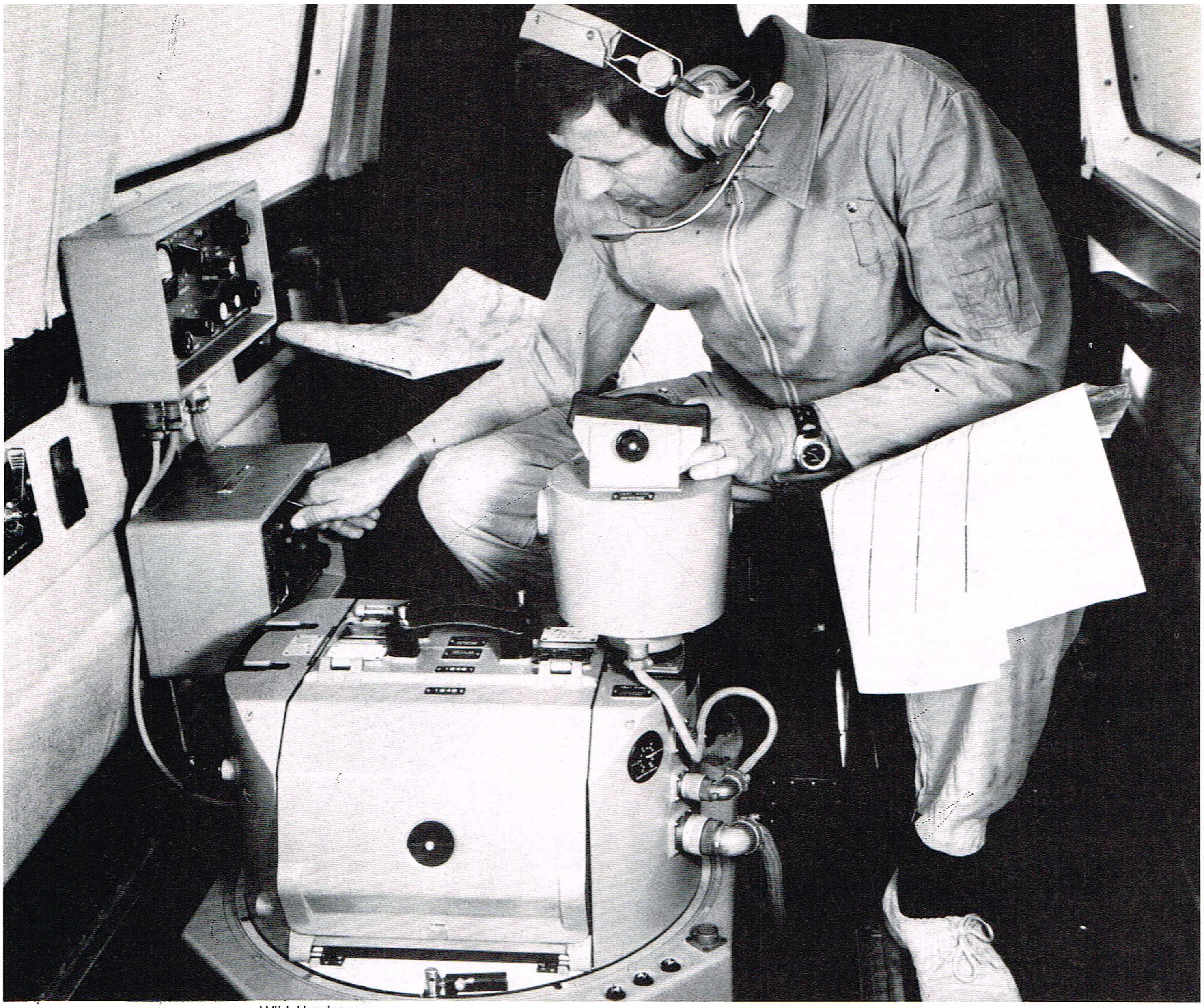

Wild-Heerbrugg

▲ ***Aménagement intérieur d'un*** **avion photographe.**

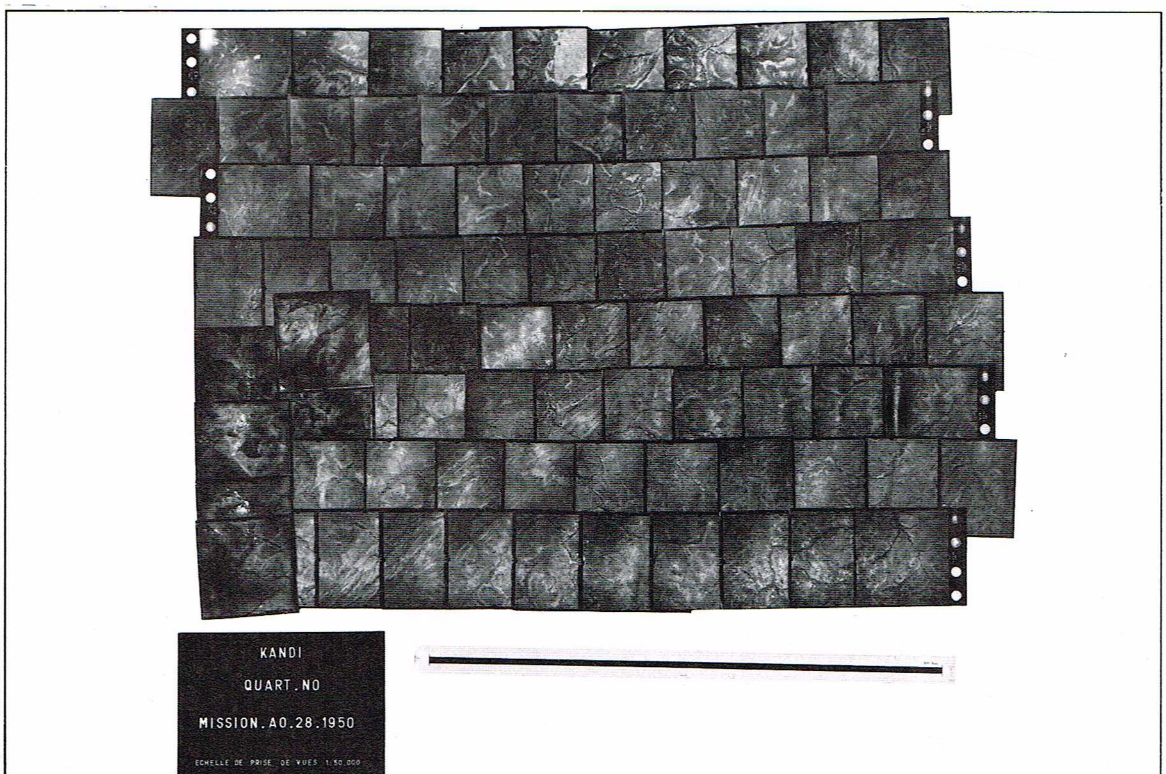

I.G.N.

▶ ***Photo-index d'une prise de vue verticale.***

par triangulation, cette technique fut utilisée pour réaliser une grande partie de la carte des Alpes à l'échelle de 1/20 000. Néanmoins le champ de cette application restait limité aux régions accidentées, sa mise en œuvre était délicate et nécessitait presque toujours un complément de levé direct dans les parties correspondant aux angles morts des clichés; enfin la précision des levés exécutés de cette manière manquait d'homogénéité. La mise au point de la prise de vue aérienne relégua la photogrammétrie terrestre à des applications limitées au levé de parois verticales et plus généralement d'édifices et d'objets divers; nous classerons maintenant ce genre de réalisations dans les applications non cartographiques de la photogrammétrie. La photogrammétrie cartographique est donc essentiellement la photogrammétrie aérienne, l'aérostat le plus utilisé étant l'avion.

● *La prise de vue*

On a continué de distinguer quatre catégories de photographies aériennes :

— les *photographies* dites *verticales,* dont l'axe optique présente avec la verticale un angle inférieur à 3°;

— les *photographies convergentes,* dont l'axe optique fait avec la verticale un angle de 10 à 20° dans la direction du vol de l'avion;

— les *photographies obliques,* dont l'axe fait avec la verticale un angle de 15 à 30° dans la direction perpendiculaire au vol;

— enfin les *photographies panoramiques,* sur lesquelles l'horizon apparaît.

Par suite du développement des **objectifs grand angulaire** et **super-grand angulaire** pouvant atteindre des champs de 137° (Roussar 48), les trois dernières catégories ont été presque abandonnées; les matériels conçus et mis en œuvre actuellement sont donc essentiellement orientés vers la prise de vue et l'exploitation de photographies verticales.

Pour réaliser la cartographie d'une certaine portion de territoire, il convient donc tout d'abord de la couvrir de photographies stéréoscopiques présentant entre elles des recouvrements suffisants. L'échelle moyenne approximative de ces clichés sera choisie en fonction de l'échelle de la carte qu'on veut réaliser mais aussi en fonction de la nature et de l'aspect du terrain à cartographier (montagneux, urbain, rural, boisé, etc.), du matériel disponible et de la précision désirée. C'est ainsi que des photos à 1/6 000 pourront avantageusement être utilisées pour réaliser une carte à 1/1 000, alors que l'établissement d'une carte à 1/50 000 nécessitera l'identification de détails pour laquelle l'échelle photographique de 1/60 000 constitue une limite.

Le plan de vol comportera généralement des bandes parallèles présentant entre elles un recouvrement moyen de 25 %; les clichés successifs d'une même bande, dont le format utile de 23 × 23 cm tend à se normaliser en Europe occidentale et en Amérique, auront des recouvrements de 60 %. De la bonne exécution d'une mission photographique dépendront pour une très grande part la commodité et la rapidité de réalisation des opérations suivantes, toujours plus longues et plus onéreuses que la couverture elle-même; il importe donc de choisir l'avion photographe en fonction des performances exigées, de résoudre les problèmes souvent délicats de navigation et de faire appel au type de chambre de prise de vue et à l'émulsion qui conviennent le mieux.

L'avion photographe doit en premier lieu permettre la mise en place et le fonctionnement correct des appareils de prise de vue et des dispositifs annexes; il possède donc généralement une cabine assez spacieuse. Les ouvertures aménagées dans la partie inférieure de la coque sont calculées pour assurer le dégagement des objectifs de deux et parfois trois caméras, quels que soient l'angle de dérive et l'assiette de l'avion, dans des conditions normales d'utilisation. Ces ouvertures sont munies de glaces capables de supporter la pressurisation de la cabine et dont les caractéristiques optiques sont calculées afin d'éliminer toute déviation des rayons lumineux; elles sont protégées par des trappes pour l'atterrissage et le décollage. Le poste de navigation et de pilotage est de préférence entièrement vitré pour assurer la meilleure visibilité; il est équipé, en plus des divers instruments exigés pour la navigation classique, d'un viseur périscopique, réglable en site et en azimut, et permettant de repérer la verticale, de déterminer la dérive et de mesurer des angles nadiraux dans des plans verticaux quelconques. La hauteur H de vol au-dessus du sol étant liée à l'échelle moyenne approximative 1/E des clichés et à la distance principale p de la caméra par la relation $H = p \cdot E$, un rapide calcul fait apparaître que, E variant de 2 000 à 100 000 et p variant de 86 mm à 300 mm, H variera dans les meilleures conditions de 600 m à 8 600 m. Si l'on fait entrer en ligne de compte l'altitude du sol et certaines considérations de précision, la gamme des altitudes au-dessus du niveau de la mer s'échelonne de 500 à 12 500 m.

De plus, il est nécessaire qu'entre deux déclenchements successifs de l'obturateur de la caméra, le dispositif automatique de déroulement et d'application du film ait le temps de fonctionner, et il est indispensable également que le déplacement de l'avion n'ait aucune influence sur la qualité des images. La cadence minimale de fonctionnement des chambres de prise de vue modernes étant de 2 secondes, et la base de prise de vue étant de 9 cm sur des clichés de format utile 23 × 23 cm, la vitesse V exprimée en km/h doit par conséquent rester inférieure à 0,162 E, ce qui représente 224 km/h pour des clichés à 1/2 000. Quant à l'effet f de filé dû au déplacement de l'avion pendant la durée t d'ouverture de l'obturateur, il est donné par la relation $f = \frac{V \cdot t}{E}$, et on estime généralement qu'il doit rester inférieur à 20 µm. En adoptant un temps de pose de 1/500 de seconde, ce qui représente un minimum, la vitesse V exprimée en km/h doit rester inférieure à 0,36 E; ce n'est donc pas ce facteur qui constituera généralement une limite à la vitesse, sauf toutefois dans les cas où les conditions particulières de la prise de vue (luminance du sol, nature de l'émulsion utilisée, ouverture, etc.) nécessiteront l'adoption d'un temps de pose plus grand.

On peut donc se rendre compte que l'avion photographe universel n'existe pas, qu'il est nécessaire d'utiliser des avions lents et stables aux basses altitudes pour la prise de vue des clichés à grande échelle, et qu'il est intéressant d'utiliser des avions rapides, à grand rayon d'action et à plafond opérationnel élevé, pour la photographie à petite échelle de vastes régions dépourvues d'aérodromes et sur lesquelles les conditions météorologiques sont aléatoires. À titre indicatif, la moyenne générale annuelle du nombre de journées favorables à la photographie aérienne est de 40 en France, de 6 au Gabon, encore faut-il ajouter que ces journées ne sont pas utilisables en totalité, car il convient d'exclure les heures pendant lesquelles le Soleil est trop bas sur l'horizon et, pour les régions tropicales, celles où l'échauffement du sol est intense. Les avions les plus couramment utilisés sont le Hurel Dubois 34, le D. C. 3, les Aerocommanders, les Piper Navarro et Aztèque, le Mystère 20, les Lear Jets 25 et 35 et le Beescraft 200 dans lesquels l'équipage comprend généralement un pilote, un navigateur et un photographe.

● *La stéréopréparation*

La mise à l'échelle et l'orientation absolue des modèles stéréoscopiques nécessitent la connaissance de données externes qui entraînent toujours des opérations astronomiques, géodésiques, topométriques, et parfois, pour

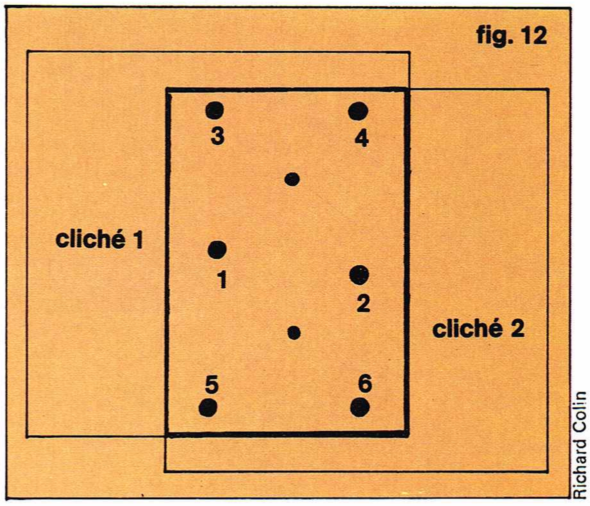

◄ *Fig. 12; points caractéristiques du modèle stéréoscopique.*

alléger et compléter ces dernières, des opérations aéroportées (déterminations de profils) et des opérations graphiques (T. P. F. R.) ou calculées (aérotriangulation) exécutées à partir de mesures effectuées sur les photographies. On appelle stéréopréparation tout ce qui concourt à fournir les coordonnées de points-images identifiés sur les photographies et situés aux emplacements caractéristiques du stéréomodèle (fig. 12).

En France et dans les pays où existe un canevas géodésique et de nivellement dense et précis, les opérations de terrain se limitent à quelques déterminations par les procédés de la triangulation ou de la polygonation. Par contre, dans les vastes territoires en voie de développement, on a souvent recours à des observations astronomiques fournissant la latitude et la longitude d'un lieu avec une précision caractérisée par un écart type d'une seconde d'arc, et l'azimut d'une direction avec une précision de 15 secondes.

A ces procédés se substitue avantageusement le « Doppler Transit Satellite System » qui consiste à exploiter les signaux émis par les satellites Transit de l'U. S. Navy et dont la précision sur les trois coordonnées peut atteindre le mètre. L'emploi d'un enregistreur de profils aéroporté (A. P. R.) en région non boisée permet de déterminer soit l'altitude du centre de perspective au-dessus du sol à l'instant du déclenchement de l'obturateur, soit, par l'intermédiaire de rattachements à des repères de nivellement de certains points d'un réseau de profils, les altitudes absolues de certains points du stéréomodèle avec une précision caractérisée par un écart type de 2 à 3 mètres. Les données fournies par ces différents procédés sont parfois utilisées directement en restitution; elles constituent le plus souvent le canevas d'appui d'une *aérotriangulation* dont la pratique est devenue courante avec l'emploi des ordinateurs.

Nous avons vu que l'orientation relative d'une gerbe par rapport à son homologue pouvait être réalisée sans le concours de données externes.

● *L'aérotriangulation*

Dans le cas d'une prise de vues aériennes verticales respectant les recouvrements habituels, chaque cliché présente des parties communes avec ceux qui l'entourent; en particulier, dans une même bande, si l'orientation relative de la gerbe 1 par rapport à la gerbe 2 a été réalisée, l'orientation relative de la gerbe 2 par rapport à la gerbe 3 entraîne l'orientation relative de la gerbe 1 par rapport à la gerbe 3. De proche en proche, il est ainsi possible de constituer un modèle unique de tous les modèles stéréoscopiques d'une même bande, puis de toutes les bandes d'un même bloc, et de calculer, dans un système et à une échelle arbitraires, les coordonnées spatiales des points du modèle qui ont fait l'objet de déterminations sur le terrain. Il suffit ensuite de rechercher les éléments d'une transformation (facteur d'échelle, translation, rotation) qui mette en correspondance le modèle fictif ou calculé et le modèle-objet réel, puis d'appliquer cette transformation à tous les points de liaison des stéréomodèles entre eux pour obtenir leurs coordonnées-terrain. L'aérotriangulation, qui a permis de réduire de 5 à 1 le coût de la stéréopréparation, n'en reste pas moins une opération délicate, car l'accumulation des erreurs systématiques et accidentelles affectant les mesures sur les clichés impose l'emploi de formules de compensation extrêmement complexes qui ont pour effet d'appliquer à chaque stéréomodèle une transformation particulière destinée à éliminer les discordances externes en réduisant au minimum les altérations apportées à l'enchaînement.

● *La restitution cartographique*

Une carte générale graphique doit être à la fois précise, fidèle, complète et lisible, et il est bien évident que les problèmes du choix des couleurs et des signes conventionnels, de la facture générale et de la généralisation des détails sont avant tout ceux du cartographe chargé de la rédaction. Le photogrammètre ne se soucie généralement que de la nature de la carte (graphique, numérique ou photographique), de sa précision et des éléments qu'il conviendra d'y faire figurer, et qui seront visibles et identifiables sur les photographies. Une intervention intermédiaire, dite de complètement topographique, pourra être envisagée s'il s'agit de représenter des détails planimétriques cachés par la végétation ou de collecter la toponymie, ainsi que les renseignements à caractère administratif ou économique que les photos ne peuvent fournir.

La précision est avant tout le facteur déterminant du choix des matériels et du processus utilisé; les deux relations $\sigma_z = \frac{H}{B} \cdot E_c \cdot \sigma_a$ et $\sigma_p = E_c \sqrt{2} \cdot \sigma_a$ donnent les écarts types respectifs caractérisant la précision sur l'altitude z et la position planimétrique p d'un point restitué, en fonction du facteur d'échelle E_c des clichés, de la hauteur moyenne H de l'avion au-dessus du sol, de la base B de prise de vue et de l'écart type σ_a caractérisant la précision de la mesure des coordonnées d'un point-image dans le plan des clichés. Cette dernière quantité dépend de la valeur qualitative et métrique des clichés, mais aussi de l'appareil et du processus de mesure employés, de l'habileté de l'opérateur et de la correction plus ou moins rigoureuse des diverses erreurs (distorsion, réfraction, etc.); elle varie de 2 µm, pour la restitution analytique faisant appel à un comparateur de 1er ordre, à 30 et même 50 µm pour des appareils analogiques de 2e et de 3e ordre. S'il s'agit de réaliser une carte traditionnelle à une échelle 1/E, l'écart graphique communément admis de 2 dcmm déterminera σ_p, et, par convention, la définition de l'équidistance *e* des courbes de niveau entraîne $\sigma_z \leqslant e/4$. La précision étant parfaitement définie, le photogrammètre fera ensuite le choix de la méthode la plus économique en fonction du matériel dont il dispose et des caractéristiques particulières à la région à cartographier.

Le tracé sur le coordinatographe d'un appareil de restitution, qui fut longtemps exécuté au crayon sur différents supports opaques ou transparents, est maintenant réalisé en « scribing », cette méthode consistant à graver des sillons d'épaisseur variable dans une couche opaque et tendre coulée préalablement sur un film de polyester transparent. La finesse incomparable du trait obtenu de cette manière et la possibilité de séparer sur des supports différents les courbes de niveau, le réseau hydrographique et la planimétrie générale, qui devront être reproduits ultérieurement en couleurs distinctes, allègent considérablement les opérations de dessin et de reproductions photomécaniques.

S'il s'agit d'une carte numérique, le tracé simultané sur coordinatographe n'est alors qu'une simple visualisation de l'état d'avancement de la restitution, car le restituteur enregistre sur bande magnétique les coordonnées x, y, z des points de l'image dont il faudra assurer la représentation. A chaque nature de détail (habitations, clôtures, rivières, courbes de niveau, etc.) est affecté un numéro de code dont le restituteur assure l'inscription; le déclenchement de l'enregistreur au cours du filage des lignes continues est assuré par un dispositif préréglé fonctionnant automatiquement selon une cadence régulière de temps ou de distance. L'avantage de ce procédé est de conserver à l'enregistrement la précision intrinsèque donnée par les clichés et l'appareil, et de pouvoir réaliser ensuite analytiquement toutes les transformations désirées; il nécessite néanmoins l'emploi ultérieur d'un ordinateur pour l'application du programme de traitement, et l'utilisation d'une table traçante pour l'obtention du document graphique élaboré.

Aucune carte graphique ne peut conserver la richesse d'une photographie, et même l'interprétation dont elle a fait l'objet peut représenter une gêne pour certains utilisateurs, c'est pourquoi des recherches ont été depuis longtemps entreprises pour obtenir une représentation photographique d'une projection orthogonale du terrain à cartographier.

● L'*orthophotographie,* maintenant d'un usage courant, s'obtient en juxtaposant des éléments infinitésimaux d'image après leur avoir fait subir une transformation ayant pour but de corriger les déformations inhérentes à la perspective photographique. Cette opération est réalisée à l'aide d'*orthoprojecteurs* permettant d'assurer le balayage de l'image par une petite fente ou par un spot le long de profils parallèles. A commandes manuelles ou automatiques, ces appareils font appel à des procédés projectifs simples ou à des tubes cathodiques ayant pour fonction de capter l'image, de l'analyser et de la reconstituer par éléments après transformation. L'enregistrement simultané des profils du terrain permet également d'obtenir les points de passage des courbes de niveau et, par suite, le tracé de ces courbes qu'il est possible de reproduire en superposition, sur l'orthophotographie. Deux inconvénients freinent toutefois l'essor de l'orthophotographie :

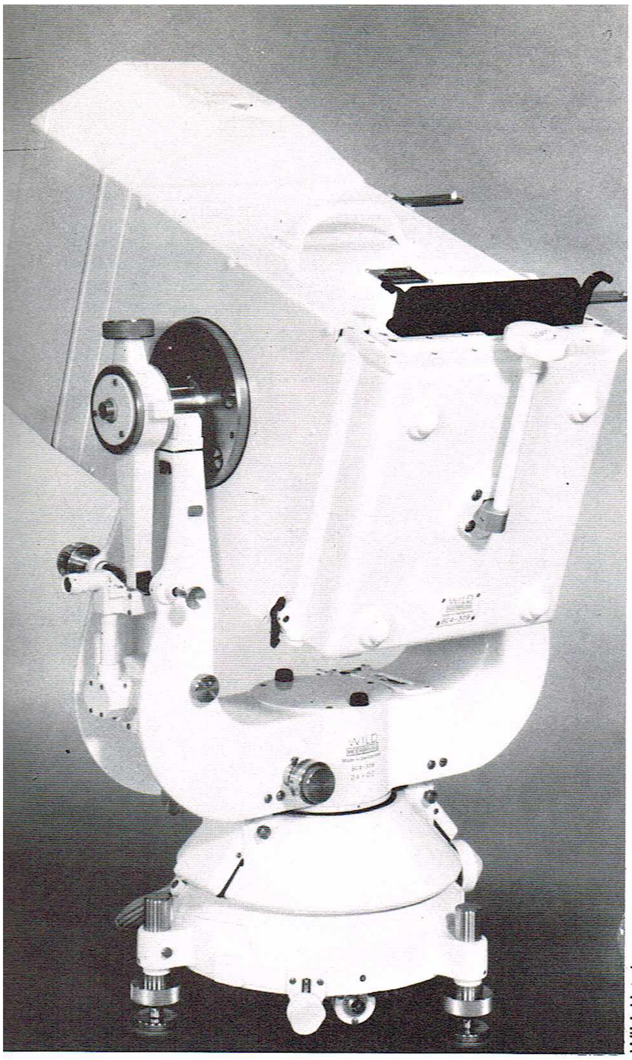

Wild-Heerbrugg

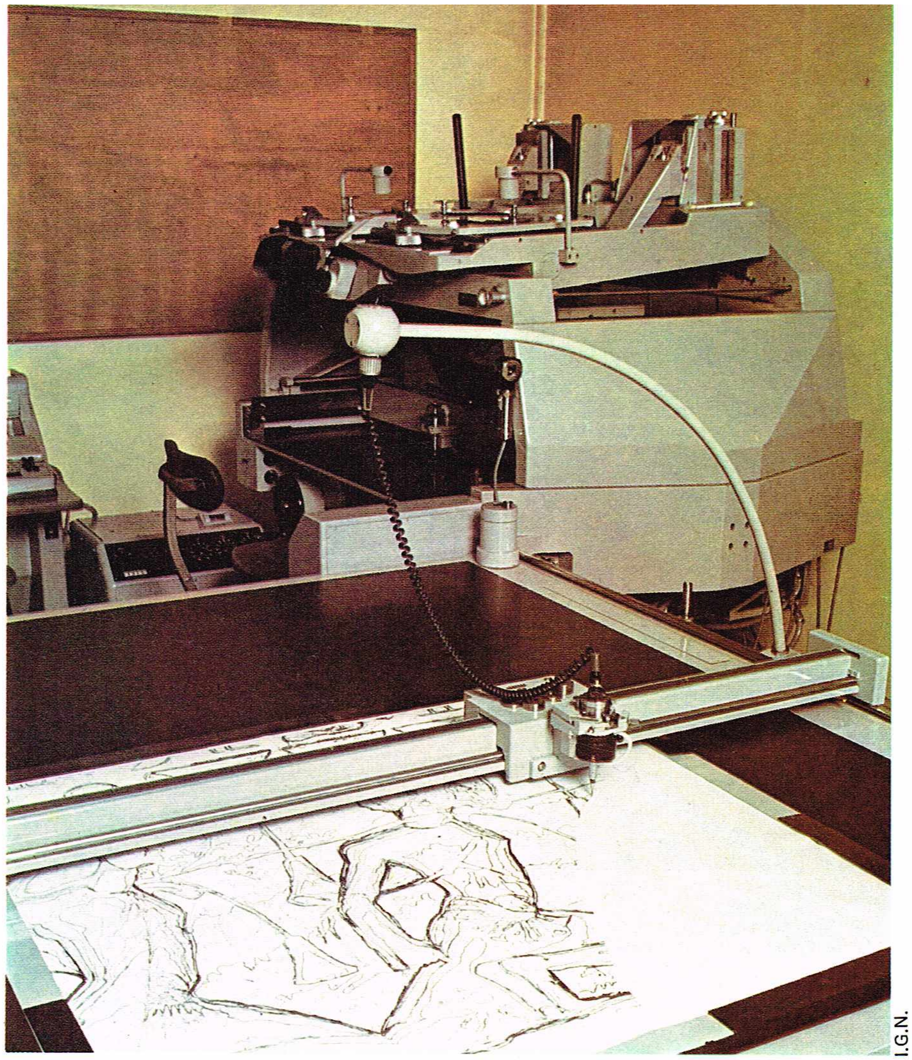

I.G.N.

▲ *A gauche, une* **chambre balistique Wild BC 4,** ***utilisée en photogrammétrie appliquée aux services de l'espace, et notamment à la géodésie spatiale.***
A droite, un appareil de restitution analogique, Zeiss-Planimat II₂, utilisé pour la restitution architecturale.

l'existence des superstructures (constructions, forêts, etc.), pour lesquelles l'effet de perspective subsiste, et la difficulté de garder une bonne qualité d'image dans les reproductions de ces documents par des procédés diazoïques.

Les applications non cartographiques de la photogrammétrie

Moins connues sont les applications scientifiques, industrielles et architecturales de la photogrammétrie qui présentent une diversité sans cesse accrue et dont les progrès sont remarquables. Leur classification en fonction du but poursuivi présente moins d'intérêt que celle dans laquelle interviennent les dimensions et l'éloignement du sujet, facteurs qui déterminent le type de matériel utilisé.

— Pour des *objets à l'infini* ou situés au-delà de la distance hyperfocale de l'objectif, les conditions sont très voisines de celles de la photogrammétrie aérienne. Les prises de vues terrestres sont généralement exécutées à l'aide d'objectifs de distances focales assez longues (150 à 300 mm) et de champ relativement faible. La nécessité de travailler par couples, de mesurer les angles d'inclinaison de l'axe principal et de relever son azimut conduit à employer des *photothéodolites,* dans lesquels se retrouvent des limbes horizontaux et verticaux, et une alidade, sur laquelle reposent les tourillons de la chambre. S'il s'agit de photogrammétrie appliquée aux services de l'espace, et notamment à la géodésie spatiale, on utilise des chambres balistiques équipées d'obturateurs spéciaux destinés à découper la trace des satellites en une succession d'images ponctuelles, et dont la synchronisation peut être assurée à 0,001 seconde par l'intermédiaire d'un récepteur de radiosignaux horaires.

— Pour les *objets à courte distance,* c'est-à-dire allant de quelques mètres à quelques centaines de mètres, il convient d'utiliser des chambres métriques à distance principale variable, mais les procédés s'apparentent encore à ceux qui ont été développés en photogrammétrie aérienne. Afin d'assurer le parallélisme des axes des clichés homologues, on préférera généralement les chambres couplées (chambres stéréométriques à base de 0,40 m ou 1,20 m) comportant un dispositif de synchronisation du déclenchement des obturateurs; ce type de chambre est couramment utilisé en Allemagne dans les constats d'accidents de la circulation.

▼ *Orthophotoplan hypsométrique d'une région saharienne.*

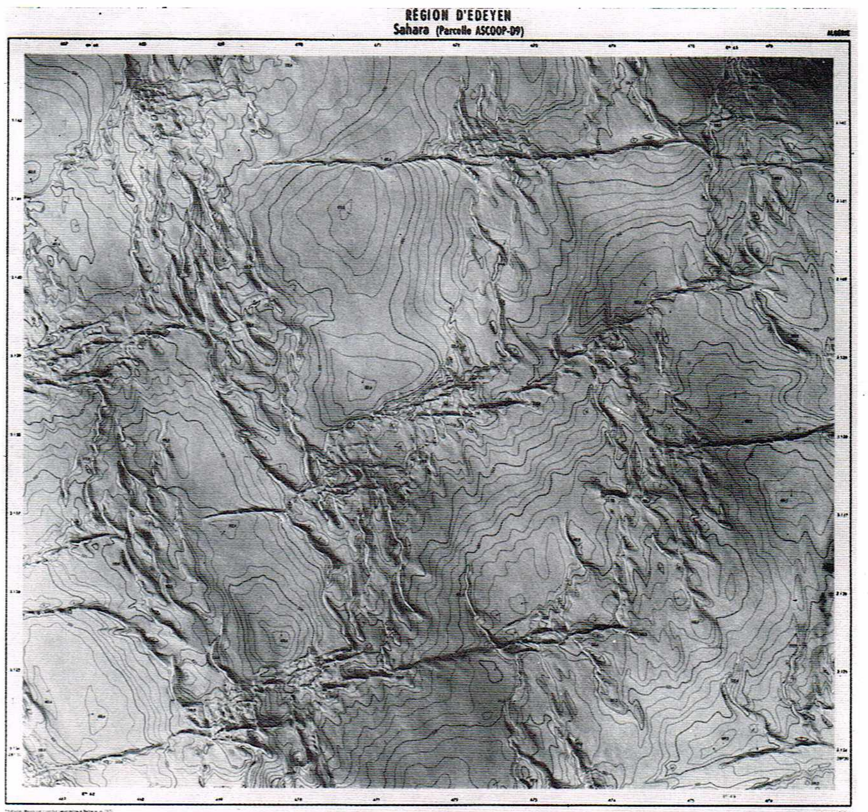

I.G.N.

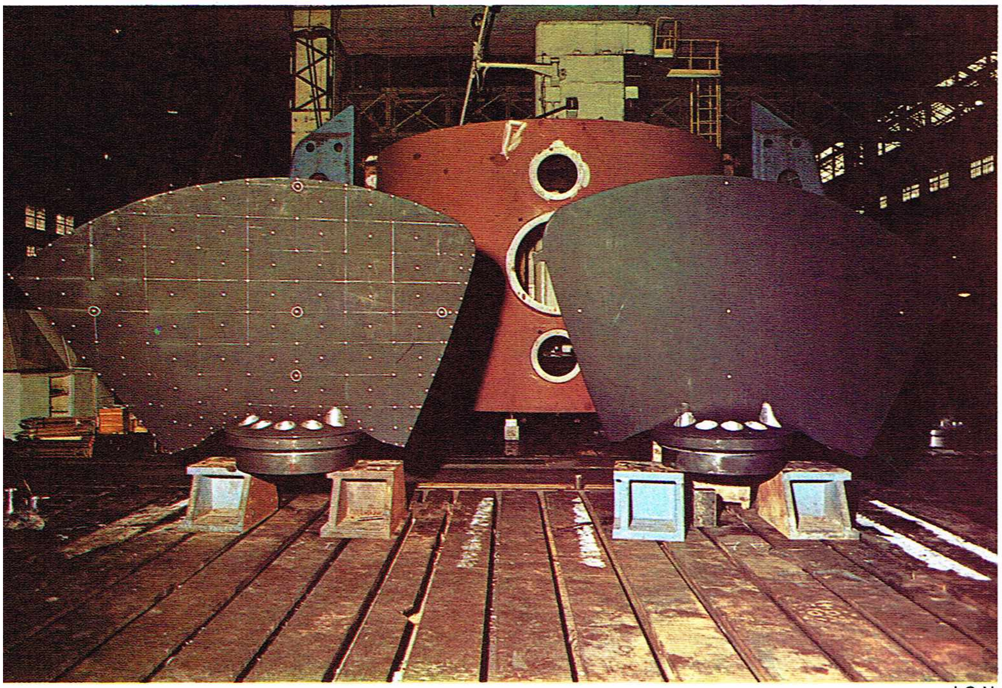

I.G.N.

▲ ***Dans l'industrie, ici une application à la fabrication de pales de turbine, la photogrammétrie est fréquemment utilisée pour contrôler la forme et les dimensions d'objets obtenus par moulage ou par assemblage de pièces.***

— La *photogrammétrie à très courte distance* concerne les éloignements variant de quelques centimètres à 2 mètres, pour lesquels les difficultés s'accroissent en raison de la nécessité de faire varier considérablement la distance principale et de conserver simultanément une grande profondeur de champ. En réalité, les seules chambres métriques existant pour des éloignements inférieurs à 0,50 m sont des chambres conçues pour une application particulière, comme c'est le cas des chambres couplées de distance focale f : 35,5 mm, construites spécialement par Bausch and Lomb pour le compte de l'École dentaire de Buffalo et destinées à effectuer une étude photogrammétrique de dents nécessitant un traitement médical. Dans les chambres couramment utilisées, la variation de la distance principale est obtenue soit par l'interposition sur le fond de chambre de cales calibrées sur lesquelles la plaque vient prendre appui, soit par l'adjonction de bagues de différentes épaisseurs entre le corps de chambre et le porte-objectif, soit par l'emploi de lentilles additionnelles ou encore par le déplacement axial de l'objectif. Le déplacement par mouvement hélicoïdal dont sont dotés presque tous les appareils d'amateurs n'est en effet concevable en photogrammétrie que s'il permet de conserver le centrage et de repérer la distance principale à 0,01 mm près. Notons cependant que, moyennant la connaissance des coordonnées de quelques repères placés dans le champ, la photogrammétrie analytique permet d'exploiter des clichés obtenus avec une chambre non métrique.

— Lorsque l'éloignement est très petit, il convient d'avoir recours à un microscope binoculaire et de faire appel aux techniques complexes de la *stéréomicrophotographie,* utilisées en particulier en biologie végétale.

Parmi les applications les plus courantes, il convient de citer les essais en charge d'un pont suspendu qui consistent à mesurer les déplacements des différents éléments d'un pont par rapport à leur position origine, l'auscultation des barrages en enrochement qui nécessite la prise de photographies à intervalles réguliers de 6 mois ou 1 an à partir des mêmes points de vue, et le relevé des profils d'un tunnel que l'on peut exécuter soit sur une série de mirettes préalablement fixées sur la paroi, soit en projetant un faisceau lumineux destiné à matérialiser une section du tunnel. Dans l'industrie, la photogrammétrie est fréquemment utilisée pour contrôler la forme et les dimensions d'objets à l'issue du moulage ou de l'assemblage des

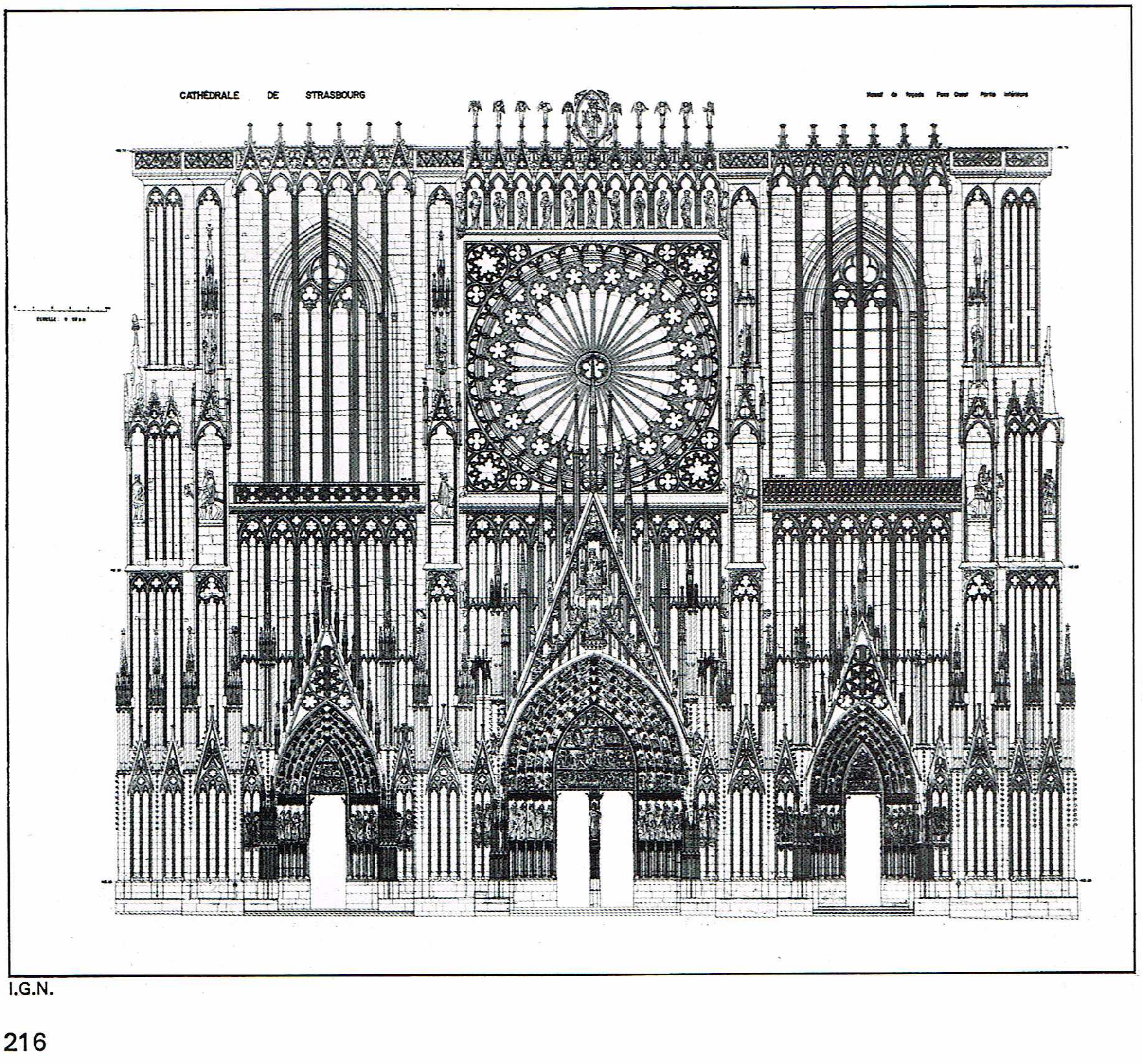

I.G.N.

▶ ***Restitution partielle de la façade de la cathédrale de Strasbourg : le domaine de l'architecture est celui où l'application de la photogrammétrie non cartographique a vu, jusqu'à présent, son plus grand essor.***

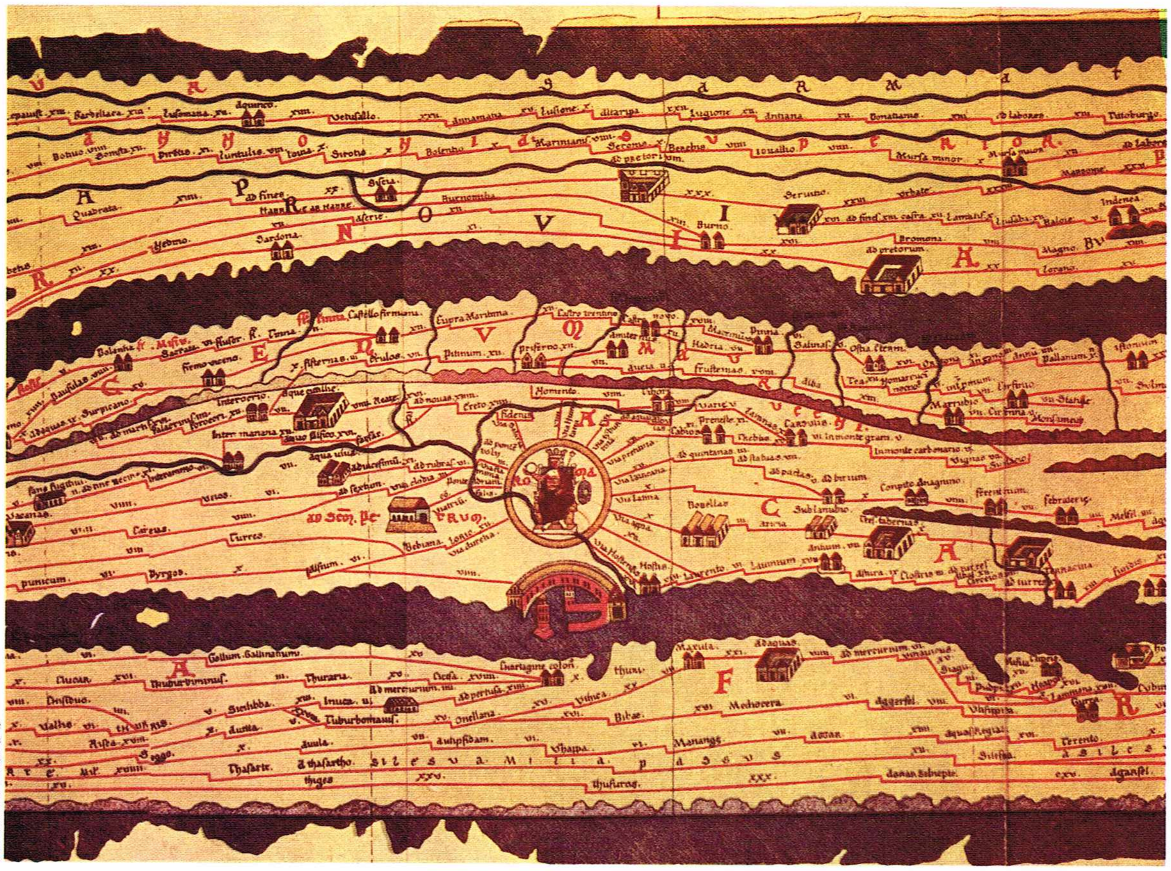

Archives I.G.D.A.

◀ ***Reproduction d'un fragment de la « Table de Peutinger » : Rome, au centre, est indiquée par un cercle.***

pièces ; c'est ainsi que sont vérifiés les pales de turbine et les réflecteurs d'onde pour lesquels les coordonnées spatiales sont déterminées avec une précision de 0,2 mm. Le relevé d'une maquette de carosserie automobile est également réalisé par photogrammétrie, ce qui permet de confectionner aisément les matrices à l'aide desquelles les plaques de tôle seront embouties. Différentes études, de déformation, d'états de surface de modèles hydrauliques, de trajectoires balistiques, nécessitant l'emploi de caméras rapides, ne pourraient être réalisées sans le concours de cette technique.

C'est cependant dans le domaine de l'architecture que la photogrammétrie non cartographique a vu jusqu'à présent son plus grand essor et qu'a été réalisé le plus grand nombre de travaux. Depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale, l'homme a commencé en effet à se tourner vers son passé, soucieux de conserver et de restaurer ce qu'il n'avait pas détruit ; pour cela, il convenait de réaliser un grand nombre de géométraux, de coupes, pour lesquels les performances de la photogrammétrie étaient connues depuis longtemps, et les services de conservation des monuments historiques et l'Unesco ont fait largement appel à ce procédé. Depuis peu, les urbanistes se sont joints aux architectes pour sauvegarder les sites, et, là encore, la confection de perspectives, de géométraux, l'intégration de projets dans un paysage bénéficient d'une technique particulièrement bien adaptée à ce genre d'études. D'année en année, la photogrammétrie apporte son concours aux secteurs les plus divers des activités humaines, et s'enrichit à leur contact.

BIBLIOGRAPHIE

AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY, *Manuel of Photogrammetry,* 3e édition, 1966. — BONNEVAL H., *Photogrammétrie générale,* Collection scientifique de l'Institut géographique national, Eyrolles, Paris, 1972. — JORDAN-EGGERT-KNEISSL, *Handbuch der Vermessungskunde,* Stuttgart, 1972. — OLLIVIER F., *la Topographie sans topographes, Traité de photogrammétrie,* Éditions de la Revue d'optique théorique et instrumentale, Paris, 1967. — ZELLER M., *Traité de photogrammétrie,* Société Wild, Heerbrug, 1948.

CARTOGRAPHIE

Historique

Selon la définition établie en 1966 par l'Association cartographique internationale : « La *cartographie* est l'ensemble des études et des opérations scientifiques, artistiques et techniques intervenant à partir des résultats d'observations directes ou de l'exploitation d'une documentation, en vue de l'élaboration de cartes, plans et autres modes d'expression, ainsi que dans leur utilisation. » Les cartes, en tant que système de transcription graphique des phénomènes géographiques, constituent l'objet essentiel de la cartographie ; le but de cette dernière est, à la fois, la recherche de méthodes et de procédés en vue de l'élaboration et de l'utilisation des cartes et l'étude exhaustive de leur contenu.

Ces définitions mettent en évidence l'aspect scientifique de la cartographie, en soulignent les aspects essentiels et affirment le rôle des cartes comme instruments de recherche scientifique ; en effet, alors qu'elles nous fournissent une représentation de la surface du sol dans ses aspects les plus variés, qu'il s'agisse d'ailleurs du sol terrestre ou de celui d'autres planètes, les cartes constituent, simultanément, un mode d'expression irremplaçable des phénomènes géographiques et des données fournies par les nombreuses sciences qui étudient les informations dans leur répartition spatiale.

Par **carte** au sens général, on entend « la représentation conventionnelle, généralement plane, en positions relatives, de phénomènes concrets ou abstraits, localisables dans l'espace ». La représentation est conventionnelle puisque, d'une part, le passage de la surface physique de la Terre à sa figuration plane comporte d'abord sa projection orthogonale, suivant les verticales, sur un ellipsoïde de référence, puis la transformation des figures de l'ellipsoïde en figures planes, et que, d'autre part, les détails du terrain et les données géographiques sont sélectionnés, schématisés et traduits par des graphismes, signes ou symboles qui matérialisent leurs positions relatives dans l'espace et qui expriment visuellement leurs caractéristiques, leur nature, leur importance, leur valeur numérique, selon des critères bien définis. Les formes et les dimensions des objets représentés sont altérées, sur la

Bibliothèque nationale, Paris

▲ ***Détail d'une carte nautique, dite improprement portulan, exécutée par le Catalan Mecia de Viladestes (1413); c'est un document très intéressant par la précision du tracé des côtes (Paris, Bibliothèque nationale).***

carte, en raison inverse de l'échelle, mais leur situation, leur distribution et leurs rapports mutuels sont mis en évidence.

Plus qu'un document d'inventaire ou qu'une image photographique de terrain, la carte, claire, complète et précise, communique à son lecteur une information géographique traitée et ordonnée en fonction du thème choisi et du but poursuivi par le cartographe; elle constitue à la fois une base de documentation, un moyen d'investigation et un instrument pédagogique, capable d'offrir la synthèse graphique de très nombreuses données analytiques. C'est un moyen de communication et d'expression universel où le lecteur assimile naturellement l'image graphique à l'espace géographique dans lequel il se déplace, ce qui explique l'ancienneté des représentations cartographiques figuratives, probablement antérieures à l'écriture.

Les premières tentatives connues de représentations géographiques étaient fondées sur les seules données incertaines des temps de parcours et des directions relevées lors de déplacements d'un lieu à un autre, la surface terrestre étant considérée comme plane. Il était donc naturel que fussent très rudimentaires et imprécises ces représentations, souvent simples descriptions d'itinéraires et, chez les peuples peu évolués, montages matérialisant la direction et la longueur des voies parcourues.

Mode d'expression de peuples nomades, la cartographie resta toujours liée aux voyages et à l'évolution de l'astronomie, de la géodésie, de la topographie et des instruments. Elle bénéficia également de l'esprit spéculatif des philosophes de la Grèce antique qui, appliquant leur exigence de formulation scientifique générale à la géographie, recherchèrent les lois de l'Univers au-delà de la connaissance du monde limité alors connu. Thalès, dans sa *Cosmologie,* avance la notion concrète de la sphéricité de la Terre et de l'axe terrestre; Anaximandre dessine la première carte du monde connu; Pythagore, Hérodote, Platon, Aristote, Ératosthène, Hipparque, Posidonios, Strabon, Marin de Tyr sont les principaux précurseurs de Ptolémée, qui, au IIe siècle après J.-C., établit les bases de la géographie mathématique et de la cartographie rationnelle. L'utilisation d'un canevas arbitraire de repérage pour les positions géographiques définies par des coordonnées orthogonales, puis l'adoption du réseau géographique marquent les premiers pas sur la voie de progrès ultérieurs, uniquement dus à une meilleure précision géométrique par le perfectionnement des moyens de mesure d'angles et de distances.

En dépit d'un certain développement des méthodes d'arpentage, les Romains n'apportèrent pas une véritable contribution à la cartographie. Le seul ouvrage important, qui constitue un des précieux vestiges de l'Antiquité, fut la fameuse *Carta itineraria,* établie d'après la Table d'Agrippa, elle-même réalisée à partir de l'Itinéraire d'Antonin datant du IIIe siècle après J.-C. Il s'agit d'une représentation graphique stylisée de l'Empire romain, portant indication des itinéraires et réduite à une mince bande qui se développe le long de l'axe de la Méditerranée. Elle fut découverte vers la fin du XVe siècle par Konrad Celtes, bibliothécaire de Maximilien Ier, qui en fit don en 1507 à Konrad Peutinger; elle est restée connue sous le nom de *Table de Peutinger.*

Après les invasions barbares, la culture gréco-latine décline, et, au Moyen Age, les Arabes en sont les seuls dépositaires; alors que l'astronomie et les mathématiques progressent, la cartographie redevient primitive et schématique. Aux XIIe et XIIIe siècles, les croisades, l'emploi de l'aiguille aimantée et les voyages par terre et par mer donnent un nouvel essor à la cartographie et surtout aux cartes de navigation, parmi lesquelles on peut citer : le *Portulan normal,* qui représente tout le bassin méditerranéen, probablement réalisé par les Génois entre 1250 et 1260, et la *Carte pisane* (1300-1311). Le réseau de référence, indépendant du réseau géographique, est alors lié aux divisions de la rose des vents, ou *rhumbs,* et facilite la navigation à la boussole suivant un cap magnétique.

Au XIVe siècle, on voit fleurir de véritables Écoles de cartographie sous la double impulsion des croisades et du commerce, mais la période d'or de la cartographie débute avec la Renaissance.

Du XVe au XVIIe siècle, l'astronomie, la géographie et la cartographie reconquièrent le caractère d'universalité qui avait été le leur dans la période grecque. L'invention de l'imprimerie, les voyages océaniques de Christophe Colomb, Vespucci, Cabot et Magellan, les grands intérêts politiques suscités par les terres nouvelles provoquent une impulsion nouvelle dans le domaine cartographique. La notion de la sphéricité de la Terre, admise alors universellement, impose des conséquences logiques dans le domaine de la géographie, alors que la nécessité d'abandonner le système de navigation à l'estime suscite la recherche de moyens instrumentaux et cartographiques plus rigoureux. On imagine de nouveaux systèmes de projection, et l'on utilise à nouveau les coordonnées géographiques. Les Flamands Mercator et Ortelius inaugurent les grandes collections de cartes modernes et créent les atlas à grande diffusion. Les plus illustres savants de ce temps apportent leur contribution aux progrès de l'astronomie, de la géodésie, de la cartographie.

Au début du XVIIe siècle, le Hollandais Snellius mesure le premier une base géodésique et applique le principe de la triangulation à la détermination des distances et des altitudes, donnant ainsi l'impulsion de départ à l'ère vraiment moderne de la science cartographique. En 1669-70, l'abbé Picard effectue la première mesure de base française dans la région d'Amiens et formule le principe d'une mesure de méridien de Dunkerque à Perpignan.

A partir du XVIIIe siècle, la forme et les dimensions de la Terre sont connues avec une approximation remarquable après les travaux de mesure d'arcs de méridiens effectués au Pérou et en Laponie sous l'égide de l'Académie des sciences. C'est alors qu'est entreprise la préparation des cartes officielles nationales, topographiques et dérivées

à l'exemple de la première d'entre elles : la *carte géométrique de la France* dite *carte de Cassini* (1750-1815).

On mesure ensuite des bases géodésiques, on réalise des systèmes de triangulation de plusieurs ordres, on raccorde les réseaux géodésiques des États limitrophes, et on calcule leurs discordances ; les échelles des levés topographiques s'agrandissent, et les systèmes modernes de représentation altimétrique se développent ; la cartographie topographique se trouve étroitement liée à la géodésie.

Les relations internationales plus fréquentes font sentir la nécessité de disposer d'au moins une carte internationale de type unifié, et l'on parvient à un accord pour la réalisation de la *carte internationale du monde* au 1/1 000 000 et de la *carte aéronautique du monde* à la même échelle.

La seconde moitié du XIX^e siècle est caractérisée par l'apparition et le développement des études photogrammétriques qui devaient aboutir à l'avènement de la photogrammétrie aérienne, méthode actuelle et universelle d'établissement des minutes cartographiques.

Aujourd'hui, les pays les plus évolués possèdent des cartes nationales à grande ou moyenne échelle et des cartes dérivées qui répondent aux principaux besoins ; l'activité cartographique intense qui se manifeste dans les pays en voie de développement concerne de nombreux secteurs de l'activité humaine qui exigent des études minutieuses du terrain et une définition planimétrique et altimétrique de plus en plus précise. Des cartes à grande échelle se révèlent nécessaires pour la satisfaction des besoins les plus divers (ouvrages de génie civil, recherches scientifiques, demandes industrielles et administratives), tandis que la cartographie déborde du cadre terrestre pour aborder le problème de représentation de la Lune, première et audacieuse étape vers la cartographie spatiale.

Systèmes de représentation

Représenter la surface mathématique de la Terre sur un plan, c'est-à-dire de la manière la plus commode et la plus pratique pour un utilisateur, sans hiatus et sans superpositions, constitue un problème très ancien, à l'étude duquel s'étaient déjà attachés Strabon, Dicéarque, Marin de Tyr, Ptolémée, etc. Ce problème ne peut être intégralement résolu ; aussi a-t-on recours à des compromis géométriques qui permettent de réduire les altérations, mais non de les éliminer. En effet, alors que la somme des angles d'un triangle plan est égale à 180°, celle d'un triangle sphérique dépasse les 180° d'une quantité appelée *excès sphérique*.

Les nécessaires compromis deviennent acceptables grâce aux *systèmes de représentation plane*, qui, utilisant des *formules de correspondance* appropriées avec le plan, permettent de tracer sur la carte le réseau géographique et la position relative des points sur le terrain, après la projection orthogonale de ces mêmes points sur la surface de l'ellipsoïde de référence.

L'opération de passage de la figure de la surface terrestre à la figure plane correspondante est plus facile si l'on encadre les éléments de la figure dans un réseau géométrique approprié. Ce dernier constitue précisément le *réseau géographique :* il est formé par les *méridiens* et les *parallèles*, cercles capables de déterminer un système de *coordonnées géographiques (latitude et longitude)*, qui permettent de déterminer la position planimétrique des points sur la surface terrestre.

Les valeurs des coordonnées géographiques, reportées sur le plan, définissent les positions des points par l'intermédiaire du système des coordonnées cartésiennes. Mais, pour définir un point dans l'espace, il faut un troisième élément, qui est la distance du point à une surface de niveau prédéfinie (niveau moyen de la mer), dont la mesure correspond à la *cote altimétrique*.

Tout système de représentation plane vise à établir avec simplicité et précision la correspondance entre les mailles du réseau géographique, donc entre les figures de la surface terrestre, et les mailles figurées sur la carte, et *vice versa*. Mais la similitude ne s'obtient pratiquement que pour les zones très limitées et jamais pour des régions étendues. Pour atteindre à l'exactitude mathématique, un système de représentation devrait être : *conforme* (ou *autogonal*, ou *orthomorphique*), c'est-à-dire capable de reproduire sans altérations les valeurs angulaires ; *équivalent* (ou *authalique*), c'est-à-dire capable de

British Museum, Londres

▲ Mappemonde de Mercator (1587) [Londres, British Museum]. Les mappemondes ont des caractéristiques similaires à celles des planisphères et représentent le globe terrestre sur un plan en deux hémisphères distincts. Les planisphères et les mappemondes trouvent un large emploi dans les atlas.

conserver le rapport entre les surfaces. Aucun système ne peut être à la fois conforme et équivalent, aucun ne conserve les longueurs, mais certains, dénommés *aphylactiques*, compensent au mieux les diverses altérations ; dans leur nombre, on distingue les systèmes équidistants qui conservent les longueurs le long des méridiens. Il n'existe donc pas de solution unique ; aussi a-t-on imaginé des systèmes multiples afin de rechercher des caractéristiques utiles aux différents cas.

A la base de tous les systèmes, on trouve l'ancienne notion de la figure perspective du territoire, que l'on suppose observé à partir d'un point de vue convenable et que l'on projette sur une surface plane ou courbe, mais développable en plan. Les différents systèmes de cette perspective pure sont ou peuvent être considérés comme des modifications adoptées pour corriger certaines altérations nuisibles dans une représentation donnée, pour répondre à certaines exigences, ou pour obtenir une plus grande facilité de construction.

Au total, dans une classification sommaire, on peut classer les systèmes de représentation plane en :

— **projection vraie** ou **pure**, qui résulte de la projection géométrique du réseau géographique de la sphère sur une surface plane *(projections azimutale, zénithale ou perspective)*, ou sur une surface développable *(projections cylindrique, conique, polyédrique)*. La surface plane peut être tangente aux pôles *(projection polaire)*, à l'équateur *(projection équatoriale)* ou à tout

I.G.D.A.

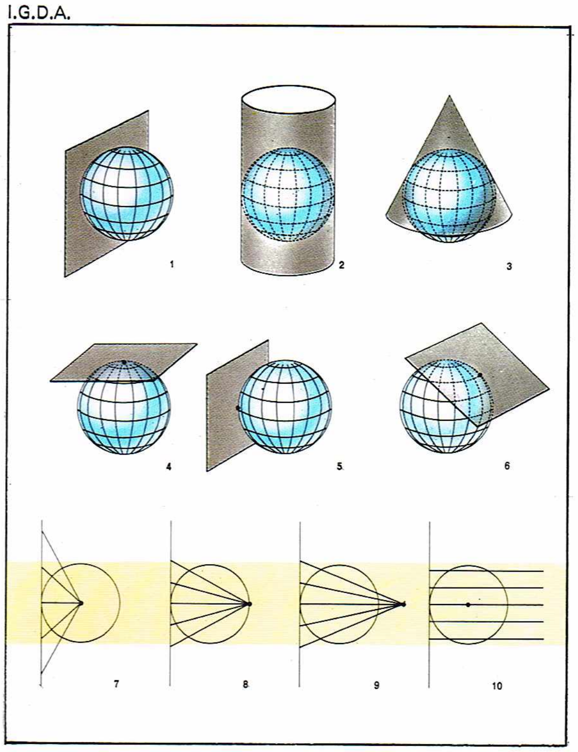

◄ Classification des projections cartographiques : 1, projection azimutale ; 2, projection cylindrique ; 3, projection conique ; 4, projection polaire ; 5, projection méridienne ou équatoriale ; 6, projection oblique ; 7, projection gnomonique ; 8, projection stéréographique ; 9, projection à point de vue extérieur à la sphère ; 10, projection orthographique.

▶ *Page ci-contre, carte géographique de la France, établie à l'échelle de 1/5 000 000.*

autre point *(projection oblique)*. Le centre de projection peut être supposé situé au centre de la Terre *(projection gnomonique)*, sur la surface terrestre *(projection stéréographique)*, en dehors de celle-ci ou à l'infini *(projection orthographique)*;

— **projections** dites improprement **modifiées**; il s'agit des projections qui, plus que les précédentes, répondent à des buts précis : *projections pseudo-perspectives, pseudo-coniques* et *pseudo-cylindriques;*

— **systèmes conventionnels**; ils définissent analytiquement la correspondance entre le réseau géographique et sa représentation, et prennent habituellement le nom de leur inventeur.

Le choix du type de projection le mieux adapté pour une carte comporte des difficultés qui augmentent avec la surface considérée et en fonction de l'échelle. D'autres facteurs interviennent dans le choix : l'extension en latitude ou en longitude du territoire à représenter, sa position géographique, les projets en vue desquels est rédigée la carte.

Les systèmes de représentation plane se réfèrent toujours à des figures terrestres envisagées comme de grands ensembles. Pour la représentation de l'orographie, de l'hydrographie et de la planimétrie, il faut le concours du topographe et du cartographe, qui, après avoir construit sur le plan le réseau géographique selon un système de projection convenable, y insèrent la figuration des différents détails en tenant compte de leur position géographique respective et des graphismes conventionnels appropriés à leur identification.

Aux problèmes déjà cités s'ajoutent les problèmes relatifs à l'art graphique, la reproduction et l'impression étant les étapes finales de l'édition de toute carte.

Classification des cartes

Du fait que les cartes ont des buts, des dimensions et des représentations divers selon les usages auxquels elles sont destinées, les critères de classification sont multiples et variés.

Le critère le plus communément adopté tient compte de l'**échelle,** qui est le rapport dimensionnel entre une longueur donnée sur la carte et la longueur correspondante sur le terrain. Ainsi on distingue souvent :

— les *cartes géographiques,* ayant des échelles de 1/1 000 000 et plus, qui donnent les caractéristiques d'ensemble des grandes divisions naturelles et politiques de la Terre, avec les principaux éléments orographiques, hydrographiques et humains;

— les *cartes chorographiques,* dont les échelles vont de plus de 1/100 000 jusqu'à 1/1 000 000, qui représentent les éléments naturels et les phénomènes humains avec un détail plus grand;

C. Dani

▼ *Carte en relief des États-Unis réalisée en matière plastique par l'Institut géographique De Agostini de Novare.*

— les *cartes topographiques,* dont les échelles sont comprises entre 1/10 000 et 1/100 000, qui fournissent une représentation fidèle du terrain et décrivent les détails naturels ou artificiels en aussi grand nombre et avec autant d'exactitude que l'échelle le permet;

— les *plans topographiques,* dont les échelles sont inférieures à 1/10 000, qui fournissent encore plus de précision et de détails; de ce fait, elles ont toujours un but technique; cette catégorie comprend les *plans parcellaires,* qui donnent les délimitations des propriétés privées.

Des cartes topographiques de base (cartes issues directement des levés du terrain), on tire les *cartes dérivées,* dont les échelles plus petites s'étagent jusqu'aux valeurs des échelles géographiques; cette opération s'effectue par *sélection* de certains détails et *généralisation* structurale et conceptuelle du contenu de la carte.

Du point de vue de leur **contenu** et de leurs **buts,** les cartes peuvent être classées en cartes topographiques, cartes thématiques et cartes spéciales ou techniques.

— Les *cartes topographiques* (ou *normales,* ou *générales*) répondent à une exigence unique : représenter le terrain en donnant le plus grand nombre possible d'informations; pour cette raison, on les considère comme *cartes fondamentales.*

— Les *cartes thématiques* fournissent des représentations conventionnelles pour un thème ou un sujet spécialisé, afin d'illustrer des situations et des rapports de phénomènes géographiques sur le plan qualitatif et quantitatif.

— Les *cartes spéciales* ou techniques sont destinées à satisfaire des besoins déterminés, qui exigent parfois des systèmes de représentation particuliers : par exemple, les cartes de navigation, les cartes aéronautiques, etc.

Certains auteurs englobent sous la dénomination générale de « cartes spéciales » les cartes thématiques. Les unes et les autres répondent à l'exigence actuelle de plus en plus grande de la spécialisation. En effet, sur un fond topographique, chorographique ou géographique et à l'aide de représentations particulières, de figurations conventionnelles, de coloris et d'expressions graphiques (diagrammes, cartogrammes, etc.), elles peuvent fournir une illustration claire de différentes données scientifiques ou statistiques dans une synthèse cartographique appropriée. Les possibilités modernes d'expression graphique permettent la réalisation de cartes hautement spécialisées, comme les cartes géomorphologiques, clinographiques, forestières, etc., qui sont venues s'ajouter aux cartes du passé, que l'on distinguait déjà en fonction de leurs caractéristiques particulières, comme les cartes orographiques, hydrographiques, politiques, administratives, économiques ethnographiques, etc.

Aux différents types de cartes cités, il faut ajouter d'autres représentations particulières :

— les *planisphères* donnent une image plane, à petite échelle et selon des projections diverses, de l'ensemble du globe terrestre;

— les *mappemondes,* qui ont des caractéristiques semblables à celles des planisphères, représentent le globe terrestre sur un plan en deux hémisphères distincts;

— les *globes* donnent une image sphérique de la Terre à petite échelle;

— les *cartes en relief,* représentations cartographiques à trois dimensions, imprimées sur des feuilles de matière plastique et soumises à un traitement particulier pour le moulage tridimensionnel des feuilles, sont devenues d'un usage courant depuis quelques années et remplacent utilement les classiques *maquettes* en plâtre.

Les planisphères et les mappemondes trouvent une large diffusion, surtout dans les *atlas,* recueils de cartes géographiques ou thématiques, et de tableaux statistiques destinés à la consultation et à des études ayant des rapports directs ou indirects avec la géographie. Dès l'Antiquité, Ptolémée, Ortelius et d'autres auteurs ont réalisé des atlas constituant des recueils cartographiques. Leur nom fut proposé au XVI^{e} siècle par Mercator, qui évoquait en le choisissant le rôle mythologique d'Atlas, condamné à supporter le monde; ce nom, qui est utilisé encore aujourd'hui, n'est entré dans l'usage commun qu'au XVIII^{e} siècle. Les atlas constituent des ouvrages très importants, dont la fonction est essentielle dans de nombreux domaines de la culture et de la science. La valeur d'un atlas dépend du niveau scientifique et technique de son contenu, du choix judicieux des échelles,

I.G.D.A.

© Istituto Geografico De Agostini S.p.A. Novara

Échelle 1 : 5 000 000

0 50 100 150 km

Projection conique modifiée

Institut géographique militaire

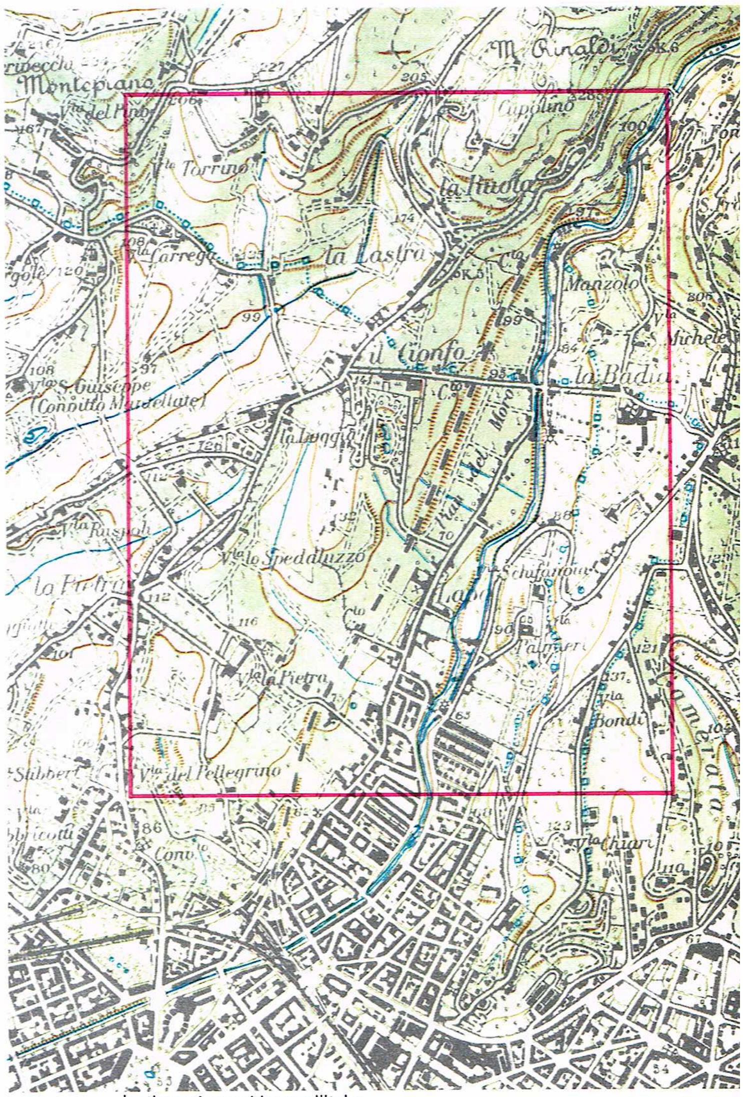

Institut géographique militaire

▲ ***A gauche, reproduction sur pellicule couleur, exemple de photogrammétrie aérienne, de la région de Florence et de ses environs, délimitée par le cadre rouge sur la carte topographique, à droite, établie au 1/25 000.***

de sa clarté, des facilités de comparaison qu'offrent les différentes planches. Celles-ci, en effet, contiennent de nombreuses illustrations thématiques, venant s'ajouter aux planches physiques et politiques traditionnelles.

Cartographie topographique

Toutes les cartes sont issues de la cartographie topographique, qui est la science, la technique et l'art de traduire en représentation graphique à grande et à moyenne échelle la surface terrestre ; elle exploite les données de la géodésie, relatives aux dimensions de la Terre, et de la topographie ou de la photogrammétrie qui décrivent les aspects et la distribution dans l'espace des phénomènes naturels et humains de sa surface. La cartographie topographique est fondée sur un ensemble de méthodes scientifiques, mathématiques et artistiques. Elle constitue le patrimoine cartographique fondamental de chaque État.

Les plans appartiennent à la cartographie topographique. Leurs échelles permettent le report de tous les détails dans une représentation exclusivement géométrique destinée à un usage technique. Ils sont essentiellement planimétriques, mais, pour des besoins particuliers, ils peuvent être complétés par des données altimétriques.

Les cartes topographiques sont obtenues exclusivement par les levés du terrain exécutés à l'aide de méthodes soit classiques, soit modernes, comme la photogrammétrie. Elles comprennent la représentation cartographique proprement dite, constituée par le dessin de la planimétrie et de l'orographie du terrain, le canevas de référence et les indications marginales. Tous les objets géographiques, qu'il s'agisse de phénomènes physiques ou humains, sont représentés avec le degré d'exactitude autorisé par l'échelle. A cet égard, il faut rappeler que, par « exactitude cartographique », on entend la correspondance géométrique entre la représentation graphique et la réalité. On ne peut donc pas parler de « précision », terme qui s'applique habituellement aux représentations géographiques et mathématiques, puisque les critères et les moyens qui président à la construction des cartes, bien qu'ils soient scientifiquement et techniquement parfaits, comportent toujours des altérations inévitables. L'exactitude impose de tenir compte de manière harmonieuse des données planimétriques et altimétriques ; elle sera d'autant plus grande que l'on aura davantage recours à la *symbolisation homométrique,* c'est-à-dire au report en projection sur la carte des détails naturels.

Les conventions de représentation

Les cartes représentent le terrain comme s'il était observé d'en haut. Le problème qui consiste à rendre sur une surface bidimensionnelle, c'est-à-dire sur une feuille de papier, le relief constitué par les éléments tridimensionnels de la surface terrestre, est résolu à l'aide de conventions géométriques (courbes de niveau, teintes hypsométriques, etc.) et par la recherche de l'effet plastique, autrement dit en essayant de donner la sensation visuelle du relief, sans tenir compte de l'exactitude géométrique (hachures, estompage, etc.).

Quelle que soit la façon de procéder, la représentation morphologique et altimétrique du terrain est toujours une opération très délicate. Souvent, pour améliorer la perception directe de la morphologie, on recourt à des méthodes combinées, associant, par exemple, courbes de niveau et estompage, courbes et hachures, courbes-hachures et estompage, courbes-estompage et teintes hypsométriques. Le choix d'un système mixte dépend de l'échelle et de l'emploi auquel la carte est destinée. Les cartes topographiques utilisent normalement les courbes

de niveau ; les cartes au 1/50 000 et 1/100 000 utilisent le système mixte des courbes et de l'estompage.

● Les *courbes de niveau* ou *isohypses*. Elles furent adoptées vers la première moitié du XIXe siècle. Il s'agit de lignes géométriques continues, monochromes, que l'on obtient en joignant tous les points du terrain qui ont la même altitude. On peut s'en faire une idée concrète en imaginant les reliefs coupés par des plans horizontaux successifs, parallèles au niveau de la mer et équidistants entre eux. Les intersections de ces plans avec le terrain, projetées sur le plan de dessin à une échelle donnée, constituent un ensemble de lignes courbes qui, par leur mouvement général, représentent les formes du terrain.

L'intervalle entre les différents plans, et donc entre les courbes, est appelé *équidistance*. Sa valeur est généralement inversement proportionnelle à l'échelle, mais elle peut varier aussi en fonction du but de la carte et de la configuration physique du terrain. Étant donné qu'elle doit être constante, les courbes seront plus rapprochées lorsque le terrain sera abrupt et plus espacées lorsque la pente sera douce. L'expérience a montré que l'équidistance la plus efficace est l'équidistance qui correspond, en mètres, au dénominateur de l'échelle de la carte, divisé par 5 000.

Le système des courbes de niveau, fondé sur un principe géométrique, exploite aussi la capacité naturelle de l'œil de percevoir simultanément le rapprochement et l'espacement d'un certain nombre de lignes, ce qui, comme un jeu de lumières et d'ombres, donne une impression de relief. Les courbes permettent en outre la solution de différents problèmes, comme la construction de profils, le calcul de l'altitude d'un point non coté de la carte, de la pente d'une portion de terrain ou d'une route, de la distance réelle entre deux points, etc.

Pour augmenter la clarté et la perception visuelle immédiate des rapports altimétriques, les courbes de niveau n'ont pas toutes la même épaisseur, mais on trace, pour un nombre déterminé de lignes minces *(courbes ordinaires)*, une ligne plus épaisse *(courbe maîtresse)*. Pour la représentation de terrains aux formes incertaines et aux pentes douces, où les courbes normales seraient trop espacées et inexpressives, on recourt aux *courbes intercalaires* ou *auxiliaires*, en tiretés, pour rendre des détails topographiquement importants.

● Les *courbes bathymétriques*. Une fonction analogue à celle des courbes de niveau est dévolue aux courbes bathymétriques, qui servent à représenter les formes des fonds marins et lacustres. Elles joignent des points d'égale profondeur cotés à l'aide de sondeurs et constituent un élément essentiel des cartes de navigation établies par le soin du Service hydrographique et océanographique de la Marine.

● *Le plan coté*. Lorsque le terrain est entièrement plat, les courbes perdent leur signification ; on recourt alors au plan coté : on cote de nombreux détails évidents, ce qui permet d'évaluer également les petites dénivellations. Ce système trouve une application utile dans les cartes à grande échelle destinées aux travaux d'assainissement, aux aménagements hydrauliques, etc.

● *Les hachures*. Les hachures sont un artifice technique qui remonte en fait au XVIIe siècle ; cet artifice a pour but de donner une valeur géographique aux pentes, grâce à une série de traits de longueur et d'épaisseur variables, disposés le long des lignes de plus forte pente du terrain. Les petits traits, plus denses et plus épais pour les pentes plus abruptes, permettent de réaliser un dessin ombré de l'orographie qui donne un rendu plastique du relief. L'éclairement du terrain, que l'on suppose réalisé soit d'en haut, donc en *lumière zénithale*, soit du nord-ouest, donc en lumière oblique, confère grâce à son jeu d'ombres et de lumières un aspect artistique à la représentation. Mais il s'agit d'une méthode très laborieuse qui n'est plus très employée aujourd'hui.

● *L'estompage*. Le système de l'estompage est largement utilisé. Complétant les autres méthodes de représentation, il associe à la précision géométrique de ces dernières sa propre efficacité artistique. Il consiste à mettre en valeur les formes orographiques par des ombres traduisant le modelé du terrain considéré, supposé éclairé du nord-ouest (éclairement en lumière oblique).

● *Les teintes hypsométriques*. Dans les cartes à petite échelle, dans lesquelles l'emploi des courbes de niveau n'est pas possible à cause de la schématisation des formes, on recourt à la méthode des teintes hypsométriques, adoptée dès 1842. En utilisant des teintes conventionnelles différentes ou des tonalités variées d'une même teinte pour les bandes altimétriques comprises entre des courbes de niveau de valeurs déterminées, on parvient à donner l'impression de l'élévation progressive du terrain, des différences ou de la similitude d'altitude des diverses régions par rapport au niveau de la mer. L'effet plastique que l'on obtient néglige certes les détails de l'orographie et le mouvement des pentes, impossibles du reste à rendre avec des échelles supérieures à 1/250 000, mais renforce l'impression d'ensemble. L'emploi des couleurs se révèle particulièrement utile dans les représentations orographiques d'ensemble, grâce à l'effet suggestif immédiat des couleurs qui mettent tout naturellement en évidence ce que l'on veut souligner.

● *Les photoplans*. Pour la représentation de terrains plats, on peut utiliser un type particulier de documents cartographiques, appelés photoplans : les éléments planimétriques sont obtenus à partir d'une mosaïque de photographies aériennes, géométriquement redressées à l'aide d'instruments spéciaux, les *redresseurs* ; l'altimétrie, obtenue par nivellement direct, est exprimée par un plan coté. Ce système ne peut être utilisé pour des terrains accidentés si l'on dispose uniquement de redresseurs ordinaires. En effet, les distorsions des images photographiques produites par les perspectives différentes des reliefs par rapport au point de vue, et les différences d'échelle des photogrammes, dues aux différences d'altitude, ne permettent pas un report géométrique des détails ; on fait alors appel à des *orthophotographies*.

● *La représentation planimétrique*. Elle consiste à reporter en projection sur la carte les détails naturels et ceux qui sont dus à l'homme, lorsqu'il est possible de les reproduire topographiquement dans leurs formes et leurs dimensions ; la couverture du sol et les cultures en font partie. Cette représentation permet de *s'orienter sur le terrain*, c'est-à-dire d'établir en tout point de ce dernier la correspondance entre détails graphiques et détails réels visibles ; elle permet également d'effectuer des mesures de distances, d'apprécier les caractéristiques et l'allure des itinéraires, de connaître les éventuelles ressources naturelles et les activités de l'homme dans la zone considérée.

Complétée par la représentation de l'orographie et de l'hydrographie, la carte topographique offre une vue d'ensemble réelle et complète du milieu géographique en général et montre, en particulier, les caractéristiques du

I.G.D.A.

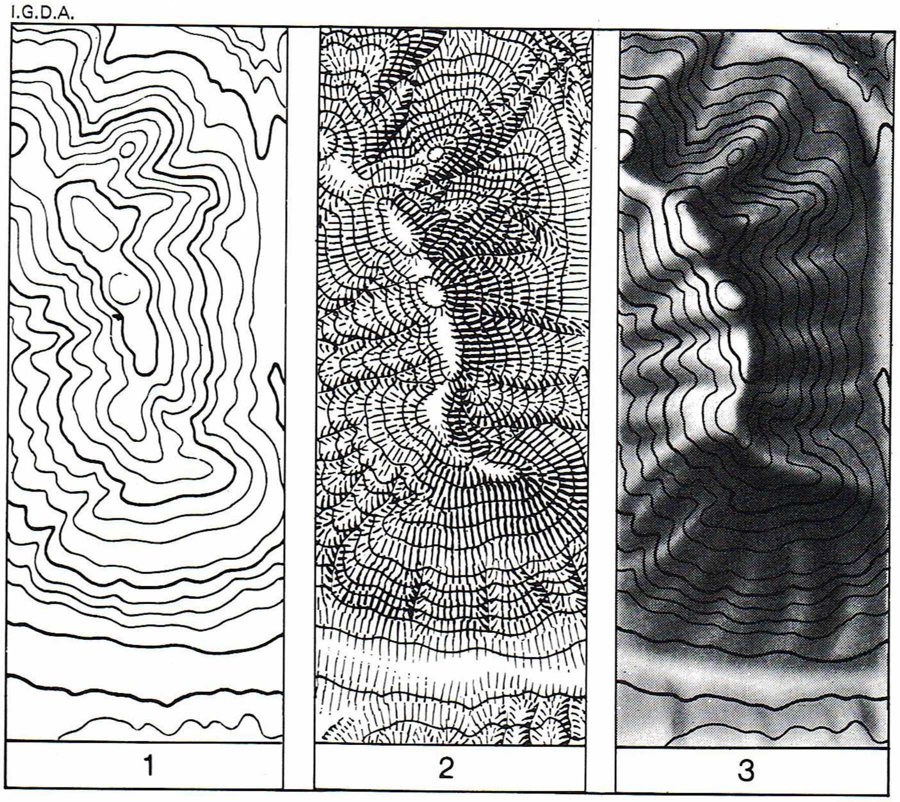

▼ ***Systèmes de représentation orographique : 1, courbes de niveau ; 2, hachures ; 3, courbes de niveau et estompage.***

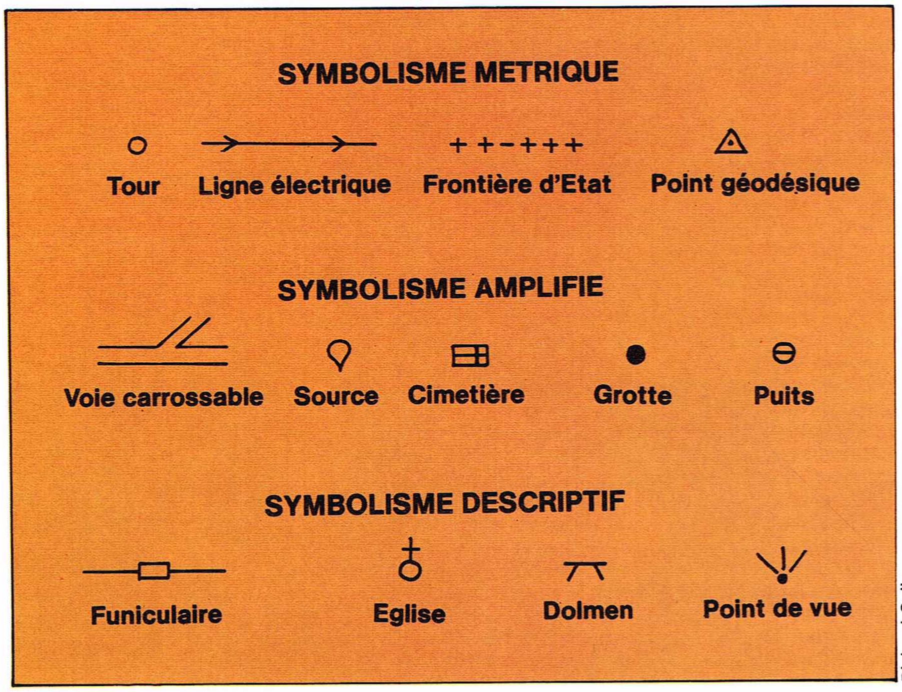

Richard Colin

▲ *Quelques exemples de symbolisme : homométrique, amplifié, descriptif.*

réseau routier. Le réseau hydrographique mérite d'être considéré à part; il intéresse la planimétrie, surtout dans sa projection horizontale, mais, à sa naissance, il intéresse également l'orographie, car les petites ramifications marquent les formes du terrain, auxquelles elles peuvent même apporter des modifications. On le représente habituellement en bleu, afin de mieux le distinguer.

Les signes conventionnels

Tous les détails topographiques sont représentés sur les cartes au moyen de graphismes et de symboles figuratifs appelés *signes conventionnels.* Ils doivent immédiatement évoquer l'idée du détail auquel ils se rapportent et ses caractéristiques essentielles. On peut les classer en deux groupes : le premier se compose des signes destinés aux ouvrages de l'homme et sert à indiquer non seulement la présence et la forme de l'objet, mais aussi son caractère et sa destination ; le second, qui s'applique à la représentation des objets topographiques naturels, est formé de figures inspirées de ces objets et de signes adaptés à la description orographique et morphologique. La nécessité de représenter le terrain par des images qui, si ressemblantes qu'elles soient pour évoquer le rapport entre graphisme et réalité physique, diffèrent néanmoins de celle-ci, commença à se manifester seulement entre la fin du XVIII^e siècle et le début du XIX^e siècle. Depuis, le nombre des signes conventionnels a augmenté, parallèlement aux possibilités figuratives des cartes et aux informations qu'on veut y trouver. Mais, afin d'en permettre un maniement aisé, le nombre de ces signes ne doit pas être excessif, tout en donnant le plus d'informations possible.

Le *symbolisme,* qui a toujours un caractère imitatif, est dit *homométrique* lorsqu'on reporte sur le plan de la carte la projection des détails, *amplifié* lorsque l'échelle ne permet pas le report métrique, *descriptif* lorsque la nature des détails est exprimée à l'aide de signes ou de coloris qui améliorent la valeur d'information de la représentation sans en altérer la valeur métrique.

Les signes conventionnels varient d'un pays à l'autre, tout en conservant cependant une certaine analogie. Sur le plan international, on tend aujourd'hui à les unifier dans toute la mesure du possible; cette tendance s'est concrétisée dans la carte du monde au millionième et dans les cartes aéronautiques. L'emploi des signes conventionnels pour les cartes topographiques officielles est régi par des règles précises, dont une synthèse est reproduite dans la légende située en marge de chaque carte.

La *représentation des rochers* constitue un cas particulier de symbolisme, qui associe une recherche artistique aux exigences géométriques, afin de donner une représentation naturelle de la morphologie. Il s'agit en effet de passer de la vision optique à l'interprétation graphique; pour cela, on combine la perspective panoramique sur le plan vertical et la projection topographique sur le plan horizontal. On observe aujourd'hui une tendance à supprimer le dessin des rochers et à se servir uniquement de courbes de niveau plus ou moins denses, rapprochées et sinueuses, pour en modeler les formes et les aspérités. Ce système, géométriquement précis, est plus adapté aux cartes techniques à grande échelle, car, dans les autres, il sacrifie un des éléments les plus efficaces pour traduire la réalité de manière artistique, élément particulièrement important pour la cartographie topographique de zones montagneuses étendues.

La toponymie

La toponymie, c'est-à-dire l'ensemble des noms contenus dans une carte, a pour fonction de donner un langage expressif à celle-ci. Les *toponymes* servent à définir et à individualiser des détails physiques ou dus à l'activité humaine; leur importance très grande ne se limite pas à ce rôle, mais s'étend aussi au domaine linguistique, puisque les cartes topographiques fondamentales (y compris les plans cadastraux) confèrent une valeur officielle aux noms, les consacrent dans l'usage et les transmettent dans le temps. Il appartient aux topographes de les relever sur le terrain, d'en préciser l'orthographe, et de choisir leur emplacement sur la carte; ces différentes opérations font partie de la compilation des cartes topographiques.

Grâce à un choix judicieux des types et des dimensions des caractères, la toponymie précise la valeur topographique des détails auxquels les noms se rapportent, permet leur classement par importance naturelle, géographique et logistique, et permet d'interpréter les rapports naturels et cartographiques que les détails représentés possèdent avec les différentes activités humaines du point de vue administratif et politique. Les toponymes doivent être inscrits sur les cartes d'après des règles spéciales, avec le souci d'une distribution équilibrée et d'une correspondance précise, de telle manière que la carte gagne en harmonie et en clarté. Leur emplacement devra permettre d'identifier de manière certaine les détails auxquels ils se rapportent, qu'il s'agisse de points, de lignes ou de surfaces. Ces mêmes critères s'appliquent à l'écriture des cotes.

Pour les cartes à petite échelle, la transcription fidèle et rigoureuse des toponymes est une tâche qui incombe aux cartographes. Elle exige une sélection minutieuse et impose une plus grande responsabilité en matière de documentation linguistique; en effet, si, pour les cartes topographiques, un tel travail a des répercussions sur le patrimoine toponymique national, pour les cartes géographiques et pour les planches d'atlas, il intéresse le patrimoine toponymique et les traditions linguistiques d'autres États, et la culture géographique générale.

Les révisions

Réviser une carte signifie porter sur celle-ci tous les détails topographiques nouveaux ou les modifications importantes qui se sont produites sur le terrain pendant la période qui a suivi la date du levé ou de la préparation de la carte. Une carte, pour remplir pleinement son but, se doit notamment d'être actualisée. De ce fait, il est indispensable de procéder, au moment de la création d'une carte, quels que soient le but et le type, à un bilan préalable du coût de son actualisation permanente. Celle-ci se révèle indispensable à cause des modifications incessantes apportées au paysage par les agents naturels, par l'activité de l'homme (pour les cartes topographiques) et par les événements politiques (surtout pour les cartes géographiques). Il est évident que, plus une représentation est détaillée, plus sa mise à jour sera fréquente et onéreuse.

Pour les cartes topographiques, on fait appel à des photographies aériennes récentes pour la restitution photographique, et à des opérations sur le terrain pour le report géométrique sur une minute de la carte existante des nouveaux détails et des modifications survenues. Les révisions sont générales lorsqu'elles s'appliquent à tous les détails, ou partielles, si elles concernent uniquement les éléments les plus importants.

La révision d'une carte topographique est une opération aussi délicate que le levé et exige un personnel expérimenté pour que l'insertion de nouveaux détails ou la suppression de ceux à éliminer n'entraîne pas une altération de l'exactitude géométrique.

La révision des cartes chorographiques et géographiques s'opère à partir des éléments tirés des cartes topographiques ou d'autres documents.

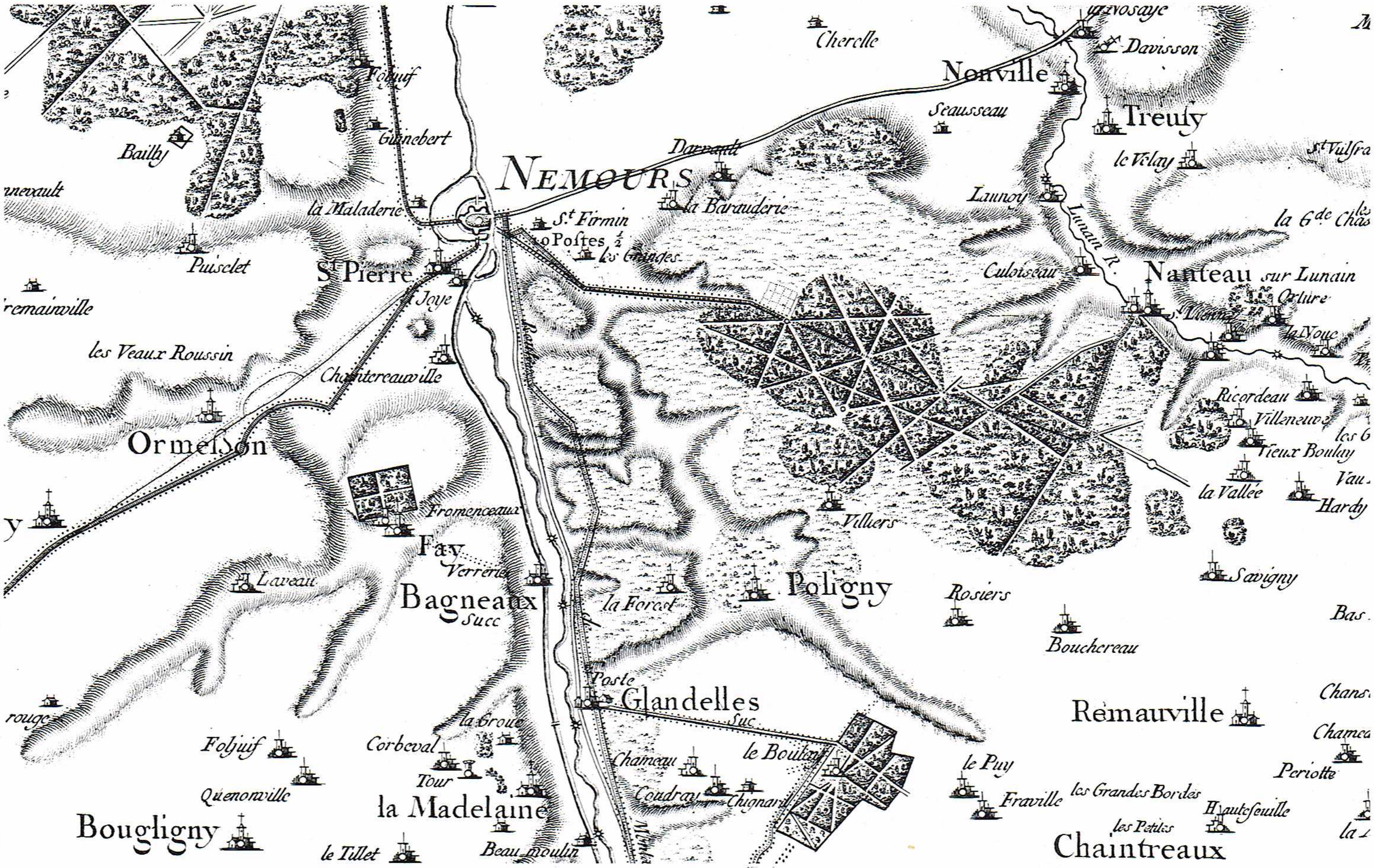

▲ ***La carte dite « de Cassini » comporte 182 feuilles, dont la réalisation, débutée en 1747 à la demande de Louis XV, se poursuivit jusqu'en 1815. Ici, un détail de la feuille nº 7 de Fontainebleau, région de Nemours.***

Les cartes de France

Après les dessins primitifs dépourvus de toute réalité, on voit éditer un certain nombre de représentations cartographiques inspirées de Ptolémée pour leurs formes générales, mais améliorées localement par exploitation de portulans et de croquis d'itinéraires ; la *Description de toute la Gaule*, dressée et gravée sur bois par Oronce Fine au début du XVIe siècle, est l'œuvre la plus marquante de cette époque. Le *Théâtre françois*, publié en 1594 par Bouguereau, et la *Charte de la France*, dressée par La Guillotière et publiée en 1613, font la synthèse de diverses cartes régionales établies séparément et sans canevas d'ensemble. Les formes générales s'améliorent mais, en l'absence de mesures des longitudes, l'extension de la France dans le sens est-ouest est très exagérée.

L'Académie des sciences, créée par Colbert en 1666, devait, dans l'esprit du ministre de Louis XIV, remplir le rôle d'établissement cartographique officiel, et elle fut chargée de déterminer les coordonnées géographiques d'un certain nombre de points du territoire, de mesurer un arc de méridien par triangulation et d'établir, à titre d'essai, une carte des environs de Paris rattachée à ce canevas et susceptible d'être étendue à l'ensemble du pays. Dès 1670, la première partie de ce programme est réalisée par l'abbé Picard, J.-D. Cassini et La Hire ; elle permet l'établissement d'une carte générale de la France corrigeant les erreurs de position des cartes antérieures ; elle est présentée à l'Académie en 1682. L'arc de méridien d'Amiens à La Ferté-Alais, mesuré par Picard, fournit le canevas géodésique sur lequel s'appuie la Carte des environs de Paris, publiée en 1678 à l'échelle d'une ligne pour 100 toises (1/86 400). L'idée d'une carte détaillée du royaume semble abandonnée, faute d'une triangulation d'ensemble qui ne sera réalisée qu'au siècle suivant, mais des considérations stratégiques imposent des levés régionaux sans canevas général et la publication de la Carte des monts Pyrénées par Roussel et La Blottière, et de la Carte du Haut-Dauphiné et du comté de Nice par Villaret.

Ce n'est qu'en 1747 que Louis XV charge Cassini de Thury, directeur de l'Observatoire, de l'exécution de la première carte topographique de la France à l'échelle d'une ligne pour 100 toises ; les travaux débutent en 1750 mais, la subvention des pouvoirs publics étant supprimée dès 1756, Cassini ne peut poursuivre sa tâche qu'en constituant une société à actions gérée par l'observatoire de Paris ; des difficultés financières, la lenteur des travaux de lever et de gravure sur cuivre, les avatars de la société pendant la période révolutionnaire retardent l'achèvement des dernières feuilles, qui ne paraissent qu'en 1815. La carte dite « de Cassini » comporte 182 feuilles qui, malgré les défauts dus aux délicates conditions de travail et à l'étalement des opérations de gravure, n'en constituent pas moins une œuvre remarquable pour l'époque.

De 1792 à 1799, les astronomes Méchain et Delambre mesurent et calculent l'arc de méridien Dunkerque-Barcelone qui fournit les éléments définissant le *mètre*, base du système métrique décimal. Pendant les campagnes napoléoniennes, les plans du génie militaire et les cartes des territoires conquis permettent d'affiner et de perfectionner les méthodes topographiques ; aussi, en 1817, on songe à refaire la carte de Cassini, qui devient insuffisante pour les services publics : une commission royale, présidée par Laplace, décide que la méridienne de Paris constituera l'ossature d'une nouvelle triangulation et qu'une carte nouvelle sera établie.

La carte dite « de l'état-major » parce qu'elle fut établie par des officiers et des ingénieurs géographes intégrés dans le corps de l'état-major fut réalisée de 1818 à 1882 ; les minutes avaient été dessinées au 1/40 000, et le relief figuré par des courbes de niveau plus figuratives que topométriques ; l'édition, qui devait être au 1/50 000, fut fixée au 1/80 000 pour des raisons d'économie ; le relief est figuré par des hachures ; le système de représentation plane, résultat d'un compromis entre les divers utilisateurs, est le système équivalent de Bonne ; le procédé de reproduction utilisé, l'impression en taille-douce, fait intervenir la gravure sur cuivre qui procure une grande finesse de trait mais impose l'édition monochrome, de longs délais d'exécution, des graveurs très habiles et une extrême difficulté pour la mise à jour des planches. La carte comporte 273 feuilles rectangulaires, couvrant chacune 64 × 40 km.

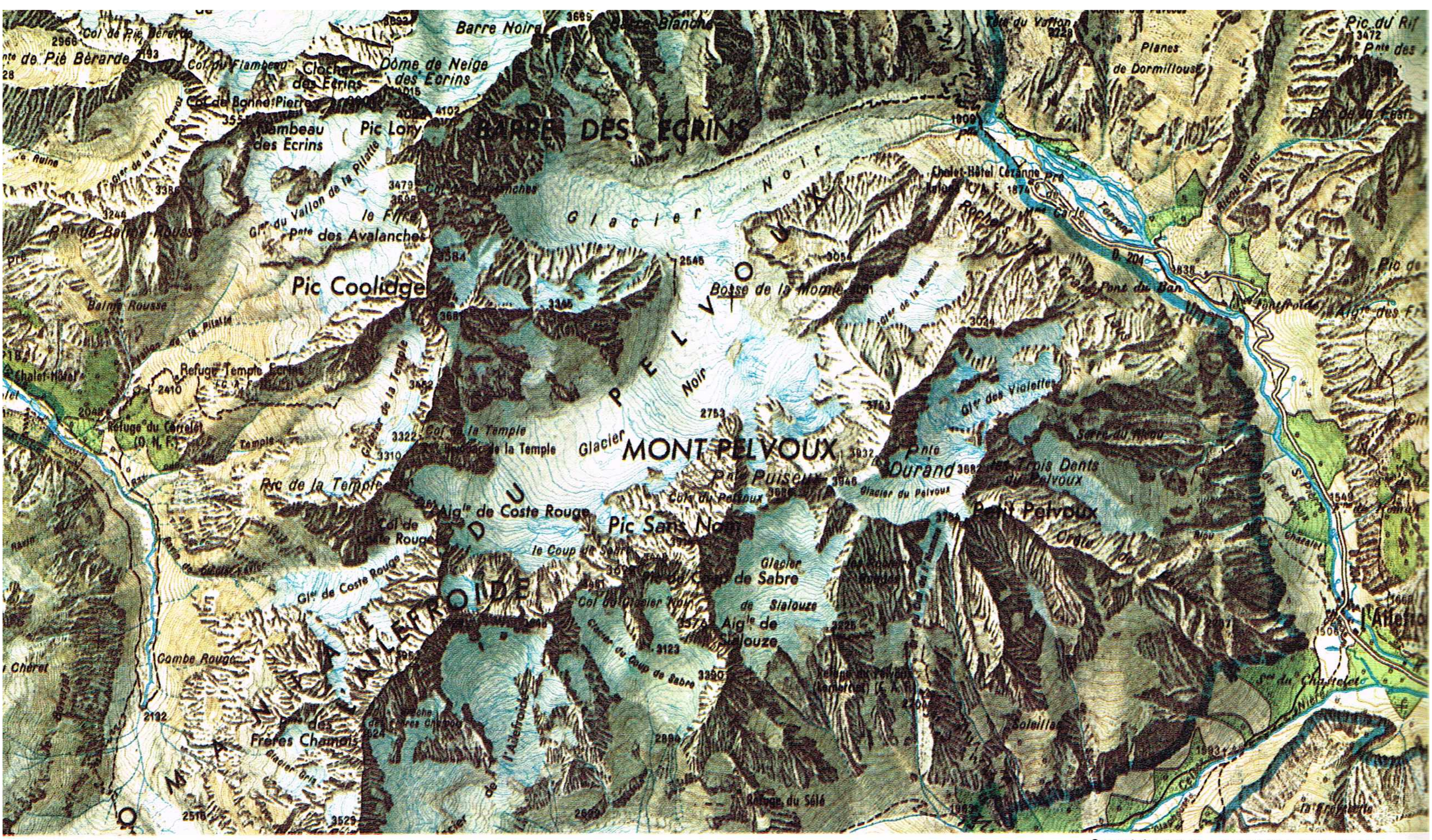

▲ ***Carte au 1/50 000 de la France, type 1922 : feuille XXXIV-36 de la région de Saint-Christophe-en-Oisans (région du mont Pelvoux).***

Dès la seconde moitié du XIX^e siècle, les applications cartographiques de la photographie et de la lithographie font entrevoir la possibilité d'éditer des cartes polychromes plus claires et plus lisibles, et on réalise bientôt des cartes de ce type, dérivées de la carte de l'état-major : carte au 1/100 000 dite « de l'Intérieur », carte au 1/200 000 du Service géographique de l'armée, carte au 1/500 000 dite « Carte Prudent ».

Enfin, en tenant compte de ces expériences concluantes et de la nécessité d'une carte plus précise, plus détaillée et plus nette, on a entrepris, en 1902, la nouvelle carte de France au 1/50 000 en courbes et en couleurs, avec minutes au 1/10 000 en courbes filées sur le terrain. La carte au 1/50 000, prévue en 8 à 12 couleurs, avançait si lentement qu'au rythme initial on pouvait estimer à trois siècles le délai d'achèvement; en 1922, la présentation fut ramenée à 5 couleurs; les levers exécutés au 1/20 000 à la planchette furent ensuite réalisés par les méthodes photogrammétriques et firent l'objet d'une édition particulière au 1/20 000, puis au 1/25 000. Actuellement, la carte au 1/50 000 est en voie d'achèvement : elle comporte 1 100 feuilles limitées par des parallèles distants de 0,20 grade et des méridiens distants de 0,40 grade. Elle est imprimée en noir pour la planimétrie, en bleu pour l'hydrographie, en bistre ou en orange pour les courbes de niveau, en vert pour la végétation et en bleu-gris pour l'estompage; le système de représentation plane est le système conique conforme de Lambert, en trois zones distinctes, afin de réduire au mieux les altérations linéaires.

La carte au 1/25 000, en 4 210 feuilles, est directement issue des levés; chaque feuille constitue un quart de la carte au 1/50 000 et comporte les mêmes couleurs, à l'exception de l'estompage.

La carte au 1/100 000, obtenue par assemblage, réduction et généralisation de 4 feuilles au 1/50 000, comporte deux couleurs supplémentaires, rouge et jaune, destinées à mettre en valeur les caractéristiques du réseau routier.

La France est également couverte par des cartes au 1/250 000, au 1/500 000 et au 1/1 000 000, dérivées des précédentes mais conformes pour leur découpage, leur système de représentation et leurs conventions à des normes internationales. Ces cartes topographiques ou chorographiques servent de fond à de nombreuses cartes thématiques, à des cartes techniques dont les plus connues sont les cartes routières ou aéronautiques, et à des cartes touristiques d'intérêt général comme des cartes pliées au 1/100 000 et au 1/250 000, ou d'intérêt local comme les cartes des parcs nationaux et régionaux, les cartes des îles, des forêts ou des massifs montagneux.

L'avenir de la cartographie

La cartographie assume aujourd'hui des finalités et des fonctions bien différentes de celles d'autrefois; l'évolution technologique actuelle comme celle prévisible dans un proche avenir, les nouvelles exigences scientifiques, sociales, politiques, économiques et militaires, la nécessité de disposer de plus en plus rapidement d'informations complètes et de parvenir à une uniformisation aussi poussée que possible dans le domaine international imposent à la cartographie une voie nouvelle.

Deux aspects sont à considérer dans son développement futur : l'unification à l'échelle mondiale des données de base et de l'information, et l'évolution technique.

— L'unification vise à instituer un quadrillage géométrique de base tel que chaque point du terrain ait des coordonnées issues d'un système unique de référence. L'Association internationale de géodésie préside à la coordination et à la direction scientifique d'une telle entreprise. La France y participe par l'intermédiaire du Comité français de géodésie. L'unification dans le domaine de l'information, simple en apparence, se montre complexe en pratique, surtout pour des motifs économiques et à cause des difficultés qui naissent de la défense de prérogatives nationales. Elle comporte la normalisation des signes conventionnels et des symboles topographiques, des échelles, des formats, des critères de transcription des toponymes, des annotations marginales, des légendes, etc. L'Association internationale de cartographie, fondée à Berne en 1959, participe à ce travail complexe de mise en ordre. Notre pays y est représenté par la Commission française de cartographie.

— Le progrès technique de la cartographie est lié essentiellement à la réalisation de procédés automatiques destinés à alléger ou à remplacer le travail de l'homme, procurant ainsi un gain de temps et une diminution des coûts. En particulier, on tend à automatiser les informations de base et à créer des appareils automatiques pour l'utilisation des informations, la séparation des couleurs, la transcription et le choix des emplacements des toponymes, la photocomposition, les mesures, l'orthophotographie, etc. Les études actuelles se consacrent à la recherche de nouveaux procédés dans le domaine de la reproduction et de l'impression, de nouveaux types de matériaux photographiques sensibles, de nouveaux dispositifs d'observation et de prises de vue photographiques;

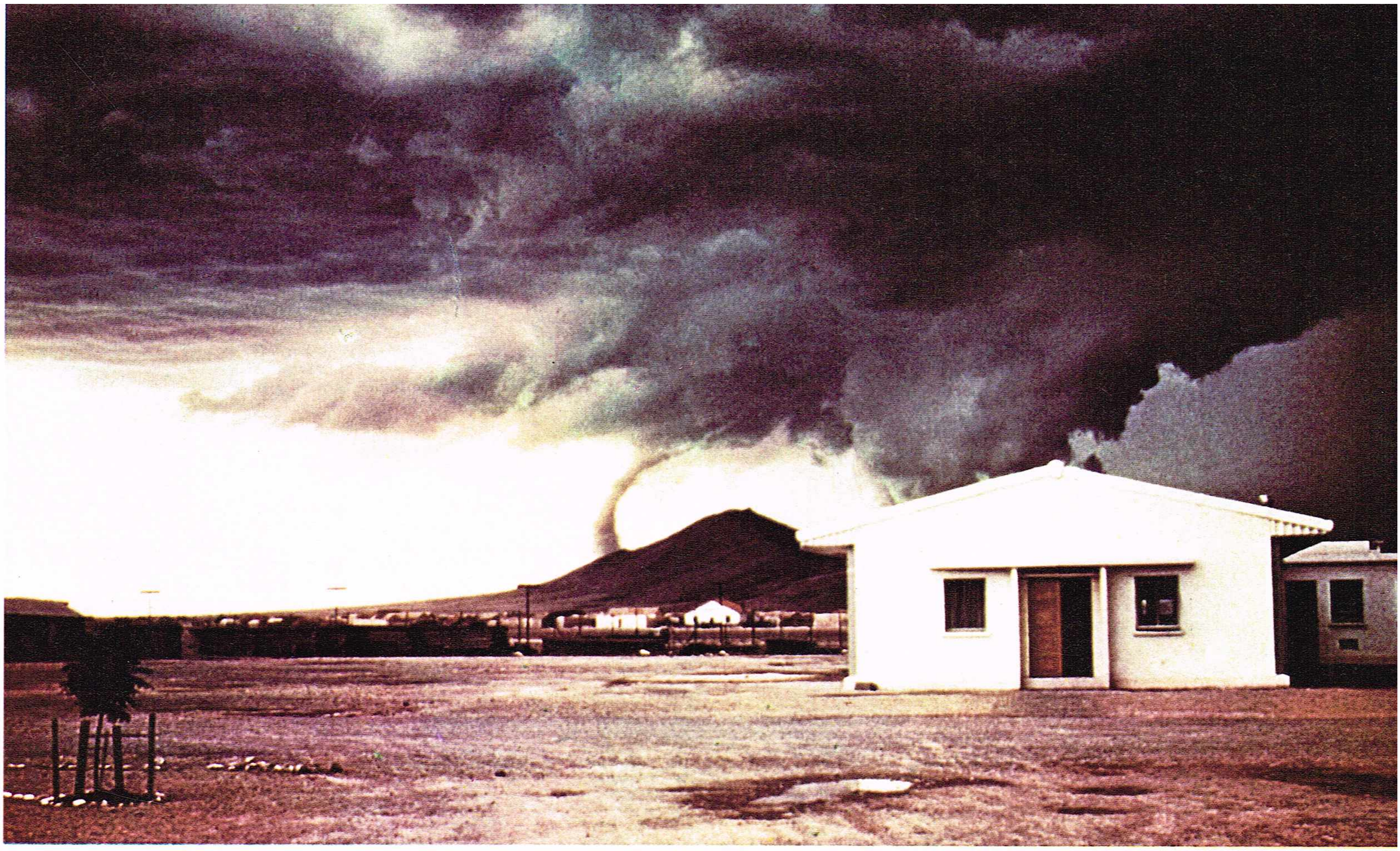
C. Fons

▲ *Une* **tornade** *dans les* **hauts-plateaux algériens** *: c'est un* **orage frontal** *d'intensité modérée.*

on a également mis au point des systèmes permettant l'utilisation des satellites artificiels à des fins non seulement géodésiques mais aussi cartographiques.

C'est surtout la fabrication de nouveaux appareils pour la réalisation automatique de stéréogrammes aériens et pour l'orthophotographie qui intéresse la cartographie topographique utilisant les photographies aériennes pour les cartes à grande échelle. Il existe déjà des instruments électroniques, qui sont encore d'un coût très élevé, capables de composer des *orthophotocartes,* c'est-à-dire des photomosaïques géométriques dans lesquelles les déformations que nous avons indiquées à propos des photoplans sont éliminées; ces appareils permettent aussi le tracé automatique ou semi-automatique des courbes de niveau selon un procédé particulier. On obtient ainsi des cartes issues de l'image photographique exacte du terrain, lesquelles, complétées par le report des indications topographiques conventionnelles de l'altimétrie, de la planimétrie, de l'hydrographie, des toponymes et des cotes, répondent à un grand nombre des exigences en matière de consultation, de recherche et d'étude, lorsque l'emploi simultané de la carte et de photogrammes aériens s'impose. Les orthophotocartes mettent à la disposition de l'utilisateur un ensemble géométrique de photographies aériennes déjà topographiquement interprétées et rendues parlantes par l'inscription des toponymes et des cotes. Enfin, un nouveau système de reproduction et d'impression, dit à *tonalité continue,* se caractérise par l'abandon, dans les procédés lithographiques, de la traditionnelle trame qui fractionne les images en petits points; il assure à la reproduction du fond photographique de ces cartes clarté et maniabilité.

BIBLIOGRAPHIE

BERTIN J., *Sémiologie graphique,* Mouton-Gauthier-Villars, Paris, 1967. - CUENIN R., *Cartographie générale,* Eyrolles, Paris, 1972. - IMHOF E., *Gelande und Karte,* E. Rentsch, Erenbach, 1950. - RAISZ E., *Principles of Cartography,* Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1962. - RIMBERT S., *Cartes et Graphiques,* S.E.D.E.S., Paris, 1964. - ROBINSON A., *Elements of Cartography,* John Wicy and Sons, New York, 1969. - SALICHTCHEV K., *Einführung in die Kartographie,* W.H. Haack, Gotha Leipzig, 1967. - TRAVERSI C., *Tecnica cartografica,* Istituto Geografico Militare, Firenze, 1968.

MÉTÉOROLOGIE

La météorologie est la science relative à l'étude de l'atmosphère sur le plan de la thermodynamique des mouvements de l'atmosphère. Si la météorologie est classée depuis peu comme science physique, il n'en demeure pas moins exact que l'observation des phénomènes atmosphériques est aussi vieille que l'humanité, et, à ce titre, la météorologie peut être considérée comme la plus vieille des sciences naturelles de la Terre. Pour beaucoup d'hommes, l'atmosphère est à considérer comme un don gratuit de la nature, et ainsi comme un élément immuable du globe. C'est là une conception erronée, car, comme pour les autres éléments du globe, l'air a subi au cours des millénaires une constante évolution, et même actuellement l'atmosphère continue de se modifier.

En 1953, le chimiste américain Stanley Miller fit une découverte surprenante : il démontra que l'atmosphère avait joué un rôle capital dans l'apparition de la vie sur notre planète. Mais le mystère de la naissance de cet « océan » se perd dans la nuit des temps. Les estimations les plus récentes de l'âge des minéraux d'après leur radio-activité permettent d'attribuer à la Terre un âge d'environ 4 à 5 milliards d'années. Les astronomes, grâce à l'étude de la lumière qui nous parvient des galaxies très éloignées, supposent que l'Univers dans lequel notre planète est incluse est en perpétuelle expansion.

Certaines hypothèses scientifiques situent la naissance du monde à 4 ou 5 milliards d'années de notre ère, naissance survenue probablement à la suite d'une explosion en milieu d'amas de matière très dense. A cette époque, une chaleur intense devait régner sur le globe, et l'atmosphère, telle que nous la connaissons et telle que nous la définissons aujourd'hui, n'existait pas. On pense que le globe baignait dans un mélange de gaz chauds, parmi lesquels on peut citer le gaz ammoniac et les gaz provenant de la combinaison du brome, du chlore, du fluor et du soufre avec l'hydrogène. D'après des hypothèses récentes, ce mélange gazeux devait avoir une température de plusieurs milliers de degrés. Cette chaleur incroyable avait l'avantage de donner à tous ces gaz une vitesse telle qu'ils ont pu rapidement se soustraire à l'attraction de la Terre et gagner d'autres parties de l'Univers. Pendant une longue période, la Terre n'a cessé de se refroidir. La croûte terrestre a durci, et l'atmosphère s'est remplie de gaz formés au sein des

C. Fons

▲ *Le givre, qui résulte de la brusque congélation des petites gouttes surfondues existant dans des brouillards ou des nuages froids, se transforme en petits cristaux de glace au contact, ici, de l'arbre et des antennes.*

minéraux en fusion : vapeur d'eau, azote et gaz carbonique. Selon une théorie du savant russe Oparine, les hydrocarbures seraient apparus lorsque la vapeur d'eau chaude de l'atmosphère serait entrée en contact avec les carbures rejetés à la surface de la Terre (composés de carbone avec des métaux et des métalloïdes).

A partir de cette époque, l'évolution de l'atmosphère entra dans sa deuxième phase avec des émanations d'origine volcanique très intenses rejetant dans l'atmosphère des fumées contenant environ 70 % de vapeur d'eau, 10 % de gaz carbonique, 10 % de vapeurs sulfureuses et un peu moins de 10 % d'oxygène. Au cours de cette deuxième phase d'évolution, le refroidissement se poursuivit, et il arriva un moment où la température atteinte permit la coexistence de l'eau liquide et de la vapeur d'eau. Cette température, dite « critique », est fixée par certains savants à 374 °K. On arriva ainsi à l'époque où les premières gouttes d'eau apparurent dans l'atmosphère baignant la Terre. A cette époque, les précipitations n'atteignaient pas le sol, car, celui-ci étant encore chaud, les gouttes d'eau s'évaporaient avant de l'avoir atteint. Mais ce processus refroidissait de plus en plus l'atmosphère et, par voie de conséquence, la croûte terrestre. Quand le refroidissement fut assez important, les pluies atteignirent la surface de la Terre et formèrent les cours d'eau, les mers et les océans. Au cours de cette phase, l'atmosphère perdit une proportion appréciable du gaz carbonique qu'elle contenait. Celui-ci fut absorbé en partie lors de la désagrégation du feldspath (partie constituante du granite) ou fixé par le calcaire et la dolomie (le gaz carbonique contenu actuellement dans les roches calcaires et dolomitiques représente 300 000 fois environ le volume contenu dans l'air). Enfin, une petite partie fut dissoute dans l'eau.

La troisième phase d'évolution de l'atmosphère débuta au moment où la masse nuageuse entourant la Terre se déchira et laissa passer le rayonnement solaire, tandis que les orages et les volcans se déchaînaient et que les forces internes du globe entraient en jeu, exerçant de violentes pressions sur la croûte refroidie superficiellement, façonnant et formant montagnes et continents. D'après les savants, c'est à cette époque que débutèrent les phénomènes qui allaient fournir à la vie ses éléments fondamentaux. Des substances organiques se sont alors formées. Plusieurs hypothèses tentent d'expliquer l'apparition sur le globe de ces substances organiques. Nous mentionnerons pour mémoire les noms des savants les plus éminents, dont on a coutume de citer les hypothèses et les travaux dans ce domaine : Miller, Urey, Loeb et Heyns. Il est admis généralement que, pendant environ 2 milliards et demi d'années, les substances organiques se sont accumulées au hasard dans l'atmosphère sous l'influence des éclairs et des volcans. Toutes les réactions possibles ont eu lieu entre elles. Nous savons également qu'il y a 2 ou 3 milliards d'années, l'atmosphère de notre planète avait une composition dans laquelle l'oxygène à l'état libre était absent. C'est l'apparition de l'oxygène libre qui marqua un tournant décisif dans la composition de l'air et donc dans l'histoire de la Terre. Cette apparition vint tardivement, après celle de la vapeur d'eau, de l'azote et du gaz carbonique. On pense à l'heure actuelle que l'oxygène est venu s'ajouter à l'atmosphère de deux manières différentes et indépendantes l'une de l'autre.

L'hypothèse du professeur allemand Harteck situe son apparition dans les couches supérieures de l'atmosphère sous l'influence du rayonnement solaire et l'explique de la manière suivante : la vapeur d'eau montait, comme elle le fait aujourd'hui, à plus de 60 km au-dessus de la surface du globe. A cette altitude, où les rayons ultraviolets du Soleil sont plus puissants qu'au sol, les molécules de la vapeur d'eau se décomposaient, formant des atomes d'hydrogène et des atomes d'oxygène. Les premiers, légers et très mobiles, se répandirent rapidement dans l'espace. Les atomes d'oxygène, plus lourds, subirent au contraire l'attraction de la Terre et restèrent ainsi dans l'enveloppe atmosphérique.

D'autres savants attribuent à l'action des végétaux la majeure partie de l'oxygène contenu dans l'atmosphère. Ces diverses hypothèses prêtent le flanc aux critiques mais, dans l'état actuel de nos connaissances de l'histoire de l'atmosphère, il faut pour l'instant se contenter d'elles.

Depuis au moins 2 milliards d'années, l'atmosphère de notre planète n'a pas subi de modifications importantes comparables à celles que nous venons d'évoquer. Sa composition est restée à peu près stable en ce qui concerne l'azote, l'oxygène et le gaz carbonique. Si l'on peut penser que la composition de l'air est réglée avec sagesse, il faut songer que l'homme, depuis quelques siècles, altère sans cesse l'air en y rejetant des impuretés, rejets qui risquent de compromettre le magnifique équilibre des divers éléments qui composent l'atmosphère.

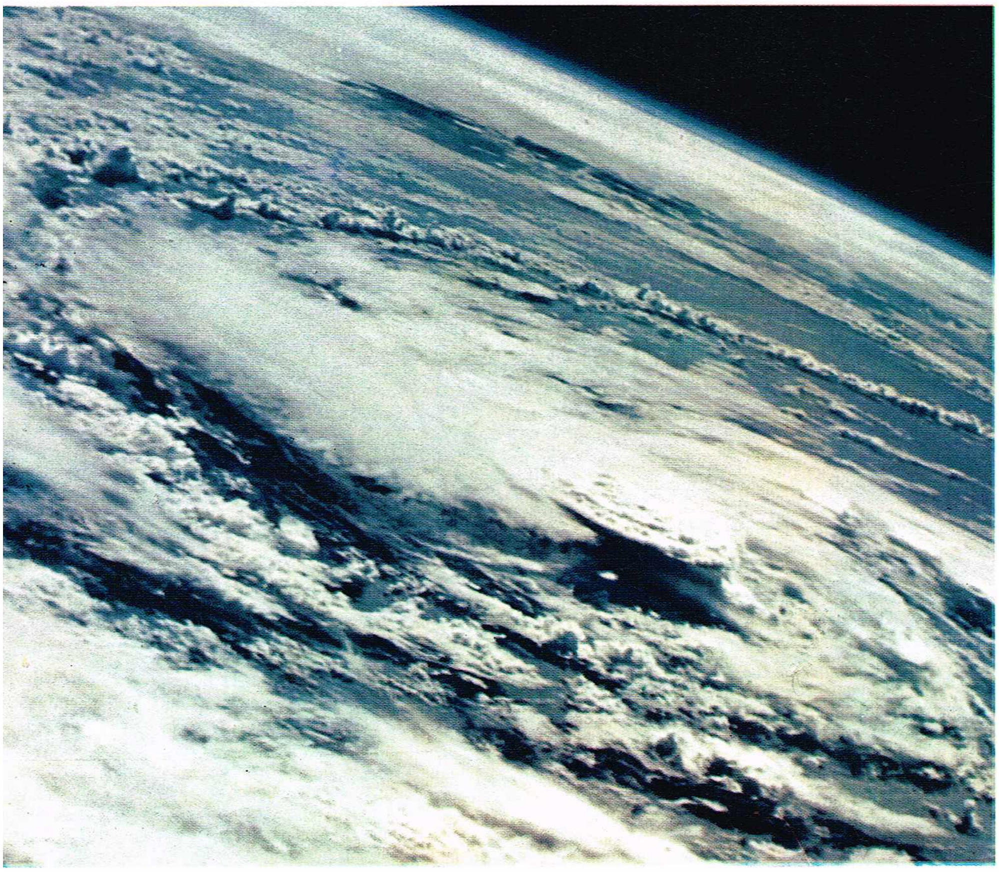

N.A.S.A.

Généralités sur l'atmosphère

Les trois paramètres de l'air

L'air constituant l'atmosphère est caractérisé à l'aide de trois paramètres : sa pression, sa température et son humidité. Chaque paramètre évolue dans le temps et dans l'espace indépendamment des deux autres.

Pression

Au niveau de la mer, la pression atmosphérique oscille en général entre 950 et 1 050 millibars (unité de pression qui vaut 10^2 pascals). La pression atmosphérique dite « normale » a une valeur de 1 013,25 millibars à ce niveau. Pour un lieu donné à la surface du globe, on observe une variation diurne de la pression. Cette oscillation diurne est très faible. Elle est souvent masquée dans les régions tempérées par des variations irrégulières de la pression, liées, comme nous le verrons plus loin, aux passages de perturbations atmosphériques. Par contre, aux latitudes tropicales et équatoriales, cette oscillation est plus nette. La courbe de variation diurne de la pression présente un maximum le matin entre 8 et 10 heures (suivant la saison), et un maximum le soir entre 20 et 22 heures.

La variation dans l'espace de la pression atmosphérique est bien connue. En effet, la valeur de cette pression n'est pas partout identique à la surface du globe. Il existe des zones de basse pression (dépressions ou cyclones) et des zones de haute pression (anticyclones). Cette variation de la pression dans le plan horizontal a une importance capitale en météorologie, car c'est elle qui engendre la circulation de l'air atmosphérique, donc les vents.

La distribution verticale de la pression en un lieu donné varie beaucoup plus rapidement que la distribution horizontale. Pratiquement, on observe une décroissance de pression de 1 millibar pour une élévation de 8 m. Mais cette décroissance n'est pas constante avec l'altitude car la température de l'air intervient dans son taux.

Température

La température de l'air atmosphérique subit également une variation dans le temps et dans l'espace. La distribution thermique est plus fluctuante que celle de la pression car les influences locales ont plus d'effet sur les températures qu'elles n'en ont sur la pression. En dehors des perturbations atmosphériques, on note une oscillation diurne marquée de la température. L'amplitude de l'oscillation dépend des caractéristiques du lieu où elle est mesurée, et elle est très influencée par les saisons.

UNESCO

▲ *Les nuages nocturnes lumineux se situent dans la* **mésosphère** *et se présentent en longues bandes parallèles brillantes à structure fibreuse.*

◀ *Page ci-contre, en bas, le* **cyclone Gladys**, *vu de la cabine Apollo 7.*

La distribution verticale de la température de l'air atmosphérique subit de grandes variations. En effet, dans les basses couches de l'atmosphère, l'influence du sol est prépondérante. Plus en altitude, on a mis en évidence par des mesures la présence d'un certain nombre de couches caractérisées par un profil thermique vertical particulier.

— La *troposphère :* c'est la première couche de l'atmosphère. D'une épaisseur d'environ 10 km, c'est en son sein que se développent toutes les perturbations atmosphériques. La décroissance moyenne de la température est de l'ordre de 0,5 °C par 100 m. Du point de vue météorologique, c'est la couche la plus importante.

La zone de transition entre la troposphère et la stratosphère s'appelle la *tropopause*. C'est une couche mince qui marque la limite entre la décroissance et la croissance de la température avec l'altitude. L'altitude de cette couche varie de 8 km (régions polaires) à 17 km (régions tropicales).

— La *stratosphère :* elle est caractérisée par une croissance de la température avec l'altitude. Le sommet de cette couche se situe entre 40 et 50 km. On donne aussi le nom d'*ozonosphère* à cette couche de l'atmosphère, car elle est le siège de la modification des molécules d'oxygène O_2 en molécules d'ozone O_3 sous l'action du rayonnement ultraviolet de très courte longueur d'onde, dit « ultraviolet C ». Cette transformation chimique est exothermique, ce qui explique la croissance de la température de cette couche. C'est dans la stratosphère que se forment les nuages nacrés.

— La *mésosphère :* elle est caractérisée par une nouvelle décroissance de la température avec l'altitude. Le sommet de cette couche est situé à environ 85 km. C'est dans la mésosphère que se situent les nuages nocturnes lumineux.

— La *thermosphère :* elle est caractérisée par une nouvelle croissance de la température avec l'altitude. La température monte jusqu'à des valeurs de + 500 °C, parfois plus. Le sommet de la couche se situe en moyenne vers 500 km. C'est dans cette couche que se produisent les aurores boréales. On y trouve également quatre couches électriques (parfois cinq). La première, la plus basse, dite *couche D*, se situe à la limite entre la mésosphère et la thermosphère. Elle n'existe que le jour et disparaît dès que le Soleil cesse de briller. A des altitudes plus hautes, on trouve les autres couches électriques :

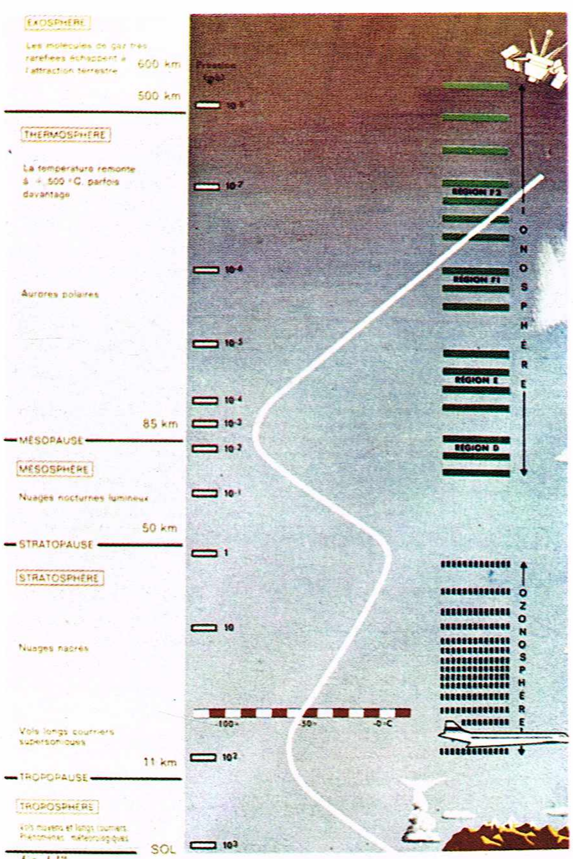

Fig. 1.18

C. Fons

◀ *Diagramme de la répartition verticale de la température de l'air atmosphérique : ce profil thermique est caractérisé par cinq couches principales.*

▲ *La présence de nuages modifie considérablement le comportement de l'atmosphère, car ceux-ci interviennent en tant que milieu diffusant.*

couche E vers 100 km, *couche F_1* vers 130 km, et enfin *couche F_2* vers 300 km. Toutes ces couches contiennent une multitude de fragments d'atomes chargés d'électricité négative. On donne aussi à la thermosphère le nom d'*ionosphère* à cause des ions dont elle est formée.

— L'*exosphère :* dans cette couche, les molécules de gaz, très raréfiées, échappent à l'attraction terrestre.

Humidité

L'humidité caractérise la richesse de l'air en vapeur d'eau. L'atmosphère contient d'autant plus de vapeur d'eau que sa température est élevée. L'alimentation en vapeur d'eau de l'atmosphère est réalisée par l'évaporation permanente de l'eau des océans et d'une manière plus générale de toute étendue d'eau, quelle que soit sa surface. La variation d'humidité est liée dans le plan horizontal à l'éloignement des sources d'évaporation, et dans le plan vertical à la décroissance de la température avec l'altitude. C'est la présence de vapeur d'eau dans l'atmosphère qui est la cause de la formation des nuages.

Le bilan thermique de l'atmosphère

Le *rayonnement solaire* constitue la source principale de l'énergie de l'atmosphère. La distribution des températures à la surface du globe et dans l'atmosphère résulte du bilan des différents apports ou pertes de chaleur du système « terre-atmosphère ». Le rayonnement solaire est un transfert d'énergie dans l'espace vide, puis dans l'atmosphère. La lumière étant un phénomène ondulatoire, il se produit dans ce transfert d'énergie des phénomènes d'interférences agissant sur la fréquence et sur la longueur d'onde du rayonnement.

Tout corps émet un rayonnement qui dépend de sa température et de la nature de la surface. Si aucune source d'énergie n'intervient au cours de l'émission, la température du corps diminue (puisque cette émission se fait au détriment de l'énergie interne du corps). Un corps qui reçoit de l'énergie en réfléchit en général une proportion plus ou moins grande, en diffuse une autre partie et enfin absorbe le reste, ce qui a tendance à faire augmenter sa température. On appelle *corps noir* un corps théorique qui absorbe intégralement le rayonnement qu'il reçoit. Un corps noir émet un autre rayonnement, qu'il est possible de calculer grâce à la *loi de Stéfan :*

$$E = S \sigma T^4,$$

où E est l'énergie exprimée en watts, S la surface en m^2 et T la température en °K ; σ est la constante de Stéfan.

Le rayonnement émis couvre en général un certain domaine de longueurs d'onde. La *loi de Wien* donne la relation liant la température à la longueur d'onde transportant le maximum de puissance rayonnée :

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}$$

où b est la constante de Wien, valant $2\,897 \cdot 10^{-6}$, λ la longueur d'onde en mètres et T la température en °K.

La puissance rayonnée par le Soleil peut être considérée comme constante. La constante solaire C est définie comme étant la puissance reçue par une surface de 1 m^2 située à la limite supérieure de l'atmosphère et exposée perpendiculairement aux rayons du Soleil. On admet comme valeur de cette constante :

$$C = 1{,}396 \text{ kW} \cdot m^{-2}.$$

Évidemment, si la surface unitaire considérée n'est pas perpendiculaire au rayonnement, la puissance reçue varie selon la distance zénithale du Soleil, qui, elle-même, varie avec l'heure, la latitude et la saison.

Le Soleil rayonne à peu près comme un corps noir dont la température superficielle serait de l'ordre de 6 000 °K (d'après la loi de Wien, en déterminant auparavant que la longueur d'onde de la radiation correspondant à la puissance maximale est $\lambda_{max} = 0{,}5$ µm). L'émission solaire se situe essentiellement dans une bande de longueurs d'onde allant de 0,25 à 5 µm. En l'absence de nuages, le rayonnement solaire s'affaiblit en traversant l'atmosphère à cause de la diffusion et de l'absorption sélective de la radiation. On dit que l'absorption de l'atmosphère non nuageuse est sélective, car elle dépend de la présence dans l'air d'un certain nombre de constituants tels que l'ozone, la vapeur d'eau, le gaz carbonique,

▶ *Tableau récapitulatif des abréviations utilisées en météorologie.*

ABRÉVIATIONS UTILISÉES EN MÉTÉOROLOGIE

C_v	= chaleur massique à volume constant du gaz
C_p	= chaleur massique à pression constante du gaz
T	= température en °K
V	= volume
P	= pression
R	= constante spécifique du gaz R_a : air sec = 287,05 J · kg^{-1} · $°K^{-1}$ R_v : vapeur d'eau = 461,51 J · kg^{-1} · $°K^{-1}$
α	= coefficient de dilatation à pression constante des gaz parfaits $\alpha = \frac{1}{273{,}15}$
β	= coefficient d'augmentation de pression à volume constant $\alpha = \beta$
E	= énergie interne d'un gaz ou énergie de rayonnement en watt
W	= travail
Q	= quantité de chaleur échangée
m	= masse
P_a	= pression partielle de l'air sec $P_a = \rho_a \cdot R_a \cdot T$
e	= pression partielle de la vapeur d'eau $e = \rho_v \cdot R_v \cdot T$
R	= constante des gaz parfaits
ρ_h	= masse volumique de l'air humide
T_v	= température virtuelle de l'air
r	= rapport de mélange de l'air humide
r_w	= rapport de mélange de saturation
e_w	= pression maximale de la vapeur saturante
$e_{w(t)}$	= pression maximale de la vapeur d'eau correspondant à la température t
θ'_w	= température pseudopotentielle du thermomètre mouillé
ρ	= densité de l'air
g	= accélération de la pesanteur
dz	= variation d'altitude
S	= surface émissive d'un corps qui rayonne
σ	= constante de Stéfan $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ W · m^{-2} · $degrés^{-4}$
λ	= longueur d'onde
θ	= température potentielle
t_d	= température du point de rosée
t_c	= température du point de condensation

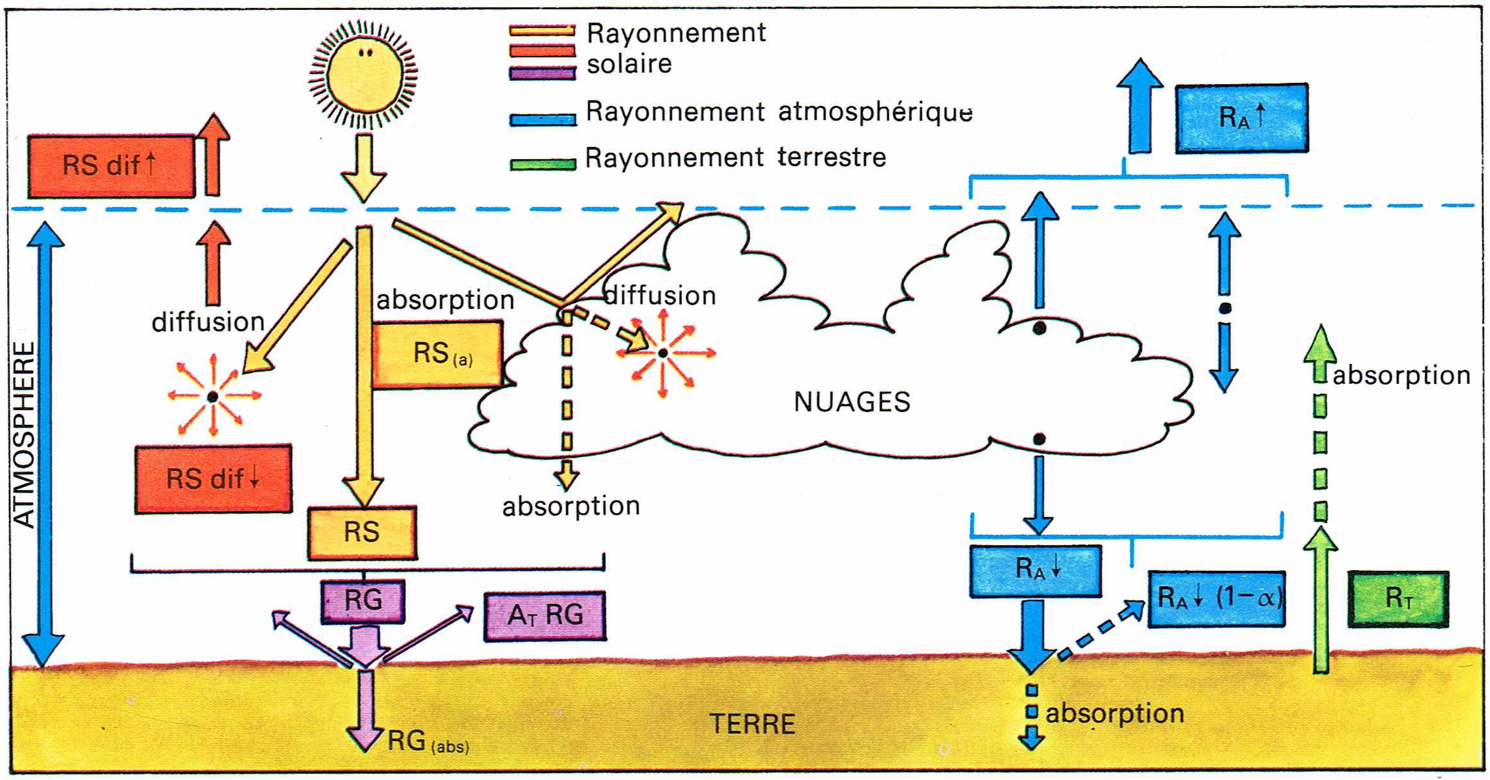

▲ ***Représentation schématique des*** **échanges radiatifs.**

etc., et de la longueur d'onde des radiations incidentes. L'oxygène, l'azote et surtout l'ozone absorbent la plus grande partie de la radiation ultraviolette, et ce malgré leur faible proportion dans la haute atmosphère. Dans la troposphère, la vapeur d'eau absorbe surtout le rayonnement infrarouge. Le gaz carbonique, dans une plus faible proportion, absorbe également le rayonnement infrarouge, mais dans des tranches de longueurs d'onde qui sont différentes de celles de la vapeur d'eau (surtout vers 2,8 et 4,3 μm).

Lorsqu'un rayon solaire rencontre sur son trajet un corps infinitésimal, il subit une série de phénomènes (réflexions, réfractions et diffractions) qui dispersent dans toutes les directions la radiation incidente élémentaire : c'est le phénomène de *diffusion*, pour lequel on considère la diffusion moléculaire et la diffusion par les aérosols.

— Dans la *diffusion moléculaire,* les particules diffusantes sont les molécules d'air atmosphérique dont les dimensions sont très petites par rapport aux longueurs d'onde du rayonnement. On démontre que la diffusion est, dans ce cas, inversement proportionnelle à la puissance quatrième de la longueur d'onde. La diffusion moléculaire agit peu sur les radiations infrarouges. Par contre, elle est très efficace sur les radiations de courtes longueurs d'onde. On explique ainsi la couleur bleue du ciel, les courtes longueurs d'onde du spectre visible correspondant bien à cette couleur.

— Dans la *diffusion par les aérosols,* on démontre que la diffusion est encore une fonction de la puissance de la longueur d'onde, mais l'exposant de la longueur d'onde peut prendre des valeurs fort différentes suivant les dimensions, la nature, l'orientation et la forme des aérosols; on admet généralement la valeur moyenne de — 1,3 pour cet exposant. C'est pour cette raison que la pollution atmosphérique agit sur la couleur bleue du ciel.

Dans les deux cas, la diffusion est d'autant plus importante que l'épaisseur d'atmosphère traversée est plus grande. En un lieu donné, elle dépend donc de la hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon. Il y a toujours affaiblissement de la radiation solaire directe dans le cas de diffusion.

La présence de nuages modifie considérablement le comportement de l'atmosphère, car le nuage intervient en tant que milieu diffusant. Il faut rappeler que le nuage est constitué par des gouttelettes d'eau ou des cristaux de glace qui ont toujours des dimensions bien supérieures aux longueurs d'onde des radiations. On démontre que la diffusion nuageuse est pratiquement neutre, c'est-à-dire qu'elle est indépendante de la longueur d'onde de la radiation considérée. Une partie du rayonnement émis par le Soleil est renvoyée, par réflexion diffuse sur le nuage, vers l'espace. Le reste est transmis vers le sol (transmission diffuse). On appelle *albédo* le rapport de l'énergie réfléchie à l'énergie incidente. L'albédo d'un nuage est très variable. Il peut varier de 0,4 à 0,9.

La surface terrestre absorbe une partie du rayonnement solaire global et renvoie le reste vers l'atmosphère par réflexion diffuse. La fraction de rayonnement solaire réfléchie par la Terre dépend de l'albédo de la surface. Cet albédo varie, suivant la nature du revêtement de la croûte terrestre (pierre, forêt, sable, neige), de 0,05 à 0,9.

Le Soleil n'est pas le seul émetteur de rayonnement. La loi de Stéfan nous indique que la Terre et l'atmosphère émettent par seconde une énergie proportionnelle à la puissance quatrième de leur température. On peut calculer que, pour un corps noir à température de + 15 °C, la puissance émise est de 0,390 kW par mm^2. L'émission terrestre s'effectue en rayonnement infrarouge, comme nous l'indique la loi de Wien ($\lambda_{max} = 10\ \mu$m). A conditions égales, les corps naturels émettent moins que le corps noir. Le rayonnement terrestre est absorbé intégralement ou presque par l'atmosphère à cause de la présence du gaz carbonique, de l'ozone (en faible quantité) et surtout de la vapeur d'eau. En l'absence de nuage, il existe un créneau de « transparence atmosphérique » entre 8,5 et 13 μm, valeurs entre lesquelles l'absorption du rayonnement infrarouge terrestre par l'atmosphère est très faible. Compte tenu des températures des différentes couches de l'atmosphère, celles-ci émettent également un rayonnement de grandes longueurs d'onde compris entre 5 et 100 μm. Cette émission est due en grande partie à la vapeur d'eau de l'atmosphère, mais aussi au gaz carbonique et, dans une proportion moindre, à l'ozone. Par transferts radiatifs, une partie de l'énergie rayonnée par les couches atmosphériques va se perdre dans l'espace, mais une autre partie revient vers le sol, qui l'absorbe presque entièrement, ce qui tend à contrebalancer les pertes par émission des corps naturels.

Le *bilan radiatif de la surface terrestre* peut s'écrire :

$$B_T = RG\ (1 - A_T) + \alpha\, R_A\!\downarrow - R_T,$$

B_T étant le bilan radiatif de la surface terrestre, RG la radiation globale, $\alpha\, R_A\!\downarrow$ la fraction du rayonnement atmosphérique absorbée (α représentant le coefficient

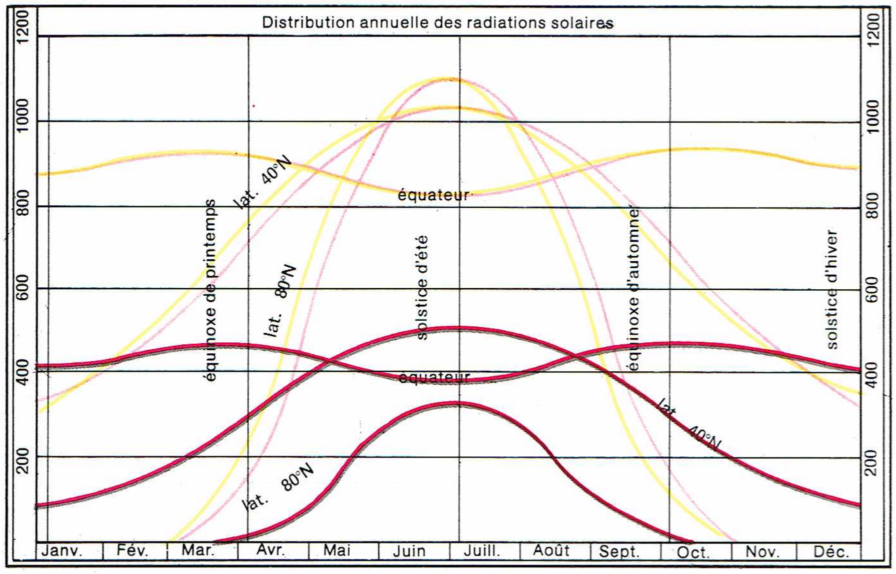

▲ ***Distribution annuelle de la radiation solaire pour quelques latitudes (la quantité reçue en un jour est indiquée en Langley). Les lignes rouges indiquent la quantité de radiations reçue à la surface de la Terre, en admettant que 0,6 Langley est la quantité transmise par incidence verticale. Les lignes jaunes indiquent la quantité de radiations reçue à la limite externe de l'atmosphère.***

d'absorption de la surface terrestre pour le domaine de longueur d'onde de l'émission atmosphérique) ; A_T est l'albédo de la surface terrestre et R_T le rayonnement terrestre.

On a mis en évidence des variations diurnes du bilan radiatif B_T de la surface terrestre ainsi que des variations saisonnières et géographiques. Il est intéressant de constater que les bilans annuels moyens sont partout positifs, ce qui met en évidence le déséquilibre radiatif positif de la surface de la Terre.

Le *bilan radiatif de l'atmosphère* peut s'écrire :

$$B_A = RS_{(a)} + R_T - R_A\uparrow - R_A\downarrow,$$

où B_A est le bilan radiatif de l'atmosphère, $RS_{(a)}$ le rayonnement solaire direct traversant l'atmosphère, R_T le rayonnement terrestre, $R_A\uparrow$ et $R_A\downarrow$ les pertes radiatives dues à l'émission atmosphérique dirigée vers le sol et vers l'espace.

Toutes les mesures effectuées confirment que B_A est toujours négatif. Il apparaît donc que l'atmosphère se trouve en déficit du point de vue des échanges radiatifs tandis que la surface de la Terre présente, comme nous l'avons vu, un déséquilibre radiatif positif. En appliquant brutalement les résultats ainsi obtenus, on arriverait à un état d'équilibre radiatif ayant des températures d'équilibre tout à fait invraisemblables. En fait, il existe entre le sol et l'atmosphère des *transferts de chaleur autres que radiatifs* qui modifient très sensiblement les températures d'équilibre.

— La chaleur peut se propager par *conduction moléculaire* au sein de tous les corps. Dans l'ensemble du système « terre-atmosphère », les échanges conductifs sont assez limités, mais ils interviennent néanmoins dans les basses couches de l'atmosphère d'une manière assez sensible, en particulier par le phénomène de « conductibilité turbulente ».

— La chaleur peut également se propager par *convection thermique*. Ce processus de transfert est bien plus efficace que le précédent. Il existe dans l'atmosphère un certain nombre de cellules dites « cellules thermo-convectives », plus ou moins régulièrement disposées, auxquelles correspond une circulation locale caractérisée par une ascendance dans la partie centrale de la cellule et des descendances latérales : c'est le phénomène de convection thermique.

Grâce aux échanges conductifs et surtout convectifs, l'atmosphère peut « capturer » une partie importante de l'énergie solaire emmagasinée dans le sol. Les océans, qui couvrent, rappelons-le, les 7/10 de la surface de la Terre, sont le siège d'une évaporation intense absorbant une quantité très importante de chaleur qui est entièrement fournie par les surfaces océaniques. La vapeur d'eau ainsi formée se disperse dans l'atmosphère, où elle se condense en libérant la chaleur emmagasinée. Par ce biais, d'importantes quantités de chaleur passent de la surface terrestre dans l'atmosphère, et cela prouve que la plus grande partie de l'énergie accumulée par l'atmosphère provient en fait de son aptitude à capter la vapeur d'eau océanique.

En définitive, les résultats de tous ces échanges de chaleur entre l'atmosphère et son environnement se traduisent par un certain nombre de phénomènes, dont les plus importants sont la *répartition verticale* de la température en un lieu donné et la *répartition méridienne* du bilan des échanges calorifiques dans le système « terre-atmosphère ». Au sujet du premier phénomène, il est possible de mesurer les températures dans les vingt premiers kilomètres de l'atmosphère et de tracer le profil de ces mesures. Il existe un certain nombre de discontinuités du profil vertical de température, ce qui permet de voir que toute l'atmosphère située au-dessous de 10 km est affectée par la convection. En ce qui concerne le deuxième phénomène, des calculs et des mesures effectués sur un méridien permettent de tracer des courbes qui indiquent clairement qu'en moyenne, à longue échéance, l'atmosphère reçoit de son environnement plus d'énergie qu'elle n'en perd dans les régions équatoriale et tropicale, alors qu'au contraire, elle en perd plus qu'elle n'en reçoit au-delà de 40° de latitude. Cela met en évidence qu'il existe une circulation méridienne atmosphérique qui véhicule vers les pôles l'excédent d'énergie emmagasiné dans les régions équatoriale et tropicale.

En conclusion, considéré dans un ensemble, le système « terre-atmosphère » ne peut échanger de l'énergie avec l'espace que sous une forme radiative. Cependant, pour maintenir un équilibre, il existe des transferts de chaleur qui atténuent le réchauffement équatorial et diminuent le refroidissement polaire. Parmi les courants participant efficacement au maintien de l'équilibre, citons :

— les courants de chaleur liés aux mouvements atmosphériques méridiens : les masses d'air chaud venant des régions subtropicales remontent en latitude, tandis que les masses d'air froid d'origine polaire sont entraînées vers les régions tropicales ;

— les courants de chaleur liés aux transports méridiens de vapeur d'eau : la chaleur fournie par les océans chauds par évaporation est libérée dans l'atmosphère aux latitudes plus élevées au moment de la condensation ;

— le courant de chaleur lié aux composantes méridiennes des grands courants marins.

Il est important de souligner que cette répartition thermique est liée à une certaine répartition de la pression atmosphérique, que nous verrons plus loin. On comprend également que toutes les modifications dans les échanges thermiques, ne fût-ce que de faible amplitude, réagissent sur l'évolution des mouvements d'échange.

La thermodynamique de l'atmosphère

Le comportement des particules

Les transformations subies par les particules atmosphériques sont classées en deux types : *transformations isobares*, c'est-à-dire transformations s'effectuant à pression constante, et *transformations adiabatiques*, c'est-à-dire transformations s'effectuant sans échange de chaleur. Ces deux types de transformations sont à la base du processus de condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère, condensation qui entraîne la formation des nuages. Le premier type de transformation peut intervenir en dehors des courants de perturbation qui entraînent une grande variation de pression. Le second type de transformation intervient au cours des détentes et des compressions subies par les particules d'air durant leurs mouvements verticaux. Compte tenu de la mauvaise conductibilité thermique des gaz (et de l'air en particulier), on peut considérer que les échanges thermiques au cours de ces mouvements sont négligeables. L'adiabatisme est donc admis pour interpréter des phénomènes atmosphériques associés à des mouvements verticaux. Un mouvement ascendant, en engendrant une détente adiabatique, produit un refroidissement, et, inversement, un mouvement descendant, en engendrant une compression adiabatique, produit un réchauffement.

La variation de la température dans les particules atmosphériques au cours de leur déplacement ne résulte pas de l'établissement d'un quelconque équilibre thermique entre ces particules en mouvement et celles qu'elles rencontrent au cours du déplacement vertical.

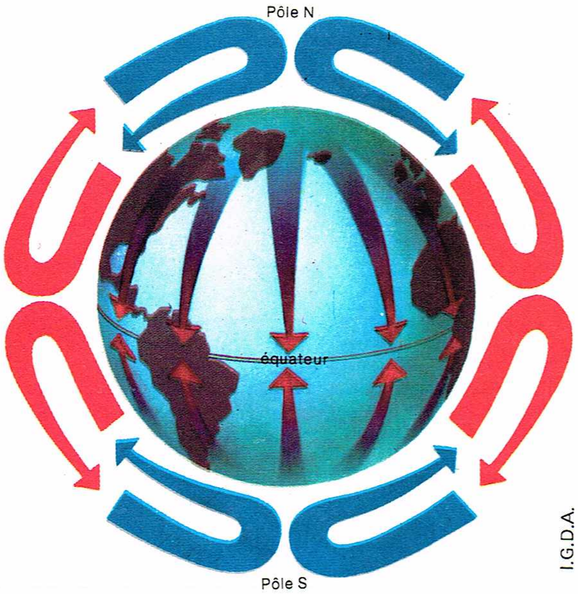

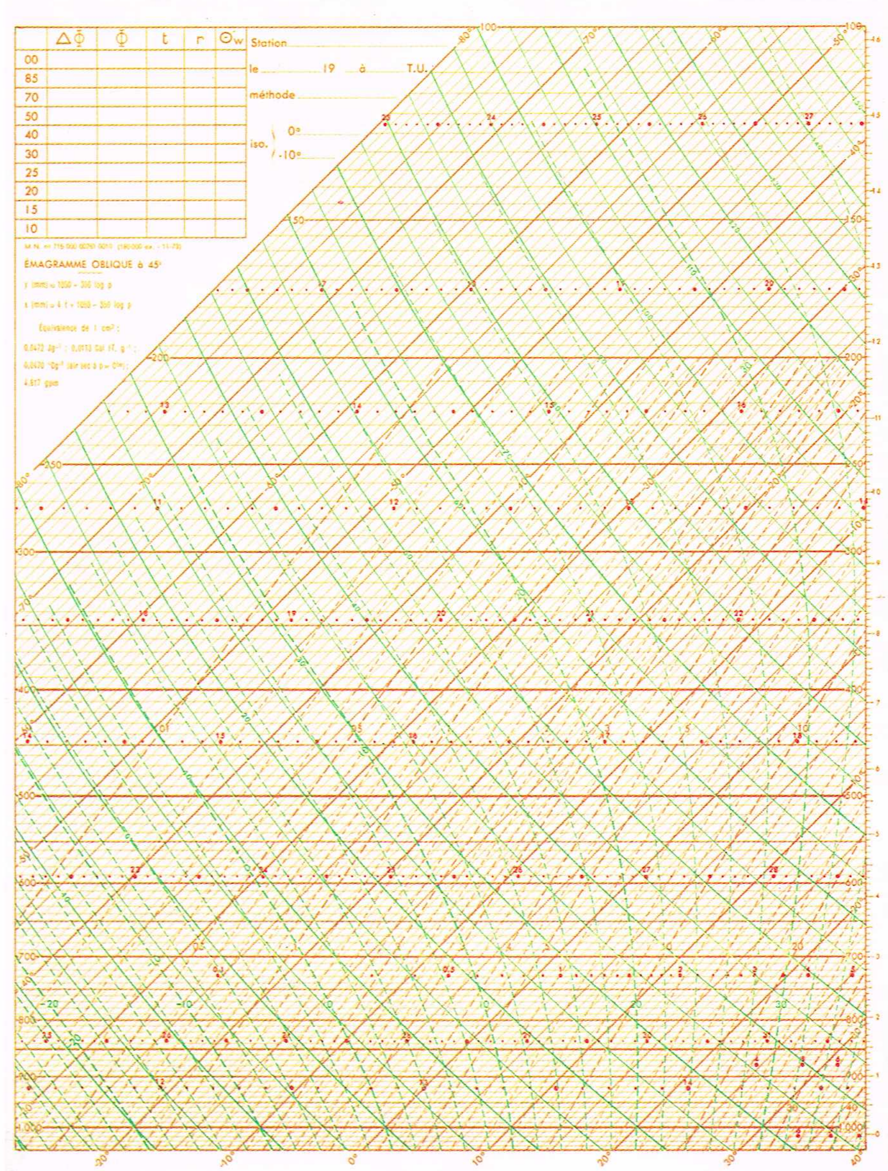

▲ ***A gauche, modèle de circulation thermique dans l'hypothèse d'une Terre immobile : en rouge, les masses d'air chaud; en bleu, les masses d'air froid. A droite, l'émagramme 761, que l'on utilise en météorologie.***

On peut chiffrer cette variation de température à partir de la *loi de Joule*

$$dE = C_v dT$$

et de la *relation de Mayer*

$$R = C_p - C_v$$

(où C_v et C_p sont les chaleurs massiques du gaz, respectivement à volume constant et à pression constante), pour une particule d'air sec de masse-unité :

$$dT = \frac{R}{C_p}\frac{T}{P}\,dP + \frac{1}{C_p}\,dQ.$$

Comme les échanges de chaleur sont nuls, $dQ = 0$ (car la détente est adiabatique), et, comme il y a équilibre de pression pour la particule,

$$\frac{dT}{T} = \frac{R_a}{C_{p_a}} \cdot \frac{dP}{P}.$$

Il apparaît dans les conditions d'expérimentation :

— qu'une détente $dP < 0$ entraîne un refroidissement $dT < 0$,

— qu'une compression $dP > 0$ entraîne un réchauffement $dT > 0$.

$$\int_{T_0}^{T_1} \frac{dT}{T} = \frac{R_a}{C_{p_a}} \int_{P_0}^{P_1} \frac{dP}{P},$$

ce qui donne

$$\log \frac{T_1}{T_0} = \frac{R_a}{C_{p_a}} \log \frac{P_1}{P_0},$$

d'où l'on tire :

$$\frac{T_1}{T_0} = \left(\frac{P_1}{P_0}\right)^{\frac{R_a}{C_{p_a}}}.$$

Cette relation permet de calculer la variation de température.

Si l'on choisit comme pression 1 000 millibars $= P_1$, on peut définir une température potentielle θ, qui sera la température prise pour une particule d'air sec amenée adiabatiquement à ce niveau de pression. La relation précédente devient (températures exprimées en °K) :

$$\theta = T_0 \left(\frac{1\,000}{P_0}\right)^{\frac{R_a}{C_{p_a}}}.$$

La température potentielle est donc invariable quand la particule subit des évolutions strictement adiabatiques.

On peut effectuer une représentation graphique des transformations en utilisant un système de coordonnées « pression » et « température » dans lequel on peut représenter des transformations isobares (P = constante), isothermes (T = constante) et adiabatiques :

$$\left(\theta = T_0 \left(\frac{1\,000}{P_0}\right)^{\frac{R_a}{C_{p_a}}}\right).$$

En fait, on utilise en météorologie un diagramme plus complexe (désigné en France par la référence *émagramme 761*) sur lequel :

— les *lignes isothermes* (transformations isothermes) sont figurées en couleur bistre, en traits continus et inclinés à 45° par rapport à l'horizontale. Cotées en degrés Celsius, elles sont tracées de degré en degré. L'échelle des températures est linéaire ;

— les *lignes isobares* sont tracées en couleur bistre, traits continus et horizontaux. Cotées en millibars, elles sont tracées de 10 en 10 millibars entre 1 050 et 200 millibars et de 5 en 5 millibars entre 200 et 100 millibars. L'échelle des pressions est logarithmique de la forme :

$$y = k \log \frac{1\,000}{P}.$$

Cette échelle correspond pratiquement à la répartition verticale de la pression dans l'atmosphère. En effet $dy = -k\frac{dP}{P}$. Une variation positive d'ordonnée correspond donc, comme dans l'atmosphère, à une variation négative de pression ;

— les *lignes « adiabatiques sèches »* représentent les transformations adiabatiques des particules d'air sec. Elles sont tracées en traits verts continus. Elles passent par les points d'état de pression 1 000 millibars et de température multiple de 5°. Ce réseau permet une détermination graphique immédiate de la température potentielle θ des particules. En considérant ce qui a été dit plus haut, on peut affirmer qu'une adiabatique sèche est une ligne d'égale température potentielle.

▸ *Représentation graphique de la notion de gradients adiabatiques : en vert, une adiabatique sèche.*

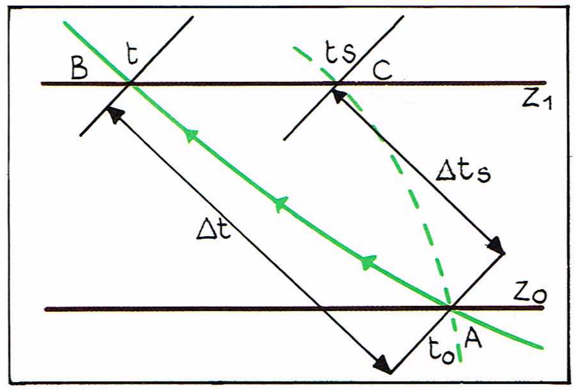

Richard Colin

Dans l'atmosphère, l'air n'est en fait jamais sec. Il est le plus souvent mélangé à de la vapeur d'eau non saturée pour former de l'air humide. On définit le rapport de mélange de l'air humide comme étant le rapport $r = \frac{m_v}{m_a}$ en grammes de vapeur d'eau par gramme d'air sec. Ce rapport de mélange peut s'exprimer par rapport à la pression partielle de la vapeur d'eau (e) :

$$r = 0{,}622 \frac{e}{P - e} \quad \text{avec} \quad P_a = P - e.$$

Comme on assimile l'air humide à un gaz parfait, ses paramètres d'état P et T doivent vérifier l'équation d'état :

$$P = \rho_h RT,$$

où ρ_h est la masse volumique de l'air humide. R, qui est une constante dépendant de la nature du gaz, n'a pas de valeur fixe pour l'air humide dont la composition est variable. On doit alors traiter l'air humide comme de l'air sec mais en prenant pour température T la température virtuelle T_v telle que

$$P = \rho_h R_a T_v \quad \text{avec} \quad T_v = \left(\frac{1 + 1{,}608\, r}{1 + r}\right) T.$$

Comme r est petit par rapport à l'unité, on utilise communément la formule :

$$T_v = (1 + 0{,}608\, r)\, T.$$

Si nous examinons maintenant l'adiabatisme de l'air humide, nous démontrons qu'il y a très peu d'écart entre cet adiabatisme et celui de l'air sec. Aussi a-t-on coutume d'utiliser sur l'émagramme 761 les lignes adiabatiques sèches pour représenter aussi bien les transformations adiabatiques des particules d'air sec que celles des particules d'air humide.

L'*air saturé* est défini comme étant un mélange d'air sec et de vapeur d'eau saturante. D'après la définition de la vapeur saturante en météorologie, l'air saturé correspond toujours à l'air nuageux. Quand, dans une particule, la vapeur est saturante, on démontre que cette particule ne peut plus absorber de vapeur d'eau sans changer d'état. On dit alors que l'air est saturé de vapeur d'eau. Le rapport de mélange s'exprime par :

$$r_w = 0{,}622 \frac{e_{w(t_0)}}{P_0 - e_{w(t_0)}}.$$

C'est le rapport de « mélange de saturation ». Ce rapport représente effectivement la masse maximale de vapeur d'eau qu'il est possible d'associer à l'unité de masse d'air sec dans une particule définie dans un état P_0, t_0, r_w étant une fonction de la pression et de la température ; on préfère l'écrire sous la forme :

$$r_{w(P,\,t)} = 0{,}622 \frac{e_{w(t)}}{P - e_{w(t)}} \text{ exprimée en g/g.}$$

Nous avons vu que l'air nuageux est toujours de l'air saturé ; il est donc nécessaire de pouvoir estimer la proximité de cet état de saturation. C'est la raison du calcul de l'*humidité relative*, qui permet cette estimation :

$$U\ \% = 100 \frac{e}{e_{w(t)}}.$$

Sur l'émagramme 761, on définit la *saturation* à l'aide de lignes d'égal rapport de mélange de saturation r_w qui sont représentées en lignes tiretées marron, obliques, cotées en grammes de vapeur d'eau par kilogramme d'air sec. Ces lignes font approximativement un angle de 60° par rapport à l'horizontale.

Les transformations adiabatiques de l'air saturé sont très différentes de toutes celles que nous avons vues jusqu'alors. Au cours de ces transformations, le point d'état d'une particule saturée (défini, rappelons-le, par P et t) se déplace sur une courbe particulière appelée *pseudo-adiabatique saturée* ou *pseudo-adiabatique de saturation*. Elles sont représentées sur l'émagramme 761 par des courbes tiretées vertes. Si l'on compare l'évolution de deux particules, l'une humide et l'autre saturée, prises à un même état initial de température et de pression, on s'aperçoit que la même détente adiabatique refroidit moins l'air saturé que l'air humide. En effet, il y a diminution du rapport de mélange dans le cas de la particule saturée. La vapeur d'eau qui disparaît se transforme en eau liquide par condensation. Cette condensation libère de la chaleur à l'intérieur du système, ce qui atténue le refroidissement provoqué par la détente. C'est pour cela que, sur l'émagramme 761, les pseudo-adiabatiques sont moins inclinées par rapport aux isothermes que les adiabatiques sèches.

Lorsqu'une particule saturée le reste au cours d'une série de transformations uniquement adiabatiques, son point d'état (P, t) se déplace toujours suivant la même ligne pseudo-adiabatique. Chaque fois que cette particule passe par le niveau 1 000 millibars, elle reprend la même température. On appelle cette dernière la *température pseudo-adiabatique potentielle du thermomètre mouillé* que l'on désigne par θ'_w.

Enfin, l'on considère également les *« gradients adiabatiques »* qui expriment la rapidité avec laquelle la température varie dans une particule atmosphérique au cours de détentes ou de compressions adiabatiques.

Si l'on considère une particule au niveau Z_0 à la température t_0, et qu'on la soulève jusqu'au niveau Z_1, elle subit une détente adiabatique et se refroidit. Si l'air est sec (ou non saturé), la température finale est t et se déduit de t_0 par un déplacement du point d'état de A en B le long d'une adiabatique sèche jusqu'au niveau Z_1. Si l'air est saturé au niveau Z_0, la température finale est

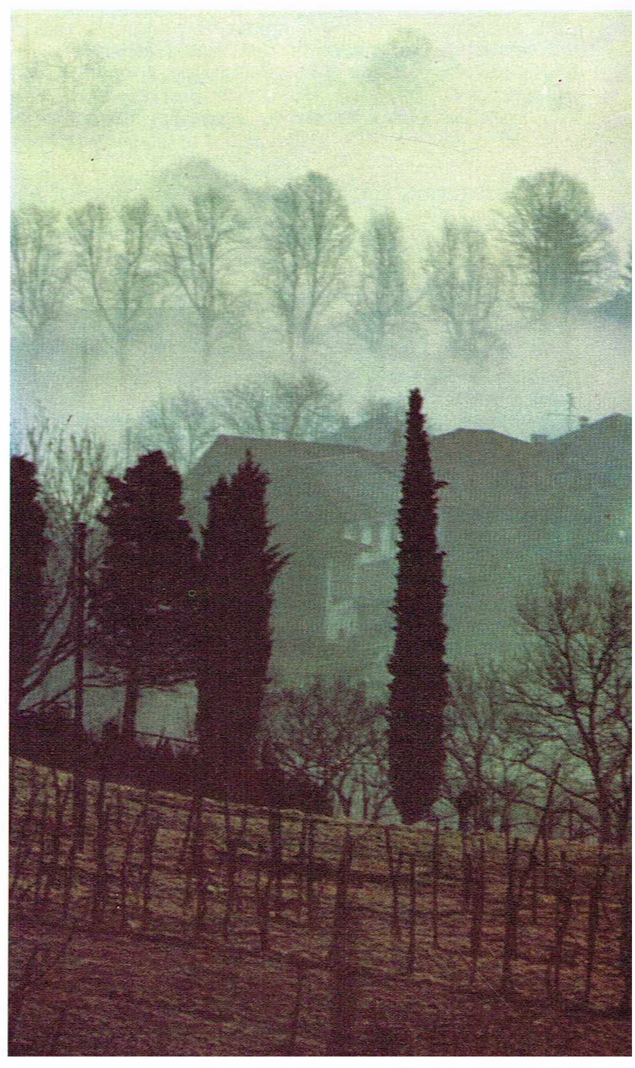

t_s et se déduit de t_0 par un déplacement du point d'état de A en C le long d'une pseudo-adiabatique jusqu'au niveau Z_1, soit (schéma page ci-contre) :

$$\Delta t = t_0 - t \quad \text{et} \quad \Delta t_s = t_0 - t_s.$$

On désigne sous les noms de :

— *gradient adiabatique sec* le rapport :

$$\gamma_d = \frac{\Delta t}{\Delta Z};$$

— *gradient adiabatique saturé* le rapport :

$$\gamma_s = \frac{\Delta t_s}{\Delta Z}.$$

La répartition verticale de la pression est telle que :

$$dP = -\rho g dz.$$

Dans le cas présent, si l'on se place au niveau Z_0 où la pression est P_0 et la température T_0 :

$$\rho = \frac{P_0}{R_a T_0} \qquad dP = -\frac{P_0}{R_a T_0} g dz.$$

Un soulèvement adiabatique dz provoquera au sein de la particule une variation de pression dP qui engendrera une variation de température dT telle que :

$$dT = \frac{R_a}{C_{p_a}} \frac{T_0}{P_0} dP$$

$$dT = -\frac{R_a}{C_{p_a}} \frac{T_0}{P_0} \frac{P_0}{R_a T_0} g dz = -\frac{g}{C_{p_a}} dz,$$

soit :

$$\gamma_d = \frac{dT}{dz} = -\frac{g}{C_{p_a}}.$$

Au cours de l'ascension, à chaque niveau P où elle parvient, la particule prend en général une température T_p différente de celle T de l'air ambiant. On a alors :

$$dT = \frac{R_a}{C_{p_a}} \frac{T_p}{P} dP \quad \text{avec} \quad dP = -\frac{P}{R_a T} g dz,$$

soit :

$$dT = -\frac{g}{C_{p_a}} \frac{T_p}{P} dz \quad \text{et} \quad \gamma_d = -\frac{g}{C_{p_a}} \frac{T_p}{T}.$$

Nous avons vu précédemment qu'au cours de détentes adiabatiques, la vapeur d'eau contenue dans l'air saturé se condense. Dans l'atmosphère, à l'origine, les particules ne sont pas saturées. Par un processus thermodynamique, il y a déclenchement de la condensation après saturation des particules. Ce fait fondamental régit en météorologie toutes les formations de nuages et de brouillards se produisant dans une masse initialement claire, c'est-à-dire non saturée. D'une manière générale, on peut dire qu'il y a deux types de processus thermodynamiques capables de provoquer la saturation : le premier conduisant à une décroissance de r_w en maintenant constante la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère, le second conduisant à une augmentation de la quantité de vapeur d'eau de l'atmosphère en maintenant constant r_w.

— Sur un émagramme 761, on peut suivre les processus de saturation et de condensation par un *refroidissement de la particule à pression constante* (autrement dit par un refroidissement isobare). Si une particule d'air humide subit un refroidissement isobare, son point d'état (donné par P, t sur l'émagramme n° 1) se déplace sur une même horizontale (même pression) vers la gauche (température décroissante). Dans ce refroidissement, la particule ne connaît aucune variation de son rapport de mélange r, car elle conserve la même quantité de vapeur d'eau. Sur l'émagramme, on remarque cependant que r_w décroît. Après le refroidissement, si l'on calcule r au nouveau point d'état (P, t_1), on s'aperçoit alors que $r = r_w$, donc que la particule s'est saturée. Le point d'état pour lequel la saturation apparaît (ici P, t_1) est le *point de rosée* de la particule dont on peut donner la définition suivante : la température t_d du point de rosée d'une particule d'air humide est la température à laquelle cette particule devient saturée lorsqu'elle subit un refroidissement isobare. Donc, pour une particule humide, son point d'état sur un émagramme est défini par :

$$r_w(P, t_d) = r, \quad \text{soit} \quad e_{w(t_d)} = e.$$

Quand on obtient $t = t_d$, la particule est à la limite de la saturation.

Ostman - S. E. Hedin

◀ ***Formation de bancs de brouillards en Italie septentrionale, en décembre.***

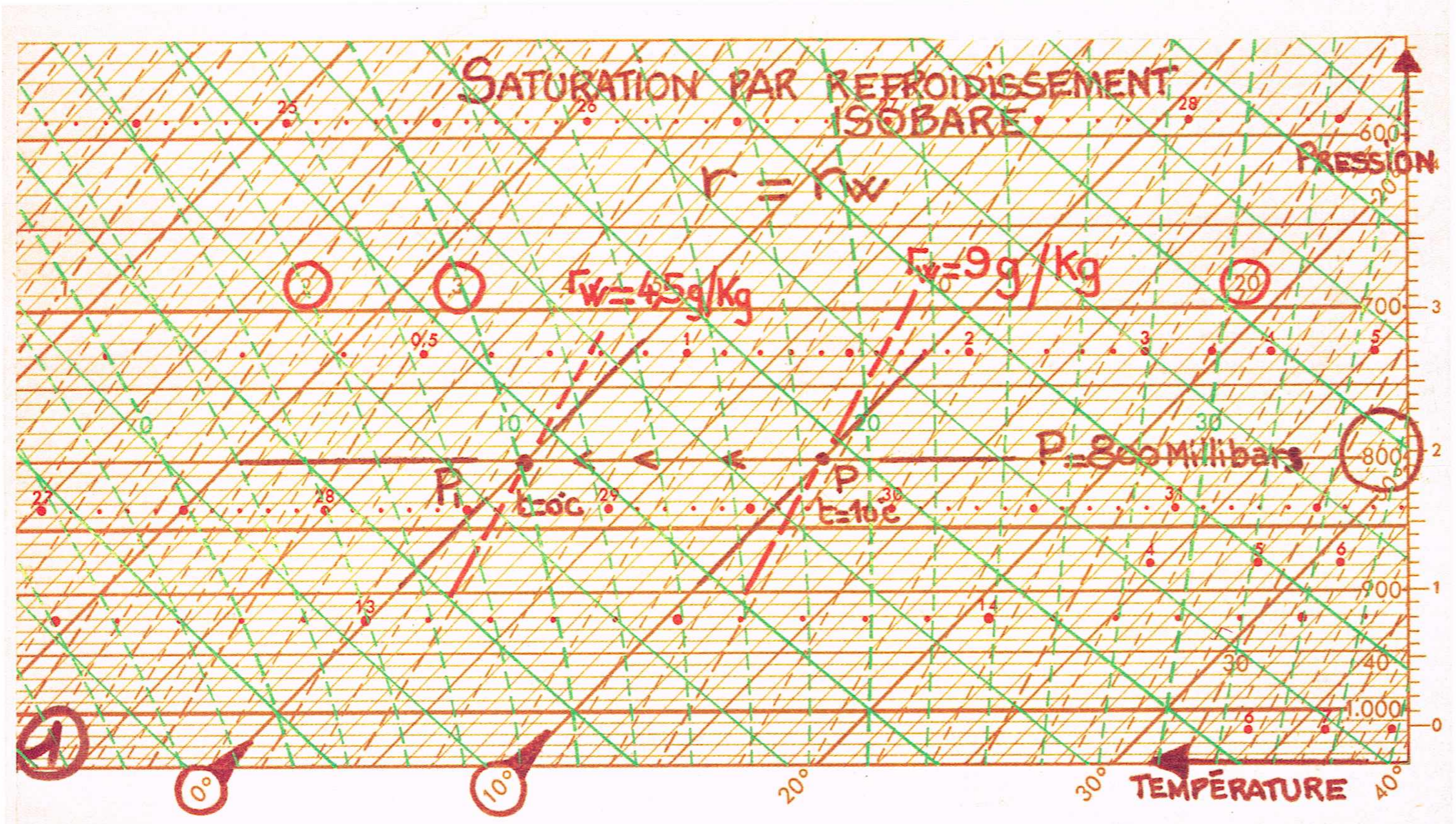

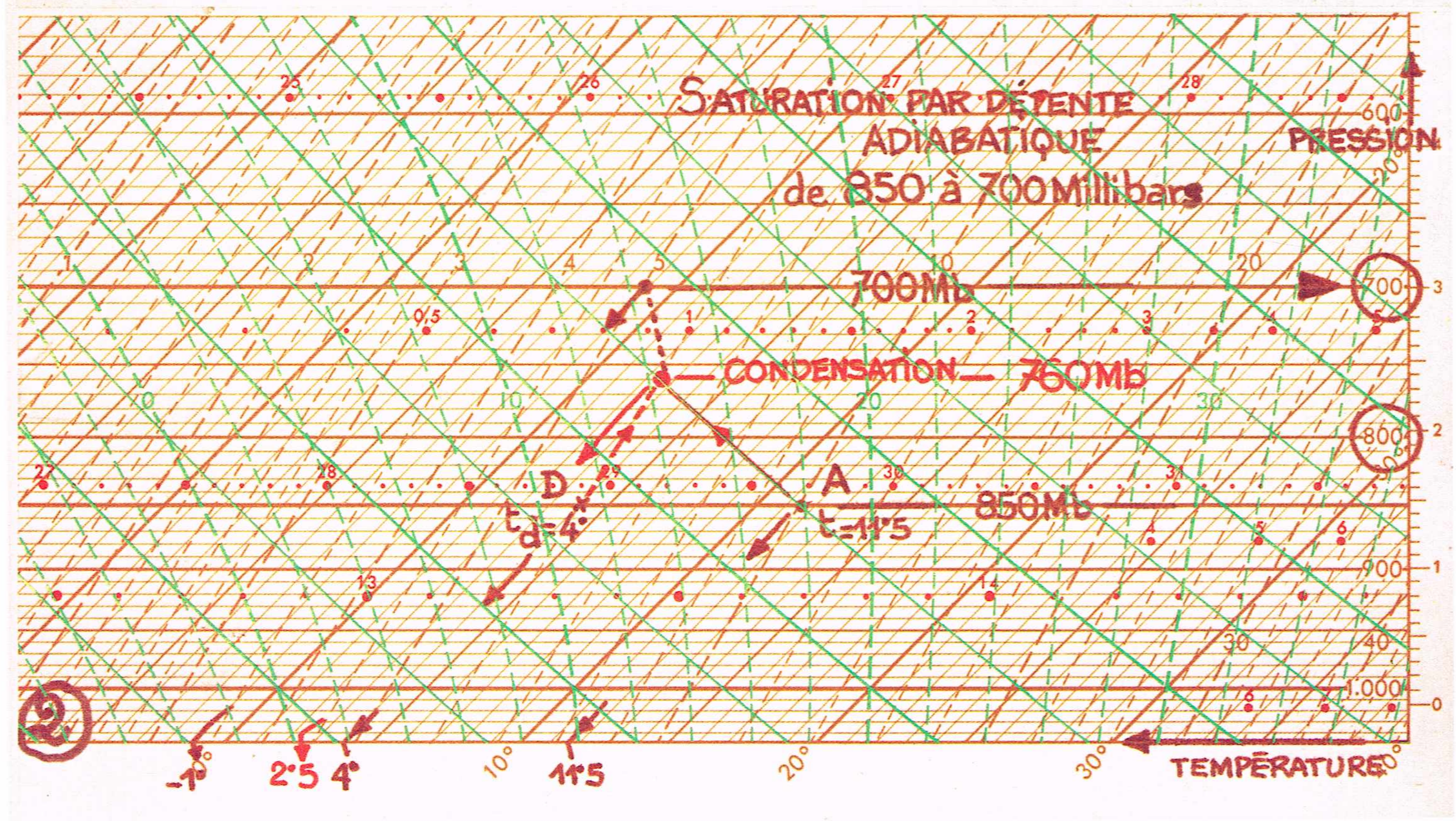

▲ ***En haut, émagramme n° 1 : saturation par refroidissement isobare.***

En bas, émagramme n° 2 : saturation par détente adiabatique.

Si le refroidissement isobare se poursuit au-delà de t_d, la capacité maximale en vapeur d'eau exprimée par r_w continue de décroître, et la particule ne peut plus garder en totalité la quantité de vapeur d'eau ; il y a alors *condensation* de la quantité excédentaire. Ce processus de condensation est celui de la formation de la rosée matinale ou des brouillards nocturnes qui portent l'appellation de *brouillards de rayonnement* (pour les distinguer des autres brouillards, formés d'une manière différente).

— La *saturation et la condensation* peuvent intervenir *par détente adiabatique* (émagramme n° 2). Dans ce cas, la particule subit une détente adiabatique en changeant de niveau de pression. Le point d'état qui la représente (P_0, t_0) vient en (P_1, t_1) en suivant une ligne adiabatique sèche,

t_d étant la température du point de rosée correspondant à P_0, t_0. Comme pour le cas précédent, tant que la saturation n'intervient pas, cette transformation ne modifie en rien la composition de la particule d'air humide. On constate une décroissance de r_w alors que r reste inchangé. Au point d'état (P_1, t_1), on peut calculer que r_w (P_1, t_1) $= r_w$ (P, t_d). L'air est saturé. Le point d'état ainsi obtenu (P_1, t_1) est appelé *point de condensation*, dont on peut donner la définition suivante : la température t_c du point de condensation d'une particule d'air humide est la température à laquelle cette particule devient saturée lorsqu'elle subit une détente adiabatique. Pour une telle particule, si le soulèvement et la détente se poursuivent au-delà du niveau de pression du point de condensation, le point d'état (P, t_c) de la particule suit alors la pseudo-adiabatique du point de condensation sur l'émagramme, car il s'agit maintenant d'une particule saturée. Cette nouvelle transformation exige qu'une partie de la vapeur d'eau contenue dans la particule atmosphérique se condense. Dès que la température du point de condensation est atteinte, il y a apparition de gouttelettes d'eau dans l'atmosphère, donc il y a formation de nuages. Le soulèvement de masses d'air peut être synoptique (cas des perturbations atmosphériques) ou local (formation de nuages isolés à fort développement vertical).

— La *saturation* et la *condensation* peuvent se produire *par apport de vapeur d'eau*. Ce phénomène se produit surtout dans les basses couches de l'atmosphère où, par exemple, des particules d'air humide non saturé sont en contact avec de l'eau liquide (cas de formation de brouillard d'évaporation). Tant que e de la particule est inférieur à $e_{w(t_{eau})}$, il y a évaporation, donc apport d'humidité dans la particule. L'évaporation cesse dès que $e = e_{w(t)}$. Pour arriver à saturation, il faut que :

$$t_{\text{part.}} < t_{\text{eau}}, \text{ ce qui entraîne } e_{\text{part.}} < e_{w(t_{\text{air}})} < e_{w(t_{\text{eau}})}.$$

Lorsque $e = e_{w(t_{air})}$, la vapeur d'eau est saturante, l'air est saturé, et on a : $e = e_{w(t_{air})} < e_{w(t_{eau})}$.
L'évaporation se poursuit donc, mais, l'air étant saturé, il y a condensation immédiate du supplément de vapeur d'eau, donc formation de gouttelettes d'eau. La saturation et la condensation peuvent encore se produire par mélange et par turbulence.

Par le processus de mélange, on peut théoriquement considérer un mélange « isobare » de particules non saturées. Ce phénomène peut se produire dans la nature, mais il est extrêmement rare et conduit, lorsqu'il se produit, à des condensations de faible importance.

Le processus par turbulence est plus complexe et donne des condensations importantes. Il s'agit bien entendu de turbulence d'origine thermique qui modifie temporairement la répartition verticale de la température et de l'humidité. Si l'air n'est pas saturé, on constate que la turbulence tend à uniformiser les températures potentielles et les rapports de mélange. On observe souvent que, dans la couche considérée, l'action de la turbulence a un effet analogue à un refroidissement au sommet de la couche brassée, et l'on constate une augmentation de r dans cette partie supérieure de la couche. Ce refroidissement et cette augmentation de r peuvent dans certains cas amener la saturation et la condensation.

Comme pour les particules saturées, la notion de température pseudo-adiabatique du thermomètre mouillé θ'_w s'applique également aux particules d'air humide. C'est la température prise par une particule d'air humide amenée à saturation par détente adiabatique, puis maintenue saturée et ramenée adiabatiquement au niveau de pression 1 000 millibars.

Ayant étudié le comportement de la particule, nous allons voir maintenant, à l'échelle plus grande, les évolutions des masses d'air.

Les masses d'air et leur évolution

On admet en général que l'atmosphère n'est pas constituée par une masse fluide parfaitement homogène, mais par un ensemble de parties plus ou moins différenciées les unes des autres appelées *masses d'air*. Il arrive que la différenciation entre deux masses d'air soit tellement importante qu'il se crée une *surface de discontinuité* qui les sépare. En fait, la masse d'air doit souvent son caractère principal à son lieu d'origine. Une masse d'air venant de Sibérie sera évidemment froide, et cet air, au cours de son déplacement, gardera plus ou moins longtemps son caractère d'origine. Mais après un long séjour sur un autre lieu, elle pourra perdre son caractère d'origine pour prendre celui de la zone qui l'aura fortement influencée. Il est donc difficile de caractériser une masse d'air uniquement selon un seul critère. D'une manière idéale, la classification des types de masses d'air devrait s'effectuer au moyen de critères répondant aux conditions suivantes :

— différer d'une masse d'air à une autre ;

— être uniforme dans chacune des masses d'air horizontalement et verticalement ;

— être, pour une masse d'air donnée, très lentement variable dans le temps.

De nombreuses difficultés surgissent pour appliquer intégralement tous ces critères à une masse d'air afin de la caractériser. On a pris l'habitude de caractériser une masse d'air par sa température pseudo-adiabatique potentielle du thermomètre mouillé θ'_w. Cette grandeur a l'avantage de se conserver dans les mouvements verticaux adiabatiques ou pseudo-adiabatiques ; θ'_w ne subit des variations que lorsqu'il y a échange de chaleur entre la particule d'air à laquelle elle se rapporte et son milieu ambiant. θ'_w augmente s'il y a apport de chaleur dans la particule (apport sous forme de chaleur réelle ou latente de vaporisation) ; θ'_w diminue lorsque la particule cède de la chaleur au milieu ambiant. L'analyse de l'évolution des masses d'air a pour principale règle qu'à tout changement important de type de masse d'air correspondent des discontinuités de θ'_w.

Évolution d'une masse d'air par refroidissement à la base

Si une masse d'air se trouve en contact avec une surface terrestre froide, en l'absence de vent, il s'établit un transfert de chaleur dans le sens air-sol. Ce transfert se produit uniquement par conduction et rayonnement puisqu'en l'absence de mouvement (vent), la convection est nulle. Le refroidissement de la masse d'air par la base a pour effet de diminuer la θ'_w, surtout dans les basses couches de l'atmosphère. S'il y a du vent, l'agitation turbulente a un double effet : d'une part, elle rend plus épaisse la couche refroidie, et, d'autre part, elle limite le refroidissement des basses couches de l'atmosphère. Dans ce cas, la décroissance de la θ'_w est moins grande que précédemment.

Il faut remarquer qu'en hiver, les masses d'air situées sur les continents très froids se refroidissent beaucoup par leur base. Le phénomène devient alors important et durable. Les masses d'air qui présentent cette particularité sont appelées *radiatives*. On les classe dans le *type R* pour rappeler que le rayonnement du sol est le principal facteur responsable de ce phénomène.

Évolution d'une masse d'air par réchauffement à la base

Si une masse d'air froid se trouve en contact avec une surface terrestre chaude, il s'établit cette fois un flux de chaleur dans le sens sol-atmosphère. A l'origine, le transfert de chaleur se produit, comme pour le cas précédent, par rayonnement et par conduction. On observe dans ce cas une élévation de température ainsi que de θ'_w dans les basses couches. Mais on constate également une très rapide décroissance des températures et des θ'_w avec l'altitude. A ce profil type correspond, comme nous le verrons plus loin, un équilibre vertical instable. Une convection thermique, liée à ce type d'équilibre instable, apparaît rapidement. L'apport de chaleur augmente très rapidement avec le jeu du brassage des basses couches. Les masses d'air présentant ce type de particularités sont dites *convectives du type C*. On les rencontre dans les invasions froides sur sol relativement chaud ou sur les océans.

Il est nécessaire, dans ce type de masse d'air, de considérer son évolution diurne en fonction des variations diurnes de la température en surface. Contrairement au refroidissement nocturne, qui stabilise les basses couches, le réchauffement à la base d'une masse d'air accroît l'instabilité qui favorise la propagation de la chaleur en altitude et, par là même, l'extension de l'instabilité en altitude. Un sondage nocturne en température et humidité met souvent en évidence une inversion de basses couches, marquant en fait le refroidissement nocturne du sol. Ce type de structure thermique se classe en *type convectif avec inversion nocturne, type Ci*.

▶ *Évolution cinématique d'une masse d'air.*

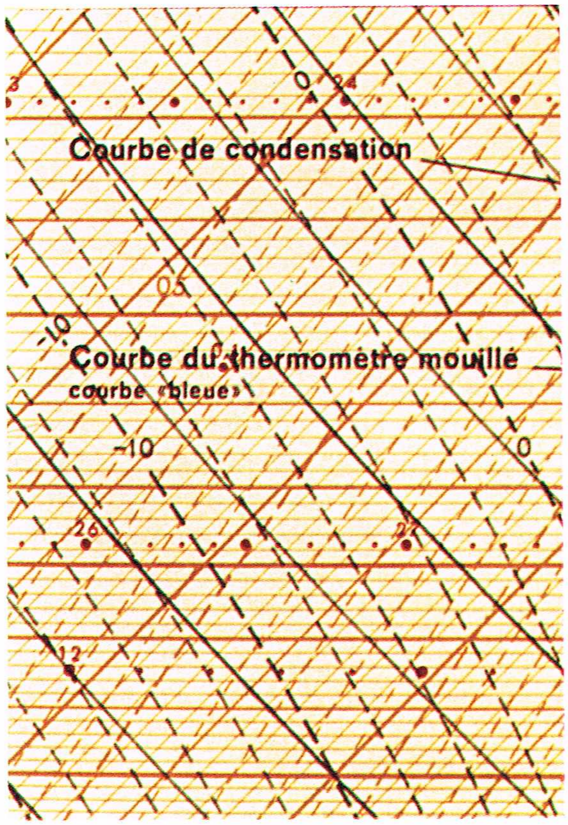

C. Fons

En hiver, lorsque le refroidissement l'emporte sur le réchauffement, l'inversion nocturne ne disparaît pas au cours de la journée. Comme, chaque nuit suivante, le refroidissement s'accentue dans les basses couches, la masse d'air évolue assez rapidement vers le type radiatif.

Évolution cinématique d'une masse d'air

Lorsqu'une masse d'air se déplace sur une surface terrestre ou marine dont la température est voisine de la sienne, les échanges de chaleur s'effectuant dans le système terre-atmosphère sont faibles et souvent lents. Pourtant la masse d'air peut continuer à évoluer par elle-même en puisant de la chaleur par transfert interne d'une couche à une autre. Cette évolution est en général dirigée par les mouvements verticaux (ascendants ou descendants). On désigne ce type de masse d'air sous le qualificatif de *cinématique de type K,* car toutes les évolutions qu'elle subit sont d'origine cinématique (la lettre *K*, qui provient du radical grec de cinématique, a été conservée pour éviter toute confusion avec le type C).

Les mouvements ascendants synoptiques provoquent, au sein de la masse d'air, une augmentation de l'humidité relative qui peut aboutir dans certains cas à la saturation de la masse d'air et également à un renforcement considérable de l'instabilité. En conséquence, les sondages de ce type de masse d'air seront caractérisés par des courbes d'état et du thermomètre mouillé très voisines (ce qui matérialise la grande humidité de l'air) et par des tranches saturées pour lesquelles les deux courbes seront confondues.

La subsidence a les conséquences inverses : diminution de l'humidité relative avec, dans certains cas, désaturation de l'air et dissipation des nuages. La subsidence engendre un renforcement général de la stabilité. Tout cela se traduit sur un sondage par l'écartement de plus en plus grand entre la courbe d'état et la courbe du thermomètre mouillé. Souvent, il apparaît sur les deux courbes une discontinuité qui correspond à une inversion : c'est la surface de subsidence, véritable couvercle qui freine tous mouvements convectifs pouvant prendre naissance au-dessous d'elle. Une masse d'air qui présente ces caractéristiques est dite *cinématique divergente type Kd.*

Si la masse d'air est le siège de mouvements convectifs importants, le brassage qui en résulte a pour conséquence le mélange vertical des différentes couches et la répartition uniforme de la chaleur. Cela se traduit par une homogénéisation au sein de la masse d'air des θ'_w, et la courbe bleue des sondages prend alors l'allure d'une pseudo-adiabatique saturée. On remarque également une décroissance très régulière de la température. Une telle masse d'air se classe dans la catégorie *cinématique de mélange type Km.*

Bien sûr, ce classement est assez grossier. Aussi est-il nécessaire de prévoir un certain nombre de variantes pour affiner la classification. Les principales variantes que l'on trouve fréquemment sont :

— les *masses d'air du type Cc,* qui présentent un réchauffement par la base, associé à une ascendance synoptique importante ; le type Cc (convectif convergent) réunit à la fois les caractères des masses d'air du type C et du type Kc. Ce type de masse d'air est très instable dans les basses couches. Par suite de l'ascendance, la saturation sera atteinte aux niveaux moyens et supérieurs, ce qui favorisera le développement de puissants nuages à extension verticale importante, générateurs de violents orages ;

— les *masses d'air du type Cd,* qui présentent un réchauffement par la base associé à une subsidence ; le type C*d* (convectif divergent) se caractérise par une instabilité dans les basses couches, due au réchauffement à la base, et par la présence d'une surface de subsidence qui bloque tous les mouvements convectifs prenant naissance dans les basses couches ; en l'absence de soulèvement synoptique ou de subsidence, l'air convectif est dit *normal du type Cn.*

Nous avons vu que le refroidissement des basses couches entraîne des modifications dans la structure verticale. La présence d'une inversion nocturne de température appelée à disparaître au cours de la matinée suivante se signale par un indice *i.* Un refroidissement temporaire peut se produire si la masse d'air se déplace sur une surface froide. La turbulence engendrée favorise le transfert de chaleur vers le bas. On note ce refroidissement par l'indice *r.*

Sur l'Europe, nous trouvons différents types de masses d'air, que l'on a coutume de classer en grands groupes en fonction de leur lieu d'origine.

— Les *masses d'air « arctique »* ou *« polaire »,* comme leur nom l'indique, viennent des latitudes les plus septentrionales. C'est donc de l'air très froid et très sec, du type radiatif. De temps à autre, ces masses d'air s'écoulent vers des latitudes plus méridionales. Elles sont responsables des invasions froides hivernales sur l'Europe occidentale, qui se produisent soit par régime de nord, soit par régime de nord-est et parfois d'est. Suivant la trajectoire de l'air, on peut avoir une évolution assez marquée, surtout si cet air s'écoule sur une surface océanique. Dans ce cas, il se réchauffe par la base et s'humidifie. On classe alors cet air polaire dans la *catégorie polaire maritime mP.* Par contre, si la trajectoire de l'air s'effectue uniquement sur une surface continentale (cas de la circulation d'est hivernale sur l'Europe), il garde ses caractéristiques d'origine : il est très froid, très sec, du type radiatif. On classe ce type d'air en *catégorie polaire continentale cP.*

— Les *masses d'air « tropicales »* ont leur origine dans les zones tropicales. Elles sont constituées par de l'air chaud plus ou moins humide. Lorsqu'elles se déplacent sur une surface océanique, elles sont du *type tropical maritime,* avec une structure de *type Kd* ou *Cd.* Entraînées par les courants aériens vers les latitudes plus septentrionales, une modification de structure les transforme en *type Km.* En été, ces masses d'air se réchauffent à nouveau sur les surfaces continentales et deviennent instables *(type C).*

L'équilibre atmosphérique

Nous avons vu dans les chapitres précédents l'évolution de chaque élément qui caractérise une masse d'air. Nous allons voir dans ce chapitre, d'une manière plus détaillée, la répartition verticale dans l'atmosphère de chaque paramètre caractéristique, cette répartition déterminant en fait ce que l'on appelle l'équilibre atmosphérique.

L'atmosphère étant un fluide, on peut lui appliquer le principe fondamental de l'hydrostatique concernant les variations de pression en fonction de la variation de profondeur (donc dans l'atmosphère, en prenant un système de coordonnées adéquates, la variation d'altitude) :

$$dP = \rho g dz \text{ ou } \overrightarrow{\text{grad}}\ P = \frac{dP}{dz} = \rho g.$$

Cela signifie que le vecteur $\overrightarrow{\text{grad}}$ P (gradient de pression) est partout vertical, dirigé vers le bas, et son intensité est ρg. Cette relation exprime l'équilibre hydrostatique du fluide atmosphérique au repos. Dans ce système en équilibre, deux forces interviennent : la résultante des forces de pression $\overrightarrow{F_p}$ et le poids P du fluide atmosphérique. La force $\overrightarrow{F_p}$ est la résultante de forces perpendiculaires aux surfaces sur lesquelles elles s'exercent. Elle est donc verticale et perpendiculaire aux surfaces isobares (surfaces pour lesquelles la valeur de la pression est la même). Elle est dirigée vers le haut (c'est-à-dire vers les pressions décroissantes) et est opposée au vecteur $\overrightarrow{\text{grad}}$ P. $\overrightarrow{F_p} = -\frac{m}{\rho}\overrightarrow{\text{grad}}$ P représente la valeur de l'intensité du vecteur $\overrightarrow{F_p}$. Mais l'atmosphère n'est pas un fluide que l'on peut considérer comme étant au repos. Les surfaces isobares sont plus ou moins inclinées. Aussi la relation $\overrightarrow{F_p} = -\frac{m}{\rho}\overrightarrow{\text{grad}}$ P, qui est l'expression vectorielle de la formule précédente, peut se projeter sur un système d'axes orthogonaux pris dans un plan horizontal et un plan vertical.

$\overrightarrow{F_{P_h}} = -\frac{m}{\rho}\overrightarrow{\text{grad}_h}$ P représente cette projection dans le plan horizontal et

$\overrightarrow{F_{P_v}} = -\frac{m}{\rho}\overrightarrow{\text{grad}_v}$ P est celle selon la verticale.

$\overrightarrow{F_{P_h}}$ est perpendiculaire aux lignes isobares du plan horizontal dirigées vers les basses pressions et a pour valeur $\overrightarrow{F_{P_h}} = -\frac{m}{\rho}\frac{\Delta P}{\Delta l}$, ΔP étant la différence de pression entre deux lignes isobares séparées par une distance horizontale Δl.

$\overrightarrow{F_{P_v}}$ est dirigée vers les basses pressions et a pour valeur $\overrightarrow{F_{P_v}} = -\frac{m}{\rho}\frac{\Delta P}{\Delta z}$, où Δz est la distance verticale qui sépare deux surfaces isobares dont les cotes diffèrent de ΔP.

En fait, malgré les mouvements de l'atmosphère, on peut considérer que l'équilibre vertical est réalisé au sein du fluide atmosphérique. La relation d'équilibre traduisant ce fait, pour l'atmosphère, s'exprime alors par $dP = -\rho g dz$. En considérant l'équation d'état de l'air atmosphérique, l'équilibre peut se traduire par l'équation :

$$dz = -\frac{R_a}{g} T_v \frac{dP}{P},$$

ce qui permet de calculer immédiatement le gradient vertical de la pression :

$$\overrightarrow{\text{grad}_v}\ P = \frac{dP}{dz} = \frac{-g}{R_a}\frac{P}{T_v}.$$

En météorologie, on doit connaître le champ de pression à tous les niveaux, ce qui implique une correspondance entre la pression et l'altitude par une loi de variation de la forme $z = f$ (P). La formule de Laplace nous donne cette relation pour l'atmosphère dite « atmosphère type ». Les hypothèses de base pour établir cette formule consistent à considérer l'accélération de la pesanteur comme constante entre deux niveaux de pression et à définir la température virtuelle selon une verticale comme une fonction logarithmique de la pression, de la forme : $T_v = k$ Log P (k étant une constante). Compte tenu de ces hypothèses, on effectue l'intégration de la relation :

$$dz = -\frac{R_a}{g} T_v \frac{dP}{P},$$

soit :

$$\int_{z_0}^{z} dz = -\frac{R_a}{g}\int_{T_{v0}}^{T_v} T_v\, dT_v,$$

ce qui donne en passant par la deuxième hypothèse :

$$z - z_0 = 67{,}445\ T_{v_m} \log \frac{P_0}{P},$$

où T_{v_m} représente la température virtuelle moyenne de la couche d'atmosphère comprise entre les cotes z et z_0.

En météorologie, on utilise également cette formule de Laplace pour effectuer la réduction de pression au niveau de la mer. Cette opération consiste, connaissant la pression au niveau z du point d'observation, à calculer la pression qu'aurait effectivement ce point d'observation s'il était situé au niveau de la mer. C'est cette pression qui figure sur les cartes météorologiques dressées pour la surface du globe.

L'hypothèse qui consiste à considérer g constant est assez grossière, et on peut s'affranchir de cette hypothèse en faisant appel à la notion de géopotentiel. Si l'on exprime le travail élémentaire d'une particule m soulevée d'une hauteur dz, on a $dw = m \cdot gdz$. Le travail fourni par unité de masse constitue une caractéristique bien définie de la couche d'épaisseur dz. On l'appelle *différence de géopotentiel* entre les niveaux z et $z + dz$, et on l'exprime par la formule :

$$d\Phi = \frac{dw}{m} = gdz$$

(en joules par kg ; équation aux dimensions : $[L^2 T^{-2}]$). Le géopotentiel s'obtient par intégration $\Phi = \int_0^z gdz$. Si on utilise l'unité pratique qui est le *mètre géopotentiel* (mgp) correspondant à 9,8 joules/kg et que l'on désigne par Z ce géopotentiel exprimé en mètres géopotentiels, on obtient :

$$d\Phi = gdz = GdZ,$$

où G vaut 9,8.

Dans ce cas, l'équilibre statique précédemment évoqué s'écrit : $dP = -\rho G dZ$, ou encore, en utilisant la température virtuelle,

$$dZ = -\frac{R_a}{G} T_v \frac{dP}{P}.$$

Dans le chapitre relatif aux masses d'air, nous n'avons évoqué que la classification et l'évolution des différents types de masse d'air. Nous allons voir maintenant, pour une même masse d'air, le problème de la stabilité et de l'instabilité verticales. Ces dernières se définissent par rapport à la mécanique classique : l'équilibre est stable si toute particule d'air atmosphérique déplacée verticalement (quel que soit le sens) de son point d'équilibre tend à y revenir sans qu'aucune impulsion intervienne. On dit qu'il y a *stabilité*. Si, au contraire, la particule tend, après le déplacement, à s'éloigner de plus en plus de son point initial, on dit qu'il y a *instabilité*. Enfin, si, pour de petites perturbations verticales, on observe une stabilité de la particule tandis que, pour de plus grandes perturbations, on observe une instabilité, on définit ce que l'on appelle l'*instabilité sélective*. Nous allons voir en détail ce que représentent ces notions pour une particule de l'atmosphère, et les conséquences que cela représente dans la schématisation de l'atmosphère en un point sur un émagramme 761.

Considérons une tranche d'atmosphère prise entre deux niveaux définis par leur pression P_0 et P_1 et leur température T_0 et T_1. L'équilibre de cette tranche s'exprime, comme nous l'avons vu, par $\overrightarrow{F_{P_v}} + \vec{P} = 0$, où $\vec{P}$ représente le poids, $\vec{P} = m\vec{g}$. Pour une particule de cette tranche d'atmosphère, l'équation d'état se traduit par :

$$P_0V_0 = mR_aT_0,$$

d'où :

$$m = \frac{P_0V_0}{R_aT_0}.$$

Au niveau initial, l'équilibre se traduit par :

$$|\overrightarrow{F_{P_v}}| = |\vec{P}| = \frac{P_0V_0}{R_aT_0} g.$$

Si l'on soulève la particule jusqu'au niveau P_1, on aura :

$$P_1V_p = m'R_aT_1,$$

d'où :

$$m' = \frac{P_1V_p}{R_aT_1}.$$

L'équilibre vertical s'exprime alors par :

$$F_a = m'g = \frac{P_1V_p}{R_aT_1} g.$$

Faisons le rapport des forces $\frac{\vec{F_a}}{\vec{P}}$.

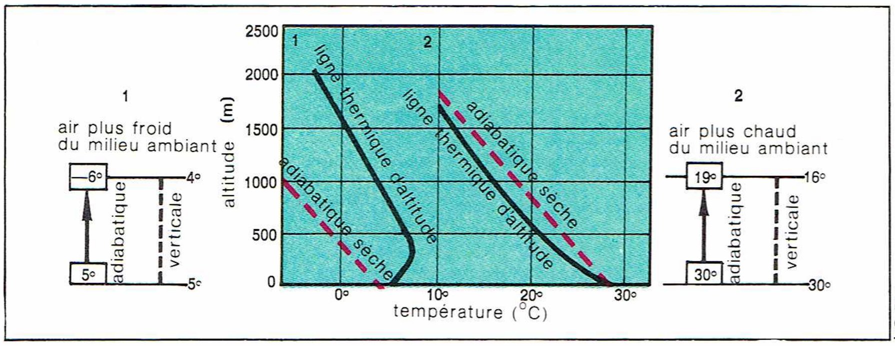

I.G.D.A.

▲ **Stabilité** *et* **instabilité** *de l'air : l'air est stable (1) quand le gradient thermique vertical ne dépasse pas le gradient adiabatique sec ; dans le cas contraire, l'air est instable (2).*

Si ce rapport est supérieur à 1, la résultante des deux forces est dirigée nécessairement vers le haut, donc il y a instabilité. Si ce rapport est inférieur à 1, la résultante est alors dirigée vers le bas, donc il y a stabilité. Si ce rapport est égal à 1, il y a équilibre indifférent.

Voyons la représentation graphique de ces phénomènes sur un émagramme 761, c'est-à-dire l'application aux masses d'air des critères de stabilité ou d'instabilité. Dans le cas de l'atmosphère non saturée, il s'agit en fait de comparer la température T_1 du sommet d'une couche déterminée d'atmosphère à la température T_2, prise par une particule qui a été soulevée adiabatiquement depuis la base de la couche sans qu'il y ait au cours de ce soulèvement saturation de la particule.

Si $T_2 > T_1$, il y a *instabilité*. On obtient sur l'émagramme une courbe d'état (courbe reliant les températures) inclinée sur la gauche de la courbe adiabatique sèche issue du point d'état de la particule située à la base de la couche. Cette configuration traduit bien une décroissance verticale de la température potentielle de bas en haut de la couche, donc $\theta_2 > \theta_1$.

Si $T_2 < T_1$, il y a *stabilité*. La courbe d'état est alors inclinée sur la droite de la courbe adiabatique sèche issue du point d'état de la particule située à la base de la couche. Il y a croissance de la température potentielle, donc $\theta_2 < \theta_1$.

Cela nous conduit à retenir comme règle que, si, dans une couche non saturée, θ croît de la base au sommet, il y a stabilité. Si θ décroît, il y a instabilité.

Dans le cas où l'atmosphère est saturée, il suffit, dans le raisonnement précédent, de considérer, à la place de θ, θ'_w, la température pseudo-adiabatique potentielle du thermomètre mouillé. Si θ'_w croît dans une couche saturée, il y a stabilité verticale, et, si θ'_w décroît, il y a instabilité. Si l'on tient compte maintenant à la fois des variations verticales de θ tandis que l'air n'est pas saturé et des variations verticales de θ'_w quand l'air est saturé (pour saisir les phénomènes qui, en réalité, dans l'atmosphère, ne se passent pas à l'échelle de la particule mais à l'échelle synoptique), on obtient les règles suivantes pour une atmosphère dont les différentes couches ne sont pas initialement saturées :

— θ et θ'_w croissent : il y a *stabilité absolue ;* la couche absolument stable s'oppose aux mouvements verticaux de petite échelle.

— θ croît et θ'_w décroît : il y a *instabilité* dite *convective*. Si la courbe d'état de la couche est située à droite de la pseudo-adiabatique issue du point d'état situé en bas de la couche, on a une *instabilité convective latente (ICL)*. Cela veut dire que l'instabilité n'est pas possible dans l'état initial de la couche. Si la courbe d'état est située à gauche de la pseudo-adiabatique issue du point d'état de la base de la couche, on a une *instabilité convective et sélective (ICS)*. Cela veut dire que, malgré la stabilité initiale de la couche, l'instabilité est possible pour certaines particules qui subissent une ascendance forcée suffisamment importante.

— θ et θ'_w décroissent : il y a *instabilité absolue ;* dans cette couche, les mouvements verticaux se développent spontanément et s'amplifient.

— θ décroît et θ'_w croît : il y a *instabilité sèche ;* la saturation de la couche fait disparaître l'instabilité.

Tout cela permet de déterminer, en fonction des critères de stabilité et d'instabilité, des règles empiriques qui permettent de trouver, à partir des radio-sondages de l'atmosphère, les différents types de nuages que l'on peut avoir.

La mécanique de l'atmosphère

L'atmosphère étant un fluide, on peut lui appliquer les principes de la mécanique des fluides. Pour établir l'équation générale du mouvement, nous allons examiner les différentes forces en présence appliquées à un point de l'atmosphère situé à la latitude Φ.

— La *résultante des forces de pression* $\vec{F_p} = -\frac{1}{\rho}\overrightarrow{\text{grad}}\,P$ peut se décomposer dans un système rectangulaire de 3 axes suivant les valeurs :

$$\vec{F}_{Px} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x},\quad \vec{F}_{Py} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial y},\quad \vec{F}_{Pz} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial z}.$$

Sur les axes x et y, on obtient la composante horizontale de $\vec{F}_{Ph}$, tandis que, sur l'axe z, on obtient la composante verticale.

— Le *poids*, force verticale dirigée vers le bas, peut être assimilé à un vecteur $\vec{g}$ de composantes 0 sur x et y et de composante $-g$ sur z.

— La *résultante des forces de frottement* $\vec{F_f}$ se décompose en $\vec{F}_{fx}$, $\vec{F}_{fy}$, $\vec{F}_{fz}$.

— La *force d'inertie de Coriolis* $\vec{F_c}$ est introduite du fait de la rotation de la Terre sur elle-même. Rappelons que cette force s'applique à tous les corps en mouvement par rapport à la surface du globe. La force de Coriolis s'exprime par $\vec{F_c} = -2\,\vec{\Omega}\wedge\vec{V}$, avec $\Omega = 7{,}29 \cdot 10^{-5}$ radian/seconde puisque $\vec{\Omega}$ est le vecteur rotation instantanée de la Terre ; $\vec{V}$ est le vecteur vitesse de déplacement par rapport à la Terre (pour l'atmosphère, c'est en fait la vitesse du vent). Les composantes de $\vec{\Omega}$ sont :

$$\vec{\Omega}_x = 0,\qquad \vec{\Omega}_y = \Omega\cos\Phi,\qquad \vec{\Omega}_z = \Omega\sin\Phi.$$

Les composantes de $\vec{V}$ sont sur x : u, sur y : v, sur z : w (u et v sont les composantes de $\vec{V}_h$, c'est-à-dire le vecteur vitesse projeté dans le plan horizontal). En définitif, $\vec{F_c}$ a pour composantes :

$$\vec{F}_{cx} = -2\,\Omega\,(w\cos\Phi - v\sin\Phi)$$
$$\vec{F}_{cy} = -2\,\Omega\,u\sin\Phi$$
$$\vec{F}_{cz} = 2\,\Omega\,u\cos\Phi.$$

Toutes ces forces donnent une accélération $\vec{r} = \frac{\vec{dv}}{dt}$, et l'on peut écrire :

$$\vec{F_p} - \vec{g} + \vec{F_f} + \vec{F_c} = \vec{r} = \frac{\vec{dv}}{dt}$$

pour une masse unitaire. Cette équation, qui est l'équation du mouvement, peut se projeter sur les 3 axes suivant les composantes :

selon Ox
$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x} - 2\,\Omega\,(w\cos\Phi - v\sin\Phi) + F_{fx}$$

selon Oy
$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial y} - 2\,\Omega\,u\sin\Phi + F_{fy}$$

selon Oz
$$\frac{dw}{dt} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial z} + 2\,\Omega\,u\cos\Phi + F_{fz} - g.$$

Le mouvement horizontal a pour équation :

$$\frac{d\vec{V}_h}{dt} = \vec{F}_{ph} + \vec{F}_{ch} + \vec{F}_{fh}.$$

L'équation du mouvement selon la verticale peut s'exprimer par :

$$-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial z} - g = 0,$$

car, en comparant les ordres de grandeur de tous les termes, $\frac{dw}{dt}$ apparaît négligeable pour l'atmosphère ainsi que la composante verticale de la force de Coriolis et la composante verticale des forces de frottement. L'équation précédente exprime l'équilibre statique dans l'atmosphère, et nous avons vu précédemment qu'une des conséquences de cette équation d'équilibre est la correspondance pression-géopotentiel exprimée par la

formule de Laplace. On peut donc utiliser la pression comme coordonnée verticale dans le mouvement, à la place du géopotentiel. On obtient ce que l'on appelle alors la *coordonnée pression* qui peut se justifier en météorologie, car tous les niveaux atmosphériques sont repérés par leur pression. Pour un point quelconque de l'atmosphère, les coordonnées sont exprimées par x, y, Z (ou par x, y, P). Pour toute valeur A variable avec le temps, on peut écrire la relation $A = f(x, y, Z, t)$ ou en utilisant la coordonnée pression $A = f_1(x, y, P, t)$. Toute variation dA de la variable peut se calculer à partir des fonctions $f(x, y, Z, t)$ et de $f_1(x, y, P, t)$. On démontre qu'il existe un certain nombre de relations entre des dérivées partielles de ces deux fonctions, dont les plus remarquables sont les suivantes :

$$\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)_{y,Z,t} = \rho G \left(\frac{\partial Z}{\partial x}\right)_{y,P,t}$$

et :

$$\left(\frac{\partial P}{\partial y}\right)_{x,Z,t} = \rho G \left(\frac{\partial Z}{\partial y}\right)_{x,P,t};$$

$\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)_{y,Z,t}$ et $\left(\frac{\partial P}{\partial y}\right)_{x,Z,t}$ sont les composantes du vecteur gradient horizontal de pression $\overrightarrow{\text{grad}_h}$ P que nous avons vu dans les chapitres précédents.

$\left(\frac{\partial Z}{\partial x}\right)_{y,P,t}$ et $\left(\frac{\partial Z}{\partial y}\right)_{x,P,t}$ sont les composantes du vecteur gradient isobare de géopotentiel $\overrightarrow{\text{grad}_p}$ Z vu également précédemment.

Vectoriellement, les deux équations précédentes peuvent se résumer ainsi :

$$\overrightarrow{\text{grad}_h}\, P = \rho G\, \overrightarrow{\text{grad}_p}\, Z.$$

Ces deux vecteurs sont colinéaires et ont le même sens.

En coordonnées pression, la vitesse verticale $w = \frac{dZ}{dt}$ est définie par $\omega = \frac{dP}{dt}$. C'est alors, ainsi exprimée, la vitesse de variation de la pression que subissent les particules lors de leur déplacement. Il existe une relation approximative entre ces deux valeurs telle que :

$$\omega \,\#\, -\rho G w.$$

Il faut remarquer que les mouvements ascendants entraînent $w > 0$ mais $\omega < 0$, et inversement. Toujours en considérant la coordonnée pression, on peut réécrire les équations d'évolution précédentes. On obtient :

$$\frac{dA}{dt} = \left(\frac{\partial A}{\partial t}\right)_p + \left(\frac{\partial A}{\partial x}\right)_p \frac{dx}{dt} + \left(\frac{\partial A}{\partial y}\right)_p \frac{dy}{dt} + \left(\frac{\partial A}{\partial P}\right) \frac{dP}{dt},$$

l'indice p indiquant que la dérivée partielle se prend par rapport à la pression.

$$\frac{dA}{dt} = \left(\frac{\partial A}{\partial t}\right)_p + u \left(\frac{\partial A}{\partial x}\right)_p + v \left(\frac{\partial A}{\partial y}\right)_p + \omega \frac{\partial A}{\partial P}.$$

On obtient ainsi la dérivée d'évolution de la variable A prise par rapport au temps. Au point de coordonnées x, y, P, la valeur de $\left(\frac{\partial A}{\partial t}\right)_p$ est de :

$$\left(\frac{\partial A}{\partial t}\right)_p = \frac{dA}{dt} - \left[u\left(\frac{\partial A}{\partial x}\right)_p + v\left(\frac{\partial A}{\partial y}\right)_p\right] - \omega \frac{\partial A}{\partial P}.$$

La quantité entre crochets est appelée *advection isobare* de A. Elle vaut $-\overrightarrow{V_h} \cdot \overrightarrow{\text{grad}_p}\, A$, où $\overrightarrow{V_h}$ est le vecteur composante horizontale du vent et où $\overrightarrow{\text{grad}_p}$ A est le vecteur « gradient isobare » de A. $-\omega \frac{\partial A}{\partial P}$ est l'*advection verticale* de A.

Le mouvement horizontal décrit par l'équation vectorielle

$$\frac{\overrightarrow{dV_h}}{dt} = \overrightarrow{F_{Ph}} + \overrightarrow{F_{ch}} + \overrightarrow{F_{fh}}$$

se décompose suivant Ox et Oy en deux équations algébriques que nous avons vues plus haut. Si on se place hors de la couche de frottement, les composantes du vecteur $\overrightarrow{F_{fh}}$ sur Ox et Oy sont nulles. Dans ce cas, $\overrightarrow{F_{Ph}}$ peut s'écrire :

$$\overrightarrow{F_{Ph}} = -\frac{1}{\rho}\, \overrightarrow{\text{grad}_h}\, P = -G\, \overrightarrow{\text{grad}_p}\, Z.$$

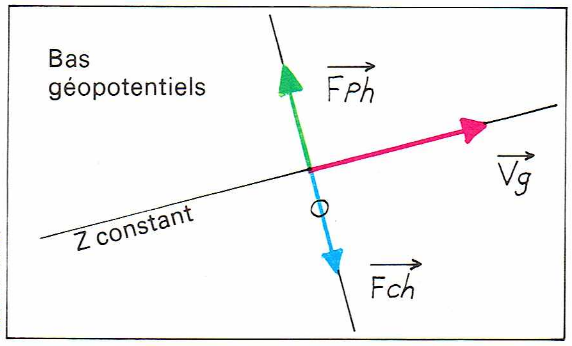

Richard Colin

◀ ***Représentation graphique de l'hypothèse géostrophique.***

Donc $\overrightarrow{F_{Ph}}$ est une force perpendiculaire aux lignes isohypses (lignes d'égal géopotentiel) et proportionnelle au gradient $\frac{\Delta Z}{\Delta l}$. Compte tenu des approximations que l'on peut faire, $\overrightarrow{F_{ch}}$ a des composantes valant sur

Ox : $+ 2\,\Omega\, v \sin \Phi$ et sur Oy : $- 2\,\Omega\, u \sin \Phi$

ou d'une manière plus simple fv et $-fu$; f est appelé « paramètre de Coriolis ». Il est positif dans l'hémisphère Nord et négatif dans l'hémisphère Sud. On pose habituellement $f = 2\,\Omega \sin \Phi$. Dans ce cas,

$$\overrightarrow{F_{ch}} = -f\,(\vec{k} \wedge \overrightarrow{V_h}),$$

ce qui signifie que $\overrightarrow{F_{ch}}$ est perpendiculaire à $\overrightarrow{V_h}$. Il est, dans l'hémisphère Nord, orienté vers la droite de $\overrightarrow{V_h}$, et, inversement, dans l'hémisphère Sud, il est orienté vers la gauche de $\overrightarrow{V_h}$. Dans l'équation vectorielle, $\frac{\overrightarrow{dV_h}}{dt}$ représente l'accélération subie par les particules synoptiques dans leurs mouvements horizontaux. Compte tenu de tout ce qui vient d'être exprimé, pour l'équation de mouvement horizontal, $\overrightarrow{F_{Ph}}$ et $\overrightarrow{F_{ch}}$ sont deux forces en équilibre. On doit donc pouvoir obtenir une solution de l'équation vectorielle en posant $\frac{\overrightarrow{dV_h}}{dt} = 0$. Cette hypothèse de calcul porte le nom d'*hypothèse géostrophique*, ce qui suppose qu'il y a équilibre dynamique entre la composante horizontale des forces de pression et celle de la force de Coriolis, c'est-à-dire

$$\overrightarrow{F_{Ph}} + \overrightarrow{F_{ch}} = 0$$

ou encore :

$$-G\, \overrightarrow{\text{grad}_p}\, Z - f\,(\vec{k} \wedge \overrightarrow{V_g}) = 0$$

($\overrightarrow{V_g}$ est le vecteur vent dans l'hypothèse géostrophique). Si on reporte $\overrightarrow{V_g}$ en un point O quelconque, on déduit que $\overrightarrow{F_{ch}}$ est perpendiculaire à $\overrightarrow{V_g}$ et à sa droite (hémisphère Nord). Comme dans l'hypothèse géostrophique,

$$\overrightarrow{F_{Ph}} + \overrightarrow{F_{ch}} = 0,$$

on en déduit immédiatement que $\overrightarrow{F_{Ph}}$ est perpendiculaire à l'isohypse passant par O, et qu'il est dirigé vers les basses valeurs de géopotentiels. On énonce la règle suivante : dans l'hémisphère Nord, le vent géostrophique est parallèle aux isohypses et laisse les bas géopotentiels sur sa gauche (schéma ci-dessus).

Reprenons l'équation vectorielle :

$$-f\,(\vec{k} \wedge \overrightarrow{V_g}) = G\, \overrightarrow{\text{grad}_p}\, Z$$

ou encore :

$$f v_g = G \left(\frac{\partial Z}{\partial x}\right)_p$$

et :

$$-f \cdot u_g = G \left(\frac{\partial Z}{\partial y}\right)_p,$$

d'où :

$$v_g = \frac{G}{f}\left(\frac{\partial Z}{\partial x}\right)_p \quad \text{et} \quad u_g = -\frac{G}{f}\left(\frac{\partial Z}{\partial y}\right)_p,$$

ce qui donne : $\overrightarrow{V_g} = \frac{G}{f}\,(\vec{k} \wedge \overrightarrow{\text{grad}_p}\, Z).$

On voit donc que, pour orienter $\overrightarrow{Vg}$ par rapport à $\overrightarrow{\text{grad}}$ Z, il suffit de faire un angle de $+\frac{\pi}{2}$ à $\overrightarrow{Vg}$ par rapport à $\overrightarrow{\text{grad}_p}$ Z.

▶ ***Représentation graphique de la force du vent lorsque le frottement n'est pas négligeable.***

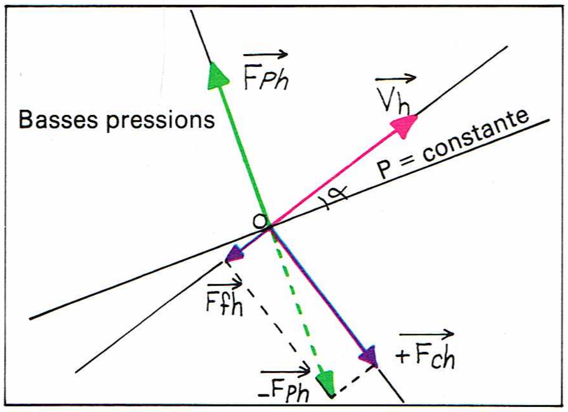

Richard Colin

La valeur de $\overrightarrow{V_g}$ est de :

$$\left|\overrightarrow{V_g}\right| = \left|\frac{G}{f}\,\overrightarrow{\text{grad}_p}\,Z\right| = \left|\frac{G}{f}\,\frac{\Delta Z}{\Delta l}\right|$$

Cela exprime que la vitesse du vent géostrophique est proportionnelle au gradient de géopotentiel, c'est-à-dire inversement proportionnelle à l'écartement des lignes isohypses. Malgré la simplicité de l'hypothèse du vent géostrophique, ce dernier donne une bonne approximation de la valeur du vent réel. Cette hypothèse confirme la règle de Buys Ballot, qui énonce que, dans l'hémisphère Nord, les vents tournent dans le sens horaire autour des zones de hautes pressions et dans le sens antihoraire autour des zones de basses pressions ; la règle est inversée pour l'hémisphère Sud. On remarque également que, comme le vent réel, le vent géostrophique est d'autant plus rapide que les lignes isohypses sont resserrées et que, à écartement égal des lignes isohypses, le vent est d'autant plus rapide que la latitude est faible. Cependant, dans certains cas, le vent géostrophique s'écarte notablement du vent réel, en particulier lorsque la courbure des trajectoires des particules atmosphériques est très prononcée (ce qui se passe toujours au voisinage des dépressions). Dans ce cas, l'hypothèse $\frac{d\overrightarrow{V_h}}{dt} = 0$ n'est plus satisfaisante, pas plus qu'elle ne l'est aux latitudes équatoriales, où le paramètre de Coriolis tend vers 0, et donc où le vent tend vers une valeur infinie, ce qui n'est pas concevable en réalité.

Nous venons de considérer le cas où nous nous trouvons en dehors de la couche de frottement. Dans les basses couches de l'atmosphère, le frottement n'est pas négligeable. Considérons (schéma ci-contre) comme encore négligeables les accélérations subies par les particules synoptiques dans leurs déplacements ; l'équation vectorielle peut s'écrire $\overrightarrow{F_{Ph}} + \overrightarrow{F_{ch}} + \overrightarrow{F_{fh}} = 0$. Si $\overrightarrow{Vh}$ est le vecteur vent d'un point 0 quelconque pris dans la basse couche de l'atmosphère, on en déduit $\overrightarrow{F_{ch}}$ et $\overrightarrow{F_{fh}}$, car $\overrightarrow{F_{Ph}} = -(\overrightarrow{F_{ch}} + \overrightarrow{F_{fh}})$. Donc on peut tracer $\overrightarrow{F_{Ph}}$ qui est opposée à la résultante $-\overrightarrow{F_{Ph}}$ des vecteurs $\overrightarrow{F_{fh}}$ et $\overrightarrow{F_{ch}}$. On en déduit que, dans la couche de frottement, le vent synoptique laisse les basses pressions à sa gauche dans l'hémisphère Nord. Il forme avec l'isobare du lieu un angle aigu et pointe vers les basses pressions. Cet angle aigu varie suivant l'importance des forces de frottement. Si le frottement est nul, $\overrightarrow{F_{fh}}$ s'annule, et l'on retrouve l'équilibre géostrophique défini plus haut. L'intensité du vent, toutes proportions gardées, augmente au fur et à mesure que les forces de frottement diminuent. Or, ces forces diminuent avec l'altitude. Donc la force du vent augmente avec l'altitude. En fait, dans l'atmosphère, la circulation de l'air à un niveau donné ne s'organise pas d'une manière indépendante par rapport à ce qui se passe dans les niveaux voisins. Il existe donc une liaison verticale entre les vecteurs vents des différents niveaux de l'atmosphère. Si l'on considère deux niveaux de pression P_0 et P_1 et si le vent géostrophique du niveau P_0 en un point A quelconque est $\overrightarrow{V_{g0}}$, on a :

$$\overrightarrow{V_{g0}} = \frac{G}{f}\,(\vec{k} \wedge \overrightarrow{\text{grad}_p}\,Z_0).$$

Si $\overrightarrow{V_{g1}}$ est le vent géostrophique d'un point B situé dans P_1 à la verticale de A, on a :

$$\overrightarrow{V_{g1}} = \frac{G}{f}\,(\vec{k} \wedge \overrightarrow{\text{grad}_p}\,Z_1).$$

Soit $\overrightarrow{V_T}$ le vecteur différence vectorielle des deux autres :

$$\overrightarrow{V_T} = \overrightarrow{V_{g1}} - \overrightarrow{V_{g0}}.$$

Par définition, $\overrightarrow{V_T}$ est nommé *vecteur vent thermique* pour la couche P_0, P_1 à la verticale du point A. On démontre que la qualification de vent thermique de $\overrightarrow{V_T}$ est justifiée par le fait que $\overrightarrow{V_T}$ est parallèle aux isothermes moyennes de la couche considérée et qu'il laisse les basses températures sur sa gauche dans l'hémisphère Nord et sur sa droite dans l'hémisphère Sud. L'intensité du vecteur $\overrightarrow{V_T}$

▼ ***Représentation schématique de la distribution des vents et des zones de pression au niveau du sol.***

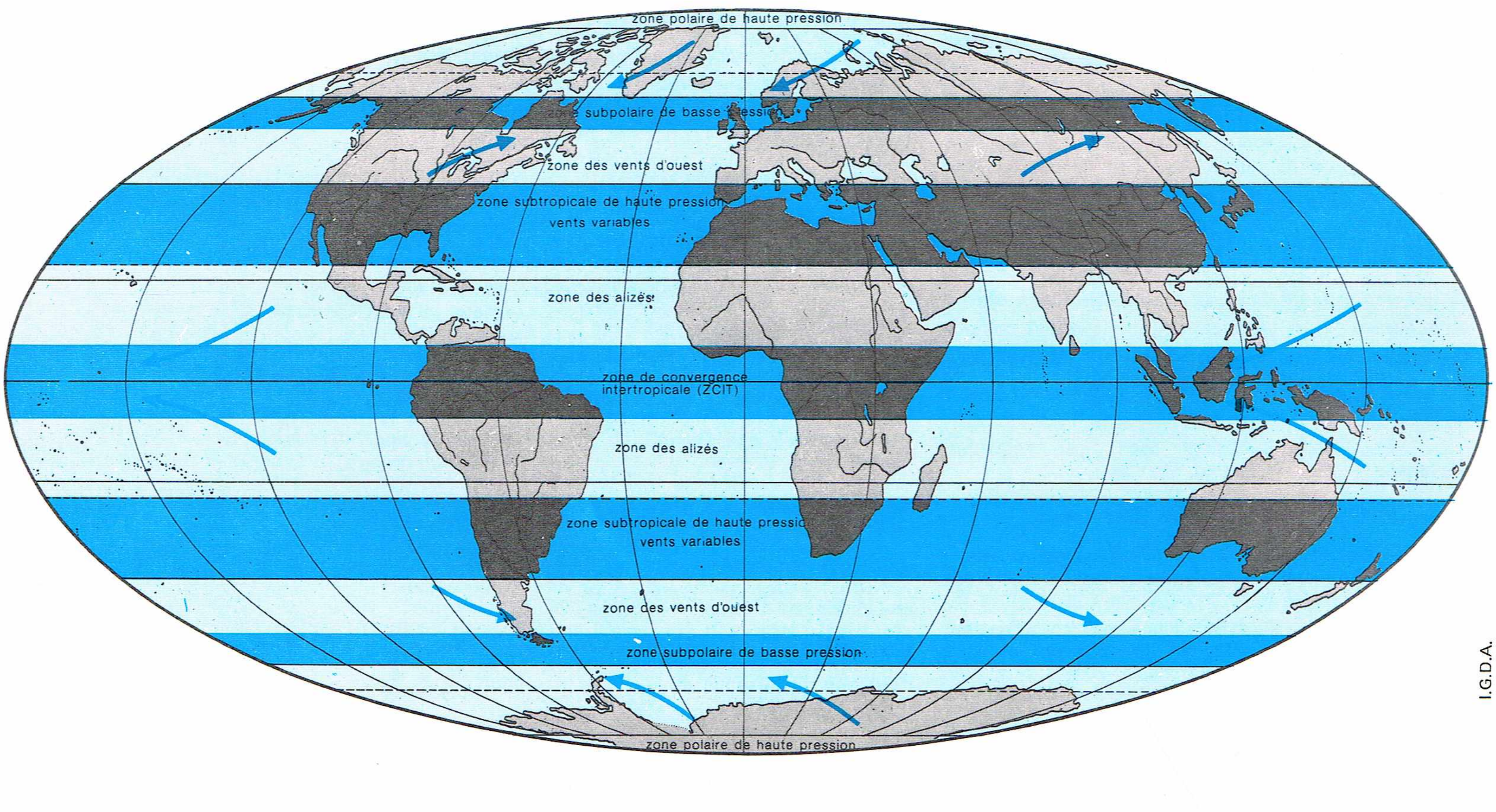

I.G.D.A.

est proportionnelle au gradient de température moyenne de la couche considérée.

Comme nous l'avons vu, il y a une différence entre le vent géostrophique et le vent réel. Si l'on pose :

$$\overrightarrow{V_a} = \overrightarrow{V_{\text{réel}}} - \overrightarrow{V_g},$$

on appelle $\overrightarrow{V_a}$ composante *agéostrophique* du vent. Cette composante agéostrophique est liée au terme d'accélération $\frac{d\overrightarrow{V_h}}{dt}$, qui n'est pas pris en compte dans l'hypothèse géostrophique.

La composante verticale de l'équation du mouvement ne permet pas de saisir complètement les déplacements verticaux synoptiques qui sont, en météorologie, des phénomènes durables. Aussi, pour déterminer des zones d'ascendance ou de subsidence (mouvements descendants), il faut faire appel à d'autres considérations que celles que nous venons de voir. L'équation de continuité exprime que la masse d'air atmosphérique contenue dans un volume limité par une surface fluide fermée reste constante au cours du mouvement de ce volume. On l'appelle encore *équation de conservation de masse*. Cette équation s'écrit :

$$\frac{dm}{dt} = 0, \quad \text{soit} \quad \frac{d\,(\rho, v)}{dt} = 0,$$

où ρ est la masse volumique de l'air à l'intérieur de la surface fluide et v le volume délimité par cette surface.

$$d\,\frac{(\rho, v)}{dt} = v\frac{d\rho}{dt} + \rho\frac{dv}{dt} = 0,$$

soit :

$$\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dt} + \frac{1}{v}\frac{dv}{dt} = 0.$$

Un champ de divergence peut s'exprimer dans le cas de deux dimensions par :

$$\text{div}\,\vec{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$$

et dans le cas d'un champ à trois dimensions par :

$$\text{Div}\,\vec{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}.$$

On démontre que ces quantités expriment la vitesse de dilatation des surfaces et des volumes de fluide, ce qui s'exprime par :

$$\text{div}\,\vec{V} = \frac{1}{S}\frac{dS}{dt} \quad \text{et} \quad \text{Div}\,\vec{V} = \frac{1}{V}\frac{dV}{dt}.$$

Dans l'équation de continuité, $\frac{1}{V}\frac{dV}{dt}$ représente la partie divergente du champ de mouvement de l'atmosphère. On peut écrire :

$$\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dt} + \text{Div}\,\vec{V} = 0$$

ou :

$$\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dt} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0.$$

Remarquons que $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$ représente la divergence de la composante horizontale $\overrightarrow{V_h}$ du vent. On peut alors écrire :

$$\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dt} + \text{div}\,\overrightarrow{V_h} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0.$$

On a donc lié la vitesse verticale w au champ de mouvement horizontal $\overrightarrow{V_h}$. En passant en coordonnées pression, l'équation de continuité peut s'écrire :

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_p + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)_p + \frac{\partial w}{\partial p} = 0.$$

Par analogie avec l'expression de div $\overrightarrow{V_h}$, on pose habituellement :

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_p + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)_p = \text{div}_p\,\overrightarrow{V_h};$$

$\text{div}_p\,\overrightarrow{V_h}$ s'appelle la divergence isobare du vent horizontal. Elle diffère légèrement de div $\overrightarrow{V_h}$, mais, généralement, on néglige cette différence. Dans la transformation en coordonnée pression, le terme $\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dt}$ disparaît, ce qui est un avantage. On obtient donc une relation simplifiée de la forme :

$$\frac{\partial \omega}{\partial p} = -\,\text{div}_p\,\overrightarrow{V_h}$$

qui lie directement la divergence isobare du vent horizontal et la dérivée qui exprime la distribution verticale de la vitesse verticale ω. On peut en tirer les conclusions suivantes :

$$\text{div}_p\,\overrightarrow{V_h} > 0 \text{ implique } \frac{\partial \omega}{\partial p} < 0,$$

ce qui veut dire que ω et p varient en sens contraire;

$$\text{div}_p\,\overrightarrow{V_h} < 0 \text{ implique } \frac{\partial \omega}{\partial p} > 0,$$

ce qui veut dire que ω et p varient dans le même sens.

Tout cela confirme le « tassement » qui accompagne les mouvements atmosphériques divergents dans les basses couches de l'atmosphère. Les champs de mouvements comportent un champ de rotation, auquel se superpose un champ de divergence positif dans le cas d'un anticyclone et un champ de divergence négatif dans le cas d'une dépression. Cela nous permet de conclure que, dans les basses couches de l'atmosphère, aux zones dépressionnaires sont associées des ascendances synoptiques, et qu'inversement, aux zones anticycloniques sont associés des mouvements de subsidence.

L'étude des mouvements verticaux de l'atmosphère peut être abordée au moyen des *fonctions d'influence*, qui ont l'avantage de fournir une interprétation complète de ces mouvements en précisant en plus les facteurs qui régissent localement l'évolution du géopotentiel des surfaces isobares. Pour cette étude, on part des équations de la thermodynamique et de l'expression de l'évolution du tourbillon. Nous avons vu que la variation de température pouvait s'exprimer par :

$$dT = \frac{R}{C_p}\frac{T}{P}\,dP + \frac{1}{C_p}\,dQ$$

en considérant une masse unité. Si l'on introduit la notion de temps, cette variation s'exprime par :

$$\frac{dT}{dt} = \frac{R}{C_p}\frac{T}{P}\frac{dP}{dt} + \frac{1}{C_p}\frac{dQ}{dt}.$$

Cela exprime la vitesse de variation de température pour une particule de masse unité. En coordonnées pression, cette dérivée d'évolution s'exprime par :

$$\frac{dT}{dt} = \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_p + u\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_p + v\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_p + \omega\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right) = \frac{R}{C_p}\frac{T}{P}\frac{dP}{dt} + \frac{1}{C_p}\frac{dQ}{dt}.$$

Comme $\frac{dP}{dt} = \omega$, on écrit cette équation sous la forme :

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_p = -u\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_p - v\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_p + \omega\left(\frac{R}{C_p}\frac{T}{P} - \frac{\partial T}{\partial P}\right) + \frac{1}{C_p}\frac{dQ}{dt}.$$

Remarquons que $\overrightarrow{V_h}\,\overrightarrow{\text{grad}_p}\,T$ vaut $-u\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_p - v\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_p$.

De plus, rappelons que le tourbillon d'un champ vectoriel horizontal $\vec{v}\,(x, y)$ est un vecteur vertical désigné par $\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{v}$, dont la valeur algébrique est égale à $\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$.

Dans le cas du champ de vent horizontal, on peut calculer $\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{V}$ en considérant que, en dehors des régions tropicales, l'écoulement atmosphérique est pratiquement géostrophique; donc on prend :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\,\overrightarrow{V_g} = \frac{\partial v_g}{\partial x} - \frac{\partial u_g}{\partial y}$$

avec :

$$u_g = -\frac{G}{f}\left(\frac{\partial Z}{\partial y}\right)_p \quad \text{et} \quad v_g = \frac{G}{f}\left(\frac{\partial Z}{\partial x}\right)_p.$$

On peut négliger les variations du paramètre de Coriolis, ce qui nous donne :

$$\frac{\partial V_g}{\partial x} = \frac{G}{f}\left(\frac{\partial^2 Z}{\partial x^2}\right)_p \quad \text{et} \quad \frac{\partial u_g}{\partial y} = -\frac{G}{f}\left(\frac{\partial^2 Z}{\partial y^2}\right)_p$$

d'où l'expression du tourbillon du vent géostrophique :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\ \vec{V}_g = \zeta_g = \frac{G}{f}\left(\frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2}\right).$$

La quantité entre parenthèses s'appelle le *laplacien* de Z, et l'on écrit symboliquement :

$$\left(\frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2}\right) = \nabla^2 Z.$$

On a donc en définitive :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\ \vec{V}_g = \frac{G}{f} \nabla^2 Z.$$

Sur les cartes, on peut évaluer le laplacien en remplaçant les dérivées par les différences finies; on utilise une grille carrée dont la dimension de la maille (c'est-à-dire la dimension du côté) a pour valeur *d* alors que la valeur réelle sur le terrain est D.
On a :

$$\nabla^2 Z_{(0)} \# \frac{4}{D^2}(\overline{Z_0} - Z_0)$$

avec :

$$\overline{Z_0} = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4}{4},$$

Z_1,Z_2, Z_3 et Z_4 représentant les valeurs des géopotentiels de la surface isobare, prises aux quatre coins du carré de maille *d*. Donc, par cette méthode, le tourbillon s'écrit :

$$(\zeta_g)_0 \# \frac{4\,G}{f\,D^2}(\overline{Z_0} - Z_0).$$

C'est la valeur du *tourbillon relatif*, car il caractérise le mouvement relatif des particules synoptiques. Le tourbillon relatif est positif au voisinage d'un centre dépressionnaire, négatif près d'un centre anticyclonique. Le tourbillon relatif est également positif dans les régions voisines de l'axe d'un thalweg, et négatif dans les régions voisines de l'axe d'une dorsale.

On appelle *tourbillon absolu* la somme du tourbillon relatif et du paramètre de Coriolis, soit $\zeta + f$. Dans l'hémisphère Nord, le tourbillon absolu est toujours positif. Si l'on reprend les équations générales du mouvement dans le plan horizontal, en coordonnées pression :

$$\frac{du}{dt} = -G\left(\frac{\partial Z}{\partial x}\right)_p + fv \quad \text{et} \quad \frac{dv}{dt} = -G\left(\frac{\partial Z}{\partial y}\right)_p - fu,$$

et que l'on applique à ces équations l'opérateur « tourbillon », on doit effectuer la dérivation des deux équations (la première par rapport à $\frac{\partial}{\partial y}$ et la seconde par rapport à $\frac{\partial}{\partial x}$) puis effectuer la différence $\frac{\partial}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y}$; on obtient l'équation d'évolution du tourbillon :

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\vec{V}_h \cdot \overrightarrow{\text{grad}_p}\ (\zeta + f) + f\frac{\partial \omega}{\partial P}.$$

Les grands mouvements de l'atmosphère

Nul ne peut contester le fait que la circulation atmosphérique est très variable, malgré un certain aspect de régularité d'écoulement pour quelques grands courants aériens qui n'ont pu être mis en évidence que par des calculs de trajectoires moyennes. Comme nous l'avons vu, il existe deux équations fondamentales qui expriment l'équilibre atmosphérique : l'*équilibre statique* sur une même verticale lie la température à l'altitude par l'intermédiaire de la pression; l'*équilibre géostrophique* lie le champ de mouvement au champ de pression. Il faut remarquer que les deux équations exprimant ces équilibres peuvent se combiner dans la relation donnant le vent thermique qui, elle, relie le champ de mouvement au champ de température. Tout cela permet de comprendre que les mouvements de l'atmosphère soient étroitement liés aux profils verticaux des températures et des pressions, surtout hors des basses couches dont la circulation reste très influencée par des phénomènes locaux liés aux caractéristiques des sites.

La répartition verticale des températures moyennes de l'atmosphère met en évidence une différence d'altitude et de température des tropopauses équatoriale et polaire, avec une variation saisonnière d'altitude de la tropopause (en hiver, la tropopause est beaucoup plus basse qu'en été). On note également une « cassure » de la tropopause entre 40° et 50° de latitude. Dans cette zone de l'atmosphère, la tropopause perd de sa netteté. On remarque également que le gradient méridien de température est dirigé vers l'équateur dans la troposphère et vers le pôle dans la stratosphère. Enfin, dans les régions polaires, compte tenu des basses températures de la surface terrestre, on note constamment une inversion de température qui permet, contrairement à ce que l'on devrait observer normalement, une croissance de la température avec l'altitude. Ces inversions sont très nettement marquées en saison hivernale, mais elles existent également en été.

En ce qui concerne le champ de pression, on note une décroissance de l'altitude des surfaces isobares du sud vers le nord, c'est-à-dire des régions équatoriales vers les régions polaires. Cela a pour conséquence la formation quasi permanente d'une zone dépressionnaire sur les pôles qui marque le fait que la décroissance verticale de la pression est plus importante dans l'air froid polaire qu'elle ne l'est dans l'air chaud tropical. Au niveau de la mer, cette répartition de la pression en altitude se répercute par la formation d'un centre anticyclonique sur chaque pôle, d'un axe dépressionnaire situé en moyenne sur les 60es parallèles, d'un axe anticyclonique situé approximativement sur les 30es parallèles (ceinture de haute pression des régions subtropicales) et d'une zone dépressionnaire à faible gradient de pression dans les parages de l'équateur.

Ces différentes zones de haute et de basse pression déterminent, pour les différentes couches de l'atmosphère, le *champ de vent moyen* qui, en fait, rappelons-le, matérialise les mouvements de l'atmosphère. Le champ de vent moyen est essentiellement zonal. Dans les basses couches, on observe des vents moyens d'est du pôle jusqu'au 60° Nord environ : c'est le *courant polaire d'est*. Les vents d'ouest sont dominants entre les latitudes 30° et 60° Nord. Ils constituent le *courant tempéré d'ouest*. Entre l'équateur et 30° Nord, règnent les *alizés*.

Entre ces différents courants généraux, on observe des zones de calme : près du pôle, au voisinage de la ceinture subtropicale de haute pression, et, enfin, dans la zone équatoriale. Compte tenu de la variation du paramètre de Coriolis avec la latitude, on comprend pourquoi les courants polaire et tempéré ont une composante méridienne faible, et l'alizé prend une composante nord-est marquée dans l'hémisphère Nord (dans l'hémisphère Sud, la composante de l'alizé est le sud-est). La région des calmes équatoriaux est soumise, à cause de la direction des courants d'alizés, à une puissante convergence horizontale que l'on a coutume d'appeler la *zone de convergence intertropicale* (ZCIT). A partir du niveau 700 millibars, on observe une circulation zonale cyclonique et une augmentation de la force des vents d'ouest dans la troposphère au fur et à mesure que l'on s'élève en altitude vers la tropopause. Cette augmentation correspond à la distribution moyenne des températures.

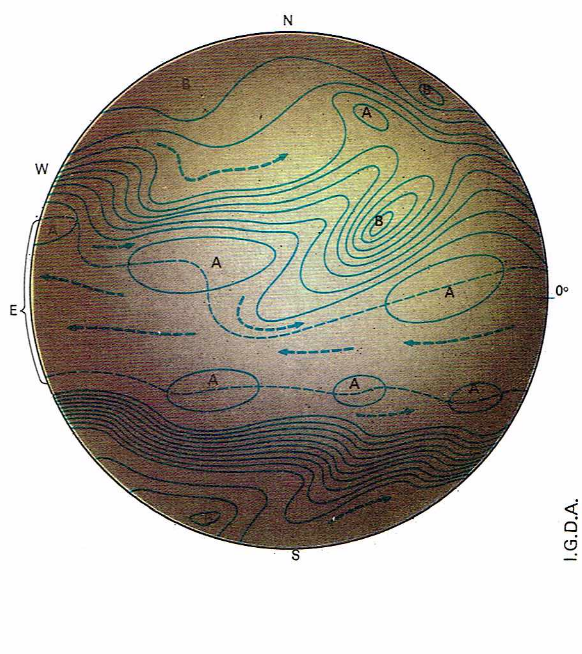

▶ ***Circulation atmosphérique dans les hauts niveaux de la troposphère : A, haute pression; B, basse pression; E, vents d'est; W, vents d'ouest.***

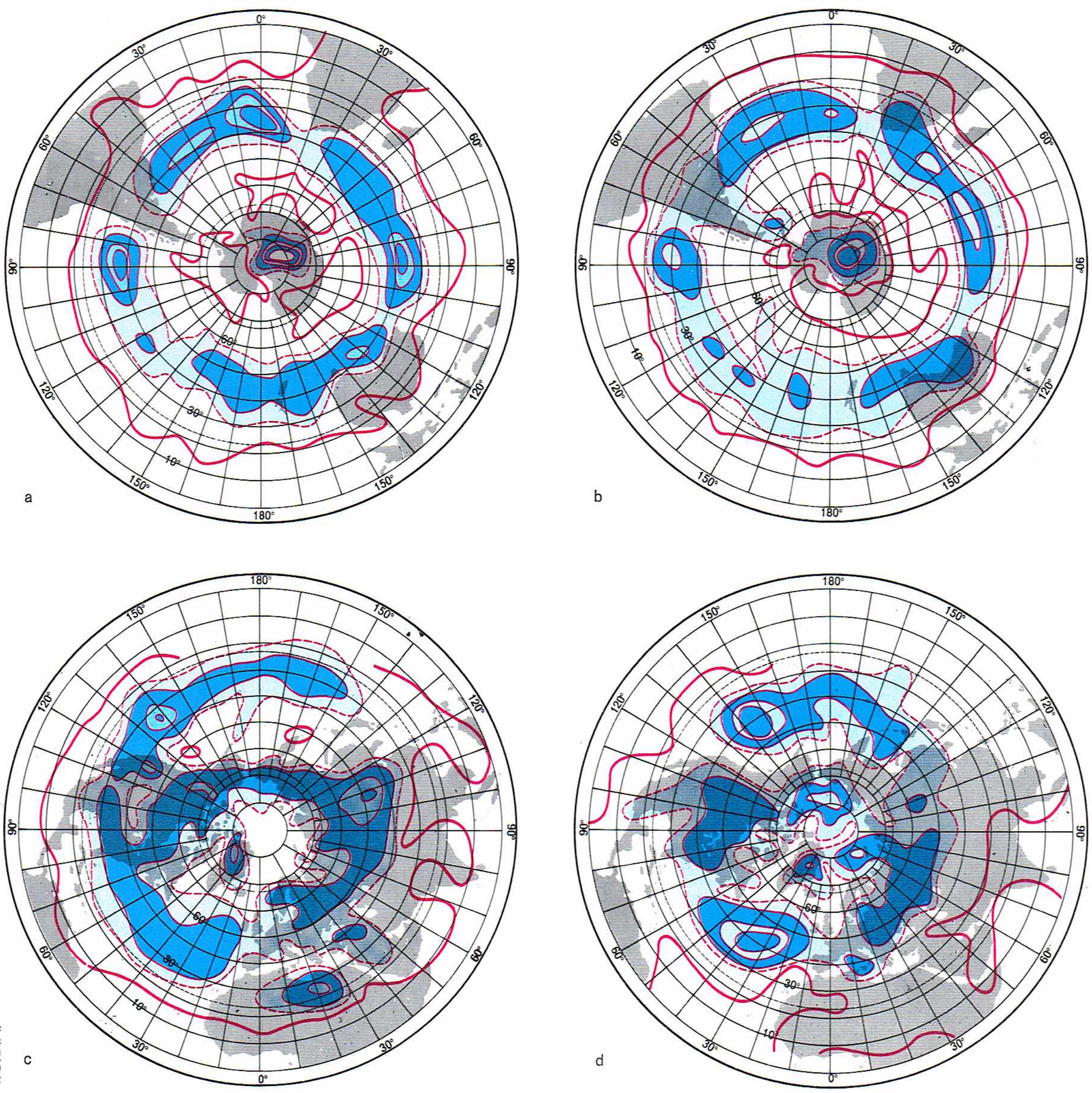

I.G.D.A.

◀ ***Distribution des aires anticycloniques et de leur fréquence (indiquée par les gradations de couleur) :***
a, hémisphère méridional en été;
b, hémisphère méridional en hiver;
c, hémisphère septentrional en été;
d, hémisphère septentrional en hiver.

La suite des saisons influence la position et l'importance des champs de température et de pression de l'atmosphère, donc en définitive la circulation en altitude. On remarque qu'en été, dans les régions tropicales, les différentes surfaces isobares ont tendance à s'élever tandis que la dépression polaire a tendance à se combler, voire même à disparaître. En hiver, au contraire, on assiste à un affaissement des surfaces isobares au voisinage des tropiques et à un creusement de la dépression polaire. Toutes ces fluctuations n'ont pas une symétrie d'une année sur l'autre mais, en hiver, les évolutions sont beaucoup plus rapides et beaucoup plus marquées qu'en été, ce qui engendre une augmentation importante de la vitesse de circulation du courant d'ouest.

Découverts au cours de la Seconde Guerre mondiale, les *courants-jets* (de l'expression anglo-saxonne jet-streams) sont caractéristiques de la circulation atmosphérique d'altitude. Ces courants-jets s'observent fréquemment. Ce sont des axes de vents très forts ou plus exactement des « rubans » de vents très forts pouvant atteindre et même dépasser parfois 300 km/h. Ces axes de vents forts sont caractérisés par d'importants gradients transversaux de vitesse. On les observe souvent près de la tropopause. On peut localiser ces vents très forts dans les zones de forts contrastes thermiques qui, en général, se rencontrent à la limite des masses d'air de caractères très contrastés (en particulier entre de l'air polaire et de l'air tropical). Les axes de vents forts ont des altitudes qui varient. Leur direction est variable mais, d'une manière générale, elle garde le caractère principal de la circulation atmosphérique, c'est-à-dire une composante surtout zonale d'ouest. Leur vitesse moyenne est beaucoup plus grande en hiver qu'en été.

Même en surface, les influences saisonnières se font sentir sur la circulation, et l'on retrouve à peu près les mêmes variations que celles que nous venons de voir pour l'altitude, à savoir une oscillation plus ou moins régulière des différents centres d'action, la présence de hautes pressions dans les régions subtropicales, tout au long de l'année, avec un maximum de développement en été, et de basses pressions vers 60° de latitude, qui, à l'inverse des hautes pressions, sont plus développées en hiver. La présence quasi permanente de ces deux principaux centres d'action engendre une circulation d'ouest qui est beaucoup plus rapide et beaucoup plus importante en hiver qu'en été. Au niveau de la mer, on observe dans les principaux centres d'action une division en plusieurs cellules de hautes et de basses pressions. Cette division peut s'expliquer par la présence des continents et par l'influence thermique non négligeable qu'ils déterminent au cours des différentes saisons.

En hiver, sur la masse continentale, l'enneigement des moyennes et des hautes latitudes, le raccourcissement des jours, allié à l'obliquité du rayonnement solaire, transforment cette masse en centre froid. C'est le cas particulièrement dans l'hémisphère Nord, de la Sibérie, du Canada et de l'Asie. Sur ces régions, il se forme des anticyclones continentaux d'origine thermique qui perturbent la ceinture de basses pressions axée approximativement sur le 60e nord. A cause des basses températures, l'air devient plus dense, ce qui augmente sa pression, d'où la formation de ces anticyclones froids.

▶ *Photographie d'une* perturbation atmosphérique *prise le 22 mai 1967 par le satellite ESSA 2.*

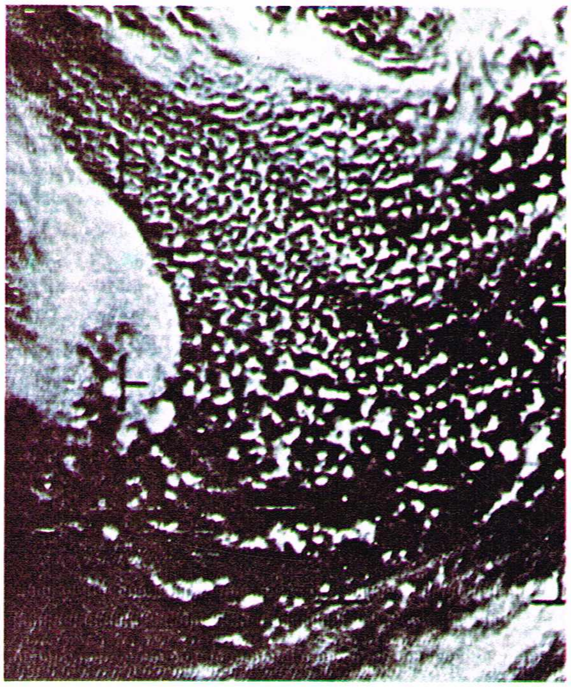

Météorologie nationale

Durant l'été, la masse continentale des latitudes méridionales devient le siège d'un bilan radiatif très fortement positif à cause de l'ensoleillement continu sur des durées journalières importantes. En général, ces régions présentent un albédo élevé et un caractère de continentalité exagéré. Les températures sont exagérément élevées dans les basses couches de l'atmosphère, ce qui diminue sensiblement la densité de l'air et, par voie de conséquence, sa pression. Il se forme alors des zones dépressionnaires. C'est le cas, en particulier, du Sahara, du Pakistan, de l'Arabie et de l'Amérique centrale. On remarque que l'équateur thermique vient coïncider durant l'été avec cette chaîne dépressionnaire d'origine thermique.

Sur les océans, le même phénomène se produit, mais, les contrastes thermiques étant moins marqués que sur les continents, les centres d'action y sont moins développés. En hiver, on trouve les dépressions stationnaires d'Islande et des îles Aléoutiennes. En été, on note la présence de l'anticyclone des Açores et de son homologue sur le Pacifique.

▼ *Cette même perturbation du 22 mai 1967 schématisée sur une carte de surface.*

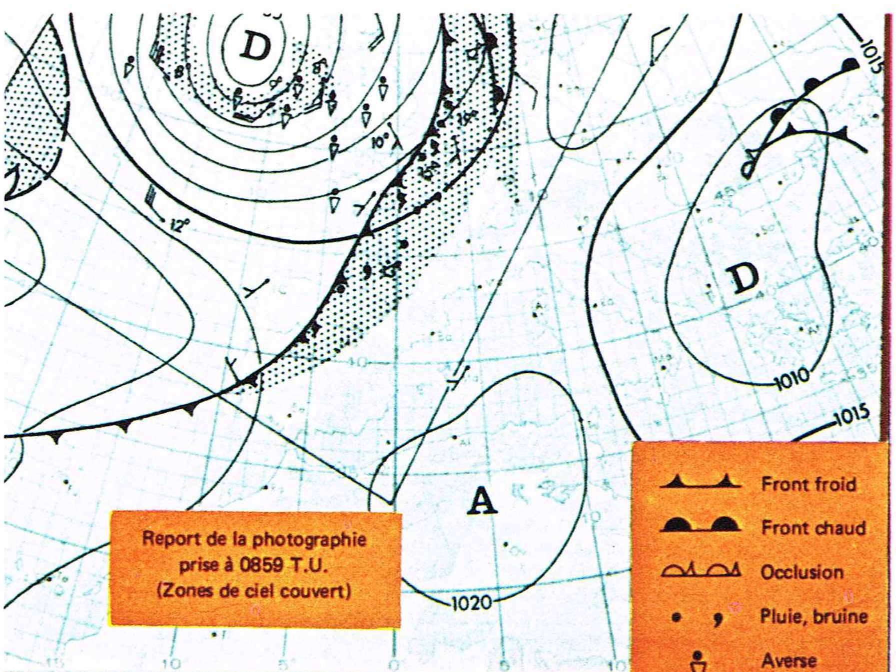

Météorologie nationale

Dans la haute atmosphère, des mesures ont mis en évidence que la circulation zonale moyenne d'est de la troposphère des latitudes équatoriales se retrouve dans la stratosphère et dans la mésosphère inférieure. A une altitude plus élevée, la circulation s'inverse, et, en moyenne, ce sont des vents d'ouest qui prédominent. Le courant d'est subit également l'influence des saisons. Son maximum d'intensité se présente en été et son minimum en hiver. Aux latitudes tempérées et septentrionales, l'influence des saisons est beaucoup plus marquée. Elle peut aller du simple au double en ce qui concerne l'intensité des courants des couches inférieures (troposphère et stratosphère), et même, elle apporte un renversement du courant dans les couches élevées de l'atmosphère (stratosphère supérieure). En été, la circulation d'est augmente avec l'altitude (entre 30 et 60 km) et présente un maximum vers 60 km. En hiver, au contraire, les vents d'ouest présentent un maximum vers 60 km d'altitude aux latitudes 30° et un second vers 55 km aux latitudes 45°.

Aux équinoxes et au cours de réchauffements importants de la stratosphère et de la mésosphère, les vents deviennent variables en direction, et leur intensité fluctue d'une manière importante. Les réchauffements à très haute altitude matérialisent l'existence de perturbations stratosphériques que l'on a maintenant l'habitude de désigner sous le nom de « réchauffements explosifs ». Ces réchauffements brutaux se produisent parfois en décembre et en mars mais sans que l'on puisse détecter une quelconque périodicité du phénomène. Ils sont importants, car, en hiver, alors qu'en moyenne les températures oscillent aux environs de — 85 °C au niveau 10 millibars au cours de la nuit polaire, elles peuvent atteindre 0 °C par « réchauffement explosif ». Ce réchauffement détruit temporairement le tourbillon cyclonique polaire et le remplace par un tourbillon anticyclonique. Les vents d'ouest tournent pour un temps à l'est.

Nous venons donc de voir que, d'une manière générale, la circulation générale de l'atmosphère est zonale. Alors, comment expliquer que, comme nous l'avons vu précédemment, les transferts de chaleur nécessaires pour expliquer la distribution thermique de l'atmosphère doivent être méridiens, c'est-à-dire en fait perpendiculaires aux premiers? Lorsque l'on considère une circulation moyenne, il est évident que l'on escamote les accidents qui surviennent dans cette circulation et qui caractérisent la circulation instantanée. Ces perturbations de l'écoulement, que l'on néglige en circulation moyenne, permettent les échanges méridiens de chaleur. L'examen journalier de la circulation atmosphérique met en évidence, d'une part, un écoulement zonal de l'air conforme à ce que nous venons de voir, et, d'autre part, un écoulement particulier correspondant aux perturbations qui se présentent sous forme d'ondulations pseudo-sinusoïdales animées d'un mouvement de translation zonal faible, voire nul. Ce phénomène peut être expliqué par la mécanique des fluides. Le régime général est un courant d'ouest dont la vitesse d'écoulement augmente avec l'altitude dans la troposphère. Il se produit un effet de cisaillement du courant d'ouest qui est fonction du contraste thermique équateur-pôles. Ce courant n'est stable que pour des cisaillements de faible importance. Si cela n'est pas le cas, le courant dérive, soit à droite, soit à gauche, en formant une circulation à méandres plus ou moins développés qui peuvent s'isoler pour donner un tourbillon. Cela a pour conséquence immédiate sur les masses d'air de permettre le mélange, entre l'équateur et le pôle, par advections froide et chaude. Pour s'adapter à la nouvelle distribution thermique, le courant doit se stabiliser, diminuer les effets de cisaillement, donc redevenir parfaitement zonal.

Perturbations atmosphériques

Dans la troposphère, on trouve de nombreuses masses d'air juxtaposées qui se déplacent dans les courants atmosphériques. Lorsque les caractères des masses d'air en présence sont très contrastés, il se forme ce que l'on appelle une *perturbation atmosphérique*. Les limites des masses d'air apparaissent comme une véritable discontinuité constituant la *surface frontale*, qui présente une certaine inclinaison par rapport à la surface terrestre, de telle manière que l'air chaud, plus léger,

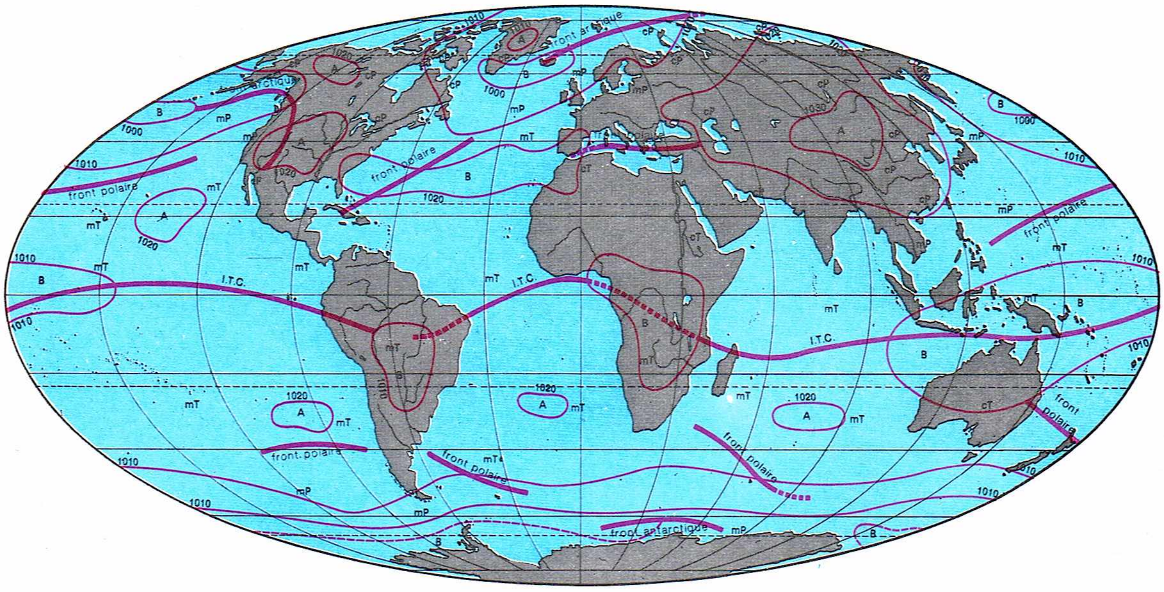

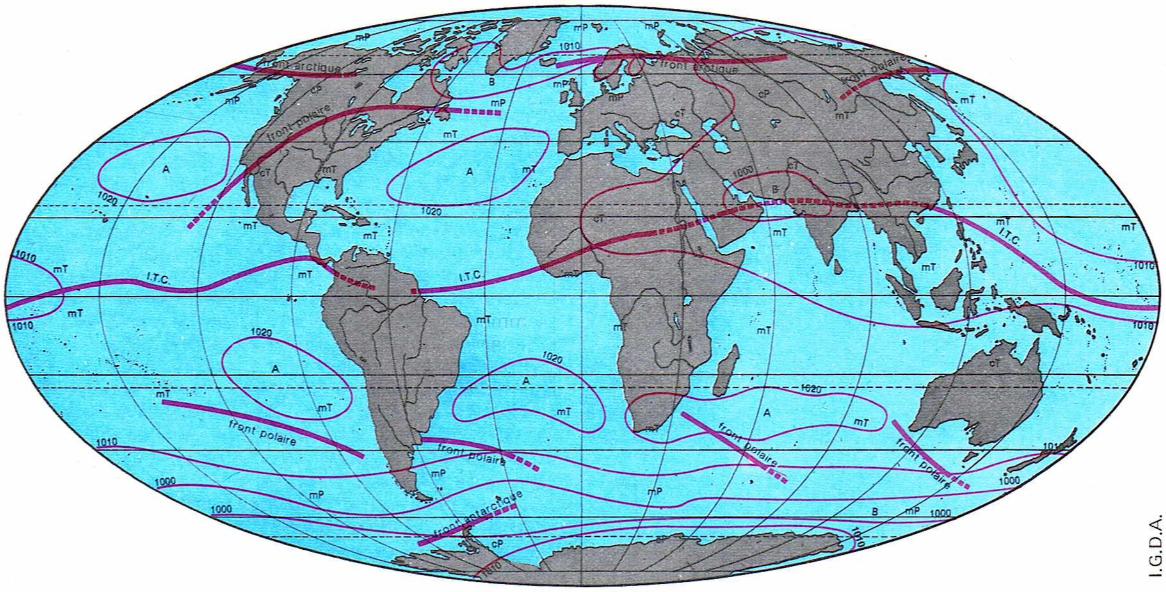

◀ ***Distribution des masses d'air et des fronts en janvier (en haut) et en juillet (en bas) :***
A, *zones de haute pression (aires anticycloniques);*
B, *zones de basse pression (aires cycloniques);*
cP, *masses d'air polaires continentales;*
mP, *masses d'air polaires maritimes;* cT, *masses d'air tropicales continentales;*
mT, *masses d'air tropicales maritimes.*

I.G.D.A.

surmonte toujours l'air froid, plus dense. L'intersection de cette surface avec la surface terrestre s'appelle le *front*. Le conflit entre deux masses d'air peut être plus ou moins marqué, ce qui entraîne une activité météorologique plus ou moins grande. A l'origine, si les contrastes sont importants entre les deux masses d'air, on dit qu'il y a *frontogenèse*. Par contre, lorsque ces contrastes s'estompent et tendent vers une certaine uniformité, on dit qu'il y a *frontolyse*.

D'une manière générale, le champ de mouvement intervient grandement dans l'activité des masses d'air. Si le champ de mouvement entraîne une masse d'air initialement homogène parallèlement à une discontinuité caractéristique de la surface terrestre (par exemple : Océan-terre, sol enneigé-sol dégagé, etc.), l'évolution sera différente de part et d'autre de la discontinuité, et, en général, il apparaîtra une nouvelle surface de discontinuité. En revanche, si le champ de mouvement entraîne la masse d'air perpendiculairement à la ligne de discontinuité, l'évolution au sein de la masse d'air en mouvement sera homogène. On voit donc que l'activité d'une surface frontale dépend de deux facteurs principaux : contraste thermique marqué entre les masses d'air en présence et permanence du contact des masses d'air au cours de leur déplacement sous l'effet du champ de mouvement. Si l'une ou l'autre des conditions précédentes n'est pas réalisée, le processus de frontolyse apparaît rapidement.

Il existe à la surface du globe un certain nombre de régions où les conditions thermiques et mécaniques citées précédemment sont couramment observées.

Pour l'hémisphère Nord, ces zones sont, en hiver : la zone du Gulf Stream le long de la côte américaine, qui détermine la limite du *front polaire,* un axe allant du détroit de Gibraltar à la Syrie, qui marque la limite du *front méditerranéen,* un axe allant de l'Islande au nord de la Sibérie, qui marque la limite du *front arctique,* et les zones tropicales de l'Atlantique et du Pacifique, qui marquent la limite du *front intertropical*. On note également, sur l'océan Pacifique, deux limites du front polaire, l'une sur le centre de l'Océan et l'autre allant de l'Australie au Japon, ainsi qu'une limite du front arctique située le long de la face ouest de l'Amérique du Nord.

L'été, la limite du front intertropical remonte vers le nord, tandis que les limites des fronts polaire et arctique vont du détroit de Béring au Canada et du détroit de Danemark au nord de la Sibérie.

Pour l'Europe occidentale, c'est la limite du front polaire de l'Atlantique Nord qui est prépondérante en hiver. En effet, à cette époque de l'année, le continent nord-américain est froid tandis que le Gulf Stream, courant chaud de l'Atlantique, persiste le long des côtes orientales américaines. On observe de plus la présence d'un anticyclone continental sur l'Amérique du Nord et sur le Canada (lié à la présence de l'air polaire très froid), et d'un anticyclone subtropical sur l'Atlantique. Les champs thermiques très contrastés d'origine continentale et maritime sont donc mis en présence d'une manière quasi permanente par le champ de mouvement créé par la présence hivernale de deux centres d'action anticycloniques. La zone de rencontre des deux masses

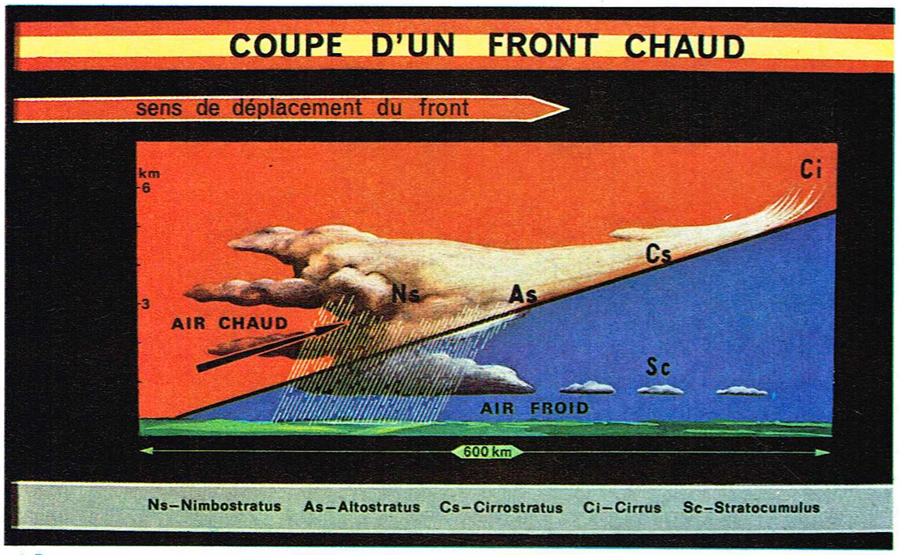

Météorologie nationale

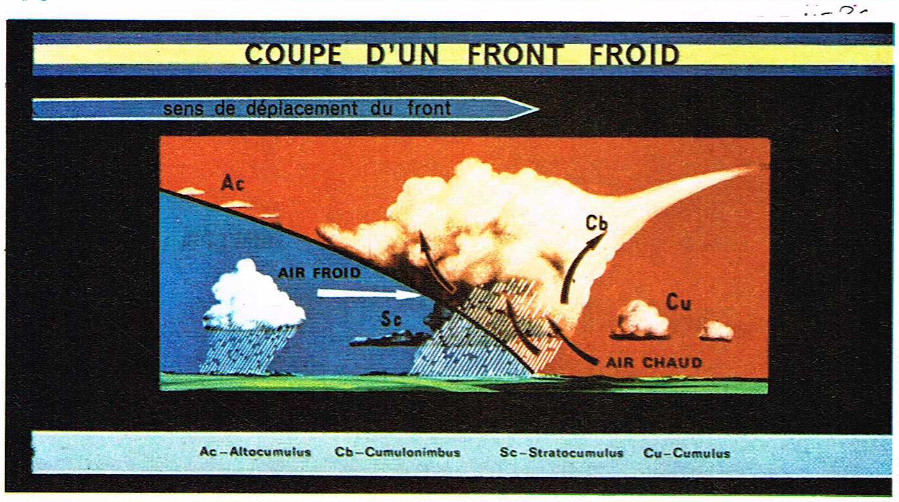

Météorologie nationale

▲ *En haut, coupe d'un* front chaud. *Ci-dessus, coupe d'un* front froid.

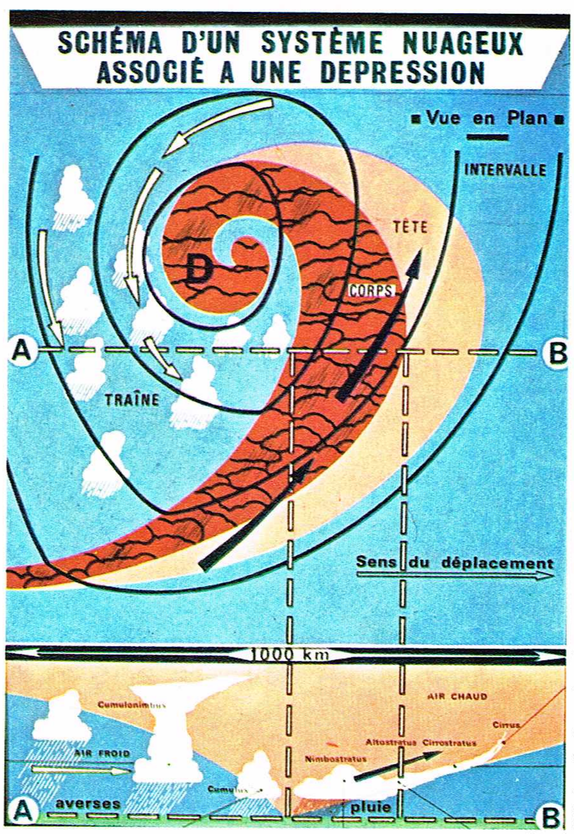

Météorologie nationale

▶ *Représentation schématique d'un système nuageux associé à une dépression : en haut, vue en plan; en bas, vue en coupe.*

d'air est le siège d'une très puissante frontogenèse. C'est du reste des ondulations du front polaire que naissent les perturbations.

Les masses d'air n'ont pas un mouvement exclusivement zonal, comme on tendrait à le croire en considérant la circulation moyenne de l'atmosphère. Des perturbations de cette circulation permettent à l'air froid polaire de s'écouler vers l'équateur et à l'air chaud tropical de remonter vers les pôles. Au cours de ces déplacements, il arrive que ces masses d'air entrent en conflit en créant une ondulation de la surface de discontinuité (ou surface frontale). Les analyses des cartes synoptiques météorologiques mettent en évidence la naissance, le développement et la disparition de ces ondes qui, prises dans la circulation d'ouest, se déplacent souvent sur de grandes distances. Le plus souvent, ces ondulations sont accompagnées par un *tourbillon* (dépression) qui évolue avec elles.

On peut expliquer la formation de tels accidents atmosphériques de la manière suivante : dès que l'ondulation du front polaire s'est formée, elle se développe, car l'air froid a tendance à s'écouler vers les basses latitudes, ce qui imprime un mouvement de plus en plus marqué vers le nord de l'air chaud des latitudes plus basses. Une « langue » d'air chaud pénètre ainsi dans l'air froid situé plus au nord. C'est ce que l'on appelle le « secteur chaud » de la perturbation atmosphérique. La surface frontale initiale est alors scindée en deux parties : celle qui est située à l'avant de l'air chaud qui est la *surface frontale de l'air chaud,* car, dans son déplacement, ce dernier remplace au fur et à mesure l'air froid; celle qui est située à l'arrière de l'air chaud qui est la *surface frontale de l'air froid,* car, dans son déplacement, ce dernier remplace au fur et à mesure l'air chaud antérieur. On obtient donc un front chaud et un front froid qui, ensemble, constituent la *perturbation.* A l'origine, le tourbillon associé est peu important, et il se manifeste par la formation d'une petite dépression centrée au sommet de la langue d'air chaud. A ce stade du développement, l'air froid postérieur se différencie nettement de l'air froid antérieur, qui a déjà plus ou moins évolué et perdu en partie ses caractéristiques d'origine. Il faut remarquer que, le plus souvent, l'air le plus froid, situé postérieurement, se déplace plus vite que l'air froid antérieur, ce qui a pour effet de diminuer la surface de la langue d'air chaud. A la surface du sol, cela se traduit par le fait que le front froid rattrape le front chaud. Souvent, la dépression mobile qui accompagne la perturbation se détache du sommet de l'air chaud et reste en arrière du sommet de la perturbation. En fait, l'air chaud est rejeté en altitude par la progression de l'air le plus froid, et il se forme, en altitude, une discontinuité sous forme de vallée chaude qui s'étend du sommet de la langue d'air chaud au centre de la dépression. C'est l'*occlusion.* A ce stade d'évolution, la perturbation commence à perdre de son activité, et c'est le déclin de la dépression qui commence. Les systèmes nuageux liés à une perturbation classique étaient connus bien avant que fût établie la théorie des fronts par l'école norvégienne.

Dans une perturbation, on distingue plusieurs parties caractéristiques.

— La *tête de la perturbation.* Elle correspond aux nuages engendrés par le lent soulèvement de l'air chaud sur l'air froid antérieur, ce qui entraîne la saturation et la condensation de la vapeur d'eau par détente adiabatique. La masse d'air ayant une évolution cinématique sera du type Kc. Elle est caractérisée par la présence, au sein de la masse d'air, de nombreuses tranches saturées donnant une nébulosité importante à tous les niveaux de la troposphère. On observe progressivement, à l'approche d'une perturbation, tout d'abord des nuages d'altitude élevée (comprise entre 6 000 et 10 000 m) de type *cirrus* et *cirrostratus.* Ils sont formés de particules de glace et ont une structure discontinue caractéristique. Ensuite arrivent les nuages de l'étage moyen, situés entre 2 000 et 6 000 m d'altitude. L'*altostratus* se présente sous forme d'un voile dense d'aspect grisâtre ou bleuâtre dans lequel on peut distinguer des stries ou des fibres. L'observation des astres lunaire ou solaire se fait vaguement, et souvent ils apparaissent comme au travers d'un verre dépoli. Ce nuage type est constitué de fines gouttelettes mais, dans sa partie la plus élevée, on rencontre

Mondi

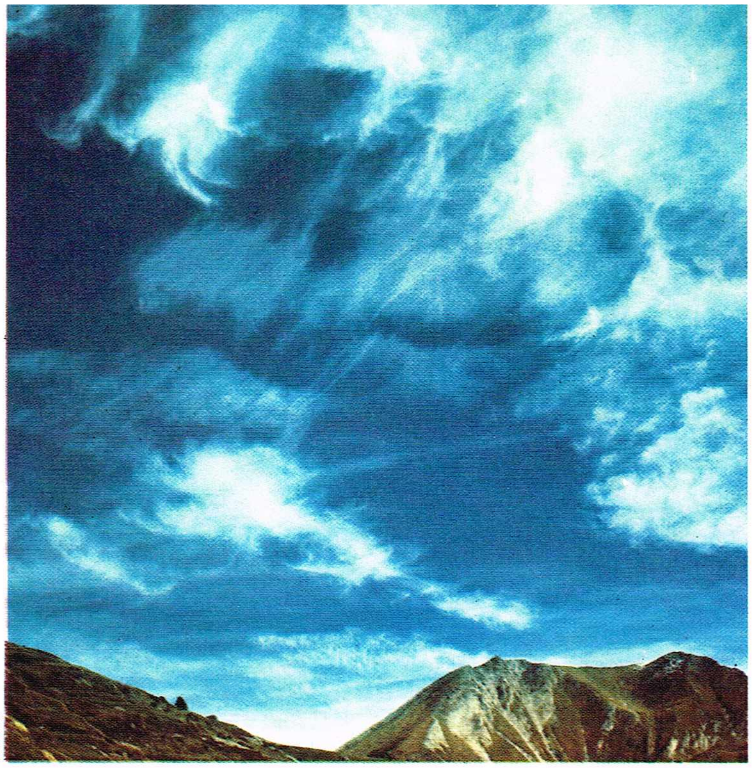

Titus

encore des cristaux de glace. Habituellement, la couche d'altostratus couvre tout le ciel et va en s'épaississant. Le processus d'épaississement se poursuivant, on arrive au *nimbostratus,* nuage épais et sombre d'où s'échappent des chutes de pluie ou de neige qui confèrent un aspect flou à la base, ce qui la rend difficilement discernable à l'observation. Le déroulement dans le ciel de la séquence cirrus-cirrostratus-altostratus-nimbostratus s'opère en une dizaine d'heures environ et correspond à l'arrivée de la masse d'air chaud qui débute d'abord à haute altitude.

Il est nécessaire de dire quelques mots sur les deux théories formulées pour expliquer le grossissement des gouttelettes et des cristaux contenus dans la masse nuageuse. Nous avons vu que la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique exigeait la saturation des particules atmosphériques. Il faut également que des microparticules solides hygroscopiques soient présentes au sein de la masse nuageuse. Ces particules sont de véritables « pièges » d'humidité. On les appelle *noyaux de condensation* ou *noyaux d'Aïtken.* La condensation commence toujours sur les noyaux d'Aïtken. Le grossissement de ces microgouttes fut expliqué en 1933 par Tor-Bergeron. Pour une même température négative au sein de la masse d'air, on a $e_p < e_w$ (e_p correspondant à la pression partielle de la vapeur d'eau au niveau de la pression p). Dans ces conditions, avec la coexistence de cristaux de glace et d'eau en surfusion, la vapeur d'eau est saturante par rapport à la glace. Elle ne l'est plus alors par rapport à l'eau liquide surfondue $e = e_{p(t)} < e_{w(t)}$. Il y a évaporation des gouttelettes. La vapeur tend à devenir « saturante » par rapport à la glace. Il se produit alors une condensation solide sur les cristaux, qui continuent de grossir au détriment des gouttelettes. Lorsqu'ils sont suffisamment gros, ils tombent et fondent en rencontrant des températures positives, et il pleut. Si les températures restent négatives, il neige. L'effet Bergeron se produit tant que le cristal est dans la zone où il existe de l'eau surfondue. Mais cela n'est pas suffisant pour expliquer complètement la formation des grosses gouttes de pluie. Le grossissement peut se produire par le phénomène de coalescence. C'est la réunion de plusieurs gouttelettes sur un cristal ou sur une autre

▲ *A gauche, des* **nimbostratus,** *nuages épais et sombres d'où s'échappent des chutes de pluie ou de neige. A droite, des* **cirrus,** *nuages d'altitude élevée, formés de particules de glace.*

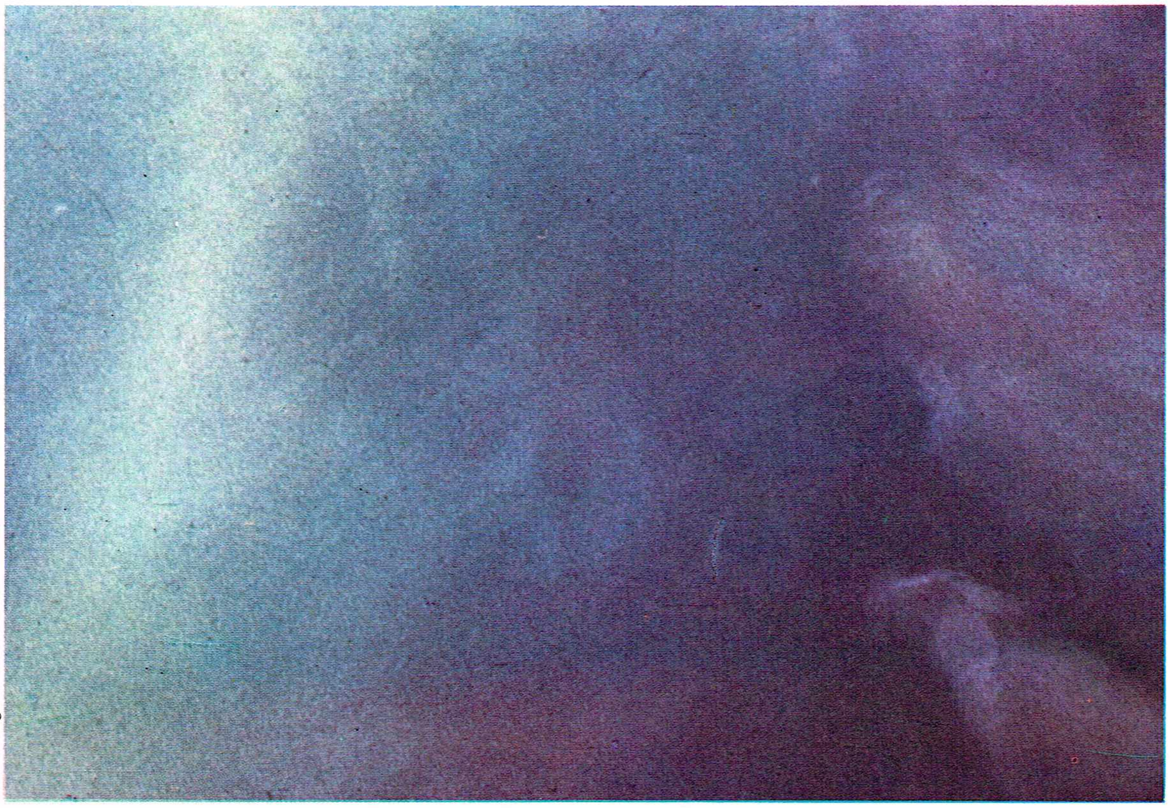

Météorologie nationale

◀ **Des cirrostratus :** *ils ont une structure caractéristique, semblable à celle des cirrus, mais donnent lieu à des phénomènes optiques (halo).*

Météorologie nationale

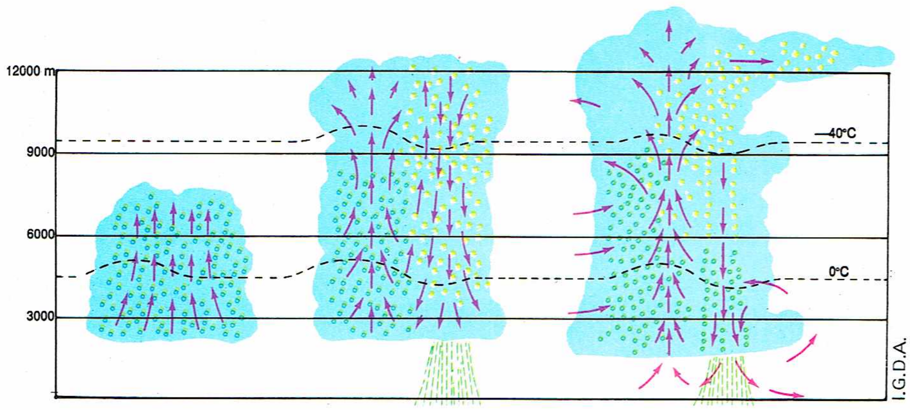

I.G.D.A.

goutte d'eau, d'où grossissement. Au sein d'un nuage, il y a, nous l'avons vu, des gouttelettes d'eau surfondue et des cristaux de glace. Tous ces éléments se déplacent à des vitesses différentes selon leur masse et leur volume. Au contact de ces divers éléments, la surfusion cesse, et les gouttelettes les plus grosses captent les plus petites. Rapidement, la pluie tombe du nuage.

— Le *corps de la perturbation*. C'est la partie comprenant l'occlusion et ayant pour limites le front froid et le front chaud, ainsi qu'une petite zone de la partie septentrionale de la « langue » d'air chaud. Le corps englobe donc le *nimbostratus* défini précédemment, et souvent cette partie de la perturbation est celle des précipitations des nuages provenant du soulèvement synoptique de la masse d'air.

— Le *secteur chaud* ou *zone de liaison*. Cette partie de la perturbation limite la langue d'air chaud de la perturbation. Du point de vue de la masse d'air, il y a en général, avec le déplacement de la perturbation sur des surfaces différentes, une évolution par refroidissement à la base, le vent renforçant l'agitation turbulente et donc l'efficacité des transferts convectifs. On observe une certaine stabilité de la couche atmosphérique dans ce secteur chaud. Qu'il y ait ou non turbulence, la courbe d'état d'un sondage effectué en air chaud de la perturbation se trouve inclinée sur la droite des adiabatiques sèches; donc θ croît et θ'_w décroît, ce qui est la règle générale de la stabilité. Les nuages du secteur chaud sont du type stratiforme : stratus et stratocumulus. Le *stratus* est un nuage bas, gris, uniforme, ressemblant en tout point à un brouillard qui ne toucherait pas le sol. Le stratus peut donner des précipitations sous forme de crachin. Souvent ces précipitations sont durables, mais elles ne sont jamais abondantes. Les *stratocumulus* sont également des nuages de l'étage inférieur. Ils ont la forme de dalles, de rouleaux, de galets, de créneaux en éléments soudés ou non entre eux et disposés régulièrement, parfois même alignés, en files ou « rues de nuages ». Dans les secteurs chauds, on observe souvent la formation de brouillard du type du brouillard d'advection. Pour toutes ces raisons, la visibilité est souvent médiocre, voire mauvaise, dans le secteur chaud d'une perturbation atmosphérique.

— La *traîne de la perturbation*. Elle matérialise l'air froid postérieur. L'évolution de la masse d'air se fait en général par réchauffement de la base qui amène une instabilité. On obtient une masse d'air du type C, et l'on note sur les sondages une élévation de θ'_w des basses couches, suivie rapidement par une décroissance avec l'altitude. Les nuages associés à cette instabilité sont du type *cumulus* et *cumulonimbus*. Le cumulonimbus, roi des nuages, a un fort développement vertical et sa grande instabilité engendre de puissants courants

▲ En haut, des stratus, nuages bas, gris, uniformes, ressemblant à un brouillard.

▲▶ Ci-dessus,* cycle d'un cumulonimbus : *à gauche, phase de formation; au centre, début de la phase de la maturité; à droite, phase de maturité. Ci-contre, à gauche,* un cumulonimbus, *avec sa forme caractéristique en enclume. Les cumulonimbus donnent de violentes précipitations sous forme d'orages et d'averses.

***▶ Ci-contre, à droite,* un type de cumulus.**

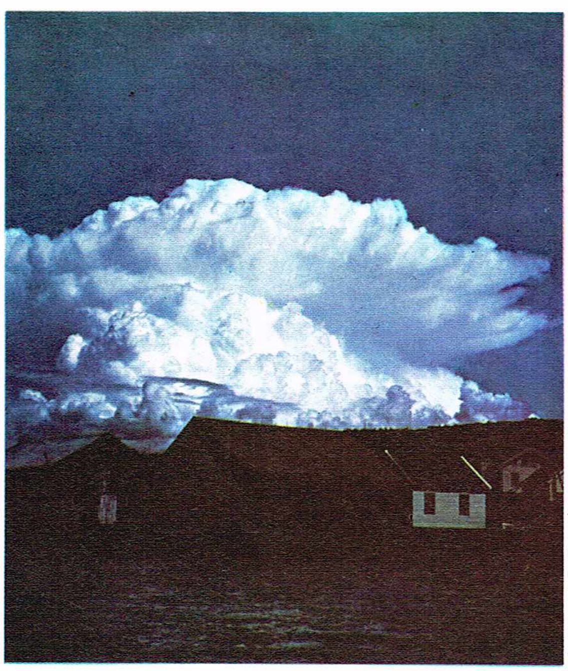

Ostman - B. Brattberg

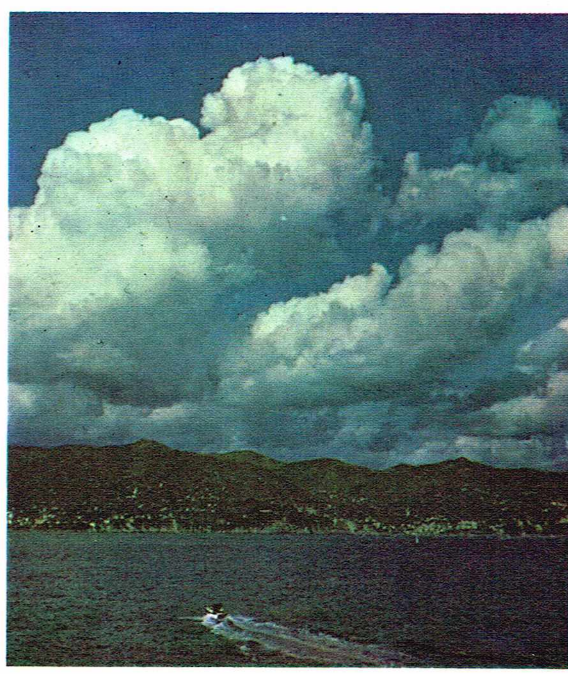

Mondi

ascendants. Le sommet du nuage, rejeté très haut en altitude, est entièrement constitué de cristaux de glace, et sa forme caractéristique est une enclume. Le cumulonimbus donne de violentes précipitations sous forme d'averses et d'orages. Lorsque les températures des basses couches sont voisines de 0 °C, les précipitations se font sous forme de grêle ou de neige. Par suite du brassage convectif qui permet une dispersion dans un grand volume d'air des poussières et impuretés de l'atmosphère, la visibilité est toujours excellente, sauf sous les averses, où elle est réduite momentanément.

Au passage d'une perturbation, on note une variation de la pression atmosphérique. Les fronts coïncident en général avec les thalwegs. Il en découle que, lorsqu'un front se décale, il est précédé par une baisse de la pression, et il est suivi par une hausse de la pression. A l'avant du front chaud, la pression baisse d'une manière continue, plus ou moins vite. Le maximum de baisse se trouve pratiquement sur le front chaud. Dans le secteur chaud, la pression n'évolue pratiquement plus et reste souvent proche de la valeur qu'elle avait au moment du passage du front chaud. Au passage du front froid, on observe une hausse très brutale de la pression qui, en fait, matérialise l'arrivée d'air froid et dense. Il arrive cependant que la pression, après le passage du front froid, subisse une faible hausse suivie d'une nouvelle baisse. Cela découle du fait que l'air froid n'est pas homogène et qu'il est constitué par plusieurs masses d'air froid de températures de plus en plus basses (donc de densités relatives de plus en plus grandes). Il se constitue ainsi, entre deux masses d'air froid de la traîne, une surface de discontinuité donnant un front froid secondaire. Dans ce cas, la pression ne subira une hausse véritable que dans l'air le plus froid de la traîne. Ces fronts froids secondaires constituent des axes de thalwegs qu'il est possible de déceler sur une carte météorologique synoptique. Au cours de son déplacement, une perturbation peut être freinée en l'un de ses points par un obstacle naturel, une chaîne de montagnes par exemple (c'est ce qui arrive fréquemment aux perturbations atlantiques qui, ayant traversé la France d'ouest en est, butent sur le massif alpin). Cette discontinuité de la vitesse de déplacement amène temporairement le front froid en contact avec le front chaud au point d'arrêt. Il se produit un genre d'étranglement qui arrive à sectionner le secteur chaud en deux parties. La partie indépendante de la perturbation qui se forme de cette manière s'appelle une *séclusion*. Cette « bulle » d'air chaud tend à disparaître rapidement par occlusion (c'est-à-dire que le front froid restant rattrape le front chaud).

Lorsqu'on analyse une carte synoptique à échelle hémisphérique, on s'aperçoit que, le long du front polaire, il se développe souvent de nombreuses perturbations qui arrivent à former une famille. Chaque membre de cette famille se développe, vit et meurt indépendamment. Dans la série, les perturbations les plus âgées sont les premières. Elles sont souvent fortement occluses. Les perturbations d'une même famille peuvent se succéder avec une cadence assez régulière de l'ordre de 24 à 36 heures pour une circulation perturbée normale, et de l'ordre de 18 à 24 heures pour une circulation rapide. Dans ce cas-ci, la traîne de la perturbation précédente est souvent masquée par l'arrivée en altitude de l'air chaud de la suivante.

Phénomènes atmosphériques en régions tropicales

Dans les perturbations atmosphériques, on doit faire une place spéciale aux phénomènes atmosphériques qui se produisent dans les régions tropicales, et qui souvent présentent une grande violence et mettent en jeu des énergies considérables.

Le **cyclone tropical** est une dépression circulaire de diamètre compris entre 200 et 1 000 km. Pour son développement, il faut qu'un certain nombre de conditions soient réunies. Phénomène prenant toujours naissance sur mer, il faut que la température superficielle de l'eau soit égale ou supérieure à 28 °C. De plus, on doit avoir une convergence horizontale de l'air dans les basses couches de l'atmosphère; cela se produit parfois après un épisode orageux où l'une des cellules accroît anormalement son activité et se transforme en cyclone tropical. Mais d'une manière générale, on distingue deux phases dans la formation d'un cyclone.

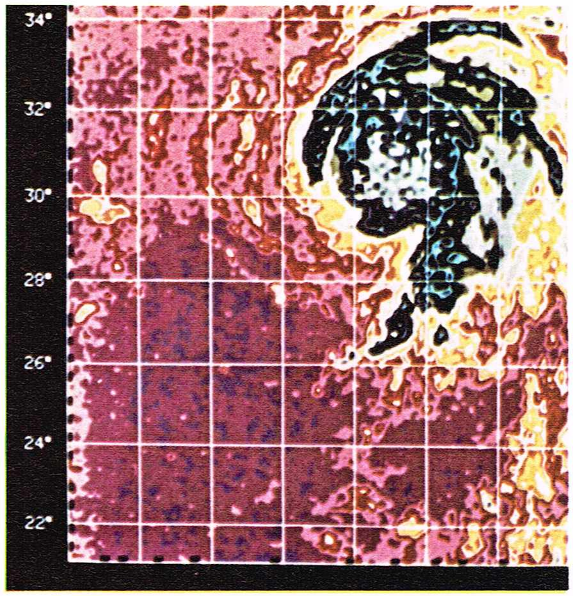

Météorologie nationale

◀ Photographie d'un cyclone tropical en infrarouge.

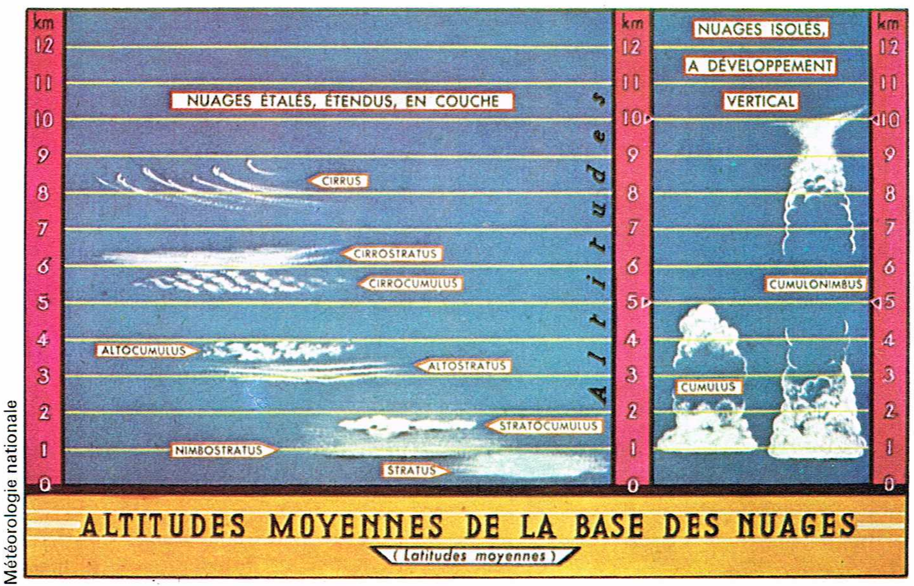

Météorologie nationale

▲ Tableau récapitulatif des altitudes moyennes de la base des nuages.

— Dans la première phase, la *phase thermique*, l'air entourant une dépression peu développée commence un mouvement sous l'unique action de la force de pression. Ce mouvement s'effectue des hautes vers les basses pressions, et sa trajectoire est perpendiculaire aux isobares. La vitesse d'écoulement de l'air s'accélère de plus en plus sous l'action de cette force. Bien qu'elle soit faible (mais non négligeable) aux latitudes tropicales, la force de Coriolis intervient à son tour pour dévier très légèrement vers la droite (dans l'hémisphère Nord) la trajectoire de l'air. La vitesse d'écoulement s'accroît de plus en plus et peut atteindre et même dépasser 30 m/s. A cette vitesse, les particules d'air continuent leur déplacement par inertie et ont de plus en plus tendance à se rabattre vers le centre de la dépression en amorçant un mouvement tourbillonnaire. Compte tenu de la valeur de la force de Coriolis, à l'équateur et dans les régions tropicales, il ne peut se former que des tourbillons de petite échelle. La convergence horizontale qui existe dans ces régions se traduit par la formation de mouvements ascendants et par l'augmentation de la vitesse horizontale du vent.

— Dans la deuxième phase, la *phase mécanique*, une importante force centrifuge apparaît dans le mouvement circulaire, dont la valeur est proportionnelle à V^2/R, où V est la vitesse de rotation du tourbillon et R son rayon qui, en tout état de cause, demeure modeste. Seule la force de pression peut équilibrer la force centrifuge. Il faut donc qu'une forte baisse de pression se

▶ *Circulation atmosphérique dans la région des moussons d'hiver (à gauche) et d'été (à droite) : en gris foncé, les zones élevées. Les masses d'air : cP, polaires continentales ; mP, polaires maritimes ; cT, tropicales continentales ; mT, tropicales maritimes ; mT(E), maritimes, tropicales, équatoriales ; cT → E, continentales tropicales passant aux équatoriales.*

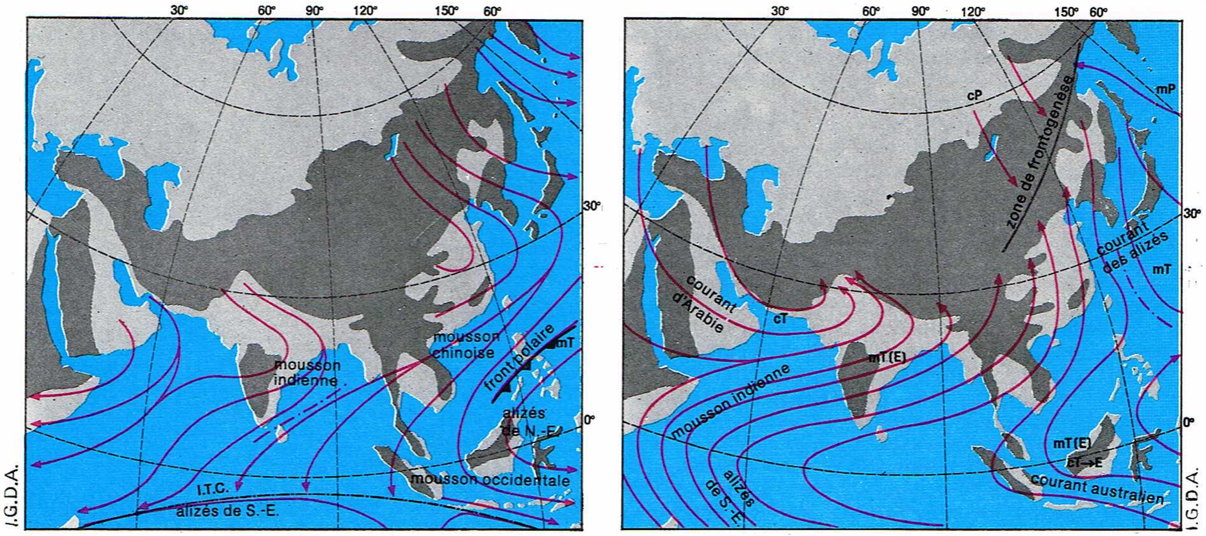

▶ *Formation du fœhn. Avant de gagner le niveau de condensation, l'air ascendant se refroidit au rythme de 10 °C/km (zone A). Au-delà du niveau de condensation, le refroidissement s'effectue au rythme de 6 °C/km avec formation de gros nuages et précipitations (zone B). Passé la crête, l'air, n'étant plus saturé, redescend en se réchauffant au rythme de 10 °C/km (zone C) et, à altitude égale, prend des températures supérieures à celles qu'il avait en montant.*

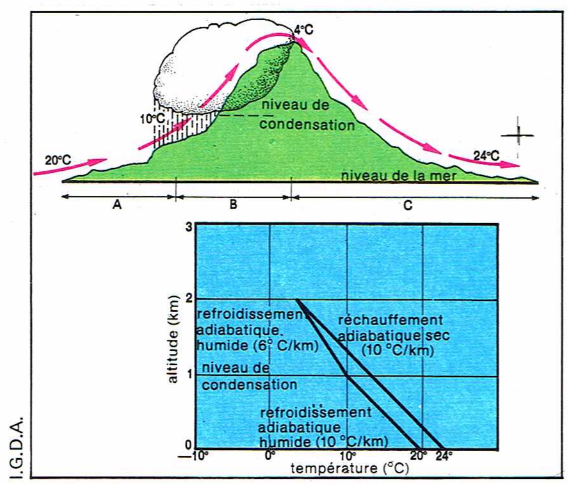

produise dans la partie centrale de la dépression. Cette baisse de pression est de l'ordre de 20 à 40 millibars. Comme elle se produit très rapidement, on obtient un enregistrement de la pression en forme de V, très caractéristique. Le tourbillon étant maintenant formé, il y a alors de grandes chances qu'il arrive au stade de cyclone tropical.

La circulation autour du tourbillon s'effectue en suivant la *règle de Buys Ballot,* à savoir, dans le sens anti-horaire dans l'hémisphère Nord et en sens inverse dans l'hémisphère Sud. Les nuages qui accompagnent ce phénomène météorologique sont tous du type *cumulonimbus.* Ils s'organisent en ligne qui s'enroule en spirale vers le centre du tourbillon. On observe des pluies torrentielles sous cette masse nuageuse importante.

Ces phénomènes météorologiques importants s'observent sur les océans des latitudes tropicales, là où l'eau de mer peut atteindre et dépasser une température superficielle de 28 °C. Les cyclones tropicaux peuvent évoluer dans la circulation générale des latitudes moyennes en se transformant progressivement en dépressions extra-tropicales.

Il existe un autre phénomène propre aux régions tropicales mais surtout caractéristique de la partie nord de l'océan Indien. Il s'agit des **moussons,** phénomène de grande échelle donnant une circulation à peu près analogue à celle de la brise qui affecte une petite échelle : en effet, ce sont des circulations engendrées par des contrastes thermiques. Le phénomène est nettement visible en Inde et en Birmanie.

— La *mousson d'été* matérialise la circulation de l'air venant des régions équatoriales, donc de l'air très chaud et très humide présentant une instabilité convective, vers la dépression asiatique d'origine thermique. Au passage de la chaîne de l'Himalaya, il se produit un soulèvement orographique des masses d'air, ce qui augmente l'extension verticale des nuages, entraînant des précipitations violentes et importantes. C'est pour cette raison que la ville de Tcherrapoundi dans le Pakistan oriental reçoit une hauteur annuelle de précipitations de plus de 12 m en moins de 6 mois.

— La *mousson d'hiver* matérialise la circulation de l'air venant des régions continentales (donc de l'air très froid et très sec) en s'échappant de l'anticyclone continental. Au passage de l'Himalaya, cet air subit un effet de fœhn. L'ascendance de l'air au vent du relief entraîne une détente adiabatique avec condensation de l'humidité qu'il renferme. L'air circulant ensuite sous le vent du relief se dessature rapidement en se réchauffant. La mousson d'hiver donne en général un ciel dégagé sur l'Inde et la Birmanie.

Un autre phénomène météorologique des régions tropicales concerne la zone de convergence intertropicale (ZCIT) qui se retrouve dans toute la ceinture tropicale. Pour l'Atlantique, on retrouve dans la partie de l'hémisphère Sud un anticyclone à peu près symétrique de celui des Açores (anticyclone dit de Sainte-Hélène). Entre ces deux centres d'action, on trouve la ZCIT, qui correspond en fait aux basses pressions équatoriales matérialisées par de l'air humide et instable. Le *pot au noir* est le type de temps caractéristique de cette ZCIT de l'Atlantique avec la présence de *cumulonimbus* très développés dont le sommet peut atteindre 15 000 m, des nuages d'étages moyens *(altostratus)* et supérieur *(cirrostratus)* en plusieurs couches et des précipitations violentes sous forme d'orages ou d'averses.

▶ *Position moyenne de la ZCIT (zone de convergence intertropicale) en juillet et en janvier.*

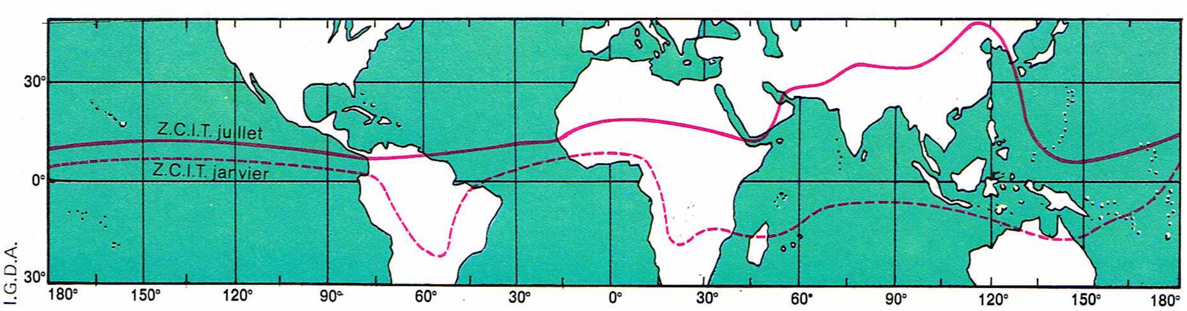

La prévision du temps

Acquisition des données météorologiques

Avant d'aborder ce problème, il est nécessaire de dire quelques mots de l'acquisition des données météorologiques de surface et d'altitude. Ces données font partie de ce que l'on appelle l'observation météorologique. Cette observation est effectuée soit par des météorologistes dans les différentes stations réparties sur le globe (stations terrestres, les plus nombreuses, stations maritimes, sous la forme de bateaux météorologiques stationnaires), soit par du personnel bénévole (sur terre : réseau d'observation complémentaire à usage climatologique ; sur mer : navires marchands faisant partie des navires météorologiques sélectionnés). Toutes les observations sont codées et transmises à des centres régionaux, puis nationaux, qui sont chargés de faire les différents échanges d'observations au moyen d'un puissant réseau de communications.

Les satellites météorologiques complètent ce canevas en donnant des photographies des zones nuageuses de l'atmosphère. De plus, ils effectuent un certain nombre de mesures en infrarouge, et, en particulier, ils donnent actuellement une indication sur les températures prises au niveau de la surface 500 millibars (5 500 m d'altitude).

Quelques stations spécialisées effectuent des radiosondages de l'atmosphère à l'aide de radiosondes qui donnent des mesures en altitude de température, d'humidité, de pression et de vent.

L'ensemble de ces données est pointé sous forme d'une représentation symbolique sur les cartes météorologiques d'échelles différentes qui servent à faire une analyse de la situation météorologique dans les 3 dimensions. Il est évident que la densité des observations varie grandement suivant les lieux que l'on considère : sur les continents habités, elles sont souvent très denses tandis que, sur les océans, elles sont clairsemées. Dans les zones désertiques, elles sont assez rares. Le prévisionniste météorologue doit commencer l'approche du problème par une analyse aussi détaillée que possible de l'état présent de l'atmosphère, car il est indispensable, pour effectuer un travail de prévision, de connaître l'état actuel et passé de l'atmosphère. Sur les cartes de pression, le prévisionniste trace un réseau de lignes d'égale pression, les *isobares*, qui délimitent des anticyclones et des dépressions. Pour ce faire, il tient compte de la valeur de la pression donnée par chaque station d'observation, mais, si le besoin s'en fait sentir, il effectue des interpolations pour combler le manque de renseignements. Il tient compte également de la direction et de la vitesse des vents (qui doivent être, rappelons-le, parallèles ou légèrement rentrants par rapport à l'isobare). Les *cartes de « pression »* sont en général au nombre de 6 qui se repèrent par rapport au niveau moyen pour lequel elles sont établies (sol, 850, 700, 500, 300 et 200 millibars). A l'aide des radiosondages, on établit une carte de masses d'air qui permet une analyse des différents types de masses d'air qui sont en circulation. Ce travail préliminaire étant établi, il reste à effectuer une prévision qui, en fait, doit traduire la variabilité du temps qu'il va faire en un lieu, compte tenu du caractère migrateur des phénomènes météorologiques. Il existe plusieurs techniques pour élaborer une prévision, mais dans ce domaine, des progrès considérables se font de plus en plus, grâce à l'aide apportée par l'utilisation des ordinateurs qui permettent de calculer rapidement la variation d'un certain nombre de paramètres de l'atmosphère.

Méthodes de prévisions météorologiques

Les représentations schématiques de l'état de l'atmosphère à un instant donné, à l'aide des cartes météorologiques, sont un « diagnostic » de la situation météorologique. Pour tirer les conclusions qui vont permettre de connaître l'état futur de l'atmosphère et, par déduction, les différents types de temps qu'il fera sur différentes régions et à des échéances de temps déterminées, on doit utiliser un certain nombre de méthodes de prévision.

La **méthode française** des noyaux de variation de pression est restée pendant longtemps la seule méthode utilisée en France pour effectuer des prévisions à 24 et 36 heures d'échéance. Actuellement cette méthode est abandonnée au profit de méthodes plus modernes que nous verrons plus loin. Cette méthode est fondée sur l'étude des variations de la pression atmosphérique au cours des 3 et des 24 heures précédant le dernier réseau d'analyse synoptique. Sur des cartes spéciales, on trace les lignes d'égale variation de pression *(isallobares)*. On constate que celles-ci ont l'allure de courbes fermées, sensiblement concentriques et donnant en leur centre le maximum de la variation de la pression, en hausse ou en baisse, c'est-à-dire avec le signe + ou le signe —. Cet ensemble de lignes concentriques a reçu le nom de *noyau*. Pour une perturbation, on trouve un couple de noyaux, l'un négatif et l'autre positif. Les noyaux se déplacent à la même vitesse que la perturbation, et l'on constate que, sur mer, en période de maturité, leur vitesse est à peu près constante (cette vitesse est grande au moment de leur apparition et très faible au moment de leur disparition). Toute une géométrie isallobarique a pu être bâtie à partir de règles empiriques que la physique a ensuite justifiées. La prévision de position et de valeur des couples de noyaux a pour but initial de tracer un champ de pression prévu, duquel on pourra déduire immédiatement la direction du vent (loi de Buys Ballot) et sa vitesse (règle du gradient de pression), de positionner d'une manière assez approchée les différentes masses d'air ainsi que leurs surfaces de discontinuité qui, au sol, déterminent les fronts, d'avoir une idée assez précise de l'état du ciel en déterminant les nuages types liés aux noyaux de pression, enfin de calculer approximativement les variations de la température (qui sont une fonction complexe de la nébulosité et de la nature de la masse d'air). Cette

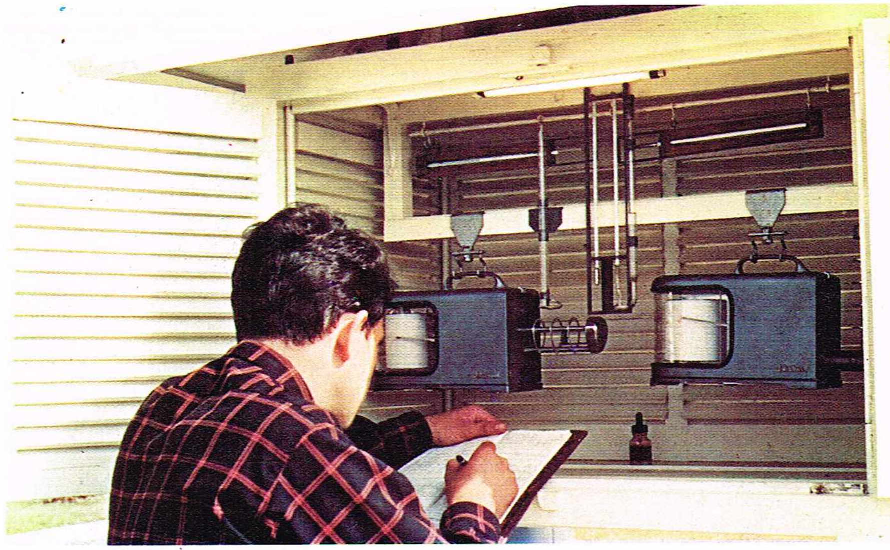

Météorologie nationale

▲ *L'observation des données météorologiques est effectuée soit par des météorologistes dans les différentes stations réparties sur le globe, soit par du personnel bénévole ; ici, le relevé des appareils dans un abri météorologique.*

▼ *Carte de pression pour la surface 500 millibars (5 500 m d'altitude).*

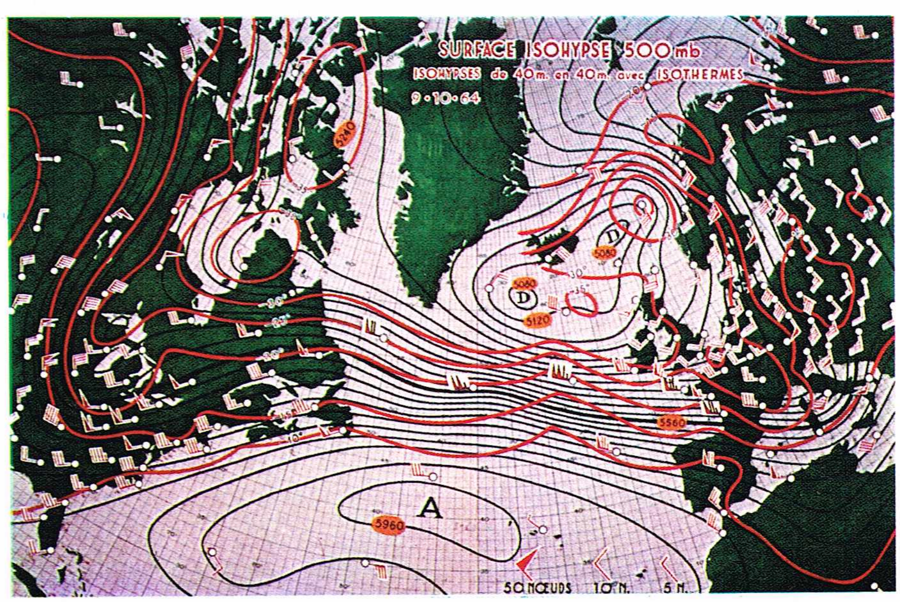

Météorologie nationale

Mondi

▲ ***Un orage avec des éclairs : la prévision de tels phénomènes nécessite l'acquisition d'un grand nombre de données et l'utilisation de modèles mathématiques.***

▼ ***A gauche, carte de la répartition en France des centres régionaux et stations de la Météorologie nationale. A droite, un radar*** **météorologique**; ***ce type de radar permet la détection des tornades, des ouragans et des lignes d'orages.***

méthode, bien qu'elle soit assez simple dans son esprit, a permis à toute une génération de météorologistes d'effectuer le travail de prévision dans des conditions assez rigoureuses de raisonnement.

Mais cette méthode a trouvé un complément de grande valeur dans la **méthode norvégienne** qui, par l'introduction de la notion de front, a permis une analyse beaucoup plus détaillée des situations. Cela a eu pour conséquence d'affiner les résultats obtenus en permettant d'inclure dans les raisonnements un plus grand nombre de données et d'appliquer un plus grand nombre de lois de la physique de l'atmosphère. La méthode norvégienne a permis un travail beaucoup plus rationnel, dont le déroulement peut se résumer comme suit.

L'*analyse de la situation (diagnostic)* est effectuée par le météorologiste en partant de l'examen des types de nuages et des hydrométéores qui sont symboliquement pointés sur une carte. Il délimite approximativement la position des masses d'air en présence, en remarquant que l'air stable donne toujours des nuages en couches tandis que l'air instable engendre toujours des nuages à développement vertical. On peut du reste, en tenant compte de la topographie isobarique, déterminer la trajectoire antérieure de ces masses d'air, et en connaître ainsi l'origine et les caractères qui se sont modifiés au cours de leur déplacement sur les continents ou sur les océans. L'identification des masses d'air permet de mieux connaître leurs limites (fronts). Elle est en général liée à l'étude de l'évolution des noyaux de pression qui leur sont associés. A l'aide des cartes de masses d'air, on effectue l'étude simultanée des fronts au sol et des discontinuités qu'ils entraînent en altitude. Cela permet de mieux tracer le *champ d'isobares*. L'étude de chaque masse d'air en présence peut être affinée par l'étude attentive d'un radiosondage effectué dans chaque masse d'air type. Pour avoir une étude fine de leur évolution, il suffit alors d'étudier une suite de radiosondages. Enfin, il est nécessaire de bien connaître les conditions météorologiques le long des fronts : types de nuages, précipitations, etc.

La *formulation de la prévision (pronostic)* s'effectue alors. Le météorologiste détermine l'évolution de chacun des facteurs cités précédemment et essaie de dégager la nature de leur interaction. Une nouvelle synthèse permet de déterminer la position des phénomènes le lendemain, puis, en revenant du général au particulier de déduire les répercussions sur l'état de l'atmosphère en chaque zone intéressée. Le travail du prévisionniste part donc du particulier pour aller au général par analyse et synthèse, puis revient du général au particulier par analyse déductive.

Avant de passer aux différents modèles de prévision, il faut préciser deux points.

— Le premier point concerne l'*introduction de la coordonnée* $\sigma = \frac{p}{\pi}$ qui permettra, à partir des diverses équations donnant le champ de vitesse et l'évolution du champ thermique, d'élaborer une méthode de prévision. On repère donc la verticale dans le système de coordonnées par une troisième variable indépendante de l'espace σ définie par $\sigma = \frac{p}{\pi}$, dans laquelle p est la pression en un point de la verticale et π la pression au niveau de la surface terrestre sur une même verticale. Par définition, on

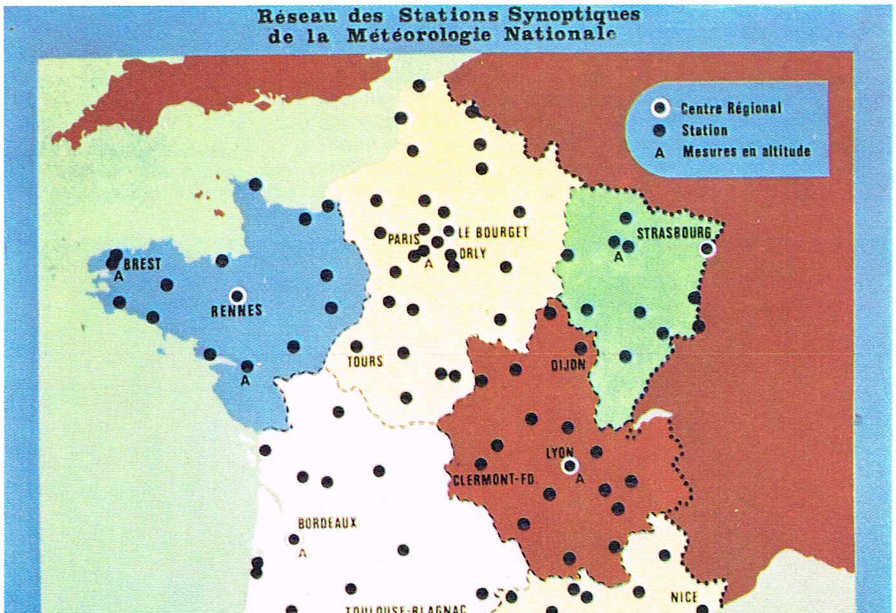

Météorologie nationale

Météorologie nationale

posera $\frac{d\sigma}{dt} = \dot{\sigma}$, qui sera nul au sommet et à la base de l'atmosphère. Il faut remarquer que, dans le système de repères, le géopotentiel du niveau π, Φ_s, représente le relief, et il est fonction de x et y; à la base, $p = \pi$, donc $\sigma = 1$; au sommet de l'atmosphère, $p = 0$, $\sigma = 0$. On comprend que les formules et les équations trouvées précédemment peuvent se réécrire en coordonnées x, y, σ en faisant un changement de coordonnées. On obtient un certain nombre de relations entre les dérivées partielles de coordonnées x, y, p et de x, y, σ, et l'équation de continuité en coordonnées « pression »

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_p + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)_p + \frac{\partial \omega}{\partial p} = 0$$

devient :

$$\left(\frac{\partial (\pi u)}{\partial x}\right)_\sigma + \left(\frac{\partial (\pi v)}{\partial y}\right)_\sigma + \pi\frac{\partial \dot{\sigma}}{\partial \sigma} + \frac{\partial \pi}{\partial t} = 0,$$

car, si A représente un scalaire, on démontre que :

$$\frac{\partial A}{\partial p} = \frac{1}{\pi}\frac{\partial A}{\partial \sigma}.$$

En remarquant que les deux premiers termes représentent :

$$\text{div}_\sigma\,(\pi\vec{V}_h) \quad \text{et que} \quad \frac{\partial \dot{\sigma}}{\partial \sigma} = 0 \quad \text{pour} \quad \sigma = 1,$$

on écrit l'équation de continuité :

$$\frac{\partial \pi}{\partial t} = -\int_0^1 \text{div}_\sigma\,(\pi\vec{V}_h)\,d\sigma.$$

On a l'évolution de la pression en surface. Par le même processus de calcul, on obtient l'équation de la tendance qui s'écrit :

$$dp = \pi\,d\sigma + \sigma\left(\frac{\partial \pi}{\partial x}dx + \frac{\partial \pi}{\partial y}dy + \frac{\partial \pi}{\partial t}dt\right),$$

soit, en divisant par dt,

$$\omega = \pi\dot{\sigma} + \sigma\left(\frac{u\partial\pi}{\partial x} + \frac{v\partial\pi}{\partial y}\right) + \sigma\frac{\partial \pi}{\partial t}.$$

On obtient ω en fonction de σ. Le géopotentiel dans ce système de coordonnées s'écrit :

$$d\Phi = -C_p p^{-\frac{R}{C_p}} \pi^{\frac{R}{C_p}} Q\, d\left(\sigma^{\frac{R}{C_p}}\right).$$

En intégrant l'équation de continuité en coordonnées « pression » par rapport à σ pour σ variant de 0 à σ, σ étant le niveau où l'on veut calculer $\dot{\sigma}$, on obtient la valeur suivante :

$$\dot{\sigma} = \frac{\sigma}{\pi}\int_0^1 \text{div}_\sigma\,(\pi\vec{V}_h)\,d\sigma - \frac{1}{\pi}\int_0^\sigma \text{div}_\sigma\,(\pi\vec{V}_h)\,d\sigma.$$

Toutes les équations de la mécanique écrites en coordonnées σ permettent l'élaboration d'un système de prévision à 5 niveaux (modèle de Hinkelman).

— Le second point est relatif aux *« fonctions d'influence »*. Ces fonctions ont été mises au point et développées par l'*école russe*. Elles permettent de donner une solution mathématique, aussi exacte que possible, au système d'équations formé à l'aide de l'équation de la thermodynamique, de l'équation d'évolution du tourbillon en associant la relation de l'équilibre statique et la relation du tourbillon en fonction du géopotentiel; soit les relations :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\vec{V}_h\,\overrightarrow{\text{grad}}_p\,T + \omega\left(\frac{R}{C_p}\frac{T}{P} - \frac{\partial T}{\partial P}\right) + \frac{1}{C_p}\frac{\partial \varphi}{\partial t},$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\vec{V}_h\,\overrightarrow{\text{grad}}_p\,(\zeta + f) + f\frac{\partial \omega}{\partial P},$$

$$T = -\frac{G}{R}P\frac{\partial Z}{\partial P} \quad \text{et} \quad \zeta_g = \frac{G}{f}\nabla^2 Z.$$

En adoptant l'hypothèse géostrophique, on obtient, après transformation, deux équations à deux inconnues, l'une étant la tendance de géopotentiel $\frac{\partial Z}{\partial t}$, l'autre étant la vitesse verticale ω. On doit cependant formuler quelques hypothèses pour les conditions aux limites. La vitesse verticale ω doit être fixée au sommet et à la base de l'atmosphère. On admet le plus souvent que, pour la limite, $\omega = 0$, ce qui signifie que l'on ne tient pas compte

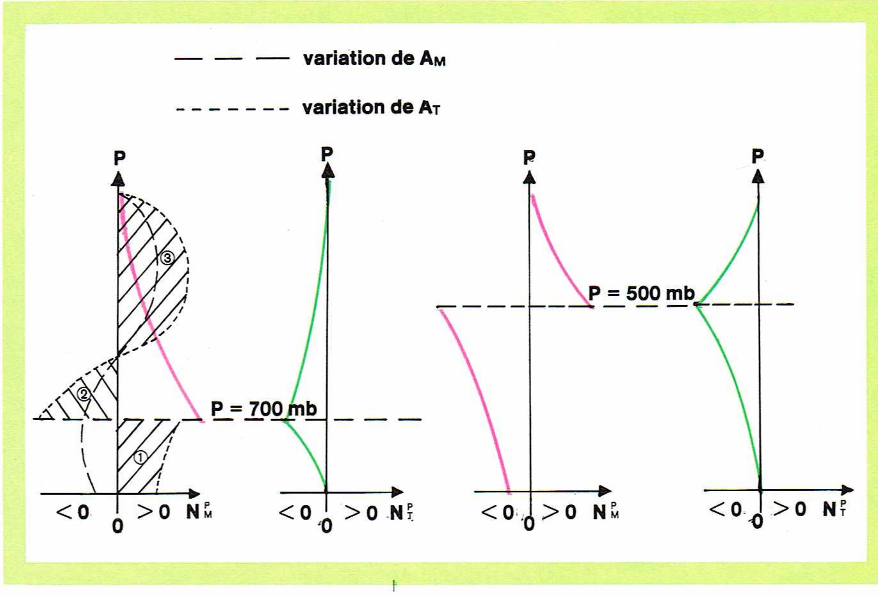

▲ ***Représentation graphique des* fonctions d'influence *mises au point et développées par l'école russe pour donner une solution aussi exacte que possible du système d'équations permettant la prévision météorologique.***

du frottement et du relief. Dans ce cas, la vitesse verticale calculée pour un niveau de pression P exprimé en milliers de millibars s'écrit :

$$\omega_P = \int_0^1 N_M^P A_M\,dP + \int_0^1 N_T^P A_T\,dP.$$

On désigne A_M par *cause mécanique*. Elle est de la forme :

$$A_M = M\,(-\vec{V}_h\,\overrightarrow{\text{grad}}_p\,(\zeta + f)),$$

M étant un coefficient de proportionnalité négatif. Le facteur entre parenthèses représente, comme nous l'avons déjà vu, l'advection isobare du tourbillon absolu. Dans la pratique, cette advection est positive à l'avant des thalwegs et à l'arrière des dorsales. A_M est donc dans ce cas négative. A l'arrière des thalwegs et à l'avant des dorsales, l'advection est négative, donc A_M est positive.

Le terme A_T est désigné par *cause thermique*. Elle est de la forme :

$$A_T = R_a\left(-\vec{V}_h\,\overrightarrow{\text{grad}}_p\,T + \frac{1}{C_p}\frac{dQ}{dt}\right).$$

Le premier terme de la parenthèse concerne l'advection thermique isobare. Elle peut être positive ou négative suivant que l'advection est chaude ou froide. Le second terme concerne les apports calorifiques au sein des particules atmosphériques. Ils sont nuls lors des transformations adiabatiques. Le terme est positif lorsque la condensation intervient au cours des échanges, par suite de la libération de chaleur latente.

Les termes N_M^P et N_T^P, qui dépendent du niveau P de pression, sont appelés *« fonctions d'influence »*. Ces fonctions sont représentées par les courbes ci-dessus.

Il faut remarquer que les courbes ont les mêmes caractéristiques, c'est-à-dire discontinuité ou point de rebroussement au niveau de pression considéré. Ces courbes permettent de déterminer ω_P puis A_M et A_T pour tous les niveaux. On reporte sur les courbes données les variations de A_M et de A_T pour un niveau donné. Sur le graphique, $\int_0^1 N_M^P A_M\,dP$ vaut la somme des surfaces hachurées 1 + 2 + 3 en considérant que 1 et 3 sont positives, et 2 négative. L'intégrale peut donc être, compte tenu de cette somme algébrique d'aires, positive ou négative, ce qui détermine le signe de ω, donc s'il y a des mouvements descendants (ω positif) ou ascendants (ω négatif). Il faut cependant s'assurer que :

$$\int_0^1 N_T^P A_T\,dP$$

ne contre pas ces mouvements (en effectuant la somme algébrique des aires déterminées par la courbe de variation de A_T). Tout cela peut se résumer par le fait qu'à un niveau de pression P donné, la vitesse verticale est fonction de la combinaison de différentes advections

▶ ***Représentation cartographique de la trajectoire des cyclones et des dépressions.***

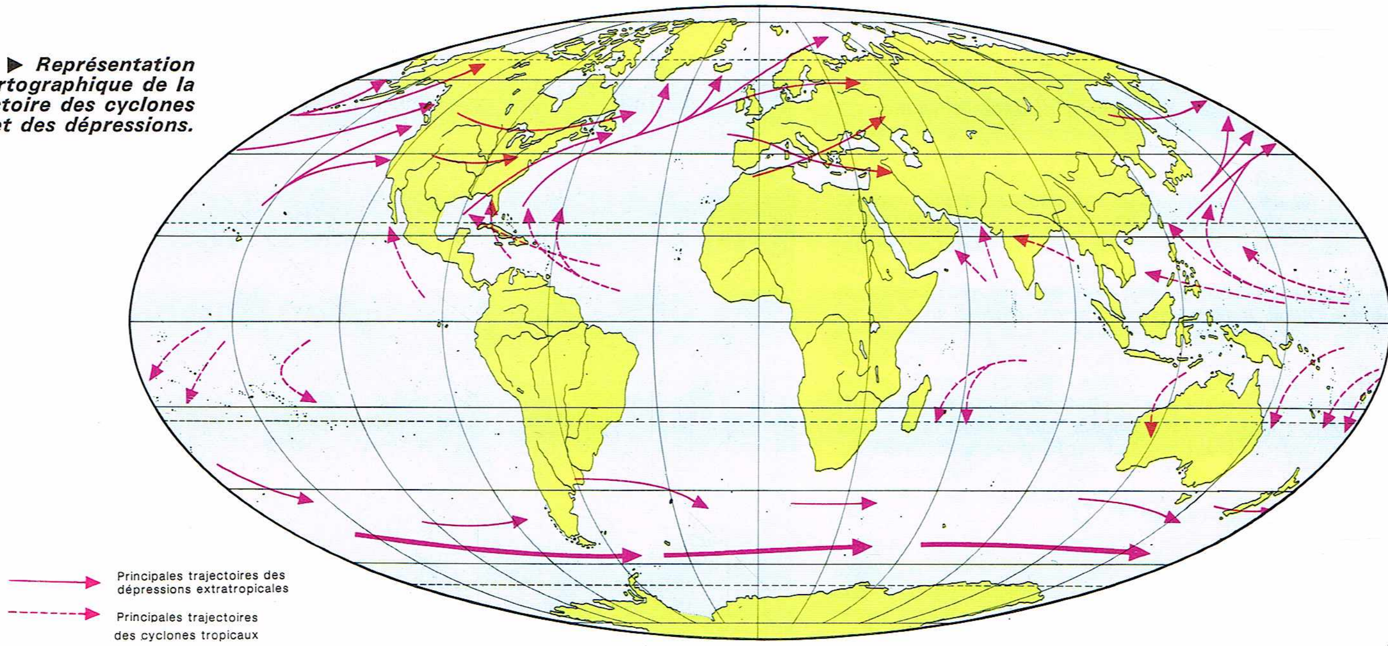

I.G.D.A.

de tourbillon absolu, pour ce qui concerne la cause mécanique, qui se produisent plus haut et plus bas que le niveau considéré. La vitesse verticale dépend également de la combinaison des diverses distributions verticales de la cause thermique, au-dessus et au-dessous du niveau de pression considéré. Toute advection thermique positive se produisant à n'importe quel niveau élève la valeur algébrique de la cause thermique A_T à ce niveau. N_T est partout négatif, donc la vitesse verticale devient plus faible, ce qui crée ou renforce un mouvement ascendant, ou bien atténue ou annule un mouvement descendant.

L'expérience montre que, d'une manière générale, les causes thermiques ont une influence moins importante que les causes mécaniques. Aussi faut-il considérer toujours en priorité la cause mécanique A_M et savoir que, dans les zones dépressionnaires des basses couches ou dans les thalwegs de surface ou d'altitude, on observe des mouvements verticaux ascendants. Dans les zones anticycloniques des basses couches de l'atmosphère et dans les dorsales de surface ou d'altitude, on observe des mouvements verticaux descendants (autrement dit, on observe de la subsidence).

Avant de voir quelques modèles de prévision numérique couramment utilisés, disons quelques mots du *problème de l'instabilité de calcul*. D'une manière générale, on peut affirmer que les phénomènes atmosphériques sont la conséquence de la superposition de mouvements périodiques ou quasi périodiques se produisant à diverses échelles de temps et d'espace. Cette périodicité peut justifier l'appellation d' « ondes » donnée à ces phénomènes atmosphériques. En considérant des échelles d'espace plus ou moins grandes, on peut distinguer plusieurs types d'ondes.

— Les *ondes d'inertie (ou de gravité)* ont une échelle allant de quelques dizaines de kilomètres au kilomètre. La vitesse de phase de ces ondes est de l'ordre de la centaine de kilomètres à l'heure. On peut classer dans cette catégorie les *ondes de relief* (provenant de la circulation du fluide atmosphérique sur une montagne), les *lignes de grains* (formés par une ligne continue de cumulonimbus), les *tornades* qui se produisent en Afrique et en Amérique et, d'une manière plus générale, tout phénomène atmosphérique de petite échelle.

— Les *ondes synoptiques* ont une échelle spatiale plus grande, de l'ordre de 1 000 km. La vitesse de phase est de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres à l'heure. Ces ondes synoptiques sont en général les perturbations du front polaire.

— Les *grandes ondes de la circulation générale* (ondes de Rossby se produisant dans la circulation à l'échelle hémisphérique) ont une étendue de l'ordre de 10 000 km. La vitesse de phase de ces ondes est très faible. Ces ondes se trouvent dans les dorsales et les thalwegs du niveau de pression 500 millibars, dans les centres d'actions (anticyclone et dépression).

Les équations d'évolution de l'atmosphère que nous avons vues plus haut, écrites sans simplifications, permettent de décrire toutes ces catégories d'ondes. Les équations du mouvement écrites en coordonnées « pression » ou « σ » qui ont comme hypothèse de base la quasi-staticité ne permettent pas de décrire les phénomènes ondulatoires des ondes sonores. Elles permettent cependant de décrire les autres phénomènes. On dit que ces équations « filtrent » les ondes sonores (qui ont, rappelons-le, une grande vitesse de phase de l'ordre de 300 m/s). Dans la prévision météorologique, seules les ondes synoptiques et les grandes ondes de la circulation générale nous intéressent. La considération des ondes d'inertie, ou ondes de gravité, ne pose pas beaucoup de problèmes. Elles sont à peu près exclues de l'analyse initiale effectuée à l'échelle synoptique, et elles n'ont qu'une importance très faible au cours de l'évolution atmosphérique envisagée. Cependant, lorsqu'on tra-

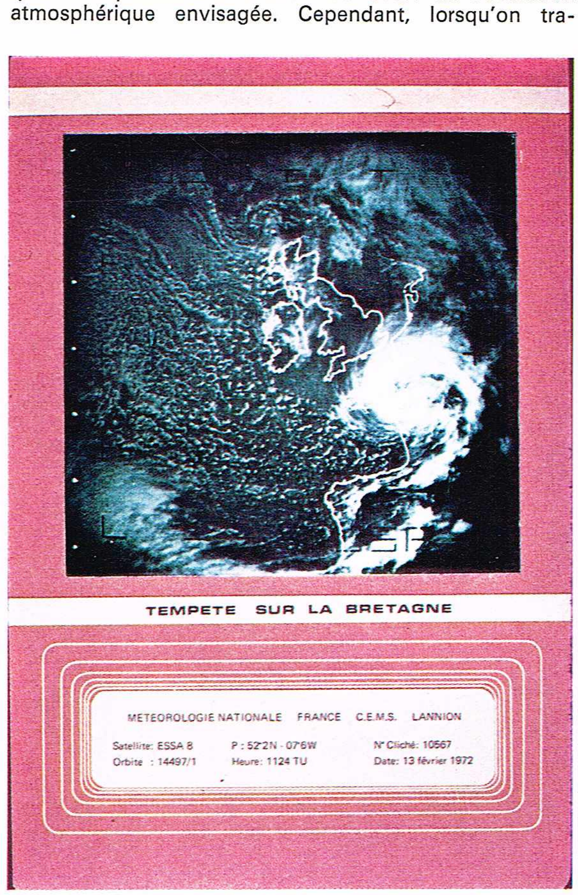

Météorologie nationale

▶ ***Photo réalisée par satellite météorologique et transmise au centre de Lannion (Côtes-du-Nord), mettant en évidence une tempête sur la Bretagne.***

vaille en différences finies, tant dans l'échelle spatiale que temporelle, les solutions numériques trouvées pour toute onde effectivement prise en compte par le modèle de prévision numérique sont instables si $\Delta t > k\frac{D}{C}$. C'est le critère de courant, dans lequel Δt représente l'avance dans le temps (ou pas dans le temps), k une constante dépendant des unités et du mode de calcul, D la dimension réelle de la maille pour laquelle on effectue le calcul et C la vitesse de phase de l'onde considérée. Cette instabilité définit le fait qu'il y a une amplification rapide et sans aucune signification physique des ondes à chaque nouveau pas de calcul (pratiquement, l'amplitude de l'onde considérée double toutes les 2 ou 3 heures), si bien qu'à l'échéance de la prévision, c'est-à-dire à l'instant futur pour lequel le calcul est effectué, la solution trouvée, à cause de son instabilité, masque tous les autres phénomènes significatifs. Avec les équations primitives en coordonnées pression ou « σ », la plus grande vitesse de phase des ondes décrites précédemment est celle des ondes d'inertie et de gravité. Pour une dimension de maille donnée D, il existe une avance dans le temps critique $(\Delta t)_c$ donnée par la relation $(\Delta t)_c = k\frac{D}{C}$. Il faut que $\Delta t < (\Delta t)_c$, ce qui signifie qu'en pratique, pour une dimension de maille de quelques centaines de kilomètres, le pas dans le temps limite est de l'ordre de quelques minutes. Si l'on filtre les ondes de gravité et d'inertie, ce temps critique est de l'ordre de 1 heure. Le modèle à équations primitives a donc des calculs assez simples à l'intérieur d'une même avance dans le temps, calculs donnant directement la tendance. Il respecte les principes énergétiques, et les simplifications, de ce fait, sont réduites au minimum. Par contre, ce modèle a une avance dans le temps très petite, ce qui nécessite de nombreux calculs dès que l'on veut avoir une échéance de prévision de 12, 18 ou 24 heures. Rappelons que les équations filtrées qui permettent des avances dans le temps beaucoup plus grandes, ont été établies plus haut et font intervenir l'équation d'évolution du tourbillon en hypothèse géostrophique.

Modèles de prévision

Le modèle de Hinkelmann

Il utilise les équations en coordonnées σ mais il n'y a pas de terme de chaleur (c'est-à-dire que les échanges thermiques sont nuls). Il prend en compte le frottement. Les calculs s'effectuent pour 5 niveaux, avec des données fondamentales de u, v et t calculées aux niveaux impairs, π étant relatif à la surface de la Terre. On calcule les géopotentiels Φ à tous les niveaux. A l'aide de l'équation donnant $\dot\sigma$, on calcule $\dot\sigma$ de tous les niveaux pairs avec $\dot\sigma = 0$ pour la base et le sommet de l'atmosphère.

Le modèle à équations primitives de Shuman

C'est un modèle à 6 couches, utilisé par les services américains de prévision. L'atmosphère du modèle comporte une couche limite planétaire, trois couches troposphériques, deux couches stratosphériques et une couche isentropique dans laquelle la température potentielle est constante dans l'espace et dans le temps. Cette couche n'a aucune réalité météorologique. La structure verticale du modèle américain se présente schématiquement de la manière indiquée sur le schéma ci-dessous.

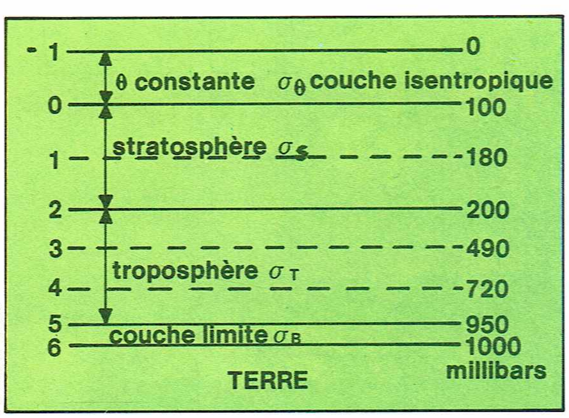

Richard Colin

La résolution des équations primitives se présente, du moins théoriquement, plus simplement que la résolution des équations modifiées par l'introduction de l'équation d'évolution du tourbillon dans les modèles qui utilisent les équations filtrées. Mais la résolution pose des problèmes d'instabilité de calculs. Comme on ne « filtre » pas les ondes de gravité, il faut effectuer des avances dans le temps de durée inférieure à 10 minutes. On multiplie de ce fait les erreurs de calcul. Au démarrage des calculs, la prise en compte de données météorologiques insuffisantes ou erronées risque d'introduire des ondes parasites qui, ultérieurement, peuvent masquer des solutions intéressantes en donnant des solutions peu réalistes sur le plan de l'évolution des phénomènes météorologiques. Pour essayer de limiter ce type d'erreur, on réalise des calculs utilisant le processus d'initialisation et des schémas de différences finies. Dans le modèle de Shuman, la coordonnée verticale utilisée est la coordonnée de Phillips, qui s'écrit :

$$\sigma = \frac{P - P_H}{P_B - P_H},$$

où P_H, P_B représentent la pression au sommet et à la base d'une couche. Ce modèle donne des solutions par couche. Les variations verticales deviennent des différences réelles dans les surfaces de coordonnées σ. On obtient, en se référant à la représentation schématique, des couches du modèle :

$$\sigma_B = \frac{P - P_5}{P_6 - P_5} \quad \sigma_T = \frac{P - P_2}{P_5 - P_2} \quad \sigma_S = \frac{P - P_0}{P_2 - P_0} \quad \sigma_\theta = \frac{P}{P_0}$$

Les Américains utilisent pour réaliser les calculs une grille de 3 021 points dont seulement les 1 977 points centraux, compris approximativement dans un octogone, servent réellement (c'est le domaine utile de la prévision). Le reste des points hors de ce domaine utile constitue une zone tampon qui permet d'assurer la stabilité des calculs en limitant l'introduction de données parasites dues aux conditions limites latérales de la grille générale. Les variables indépendantes sont x, y (coordonnées cartésiennes horizontales sur la projection), σ, et t, le temps. Les variables dépendantes du temps sont : u et v composantes horizontales réelles du vent, $\omega = \frac{d\sigma}{dt}$ vitesse verticale, θ la température potentielle, Z le géopotentiel, p la pression, $\pi = \frac{T}{T_{1\,000}}$ ($T_{1\,000}$ est T à la pression 1 000 millibars), et q l'humidité spécifique.

On calcule la valeur des variables à l'aide des équations dites de pronostic. Le modèle de prévision utilise les équations de base suivantes :

— équation du mouvement en projection :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \dot\sigma\frac{\partial u}{\partial \sigma} - v\left(f - v\frac{\partial m}{\partial x} + u\frac{\partial m}{\partial y}\right) + m\left(u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial gZ}{\partial x} + C_p\theta\frac{\partial \pi}{\partial x}\right) + F_x = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \dot\sigma\frac{\partial v}{\partial \sigma} + u\left(f - v\frac{\partial m}{\partial x} + u\frac{\partial m}{\partial y}\right) + m\left(u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial gZ}{\partial y} + C_p\theta\frac{\partial \pi}{\partial y}\right) + F_y = 0;$$

— équation de l'hydrostatique :

$$\frac{\partial gZ}{\partial \sigma} + C_p\theta\frac{\partial \pi}{\partial \sigma} = 0;$$

— équation de la thermodynamique :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \dot\sigma\frac{\partial \theta}{\partial \sigma} + m\left(u\frac{\partial \theta}{\partial x} + v\frac{\partial \theta}{\partial y}\right) + H = 0;$$

— équation de continuité :

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial p}{\partial \sigma}\right) + \frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\frac{\partial p}{\partial \sigma}\dot\sigma\right) + m\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial p}{\partial \sigma}u\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial p}{\partial \sigma}v\right)\right] - \frac{\partial p}{\partial \sigma}\left(u\frac{\partial m}{\partial x} + v\frac{\partial m}{\partial y}\right) = 0;$$

— équation de conservation de la vapeur d'eau :

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \dot\sigma\frac{\partial q}{\partial \sigma} + m\left(u\frac{\partial q}{\partial x} + v\frac{\partial q}{\partial y}\right) + C = 0.$$

Pour simplifier l'écriture, F_x et F_y sont les termes de frottement et de turbulence dans la couche limite, H les

◀ ***Il existe différents modèles mathématiques permettant d'effectuer des prévisions météorologiques à partir des données acquises par le réseau d'observation à la surface du globe et en altitude : ici, représentation graphique de la structure verticale du modèle à équations primitives de Shuman, qui est utilisé par les services américains de météorologie; selon ce type de modèle, l'atmosphère est divisée en 6 couches.***

influences adiabatiques, et C les influences de la condensation et de l'évaporation dans le bilan de la vapeur d'eau. Il faut remarquer que les équations sont écrites en coordonnées σ. Les données initiales entrant dans le calcul sont obtenues à partir des analyses objectives faites journellement dans le domaine des 3 021 points. On obtient ainsi la température au sol, le géopotentiel du niveau 1 000 millibars, les températures et les géopotentiels des niveaux standards 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150 et 100 millibars. $\frac{\partial p}{\partial \sigma}$ est initialisée à partir de 3 champs de pression préalablement analysés et correspondant à la base, au sommet de la stratosphère et à la tropopause du modèle. En interpolant les géopotentiels et les pressions des surfaces σ, θ de chaque couche est calculée par l'équation de l'hydrostatique. L'initialisation des vents se fait par l'intermédiaire des fonctions de courant déterminées par l'équation de balance à partir des géopotentiels moyens de chaque couche (cela permet d'éliminer les ondes de gravité initiales). Pour l'humidité, on initialise la quantité d'eau précipitable que l'on calcule par :

$$W = \frac{1}{g} \int_{\sigma_u}^{\sigma_e} q \frac{\partial p}{\partial \sigma} d\sigma$$

intégrée sur les couches inférieures du modèle. On admet qu'au-dessus du niveau 3, il n'y a plus de vapeur d'eau. A partir des tendances calculées pour les éléments :

$$\overline{u}_t^t, \quad \overline{v}_t^t, \quad \overline{p}_{\sigma t}^t \quad \text{et} \quad \overline{w}_t^t,$$

on calcule, en partant des valeurs initiales, les nouvelles valeurs des variables par avance dans le temps. Ce modèle tient compte, en plus des forces de frottement, de la convection, du rayonnement et des échanges thermiques sur les océans. C'est donc un modèle très élaboré. Les résultats de la prévision qui sont obtenus en coordonnées σ sont traduits ensuite en valeurs sur les surfaces isobares standards. Cela donne un champ de pression en surface, des géopotentiels, des températures et des vents jusqu'au niveau 1 000 millibars. Avant leur exploitation, ces champs sont réexaminés et éventuellement lissés, en particulier pour tenir compte de certains effets orographiques importants (comme le Groenland, les Rocheuses, l'Himalaya). On peut en tirer alors certains champs complémentaires (comme le champ d'épaisseur 850-500 millibars), des vents et des vitesses verticales ω pour certains niveaux. Ce type de modèle donne des prévisions à échéance de 24 et 48 heures que l'on peut qualifier de satisfaisantes; à 72 heures d'échéance, le produit du calcul est moins satisfaisant, mais il donne néanmoins une idée de l'évolution des différents champs. A l'échéance de 4 et 5 jours, de nombreuses erreurs s'introduisent dans les calculs, ce qui limite pour l'instant l'exploitation de ce modèle à ces échéances avec une fiabilité acceptable.

Le modèle japonais

C'est un modèle à 4 niveaux numérotés en centaines de millibars : niveaux 3, 5, 7 et 9. Il dérive directement d'un modèle filtré très simple élaboré à partir de deux équations fondamentales :

$$\nabla^2 \frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\frac{1}{f_0} J\,(\Phi, \nabla^2\Phi + f_0 f) + f_0^2 \frac{\partial \omega}{\partial p} + f_0 \,\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{F}$$

et :

$$p^2 \frac{\partial}{\partial p}\left(\frac{\partial \Phi}{\partial t}\right) = -p\left[\frac{1}{f_0} J\left(\Phi, p\frac{\partial \Phi}{\partial p}\right) + \frac{RQ}{C_p}\right] - R_a \omega s$$

pour lesquelles f_0 est la valeur moyenne du paramètre de Coriolis et s le paramètre de stabilité de l'atmosphère. On néglige dans ce cas les effets de frottement, et on opère en hypothèse d'adiabatisme sec. On considère comme conditions aux limites $\omega_{10} = 0$ et $\omega_2 = 0$ (voir ci-dessous, à gauche la schématisation du modèle japonais).

On écrit alors la première équation uniquement pour les niveaux impairs et l'équation suivante pour les niveaux pairs. Le modèle présente quelques particularités. On introduit les termes de frottement dans l'équation du tourbillon écrite pour le niveau 9. On introduit des termes d'apport de chaleur dans l'équation $p^2 \frac{\partial}{\partial p}\left(\frac{\partial \Phi}{\partial t}\right)$ considérée pour les niveaux 8 et 6. Ces termes d'apport de chaleur se divisent en deux parties : chaleur sensible, qui représente la chaleur échangée entre la surface terrestre et l'atmosphère, et le terme de libération éventuelle de la chaleur latente de condensation. La conduite des calculs s'effectue de la manière suivante : on calcule les prévisions de géopotentiels pour les niveaux 9, 7, 5 et 3. On peut obtenir le géopotentiel à 1 000 millibars à partir des niveaux 9, 7 et 5 à l'aide d'une équation de régression (formulation linéaire). En fait, ce modèle est un modèle à 5 niveaux. On calcule ensuite les épaisseurs des tranches d'atmosphère 700/900, 500/700 et 300/500 millibars. On obtient ainsi une idée des températures aux niveaux 800, 600 et 400 millibars, qui sont les niveaux milieux des tranches précédentes. Enfin, on calcule les vitesses verticales aux niveaux 800, 600 et 400 millibars.

Le modèle américain Cressman

C'est le premier modèle utilisé en Amérique à partir de 1966. C'est un modèle à 3 niveaux notés 2, 5, 8. La schématisation des niveaux du modèle est donnée ci-dessous.

Les conditions aux limites sont $\omega = 0$ pour le niveau 0,5 et $\omega = 0$ pour le niveau 9,5. On utilise les principes généraux propres aux équations filtrées. L'équation du tourbillon est appliquée aux niveaux 2,5 et 8, tandis que l'on applique l'équation thermique aux niveaux 6,5 et 3,5. On considère un certain nombre de particularités du modèle : on utilise une « balance équation » avec un terme de courbure pour passer de Φ à Ψ. C'est plus précis, et on peut ainsi raisonner sur l'hémisphère entier (f n'est pas constant comme dans le cas précédent où l'on prenait f_0). De plus, l'équation du tourbillon n'est plus l'équation donnée précédemment $\nabla^2 \frac{\partial \Phi}{\partial t}$ mais une équation beaucoup plus complexe. Enfin, on prend en compte le frottement et le relief de la surface terrestre. Il n'y a pas de termes d'apport de chaleur. Les calculs permettent de prévoir la fonction de courant aux niveaux 8, 5 et 2, ce qui entraîne la connaissance du géopotentiel aux niveaux 800, 500 et 200 millibars. Sur les autres niveaux, on obtient les vitesses verticales et les températures.

Le modèle barotrope

C'est un modèle filtré qui répond au principe de conservation de la composante verticale du tourbillon absolu et qui, faisant appel aux hypothèses quasi statique et quasi géostrophique, filtre les ondes sonores et les ondes de gravité et d'inertie. Avec ces hypothèses, ce modèle considère l'atmosphère comme un fluide à deux dimensions. On étudie son mouvement avec un seul paramètre, la fonction de courant Ψ au niveau 500 millibars. Cette fonction de courant est déduite du champ de géopotentiel analysé Φ_{500} à l'aide de l'équation de balance linéarisée :

$$\nabla^2\Phi = \nabla \cdot f \nabla \Psi.$$

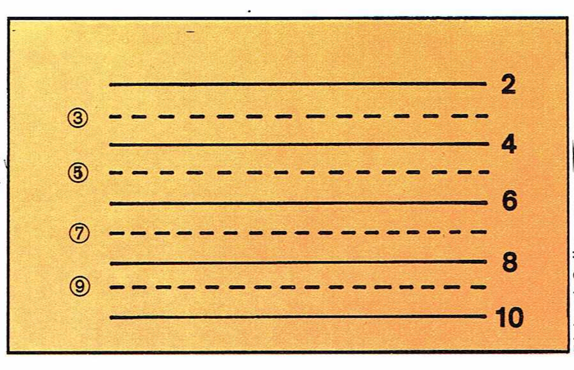

Richard Colin

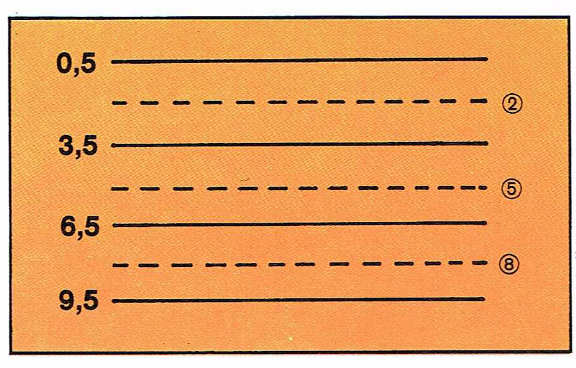

Richard Colin

▶ ***Représentation schématique de 2 types de modèles utilisés pour la prévision météorologique : à gauche, le** modèle **japonais à 4 niveaux notés 3, 5, 7 et 9; à droite, le** modèle américain Cressman **à 3 niveaux numérotés 2, 5 et 8.***

L'équation d'évolution de Ψ est l'équation du tourbillon sous la forme :

$$(\nabla^2 - kf)\frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\text{J}(\Psi, \nabla^2\Psi + f) + f\frac{\partial \omega}{\partial p}.$$

C'est une équation type Helmholtz. J représente l'*opérateur jacobien* donnant, comme nous l'avons vu précédemment, l'advection horizontale du tourbillon absolu. $-k\frac{\partial \Psi}{\partial t}$ est un terme de divergence permettant de contrôler le mouvement zonal des grandes ondes planétaires. Les conditions aux limites sont $\omega = 0$ à 200 millibars (niveau moyen de la tropopause) ; $\omega = \omega_s$, vitesse verticale en surface induite par le relief, et le frottement est donné par :

$$\omega_s = \text{J}(\Psi_s, p_s) - \frac{\rho_s g}{f}\text{C}_d\,|\text{V}_s|\,\nabla^2\alpha_s,$$

où p_s est la pression standard en surface correspondant à un relief terrestre adouci, ρ_s la masse spécifique de l'air en surface, C_d le coefficient de frottement de Cressman qui est fonction de la nature de la surface, $|\text{V}_s|$ le module du vent en surface et Ψ_s la fonction de courant en surface, extrapolée de la formule :

$$\Psi_s = \Psi_{500}\left(1 - 0{,}8\,\frac{p_s - 500}{500}\right);$$

α_s est le coefficient de diffusion. On effectue les calculs en différences finies, les jacobiens étant calculés avec 9 points, le laplacien avec 5 points et l'équation du tourbillon étant résolue par la méthode de surrelaxation itérative. Ψ est ensuite intégré par la méthode des avances en prenant un pas dans le temps $\Delta t = 1$ h. Ce modèle donne une prévision peu satisfaisante au niveau 500 millibars mais rend bien compte de l'évolution d'une colonne atmosphérique. Ce modèle conserve pratiquement les quantités de tourbillon absolu des particules et ne peut générer des phénomènes de cyclogenèse ou d'anticyclogenèse.

Le modèle à divergence nulle

C'est un modèle voisin du précédent. Si l'on considère comme précédemment la fonction de courant Ψ et le géopotentiel à 500 millibars Φ, l'équation du modèle à divergence nulle sera :

$$\frac{\partial(\nabla^2\Psi)}{\partial t} = -\text{J}(\Psi, \nabla^2\Psi + f).$$

En adoptant la balance équation la plus simple :

$$\Psi = \frac{\Phi}{f_0} = g\frac{\text{Z}}{f_0}$$

(où Z représente les géopotentiels en unités M.K.S.A.), on peut résoudre l'équation. Bien que le modèle puisse s'appliquer à de vastes domaines, nous raisonnerons sur un domaine réduit. Soit D la dimension réelle de la maille. On définit l'opérateur J* tel que $\text{J} = \frac{1}{4\,\text{D}^2}\text{J}^*$.

On obtient après transformation mathématique :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\text{Z}} - \text{Z}) = \frac{-g}{4\,\text{D}^2 f_0}\text{J}^*\left(\text{Z}, \bar{\text{Z}} + \frac{\partial^2 f_0}{4\,g}f\right).$$

En effectuant une avance dans le temps de Δt, avec pour variation de Z et $\bar{\text{Z}}$ les quantités ΔZ et $\Delta\bar{\text{Z}}$, on peut écrire :

$$\frac{\Delta \text{Z}}{\Delta t} \# \frac{\partial \text{Z}}{\partial t}$$

soit : $$\Delta\bar{\text{Z}} - \Delta\text{Z} = -g\frac{\Delta t}{4\,\text{D}^2 f_0}\text{J}^*\left(\text{Z}, \bar{\text{Z}} + \frac{\text{D}^2 f_0}{4\,g}f\right).$$

Cette équation permet de calculer la quantité ΔZ que nous cherchons. Cette équation est l'*équation de prévision*.

Le modèle à 3 niveaux

Les équations de base de ce modèle sont :

— L'*équation du tourbillon* écrite pour les 3 niveaux 800, 500 et 300 millibars. Comme pour le modèle barotrope, on peut dire que les termes de divergence de la forme $k_i\frac{\partial \Psi_i}{\partial t}$ que l'on introduit à chaque niveau dans l'équation du tourbillon permettent d'amortir les déplacements des grandes ondes.

— On trouve également, en hypothèse d'adiabatisme, l'*équation du premier principe de la thermodynamique* qui s'écrit, rappelons-le, sous la forme :

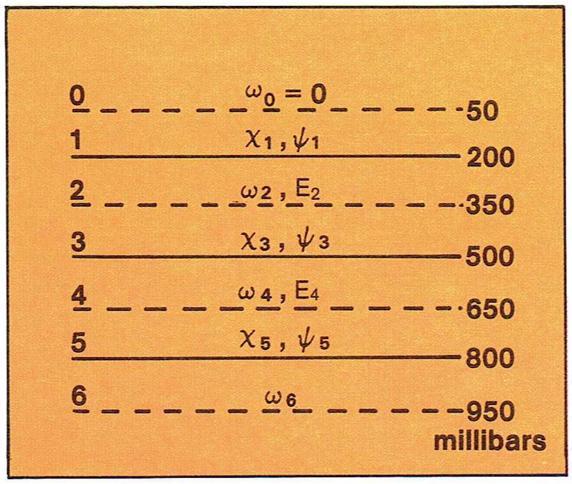

Richard Colin

◀ ***Le modèle de prévision à 3 niveaux (1, 3, 5, correspondant aux surfaces 300, 500 et 800 millibars) ; x représente le potentiel de vitesse, y la fonction de courant, et E l'épaisseur entre 2 niveaux.***

$$\frac{\partial \text{T}}{\partial t} = -\text{J}(\Psi, \text{T}) + \omega\left[\frac{\text{R}}{\text{C}_p}\frac{\text{T}}{p} - \frac{\partial \text{T}}{\partial p}\right]$$

qui est traduite en termes d'épaisseur, c'est-à-dire de la forme :

$$\frac{\partial \text{E}_2}{\partial t} = -\text{J}(\Psi_2, \text{E}_2) + \omega_2\sigma_2\Delta p$$

et :

$$\frac{\partial \text{E}_4}{\partial t} = -\text{J}(\Psi_4, \text{E}_4) + \omega_4\sigma_4\Delta p.$$

— Enfin, l'*équation de continuité* écrite en différences finies :

$$\nabla^2\chi_1 = -\frac{\omega_2}{\Delta p};\quad \nabla^2\chi_3 = \frac{\omega_2 - \omega_4}{\Delta p};\quad \nabla^2\chi_5 = \frac{\omega_4 - \omega_6}{\Delta p};$$

ω_6 est la vitesse verticale induite à la base de l'atmosphère par le frottement et le relief.

Pour un tel modèle, l'atmosphère se présente sous la forme schématique présentée ci-dessus où χ représente le potentiel de vitesse, $\omega = \frac{dp}{dt}$, Ψ la fonction de courant et E l'épaisseur entre 2 niveaux.

Le problème consiste à résoudre les équations de pronostic qui sont, en fait, les équations du tourbillon écrites pour les 3 niveaux, 800, 500 et 200 millibars. On calcule d'abord les géopotentiels à l'aide d'un modèle simplifié en faisant l'approximation $\nabla \cdot f\nabla\chi \simeq f\nabla^2\chi$. Cela permet de faire apparaître dans les équations d'énergie du système les vitesses verticales ω_2 et ω_4 en fonction des tendances d'épaisseur $\frac{\partial \text{E}_2}{\partial t}$ et $\frac{\partial \text{E}_4}{\partial t}$. Ayant calculé ces tendances, on en déduit les vitesses verticales ω, et de là les potentiels de vitesse χ. On peut alors résoudre les équations du tourbillon (encore appelées équations de Helmoltz), pour obtenir Ψ et terminer les calculs par les épaisseurs E_2 et E_4. L'initialisation des Ψ est obtenue par l'équation de balance linéarisée, soit à partir de l'analyse objective classique, soit à partir des champs de géopotentiels du modèle 6 niveaux pour des échéances de 36 et 48 heures. Pour des échéances de 72 à 96 heures, on couple les deux modèles. D'une manière générale, l'expérience montre que les modèles baroclines sont supérieurs aux modèles barotropes (rappelons que les modèles barotropes fournissent une prévision à un niveau unique, généralement 500 millibars, tandis que les modèles baroclines fournissent une prévision à plusieurs niveaux) pour des échéances de 36 à 48 heures. Au-delà, les modèles baroclines divergent par rapport à la réalité. Dans la pratique, pour de meilleurs résultats, on opère en général avec les deux modèles conjointement et, à partir de l'échéance 36 heures, on continue les calculs avec le modèle barotrope exclusivement.

Analyses automatiques

Pour rationaliser les calculs sur ordinateur, on crée une chaîne de calcul qui inclue le contrôle des données, l'analyse automatique des champs météorologiques, les calculs de prévision et enfin la présentation des résultats sous forme de cartes tracées automatiquement sur tables traçantes reliées aux ordinateurs. Nous allons dire

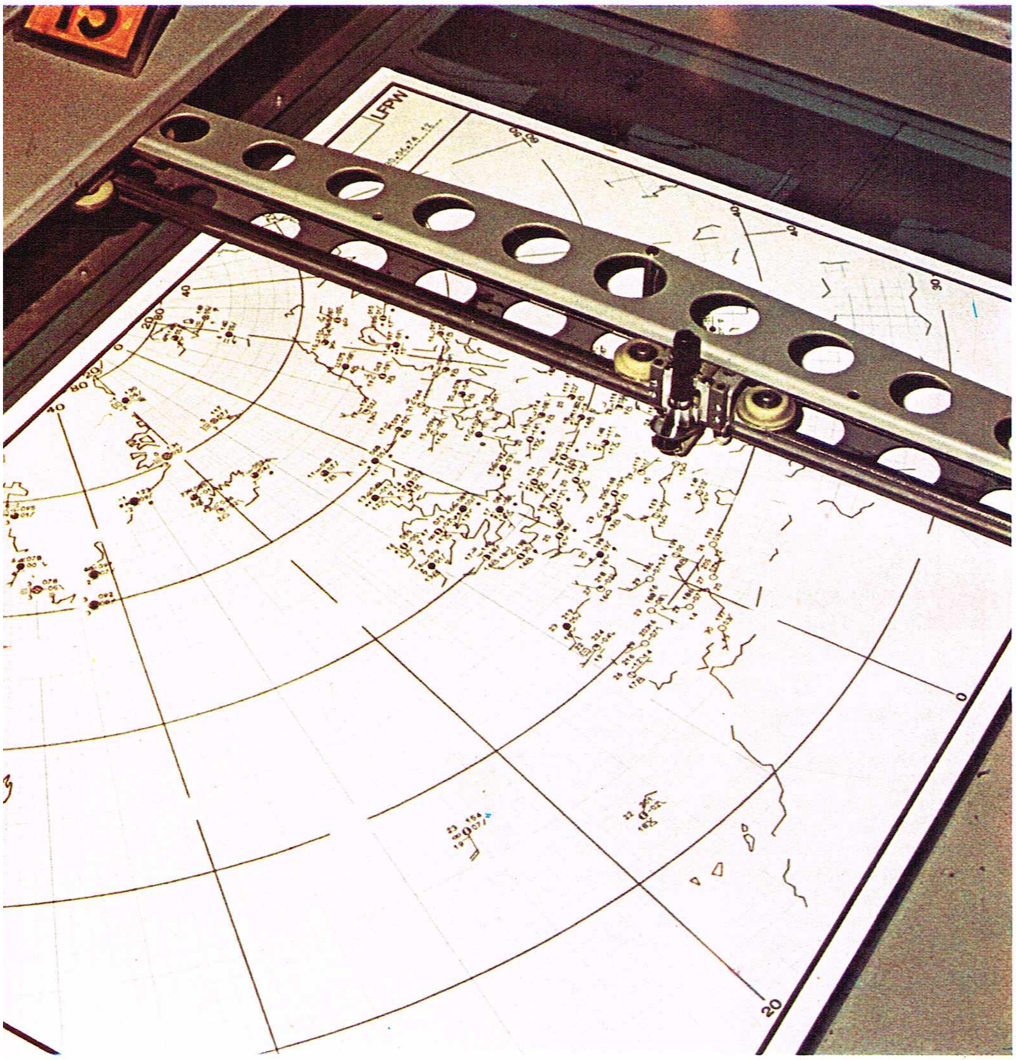

C. Fons

quelques mots des *analyses automatiques*. Il existe plusieurs méthodes pour effectuer ces analyses. Nous traiterons la plus simple de ces méthodes, celle du Suédois Doos revue par Cressman. Envisageons, par exemple, l'analyse automatique du géopotentiel. Le problème consiste à obtenir aux points de grille de calcul les valeurs de géopotentiel de la surface isobare considérée, et ce par l'intermédiaire des données de géopotentiel et de vent aux différentes stations (données discrètes). Il faut disposer d'une première ébauche de l'analyse sous forme de valeurs aux points de grille. Cette pseudo-analyse porte le nom de « guess-field ». Elle peut éventuellement être une prévision valable pour l'heure de l'analyse. A travers un certain nombre d'itérations, on corrige les valeurs aux points de grille par rapport aux valeurs données par les stations qui ont effectué des mesures. Soit Z_g^0 la valeur du géopotentiel du guess-field au point de grille, Z_i^r la valeur réelle du géopotentiel à la station numérotée i, Z_i^0 la valeur de ce géopotentiel à la station i impliquée par le guess-field Z_g^0. Soit $\overrightarrow{V_i}$ le vecteur vent réel à la station. Si le point de grille de calcul g et la station i sont voisins, la connaissance de $\overrightarrow{V_i}$ et de la différence $Z_i^r - Z_i^0$ va entraîner la détermination d'une correction au point de grille g. Lorsque toutes les stations auront ainsi apporté leur correction à tous les points de la grille, on obtiendra une première approche de l'analyse définitive dont les valeurs au point de grille sont notées par Z_g^1. En partant de cette première approche, on recommence le même processus de calcul en partant de la valeur Z_g^1 qui influe sur la valeur Z_i^1, etc., jusqu'à ce que toutes les stations aient ainsi apporté leurs corrections à tous les points de grille. On arrive ainsi à une deuxième approche de l'analyse qui se rapproche de l'analyse définitive. C'est donc un procédé pseudo-itératif. En général, on admet que l'analyse définitive est atteinte au bout de la quatrième itération. Il faut remarquer que le poids de la correction élémentaire qu'apporte une station i au point de grille g est d'autant plus grand que la distance point grille-station sera plus faible. Il faut donc introduire une fonction de poids W qui sera proportionnelle à la correction élémentaire. Cette fonction de poids W est donnée par la formule $W = \frac{N^2 - d^2}{N^2 + d^2}$, où N et d sont des longueurs mesurées en prenant comme unité de mesure la dimension

▲ *Une table traçante utilisée pour la météorologie : reliées aux ordinateurs qui réalisent les calculs de prévision météorologique, ces tables donnent les résultats directement sous forme de cartes.*

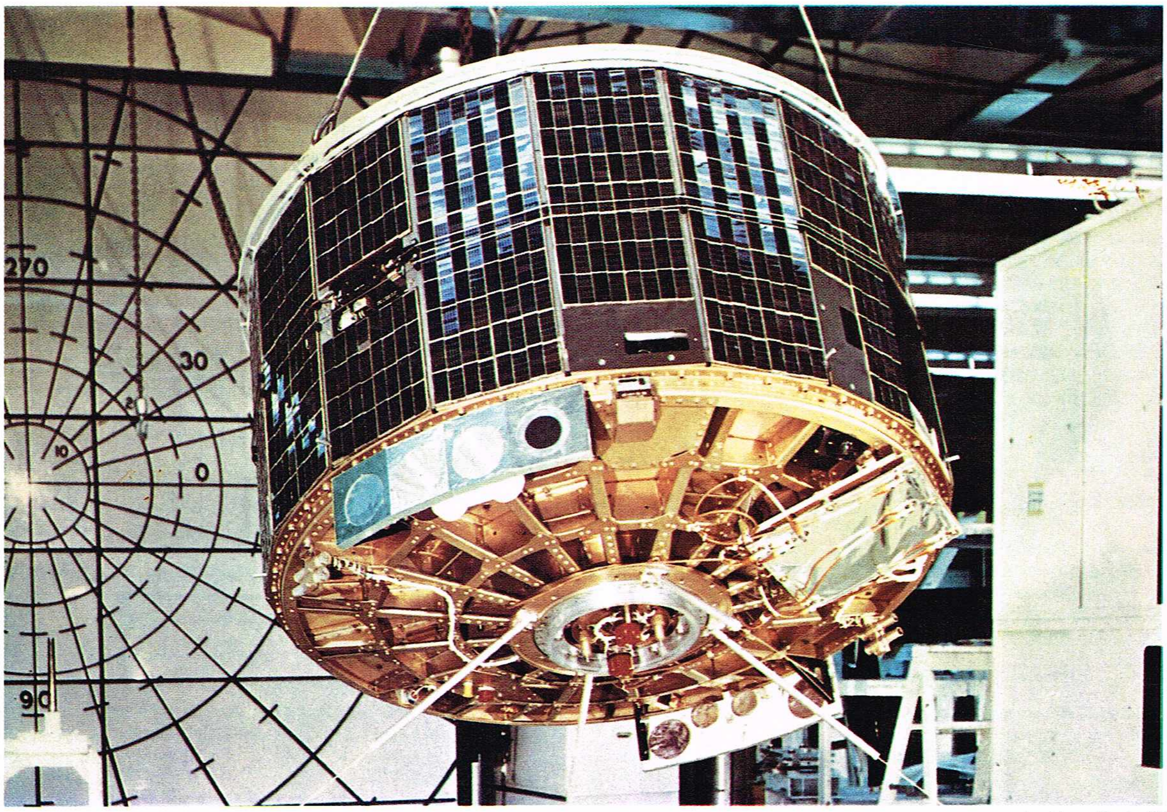

▶ *L'utilisation de satellites artificiels en météorologie a permis de dresser des catalogues des différents types de formations nuageuses, et surtout de compléter le manque de données au niveau des océans : ici, le satellite Essa III, version améliorée des satellites de la série des Tyros.*

Archives Radaelli

de maille (d est la distance point grille-station et N représente une constante dépendant uniquement du numéro de l'itération en cours). On constate que $W = 1$ pour $d = 0$, que W sera négatif pour $d > N$, ce qui est, bien sûr, impossible. Cela veut dire que seules les stations situées à l'intérieur d'un cercle de centre g et de rayon N contribuent à la correction totale apportée en g. Donc N est le domaine d'influence au-delà duquel on ne peut faire intervenir la valeur point station aux valeurs points grille.

Conclusion

La conclusion se tournera résolument vers l'avenir. En effet, depuis une dizaine d'années, avec l'avènement des calculateurs d'une part et avec l'utilisation intensive des satellites météorologiques d'autre part, la science météorologique est entrée dans une ère nouvelle, mais avec des objectifs bien modestes en regard des moyens techniques mis à sa disposition. A l'aide de calculatrices de plus en plus puissantes, les météorologistes ont pu résoudre les problèmes de la thermodynamique de l'atmosphère et appréhender plus parfaitement la mécanique atmosphérique.

Au début de cette ère nouvelle, le réseau d'observation de surface et d'altitude a suffi en fournissant régulièrement les données nécessaires pour effectuer des prévisions à l'aide de modèles mathématiques relativement simples. Mais, de plus en plus, les différents services nationaux de prévision ont essayé de parfaire ces modèles mathématiques, et, rapidement, le manque de données régulières sur de vastes parties du globe (en particulier sur les océans et les déserts) a été un frein au développement de ces différents modèles. Par certains artifices de calcul, on a pu, dans certains cas bien précis, pallier le manque d'informations de base.

Mais ces procédés n'ont pas remplacé l'acquisition directe des données par l'observation immédiate. Aussi s'est-on tourné vers les techniques aérospatiales, et les premiers satellites artificiels ont été surtout des satellites météorologiques. Cette nouvelle technique d'observation « globale » de l'atmosphère, par prises de vue successives soit en visible, soit en infrarouge, a, au début, posé plus de problèmes qu'elle n'a donné de sources d'explication des phénomènes. Cependant, grâce à l'étude *a posteriori* de l'imagerie satellitaire, on a pu dresser des catalogues de configurations types des formations nuageuses et, par là même, apporter au prévisionniste météorologue une nouvelle source de renseignements qui est loin d'être négligeable. Cette imagerie a également confirmé le bien-fondé de la théorie norvégienne sur la frontologie. Plus récemment, les mesures de températures en altitude faites par les satellites équipés de sondes à infrarouge ont permis de compléter assez efficacement le manque de données, en particulier sur les océans.

Il est évident que les moyens mis en œuvre dépassent très largement les possibilités considérées aux niveaux nationaux. Aussi comprend-on mieux que la météorologie soit devenue plus que jamais une science internationale dont l'organe de direction est l'Organisation mondiale de météorologie, organisme dépendant de l'O.N.U. Les recommandations de l'O.M.M. concernent exclusivement le caractère international de la science de l'atmosphère, donc l'interdépendance, pour certains domaines, de tous les services nationaux. Faut-il rappeler qu'en matière de prévision, les visées de l'O.M.M. sont bien modestes : l'organisation recommande de coordonner toutes les recherches en modèles de prévision afin qu'en 1980, chaque service national, en les appliquant, puisse fournir des prévisions à échéance de 5 jours qui aient un coefficient de réussite de 80 %. Par cette nouvelle orientation, la météorologie n'est plus l'affaire d'un seul mais de tous les météorologistes du monde.

BIBLIOGRAPHIE

BESSMOULIN J. et CLAUSSE R., *Vents, Nuages et Tempêtes,* Plon. - BRICARD J., *la Physique des nuages,* P.U.F. - DADY G., *Météorologie dynamique et Prévision numérique,* Météorologie nationale. - GEIGER R., *The Climate near the Ground*. - PERLAT A. et PETIT M., *Mesures en météorologie,* Gauthier-Villars. - PETTERSEN S., *Weather Analysis and Forecasting.* Vol. I et II.

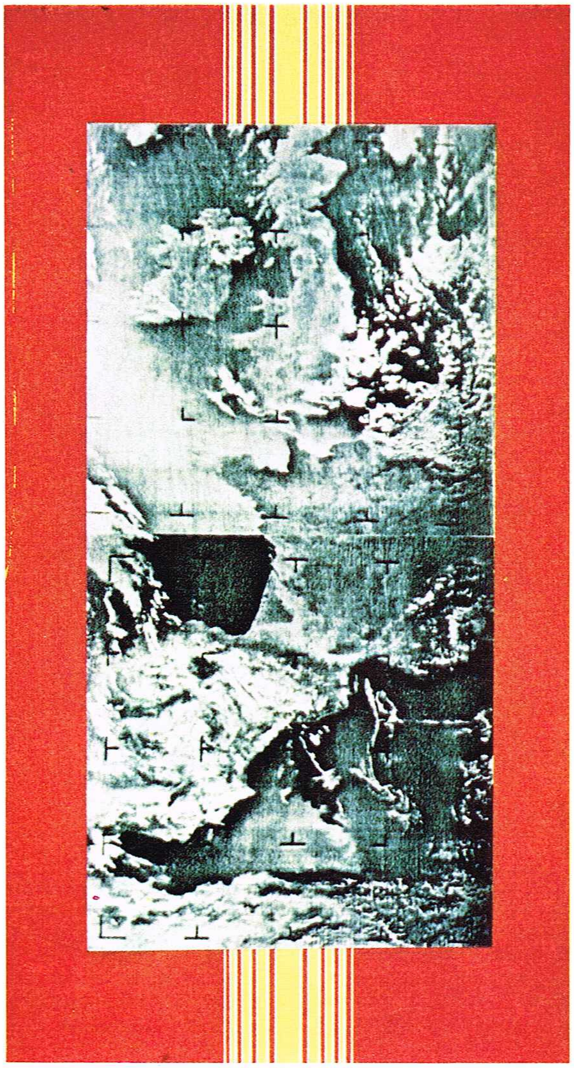

Météorologie nationale

◀ ***Photo prise en infrarouge par satellite météorologique.***

▼ ***Représentation schématique de la réception au Centre des études météorologiques spatiales de Lannion des photographies prises par satellite météorologique.***

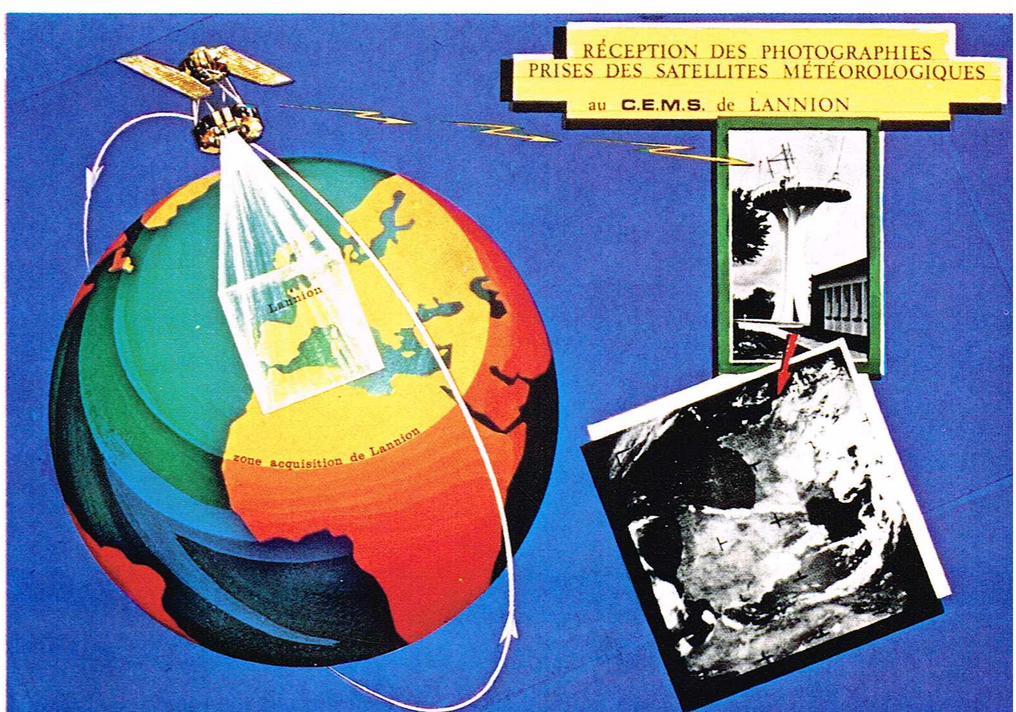

Météorologie nationale

N. Cirani

▲ *La* climatologie *étudie les variations de l'ensemble des conditions atmosphériques caractérisant le climat, mais aussi leurs causes et leur répartition géographique; ici, une zone désertique du sud-est de l'Égypte, caractérisée par un climat aride et une végétation éparse, localisée sur des buttes sablonneuses.*

CLIMATOLOGIE

La climatologie est la science qui étudie les variations de l'ensemble des conditions atmosphériques caractérisant le climat, leurs causes, leur répartition sur le globe. Pour pouvoir effectuer la climatologie d'une région, d'un pays, il est nécessaire de posséder un nombre assez important d'observations échelonnées régulièrement ou même irrégulièrement dans le temps. A ce titre, la climatologie s'adresse toujours aux événements climatiques passés, et, si ceux-ci présentent un quelconque caractère de périodicité, on essaie de dégager les caractéristiques de cette périodicité. On prend, par principe, un certain nombre d'éléments météorologiques comme la température, les précipitations, les vents, l'humidité, la pression, la nébulosité, et on étudie les variations de chaque élément et leur interaction. Tout cela constitue le *climat*. Cependant, il ne faut pas perdre de vue que ces différents facteurs météorologiques sont influencés par les divers facteurs géographiques et géologiques : latitude, relief, altitude, proximité ou éloignement des étendues d'eau, et nature du sous-sol. Définir un climat, c'est essayer de le classer, en fonction de ses caractéristiques propres, dans un système plus général de *climats types*. Ces climats types permettent à leur tour, compte tenu de leur répartition à la surface du globe, de définir des *zones climatiques*. Il existe plusieurs classifications de climats. Pris séparément, des éléments météorologiques peuvent à eux seuls donner une classification des climats.

Si l'on considère la répartition géographique des *températures moyennes mensuelles,* on obtient une classification sommaire qui permet de distinguer 5 zones climatiques.

— *Zone froide,* pour laquelle 4 mois au moins de l'année connaissent une température moyenne inférieure à 10 °C. On n'observe pas à proprement parler de saison estivale.

— *Zone tempérée,* pour laquelle les quatre saisons sont assez marquées du point de vue thermique. Le contraste est bien entendu le plus grand entre les saisons extrêmes : l'hiver et l'été.

— *Zone subtropicale,* pour laquelle on observe des oscillations thermiques plus marquées avec un maximum prononcé. Cette zone connaît au moins 1 mois (8 au plus) de température moyenne maximale au-dessous de 20 °C.

— *Zone tropicale,* pour laquelle les variations mensuelles de la température sont prononcées. Dans cette zone, on observe une période chaude, mais on remarque qu'aucun mois de l'année n'a une température moyenne diurne au-dessous de 20 °C.

— *Zone équatoriale,* pour laquelle les saisons sont mal définies à cause des faibles oscillations de la température tout au long de l'année.

Si l'on considère maintenant uniquement les *quantités d'eau précipitées en une année,* on obtient un nouveau type de classification des climats fondé sur le régime pluviométrique.

— *Régime pluviométrique équatorial :* les pluies tombent tout au long de l'année. On observe tout de même deux maximums bien marqués se produisant au moment des équinoxes.

— *Régime pluviométrique subéquatorial :* on distingue deux saisons pluvieuses séparées par une période de sécheresse plus ou moins longue.

— *Régime pluviométrique tropical :* il est caractérisé par de longues périodes de sécheresse.

— *Régime pluviométrique des déserts :* les pluies sont rares, et leur fréquence est fortement irrégulière.

— *Régime pluviométrique méditerranéen :* on distingue deux régimes principaux : le *régime* dit *maritime* et celui dit *continental.* Dans le premier, les pluies sont abondantes avec un maximum principal en automne et un maximum secondaire au printemps. Dans le second, les pluies sont abondantes en hiver et en automne. Pour les deux régimes types, l'été est une saison caractérisée par l'absence de pluies sur une durée plus ou moins longue suivant les années.

— *Régime pluviométrique des régions septentrionales :* les pluies sont réparties tout au long de l'année. On observe cependant un maximum franchement marqué en été pour les régions présentant un caractère continental, ou en hiver pour celles qui présentent un caractère maritime.

— *Régime pluviométrique des moussons :* il est caractérisé par deux saisons très contrastées, l'hiver, qui est la saison sèche, et l'été, qui est la saison pluvieuse.

Pris séparément, les éléments météorologiques ne peuvent pas permettre une classification satisfaisante. Par contre, en groupant un certain nombre d'éléments, on arrive à des classifications plus rationnelles et plus exactes.

La classification la plus utilisée est celle de Köppen. Elle est essentiellement fondée sur les effets des climats sur la croissance de la végétation. Donc température et pluviométrie sont les deux principaux critères de cette classification qui distingue 11 types de climat classés en 5 groupes référencés par les cinq premières lettres de l'alphabet et qui dépendent de la latitude.

— A est le groupe des *climats tropicaux humides,* c'est-à-dire pluvieux ;

— B est le groupe des *climats tropicaux secs,* c'est-à-dire le plus souvent arides ;

— C est le groupe des *climats tempérés humides,* c'est-à-dire en général chauds et pluvieux ;

— D est le groupe des *climats froids ;*

— E est le groupe des *climats polaires neigeux.*

Chaque groupe comprend des sous-groupes qui constituent les types climatiques principaux. Ces types sont référencés par des lettres majuscules ou minuscules, différentes des premières.

— *f* est le climat sans saison sèche ;

— *s* est le climat avec sécheresse estivale ;

— *w* est le climat avec sécheresse hivernale ;

— S est celui des steppes ;

— W celui des déserts ;

— T celui des toundras ;

— F celui des glaces.

Les 11 types de climats se classent de la manière suivante.

— Climats tropicaux pluvieux

Type Af : climat tropical pluvieux des zones de forêts, ne comportant pas de saison sèche. Les caractères essentiels de ce climat type sont, d'une part, une température moyenne du mois le plus froid supérieure à 18 °C et, d'autre part, des précipitations mensuelles, même pour le mois le moins pluvieux de l'année, supérieures à 60 mm.

Type Aw : climat tropical pluvieux des zones de savane comportant une période de sécheresse hivernale.

▶ *Page ci-contre, répartition géographique des principaux types de pluies, en janvier (en haut) et en juillet (en bas); le déplacement des masses d'air est représenté par les flèches bleues et ces masses sont notées : A, arctique; cP, continentale polaire; mP, maritime polaire; cT, continentale tropicale; mT, maritime tropicale.*

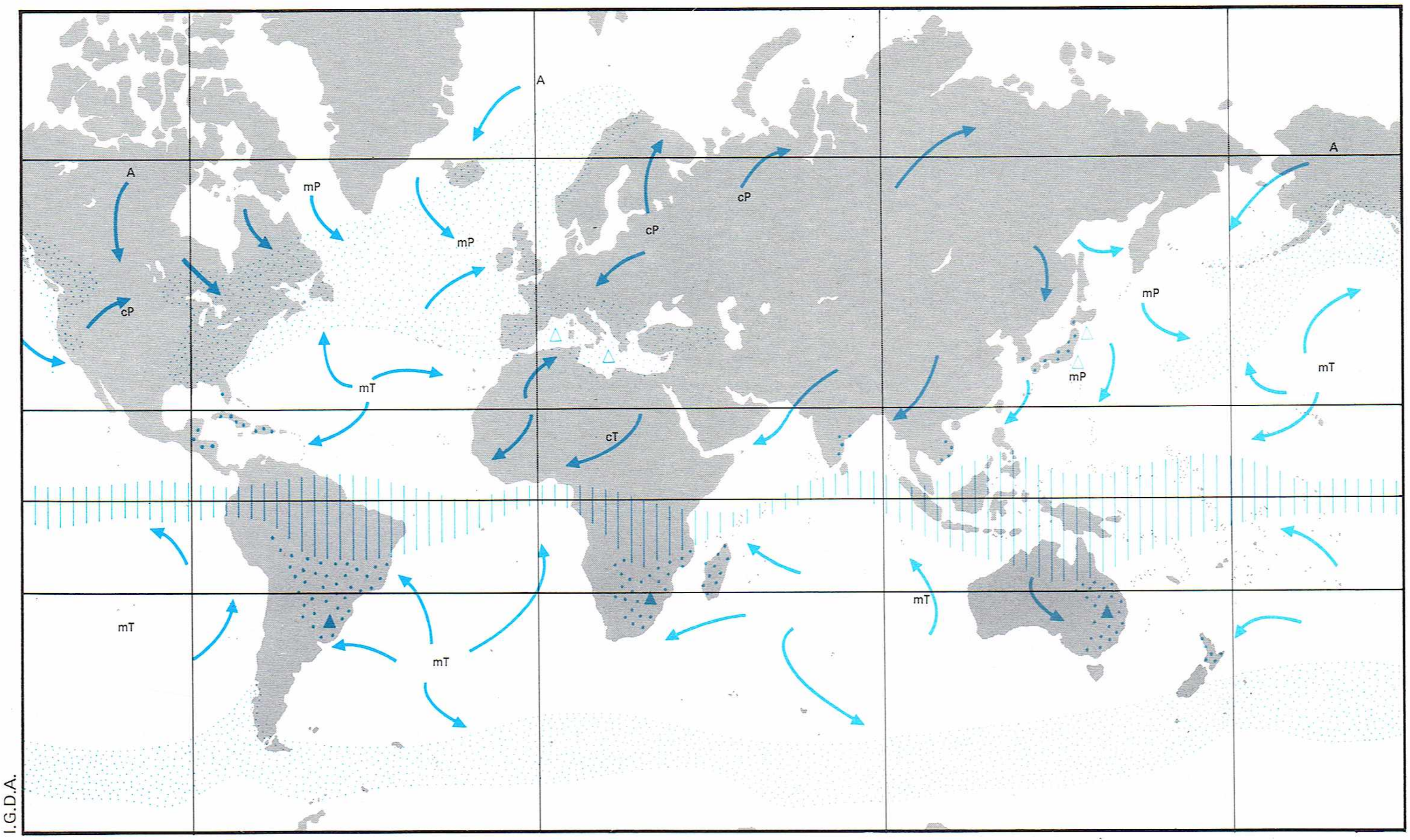

Pluie frontale et orographique provenant des fronts polaire et arctique

Pluie frontale et convective provenant du front équatorial

Pluie orographique et de mousson provenant des masses d'air humide

▲ Instabilité convective estivale sur les surfaces continentales

△ Instabilité convective hivernale sur les surfaces océaniques

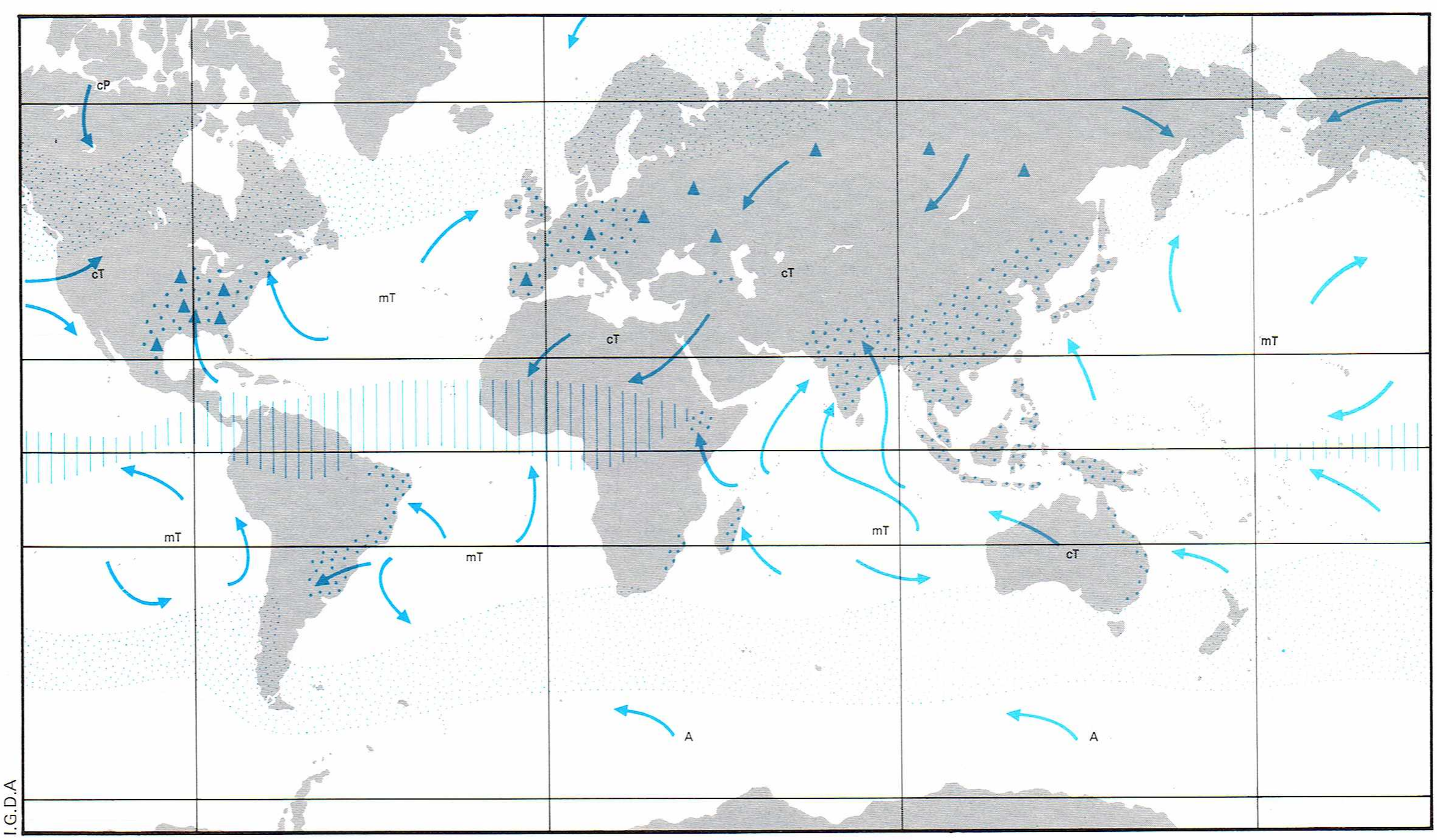

La température moyenne du mois le plus froid de l'année reste supérieure à 18 °C. En ce qui concerne les précipitations du mois le plus sec, elles sont inférieures à 10, 20, 40 ou 60 mm selon que la quantité annuelle des pluies est respectivement de 100, 150, 200 ou 250 mm.

— **Climats secs (arides)**

Type BS : climat aride des zones de steppes. Le climat type sec ou aride du groupe B est caractérisé par une imbrication étroite des températures et des pluies ainsi que de leurs effets (en particulier pour les précipitations) sur la vie végétative. Pour déterminer un climat sec des zones de steppes, il faut avoir la relation $r \leqslant 20\,t + 140$ pour laquelle r représente la quantité annuelle de précipitations en millimètres et t la température moyenne annuelle en °C.

Type BW : climat aride des déserts. Pour ce climat type, il faut que les quantités annuelles de précipitations soient égales à la moitié de celles que l'on obtient par le calcul de la relation précédente.

— **Climats tempérés pluvieux et chauds**

Dans ce type de climat, la température moyenne du mois le plus froid de l'année et celle du mois le plus chaud sont identiques, à peu de chose près, à celles du climat tempéré pluvieux chaud sans saison sèche du type C*f*. Les précipitations tombant au cours du mois le plus humide de la saison chaude sont au moins dix fois plus abondantes que celles qui tombent au cours du mois le plus sec de la saison froide.

Type Cf : climat tempéré pluvieux chaud sans saison sèche. Ce climat comporte des précipitations réparties en toutes saisons. La température moyenne du mois le plus froid est comprise entre 18 °C et — 3 °C. La température moyenne du mois le plus chaud est toujours supérieure à 10 °C.

Type Cw : climat tempéré pluvieux chaud avec sécheresse hivernale. On observe dans ce cas les précipitations uniquement en été. La température moyenne du mois le plus froid reste comprise entre 15 °C et — 4 °C ; quant à celle du mois le plus chaud, elle est supérieure à 12 °C.

Type Cs : climat tempéré pluvieux chaud avec sécheresse estivale et pluies en hiver. Les températures du mois le plus froid et du mois le plus chaud sont comparables à celles du climat type C*f*. Les précipitations tombant au cours du mois le plus humide de la saison froide sont au moins trois fois plus abondantes que celles qui tombent au cours du mois le plus sec de la saison chaude.

— **Climats froids**

Type Df : climat froid des forêts, sans saison sèche. La température moyenne du mois le plus froid est inférieure à — 3 °C. Elle est supérieure à 10 °C au cours d'un mois au moins de la saison chaude. Les précipitations ont lieu en toute saison.

Type Dw : climat froid des forêts avec sécheresse hivernale. Dans ce type de climat, la température moyenne du mois le plus froid et celle du mois le plus chaud sont identiques à celles du climat D*f*. Les précipitations qui tombent au cours du mois le plus humide de la saison chaude sont au moins dix fois supérieures à celles du mois le plus sec de la saison froide.

— **Climats polaires neigeux**

Type ET : climat polaire des zones couvertes par les toundras. La température moyenne du mois le plus chaud est comprise entre 10 °C et 0 °C.

Type EF : climat polaire des glaces. Dans ce climat type, la température moyenne du mois le plus chaud reste inférieure à 0 °C. Le climat type E se retrouve quelquefois ailleurs qu'aux latitudes polaires, par exemple, dans les régions situées aux altitudes supérieures à 3 000-3 500 mètres. Pour indiquer cette particularité due à l'altitude et non à la latitude, on utilise la lettre H.

Pour parfaire cette classification, Köppen a utilisé d'autres lettres afin de préciser quelques particularités intéressantes du point de vue climatique.

— *a* est utilisé lorsque la température du mois le plus chaud est supérieure à 22 °C ;

— *h* indique que la température moyenne annuelle est supérieure à 22 °C ;

— *i* signifie que la température est à peu près constante et que l'amplitude annuelle de sa variation est inférieure à 5 °C ;

— *m* est caractéristique des pluies de mousson ;

— *n* signale que le type de climat en question donne de fréquents brouillards ;

— *k* est significatif d'un climat à hiver froid ayant une température annuelle moyenne inférieure à 18 °C.

Ainsi, en combinant de manières différentes toutes ces lettres, on obtient un symbolisme climatique relatif à chaque site. Sur une carte géographique du monde où l'on indique la distribution des divers climats, on peut observer quelques zones qui, sur chaque continent, présentent des caractéristiques climatiques semblables. Sur une carte planétaire, on trouvera sur les zones les plus septentrionales de chaque hémisphère le climat polaire des glaces du type EF, suivies immédiatement, un peu plus bas en latitude, par des surfaces plus importantes en étendue sur lesquelles règne le climat polaire des toundras du type ET. Plus au sud, on trouve de vastes zones sur lesquelles s'étend le climat froid des forêts du type D. La masse continentale située à l'occi-

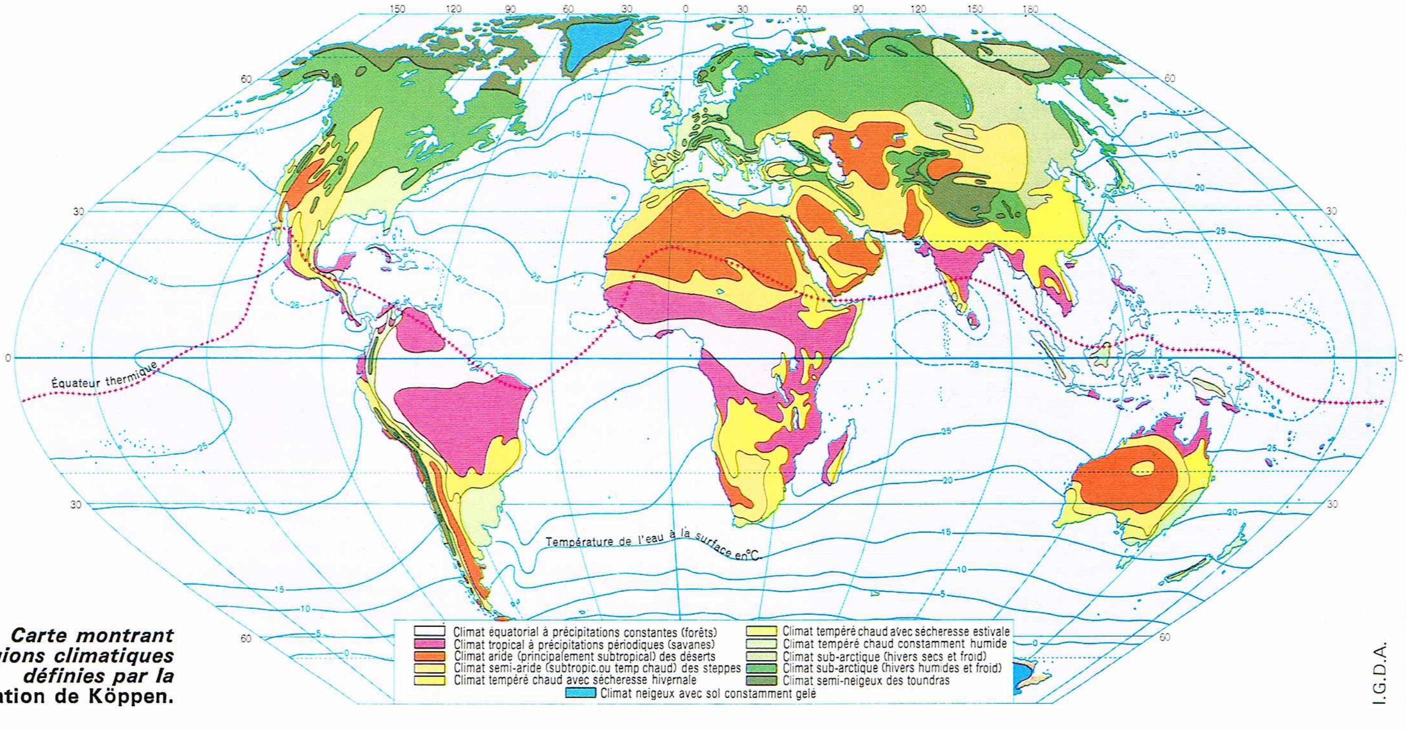

▶ ***Carte montrant les régions climatiques définies par la*** **classification de Köppen.**

I.G.D.A.

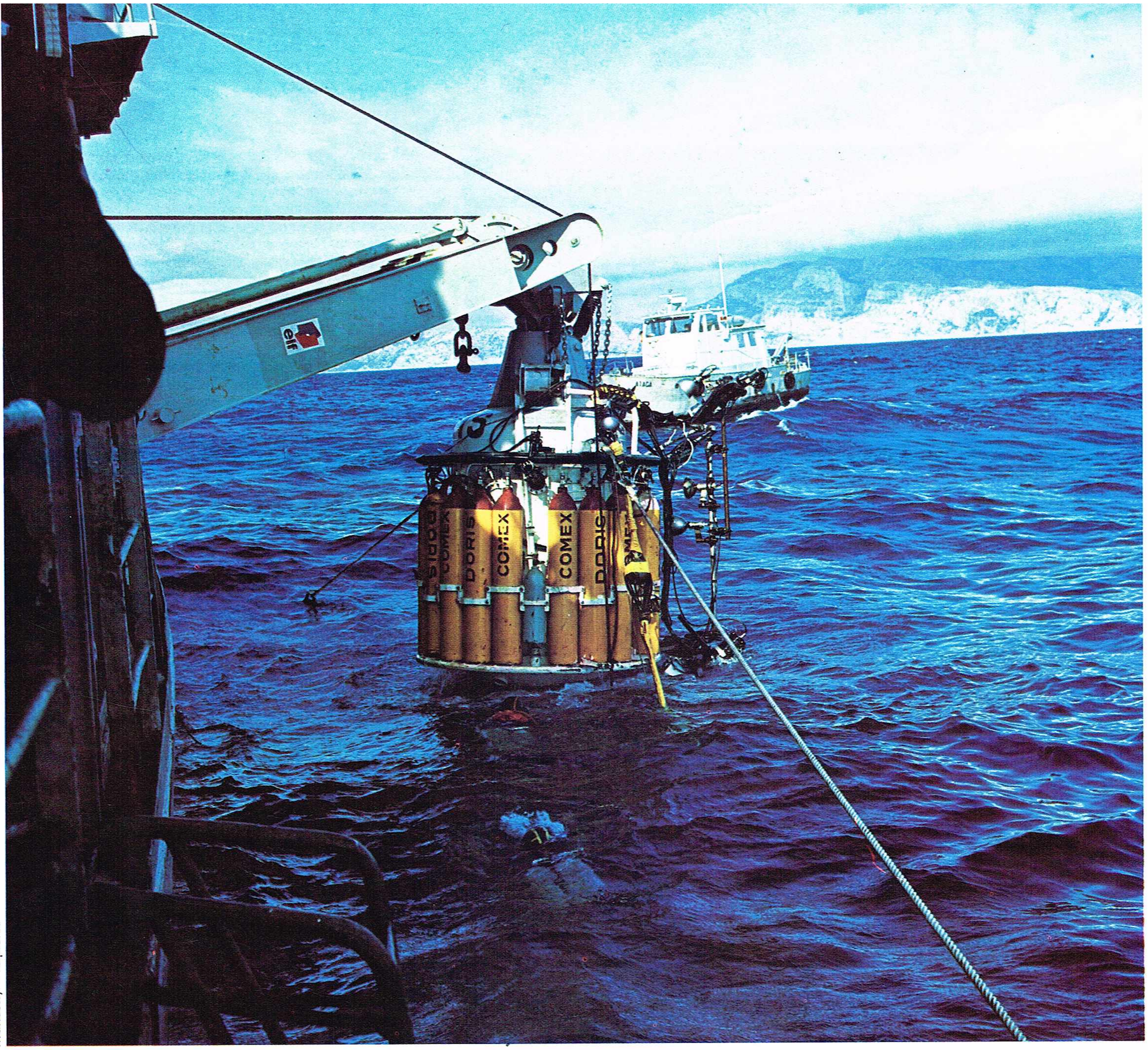

Munschy - Explorer

▲ *L'étude du milieu marin, qui couvre 71 % de la surface du globe terrestre, nécessite la mise en place d'un matériel technique très particulier, bien adapté aux milieux étudiés : milieu vivant, milieu fluide et milieu solide avec l'étude des fonds océaniques; ici, une* **tourelle de plongée.**

dent, constamment sous l'influence des courants océaniques d'ouest humides et doux, n'a pas de saison sèche (type D*f*), tandis que les parties orientales des continents, hors de l'influence océanique, ont un climat du type D*w*.

En descendant en latitude, on assiste à un adoucissement des températures avec apparition des différents climats du type C donnant des hivers moins froids que le type D. L'extension septentrionale du climat C se trouve sur la bordure occidentale des continents qui est soumise à l'influence directe de l'effet adoucissant des océans. Cependant, dans ces régions, le climat est du type C*f*, c'est-à-dire que l'on ne retrouve pas de saison sèche.

Par contre, aux latitudes plus méridionales, il est du type C*s* qui caractérise l'été chaud de ces régions. Sur la face orientale des continents, le climat type C s'observe uniquement sous la forme C*w*, plus au sud que sur la face occidentale, avec des hivers secs. Aux basses latitudes, on trouve les vastes zones de climat aride s'étendant de la côte occidentale des continents jusque vers le milieu de la masse de terre. Le climat aride des steppes du type BS entoure les zones de climat aride des déserts BW. Près de l'équateur, on retrouve les zones de climat tropical des savanes du type A*w* et enfin le climat tropical pluvieux des forêts du type A*f*.

BIBLIOGRAPHIE

GRISOLLET-GUILMET et ARLERY, *Climatologie - Méthodes et pratiques,* Gauthier-Villars. - THOMPSON P. et O'BRIEN R., *le Climat,* Laffont Sciences.

LES OCÉANS OCÉANOGRAPHIE OCÉANOLOGIE

Les océans couvrent 71 % de la surface du globe terrestre. Si banale qu'elle soit, cette constatation est à la base de l'étude du milieu marin, de sa masse, de son cadre structural, de ses fonds. Les sciences qui s'attachent à le décrire, à le connaître, à préparer la mise en valeur des ressources qu'il contient — *océanographie* et ses différentes branches, *océanologie* et ses possibilités d'action — sont dominées par les faits quantitatifs, éloquents par leurs dimensions. L'importance des superficies et des volumes a déterminé, non pas le développement d'une science particulière, mais bien plutôt le rassemblement de disciplines mères, telles que la mécanique des fluides, la physique, la chimie, la biologie, la biochimie, la géologie, la géophysique, la géochimie, la météorologie.

On entend par **océanographie** la description des phénomènes et la démarche qui a pour objet la connaissance des lois et des mécanismes gouvernant ces phénomènes. Les disciplines fondamentales les plus développées dans tous les pays s'intéressant aux océans — qui sont généralement les grands pays maritimes et industriels, en comprenant parmi eux l'Union soviétique, dont l'importante « percée » océanique est un des faits majeurs de notre temps et réalise le rêve de Pierre le Grand — sont au nombre de trois.

CNEXO

▲ *Vue aérienne du Centre océanologique du Pacifique, établi à Vairao dans l'île de Tahiti, par le CNEXO (Centre national pour l'exploitation des océans) qui a été créé en 1967, pour coordonner les programmes de recherche en matière d'océanographie.*

▶ *Page ci-contre, un tableau de Tinayre représentant l'intérieur du laboratoire de l'Hirondelle II, un des quatre navires océanographiques mis au point par le prince Albert Ier de Monaco.*

▼ *Portrait du prince Albert Ier de Monaco (1848-1922), océanographe et fondateur du Musée océanographique de Monaco.*

F. Arborio Mella

— L'*océanographie géologique* et *géophysique,* qui traite de l'étude des fonds marins, de leur structure, et de leurs mouvements ;

— l'*océanographie physique* et *dynamique,* qui comprend la description des différents bassins océaniques, l'étude des propriétés physiques de l'eau de mer, celle des éléments dissous, ainsi que l'étude des mouvements au sein du milieu marin ;

— l'*océanographie biologique,* qui porte sur la description et l'étude de la faune et de la flore océaniques, sur leurs conditions de vie et de croissance, et dont il ne sera pas question dans ce chapitre, car elle a fait l'objet d'une présentation dans le chapitre traitant de la biologie.

L'**océanologie,** terme récent, tout au moins dans la langue française en raison de son apparition en 1967 à la création du Centre national pour l'exploitation des océans (CNEXO), couvre une réalité plus vaste que le terme d'océanographie. On admet communément que l'océanologie recouvre l'ensemble des activités humaines dont les océans sont le « carrefour », ou plutôt le point de convergence : recherches scientifiques océanographiques, pêches, aquaculture ou élevage des animaux marins, exploitations des ressources énergétiques et minérales des océans, transports, questions juridiques, environnement industriel. Le terme est apparu aux États-Unis, au début des années 1960. L'avènement de l'instrument de dissuasion le plus efficace encore actuellement en service, le sous-marin à propulsion nucléaire, lanceur d'engins à tête thermonucléaire, a fait des océans l'espace stratégique principal de la planète. Un espace qu'il fallait découvrir, connaître et utiliser, non plus sur sa seule surface, mais dans son volume même. Parallèlement, l'océan devenait un espace économique prioritaire, « une nouvelle frontière », selon l'expression employée par le président John Kennedy, en raison directe des ressources qu'il contient en matière vivante, en hydrocarbures et en minerais.

L' « océanologie » consacrait une véritable « mutation » de la civilisation, dans la mesure où une progressive prise de conscience collective des fins et des moyens de la civilisation industrielle effectuée depuis 1960 fonde désormais sur le développement des ressources océaniques une grande partie de l'avenir de la société.

Historique du développement de l'intérêt pour l'océan

Les peuples de la Terre ont commencé de bonne heure l'investigation de l'immensité océanique qui les encerclait, mais à la surface seulement de cette immensité. Au commencement étaient des hommes et des navires. Les premiers océanographes sans le savoir furent des navigateurs. Le bâtiment portant le Phocéen Pythéas vers les Cassitérides pour ouvrir la route de l'étain, ou celui du Carthaginois Hannon parti à la recherche des îles du « Sang du Dragon », exerçaient déjà, en quelque sorte, les fonctions de navires océanographiques. Le hasard des tempêtes, le goût de l'aventure et la nécessité d'ouvrir des routes maritimes commerciales permirent peu à peu d'accroître la connaissance d'un monde considéré comme hostile, la « mer des ténèbres » semée d'embûches et peuplée de monstres fabuleux.

La science océanographique naît à la fin du XVIIIe siècle, avec les grands voyages autour du monde. Cependant, déjà en 1725, dans son *Histoire physique de la mer,* l'Italien Luigi Ferdinando Marsigli observait qu'en matière de connaissance de la mer, les légendes, les traditions ou les opinions peuvent paraître absurdes « tant que l'on ne s'est pas donné la peine nécessaire, et n'a entrepris les dépenses convenables (...), à moins qu'un prince n'ordonne la construction de navires spéciaux, munis d'instruments convenables ».

Ce ne fut pas un prince qui écouta le premier l'avis de Marsigli, mais une république, qui obligea tous ses navires de guerre à participer à la recherche de la connaissance du milieu marin. En 1845, instruction est donnée aux commandants des navires de la marine militaire des États-Unis de remplir scrupuleusement trois fois par jour les questionnaires en vingt-quatre points préparés par le Dépôt des cartes et instruments à l'instigation du lieutenant de vaisseau Matthew Fontaine Maury, que l'on peut considérer comme le fondateur de l'océanographie américaine. Les grandes marines procèdent dès lors à l'étude systématique des conditions physiques du milieu marin et des fonds des passages stratégiques, rades et atterrages des ports, et fondent des services hydrographiques. La révolution industrielle du XIXe siècle accélère le développement de ces études rendues nécessaires par l'intensification des échanges maritimes. En même temps naît une intense curiosité pour les sciences naturelles. Marins et savants s'associent pour mener à bien des expéditions de découverte du monde marin, et surtout des terres lointaines. Dès 1850, les profondeurs marines sont étudiées systématiquement. De nouvelles lignes de sonde, en fil métallique, viennent remplacer les lignes de chanvre, trop légères, du traditionnel « plomb de sonde ». La technologie océanique commence à se développer. On réalise en 1869 des thermomètres immergeables insensibles aux effets de la pression. En 1878 apparaîtra le thermomètre à renversement, qui permettra de connaître la température par grande profondeur avec une précision du centième de degré Celsius.

Les voyages d'Alexander von Humboldt, de Charles Willxes, de sir James Clarke Ross et de Charles Darwin mettent l'accent sur la zoologie. Une importante question préoccupe alors les milieux scientifiques : jusqu'à quelle profondeur la vie se manifeste-t-elle dans les océans ? En 1869, un tremblement de terre rompt le câble télégraphique posé entre la Sardaigne et l'Algérie. Sur une portion de ce câble remontée à la surface, Alphonse Milne-Edwards découvre des Mollusques et des polypiers vivants, ramenés d'une profondeur de 2 000 m.

L'idée ambitieuse d'une grande expédition scientifique océanique vient alors du Britannique William B. Carpenter qui écrit en 1871 à la Royal Society : « Le moment est venu pour entreprendre des recherches complètes et systématiques des mers. »

Répondant avec un délai de cent quarante-sept ans à la suggestion de Marsigli, le « prince », en l'occurrence la reine d'Angleterre, décide d'armer la corvette *Challenger* et de l'équiper pour la première campagne océanographique de l'histoire : instruments de prélèvements et de mesures, dragues, filets, lignes de sonde, thermomètres immergeables, bouteilles à renversement pour prélever à diverses profondeurs des échantillons d'eau de mer sont spécialement conçus et fabriqués. Des laboratoires sont aménagés à bord. Cinq savants embarquent pour trois ans et demi afin de poursuivre l'exploration dans toutes les mers du monde. Le premier navire océanographique de l'histoire appareille de Portsmouth le 21 décembre 1872.

Dans le sillage du *Challenger,* le prince Albert Ier de Monaco navigue à son tour. Il transforme son yacht,

l'*Hirondelle,* afin de « connaître plus intimement tous les séduisants mystères de la mer ». De 1884 à 1922, quatre navires portant successivement les noms d'*Hirondelle* ou de *Princesse Alice* poursuivent méthodiquement l'étude de la Méditerranée et de l'Atlantique Nord. Ils tentent de mettre au point des techniques nouvelles de recherche, notamment la photographie et le cinéma sous-marins.

Stéphan Makarov, à bord de la corvette russe *Vitiaz,* contribue de façon décisive de 1886 à 1889 à la connaissance de l'océan Pacifique. De 1894 à 1930, le Norvégien Fridtjof Nansen développe l'océanographie des océans glaciaux. Jean Charcot dispose, avec le *Français,* puis le *Pourquoi pas?,* de navires d'étude des mers des hautes latitudes arctiques et antarctiques. En même temps s'élaborent les premières théories sur les courants marins, dues à Ellxman (1905), tandis que Dittmar établit les premières lois concernant la salinité de l'eau de mer. L'océanographie n'est plus désormais une science uniquement descriptive. Entre les deux guerres mondiales se multiplient, le plus souvent financées par des mécènes passionnés, les campagnes océanographiques, telles les allemandes du *Meteor,* les britanniques du *Discovery* et du *Scoresby,* les danoises du *Thor* et du *Dana,* les américaines de l'*Atlantis* et de l'*E.W. Scripps*. Ces navires, parfois encore de grands voiliers, perpétuent la tradition « marsiglienne » des premiers navires-laboratoires princiers.

La Seconde Guerre mondiale, avec la lutte sous-marine menée dans l'Atlantique et dans le Pacifique, avec les grandes opérations amphibies de débarquement, rend indispensable l'approfondissement de la connaissance du milieu marin. L'avènement de la propulsion nucléaire pour les sous-marins et le pouvoir dissuasif stratégique confié aux submersibles lanceurs d'engins balistiques obligent les états-majors des grandes marines militaires à posséder une plus grande connaissance des fonds marins et des données physico-chimiques du milieu, afin de ne pas faire naviguer ces redoutables unités dans ce qu'un amiral américain appela « les profondeurs de l'ignorance ». Dès lors, les services hydrographiques de ces marines se transforment en services océanographiques. Un amiral prend le titre d' « Oceanographer of the U.S. Navy ». Les héritiers de la tradition des mécènes, les voiliers océanographiques, tels l'*Albatross* suédois ou le *Vema* américain, les navires de recherche aux allures de yachts comme la *Galathea* danoise et la *Calypso* de Jacques-Yves Cousteau rencontrent à la surface des océans des bâtiments militaires aux formes ramassées, munis d'appareillages de sondages acoustiques, de navigation précise, de mesures magnétiques, de prélèvements automatiques, conçus comme des supports d'instrumentation, comme le sont après eux les navires océanographiques civils apparus sur les océans avec l'ère de l'océanologie à partir de 1960.

Des navires aux allures de paquebots de l'Académie des sciences de l'Union soviétique ou du *Marion Dufresne* des terres australes et antarctiques françaises (T.A.A.F.) aux petits navires français N.O.R.O.I.S. (navires océanographiques de recherche, d'observation, d'intervention et de soutien), en passant par les navires américains mus par propulseurs cycloïdaux et par le *Jean Charcot* français, de tonnages moyens, l'unité fondamentale apparaît : l'amateur éclairé et le mécène passionné ont cédé leur rôle aux équipes océanographiques dotées de moyens techniques puissants et raffinés, qu'il importe d'utiliser au mieux.

Une course technique à l'innovation permanente est désormais engagée, dans la mesure où l'océanographie est, à partir de 1960, englobée par l'océanologie, désignant l'ensemble des activités humaines, à dominante économique, qui intéressent « l'espace océan ». L'innovation, à laquelle incite la pression de l'intérêt économique, apporte le perfectionnement des instruments scientifiques, et le renouvellement permanent des méthodes de connaissance du monde océanique. Toute recherche, toute activité d'exploitation qui dispose pour travailler dans l'océan d'une certaine marge d'anticipation technique — afin de surmonter les difficultés opposées par le milieu marin à l'exploration, à l'intervention et au travail de l'homme, soit directement, soit indirectement par automatismes immergés — bénéficie d'un atout important dans la compétition internationale

Candelier - Brumaire - Cedri

C. Rives - Marina-Cedri

Coulmy - CNEXO

▲ ***Deux navires océanographiques : à gauche, le français* Jean Charcot *(2 200 t) ; à droite, le soviétique* Akademik Vernadsky *(5 460 t) de la série des « Académiciens ».***

dont l'océan est devenu l'enjeu. Mais cette marge d'anticipation est par nature condamnée à disparaître si elle est statique. Or la mutation océanologique exerce en la matière, depuis 1960 environ, un effet considérable.

La mutation océanologique

Au Japon, les programmes d'exploration et d'action dans les océans sont soumis à l'impératif économique. Quatre-vingts pour cent des activités japonaises de prospection de gisements d'hydrocarbures et de minerais sont exercées dans l'océan.

Le gouvernement japonais a lancé de grands programmes pour la prospection de ressources sous-marines dans l'océan Pacifique. Une importance particulière est attachée à la reconnaissance de zones profondes riches en nodules polymétalliques. Des campagnes de prospection de tels gisements ont été lancées par des groupes industriels avec une participation gouvernementale. Des accords ont été proposés par le gouvernement japonais à des États asiatiques et sud-américains riverains du Pacifique, afin d'entreprendre des reconnaissances systématiques dans le cadre de coopérations bilatérales.

L'industrie de la République fédérale allemande fait également preuve d'un grand dynamisme océanologique. L'Allemagne a engagé un effort important dans le domaine océanique, où les instituts de recherche océanographique procèdent, en tout, associés aux industriels. En annonçant un triplement du budget fédéral en matière océanologique, qui est le plus important d'Europe depuis 1972, le ministre compétent déclarait qu'il y a « un espace intérieur de la planète ouvert à l'esprit d'entreprise », un « défi » à relever d'autant plus intéressant que, selon lui, « pas grand-chose n'a été fait par les autres » jusqu'à présent.

L'importance de la préparation américaine en matière océanologique est saisissante. Le 11 août 1975, le secrétaire d'État américain, M. Henry Kissinger, déclarait que l'intérêt présenté par les océans atteignait « des dimensions gigantesques... dans un monde qui recherche avidement de nouvelles sources d'énergie et de minerais, les océans renferment des réserves immenses et, pour la plupart, inexplorées... dans un monde menacé par la pollution, l'intégrité de l'environnement marin devient un problème international critique ; dans un monde où 94 % des produits du commerce international sont acheminés par mer, la liberté de navigation est essentielle ». A cet égard, a estimé M. Kissinger, « les États-Unis n'ont rien à redouter de la concurrence. Notre technologie est la plus avancée du monde, et notre marine militaire est suffisante pour défendre nos intérêts ».

Créée en 1971, une administration fédérale est chargée du développement océanologique. La National Oceanic and Atmospheric Administration (N.O.A.A.) regroupe les principaux programmes concernant les océans et l'atmosphère, poursuivis avant sa création par quatre départements ministériels et une agence fédérale. Elle dispose de moyens de travail considérables tant à terre qu'en mer, où elle peut notamment mettre en œuvre plus de cent navires spécialisés. Devant le Congrès, le président des États-Unis avait souligné que « les États-Unis étaient entraînés par une nécessité déterminante à entreprendre une exploration et un développement technique conduisant à une exploitation rationnelle des ressources marines... Nous disposons déjà, bien qu'ils soient éparpillés à travers plusieurs départements et agences fédéraux, des moyens scientifiques, techniques et administratifs pour entreprendre un effort efficace et unifié. Tout ce que nous avons à faire est de rassembler ces moyens. C'est le but assigné à la N.O.A.A. ».

L'expansion océanique de l'Union soviétique, l'importance de ses programmes océanologiques sont des faits majeurs de l'époque contemporaine. Le nombre des navires océanographiques soviétiques, la plupart remarquablement équipés, est supérieur à celui de tous les autres pays du monde réunis. L'Union soviétique possède la flotte de pêche de haute mer la plus importante et la plus moderne du monde. Elle a entrepris une prospection systématique des minerais et des hydrocarbures dans ses mers intérieures et au large de ses côtes depuis 1966, des déclarations officielles ayant

souligné que « certaines réserves continentales de plusieurs métaux non ferreux seraient épuisées avant la fin de ce siècle ».

En France, la loi du 3 janvier 1967 a créé le Centre national pour l'exploitation des océans (CNEXO), outil du gouvernement pour coordonner les efforts scientifiques et techniques et stimuler les programmes d'action. Le CNEXO joue un rôle d'aide et de soutien lorsque les structures de recherche ou d'exploitation existent. Il exerce une action de promotion si l'initiative ne peut venir que de lui en l'absence de structures adéquates. En ce cas, il assure les préalables et ouvre les voies techniques dans lesquelles les organismes publics et les entreprises privées orientent leurs travaux.

La « mutation océanologique » exerce sur les moyens et les méthodes destinés à surmonter les difficultés inhérentes au milieu océanique un puissant effet de perfectionnement et de renouvellement.

Méthodes et moyens pour surmonter les difficultés inhérentes au milieu océanique

Longtemps limitée aux seuls travaux pouvant être menés depuis la surface, la recherche océanologique dispose aujourd'hui de moyens de travail dans le volume même du milieu océanique et sur les grands fonds marins. Ces moyens comprennent d'abord des plates-formes de travail à la mer : navires océanographiques, bouées-laboratoires; ensuite des moyens précis de navigation et de localisation par rapport au fond et par rapport aux coordonnées géographiques; des appareils de mesure adaptés aux milieux étudiés : milieu solide, milieu fluide, milieu vivant; des engins de pénétration dans le volume océanique : robots ou submersibles habités.

Ces moyens d'investigation sont conçus et réalisés pour permettre à l'homme d'étudier *un milieu qui lui est hostile*. L'océan a toujours opposé à l'homme des difficultés considérables qui sont l'absence de points de repère dans l'espace, les forces physiques mettant en mouvement la surface et la masse des océans, l'impossibilité pour l'homme de vivre dans le milieu marin en raison de sa respiration pulmonaire, de sa température interne supérieure à celle de l'eau et de son inaptitude à supporter d'importantes variations de pression.

Le développement des moyens de travail dans le milieu océanique est donc celui d'une lutte contre l'hostilité permanente d'un milieu redoutable, tenant l'homme à distance en le soumettant à de fortes lois naturelles. Cette lutte bénéficie des effets de la course technique à l'innovation, entreprise en raison des impératifs économiques ou stratégiques, course qui induit le perfectionnement de l'appareillage et le renouvellement des méthodes. Ce développement est particulièrement net en ce qui concerne l'étude géologique et géophysique des grands fonds océaniques, qui est un exemple très démonstratif de l'évolution des moyens mis en œuvre pour surmonter les difficultés du milieu.

Tout prélèvement de roches, ou de sédiments, à partir de la surface de l'océan, demande encore plusieurs heures et représente une somme considérable d'efforts, comprenant en général le déroulement d'une longueur de plusieurs kilomètres de câbles, pour n'aboutir qu'à l'obtention d'échantillons dont le lieu de prélèvement n'est pas connu de manière précise, et dont le contexte géologique local demeure indéterminé.

L'écran d'eau d'une épaisseur de plusieurs kilomètres qui sépare le géologue marin de l'objet de ses études rend toute exploration menée depuis la surface lente et peu précise, si bien que les 450 millions de kilomètres carrés de surface terrestre couverts par les océans restent plus mal connus dans le détail que la face cachée de la Lune, explorée en 1959 en moins d'un an par les Soviétiques grâce à l'envoi dans le vide intersidéral d'appareillages robots.

En matière de connaissance géologique et géophysique du fond des océans, l'exploration a connu plusieurs étapes de développement. La première étape aura été celle de l'exploration ponctuelle extrêmement lente par lignes de sonde et dragages profonds inaugurée à la fin du XIX[e] siècle par la campagne de *H.M.S. Challenger*. La seconde étape aura été, à partir de 1945, celle de l'exploration géophysique à larges mailles, menée depuis la surface en mettant en œuvre des procédés de détection sismique dérivés de ceux qu'emploie l'industrie pétrolière. Cette étape a eu pour résultat majeur la possibilité d'une compréhension globale de la structure des fonds des océans à une échelle de l'ordre de la centaine de kilomètres. Depuis 1974 a commencé une troisième étape, celle des études intégrées de zones clefs restreintes en étendue, à l'échelle du kilomètre ou de la dizaine de kilomètres, permise par une précision de plus en plus grande de la localisation sur le fond de l'ordre du mètre ou de la dizaine de mètres au lieu de la dizaine de kilomètres, et par l'utilisation de submersibles, d'engins télémanipulés depuis la surface ou d'engins robots autonomes posés sur le fond. A ce titre, l'opération franco-américaine FAMOUS (French American Mid-Oceanic Undersea Survey) d'exploration par submersibles d'une partie de la dorsale médio-atlantique au sud-ouest des Açores, sur une surface au fond de 1 000 kilomètres carrés, menée en 1973 et en 1974, aura ouvert l'ère de la cartographie géologique précise par grands fonds, alors que, jusqu'à ces dates, les méthodes utilisées en recherche océanographique ne convenaient pas pour étudier des structures complexes pour lesquelles il était essentiel de connaître dans le détail la distribution spatiale des phénomènes. En particulier, les techniques géologiques utilisées sur le « terrain » des continents émergés n'avaient pu jusqu'alors être transposées au fond des océans.

Cet exemple montre que l'évolution des méthodes et des moyens d'investigation du milieu océanique va vers une précision toujours plus grande dans la localisation. Cette évolution entraîne, en premier lieu, une transformation des plates-formes de travail à la mer, essentiellement les navires. Elle impose en second lieu un renouvellement permanent des méthodes de travail des équipes de recherche, fondées sur la pluridisciplinarité nécessaire. Pour troisième conséquence, elle conduit à une évolution constante des moyens de travail à terre, dans les centres océanologiques où sont dépouillés et traités les résultats des campagnes à la mer, caractérisés par un considérable accroissement en volume,

CNEXO

◀ ***Pour certains travaux de mesures, notamment physiques, les chercheurs utilisent une plate-forme de travail mouillée en un point fixe : la bouée laboratoire; ici, Borha II, ancrée par 2 000 m de fond dans le golfe du Lion.***

depuis la « mutation océanologique ». Elle influe enfin sur l'amélioration des conditions de l'intervention de l'homme dans le milieu océanique, soit directement, soit à bord de submersibles.

Transformation des plates-formes de travail

Le navire de surface, plate-forme de travail à la mer essentielle pour l'océanographe, demeure depuis le *H.M.S. Challenger* le principal instrument de la recherche océanique, et le demeurera très vraisemblablement au cours des années à venir. Il doit présenter des qualités de robustesse marine, de tenue à la mer, de manœuvrabilité, de simplicité de mise en œuvre et enfin d'économie de fonctionnement.

Afin de mener à bien des campagnes lointaines de longue durée, le navire océanographique doit être de dimensions relativement importantes et doit disposer d'un grand rayon d'action. C'est le cas du *Jean Charcot* (2 200 tonnes) et des plus modernes unités de la flotte de recherche des États-Unis, les R.V. (Research Vesels) *Atlantis II, Melville, Knorr* (2 074 tonnes). Les plus imposants sont les navires soviétiques de la série des *Académiciens,* d'un déplacement de 5 460 tonnes.

Quelle que soit l'importance du navire de haute mer considéré, l'océanographe faisant partie d'une mission scientifique embarquée (qui se compose d'une vingtaine de personnes à bord du *Jean Charcot*, d'unités américaines de plus de 2 000 tonnes, d'une cinquantaine à bord des *Académiciens* soviétiques) trouve à son bord un certain nombre d'installations fixes. Ce sont d'une part tous les répétiteurs des appareils usuels de navigation (compas, radar, traceur de route, sondeurs, etc.), et d'autre part les commandes des équipements scientifiques spécialisés réunies en un poste central : le P.C. scientifique. Les équipements sont installés dans des laboratoires (à bord du soviétique *Akademik Kortchatov,* ces laboratoires occupent une surface de 417 m^2) qui sont de deux types :

— les uns, dits « humides », permettent un premier tri et un prétraitement des échantillons d'eau, d'êtres vivants, de sédiments et de roches prélevés dans le milieu océanique et sur les fonds ;

— les autres, dits « secs », contiennent les appareils d'analyse, d'observation ou de traitement des prélèvements, qui ne supportent pas l'action corrosive de l'eau de mer et doivent être protégés contre les effets des embruns ou d'une atmosphère très chargée d'humidité marine.

On tend actuellement — notamment aux États-Unis, à la Scripps Institution of Oceanography, et en France où la tendance est développée par les équipes du CNEXO — à remplacer les laboratoires « secs » par des espaces libres prévus pour recevoir des « conteneurs-laboratoires » ou des « conteneurs-ateliers », préparés et équipés à terre, embarqués pour une campagne déterminée et branchés sur les circuits de fluides du bord. Cette tendance permettrait, à la limite, de se passer d'un navire spécialement équipé, pour une étude à mener dans une zone éloignée, en louant sur place un navire à bord duquel serait placé un conteneur transporté par avion. Cette possibilité est envisageable pour un grand nombre d'études ponctuelles effectuées « à la demande », notamment pour la mesure des nuisances liées à d'éventuelles pollutions d'une zone océanique.

▼ Un laboratoire dit « sec » à bord du navire océanographique* Jean Charcot, *contenant des appareils d'analyse et d'enregistrement.

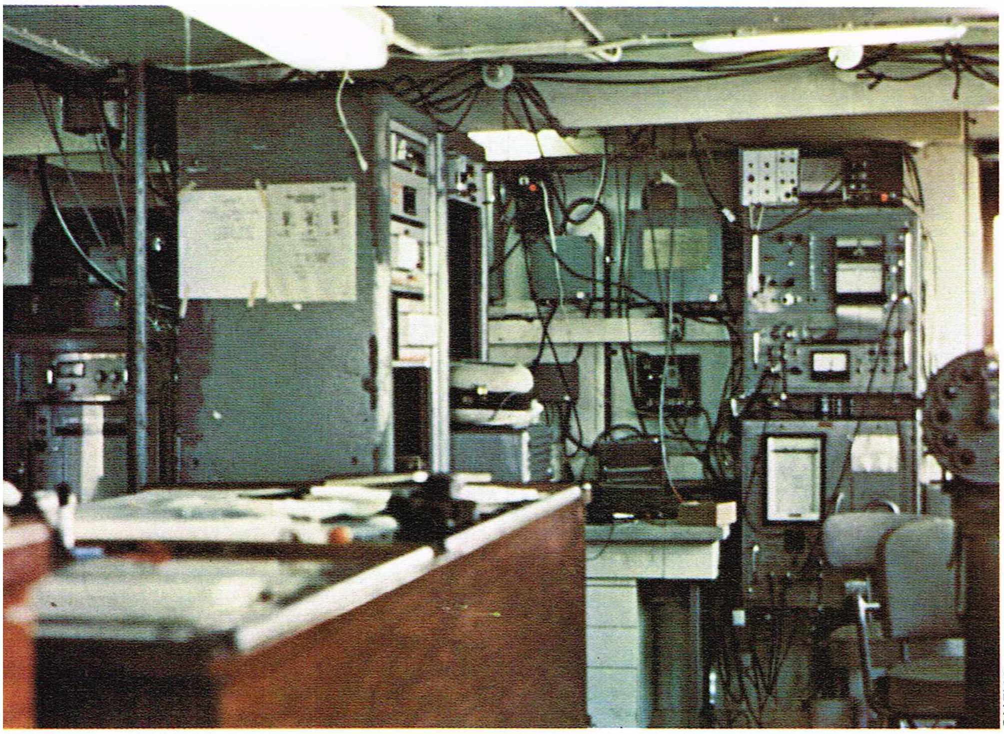

CNEXO

Les navires océanographiques doivent être très manœuvrants de façon, notamment, à pouvoir rester « en station », c'est-à-dire immobiles sur une position donnée, pendant une longue durée, nécessitée en particulier par des prélèvements profonds malgré les effets du vent, de la houle et des courants. A cet effet, les navires sont équipés d'hélices à pas variable, de gouvernails actifs et d'hélices latérales placées dans des conduits traversiers, ou de propulseurs cycloïdaux.

La nécessité d'effectuer des forages par des profondeurs de plus en plus importantes a conduit l'industrie pétrolière à promouvoir le « positionnement (ou ancrage) dynamique » qui, dans le domaine de la recherche océanique, est appliqué pour le maintien en station du navire *Glomar Challenger,* spécialisé dans les prélèvements géologiques par très grands fonds. L'ancrage dynamique est appelé à connaître un grand développement dans un proche avenir pour toute étude précise des fonds menée depuis la surface, en combinaison avec la mise en œuvre d'un système de positionnement du navire par rapport au fond, soit par mesure de l'effet Doppler, soit par référence à un réseau de balises acoustiques immergées délimitant un polygone de repérage. « Positionné » par rapport au fond, le navire doit enfin être localisé avec une précision maximale, afin de situer géographiquement les mesures effectuées par les membres de la mission scientifique embarquée, en réduisant le plus possible la marge d'erreur. Aussi les navires de recherche sont-ils équipés de systèmes de navigation par satellite artificiel, donnant de façon simple et par tous les temps la position du navire à la surface des océans.

Placé avec précision par rapport au fond et par rapport aux cartes, le navire de recherche doit aussi être stabilisé au moyen de caisses de compensation. Cette stabilisation est indispensable pour éviter les conséquences fâcheuses des mouvements de la surface de l'océan sur les appareils de mesure embarqués. Pour pallier les inconvénients de ce « mal de mer » des instruments, déréglés par des secousses mécaniques, le géophysicien néerlandais Vening Meinesz, étudiant de 1920 à 1930 les anomalies de la pesanteur, avait obtenu le concours de la marine royale des Pays-Bas qui lui permit d'installer ses appareils de gravimétrie à bord d'un sous-marin afin de les soustraire aux mouvements de la surface. Une telle solution ne pouvant être qu'exceptionnelle, un grand nombre d'appareils sensibles sont montés à bord des navires sur des plates-formes équipées de systèmes de stabilisation dérivés des gyrocompas.

Enfin, afin de passer à travers l'écran déformant d'eau de mer qui empêche le scientifique de détailler et de comprendre des phénomènes se passant sur le fond à l'échelle du kilomètre, les navires de recherche, et plus spécialement ceux de la série française N.O.R.O.I.S., disposent de moyens de levage qui leur permettent de mettre en œuvre des engins submersibles d'exploration et de travail.

L'utilité des submersibles pour la reconnaissance des fonds océaniques a été mise en évidence par l'opération franco-américaine FAMOUS en 1973 et en 1974.

La pluridisciplinarité des équipes et les centres océanologiques à terre

L'évolution des navires et le perfectionnement de leurs appareils scientifiques ont entraîné depuis 1960 un renouvellement important dans la conception des campagnes à la mer, et dans la composition des équipes embarquées. Le changement le plus significatif est venu de la nécessité d'utiliser au mieux les puissants, délicats et coûteux instruments installés à bord. Accélération de la rotation des navires, alternance des équipages, préparation des appareillages spécialisés en conteneurs ou en baies complètes d'électronique, et pluridiscipli-

narité des équipes embarquées concourent à l'utilisation optimale des navires.

Depuis 1960, les Américains, puis les Français pratiquent systématiquement la pluridisciplinarité à l'intérieur d'une mission scientifique à la mer, en s'efforçant d'aller au-delà d'une simple juxtaposition de programmes. C'est ainsi que les « quarts » scientifiques comprennent au moins un spécialiste de chaque discipline, ce qui permet de réaliser tout type d'opération, depuis les enregistrements sismiques jusqu'aux dragages géologiques, aux carottages sur le fond et aux chalutages biologiques. Cette méthode fait ainsi bénéficier une discipline des résultats obtenus par les autres. Elle permet surtout d'obtenir rapidement des éléments synoptiques, de modifier en cours de campagne un programme initial, et d'envisager en fonction des résultats obtenus l'établissement du programme des recherches ultérieures.

Enfin, la masse considérable des données enregistrées au cours d'une campagne rend nécessaires aussi bien le traitement en commun que la coopération internationale pour l'interprétation de mesures nouvelles. Pluridisciplinarité et coopération caractérisent donc les travaux menés à terre dans les centres océanologiques modernes, afin de préparer les campagnes à la mer et d'en exploiter les résultats.

Il est en effet nécessaire, pour assurer la pleine efficacité du travail à la mer, que l'exploitation des résultats puisse commencer dès le retour du navire, grâce aux moyens fournis par les services d'un centre terrestre : traitement des données recueillies, reproduction des enregistrements, documents de synthèse, observations sur le comportement du matériel embarqué et propositions pour toute amélioration, etc.

La tendance générale — inaugurée aux États-Unis au lendemain de la Seconde Guerre mondiale par les centres de recherche de la Woods Hole Oceanographic Institution, sur les côtes du Massachusetts, et de la Scripps Institution of Oceanography, sur celles de Californie — est à la concentration géographique d'équipes de spécialités différentes, autour d'importants moyens de travail communs.

La recherche océanique moderne est caractérisée par le développement de centres terrestres polyvalents, rassemblant des chercheurs de toutes les disciplines : géologie, géophysique, physique, biologie, afin de les faire travailler ensemble sur des projets définis géographiquement, ou par nature.

Ces centres jouent pour la communauté scientifique océanique un rôle de catalyseur. Ainsi ceux de la Woods Hole Oceanographic Institution et de la Scripps Institution of Oceanography rassemblent-ils, pour des périodes déterminées mais non forcément à titre définitif, des équipes pluridisciplinaires travaillant sur une « opération » définie par un calendrier et un budget. Le Centre océanologique de Bretagne (C.O.B.), installé depuis 1968, par le CNEXO, à proximité de Brest, est le lieu de développement d'un ensemble indissociable de disciplines qui s'exercent tout au long d'un processus aboutissant à l'application des activités scientifiques aux activités de production.

La solution des difficultés par le perfectionnement des techniques

L'évolution des techniques d'investigation en milieu marin est un perfectionnement continu des appareillages utilisés dans les différentes disciplines : dynamique et physique de la mer, biologie, géologie et géophysique.

Si le milieu marin ne permet pas la propagation des ondes électromagnétiques, les ondes acoustiques s'y propagent, quant à elles, avec une vitesse qui augmente en fonction de la température, de la pression et de la salinité. Les premiers échosondeurs, mis au point après la Première Guerre mondiale, manquaient de précision. Le développement de l'acoustique marine au cours de la Seconde Guerre mondiale allait permettre de disposer, en 1954, d'instruments précis sondant en continu jusqu'aux plus grandes profondeurs.

Dès lors, l'océanographie moderne fait largement appel aux ondes sonores pour obtenir des renseignements sur l'état physique de grandes masses d'eau, la nature et la morphologie des fonds, et même le comportement dans l'eau des êtres vivants.

L'*océanographie dynamique et physique,* historiquement la première-née, est pratiquée depuis son origine par les services hydrographiques des marines militaires et fait toujours appel, comme au milieu du XIXe siècle, aux mesures de température et aux prélèvements d'eau à diverses profondeurs. Mais les lignes de sondes lestées, maniées à la main par un matelot agrippé au beaupré d'une frégate, sont remplacées par les échosondeurs.

Les bouteilles à renversement (imaginées par Nansen) qui se plaçaient le long d'un navire immobile ont cédé le pas au bathythermographe et à la bathysonde, qui, par liaison électrique, envoient directement à bord du navire les mesures de température et de salinité. Les courantomètres, qui évaluent la force d'un courant en mettant à profit la différence de potentiel entre deux électrodes remorquées, donnent des résultats de plus en plus précis. Au moyen de marégraphes immergeables autonomes, on peut maintenant étudier les ondes de marées par très grands fonds.

▼ Le Centre océanographique de Bretagne (C. O. B.), créé en 1968 par le CNEXO à proximité de Brest.

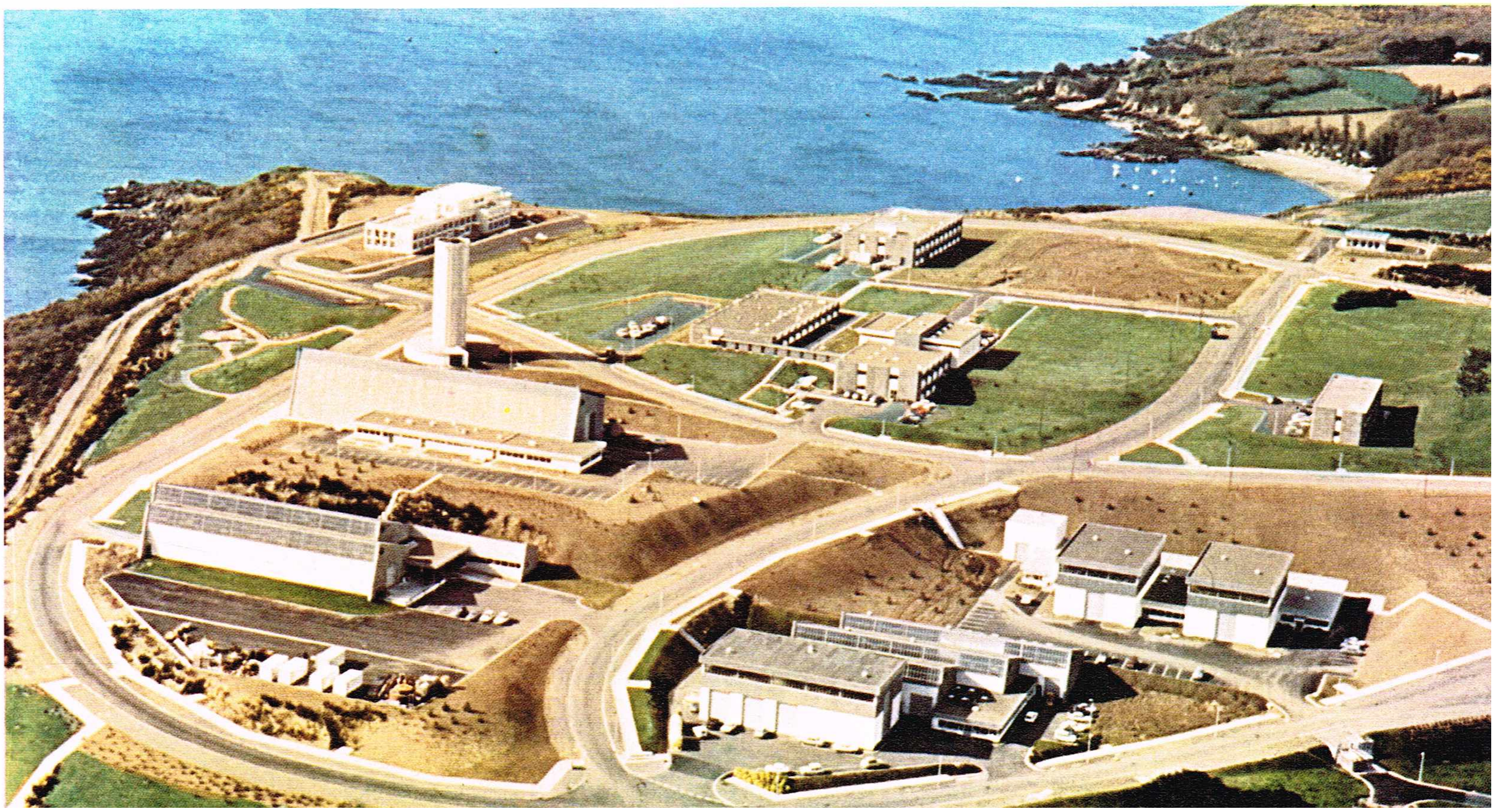

Mazo - CNEXO

▶ ***Pour la connaissance du comportement des masses d'eau océaniques, il est très important d'avoir une représentation simultanée des températures et des salinités sur des diagrammes; actuellement, celles-ci sont données par des appareils automatiques : ici, l'enregistreur d'un*** **thermosalinographe** ***à bord du*** **Jean Charcot.**

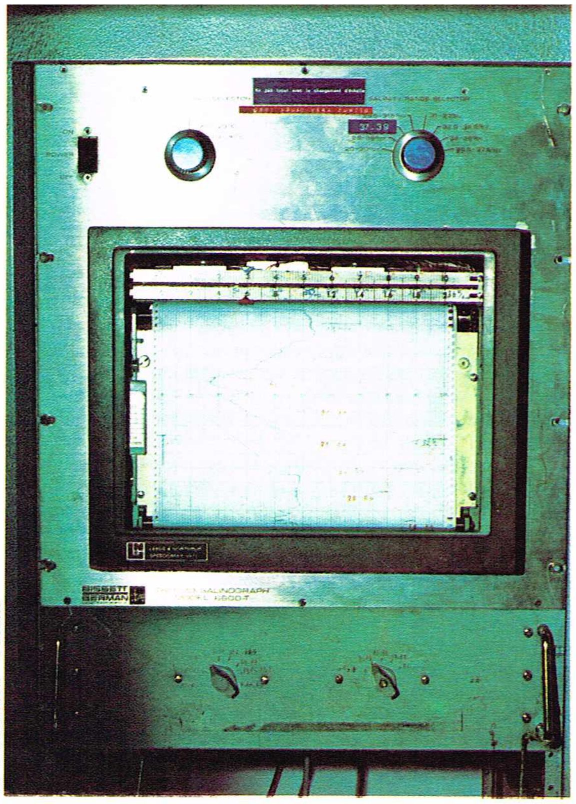

H. Chaumeton - Jacana

Chaque branche de la physique de la mer crée, de façon continue, des appareils de mesure aux noms évocateurs : irradiancemètre, fluoromètre, diffusiomètre, célérimètre, atténuancemètre.

Mais l'évolution en cours ne se limite pas à une transformation du langage. Elle résulte du développement des techniques océano-spatiales, qui tendent à substituer aux mesures ponctuelles effectuées depuis des navires l'enregistrement continu de données par des bouées captrices disposées en réseau, transmettant leurs informations en temps réel par satellites artificiels.

L'*océanographie biologique* dispose, aujourd'hui, d'instruments plus perfectionnés que les filets et chaluts préparés, en 1871, pour la campagne du *Challenger*. Les filets à plancton s'ouvrent et se ferment par télécommande, ce qui permet de limiter un prélèvement à une couche d'eau déterminée. Les chaluts pélagiques, dotés d'émetteurs-récepteurs acoustiques permettant de contrôler leur immersion depuis la surface, sont également remorqués aux profondeurs choisies.

L'utilisation de la photographie sous-marine, grâce à des caméras montées sur des engins autonomes ou remorquées à une certaine distance du fond, donne aux biologistes une image précise de la vie sous-marine. L'étude des différents planctons fait de plus en plus intervenir des mesures physico-chimiques; le prélèvement des échantillons s'effectue au moyen de dragues, de chaluts et, surtout, de collecteurs quantitatifs équipés de dispositifs acoustiques de commande pour effectuer des prélèvements sur tous les fonds. Avec les diverses méthodes acoustiques d'échosondage, on obtient de précieuses indications sur la distribution des couches planctoniques et même sur la répartition des espèces pélagiques.

▼ **Nasses caméras** ***utilisées sur le*** **Jean Charcot*;*** ***certaines de ces caméras peuvent prendre des films jusqu'à — 8 000 m de profondeur.***

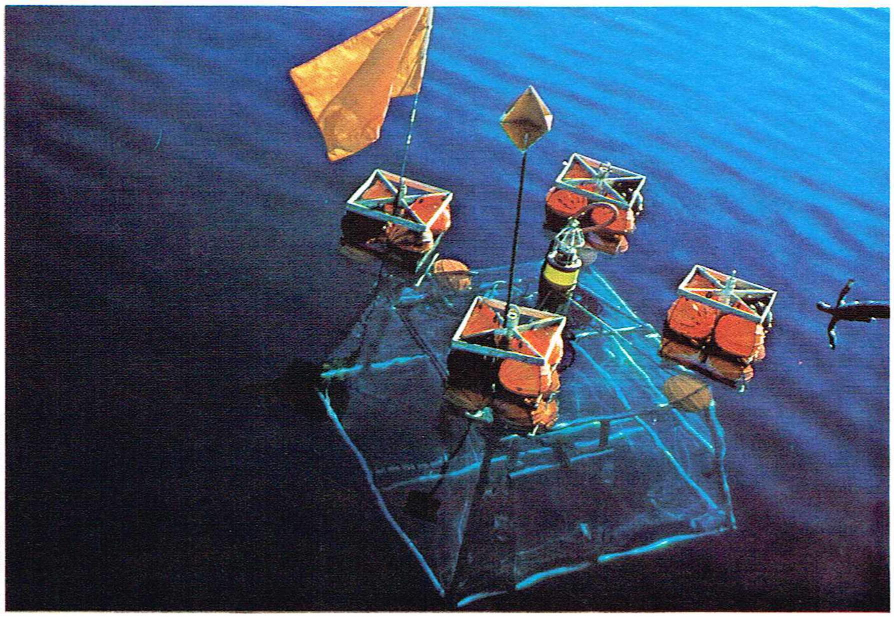

H. Chaumeton - Jacana

L'acoustique marine, qui a été l'un des principaux facteurs de perfectionnement des instruments d'océanographie physique — et, dans une moindre mesure, des techniques de l'océanographie biologique — a, en quelques années, fait progresser de façon prodigieuse la *géologie* et la *géophysique marines*.

L'étude des fonds, par l'intermédiaire d'échantillons remontés sur un plomb de sonde suiffé ou dragués au hasard, est désormais une discipline rigoureuse, dont les moyens de recherche sont fondés à la fois sur la propagation des ondes acoustiques dans le milieu marin et sur l'application, en mer, des méthodes de prospection mises au point à terre par les pétroliers (reconnaissance sismique, forage).

Les échosondeurs permettent d'établir des cartes des fonds, au moyen de puissantes sources émettrices d'ondes ultrasonores, lesquelles pénètrent dans le sous-sol marin, jusqu'à ce qu'elles atteignent des couches qui les réfléchissent. L'enregistrement de ces ondes dessine une coupe, ou « profil », des structures profondes.

Enfin, des sonars émetteurs-récepteurs, soit montés latéralement sur la coque d'un navire ou d'un engin submersible, soit panoramiques et montés sur un submersible, soit remorqués derrière un navire dans un carénage hydrodynamique, ou « poisson », réalisent des « pseudo-photographies sonores » du fond, analogues aux photographies aériennes.

Sondages acoustiques, mesures de vitesse du son, sonars latéraux ou panoramiques apportent au géologue et au géophysicien océanographes des indications déterminantes. L'adaptation au milieu marin des techniques pétrolières d'exploration sismique, réussie pour la première fois par l'Américain Maurice Ewing vers 1947, a joué un rôle décisif dans l'évolution de la géologie marine.

Le principe de l'exploration sismique consiste à émettre dans le sol des ondes sonores et à étudier les réflexions successives de ces ondes sur les surfaces de séparation de couches géologiques de nature différente. Les ondes sonores peuvent être engendrées par des explosions de faible importance ou par tout autre moyen. Des sismographes montés en série détectent les temps de retour des ondes après réflexion; l'interprétation des enregistrements permet d'identifier les différentes couches rencontrées.

A terre, l'exploration sismique nécessite plusieurs forages et l'utilisation de sismographes alignés sur le sol. En mer, l'émission d'ondes sonores peut être faite en continu, et l'enregistrement s'effectue par l'intermédiaire d'hydrophones répartis, sur plusieurs milliers de mètres, dans des conduites spéciales, ou « flûtes », remorquées par un navire. Ainsi, l'exploration sismique en mer est non seulement plus simple et plus rapide mais elle est environ cinq ou six fois moins coûteuse qu'à terre.

Les sources sonores le plus couramment utilisées sont de faibles charges d'explosif (dans le procédé français Flexotir, ces charges explosent au centre d'une sphère d'acier percée de trous et remorquée derrière un navire, afin d'éliminer les répétitions et les résonances dues aux réflexions multiples de la bulle de gaz produite par l'explosion), des décharges électriques (étinceleurs), des décharges d'air comprimé (canon à air). Un nouveau procédé français, le Simplon, fait imploser une poche d'eau sous pression; les ondes émises, situées dans les basses fréquences, pénètrent très profondément dans le sous-sol océanique.

L'étude de la composition des fonds par prélèvement d'échantillons, ou carottes, est effectuée par le géologue au moyen d'une vaste panoplie d'appareils descendus sur le fond au bout de câbles : carottiers à piston de Kullenberg, électrocarottiers, vibrofonceuses, dragues à roches, avec caméras photographiques Thorndike et caméras de télévision. Les techniques de forage profond, inspirées de celles des pétroliers, ont été adaptées à l'exploration scientifique des grands fonds lors de la

construction du navire *Glomar Challenger* (programme américain JOIDES [Joint Oceanographic Institutions Deep Earth Sampling]).

Enfin, les géophysiciens déduisent certains aspects importants de la nature des sous-sols marins en analysant les perturbations du champ magnétique et de la gravité terrestres, enregistrées à l'aide de magnétomètres et de gravimètres. Ceux-ci sont soit remorqués dans des « poissons » carénés (c'est le cas pour les magnétomètres), soit montés à bord sur des plates-formes stabilisatrices pour éliminer les accélérations considérables dues aux oscillations du navire (c'est le cas pour les gravimètres).

Les robots sous-marins

A ces instruments, l'océanographe peut ajouter le robot sous-marin, capable d'effectuer les interventions les plus diverses.

Comme les sous-marins habités, les robots comprennent des systèmes de propulsion, d'observation et de télémanipulation, mais, par le truchement d'un câble (l' « ombilical »), ils sont entièrement télécommandés depuis un poste de commande établi en surface ou à terre.

Mis au point depuis longtemps déjà pour les centres nucléaires, leurs bras manipulateurs, auxquels sont adaptés des outils divers allant de la pince aux godets de prélèvements, accomplissent des gestes simples. Certains sous-marins habités, comme le *Trieste*, l'*Archimède*, *Cyana*, l'*Aluminaut*, possèdent de tels bras afin de pouvoir exécuter certains travaux sur le fond.

Les robots téléguidés peuvent se différencier de la façon suivante : d'abord, les engins naviguant en pleine eau et sur le fond, tels le *CURV* américain, le *Télénaute* et l'*ERIC* (engin de recherche et d'intervention à câble) français; ensuite, les engins rampants, tels le *RUM* (Remote Underwater Manipulator) américain et les excavatrices japonaises.

Ces engins constituent un compromis entre le plongeur et le sous-marin habité; ils exécuteront certaines tâches à toutes les profondeurs dans un avenir proche. Ils multiplieront les possibilités d'intervention sous la mer et seront des assistants indispensables pour les spécialistes et des travailleurs hors pair pour les industriels.

L'homme à bord de submersibles

L'océanographe moderne préfère de plus en plus, afin de s'affranchir des sujétions de l'écran d'eau déformeur, pénétrer lui-même dans le milieu marin, afin d'y effectuer observations, mesures et interventions, à bord de submersibles bien équipés comme les bathyscaphes et les petits sous-marins profonds de recherche, tels l'*Alvin* américain et *Cyana* français. C'est ce que firent les géologues et les géophysiciens au cours de l'opération franco-américaine sur la dorsale médio-atlantique en 1973 et en 1974. La préparation débuta en 1972 par une reconnaissance très précise de la zone des futures

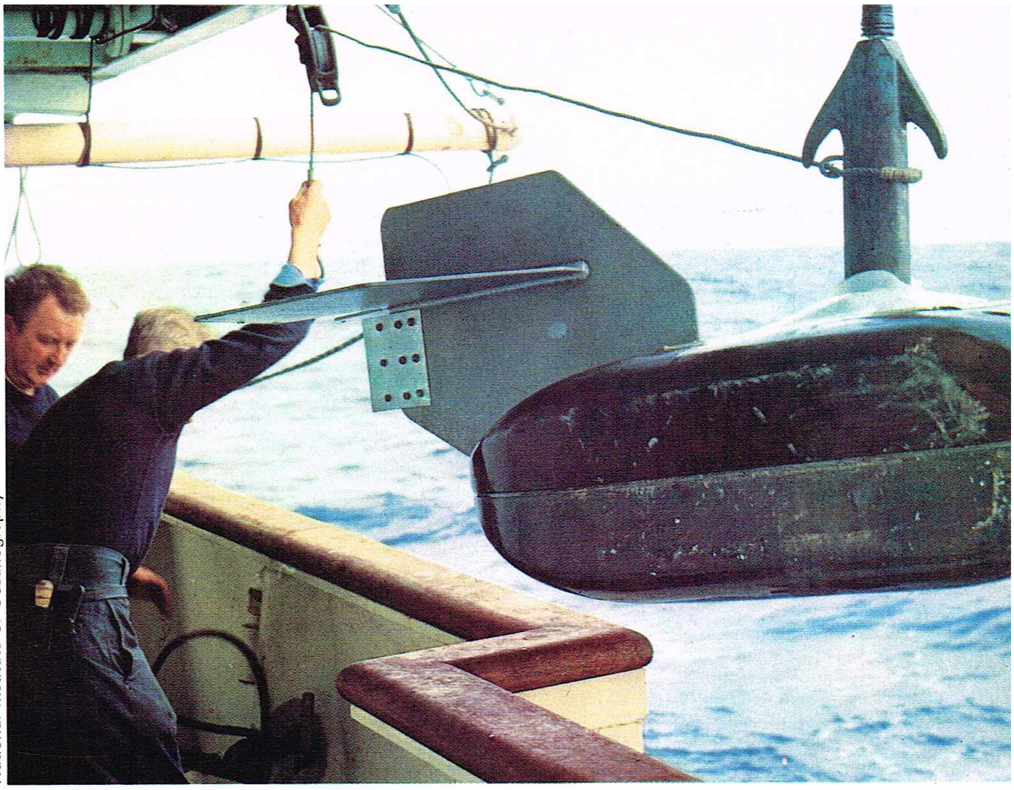

National Institute of Oceanography

▲ *Un échosondeur durant la phase d'immersion : cet instrument, traîné en profondeur par le navire, permet, grâce à l'emploi des ultra-sons, d'établir des profils du fond des mers, de localiser des objets ou des bancs de poissons.*

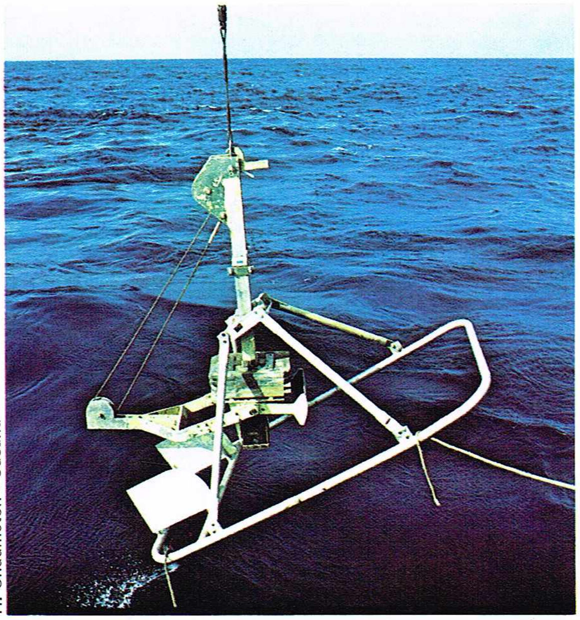

H. Chaumeton - Jacana

◀ *Pour étudier la composition du fond des océans, le géologue utilise un carottier descendu sur le fond par un système de câbles : ici, un carottier* **Reineck.**

Research International

◀ *Le bathyscaphe* **Trieste,** *réalisé par Auguste Picard, est descendu en 1960 dans la fosse de Guam (près des îles Mariannes); c'est un submersible habité, muni de bras manipulateurs permettant de réaliser des prélèvements sur le fond.*

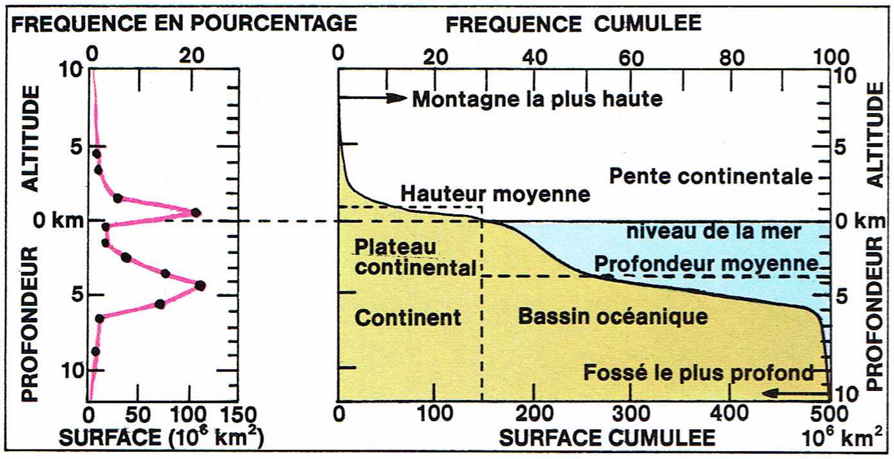

Richard Colin

Profondeur en m	Surface occupée (en %) de la surface totale des fonds océaniques		Appellation
AIRES OCCUPEES PAR LES DIFFERENTES PROFONDEURS OCEANIQUES			
0 à 200	7,6		Plateau continental
200 à 1 000	4,3	15,3	Talus continental
1 000 à 2 000	4,2		
2 000 à 3 000	6,8		
3 000 à 4 000	19,6	77	Fonds abyssaux
4 000 à 5 000	33,0		
5 000 à 6 000	23,3		
6 000 à 7 000	1,1		
> 7 000	0,1		Fosses océaniques

▲ *A gauche, courbes donnant la fréquence, la surface et la profondeur des océans, et l'altitude des terres émergées (d'après Wyllie, 1971). A droite, tableau des aires occupées par les différentes profondeurs océaniques.*

plongées des submersibles, mettant en œuvre l'arsenal le plus moderne des moyens d'investigation depuis la surface. La dernière mission de cette préparation, en 1974, fut menée par le navire hydrographe d'*Entrecasteaux*, de la Marine nationale française, qui établit au moyen d'un très remarquable sondeur à pinceau étroit une carte détaillée de la zone des futures plongées. Les résultats de cette campagne préparatoire « aux instruments » furent tels qu'à la veille de la première plongée de l'opération FAMOUS, l'équipe scientifique pouvait déclarer à titre de boutade qu'il n'était pas nécessaire de plonger, la synthèse des renseignements rassemblés depuis la surface constituait à elle seule une première mondiale.

Mais durant les plongées, géologues et géophysiciens découvrirent un aspect et une structure des fonds différents de ceux qu'ils avaient pu imaginer à partir des travaux de surface. Le responsable français de l'opération FAMOUS pouvait dès lors estimer, à juste titre : « Dans l'état actuel de nos connaissances technologiques, les informations nécessaires... sont pratiquement impossibles à obtenir à partir des moyens de surface... Il apparaît très clairement que le submersible est le seul outil actuellement disponible pour apporter aux scientifiques les réponses qu'ils désirent. »

On peut estimer que l'opération FAMOUS a ainsi renouvelé la méthodologie d'exploration des fonds océaniques. Rien ne saurait mieux caractériser la continuité dans l'innovation technique nécessaire pour surmonter les difficultés inhérentes au milieu marin que cette conclusion de Xavier Le Pichon, directeur scientifique français du projet FAMOUS : « ... L'outil est maintenant au point, mais il faut apprendre à considérer les problèmes qui se posent en fonction des nouvelles possibilités apportées par cet outil. Cela demandera une longue éducation des chercheurs. »

Le cadre structural des océans

Pour les géographes, le terme d'océan recouvre deux notions différentes : d'une part les dépressions de l'écorce terrestre, d'autre part les masses d'eau qui emplissent ces dépressions et constituent l'*hydrosphère*.

L'océan planétaire, le plus souvent appelé océan mondial, comprenant l'ensemble des bassins océaniques, des mers ouvertes et des mers fermées, couvre 361 millions de km², soit près de 72 % de la surface de la planète. Sa profondeur moyenne, dépassant 4 000 m, lui confère un volume approximatif de 1 370 millions de km³.

De l'océan compris comme l'ensemble des dépressions de l'écorce, les fonds océaniques proprement dits représentent 60 de ces 72 % de la surface de la planète, les 12 % restant correspondant aux bords immergés des continents, ou marges continentales.

L'océan considéré comme masse d'eau emplissant les dépressions de l'écorce a changé en étendue et en volume au cours des temps géologiques. Au sommet de l'invasion, ou « transgression marine », qui, à l'âge du Crétacé, a représenté la plus grande superficie de l'*hydrosphère*, et qui a couvert notamment ce qui est aujourd'hui le Bassin parisien, l'océan mondial s'étendait sur environ 85 % de la surface de la planète, alors que, pendant les périodes glaciaires du Quaternaire, il ne couvrait plus que 65 % de cette surface. La « régression » océanique avait suivi la « transgression marine ».

A notre époque géologique, la profondeur moyenne des dépressions de l'écorce terrestre qu'emplit l'océan mondial est comprise entre 4 000 et 4 500 m, le point le plus profond, situé dans l'océan Pacifique, étant la fosse de Guam, à 11 034 m sous la surface du volume liquide de l'hydrosphère.

Cet océan mondial peut être géographiquement subdivisé en trois grandes parties : l'océan Pacifique, l'océan Atlantique et l'océan Indien. Au sein de chacune de ces parties, certaines zones, plus ou moins resserrées, entre les terres émergées sont individualisées sous le nom de mers. La surface de l'océan Pacifique, le plus grand de tous, comporte 181 millions de km²; celle de l'océan Atlantique est de 94 millions de km² et celle de l'océan Indien de 74 millions. Le bassin Glacial Arctique, d'une superficie de 12 millions de km² environ, forme autour du pôle Nord une sorte de zone intermédiaire entre un bassin océanique et une mer. Enfin, les trois grands océans ne sont des entités géographiques nettement individualisées, pour leurs parties situées dans l'hémisphère Sud, que jusqu'à la latitude de 45° sud. Leurs parties méridionales entourent en effet le continent antarctique et le pôle Sud d'une ceinture continue d'eaux très froides, d'une superficie de 32 millions de km², que l'on désigne généralement sous le nom d'océan Austral.

Géomorphologie des fonds océaniques

Si l'on imagine l'océan mondial vidé d'eau, les dépressions de l'écorce terrestre qu'il recouvre présentent un relief relativement facile à schématiser.

Ce n'est qu'au cours des années 1950 que le perfectionnement des matériels et des techniques d'étude, par l'adaptation à une utilisation à la mer des procédés de recherches sismiques employés à terre par l'industrie pétrolière, ainsi que celui des sondeurs acoustiques à pôles qui a suivi la Seconde Guerre mondiale ont permis d'enregistrer en continu, le long de la route suivie par un navire, l'image de la topographie sous-marine, celle de la « face cachée » de la planète.

Cette « face cachée » présente une immense chaîne sous-marine, ligne impressionnante de montagnes — ou dorsales médio-océaniques — qui sillonne le globe sur une largeur totale d'environ 65 000 km. Formées de segments déplacés les uns par rapport aux autres par des failles transformant la direction générale de la chaîne — dites ainsi à juste titre « failles de transformation » — ces dorsales sont larges par endroits de plus de 2 000 km. Elles s'élèvent en moyenne à 2 000 m au-dessus de vastes zones plates, les bassins océaniques profonds et les plaines abyssales, parsemées de monts sous-marins isolés (les guyots) ou alignés selon des arcs insulaires.

Une vallée centrale, ou « rift », profonde de 1 500 à 1 800 m, et large de 20 à 50 km, entaille la crête des dorsales.

Des fosses profondes, pouvant s'enfoncer à plusieurs milliers de mètres au-dessous du niveau des bassins

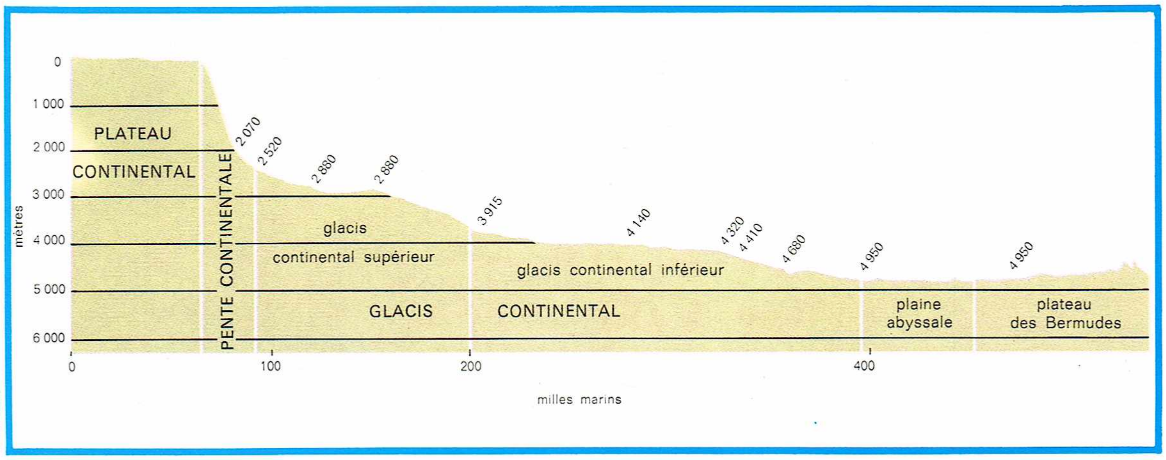

I.G.D.A.

◀ ***Un exemple de profil de marge continentale réalisé au niveau de la côte nord-est des États-Unis, entre le cap Hatteras (Caroline du Nord) et le secteur du banc Georges (d'après R. W. Fairbridge,* Encyclopedia of Oceanography).**

océaniques, établissent souvent une frontière entre les continents émergés et les bassins océaniques profonds. Ces fosses sont des dépressions généralement allongées et de faible largeur, dont les flancs à très forte pente peuvent atteindre parfois 45°. Elles sont souvent situées au voisinage de cordillères continentales ou insulaires. Les plus profondes se trouvent dans l'océan Pacifique occidental (fosse de Guam : 11 034 m, point le plus profond de l'océan mondial, où le mont Everest immergé serait recouvert par 2 150 m d'eau; fosse des Tonga : 10 880 m; fosse des Philippines : 10 500 m; fosse des Kouriles : 9 500 m).

Entre les bassins océaniques profonds et les continents émergés, la *marge continentale* forme une zone de transition.

La marge continentale

Selon la morphologie des fonds océaniques, les marges continentales sont caractérisées par une très forte subsidence — ou lent mouvement d'affaissement — due en partie à un couplage rigide du continent avec le bassin océanique adjacent.

Elles comprennent trois provinces, en partant des bassins océaniques vers le continent. La première est celle des *glacis,* contact avec la plaine abyssale, frontière ultime vers l'océan de la structure continentale proprement dite. Ce glacis est un prisme sédimentaire aux formes relativement molles, dont le gradient de pente est compris entre 1/100 et 1/700, et dont la largeur est comprise entre quelques kilomètres et quelques centaines de kilomètres.

Le glacis est surmonté par la *pente continentale,* à déclivité moyenne de 3° à 6° et d'une largeur variant de 20 à 100 km selon la déclivité. Cette pente relie des fonds de l'ordre de 3 000 m à des fonds d'environ 200 m. Elle peut présenter géologiquement la structure d'une coupe en tranche des différentes couches constituant un socle continental.

Au sommet de la pente, à la profondeur moyenne de 200 m, se trouve le *plateau continental,* plate-forme relativement horizontale, d'une largeur qui varie selon les lieux géographiques entre quelques kilomètres et quelques centaines de kilomètres. Le plateau continental, caractérisé par une rupture de pente très marquée à l'amorce de la pente continentale, peut être géologiquement considéré comme une partie immergée du socle continental.

Le plateau continental

Les plateaux continentaux prolongeant les terres émergées jusqu'à la profondeur moyenne de 200 m représentent 7,6 % de la superficie totale des fonds océaniques. La profondeur moyenne à laquelle ils se terminent vers les bassins océaniques est de l'ordre de 200 m, mais peut varier selon le type de plateau. On peut distinguer en effet plusieurs plateaux en fonction de leur origine.

— Plateaux continentaux des régions continentales arctiques et antarctiques. Dans ces régions glacées, les mouvements de mise à l'eau et de frottement des icebergs créent des plateaux très irréguliers, accidentés par de nombreux fossés longitudinaux dans l'axe des glaciers terrestres. La région entourant Terre-Neuve est un exemple typique de ce genre de plateau. Au sud de cette île, le cours terminal du Saint-Laurent échancre le plateau continental canadien sur toute la largeur vers l'est en formant des fossés de l'ordre de 500 m de profondeur. Au large des côtes, des bancs d'accumulation morainique peuvent former des structures émergées (île Sable au large de la Nouvelle-Écosse), ou immergées, offrant des frayères remarquables pour certaines espèces de poissons (bancs de Terre-Neuve).

— Plateaux continentaux présentant un relief en rigoles parallèles aux côtes et aux limites océaniques. Ces plateaux sont caractéristiques des zones tempérées. Les structures parallèles qui les composent, en fosses et en reliefs, sont de faibles hauteurs, de 5 à 10 m. Les points hauts sont recouverts de sable, les dépressions sont comblées par des sédiments vaseux (bancs de Flandre en mer du Nord méridionale, atterrages orientaux des États-Unis). Ces plateaux sont des vestiges d'un niveau marin inférieur à des âges géologiques antérieurs, en relation avec les périodes de glaciation.

— Plateaux aplanis des hautes latitudes. Dans ces régions proches des pôles, dans l'océan Glacial Arctique ou dans l'océan Austral, le mouvement constant des glaces flottantes raclant le fond a raboté et aplani le sol des plateaux en le couvrant de débris rocheux.

— Plateaux balayés par de forts courants. Dans certaines zones parcourues par des courants d'une vitesse égale ou supérieure à trois nœuds, on relève sur le plateau continental non seulement une absence de dépôts de sédiments d'origine terrestre, mais encore une action érosive très marquée.

▼ ***Représentation schématique de la côte nord-est des États-Unis et des fonds océaniques au large de celle-ci, montrant le plateau continental, la pente continentale, le glacis continental et la plaine abyssale (dessin exécuté d'après un cartogramme du Lamont Geological Observatory; l'exagération verticale est de 20).***

I.G.D.A.

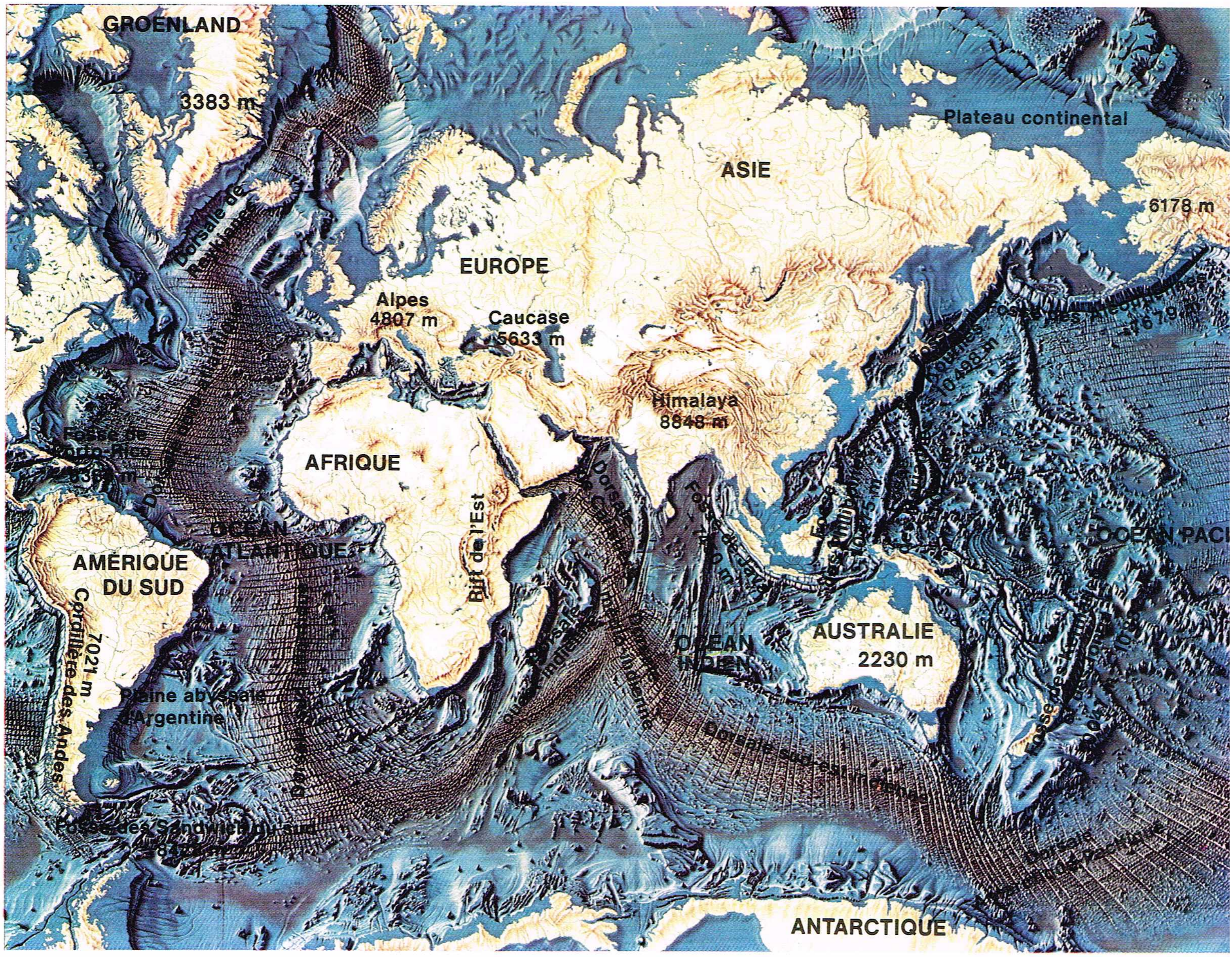

▲ ***Carte du fond des océans montrant notamment la répartition des dorsales et des fosses océaniques.***

— Plateaux des mers tropicales. Ces plateaux présentent souvent des bancs à proximité de la surface qui sont en partie recouverts par des coraux ou d'autres organismes calcaires (Grande Barrière de corail, sur la côte orientale de l'Australie).

— Plateaux bordés vers le large par des bancs rocheux. Certains bancs rocheux émergent pour former des îles. Ce type de plateau est fréquent sur la côte du nord-ouest des États-Unis (Oregon, Washington) et de la Colombie canadienne. Il est sans doute le résultat d'une combinaison de mouvements tectoniques entre des îles érodées et des blocs continentaux cassés par des failles.

— Plateaux bordant des deltas. Les dépôts terrigènes des grands fleuves, comme le Mississippi, le Gange ou, à une échelle moindre, le Rhône, constituent de vastes deltas sous-marins qui ont pour conséquence un comblement et un élargissement du plateau continental.

En règle générale, les plateaux continentaux sont le prolongement immergé d'une frange continentale côtière émergée. La couverture superficielle de ces plateaux résulte des oscillations eustatiques (variations du niveau de la mer) dues aux glaciations quaternaires et aux transgressions marines. On trouve donc sur ces plateaux essentiellement des dépôts d'origine continentale sur de faibles épaisseurs, remaniés par les courants qui en parcourent la surface. En profondeur, les prélèvements d'échantillons par forage ou carottage ont montré qu'on trouve toujours des dépôts peu profonds qui se sont déposés au cours du processus de subsidence, ou affaissement de l'ensemble de la marge continentale : sables terrigènes ou coquilliers, dépôts fluvio-marins ou lagunaires.

La pente continentale

Le terme a été proposé en 1900 par H. Wagner pour désigner la déclivité entre la limite du plateau continental, marquée à l'isobathe de 200 m par une nette rupture de pente, et les profondeurs abyssales. Un sens plus restrictif a été donné en 1959 par B. Heezen : « C'est une portion du sol sous-marin à pente relativement accentuée qui s'étend au large de la rupture de pente du plateau continental. »

La pente continentale — qui peut être en déclivité régulière ou former des terrasses — existe partout dans le monde. En bordure des îles océaniques, on observe des « pentes insulaires » pouvant atteindre 45°.

On peut proposer une classification typologique des pentes continentales en fonction de leur déclivité et de leur histoire géologique.

— Pente continentale de type primaire, au sens structural du terme, correspondant au flanc d'une structure géologique continentale plissée. Dans ce cas, la déclivité est importante (côte sud-américaine du Pacifique).

— Pente continentale résultant d'une influence structurale secondaire, observée sur les côtes atlantiques sud de l'Afrique et de l'Amérique, qui se sont individualisées par distension d'un bloc continental initial unique. Au fur et à mesure de l'écartement des deux bordures, la pente continentale à forte déclivité s'est créée au contact de fonds océaniques récents, en cours de refroidisse-

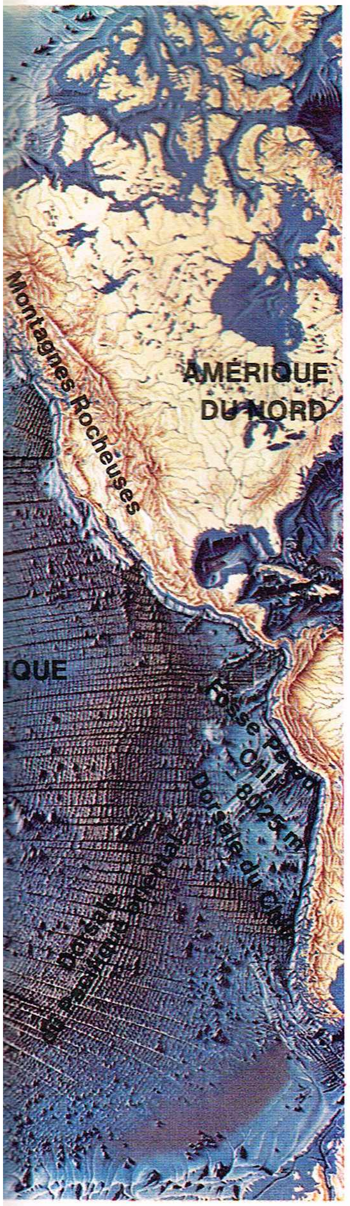

ment. Dans ce cas, la pente représente un plan de faille originel. La pente continentale de la Provence et des côtes occidentales de la Corse présentent aussi de bons exemples de ce type. On estime qu'il y a trente millions d'années, la Corse faisait partie du domaine continental provençal, et que la mer Ligure a été formée par la rotation de l'île vers l'est à partir d'un plan de failles, ce qui expliquerait la formation de pentes abruptes.

— Pente continentale secondaire modifiée par la sédimentation. Plusieurs formes d'accumulation sédimentaire peuvent modifier la morphologie d'une pente préexistante : accumulation de couches sédimentaires empilées ; inclusion d'un ancien talus à une ancienne pente continentale, adoucissant ainsi la déclivité ; sédimentation carbonatée du type atoll, pouvant se produire sur une pente et augmentant, au contraire du cas précédent, une très forte déclivité.

On peut caractériser en général la pente continentale en soulignant que, structuralement, cette pente résulte soit de failles, soit d'accumulations. A son pied, le glacis continental la raccorde à la plaine abyssale, ou au fond d'un bassin océanique adjacent.

Le glacis continental

Le glacis continental n'existe que sur des marges bien développées. Selon la définition donnée en 1959 par B. Heezen, le glacis est un trait géomorphologique de la partie inférieure de la marge, comprise entre une pente de gradient 1/40 (ce qui est encore la pente continentale) et une structure de gradient de pente 1/2 000 (ce qui est déjà la plaine abyssale).

La morphologie du glacis est variable : il est parfois constitué de grands gradins décalés les uns par rapport aux autres ; il peut souvent ne pas exister.

L'étude de la sédimentation superficielle des glacis montre qu'ils sont constitués de langues allongées de sédiments sablonneux ou argileux issus des plateaux continentaux et d'origine terrestre. Ces sédiments sont entraînés par simple gravité et par des courants perpendiculaires à la ligne de pente. D'autres courants importants parcourent la partie inférieure du glacis dans un sens parallèle au front de ce glacis. Ces « courants de contour » trient les sédiments terrigènes provenant de la partie supérieure de la pente continentale.

Sur le plan structural, le glacis continental est un prisme sédimentaire. A sa lisière, il est souvent le siège d'une activité volcanique, qui est indiquée par des lignes de failles et marque le contact entre le sous-sol continental et le sous-sol océanique. L'origine de ce prisme peut être attribuée à un mouvement d'affaissement ou de subsidence de ce sous-sol océanique par rapport au sous-sol continental, le long d'une faille ou d'une flexure. Une telle subsidence entraîne une accumulation importante de sédiments. Son mécanisme peut être expliqué à la fin par le refroidissement progressif du sous-sol océanique issu par accrétion ou accroissement progressif à partir d'une dorsale médio-océanique, et par le poids de la couverture sédimentaire.

Pente et glacis continentaux sont en général découpés par des réseaux de gorges ou de vallées, appelées généralement **canyons sous-marins**, qui sont le siège de glissements massifs du remplissage sédimentaire. Ces glissements sont probablement à l'origine de la plupart des courants de turbidité observés dans le volume de l'hydrosphère. On constate que les énormes accumulations de sédiments d'origine terrestre formant de très grands cônes de déjection abyssaux se trouvent aux débouchés de canyons sous-marins de la marge continentale. Les exemples les plus spectaculaires sont, dans l'océan Indien, les cônes du Gange et de l'Indus qui s'étendent sur des centaines de kilomètres à partir de la marge. On trouve à la surface de ces cônes de déjection un réseau de chenaux en liaison avec l'écoulement des courants de turbidité.

L'origine des canyons sous-marins est encore très discutée. Elle est probablement, dans certains cas, tectonique ; mais on observe que les processus de glissement massif, en raison de la déclivité, des masses sédimentaires qui transitent par eux les érodent activement, de la même manière que la « marche » d'un glacier érode son lit rocheux.

L'analyse de la structure profonde ne permet pas de déterminer avec grande précision, au sens structural, la frontière de la marge continentale avec un bassin océanique. Cette frontière se situe à un niveau quelconque du glacis. Par contre, au sens morphologique et sédimentaire, on assimile le glacis tout entier à la marge continentale, considérée comme une zone de transition de largeur variable.

Pente et plateau continentaux appartiennent aux structures continentales proprement dites, et leur histoire géologique est liée aux transgressions marines (avancées) et aux reculs (régressions) de la ligne de rivage, dus aux variations du niveau de l'hydrosphère océanique au cours des ères géologiques pendant la formation des océans.

Gisements d'hydrocarbures et de minerais dans les structures géologiques de la marge continentale

Les structures géologiques de la marge continentale peuvent contenir dans certaines conditions des gisements d'hydrocarbures et présenter des dépôts de substances minérales exploitables dans des conditions industrielles.

● *Gisements d'hydrocarbures*

La mise en valeur de ces gisements, situés en premier lieu sous de faibles profondeurs d'eau, dans les structures du plateau continental, a commencé réellement peu après la Seconde Guerre mondiale, en 1947, sur les côtes du golfe du Mexique. Les premiers forages marins remontent cependant à 1897 sur les côtes de Californie, par quelques mètres d'eau, puis à 1924 dans la lagune de Maracaibo au Venezuela et dans la mer Caspienne en Union soviétique. Il s'agissait en fait des prolongements immédiats de gisements terrestres. Le développement considérable de la prospection des plateaux continentaux commence au cours des premières années de la décennie 1950. En 1955, dix pays étaient concernés. En 1974, cent pays le sont. Les plateaux continentaux sont systématiquement recensés. Des zones importantes font l'objet d'activités d'exploitation. Ce sont principalement le golfe du Mexique, le littoral nord-est de l'Amérique du Sud (Venezuela, Trinidad, Brésil), le littoral sud-ouest des États-Unis (Californie), l'Afrique occidentale (Nigeria, Gabon, Congo, Angola), le golfe Persique (Arabie Saoudite, Iran, émirats), l'Extrême-Orient (Indonésie, Malaisie, golfe du Siam, mer de Chine orientale, mer du Japon), l'Australie, l'Europe occidentale (mer du Nord, Adriatique) et l'Europe orientale (mer Caspienne).

Qu'ils soient exploités à partir de gisements terrestres ou de gisements marins, les hydrocarbures sont des produits océaniques.

Le milieu marin contient, en effet, à proximité de la surface de l'hydrosphère, une matière première vivante : plancton végétal et plancton animal — Algues microscopiques et animalcules — dans des eaux dont la température est suffisante, en raison de la durée d'ensoleillement, pour engendrer une prolifération de matière organique. Celle-ci est attaquée par les Bactéries et se dépose sur les fonds marins. Une partie en est minéralisée sous forme de sédiments. Une autre, si elle se trouve dans un milieu réducteur pauvre en oxygène, forme une sorte d'humus, le kérogène, que l'on estime être à l'origine des hydrocarbures.

Or la pauvreté du milieu en oxygène est une des caractéristiques des mers tropicales. La formation du kérogène à partir de l'attaque de la matière organique vivante dépend d'un type de climat à un moment donné de l'histoire géologique de la planète. La connaissance de la situation relative des différentes régions de l'écorce terrestre par rapport aux latitudes tropicales au cours de l'histoire de cette écorce est une condition importante de départ pour une prospection de gisements d'hydrocarbures.

Le kérogène se transforme en hydrocarbures dans certaines conditions de température et de pression. Ces conditions sont fonction de son enfoncement, ou subsidence. Au-delà d'une limite de température, donc d'une certaine profondeur dans le sous-sol, les hydrocarbures sont détruits. Il faut donc que la matière organique transformée en kérogène soit retenue dans de véritables *pièges* qui empêchent la destruction métamorphique ultérieure des hydrocarbures produits à partir du kérogène. Ces pièges sont constitués par des couches imperméables, argiles ou strates salifères, présentant des structures géométriques favorables, telles que failles, plissements, dômes. On s'attachera tout particulièrement à l'identification de pièges gréseux ou coralliens qui

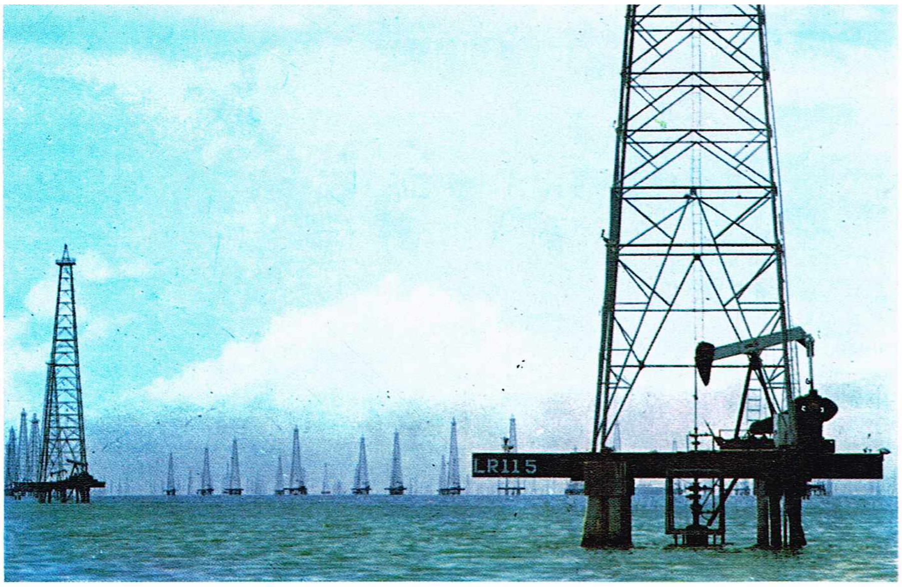

S.E.F.

▲ *Puits de pétrole dans la lagune de Maracaibo au Venezuela. Ces gisements, exploités depuis 1924, sont en fait des prolongements immédiats des gisements terrestres. Ceux du plateau continental font l'objet d'une recherche intense depuis 1950; plus de cent pays sont concernés par ce phénomène.*

constituant des « roches mères » au sein desquelles les hydrocarbures produits par transformation du kérogène sous certaines conditions de température et de pression auraient été préservés de la destruction par métamorphisme.

Ces pièges n'ont pu être constitués que sous de faibles profondeurs d'eau. En effet, la matière organique est formée, par synthèse des éléments minéraux sous l'action du rayonnement solaire, dans les couches océaniques proches de la surface de l'hydrosphère. Si la hauteur d'eau est trop grande, les particules de cette matière organique attaquées par les Bactéries seraient entièrement minéralisées avant d'arriver sur le fond et de pouvoir être transformées en kérogène.

On s'attache donc à rechercher des pièges à kérogène soit dans des bassins océaniques anciens peu profonds, où l'évaporation a formé d'épais dépôts de sels, soit dans des bassins océaniques effondrés par subsidence. Dans ces deux cas, on pourra trouver des pièges gréseux, coralliens ou salifères, dans lesquels la matière organique a pu rencontrer les conditions favorables à sa transformation en hydrocarbures.

Si l'on considère par exemple les récifs coralliens actuels, ceux-ci se développent dans des eaux claires, peu profondes, d'une température stable comprise entre 25 et 35 °C. Des récifs coralliens correspondant à des paléoclimats tropicaux, indiqués plus haut comme nécessaires à la formation des hydrocarbures, ont été localisés dans les structures géologiques pétrolifères canadiennes, et dans plusieurs structures nordiques européennes. Les conditions que l'on trouve par exemple aujourd'hui en Polynésie existaient il y a 450 millions d'années en Amérique du Nord et en Europe.

Un premier type de gisements pétrolifères océaniques est trouvé dans les structures géologiques des marges continentales. Les bassins contenant ces gisements ont constitué des milieux confinés de faible profondeur dans lesquels la matière organique proliférait. Dans les conditions climatiques favorables, la matière organique kérogénique déposée sur le fond a été mise à l'abri de l'oxydo-réduction par d'épaisses couches d'évaporites. Ces bassins peuvent s'étendre assez loin vers le large, mais ils sont toujours liés à des structures de marge continentale.

Un second type de ces gisements contenus dans des bassins océaniques associés à des mouvements actuels de subduction sera décrit ultérieurement dans la partie consacrée au fond des océans.

● *Gisements de minerais*

Les gisements minéraux de la marge continentale comprennent d'abord, à proximité des côtes, les sédiments meubles du plateau continental, les gisements métallifères du plateau, puis, au-delà, les dépôts biochimiques du glacis continental.

Des gisements de sables et de graviers sont situés dans les paléovallées sous-marines des plateaux continentaux émergés après une période de glaciation. L'évaluation des réserves de tels gisements, notamment en Europe, dans les paléovallées de la Tamise, du Rhin, de la Seine, est assez importante pour répondre à la demande de granulats utilisés pour de grands travaux publics. A l'heure actuelle, la demande est en France supérieure à 5 tonnes par habitant. Or les réserves terrestres ne sont pas inépuisables, et les contraintes d'urbanisme, la protection des sites, le souci de sauvegarder les nappes phréatiques tendent à en limiter l'exploitation.

On trouve également, à proximité des côtes, des sables calcaires formés à partir de coquilles de Mollusques. Ces sables fournissent du carbonate de calcium, matière première pour la fabrication de la chaux et du ciment. Des exploitations importantes de gisements de ce genre ont lieu au large de l'Islande, dans le golfe du Mexique et aux îles Bahamas. L'étude de tels gisements a été effectuée au large de la Bretagne.

Les gisements métallifères du plateau continental prolongent ceux des côtes. Les plateaux continentaux ont en effet la même constitution géologique que les continents qu'ils continuent. Ils présentent sous une couche meuble de sédiments récents des gisements de type terrestre tels que filons, amas, gîtes stratiformes. Leur exploitation va de pair avec celle du sous-sol continental. On extrait ainsi, en prolongement de gisements terrestres, du charbon à proximité des côtes du Japon, du Canada et de Grande-Bretagne, du fer à proximité de celles de Finlande et de Terre-Neuve. Les gisements de soufre de la côte est des États-Unis, notamment dans le golfe du Mexique, et ceux qui ont été découverts récemment au large du Sénégal et du Gabon, sont exploités par injection d'eau chaude sous pression.

Plus intéressants que ces gisements filoniens d'accès généralement difficile, les *« placers »* des plateaux continentaux se présentent sous une forme meuble de gîtes sédimentaires, le plus souvent au fond de paléovallées de fleuves immergées à la suite des changements de niveau des océans au cours des âges géologiques.

On distingue trois groupes de *« placers » :* d'une part, ceux qui contiennent des minerais lourds : or, platine, étain; d'autre part, ceux qui renferment des minerais de poids moyen : sables ferrugineux (magnétite), zircon, monazite, rutile et ilménite qui sont des minerais de titane; enfin, ceux qui recèlent des gemmes : diamants, saphirs, rubis, émeraudes.

Les *« placers lourds »* sont généralement situés près des côtes. Les plus importants sont des gisements d'étain, reconnus sur les plateaux continentaux de Birmanie, de Thaïlande, de Malaisie et d'Indonésie. Ce dernier pays est placé, d'ailleurs, au premier rang des producteurs mondiaux d'étain. On extrait de l'or des placers au large de l'Alaska.

Les *« placers poids moyen »* se trouvent essentiellement sur les franges côtières, où les mouvements de la mer séparent les éléments, et où les courants les dispersent selon leur poids. L'Australie retire de la mer la quasi-totalité de la production mondiale de zircon et de rutile. L'Union soviétique a entrepris l'étude systématique de ses plateaux continentaux afin d'évaluer les possibilités d'extraction de sables contenant des minerais de titane. D'une façon générale cependant, la prospection de ce type de ressources minérales océaniques n'a pas été notablement développée, en raison du grand nombre de gisements terrestres reconnus qui n'ont pas encore été épuisés.

Les *« placers gemmifères »* recèlent essentiellement des diamants. La dureté de ces pierres résiste en effet à l'action mécanique des éléments océaniques, alors que les rubis, les saphirs et les émeraudes la supportent mal, si bien qu'on ne peut les trouver qu'à proximité immédiate des côtes. L'exploitation des placers diamantifères est surtout poursuivie à l'embouchure du fleuve Orange, au large des côtes d'Afrique du Sud.

Au-delà du plateau continental, on trouve sur les marges divers dépôts biochimiques d'origine purement océanique.

● *Dépôts biochimiques des marges*

Sous l'action de Bactéries, des processus biochimiques précipitent ou concrétionnent certains minéraux présents dans l'eau de mer. Les phosphorites sous-marines créées par de tels processus se présentent sous la forme de nodules, de sables et de boues phosphatées, parfois sous celle de « croûtes » solidifiées. Les gisements les plus connus de ce type sont situés sur les pentes et les glacis des marges continentales de la Californie et du Mexique, dans l'océan Pacifique, par des fonds relativement peu importants. Des conditions propices à leur formation permettent d'en supposer la présence le long des côtes du Pérou, de l'Afrique du Sud et de l'Australie.

L'intérêt économique présenté par des dépôts de phosphates océaniques, comparé à celui des gisements terrestres, n'a pas encore justifié une reconnaissance systématique ni, à plus forte raison, le début d'une exploitation.

Le fond des océans

Dans un sens général, on emploie le terme « abysses » pour désigner les profondeurs océaniques à partir des marges continentales. Dans un sens plus précis et restreint, « abysse » devient un adjectif et qualifie tant les étendues plates des bassins océaniques profonds, dites « plaines abyssales », que les grandes fosses, dites « fosses abyssales ».

Plaines abyssales

D'un point de vue morphologique et structural, on parle d'*abysses* au sens large pour désigner les étendues plates situées entre le talus continental et les chaînes de montagnes sous-marines, ou *dorsales*. Dans un sens plus restrictif, on utilise ce terme pour désigner les grandes *fosses*, morphologiquement définies comme de longues et étroites dépressions aux parois abruptes, dont le fond se situe parfois à plus de 10 000 m sous la surface de l'océan. Cette définition est fondée sur les seuls critères morphologiques, car une fosse peut avoir été comblée par des sédiments, et devenir ainsi un fossé.

Historiquement, la curiosité des scientifiques a porté d'abord — c'est-à-dire à partir de la campagne du *Challenger* — sur ces profondeurs abyssales avec comme objet l'étude de l'existence possible d'êtres vivants. Lorsque cette existence fut prouvée, cette curiosité se transféra à la recherche sur les continents de fossiles de ces animaux marins. Très curieusement, l'océan profond n'était compris que comme un gigantesque réservoir biologique. En 1942 encore, trois savants célèbres, très représentatifs du règne des biologistes sur la recherche océanographique profonde, écrivaient que « l'intérêt principal de la topographie des fonds des océans est qu'elle délimite la couche d'eau qui nous intéresse ».

Ce n'est qu'après la Seconde Guerre mondiale — en raison notamment des progrès des méthodes d'investigation — que les « abysses », considérés comme le fond d'un gigantesque vivier, et présentés sur les cartes avec un ton uniformément bleu, révèlent un faciès géomorphologique étonnant. Les « fonds océaniques » jouent désormais un rôle majeur dans l'explication de l'histoire géologique et de l'évolution de la planète.

Iles et rides asismiques — panaches — guyots

Le premier trait de la morphologie des profondeurs abyssales à être identifié fut celui d'îles, de grands monts sous-marins, ou de rides asismiques parsemant de façon irrégulière les plaines.

Certaines de ces structures sont d'origine continentale. Il s'agit de fragments de continents qui ont été séparés des continents principaux lors de processus d'écartement. Leur structure est typiquement continentale. Un exemple en est le banc des Seychelles dans le nord-ouest de l'océan Indien. Un autre exemple est celui du banc sous-marin de Yamato, en mer du Japon.

Les deux grands types de structures océaniques sont tous deux d'origine volcanique. Il s'agit soit de volcans, souvent disposés en *archipels linéaires* sur une largeur de 50 à 100 km, émergeant de profondeurs d'eau de l'ordre de cinq mille mètres, soit de *rides volcaniques*, de dimensions semblables en largeur et en profondeur, mais s'étendant de façon continue sur des centaines de kilomètres sans présenter de points émergents.

Un exemple de ces volcans est donné par l'archipel des îles Hawaii, qui se prolonge vers le nord par quelques atolls, dont celui de Midway, puis par des monts sous-marins (chaîne sous-marine des monts de l'Empereur). Ces volcans sont produits par des sources de roches en fusion situées en profondeur sous la lithosphère. Le magma plus léger monte continuellement jusqu'à la base de la lithosphère, à travers laquelle il s'introduit par des systèmes de *fractures*. Comme la lithosphère — ainsi qu'on le verra ultérieurement — est en déplacement par rapport à l'asthénosphère sous-jacente, les éruptions de magma migrent avec le temps à la surface de la lithosphère. On a donc une traînée, ou ligne, de volcans, qui marque la trace du mouvement relatif du fond océanique par rapport à la source de magma. Tuzo Wilson a baptisé *panache* cette formation d'îles et de rides.

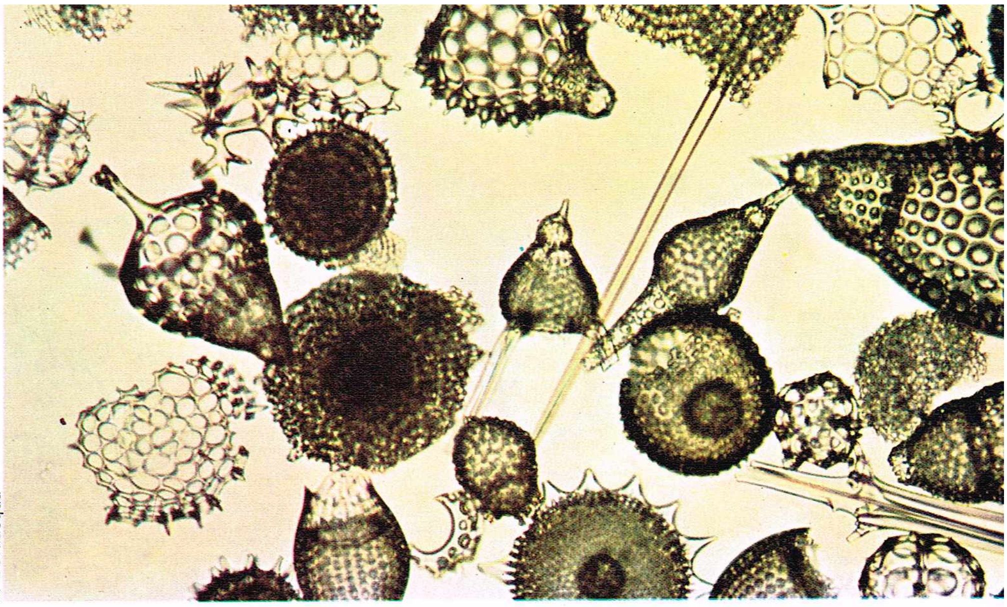

C. Bevilacqua

▲ ***Squelettes de Radiolaires fossiles de l'Éocène supérieur provenant de l'île de la Barbade (Petites Antilles).***

Le fond de l'océan s'approfondissant au cours du temps, une île d'origine volcanique ayant cessé d'être active est rapidement érodée au niveau de la surface de l'eau pour s'enfoncer ensuite sous cette surface. Il arrive que la productivité des organismes coralliféres — qui peuvent proliférer sur le socle volcanique si les conditions hydrologiques sont favorables — soit telle qu'un *atoll*, ou couronne de récifs coralliens, se maintienne au-dessus du niveau de l'océan, alors que le substratum volcanique continue de s'enfoncer. Darwin avait proposé cette explication de l'origine des atolls, qui a été vérifiée depuis par de nombreux forages dans les récifs et les socles des îles du Pacifique.

Si la productivité corallienne n'est plus suffisante, l'île ou l'atoll érodés s'enfoncent et deviennent des monts sous-marins tronqués par l'érosion, appelés *guyots*.

Les fonds océaniques présentent également de grandes *crêtes* sous-marines, ou rides, qui paraissent avoir une origine volcanique sans marquer d'interruption de niveau au long de centaines ou même de milliers de kilomètres. Les plus connues de ces rides sont la crête de Walfish dans l'océan Atlantique Sud, et la crête dite des quatre-vingt-dix degrés est dans l'océan Indien. Leur processus de formation est encore mal compris. On admet actuellement qu'elles sont dues à un phénomène de « panache » particulièrement prononcé en raison d'une fracture active ayant permis la montée continue de grands volumes de magma à la surface de la lithosphère. Ces fractures seraient liées au phénomène d'écartement des plaques constituant l'écorce terrestre accompagné de mouvements tectoniques soulevant les extrémités de ces plaques. On doit dans ces conditions trouver des crêtes identiques

▼ ***Une île d'origine volcanique est rapidement érodée au niveau de la surface de l'eau, mais des coraux peuvent proliférer et se maintenir au-dessus du niveau de l'océan, favorisant la formation d'un atoll : ici, une vue aérienne d'un atoll entre Tahiti et les îles Fidji : on peut reconnaître les lagons reliés entre eux et à la mer par des passes, qui permettent un renouvellement de l'eau.***

G. Mairani

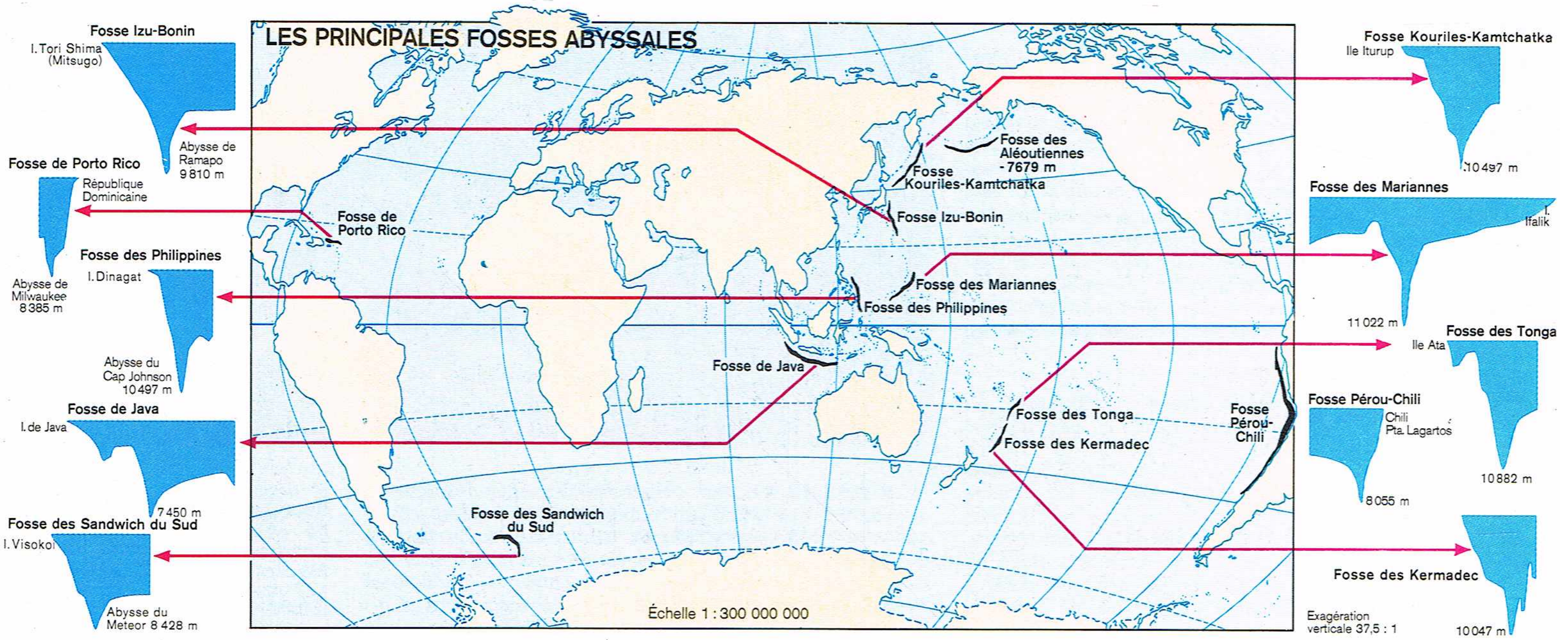

▲ ***Carte et profils des principales fosses abyssales.***

de part et d'autre d'une frontière de plaques. Il en est ainsi dans un certain nombre de cas, la crête de Walfish et la crête de Rio Grande étant symétriques dans l'océan Atlantique Sud de part et d'autre de la dorsale médio-océanique.

Fosses abyssales

Si les monts sous-marins, guyots et rides sont des accidents en hauteur sur les plaines abyssales, les *fosses* sont de longues et étroites dépressions, s'étendant souvent sur des centaines de kilomètres, rectilignes ou arquées, présentant parfois des changements brutaux de direction, offrant un profil en V très aigu, avec des pentes de 5 à 45°. Le fond de ces fosses, très plat, peut présenter une largeur de quelques mètres ou de plusieurs kilomètres. On dénombre une soixantaine de ces fosses : cinq dépassent la profondeur de 10 000 m ; la plus grande profondeur à la surface du globe terrestre est présentée par la fosse de Guam (11 034 m) dans le Pacifique Ouest. Dans l'Atlantique et la Méditerranée, les profondeurs maximales sont respectivement de 8 428 m (fosse des Sandwich du Sud) et de 5 121 m (fosse Hellénique, au large de la Crète).

La plupart de ces fosses font partie de fosses volcaniques actives et sont liées à des *arcs volcaniques insulaires*. En s'éloignant de la fosse, on trouve en effet généralement des arcs volcaniques, constitués d'archipels d'îles actives. Ces archipels marquent souvent une partie des frontières de plaques constitutives de l'écorce terrestre convergentes, comme on le verra ultérieurement. Plusieurs arcs insulaires existent sur les marges de l'océan Pacifique, la « ceinture de feu du Pacifique », comme les îles Aléoutiennes, les Kouriles, le Japon, les Ryu-Kyu, les Philippines, l'Indonésie, situés entre la fosse océanique et le continent.

Les Mariannes, les Hawaii méridionales et les Antilles sont d'autres arcs volcaniques du même type. Ces archipels en chapelet délimitent des bassins partiels « inter-arcs » ou marginaux, plus ou moins fermés entre les îles et le continent voisin.

Ces bassins, suivant leur âge, sont plus ou moins comblés de sédiments, dans la mesure où les arcs insulaires forment une barrière relative à la circulation générale de l'océan. Tels sont les bassins des mers de Béring et d'Okhotsk, de la mer du Japon, de la mer Jaune, de la mer de Chine orientale, et de la mer de Chine méridionale. Ils forment, avec les arcs insulaires qui les limitent, des ensembles dits « marginaux », qui s'écartent des continents adjacents.

Dorsale médio-océanique

Enfin, le trait le plus frappant des fonds océaniques est une élévation prismatique longtemps prise pour une chaîne de montagnes, la dorsale médio-océanique, qui sillonne le globe sur une distance d'environ 65 000 km. Formée de segments déplacés les uns par rapport aux autres par des failles transformant la direction générale — ou failles de transformation — cette dorsale est large par endroits de plus de 2 000 km et s'élève en moyenne à 2 000 m au-dessus des plaines abyssales.

L'existence de tels reliefs montagneux a été reconnue à la fin du XIXe siècle dans l'Atlantique, et au début du XXe siècle dans le Pacifique. Elle n'a été mise en évidence dans l'océan Indien qu'à la veille de la Seconde Guerre mondiale.

Ce ne fut qu'en 1956 qu'Ewing et Heezen, constatant qu'une ligne d'enregistrement d'activité sismique coïncidait avec les indications plus ou moins précises de reliefs montagneux sur les cartes, émirent l'hypothèse que cette ligne sismique océanique suivait exactement la ligne de crête de la dorsale. La même carte permet donc de suivre le tracé des dorsales et des séismes dans l'océan mondial.

Cette hypothèse, vérifiée par tous les travaux océanographiques ultérieurs et l'étude de cette succession presque ininterrompue de systèmes d'élévations représentant plus d'un tiers de la surface des fonds océaniques, est un des événements les plus importants et les plus déterminants de l'évolution des sciences de la Terre au cours des vingt dernières années. Auparavant, toutes les théories portant sur l'histoire de la Terre et la constitution de l'écorce terrestre, étaient fondées sur l'étude exclusive des 29 % émergés de la surface du globe. Ewing et Heezen firent apparaître à l'évidence que le trait le plus important à la surface de la Terre ne se trouve pas sur les continents, mais bien au fond de l'océan. La dorsale médio-océanique ne laisse que quelques prolongements au sein même des continents, au nord-est de l'Afrique et en Sibérie notamment. Sur 97 % de sa longueur, la clef de l'explication des mouvements de l'écorce terrestre est cachée par une couche de plusieurs milliers de mètres d'eau. Le volcanisme qui lui est associé est très difficilement détectable depuis la surface de ce volume d'eau.

La dorsale présente à son sommet une particularité. Elle est entaillée, sur toute la longueur, par une étroite vallée, qui fut détectée sur des cartes séismiques transversales de la dorsale par l'œil acéré de Mary Tharp. Cette vallée est profonde en moyenne de 1 500 à 1 800 m et large de 20 à 50 km. Baptisée « rift » (de l'anglais déchirure, fissure, par analogie avec les grandes cassures qui entaillent les hauts plateaux de l'Est africain et ont permis la formation des vallées profondes où se trouvent les grands lacs), la dépression entaillant le sommet des dorsales médio-océaniques est désormais reconnue comme étant la plus grande structure active à la surface de la Terre.

L'étude des fonds océaniques, qui furent longtemps considérés comme une structure passive, simple réceptacle de débris où la seule évolution géologique était la sédimentation, allait confirmer que la Terre est la planète vivante du système solaire. L'exploration du fond des océans amorce de nos jours une véritable révolution des sciences de la Terre.

Les sédiments profonds

Pendant de nombreuses années, l'étude géologique des fonds marins a porté presque exclusivement sur l'analyse des sédiments et leur répartition topologique et géographique. Le fond des océans, pensait-on, ne connaît pas l'érosion, et se trouve donc lentement enseveli sous un dépôt de minuscules débris, organiques et minéraux, qui tombent continuellement de la surface. On avait pu calculer que, depuis l'origine supposée de la Terre, une épaisseur de 12 km de sédiments, provenant de l'érosion des continents, s'était accumulée dans les profondeurs marines. Agassiz, célèbre géologue et océanographe du XIXe siècle, écrivait : « La monotonie des fonds de l'océan n'est rompue que par les carcasses d'animaux morts qui proviennent de la surface. »

Les sédiments profonds sont soit organiques, formés de fragments d'organismes tels que coquilles d'animalcules calcaires et siliceux, matériaux organiques et phosphatés provenant de débris de Vertébrés, soit inorganiques (minéraux argileux, quartz et autres minéraux détritiques, produits volcaniques, nodules de manganèse, éléments traces). Ils peuvent être répartis en trois catégories :

— les particules pélagiques provenant de la surface des océans et dont la vitesse de dépôt varie en fonction de la taille;

— les particules transportées par les courants de fond ou les courants de turbidité : sables, particules terrigènes, organismes vivant à faible profondeur, entraînés par grands fonds;

— enfin, les dépôts de provenance locale, dérivés du bassin océanique lui-même au terme de processus très variés, qui peuvent être une réaction sous-marine entre l'eau de mer et le matériel volcanique, la migration et la reconstitution de matériaux dans les sédiments, le lessivage des roches exposées à l'air libre dans le cas des îles volcaniques.

Ces éléments constituent les sédiments qui s'accumulent par gravité en dépôts parallèles au fond de l'océan. Les sédiments d'origine continentale s'entassent sur le glacis dont ils comblent la base à la frontière de la plaine abyssale, constituant le talus. Sur les flancs des dorsales médio-océaniques et des guyots ou monts sous-marins, seules des particules fines en suspension peuvent se sédimenter.

D'une façon générale, les sédiments sur les plaines abyssales se composent d'une alternance de sédiments terrigènes et de dépôts pélagiques : argiles, cendre volcanique et boues siliceuses à Diatomées ou à Radiolaires. Les dépôts carbonatés y sont rares, les coquilles calcaires des organismes pélagiques et les squelettes de Poissons étant dissous avant d'atteindre des profondeurs supérieures à 4 000 ou 5 000 m. Les seules exceptions à cette règle de dissolution sont les dents de requin et les otolithes de baleine. Par grands fonds, dans les zones dépourvues d'apports terrigènes, on trouve surtout des sédiments argileux et siliceux, les *argiles rouges*. Ces sédiments d'origine détritique, dont le dépôt se fait au rythme de 1 millimètre par an, contiennent une association de kaolinite, de montmorillonite et d'illite provenant des zones d'érosion sous climat tropical, et l'association de chlorite et d'illite provenant des zones froides et tempérées.

Sur de grandes étendues des fonds de l'océan Pacifique et de l'océan Indien, il semble que les sédiments soient principalement formés à la suite de la dévitrification de verres volcaniques au cours d'un processus géochimique complexe. Il se forme alors de la montmorillonite et de la phillipsite, très communes dans l'océan Pacifique central où elles forment plus de 90 % des sédiments actuels.

Parmi les sédiments des grands fonds, dont l'origine vient également du sous-sol marin, et non de la surface de l'océan, les **nodules polymétalliques** présentent un très grand intérêt. Ce sont des concrétions riches en fer et en manganèse, qui contiennent aussi en proportions faibles du cuivre, du nickel, du cobalt et des métaux rares. Les formes de ces concrétions sont très variées. Ce sont des boules plus ou moins ellipsoïdales à surface lisse ou mamelonnée, des agglomérats de formes anguleuses, des croûtes recouvrant les roches ou même le fond sédimentaire. Le diamètre moyen des nodules est de 3 à 5 cm, mais on a remonté à la surface un encroûtement d'un poids de 850 kg. Les concrétions d'oxydes métalliques forment souvent des auréoles plus ou moins épaisses autour d'un noyau, qui peut être un fragment volcanique ou une boule d'argile indurée, voire même une dent de requin. Le mode de formation des nodules n'est pas encore connu avec certitude. On sait toutefois que les nodules les plus riches en minéraux tels que le nickel, le cuivre, le cobalt ne se trouvent qu'à de grandes profondeurs, notamment dans l'océan Pacifique central, dans des zones de fonds où la sédimentation est faible et parfois nulle. On les trouve à l'interface eau-sédiments. Il semble qu'ils disparaissent dans les sédiments.

La carte de la répartition mondiale des gisements profonds de ces nodules, présents dans toutes les mers, fait apparaître un certain nombre de régions où ils sont particulièrement abondants. Dans l'Atlantique Nord, on les trouve surtout au large de la Floride, sur des fonds caractérisés par une sédimentation du type des argiles rouges des grands fonds. Dans l'Atlantique Sud, les dépôts sont rares au large des côtes sud-américaines, et plus abondants à proximité de l'Afrique. Dans l'océan Indien, l'étude ne fait que commencer. D'importantes concentrations ont été reconnues dans le bassin de Madagascar et dans celui de Crozet. Le Pacifique, et notamment le Pacifique central, apparaît en l'état actuel des recherches comme l'océan le plus riche en gisements de nodules.

▼ ***Parmi les sédiments de grands fonds, dont l'origine vient du sous-sol marin, les* nodules polymétalliques *se révèlent d'un intérêt économique majeur : ici, un champ de nodules de dimensions variables.***

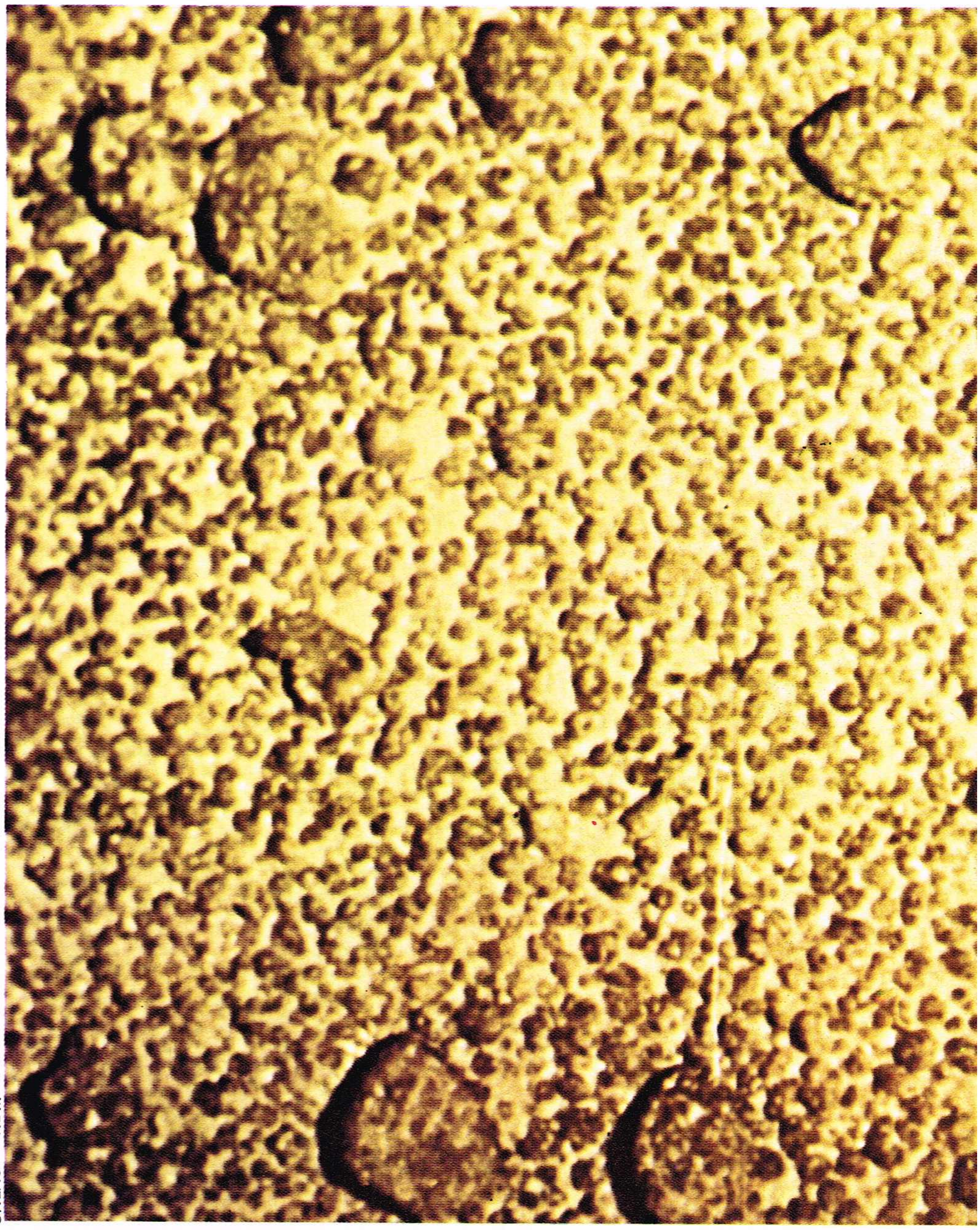

CNEXO - T.D.I.

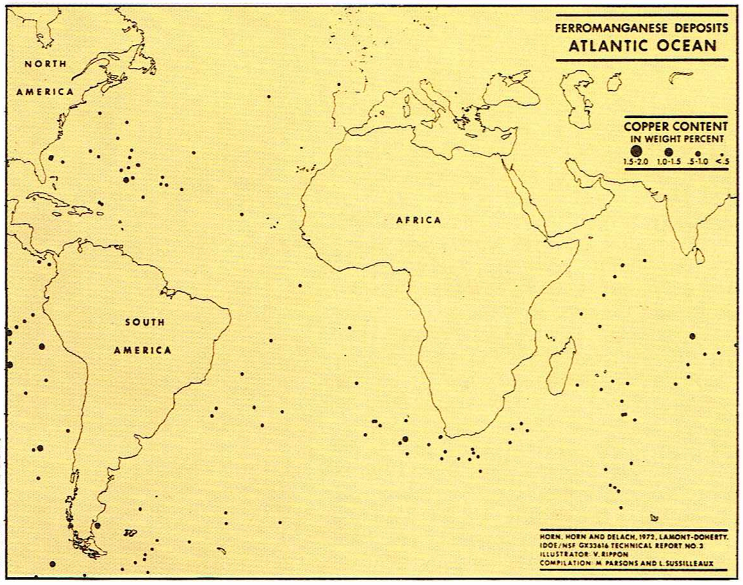

CNEXO - C.O.B.

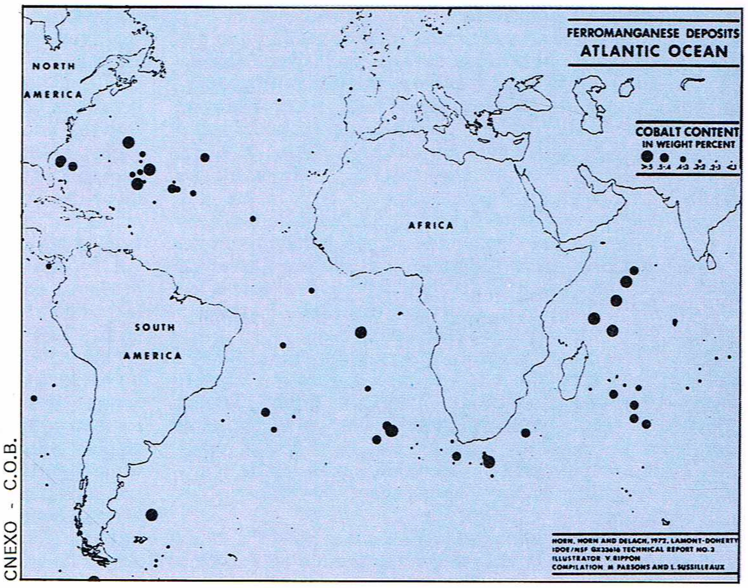

CNEXO - C.O.B.

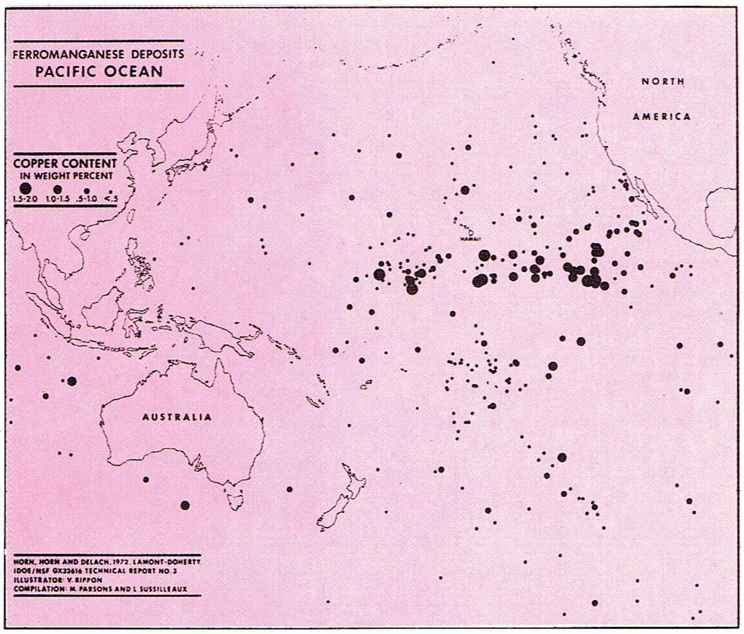

CNEXO - C.O.B.

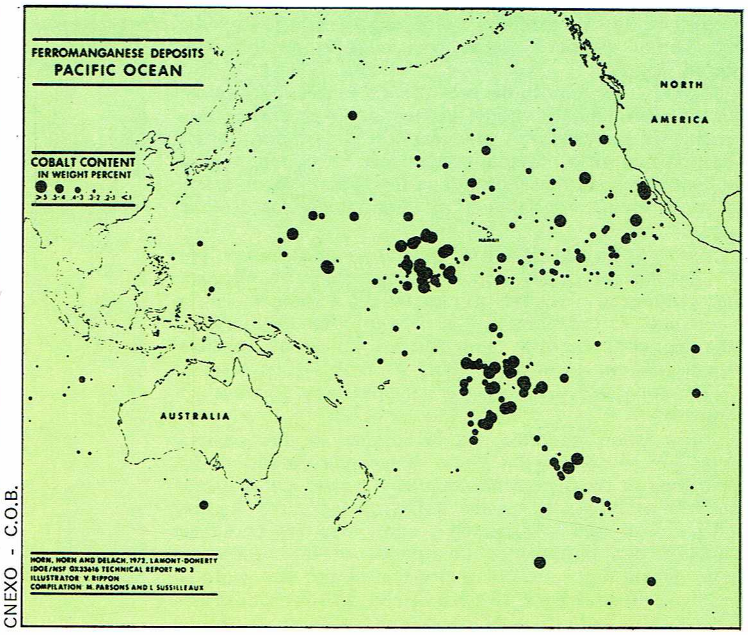

CNEXO - C.O.B.

▲ ***En haut, cartes de l'Atlantique montrant la répartition des principaux gisements identifiés de nodules polymétalliques : à gauche, en fonction de leur teneur en cuivre ; à droite, en fonction de leur teneur en cobalt. Ci-dessus, cartes du Pacifique montrant la répartition des principaux gisements de nodules : à gauche, en fonction de leur teneur en cuivre ; à droite, en fonction de leur teneur en cobalt.***

Du point de vue minéralogique, les nodules sont caractérisés par la rareté des phases cristallines. Il est possible d'y distinguer cependant des minéraux lourds d'origine détritique. On pense généralement que les oxydes métalliques contenus dans les nodules proviennent de l'érosion des continents, de l'altération sous-marine des roches volcaniques, du volcanisme sous-marin lui-même qui peut libérer des ions métalliques dans l'eau de mer, de la remobilisation enfin des ions métalliques dans des épaisseurs sédimentaires suivie d'une précipitation à la surface de ces épaisseurs. Il apparaît une corrélation entre la teneur en oxydes des nodules et celle des sédiments qui les environnent. Actuellement aucune hypothèse, si séduisante puisse-t-elle paraître, ne résout entièrement les questions posées par la formation des nodules.

On note enfin sur les grands fonds la présence de débris de **météorites,** qui sont évidemment plus abondants dans les zones profondes de très faible sédimentation. Ce sont les seuls sédiments dont l'origine soit extraterrestre. Une hypothèse intéressante, mais non encore prouvée, propose que leur taux de dépôt soit constant au cours du temps, ce qui permettrait de disposer d'éléments de référence pour la mesure de la vitesse générale de sédimentation. On avance, pour cette vitesse, des ordres de grandeur. Ainsi, les zones de dépôts de sédiments terrigènes ont des taux de sédimentation de l'ordre de 100 m par million d'années. Les zones de sédiments organiques ont une sédimentation de l'ordre de 10 m par million d'années, celles des argiles rouges et des nodules, une vitesse de l'ordre de 1 m par million d'années.

Un aspect particulier du processus de sédimentation dans les fonds océaniques est présenté par les *fosses océaniques,* et plus spécifiquement par les fosses associées à des arcs volcaniques insulaires, constituant des ensembles dits bassins marginaux, à la frontière de deux plaques de l'écorce terrestre, l'une de ces plaques plongeant sous l'autre (frontière de subduction). Ces fosses jouent le rôle de pièges à sédiments. Des épaisseurs sédimentaires considérables peuvent être accumulées, empilées, et constituer de véritables terrasses étagées à toutes les profondeurs de la fosse. Ces terrasses sont encore très peu connues, et les bassins marginaux dont elles font partie ne sont que délimités et pas encore explorés. Le moins mal connu est le bassin d'Anchorage, au large des côtes de l'Alaska. Suivant leur âge, ces bassins marginaux sont plus ou moins comblés et sont soumis à des forces géodynamiques qui peuvent soumettre les couches sédimentaires à de très fortes conditions de température et de pression.

L'étude des sédiments profonds met en évidence la dynamique des fonds océaniques

Dès sa première campagne d'étude à la mer, en 1947, au cours de laquelle il adapta à l'étude du sous-sol marin les techniques sismiques d'exploration mises au point

par l'industrie pétrolière, Ewing mit en cause la théorie des épaisseurs sédimentaires universellement importantes sur tous les fonds. Il mesura en effet que la couche de sédiments dépassait rarement l'épaisseur d'un kilomètre sur le fond des bassins océaniques, et qu'elle était très faible ou même inexistante sur la dorsale médio-océanique, au centre de l'Atlantique, où des couches volcaniques venaient partout à l'affleurement. Il fallait admettre soit que la théorie du taux universel de dépôt des sédiments était fausse, soit que les bassins océaniques et les dorsales étaient géologiquement très jeunes.

Pourtant, les « carottes » de vase que l'on prélevait sur les grands fonds, grâce à de longs tubes, révélaient que les taux de dépôts actuels étaient encore plus élevés que prévu. Bien plus, alors que chacun s'accordait à prédire que cette vase ne devait comprendre que de très fines particules capables de flotter sur de grandes distances en surface, ou d'être transportées par le vent, on trouvait de nombreux lits de sables semblables à ceux que produit l'action des vagues sur la côte.

L'équipe d'Ewing chercha à découvrir le processus naturel qui apportait ces lits de sables au milieu des bassins océaniques. Elle remarqua qu'on ne trouvait ces lits que dans les régions plates des plaines abyssales. Elle pensa trouver une hypothèse d'expansion de sédiments terrigènes avec l'existence des canyons sous-marins.

Avant la guerre, deux géologues américains, Shepard et Smith, avaient découvert que la pente continentale à l'est des États-Unis est entaillée par une multitude de gorges étroites qui ressemblent aux vallées découpées par les torrents à flanc de montagne. La plus importante de ces vallées se raccorde au tracé fossile que suivait le fleuve Hudson sur le plateau continental durant la dernière glaciation. Les levés topographiques montrèrent que le canyon de l'Hudson se prolongeait jusqu'au pied de la marge continentale, et au-delà, à des profondeurs dépassant 4 500 m. Ce canyon n'avait pu être creusé que par des courants de *turbidité*. Une eau dont la densité est accrue par les sédiments en suspension qu'elle contient forme en effet un courant turbide sur une pente. Ce courant peut atteindre, dans certaines conditions, des vitesses nécessaires pour creuser une vallée dans des roches dures et transporter des sédiments grossiers sur des centaines de kilomètres. La preuve de l'existence de ces courants de turbidité, véritables avalanches boueuses sous-marines agissant comme des niveleuses géantes, fut apportée par l'analyse des archives portant sur la rupture en 1929 de 12 câbles sous-marins au sud de Terre-Neuve. Des sections entières de câbles, certaines longues de 200 kilomètres, avaient été balayées au cours d'un tremblement de terre de grande magnitude. Un gigantesque flot de boue avait répandu des sédiments sur une surface de 100 000 km^2 sur une distance de 800 km. Le tremblement de terre avait entraîné un glissement de terrain qui avait provoqué un courant de turbidité. Ces courants prennent naissance sur le plateau continental, s'engouffrent dans des canyons qu'ils contribuent à creuser, s'amortissent progressivement sur le fond du bassin, se délestent des sédiments grossiers, puis des particules fines, et agissent comme des niveleurs des plaines abyssales, non par érosion, mais par un processus de dépôt.

Le cadre morphologique des fonds océaniques était donc modifié par les conséquences d'une importante activité séismique.

Séismicité et volcanisme

L'analyse des causes de rupture des câbles sous-marins allait par la suite permettre de mettre en évidence les forces dynamiques agissant dans ce cadre géomorphologique longtemps considéré comme un « cimetière » immobile. Car il apparut bientôt à Bruce Heezen que la plupart des coupures de câbles se produisaient soit sur les marges continentales, en bordure des océans, soit en plein milieu de la dorsale médio-atlantique. En reportant sur la carte la position des séismes qui étaient à l'origine de ces ruptures, il constata qu'ils semblaient, aux erreurs de mesure près, se produire au cœur de la vallée dont l'existence venait d'être découverte : il s'agissait du *Rift*.

A l'époque, en 1953, il n'existait que six sections topographiques continues au travers de la dorsale. Mary Tharp, la jeune cartographe qui travaillait pour Bruce Heezen, avait remarqué que, sur chaque section, la portion la plus élevée était entaillée par une dépression de 1 500 à 2 000 m de profondeur et de 30 à 40 km de large. En 1956, Ewing et Heezen n'hésitèrent pas à extrapoler, à partir de ces six sections, et à prédire qu'il devait exister une telle vallée tout au long de la ligne séismique décrite précédemment par Rothé, ligne qui se prolongeait à travers l'océan Indien jusque dans l'océan Pacifique sur une longueur totale de 65 000 km. Le Rift océanique allait être tenu pour la plus grande structure active à la surface de la Terre !

Heezen et Tharp n'étaient pas les premiers à découvrir l'existence d'un Rift au milieu de la dorsale. Dès avant la guerre, deux savants anglais, Wiseman et Sewell, avaient rapporté que la dorsale de Carlsberg, dans le nord-est de l'océan Indien, était entaillée par une vallée axiale qu'ils comparaient aux fameux Rifts africains dont nous avons parlé plus haut. Après la guerre, deux autres anglais, Hill et Swallow, avaient exploré en détail une portion de Rift dans l'océan Atlantique. Mais Ewing et Heezen étaient les premiers à avoir pressenti l'importance globale de leur découverte et à avoir osé proposer une pareille extrapolation. Il était dès lors démontré que

Vulcain - Explorer

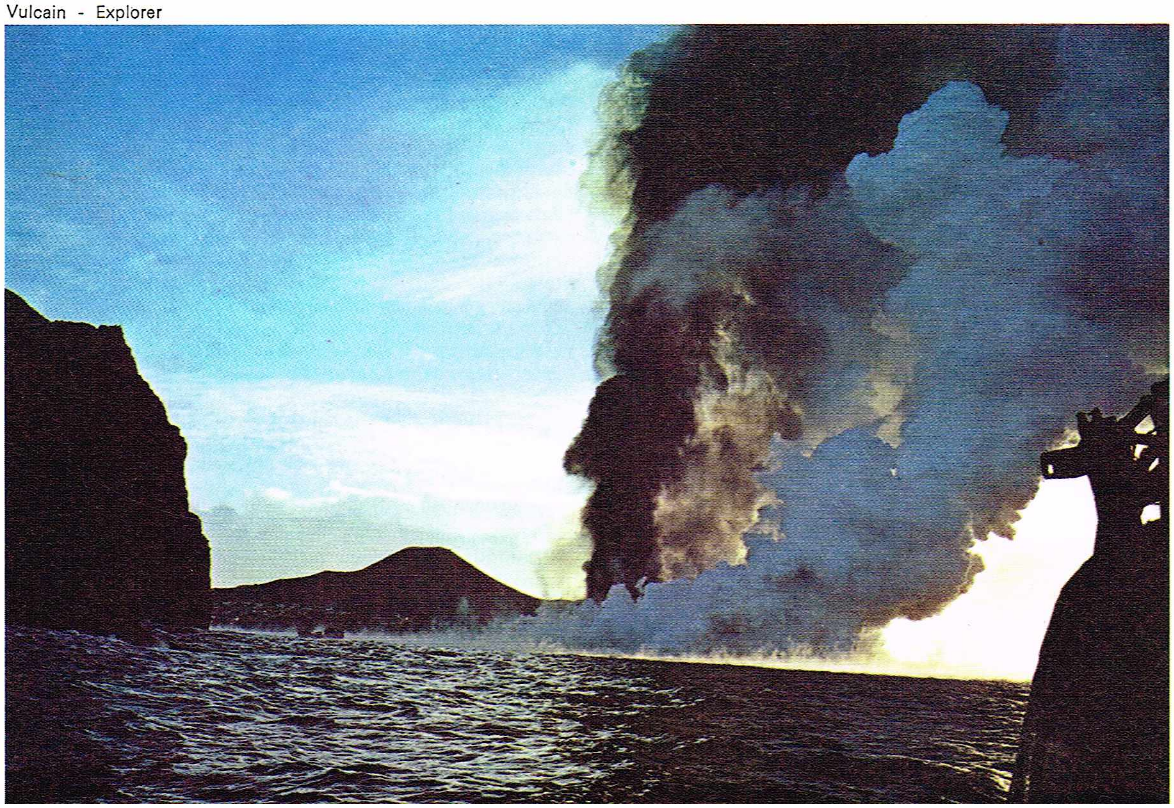

◀ *L'Islande, portion de la dorsale médio-atlantique, est le type même d'île traversée par un Rift ; c'est pourquoi elle est périodiquement le siège d'éruptions volcaniques violentes, telle celle de l'Helgafell qui détruisit, en janvier 1973, le village de Vestmannaeyjar.*

▶ *Deux planisphères illustrant la célèbre hypothèse d'Alfred Wegener sur la « dérive des continents » : en haut, la position actuelle des continents ; en bas, la distribution des océans et des continents il y a deux cents millions d'années.*

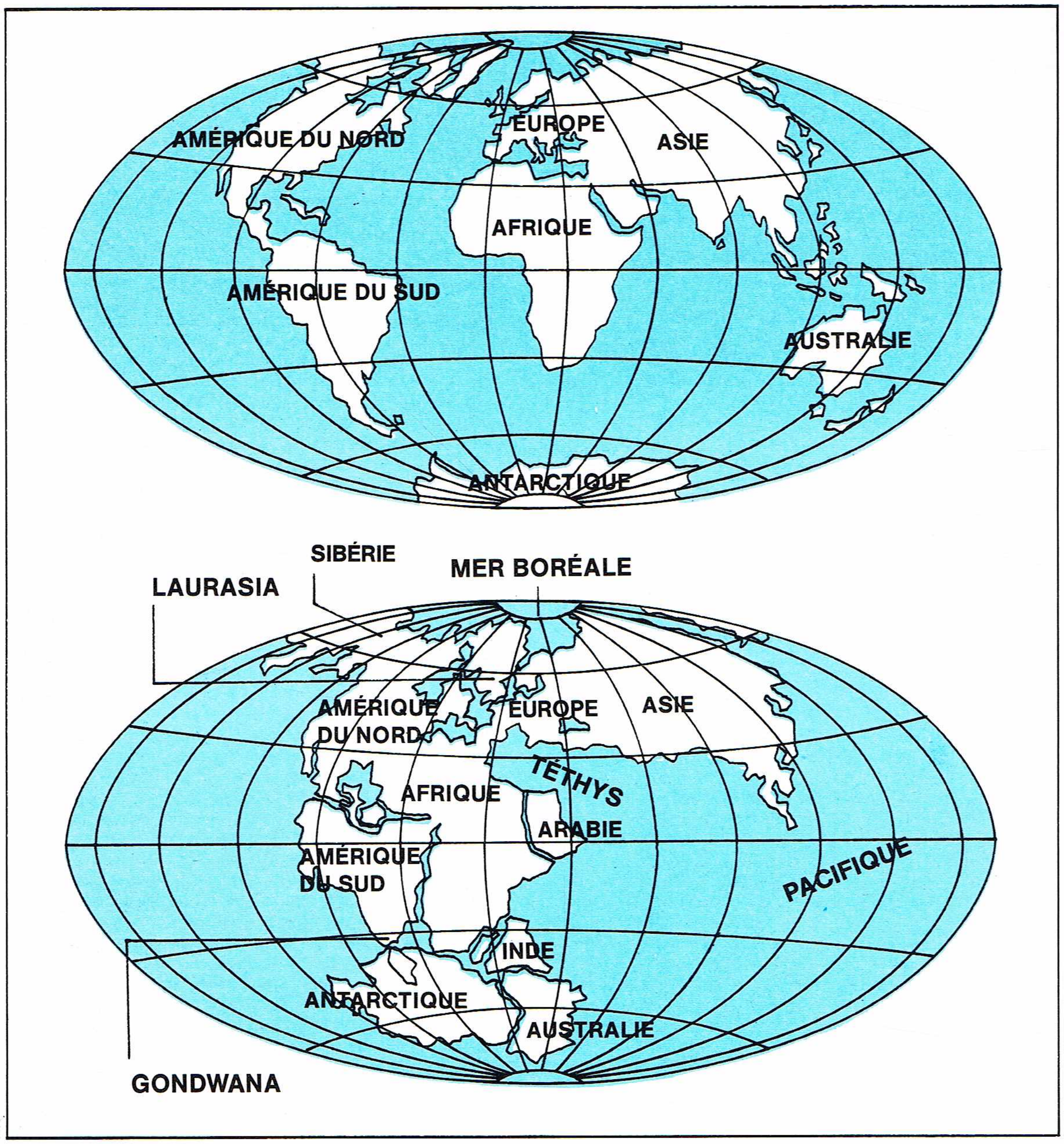

Richard Colin

l'océan n'est pas une structure passive, un simple réceptacle pour les débris continentaux, mais qu'il possède une activité propre le long d'une vallée dont les Rifts continentaux ne sont que les prolongements émergés.

La découverte du Rift arrivait à un moment crucial dans l'évolution des sciences de la Terre. L'hypothèse de la dérive des continents, qui avait paru moribonde, venait en effet d'être réanimée, et cette fois par des géophysiciens. Il s'agissait des paléomagnéticiens, ceux qui s'attachent à déterminer les directions fossiles du champ magnétique terrestre, conservées dans les roches volcaniques principalement. Lorsqu'une lave en fusion se refroidit, elle acquiert une aimantation dans la direction du champ magnétique de l'époque, chacun de ses cristaux magnétiques se comportant un peu comme une boussole. L'aimantation acquise lors du refroidissement est stable ; elle ne change plus au cours du temps. On peut mesurer cette aimantation et retrouver par conséquent la position qu'avait le pôle par rapport à la région où se trouvait la roche au moment où celle-ci s'est refroidie.

Dès le début du XX[e] siècle, dans son hypothèse célèbre de la *dérive des continents,* Alfred Wegener avait proposé l'idée que la distribution des océans et des continents sur le globe terrestre avait complètement changé au cours des deux cents derniers millions d'années. Au début de l'ère secondaire, une seule masse continentale, qu'il baptisa *Pangea,* aurait émergé de l'océan mondial emplissant les dépressions de l'écorce terrestre. L'océan Atlantique et l'océan Indien que nous connaissons de nos jours n'existaient pas. Un océan aujourd'hui disparu, la *Téthys,* s'insérait entre la partie nord de la masse émergée, ou *Laurasia* — qui aurait compris l'Amérique du Nord et l'Eurasie — et la partie sud de cette masse, ou *Gondwana,* qui aurait compris l'Amérique du Sud, l'Afrique, l'Inde, l'Australie et l'Antarctique. La *Téthys* se serait ouverte largement sur un océan Pacifique primitif plus étendu qu'il ne l'est aujourd'hui. A l'emplacement de la *Téthys,* la cicatrice de sa disparition en tant qu'océan est la chaîne de montagnes alpino-himalayennes formée par la rencontre de la *Laurasia* et du *Gondwana.* Les parties du continent originel, tels des radeaux, auraient dérivé depuis 200 millions d'années, et continueraient à dériver.

Pour séduisante qu'elle fût, cette théorie de la dérive des continents fut vivement combattue par le monde scientifique, qui classa le processus proposé par Wegener parmi les utopies.

Il fallut donc attendre les années 1960 pour que revînt au premier plan l'idée de Wegener, et que l'on assistât à un spectaculaire bouleversement de la connaissance de la structure et des mouvements de l'écorce de notre planète. Depuis les travaux de Hess, de Dietz, de Vine,

de Matthews, de Tuzo Wilson, la réalité d'ensemble du continent primitif *Pangea* ne fait plus de doute. En deux cents millions d'années, des morceaux de *Pangea,* telles l'Amérique et l'Afrique, ont été séparés par un océan, alors que d'autres sont entrés en collision et se sont soudés, par exemple l'Inde ou l'Arabie avec l'Asie. Une constatation importante s'impose : il n'y a eu ni création, ni destruction de continent. Au contraire, pendant cette même période, un océan primitif aurait disparu, et deux des principaux océans actuels seraient nés. Dans un laps de temps qui correspond au vingt-cinquième de l'histoire géologique de notre planète Terre, les océans peuvent donc naître, grandir, et mourir. *Le cadre géomorphologique des fonds océaniques que nous avons décrit est donc en perpétuelle modification.* Les fonds océaniques sont la partie vivante de la planète.

Vérification paléomagnétique

La méthode *paléomagnétique* permit une vérification particulièrement simple de l'hypothèse de Wegener. Si les continents ne se sont jamais déplacés à la surface de la Terre, la position du pôle Nord doit être restée la même pour tous les continents au cours des temps géologiques. Si par contre Wegener avait raison, la position du pôle au cours du temps devait varier de manière différente pour chaque continent, suivant les déplacements qu'il avait effectués. Or, c'est bien ce que constatèrent Blackett et son disciple Runcorn, de l'université de Manchester. L'intuition de Wegener était donc correcte : la position relative des continents avait changé au cours du temps. Mais par quel mécanisme ?

Bruce Heezen proposa l'hypothèse selon laquelle l'écorce terrestre serait brisée par des forces de distension internes. Par les fractures ainsi créées, les roches en fusion remontent progressivement et, à mesure que l'écartement se produit, emplissent les vides. Il y a donc progressivement création d'un océan dont l'âge diminue régulièrement en allant des marges continentales vers la dorsale. Pour Heezen, la dorsale médio-océanique est la partie la plus récente des océans, et c'est pourquoi l'épaisseur des sédiments augmente lorsque l'on se rapproche des continents.

Sous la direction d'Ewing notamment, les campagnes à la mer étudièrent systématiquement la dorsale. Les résultats furent précis. Le Rift se trouvait là où l'avaient placé Ewing et Heezen, sur la base de l'enregistrement des épicentres de tremblements de terre. Le Rift était bien le sommet de la dorsale médio-atlantique. L'hypothèse était vérifiée de manière aussi spectaculaire que rapide. Le Rift était devenu désormais pour les spécialistes des sciences de la Terre la caractéristique la plus remarquable de l'écorce de notre planète. On n'en savait pourtant pas grand-chose, et il n'était pas possible d'en dessiner une section précise à partir des enregistrements de sondeur obtenus depuis la surface. Il faudra attendre l'opération franco-américaine FAMOUS en 1973, et, en 1974, l'étude par submersibles d'une région du Rift choisie dans l'Atlantique au sud-ouest des Açores pour pouvoir en établir une cartographie précise et y découvrir les manifestations d'une intense activité volcanique.

Il était dès lors évident qu'il fallait s'attacher à l'étude de la dorsale médio-océanique et à celle du Rift si l'on voulait comprendre la structure des fonds océaniques. La révolution des sciences de la Terre vint des équipes de Cambridge, autour de Bullard, et de Princeton, autour de Hess, étudiant les résultats apportés par l'équipe du Lamont Laboratory autour d'Ewing.

Hess proposa en 1960 un nouveau modèle dynamique de la Terre. Il avait acquis la conviction que l'écorce océanique n'est qu'une pellicule altérée du *manteau* sous-jacent, alors que l'écorce continentale est différente de ce manteau. L'écorce continentale est indestructible, l'écorce océanique est éphémère. Il suffit de la faire rentrer au sein du manteau en fusion pour qu'elle retourne à son état primitif. Inversement, pour produire de la croûte océanique, il suffit de faire monter le manteau au fond des océans. Les deux structures fondamentales de cette évolution sont donc, d'après Hess, le Rift, où se forme la nouvelle écorce océanique à partir du manteau, et les fosses océaniques, où cette écorce se détruit en retournant au manteau. Les deux traits caractéristiques du cadre géomorphologique des fonds océaniques que nous avons présenté recevaient de Hess la reconnaissance de leurs fonctions respectives. Le mécanisme moteur propulsant l'écorce océanique de l'un à l'autre était celui des courants de convection dans les matières en fusion du manteau supérieur, courants qui joueraient le rôle d'énormes courroies de transmission venant affleurer l'écorce océanique. Selon Hess, tout se passerait comme si le fond des océans était un tapis roulant se déplaçant à partir du Rift. Le temps de parcours du tapis depuis le Rift jusqu'à la fosse où il disparaît serait de 200 à 400 millions d'années.

Le fond de l'Océan tout entier serait renouvelé tous les 300 ou 400 millions d'années. Il serait géologiquement éphémère. Les continents pourraient être déformés, fragmentés ou soudés l'un à l'autre, suivant le tapis sur lequel ils se trouvent encastrés, mais ils ne disparaîtraient jamais. Ils sont permanents. Il y a bien dérive des continents, comme le pensait Wegener, mais une dérive passive, le continent se déplaçant sur le dos des courants de convection internes.

Ainsi s'expliquent l'âge très faible des océans par rapport aux continents, la symétrie par rapport aux Rifts, la progression de la croûte océanique au fur et à mesure qu'on s'éloigne de ces Rifts. Les océans Atlantique, Indien et Arctique sont en cours d'expansion, avec écartement des continents de part et d'autre. L'océan Pacifique est en cours de rétrécissement, le fond océanique étant avalé dans les « mâchoires » des fosses qui l'entourent.

La preuve décisive allait venir de Cambridge. Vine s'intéressait plus particulièrement à la distribution des anomalies magnétiques. Il s'agit des petites variations dans le champ magnétique terrestre qui sont dues au fait que les roches possèdent une aimantation propre et sont donc à l'origine d'un faible champ magnétique qui s'ajoute au champ terrestre — exactement comme celui d'un petit aimant.

A l'époque, les géophysiciens anglais étaient convaincus de la réalité de la dérive des continents, et le mécanisme du renouvellement des fonds océaniques leur paraissait tout à fait vraisemblable. Les paléomagnéticiens leur avaient appris que la direction du champ magnétique terrestre s'est très souvent inversée au cours des temps géologiques. En quelques milliers d'années, le pôle Sud prend la polarité du pôle Nord et *vice versa.* Autrement dit, une boussole qui indique le nord de nos jours aurait indiqué le sud il y a 700 000 ans, lors de la dernière inversion. Vine avait vérifié qu'il existait sur la dorsale des volcans possédant une aimantation inverse. Avec Matthews, il en conclut que s'il y avait création de nouveaux fonds océaniques, il devait y avoir aussi création de bandes d'écorce océanique possédant alternativement une aimantation normale et une aimantation inverse. Le fond des océans doit donc être formé par une série de bandes parallèles et symétriques par rapport au Rift et dont l'aimantation est successivement normale et inverse. Si l'on connaît les dates des inversions du

▼ ***Un** magnétomètre, appareil permettant de calculer les variations du champ magnétique terrestre.*

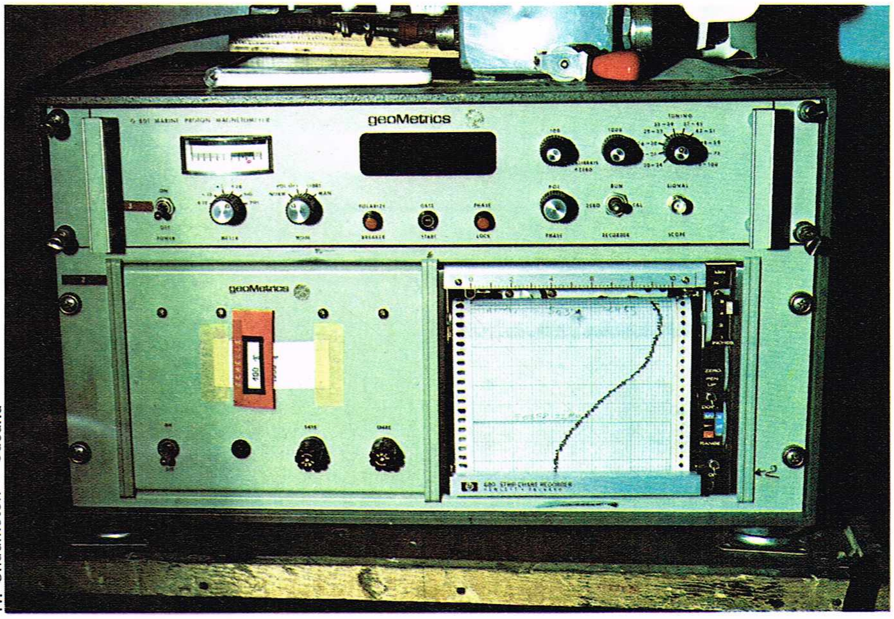

H. Chaumeton - Jacana

▶ Représentation schématique de la théorie de la tectonique des plaques montrant l'enfoncement des flancs d'une dorsale avec sa couverture sédimentaire (d'après Pautot et Le Pichon).

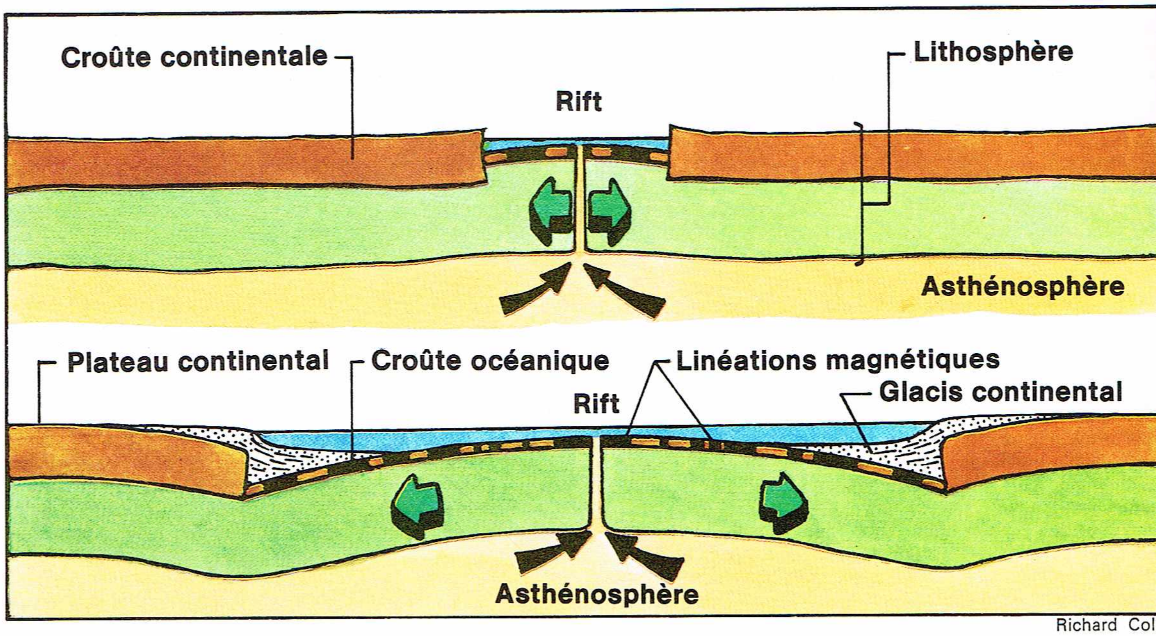

Richard Colin

▶ Page ci-contre, schémas montrant, selon la tectonique des plaques, différents modes de formation. En haut, rencontre de deux plaques, avec compression, puis glissement de l'une sous l'autre; il y a création d'une fosse océanique. *Au centre, collision de deux continents avec écrasement et bombement de la masse sédimentaire; il y a naissance d'une* chaîne de montagnes. *En bas, création de* failles transformantes, *grandes cassures transversales qui affectent les rides océaniques.*

champ magnétique, on peut également dater ces bandes en partant du Rift et en progressant vers l'est et vers l'ouest, c'est-à-dire vers les âges plus anciens. Il va de soi qu'on peut en déduire la vitesse de création du fond des océans à partir de l'axe initial.

L'hypothèse fournissait une clef facile à utiliser. Il suffisait de mesurer le champ magnétique en traînant un magnétomètre derrière un navire au-dessus des dorsales. La carte du fond des océans se couvrait progressivement d'un réseau de zébrures parallèles et symétriques par rapport au Rift. Les taux d'expansion avaient été mesurés tout le long du Rift et variaient entre 2 cm et 20 cm par an, soit 20 et 200 km par million d'années. On montrait que les parties les plus anciennes de la croûte océanique ne dépassaient nulle part 180 millions d'années, soit moins d'un vingtième de l'âge de la Terre.

On disposait enfin d'une hypothèse qualitative d'évolution des océans. Il restait à bâtir un modèle quantitatif de la dynamique terrestre, modèle capable d'expliquer en particulier la nature et la distribution de la séismicité sur le globe. Cette dernière pierre fut apportée à l'édifice dès l'année suivante avec la proposition de la *tectonique des plaques.*

La tectonique des plaques

C'est à Princeton, à Cambridge et au Lamont Laboratory qu'allait se préciser et se développer la théorie de la tectonique des plaques. Le modèle géométrique fut d'abord proposé par Morgan, puis précisé par Mac Kenzie, et enfin étendu à la surface de la Terre tout entière par Le Pichon.

Disposant maintenant d'un modèle quantitatif, il restait à y intégrer l'ensemble des données géologiques et géophysiques accumulées depuis près de 200 ans. L'équipe du Lamont, avec Isacks, Oliver et Sykes, ouvrit la voie à l'interprétation de la séismicité en fonction des mouvements entre plaques. Des géologues, et en particulier John Dewey à Cambridge, montrèrent comment on pouvait expliquer l'origine des montagnes, et le concept du *géosynclinal,* en fonction des régions de rapprochement entre deux plaques, et plus spécialement de deux plaques portant des morceaux de continent.

La théorie est fondée au départ sur la constatation de la différence fondamentale de nature entre, d'une part, les fonds océaniques, de l'autre, le socle continental.

L'écorce terrestre, de la surface de la planète jusqu'à une profondeur de 700 km à l'intérieur du globe, est en premier lieu constituée par le *manteau supérieur* composé de roches ultrabasiques de grande densité. Le basalte est un premier produit rocheux de la fusion partielle du manteau, à la profondeur de 100 km, en raison de l'augmentation des conditions de température et de pression.

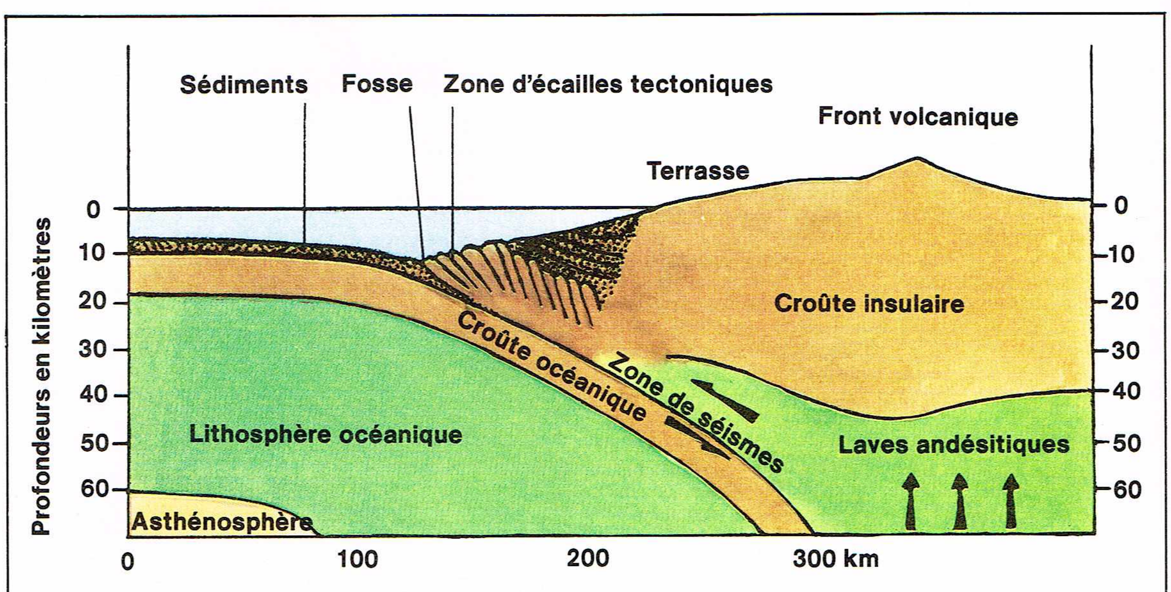

Richard Colin

▶ Représentation schématique du passage entre les deux types de croûte, quand une plaque océanique s'enfonce sous une plaque continentale.

Au-dessus de cette limite, les roches sont résistantes et relativement élastiques. Au-dessous, elles peuvent fluer sous l'effet de forces faibles. On considère donc, d'une façon très générale, que l'écorce de la planète est constituée d'une enveloppe externe indéformable, d'une épaisseur de 100 km, nommée *lithosphère,* qui repose sur une couche fluide sous-jacente, l'*asthénosphère.*

La lithosphère, plus légère, s'élève au-dessus de l'asthénosphère sous l'effet du phénomène dit d'*isostasie* qui préserve l'équilibre des masses au sein de la couche fluide. La différence moyenne de niveau de 5 km entre les fonds des océans et la surface émergée des continents est due à la légèreté relative de la lithosphère, ou « croûte continentale », par rapport à l'asthénosphère, ou « croûte océanique ».

Croûte continentale et croûte océanique sont de compositions différentes. Les roches formant la croûte continentale, épaisse de 40 à 50 km, sont plus acides que le manteau supérieur. Cette croûte est le produit d'un volcanisme et d'un plutonisme intenses au cours d'une très longue histoire géologique, qui peut être évaluée en centaines de millions d'années. La composition chimique de la croûte océanique, qui est beaucoup moins épaisse puisqu'elle n'atteint en moyenne que 6 km, est moins acide. La croûte est formée de roches basaltiques d'âge géologique récent, qui proviennent d'une fusion partielle du manteau.

A quel niveau se fait le passage entre les deux types de croûte? Il est tentant de choisir comme limite la profondeur de 2 000 m, qui correspond à la moitié de l'élévation du continent moyen au-dessus du bassin océanique moyen. La question de la nature de la transition entre la croûte continentale et la croûte océanique est très complexe et fait notamment l'objet d'un programme international de forages profonds, IPOD (International Phase of Ocean Drilling), à partir du navire américain *Glomar Challenger*. A ce programme lancé par les États-Unis participent l'Union soviétique, le Japon, la Grande-Bretagne et la France. Nous retrouvons là la zone de largeur variable entre continent et bassin océanique, que nous avons présentée comme la *marge continentale.*

La différence de nature entre structures continentales et structures océaniques, les possibilités de mouvement des parties résistantes de la lithosphère sur la couche fluide du manteau permettent de répondre aux questions posées sur les forces agissant dans les profondeurs océaniques.

Si l'on considère en effet une croûte lithosphérique continentale soumise à des forces d'extension supérieures à la rupture, on assistera dans un premier temps à la création d'un réseau de fractures.

Accrétion

Premier stade : un réseau de fractures d'extension se développe. Par ces fractures, le matériau de l'asthénosphère remonte progressivement, au fur et à mesure que l'écartement se produit. Au cours de son ascension, la pression diminue de plus en plus, et une fusion partielle est à l'origine d'un volcanisme basique qui s'infiltre jusqu'en surface. Le réchauffement par la base de la lithosphère se produit sur une grande largeur. Celle-ci s'amincit par transformation de sa partie inférieure en matériau asthénosphérique, et il en résulte un bombement de la surface, du fait de la densité moyenne plus faible due à la température moyenne plus élevée. Ce bombement a une amplitude de 1 à 2 km et une largeur de quelques centaines de kilomètres.

Par ailleurs, les fractures superficielles tendent à se localiser dans une zone axiale relativement étroite. Elles créent, par failles normales antithétiques, un fossé d'effondrement (graben) où les épanchements volcaniques (en général des basaltes alcalins) s'intercalent avec les produits grossiers provenant de l'érosion des flancs adjacents.

Si l'extension se poursuit, la plaque lithosphérique finit par se séparer en deux plaques bien distinctes. Le stade du Rift continental bien développé, comme les Rifts africains, est dépassé. On entre dans celui du Rift océanique. C'est souvent à ce stade que se produisent les dépôts de sédiments évaporitiques dans le Rift qui s'approfondit; le matériau asthénosphérique remonte alors entre les deux plaques ainsi créées. Une partie du basalte produit par fusion partielle atteint la surface, où il forme une croûte de type océanique de 5 à 6 km

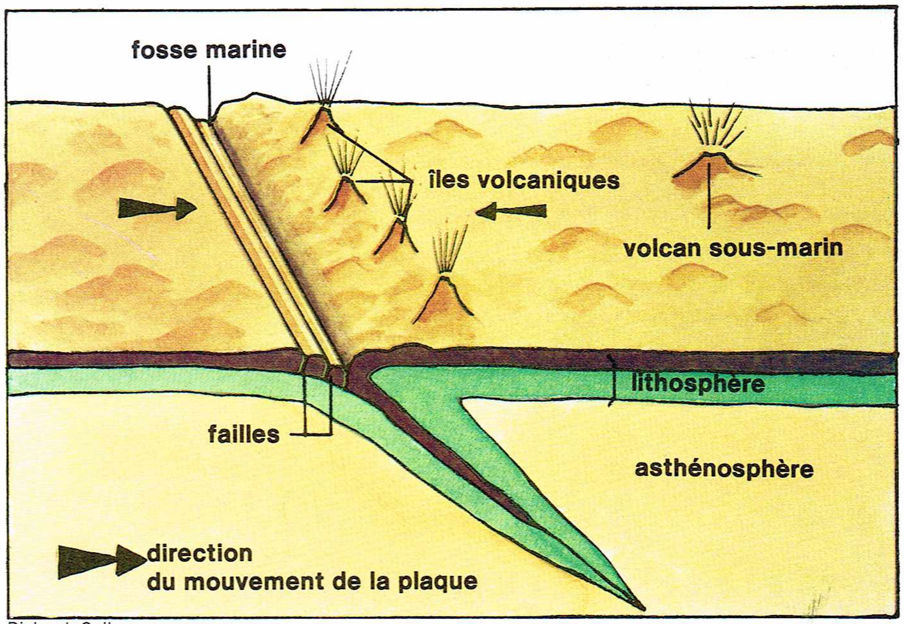

Richard Colin

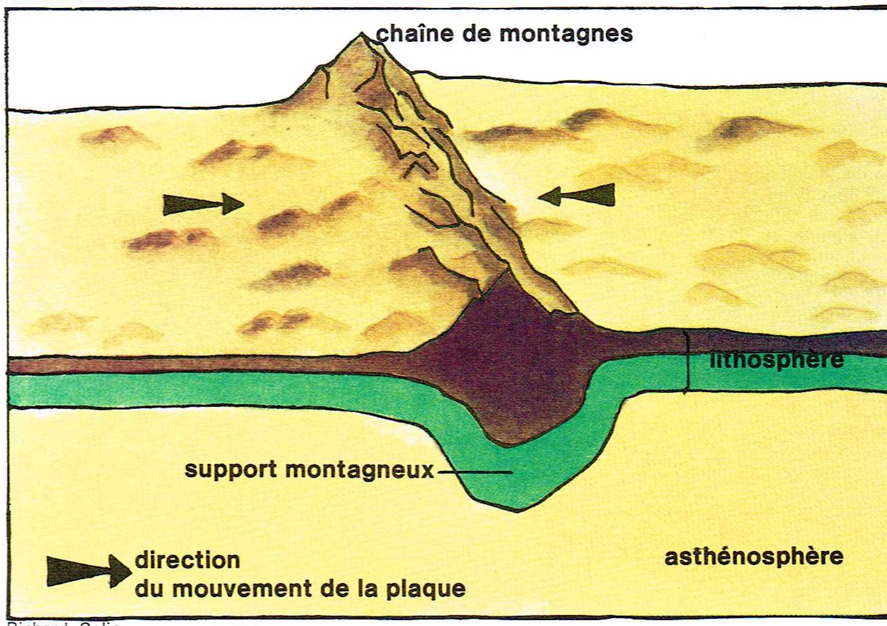

Richard Colin

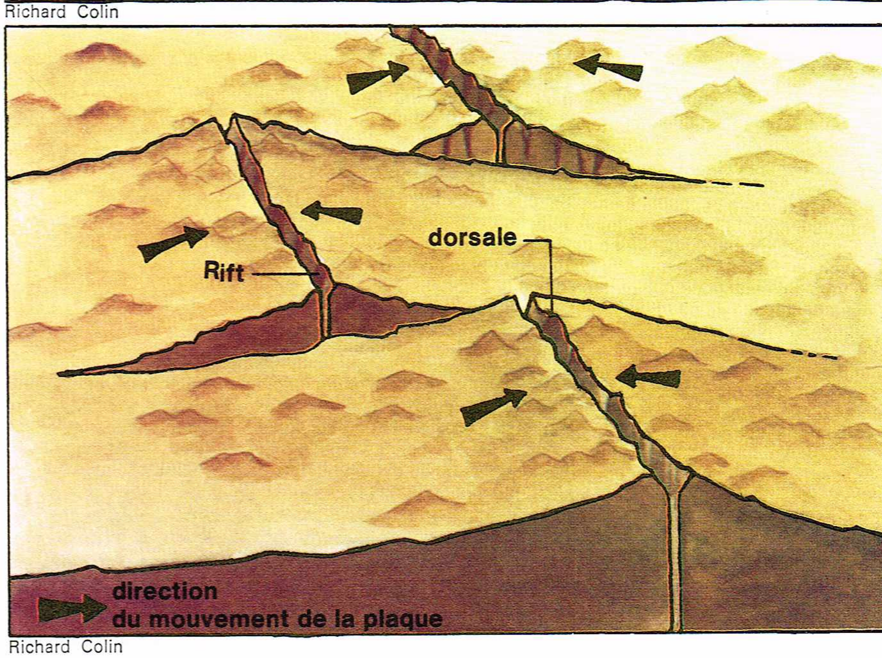

Richard Colin

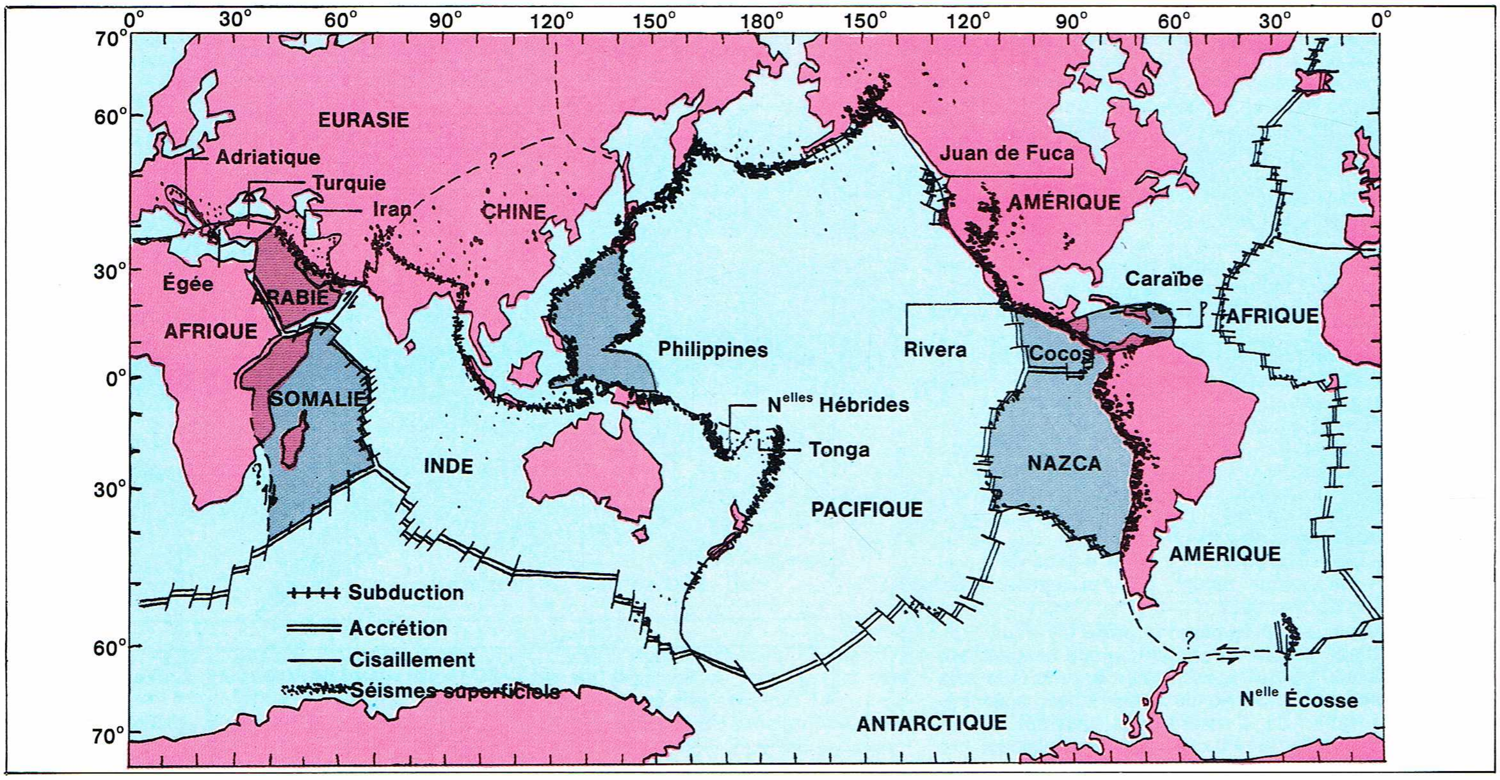

Richard Colin

▲ ***Modèle cinématique, calculé pour douze plaques : ce modèle permet de coordonner la sismicité globale et la distribution du volcanisme des basaltes le long des lignes de Rift (d'après Le Pichon).***

d'épaisseur. En se refroidissant, la croûte océanique nouvellement formée et l'asthénosphère sous-jacente trouvent progressivement leur niveau d'équilibre hydrostatique à environ 5 km sous le niveau continental.

On voit que ces processus sont dominés par les phénomènes thermiques. Le matériau asthénosphérique remonte sans cesse dans la zone d'injection. En se refroidissant, il acquiert les propriétés physiques de rigidité de la lithosphère adjacente. Il y a accrétion de nouvelle lithosphère océanique à chacune des plaques. Cette accrétion est symétrique par rapport à la zone d'injection, le refroidissement s'effectuant de manière identique de part et d'autre.

La lithosphère océanique est donc formée par un processus d'accrétion symétrique par rapport à la zone d'injection, appelée frontière d'accrétion, qui n'est autre que le Rift de la dorsale médio-océanique.

Dans la zone d'accrétion, l'asthénosphère remonte jusqu'en surface : la température moyenne sur les premiers 100 km d'épaisseur est très élevée dans cette zone et comparable à celle de l'asthénosphère (soit plus de 1 000 °C). En conséquence, la densité moyenne est faible, et la profondeur dans la zone d'accrétion se situe entre 2,5 et 3 km au lieu de 5 ou 6 km. Tout se passe d'un point de vue physique comme si l'on avait affaire à l'évolution thermique d'une plaque très épaisse, portée à température uniforme, et soumise à une perte de chaleur à travers sa frontière supérieure maintenue à une température voisine de 0 °C. Ce refroidissement suit une loi telle qu'il varie à peu près comme l'inverse de la racine carrée du temps. L'épaisseur de la lithosphère et sa densité moyenne augmentent donc aussi comme la racine carrée du temps, ce qui contrôle l'évolution de la profondeur de sa surface. Puisque la lithosphère peut être considérée comme flottant sur l'asthénosphère, la profondeur de sa surface ne dépend que de son âge. Une portion d'océan est donc d'autant plus profonde qu'elle est âgée. Mais, si l'augmentation de profondeur est très rapide dans les premiers millions d'années (plus de 100 m par million d'années), elle devient de plus en plus faible avec l'âge et est difficile à percevoir au-delà de 150 millions d'années.

Il y a donc approfondissement symétrique de la surface de la croûte océanique depuis l'axe du Rift jusqu'aux marges continentales. La partie la plus récente (quelques dizaines de millions d'années) a la forme d'un triangle isocèle très aplati, dont le sommet est à 2,5-3 km de profondeur, et dont la largeur est de plusieurs centaines de kilomètres. C'est la *dorsale médio-océanique*. La morphologie est celle d'une province volcanique, modifiée secondairement par une tectonique d'extension dans la zone axiale.

Subduction

Le phénomène d'accrétion à partir d'une frontière de portions de croûte océanique qui s'écartent caractérise la genèse et l'évolution d'un océan du type de l'océan Atlantique actuel. Or on a vu précédemment que, si depuis deux cents millions d'années l'océan Atlantique et l'océan Indien s'étaient développés, par contre, la *Téthys* avait complètement disparu, et l'océan Pacifique avait considérablement rétréci et changé de configuration. Le processus qui fait disparaître la croûte océanique, prévu par Hess, est appelé communément *subduction*.

La composition chimique moyenne de la lithosphère océanique est identique à celle de l'asthénosphère sous-jacente. Seules ses propriétés physiques l'en différencient nettement. Au cours de son refroidissement, la lithosphère s'alourdit progressivement. L'augmentation de densité de la lithosphère océanique par rapport à l'asthénosphère accentue l'instabilité gravitationnelle de ce système dans lequel une « plaque » flotte sur un « fluide » moins dense qu'elle. Il suffit donc de créer une cassure au sein d'une lithosphère océanique déjà âgée, et donc dense, pour que celle-ci puisse plonger au sein de l'asthénosphère et y perdre progressivement, en se réchauffant, son identité physique, c'est-à-dire sa rigidité et son « indéformabilité ».

Les *fosses* océaniques, dont la profondeur peut atteindre 11 km, et qui bordent principalement l'océan Pacifique, sont l'expression superficielle de cette zone de subduction le long de laquelle une plaque lithosphérique océanique se découple de la plaque adjacente et s'enfonce sous l'autre plaque lithosphérique. Dans la zone de subduction des Kouriles, par exemple, une portion de croûte océanique s'enfonce sous l'arc insulaire de celles-ci suivant un plan dont la pente augmente progressivement avec la profondeur. Il lui faudra, une fois retournée dans l'asthénosphère, une période de 10 à 20 millions d'années pour perdre son identité physique par réchauffement et fusion. L'enfoncement a pour conséquence directe la formation d'une zone de frottement entre les deux portions de croûte, zone d'intense activité volcanique où se produisent de très forts séismes de chevauchement chaque fois que les portions bougent l'une par rapport à l'autre. La subduction est un processus très efficace de disparition en un temps géologiquement

court d'importantes surfaces de fonds océaniques. Les taux de subduction atteignent 10 cm par an, soit 100 km par million d'années.

A l'heure actuelle, environ 2,6 km² de surface de fonds océaniques disparaissent tous les ans, surface équivalente à celle qui est produite à l'axe des dorsales si l'on admet que la Terre garde une surface constante. On voit qu'au taux actuel, 520 millions de km² peuvent être détruits en deux cents millions d'années, soit près du double de la surface des fonds océaniques actuels. Il y a un renouvellement constant des fonds océaniques, qui sont créés à l'axe des dorsales, s'en écartant symétriquement pour finalement plonger dans les zones de subduction, le long des fosses océaniques. On a comparé ce processus à celui d'un tapis roulant dont la partie montante est le Rift et la partie descendante la fosse de subduction. Ce renouvellement se produit même dans un océan qui se rétrécit, comme l'océan Pacifique. Cela aboutit au paradoxe que l'âge moyen du fond de l'océan Pacifique n'est pas supérieur à celui de l'océan Atlantique ou Indien : il est voisin de 50 à 70 millions d'années.

Ce renouvellement des fonds océaniques, « sea floor spreading » pour les Anglo-Saxons, est ainsi la caractéristique principale qui permet d'expliquer la structure et les mouvements de l'écorce de notre planète. La « tectonique des plaques » est fondée sur cette constatation fondamentale des possibilités de glissement de la lithosphère indéformable sur l'asthénosphère.

Il n'y a pas nécessairement couplage entre les mouvements de l'asthénosphère et ceux de la lithosphère. A la limite, on peut très bien envisager que le mouvement soit tel que la lithosphère aille dans un sens contraire à celui de l'asthénosphère; il suffit pour cela que la lithosphère se meuve d'elle-même, par exemple entraînée par son propre poids, puisqu'elle est plus lourde que l'asthénosphère sous-jacente. L'enveloppe lithosphérique n'est pas d'un seul tenant. C'est une mosaïque de *plaques* lithosphériques en mouvement les unes par rapport aux autres. Une plaque peut donc être limitée par trois types de frontières. S'il y a écartement, l'asthénosphère remonte, amorçant le processus d'accrétion de nouvelle lithosphère : il s'agit d'une frontière d'accrétion. S'il y a rapprochement et donc perte de surface, une des plaques est chevauchée le long d'une zone de subduction et s'enfonce dans le manteau, où elle perd son identité physique. Enfin, s'il n'y a ni création, ni destruction de surface, les deux plaques coulissent l'une contre l'autre le long d'une faille de cisaillement appelée faille transformante.

Dans un tel système, on ne peut considérer les frontières de plaques comme fixes par rapport à l'asthénosphère, ou à plus forte raison comme formant un système indéformable. Ainsi, la plaque africaine, qui, au début du Mésozoïque, ne comprenait que le continent africain actuel, s'est progressivement agrandie par accrétion de lithosphère océanique sur tout son périmètre, la portion nord exceptée. Cela veut dire que le périmètre formé par la frontière d'accrétion n'a cessé de croître, et donc que la dorsale dans l'océan Indien s'est écartée progressivement de la dorsale dans l'océan Atlantique.

Le problème est ainsi défini comme la cinématique d'un petit nombre de plaques se déplaçant l'une par rapport à l'autre sur une sphère. C'est un problème relativement aisé à résoudre et dont la solution fut proposée pour la première fois par Jason Morgan, en 1967. Sur une sphère, le déplacement d'une portion de calotte sphérique indéformable ne peut être qu'une *rotation,* comme on peut le vérifier aisément sur un globe. La rotation se fait par rapport à un *axe* de rotation qui est un diamètre de la sphère. Le point où cet axe de rotation perce la sphère est appelé pôle de rotation eulérien. La plaque pivote sur elle-même autour de ce point. La plaque étant indéformable, la vitesse angulaire de rotation par rapport à l'axe est la même en tout point de la plaque. La vitesse linéaire croît avec la distance au pôle eulérien de rotation, comme le sinus de cette distance exprimée en degrés, pour atteindre un maximum à l'équateur eulérien de rotation. La vitesse redécroît ensuite jusqu'à l'autre pôle eulérien de rotation, à l'antipode du premier, où elle est nulle à nouveau. Par ailleurs, la trajectoire d'un point quelconque de la plaque est un petit cercle ayant pour axe l'axe eulérien de rotation. Ainsi, supposons que cet axe de rotation soit l'axe géographique N.-S. ;

U.S.I.S.

▲ ***Photographie des monts de la péninsule du Sinaï prise depuis Apollo 7 : à gauche de la péninsule, le golfe de Suez ; à droite, le golfe d'Akaba ; au premier plan, la mer Rouge qui, il y a 20 millions d'années, fut ouverte par le détachement de l'Arabie et de l'Afrique.***

les trajectoires sont alors les parallèles, et la vitesse linéaire est maximale à l'équateur. En général, bien sûr, l'axe de rotation d'une plaque par rapport à une autre n'est pas l'axe de rotation de la Terre.

Cette règle géométrique simple permet de définir entièrement le mouvement d'une plaque par rapport à la plaque adjacente, connaissant l'axe (ou le pôle) eulérien de rotation et la vitesse angulaire. Si l'on prend par exemple une frontière d'accrétion entre deux plaques, la plaque africaine et la plaque américaine, et si les plaques sont indéformables, le taux d'accrétion ou d'expansion doit varier suivant la loi sinusoïdale définie plus haut par rapport au pôle eulérien. Par ailleurs, la direction d'expansion, en tout point de la frontière d'accrétion, matérialisée par une faille transformante, est la tangente à un petit cercle centré sur l'axe eulérien. En conséquence, les grands cercles orthogonaux à cette direction d'expansion doivent se recouper en un point qui est le pôle eulérien de rotation. Morgan vérifia cette loi dans le cas de l'expansion qui se produit à la frontière d'accrétion entre les plaques africaine et américaine, prouvant ainsi que cette accrétion se faisait bien entre plaques indéformables.

Depuis, cette loi a été vérifiée sur l'ensemble des dorsales actives. Dès 1968, elle permit à Xavier Le Pichon d'obtenir une image cinématique globale des vitesses de déplacement relatif entre plaques. En effet, connaissant les déplacements le long des frontières d'accrétion, on peut, en faisant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, en déduire de proche en proche le déplacement le long des zones de subduction. Il s'agit de déplacements relatifs, c'est-à-dire des déplacements entre plaques adjacentes.

On peut noter que l'océan Atlantique a été créé par la séparation de trois plaques principales. Il y a d'une part écartement entre la plaque africaine et la plaque américaine, d'autre part écartement entre la plaque américaine et la plaque eurasienne. Les écartements, depuis deux cents millions d'années, ont été tels qu'ils ont engendré une fermeture progressive de la Téthys, située antérieurement entre la plaque africaine et la plaque eurasienne. De même, l'océan Indien a été créé par l'écartement entre trois plaques principales : d'une part, la plaque indienne par rapport à la plaque antarctique, et d'autre part, la plaque africaine par rapport à la même plaque antarctique. La Théthys a disparu dans la région située au nord de l'Arabie et de l'Inde. Il y a seulement 20 millions d'années, l'Arabie s'est détachée de l'Afrique,

▶ *Reproduction perspective du fond de la vallée centrale du Rift.*

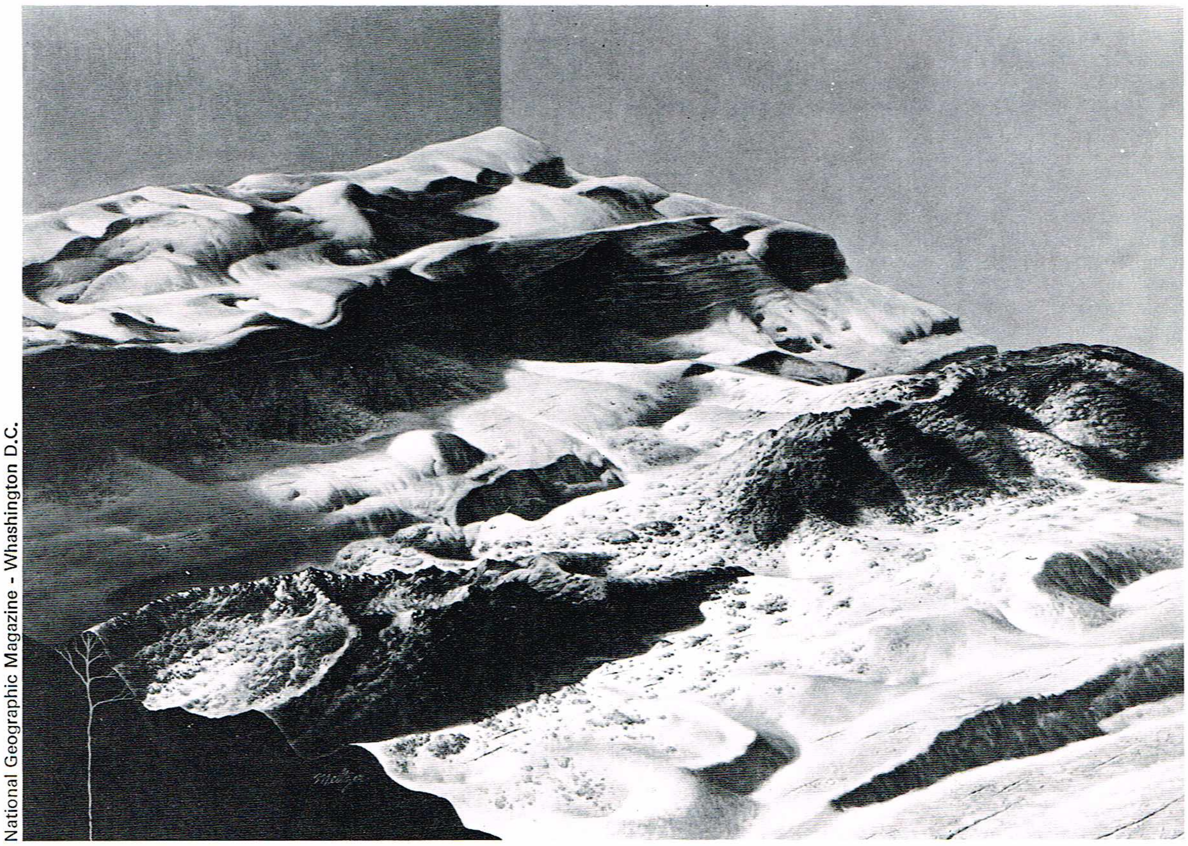

National Geographic Magazine - Whashington D.C.

ouvrant la mer Rouge. Une plaque est en train de se détacher de l'Est africain, le long des Rifts.

L'océan Pacifique est couvert sur la plus grande partie de sa surface par la seule grande plaque qui soit entièrement océanique : la plaque Pacifique. Cette plaque s'enfonce dans l'asthénosphère à des taux de l'ordre de 8 à 10 cm/an le long de sa bordure occidentale, en un système très complexe de zones de subduction et de bassins marginaux. Elle se renouvelle par accrétion le long de sa frontière avec la plaque antarctique et avec deux plaques subsidiaires, les plaques Nazca et Cocos, qui, toutes deux, s'enfoncent le long de zones de subduction au pied du continent américain.

Jeunesse des fonds océaniques

En raison de leur renouvellement, les fonds océaniques sont, on l'a vu, beaucoup plus jeunes que les continents. Les échantillons géologiques les plus anciens prélevés sur ces fonds sont âgés de 160 millions d'années, alors que la planète a plus de 4 milliards d'années. Un océan disparu a laissé une partie de ses fonds dans les blocs continentaux actuels sous forme de chaînes de montagnes, alors que l'autre partie a été réabsorbée dans le manteau en fusion. De la connaissance très récente des fonds marins, de la découverte du « cycle de vie » des océans, nous retirons les éléments qui nous permettent progressivement de comprendre notre planète.

Si l'on a fait d'immenses progrès dans la conception d'ensemble de la dynamique de la Terre, dans la synthèse générale, il reste encore de très nombreuses inconnues, en particulier tout ce qui touche à la constitution interne de la plaque. Car il est impossible à l'observateur d'obtenir des informations sur la partie interne de la plaque en restant à sa surface. Cela est d'autant plus vrai, en ce qui concerne la Terre, que les plaques ont une épaisseur moyenne de 75 km et qu'il est donc tout à fait impossible d'espérer y faire pénétrer un trépan de forage à une profondeur suffisante.

Il existe toutefois une possibilité : étudier les Rifts. Le long des Rifts, en effet, l'observateur peut assister à la formation de la plaque, encore très mince à cet endroit et qui laisse apercevoir la couche « fluide » sous-jacente.

Entre 1967 et 1973, l'essentiel des efforts avait été consacré à la datation de la croûte océanique, à la surface de la plaque. Mais on ne savait toujours pas ce que l'on datait, quelle était la nature de cette croûte océanique et comment elle se formait. On en savait encore moins sur la constitution de la partie profonde de la plaque et sur la couche « fluide ». Pour progresser, il fallait étudier le Rift, qui est une véritable *fenêtre* ouverte sur les couches profondes, mais à 3 000 m sous la surface de l'Océan.

Pour démêler l'écheveau complexe des phénomènes qui s'y produisent sur une largeur totale qui ne dépasse pas quelques kilomètres, il fallait disposer d'une nouvelle technologie permettant d'obtenir une précision à l'échelle du mètre ou de la dizaine de mètres — et non plus du kilomètre comme c'était le cas jusqu'alors. Tel a été le but de l'opération FAMOUS : obtenir les données nécessaires à la compréhension d'une portion de Rift, au moyen d'une étude détaillée utilisant une technologie avancée faisant intervenir des submersibles ainsi que des navires de surface et des appareils remorqués au-dessus du fond. Il s'agissait d'éliminer l'effet d'écran de l'Océan et de permettre l'emploi de méthodes d'observation géologique telles qu'elles sont utilisées de manière classique sur le continent.

Opération FAMOUS

Cette opération a ouvert une nouvelle ère de l'exploration des océans. Jusqu'alors, les océanologues observaient les fonds à travers un écran d'eau déformant qui empêchait de détailler et de comprendre des phénomènes à une échelle inférieure à celle du kilomètre. Pour aborder une vérification géologique de la théorie du renouvellement des fonds océaniques, il fallait étudier les « détails » du fond de l'océan avec une précision de l'ordre de la dizaine de mètres. A cette fin, des chercheurs américains et des chercheurs français mirent au point une opération scientifique internationale d'étude d'une partie représentative du Rift médio-océanique, dans laquelle il serait possible, avec la technologie appropriée, de chercher à déterminer les processus conduisant à la formation de lithosphère nouvelle à partir de l'asthénosphère. Français et Américains unirent leurs efforts pour la réalisation de l'opération FAMOUS (French American Mid-Oceanic Undersea Survey).

L'opération fut conçue au cours de l'été 1971. Elle s'est inscrite naturellement dans l'Accord de coopération océanologique franco-américain, animé du côté améri-

Claude Rives - Marina - Cedri

◀ *Le bathyscaphe* **Archimède** *et son navire d'appui, le* **Marcel Le Bihan,** *de la Marine nationale.*

cain par la National Oceanic and Atmospheric Administration (N. O. A. A.) et du côté français par le Centre national pour l'exploitation des océans (CNEXO).

Le projet fut établi, dans ses grandes lignes, en décembre 1971, au cours d'une réunion à la Woods Hole Oceanographic Institution, aux États-Unis. L'objectif fut clairement défini : utiliser des submersibles français et américains pour observer, photographier, prélever des échantillons et effectuer diverses mesures, dans le fond de la vallée centrale de la dorsale médio-atlantique, ainsi que dans une ou deux failles transformantes perpendiculaires à l'axe de cette vallée. Le programme fut établi par les scientifiques américains et français afin d'identifier les phénomènes qui se passent à la frontière d'une plaque en voie de formation, les modalités de mise en place de nouvelle croûte océanique, et les formes des mouvements tectoniques affectant le bord d'une plaque.

Une portion longue de 40 km fut choisie sur le Rift médio-atlantique, délimitée par deux failles transformantes, à 700 km au sud-ouest des Açores. Ce choix fut motivé par la représentativité de la morphologie d'après les renseignements obtenus depuis la surface, par la bonne définition des alignements magnétiques, et enfin par des considérations logistiques telles que la proximité des ports des Açores comme bases et les bonnes conditions météorologiques, en été, dans la zone considérée.

Les questions que l'on voulait résoudre en étudiant en détail une zone frontière de plaques, où se produisent des phénomènes d'accrétion, étaient celles de la formation de la partie superficielle de la croûte océanique à partir des montées de matériau asthénosphérique. La connaissance de la nature et de la genèse des processus de cette formation nécessitait des observations géologiques à l'échelle du mètre ou de la dizaine de mètres, et non plus les mesures indirectes, effectuées depuis la surface. Il fallait avoir recours à des engins télémanipulés, des engins autonomes, ou des submersibles habités, navigant sur le fond grâce à un système très précis de positionnement. Les moyens pouvant être employés étaient, du côté américain : le sous-marin *Alvin* avec son navire de support *Lulu,* le navire océanographique *Knorr* de la Woods Hole Oceanographic Institution; du côté français : le bathyscaphe *Archimède* et son navire d'appui *Marcel Le Bihan,* de la Marine nationale, l'engin submersible *Cyana* et le navire océanographique *Le Noroit* du CNEXO. L'équipe scientifique française était composée de géophysiciens, de géologues, de vulcanologues et de pétrographes du Centre national de la recherche scientifique (C. N. R. S.) et du CNEXO.

La réalisation d'une carte géologique — par 3 000 m de fond au milieu de l'Atlantique et avec une précision de quelques mètres — nécessitait dans un premier temps la mise au point d'une technologie nouvelle qui permît d'obtenir une précision comparable à celle de la géologie continentale. Pour effectuer un levé précis, il fallait une navigation précise. Un nouveau type de navigation a donc été testé dans la zone FAMOUS qui repose sur des balises émettrices posées sur le fond et positionnées entre elles par triangulation et interrogation de satellites. Comme la morphologie de cette zone très accidentée ne pouvait être définie avec les sondeurs ultrasonores classiques, on utilisa des sondeurs à pinceau étroit et des « poissons » remorqués au-dessus du fond, dont une couverture photographique fut également effectuée. En 1972 et 1973, de nombreux bâtiments océanologiques tournèrent des jours durant au-dessus de cette petite zone et dressèrent des cartes très détaillées des fonds. Le cadre étant ainsi déterminé, on pouvait faire intervenir les submersibles pour l'observation directe et les prélèvements précis.

Au cours de l'été 1973, le bathyscaphe *Archimède,* armé par la Marine nationale, effectua sept plongées sur une zone où le Rift présente une largeur de 30 km. La vallée, d'une profondeur maximale de 2 800 m, est formée d'une série de larges marches basculées vers l'extérieur et séparées par des pentes abruptes dirigées vers son axe. La zone axiale est marquée par un plancher de 3 km de large, dont la topographie est accidentée par un haut central et deux hauts marginaux surplombant des fossés encaissés. Le mur bordant le plancher interne du côté occidental est plus élevé, localement plus raide et mieux défini sur une longue distance que le mur oriental.

On s'aperçut, dès les premières plongées, que l'utilisation de submersibles, loin de faire double emploi avec les observations de surface, en était absolument complémentaire. En effet, malgré les progrès importants réalisés dans la télémanipulation d'engins à partir de la surface, on ne sait pas encore prélever ponctuellement des roches dans un environnement bien connu, surtout

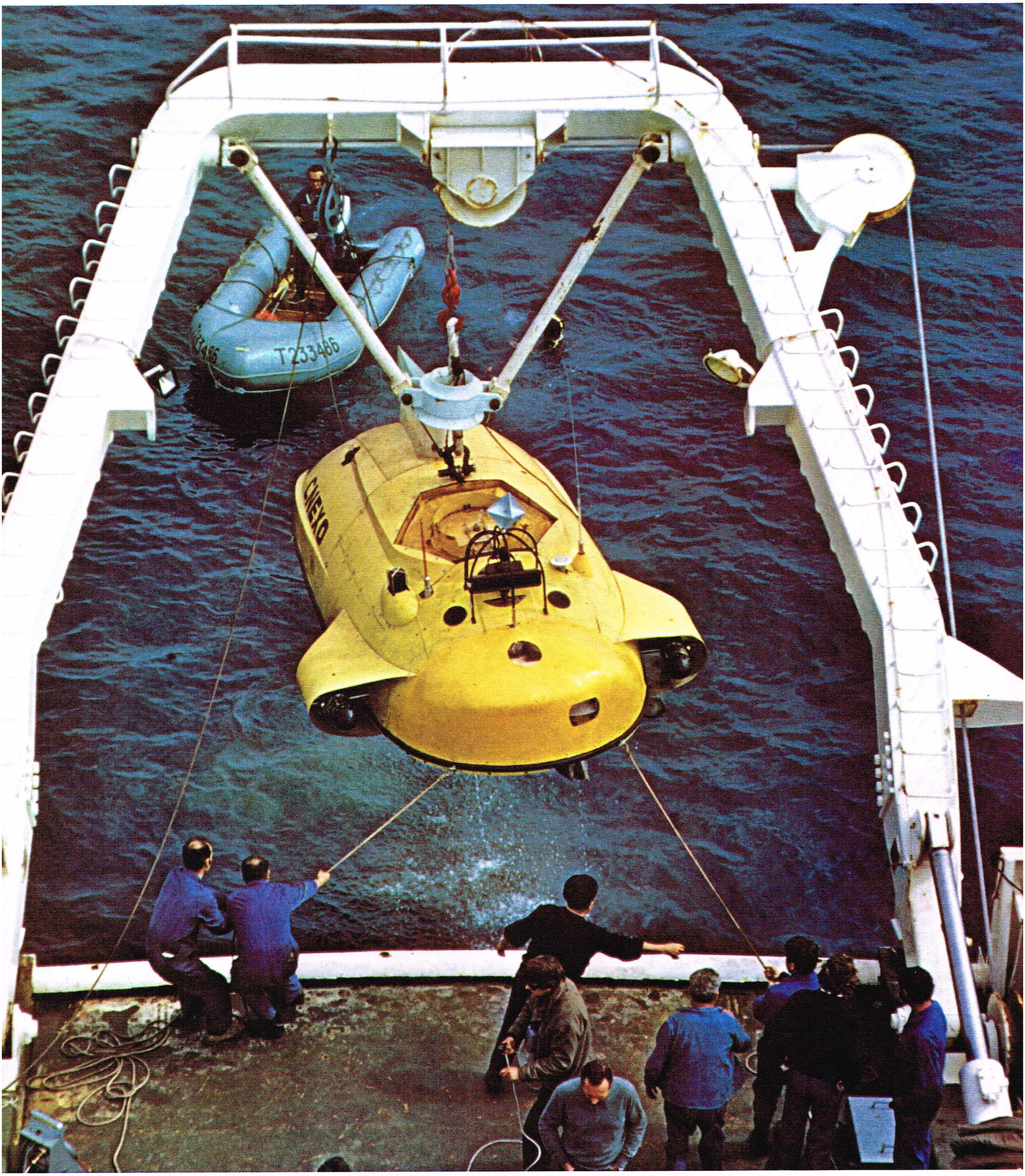
T233486
CNEXO

lorsque la topographie en est très accidentée; on ne sait même pas observer et cartographier avec précision les pentes supérieures à 45° caractéristiques du fond du Rift. En ce sens, le submersible est devenu une excellente plate-forme non seulement d'observation mais aussi de mesure et d'échantillonnage. En plus d'un système de navigation très précis, il est équipé d'un sonar panoramique, qui lui permet de « voir » les reliefs dans un rayon de 1 500 m. Pour la vision rapprochée, il possède des caméras de télévision avec magnétoscope et des appareils de photographie donnant une vision stéréographique. Il peut donc aussi bien examiner en détail une paroi de faille ou de coulée verticale que prélever des échantillons de roches ou de sédiments dans un environnement structural bien déterminé.

Les sept plongées de l'*Archimède* ont permis d'étudier un relief (4 km de long, 1 km de large) culminant à 250 m au-dessus du plancher du Rift en son centre : il s'agit du mont de Vénus, un volcan probablement construit à l'aplomb de fissures disposées en échelons et d'âge plus récent que le plancher du Rift (les datations, bien qu'elles soient difficiles du fait de la « jeunesse » des basaltes — quelques dizaines de milliers d'années — ont été effectuées par deux méthodes différentes). La lave s'est écoulée de façon tranquille de part et d'autre de ce volcan central, formant une accumulation de *pillow lavas* qui ne porte pas de traces évidentes d'une manifestation tectonique quelconque. La mise en place de la croûte océanique se fait donc, pour l'essentiel, sur le plancher interne, dans une zone de 500 à 3 500 m de large bordée par les escarpements qui forment la base des murs du Rift. Il semble que, au moins à la surface de la croûte, la zone d'injection de magma soit encore plus étroite et limitée à des volcans peu élevés, bâtis sur des fissures en échelons. Ce mode d'écoulement et l'absence de tectonique dans la vallée du Rift confirment que la lave n'est pas injectée de force en écartant les plaques de part et d'autre, mais que c'est bien le mouvement de divergence des plaques qui permet les épanchements de magma.

Les résultats des sept plongées effectuées par le bathyscaphe *Archimède* au cours de l'été 1973 ont montré que le submersible apportait aux scientifiques, dans un contexte géologique et tectonique aussi complexe que celui d'une dorsale médio-océanique, des informations qu'aucun autre moyen ne pouvait fournir.

La phase principale de l'opération FAMOUS eut lieu au cours de l'été 1974. Il y eut alors, sur la zone choisie, soit en même temps, soit avec un décalage de quelques jours, trois groupes engin-navires de soutien : — le groupe français *Archimède-Marcel Le Bihan;* le groupe français *Cyana-Le Noroit;* — le groupe américain *Alvin-Lulu-Knorr*.

En dépit de conditions météorologiques qui ne furent pas toujours favorables et de difficultés techniques qui furent résolues à la mer, surtout au début de l'opération, le bilan des plongées a été proche de l'optimum prévu :

— *Cyana* a effectué 15 plongées, pour la plupart dans la faille transformante perpendiculaire à l'axe du Rift au nord de la zone;

— *Archimède* a effectué 12 plongées, pour la plupart dans le fond du Rift lui-même;

— *Alvin* a effectué 19 plongées, sur les parois du Rift, sur une faille transformante située au sud de la zone, et sur le fond du Rift.

Au cours de ces plongées, *Cyana* a parcouru un total de 28 km sur le fond, effectué 40 prélèvements de roches et pris plus de 3 000 photographies. L'*Archimède* a parcouru 25 km sur le fond, prélevé 780 kg d'échantillons de roches, pris 7 000 photographies.

L'opération a été caractérisée par l'excellence de la navigation sur le fond, obtenue grâce à un système de navigation par satellite et à un ensemble de positionnement acoustique avec transpondeur posé sur le fond, qui a permis aux submersibles de s'y localiser, en relatif avec une précision de l'ordre de la dizaine de mètres, et dans l'absolu sur la carte marine avec une précision de l'ordre de 200 m.

Les submersibles ont permis, dans l'axe du Rift, d'observer des empilements épais de « pillow lavas », ou coussins de lave, aux parois escarpées. Ils ont permis de localiser des fissures identifiant la limite précise entre les deux plaques qui s'écartent.

Besacier - CNEXO

CNEXO

On a pu préciser dans le Rift que, sur une courte distance latérale, le volcanisme diminuait ou disparaissait, et que les phénomènes de tension commençaient à créer des fentes et des fissures, montrant rapidement des signes de soulèvement et de subsidence sous la forme de décrochements qui deviennent de plus en plus importants à mesure que l'on s'éloigne de l'axe du Rift. Des failles verticales apparaissent, puis, sur les « murs » latéraux de la vallée centrale du Rift, le soulèvement atteint des dimensions impressionnantes, des paliers de 300 m ou plus de rejets verticaux, mettant à nu la partie interne de la croûte océanique, formée probablement il y a moins de 100 000 ans dans la fissure centrale du Rift, et à seulement 1,5 km de celle-ci. L'augmentation de l'âge des laves basaltiques avec la distance par rapport au centre volcanique axial du Rift est caractérisée en particulier par une altération progressive des couches superficielles.

Des observations importantes ont été faites au cours de l'exploration par *Cyana* d'une faille transformante, zone de coulissement entre les deux plaques, dans

▲ ***Relief du centre de la vallée du Rift montrant des coulées fraîches de* pillow lavas. *Cette photographie a été faite par 2 550 m de fond, lors d'une plongée de l'*Archimède, *dans le cadre de l'opération* FAMOUS. *Le nuage de sédiments (en haut, à gauche) a été provoqué par le contact du bathyscaphe avec le fond.***

◀ ***Page ci-contre, manœuvres de récupération du* Cyana.**

▼ ***Escarpement de faille associée à une faille transformante dont le rejet est de 1,50 m.***

CNEXO

laquelle des pentes de 40 à 50° alternent avec des parties planes recouvertes de sédiments.

La première a été la localisation de la limite de plaque dans la partie profonde de la faille, actuellement active, large de 1 km. Le relief des plans de faille et la découverte de failles récentes dans les sédiments consolidés ont confirmé l'existence d'une activité volcanique. L'examen détaillé des plans de faille a montré que le sens du mouvement cisaillant de glissement était conforme à celui prévu par la théorie de la tectonique des plaques. La seconde a été celle de filons nourriciers de laves, les « dykes », se présentant comme des murs verticaux de 5 à 6 m de haut, larges de 1 m, longs de 10 m. La troisième a été celle de sources hydrothermales, dans la partie active de la faille transformante. D'épais dépôts d'oxydes de manganèse et de fer ont été identifiés autour des sources, sur le sédiment.

Les dépôts couvrent une surface d'environ 800 m^2, et leur épaisseur varie de 10 à 50 cm. Cette observation, et les prélèvements qui l'ont accompagnée, apportent la preuve formelle de la formation de concentrations minérales au fond de l'Océan, par circulation hydrothermale d'eaux dans un sous-sol très fissuré par les cisaillements qui s'exercent dans les zones frontières de plaques.

Les premiers résultats de l'opération FAMOUS ont souligné des faits importants, qui sont l'étroitesse de la zone de renouvellement de la croûte océanique, le volcanisme effusif tranquille de ce renouvellement, l'absence de mouvements tectoniques vigoureux au niveau des parois latérales du Rift. On s'interroge sur le phénomène physique qui règle l'épanchement de laves basaltiques dans celle vallée étroite, sous 3 000 m d'eau, puis sur la remontée de ces laves refroidies, sur une hauteur de près de 1 500 m. Depuis FAMOUS, certains chercheurs avancent l'hypothèse du « bouchon visqueux ». Le magma du manteau aurait tendance à remonter par les fissures du plancher du Rift, mais il serait contenu en profondeur par des forces latérales de frottement. Tout se passerait comme si le bouchon du fond du Rift était enfoncé dans un liquide, et maintenu par des bordures rigides. Ce bouchon peut, avec le temps, être fissuré, et ses bords externes, plus froids, découpés par les fissures, peuvent monter avec les parois du Rift sous l'action des forces tectoniques.

Une ère nouvelle de l'investigation

L'opération FAMOUS ouvre une période nouvelle. Après une première ère d'explorations océaniques ponctuelles et lentes ouverte par les campagnes du *Challenger* à la fin du XIXe siècle, une deuxième ère a été celle de l'exploration géophysique à larges mailles des fonds océaniques, commencée en 1947. Grâce à l'adaptation à la mer des méthodes d'investigation sismique de l'industrie pétrolière, cette ère a permis une compréhension globale de la structure des océans à l'échelle de la centaine de kilomètres. A partir de 1974, année décisive de l'opération FAMOUS, commence une troisième ère, celle de l'étude de zones clefs, à l'échelle du kilomètre. Les zones devront être étudiées simultanément sous l'aspect géologique, géochimique et géophysique. Cette ère nouvelle est permise par une mutation des techniques, qui repose avant tout sur une précision beaucoup plus grande du positionnement, sur l'emploi de submersibles, d'engins télémanipulés ou d'engins autonomes posés sur le fond.

▼ *Le* Glomar Challenger, *affecté à l'exécution du programme IPOD.*

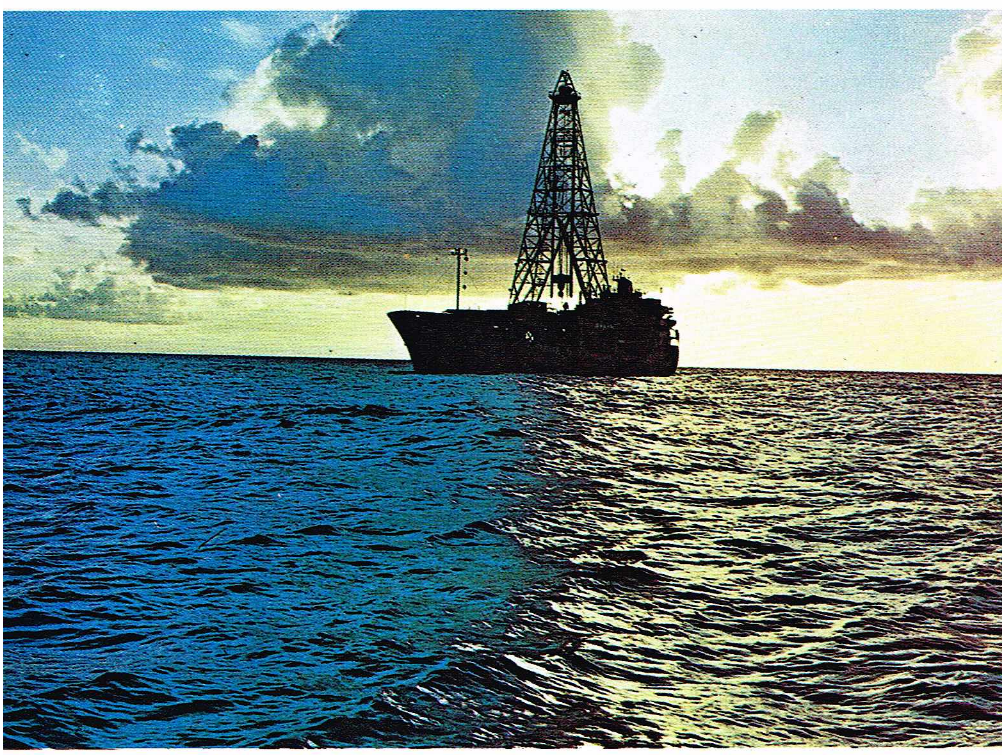

U.S.I.S.

A la cartographie détaillée du fond des océans, le forage profond apportera l'essentielle dimension verticale. A ce titre, le programme de forage dans les grands fonds, JOIDES (Joint Oceanographic Institutions for Deep Earth Sampling), financé au départ par la National Science Foundation des États-Unis, ouvert depuis 1974 à la participation internationale sous la forme du programme IPOD (International Phase of Ocean Drilling), auquel la communauté scientifique française collabore depuis janvier 1976, présente un très grand intérêt. Ce programme a pour objet d'explorer la croûte océanique au moyen de forages et de prélèvements d'échantillons géologiques à 1 500 m sous le fond des océans, par 5 000 à 6 000 m d'eau. Un navire spécialisé, le *Glomar Challenger,* muni de dispositifs de positionnement dynamique et d'un équipement permettant la rentrée d'un trépan de forage dans un trou commencé, est affecté à l'exécution de ce programme.

L'opération FAMOUS, les programmes de forage par grands fonds, marquent une date dans l'histoire des progrès de la connaissance de la structure de l'écorce terrestre. Ils permettent en même temps de mettre au point et d'utiliser avec efficacité des méthodes et des procédés d'intervention sous-marins qui rapprochent le moment auquel il sera possible de mettre en valeur les ressources des grands fonds océaniques.

Ressources minérales des grands fonds

Les métaux économiquement intéressants, comme le fer, le cuivre, le nickel, l'or, l'argent, le zinc, le cobalt, etc., ne se trouvent qu'à l'état de traces infimes dans les roches de la croûte lithosphérique terrestre. Ces traces sont parfois transférées sous forme d'oxydes ou de sulfures dans des zones bien précises où leur concentration devient si importante qu'elles forment des gisements exploitables. Aucune explication d'ensemble des processus de transfert et de formation de gisement n'a été donnée jusqu'à présent.

La théorie de la tectonique des plaques a posé la question de la genèse des gisements métalliques d'une manière totalement nouvelle. Les plaques lithosphériques océaniques ont en effet une vie géologique courte. Elles naissent au long du Rift médio-océanique, s'en éloignent en vieillissant de cent cinquante à deux cents millions d'années au plus, et replongent au sein de la Terre dans les fosses océaniques. En s'enfonçant sous le bord des plaques continentales, dans les fosses, les roches et les sédiments de la plaque descendante peuvent être en quelque sorte rabotés et empilés sur la pente en une série de terrasses qui sont progressivement échauffées au fur et à mesure de l'enfoncement de la plaque vers l'asthénosphère et fondent partiellement. Des éléments métalliques peuvent être portés jusqu'à la surface de la plaque continentale par les processus volcaniques qui se produisent en arrière des zones d'enfoncement de plaques, comme dans les Andes ou au Japon.

On sait que de nombreux gisements de minerais se trouvent effectivement situés dans ces régions. Il semble qu'une « zonation » existe dans la distribution des minerais. Le fer se trouve généralement dans la zone la plus proche de la fosse océanique, puis viennent le cuivre et l'or, l'argent, le plomb et le zinc. Il s'agit peut-être d'une distillation progressive au fur et à mesure que la plaque s'enfonce plus profondément sous le continent.

Si la corrélation entre fosses océaniques, plaque plongeante et volcanisme associé est supposée plus que prouvée, il n'en est plus de même en ce qui concerne le rôle joué par le Rift, rôle direct et sans doute fonda-

mental, à la frontière de formation de deux plaques, dans la distribution et la répartition des minerais à la surface.

Depuis 1948, des campagnes d'exploration britanniques, suédoises, allemandes et américaines ont mis en évidence des dépressions situées au fond de la vallée du Rift qu'est la mer Rouge, à plus de 2 000 m de profondeur. Les dépressions contiennent des eaux chaudes et sursalées d'une température moyenne de 50 °C et d'une salinité dix fois supérieure à la moyenne de celles des eaux océaniques. D'autres dépressions contenant de telles « saumures chaudes » furent découvertes par la suite dans l'Atlantique et le Pacifique. L'analyse de la composition chimique des ces saumures a montré qu'elles présentaient des concentrations exceptionnelles en métaux lourds : fer, manganèse, cuivre, argent, or, cobalt, chrome, nickel et plomb, sous forme de boues au fond des dépressions, boues noires alternant avec des boues bleues ou jaunes. En 1971, une campagne du navire américain *Chain* trouvait que le volume des saumures contenues dans une dépression de la mer Rouge, déjà mesuré quelques années auparavant, s'était accru de 23 % et que la température avait augmenté de près de 3 °C. Les chercheurs établirent que la dépression avait reçu des saumures portées à une température de 103 °C, au taux de 3 000 litres par seconde durant les cinquante-deux mois ayant séparé les mesures. Pour expliquer une température aussi élevée, il fallait admettre que l'eau, véhicule des métaux, avait circulé jusqu'à une profondeur d'environ deux kilomètres à l'intérieur de la croûte océanique.

Comme on savait que l'Afrique et l'Arabie s'écartent de deux centimètres par an de part et d'autre du Rift de la mer Rouge, par un processus entraînant la formation de nouvelle croûte océanique, il devenait naturel d'associer l'augmentation des saumures aux montées volcaniques dans le Rift. Cette observation était corroborée historiquement par l'exploitation en Égypte, depuis la plus haute antiquité, de mines de cuivre disposées dans des fissures parallèles à l'axe du Rift de la mer Rouge, ainsi que par la récente découverte en Arabie Saoudite de gisements de plomb et de zinc pareillement orientés.

En 1971 également, Vine étudiait l'île de Chypre et parvenait à la conclusion qu'une grande partie de cette île était formée de morceaux de croûte océanique incorporés au continent. Dans cette partie de l'île, constituée essentiellement de laves basaltiques, se trouvent les célèbres mines de cuivre exploitées depuis trois mille ans et qui ont donné son nom à l'île (cuivre vient du latin *Cuprium*, bronze de Chypre, venant lui-même du grec *Cupros*).

Les forages effectués dans l'océan profond par le navire américain *Glomar Challenger*, depuis 1968, multipliaient d'ailleurs les indices de minéralisations dans la roche basaltique elle-même, sous forme de veines de cuivre, et dans la couche de sédiment au contact du basalte, sous forme principalement de fer et de manganèse. D'autres navires avaient dragué d'énormes encroûtements de manganèse et de fer dans la vallée du Rift au milieu de l'Atlantique. Chacun s'accordait à attribuer la formation de ces dépôts à des circulations d'eau très chaude provenant de grandes profondeurs dans une région volcanique, lessivant roches et sédiments sur son parcours. Une partie des métaux en solution se déposerait au creux des fissures dans la roche volcanique elle-même, formant des veines et des filons. Une autre partie serait précipitée au contact de l'eau de mer en arrivant au niveau du fond, près de la bouche hydrothermale. La question qui restait posée était celle de l'origine de l'eau elle-même et des minéraux en solution. S'agit-il d'eau de mer infiltrée à travers des fissures le long de failles, réchauffée en profondeur, puis remontant à la surface ? Existe-t-il, au contraire, de l'eau, dite « juvénile », provenant des exhalaisons volcaniques ? Les analyses faites sur les saumures chaudes de la mer Rouge prouvèrent qu'il s'agissait bien d'eau de mer infiltrée, puis remontée en surface.

L'influence volcanique sur cette circulation hydrothermale est évidente. Aussi, l'une des hypothèses de travail de l'opération FAMOUS était la reconnaissance et l'exploration d'une fissure ouverte et d'une accumulation de saumures chaudes dans le Rift médio-atlantique. Au cours des plongées du bathyscaphe *Archimède* pendant la phase 1973 de l'opération FAMOUS,

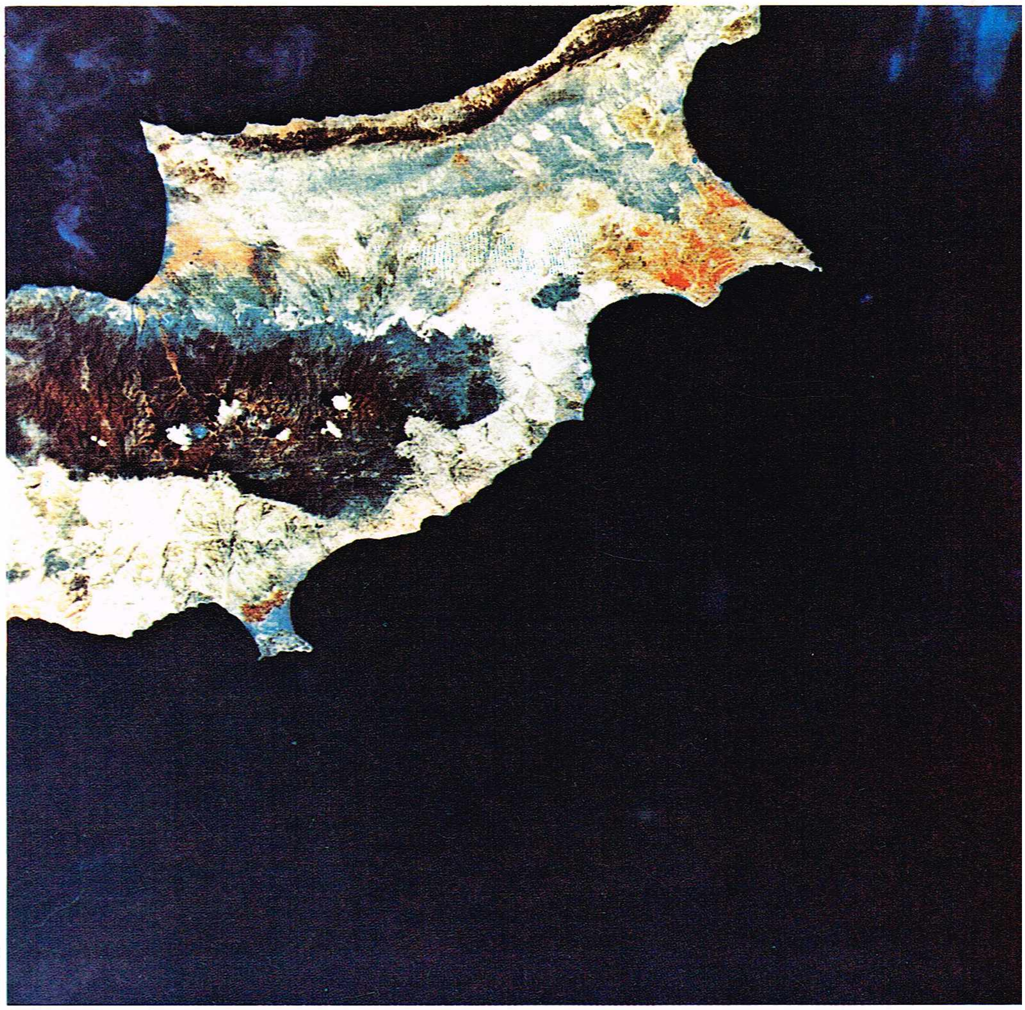

U.S.I.S.

▲ L'île de Chypre photographiée par le satellite Erts I. En étudiant cette île, Vine parvint, en 1971, à la conclusion qu'une grande partie de celle-ci était formée de morceaux de croûte océanique incorporés au continent.
▼ Photographie d'une fissure affectant le sédiment dans le plancher interne du Rift médio-atlantique ; l'écartement est approximativement de 50 cm.

CNEXO

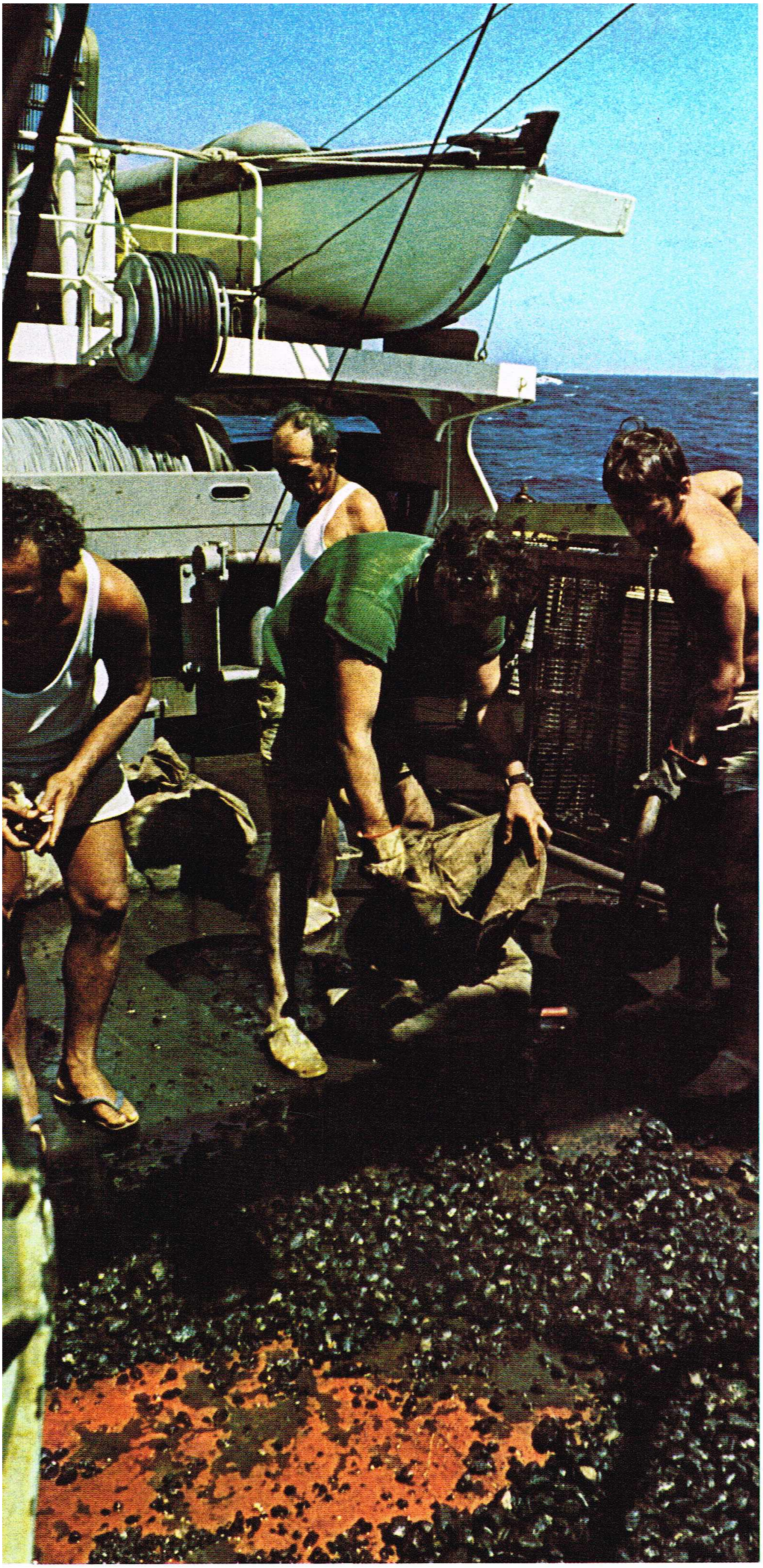

CNEXO - T.D.I.

aucune découverte de ce genre n'avait été effectuée. Ce fut, comme on l'a vu précédemment, au cours de la phase 1974 que l'équipe scientifique embarquée à bord du submersible *Cyana* observa des dépôts hydrothermaux dans une faille de transformation : zone active du système volcanique de la dorsale médio-atlantique, probablement fissurée de fractures verticales créant, dans les roches magmatiques montant de l'asthénosphère, un réseau d'infiltration pour les eaux de mer qui, par percolation, s'échauffent et se chargent d'éléments minéraux.

L'étude des « saumures chaudes » de la mer Rouge et la découverte de sources hydrothermales émissives de minerais au cours de l'opération FAMOUS apportent des éléments déterminants pour la connaissance du processus de formation des gisements métallifères. Elles permettent aussi de faire progresser les méthodes de prospection des gisements profonds de matières premières. Si l'exploitation de ces gisements océaniques profonds paraît à court terme peu probable en raison de la difficulté de mise en œuvre et du coût des techniques appropriées, leur étude apporte par contre dès maintenant à l'économie minière la possibilité d'établir une véritable « gîtologie » prévisionnelle des gisements, dont les effets sur la prospection peuvent être rapidement considérables.

Dépôts profonds de nodules polymétalliques

Les plus riches gisements minéraux de la planète semblent bien recouvrir les sédiments des plaines abyssales. Les nodules polymétalliques, décrits précédemment dans la partie consacrée aux sédiments des grands fonds, ont été considérés longtemps comme des curiosités minéralogiques. Ces curiosités entrèrent en 1958 dans l'actualité économique. A cette date, l'université de Californie effectua une étude des possibilités de ramassage des nodules sur les fonds, et des procédés de séparation des différents métaux les constituant. L'intérêt des compagnies minières s'éveilla alors et entraîna à partir de 1965 la prospection systématique de zones étendues de l'océan Pacifique. Depuis cette date, l'effort de reconnaissance s'est intensifié. Il est mené par un nombre de plus en plus important d'industriels de plusieurs pays. Américains, Soviétiques, Japonais, Canadiens, Allemands, Français effectuent des travaux portant à la fois sur les conditions de gisement des nodules et sur les technologies de ramassage. Bien que les campagnes de reconnaissance à la mer ne donnent lieu à aucune publication et que les données recueillies soient réservées aux organisateurs de ces campagnes, les grandes lignes de la répartition des gisements de nodules dans l'océan Pacifique sont connues. Les gisements sont situés dans deux vastes zones considérées comme exploitables, sans que l'on puisse cependant encore attacher une valeur économique particulière à ce terme. Car, pour être exploitables, il faut non seulement que les gisements de nodules présentent une bonne densité au mètre carré, mais encore que les nodules eux-mêmes contiennent des oxydes métalliques considérés comme justifiant l'effort d'exploitation. Or ces oxydes présents en forts pourcentages sont le manganèse (24 %) et le fer (de 10 à 14 %), qui ne sont pas demandés sur le marché mondial des matières premières. Par contre, la structure géopolitique du marché mondial des métaux non ferreux entraîne une demande appréciable des métaux justifiant une production océanique. Par exemple, les États-Unis importent chaque année 19 % du cuivre, 84 % du nickel, 92 % du cobalt qui leur sont nécessaires. Ces importations représentaient en 1973 une valeur de 600 millions de dollars. Si cette tendance se poursuit jusqu'à l'an 2000, les importations de métaux non ferreux atteindront une valeur d'environ 6 milliards de dollars par an, grevant très lourdement la balance américaine du commerce extérieur. Aussi considère-t-on qu'une exploitation rentable doit permettre que le traitement des oxydes métalliques contenus dans un million de tonnes de nodules prélevés par an sur les grands fonds produise, après réduction, de l'ordre de 3 000 tonnes de cobalt, 30 000 tonnes de nickel et de cuivre, 280 000 tonnes de manganèse.

L'une des zones possibles de prélèvement couvre largement le Pacifique Nord, de la Californie au Japon. L'autre est située dans le Pacifique Sud, entre la Polynésie française et la fosse des Tonga. Ces deux zones sont entourées par des étendues plus ou moins vastes, dans

lesquelles les nodules sont fréquents. Par contre, les régions de l'équateur et celles du Pacifique Sud-Est, entre la Polynésie et l'Amérique du Sud, ne présentent que de très rares concentrations de nodules sur le fond. Ces répartitions suggèrent que la formation des nodules polymétalliques et leur concentration en gisements sont très étroitement liées à la structure des fonds, à l'émission possible d'éléments métalliques par les fissures actives des dorsales médio-océaniques et au type de sédimentation qui prévaut localement.

Renouvellement des fonds océaniques et gisements profonds d'hydrocarbures

Enfin, dans le domaine océanique profond, un bassin contenant des hydrocarbures peut être associé à un mouvement actuel de subduction, entraîné par le renouvellement des fonds océaniques, lorsqu'une plaque océanique plonge sous une plaque lithosphérique continentale. La frontière de plaques sera en ce cas, ainsi qu'on l'a vu précédemment, caractérisée par la présence d'un fossé océanique profond à la limite de séparation. Il en est ainsi, par exemple, le long des marges occidentales de l'Amérique du Nord et de l'Amérique du Sud, au long desquelles les plaques lithosphériques océaniques du Pacifique plongent sous les plaques continentales.

La couverture sédimentaire de la plaque plongeante, contenant des résidus kérogéneux de matière organique, est intégrée en totalité ou en partie dans le flanc abrupt de la fosse frontière. Des épaisseurs considérables de sédiments peuvent être ainsi accumulées sous forme de terrasses étagées à toutes les profondeurs, et peuvent présenter, dans certaines conditions de température et de pression, des pièges où se concentrent les résidus kérogéneux.

En remontant la pente de la plaque descendante, on trouve généralement les arcs insulaires volcaniques, qui délimitent les bassins marginaux entre eux et le continent. Ces ensembles bassins marginaux-arcs insulaires sont, sous plusieurs aspects, favorables à la métamorphose du kérogène en hydrocarbures. Certains bassins de ce type, situés à des profondeurs peu importantes en raison de leur histoire géologique, sont productifs, tout au moins sur leurs bordures accessibles aux techniques actuelles. Ce sont les petits bassins « interarcs » de Sumatra, de Sunda, de Taïwan, d'Hokkaïdo. Des homologues émergés de ces bassins sont connus dans le domaine alpin, et sont producteurs d'hydrocarbures, comme le bassin nord-iranien, ou économiquement prometteurs, comme celui de Vienne. Bien qu'ennoyée par effondrement, la Méditerranée occidentale est un bassin de ce type.

Selon Hedberg et Rona, les bassins marginaux sont les régions du monde les plus prometteuses pour l'accumulation du pétrole, tout au moins ceux de ces bassins qui n'ont pas disparu au cours de l'évolution des fonds engloutis progressivement par l'asthénosphère.

Un autre type de bassin océanique pouvant contenir des hydrocarbures est lié au système d'écartement de deux plaques et d'ouverture d'un océan. Au début de cette ouverture, les masses continentales gênent la circulation des eaux. Le phénomène d'éloignement étant très lent, la teneur en oxygène du milieu marin est réduite en raison directe de la mauvaise circulation des eaux. En même temps s'effectue une concentration de la salinité dans les couches d'eau inférieures, par suite de la plongée des eaux de surface rendues plus denses par l'évaporation. Les conditions de kérogénisation de la matière organique sont donc remplies. Si l'évaporation peut excéder le renouvellement des eaux, ce qui est le cas des lagunes et des mers fermées, des couches épaisses d'évaporites et de sel se disposent sur le fond en même temps que la matière organique. Au fur et à mesure du renouvellement des fonds océaniques et de l'ouverture d'un océan, l'éloignement des masses continentales devient tel que les zones bordières, c'est-à-dire les marges continentales, s'enfoncent. Les couches de sel et de matière organique sont enfouies progressivement, au contact de ces marges, sous des sédiments d'origine continentale dont l'épaisseur augmente la pression géostatique et la température, conditions favorables à la transformation du kérogène en hydrocarbures. Sous l'action de la poussée latérale de la croûte océanique, les couches de sel, dont la plasticité est supérieure à celle des dépôts de sédiments d'origine continentale, se déforment de façon importante. La déformation de ces couches de sel prend l'aspect de dômes, qui percent parfois les couches sédimentaires sus-jacentes et forment des diapirs. Ces structures observées le long des marges continentales, dômes de sel et diapirs, peuvent constituer autant de pièges à hydrocarbures, dans lesquels peut s'effectuer la transformation de la matière organique.

Les dômes de sel ont été étudiés sur les marges orientales et occidentales de l'Atlantique Nord et de l'Atlantique Sud, ainsi qu'en Méditerranée occidentale. Certains ont fait l'objet de prélèvements effectués depuis le navire *Glomar Challenger* dans l'exécution du programme JOIDES. Les travaux de ce navire ont compris des prélèvements d'échantillons sur des dômes de sel à plus de 3 000 m de profondeur. Ils montrent qu'au stade initial de la formation des océans, l'Atlantique était une mer à circulation restreinte dans laquelle les conditions de transformation de la matière organique et de dépôt d'épaisses couches d'évaporites étaient réunies. Le renouvellement des fonds océaniques à partir des dorsales a transformé lentement cette mer fermée en un océan. Les continents américain, européen et africain ont fourni les sédiments terrigènes sous lesquels sont enfouis aujourd'hui sel et matière organique, peut-être transformés en hydrocarbures, le long des marges continentales. Les marges continentales seront sans doute les premières à être explorées.

En second lieu, l'intérêt pourra se porter sur les bassins marginaux « interarcs », notamment ceux du pourtour de l'océan Pacifique : bassins indonésien, philippin, mer du Japon, mer d'Okhotsk et mer de Béring. La Méditerranée occidentale entre dans cette catégorie.

Enfin, à terme, il sera intéressant d'entreprendre l'exploration des bassins « en terrasses », situés sur la pente d'une fosse océanique.

Les eaux des océans et leurs mouvements

Les eaux de l'océan mondial, emplissant les dépressions de l'écorce terrestre constituant le cadre géomorphologique des fonds marins décrit précédemment, ont un volume approximatif de l'ordre de 1 milliard 400 millions de km^3.

L'océan mondial peut être géographiquement subdivisé en trois grandes parties : océan Pacifique, océan Atlantique et océan Indien, entités nettement individualisées, sauf pour leurs parties situées dans l'hémisphère Sud, au-dessus de la latitude 45° Sud. Leurs parties méridionales entourent le continent antarctique d'une ceinture continue d'eaux très froides, l'océan Austral, d'une superficie de 32 millions de km^2.

Composition

Les eaux constituant l'océan mondial comportent, souvent à l'état de traces, pratiquement tous les corps compris dans la classification de Mendeleïev. La teneur globale en sels est, en moyenne, de l'ordre de 35 grammes par litre. Cette salinité est le caractère fondamental de l'eau de mer, opposant cette eau à celles des rivières et des lacs qui se déversent dans l'Océan. La salinité tend à augmenter dans les eaux de surface, là où les processus d'évaporation l'emportent sur les précipitations, et principalement dans les mers fermées : 38 g en Méditerranée occidentale, 39 g en Méditerranée orientale, 40 à 41 g en mer Rouge et dans le golfe Persique. Elle est, au contraire, plus faible dans les mers polaires en période de fonte des glaces (30 à 33 g), dans les mers intérieures qui reçoivent d'importants apports fluviaux, comme la mer Baltique et la mer Noire, et dans les estuaires. En haute mer, la zone située de part et d'autre de l'équateur thermique, qui est placé un peu au nord de l'équateur géographique, est caractérisée par des précipitations atmosphériques importantes et, par conséquent, par une légère diminution de la teneur moyenne en sels des eaux de surface.

La règle de la constance de composition chimique n'est valable que pour les océans et les mers communiquant avec eux. Dans les nappes privées de liaisons avec l'océan mondial, la composition chimique est très différente. La mer Morte, à la différence des océans, contient

◀ ***Page ci-contre,***
la mise en sacs des nodules polymétalliques est encore une opération manuelle.

Claude Rives - Marina - Cedri

▲ *La teneur globale en sels des eaux constituant l'océan mondial est en moyenne de l'ordre de 35 g/l. Ici, les marais salants de la presqu'île de Guérande en Loire-Atlantique.*

▼ *Une mer agitée et la formation d'écume constituent une turbulence très favorable à la diffusion de l'oxygène de l'atmosphère dans la couche superficielle des eaux.*

F. Mosetti

ainsi beaucoup plus de chlorure de magnésium que de chlorure de sodium. La mer Caspienne renferme deux à trois fois plus de carbonate de chaux que les océans, alors que sa salinité est plus faible.

Parmi les sels contenus dans les eaux des océans, certains sont présents en proportions relativement constantes, quelle que soit la teneur globale de ces sels. On les appelle **constituants conservatifs,** ou encore **constituants primaires.** Les plus importants quantitativement sont ceux qui entrent dans la composition du sel de mer : chlore, à raison de 18,98 g/l, sodium, à raison de 10,56 g/l. On trouve ensuite, par ordre de poids décroissant par litre : le magnésium, le soufre sous forme principalement de sulfates, le calcium, le potassium, le brome, le carbone minéral sous forme de gaz carbonique, de carbonates et de bicarbonates, ainsi que le strontium, le bore, etc.

La constance de rapport des différents ions métalliques pris séparément, par rapport au chlorure qui est l'ion le plus répandu dans les eaux des océans, permet de définir la salinité — c'est-à-dire la teneur globale d'une eau de mer en constituants primaires — grâce au dosage du chlore des chlorures.

Les gaz contenus dans l'atmosphère sont présents à l'état dissous dans les eaux des océans. On trouve dans ces eaux, comme constituants conservatifs ou primaires, jusqu'à des gaz rares à des teneurs très faibles mais constantes.

Les **constituants secondaires,** ou **non conservatifs,** sont ceux dont la teneur varie dans le temps et dans l'espace, et qui sont impliqués dans des phénomènes biologiques et biochimiques. Les plus importants sont le gaz carbonique, l'oxygène, les composés d'azote minéral et ceux de phosphore, qui sont les agents, en combinaison avec le gaz carbonique, des processus de synthèse de la matière organique par les végétaux (phytoplancton) grâce à l'utilisation de l'énergie solaire par la chlorophylle.

Le *gaz carbonique,* source de carbone, est toujours présent en quantités suffisantes sous forme d'ions carbonate, pour les besoins de la photosynthèse. Il réagit chimiquement très facilement. L'instabilité du système gaz carbonique-carbonates-bicarbonates est à l'origine de l'aptitude de l'eau de mer à compenser les variations du pH.

Le *pH* d'un milieu est lié à la concentration en ions hydrogène que l'on mesure dans ce milieu. Il définit l'acidité ou l'alcalinité de ce milieu. En théorie, il peut varier de 0 à 14, avec un état neutre fixé à 7. Mesuré à moins de 7, le pH est acide, mesuré à plus de 7, il est alcalin. Le pH des eaux des océans est alcalin, mais il varie dans l'espace et dans le temps. Les valeurs sont généralement comprises entre 7,5 et 8,4. Dans des étendues d'eau de mer de faible profondeur, on a pu mesurer des pH de 9 et de 10. Inversement, dans les estuaires, en raison d'apports importants d'eau douce, ou dans les régions océaniques soumises à des régimes pluviaux de fortes précipitations, on peut mesurer des pH de l'ordre de 6. Les eaux sont en ce cas devenues acides.

Les variations du pH sont donc liées à celles de la salinité. Elles sont aussi fonction de la température, et s'élèvent avec celle-ci. Ces variations sont indicatrices de la teneur en gaz carbonique dissous. Les variations diurnes de cette teneur sont inverses de celles du pH.

En haute mer, les variations du pH sont moins importantes qu'à proximité des côtes. Dans l'océan Atlantique, le pH varie, avec la latitude et la profondeur, entre 7,7 et 8,2. Les valeurs les plus fortes sont situées dans la tranche d'eau de 0 à 300 m, vers 30° de latitude Nord. Les valeurs les plus faibles sont mesurées vers 500 m de profondeur aux latitudes 10° Nord et Sud, dans les régions équatoriales, ainsi qu'aux profondeurs moyennes sous les hautes latitudes de l'hémisphère Nord.

La teneur en *oxygène* des eaux des océans présente des variations importantes. L'oxygène est fourni dans la couche superficielle sous la surface, par diffusion à partir de l'atmosphère, ainsi que très abondamment par la fonction chlorophyllienne du phytoplancton et des autres végétaux verts. Lorsque phytoplancton et végétaux sont très abondants, l'excès d'oxygène dissous dans la couche superficielle passe au contraire dans l'atmosphère. Certains auteurs ont pu estimer que, si la vie végétale de l'Océan cessait, la teneur en oxygène de l'air respiré par l'humanité à la surface de la planète aurait diminué de 10 % à la fin du siècle.

Les eaux de surface sont donc saturées en oxygène. La solubilité de ce gaz varie en raison inverse de la température. Il y a ainsi des différences très accusées en fonction des latitudes. Les eaux proches de l'Arctique et de l'Antarctique sont très oxygénées, alors que les eaux océaniques de la ceinture tropicale sont pauvres en oxygène.

La teneur en oxygène diminue aussi avec la profondeur, et passe par un minimum plus ou moins marqué, qui diffère selon les régions. Le minimum est ainsi mesuré dans l'Atlantique vers 40° de latitude Nord, entre 400 et 500 m sous la surface, alors qu'il est mesuré entre 1 000 à 1 200 m en mer d'Arabie.

Ce minimum est causé d'une part par le fait qu'il n'y a plus à ces profondeurs de vie végétale (phytoplancton) susceptible de fournir de l'oxygène par fonction chlorophyllienne, puisqu'il n'y a plus assez de lumière, et d'autre part parce que l'on trouve aux profondeurs considérées des accumulations importantes de matières

organiques descendues de la couche superficielle éclairée sous la surface. La descente de ces matières est freinée par l'accroissement du coefficient de viscosité lié à l'abaissement de la température en fonction de la profondeur.

Au-delà de cette couche du minimum, la teneur des eaux en oxygène dissous augmente avec la profondeur sans toutefois atteindre la saturation. Elle devient très faible au-dessus des sédiments des plaines abyssales.

Un cas particulier est présenté par les eaux de la mer Noire, dans lesquelles la densité croît très fortement avec la profondeur, ce qui empêche tout mélange vertical dans le volume marin. Non seulement l'oxygène dissous disparaît totalement au-delà des profondeurs comprises entre 125 et 175 m, mais on mesure des quantités importantes d'hydrogène sulfuré jusque dans les eaux profondes. Cette apparition d'hydrogène sulfuré, qui a été nommée « euxinisme », mot dérivé de Pont-Euxin, appellation de la mer Noire dans l'Antiquité, est un phénomène caractéristique des eaux marines confinées dans un bassin isolé soumis à de fortes précipitations et recevant des apports fluviaux importants, ce qui ne permet pas la formation d'eaux superficielles de forte salinité pouvant renouveler par plongée les eaux profondes. L'euxinisme est lié à la consommation totale par les êtres vivants de l'oxygène dissous, et l'hydrogène sulfuré est d'autant plus abondant que le confinement des eaux est plus prolongé. Il est exceptionnel, et la rareté des grandes zones euxiniques montre que l'ensemble de l'océan mondial et des mers secondaires est soumis à un renouvellement et à un brassage des eaux qui apportent de l'oxygène.

L'*azote* est dissous dans les eaux des océans en quantités plus importantes que l'oxygène. Le point de saturation varie, comme celui de l'oxygène, en fonction de la température et de la salinité. L'essentiel de la réserve d'azote est combiné sous forme de nitrates qui sont mesurés avec le plus grand soin, de même que les phosphates et les silicates dissous, car ces constituants non conservatifs sont les *sels nutritifs* des eaux océaniques et jouent, en même temps que le gaz carbonique, un rôle fondamental dans le développement du phytoplancton et donc dans le développement de la vie dans le milieu marin.

L'exercice de la photosynthèse nécessite, on l'a vu, l'énergie solaire. L'utilisation des sels nutritifs pour le développement de la vie végétale n'est donc effective que dans une tranche d'eau assez limitée sous la surface. Cette tranche est d'une profondeur de 50 m en moyenne, présentant des maximums exceptionnels de 130 à 140 m. Au-delà, la quantité suffisante d'énergie lumineuse ne parvient plus, et la quantité de sels nutritifs dissous dans les eaux et qui ne sont plus utilisés par le développement végétal augmente graduellement jusqu'à une stabilisation à partir de la profondeur de 1 000 m en moyenne.

Dans la tranche d'eau superficielle qui reçoit l'énergie solaire, les sels nutritifs, composés minéraux de l'azote et du phosphore, ne sont abondants que lorsque les végétaux sont rares. Dès que les organismes végétaux croissent et se multiplient, ils consomment les sels nutritifs jusqu'à les faire disparaître complètement. La poussée végétale, ou *bloom* selon les auteurs anglo-saxons, est alors arrêtée, jusqu'à ce que la dégradation de la matière organique dans la tranche superficielle, ou la remontée en surface de sels nutritifs profonds, reconstituent la réserve minérale nécessaire à une nouvelle « floraison ».

Les régions océaniques les plus favorables au développement de la vie sont donc celles où des eaux riches en sels nutritifs, nitrates et phosphates, sont apportées en surface par des mouvements verticaux, *upwellings*, ou remontées d'eaux profondes, et soumises à l'énergie solaire. De tels *upwellings* sont observés au large des côtes du Pérou, de la Basse-Californie, de la Mauritanie notamment, faits capitaux pour la répartition géographique des populations de Poissons et l'exploitation de zones de pêche.

Les constituants non conservatifs comprennent également des ions dérivés de métaux lourds : fer, manganèse, cuivre, etc., qui semblent agir dans le développement de la vie après combinaison avec de petites molécules organiques. Le fer paraît jouer un rôle très important, notamment par apport d'origine terrestre, dans la fertilité des eaux situées au-dessus des plateaux continentaux, fertilité élevée par rapport à celle des eaux océaniques au-dessus des grands fonds.

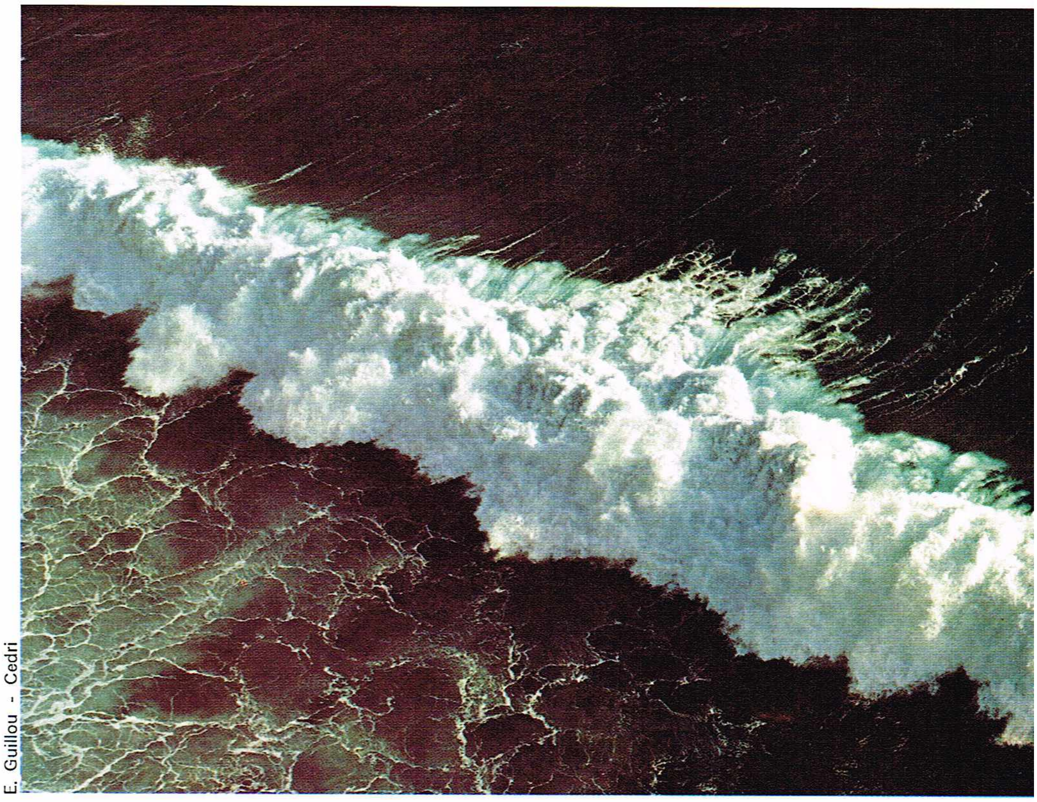

▲ ***La rareté de grandes zones euxiniques montre que l'ensemble de l'océan mondial et des mers secondaires est soumis à un renouvellement et à un brassage (notamment par les vagues) des eaux qui apportent l'oxygène.***

Origine de l'eau de mer

L'origine des eaux des océans ne semble pas être due à la condensation de l'atmosphère primitive de la planète. Les recherches effectuées au cours des dernières années, la vérification progressive des hypothèses avancées, la multiplication de mesures précises ont montré que la planète aurait perdu son atmosphère primitive et que l'atmosphère et les eaux océaniques actuelles n'auraient pas existé à l'origine. Elles auraient été produites par la déshydratation et le dégazage progressifs des matériaux constitutifs du globe terrestre.

Selon l'hypothèse de la formation de la planète par accrétion de matières stellaires (gazeuses et météoritiques), la Terre aux tout premiers moments de son existence aurait été un « agglomérat froid ». Sous l'action de la gravitation et des transformations radio-actives d'origine nucléaire, cet « agglomérat » aurait été échauffé jusqu'à approcher, sinon atteindre, la fusion. Un tel processus aurait entraîné le classement caractéristique par densité des matériaux constitutifs du globe terrestre. Par dégazage de ces matériaux au cours du refroidissement qui aurait suivi, une nouvelle atmosphère aurait été constituée, qui n'aurait pas comporté d'oxygène, mais qui aurait été riche en vapeur d'eau, en gaz carbonique et en hydrogène sulfuré.

Les conditions de température et de pression étant devenues — il y a environ 4 milliards d'années — proches de celles que nous connaissons actuellement, une couche basaltique, semblable à la croûte océanique connue aujourd'hui, se serait formée à la surface de la planète. C'est alors qu'une partie de la vapeur d'eau contenue dans la « nouvelle atmosphère » formée par dégazage se serait condensée, formant dans les dépressions de la surface basaltique les premières « cuvettes océaniques ». Une autre partie de cette vapeur d'eau aurait donné, par photo-dissociation, les premières molécules de l'oxygène indispensable à la vie.

Le dégazage des matériaux constitutifs du globe, se poursuivant au travers des fissures de l'écorce basaltique, notamment sous forme de venues hydrothermales, a apporté et apporte encore dans le milieu océanique d'importantes quantités d' « eaux juvéniles » riches en chlorures et en bromures.

▼ ***Distribution de l'oxygène dissous (en cm^3/l) en fonction de la profondeur, pour différents bassins océaniques. On a représenté des situations types de large moyenne.***

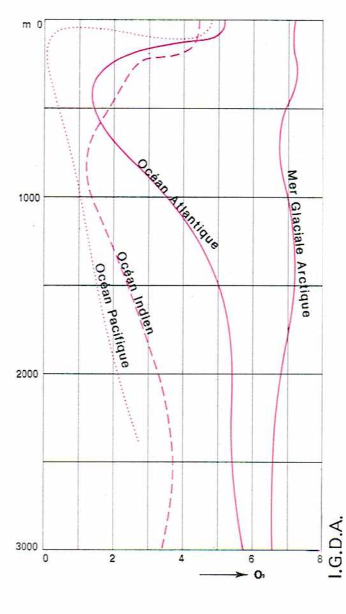

On peut donc considérer que les eaux des océans ont été engendrées par la planète Terre elle-même, et non par l'environnement cosmique de celle-ci. Nées du globe, et non plaquées sur lui, elles constituent le milieu dans lequel a pu se développer la vie végétale, puis la vie animale, sous l'action de l'énergie solaire.

Température, salinité et densité des eaux des océans

La **température** des eaux des océans dépend du bilan, perpétuellement fluctuant, des gains et des pertes de chaleur. Pour les eaux de surface, la source principale d'énergie calorifique est le rayonnement solaire. Compte tenu du fait qu'une partie de cette énergie est réfléchie par la surface de l'océan, d'autant plus que cette surface sera agitée, on admet généralement que la quantité d'énergie solaire pénétrant dans l'océan est de l'ordre de 0,22 calorie par centimètre carré et par minute. Cette énergie solaire subit dans le milieu marin deux sortes d'altérations : la diffusion et l'absorption.

— La *diffusion* par les molécules d'eau ainsi que par les particules minérales ou organiques en suspension renvoie l'énergie lumineuse dans diverses directions.

— L'*absorption* correspond à une transformation de l'énergie lumineuse en chaleur. L'énergie solaire, au fur et à mesure de sa pénétration dans le milieu marin, est accompagnée d'un échauffement des molécules d'eau. L'absorption globale est en fait la somme de trois absorptions partielles : celle de l'eau elle-même, celle des substances dissoutes, celle des particules inertes ou organiques en suspension. Les deux premières sont importantes, la troisième est négligeable. Les neuf dixièmes de l'énergie correspondant à la longueur d'onde d'énergie maximale du spectre solaire (radiations bleues) sont absorbés et transformés en chaleur dans la tranche superficielle des premiers cent mètres sous la surface. Les radiations ultraviolettes et infrarouges sont absorbées totalement dans les premiers centimètres. Les radiations visibles de grande longueur d'onde sont absorbées rapidement : les rouges disparaissent vers la profondeur de quinze mètres, puis ce sont les oranges et les jaunes.

La pénétration de l'énergie solaire dans les eaux des océans est ainsi marquée, en fonction de la profondeur, par une altération croissante de la composition du spectre et par la transformation de la plus grande partie de l'énergie incidente totale en énergie calorifique.

A cette énergie solaire s'ajoutent, en gains de chaleur pour les eaux superficielles, aussi bien le transfert par convection à partir de l'atmosphère que la condensation de la vapeur d'eau et la transformation de l'énergie cinétique des vents par frottement à la surface. Les pertes de chaleur sont, par contre, provoquées par les rayonnements de grande longueur d'onde émis par la surface, l'évaporation, le transfert par convection vers l'atmosphère lorsque celle-ci est plus froide que l'hydrosphère.

En surface, la température moyenne des eaux des océans croît des régions polaires (de — 1 à — 1,5 °C) jusqu'aux régions équatoriales (28 °C au large, plus de 30 °C dans certains golfes ou mers fermées). L'équateur thermique ne coïncide pas rigoureusement avec l'équateur géographique. Les lignes d'égales températures à la surface ne coïncident pas avec les latitudes en raison des altérations apportées par les courants de la circulation océanique.

La température des eaux de surface est affectée par les échanges thermiques entre celles-ci et l'atmosphère. Il en résulte des variations, les unes diurnes de faible importance relative, les autres saisonnières. Les variations diurnes ne sont notables que dans les premiers mètres. Les variations saisonnières reflètent, en les amortissant, compte tenu de la relative inertie thermique spécifique de l'eau, les variations de la température atmosphérique. Ces variations saisonnières sont faibles, de l'ordre de 1 à 3 °C dans les régions polaires et équatoriales, mais peuvent être très marquées aux latitudes moyennes (de l'ordre de 8 à 9 °C au large des côtes occidentales de l'Europe et de 12 à 13 °C en Méditerranée nord-occidentale).

La température, en fonction de la profondeur, présente le plus souvent des discontinuités, ou *thermoclines*. Ces discontinuités correspondent aux séparations entre couches de surface et couches profondes.

La thermocline principale est très marquée dans la ceinture tropicale et surtout dans les régions équatoriales, dans lesquelles la limite supérieure est située vers 100 m

▼ Ci-dessous, lecture de mesures (température et salinité) à bord d'un navire océanographique. En bas, à gauche, représentation graphique de la distribution des températures et des courants sur une section verticale au niveau du détroit de Gibraltar. A droite, répartition des températures dans les eaux océaniques en fonction de la profondeur.

Paul-Émile Victor - Pitch

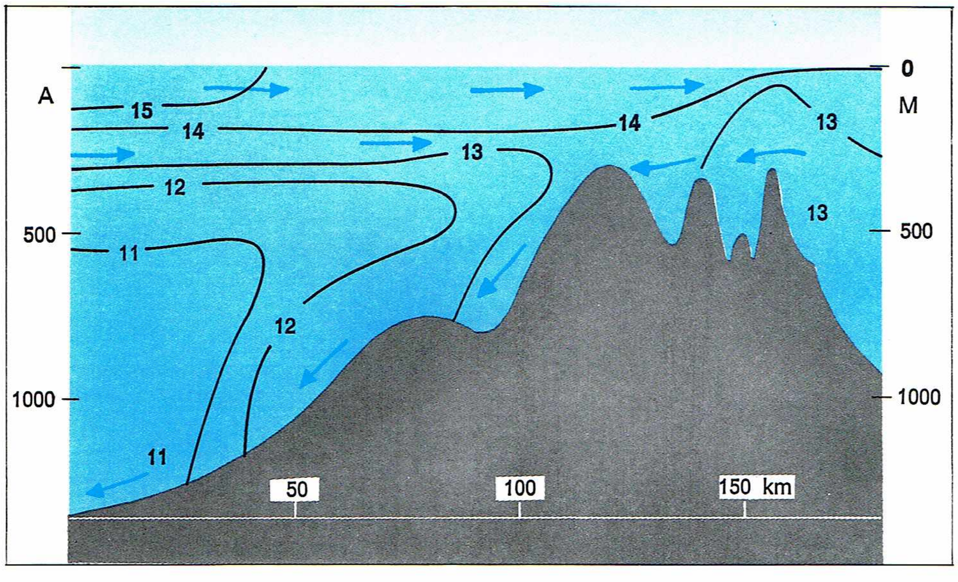

I.G.D.A.

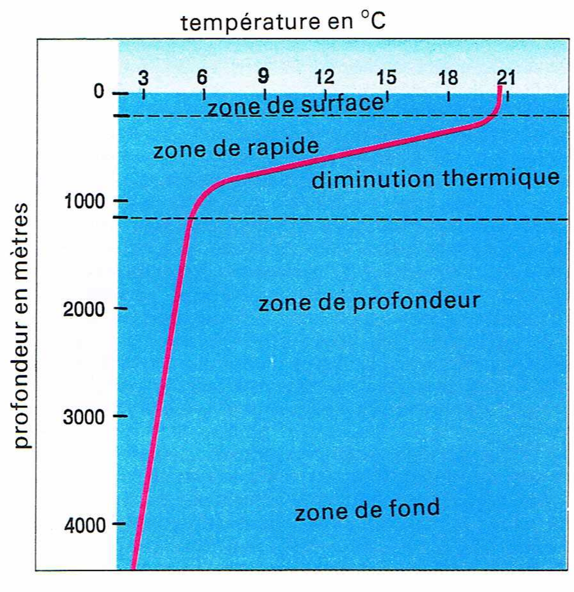

I.G.D.A.

de profondeur. Aux latitudes moyennes, cette limite supérieure peut descendre jusque vers 600 à 700 m. En allant vers les pôles, la thermocline principale tend à remonter vers la surface. Dans les deux hémisphères, elle atteint la surface vers 55° de latitude et se manifeste par un front thermique très net et caractérisé. Aux latitudes moyennes, comme on l'a vu précédemment, de fortes variations saisonnières des échanges de température entre l'hydrosphère et l'atmosphère se produisent. Des thermoclines saisonnières peuvent alors se superposer à la thermocline principale. L'évolution de ces thermoclines saisonnières a des conséquences directes sur les échanges verticaux entre les couches profondes riches en sels nutritifs et la couche superficielle où s'effectue la photosynthèse.

Dans les couches profondes des océans, au-dessous de la thermocline principale, la température décroît en fonction de la profondeur et tend à être uniforme et basse, étant comprise dans l'océan mondial entre 2 °C et un peu moins de 0 °C. Il en résulte que les trois quarts du volume total de l'océan ont une température comprise entre 0 et 6 °C, la température moyenne générale étant de l'ordre de 3,25 °C. Toutefois, il se produit un léger accroissement de température vers les grands fonds en raison des effets de la pression. C'est le réchauffement adiabatique, c'est-à-dire sans échange avec l'extérieur.

Un cas particulier est présenté par des mers fermées comme la Méditerranée. La température de ces mers est sensiblement constante à un niveau qui est celui de la température de l'océan mondial à la profondeur correspondant à celle du seuil qui fait communiquer l'océan et la mer considérée. En Méditerranée occidentale, par exemple, les eaux sont constantes à 13 °C environ depuis le fond jusqu'à 200 m de la surface.

La répartition de la **salinité** de surface dans les océans est fonction des zones géographiques en latitude. Elle se présente de la même façon dans l'océan Pacifique, dans l'océan Atlantique et dans l'océan Indien. On distingue en effet dans ces trois océans trois zones de salinité minimale. Ce sont la région équatoriale, ou plus exactement la région située vers 5° de latitude Nord (équateur thermique), et les hautes latitudes dans les deux hémisphères. Deux zones de salinité maximale les séparent, situées sous les tropiques, avec le même décalage vers le nord que l'équateur thermique.

On remarque que cette répartition est calquée sur celle des précipitations à la surface du globe, les maximums tropicaux de salinité correspondant aux déserts sur les continents. Les variations de la salinité des eaux de surface sont en effet commandées par l'évaporation et les précipitations.

Les salinités des eaux profondes sont beaucoup plus uniformes que celles des eaux de surface. Comprises entre 34,6 et 34,9 $^0/_{00}$, elles sont plus faibles que celles des eaux des régions tropicales, et se rapprochent de celles des eaux de surface des régions de hautes latitudes.

La température et la salinité, auxquelles s'ajoute la pression, conditionnent la **densité** des eaux des océans. Lorsqu'elles sont en présence sous la forme de grandes masses, deux eaux marines de densités différentes ne se mélangent pas, ou du moins ne se mélangent que d'une façon insignifiante par rapport aux volumes qu'elles représentent. Les différences de densité conditionnent ainsi les déplacements relatifs de ces masses d'eaux, la plus dense ayant toujours tendance à passer sous la plus légère. La température de densité maximale, qui est 4 °C pour l'eau douce, est plus basse pour l'eau des océans, en raison de la salinité. Pour une salinité de 15 $^0/_{00}$, elle est d'environ 0,7 °C. Pour une salinité de 35 $^0/_{00}$, elle sera de — 3,7 °C. Le point de congélation est aussi abaissé par la salinité. Il diminue de 0 °C pour l'eau douce à — 1,91 °C pour l'eau salée à 35 $^0/_{00}$. Pour les salinités supérieures à 24,7 $^0/_{00}$, qui sont universelles dans les océans, les eaux seront d'autant plus denses qu'elles seront plus froides jusqu'au point de congélation.

Au contraire, pour les salinités exceptionnellement inférieures à 24,7 $^0/_{00}$, ce qui est le cas dans la Baltique, mer fermée, la température de densité maximale est plus élevée que le point de congélation. Ainsi, lorsque la surface de cette mer se refroidit en raison des conditions atmosphériques sans pour cela atteindre le point de congélation, l'eau de la couche superficielle va flotter sur de l'eau profonde moins froide, mais plus dense. Il y aura en ce cas apparition d'un phénomène curieux de stratification thermique inverse, les températures étant plus basses en surface qu'en profondeur.

Une représentation essentielle pour la connaissance des comportements des masses d'eaux océaniques est la figuration simultanée des températures et des salinités sur des diagrammes T. S. (température et salinité). Quand des observations et des prélèvements d'eau de mer ont permis d'évaluer les valeurs de ces deux paramètres, on est en mesure de dresser une courbe où les températures sont en ordonnées et les salinités en abscisses. A côté de chaque point correspondant à une observation, on porte l'indication de la profondeur. Chaque portion rectiligne d'un diagramme, ou courbe T. S., permet de caractériser une masse d'eau. La comparaison de plusieurs diagrammes permet de suivre la destinée des masses d'eau dans une région considérée et d'apprécier leurs mouvements relatifs. Un principe général important est que, le plus souvent, les salinités sont plus caractéristiques des masses d'eau que les températures, même si les conséquences géographiques de la répartition des températures sont plus importantes.

La température, la salinité et la pression conditionnent conjointement deux propriétés importantes des eaux océaniques, qui sont la viscosité et la conductivité électrique.

La **viscosité** varie de la même façon que la densité, c'est-à-dire qu'elle croît avec la salinité et décroît avec

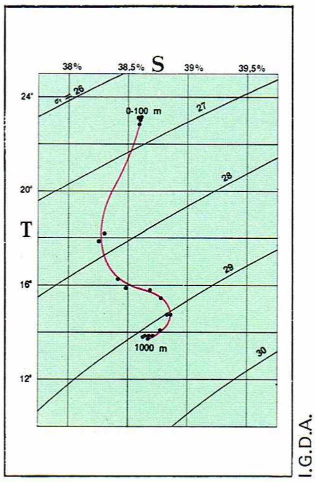

▲ *Diagramme T.S. (température et salinité) établi pour la connaissance des comportements des masses d'eaux océaniques.*

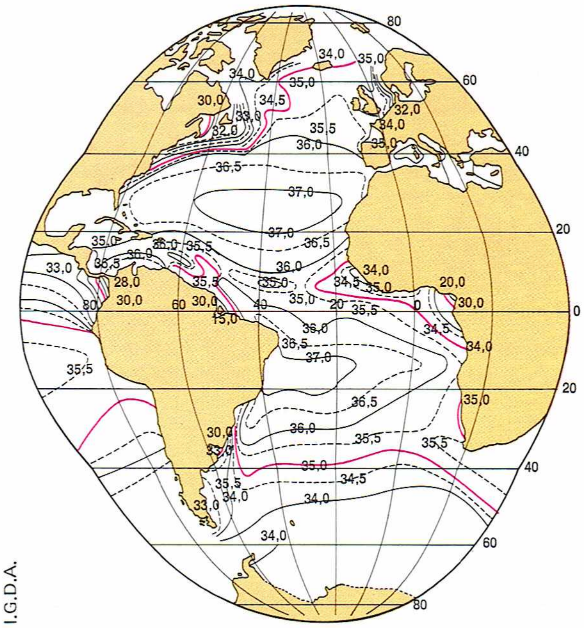

◀ *Représentation des salinités superficielles de l'océan Atlantique durant l'été (d'après Sverdrup-Johnson-Fleming).*

◀ *Graphique de la salinité des océans : elle varie en général avec la latitude, diminuant au voisinage des régions polaires sous l'action de la fonte des glaciers, et près des tropiques à cause de l'apport d'eau douce des grands fleuves.*

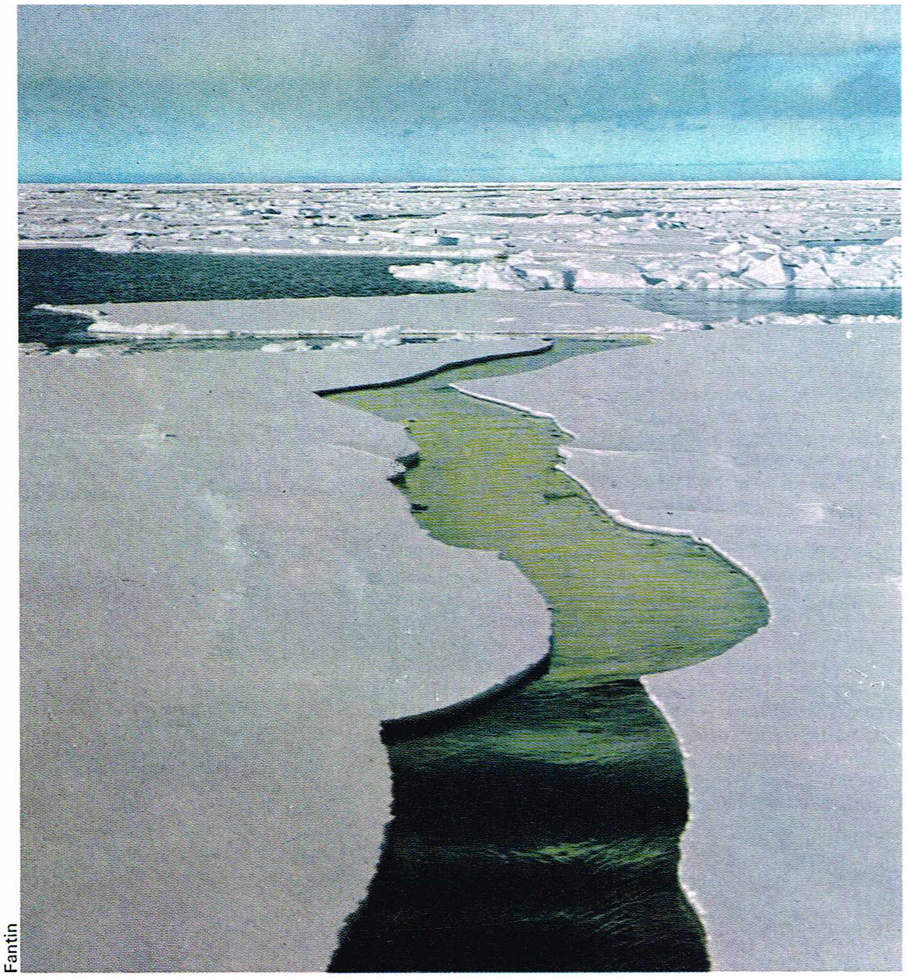
Fantin

▲ ***Un aspect de la mer de Ross montrant comment la banquise s'est fragmentée en* floes, *individualisés et séparés par des* polynies *ou formant sous l'action des agents atmosphériques des* hummoks.**

la température. Elle agit sur les processus de mélange de deux masses d'eaux et intervient par le jeu des forces de frottement dans la flottabilité des organismes vivant dans le milieu marin.

La **conductivité électrique**, à égalité de température et de pression, est fonction de la salinité. Le milieu marin, compte tenu de sa salinité moyenne de 24,7 ‰, est considéré comme un milieu conducteur dispersant.

Glaces de mer

La glace qui se forme lorsque le point de congélation de l'eau de mer est atteint, point d'autant plus bas que la salinité est plus forte, ne consiste pas en une congélation en bloc de tous les éléments de l'eau de mer. Il se forme d'abord des cristaux de glace plus ou moins pure qui enserrent des cellules ou de petites poches de saumures, dans lesquelles se concentre la majeure partie des sels. Il en résulte que la congélation de l'eau de surface sur une certaine épaisseur a pour conséquence un léger accroissement de la salinité de l'eau qui n'est pas passée à l'état solide, et donc une augmentation de sa densité. Il semble que la congélation lente soit plus favorable au dessalement complet de la glace résultante que la congélation rapide. A mesure que la température s'abaisse, la concentration des saumures augmente, la solubilité de certains sels est dépassée. Ces sels commencent à cristalliser. Le chlorure de sodium, en particulier, cristallise à la température de — 23 °C. La glace de mer est une sorte de bouillie contenant des poches de saumure qui sont d'autant plus petites que la température s'abaisse et que les sels cristallisent. La glace de mer est donc moins dure et moins compacte que la glace d'eau douce.

La *jeune glace,* qui se forme au début de l'hiver dans les eaux côtières des zones de hautes latitudes, est dite « glace fixe ». Cette glace peut dériver vers le large si le vent souffle de terre, ouvrant entre les radeaux de glace et la terre des espaces libres, les « polynies » où la jeune glace peut se reformer. Si le vent souffle vers la terre, la glace fixe et, éventuellement, les radeaux de dérive sont empilés contre la côte, formant des « murs de glace ». Les radeaux de dérive peuvent aussi se chevaucher en pleine mer, formant des empilements chaotiques appelés « hummocks ».

La jeune glace peut se former en haute mer comme sur les côtes par petits fonds, si les conditions sont requises en profondeur, l'eau étant en déséquilibre à la limite du point de congélation. Un cas assez fréquent de formation de jeune glace en haute mer est celui d'une chute de neige sur une zone océanique dont les eaux sont proches du point de congélation. Il se forme alors une *glace de neige* à partir d'une bouillie dans l'eau, puis de la *glace en assiettes* constituée de petits glaçons circulaires dérivant de l'agglomération en boules de la glace de neige.

A un stade ultérieur, la glace de mer forme un revêtement général troué de polynies, la *banquise*. Suivant qu'elle fond chaque année ou qu'elle demeure, cette banquise sera de la *glace d'hiver* ou de la *glace polaire*. La banquise permanente polaire peut atteindre une épaisseur de 4,50 m en mer Polaire Arctique. Les glaces polaires les plus âgées sont les plus compactes et se rapprochent des glaces d'eau douce sous cet aspect.

Les stades de régression du phénomène de glaciation comprennent d'abord une fragmentation de la banquise en « floes » individualisés, qui peuvent encore former des « hummocks » sous l'influence du vent.

La glace de mer a plus de tirant d'eau, à volume égal, que les « icebergs » dérivants, de glace d'eau douce, qui proviennent de glaciers terrestres aboutissant à la mer. En raison des saumures qu'elle contient, elle enfonce des 5/6, alors que les icebergs, de densité plus faible, n'enfoncent que des 4/5.

Les mouvements de la mer

Parmi les mouvements dont sont animées les masses d'eaux océaniques constituant l'hydrosphère à la surface de la planète, les uns, de caractère périodique, sont les *marées* et les *courants* qu'elles engendrent. Les autres, de caractère périodique également, mais dont l'apparition est épisodique, comprennent les *houles* et les *vagues,* ainsi que les *ondes longues* et les *ondes de tempête*. Enfin, les *courants marins* sont apériodiques et peuvent être engendrés soit par des forces issues de différences de densité entre deux masses d'eaux océaniques, soit par des forces atmosphériques, comme la pression barométrique, l'effet du vent sur la surface ou les forces engendrées par des différences de niveau entre deux points de l'océan.

Tous les mouvements dans l'hydrosphère sont influencés par la force de Coriolis, accélération due à la rotation de la Terre.

Les marées

Les marées océaniques sont des mouvements oscillatoires de l'hydrosphère qui répondent à l'action gravitationnelle du Soleil et de la Lune. La force d'attraction de la Lune, plus forte que celle du Soleil en raison de la proximité du satellite de la planète Terre, détermine la composante principale de la marée que la force d'attraction du Soleil module. L'amplitude est maximale lorsque Terre, Lune et Soleil sont en conjonction. Elle est minimale lorsque la Lune est à 90° de la direction du Soleil. Une troisième modulation est apportée par le rythme des saisons, au moment des équinoxes, lorsque Lune, Terre et Soleil sont en conjonction sur le plan de l'écliptique. Cette modulation amplifie les mouvements oscillatoires, qui sont alors les grandes marées.

Le calcul de la force génératrice des mouvements est fondé sur l'hypothèse selon laquelle les masses s'attirent proportionnellement à leur produit et, inversement, proportionnellement au carré de leur distance. Dans le mouvement relatif de la Terre par rapport à un astre, tout se passe comme si toute la masse de la Terre était concentrée en son centre. Si l'on considère une particule isolée placée à la surface de la Terre, l'attraction que cet astre exerce sur elle est différente, en grandeur et en direction, de l'attraction qu'elle subirait si elle était placée au centre de la Terre. La différence entre ces deux attractions définit la force génératrice de la marée, toujours très petite par rapport à la pesanteur, et provoque un déplacement de la particule considérée par rapport au centre de la Terre. Cette force génératrice est inversement proportionnelle au cube de la distance de la Terre à l'astre. C'est pourquoi la Lune, dont la distance à la Terre est faible, a une influence appréciable sur le phénomène de marée.

La force génératrice est maximale au point du globe pour lequel l'astre est au zénith ou au nadir. La composante horizontale agit dans le même sens en tous les points d'un même quart de méridien et entraîne une

légère modification de la pesanteur. La profondeur relative des océans étant faible par rapport au rayon de la sphère terrestre, toutes les mêmes molécules d'eau d'une même verticale dans l'océan subissent à un moment donné des forces pratiquement identiques.

Le mouvement diurne de la rotation de la Terre autour de l'axe des pôles fait défiler dans le champ des forces génératrices de la marée les molécules d'eau océaniques. Comme les déclinaisons du Soleil et de la Lune et leurs distances à la Terre varient, on observera des variations dans l'amplitude de la marée.

Au moment des syzygies, c'est-à-dire lorsque la Terre, le Soleil et la Lune sont alignés (Nouvelle ou Pleine Lune), la force génératrice est maximale, et l'on observe une marée de vive-eau. Au contraire, à l'époque des quadratures (premier et dernier quartier de la Lune), les attractions dues au Soleil et à la Lune se contrarient. La force résultante est plus faible, et l'on observe une marée de morte-eau.

La force génératrice des marées est donc éminemment périodique et comprend plusieurs composantes : la composante semi-diurne, de période 12 heures 24 minutes ou 12 heures, selon qu'il s'agit de la Lune ou du Soleil; la composante diurne, de période 24 heures 50 minutes ou 24 heures, car l'attraction de jour est plus forte que celle de nuit en raison de la variation de distance de la Terre à l'astre; la composante bimensuelle, de période 14 jours 18 heures, due aux positions respectives de la Lune et du Soleil, à la moitié de l'intervalle séparant deux de leurs conjonctions; la composante mensuelle, de période 27 jours et 13 heures, due aux positions respectives de la Lune et de la Terre, pendant la durée s'écoulant entre deux passages de la Lune au périgée; la composante annuelle, due à la variation de la distance de la Terre au Soleil et à la déclinaison du Soleil. Les plus fortes marées ont lieu aux Pleines et Nouvelles Lunes d'équinoxe, comme on l'a vu précédemment, alors que le Soleil se trouve à l'intersection du plan de l'équateur et de celui de l'écliptique.

La marée en un point donné tire son caractère essentiel de l'onde-réponse à la force génératrice dont l'amplitude est prépondérante. On considère, en fonction de cette onde prépondérante, quatre principaux types de marées : la marée semi-diurne régulière, la marée diurne régulière, la marée semi-diurne à inégalité diurne et la marée mixte.

Les marées se font sentir partout dans l'océan mondial. Mais leurs effets se manifestent avec plus ou moins de force selon les régions, notamment en fonction des contours des côtes. En haute mer, la marée provoque une élévation du niveau des eaux de l'ordre du décimètre. Elle passe quasiment inaperçue sur le littoral des îles isolées et des archipels éloignés des continents, comme les Antilles et la Polynésie. Par contre, une amplitude de marée très importante et des marnages (le marnage est la différence de hauteur d'eau entre la pleine mer et la basse mer précédente ou suivante) considérables sont observés sur les côtes atlantiques françaises et britanniques, ainsi qu'en plusieurs points du littoral atlantique canadien. On a pu mesurer au Canada, dans la baie de Fundy, en Grande-Bretagne dans l'estuaire de la Severn, et en France dans la baie du Mont-Saint-Michel, des amplitudes de marée comprises entre 13 et 16 m.

De telles amplitudes sont dues à un phénomène de résonance. Sous l'influence de la force génératrice des marées, en effet, d'importantes masses d'eau sont mises en mouvement selon un rythme régulier, à des fréquences caractérisant l'attraction cosmique dont elles sont l'objet. Des contours de côtes s'opposant à la direction générale du mouvement provoquent des oscillations des masses d'eau pendant le flux et le reflux. Lorsque la fréquence de ces oscillations est proche de celle des ondes de marée, il y a résonance, donc augmentation considérable de l'amplitude.

A l'opposé, les volumes d'eau contenus dans les mers fermées comme le bassin méditerranéen ne connaissent aucune fréquence d'oscillation proche des fréquences des ondes de marée. Il n'y a pas de résonance possible. Les ondes océaniques ne pouvant pénétrer dans ces bassins fermés, l'effet de l'attraction du Soleil et de la Lune sur une masse liquide confinée n'engendre qu'une amplitude ne dépassant pas le décimètre. Dans l'océan mondial ouvert, au contraire, les fluctuations de niveau intéressent toutes les eaux jusqu'aux fonds océaniques. On a pu mesurer des ondes de marée jusqu'à 5 000 m de profondeur.

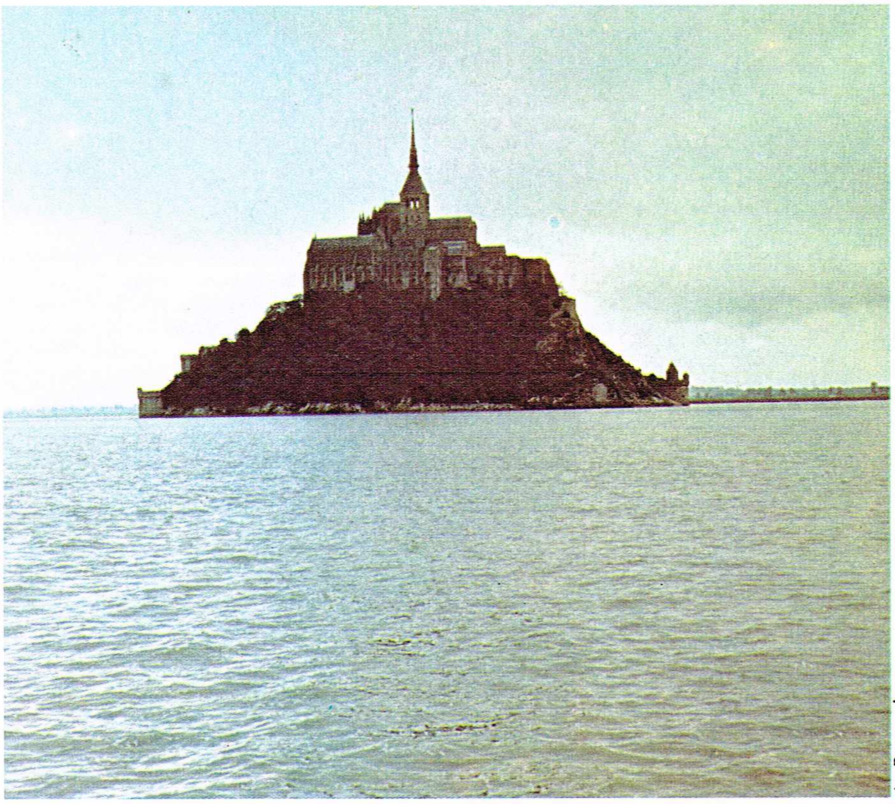

A. Perceval

▲ Le Mont-Saint-Michel lors de l'exceptionnelle marée haute de mars 1967,

▼ Vue aérienne du Mont-Saint-Michel à marée basse. Cet îlot de la côte normande est soumis au régime des marées diurnes à fort marnage.

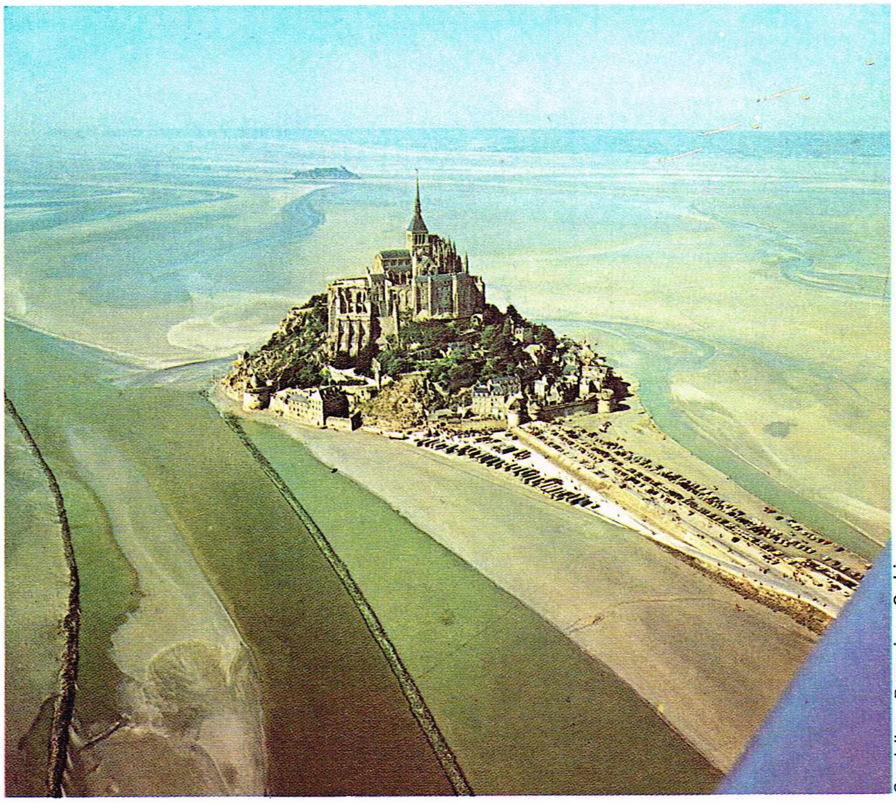

Candelier - Brumaire - Cedri

Les courants de marée

Les marées engendrent des courants dont l'importance dépend de l'amplitude de la marée, elle-même variable suivant les conditions locales et les variations de la force génératrice. La période de ces courants dépend du régime de la marée, le plus souvent diurne ou semi-diurne. La marée montante provoque un courant dit de *flot*, et la marée descendante un courant dit de *jusant*, qui sont

▶ *Page ci-contre, en haut, les trois illustrations montrent : à gauche, une agitation de surface, en présence de vent qui se lève, appelée* mer du vent *; au centre, par vent fort, l'agitation est constituée par des lames à longues crêtes, c'est la* houle *; à droite, dans la* mer en tempête, *l'onde se brise, et l'écume est traînée par le vent.*

de sens opposé. Flot et jusant, flux et reflux, sont séparés par une brève période pendant laquelle le courant est nul. C'est l'*étale,* de basse mer ou de pleine mer. La force de Coriolis agit sur les ondes de marée, qui sont également très sensibles à la morphologie des fonds et aux phénomènes de réflexion sur les rivages, notamment dans les mers étroites. L'importance des courants de marée pour la navigation conduit à l'établissement de cartes de marées, ou cartes cotidales, sur lesquelles des lignes joignent les points d'un bassin auxquels la marée se produit au même moment. Les lignes cotidales convergent vers des points dits amphidromiques, ou de marée nulle. Des exemples connus de courants de marée dangereux pour la navigation, atteignant des vitesses relativement élevées dans les passages étroits, sont celui du Maelström dans les îles Lofoten au large des côtes norvégiennes, qui engendre un vaste tourbillon aux renversements de marée, et celui du raz Blanchard dans la Manche, entre le Cotentin et les îles anglo-normandes, dont la vitesse peut dépasser dix nœuds (18 km/h).

Les houles et les vagues

Les houles et les vagues sont les mouvements de l'hydrosphère les plus apparents à l'œil de l'observateur. Ces ondes océaniques sont lentes si on les compare aux ondes électromagnétiques, aux ondes sonores et même aux ondes sismiques.

L'origine la plus fréquente de l'agitation de la surface de l'hydrosphère est celle de l'atmosphère sous la forme du vent. Trois facteurs interviennent pour créer houle et vagues : en premier lieu la force du vent, en second lieu sa durée, enfin l'étendue de la surface océanique sur lequelle il peut s'exercer. On estime que la hauteur, ou creux, d'une vague, ne peut dépasser en centimètres dix fois la vitesse du vent mesurée en kilomètres à l'heure.

Le vent est engendré par une dépression atmosphérique qui se déplace elle-même à une vitesse qui est de l'ordre de celle des vagues. Une agitation de la surface, en présence du vent qui la lève, est appelée *mer du vent.*

Lorsque cette agitation est propagée au cours du temps vers des zones marines éloignées de la région intéressée par la dépression qui lui a donné naissance par actions atmosphère-océan, les vagues perdent peu à peu de leur hauteur, et leur longueur d'onde s'étire. Les lames les plus longues se propagent plus vite que les courtes. Il s'opère ainsi au cours du temps un étalement de la zone d'agitation. La dépendance entre la vitesse de propagation, ou célérité, des lames et leur longueur constitue la *dispersion*. Les lames les plus courtes subissent, par frottement et turbulence, des pertes d'énergie plus considérables que celles subies par les lames longues. Il y a amortissement sélectif des composantes de période courte.

Il résulte du triage des lames, opéré par la divergence en direction, par la dispersion, par l'amortissement sélectif des fréquences élevées, qu'une agitation parvient dans une zone très éloignée de celle dans laquelle elle a pris naissance. Cette agitation est constituée par des lames à longues crêtes, dont l'amplitude et la période ne varient que lentement avec le temps. C'est la *houle*. A la limite, la houle s'identifierait à une onde cylindrique de période unique dite « monochromatique », à profil sensiblement sinusoïdal. En évoluant avec le temps, les lames de la houle, provenant de la mer du vent suscitée dans une dépression atmosphérique en déplacement, ont en un point donné des périodes de plus en plus courtes au fur et à mesure que parviennent en ce point les lames initiales moins longues. Il y aura diminution constante de la période tandis que l'amplitude augmente, passe par un maximum, puis décroît.

Au cours de la propagation d'une houle monochromatique au large, l'énergie cinétique des lames tend à se concentrer dans les crêtes. Il y a un transport général d'eau en surface dans la direction de propagation. Le profil de la crête devient anguleux, l'angle entre les plans des faces avant et arrière de la lame atteint 120°. A ce stade, la houle est à la limite de stabilité, avec une cambrure maximale, au-dessus des grands fonds, de 14 %, au-delà de laquelle la lame « déferle ». Cette cambrure limite est plus faible par petites profondeurs. Dans l'océan Pacifique, la vitesse moyenne de la houle océanique est de l'ordre de 55 kilomètres à l'heure et est la plus élevée de tout l'océan mondial, compte tenu de l'importance des surfaces de formation. Dans l'océan Atlantique, la houle moyenne présente une vitesse de l'ordre de 45 kilomètres à l'heure.

Arrivant à proximité des côtes, par petits fonds, la houle se comporte comme une « onde de masse », dont la vitesse et la longueur d'onde seront alors proportionnelles à la racine carrée de la profondeur. La façon dont la houle déferlera sur le littoral dépendra donc de la nature des fonds. Si ceux-ci se relèvent très abruptement à l'approche des côtes, la houle se brise avec une énergie importante. Cette énergie est, depuis la formation des océans, l'agent quotidien et patient du modelage des rivages.

F. Mosetti

Titus

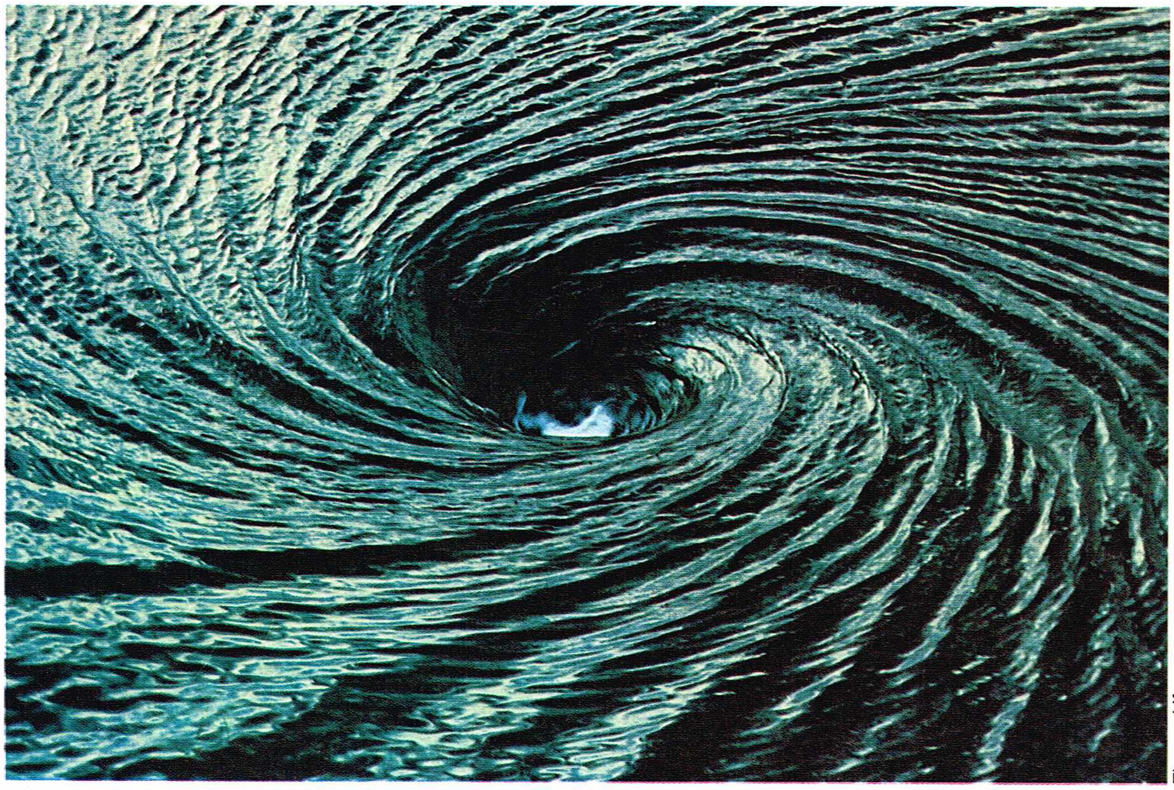

Time - Life

▶ *Le Maelström : tourbillon dû à des courants de marée et situé près de la côte norvégienne. Son mouvement est régulier et incessant.*

F. Mosetti

F. Mosetti

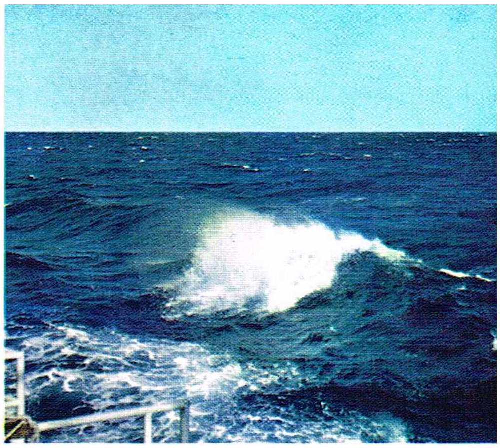

S. Prato

Une meilleure connaissance des conditions de formation de la mer du vent, des vagues et de la houle permettrait de prévoir l'importance de l'amplitude des lames ainsi que le moment où les ondes de masse atteindraient une zone déterminée du littoral.

Les courants marins

A la différence des mouvements des marées et de ceux des vagues et de la houle, les courants marins sont des mouvements apériodiques.

Les courants sont tous les déplacements de masses d'eau océanique, que ces déplacements aient un caractère local ou qu'ils participent au contraire à la circulation générale de l'océan mondial. Un courant est défini par sa vitesse, par sa direction et par le volume d'eau transporté.

Le paramètre direction comporte, en plus d'une orientation géographique, un angle de site. Il y a, en effet, des courants horizontaux, des courants obliques, des courants verticaux. Ces deux derniers peuvent se manifester sous la forme de « plongées » d'eaux de surface, ou de « remontées » d'eaux profondes *(upwellings)*. Les trois paramètres peuvent pour un même courant, et surtout si ce courant présente une certaine extension, varier dans le temps et dans l'espace.

Les courants sont créés par trois catégories de forces : les forces génératrices des marées, que l'on a traitées précédemment (*cf.* courants de marée), les forces issues des différences de densité entre les masses d'eaux, les forces issues du frottement du vent sur les eaux de surface.

— Les *courants de vent* résultent de l'entraînement des molécules superficielles d'eau. Le frottement de ces molécules les unes sur les autres transmet le mouvement en profondeur, mais en même temps absorbe une partie

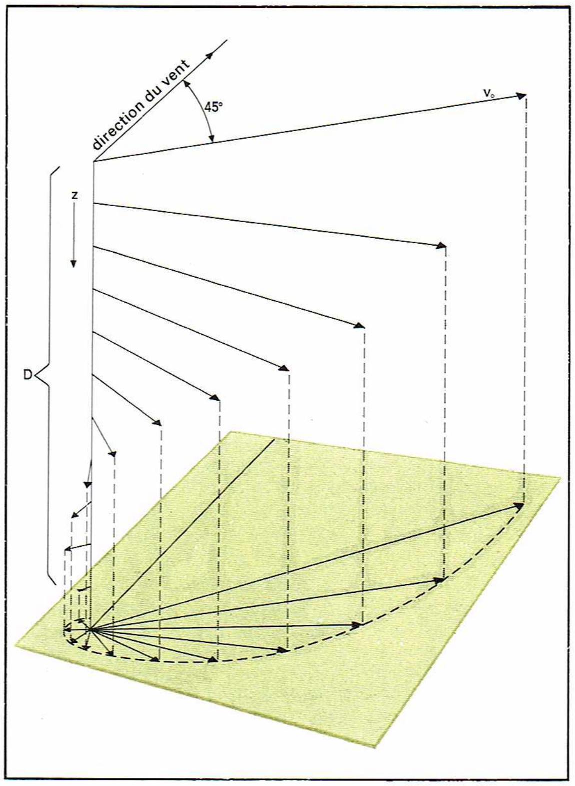

I.G.D.A.

▲ *Ci-dessus, à gauche, quand l'onde se meut sur des fonds bas, le creux de la vague avance plus lentement que la crête ; c'est ce que l'on observe généralement près des plages. A droite, à proximité des côtes basses, les ondes se disposent parallèlement à celles-ci (côte occidentale de la Nouvelle-Zélande).*

◀ *La spirale classique d'Ekman indique la distribution, en fonction de la profondeur z, du courant provoqué par le vent. Le courant superficiel est dévié de 45° par rapport à la direction du vent ; progressivement, la déviation augmente et l'intensité du courant diminue. A une profondeur D, déterminable sur la base des caractéristiques physiques de l'eau, la direction du courant est inversée par rapport à la surface.*

de l'énergie reçue. On observe une réduction de la vitesse du courant proportionnelle à sa profondeur. La force de Coriolis intervient également : elle dévie le courant au fur et à mesure qu'il s'enfonce, jusqu'à inverser parfois sa direction par rapport à celle de la partie en surface.

— Les *courants de densité* résultent de la tendance qu'ont les eaux de densités différentes à ne pas se mélanger. La densité de l'eau de mer est fonction de sa température et de sa salinité. On a vu qu'en raison de l'absorption de l'énergie solaire par la couche superficielle des eaux océaniques, les eaux de surface sont plus chaudes que les eaux profondes. Il existe aussi un gradient de température qui est fonction de la latitude, les régions de la ceinture tropicale étant les plus ensoleillées, et fonction de la profondeur. Il arrive cependant dans certaines zones et en particulier dans les régions polaires, ou plus paradoxalement en Méditerranée occidentale, que les eaux de surface deviennent plus froides et plus denses que les eaux sous-jacentes par évaporation sous l'action de vents froids. Ces eaux de surface plongent alors vers le fond, en colonnes très individualisées, et deviennent des eaux profondes.

Les eaux de densités différentes sont séparées par des surfaces de discontinuité qui peuvent être quasi verticales ou presque horizontales. Les masses d'eaux chaudes et légères du Gulf Stream venues de la ceinture tropicale dans l'Atlantique Nord sont déportées vers l'est par les masses d'eaux froides et denses formées en partie sur le plateau continental américain, et en partie influencées par des apports très froids venus de la mer du Labrador. On a vu que ces surfaces de discontinuité, ou thermoclines, sont importantes au point de vue biologique, car elles favorisent le développement du cycle de vie, donc de production de matière vivante dans l'hydrosphère.

La circulation générale de l'océan mondial

Les forces issues des vents et les forces de densité n'agissent pas indépendamment. On peut cependant admettre que les courants de vent prédominent aux latitudes moyennes et basses où la direction et la vitesse des vents sont relativement constantes, alors que les courants de densité ont un rôle plus important aux hautes latitudes.

— La *circulation superficielle* n'intéresse qu'une couche d'eau de l'ordre de 100 à 200 m, toujours plus mince dans les basses latitudes et plus épaisse dans les mers polaires.

De part et d'autre de la zone des calmes équatoriaux, les alizés forment deux courants (nord- et sud-équatoriaux) qui transportent vers l'ouest des volumes importants, alimentant les circuits anticycloniques nord et sud. Le long des rives orientales des grands océans, ces courants nord- et sud-équatoriaux reçoivent des eaux issues des hautes latitudes. A partir du sud, il s'agit d'eaux de la grande dérive circumantarctique issue des grands vents d'ouest soufflant au-delà de 40° de latitude sud et qui forment des courants sur la rive ouest des masses continentales : courant de Humboldt (côtes du Chili et du Pérou), courant ouest-australien, courant de Benguela le long de la côte sud-occidentale de l'Afrique. Ces courants, déviés vers la gauche par la force de Coriolis et renforcés par des vents de direction générale sud-nord, créent entre eux et la côte un soulèvement d'eau des profondeurs intermédiaires qui contribue encore à gonfler les courants sud-équatoriaux. Dans l'hémisphère Nord, les courants nord-équatoriaux sont également alimentés par des courants qui descendent en latitude : courant de Californie, courants du Portugal et des Canaries, grossis eux aussi par des phénomènes de soulèvement d'eaux intermédiaires dus aux mêmes causes que dans l'hémisphère Sud. L'origine subpolaire des eaux qui bordent les rives orientales des océans, en même temps que les phénomènes d'*upwelling* qui s'y développent, sont la cause des anomalies négatives de température et de leurs conséquences climatiques.

Lorsqu'elles viennent se heurter aux rives occidentales des océans, les eaux superficielles chaudes transportées par les courants équatoriaux sont déviées, vers la droite dans l'hémisphère Nord, vers la gauche dans l'hémisphère Sud, et se dirigent vers les latitudes moyennes, pour donner ces grands courants que sont le Kuro-Shio dans le Pacifique Nord et le Gulf Stream dans l'Atlantique Nord, et, pour l'hémisphère Sud, le courant est-australien

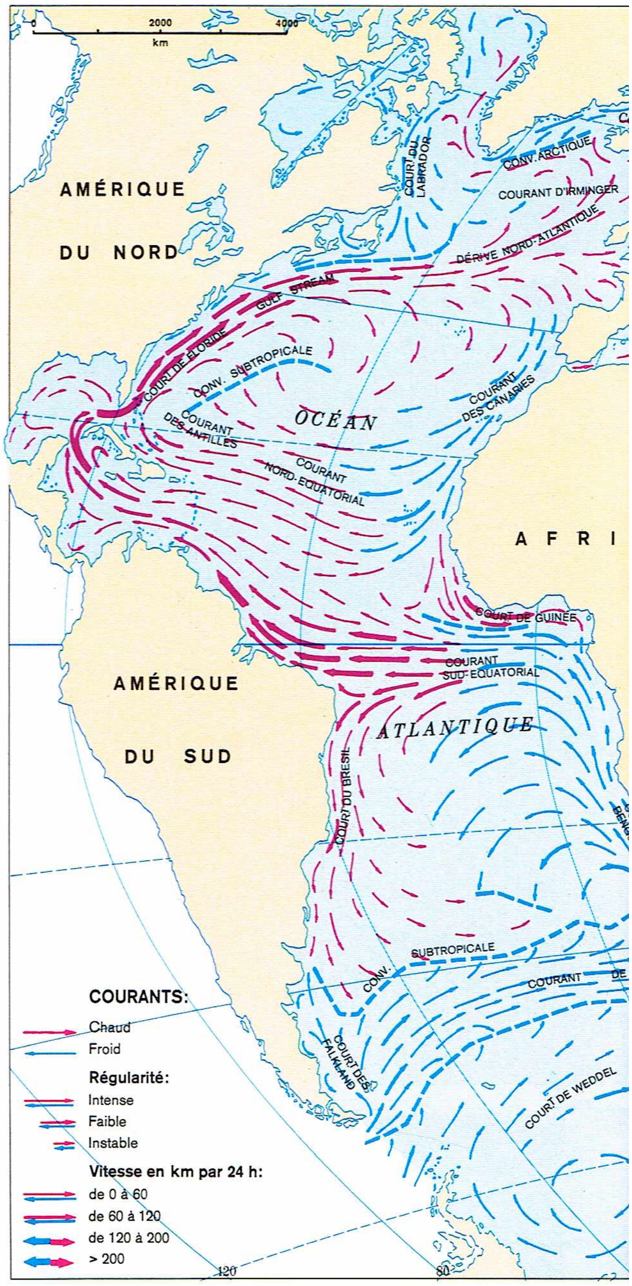

dans le Pacifique, le courant du Brésil dans l'Atlantique, le courant est-malgache continué par le grand courant des Aiguilles dans l'océan Indien. L'importance des transports d'est en ouest par les courants équatoriaux crée un certain déficit sur les rives orientales des océans, malgré l'apport des eaux des hautes latitudes et des eaux d'*upwelling*. Ce déficit n'est qu'insuffisamment compensé par un contre-courant équatorial portant à l'est, situé entre les courants nord- et sud-équatoriaux. Le contre-courant équatorial n'ayant qu'un faible débit, la différence de niveau entre les rives occidentales et orientales des océans est compensée par un puissant courant de compensation subsuperficiel coulant au-dessus du contre-courant équatorial et du courant sud-équatorial jusqu'à une profondeur variant de 100-150 m à 500-700 m. Ce contre-courant comporte trois veines presque parallèles dans le Pacifique (courant de Cromwell) et dans l'Atlantique (courant de Lomonossov), et deux veines seulement dans l'océan Indien.

— La *circulation dans les couches intermédiaires, profondes et de fond* trouve son origine essentielle dans les eaux superficielles des très hautes latitudes ; celles-ci présentent une forte tendance à l'augmentation de densité, d'une part parce que les températures sont très basses, d'autre part parce que la formation de glace augmente la

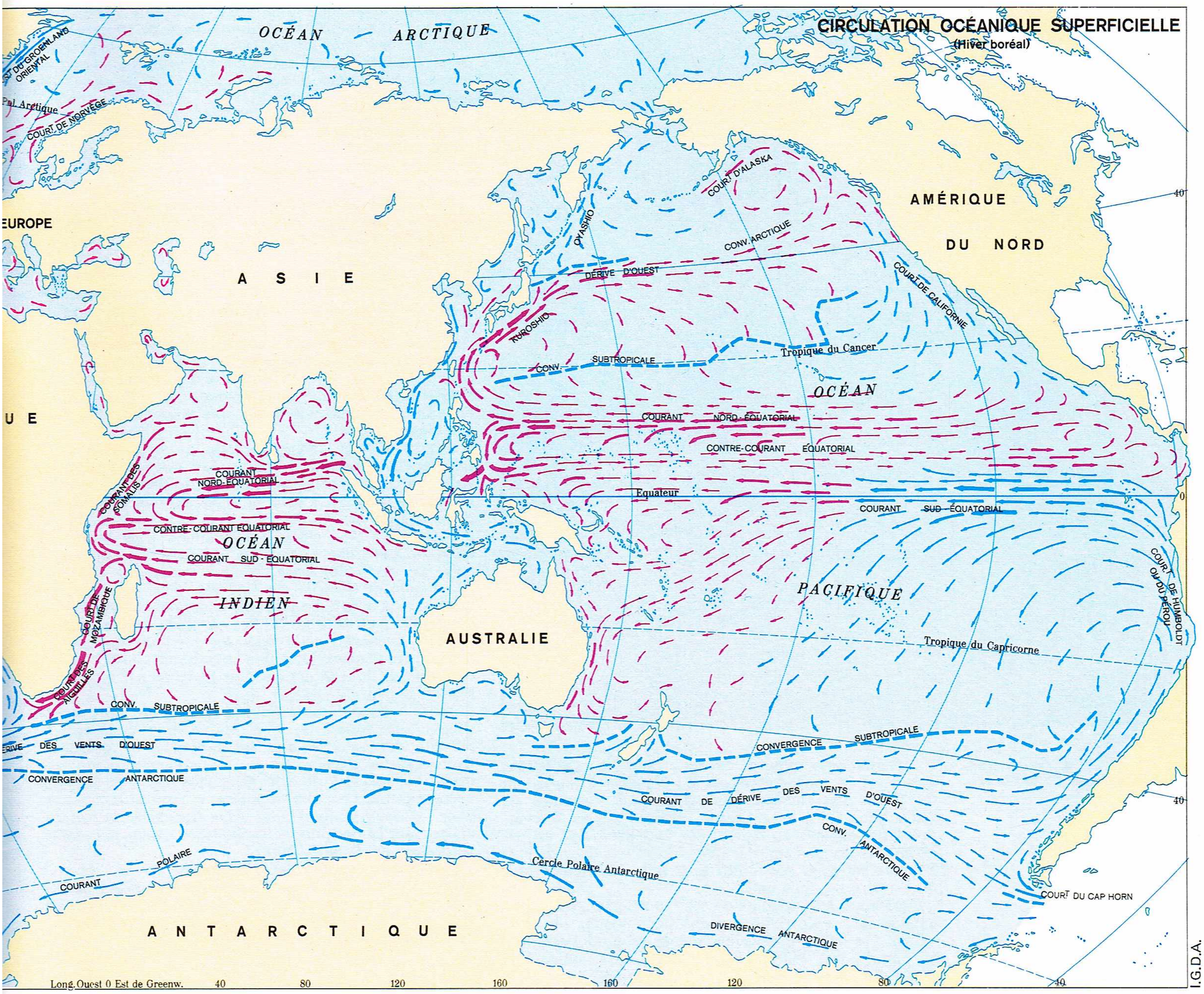

▲ ***La circulation océanique superficielle (hiver boréal) n'intéresse qu'une couche d'eau de l'ordre de 100 à 200 m, toujours plus mince dans les basses latitudes et plus épaisse dans les mers polaires.***

salinité. Ces eaux de densité élevée ont tendance à tomber le long des talus continentaux des mers polaires et viennent former les eaux profondes et de fond de l'océan mondial. Leurs mouvements sont affectés par la force de Coriolis mais elles peuvent aussi être *canalisées* par certains traits majeurs du relief sous-marin. Les lieux de formation de ces eaux profondes et de fond sont, en fait, très localisés, les deux principaux étant la mer de Weddell et la mer de Ross, en bordure du continent antarctique. Dans les régions polaires Nord, la faible profondeur du détroit de Béring empêche pratiquement les eaux du bassin glacial arctique de s'écouler vers les profondeurs du Pacifique ; en revanche, des eaux issues de ce bassin pénétrant dans la mer du Groenland et la mer de Norvège s'écoulent de façon épisodique dans l'Atlantique Nord, par-dessus le seuil qui barre transversalement cet océan depuis la côte est du Groenland jusqu'à la Scandinavie, en passant par l'Islande et les îles Féroé (seuil dont la profondeur n'excède jamais 1 000 m).

D'une façon générale, les eaux profondes et de fond, issues des centres de formation proches de l'Antarctique, s'écoulent vers le nord, alors que celles qui passent par-dessus le seuil de l'Atlantique Nord s'écoulent vers le sud.

D'autres masses d'eau issues des très hautes latitudes, mais de densité moindre, ne plongent vers les couches intermédiaires qu'au niveau des fronts polaires, situés dans les deux hémisphères entre 50° et 55° de latitudes Nord et Sud, et tendent à descendre en latitude, en même temps qu'elles descendent vers des profondeurs de plus en plus grandes.

Certains mouvements verticaux ont une grande importance. Le refroidissement hivernal des eaux superficielles, dans les mers tempérées, par exemple, accroît la densité des eaux superficielles et provoque des courants de convection assurant un brassage vertical, qui favorise le renouvellement des sels minéraux nutritifs nécessaires à la production végétale au sein de la couche éclairée. Les *upwellings* formés entre la côte et un courant de direction parallèle à celle-ci en sont un autre exemple.

L'énergie dynamique et l'énergie thermique des océans

Constituant 71 % de la surface de la Terre, réservoir de 1,4 milliard de km^3 d'eaux absorbant la majeure partie du rayonnement solaire reçu par la planète, perpétuellement animé par les marées, les vagues, la houle et les courants, l'océan mondial représente un important potentiel d'énergie dynamique et d'énergie thermique.

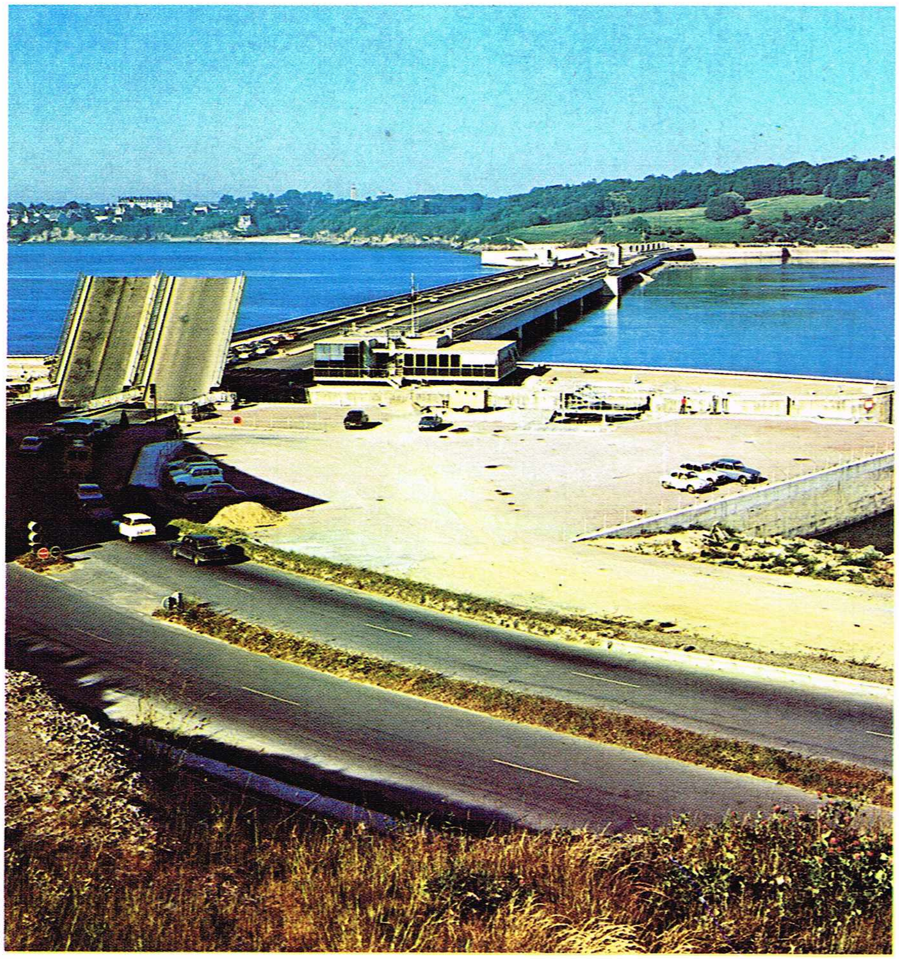

Claude Rives - Marina - Cedri

▲ ***La centrale marémotrice de la Rance.***

La tentation a toujours été forte pour les populations vivant sur les côtes d'essayer de maîtriser à leur profit les forces des marées. Les populations riveraines de l'Atlantique Nord, en Bretagne, en Espagne, en Grande-Bretagne, ont mis en œuvre, dès le Moyen Age et jusqu'au développement de l'âge industriel, des moulins à marée entraînés par le flux et le reflux de la mer dans un estuaire ou dans une baie.

On a vu que l'amplitude de ces mouvements est considérablement augmentée par des phénomènes de résonance. Les sites où les phénomènes se produisent sont en nombre très limité dans le monde. Leur équipement assez dispendieux et leur faible rendement, comparé à celui des centrales thermiques classiques ou nucléaires, justifieraient l'installation d'usines marémotrices destinées à la production d'électricité seulement dans des zones actuellement non desservies par les réseaux existants.

La centrale française de l'estuaire de la Rance, mise en service en 1966, comprend vingt-quatre groupes bulbes, ayant, chacun, une puissance nominale de dix mégawatts. En raison des heures de marées, et malgré un fonctionnement flux-reflux, grâce aux cent quatre-vingts millions de mètres cubes du bassin de retenue, l'énergie produite par an est de l'ordre de cinq cents millions de kilowatts-heures, contre cinq milliards de kilowatts-heures pour une centrale nucléaire de mille mégawatts. Son grand intérêt est de ne consommer aucun combustible et d'utiliser des forces toujours renouvelées n'engendrant aucune nuisance.

Plusieurs pays envisagent l'installation de centrales marémotrices. Ce sont : la Grande-Bretagne, dans l'estuaire de la Severn ; l'Union soviétique, en mer Blanche et en mer de Barents ; les États-Unis, dans la baie de Cook, en Alaska, et, en collaboration avec le Canada, dans la baie de Fundy, entre les côtes américaines du Maine et les côtes canadiennes de la Nouvelle-Écosse. Ce dernier site est, à tous égards, le plus exceptionnel que l'on puisse trouver au monde.

La structure des eaux de l'océan mondial permet d'imaginer un procédé fondamentalement simple, mais de réalisation technique peu aisée pour une production d'énergie. Il s'agit d'utiliser la différence de températures entre les eaux chaudes de surface et les eaux froides du fond. Georges Claude fut, entre les deux guerres mondiales, le promoteur du captage de « l'énergie thermique des mers ».

Les eaux profondes des océans, d'une température variant entre 0 et 5 °C, sont formées dans les régions polaires en raison du phénomène de plongée des eaux froides et denses, et se répandent sur les fonds en fonction de la circulation océanique mondiale.

Dans la ceinture tropicale, les eaux de surface peuvent atteindre une température de 25 à 30 °C. L'écart de température entre les eaux de fond et les eaux de surface peut donc varier entre 20 et 30 °C.

Dans une machine thermodynamique utilisant cet écart, on cherchera à soumettre l'eau chaude de surface à une pression lui permettant de se vaporiser dans un évaporateur. Cette vapeur passera par une turbine avant d'être condensée dans un condensateur refroidi par une circulation des eaux de fond, à une pression trois fois plus faible que celle qui règne dans l'évaporateur. La différence de pression ainsi obtenue est suffisante pour entraîner un turbo-alternateur produisant de l'énergie électrique.

Une partie de l'énergie produite est utilisée pour pomper l'eau de fond. On remarquera sur ce point que la structure volcanique et corallienne des îles du Pacifique permet de trouver les eaux profondes à proximité immédiate des côtes, et de faire émerger la conduite de pompage en eaux calmes, à l'intérieur d'un lagon. Le débit de pompage nécessaire est de l'ordre du mètre cube par seconde, pour une production de 400 kW. Le rendement d'un tel système est faible et ne saurait dépasser 7 à 8 %. Mais sur le plan économique et dans les conditions particulières des îles ou côtes situées dans la ceinture tropicale, cette faiblesse ne présente pas un grand inconvénient, puisque *l'installation n'utilise aucun combustible* dont le coût oblige à rechercher un rendement maximal.

Jusqu'à présent, les difficultés techniques, notamment celles de la tenue à la mer d'une conduite de pompage profond des eaux froides, ont empêché la réalisation d'installations d'utilisation de l'énergie thermique des mers. La solution de ces difficultés est, par ailleurs, nécessaire pour enrichir en éléments minéraux contenus dans les eaux profondes les eaux tropicales de surface, où peuvent se développer les élevages d'animaux marins (programmes d'aquaculture).

Les océans captent la majeure partie de l'énergie solaire reçue par la Terre. Ils sont un immense réservoir de chaleur renouvelé en permanence, et peuvent apporter à l'humanité le bénéfice d'une énergie thermodynamique perpétuellement renouvelée.

BIBLIOGRAPHIE

BEHRMAN D., *The New World of the Oceans,* Little Brown, 1969. - BENOIT C., *les Ressources des océans,* Eyrolles, 1976. - COULMY D., PAGE J.-P., *les Ressources des océans, mythe ou réalité ?* Presses de la cité, 1974. - COULOMB J., *l'Expansion océanique et la Dérive des continents,* P.U.F., 1969. - DEFANT A., *Physical Oceanography,* Pergamon, 1961. - FAIRBRIDGE W., *The Encyclopedia of Oceanography,* Reinhold, 1969. - GUILCHER A., *Précis d'hydrologie,* Masson, 1971. - HILL M. N., *The Sea,* J. Wiley, 1962. - IVANOFF A., *Introduction à l'océanographie. Propriétés physiques et chimiques des eaux de mer,* Vuibert, 1975. - LACOMBE H., *Cours d'océanographie physique,* Gauthier-Villars, 1965. - LACOMBE H., *les Énergies de la mer,* P.U.F., 1968. - LE PICHON X., FRANCHETEAU J., BONNIN J., *Plate Tectonics,* Elsevier, 1973. - LE PICHON X., PAUTOT G., *le Fond des océans,* P.U.F., 1976. - PÉRÈS J.-M., *Clefs pour l'océanographie,* Seghers, 1972. - RIFFAUD C., *Demain, la mer,* L'École des loisirs, 1972. - RIFFAUD C., LE PICHON X., *Opération Famous,* Albin Michel, 1975. - SHEPARD P., *The Earth Beneath the Sea,* John Hopkins Press, 4e éd., 1967. - TARLING D. H. et D. M. P., *Continental Drift,* Bell and Sons, 1971. - *Grande Encyclopédie « Alpha » : La Mer.* - *Les Grands Dossiers « Alpha » de la Mer.*

LEXIQUES D'ASTRONOMIE ET DE PHYSIQUE DU GLOBE

SUPPLÉMENTS AU VOLUME XI DE LA GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

ABRÉVIATIONS

adj.	adjectif	*n.*	nom	*par ext.*	par extension
ex.	exemple	*p. ex.*	par exemple	*syn.*	synonyme

ASTRONOMIE

A-B

aberration (temps d'). La direction apparente d'un astre du système solaire est celle qui correspond au moment de l'émission de la lumière. On tient compte de cet effet en calculant le temps que met la lumière pour parcourir la distance D qui nous sépare de l'astre. Ce temps $t = \frac{D}{c}$ est le temps d'aberration (*c,* vitesse de la lumière). Pour le Soleil, il est de 499 secondes. La position observée du Soleil est celle qu'il occupait 499 secondes plus tôt.

aberration des étoiles. Déplacement apparent des étoiles dû à la vitesse relative des étoiles et de l'observateur. La seule aberration observable est celle due au mouvement orbital de la Terre. Cet effet produit un petit déplacement apparent sur une orbite elliptique parallèle à l'écliptique et ayant 20″,49 de demi-grand axe. Cet effet ne doit pas être confondu avec le mouvement propre. Il est perpendiculaire à cet effet et indépendant de la distance.

accélération. *n.* Taux de variation de la vitesse par unité de temps. Un corps de masse *m* soumis à une force F subit une accélération $\gamma = \frac{F}{m}$.

activité solaire. Le Soleil présente de façon permanente des taches, des éruptions, des facules. Cet ensemble de phénomènes porte le nom d'activité solaire. Elle est souvent mesurée par le nombre de Wolf. Elle varie avec une période de 11 ans.

aérolithe. *n.* Pierre tombée du ciel. Syn. de *météorite.*

âge des amas. La forme des diagrammes de Russell-Hertzsprung permet d'estimer l'âge des amas stellaires. Voir *évolution stellaire.*

albédo *n.* ou **albédo de Bond** ou **albédo intégral.** Il mesure la fraction de la lumière du Soleil qui est rediffusée par une planète. L'albédo de la Lune est de 0,07 : la Lune ne diffuse que 7 % de la lumière solaire qui tombe sur elle.

amas galactiques. Nom attribué quelquefois aux *amas ouverts.*

amas de galaxies. Ensembles de plusieurs dizaines ou centaines de galaxies situées au même endroit de l'Univers et ayant une structure analogue aux amas stellaires ouverts de la Galaxie, mais à une échelle beaucoup plus grande.

amas globulaires. Amas formés par des centaines de milliers d'étoiles de population II (vieilles). Ils sont répartis autour de la Galaxie dans un système presque sphérique et forment une partie importante du halo galactique. On connait auss ides amas globulaires dans les galaxies extérieures.

amas ouverts. Amas stellaires formés de quelques dizaines à quelques centaines d'étoiles. Situés dans les bras spiraux de la Galaxie, les amas stellaires sont des amas d'étoiles jeunes (population I).

amas stellaires. Ensembles d'étoiles groupées dans une région de la Galaxie et évoluant ensemble. Ils sont divisés en amas ouverts et amas globulaires.

angle horaire. Voir *coordonnées horaires.*

angle de phase d'une planète. Angle ayant pour sommet le centre de la planète et pour côtés les directions du centre du Soleil et de la Terre. Il permet de calculer la phase apparente de l'astre. Pour la Nouvelle Lune, l'angle de phase est nul. Pour Mars, l'angle de phase maximal est inférieur à 40°.

année. *n.* Intervalle de temps qui correspond à une révolution de la Terre autour du Soleil. Cette définition doit être précisée : voir les définitions suivantes.

année anomalistique. Intervalle de temps qui sépare deux passages successifs de la Terre par le périhélie. L'année anomalistique vaut 365,259 6 jours.

année bissextile. Année de 366 jours qui comprend un 29 février.

année julienne. Année de 365,25 jours exactement. Elle est souvent utilisée dans les calculs astronomiques.

année de lumière (a.d.l.). Unité de longueur astronomique qui est quelquefois utilisée (c'est le parcours qu'effectue la lumière en une année). Une a.d.l. vaut 9,461 0^{12} km. Un parsec vaut 3,26 a.d.l.

année sidérale. L'année sidérale est l'intervalle de temps qui sépare deux passages successifs du Soleil par le point vernal fixe. L'année sidérale de 365,256 36 jours est la période qui commande la conjonction du Soleil avec les étoiles.

année tropique. L'année tropique est l'intervalle de temps qui sépare deux passages successifs du Soleil par le point vernal mobile, donc affecté de la précession. L'année tropique, de 365,242 199 jours, commande les saisons.

anomalie. *n.* L'*anomalie vraie* est l'angle que fait la direction héliocentrique d'une planète avec la direction du périgée. Pour la commodité des calculs, les astronomes introduisent deux notions supplémentaires : l'*anomalie moyenne,* qui augmente uniformément avec le temps, et l'*anomalie excentrique,* qui intervient dans les formules de Kepler.

apex solaire. Point de la sphère céleste vers lequel se dirige le Soleil en prenant comme système de référence l'ensemble des étoiles proches de celui-ci. L'apex est situé dans la constellation d'Hercule $\alpha = 271°$ $\delta = 30°$, la vitesse du Soleil vers l'apex est S = 19,7 km/s.

aphélie, apoastre, apogée. C'est le sommet le plus éloigné de l'ellipse que décrit un corps céleste autour d'un centre d'attraction. L'*aphélie* est le point où se trouve la Terre ou une planète. L'*apogée* est le point où se trouve alors le Soleil dans son mouvement relatif au tour de la Terre. L'*apoastre* correspond à un astre quelconque; l'opposé est le périastre.

aplanétique. *adj.* Un instrument d'optique est aplanétique lorsqu'il ne présente pas d'aberration hors de l'axe (coma). Le télescope de Ritchey-Chrétien est aplanétique.

ascension droite. Voir *coordonnées célestes équatoriales.*

astéroïde. *n.* Voir *petite planète.*

astrolabe. *n.* Instrument qui sert à observer la position des astres. De nombreux types d'astrolabes anciens ont été utilisés. Un astrolabe moderne et très précis est l'astrolabe à prisme de A. Danjon.

astrologie. *n.* Art illusoire pour déterminer le destin des hommes par la position des astres.

attraction universelle. Voir *Newton (loi de).*

avance du périhélie de Mercure. La longitude du périhélie de la planète Mercure n'est pas fixe mais augmente de 5″,7 par an. La plus grande partie est expliquée par les *perturbations.* Le résidu de 0″,425 par an n'est expliqué que par la Relativité généralisée.

azimut. *n.* Voir *coordonnées horizontales.*

bras spiraux. De nombreuses galaxies montrent des condensations d'étoiles et de nébuleuses gazeuses en forme de spires. Ces bras spiraux s'échappent soit d'une condensation centrale soit d'une barre.

C

cadran solaire. Instrument permettant de déterminer le temps solaire vrai par la position de l'ombre portée d'un stylet.

calendrier. *n.* Ordonnance des jours en périodes d'une année. Les calendriers solaires essayent d'adopter l'année tropique : calendriers julien et grégorien. Les calendriers luni-solaires tentent de garder des mois lunaires de 29,5 jours, mais ils introduisent des mois supplémentaires pour harmoniser ce calendrier avec l'année tropique.

calendrier grégorien. Institué en 1582 à partir du 15 octobre 1582 (20 décembre pour la France). Une période de 400 ans ne comprend que 99 années bissextiles. L'année grégorienne vaut 365,242 5 jours.

calendrier julien. Ce calendrier, institué par Jules César en 46 avant J.-C., est valable jusqu'au 4 octobre 1582. L'année julienne comporte exactement 365,25 jours. Une année sur quatre est bissextile.

caméra électronique. Dispositif dont le principe a été établi par A. Lallemand. Il permet d'augmenter l'énergie des photons tout en gardant une image. L'image optique est reçue sur une photocathode qui émet des électrons. Ceux-ci sont accélérés et concentrés sur une plaque nucléaire par une optique électronique. Le gain de luminosité peut atteindre un facteur 100.

canaux de Mars. Les observateurs du début du XX^e siècle ont cru discerner sur Mars des lignes droites, qu'ils ont interprétées comme des canaux. Il s'agit d'une illusion d'optique : aucun canal n'a été retrouvé sur les photographies spatiales.

catalogue stellaire. Un catalogue d'étoiles est une liste plus ou moins importante de coordonnées précises d'étoiles. Un catalogue est fondamental lorsqu'il correspond à des mesures de haute précision. Il existe aussi des catalogues comportant, en plus, des données d'astrophysique : types spectraux, magnitudes, couleurs, vitesses radiales, etc.

ceinture de Van Allen. La Terre est entourée par deux ceintures présentant la forme de deux grands tores ayant pour plan de symétrie l'équateur magnétique, et qui contiennent des particules de haute énergie. Elles sont alimentées par le vent solaire et se déchargent dans l'atmosphère sous forme d'aurores polaires. La ceinture interne est située à une altitude de l'ordre de 3 000 km, la ceinture externe à 18 000 km.

centre actif solaire. Ensemble des perturbations groupées autour d'une ou de plusieurs taches, accompagnées de facules et de protubérances.

centre de la Galaxie. Le centre de notre système, la Galaxie, est situé dans le Sagittaire à 9 000 parsecs de distance. C'est certainement un objet très lumineux mais il est caché à notre vue par des nuages absorbants. Il est une source radioastronomique très intense, nommée Sagittaire A.

centre de gravité. Point d'application de la résultante des forces de pesanteur à laquelle est soumis un corps. Il se calcule par la géométrie lorsqu'on connaît la valeur des masses de tous les points. Pour un corps indéformable, il reste fixe pendant le mouvement.

céphéide. *n.* Étoile variable dont l'éclat varie très régulièrement en fonction du temps. δ Céphée a donné son nom à ce type d'étoile variable. La variation s'explique par une pulsation de l'étoile qui est accompagnée par une variation de température.

cercles polaires. Sur la Terre, deux cercles aux latitudes $\pm$ 66°33′. Au nord ou au sud de ces cercles, le Soleil n'apparaît pas pendant l'hiver correspondant. (La valeur 66°33′ = 90° — 23°27′, où 23°27′ est l'inclinaison de l'écliptique.)

chevelure ou **coma.** *n.* Partie d'une comète qui entoure directement le noyau et dont s'échappent les deux queues de gaz et de poussières.

chromosphère. *n.* Partie de l'atmosphère solaire qui se manifeste par l'absorption des raies atomiques. En fait, la chromosphère n'a pas de limite bien nette : elle est intermédiaire entre la photosphère et la couronne mais il n'y a pas de discontinuités nettes entre ces couches.

classification spectrale. Opération qui consiste à classer les spectres stellaires d'après leurs raies d'absorption. Les classes spectrales principales sont O, B, A, F, G, K, M, mais quelques étoiles froides sont classées R, N ou S.

clepsydre. *n.* Instrument permettant de mesurer l'écoulement du temps par celui d'un filet d'eau. C'est l'analogue du sablier où le sable a été remplacé par de l'eau.

comète. *n.* Astre du système solaire décrivant une orbite parabolique ou elliptique fortement allongée, et qui n'est visible que lorsqu'il est près du Soleil. Il est alors formé d'une chevelure et d'une queue.

compagnon. *n.* Dans une étoile double, on nomme compagnon l'étoile la plus faible si elle est beaucoup moins brillante que l'étoile principale.

comput ecclésiastique. Règle qui permet de déterminer la date de Pâques à l'aide d'un certain nombre de lettres, dont le calcul est précisé par des règles : Lettre dominicale, Épacte, Nombre d'or, etc.

conjonction. *n.* Deux astres sont en conjonction lorsqu'ils ont même longitude céleste. La conjonction sera *géocentrique* ou *héliocentrique* suivant que l'observateur est situé au centre de la Terre ou du Soleil. Pour une planète inférieure (Vénus ou Mercure), la conjonction sera dite *inférieure* si la planète est plus proche que le Soleil, et *supérieure* dans le cas inverse.

constellation. *n.* Les Anciens ont classé les étoiles en figures symboliques que nous avons gardées. L'Union Astronomique Internationale a fixé les limites des constellations. *Ex.* Grande Ourse, Orion.

coordonnées célestes équatoriales. Dans ce système, le plan de référence est l'équateur et son pôle P. Considérons le grand cercle passant par le pôle P et l'astre A. Son intersection avec l'équateur est *a*. Par définition, l'ascension droite α de l'astre est l'angle γa entre le point vernal γ et *a*. γa est compté dans le sens direct entre 0 et 24 heures. La déclinaison est l'angle *a*A.

coordonnées écliptiques. Dans ce système, le plan de référence est l'écliptique et son pôle Q. Considérons le grand cercle passant par le pôle Q et l'astre A. Son intersection avec l'écliptique est *a*. Par définition, la longitude L de l'astre est l'angle γa entre le point vernal γ et *a*. γa est compté dans le sens direct. La latitude de l'astre est *a*A.

coordonnées galactiques. Dans ce système, le plan de référence est le plan galactique et son pôle G. Considérons le grand cercle passant par G et l'astre A, son intersection avec le plan galactique est *a*. La longitude galactique est l'angle C*a*, où C est le centre de la Galaxie, situé dans le Sagittaire. C*a* est compté dans le sens direct ; *a*A est la latitude galactique.

coordonnées géographiques. Dans ce système, le plan de référence est le plan équatorial de la Terre et son pôle P. Considérons le grand cercle passant par P et le lieu géographique A. Son intersection avec le plan équatorial est *a*. La longitude géographique est l'angle G*a*, où G est le point correspondant au grand cercle passant par Greenwich. On compte la longitude vers l'est ou l'ouest. La latitude géographique est l'angle que fait la verticale du lieu avec le plan de l'équateur. Rappelons que la verticale du lieu ne passe pas par le centre de la Terre.

coordonnées horaires. Dans ce système, le plan de référence est le plan équatorial céleste et son pôle P. Considérons le grand cercle passant par l'astre A et coupant l'équateur en *a*. L'angle horaire est l'angle S*a*, où S est le point d'intersection du méridien avec l'équateur. S*a* est compté en heures dans le sens rétrograde. L'angle *a*A est la déclinaison.

coordonnées horizontales. Dans ce système, le plan de référence est le plan horizontal et le zénith Z. Considérons le cercle vertical passant par Z et l'astre A ; son intersection avec l'horizon est *a*. L'azimut *a* est l'angle S*a* compté dans le sens rétrograde, où S est le point sud et la hauteur *h* est *a*A. Son complément Z*a* est la distance zénithale.

coronographe. *n.* Instrument qui permet d'observer la couronne solaire en dehors des éclipses de Soleil.

cosmologie. *n.* Science qui étudie les lois générales gouvernant l'Univers. La cosmologie s'intéresse plus particulièrement à l'évolution de l'Univers, à la formation des galaxies et essaye d'interpréter les faits d'observation : le décalage vers le rouge des raies spectrales notamment.

couronne solaire. Partie extérieure de l'atmosphère solaire s'étendant à plusieurs rayons du Soleil. Très ténue et très chaude, la couronne n'est visible directement que pendant les éclipses totales de Soleil.

crépuscule. *n.* Durée qui s'écoule entre le coucher du Soleil et le moment où la hauteur du Soleil au-dessous de l'horizon atteint une certaine valeur : 6° pour le *crépuscule civil*, 12° pour le *crépuscule aéronautique* et 18° pour le *crépuscule astronomique*. Dans ce sens, ces durées du crépuscule sont aussi valables pour l'aurore.

culmination. *n.* Moment où un astre passe au méridien. Sa hauteur est alors maximale.

cycle de Beethe. L'énergie du Soleil provient de la fusion de l'hydrogène en hélium 4H $\rightarrow$ He + Énergie. Dans un certain nombre d'étoiles, cette réaction n'est pas directe mais se fait par l'intermédiaire d'atomes de C et N qui se retrouvent à la fin de la réaction et agissent comme les catalyseurs en chimie. Ce cycle porte également le nom de *cycle du carbone*.

cycle solaire. Période d'environ 11 ans qui régit l'activité solaire. La vraie période est le double (22 ans) pour tenir compte de l'inversion de la polarité des taches.

D

déclinaison. *n.* Voir *coordonnées célestes équatoriales*.

diagramme-papillon. Représentation de la position des taches solaires sur le disque en fonction du temps. Chaque tache est représentée sur un graphique où la latitude solaire est portée en abscisses et la date d'apparition en ordonnées. Au cours d'un cycle solaire, ces points se groupent en figures qui ont l'aspect des ailes d'un papillon.

diagramme RH ou **de Russell-Hertzsprung.** Diagramme dans lequel on porte le type spectral des étoiles ou leurs couleurs en abscisses et la magnitude absolue en ordonnées (en valeur décroissant vers le haut). Les étoiles ne remplissent pas tout l'espace mais y forment des familles : série principale, géantes, supergéantes et naines blanches.

diamètre apparent. Angle sous lequel on voit un astre : le Soleil, la Lune, les planètes. Le diamètre apparent du Soleil est très sensiblement égal à 32′.

direct. *adj.* **(mouvement).** Le sens direct est le sens qui correspond au mouvement apparent du Soleil et donc opposé au sens des aiguilles d'une montre. En trigonométrie, on a l'habitude de compter les angles dans le sens direct, qui est aussi nommé le *sens trigonométrique*.

distance angulaire. Angle que forment les directions qui joignent l'observateur à deux points de la sphère céleste. A l'élongation, la distance angulaire de Mercure au Soleil atteint 23°.

distance zénithale. Voir *coordonnées horizontales*.

Doppler-Fizeau (principe ou effet). Énoncé par Doppler et expliqué par Fizeau, ce principe permet de calculer les longueurs d'onde ou les fréquences perçues par un observateur mobile par rapport à la

source. Pour les petites vitesses, on démontre que la variation de longueur d'onde est :

$$\lambda - \lambda_0 = \frac{v}{c}.$$

En Relativité, on démontre une formule plus complexe qui ne dépend que de la vitesse relative. Voir *vitesse radiale*.

E-F

éclat stellaire. Éclairement produit par un astre sur une surface perpendiculaire à ses rayons. L'éclat stellaire dépend à la fois de l'éclat intrinsèque et de la distance de l'astre.

éclipse annulaire de Soleil. Éclipse de Soleil pour laquelle le diamètre apparent de la Lune est plus petit que celui du Soleil ; cela arrive lorsque la Lune se trouve à son apogée ; il subsiste au moment du maximum de l'éclipse un petit anneau de Soleil.

éclipse de Lune. Diminution de l'éclat de la Lune lorsqu'elle passe dans les cônes d'ombre et de pénombre situés derrière la Terre et à l'intérieur desquels la lumière solaire est absente (cône d'ombre) ou fortement diminuée (cône de pénombre).

éclipse de Lune partielle. Une éclipse de Lune est partielle lorsqu'à son maximum la Lune ne pénètre que partiellement dans le cône d'ombre.

éclipse de Lune par la pénombre. Une éclipse est dite éclipse par la pénombre quand la Lune ne pénètre que dans le cône de pénombre. Une telle éclipse peut aussi être partielle ; elle est alors à peine visible.

éclipse de Lune totale. Une éclipse de Lune est totale lorsqu'à son maximum la Lune pénètre complètement dans le cône d'ombre.

éclipse partielle de Soleil. A un moment donné, l'éclipse n'est totale que dans une petite région de la Terre. Mais dans des régions étendues voisines, la Lune cache une partie du Soleil : il s'agit d'une éclipse partielle.

éclipse totale de Soleil. Une éclipse de Soleil est totale lorsque le Soleil disparaît complètement derrière la Lune. Ce phénomène n'est visible, à un moment donné, que d'une petite région de la Terre. Cette zone se déplace et décrit une bande étroite sur la Terre.

écliptique. *n.* Grand cercle que décrit le Soleil sur la sphère céleste. L'écliptique est incliné de 23°27′ sur l'équateur céleste. Le point d'intersection où se trouve le Soleil au printemps est le point vernal (♈). On désigne aussi sous le nom d'écliptique le plan de la trajectoire de la Terre autour du Soleil.

ellipse. *n.* Courbe fermée, obtenue par la section d'un cône par un plan. L'ellipse peut aussi être obtenue par la projection d'un cercle. Dans leur mouvement autour du Soleil, les planètes décrivent des ellipses dont l'un des foyers est occupé par le Soleil.

élongation. *n.* ou **plus grande élongation.** Position d'une planète inférieure, Mercure ou Vénus, au moment où cet astre est à la plus grande distance angulaire apparente du Soleil. Pour cette planète, la Terre et le Soleil sont en quadrature. La planète est alors « étoile du soir » à l'élongation Est, « étoile du matin » à l'élongation Ouest.

émersion. *n.* Au cours d'une occultation, moment précis où l'étoile reparaît après être passée derrière la Lune. L'émersion est aussi le moment où une planète sort du disque solaire après un passage devant le disque.

éphémérides. *n.* Tables de prévisions des phénomènes célestes, obtenues par les calculs de la mécanique céleste.

équateur. *n.* 1° Plan perpendiculaire à la ligne des pôles et passant par le centre de la Terre. 2° **équateur céleste.** Grand cercle de la sphère céleste perpendiculaire à la ligne des pôles. (L'équateur céleste passe par l'observateur O.)

équation de temps. Correction qu'il faut ajouter au temps solaire vrai pour obtenir le temps solaire moyen uniforme.

équinoxe. *n.* Chacune des deux époques de l'année où les longitudes du Soleil sont de 0° (équinoxe de printemps, 21 mars) et de 180° (équinoxe d'automne, 22 septembre). La durée du jour est alors égale à celle de la nuit. La déclinaison du Soleil est nulle.

éruption solaire. Émission de matière ionisée, souvent observée dans les centres actifs du Soleil. Sur le bord du Soleil, elles forment les protubérances ; elles alimentent le vent solaire en particules.

espace interstellaire. Espace entre les étoiles et qui contient des atomes isolés, des molécules et des grains de poussière.

étoile double. Système de deux étoiles liées physiquement et tournant autour de leur centre de gravité.

étoile double à éclipse. Étoile double serrée et dont le plan orbital passe sensiblement par l'observateur de sorte que les deux étoiles s'éclipsent mutuellement. Une étoile double à éclipse est en général aussi une *étoile double spectroscopique.*

étoile double spectroscopique. Étoile double très serrée qu'on ne peut pas séparer par l'observation télescopique directe mais dont le mouvement orbital est observable, avec un spectroscope, par l'oscillation des raies spectrales.

étoile double visuelle. Étoile double qu'on peut séparer visuellement en l'examinant avec une lunette ou un télescope.

étoile à enveloppe. Étoile, entourée d'une enveloppe gazeuse assez étendue, qui se manifeste par des raies d'émission dans le spectre. On a restreint l'usage de ce nom aux astres pour lesquels les enveloppes ne sont pas directement visibles, comme les nébuleuses planétaires.

étoile filante. Météore de faible éclat dû au passage d'une petite météorite dans l'atmosphère terrestre.

étoile géante. Étoile de type spectral G0 à M5, environ 100 à 1 000 fois plus lumineuse que le Soleil et ayant un diamètre beaucoup plus grand que celui-ci. Ces étoiles sont peu abondantes.

étoile naine ou **de la série principale.** Étoile normale dont les conditions physiques sont analogues à celles du Soleil. Elles sont situées sur la diagonale du diagramme RH.

étoile à neutrons. Étoile hyperdense constituée par des neutrons. Les pulsars sont probablement des étoiles à neutrons.

étoile pulsante. Étoile variable dont le diamètre varie de façon périodique avec le temps. Les Céphéides, mais aussi les étoiles du type Mira Ceti, sont de ce type.

étoile supergéante. Étoile 500 000 fois plus brillante que le Soleil et de diamètre considérable. Ce sont des étoiles en pleine évolution dont les types spectraux vont de B à K. Elles sont très peu nombreuses.

étoile temporaire. Nom général des *novae* et *supernovae,* qui sont des étoiles dont l'éclat est subitement multiplié par un facteur allant de 1 000 à 10 millions.

étoile variable. Étoile dont l'éclat varie en fonction du temps. Les causes de variation sont diverses : éclipses, étoiles pulsantes, etc.

étoile variable à longue période. Étoile pulsante froide des types spectraux M,S ou R,N et présentant une variation d'éclat assez régulière à longue période.

étoile de Wolf-Rayet. Étoile très chaude entourée d'une atmosphère animée de mouvements rapides. Ces étoiles, peu nombreuses, sont caractérisées par un spectre de raies d'émission larges.

évection. *n.* Une des *inégalités* du mouvement de la Lune. Elle a une période de 31,812 jours et produit une avance ou un retard de 2h 20 mn de la Lune sur son orbite.

évolution stellaire. Ensemble des mécanismes par lesquels les étoiles naissent et meurent. La théorie de l'évolution stellaire a fait de grands progrès en permettant l'explication des diagrammes de Russell-Hertzsprung des étoiles des diverses populations.

excentricité. *n.* Nombre *e* qui caractérise l'aplatissement d'une ellipse. C'est le rapport de la distance du foyer au centre au demi-grand axe. $e = 0$ pour le cercle ; $e = 1$ pour la parabole.

expansion de l'Univers. L'observation montre que les spectres des nébuleuses extragalactiques sont décalés vers le rouge. Ce décalage augmente avec la magnitude et donc avec la distance de ces galaxies. Hubble a montré que l'ensemble de ces faits pouvait s'expliquer par une expansion de l'Univers avec des vitesses proportionnelles à la distance.

facules. *n.* Régions plus claires qui entourent les taches solaires. Les facules correspondent aux éruptions solaires.

fuseaux horaires. La surface de la Terre est découpée en 24 fuseaux de 15° de large dont le fuseau central est centré sur Greenwich ; il va des longitudes E = 7°30′ à W = 7°30′. En principe, l'heure est la même pour tous les lieux situés à l'intérieur d'un fuseau. Des raisons pratiques ont amené les divers pays à adapter les fuseaux à la géographie locale.

G-H

Galaxie. *n.* La nébuleuse spirale dans laquelle se trouve notre Soleil. La Voie Lactée est sa trace sur la sphère céleste. Notre Galaxie est formée de 120 milliards d'étoiles.

galaxie. *n.* Nom commun désignant des ensembles stellaires comprenant des milliards d'étoiles et analogues à notre système local, la Galaxie. On connaîdes *galaxies à structure spirale* (nébuleuses spirales), des *galaxies elliptiques* et des *galaxies irrét gulières.*

galaxies irrégulières. Galaxies qu'on ne peut classer ni parmi les spirales ni parmi les galaxies elliptiques. *Ex.* Le Petit Nuage de Magellan.

gnomon. *n.* Cadran solaire comprenant une tige verticale dont la longueur de l'ombre est observée sur un plan horizontal. Instrument très utilisé dans l'Antiquité. La *gnomomique* est l'art de construire des cadrans solaires.

grains de riz ou **granulation.** Sur de très bonnes images, on aperçoit sur la surface solaire une granulation présentant des grains de 1 à 2″ de diamètre et ayant des durées de vie de l'ordre de quelques minutes. Cet aspect fait penser à des grains de riz, ce qui explique le nom qui lui est donné.

grandeur d'une éclipse de Lune. Rapport de la distance du bord de la Lune éclipsée, au centre de l'ombre, au diamètre apparent de la Lune. Ce nombre est supérieur à 1 ; si l'éclipse est totale, il peut atteindre 1,8. La grandeur d'une éclipse partielle est inférieure à 1.

grandeur maximale d'une éclipse de Soleil. La grandeur d'une éclipse dépend essentiellement du lieu d'observation. La grandeur maximale est celle qui correspond à l'endroit de la Terre où l'éclipse est maximale. C'est le rapport, au moment du phénomène, du diamètre apparent de la Lune à celui du Soleil. La grandeur maximale est légèrement supérieure à 1 pour les éclipses totales et légèrement inférieure à 1 pour les éclipses annulaires.

granulation. *n.* Voir *grains de riz.*

grosses planètes. On désigne ainsi Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune, dont les volumes sont beaucoup plus grands que celui de la Terre.

halo galactique. Volume entourant la Galaxie et peuplé de quelques étoiles et d'amas de population II (ancienne). Le halo galactique est sensiblement un ellipsoïde centré sur la Galaxie et ayant 30 000 parsecs de diamètre dans le plan galactique et 20 000 parsecs d'épaisseur.

hauteur. *n.* Voir *coordonnées horizontales.*

héliographe. *n.* Instrument utilisé pour la photographie du Soleil.

heure. *n.* Ce terme a de nombreuses significations. Du point de vue astronomique, c'est une unité d'angle qui vaut 15°. *Par ext.,* c'est l'angle horaire du Soleil qui sert à la mesure du temps.

horoscope. *n.* Étude de la position des astres au moment de la naissance d'un homme, dont l'astrologue prétend déduire sa destinée.

Hubble (constante de). Taux d'augmentation de l'expansion par mégaparsec. Sa valeur est difficile à déterminer. Les premières valeurs étaient de l'ordre de 200, puis de 100, et actuellement on pense que la valeur est de l'ordre de 60 km/s/Mpc. Son inverse a la signification d'un temps et est quelquefois assimilé à l'âge de l'Univers. Voir *expansion de l'Univers.*

I-J-K

immersion. *n.* Au cours d'une occultation, moment précis où l'étoile disparaît derrière la Lune. Dans le cas d'un passage d'une planète devant le Soleil, c'est aussi le moment où la planète commence à passer sur le disque solaire.

inclinaison de l'écliptique. Angle de 23°27′ que fait l'écliptique avec l'équateur.

inclinaison d'une orbite. Angle que fait le plan de l'orbite avec le plan de l'écliptique.

inégalité. *n.* Lorsque le mouvement keplerien d'un astre est soumis à des *perturbations,* on peut représenter le mouvement en ajoutant au mouvement keplerien des termes périodiques nommés inégalités. Ainsi, l'*évection* est une inégalité du mouvement de la Lune de 31,81 jours de période et de 1°19′ d'amplitude.

interféromètre. *n.* Instrument de physique qui utilise les propriétés vibratoires des ondes électromagnétiques en réalisant la superposition de faisceaux. On construit sur ce principe des spectrographes (interféromètres de Michelson, de Pérot Fabry) ou des instruments de haute résolution (interféromètres radioastronomiques en particulier).

ionisation. *n.* Mécanisme par lequel, sous l'action d'un choc ou d'une différence de potentiel, un atome ou une molécule perd un ou plusieurs électrons.

ionosphère. *n.* Partie de l'espace qui entoure un corps céleste où se trouve de la matière ionisée. Dans le cas de la Terre, région de l'atmosphère située au-delà de 50 km d'altitude.

jour. *n.* 1° Au sens propre, intervalle de temps pendant lequel le Soleil est levé. 2° *En astronomie :* intervalle entre deux passages du Soleil au méridien du lieu.

jour sidéral. Intervalle de temps qui sépare deux passages successifs du point vernal au méridien du lieu. Le jour sidéral a une durée de 23 h 56 mn 4 s de temps solaire moyen.

jour solaire moyen. Intervalle de temps entre deux passages du Soleil moyen au méridien. Le jour moyen est constant, mais il n'est pas directement accessible à l'observation.

jour solaire vrai. Intervalle de temps entre deux passages du Soleil au méridien. A cause de la variation de l'équation du temps, le jour solaire vrai varie.

Kelvin (température ou degré). Échelle de température absolue. La température K s'obtient en ajoutant 273,4° à la température Celsius.

Kepler (lois de). Énoncé de trois lois qui gouvernent le mouvement d'une planète autour du Soleil. Déduites de l'observation par Kepler, elles s'expliquent par la *loi de Newton.*

L

latitude céleste écliptique. Voir *coordonnées écliptiques.*

latitude galactique. Voir *coordonnées galactiques.*

latitude géographique. Voir *coordonnées géographiques.*

lever héliaque de Sirius. Première apparition de Sirius dans l'aurore avant le lever du Soleil.

libration. *n.* Mouvement de balancement apparent de la Lune qui entraîne le fait que l'observateur terrestre peut voir plus de 50 % de la surface lunaire. On distingue la *libration optique,* qui s'explique par les inégalités de mouvement de la Lune alors que sa rotation est régulière, et la *libration physique,* qui est un vrai balancement. Cette partie de la libration est très petite.

ligne des apsides. Droite qui joint le *périhélie* à l'*aphélie.*

ligne de changement de date. Grand cercle terrestre de longitude 180° qui correspond au changement de date. Lorsqu'on franchit cette ligne d'est en ouest, il faut augmenter la date de 1 jour et inversement pour un franchissement dans l'autre sens. La ligne a été déformée pour inclure les îles Aléoutiennes dans la partie est et une zone de Sibérie dans la partie ouest, afin de tenir compte des souverainetés des États-Unis et de l'Union soviétique.

ligne des nœuds. Droite d'intersection du plan d'une orbite de planète ou de comète avec le plan de l'écliptique. On nomme *nœud ascendant* le point de la sphère céleste où l'astre passe du sud au nord, et *nœud descendant* l'autre point.

longitude écliptique. Voir *coordonnées écliptiques.*

longitude galactique. Voir *coordonnées galactiques.*

longitude géographique. Voir *coordonnées géographiques.*

lumière cendrée. Éclairement de la Lune par la Terre; ce phénomène correspond au clair de Terre sur la Lune. Elle est surtout visible un peu avant ou après la Nouvelle Lune; à ce moment, la Terre vue de la Lune est complètement éclairée.

lumière zodiacale. Lumière diffuse vue après le coucher ou avant le lever du Soleil et ayant l'aspect d'un fuseau elliptique centré sur le Soleil et axé sur l'écliptique. La lumière zodiacale provient de la diffusion de la lumière solaire par des poussières interplanétaires.

lunaison. *n.* Voir *révolution synodique de la Lune.*

lunette astronomique. Instrument d'optique constitué par un objectif achromatique de plus ou moins grand diamètre auquel on associe un oculaire convergent. La lunette grandit l'image et la renverse. On remplace de plus en plus les unettes par des télescopes.

lunette méridienne. Instrument d'astronomie de position, constitué par une lunette astronomique montée sur un axe horizontal est-ouest. La lunette qui se déplace dans le plan méridien permet de déterminer avec une grande précision l'heure de passage d'une étoile au méridien et sa distance zénithale. C'est l'instrument qui permet les meilleures déterminations de l'ascension droite et de la déclinaison. Elle permet aussi une excellente détermination de l'heure sidérale.

Lune rousse. Dénomination populaire de l'aspect de la Lune présentant le phénomène de la lumière cendrée. Son observation est un indice de ciel clair; des gelées nocturnes sont donc à craindre, mais la Lune rousse n'en est pas la cause. Voir *lumière cendrée.*

M

magnétosphère. *n.* Partie de l'espace qui entoure une planète où existe un champ magnétique. La magnétosphère cesse à l'endroit où le vent solaire l'emporte sur le champ magnétique propre. La magnétosphère de Jupiter est particulièrement étendue.

magnitude. *n.* ou **magnitude apparente.** Expression de l'éclat apparent dans une échelle logarithmique. Lorsque l'éclat est divisé par 10, la magnitude augmente de 2,5.

magnitude absolue. Magnitude qu'aurait l'étoile si elle était placée à la distance type de 10 parsecs. Elle est une mesure de l'éclat intrinsèque de l'étoile.

masse. *n.* On peut définir deux masses : la *masse d'inertie* est le rapport entre la force F qu'on applique en un point et l'accélération γ qu'elle produit :

$$m = \frac{F}{\gamma};$$

la *masse d'attraction* est l'un et l'autre des deux coefficients m_1 et m_2 qui figurent dans la loi de Newton $F = -k\frac{m_1 m_2}{r^2}$. L'identité de ces deux masses a une importance capitale et n'est expliquée que par la Relativité généralisée.

mécanique céleste. Partie de la mécanique qui étudie plus particulièrement le mouvement des corps célestes. Elle est fondée sur les principes de l'inertie et la loi d'attraction de Newton.

méridien. *n.* ou **plan méridien.** Cercle vertical qui contient le pôle céleste et par conséquent aussi les points cardinaux Nord et Sud et, naturellement, le zénith et le nadir.

météore. *n.* 1° Dans le sens général, tout phénomène lumineux dans l'atmosphère terrestre : arc-en-ciel, halo, etc. 2° Dans le sens astronomique strict, phénomène lumineux dû au passage d'une météorite, particule plus ou moins grosse traversant l'atmosphère terrestre.

météorite. *n.* Particule de matière dont la masse peut aller de quelques milligrammes à des centaines de tonnes et qui traverse l'atmosphère terrestre. Elle donne lieu à un météore plus ou moins lumineux. C'est aussi le nom des particules de météorites qu'on peut trouver sur la Terre.

méton. *n.* Cycle de 19 ans qui correspond presque exactement à 235 lunaisons. Il permet de calculer, par le reste de la division par 19, le Nombre d'or.

Mira Ceti. Étoile variable. Autre nom pour les étoiles variables à longue période. Mira Ceti, ou Omicron Ceti, en est un représentant typique.

mouvement parabolique. Le mouvement d'un astre qui décrit une orbite parabolique autour d'un point d'attraction situé au foyer de la parabole. De nombreuses comètes ont des mouvements paraboliques.

mouvement propre stellaire. Projection sur la sphère céleste du mouvement relatif d'une étoile par rapport au Soleil. Le mouvement propre est le mouvement angulaire exprimé en secondes d'arc par an.

mouvement séculaire. Dans le mouvement keplerien, les éléments qui définissent l'orbite sont constants. Par suite des *perturbations,* ces éléments changent lentement en fonction du temps; ce mouvement est dit séculaire parce qu'il n'est appréciable qu'avec la période du siècle; il entraîne des variations séculaires des positions.

N-O

nadir. *n.* Intersection de la verticale descendante avec la sphère céleste. Le nadir est le point opposé au zénith.

naine blanche. Étoile de petit diamètre, mille fois moins lumineuse que le Soleil, en général de couleur blanche. Ces étoiles sont constituées par de la matière dégénérée. Elles sont très nombreuses mais difficiles à observer à cause de leur faible luminosité intrinsèque. *Ex.* Le compagnon de Sirius.

nébuleuse elliptique. Galaxie diffuse de forme ronde ou elliptique et ne présentant pas de bras spiraux. Les nébuleuses elliptiques ressemblent aux condensations centrales des galaxies spirales.

nébuleuse extragalactique. Voir *galaxie*.

nébuleuse gazeuse. Grand nuage gazeux dont les atomes sont excités par le rayonnement ultra-violet d'étoiles chaudes. De telles nébuleuses émettent des spectres de raies. La nébuleuse d'Orion est une nébuleuse gazeuse typique.

nébuleuse obscure. Les régions interstellaires contenant de nombreuses poussières mais pas d'étoiles chaudes ne se manifestent que par leur absorption. On nomme nébuleuses obscures les régions de la Voie Lactée qui paraissent ainsi dépourvues d'étoiles. Elles sont souvent liées à des nébuleuses d'émission. Les « sacs à charbon » de l'hémisphère austral sont des nébuleuses obscures typiques.

nébuleuse planétaire. Nébuleuse gazeuse entourant une étoile très chaude. De telles nébuleuses ont l'aspect de petits disques ou anneaux bleuâtres de quelques secondes à quelques minutes d'arc de diamètre.

nébuleuse spirale. Galaxie présentant des bras de spirales s'échappant d'une condensation centrale. Ces spirales sont classées S*a*, S*b*, S*c* suivant l'importance relative de la condensation et des bras. Les spirales S*a* ont des noyaux très développés. Les spirales barrées sont des galaxies comportant une barre centrale d'où s'échappent les bras (classées SB*a* à SB*c*).

Newton (loi de) ou **loi d'attraction universelle.** Loi selon laquelle deux masses m_1 et m_2 situées à la distance r sont soumises chacune à une force d'attraction $F = -k\dfrac{m_1 m_2}{r^2}$, où k est la constante de l'attraction universelle, ou constante de Newton.

nœud. *n.* On désigne par nœud sur la sphère céleste les points d'intersection du plan d'une orbite avec le plan de l'écliptique. Le nœud ascendant correspond au point où la planète ou la comète passe du sud au nord.

nombre de Wolf. Nombre obtenu en ajoutant le nombre G de groupes de taches multiplié par 10 au nombre I de taches isolées que présente la surface solaire : $N = 10\,G + I$. Il est une mesure de l'activité solaire.

nova. *n.* Étoile temporaire dont l'éclat est multiplié en quelques heures par un facteur 1 000 ou 10 000. La décroissance plus ou moins lente ramène l'éclat à son état initial.

novoïde. *n.* Étoile variable dont l'éclat augmente de façon irrégulière de 1 à 2 magnitudes. Le mécanisme de cette éruption est assez voisin de celui des *novae*.

noyau d'une comète. Partie principale de la comète du point de vue de la masse : probablement un conglomérat de rochers et de glace qui libère, en s'échauffant, les gaz formant la chevelure et les queues.

noyau de la Galaxie. Le noyau, ou centre, de la Galaxie n'est pas visible optiquement mais c'est une source radioélectrique intense.

nutation. *n.* Petite oscillation de l'axe de rotation terrestre qui accompagne la précession. De ce fait, le cône que décrit l'axe terrestre par suite de la précession est un peu festonné et le point vernal oscille un peu autour de sa position moyenne, l'inclinaison de l'écliptique subissant aussi une petite oscillation.

occultation. *n.* Passage de la Lune ou d'une planète devant des étoiles. Une planète peut aussi occulter ses propres satellites.

onde de choc. Onde constituée par l'enveloppe des ondes de pression rayonnées par un mobile se déplaçant à une vitesse supérieure à celle du son. Tout solide, par exemple une météorite se déplaçant à grande vitesse, est accompagné par une onde de choc.

ondes millimétriques. Rayonnement électromagnétique dont les longueurs d'onde vont de 0,5 à quelques millimètres. Ce domaine de radiations est devenu très intéressant en astronomie depuis la découverte des étoiles infrarouges et des molécules interstellaires complexes.

Oort (constante d'). Voir *rotation différentielle de la Galaxie*.

opposition. *n.* Deux astres sont en opposition lorsque leurs longitudes célestes diffèrent de 180°. L'opposition est géocentrique ou héliocentrique suivant que l'observateur est supposé placé au centre de la Terre ou du Soleil.

orbite. *n.* Courbe que décrit un corps céleste qui se déplace autour d'un autre. Dans le mouvement keplerien, les orbites sont des courbes planes : ellipses, paraboles ou hyperboles, ayant le Soleil au foyer.

P

parabole. *n.* Courbe à branches infinies correspondant à la section du cône par un plan de section parallèle à une génératrice du cône. Les comètes décrivent sensiblement des orbites paraboliques.

parallaxe. *n.* 1° *Pour un astre du système solaire* c'est l'angle sous lequel on voit du centre de cet astre le rayon équatorial terrestre. *Ex.* La parallaxe du Soleil est de 8″,794. 2° *Pour une étoile*, c'est l'angle sous lequel on voit, de cet astre, l'unité astronomique. Cette parallaxe est exprimée en secondes (″). Son inverse est la distance de l'étoile en parsecs.

parsec (pc). *n.* Unité de longueur qui vaut 206 265 unités astronomiques ou $30{,}86 \cdot 10^{12}$ km. Multiples : le *kiloparsec* et le *mégaparsec*.

passage de Mercure ou **de Vénus.** Dans leur mouvement autour du Soleil, il peut arriver que ces planètes se détachent sur le disque du Soleil au moment de leur conjonction géocentrique inférieure. Ce phénomène porte le nom de passage.

pénombre. *n.* Région extérieure des taches solaires, moins foncée que la partie centrale. Cette dénomination ancienne n'est pas très correcte. Voir *éclipse de Lune par la pénombre*.

périhélie, périgée, périastre. 1° *Périhélie :* sommet de l'ellipse que décrit la Terre autour du Soleil où la distance Soleil-Terre est minimale. La Terre passe au périhélie vers le 5 janvier. 2° *Périgée :* point correspondant au périhélie si l'on adopte un point de vue géocentrique. 3° Par généralisation, le *périastre* dans le mouvement relatif de deux astres, comme les étoiles doubles, correspond au minimum de distance.

période julienne. Période chronologique proposée en 1583 par Scaliger. Elle permet de compter les jours à partir de l'année 4713 avant J.-C. Les jours juliens commencent à midi ; le 1er janvier 1976 à midi le nombre de jours écoulés était de 2 442 779.

perturbation. *n.* L'étude du mouvement d'un corps céleste autour d'un centre d'attraction est facile (lois de Kepler). Ce problème devient très ardu lorsqu'un troisième corps entre en jeu. Mais il peut être résolu approximativement si le troisième corps a une petite influence : on dit que la trajectoire est soumise à des perturbations, qu'on peut calculer.

petite planète ou **astéroïde.** Petit corps céleste ayant des dimensions variant de quelques kilomètres à quelques centimètres de diamètre et circulant dans le système solaire entre les orbites de Mars et Jupiter.

phases. *n.* Divers aspects de la Lune ou d'une planète inférieure qui présente une partie éclairée par le Soleil et une partie obscure. Les phases de la Lune sont : la Nouvelle Lune, le Premier Quartier, la Pleine Lune, le Dernier Quartier. Voir *angle de phase*.

photométrie. *n.* La photométrie est la technique qui permet de mesurer les éclats des astres avec grande précision. L'instrument utilisé est un *photomètre*. Tous les photomètres modernes utilisent des récepteurs photoélectriques.

photosphère. *n.* Partie de l'atmosphère solaire qui se manifeste surtout par l'émission du spectre continu. C'est une région assez mal limitée ; elle est surmontée par la chromosphère.

plan galactique. Trace sur la sphère céleste du plan de la Galaxie ; il passe sensiblement au milieu de la Voie Lactée. Est incliné de 62°36′ sur le plan équatorial, qu'il coupe au point $\alpha = 12$ h 49 mn 0 s (coord. 1950).

planète. *n.* Corps du système solaire de forme en général sphérique et décrivant des orbites elliptiques presque circulaires autour du Soleil. *Par ext.*, corps analogues pouvant circuler autour d'autres étoiles.

planètes inférieures. Les deux planètes Mercure et Vénus, qui sont plus proches du Soleil que la Terre.

planètes supérieures. Les planètes de Mars à Pluton, plus éloignées du Soleil que la Terre.

plasma. *n.* Milieu gazeux ionisé comportant des électrons et des ions en nombres égaux, de sorte que la charge électrique du plasma est pratiquement nulle.

point vernal ou **point gamma** (γ). Le point d'intersection de l'écliptique avec l'équateur céleste où se trouve le Soleil à l'équinoxe de printemps.

polarisation de la lumière. Le rayonnement électromagnétique est composé par un champ magnétique et un champ électrique perpendiculaires entre eux et perpendiculaires à la direction de propagation. Dans la lumière naturelle, la direction des champs varie très rapidement de façon aléatoire. Dans la lumière polarisée, le champ électrique, et donc aussi le champ magnétique, ont une orientation fixe dans l'espace. Le plan de polarisation est par définition le plan qui contient le champ électrique.

polhodie. *n.* Trace du mouvement du pôle terrestre sur le globe. C'est une courbe bouclée, de petites dimensions.

populations stellaires. Les étoiles qui se trouvent dans le plan de la Voie Lactée sont des étoiles de formation récente ou de population I. Les étoiles des amas globulaires, du centre de la Voie Lactée, du halo, sont des étoiles très anciennes (âge de l'ordre de 10 milliards d'années). Ce sont des étoiles de population II.

postnova. *n.* État final d'une *nova* lorsqu'elle a repris son état initial. La postnova est pratiquement identique à la *praenova*.

praenova. *n.* Nom donné à l'astre qui explose pour donner une *nova*.

précession des équinoxes. Lent mouvement de l'axe polaire de la Terre, qui décrit un cône ayant un angle de 23°27′ en 25 800 ans. L'axe du cône est perpendiculaire à l'écliptique. De ce fait, le point vernal, point d'intersection de l'équateur avec l'écliptique, se déplace de 50″,26 par an et les longitudes stellaires augmentent d'autant.

prisme objectif. *n.* Instrument constitué par un objectif astronomique ou un télescope de Schmidt devant lequel on place un prisme à petit angle. Cet instrument permet d'obtenir de nombreux spectres stellaires. Le prisme objectif à champ normal de

Ch. Fehrenbach permet aussi la mesure des vitesses radiales.

problème des trois corps. Étude du mouvement de trois corps qui s'attirent mutuellement. C'est un problème mathématique très ardu. Voir *perturbation*.

protubérance solaire. Éruption de matière solaire visible sur le bord du Soleil particulièrement pendant les éclipses ou à l'aide d'un coronographe.

pulsar. *n.* Étoile émettant des impulsions radioélectriques brèves avec des périodes allant de 0,03 seconde à quelques secondes. Les pulsars émettent aussi des éclats de lumière visible. Ce sont les résidus des explosions de *supernovae*. Les pulsars sont probablement des étoiles à neutrons.

Q-R

quadrature. *n.* Position d'une planète supérieure lorsque sa direction géocentrique fait un angle de 90° avec la direction géocentrique du Soleil. L'angle de phase est alors maximal.

quanta. *n.* Planck a émis en 1900 la théorie que les rayonnements électromagnétiques étaient émis sous forme de petits éléments discontinus dont l'énergie est donnée par la formule (dite de Planck) $W = h\nu$, où h est une constante universelle et ν la fréquence de la radiation émise. Cette quantité W est un *quantum*.

quart de cercle. Ancien instrument d'observation qui permettait de mesurer les passages au méridien et les distances zénithales des astres. Un quart de cercle gradué était disposé à cet effet dans le plan méridien. Il a été remplacé par la lunette méridienne.

quasar. *n.* Source émettant des ondes hertziennes très intenses et qu'on a pu identifier avec quelques nébuleuses extragalactiques. Les quasars s'éloignent à des vitesses considérables, ce qui explique que ce sont des galaxies extrêmement lumineuses. Leur nature exacte est encore discutée.

queue de comète. Très longue traînée de gaz opposée à la direction du Soleil; ces gaz sont repoussés par la pression de radiation et le vent solaire. Une queue de poussière est en général aussi visible; elle est incurvée et de structure plus uniforme.

radiant. *n.* Point de la sphère céleste d'où paraissent diverger les étoiles filantes d'un essaim. *Ex.* Les Perséides qui divergent d'un point de la constellation de Persée.

radioastronomie. *n.* Branche de l'astronomie qui observe les astres à l'aide des ondes hertziennes qu'ils émettent. Le domaine des longueurs d'onde varie entre quelques centimètres et des centaines de mètres.

radiotélescope. *n.* Instrument recevant les ondes électromagnétiques des astres dans le domaine des ondes hertziennes (quelques centimètres à 100 m de longueur d'onde). Ils fonctionnent comme des télescopes pour ces radiations.

raies interdites. Raies spectrales observées dans certains astres (les nébuleuses gazeuses notamment) et dont l'émission paraissait interdite en laboratoire. Elles correspondent aux transitions à partir d'un état métastable.

rayonnement synchrotron. Rayonnement électromagnétique émis par des électrons se déplaçant à des vitesses voisines de celle de la lumière dans un champ magnétique intense. Le rayonnement émis est intense dans un grand domaine spectral; il s'observe dans les synchrotrons mais il explique aussi le rayonnement dans les résidus des *supernovae* et des quasars ainsi que la radiation dans certains centres d'activité solaire.

rayons infrarouges. Domaine des ondes électromagnétiques de longueur d'onde supérieure à 0,8 mμ et allant jusqu'aux ondes de longueur d'onde voisine de 1 mm, qui sont observables avec diverses techniques spéciales. On a reconnu ces dernières années un certain nombre d'étoiles émettant uniquement dans le domaine des ondes infrarouges.

rayons X. Radiations électromagnétiques de courte longueur d'onde. Assez arbitrairement, le domaine des rayons X s'étend de $\lambda = 20$ Å à $\lambda = 0{,}03$ Å. On a découvert un certain nombre d'astres émettant des rayons X.

récession des galaxies. Voir *expansion de l'Univers*.

réfraction atmosphérique. L'atmosphère terrestre réfracte la lumière des astres et les rapproche du zénith d'un angle R, nommé réfraction. R vaut environ 1′ pour une distance zénithale de 45°.

relation période-luminosité. Importante relation entre la luminosité moyenne d'une Céphéide et sa période. Elle est très utile pour déterminer la distance des galaxies qui en contiennent.

relativité restreinte. Postulat énoncé en 1905 par A. Einstein d'après lequel la vitesse de la lumière est une constante universelle quel que soit le mouvement du système considéré. Dans le cas de la Relativité restreinte, on ne considère que des systèmes en mouvements de translation. Dans le cas de la *Relativité généralisée,* la restriction des systèmes en mouvements de translation n'est plus nécessaire. La loi de Newton se retrouve comme première affirmation des lois de la Relativité.

réseau. *n.* Disque ou parallélépipède de silice fondue sur lequel a été déposée une mince couche d'aluminium. Cette couche est rayée par de très nombreux traits de diamant. Un réseau moderne peut avoir des dimensions de 20 × 30 cm et comprendre 1 000 traits au millimètre. Le réseau disperse la lumière comme un prisme.

rétrogradation. *n.* Mouvement dans le sens rétrograde vers l'ouest qu'effectue une planète entre les deux stations orientale et occidentale.

rétrograde. *adj.* **(mouvement).** Le sens rétrograde est le sens opposé au mouvement apparent du Soleil; c'est le sens des aiguilles d'une montre.

révolution anomalistique. Intervalle moyen qui sépare deux passages successifs de l'astre par son périastre (périhélie pour une planète, périgée pour la Lune).

révolution draconitique de la Lune. Intervalle moyen qui sépare deux conjonctions successives de la Lune avec le nœud de son orbite. Cette période de 27,212 220 jours détermine, avec la révolution synodique, la périodicité des éclipses.

révolution sidérale. Temps qui s'écoule entre deux conjonctions successives d'une planète avec le point vernal fixe. C'est la période qui obéit pratiquement à la troisième loi de Kepler.

révolution synodique de la Lune ou **lunaison.** Intervalle moyen de deux conjonctions géocentriques successives de la Lune et du Soleil. Elle détermine les phases de la Lune. Elle vaut 29,530 588 2 jours.

révolution synodique d'une planète. Intervalle moyen de deux conjonctions héliocentriques successives de la Terre et de la planète. Elle détermine les conditions d'observation de la planète. Elle est très différente de la révolution sidérale pour les planètes proches de la Terre.

rotation différentielle de la Galaxie. On constate que les vitesses radiales moyennes des étoiles situées aux longitudes 0°, 90°, 180° et 270° sont nulles, mais que les étoiles situées dans les octants (l = 45°, 135°, 225° et 315°) ont des valeurs croissantes avec la distance. La constante d'Oort est la valeur correspondant à des étoiles des octants situés à 1 000 parsecs. La valeur actuellement admise est de 15 km/s par kiloparsec.

rotation galactique. La Galaxie tourne autour de son centre en se déformant. Dans la théorie d'Oort, chaque point de la Galaxie tourne autour du centre avec une vitesse qui ne dépend que de la distance au centre. Cette théorie explique la *rotation différentielle*.

RR Lyrae. Étoile variable, du type céphéide mais dont la période est inférieure à un jour. Ces étoiles pulsantes sont typiques des étoiles vieilles de population II. Elles sont abondantes dans les amas globulaires.

S

saisons. *n.* Les quatre divisions de l'année, qui s'écoulent entre les moments où la longitude du Soleil a les valeurs :

printemps	0° à 90°;
été	90° à 180°;
automne	180° à 270°;
hiver	270° à 360°.

Les quatre saisons ne sont pas égales à cause de l'excentricité de l'orbite terrestre.

saros. *n.* Période de 6 585 jours ou 18 ans 11 jours qui permet de prédire les éclipses de Lune et de Soleil. Celles-ci se reproduisent très sensiblement d'un saros au suivant.

satellite. *n.* 1° Corps en général sphérique tournant autour d'une planète. *Ex.* La Lune. 2° Un *satellite artificiel* est un engin spatial placé sur une orbite analogue à celle d'un satellite naturel. *Ex.* Satellites artificiels de la Terre mais aussi de Mars.

scintillation. *n.* L'atmosphère terrestre produit, par ses fluctuations, des petits mouvements aléatoires des étoiles qui se traduisent par des fluctuations d'intensité pour l'observation visuelle. Ce phénomène est la scintillation des étoiles.

seconde de temps. La seconde de temps correspond à 9 192 631 770 oscillations d'une raie rouge de l'atome de césium (seconde atomique). L'année tropique pour 1900 contenait 31 556 925,974 7 secondes des éphémérides. Ces deux unités sont pratiquement égales et un jour solaire moyen actuel contient très sensiblement 86 400 secondes.

sections coniques. Lorsqu'on coupe un cône à base circulaire par un plan on obtient, suivant l'orientation du plan par rapport à l'axe du cône, des sections qui sont des ellipses (dont le cercle), des paraboles, des hyperboles. Le mouvement des astres autour du Soleil ne peut se faire, comme l'a montré Newton, que sur des trajectoires qui sont des sections coniques.

sélénologie. *n.* Science qui étudie la Lune.

sextant. *n.* Instrument de marine qui permet de déterminer la hauteur du Soleil ou d'une étoile, et permet donc de faire le point en mer.

sidérolithe. *n.* Météorite composée de roches et d'un alliage de fer-nickel en quantités à peu près égales.

solstice. *n.* Époque de l'année où le Soleil a sa déclinaison maximale *(solstice d'été)* ou minimale *(solstice d'hiver)*. La longitude du Soleil est alors de 90° et de 270°. La déclinaison du Soleil passe par des extrémums et ne paraît pas bouger en déclinaison. Les solstices correspondent aux jours les plus longs et les plus courts et se situent au début de l'été et de l'hiver.

sources X. *n.* Astres émettant des rayons X. La plupart de ces astres sont des étoiles doubles à forte interaction.

spectre d'un astre ou **spectre stellaire.** Cliché ou enregistrement montrant la variation de l'intensité de la lumière en fonction de la longueur d'onde. On y distingue les raies d'absorption.

spectrographe. *n.* Instrument d'astrophysique, disposé en général au foyer d'un télescope. Il disperse la lumière collectée par le télescope et donne un spectre de l'astre qui permet de reconnaître les atomes existant dans la source. Le spectrographe permet de déterminer, par la mesure de ces raies, la température, la pression, la vitesse radiale, la rotation, etc. des étoiles. Les spectrographes modernes ont des réseaux pour éléments dispersifs.

spectrohéliographe. *n.* Instrument qui permet d'obtenir des photographies monochromatiques du Soleil. Dans les premières versions, la lumière du

Soleil était d'abord décomposée en un spectre sur lequel on isolait une radiation, et l'on recombinait ensuite la lumière. B. Lyot a introduit l'usage de filtres à quartz.

sphère céleste. Sphère théorique de rayon unité et centrée sur l'observateur. Les directions des astres peuvent être reportées sur cette sphère par des points.

spirale. *n.* Voir *galaxie*.

spirale barrée. Voir *nébuleuse spirale*.

station. *n.* Moment où une planète, au cours de son déplacement apparent sur la sphère céleste, paraît immobile par rapport aux étoiles. Cet effet est dû à la combinaison des déplacements de la planète et de l'observateur terrestre. Il y a deux stations par révolution synodique : la *station orientale,* suivie de la *station occidentale*. Entre les deux, la planète rétrograde.

supernova. *n.* Étoile temporaire dont l'éclat est multiplié en quelques jours par un facteur de l'ordre du million. Les *supernovae* laissent comme résidus des nébulosités et des pulsars.

syzigie. *n.* Position de la Lune lorsqu'elle est en opposition ou en conjonction avec le Soleil. La Pleine Lune et la Nouvelle Lune sont les deux syzigies.

T

tache solaire. Formation sombre plus ou moins étendue qui apparaît sur le Soleil. C'est une région plus froide due à des tourbillons dans la photosphère solaire.

tectites. *n.* Fragments de verre fondus de diverses formes et couleurs, et répandus dans certaines zones (Australie, Tchécoslovaquie, etc.). Leur origine cosmique n'est pas absolument prouvée.

télescope astronomique. Instrument d'optique dont l'élément principal est constitué par un miroir de grand diamètre. Dans sa conception ancienne, le miroir était parabolique et on lui associait un oculaire convergent. Ce télescope a les mêmes propriétés qu'une lunette. Voir *télescope de Ritchey-Chrétien, télescope de Schmidt*.

télescope de Ritchey-Chrétien. Combinaison optique inventée par H. Chrétien dans laquelle le miroir principal est plus déformé que la parabole. Les aberrations de ce miroir sont compensées par un second miroir, plus petit et spécialement déformé. Il est possible d'obtenir avec cet instrument, dénué de coma, des champs plus grands (télescope aplanétique).

télescope de Schmidt. Instrument d'astronomie qui sert essentiellement à la photographie à grand champ. Les deux éléments sont un miroir sphérique dont l'aberration est corrigée par une lame asphérique, dite lame de Schmidt, située au centre de courbure du miroir. La plaque courbée permet la photographie de champs très étendus.

temps atomique. Temps défini par la fréquence d'une pendule à césium. Ce temps est, à une constante additive près, pratiquement identique au temps des éphémérides. TAI = TE — 32,180 s, 1 s = 9 192 631 770 oscillations d'une raie définie de l'atome de césium.

temps des éphémérides. Temps qui entre dans les équations de la mécanique et dont la seconde est définie comme la fraction 1/31 556 925,974 7 de l'année tropique pour 1900. Cette seconde est pratiquement identique à la seconde atomique.

temps solaire moyen local. Temps obtenu en ajoutant au temps solaire vrai l'équation du temps qu'on peut calculer. Ce temps est uniforme.

temps solaire vrai local. C'est l'angle horaire du Soleil. Il est midi lorsque cet angle horaire est de 0°, 1 heure lorsqu'il est de 15°, etc. Le temps solaire vrai n'est pas une fonction uniforme du « temps des mécaniciens ».

temps sidéral. Angle horaire du point vernal. Le temps sidéral régit le mouvement horaire des étoiles. 1 jour sidéral = 86 164,090 55 s de temps atomique.

temps universel (T. U.). Temps moyen au méridien de Greenwich augmenté de 12 heures. Il a été adopté comme temps universel. L'expression *temps moyen de Greenwich* (TMG) pour ce temps est erronée : celui-ci diffère de 12 h du T. U.

théodolite. *n.* Instrument d'astronomie et de géodésie de grande précision qui permet de mesurer les azimuts et les hauteurs des astres.

transition atomique ou **moléculaire.** Les atomes et les molécules existent sous un nombre discret de configurations. A chaque configuration correspond une certaine énergie ou niveau d'énergie. Les raies spectrales correspondent aux transitions entre deux niveaux. Elles sont en émission lorsque le passage se fait à partir d'un niveau plus énergétique, et en absorption dans le cas contraire.

triangle sphérique. Figure formée sur la sphère céleste par l'intersection de trois grands cercles.

trigonométrie sphérique. Partie des mathématiques qui s'occupe de la résolution des triangles sphériques.

trois corps. Voir *problème des trois corps*.

tropiques. *n.* Petits cercles de la sphère céleste et de la Terre situés à ± 23°27′ de l'équateur. Ils correspondent à la position du Soleil aux solstices. Le Tropique du Cancer est boréal, celui du Capricorne austral. Sur la Terre, le Soleil passe au zénith de ces lieux respectivement le 21 mars et le 22 septembre.

trous noirs. Lorsque la matière est suffisamment condensée, la vitesse d'évasion peut être supérieure à celle de la lumière et aucune matière, ni photon ne peuvent s'en échapper. Ces singularités, prévues depuis longtemps et qui n'ont pas encore été reconnues avec certitude, portent le nom de trous noirs *(black holes)*.

turbulence atmosphérique. Les inégalités de densité de l'atmosphère produisent de petites déviations de la direction des rayons optiques venant d'une étoile. Ce phénomène est la turbulence. On nomme quelquefois turbulence la valeur moyenne de cette déviation, exprimée en secondes d'arc.

U-V-Z

Union Astronomique Internationale (U. A. I.). Une des unions scientifiques qui réunit l'ensemble des astronomes du monde entier. Elle permet l'échange des informations et propose des définitions et des conventions scientifiques.

unité astronomique (u. a.). Unité de longueur qui est très sensiblement égale au demi-grand axe de l'orbite terrestre ou sensiblement égale à la distance Soleil-Terre : 1 u. a. = 149,598 millions de km.

variation. *n.* Une des *inégalités* du mouvement de la Lune, qui a une période de 14,77 jours et produit dans les octants une avance ou un retard de 72 minutes de la Lune sur son orbite. Elle s'annule aux syzigies (NL et PL) et aux quartiers (PQ et DQ).

vent solaire. Le Soleil émet de façon permanente des particules ionisées qui s'en éloignent à grande vitesse (de l'ordre de 500 à 1 000 km/s). Ce phénomène porte le nom de vent solaire. Ce vent solaire entraîne aussi un champ magnétique.

vertical *adj.* **(plan).** Dans le système des coordonnées locales, tout plan contenant l'observateur et le zénith. Le premier plan vertical est celui qui est perpendiculaire au plan méridien.

vidicon. *n.* Tube électronique servant à la prise de vue des images de télévision. Un objectif classique projette l'image de l'objet sur une surface sensible. Celle-ci est ensuite explorée par un faisceau d'électrons qui est modulé par l'image qu'on peut ainsi transmettre et qui permet de la reconstituer.

vitesse aréolaire. Surface balayée dans l'unité de temps par le rayon vecteur qui joint la planète au Soleil. Dans le mouvement keplerien, la vitesse aréolaire est constante.

vitesse radiale. Projection sur la direction de l'étoile (ou de l'astre) de la vitesse relative Soleil-étoile. Elle est comptée positivement si l'étoile s'éloigne : on l'exprime en km/s.

Voie Lactée. Région de la sphère céleste qui apparaît, à l'œil nu, comme une bande laiteuse ayant la forme d'un grand cercle. La Voie Lactée est la trace sur notre ciel de notre nébuleuse spirale : la Galaxie.

zénith. *n.* Intersection de la verticale ascendante avec la sphère céleste.

zodiaque. *n.* Zone située de part et d'autre de l'écliptique et délimitée arbitrairement à ± 8°,5. Le zodiaque est divisé en douze intervalles, ou maisons, qui correspondaient, il y a deux mille ans, aux constellations zodiacales.

PHYSIQUE DU GLOBE

A-B

aberration. *n.* Défaut de sphéricité d'une lentille, qui donne une image déformée.

absorption du rayonnement solaire. Altération de l'énergie solaire dans l'eau. Cette énergie diffusée dans l'eau est transformée en chaleur par frottement contre les molécules d'eau ou des substances dissoutes. La plus grande partie de l'énergie solaire incidente est ainsi transformée en énergie calorifique.

acoustique sous-marine. Étude de la production, de la transmission et de la réception des sons dans les grandes masses d'eaux océaniques.

adiabatique. *adj.* **(réchauffement).** Léger accroissement de la température des eaux océaniques vers les grands fonds, en raison des effets de la pression, sans échange avec l'extérieur.

advection. *n.* Processus de transport des propriétés d'une masse d'air par le champ de vitesse de l'atmosphère.

alcalin. *adj.* Qualifie des métaux qui, combinés avec l'oxygène, produisent des alcalis (lithium, potassium, rubidium, sodium).

alidade. *n.* Dans les appareils destinés à la mesure des angles horizontaux, la lunette est solidaire d'un cercle porteur d'index de lecture. Ce cercle s'appelle *cercle-alidade* ou simplement *alidade*. *Par ext.,* le nom d'alidade est donné à certains instruments comportant une règle à biseau permettant le tracé des directions et un organe de visée.

alizés. *n.* Vents persistants de l'atmosphère inférieure, soufflant de l'anticyclone subtropical vers les régions équatoriales.

altération linéaire. Différence entre la longueur d'un arc sur la carte et la longueur correspondante sur l'ellipsoïde.

altimétrie. *n.* Représentation du relief de la surface terrestre. Les principaux éléments altimétriques sont les altitudes, les différences d'altitudes et les pentes.

amphibole. *n.* Nom d'un groupe de silicates (inosilicates) à deux clivages faciles et parfaits.

amphidromiques. *adj.* **(points).** Points géographiques de marée nulle.

amplitude. *n. En physique,* écart maximum, par rapport à sa valeur d'équilibre, d'une quantité qui varie de façon oscillatoire autour de cette valeur (mouvement pendulaire, oscillatoire...).

analyse synoptique. A partir des cartes synoptiques, opération de recherche de la description d'ensemble de l'état de l'atmosphère sur une région, avec l'aide d'éléments tels que les masses d'air, les fronts, etc.

anémomètre. *n.* Instrument de mesure de la vitesse du vent, ou d'observation de la direction et de cette vitesse.

anéroïde. *adj.* Relatif à certains baromètres constitués par une boite hermétiquement close et où l'on a fait le vide. Les variations de la pression atmosphérique impriment à l'une des faces des flexions amplifiées par un mécanisme et transmises à une aiguille mobile devant un cadran gradué en millimètres de mercure.

angle d'incidence. Angle formé par le rayon incident et la normale à la surface frappée, au point d'incidence.

angle de réfraction. Angle formé par le rayon réfracté et la normale à la surface de séparation entre deux milieux traversés par la lumière.

angle vertical. Dans le plan vertical, angle entre la direction de visée et la verticale (distance zénithale), ou l'horizontale (angle de site).

anomalies magnétiques (zones ou **bandes d').** Zones de roches volcaniques de la croûte océanique, parallèles à l'axe d'un segment de dorsale médio-océanique, symétriques par rapport à cet axe. Les particules magnétiques contenues dans les roches gardent les marques des inversions répétées du champ magnétique terrestre au cours des temps géologiques. La largeur de ces zones, ou bandes, d'une structure dite en « peau de zèbre », représente la durée de chaque période d'orientation du champ magnétique et le rythme de renouvellement de la croûte océanique.

anticyclogenèse. *n.* Processus d'apparition ou d'intensification d'une circulation anticyclonique.

anticyclone. *n.* Région de haute pression atmosphérique.

arcs insulaires. Chaînes de montagnes en formation, qui correspondent aux endroits où une plaque océanique disparaît en s'enfonçant par subduction dans l'écorce. La topographie d'une région d'arc insulaire est caractérisée par un profond fossé océanique et l'arc des iles. Dans de nombreux cas, il existe un fossé sur le côté continental de l'arc. Plus de 90 % des volcans actifs du globe sont situés sur des arcs insulaires (on les appelle souvent la « ceinture de feu » du Pacifique).

arcs volcaniques insulaires. Archipels actifs du point de vue volcanique marquant une partie de la zone de rencontre de deux plaques convergentes. Ils délimitent entre eux et le continent voisin des bassins marginaux, ou interarcs, plus ou moins fermés.

argiles rouges abyssales. Sédiments terrigènes très fins composés principalement d'argiles détritiques, se déposant très lentement (1 mm/an) sur les grands fonds, trop profonds pour que s'y déposent des sédiments biogènes, trop éloignés des continents pour que s'y accumulent des sédiments terrigènes grossiers. Ces « argiles rouges des grands fonds », en réalité boues brunâtres, peuvent contenir des sédiments minéraux authigènes en proportion importante.

asismiques. *adj.* **(chaînes** ou **dorsales).** Chaînes sous-marines distinctes des dorsales médio-océaniques, ne présentant pas de Rift au sommet, et qui ne sont affectées par aucune activité volcanique.

asphérique. *adj.* Qualifie une surface de révolution engendrée par la rotation d'un segment de ligne plane à variation continue de courbure, autour d'un axe passant par une extrémité du segment et orthogonal à la courbe en cette extrémité.

asthénosphère. *n.* Couche visqueuse, magmatique, du manteau de l'écorce terrestre, épaisse d'environ 200 km. Les mouvements de convection dont elle est animée entrainent les plaques lithosphériques sus-jacentes.

astigmatisme. *n.* Aberration d'un système optique qui donne au foyer non pas un point-image, mais deux petits segments de droite perpendiculaires entre eux.

atmosphère. 1° *En physique,* unité de pression. Une atmosphère correspond à : 1° Une pression de 1 kg par cm²; 2° La pression exercée sur sa base par une colonne de mercure de 1 cm² de section et de 76 cm de hauteur; 3° La pression exercée sur sa base par une colonne d'eau de 1 cm² de section et de 10 m de hauteur; 4° La pression moyenne qui règne au niveau de la mer.
2° *En météorologie,* ensemble de parties plus ou moins différenciées les unes des autres appelées masses d'air.

atmosphère barotrope. Modèle d'atmosphère dans lequel la masse volumique est fonction uniquement de la pression. Les surfaces isostères coïncident avec les surfaces isobares.

atmosphère isotherme. Modèle d'atmosphère dans lequel la température, ou la température virtuelle, est constante selon la verticale.

atoll. *n.* Récif corallien en forme d'anneau irrégulier, édifié à partir d'une ile volcanique en cours de submersion, entourant une lagune centrale d'eau tranquille, appelée lagon.

avis de coup de vent. Message météorologique destiné à prévenir les intéressés de l'existence ou de la prévision, dans une région déterminée, d'un vent correspondant à force 8 à 9 de l'échelle de Beaufort.

avis de tempête. Message météorologique destiné à prévenir les intéressés de l'existence ou de la prévision, dans une région déterminée, d'un vent correspondant à force 10, ou plus, de l'échelle de Beaufort.

axe d'accrétion. Axe de symétrie de l'augmentation de masse de chacune de deux plaques lithosphériques s'écartant l'une de l'autre à partir d'une zone de remontée de matériaux asthénosphériques.

azimut. *n.* Angle dièdre entre le méridien et le plan de visée, compté positivement dans le sens des aiguilles d'une montre avec origine vers le nord géographique.

banquise. *n.* Revêtement général de glace dans une zone océanique de haute latitude, troué de polynies, saisonnier (glace d'hiver), ou permanent (glace polaire).

basaltiques. *adj.* **(laves océaniques).** Le manteau supérieur du globe terrestre donne, par fusion partielle des péridotites qui le composent, des liquides basaltiques. A partir du moment où ils sont formés dans le magma, les liquides basaltiques montent vers la surface d'autant mieux qu'ils sont plus enrichis en gaz. Au cours de la montée, la traversée de couches plus froides entraîne une cristallisation partielle. L'apport de liquides magmatiques basaltiques comble de façon permanente le volume libéré dans l'axe d'une dorsale par l'écartement de deux plaques.

bassin océanique. Province lithosphérique caractéristique du domaine océanique, au-dessous de la profondeur de 5 000 m. Dépression de dimensions variables, entourée de reliefs montagneux. Sa morphologie est celle de sa couverture sédimentaire.

bassins marginaux. Ces bassins sont créés par une migration des zones de subduction (fosse-arc insulaire) qui s'écartent des continents adjacents. La migration entraîne une remontée de l'asthénosphère et la formation de nouvelle lithosphère entre l'arc insulaire et le continent.

bathymétrie. *n.* Mesure et cartographie des fonds océaniques.

bathythermographe. *n.* Appareil utilisé pour enregistrer la température de l'eau de mer et la profondeur à laquelle est effectuée chaque mesure par rapport à la surface, de façon à inscrire la variation de la température en fonction de la profondeur.

Beaufort (échelle de). Classement de la force estimée du vent en fonction de l'état de la mer, proposé en 1806 par l'amiral britannique Francis Beaufort, généralisé après la Conférence internationale de météorologie maritime de 1874. S'exprime par un nombre de 0 à 12.

boues à Diatomées. Sédiments caractéristiques des fonds des régions (zone subantarctique et Nord-Pacifique en particulier) trop froides pour le développement des Foraminifères (Globigérines), mais très productives en Algues siliceuses (Diatomées).

boues à Globigérines. Sédiments calcaires sur les fonds océaniques, composés principalement de tests en calcite d'organismes planctoniques (Foraminifères et Coccolithophoridés) dominants dans les eaux chaudes et dans les eaux tempérées.

C

canevas. *n. En topographie,* réseau de points de coordonnées connues servant d'appui aux observations et mesures nécessaires à la mise en place des points de détail.

canyons sous-marins. Réseau de gorges ou de vallées découpant la pente continentale. Ils peuvent être le siège de glissements massifs du remplissage sédimentaire, qui sont probablement à l'origine des courants de turbidité.

cardan. *n.* Mode de suspension, à l'intérieur de deux anneaux mobiles, qui permet au corps suspendu de garder une direction invariable malgré les mouvements du support.

carte clinographique. Carte thématique consacrée à la représentation des valeurs de la pente du terrain et de ses variations.

carte isallobarique. Carte géographique sur laquelle sont représentées les variations de pression atmosphérique pendant un intervalle de temps déterminé.

carte prévue. Prévision, présentée graphiquement, d'éléments météorologiques déterminés pour une heure ou une période définie et pour une région déterminée.

cartogramme. *n.* Représentation de phénomènes quantitatifs, sous forme de figures de dimensions proportionnelles aux valeurs et localisées sur un fond de carte.

centre d'action. Dépression ou anticyclone, de grande étendue, presque stationnaire, guidant le mouvement des perturbations atmosphériques.

circulation cyclonique. Circulation de l'air liée systématiquement à une dépression.

circulation générale. Ensemble des configurations de circulation atmosphérique s'étendant sur tout le globe terrestre.

circulation océanique. Ensemble des mouvements des eaux océaniques s'effectuant selon des circuits qui peuvent être, en moyenne, considérés comme réguliers dans le temps.

circulation profonde (dite **thermoaline**). Circulation liée au mécanisme de formation des eaux profondes dans les régions boréales. Les eaux denses et froides formées en surface plongent et envahissent les bassins profonds des océans. Elles

chemineraient à des profondeurs supérieures à 4 000 m, en veines relativement intenses, le long des bords occidentaux des continents.

cisaillement. *n.* Déformation par aplatissement et rotation d'ensemble. Si un cube est soumis à une contrainte *cisaillante,* qui peut être matérialisée par un couple de forces, il se transformera en un parallélépipède dont les faces ne seront plus parallèles à celles du cube initial. Il n'y aura donc pas un changement de volume, mais un changement de forme.

code météorologique. Ensemble de règles adoptées par convention internationale ou nationale, et utilisées pour condenser les messages météorologiques à transmettre.

collines abyssales. Province océanique profonde formant les contreforts des dorsales médio-océaniques, ou des bassins océaniques profonds dans le cas où ceux-ci sont à l'abri de processus de sédimentation terrigène.

colloïdal. *adj.* Qualifie une substance, dispersée dans un solvant dont les molécules sont groupées en micelles portant une charge électrique de même signe (la substance ne peut traverser une membrane semi-perméable).

conductivité électrique ou **conductibilité des eaux océaniques.** Aptitude des eaux océaniques à conduire les charges électriques, en fonction de la salinité. Sa mesure est une méthode de mesure de la salinité.

constituants conservatifs ou **constituants primaires.** Éléments présents dans les eaux des océans en proportions relativement constantes, quelle que soit la teneur globale en sels des eaux considérées. Par ordre quantitativement décroissant, on trouve : chlore, sodium, magnésium, soufre, calcium, potassium, brome, carbone, strontium, bore...

constituants non conservatifs ou **constituants secondaires.** Corps dont la teneur dans les eaux océaniques varie selon l'espace et le temps, et qui sont impliqués dans des phénomènes biologiques et biochimiques : gaz carbonique, oxygène, composés d'azote minéral, composés de phosphore.

convection. *n.* Mouvement d'un fluide dû à une variation de la température.

convergence des méridiens. Sur un plan de représentation, angle entre la direction du nord géographique et l'axe des ordonnées.

coordonnées orthogonales. Coordonnées cartésiennes définissant sur un plan la position de l'homologue d'un point de l'ellipsoïde de référence, dans un système de représentation plane donné.

corrélateur d'images. Dispositif électronique interprétant les résultats de l'analyse des densités de deux images photographiques d'un même objet, dans le but de définir les zones infinitésimales homologues.

cotidales. *adj.* **(lignes).** Lignes joignant sur une carte (dite cotidale) les points d'un bassin où la marée se produit au même moment.

couche du minimum. Teneur minimale en oxygène dissous du milieu marin, en fonction de la profondeur. Par exemple, dans l'Atlantique, la couche du minimum est située à 40° de latitude Nord, entre 400 et 900 m sous la surface.

courantomètre. *n.* Appareil de mesure de la vitesse et de la direction d'un courant, conçu pour une utilisation durant des périodes assez brèves, de quelques dizaines de minutes à quelques jours.

courants de marée. Courants, engendrés par la marée, de période et d'amplitude dépendant du régime de celle-ci.

courants océaniques. Mouvements apériodiques de déplacement de masses d'eaux océaniques, définis par la vitesse, la direction et le volume d'eau transportée.

courants de turbidité. Courants de gravité dans l'Océan, dus à l'écoulement d'une eau dont la densité est augmentée par les sédiments qu'elle contient en suspension. Il s'agit souvent d'avalanches boueuses (pouvant atteindre des vitesses de 50 km/h ou plus), déclenchées sur les pentes de la marge continentale.

courbe de niveau. Ligne conventionnelle joignant les points de même altitude.

croisement. *n.* Sur un plan de représentation, angle entre la direction de l'axe des ordonnées et la droite joignant deux points.

croûte continentale. Couche constitutive de la partie superficielle du globe terrestre, située sous les continents, d'une épaisseur moyenne de 35 km. Elle est formée de roches métamorphiques anciennes et de roches plutoniques, comme les granites. Elle repose sur le manteau supérieur. Voir *croûte sialique.*

croûte océanique. Couche constitutive de la partie superficielle du globe terrestre, située sous les océans, d'une épaisseur moyenne de 10 km. Elle est formée de basaltes, roches volcaniques riches en silicates et alumino-silicates de magnésium, de fer et de calcium. Elle repose sur le manteau supérieur.

croûte sialique. Autre nom donné à la croûte continentale, en raison de sa composition comprenant principalement de la silice et des alumino-silicates de potassium ainsi que de sodium.

cyclogenèse. *n.* Processus d'apparition ou d'intensification d'une circulation cyclonique.

cyclone tropical. Dépression d'origine tropicale, de petit diamètre, donnant des vents violents et des précipitations torrentielles parfois accompagnées d'orages.

D-E

déclinaison. *n.* Angle compris entre la direction du nord magnétique et le méridien géographique du lieu considéré (déclinaison magnétique).

déclinaison magnétique. Angle horizontal entre les directions du nord géographique et du nord magnétique.

déclinatoire. *n.* Boîte contenant une aiguille aimantée reposant sur un pivot. Permet d'orienter une planchette ou de donner une direction de référence à la mesure d'angles horizontaux avec une précision de l'ordre du décigrade.

densité de l'eau de mer. Comme pour tous les corps, la densité de l'eau de mer est la masse de l'unité de volume pour une température et une pression données. Une troisième variable, la salinité, lui est ajoutée; elle est exprimée en g/cm³.

dépression. *n.* Région de l'atmosphère où la pression est basse par rapport aux régions voisines situées au même niveau.

dérive des continents. Théorie proposée entre 1910 et 1915, formulée en 1929 par le géophysicien et météorologue allemand Alfred Wegener, et selon laquelle, dans le passé, les continents auraient formé un « supercontinent » qui se serait fragmenté, et dont les morceaux se seraient éloignés les uns des autres par dérive.

déviation de la verticale. En un point, angle de la verticale et de la normale.

diagramme. *n.* Représentation géométrique de la structure ou de l'évolution d'un phénomène.

diagramme aérologique. Diagramme thermodynamique utilisé pour des analyses aérologiques et synoptiques.

diagramme t. s. Figuration simultanée des températures en ordonnées et des salinités en abscisses, indispensable pour la connaissance du comportement des masses d'eaux océaniques.

diffusion du rayonnement solaire. Altération de l'énergie solaire dans l'eau. Les molécules d'eau de mer ainsi que les particules minérales ou organiques en suspension renvoient le rayonnement solaire dans diverses directions.

dipôle. *n.* Ensemble formé par deux charges électriques ou magnétiques ponctuelles égales et de signes opposés, situées à faible distance.

dislocation. *n.* Les dislocations peuvent être des ploiements de couches sans cassure, ou bien avec cassure et déplacement. Dans le premier cas on parle de *plissements,* dans le second de *failles.*

distorsion. *n.* Écart, dû à certaines aberrations de l'objectif, entre la position d'une image photographique ponctuelle sur le cliché et la position qu'elle devrait théoriquement occuper.

divergence. *n.* Grandeur scalaire définie, pour un champ de vecteur V (*ex.* le vecteur vent) par :

$$\text{div } V = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}.$$

dorsales médio-océaniques. Système de reliefs montagneux, ou fragments de dorsales reliés entre eux par des zones de fractures actives, sillonnant les fonds de l'océan mondial sur une distance d'environ 65 000 km. Les dorsales sont, par endroits, larges de plus de 2 000 km, et s'élèvent en moyenne à 2 000 m au-dessus des bassins océaniques. La crêtes des dorsales est entaillée par une vallée centrale, ou Rift. Les dorsales sont les zones frontières de deux plaques divergentes, et des zones de formation de plaques lithosphériques océaniques par accrétion.

dyke. *n.* Filon de lave injecté dans des fissures de cônes volcaniques.

dynamomètre. *n.* Instrument qui sert à évaluer les forces.

eaux juvéniles. Eaux riches en chlorures et en bromures, provenant, sous forme de venues hydrothermales, du dégazage des matériaux constitutifs du globe au travers de fissures de l'écorce basaltique.

éclimètre. *n.* Instrument ou organe d'instrument conçu pour la mesure des angles dans le plan vertical. Il est composé d'un cercle vertical gradué et centré sur les tourillons porteurs d'une lunette. Le cercle gradué comporte une nivelle, destinée à mettre en coïncidence l'origine des graduations avec la verticale du lieu.

électromagnétisme. *n.* Partie de la physique qui étudie les interactions entre courants électriques et champs magnétiques.

ellipsoïde de révolution. Surface engendrée par une ellipse tournant autour d'un de ses axes.

émagramme. *n.* Diagramme thermodynamique ayant pour coordonnées cartésiennes rectangulaires ou obliques t (température) et $\ln p$ (log. népérien pression).

énergie marémotrice. Énergie qu'il est possible, en quelques points du monde où l'amplitude des marées est maximale, de produire à partir de turbines entraînées par le courant de flot et par celui de jusant.

énergie thermique des mers. Énergie qu'il est possible de produire en utilisant les différences de température qui existent entre les eaux de surface et les eaux profondes.

épicentre. *n.* Foyer apparent d'un séisme, situé sur la surface de la Terre.

équation de continuité. Équation de l'hydrodynamique exprimant que, dans un volume fluide hypothétique, l'accroissement de masse est égal au bilan des masses qui y rentrent et en sortent.

équation de l'hydrostatique. Forme de l'équation de mouvement pour les composantes verticales, dans laquelle tous les termes sont considérés

comme négligeables devant les forces de pression et de pesanteur.

équation du mouvement. Dans le mouvement de l'atmosphère par rapport à la Terre, l'équation vectorielle relative à l'unité de masse de l'air est :

$$\frac{dV}{dt} = -2\,\Omega \times V - gk - \frac{1}{\rho}\nabla p + F.$$

équation de tendance. Équation exprimant que la rapidité de variation locale de la pression, à un niveau donné de l'atmosphère, est due à la fois à l'advection et à la divergence de vitesse horizontale.

équation du tourbillon. Équation obtenue en prenant les tourbillons des termes de l'équation vectorielle du mouvement. Elle donne la rapidité de changement du tourbillon relatif d'une particule d'air.

estompage. *n.* Variation de teinte donnant une figuration plastique du relief en fonction de la pente et d'une hypothèse conventionnelle d'éclairage du terrain.

étale. *n.* Brève période de la marée océanique séparant le flot et le jusant, au cours de laquelle le courant de la marée, montante ou descendante, est nul.

eustatisme. *n.* Théorie d'explication des variations du niveau moyen des océans au cours des temps géologiques.

euxinisme. *n.* Apparition d'hydrogène sulfuré dans un milieu aquatique confiné, en raison de la consommation totale de l'oxygène dissous et du non-renouvellement des eaux.

évaporites. *n.* ou **roches salines.** Toutes roches sédimentaires formées par précipitation de sels originairement dissous dans les eaux d'un bassin océanique, à la suite de l'évaporation et de la sursaturation de la masse liquide. Les évaporites sont en rapport étroit avec les zones marines de subsidence.

excavation. *n.* Action de creuser dans le sol; creux dans un terrain qui peut être naturel (caverne, faille, grotte) ou artificiel (fosse, puits, souterrain, tranchée).

extensomètre. *n.* Instrument qui mesure les déformations produites dans un corps sous l'effet des contraintes mécaniques.

F

faille. *n.* Fracture de l'écorce terrestre, suivie d'un glissement relatif des deux masses rocheuses résultantes le long d'une surface appelée *plan de faille.*

faille transformante. Accident tectonique perpendiculaire à l'axe d'accrétion d'une dorsale médio-océanique, et décalant des segments de cette dorsale, dont elle transforme ainsi la direction. C'est une zone de frottement de plaques lithosphériques.

floes. *n.* Fragments individualisés de banquise au cours de la régression du phénomène de glaciation océanique.

floraison ou ***bloom.*** *n.* Poussée végétale rapide dans la tranche d'eau superficielle qui se développe en raison de la combinaison de l'énergie solaire et des sels nutritifs (nitrates et phosphates).

flot. *n.* Courant de marée montante (flux).

fluage. *n.* Déformation d'un corps soumis à de très fortes pressions.

forages profonds (programme de). Programme mené depuis 1968 pour effectuer des prélèvements par grands fonds au moyen d'un navire capable de forer un maximum de 1 500 m dans la croûte océanique sous une épaisseur de 6 000 m d'eau. De tels prélèvements sont nécessaires pour connaître, notamment, l'évolution de la couverture sédimentaire depuis l'époque de formation de la croûte.

force de Coriolis. 1° *En météorologie,* force centrifuge, composée, due à la rotation de la Terre sur elle-même, qui agit sur les particules d'air dont on considère le mouvement par rapport à la Terre.
2° *En océanographie,* accélération due à la rotation de la Terre et dont la grandeur ne dépasse pas 1/100 000 de celle de la pesanteur, mais dont l'influence sur les marées et sur les courants océaniques est essentielle.

formule harmonique des marées. Méthode de prédiction universelle des marées, proposée en 1867 par Lord Kelvin; elle est l'expression de la marée totale. Les constantes locales d'amplitude et de phase relatives se déduisent d'une longue série d'observations par un traitement mathématique approprié, ou *analyse harmonique.*

fosse océanique. Dépression longue et étroite, dont la profondeur peut atteindre 11 km (le point le plus profond des océans est situé à 11 022 m dans la fosse des Mariannes, ou de Guam), qui est, à la surface d'une plaque lithosphérique, l'expression d'une zone de subduction. La fosse océanique est associée généralement à un intense volcanisme (arcs volcaniques insulaires), particulièrement marqué sur la bordure de l'océan Pacifique (« ceinture de feu » du Pacifique).

fossé océanique. Fosse partiellement comblée par des sédiments.

front. *n.* Surface de séparation de deux masses d'air (surface frontale).

front chaud. Front non occlus se mouvant de façon telle que la masse d'air chaud succède à la masse d'air froid.

front froid. Front non occlus se mouvant de façon telle que la masse d'air froid succède à la masse d'air chaud.

front occlus. Front séparant deux masses d'air froid qui sont entrées en contact par suite du processus d'occlusion.

frontogenèse. *n.* Processus de formation ou d'intensification d'un front ou d'une zone frontale.

frontolyse. *n.* Processus d'atténuation ou même d'évanouissement d'un front ou d'une zone frontale.

G-H

gabbros. *n.* Roches éruptives grenues à pyroxène.

galvanomètre. *n.* Instrument servant à mesurer l'intensité des courants électriques.

généralisation. *n.* Adaptation des données cartographiques, par allègement du nombre de détails représentés, et simplification des formes des tracés, en vue de l'établissement d'une carte répondant à un but donné.

géodésie. *n.* Science qui étudie la forme et les dimensions de la Terre et s'occupe de l'établissement de cartes.

géodimètre. *n.* Appareil de mesure de distance utilisant le principe de la mesure du temps de parcours d'une onde électromagnétique ou optique.

géoïde. *n.* Surface constituée par le niveau moyen des mers supposé prolongé sous les continents. Le géoïde est voisin de l'ellipsoïde terrestre.

géométral. *n.* Projection de toutes les constructions et de tous les éléments du paysage sur certains plans verticaux dont les directions ont été choisies en fonction de la configuration du centre ou du site.

géopotentiel. *n.* Potentiel auquel le champ de gravité terrestre est associé. Le géopotentiel Φ à la hauteur géométrique z est donné par : $\Phi = \int_{o}^{z} g dz.$

gerbe perspective. Ensemble de demi-droites, toutes concourantes en un même point; le nombre d'éléments de l'ensemble pouvant être fini ou infini.

glace fixe ou **jeune glace.** Glace de mer formée au début de l'hiver dans les eaux côtières aux hautes latitudes.

glacis continental. Trait géomorphologique de la partie inférieure de la marge continentale, où le gradient de la pente est compris entre 1/40 (pente continentale) et 1/2 000 (plaine abyssale).

gravimètre. *n.* Appareil installé sur une plateforme stabilisatrice à bord d'un navire de recherche, afin de mesurer les variations de l'accélération de la gravité d'un point à un autre de l'Océan ou en un même point.

gravimétrie. *n.* Technique de détermination de l'intensité de la pesanteur et de son interprétation.

guyot. *n.* Mont sous-marin inactif de forme circulaire, ancienne île ou atoll érodés et tronqués s'enfonçant en fonction d'un mouvement général de subduction. Un guyot peut aussi être un volcan sous-marin primitif. Nommé ainsi en souvenir du géologue suisse Arnold Guyot.

gyroscope. *n.* Appareil animé d'un mouvement de rotation autour de l'un de ses axes, et qui peut être déplacé sans que la direction de cet axe soit modifiée.

hachures. *n.* Traits disposés selon la ligne de plus grande pente et dont la longueur, l'espacement ou l'épaisseur varient en fonction de la pente et d'une hypothèse conventionnelle d'éclairage du terrain.

hodochrone. *n.* Graphique qui représente le temps en fonction de la distance.

houle. *n.* Onde cylindrique monochromatique de période unique, à profil sensiblement sinusoïdal, intéressant la couche superficielle des eaux océaniques. Composante élémentaire de l'agitation de la surface des océans.

hummocks. *n.* Radeaux de glace dérivant en pleine mer et empilés de façon chaotique.

hydrodynamique. *adj.* Relatif aux mouvements des fluides.

hydrosphère. *n.* L'ensemble de l'élément liquide de la Terre.

hypocentre. *n.* Foyer réel d'un séisme, situé dans les profondeurs de la Terre. S'oppose à *épicentre.*

hypsométrique. *adj.* Qualifie une carte ou une courbe rendant compte de l'altitude des lieux.

I-J

impédance. *n.* Grandeur qui est, pour les courants alternatifs, l'équivalent de la résistance pour les courants continus.

impulsion. *n.* Produit d'une force constante par son temps d'application.

incident. *adj.* Qui rencontre une surface, un corps.

induit. *adj.* Qualifie un courant électrique produit par une variation de flux dans un circuit (sous l'influence d'un aimant ou d'un courant inducteur).

instabilité. *n.* Propriété de l'état de repos ou de mouvement permanent de l'atmosphère telle que toute perturbation introduite dans cet état s'amplifie.

interférence. *n.* Rencontre d'ondes de même direction, qui se détruisent ou se renforcent selon que la crête de l'une rencontre le creux de l'autre ou que les deux crêtes se superposent.

interféromètre. *n.* Instrument permettant de mesurer la distance des franges d'interférence, et servant spécialement à comparer la longueur d'un objet à une longueur d'onde connue.

isostasie. *n.* Condition d'équilibre vers laquelle tend l'écorce terrestre et qui a pour conséquence l'immobilité apparente que l'on constate entre des masses voisines de densité différente, comme les océans et les continents.

isotache. *n.* **(ligne).** Lieu des points d'égale valeur de la vitesse du vent.

isotherme. *adj.* Qui se produit à température constante.

itération. *n.* Procédé de calcul des racines d'une équation, par approximations successives.

jusant. *n.* Courant de marée descendante (reflux).

L-M

latitude astronomique. Angle de la verticale avec le plan de l'équateur.

latitude géodésique. Angle de la normale avec le plan de l'équateur.

légende. *n.* Résumé explicatif des conventions adoptées pour un type de carte et qui figure dans sa marge.

levé. *n.* Ensemble des opérations topographiques destinées à la représentation graphique ou numérique du terrain.

limbe. *n.* Couronne, ou disque, en métal ou en verre, portant une graduation angulaire centrée sur l'axe principal ou secondaire d'un instrument de mesure d'angles horizontaux ou verticaux. La graduation est obtenue à l'aide d'une machine à diviser qui possède un mouvement circulaire centré sur le limbe et dont le tracelet grave automatiquement les traits équidistants.

lithosphère. *n.* Ensemble externe, indéformable, de l'écorce terrestre, fragmenté en plaques, capable de transmettre à de longues distances des contraintes mécaniques. D'une épaisseur d'environ 100 km elle repose sur une couche visqueuse capable de fluer, l'asthénosphère, dont les mouvements de convection peuvent entraîner les déplacements relatifs des plaques.

longitude astronomique. Angle dièdre entre le méridien astronomique et un méridien origine (généralement Greenwich).

longitude géodésique. Angle dièdre entre le méridien géodésique et un méridien origine.

macrométéorologie. *n.* Partie de la météorologie se rapportant à l'étude des conditions météorologiques à grande échelle.

magma. *n.* Masse minérale pâteuse située en profondeur, dans une zone de températures très élevées et de très fortes pressions, où s'opère la fusion des roches. La solidification des magmas donne naissance aux roches éruptives.

manteau supérieur. Couche constitutive de la partie superficielle du globe terrestre, sur laquelle reposent la croûte océanique et la croûte continentale, ou sialique. Le manteau supérieur est constitué de roches de forte densité, les péridotites, formées essentiellement de silicates et d'oxydes de magnésium, de fer et de calcium. La composition du manteau varie avec la profondeur.

marée océanique. Mouvement oscillatoire des eaux océaniques répondant à l'action gravitationnelle du Soleil et de la Lune.

marge continentale. Zone immergée formant la transition entre les continents émergés et les bassins océaniques.

marnage. *n.* Différence de hauteur d'eau entre la pleine mer et la basse mer précédente ou suivante.

masse d'air. Ensemble de particules d'air dont les trajectoires et les propriétés ne présentent horizontalement qu'une différence faible et continue.

méridien astronomique. Plan formé par la verticale et la parallèle à l'axe de rotation de la Terre.

méridien géodésique. Plan formé par la normale et la parallèle à l'axe de rotation de la Terre.

méthode des analogues. *En météorologie,* méthode de prévision basée sur l'hypothèse que la situation synoptique actuelle évoluera de la même façon qu'a évolué une situation analogue dans le passé.

méthode de la particule. Méthode de discussion de la stabilité hydrostatique de l'atmosphère en considérant le déplacement vertical d'une particule d'air, l'environnement étant supposé rester au repos.

méthode de la tranche. Perfectionnement de la méthode de la particule dans laquelle on tient compte des perturbations de l'environnement provoquées par le déplacement de la particule.

mésométéorologie. *n.* Partie de la météorologie se rapportant à l'étude des conditions météorologiques à moyenne échelle.

micrométéorologie. *n.* Partie de la météorologie se rapportant à l'étude des conditions météorologiques à petite échelle.

minute. *n.* Support plan sur lequel sont représentés à une échelle donnée les détails planimétriques et altimétriques du terrain. La minute de levé est généralement munie d'un réseau d'axes de coordonnées correspondant au système de représentation utilisé.

modèle barocline. Atmosphère barocline hypothétique utilisée comme modèle atmosphérique qui tient compte de la structure thermodynamique et fournit une prévision à plusieurs niveaux.

modèle barotrope. Atmosphère barotrope hypothétique utilisée comme modèle atmosphérique qui fournit une prévision à un niveau unique (généralement, 500 millibars).

N-O

nodules polymétalliques. Concrétions riches en oxydes de fer et en oxydes de manganèse, pouvant contenir de faibles proportions de cuivre, de nickel et de cobalt. De formes variées (nodules ellipsoïdaux, agglomérats anguleux ou croûtes de grandes surfaces), on les trouve principalement à grande profondeur dans des zones où la sédimentation est très faible ou nulle.

nord géographique. Direction du pôle Nord géographique. Abrégé NG.

nord magnétique. Direction du pôle Nord magnétique.

normale. *n.* Droite perpendiculaire à l'ellipsoïde.

octa. *n.* Fraction égale à un huitième de la voûte céleste. Elle est utilisée dans le chiffrement de la nébulosité.

œrsted. *n.* Unité C.G.S. d'intensité de champ magnétique.

onde. *n.* Déformation, ébranlement ou vibration dont l'élongation est fonction périodique des variables de temps et de l'espace.

onde de Helmholtz. Onde instable à la limite de séparation de deux couches d'air adjacentes sur laquelle se trouve une discontinuité de vitesse du vent.

ondes internes. Ondes sous-marines se développant entre des volumes d'eaux de densités différentes, horizontalement ou verticalement selon le gradient de densité. Leur rôle est important pour le mélange et le transport des eaux.

ondes longitudinales. Ondes dans lesquelles le déplacement, la vibration, se produisent dans la direction de la propagation. *Ex.* Ondes sonores.

ondes transversales. Ondes dans lesquelles le déplacement, la vibration, se produisent dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation. *Ex.* Ondes électromagnétiques.

ophiolites. *n.* Roches magmatiques extrêmement variées, tantôt grenues, tantôt très fines, de teinte verte. On rencontre des massifs d'ophiolites dans toute la chaîne alpine et ses prolongements orientaux, c'est-à-dire depuis les Alpes franco-italiennes jusqu'à l'Himalaya.

orage. *n.* Une ou plusieurs décharges brusques d'électricité atmosphérique se manifestant par une lueur brève (éclair) et par un bruit sec ou un roulement sourd (tonnerre).

orogenèse. *n.* Ensemble des grands phénomènes, passés et actuels, qui sont à l'origine de la formation des chaînes de montagnes, accompagnés de transformations métamorphiques, de volcanisme et d'intrusion de matières magmatiques en provenance du manteau supérieur.

orthonormé. *adj.* Qualifie une référence dans laquelle les directions sont orthogonales et pour laquelle une norme de longueur a été adoptée.

orthophotographie. *n.* Photographie transformée dans laquelle tous les détails sont remis à leur place, permettant ainsi de faire les mêmes mesures que le levé graphique.

orthoprojecteur. *n.* Appareil de restitution permettant d'effectuer des orthophotographies.

ouragan. *n.* Nom donné, par extension, à tout cyclone tropical où le vent atteint une grande violence.

P

palladium. *n.* Métal précieux, blanc, très ductile et très dur.

panache. *n.* Ligne de volcans sous-marins ou insulaires marquant la trace du mouvement relatif d'une plaque lithosphérique par rapport à une source de magma montant à la surface de la plaque par un réseau de fractures.

parallaxe. *n.* D'une façon générale, différence de position de deux points par rapport à une même référence. En photogrammétrie, on distingue la *parallaxe linéaire* ou *horizontale,* parallèlement à la ligne de vol, et la *parallaxe transversale* ou *verticale,* perpendiculairement à cette ligne.

pente continentale. Déclivité entre le rebord du plateau continental et la plaine abyssale d'un bassin océanique.

péridot. *n.* Silicate de magnésium et de fer, de couleur vert clair.

période. *n.* Temps écoulé entre deux passages successifs d'un système oscillant par la même position et avec la même vitesse. *Ex.* Période d'une onde : intervalle entre deux maximums successifs en un point donné.

perturbation atmosphérique. Terme appliqué habituellement à une faible dépression ou aux conditions météorologiques dans une région où apparaissent les signes de développement d'une circulation cyclonique.

pH. Concentration mesurable d'ions d'hydrogène dans un milieu aqueux considéré. Définit l'acidité ou l'alcalinité de ce milieu.

phase. *n.* Constante angulaire caractéristique d'un mouvement périodique. Le déphasage est la différence de phase entre deux mouvements de même période. Des mouvements de même période en phase débutent en même temps, leurs fonctions ayant leurs maximums et leurs minimums pour des valeurs identiques de leurs variables; des mouvements en opposition de phase ont un angle de phase de 180°.

photocomposition. *n.* Procédé photographique remplaçant la typographie pour la réalisation de textes.

photogoniomètre. *n.* Appareil constitué d'un support de chambre photographique et d'un théo-

dolite à lunette décalée. Cet appareil mesure l'angle formé par deux rayons perspectifs traversant l'objectif photographique et permet de déterminer sa distorsion, ainsi que les caractéristiques de la chambre photographique (centrage et tirage).

pillow lavas. *n.* Structure « en coussin » des laves ophiolitiques, due à l'épanchement du magma basaltique sous l'eau, en particulier, en milieu marin.

plaine abyssale. Partie d'un bassin océanique recouverte et nivelée par des sédiments terrigènes, caractérisée par une surface extrêmement plane dont la pente générale, selon la direction d'écoulement des sédiments, ne dépasse pas 1 pour 2 000.

plan. *n.* Document représentant une surface d'étendue suffisamment restreinte pour que la courbure de la Terre puisse être négligée.

planimétrie. *n.* Représentation sur un plan horizontal des points caractéristiques du terrain. Cette opération, jointe à celle de l'altimétrie, permet la représentation complète du terrain. Les principaux éléments planimétriques sont les distances et les angles horizontaux formés par les points du sol.

plaques. *n.* Grandes zones asismiques de la couche lithosphérique de l'écorce terrestre, ceinturées par des zones sismiques linéaires. Elles sont considérées comme rigides sur une épaisseur de 70 à 100 km. Les plaques comportent aussi bien de la croûte océanique que de la croûte continentale. Voir *tectonique des plaques*.

plasma. *n.* Gaz (ou vapeur) ionisé. Le plasma solaire est composé d'électrons, de protons et de noyaux d'atomes d'hélium (hélicons).

plateau continental. Partie relativement horizontale de la marge continentale, prolongeant les terres émergées jusqu'à une profondeur de l'ordre de 200 m. Il se termine vers le large par une rupture de pente bien marquée.

podomètre. *n.* Appareil utilisé au cours des levés de reconnaissance à petite échelle. Il permet d'enregistrer approximativement les distances parcourues à pied.

point de Curie. Température au-dessus de laquelle un corps ferromagnétique perd ses propriétés caractéristiques et ne se comporte plus que comme un corps paramagnétique. Le point de Curie des roches est en général de l'ordre de 600 °C ou moins, donc très inférieur au point de fusion.

pointé. *n.* Mise en coïncidence de l'intersection des traits du réticule d'une lunette avec l'image de l'objet visé. Cette opération permet la mise en place du plan vertical de visée, défini par l'axe optique de la lunette et l'axe vertical de l'instrument. C'est une phase préalable à la mesure d'un angle.

polynies. *n.* Espaces libres d'eaux océaniques ouverts entre la terre et des radeaux de glace dérivant vers le large.

portulan. *n.* Ouvrage contenant la description des ports, de leurs fonds, de la manière d'y entrer ou d'en sortir, des marées les concernant. Dans le langage courant, carte marine illustrant cette description.

prévision. *n.* Exposé de conditions météorologiques prévues pour une période définie et pour une zone ou une partie d'espace aérien déterminées.

prévision à longue échéance. Prévision dont la période de validité est supérieure à celle d'une prévision à moyenne échéance (généralement, un mois ou plus).

prévision numérique. Prévision des champs de pression par résolution numérique des équations du mouvement sous une forme simplifiée.

prévision objective. Prévision météorologique basée sur l'application des lois soit de la dynamique soit de la thermodynamique, soit encore de la statistique, de façon à éliminer tout élément de jugement personnel.

prévision statistique. Prévision objective basée sur l'étude statistique du comportement passé de l'atmosphère, exprimée sous la forme d'équations de régression, de probabilités, etc.

processus adiabatique. Transformation thermodynamique opérée sans échange de chaleur entre le système considéré et son environnement.

processus pseudo-adiabatique. Processus adiabatique de l'air humide saturé dans lequel les particules d'eau condensée sont évacuées du système.

projection. *n.* Correspondance ponctuelle entre l'ellipsoïde terrestre et le plan. Cette correspondance n'étant pas toujours susceptible d'une définition géométrique, il faut préférer au mot projection le terme *représentation plane de l'ellipsoïde*.

R

radioactif. *adj.* Qualifie un élément susceptible de se transformer par désintégration en un autre élément par suite d'une modification du noyau de l'atome, en émettant des rayonnements corpusculaires (hélions, électrons) ou électromagnétiques (rayons γ).

radiovent. *n.* Équipement utilisé pour la détermination du vent en altitude en suivant, par des moyens électroniques, la trajectoire d'un ballon libre.

radon. *n.* Gaz inerte et radioactif, émanation du radium.

raz de marée. *n.* Sont le résultat de brusques mouvements du fond marin, généralement provoqués par des tremblements de terre mais quelquefois par des éruptions volcaniques (Krakatoa) ou par des glissements de terrains sous-marins. Ces mouvements peuvent déplacer de grosses masses d'eau et déclencher des vagues qui parcourent les mers ou les océans à une vitesse proportionnelle à la racine carrée de la profondeur de ceux-ci. Voir *tsunami*.

réduction barométrique. Table de réduction des lectures du baromètre à mercure d'une station à des conditions types de température et de gravité.

réfraction. *n.* Déviation d'un rayon lumineux ou d'une onde électromagnétique qui franchit la surface de séparation de deux milieux, dans lesquels il se propage avec des vitesses différentes.

remontées d'eaux profondes ou ***upwellings.*** Montées vers la surface d'eaux profondes riches en sels nutritifs (nitrates et phosphates), observées en certaines régions océaniques (Pérou, basse Californie, Mauritanie notamment) et qui conditionnent la répartition géographique des populations de Poissons.

renouvellement des fonds océaniques ou ***sea-floor spreading.*** Modèle proposé en 1960 par H. H. Hess, et en 1961 par R. Dietz, complété en 1963 par F. Vine et D. Matthews, en 1968 par W. J. Morgan et X. Le Pichon, selon lequel les fonds océaniques sont renouvelés continuellement à partir des dorsales médio-océaniques par épanchement de matériaux basaltiques provenant du manteau supérieur de l'écorce terrestre.

résonance. *n.* Effet qui augmente l'amplitude des marées lorsque les ondes de marée se superposent à des oscillations de masses d'eau dont les fréquences sont proches des leurs.

restitution. *n. En photogrammétrie,* recherche de l'ensemble des intersections dans l'espace de tous les rayons homologues de deux gerbes perspectives définies par deux clichés photographiques.

réticule. *n.* Disque composé d'une lame de verre sur laquelle sont gravés des traits de repère. Ces repères sont placés dans le plan focal de l'objectif d'une lunette réglée à l'infini et servent à exécuter les pointés.

rides océaniques. Longue série de sommets sur une chaîne montagneuse sous-marine étroite.

rift. *n.* Vallée centrale de la dorsale qui est le siège d'une excrétion permanente de matière provenant du manteau supérieur. Cette matière basaltique monte dans l'intervalle libéré par les mouvements de divergence des plaques.

rift océanique. Vallée axiale centrale entaillant la crête d'une dorsale médio-océanique, profonde d'environ 2 km. Zone sismique active que les travaux de l'océanologie et de la géophysique ont identifiée progressivement à partir de 1956 comme étant la zone de remontée de matériau asthénosphérique constituant par accrétion les plaques lithosphériques.

S

salinité. *n.* Teneur globale d'une eau de mer en constituants conservatifs, ou primaires. Elle est définie par la constance du rapport d'un ion métallique pris séparément au chlorure qui est l'ion le plus répandu dans les eaux océaniques.

sédiments authigènes. Dépôts sur les fonds océaniques formés sur place à partir de minéraux en solution dans l'eau.

sédiments biogènes. Produits de la décomposition de micro-organismes planctoniques ou benthiques, végétaux (phytoplancton) ou animaux (zooplancton), se déposant sur les fonds océaniques.

sédiments terrigènes. Produits d'érosion d'origine continentale se déposant sur les fonds océaniques sans avoir subi d'autres modifications que mécaniques.

seiches. Oscillations du niveau d'une étendue d'eau (golfes resserrés, baies profondes, lacs) sur une des périodes propres de cette étendue. Ce sont des ondes stationnaires engendrées en général par des variations de la pression atmosphérique.

séisme. *n.* Relâchement soudain d'énergie élastique dans un volume limité. Le modèle le plus simple, dit du rebondissement élastique, suppose donc l'existence d'un corps cassant et élastique.

sels nutritifs. Constituants non conservatifs ou secondaires du milieu océanique : composés d'azote, phosphates et silicates, jouant un rôle fondamental dans le développement de la vie.

serpentines. *n.* Roches métamorphiques (silicates magnésiens) dont la masse, vert sombre, est traversée de petits filons fibreux.

seuil océanique. Point le plus profond d'une chaîne de montagnes, ou dorsale entre deux bassins océaniques établissant une communication profonde entre ces bassins.

signe conventionnel. Graphisme positionné sur une carte et facilitant l'identification d'un détail dont la surface, à l'échelle, serait trop petite pour être perceptible ou caractérisée.

sismique réflexion. Procédé de prospection utilisé en mer pour l'étude de la croûte océanique, fondé sur le fait que, lorsque le front d'une onde acoustique émise dans l'eau des océans rencontre la surface des fonds, une partie de son énergie revient en arrière. Un navire remorquant des hydrophones et enregistrant en surface la réflexion des ondes acoustiques, émises par des sources sonores, pourra effectuer en continu un profil de la surface des fonds.

sismique réfraction. Procédé de prospection utilisé en mer pour l'étude des couches de la couverture sédimentaire de la croûte océanique, fondé sur la transmission dans cette couverture d'une partie de l'énergie d'un front d'une onde acoustique émise dans le milieu marin (réfraction). L'onde réfractée est décrochée de l'onde incidente et de l'onde réfléchie, en fonction des différences de vitesse de propagation dans des milieux hétérogènes. Les hydrophones enregistreurs du retour à la surface d'une onde réfractée seront placés sur une bouée éloignée du navire émetteur de l'onde acoustique.

situation synoptique. État de l'atmosphère tel qu'il apparaît d'après la distribution de la pression et des masses d'air sur une ou des cartes synoptiques.

sondage. *n.* 1° *En océanographie,* procédé de mesure de la profondeur d'un volume d'eau considéré. L'établissement des cartes bathymétriques est permis par des lignes de sondages, de même que les cartes terrestres sont établies à partir de levés topographiques. Le procédé moderne de sondage est celui de l'écho-sondage, mesure du temps écoulé entre la génération d'une onde sonore en surface et l'enregistrement de son retour à la surface après réflexion sur le fond. 2° *En météorologie,* détermination d'un ou de plusieurs éléments météorologiques en altitude au moyen d'instruments emportés par des véhicules : ballon, avion, etc.

stabilité. *n.* Propriété de l'état de repos ou de mouvement permanent de l'atmosphère tel que toute perturbation introduite dans cet état s'atténue.

stadimètre. *n.* Organe de mesure indirecte des distances. Les tachéomètres sont munis de stadimètres à angle constant ou à variation de pente.

stéréocomparateur. *n.* Appareil destiné à la mesure des coordonnées rectangulaires des points-images de deux clichés observés stéréoscopiquement.

stéréogramme. *n.* Ensemble de deux perspectives d'un même objet prises de points de vue différents.

stéréomodèle. *n.* Vision virtuelle que l'on obtient à travers les objectifs d'un appareil de restitution lorsque les deux clichés contenant le couple stéréoscopique sont mis en place.

subduction. *n.* Mouvement général, lent et progressif, de retour d'une plaque lithosphérique dans l'asthénosphère suivant un plan dont la pente augmente progressivement avec la profondeur. Une zone de subduction est en général caractérisée par un système fosse-arc insulaire. Les taux de subduction, ou de disparition de croûte océanique, atteignent 10 cm par an, soit 100 km par million d'années.

système géodésique. Ensemble de données définissant les valeurs numériques des coordonnées géodésiques : point fondamental, ellipsoïde de révolution, observations d'angles, de distances et d'azimut, mode de calcul.

T

tachéomètre. *n.* Instrument muni d'organes permettant la mesure d'angles horizontaux (goniomètre) d'angles verticaux (éclimètre) et des longueurs (stadimètre). Il est quelquefois complété par un déclinatoire.

tectonique. *n.* Partie de la géologie qui traite de la structure de l'écorce terrestre, telle qu'elle résulte des déformations orogéniques (dislocations, plissements). *Par ext.,* cette structure.

tectonique des plaques. Théorie qui utilise plusieurs idées de la dérive de continents de Wegener, du renouvellement des fonds océaniques (Hess, Dietz, Vine, Matthews, Morgan, Le Pichon), et propose un modèle de cinématique rendant compte de l'activité tectonique actuelle de l'écorce terrestre, composée de six grandes plaques lithosphériques (Le Pichon, 1968), complétées par six plaques plus petites (Morgan, 1971), se déplaçant les unes par rapport aux autres en fonction sans doute des courants de convection dans l'asthénosphère.

teintes hypsométriques. Teintes conventionnelles représentant des zones dont l'altitude est comprise entre certaines courbes de niveau, déterminées selon des conventions.

tellurique. *adj.* De la terre, qui provient de la terre. *Ex.* Mouvement tellurique, tremblement de terre, séisme. Courant tellurique : qui circule dans le sol.

température des eaux des océans. Dépend du bilan fluctuant des gains et des pertes de chaleur, la source principale d'énergie calorifique pour les eaux de surface étant le rayonnement solaire.

température potentielle. Température θ que prendrait une petite masse d'air si elle était amenée adiabatiquement et sans être saturée à une pression de 1 000 millibars.

température virtuelle. Température à laquelle il faudrait porter de l'air absolument sec pour qu'il ait la même masse volumique que l'air humide considéré à la même pression.

tension. *n.* Toute force qui agit de manière à écarter, à séparer les parties constitutives d'un corps (opposé à *pression*).

téthys. *n.* Océan aujourd'hui disparu. Selon la théorie de la dérive des continents, il aurait été inséré entre la partie nord (Pangea) et la partie sud du continent unique à la surface de la Terre au début de l'ère secondaire. Les chaînes de montagnes alpino-himalayennes actuelles marquent le lieu de disparition de la Téthys.

thermocline. *n.* Discontinuité de la courbe de température des eaux en fonction de la profondeur, correspondant à la couche de séparation de masses d'eau de températures différentes.

thermométrie. *n.* Repérage des températures à l'aide de points fixes (ébullition, fusion, solidification de certaines substances dans des conditions déterminées).

topométrie. *n.* Ensemble des techniques de levé permettant d'aboutir à des documents graphiques de représentation du terrain à grande échelle (1/200 et au-dessus) ainsi qu'à la saisie de valeurs numériques précises.

toponyme. *n.* Nom propre à un lieu déterminé.

tornade. *n.* Nom donné en Amérique du Nord à une sorte de trombe intense et de grand diamètre. En Afrique, les tornades sont des orages frontaux d'intensité modérée.

train d'ondes. Émission d'ondes en nombre limité.

triangulation. *n.* Technique de détermination des positions relatives des points sur l'ellipsoïde par observation des éléments (angles et distances) de triangles dont ces points sont les sommets.

trombe. *n.* Phénomène qui consiste en un tourbillon de vent, souvent intense, et dont la présence se manifeste sous la base d'un cumulonimbus.

tropopause. *n.* Limite supérieure de la troposphère. Par convention, elle est définie comme le niveau le plus bas auquel le gradient vertical de température devient égal ou inférieur à 2 °C/km.

troposphère. *n.* Partie inférieure de l'atmosphère terrestre, qui s'étend du sol jusqu'à une hauteur variant d'environ 9 km aux pôles à 17 km à l'équateur.

tsunami. *n.* Nom japonais donné aux systèmes en lames de fond engendrés par des séismes de plus de 6,5 dans l'échelle de Richter. L'amplitude de ces lames arrivant en eaux peu profondes est telle que des dégâts considérables peuvent être causés sur les rivages.

typhon. *n.* Nom donné aux cyclones tropicaux de la mer de Chine et, plus généralement, du nord-ouest du Pacifique.

V-Z

vernier. *n.* Organe de lecture sur une règle ou un cercle gradué (limbe). La lecture est assurée par la coïncidence de l'une des divisions du vernier avec l'une des divisions du limbe. Généralement, les limbes sont munis de deux verniers diamétralement opposés.

verticale. *n.* Droite perpendiculaire aux surfaces de niveau et au géoïde.

viscosité des eaux océaniques. Comportement des eaux de mer sous l'action de forces extérieures. La viscosité croît avec la salinité, et décroît avec la température.

visqueux. *adj. En séismologie,* qualifie un corps pour lequel la vitesse de déformation est uniquement fonction de la contrainte.

zéolithe. *n.* Solide cristallin susceptible de fixer de très grandes quantités de gaz (par exemple, de vapeur d'eau) et de les libérer par simple chauffage.

ERRATA

Page 36, schéma du haut : par rapport aux indications inscrites sur la figure, faire tourner le dessin de 180°.

Page 107, photographie de gauche : tourner le cliché de 180°.

INDEX DES NOMS CITÉS

La référence aux différents termes figurant dans le volume Astronomie-Physique du Globe se compose du numéro de la page où se trouve la citation, suivi, le cas échéant, des lettres *a* et *b* se rapportant respectivement à la colonne de gauche et à la colonne de droite de chaque page.

Les références sont données, pour les illustrations, par le numéro de la page en caractères gras et, pour le texte, par le numéro de la page en caractères maigres pour une simple citation, et en italique pour un développement plus complet.

Pour les différentes variantes se rattachant à un même terme, un astérisque indiquera le renvoi à ce dernier. *Ex. :*

Algol
 * étoile β Per
étoile β Per (Algol) 95 a, **95**

A

B

C

D

E

F

G

H

I

J

K

L

M

N

ENCYCLOPÉDIE DES SCIENCES

GÉOLOGIE

I

GRANDE ENCYCLOPÉDIE
ALPHA
DES SCIENCES
ET DES TECHNIQUES

GÉOLOGIE

I

GRANGE BATELIÈRE, PARIS - ÉDITIONS KISTER, GENÈVE - ÉRASME, BRUXELLES-ANVERS

Publiée sous le haut patronage de :
Messieurs les professeurs :
Jean DORST, membre de l'Institut,
Charles FEHRENBACH, membre de l'Institut,
Roger HEIM, membre de l'Institut,
Monsieur l'amiral André JUBELIN,
Messieurs les professeurs :
Pierre LÉPINE, membre de l'Institut,
Louis LEPRINCE-RINGUET, de l'Académie française,
Jean-François LEROY, professeur au Muséum national d'histoire naturelle,
Henri NORMANT, membre de l'Institut,
Monsieur Jacques PICCARD, docteur ès sciences h.c.

Réalisation	IDÉES ET ÉDITIONS 16, avenue de Friedland, 75008 Paris
Comité de direction	Simone DEVAUX, Uberto TOSCO.
Rédaction	Patrick PHLIPONEAU, Françoise MENU, Marie-Noëlle PAILLETTE, Vanina DORÉ, William LE GOAN.
Recherche de l'illustration	Mathilde RIEUSSEC.
Mise en pages	Tito TOPIN et Serge BROCHE.
Illustrations techniques	Richard COLIN.
Coordinateur des dessins	Mario LOGLI.
Fabrication	Sylvia COLIN, Sylvie MARCHAND, Jocelyne DUCHESNE, Jocelyne TÉPÉNIER.
Directeur de la publication	J.-P. BRÉVOST.

Ont collaboré à ce volume :

J. FABRIÈS, pour l'introduction.

H.-J. SCHUBNEL en collaboration avec P. ROSE-BERTHELON, pour la minéralogie.

M. BOUROT, pour les météorites.

M. COLCHEN, pour géologie stratigraphique et géologie historique et régionale.

M.-J. BARRAULT, A. BEAUGRAND, C. CHARLES, E. CRENER, F. DENIEL,
A. DENIS, J.-P. KELLER, A. TRUCHON, D. TURKI-ZAGHBIB,
L. VAN EGROO, pour la paléontologie.

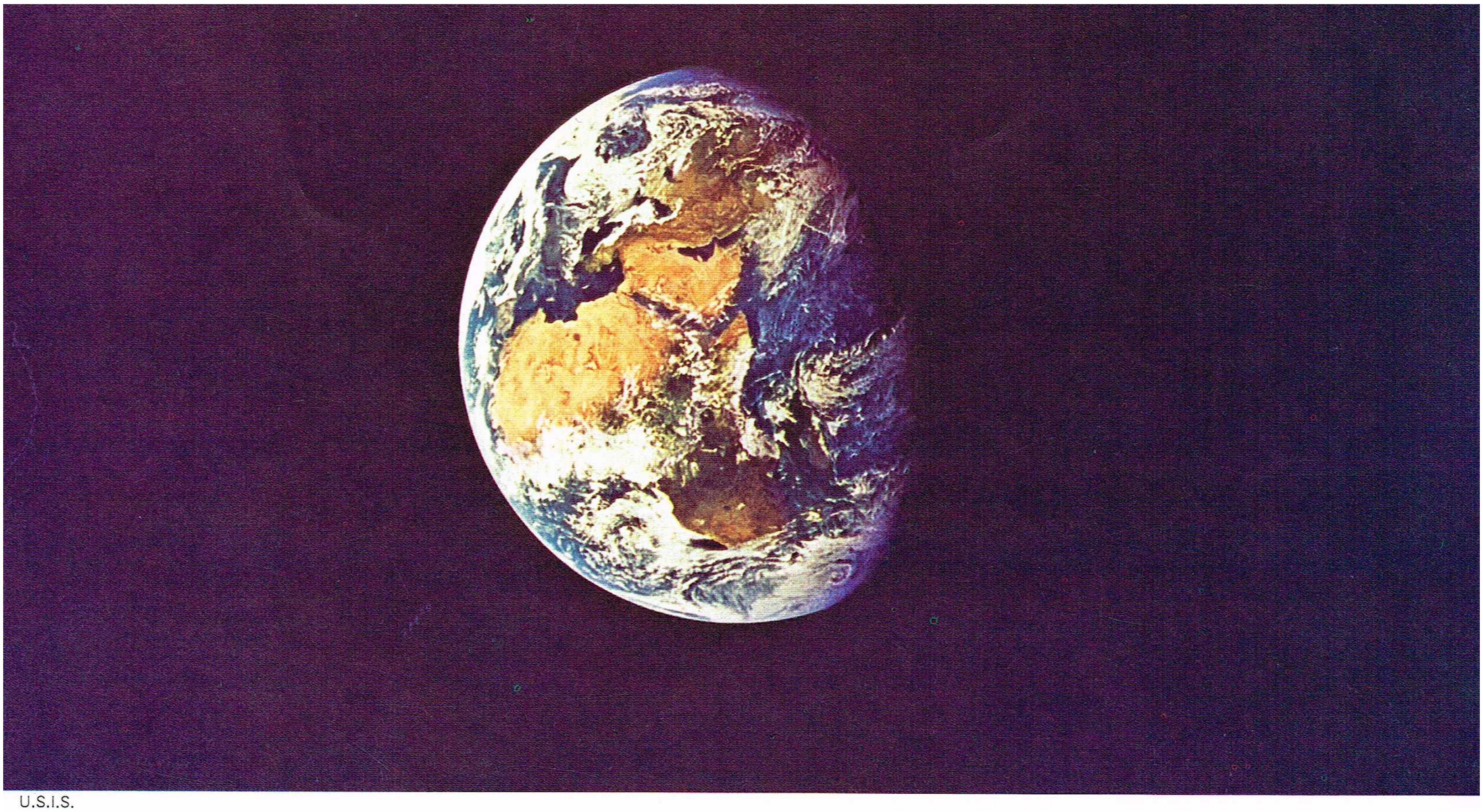

U.S.I.S.

LA GÉOLOGIE

▲ *L'étude de l'évolution de notre planète (formée il y a 4,6 milliards d'années) est un des objets fondamentaux de la géologie. Sur cette photo, prise à bord d'Apollo 11, à environ 181 km d'altitude, l'Afrique et des portions de l'Europe et de l'Asie peuvent être repérées.*

A l'échelle de l'homme, la Terre apparaît comme un champ d'étude immense dans l'espace comme dans le temps. C'est en effet un objet de taille élevée puisque son rayon moyen est de 6 371 km et d'un âge important (4,6 milliards d'années), difficile à percevoir directement par l'homme. Ces dimensions démesurées sont responsables de la variété des matériaux et de la variété des phénomènes qui interviennent, et constituent donc une des difficultés majeures à laquelle se heurtent les géologues. Aucun objet géologique n'est en effet rigoureusement identique à un autre, quel que soit le niveau de l'observation. L'Afrique est différente de l'Eurasie, ou de l'Amérique du Nord ; de même les roches qui sont des mélanges continus de minéraux ont rarement des compositions et des textures analogues. Cette complexité de l'objet à étudier vient aussi du fait que chaque matériel géologique ou chaque milieu géologique est pratiquement unique, résultant d'une évolution particulière qui s'intègre dans l'évolution générale de la Terre depuis son origine. Ces situations géologiques très complexes et irrégulières sont évidemment le résultat de processus qui sont régis par des lois régulières de la physique et de la chimie mais dont le nombre des variables intervenant est extrêmement grand. C'est un caractère général à toutes les sciences naturelles ; mais à la différence de la géologie, dans les sciences biologiques, comme la zoologie ou la botanique, chaque espèce vivante présente une variabilité relativement réduite et surtout un nombre important d'individus qui permet alors une étude statistique susceptible de déterminer des caractères généraux spécifiques.

La Terre dans le système solaire

La Terre est une des neuf planètes principales gravitant autour du Soleil, qui représente à lui seul 99,8 % de la masse totale du système. Elles décrivent des orbites elliptiques de faible excentricité, donc pratiquement circulaires, situées dans des plans très proches de l'écliptique. Toutes ces planètes, ainsi que la plupart de leurs satellites, tournent dans le même sens autour du Soleil, le sens de rotation étant le sens direct (sens inverse des aiguilles d'une montre) pour un observateur regardant la face nord du système solaire qui est très aplati. C'est aussi le sens de rotation sur elles-mêmes de la plupart des planètes (sauf Vénus et Uranus). Les distances planètes — Soleil sont exprimées en unités astronomiques (U.A.), une unité astronomique étant égale à la longueur du demi grand axe de l'orbite terrestre et valant 149 675 000 km. Ces distances, sauf pour Neptune, obéissent approximativement à la loi empirique de Titius-Bode : $r = 0{,}4 + 0{,}3 \times 2^n$, *avec* $n = -\infty$ *pour Mercure,* $n = 0$ *pour Vénus,* $n = 1$ *pour la Terre,* $n = 2$ *pour Mars,* $n = 4$ *pour Jupiter... La régularité remarquable de ces caractères laisse supposer une même origine temporo-spatiale des éléments du système solaire.*

Les planètes peuvent être classées en deux catégories : les petites planètes, proches du Soleil, et les grosses planètes à densité faible, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune et Pluton. Celles du premier groupe, appelées aussi « planètes telluriques », Mercure, Vénus, Terre, Mars, auxquelles il faut ajouter la Lune, possèdent des propriétés comparables à celles de la Terre, en particulier la

▶ *A gauche, tableau des principales données mécaniques concernant les planètes telluriques. A droite, tableau de la répartition de 698 chutes de météorites observées entre 1942 et 1961 (d'après Kiel). En 1966, 2 045 météorites différentes étaient enregistrées dans les grandes collections mondiales; plusieurs dizaines ont été recueillies depuis lors.*

Tableau 1

	a (U.A.)	Masse	Rayon	Densité
Mercure	0,387	0,054	0,377	5,59
Vénus	0,723	0,814	0,957	5,12
Terre	1,0	1,0	1,0	5,52
Lune	—	0,012	0,273	3,34
Mars	1,524	0,108	0,53	~ 4,0

Tableau 2

	Nombre de chutes	Proportions numériques %	Proportions pondérales %
Aérolithes	647	92,7	33,7
dont chondrites	592	84,8	29,3
dont achondrites	55	7,9	4,4
Sidérites	39	5,6	64,6
Lithosidérites	12	1,7	1,7

densité (tableau 1). Cependant leurs densités moyennes déterminées d'après les lois de la mécanique céleste ne sont pas constantes et varient de façon significative; elles suggèrent donc que les planètes telluriques ont des compositions chimiques globales probablement différentes. Les études spatiales récentes ainsi que l'astrophysique ont montré également que chaque planète présente des conditions locales particulières, telles que présence ou absence d'atmosphère. Les conditions du fractionnement chimique sur ces planètes sont donc probablement très diverses.

Entre les deux groupes des planètes principales, circule une multitude de petits objets, appelés astéroïdes; ils se disposent grossièrement en une ceinture à une distance du Soleil correspondant à la valeur n = 3 *de la loi de Titius-Bode. Ces astéroïdes ont des dimensions très variables et des formes généralement irrégulières. On estime à 10 000 le nombre des corps dont le diamètre dépasse 10 km, et à* 10^{11} *ceux de diamètre supérieur à 1 m. Les plus gros (Cérès, 770 km; Pallas, 480 km; Vesta, 380 km; Junon, 190 km) ont une forme sensiblement sphérique. Ces astéroïdes correspondraient à des fragments d'un ou plusieurs corps planétaires brisés ou bien à des morceaux de matière planétaire dont l'accrétion n'a pas été suffisante pour former une planète. Les météorites, qui sont des corps solides rencontrant régulièrement la Terre et les autres planètes telluriques, représenteraient de tels astéroïdes, comme le laisse supposer la nature identique de leurs orbites respectives autour du Soleil. La constitution physique et minéralogique des météorites fournit donc des renseignements très précieux sur la nature des astéroïdes, ainsi que sur la composition interne et primitive de la Terre.*

L'histoire de la Terre est en effet à l'échelle de celle du système solaire et les périodes de temps se mesurent en milliards d'années. On pense que les éléments chimiques du système solaire se sont formés par nucléo-synthèse il y a environ 7 à 8 milliards d'années. De même les planètes, dont la Terre, se seraient formées pendant un temps relativement court, de l'ordre de 300 millions d'années, il y a 4,6 milliards d'années. L'étude de l'évolution de notre planète depuis cette date est un des objets fondamentaux de la géologie.

▼ *A gauche, tableau de la composition chimique globale moyenne de la croûte océanique et de la croûte continentale (d'après Ronov et Yaroshevsky [1969]). A droite en haut, données concernant les propriétés rhéologiques du manteau supérieur et de la croûte de la Terre. L'étude de ces propriétés a entraîné le concept moderne de lithosphère, cette dernière comprenant la croûte et une partie du manteau. A droite en bas, schéma classique de la structure de la Terre; l'hydrosphère et l'atmosphère ont été indiquées.*

Tableau 3

	CROÛTE continentale	CROÛTE océanique	Moyenne de la croûte (pourcentage en poids)	
SiO_2	60,2	48,7	Oxygène	46,6
TiO_2	0,7	1,4	Silicium	27,7
Al_2O_3	15,5	16,5	Aluminium	8,2
Fe_2O_3	2,5	2,3	Fer	5,0
FeO	3,8	6,2	Calcium	3,7
MnO	0,1	0,2	Sodium	2,9
MgO	3,1	6,8	Potassium	2,6
CaO	5,5	12,3	Magnésium	2,1
Na_2O	3,0	2,6		98,8
K_2O	2,9	0,4		
P_2O_5	0,2	0,2		

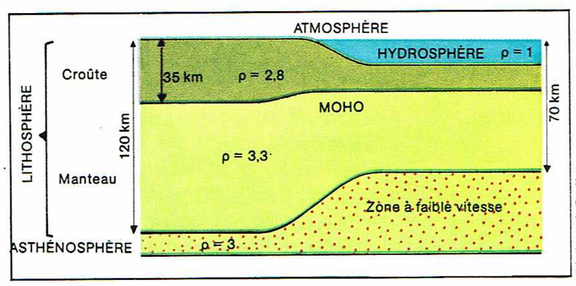

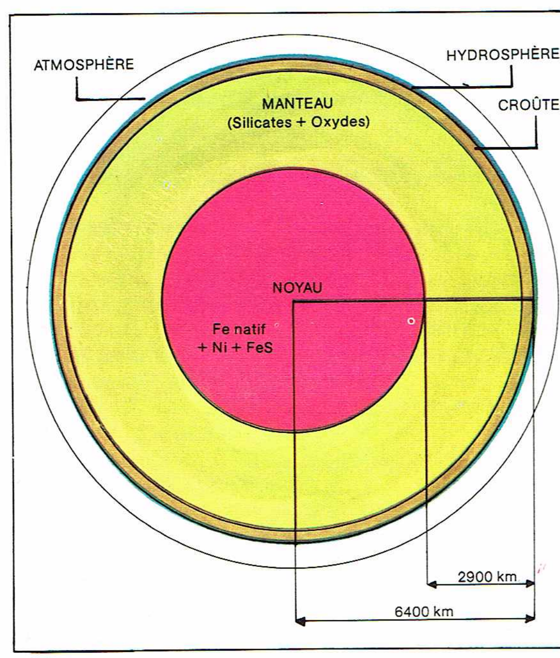

Structure et constitution de la Terre

Seule la partie superficielle de la Terre, jusqu'à une profondeur de quelques kilomètres, est directement accessible à l'observation et permet le prélèvement d'échantillons. La structure et par suite la constitution internes de notre planète sont beaucoup plus difficiles à déterminer ; elles ne peuvent être connues qu'indirectement par la construction de modèles qui tiennent compte des données de la gravité en surface, de la rotation, du moment d'inertie... et surtout de la propagation des ondes sismiques lors des tremblements de terre, et qui expliquent la formation des corps géologiques observés en surface. Ces préoccupations sont du domaine d'une discipline voisine de la géologie, la géophysique, *qui étudie les phénomènes physiques concernant le globe terrestre dans leurs manifestations instantanées, et qui fournit au géologue des informations sur les couches profondes. Mais il ne faut pas oublier que les modèles ainsi élaborés restent toujours arbitraires sur différents points et ne donnent de la Nature qu'une image simplifiée et provisoire, fonction des moyens de mesure disponibles actuellement.*

Le schéma classique de la structure interne de la Terre comporte trois grands ensembles concentriques. La partie centrale est occupée par un noyau, *d'un rayon de 3 400 km environ et dont la densité élevée permet de supposer une composition à base de fer métallique essentiellement, plus du nickel et du sulfure de fer. Il est séparé par la discontinuité de Gutenberg du* manteau *qui forme une enveloppe d'environ 2 900 km et dont la composition est dominée par la présence de silicates (riches en magnésium et en fer) et d'oxydes. On a cru pendant longtemps que le manteau était homogène et entièrement uniforme ; les progrès récents de la géophysique et de l'exploration océanographique ont permis de se rendre compte qu'il n'en était rien. On pense que l'hétérogénéité du manteau provient de phénomènes de différenciation par fusions partielles successives d'un manteau primitif relativement uniforme et dont la composition serait très comparable à celle des chondrites.*

Le manteau est limité vers l'extérieur par la discontinuité séismique de Mohorovicic (en abrégé Moho) qui le sépare de la croûte, *caractérisée par une densité plus faible, 2,8 en moyenne, et une grande hétérogénéité. Une distinction fondamentale entre les domaines océaniques et les domaines continentaux est rapidement apparue au sujet de la profondeur du Moho. Sous les Océans, cette discontinuité est située à 10-12 km de profondeur alors qu'elle est en moyenne à 35 km sous les continents. Étant donné la profondeur moyenne de 4 km des Océans et l'altitude moyenne des continents de 800 m au-dessus du niveau de la mer, la croûte océanique a une épaisseur beaucoup plus faible (8 km environ) que la croûte continentale.*

La croûte océanique est constituée essentiellement par une couche basaltique reposant sous une mince couverture de sédiments. Au-dessous de cet ensemble accessible à l'observation directe s'étend une couche dont la composition est encore controversée : roches basiques, grenues métamorphiques (du type gabbro métamorphisé), ou roches ultrabasiques hydratées (du type serpentinite).

La croûte continentale a une structure et une composition beaucoup moins régulières. Elle est cependant caractérisée par l'abondance de roches magmatiques telles que les granites qui n'existent pas dans les domaines océaniques. Les études statistiques ont montré que les roches les plus abondantes dans la croûte continentale sont (a) les granites, granodiorites et diorites, (b) les basaltes, gabbros, amphibolites et (c) leurs équivalents métamorphiques ; les roches sédimentaires ont une importance faible.

Malgré leur différence fondamentale, la croûte océanique et la croûte continentale passent graduellement de l'une à l'autre de façon continue comme cela a été observé sur la marge du continent américain au Pérou. Le tableau 3 indique la composition globale moyenne de ces deux catégories de croûte, d'après Ronov et Yaroshevsky (1969), ainsi que la moyenne générale des deux en tenant compte des proportions relatives de ces deux milieux géologiques. On voit ainsi que huit éléments, O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, constituent à eux seuls la quasi-totalité (99 % en poids) de la croûte terrestre. Tous les autres corps simples, en particulier certains métaux pourtant les plus usuels pour l'homme, ont des teneurs moyennes largement inférieures à 1 %, comme le cuivre (0,005 5 %), le plomb (0,001 3 %) ou le zinc (0,007 0 %). Les huit éléments prépondérants sont en fait les composants majeurs des silicates et de la silice qui forment à eux seuls plus de 95 % de la croûte, quartz + feldspath représentant 63 %, pyroxène + olivine 14 %, les silicates hydratés (amphibole, mica, chlorite et argiles) 14,5 %, les carbonates 2 %.

L'étude des propriétés rhéologiques du manteau supérieur et de la croûte a entraîné le concept moderne de lithosphère. *Du point de vue rhéologique, le manteau peut être grossièrement divisé en trois couches concentriques, possédant des caractéristiques mécaniques très différentes : la lithosphère, l'asthénosphère et la mésosphère.*

La lithosphère *est la couche superficielle, extrêmement rigide, élastique et résistante, dont l'épaisseur varie de 70 km sous les Océans à 150 km sous les boucliers continentaux. Sa définition est purement rhéologique et non chimique puisqu'elle comprend la croûte, continentale ou océanique, et le manteau supérieur. En fait cette lithosphère serait constituée d'un nombre restreint (peut-être six) de plaques rigides (calottes sphériques) qui peuvent se mouvoir tangentiellement les unes par rapport aux autres.*

*L'*asthénosphère *sur laquelle reposent les plaques lithosphériques correspond à la* zone à faible vitesse *de propagation des ondes sismiques et se définit comme une couche plastique n'offrant pas de résistance aux contraintes pour une durée suffisamment grande et dans laquelle les ondes sismiques se propagent avec de faibles vitesses. Elle s'étend jusqu'à une profondeur de 350 km à partir de laquelle se développe la* couche de transition *qui est caractérisée par une augmentation progressive, par paliers, de la vitesse de propagation des ondes et de la densité des roches jusqu'à 850 km. Au-delà de cette profondeur, la* mésosphère *constitue la majeure partie du manteau (manteau inférieur) où les vitesses et les densités ont des valeurs élevées.*

*La partie superficielle de la Terre au-dessus de la lithosphère est constituée également d'enveloppes plus ou moins concentriques. L'*hydrosphère *comprend l'ensemble des Océans, des mers, des*

*lacs, des rivières et des glaciers. Près de 71 % de la surface du globe terrestre est couverte par les Océans ; mais l'eau est présente en quantité relativement importante dans les niveaux très superficiels de la croûte et joue un rôle souvent prépondérant dans les processus de tels milieux géologiques. L'atmo-*sphère *correspond à l'enveloppe gazeuse externe, dans laquelle l'azote, l'oxygène et l'argon sont les trois constituants majeurs. On a l'habitude de distinguer aussi la* biosphère *pour désigner l'ensemble des êtres vivants qui se développent aux interfaces lithosphère-atmosphère-hydrosphère. La vie qui est une des caractéristiques de notre planète dans le système solaire est en réalité un phénomène géologique important et a des interactions évidentes avec d'autres phénomènes géologiques dans les domaines superficiels.*

Les grands traits structuraux et dynamiques de la Terre

La surface de la Terre est actuellement couverte à plus de 70 % par les Océans. L'Océan Pacifique est plus grand que tous les autres réunis puisqu'il représente 35,4 % de la surface terrestre. Les masses continentales ne sont pas non plus réparties de façon homogène puisque 65 % d'entre elles sont situées dans l'hémisphère boréal. Il faut remarquer également que dans plus de 95 % des cas, toute localité continentale a son antipode situé dans le milieu océanique.

Plus des deux tiers de la surface des continents, soit 21 % de la surface totale, ont une altitude comprise entre 0 et 1 km, l'altitude moyenne des continents s'établissant à 0,875 km. Par ailleurs, près des trois quarts de la surface des Océans (74 %, soit 52,5 % du total) ont une profondeur comprise entre 3 et 6 km, avec une valeur moyenne de 3,73 km. Les dénivellés maximaux entre les altitudes continentales les plus hautes (mont Everest, 8 848 m) et les profondeurs les plus grandes (fosse des Mariannes, plus de 11 km) atteignent une vingtaine de kilomètres, représentant plus de la moitié de l'épaisseur moyenne de la croûte continentale. Ces deux grandes unités orographiques correspondent respectivement aux plates-formes continentales et aux bassins océaniques.

Morphologie des continents

Les continents sont caractérisés par trois ensembles structuraux : les boucliers anciens (près de 6 % de la surface totale), les plates-formes continentales (18 % du total), et les chaînes de montagnes plissées, récentes (5,5 % du total). Les plates-formes continentales sont essentiellement constituées par des couvertures sédimentaires, reposant sur des socles plus anciens, préalablement arasés et pénéplanés.

Les chaînes de montagnes récentes (principalement tertiaires) forment des zones allongées de roches et de terrains plissés, qui ont reçu le nom de ceintures orogéniques. Elles se répartissent en deux grands ensembles, la ceinture du Pacifique et la zone dite méditerranéenne ou alpine, qui borde au sud le continent eurasien, et qui se branche sur la précédente au niveau des Moluques et se termine à Gilbraltar. Ces ceintures orogéniques sont caractérisées par la présence de structures arquées comme les chaînes de l'Himalaya, des Carpates, ou les arcs insulaires du Pacifique occidental, des Antilles, etc.

Morphologie des Océans

Deux grandes unités morphologiques caractérisent les fonds océaniques et représentent près de 75 % de la surface des Océans : les bassins et les dorsales océaniques. Les bassins océaniques comprennent les plaines abyssales et les régions à collines abyssales. Les dorsales océaniques correspondent à de larges élévations en forme d'arche, abondamment fracturées. La partie centrale, la zone des crêtes, est occupée par un fossé ou rift de quelques kilomètres de large, dominé par deux blocs ayant une topographie très accidentée. Le rift est en fait constitué par une succession de segments rectilignes décrochés les uns par rapport aux autres par des failles transverses. Les flancs d'une dorsale océanique comprennent une série de chaînons parallèles à la direction du rift, qui sont compartimentés comme lui par des décrochements transverses et qui s'élèvent progressivement depuis les plaines abyssales. On a remarqué une symétrie très poussée dans la morphologie des deux versants d'un même segment de dorsale océanique. Les rifts des dorsales forment un ensemble qui court avec plusieurs embranchements à travers tous les Océans à la surface de la Terre.

Une autre catégorie morphologique est constituée par les fosses océaniques, qui ont une grande importance structurale bien qu'elles représentent moins de 2 % de la surface totale des fonds marins. Ce sont des dépressions longues et étroites, plus profondes que les plaines abyssales et à flancs raides. Les dimensions de ces fosses ont les ordres de grandeur suivants : plus de 1 000 km de long, 100 km de largeur en surface, 10 km au fond... Elles sont en général dissymétriques, la pente étant abrupte du côté où elles bordent un continent ou un arc insulaire. Les fosses les plus profondes (supérieures à 10 km) accompagnent les guirlandes du Pacifique occidental.

Les marges continentales

Comme son nom l'indique, la marge continentale est la zone de passage du continent à l'Océan. Elle comprend en principe trois parties : le plateau continental qui correspond à la continuation immergée du continent, la pente continentale et le glacis précontinental. L'étendue et la profondeur du plateau continental sont très variables, respectivement de 0 à 1 500 km (en moyenne 78 km) et de 20 à 550 m (moyenne 133 m). Cette disposition ternaire caractérise en fait un type de marge continentale, le type atlantique. *On distingue également le* type andin *comportant un plateau continental très étroit et une pente continentale immédiatement au-dessus d'une fosse océanique. Enfin le* type arc insulaire *est constitué par une guirlande d'îles volcaniques bordée du côté du large par une fosse océanique et séparée du continent par un petit bassin océanique.*

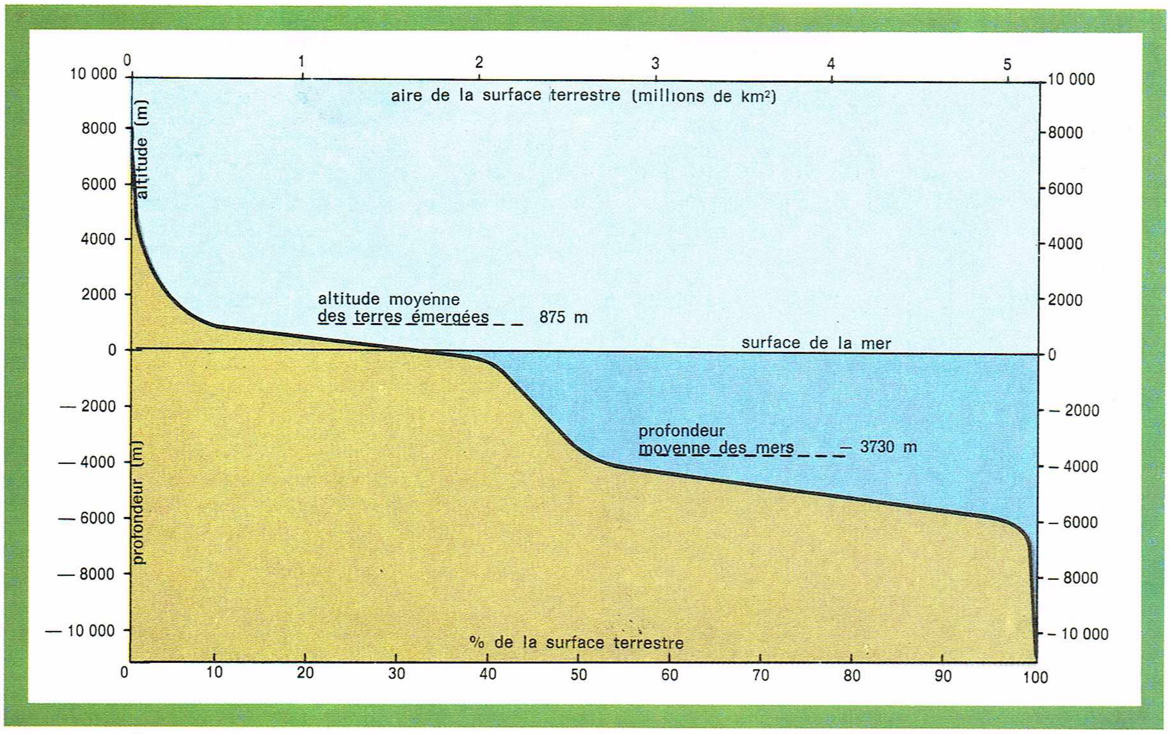

I.G.D.A.

◄ ***Courbe hypsographique de la surface de la Terre : 21% de la surface totale ont une altitude comprise entre 0 et 1 km, soit une altitude moyenne des continents s'établissant à 0,875 km, alors que la valeur moyenne de la profondeur des Océans est de — 3,73 km.***

Manifestations énergétiques à la surface de la Terre

La surface du globe terrestre est le siège de manifestations énergétiques qui ont un aspect discontinu à l'échelle humaine, mais qui s'intègrent dans un processus continu dans l'échelle de temps géologique. Elles sont essentiellement de deux types, les séismes ou tremblements de terre qui correspondent à des manifestations d'énergie mécanique, et les volcans liés à des transferts de matière. Leur répartition à la surface de la Terre n'est pas quelconque et met au contraire en évidence certaines zones remarquables, qui paraissent « vivantes » comparées aux autres. Ces zones sont appelées zones tectoniquement actives.

Les tremblements de terre libèrent annuellement une quantité d'énergie assez constante, de l'ordre 10^{26} à 10^{27} ergs. Sur environ 300 000 séismes annuels, une vingtaine représentent à peu près 90 % de l'énergie totale. On distingue trois catégories de séismes, en fonction de leur profondeur ; les séismes superficiels de 0 à 70 km (70 % du total), les moyens de 70 à 300 km (25 %) et les profonds de 300 à 700 km (5 %). L'essentiel de l'énergie mécanique libérée l'est dans les 100 premiers kilomètres. Leur répartition géographique fait apparaître deux types de zones sismiques : les régions plissées récentes (Tertiaire-Quaternaire) et les dorsales océaniques qui se distinguent de façon spectaculaire par la quantité d'énergie libérée, les premières représentant à elles seules 90 % du total de l'énergie. Il faut remarquer aussi que la ceinture circumpacifique groupe à peu près les 4/5 des séismes connus. Les zones de plissements tertiaires-quaternaires sont le siège jusqu'ici exclusif des séismes profonds dont la présence est généralement liée à celle d'une fosse océanique.

La distribution des volcans actifs présente un certain parallélisme avec celle des séismes. Ils se localisent tout d'abord le long des chaînes plissées récentes, autour du Pacifique (« ceinture de

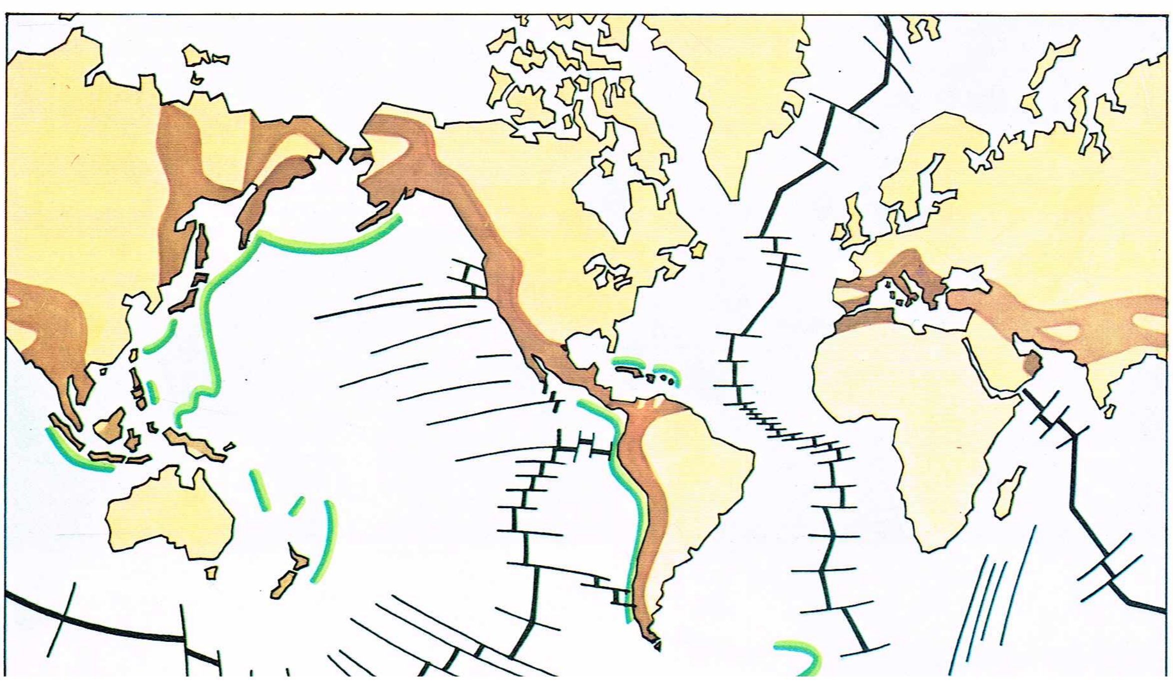

Richard Colin

◄ ***Principales unités structurales à la surface de la Terre. Traits verts, fosses océaniques ; traits noirs épais, rides des dorsales océaniques ; traits noirs fins, failles des décrochements océaniques ; en beige, plates-formes et boucliers continentaux ; en brun foncé, chaînes de montagnes tertiaires et quaternaires ; en bleu, domaines océaniques.***

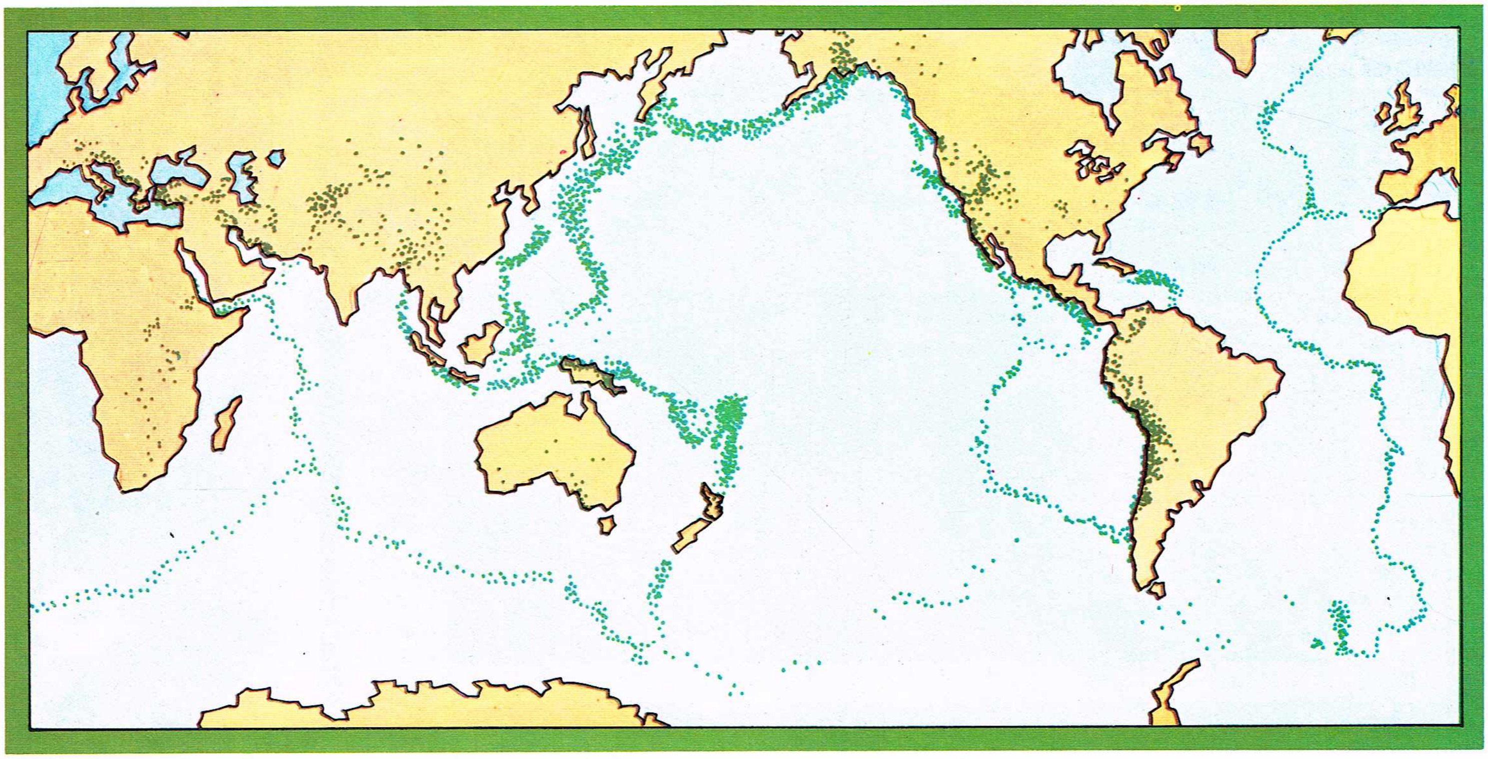

▲ *La surface du globe terrestre est le siège de manifestations énergétiques (séismes et volcans) dont la répartition à la surface de la Terre n'est pas quelconque et met au contraire en évidence des zones tectoniquement actives; ici, la localisation des zones de séismes.*

feu » du Pacifique) et dans la région méditerranéenne et alpine. Ils s'échelonnent aussi suivant les rifts des dorsales océaniques et sur certaines failles de décrochement ou à leur proximité. Dans les domaines océaniques certains volcans se développent aussi en chapelets sur des rides asismiques (sans tremblement de terre), comme les archipels d'Hawaii, de Polynésie par exemple. Sur les continents ils accompagnent les fossés d'effondrement tectonique comme la Limagne, le fossé rhénan ou les « rift-valleys » de l'Est africain. D'une manière générale les volcans sur les dorsales et sur les rides asismiques océaniques sont de faible explosivité; par contre, ceux liés aux chaînes plissées circumpacifiques qui groupent plus de 75 % des volcans actifs sont très explosifs.

Cette fresque rapide des grands traits structuraux et dynamiques de la surface de la Terre fait apparaître l'objectif fondamental de la géologie. Cette science a pour but essentiel de retracer l'histoire de la Terre afin de découvrir comment les continents se sont formés et ont acquis leur allure actuelle, et quels ont été le développement et l'évolution du plancher océanique. Les connaissances que nous possédons aujourd'hui sur ces problèmes n'ont été évidemment acquises qu'à la suite d'une lente progression des idées et des recherches.

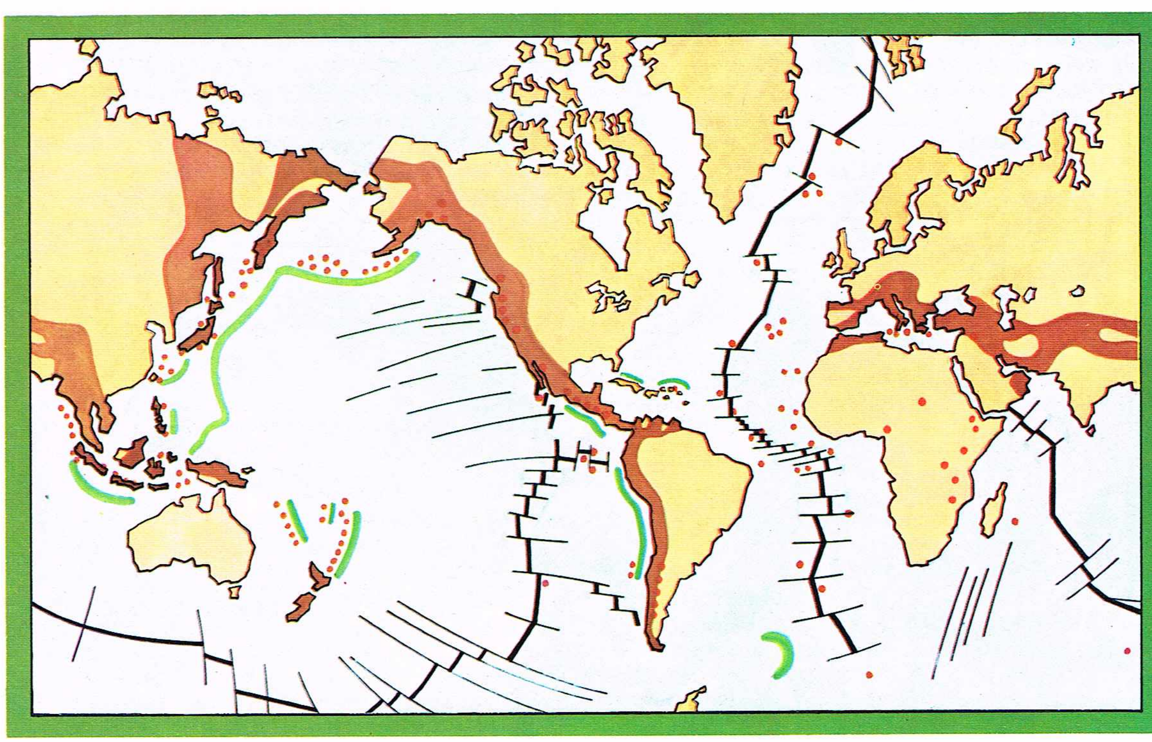

▶ *Répartition des volcans actifs (points rouges).*

Historique des connaissances géologiques

De tous temps les roches et les minéraux ont retenu l'attention des hommes, qui très tôt se sont exercés à reconnaître empiriquement les « pierres » utiles à la confection des outils et des armes de plus en plus perfectionnés, ainsi que de leur parure et de leur ornementation. Les hommes préhistoriques ont ainsi utilisé progressivement certains matériaux terrestres, tels que les silex, les jaspes et même des coquilles de dentales fossiles pour faire des colliers, bien avant d'en acquérir toute conscience scientifique. Les formes curieuses et géométriquement régulières des cristaux naturels, les couleurs souvent splendides de certains minéraux et roches leur ont suggéré au contraire des vertus magiques, des concepts mystiques dont des réminiscences subsistent encore de nos jours.

L'utilisation des métaux a succédé progressivement à celle de la pierre dès la plus haute antiquité, surtout au Moyen-Orient. Le cuivre a été découvert le premier au Ve millénaire avant J.-C. du fait de sa métallurgie très facile, et exploité activement en Iran. Au début du IIIe millénaire apparaissent l'étain et son alliage avec le cuivre, le bronze ; enfin le fer commence à être utilisé au IIe millénaire par les Hittites. Pendant cette période ancienne, les exploitations minières se sont développées et les hommes ont appris à reconnaître les caractères des minerais métalliques en vue de leur prospection.

La Grèce

La Grèce antique a contribué d'une manière brillante au développement des connaissances géologiques, dont la plupart possèdent dès lors un caractère et une formulation scientifiques. Dès le VIe siècle av. J.-C., Pythagore (580-500 environ) reconnaît que la Terre est une planète sphérique et que le modelé du relief est dû à l'érosion par les agents superficiels tels que l'eau, qui est responsable du creusement des vallées. Anaxagore (500-428) puis Aristote (384-322) comprennent le cycle superficiel de l'eau, évaporation, pluie, ruissellement des eaux courantes et rassemblement dans les rivières et les fleuves.

Une autre découverte importante est celle de la nature exacte des fossiles. Xénophane (570-480) observe l'existence de fossiles marins dans des terrains consolidés situés à l'intérieur des terres, et loin de toute mer. Pythagore à peu près à la même époque et plus tard Hérodote (484-425) font des observations similaires desquelles ils concluent à la variation avec le temps des limites entre les continents et les Océans. Le problème des causes responsables de ces fluctuations entre mers et continents a préoccupé plusieurs philosophes grecs. Thalès (640-547) qui avait découvert les propriétés électrostatiques de l'ambre imaginait l'eau comme principe actif. Au contraire le feu intérieur fut invoqué comme cause principale par Parménide (VIe-Ve siècle), son élève Zénon d'Élée (Ve siècle), et surtout Empédocle (490-430) qui étudia l'Etna et qui mourut d'ailleurs en tombant dans le cratère de ce volcan. De ses observations sur les éruptions volcaniques, cet auteur eut l'idée des mouvements souterrains de laves et est ainsi à l'origine de la notion importante de transfert de matière à l'intérieur de la Terre.

Le concept de la durée considérable des phénomènes géologiques par rapport à l'échelle humaine apparaît également dans les enseignements d'Anaxagore et surtout d'Aristote qui écrit : « Les révolutions du globe sont si lentes, comparativement à la durée de notre existence, qu'elles passent inaperçues. » Dans le même courant d'idées, Strabon définit une méthode pour déchiffrer l'histoire de la Terre et qui constitue un premier énoncé du principe dit des « causes actuelles » : « Il convient de déduire nos explications de choses qui tombent sous nos sens et qui, dans une certaine mesure, se passent tous les jours sous nos yeux. »

La civilisation grecque classique a donc apporté un nombre important de résultats et de méthodes scientifiques concernant la géologie. Plusieurs concepts fondamentaux furent émis, comme la variation des domaines océaniques et continentaux au cours des temps, la durée considérable des processus géologiques, le cycle de l'eau, l'existence de transferts de matière de l'intérieur vers l'extérieur de la planète, les fondements de la paléontologie et le problème du renouvellement des espèces.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Cristaux de sel gemme coloré (British Museum, Londres).*

Rome

L'apport des Romains est au contraire décevant à côté de celui des Grecs dans le domaine scientifique. La progression des connaissances géologiques est pratiquement arrêtée dès la conquête de la Grèce (IIe siècle av. J.-C.) et les premiers siècles de notre ère virent même une régression et le retour de certaines croyances mystiques. Mais le caractère ingénieux du peuple romain permit le développement des exploitations de pierres pour la construction et la décoration ainsi que celles des mines dont la conquête a joué un rôle important dans l'histoire romaine.

Le Moyen Age

L'héritage de l'esprit scientifique de la Grèce ancienne dont un dernier éclat luit grâce à la deuxième école d'Alexandrie, est transmis par Byzance aux Arabes qui, ayant traduit les œuvres des savants grecs et alexandrins, vont maintenir dans le monde méditerranéen le niveau des connaissances.

En Europe occidentale, la période qui s'étend du Ve au XIIe siècle est marquée par une importante régression de l'acquis scientifique. Il fallut attendre le XIIe siècle pour qu'une tentative de renouveau s'amorçât. Ce phénomène qui se traduisit notamment par la fondation d'universités dans plusieurs villes importantes (Paris, Oxford, Montpellier, Naples...) fut une des conséquences des croisades et aussi du rayonnement des universités arabes de Séville, de Tolède et surtout de Cordoue, avec Averroès (1126-1198) qui fit traduire de nombreux textes arabes en hébreu. Plusieurs lettrés juifs entreprirent leur traduction en latin (Gérard de Crémone, Jean de Luna, Ibn Tiddon...),

C. Bevilacqua

Scala

▲ *A gauche, représentation d'une vieille croyance populaire ; un gisement de magnétite attire les clous d'un navire, entraînant ainsi son effondrement et le naufrage (planche du* **Hortus sanitatis**). *A droite, Léonard de Vinci (1452-1519) qui, entre autres travaux, jeta les bases de la stratigraphie et de l'analyse structurale des terrains plissés ; il démontra aussi que la présence des fossiles marins dans les terrains n'est pas la conséquence du Déluge.*

surtout à partir des ouvrages conservés à Tolède, et permirent ainsi un accès plus aisé des lettrés occidentaux à la connaissance des savants helléniques, en particulier Aristote.

Ainsi depuis cette époque, l'Occident européen commença à rapprendre la science antique progressivement jusqu'au XVe siècle. On redécouvrit la signification exacte des fossiles, avec Albert de Bollstoedt, dit le Grand (1193-1280), ou le moine Ristoro d'Arizzo (1239-1282), qui le premier semble avoir introduit l'explication du Déluge comme facteur responsable de l'extinction de ces espèces animales. La découverte de la pensée d'Aristote va en effet peser sur la pensée des lettrés médiévaux, dont une des préoccupations fut de se livrer à des spéculations pour concilier le rationalisme et la logique aristotéliciens avec les principaux dogmes chrétiens. Il en résulta de nombreuses discussions d'ordre métaphysique, laissant très peu de place aux observations réelles ou aux méthodes expérimentales. La science dut donc évoluer sous la double emprise de la Bible et d'Aristote et s'enferma dans un véritable dogmatisme. Certains esprits tentèrent cependant de secouer ce joug au XIVe siècle, comme Albert de Saxe (1316-1390) qui entrevit l'action antagoniste de l'érosion et du soulèvement des continents dans l'élaboration de la morphologie de la surface terrestre.

La Renaissance

La première moitié du XVIe siècle est marquée par une tentative de lutte contre l'emprise d'Aristote et de la scholastique. Elle fut généralement l'œuvre de médecins, car en ce temps-là l'art de la médecine couvrait pratiquement l'étendue des connaissances scientifiques. Trois noms se dégagent pendant cette période dans le domaine des sciences de la Terre. Léonard de Vinci (1452-1519), véritable génie de la Renaissance italienne, jeta les bases de la stratigraphie et de l'analyse structurale des terrains plissés ; il démontra que contrairement à l'opinion généralement admise à l'époque, la présence des fossiles marins n'est pas la conséquence du Déluge, puisqu'on en rencontre dans des couches différentes, qui sont forcément d'âges différents. Ces constatations lui suggérèrent d'ailleurs la durée considérable des temps géologiques. Un des premiers aussi, il préconisa le recours à l'expérience et à l'observation : « La véritable science est celle que l'expérience a fait pénétrer en nous par les sens, en imposant silence aux clabauderies des disputeurs. » Ses écrits et ses enseignements sont malheureusement restés sans grand écho auprès de ses contemporains.

Bernard Palissy (1510-1590) émit les mêmes réserves que Vinci sur le rôle du Déluge pour expliquer la répartition des fossiles marins. Il montra également l'existence des fossiles non marins, de coquilles d'eau douce, entrevoyant la possibilité de retracer les conditions de vie des milieux passés.

Georges Bauer, dit Agricola (1494-1555), est très connu par son ouvrage illustré posthume *De re metallica* (1556) dans lequel il consigna la somme des connaissances de l'époque sur l'art minier, appliqué spécialement aux gisements métallifères (mines de Saxe). Il établit une classification des minéraux d'après leurs propriétés physiques (éclat, couleur, densité, dureté...). On lui doit également le mot « fossile » (*De re fossilium*, 1530).

Le mouvement de réaction contre l'aristotélisme se poursuivit pendant le XVIe siècle, mais alla trop loin. Il aboutit à la résurrection du néoplatonisme et au développement du mysticisme et de doctrines hermétiques ou dogmatiques. Les grandes querelles religieuses qui accompagnèrent la Réforme ont entretenu ce climat peu propice à l'épanouissement de la science rationnelle.

Cependant cette époque est marquée par le début des grandes collections de minéraux (surtout les gemmes auxquelles on attribuait des vertus curatives), de roches et de fossiles, comme celles du Vatican. Leur inventaire entraîna la rédaction de plusieurs catalogues (Conrad Gesner, 1565 ; Valerius Cordus, 1561 ; Mercati, 1574), qui constituèrent les premiers ouvrages de référence nécessaires à l'élaboration d'une nomenclature systématique de ces objets.

La Renaissance correspond donc à un échec de cette première tentative pour dégager un savoir positif. Cet effort s'appuyait trop sur l'humanisme et demeurait trop littéraire ; il n'a jamais pu se sortir de l'emprise des auteurs anciens pour lesquels les hommes du XVIe siècle ont manifesté un trop grand respect. Les études sur le règne minéral faites par les humanistes de la Renaissance ne sont pas encore vraiment de la science.

Le XVIIe siècle

La contrainte intransigeante imposée par l'Église et surtout les Jésuites à la suite du Concile de Trente eut un effet bénéfique assez inattendu pour le développement scientifique. Comme il devenait dangereux de discuter et

▶ *Page ci-contre : en bas à gauche, portrait de Georges Bauer, dit Agricola (1494-1555), qui consigna la somme des connaissances de son époque sur l'art minier, établit une classification et créa le terme de* **fossile**.

d'exprimer des idées qui pouvaient être rapidement considérées comme hérétiques, les savants, en ce début du XVIIe siècle, se consacrent beaucoup plus à l'observation et à la méthode expérimentale. Ce siècle marque vraiment le début de la mesure scientifique qui permit de trancher la discussion, et tout d'abord dans le domaine de la physique. De grands esprits comme Bacon (1561-1628) et Descartes (1596-1650) ont contribué à donner les méthodes rationnelles à la science. On va donc assister au triomphe progressif de l'expérience et de la raison.

Par opposition à la pensée aristotélicienne et à la pensée humaniste des siècles antérieurs, Galilée supprima la distinction entre la physique céleste et la physique terrestre. Descartes exprima une idée analogue en 1630 : « La terre et les cieux sont faits d'une même matière. » Notre planète avec les phénomènes qui l'intéressent est ainsi replacée dans son contexte, l'Univers.

Dans cet état d'esprit général, la géologie, dont le mot apparut dans les écrits pour la première fois en 1657 (*Geologia norvegica,* par Escholt), commença à s'ériger scientifiquement à partir de la deuxième moitié du XVIIe siècle. Les premières idées sur la constitution générale de la Terre sont dues à Descartes qui imagina une structure en couches concentriques entourant un noyau sans doute fondu et en cours de refroidissement. Kircher (1601-1680) découvrit en 1664 l'existence du gradient géothermique, la température augmentant progressivement avec la profondeur, à l'intérieur du globe terrestre. Il suggéra également que l'état de notre planète a subi une évolution lente et irréversible depuis sa formation. Enfin en 1693, avec la rédaction de son ouvrage *Protogea,* Leibniz (1646-1716) mit l'accent sur les phénomènes ignés dont le rôle lui parut prépondérant dans l'origine et les transformations du globe terrestre. Il distingua nettement les deux grands types de roches d'après leur mode de formation, les roches ignées et les roches sédimentaires. Les connaissances sur les minéraux s'organisèrent principalement grâce au Danois Niels Steensen (plus connu sous le nom de Nicolas Sténon) [1638-1686] qui donna un premier énoncé de la loi sur la constance des angles des cristaux d'une même espèce en 1669. Le terme « minéralogie » est d'ailleurs employé pour la première fois dans le sens actuel par Robert Boyle en 1696.

Les notions fondamentales de la stratigraphie sont établies à cette époque à l'aide de nombreuses observations sur le terrain. Sténon fit aussi œuvre de pionnier dans ce domaine, en mettant en évidence le principe de superposition, les couches inférieures étant plus vieilles que les couches sus-jacentes, du fait de leurs dépôts successifs aux fonds des mers. Les Anglais Lister (1638-1711) et Woodward (1665-1722) furent les auteurs d'observations stratigraphiques pertinentes. John Ray (1627-1705) et surtout Nicolas Sténon prirent conscience des durées importantes qui caractérisent les processus évolutifs de la

A. et G. Buscaglia

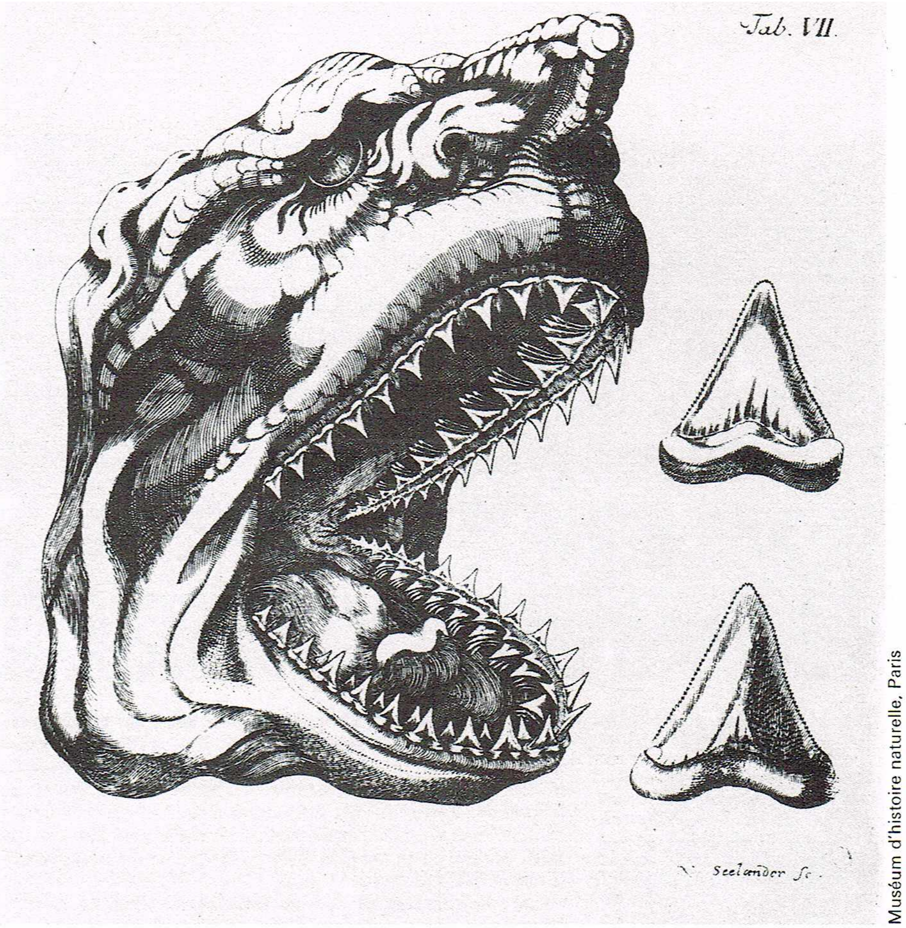

Muséum d'histoire naturelle, Paris

▲ *Planche VII de l'ouvrage* Protogea *de Leibniz, rédigé en 1693 et paru en 1749.*

▼ *Planche d'Agricola, montrant le lavage des sables aurifères.*

Dani

De Cesare

De Cesare

▲ *A gauche, Niels Steensen, plus connu sous le nom de Nicolas Sténon (1638-1686); il donna le premier énoncé de la loi sur la constance des angles des cristaux d'une même espèce et fit œuvre de pionnier dans le domaine de la stratigraphie en mettant en évidence le principe de la superposition des couches de terrain. A droite, Pallas (1741-1811); participant à une expédition scientifique à travers l'Empire russe, il observa une disposition régulière des unités structurales dans une chaîne de montagnes.*

Terre. Ce dernier établit la première division des temps géologiques en six époques et distingua fondamentalement les terrains « primitifs » des terrains fossilifères. Les bases méthodologiques de la chronostratigraphie relative et de la paléogéographie ont été jetées et la notion de discordance angulaire fut également entrevue par Sténon qui peut donc être considéré comme le fondateur de la stratigraphie et de la tectonique.

Les connaissances sur les fossiles s'améliorèrent surtout sur le plan de l'anatomie et progressèrent avec celles sur le monde vivant actuel à la suite de l'introduction de l'esprit cartésien en zoologie et en botanique. La notion d'espèce fossile fut précisée, avec John Ray et surtout Robert Hooke (1635-1703) qui, par l'emploi du microscope, fit des observations intéressantes sur l'anatomie des végétaux et découvrit les Foraminifères. Soucieux de déterminer pour chaque reste d'être vivant le milieu naturel dans lequel il avait évolué, il fonda ainsi la paléoclimatologie.

Au XVII^e siècle, les brumes de l'obscurantisme mystique et religieux se dissipent quelque peu devant l'assaut du cartésianisme, mais ayant droit de cité, elles gênent encore le développement de la science, en contrôlant rigoureusement la diffusion des publications (mise à l'index des œuvres de Descartes, Galilée, etc.). Il faudra que presque tout le XVIII^e siècle, le « Siècle des Lumières », s'écoule pour que disparaissent toutes ces entraves.

Le XVIII^e siècle

Pendant cette période, de nombreux écrits concernant les sciences de la Terre vont encore être empreints de fantaisie et manquer de rigueur positive. Ils furent l'œuvre d'auteurs qui se sont efforcés d'expliquer l'origine de toutes les choses de l'Univers avec l'appui d'une quantité souvent très faible de faits d'observation. Il fallut en effet beaucoup de temps encore pour que les hommes comprennent qu'une théorie, un modèle vraisemblable de la Terre ne peuvent être établis tant qu'un grand nombre d'arguments, fournis par la Terre elle-même, n'a pas été rassemblé.

Buffon (1707-1788), que son caractère poussait à la vision généralisatrice des choses, peut être rangé dans cette catégorie. En 1749 il publia la *Théorie de la Terre*, en introduction à sa volumineuse *Histoire naturelle*. Il se pencha sur la signification des coquilles fossiles et en déduisit que le globe a dû évoluer tout au long de son histoire; il entrevit ainsi l'intérêt des reconstitutions paléogéographiques. Il affirma aussi la liaison intime entre l'histoire de la Terre et celle du système solaire : les planètes seraient des parties échappées du Soleil primitif autour duquel elles gravitent. Il admit l'existence d'une masse centrale en fusion (feu central) entourée d'une croûte provenant du refroidissement progressif à partir de la matière solaire primaire. Dans *les Époques de la Nature* qu'il publia en 1778, Buffon divisa l'histoire de la Terre en six époques auxquelles il ajouta une septième (l'époque de la civilisation) qui se caractérise par l'influence puissante de l'homme sur les modifications de la surface terrestre.

A côté de cette brillante vision sur l'origine des objets terrestres, des chercheurs de plus en plus nombreux commencèrent à accumuler les faits d'observation, à les passer soigneusement au crible et à les coordonner de façon systématique et logique. Parmi eux, Guettard (1715-1786) rassembla ses observations sur la distribution des roches et des minéraux à la surface de la Terre en confectionnant une véritable carte géologique, qu'on appelle à l'époque carte minéralogique : il publia ainsi en 1746 un *Mémoire et carte minéralogiques sur la nature et situations des terrains qui traversent la France et l'Angleterre,* dans lequel il donna une esquisse exacte de la structure du Bassin parisien et de son prolongement outre-Manche sur le territoire britannique. Voyageur infatigable, il entreprit avec l'aide de Lavoisier puis de Monnet la carte minéralogique de la France, qui se traduisit par la publication en 1780 de l'*Atlas et description minéralogiques de la France, entrepris par ordre du roi par MM. Guettard et Monnet*. Ses travaux couvrirent aussi des domaines de la paléontologie, avec la description de nombreux fossiles et de gisements fossilifères, de la géodynamique externe, en s'intéressant au problème de l'érosion par les eaux de ruissellement, les fleuves et la mer. A la suite d'un voyage (1757), il suggéra que de nombreux monts d'Auvergne sont d'anciens volcans, bien qu'il n'eût jamais vu de volcan actif; il arriva à cette conclusion parce qu'il avait vu des régions volcaniques, en particulier d'Italie, et en comparant les roches d'Auvergne avec les échantillons qui lui avaient été rapportés du Vésuve.

La géologie du volcanisme se développa en même temps, surtout en ce qui concerne la nature des matériaux volcaniques. Desmarets (1725-1815) démontra en 1763 de façon définitive l'origine volcanique du basalte et des structures prismées si fréquentes dans les coulées basaltiques (Auvergne, Chaussée des Géants...) et considérées par les minéralogistes anciens comme une sorte de schorl cristallisé. La même conclusion fut avancée en 1771 par Faujas de Saint-Fond (1741-1819) pour les basaltes de Saxe.

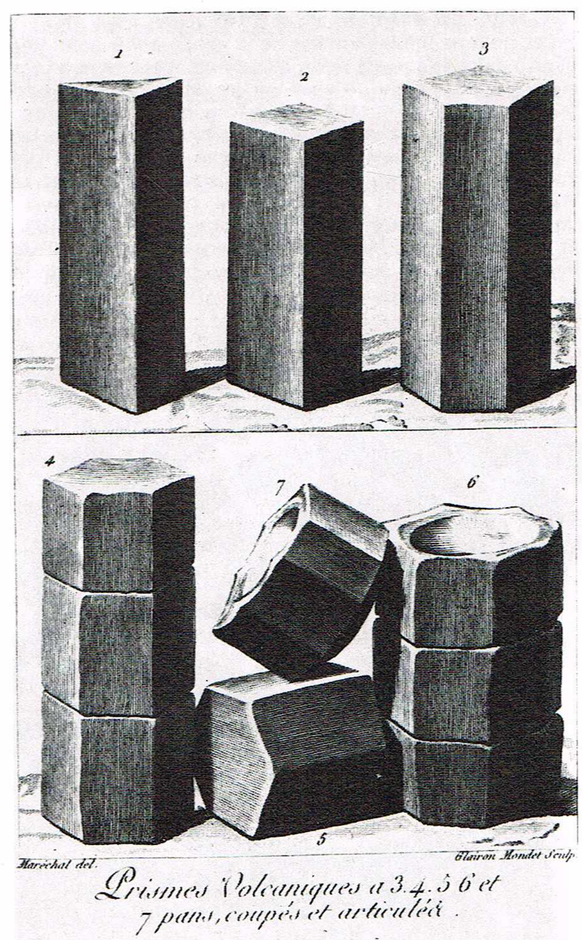

Muséum d'histoire naturelle, Paris

▶ *Planche XXIII de l'Essai de géologie, ou Mémoire pour servir à l'histoire naturelle du globe, de B. Faujas de Saint-Fond, en 1809. Comme Desmarets, il démontra l'origine volcanique du basalte et des structures prismées fréquentes dans les coulées basaltiques.*

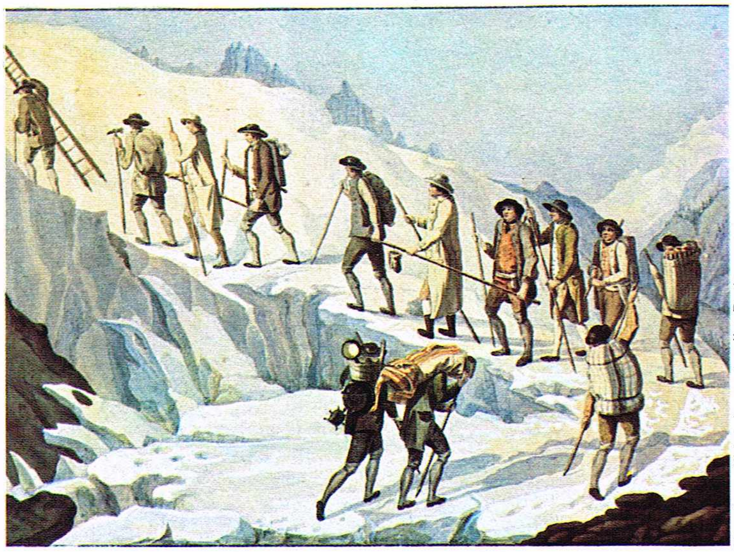

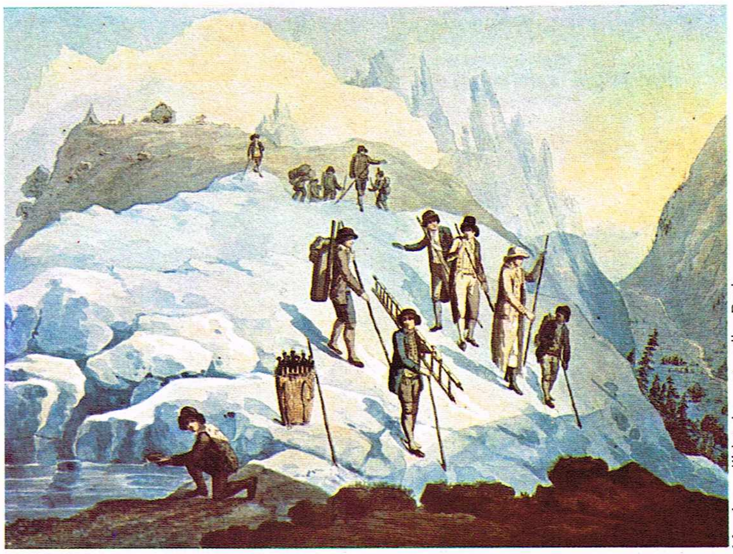

La structure et la formation des montagnes firent aussi l'objet d'études de reconnaissance. Pallas (1741-1811), participant à une expédition scientifique à travers l'Empire russe qui dura plus de six ans, observa une disposition régulière des unités structurales dans une chaîne de montagnes (l'Oural en l'occurrence) : les parties les plus anciennes se situent dans la partie axiale et les plus récentes sur les côtés. De Saussure (1740-1799), créateur de l'alpinisme avec l'ascension du mont Blanc en 1787, qui contribua puissamment à ôter de l'esprit des hommes le mythe du caractère maléfique des montagnes, s'attacha à l'étude descriptive de la géologie alpine et à la tectonique.

Dans la deuxième moitié du XVIII^{e} siècle, de grands progrès furent réalisés dans la connaissance de l'histoire de la Terre. Plusieurs géologues, principalement allemands, conçurent que les différentes parties de la croûte terrestre sont les témoins des différentes étapes de l'évolution de notre planète : elles ne sont pas disposées au hasard mais suivant un ordre bien défini. Les travaux de Lehmann (mort en 1767) et de Fuchsel (1722-1773) s'inscrirent dans cette optique. Mais c'est surtout Abraham Werner (1749-1817) qui s'illustra le plus dans cette démarche et acquit une très grande autorité auprès de ses contemporains et de ses successeurs. Professeur à Freiberg, le « père de la géologie descriptive » sut donner à ses nombreux élèves le goût de l'observation méticuleuse, au point de réduire cette science à la seule constatation des faits, comme elle apparaît dans ses œuvres écrites; la théorie tenait au contraire une place plus importante dans son enseignement. Il eut avant tout le souci de la classification et de la terminologie afin de pouvoir désigner les roches, les minéraux, les terrains de façon méthodique et sans ambiguïté; c'est un des mérites de son œuvre. Il étendit sa doctrine à la succession géologique, à laquelle il attribua un caractère universel. Il admit l'existence d'un Océan primitif couvrant toute la surface de la Terre, à partir duquel ont commencé à précipiter chimiquement les premières roches solides, comme les granites, les gneiss, les micaschistes qui constituent les terrains primitifs. Au-dessus se sont déposés successivement les terrains de transition, les terrains secondaires (essentiellement sédimentaires) et enfin les séries alluviales. Toutes les formations lithologiques résultent donc de dépôts marins, d'où le nom de *neptunisme* donné à cette théorie. Werner et ses disciples nièrent l'origine volcanique du basalte et minimisèrent à l'excès le rôle des volcans, qui seraient dus à l'incendie de couches de charbon. L'influence du neptunisme fut très grande, mais extrêmement néfaste et désastreuse car elle freina l'évolution des concepts géologiques au cours du XIX^{e} siècle.

On a l'habitude dans toute revue historique des sciences géologiques d'opposer au nom de Werner la personne de James Hutton (1726-1797), que l'on considère comme le chef de file du *plutonisme*. Les idées de base émises par ce savant écossais sont consignées dans son célèbre ouvrage *Theory of the Earth, with Proofs and Illustrations* (1795) dans lequel il décrivit les filons de granite de la vallée de Glen Tilt en Écosse. Il considère que ces filons ont été injectés à l'état liquide comme une lave dans des fissures. Il précise la distinction fondamentale établie par Sténon entre les roches sédimentaires et les roches ignées. Il émit des conceptions très modernes sur l'érosion, la sédimentation et la consolidation des sédiments, le plissement et la surrection des roches sédimentaires, qui l'amenèrent ainsi à la notion de cycle géologique. Cette idée lui fut en particulier suggérée par l'examen de la discordance des Vieux Grès Rouges, presque horizontaux, sur les strates verticales siluriennes observée à la Pointe Siccar sur la côte sud-est de l'Écosse. Hutton peut aussi être considéré comme le père de la géologie moderne, car on lui doit surtout le premier énoncé du principe des « causes actuelles » : tous les phénomènes géologiques sont attribuables à des processus naturels observables et vus en action de nos jours.

▲ *En haut, De Saussure (1740-1799), créateur de l'alpinisme, s'attacha à l'étude descriptive de la géologie alpine et de la tectonique. De Saussure, son fils et ses guides arrivant au glacier du Tacul, ou Grand Géant, où ils ont habité 17 jours sous des tentes en juillet 1788 (à gauche), et descendant le glacier du Tacul (à droite). En bas, Abraham Werner, père de la géologie descriptive et d'une théorie, le* neptunisme.

◀ *James Hutton (1726-1797), que l'on considère comme le chef de file de la théorie du* plutonisme *et du principe des* causes actuelles : *« Tous les phénomènes géologiques sont attribuables à des processus naturels observables et vus en action de nos jours. »*

De Cesare

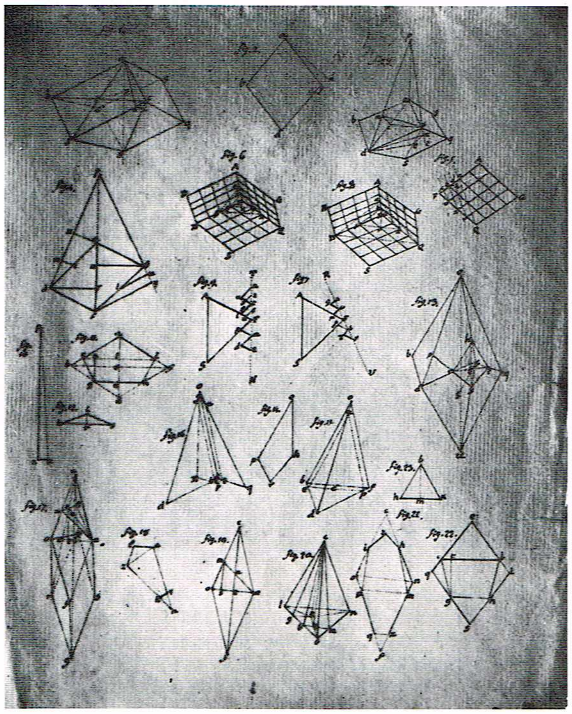

Muséum d'histoire naturelle, Paris

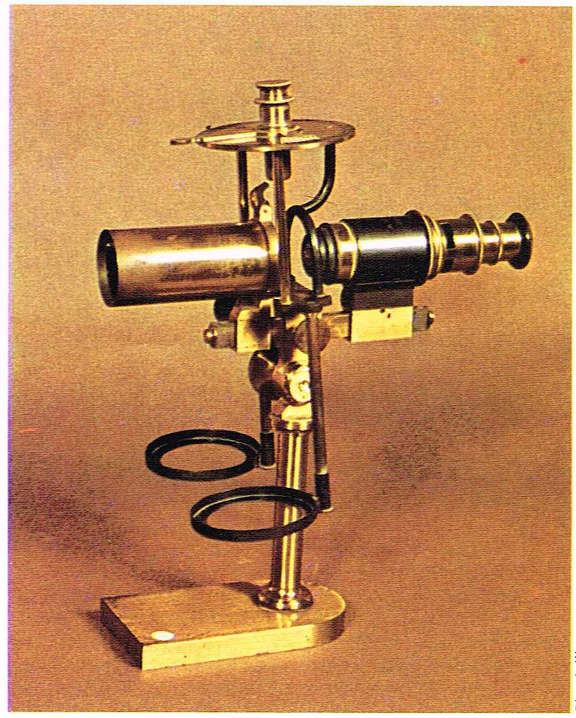

Chadaillac

▲ *A gauche, Leopold von Buch (1774-1853), qui a expliqué la formation des volcans et des chaînes de montagnes par des soulèvements d'origine profonde. Au milieu, dessins de cristaux, exécutés par Haüy (1743-1822) [manuscrit, Bibliothèque centrale du Muséum, Paris] : les travaux de ce dernier marquent la naissance de la cristallographie. A droite, microscope polarisant de Descloizeaux avec lequel il étudia les variations des propriétés optiques des cristaux sous l'effet de la chaleur (vers 1867).*

Muséum d'histoire naturelle, Paris

▶ *Planche de dessins de Jacquemin représentant une dolérite andésitique (ophite) provenant de Biarritz (Basses-Pyrénées) : figure 1, en lumière naturelle ; figure 2, entre nicols croisés (Minéralogie microscopique, par par Fouqué et A. Michel-Lévy [1879]).*

La fin du XVIII^e siècle vit également le développement de la géologie stratigraphique, particulièrement en France et en Angleterre, où les formations secondaires et tertiaires non plissées se prêtent bien à ce genre d'étude. Giraud-Soulavie (1752-1813) découvrit la possibilité de dater les couches d'une région à l'autre à l'aide des fossiles qu'elles renferment ; il suggéra donc l'intérêt de la paléontologie pour la chronostratigraphie relative. Malheureusement Giraud-Soulavie fut un piètre écrivain et tomba dans l'oubli. En Angleterre Michell et surtout William Smith (1769-1839) contribuèrent à la mise au point de cette méthode. Ce dernier, baptisé le père de la géologie anglaise, que ses activités professionnelles (travaux publics) appelèrent à parcourir de nombreux kilomètres à travers le territoire britannique, publia en 1799 la première échelle stratigraphique des terrains secondaires d'Angleterre méridionale.

Les fondements vraiment scientifiques de la géologie sont enfin solidement établis ; il en est de même dans le domaine de la minéralogie qui, à cette époque, couvrait l'étude de tous les matériaux de la croûte terrestre, les roches comme les minéraux. Les travaux de Lomonossov, de Romé de l'Isle et surtout d'Haüy marquent la naissance de la cristallographie qui va fournir un cadre législateur à la science des minéraux.

Le XIX^e siècle

L'exploration des continents, principalement l'Europe, va démarrer de façon intensive à l'aide des méthodes géologiques élaborées au siècle précédent et les observations vont s'accumuler. On enregistra également une diversification de plus en plus grande des spécialités de la géologie dont certaines branches s'individualisent progressivement en disciplines plus ou moins autonomes (pétrographie, géochimie, paléontologie...).

Le principe de la stratigraphie paléontologique fut appliqué à de nombreuses régions d'Europe occidentale. Georges Cuvier (1769-1832) et Alexandre Brongniart (1770-1847) fondèrent la stratigraphie du Bassin parisien avec la publication d'un important mémoire en 1808. Les terrains antérieurs au Secondaire, correspondant en gros à la Formation de transition de Werner, furent étudiés par les Anglais Segdwick (1785-1873) et Murchison (1792-1871) qui créèrent les termes de Cambrien, Silurien et Dévonien. Les formations plus anciennes, qui couvrent des surfaces importantes en Amérique du Nord (bouclier canadien), attirèrent l'attention de Logan (1798-1875) qui en établit une première ébauche d'échelle stratigraphique malgré l'absence de fossiles et qui les groupa sous le terme de Précambrien.

En même temps, la cartographie géologique se développa, méthode permettant de regrouper de façon cohérente une grande quantité de faits d'observation et de tester les hypothèses. W. Smith publia, en 1815, une carte en couleur de plusieurs comtés d'Angleterre au 316 800e. Dufrénoy et Élie de Beaumont entreprirent en 1822 la confection de la carte géologique de France au 500 000e qui parut en 1841. Cet effort de cartographie nécessita l'élaboration d'échelles stratigraphiques codifiant l'histoire géologique afin d'harmoniser les légendes des cartes. La nomenclature des ères, des systèmes, des étapes fut établie peu à peu, et d'Orbigny (1802-1857) publia en 1849 une première synthèse générale.

La paléontologie (mot créé en 1834), outil indispensable à la géologie historique, fit de grands progrès. Cuvier, fondateur de la paléontologie des Vertébrés, fut surtout un anatomiste. Bien qu'il défendît avec acharnement et autorité une thèse « catastrophiste » pour expliquer par des causes violentes les changements de faunes dans le passé (*Discours sur les révolutions du globe*, 1822), il fournit, malgré lui, par ses observations d'anatomie comparée et par les lois qu'il en a tirées des arguments aux théories transformistes. L'hypothèse de l'évolution des espèces, le transformisme, fut en effet avancée par Lamarck (1744-1829) et soutenue par Geoffroy Saint-Hilaire (1772-1844). Cette doctrine évolutionniste, combattue par de nombreux savants, fut relancée en 1859 lors de la publication de *The Origin of Species* par Darwin (1809-1882). Les paléontologistes Gaudry (1827-1908) et von Zittel (1839-1903) contribuèrent alors à fournir un appui objectif à cette idée transformiste et à la faire adopter définitivement par la majorité des naturalistes.

En dépit de l'œuvre de Hutton, nombreux étaient les géologues qui invoquaient au début du XIXe siècle des causes violentes, catastrophiques, de « grandes débâcles » périodiques, pour expliquer l'histoire de la croûte terrestre. Constant Prévost (1787-1856), qui occupa à la Sorbonne la première chaire dénommée « Géologie » en France, et Charles Lyell (1797-1875), qui publia en 1830 un ouvrage célèbre, *Principles of Geology*, défendirent la doctrine de Hutton (appelée « uniformitarisme » par Lyell), consistant à considérer le présent comme la clef du passé : les facteurs responsables des phénomènes anciens ne sont pas essentiellement différents de ceux qui opèrent aujourd'hui. Le principe de l'uniformitarisme, qui permit d'asseoir solidement la géologie comme science historique, fit réfléchir à la durée possible des temps géologiques, et incita plusieurs savants à avancer des estimations qui, bien que fausses, sont déjà chiffrées en millions d'années (par exemple 80 millions d'années pour le Tertiaire selon Lyell).

Les explorations géologiques détaillées qui sont en plein essor dans cette période amènent à considérer les dislocations et les déformations subies par les terrains après leur dépôt. Une controverse va opposer deux clans pour expliquer les chaînes de montagnes. Reprenant une idée erronée de Leopold von Buch (1774-1853), Élie de Beaumont (1798-1874) préconisa la théorie des cratères de soulèvement (1833) et du réseau pentagonal dans lequel il essaya de faire entrer tous les plissements du globe. L'action des poussées horizontales et des mouvements tangentiels est cependant reconnue peu à peu, grâce aux expériences de l'Écossais James Hall et aux observations sur le terrain de Heim et de Bertrand (1847-1907) qui formulèrent la notion de nappes de charriage. En 1873, l'Américain Dana (1813-1895) créa la notion et le terme de géosynclinal, pour désigner le sillon océanique dans lequel s'élabore une chaîne de montagnes. Les théories sur l'orogenèse s'organisent et profitent des progrès de la géophysique, en particulier de la gravimétrie grâce aux Anglais Pratt et Airy à qui on doit l'hypothèse de l'isostasie, traduisant l'équilibre des différentes parties de la croûte. L'étude des tremblements de terre, qui avait débuté au siècle précédent avec Michell, prit un essor conséquent vers les années 1880 quand les premiers séismographes purent être construits ; les premières données précises sur la structure interne du globe terrestre en découlèrent quelques années plus tard.

Le XIXe siècle fut marqué aussi par le développement de la pétrographie qui s'individualisa avec ses propres méthodes à partir de la minéralogie. La controverse entre les Neptuniens et les Plutoniens entretint une émulation certaine. Mais les progrès vinrent surtout de l'invention et de la mise au point du microscope polarisant pour l'examen des roches. Après la découverte de la polarisation de la lumière (Malus, 1808) et de la polarisation chromatique des lames cristallines (Arago, Brewster, Fresnel), l'invention d'un polariseur rectiligne en calcite par William Nicol (1792-1852) fit faire un bond important aux techniques d'observation. Bien que ce savant ait imaginé dès 1827 la possibilité de tailler des lames minces dans les minéraux et les roches, il fallut attendre le milieu du siècle pour que Sorby généralise la méthode et la vulgarise auprès des minéralogistes et des pétrographes. L'examen au microscope de la texture des roches était rendu possible, et les observations se succédèrent rapidement à partir de cette date. Sorby étudia la structure du marbre (1856), le granite dans les cristaux de quartz duquel il découvrit les inclusions fluides (1858). Zirkel en Allemagne et Fouqué en France développèrent cette méthode, qui permit alors la réalisation de monographies pétrographiques régionales. L'analyse de plus en plus poussée des variétés de roches ignées rendit nécessaire de les classer. Ainsi à la fin du siècle, plusieurs classifications systématiques des roches apparurent, fondées sur des critères minéralogiques (A. Michel-Lévy, 1879), des critères de gisement (Rosenbusch, 1887) ou des critères chimiques (Cross, Iddings, Pirsson et Washington, 1903).

◀ ***Rosenbusch (1836-1914), qui établit une classification systématique des roches, fondée sur des critères de gisement.***

Muséum d'histoire naturelle, Paris

L'étude du volcanisme démarra sérieusement au XIXe siècle, curieusement grâce aux deux principaux disciples de Werner, Humboldt (1769-1859) et Leopold von Buch, qui, contrairement à leur maître, furent des voyageurs infatigables. Von Buch étudia l'Auvergne, les Canaries, le Vésuve, l'Etna et souligna les alignements des volcans en rapport avec les structures tectoniques. Le flambeau de la vulcanologie passa ensuite en France avec Élie de Beaumont, qui accompagna von Buch à l'Etna en 1835, et ses disciples, Sainte-Claire Deville (1818-1886), Fouqué (1828-1904) et enfin Lacroix (1863-1948) qui analysa en très grand détail l'éruption de la montagne Pelée à la Martinique en 1902.

Hall est considéré comme le père de la pétrographie expérimentale, à la suite de ses expériences entre 1801 et 1805 sur les transformations de calcaires en marbres par chauffage en tube scellé et sur la fusion et recristallisation du basalte. Entre 1860 et 1879, Daubrée réalisa une série de synthèses hydrothermales de minéraux et d'associations minérales variées, et démontra l'influence importante des fluides (« minéralisateurs »), principalement l'eau, dans certains phénomènes de cristallisation magmatique. Fouqué et Michel-Lévy (1878-1881) réussirent enfin la

A. Lacroix

▲ *La montagne Pelée (Martinique) après l'éruption en 1902 ; cette photo a été réalisée par A. Lacroix (1863-1948), volcanologue français qui analysa en détail cette éruption.*

▼ *Un spectromètre de masse, appareil utilisé en géochimie pour l'analyse fine des constituants des roches.*

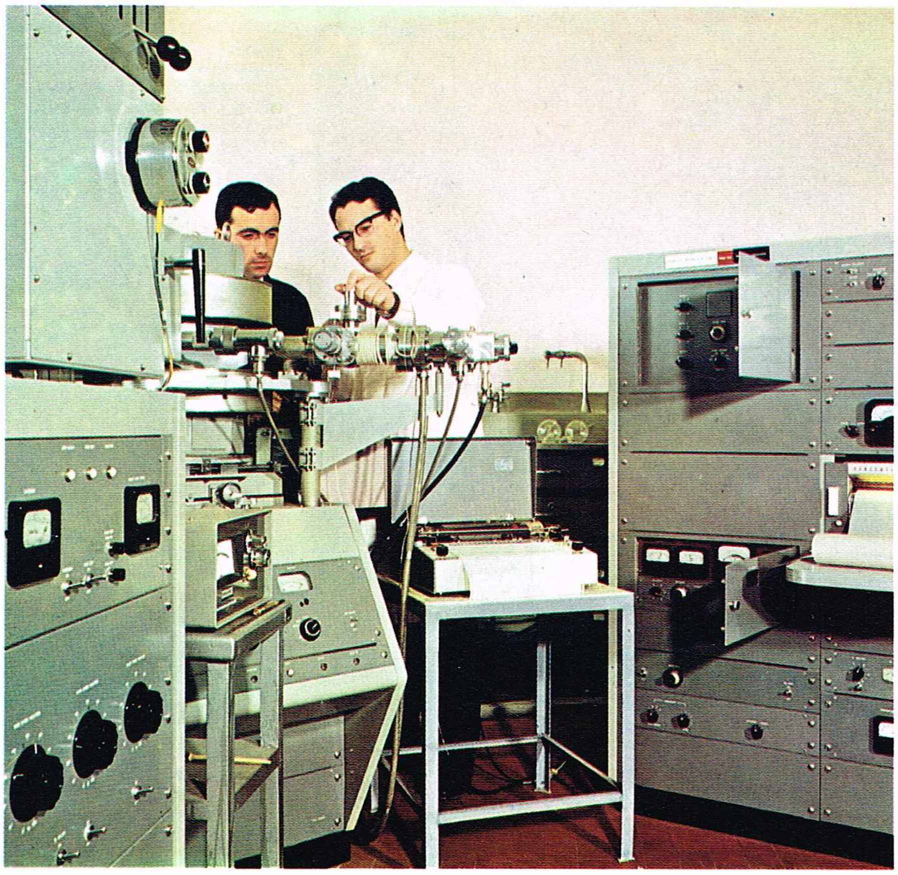

Montedison

synthèse de diverses roches volcaniques, obtenues par fusion purement ignée et sans l'intervention d'une phase gazeuse.

Le XXe siècle

Les sciences de la Terre se sont donc progressivement constituées pendant le XIXe siècle, parallèlement au développement considérable des sciences physiques et chimiques. Au XXe siècle, elles vont faire un véritable bond en avant, conséquence des découvertes importantes sur la nature de la matière, comme celles des rayons X ou de la radioactivité. La possibilité d'utiliser des sources d'énergie de plus en plus commodes permet une accélération grandissante des progrès techniques, particulièrement dans le domaine des transports, entraînant une exploration plus complète de notre planète. On assiste aussi à un effort croissant de quantification des phénomènes géologiques analysés.

Deux périodes peuvent être distinguées. La première, du début du siècle jusqu'à la Deuxième Guerre mondiale, correspond à une continuation de l'impulsion donnée au siècle précédent, avec un souci accru pour la mesure quantitative. Ainsi, deux branches annexes de la géologie acquièrent leur autonomie, la géophysique et la géochimie. Cette dernière, dont le terme fut introduit en 1838 par le chimiste suisse Schönbein, s'est attachée d'abord à établir la composition moyenne de la croûte terrestre, à partir d'un grand nombre d'analyses de roches ; la première estimation par l'Américain Clarke fut publiée en 1908. L'étude chimique des mouvements de matière fut ensuite abordée pour connaître les bilans des échanges d'éléments au sein de la Terre (Goldschmidt, Vernadsky qui créa la notion de cycle géochimique). Une branche de la géochimie, celle des isotopes radioactifs, s'est progressivement spécialisée vers la détermination quantitative de l'âge des roches (géochronologie absolue) et a permis la numérisation de l'échelle stratigraphique.

Devant la spécialisation de plus en plus marquée de la géologie, quelques essais de synthèse générale se manifestèrent, en particulier une tentative pour changer les bases des sciences de la Terre avec la notion de dérive des continents. Le météorologiste allemand Wegener (1912) déploya beaucoup d'efforts pour l'étudier et la démontrer. Il rallia beaucoup de géologues comme Argand, Staub, à ses idées « mobilistes », mais la plupart des géophysiciens rejetèrent catégoriquement la majorité de ses propositions qui contenaient d'importantes erreurs et ne permettaient pas de conclusions véritables. Cet échec est dû au manque de données suffisantes, à l'époque, sur les domaines océaniques et sur la structure interne du globe terrestre (pour laquelle Wegener avait adopté un schéma inexact).

La période postérieure à la Deuxième Guerre mondiale peut être subdivisée en deux. Un premier temps, de 1944 à 1964, est caractérisé par l'introduction massive des techniques modernes de la physique et de la chimie dans les différentes disciplines des sciences de la Terre. Les mesures sont prodigieusement améliorées grâce à l'électronique moderne, et la mise au point d'appareils de plus en plus sensibles et de moyens de calcul (ordinateur) puissants fait faire des bonds considérables aux diverses branches de la géologie ; spectromètre de masse pour la géochimie, micro-analyseur électronique qui introduit en pétrographie une dimension nouvelle, comparable à la révolution des idées que l'utilisation du microscope a entraînée au siècle précédent. Les progrès énormes des moyens de locomotion permettent d'atteindre tous les points de la surface de la Terre et d'y procéder à des observations quantitatives : c'est le cas en particulier des fonds océaniques dont la cartographie et l'échantillonnage se développent activement. Jusqu'à cette date, les modèles géologiques globaux s'appuyaient presque exclusivement sur des observations effectuées sur les continents, évidemment plus accessibles. Pendant ces deux décades, la diversification des spécialités devient telle que chacune d'entre elles a tendance à évoluer de façon autonome, afin d'aller jusqu'au point le plus avancé, grâce à la technique qui sert en fait de support à la spécialité, en ignorant à peu près tout des disciplines voisines.

Cependant, les progrès énormes de nos connaissances, réalisés à l'aide de ces techniques analytiques raffinées,

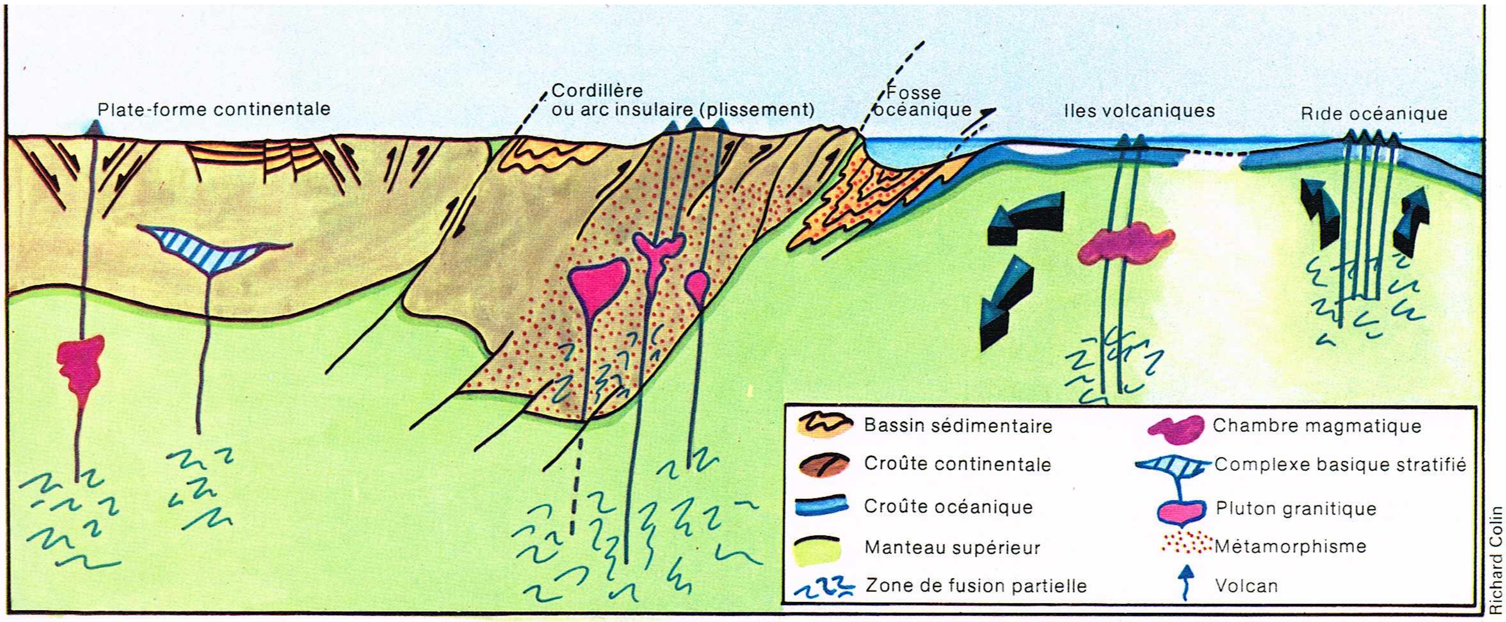

▲ ***Schéma général des principaux phénomènes géodynamiques au niveau de la croûte et du manteau (volcanisme, plutonisme, métamorphisme, tectonique).***

débouchèrent nécessairement sur une prise de conscience plus globale des problèmes géologiques. Vers 1956, les mesures paléomagnétiques enregistrées sur divers continents purent montrer de façon formelle leurs déplacements relatifs. L'hypothèse de la dérive des continents reprit vigueur, cette fois sous l'impulsion des géophysiciens, et, en 1963, Vines et Matthews lancèrent la théorie de l'expansion océanique. A partir de cette date, cette conception mobiliste commence à être adoptée en nombre de plus en plus grand par les géologues de différentes spécialités, tectoniciens, paléontologistes, sédimentologistes, pétrographes, géochimistes..., et conduit à l'hypothèse de la tectonique des plaques, hypothèse unificatrice et cohérente à l'échelle du globe. Les sciences de la Terre connaissent donc une véritable révolution, qui confère un nouveau mode de pensée à chacun des spécialistes, en l'obligeant à donner une dimension vraiment planétaire aux modèles relatifs aux phénomènes particuliers qu'il étudie. Ce nouvel état d'esprit nécessite la confrontation incessante entre géologues, géochimistes et géophysiciens, de toutes spécialités, dans l'espoir d'élaborer un modèle de plus en plus précis de l'évolution générale du globe.

Hypothèse géodynamique globale

Comme l'a montré l'essai historique précédent, l'évolution des idées au cours des dernières décades a abouti à un regroupement des géologues, des géochimistes et de géophysiciens autour d'une hypothèse de travail, la tectonique des plaques. Elle s'appuie, en effet, sur l'ensemble des disciplines des sciences de la Terre, dont le concours a permis de démontrer la dérive des continents et le renouvellement des fonds océaniques *(« sea floor spreading »)*.

Les continents se déplacent lentement les uns par rapport aux autres et par rapport aux pôles, se morcellent ou s'accolent éventuellement suivant une disposition différente. L'ordre de grandeur des vitesses de tels déplacements est estimé à quelques centimètres par an. Les fonds océaniques participent également à ce schéma général de mouvement : la croûte océanique jeune est créée au niveau des crêtes des dorsales océaniques, grâce aux montées magmatiques issues du manteau ; les planchers océaniques s'écartent de chaque côté des dorsales, entraînés par un système de courants sous-crustaux ; enfin certaines parties de la lithosphère sont réintégrées dans le manteau au niveau des fosses océaniques et des jeunes chaînes de montagnes. Les blocs continentaux que l'on considère comme ancrés à la surface d'une portion de lithosphère (ou plaque lithosphérique) se déplacent à la suite de l'expansion des fonds océaniques. Au niveau des zones d'enfoncement des plaques lithosphériques dans le manteau, la croûte continentale, contrairement à la croûte océanique, ne peut pas être réabsorbée à cause de sa composition très différente et de sa densité plus faible que le milieu environnant.

Les données précédentes ont conduit à l'hypothèse de la tectonique des plaques que l'on peut formuler de la façon suivante : les zones orogéniques, dans lesquelles se dissipe l'essentiel de l'énergie mécanique, sont les zones où se produisent des mouvements horizontaux différentiels entre plaques lithosphériques rigides (Le Pichon, 1968). Cette hypothèse met l'accent sur une des caractéristiques importantes des sciences de la Terre, découverte récemment, à savoir l'influence déterminante du manteau, plus spécialement le manteau supérieur, et de ses interactions avec la croûte dans les processus géologiques. Considéré il n'y a pas très longtemps comme une enveloppe relativement inerte, il nous apparaît aujourd'hui hétérogène, soumis à des mouvements intenses et incessants. La différence entre continent et Océan passe alors au second plan, simples parties d'unités plus conséquentes du manteau, dont le jeu relatif conditionne la dynamique des phénomènes géologiques.

Il est probable que dans l'avenir la vision des sciences géologiques prenne encore une dimension supplémentaire, en intégrant dans les modèles les interactions probables avec le noyau et aussi avec l'environnement terrestre (cosmos) comme plusieurs indices le laissent pressentir.

Phénomènes et cycles géologiques

La croûte et le manteau terrestres sont le siège de transformations qui ont un caractère évolutif depuis l'origine de la Terre. Traditionnellement depuis Hutton, on parle de cycles ou mieux de séquences pour décrire ces enchaînements de phénomènes géologiques, qui sont responsables des modifications de notre planète. Ces séquences se répètent mais ne sont pas séparées dans le temps ; elles se recouvrent et s'imbriquent les unes dans les autres, mais sans qu'aucune d'elles ne reconstitue exactement les événements de celles qui la précèdent. Pour des commodités d'exposé, on est obligé d'examiner séparément les grands phénomènes géologiques qui, il ne faut pas l'oublier, ne sont pas cependant indépendants les uns des autres et sont connectés dans un cycle donné.

Altération superficielle et érosion

Le contact entre la lithosphère et l'hydrosphère est le lieu de modifications minéralogiques très prononcées, qui résultent de réactions chimiques d'hydrolyse, d'oxydation

▼ ***Diagramme expliquant l'hypothèse de la tectonique des plaques (d'après Isacks, 1968).***

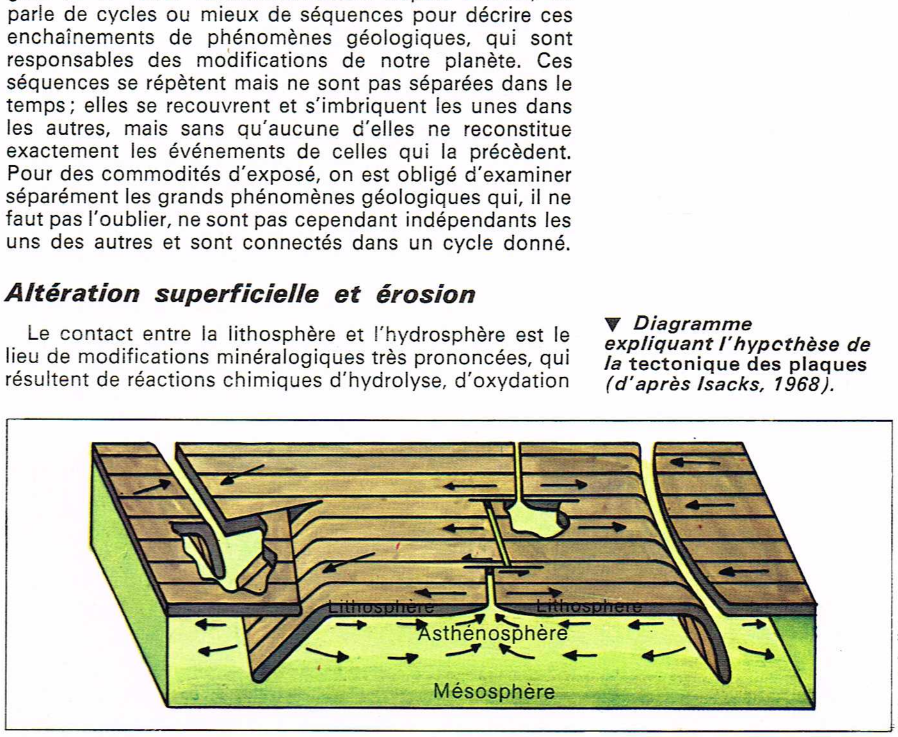

J. Fabriès

▲ *Montagnes et dunes de la région du Tazat (Hoggar) montrant les effets de l'érosion et du transport des matériaux par le vent.*

et de dissolution entre l'eau et les roches. L'eau est un agent de corrosion très puissant et provoque un véritable lessivage des continents. Elle facilite aussi la désagrégation des roches, dont les résidus constituent des arènes ou des sols suivant leur degré d'évolution. Les transformations superficielles donnent naissance à des silicates hydratés dont les plus caractéristiques sont les constituants des argiles. A côté des phénomènes purement physiques et chimiques, interviennent des processus biologiques qui jouent un rôle très important dans la genèse des sols ou pédogenèse. La *pédologie* est la branche des sciences de la Terre qui s'occupe de l'étude des sols et des facteurs responsables de leur constitution. Aussi est-il possible de reconstituer la nature de certains milieux passés, en particulier les conditions climatiques, à partir des produits d'altération anciens, que l'on peut rencontrer dans certaines formations géologiques.

Une partie, souvent importante, de ces matériaux d'altération est enlevée (érosion) et transportée vers les points bas de la surface terrestre. Ce transport est soit mécanique, après désagrégation, fragmentation, avec les eaux courantes et dans quelques cas plus particuliers le vent et la glace comme véhicules, soit chimique, après dissolution et lessivage par les eaux. La gravité étant le moteur de cette mobilisation, une grande partie de ces matériaux sont déchargés dans un fond océanique. Le résultat de cette érosion est un abaissement progressif de l'altitude des régions continentales, qui en général sont d'autant plus rapidement érodées qu'elles sont élevées (zones montagneuses). La vitesse d'érosion dépend cependant de nombreux facteurs, comme les conditions climatiques, l'instabilité tectonique avec la possibilité de mouvements verticaux... La morphologie de la surface terrestre découle d'une perpétuelle recherche de l'équilibre, qui idéalement devrait conduire à une topographie parfaitement lisse ; elle résulte en fait d'une action antagoniste des processus d'érosion et des processus de soulèvement des masses continentales, une surrection entraînant automatiquement une accentuation de l'érosion, et l'enlèvement de volumes importants de matériaux facilitant la montée isostatique de ces masses continentales. Un tel exemple permet d'entrevoir les connexions très complexes qui existent entre les divers phénomènes géologiques, la nature d'un objet superficiel telle que la forme d'un paysage pouvant être conditionnée par des causes dont il faut rechercher le siège dans le manteau sous-jacent.

La sédimentation

Les éléments transportés, en solution ou mécaniquement, vont se déposer dans les parties creuses de la surface terrestre : lits de rivière, lacs, estuaires, bassins marins... Ces accumulations constituent les sédiments qui se disposent suivant des structures reflétant les conditions du dépôt. Ces « figures sédimentaires », comme le tri, le classement et l'arrangement des particules dans le sédiment, la forme des objets, qui reflète surtout l'histoire du transport, conservent les marques des eaux courantes, du vent, de la glace ou simplement de la gravité, et leur examen permet en effet de reconstituer le milieu et le climat dans lesquels la sédimentation s'est opérée.

Après compaction et expulsion d'une partie de l'eau interstitielle, le sédiment est le siège d'un ensemble de transformations, appelé *diagenèse*. Elle se manifeste par une augmentation de la taille des grains avec nourrissage périphérique, une cimentation par des phases minérales précipitées chimiquement entre les grains, des recristallisations avec arrangement de forme, et parfois des modifications de la composition chimique à la suite de réactions avec des solutions environnantes. Elle conduit à l'aide de ces processus fort complexes à la formation de roches sédimentaires.

La nature des roches sédimentaires est très variée bien que le nombre des minéraux qui interviennent dans leur constitution soit relativement faible. A côté des minéraux détritiques, dont le quartz est de loin le plus important, les phyllites (argiles) et les carbonates sont les plus caractéristiques de ces domaines superficiels de lapidification. Dans l'ensemble des roches sédimentaires, celles qui contiennent une fraction argileuse importante (shales, grauwackes) représentent plus de 80 % ; leur composition moyenne est en effet assez voisine de la composition moyenne de la croûte continentale, et explique donc leur fréquence. Les grès, les sables et les calcaires (et autres roches carbonatées) atteignent environ 10 %. Tous les autres types pétrographiques (évaporites, combustibles, phosphates...) ne dépassent pas 1 % du total.

Beaucoup de roches sédimentaires renferment des traces d'organismes vivants. Outre la présence de fossiles qui interviennent pour une part variable dans la constitution des sédiments par la simple accumulation de leurs organes solides (coquilles, tests, squelettes), les êtres vivants jouent un rôle biochimique souvent très important dans la fixation de la matière minérale.

Les sédiments et leurs produits de consolidation recouvrent des roches magmatiques et métamorphiques sur les trois quarts de la surface de la Terre, bien qu'ils représentent moins de 5 % de la croûte. D'énormes accumulations, de plusieurs kilomètres d'épaisseur, ont été découvertes dans certains bassins fermés comme la mer Caspienne et dans les fosses océaniques. Les caractères des sédiments montrent que dans de nombreux cas ils se sont déposés sous une tranche d'eau peu épaisse ; cette observation a suggéré la notion de subsidence, un enfoncement accom-

S.E.F.

◀ *Effet de la sédimentation marine : cordon sédimentaire ayant isolé un bras de mer transformé en lagune.*

pagnant de façon synchrone la sédimentation. La couverture sédimentaire est au contraire relativement réduite sur les planchers océaniques, sa puissance variant en moyenne entre quelques centaines de mètres et un kilomètre. C'est un des arguments démontrant la jeunesse des Océans actuels.

Le volcanisme

Le volcanisme est un phénomène géologique qui, comme les précédents, peut être observé directement par l'homme dont il a frappé depuis longtemps l'imagination par son caractère très spectaculaire et catastrophique. C'est un

I.G.N.

◀ *Vue aérienne du puy de Côme (Puy-de-Dôme) : des coulées de lave et des produits pyroclastiques se sont accumulés et ont formé un volcan au centre duquel s'est individualisé un cratère.*

J. Fabriès

▲ ***Souvent les volcans et leurs produits sont associés dans une région sur quelques centaines de km², définissant ainsi une province volcanique ; ici, les volcans de l'Atakor (Sahara).***

processus de géodynamique interne amenant à la surface des matériaux d'origine profonde. Ceux-ci sont émis à des températures très élevées, entre 850 °C et 1 200 °C, et sont constitués par une phase fondue importante et des quantités variables de cristaux et de gaz. On donne le nom de *magma* à de tels mélanges.

Dans de nombreux cas, les matières fondues débordent de la bouche d'émission et s'écoulent par gravité vers les points bas de la région en donnant des coulées de lave. Elles se refroidissent progressivement et leur solidification complète aboutit à la naissance des roches volcaniques. Le dégagement des gaz, occlus dans le magma et qui consistent essentiellement en vapeur d'eau et anhydride carbonique, se fait souvent d'une façon explosive. Ces explosions provoquent des morcellements importants des matériaux déjà consolidés qui obstruent les évents d'émission, et entraînent la projection des fragments ainsi formés : cristaux, verres, bombes, roches... Ces différents éléments se déposent par gravité, et constituent alors des formations pyroclastiques (roches pyroclastiques). Ces dépôts peuvent s'amonceler avec des coulées de lave de façon importante autour de la bouche émissive et construire ainsi un appareil plus ou moins conique appelé volcan, au centre duquel s'individualise généralement un cratère.

▼ ***Lame mince de lave observée au microscope polarisant. Il s'agit d'une basanite leucitique de l'île de Ringgit, près de Java.***

Conquéré

En grande majorité les magmas émis par les volcans sont silicatés. Leurs compositions ont des teneurs en silice comprises entre 40 % et 75 %, avec une fréquence maximale pour la valeur 53 %. Ce résultat rend compte de la prédominance extrême des basaltes, roches volcaniques basiques contenant 45 à 50 % de silice, qui représentent environ 82 % de la surface totale couverte par les roches volcaniques, les andésites 16 % et les rhyolites 2 %. Un volcan donné peut, au cours de son histoire, émettre des laves de composition différente. On connaît même des cas où des produits de compositions aussi éloignées que des basaltes et des rhyolites ont été rejetés d'un cratère à des cadences relativement rapides.

Souvent les volcans et leurs produits, les roches volcaniques, sont associés dans une certaine région, sur quelques centaines de km² de surface. On définit ainsi une *province volcanique* dans laquelle les roches volcaniques se sont mises en place pendant une période restreinte (de l'ordre de quelques millions d'années au plus) et présentent des particularités communes, à la fois chimiques et minéralogiques, qui les distinguent nettement des roches d'autres provinces ; par exemple les laves leucitiques, fortement potassiques, des régions de Naples et de Rome, constituent une province volcanique. L'existence de ces caractères communs suggère une consanguinité, une communauté d'origine de ces roches, dont la diversité résulte d'une sorte d'évolution à partir d'un stock parent ou magma primaire, souvent de nature basaltique. Cette notion fondamentale a reçu le nom de différenciation magmatique, dont l'étude est un des domaines de la *pétrologie ignée*.

Les études très soignées des volcanologues américains à Hawaii, et soviétiques au Kamchatka, ont montré à l'aide d'arguments sismiques que les magmas basaltiques proviennent des réservoirs situés entre 60 et 90 km de profondeur. Sous le grand volcan Bezymianny qui explosa en 1956, les données géophysiques ont indiqué l'existence d'une poche lenticulaire, liquide, d'un volume de 10 000 à 20 000 km³. Ces zones de rassemblement des liquides magmatiques sont nettement au-dessous de la discontinuité de Mohorovicic, dans le manteau supérieur. Le problème de la génération des magmas basaltiques est une des tâches fondamentales de la pétrologie ignée, qui compare les phénomènes naturels avec les résultats de travaux expérimentaux réalisés en laboratoire, sur la cristallisation et le fractionnement de bains silicatés fondus. On pense actuellement que les basaltes résultent d'une fusion partielle de matériel ultrabasique ou basique constituant le manteau supérieur. La nature des liquides primaires formés est fonction du taux de fusion partielle qui s'effectue à très grande profondeur, de l'ordre de 100 à 120 km. Un tel magma ainsi réalisé peut se rassembler et s'arrêter

Tomsich

▲ *Éruption avec coulées de lave d'un volcan d'Hawaii (1952).*

lors de son ascension vers la surface pour constituer un réservoir magmatique dans lequel une différenciation est susceptible d'avoir lieu.

Le plutonisme

A la différence du volcanisme, le plutonisme est une manifestation magmatique qui échappe à l'observation directe par l'homme pendant son temps d'activité. Il correspond en effet à la mise en place, au refroidissement et à la solidification de masses magmatiques à l'intérieur de la lithosphère. C'est simplement le jeu de l'érosion qui permet de porter à la surface, une fois qu'elles sont entièrement consolidées, ces roches plutoniques qui sont les produits de la cristallisation magmatique dans des conditions de profondeur.

Les roches plutoniques ont des compositions chimiques très comparables à celles des roches volcaniques. Mais leur fréquence n'est pas du tout la même. Les types riches en silice prédominent largement, l'histogramme de distribution de la teneur en silice présentant un maximum pour 65 %. Ainsi les affleurements des roches renfermant du quartz représentent près de 86 % de la surface totale couverte par les roches plutoniques (granites 44 %, granodiorites 34 %, diorites quartziques 8 %, diorites 1 %, gabbros 13 %...). Elles sont toujours cristallines, c'est-à-dire constituées par un agrégat de cristaux, caractère qui les distingue des roches volcaniques qui peuvent renfermer du verre. En fait, les différences d'ordre textural et d'ordre minéralogique entre ces deux grandes catégories de roches tiennent aux conditions particulières de la cristallisation en profondeur. Dans un tel milieu, le refroidissement est plus lent et cette durée plus grande de la cristallisation permet une croissance plus poussée des cristaux constitutifs ; par ailleurs, les phases fluides contenues dans le magma, plus spécialement l'eau, sont retenues plus longtemps ; elles influent de façon plus intense sur la nature des minéraux qui se développent (minéraux hydroxylés) dès les stades précoces de la consolidation, et elles sont aussi la cause de transformations minéralogiques ultérieures qui se poursuivent sur des périodes relativement longues jusqu'à ce que toute l'activité ignée soit arrêtée dans la région intéressée (hydrothermalisme).

Les magmas montent dans la lithosphère, les volcans en fournissent une preuve. Ainsi les masses plutoniques font intrusion dans des terrains sus-jacents. La cause de l'ascension des magmas tient essentiellement à la différence de densité qui existe entre les zones fondues (moins denses) et les résidus de fusion. Les magmas granitiques (acides) les moins denses présentent une tendance accrue à

▼ *A gauche, une zone de contact de massif granitique. A droite, une lame mince d'une roche ignée grenue récoltée dans la Sierra Leone : l'allivalite. Les roches ignées dues à une cristallisation lente et en profondeur, sont caractérisées par de grands et nombreux cristaux.*

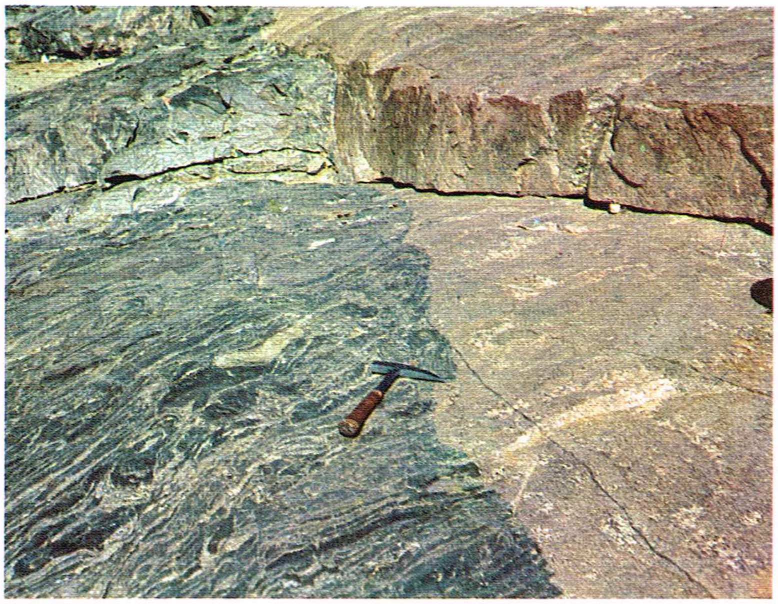

J. Fabriès

Conquéré

J. Touret

▲ *L'effet des mouvements tectoniques est souvent bien visible sur les roches sédimentaires qui présentent des plis.*

▼ *Zone de fusion dans des roches métamorphiques (ici du gneiss à biotite) observée dans l'Ontario (Canada).*

J. Fabriès

monter ; c'est pourquoi les grandes masses plutoniques qui en résultent se mettent en place exclusivement dans les continents, au point que l'on peut affirmer que les roches grenues acides caractérisent la constitution de la croûte continentale.

Les problèmes posés par le mécanisme de l'intrusion des corps plutoniques, dont certains atteignent des dimensions très élevées, sont conjecturaux, en particulier celui de la place. Des renseignements précieux sont d'abord fournis par la forme et le volume d'un tel corps, qui est désigné souvent sous le nom de pluton. Mais la morphologie n'est pas facile à déterminer avec précision car les observations ont lieu pratiquement sur deux dimensions (surface terrestre) ; souvent l'allure du plancher de nombreux plutons n'est pas connue par manque d'informations tirées de sondages et de mesures géophysiques. L'examen de la forme générale d'un volume igné avec la structure générale des terrains qui l'entourent renseigne également sur la raison de l'emplacement de tel pluton. Les structures internes qu'on peut observer sur le terrain dans les massifs de roches plutoniques sont très précieuses pour reconstituer les diverses étapes de la mise en place et les mécanismes. On peut citer : les bordures figées qui résultent d'un refroidissement plus rapide près des parois, surtout quand le déséquilibre thermique est grand entre le corps intrusif et le terrain environnant; les enclaves de roches encaissantes ou de roches magmatiques de la même série différenciée, déjà cristallisées; les figures de flux correspondant à des alignements de minéraux, des dispositions en filet d'écoulement... ; les figures de sédimentation qui proviennent de l'accumulation et de la décantation des minéraux dans les chambres magmatiques suivant leurs densités respectives.

Le plutonisme contribue, comme le volcanisme et le processus sédimentaire, mais de façon plus massive, à la redistribution de la matière dans la lithosphère, et corrélativement à des concentrations d'éléments, dont certaines peuvent avoir un intérêt économique. Ces concentrations minérales, dont les teneurs en certains métaux atteignent des valeurs telles qu'elles sont susceptibles d'être exploitées par des mines ou des carrières, sont appelées gîtes métallifères et l'étude de leurs processus de formation est plus spécialement du ressort de la *métallogénie*. Il existe des relations certaines entre la nature des concentrations métallifères et celle des ensembles plutoniques ; le cortège des minéralisations accompagnant les plutons granitiques est, par exemple, tout à fait différent de celles associées aux roches plutoniques basiques et ultrabasiques.

Le métamorphisme

Quelquefois les roches sédimentaires et les roches ignées demeurent fixées dans leur état de cristallisation initiale pendant de très longues périodes. D'autres vont subir une série de transformations et de nouvelles cristallisations de minéraux que l'on groupe sous la notion générale de métamorphisme. Ces modifications sont essentiellement minéralogiques, structurales et chimiques; elles sont progressives et finalement font perdre à la roche son aspect initial. Elles correspondent à un ajustement des roches solides à des conditions physico-chimiques nouvelles, qui sont imposées en profondeur dans la lithosphère. On exclut en effet de cette définition les mécanismes de l'altération superficielle. Au début de la science géologique, ce comportement des roches solides était difficile à comprendre, car on ne connaissait pas alors les lois de l'équilibre et de la cinétique chimiques, la règle des phases, la loi d'action de masse, et la notion de plasticité cristalline était encore vague.

Ces transformations métamorphiques ne se produisent jamais de façon autonome; elles se rencontrent au contraire dans certaines situations géologiques bien définies : associées à des zones plus ou moins vastes de plissement intense (métamorphisme régional) ; localisées à la périphérie d'intrusions plutoniques (métamorphisme de contact) ; confinées au voisinage des zones de fracture et des rides centrales de certaines dorsales océaniques (métamorphisme de fond océanique) ; exceptionnellement localisées dans quelques cratères provoqués par la chute de très grosses météorites à la surface de la Terre (métamorphisme de choc ou d'impact).

Les roches métamorphiques présentent donc une variété souvent déconcertante des compositions et des

textures, du fait même de la diversité des matériaux originels dont elles dérivent. Aussi leur étude pétrographique a-t-elle nécessité, dès ses premiers pas au siècle dernier, une confrontation permanente entre les observations de terrain et les données de laboratoire (observations microscopiques et expériences de synthèse minérale). Cette réflexion a permis d'établir qu'une association minérale métamorphique se développe en réponse à l'imposition de certaines conditions de température (facteur important) et de pression, et qu'elle est déterminée par la composition chimique de la roche et par ces conditions physiques. Cette réponse se traduit par des réactions chimiques entre minéraux solides en présence de phases fluides intergranulaires (H_2O, CO_2), réactions qui tendent à mettre le système en équilibre thermodynamique. En effet de nombreux faits permettent de penser que la plupart des roches métamorphiques se sont comportées comme des systèmes dans lesquels l'équilibre chimique était atteint (ou presque). Ce principe fondamental de la pétrologie métamorphique s'est traduit par la notion de faciès minéral (Eskola), qui met l'accent sur la liaison essentielle entre composition chimique et composition minéralogique. Grâce à cette méthode, il est possible d'estimer avec des précisions plus ou moins grandes suivant les cas les conditions physiques sous lesquelles une roche métamorphique donnée a recristallisé.

Les terrains affectés par un métamorphisme régional sont plissés et à, l'échelle de l'échantillon, les roches métamorphiques montrent généralement des marques évidentes de déformations. Elles présentent ainsi des structures orientées nettes, planaires (schistosité, foliation) ou linéaires (linéations) dont la description est l'objet de la structurologie. Les minéraux constitutifs ont tendance à se développer avec des orientations cristallographiques préférentielles. Les études au microscope et leur confrontation avec les mesures effectuées sur le terrain permettent de reconstituer les différentes phases de cristallisation et de déformation ainsi que leurs relations, qui ont été enregistrées dans les roches métamorphiques ; elles permettent donc d'introduire le facteur temps dans l'analyse du métamorphisme.

Dans certains domaines métamorphiques, où des températures et des pressions élevées ont pu être atteintes, des indices de fusion partielle de certaines roches ont été décelés. Ce phénomène de fusion partielle (anatexie différentielle), qui affecte principalement des roches quartzo-feldspathiques, aboutit à la formation *in situ* d'un magma de composition granitique mélangé à une trame de roches métamorphiques.

La tectonique

Un des processus dynamiques importants que l'on retrouve jusque dans les époques les plus anciennes de l'histoire de la Terre, est le développement de chaînes de montagnes qui correspondent à des portions de la croûte continentale dans lesquelles les roches ont été affectées par des déformations mécaniques. La preuve de tels mouvements est évidente pour les roches sédimentaires dont la disposition en couches, en strates le plus souvent plissées, parfois redressées jusqu'à la verticale, contraste avec la disposition en couches horizontales caractéristiques des dépôts dans les mers ou dans les lacs. L'analyse des structures ainsi engendrées à la suite de déformations (plis, failles, etc.) suggère la notion géométrique de déplacement de grands ensembles. Pendant longtemps la géométrie des structures a été la préoccupation majeure des tectoniciens ; la tendance actuelle est d'introduire des données quantitatives afin d'aborder les mécanismes de la déformation. Pour avoir une vision complète du problème, il faut nécessairement étudier les structures tectoniques à toutes les échelles, des torsions microscopiques dans les cristaux jusqu'au déplacement des grandes masses continentales. Seule l'étude des microstructures, appelée aussi microtectonique, permet d'envisager l'étude des mécanismes de la déformation grâce à la possibilité de comparaison avec des données expérimentales. Comme des lois souvent simples ont pu être établies pour relier les macrostructures aux microstructures, il est possible d'établir des modèles cohérents, définissant les axes de la déformation (direction de raccourcissement, d'allongement et intermédiaire) et donnant l'allure du champ de la déformation à toutes les échelles.

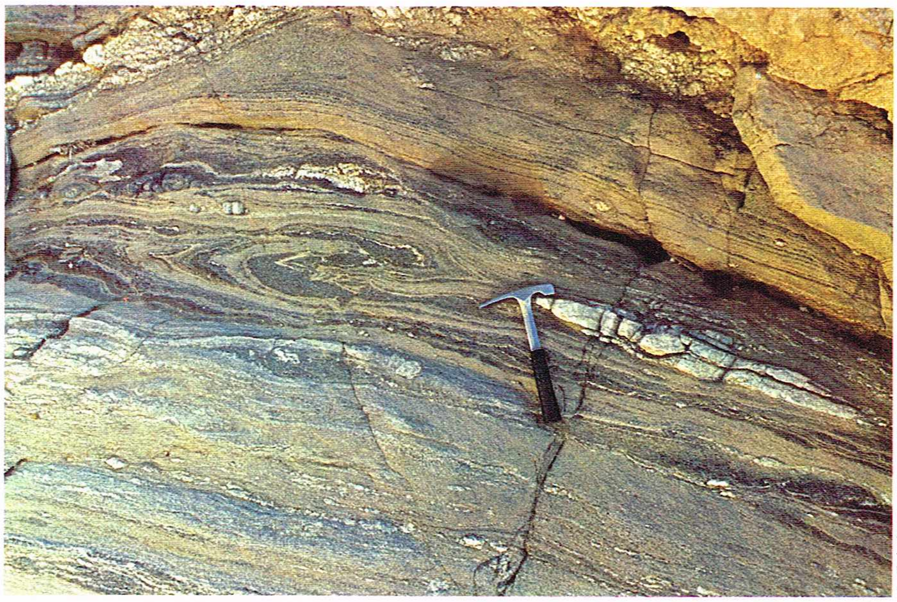

J. Fabriès

▲ ***Plissements superposés observés dans le massif du Hoggar.***

A une époque déterminée de l'histoire de la Terre, seules certaines parties particulières de la croûte sont l'objet de déformations importantes, alors que rien ne semble se produire ailleurs. Ces zones privilégiées, qui correspondent pour le temps actuel à des chaînes de montagnes, sont appelées zones ou ceintures orogéniques, l'orogenèse désignant l'ensemble des phénomènes conduisant à leur élaboration. Le processus orogénique est discontinu dans le temps pour un secteur donné de la Terre ; plusieurs phases de déformation, séparées par des temps de relaxation des contraintes, peuvent ainsi être définies. En outre, des relations étroites ont été depuis longtemps notées entre l'orogenèse et d'autres phénomènes géodynamiques internes, métamorphisme et activités volcanique et plutonique. Ces déformations mécaniques ne sont en fait qu'une des manifestations de l'activité énergétique de la Terre. Le modèle de la tectonique des plaques fait ressortir les connexions étroites qui existent entre ces différents phénomènes énergétiques.

La revue des principaux phénomènes géologiques ci-dessus met en évidence le lien organique entre les divers domaines des sciences de la Terre, lien qui est le reflet de l'interdépendance des processus naturels. Elle est obligatoirement incomplète car elle n'envisage que les mécanismes observés ou indirectement déduits dans la lithosphère et à la rigueur dans la partie supérieure de l'asthénosphère. Il est évident que les couches plus profondes

▼ ***Microplis dans des phyllades du Gédinnien de la région de Morlaix dans le Finistère. Ces microplis sont observés en lumière polarisée sur une préparation en lame mince.***

Cabanis

▶ *Le développement de chaînes de montagnes correspond à des déformations mécaniques des roches dans certaines portions de la croûte continentale. Ici, la Dent des Géants et les Grandes Jorasses vues du téléphérique de la vallée Blanche.*

G. Mairani

du globe ne sont pas inertes et que leur activité doit avoir un rôle déterminant dans la géodynamique plus superficielle, par exemple en ce qui concerne les sources et les transferts de chaleur. Mais il faut reconnaître qu'elle est beaucoup plus difficile à déceler directement et que la science a encore beaucoup à apprendre sur ce domaine.

Principes généraux de la méthode géologique

Comme dans toute science, la recherche en géologie conduit tour à tour à observer, expérimenter et interpréter. Pour cela, le géologue doit appuyer ses raisonnements sur la thermodynamique et sur la méthode des modèles. De l'observation des faits qu'il analyse, il en conclut une loi hypothétique par généralisation, induction, synthèse. Toute interprétation des phénomènes de la nature doit en effet satisfaire aux principes fondamentaux de la thermodynamique, qui indique si la loi envisagée est possible ou non. Mais elle ne donne aucune indication sur les modes opératoires, sur les mécanismes qui permettent de réaliser les transformations qu'elle a reconnues possibles, ni sur le temps nécessaire pour les effectuer. Différant profondément de la thermodynamique, la méthode des modèles cherche au contraire à expliquer les phénomènes et vise à atteindre les mécanismes mêmes des transformations. Elle opère par hypothèse alors que la thermodynamique procède uniquement par déduction. Ces deux méthodes d'étude sont complémentaires l'une de l'autre, et leur concours est indispensable pour l'approfondissement des connaissances géologiques.

Comment le géologue réalise-t-il cet objectif dans la pratique ?

Comme toutes les sciences naturelles, la géologie ne peut se passer d'explorations préalables sur le terrain qui constituent souvent la partie la plus longue du travail. La tâche du géologue se déroule donc dans deux domaines distincts, sur le terrain et dans le laboratoire. Bien qu'actuellement la spécialisation des sciences de la Terre soit telle qu'un individu est amené à consacrer plus de temps à une fraction au détriment de l'autre, un équilibre entre ces deux modes d'action doit être maintenu globalement à l'échelle de l'ensemble des spécialistes pour permettre un progrès efficace de la connaissance.

Travaux sur le terrain

Le travail sur le terrain est à la base de toute véritable étude géologique. Face à face avec la roche qui affleure, devant le front de taille d'une carrière, ou à la recherche d'un contact caché entre deux formations, le géologue prend en effet conscience de l'ampleur des problèmes que lui offre la Terre. C'est là encore qu'il trouve les matériaux nécessaires pour résoudre ces énigmes. L'étude sur le terrain comporte donc des observations locales (structures des roches, pendages des couches, accidents tectoniques visibles, contacts entre terrains différents, etc.) et des collectes rationnelles d'échantillons représentatifs de roches, de minéraux ou fossiles, avec notation soignée et scrupuleuse de leur localisation et de leur mode de gisement. Ainsi, sur le terrain, le géologue est presque exclusivement naturaliste ; parfois il opère en physicien ou en chimiste, par exemple pour des mesures de températures, des prélèvements et des analyses de gaz, d'eau...

Le géologue à pied, cloué au sol, a évidemment un champ de vision restreint. Cependant l'observation du terrain ne se limite pas à une étude à cette échelle ponctuelle ; il est nécessaire de pouvoir observer d'un seul coup d'œil des surfaces parfois très grandes de la Terre. Les moyens aériens ont en effet permis le développement de cette vision mégascopique, en particulier grâce à l'utilisation des photographies aériennes en vision stéréoscopique. Aussi une intégration meilleure et plus facile des données ponctuelles est-elle rendue possible grâce à l'observation directe de la réalité géologique à un niveau d'organisation relativement élevé. Une amélioration a encore été apportée récemment avec les prises de vues réalisées à partir des vols orbitaux.

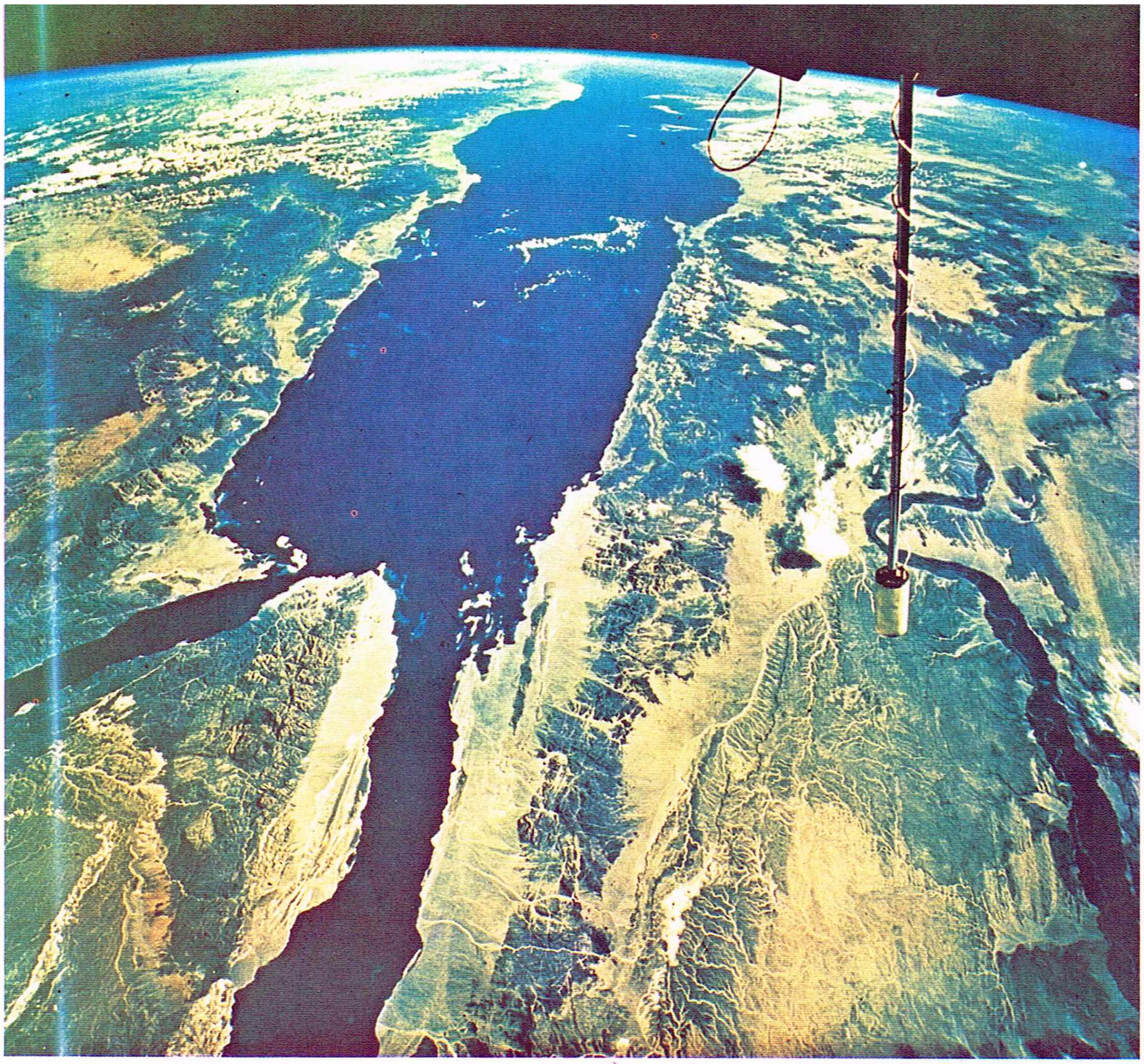

U.S.I.S.

◀ *En géologie, l'observation du terrain ne se limite pas à une étude à l'échelle ponctuelle ; il est nécessaire de pouvoir observer d'un seul coup d'œil des surfaces parfois très grandes de Terre ; les photos aériennes prises d'avion ou de satellite (ici, la mer Rouge, le sud de l'Arabie, la vallée du Nil et le Sinaï, photographiés depuis Gemini 12) ont permis le développement d'une vision mégascopique.*

Les divers résultats obtenus sont coordonnés sous la forme de plans, de coupes verticales et surtout de cartes. La carte géologique est une représentation tridimensionnelle des terrains, étant toujours établie sur un fond topographique. C'est d'abord un moyen de rassembler les observations, avec la possibilité de les relier entre elles et de saisir d'un coup d'œil la géologie générale du pays étudié.

C'est aussi un but, afin de mettre un document à la disposition de tous ceux qui ont à connaître pour leur travail la nature des terrains (mines, carrières, travaux publics, agriculture...). La plupart des pays ont entrepris l'établissement et la publication de cartes géologiques régulières, à des échelles variables, détaillées (1/80 000 et 1/50 000 en France) ou générales (1/1 000 000 en France). La collaboration internationale dans le cadre de l'UNESCO a permis la réalisation de cartes géologiques internationales et de cartes thématiques, comme la carte tectonique du monde, la carte métamorphique de l'Europe...

Le géologue reporte sur un fond topographique les faits d'observation fragmentaires, en utilisant une gamme de symboles et de couleurs. Il cherche à tracer les contours des aires occupées par les différentes formations, définies le plus souvent par leur nature lithologique et parfois par leur âge. A partir de cette carte d'affleurements, qui est objective, inventaire des résultats bruts, il établit une carte géologique qui est un modèle interprétatif obtenu par extrapolation et généralisation des informations. La valeur de ce document et plus spécialement la précision des contours dépendent de nombreux facteurs, des conditions d'affleurements, de la qualité du fond topographique, de la pratique et du soin de l'auteur. Il est évident que le modèle qui en résulte pourra être amélioré, affiné, par des observations ultérieures (on ne peut pas passer partout !) et par les études en laboratoire. A cette précision près, les contours eux-mêmes restent valables même si plus tard on doit changer l'âge d'un des terrains, l'ordre de superposition ou encore la nature d'un contact (stratigraphique, magmatique ou tectonique) entre deux unités cartographiques.

Travaux en laboratoire

On peut distinguer deux grandes catégories d'opérations dans les travaux effectués par le géologue au laboratoire : des opérations analytiques et des opérations expérimentales. Et pour mener à bien cette tâche, il doit adopter l'état d'esprit et les techniques d'un physico-chimiste.

Les échantillons collectés sur le terrain sont préparés (par exemple, analyse immédiate de leurs différents constituants) et étudiés afin de déterminer leurs propriétés

▼ *Photo aérienne de la côte méditerranéenne près de Sète ; à gauche, l'étang de Thau, parallèle à la mer, est bien visible.*

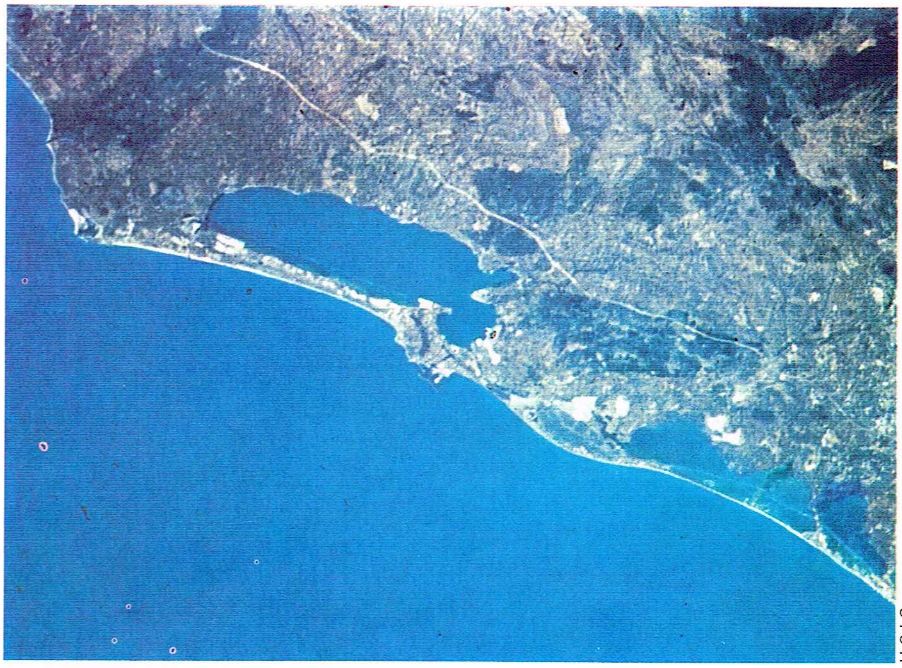

U.S.I.S.

I.G.N.

▲ *Vue aérienne de la région de Ferrals dans les Corbières (1/30 000).*

géométriques (structurales), physiques et chimiques. La qualité et la précision de ces déterminations, dont la plupart deviennent quantitatives, sont de plus en plus grandes, à l'aide d'appareils analytiques que les progrès de la technologie moderne rendent toujours plus efficaces (microscope polarisant, microscope électronique, microsondes électronique et ionique, spectromètre de masse...). Les processus géologiques sont très lents à l'échelle humaine, cette lenteur, qui résulte en grande partie de la grande taille de la Terre, étant compensée par la durée importante dont disposent ces processus pour se dérouler. Aussi est-il nécessaire de réaliser des mesures avec une extrême précision ou avec un pouvoir séparateur des plus parfaits pour compenser le manque de temps afin de mettre en évidence et de quantifier une transformation, un déplacement, une accélération...

Depuis le siècle dernier, l'expérimentation s'est largement développée dans les sciences de la Terre, dans le but de la reproduction artificielle de minéraux, de roches ou de certains phénomènes naturels (déformations, sédimentations, intrusions magmatiques...). Elle permet l'étude des mécanismes de formation dans les cas les plus simples, puis allant du simple au plus compliqué, elle généralise les lois dans le but de rechercher et d'estimer les conditions naturelles. Dans leurs travaux expérimentaux, les géologues et les minéralogistes ont à envisager des processus qui relèvent d'une échelle de grandeur généralement inconnue du physicien ou du chimiste, surtout en ce qui concerne la durée. Mais des valeurs considérables, qui excèdent l'intervalle habituellement possible de la plupart des expériences de laboratoire, caractérisent aussi les paramètres température et pression qui peuvent atteindre respectivement plusieurs milliers de degrés centésimaux et jusqu'à trois millions de bars. Les expériences de laboratoire et les modèles théoriques qu'elles permettent de déduire ne font progresser la connaissance que si elles sont constamment confrontées avec les données de terrain. Souvent on observe des écarts entre les faits de terrain et les résultats de laboratoire, qui sont dus soit à une approximation trop grossièrement simplificatrice de la nature, soit à une cinétique différente dans les deux cas. L'utilisation prudente des données expérimentales nécessite donc un incessant va-et-vient entre le terrain et le laboratoire ; c'est le reflet même de la démarche scientifique, de la méthode des modèles, qui n'est jamais linéaire.

JACQUES FABRIÈS

▼ *Carte géologique de la France.*

B.R.G.M.

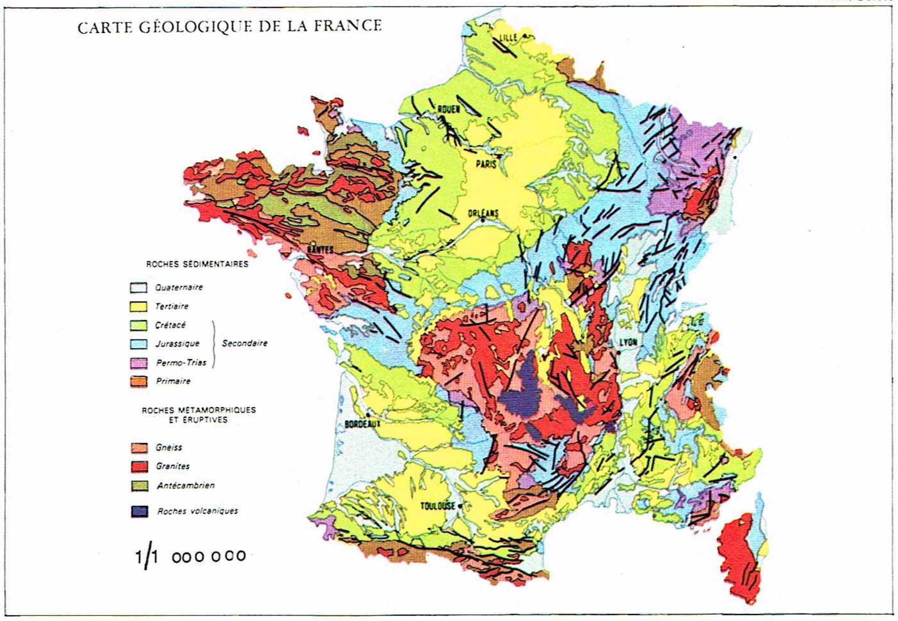

BIBLIOGRAPHIE

ADAMS F.D., *The Birth and Development of the Geological Sciences,* Douvres, 1938. - ALLÈGRE C.-J. et MICHARD G., *Introduction à la géochimie,* Paris, 1974. - AUBOIN J., BROUSSE R. et LEHMAN J.-P., *Précis de géologie,* 3 vol., Paris, 1967. - BELLAIR P. et POMEROL C., *Éléments de géologie,* Paris, 1965. - CAILLEUX A., *Histoire de la géologie,* Paris, 1961. - CARMICHAEL I.S.E., TURNER F.J. et VERHOOGEN J., *Igneous Petrology,* New York, 1974. - DEBELMAS J., *Géologie de la France,* 2 vol., Paris, 1974. - DERCOURT J. et PAQUET J., *Géologie - Objets et Méthodes,* Paris, 1974. - ERNST W.G., *Earth Materials,* New York, 1969. - FAURE G. et POWELL J.L., *Strontium Isotope Geology,* New York, 1972. - GASS I.G., SMITH P.J. et WILSON R.C.L., *Understanding the Earth,* Sussex, 1971. - GEIKIE A., *The Founders of Geology,* Londres, 1905. - GIGNOUX M., *Géologie stratigraphique,* Paris, 1960. - GILLULY J., WATERS A.C. et WOODFORD A.D., *Principles of Geology,* San Francisco, 3e éd., 1968. - GOGUEL J., *Géologie,* Encyclopédie de la Pléiade, 2 vol., Paris, 1972. - GOGUEL J., *Géophysique,* Encyclopédie de la Pléiade, Paris, 1971. - HAMILTON E.T. et FARQUHAR R.M., *Radiometric Dating for Geologists,* Londres, 1968. - HOWELL B.F., *Introduction à la géophysique,* Paris, 1969. - JUNG J., *Précis de pétrographie,* Paris, 1963. - LAMEYRE J., *Roches et Minéraux,* 2 vol., Paris, 1975. - De LAUNAY L., *la Science géologique,* Paris, 1905. - MATTAUER M., *les Déformations des matériaux de l'écorce terrestre,* Paris, 1973. - PILOT J., *les Isotopes en géologie, Méthodes et Applications,* Paris, 1974. - PIVETEAU J., *Traité de paléontologie,* 8 vol., Paris, 1957-1966. - RAGUIN E., *Géologie du granite,* Paris, 1957. - RAGUIN E., *Pétrographie des roches plutoniques dans leur cadre géologique,* Paris, 1970. - RAMSAY J., *Folding and Fracturing of Rocks,* New York, 1967. - RINNE F., *la Science des roches,* Paris, 1950. - RITTMANN A., *les Volcans et leur activité,* Paris, 1963. - ROUTHIER P., *les Gisements métallifères,* 2 vol., Paris, 1963. - ROUTHIER P. *Essai critique sur les méthodes de la géologie,* Paris, 1969. - TARLING D.H. et M.P., *la Dérive des continents,* Paris, 1973. - TERMIER H. et G., *l'Évolution de la lithosphère,* 3 vol., Paris, 1957. - TURNER F.J., *Metamorphic Petrology,* New York, 1968. - VERHOOGEN J., TURNER F.J., WEISS L.E., WAHRHAFTIG C., FYFE W.S., *The Earth, an Introduction to Physical Geology,* New York, 1970. - WINKLER H.G.F., *Petrogenesis of Metamorphic Rocks,* 3e éd., New York, 1974. - WYLLIE P.J., *The Dynamic Earth,* New York, 1971.

◀ ***La région du Fars, en Iran, photographiée à partir de Gemini 5. L'aspect tourmenté de la terre, tel qu'il nous apparaît sur cette illustration, est le résultat de l'action des forces, internes et externes, qui agissent lentement au cours du temps et qui modèlent les structures de la croûte terrestre.***

GÉOCHIMIE

Les étapes de l'histoire de la géochimie

La géochimie est la science qui s'occupe de la distribution des éléments dans la terre et des processus physico-chimiques auxquels ils prennent part. Ce terme fut utilisé pour la première fois par Schönbein en 1838, alors que les perspectives de cette nouvelle discipline n'étaient pas encore très vastes. A la fin du XVII^e siècle, on connaissait à peine 55 éléments; parmi ceux-ci, l'or, l'argent, le cuivre, le fer, le plomb, l'étain, le mercure, le soufre et le carbone étaient déjà connus à l'époque de la Renaissance et, en partie, avant le Moyen Age, voire à l'époque romaine. En effet, il s'agit d'éléments que l'on peut trouver dans les roches à l'état natif, c'est-à-dire d'éléments non combinés. Trente nouveaux éléments furent ensuite découverts par Lavoisier.

Au siècle suivant, le système périodique a été progressivement complété : entre 1800 et 1859, le rythme des découvertes fut plus lent car les anciennes méthodes ne permettaient pas d'individualiser de nouveaux éléments. Par la suite, grâce à l'application de nouvelles méthodes physiques (en 1860, Bunsen et Kirchoff utilisèrent un premier modèle de spectrographe) et aux découvertes de scientifiques comme Curie et Debierne, on arriva rapidement à compléter le tableau périodique (tableau 1), excepté certains éléments radio-actifs de très courtes périodes et des « vides » du système périodique, c'est-à-dire les éléments aujourd'hui reconnus instables à cause de la structure de leur noyau (numéros atomiques 43, 61, 85, 87). La théorie de la structure atomique permettait de prévoir l'existence des premiers et l'instabilité des seconds. En effet, les atomes ayant un noyau avec un nombre de neutrons (N) pair et un nombre de protons (Z) pair sont très stables et sont donc les éléments les plus abondants dans le milieu naturel. Les atomes avec un N impair et un Z pair ou un N pair et un Z impair sont assez stables, souvent radio-actifs; ce sont donc des éléments isotopiques généralement fréquents. Enfin, les atomes avec un N impair et un Z impair sont instables et donc rares (parmi ces derniers, se trouvent justement les « vides » du système périodique).

La géochimie, en relation directe avec la chimie et conditionnée par les progrès de cette dernière, avait donc, à cette époque, œuvré dans un domaine assez modeste. Elle consistait à faire les analyses chimiques de minéraux, de roches, d'eaux de source, d'eaux minérales, de gaz volcaniques, de fumerolles, etc. Un progrès fut accompli lorsque l'examen de tous les résultats obtenus révéla que les éléments chimiques manifestaient certaines « préférences » dans le milieu naturel. En effet, certains éléments

TAB. 1 - SYSTÈME PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII a	VIII		VIII b
1	**1** H 0,46							**2** He 1,78			
2	**3** Li 1,52 Li^{+} 0,68	**4** Be 1,12 Be^{2+} 0,35	**5** B 0,97 B^{3+} 0,23	**6** C 0,77 C^{4+} 0,16	**7** N 0,71 N^{3+} 0,16 N^{5+} 0,13	**8** O^{2-} 1,32 O 0,60 O^{6+} 0,10	**9** F^{-} 1,33 F^{7+} 0,08	**10** Ne 1,60			
3	**11** Na 1,86 Na^{+} 0,97	**12** Mg 1,60 Mg^{2+} 0,66	**13** Al 1,43 Al^{3+} 0,51	**14** Si^{4-} 1,98 Si 1,17 Si^{4+} 0,42	**15** P P^{3+} 0,44 P^{5+} 0,35	**16** S^{2-} 1,74 S 1,04 S^{4+} 0,37 S^{6+} 0,30	**17** Cl^{-} 1,81 Cl 1,07 Cl^{5+} 0,34 Cl^{7+} 0,27	**18** Ar 1,91			
4	**19** K 2,31 K^{+} 1,33	**20** Ca 1,96 Ca^{2+} 0,99	**21** Sc 1,51 Sc^{3+} 0,81	**22** Ti 1,46 Ti^{3+} 0,76 Ti^{4+} 0,68	**23** V 1,30 V^{2+} 0,88 V^{3+} 0,74 V^{4+} 0,63 V^{5+} 0,59	**24** Cr 1,25 Cr^{3+} 0,63 Cr^{6+} 0,52	**25** Mn 1,18 Mn^{2+} 0,80 Mn^{3+} 0,66 Mn^{4+} 0,60 Mn^{7+} 0,46		**26** Fe 1,24 Fe^{2+} 0,74 Fe^{3+} 0,64	**27** Co 1,25 Co^{2+} 0,72 Co^{3+} 0,63	**28** Ni 1,24 Ni^{2+} 0,69
	29 Cu 1,28 Cu^{+} 0,96 Cu^{2+} 0,72	**30** Zn 1,33 Zn^{2+} 0,74	**31** Ga 1,22 Ga^{3+} 0,62	**32** Ge 1,22 Ge^{2+} 0,73 Ge^{4+} 0,53	**33** As 1,25 As^{3+} 0,58 As^{5+} 0,46	**34** Se^{2-} 1,91 Se 1,16 Se^{4+} 0,50 Se^{6+} 0,42	**35** Br^{-} 1,96 Br 1,19 Br^{5+} 0,47 Br^{7+} 0,39	**36** Kr 2,01			
5	**37** Rb 2,43 Rb^{+} 1,47	**38** Sr 2,15 Sr^{2+} 1,12	**39** Y 1,81 Y^{3+} 0,92	**40** Zr 1,56 Zr^{4+} 0,79	**41** Nb 1,43 Nb^{4+} 0,74 Nb^{5+} 0,69	**42** Mo 1,36 Mo^{4+} 0,70 Mo^{6+} 0,62	**43** Tc Tc^{7+} 0,56		**44** Ru 1,33 Ru^{4+} 0,67	**45** Rh 1,34 Rh^{3+} 0,68	**46** Pd 1,37 Pd^{2+} 0,80 Pd^{4+} 0,65
	47 Ag 1,44 Ag^{+} 1,26 Ag^{2+} 0,89	**48** Cd 1,49 Cd^{2+} 0,97	**49** In 1,62 In^{3+} 0,81	**50** Sn^{4-} 2,15 Sn 1,40 Sn^{2+} 0,93 Sn^{4+} 0,71	**51** Sb 1,45 Sb^{3+} 0,76 Sb^{5+} 0,62	**52** Te^{2-} 2,11 Te 1,43 Te^{4+} 0,70 Te^{6+} 0,56	**53** I^{-} 2,20 I 1,36 I^{5+} 0,62 I^{7+} 0,50	**54** X 2,20			
6	**55** Cs 2,62 Cs^{+} 1,67	**56** Ba 2,17 Ba^{2+} 1,34	**57** La* 1,86 La^{3+} 1,14	**72** Hf 1,58 Hf^{4+} 0,78	**73** Ta 1,43 Ta^{5+} 0,68	**74** W 1,36 W^{4+} 0,70 W^{6+} 0,62	**75** Re Re^{4+} 0,72 Re^{7+} 0,56		**76** Os 1,35 Os^{6+} 0,69	**77** Ir 1,35 Ir^{4+} 0,68	**78** Pt 1,38 Pt^{2+} 0,80 Pt^{4+} 0,60
	79 Au 1,44 Au^{+} 1,37 Au^{3+} 0,85	**80** Hg 1,50 Hg^{2+} 1,10	**81** Tl 1,70 Tl^{+} 1,47 Tl^{3+} 0,95	**82** Pb 1,75 Pb^{2+} 1,20 Pb^{4+} 0,84	**83** Bi 1,55 Bi^{3+} 0,96 Bi^{5+} 0,74	**84** Po Po^{6+} 0,67	**85** At At^{7+} 0,62	**86** Rn			
7	**87** Fr Fr^{1+} 1,80	**88** Ra Ra^{2+} 1,43	**89** Ac** Ac^{3+} 1,18	104 —	105 —	106 —	107 —		108 —	109 —	110 —

*Lanthanides : **58** Ce 1,82 Ce^{3+} 1,07 Ce^{4+} 0,94 **59** Pr 1,81 Pr^{3+} 1,06 Pr^{4+} 0,92 **60** Nd 1,80 Nd^{3+} 1,04 **61** Pm **62** Sm^{3+} 1,00 **63** Eu^{3+} 0,98 **64** Gd^{3+} 0,97 **65** Tb^{3+} 0,93 Tb^{4+} 0,81 **66** Dy^{3+} 0,92 **67** Ho^{3+} 0,91 **68** Er 1,86 Er^{3+} 0,89 **69** Tm^{3+} 0,87 **70** Yb^{3+} 0,86 **71** Lu^{3+} 0,85

** Actinides : **90** Th 1,80 Th^{4+} 1,02 **91** Pa^{3+} 1,13 Pa^{4+} 0,98 Pa^{5+} 0,89 **92** U 1,38 U^{4+} 0,97 U^{6+} 0,80 **93** Np^{3+} 1,10 Np^{4+} 0,95 Np^{6+} 0,71 **94** Pu^{3+} 1,08 Pu^{4+} 0,93 **95** Am^{3+} 1,07 Am^{4+} 0,92

▲ ***Tableau n° 1 : système périodique des éléments (rayons des ions + selon Ahrens, 1952 ; rayons des ions — selon Goldschmidt, 1926).***

▼ ***Tableau n° 2 : classification géochimique des éléments selon Vernadsky.***

se concentrent dans l'un ou l'autre type de roches de la croûte terrestre (lithosphère) ; d'autres se trouvent concentrés dans l'atmosphère (N, Ar, Rn, He) ; d'autres, comme le carbone et l'azote, participent aux processus biologiques de la biosphère ; enfin, certains d'entre eux se concentrent particulièrement dans les eaux (hydrosphère). Le concept fondamental dégagé de ces observations fut la notion de *comportement géochimique* des éléments : celui-ci est l'aptitude naturelle d'un élément à se concentrer dans certains minéraux ou roches déterminés, ce qui correspond à des conditions de minéralisation et de pétrogenèse bien définies.

Le Russe Vernadsky (1917) proposa une classification géochimique permettant d'ordonner la diversité des tendances de chaque élément (voir tableau 2). Cette classification avait le mérite de constituer un premier regroupement, mais elle ne fut pas retenue car elle avait l'inconvénient d'être fondée sur des critères divers. En effet, dans les deux premiers groupes, les éléments étaient classés sur le critère de l'inertie chimique, c'est-à-dire l'inaptitude à former des composés. Dans les 3ᵉ et 4ᵉ groupes étaient inclus respectivement les éléments « cycliques » qui ont tendance à former des minéraux propres et ceux qui sont dispersés dans des minéraux d'autres éléments. Les autres éléments se trouvaient dans les 5ᵉ et 6ᵉ groupes, fondés sur deux critères : une propriété physique, la *radio-activité*, pour le 5ᵉ groupe, et une propriété chimique, la *valence*, pour le 6ᵉ qui comprenait les éléments des terres rares.

Un tel système de classification est peu commode : par exemple, le radon, en tant que gaz noble, peut se situer dans le premier groupe ; à cause de sa radio-activité, il peut appartenir au 5ᵉ groupe ; enfin, par son impossibilité à former des minéraux particuliers, il peut être placé dans le 4ᵉ groupe.

Goldschmidt (1928) proposa ensuite une classification uniforme, fondée sur l'affinité des éléments pour les différents matériaux qui constituent notre globe. En se fondant sur ce principe, il appela *sidérophiles* les éléments ayant des affinités avec le fer, *chalcophiles* ceux qui ont des affinités avec les sulfures, *lithophiles* les éléments qui sont associés aux silicates et enfin *atmophiles* ceux qui se trouvent dans l'atmosphère.

TABLEAU 2 : CLASSIFICATION GÉOCHIMIQUE DES ÉLÉMENTS SELON VERNADSKY (1917)

1	Gaz nobles	He, Ne, A, Kr, Xe
2	Métaux « nobles »	Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt
3	Éléments cycliques	H, Be ?, B, C, N, O, F, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ge ?, As, Se, Sr, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Te, Ba, W, Au ?, Hg, Tl, Pb, Bi
4	Éléments dispersés	Li, Sc, Ga, Br, Rb, Y, In, I, Cs
5	Éléments radio-actifs	Po, Np, Ra, Ac, Th, Pa, U
6	Éléments des terres rares	La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu

Les météorites et les premiers modèles de la planète

La composition de notre planète et, surtout, l'état dans lequel se trouve la matière en dessous de la croûte terrestre sont encore très peu connus. L'homme a exploré

l'espace sur quelques centaines de milliers de kilomètres, il a analysé la surface de la lune ; mais il a analysé des échantillons de la terre jusqu'à 7 km de profondeur seulement. En connaissant la structure des premières couches géologiques grâce aux données de la géophysique, on peut faire une extrapolation des caractères minéralogiques et pétrographiques des roches superficielles jusqu'à 30 à 40 km de profondeur. Ainsi, l'on peut dire, en optimisant, que l'on connaît la composition de 5 % de la terre par l'observation directe. Les 95 % restant sont un mystère absolu : la géophysique n'a pas fourni de critères permettant de construire des modèles de structure et de composition internes de la terre qui soient en accord avec les données physiques, géophysiques et astronomiques connues.

Les travaux fondamentaux portent sur :

— la mesure de l'accélération de la pesanteur à la surface et de la constante de gravitation permettant de déterminer la densité de la terre ;

— le mode de propagation des ondes séismiques à l'intérieur de la terre, qui indique la présence de discontinuités internes ou de changements de propriétés des matériaux traversés ;

— la vitesse de propagation des ondes, qui donne des informations sur les modules d'élasticité des matériaux traversés ;

— le flux thermique qui s'échappe de la terre et qui rend compte, en partie, de l'abondance et de la distribution des éléments radio-actifs.

Les mesures astronomiques sont particulièrement importantes :

— la constante de précession des équinoxes, à partir de laquelle on peut calculer le moment d'inertie de la terre ; ce moment donne de précieuses indications sur la répartition de la densité à l'intérieur de la terre ;

— la composition chimique et minéralogique des différents types de météorites qui sont tombées sur la terre ; Goldschmidt avait observé que les météorites rencontrées sur la terre pouvaient être divisées en trois groupes : les sidérites, les sidérolithes, et les aérolithes.

— Les *sidérites* sont constituées par un alliage de fer et de nickel ; elles représentent une portion relativement modeste des météorites d'origine sûre, c'est-à-dire que l'on a vues tomber.

— Les *sidérolithes* sont constituées, en parts égales, par un amas de fer-nickel et de silicates du type olivine.

— Enfin, les *aérolithes*, ou météorites pierreuses, sont composées presque exclusivement de silicates ; parmi celles-ci, le type le plus fréquent est représenté par les *chondrites*, composées de sphérules (chondres) d'olivine et de pyroxènes.

Les géochimistes ont émis l'hypothèse que les météorites représenteraient un fragment d'une planète solaire du début de l'évolution du système planétaire. Goldschmidt (1922) a utilisé cette hypothèse et les données sur les chondrites pour élaborer un modèle de la composition interne de la terre. Ce modèle prévoyait : un noyau, appelé *sidérosphère*, composé, par analogie aux météorites métalliques, de fer et de nickel ; une enveloppe entourant ce noyau, composée de sulfures dans sa partie la plus interne et de matériel semblable aux éclogites dans sa partie externe (analogue donc aux météorites lithoïdes pierreuses) ; enfin, une enveloppe externe superficielle composée de silicates communs, appelée *croûte*, ou *lithosphère*.

La classification géochimique moderne des éléments

A partir des analyses minéralogiques et chimiques des météorites, on a pu constater que les éléments majeurs, les éléments mineurs et même les éléments traces présentaient des affinités particulières pour l'une des trois phases minéralogiques des météorites. Goldschmidt imagina que ce phénomène pouvait se vérifier pour la distribution des éléments sur la terre, et élabora ainsi, en 1923, sa classification (tableau 3). Il sépara les éléments en quatre groupes : sidérophiles, chalcophiles, lithophiles et atmophiles. Naturellement, suivant les conditions physico-chimiques du milieu, certains éléments peuvent se placer dans l'un ou l'autre groupe. C'est le cas du chrome, qui est fortement lithophile en milieu oxydant et qui, en milieu réducteur, se comporte comme un élément chalcophile. Le comportement minéralogique d'un élément

TAB. 3 - CLASSIFICATION GÉOCHIMIQUE DES ÉLÉMENTS EN RELATION AVEC LE SYSTÈME PÉRIODIQUE

éléments lithophiles
éléments atmophiles
éléments chalcophiles
éléments sidérophiles

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	A
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo		Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi			
			Th		U												

I.G.D.A.

TAB. 4 - COMPOSITION MOYENNE DES CHONDRITES CARBONÉES DE TYPE I (Orgueil et Ivuna)

ÉLÉMENTS MAJEURS (% en poids)		ÉLÉMENTS TRACES (rapportés à Si = 10^6)			
H_2O	19,29	F	2200	La	0,36
C	3,97	Na	$6,40 \times 10^4$	Ce	1,17
Matière organique	5,53	P	$1,27 \times 10^4$	Pr	0,17
Na_2O	0,74	S	$5,05 \times 10^5$	Nd	0,77
MgO	15,96	Cl	2200	Sm	0,23
Al_2O_3	1,64	K	3540	Eu	0,091
SiO_2	22,63	Sc	33	Gd	0,55
P_2O_5	0,35	Ti	2300	Tb	0,037
K_2O	0,07	Cr	$1,24 \times 10^4$	Dy	0,36
CaO	1,56	Co	2300	Ho	0,09
TiO_2	0,07	Zn	930	Er	0,22
Cr_2O_3	0,34	Ge	135	Tm	0,035
MnO	0,22	Rb	7,1	Yb	0,21
FeO	10,42	Sr	58,4	Lu	0,035
FeS	16,73	Y	4,6	Hg	11,5
CoO	0,06	Cd	2,37	Tl	0,18
NiO	1,29	Cs	0,37	Pb	1,6
		Ba	4,7	Bi	0,17
				Th	0,076
				U	0,028

I.G.D.A.

◀▲ ***Ci-dessus, tableau n° 3 : classification géochimique des éléments en relation avec le système périodique d'après Goldschmidt. Ci-contre, tableau n° 4 : composition moyenne des chondrites carbonées de type 1 (Orgueil et Ivuna).***

ne doit donc pas être confondu avec son comportement géochimique. C'est, par exemple, le cas du thallium, dont les minéraux les plus fréquents sont des sulfures mixtes, mais qui se trouve également en substitution du potassium dans les minéraux potassiques.

Au total, le comportement géochimique des éléments est fortement influencé par la structure électronique des atomes, comme on peut le voir sur le tableau n° 3 montrant le caractère des éléments en fonction de leur position dans le tableau périodique. Le volume d'un atome est, par conséquent, un facteur important du caractère géochimique des éléments.

La genèse de la terre

Notre planète s'est très probablement formée dans la nébuleuse solaire, par aggradation à partir d'une nébuleuse primitive froide constituée de glace et de gaz. La composition chimique de cette nébuleuse primitive a été estimée d'après les concentrations des éléments dans le soleil et dans les météorites chondritiques carbonées de type 1. En effet, ces météorites sont très oxydées et riches en gaz, ce qui correspond à ce que l'on pourrait attendre de la composition de la nébuleuse primitive. Cette hypothèse génétique de notre planète est soutenue par trois considérations :

— les concentrations des éléments dans l'atmosphère solaire actuelle, qui sont le reflet assez direct de la composition de la nébuleuse solaire primitive ;

— l'origine primitive, suggérée par Urey (1953), des météorites chondritiques carbonées qui avaient, pour ainsi dire, conservé les concentrations primordiales des éléments ;

— la composition de ces chondrites, qui est en parfait accord avec les concentrations théoriques primordiales des éléments dans le soleil, estimées par la théorie

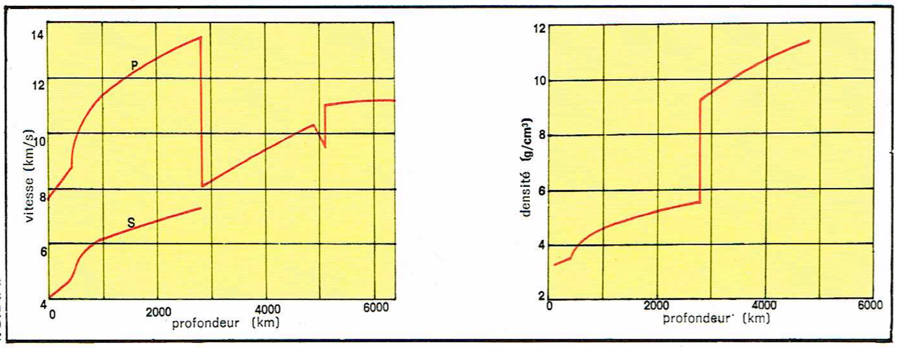

I.G.D.A.

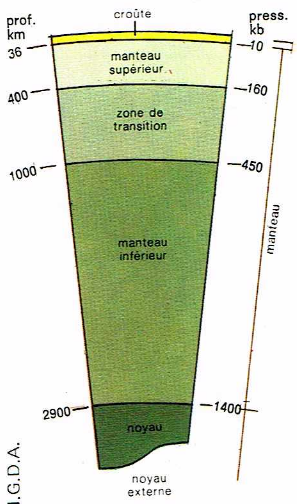

I.G.D.A.

▲ *En haut, à gauche : diagramme des vitesses des ondes P et S à l'intérieur de la terre (abscisse : profondeur [km]; ordonnée : vitesse [km/s]). A droite : diagramme de la variation de la densité à l'intérieur de la terre (abscisse : profondeur [km]; ordonnée : densité [g/cm³]). En bas, représentation schématique de la structure interne de la terre (noyau, manteau, croûte).*

de la nucléosynthèse. Cette théorie suppose que tous les éléments de numéro atomique supérieur à 1 peuvent dériver, par réaction thermonucléaire, de l'atome d'hydrogène (proton). D'autres éléments et isotopes (deutérium, ^2H, hélions, ^3He et ^4He) peuvent prendre naissance à partir de l'interaction de protons (combustion de l'hydrogène). Par interaction de particules α à température élevée (combustion de l'hélium) et d'autres réactions toujours plus complexes, il est possible de former les autres éléments à partir de l'hydrogène « générateur ».

La question se pose de savoir comment la composition actuelle de la terre dérive de celle de la nébuleuse primitive. Il est très probable que la fugacité sélective des substances a dû jouer un rôle important dans la perte des gaz (méthane, eau, ammoniac, etc.). A haute température, le matériel primitif a dû être soumis à des conditions très réductrices, ce qui a provoqué le passage de Fe, Ni et Si de l'état oxydé à l'état métallique et la perte des substances volatiles.

La structure interne et la composition de la terre

Les mesures géophysiques

Les séismes donnent naissance à des ondes de différents types, qui, en se propageant dans le sous-sol, subissent des déviations et des ralentissements quand elles passent d'une zone à l'autre, zones différenciées par l'état d'agrégation et la composition du matériel. Il y a trois types d'ondes, dont deux sont plus importants : les *ondes P (primaires)*, qui sont les plus rapides et se transmettent comme des vibrations dans la direction de propagation (comme les ondes sonores); les *ondes S (secondaires)*, qui sont les plus lentes et se transmettent comme des vibrations transversales par rapport à la direction de propagation (comme les ondes lumineuses).

Chaque fois que les ondes P et S traversent des couches de matériaux de densités différentes, leurs vitesses de propagation varient. La figure ci-dessus donne une idée de la façon selon laquelle les brusques changements de vitesse séismique signalent la présence de discontinuités. Ainsi, à une profondeur de 35-40 km à partir de la surface de la terre, il existe une première discontinuité, appelée de Mohorovicic, puis une seconde plus marquée, dite de Gutenberg, se situant à 2 900 km de profondeur; enfin, on en remarque une troisième située à 5 100 km de profondeur.

Ces données séismiques, complétées par d'autres données gravimétriques et astronomiques, permettent de construire le graphique de la variation de la densité à l'intérieur de la terre; les résultats sont concordants avec ceux du premier graphique. Grâce à ces données, la terre peut grossièrement être divisée en zones concentriques : atmosphère, hydrosphère, lithosphère, ou croûte, manteau et noyau.

Le noyau

Les travaux de plusieurs auteurs attribuent au noyau une masse représentant environ 31 % à 32 % de celle de la terre, le reste étant distribué entre le manteau et la croûte. Généralement, par analogie avec la composition des météorites de type sidérite, on pense que le noyau est formé d'un alliage de fer et de nickel. Il y a une vingtaine d'années, Ramsey a émis l'hypothèse que la discontinuité entre le noyau et le manteau représenterait seulement le passage d'un état physique de la matière à un autre, sans changement de composition chimique. Il n'existerait entre les deux couches qu'une transition de faciès isochimique, provoquée par les très fortes pressions qui s'exercent sur les minéraux constituant le manteau, c'est-à-dire l'olivine et les pyroxènes.

Des expériences de laboratoire effectuées après 1960 ont montré qu'il était extrêmement improbable que le matériel du manteau, constitué essentiellement de Mg, Si et O, fût modifié à très hautes pressions au point de justifier une densité et une vitesse séismique égales à celles enregistrées pour le noyau. En effet, de telles transformations entraînent une augmentation de la densité de 20 % à peine et le type de liaison entre les éléments doit être covalent; or, il est très probable que les liaisons ont un caractère ionique. En l'état actuel de nos connaissances, il n'est pas possible d'expliquer une augmentation de la densité de 65 % sans changement de la composition chimique : l'hypothèse de Ramsey paraît donc devoir être écartée.

Que se passerait-il si la composition de la terre dérivait de la composition de la nébuleuse primitive ou de celle d'une chondrite de type primitif?

Dans le tableau 6, la colonne 1 représente la composition chimique primitive oxydée (chondrite). A partir de ces résultats on a réparti dans la colonne 2 les éléments constitutifs en deux lots : ceux supposés former le manteau en haut, et ceux formant le noyau en bas. La quantité de nickel et une quantité proportionnelle de fer ont été diminuées de manière que le rapport FeO/FeO + MgO, observé dans les météorites pierreuses, soit respecté. Ainsi le rapport des analyses respectives manteau-noyau est de 73,5/26,5. Pour obtenir le rapport réel de masse de 69/31 (colonne 3) il faut retrancher d'autres éléments de la partie supérieure du tableau et les ajouter à la partie inférieure. En l'occurrence, il paraît nécessaire de transférer une quantité suffisante de silicium car, après le fer et le nickel, c'est l'élément le plus facilement réductible à l'état métallique. Il faut admettre que le noyau contient

TABLEAU 5 : VOLUME ET MASSE DES ZONES CONCENTRIQUES DE LA TERRE

	Épaisseur (km)	Volume (× 10^{27} cm^3)	Densité moyenne (g/cm^3)	Masse (× 10^{27} g)	Masse %
Atmosphère	—	—	—	0,000005	0,00009
Hydrosphère	3,80*	0,00137	1,03	0,00141	0,024
Croûte	17*	0,008	2,8	0,024	0,4
Manteau	2 883	0,899	4,5	4,016	67,2
Noyau	3 471	0,175	11,0	1,936	32,4
Terre totale	6 371	1,083	5,52	5,976	100,0

* = valeur moyenne.

TAB. 6 - ESTIMATION DE LA COMPOSITION DE LA TERRE A PARTIR DE CELLE DES CHONDRITES CARBONÉES DE TYPE I

	1	2	3	4
SiO_2	33,32	35,85	29,84	43,25
MgO	23,50	25,19	26,29	38,10
FeO	35,47	6,14	6,38	9,25
Al_2O_3	2,41	2,59	2,69	3,90
CaO	2,30	2,47	2,57	3,72
Na_2O	1,10	1,18	1,23	1,78
NiO	1,90	—	—	—
	100,00	73,52	69,00	100,00
Fe		24,88	25,87	
Ni		1,60	1,66	
Si		—	3,47	
		26,48	31,00	

I.G.D.A.

11 % (en poids) de silicium métallique en plus du fer et du nickel. Mais pourquoi ne s'agirait-il pas du magnésium ou du soufre au lieu du silicium ? D'une part, l'oxyde de Mg est plus difficilement réductible que celui de Si, à pression et température égales. D'autre part, étant donné la densité du noyau, il faudrait 15 % en poids de soufre, ce qui supposerait que pratiquement tout le soufre disponible du matériel primitif a été capturé par la terre : compte tenu de la très grande fugacité du soufre, cette hypothèse est peu vraisemblable. Le silicium, capable de former des solutions solides avec le fer et trouvé à l'état métallique dans les chondrites, doit être considéré comme formant très probablement le troisième composant du noyau.

Le manteau

La *discontinuité de Mohorovicic,* plus simplement appelée *Moho,* sépare la croûte terrestre hétérogène du manteau, lequel apparaît beaucoup plus homogène. Les vitesses des ondes séismiques permettent de distinguer trois zones dans le manteau : un manteau inférieur, épais de 1 900 km, une zone intermédiaire de transition, épaisse de 600 km, et un manteau supérieur, d'une épaisseur de 350 à 400 km, appelé *upper-mantle* par les Anglo-Saxons.

Le manteau inférieur est mal connu. On suppose que la variation des propriétés séismiques dans la zone de transition est due à une modification de l'état solide de l'olivine. Cette modification, à très fortes pressions, entraînerait une augmentation de la densité de l'ordre de 9 %, proportion qui est insuffisante pour expliquer l'augmentation réelle de 20 % observée entre manteau inférieur et supérieur.

La composition minéralogique probable du manteau supérieur serait la suivante : olivine, pyroxènes, grenats et parfois amphiboles. Parmi les roches de la surface terrestre, deux types correspondent à cette composition minéralogique : les *péridotites,* roches très ferromagnésiennes composées d'olivine et de pyroxènes, et les *éclogites,* roches ferro-magnésiennes (chimiquement équivalentes aux basaltes) mais composées de pyroxènes et de grenats.

En fait, ces roches correspondent à deux phénomènes bien différents : les péridotites sont des roches intrusives formées à haute température ; les éclogites proviennent, pour ainsi dire, de la transformation métamorphique de basaltes sous de hautes pressions.

Ces observations suggèrent deux hypothèses sur la nature du manteau supérieur :

— le manteau supérieur aurait une composition extrêmement ferro-magnésienne (ultramafique ou ultrabasique), analogue à celle d'une péridotite. Le Moho représenterait donc un changement chimique par rapport au basalte qui constitue la base de la croûte ;

— le manteau supérieur serait une éclogite, c'est-à-dire seulement mafique (basique), et le Moho ne représenterait qu'une transformation physique sans changement de composition chimique ; on aurait une transition de faciès isochimique basalte — éclogite.

Si la discontinuité de Mohorovicic représente seulement un changement de phase (seconde hypothèse), les perturbations thermiques qui se produisent sous la croûte pourraient causer les transformations réciproques éclogite — basalte, transformations qui produiraient les bombements et effondrements de la croûte ; de plus, les éclogites donneraient naissance au magma basaltique, ce qui expliquerait l'origine de certains volcans comme ceux d'Hawaï, sans doute alimentés par un magma primaire. Cependant, si cette hypothèse est exacte, le flux thermique devrait être plus élevé aux endroits où la croûte est plus mince (sous les océans) ; or, il est relativement constant. Ringwood et Green ont déterminé expérimentalement les domaines de pression dans lesquels basalte et éclogite sont respectivement stables. Ils en ont déduit qu'il faut une épaisseur d'au moins 20 km pour que la transformation puisse se réaliser, ce qui semble trop important pour expliquer la coupure aussi nette que constitue le Moho. D'autre part, la densité des éclogites (3,55 g/cm^3) est supérieure à celle que l'on observe pour le manteau (3,3 à 3,4 g/cm^3), alors que les roches ultramafiques de type péridotite ou dunite ont une densité qui correspond à ces dernières valeurs. De plus, par rapport aux roches ultrabasiques, les éclogites sont des roches extrêmement rares à la surface de la terre.

Au contraire, la répartition géographique des péridotites est un argument en faveur de la première hypothèse. Les péridotites de type alpin sont intrusives en bordure des nappes. Généralement, les péridotites sont intrusives au niveau des axes correspondant au maximum de déformations des couches, ou au voisinage des grandes failles qui s'étendent sur plusieurs centaines de kilomètres. De telles structures ont un développement en profondeur proportionnel à celui de la surface et rejoignent donc le manteau, qui se situe environ à 40 km de profondeur.

Outre qu'elles ont une densité et une vitesse séismique égales à celles mesurées pour le manteau supérieur, les péridotites se trouvent fréquemment sous forme d'enclaves dans les laves basaltiques et dans les pipes de kimberlite diamantifères d'Afrique du Sud. Beaucoup de phénomènes géologiques s'expliquent donc si l'on considère que le manteau est constitué de matériel semblable aux péridotites alpines. Cette hypothèse pose toutefois un problème géochimique : les péridotites alpines sont typiquement pauvres en calcium, sodium et aluminium, et il est difficile de comprendre comment elles peuvent donner naissance à un magma basaltique calco-alcalin. Rubey a suggéré que le manteau supérieur avait perdu ces éléments par fusion partielle et dégazages successifs. On peut alors imaginer de reconstituer la péridotite primitive non appauvrie en supposant des concentrations en Ca, Na et Al du même ordre de grandeur que dans les chondrites. Ce matériel primitif hypothétique, appelé *pyrolite,* se distingue des péridotites courantes par ses éléments mineurs et traces. Dans le milieu naturel, on rencontre très rarement des exemples d'une telle roche, qui se trouve sous forme d'enclaves particulières de péridotites dans des pipes diamantifères ou dans des basaltes. Toutefois, l'absence de pyrolites à la surface de la terre fait douter de leur existence dans le manteau. Selon Ringwood (1964) et Bullard (1962), la pyrolite primitive devrait se rencontrer dans le manteau en correspondance avec les fonds océaniques et non avec les continents. Par fusion, la pyrolite se fractionnerait en deux parties : le basalte, qui constitue le « coussin » de base de la croûte, et la péridotite résiduelle, semblable aux péridotites alpines, qui reste sur place pour constituer la partie supérieure du manteau. La composition de la pyrolite serait équivalente à un mélange de trois parties de péridotite alpine et d'une part de lave basaltique hawaïenne : le tableau 7 montre comment la composition d'un tel mélange coïncide avec celle du manteau dérivée de la composition des météorites carbonées de type I.

La croûte terrestre, ou lithosphère

La discontinuité de Mohorovicic, qui sépare la croûte terrestre du manteau, est une surface très irrégulière. Le géophysicien Pakiser a reconstitué la morphologie de cette surface de discontinuité sous les États-Unis.

La croûte terrestre, qui représente à peine 1 % de la masse totale de notre planète, constitue en fait les 99 % de notre observation directe. Elle repose sur le manteau

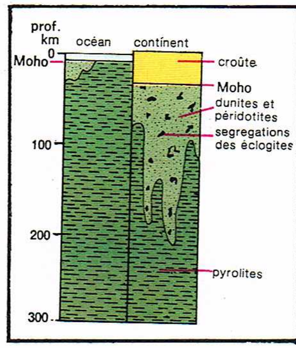

▲ ***Modèle de la zonation chimique du manteau supérieur selon Ringwood.***

◀ ***Page ci-contre, en bas à gauche, tableau n° 5 : volume et masse des zones concentriques de la terre. A droite, tableau n° 6 : estimation de la composition de la terre à partir de celle des chondrites carbonées de type 1.***

▼ ***Tableau n° 7 : estimation de la composition des pyrolites.***

TABLEAU 7 : ESTIMATION DE LA COMPOSITION DES PYROLITES

	Péridotite alpine	Lave basaltique hawaïenne, toléiite à olivine	Pyrolite péridotite 3 basalte 1	Composition du manteau dérivée de celle des chondrites (tableau 6)
SiO_2	43,98	48,72	45,16	43,25
Al_2O_3	0,25	13,40	3,54	3,90
Fe_2O_3	0,04	1,70	0,46	} 9,25
FeO	7,42	9,88	8,04	
TiO_2	0,03	2,77	0,71	
Cr_2O_3	0,57	—	0,43	
CaO	0,33	11,30	3,08	3,72
MgO	46,96	8,98	37,47	38,10
Na_2O	0,01	2,23	0,57	1,78
K_2O	—	0,58	0,13	
MnO	0,14	0,18	0,14	
CoO	0,01	—	0,01	
NiO	0,26	—	0,20	
P_2O_5	—	0,24	0,06	

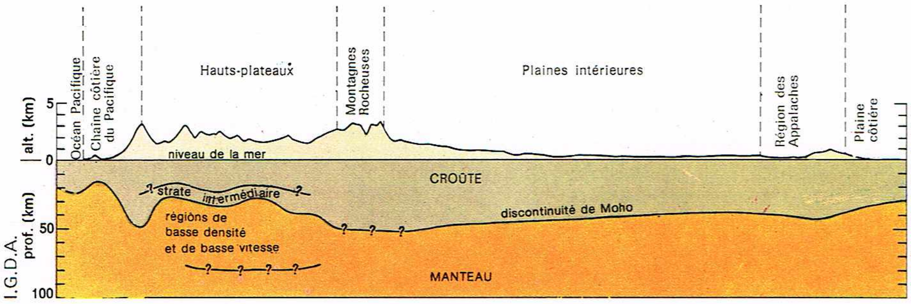

▲▶ *Ci-dessus, représentation schématique du profil de la croûte et du manteau supérieur à travers les États-Unis, d'après les données de la réfraction séismique (Pakiser). Ci-contre, rapports entre la croûte et le manteau à partir des données moyennes calculées pour la côte occidentale des États-Unis (Bullard, 1961, et Borchert, 1962).*

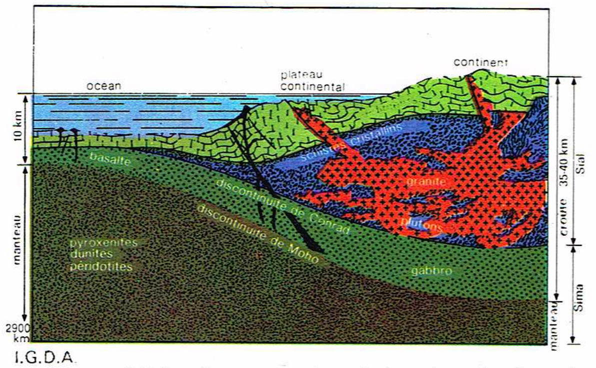

par l'intermédiaire d'un « coussin » de basalte primaire qui aurait pour limite inférieure le Moho et pour limite supérieure une autre discontinuité de second ordre, dite *discontinuité de Conrad*. Sous les océans, cette discontinuité met en contact direct le basalte primaire et la croûte de sédiments des fonds océaniques, dont l'épaisseur varie de quelques centaines à quelques milliers de mètres. Sous les continents, la discontinuité de Conrad s'enfonce jusqu'à 30 km de profondeur sous l'action des masses sialiques continentales.

Un projet international (projet Mohole) a pour programme de forer sous les océans à travers les sédiments et le basalte pour finalement atteindre le manteau. Les difficultés techniques inhérentes à un tel projet (problèmes de la résistance des tubes de forage et de la stabilité des installations) sont évidentes et, à la suite d'une première expédition, il est actuellement reporté. Il est remplacé par d'autres projets, dont l'un prévoit d'atteindre le manteau en forant la croûte au niveau de la zone orogénique des Alpes près d'Ivrée (Piémont), où la croûte est amincie par une intumescence du manteau.

▼ *Représentation cartographique montrant comment l'Afrique et l'Amérique du Sud étaient probablement réunies il y a environ 200 millions d'années. Les zones de couleur représentent les vieux blocs continentaux ou « cratons » qui ont au moins 2 000 millions d'années. Les zones blanches sont les zones actives plus récentes. Les cercles pleins représentent les roches ayant un âge d'au moins 2 000 millions d'années. Les cercles vides celles qui sont plus jeunes.*

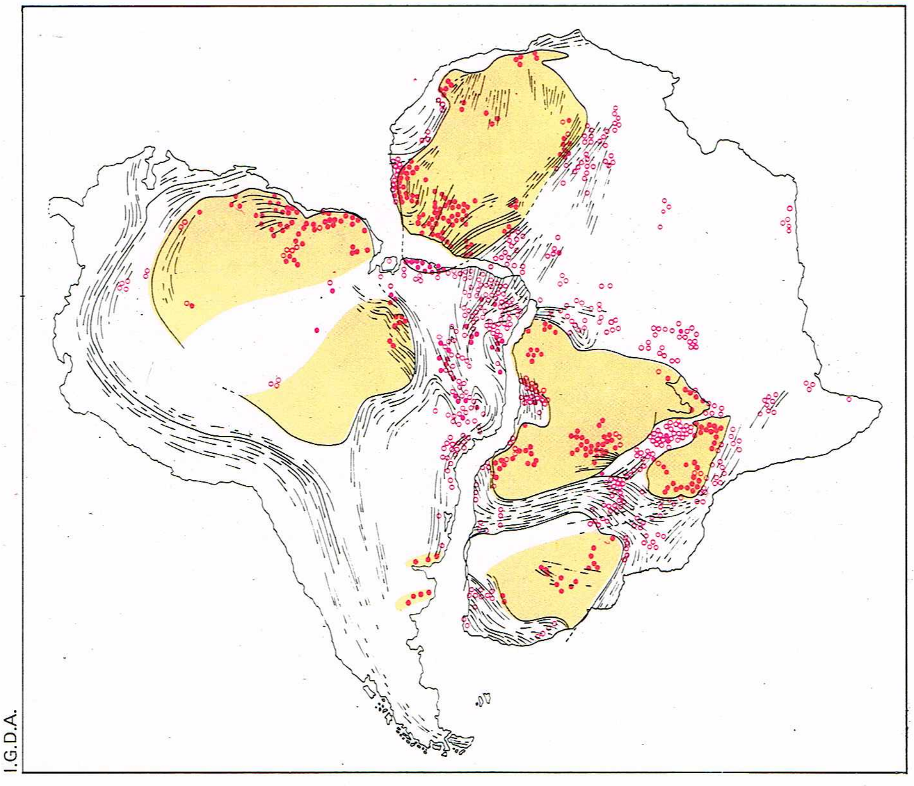

La genèse et la dynamique de la croûte primitive

Genèse

Les processus physico-chimiques qui sont à l'origine de la croûte terrestre sont encore très mal connus. Deux hypothèses peuvent être avancées :

— la croûte sialique s'est formée tardivement, par évolution géologique d'une croûte de basalte primitif ;

— elle provient directement de matériaux légers fondus, qui, à cause de leur plus faible densité, se seraient séparés en flottant au-dessus du basalte au cours de l'abaissement de la température.

Si la croûte sialique provenait de l'évolution d'une croûte basaltique uniforme (première hypothèse), il ne devrait y avoir aucune différence entre les continents et les bassins océaniques. La contraction de cette croûte au cours du refroidissement aurait provoqué des fractures qui ont permis l'extrusion de la lave et la sortie des gaz ainsi que des solutions acides résiduelles.

Selon la seconde hypothèse, une « île » formée de matériaux sialiques légers aurait constitué le *protocontinent*. Celui-ci, après plusieurs fusions successives, aurait définitivement cristallisé en une masse essentiellement quartzo-feldspathique, qui se serait scindée. Les preuves géologiques qui permettent de retenir cette seconde hypothèse sont les suivantes :

— les fonds océaniques sont constitués de basalte recouvert uniquement par une mince couche de sédiments marins ;

— les bordures des deux continents euro-africain et américain de part et d'autre de l'océan Atlantique ont des morphologies complémentaires, et il est surprenant de voir l'adaptation mutuelle de ces deux continents si on les rapproche l'un de l'autre. C'est à ce niveau que résiderait une des principales fractures subies par le protocontinent au Tertiaire ;

— la théorie de la dérive des continents, formulée par Wegener, a trouvé une nouvelle confirmation dans les mesures du magnétisme fossile (paléomagnétisme), qui montrent que les pôles magnétiques de la terre ont varié au cours des temps géologiques. D'autre part, la reconstitution des courants de convection qui existent dans le manteau supérieur et le coussin basaltique montre que la fracture entre les aires continentales a eu lieu et est encore active. Depuis, cette dérive a été confirmée ; elle est, à l'heure actuelle, estimée à environ 2 cm par an.

Dynamique

La croûte terrestre a été et est toujours soumise à une dynamique de transformation ainsi qu'à une redistribution des masses. Les chaînes de montagnes continentales sont le siège d'une érosion intense et sont arasées par l'eau et le vent. Le matériel transporté (graviers, sables, argiles) vient se déposer principalement dans la mer, où il sédimente lentement et s'accumule sur la plate-forme continentale. En conséquence, les blocs sialiques continentaux, diminuant de masse et de poids, s'enfoncent moins profondément dans le manteau, alors que, dans les zones de sédimentation intense, c'est le phénomène inverse qui se produit.

A chaque époque, d'importantes quantités de laves se sont épanchées dans la croûte terrestre ; ces laves, initialement de type basalte, peuvent se différencier en laves de plus en plus acides jusqu'à atteindre une composition rhyolitique (équivalent effusif du granite). D'autres masses de magma ne peuvent atteindre la surface et cristallisent à des profondeurs variables, donnant ainsi naissance à des corps magmatiques intrusifs, appelés *plutons*. Enfin, les autres roches, qu'elles soient sédimentaires, métamorphiques ou éruptives, sont recouvertes par de nouveaux dépôts sous lesquels elles peuvent être enfouies jusqu'à des profondeurs de quelques dizaines de kilomètres. Les minéraux primaires se trouvent alors placés dans des conditions de pression et de température très différentes et vont se transformer.

Géochimie de la lithosphère

D'après Clarke et Washington (1924), les premiers seize kilomètres de la croûte sont constitués par 95 % de roches éruptives (roches magmatiques ou ignées), 4 % de schistes (roches métamorphiques), 0,75 % de grès

et 0,25 % de calcaires et calcaires dolomitiques (roches sédimentaires). En se basant sur 5 159 analyses très précises de roches de provenances diverses, ces auteurs ont trouvé que les valeurs moyennes obtenues dans diverses régions étaient concordantes et que la composition chimique moyenne était voisine de celle des roches éruptives. Ils pensèrent donc que l'on pouvait prendre comme composition moyenne de la croûte celle des roches éruptives. Les valeurs qu'ils ont établies sont les suivantes :

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MgO
60,18	15,61	3,14	3,88	3,56

CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5
5,17	3,91	3,19	1,06	0,22

Les principales objections qui ont été faites à la proposition de ces deux auteurs concernent les critères de choix des analyses :

— la distribution géographique des échantillons analysés n'est pas homogène; il y a prédominance d'échantillons continentaux d'Amérique du Nord et d'Europe;

— l'échantillonnage n'est pas statistiquement proportionnel à l'abondance des différents types de roches;

— dans le calcul de la moyenne, il n'est pas tenu compte de l'importance qui aurait dû être attribuée aux analyses des roches les plus répandues dans la croûte.

Clarke a répondu à la première objection en démontrant que la composition de chaque continent était sensiblement identique. Les valeurs reportées ci-dessus peuvent être considérées comme représentatives de la composition moyenne des aires continentales.

La seconde objection tend à enlever une certaine valeur aux moyennes continentales car, généralement, les analyses publiées se réfèrent à des types de roches particulières, dignes d'être signalées. Toutefois, Clarke et Washington affirment avoir éliminé les valeurs qui se réfèrent à des roches inhabituelles.

Quant à la troisième objection, ils répondent qu'il n'est pas toujours exact que l'extension superficielle d'une roche soit représentative de son volume réel, c'est-à-dire de son développement en profondeur.

Les données de Goldschmidt, portant sur 77 échantillons d'un limon glaciaire de Norvège méridionale, sont :

SiO_2	Al_2O_3	$FeO + Fe_2O_3$	MgO	CaO
59,12	15,82	6,99	3,30	3,07

Na_2O	K_2O	H_2O	TiO_2	P_2O_5
2,05	3,93	3,02	0,79	0,22

Elles sont en bon accord avec les précédents résultats, surtout si l'on tient compte qu'une partie du sodium et du calcium contenus dans le limon glaciaire passe en solution dans l'eau de fusion de la glace. En se basant sur les deux dernières objections à l'hypothèse de Clarke et Washington, Poldervaart (1955) propose une autre composition moyenne basée sur des groupes d'analyses obtenus à partir des principales divisions géologiques de la terre : les fonds océaniques, les boucliers continentaux, les zones orogéniques jeunes, les plates-formes et les talus continentaux. Un tel regroupement prend en considération le poids statistique relatif des différents types de roches et donne les pourcentages suivants (H_2O déduite) :

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO
55,2	15,3	2,8	5,8	0,2

MgO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5
5,2	8,8	2,9	1,9	1,6	0,3

Cette moyenne est certainement celle qui représente le mieux la composition de la croûte avec des teneurs inférieures en SiO_2 et supérieures en Fe, Mg, Ca puisque l'on attribue plus d'importance aux fonds océaniques constitués de basalte.

◀ *Tableau n° 8 : abondance des éléments majeurs dans la croûte terrestre.*

TABLEAU 8 : ABONDANCE DES ÉLÉMENTS MAJEURS DANS LA CROÛTE TERRESTRE				
Éléments	Poids %	Atomes %	Rayons Å	Volumes %
O	46,60	62,55	1,40	93,77
Si	27,72	21,22	0,42	0,86
Al	8,13	6,47	0,51	0,47
Fe	5,00	1,92	0,74	0,43
Mg	2,09	1,84	0,66	0,29
Ca	3,63	1,94	0,99	1,03
Na	2,83	2,64	0,97	1,32
K	2,59	1,42	1,33	1,83

Parmi tous les éléments, O, Si, Al, Fe, Mg, Ca, Na et K constituent à eux seuls les 99 % de la croûte terrestre et sont appelés *éléments majeurs;* Ti, P et Mn sont des *composés mineurs;* enfin, les autres éléments sont des *éléments traces*. Selon Shaw, les limites de concentration qui définissent ces trois catégories sont :

— éléments majeurs O, Si, Al > 1 %
— éléments mineurs P, Ti, Mn < 1 %; > 0,1 %
— éléments traces Zr, Rb, V, Ce < 0,1 % ou 1 000 ppm

Le tableau 8 montre que pratiquement les 94 % en volume de la croûte terrestre sont constitués d'oxygène, les autres éléments n'en représentant que 6 %. Si l'on considère la concentration en poids, le rapport entre l'oxygène et les autres éléments majeurs est moins marqué (tableau 9).

Il est beaucoup plus difficile d'obtenir une valeur moyenne significative pour les éléments traces que pour les éléments majeurs et mineurs. Un des principaux obstacles tient au fait qu'il faut des instruments sensibles et précis, capables de doser des quantités de l'ordre de quelques grammes par tonne (partie par million = ppm). Au cours des trente dernières années, les progrès de techniques comme la spectrométrie de masse, la spectrométrie infrarouge, l'activation neutronique ou l'analyse colorimétrique ont permis de résoudre ces difficultés.

Pour obtenir le chiffre moyen du tableau 9 relatif aux éléments mineurs et en traces, il faut procéder en suivant les trois étapes énoncées ci-après.

▼ *Proportions des éléments dans la croûte terrestre.*

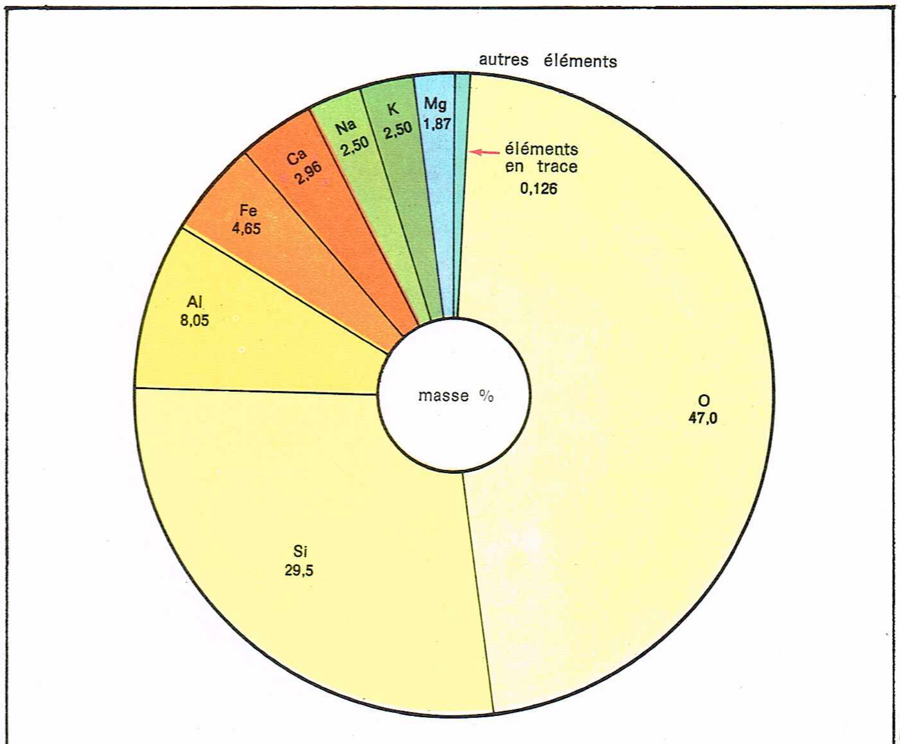

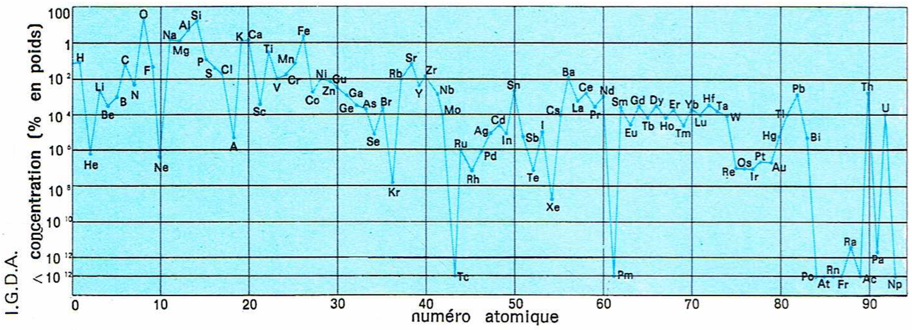

▲ *Concentrations des éléments de numéro atomique allant de 1 à 93. Les pics vers le haut représentent les éléments les plus courants (surtout de numéro atomique pair); les pics vers le bas sont les éléments plus rares.*

— établir la moyenne des principales analyses de chaque roche;

— faire des analyses de mélange de roches de différents types en prenant chacune d'elles dans des quantités proportionnelles à celles de sa répartition dans la terre;

— estimer le pourcentage d'un élément en trace en se fondant sur celui de l'élément majeur avec lequel il est géochimiquement associé. Par exemple, le Rb se trouve concentré dans les minéraux potassiques; si l'on connaît le rapport Rb/K, on peut en déduire le pourcentage de Rb à partir de celui de K. A titre de comparaison, les analyses chimiques de deux roches types, un granite G1 et une diabase W1, sont reportées dans le tableau 9.

Si l'on examine la composition de la croûte, on constate immédiatement la rareté des éléments qui ont une importance économique. Ainsi, le cuivre est plus rare que le zirconium, et le mercure nettement plus rare qu'un élément quelconque de la famille des terres rares. Au contraire, certains éléments peu familiers sont relativement plus abondants : le rubidium et le zirconium sont plus abondants que le nickel, le vanadium que l'étain, le scandium plus que l'arsenic, et le hafnium (découvert en 1923) que l'iode. De plus, certains éléments assez abondants sont systématiquement dispersés ou substitués dans des minéraux d'autres éléments; par exemple, le rubidium se substitue au potassium dans l'orthose ou les micas, le germanium est substitué dans les minéraux du silicium, le gallium dans ceux de l'aluminium. Au contraire, d'autres éléments rares forment des minéraux propres : c'est le cas du zirconium dans les zircons, etc.

▼ *Tableau n° 9 : abondance moyenne des éléments dans les roches crustales.*

TABLEAU 9 : ABONDANCE MOYENNE DES ÉLÉMENTS DANS LES ROCHES CRUSTALES (EN g/TONNES OU PPM)

Numéro atomique	Éléments	Moyenne roches crustales	Granite (G - 1)	Diabase (W - 1)
1	H	1 400	400	600
3	Li	20	24	12
4	Be	2,8	3	0,8
5	B	10	2	17
6	C	200	200	100
7	N	20	8	14
8	O	466 000	485 000	449 000
9	F	625	700	250
11	Na	28 300	24 600	15 400
12	Mg	20 900	2 400	39 900
13	Al	81 300	74 300	78 600
14	Si	277 200	339 600	246 100
15	P	1 050	390	650
16	S	260	175	135
17	Cl	130	50	
19	K	25 900	45 100	5 300
20	Ca	36 300	9 900	78 300
21	Sc	22	3	34
22	Ti	4 400	1 500	6 400
23	V	135	16	240
24	Cr	100	22	120
25	Mn	950	230	1 320
26	Fe	50 000	13 700	77 600
27	Co	25	2,4	50
28	Ni	75	2	78
29	Cu	55	13	110
30	Zn	70	45	82
31	Ga	15	18	16
32	Ge	1,5	1,0	1,6
33	As	1,8	0,8	2,2
34	Se	0,05		
35	Br	2,5	0,5	0,5
37	Rb	90	220	22
38	Sr	375	250	180
39	Y	33	13	25
40	Zr	165	210	100
41	Nb	20	20	10
42	Mo	1,5	7	0,05
44	Ru	0,01		

Les lois de la distribution des éléments

Éléments majeurs

Quand un magma basique subit la cristallisation fractionnée au cours du refroidissement, il peut donner naissance à une séquence de roches dans lesquelles les teneurs en SiO_2 croissent au fur et à mesure de l'abaissement de température. Cependant, d'une façon générale, qu'il s'agisse de roches magmatiques ou de roches métamorphiques, celles qui se sont formées à température plus basse sont les plus acides (par exemple, il s'agit du granite pour les roches magmatiques et du gneiss pour les roches métamorphiques).

Bowen a reconstitué deux séries de réactions dans lesquelles les minéraux sont disposés dans l'ordre suivant lequel ils cristallisent (tableau 10). Cet ordre devrait être considéré comme le plus fréquemment suivi, encore qu'il ne soit pas rigoureux. Les lois qui gouvernent la distribution des éléments majeurs dans une série magmatique en voie de solidification ou dans une roche métamorphique à divers stades de métamorphisme dépendent, d'une part, des propriétés physiques et chimiques des ions du matériel silicaté fondu, et, d'autre part, des propriétés cristallochimiques de ceux-ci dans le solide cristallisé. La suite réactionnelle, ou succession de cristallisation, montre que Mg, Fe^{2+} et un peu Al (dont les rayons ioniques sont respectivement de 0,66 Å, 0,74 Å et 0,51 Å) sont les premiers éléments qui entrent dans les réseaux cristallins à haute température ou les derniers qui s'ordonnent pendant la recristallisation des roches métamorphiques. Ensuite, sont entraînés le calcium et le sodium (avec un rayon ionique voisin de 1 Å), puis le potassium (1,4 Å). Le silicium fait exception : il est plus concentré dans les produits ultimes de la consolidation magmatique et est un des premiers qui cristallisent pendant le métamorphisme, à cause de son plus petit rayon ionique.

Éléments mineurs et traces

La diadochie (ou substitution, dans le réseau des minéraux, d'un ion par un autre de dimension et de charge assez proches) est considérée comme le phénomène

Liaisons	Aspect superficiel	Couleur	Clivage
métallique (liquide et cristaux)	très bon réflecteur	surtout grise avec quelques exceptions	difficile à cause de sa ductilité sauf à basse température
covalente (liquides et cristaux)	transparent ou métallique	de blanc à gris	assez bon
ionique (liquides et cristaux)	transparent ou coloré non métallique	très variable	très bon

responsable de la distribution et de l'incorporation des éléments traces dans les minéraux. Les premières règles relatives à la substitution furent énoncées par Goldschmidt.

— Lorsque deux ions de rayons ioniques et de charges identiques sont en compétition pour occuper un site, leur teneur dans le minéral sera proportionnelle à leur teneur dans le milieu. Les éléments mineurs sont camouflés par les majeurs. Par exemple, le Cr^{3+} (0,63 Å) est camouflé par le Fe^{3+} (0,64 Å), le Ge^{4+} (0,53 Å) par le Si^{4+} (0,42 Å).

— Si les deux ions ont des charges identiques mais des rayons différents, c'est le plus petit qui rentre dans la structure.

— Si l'ion le plus chargé est un élément mineur, il est capturé par le minéral ; il apparaîtra dans les minéraux qui cristallisent les premiers. Si c'est un élément majeur, les éléments mineurs se trouveront dans les minéraux cristallisant tardivement.

Les progrès des études cristallochimiques ont montré que la substitution, bien qu'importante, n'était pas la seule forme de distribution des éléments traces. Il est pratiquement impossible d'envisager la substitution avec les seules règles de Goldschmidt, et les exceptions sont souvent dues au type de liaisons entre les atomes.

Certains géochimistes modernes, comme W. S. Fyfe, D. M. Shaw, H. Ramberg et L. H. Ahrens, ont démontré que la charge et la dimension des ions ne peuvent, en aucun cas, être les seuls facteurs réglant la substitution des éléments. Selon ces auteurs, les facteurs les plus importants seraient :

— les propriétés cristallochimiques des éléments, c'est-à-dire les types de liaisons, les dimensions des ions, la valence et les caractéristiques thermodynamiques ;

— les variations de structure, de coordinence ou de composition qui peuvent exister dans les minéraux ;

— les conditions physico-chimiques dans lesquelles a cristallisé le minéral (température, pression, rapports de concentrations entre les éléments composant la roche, vitesse de formation et de croissance des germes de cristallisation).

Types de liaisons dans les minéraux de la lithosphère

Les types de liaisons les plus fréquents dans les minéraux de la lithosphère sont : la liaison métallique, la liaison covalente ou homopolaire, la liaison ionique ou hétéropolaire et les liaisons résiduelles ou de Van der Waals (cette dernière ayant peu d'importance).

Dans la *liaison métallique,* les centres (noyaux) des atomes sont relativement proches, et les électrons appartenant aux deux atomes liés n'ont pas de position fixe, mais sont libres de se déplacer à travers la structure du minéral métallique, qui, par conséquent, peut être un bon conducteur. C'est le cas des Fe, Cu, Ag natifs ainsi que, dans une moindre mesure, des sulfures simples comme la pyrite (FeS_2) et la pyrrhotine (FeS).

TABLEAU 10 · SUITE RÉACTIONNELLE DE BOWEN

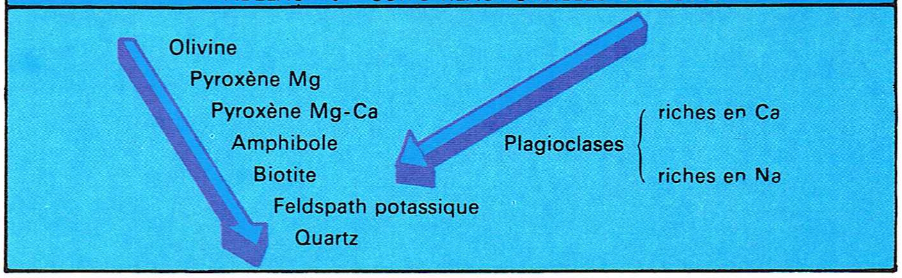

▲ *Tableau n° 10 : suite réactionnelle de Bowen.*

Dans la *liaison covalente,* les noyaux des atomes liés sont plus éloignés que dans la liaison métallique : leurs électrons occupent une position fixe dans la structure et ainsi ne peuvent s'éloigner, même sous l'action d'un champ électrique. Les substances qui possèdent uniquement des liaisons covalentes se comportent donc comme de mauvais conducteurs thermiques et électriques. C'est, par exemple, le cas du quartz, du diamant, de l'hématite et du corindon.

Dans la *liaison ionique,* les noyaux des atomes qui constituent le minéral sont encore plus distants que dans la liaison covalente et les électrons des orbitales les plus externes, au lieu d'être partagés entre les deux atomes voisins, participent au nuage électronique d'un seul des deux atomes. Dans ce cas, la nature de la force de liaison n'est pas une orbitale électronique mais la force électrostatique entre deux ions de charges différentes, positive et négative. Dans l'ensemble de la structure électronique, les électrons occupent des positions rigoureusement fixes ; par conséquent les minéraux ioniques n'ont pas de conductibilité électrique. Les solutions aqueuses de substances ioniques comme le sel gemme sont conductrices, mais ce sont des ions chargés Na^+ et Cl^- qui permettent le transport de l'électricité, et non les électrons, comme dans les métaux. Le tableau 11 indique les propriétés des matériaux naturels en fonction des liaisons entre les atomes qui les constituent.

En réalité, dans la plupart des minéraux de la lithosphère, les liaisons entre constituants doivent être considérées comme hybrides, c'est-à-dire comme des liaisons intermédiaires métallique-covalente ou covalente-ionique. D'une façon générale, on appelle liaison *semi-métallique* tous les stades intermédiaires entre liaison métallique et covalente, et liaison *semi-ionique* les stades qui se situent

▼ *Tableau n° 11 : effets des liaisons métalliques, covalentes et ioniques.*

TABLEAU 11 : EFFETS DES LIAISONS MÉTALLIQUES COVALENTES ET IONIQUES

ensité	Dureté	Point de fusion	Compressibilité	Vapeur	Conductivité électrique et thermique	Propriétés optiques	Viscosité	Structure	Exemples
vée		moyen	faible	atomique (rarement en agrégats de quelques molécules)	bon conducteur de l'électricité et de la chaleur	opaque dans le spectre visible	liquides peu visqueux	structure simple à coordination élevée (12)	métaux natifs : or, argent, cuivre
oyenne	cristaux fragiles et durs	élevé	moyenne	atomique (rarement en agrégats de quelques molécules)	bon isolant de l'électricité et de la chaleur	transparent dans le spectre visible réfraction élevée	liquides assez visqueux	structure simple à coordination faible ou moyenne (3, 4,6)	corindon, diamant, quartz, cassitérite
oyenne	cristaux fragiles	moyen	élevée	atomique ou molécule di-atomique	cristaux = bons isolants liquides = bons conducteurs (conducteurs électrolytiques)	transparent dans le spectre visible réfraction faible	liquides peu visqueux	structure simple ou complexe à coordination variable	sel gemme, sylvite, fluorine

TABLEAU 12 : SUITE DE MINÉRAUX CLASSÉS SELON LE TYPE DE LIAISONS HYBRIDES

Ag (natif)	Cu (natif)	Fe (fer)	MÉTALLIQUE
Ag_3Sb (dyscrasite)	Bi (natif)	FeS (pyrrhotine)	
Ag_2Te (hessite)	As (natif)	FeS_2 (pyrite)	↕
Ag_2S (argentite)	Te (natif)	Fe_3O_4 (magnétite)	
Ag_3AsS_3 (proustite)	S (natif)	Fe_2O_3 (hématite)	
$Ag_2S \cdot As_2S_3$ (smithite)	C (diamant)		
SiO_2 (quartz)			
$NaAlSi_3O_8$ (albite)			COVALENTE
$MgSiO_3$ (enstatite)			
Mg_2SiO_4 (forstérite)			↕
$CaF_2 \cdot 3Ca_3P_2O_5$ (apatite)			
$CaCO_3$ (calcite)			
CaF_2 (fluorine)			
NaCl (sel gemme)			IONIQUE

▲ *Tableau n° 12 : suite de minéraux classés selon le type de liaisons hybrides.*

entre liaison covalente et ionique. La liaison semi-ionique entre l'oxygène et les métaux est celle qui prédomine dans les silicates, les phosphates et les carbonates.

La liaison chimique a donc des caractéristiques intermédiaires entre les deux types de liaisons idéales, ionique et covalente, qui contribuent respectivement à former la structure réelle. Des tentatives diverses sont faites, à l'heure actuelle, pour exprimer quantitativement le pourcentage de ces contributions. La meilleure de celles-ci, faite par Pauling, est basée sur l'électronégativité des atomes (l'électronégativité exprime la capacité d'un éléments à attirer les doublets électroniques des liaisons). Povarennykh (1956) a construit une courbe empirique par laquelle il est possible d'évaluer le pourcentage de liaisons ioniques en fonction de la différence d'électronégativité des atomes liés. L'équation de cette courbe a été trouvée par Smith et Welles :

$$\% \text{ de liaisons ioniques} = 16\,\Delta x + 3{,}5\,\Delta x^2$$

(Δx est la différence d'électronégativité des atome sliés).

En règle générale, on peut dire que le caractère d'une liaison est d'autant plus ionique que la différence d'électronégativité entre le métal et l'oxygène est plus grande, soit, selon Ringwood, quand l'électronégativité du métal est plus faible. Par exemple, on trouve, par ordre décroissant du degré d'ionicité, les liaisons : K-O (69 %) ; Na-O (65 %) ; Ca-O (62 %) ; Mg-O (55 %) ; Al-O (46 %) ; Si-O (37 %) ; H-O (29 %) ; Zn-S (20 %) ; Cu-S (13 %).

Le géochimiste Ahrens a proposé d'utiliser le potentiel d'ionisation du métal pour évaluer le degré d'ionicité d'une liaison. Le potentiel d'ionisation est le travail nécessaire pour ajouter ou soustraire un électron à un atome et ainsi le transformer en ion. Plus un élément sera électronégatif, plus son potentiel d'ionisation sera faible et il formera une liaison d'autant plus ionique avec l'oxygène. Cependant, les propriétés physico-chimiques que nous venons de citer ne permettent pas, à elles seules, de prévoir le comportement géochimique des éléments. En effet, les déductions que l'on peut en tirer sont souvent en contradiction avec celles qui découlent des trois règles de la substitution.

Étude géochimique des éléments substitués

Fe^{2+}, Co^{2+}, Ni^{2+}

Les comportements géochimiques du cobalt et du nickel sont voisins ; ces ions ont des dimensions comprises entre celles du Mg^{2+} et du Fe^{2+}. Les potentiels d'ionisation de Fe^{2+}, Co^{2+} et Ni^{2+} sont respectivement : 2,67, 2,78 et 2,90. Leurs électronégativités sont 1,6, 1,7 et 1,8 ; ceci indique un pourcentage croissant de covalence des liaisons métal-oxygène dans l'ordre Fe-Co-Ni, qui devrait être celui d'entrée dans les réseaux cristallins. Mais si l'on se fonde uniquement sur les dimensions respectives des ions (0,75, 0,72 et 0,69 Å), l'ordre devrait être inverse, c'est-à-dire Ni, Co, Fe. Les points de fusion des oxydes indiquent un pourcentage d'ionicité croissant pour les liaisons Fe-O, Co-O, Ni-O que l'on ne peut expliquer ni en termes d'électronégativité, ni en termes de potentiel d'ionisation mais qui est en accord avec les prévisions basées sur la mesure des rayons ioniques.

En réalité, on constate que le Ni entre avant le fer dans les minéraux ferrifères, mais après le Mg dans les minéraux magnésiens. Nous avons vu que le Co et le Ni sont concentrés dans les roches basiques et ultrabasiques avec le Mg et le Fe. Ainsi, dans l'olivine $(Mg, Fe)_2SiO_4$, le terme magnésien pur Mg_2SiO_4 est celui qui cristallise en premier, alors que le terme ferrifère cristallise plus tardivement. Dans les solutions solides intermédiaires où ces deux extrêmes apparaissent, le rapport Ni/Co diminue à partir de l'olivine magnésienne jusqu'à l'olivine ferrifère.

Al^{3+}, Ga^{3+}, Fe^{3+}

Les études géochimiques laissent prévoir un affaiblissement progressif des liaisons métal-oxygène dans l'ordre Al, Ga, Fe. Le gallium et l'aluminium ont la même électronégativité ; théoriquement, le gallium doit être considéré comme camouflé dans les minéraux de l'aluminium. En réalité, ses variations de concentration dans les minéraux et les roches sont très faibles, et le couple Ga-Al n'est pas un bon exemple de camouflage car ces deux éléments diffèrent sous bien des aspects : le Ga est plus grand que l'Al, il forme une liaison plus covalente que celui-ci, et entre ainsi facilement dans les sulfures, surtout dans la blende.

Le gallium est plus proche du fer par ses dimensions et la liaison Ga-O est plus ionique que la liaison Fe-O ; d'après les potentiels d'ionisation, il semblerait que les deux liaisons aient le même degré d'ionicité. Ainsi, théoriquement, le Ga^{3+} devrait avoir la possibilité d'occuper la position du fer trivalent : en effet, il substitue le fer dans la magnétite.

Autres formes de dispersion des éléments en trace

En dehors de la substitution, il existe d'autres formes de dispersion des éléments en trace dans les minéraux. Des corpuscules dispersés, pouvant atteindre la dimension de microcristaux, peuvent se séparer pendant le refroidissement d'un minéral dans lequel ils forment une solution solide à température plus élevée, c'est-à-dire qu'ils y seront en substitution isomorphique. Ou bien, de minuscules cristallites de minéraux de composition simple, formés en premier, se trouveront englobés dans des cristaux d'un autre minéral ayant cristallisé par la suite.

Par exemple, à haute température, le zinc peut substituer le fer ou le magnésium dans des minéraux comme la biotite ou l'amphibole dans les roches granitiques. De la même façon, le molybdène peut entrer dans le réseau des plagioclases. Toutefois, ces solutions solides ne sont stables qu'à haute température et elles peuvent difficilement exister dans les conditions thermodynamiques de la surface de la terre. La preuve en est que le zinc contenu dans les biotites est facilement extrait par l'acide chlorhydrique sans que le réseau des minéraux soit attaqué. Le pourcentage de la teneur totale de zinc lessivé au cours de cette attaque chlorhydrique varie de 67 % à 94 %. La majeure partie de cet élément n'est donc pas liée au réseau de la biotite mais se trouve à l'état dispersé. Cette ségrégation des corpuscules rend compte de la présence d'impuretés non structurales qui doivent, après ségrégation, rester dans le minéral-hôte comme une phase cristalline indépendante et séparée. Cela peut avoir lieu de deux façons :

— le corpuscule cristallin de l'impureté croît et se distribue de façon régulière et ordonnée dans la matrice cristalline : on parle d'*épitaxie* ou de *croissance isostruc-*

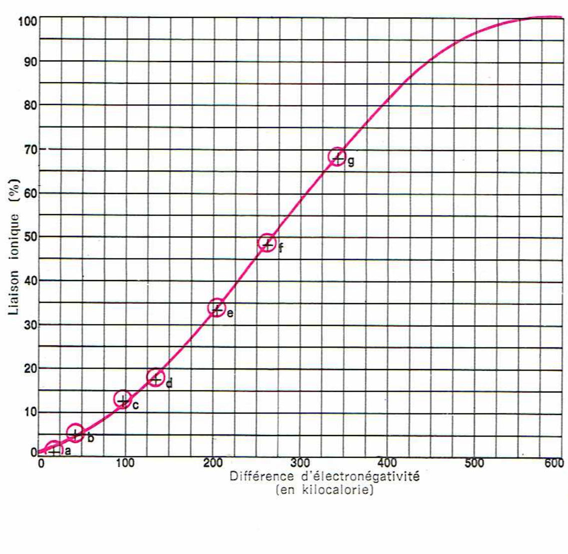

▶ *Courbe empirique construite par Povarennykh (1956) qui montre comment le pourcentage de liaison ionique, dans une liaison hybride ionique-covalente, est proportionnel à la différence d'électronégativité entre les deux ions de la liaison. A partir de la différence d'électronégativité entre deux ions, on peut connaître le degré d'ionicité de leur liaison. Les cercles représentent quelques exemples : dans l'ordre,* a, b, c, d, e *correspondent à* AsH_3, *HI, HBr, HCl,* H_2O, f *à* SiO_2 *et* g *à NaCl.*

turale (c'est, par exemple, le cas des microperthites) ;

— les impuretés se développent de façon désordonnée (par exemple, dans la structure pœcilithique).

Naturellement, un même élément peut se trouver sous plusieurs formes dans un minéral : soit en substitution isomorphique, soit en dispersion non structurale mais cristalline et iso-orientée, soit enfin en dispersion corpusculaire non orientée. Cependant, un cristal, ayant une formule minéralogique définie, aura tendance à sélectionner les impuretés au cours de sa croissance. Ces impuretés ont parfois une certaine importance économique. Par exemple, certaines galènes contiennent des quantités notables d'argent ou de germanium substitué au zinc ou encore sous forme de sulfures complexes. De même, il existe des ségrégations microscopiques ou submicroscopiques d'éléments à l'état natif comme l'or, l'argent, le plomb, l'étain, etc.

Un géochimiste russe, L. N. Ochinnikov, a réalisé une expérience intéressante : ayant fondu un mélange de roche silicatée et de calcaire, il a observé la formation de petites gouttes de minéraux ferrifères, séparés des silicates fondus, qui flottaient sur la surface avec des bulles de gaz. Ce type de genèse peut expliquer l'origine de la dispersion du cuivre, du nickel, du cobalt, du titane, du zinc, du molybdène, du manganèse et d'autres métaux qui sont souvent enrichis dans les minéraux ferrifères.

Au contraire, l'étain, le tungstène, l'uranium et d'autres atomes de rayons plus importants sont présents à l'état d'ions libres dans les silicates fondus et restent ainsi jusqu'au stade final de la cristallisation. Ces atomes ont des possibilités très faibles de former des liaisons cristallochimiques avec les éléments pétrogénétiques majeurs. Ainsi, on ne les retrouve pas ou très peu associés aux minéraux des roches, alors qu'ils ont fortement tendance à s'accumuler dans les résidus microscopiques de fusion aux stades ultimes de la cristallisation. Par exemple, on observe dans certains granites très alcalins une augmentation des quantités de grains de magnétite et un déficit parallèle des teneurs en fer dans la biotite.

Géochimie des isotopes. Fractionnement isotopique dans la lithosphère

Parmi les facteurs physico-chimiques les plus importants dans la répartition des isotopes au cours des différents processus pétrogénétiques, l'*échange* est considéré comme ayant un rôle uniquement dans les stades initiaux de la solidification d'un magma car il cesse pratiquement avec la cristallisation. La *diffusion thermique* et la *diffusion par gradients de concentrations* sont des phénomènes très importants dans les processus métamorphiques et métasomatiques, alors que la diffusion par différenciation gravitationnelle et par des gradients géothermiques est secondaire.

En général, le fractionnement isotopique décroît quand la température augmente; il est donc pratiquement inexistant à la température du stade « orthomagmatique », entre 700 et 1 000 °C. Dans les stades intermédiaires, le fractionnement devient significatif surtout pour les éléments plus légers, dont les rapports des masses isotopiques sont très différents. Dans les minéraux cristallisés, l'enrichissement isotopique est généralement plus significatif pour les éléments en trace que pour les éléments majeurs, spécialement lorsqu'il s'est effectué par un processus de diffusion à l'état solide. Dans les solutions naturelles, les isotopes plus lourds devraient préférer les phases non dissoutes ou précipitées, tandis que les plus légers devraient être concentrés dans les phases dissoutes. Cependant, le lessivage des roches est un phénomène qui accentue généralement le fractionnement des isotopes.

Une des plus importantes applications des isotopes est la *géochronologie,* qui s'occupe de déterminer l'âge des roches et des minéraux en mesurant les rapports entre les isotopes radio-actifs et ceux à noyau stable qui en dérivent (compte tenu de la vitesse de désintégration du noyau radio-actif parent en noyau stable).

La géochimie appliquée à la prospection géochimique

Principes généraux

La redistribution continuelle des éléments d'une roche à l'autre, d'un minéral à l'autre, constitue dans son ensemble un phénomène appelé *cycle géochimique*.

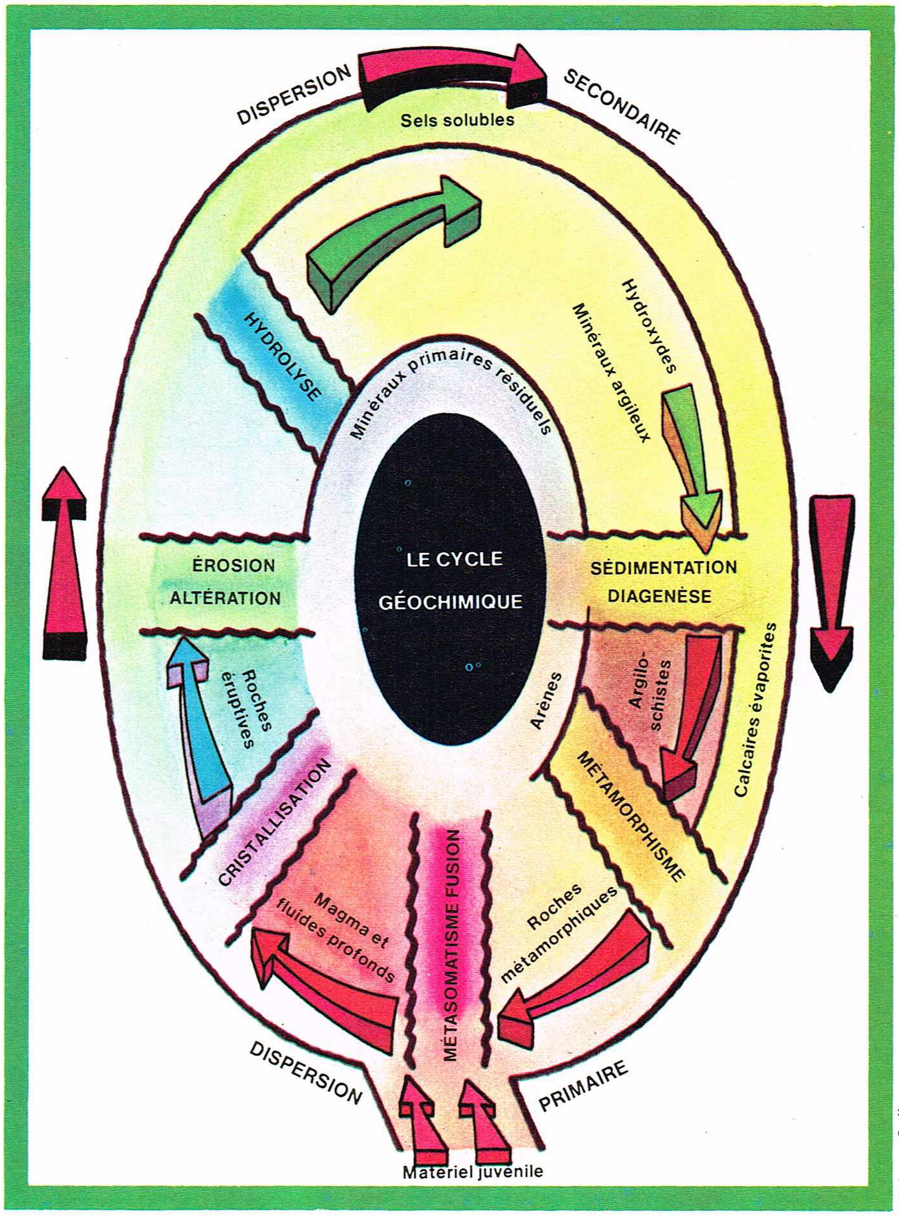

Richard Colin

▲ ***Représentation schématique du cycle géochimique.***

D'une façon idéale, un élément quelconque, présent dans le magma originel, parcourt (voir figure ci-dessus) un trajet suivant le sens des aiguilles d'une montre à partir du bas de la figure.

Durant ces cycles, les différents éléments obéissent, à quelques exceptions près, aux lois cristallochimiques concernant les liaisons, les dimensions et les charges ioniques que nous avons vues précédemment. D'une façon synthétique, on peut résumer les principaux regroupements d'éléments qui constituent les *associations géochimiques* utilisées dans la prospection (voir tableau 13).

Les différents éléments sont plus ou moins mobiles au cours des processus pétrogénétiques, qui, dans leur ensemble, constituent le cycle géochimique au cours duquel s'effectue une dispersion par rapport à la répartition originelle dans le magma. Les nombreux phénomènes qui président à la dispersion des éléments peuvent être rassemblés en deux groupes principaux : les processus mécaniques et les processus chimiques.

La dispersion peut être due à l'action de phénomènes exclusivement mécaniques (comme l'intrusion ou l'effusion de magma, ou encore le mouvement de matériaux superficiels entraînés par un glacier) mais ceux-ci ne provoquent pas de différenciation appréciable du matériel.

Au contraire, les processus chimiques et biochimiques produisent une différenciation marquée des matériaux en les décomposant en de nombreuses fractions de composition différente. Dans ce type de fractionnement, le rôle primordial est joué par la mobilité chimique des

TABLEAU 13 : PRINCIPALES ASSOCIATIONS GÉOCHIMIQUES DES ÉLÉMENTS D'APRÈS GOLDSCHMIDT (1954) ET KRAUSKOPF (1955)	
Groupes	**Associations**
Éléments généralement associés	K-Rb Ca-Sr Al-Ga Si-Ge Zr-Hf Nb-Ta Terres rares Pt-Ru-Rh-Pd-Os-Ir
Associations d'éléments lithophiles caractéristiques des roches plutoniques	Si-Al-Fe-Mg-Ca-Na-K-Ti-Mn-Zr-Hf-Th-U-B-Be-Li-Sr-Ba-P-V-Cr-Sn-Ga-Nb-Ta-W-halogènes et terres rares
Associations particulières :	
Roches ignées felsiques	Si-K-Na
Roches ignées alcalines	Al-Na-Zr-Ti-Nb-Ta-F-P-terres rares
Roches ignées mafiques	Fe-Mg-Ti
Roches ignées ultramafiques	Mg-Fe-Cr-Ni-Co
Certaines différenciations pegmatitiques	Li-Be-B
Certains dépôts métamorphiques de contact	Mo-W-Sn
Feldspaths potassiques	K-Ba-Pb
Autres minéraux potassiques	K-Na-Rb-Cs-Tl
Minéraux ferromagnésiens	Fe-Mg-Mn-Cu-Zn-Co-Ni
Associations d'éléments chalcophiles caractéristiques des sulfures métalliques	S-Cu-Zn-Pb-Fe-Ag-Au-Hg-Cd-In-Se-Te-As-Sb-Bi-Ni-Co-Mo-métaux du platine
Associations particulières :	
Substitutions dans les calcaires	Zn-Pb-Ba-F-Sr
Métaux de bases complexes	Fe-Zn-Pb-Ag-Cu-Se-Sb-Bi
Métaux précieux simples	Ag-Au-As
Métaux précieux complexes	Ag-Au-As-Sb-Zn-Cu-Pb-Hg
Minéraux métalliques associés avec les roches ignées mafiques	Fe-Ni-Co-Pt
Dépôts de cuivre	Fe-Cu-Mo-Re
Dépôts fumerolliens	Hg-Sb-As-Se
Roches sédimentaires :	
Oxydes de fer	Fe-As-Co-Ni-Se
Oxydes de manganèse	Mn-As-Ba-Co-Mo-Ni-V-Zn
Phosphorites	P-Ag-Mo-Pb-F-U
Schistes argileux	Al-Ag-As-Au-Bi-Cd-Mo-Ni-Pb-Sb-V-Zn

▲ ***Tableau n° 13 : principales associations géochimiques des éléments.***

matériaux : autrement dit, les phases ou les éléments les plus mobiles tendent à être exportés loin des aires d'origine, cela en relation avec le réseau naturel de distribution et les variations des paramètres physico-chimiques.

TABLEAU 14 : MOBILITÉS RELATIVES DES ÉLÉMENTS DANS UN MILIEU SILICEUX DÉPOURVU DE MINÉRAUX SULFURÉS DANS DES ZONES SUPERFICIELLES		
Mobilité relative	**Éléments majeurs**	**Éléments mineurs**
Très mobiles	S, Cl	Br, I, Mo, B, Se
Moyennement mobiles	Ca, Na, Mg, K	Zn, Ba, U
Moyennement immobiles	Si, Mn	Ni, Co, Cu, As, Sb, Pb
Pratiquement immobiles	Fe, Al, Ti	Cr, terres rares

▶ ***Tableau n° 14 : mobilités relatives des éléments dans un milieu siliceux dépourvu de minéraux sulfurés dans des zones superficielles.***

Le tableau 14 donne des indications sur les mobilités relatives de certains éléments dans un milieu géochimique siliceux et dépourvu de minéraux sulfurés.

La dispersion peut être primaire ou secondaire selon le milieu dans lequel elle s'effectue. Dans la *dispersion primaire,* ou *syngénétique,* le réseau de distribution et de redépôt des matériaux est généralement représenté par des fissures et des espaces intergranulaires des roches fraîches, non altérées parce que situées à une certaine profondeur. La *dispersion secondaire,* ou *épigénétique,* au contraire, s'effectue à la surface ou presque, dans les fractures de la roche superficielle ou à la surface même d'altération des roches exposées aux agents atmosphériques. Le spectre de distribution géochimique d'un élément correspond au mode de dispersion dans une zone donnée, sous l'effet de tous les facteurs qui concourent à déterminer les mouvements dans les matériaux terrestres. La reconstitution de ces spectres est donc nécessaire pour l'exploration géochimique qui s'applique à la recherche de gisements miniers.

La prospection géochimique appliquée à la recherche de minerais

Le principe de base de cette application est fondé sur le fait que, dans les zones qui entourent une concentration de minéraux recherchés, il existe une dispersion des éléments présents dans le gisement telle que les teneurs décroissent au fur et à mesure que l'on s'éloigne du gisement. Cette dispersion constitue une anomalie de la province géochimique, et une étude détaillée de la région permettra de mettre en évidence et donc de localiser le gisement.

Les moyens utilisés en prospection géochimique sont les mêmes que ceux qui existent en géochimie générale : analyses chimiques effectuées par spectrographie, photométrie de flamme, fluorescence X, spectrophotométrie et absorption, chromatographie sur papier, fluorescence ultraviolette. L'appareillage est aujourd'hui utilisable en version portative : on aménage ainsi des camions ou des bateaux-laboratoires. Bien sûr, une bonne prospection géochimique ne peut être effectuée qu'après un relevé géologique détaillé de la région.

Échantillonnage

Il faut utiliser : d'une part, des échantillons dont la moyenne a approximativement des teneurs normales (dites aussi *fond de l'élément*) dans le type de roche étudié, et, d'autre part, des échantillons ayant des teneurs anormales. On peut espérer localiser un gisement ou, tout au moins, une distribution anormaux si et seulement si la différence entre les deux types d'échantillons est bien mise en évidence et si les premières valeurs anormales significatives peuvent être individualisées avec sûreté.

Le nombre d'échantillons doit être assez grand pour être représentatif et couvrir l'aire de dispersion normale et celle de dispersion anormale. D'autre part, la distance entre les échantillons doit être proportionnelle à la rapidité avec laquelle augmente la concentration des éléments cherchés. Le « fond » constitue la teneur moyenne d'un élément donné dans un certain type de roche d'une région particulière. La figure page 41, au milieu, donne certaines des valeurs du fond pour les éléments métalliques dans les principaux types de roches, c'est-à-dire les roches ignées ultrabasiques, basiques, intermédiaires, acides et les roches sédimentaires.

En réalité, les valeurs de base d'un élément dans un certain type de matériel peuvent osciller d'un point à un autre, même s'ils sont proches. Par exemple, le cuivre présente des variations du fond de 10 à 70 ppm dans certains sédiments de l'Ouganda. Les variations des valeurs de base sont différentes selon les éléments. La même figure montre que celles-ci sont moins importantes pour le plomb que pour le zinc et encore moins que pour le chrome, le cobalt et le cuivre.

Pour trouver la teneur normale du cuivre dans une région donnée, on peut, à partir des analyses des échantillons, faire le calcul en effectuant simplement la moyenne arithmétique des teneurs rencontrées :

$$L_{Cu} = \frac{\Sigma_i \cdot l_i}{n}$$

où l_i représente les résultats de chaque dosage de l'élément pour les n échantillons récoltés ; ce qui donne L_{Cu}

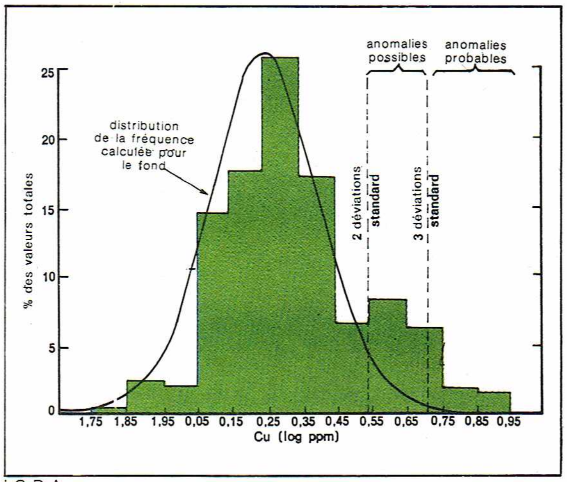

I.G.D.A.

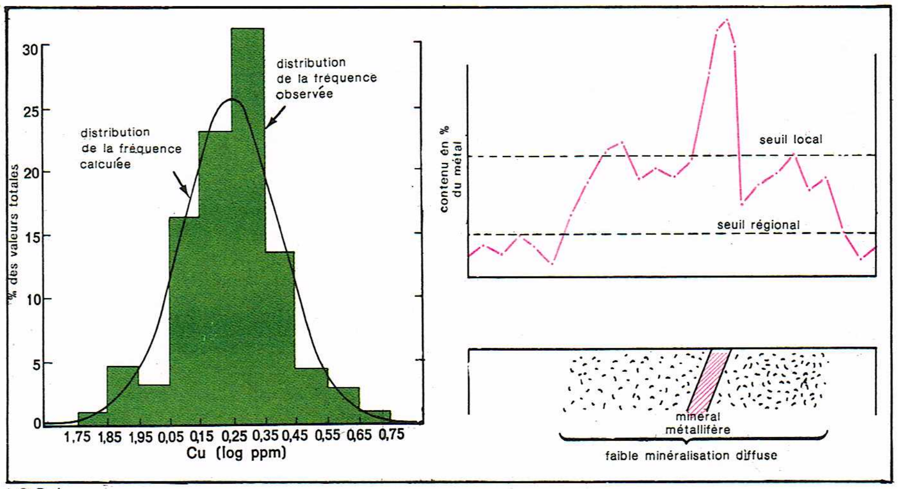

I.G.D.A.

comme fond normal pour le cuivre. En réalité, la valeur obtenue du fond normal ne peut être qu'approximative car les variations des teneurs peuvent être très importantes. La phase suivante de la prospection consiste à individualiser les anomalies géochimiques.

D'après Ahrens, dans la majorité des roches (aussi bien basiques qu'acides), la distribution géochimique des éléments apparaît plus comme de type logarithme normal que comme de type normal. Cela veut dire que le logarithme des teneurs d'un élément tend à se distribuer de façon symétrique à l'intérieur de la moyenne géométrique, à la différence des valeurs naturelles (non logarithmiques), qui se distribuent à l'intérieur de la moyenne arithmétique. Par exemple, le Cu, le Zn et aussi le Pb présentent toujours une distribution normale logarithmique pour le fond. Les figures ci-dessus illustrent ce phénomène pour les teneurs en cuivre des sols et des sédiments fluviatiles. Pour l'uranium, on a rencontré sur le terrain aussi bien une distribution logarithmique qu'une distribution normale, selon qu'il dérive d'un granite stérile ou d'un granite associé avec des dépôts uranifères.

Étude des anomalies géochimiques

Par définition, une anomalie est une déviation de la normale; une *anomalie géochimique* est une déviation dans le spectre de distribution géochimique normale pour une région déterminée. Un minerai, étant un phénomène rare et relativement anormal, constitue donc une anomalie. Les variations du fond au voisinage d'un gisement sont des anomalies guides de la prospection minière. Lorsque l'on étudie le fond, il faut rechercher les *anomalies significatives*. Une anomalie peut être considérée comme significative quand la valeur moyenne est largement supérieure à la limite supérieure des fluctuations du fond normal. Les valeurs limites de concentration d'un élément au-delà desquelles il est raisonnable de parler d'anomalies significatives, et non de fluctuations du fond, sont appelées *valeurs de seuil,* ou simplement *seuil*. On distingue un *seuil régional,* qui sépare les valeurs du fond normal de la concentration anormale de métaux dans l'auréole qui entoure le gisement, et un *seuil local,* qui sépare les valeurs moyennes de l'auréole des teneurs propres du corps minier.

L'interprétation des données de la prospection géochimique

Après avoir sélectionné un réseau d'échantillons et dosé les teneurs des éléments désirés, il est nécessaire d'interpréter les données géochimiques d'une manière efficace. Généralement, il faut prendre en considération diverses *populations* de données pour aboutir à une interprétation valable.

On peut expliquer le terme de population en prenant l'exemple du nickel. Dans les sols qui dérivent d'un granite homogène ou d'un schiste argileux, la teneur en nickel sera faible et uniforme; dans les sols qui proviennent de roches éruptives basiques, elle sera probablement un peu plus élevée mais toujours uniforme; dans les sols provenant de roches serpentinisées, elle pourra être plus élevée et moins constante; enfin, dans les sols qui dérivent de gisements de sulfures de nickel, la teneur en nickel

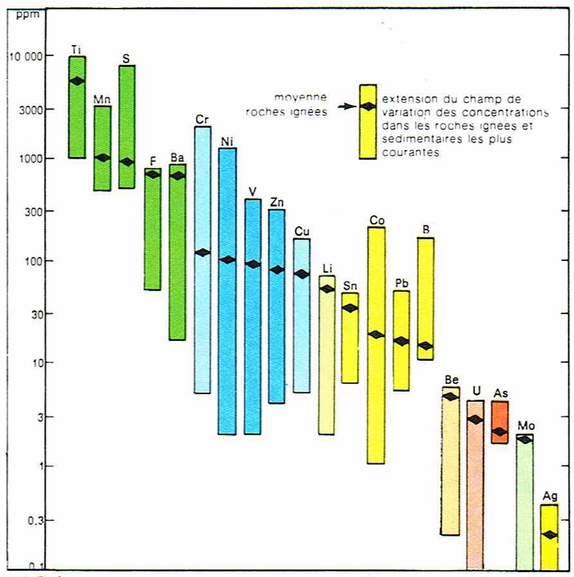

I.G.D.A.

sera plus élevée et très variable. Les sols qui s'étendent sur des zones occupées par un seul type des roches que nous venons de citer auront des teneurs en nickel présentant une seule valeur moyenne, caractéristique, et une certaine déviation standard, également caractéristique, constituant ainsi une seule population de données. Au contraire, les sols qui dérivent de deux ou de plusieurs types de ces roches présenteront deux ou plusieurs

◄▲ *A gauche, en haut, distribution du cuivre soluble de 825 échantillons du fond et d'aires d'anomalies dans certains sédiments de Zambie. Ci-dessus, à gauche, schéma illustrant la distribution de fréquence du cuivre soluble dans 216 échantillons de certains sédiments de Zambie; à droite, diagramme des valeurs des seuils locaux et régionaux. Ci-contre, valeurs moyennes et variations de teneurs des principaux éléments dans des roches courantes.*

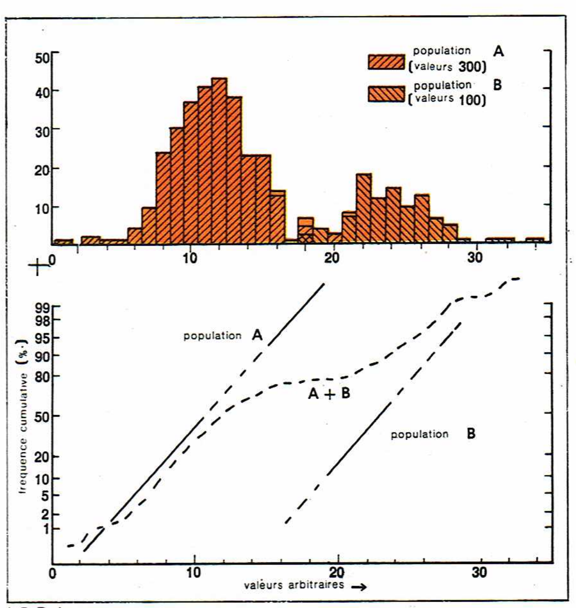

I.G.D.A.

◄ *Histogrammes et projections correspondantes des fréquences cumulatives pour des populations variables.*

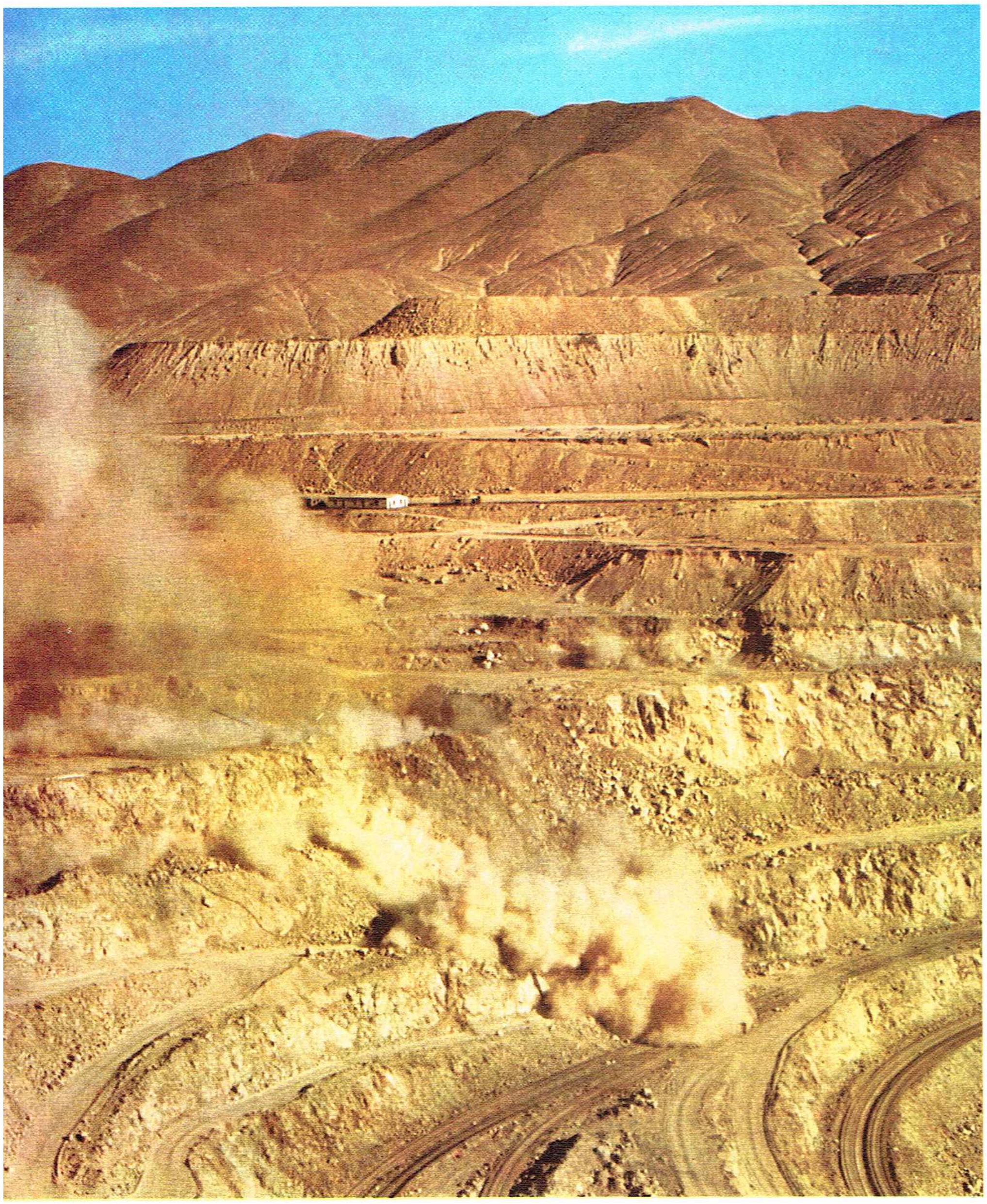

S.E.F.

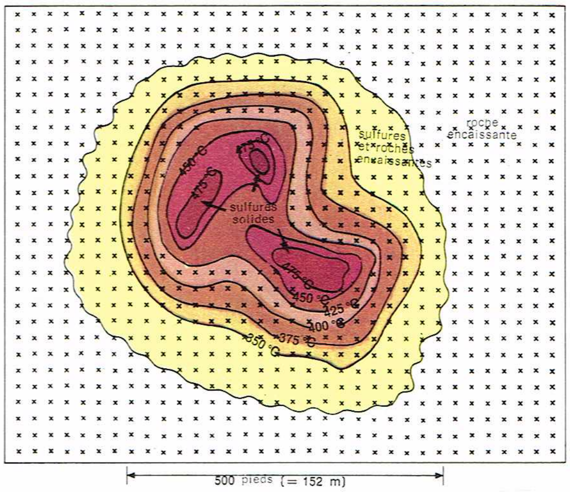

I.G.D.A.

▲ ***Ci-dessus, explosion de mine dans le plus grand gisement minier de cuivre du monde (Chuquicamata, Chili).***

En haut, à droite, carte schématique de la mine (n° 2, niveau 457) de Balmat (New York) montrant les isothermes (lignes d'égales températures) déduites de la teneur en fer de la blende.

▼ ***A gauche, auréoles de dispersion des éléments métalliques présents dans certaines régions de l'Arizona. Les roches sont essentiellement des calcaires et dolomies, parfois métamorphiques (F = zone de faille). A droite, anomalie de dispersion dans un sol résiduel.***

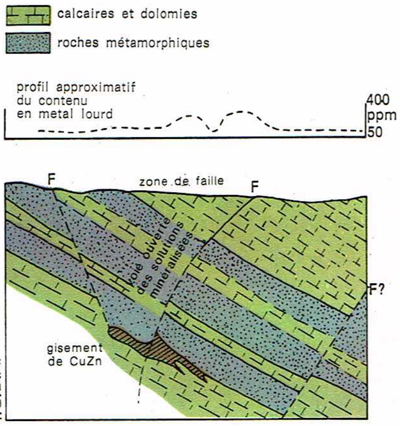

I.G.D.A.

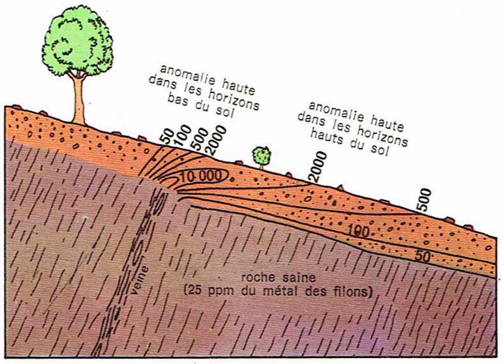

populations pour les teneurs en nickel, chacune correspondant à une des différentes roches altérées.

Dans la pratique, les populations ne sont pas aussi simples à mettre en évidence car, outre la nécessité d'individualiser les différentes roches sources de métaux, il faut déterminer les valeurs des seuils à partir des données de chaque population. Parmi les populations individualisées, il faut rechercher celle qui représente une anomalie significative, c'est-à-dire qui signale la présence d'une auréole de dispersion pouvant être attribuée à un éventuel gisement enfoui.

Utilité de l'étude de la dispersion

L'étude de la dispersion primaire, ou syngénétique, peut servir pour les recherches suivantes :

— délimiter une province géochimique dans une zone relativement étendue de la croûte terrestre où la composition chimique sera significativement différente de la moyenne (par exemple, une série de roches éruptives différentes mais géologiquement reliées, enrichies ou appauvries en un élément déterminé) ;

— reconstituer la température de cristallisation de certaines associations de roches *(géothermométrie chimique)* ; en effet, la répartition d'un ou de plusieurs éléments en trace entre deux phases minéralogiques, en réciproque dans la roche, est fonction de la pression et de la température qui régnaient au moment de la cristallisation des minéraux ;

— suivre une prospection régionale destinée à repérer les zones les plus intéressantes ;

— détailler une prospection superficielle permettant de localiser avec précision les points d'anomalies les plus notables ;

— effectuer la prospection en sous-sol destinée à l'ouverture de nouvelles galeries d'extraction de minerai ;

— effectuer des sondages, avec prélèvements de carottes, permettant de suivre la distribution des éléments en profondeur dans la roche non altérée.

L'étude de la dispersion secondaire, ou épigénétique, sert à la recherche superficielle de corps miniers masqués par des terrains de couverture, et à localiser le développement des veines de minerais enfouis.

BIBLIOGRAPHIE

GOLDSCHMIDT V. M., *Geochemistry,* Clarendon Press, Oxford, 1954. - HAWKES H. E., WEBB J. S., *Geochemistry in Mineral Exploration,* New York, 1962. - MASON B., *Principles of Geochemistry,* J. WILEY & SONS, New York, Londres, Sidney, 1952, 1958, 1966. - RANKAMA K., SAHAMA Th. G., *Geochemistry,* Chicago University Press, Chicago, 1950. - RINGWOOD A. E., *Advances in Earth Science,* Hurley, Massachusetts Editorial Press, 1964. - SMITH F. G., *Physical Geochemistry,* Addison-Wesley, Massachusetts, Palo Alto, Londres, 1963. - TAYLOR S. R., *Physic, Chemistry of the Earth,* vol. VI, Pergamon Press, Oxford, Londres, New York, Paris, Francfort-sur-le-Main, 1965. - VLASOV K. A., *Geochemistry and Mineralogy of Rare Elements and Genetic Types of their Deposits,* S. Monson, Jerusalem, 1966.

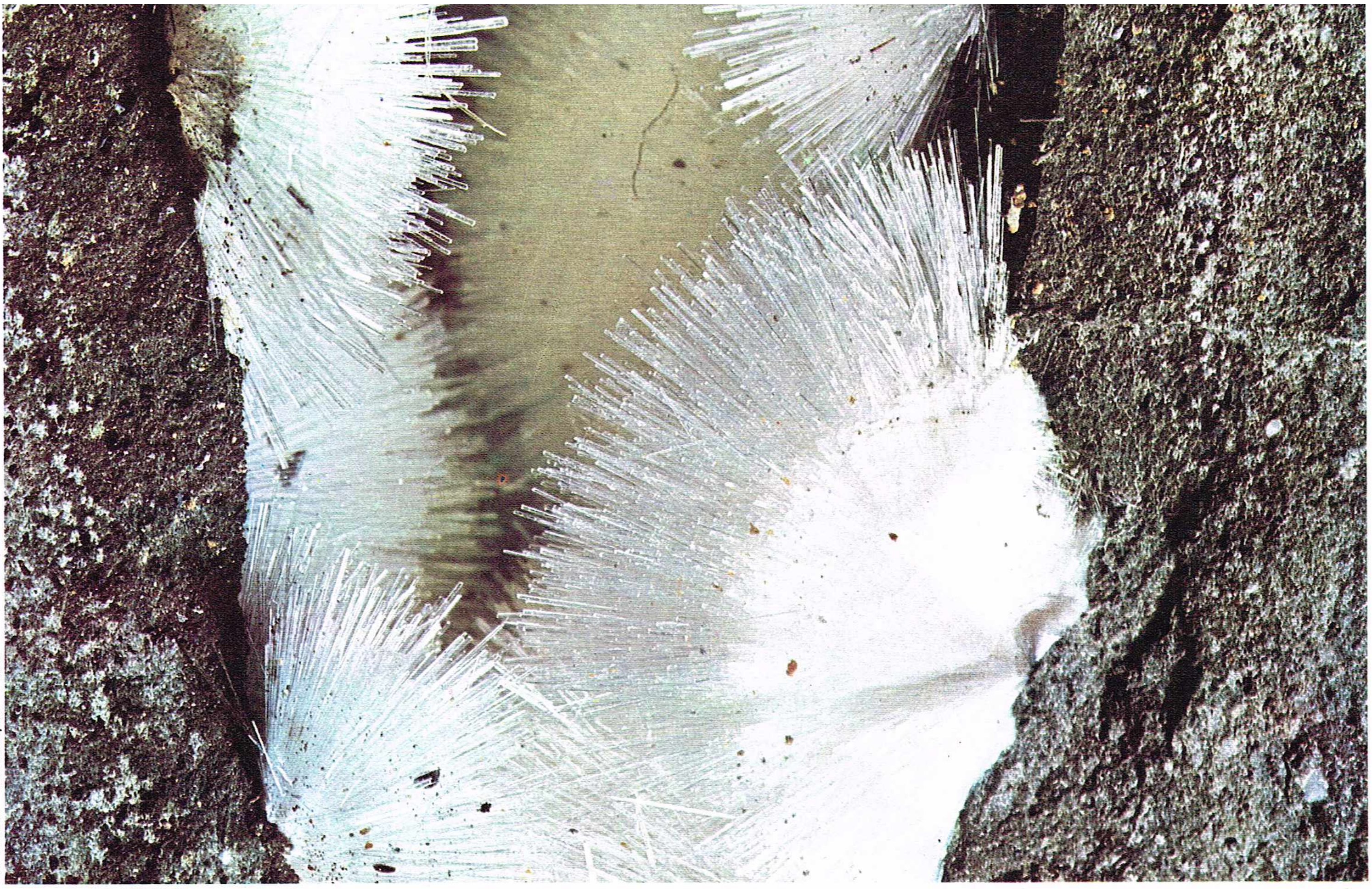

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Actuellement, deux mille cinq cents espèces environ se partagent le règne minéral ; ici, une gerbe d'aiguilles blanches de* **natrolite** *provenant d'Altavilla.*

MINÉRALOGIE

Les sciences minérales à travers les siècles

La matière et l'homme primitif

Les origines des sciences minéralogiques se perdent dans la nuit des temps, à l'époque où les premiers hommes surent distinguer, dans leur environnement naturel, les diverses sortes de « pierres » qui leur permettaient de confectionner leurs premiers outillages. Pendant des millénaires, la recherche de minéraux utiles conditionna l'évolution des connaissances en ce domaine par la constatation des propriétés les plus intéressantes des nouveaux matériaux utilisés.

La découverte du polissage, par l'usure d'un minéral contre un autre plus dur, a permis l'éclosion de la période néolithique, et la gravure sur pierre (ou sur d'autres matières dures) contenait en germe l'art lapidaire avec l'invention du sceau et la mise au point du langage écrit.

L'emploi des premiers métaux (cuivre, or) permettra aux hommes de la fin du Néolithique de constater d'autres propriétés de la matière (fusion et malléabilité). Ces progrès entraîneront ainsi l'humanité naissante vers une autre forme de civilisation : à l'âge des cités, l'emploi des métaux remplacera peu à peu la pierre, l'os ou le bois dans la vie quotidienne.

La métallurgie, par le biais du traitement des minerais, puis l'utilisation des substances minérales en médecine jetteront les bases d'une science empirique et spéculative à caractère demi-magique, l'alchimie, dont le contenu sera suffisamment riche pour évoluer de plus en plus rapidement à partir du XVIe siècle vers une science plus exacte.

Les plus anciennes observations minéralogiques remontent aux Phéniciens, grands découvreurs de nouvelles sources d'approvisionnement du monde antique en matières métalliques. L'apport du monde oriental à la minéralogie empirique est encore attesté par certains noms actuels de minéraux dont l'origine est indienne ou babylonienne (corindon, saphir, etc.), noms qui nous sont parvenus au travers de notre héritage culturel grec. Le successeur d'Aristote au lycée d'Athènes : Théophraste (372-287 av. J.-C.) est le plus ancien auteur connu chez qui on trouve cités des minéraux, parmi lesquels on peut noter le cinabre et l'hématite. Le test de dureté pour la reconnaissance des espèces minérales était connu, et le calcul des densités était possible depuis Archimède (287-212 av. J.-C.) par la méthode hydrostatique.

Premières théories atomiques

Les premières idées exactes sur la constitution atomique de la matière ont probablement été professées aux Indes, au début du premier millénaire avant J.-C., par l'école des Vaicesiskas. On ne sait pas si les Grecs avaient eu connaissance de ces idées ou s'ils les avaient également élaborées de leur côté. Toujours est-il que l'on attribue l'invention de la théorie atomique de la constitution de la matière à Leucippe de Milet et à son élève et ami Démocrite d'Abdère (460-370 av. J.-C.). Ce dernier supposait un vide à travers lequel se meut la matière, composée d'un nombre infini d'atomes indivisibles, homogènes dans leur substance, mais de poids et de dimensions variables. Dans le mouvement perpétuel des atomes, ceux qui sont de poids égal cherchent à s'unir pour former divers corps, mais lorsqu'ils sont heurtés par des atomes de vitesse différente, ils se désagrègent. Épicure de Samos (341-271 av. J.-C.) développa un peu plus cette théorie ; elle sera encore perfectionnée par Lucrèce (100-50 av. J.-C.) et quelque peu modifiée d'un autre côté par Asclépiade (130-40 av. J.-C.), qui affirmait, probablement sous l'influence des idées d'Aristote qui se figeront tels des dogmes pendant deux millénaires, que les atomes étaient divisibles. La thèse atomique sommeillera pendant dix-sept siècles, ressurgissant ici et là dans les écrits d'esprits universels, tels saint Isidore de Séville (560-636 ap. J.-C.) ou Salomon Ben Gabirol, dit Avicébron (1020-1058, Saragosse), ou encore dans ceux de Guillaume de Conches et Nicolas d'Autricourt au XIIe siècle.

Minéralogie empirique et alchimie

Le mode de pensée atomiste, extraordinairement fécond, a été supplanté pendant deux mille ans par un autre courant de pensée qui ne sera rejeté définitivement qu'à la fin du XVIIIe siècle. La théorie des éléments

▶ *Les origines des sciences minéralogiques sont très anciennes et les premières observations remontent aux Phéniciens. Ici, deux des illustrations d'Hortus sanitatis, traité d'un anonyme de la fin du XVe siècle. Dans ce manuel de botanique, de zoologie et de minéralogie, les minéraux sont inscrits par ordre alphabétique avec leurs vertus magiques et prophylactiques supposées.*

De Lapidibus

arabic⁹ grosse viriditatis. s3 nō trāslucid⁹ sicut smarald⁹. 7 ē mollis¶ Ferf q̄ ꝟtutē hēat custo dīēdi gestantē se a nocuis casibꝰ. Et sup cuna bula infantiū. Hoc aūt in lapidario suo enax

Capitulum. lxxxiij

Enphites. Alber. Mēphites ē lapis a ciuitate egipti q̄ mēphis vocaf. q̄ dr vt ignis calere. virtute quadē nō actu

Operationes

¶ Hic tritus et in aqua mixtus in potu detur vrendis vel secandis. quia inducit insensibili tatē ne sentiat cruciandus. Hoc idē ait Enax in lapidario suo.

Capitulum. lxxxiiij

Edus. Dyas. Medus lapis ē niger q̄ trit⁹ emittit croceū colorē. Alb. Lapis medus vel medo dr q̄ a regiōe medo rū ferf vbi plēs iueniūf Sunt aūt hu⁹ spēs due vnus niger 7 alter viridis

Operationes

¶ Alb. Hui⁹ ꝟtutē ē dicitū vetere podagrā. oculoꝝ cecitatē. 7 nefreticā passionē. etiā refoue re dr fessos 7 debiles ¶ Ferf etiā q̄ fragmenta nigri si in aq̄ ca. missa fuerit. 7 se qs i aq illa la uerit incurrit mēbroꝝ excoriatōēz. 7 si ex ea bi berit ꝑibit vomen do¶ Dyas. Est aūt duplicis potētie. s. bone 7 male. nā trit⁹ in cote medicia li cū lacte muliebri (q̄ sel' creauit ꝑmo pru pue rū) 7 iunct⁹ albugies curat oculoꝝ. 7 oēm illo rū dolorē etiā si desꝑatus fuerit medz podagri cos¶ Eodem mō cū lacte ouis q̄ sel' genuit ma sculū sanat. Renes 7 anhelit⁹ 7 iteriores ꝑtes corꝑis Hoc medicamē ꝑꝑatū hēas in vale vi treo vel argenteo 7 pfice ieiun⁹ ad vindictā q̄s supra corē 7 da cui vis. 7 lauet faciem et expicca bit. ¶ Si quis autem ex eo biberit. pulmones vomet ¶ D ptz aūt biberi paululū dare vt non satief. Inuent⁹ ē aūt iuxta fluuiū fasin.

Capitulum. lxxxv

Ogra. Sera. Mogra ex ea est ques dam que def'f ex terris sinos. 7 melior ex ea est grauis densa cuius color nō est diuersus. 7 ē sicut color eparis aut sāguinis nō hūs lapidē. Et qn ponif in aqua dissoluif facile et crescit. Illa ꝟo mogra q̄ vtunf carpen

C. Dani

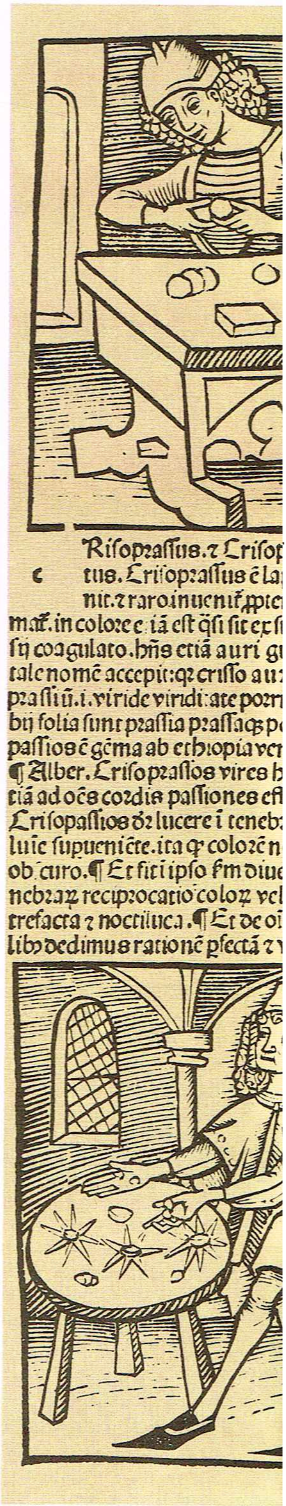

Risopassus. 7 Crisop tus. Crisopassus ē la nit. 7 raro inuenif ꝑpte maf. in colore e. iā est q̄si fit ex fi coagulato. hñs etiā auri g tale nomē accepit: q crisso au passiū. i. viride viridi: ate por bij folia sunt passia passiaqs p passios ē gēma ab ethiopia ve ¶ Alber. Crisopassios vires h ciā ad oēs cordis passiones ef Crisopassios dr lucere i teneb luie supueniēte. ita q colore n ob curo. ¶ Et fiti ipso fm diue nebraꝝ reciprocatio coloꝝ vel trefacta 7 noctiluca. ¶ Et de o libꝰ dedimus ratione pfectā 7

C. Dani

d'Aristote (384-322 av. J.-C.) professait que le ciel et la terre étaient deux mondes opposés, l'un empli d'un éther inaltérable et immuable, l'autre où toute chose est un composé des quatre éléments : air, eau, feu, terre, en constante transformation. Aristote avait nié l'existence des atomes pour des raisons d'ordre mathématique : il acceptait l'idée de nombre infiniment petit alors que, pour les matérialistes grecs, la notion d'atome imposait celle d'unité indivisible.

Après l'effondrement de l'Empire romain d'Occident, l'Europe fut redevable à l'Islam de la restitution d'une grande partie du savoir de l'Antiquité. Traduite en langue arabe, la science grecque, qui plongeait ses racines dans le savoir des Babyloniens et des Égyptiens, imprègne les deux sortes d'ouvrages connus du Moyen Age : les multiples « Lapidaires », produits de compilations excessives et dont le plus intéressant est le fameux *De gemmis* de l'évêque de Rennes, Marbodus (1035-1123), et les ouvrages d'érudition des Encyclopédistes arabes et chrétiens. La science de cette époque était celle d'Aristote et de Pline l'Ancien (23-79 ap. J.-C.), dont les derniers volumes de l'*Histoire naturelle* (t. 33 à 37) étaient consacrés aux minéraux. A cela s'ajoutent les multiples observations empiriques des alchimistes croyant à la transmutation des métaux et des métallurgistes dont les recherches, plus pratiques, sur le traitement des minerais débouchaient sur de nouvelles connaissances des réactions chimiques et la découverte de corps simples ou de sels nouveaux.

En Orient, les alchimistes Geber (VIIIe siècle), Rhazès (IXe siècle), Avicenne (980-1037) et Averroès (1126-1198) firent progresser les connaissances chimiques

Tractatus

Capitulum.xxxviij.

Crisolitus. et Crisolansis. Dyas. Crisolitus lapis lucidissim⁹ est et similis auro. Albert⁹. Lapis crisolitus est in colore habens tenuē viriditatē lucidam in qua ad oculū solis micat ut stella aurea. et nō est rarus. Ysidorus. Crisolansis est gemma ex auro et igne vocata. dic siquidē est aurea et noctu ignea Hanc gignit ethyopia.

Operationes.

Albertus. Dicit q crisolitus spiritualia confortat. propter quod tritus asmaticis dat. Fertur etiā q perforatus et setis asini in foramine repletus ac sinistro brachio alligatus fugat timores melancolicos pessimos. et hoc dicit in phisicis ligaturis. In auro etiā positus et gestatus fugat fantasmata. Et dicūt quidā ipsum stulticiam pellere: et sapientiā adducere. Dyasco. Hic applicat (videlicet crisolitus) rasure auri filateriū est et tutamen adversus nocturnos timores. Pertusus et traiectus cū setis asini et in brachio sinistro ligatus oīa demonia vincit.

Capitulum.xxxix.

Cristallus. Albert⁹. Lapis cristallus qui aliquādo fit ex frigore. aliquando aūt ex nive. sicut sepe experti sumus. et in germania vbi multi inveniuntur. Utercp autē modus generationis facilis ex superioribus erat manifestus.

Operationes.

Hic lapis frigid⁹ oculo solis oppositus ignē

égyptiennes et alexandrines, notamment par leurs travaux sur la combinaison du soufre aux métaux et la préparation des amalgames.

En Occident, Alain de Lille (1120-1202), Vincent de Beauvais (1190-1264), Roger Bacon (1214-1294), Raymond Lulle (1235-1315), Arnaud deVilleneuve (1240-1312), Nicolas Flamel (1330-1418) et Basile Valentin (mort en 1413), qui découvrit l'antimoine et le bismuth, comptent parmi les alchimistes les plus célèbres. Un grand nom domine la science du Moyen Age, celui du Grand Albert (1193-1280) ; son enseignement parisien (1245-1248) attirait une foule considérable sur une place qui porte aujourd'hui son nom : la place Maubert (de Magister Albertus). Il dépouilla les travaux des Arabes et des rabbins qui avaient apporté en Occident la traduction des œuvres d'Aristote et fut l'un des plus grands expérimentateurs de l'époque (affinage de l'or, préparation des nitrates métalliques, étude du soufre et de différents sels). On lui doit aussi la première étude sur la notion d'affinité.

L'évolution des idées pendant la Renaissance marque un tournant décisif en matière d'alchimie. De nombreuses et minutieuses observations sur le terrain jettent les bases des « Sciences de la Terre ». Les plus grands esprits s'intéressent à tout ce qui les entoure et défendront la méthode expérimentale. Léonard de Vinci (1452-1519) est l'un des premiers à reconnaître l'origine animale des fossiles et constater que l'air n'est pas utilisé totalement par la respiration ; c'est là le tout premier germe d'une idée qui ébranlera plus tard la théorie des éléments d'Aristote. C'est également à Léonard de Vinci que l'on doit l'une des premières études systématiques de la résistance des matériaux. Le Suisse Paracelse (1493-1541) s'intéressera à la chimie et aux minéraux pour leur emploi en médecine.

Georgius Agricola (1494-1555) donna, dans ses livres consacrés aux sciences minérales, le résumé des connaissances de son temps en minéralogie, en métallurgie et en art des mines. Bernard Palissy (1510-1589) jeta les premières bases de la cristallographie ; on lui doit une théorie rationnelle de la formation des cristaux, des descriptions de leurs formes qui, selon lui, étaient spécifiques et variables suivant leur nature ; il compara aussi leur formation dans la nature avec la cristallisation des sels dans une solution. En paléontologie, il mit en évidence l'identité de nombreux fossiles avec les formes actuelles, dont il distingua les formes marines des formes fluviatiles. Lors de conférences publiques à Paris, il montrait souvent les minéraux de sa « petite académie », ensemble de diverses collections formant le tout premier des « Cabinets d'histoire naturelle » que l'on connaisse. Au XVII[e] siècle, la physique, par l'usage des mathématiques, était dégagée des erreurs des savants et des alchimistes du Moyen Age. Robert Boyle (1627-1691), physicien et chimiste, montra que la théorie des éléments d'Aristote était arbitraire, mais il ne parvint pas à convaincre ses contemporains ; on lui doit de nombreuses mesures précises de la densité des minéraux, la définition des acides, la découverte de l'hydrogène et une toute première conception moderne des éléments chimiques. Nicolas Sténon (1638-1686) posa les bases de la géologie stratigraphique en reconnaissant que les couches fossiles correspondent à des dépôts successifs, les plus anciens étant les plus profonds. Il avança aussi l'idée que les couches devaient être inclinées et déformées par les mouvements du sol. En cristallographie, il observa que les faces de la pyrite, de l'oligiste et du quartz formaient toujours entre elles les mêmes angles.

Au XVII[e] siècle, quelques belles découvertes constituèrent les bases de l'optique. Willebrord Snell (1580-1626) trouva, en 1620, la loi de la réfraction qui sera énoncée sous sa forme actuelle en 1637 par René Descartes. La double réfraction sera découverte dans le spath d'Islande par Érasme Bartolin en 1669 et Christian Huygens (1629-1695) laissera de beaux travaux sur la réfraction et la polarisation de la lumière. A cette époque, la chimie n'était pas une science exacte, même si Lémery (1645-1715) tentait d'expliquer les réactions chimiques par la mécanique. Durant ce siècle, la minéralogie ne pouvait encore se développer. Elle ne le pourra que lorsque Axel Frederik de Cronstedt (1722-1765) rapprochera quelque peu la minéralogie de la chimie et publiera, en 1758, sa classification des minéraux. Elle prendra corps tout d'abord d'une manière empirique, par le développement de méthodes basées sur les caractères extérieurs des minéraux en vue de leur identification et de l'emploi du chalumeau de Cronstedt et des réactions aux acides. Johan-Gotsch Wallerius (1709-1785) publiera son *Traité* en 1779, Abraham-Gottlob Werner (1750-1817) ses *Caractères externes des minéraux* en 1787. L'œuvre de ce dernier peut être considérée comme le sommet de la minéralogie empirique ; on lui doit de nombreux noms de minéraux et la théorie du neptunisme sur la formation des gisements.

Il est curieux de constater dans la plupart des traités du XVIII[e] siècle le peu d'intérêt accordé aux formes cristallines. Dans l'œuvre de Buffon (1707-1788), dont l'*Histoire naturelle* résumait les connaissances empiriques de l'époque en géologie, on est étonné de voir cet illustre Intendant du « Jardin du Roi » prendre ses distances

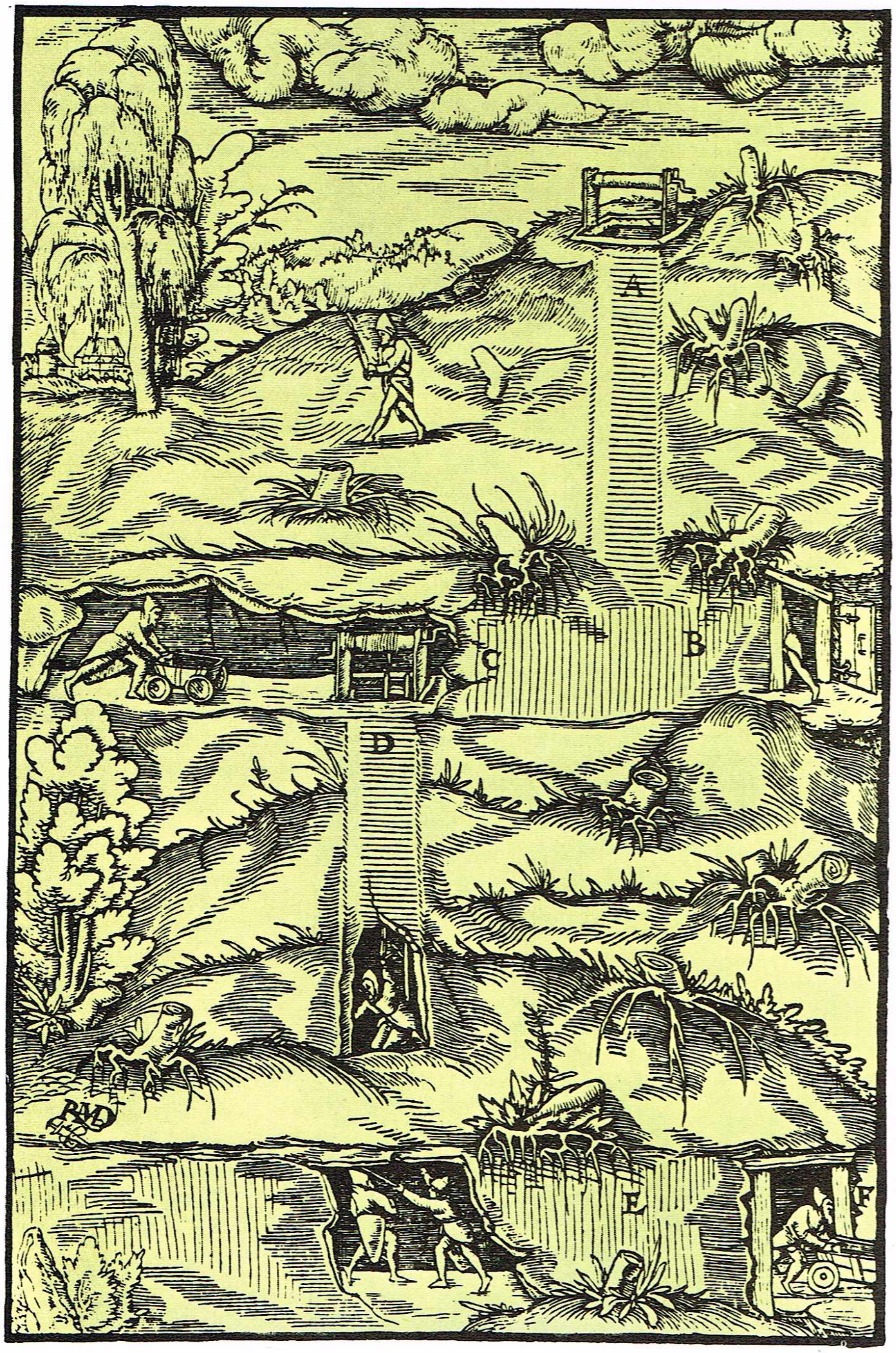

C. Dani

▲ ***Une planche illustrant le* De re metallica *d'Agricola (1494-1555), montrant le système des galeries d'une mine.***

avec toute théorie fondée sur la géométrie des cristaux. Malgré les écrits de Palissy, les travaux de Sténon sur l'oligiste, la pyrite et le quartz, ceux de Guglielmini (*Possibilité de faire dériver les formes d'un sel cristallisé de l'une d'elles choisie parmi les plus simples,* 1688) et l'œuvre de Mikhaïl Vassilievitch Lomonossov (1711-1765), il est vrai assez peu connue chez nous, il faudra attendre 1772 pour que Romé de l'Isle (1736-1790) publie un travail d'ensemble cohérent sur les formes cristallines, employant même le nom de cristallographie pour la première fois.

A travers cette évolution, apparaît un problème d'une extrême importance dans l'histoire de l'humanité : l'interdépendance des sciences dans l'évolution des idées. L'erreur de base avait été d'ériger en véritable dogme la théorie des éléments d'Aristote (ce qui du reste trahissait les conceptions philosophiques de ce grand savant grec !). Le plus grand mérite d'Antoine-Laurent de Lavoisier (1743-1794) aura été de démontrer expérimentalement que cette théorie des éléments ainsi que celle du phlogistique de G.-E. Stahl devaient être répudiées définitivement.

Chimie et minéralogie scientifiques

En introduisant l'usage systématique de la balance, Lavoisier fonda la chimie moderne sur une loi méconnue jusqu'alors : « Rien ne se perd, rien ne se crée », et, grâce à un nombre considérable d'expériences, il établit la composition de l'air et de l'eau, le mécanisme de la combustion et distingua les corps simples des combinaisons (oxydes, etc.).

En 1787, avec Guyton de Morveau, Berthollet et Fourcroy, Lavoisier établira une nomenclature chimique dont les traits essentiels ont subsisté jusqu'à nos jours et qui indique dans le nom composé la nature des éléments qui y entrent.

Né la même année que Lavoisier, René-Just Haüy (1743-1822) laissera une œuvre scientifique considérable. Créateur de la cristallographie mathématique, il éleva véritablement la minéralogie au rang de science. Son *Essai d'une théorie sur la structure des cristaux,* écrit en 1784, fit sensation à l'Académie des sciences. Ses travaux de minéralogie descriptive lui ont permis de décrire un grand nombre d'espèces nouvelles, et de nombreux noms créés par lui sont encore employés de nos jours (orthose, amphibole, pyroxène, euclase, axinite, stilbite, épidote, apophyllite, disthène, sphène, etc.). Il fit analyser un grand nombre de minéraux par Vauquelin (1763-1829), qui découvrit le chrome et le bérylium. A sa mort, il avait mesuré et calculé 1 040 variétés de formes de cristaux qui restent le plus important ensemble de types cristallographiques connus ; on peut citer parmi ses découvertes la loi de symétrie, l'anisotropie des cristaux et la loi des caractéristiques entières limitant les orientations des troncatures des cristaux.

Le Muséum de Paris s'enorgueillit de posséder la plus importante collection historique du monde avec les manuscrits et les collections de minéraux et cristaux types de R.-J. Haüy (près de 8 000), ainsi que les collections de cristaux et de minerais de Romé de l'Isle (qui énonça la loi de constance des angles) et de nombreuses séries de minéraux étudiés et envoyés par les plus grands savants et voyageurs de cette époque. Dombey ramena d'Amérique du Sud les premières euclases et atacamites au Muséum ; Macquart donna les chromates de plomb de Sibérie à Haüy, qui en calcula les angles, et dans lesquels Vauquelin découvrit le chrome en établissant leur formule chimique. Dolomieu rapporta l'analcime de l'île des Cyclopes (Sicile) ; ce minéral fut étudié par Haüy, qui reçut aussi un fragment du premier « palladium » isolé par Wollaston en 1803, ainsi que des échantillons trouvés ou reconnus par Gismondi, Werner, de Bournon, Beudant, etc., ou analysés par Rose ou Klaproth (1743-1817) ; ce dernier propagea en Allemagne les théories de Lavoisier et analysa un grand nombre de minéraux en découvrant plusieurs corps simples.

Haüy reçut de Carl-Caesard von Leonhard (1779-1862) et de Jöns-Jacob Berzelius (1779-1848) d'importants envois d'Allemagne et de Suède. Ces deux savants vinrent à Paris lui rendre visite. A travers des lettres de Berzelius et des annotations de Haüy sur les échantillons, on peut suivre d'une manière vivante le prodigieux développement de la minéralogie à la charnière des XVIII^e et XIX^e siècles, avec le développement de la chimie appliquée à l'analyse exacte des minéraux.

Berzelius fut l'un des plus grands savants de son temps. Il généralisa la notion de « radical » due à Lavoisier, distingua la chimie organique de la chimie minérale, introduisit l'usage de lettres pour représenter les symboles des éléments chimiques ; on lui doit aussi les concepts d'isomérie, d'allotropie, de polymérie, les lois de l'électrochimie et une théorie électrique de l'affinité chimique, ainsi que la découverte de plusieurs corps simples lors de l'analyse de minéraux nouveaux.

En Angleterre, reprenant l'idée de Lavoisier que la potasse, la soude, la chaux, la baryte ne sont pas des corps simples mais des oxydes, Davy (1778-1828) parvint à décomposer ceux-ci à l'aide de la pile, en isolant les métaux alcalins et alcalino-terreux (ce qui lui valut de recevoir la plus haute distinction de l'Académie des sciences française, malgré la guerre franco-anglaise).

A cette époque, beaucoup de savants étaient pluridisciplinaires ; Haüy était aussi botaniste, et Napoléon I^{er} lui commanda un traité de mathématiques à l'usage des élèves des grandes écoles. On comprend que la minéralogie et la chimie minérale purent évoluer ensemble

grâce aux travaux d'hommes comme Vauquelin, Klaproth, Berzelius dont la culture scientifique était exceptionnelle.

John Dalton (1766-1844) était aussi bien excellent chimiste que physicien ; il donna une base scientifique et quantitative à la théorie atomique des Anciens, en observant que cette théorie permettait à la fois d'interpréter les propriétés physiques des gaz et d'expliquer les lois pondérales des combinaisons chimiques. D'ailleurs, tout devenait simple lorsque l'on admettait l'atome. Les lois fondamentales de la chimie purent être énoncées au début du siècle dernier : la loi des proportions multiples en 1806 par Proust (1754-1826), qui analysa bon nombre de minéraux (dont la proustite) ; la loi des rapports simples en 1807 par Dalton ; la loi des nombres proportionnels par Richter (1762-1807) et les lois des volumes par Gay-Lussac en 1808 (1778-1850), et, en 1819, la loi de l'isomorphisme de Mitscherlich (1794-1863).

A la suite des travaux de Romé de l'Isle et de R.-J. Haüy, la cristallographie se développa (apparemment) dans deux directions. En Allemagne, Christian-Samuel Weiss (1780-1856) fit connaître les théories de Haüy mais orienta ses propres travaux, avec la loi des zones, vers une autre explication de la théorie cristallographique. Weiss exprima la position des faces cristallines par rapport aux trois axes des cristaux. Un autre cristallographe allemand, Naumann, montra que toutes les faces cristallines possibles peuvent être définies par l'intersection de deux zones. Ce fait est une conséquence de la rationalité des indices découverts par Haüy ; les travaux de son élève Gabriel Delafosse (1796-1878), qui eut le premier l'idée du *réseau cristallin,* montrèrent que les deux lois d'Haüy et de Weiss ne sont que les « expressions diverses d'un même fait et sont contenues l'une et l'autre dans le principe des assemblages réticulaires », comme le dira A. de Lapparent dans son célèbre *Cours de minéralogie,* publié en 1884.

La notation cristallographique actuellement employée est celle de Miller. On doit les premiers développements mathématiques de la théorie réticulaire des cristaux à Auguste Bravais (1811-1863), qui montra l'existence de quatorze types de réseaux. Ces travaux furent parachevés vers la fin du siècle dernier par Schœnflies et Fiodorov, qui élaborèrent une théorie géométrique des groupes spatiaux (groupes de symétrie).

En 1912, les travaux de Max von Laue (1879-1960) puis de William-Henry Bragg (1862-1942) et de son fils William-Lawrence Bragg, né en 1890, prouveront la réalité de la conception du réseau cristallin par la diffraction des rayons X dans les cristaux. Pour l'optique

▼ *Une planche du* **Traité de cristallographie** *de* **R. J. Haüy** *(1822) montrant les relations existant entre diverses formes cristallines.*

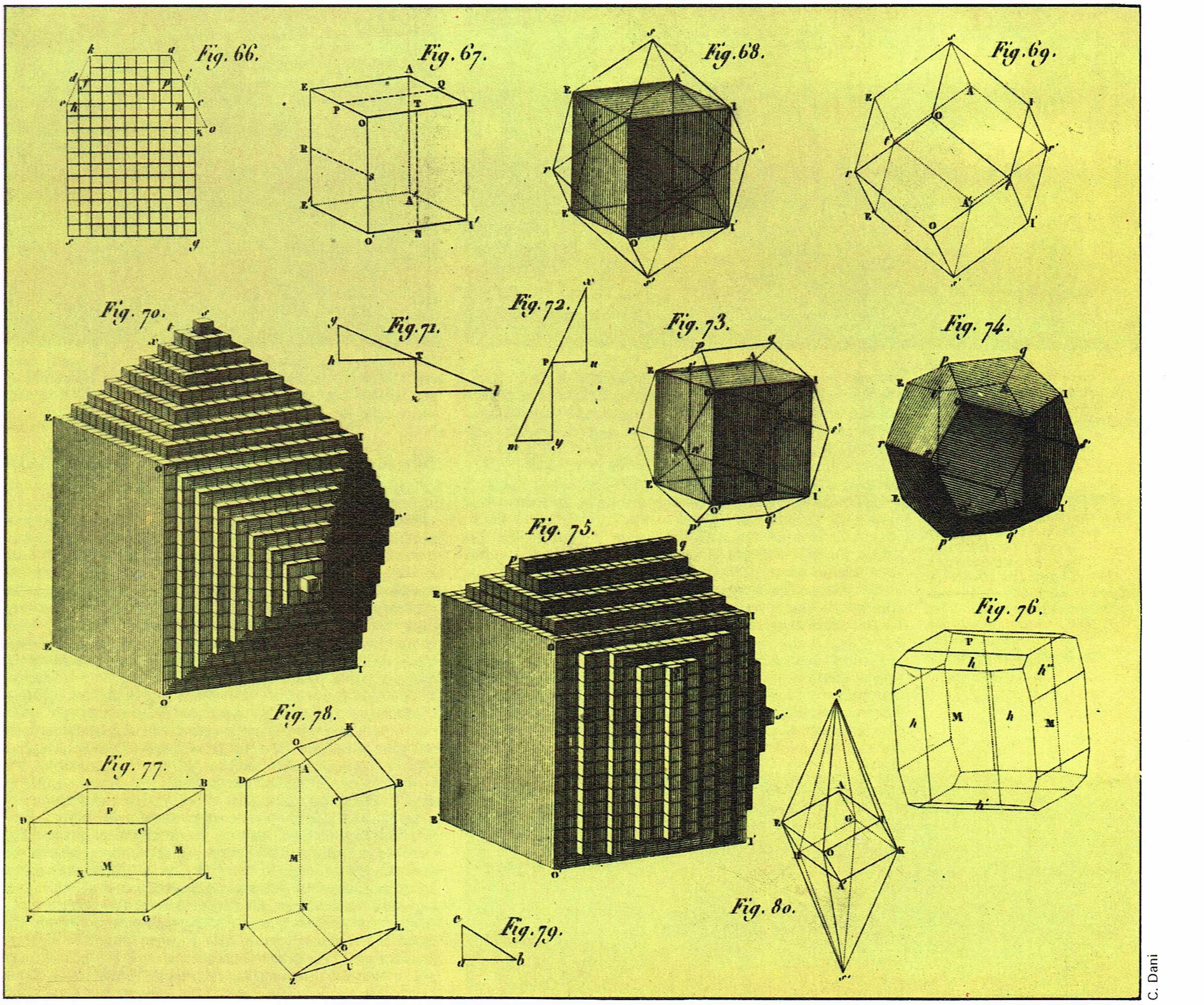

C. Dani

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

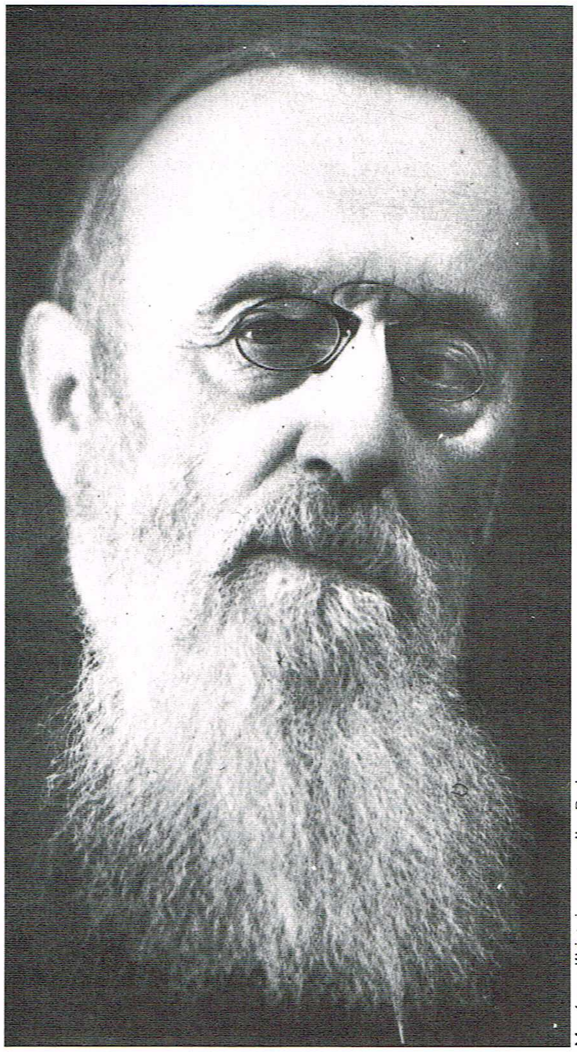

Muséum d'histoire naturelle, Paris

▲ *A gauche, deux cristaux de proustite provenant de Chañarcillo (Chili) et conservés au British Museum de Londres (nº 84698). A droite, portrait d'Alfred Lacroix (1883-1948), pétrographe et minéralogiste français : on lui doit notamment une classification des roches éruptives, la création de plusieurs noms d'espèces minérales nouvelles et des études de volcanologie, en particulier sur la montagne Pelée.*

cristalline, trois noms dominent le XIX^{e} siècle : Jean-Baptiste Biot (1744-1862), Dominique-François Arago (1786-1853) et Augustin-Jean Fresnel (1788-1827).

En minéralogie descriptive, on se doit de citer les travaux de François-Sulpice Beudant (1787-1850), qui créa de nombreux noms de minéraux, ceux d'Alfred Louis-Olivier Descloizeaux (1817-1897), d'Alfred Lacroix (1863-1948), dont l'œuvre est considérable et des Dana (père et fils) de l'université de Yale, qui laissèrent un *Système de minéralogie* (1827) et un *Recueil de minéralogie* (1898) qui sont les ouvrages les plus connus des minéralogistes du monde entier.

Chimie minérale, minéralogie, cristallographie, physique du solide, nécessairement divisées par l'étendue du savoir actuel, ne l'étaient pas autant au début du siècle dernier. La relation de la minéralogie avec les autres sciences peut être illustrée par les travaux de quatre générations de chercheurs remarquables : Antoine-César Becquerel (1788-1878), qui étudia les propriétés électriques des minéraux, son fils Edmond (1829-1891), qui fit des recherches sur les infrarouges, leur action sur les sels et les minéraux, son petit-fils Henri (1852-1908), qui découvrit la radio-activité en 1896 au Muséum, et son arrière-petit-fils Jean-Antoine Edmond (1878-1946), qui étudia les propriétés magnéto-optiques des cristaux.

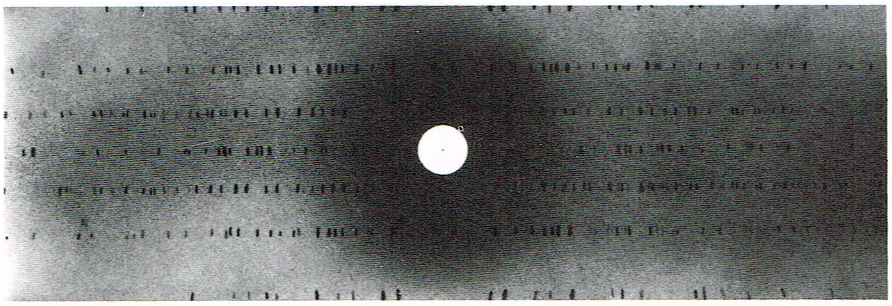

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Méthodes d'étude pour la création d'une nouvelle espèce minérale

Dépôts marins sur les grèves, géodes dans la roche : autant d'images qui surgissent lorsqu'on évoque la formation des minéraux. Que cette formation soit le fruit de longs cheminements d'eaux souterraines, de dépôts fumerolliens ou de lentes cristallisations au sein des roches en fusion, le public peut encore se faire une idée plus ou moins exacte de la naissance des minéraux. Mais seuls les spécialistes connaissent les multiples et minutieux examens qu'un minéral inconnu doit subir pour prendre place parmi les espèces décrites.

Chaque année, de nouvelles espèces sont créées, d'autres discréditées et rattachées à des espèces antérieurement connues. C'est le cas, par exemple, de certains mélanges de minéraux dont l'homogénéité n'était qu'apparente et que seules de longues études de laboratoire ont pu mettre en évidence. Car le mot « minéral » se définit ainsi : substance homogène de formation naturelle.

La plupart des minéraux sont cristallisés, c'est-à-dire que les atomes, les ions ou les molécules qui entrent dans leur composition sont régulièrement répartis et orientés dans l'espace en fonction de leurs forces de liaisons. On nomme *structure cristalline* cette répartition régulière (périodique) de la matière, et *formule structurale* la nature et la quantité des corps simples combinés dans le minéral. Formule chimique et structure cristalline, indissolublement liées, sont les deux caractéristiques qui différencient les espèces minérales entre elles. Car il existe des espèces qui possèdent une composition iden-

tique sans avoir la même structure, alors que d'autres espèces possèdent des structures voisines tout en présentant une composition chimique différente.

Actuellement, deux mille cinq cents espèces environ se partagent le règne minéral. Nous n'expliquerons pas ici leurs différents modes de formation. Nous imaginerons la découverte d'un minéral inconnu et nous examinerons les multiples difficultés qui ne manqueront pas de surgir lorsque nous voudrons lui donner un état civil.

Le minéral est découvert en place dans une roche, pris dans la masse ou implanté sur les parois d'une fissure ou d'une géode. Détachés, les échantillons sont placés dans des boîtes, soigneusement protégées jusqu'à leur arrivée au laboratoire. On note les circonstances de la découverte de la minéralisation, la localisation exacte du gisement, la morphologie du lieu et le cadre géologique. On prélève également en place un échantillonnage complet des roches environnantes pour tenter d'expliquer le mode de formation et d'association *(paragenèse)*.

On pourrait croire que le principal est fait, mais les spécialistes pensent tout autrement. Trouver un minéral et l'observer à la loupe n'est que le début d'une suite ininterrompue d'expériences qui, depuis la simple observation de son faciès au moment de la découverte, se poursuivront par l'étude approfondie de ses propriétés les plus cachées jusqu'à ce que minéralogistes, cristallographes et physiciens du solide aient épuisé le formidable arsenal de moyens de recherches et d'appareils que la science actuelle met à leur disposition.

L'observation se poursuit en laboratoire, généralement à l'aide d'une loupe binoculaire stéréoscopique, d'un grossissement variant entre 6 et 40 fois. On note l'aspect du minéral, sa couleur, l'éclat de sa cassure et, s'il se présente en cristaux, leur forme, leurs dimensions et éventuellement la position des plans de clivages, s'il en existe.

On réalise un dessin à main levée d'un des cristaux pour essayer de déterminer son système cristallin. On note aussi le développement, la position et l'aspect des faces (stries, figures de corrosion, brillance), prélude à l'étude goniométrique qui doit s'effectuer en même temps que l'étude radiocristallographique. Car les formes géométriques du cristal dépendent étroitement de l'organisation de sa structure. Les propriétés physiques du minéral sont également liées à son système cristallin, et c'est par l'étude de ses propriétés physiques que l'on arrive, en l'absence de cristaux, à déterminer le type de symétrie auquel il appartient (il existe quelques minéraux amorphes, c'est-à-dire sans structure organisée, mais ils constituent une exception).

Tentatives de détermination de l'espèce

Lorsque le minéral est soluble dans les acides, la première des méthodes employées en vue de son identification est la *micro-analyse chimique qualitative*. Celle-ci a l'avantage de n'utiliser qu'une très petite quantité de substance et permet, en quelques essais très caractéristiques (coloration ou formation de cristaux observables sous la loupe binoculaire), de mettre en évidence les principaux corps chimiques contenus dans la substance analysée. Cette méthode oriente immédiatement l'étude du minéral vers le groupe d'espèces auquel il est susceptible d'appartenir. Dans certains cas, la micro-chimie qualitative ne peut pas être utilisée avec succès, en particulier pour l'étude des silicates, dont trois cents espèces possèdent à peu près la même composition chimique. On aura alors recours à un ensemble d'expériences basées sur l'interaction de la structure cristalline avec différentes ondes électromagnétiques.

Nous savons que lorsqu'un rayonnement électromagnétique pénètre dans un cristal, les électrons des atomes constituant l'édifice cristallin sont accélérés et rayonnent à leur tour sur la même fréquence que l'onde incidente. Si le rayonnement incident est d'une longueur d'onde qui se situe dans la gamme du visible, c'est-à-dire s'il s'agit de lumière, on obtiendra des phénomènes de réfraction qui seront à l'origine de l'étude optique du minéral. Mais si le rayonnement incident est d'une longueur d'onde beaucoup plus courte, de dimension voisine de celle qui sépare les atomes dans les édifices cristallins (c'est le cas des rayons X), on obtiendra alors des phénomènes de diffraction qui permettront l'étude des structures et la détermination des intervalles interréticulaires (distances entre les plans d'atomes).

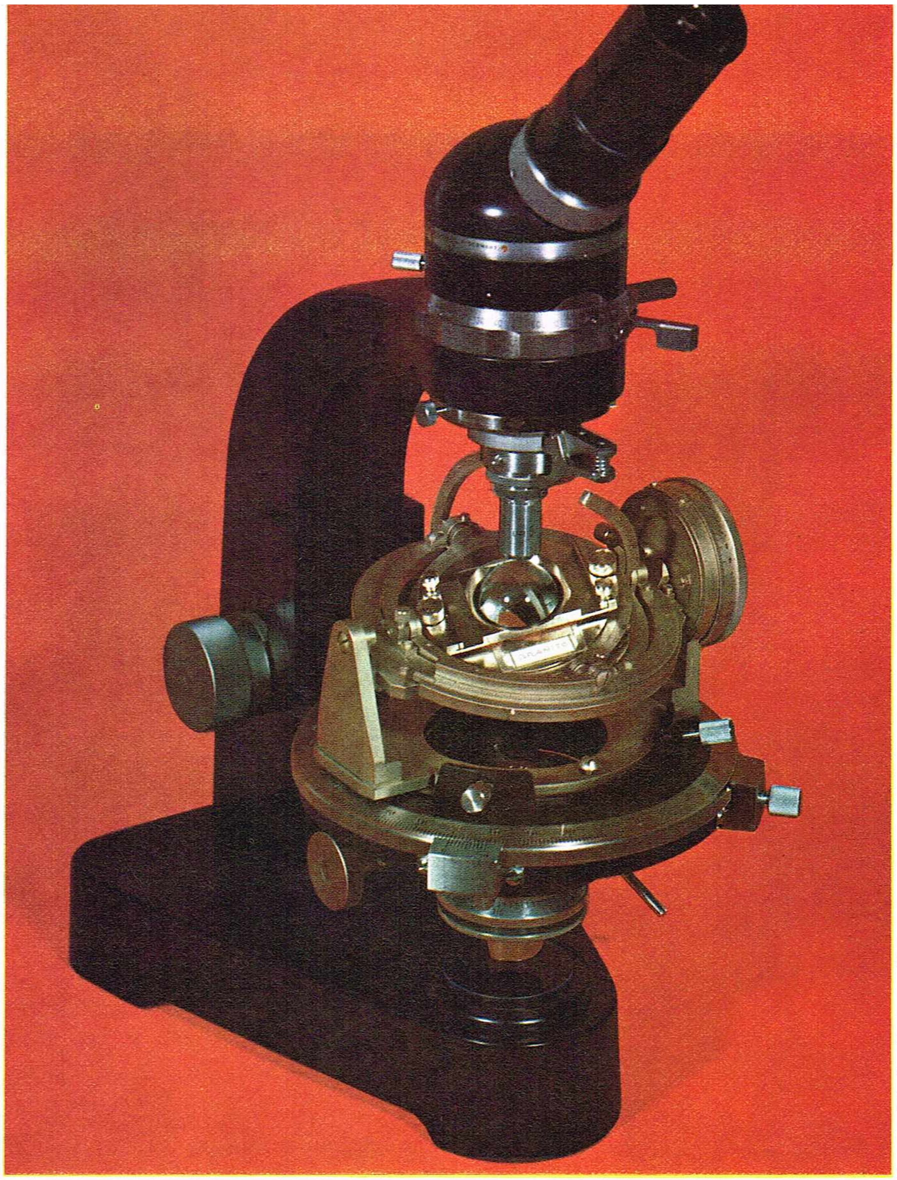

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Microscope de minéralogie doté d'une platine spéciale, appelée* platine de Fedoroff.**

Les traités de minéralogie seront consultés. On établira une liste de minéraux possédant les mêmes constituants chimiques que ceux de notre minéral, en vue de comparer leurs propriétés les plus caractéristiques aux siennes.

Étude des propriétés optiques

La lumière, lorsqu'elle pénètre dans un minéral ou dans toute autre substance cristallisée, est soumise à un certain nombre de contraintes, variables suivant le degré de symétrie de la structure cristalline.

Dans le cas le plus simple, la lumière est ralentie et subit une réfraction, se propageant dans le milieu cristallin à une vitesse constante quelle que soit sa direction. C'est le cas des minéraux cristallisant dans le système « cubique ». On nomme *indice de réfraction* le rapport qui existe entre la vitesse de la lumière dans l'air et sa vitesse dans le second milieu qu'elle traverse. Et les minéraux cubiques sont dits *isotropes* ou *monoréfringents* (ce qui est également vrai pour les minéraux amorphes, les verres non trempés, les gaz, l'eau et un certain nombre de liquides) parce qu'ils ne possèdent qu'un seul indice de réfraction.

Pour les minéraux cristallisés dans les autres systèmes, les phénomènes de réfraction deviennent plus complexes. La vitesse de la lumière varie suivant sa direction de propagation, et tout rayon lumineux qui pénètre dans l'un de ces minéraux, appelés *biréfringents* ou *anisotropes,* se dédouble en deux rayons de directions différentes et polarisés à angle droit (rayon ordinaire et rayon extraordinaire). Il en résulte des effets chromatiques, des extinctions dans des directions particulières, etc., qui sont caractéristiques de la symétrie cristalline.

C'est à l'aide du microscope polarisant que l'on mesure les indices de réfraction et que l'on détermine : le groupe optique (isotrope, uniaxe, biaxe), le signe (négatif, positif) et, pour les biaxes (à l'aide d'une platine de

◀ ***Page ci-contre, en bas, diagramme de diffraction des rayons X sur un cristal de tourmaline, obtenu par la méthode dite du « cristal tournant » (Bragg).***

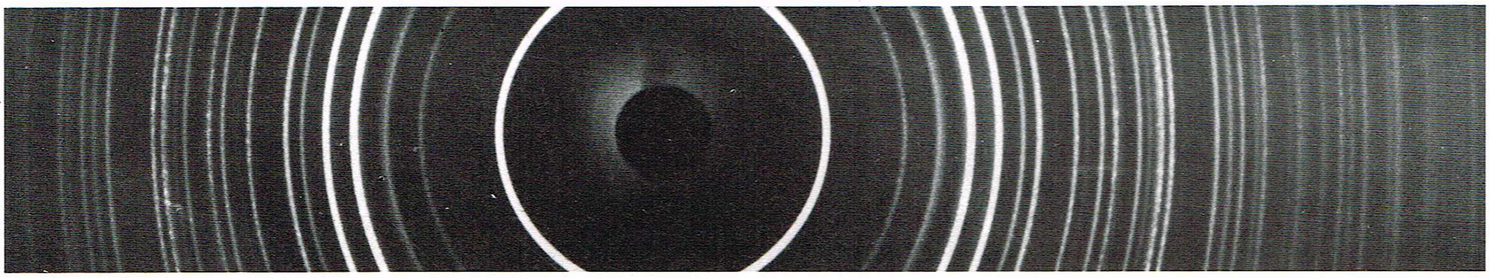

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Spectre obtenu par la méthode de Debye appelée aussi méthode des poudres et qui permet l'étude radiocristallographique des agrégats microcristallins.*

microscope spéciale, appelée platine de Fedoroff), la valeur de l'angle d'écartement des axes optiques.

Lorsqu'un minéral ne peut, en raison de son opacité, être observé au microscope polarisant, on emploie un microscope polarisant métallographique qui permet d'observer certains phénomènes lumineux produits par réflexion sur une surface polie de ce minéral (pouvoir réflecteur, couleur comparée à celle d'autres minéraux bien connus, anisotropie, réflexions internes, etc.).

Étude radiocristallographique et analyse chimique

Les structures cristallines se définissent par les dimensions de leur maille cristalline (paramètre) mesurées en angströms (Å = 1/10 000 000 de mm) et par les angles formés par les trois directions de ces paramètres.

On les observe en photographiant aux rayons X le spectre de poudre, que l'on obtient de la manière suivante : une petite quantité du minéral réduite en poudre très fine est collée sur un mince bâtonnet de verre placé au centre de la chambre photographique. Par un petit orifice, ouvert à mi-hauteur de la chambre cylindrique, entre un faisceau incident de rayons X, de longueur d'onde connue, qui vient se diffracter sur la poudre cristalline. Les cônes de révolution formés par les rayons diffractés impressionnent une pellicule photographique placée contre la paroi intérieure de la chambre, donnant cet ensemble de raies courbes si caractéristiques pour chaque espèce.

Si le minéral reste indéterminé, on doit établir sa composition chimique quantitative. Lorsque l'on a trop peu de matière pour employer la méthode chimique classique, on se sert de la microsonde électronique de Castaing, qui permet, à l'échelle de quelques microns, le dosage des divers corps contenus dans le minéral ; ce dosage est basé sur la différenciation et la mesure de l'intensité des diverses fréquences de rayons X que les atomes de l'échantillon émettent sous un bombardement électronique ponctuel.

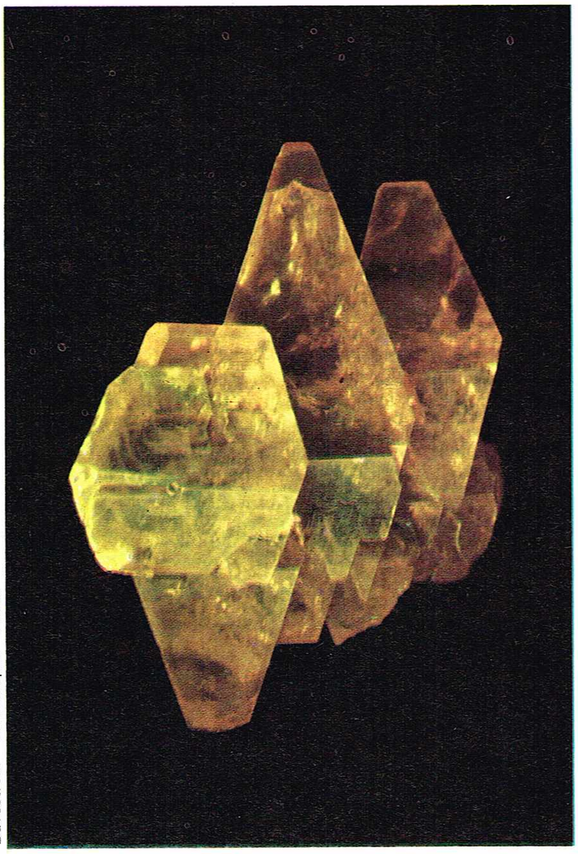

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ *Cristaux de soufre natif montrant la forme bipyramidale (Sicile).*

Description de l'espèce nouvelle

Obtenue par les deux méthodes décrites ci-dessus, l'analyse chimique peut poser le problème suivant : on est en présence d'un minéral homogène (l'examen optique et l'analyse ponctuelle l'ont prouvé) dont le diagramme de poudre et la composition chimique sont différents de ceux de tous les minéraux connus. Une bibliographie des espèces voisines s'impose, car il faut prouver que le minéral n'a jamais été étudié par un autre auteur, même d'une manière très incomplète. C'est quelquefois sur plus d'un siècle de publications que portent de telles recherches. Si l'on trouve une ancienne publication avec des données fausses, par exemple les indices de réfraction ou l'absence d'analyse quantitative par manque de matière ou encore, suivant l'ancienneté de la publication, l'absence d'étude par diffraction des rayons X, il est nécessaire de rechercher dans quel musée est conservé l'échantillon original. On demandera celui-ci en vue de prouver l'identité des deux espèces, afin de publier de nouvelles données tout en conservant l'ancien nom du minéral.

Supposons que la bibliographie montre que le minéral est vraiment étudié pour la première fois. L'étude de ce fait est très intéressante et devra se poursuivre dans les limites imposées par la quantité de matériel disponible. En effet, il faut évidemment garder un nombre raisonnable d'échantillons qui seront conservés dans les musées comme *espèce type* et dont les doubles pourront être échangés avec ceux d'autres musées. Naturellement aucune publication incomplète n'est souhaitable, et on doit attendre d'avoir un minimum de données pour créer un nouveau nom.

L'étude radiocristallographique sera donc poursuivie. Après détermination des angles et des paramètres de la maille élémentaire, on calculera la densité du minéral en fonction de ses paramètres et de sa composition chimique. Cette densité calculée sera comparée à la densité mesurée par la méthode hydrostatique et devra s'en approcher de très près.

Puis on entreprendra l'étude goniométrique des cristaux. Cette étude a pour but de préciser le système cristallin du minéral, d'établir le rapport et les angles que les axes géométriques forment entre eux, ce qui permettra de recouper avec une grande précision le rapport paramétrique ainsi que les angles de la maille cristalline trouvés par l'étude radiocristallographique.

Les mesures devront se faire sur un certain nombre de cristaux aux faces bien réfléchissantes afin d'avoir une moyenne de mesures très approchante de la réalité. On dressera, en dernier lieu, le tableau général des faces rencontrées pour l'espèce, en donnant les angles formés entre les normales des faces. Ce tableau permettra d'établir la projection stéréographique en vue de dessiner les différents faciès sous lesquels se présente le minéral.

On possède alors suffisamment de données pour décrire l'espèce :

— description macroscopique ;
— analyse chimique du corps pur et sa formule ;
— diagramme de poudre et tableau des valeurs qui en découlent (distances interréticulaires et intensité) ;
— propriétés optiques (couleur, indices, etc.) ;
— densité ;

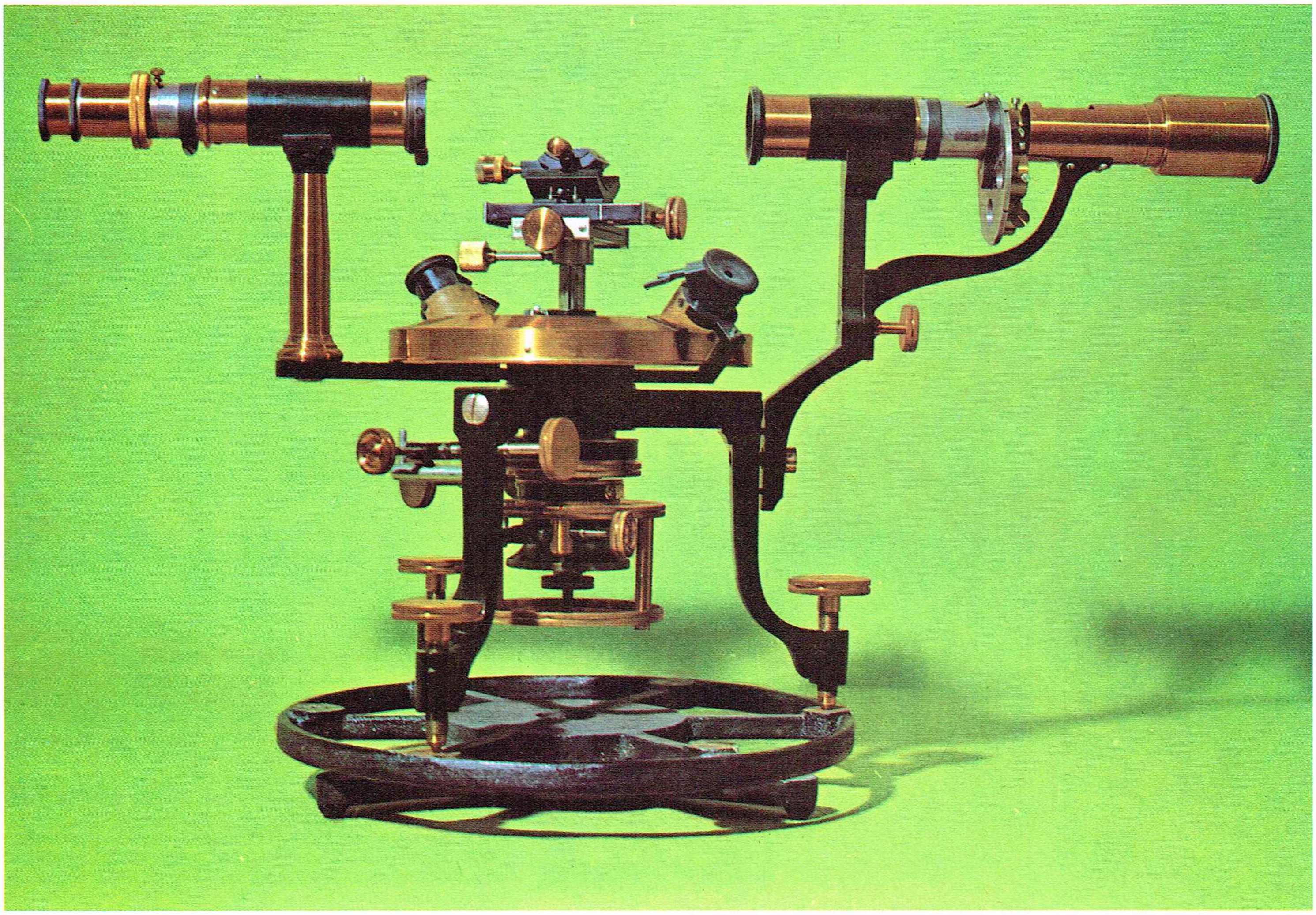

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ **Goniomètre à réflexion** ***ou goniomètre de Babinet pour la mesure des angles entre les faces des cristaux.***

— mesures goniométriques, paramètres et angles de la maille élémentaire ;

— comparaison du minéral avec les espèces voisines connues ou non connues ;

— description du gisement ;

— lieu où les échantillons sont conservés ;

— étymologie du nouveau nom et bibliographie.

La rareté du minéral ne permet peut-être pas encore d'effectuer d'autres études, mais dès qu'on l'aura trouvé en quantité suffisante dans un autre gisement, on pourra aborder l'étude de ses propriétés physico-chimiques : transformation de structure, étude de déshydratation et de décomposition au cours d'un chauffage progressif (analyse thermique différentielle et analyse thermopondérale) et, enfin, parachever l'étude de sa structure en pénétrant toujours plus avant dans l'immense domaine de la physique du solide.

La cristallographie

Les cristaux, du fait de leur structure géométrique interne, présentent souvent des formes géométriques externes limitées par des faces planes. On observe fréquemment des cristaux cubiques (pyrite, fluorine, galène, sel gemme), des cristaux en forme de rhombododécaèdres (grenats), des cristaux rhomboédriques ou scalénoédriques (calcite), des cristaux prismatiques allongés (stibine), des cristaux orthorhombiques bipyramidaux (soufre), etc.

Pour que les cristaux présentent des formes géométriques, il leur faut de l'espace pour se développer. C'est pourquoi les mieux formés font saillie dans les fentes et les géodes ou bien sont englobés dans des roches tendres et déformables, ce qui est le cas des cristaux de gypse dans les argiles. Le marbre aussi est une roche formée d'innombrables cristaux de calcite, mais pressés les uns contre les autres et par conséquent non limités par des faces planes : il leur manquait justement de l'espace pour se développer régulièrement.

Loi de la constance de l'angle dièdre

Les cubes de pyrite, les rhomboèdres de calcite, et rhombododécaèdres de grenat, etc., que nous avons cités, sont des minéraux classiques. En fait, on ne rencontre pas souvent les minéraux sous forme de solides parfaitement réguliers. Toutefois, du point de vue cristallographique, les cristaux déformés sont considérés comme réguliers, car on peut considérer les faces comme déplacées parallèlement à elles-mêmes (bien qu'on ne puisse modifier la valeur de l'angle que forment les faces, c'est-à-dire modifier les angles dièdres).

Cette propriété, qui est une caractéristique des substances cristallisées, a été énoncée sous forme d'une loi, que l'on peut considérer comme la loi fondamentale de la cristallographie, et qui a reçu plusieurs noms : loi de Sténon, loi de Romé de l'Isle, loi de Guglielmini, ou plus simplement loi de la constance de l'angle dièdre. Celle-ci s'exprime ainsi : « Dans des cristaux de la même espèce, et dans des conditions identiques de température, les angles dièdres correspondants sont égaux. » (La différence de température peut en effet modifier la valeur des angles dièdres correspondants dans les cristaux anisotropes, du fait de la dilatation thermique.) Ainsi, les angles formés par les faces d'un cube de pyrite mesurent toujours 90°, quel que soit le gisement d'origine. Les angles formés par les faces des prismes hexagonaux de quartz sont toujours de 120°, même si le prisme hexagonal n'est pas régulier.

Pour contrôler l'exactitude de la loi que nous venons d'énoncer, il suffit d'effectuer expérimentalement la mesure des dièdres à l'aide d'appareils nommés *goniomètres*.

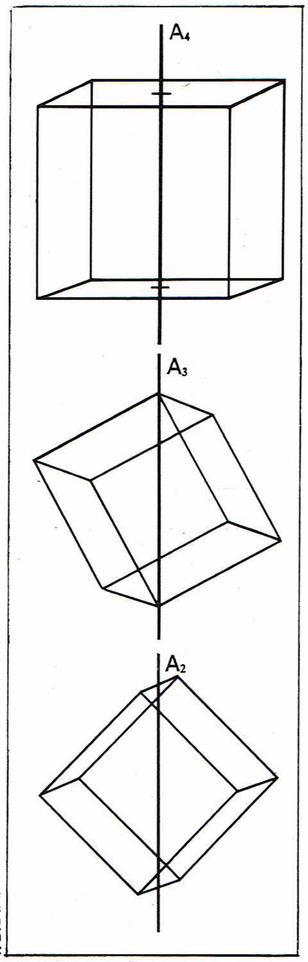

I.G.D.A.

▲ ***Cube avec ses axes de symétrie ; en haut, axe quaternaire (A_4) ; au centre, axe ternaire (A_3) ; en bas, axe binaire (A_2). Lors d'une rotation de 360° autour de ces 3 axes, il se superpose à lui-même quatre, trois et deux fois.***

▶ ***Ci-contre, de haut en bas : figures 1, 2 et 3 illustrant la démonstration de la loi des troncatures rationnelles.***

▶ ***Page ci-contre, dans la marge, formes dérivées du cube.*** **Classe hexoctaédrique :** ***1, hexoctaèdre ; 2, trioctaèdre ; 3, icositétraèdre ; 4, tétrahexaèdre ; 5, octaèdre ; 6, rhombododécaèdre ; 7, cube ou hexaèdre.***

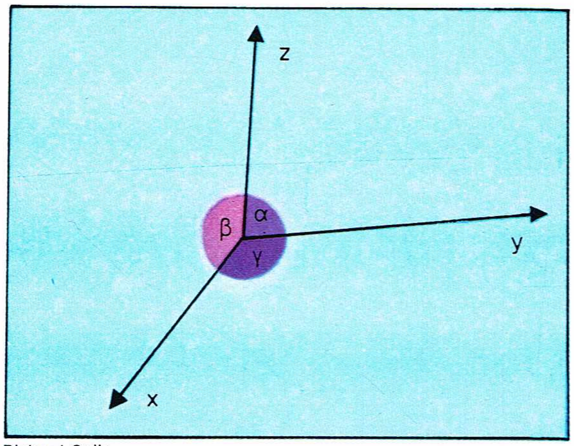

Richard Colin

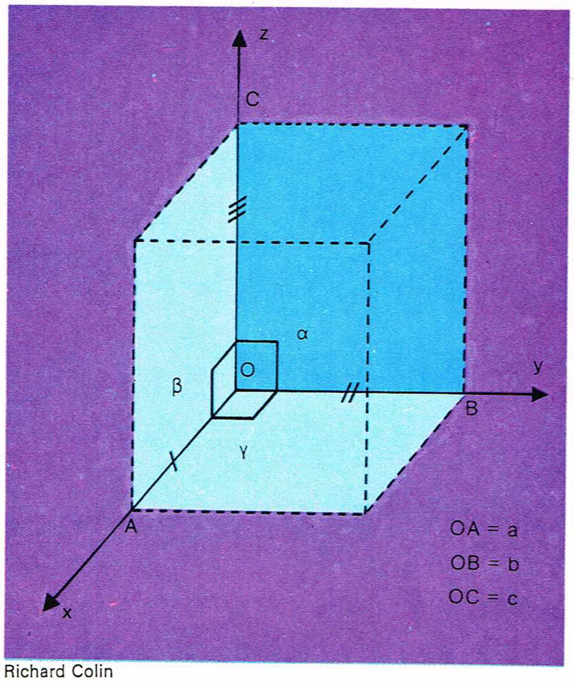

Richard Colin

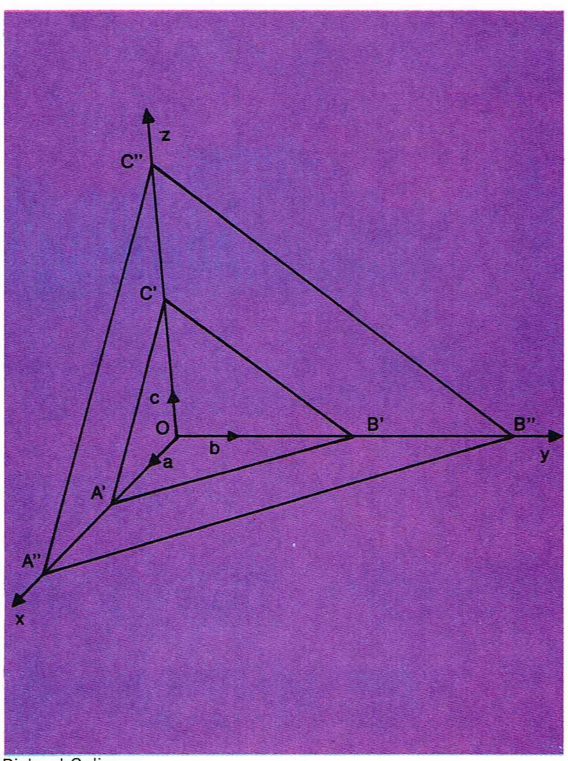

Richard Colin

Le goniomètre le plus simple et le plus ancien est le *goniomètre d'application*. Il s'agit d'un demi-cercle métallique, gradué, divisé en degrés sexagésimaux. Une alidade rotative est liée à un pivot situé à la moitié du diamètre. Les deux faces formant le dièdre sont mises respectivement en contact avec le prolongement de l'alidade et avec le diamètre du demi-cercle. La lecture est effectuée à l'autre extrémité de l'alidade. Ce goniomètre ne permet pas de mesurer les dièdres des tout petits cristaux.

Le *goniomètre à réflexion* est constitué par un porte-cristal, réglable verticalement et horizontalement, pourvu de deux glissières formant berceau pour redresser le cristal lors du centrage. Le cristal y est fixé avec de la cire ou de l'acétocellulose, de manière que l'arête du dièdre à mesurer soit à peu près verticale. La rectification est effectuée ensuite par voie optique. Un cercle gradué de 0° à 360° permet habituellement des mesures avec une approximation de 30''. Une première lunette, le collimateur, sert à concentrer la lumière blanche d'une source lumineuse. Un rayon lumineux, diaphragmé, traverse le collimateur et tombe sur le cristal. Une face du dièdre, en position voulue, réfléchit le rayon lumineux dans une lunette de Galilée pourvue d'un réticule et d'une lentille frontale, que l'on peut mettre ou ôter. Lorsque la lentille est en place, on observe une image agrandie et retournée du cristal ainsi que la face réfléchissante illuminée. Lorsqu'on ôte la lentille frontale, on observe l'image du diaphragme, réfléchie par la face. On peut alors la centrer avec le réticule, puis faire tourner le cristal jusqu'à ce que soit visible, dans le champ de la lunette, l'image réfléchie de la seconde face à mesurer, parfaitement centrée. La différence d'angle observée sur le cercle gradué correspondra à l'angle de rotation du cristal (angle mesuré entre les normales aux deux faces). Par exemple, un angle de 60° mesuré par le goniomètre à réflexion sur un cristal de quartz correspond à l'angle des normales entre deux faces qui forment entre elles un angle réel de 120°. Les mesures de plusieurs angles dièdres d'un cristal peuvent permettre d'identifier l'espèce minérale dont il s'agit : on les compare avec les valeurs angulaires connues, caractéristiques de cette espèce. Le goniomètre à réflexion sert aussi pour mesurer l'indice de réfraction et pour le centrage des cristaux en radio-cristallographie.

On se sert aussi en cristallographie du *goniomètre à deux cercles*, ou *goniomètre-théodolite*, qui permet de réaliser des mesures d'angles dièdres sans avoir à monter et démonter le cristal. Avec cet appareil, on n'obtient pas directement la valeur angulaire de l'angle dièdre, mais deux coordonnées pour chaque face, à savoir ρ et φ ; en faisant une projection stéréographique des faces, on trouve graphiquement les angles qu'elles forment.

Des *goniomètres automatiques à cellule photo-électrique*, encore plus perfectionnés, ont été récemment mis au point : ils servent à mesurer et à enregistrer automatiquement les données relatives à la morphologie des cristaux.

Loi des troncatures rationnelles

Romé de l'Isle nous a donné, avec la mesure des angles que faisaient entre elles les faces des cristaux, le premier des critères rationnels permettant d'identifier ceux-ci. Après lui, on a été amené à établir un système de référence permettant de symboliser toutes les faces d'un même cristal afin de les imaginer dans l'espace. Plusieurs systèmes furent élaborés puis abandonnés. De nos jours, le *système de Miller* est de plus en plus utilisé en raison de sa clarté. Cette possibilité nous fut donnée la première fois par René-Just Haüy qui, à la suite de ses travaux sur l'idée de la « molécule intégrante » (découlant de ses mesures sur les clivages), est arrivé à dégager la loi des troncatures rationnelles, premier pas effectué vers la notion de « maille élémentaire » et de celle du réseau cristallin, découvert par l'un de ses élèves.

Cette loi des troncatures rationnelles s'énonce ainsi : les plans tronquant un angle de la forme primitive détachent, sur les trois arêtes adjacentes au sommet, des longueurs multiples de l'unité relative à l'arête considérée. La maille élémentaire possède des éléments géométriques de symétrie tels que les axes, les plans et centre de symétrie. Les différentes combinaisons des éléments de symétrie

cristallographique permettent de former sept systèmes cristallins : cubique, quadratique, orthorhombique, etc., dont les mailles élémentaires sont le cube, le parallélépipède, etc.

On rend compte de ces éléments de symétrie à partir d'un système de 3 axes orientés ayant une origine O (fig. 1). Dans le cas de la symétrie hexagonale, on considère 4 axes, 3 axes étant situés dans un plan horizontal à 120° les uns des autres, le 4e étant vertical, c'est-à-dire perpendiculaire à ce plan horizontal. Ces axes Ox, Oy, Oz constituent un système de coordonnées formant entre elles 3 angles α, β et γ. Ces angles sont les constantes angulaires du cristal et donc de la maille élémentaire, alors que les 3 axes sont désignés comme les axes cristallographiques.

Si l'on considère la maille élémentaire parallélipipédique d'un cristal orthorhombique, l'origine O située à l'intersection de 3 arêtes et les 3 côtés OA, OB et OC situés sur les axes cristallographiques de longueur *a, b* et *c* sont les paramètres du cristal (fig. 2).

Ces paramètres *a, b* et *c* constituent avec les angles α, β et γ les *constantes cristallographiques* du cristal.

Dans les sept systèmes cristallins, les constantes sont les suivantes :

Système cubique	$a = b = c$; $\alpha = \beta = \gamma = 90°$
Système quadratique	$a = b \neq c$; $\alpha = \beta = \gamma = 90°$
Système orthorhombique	$a \neq b \neq c$; $\alpha = \beta = \gamma = 90°$
Système rhomboédrique	$a = b = c$; $\alpha = \beta = \gamma \neq 90°$
Système hexagonal	$a = b \neq c$; $\alpha = \beta = 90°, \gamma = 120°$
Système monoclinique	$a \neq b \neq c$; $\alpha = \gamma = 90°; \beta \neq 90°$
Système triclinique	$a \neq b \neq c$; $[\alpha \neq \beta \neq \gamma] \neq 90°$

On considère maintenant la face d'un cristal coupant les 3 axes cristallographiques et déterminant ainsi 3 segments dont les longueurs *a', b'* et *c'* sont des multiples des paramètres *a, b* et *c* de la maille élémentaire, soit : $a' = pa$, $b' = qb$, $c' = rc$; où *p, q* et *r* sont des nombres entiers.

Si l'on effectue alors le rapport entre le paramètre et la longueur du segment intercepté sur chacun des axes, on obtient :

$$\frac{a}{a'} = \frac{a}{pa} = \frac{1}{p}, \frac{b}{b'} = \frac{b}{qb} = \frac{1}{q}, \frac{c}{c'} = \frac{c}{rc} = \frac{1}{r}.$$

Ces trois valeurs : $1/p$, $1/q$ et $1/r$ caractérisent la face envisagée du cristal. Or, tous les nombres conservant entre eux les rapports existant entre ces trois valeurs permettent de caractériser toutes les faces parallèles à cette première face, ces faces parallèles formant une famille de plans. D'autre part, la loi de la constance de l'angle dièdre permet de considérer uniquement les différentes familles de plans pour caractériser les cristaux. On définit alors une famille de plans par les trois nombres entiers premiers entre eux, notés : *(h, k, l)*, que l'on appelle indices. Ces trois nombres sont obtenus en multipliant $1/p$ $1/q$ et $1/r$ par le PPCM (plus petit commun multiple) de *p, q* et *r*. Ce système de notation pour désigner les familles de plans réticulaires est dû au cristallographe anglais Miller.

A titre d'exemple, prenons le cas particulier de la figure 3. Soit A′ B′ C′ et A″ B″ C″, deux faces parallèles dont les coordonnées sont :

$$OA' = 2a \quad OA'' = 4a$$
$$OB' = 5b \quad OB'' = 10b$$
$$OC' = 3c \quad OC'' = 6c$$

Nous avons vu que les indices de Miller sont obtenus en multipliant les inverses $1/p$, $1/q$ et $1/r$ par le PPCM de *p, q* et *r*. Dans l'exemple considéré, les inverses sont :

$$1/p' = 1/2 \quad 1/p'' = 1/4$$
$$1/q' = 1/5 \quad 1/q'' = 1/10$$
$$1/r' = 1/3 \quad 1/r'' = 1/6$$

On obtient donc :

$$h' = h'' = 15$$
$$k' = k'' = 6$$
$$l' = l'' = 10$$

Ces deux faces A′B′C′ et A″B″C″, étant parallèles, appartiennent à une même famille de plans dont les indices de Miller sont 15, 6, 10.

Cas particuliers. Très souvent, les faces des cristaux sont parallèles à un ou deux axes. Dans ce cas, on dit que la face coupe l'axe cristallographique à l'infini (∞). Si la face est parallèle à Ox, on a $pa = \infty$, d'où $p = \infty$ et $1/p = 1/\infty = 0$; l'indice de Miller sera donc nul. Si cette face coupe les deux autres axes de telle sorte que $q = r$, on a $1/q = 1/r$ et $k = l = 1$.

On appellera donc cette face, d'après les indices de Miller, (011). Dans le cas où $q \neq r$, la face sera notée (O*kl*) par exemple (O12), (O23), (O32), etc. On note de la façon suivante les faces parallèles aux différents axes, soit :

— les faces parallèles aux axes : Ox Oy → (001) ; Oy Oz → (100) ; Ox Oz → (010)

— les faces parallèles à l'axe : Ox → (O*kl*) ; Oy → (*h*O*l*) ; Oz → (*hk*O)

Dans le système hexagonal, qui possède quatre axes, les indices de Miller deviennent (*hkil*), *i* étant la somme négative de *h* et *k* (ex. $11\bar{2}1$).

Dans la nature, les faces les plus courantes sont celles qui présentent une densité maximale d'atomes. Cela est dû au fait que les atomes proches sont solidement liés entre eux. Les plans à densité maximale seront donc ceux caractérisés par les indices de Miller, généralement petits ; ainsi les faces (001) (010) et (100) seront les faces les plus importantes d'un cristal. Les indices de Miller les plus couramment employés sont O et les nombres compris entre 1 et 6.

Lorsque les indices de Miller sont mis entre accolades, ils ont la signification de symbole d'une forme. Par exemple, dans le système cubique, {100} représente non seulement la face antérieure du cube, mais aussi les 5 autres faces, qui ont donc le même symbole bien que les indices des faces puissent être changés de place et de signe : (100), ($\bar{1}00$), (010) ; ($0\bar{1}0$), (001) et ($00\bar{1}$). Lorsque les indices sont mis entre crochets, ils symbolisent une arête, c'est-à-dire une droite déterminée par l'intersection de 2 faces. Par exemple, dans le cube, les faces (100) et (001) forment l'arête [010].

Les éléments de symétrie

Un cristal régulier possède toujours un ou plusieurs éléments de symétrie. Il peut y avoir dans un cristal trois catégories différentes d'éléments de symétrie : axes, plans et centre. Dans certains cristaux, les trois éléments coexistent, alors que dans d'autres ils manquent totalement ou partiellement.

Axes de symétrie

— *Axes de symétrie simple*

Un axe de symétrie est une droite telle qu'un cristal tournant autour d'elle se superpose à lui-même deux, trois, quatre ou six fois en accomplissant une rotation de 360°. Il y a donc des axes de symétrie d'ordre 2, d'ordre 3, d'ordre 4 et d'ordre 6.

Dans un *cube* par exemple, si l'on joint par une droite le centre de deux faces opposées et si l'on fait tourner le solide de 360° autour de cette droite, on observe 4 superpositions. Étant donné que les faces d'un cube sont au nombre de 6 et qu'elles se font face deux à deux par rapport à l'axe de symétrie d'ordre 4, on peut dire qu'il existe dans un cube 3 axes de symétrie d'ordre 4, ce qui s'exprime symboliquement par $3A_4$. Si, dans le même cube, on joint par une droite deux sommets opposés (un sommet est le point de rencontre de trois angles ou plus) et si l'on fait à nouveau effectuer au solide une rotation de 360°, on observe 3 superpositions, c'est-à-dire qu'on retrouve trois fois le même type de face, identiquement orientée. Il y a dans cette direction un axe de symétrie d'ordre 3. Étant donné que, dans un cube, les sommets sont au nombre de 8 et que chaque axe de symétrie d'ordre 3 joint deux sommets, on dit qu'il y a

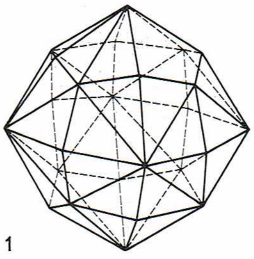
1

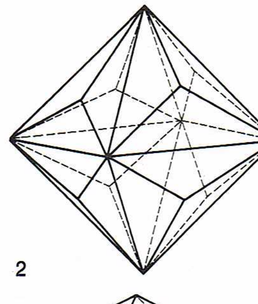
2

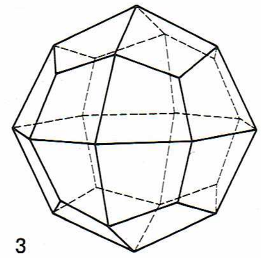
3

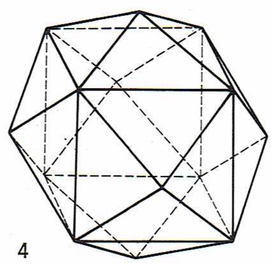
4

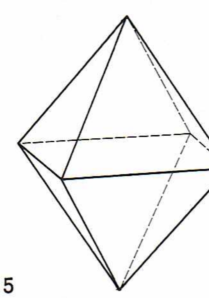
5

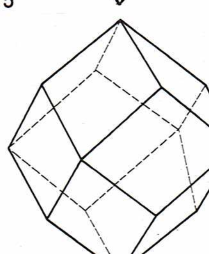
6

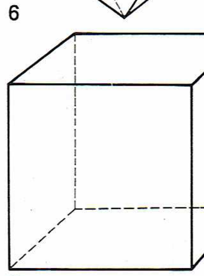
7
I.G.D.A.

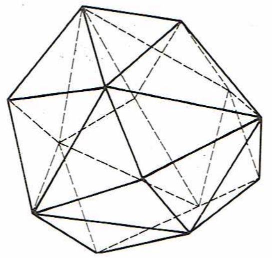

1

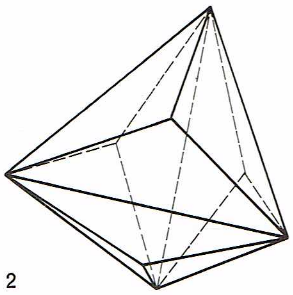

2

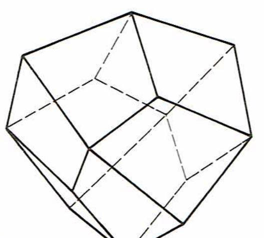

3

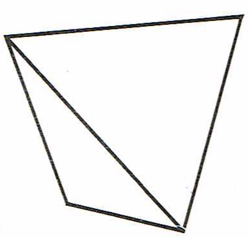

4

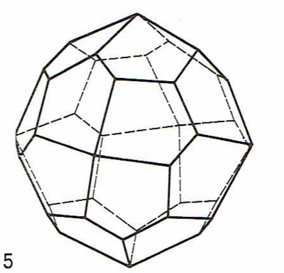

5

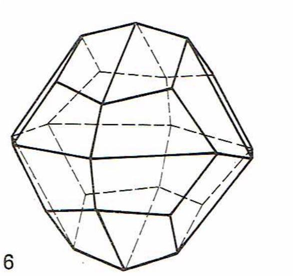

6

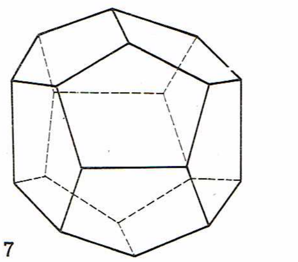

I.G.D.A. 7

dans un cube 4 axes de symétrie d'ordre 3, soit symboliquement $4A_3$. Si, toujours dans le même cube, on joint par une droite les points médians de deux arêtes opposées et si l'on fait encore effectuer au solide une nouvelle rotation de 360°, la superposition a lieu deux fois : il s'agit d'un axe de symétrie d'ordre 2 ; comme il y a 12 arêtes dans un cube, il y a 6 axes de symétrie d'ordre 2, ou symboliquement $6A_2$.

Si l'on prend, au lieu d'un cube, *une bipyramide de section hexagonale* et si l'on joint par une droite le sommet supérieur au sommet inférieur, en faisant en outre effectuer au solide une rotation de 360°, on observe 6 superpositions ; il s'agit d'un axe de symétrie d'ordre 6, ou A_6.

Il n'y a jamais plus d'un axe de symétrie d'ordre 6 dans les cristaux. Il n'existe pas d'axe d'ordre 5 : cela ne serait pas compatible avec la géométrie de la structure cristalline. En effet, il n'est pas possible de renfermer exactement une portion d'espace par des solides à section pentagonale, de même qu'il n'est pas possible de faire un pavement avec seulement des tomettes pentagonales.

— *Axes de symétrie composés*

Dans le cas de ces axes. il faut supposer non seulement une rotation, mais aussi un renversement ou une réflexion spéculaire. Par exemple, dans un *tétraèdre,* si l'on joint par une droite les points médians de deux arêtes opposées et si l'on fait effectuer au cristal une rotation autour de cette droite, et si, en outre, celui-ci présente initialement vers l'observateur une face triangulaire à base tournée en haut, on voit encore, après une rotation de 90°, une face triangulaire, mais à base tournée en bas ; on doit faire effectuer une rotation de 90° supplémentaire, soit 180° en tout, pour obtenir une superposition exacte. Mais, si après une rotation de 90°, on fait aussi effectuer un renversement du cristal autour d'un axe perpendiculaire à l'observateur, ou si l'on considère l'image spéculaire de la face dont la base est tournée vers le bas, par rapport à un plan passant par le sommet supérieur, on obtient aussi une superposition après une rotation de 90° ; en ce cas, l'axe de symétrie est d'ordre 2 et simple, et d'ordre 4 et composé ; il est dit *axe d'ordre 2 tétracomposé* et indiqué par $A_{2(4)}$. Il existe des *axes d'ordre* 3 *hexacomposés,* $A_{3(6)}$.

— *Axes d'inversion*

Aujourd'hui, les cristallographes préfèrent remplacer les axes composés par des axes d'inversion, que l'on obtient quand la rotation autour d'un axe est accompagnée d'une inversion par rapport à un centre.

Lorsqu'un axe de symétrie joint des éléments différents, comme un sommet à une face, une arête longue et une arête courte, un sommet aigu et un sommet obtus, on le nomme *axe polaire*. Dans le tétraèdre, les axes de symétrie d'ordre 3 qui joignent un sommet au centre de la face opposée sont des axes polaires. Les axes polaires sont indiqués par les symboles $A_{2(p)}$, $A_{3(p)}$, $A_{4(p)}$, et $A_{6(p)}$.

Plans de symétrie

Un plan de symétrie est un plan qui divise le cristal en deux parties symétriquement égales.

Dans un *cube,* le plan qui intersecte au milieu deux couples d'arêtes parallèles et qui est parallèle aux deux autres couples est un plan de symétrie. Il en existe deux autres, équivalents, dans le cube. Le plan qui intersecte en diagonale un cube tout en passant par deux arêtes opposées est lui aussi un plan de symétrie, mais non équivalent aux précédents. Dans le cube, les plans de symétrie sont au nombre de 6. La notation se fait donc de la façon suivante : 3P, 6P′.

Centre de symétrie

Le centre de symétrie est un point d'où partent des directions et des contre-directions (ou des sens et des sens inverses) physiquement égales, de sorte qu'à chaque face en correspond une autre, opposée, parallèle et inversée, et à chaque arête ainsi qu'à chaque sommet un élément correspondant. On s'assure de la présence du centre de symétrie dans les cristaux en observant si les faces forment toutes des couples parallèles. Il suffit qu'une seule face ne possède pas sa face correspondante parallèle pour qu'il n'y ait pas de centre de symétrie. Dans le *cube,* qui possède trois couples de faces parallèles, le centre de symétrie existe. Dans le *tétraèdre, au* contraire, où à chaque face correspond, du côté opposé, un sommet, il n'y a pas de centre de symétrie. L'absence de centre de symétrie est également déterminée par la présence d'axes polaires. La notation du centre se fait par le symbole C.

Le degré de symétrie

Nous avons vu que le cube, que nous avons pris comme exemple, possède trois axes d'ordre 4, quatre axes d'ordre 3, six axes d'ordre 2, neuf plans de symétrie (3 + 6), et un centre de symétrie, c'est-à-dire $3A_4$, $4A_3$, $6A_2$, 3P, 6P′, C. L'ensemble de tous les éléments de symétrie d'un cristal est appelé *degré de symétrie*.

Le *degré apparent de symétrie géométrique* d'un cristal ne correspond pas toujours à sa symétrie réelle. Par exemple, un cube de pyrite a des faces striées ; les stries sont verticales et horizontales sur les faces contiguës. Si l'on fait effectuer une rotation au cube de pyrite autour d'une droite joignant le centre de deux faces opposées, en partant d'une face à stries verticales, on voit apparaître, après une rotation de 90°, une face à stries horizontales, puis, après 180°, une face à stries verticales ; il y a donc une superposition à 180° et non à 90°. L'axe de symétrie, qui du point de vue géométrique est d'ordre 4, devient, du point de vue cristallographique, d'ordre 2. On observe des phénomènes analogues *(hémiédrie)* dans des cristaux d'autres substances.

Parfois, pour déterminer la *symétrie réelle,* en l'absence d'indications naturelles, on doit attaquer les faces avec des produits appropriés, de manière à provoquer l'apparition de figures de corrosion caractéristiques. Par exemple, en effectuant l'attaque à l'aide d'acide fluorhydrique, on met en évidence dans le quartz bipyramidal que l'axe vertical est un axe de symétrie d'ordre 3 et non d'ordre 6, comme on pourrait le croire d'après l'aspect géométrique.

Les familles, les systèmes et les classes

Dans la nature, il existe trente et un degrés de symétrie pour les cristaux ; il existe, en outre, des cristaux sans symétrie, de sorte qu'on peut grouper toutes les substances cristallisées en trente-deux classes de symétrie. Ces classes sont réunies en sept systèmes, et ces systèmes en trois familles.

La première est dite **famille isométrique**, car les trois paramètres déterminés sur les trois axes sont de longueur égale. Le rapport paramétrique de cette famille s'exprime ainsi : $\mathbf{a} : \mathbf{a} : \mathbf{a}$, ou $\mathbf{a} = \mathbf{b} = \mathbf{c}$.

La famille isométrique est constituée par un seul système : le *système cubique,* ou *isométrique,* de symétrie $4A_3$. Les angles formés par les axes sont tous égaux et ont tous pour valeur 90°. On a donc $\alpha = \beta = \gamma = 90°$. Le rapport paramétrique et les valeurs angulaires existant entre les axes constituent les constantes cristallographiques.

La **famille dimétrique** est caractérisée par deux paramètres égaux entre eux et un paramètre différent, ou bien, du fait qu'il peut y avoir dans ce groupe un système de référence à quatre axes, trois paramètres égaux et un autre paramètre différent. Cette famille comprend les trois systèmes qualifiés respectivement de tétragonal, hexagonal et trigonal.

Le *système tétragonal,* ou *quadratique,* a un système de référence triaxial. Le rapport paramétrique est $\mathbf{a} : \mathbf{a} : \mathbf{c}$ ou bien $\mathbf{a} = \mathbf{b} \neq \mathbf{c}$, où l'on peut avoir $\mathbf{c} > \mathbf{a}$ ou $\mathbf{c} < \mathbf{a}$ et $\alpha = \beta = \gamma = 90°$.

Le *système hexagonal* comporte 4 axes ; le rapport paramétrique est donc $\mathbf{a} : \mathbf{a} : \mathbf{a} : \mathbf{c}$ ou bien $\mathbf{a} = \mathbf{b} = \mathbf{t} \neq \mathbf{c}$. Les angles formés par les axes sont les suivants :

$$\alpha = \beta = \delta = 90° \text{ et } \gamma = 120°,$$

où γ est l'angle formé par les axes des **x**, **y** et **t** qui se trouvent dans le plan horizontal, et où α, β et δ sont les angles formés par les trois axes des **x**, **y** et **t** d'une part et l'axe vertical **z** d'autre part. L'élément caractéristique du système est un axe de symétrie d'ordre 6.

Le *système trigonal* ou *rhomboédrique*, peut comporter soit 4 axes, soit 3 axes. Le cas des 4 axes est plus simple, car il possède les mêmes constantes cristallographiques que dans le système hexagonal. Le principal caractère de symétrie est cependant un seul axe de symétrie d'ordre 3.

La **famille trimétrique** présente trois paramètres de longueurs différentes. Ce groupe comprend trois systèmes, qualifiés respectivement d'orthorhombique, de monoclinique et de triclinique.

Le *système orthorhombique* a pour rapport paramétrique **a : b : c**, c'est-à-dire **a** $\neq$ **b** $\neq$ **c**, $\alpha = \beta = \gamma = 90°$.

Le *système monoclinique* a pour rapport paramétrique **a : b : c**, $\alpha = \gamma = 90°$ et $\beta \neq 90°$. Dans ce système, en effet, l'axe des **x** est par convention incliné vers l'observateur; en conséquence, l'angle β formé par **x** et **z** est supérieur à 90°. Toute substance monoclinique a un angle β caractéristique.

Le *système triclinique* a lui aussi pour rapport paramétrique **a : b : c**, mais $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90°$.

Comme nous l'avons dit, il existe dans chaque système plusieurs classes (en nombre variable selon les systèmes). Les classes se différencient par leur degré différent de symétrie.

Il existe ainsi des classes holoédriques, des classes hémiédriques, et des classes tétartoédriques. Dans les classes holoédriques, on observe un maximum de faces et un degré maximal de symétrie. Dans les classes hémiédriques, on ne retrouve que la moitié des faces des classes holoédriques, et un degré de symétrie inférieur (mais non réduit à la moitié de celui des classes holoédriques). Dans les classes tétartoédriques, il reste seulement un quart des faces des classes holoédriques, et un degré de symétrie encore plus bas que celui des classes hémiédriques.

Dans la classe holoédrique du système cubique, par exemple, il existe une forme simple appelée *hexoctaèdre*, solide à 48 faces, dont le symbole général est $\{hkl\}$. Le degré de symétrie est le même que celui du cube : $3A_4$, $4A_3$, $6A_2$, 3P, 6P', C.

L'existence de la moitié des faces de l'hexoctaèdre aboutit à la formation de l'*hexatétraèdre* à 24 faces, dont le symbole général est identique, soit $\{hkl\}$, et dont la symétrie est inférieure : $3A_{2(4)}$, $4A_{3(p)}$, 6P.

L'existence d'un quart des faces de l'hexoctaèdre aboutit à la formation du *dodécaèdre pentagonal*, solide à 12 faces, qui a le même symbole général $\{hkl\}$, mais a pour degré de symétrie $4A_{3(p)}$, $3A_2$.

Système cubique, ou monométrique

Le système cubique comprend 5 classes. Son élément caractéristique de symétrie est $4A_3$. Les constantes sont les suivantes : **a : a : a**, $\alpha = \beta = \gamma = 90°$.

Classe hexoctaédrique (holoédrique) ou classe de la fluorite

On l'appelle classe de la fluorite du nom de l'un des minéraux les plus connus qui lui appartiennent. Le degré de symétrie est : $3A_4$, $4A_3$, $6A_2$, 3P, 6P', C.

Il existe des *formes simples* et des *combinaisons*. Les formes simples sont celles qui se présentent par la superposition d'une face donnée en fonction du degré de symétrie existant. Par exemple, dans le cas de la symétrie de la classe hexoctaédrique, lorsqu'une face du cube apparaît, il doit en exister nécessairement 5 autres, situées de telle façon qu'elles engendrent la forme du cube simple. Une forme composée, ou combinaison, est donnée par contre par l'association de plusieurs formes simples dans un même cristal.

Les formes simples de la classe hexoctaédrique sont : l'*hexoctaèdre* $\{hkl\}$, solide à 48 faces triangulaires, nombre maximal qui puisse exister dans une forme simple; le *trioctaèdre* $\{hhl\}$, solide à 24 faces triangulaires; l'*icositétraèdre* $\{hll\}$, ou *leucitoèdre*, solide à 24 faces deltoïdes; le *tétrahexaèdre* $\{hk0\}$, également à 24 faces triangulaires, que l'on peut réduire à un cube sur chacune des faces duquel s'est formée une pyramide; l'*octaèdre* $\{111\}$, solide à 8 faces constituées par des triangles équilatéraux; le *rhombododécaèdre*, ou *grenatoèdre* $\{110\}$, à 12 faces rhombiques; enfin, le *cube*, ou *hexaèdre* $\{100\}$, à 6 faces, parallèles deux à deux.

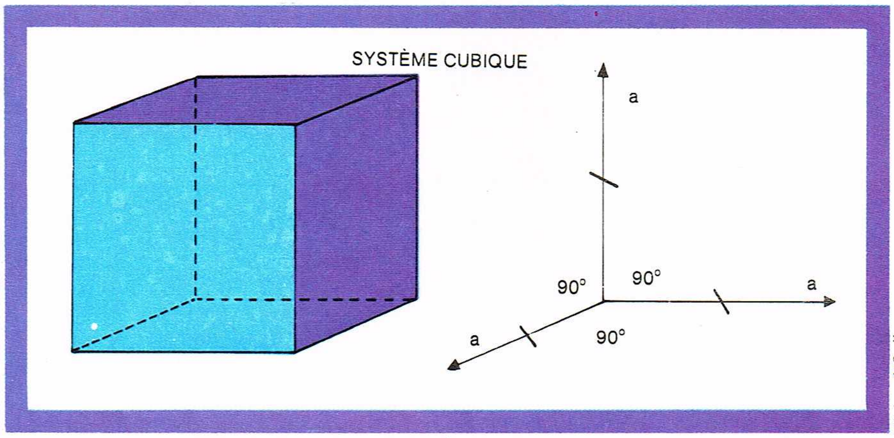

▲ ***Le système cubique comprend 5 classes; son élément caractéristique de symétrie est 4 A_3; les constantes sont les suivantes :*** **a = a = a, $\alpha = \beta = \gamma = 90°$.**

Ces formes peuvent se combiner entre elles. Parmi les combinaisons fréquentes, citons celles qui ont lieu entre le cube et l'octaèdre, entre le rhombododécaèdre et l'icositétraèdre, entre le cube et l'hexoctaèdre.

Parmi les substances qui cristallisent dans la classe hexoctaédrique (et il y en a bien d'autres), signalons : la galène PbS, la fluorine, ou fluorite CaF_2, le diamant C, la magnétite Fe_2O_3. FeO, le sel gemme NaCl.

Classe hexatétraédrique ou classe de la blende (hémiédrique)

Son degré de symétrie est : $3A_{2(4)}$, $4A_{3(p)}$, 6P. Les formes simples sont : l'*hexatétraèdre* $\{hkl\}$, à 24 faces, dérivant par hémiédrie de l'hexoctaèdre; le *tritétraèdre* $\{hll\}$, hémiédrique de l'icositétraèdre; le *deltoïdedodécaèdre* $\{hhl\}$, à 12 faces deltoïdes (triangulaires), forme hémiédrique du trioctaèdre. On observera que le deltoïdedodécaèdre, à faces deltoïdes, dérive du trioctaèdre à faces triangulaires, alors que le tritétraèdre à faces triangulaires dérive de l'icositétraèdre à faces deltoïdes; cela montre le peu d'importance de la forme des faces, lesquelles, dans les combinaisons, peuvent prendre les formes géométriques les plus diverses. En cristallographie, il faut donc donner de l'importance à l'emplacement des faces surtout. Il existe, enfin, le *tétraèdre* $\{111\}$, dérivant par hémiédrie de l'octaèdre. Si l'on prend 4 faces sur 8 de l'octaèdre, précisément les (111), $(\bar{1}\bar{1}1)$, $(1\bar{1}\bar{1})$, et $(\bar{1}1\bar{1})$, on obtient un tétraèdre positif; si l'on prend, par contre, les quatre autres faces, à savoir $(\bar{1}11)$, $(1\bar{1}1)$, $(11\bar{1})$, et $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$, on obtient un tétraèdre négatif, qui aura pour symbole général $\{111\}$. Il en va de même pour les autres formes simples de la même classe. Il existe ainsi des hexatétraèdres négatifs $\{h\bar{k}l\}$, des tritétraèdres négatifs $\{h\bar{l}l\}$, et des deltoïdedodécaèdres négatifs $\{h\bar{h}l\}$. Les deux formes positive et négative sont *conjuguées congruentes* et peuvent se superposer par rotation de 90° autour d'un axe $A_{2(4)}$.

On compte, dans cette classe, la blende ZnS et la tétraédrite $(Cu, Fe)_{12}Sb_4S_{13}$.

◀ ***Page ci-contre dans la marge;*** **classe hexatétraédrique :** ***1, hexatétraèdre; 2, tritétraèdre; 3, deltoïdedodécaèdre; 4, tétraèdre.*** **Classe gyroédrique :** ***5, icositétraèdre pentagonal.*** **Classe diploédrique :** ***6, didodécaèdre, 7, dodécaèdre pentagonal.***

▼ ***Formes composées du système cubique : rhombododécaèdre; icositétraèdre; cube; octaèdre; tétrahexaèdre.***

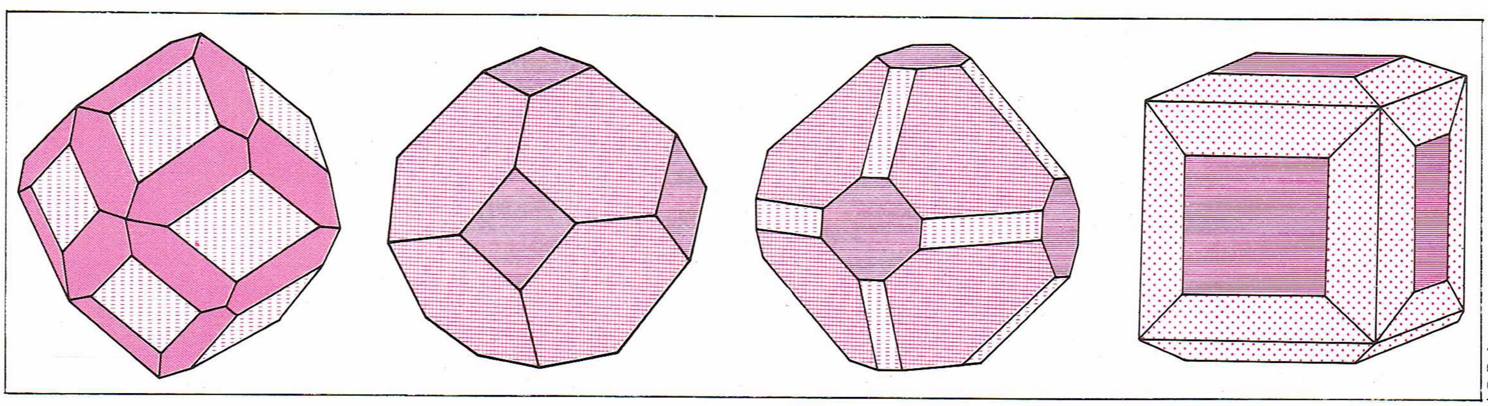

▶ *A gauche,* cristal octaédrique de galène *provenant de Gonderbach, Westphalie (musée d'Histoire naturelle, Milan). A droite,* pyrite en cristaux pentagonododécaédriques : *ce minéral est l'un des plus riches en fer (musée d'Histoire naturelle, Milan).*

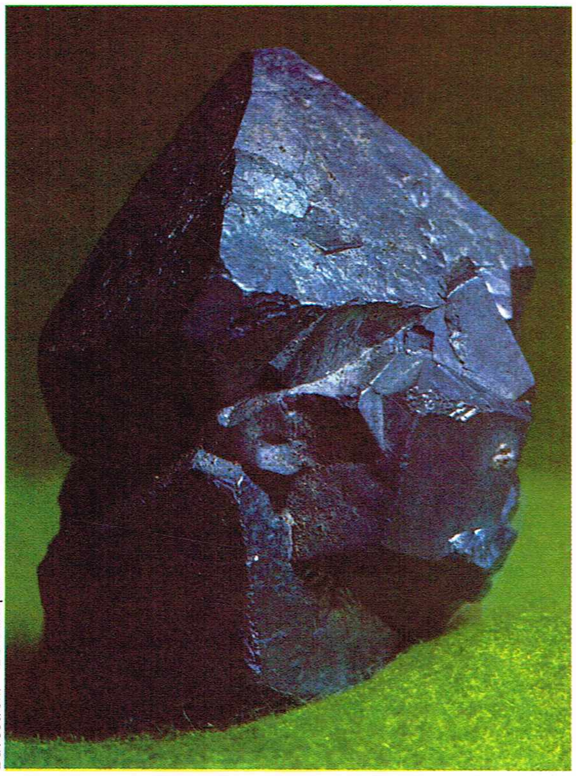

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Classe gyroédrique ou **de la cuprite** (**hémiédrique**)

Son degré de symétrie est : $3A_4$, $4A_3$, $6A_2$. Les formes simples sont un *icositétraèdre pentagonal droit* {*hkl*} et un *icositétraèdre gauche* {*khl*}. Ces deux solides ne peuvent se superposer par rotation autour d'un axe, mais seulement par réflexion spéculaire, comme la main droite et la main gauche. Ces formes sont dites *conjuguées énantiomorphes* et ne possèdent ni plans ni centre de symétrie.

Nous citerons, parmi les minéraux de cette classe, la cuprite Cu_2O.

Classe diploédrique ou **de la pyrite** (**hémiédrique**)

Son degré de symétrie est : $4A_3$, $3A_2$, 3P, C. Les formes simples sont : le *didodécaèdre direct* {*hkl*}, et le *didodécaèdre inverse* {*khl*}, solide à 24 faces trapézoïdales ; le *dodécaèdre pentagonal direct* {*hk*O} et le *dodécaèdre pentagonal inverse* {*kh*O}, solide à 12 faces pentagonales non régulières, appelé aussi *pyritoèdre*. Le dodécaèdre pentagonal dérive par hémiédrie du tétrahexaèdre. Dans cette classe, comme dans les autres classes hémiédriques et tétartoédriques, les formes caractéristiques de la classe peuvent être associées à des formes de la classe holoédrique ; le degré de symétrie est cependant toujours celui de la forme à symétrie la plus basse. On rencontre très communément dans cette classe les combinaisons du cube et du dodécaèdre pentagonal, ainsi que celles de l'octaèdre et du dodécaèdre pentagonal.

La substance la plus commune cristallisant dans cette classe est la pyrite FeS_2.

Classe pentagonododécaédrique-tétraédrique tétartoédrique

Celle-ci a pour degré de symétrie : $4A_{3(p)}$, $3A_2$. Les formes caractéristiques de la classe sont des *pentagono-dodécaèdres-tétraèdres* {*hkl*} *droits* et *gauches,* dont chacun a des formes directes et inverses. Il s'agit d'un solide à 12 faces pentagonales, dérivant de l'hexoctaèdre, dont il a seulement un quart des faces.

Dans cette classe, seuls cristallisent des composés naturels rares.

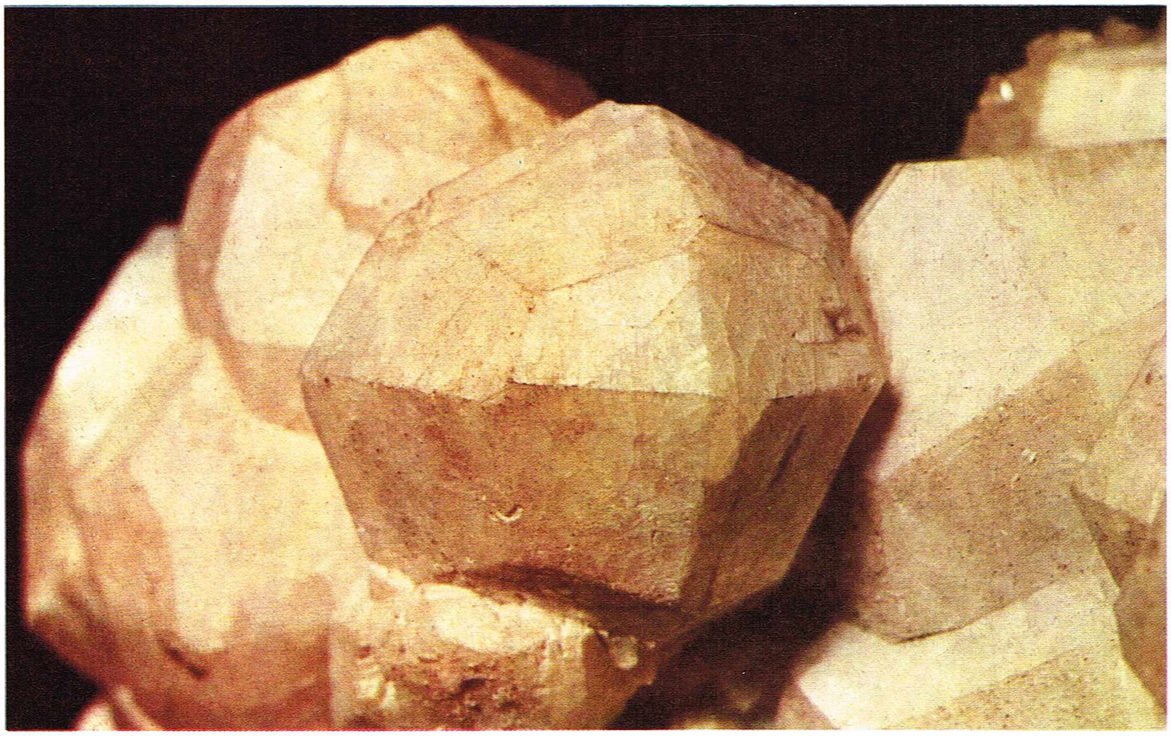

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ Analcime *de forme icositétraèdre (musée d'Histoire naturelle, Milan).*

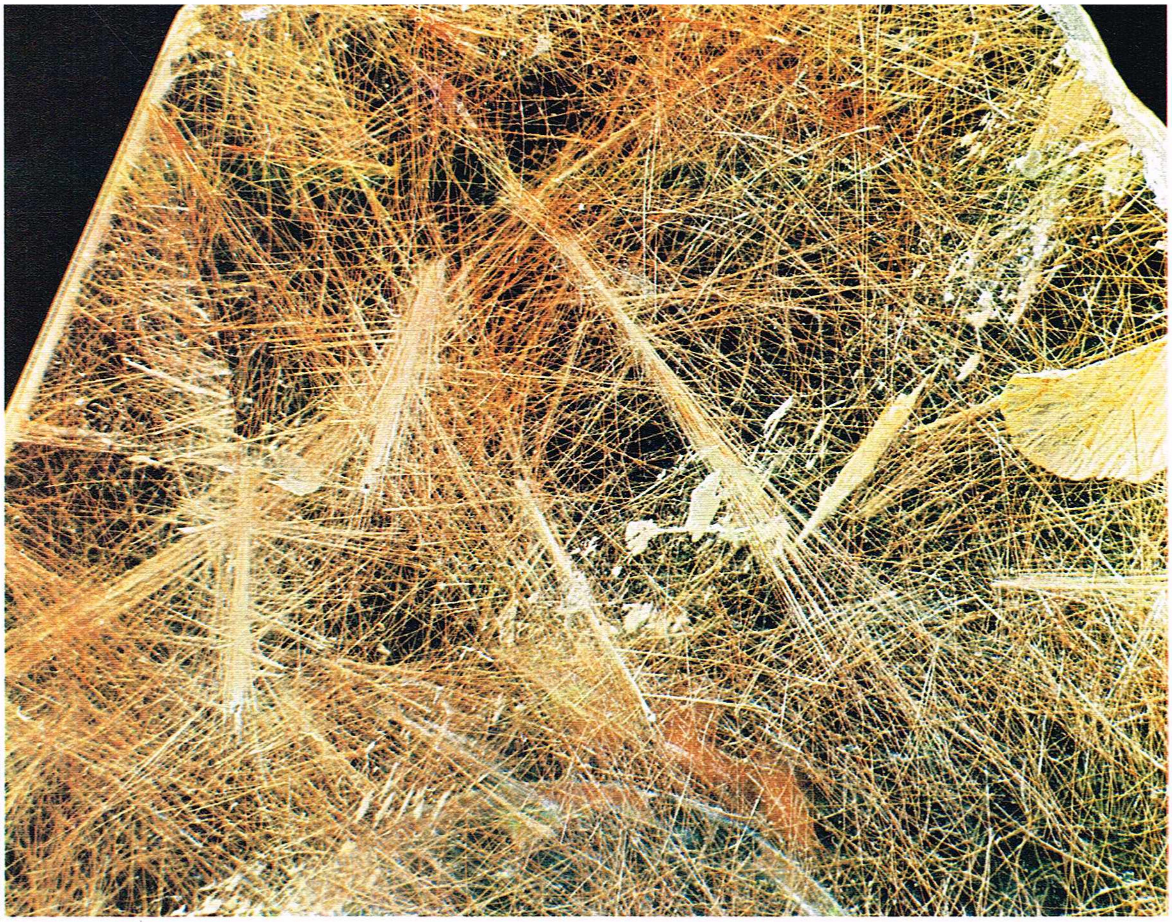

H. Chaumeton-Jacana

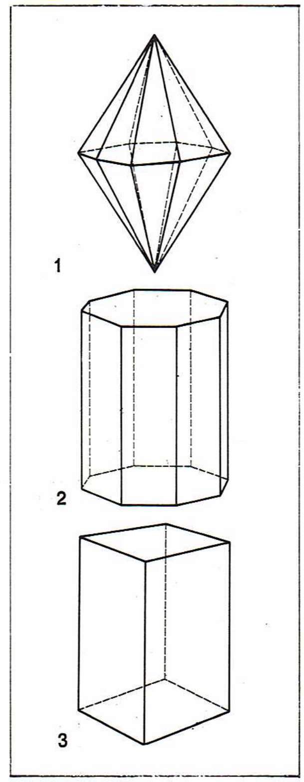

I.G.D.A.

▲ ***A gauche, le*** **rutile,** ***minéral cristallisant dans la*** **classe bipyramidale ditétragonale** ***du*** **système quadratique.**
A droite, système de cristallisation de la **classe bipyramidale ditétragonale :**
1, bipyramide ditétragonale;
2, prisme ditétragonal;
3, prisme tétragonal.

Système quadratique ou tétragonal

Ce système comprend sept classes. Son élément caractéristique de symétrie est A_4 ou $A_{2(4)}$. Ses constantes sont les suivantes : **a : a : c**, $\alpha = \beta = \gamma = 90°$.

Classe bipyramidale ditétragonale (holoédrique) de la cassitérite

Son degré de symétrie est : A_4, $2A'_2$, $2A''_2$, P, 2P′, 2P″, C. Elle comprend des formes ouvertes et fermées. Parmi les formes simples fermées, on compte la *bipyramide ditétragonale* $\{hkl\}$, de section octogonale régulière. La *bipyramide tétragonale* de 1ᵉʳ ordre $\{hhl\}$ et celle de 2ᵉ ordre $\{h01\}$ sont congruentes l'une par rapport à l'autre. Parmi les formes ouvertes, le *prisme ditétragonal* $\{h01\}$ est à 8 faces parallèles à l'axe de symétrie d'ordre 4. Comme il s'agit d'une forme ouverte, c'est-à-dire qui se prolonge à l'infini, le prisme doit être limité par une ou plusieurs autres formes, le pinacoïde basal $\{001\}$, par exemple. Les autres formes ouvertes sont le *prisme tétragonal* de 1ᵉʳ ordre $\{110\}$ et celui de 2ᵉ ordre $\{100\}$.

Parmi les minéraux qui cristallisent dans cette classe, citons la cassitérite SnO_2, le rutile TiO_2, et le zircon $ZrSiO_4$.

Classe trapézoédrique tétragonale (hémiédrique)

Elle a pour degré de symétrie : A_4, $2A'_2$, $2A''_2$. Le solide caractéristique de la classe est un *trapézoèdre tétragonal* $\{hkl\}$, qui admet une autre forme énantiomorphe $\{khl\}$. Il dérive de la bipyramide tétragonale par réduction du nombre des faces à la moitié.

Parmi les substances naturelles qui cristallisent dans cette classe, citons la phosgénite CO_3Pb. $PbCl_2$.

Classe bipyramidale tétragonale (hémiédrique) ou classe de la schéelite

Elle a pour degré de symétrie : A_4, P, C. La forme simple fermée caractéristique est une *bipyramide tétragonale* de 3ᵉ ordre $\{hkl\}$, dérivant de la bipyramide ditétragonale, du fait qu'elle en possède 4 faces de la partie supérieure et 4 faces correspondantes de la partie inférieure. Parmi les formes ouvertes, citons le prisme tétragonal de 3ᵉ ordre $\{hk0\}$.

La schéelite WO_3CaO est l'un des minéraux faisant partie de cette classe.

Classe pyramidale ditétragonale (hémiédrique)

Elle a pour degré de symétrie : $A_{4(p)}$, 2P′, 2P″. C'est une classe peu importante qui compte presque uniquement des composés artificiels. La combinaison caractéristique

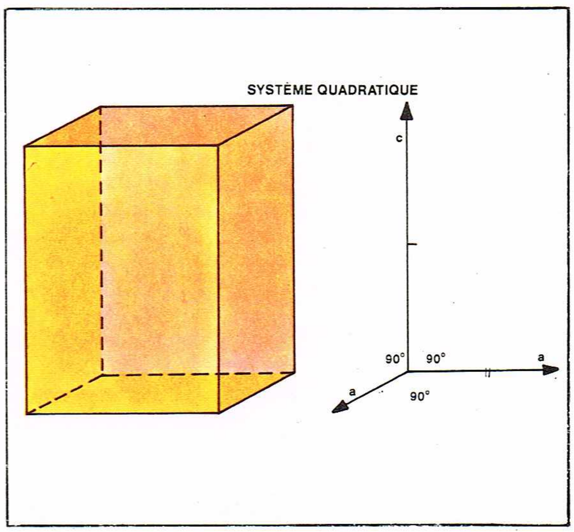

Richard Colin

prisme tétragonal de 2ᵉ ordre
prisme tétragonal de 1ᵉ ordre
bipyramide tétragonale de 2ᵉ ordre
bipyramide tétragonale de 1ᵉ ordre
pinacoïdes

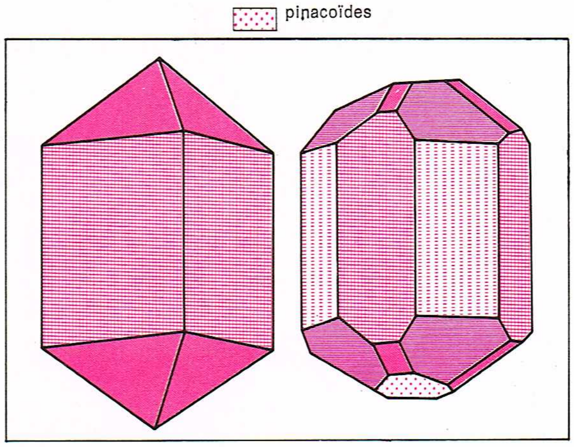

I.G.D.A.

◀ ***En haut, représentation géométrique du*** **système quadratique.**
En bas, **formes composées** ***des cristaux du*** **système tétragonal.**

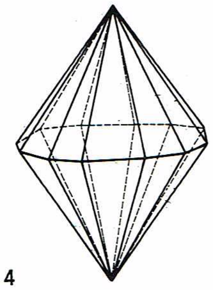

4

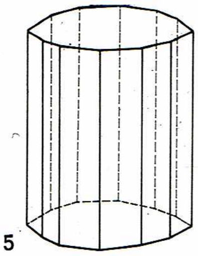

5

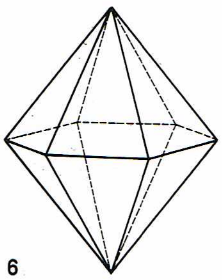

6

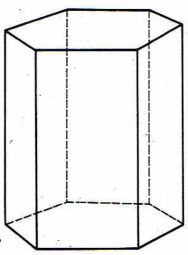

7

I.G.D.A.

▲ ***Ci-dessus, système de cristallisation de la* classe bipyramidale dihexagonale : *4, bipyramide dihexagonale ; 5, prisme dihexagonal ; 6, bipyramide hexagonale ; 7, prisme hexagonal. En haut à droite,* formes composées *des cristaux du système hexagonal.***

est une *pyramide tétragonale* $\{hkl\}$, complétée par un *pédion* $\{001\}$, forme constituée par une seule face.

Classe pyramidale tétragonale (tétartoédrique)
Elle a pour degré de symétrie : $A_{4(p)}$. Il existe dans cette classe des *pyramides tétragonales* de 3ᵉ ordre supérieures et inférieures, qui se combinent les unes avec les autres et avec le pédion.
Citons comme représentant de cette classe la wulfénite MoO_3PbO.

Classe scalénoédrique tétragonale ou de la chalcopyrite (hémiédrique)
Elle a pour degré de symétrie : $A_{2(4)}$, $2A'_2$, $2P''$. Le *scalénoèdre tétragonal* $\{hkl\}$, forme fermée à 8 faces, dérive de la bipyramide ditétragonale. Par contre, les *bisphénoïdes tétragonaux* $\{hhl\}$, solides à 4 faces, dérivent par hémiédrie des bipyramides tétragonales de 1ᵉʳ et 2ᵉ ordre.
La chalcopyrite $CuFeS_2$ est le plus important minéral cristallisant dans cette classe.

Classe tétragonale bisphénoïdale (tétartoédrique)
Elle a pour degré de symétrie : $A_{2(4)}$. Les *bisphénoïdes tétragonaux* de 3ᵉ ordre $\{hkl\}$ de ce groupe dérivent par tétartoédrie de la bipyramide ditétragonale. Seuls des minéraux rares cristallisent dans cette classe.

Système hexagonal

Ce système a 4 axes pour système de référence. Ses constantes sont les suivantes :

$$a : a : a : c, \quad \alpha = \beta = \delta = 90^\circ, \quad \gamma = 120^\circ$$

Du point de vue cristallographico-morphologique, il comprend cinq classes ; si on le considère du point de vue structural, les classes sont au nombre de sept, par adjonction de deux classes particulières du système trigonal.
Pour plus de simplicité, nous citerons seulement ici les classes qui possèdent un axe de symétrie d'ordre 6.

Classe bipyramidale dihexagonale, ou du béryl (holoédrique)
Elle a pour degré de symétrie : A_6, $3\,A'_2$, $3\,A''_2$, P, 3 P′, 3 P″, C. Parmi les formes fermées, on compte la *bipyramide dihexagonale* {hkil}, solide à 24 faces, de section dodécagonale, mais à angles alternativement égaux. En outre, on connaît la *bipyramide hexagonale de 1ᵉʳ ordre* {h0hl} et la bipyramide hexagonale de 2ᵉ ordre {hh2hl}. Les formes ouvertes sont le *prisme dihexagonal* {hki0}, le *prisme hexagonal de 1ᵉʳ ordre* $\{10\bar{1}0\}$ et celui de 2ᵉ ordre $\{ll\bar{2}0\}$. Naturellement, les prismes se terminent par des pinacoïdes {0001} ou par des bipyramides.
Parmi les minéraux qui cristallisent dans cette classe, citons le béryl $6\,SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot 3\,BeO$, et la molybdénite MoS_2.

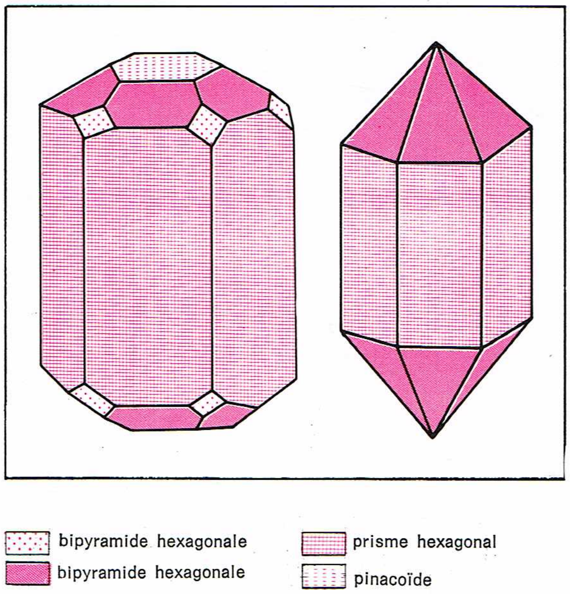

I.G.D.A.

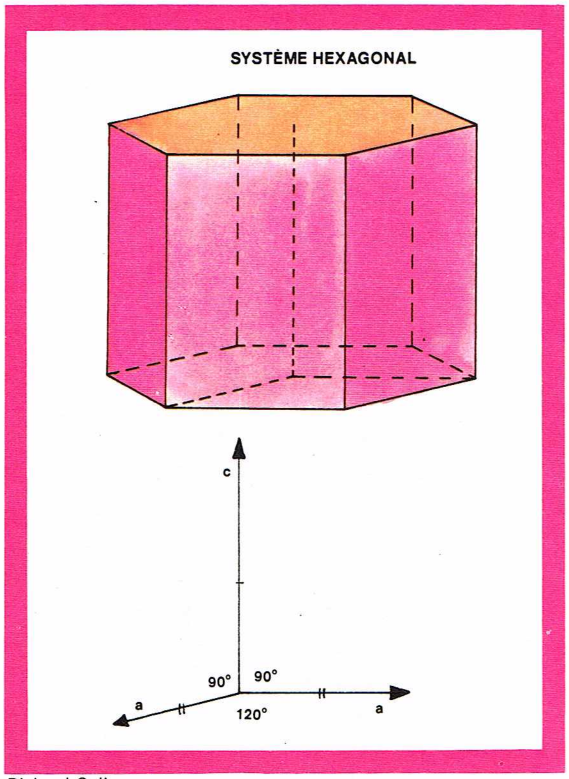

▶ ***Représentation géométrique du système* hexagonal.**

Richard Colin

Classe trapézoédrique hexagonale (hémiédrique)
Cette classe a pour degré de symétrie : A_6, $3\,A'_2$, $3\,A''_2$. Elle a de l'importance car elle comprend le quartz β. Les formes caractéristiques sont un *trapézoèdre droit* {hkil} et un *trapézoèdre gauche* {ihkl}. Naturellement, presque toutes les formes de la classe holoédrique peuvent entrer en combinaison avec celle-ci.

Classe bipyramidale hexagonale ou de l'apatite (hémiédrique)
Elle a pour degré de symétrie : A_6, P, C. Les formes caractéristiques sont des *bipyramides hexagonales de 3ᵉ ordre*, dérivant par hémiédrie de la bipyramide hexagonale, et des *prismes hexagonaux*, également *de 3ᵉ ordre*, dérivant du prisme dihexagonal.
L'apatite $3\,(P_2O_5\,3\,CaO) \cdot Ca\,[F_2,\ Cl_2,\ (OH)_2]$ ou $[Ca_5\,(F, Cl, OH)\,(PO_4)_3] \cdot CaF_2$ est le plus commun des minéraux qui cristallisent dans cette classe.

Classe pyramidale dihexagonale (hémiédrique)
Elle a pour degré de symétrie : $A_{6(p)}$, 3 P′, 3 P″. Il existe dans cette classe des *pyramides dihexagonales* et *hexagonales* supérieures et inférieures. On y compte la greenockite CdS, et la würtzite ZnS.

Classe pyramidale hexagonale, ou de la néphéline (tétartoédrique)
Elle a pour degré de symétrie : $A_{6(p)}$. Les *pyramides* que l'on observe dans cette classe sont *de 3ᵉ ordre* et dérivent de la bipyramide dihexagonale par réduction à un quart des faces.
Parmi les minéraux qui cristallisent dans cette classe, citons la néphéline $2\,SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot (Na_2,\ K_2)\,O$ ou (NaK) $AlSiO_4$ (la composition de ce minéral est variable).

Signalons ici, comme nous l'avons déjà laissé entendre, que certains auteurs considèrent l'existence de deux classes qui, ayant un axe de symétrie d'ordre 3, mais un axe d'ordre 6 d'inversion, peuvent être ramenées au système hexagonal ou au système trigonal. Nous les considérons ici comme trigonales.

Système trigonal ou rhomboédrique

Par commodité, on utilise aujourd'hui comme système de référence le système de notation à 4 axes (voir plus haut, système hexagonal). Comme nous l'avons déjà dit, on peut utiliser aussi dans le système trigonal

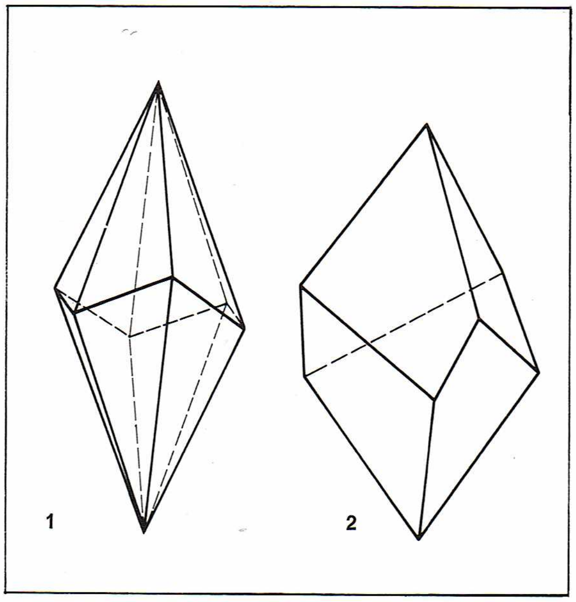

I.G.D.A.

un système de référence à 3 axes, en prenant comme axes cristallographiques trois arêtes du rhomboèdre. Nous préférons ici considérer un système de référence quadri-axial, également du fait que les analogies entre le système hexagonal et le système trigonal sont nombreuses. Les classes du système trigonal peuvent même être considérées comme hémiédriques ou tétartoédriques par rapport à la classe bipyramidale dihexagonale. Pendant un certain temps, les deux systèmes ont été confondus en un unique système.

Classe bipyramidale ditrigonale

Elle a pour degré de symétrie : $A_{3(6)}$, 3 A_2, 3 P, C. Les formes caractéristiques de cette classe sont la *bipyramide ditrigonale,* dérivant avec l'existence de 6 faces supérieures et 6 faces inférieures de la bipyramide dihexagonale, et le *prisme ditrigonal,* la *bipyramide trigonale* dérivant par hémiédrie de la bipyramide hexagonale, et enfin le *prisme trigonal.*

Cette classe n'a pas d'importance pour les substances naturelles.

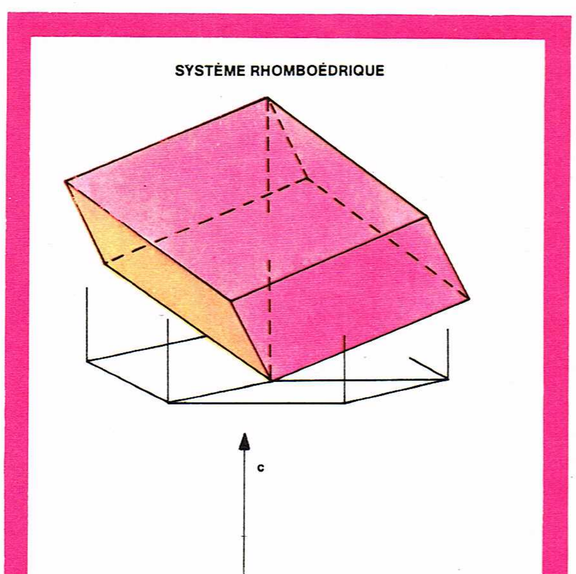

Richard Colin

Classe scalénoédrique ditrigonale, ou de la calcite

Elle a pour degré de symétrie : $A_{3(6)}$, 3 A_2, 3 P, C. Cette classe comprend deux formes très communes : le *scalénoèdre ditrigonal* {hkil}, solide à 12 faces, dérivant lui aussi de la bipyramide dihexagonale, par hémiédrie, mais à faces de la partie supérieure ne correspondant pas à celles de la partie inférieure, et le *rhomboèdre* {h0hl}, dérivant par hémiédrie de la bipyramide hexagonale de 1er ordre. Le rhomboèdre a 3 couples de faces parallèles; il peut être allongé ou aplati selon l'axe d'ordre 3; c'est le solide de clivage de la calcite.

Cette classe comprend non seulement la calcite $CaCO_3$, mais aussi la sidérite (sidérose) CO_3Fe, la smithsonite $ZnCO_3$, le corindon Al_2O_3, l'hématite Fe_2O_3, et bien d'autres minéraux.

Classe bipyramidale trigonale

Elle a pour degré de symétrie : A_3. Certains auteurs considèrent que cette classe est hexagonale, du fait de l'existence d'un axe d'inversion d'ordre 6. Elle est caractérisée par des *bipyramides* et des *prismes trigonaux de 3^e ordre,* dérivant par tétartoédrie de la bipyramide et du prisme hexagonaux.

Cette classe n'a pas de représentants naturels.

Classe trapézoédrique trigonale, ou du quartz

Elle a pour degré de symétrie : A_3, 3 $A_{2(p)}$. Le *trapézoèdre trigonal* dérive, comme la bipyramide trigonale de 3^e ordre, et par tétartoédrie, de la bipyramide dihexagonale. Alors que la bipyramide possède les faces correspondantes à la partie supérieure et à la partie inférieure, le trapézoèdre a des faces qui ne se correspondent pas. Faute de plans et d'un centre de symétrie, les trapézoèdres présentent des formes énantiomorphes, l'une droite et l'autre gauche. Le symbole est le même que celui de la forme holoédrique, c'est-à-dire celui de la bipyramide dihexagonale. Naturellement, on peut combiner avec le trapézoèdre d'autres formes du système, comme des rhomboèdres et des bipyramides et même des formes du système hexagonal. Dans le quartz les combinaisons du trapézoèdre {hkil} avec deux rhomboèdres {h0hl} et {0hhl}, qui ressemblent parfois à une bipyramide hexagonale, et avec le prisme hexagonal {1010} sont fréquentes.

Outre le quartz α de formule SiO_2, nous citerons dans cette classe le cinabre HgS.

Classe rhomboédrique, de la dolomite, ou dolomie

Elle a pour degré de symétrie : $A_{3(6)}$, C. Cette classe est caractérisée par des *rhomboèdres de 3^e ordre,* dérivant par tétartoédrie de la bipyramide dihexagonale, et qui ont donc une orientation n'admettant pas des plans de symétrie comme dans le rhomboèdre de 1er ordre.

Nous citerons, parmi les représentants de cette classe, la dolomite, ou dolomie,

$$CO_3Ca \cdot CO_3Mg \quad \text{ou} \quad CaMg\,(CO_3)_2,$$

et l'ilménite (Fe, Mg, Mn) TiO_3 (le magnésium et le manganèse sont peu abondants dans l'ilménite proprement dite, dont la formule peut donc être ramenée à $FeTiO_3$).

Classe pyramidale ditrigonale, ou de la tourmaline

Elle a pour degré de symétrie : $A_{3(p)}$, 3 P. Dans cette classe, il existe seulement des formes ouvertes, comme des *pyramides ditrigonales* et *trigonales supérieures et inférieures,* des *prismes ditrigonaux* et *trigonaux,* et des *pédions.*

Le représentant le mieux connu est la tourmaline $12\,SiO_2 \cdot 3\,B_2O_3 \cdot 26\,RO \cdot 4\,H_2O$, où R représente

$$(Al_2,\ Cr_2,\ Fe,\ Mg,\ Mn,\ Li_2,\ Na_2,\ K_2) \text{ ou}$$
$$[(Na_2, Ca)\ (Fe, Li_2, Mg)_6 \cdot B_6Al_6\ (AlSi_2O_9)_6 \cdot (O \cdot OHF)_8].$$

Classe pyramidale trigonale

Elle a pour degré de symétrie : $A_{3(p)}$. Il s'agit d'une classe tétartoédrique, à *pyramides trigonales de 3^e ordre.*

Elle ne compte pas de représentants parmi les substances naturelles.

Système orthorhombique

Le système orthorhombique est caractérisé par les constantes **a : b : c,** $\alpha = \beta = \gamma = 90°$. Il est le premier du groupe trimétrique. Il comprend trois classes.

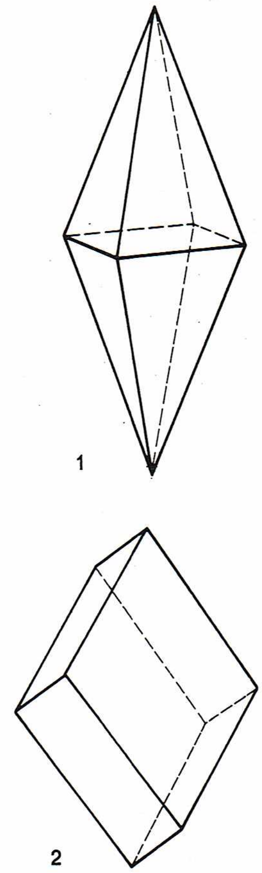

I.G.D.A.

▲ ***Système de cristallisation de la* classe bipyramidale rhombique :** ***1, bipyramide; 2, prisme.***

◀ ***En haut, système de cristallisation de la* classe scalénoédrique ditrigonale :** ***1, le scalénoèdre ditrigonal;* classe trapézoédrique trigonale :** ***2, trapézoèdre trigonal.***

◀ ***Représentation géométrique du* système rhomboédrique.**

▶ ***Page ci-contre, en haut à gauche,* formes composées *des cristaux* du système monoclinique *(à gauche et au centre);* du système triclinique *(à droite).***

Classe bipyramidale rhombique, ou de la barytine (holoédrique)

Elle a pour degré de symétrie : A_2, A'_2, A''_2, P, P', P''_3, C. Cette classe est caractérisée par des *bipyramides* de section rhombique {hkl} et par des *prismes,* également de section rhombique. Il n'y a pas de règle fixe pour l'orientation des prismes. Habituellement, on préfère faire coïncider avec l'axe des **z** la plus grande dimension et avec l'axe des **x** la plus petite. Il peut y avoir des prismes allongés suivant **x** {0kl}, suivant **y** {h0l}, ou encore allongés suivant **z** {hk0}. Les autres formes fréquentes sont les *picanoïdes.*

Il existe dans cette classe de nombreux minéraux, comme la barytine $BaSO_4$, la célestine $SrSO_4$, l'anglésite $PbSO_4$, la stibine Sb_2S_3, les péridots SiO_4 (Mg, Fe)$_2$, la marcassite FeS_2 et le soufre S.

Classe bisphénoïdale rhombique (hémiédrique)

Elle a pour degré de symétrie : A_2, A'_2, A''_2. Cette classe doit son nom au *bisphénoïde,* qui dérive de la bipyramide rhombique, du fait de l'existence de 4 faces alternantes. L'absence de plans et de centre de symétrie aboutit à l'existence de formes énantiomorphes droites et gauches.

Le composé le mieux connu qui cristallise dans cette classe est l'epsomite $MgSO_4 \cdot 7\ H_2O$.

Classe pyramidale rhombique, ou de la calamine (hémiédrique)

Elle a pour degré de symétrie : $A_{2(p)}$, P', P". Cette classe comprend des *pyramides supérieures* et *inférieures* et des *pédions,* des *dômes,* c'est-à-dire des formes constituées par deux faces tectiformes, symétriques par rapport à un plan, ainsi que des *prismes* et des *pinacoïdes.*

La calamine $SiO_2 \cdot 2\,ZnO \cdot H_2O$ est le composé naturel le mieux connu.

Système monoclinique

Ce système est caractérisé par les constantes **a : b : c,** $\alpha = \gamma = 90°$, $\beta \neq 90°$. L'axe des **z** est incliné vers l'observateur. Il n'existe pas de formes simples fermées, et il y a donc seulement des combinaisons. Le système comprend trois classes.

Classe prismatique, ou de l'orthoclase (holoédrique)

Elle a pour degré de symétrie : A_2, P, C. L'unique axe de symétrie coïncide avec **y**. La combinaison la plus élémentaire est celle du *prisme monoclinique* {hk0}, de section rhombique, combiné avec le *pinacoïde* de base {001}. Il existe aussi des *prismes parallèles* à **x** {0kl}, des *prismes obliques positifs* {hkl} et *négatifs* {hkl}; il n'y a pas de possibilité d'existence de prismes parallèles à **y**. Dans la zone {010}, il existe des *pinacoïdes* à deux axes positifs {h01} et négatifs {h01}. Il y a aussi, fréquemment, des pinacoïdes à un seul axe {100}, {010}, {001}.

Les substances qui cristallisent dans cette classe du système monoclinique sont très nombreuses; citons, par exemple, les orthoses,

$$6\ SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot K_2O \quad \text{ou} \quad KAl \cdot Si_3O_8,$$

le gypse $SO_4Ca \cdot 2\ H_2O$, l'arsénopyrite, ou mispickel, FeAs · S, les pyroxènes, les amphiboles et les micas.

Classe domatique (hémiédrique)

Elle a pour degré de symétrie : P. Il existe dans cette classe des combinaisons de *dômes* (formes hémiédriques des prismes monocliniques) *à deux axes et à trois axes,* de *pédions* et du *pinacoïde* {010}.

Les substances naturelles qui cristallisent dans cette classe sont mal connues.

Classe sphénoïdale (hémiédrique)

Elle a pour degré de symétrie : $A_{2(p)}$. Cette classe comprend des *sphénoïdes,* formes constituées par deux faces tectiformes, symétriques par rapport à un axe de symétrie d'ordre 2. Les sphénoïdes possibles correspondent aux symboles {0kl}, et {hk0}, chacun avec une forme gauche correspondante. Les sphénoïdes se combinent habituellement avec des *pinacoïdes* et des *pédions.*

Dans cette classe cristallisent d'innombrables substances organiques dextrogyres et lévogyres, dont les acides tartriques.

Système triclinique

Ce système est caractérisé par les constantes suivantes : **a : b : c,** $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90°$. Il compte deux classes, dont l'une est asymétrique.

Classe pinacoïdale, ou de l'albite (holoédrique)

Elle a pour degré de symétrie : C. Cette classe comprend sept types de *pinacoïdes :* à un axe, à deux axes et à trois axes.

Elle est riche en minéraux, dont l'albite :

$$6\ SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot Na_2O \quad \text{ou} \quad Na\ Al\ Si_3O_8,$$

le microcline $6\ SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot K_2O$ ou $K\ Al\ Si_3O_8$, et la cyanite, ou disthène, $SiO_2 \cdot Al_2O_3$ ou Al_2SiO_5.

Classe pédiale (hémiédrique)

Elle ne présente pas d'éléments de symétrie. Les formes existantes sont toutes des *pédions* qui, comme nous l'avons dit, sont constitués par une face unique.

On connaît seulement quelques substances organiques cristallisant dans cette classe.

Agrégats et macles

Dans la nature, les cristaux peuvent se présenter en tant qu'individus isolés, mais on les trouve plus communément en *agrégats.*

Quand plusieurs cristaux sont implantés dans une matrice, ou gangue, mais font saillie dans une cavité, il s'agit d'une *druse* si la matrice est plane et d'une *géode* si la matrice est concave. Il existe d'autres agrégats caractéristiques, comme les *dendrites,* d'aspect arborescent, qui se forment lorsqu'il y a peu de matière constituant l'agrégat. Quand de nombreux cristaux prennent une même orientation, il s'agit d'une *association parallèle,* comme pour les cristaux de quartz, implantés sur la matrice selon {0001}, avec leurs axes de symétrie d'ordre 3 parallèles.

Lorsque deux cristaux ou plus sont réunis les uns aux autres selon des règles déterminées, il s'agit de *macles.* Nous appellerons *plan de macle, axe de macle,* et *centre de macle,* les éléments réticulaires par rapport auxquels deux cristaux maclés sont symétriques non seulement en

▼ ***Représentations géométriques : à gauche,* du système orthorhombique*;* *à droite,* du système monoclinique.**

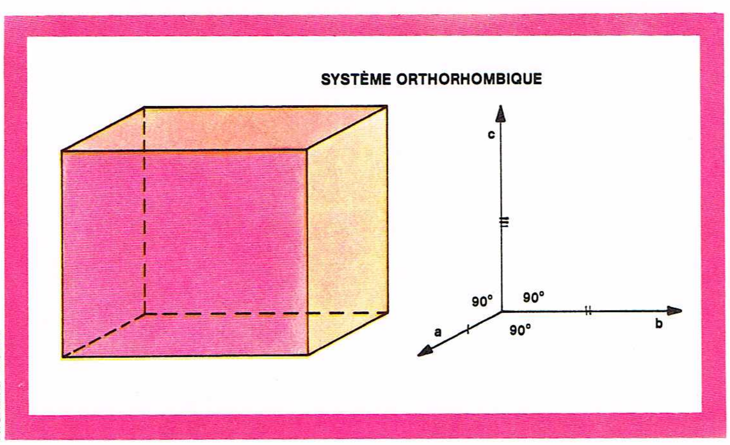

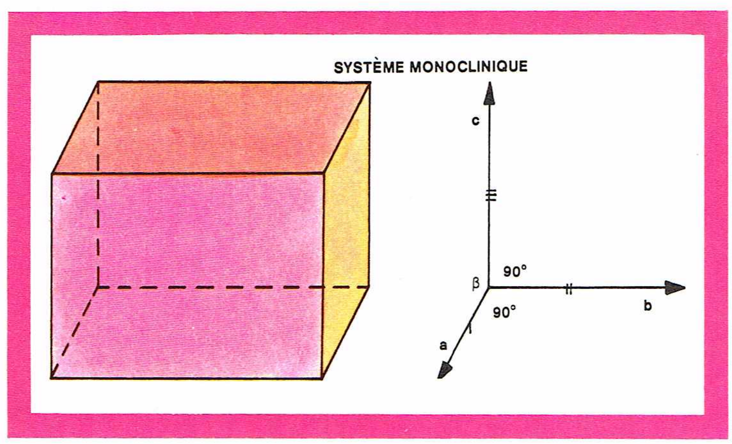

Richard Colin

Richard Colin

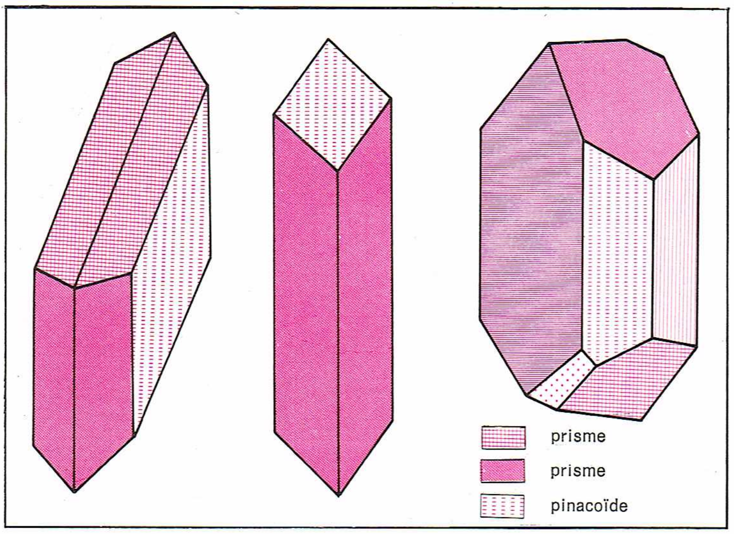

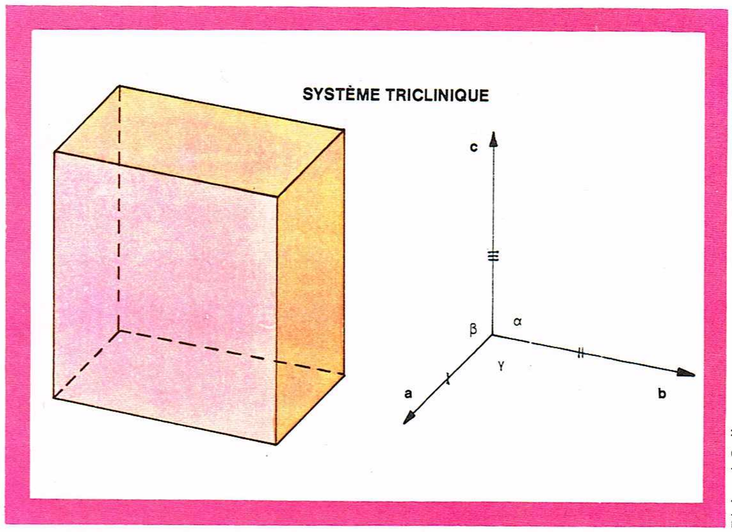

ce qui concerne leur réseau, mais aussi en ce qui concerne toutes leurs propriétés physiques. Le plan de macle divise la macle en parties (théoriquement) égales. Il ne peut être un plan parallèle au plan de symétrie de chacun des cristaux de la macle. Deux cristaux maclés peuvent être en contact selon une face *(macles de contact)* ou selon une surface irrégulière *(macles d'interpénétration)*. Les macles sont indiquées soit par le symbole de l'axe de la macle, soit par un nom particulier.

Il existe plusieurs types de macles. Nous n'en citerons que quelques-uns.

● Il existe des **macles selon la loi du spinelle.** Il s'agit de deux octaèdres et de deux cubes réunis les uns aux autres, avec un plan de macle {111}, et un axe de macle qui est l'un des quatre axes d'ordre 3. Cette macle est caractéristique de la magnétite et de la fluorite.

● La pyrite présente **une macle en « croix de fer ».** Le plan est alors une face du rhombododécaèdre {110}, et l'axe de macle est la normale à cette face, qui, dans la classe holoédrique, est un axe de symétrie d'ordre 2, mais non dans la pyrite.

● La **macle « en bec d'étain »**, la **macle « en cœur »** et la **macle « en genou »** sont caractéristiques de la cassitérite et du rutile. Le plan de macle est alors une face de la bipyramide de 2ᵉ ordre {101}.

● Le gypse présente très fréquemment la **macle « en fer de lance »**, avec le plan de macle et le plan de contact {101}.

● L'orthose peut obéir à plusieurs lois de macle, la plus commune étant la **macle de Carlsbad.** Il s'agit d'une macle par hémitropie parallèle, avec un axe de macle [001]. Les cristaux s'interpénètrent partiellement et sont aplatis selon {010}.

● Les plagioclases présentent eux aussi de nombreux types de macles, souvent même combinés entre eux; le plus répandu de ces types est la **macle polysynthétique (ou selon la loi de l'albite).** Les cristaux tricliniques de l'albite ou des autres termes de la série des plagioclases s'unissent les uns aux autres selon la face (010), qui est aussi un plan de macle. L'axe de macle est normal à (010). Il en résulte un ensemble de cristaux ayant subi une rotation de 180° l'un par rapport à l'autre, mais ressemblant extérieurement à un cristal monoclinique.

● Le quartz, qui présente des formes énantiomorphes, droites et gauches, peut former des macles d'un individu

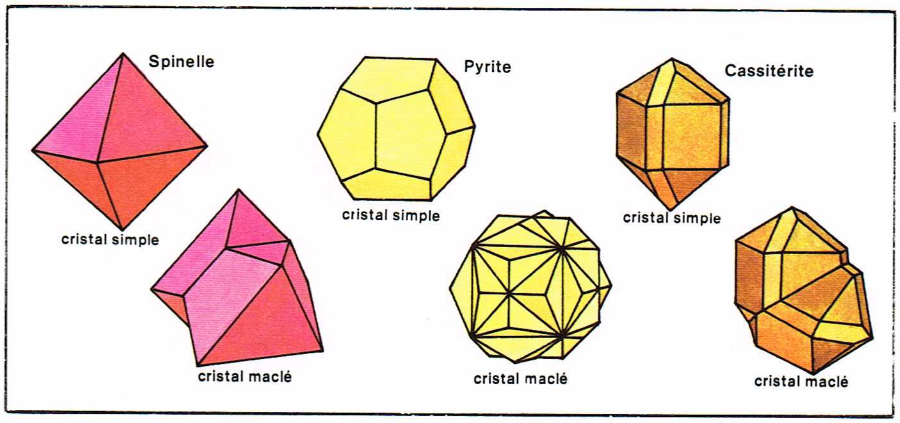

▲ ***Ci-dessus, en haut, représentation géométrique du* système triclinique.**
En bas, différents types de cristaux simples et maclés.

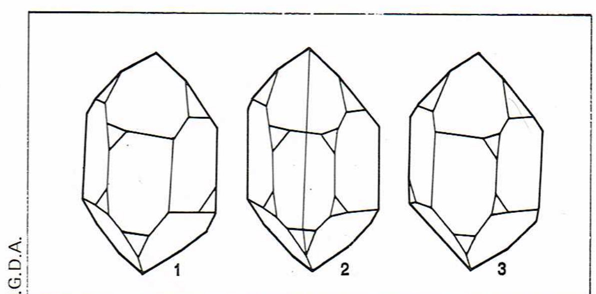

◀ ***Macle de quartz selon la* loi du Brésil *(2) : la macle est formée par l'interpénétration d'un cristal gauche (1) et d'un cristal droit (3).***

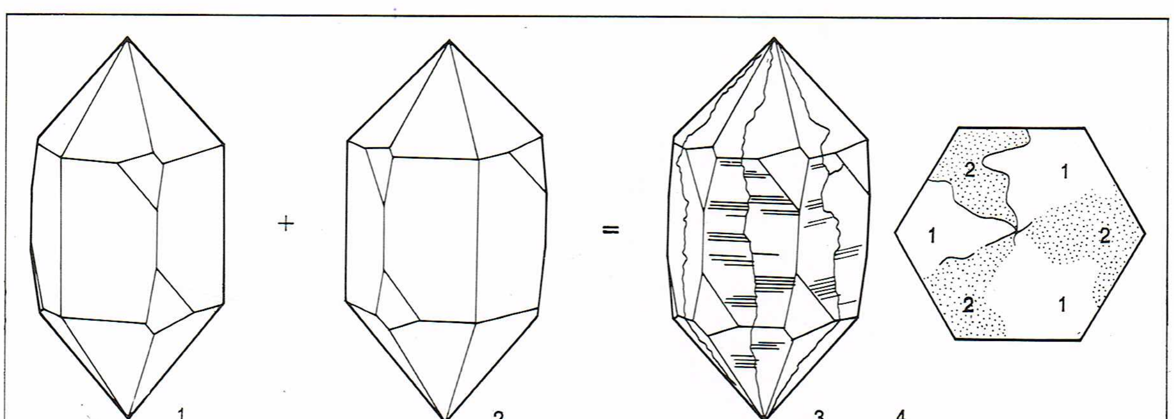

◀ ***Macle de quartz selon la* loi du Dauphiné *(3) : la section transversale (4) montre le schéma théorique de la macle issue de deux cristaux droits; les schémas 1 et 2 correspondent aux cristaux simples.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

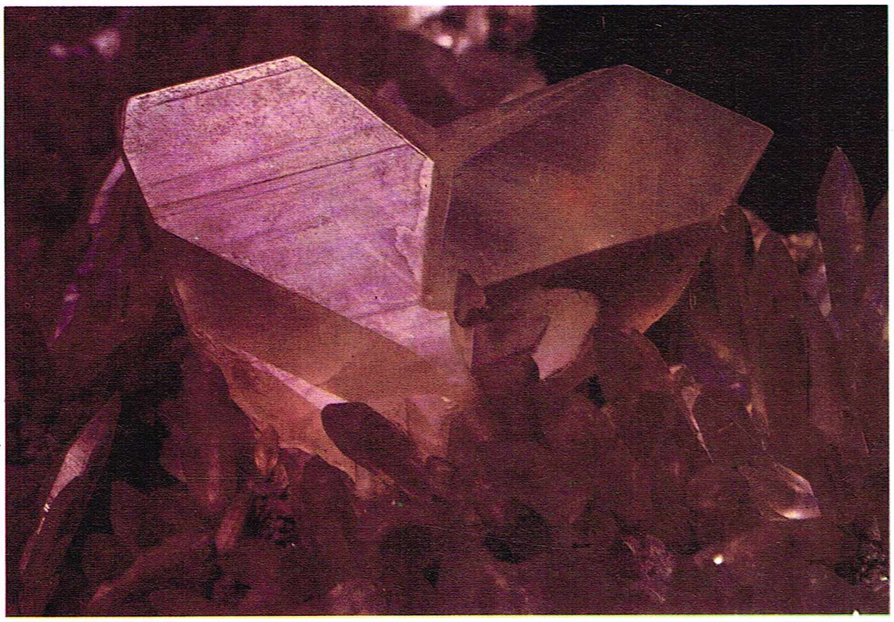

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *A gauche, cristal de* calcite *maclé en* « cœur »; *à droite,* pyrite *maclée en « croix de fer ».*

▶ *A gauche, cristal de* gypse *maclé en* « fer de lance ». *A droite, en haut, macle en* « bec d'étain »; *en bas, groupe d'*orthoses *maclées.*

Bavestrelli - Bevilacqua

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

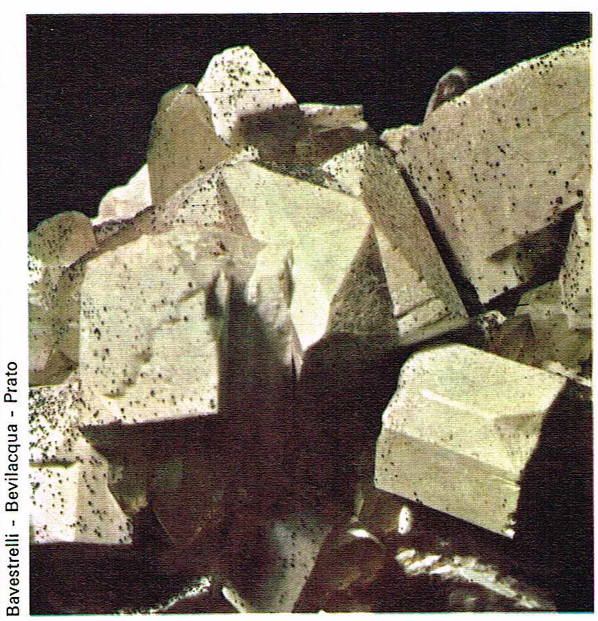

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

droit avec un individu gauche, ou bien de deux individus droits et de deux individus gauches. Dans le premier cas, la loi de macle est appelée **loi du Brésil.** Le plan de macle est alors une face du prisme hexagonal {1120}. L'interpénétration est telle que la macle présente l'aspect d'un cristal simple. Il est possible de reconnaître qu'il s'agit d'une macle seulement si l'on voit les facettes du trapézoèdre trigonal, appartenant à deux individus droits et gauches; sinon, il faut avoir recours aux figures de corrosion. Il en va autrement dans la macle de deux individus soit droits, soit gauches. La loi de macle est alors dite **loi du Dauphiné.** L'axe de macle est [0001], c'est-à-dire l'axe d'ordre 3. Pour faire superposer les deux cristaux, il faut faire effectuer une rotation de 180° de l'un d'entre eux autour de l'axe de macle. Le phénomène de la macle dans le quartz est très commun et il est important de le déterminer, car les cristaux de quartz maclés, par suite de compensations internes, ne présentent pas le phénomène de la piézo-électricité, qui est au contraire caractéristique dans les cristaux simples très recherchés par différentes industries.

Propriétés physiques des cristaux

Les propriétés physiques des cristaux sont soit scalaires, soit vectorielles. Les propriétés scalaires peuvent être représentées par un seul paramètre, alors que les propriétés vectorielles le sont par trois : l'intensité, la direction et le sens.

Par exemple, le poids spécifique est une propriété scalaire : il suffit d'en donner la valeur obtenue avec l'un des instruments de mesure habituels. La dureté est, par contre, une propriété vectorielle. Il convient de spécifier dans quelle direction et dans quel sens a été exécutée la mesure ayant permis d'établir la dureté attribuée à un minéral cristallisé, bien que, dans la pratique, on considère une valeur moyenne. En effet, les valeurs de la dureté varient parfois énormément selon les différentes faces d'un même cristal ou selon des directions différentes d'une même face, ou même, bien que la différence soit minime, selon les différents sens d'une même direction.

Alors que les propriétés scalaires sont en quelque sorte indépendantes de la structure, les propriétés vectorielles dépendent étroitement de la structure cristalline et spécifiquement de la plus ou moins grande densité réticulaire.

Le poids spécifique

Le poids spécifique est une propriété importante, car on s'en sert pour le diagnostic ainsi que pour séparer des minéraux les uns des autres. Il est particulièrement employé pour la reconnaissance des gemmes, étant donné que sa détermination n'endommage pas la pierre précieuse.

Le poids spécifique est le rapport entre le poids d'un minéral et le poids d'un volume égal d'eau distillée à 4 °C. On peut l'obtenir directement avec le pycnomètre ou indirectement avec la balance de Westphal.

— *Méthode directe de détermination*

Le pycnomètre est utilisé quand on dispose de plusieurs grammes du minéral. Il s'agit d'un petit flacon à col large, où est enfoncé un bouchon à l'émeri relié à un tube capillaire de plusieurs centimètres de longueur. On pèse le minéral à l'aide d'une balance de précision, puis on remplit d'eau le pycnomètre, y compris son tube capillaire. On introduit le minéral dans le pycnomètre en éliminant l'eau déplacée; on remet à niveau et on pèse le pycnomètre contenant l'eau et le minéral. Si l'on nomme M le poids du minéral, P le poids du pycnomètre plein d'eau, et T le poids du pycnomètre contenant de l'eau en même temps que le minéral, on obtient la relation suivante :

$$\text{poids spécifique} = \frac{M}{P + M - T}.$$

Il faut vérifier que le minéral n'est pas soluble dans l'eau. Si tel est le cas, on peut utiliser un autre liquide en tenant compte de son poids spécifique différent; en tout cas, il est nécessaire de faire attention que le minéral examiné soit exempt de cavités.

— *Méthode indirecte de détermination*

On utilise plus communément en minéralogie la méthode des liquides denses. Avec cette méthode, il suffit d'un fragment, même petit, du minéral. Celui-ci est mis dans un petit tube contenant un liquide particulièrement lourd. Si le fragment flotte, on dilue le liquide avec de l'eau ou un autre diluant approprié jusqu'à ce que le fragment reste parfaitement en équilibre dans le liquide (c'est-à-dire reste dans la position où on le met, sans flotter ni aller au fond, même lentement). En ce cas, le poids spécifique du minéral est identique à celui du liquide. On détermine alors le poids spécifique du liquide avec une balance de Westphal, qui est une balance hydrostatique adaptée à cet usage. La balance de Westphal consiste en un pied à tige réglable et en un bras gradué.

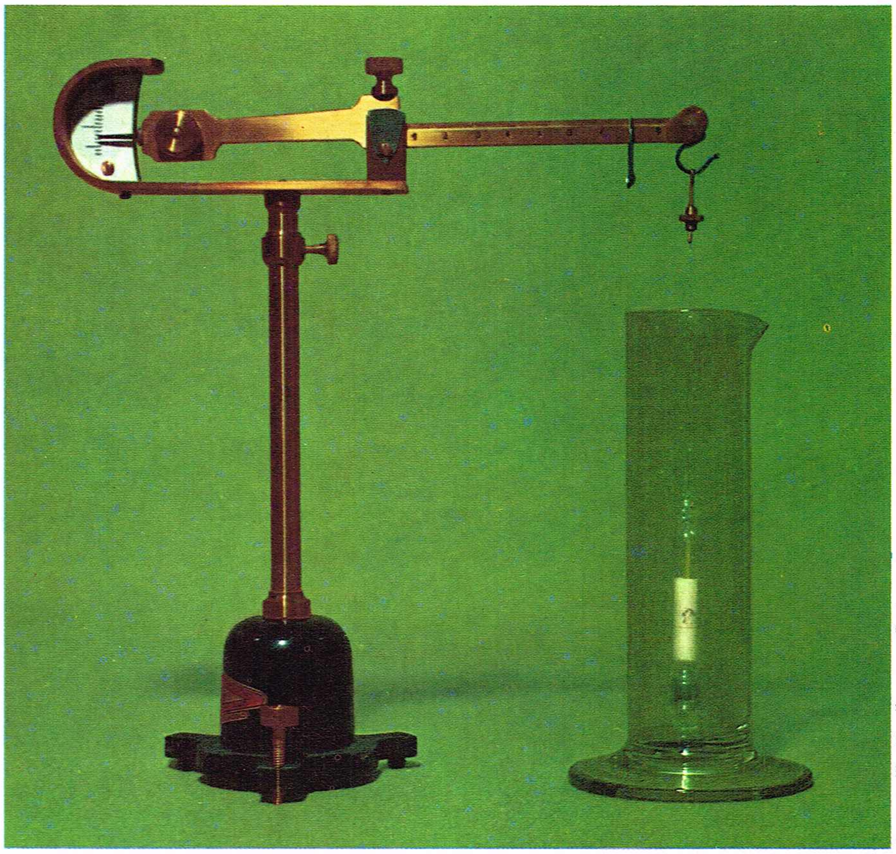

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***La* balance de Westphal *est un système hydrostatique permettant de déterminer indirectement le poids spécifique d'un minéral.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ ***Deux types de* pycnomètres *utilisés pour la détermination directe du poids spécifique des minéraux.***

A l'extrémité du bras gradué, on suspend par un fil très fin, en platine ou en soie, un petit thermomètre, qui sert à la fois de corps immergé et pour la lecture de la température du liquide.

On immerge le thermomètre dans le liquide, après avoir taré la balance avec de l'eau distillée (poids spécifique = 1). Le bras subit un déplacement vers le haut, qui est équilibré par des poids cavaliers, que l'on pose sur dix crans que porte le bras. Certains poids représentent les unités, d'autres la première décimale, d'autres encore la deuxième décimale, et d'autres enfin la troisième décimale. Ainsi, on lit directement sur le bras de la balance le poids spécifique du liquide, qui est également celui du minéral.

Parmi les liquides les plus utilisés, nous citerons : le bromoforme (poids spécifique = 2,90), qu'on peut diluer avec du benzène ou de l'éther, l'iodure de méthylène, généralement le plus employé (poids spécifique = 3,32), qu'on peut diluer également, et la liqueur de Clerici, solution aqueuse de formiate et de malonate de thallium (poids spécifique = 4,10), dont l'emploi est difficile en raison de sa toxicité.

Pour des poids spécifiques supérieurs, il convient d'utiliser comme liquides lourds des substances à l'état fondu; mais alors la méthode devient très laborieuse, de sorte que, pour les minéraux à haut poids spécifique, comme de nombreux minerais métallifères, cette méthode n'est pas applicable.

Actuellement, on se sert pour la détermination du poids spécifique de la balance de torsion, qui permet une détermination très rapide et très exacte et nécessite seulement de petites quantités des minéraux étudiés.

Les propriétés magnétiques

Les minéraux sont dits *magnétiques* quand ils peuvent être attirés par un aimant. Pour observer le magnétisme, il faut souvent réduire le minéral en poudre fine. Les minéraux qui sont attirés par un aimant sont dits *paramagnétiques,* ceux qui ne le sont pas sont qualifiés de *diamagnétiques*. Quand on tire une petite barre d'un minéral paramagnétique et qu'on la place, suspendue à un fil, dans un champ magnétique, elle se met parallèlement aux lignes de force.

Parmi les minéraux paramagnétiques, citons : la magnétite, qui a la plus grande susceptibilité magnétique, la pyrrhotite, et, dans une moindre mesure, presque tous les minerais de fer comme l'hématite, la sidérite, etc. Le soufre, le bismuth et la titanite, ou sphène, par exemple, sont diamagnétiques (ils présentent fort peu de susceptibilité magnétique).

Les propriétés magnétiques sont utilisées pour séparer les phases de mélanges de minéraux dont la susceptibilité magnétique est différente, aussi bien en laboratoire que dans l'industrie, grâce à des séparateurs magnétiques. Il existe de nombreux types de séparateurs magnétiques : à plan incliné, à ruban et à vis d'Archimède; ils peuvent sélectionner plusieurs minéraux en une seule fois, quand ces minéraux ont une susceptibilité magnétique différente.

Les propriétés magnétiques sont utilisées aussi pour la recherche de gisements de minerais magnétiques, particulièrement la magnétite. On se sert à cet effet d'une boussole spéciale, pourvue d'un bras et d'une masse en fer doux réglable sur celui-ci. La boussole est tarée en un lieu ne présentant sûrement pas de magnétisme, et l'on note la déviation du nord magnétique de l'aiguille sous l'action de la masse métallique. La présence de masses de magnétite dans le sous-sol modifie d'autant plus l'angle que ces masses sont plus puissantes et plus proches de la surface. En effectuant un certain nombre de relevés en des lieux voulus, on arrive, par jonction des points où la déviation est égale, à établir une carte qui permet d'interpréter la présence de masses magnétiques dans le sous-sol. En certains cas, les minéraux paramagnétiques peuvent devenir des aimants permanents, comme dans l'exemple classique de la magnétite du cap Calamita, dans l'île d'Elbe, où l'on considère que la magnétisation permanente a eu lieu grâce aux coups de foudre répétés qui sont tombés sur le minerai de fer, lequel affleure presque. En effet, dans de nombreux cas, la magnétite de cap Calamita peut attirer la limaille de fer.

Le clivage

L'une des propriétés physiques les plus évidentes des cristaux est le clivage. Toutefois, celui-ci n'est pas commun à tous les cristaux : certains, comme le quartz, la pyrite, les grenats, la magnétite, etc., ne se clivent pas, mais se cassent selon une cassure conchoïdale. La facilité du clivage dépend de la structure réticulaire; dans une structure « en feuillets » (phyllosilicates), ceux-ci sont faiblement liés entre eux et le clivage est facile parallèlement au plan de ces feuillets. Lorsque le réseau est très compact, ce qui est le cas pour de nombreux métaux, le clivage est totalement impossible. Dans certains cristaux, il peut exister plusieurs types de clivages.

Parmi les clivages les plus faciles et les plus caractéristiques, citons : celui de la galène et du sel gemme, selon le cube; celui de la fluorite, selon l'octaèdre; celui de la blende, selon le rhombododécaèdre; enfin, celui de la calcite, selon le rhomboèdre. Les micas ont un clivage basal très facile, étant donné que les diverses couches de tétraèdres sont très faiblement liées. Le gypse présente trois clivages différents : l'un, facile, selon {010}, les deux autres moins nets. L'orthose présente deux clivages, parfaits et faciles, selon {010} et selon {001}, lesquels, étant orthogonaux, ont fait donner son nom au minéral. Les amphiboles et les pyroxènes se clivent selon le prisme {110}. Alors que dans les amphiboles les plans de clivage forment entre eux des angles de 124°, l'angle est de 93° dans les pyroxènes; ainsi, il est possible de distinguer les amphiboles des pyroxènes en observant au microscope des sections basales : dans celles-ci, les traces des plans de clivage forment des losanges très prononcés pour les amphiboles et, par contre, des dessins à peu près rectangulaires pour les pyroxènes.

La dureté

Déjà connue chez les Grecs, la dureté est la résistance qu'un minéral oppose à la rayure. C'est donc une propriété qui dépend de la cohésion, et par conséquent de la structure réticulaire des minéraux.

Par rapport à la dureté, tous les cristaux, y compris ceux qui sont monométriques, sont anisotropes, alors que les minéraux amorphes sont isotropes. Les surfaces vectorielles de dureté sont des figures géométriques complexes; on prend habituellement en considération des courbes planes, dites *courbes de dureté,* se référant à une seule face.

La dureté est largement utilisée dans un but de diagnostic; il n'est cependant pas possible d'obtenir une précision, une constance et une uniformité absolues de mesure, car il existe d'importantes variations en fonction de la qualité, de la forme et de l'inclinaison de la pointe servant à rayer. C'est pourquoi l'on ne donne guère, dans les traités de minéralogie, les données trouvées à l'aide

▼ ***Le* scléromètre de Seebeck *utilisé pour déterminer la* dureté *des minéraux : on note sur la pointe (1) le poids nécessaire pour obtenir la rayure sur un échantillon de minéral (2); 3, chariot mobile; 4, contrepoids.***

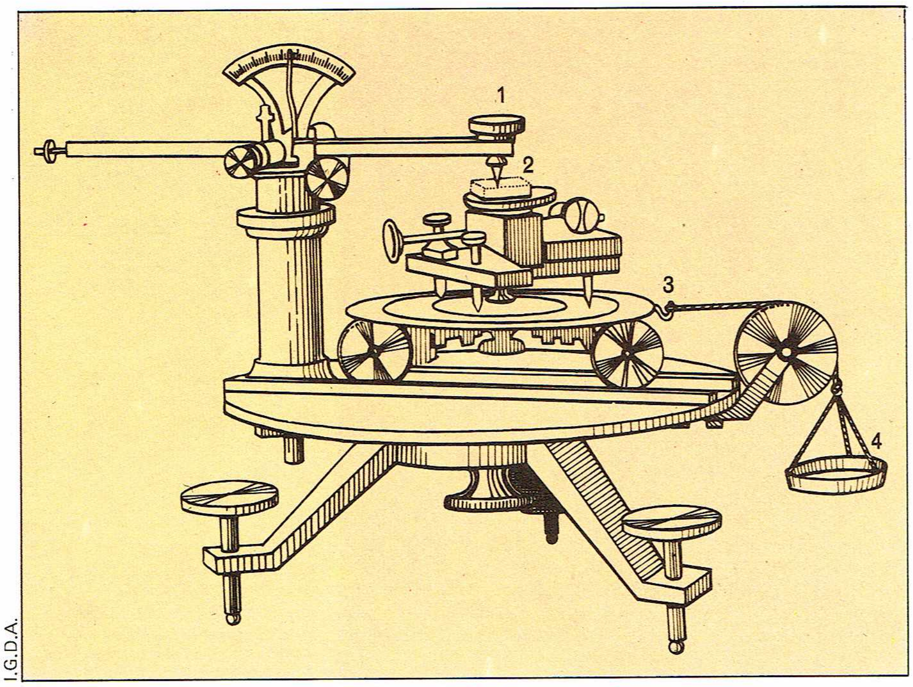

I.G.D.A.

des *scléromètres* (c'est-à-dire des appareils de mesure de la dureté), alors que l'on utilise fréquemment les valeurs de la vieille échelle de Mohs, qui est empirique.

L'*échelle de Mohs* est fondée sur le principe du minéral le plus dur qui raye le plus tendre. Les degrés ou termes de cette échelle sont au nombre de dix, chaque terme supérieur rayant celui qui lui est inférieur; mais il n'y a pas d'intervalle régulier de dureté entre un terme et un autre.

Les degrés de l'échelle de Mohs sont les suivants :

1. Talc
2. Gypse
3. Calcite (face du rhomboèdre)
4. Fluorite
5. Apatite
6. Orthose
7. Quartz
8. Topaze
9. Corindon
10. Diamant

On dit qu'un minéral a la dureté 7 si, comme le quartz, il raye l'orthose mais est rayé par la topaze. On utilise communément aussi des valeurs intermédiaires, approximatives, comme $2\frac{1}{2}$, $9\frac{1}{2}$, etc.

Les deux premiers degrés de l'échelle de Mohs, le talc et le gypse, sont rayés par l'ongle; les trois suivants (la calcite, la fluorite et l'apatite) le sont avec une pointe en acier; les autres, du sixième au dixième, ne sont pas rayés par une pointe d'acier. C'est à partir de ces critères qu'on a aussi classé les minéraux en *tendres, demi-durs* et *durs*.

Les *scléromètres* sont de divers types. Le *scléromètre de Seebeck* fait déplacer le minéral examiné sous une pointe chargée par un poids déterminé; la dureté est proportionnelle au poids employé pour obtenir la rayure. Dans le *scléromètre de Pfaff*, on charge également la pointe avec des poids, mais c'est la quantité de poudre enlevée par la rayure, naturellement inversement proportionnelle à la dureté, qui détermine celle-ci.

Il existe aussi une dureté qui est la *résistance au polissage*. Pour ce faire, on se sert d'une quantité dosée d'abrasif pendant un temps déterminé et en tenant compte de la superficie de la face examinée. Cette méthode est très pratique, mais elle ne tient pas compte de l'anisotropie.

Quand on utilise la *méthode de polissage, ou de Rosiwal*, les dix termes de Mohs présentent les valeurs de dureté suivantes :

1.	Talc	0,003
2.	Gypse	0,125
3.	Calcite	0,45
4.	Fluorite	0,50
5.	Apatite	0,65
6.	Orthose	3,7
7.	Quartz	12,7
8.	Topaze	17,5
9.	Corindon	100
10.	Diamant	14 000

Un exemple typique de l'anisotropie des cristaux par rapport à la dureté est fourni par la cyanite, ou disthène, Al_2SiO_5. Dans la longueur, la dureté est de $4\frac{1}{2}$ dans l'échelle de Mohs; normalement à la longueur, la dureté est de 7. De façon analogue, le sel gemme présente une dureté moindre à la rayure sur les faces du cube parallèlement à une arête que selon la diagonale de la face.

Propriétés optiques

Généralités sur la lumière

Le mouvement de la lumière, lors des phénomènes d'interférence, de diffraction et de polarisation, est ondulatoire dans le sens transversal, avec un plan de vibration normal à la direction de propagation. Ce fait, apparemment en contradiction avec la théorie quantique, est expliqué en admettant que la lumière jouit des propriétés d'un mouvement ondulatoire et corpusculaire en même temps, c'est-à-dire qu'elle serait constituée de *photons*, ou *quanta de lumière*, ayant en puissance une quantité de mouvement. Au cours de ce mouvement, les photons se comportent comme si la propagation d'une onde leur était associée. Il est donc normal de traiter des propriétés optiques des cristaux en considérant la lumière comme un mouvement vibratoire.

Un mouvement vibratoire de type harmonique peut être représenté par une sinusoïde. Dans la sinusoïde, la distance de deux points en concordance de phase, c'est-à-dire qui se trouvent dans le même état de vibration, est la longueur d'onde λ. On sait que, dans le spectre de la lumière visible, chaque couleur a sa propre longueur

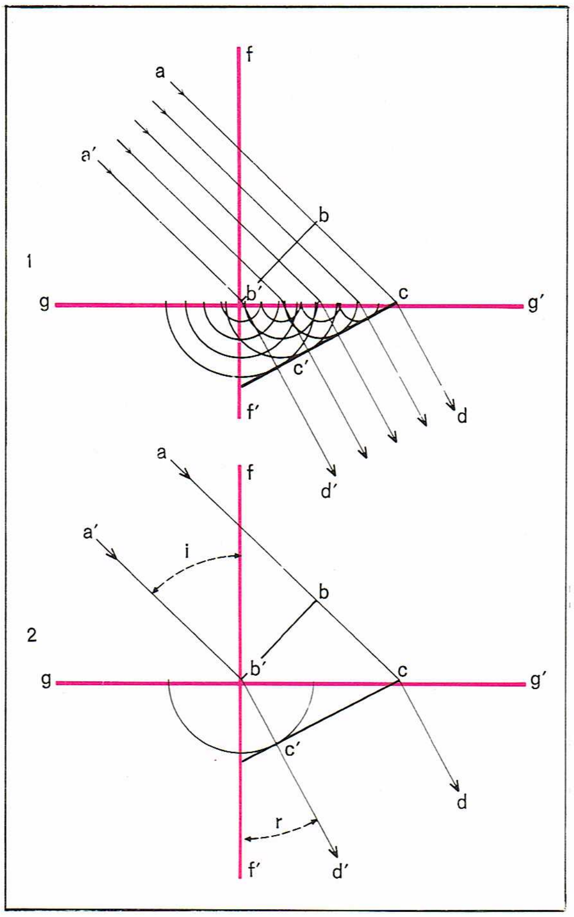

◀ ***Principe de la* réfraction de la lumière *sur une surface plane :***
1, réfraction de tous les rayons lumineux;
2, simplification de la figure précédente :
a-a', ***rayons lumineux incidents;*** **d-d'**, ***rayons lumineux réfléchis;***
g-g', ***plan de réfraction;***
f-f', ***normale d'incidence;***
i, ***angle d'incidence;***
r, ***angle de réfraction.***

d'onde, avec un maximum pour la lumière rouge, soit $\lambda = 8\,000$ Å, et un minimum pour la lumière violette, soit $\lambda = 4\,000$ Å. La lumière jaune est considérée comme ayant une longueur d'onde moyenne, avec $\lambda = 5\,896$ Å.

Dans l'air, plus la longueur d'onde est grande, et plus la vitesse l'est aussi. L'intensité de la lumière est, par contre, en rapport avec l'amplitude de la vibration. Si deux vibrations ayant la même longueur d'onde et vibrant dans le même plan sont déphasées d'une demi-longueur d'onde ou d'un nombre impair de demi-longueurs d'onde, elles interfèrent en s'annulant. Si, par contre, le déphasage est un nombre pair de demi-longueurs d'onde, les intensités s'additionnent.

Lumière naturelle et lumière polarisée

La lumière qui se propage dans le vide, dans l'air, dans un minéral amorphe ou dans un cristal monométrique vibre presque simultanément dans une infinité de directions normales à la direction de propagation. La lumière ayant ce comportement est appelée *lumière naturelle*.

Quand la lumière traverse un cristal dimétrique ou trimétrique (sauf dans des cas tout à fait particuliers), elle est amenée à vibrer dans deux directions perpendiculaires entre elles et à la direction de propagation. Le plan de vibration est, pour sa part, normal au plan de polarisation ; tous deux contiennent la direction de propagation. Les deux vibrations qui sortent du cristal seront de la *lumière polarisée*. On s'intéresse surtout, dans l'optique des cristaux, à la lumière polarisée linéairement.

L'indice de réfraction

L'*indice de réfraction* est l'une des données les plus fréquentes des traités et des manuels de minéralogie. Sa mesure est nécessaire pour l'identification des minéraux. C'est pour cela qu'on a étudié et mis au point de nombreuses méthodes en vue de sa détermination.

La vitesse de la lumière dans le vide est supérieure à sa vitesse dans des substances pondérables. Elle est d'autant plus faible que le milieu est plus réfringent. Dans les cristaux, la réfringence est plus élevée parce que la densité réticulaire est plus forte. Quand une onde lumineuse passe d'un milieu moins réfringent à un milieu plus réfringent, sa vitesse diminue et elle change de direction, en se rapprochant de la normale d'incidence. Il y a ainsi un *angle*

d'incidence i, formé par la direction de l'onde incidente avec la normale d'incidence, et un *angle de réfraction r*, déterminé par la direction de l'onde réfractée par rapport à la normale d'incidence; lors du passage d'un milieu moins réfringent à un milieu plus réfringent, i est toujours supérieur à r.

L'indice de réfraction n est donné par le rapport :

$$n = \frac{\sin i}{\sin r}.$$

Le rapport devrait, pour un maximum d'exactitude, se référer à un milieu réfringent et au vide; en pratique, on remplace le vide par l'air. De toute façon, les différences sont absolument négligeables.

Quand une onde lumineuse passe d'un milieu plus réfringent à un milieu moins réfringent, elle dévie, en s'éloignant de la normale. Lorsque l'incidence augmente, il arrive un moment où l'onde déviée se trouve dans la surface de contact des deux milieux. Il suffit alors d'une très légère augmentation de l'angle d'incidence pour provoquer la réflexion totale de l'onde, qui ne passe plus dans le milieu moins réfringent, mais est réfléchie par le plan de séparation selon un *angle de réflexion* égal à l'angle d'incidence.

Alors que la mesure de l'angle d'incidence est facile, celle de l'angle de réfraction est plus compliquée car, lorsque l'onde réfractée sort du milieu le plus réfringent et revient dans l'air, elle reprend le trajet qu'elle parcourait précédemment. On a donc recours à divers artifices et à diverses méthodes pour la mesure de l'indice de réfraction.

— *Méthode des liquides à indice de réfraction connu : « méthode de la frange de Becke »*

Cette méthode peut aussi servir pour des poudres cristallines. En effet, le minéral est examiné au microscope, sous un grossissement suffisamment important et, si l'on dispose d'éclats ou de fragments de minéraux, ceux-ci seront réduits en poudre. On place une petite quantité de poudre du minéral à examiner appelé frottis sur un verre porte-objet. On ajoute une goutte de liquide d'indice de réfraction connu, et on recouvre le tout d'un verre couvre-objet, en exerçant une légère pression pour distribuer uniformément le liquide et la poudre. On observe ensuite avec un objectif sous agrandissement moyen, en utilisant un très petit diaphragme pour produire une lumière faiblement convergente. S'il y a une différence entre l'indice de réfraction du liquide et celui du minéral, le fragment de celui-ci sera entouré d'une ligne lumineuse, appelée *frange*, ou *liséré de Becke*. Cette frange lumineuse est un renforcement de la lumière dû à la réflexion partielle des ondes, qui passent d'un milieu plus réfringent à un milieu moins réfringent.

Si l'on éloigne la préparation de l'objectif en soulevant le tube du microscope ou en abaissant la plate-forme porte-objet (selon le type de microscope), la frange de Becke se déplace vers le milieu à indice de réfraction le plus élevé. Lorsque l'on immerge les petits fragments du minéral (frottis) dans un liquide ayant le même indice que le minéral, la frange de Becke disparaît; si le minéral est incolore, il devient à peu près invisible; s'il est coloré, ses bords s'estompent et seule une silhouette colorée persiste.

Il convient alors de déterminer exactement l'indice de réfraction du liquide utilisé (qui pourra être un mélange de deux liquides d'indices connus). Cette opération est effectuée plus rapidement grâce à l'emploi des *réfractomètres*. Un réfractomètre est constitué par deux prismes en verre à haut indice de réfraction, juxtaposés, entre lesquels on met une goutte du liquide que l'on veut déterminer.

Les réfractomètres les plus simples sont constitués par une demi-sphère en verre à haut indice de réfraction, dans laquelle pénètre une onde lumineuse, qui est réfléchie totalement par la surface de séparation avec l'air. Si l'on met sur la sphère un liquide ou un morceau de minéral à surface plane, l'angle de réflexion varie en fonction de l'indice de réfraction de la substance examinée. Dans ce cas, le centrage exact est réalisé en déterminant la ligne de séparation des deux champs, l'un éclairé et l'autre obscur.

Naturellement, dans tous les cas, la détermination est limitée à des liquides ou des minéraux dont l'indice est inférieur à celui du verre des prismes ou de la demi-sphère.

Les liquides pour immersion les plus utilisés pour la détermination de l'indice de réfraction sont : l'essence de lavande ($n = 1{,}658$), l'essence de cannelle ($n = 1{,}590$), le monobromonaphtalène ($n = 1{,}658$), l'iodure de méthylène ($n = 1{,}741$), et, enfin, le plus employé, une solution de soufre dans l'iodure de méthylène ($n = 1{,}81$).

Pour déterminer les indices élevés on se sert d'arsines, dont l'indice de réfraction maximal est de 2,02. Les arsines sont des liquides extrêmement toxiques, donc à manipuler avec précautions.

— *Méthode plus moderne de détermination des indices de réfraction des substances anisotropes : « méthode de la chambre d'Emmons »*

Cette méthode utilise également le phénomène de la « frange de Becke ». Ici, le minéral à déterminer, sous forme de lame mince, est posé sur une plate-forme spéciale de microscope, appelée tablette universelle, ou plate-forme de Fedoroff, qui permet de donner au minéral l'orientation désirée, dont nous parlerons brièvement. L'indice de réfraction du liquide dans lequel est immergé le minéral doit être proche de celui de ce dernier : grâce à un chauffage ou à un refroidissement selon les cas, on induit des variations d'indices permettant de faire coïncider leur indice.

Afin d'obtenir des mesures très précises, on opère en lumière monochromatique, qui est fournie, par exemple, par une lampe à vapeurs de sodium (laquelle donne de la lumière jaune dans la partie médiane du spectre visible), ou bien encore grâce à des filtres en verre fortement coloré. Outre la lumière jaune (de la lampe à vapeurs de sodium), on utilise la lumière verte (coloration donnée par le thallium) et la lumière rouge (coloration donnée par le lithium).

On obtient de la lumière monochromatique, dans toutes les longueurs d'onde du spectre visible, à l'aide du *monochromateur*. Il existe divers types de monochromateurs. L'un des plus utilisés est constitué par un prisme transparent, tournant autour d'un axe, qui disperse les différentes couleurs du spectre de la lumière blanche; en faisant varier la position du prisme, on peut obtenir successivement toutes les couleurs possibles, que l'on fait défiler devant la fente d'un collimateur, la longueur d'onde exacte étant lue sur un cadran étalonné.

Le relief des minéraux

Quand il existe des associations de minéraux, et lorsqu'on effectue des observations sur des lames minces, les minéraux ayant le plus haut indice de réfraction sont plus en relief que ceux dont l'indice est plus bas. Par exemple, un zircon inclus dans un mica ressemble à un petit grain très en relief sur le mica. Un cristal d'apatite englobé dans de l'orthose est également nettement en relief, bien que les deux substances soient transparentes et incolores. Les aiguilles de rutile existant dans le quartz, tout en étant fines et minuscules, sont facilement reconnaissables à leur importante ombre de contour, due à la différence des indices de réfraction. Par contre, les minéraux à faible indice de réfraction, comme la fluorite et l'opale, donnent une impression de vide.

La biréfringence

Nous avons déjà vu que, lorsqu'une onde lumineuse non polarisée (lumière naturelle) vibrant dans une infinité de directions normales à la direction de propagation pénètre dans un cristal dimétrique ou trimétrique, elle se met à vibrer dans deux directions perpendiculaires entre elles et à la direction de propagation. Nous avons également vu que les deux ondes ainsi formées sont polarisées et ont des vitesses différentes, donc un indice de réfraction différent, car l'indice de réfraction est inversement proportionnel à la vitesse. Ce phénomène de dédoublement de l'onde lumineuse a été nommé *biréfringence;* les cristaux qui le présentent sont dits biréfringents.

Dans la plupart des minéraux, le phénomène ne peut être observé ni à l'œil nu ni avec les appareils optiques de conception simple; par contre, dans la calcite, le phénomène est remarquable, notamment dans les cristaux limpides et transparents (on se sert pour la démonstration de rhomboèdres de la variété de calcite nommée spath d'Islande). Dans le spath, on peut voir le phénomène de biréfringence par transparence, du fait de l'importante différence d'indice de réfraction existant entre les deux ondes.

Si l'on trace un point sur une feuille de papier blanc et que l'on pose dessus le rhomboèdre de spath d'Islande (l'axe de symétrie 3 est alors oblique car le rhomboèdre

repose sur une face de clivage), on observe à travers le cristal deux petits points dont la distance est proportionnelle à l'épaisseur du spath. Si l'on fait tourner le rhomboèdre, l'un des points reste à sa place et l'autre tourne autour de lui en décrivant un cercle dont le centre est le point immobile. L'image immobile concerne le *rayon ordinaire,* alors que celle qui effectue une rotation concerne le *rayon extraordinaire.* Alors que le rayon ordinaire obéit aux lois de la réfraction simple, le rayon extraordinaire en est indépendant.

Si l'on regarde le petit point sur la feuille de papier parallèlement à l'axe de symétrie d'ordre 3 du cristal de spath d'Islande, on ne le voit pas dédoublé. L'axe de symétrie d'ordre 3 est donc une direction d'isotropie, selon laquelle n'ont lieu ni biréfringence, ni polarisation. Cette direction est appelée *axe optique.* Dans les cristaux trigonaux, elle coïncide avec l'axe simple de symétrie d'ordre 3, alors que, dans les cristaux hexagonaux, elle coïncide avec l'axe de symétrie d'ordre 6, et, dans les cristaux tétragonaux, avec l'axe de symétrie d'ordre 4.

D'intéressantes expériences peuvent également être effectuées avec deux cristaux identiques de spath d'Islande. Si l'on fait passer à travers l'un des deux cristaux un rayon de lumière ordinaire et si l'on place un écran de l'autre côté, on observe sur cet écran deux images lumineuses, à une certaine distance l'une de l'autre. Si l'on place un second rhomboèdre identique sur le parcours de la lumière, de façon rigoureusement parallèle au premier, le rayon lumineux, traversant les deux rhomboèdres, formera sur l'écran deux images lumineuses, dont la distance l'une par rapport à l'autre aura doublé par rapport à la distance précédente.

En faisant effectuer une rotation de 180° à l'un des deux rhomboèdres, de manière à le mettre en position spéculairement symétrique au premier, on voit que les deux images se recomposent en une seule, car le second rhomboèdre, identique au premier, le compense exactement.

En faisant effectuer à nouveau une rotation à l'un des deux rhomboèdres, on observe que les images se dédoublent immédiatement pour en donner quatre : deux proviennent du dédoublement dans le second rhomboèdre de l'onde ordinaire qui provient du premier rhomboèdre ; et deux sont formées par le dédoublement, toujours dans le second rhomboèdre, de l'onde extraordinaire qui provient du premier. L'intensité des quatre images n'est pas égale ; elle le devient seulement quand les deux rhomboèdres ont tourné l'un par rapport à l'autre de 45°. Dans les autres positions, deux images sont plus faibles, alors que les deux autres sont plus intenses. Les images se ramènent à deux quand les deux rhomboèdres ont tourné de 90° l'un par rapport à l'autre.

On déduit de cette expérience que la lumière ayant traversé le premier rhomboèdre de calcite est polarisée linéairement, que les vibrations sont perpendiculaires les unes par rapport aux autres, et, enfin, que les vibrations ont lieu dans la section principale et normalement à celle-ci (on entend par section principale le plan qui comprend la direction de l'onde incidente et celle de l'axe optique).

Ces propriétés sont celles de tous les cristaux dimétriques, bien que le phénomène ne soit pas aussi manifeste dans les autres substances que le spath d'Islande.

L'isomorphisme

L'isomorphisme est l'un des domaines de la minéralogie que les récentes découvertes ont le plus bouleversés. On croyait naguère que deux ou plusieurs substances, pour être isomorphes les unes vis-à-vis des autres, devaient avoir une composition chimique à peu près égale, ou, tout au moins, devaient contenir un nombre égal d'atomes dans leur formule. Or, on s'est aperçu que les substances sont isomorphes quand elles présentent une analogie de composition chimique et de structure, ainsi que de forme cristalline, quand elles sont constituées par des ions à rayon et à polarisabilité analogues, et, enfin, quand elles peuvent donner des cristaux mixtes en toutes proportions, ou en proportions définies.

L'une des conditions essentielles pour que puisse avoir lieu la substitution d'ions est l'analogie du rayon ionique des éléments qui se remplacent. Ceux-ci sont appelés *éléments isomorphogènes,* ou *vicariants.* Pour que deux éléments isomorphogènes puissent se remplacer l'un l'autre, la différence entre leurs rayons ioniques ne doit pas dépasser 10 à 15 % du plus petit rayon.

Ces possibilités de remplacement rendent parfois difficile d'établir combien il existe d'espèces dans une famille de minéraux. Par exemple, dans la série de l'olivine, se pose la question de savoir s'il existe une, deux, trois, quatre ou cinq espèces. C'est-à-dire, existe-t-il : l'olivine seule $(Mg, Fe)_2SiO_4$, ou les termes extrêmes de cette série : la fayalite Fe_2SiO_4 et la forstérite Mg_2SiO_4, ou bien les deux termes extrêmes et le terme intermédiaire $(Mg, Fe)_2SiO_4$, ou encore cinq espèces si on ajoute aux précédentes la variété où le fer prédomine sur le magnésium et celle où le magnésium prédomine sur le fer ?

De cette difficulté il résulte qu'il n'est pas possible d'établir avec exactitude le nombre d'espèces minérales connues ; il devrait être compris entre 2 200 et 2 500.

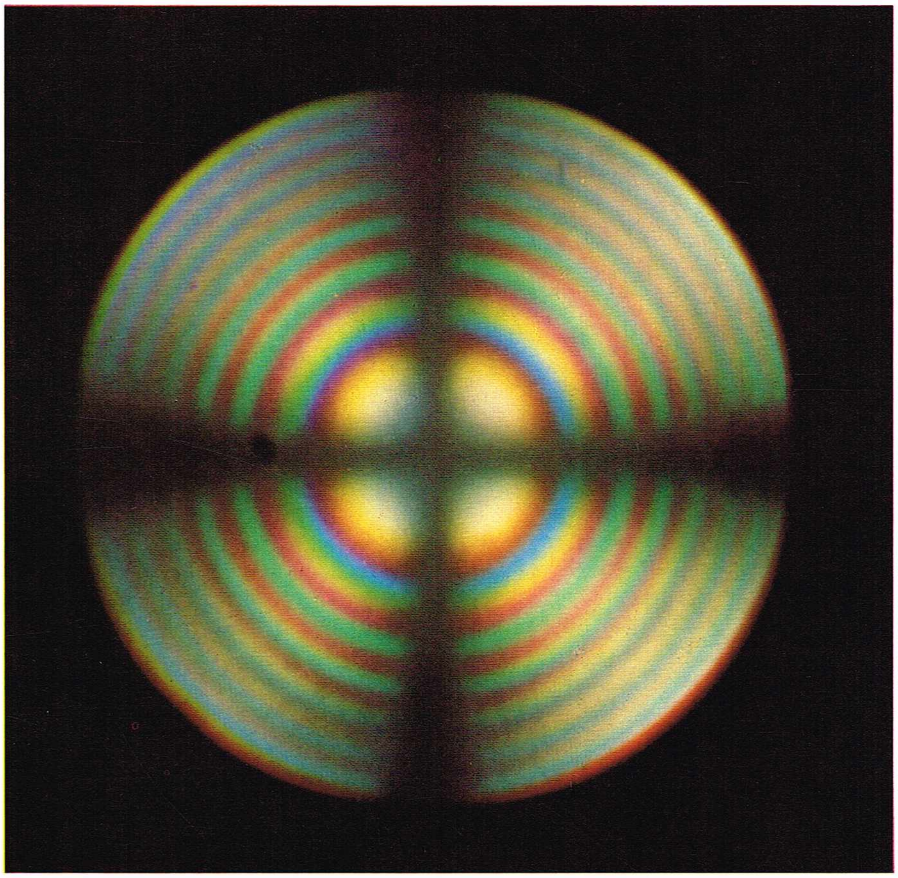

R. Potenza

▲ ***Figure d'interférence d'un minéral biréfringent uniaxe, en section normale à l'axe optique.***

▼ ***Phénomène montrant la biréfringence de la calcite à travers un rhomboèdre de clivage transparent.***

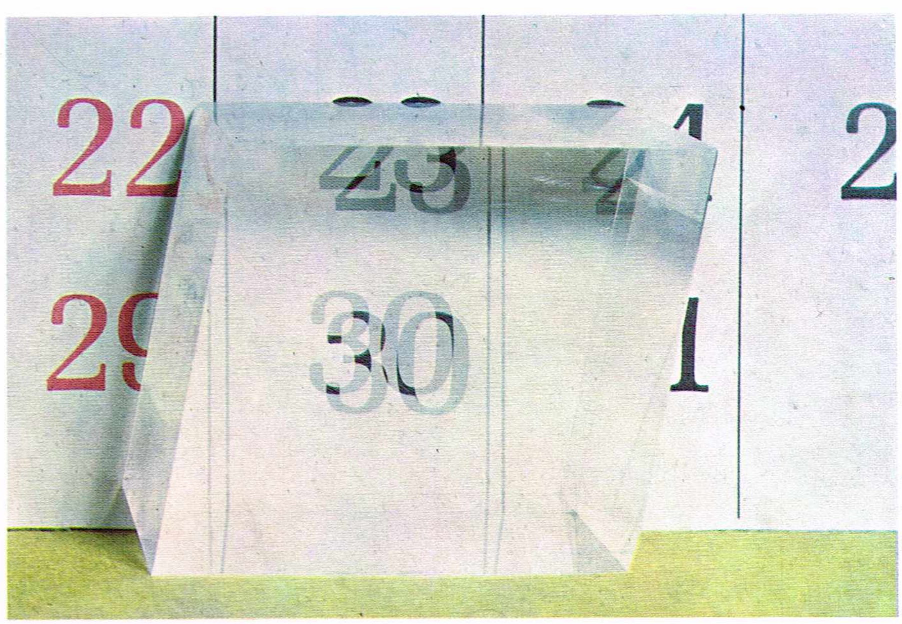

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ *A gauche, cristaux de cuivre natif provenant du lac Supérieur (musée d'Histoire naturelle, Milan). A droite, cristaux de cuivre natif provenant de Zambie (Londres, British Museum).*

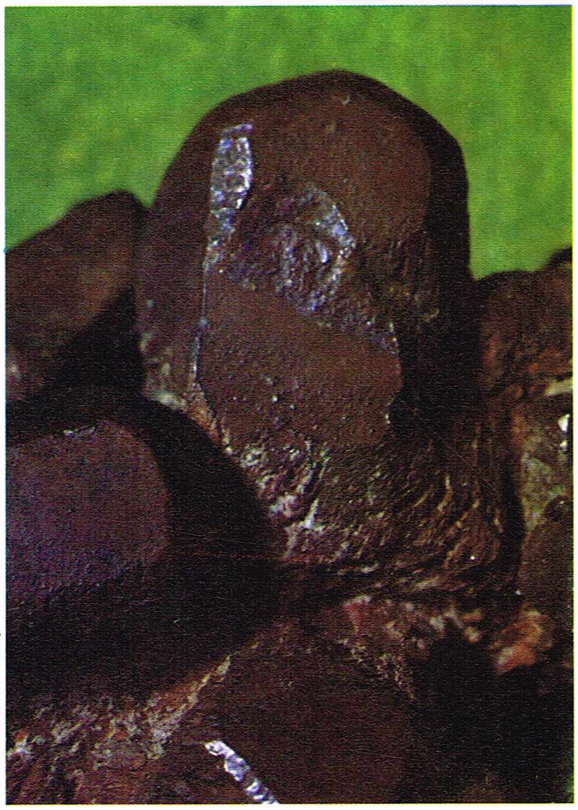

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Description des minéraux

Corps natifs

Cuivre, Cu - cubique

Le cuivre à l'état natif est l'un des premiers métaux utilisés par l'homme. Son nom est dérivé du latin *cuprum,* nom que lui ont donné les Romains, qui l'importaient de l'île de Chypre. Il se présente en masses lamellaires ou à contours irréguliers et déchiquetés, en pépites, en agrégats dendritiques, plus rarement en cristaux de formes dérivées du cube (combinaison des faces du cube, de l'octaèdre, tétrahexaèdre). Les cristaux se maclent sur {111}.

Propriétés. Dureté : $2\frac{1}{2}$ à 3; densité : 8,95; point de fusion : 1 083 °C. Ductile, malléable, bon conducteur de la chaleur et de l'électricité. Il possède un lustre métallique et une couleur rouge-brun brillante si caractéristique qu'elle a donné naissance à l'adjectif *cuivré*.

Signes distinctifs. La densité, l'éclat métallique et la couleur apparaissant lors de la rayure de la surface (souvent terne ou altérée) permettent de reconnaître le cuivre natif. Facilement soluble dans l'acide nitrique, il donne une solution bleue avec l'ammoniaque.

Gisements. On le rencontre parfois dans les gîtes hydrothermaux, mais le plus souvent dans les parties inférieures des zones d'oxydation des gîtes de sulfure de cuivre, associé à la malachite, la cuprite et la chalcosine. Les plus beaux groupes de cristaux proviennent du Michigan, près des rives du lac Supérieur, où ce minéral est associé aux zéolites, calcites et parfois à l'argent natif; la plus grande masse de cuivre natif que l'on y ait rencontrée pesait 420 tonnes. Des formations dendritiques très belles ont été rencontrées à Tourimskié, Oural. A Coroco (Bolivie), le cuivre pseudomorphose parfois des macles d'aragonite dont il a pris la forme du prisme hexagonal à faces concaves. Les échantillons classiques de cuivre natif des collections viennent aussi de Cuba, de Cornouailles, du Mexique et de Toscane. C'est le métal le plus recherché pour l'industrie électrique. Du point de vue de la valeur, il se place au premier rang mondial des substances métalliques extraites chaque année dans le monde.

Argent, Ag - cubique

C'est l'un des trois premiers métaux connus par l'homme. L'argent natif se rencontre sous forme de filaments, de dendrites arborescentes, de feuilles, de lames, de masses irrégulières et de pépites. On le trouve, plus rarement, en cristaux de formes semblables à celles de l'or et du cuivre (cube et octaèdre). La macle sur {111} est assez commune; elle explique l'angle de 60° que forment certains agrégats de cristaux réticulés en dendrites (triangles équilatéraux).

Propriétés. Dureté : $2\frac{1}{2}$ à 3; densité : 10,5; point de fusion : 960 °C. Ductile, malléable, c'est l'un des meilleurs conducteurs de la chaleur et de l'électricité. Sa couleur blanche, métallique, a donné naissance à l'adjectif *argenté*. Il est souvent allié à l'or ou au cuivre.

Signes distinctifs. Souvent altéré en surface; la couleur blanc métallique caractéristique apparaît lors de la rayure. Sa densité élevée le distingue des sulfures sectiles. On le distingue du platine par sa plus grande dureté et sa densité moins élevée.

Gisements. L'argent natif associé à l'argentite et à la calcite se rencontre dans les filons hydrothermaux (avec parfois des sulfures, des arséniures ainsi que des antimoniures de nickel-cobalt-bismuth, et des oxydes d'uranium). Il peut se former dans les zones d'oxydation par réduction des sulfo-arséniures ou antimoniures d'argent. Les meilleurs échantillons de collection proviennent de Kongsberg (Norvège), de Charñacillo, Valenciana (Mexique), de Cobalt (Ontario, Canada), de Freiberg et d'Andreasberg (Allemagne), de Sarrabus (Sardaigne). En France, les anciennes mines de Sainte-Marie-aux-Mines ont donné autrefois de fort beaux argents natifs : une masse de plus d'une demi-tonne y a été extraite au XVI[e] siècle.

Amalgame (Hg, Ag)

L'amalgame est le nom donné à l'argent contenant du mercure en solution solide (20 à 30 %). On l'a rencontré en cristaux blancs brillants à Moschelsberg (Rhénanie) avec les formes {100}, {110} et {111}. Sa dureté est $3\frac{1}{2}$ et sa densité 13,6. Cette dernière variété est parfois considérée comme une espèce distincte, sous le nom de *moschellandsbergite,* avec pour formule (Hg_3Ag_2).

Or, Au - cubique

L'or a de tout temps été le métal le plus recherché par l'homme, qui l'employait déjà pour sa parure à la fin du Néolithique (au Chalcolithique, c'est-à-dire en même temps que le cuivre). On le rencontre le plus souvent en paillettes et en grains irréguliers (pépites), ainsi qu'en dendrites et en arborescences filiformes ou lamellaires.

▶ *Page ci-contre, en bas, or natif sur quartz, provenant de Californie (musée d'Histoire naturelle, Milan).*

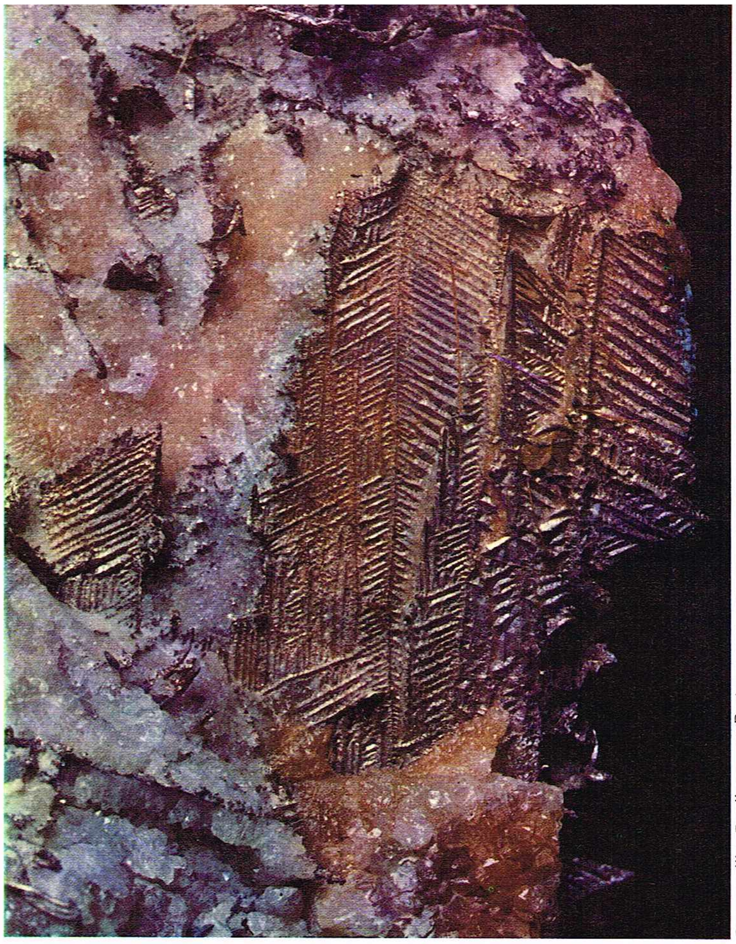

▲ ***A gauche,* argent natif *filamenteux provenant de Kongsberg, Norvège; à droite,* argent natif *en forme de dendrites réticulées (musée d'Histoire naturelle, Milan).***

Les cristaux sont rares et portent les faces du cube, de l'octaèdre et du dodécaèdre. La macle sur {111} apparaît surtout dans les agrégats de cristaux formant des ramifications dont les angles d'intersection ont 60°. Les cristaux peuvent être allongés ou aplatis suivant {111}.

Propriétés. Dureté : $2\frac{1}{2}$ à 3 ; densité : 15 à 19,3 quand il ne contient pas d'autres métaux en alliage ; point de fusion : 1 062 °C pour le métal pur. Ductile, malléable, il se laisse réduire en feuilles si minces qu'elles deviennent translucides, laissant passer la lumière verte. C'est un bon conducteur de la chaleur et de l'électricité. Sa couleur métallique est si caractéristique qu'elle définit un jaune vif et brillant (jaune d'or). Les variétés pâles sont celles qui contiennent de l'argent ; une couleur orangée est donnée par le cuivre (la présence de ces métaux abaisse la densité de l'or).

Signes distinctifs. La densité, l'inaltérabilité aux acides isolés et l'éclat métallique jaune (rayure à la surface des pépites granuleuses) suffisent à caractériser l'or natif.

Gisements. L'or se rencontre dans les gîtes hydrothermaux, liés aux intrusions de roches acides. En filon de quartz avec la pyrite, l'arsénopyrite, la chalcopyrite,

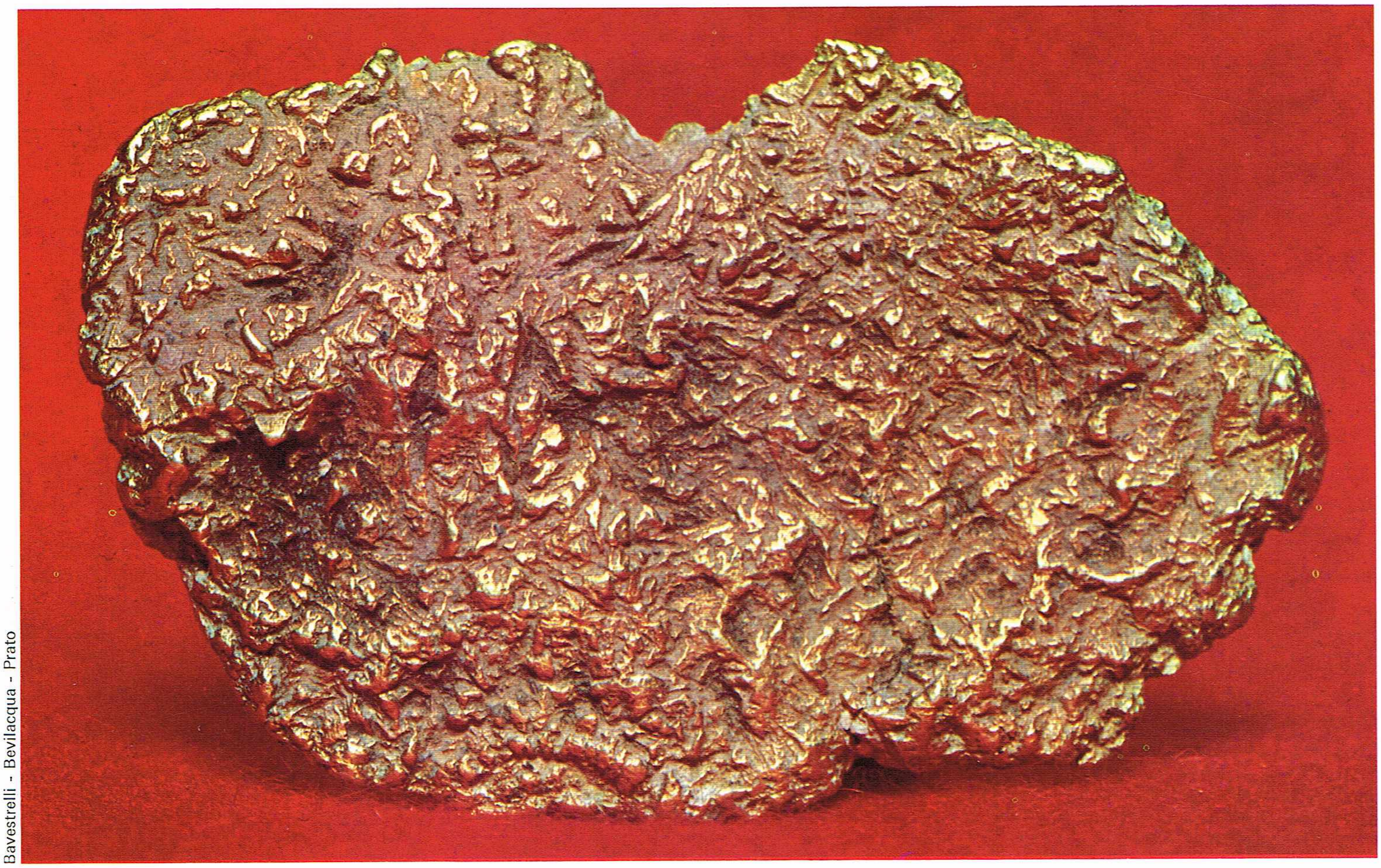

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Pépite d'*****or natif** ***provenant de Californie (musée d'Histoire naturelle, Milan).***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ **Mercure natif** ***sous forme de gouttelettes à éclat métallique blanc.***

et parfois la stibine et la galène, ou encore associé à des tellures d'or et d'argent, comme à Nagyag (Roumanie), à Kalgoorlie (Australie), à Cripple Creek (Colorado). Les gisements les plus importants sont ceux des conglomérats très anciens du Witwatersans (Transvaal). Les meilleurs cristaux proviennent de l'Oural (Beresowsk) et de Californie. En Australie, plusieurs pépites géantes, de plus de 50 kg, ont été trouvées. L'or se rencontre en de nombreux endroits du globe en alluvions (paillettes, pépites) ; les pépites peuvent se former ou croître dans les remous de l'eau par compaction d'or colloïdal contre des grains de sable. Étalon monétaire depuis deux mille ans, l'or est particulièrement recherché pour la bijouterie, la dentisterie, l'industrie, etc.

Électrum (Au, Ag) - cubique

L'électrum est un alliage naturel d'or et d'argent (plus de 15 % d'argent) de couleur jaune à jaune très pâle. Il existe d'autres alliages de l'or : avec le cuivre (= cuproaurite), avec le palladium (= porpézite, contenant 5 à 12 % de Pd), ainsi qu'avec le bismuth. Le cuivre donne à l'or une teinte plus rouge, le palladium une teinte plus pâle jusqu'au blanc d'argent. L'or natif est très rarement pur ; il contient presque toujours une petite proportion d'autres métaux.

Mercure, Hg - seul minéral liquide

Le mercure natif se rencontre en petites gouttelettes brillantes à éclat métallique blanc. Sa densité est 13,6. On le trouve dans les gisements de cinabre d'Almaden (Espagne), d'Idrija et d'Avala (Yougoslavie), de New Almaden (États-Unis) et dans quelques gîtes de l'Altaï (U.R.S.S.).

Les amalgames naturels sont des alliages de mercure avec l'or ou l'argent (moschellandsbergite Hg_3Ag_2).

Plomb, Pb - cubique

Le plomb natif est très rare. Il se présente en lames, masses contournées aux grains irréguliers. Il est rarissime en cristaux cubiques (avec les faces de l'octaèdre et du dodécaèdre) ; il est maclé sur {111}.

Propriétés. Dureté : $1\frac{1}{2}$, densité : 11,30. Il est très malléable et ductile, fusible (330 °C). Son éclat métallique gris plomb est caractéristique sur la rayure. Il est soluble dans l'acide nitrique. Le gisement le plus connu est celui de Langban (Suède).

Fer, Fe - cubique

Le fer d'origine terrestre se présente en grains irréguliers, en masses plates et lamellaires, parfois de grandes dimensions. On le rencontre aussi en intercroissances régulières avec le ferronickel. Les cristaux sont très rares (macle suivant {111}).

Propriétés. Dureté : 4 ; densité : 7,3 à 7,8 ; malléable et un peu cassant, avec un clivage suivant {100} ; magnétique ; couleur gris acier.

Signes distinctifs. Se distingue du platine par sa solubilité dans les acides et par sa densité plus faible.

Gisements. Le principal gisement de fer natif est celui d'Ovifak (Groenland), où on l'a rencontré en masses atteignant 25 tonnes.

Awaruite, Ni_2Fe - cubique

Trouvé à Awarua Bay en Nouvelle-Zélande, cet alliage naturel contient de 70 à 75 % de nickel et de 25 à 30 % de fer. Dureté : 5 ; densité : 8. On le rencontre aussi dans les « placers » platinifères de l'Oural.

Platine, Pt - cubique

Découvert en 1735 en Colombie, le platine doit son nom au mot espagnol *plata,* qui signifie argent, avec lequel il a tout d'abord été confondu. Très rare en cristaux (cubes déformés parfois maclés sur {111}), on le rencontre surtout sous forme de paillettes, de grains, de pépites (ne dépassant que rarement 5 kg).

Propriétés. Dureté : 4 à $4\frac{1}{2}$; densité : 14 à 19 (21,5 pour le métal pur) ; point de fusion : 1 750 °C. Ductile, malléable, bon conducteur de l'électricité. Éclat métallique, blanc à gris acier. Il peut contenir du fer (11 %, ce qui le rend magnétique), de l'iridium (qui élève sa dureté jusqu'à 6), du palladium en quantité notable (7 %), et, en plus petite quantité, du rhodium, du cuivre et du nickel (moins de 1 %).

Signes distinctifs. La densité et l'inaltérabilité aux acides suffisent à le distinguer du fer natif et de l'argent.

Gisements. Le platine se rencontre dans les gîtes liés aux roches magmatiques éruptives ultrabasiques (pauvres en silice et riches en magnésium). Les plus grosses pépites visibles dans les musées proviennent des placers de Nijne-Taguilsk (Oural). Citons parmi les autres gisements : Takaka (Nouvelle-Zélande), Couca et Pinto (Colombie), Sudbury (Canada) et quelques gisements au Transvaal.

Famille du platine : iridium, osmium, rhodium, ruthénium, palladium

Outre les alliages naturels cubiques du platine avec l'iridium, le palladium et le rhodium, les métaux de la mine du platine se rencontrent dans la nature sous forme de « solution solide ». De cristallisation hexagonale, le syserjskite (Os, Ir), l'iridosmine (Ir, Os) ainsi que leurs variétés, contenant du ruthénium et du rhodium, se rencontrent en grains irréguliers ou sous forme de lamelles hexagonales à clivage basal parfait, de couleur blanc d'étain à noir de fer.

Propriétés. Dureté : 6 ; une densité très forte : 17 à 22,5 (la plus forte densité connue dans le règne minéral, près de 23, a été mesurée sur un minéral de cette série).

Gisements. On les rencontre dans certains gîtes platinifères de Tasmanie, d'Oural, de Bornéo, de Californie, etc. La collection du Muséum de Paris possède un fragment du premier palladium isolé par Wollaston en 1803 et les platinoïdes étudiés par Fourcroy, Vauquelin et Berzelius dans les premières années du XIX^e siècle.

Arsenic, As - rhomboédrique

Très rarement cristallisé (cristaux aciculaires), l'arsenic se rencontre à l'état naturel en masses grenues ou écailleuses mamelonnées ou stalactitiques, formées de couches concentriques. Ses cristaux se clivent suivant {1014}.

Propriétés. Dureté : $3\frac{1}{2}$; densité : 5,7. C'est un minéral fragile et cassant, dont l'éclat métallique blanc d'étain apparaît sur la cassure fraîche mais se ternit rapidement en devenant gris fonte.

Signe distinctif. Il se volatilise sans fondre en dégageant une odeur d'ail (AsH_3).

Gisements. On le rencontre dans les gisements hydrothermaux ; les meilleurs échantillons proviennent de Sacarimbu (Roumanie), de Gabe-Gottes (Sainte-Marie-aux-Mines, Haut-Rhin), de Futliu (Japon), de Bohême, du Piémont, etc.

Allemontite (As, Sb) - rhomboédrique

Cette solution solide entre l'arsenic (38 %) et l'antimoine (62 %) prend place parmi les corps simples natifs. L'allemontite se présente en masses mamelonnées, granulaires ou lamellaires.

Propriétés. Dureté : 3 à 4 ; densité : 5,8 à 6,2 ; éclat métallique blanc d'étain parfois très vif.

Gisements. Se rencontre dans les gîtes hydrothermaux : Allemont (Isère), Atlin (Canada), Przibram (Bohême).

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Pépite de platine provenant de Sibérie.***

Antimoine, Sb - rhomboédrique

L'antimoine se rencontre à l'état natif en masses grenues ou mamelonnées, ou encore en masses lamellaires montrant un clivage distinct. Les cristaux sont rares ; ils possèdent un faciès pseudo-cubique {01$\bar{1}$2}, avec macle commune sur {10$\bar{1}$4} et présentent plusieurs clivages : facile sur {0001}, distinct sur {10$\bar{1}$1} et imparfait sur {10$\bar{1}$4}.

Propriétés. Dureté : 3 à $3\frac{1}{2}$; densité : 6,6 à 6,7 ; éclat métallique à couleur blanc d'étain.

Gisements. C'est un minéral rare des gisements hydrothermaux, où il est associé à l'arsenic et la stibine. De beaux échantillons ont été rencontrés aux Chalanches, près d'Allemont (Isère), à Sarrabus (Sardaigne), à Kern Crinty (Californie), à Przibram (Bohême) et à Broken-Hill (Australie).

Bismuth, Bi - rhomboédrique

A l'état natif, le bismuth se rencontre en masses grenues ou lamellaires, ou en formations arborescentes et réticulées. Les cristaux sont rares et indistincts avec macle suivant {10$\bar{1}$4} et montrent un clivage parfait suivant (0001).

Propriétés. Dureté : 2 à $2\frac{1}{2}$; densité : 9,7 à 9,8 ; cassant, moyennement sectible ; éclat métallique blanc à reflets rosés s'irisant facilement après exposition à l'air.

Gisements. Plus répandu que l'antimoine natif, auquel il ressemble, il se rencontre dans divers gîtes sulfurés et dans les pegmatites à cassitérites. Des masses de plus de 100 kg ont été rencontrées à Oruro, Sarganaya et Huaina (Bolivie). De beaux spécimens proviennent de Meymac (Corrèze), Schneeberg (Saxe), Fazenda Campo-Formozo (Brésil).

Graphite, C - hexagonal

Cette variété de carbone cristallisé (très différente du diamant en raison de sa structure) se présente en masses feuilletées, écailleuses ou en agrégats radiés. Les cristaux hexagonaux sont aplatis sur (001) avec un clivage basal parfait.

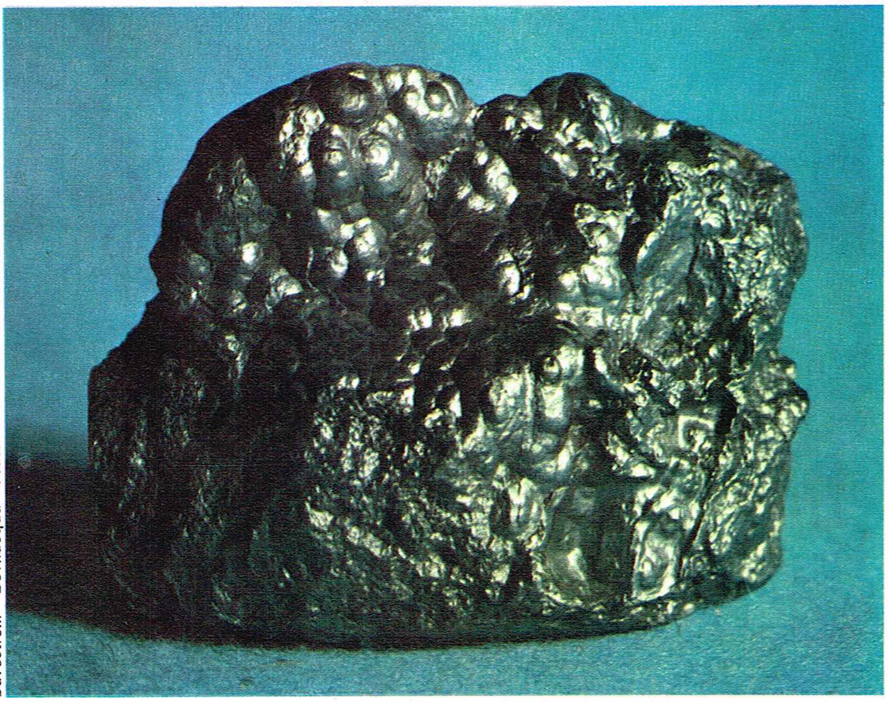

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *A gauche, masse de graphite provenant de Sibérie; les diverses variétés de ce carbone cristallisé se trouvent associées aux roches métamorphiques. A droite,* diamant brut *sur matrice de conglomérat (on notera les faces courbes du cristal) provenant d'Alexander Bay (République sud-africaine).*

▼ *Un assortiment de cristaux bruts de* diamant *appartenant à la collection De Beers.*

Coll. De Beers

Propriétés. Dureté : 1 à 2 ; densité : 2,10 à 2,23 ; sectible, flexible et onctueux au toucher (employé comme lubrifiant). De couleur gris-noir, il donne un trait noir brillant sur le papier (mine de crayon). Bon conducteur de l'électricité.

Gisements. Associé aux roches métamorphiques ; ses belles variétés se trouvent à Ceylan, à Madagascar, au Canada, en Finlande, en Bohême et dans l'État de New York.

Diamant, C - cubique

Connu en Inde douze siècles avant J.-C., le diamant (carbone cristallisé) doit son nom au croisement de deux mots grecs : *adamas* (acier, fer, très dur, ou diamant) et d'un mot commençant par *dia* tel que *diaphanès* (transparent). Il se présente en cristaux dérivés du cube (octaèdre fréquent), souvent à faces courbes et déformées qui lui donnent l'allure de grains irréguliers. Le boart est la variété cryptocristallisée radiée, le carbonado une variété cryptocristallisée finement grenue contenant beaucoup d'impuretés noirâtres. Il présente une macle et un clivage parfait suivant {111} ; les macles multiples de tétraèdres maclés interpénétrés suivant l'axe [001] ne sont pas rares (octaèdres cannelés). Les types cristallographiques sont conservés par le Muséum de Paris.

Propriétés. Dureté : le diamant est le minéral le plus dur et sert à définir le degré 10 de l'échelle de Mohs ; densité : 3,50 à 3,53. Assez fragile en raison du clivage, il possède une cassure conchoïdale. Éclat adamantin en raison de son indice de réfraction élevé $n = 2,42$. Ses couleurs, très variables, vont de l'incolore aux teintes les plus vives : brun, jaune, rose, bleu, vert, noir. Il est parfois fluorescent aux ultraviolets et brûle dans un courant d'oxygène vers 1 000 °C. Il est inattaquable aux acides.

Signe distinctif. Sa grande dureté permet de le reconnaître facilement des autres minéraux.

Gisements. Sa roche mère est la kimberlite où il est associé au pyrope, et au chrome-diopside. On le rencontre également dans les gisements détritiques (anciens et remaniés, ou modernes dérivant de l'altération des kimberlites : éluvions, alluvions, conglomérats, etc.). Jusqu'au XVIIIe siècle, l'Inde et Bornéo étaient les seuls producteurs ; vers 1723 on découvrit les premiers diamants brésiliens, en 1867 ceux d'Afrique du Sud et en 1898 ceux du bassin de l'Ienisseï en Sibérie. La république d'Afrique du Sud et l'U.R.S.S. sont les deux principaux producteurs. Le plus gros diamant transparent connu est le *Cullinan,* qui pesait 621,2 g (3 106 carats) avant sa taille. Il fut trouvé dans la « mine Premier », près de Prétoria, en 1905. Les autres pays producteurs sont : le Sud-Ouest africain, l'Angola, la Sierra Leone,

la Tanzanie, le Libéria, le Zaïre, le Ghana, la République centrafricaine, la Côte-d'Ivoire et le Venezuela.

Utilisation. C'est, en raison de sa grande dureté, l'un des minéraux les plus recherchés pour l'industrie, qui en consomme plus de 40 millions de carats par an (80 % du total extrait). Ses variétés transparentes (20 %) sont traditionnellement réservées à la joaillerie.

Soufre, S - orthorhombique

Très recherché par les collectionneurs, ce beau minéral se rencontre souvent en cristaux bipyramidaux {111} ou tabulaires sur (001) et en stalactites, croûtes, agrégats de fibres ou masses pulvérulentes.

Propriétés. Dureté : 1 ½ à 2 ; densité : 2,07 ; cassant, mauvais conducteur de la chaleur, il craint les changements de température (la chaleur de la main suffit parfois à fissurer les cristaux). L'éclat adamantin est dû à ses indices de réfraction élevés : 1,95 à 2,24. Sa couleur varie du jaune pâle au brun miel en passant par le jaune d'or (le soufre brun-rouge contient jusqu'à 5 % de sélénium).

Signe distinctif. Le soufre brûle facilement avec une flamme bleue, dégageant une odeur très caractéristique de gaz sulfureux.

Gisements. Le soufre est fréquemment associé à la célestine, au gypse, à l'aragonite ; les meilleurs spécimens cristallisés proviennent des gisements sédimentaires gypseux de Sicile (région d'Agrigente et Caltanissetta) et de la Romagne (Perticara). Le soufre est un minéral qui se dépose fréquemment autour des fumerolles volcaniques. Le plus grand cristal du monde (Perticara) est au Muséum d'histoire naturelle de Milan. Le soufre est l'un des éléments de base de l'industrie chimique.

Sélénium, Se - rhomboédrique

Dureté : 2 ; densité : 4,8 ; éclat métallique gris. Rare à l'état natif, ce métalloïde accompagne parfois le soufre dans les émanations volcaniques.

Tellure, Te - rhomboédrique

Dureté : 2 ½ ; densité : 6,2 ; éclat métallique blanc d'étain. Rarissime en cristaux (aciculaires), ce métalloïde à l'état natif se rencontre dans certains gîtes d'or et d'argent, associé aux tellurures de ces métaux.

Sulfures

Algodonite, CuAs - orthorhombique

L'algodonite est massive ou se présente en agrégats de petits cristaux.

Propriétés. Dureté : 4 ; densité : 8,4 à 8,7. L'éclat métallique, couleur blanc d'argent à gris acier sur cassure fraîche, se ternit rapidement à l'air.

Gisements. Les meilleurs échantillons proviennent du Chili.

Domeykite, Cu_3As - cubique

Massif ou botryoïdal à cassure inégale.

Propriétés. Dureté : 3 ½ ; densité : 7,3 à 7,8. L'éclat métallique, blanc d'étain à gris acier, sur cassure fraîche se ternit rapidement à l'air en devenant brun irisé.

Gisements. Se rencontre à Copiapo (Chili).

Dyscrasite, Ag_3Sb - orthorhombique

Ses cristaux sont très rares, pyramidés avec macle sur {110} et un clivage net sur {001}. La dyscrasite se rencontre surtout sous une forme grenue ou massive.

Propriétés. Dureté : 3 ½ à 4 ; densité : 9,7. Habituellement grise ou noirâtre, elle montre un éclat métallique blanc argent sur la rayure. Sectible, elle est soluble dans l'acide nitrique. C'est un minéral hydrothermal associé à la galène, à l'argent natif et aux argents rouges.

Gisements. Les meilleurs spécimens viennent de Andreasberg (Harz, R.F.A.). Se rencontre également en masses importantes à Wolfach (Bavière, R.F.A.).

Mauchérite, Ni_4As_3 - quadratique

Rare en cristaux (tabulaires suivant 001), elle est le plus souvent radiée, fibreuse ou massive.

Propriétés. Dureté : 5 ; densité : 8. L'éclat métallique gris rougeâtre sur la cassure fraîche devient rouge cuivreux en se ternissant. Soluble dans l'acide nitrique concentré.

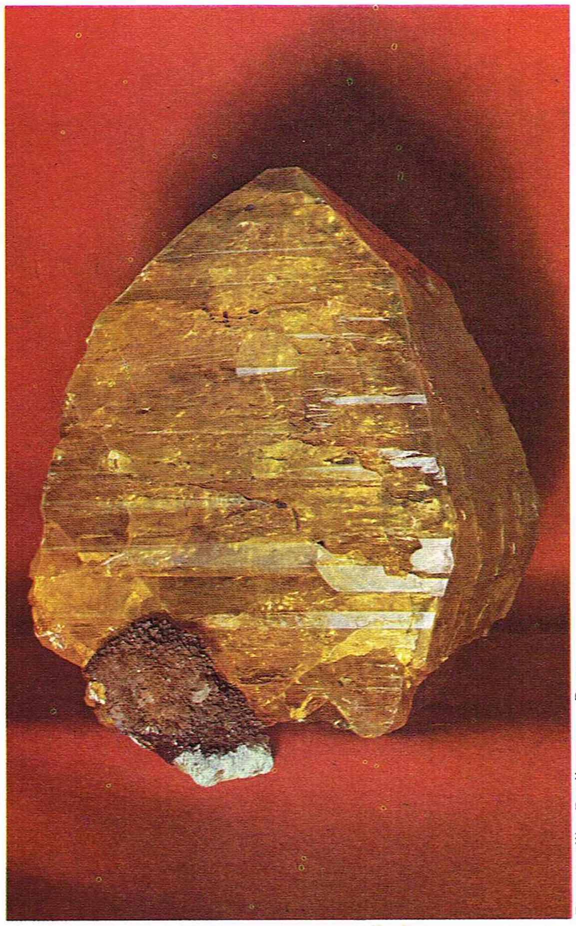

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ *Le plus grand cristal de soufre provenant de Perticara (Romagne) et conservé au musée d'Histoire naturelle de Milan.*

Gisements. Le gîte classique de ce minéral est celui de Eisleben (Harz, R.D.A.), où il est associé à la nickelite et autres minéraux filoniens.

Chalcocite, Cu_2S - orthorhombique

C'est l'un des meilleurs minerais de cuivre (80 % de Cu). Ses cristaux prismatiques sont allongés ou tabulaires suivant {001} ; les formes pseudohexagonales sont dues à une macle triple sur {110} ; deux autres macles sont connues, {032} et {112}, mais la chalcocite est généralement massive et compacte.

Propriétés. Dureté : 2 ½ à 3 ; densité : 5,5 à 5,8 ; cassure conchoïdale ; éclat métallique couleur gris plomb noirâtre, soluble dans l'acide nitrique. La chalcocite se distingue des cuivres gris par une relative malléabilité et sectibilité.

Gisements. Ses gisements sont variés, les plus intéressants pour l'exploitation du cuivre étant les amas de

▼ **Dyscrasite** *provenant de Saint-Andreasberg (Harz, R.F.A.) ; ce minéral hydrothermal se trouve associé à la galène, à l'argent natif et aux argents rouges.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ **Chalcocite** *provenant de Saint-Yves-Consols (Cornwall, Grande-Bretagne); ce minéral est l'un des meilleurs minerais de cuivre.*

cémentation et les gîtes des massifs granito-dioritiques (porphyry-copper), dont la chalcocite est le principal minerai cuprifère. Les plus beaux cristaux viennent de Redruth (Cornwall, Grande-Bretagne), de Bristol (Connecticut, États-Unis), de Messina (Afrique du Sud) et de quelques gîtes de Hongrie.

Bornite (erubescite), Cu_5FeS_4 - rhomboédrique (pseudocubique)

Très rarement en cristaux pseudocubiques à faces courbes, ce minéral est le plus souvent compact. La cassure fraîche, brun-rose à bronze jaune, se ternit très vite en donnant de belles irisations très caractéristiques, pourpres, violettes et bleues.

Propriétés. Dureté : 3; densité : 5,07; fragile. Se distingue de la covellite par sa rayure brun-rose brillant.

C'est un bon minerai de cuivre, associé à la covellite et la chalcocite dans de nombreux gîtes.

Gisements. Quelques beaux échantillons français proviennent d'Alban (Tarn).

Argentite, Ag_2S - cubique

L'argentite cristallise en cubes et en octaèdres. Instable en dessous de 180 °C, elle se transforme en acanthite. Les échantillons d'argentite cristallisée exposés dans les musées ont la structure et les propriétés de l'acanthite (tout en ayant conservé leur forme extérieure cubique d'argentite). On peut voir au Muséum de Paris le plus grand cristal connu dans le monde.

Acanthite, Ag_2S - monoclinique

Ses cristaux automorphes sont rares (cristaux prismatiques allongés suivant [001]). L'acanthite est le plus souvent produite par la transformation de l'argentite cubique (instable à basse température) en acanthite stable à basse température et elle revêt toutes les formes de l'argentite : massive, réticulée, arborescente, en cristaux (cubo-octaèdres).

Propriétés. Dureté : 2 à $2\frac{1}{2}$; densité : 7,2 à 7,4; très sectible. Éclat métallique gris plomb; rayure brillante se ternissant rapidement.

Gisements. L'argentite (transformée en acanthite) est un important minerai d'argent (87 % d'Ag) rencontré dans les filons argentifères à quartz aurifère et dans les gîtes mésothermaux à Ni-Co-Ag, ou en inclusions dans la galène argentifère. Les plus beaux spécimens minéralogiques proviennent de Charñacillo (Chili), Freiberg (R.D.A.), Jachymov (Tchécoslovaquie); des spécimens intéressants ont été trouvés au Mexique, au Canada, en Bolivie, etc.

Hessite, Ag_2Te - monoclinique

Rarissime en cristaux de plus d'un centimètre (cristaux déformés à contours arrondis), ce tellurure d'argent, peu répandu, se rencontre surtout en masse compacte ou finement grenue.

Propriétés. Dureté : 2 à 3; densité : 8,25 à 8,75; un peu sectible; éclat métallique gris acier.

Gisements. La localité où l'on trouve classiquement ce minéral est Botes (Roumanie), où il est associé à l'or et à d'autres tellurures d'or et d'argent.

Petzite $(Ag, Au)_2Te$ - cubique

Massif ou finement granulé, ce minéral laisse un résidu d'or après attaque à l'acide nitrique.

Propriétés. Dureté : $2\frac{1}{2}$ à 3; densité : 8,7 à 9,1; éclat métallique gris acier; légèrement sectible.

Gisements. De beaux échantillons ont été rencontrés à Sunshire (Wyoming, États-Unis).

Canfieldite, $4\,Ag_2S \cdot SnS_2$ - orthorhombique

Ce minéral rare se présente parfois en cristaux (octaèdres ou dodécaèdres), également en masses compactes ou en agrégats de cristaux radiés, ou encore en croûtes botryoïdales couvertes de pointements cristallins.

Propriétés. Dureté : $2\frac{1}{2}$; densité : 3,25; éclat semi-métallique noir à reflets pourpres ou bleuâtres. La canfieldite forme une série complète avec l'argyrodite $4\,Ag_2S \cdot GeS_2$ (remplacement de l'étain par le germanium).

Gisements. Les meilleurs échantillons viennent de Potosi (Bolivie) et de Freiberg (R.D.A.).

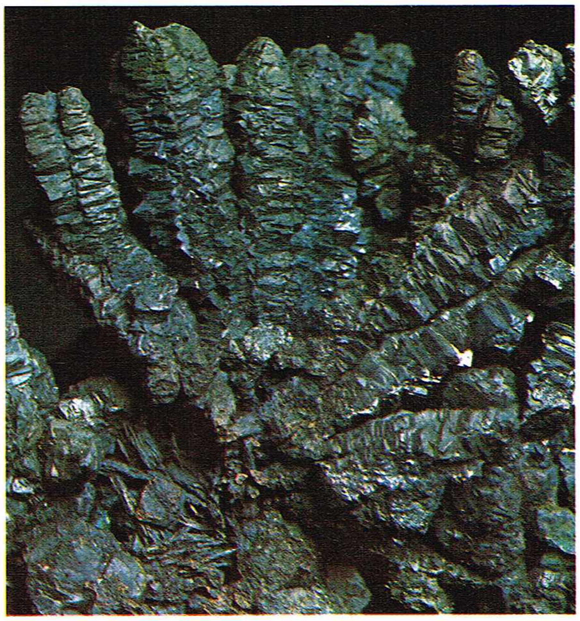

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ *Un échantillon de* **bornite** *provenant du Cornwall (Grande-Bretagne); c'est un minéral généralement compact.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *A gauche, cristaux maclés (« type spinelle ») de blende ou sphalérite; c'est le principal minerai de zinc. A droite, cristaux d'argentite de Sardaigne, un des plus importants minerais d'argent (musée d'Histoire naturelle, Milan).*

Stromeyerite, Cu · AgS - orthorhombique

Ce minéral porte le nom célèbre du chimiste F. Stromeyer, qui fut le premier à l'analyser. Rare en cristaux, ce minéral est le plus souvent massif.

Propriétés. Dureté : $2\frac{1}{2}$ à 3; densité : 6,2; éclat métallique gris acier foncé, bleuissant à l'air; soluble dans l'acide nitrique.

Pentlandite (Fe, Ni)$_9$S$_8$ - cubique

90 % de la production mondiale de nickel proviennent de ce minéral qui ne présente pas de cristaux macroscopiques et que l'on rencontre, massif, toujours associé à la pyrrhotite, qui lui ressemble beaucoup.

Propriétés. Dureté : $3\frac{1}{4}$ à 4; densité : 4,6 à 5; cassure brillante, éclat métallique à couleur jaune bronze clair. Bon conducteur de l'électricité. Son absence de magnétisme permet de le distinguer de la pyrrhotite.

Gisements. La pentlandite est associée à la chalcopyrite et à la pyrrhotite dans les gîtes génétiquement liés aux roches ultrabasiques et basiques d'U.R.S.S. (Norilsk) et du Canada (Sudbury), qui sont les deux principaux pays producteurs de cet intéressant minerai de nickel. De beaux spécimens minéralogiques proviennent de Makola (Finlande).

Sphalérite, ou blende, ZnS - cubique

C'est le principal minerai de zinc (Zn = 67 %), contenant parfois des teneurs intéressantes en gallium, indium, germanium et cadmium, ce qui permet leur récupération. Le plus souvent, la blende se présente en masses clivables ou grenues. Ses cristaux ont un faciès varié (tétraèdre, dodécaèdre, etc.), présentant une macle suivant {111}, des faces courbes et des déformations conduisant à des formes complexes. Le clivage suivant {011} est parfait.

Propriétés. Dureté : $3\frac{1}{2}$ à 4; densité : 4,1; c'est l'un des rares sulfures pouvant être transparents; son indice de réfraction est élevé. Sa couleur va de l'incolore légèrement teinté au noir (forte teneur en fer), du brun au rouge et du jaune au vert. Fluorescente aux ultraviolets et aux rayons X, la blende ne présente pas d'éclat métallique, comme les autres sulfures, du fait de son plus faible pouvoir réflecteur.

Signes distinctifs. Son clivage, sa transparence et son éclat adamantin permettent de la distinguer des autres sulfures.

Gisements. La blende est présente dans presque tous les types de gisements, surtout les gîtes hydrothermaux et les gîtes filoniens, où elle est associée à la galène, à la pyrite et à d'autres sulfures; on l'exploite également dans certains gisements sédimentaires (séries macro-dolomitiques ou calcaire-dolomie). Les beaux cristaux que l'on peut voir dans les collections viennent de Laffrey et Prunière (Isère), Trepca (Yougoslavie), Rodna et Cavnic (Roumanie), Weardale et Alston-Moor (Grande-Bretagne), du Missouri et du Kansas (États-Unis), ainsi que de nombreuses autres localités.

Marmatite

Marmatite est le nom donné à une sphalérite noire contenant de 10 à 12 % de fer (remplaçant le zinc). La variété de christophite en contient jusqu'à 26 %.

Métacinabre, HgS - cubique

Rare en cristaux (très petits), avec des faces rugueuses, et souvent maclé suivant {111}, il se présente surtout en masses terreuses.

Propriétés. Dureté : 3; densité : 7,7; noir à gris-noir, opaque. Généralement associé au cinabre et à d'autres sulfures.

Gisements. Les localités les plus connues pour ce rare minéral sont Guadalcazar (Mexique) et New-Idria (Californie).

Tiémanite, HgSe - cubique

Le plus souvent en masses compactes ou grenues, ce minéral se rencontre rarement en cristaux tétraédriques. La tiémanite est fragile et ne présente aucun clivage.

Propriétés. Dureté : $2\frac{1}{2}$; densité : 8,20 à 8,40; opaque, couleur gris acier avec éclat métallique.

Gisements. La mine de Dear Trail (Utah) a donné de beaux exemplaires cristallisés.

Coloradoïte, HgTe - cubique

Massif ou grenu, ce minéral est fragile mais ne présente pas de clivage.

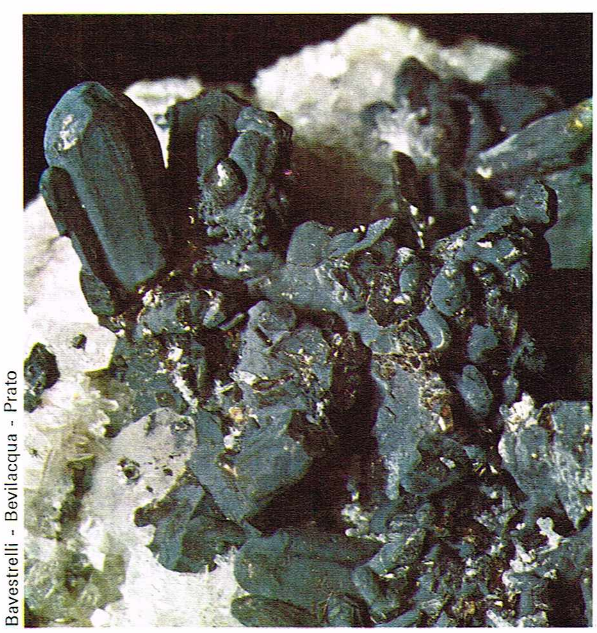

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ *Un échantillon de hessite, provenant de Transylvanie; ce tellurure d'argent, peu répandu, se rencontre surtout en masse compacte ou finement grenue.*

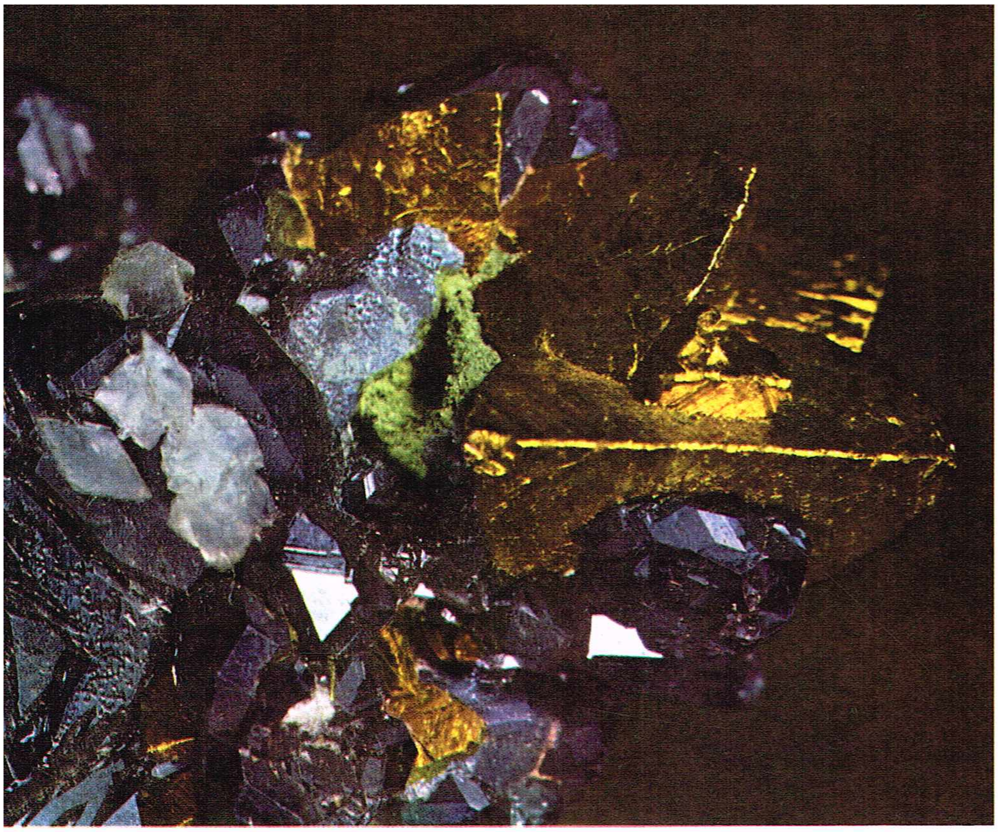

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Chalcopyrite**, à éclat jaune laiton, associée à de la marmatite; c'est un des minerais de cuivre les plus répandus.*

Propriétés. Dureté : $2\frac{1}{2}$; densité : 8,05. Opaque, éclat métallique noir de fer.

Gisements. Sa localité classique est Kalgoorlie (Australie), où on l'a rencontré associé à des tellurures d'or et d'argent lors de l'exploitation des mines d'or (Ivanhoe Gold Corp., etc.).

Stannite, Cu_2FeSnS_4 - quadratique

Ce minéral se rencontre en masses grenues ou en cristaux rares et petits à faces striées (pseudo-dodécaèdres). Plusieurs macles sont connues (sur {102} et {112}).

Propriétés. Dureté : 4; densité : 4,3 à 4,5. Éclat métallique gris acier à noir de fer, avec parfois des teintes bleuâtres à verdâtres sur cassure. Une teinte jaune est due à la présence de nombreuses inclusions de chalcopyrite. Le clivage est indistinct, la cassure irrégulière.

Gisements. La stannite est assez rare; on la trouve associée à d'autres sulfures dans les filons stannifères à quartz-Wolfram et cassitérite. Les meilleurs échantillons de collection viennent d'Oruro (Bolivie) et de Sainte-Agnès (Wheal Rock, Grande-Bretagne).

Germanite $Cu_3(Ge, Fe)S_4$ - cubique

Il s'agit d'un minéral rare se présentant en petites masses fragiles.

Propriétés. Dureté : 4; densité : 4,46 à 4,53. Couleur gris foncé rougeâtre, éclat métallique, opaque. Soluble dans l'acide nitrique. Pas de clivage. Associé à d'autres sulfures. On le trouve à Tsumeb (Namibie).

Sulvanite, Cu_3VS_4 - cubique

La sulvanite se présente sous forme de cristaux cubiques et sous forme massive; clivage {001} parfait.

Propriétés. Dureté : $3\frac{1}{2}$; densité : 4. Éclat métallique se ternissant à l'oxydation. Couleur bronze doré opaque.

Gisements. En association avec la malachite, l'azurite, l'atacamite, la cuprodescloïzite et le gypse; on la trouve à Edelweismine, Buna-Buna (Australie du Sud).

Chalcopyrite, $CuFeS_2$ - quadratique

En masses compactes, plus rarement botryoïdal ou réniforme, ce minéral est plus rare en cristaux que la pyrite. Son faciès est tétraédrique; certains cristaux ont des faces du sphénoèdre direct bien développées, mates et striées parallèlement à [110], alors que les faces du sphénoèdre inverse sont petites mais souvent brillantes. Les macles par pénétration ou perpendiculaires au plan {112} sont connues.

Propriétés. Dureté : $3\frac{1}{2}$ à 4; densité : 4,1 à 4,3. Opaque, éclat métallique jaune laiton. La chalcopyrite est fragile et présente une cassure inégale qui prend à la longue des teintes irisées. Elle est soluble dans l'acide nitrique.

Signes distinctifs. Elle se reconnaît assez facilement grâce à la couleur de sa cassure fraîche et de ses irisations, et se distingue de la pyrite par une dureté moindre.

Gisements. C'est le minerai de cuivre le plus répandu; on le rencontre dans tous les types de gisements, notamment dans les roches magmatites (Mexique), les pegmatites (Groenland), dans presque tous les gîtes hydrothermaux (avec la blende, la pyrite et la galène), comme minerai primaire des « porphyry coppers » avec la pyrite (Utah, Kazakhstan), dans les gîtes liés aux roches basiques en association avec la pentlandite, la pyrrhotite, la magnétite et l'ilménite (Sudbury, Ontario), dans les filons mésothermaux associée à d'autres sulfures (Butte, Montana), etc. Les plus beaux exemplaires cristallisés qu'on peut voir dans les collections proviennent de la Gardette (Isère), de Sainte-Agnès (Cornouailles), d'Ani et Arakawa (Ugo, Japon), de Baïa Sprie et Baïa Mare (Roumanie), de Seigen (Allemagne fédérale). Quelques beaux groupes proviennent des anciennes mines d'argent de Sainte-Marie-aux-Mines (Haut-Rhin) et de la mine Erminia (Pérou).

Groupe des cuivres gris - cubique, hémiédrie tétraédrique

Ce groupe comprend deux espèces minérales formant une série isomorphe complète :

— la **ténantite** $(Cu, Fe)_{12}As_4S_{13}$, qui peut contenir du zinc et de l'argent;

— la **tétraédrite** $(Cu, Fe)_{12}As_4S_{13}$, qui peut contenir du zinc, de l'argent, du mercure, du bismuth ou du tellure.

Les cuivres gris ne sont pas rares en cristaux. La forme la plus courante est le tétraèdre pyramidé, le dodécaèdre étant plus rare. La macle suivant {111} est fréquente. En minerai, les cuivres gris sont compacts ou grenus.

Propriétés. Dureté : 3 à $4\frac{1}{2}$ (la ténantite est plus dure que la tétraédrite); densité : 4,6 à 5,1 (elle augmente avec la teneur en antimoine). Éclat métallique gris acier à noir de fer, souvent brillant. La variété riche en mercure est noire et terne. Tous les cuivres gris sont fragiles et leur cassure est conchoïdale.

Signes distinctifs. On distingue les cuivres gris de la bournonite par leur dureté plus grande, de l'argentite et de la chalcocite par leur rayure moins brillante. Mais il faut souvent avoir recours à des tests microchimiques pour les différencier de certains autres sulfosels avec lesquels ils peuvent être confondus.

Gisements. Les minéraux de ce groupe sont assez répandus en associations variées avec des minéraux de plomb, de zinc, de cuivre, d'argent des gîtes hydrothermaux; ils sont plus rares dans les gisements de pegmatite et dans les gîtes de contact (en association avec la cassitérite, l'or, l'arsenic, etc.). Ils sont parfois exploités pour le cuivre; la variété argentifère est une importante source d'argent.

Les exemplaires les plus recherchés par les musées viennent de Cabrières (Hérault), d'Irazein (Ariège), de Tsumeb (Namibie), du Zacatécas (Mexique), de

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ ***Cristaux de ténantite** d'Idaho Springs (Colorado), minéral appartenant au groupe des cuivres gris et pouvant contenir du zinc et de l'argent (Londres, British Museum).*

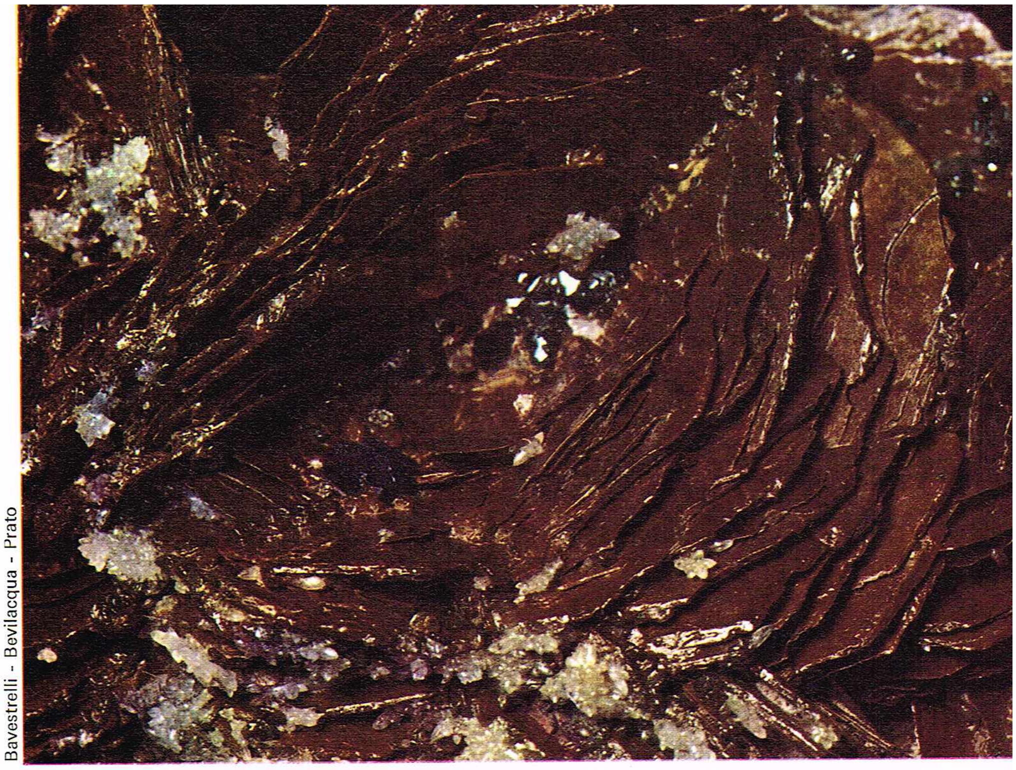

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Cristaux en « rosette » de pyrrhotite de Roumanie, avec, au centre, quelques cristaux de blende.***

Mouzaïa (Algérie) ainsi que de bien d'autres localités classiques pour ces minéraux (Angleterre, Allemagne, Bolivie, Chili, États-Unis, etc.).

Greenockite, CdS - hexagonal

La greenockite se présente en rares cristaux hexagonaux hémimorphiques.

Propriétés. Dureté : 3 à $3\frac{1}{2}$; densité : 4,9 environ; point de fusion : 780 °C; cassure conchoïdale, fragile. Éclat adamantin à résineux; présente toutes les nuances entre le jaune et l'orange; soluble dans HCl concentré.

Gisements. Ce minéral se trouve en dépôts poussiéreux, associé à la sphalérite. Les cristaux se rencontrent dans des cavités de roches basiques ignées. On en trouve à Bishopton Renfren et à Wanlockhead (Écosse), et à Pulacayo, Potosi (Bolivie).

Wurtzite, ZnS - hexagonal

Ce minéral, rare sous la forme de cristaux (pyramidaux ou prismatiques), se rencontre le plus souvent en masses ou en croûtes concentriques.

Propriétés. Dureté : $3\frac{1}{2}$ à 4; densité : 3,98. Éclat résineux; couleur noir brunâtre.

Gisements. Le wurtzite est le plus souvent associé à la sphalérite, à la marcassite et à d'autres sulfures. On le rencontre en Bohême, à Pribram (Tchécoslovaquie).

Énargite, Cu_3AsS_4 - orthorhombique

Ce sulfosel de plomb est très recherché des collectionneurs lorsqu'il se présente en gros cristaux. La macle {320} est commune et conduit à des groupements étoilés avec angles rentrants. Les cristaux sont souvent allongés et parfois tabulaires.

Propriétés. Dureté : 3; densité : 4,45 $\pm$ 0,05. Éclat métallique noir grisâtre à noir de fer. L'énargite est fragile et possède un clivage parfait sur 110.

Gisements. L'énargite se rencontre dans les dépôts de substitution, plus rarement dans les dépôts de basse température comme minerai secondaire. Associée à la pyrite, la sphalérite, la bornite, la galène, la tétraédrite, la covellite, la chalcocite et le quartz. Les belles cristallisations viennent de Kikwaseki Mine, Chi-Lung, Tai-Wan; à Butte Montana (États-Unis); c'est de la mine Luz Angelica Quiruvilca (Pérou) que proviennent les plus beaux cristaux, qu'on peut voir aux Muséums de Paris et de Washington.

Nickéline, NiAs - hexagonal

La nickéline se présente habituellement sous forme massive et peut avoir aussi une structure réticulée ou arborescente. Les cristaux sont très rares.

Propriétés. Dureté : 5 à $5\frac{1}{2}$; densité : 7,784 $\pm$ 0,001. Ne présente pas de clivage; fragile. Opaque avec éclat métallique; couleur rouge de cuivre pâle, qui, exposée à l'air, se ternit et devient grise ou noirâtre; soluble dans l'eau régale.

Gisements. Excellent minerai de nickel, la nickélite se rencontre associée à la chalcopyrite, la pyrrhotite, la pentlandite, dans les minerais sulfurés liés aux roches basiques et dans les filons à paragenèse argent-nickel-cobalt (sulfures et arséniures). Les rares cristaux qu'on peut voir dans les collections viennent d'Eisleben dans le Harz; des masses brillantes très pures ont été rencontrées à Bou-Azzer (Maroc) et dans l'Ontario.

Breithauptite, NiSb - hexagonal

Cet autre composé de nickel est rare en cristaux et se rencontre le plus souvent en masses grenues ou en arborescences dendritiques.

Propriétés. Dureté : $5\frac{1}{2}$; densité : 8,23 (8,629 calculé). Ce minéral est opaque et possède un éclat métallique brillant avec, sur la cassure fraîche, une couleur rouge cuivre lumineux tirant sur le violet. Soluble dans HNO_3 et l'eau régale.

Gisements. Se trouve dans les filons de calcite, associé à l'ullmanite, la sphalérite, la galène, la nickéline et à des minéraux d'argent. Les gisements les plus classiques sont Cobalt, Ontario (Canada) et la mine de Montenarba à Sarabus (Italie).

Pyrrhotite, $Fe_{1-x}S$ - hexagonal

Massive ou grenue, la pyrrhotite cristallise parfois en tables hexagonales ou en rosettes formées par une association subparallèle des cristaux sur (0001), et plus rarement en gros cristaux prismatiques striés horizontalement.

Propriétés. Dureté : $3\frac{1}{2}$ à $4\frac{1}{2}$; densité : 4,6 à 4,7. Opaque, éclat métallique jaune bronze à brun-rouge se ternissant rapidement à l'air et pouvant présenter des irisations. Assez fragile, ce minéral montre un plan de séparation suivant (0001) et un magnétisme très variable en intensité.

Signe distinctif. Se distingue de la bornite par son magnétisme.

Gisements. La pyrrhotite est présente dans un grand nombre de gisements : dans les roches éruptives basiques, associée à la pentlandite et à la chalcopyrite, dans les pegmatites, les gîtes de contact avec d'autres sulfures, la cassitérite, la scheelite, etc., les gîtes hydrothermaux, les dépôts de fumerolles, etc. Les meilleurs cristaux viennent du Potosi et de Santa Eulalia (Mexique), de Morro Velha et d'Ouro-Preto (Brésil), d'Herja (Roumanie), de Trepca (Yougoslavie) et de Kisbanya (Hongrie).

Millérite, NiS - rhomboédrique

Les cristaux sont allongés suivant [0001] et habituellement très fins. Ils sont le plus souvent associés en groupes radiés très fragiles, parfois entremêlés comme des cheveux. La millérite se présente également en masses fibreuses à surfaces mamelonnées.

Propriétés. Dureté : 3 à $3\frac{1}{2}$; densité : 5,5. Opaque, éclat métallique jaune laiton pâle passant au jaune bronze, avec souvent des irisations grises lorsqu'elle se ternit. C'est un minéral fragile, mais les cristaux capillaires sont élastiques. Il se clive parfaitement suivant {1011} et {0112}.

Gisements. La millérite, peu fréquente, se rencontre dans les filons carbonatés associés à la fluorine, la galène et d'autres sulfures. Les plus beaux spécimens proviennent de Friedrich (Wissen), Koslenz et Oillenburg (Hessen) ainsi que de Mine Gap, Lancaster Country (Pennsylvanie) et Eastbrook Park (Wisconsin).

Alabandite, MnS - cubique

Massive ou grenue le plus souvent, on rencontre assez rarement l'alabandite en cristaux cubiques ou octaédriques dont le clivage {001} est parfait.

Propriétés. Dureté : $3\frac{1}{2}$ à 4; densité : 4. Opaque, avec un éclat submétallique noir de fer se ternissant en brun quand elle est exposée à l'air. Soluble dans l'acide chlorhydrique avec dégagement d'hydrogène sulfuré.

Gisements. On rencontre l'alabandite dans les gisements d'or et d'argent, associée avec la rhodochrosite, la rhodonite, la pyrite, la galène et la sphalérite, à Sacarambu, Humedoara (Roumanie), au Potosi (Bolivie). De rares cristaux proviennent d'Adervielle (Hautes-Pyrénées).

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *A gauche, cristaux de galène associés à du quartz et de la sidérite; c'est le minerai de plomb le plus répandu dans la nature et également un minerai d'argent prépondérant. A droite, gros cristaux de cinabre provenant du fleuve Mayang (Chine) [Londres, British Museum].*

Galène, PbS - cubique

Connue depuis des millénaires, la galène est le principal minerai de plomb. Ses variétés argentifères (de 0,1 à 1 % d'argent) en font aussi un minerai d'argent prépondérant. Au cours de l'Antiquité, l'exploitation des mines de plomb argentifère du Laurium a été un des facteurs qui ont permis l'hégémonie d'Athènes sur le monde méditerranéen. La galène se rencontre fréquemment en cristaux cubiques, octaédriques, dodécaédriques (plus rares); certains cubes peuvent atteindre 30 cm et sont souvent polysynthétiques.

Le clivage cubique est parfait {001}; un clivage plus difficile sur {111} devient assez net dans les variétés bismuthifères. Certains cristaux présentent des figures de corrosion ou des petits cristaux orientés (généralement octaèdres sur des gros cubes).

Propriétés. Dureté : 2 ½ à 3; densité : 7,5 à 7,6. Opaque avec un éclat métallique gris de plomb. La galène s'oxyde facilement en donnant de l'anglésite

$$(PbS + 2\,O_2 = PbSO_4).$$

Signes distinctifs. Son clivage caractéristique, sa forte densité et sa faible dureté permettent de la distinguer d'autres sulfures.

Gisements. La galène est le minerai de plomb le plus répandu dans la nature et ses gisements sont nombreux. Elle est fréquente dans les gîtes hydrothermaux, soit associée à des silicates de haute température (gîtes hypothermaux), soit dans les intéressantes paragenèses mésothermales (blende, pyrite, galène) avec baryte et fluorite (Angleterre, Allemagne) ou avec des cuivres gris et divers sels d'argent (Idaho), ou encore avec le cortège des nombreux minéraux de cuivre rencontrés au Tsumeb. La galène se rencontre aussi dans les gîtes épithermaux volcano-sédimentaires, sédimentaires, pegmatitiques et pneumatolytiques de contact.

Les beaux cristaux qu'on peut voir dans les musées, souvent associés à la fluorite, à la sphalérite (blende), à la pyrite, à la calcite et au quartz, proviennent de Joplin (Missouri), d'Ejam et de Derbyshire (Grande-Bretagne), de Trepca (Yougoslavie), d'Ottawa (Oklahoma), de Neudorf et d'autres localités allemandes, enfin, en France, de Pont-Péan (Ille-et-Vilaine) et de Saint-Sauveur (Haute-Garonne).

Altaïte, PbTe - cubique

L'altaïte est un minéral rare qui se présente habituellement sous forme massive et rarement en cristaux cubiques.

Propriétés. Dureté : 3; densité : 8,15. Opaque, éclat métallique blanc étain avec une nuance jaunâtre et se ternissant à l'air en jaune bronze. Sectible, elle présente un clivage cubique parfait et une cassure subconchoïdale.

Gisements. On trouve l'altaïte associée à l'or natif, à la hessite et autres tellurures. Les plus beaux échantillons exposés dans les musées proviennent de l'Altaï (Sibérie).

Myargyrite, $AgSbS_2$ - monoclinique

Elle se présente généralement sous forme massive ou en cristaux tabulaires épais (001) ou (100).

Propriétés. Dureté : 2 ½; densité : 5,25. Pratiquement opaque, avec un éclat métallique adamantin noir de fer à gris acier. En fines lamelles, elle est translucide et de couleur rouge sang foncé. C'est un minéral fragile, à cassure subconchoïdale à inégale.

Gisements. La myargyrite se dépose dans les gisements filoniens de basse température, associée habituellement à d'autres sulfosels d'argent, à la galène, à la pyrite, au quartz et à la calcite. De beaux cristaux proviennent de Braunsdorf (Saxe) et de la mine Valenciana à Guanajuato (Mexique).

Matildite, $AgBiS_2$ - orthorhombique

La matildite se rencontre le plus souvent sous forme massive ou grenue. Les cristaux, rarement distincts, sont prismatiques.

Propriétés. Dureté : 2 ½; densité : environ 6,9. Opaque, éclat métallique noir de fer à gris. Elle est fragile, ne présente pas de clivage et sa cassure est inégale.

Gisements. Ce minéral se rencontre dans quelques filons de moyenne et haute température, associé à la galène et à d'autres sulfures et sulfosels. Se trouve dans les pegmatites de Bustarviejo (Espagne) et à Morococha (Pérou).

Téallite, $PbSnS_2$ - orthorhombique

La téallite se présente généralement sous forme d'agrégats massifs de minces feuillets à contours irréguliers. Les cristaux sont tabulaires, aplatis sur (001) et pratiquement carrés, souvent déformés.

Propriétés. Dureté : 1 ½; laisse une trace sur le papier; densité : 6,36. Opaque, éclat métallique noir grisâtre, s'oxyde rapidement à l'air en devenant terne ou en s'irisant. Flexible mais non élastique; un peu malléable; se clive parfaitement suivant {001}.
Gisements. Elle est associée à la cassitérite et d'autres sulfures dans les filons d'étain argentifère de Bolivie.

Cylindrite, $Pb_3Sn_4Sb_2S_{14}$

Ce minéral rare est ainsi nommé parce qu'il se présente en agrégats de cylindres allongés très caractéristiques.
Propriétés. Dureté : 2 ½; densité : 5,46. Opaque, éclat métallique gris de plomb noirâtre; légèrement malléable.
Gisements. La cylindrite est associée à la cassitérite, à la stannite et à la frankéite des gîtes stanno-argentifères de Bolivie tels que celui de Colquechaca (Potosi).

Cinabre, HgS - rhomboédrique

Les cristaux de cinabre sont rares et se présentent sous forme de rhomboèdres parfois aplatis sur (0001), plus rarement allongés selon [10$\bar{1}$0]. Ils sont fréquemment maclés sur (0001) ou en groupes pseudohexagonaux. Généralement, ce minéral est massif, grenu ou en encroûtements poussiéreux vermillon.
Propriétés. Dureté : 2 à 2 ½; densité : 8,10. Les cristaux sont translucides à transparents, de couleur rouge cochenille à gris rougeâtre. L'éclat adamantin semi-métallique est dû à des indices très élevés : np = 3,27 et ng = 2,91. Le pouvoir rotatoire est quinze fois plus élevé que celui du quartz. Les variétés friables sont ternes. Ce minéral est peu sectible, sa cassure est conchoïdale à inégale; il se clive parfaitement suivant (10$\bar{1}$0).
Gisements. Le cinabre est lié au volcanisme récent; il se rencontre donc dans les gîtes hydrothermaux de basse température associé à la pyrite, la marcassite, la stibine et, plus rarement, à l'arsénopyrite et au réalgar. A Almaden (Espagne), il imprègne des quartzites à l'intérieur des schistes bitumineux. Les plus beaux cristaux connus proviennent de Pa-Lo, dans le Kouei-Tchéou (Chine). De beaux groupes proviennent également d'Almaden et de Guipuzcoa (Espagne), de la mine de Siele, Monte Amiata (Italie), de Silgerg, Olpe et Moschel-Landsberg (Bavière).

Covellite, CuS - hexagonal

La covellite est massive, grenue, pulvérulente; ses cristaux sont rares. Les lamelles hexagonales de plus de 6 cm sont exceptionnelles; le clivage est facile suivant (0001).
Propriétés. Dureté : 1 ½ à 2; densité : 4,6 à 4,7. Opaque, bleu indigo foncé avec éclat métallique et fréquentes irisations jaune bronze à pourpre. C'est un minéral fragile; ses lamelles, très minces, sont légèrement flexibles.
Gisements. La covellite est un minéral secondaire que l'on rencontre dans les zones d'enrichissement des gisements de cuivre, souvent associé à l'énargite, la marcassite, les cuivres gris, la ténorite, la chalcocite, etc. Les groupes cristallisés viennent de Bor (Yougoslavie), Summitville (Colorado) et de Calabona Alghero (Sardaigne) d'où ont été extraits les plus beaux échantillons connus. On peut voir ces derniers dans la collection de la Faculté des sciences de Florence et dans celle de l'École des mines de Paris.

Vallériite, $Cu_2Fe_4S_7$ - orthorhombique

La vallériite est un minéral métallique massif ressemblant à la pyrrhotite pour la couleur et au graphite pour les propriétés physiques.
Propriétés. Très tendre; densité : 3,1. Éclat métallique bronze à brun-rouge; clivage parfait.
Gisements. C'est un minéral très rare des gisements de cuivre de haute température. Les échantillons que l'on peut voir dans les musées viennent d'Érétria, Thessalie (Grèce).

Groupe de la linnéite

On classe dans ce groupe des sulfures doubles cubiques dont la formule est du type $R^{2+} R_2^{3+} S_4$, ou R^{2+} = Co, Ni, Fe, Cu et R^{3+} = Co, Ni.

Linnéite (Co_3S_4)

Rare en cristaux octaédriques, elle est le plus souvent grenue ou massive.

R. Kandaroun - Lab. de minéralogie. Muséum d'histoire naturelle, Paris

▲ ***Quelques beaux cristaux de stibine du Japon; c'est le principal minerai d'antimoine (Paris, Muséum national d'histoire naturelle).***

Propriétés. Dureté : 4 ½ à 5 ½; densité : 4,5 à 4,8. Éclat métallique brillant dans les teintes rouge cuivre à violet, s'oxydant facilement à l'air, la cassure est conchoïdale.
Gisements. Se trouve dans les filons hydrothermaux avec des sulfures de cuivre, de nickel et de fer : mine Victoria, Littfeld, (R.F.A.).

Siégénite ($CoNiS_4$)

Ce minéral a les mêmes caractéristiques que la linnéite. Son gisement le plus classique est Stahlberg, Müsen (R.F.A.).

Violarite (Ni_2FeS_4)

Bien que ses propriétés soient proches de celles des autres sulfures de ce groupe, ce minéral ne se rencontre jamais en cristaux. Son gisement le plus classique est Julian (Californie).

Carrolite (Co_2CuS_4)

Ce minéral, par contre, est fréquemment cristallisé en octoèdres ou cubo-octoèdres brillants de 0,5 à 1 cm. Il provient de Musonoï (Katanga).

Stibine, Sb_2S_3 - orthorhombique

La première utilisation de ce minéral remonte à la plus haute antiquité (fard). C'est le principal minerai d'antimoine qui peut cristalliser en magnifiques prismes brillants de couleur gris métallique. On connaît des prismes de plus de 50 cm, terminés par de nombreuses facettes. Un clivage parfait est parallèle à l'allongement. La stibine est aussi massive, aciculaire ou en groupes radiés.
Propriétés. Dureté : 2; densité : 4,61 à 4,65; clivage {010}. Éclat métallique, couleur gris de plomb se ternissant rapidement. Elle fond à la flamme d'une bougie (550 °C).
Gisements. Minéral typique des gisements hydrothermaux de basse température, la stibine est généralement associée au réalgar, à l'orpiment, à la galène, à la baryte, etc. Les plus grands cristaux connus viennent de Sedjo et Ichinokawa (Japon). En France et en Roumanie, la stibine est fréquemment associée à la baryte. Les mines suivantes ont fourni de beaux groupes de cristaux : Chassagnes et Lubilhac (Haute-Loire), Massiac (Cantal), La Lucette (Mayenne); Baia Sprie (Roumanie), Kisbanya, Cavnic (Roumanie). On a aussi rencontré de beaux exemplaires de stibine au Nevada.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ Pyrite *globulaire provenant de la mine de Blackdene, Durham (British Museum, Londres); c'est le sulfure le plus répandu dans la nature; il se présente sous une grande variété de formes.*

▶ *Page ci-contre, cristaux de pyrite provenant de Cassandra (Grèce) [Paris, Muséum national d'histoire naturelle].*

Bismuthinite, Bi_2S_3 - orthorhombique

La bismuthinite est généralement en agrégats lamellaires, parfois radiés, en masses clivables ou fibreuses. Les cristaux sont allongés suivant [001] et montrent un clivage très net. Ils ne dépassent qu'exceptionnellement 10 cm.

Propriétés. Dureté : 2 ; densité : 6,75 à 6,00. Éclat métallique, couleur gris de plomb mais plus clair que la stibine ; s'oxyde en donnant des teintes jaunes ou irisées.

Gisements. Se trouve généralement associé au bismuth natif et aux sulfures des filons de haute température : Fefena (Madagascar), Ampangabe (Madagascar), Huaina (Bolivie), Fowey, Consol's Mine, Saint-Blasey (Angleterre), Meymac (Corrèze).

Kermésite, Sb_2S_2O - triclinique

Minéral monoclinique se trouvant en cristaux allongés suivant [010], ou en agrégats radiés.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ *Cristaux aciculaires de bismuthinite; ce minéral se trouve généralement associé au bismuth natif et aux sulfures des filons de haute température.*

Propriétés. Dureté : $1\frac{1}{2}$; densité : 4,68. Éclat métallique, couleur rouge cerise en fines lamelles.

Gisements. C'est un produit d'altération de la stibine ; on le rencontre avec des oxydes d'étain comme la sénarmontite, la valentinite ou la cervantite. Les localités les plus classiques sont Malacky et Pezinok (Tchécoslovaquie) ; de beaux exemplaires viennent également d'Afrique du Sud.

Tétradymite, Bi_2Te_2S - hexagonal

Ce minéral se présente sous forme grenue ou en feuillets. Ses rares cristaux sont des pyramides très allongées avec des faces striées.

Propriétés. Dureté : $1\frac{1}{2}$ à 2 (laisse une trace sur le papier) ; densité : 7,1 à 7,5. Il fond à 600 °C. Éclat métallique très brillant, couleur gris acier pâle se ternissant rapidement à l'air.

Gisements. C'est le plus courant des tellurures. On le retrouve en associations avec des sulfures variés et avec l'or à Banska-Stiavnica (Tchécoslovaquie) et Oravita (Roumanie).

Joséite, Bi_3TeS - rhomboédrique

La joséite se présente en masses lamellaires irrégulières.

Propriétés. Dureté : 2 ; densité : 8,18. Éclat métallique, couleur noir grisâtre.

Gisements. La joséite a été trouvée dans des calcaires grenus au Minas Gerais (Brésil) et à Carrock Fell, Cumberland (Grande-Bretagne).

Nagyagite $PbSAu(TeSb)_4S_{b-8}$ - orthorhombique

La nagyagite se présente en cristaux tabulaires mais aussi sous forme massive grenue. En section polie elle montre des macles complexes.

Propriétés. Dureté : 1 à $1\frac{1}{2}$; densité : 7,39 à 7,46 ; clivage {010} parfait. Éclat métallique, couleur gris de plomb.

Gisements. Minéral rare associé à l'or natif à d'autres tellurures d'or, dans des gangues carbonatées. Le gisement le plus classique est celui de Sacarambu, Hune Doara (Roumanie).

Sylvanite (Ag, Au)Te_2 - monoclinique

Les cristaux de sylvanite sont prismatiques courts ou tabulaires épais, plusieurs types de macles existent, les macles par pénétration donnant des formes arborescentes.

Propriétés. Dureté : 1 ½ à 2 ; densité : 8,11. Éclat métallique très brillant de couleur gris acier légèrement jaune.

Gisements. Ce minéral aurifère se rencontre habituellement dans les filons de basse température, en association avec d'autres tellurures, de l'or natif, du quartz, de la calcédoine, de la fluorine et des carbonates. Les meilleurs échantillons qu'on peut voir dans les musées viennent de la mine de Sigismond, de Baia de Aries, de Cluj (Roumanie), de Lake View Consols, Kalgoorlie (Australie), et de la mine Doctor (Colorado).

Krennérite (Au, Ag)Te₂ - orthorhombique

Elle se présente sous l'aspect de cristaux prismatiques courts.

Propriétés. Dureté : 2 à 3 ; densité : 8,62 ; clivage parfait sur {001}. Éclat métallique, couleur blanc d'argent à jaune laiton.

Gisements. Plus rare que la sylvanite, la krennérite se rencontre dans le même type de gisements. Sacarambu (Roumanie) est la localité la plus classique.

Calavérite (Au, Ag)Te_2 - monoclinique pseudo-orthorhombique

Massive ou grenue, ses cristaux sont rares.

Propriétés. Dureté : 2 ½ à 3 ; densité : 9,25 ; fond à 464 °C et ne possède pas de clivage. Éclat métallique, couleur jaune laiton à blanc.

Gisements. Associée à l'or natif et à d'autres tellurures d'or, la calavérite se forme dans les gisements aurifères hydrothermaux de basse température, à Kalgoorlie (Australie), et à la mine Doctor (Colorado).

Pyrite, FeS_2 - cubique

C'est le sulfure le plus répandu dans la nature. Il se présente sous une grande variété de formes dont les plus communes sont le cube, le dodécaèdre pentagonal et l'octaèdre pouvant atteindre 30 cm ; la macle en « croix de fer » est fréquente par interpénétration (90°).

Propriétés. Dureté : 6 à 6 ½ ; densité : 4,9 à 5,1 ; fragile, à cassure conchoïdale. Éclat métallique, couleur jaune de laiton pâle.

Caractères distinctifs. La pyrite se distingue de la chalcopyrite par une dureté plus forte (elle raye le verre) et une plus grande densité, et de la marcassite par sa couleur plus jaune.

Gisements. La pyrite se rencontre dans tous les types de gisements. Dans les roches magmatiques elle peut donner des gîtes exploitables. Les plus grandes concentrations sont généralement celles qui se disposent dans des séries métamorphiques schistogréseuses avec des intrusions de roches assez basiques. Elle se rencontre aussi en concentrations exploitables dans des dépôts argileux et charbonneux et dans bien des formations métamorphiques. Les plus beaux cristaux viennent de l'île d'Elbe, où ils sont associés à l'hématite, de Gavorano et de Grossetto (Toscane), de Cassandra (Grèce), de Birgham (Utah), d'Uepac, Sonora (Mexique), et du Pérou.

Hauérite, MnS_2 - cubique

Se présente sous forme octaédrique ou de cube octaédrique ou en groupe globuleux.

Propriétés. Dureté : 4 ; densité : 3,444 ; cubique. Clivage parfait sur {001}, cassure subconchoïdale. L'éclat métallique est adamantin, de couleur brun rougeâtre, mais les cristaux ont souvent un aspect terreux en surface.

Gisements. L'hauérite est un minéral rare que l'on trouve associé au gypse et à d'autres sulfures, à Kalinka (Tchécoslovaquie) et à Radduca (Sicile), d'où viennent les plus gros cristaux.

Sperrylite, $PtAs_2$ - cubique

Se présente en cubes et cubo-octaèdres aux coins et arêtes arrondis.

Propriétés. Dureté : 6 à 7 ; densité : 10,59. Minéral fragile à cassure conchoïdale, de couleur blanc d'étain à vif éclat métallique.

Gisements. On rencontre ce minéral dans quelques roches ultrabasiques platinifères d'Afrique du Sud (Vermilion, Sudbury, Victoria Mine) et du Canada (Frood Mine, Ontario).

R. Kandaroun - Lab. de minéralogie. Muséum d'histoire naturelle, Paris

▶ *A gauche,* ullmanite *provenant de Monte Narba (Sardaigne). A droite, cristaux de* cobaltite *sur chalcopyrite provenant de Tunaberg (Suède).*

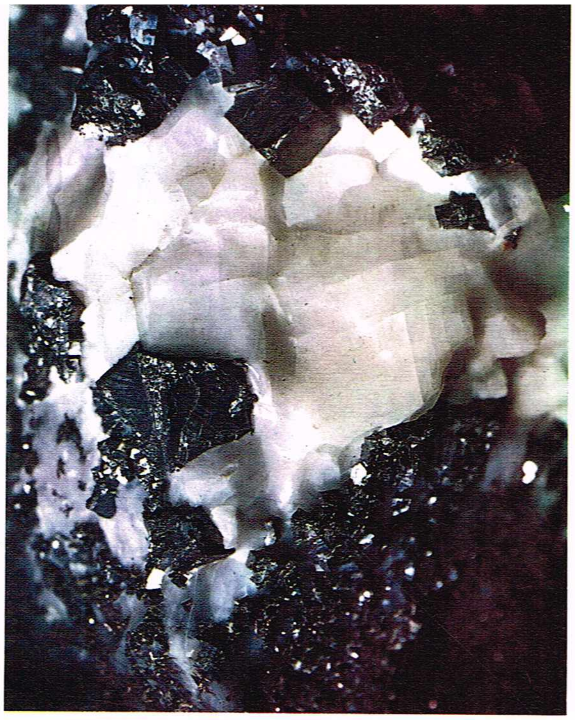

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

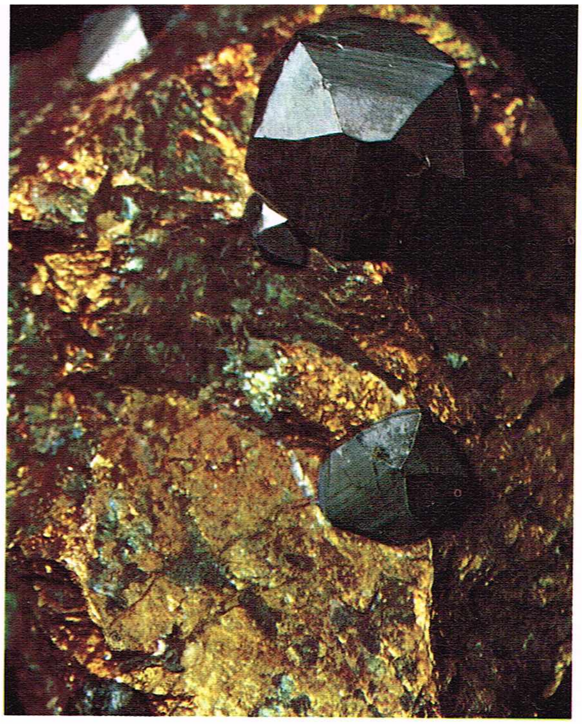

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bravoïte (WFe)S₂ - cubique

Rare en cristaux, la bravoïte se présente sous forme d'encroûtements noduleux à structure fibroradiée sur la pyrite.

Propriétés. Dureté : 5 ½ à 6 ; densité : 4,30 à 4,60 suivant la teneur de W ou de Fe ; éclat métallique gris acier.

Gisements. Les meilleurs échantillons proviennent de Rico (Argentine Mine) dans le Colorado.

Cobaltite (CoFe)AsS - cubique

Les cristaux de cobaltite montrent des formes proches de celles de la pyrite (cube, dodécaèdre pentagonal, octaèdre, etc.) ; ils sont fragiles avec un clivage parfait sur {001}.

Propriétés. Dureté : 5 ½ ; densité : 6,302. Éclat métallique vif blanc d'argent à gris acier avec une pointe violacée.

Gisements. On la rencontre associée à d'autres arséniures ou sulfures de nickel et cobalt dans des gisements dits de haute température à Tunaberg, Hakansbö, Vastmanland (Suède) et à Schneeberg (Saxe).

Gersdorffite, NiAsS - cubique

Massif, lamellaire ou grenu à cassure inégale, ce minéral est rare en cristaux de plus d'un centimètre. Sa forme est le plus souvent octaédrique (avec parfois les faces du cube ou du pyritoèdre).

Propriétés. Dureté : 5 ½ ; densité : 5,9. Éclat métallique, couleur blanc argent à gris acier s'oxydant en gris.

Gisements. C'est un minéral filonien associé à la nickélite, l'ullmanite, la chloanthite. Les plus gros cristaux viennent d'Aït-Aman et Bou-Azzer (Maroc) et de Friedrichesegen (Allemagne).

Ullmanite, NiSbS - cubique

Ce minéral ressemble à la cobaltite et aux autres minéraux de cette famille mais se présente le plus souvent en cristaux cubiques à faces striées.

Propriétés. Dureté : 5 à 5 ½ ; densité : 6,65. Le clivage est aisé sur {001}. Éclat métallique, couleur gris acier à blanc d'argent.

Gisements. L'ullmanite est un minéral filonien associé à d'autres minéraux de nickel. Les meilleures pièces de collection viennent de Masaloni et Montenarba (Sardaigne).

Marcassite, FeS₂ - orthorhombique

La marcassite se présente souvent sous forme stalactiforme avec à l'intérieur une structure radiée, l'extérieur présentant des cristaux. La macle est commune et donne des étoiles ou des formes dites en « crête de coq ». Les cristaux sont tabulaires ou pyramidaux.

Propriétés. Dureté : 6 à 6 ½ ; densité : 4,88. Éclat métallique sur cassure fraîche, couleur jaune bronze plus instable que la pyrite ; elle s'oxyde en devenant plus foncée.

Gisements. Ce minéral supergène se forme à basse température fréquemment à partir de solutions acides. On le trouve en concrétions dans les gisements sédimentaires. D'intéressantes cristallisations viennent de Kara Kowa (Russie), du cap Blanc-Nez (Pas-de-Calais), de Santa Eulalia (Mexique), de Tecklenburg (Rhénanie) et de Folkestone (Grande-Bretagne).

Löllingite, FeAs₂ - orthorhombique

La löllingite est le plus souvent massive. Ses cristaux sont rares et se présentent sous forme de prismes allongés suivant [001] ; on peut aussi trouver des cristaux pyramidaux.

Propriétés. Dureté : 5 à 5 ½ ; densité : 7,40. Éclat métallique, couleur blanc argent à gris acier.

Gisements. Ce minéral se rencontre uniquement dans des gisements hydrothermaux, associé à de l'arsenic, de la pyrite et des sulfures de cuivre. Les meilleures pièces de collection viennent de Vaulry (Haute-Vienne), de Challanches (Isère) et de Tazna (Bolivie).

Safflorite (Co, Fe)As₂ - monoclinique

Ce minéral ressemble à l'arsénopyrite ; il est souvent massif avec une structure fibreuse radiée.

Propriétés. Dureté : 5 ; densité : 7,3 à 7,5. Éclat métallique couleur blanc d'étain s'oxydant rapidement en gris foncé. La macle suivant {011}, ou macle par pénétration, forme des étoiles à 6 branches.

Gisements. La safflorite est couramment associée à des minéraux de nickel-cobalt, à l'argent et au bismuth dans des gisements filoniens mésothermaux. De beaux exemplaires de collection viennent de Bieber près de Hanau (Allemagne fédérale).

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ *Gros cristaux octaédriques de* gersdorffite *provenant d'Aït Ahmane (Maroc) [Paris ; École des mines].*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

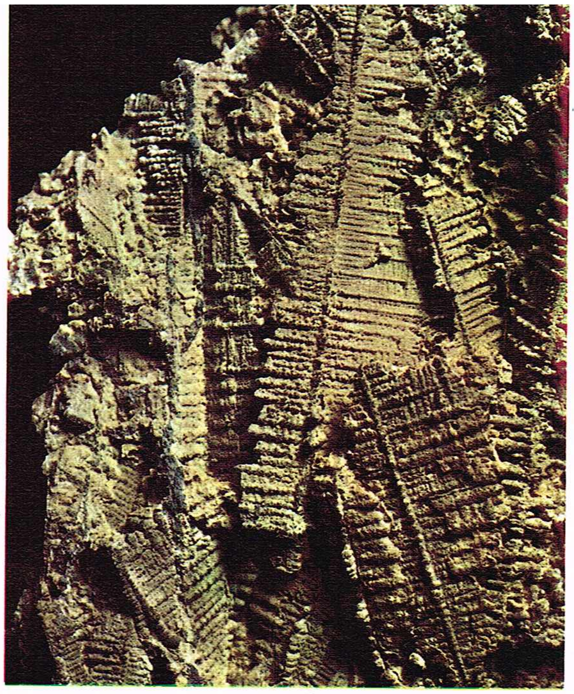

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***A gauche,*** **marcassite** ***provenant de Dover, Kent (Londres, British Museum).***
A droite, **rammelsbergite** ***provenant de Schneeberg (Saxe).***

Rammelsbergite $NiAs_2$ - orthorhombique

Elle se présente sous forme massive, de structure grenue à prismatique; ses cristaux, très rares, sont aciculaires.

Propriétés. Dureté : 5 ½ à 6; densité : 7,1. Éclat métallique, couleur blanc d'étain légèrement rouge.

Gisements. Cet arséniure de nickel est associé à d'autres minéraux de cobalt et de nickel dans les filons. De la mine Gabe Gotte, à Sainte-Marie-aux-Mines (Haut-Rhin) et de Cobalt-Ontario (Canada) proviennent les meilleures pièces qu'on peut voir dans les musées.

Arsénopyrite mispickel, FeAsS - orthorhombique

Se présente habituellement sous la forme de cristaux prismatiques allongés selon [001], parfois selon [010]. Les faces des cristaux sont striées selon la direction parallèle à C. On peut aussi la trouver en masses grenues ou compactes.

Propriétés. Dureté : 5 ½ à 6; densité : 6,07. Éclat métallique, couleur blanc argent pour les faces des cristaux et gris acier sur la cassure fraîche. Les macles donnent soit des cristaux pseudo-orthorhombiques, soit des cristaux cruciformes ou en étoile à 6 branches.

Gisements. C'est le plus abondant des minéraux d'arsenic que l'on trouve fréquemment disséminé dans divers types de gisements de haute température (filons aurifères, filons d'étain) et associé à des sulfures dans des gisements de métamorphisme de contact. Il est présent plus rarement dans les gisements de basse température. Les localités les plus connues sont : Cassandra (Grèce), Altenberg et Freiberg Mitterberg (Allemagne fédérale), Trepca (Yougoslavie), Willasberg (Bohême) et Panasqueira (Portugal).

Glaucodot (Co, Fe)AsS - orthorhombique

Ce minéral ressemble beaucoup à l'arsénopyrite; ses cristaux sont prismatiques, allongés avec des faces striées.

Propriétés. Dureté : 5; densité : 6,04. Éclat métallique, couleur blanc d'étain. Les macles donnent des cristaux cruciformes ou en étoile.

Gisements. Le glaucodot est généralement associé à la cobaltite, à la pyrrhotite, et à la chalcopyrite dans des gîtes de haute température. Hakansbö (Suède), Skutterud (Norvège), Cobalt-Ontario (Canada) donnent les meilleurs cristaux.

Molybdénite, MoS_2 - hexagonal

En masses écailleuses, foliacées ou lamellaires, ce minéral se reconnaît facilement par sa sectibilité et par sa flexibilité. Ses cristaux à contours hexagonaux sont tabulaires; les faces des prismes sont fortement striées parallèlement au clivage, qui est parfait suivant (0001).

Propriétés. Dureté : 1; densité : 4,7 à 4,8. Le toucher est gras. L'un des critères de reconnaissance de ce minéral est la trace gris bleuté qu'il laisse sur le papier; l'éclat métallique est gris de plomb brillant, ce qui le distingue de celui du graphite auquel il ressemble parfois.

Gisements. Cet excellent minerai de molybdène, très recherché pour la fabrication des aciers spéciaux, se rencontre dans plusieurs types de gisements (pegmatites, roches plutoniques, gîtes de contacts métasomatiques, filons hydrothermaux, etc.). Les meilleurs cristaux que l'on peut voir dans les collections viennent de Deepwater (Australie), de Ross (Ontario), de Madagascar, du Maroc, etc.

Mélonite, $NiTe_2$ - rhomboédrique

Elle se rencontre en lamelles hexagonales dont le clivage (0001) est parfait.

Propriétés. Dureté : 1 à 1 ½; densité : 7,35. Éclat métallique, couleur blanc rougeâtre se ternissant en brun. Ce minéral, très rare, a été trouvé associé à d'autres tellurures dans des filons de quartz aurifère de Californie et du Colorado (Criple Creek).

Skuttérudite, Smaltite, Chloantite (CoNi)As_3 et (NiCO)As_3 - cubique

Ces trois minéraux sont semblables d'aspect, massifs le plus souvent, leurs cristaux étant peu fréquents (faces du cube, de l'octaèdre et du dodécaèdre). Ils dépassent rarement 3 cm. Les groupements réticulés ou arborescents sont rares.

Propriétés. Dureté : 5 ½ à 6; densité : 6,2 à 6,7. Éclat métallique, blanc d'étain à gris acier. Ce sont des minéraux fragiles; la cassure est inégale.

Gisements. On les rencontre dans les filons à paragenèse Ni-Co-Ag et dans certains gîtes de contact. Les plus

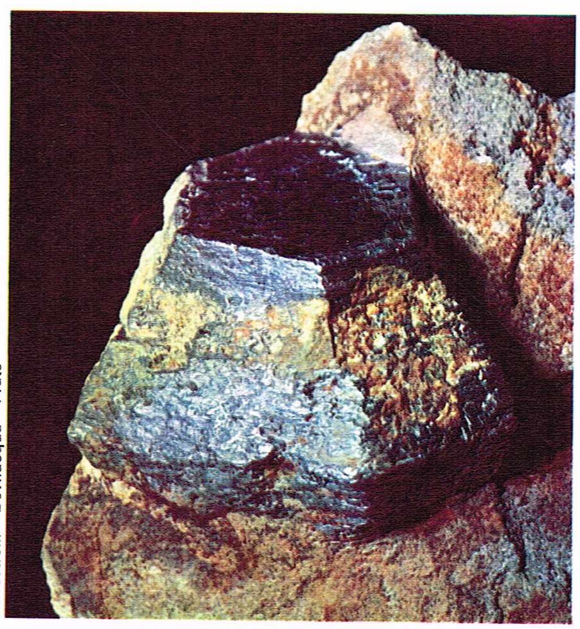

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ ***Cristaux de*** **molybdénite** ***provenant de Pontiac (Canada) : c'est un minéral très recherché pour la fabrication des aciers spéciaux.***

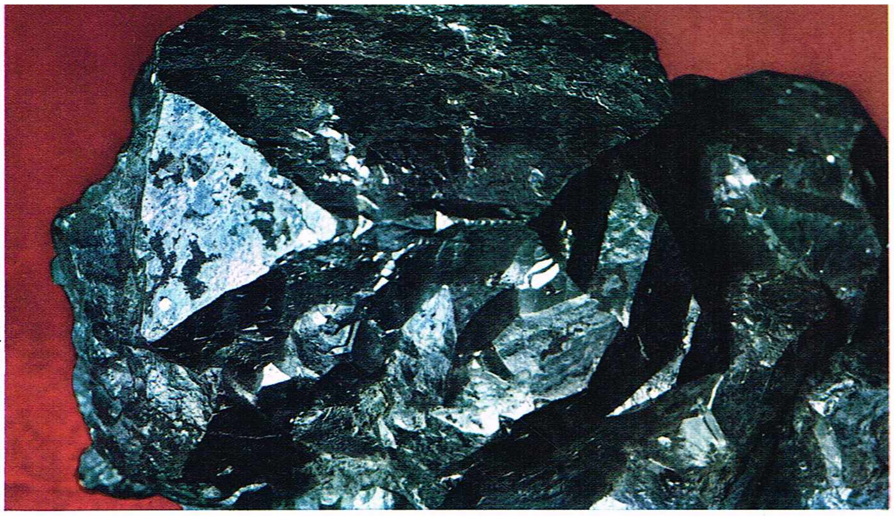

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *La* skuttérudite, *en haut, et la* smaltite, *en bas, sont d'aspect semblable : la première provient de Bou-Azzet (Maroc) [Paris, École des mines], la seconde de Ricchelsdorf (Hesse) [Londres, British Museum].*

gros cristaux connus de skuttérudite viennent de Bou-Azzer (Maroc); d'autres belles cristallisations ont été trouvées à Skutterud (Norvège), Tunaberg (Suède), Cobalt (Ontario), Scheeberg (Saxe), Jachinov (Bohême).

Proustite, Ag_3AsS_3 - rhomboédrique

Massive, grenue, la proustite est rare en beaux cristaux. Ceux-ci, très recherchés par les collectionneurs, sont prismatiques et souvent terminés par un scalénoèdre aigu.

Propriétés. Dureté : 2 à 2 $\frac{1}{2}$; densité : 5,6. Transparent, rouge vermillon; éclat fortement adamantin. Les indices de réfraction sont élevés : ng = 3,09; np = 2,79. La biréfringence est forte. Sensible à la lumière du Soleil en noircissant, ce minéral peut redevenir rouge vif par immersion dans une solution diluée de cyanure alcalin ou avec un liquide pour argenterie.

Gisements. Minéral des filons de basse température, la proustite est associée à la pyrargyrite, l'arsénopyrite et la baryte. Surnommée « argent rouge », de même que la pyrargyrite, c'est un excellent minerai d'argent. De grandes concentrations d'« argent rouge » ont été exploitées à Charñacillo (Chili), d'où proviennent les plus gros cristaux. De Freiberg (Allemagne), du Mexique et de Bolivie proviennent aussi d'excellents échantillons de collection.

Pyrargyrite, Ag_3SbS_3 - rhomboédrique

Plus fréquent que la proustite, ce minerai d'argent est également surnommé « argent rouge ». Les cristaux prismatiques sont souvent terminés par les faces du rhomboèdre aplati et n'ont presque jamais de terminaison aiguë.

Propriétés. Dureté : 2 à 2 $\frac{1}{2}$; densité : 5,8; indices de réfraction : ng = 3,1 et np = 2,9, avec une forte biréfringence. Moins transparente que la proustite, couleur rouge cochenille foncé, éclat adamantin. Elle est fragile; sa cassure est conchoïdale. Les cristaux, noircis par exposition à la lumière, peuvent également s'éclaircir par immersion dans un liquide pour argenterie.

Gisements. Son mode de gisement est identique à celui de la proustite. Les meilleurs cristaux que l'on peut voir dans les collections viennent de Guanajuato (Mexique), d'Andreasberg (Harz), de Jachinov (Bohême).

Stéphanite, Ag_5SbS_4 - orthorhombique

Massive, compacte, la stéphanite se présente aussi en cristaux prismatiques courts ou tabulaires, pseudo-hexagonaux.

Propriétés. Dureté : 2 à 2 $\frac{1}{2}$; densité : 6,25. Éclat métallique, couleur noir de fer. Fragile, la stéphanite a une cassure subconchoïdale; son manque de sectibilité la distingue de la chalcocite.

Gisements. Elle est associée à d'autres sulfosels d'argent dans les gisements argentifères, en particulier à Freiberg (Saxe) et Guanajuato (Mexique).

Polybasite $(AgCu)_{16}Sb_{12}S_{11}$ - monoclinique

La polybasite est le plus souvent massive, et ses cristaux ont un faciès pseudohexagonal.

Propriétés. Dureté : 2 à 3; densité : 6,1. Elle n'est rouge qu'en lame mince, pratiquement opaque, son éclat métallique est noir de fer. Son clivage est imparfait et sa cassure inégale.

Gisements. Fréquente dans les gisements d'argent, elle peut être trouvée en quantité considérable dans les filons de basse ou de moyenne température. Elle est associée aux sulfosels d'argent et de plomb ainsi qu'à l'or ou à des sulfures variés. Les plus beaux groupes cristallisés viennent de Guanajuato (Mexique).

Chalcostibite, $CuSbS_2$ - orthorhombique

Rarissime en cristaux de plus de 3 cm; ceux-ci, prismatiques, trapus, présentent des formes allongées et striées et sont souvent recouverts de carbonates (azurite, malachite).

Propriétés. Dureté : 3 à 4; densité : 4,95; le clivage est facile sur (001). Éclat métallique, couleur gris de plomb à gris de fer sur la cassure fraîche.

Gisements. S'altère en azurite ou en malachite, a été trouvée dans des filons calcaires en beaux cristaux à Rar-el-Anz (Maroc).

Emplectite, $CuBiS_2$ - orthorhombique

Ses cristaux sont prismatiques et aplatis avec un clivage sur {010}.

Propriétés. Dureté : 2; densité : 6,38. Éclat métallique, couleur grisâtre ou blanc d'étain; fragile, sa cassure est conchoïdale.

Gisements. Ce minéral rare des gîtes filoniens est associé à la chalcopyrite, la pyrite, la sphalérite, la fluorine à Schlaggenwald (Bohême) et au Chili.

Berthiérite, $FeSb_2S_4$ - orthorhombique

Elle se présente en cristaux allongés avec les faces du prisme striées mais aussi en masses fibreuses, plumeuses ou radiées.

Propriétés. Dureté : 2 à 3; densité : 4,64. Éclat métallique, couleur gris d'acier s'oxydant facilement pour donner une teinte dorée, irisée.

Gisements. Elle est associée au quartz et à la stibine dans les filons hydrothermaux de basse température; de beaux échantillons viennent de Herja (Roumanie) et de Belgodere (Corse).

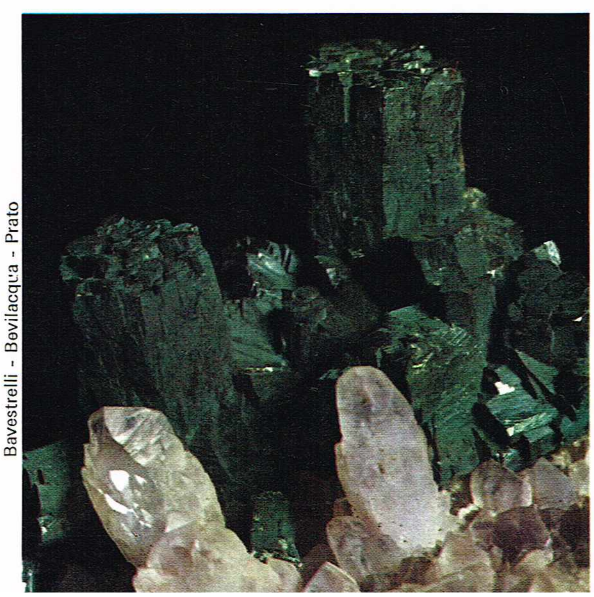

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ *Cristaux de* pyrargyrite, *ou « argent rouge », associés ici à de l'améthyste et provenant de Guanajuato (Mexique).*

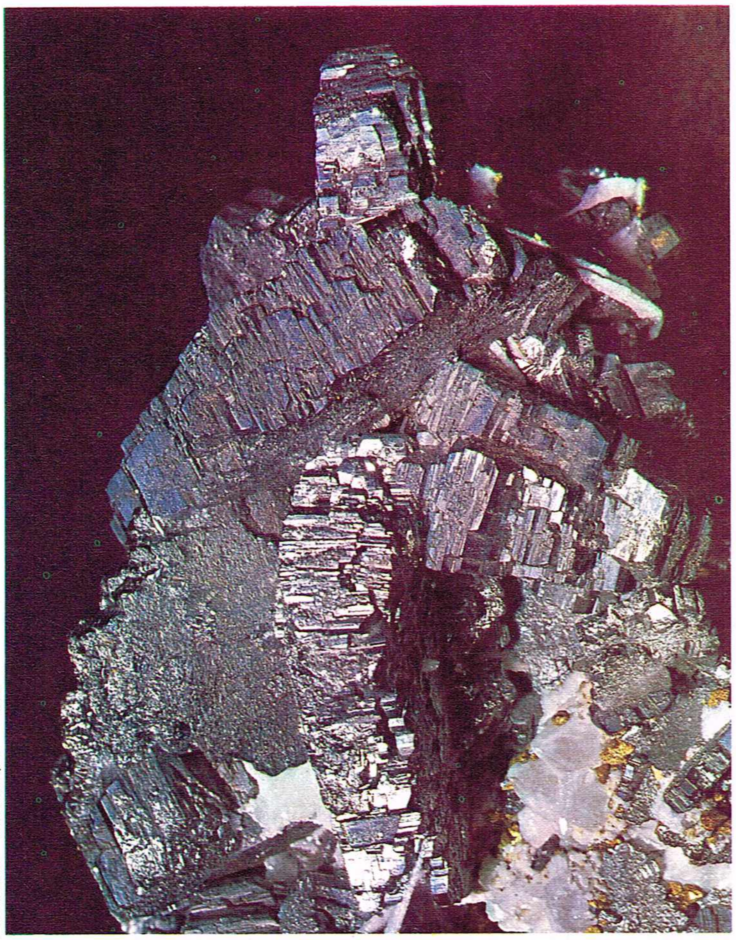

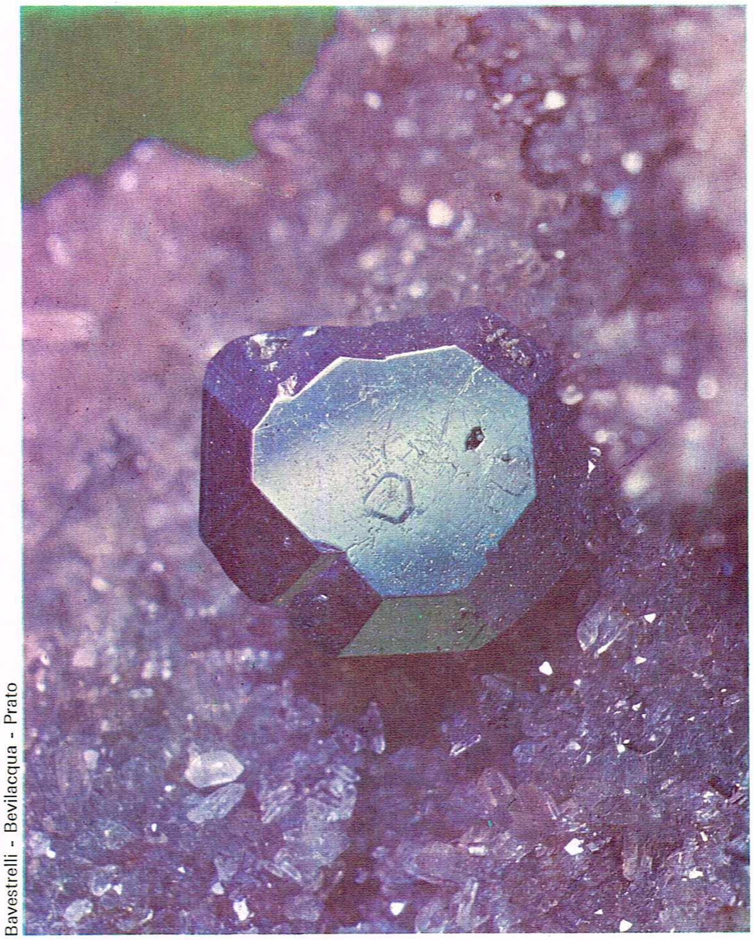

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *A gauche, gros cristaux* **de bournonite** *associée à de la chalcopyrite et de la calcite (10 cm de haut) [mine d'Herodsfoot, Lanreath, Cornwall — Londres, British Museum]. A droite, une belle macle* **tabulaire de bournonite** *(musée d'Histoire naturelle, Milan).*

Bournonite, $PbCuSbS_3$ - orthorhombique

Généralement massive et compacte, la bournonite, lorsqu'elle cristallise, est l'un des sulfures les plus recherchés par les collectionneurs. Les cristaux pseudo-quadratiques sont tabulaires, les faces du prisme étant brillantes et striées. La macle, souvent multiple (110), conduit à des associations en forme de « roue » ou « pignon » à angles rentrants, très caractéristiques.

Propriétés. Dureté : $2\frac{1}{2}$ à 3; densité : 5,83. L'éclat métallique, couleur gris acier, est plus brillant que celui des cuivres gris. Fragile, sa cassure est subconchoïdale.

Gisements. C'est le plus commun des sulfosels. On le trouve en association avec la galène, la tétraédrite, la sphalérite, la chalcopyrite et le quartz dans les filons métallifères de moyenne température. D'intéressants groupes de cristaux ont été trouvés à Prunière (Isère), Pranal, Pontgibaud (Puy-de-Dôme), à Neudorf (Harz), et Herodsfoot (Cornouailles).

Fizelyite, 7 PbS · 1,5 Ag_2S · 5 Sb_2S_3 - orthorhombique

Ses cristaux prismatiques sont fortement striés sur les faces terminales.

Propriétés. Dureté : 2; clivage (010). Éclat métallique, couleur gris acier à gris de plomb foncé.

Gisements. Minéral filonien, il est associé généralement à la galène, la pyrite, la sphalérite, la pyrrhotite, le quartz et la dolomite à Kisbanya (Roumanie).

Andorite, $PbAgSb_3S_6$ - orthorhombique

L'andorite se présente sous forme de cristaux prismatiques striés suivant (001), ou bien en cristaux tabulaires épais ou minces. Elle est également massive. Elle est fragile, et sa cassure est conchoïdale.

Propriétés. Dureté : 3 à $3\frac{1}{2}$; densité : 5,35. Éclat métallique, gris acier foncé, s'oxydant quelquefois en donnant une couleur jaune ou irisée.

Gisements. Minéral filonien, l'andorite se rencontre à Felsöbanya en Roumanie, associée à la stibine, la sphalérite, la baryte, la sidérite et le quartz. A Itos Mine et d'autres mines de l'Oruro (Bolivie), on la trouve associée à la cassitérite, l'arsénopyrite, la stannite, la zinkénite, la tétraédrite, la pyrite et l'alunite.

Freieslebénite, $Pb_3Ag_5Sb_5S_{12}$ - monoclinique

Ses cristaux, prismatiques et striés selon (001), se maclent sur (100). Plutôt fragiles; leur cassure est subconchoïdale à inégale.

Propriétés. Dureté : 2 à $2\frac{1}{2}$; densité : 6,1. Opaque. Éclat métallique, gris d'acier clair, blanc argent ou gris de plomb.

Gisements. Associés à l'argentite, aux argents rouges à la galène et à la sidérite, les plus beaux cristaux proviennent de Hiendelaencina en Espagne.

Sartorite, $PbAs_2S_4$ - monoclinique

Les cristaux, de forme prismatique, sont profondément striés suivant la direction (010) et se présentent souvent en groupes parallèles ou subparallèles. La macle sur (100), répétée, donne un aspect lamellaire aux cristaux. La sartorite est extrêmement fragile et sa cassure est conchoïdale.

Propriétés. Dureté : 3; densité : 5,10. Opaque. Éclat métallique, gris de plomb foncé.

Gisements. On la trouve dans la dolomite saccharoïde de Binnental à Lengenbach dans le Valais (Suisse) en beaux cristaux atteignant plusieurs centimètres de long, associée principalement à la tennantite, la pyrite, la dufrénoysite et au réalgar.

Baumhauérite, $Pb_4Ag_6S_{13}$ - monoclinique

Les cristaux sont prismatiques courts selon (010) ou tabulaires sur (100); ils sont striés parallèlement à (010) sur (100) et (001) sur (010). La baumhauérite se macle polysynthétiquement sur (100) et se clive parfaitement sur (100). Sa cassure est conchoïdale.

Propriétés. Dureté : 3; densité : 5,33. Opaque. Éclat gris de plomb métallique à gris d'acier, s'oxydant quelquefois en donnant des couleurs irisées.

Gisements. On la rencontre à Binnental dans le Valais (Suisse) associée à la rathite, la sartorite et à d'autres sulfo-arséniures de plomb.

▼ *Représentation schématique d'un cristal et d'une macle de bournonite*

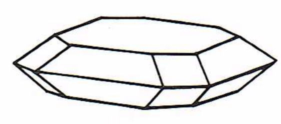

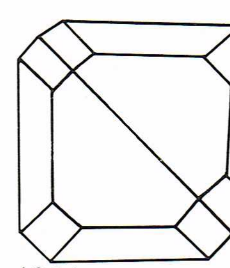

I.G.D.A.

Rathite, $Pb_3Ag_{18}S_{40}$ - monoclinique

Les cristaux prismatiques courts sont striés dans la direction (001). La rathite se clive parfaitement sur (100) et sa cassure est conchoïdale.

Propriétés. Dureté : 3; densité : 5,37. Couleur gris de plomb s'oxydant rapidement à l'air en donnant des teintes irisées.

Gisements. On la rencontre à Binnental (Valais, Suisse) dans de la dolomite associée à la liveingite, la baumhauérite, la sartorite, la hutchinsonite et d'autres sulfo-arséniures rares de cette localité.

Dufrénoysite, $Pb_2Ag_2S_5$ - monoclinique

Les cristaux sont généralement tabulaires sur (010), quelquefois allongés selon (100) ou selon (010) et striés suivant la direction (100). La dufrénoysite se macle sur (001) et se clive parfaitement sur (010). Elle est fragile et sa cassure est conchoïdale.

Propriétés. Dureté : 3; densité : 5,53. Éclat métallique gris de plomb à gris d'acier.

Gisements. On trouve la dufrénoysite dans les poches de dolomite saccharoïde; elle est associée à d'autres sulfo-arséniures de plomb.

Gratonite, $Pb_9Ag_4S_{15}$ - rhomboédrique

La gratonite peut se présenter sous forme massive ou en cristaux prismatiques allongés selon (0001).

Propriétés. Dureté : 2 ½; densité : 6,22. Elle est opaque; l'éclat métallique est gris de plomb foncé.

Gisements. Ce minéral se rencontre disséminé dans les gisements de pyrite, associé au réalgar et à la tétraédrite, dans la mine d'Excelsior de Cerro de Pasco (Pérou).

Zinkénite, $Pb_6Sb_{14}S_{27}$ - hexagonal

Habituellement sous forme massive, on rencontre la zinkénite aussi en colonnes ou en agrégats fibro-radiés; plus rares, les cristaux, rarement distincts, sont prismatiques et fins. La cassure est inégale.

Propriétés. Dureté : 3 à 3 ½; densité : 5,3. Opaque, l'éclat métallique gris d'acier se ternit en donnant des teintes irisées.

Gisements. C'est un minéral de gisement filonien de basse à moyenne température, associé à la stibine, la jamesonite, la boulangérite, la bournonite (et autres sulfosels), la sphalérite, la pyrite, les carbonates (des gangues) et le quartz. On trouve de beaux échantillons à Wolfsberg dans le Harz (Allemagne).

Füloppite, $Pb_3Sb_8S_{15}$ - monoclinique

Les cristaux de füloppite sont prismatiques, courts et pyramidaux avec des faces striées. Plus rarement, ils peuvent être tabulaires épais.

Propriétés. Dureté : 2 ½; densité : 5,23. Elle est opaque; l'éclat métallique gris de plomb s'oxyde quelquefois en donnant une couleur bleu d'acier ou bronze. Elle est fragile, sa cassure est inégale.

Gisements. Les exemplaires qu'on peut voir dans les collections viennent de Grüber, Krezberg (Hongrie).

Hétéromorphite, $Pb_7S_8Sb_{19}$ - monoclinique

Ce minéral se présente en cristaux pyramidaux dont les arêtes sont arrondies parallèlement à la direction (110); les cristaux sont souvent déformés et composés d'individus subparallèles; l'hétéromorphite est également massive.

Propriétés. Dureté : 2 ½ à 3; densité : 5,73. Opaque, éclat métallique noir de fer. Elle est fragile, son clivage est bon et sa cassure inégale.

Gisements. Se trouve dans les mines de stibine d'Armsberg (Wetsphalie), en cristaux associés à de la sphalérite garnissant l'intérieur de cavités dans le minéral massif. On rencontre également de beaux cristaux à Prusberg (Westphalie).

Jamesonite, $Pb_4FeSb_6S_{14}$ - monoclinique

Ses cristaux sont aciculaires à fibreux, striés parallèlement à leur sens d'allongement. Ils se présentent souvent en masses d'aiguilles feutrées. La jamesonite est aussi massive, fibro-radiée ou en agrégats subparallèles de cristaux prismatiques.

Propriétés. Dureté : 2 ½; densité : 5,63. Elle est opaque; l'éclat métallique gris-noir s'oxyde quelquefois en donnant des teintes irisées. Ce minéral est fragile et se clive bien suivant (001).

Gisements. On rencontre la jamesonite dans les filons hydrothermaux formés à température moyenne ou basse; elle est associée à d'autres sulfosels de plomb, à la pyrite, la sphalérite, la galène, la tétraédrite et la stibine. Ses principaux gisements se rencontrent à Arangidka (Hongrie), et à Felsöbanya et Przibram (Tchécoslovaquie).

Boulangérite, $Pb_5Sb_4S_{11}$ - monoclinique

La boulangérite se présente le plus souvent en cristaux prismatiques, allongés à aciculaires et profondément striés selon (001). Elle forme aussi des masses fibreuses, compactes, et il existe une variété aciculaire formée de fibres légères et enchevêtrées ayant un aspect de plume que l'on appelle la *plumosite*.

Propriétés. Dureté : 2 ½ à 3; densité : 6,23. Elle est opaque; l'éclat métallique gris de plomb bleuâtre est souvent recouvert de points jaunes dus à l'oxydation. C'est un minéral fragile, qui se clive sur (100). Les fibres, très fines, sont flexibles.

Gisements. La boulangérite se trouve dans les filons hydrothermaux formés à basse ou moyenne température, associée à d'autres sulfosels de plomb, à la stibine, la galène, la sphalérite, la pyrite, l'arsénopyrite, au quartz et à certains carbonates (plus particulièrement la sidérite). On trouve de beaux échantillons à Trepca (Yougoslavie) et à Baïa Sprie (Roumanie).

Ménéghinite, $Pb_{13}Sb_7S_{23}$ - orthorhombique

Elle se présente en petits prismes striés selon la direction de l'allongement. Elle est également massive, fibreuse à compacte.

Propriétés. Dureté : 2 ½; densité : 6,36. Opaque; l'éclat métallique est brillant, gris de plomb noirâtre. Elle est fragile; sa cassure est conchoïdale et elle se clive parfaitement.

Gisements. Le gisement le plus important est celui de Bottino (Toscane), où elle se trouve en cristaux complexes associée à la galène, la chalcopyrite et l'albite.

Galénobismutite, $PbBi_2S_4$ - orthorhombique

Les cristaux sont le plus souvent en plaquettes allongées ou parfois en aiguilles; ils sont striés selon la direction de leur allongement. Habituellement, la galénobismutite est massive fibreuse à compacte. Les cristaux, fréquemment déformés, sont flexibles.

Propriétés. Dureté : 2 ½ à 3 ½; densité : 7,04. Elle est opaque; l'éclat métallique est gris clair à blanc d'étain ou gris de plomb. La galénobismutite s'oxyde quelquefois en donnant des teintes jaunes ou irisées.

Gisements. De beaux échantillons ont été trouvés à Nordmark (Suède).

Cosalite, $Pb_2Bi_2S_5$ - orthorhombique

La cosalite se présente habituellement sous forme massive en prismes radiés ou en agrégats fins et doux; elle peut aussi être massive avec une structure cristalline non distincte. Les cristaux se présentent sous forme de prismes allongés ayant l'aspect d'aiguilles ou même de cheveux.

Propriétés. Dureté : 2 ½ à 3; densité : 6,76. Elle est opaque; l'éclat métallique est gris de plomb à gris d'acier; la cassure est inégale.

Gisements. C'est un minéral relativement commun que l'on trouve dans les gisements hydrothermaux de température moyenne et dans les gisements de métamorphisme de contact, tels que celui de Nordmark (Suède), où on la trouve associée à la calcite, au diopside et à l'épidote.

Réalgar, AsS - monoclinique

Son nom provient de l'arabe *Rahj-el-Ghar* = poudre de la mine. Il se présente en cristaux prismatiques courts et striés. Il est aussi grenu, compact ou en encroûtements.

Propriétés. Dureté : 1 ½ à 2; densité : 3,56. Transparent quand il est frais (indices de réfraction : ng = 2,61; np = 2,46; biréfringence = 0,15); éclat résineux à gras, rouge aurore ou jaune-orangé. Quand il reste longtemps exposé à la lumière, il se désintègre en poudre jaune rougeâtre qui est un mélange de As_2S_3 et As_2O_3. Il est sectible et sa cassure est conchoïdale.

◀ *Cristaux tétraédriques de marshite provenant de Broken Hill, Australie (Londres, British Museum).*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Gisements. C'est un constituant mineur commun de certains minerais filoniens, où il est associé à l'orpiment, à d'autres minéraux d'arsenic et à la stibine. Il est aussi trouvé dans certains calcaires et dolomies, dans les roches argileuses et dans les produits volcaniques de sublimation. Les principaux gisements produisant des cristaux sont ceux du Nevada et de Cavnic (Roumanie). On l'a rencontré à Mattra (Corse).

Orpiment, As_2S_3 - monoclinique

Le nom de ce minéral vient de la déformation du mot latin *auripigmentum,* qui signifie peinture dorée. Il fut donné par allusion à la couleur mais aussi parce que sa substance était supposée contenir de l'or. Ses cristaux sont prismatiques d'aspects pseudo-orthorhombiques ou monocliniques. Ils sont petits et rarement distincts. L'orpiment se présente habituellement en feuillets, en masses fibreuses ou en agrégats réniformes et botryoïdaux ; il est quelquefois grenu, pulvérulent. On y rencontre assez souvent des cristaux orientés de réalgar.

Propriétés. Dureté : 1 ½ à 2; densité : 3,49. Il est transparent (indices de réfraction : ng = 3,0 ; np = 2,4 ; biréfringence : 0,6) ; l'éclat résineux, jaune de différentes nuances, est perlé sur les faces de clivage. Il se clive parfaitement et les lamelles de clivage sont flexibles mais non élastiques ; il est sectible.

Gisements. C'est un minéral typique des filons hydrothermaux de très basse température, ainsi qu'un minéral commun d'altération, à partir des minéraux d'arsenic et en particulier du réalgar. On le trouve comme produit de sublimation dans les fumerolles ; il est associé à la stibine, au réalgar, à l'arsenic natif, à la calcite, à la barytine et au gypse. Les principaux gisements sont Balia (Asie Mineure), Tareshun-Takab (Iran), Kurvistan (Turquie), Quivuvilca (Pérou), Tajawa (Hongrie), Lukhumis (U.R.S.S.). En France, on l'a rencontré à Duranus et Lucéram (Alpes-Maritimes).

Halogénures

Nantokite, CuCl - cubique

La nantokite est massive ou grenue ; sa cassure est conchoïdale.

Propriétés. Dureté : 2 ½; densité : 4,136. L'éclat adamantin, incolore à blanc sur la cassure fraîche, devient grisâtre à verdâtre quand le minéral se ternit à l'air.

Gisements. Originellement trouvée dans les mines de Copiapo près de Nantoko (Chili), localité à laquelle elle doit son nom. On la rencontre également à Broken Hill (Australie), associée à la cuprite, au cuivre natif et à des halogénures d'argent.

Marshite, CuI - cubique

La marshite se présente en cristaux isolés ou en encroûtements. Les cristaux sont habituellement de forme tétraédrique sur (011) ; la cassure est conchoïdale.

Propriétés. Dureté : 2 ½ ; densité : 5,68. L'éclat adamantin, incolore à jaune pâle quand la marshite est fraîche, se ternit à l'air en rouge saumon ou brique foncé. A la lumière ultraviolette, présence d'une fluorescence rouge foncé.

Gisements. Ce minéral de formation secondaire provient principalement de Broken Hill (Australie) et de Chuquicamata (Chili).

Miersite, AgI - cubique

La miersite, de couleur jaune canari, se présente en cristaux de forme tétraédrique, avec parfois les faces du cube ; ces cristaux se clivent parfaitement suivant (011). Elle peut également former des encroûtements sur d'autres minéraux.

Propriétés. Dureté : 2 ½ ; densité : 2,64. Elle est transparente ; son éclat est adamantin.

Gisements. Le gisement le plus connu est celui de Broken Hill (Australie).

Iodyrite, AgI - hexagonal

Les cristaux, habituellement prismatiques ou tabulaires selon (0001), se clivent parfaitement sur 0001. Ils forment des groupements parallèles ou des rosettes. Parfois massive, l'iodyrite possède une cassure conchoïdale.

Propriétés. Dureté : 1 ½ ; densité : 5,69. L'éclat, résineux à adamantin, est perlé sur les faces de clivage. Incolore quand elle est fraîche, l'iodyrite devient jaune pâle, jaune citron à vert jaunâtre par exposition à l'air.

Gisements. Ce minéral secondaire, rare, se rencontre dans la zone d'oxydation des gisements d'argent, associé principalement à la cérargyrite, la bromyrite et à l'argent natif. Broken Hill (Australie) en est le principal gisement.

▼ *Cristaux d'orpiment provenant de Takab Afschaz (Iran) [Paris, École nationale supérieure des mines].*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

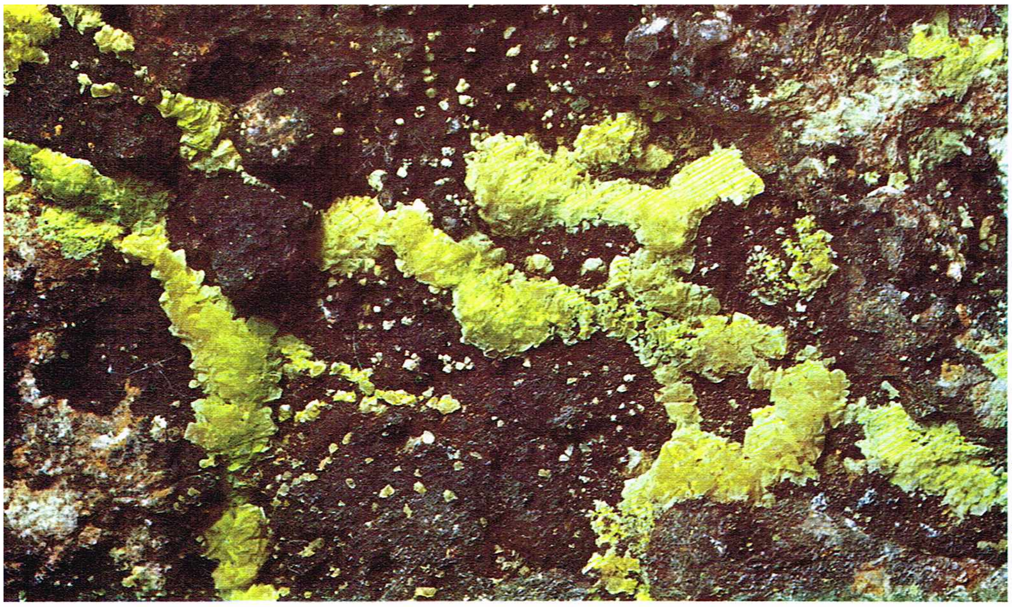

▲ Miersite *provenant de Broken Hill (Australie), le gisement le plus connu (Londres, British Museum).*

▼ Villiaumite *des syénites néphéliniques des îles de Los (Guinée)* [*collection privée*].

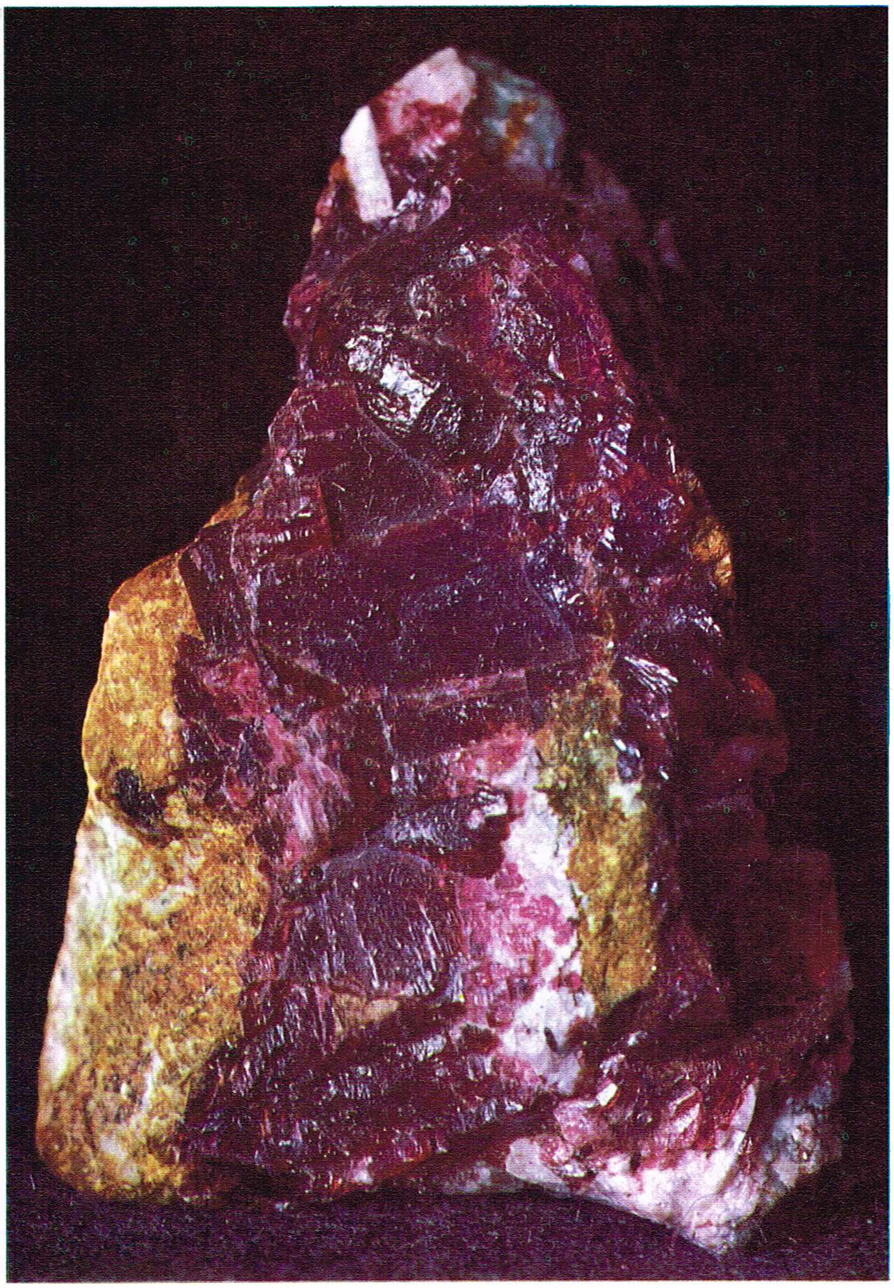

Villiaumite, NaF - cubique

Habituellement impure, la villiaumite, qui se présente sous forme massive ou grenue, est de couleur rouge carmin. Elle est fragile et se clive parfaitement suivant les faces du cube.

Propriétés. Dureté : 2 à 2 ½; densité : 2,79. L'éclat vitreux est transparent quand elle est pure.

Gisements. On la trouve principalement en Guinée, dans les îles de Los, à Sourognia Kassa. Elle est associée à l'astrophyllite et à d'autres minéraux rares des syénites néphéliniques.

Halite, NaCl - cubique

Élément essentiel de l'alimentation et matière première très utilisée par l'industrie, le « sel gemme », ou halite, se rencontre en masses granuleuses ou en cristaux (cubes ou cubo-octaèdres) pouvant parfois dépasser 10 cm d'arête. Les groupements polysynthétiques *(trémies)* sont très caractéristiques.

Propriétés. Dureté : 2 ; densité : 2,16. La halite est incolore, bleue, violacée ou jaune ; son lustre est vitreux. Cassante, elle est très soluble dans l'eau et son goût, caractéristique, est l'un des meilleurs critères de reconnaissance.

Gisements. Minéral des dépôts sédimentaires et d'efflorescences en région aride, il est associé à divers chlorures et sulfates : gypse, sylvine, polyhalite, carnalite, anhydrite, etc. Les gisements sont nombreux. Les beaux sels bleus viennent de Sicile et d'Allemagne. Les grands groupes incolores que l'on peut voir dans les musées viennent de Wieliczka (Pologne). Si l'on veut conserver la halite en collection, il faut la protéger de l'humidité.

Sylvite, KCl - cubique

La sylvite, ou « sel de Sylvius », incolore ou blanche, a un goût plus amer que la halite. Elle se présente fréquemment en cristaux cubiques et, moins souvent, en cubo-octaèdres ; elle est également massive ou grossièrement grenue à compacte. Elle se clive parfaitement suivant les faces du cube mais sa cassure est inégale.

Propriétés. Dureté : 2 ; densité : 1,993. L'éclat, vitreux, est incolore ou blanc ; des inclusions d'hématite, qui sont assez fréquentes, lui donnent des teintes variant du rouge-jaune au rouge.

Gisements. Principalement d'origine sédimentaire, la sylvite se trouve, en dépôts dans de grands bassins résultant de l'évaporation, associée à la kiesérite, au gypse et plus particulièrement à la halite. De beaux échantillons provenant de ce type de gisement se rencontrent à Stassfurth (Allemagne). On rencontre également la sylvite dans les produits de sublimation des fumerolles du Vésuve et dans les gisements de nitrates dans les déserts au Chili et au Pérou.

Cérargyrite, AgCl
Embolite (chlorobromure d'argent) - cubique
Bromyrite, AgBr

Les minéraux de cette série, transparents à translucides, se présentent en cristaux habituellement cubiques montrant parfois les faces de l'octaèdre et du tétraèdre. Ils forment souvent des groupes parallèles à subparallèles. Le plus souvent, on les rencontre en masses malléables ayant l'aspect de la cire. De cassure inégale à subconchoïdale, ils sont sectibles, ductiles et très plastiques.

Propriétés. Dureté : 2 ½; densité : 5,55 pour la cérargyrite et 6,50 pour la bromyrite. L'éclat, résineux à adamantin, est incolore pour des échantillons purs et frais, mais devient rapidement gris, brun jaunâtre ou verdâtre (pour la bromyrite). Par exposition à l'air, la cérargyrite devient brun-violet ou pourpre.

Gisements. Ces minéraux secondaires se trouvent dans la zone oxydée des gisements d'argent des régions arides, où ils sont associés à l'argent natif, à l'iodyrite, à la jarosite et à la limonite. Les principaux gisements des minéraux de cette série se trouvent au Chili : la bromyrite à Cerro de Chanarcillo et Sierra Gorda, l'embolite à Pacos de Chanarcillo.

Calomel, HgCl - quadratique

Calomel est un vieux terme d'origine incertaine, qui provient du grec. Il signifie peut-être « beau » et « miel » (à cause de son goût sucré) ou « beau » et « noir » (à cause de la couleur noire du sulfure de mercure, auquel

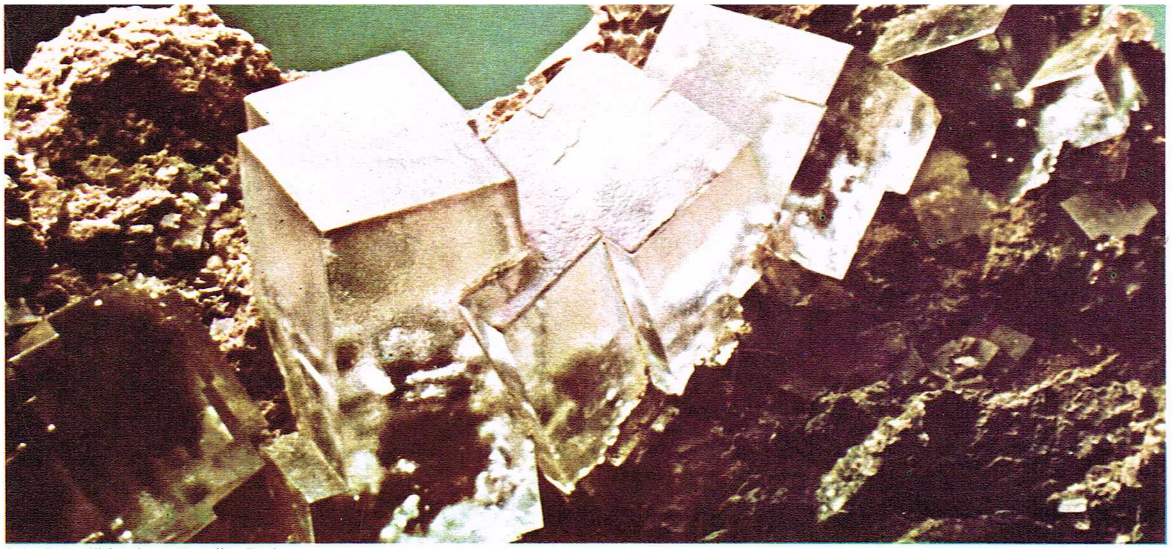

Muséum d'histoire naturelle, Paris

◀ *Cristaux de halite ou « sel gemme » provenant de Wieliczka (Pologne) et conservés au Muséum national d'histoire naturelle de Paris.*

ce nom fut le premier appliqué). Ce minéral, de morphologie variée, se présente souvent en cristaux tabulaires, prismatiques ou pyramidaux. Ces cristaux se maclent sur (112) par contact ou interpénétration souvent répétés. On le rencontre également sous forme massive ou poussiéreuse. Sa cassure est conchoïdale.

Propriétés. Dureté : $1\frac{1}{2}$; densité : 7,15. Transparent; l'éclat, adamantin, est bicolore à blanc, blanc grisâtre ou jaunâtre. Le calomel est rouge brique fluorescent à la lumière ultraviolette.

Gisements. Ce minéral secondaire est formé par altération du cinabre, de l'amalgame et autres minéraux contenant du mercure et il est associé au mercure natif, au cinabre et à la calcite. De beaux échantillons proviennent d'Obermoschel (Allemagne).

Fluorite, CaF_2 - cubique

Son nom dérive du latin *fluor :* écoulement. C'est le fluorure le plus répandu dans la nature. Les cristaux sont fréquents. La fluorite est souvent cubique, plus rarement en rhombododécaèdres ou octaèdres (ces trois formes pouvant se combiner) ; elle montre des groupements polysynthétiques fréquents et une macle par interpénétration après rotation de 180° autour de l'axe ternaire. Le clivage est parfait suivant les faces de l'octaèdre (111).

Propriétés. Dureté : 4 (elle définit le degré 4 de l'échelle de Mohs) ; densité : 3,18; indice de réfraction très bas : 1,43. La fluorite est transparente avec un éclat vitreux; elle présente une gamme de couleurs très étendue (bleu, rose, vert, jaune, violet) et montre parfois une dichromie très nette en bandes de croissance. Fluorescente aux rayons ultraviolets, phosphorescente à la chaleur, elle décrépite et émet de la lumière au chalumeau et fond assez facilement en émail blanc.

Signes distinctifs. Son clivage octaédrique parfait, son indice de réfraction bas lui donnant un éclat vitreux, et sa dureté permettent de la reconnaître. Elle est entièrement soluble dans l'acide sulfurique, donnant alors de l'acide fluorhydrique qui corrode le verre.

Gisements. La fluorite est fréquente dans les filons hydrothermaux, en association avec divers sulfures, et dans les filons de pegmatite ainsi que les dépôts pneumatolytiques avec l'apatite, la cassitérite, la topaze, la tourmaline, etc. On la rencontre aussi comme produit de sublimation dans les roches volcaniques, dans certaines roches sédimentaires (calcaires, dolomies) et dans les roches éruptives acides. Les gisements sont nombreux : Weardale, Durham et Alston-Moor (Cumberland) ont produit de magnifiques groupes verts ou violets répandus dans tous les musées. En Allemagne, on peut citer Wölsendorf (Bavière) pour les cubes verts, violacés, bruns ou jaunes, puis Segen Gottes, Gersdorf et Beibille en Saxe (jaunes, bleus). En Espagne, de gros cubes polysynthétiques proviennent des Asturies (verts, bleus, violets) et de grands cristaux bleu pâle de 30 cm ont été extraits à Collada. Aux États-Unis, les deux gîtes classiques de Bacomb (New York), où l'on trouve les grands cristaux vert pâle, et de l'Illinois (violet foncé ou bleu) sont les plus connus par les collectionneurs. C'est à Peyrebrune (Tarn) que l'on a trouvé le plus gros cristal connu dans le monde, il a été déposé au Muséum de Paris. De nombreuses mines du Massif central donnent ou ont donné de splendides groupes de toutes couleurs : bleu pâle au Beix (Puy-de-Dôme) ; bleu-vert à Langeac (Haute-Loire) ; violet et vert à Chavagnac (Haute-Loire), etc. Les octaèdres roses, associés au quartz fumé des fentes alpines, sont parmi les associations les plus recherchées des collectionneurs.

Muséum d'histoire naturelle, Paris

▲ *Cristaux de fluorite provenant de Peyrebrune (Tarn) et conservés au Muséum national d'histoire naturelle de Paris; ce minéral est le fluorure le plus répandu dans la nature.*

Yttrofluorite, $(CaY)F_2$ - cubique

L'yttrofluorite est une variété de fluorite contenant de l'yttrium en substitution du calcium. Cette variété contient également du césium mais en plus faible quantité. Elle est massive ou grenue.

Propriétés. La dureté et la densité sont quelquefois plus grandes que celles de la fluorite. La couleur est jaune, brune, violette ou bleue.

Gisements. Il existe quelques gisements en Norvège.

Fluocérite, $(Ce, La, Nd)F_3$ - hexagonal

Elle se présente en cristaux prismatiques ou tabulaires, mais aussi sous forme massive ou grossièrement grenue; sa cassure est subconchoïdale à inégale.

Propriétés. Dureté : 4 à 5; densité : 6,14 pouvant décroître jusqu'à 5,7. La fluocérite est transparente à translucide; l'éclat, vitreux à résineux, est quelquefois perlé sur les faces de clivage. De couleur jaune de cire pâle quand elle est fraîche, la fluocérite devient jaunâtre ou rougeâtre.

Gisements. On la trouve surtout dans les pegmatites; de beaux échantillons se rencontrent à Brodbo (Suède).

Cryolithionite, $Na_3Li_3Al_2F_{12}$ - cubique

Minéral peu fréquent, la cryolithionite se présente en cristaux dodécaédriques. Elle est fragile et sa cassure est inégale à subconchoïdale.

Propriétés. Dureté : $2\frac{1}{2}$ à 3; densité : 2,77. Elle est transparente; l'éclat vitreux est incolore à blanc.

▼ *Représentation schématique de la structure de la fluorite : les boules noires représentent les atomes de calcium, les boules blanches, les atomes de fluor.*

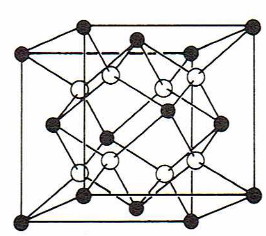

I.G.D.A.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

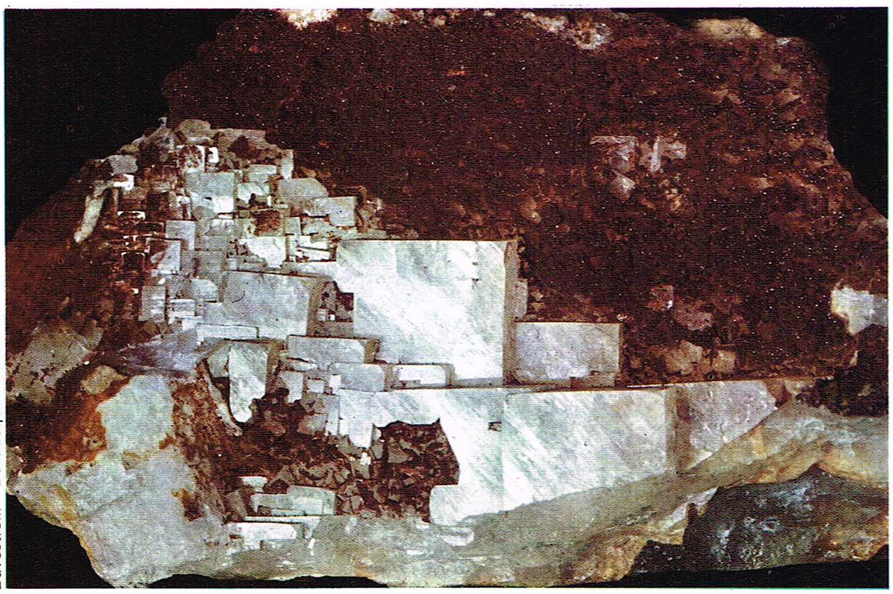

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

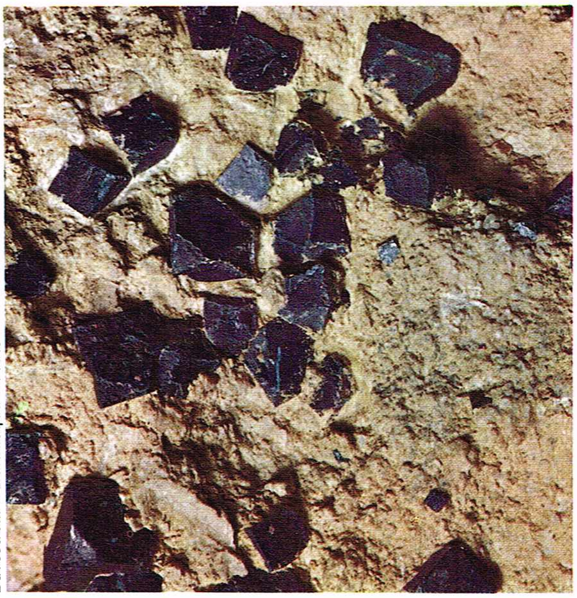

▲ *A gauche, un très beau groupement de cristaux de cryolite provenant d'Ivigtut (Groenland) où se trouve le plus grand gisement de ce minéral. A droite, cristaux de boléïte provenant de Boleo (Mexique)* [*Londres, British Museum*].

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ *Cristaux aciculaires* de connelite, *disposés en groupes radiés, provenant de Wheal Damsel, Cornwall (Londres, British Museum).*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ *Cristaux de* pachnolite *provenant des pegmatites d'Ivigtut (Groenland).*

Gisements. Ce minéral se trouve intimement associé à la cryolite dans les pegmatites d'Ivigtut (Groenland), où les cristaux peuvent atteindre 15 cm.

Cryolite, Na_3AlF_6 - monoclinique

Le nom de cryolite vient du grec « pierre de glace » à cause de la blancheur de ses cristaux, qui fondent à la simple chaleur de la flamme d'une bougie. Elle est habituellement massive ou grossièrement grenue. Les cristaux sont ordinairement cuboïdaux ou en prismes allongés. Les macles, fréquentes, sont souvent polysynthétiques, ce qui donne la pseudosymétrie cubique. La cassure est inégale et elle est fragile.

Propriétés. Dureté : 2 ½ ; densité : 2,97. L'éclat, vitreux à gras, quelquefois perlé sur (001), est incolore à blanc ; sa couleur peut aussi être brunâtre à rouge brique.

Gisements. Il existe de grands gisements pegmatitiques à Ivigtut dans le fjord d'Arksuk à l'ouest du Groenland. Les principaux minéraux associés sont la microcline, la sidérite, le quartz, la fluorite et également quelques sulfures tels que la pyrite, la galène, etc.

Creedite, $Ca_3Al_2F_4\ (OHF)_6\ (SO_4)\ H_2O$ - monoclinique

Les cristaux sont prismatiques, courts à aciculaires. La creedite se présente souvent en agrégats radiés ressemblant à la structure de la wavellite, ou bien de façon massive, ayant l'aspect de verrues. Elle se clive parfaitement suivant (100) ; elle est fragile et sa cassure est conchoïdale.

Propriétés. Dureté : 4 ; densité : 2,713. Transparente ; l'éclat, vitreux, est incolore à blanc ou rarement pourpre.

Gisements. Ce minéral se rencontre principalement dans les filons de quartz, de fluorite et de baryte. De beaux échantillons se trouvent à Santa Eulalia, Chihuahua (Mexique) et à Catavi, La Paz (Bolivie).

Thomsenolite, $NaCaAlF_6H_2O$ - monoclinique

Les cristaux de thomsenolite sont habituellement prismatiques ; ils sont aussi tabulaires, mais souvent ils se présentent sous un aspect cubique. On trouve également ce minéral en encroûtements comme la calcédoine, ou en masses stalactiformes. La thomsenolite se clive parfaitement sur (001) ; elle est fragile et sa cassure est inégale.

Propriétés. Dureté : 2 ; densité : 2,98. Transparente à translucide ; son éclat vitreux est incolore à blanc avec parfois des nuances brunâtres ou rougeâtres lorsqu'elle contient des inclusions d'oxyde de fer.

Gisements. Le principal gisement est celui d'Ivigtut au Groenland.

Pachnolite, $NaCaAlF_6H_2O$ - monoclinique

Ce minéral se présente également en masses clivables ou grenues, ou encore en masses stalactitiques ayant un aspect de calcédoine ; ses cristaux sont prismatiques avec des extrémités habituellement acérées. La pachnolite se macle communément sur (100), donnant aux cristaux une apparence orthorhombique. Elle est fragile et sa cassure est inégale.

Propriétés. Dureté : 3 ; densité : 2,98. Transparente à translucide ; son éclat est vitreux, incolore à blanc.

Gisements. On la trouve comme produit d'altération de la cryolite dans les pegmatites d'Ivigtut (Groenland).

Ralstonite, $Na(MgAl_5)_6F_{12}(OH)_6\ 3\ H_2O$ - cubique

Ce minéral se présente en cristaux octaédriques et, moins fréquemment, en cubo-octaèdres. Il est fragile et sa cassure est inégale.

Propriétés. Dureté : 4 ½ ; densité : 2,56 à 2,62 (variant avec la composition). Transparent à translucide ; son éclat vitreux est incolore à blanc laiteux, souvent coloré superficiellement en jaune par de l'oxyde de fer.

Gisements. La ralstonite est associée à la thomsenolite dans les cavités de la cryolite des pegmatites d'Ivigtut (Groenland).

Carnallite, $KMgCl_3\ 6\ H_2O$ - orthorhombique

Ordinairement massive ou grenue, la carnallite se présente parfois en cristaux pseudo-hexagonaux, de forme pyramidale, ou quelquefois en cristaux tabulaires épais. Sa cassure est conchoïdale et des macles lamellaires secondaires peuvent s'être développées par pression.

Propriétés. Dureté : 2 à 2 ½ ; densité : 1,602 ; transparente à translucide. Son éclat gras, terne à brillant, est incolore à blanc laiteux ou souvent avec un éclat métallique rougeâtre dû à des inclusions orientées d'écailles d'hématite.

Gisements. Elle se rencontre associée à la sylvite, la halite et plus particulièrement la kiesérite dans les couches supérieures des gisements salins de type marin. De beaux spécimens se trouvent à Beienrode (Hanovre).

Atacamite, $Cu_2(OH_3)Cl$ - orthorhombique

Ce minéral secondaire se présente communément en agrégats cristallins, confus, mais aussi en masses fibreuses, grenues ou compactes. Le clivage suivant {010} est parfait. L'atacamite est fragile et sa cassure est conchoïdale.

Propriétés. Dureté : 3 à 3½ ; densité : 3,76. Transparent à translucide ; éclat adamantin à vitreux, de couleur vert brillant (nuances variées).

Gisements. C'est un minéral formé dans des conditions arides et salines par l'oxydation d'autres minéraux de cuivre. On le trouve largement réparti dans la ceinture côtière aride du Chili et du Pérou, communément associé à la malachite, la cuprite, la brochantite, le gypse, etc. Les principaux gisements sont ceux d'Atacama (Chili), de Paposo (Mexique), de Bolivie, de Moonta et Walloroo (Australie). Les cristaux de plus de 3 cm sont rares.

Connelite, $Cu_{19}(SO_4)Cl_4(OH)_{32}3H_2O$ - hexagonal
Buttgenbachite $Cu_{19}(NO_3)_2Cl_4(OH)_{32}3H_2O$ - hexagonal

Les minéraux de cette série se présentent en cristaux de forme aciculaire, disposés en groupes radiés ou en agrégats feutrés.

Propriétés. Dureté : 3 ; densité : 3,36 pour la connelite et 3,33 pour la buttgenbachite. Translucide ; éclat vitreux d'un beau bleu azur.

Gisements. Les plus beaux échantillons proviennent de Lostwithiel et de Wheal Gorland (Cornouailles).

Percylite, $PbCuCl_2(OH)_2$

La percylite est massive ou en petits cristaux cubiques, parfois dodécaédriques.

Propriétés. Dureté : 2 ½ ; densité non connue. Transparente ; éclat vitreux.

Gisements. Ce minéral secondaire se rencontre en association avec la matlochite, la cérargyrite, la cérusite, l'anglésite et la limonite. Un gisement se trouve à Tarapaca (Chili).

Pseudoboléite, $Pb_5Cu_4Cl_{10}(OH)_8 \cdot 2H_2O$ - quadratique

C'est un minéral uniquement observé en croissance parallèle sur la boléite ; la pseudoboléite et la boléite sont toujours accolées sur leurs faces (001) ; la pseudoboléite se clive parfaitement sur {001}.

Propriétés. Dureté : 2½ ; densité : 4,85 ; Translucide ; l'éclat est perlé sur les faces de clivage et sa couleur bleu indigo ressemble beaucoup à celle de la boléite.

Gisements. La pseudoboléite se trouve en association avec la boléite et la cumengéite à Boleo près de Santa Rosalia (Mexique).

Boléite, $Pb_9Cu_8Ag_3Cl_{21}(OH)_{16}2H_2O$ - quadratique

Les cristaux souvent associés à la cumengéite et à la pseudoboléite sont de forme cubique et sont composés chacun de trois individus formant les faces pseudo-cubiques ; la boléite se présente également en cristaux pseudocubo-octaédriques et pseudo-dodécaédriques et elle se clive parfaitement suivant {001}.

Propriétés. Dureté : 3 à 3 ½ ; densité : 5,05. Translucide ; l'éclat vitreux, perlé sur les faces de clivage, est bleu de Prusse foncé, déclinant au bleu noirâtre sur les faces des cristaux.

Gisements. Ce minéral secondaire a été trouvé originellement à Boleo, près de Santa Rosalia (Mexique), d'où proviennent les plus beaux échantillons connus.

Cumengéite, $Pb_4Cu_4Cl_8(OH)_8H_2O$ - quadratique

Elle se présente en cristaux octaédriques ou cubo-octaédriques et croît parallèlement aux cristaux de boléite et pseudoboléite en les enveloppant, parfois complètement.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *A gauche, cristaux allongés de* laurionite *associés à de petits cristaux de phosgénite (Laurion, Grèce). A droite, cristaux de* matlockite *provenant de Cromford (Derbyshire) [Londres, British Museum].*

Propriétés. Dureté : 2 ½; densité : 4,67. Translucide; éclat faiblement vitreux, bleu indigo.
Gisements. Ce minéral se rencontre en association avec la boléïte et la pseudoboléïte à Boleo, près de Santa Rosalia (Mexique).

Fiedlérite, $Pb_3(OH)_2Cl_4$ - monoclinique

Les cristaux, de contour rectangulaire, sont tabulaires sur (001) et allongés selon [010]; leurs faces ne sont généralement pas belles. Ils se maclent communément sur (100).
Propriétés. Dureté : environ 3 ½; densité : 5,88. Transparente; éclat adamantin, incolore à blanc.
Gisements. Comme la laurionite ou la penfieldite, on la trouve au Laurium (Grèce), où elle est formée par action de l'eau de mer sur d'anciennes scories de plomb exploitées dans l'Antiquité par les Grecs.

Laurionite, $Pb(OH)Cl$ - orthorhombique

La laurionite, dont le nom provient de la localité du Laurium où elle a été découverte, se présente en cristaux allongés ou bien tabulaires, plus ou moins épais.
Propriétés. Dureté : 3 à 3 ½; densité : 6,24. Éclat adamantin, perlé sur (100), incolore à blanc.
Gisements. Elle se trouve dans les scories de plomb qui ont été exposées à l'action de la mer du Laurion, en Grèce; elle est associée à la paralaurionite, la penfieldite, la phosgénite, la cérusite, l'anglésite et d'autres minéraux secondaires de plomb. Ces mines du Laurium étaient exploitées par les Athéniens à l'époque de Périclès pour le plomb et plus particulièrement pour l'argent.

Cotunnite, $PbCl_2$ - orthorhombique

Les cristaux ont une forme plus ou moins aplatie suivant (010) et allongée selon [001]. La cotunnite est aussi massive ou grenue, souvent en association avec la galène. Elle se clive parfaitement selon (010) et sa cassure est subconchoïdale.
Propriétés. Dureté : 2 ½; densité : 5,80. Transparente à translucide; l'éclat est adamantin à perlé ou soyeux; incolore à blanche, elle peut aussi être jaunâtre ou verdâtre.

Matlockite, $PbFCl$ - quadratique

Les cristaux, habituellement tabulaires, ont souvent aussi une forme pyramidale et trapue; ils se regroupent parfois en agrégats subparallèles de cristaux plats ou en rosettes. Ce minéral se rencontre aussi sous forme massive, grossièrement lamellaire. Il se clive parfaitement selon {001} et sa cassure est inégale à subconchoïdale.
Propriétés. Dureté : 2 ½ à 3; densité : 7,12. Transparent; éclat adamantin, tendant à l'éclat perlé sur les faces de clivage; incolore, jaune ambre pâle ou verdâtre.
Gisements. On trouve la matlockite à Cromford, près de Matlock (Derbyshire), associée à la phosgénite, l'anglésite, la cérusite, la galène, la sphalérite et la fluorite.

Penfieldite, $Pb_2(OH)Cl_3$ - hexagonal

Les cristaux, habituellement très petits et allongés, disposés en groupes parallèles, sont prismatiques ou pyramidaux; il existe également des cristaux tabulaires sur (001).

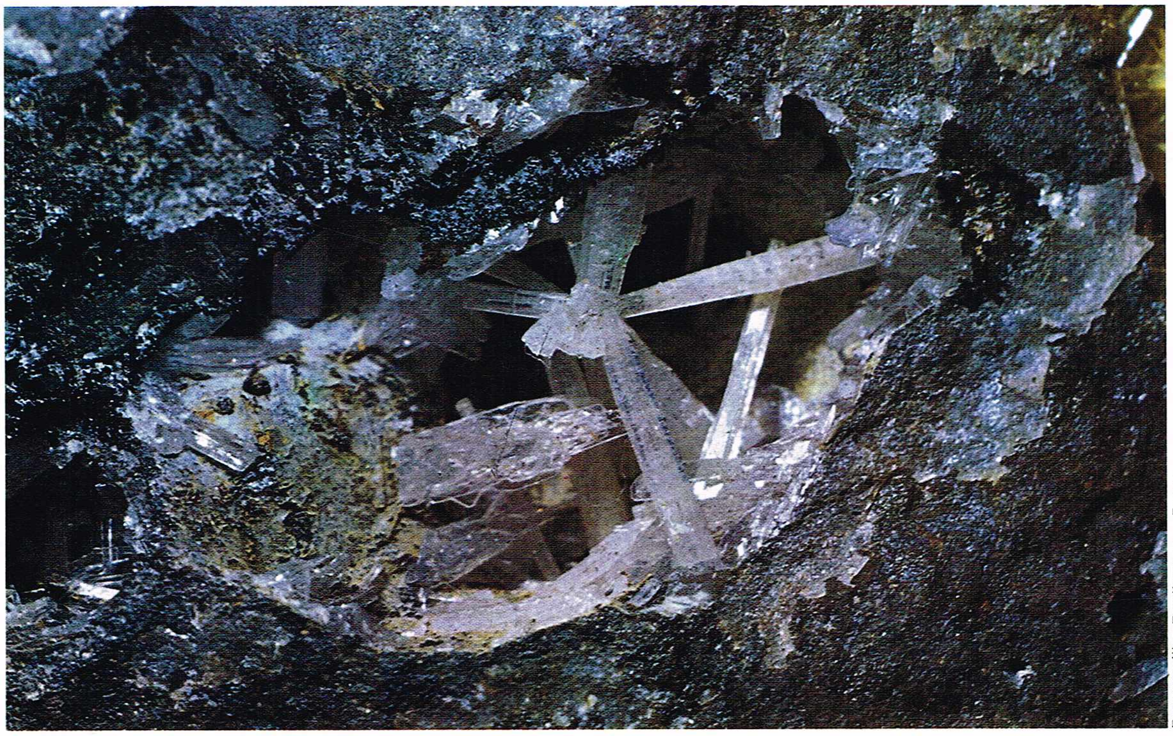

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ *Cristaux de* penfieldite *(Laurion, Grèce); ce minéral, associé à la laurionite et à la fiedlérite, est formé par l'action de l'eau de mer sur les anciennes scories de minerai de plomb exploité dans l'Antiquité.*

Propriétés. Densité : 6,61. Transparente ; éclat adamantin à gras, incolore, blanc ou teinté en jaunâtre ou bleuâtre par des impuretés.

Gisements. On trouve la penfieldite associée à la laurionite, la fiedlérite au Laurium (Grèce), où elle est formée par l'action de l'eau de mer sur les anciennes laves de plomb.

Nadorite, $PbSbO_2Cl$ - orthorhombique

Les cristaux sont tabulaires ou prismatiques allongés ; on les rencontre aussi sous forme lenticulaire au contour carré ou octogonal. Ce minéral se clive parfaitement selon {010}.

Propriétés. Dureté : $3\frac{1}{2}$ à 4 ; densité : 7,02. Translucide ; éclat résineux, brun foncé ou jaune brunâtre à jaune.

Gisements. On rencontre de belles nadorites à Hamman-N'Bails (Algérie).

Ecdémite, $Pb_3AsO_4Cl_2$ - quadratique

L'ecdémite forme des masses grossièrement feuilletées ou bien de petits cristaux tabulaires.

Propriétés. Dureté : $2\frac{1}{2}$ à 3 ; densité : 7,14. Translucide ; l'éclat est vitreux sur les faces de clivage et gras sur les cassures ; sa couleur va du jaune verdâtre au jaune.

Gisements. Un beau gisement est situé à Collistein Aiger (Arizona).

Oxydes

Cuprite, Cu_2O - cubique

La cuprite, dont le nom est une allusion à sa composition, se présente en cristaux octaédriques, dodécaédriques ou cubiques, ces trois formes pouvant se combiner pour donner des cristaux très modifiés. La variété *chalcotrichite* est fibreuse ; les cristaux rouge vif sont allongés selon [001]. La cuprite est souvent massive ou grenue.

Propriétés. Dureté : $3\frac{1}{2}$ à 4 ; densité : 6,14. C'est un minéral fragile, et sa cassure est conchoïdale à inégale. L'éclat est adamantin à submétallique. La couleur est rouge aux tonalités variées (plus particulièrement rouge cochenille) ; elle est quelquefois presque noire ; la variété terreuse *(hydrocuprite)* est rouge brique ou brun rougeâtre.

Gisements. La cuprite est un minéral commun aux zones d'oxydation des gisements de cuivre ; souvent impure, elle contient des oxydes de fer, des argiles ferrugineuses, de la ténotite et de la limonite. Les principaux gisements sont ceux de Cornwall à Redruth (Angleterre), de Tsumeb (Afrique du Sud), des monts Oural ainsi que ceux d'Ekaterinbourg et de Sverdlovsk (U.R.S.S.), et, enfin, celui de Chessy dans le Rhône qui a donné les cristaux isolés, recouverts de malachite, que l'on voit dans toutes les collections.

Zincite, ZnO - hexagonal

Rarement cristallisée, la zincite se présente généralement sous forme massive feuilletée, compacte ou grenue. Les rares cristaux naturels, souvent corrodés, sont pyramidaux hémimorphiques avec une grande base {0001} ; la zincite se macle sur {0001} et se clive sur {10$\bar{1}$0}.

Propriétés. Dureté : 4 ; densité : 5,66. Transparente en fine épaisseur ; éclat adamantin jaune-orangé à rouge foncé, rarement jaune ; fragile, sa cassure est conchoïdale.

Gisements. La zincite est rare sauf dans les deux importants gisements de Franklin East Sterling Hill à New Jersey, où elle se trouve en petite quantité, associée à la willemite et la franklinite dans la calcite.

Massicot, PbO - orthorhombique

Le massicot est habituellement massif, terreux à écailleux. Les cristaux sont flexibles mais non élastiques.

Propriétés. Dureté : 2 ; densité : 9,56. Transparent en très faible épaisseur ; éclat gras à terne ; couleur située entre le jaune de l'orpiment et celui du soufre, avec quelquefois une nuance rougeâtre.

Gisements. C'est un produit d'oxydation de la galène et d'autres minéraux primaires de plomb. On le rencontre souvent associé à la cérusite et à d'autres minéraux secondaires de plomb et de cuivre, à la limonite et à des oxydes d'antimoine. Il peut facilement être confondu avec des minéraux jaune ocre de plomb ou d'antimoine. Ses gisements les plus classiques sont ceux de Cornouailles (Grande-Bretagne).

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Cristaux lenticulaires*** **de nadorite** ***provenant du Djebel Nador (Algérie), localité qui a donné son nom à ce minéral.***

Spinelle, Al_2MgO_4 - cubique
Gahnite, Al_2ZnO_4 - cubique

Ces deux minéraux forment une série continue ; leurs cristaux sont habituellement de forme octaédrique et plus rarement cubique ou dodécaédrique. Le spinelle et la gahnite se présentent aussi sous forme massive, grossièrement grenue à compacte, et en grains inclus dans la roche, irréguliers ou arrondis. Les cristaux se maclent suivant la *loi du spinelle ;* les agrégats maclés sont souvent aplatis parallèlement au plan d'accolement (111). Ces minéraux sont fragiles ; leur cassure est conchoïdale, quelquefois inégale à esquilleuse.

Propriétés. Dureté : $7\frac{1}{2}$ à 8 ; la densité est fonction du rapport Mg/Zn : 3,55 pour le spinelle (Mg) et 4,62 pour la gahnite (Zn). Indice de réfraction : 1,72 (pour le spinelle) à 1,79 (pour la gahnite) ; il croît avec la teneur en Zn. De couleur variable : rouge (très recherché comme gemme) à bleue, verte, brune ou presque incolore pour

▼ **Chalcotrichite,** ***variété de*** **cuprite** ***en cristaux aciculaires, rouges (Fowey Consols, Tywardreath [Cornwall] - Londres, British Museum).***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Archives Photo B

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *A gauche, un beau cristal de franklinite provenant de Franklin (New Jersey, États-Unis) [Londres, British Museum]. A droite, cristaux de magnétite de Traversella (Piémont) [collection privée].*

▶ *Cristal pseudo-octaédrique de haussmannite, provenant de Langban (Suède) [Londres, British Museum].*

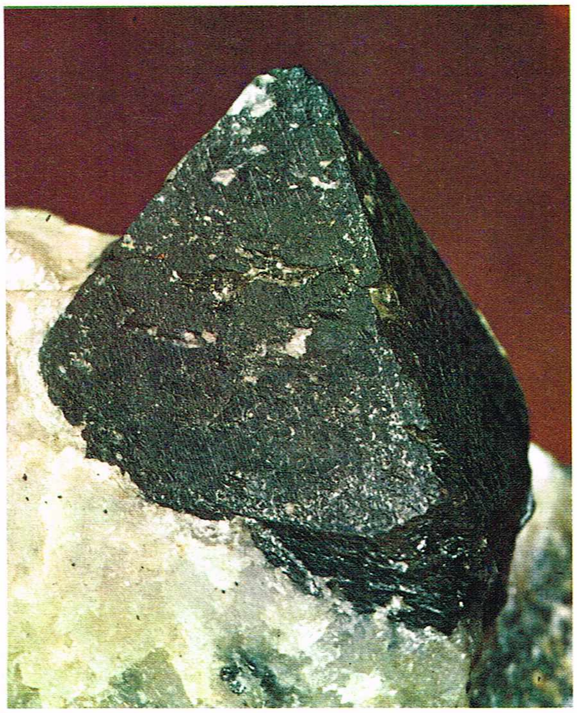

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▼ *Cristaux de spinelle bleu provenant de Franklin (New Jersey) [Londres, British Museum].*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

le spinelle, tandis que la gahnite est habituellement vert foncé, quelquefois jaune ou brune ; l'éclat est métallique brillant à presque terne pour la gahnite ; les membres de la série riches en magnésium sont plus transparents.

Gisements. Les cristaux de la série du spinelle sont essentiellement des minéraux de haute température. On les trouve principalement comme minéraux accessoires des roches ignées, ainsi que dans les schistes alumineux, très métamorphiques, dans les gisements calcaires de métamorphisme de contact et dans les pegmatites. Les plus beaux échantillons viennent de Betroka, Ampandrandava et Amlodroube (Madagascar), et de Fahlun (Suède). Les variétés gemmes viennent de Birmanie et de Ceylan. Le plus grand cristal connu (103 kg) est conservé par l'École des mines de Paris.

Le *pléonaste* (spinelle ferrique) se trouve à Monroe (New York).

Le *dysluite* (gahnite ferrique) se trouve à la mine de Sterling (New Jersey).

Série de la magnétite
Magnésioferrite, $MgFe_2O_4$ - cubique
Magnétite, Fe_3O_4 - cubique
Franklinite, $ZnFe_2O_4$ - cubique

Les cristaux sont habituellement octaédriques ; la magnétite est parfois dodécaédrique ; la magnésioferrite est rarement cristallisée. Généralement, on les rencontre sous forme massive, finement à grossièrement grenue. Ces cristaux se maclent suivant la loi du spinelle : plan d'accolement (111).

Propriétés. Dureté : $5\frac{1}{2}$ à $6\frac{1}{2}$; densité : 4,6 pour la magnésioferrite, 5,17 pour la magnétite et 5,1 pour la franklinite. Éclat métallique à semi-métallique, brillant à presque terne ; couleur noire à noir brunâtre. La magnétite est un bon conducteur de l'électricité.

Gisements. La magnétite est l'un des oxydes les plus abondants et les plus répandus. Elle peut constituer des minerais de fer importants, comme à Kirunavaara (Suède) ; on les rencontre comme minéraux accessoires des roches ignées, en association avec l'apatite et le pyroxène dans les gisements de ségrégation et dans les roches métamorphiques telles que les calcaires (où ils sont associés au grenat, au diopside, à l'olivine et à certains sulfures). La magnétite se rencontre dans les alluvions. Les échantillons de magnétite les plus appréciés par les collectionneurs sont ceux des fentes alpines provenant de Zermatt, du Binnenthal dans le Valais (Suisse), et de Brosso et Traversella dans le Piémont (Italie). De beaux échantillons viennent également du Minas Gerais (Brésil). Les plus beaux échantillons de franklinite qu'on peut voir dans les musées sont ceux de Franklin Furnace (New Jersey).

Magnésiochromite, $MgCr_2O_4$
Chromite, $FeCr_2O_4$

La magnésiochromite se rencontre rarement en cristaux ; les cristaux de chromite, moins rares, sont généralement des octaèdres, parfois modifiés par les faces du cube. La magnésiochromite et la chromite sont habituelle-

ment massives, finement grenues à compactes ; elles sont fragiles et leur cassure est inégale.

Propriétés. Dureté : 5 ½ (pour la chromite) ; densité : 4,2 pour la magnésiochromite et 4,5 à 4,8 pour la chromite. Transparentes en très fine épaisseur; éclat métallique noir; quelquefois magnétite.

Gisements. La chromite est un minéral accessoire des péridotites. On la rencontre également en ségrégation dans les péridotites, où elle forme une source valable de minerai. Elle se rencontre en outre dans les météorites. La chromite est fréquemment associée à l'olivine, au pyroxène, au spinelle, à l'idocrase chromifère et à quelques sulfures. Deux gisements importants sont ceux de Tiebaghi (Nouvelle-Calédonie) et de Sparte Becspoort (Transvaal).

Haussmannite, $MnMn_2O_4$ - quadratique

Les cristaux de haussmannite sont pseudo-octaédriques avec des faces (103) planes et brillantes et des faces (001) ternes et striées. Elle se clive presque parfaitement sur {001}, et la macle sur le plan (112) se répète souvent 5 fois ; elle est fragile, et sa cassure est inégale ; elle est souvent massive.

Propriétés. Dureté : 5 ½ ; densité : 4,84. Transparente quand l'épaisseur est extrêmement fine ; éclat submétallique noir brunâtre.

Gisements. Ce minéral se rencontre typiquement dans les filons hydrothermaux de haute température, mais aussi comme minéral de métamorphisme de contact associé à la braunite, la magnétite, l'hématite, la baryte, la pyrolusite et au psilomélane.

Deux gisements importants sont ceux d'Ilmeneau (Allemagne) et Mina Gerais (Brésil).

Minium, Pb_3O_4

Le minium ne se rencontre que sous forme massive, terreuse ou pulvérulente. Les cristaux n'existent qu'à l'échelle microscopique.

Propriétés. Dureté : 2 ½ ; densité : 8,9 à 9,2. Éclat un peu gras à terne ; rouge-écarlate à rouge brunâtre, avec quelquefois une teinte jaune.

Gisements. Ce minéral secondaire se rencontre en petite quantité dans de nombreuses localités, habituellement comme produit d'altération de la galène et de la cérusite. Le principal gisement est celui de Leadville (Colorado).

Chrysobéryl, $BeAl_2O_4$ - orthorhombique

Les cristaux sont habituellement simples et tabulaires ; parfois, ils peuvent être prismatiques courts. Ils sont striés sur (001), parallèlement à la direction [100], et se maclent par contact ou par pénétration en donnant des groupements à angles rentrants ou pseudo-hexagonaux.

Le chrysobéryl a deux variétés très recherchées comme gemmes : l'*alexandrite,* rouge à la lumière électrique, verte à la lumière du jour, et l'*œil-de-chat,* qui présente un chatoiement très particulier composé d'une bande lumineuse argentée qui se meut entre deux zones jaune et vert pâle.

Propriétés. Dureté : 8 ½ ; densité : 3,7. Transparent à opaque ; indice de réfraction : 1,74 à 1,75 ; biréfringence faible : 0,009. Éclat vitreux, couleur jaune, vert pâle à vert foncé (très pléochroïque) et vert-jaune. Il est fragile, avec une cassure conchoïdale, un clivage assez bon sur (110). Insoluble dans les acides.

Sa grande dureté (8 ½) est l'un des critères de reconnaissance.

Gisements. On rencontre le chrysobéryl dans les granites, les pegmatites et les aplites, également dans les micaschistes et, rarement, dans les marbres dolomitiques. Le chrysobéryl se trouve comme minéral détritique avec : le diamant, le corindon, le grenat, et la cassitérite. Des pegmatites contenant du chrysobéryl, de l'almandin, du spinelle et du béryl existent à Schinderhübel, près de Marschendorf (Moravie). Il est également associé à l'hématite et au béryl dans les micaschistes de l'Oural. Les plus belles alexandrites viennent de cette dernière région (Takowaja) et de Ceylan, où l'on rencontre aussi l'œil-de-chat. De grands cristaux de chrysobéryl ont été trouvés au Minas Gerais (Brésil), à Madagascar et en Rhodésie.

Claudétite, As_2O_3 - monoclinique

La claudétite se présente en cristaux très aplatis sur (010), allongés suivant l'axe [001] et avec les formes

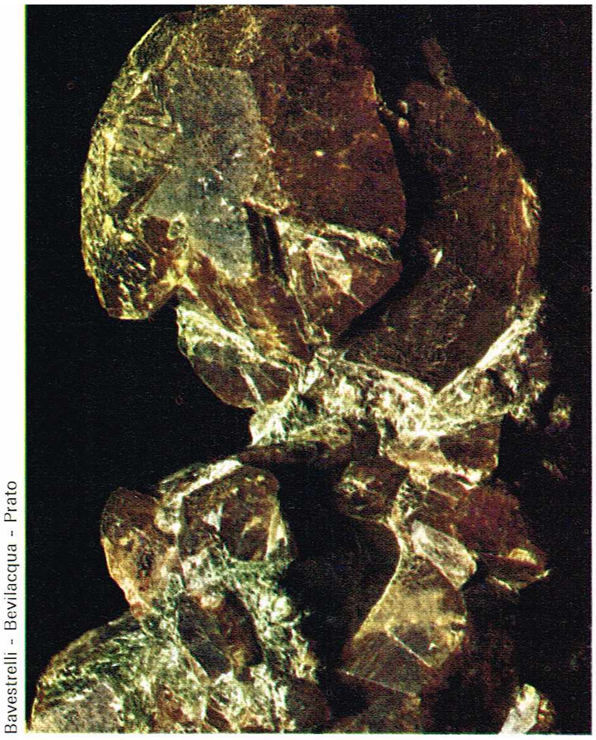

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

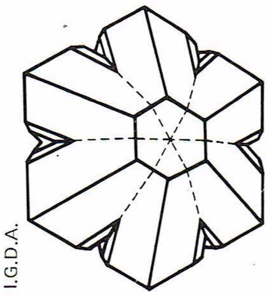

I.G.D.A.

◄▼ *Ci-contre, cristaux maclés d'*alexandrite, *variété de* chrysobéryl, *rouge à la lumière artificielle, provenant de Sverdlovsk (Sibérie). Ci-dessous, représentation schématique de cristaux maclés de* chrysobéryl.

{111} et {$\bar{1}$11} bien développées lui donnant l'aspect du gypse.

Propriétés. Dureté : 2 ½ ; densité : 4,15 ; indice de réfraction : 1,87 à 2,01 ; biréfringence forte. Transparente ; éclat vitreux, incolore à blanc et perlé sur les faces de clivage ; elle se clive parfaitement sur (010) ; elle est très flexible.

Gisements. Ce minéral secondaire est formé par oxydation du réalgar, de l'arsénopyrite et d'autres minéraux d'arsenic. Il est généralement associé à l'arsénolite, à l'orpiment, au réalgar et au soufre natif. On trouve de la claudétite bien cristallisée à Szomolnok (Hongrie).

Valentinite, Sb_2O_3 - orthorhombique

La valentinite se présente habituellement en cristaux prismatiques ou parfois tabulaires ; les cristaux ont souvent les faces striées, ce qui leur donne un aspect arrondi, formant fréquemment des agrégats étoilés ou en éventail. La valentinite est aussi massive, à structure lamellaire ou grenue.

Propriétés. Dureté : 2 ½ à 3 ; densité : 5,79 ; indice de réfraction : 2,18 à 2,55 ; biréfringence forte. Transparente ; éclat adamantin souvent perlé sur les faces de clivage ; couleur incolore à blanc de neige avec occasionnellement des nuances jaunâtres, rougeâtres ou gris de cendre à brunâtres. Elle est fragile et elle se clive parfaitement sur (110).

Gisements. C'est un minéral secondaire commun, résultant de l'oxydation de la stibine, de l'antimoine natif, de la kermésite, la tétraédrite et d'autres minéraux d'antimoine. On la trouve à Malaczka (Hongrie) et à Allertigang (Bohême), associée à des oxydes d'antimoine.

Arsénolite, As_2O_3 - cubique

L'arsénolite, dont le nom a été donné par allusion à sa composition, se présente en minuscules cristaux octaédriques ou bien en agrégats étoilés. Elle se trouve également sous forme botryoïdale, stalactitique ou en encroûtements terreux à pulvérulents.

Propriétés. Dureté : 1 ½ ; densité : 3,87 ; indice de réfraction : 1,755. Transparente ; éclat vitreux à soyeux blanc avec occasionnellement une nuance bleuâtre, jaunâtre ou rougeâtre. Sa cassure est conchoïdale. L'arsénolite est également reconnaissable par son goût astringent un peu sucré et sa très grande solubilité dans l'eau chaude.

Gisements. Ce minéral secondaire est formé par oxydation de l'arsénopyrite, l'arsenic natif, l'énargite, la tennantite, la smaltite et autres minéraux d'arsenic. Il est habituellement associé à la claudétite, l'érythrite, l'orpiment et au réalgar. On le rencontre aussi dans les gisements de charbon comme produit de sublimation après des incendies de mines. Freiberg (Allemagne) est l'une de ces localités les plus classiques.

Sénarmontite, Sb_2O_3 - cubique

La sénarmontite se présente en masses grenues, en encroûtements ou bien en cristaux de forme octaédrique.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Cristaux octaédriques de sénarmontite (provenant d'Ain Bobouche - Algérie), dont les plus gros cristaux connus sont conservés par le Muséum national d'histoire naturelle de Paris.*

Propriétés. Dureté : 2 à $2\frac{1}{2}$; densité : 5,50; indice de réfraction : 2,087. Transparente; éclat résineux à subadamantin, incolore à blanc grisâtre; fragile; cassure inégale.

Gisements. C'est un minéral secondaire formé par l'oxydation de la stibine, de l'antimoine natif et d'autres minéraux d'antimoine, et qui est généralement associé à la valentinite et à la kermésite. Un gisement important se trouve à Hamimate (Algérie).

Bismite, Bi_2O_3 - monoclinique

Cet oxyde se rencontre en masse compacte, grenue à terreuse ou même pulvérulente.

Propriétés. Dureté : $4\frac{1}{2}$; densité : 8,64 à 9,22 suivant les localités. Son indice de réfraction est d'environ 2,42 et sa biréfringence est élevée. Transparente en très petits fragments; l'éclat est adamantin à terne, la couleur vert grisâtre ou jaune verdâtre à jaune brillant; sa cassure est inégale.

Gisements. Ce minéral secondaire, formé par l'oxydation des minéraux de bismuth, se rencontre à Schneeberg (Saxe).

Bixbyite, $(Mn,Fe)_2O_3$ - cubique

Les cristaux, de forme cubique, sont parfois modifiés par les faces (111).

Propriétés. Dureté : 6 à $6\frac{1}{2}$; densité : 4,95. Opaque; éclat métallique à submétallique noir. Sa cassure est irrégulière.

Gisements. Les meilleurs échantillons sont des cristaux de 1 cm associés au diaspore manganésifère. Ils proviennent de Postmasbury (Afrique du Sud).

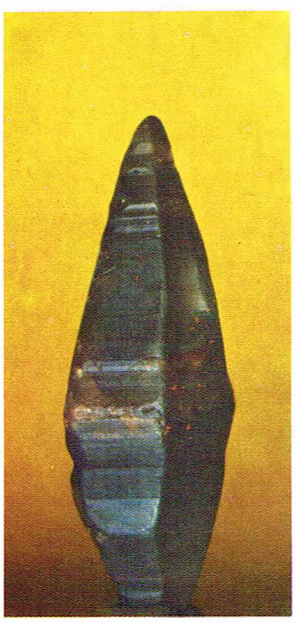

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Cristal de corindon, variété saphir, de forme trigonale bipyramidale, caractéristique, provenant de Ratnapura (Ceylan) [musée d'Histoire naturelle de Milan].*

Corindon, Al_2O_3 - rhomboédrique

Très anciennement connu en Orient, le corindon se rencontre en masse grenue ou lamellaire; ses cristaux sont fréquents et peuvent atteindre 100 kg. De faciès variés, prismes pseudo-hexagonaux allongés ou en « tonnelets », ou encore aplatis sur (0001), ils sont souvent irréguliers. Les cristaux suffisamment transparents et présentant une belle couleur sont des pierres précieuses très recherchées (rubis, saphir). L'émeri est un mélange de corindon avec de la magnétite, de l'hématite, du spinelle et du quartz.

Propriétés. Sa dureté sert à définir le degré 9 de l'échelle de Mohs; densité : 3,96 à 4,10; indices de réfraction : np = 1,77; ng = 1,76; biréfringence faible. Transparent à translucide; éclat vitreux à légèrement adamantin; les couleurs sont très variées : ce sont des traces de chrome, de titane et de fer qui sont responsables des diverses colorations. Le rubis est rouge, le saphir bleu; les corindons, de couleur jaune, rose, mauve, violette, etc., peuvent prendre le nom de saphir, suivi du nom de leur propre couleur (saphir jaune, saphir rose, etc.). La couleur est parfois répartie dans les cristaux de manière irrégulière; de fines inclusions de rutile peuvent provoquer un astérisme à six branches : une étoile lumineuse se manifestant à la surface des gemmes (rubis ou saphirs étoilés). Insoluble dans les acides et infusible, le corindon change de couleur à haute température mais retrouve sa couleur initiale en refroidissant.

Gisements. Le corindon provient de roches métamorphiques et cristallise dans des magmas pauvres en silice (syénite, péridotite). Très employé comme abrasif, l'émeri provient des roches magnésiennes magmatiques. Les variétés précieuses (rubis, saphirs) se rencontrent en place dans les calcaires métamorphiques en Birmanie, dans les amphibolites à anorthite et zoïsite chromifère en Tanzanie ou dans les basaltes en Australie et dans le Sud-Est asiatique. La plupart des gemmes sont exploitées dans les éluvions et alluvions qui dérivent de gîtes pyrométasomatiques, résultant d'une réaction entre des intrusions de magmas riches en Al_2O_3 et des roches basiques ou des calcaires au contact desquels ils se sont désilicifiés.

Hématite, Fe_2O_3 - rhomboédrique

L'hématite se présente souvent en cristaux tabulaires minces ou épais, en croissances souvent subparallèles ou en rosettes. Les faces sont fréquemment striées. La forme rhomboédrique $\{10\bar{1}1\}$ donne des cristaux pseudocubiques; il existe aussi une forme prismatique selon {0001}. L'hématite existe également sous forme compacte fibreuse, en masses réniformes et en concrétions. Elle est aussi communément terreuse (ocre) et associée à de l'argile et d'autres impuretés. Elle montre une macle par pénétration sur (0001) ou avec la face $(10\bar{1}0)$ comme plan d'accolement.

Propriétés. Dureté : 5 à 6; densité : 5,26; indices de réfraction : 2,69 à 2,90; biréfringence élevée. Translucide à opaque, éclat métallique à submétallique gris d'acier, quelquefois irisé pour les cristaux (hématite de l'île d'Elbe); éclat terne, rouge à rouge brillant pour les variétés terreuses. En fines lamelles, l'hématite est rouge sang foncé. Les cristaux sont fragiles et leur cassure est subconchoïdale à inégale; ils sont élastiques en fines lamelles (provenant souvent de fumerolles volcaniques). Le meilleur critère de reconnaissance est la trace rouge que ce minéral laisse sur la porcelaine dépolie.

Gisements. L'hématite se rencontre en dépôts très importants et constitue l'un des principaux minerais de fer : les gisements sont nombreux et leur mode de forma-

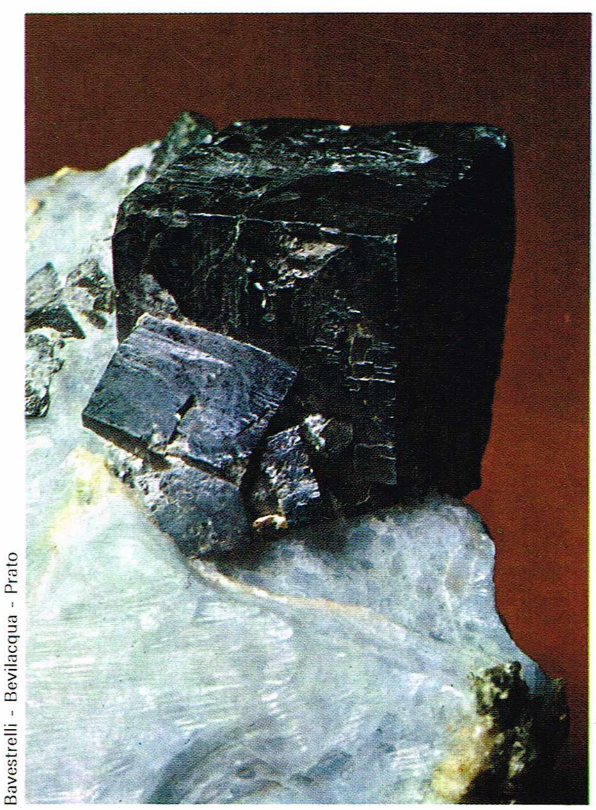

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

tion varié (fumerolles volcaniques, gîtes hydrothermaux, métasomatiques, sédimentaires, etc.). Les gisements les plus considérables sont de type sédimentaire (hématite rouge), les cristaux à éclat métallique se rencontrant dans des formations dues au métamorphisme régional ou au dynamométamorphisme. Les plus beaux cristaux connus viennent du Brésil et de l'île d'Elbe, où l'hématite est associée avec la pyrite en cristaux brillants parfois irisés. Les fentes alpines ont aussi produit de très fines cristallisations en rosettes de rhomboèdres aplatis, associés au rutile et au quartz. De belles masses mamelonnées noires et brillantes proviennent de Cornouailles et d'Azegour (Maroc).

Série de l'ilménite - rhomboédrique
Ilménite, $FeTiO_3$
Geikiélite, $MgTiO_3$
Pyrophanite, $MnTiO_3$

Les minéraux de cette série peuvent être massifs, compacts, ou bien cristallisés. Les cristaux sont habituellement tabulaires, épais (ilménite) à finement écailleux (pyrophanite) ; l'ilménite se présente parfois en rhomboèdres pointus.

Propriétés. Dureté : 5 à 6 ; densités : 4,72 pour l'ilménite, 4,05 pour la geikiélite et 4,54 pour la pyrophanite ; indices de réfraction : 1,95 à 2,31 pour l'ilménite, 2,21 à 2,48 pour la pyrophanite. Leur biréfringence est très forte ; éclat métallique à submétallique noir de fer (pour l'ilménite) à brun noirâtre (pour la geikiélite) ou rouge sang (pour la pyrophanite) ; leur cassure est conchoïdale à subconchoïdale.

Gisements. L'ilménite est un minéral accessoire commun des roches ; elle se rencontre principalement en association étroite avec les gabbros, les diorites, les anorthosites, en gisements filoniens ou disséminés, quelquefois importants, et dont l'origine est supposée être magmatique ou filonienne de haute température ; on la trouve dans les filons métallifères, les pegmatites, les quartz massifs et quelquefois en gisements étendus dans les sables noirs et lourds des plages. Il existe un important gisement dans les montagnes d'Ilmen à Miask (Oural), localité qui lui a d'ailleurs donné son nom. On en trouve également à Snarum et à Iröland (Norvège), et plus particulièrement à Krägero dans des filons de diorite, d'où proviennent les plus beaux échantillons des collections.

Pérovskite, $CaTiO_3$ - orthorhombique pseudocubique

Les cristaux sont habituellement cubiques, quelquefois très déformés, et leurs faces sont souvent striées parallèlement à (001) ou parfois à (110) ; ils se présentent également en cubo-octaèdres et octaèdres (pour les variétés contenant du cérium et du niobium). La pérovskite est rarement massive. Les variétés contenant Ce ou Nb se maclent fréquemment par pénétration sur (111).

Propriétés. Dureté : 5 ½ ; densité : 4,01 (elle augmente pour les variétés contenant Ce ou Nb) ; indice de réfraction : 2,34. Les échantillons de couleur foncée sont transparents en fines lamelles ; éclat adamantin, quelquefois terne ; couleur noire, noir grisâtre, noir brunâtre, brun rougeâtre avec des nuances jaunes. Les variétés contenant Nb sont noires et fragiles ; la cassure est inégale à subconchoïdale.

Gisements. On trouve la pérovskite en beaux cristaux dans les schistes chloriteux à Achmatowsk (U.R.S.S.), et en cristaux ou en masses réniformes dans les talcs-schistes du glacier de Findelen près de Zermatt (Suisse).

Dysanalite, (Ca,Na,Ce) (Ti,Nb,Fe) O_3 - orthorhombique pseudocubique

Ce titano-niobate de calcium se présente en cristaux cubiques.

Propriétés. Dureté : 5 à 6 ; densité : 4,1. Couleur noire.

Gisements. Un gisement important se trouve à Magnet Cove (Arkansas).

Stibiconite, $Sb_3O_6(OH)$ - cubique

La stibiconite est en général pulvérulente, massive, compacte, botryoïdale, ou en encroûtements concentriques.

Propriétés. Dureté : 4 à 5 ½ ; densité : 5,58 ; indice de réfraction : de 1,60 à 2,00 suivant les localités. Transparente ; éclat perlé, terreux, jaune pâle à blanc jaunâtre ou blanc rougeâtre.

Gisements. Ce minéral secondaire, souvent associé à la cervantite et à la valentinite, est formé par l'oxydation de la stibine et d'autres minéraux d'antimoine ; on trouve de beaux échantillons au Mexique.

Uran-pyrochlore, $(U, ...)_2(NbTaTi)_2O_6(O, OH, F)$ - cubique

Encore appelé hatchettolite, ce tantaloniobate d'uranium est proche du pyrochlore. Il se présente en cristaux octaédriques mais également sous forme massive.

Propriétés. Dureté : 5 ; densité : 4,8 ; indice de réfraction : 1,98. Transparent, éclat résineux brun jaunâtre ; cassure subconchoïdale.

Gisements. Le principal gisement est celui de Mitchell Co. en Caroline du Nord, où ce minéral est associé à la samarskite.

Microlite, $(NaCa)_2Ta_2O_6(O,OH,F)$ - monoclinique
Pyrochlore $(Ca,Na)_2(Nb,Ta)_2O_6(O,OH,F)$ - monoclinique

Les minéraux de cette série se présentent en cristaux octaédriques, souvent associés à d'autres formes telles que {011}, {113} ou {001}. Les cristaux de microlite peuvent atteindre 6 cm (Amélia) malgré leur nom, qui fut donné par allusion à la très petite taille des premiers cristaux trouvés. Le pyrochlore et la microlite existent aussi en masses irrégulières ou grenues.

Propriétés. Dureté : 5 à 5 ½ ; densité : 4,2 à 6,4 (croît avec la teneur en tantale) ; très variable, elle diminue lors de l'hydratation ou d'autres altérations et augmente quand on chauffe l'échantillon ; indice de réfraction : 2,00 à 2,20. Ces minéraux sont transparents sous faible épaisseur ; l'éclat est vitreux ou résineux sur la cassure. Le pyrochlore est brun à noir, souvent brun avec des nuances jaunâtres, rougeâtres ou noirâtres ; la microlite est jaune pâle à brune, quelquefois rouge hyacinthe, brun olive à verte.

Gisements. Le pyrochlore se rencontre typiquement dans les pegmatites provenant des roches alcalines et est associé au zircon, à l'apatite, l'ægyrite et à un grand nombre de minéraux non communs contenant Zr, Ti, Nb, Ta et des terres rares. C'est aussi un minéral accessoire des syénites néphéliniques, des calcaires métamorphiques au contact des roches alcalines. On trouve de beaux échantillons au Québec. La microlite se trouve typiquement dans les parties albitisées des granites à pegmatites.

Bétafite, $(U,Ca)_2(Ti,Nb,Ta)_2O_6(O,OH,F)$ - cubique

Les cristaux sont généralement octaédriques, souvent modifiés par la forme {011} ; ils sont quelquefois aplatis sur (011) ou (001) ou allongés selon les axes [001] ou [111].

Propriétés. Dureté : 4 à 5 ½ ; densité : 3,7 à 5 ; indice de réfraction : 1,915. Les fines lamelles sont transparentes ; éclat cireux à vitreux et même semi-métallique ; brun verdâtre ou jaune à noir suivant les variétés ; elle est fragile ; sa cassure est conchoïdale.

Gisements. La bétafite se trouve typiquement dans les granites et les pegmatites avec d'autres minéraux de terres rares. Elle est généralement associée à l'euxénite, la fergusonite, l'allanite, le zircon et le béryl. Les plus beaux échantillons se trouvent en très gros cristaux à Ambatolampykely (Madagascar), où il existe des groupes de plus de 30 kg.

Quartz, SiO_2 - rhomboédrique

C'est l'un des minéraux les plus répandus. On le rencontre très souvent en cristaux prismatiques à faces striées, terminés soit par une pyramide hexagonale plus ou moins régulière, soit par trois faces triangulaires montrant la symétrie ternaire. Il est fréquemment maclé par interpénétration ou rotation autour de l'axe ternaire ; les macles suivant le plan (1102) sont plus rares (l'angle des axes est de 84°34') ; les groupements polysynthétiques sont légèrement hélicoïdaux (quartz peignes). Massif, le quartz se rencontre aussi très souvent en groupements microcristallins.

Propriétés. Sa dureté sert à définir le degré 7 de l'échelle de Mohs ; densité : 2,65 ; indices de réfraction : ng = 1,533, np = 1,544 ; biréfringence faible. Transparent à opaque avec un éclat vitreux ; cassure conchoïdale. Le quartz a de nombreuses variétés de couleurs : le **cristal de roche**

▼ Cristal trigonal d'hématite provenant de Rio Marina (île d'Elbe).

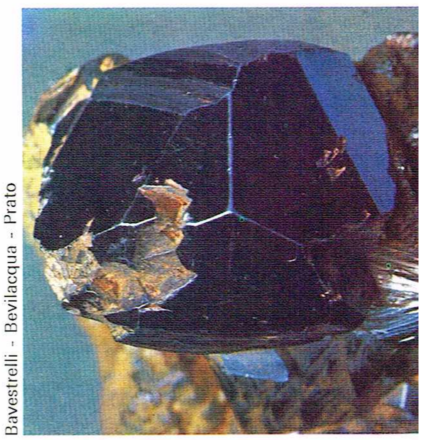

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ Page ci-contre, à droite, un beau cristal de pérovskite provenant des schistes chloriteux d'Achmatowsk (U.R.S.S.) [Londres, British Museum].

▼▶ ***Ci-dessous,*** *représentation schématique de deux cristaux de quartz maclés.* ***Ci-contre, à gauche,*** *cristaux de quartz brun provenant du val Giuf (Suisse) [musée d'Histoire naturelle de Milan].*

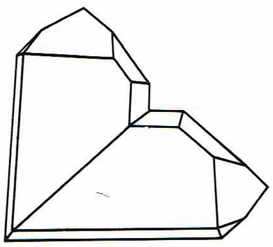

I.G.D.A.

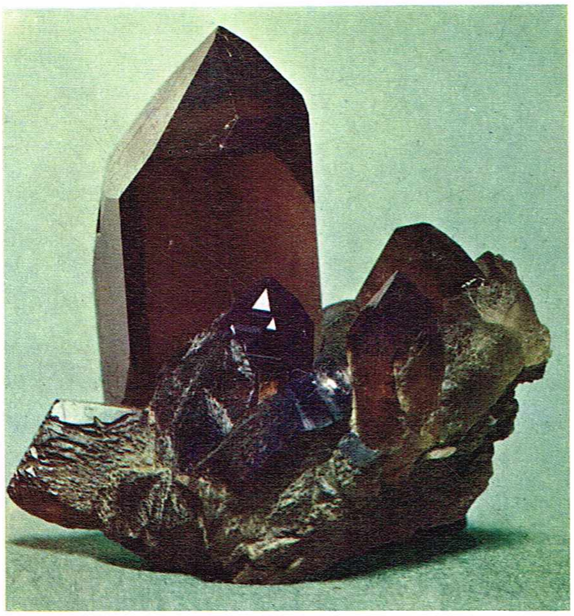

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ ***A droite,*** *quartz, limpide et transparent, provenant de l'Arkansas (États-Unis) [Muséum national d'histoire naturelle de Paris].*

Muséum d'histoire naturelle, Paris

est limpide et transparent ; le **girasol** est laiteux ; la **citrine** est jaune à orangée ; l'**améthyste** est violette ; la **prase** est verte ; le **morion** est noir ; l'**hématoïde** est rouge ; il peut également être rose, brun, bleuté, etc. Les variétés microcristallisées prennent le nom de **calcédoines** ; la **cornaline** est rouge, la **sardoine** brune, la **chrysoprase** est verte. Les **agates** sont des calcédoines finement zonées, l'**onyx** étant une agate à zonage plan utilisée pour la fabrication des camées. Les jaspes sont des calcédoines impures pouvant contenir jusqu'à 25 % d'argile ou d'hydroxydes de fer. Le **jaspe sanguin** est vert tacheté de rouge. Les quartz agates et jaspes peuvent montrer une multitude de combinaisons de couleurs.

Gisements. Le quartz est l'un des minéraux essentiels des roches éruptives, sédimentaires et métamorphiques ; c'est l'élément principal des sables. Ses cristaux se rencontrent dans les pegmatites et les filons hydrothermaux ; les calcédoines sont souvent d'origine secondaire ; on en trouve des concrétions dans les dépôts de sources thermales et dans les zones superficielles des filons ; l'agate, associée à l'améthyste, se rencontre dans les amygdales des roches basaltiques ; les jaspes sont d'origine sédimentaire. Les grands cristaux de quartz viennent du Brésil et Madagascar. Les plus beaux quartz filoniens viennent de La Gardette (Isère). Le Brésil et l'Uruguay sont les deux principaux producteurs d'améthyste et d'agate. De très belles variétés de quartz viennent également du Mexique, de l'Inde, des États-Unis et d'Afrique du Sud.

▼ ***A gauche,*** *opale précieuse, rouge, dite « opale de feu », provenant de Zimapan (Mexique).* ***A droite,*** *quartz améthyste provenant de Bolzano (Italie) [musée d'Histoire naturelle de Milan].*

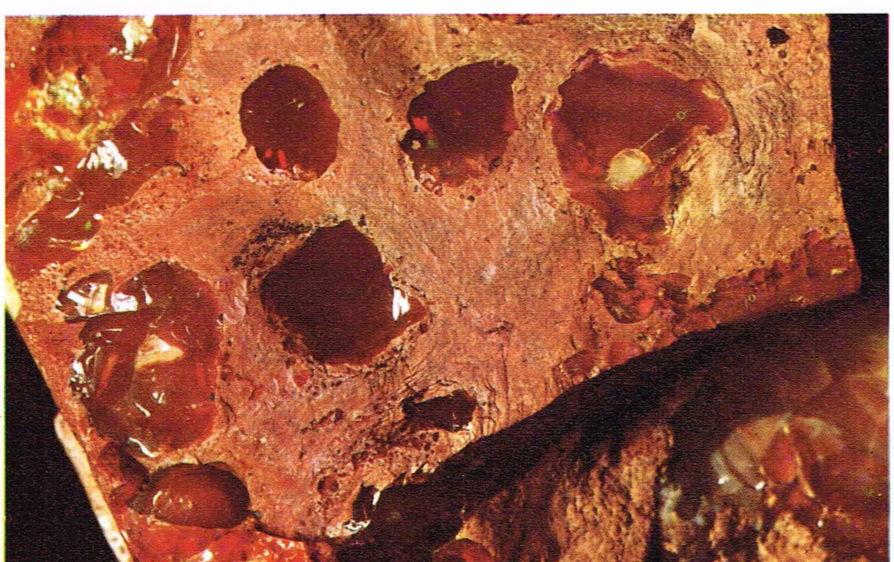

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

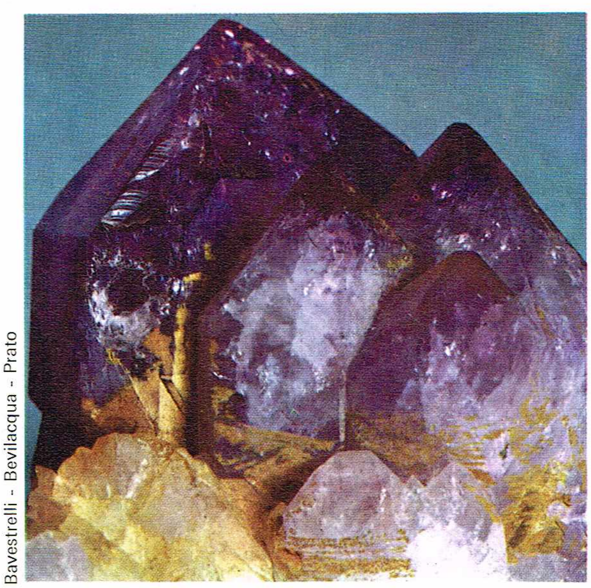

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Tridymite, SiO_2 - orthorhombique

Généralement, les cristaux sont très petits, fins et tabulaires sur (001). Ils forment souvent des groupes en éventail.

Propriétés. Dureté : 7 ; densité : 2,28 à 2,33. Transparente à translucide ; éclat vitreux incolore à blanc ; elle est fragile, sa cassure est conchoïdale.

Gisements. On rencontre la tridymite en grande quantité dans les roches volcaniques acides (rhyolites, trachytes, andésites...) Elle est souvent associée à la cristobalite, mais aussi à la sanidine, la hornblende, l'augite, l'hématite et quelquefois à l'opale. Il existe de beaux échantillons dans les trachytes du puy Capucin au Mont-Dore (Puy-de-Dôme) et à Padoue (Italie).

Cristobalite, SiO_2 - basse température : quadratique ou pseudocubique ; haute température : cubique.

La cristobalite existe sous les deux formes de basse et haute température. Elle se présente en cristaux octaédriques (souvent maclés d'après la loi de macle du spinelle), qui se regroupent en agrégats cristallins.

Propriétés. Dureté : 7 ; densité : 2,27 ; translucide ; éclat vitreux incolore.

Gisements. La cristobalite se trouve dans de nombreuses roches volcaniques siliceuses. Les plus beaux échantillons sont ceux de Cerro San Cristobal, Pachuta (Mexique).

Mélanophlogite, SiO_2 - cubique

Ce minéral peu courant se présente en cubes minuscules ou en agrégats sphériques. On le trouve en Sicile, implanté sur des cristaux de soufre avec de la calcite et de la célestine.

Lechateliérite, SiO_2

C'est le nom donné au quartz fondu naturellement que l'on rencontre dans les inclusions des roches volcaniques. On a également noté sa présence dans le cratère météoritique de l'ouest de Waislon (Arizona), où il semble provoqué par la fusion de grès finement grenus.

Opale, SiO_2nH_2O - amorphe

L'opale est massive, souvent botryoïdale ou stalactitique. Elle est très fréquemment en pseudomorphose d'autres minéraux. Elle est également terreuse.

Propriétés. Dureté : $5\frac{1}{2}$ à $6\frac{1}{2}$; densité : 1,9 à 2,3 ; indice de réfraction : 1,45. Transparente à presque opaque ; Éclat vitreux à subvitreux et même résineux ou parfois perlé. La couleur est variée : blanche, jaune, rouge, verte, grise, bleue, mais généralement pâle ; les couleurs sombres sont dues à des éléments étrangers ; la cassure est conchoïdale.

Gisements. L'opale est un minéral de basse température, déposé par des eaux siliceuses ; elle se trouve dans de nombreux types de roches ignées, sédimentaires et métamorphiques. Elle se dépose dans les fissures des roches ignées lors du dernier stade de refroidissement de la roche. Elle forme aussi le squelette d'organismes marins variés, comme les Diatomées, les Éponges, etc., et peut s'accumuler en grands lits. En France, les principaux gisements d'opale sont : Mehun-sur-Yèvre, Quincy (Cher) et la plaine Saint-Denis (Seine). De très belles opales précieuses sont trouvées à Kosice (Tchécoslovaquie), à San Juan del Rio, à Queretaro et à Zimapan (Mexique), à Pegu (Roumanie), au Boi Morto (Brésil). La plus grande production actuelle d'opales gemmes provient d'Australie (Queensland et Nouvelles-Galles du Sud). On nomme *hyalite* une variété d'opale qui constitue des concrétions globulaires ou des encroûtements incolores et clairs comme du verre. On la trouve dans les phonolites de Valec (Bohême) ainsi qu'à San Luis Potosi et à Guerrero (Mexique).

Cassitérite, SnO_2 - quadratique

La cassitérite est le seul minerai d'étain. Elle fut l'un des minéraux les plus recherchés dans l'Antiquité pour la préparation du bronze. Elle appartient au groupe du rutile. Les cristaux non maclés sont habituellement prismatiques, courts ou parfois allongés selon l'axe [001]. Elle est moins couramment pyramidale. Les faces (001) et (110) sont fréquemment abîmées et les faces du prisme sont souvent striées. Les cristaux se maclent très communément sur {011}. Les macles peuvent se répéter en produisant des formes complexes. La cassitérite est aussi massive, en encroûtements, en masses concrétionnées ou grenues grossièrement à finement.

Propriétés. Dureté : 6 à 7 ; densité : 6,99 ; indice de réfraction : de l'ordre de 2. Souvent transparente avec éclat adamantin à métallique, habituellement brillante ; les surfaces cassées ont un éclat gras. La couleur est habituellement jaunâtre ou rougeâtre à noir brunâtre, occasionnellement rouge, jaune, grise ou blanche, très rarement incolore.

Gisements. Ce minéral de haute température se rencontre dans des pegmatites, associé au quartz, à l'orthose, à la muscovite, etc., et dans les parties supérieures de gîtes pneumatolytiques, disséminé dans les « greisen », associé au wolfram, à la scheelite, au mispickel, etc.

H.-J. Schubnel

▲ Mine de cassitérite établie à 60 km au sud d'Ipoh (Malaisie). Les bacs que l'on voit au premier plan servent à décanter les alluvions qui ont été entraînées par des jets d'eau et qui contiennent différents minéraux, dont la cassitérite.

Les gisements les plus importants sont alluvionnaires (Malaisie). Les meilleurs cristaux viennent d'Araca (Bolivie) ; de grands cristaux ont été également signalés au Niger, en Namibie. On peut voir dans les musées de jolis cristaux en provenance de La Villeder (Morbihan), Pia-Ouac (Nord Vietnam), Odontschelon (Daourie, U.R.S.S.) ; des groupes de cristaux très brillants provenant de Horni-Slavkow, autrefois appelé Schaggenwald (Bohême), du Harz et de Cornouailles.

Rutile, TiO_2 - quadratique

Rare en gros cristaux, le rutile, dont le nom provient du mot latin *rutilus* signifiant « rouge rougeâtre » (par allusion à sa couleur habituelle), se présente sous forme de cristaux prismatiques, fins ou aciculaires ; les faces en zone du prisme sont striées verticalement. Les cristaux sont habituellement terminés par les formes {101} ou {111}. Le rutile se rencontre également sous forme massive, grossièrement à finement grenue. Il se macle fréquemment sur {011}. Le rutile peut croître sur des minéraux tels que l'hématite, la magnétite ; on peut aussi l'observer en aiguilles microscopiques et orientées dans le corindon, la pseudobrookite, le phlogopite et surtout dans le quartz.

Propriétés. Dureté : 6 à $6\frac{1}{2}$; densité : 4,23 ; indice de réfraction : 2,61 et 2,89. Transparent en fines épaisseurs ;

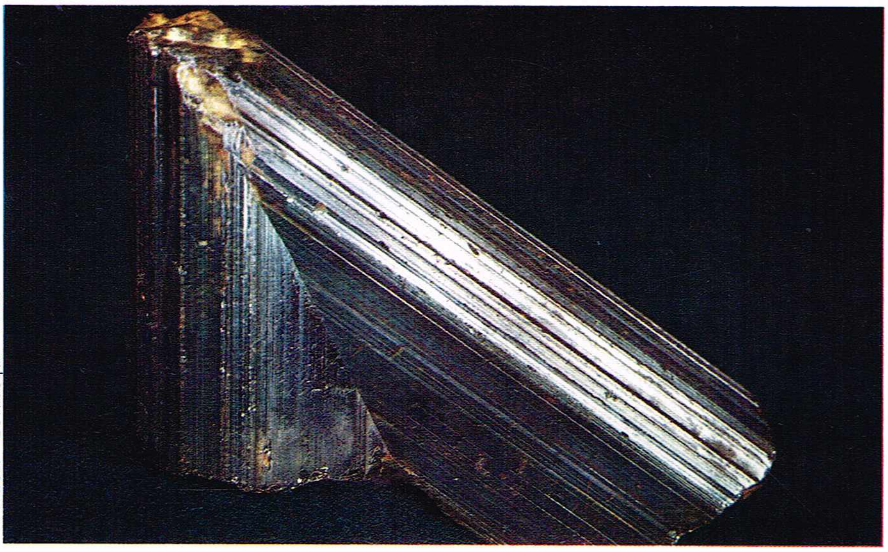

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

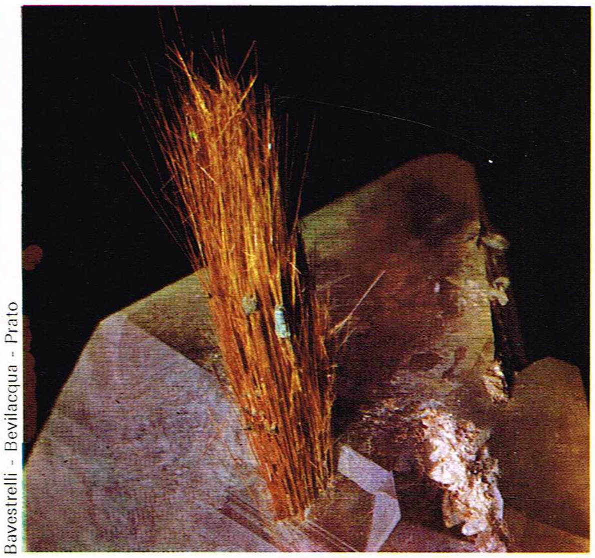

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

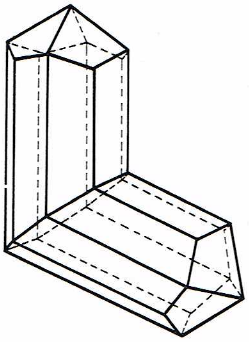

I.G.D.A.

▲ *Ci-dessus, en haut, macle de* rutile *« en genoux », provenant du Brésil; en bas, représentation schématique de deux cristaux de* rutile *maclés. A droite,* rutile *en forme de « cheveux de Vénus » associé à du quartz (Brésil)* [*Londres, British Museum*].

▼ *Cristaux de* pyrolusite *provenant de Cornwall. La pyrolusite est l'un des minerais de manganèse les plus courants.*

éclat adamantin métallique brun rougeâtre ou rouge, quelquefois jaunâtre, bleuâtre, violet, noir, rarement vert gazon; il est fragile, sa cassure est conchoïdale ou subconchoïdale à inégale.

Gisements. Ce minéral typique des gisements de haute température est plus commun que l'anatase ou la brookite. Il est très largement répandu dans les gneiss et les schistes en tant que constituant mineur; c'est également un minéral des roches ignées, et plus particulièrement des roches plutoniques riches en hornblende; on le trouve également dans les anorthosites, les pegmatites basiques ou granitiques, les calcaires cristallins formés par métamorphisme régional ou de contact, les filons d'apatite de haute température et les filons de quartz. De très beaux cristaux viennent des quartzites de Groves Moutains, Géorgie (États-Unis), associés à la pyrophyllite et à la lazulite, ainsi que de Lincoln County, du même État. De beaux groupes, recherchés par les collectionneurs, ont été trouvés à Ampahyabe (Madagascar), à Ferrera et Alto Catalum Bo (Colombie) et à Modriach (Moravie).

Plattnérite, PbO_2 - quadratique

Ce minéral appartient au groupe du rutile; il se présente parfois en cristaux primastiques selon l'axe [001] mais habituellement en masses nodulaires ou botryoïdales, denses à fibreuses.

Propriétés. Dureté : 5 ½; densité : 9,42; indice de réfraction : 2,30. Opaque; éclat adamantin métallique brillant mais se ternissant rapidement au contact de l'air; couleur noir de fer à noir brunâtre ou, pour les cristaux, noir de jais. Les cristaux sont fragiles; la cassure est légèrement conchoïdale.

Gisements. De beaux échantillons associés à de la smithsonite et de la calcite plombifère proviennent de Wanlockhead (Écosse). On en trouve également à Dareh-Zandjir-Yazol (Iran) et au Mexique.

Lampadite - wad à haute teneur en cuivre

La lampadite est un oxyde de manganèse hydraté du groupe des wads dont on ne connaît pas la formule exacte. C'est probablement un mélange de plusieurs oxydes tels que la pyrolusite, le psilomélane et la ténorite. Elle se rencontre le plus souvent en mases compactes terreuses et parfois en concrétions. Elle est parfois finement fibreuse mais habituellement ne présente pas de structure.

Propriétés. Densité : 2,8 à 4,4; elle est très tendre et laisse des traces sur le papier. Éclat terne, noir ou noir bleuâtre à brunâtre.

Gisements. Ce minéral, formé à température et pression ordinaires dans des conditions oxydantes, se rencontre dans de nombreux gisements.

Pyrolusite, MnO_2 - quadratique

Les cristaux de pyrolusite, prismatiques, longs à courts selon [001], sont rarement grands et bien développés. Parfois, des groupements subparallèles de microcristaux ont l'aspect de grands cristaux grossiers. Généralement, la pyrolusite est massive, fibreuse, grenue ou poudreuse; elle forme aussi des croissances dendritiques sur les surfaces de cassure (quartz rose) ou bien dans la calcédoine (agate mousse).

Propriétés. Dureté : 6 à 6 ½ pour les cristaux (la pyrolusite pulvérulente laisse une trace noire sur le papier); densité : 5,06 pour les cristaux et 4,4 à 5 pour les variétés massives. Opaque; éclat métallique gris d'acier clair ou gris de fer pour les cristaux, et gris d'acier foncé ou noir de fer quand elle est massive.

Gisements. C'est l'un des minerais de manganèse les plus communs. Il est apparemment toujours formé dans des conditions très oxydantes; les principaux types d'occurrence sont les gisements lacustres ou marins peu profonds, la zone d'oxydation des gisements de minerais et les gisements formés par la circulation des eaux météoritiques. La pyrolusite est souvent associée à d'autres minerais de manganèse et à des oxydes de fer, tels que la hausmannite, la manganite, la braunite, le psilomélane, la limonite, l'hématite et la goethite. Parmi les nombreuses localités, celles présentant les plus beaux gisements sont Oraloros (Roumanie), Alban (Tarn), Huelva (Espagne) et Ilfeld (Harz).

Hollandite, $BaMn_8O_{16}$ - quadratique ou pseudoquadratique

Les cristaux sont prismatiques, courts, terminés par une pyramide plate. La hollandite se présente également sous forme fibreuse ou massive.

Propriétés. Dureté : 6 sur les faces des cristaux, et plus faible sur les cassures; densité : 4,95. Éclat métallique brillant, gris d'argent à noir grisâtre et noir.

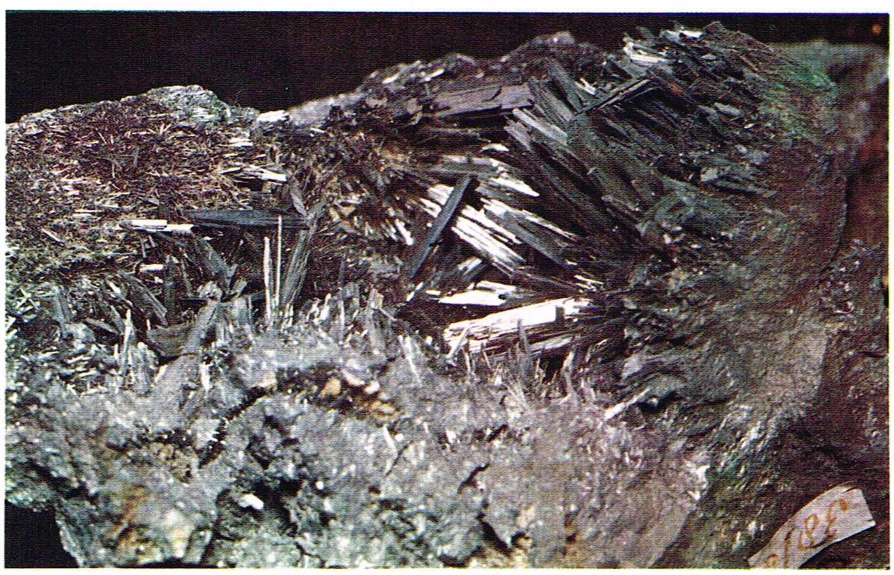

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Gisements. Elle fut trouvée pour la première fois en cristaux grossiers dans des veines de quartz traversant un minerai de manganèse à Kajlidongri, Jhabua (Inde centrale). Dans ce même pays, les mines de Sitapar à Chindwara ont également fourni de beaux cristaux.

Coronadite, $Pb_2Mn_8O_{16}$ - quadratique ou pseudoquadratique

La coronadite se présente sous forme massive ou en masses botryoïdales avec une structure fibreuse.

Propriétés. Dureté : 4½ à 5 ; densité : 5,44. Opaque ; éclat terne à submétallique, gris foncé à noir.

Gisements. Les meilleurs échantillons connus proviennent de niveaux supérieurs des gisements de manganèse de Bou Tazoult, Imini (Maroc).

Psilomélane ou romanéchite $BaMnMn_8O_{16}(OH)_4$ - orthorhombique

Le psilomélane ou romanéchite (nom donné par A. Lacroix) est toujours massif, botryoïdal ou réniforme ; il est parfois terreux ou pulvérulent.

Propriétés. Dureté : 5 à 6 (plus faible pour les variétés terreuses) ; densité : 4,71. Opaque ; éclat submétallique, terne, noir de fer à gris d'acier.

Gisements. Ce minéral secondaire, formé dans des conditions superficielles de température et de pression, se trouve en association avec la pyrolusite, la goethite, la limonite, la hausmannite, la chalcopyrite et la braunite. C'est un produit commun dû à l'altération des carbonates et silicates de manganèse par l'action des intempéries et pouvant former de grands gisements résiduels ou d'imprégnation.

De belles masses botryoïdales et pulvérulentes se trouvent à Romanèche (Saône-et-Loire), ainsi qu'à Samalkalde (Bavière).

Tapiolite, (Fe,Mn) $(Ta,Nb)_2O_6$ - quadratique

Les cristaux sont habituellement prismatiques et courts, avec les formes {001}, {110} et {113} habituellement bien développées ; les cristaux paraissent souvent monocliniques ou orthorhombiques car ils sont déformés ; la tapiolite se macle très communément sur {013}.

Propriétés. Dureté : 6 à 6½ ; densité : 7,90. Des fragments extrêmement minces sont transparents ; éclat subadamantin à submétallique, quelquefois brillant ; couleur noir brillant, parfois noir brunâtre en surface.

La **mossite** (FeMn) $(Nb,Ta)_2O_6$ est le terme niobifère de la série ; elle est très rare ; ses propriétés sont voisines de celles de la tapiolite.

Gisements. La tapiolite se rencontre dans les granites à pegmatites. De beaux échantillons proviennent d'Angara-Tazenakht (Maroc).

Anatase, TiO_2 - quadratique

L'anatase se présente habituellement en pyramides aiguës ou obtuses, en octaèdres quadratiques (bipyramides), plus rarement en prismes, tabulaires sur (001) ou allongés suivant l'axe quaternaire ; les cristaux sont souvent très déformés et dépassent très rarement 15 mm.

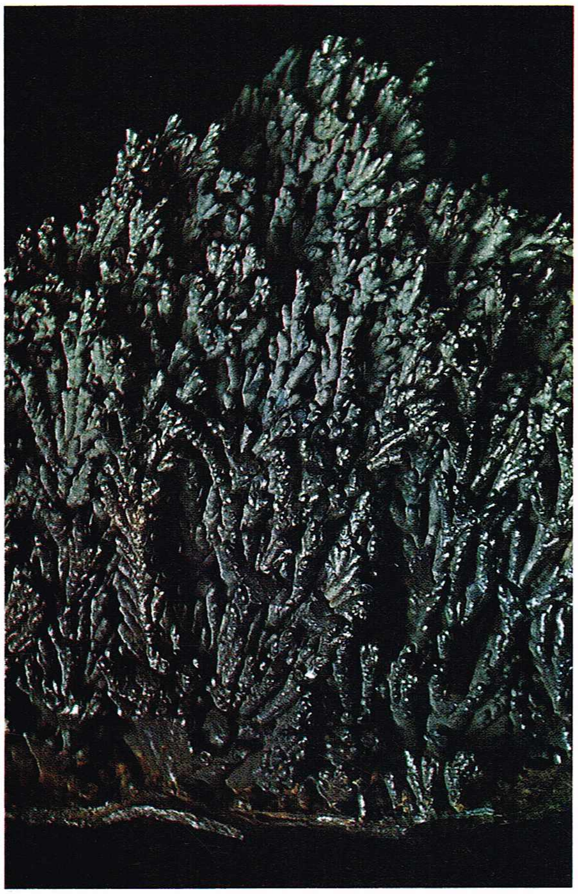

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◄▲ *Ci-contre, croûte dendritique de* **psilomélane** *provenant du Cornwall (Londres, British Museum). Ci-dessus, cristal d'***anatase** *en forme de bipyramide octaédrique (Le Bourg-d'Oisans, France)* [*musée d'Histoire naturelle de Milan*].

Propriétés. Dureté : 5½ à 6 ; densité : 3,90 ; indice de réfraction : 2,48 à 2,56. Transparente ; éclat adamantin ou adamantin métallique, quelquefois brillant ; couleur variée avec des nuances de brun jaunâtre et rougeâtre passant à l'indigo bleu et au noir ; également verdâtre, bleu-vert, lilas pâle, gris ardoise et, rarement, presque incolore. Les cristaux pyramidaux, montrant la réflexion totale, paraissent opaques. L'anatase est fragile, sa cassure est subconchoïdale et elle se clive parfaitement sur {001} et {011}.

Gisements. Comme la brookite, ce minéral se rencontre typiquement dans des gisements de veines et de crevasses de type alpin, dans des gneiss et des schistes. Dans ces gisements alpins, l'anatase est associée au quartz, à la brookite, au rutile, à l'adulaire, à l'hématite, à la chlorite et à d'autres minéraux. Elle est également très répandue comme constituant mineur des roches ignées et métamorphiques, plus particulièrement celles dont le faciès est altéré. On la trouve dans les pegmatites et dans les granites. C'est un minéral détritique commun dans de nombreuses localités alpines ; les plus beaux cristaux se trouvent à Binn et à Alp Lercheltini. De gros cristaux pseudomorphosés ont été rencontrés à Tapira (Brésil).

Brookite, TiO_2 - orthorhombique

La brookite se présente uniquement sous forme de cristaux ; ceux-ci sont habituellement tabulaires sur (010) et allongés selon [001], parfois prismatiques selon (001), rarement pyramidaux ou pseudo-hexagonaux avec les faces (120) et (111) également développées.

Propriétés. Dureté : 5½ à 6 ; densité : 4,14 ; indices de réfraction : 2,6 et 2,7. Transparente en petits fragments (les variétés foncées étant transparentes uniquement sous faible épaisseur) ; éclat métallique adamantin à submétallique, brun à brun jaunâtre ou rougeâtre, ou encore brun foncé à noir de fer ; elle est fragile, sa cassure est subconchoïdale à inégale.

Gisements. La brookite se rencontre typiquement en fins cristaux dans les fentes des gneiss et des schistes de type alpin, associés à l'anatase, au sphène, à l'adulaire, au

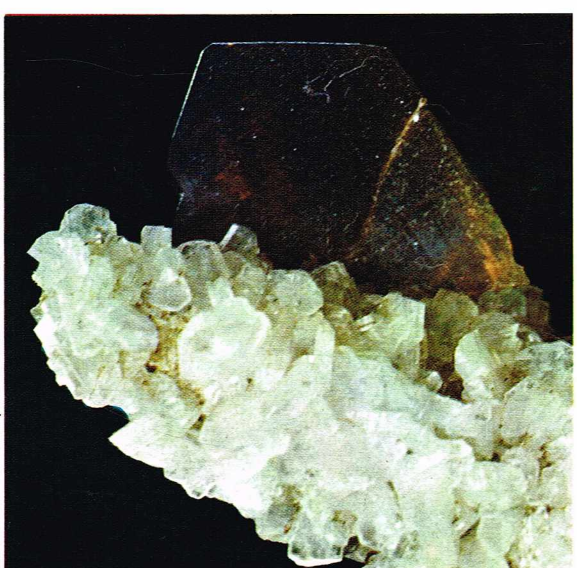

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◄ *Cristal de* **brookite**, *associé à de l'albite et provenant de Bristentock (Suisse)* [*Londres, British Museum*].

quartz, au rutile, à l'hématite, à l'albite, à la calcite et à la chlorite. C'est un minéral accessoire des gneiss, schistes et roches ignées et aussi un minéral détritique commun. On trouve de très beaux échantillons dans les filons alpins à Piz Aul dans les Grisons et au glacier de Kaldwasser au Simplon (Suisse) ; on peut également citer les échantillons de Magnet Cove (Arkansas), qui comptent parmi les plus gros connus et ceux de Tremadoc, Caernarvon (Grande-Bretagne).

Wolframite, (Fe,Mn)WO_4 - monoclinique

Les termes extrêmes de la série de la wolframite sont la *ferbérite,* qui est le pôle ferreux, et la *huebnérite,* qui est le pôle manganésifère. La wolframite se présente couramment sous la forme de cristaux prismatiques courts selon [001], moins fréquemment en prismes allongés et quelquefois en cristaux aplatis ou tabulaires; les trois directions sont parfois égales. Ces cristaux, habituellement striés selon (001), sont souvent réunis en groupes subparallèles. La wolframite se présente également en masses lamellaires ou grenues, rarement en intercroissances de cristaux aciculaires entremêlés. La huebnérite se présente le plus souvent en cristaux prismatiques à prismatiques allongés selon [001] ; la ferbérite se présente en prismes allongés selon [010], quelquefois aplatis sur (100), et parfois sous forme massive. Tous les membres de la série se maclent communément sur le plan (100); la wolframite et la ferbérite se maclent également sur le plan (023).

Propriétés. Dureté : 4 à 4 $\frac{1}{2}$; 7,12 pour la huebnérite à 7,51 pour la ferbérite (la dureté et la densité augmentent avec la teneur en fer) ; indices de réfraction : 2,26 à 2,42 pour la wolframite, plus élevés pour la huebnérite. La huebnérite est transparente, la ferbérite est presque opaque; éclat submétallique à adamantin métallique, un peu résineux pour la huebnérite, qui est brun jaunâtre à brun rougeâtre, rarement noir brunâtre; la wolframite est noir grisâtre à noir de fer et la ferbérite est noire. Ces minéraux se ternissent quelquefois en donnant des irisations; les membres les plus ferreux de la série sont très magnétiques; ils se clivent parfaitement sur (010); ils sont fragiles et leur cassure est inégale.

Gisements. Ces minéraux sont d'importants minerais de tungstène. Les principaux gisements se situent dans les grès, les veines riches en quartz ou les veines de pegmatites liées aux roches granitiques intrusives; la majorité des dépôts est d'origine pneumatolytique et se trouve dans les filons hydrothermaux de haute température associée à des sulfures variés, tels que la pyrrhotite, la pyrite, la chalcopyrite, ainsi qu'à la cassitérite, à la scheelite, au bismuth natif, etc. Les plus beaux échantillons de wolframite proviennent de Panasquera (Portugal), de Horni Slavkav dans le Schagenwald (Bohême), de Tong-Wha (Corée) et de Puy-les-Vignes (Haute-Vienne). De beaux cristaux de huebnérite ont été rencontrés à White Oaks Lincoln Co. (New Mexico), à Adamis Hod Bonita (Colorado), à Pelagatos et à Conchucos (Pérou), à Pia-Ouac, Cao-Bang (Nord Vietnam). Les plus belles ferbérites viennent de Kurasawa (Japon) et de Lovra de Cobra (Brésil).

Columbite, (Fe,Mn) $(Nb,Ta)_2O_6$ - orthorhombique

Les deux termes de cette série, la **niobite** et la **tantalite**, sont très recherchés comme minerais de tantale et niobium pour la fabrication d'aciers spéciaux. Les cristaux sont de faciès variés, prismatiques et courts selon [001] ou, moins fréquemment, selon [100] ou [010]. Ils sont parfois trapus, quelquefois tabulaires, minces sur (010) ou épais sur (100) et forment souvent des groupes parallèles ou subparallèles. La columbite est également massive; elle se macle communément sur le plan (201), généralement par contact, quelquefois par pénétration.

Propriétés. Dureté : 6 à 6 $\frac{1}{2}$; densité : 5,20 pour le pôle niobite à 7,95 pour la tantalite; indices de réfraction : jusqu'à 2,45; biréfringence élevée. Transparente en fines lamelles; éclat submétallique noir de fer à noir brunâtre avec des réflexions internes brun rougeâtre (particulièrement pour les variétés manganifères). Elle se ternit très fréquemment en donnant des irisations. Les minéraux de cette série sont paramagnétiques, fragiles; leur cassure est subconchoïdale à inégale.

Gisements. La columbite se rencontre dans les roches granitiques et dans les pegmatites, associée au quartz, au feldspath, au mica, à la tourmaline, au béryl, au spodumène, à la cassitérite, etc. On la trouve également comme minéral détritique, quelquefois en grande quantité. Ampangabe (Madagascar), Middletown dans le Connecticut et Greenwood dans le Maine (États-Unis), Rade Ostfold (Norvège), Larmant-Saint-Sylvestre et Chabannes en Haute-Vienne comptent parmi les localités d'où proviennent les plus jolis cristaux. De beaux exemplaires de tantalite se trouvent aussi à Chabannes ainsi qu'au Minas Gerais (Brésil). La *manganoniobite* (variété manganifère de la niobite) a été trouvée en beaux cristaux à la Mine Catharina, à Pala (Californie).

Euxénite, $(Y,Ce,U,Pb,Ca)(Nb,Ta,Ti)_2(O,OH)_6$ - orthorhombique

L'euxénite forme une série avec le *polycrase* de formule (Y,Ce,Ca,U,Th) $(Ti,Nb,Ta)_2$ $(O,OH)_2$; les minéraux de cette série se présentent en gros cristaux allongés selon [001] et quelquefois aplatis selon (010) [polycrase]. Les faces des cristaux sont striées parallèlement à leur intersection avec le plan (010). Les cristaux sont souvent disposés en agrégats parallèles ou subparallèles, légèrement radiés. L'euxénite peut être massive; elle se macle sur {201}.

Propriétés. Dureté : 5 $\frac{1}{2}$ à 6 $\frac{1}{2}$; densité : 5 (elle décroît avec l'altération et augmente après chauffage du cristal) ; indice de réfraction : 2,24. Les fragments minces sont transparents; éclat souvent brillant, submétallique, et quelquefois gras ou vitreux, noir avec de temps à autre une nuance brunâtre ou verdâtre. La cassure est conchoïdale à subconchoïdale.

Gisements. On trouve l'euxénite principalement dans les granites à pegmatites, quelquefois en grande quantité, associée à la biotite, la muscovite, l'ilménite, la monazite, la xénotine, le zircon, le béryl, la magnétite, le grenat, l'allanite, la gadolinite, et moins fréquemment à la thorite, l'uraninite, la bétafite, et la columbite. C'est également un minéral détritique des roches granitiques. Dans de nombreuses localités de Madagascar, telles que Beronono Mondridano, Betsiboka, mont Vohambohitra et Soavinandriana, les pegmatites riches en potasse fournissent de très beaux échantillons. De beaux cristaux proviennent aussi de la mine de Bomba au Minas Gerais (Brésil).

Samarskite, $(Y,U,Ca)(Nb,Fe)_2(O,OH)_6$ - orthorhombique

Les cristaux sont des prismes courts selon [001], à section transversale rectangulaire; ils sont parfois tabulaires et très souvent déformés; la samarskite est souvent massive mais dans ce cas elle est difficilement identifiable.

Propriétés. Dureté : 5 à 6; densité : 5,69; indice de réfraction : 2,20. Les fragments minces sont transparents; éclat vitreux à résineux sur les cassures, quelquefois submétallique et brillant; les cristaux sont souvent ternes extérieurement. Couleur noir velouté, avec quelquefois des nuances brunâtres, souvent brunes ou brun jaunâtre extérieurement à cause de l'altération. Elle est fragile; sa cassure est conchoïdale; elle est radio-active.

Gisements. On la trouve dans les pegmatites riches en potasse de Madagascar, étroitement associée à la columbite; le principal gisement est celui d'Ahi Tromby. De beaux échantillons proviennent de Stripaesen, Norberg (Suède).

Priorite, (Y,Ce,Th,Ca,Na,U) $(Ti,Nb,Ta)_2O_6$ - orthorhombique

La priorite forme une série avec l'*æschynite* de formule (Ce,Th,Ca, ...) [(Ti, Nb, $Ta)_2O_6$]. Les cristaux sont prismatiques à prismatiques courts selon [001], quelquefois tabulaires sur (010), et striés selon [100] sur (010); quelquefois en grands cristaux, la priorite peut également être massive.

Propriétés. Dureté : 5 à 6 ; densité : 5,19 pour l'æschynite et 4,15 pour la priorite; indices de réfraction : 2,25 pour l'æschynite et 2,14 pour la priorite. Éclat submétallique à résineux et même cireux, quelquefois brillant; couleur noire à brune ou jaune de nuances variées. Elle est fragile, sa cassure est conchoïdale. Elle est radio-active.

Gisements. L'æschynite se rencontre dans les syénites néphéliniques avec du feldspath, du zircon et de la samarskite. La priorite se trouve dans les granites à pegmatite, associée à l'euxénite, au zircon, à la monazite, au xénotime, à l'allanite, et à d'autres minéraux de terres rares.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

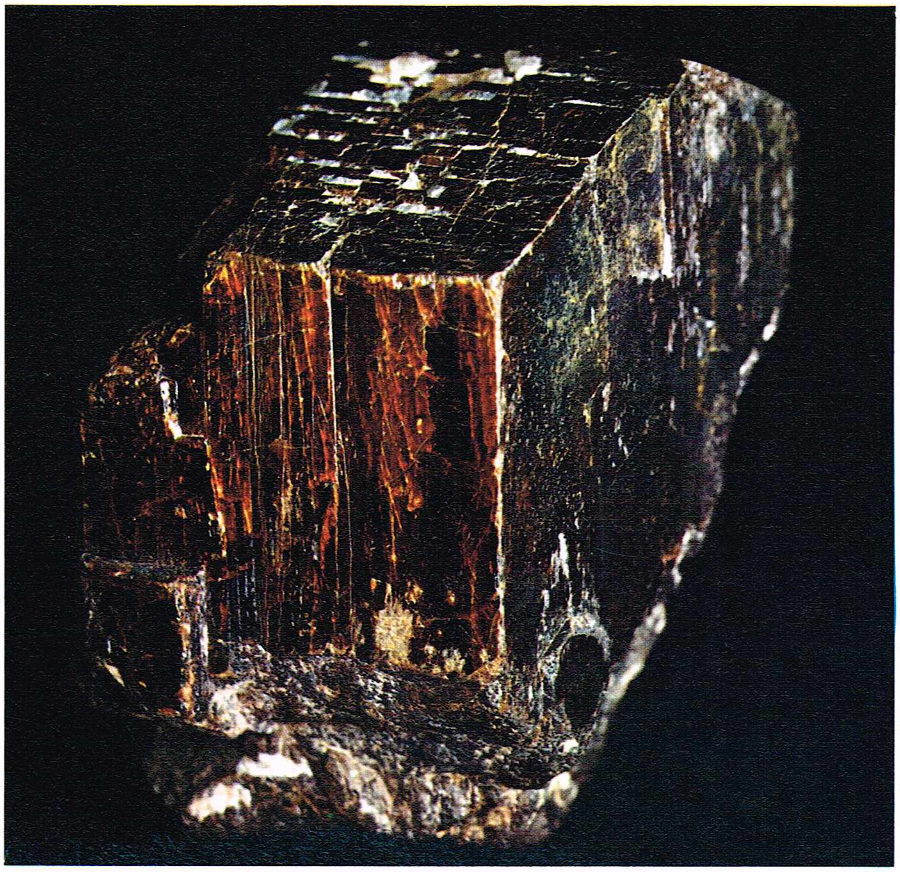

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *A gauche, cristaux de* **stibiotantalite** *provenant de Mesa Grande (Californie) [Londres, British Museum].*
A droite, cristal de **manganotantalite** *provenant de Miniera Morrua (Mozambique) [Londres, British Museum].*

De beaux cristaux de priorite proviennent d'Ambahitromby (Madagascar).

Polymignite, (Ce,La,Y,Th,Mn,Ca) (Ti,Zr,Nb,Ta)$_2$O$_6$ - orthorhombique

La polymignite se présente en cristaux prismatiques, allongés selon [001] et striés selon [001].

Propriétés. Dureté : 6 ½; densité : 4,77; indice de réfraction : 2,22. Les fragments très minces sont transparents; éclat submétallique à métallique brillant noir; cassure conchoïdale.

Gisements. Ce minéral se trouve habituellement dans les granites à pegmatites; de beaux échantillons proviennent de Stavern Vesthold (Norvège).

Brannérite, (U,Ca,Th,Y) (Ti,Fe)$_2$O$_6$ - monoclinique

Ce minéral se rencontre en galets détritiques arrondis ou en cristaux prismatiques.

Propriétés. Dureté : 4 ½; densité : 4,5 à 5,4; indices de réfraction : 2,26 à 2,30; les très fins fragments sont transparents; couleur noire et jaune brunâtre extérieurement quand elle est altérée. La cassure est conchoïdale. La brannérite est radio-active.

Gisements. Les principaux gisements sont Cena de Fuente, Obejuna Cordoba (Espagne) et Crockerswell (Australie).

Fergusonite, YNbO$_4$ - quadratique

Les cristaux sont prismatiques selon [001] à pyramidaux, avec quelquefois la face (001) bien développée. On trouve également la fergusonite en masses irrégulières et en grains.

Propriétés. Dureté : 5 ½ à 6 ½; densité : 5,6 à 5,8; indice de réfraction : 2,10. Les fragments minces sont transparents; éclat gras mais vitreux et brillant sur les cassures et même submétallique; couleur externe grise, jaune ou brune à cause de l'altération mais les surfaces de cassure sont noir brunâtre ou velouté; elle est fragile et sa cassure est conchoïdale.

Gisements. On la rencontre dans les pegmatites granitiques et particulièrement dans celles riches en terres rares, Nb, Ta et Be. De beaux échantillons viennent de Helle Arendal (Norvège) et de Tsaratanana (Madagascar).

Stibiotantalite, Sb (Ta,Nb)O$_4$ - orthorhombique
Stibiocolumbite, Sb (Nb,Ta)O$_4$ - orthorhombique

Les cristaux de cette série sont prismatiques, allongés selon [001]. Les faces (010) et (110) sont striées parallèlement à (001).

Propriétés. Dureté : 5 ½; densité : 7,34 à 5,98, décroissant avec la teneur en Nb; indices de réfraction : 2,37 à 2,45, augmentant avec la teneur en Nb. Transparente; éclat résineux à adamantin, brun foncé à brun jaunâtre lumineux; mais aussi jaune rougeâtre, brun rougeâtre et jaune verdâtre. Fragiles, leur cassure est subconchoïdale à grenue.

Gisements. On a trouvé de beaux cristaux de stibiotantalite, mais surtout de stibiocolumbite à Mesa Grande, dans la région de San Diego (Californie), dans les pegmatites, associés à du béryl rose, de la lépidolite, de la tourmaline rose et, rarement, à de la cassitérite.

Bismutotantalite, Bi(TaNb)O$_4$ - orthorhombique

La bismutotantalite se présente en gros cristaux prismatiques allongés selon [001] et souvent irréguliers.

Propriétés. Dureté : 5; densité : 8,26; indices de réfraction très élevés. Les fragments très minces sont transparents; éclat adamantin noir de poix. La bismutotantalite est parfois altérée superficiellement et devient alors jaune rosâtre terne. Sa cassure est conchoïdale.

Gisements. On la rencontre principalement dans les pegmatites, associée à de la tourmaline noire, à de la cassitérite en petite quantité, ainsi qu'à de grandes plaques de muscovite de couleur chamois à Gamba Hill (sud-ouest de l'Ouganda). Il y a également de beaux échantillons à Tsaratanana (Madagascar).

Baddeleyite, ZrO$_2$ - monoclinique

Les cristaux sont habituellement aplatis selon [100] et prismatiques plus ou moins allongés selon [001]; ils peuvent être également tabulaires sur (100) et quelquefois allongés selon [010]. Les faces (100) et celles du prisme sont striées selon [001]. La baddeleyite se présente quelquefois en masses botryoïdales.

Propriétés. Dureté : 6 ½; densité : 5,4 à 6,02; indices de réfraction : 2,13 à 2,20; biréfringence faible. Transparente; les échantillons très colorés ne sont transparents qu'en

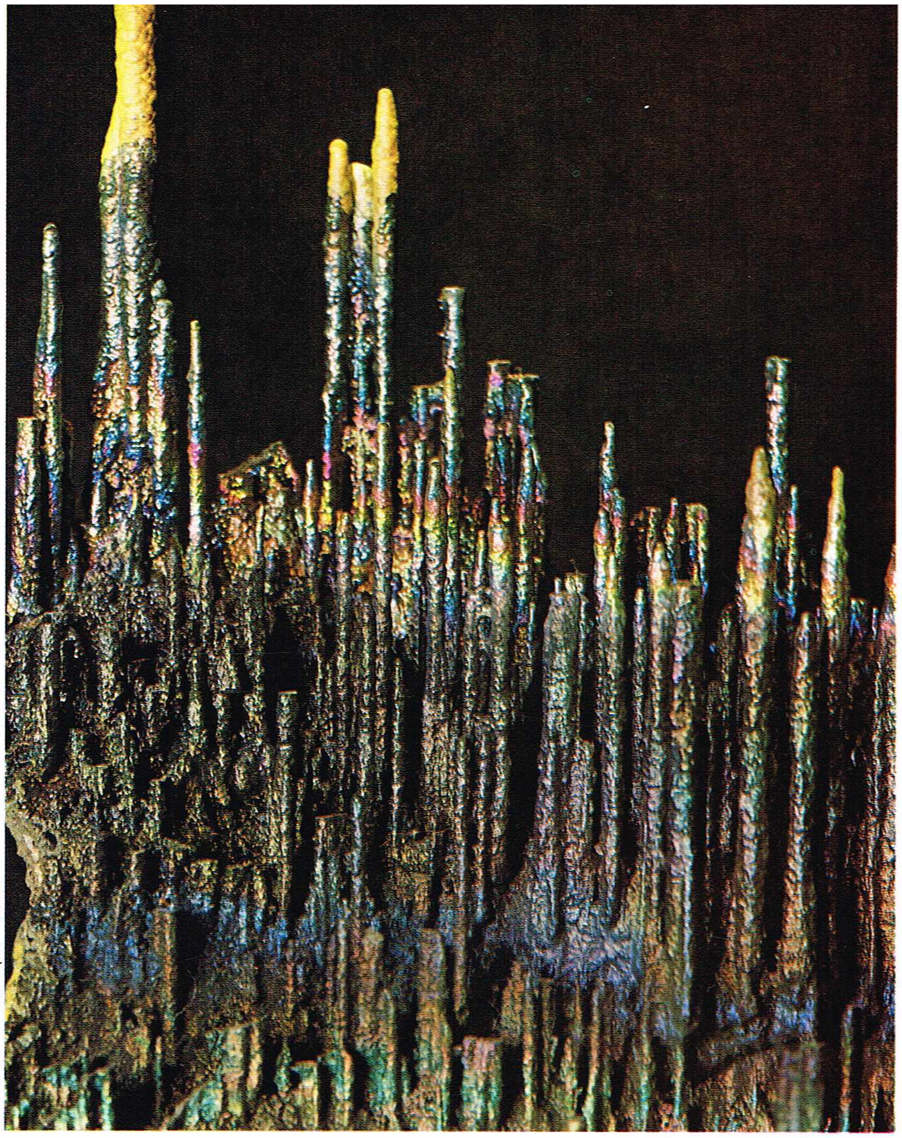

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ Goethite *stalactiforme provenant de Rossbach (Nassau). Ce minéral est l'un des oxydes ferriques les plus répandus.*

fragments très minces. Éclat gras à vitreux, presque submétallique lorsque les cristaux sont noirs. La couleur varie de l'incolore au noir de fer.

Gisements. Ce minéral accessoire se trouve dans des roches à magnétite et pyroxénite ainsi que dans la zone de contact de ces roches avec le marbre de Jacupiranga, São Paulo (Brésil), associé à l'ilménite, l'apatite, la magnétite et la pérowskite. Également au Brésil, on trouve la baddeleyite en masses radiées fibreuses et en cailloux roulés dans la syénite à augite de la région de Serra Caldas, au Minas Gerais, ainsi que dans les sables diamantifères du Rio Verdinho, un affluent du Rio Parana (Matto Grosso).

Thorianite, ThO_2 - cubique

Les cristaux sont cubiques et présentent des arêtes plus ou moins arrondies.

Propriétés. Dureté : 6 $\frac{1}{2}$; densité : 9,7 (la densité et la dureté décroissent quand la thorianite s'altère) ; indice de réfraction : environ 2,20. Les fragments très minces sont transparents ; éclat corné à submétallique, gris foncé à noir brunâtre et même noir. La thorianite se macle souvent sur {111} par pénétration. Fragile, sa cassure est inégale à subconchoïdale. Elle est radioactive.

Gisements. On trouve de la thorianite associée à la phlogopite, au diopside et au spinelle à Ambindrandakemba et à Besakoa Esiva (Madagascar).

Uraninite, ou pechblende, UO_2 - cubique

Ce minéral radio-actif se présente en cristaux octaédriques, cubo-octaédriques, cubiques, et moins communément, dodécaédriques. L'uraninite est également massive, dense, botryoïdale ou réniforme. Les cristaux se réunissent parfois en agrégats d'aspect dendritique.

Propriétés. Dureté : 5 à 6 ; densité : 10,95 (elle décroît avec l'augmentation de l'oxydation de U^4 en U^6). Généralement opaque (les fragments très minces sont transparents) ; éclat submétallique à gras et terne, noir d'acier à velouté et noir brunâtre, grisâtre ou verdâtre. Fragile, sa cassure est inégale à conchoïdale.

Gisements. Minéral des pegmatites granitiques et des filons hydrothermaux, associé à des minéraux de nickel-cobalt-argent, la « pechblende » est le principal minerai d'uranium. Les meilleurs cristaux cubiques viennent d'Espagne et du Katanga ; le faciès pechblende est classique par la mine de Jachimov (Tchécoslovaquie).

Sassolite, $B(OH)_3$ - triclinique

Les cristaux sont tabulaires sur (001) et d'aspect pseudo-hexagonal, ou, rarement, en aiguilles allongées selon [001] ; ils se présentent aussi en petites écailles. La sassolite forme également des encroûtements.

Propriétés. Dureté : 1 ; densité : 1,48 ; indice de réfraction : 1,34 à 1,46. Transparente ; éclat perlé blanc à gris, quelquefois teinté de jaune ou de brun par l'inclusion de sulfure ou de limonite. Elle se macle communément par rapport à l'axe [001] et se clive parfaitement sur {001}.

Gisements. Ce minéral se trouve particulièrement dans les eaux des lagons de Toscane. Il est formé lors du passage des vapeurs (surtout d'acide borique) à travers l'eau et se dépose après l'évaporation de la solution. La localité où se trouvent les plus beaux échantillons est Larderello (Toscane).

Gibbsite, $\gamma Al(OH)_3$ - monoclinique

Les cristaux sont habituellement tabulaires sur (001), avec les formes {100} et {110} bien développées leur donnant un aspect pseudo-hexagonal. La gibbsite peut se présenter aussi en concrétions sphéroïdales, en petites masses mamelonnées ou en encroûtements avec une surface lisse et une structure faiblement fibreuse ; elle peut également être terreuse et compacte.

Propriétés. Dureté : 2 $\frac{1}{2}$ à 3 $\frac{1}{2}$; densité : 2,4 ; indices de réfraction : 1,57 à 1,59. Transparente ; éclat vitreux et perlé sur les faces de clivage ; couleur blanche, blanc grisâtre, verdâtre ou rougeâtre. Elle se macle très communément par rapport à l'axe [130] et se clive sur {001}.

Gisements. C'est un minéral secondaire, résultant typiquement de l'altération des minéraux d'aluminium, que l'on rencontre dans les gisements de bauxite ainsi que dans les latérites. C'est également un minéral des filons hydrothermaux de basse température et des cavités des roches ignées ou alcalines. Les plus belles gibbsites viennent du Minas Gerais et de Lagõa Doguamba Ouro Preto (Brésil).

Brucite, $Mg(OH)_2$ - hexagonal

Les cristaux sont habituellement assez grands et tabulaires sur (0001), souvent réunis en agrégats subparallèles ; la variété manganésifère est quelquefois aciculaire selon [0001]. Elle est très souvent massive, feuilletée, fibreuse ou finement grenue.

Propriétés. Dureté : 2 $\frac{1}{2}$; densité : 2,39 ; indices de réfraction : np = 1,56, ng = 1,60. Transparente, éclat vitreux à cireux et perlé sur les faces de clivage ; couleur blanche inclinant au vert pâle, au gris ou au bleu ; les variétés manganésifères sont jaune miel à rouge-brun ou brunâtres. Sectile, elle se clive parfaitement sur (0001).

Gisements. La brucite se rencontre typiquement dans les filons hydrothermaux de basse température, dans de la serpentine et des schistes chloriteux ; on la trouve aussi dans les calcaires cristallins comme produit d'altération du périclase. Elle est souvent associée à la calcite, l'aragonite, l'hydromagnésite, l'artinite, la brugnatellite, au talc, à la magnésite et la deweylite. Il y a de très beaux échantillons à la mine de Tilly Foster (État de New York) et au Texas.

Pyrochroïte, $Mn(OH)_2$ - hexagonal

Les cristaux sont tabulaires sur (0001), moins couramment rhomboédriques avec les faces $(10\bar{1}2)$ ou $(10\bar{1}1)$ bien développées, ou rarement prismatiques selon [0001]. Habituellement, la pyrochroïte se présente en masses feuilletées.

Propriétés. Dureté : 2 $\frac{1}{2}$; densité : 3,25 ; indice de réfraction : np = 1,68, ng = 1,72. Transparente, mais devenant opaque quand elle s'altère ; éclat perlé sur les faces de clivage. Incolore quand elle est fraîche à verdâtre ou bleuâtre, mais devient rapidement brun bronze puis noire quand elle est exposée à la lumière. Elle se clive parfaitement sur (0001).

Gisements. La pyrochroïte est essentiellement un minéral hydrothermal de basse température. Elle est

généralement associée à la hausmannite, la rhodochrosite, la calcite et la dolomite. On trouve de beaux cristaux à Pajsberg (Suède).

Diaspore, α Al O OH - orthorhombique

Les cristaux sont habituellement minces, aplatis sur (010) et allongés selon [001], quelquefois aciculaires et rarement tabulaires. Les faces (010), (001) et (0$\bar{1}$2) sont striées. Le diaspore est souvent massif, feuilleté.

Propriétés. Dureté : 6 ½ ; densité : 3,3 à 3,5 ; indices de réfraction : np = 1,70, ng = 1,75. Transparent, éclat vitreux brillant et perlé sur les faces de clivage. Le diaspore peut être blanc, blanc grisâtre, incolore mais aussi gris verdâtre, brun jaunâtre, lilas, rose, quelquefois bleu-violet dans une direction, rougeâtre dans une autre et vert pâle dans une troisième. Les variétés manganésifères sont rose-rouge à rouge foncé. Il se clive parfaitement sur (010).

Gisements. Minéral d'altération des roches alumineuses, il est répandu dans les bauxites provenant des calcaires. Les plus beaux échantillons de diaspore ont été trouvés en U.R.S.S. à Sverdlovsk et à Gornochitzkaya, en République centrafricaine et en Uruguay dans la Cerro Redondo.

Goethite, α Fe O OH - orthorhombique

La goethite se présente en cristaux prismatiques allongés et striés selon (001) ; ceux-ci sont aplatis en écailles sur (010). La goethite forme des agrégats veloutés de cristaux capillaires souvent radiés. Elle est habituellement massive, réniforme, botryoïdale ou stalactiforme avec une structure interne concentrique ou fibroradiée. Elle est aussi souvent terreuse, ce qui est dû à la présence d'impuretés (argile, sable) ou en nodules concrétionnés, compacts ou fibreux, quelquefois pisolitiques ou oolitiques.

Propriétés. Dureté : 5 à 5 ½ ; densité : 3,3 à 4,3 ; indices de réfraction : np = 2,26, ng = 2,40. Transparente sous faible épaisseur ; l'éclat des cristaux est imparfaitement adamantin, métallique (quelquefois terne) et souvent soyeux pour les variétés fibreuses ; les cristaux sont brun noirâtre et les variétés massives sont brun jaunâtre ou rougeâtre. La goethite se clive parfaitement sur (010) ; elle est fragile et sa cassure est inégale.

Gisements. La goethite est un des minéraux les plus communs et, après l'hématite, l'oxyde ferrique le plus répandu. Elle est formée typiquement dans des conditions oxydantes à température et pression ordinaires, comme produit d'altération des minéraux tels que la sidérite, la pyrite, la magnétite et la glauconite. C'est également un précipité inorganique et biogénétique direct des eaux marines ou météoritiques. Elle forme avec la limonite la partie supérieure altérée des filons de sulfure. Elle est souvent associée à l'hématite, au psilomélane, à la pyrolusite, la manganite, la calcite, au quartz, à la lépidocrocite, aux minéraux argileux et à la limonite. On trouve de beaux échantillons à Florissant (Colorado), à la mine de Restormel (Cornouailles) et à Ouro-Preto, Minas Gerais (Brésil).

Manganite, α Mn O OH - monoclinique

La manganite se présente en cristaux prismatiques plus ou moins allongés et striés selon [001] ; ces cristaux sont souvent terminés par la forme {001} et groupés en faisceaux très nettement subparallèles à (001). La manganite est parfois grossièrement fibreuse et rarement grenue.

Propriétés. Dureté : 4 ; densité : 4,33 ; indices de réfraction : np = 2,25, ng = 2,53. Seuls les fragments minces sont transparents ; l'éclat submétallique est gris d'acier à noir de fer. La manganite se clive parfaitement sur (010) ; elle est fragile et sa cassure est inégale.

Gisements. C'est un minéral hydrothermal de basse température associé à la pyrolusite, la goethite, au psilomélane, à la baryte et la limonite. Les plus beaux cristaux viennent d'Ilfeld (Harz).

Bauxite (minerai d'aluminium)

Ce nom fut donné à un oxyde d'aluminium hydraté de composition supposée $Al_2O_32H_2O$ et trouvé aux Baux, près de Saint-Rémy (Bouches-du-Rhône). En réalité, la bauxite est formée d'un mélange de nombreux minéraux différents, donnant une roche massive dont l'analyse approche de la formule citée ci-dessus. Cependant, il n'existe pas un minéral naturel ou artificiel ayant cette formule. Le nom de bauxite est donc utilisé pour désigner les roches riches en oxyde d'aluminium hydraté. Les principaux constituants sont la gibbsite, la bœhmite et le diaspore. Lorsque la teneur en oxyde de fer hydraté augmente, la bauxite se classe parmi les latérites.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Un agrégat de cristaux de manganite provenant d'Ilfeld (Harz)* [*Londres, British Museum*].

Limonite, formule supposée : $2Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$

Les recherches aux rayons X et autres méthodes ont montré que la majorité du matériel actuellement classé comme limonite était de la goethite cryptocristalline avec de l'eau absorbée ou capillaire. La limonite se présente sous forme botryoïdale mamelonnée, terreuse, poreuse, floconneuse. Elle est habituellement sans structure interne et vitreuse.

Propriétés. Dureté variable, le plus généralement comprise entre 4 et 5 ½ ; densité : 2,7 à 4,3 ; indices de réfraction : environ 2,00 à 2,10. La limonite n'est transparente que sous faible épaisseur ; l'éclat est vitreux à terne et sa couleur est brune à brun foncé ou noir brunâtre ; quand elle est terreuse, elle est brun terne, jaune brunâtre, jaune ocre, brun rougeâtre ou brun-orangé ; la forme botryoïdale présente occasionnellement des irisations.

Gisements. La limonite est un minéral secondaire formé dans des conditions oxydantes à température et à pression ordinaires. Elle peut se former sur place par oxydation directe d'autres minéraux de fer, ou comme précipité inorganique ou biologique dans les marécages et les gisements lacustres ou marins. Elle constitue, en partie avec la goethite, la zone supérieure de nombreux filons métalliques. La limonite se trouve toujours intimement associée à la goethite et est souvent associée à l'hématite et aux minerais secondaires de manganèse. On rencontre de beaux échantillons de limonite dans de nombreuses localités telles que Berezovskij Sverdlovskaïa (U.R.S.S.), Uttenberg en Carinthie (Autriche), Quiro Lima (Pérou), Nova Scotia (Canada), Schrotteberg, Nassau Siegen (Allemagne fédérale), Rio Marina dans l'île d'Elbe (Italie), et Vic Dessos (Ariège).

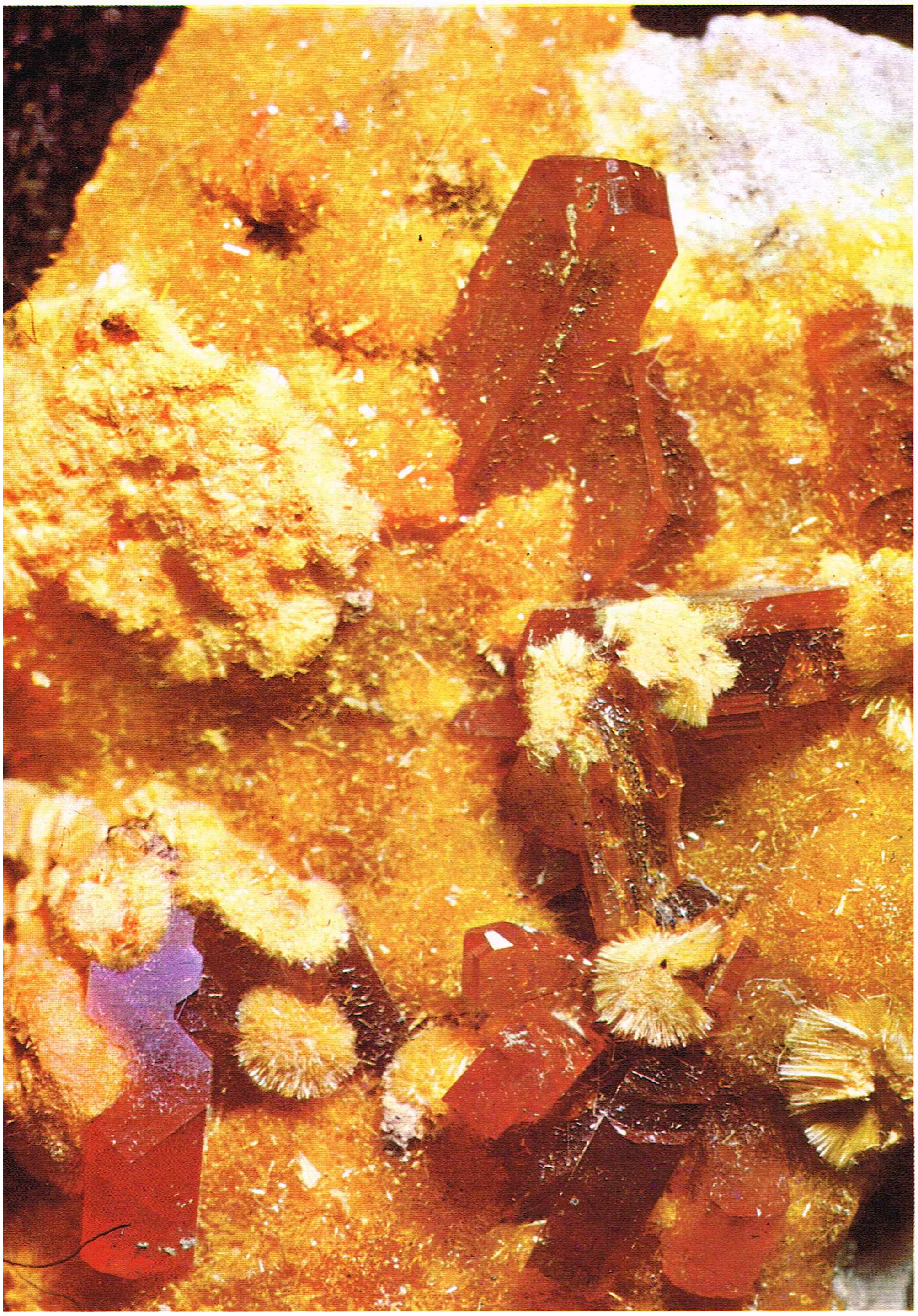

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ Billiétite *associée à de l'uranotile : un oxyde radioactif. Shinkolowe (Zaïre) [Londres, British Museum].*

Thorotungstite, $WO_2(OH)_2H_2O$ - monoclinique

Ce rare minéral se présente le plus souvent en encroûtements et en minuscules cristaux allongés et plats.

Propriétés. Densité : $5\frac{1}{2}$; indices de réfraction supérieurs à 1,74 et biréfringence élevée. Couleur jaune.

Gisements. C'est un produit d'altération de la wolframite ou de la scheelite; elle est trouvée dans les gisements alluvionnaires de cassitérite à Pulai, dans le district de Kenta, et à Perak (Malaisie).

Hétérogénite, Co O OH - rhomboédrique

L'hétérogénite est un minéral mal défini et colloïdal, contenant de l'eau capillaire ou d'adsorption et des impuretés. Elle se présente en masses réniformes ou en globules.

Propriétés. Dureté : 3 à 4; densité : 3,44. Éclat terne à vitreux, noir ou brun rougeâtre à noirâtre. Sa cassure est conchoïdale.

Gisements. C'est souvent un produit d'altération. On en trouve de belles masses à Shinkolobwe, au Katanga.

Chalcophanite, $ZnMn_3O_73H_2O$ - triclinique

Les cristaux sont généralement petits et tabulaires, d'aspect souvent octaédrique. Ils sont communément dans les druses ou en encroûtements stalactitiques. La chalcophanite se présente aussi sous forme massive, dense, grenue ou en fibres aplaties.

Propriétés. Dureté : $2\frac{1}{2}$; densité : 4,00; indices de réfraction : voisins de 2,72. Les fragments très minces sont transparents. L'éclat est métallique, bleuâtre à noir de fer. La chalcophanite se clive parfaitement; ses fragments plats et minces sont flexibles.

Gisements. Ce minéral secondaire se trouve en association avec les oxydes hydratés de manganèse et de fer. De beaux cristaux viennent d'Ojuela, Durango (Mexique).

Quensélite, PbOMn O OH - monoclinique

Les cristaux sont tabulaires sur (010), légèrement allongés selon [001] ou [100], et striés sur (011), parallèlement à (100).

Propriétés. Dureté : $2\frac{1}{2}$; densité : 6,84; indices de réfraction : voisins de 2,30. Opaque; éclat métallique à adamantin, noir de poix. La quensélite se clive parfaitement sur (001). Ses lamelles fines sont flexibles.

Gisements. On a trouvé ce minéral à Langban (Suède), associé à la calcite et la baryte dans des crevasses recoupant un minerai d'hausmannite, d'hématite et de braunite.

Vanoxite, $2V_2O_4V_2O_58H_2O$ - orthorhombique

Les cristaux sont microscopiques avec, quelquefois, une section rhomboédrique. La vanoxite est parfois massive.

Propriétés. Opaque et de couleur noire; ses fragments extrêmement minces transmettent une couleur brunâtre.

Gisements. On trouve la vanoxite à Paradox Valley (Colorado), où elle forme le ciment d'un grès ainsi que des encroûtements.

Becquerélite, $6(UO_2)(OH)_2$-$Ca(OH)_2 \cdot 4H_2O$ - orthorhombique

Ce minéral, rare, se présente en petites masses, ou en cristaux tabulaires sur (001) ou allongés selon [010]; les faces (010) sont striées suivant (100) et les faces (101) sont striées suivant (010).

Propriétés. Dureté : 2 à 3; densité : 5,2; indices de réfraction : 1,73 à 1,83; biréfringence moyenne. Transparente; éclat adamantin à gras et de couleur jaune brunâtre à ambre; elle se clive parfaitement sur (001) et sur (101); les macles polysynthétiques sur (110) donnent des agrégats pseudo-hexagonaux.

Gisements. Les meilleurs cristaux viennent des zones d'oxydation des gisements uranifères du haut Katanga.

Billiétite, $6(UO_2)(OH)_2$ - $Ba(OH)_2 \cdot 4H_2O$ - orthorhombique

Ce minéral d'uranium est rare; il a des propriétés et un aspect voisins de ceux de la becquerélite. Les meilleurs échantillons proviennent de Margnac (Haute-Vienne) et du haut Katanga.

Fourmariérite, $8(UO_2)_2(OH)_2$ - $2Pb(OH)_2 \cdot 4H_2O$ - orthorhombique

Les cristaux, toujours très petits, sont habituellement tabulaires sur (001) et allongés selon [010]; la forme {001} est striée selon [010].

Propriétés. Dureté : 3 à 4; densité : 6,05; indices de réfraction : 1,85 à 1,94; biréfringence faible. Transparente; éclat adamantin rouge à rouge d'or, parfois brun. La fourmariérite se clive parfaitement sur (001).

Gisements. Ce minéral secondaire est trouvé en association avec la torbernite, la kasolite et la curite, comme produit d'altération de l'uraninite à Kasolo (Katanga).

Vandenbrandéite, $(UO_2)(OH)_2$ - $Cu(OH)_2$ - triclinique

Les cristaux sont généralement petits, aplatis sur (001) et souvent regroupés en agrégats parallèles. La vandenbrandéite est parfois massive.

Propriétés. Dureté : 4; densité : 5,03; indices de réfraction : 1,76 à 1,80, biréfringence faible. Elle est transpa-

rente lorsqu'elle est en petites paillettes ; la couleur est vert foncé à presque noire ; elle se clive parfaitement sur (001).
Gisements. Ce minéral secondaire a été trouvé à Kalongwe (Katanga), associé à la kasolite, la sklodowskite, la malachite, la goethite, la chalcocite, la chalcopyrite et la pechblende.

Curite, $3PbO\text{-}8UO_3\text{-}4H_2O$ - orthorhombique

La curite, dont le nom a été donné en l'honneur de Pierre Curie (1859-1906), se présente en cristaux prismatiques allongés et striés selon (001). Habituellement, elle est massive compacte, terreuse ou saccharoïde et également en agrégats de fines aiguilles.
Propriétés. Dureté : 4 à 5 ; densité : 7,26 ; indices de réfraction : 2,06 à 2,15 ; biréfringence très faible. Les cristaux fins sont transparents ; éclat adamantin rouge-orangé.
Gisements. Ce minéral se rencontre le plus souvent comme produit d'oxydation de l'uraninite et associé à des minéraux, tels que la torbernite, la soddyite, la sklodowskite, la fourmariérite et d'autres minéraux secondaires d'uranium. On trouve de beaux échantillons à Shinkolobwe (Katanga).

Guilleminite, $Ba[(UO_2)_3(OH)_4(SeO_3)_2] \cdot 3H_2O)$ - orthorhombique

En enduits pulvérulents ou en tout petits cristaux, ce minéral rare a été trouvé à Musonoï (Katanga).

Schwartzembergite, $Pb_3\ Cl_2|O|OH|IO_3$ - orthorhombique pseudoquadratique

Les cristaux sont pyramidaux aplatis et arrondis. Ce minéral peut aussi être massif ou en encroûtements compacts à terreux.
Propriétés. Dureté : 2 à $2\frac{1}{2}$; densité : 7,39 ; indices de réfraction : 2,25 à 2,36 ; biréfringence faible. Éclat adamantin jaune miel à brun rougeâtre, jaune paille ou jaune citron.
Gisements. On trouve de beaux cristaux à la mine de San Raphael, Serra Gorda (Chili), associés à la percylite, à la paralaurionite et au gypse.

Carbonates

Magnésite, $MgCO_3$ - rhomboédrique

La magnésite est habituellement massive, grossièrement à finement grenue ou très compacte et ressemblant à de la porcelaine ; elle est aussi terreuse ou quelquefois crayeuse, lamellaire à grossièrement fibreuse. Les cristaux bien formés sont rares ; ils sont généralement en rhomboèdres très plats ou plus rarement prismatiques selon [0001], ou encore scalénoédriques.
Propriétés. Dureté : $3\frac{3}{4}$ à $4\frac{1}{4}$; densité : 3,00 ; indices de réfraction : 1,509 et 1,700 ; biréfringence élevée. Transparente à translucide ; éclat vitreux, incolore quand les cristaux sont purs ; elle peut aussi être blanche, blanc grisâtre, jaunâtre à brune ; elle se clive parfaitement sur $(10\bar{1}1)$; elle montre quelquefois une fluorescence et une phosphorescence verdâtre ou bleuâtre ; dans les radiations ultraviolettes, elle est triboluminescente.
Gisements. Les gisements de magnésite sont variés. Elle peut se former par altération des roches riches en magnésium (serpentine, péridotite, dunite). On la trouve également en lits cristallins associés au talc, à la chlorite et aux micaschistes d'origine métamorphique, comme remplacement de la calcite des roches par des solutions contenant du magnésium. La dolomite peut former aussi des gisements sédimentaires. De très beaux échantillons proviennent du mont Greiner au Tyrol (Autriche), du Djebel Hadifa (Tunisie) et de Bom Jesus das Meiras (Brésil).
La **mésitite** est une variété intermédiaire entre la magnésite et la sidérite (du fer se substituant au magnésium). Les minéraux sont habituellement blanc jaunâtre à brunâtres, rarement noirs. On trouve de beaux groupes de cristaux de mésitite à Vizille (Isère) et à Traversella dans le Piémont (Italie).

Smithsonite, $ZnCO_3$ - rhomboédrique

Les cristaux bien cristallisés de plus de 2 cm sont rares ; ils sont habituellement de forme rhomboédrique $\{10\bar{1}1\}$ ou scalénoédrique. Ordinairement, la smithsonite

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ ***Cristaux de* smithsonite *provenant de Berg Aukas, Grootfontein (Afrique du Sud) [Londres, British Museum].***

est botryoïdale, réniforme ou stalactiforme ; elle est aussi grossièrement grenue à massive, compacte ou terreuse et friable.
Propriétés. Dureté : 4 à $4\frac{1}{2}$; densité : 4,43 ; indices de réfraction : 1,62 à 1,85 ; biréfringence élevée. Rarement transparente, habituellement translucide ; éclat vitreux, quelquefois perlé sur les faces des cristaux. La couleur est variée, souvent blanc grisâtre à gris-noir, blanc verdâtre ou brunâtre ; elle peut aussi être vert pomme, vert bleuâtre, bleue, grise, bleuâtre, rose, rouge, jaune, brune, blanche et très rarement incolore. La smithsonite est fragile ; sa cassure est inégale à imparfaitement conchoïdale. Certains échantillons sont fluorescents (blanc verdâtre ou bleuâtre) aux radiations ultraviolettes.
Gisements. Ce minéral secondaire se trouve principalement dans la zone d'oxydation des filons zincifères. Il est souvent associé à l'hémimorphite ainsi qu'à la cérusite, la malachite, l'azurite, l'anglésite, la pyromorphite, la mimétite, etc. Il y a de très belles smithsonites en Grèce au Laurium (Loutso-Lavrio), au Sonora (Mexique), au mont Agoukiano (Sardaigne), au Tsumeb dans le Sud-Ouest africain. Les plus grands cristaux connus viennent de Broken Hill (Rhodésie).

Sidérite, $FeCO_3$ - rhomboédrique

Les cristaux sont généralement rhomboédriques avec la forme $\{10\bar{1}1\}$ ou moins fréquemment $\{01\bar{1}2\}$; ils peuvent être tabulaires minces à épais sur {0001} ou prismatiques selon [0001] ; les faces des cristaux sont incurvées. La sidérite est souvent massive, parfois grossièrement à finement grenue ou botryoïdale, globuleuse, oolitique ou terreuse.
Propriétés. Dureté : $3\frac{3}{4}$ à $4\frac{1}{4}$; densité : 3,96 ; indices de réfraction ; 1,87 à 1,63 ; biréfringence élevée. Translucide à subtranslucide ; éclat vitreux (parfois perlé ou soyeux) ; brun jaunâtre ou grisâtre à brun et brun rougeâtre ; la couleur peut aussi être gris jaunâtre, gris verdâtre, vert pâle et quelquefois blanche ; la teinte brun foncé ou noirâtre est due à une oxydation partielle ; elle se ternit quelquefois en donnant des irisations. La sidérite se clive parfaitement sur $\{10\bar{1}1\}$. Elle est fragile ; sa cassure est inégale à conchoïdale.
Gisements. On la trouve en grande quantité dans les gisements secondaires, associée à des schistes et des argiles. Ces dépôts sont souvent formés par le processus biogénétique dans des conditions déficitaires en oxygène. La sidérite est également un minéral de gangue primaire située dans les filons hydrothermaux métalliques et,

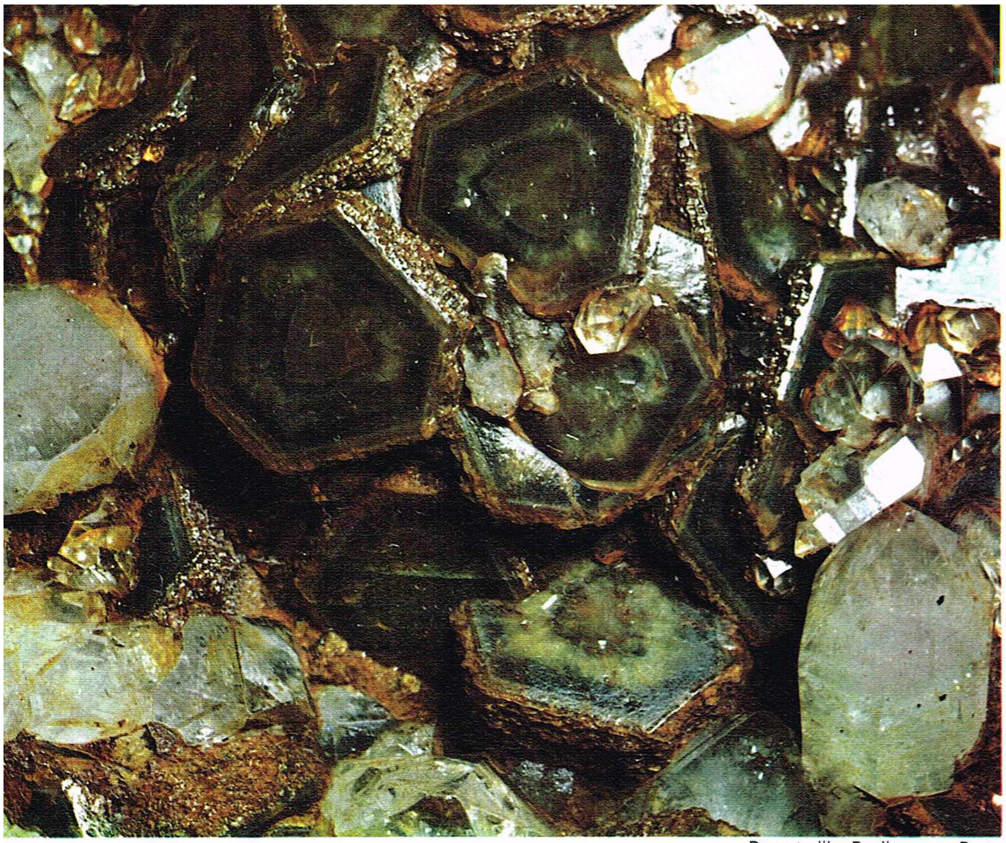

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Cristaux de sidérite zonée, associée à du quartz (Wheal Maudin, Cornwall) [Londres, British Museum].*

quelquefois, comme minéral principal dans les filons. Les plus beaux échantillons proviennent d'Allevard (Isère), de Traversella au Piémont (Italie), de Saint-Hilaire au Québec (Canada), de la mine de Beni-Akil (Algérie), du Tsumeb (Sud-Ouest africain) et de Panasqueira (Portugal).

Cobaltocalcite, ou sphérocobaltite, $CoCO_3$ - rhomboédrique

Les cristaux sont rares; la cobaltocalcite se présente habituellement en petites masses sphériques, avec une surface cristalline et une structure concentrique et radiée.

Propriétés. Dureté : 4; densité : 4,13; indices de réfraction : 1,60 à 1,85; biréfringence élevée. Translucide à subtranslucide; éclat vitreux, rouge-rose, s'altérant superficiellement en gris-brun ou noir velouté.

Gisements. De beaux échantillons proviennent de Boleo (Mexique) et de Kolwezi, au sud du Katanga.

Rhodochrosite, $MnCO_3$ - rhomboédrique

Les cristaux distincts ne sont pas courants; généralement rhomboédriques avec des faces souvent arrondies, ils sont rarement scalénoédriques; ils peuvent être tabulaires, épais sur (0001) ou prismatiques allongés selon [0001]; les formes (11$\bar{2}$0) et (21$\bar{3}$1) sont souvent striées selon (1101). La rhodochrosite est généralement massive compacte ou grossièrement grenue; elle peut être globuleuse et botryoïdale.

Propriétés. Dureté : 3 $\frac{1}{2}$ à 4; densité : 3,70; indices de réfraction : 1,60 à 1,82; biréfringence élevée. Transparente à translucide; éclat vitreux (parfois perlé) de couleurs variées : différentes nuances de rose à rose-rouge et quelquefois rouge vif, gris jaunâtre, jaune ou brun. Elle se clive parfaitement sur {10$\bar{1}$1}. Elle est fragile et sa cassure est inégale à conchoïdale.

Gisements. C'est un minéral commun de gangue primaire, trouvé dans les filons hydrothermaux de moyenne et de basse température, et plus particulièrement dans les minerais d'argent, de plomb, de zinc, et de cuivre, où il s'associe à la calcite, la sidérite, la dolomite, la baryte, au quartz, à la manganite, l'alabandite, etc. On le rencontre également dans les gisements métasomatiques de haute température (ou métamorphiques), associé à la rhodonite et au grenat; c'est également un minéral secondaire dans les gisements résiduels des oxydes de fer et de manganèse d'origine sédimentaire. De beaux cristaux viennent de la mine d'Emma, de Butte Montana, d'Alicante et de la mine de John Reed (Colorado), de Vieille-Aure dans les Hautes-Pyrénées, de Trepca (Yougoslavie), de Hapfenberg (Essen). De beaux échantillons cristallisés proviennent également d'Afrique du Sud.

Calcite, $CaCO_3$ - rhomboédrique

La calcite se présente fréquemment en cristaux isolés, de formes extrêmement variées. Les plus fréquents sont : les cristaux prismatiques allongés selon [0001] avec les faces (10$\bar{1}$0) dominantes, ou moins fréquemment (11$\bar{2}$0), ainsi que les cristaux tabulaires minces à épais sur (0001), avec latéralement la forme {10$\bar{1}$0}, et qui peuvent passer à des formes lenticulaires par distorsion. Sont également fréquents les rhomboèdres aplatis avec la forme {01$\bar{1}$2}, les scalénoèdres avec la forme {21$\bar{3}$1}. Les cristaux rhomboédriques avec uniquement les faces (10$\bar{1}$1) sont rares et ces faces sont ternes. La face (0001) est souvent grossière et terne avec, quelquefois, un éclat perlé. Les faces autres que (10$\bar{1}$1) en zone avec (01$\bar{1}$1) sont assez souvent striées sur (01$\bar{1}$1). La calcite peut également se

▼ *Cristaux rhomboédriques de rhodochrosite provenant de la mine Sweet Home (Colorado) [Londres, British Museum].*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

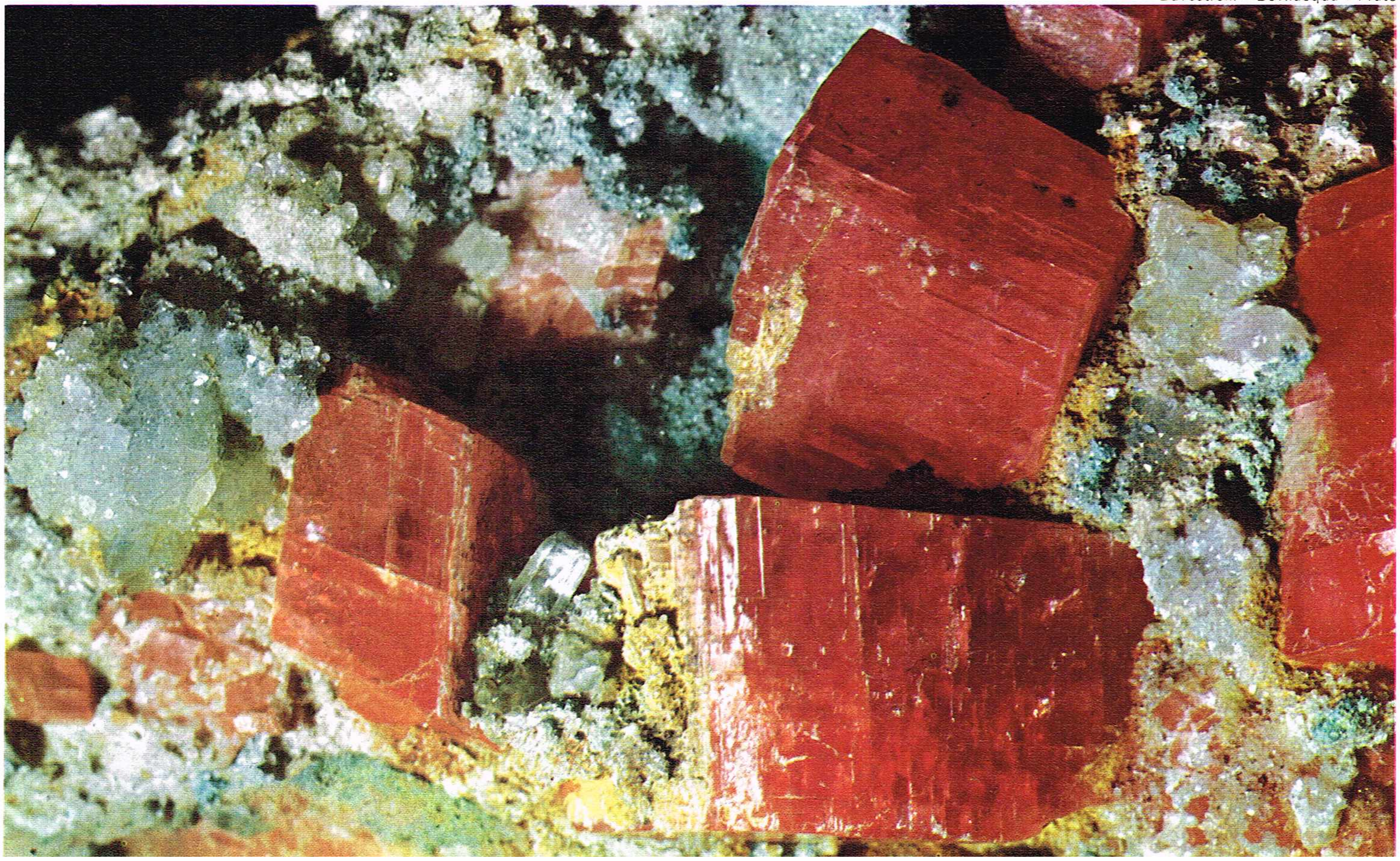

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

présenter en agrégats parallèles et subparallèles, les cristaux lenticulaires pouvant être empilés verticalement. Des cristaux de formes variées et de différentes générations peuvent croître en position parallèle. La calcite est souvent massive, grossièrement grenue à impalpable, nodulaire, coralloïdale ou terreuse.

Propriétés. Sa dureté sert à définir le degré 3 de l'échelle de Mohs. Densité : 2,71 ; indices de réfraction : 1,49 à 1,66. Sa biréfringence élevée a permis à Érasme Bartholin de découvrir le phénomène de la double réfraction dans les cristaux. Elle est transparente à translucide ; son éclat, vitreux, est quelquefois perlé ou irisé sur les faces de clivage. Incolore ou blanche quand elle est pure, sa couleur varie avec les substitutions isomorphiques d'atomes de calcium (avec fer, manganèse, cobalt, etc.) ou du fait de la présence de diverses impuretés : elle peut être rose, jaune à brune, rouge, violette, bleu pâle à lavande, verdâtre, gris-noir. Le clivage est parfait sur $\{10\bar{1}1\}$, ce qui ne permet pas souvent d'observer sa cassure conchoïdale, plus difficile à mettre en évidence. Beaucoup de calcites sont fluorescentes aux ultraviolets et aux rayons X.

Gisements. La calcite est l'un des minéraux les plus communs et les plus largement distribués à la surface de la Terre. Elle est le constituant principal des roches carbonatées (calcaires, marbres, etc.), et on la rencontre dans de nombreux types de gisements (sédimentaires, filoniens, etc.). La localité la plus classique pour les cristaux transparents de qualité optique (spath d'Islande) est Helgustadir dans l'Eskefiord (Islande). De grands cristaux, que l'on peut voir dans toutes les collections, viennent du Guanajuato (Mexique), de Joplin (Missouri). Quant aux fines cristallisations, très recherchées par les collectionneurs, elles viennent d'Andreasberg (Harz) d'Egremont, dans le Cumberland (Angleterre). En France, de beaux cristaux ont été trouvés à Romanèche (Saône-et-Loire), à Saint-Julien-du-Gard (Gard), et à Maronne (Isère).

L'une des pseudomorphoses les plus appréciées des collectionneurs est la calcite de Fontainebleau, pseudomorphosée en grès.

Dolomite, $CaMg(CO_3)_2$ - rhomboédrique
Ankérite, $CaFe(CO_3)_2$ - rhomboédrique

Les cristaux sont habituellement rhomboédriques avec la forme $\{10\bar{1}1\}$ ou moins fréquemment avec $\{40\bar{4}1\}$. Ils peuvent aussi être prismatiques avec la forme $\{11\bar{2}0\}$ et terminés par un rhomboèdre, tabulaires sur (0001) et $\{10\bar{1}1\}$ étant également développées. Les faces $(10\bar{1}1)$ sont souvent striées horizontalement et incurvées. La dolomite et l'ankérite peuvent être massives, grossièrement à finement grenues ; elles sont rarement fibreuses ou pisolitiques. La dolomite est un minéral important

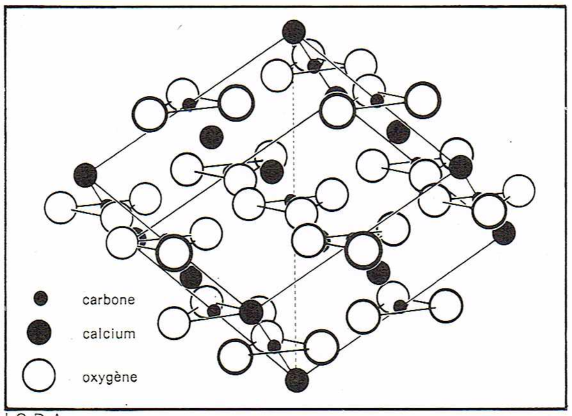

I.G.D A

▲ *En haut, cristaux de calcite provenant de l'Egremont (Cumberland).*
Ci-dessus, représentation schématique de la structure de la calcite.

▼▶ *Ci-contre, de haut en bas, représentation schématique de : un rhomboèdre fondamental de calcite avec zone de séparation secondaire ; deux cristaux scalénoédriques (avec les faces de rhomboèdre direct et en « dent de chien ») ; un cristal de calcite maclé selon la base 0001.*
Ci-dessous, de gauche à droite : calcite maclée selon $10\bar{1}1$; les deux autres cristaux maclés selon 0001 (d'après Kokscharow).

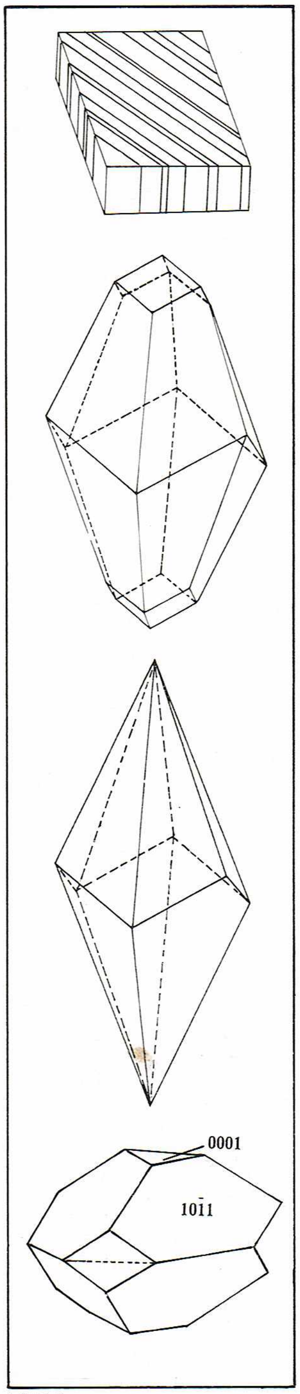

I.G.D.A.

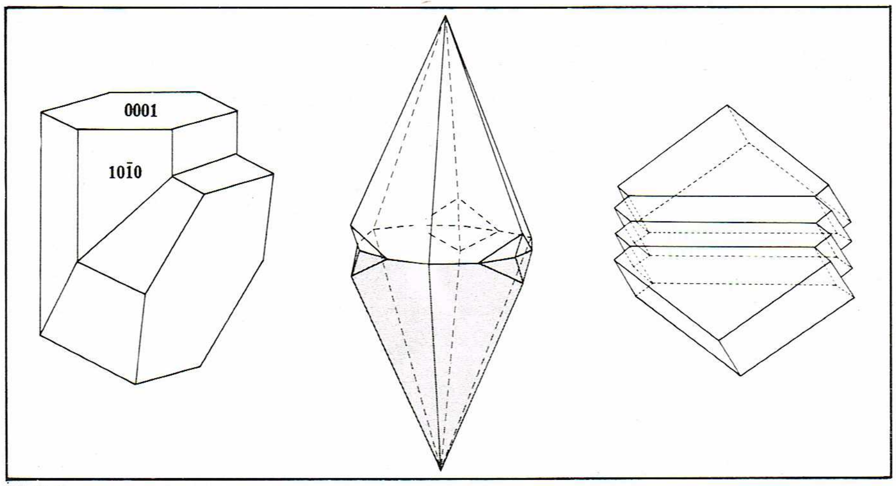

I.G.D.A.

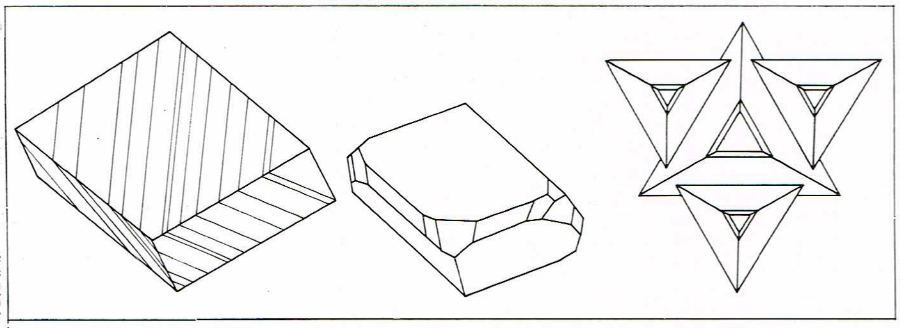

I.G.D.A.

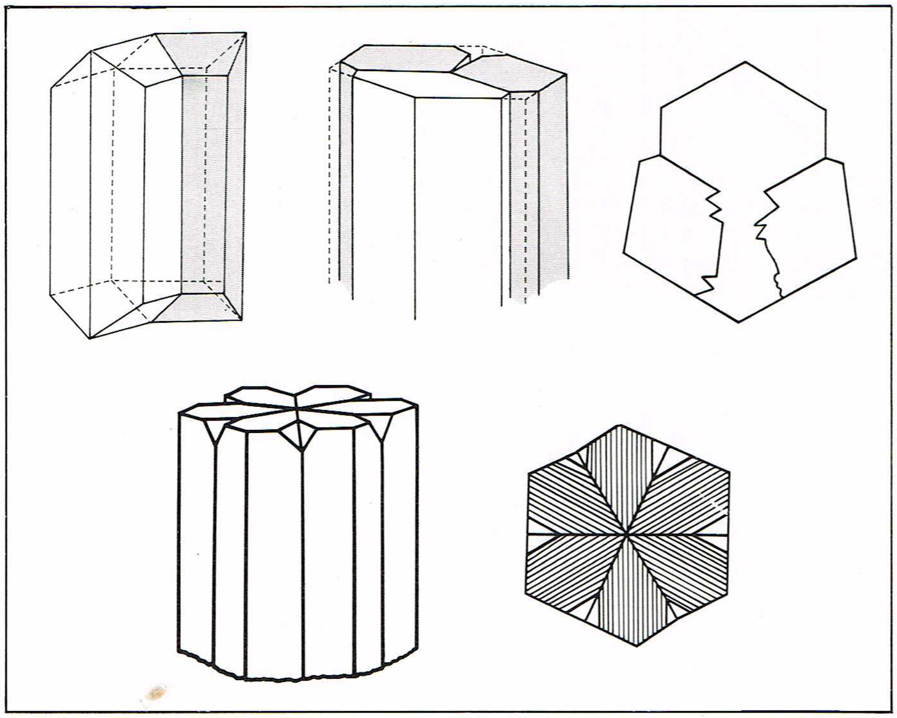

I.G.D.A.

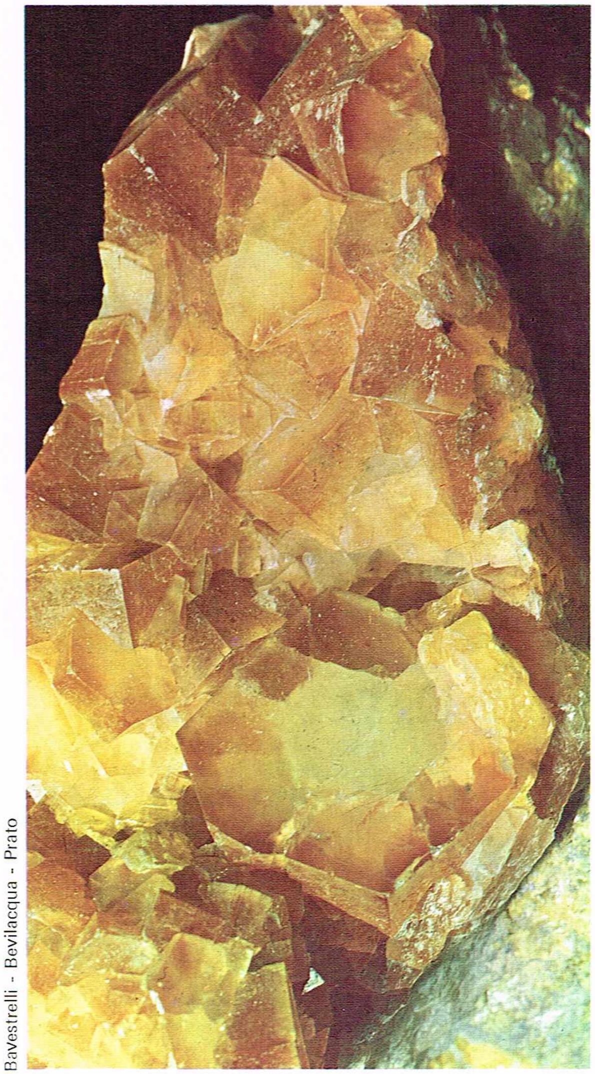

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲▶ *Ci-dessus, en haut, représentation schématique, de gauche à droite, d'un cristal rhomboédrique de* **dolomite** *avec plan de séparation selon* $02\bar{2}1$ *(dû à des macles polysynthétiques); d'un cristal de* **dolomite** *de Traversella présentant plusieurs faces; d'un cristal de Crevola dans lequel les petits cristaux sont tournés de 60° par rapport au grand cristal (d'après Grill). En bas, cinq schémas représentant des cristaux maclés d'***aragonite** *: une macle de 2 individus; une macle composée de 3 individus; une coupe transversale de la macle précédente; une aragonite maclée dont le contour hexagonal est dû à l'interpénétration de 3 individus; la coupe de ces derniers, qui montre, grâce aux stries dans trois directions, qu'il s'agit bien de trois cristaux (d'après Gallitelli). Ci-contre, à droite, cristaux pseudo-hexagonaux d'***aragonite** *maclée provenant d'Agrigente (musée d'Histoire naturelle de Milan).*

dans la formation des roches sédimentaires ou métamorphiques; elle est alors massive, compacte, ou grenue à saccharoïde, et constitue des marbres.

Propriétés. Dureté : 3 ½ à 4; densité : 2,85 (elle augmente quand Mg est substitué par Fe); indices de réfraction : 1,50 à 1,68 (un peu plus élevés pour l'ankérite); biréfringence élevée. Translucide à subtranslucide; éclat vitreux à perlé, incolore ou blanc pour la dolomite pure mais quelquefois gris ou verdâtre devenant brun avec l'augmentation de la teneur en fer. La dolomite ferrifère et l'ankérite passent à une couleur rougeâtre ou au brun foncé quand elles sont exposées aux intempéries. Les cristaux se maclent communément sur le plan (0001) et se clivent parfaitement sur $\{10\bar{1}1\}$. Ces minéraux sont fragiles; leur cassure est subconchoïdale. Quelques variétés sont fluorescentes aux radiations ultraviolettes, ou triboluminescentes.

Gisements. La dolomite massive se rencontre en vastes couches dans le monde entier. On suppose que ces roches sont d'origine secondaire, transformées à partir du calcaire ordinaire ou du marbre par l'action de solutions contenant du magnésium. De très beaux cristaux de dolomite se trouvent à Eugui, près de Pampelune (Espagne), en Italie à Traversella dans le Piémont et à Brosso, à Pezey (Savoie), à Trepca (Yougoslavie) et à Morro-Velho (Brésil). On trouve de beaux échantillons d'ankérite à Allevard-en-Isère (France) et à Ojos Negros, Teruel (Espagne).

Aragonite, $CaCO_3$ - orthorhombique

Les cristaux d'aragonite non maclés sont très rares. Habituellement prismatiques et plus ou moins allongés selon [001], ils sont quelquefois aplatis sur (010). Ils peuvent être aussi aciculaires, ou moins fréquemment pyramidaux ou tabulaires, épais sur (001) avec la forme {110} et {010}. On rencontre souvent l'aragonite en agrégats de cristaux pseudo-hexagonaux et en groupes radiés ou étoilés de cristaux aciculaires. On la trouve aussi sous les formes coralloïdales ou globulaires, pisolitiques avec une structure zonée fibroradiée et concentrique, stalactitique ou en encroûtement.

Propriétés. Dureté : 3 ½ à 4; densité : 2,95; indices de réfraction : np = 1,53, ng = 1,69. Transparente à translucide; éclat vitreux inclinant à résineux sur les surfaces de cassure. L'aragonite est incolore à blanche, grise, jaunâtre, bleue, verte, violet pâle à foncé, rouge rosé. Elle se macle couramment sur {110}. Elle est fragile et sa cassure est conchoïdale. Elle est fluorescente aux rayons X et à la lumière ultraviolette, l'intensité et la couleur variant suivant les échantillons. Elle est aussi thermoluminescente.

Gisements. L'aragonite est beaucoup moins répandue et abondante que la calcite. Les conditions physicochimiques de sa formation sont beaucoup plus étroites que celles de la calcite; elle est souvent convertie en ce minéral, son environnement changeant également. L'aragonite se forme toujours dans les gisements de basse température proches de la surface. On la trouve principalement dans les gisements de travertins des sources chaudes, en oolites dans les fonds marins, en cristaux disséminés, dans les lits de gypse et d'argile, etc. De très beaux échantillons se rencontrent dans de nombreuses localités, telles que Cianciana et Falconera (Sicile), Bilin (Bohême), Cleator (Cumberland), Vertaizon (Puy-de-Dôme), Antares (îles Kerguelen), Molina de Aragon (Espagne), Bastennes (Landes), Gonnesa (Sardaigne), etc.

Alstonite, $CaBa(CO_3)_2$ - orthorhombique

Les cristaux sont pyramidaux pseudo-hexagonaux, formés par la répétition d'individus maclés, limités par

les formes {111} et {021}, ou en pyramides pointues. L'alstonite se présente également en prismes pseudo-hexagonaux résultant de trois individus maclés limités par les formes {010} et {110}. Les faces dipyramidales sont fortement striées horizontalement.

Propriétés. Dureté : 4 à $4\frac{1}{2}$; densité : 3,707 ; indice de réfraction : np = 1,52, ng = 1,67. Transparente à translucide ; éclat vitreux incolore à blanc de neige, mais aussi grisâtre, crème ou rose à rose-rouge pâle (blanchissant quand elle est exposée à l'air) ; cassure inégale ; l'alstonite est légèrement fluorescente pour les grandes longueurs d'onde des radiations ultraviolettes.

Gisements. Ce minéral se rencontre associé à la calcite, la baryte et la withérite dans les gisements hydrothermaux de basse température ; les deux principaux gisements sont situés en Grande-Bretagne : il s'agit de la mine de plomb et de zinc de Brownley Hill, près d'Alston (Cumberland), et de la mine de plomb de Fallowfield, près d'Hexham (Northumberland).

Strontianite, $SrCO_3$ - orthorhombique

Les cristaux sont prismatiques selon [001], plus ou moins allongés et souvent aciculaires. La strontianite à haute teneur en calcium se présente sous forme pyramidale très abrupte. Les cristaux sont souvent pseudo-hexagonaux à cause du développement égal des formes {110} et {010}. Les faces (110) et (010) sont striées horizontalement. La strontianite peut aussi être massive, parfois fibreuse, grenue ou mamelonnée.

Propriétés. Dureté : $3\frac{1}{2}$; densité : 3,76 ; indices de réfraction : np = 1,52, ng = 1,67. Transparente à translucide ; éclat vitreux à résineux sur les surfaces de cassure inégale ; couleur incolore à grise, jaunâtre ou verdâtre. La strontianite se macle communément sur le plan (110) et se clive presque parfaitement sur {110} ; Elle est fragile, et sa cassure est inégale à subconchoïdale. Elle est fluorescente et phosphorescente aux rayons X et à la lumière ultraviolette, et quelquefois thermoluminescente.

Gisements. On trouve ce minéral hydrothermal de basse température associé à la baryte, la célestite et la calcite dans les filons des marbres et roches calcaires ainsi que, moins fréquemment, comme minéral de gangue des filons de sulfure. On le trouve aussi en masses concrétionnées ou en géodes dans les roches calcaires et les argiles. Les plus beaux cristaux proviennent de Hamm et de Dreustenfurt (Westphalie).

Withérite, $BaCO_3$ - orthorhombique

Les cristaux sont toujours maclés plusieurs fois sur {110}, donnant des dipyramides pseudo-hexagonales ; ils peuvent être prismatiques courts, allongés selon [001] ou tabulaires à lenticulaires avec une base convexe. Les faces sont habituellement rugueuses et striées horizontalement. La withérite peut aussi être globuleuse, botryoïdale ou grossièrement fibreuse.

Propriétés. Dureté : 3 à $3\frac{1}{2}$; densité : 4,29 ; indices de réfraction : np = 1,53, ng = 1,67. Transparente à translucide ; incolore à laiteuse, blanche ou grisâtre, mais parfois aussi faiblement teintée de jaune, de brun ou de vert. Sa cassure est inégale. Elle est fluorescente et phosphorescente aux rayons X et à la lumière ultraviolette ; elle est aussi thermoluminescente.

Gisements. C'est le minéral de baryum le plus commun après la baryte ; on le trouve associé dans les filons hydrothermaux à la baryte et la galène. De beaux cristaux proviennent de Pribram Cechy (Tchécoslovaquie) et en Angleterre d'Alston-Moor (Cumberland), de la mine d'Anglesey (Lancashire) et du Northumberland.

Cérusite, $PbCO_3$ - orthorhombique

La cérusite se présente sous des formes extrêmement variées. Les cristaux isolés sont souvent tabulaires sur {010} et allongés selon [001] ou [100] ; ils sont aussi équidimensionnels, ou dipyramidaux et alors pseudo-hexagonaux ; ils sont plus rarement aciculaires. Les formes {010} sont habituellement striées selon [100] ; les cristaux sont souvent groupés en agrégats réticulés ou en grappes. Ce minéral se présente également sous forme massive, grenue à dense et compacte, quelquefois pulvérulente à terreuse.

Propriétés. Dureté : 3 à $3\frac{1}{2}$; densité : 6,55 ; indices de réfraction : np = 1,80, ng = 2,07, biréfringence élevée. Transparente à translucide ; éclat adamantin à vitreux, résineux ou perlé et quelquefois submétallique quand elle est recouverte d'un film superficiel. Elle est incolore à blanche, et grise ou gris foncé à noire à cause d'inclusions de microcristaux (sulfures, oxydes) ; les composés de cuivre donnent une couleur bleue à verte. Elle est très fragile et sa cassure est conchoïdale. Les macles sont très communes sur {110} en particulier. Les macles de contact produisent des groupes étoilés pseudo-hexagonaux ou des agrégats réticulés ; elles peuvent aussi être lamellaires. La cérusite est fluorescente dans diverses teintes de jaune aux rayons X et aux grandes longueurs d'onde de l'ultraviolet.

Gisements. C'est un minéral de plomb secondaire, commun, trouvé typiquement dans la partie oxydée supérieure des gisements minéraux, où il est associé à l'anglésite, la limonite et moins fréquemment à la pyromorphite, le phosgénite, la malachite, la smithsonite et d'autres minéraux secondaires contenant du plomb, du zinc ou du cuivre. De très beaux échantillons proviennent de Sidi Amor Ben Salem, de Trang-Da (Nord Vietnam), de Broken Hill (Nouvelles-Galles du Sud, Australie), des mines de Tchicoumba, Mindouli et de Djoué (Zaïre), de la mine Virgem del Carmen, dans le Castillo de Rodal Guilar (Espagne), de Dundas (Tasmanie) et de Melle (Deux-Sèvres). Les plus beaux cristaux connus viennent du Tsumeb (Namibie) ; ils dépassent parfois 15 cm.

Barytocalcite, $CaBa(CO_3)_2$ - monoclinique

Elle se présente habituellement en cristaux primastiques, plus ou moins allongés selon l'axe [101] ou prismatiques courts selon [001] ; certains cristaux sont équidimensionnels ; les faces (100) sont striées selon (001). La barytocalcite est quelquefois massive.

Propriétés. Dureté : 4 ; densité : 3,66 ; indices de réfraction : np = 1,52, ng = 1,68. Transparente à translucide ; éclat vitreux à résineux ; incolore à blanche, grisâtre, verdâtre ou jaunâtre. Clivage parfait suivant {210}. Elle est fragile, et sa cassure est inégale à subconchoïdale. Elle est faiblement fluorescente à la lumière ultraviolette.

Gisements. Les plus beaux cristaux trouvés atteignent 5 cm et se présentent en masses clivables associées à la baryte, à la calcite et à la fluorite dans les veines de calcaire d'Alston-Moor, dans le Cumberland (Grande-Bretagne).

Azurite, $Cu_3\ (OHCO_3)_2$ - monoclinique

L'azurite, dont le nom a été donné par allusion à sa couleur, a été très anciennement employée comme pigment bleu. Les cristaux sont de formes variées : tabulaires sur {001} ou sur {102} et {102}, prismatiques selon [001] avec la forme {110} ou {100} dominante, ou encore prismatiques selon [010]. Ils sont parfois équidimensionnels. La face (001) est striée suivant la direction [100] et la face (001) selon [010]. Les cristaux forment des groupes subparallèles ou des agrégats rhomboïdaux, lenticulaires

▼ ***Cristaux maclés de cérusite provenant du Tsumeb (Namibie) [Londres, British Museum]. Le schéma représente une macle multiple de cristaux de cérusite.***

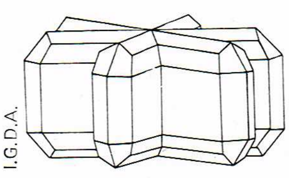

I.G.D.A.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Muséum d'histoire naturelle, Paris

▲ *Concrétion zonée d'azurite associée à de la* malachite *provenant de Clifton (Arizona)* [*Muséum national d'histoire naturelle de Paris*].

ou sphériques. L'azurite se présente rarement sous forme massive ou stalactitique, avec une structure grossièrement radiée.

Propriétés. Dureté : 3 ½ à 4 ; densité : 3,773 ; indices de réfraction : np = 1,73, ng = 1,84 ; biréfringence élevée. Transparente à translucide ; éclat vitreux presque adamantin, bleu azur à bleu berlin ; la couleur peut être bleu très foncé ou, pour quelques types massifs ou terreux, bleu lumineux. L'azurite se clive parfaitement sur {011} et assez bien sur {100}. Elle est fragile et sa cassure est conchoïdale.

Gisements. C'est un minéral secondaire trouvé dans la partie supérieure de la zone d'oxydation des gisements de minerais. Elle est formée principalement par l'action des eaux carbonatées sur les minéraux de cuivre, ou encore par celle du sulfate de cuivre ou des solutions chlorhydriques sur le calcaire. Elle est presque toujours associée à la malachite (bien qu'elle soit moins fréquente et moins abondante que cette dernière) et également à la limonite, la cuprite, la calcite, la chrysocolle ; elle l'est moins souvent à la brochantite, l'antlérite, l'atacamite et d'autres minéraux de cuivre secondaires. Les plus beaux échantillons viennent de Chessy (Rhône), de Tsumeb (Sud-Ouest africain), de la mine de Cooper Queen, à Bisbee (Arizona), des mines de Calabona, et d'Alguero (Sardaigne), de Sibérie, et du Djebel Chouicha, Souk el-Arba (Tunisie).

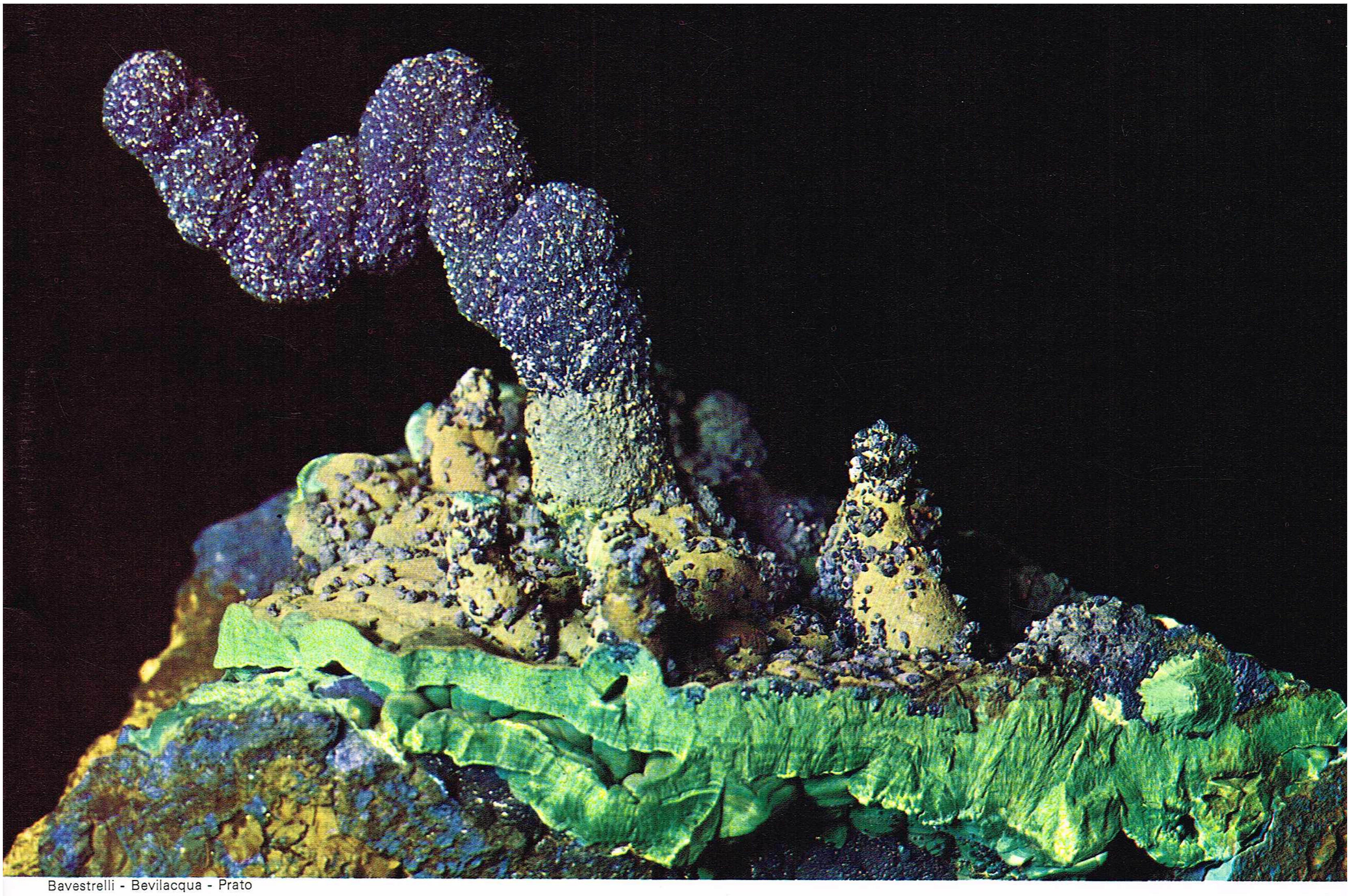

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Formation stalactitique d'azurite associée à de la* **malachite** *(Chessy, Rhône)* [*Londres, British Museum*].

Malachite $Cu_2(OH)_2(CO_3)$ - monoclinique

Les cristaux de malachite sont rares. Ils sont généralement prismatiques, plus ou moins allongés selon [001] et ressemblent parfois à des aiguilles se groupant en touffes ou en rosettes. Les formes sont rarement distinctes et les faces sont souvent inégales, arrondies et striées. Habituellement la malachite est massive ou forme des encroûtements sur des surfaces mamelonnées ou botryoïdales; intérieurement, elle présente des fibres radiées pouvant être très fines à grossières, et parfois des bandes de couleur. Elle se présente aussi en agrégats fibreux délicats, quelquefois en stalactites présentant des bandes concentriques, la malachite pouvant alterner avec l'azurite.

Propriétés. Dureté : 3 ½ à 4; densité : 4,05; indices de réfraction : np = 1,65, ng = 1,91. Translucide à opaque; les cristaux ont un éclat adamantin à vitreux, alors que les variétés fibreuses ont un éclat plus ou moins soyeux ou velouté. Elle est souvent terne; de couleur vert brillant, les cristaux inclinent vers le vert sombre et le vert noirâtre. Les cristaux non maclés sont pratiquement inconnus. La malachite se clive parfaitement sur {201}; les types massifs compacts ont une cassure subconchoïdale à inégale.

Gisements. C'est un minerai mineur de cuivre se rencontrant comme minéral secondaire dans la zone d'oxydation supérieure des gisements de cuivre. On la trouve typiquement associée à l'azurite, ainsi qu'à la cuprite, la ténorite, la limonite, la calcite, la calcédoine, la chrysocolle et moins couramment à l'atacamite, la brochantite et d'autres minéraux secondaires de cuivre, de plomb et de zinc. On trouve de très belles malachites dans de nombreuses localités, telles que : Likasi, Kambowe et Musonoï au Katanga, Chessy (Rhône), Tsumeb (Namibie); Sunrise (Wyoming), Bisbee, Morenci et Clifton (Arizona), la mine de Tourtschaminowsky dans l'Oural et Zmeindgorsk dans l'Altaï, Mariana près de Moldava (Tchécoslovaquie), et au Tyrol (Autriche).

Rosasite $(ZnCu)_2((OH)_2CO_3)$ - monoclinique pseudo-orthorhombique

La rosasite se présente sous forme d'encroûtements mamelonnés ou botryoïdaux avec une structure fibreuse à sphérolitique.

Propriétés. Dureté : environ 4 ½; densité : 4,0 à 4,2; indices de réfraction : np = 1,67, ng = 1,83. Couleur verte ou vert bleuâtre et bleu ciel. Elle se clive bien et est fragile.

Gisements. C'est un minéral secondaire trouvé dans la zone d'oxydation des minerais de zinc, de cuivre et de plomb. De belles rosasites proviennent de Durango (Mexique).

Hydrozincite $Zn_5(OH)_3(CO_3)_2$ - monoclinique

L'hydrozincite se rencontre sous forme massive terreuse et poreuse à compacte, ou en masses denses; en incrustations, elle montre parfois des bandes concentriques avec une structure fibro-radiée fine; elle est quelquefois stalactitique, réniforme ou pisolitique. Les cristaux minuscules, aplatis selon [100] et allongés selon [001], se terminent souvent par une pointe aiguë.

Propriétés. Dureté : 2 à 2 ½; densité : environ 4; indices de réfraction : np = 1,63, ng = 1,74. Éclat terne à terreux ou, pour le matériel relativement cristallisé, soyeux à brillant; l'éclat des cristaux est perlé. Couleur blanc pur à gris jaunâtre, brunâtre, rosâtre, lilas pâle. Très fragile, elle se clive parfaitement sur {100}. Elle est fluorescente à la lumière ultraviolette.

Gisements. C'est un minéral secondaire formé dans la zone d'oxydation des gisements métallifères par l'altération de la sphalérite. Il est associé à la smithsonite ainsi qu'à l'hémimorphite, la calcite, la cérusite, l'aurichalcite et la limonite. Le principal gisement est celui de Santander (Espagne).

Aurichalcite $(ZnCu)_5((OH)_3CO_3)_2$ - orthorhombique

L'aurichalcite se présente en cristaux aciculaires très fins ou en lattes allongées selon l'axe [001] et formant des touffes; elle est rarement grenue.

Propriétés. Dureté : 1 à 2; densité : 3,64; indices de réfraction : np = 1,65, ng = 1,75. Transparente; éclat soyeux à perlé, vert pâle à bleu verdâtre et bleu ciel. Elle se clive parfaitement sur {010} et est fragile.

Gisements. C'est un minéral secondaire de la zone d'oxydation des gisements de cuivre et de zinc associé à la malachite, l'azurite, la cuprite, la smithsonite,

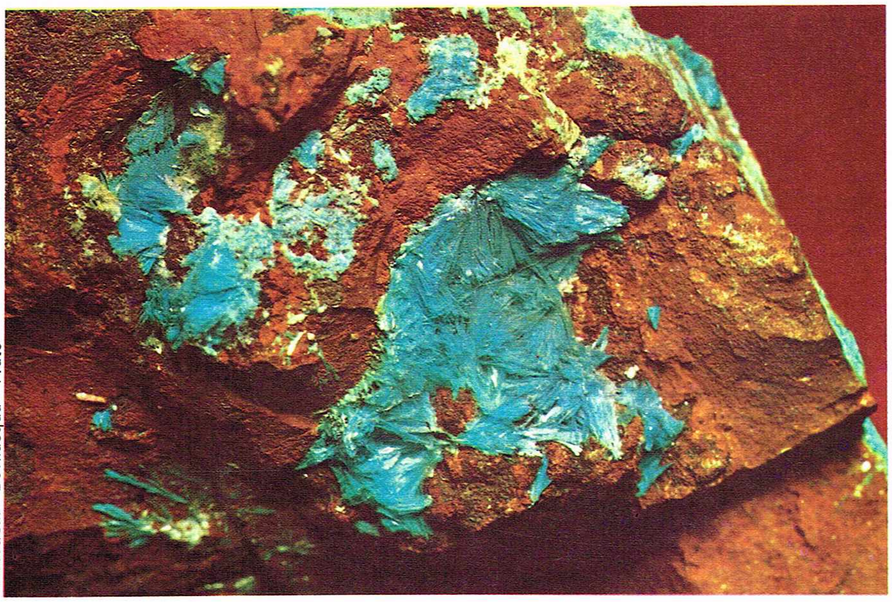

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Cristaux aciculaires d'aurichalcite provenant de Yangakoubanza (Zaïre) [musée d'Histoire naturelle, Milan].***

▼ ***Très beau groupe de cristaux tabulaires de phosgénite provenant de Monteponi (Sardaigne) [musée d'Histoire naturelle, Milan].***

l'hémimorphite, l'hydrozincite, la rosasite et la limonite. On trouve de très beaux échantillons au Laurium (Grèce), à la mine de Djuela Mapimi (Mexique), à Bisbee (Arizona), et à Yangakoubanza (Zaïre).

Dawsonite $NaAl(CO_3)(OH)_2$ - orthorhombique

Elle se présente en fines incrustations ou en rosettes de cristaux aplatis à aciculaires et en touffes de fines aiguilles, allongées selon [001] avec un clivage {110} parfait.

Propriétés. Dureté : 3; densité : 2,44. Éclat vitreux, soyeux en fins agrégats; transparente, le plus souvent de couleur blanc-gris; soluble dans les acides avec effervescence.

Gisements. C'est un minéral hydrothermal de basse température, formé par la décomposition de silicates d'aluminium. Les localités les plus classiques sont Santa Fiore et Terlano, Bolzano (Italie) et Oued-Sveli Ali, Ténès (Algérie).

Tychite $Na_6Mg_2(SO_4)(CO_3)_4$ - cubique

La tychite se présente en cristaux octaédriques.

Propriétés. Dureté : $3\frac{1}{2}$ à 4; densité : 2,456; indice de réfraction : n = 1,51. Transparente; éclat vitreux blanc; elle est fragile; sa cassure est conchoïdale.

Gisements. On a trouvé de beaux cristaux associés à la northupite, la gaylussite, la thénardite et la pirssonite dans un lit d'argile à Borax Lake, San Bernardino County (Californie) et au Lake Katwe en Ouganda.

Bastnaésite $Ce(F)CO_3$ - hexagonal

Les cristaux sont tabulaires sur (0001) avec la forme $\{10\bar{1}0\}$; ils sont généralement creusés horizontalement à cause d'une combinaison oscillante des deux formes $\{10\bar{1}1\}$ et $\{10\bar{1}0\}$. La bastnaésite se présente aussi en grandes masses ou grenue.

Propriétés. Dureté : 4 à $4\frac{1}{2}$; densité : 4,9 à 5,2; indices de réfraction : np = 1,49, ng = 1,56. Transparente à translucide. Éclat vitreux à gras, jaune citron à brun rougeâtre; les faces de séparation ont un éclat perlé. Elle est fragile, et sa cassure est conchoïdale.

Gisements. C'est un minéral des terres rares, très recherché, que l'on trouve dans les gîtes métasomatiques, les syénites et les pegmatites. Le plus grand cristal connu (Muséum de Paris) provient de Madagascar.

Parisite $CaCe_2(F_2)(CO_3)_3$ - hexagonal

Habituellement, les cristaux sont hexagonaux bipyramidés et pointus; ils ont parfois une apparence prismatique à cause d'une combinaison oscillante des bipyramides. Les cristaux ont parfois un développement rhomboédrique. Les faces latérales sont généralement striées ou profondément cannelées. La face (0001) est assez commune.

Propriétés. Dureté : $4\frac{1}{2}$; densité : 4,36; indices de réfraction : np = 1,67, ng = 1,77. Transparente à translucide; éclat vitreux à résineux jaune brunâtre, brun ou jaune grisâtre. Sur la face de séparation (0001), l'éclat est perlé. Elle est fragile, et sa cassure est subconchoïdale à esquilleuse.

Gisements. Les meilleurs cristaux de ce minéral rare ont été rencontrés dans les filons de la mine d'émeraude de Muzo (Colombie).

Synchisite $CaCe(F)(CO_3)_2$ - hexagonal

Les cristaux de synchisite sont pyramidaux avec une petite face (0001) ou tabulaires épais sur (0001). La face (0001) est généralement petite et brillante et les faces latérales sont striées latéralement.

Propriétés. Dureté : $4\frac{1}{2}$; densité : 3,90; indices de réfraction : np = 1,67, ng = 1,77. Translucide; éclat vitreux à gras, ou subadamantin jaune cireux à brun, ou jaune grisâtre. Elle se macle souvent sur (0001). Elle est fragile, et sa cassure est subconchoïdale à esquilleuse.

Gisements. On trouve de beaux échantillons de ce minéral dans les ségrégations pegmatitiques des syénites de Narsarsuk, situées dans la région de Julianehaab au Groenland. Elle est associée à l'astrophyllite, l'ægyrite, le microcline, la cataplérite, l'albite, la neptunite, l'elpidite, l'épidymite, la fluorite et la rhodochrosite.

Cordylite $Ba(CeLaNd)_2(F_2)(CO_3)_3$ - hexagonal

Les cristaux sont prismatiques courts à allongés selon [0001], avec des terminaisons hexagonales dipyramidées. Lorsque les prismes sont très petits, les terminaisons hexagonales sont larges.

Propriétés. Dureté : $4\frac{1}{2}$; densité : 4,31; indices de réfraction : np = 1,58, ng = 1,76. Éclat gras à adamantin, incolore à jaune cire ou souvent jaune ocre et terne à cause de l'altération superficielle; l'éclat est perlé sur la face (0001). Elle est plutôt fragile; sa cassure est conchoïdale.

Gisements. On trouve ce minéral à Narsarsuk, dans le district de Julianehaab (Groenland), associé à l'ægyrite, l'ancylite, la synchisite et la neptunite, dans des filons de pegmatites dans les syénites néphéliniques.

Phosgénite $Pb_2(Cl_2CO_3)$ - quadratique

Les cristaux sont prismatiques, plus ou moins allongés selon [001]; ils sont rarement tabulaires, épais sur (001).

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Ces prismes sont généralement terminés par une grande face (001) ou quelquefois par les faces {111}. La phosgénite est aussi souvent massive ou grenue.

Propriétés. Dureté : 2 à 3; densité : 6,13; indices de réfraction : np = 2,12, ng = 2,14. Transparente à translucide. Éclat adamantin blanc jaunâtre à brun jaunâtre, brun pâle, ou brun fumé; elle est aussi parfois incolore, blanche, rose pâle, grise, gris jaunâtre ou verdâtre. Plutôt sectile, sa cassure est conchoïdale. Elle est faiblement fluorescente dans les grandes longueurs d'onde de la lumière ultraviolette et aux rayons X.

Gisements. La phosgénite est un minéral secondaire formé dans des conditions d'altération superficielle de la galène et des autres minéraux de plomb; elle est généralement associée à la cérusite et à l'anglésite. Les plus beaux échantillons viennent de Monteponi (Sardaigne), de Sidi Amor Ben Salem (Tunisie) et de Boleo (Mexique). Une splendide série de cristaux est conservée au musée d'Histoire naturelle de Milan.

Hydrocérusite $Pb_3(OH)(CO_3)_2$ - rhomboédrique

L'hydrocérusite se présente en écailles minces, hexagonales et aplaties sur {0001}, en cristaux tabulaires épais sur {0001} ou en pyramides très allongées avec parfois de très petites faces (0001).

Propriétés. Dureté : 3 $\frac{1}{2}$; densité : 6,80; indices de réfraction : np = 1,94, ng = 2,09. Transparente à translucide. Éclat adamantin, incolore à blanc gris parfois verdâtre, perlé sur la face de clivage (0001). Fragile.

Gisements. Ce minéral secondaire est associé à la leadhillite, le matlokite, la cérusite et la paralaurionite. Parmi les localités les plus classiques, on peut citer : Wanlockhead (Écosse) et Mendip-Hills dans le Somerset (Angleterre), Laurium (Grèce) et Mammoth-Mine à Tiger (Arizona).

Nesquehonite $MgCO_3 \cdot 3H_2O$ - monoclinique

Les cristaux sont prismatiques, allongés selon [001], avec la forme {110} profondément striée selon l'allongement. Ils peuvent être aciculaires et réunis en touffes radiées; la nesquehonite peut aussi être botryoïdale.

Propriétés. Dureté : 2 $\frac{1}{2}$; densité : 1,852; indices de réfraction : np = 1,42, ng = 1,53. Transparente à translucide; éclat vitreux ou légèrement gras, incolore à blanc. Sa cassure est esquilleuse à fibreuse, et son clivage est parfait sur {110}.

Gisements. La nesquehonite fut trouvée pour la première fois dans une mine de charbon à Nesquehoning près de Lansford, dans la région de Larson en Pennsylvanie (U.S.A.). Des cristaux de plus de 5 cm ont été signalés à La Mure (Isère).

Trona $Na_3H(CO_3)_2 \cdot 2H_2O$ - monoclinique

Les cristaux sont généralement allongés selon [010] et aplatis sur {001}. Les cristaux naturels bien formés sont très rares. Le trona est le plus souvent fibreux ou massif.

Propriétés. Dureté : 2 $\frac{1}{2}$ à 3; densité : 2,14; indices de réfraction : np = 1,41, ng = 1,54. Translucide; éclat vitreux, brillant, incolore ou habituellement gris ou blanc jaunâtre. Sa cassure est inégale à subconchoïdale. Le clivage est parfait sur {100}. Le trona a un goût alcalin.

Gisements. Ce minéral se trouve à proximité des lacs salés où il est produit par évaporation; il apparaît aussi en efflorescence sur les sols des régions arides. Il est communément associé au natron, à la thermonatrite, à la halite, à la glaubérite, à la thénardite, à la mirabilite et au gypse. De larges plaques de cristaux aciculaires associés en rosettes ou en gerbes proviennent du lac Tchad.

Gaylussite $Na_2Ca(CO_3)_2 \cdot 5H_2O$ - monoclinique

Les cristaux sont allongés selon [001] ou aplatis avec les formes dominantes {110} et {011}. Les faces sont habituellement rugueuses.

Propriétés. Dureté : 2 $\frac{1}{2}$ à 3; densité : 1,991; indices de réfraction : np = 1,44, ng = 1,52. Transparente à translucide; éclat vitreux, incolore à blanc. Très fragile, sa cassure est conchoïdale. Elle se clive parfaitement sur {110}.

Gisements. On trouve la gaylussite à proximité des lacs salés, où elle est habituellement associée au natron, à la thermonatrite, au trona, à la calcite et au borax. De grands cristaux pseudomorphosés en calcite proviennent d'Helensburg (Écosse).

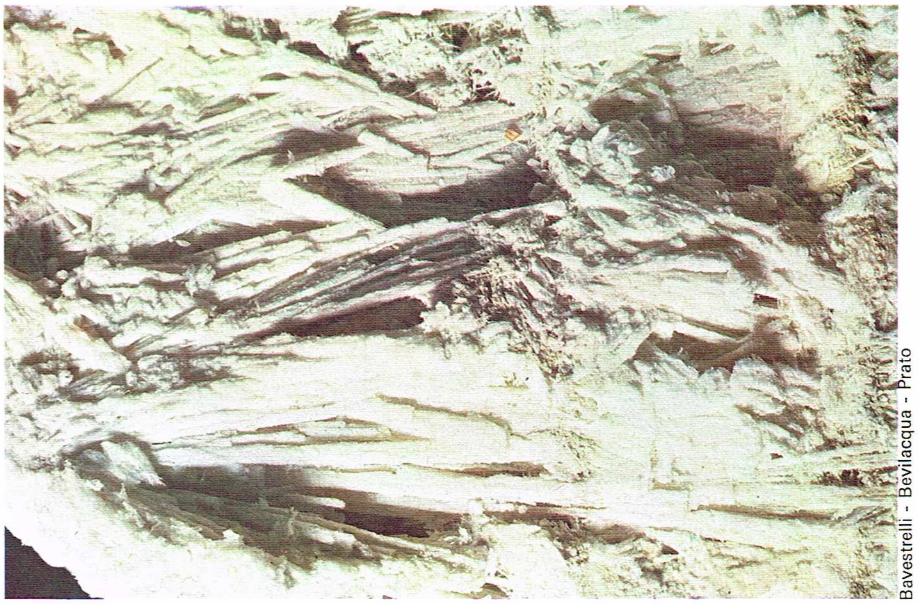

▲ ***Cristaux de trona, d'aspect fibreux, provenant du lac Magadi (Kenya).***

Hydromagnésite (lancastérite) $Mg_5(OH)(CO_3)_2 \cdot 4H_2O$ - monoclinique

L'hydromagnésite se présente en petits cristaux disposés en touffes, en rosettes ou en encroûtements; ces cristaux sont aciculaires ou en lames. Ce minéral peut aussi être massif ou crayeux.

Propriétés. Dureté : 3 $\frac{1}{2}$; densité : 2,236; indices de réfraction : np = 1,52, ng = 1,54. Transparente; les cristaux ont un éclat vitreux, et les agrégats terreux ont un éclat soyeux ou perlé. Elle est incolore à blanche. Fragile, elle se clive parfaitement sur {010}. La macle est très commune sur le plan {100}.

Gisements. C'est principalement un minéral hydrothermal de basse température, situé en petits filons dans les serpentines et dans les roches ignées altérées, riches en magnésium. Elle est souvent associée à l'opale, la calcite, la dolomite, l'aragonite, la brucite, la magnésite et l'artinite. C'est également un produit d'altération de la brucite dans les marbres à périclase. Les meilleures pièces de collection viennent du Texas et d'Iran. Les plus beaux cristaux connus sont conservés à l'université de Paris VI.

Artinite $Mg_2(OH)_2(CO_3) \cdot 3H_2O$ - monoclinique

L'artinite forme des encroûtements de cristaux aciculaires allongés selon [010]. Elle se présente aussi en masses botryoïdales de fibres soyeuses ou en agrégats sphériques de fibres radiées.

Propriétés. Dureté : 2 $\frac{1}{2}$; densité : 2,02; indices de réfraction : np = 1,49, ng = 1,56. Transparente; l'éclat des agrégats fibreux est soyeux ou satiné alors que les cristaux sont vitreux. Elle est blanche. Fragile; son clivage est parfait sur {100}.

Gisements. L'artinite est un minéral hydrothermal de basse température, commun, formé en petites veines ou en encroûtements sur les surfaces de fracture des roches ultrabasiques serpentinisées. Elle est associée à l'hydromagnésite, la brucite, l'aragonite, la calcite, la dolomite, la magnésite, la pyroaurite et au chrysotile. Elle a été trouvée en beaux exemplaires au Val Malenco (Italie), à New York et à San Benito (Californie).

Brugnatellite $Mg_6Fe(OH)_{13}(CO_3) \cdot 4H_2O$ - hexagonal

Habituellement, elle se présente en masses lamellaires ou foliées de petites paillettes aplaties sur (0001); ces dernières sont limitées par 3 ou 6 côtés, et les stries se recoupent à 60°.

Propriétés. Dureté : environ 2; densité : 2,14; indices de réfraction : np = 1,51, ng = 1,54. Transparente; éclat perlé rose chair à jaunâtre ou blanc brunâtre; elle se clive parfaitement sur {0001} et s'écrase en poudre comme du talc.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

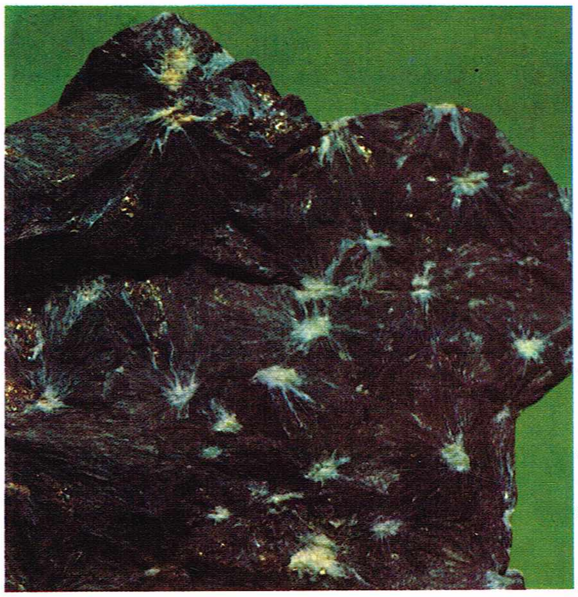

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *A gauche,* **dundasite** *provenant de Dundas (Tasmanie)* [*Londres, British Museum*]. *A droite, cristaux fibro-radiés de* **ludwigite** *provenant de Brosso (Italie)* [*musée d'Histoire naturelle, Milan*].

Gisements. Elle se trouve le plus souvent en encroûtements dans les fissures des serpentines, où elle est associée à l'artinite, l'hydromagnésite, la pyroaurite, la magnésite, au chrysotile, à l'aragonite et à la brucite. On la trouve au Val Malenco (Italie).

Zaratite $Ni_3(OH)_4(CO_3) \cdot 4H_2O$ - cubique

Elle forme généralement des incrustations finement lamellaires à structure micro-cristalline. Elle est souvent aussi massive, compacte ou en fins cristaux isolés, orientés sur de la millérite.

Propriétés. Dureté : 3 ½ ; densité : 2,57 à 2,69 ; indice de réfraction : environ 1,56. Transparente à translucide ; éclat vitreux à gras, couleur vert émeraude. Fragile ; sa cassure est conchoïdale sur les agrégats.

Gisements. Ce minéral secondaire se trouve avec la chromite, la pentlandite, la pyrrhotite dans les roches ignées basiques et dans la serpentine. Il est typiquement associé à la dolomite, l'aragonite, la calcite, l'hydromagnésite, la gœthite et la brucite. Les échantillons exposés dans les musées viennent de Lancaster (Pennsylvanie) et de Tasmanie (Australie).

Dundasite $PbAl_2(OH)_4(CO_3)_2 \cdot 2H_2O$

La dundasite se présente habituellement en petits agrégats sphériques de cristaux radiés allongés selon [001] ou en encroûtements feutrés.

Propriétés. Dureté : 2 ; densité : 3,25 environ ; indices de réfraction : np = 1,60, ng = 1,74. Transparente ; éclat vitreux à soyeux, blanc ; elle se clive parfaitement sur {010}.

Gisements. On l'a trouvée, la première fois, associée à la pyromorphite, la crocoïte et la limonite dans la mine Adélaïde Proprietary à Dundas (Tasmanie). Ce minéral rare a aussi été découvert, en relative abondance, il y a quelques années à Gonnesa, près d'Iglésias (Sardaigne), associé à de la cérusite aciculaire.

Bayleyite $Mg_2(UO_2)(CO_3)_3 \cdot 18H_2O$ - monoclinique

Les cristaux sont minuscules, courts et prismatiques.

Propriétés. Densité : 2,05 ; indices de réfraction : np = 1,45, ng = 1,50. Couleur jaune soufre. Elle est faiblement fluorescente à la lumière ultraviolette.

Gisements. Elle se trouve généralement en efflorescences sur les parois des galeries de mine, associée à la schroeckingérite, l'andersonite, la schwartzite et au gypse, en particulier à la mine de Hillside, dans la région de Yarapai en Arizona (U.S.A.) et à Azegour (Maroc).

Liebigite $Ca_2(UO_2)(CO_3)_3 \cdot 10H_2O$ - orthorhombique

Les cristaux sont prismatiques, courts, allongés selon [001] et habituellement indistincts, avec des angles arrondis et des faces convexes. Elle se présente communément en agrégats grenus ou écailleux ou en fins encroûtements.

Propriétés. Dureté : 2 ½ à 3 ; densité : 2,41 ; indices de réfraction : np = 1,50, ng = 1,54. Transparente à translucide ; éclat vitreux, couleur vert tarin à vert jaunâtre ; la face de clivage (100) a un éclat légèrement perlé. La liebigite est fluorescente dans le vert à la lumière ultraviolette.

Gisements. Ce minéral secondaire est communément associé à la schroeckingérite et à l'uranotile. La localité la plus classique est Joachimsthal (Bohême).

Andersonite $Na_2Ca(UO_2)(CO_3)_3 \cdot 6H_2O$ - rhomboédrique

L'andersonite se présente en groupes de cristaux pseudocubiques minuscules.

Propriétés. Densité : 2,8 ; indices de réfraction : np = 1,52, ng = 1,54. Couleur vert brillant. Elle présente une fluorescence vert brillant à la lumière ultraviolette. Elle est stable quand elle est exposée à l'air.

Gisements. On la trouve associée au gypse, à la schroeckingérite, la bayleyite et la schwartzite, en efflorescences sur les parois de galeries de la mine de Hillside dans la région de Yarapai (Arizona).

Voglite $Ca_2Cu(UO_2)(CO_3)_4 \cdot 6H_2O$ - triclinique

La voglite forme des recouvrements écailleux ; ces écailles sont rhomboédriques avec un angle inférieur aigu de 75° à 80°.

Propriétés. Indices de réfraction : np = 1,54, ng = 1,56. Éclat perlé, couleur vert émeraude à vert gazon brillant.

Gisements. On la trouve avec la liebigite comme altération de l'uraninite dans la mine d'Elias, près de Joachimsthal (Bohême).

Studtite (formule incertaine) - orthorhombique

Ce minéral rare est un carbonate d'uranium hydraté que l'on a trouvé à Shimkolobwe au Katanga (Zaïre). Il se présente en encroûtements de cristaux flexibles et fibreux. La studtite est jaune, et ses indices de réfraction sont : np = 1,54, ng = 1,68.

Borates

Ludwigite $(Mg,Fe^{2+})_2Fe^{3+}(O_2|BO_3)$ - orthorhombique
Vonsénite $(Fe^{2+}Mg)_2Fe^{3+}(O_2|BO_3)$ - orthorhombique

Les minéraux de cette série se présentent en masses fibreuses radiées ou entremêlées, donnant alors des agrégats denses microcristallins veloutés. Ils forment aussi des agrégats en rosettes de cristaux aciculaires, ou sont parfois grenus. Les beaux cristaux prismatiques allongés selon [001] sont rares et sans faces terminales.

Propriétés. Dureté : 5 ; densité : 4,7 (vonsénite) à 3,6 (ludwigite) ; indices de réfraction : np = 1,83, ng = 2,00. Opaque sauf pour les petits grains contenant beaucoup de Mg (ludwigite). Éclat soyeux sur les cas-

sures fraîches; couleur noir charbon à noir verdâtre pour la vonsénite inclinant au vert foncé pour la ludwigite. Difficiles à casser.

Gisements. Ce sont des minéraux de haute température découverts dans les gisements de métamorphisme de contact, associés à la magnétite, au diopside, à la forstérite et à la szaibélyite. De belles masses fibro-radiées ont été trouvées à Brosso près de Turin (Italie).

Sussexite $Mn_2(B_2O_5) \cdot H_2O$ - orthorhombique
Ascharite ou szaibélyite
$Mg_2(B_2O_5) \cdot H_2O$ - orthorhombique

Le plus souvent, ces minéraux se présentent en petites veines ou en masses dont la structure fibreuse feutrée ressemble à celle de l'amiante. Ils apparaissent aussi parfois sous forme de nodules denses ou crayeux.

Propriétés. Dureté : 3 à 3 ½; densité : 3,30 (sussexite) à 2,62 (ascharite); indices de réfraction de l'ascharite : np = 1,57, ng = 1,65, et de la sussexite : np = 1,67, ng = 1,73. Éclat soyeux à terne ou terreux de couleur blanche à jaune paille. Les fibres ne sont pas flexibles.

Gisements. Ces deux minéraux se trouvent dans les veines hydrothermales et les calcaires cristallins, associés à la ludwigite dans les skarns à magnétite. On en a récemment retrouvé à Brosso, près de Turin (Italie), de grandes masses associées à la ludwigite.

Kurnakovite $Mg(B_3O_3(OH)_5) \cdot 5H_2O$ - triclinique

On trouve la kurnakovite en agrégats denses et grenus ou en gros cristaux avec les faces (100), (010), (10$\bar{1}$) et (01$\bar{1}$).

Propriétés. Dureté : 3; densité : 1,85; indices de réfraction : np = 1,49, ng = 1,52. Éclat vitreux incolore à blanc.

Gisements. La kurnakovite se rencontre dans le gisement de borate d'Inderkozakhstan (U.R.S.S.), en partie associée à l'ascharite. Les plus gros cristaux proviennent de Californie.

Meyerhofférite $Ca(B_3O_3(OH)_5) \cdot H_2O$ - triclinique

Les cristaux sont habituellement allongés selon l'axe [001] et aplatis sur la face (100) ou aussi sous forme fibreuse.

Propriétés. Dureté : 2; densité : 2,12; indices de réfraction : np = 1,50, ng = 1,56. Transparent à translucide. Les cristaux ont un éclat vitreux tandis que les masses fibreuses ont un éclat soyeux. Incolore à blanche. Elle se clive parfaitement suivant {010}.

Gisements. C'est un minéral associé à la colémanite dans les gisements de borates de Californie.

Inyoïte $Ca(B_3O_3(OH)_5) \cdot 4H_2O$ - monoclinique

Les cristaux sont prismatiques courts, allongés selon [001] ou tabulaires sur (001), avec les formes {110} et {001} dominantes. L'inyoïte est aussi grenue, massive ou en agrégats grossièrement sphérolitiques.

Propriétés. Dureté : 2; densité : 1,875; indices de réfraction : np = 1,49, ng = 1,52. Éclat vitreux, incolore et transparent, devenant blanc et s'assombrissant par déshydratation. Ce minéral est fragile et sa cassure est irrégulière.

Gisements. Minéral associé à la meyerhofférite et à la colémanite dans les gisements de borates de Californie. D'intéressants groupes de cristaux viennent de Kazakhskaïa (U.R.S.S.).

Borax $Na_2(B_4O_5(OH)_4) \cdot 8H_2O$ - monoclinique

La forme des cristaux de borax ressemble beaucoup à celle du pyroxène : ils sont habituellement prismatiques courts, allongés selon [001] ou souvent légèrement tabulaires sur (100). Les faces en zone avec [001] et [110] dominent et sont généralement malformées par suite d'un développement anormal d'une ou plusieurs de ces faces en zone.

Propriétés. Dureté : 2 à 2 ½; densité : 1,715; indices de réfraction : np = 1,45, ng = 1,47. Translucide à opaque; éclat vitreux ou résineux incolore à blanc ou grisâtre, bleuâtre, verdâtre. Il se clive parfaitement sur (100). Plutôt fragile; sa cassure est conchoïdale. Goût alcalin faible et un peu sucré. Diamagnétique.

Gisements. Le borax dépose par évaporation dans les lacs salés où il est associé à la halite, au trona, à l'ulexite, la thénardite, la glaubérite, au gypse, à la calcite, la

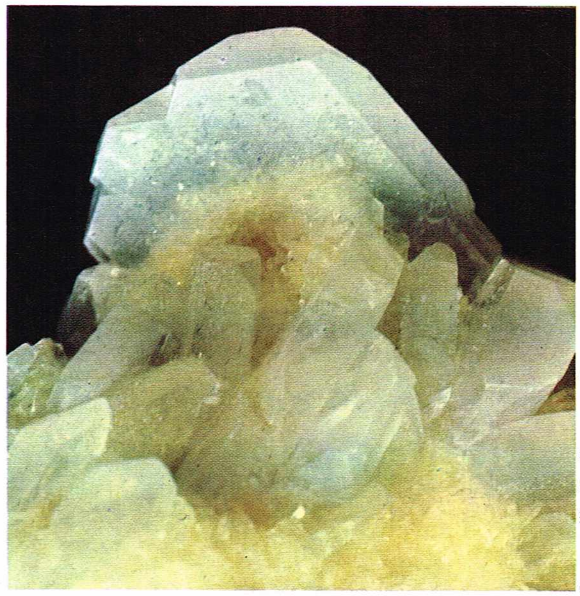

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

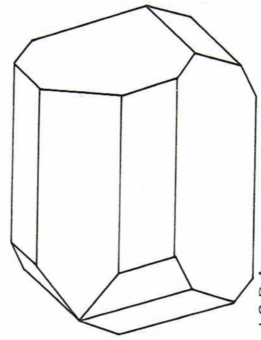

I.G.D.A.

▲ *Ci-dessus, gros cristaux de* borax *provenant de Searles Lake (Californie). En haut à droite, schéma d'un cristal de* borax *de forme classique.*

▶ *Ci-contre, représentation schématique de deux formes de cristallisation de la* meyerhofférite.

▼ *A gauche,* ulexite fibreuse, *à droite,* ulexite transparente *provenant de Boron (Californie) [Londres, British Museum].*

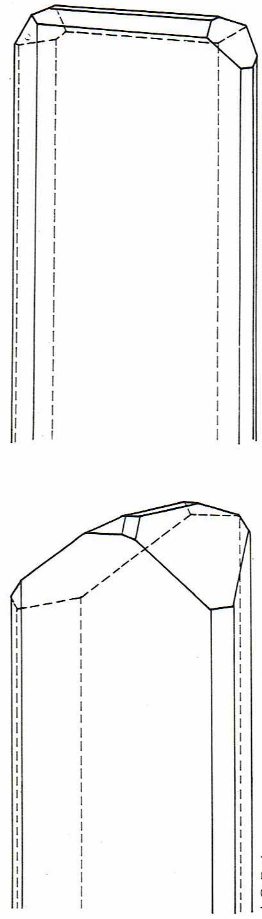

I.G.D.A.

gaylussite et à divers sulfates et carbonates de sodium rares. Le borax se rencontre aussi en efflorescences sur les sols des régions arides et en solution dans des sources chaudes. De très gros cristaux ont été trouvés en Californie (Borax Lake West-Baker).

Ulexite $NaCa[B_5O_6(OH)_6] \cdot 5H_2O$ - triclinique

Elle se présente en petits nodules arrondis ou en masses ressemblant à des lentilles constituées de cristaux capillaires à aciculaires. Les fibres sont radiées ou parfois orientées au hasard vers le centre de la masse et parallèles entre elles à la périphérie. L'ulexite forme aussi des encroûtements botryoïdaux de fibres ayant une structure fibro-parallèle. Les cristaux distincts sont très rares et très allongés selon [001].

Propriétés. Dureté : 2 ½; densité : 1,955; indices de réfraction : np = 1,49, ng = 1,52. Les agrégats ont un éclat soyeux ou satiné blanc pur, celui des cristaux

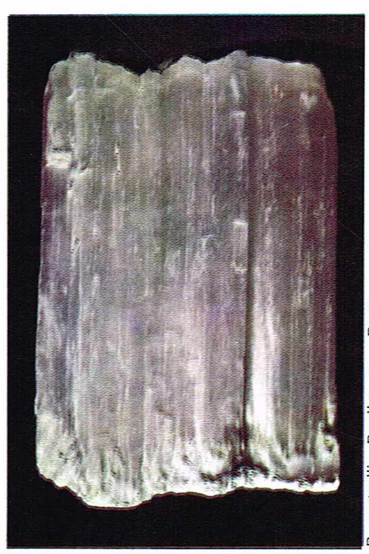

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

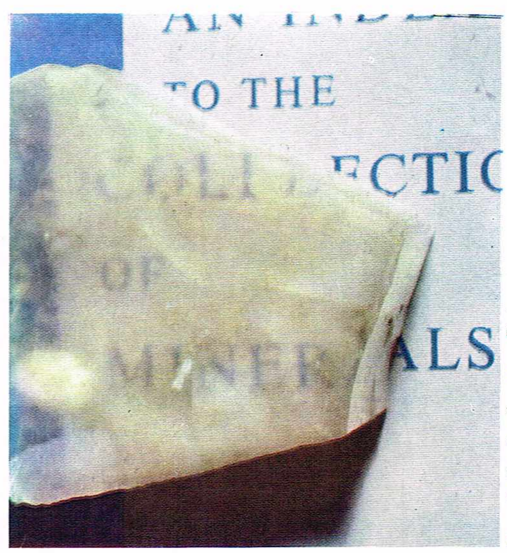

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ *Cristaux de colémanite provenant de San Bernardino County (Californie) [musée d'Histoire naturelle, Milan].*

est vitreux incolore. Sans goût. Fragile; la cassure est inégale. Ce minéral se clive parfaitement sur (010). Les macles polysynthétiques sont communes sur les agrégats massifs.

Gisements. On trouve typiquement l'ulexite dans les dépôts de lacs salés situés en régions arides (Californie, Nevada), associée au borax, à la glaubérite, au trona, etc.

Pricéite $5CaO \cdot 6B_2O_3 \cdot 9H_2O$ ***- triclinique***

Elle se présente en masses nodulaires ou irrégulières, douces et crayeuses à dures, ou compactes et dures.

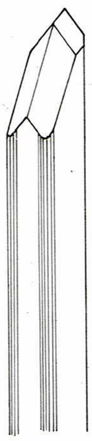

I.G.D.A.

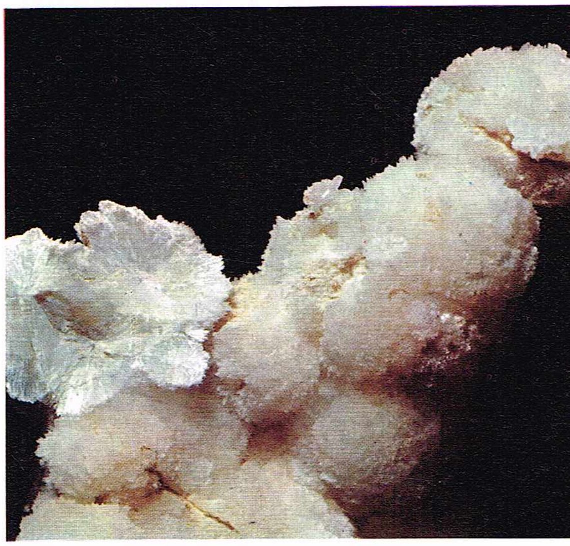

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

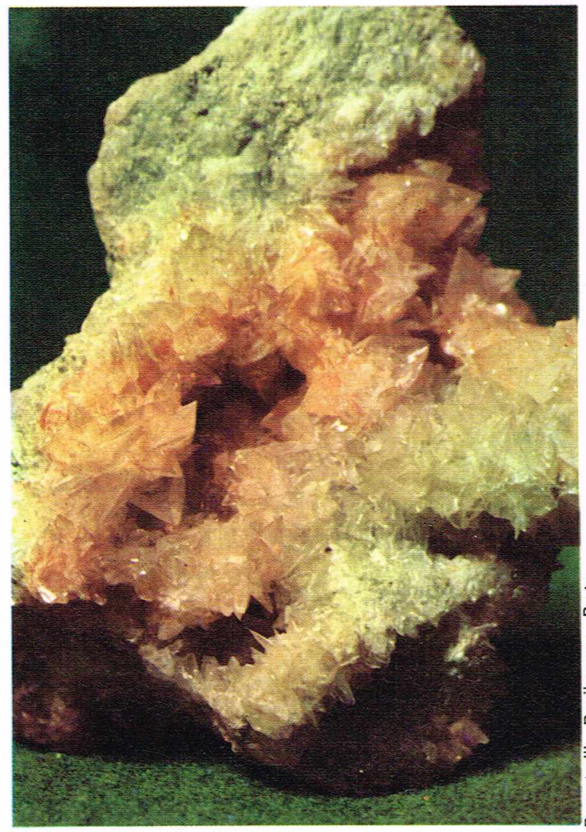

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *A gauche, schéma d'un cristal d'hydroboracite provenant de Ryan (Californie); à droite, hydroboracite fibro-radiée provenant de Turquie.*

Propriétés. Dureté : 3 à 3 ½; indices de réfraction : np = 1,57, ng = 1,59. Éclat terreux blanc. Cassure terreuse à conchoïdale pour les variétés compactes et dures.

Gisements. C'est un minéral associé à la colémanite et au gypse dans les gisements de borates de Californie (Death Valley).

Larderellite $NH_4[B_5O_6(OH)_4]$ ***- monoclinique***

Au microscope, elle apparaît sous forme de tablettes rhomboïdales aplaties sur (100).

Propriétés. Dureté et densité non connues; indices de réfraction : np = 1,49, ng = 1,56. Elle est blanche ou quelquefois jaunâtre à cause de l'admission d'impuretés. Elle est sans goût et se décompose dans l'eau chaude.

Gisements. On l'a trouvée associée à la sassolite et l'ammonioborite dans l'acide borique des fumerolles en Toscane (Italie).

Colémanite $Ca[B_3O_4(OH)_3] \cdot H_2O$ ***- monoclinique***

Les cristaux sont habituellement prismatiques courts selon [001] avec la face (110) bien développée, la face (001) plus ou moins grande et des faces terminales complexes; ils sont parfois équidimensionnels, pseudorhomboédriques avec les faces (110) et (301) ou aussi pseudo-octaédriques avec les faces (221) et (011). La colémanite est souvent massive, clivable et grenue à compacte ou en agrégats sphérolitiques.

Propriétés. Dureté : 4 ½; densité : 2,423; indices de réfraction : np = 1,50, ng = 1,61. Transparente à translucide; éclat vitreux à adamantin, brillant, incolore ou blanc laiteux, blanc jaunâtre, ou encore gris. Sa cassure est inégale à subconchoïdale, et elle se clive parfaitement sur (010).

Gisements. La colémanite se rencontre dans les terrains sédimentaires du Tertiaire associée au gypse, à la célestite et à d'autres borates dont la formation est liée très probablement au volcanisme (fumerolles, sources chaudes). De très beaux groupes de cristaux ont été trouvés à Death Valley (Californie) et dans diverses mines de l'ouest de l'Anatolie (Turquie).

Hydroboracite $MgCa[B_3O_4(OH)_3]_2 \cdot 3H_2O$ ***- monoclinique***

Les cristaux sont allongés selon [001] et aplatis sur (010). Ils peuvent être lamellaires, fibreux, radiés, ressemblant à du gypse fibreux. L'hydroboracite est souvent compacte et finement grenue.

Propriétés. Dureté : 2 (cristaux) à 3 (masses compactes); densité 2,167; indices de réfraction : np = 1,52, ng = 1,57. Transparent. Éclat vitreux et soyeux pour les masses fibreuses. L'hydroboracite est claire, incolore à blanche. Elle se clive parfaitement sur (010).

Gisements. C'est un minéral des dépôts salins, associé à la halite à Stassfurt (Allemagne) et à d'autres borates dans les gisements de Californie (Inyo County).

Probertite $NaCa[B_5O_7(OH)_4] \cdot 3H_2O$ ***- monoclinique***

La probertite forme habituellement des rosettes ou des groupes radiés d'aiguilles ou de lattes d'environ 3 cm de longueur, ou bien des agrégats durs compacts et réticulés. Les cristaux sont rarement isolés; ils sont alors aciculaires, allongés selon [001] et légèrement aplatis sur (100), rarement sur (110).

Propriétés. Dureté : 3 ½; densité : 2,14; indices de réfraction : np = 1,51, ng = 1,54. Éclat vitreux, incolore à transparent. Fragile, son clivage est parfait sur (110).

Gisements. Les premiers échantillons de probertite ont été trouvés dans les gisements de kernite, dans le district de borate de Kramer au sud-est de la région de Kern (Californie).

Kaliborite $KMg_2H[B_6O_8(OH)_5]_2 \cdot 4H_2O$ ***- monoclinique***

Les cristaux sont généralement petits, souvent disposés en agrégats; leurs faces ne sont pas développées symétriquement. La kaliborite est aussi massive et grenue.

Propriétés. Dureté : 4 à 4 ½; densité : 2,128; indices de réfraction : np = 1,51, ng = 1,55. Transparent; éclat vitreux, incolore à blanc, parfois aussi brun rougeâtre. Elle se clive parfaitement sur (001) et ($\bar{1}01$).

Gisements. La kaliborite a été trouvée en cristaux dans les gîtes salins de Stassfurt (Allemagne).

Hambergite $Be_2(OH,F)|BO_3$ ***- orthorhombique***

Les cristaux sont prismatiques, allongés selon [001], souvent aplatis sur (100). Ils sont habituellement grands avec la forme {100} striée selon [001] et les faces terminales ternes.

Propriétés. Dureté : 2 ½; densité : 2,359; indices de réfraction : np = 1,55, ng = 1,63. Transparente;

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Sulfates

Thénardite $Na_2[SO_4]$ - orthorhombique

Ce minéral se présente en cristaux dipyramidaux avec la forme {111} et des troncatures secondaires. Les cristaux de 10 cm et plus sont assez communs, mais apparaissent aussi en encroûtements pulvérulents. Ils se maclent souvent sur la face (110), produisant des groupes cruciformes. Le clivage suivant {010} est parfait.
Propriétés. Dureté : 2 ½ à 3 ; densité : 2,664. Éclat vitreux inclinant à résineux ; indices de réfraction :

◀ *Cristaux d'hambergite provenant d'Aujanabousana (Madagascar) [Londres, British Museum].*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Éclat vitreux incolore inclinant au blanc grisâtre et jaunâtre. Fragile, elle se clive parfaitement sur (010).
Gisements. Minéral rare des pegmatites alcalines associé au spodumène, à la danburite et au béryl. Les cristaux les plus purs viennent d'Imalo et Maharitra (Madagascar).

Rhodizite $(Cs,K,Rb)Al_4Be_4[B_{11}O_{26}(OH)_2]$ - cubique

Les cristaux de rhodizite sont dodécaédriques et aussi tétraédriques. Le plus grand cristal connu (6 cm) est conservé à l'École des mines de Paris.
Propriétés. Dureté : 8 ; densité : 3,38. Transparente à translucide ; éclat vitreux inclinant à l'adamantin. Elle est incolore à blanche, mais aussi grisâtre ou blanc jaunâtre. Sa cassure est conchoïdale. Pyro-électrique.
Gisements. Les premiers cristaux trouvés à Sarapulsk et Schaitansk près de Mursink, au nord de Sverdlovsk dans les montagnes de l'Oural (U.R.S.S.), étaient minuscules et situés sur de la tourmaline rouge. D'autres très beaux cristaux ont été trouvés, associés à la rubellite dans une pegmatite d'Ambatofinandrahama (Madagascar).

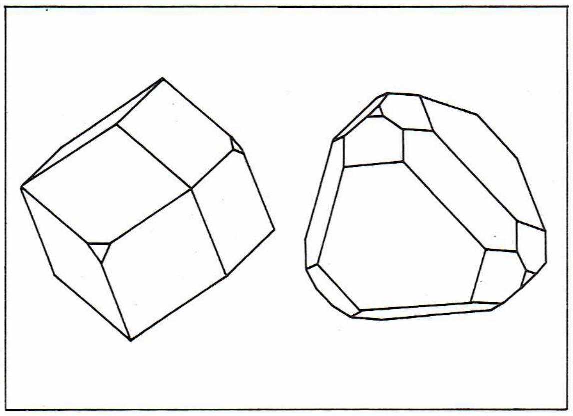

I.G.D.A.

▲◀ *Ci-dessus, cristaux de rhodizite provenant de Madagascar ; ci-contre, représentation schématique d'une forme de cristallisation du même minéral.*

Boracite $Mg_3[Cl|B_7O_{13}]$ - cubique au-dessus de 265 °C et orthorhombique pseudocubique à la température ordinaire

Les cristaux sont habituellement isolés, quelquefois en groupes ou aussi en petits individus fixés sur les grandes faces d'individus uniques. Ils sont souvent cubiques, dodécaédriques ou cubo-octaédriques avec la forme {111} habituellement plus grande et plus brillante que {$\bar{1}$11}. Ils se présentent souvent en agrégats finement grenus ou fibreux.
Propriétés. Dureté : 7 à 7 ½ ; densité : 2,91 à 2,97 (cristaux incolores) et 2,97 à 3,10 (cristaux verts) ; indices de réfraction : np = 1,66, ng = 1,67. Transparente à translucide. Éclat vitreux inclinant à l'adamantin. Incolore à blanc ; parfois jaune, vert bleuâtre, vert et vert foncé (type ferreux). Sa cassure est conchoïdale à inégale. Fortement piézo-électrique et pyro-électrique.
Gisements. On trouve la boracite en lits dans les dépôts sédimentaires d'anhydrite, de gypse et d'halite et dans les dépôts de potasse de type océanique. De beaux cristaux centimétriques viennent de Wathlingen (Allemagne fédérale).

▼ *Cristaux de thénardite provenant de Borax Lake (Paris, École nationale supérieure des mines).*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

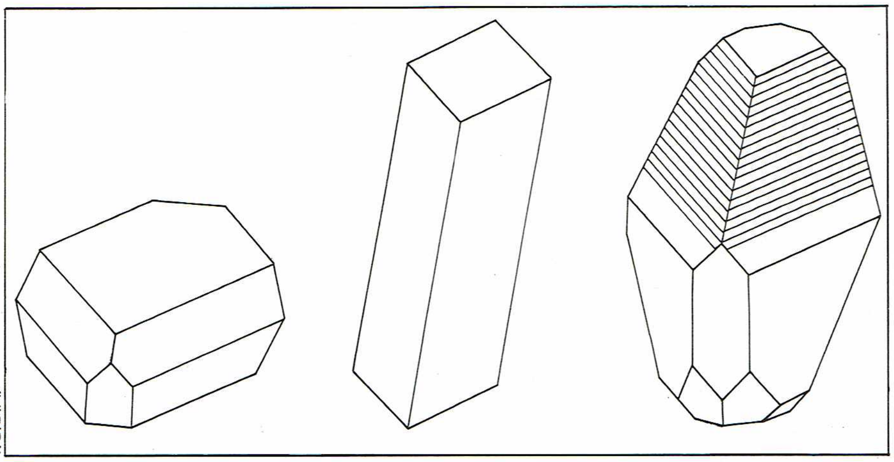

I.G.D.A.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲▶ *Ci-dessus, représentation schématique de divers cristaux de glaubérite; ci-contre, à gauche, cristaux du même minéral provenant de l'Arizona (Paris, École nationale supérieure des mines).*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ *Ci-contre, à droite, cristaux tabulaires de barytine, minéral très recherché pour ses usages industriels (Traversella, Piémont).*

np = 1,471, ng = 1,484. Sans couleur quand elle est pure, mais aussi blanc grisâtre, jaunâtre ou brun-jaune. Transparente à translucide. Goût légèrement salé.

Gisements. Ce minéral se forme par évaporation des lacs salés en régions arides. On le trouve associé à l'epsomite, la glaubérite, le gypse, etc. De gros cristaux iennent de Bilma (Sahara) et du Niger.

Glaubérite $CaNa_2[SO_4]_2$ - monoclinique

La glaubérite cristallise sous des formes variables, soit tabulaires sur (001) avec parfois les faces (110), soit prismatiques suivant $[\bar{1}01]$ avec les faces (111) bien développées, soit encore dipyramidales avec les faces (111) et $(1\bar{1}0)$ combinées ou prismatiques suivant [001] avec les faces (110). Les faces (001) et (111) sont souvent striées.

Propriétés. Dureté : 2 ½ à 3; densité : 2,75 à 2,85; indices de réfraction : np = 1,515, ng = 1,54. Transparente à translucide; éclat vitreux à légèrement cireux et perlé sur la face de clivage; couleur habituellement grise ou jaunâtre, quelquefois incolore, ou rougeâtre à cause d'inclusions d'oxyde de fer. Fragile, sa cassure est conchoïdale. Elle se clive parfaitement sur (001). Goût légèrement salé.

Gisements. C'est un constituant très répandu des dépôts salins dont l'origine peut aussi bien être marine que lacustre. De beaux cristaux transparents viennent de la région de Tolède (Espagne).

Barytine ou baryte $Ba[SO_4]$ - orthorhombique

Recherchée pour ses usages industriels, la barytine est habituellement tabulaire sur (001) plus ou moins épaisse, avec les faces latérales (210) seules ou combinées avec (101), (011) et autres; ces cristaux tabulaires peuvent présenter un allongement selon [100] ou [010]. Ils sont moins souvent prismatiques, plus ou moins allongés selon [001], ou prismatiques selon [100] ou [010], ou encore équidimensionnels. Habituellement grands, ils sont disposés en agrégats de cristaux tabulaires ou en rosettes. La barytine est parfois massive, grenue à compacte et cryptocristalline; elle apparaît aussi sous forme de concrétions globulaires ou nodulaires et fibreuses intérieurement ou encore terreuses.

Propriétés. Dureté : 3 à 3 ½; densité : 4,50; indices de réfraction : np = 1,63, ng = 1,65. Transparente à subtranslucide; éclat vitreux inclinant à résineux; quelquefois perlé sur (001) et sur d'autres formes. La barytine est incolore à blanche ou tirant sur le jaune, le brun, le brun foncé, le rougeâtre, le gris, rarement verdâtre ou bleue. Fragile, sa cassure est inégale. Elle se clive parfaitement sur (001). Elle est diamagnétique; certaines variétés sont fluorescentes dans l'ultraviolet et souvent thermoluminescentes et phosphorescentes.

Gisements. C'est un minéral très fréquent des filons hydrothermaux, associé à la fluorite, la blende, la galène, la stibine, etc. La barytine se rencontre également dans

▼ *Représentation schématique de divers cristaux de thénardite, les deux premiers provenant de Californie, le troisième du désert d'Atacama.*

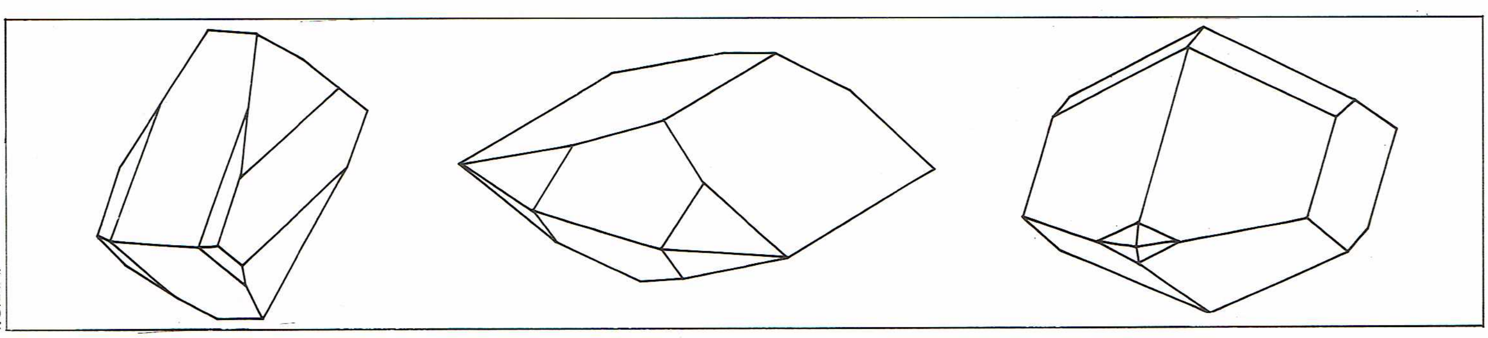

I.G.D.A.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

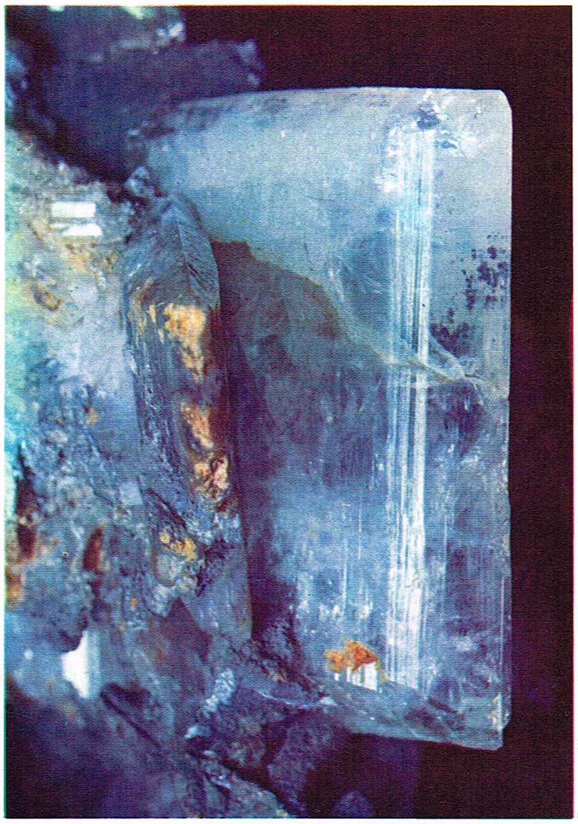

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ *A gauche, cristaux prismatiques* **de célestite** *à inclusions de soufre provenant d'Enna (Sicile) [musée d'Histoire naturelle, Milan]. A droite, cristaux tabulaires* **d'anglésite** *provenant de Monteponi (Sardaigne) [musée d'Histoire naturelle, Milan].*

des argiles sous forme de nodules (dépôts résiduels parfois importants) et dans les roches sédimentaires (calcaires) en filons et en lentilles. De grands cristaux proviennent des filons métallifères du Cumberland, de Saxe, de Roumanie. En France, de beaux cristaux de couleur miel ont été trouvés à Saint-Saturnin (Puy-de-Dôme).

Célestite $Sr[SO_4]$ - orthorhombique

C'est le principal minerai de strontium recherché par l'industrie. Le développement des cristaux est très variable : ils sont habituellement tabulaires, minces à épais sur (001), avec les faces (210) bien développées; ces cristaux peuvent présenter un allongement selon [100]. La célestite peut également montrer un allongement selon [100], les deux autres directions étant égales, moins fréquemment équidimensionnelles ou pyramidales. Elle se présente aussi en nodules, en veines fibreuses, en masses grenues, en cristaux lenticulaires ou en agrégats; elle est rarement lamellaire, ou terreuse mélangée à de l'argile et à de la calcite.

Propriétés. Dureté : 3 à 3 $\frac{1}{2}$; densité : 3,97; indices de réfraction : np = 1,62, ng = 1,64. Transparente à translucide; éclat vitreux inclinant au perlé sur les faces de clivage; incolore à bleu pâle, mais aussi blanche, rougeâtre, verdâtre ou brunâtre. La couleur bleue est quelquefois inégalement distribuée suivant les zones de croissance. La cassure est inégale et son clivage est parfait sur (001). La célestite est parfois fluorescente et thermoluminescente; la fluorescence est quelquefois due à l'inclusion de matière organique.

Gisements. La formation de ce minéral d'origine sédimentaire (calcaires, dômes salins, etc.) donne lieu à diverses théories. En Sicile, la célestite se forme lors de la transformation du gypse en soufre. Depuis quelques années, de grandes géodes de cristaux limpides et bleus viennent de Madagascar. Les plus grands cristaux venaient autrefois de l'île de Strontian (Canada).

Anglésite $Pb[SO_4]$ - orthorhombique

L'anglésite est souvent bien cristallisée. Les cristaux sont tabulaires minces à épais sur (001) avec les faces (210) et (101). Ils sont quelquefois allongés selon [100] ou [010]. Ils peuvent être prismatiques allongés selon [001] avec les faces (210) bien développées et striées verticalement ou selon [100] avec les faces (011) bien développées : ce sont parfois de gros prismes allongés selon [010] avec les faces (101) et (102), des cristaux tabulaires sur (100), des cristaux équidimensionnels ou pyramidaux avec les faces (111), (211) et autres. Les faces (100) et (210) sont souvent striées selon [001]. L'anglésite est communément massive, grenue à compacte, nodulaire, stalactitique.

Propriétés. Dureté : 2 $\frac{1}{2}$ à 3; densité : 6,38 pour les cristaux et inférieure pour les types terreux; indices de réfraction : np = 1,87, ng = 1,90. Transparente à opaque; éclat adamantin inclinant à résineux et vitreux pour quelques échantillons. Incolore à blanche, souvent teintée de gris, de jaune, de vert et quelquefois de bleu. Fragile, sa cassure est conchoïdale. Elle se clive bien sur (001). Elle est souvent fluorescente en jaune à la lumière ultraviolette.

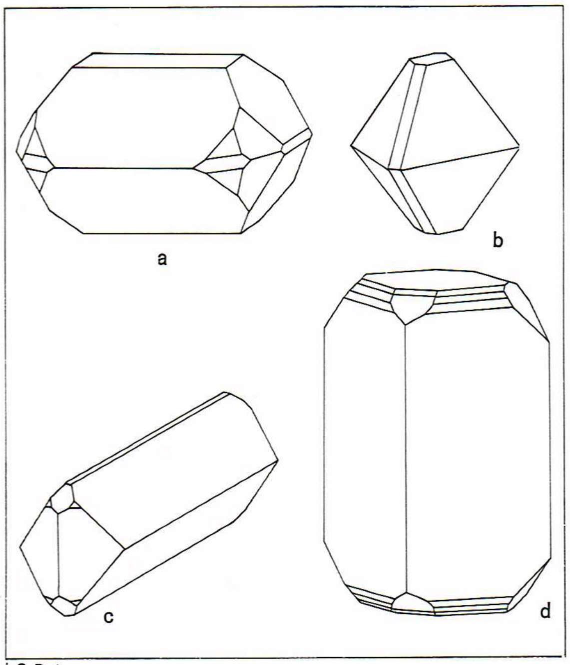

I.G.D.A.

◀ **Représentation schématique de divers cristaux d'anglésite** *provenant : a, d'Anglesey; b, du Nevada; c, du Pérou; d, de Mies.*

▶ *Page ci-contre, à gauche, cristaux de calédonite provenant de Mammoth Mine à Tiger (Arizona) [Paris, École nationale supérieure des mines].*

Gisements. Minéral secondaire formé par l'oxydation de la galène. Les meilleurs cristaux viennent du Tsumeb (Namibie), de Monte Poni (Iglésias, en Sardaigne) où elle est associée à la phosgénite et de Sidi Amor Ben Salem (Tunisie).

Antlérite $Cu_3[(OH)_4|SO_4]$ - orthorhombique

Les cristaux sont habituellement tabulaires épais sur (010) ou prismatiques courts allongés selon [001]. L'antlérite se présente aussi en agrégats entrelacés et friables de cristaux aciculaires à fibreux; elle est parfois feutrée ou grenue; son clivage sur (010) est parfait. Elle est fragile.

Propriétés. Dureté : 3 ½; densité : 3,88; indices de réfraction : np = 1,726, ng = 1,789. Éclat vitreux; couleur vert émeraude à vert noirâtre, qui ressemble beaucoup à celle de la brochantite et de l'atacamite; elle est translucide.

Gisements. C'est un minéral secondaire de zones d'oxydation des gisements cuprifères en région aride. L'antlérite est associée à la chalcantite, la natrocalcite, la brochantite, le gypse, etc. Les cristallisations qu'on peut voir dans les musées viennent des mines d'Arizona (U.S.A.) et de Chuquicamata (Chili).

Brochantite $Cu_4[(OH)_4|SO_4]$ - monoclinique

Elle se présente en cristaux aciculaires ou prismatiques assez gros, allongés selon [001], quelquefois tabulaires sur (010) ou parfois tabulaires sur (001). Les cristaux aciculaires forment des agrégats peu cohérents. La brochantite est aussi massive, grenue. Elle se macle communément sur la face (100), et le clivage sur cette face est parfait. La cassure est inégale à conchoïdale.

Propriétés. Dureté : 3 ½ à 4; densité : 3,97; indices de réfraction : np = 1,728. ng = 1,80, Éclat vitreux, un peu perlé sur les faces de clivage. Couleur vert émeraude à vert noirâtre; transparente à translucide.

Gisements. Ce minéral secondaire est assez commun dans les gisements de cuivre. Les plus belles cristallisations viennent de Chuquicamata (Chili) et de Bisbee (Arizona).

Linarite $PbCu[(OH)_2|SO_4]$ - monoclinique

Les cristaux sont allongés selon la direction [010] et souvent tabulaires sur ($\bar{1}$01) ou (001). La linarite se présente en cristaux isolés ou en groupes, en encroûtements ou en agrégats confus de cristaux prismatiques. La macle sur (100) est assez commune; le clivage sur (100) est parfait. Sa cassure est conchoïdale, et elle est fragile.

Propriétés. Dureté : 2 ½; densité : 5,35; indices de réfraction : np = 1,809, ng = 1,859. Éclat vitreux à subadamantin; couleur bleu azur foncé; translucide. Elle se distingue de l'azurite en blanchissant dans l'acide chlorhydrique alors que cette dernière fait effervescence.

Gisements. Minéral secondaire des zones d'oxydation des gisements de cuivre. Il est associé à la cérusite, la malachite, la brochantite, l'anglésite, etc. Les meilleurs cristaux viennent de Leadhills (Écosse) et de Rougtten Hill (Cumberland).

Alunite $KAl_3[(OH)_6|(SO_4)_2]$ - rhomboédrique

Les cristaux sont petits et rares, et se présentent en druses dans l'alunite massive ou en agrégats. Les cristaux sont souvent tabulaires sur (0001) ou terminés par une forme rhomboédrique plate. L'alunite est aussi massive et dense lorsqu'elle est mélangée à d'autres espèces minérales telles que le quartz, etc. Elle est parfois fibreuse. Les cristaux ont une cassure conchoïdale alors que les masses denses ont une cassure inégale esquilleuse à conchoïdale. L'alunite est fragile.

Propriétés. Dureté : 3 ½ à 4; densité : 2,6 à 2,9; indices de réfraction : np = 1,572, ng = 1,592; éclat vitreux un peu perlé sur (0001); couleur blanche quand elle est pure, mais aussi grisâtre, jaunâtre, rougeâtre, brun rougeâtre; transparente à translucide. Fortement pyro-électrique.

Gisements. Minéral des fumerolles, l'alunite est aussi de formation secondaire, résultat de l'action de l'acide sulfurique (provenant de l'oxydation de la pyrite) sur des roches silicatées; c'est un sulfate assez fréquent des gisements de sulfures métalliques. Le gisement de Tolfa (Italie) est l'un des plus connus.

Jarosite $KFe_3[(OH)_6|(SO_4)_2]$ - rhomboédrique

Les cristaux sont minuscules et indistincts; ils ont habituellement une forme cubique {01$\bar{1}$2} ou tabulaire sur (0001). La jarosite se présente en croûtes ou en enduits de microcristaux, mais elle est aussi massive, grenue ou fibreuse; elle peut parfois être pulvérulente ou former des concrétions. Sa cassure est inégale à conchoïdale. Elle est fragile.

Propriétés. Dureté : 2 ½ à 3 ½; densité : 2,91 à 3,26; indices de réfraction : np = 1,72, ng = 1,820. Éclat subadamantin à vitreux sur les faces et résineux sur les cassures. Couleur ocre, jaune ambre à brun foncé; translucide, fortement pyro-électrique.

Gisements. Minéral secondaire très répandu dans les zones d'oxydation des gisements de la pyrite, situés dans les régions arides. Les meilleures pièces de collection viennent de Kamaresa, Laurium (Grèce), et de Baranca Jaroso (Espagne).

Argentojarosite $AgFe_3[(OH)_6|(SO_4)_2]$ - rhomboédrique

L'argentojarosite se présente en masses très finement grenues et en enduits composés de cristaux aplatis sur (0001) et de forme hexagonale. Elle se clive suivant (0001).

Propriétés. Densité : 3,66; indices de réfraction : np = 1,785, ng = 1,882. Couleur brune à jaune; éclat brillant.

Gisements. C'est un minéral rare de formation secondaire. On le trouve associé à l'anglésite à Tinto Mine (Utah, U.S.A.).

Corkite $PbFe_3(PO_4)(SO_4)(OH_6)$ - rhomboédrique

La corkite se présente en cristaux rhomboédriques, généralement pseudocubiques, similaires à ceux de la beudantite. Elle se clive parfaitement sur (0001).

Propriétés. Dureté : 3 ½ à 4 ½; densité : 4,295; indices de réfraction : np = 1,93, ng = 1,96. Couleur vert foncé, vert jaunâtre à jaune pâle; éclat vitreux à résineux.

Gisements. On trouve la corkite associée à la limonite dans les mines de fer de Cork (Irlande).

Beudantite $PbFe_3(AgO_4)(SO_4)(OH)_6$ - rhomboédrique

La beudantite se présente en cristaux rhomboédriques, pseudocubiques; elle se clive facilement suivant [0001].

Propriétés. Dureté : 3 ½ à 4 ½; densité : 4 à 4,3; indices de réfraction élevés. Couleur noire, vert foncé ou brune; éclat vitreux à résineux, transparent à opaque.

Gisements. Meilleurs gisements à Kamaresa (Grèce).

Lanarkite $Pb_2(SO_4)O$ - monoclinique

La lanarkite se présente en cristaux allongés selon [010]. Elle se clive parfaitement selon (201). Elle est flexible, en fines lamelles. Elle est aussi massive.

Propriétés. Dureté : 2 à 2 ½; densité : 6,92; indices de réfraction : np = 1,93, ng = 2,04. Éclat adamantin à résineux, mais perlé sur les faces de clivage. Couleur grise à blanc verdâtre, ou jaune pâle. Transparente à translucide. La lanarkite est fluorescente dans le jaune à l'ultraviolet et aux rayons X.

Gisements. Ce minéral rare a été trouvé associé à la leadhillite, la calédonite et la cérusite dans quelques mines de plomb. Les cristaux les plus gros proviennent de Leadhills (Écosse) et de Laquorre (Ariège).

Hanksite $Na_{22}K(SO_4)_9(CO_3)_2Cl$ - hexagonal

La hanksite se présente sous forme de beaux cristaux pouvant atteindre 10 cm, souvent disposés en groupes interpénétrés. Ses prismes sont hexagonaux, habituellement prismatiques courts suivant [0001] ou tabulaires sur (0001). Elle se clive bien sur (0001). Fragile, sa cassure est inégale.

Propriétés. Dureté : 3 ½; densité : 2,562. Indices de réfraction : np = 1,46, ng = 1,48. Éclat vitreux à terne; sans couleur, quelquefois faiblement jaunâtre ou grise, ceci étant dû à des inclusions de particules d'argile. Transparente à translucide. Elle a un goût salé. Elle est faiblement fluorescente dans le jaune pâle pour les grandes longueurs d'onde des radiations ultraviolettes.

Gisements. La hanksite est abondante dans les dépôts salins de Searles Lake et San Bernardino Co. (Califor-

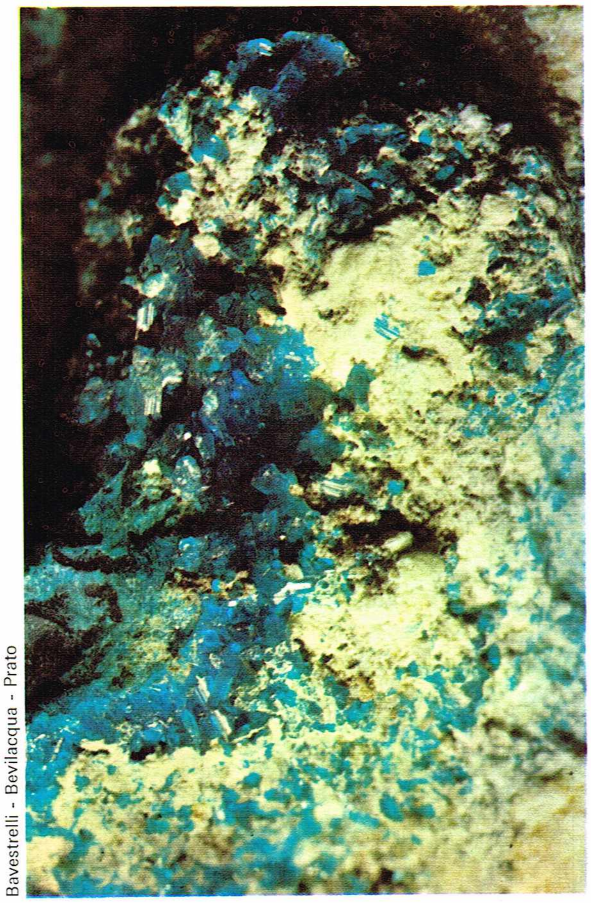

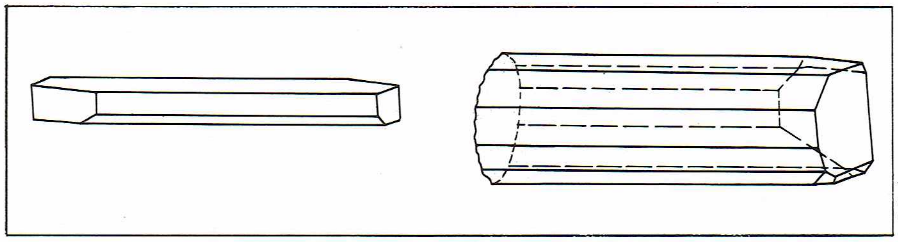

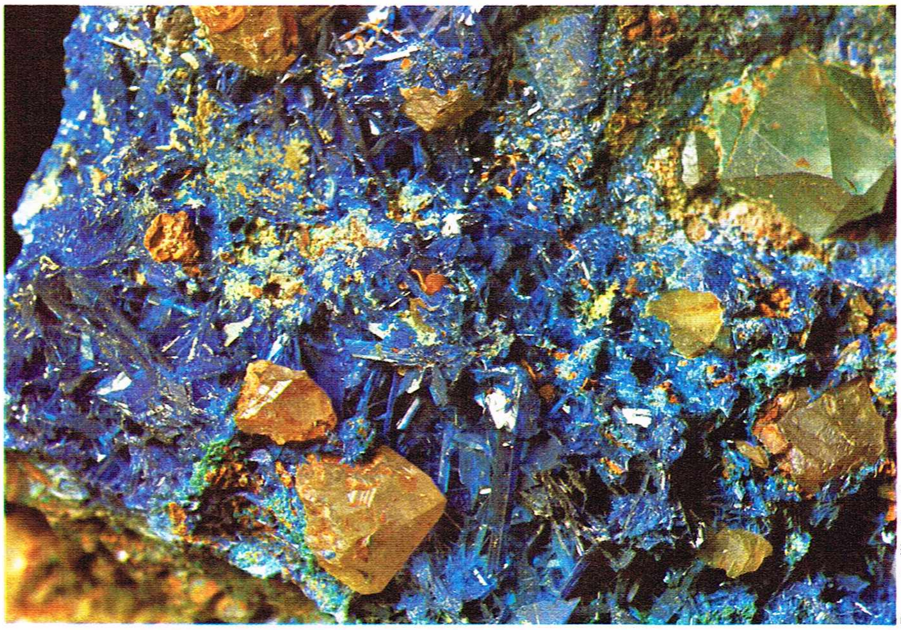

nie) où elle est associée au borax, au trona et à l'aphthitalite.

Calédonite $Cu_2Pb_5(SO_4)_3(CO_3)(OH)_6$ - orthorhombique

La calédonite se présente en cristaux allongés selon [001], habituellement petits et disposés en groupes divergents; les cristaux sont souvent striés suivant [001]. La calédonite est parfois en recouvrement mais rarement massive. Son clivage est parfait sur (010); sa cassure est inégale et elle est plutôt fragile.

Propriétés. Dureté : 2 ½ à 3; densité : 5,76; indices de réfraction : np = 1,82, ng = 1,91. Éclat résineux; couleur verte, vert-de-gris foncé ou vert bleuâtre. Translucide.

Gisements. C'est un minéral secondaire des zones d'oxydation des gisements de cuivre, associé à l'anglésite, la cérusite, la malachite, etc. De beaux échantillons viennent de Leadhills (Écosse) et de Mammoth Mine à Tiger (Arizona).

Leadhillite $Pb_4(SO_4)(CO_3)_2(OH)_2$ - monoclinique

Les cristaux sont habituellement pseudo-hexagonaux et se présentent sous forme de prisme à contours hexagonaux, tabulaires, minces ou épais sur (001) ou de forme rhomboédrique. La leadhillite peut aussi être massive ou grenue. Les faces en zone avec (101) sont souvent largement développées et striées. Le plan de macle {140} est très commun (macle par contact, de type aragonite) et le plan de macle {340} est fréquent. Le clivage sur (001) est parfait et facile; la cassure est conchoïdale; la leadhillite est sectile.

Propriétés. Dureté : 2 ½ à 3; densité : 6,55; indices de réfraction : np = 1,87, ng = 2,01. Éclat résineux à adamantin et perlé sur (001). Incolore à blanc, passant au gris, vert pâle, vert bleuâtre pâle, bleu pâle ou jaunâtre. Transparent et translucide; et montrant quelquefois une fluorescence jaune à la lumière ultraviolette.

Gisements. C'est un minéral secondaire des gisements de plomb, associé à l'anglésite, la linarite, la cérusite, etc. De belles pièces de collection viennent de Leadhills (Écosse) où ce minéral a été mis au jour pour la première fois.

Chalcanthite $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ - triclinique

La chalcanthite se présente sous forme de cristaux prismatiques courts, allongés selon [001] et moins communément tabulaires, épais sur (111). Elle se présente aussi sous forme stalactitique, réniforme, massive ou grenue. Les macles sont rares, et le clivage suivant (110) imparfait. La cassure est conchoïdale. C'est un sulfate soluble dans l'eau.

Propriétés. Dureté : 2 ½; densité : 2,286; indices de réfraction : np = 1,51, ng = 1,54; éclat vitreux; couleur bleu berlin à bleu ciel, de différentes nuances, quelquefois un peu verdâtre. Subtransparente à translucide. Goût métallique désagréable.

Gisements. Ce minéral secondaire est très fréquent dans les gisements de cuivre et se forme souvent dans les galeries des mines.

Hexahydrite $MgSO_4 \cdot 6H_2O$ - monoclinique

L'hexahydrite apparaît le plus souvent en agrégats de cristaux aciculaires, rarement en beaux cristaux tabulaires épais sur (001). Elle se clive parfaitement sur (100); sa cassure est conchoïdale.

Propriétés. Densité : 1,757; indices de réfraction : np = 1,43, ng = 1,47. Transparente, incolore à blanche; éclat perlé à vitreux mais habituellement blanc et opaque; goût amer, salé.

Gisements. C'est un produit de déshydratation de l'epsomite, plus rarement rencontré en efflorescences autour des lacs salés.

Parmi les localités les plus classiques, on peut citer Sidney (Australie).

Mélantérite $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ - monoclinique

La mélantérite se présente sous forme de prismes assez courts selon la direction [001], avec les formes {110} et {001} bien développées; les cristaux sont parfois tabulaires, épais sur (010) ou (10$\bar{1}$), ou octaédriques, ceci étant dû au développement égal des formes {110}, {001} et {$\bar{1}$01}. Elle est aussi souvent stalactitiforme ou

▲ ***Ci-dessus, en haut, représentation schématique de cristaux de* linarite *provenant respectivement de Mammoth Mine (à gauche) et de Nouvelle-Calédonie (à droite). En bas, un échantillon de* linarite*, provenant de Suzannah, Leadhills (Grande-Bretagne) [Paris, École nationale supérieure des mines].***

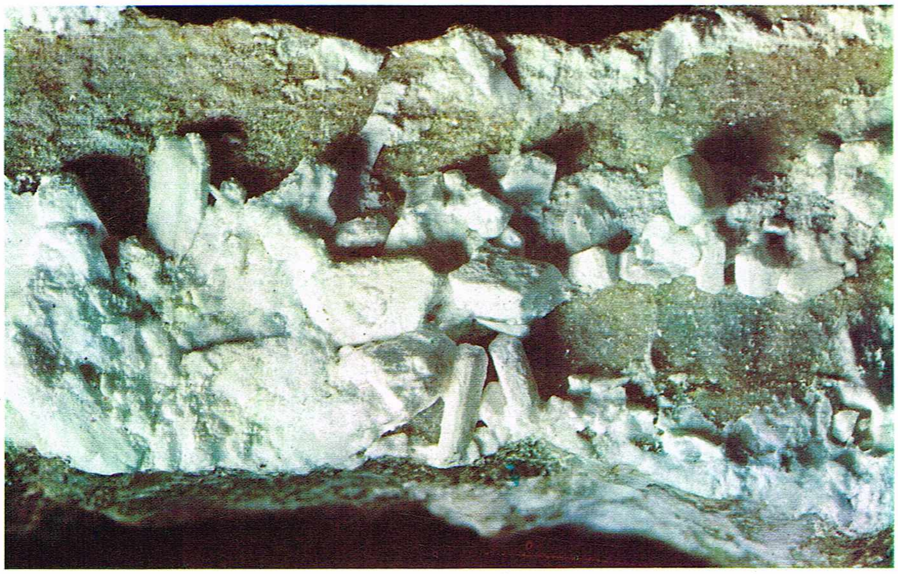

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

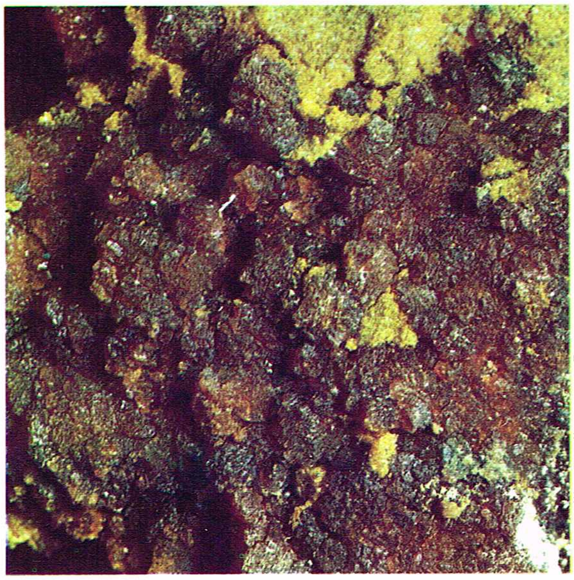

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *A gauche, agrégat d'epsomite provenant de l'Hérault (France) [Paris, École nationale supérieure des mines]. A droite,* roemérite *provenant de Rammelsberg (Harz) [Paris, École nationale supérieure des mines].*

concrétionnée, ou en agrégats fibreux à capillaires, massive ou pulvérulente. Elle se clive parfaitement sur (001). Elle est fragile, sa cassure est conchoïdale, et elle est soluble dans l'eau.

Propriétés. Dureté : 2; densité : 1,898; indices de réfraction : np = 1,47, ng = 1,49. Son éclat est vitreux, vert, de nuances variées, passant au bleu verdâtre et au bleu quand le fer est remplacé par le cuivre; subtransparente à translucide. Exposée à l'air humide, elle devient blanc jaunâtre et opaque. Goût un peu sucré, astringent et métallique.

Gisements. C'est un minéral d'altération secondaire des gisements de fer, formé par oxydation de la pyrite, de la marcassite. En France, on l'a trouvée à Salsigne dans l'Aube. Elle se forme dans les galeries, sur les parois ou les bois de mines.

Boothite $CuSO_4 \cdot 7H_2O$ - monoclinique

La boothite est habituellement massive, avec une structure cristalline ou fibreuse; elle n'apparaît que rarement en cristaux.

Propriétés. Dureté : 2 à 2 ½; densité : 2 à 2,1; indices de réfraction : np = 1,47, ng = 1,49. Transparente à translucide; éclat vitreux et soyeux ou perlé pour les fibres; couleur bleue, légèrement plus pâle que celle de la chalcanthite.

Gisements. C'est un minéral secondaire formé par altération des minerais sulfurés de cuivre. On peut citer Sain-Bel dans le Rhône (France) à titre de gisement typique.

▼ *Cristaux prismatiques de* kroehnkite *provenant de Chuquicamata (Chili) [Paris, École nationale supérieure des mines].*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Epsomite $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ - orthorhombique

Dans la nature, l'epsomite est rarement bien cristallisée. Elle se présente habituellement sous forme d'encroûtements fibreux ou aciculaires, avec des fibres allongées selon [001], de même qu'en efflorescences laineuses, et en masses botryoïdales ou réniformes. Son clivage suivant (010) est parfait et sa cassure est conchoïdale.

Propriétés. Dureté : 2 à 2 ½; densité : 1,697; indices de réfraction : np = 1,43, ng = 1,46. Éclat vitreux mais soyeux à terreux pour les types fibreux. Les cristaux uniques et purs sont incolores et transparents tandis que les agrégats massifs sont blancs et translucides; la variété cobaltifère est rose et la variété nickelifère verdâtre. L'epsomite est légèrement diamagnétique. Son goût est amer et salé.

Gisements. Ce minéral est très fréquent et ses modes de gisement sont très variés (fumerolles, dépôts salins, altération des minéraux sulfurés, etc.). De grandes masses fibreuses ont été rencontrées à Sydney (Australie) et à Calatayud (Espagne).

Morénosite $NiSO_4 \cdot 7H_2O$ - orthorhombique

Ce minéral ne se rencontre que sous forme d'encroûtements efflorescents de cristaux indistincts ou fibreux. Il se clive suivant (010) et sa cassure est conchoïdale.

Propriétés. Dureté : 2 à 2 ½; densité : 1,953; indices de réfraction : np = 1,47, ng = 1,49. Éclat vitreux; couleur vert pomme à blanc verdâtre; transparente quand elle n'est pas altérée. Elle est faiblement paramagnétique; goût métallique astringent.

Gisements. C'est un minéral secondaire des gisements de sulfures métalliques. Parmi les gisements, on peut citer Oreighton (Ontario).

Roemérite $Fe^{2+}Fe_2^{3+}(SO_4)_4 \cdot 14H_2O$ - triclinique

La roemérite se présente en cristaux cuboïdaux avec un développement important des faces en zone avec l'axe [001]; ils sont parfois tabulaires épais sur (010). La roemérite est aussi grenue. Elle se clive parfaitement sur (010) et un peu moins bien sur (001). Sa cassure est inégale.

Propriétés. Dureté : 3 à 3 ½; densité : 2,174; indices de réfraction : np = 1,52, ng = 1,58. Couleur brun rouille à jaune et parfois aussi brun-violet; éclat huileux à vitreux; translucide; goût salé astringent.

Gisements. Minéral secondaire formé par l'oxydation de la pyrite associée à la copiapite, l'halotrichite, la szomolnokite, se rencontre à Alcaparosa (Chili), dans la Copper-Quen-Mine à Bisbee (Arizona) et à Rammelsberg (Harz).

Halotrichite $Fe^{2+}Al_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$ - monoclinique

L'halotrichite se présente en agrégats radiés de cristaux aciculaires allongés selon [001], mais aussi sous

un aspect feutré, ou encore forme des efflorescences. Elle est fragile; sa cassure est conchoïdale et ressemble un peu à de l'asbeste. Elle est soluble dans l'eau.

Propriétés. Dureté : 1 ½; densité : 1,90; indices de réfraction : np = 1,48, ng = 1,49; éclat vitreux. Incolore à blanche, mais aussi jaunâtre ou verdâtre. Son goût est astringent.

Gisements. C'est un minéral d'altération se formant par l'action des eaux sulfatées sur des roches sédimentaires argileuses ou dans des houillères embrasées. Ses gisements sont nombreux, de grandes masses fibreuses viennent de Baiedjan (Iran).

Kroehnkite $Na_2Cu(SO_4)_2 \cdot 2H_2O$ - monoclinique

La kroehnkite se présente en cristaux prismatiques courts allongés selon [001], ou en cristaux octaédriques un peu allongés selon [100] avec les formes {110} et {011} bien développées. Elle forme des encroûtements. Elle est aussi massive, grenue. Elle se macle communément sur {101} et se clive parfaitement sur {010}. Sa cassure est conchoïdale.

Propriétés. Dureté : 2 ½ à 3; densité : 2,90; indices de réfraction : np = 1,544, ng = 1,601. Éclat vitreux; couleur bleu ciel à bleu pâle inclinant au bleu verdâtre quand elle est exposée à l'air. Transparente.

Gisements. Ce minéral secondaire provient du Chili (Atacama, Chuquicamata, Quetena) où il est associé à d'autres minéraux secondaires du cuivre (atacamite, chalcanthite, etc.).

Astrakanite $Na_2Mg(SO_4)_2 \cdot 4H_2O$ - monoclinique

Ce minéral, encore appelé bloedite, se présente en cristaux prismatiques courts, allongés selon [001], souvent très déformés. Il est aussi massif, grenu ou compact. Sa cassure est conchoïdale; il est fragile.

Propriétés. Dureté : 2 ½ à 3; densité : 2,25; indices de réfraction : np = 1,481, ng = 1,484. Incolore, quelquefois vert bleuâtre ou rougeâtre par la présence d'inclusions; transparent; éclat vitreux. Léger goût salé et amer.

Gisements. Minéral fréquent des dépôts de sels d'origine marine, associé à la halite, la thénardite, etc. De gros cristaux ont été trouvés à Varcha, Salt Range, dans le Pendjab (Pakistan).

Léonite $K_2Mg(SO_4)_2 \cdot 4H_2O$ - monoclinique

Les cristaux se présentent sous forme tabulaire sur (100) ou allongés selon [001]. Ils croissent habituellement avec d'autres minéraux salins. La cassure est conchoïdale.

Propriétés. Dureté : 2 ½ à 3; densité : 2,201; indices de réfraction : np = 1,483, ng = 1,490. Transparente. Incolore, mais aussi jaunâtre. L'éclat est cireux à vitreux. Le goût est amer.

Gisements. C'est un minéral secondaire des dépôts de sels d'origine marine; les meilleurs cristaux se rencontrent à Herringen (Hessen, Allemagne fédérale).

Gypse $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ - monoclinique

Les cristaux sont souvent tabulaires, minces à épais sur (010) avec les faces ($\bar{1}$11), (120) et ($\bar{1}$03); ils sont habituellement allongés selon [001]. Les faces (120) et (010) sont profondément striées parallèlement à [001] et la face (010) est parfois rugueuse. Les cristaux peuvent être prismatiques selon [001] avec une section presque équidimensionnelle et une forme plus ou moins allongée à aciculaire. Les faces en zone du prisme sont parfois très nombreuses et striées selon [001]. Les cristaux peuvent être lenticulaires et forment parfois des agrégats en rosettes. Le gypse est aussi massif, lamellaire, pulvérulent ou disposé en concrétions fibreuses.

Propriétés. Dureté : 2, variant avec la direction; densité : 2,317; indices de réfraction : np = 1,52, ng = 1,53. Éclat subvitreux (perlé sur les faces de clivage); incolore à transparent, mais aussi blanc, gris, jaunâtre ou brunâtre quand il est massif. Facilement flexible mais non élastique. Il présente un très bon clivage sur {010}. La macle très commune sur {100} est dite « queue d'aronde »; et sur {$\bar{1}$01} elle est dite « fer de lance ».

Gisements. C'est un minéral très utilisé par l'industrie (ciment, plâtre) dont la production dépasse soixante millions de tonnes par an. On le rencontre en couches importantes dans les gisements de sel d'origine marine,

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

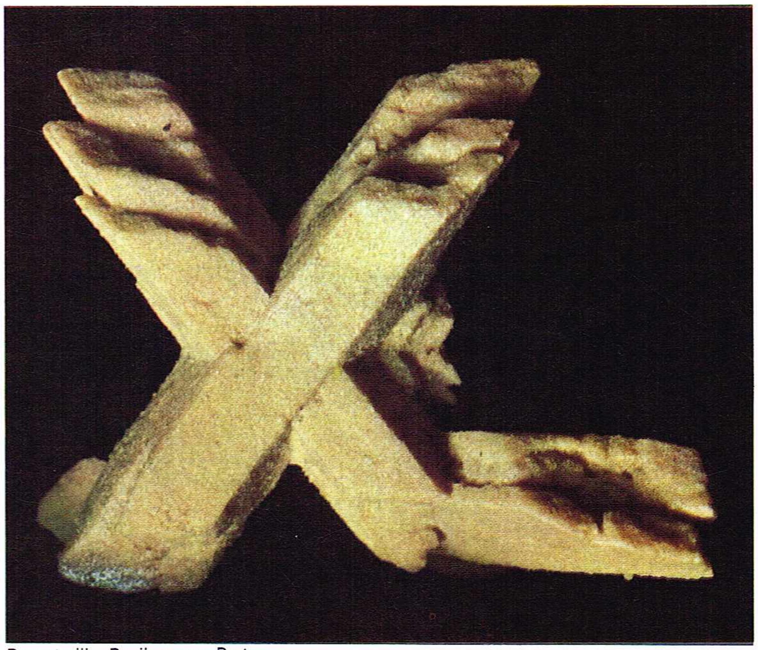

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Ci-dessus, en haut, cristaux de léonite, associés à des cristaux de sel gemme, provenant de Sigmundshall (Saxe) [Paris, École nationale supérieure des mines].***

▲◀ ***Trois formes de cristallisation du gypse : ci-dessus, à gauche, cristaux maclés recouverts de sable (Algérie); à droite, un cristal tabulaire provenant de Wiesloch, Baden (Allemagne); ci-contre, agrégats de cristaux lenticulaires recouverts de sable (rose des sables) [Sahara].***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

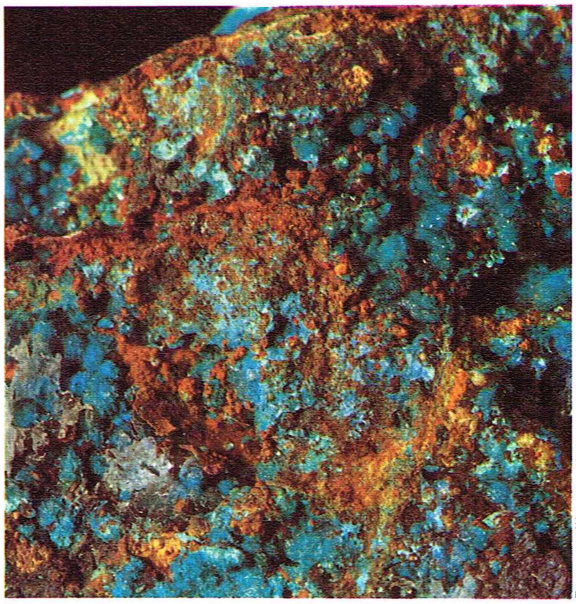

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *A gauche, cristaux d'amarantite provenant de Sierre Gorda (Chili) [Paris, École nationale supérieure des mines]. A droite, serpiérite provenant du Laurium (Grèce).*

▼ *A gauche, le plus bel échantillon connu de cristaux aciculaires de* cyanotrichite *provenant de Cap-Garonne (Var). A droite,* botryogène *provenant de Knoxville (Californie) [Paris, École nationale supérieure des mines].*

dans les zones superficielles des gisements sulfurés, dans les dépôts de sources thermales, etc. Des cristaux métriques ont été rencontrés à Naica (Chihuahua, Mexique) et à Mazan (Vaucluse) ; associés au soufre, des cristaux très limpides viennent de Sicile. La macle en « fer de lance » est fréquente dans le Bassin parisien. Les associations de cristaux lenticulaires recouvertes de sable *(roses des sables)* sont très abondantes au Sahara.

Polyhalite $K_2Ca_2Mg(SO_4)_4 \cdot 2H_2O$ - triclinique

Les cristaux sont petits et rares. La polyhalite est habituellement massive mais aussi fibreuse à feuilletée. La macle sur (010) et (100) est commune et souvent polysynthétique. Ce minéral se clive parfaitement sur (10$\bar{1}$).

Propriétés. Dureté : $3\frac{1}{2}$; densité : 2,78 ; indices de réfraction : np = 1,548, ng = 1,567 ; éclat vitreux à résineux. Incolore et transparente, ou encore blanche ou grise, ou souvent rose saumon à rouge brique, ce qui est dû à de fines inclusions d'oxyde de fer.

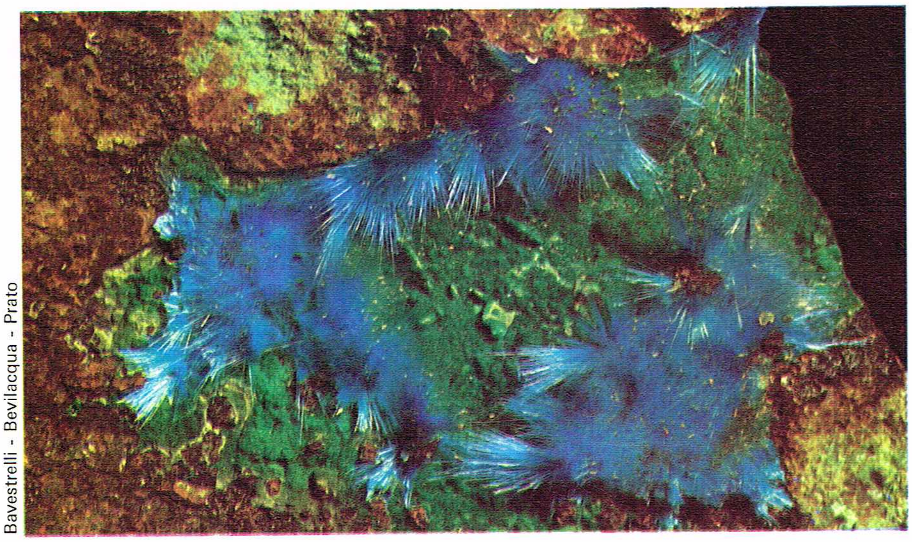

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Gisements. Ce minéral très répandu dans les dépôts salins est associé à la carnalite, la kiésérite, l'anhydrite, la glaubérite, etc.

Leightonite $K_2Ca_2Cu(SO_4)_4 \cdot 2H_2O$ - triclinique

Les cristaux sont disposés en lattes allongées selon [001] et aplatis sur (100). Les surfaces courbées qui recoupent plus ou moins les coins du prisme donnent à certains cristaux l'apparence de verres de montre. La leightonite se présente aussi sous forme de fibres. Les macles lamellaires sont répétées. Il n'y a pas de clivage.

Propriétés. Dureté : 3 ; densité : 2,95 ; indices de réfraction : ng = 1,595, np = 1,578. Éclat vitreux couleur bleu d'eau pâle à bleu verdâtre. Transparente à translucide.

Gisements. Ce minéral rare est associé à l'atacamite et la kroehnkite à Chuquicamata (Chili).

Langite $Cu_4(SO_4)(OH)_6 \cdot H_2O$ - orthorhombique

La langite se présente en petits cristaux de développement égal dans les 3 directions ou allongés selon [100]. Ils sont aussi en lattes ou en écailles formant des encroûtements sur (110). La langite se clive sur (001) et (010).

Propriétés. Dureté : $2\frac{1}{2}$ à 3 ; densité : 3,48 à 3,50 ; indices de réfraction : np = 1,708, ng = 1,798. Éclat des cristaux vitreux et un peu soyeux pour les encroûtements, couleur bleue à bleu verdâtre, translucide.

Gisements. Minéral secondaire des zones d'oxydation des gîtes de cuivre. De beaux exemplaires viennent des mines de Cornouailles.

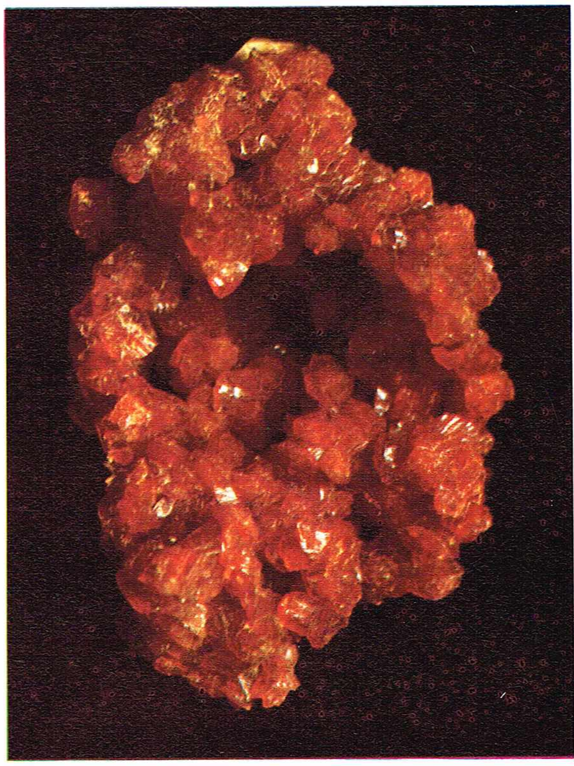

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

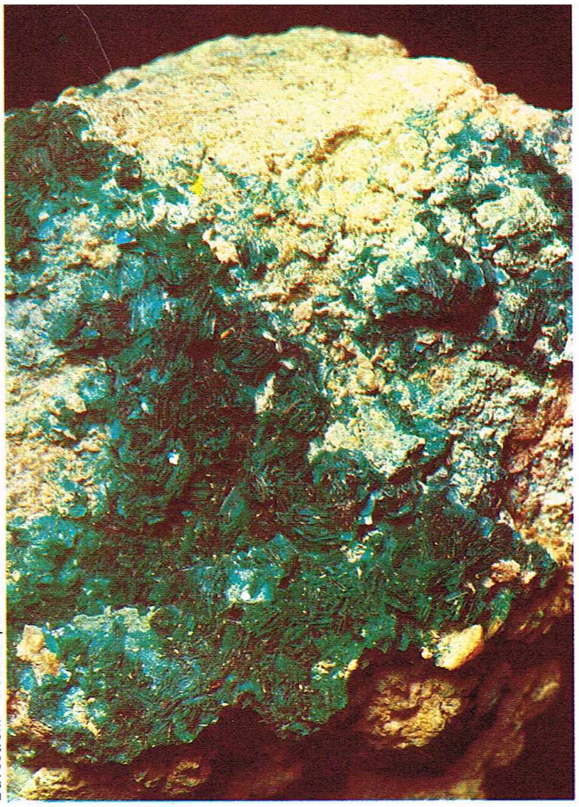

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ **Devillite** ***provenant de Neusohl, Bersztuzehanaya.***

Parabutlérite $Fe(SO_4)(OH) \cdot 2H_2O$ - orthorhombique

La parabutlérite se présente en cristaux prismatiques allongés selon [001], et les faces en zone du prisme sont striées. Sa cassure est conchoïdale et elle est fragile.

Propriétés. Dureté : 2 ½; densité : 2,55; indices de réfraction : ng = 1,74, np = 1,60. Éclat vitreux; couleur orange lumineux à brun-rouge lumineux; transparente.

Gisements. Ce minéral rare est associé à la copiapite et la jarosite au Chili. De très beaux cristaux ont été signalés récemment en Iran à Saghand.

Amarantite $Fe(SO_4)(OH) \cdot 3H_2O$ - triclinique

L'amarantite se présente en cristaux allongés selon [001] avec les formes {100} et {010} bien développées et formant une section transversale presque carrée ou aplatie sur (100). Ils sont striés suivant [001]. On la trouve aussi en agrégats radiés de cristaux aciculaires. Elle se clive parfaitement sur (010) et (100); elle est fragile.

Propriétés. Dureté : 2 ½; densité : 2,189; indices de réfraction : np = 1,51, ng = 1,62. Éclat vitreux, couleur rouge amarante à rouge brunâtre et rouge orange. Transparente.

Gisements. C'est un minéral secondaire formé en région aride, rencontré dans divers gisements chiliens, associé à la copiapite, la chalcanthite et la coquimbite. De jolis cristaux ont été trouvés à Sierra Gorda (Chili).

Cyanotrichite $Cu_4Al_2(SO_4)(OH)_{12} \cdot 2H_2O$ - orthorhombique

La cyanotrichite se présente en agrégats laineux ou pelucheux et en revêtements de minuscules cristaux aciculaires, également fibro-radiés, ou en touffes délicates.

Propriétés. Densité : 2,95; indices de réfraction : np = 1,588, ng = 1,655. Éclat soyeux, couleur bleu ciel ou bleu azur très vif.

Gisements. C'est un minéral secondaire trouvé dans les zones d'oxydation de quelques gisements de cuivre, associé à l'azurite et à la malachite. Les plus beaux exemplaires connus viennent du Cap-Garonne (Var) et de Grandvien Mine, Arizona (U.S.A.).

Botryogène $MgFe^{3+}(SO_4)_2 \cdot 7H_2O$ - monoclinique

Le botryogène se présente en cristaux prismatiques allongés selon [001]. Les cristaux les plus petits sont habituellement prismatiques et longs tandis que les grands cristaux sont prismatiques courts avec la forme {101} bien développée et souvent striée suivant [100]. Mais le plus souvent, on le trouve en agrégats réniformes, botryoïdaux ou globulaires avec une structure radiée et une surface cristalline. Il se clive parfaitement sur (010) et bien sur (110). Cassure conchoïdale, interrompue, fragile.

Propriétés. Dureté : 2 à 2 ½; densité : 2,14; indices de réfraction : np = 1,522, ng = 1,577. Éclat vitreux, couleur rouge-orangé, lumineux à foncé; transparent à translucide.

Gisements. C'est un minéral secondaire des gisements pyriteux, formé surtout dans les régions arides, associé à la coquimbite, l'amarantite et la copiapite au Chili. De belles cristallisations ont été récemment trouvées à Sestri Levante (Italie).

Copiapite $(FeMg)Fe_4^{3+}(SO_4)_6(OH)_2 \cdot 20H_2O$ - triclinique

La copiapite se présente en cristaux tabulaires sur (010), quelquefois très déformés. Habituellement, elle forme des agrégats peu cohérents de minuscules écailles. Elle est aussi grenue. Sa macle est peu commune; son clivage sur (010) est parfait.

Propriétés. Dureté : 2 ½ à 3; densité : 2,08; indices de réfraction : np = 1,506 à 1,540, ng = 1,575 à 1,600 (la variation de l'indice de réfraction par rapport à la composition n'est pas bien définie). Éclat perlé sur (010); couleur jaune à jaune-orangé ou jaune d'or; quand elle est massive, elle est souvent jaune verdâtre; transparente à translucide.

Gisements. C'est un minéral secondaire des zones d'oxydation de la pyrite, associé à la fibroferrite, l'halotrichite et la mélantérite. Parmi ses nombreux gîtes, on peut citer Copiapo (Chili) où on l'a rencontrée pour la première fois.

Natrocalcite $NaCu_2(SO_4)_2(OH) \cdot H_2O$ - monoclinique

La natrocalcite se présente en cristaux pyramidaux de forme {111}; la forme {110} est habituellement bien développée mais les faces des autres formes sont petites. Elle se clive parfaitement sur (001).

Propriétés. Dureté : 4 ½; densité : 3,49 ± 0,02; indices de réfraction : np = 1,649, ng = 1,714. Couleur vert émeraude brillant; éclat vitreux; transparente.

Gisements. C'est un minéral secondaire associé à l'atacamite, l'antlérite et la kroehnkite, que l'on trouve à Chuquicamata au Chili.

Devillite $Cu_4Ca(SO_4)_2(OH)_6 \cdot 3H_2O$ - monoclinique

Habituellement, elle forme des croûtes ou bien des rosettes de cristaux aplatis sur (001), à six côtés et striés suivant la direction [010]. Son clivage sur (001) est parfait.

Propriétés. Dureté : 2 ½; densité : 3,13; indices de réfraction : np = 1,585, ng = 1,660. Éclat vitreux et parfois perlé sur (001). Couleur vert émeraude foncé à vert-de-gris et vert bleuâtre. Transparente.

Gisements. C'est un minéral secondaire des zones d'oxydation du cuivre. De belles masses fibreuses ou radiées de plusieurs centimètres proviennent de Cornouailles et de beaux groupes de cristaux lamellaires très brillants de Herrengrund (Tchécoslovaquie).

Aluminite $Al_2(SO_4)(OH)_4 \cdot 7H_2O$ - monoclinique

Minéral souvent friable, l'aluminite se présente en masses réniformes ou nodulaires composées de fines aiguilles ou de fibres. La cassure des agrégats est terreuse.

Propriétés. Dureté : 1 à 2; densité : 1,66 à 1,82; indices de réfraction : np = 1,459, ng = 1,470. Éclat terne, terreux; couleur blanche; opaque.

Gisements. C'est un minéral secondaire produit par l'action de solutions sulfatées (dérivant de l'altération des sulfures de fer) sur des silicates aluminifères. De grandes concrétions blanchâtres proviennent de Castle Hill (Angleterre).

Serpiérite $Ca(Cu, Zn)_4[(OH)_3|SO_4]_2 \cdot 3H_2O$ - orthorhombique

La serpiérite se rencontre en encroûtements ou en agrégats touffus de fins cristaux allongés selon [100] et aplatis sur (001) ou encore en masses à la surface satinée. Elle se clive parfaitement sur (001).

Propriétés. Densité : 2,52; indices de réfraction : np = 1,584, ng = 1,647 sur la surface de clivage. Couleur bleu ciel; transparente.

Gisements. Les meilleures pièces de collection viennent du Laurium (Grèce) où on les trouve en association avec l'azurite.

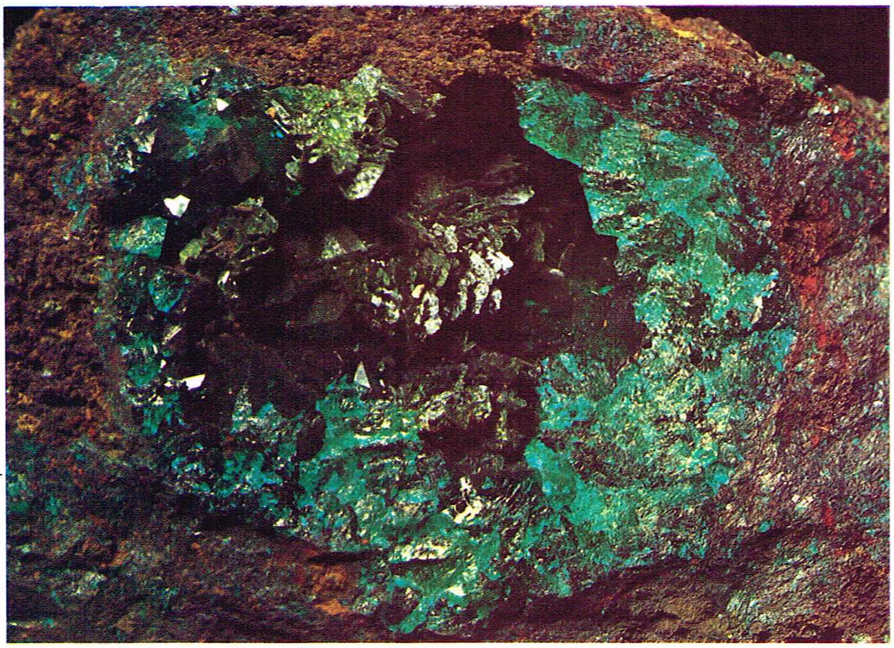

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Cristaux de fornacite associés à la dioptase (Renéville, Congo) [Paris, École nationale supérieure des mines].*

Zincaluminite $Zn_3Al_3[(OH)_{13}|SO_4] \cdot 2H_2O$ - orthorhombique

La zincaluminite se présente en touffes ou encroûtements de minuscules cristaux, plats, très minces et hexagonaux.

Propriétés. Dureté : 2 ½ à 3; densité : 2,26; indices de réfraction : np = 1,514, ng = 1,534. Couleur blanche à blanc bleuâtre et bleu pâle.

Gisements. Minéral rare rencontré au Laurium (Grèce) et au Rosas (Espagne).

Spangolite $Cu_6Al(SO_4)(OH)_{12}Cl \cdot 3H_2O$ - hexagonal

Ses cristaux sont souvent holoédriques et sont soit prismatiques courts, allongés selon [0001], soit tabulaires sur (0001). Les faces du prisme et de la pyramide trigonale sont striées horizontalement. Le développement des pyramides trigonales positives ou négatives donne un aspect hexagonal. La spangolite se clive parfaitement sur (0001). Sa cassure est conchoïdale; fragile.

Propriétés. Dureté : 2 sur (0001) et environ 3 sur les faces inclinées; densité : 3,14; indices de réfraction : np = 1,641, ng = 1,694. Éclat vitreux; couleur vert foncé mais aussi vert émeraude à vert bleuâtre. Pyroélectrique.

Gisements. C'est un minéral secondaire des zones d'oxydation des gisements de cuivre, associé à la malachite, l'azurite, la brochantite, etc. Les meilleures pièces de collection viennent de Blanchard Claims (Birgham, U.S.A.). Un nouveau gisement de ce rare minéral a été mis au jour près de Fontana Rossa (Corse).

Johannite $Cu(UO_2)(OH)(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ - triclinique

Ce minéral rare se présente en agrégats de cristaux fibreux ou sphéroïdaux, plus rarement en petits cristaux tabulaires ou prismatiques avec les formes simples (100), (010), (110), (120) et (111).

Propriétés. Dureté : 2 ½; densité : 3,30; indices de réfraction : np = 1,57, ng = 1,61. Transparente à translucide, de couleur vert émeraude à vert pomme.

Gisements. C'est un minéral secondaire des gisements d'uranium; les meilleures pièces proviennent de Joachimsthal (Bohême).

Uranopilite $(6UO_2)(5OH)_2(SO_4) \cdot 12H_2O$ - monoclinique

C'est le plus abondant des sulfates d'uranium; il se rencontre le plus souvent en masses botryoïdales formées d'agrégats de cristaux microscopiques.

Propriétés. Dureté très faible; densité : 3,95 à 4; indices de réfraction : ng = 1,63, np = 1,62. La couleur varie du jaune-vert intense au jaune citron; ce minéral est très fluorescent aux rayons ultraviolets.

Gisements. Ce minéral secondaire se forme continuellement dans les mines d'uranium et sur les haldes, mais disparaît très vite en raison de sa grande solubilité dans l'eau acidulée.

▶ *Page ci-contre, magnifiques cristaux prismatiques de crocoïte provenant de Dundas (Tasmanie) [Muséum national d'histoire naturelle, Paris].*

Chromates — Tungstates — Molybdates

Crocoïte $Pb[CrO_4]$ - monoclinique

La crocoïte se présente habituellement en cristaux prismatiques allongés selon [001], qui peuvent aussi être octaédriques avec les formes {111} et {$\bar{1}$11} ou rhomboédriques pointus avec les formes {110} et {h0l}. La plupart des faces sont petites et brillantes. Les cristaux sont fréquemment creux. La crocoïte est aussi massive, aciculaire ou grenue. Sectile, sa cassure est conchoïdale, fine à inégale.

Propriétés. Dureté : 2 ½ à 3; densité : 5,99 ± 0,03; indices de réfraction : np = 2,29, ng = 2,66. Éclat adamantin à vitreux, couleur rouge hyacinthe mais aussi rouge-orangé profond, orange ou jaune. Transparente à translucide.

Gisements. Ce minéral secondaire assez rare des zones d'oxydation des gisements de plomb a été trouvé en magnifiques cristaux prismatiques à Dundas (Tasmanie, Australie) et à Bérésov (Oural, Sibérie).

Fornacite $Pb_2Cu[(OH|CrO_4|AsO_4]$ - monoclinique

Ce minéral rare se présente en agrégats microcristallins ou en petits cristaux prismatiques à terminaison aigüe.

Propriétés. Dureté : 2 ½ à 3; densité : 6,25. De couleur vert-jaune, vert olive à vert-noir.

Gisements. Se rencontre associé à la dioptase de Renéville (Congo).

Vauquelinite $Pb_2Cu[OH|CrO_4|PO_4]$ - monoclinique

Ses cristaux sont prismatiques et aplatis. Dureté : 2 ½ à 3; densité : 6. Sa couleur varie du vert olive au noir. Les meilleures pièces de collection viennent de Bérésov (Oural) où elle est associée à la crocoïte.

Scheelite $Ca[WO_4]$ - quadratique

La scheelite se présente en cristaux octaédriques avec les formes {011} ou {112}, bien développées ou parfois en cristaux tabulaires sur la face (001) qui est habituellement rugueuse; la forme {112} est souvent striée diagonalement. La scheelite est aussi massive, grenue. Elle se macle communément sur {110}. Elle se clive sur {101}. Sa cassure est inégale à subconchoïdale.

Propriétés. Dureté : 4 ½ à 5; densité : 6,10; indices de réfraction : np = 1,92, ng = 1,94. Éclat vitreux inclinant à l'adamantin; incolore à blanc, habituellement blanc jaunâtre, jaune pâle ou brunâtre mais aussi verdâtre, gris rougeâtre, jaune-orangé. Transparente. La scheelite est fluorescente (blanc bleuâtre brillant) aux rayons X, aux courtes longueurs d'onde de l'ultraviolet et aux rayons cathodiques; quand la teneur en Mo augmente, la fluorescence passe au blanc et blanc jaunâtre. Thermoluminescente.

Gisements. Ce minéral se forme au cours du métamorphisme de contact (intrusion de granites dans les calcaires) ou dans les greisens, associé au wolfram et à la cassitérite.

De splendides cristaux ont été trouvés à Tong-Wha (Corée) et à Traverselle (Piémont).

Stolzite $Pb[WO_4]$ - quadratique

La stolzite se présente habituellement en cristaux dipyramidaux avec les formes {111}, {101} ou autres; les cristaux peuvent être tabulaires épais sur (001); les faces du prisme sont striées horizontalement. Sa cassure est conchoïdale à inégale, fragile.

Propriétés. Dureté : 2 ½ à 3; densité : 7,9 à 8,3; indices de réfraction : np = 2,19, ng = 2,87. Éclat résineux, subadamantin; couleur brun rougeâtre, brune, fauve, gris jaunâtre, jaune paille, et aussi verte, rouge-jaune, rouge. Transparente en fines écailles.

Gisements. C'est un minéral secondaire inclus dans les zones d'oxydation de gisements contenant des minerais primaires de tungstène, associé à la vanadinite, la wulfénite, la cérusite, etc. De beaux groupes de cristaux

Muséum national d'histoire naturelle, Paris

Muséum national d'histoire naturelle, Paris

▲ *Cristaux de wulfénite provenant de Red Cloud Mine (Arizona) [Muséum national d'histoire naturelle, Paris].*

brun-orangé viennent de Broken Hill (Australie). Les plus gros cristaux connus ont été rencontrés dans un petit gisement métallifère à Sainte-Lucie (Lozère).

Wulfénite $Pb[MoO_4]$ - quadratique

Les cristaux sont habituellement carrés et tabulaires sur {001}, parfois extrêmement minces ou avec une pyramide très plate remplaçant la forme {001}; elle est moins fréquemment octaédrique. Elle est aussi massive, grossièrement à finement grenue. Elle se clive sur {011}. Sa cassure est subconchoïdale à inégale. Elle n'est pas très fragile et peut contenir Ca et W.

Propriétés. Dureté : $2\frac{1}{2}$ à 3; densité : 6,5 à 7 (elle décroît avec l'augmentation de la teneur en Ca et la diminution de la teneur en W); indices de réfraction : np = 2,28, ng = 2,40. Éclat résineux à adamantin; couleur jaune-orangé mais aussi gris jaunâtre, blanc grisâtre, vert olive, brun, brun rougeâtre; la présence de chrome la colore de l'orange au rouge brillant. Transparente.

Gisements. C'est un minéral des zones d'oxydation des gisements de plomb associé à la cérusite, la pyromorphite, la mimétite, etc. Les plus belles pièces de collection ont été trouvées à Red Cloud Mine (Arizona), à Chihuahua (Mexique) et au Tsumeb (Namibie) d'où proviennent les plus grands cristaux connus, et au Djebel-Mahseur (Maroc).

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ *Groupe de cristaux de stolzite provenant de Broken Hill (Australie).*

Phosphates — Arséniates — Vanadates

Béryllonite $NaBe[PO_4]$ - monoclinique avec une pseudo-symétrie orthorhombique marquée

Tabulaires sur {010} à prismatiques courts allongés selon [010], les cristaux sont souvent très complexes. Leurs faces sont fréquemment ternes ou rugueuses. La béryllonite se macle sur {101}, à la fois par contact et par pénétration; les macles se répètent parfois en donnant une forme étoilée pseudo-hexagonale ou bien des macles polysynthétiques. Elle se clive parfaitement sur (010) mais aussi sur (100). Cassure conchoïdale. Fragile.

Propriétés. Dureté : $5\frac{1}{2}$ à 6; densité : 2,81; indices de réfraction : np = 1,552, ng = 1,561. Éclat vitreux, brillant quelquefois perlé sur (010). Incolore à blanc neige ou jaunâtre pâle; transparente à translucide.

Gisements. Ce minéral rare des pegmatites, associé à la herdérite, à l'apatite, la triplite, au béryl et au quartz enfumé, a été trouvé à Stoneham (Maine, U.S.A.).

Triphylite $Li(Fe^{2+},Mn^{2+})[PO_4]$ ***- orthorhombique***

Les cristaux sont rares et possèdent habituellement des surfaces inégales; ils se présentent sous forme de gros prismes allongés selon [100]. La triphylite se présente communément sous forme massive, clivable à compacte. Elle se clive presque parfaitement sur (100). Sa cassure est inégale à subconchoïdale.

Propriétés. Dureté : 4 à 5; densité : 3,34 (terme manganifère) et 3,58 (pour le terme ferrifère); indices de réfraction : np = 1,669, ng = 1,694; éclat vitreux à subrésineux; couleur gris bleuâtre à gris verdâtre. Lorsque l'échantillon est exposé à l'air, il devient brunâtre ou gris foncé à presque noir à cause de l'altération. Transparente à translucide.

Gisements. Ce minéral primaire des pegmatites granitiques est associé à d'autres phosphates de fer et de manganèse, au spodumène, au béryl et à l'albite. De beaux spécimens de collection viennent de Géo Smith Mine, Claremont (New York, U.S.A.).

Purpurite $(Mn^{3+},Fe^{3+})[PO_4]$ ***- orthorhombique***

La purpurite se présente le plus souvent en masses cristallines clivables [bon clivage sur (100)], les faces de clivage étant quelquefois incurvées ou ondulées. Elle est fragile et sa cassure est inégale.

Propriétés. Dureté : 4 à 4 ½; densité : 3,2 à 3,4; indices de réfraction : np = 1,85, ng = 1,92. Éclat satiné sur les surfaces de cassures fraîches. Couleur rose profond à pourpre rougeâtre. Ce minéral est souvent altéré extérieurement, son éclat est alors terne ou terreux et sa couleur brun foncé à noir brunâtre; un bref lavage dans de l'acide dilué restaure la vraie couleur. Subtransparente à opaque.

Gisements. Ce minéral secondaire est formé par l'altération de la triphylite et de la lithiophilite dans les pegmatites granitiques. De grandes masses violettes ont été trouvées à Newry (Maine, U.S.A.).

Varulite $(Na,Ca)_2(Mn,Fe)_3[PO_4]_3$ ***- orthorhombique***

La varulite se présente sous forme massive, grenue. Elle se clive bien sur (100).

Propriétés. Dureté : 5; densité : 3,5 à 3,6; indices de réfraction : np = 1,708, ng = 1,722. Couleur vert olive, devenant jaunâtre ou brunâtre s'il y a altération. Éclat vitreux.

Gisements. C'est un minéral des pegmatites granitiques. Sa localité la plus classique est Varuträsk (Suède).

Arrojadite $Na_2(Fe^{2+}Mn^{2+})_5[PO_4]_4$ ***- monoclinique***

L'arrojadite se présente en grandes masses clivables; elle se clive bien sur (001). Sa cassure est inégale à subconchoïdale.

Propriétés. Dureté : 5; densité : 3,55; indices de réfraction : np = 1,662, ng = 1,672. Éclat vitreux et quelquefois gras; couleur vert foncé; translucide.

Gisements. C'est un minéral de pegmatites, associé au spodumène, au béryl, à la graftonite. De larges masses proviennent de Keystone (South Dakota, U.S.A.).

Whitlockite $Ca_3[PO_4]_2$ ***- hexagonal***

La whitlockite se présente en cristaux rhomboédriques, rarement tabulaires sur (0001). Elle est aussi grossièrement grenue à terreuse. Elle n'a pas de clivage. Sa cassure est inégale à subconchoïdale.

Propriétés. Dureté : 5; densité : 3,12; indices de réfraction : np = 1,626, ng = 1,629. Éclat vitreux inclinant au subrésineux. Incolore à blanche, grise ou jaunâtre. Transparente à translucide.

Gisements. Ce minéral se rencontre associé à l'apatite, la ludlamite, la triphylite à Palermo (New Hampshire, U.S.A.) et à Table Mount, Curaçao (Antilles).

Xénotime $Y[PO_4]$ ***- quadratique***

La xénotime se présente en cristaux prismatiques plus ou moins allongés selon (001); ils sont parfois pyramidaux et leur aspect est très proche de celui du zircon. Ce minéral se présente aussi en cristaux mal formés, disposés en agrégats grossièrement radiés. Il se clive sur (100). Sa cassure est inégale à esquilleuse. Il est fragile.

Propriétés. Dureté : 4 à 5; densité : 4,4 à 5,1; indices de réfraction : np = 1,721, ng = 1,816. Éclat vitreux inclinant au résineux. Couleur communément brun jaunâtre à brun rougeâtre, mais aussi brune, blanc grisâtre, jaune, jaune paille verdâtre. Translucide à opaque. Modérément paramagnétique.

Gisements. Ce minéral des roches éruptives alcalines, des pegmatites et des roches métamorphiques gneissiques est associé au rutile, au zircon et à la monazite.

De jolis cristaux proviennent de Bétsékoba (Madagascar).

Monazite $(Ce,La,Y,Th)[PO_4]$ ***- monoclinique***

Ses cristaux sont souvent aplatis sur (100) ou allongés selon [010]; les faces sont en général rugueuses, striées et inégales. Les grands cristaux sont rares. La macle sur (100) est commune, quelquefois cruciforme. La monazite se clive distinctement sur (100) et la qualité du clivage semble dépendre de l'altération du cristal. La cassure est conchoïdale à inégale. C'est un minéral fragile.

Propriétés. Dureté : 5 à 5 ½; densité : 4,6 à 5,4 (elle augmente avec la teneur en Th); indices de réfraction : np = 1,800, ng = 1,849. Éclat variable, habituellement résineux ou cireux, mais inclinant au vitreux ou à l'adamantin. Couleur brun jaunâtre ou rougeâtre à brune, présentant aussi différentes nuances de jaune, ou encore verdâtre à presque blanche. Transparente à subtranslucide; léger paramagnétisme.

Gisements. C'est un minéral accessoire des roches granitiques et métamorphiques gneissiques, se rencontrant parfois dans les pegmatites syénitiques. La monazite est associée aux : zircon, xénotime, apatite, columbite. De grands cristaux proviennent d'Arendal (Norvège), d'Ampataka et Béfanamo (Madagascar).

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Un cristal de*** **monazite** ***(musée d'Histoire naturelle, Milan).***

Herdérite $(CaBe)[(F,OH)|PO_4]$ ***- monoclinique***

Elle se présente sous forme de prismes allongés selon [100] ou [001] ou encore tabulaires épais sur (001). Les cristaux sont d'aspect pseudo-orthorhombique. L'herdérite se forme aussi en agrégats botryoïdaux ou sphéroïdaux avec une structure fibro-radiée. Elle se macle sur (001) ou (100). La cassure est subconchoïdale.

Propriétés. Dureté : 5 à 5 ½; la densité augmente avec la teneur en F : 2,95 à 3,01; indices de réfraction : np = 1,592, ng = 1,621. Éclat vitreux à subvitreux. Incolore, jaune pâle ou blanc verdâtre. Transparente à translucide.

Gisements. C'est un minéral des pegmatites granitiques. Les plus beaux groupes de cristaux ont été rencontrés à Greenwood (Maine, U.S.A.) et dans le Minas Gerais (Brésil).

Montebrasite $Li\,Al[(OH,F)|PO_4]$ ***- triclinique***
Amblygonite $Li\,Al[(F,OH)|PO_4]$ ***- triclinique***

Ces minéraux se présentent en cristaux équidimensionnels dans les trois directions, ou bien prismatiques, allongés selon [010]. Les cristaux sont habituellement rugueux (particulièrement quand ils sont de grande taille). La montebrasite forme aussi de grandes masses clivables. Elles se maclent communément sur ($\bar{1}$11) et se clivent parfaitement sur (100). Un second clivage sur (110) est assez bon. La cassure est inégale à subconchoïdale. Fragile.

Propriétés. Dureté : 5 ½ à 6; densité : 3,11 (amblygonite), 2,98 (montebrasite); indices de réfraction : np = 1,587, ng = 1,598. L'éclat est vitreux à gras et perlé sur les surfaces de clivage bien développées. Couleur habituellement blanche à laiteuse ou blanc crème, aussi jaunâtre, beige, rose saumon, verdâtre, bleuâtre, grise. Transparente à translucide.

Gisements. Ce sont des minéraux des pegmatites granitiques, associés au spodumène, à l'apatite et à la tourmaline. Ils se rencontrent également dans les greisens avec la topaze et la cassitérite. De beaux cristaux transparents jaunes viennent du Minas Gerais (Brésil), de grands cristaux opaques, très bien formés, ont été trouvés à Custer (South Dakota, U.S.A.).

▼ ***Représentation schématique d'un cristal d'amblygonite (Newry).***

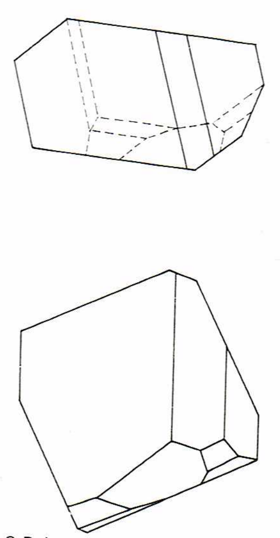

I.G.D.A.

Wagnérite $Mg_2[PO_4|F]$ ***- monoclinique***

La wagnérite se présente en cristaux prismatiques allongés selon [001], les plans du prisme vertical étant striés

Muséum national d'histoire naturelle, Paris

▲ **Beaux agrégats de cristaux d'adamite provenant du Laurium (Grèce) [Muséum national d'histoire naturelle, Paris].**

ou arrondis; les gros cristaux ont des faces rugueuses. Ils sont rarement tabulaires sur (100). La wagnérite est aussi massive. Sa cassure est inégale ou subconchoïdale à esquilleuse.

Propriétés. Dureté : 5 à 5 ½; densité : 3,15; les indices de réfraction (np = 1,567, ng = 1,582), diminuent quand elle est opaque ou contient du calcium. Éclat vitreux à légèrement résineux. Couleur jaune de différentes nuances, mais aussi grisâtre, rouge chair, verdâtre. Translucide, presque opaque quand elle est altérée.

Gisements. La wagnérite se rencontre dans des filons de quartz, associée à la lazulite et à la chlorite, à Radelgraben (Salzburg, Autriche); les plus gros cristaux viennent de Bamle (Norvège).

Triplite $(Mn,Fe^{2+})_2[F|PO_4]$ *- monoclinique*

Ses cristaux sont rugueux et incomplètement développés; la triplite se présente habituellement sous forme massive. Elle se clive bien sur (001). Sa cassure est inégale à subconchoïdale.

Propriétés. Dureté : 5 à 5 ½, décroissant avec l'altération. La densité est variable (en raison des substitutions isomorphiques et de l'altération); elle est habituellement comprise entre 3,5 et 3,9. Indices de réfraction : 1,643, ng = 1,668. L'éclat est vitreux à résineux; la couleur est souvent brun foncé ou brun noisette, mais aussi brun rougeâtre à rose saumon pour la variété très manganésifère et devient noir brunâtre et noire par altération; la triplite est parfois subtransparente, le plus souvent opaque.

Gisements. C'est un minéral primaire assez fréquent des pegmatites granitiques riches en phosphore, associé à d'autres phosphates de fer et de manganèse, à la tourmaline, à l'apatite, au quartz, etc. La localité la plus classique est celle de Chanteloube (Haute-Vienne); de belles masses proviennent aussi d'Hagendorf (Bavière) et de Mangualde (Portugal).

Libéthénite $Cu_2[OH|PO_4]$ *- orthorhombique*

Ce minéral se présente toujours en cristaux. Ceux-ci sont prismatiques courts allongés selon [001] ou légèrement allongés selon [100], bien que parfois ils ne présentent pas de direction privilégiée. La forme {110} est cannelée ou striée verticalement. La cassure est conchoïdale à inégale.

Propriétés. Dureté : 4; densité : 3,97; indices de réfraction : np = 1,701, ng = 1,787. Éclat vitreux sur les faces des cristaux à un peu gras sur les surfaces des cassures. Couleur vert olive clair à foncé ou vert profond à vert noirâtre. Translucide.

Gisements. C'est un minéral secondaire assez rare des zones d'oxydation des gîtes de cuivre situés dans des terrains granitiques riches en apatite. Associés à la malachite, les meilleurs cristaux viennent de Kakanda (Katanga) et de Libethen (Roumanie), localité qui a donné son nom à cette espèce.

Olivénite $Cu_2[OH|AsO_4]$ *- orthorhombique*

L'olivénite se présente sous des formes variables; les cristaux sont souvent allongés selon [100], mais ils sont aussi prismatiques courts à aciculaires selon [001]. L'olivénite apparaît souvent sous forme globulaire à réniforme avec une structure fibreuse, les fibres étant rectilignes ou divergentes; elle existe aussi sous forme de lamelles incurvées, massive, grenue à terreuse. La cassure est conchoïdale à irrégulière.

Propriétés. Dureté : 3; densité : 4,46; indices de réfraction : np = 1,701, ng = 1,787. Éclat adamantin à vitreux, quelquefois perlé à soyeux pour les variétés fibreuses; couleur vert olive de nuances variées et aussi brun verdâtre et brune. Translucide à opaque. Elle peut contenir du zinc ou du phosphore et forme une série partielle avec l'adamite.

Gisements. Ce minéral des zones d'oxydation des gisements de cuivre est associé à l'adamite, la malachite, l'azurite, etc.

Les pièces de collection viennent des vieux gîtes de Cornouailles. En France, on l'a rencontré au Cap-Garonne (Var).

Adamite $Zn_2[OH|AsO_4]$ *- orthorhombique*

L'adamite se rencontre souvent en agrégats radiés, les cristaux se présentant sous forme variable : allongés selon [010], mais aussi selon [001] comme l'olivénite; ils sont quelquefois tabulaires sur (101). Les cristaux forment souvent des encroûtements globulaires. Elle se clive bien sur (101); sa cassure est inégale à subconchoïdale.

Propriétés. Dureté : 3 ½; densité : 4,32 à 4,48; indices de réfraction : np = 1,722, ng = 1,763. Éclat vitreux; couleur variable : jaune lumineux, jaune miel, jaune brunâtre, vert pâle à verte; la variété cuprifère (cuproadamite) est vert brillant et la variété cobaltifère varie

du violet au rose. Transparente à translucide. Quelques échantillons sont fluorescents jaune citron aux radiations ultraviolettes.

Gisements. C'est un minéral des zones d'oxydation des gisements de cuivre et de zinc, associé à l'olivénite, la smithsonite, la malachite, etc. Les plus belles pièces de collection viennent du Laurium (Grèce) et de Mapimi dans le Durango (Mexique) qui fournit les cristaux les plus gros.

Tarbuttite $Zn_2[OH|PO_4]$ - triclinique

Ce minéral rare forme habituellement des agrégats en faisceaux ou en encroûtements; les cristaux individuels, arrondis et profondément striés, se clivent parfaitement sur (010). La cassure est inégale.

Propriétés. Dureté : 3 ½; densité : 4,12; indices de réfraction : np = 1,660, ng = 1,713. L'éclat est vitreux et perlé sur les faces de clivage; incolore, transparente à translucide ou avec des nuances assez pâles de jaune, brun, rouge ou vert.

Gisements. Les pièces qu'on peut voir dans les collections viennent de Broken Hill (Rhodésie) où la tarbutitte est associée à la hopéite, la descloizite, l'hémimorphite, etc.

Lazulite $(Mg, Fe^{2+})Al_2[OH|PO_4]_2$ - monoclinique

Ce minéral (qu'il conviendrait de rebaptiser klaprothite en raison de la confusion qui existe entre trois noms presque semblables : la lazulite, l'azurite et la lazurite !) se présente habituellement en cristaux pyramidaux pointus avec les faces (111) et ($\bar{1}$11) bien développées, la face (101) réduite; ils sont aussi tabulaires sur ($\bar{1}$11) ou (101). La lazulite est également massive, compacte à grenue. Elle se macle communément sur (100) et se clive parfois sur (110). Sa cassure est inégale à esquilleuse. Elle est fragile.

Propriétés. Dureté : 5 ½ à 6; densité : 3,08 (pour le terme extrême magnésifère) à 3,38 (pour le terme extrême ferrifère) ; indices de réfraction : np = 1,626, ng = 1,663. Éclat vitreux couleur bleu azur, bleu ciel, blanc bleuâtre, et aussi bleu profond ou vert bleuâtre; subtransparente à opaque. Certains cristaux transparents sont taillés comme gemmes.

Gisements. Associée à l'andalousite, au disthène et au corindon, la lazulite se rencontre dans des roches métamorphiques alumineuses, dans des quartzites et quelques pegmatites granitiques. Les pièces bien cristallisées viennent de Graves Mountains (Géorgie, U.S.A.), de Werfen, près de Salzbourg (Autriche), et d'Ukon (Canada).

Dufrénite $Fe_3^{2+}Fe_6^{3+}[(OH)_3|PO_4]_4$ - monoclinique

La dufrénite se présente habituellement en masses botryoïdales ou en encroûtements avec une structure fibro-radiée. Elle se forme rarement en cristaux, et ceux-ci sont alors arrondis et indistincts, disposés en agrégats subparallèles ou en feuilles. Fragile, elle se clive parfaitement, parallèlement à la direction des fibres.

Gisements. Ce minéral secondaire est associé à la limonite. Les exemplaires qu'on peut voir dans les collections viennent de Rockbridge (Virginie, U.S.A.), Hagendorf (Bavière, Allemagne), et, pour la France, de diverses carrières de la Haute-Vienne et du Morbihan.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Cristaux de* **tarbuttite** *provenant de Broken Hill (Rhodésie) [Paris, École nationale supérieure des mines].*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

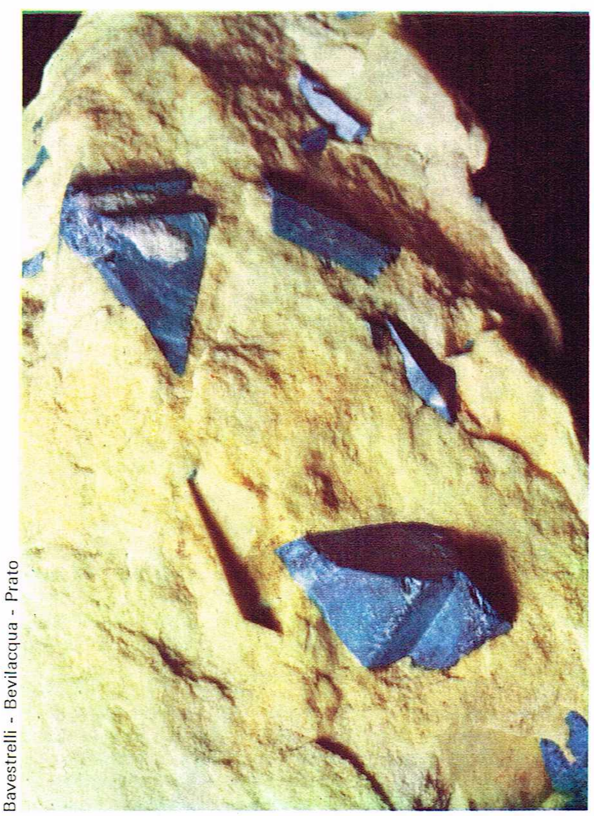

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ *A gauche,* **olivénite** *provenant du Cornwall (Grande-Bretagne) [musée d'Histoire naturelle, Milan]. A droite, cristaux de* **lazulite** *provenant de Lincoln Co. (Géorgie); certains cristaux transparents de ce minéral sont taillés en gemmes.*

▶ *Belle concrétion de pseudomalachite provenant du Zaïre (Paris, École nationale supérieure des mines).*

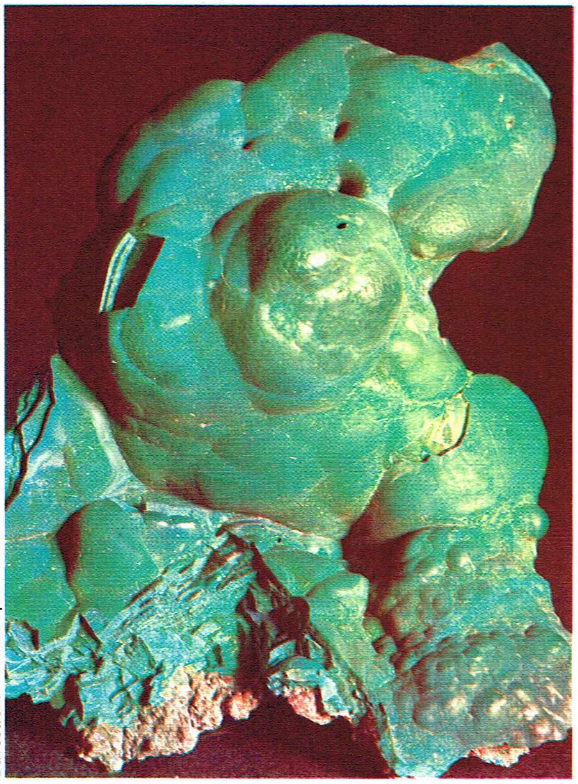
Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Pseudomalachite $Cu_5[(OH)_2|PO_4]_2$ *- monoclinique*

Les cristaux uniques sont rares; ils sont prismatiques allongés selon [001], habituellement avec des petites faces inégales. Ils se présentent le plus souvent en agrégats subparallèles. La pseudomalachite est aussi réniforme, botryoïdale ou massive avec une structure fibro-radiée montrant des couches concentriques. Elle se macle sur (100) et se clive sur (010). Sa cassure est esquilleuse.

Propriétés. Dureté : 4 ½ à 5; densité : 4,35 ± 0,05; indices de réfraction : np = 1,78, ng = 1,84. Éclat vitreux; couleur vert émeraude foncé à vert foncé et vert noirâtre; les variétés fibreuses ont souvent des couleurs un peu plus claires. Translucide à subtranslucide.

Gisements. C'est le phosphate de cuivre le plus fréquemment rencontré dans les zones d'oxydation des gisements cuprifères; il est très souvent associé à la malachite. Les meilleures pièces de collection viennent du Katanga (Zaïre) et de Nijne-Tagilsk (Oural).

Cornétite $Cu_3[(OH)_3|PO_4]$ *- orthorhombique*

Ce minéral peu courant se présente en cristaux prismatiques parfois aplatis selon (001). La forme {210} est habituellement arrondie. La cornétite forme aussi des encroûtements de cristaux minuscules parfois radiés.

Propriétés. Dureté : 4 ½; densité : 4,10; indices de réfraction : np = 1,77, ng = 1,82. Éclat vitreux, couleur bleu profond ou bleu paon à bleu verdâtre; transparente à translucide.

Gisements. La cornétite se rencontre, associée à l'hétérogénite, dans la mine de l'Étoile, à Élisabethville (Katanga).

Clinoclase $Cu_3[(OH)_3|AsO_4]$ *- monoclinique*

Elle forme des encroûtements ou des agrégats de cristaux groupés en rosette. Les cristaux isolés sont allongés selon [010] et tabulaires sur (001); ils sont aussi d'aspect rhomboédrique, ou bien ils sont allongés selon [001] avec la forme {100} bien développée. La clinoclase se clive parfaitement sur (001). Sa cassure est inégale, plutôt brillante.

Propriétés. Dureté : 2 ½ à 3; densité : 4,38; indices de réfraction : np = 1,75, ng = 1,89. Éclat vitreux perlé sur les faces de clivage. Couleur noir verdâtre foncé et bleu verdâtre. Transparente à translucide.

Gisements. C'est un minéral secondaire des gîtes de cuivre, associé à d'autres arséniates de cuivre, en particulier à l'olivénite. Les mines de Cornouailles (Angleterre) et de Majuba-Hill (Nevada, U.S.A.) ont produit les meilleurs échantillons.

Conichalcite $CaCu[OH|AsO_4]$ *- orthorhombique*

Les cristaux ne présentent pas de direction privilégiée ou bien sont prismatiques courts, selon [010]. Habituellement la conichalcite forme des encroûtements botryoïdaux à réniformes et des masses à structures radiées. Elle ne se clive pas. Sa cassure est inégale, fragile.

Propriétés. Dureté : 4 ½; densité : 4,33 (la densité des types fibreux est plus faible : 4,10); indices de réfraction : np = 1,78, ng = 1,80. Éclat vitreux à un peu gras. Couleur vert gazon à vert jaunâtre, vert pistache ou vert émeraude. Subtranslucide.

Gisements. C'est un minéral secondaire des zones d'oxydation des gisements cuprifères, associé à la malachite et à d'autres arséniates de cuivre. Parmi ses localités, on peut citer : Bisbee (Arizona), Guchab-Otavi (Namibie) et Mapimi (Mexique).

Descloizite $Pb\,(Zn, Cu)[OH|VO_4]$ *- orthorhombique*
Mottramite $Pb\,(Cu, Zn)[OH|VO_4]$ *- orthorhombique*

Ces deux minéraux de vanadium forment une série. Les cristaux de mottramite ont des faciès très variables, souvent pyramidaux avec la forme {111}, ou prismatiques suivant [001]. Les faces des cristaux sont habituellement inégales ou rugueuses; une croissance subparallèle est fréquente. Ces deux minéraux forment communément des encroûtements de cristaux ou sont aussi stalactiformes ou massifs avec une structure grossièrement fibreuse et une surface mamelonnée ou botryoïdale; ils sont quelquefois grenus, compacts à friables. Leur cassure est conchoïdale à inégale. Ils sont fragiles.

Propriétés. Dureté : 3 à 3 ½ sur les surfaces de cassure, quelquefois plus élevée sur les faces externes; densité : 6,2 (pour la descloizite) à 5,9 (pour la mottramite); indices de réfraction : np = 2,17 et ng = 2,32 pour la mottramite; np = 2,18 et ng = 2,35 pour la descloizite. Éclat gras. Couleur variable habituellement rouge brunâtre à brun noirâtre mais incluant des nuances de rouge-orangé à brun rougeâtre profond et presque noir, mais aussi vert gazon à vert olive. Transparentes à presque opaques.

Gisements. Ce sont des minéraux d'oxydation des gisements situés en climat chaud, associés à la vanadinite, la pyromorphite, la mimétite et la cérusite; ils sont recherchés comme minerai de vanadium. De beaux groupes cristallisés de descloizite viennent de la région d'Otavi (Namibie) où on a également découvert la mottramite en grandes masses mamelonnées. Celle-ci est souvent associée à la dioptase dans les gisements du Congo.

Brazilianite $NaAl_3[(OH)_2|PO_4]_2$ *- monoclinique*

Très recherchés par les collectionneurs, les cristaux peuvent dépasser 15 cm et sont prismatiques selon [001] avec les faces en zone du prisme striées selon [001]; certains cristaux sont aussi allongés selon [100]. La brazilianite se trouve également en globules dont la structure est fibro-radiée. Elle se clive bien sur {010}. Fragile, sa cassure est conchoïdale.

Propriétés. Dureté : 5 ½; densité : 2,983. Indices de réfraction : np = 1,60, ng = 1,62. Couleur jaune chartreuse à jaune pâle ou brunâtre. Éclat vitreux, transparent.

Gisements. Ce minéral rare se rencontre dans les pegmatites associé à l'albite, la muscovite, la tourmaline; il provient de Conselheira-Pena (Minas Gerais, Brésil). Il est quelquefois taillé comme gemme.

Bayldonite $PbCu_3[OH|AsO_4]_2$ *- monoclinique*

Cet arséniate assez rare se présente en minuscules concrétions mamelonnées avec une structure fibreuse et une surface en druse. Il est aussi massif, finement grenu à poudreux ou formé en encroûtements.

Propriétés. Dureté : 4 ½; densité : 5,5; indices de réfraction : np = 1,95, ng = 1,99. Éclat fortement résineux; couleur vert tarin à vert pomme et vert-jaune; subtranslucide.

Gisements. Ce minéral secondaire des zones d'oxydation des gîtes de cuivre est associé à l'olivénite.

C. Bevilacqua

On le trouve à Saint-Day, en Cornouailles (Angleterre) et au Tsumeb (Namibie).

Plumbogummite** $PbAl_3H[(OH)_6|(PO_4)_2]$ **- rhomboédrique

Trouvée pour la première fois en France, la plumbogummite se présente en encroûtements ou en masses botryoïdales, réniformes, stalactiformes, globulaires (souvent avec une structure concentrique) ; elle peut aussi être massive, compacte. Au microscope, elle est fibro-radiée ou sphérolitique. Les cristaux de forme hexagonale sont rares et minuscules.

Propriétés. Dureté : 4 ½ à 5 ; densité : 4,014 ; indices de réfraction : np = 1,65, ng = 1,67. Couleur blanc grisâtre, gris jaunâtre, jaune à brun jaunâtre, rougeâtre ou encore verdâtre à bleuâtre. Éclat terne à résineux ou rappelant la gomme ; translucide. Fragile, sa cassure est inégale à subconchoïdale.

Gisements. C'est un minéral secondaire des zones d'oxydation des gîtes de plomb, associé à la pyromorphite. Les meilleures pièces de collection viennent de Huelgoat (Bretagne).

Dussertite** $BaFe_3^{3+}H[(OH)_6|(AsO_4)_2]$ **- rhomboédrique

La dussertite se présente en minuscules cristaux aplatis sur (0001), regroupés en rosettes ou en encroûtements.

Propriétés. Dureté : 3 ½ ; densité : 3,75 ; indices de réfraction : np = 1,85, ng = 1,87. Couleur verte à vert pistache.

Gisements. Ce minéral rare a été rencontré au Djebel Delar (Constantine, Algérie) ainsi qu'à Mapimi au Mexique.

Groupe des apatites

On rassemble sous ce nom une série de minéraux hexagonaux dont la formule chimique structurale est : $Ca_5[X(PO_4)_3]$, X pouvant être F (apatite ou fluorapatite), Cl (chlorapatite), O (oxy-apatite), OH (hydroxyl-apatite).

Apatite** $Ca_5[F|(PO_4)_3]$ **- hexagonal

Les minéraux de ce groupe ont une grande importance pour l'industrie (phosphates) ; le plus souvent massifs et microcristallisés, globulaires, oolithiques ou terreux, ils sont assez fréquemment formés en cristaux qui peuvent exceptionnellement atteindre 40 ou 50 cm sur 20 cm.

C. Bevilacqua

▲ *A gauche, exceptionnel cristal de **brazilianite** provenant de Conselheira-Pena (Brésil) [Paris, École nationale supérieure des mines]. C'est un minéral rare, quelquefois taillé comme gemme. A droite, cristaux d'**apatite** provenant de Durango (Mexique) [Paris, École nationale supérieure des mines].*

C. Bevilacqua

◀ *Cristaux de **clinoclase** provenant de Gwennap (Cornwall) [Paris, École nationale supérieure des mines].*

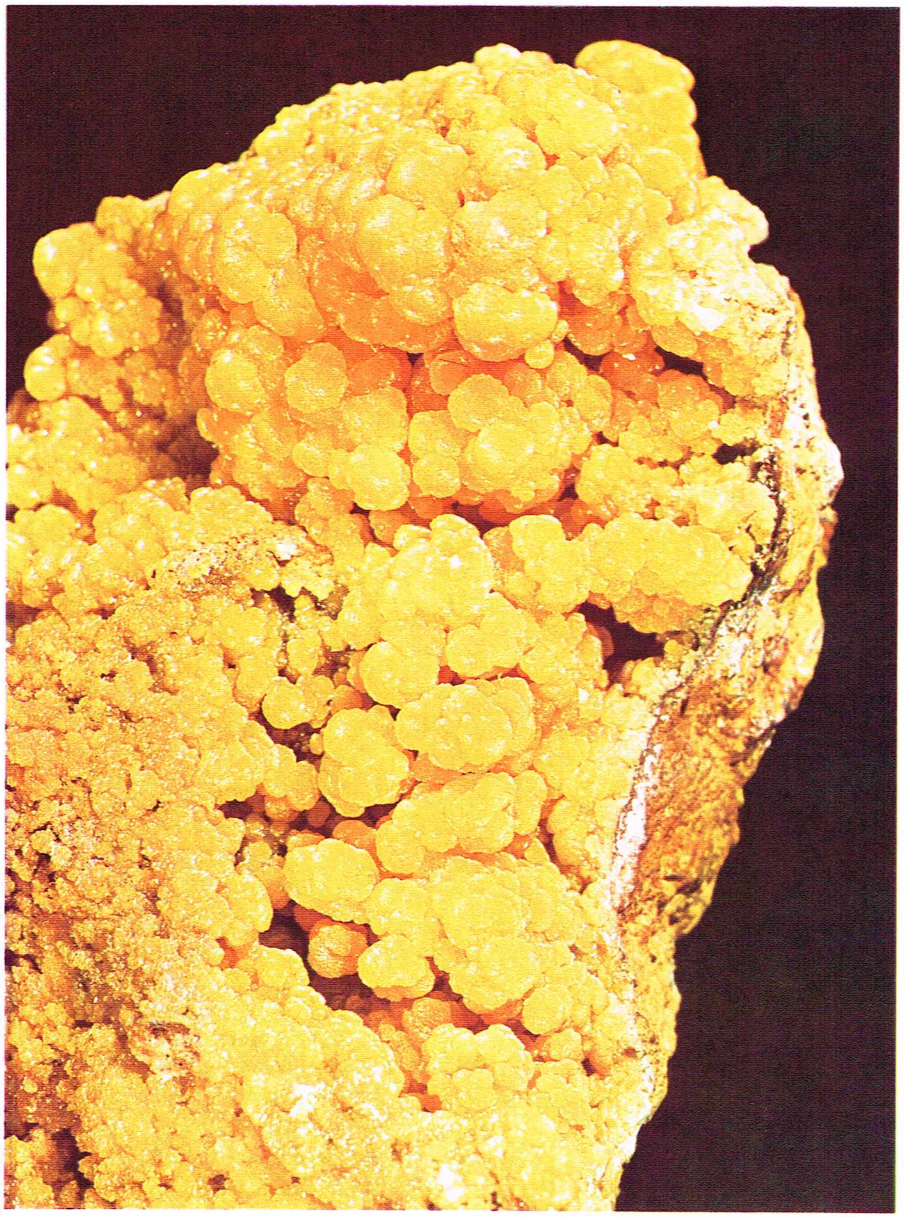

Muséum national d'histoire naturelle, Paris

▲ **Mimétite** ***globulaire provenant de Santa Eulalia (Mexique) [Muséum national d'histoire naturelle, Paris].***

Ils sont de faciès prismatique, allongés selon [0001] avec les faces (0001), $(10\bar{1}0)$ et $(10\bar{1}1)$, ou encore tabulaires épais avec de nombreuses facettes, modifiant la terminaison (0001).

Propriétés. La dureté de l'apatite définit le degré 5 de l'échelle de Mohs ; densité : 3 à 3,18 ; indices de réfraction : np = 1,615 à 1,655, ng = 1,620 à 1,660. Transparente à opaque avec des couleurs variées : brun, jaune, bleu, vert, violet, etc., elle est également incolore ou blanche. L'éclat est vitreux et la cassure conchoïdale.

Gisements. C'est un minéral des roches éruptives, métamorphiques et sédimentaires (d'origine marine ou organique). Les plus gros cristaux se rencontrent dans les calcaires cristallins avec le sphène et le pyroxène, près de Greenville (Canada) ; de beaux cristaux bleu foncé viennent du Minas Gerais (Brésil) et des cristaux vert transparent du gisement de Panasqueira (Portugal) où ils sont associés au wolfram, à l'arsénoypyrite, etc. Quelques beaux exemplaires jaune-vert limpide en provenance de Durango (Mexique) sont parfois taillés comme gemmes. Les « phosphates » sont des mélanges d'apatites amorphes ou microcristallisées d'origine sédimentaire, exploités par l'industrie chimique.

Pyromorphite $Pb_5(PO_4AsO_4)_3Cl$ - hexagonal
Mimétite $Pb_5(AsO_4,PO_4)_3Cl$ - hexagonal

Une série existe entre ces deux minéraux qui se présentent en cristaux prismatiques, allongés selon [0001] et de forme généralement simple avec $\{10\bar{1}0\}$ et $\{0001\}$ ou bien ces deux formes avec $\{10\bar{1}1\}$; ils sont rarement tabulaires sur (0001) ou pyramidaux, souvent arrondis en « tonnelets ». En groupes, ils forment des buissons de cristaux prismatiques. Ces deux minéraux sont parfois aciculaires, assez souvent globulaires mamelonnés, réniformes ou botryoïdaux. Leur cassure est inégale à subconchoïdale. Ils sont fragiles.

Propriétés. Dureté : $3\frac{1}{2}$ à 4 ; densité : 7,04 (pyromorphite) à 7,24 (mimétite) ; elle décroît pour les variétés contenant du Ca en substitution du Pb ; indices de réfraction supérieurs à 2. Éclat résineux à subadamantin. La pyromorphite est verte ou jaune et brune de différentes nuances, mais aussi jaune cire, jaune-orangé, rouge-orangé et rouge brunâtre ou encore grisâtre. Elle est très rarement incolore et transparente. La mimétite est habituellement jaune pâle à brun jaunâtre, jaune orange, blanche ou incolore. Ordinairement subtransparente à translucide. Piézoélectrique. Les cristaux montrent souvent des zones de croissance concentriques dans lesquelles le rapport P/As varie.

Gisements. Très recherchés pour les collections, ces minéraux fréquents dans les zones d'oxydation des gisements de plomb sont principalement associés à la cérusite et à la limonite. Pour la pyromorphite, de belles pièces viennent de Friedrichsegen (Allemagne), de Huelgoat (Bretagne), de Vézis (Aveyron), des Farges (Corrèze) et, pour la mimétite, de Tsumeb (Namibie), Santa Eulalia (Chihuahua, Mexique) et des vieilles mines du Cumberland (Angleterre).

Vanadinite $Pb_5(VO_4)_3Cl$ - hexagonal

La vanadinite se présente en cristaux prismatiques plus ou moins allongés selon [0001], avec habituellement de petites faces et des arêtes nettes ; ils sont aussi aciculaires, en formes arrondies et disposés en groupements parallèles comme chez la pyromorphite et la mimétite. La cassure est inégale à conchoïdale. Fragile.

Propriétés. Dureté : $2\frac{3}{4}$ à 3 ; densité : 6,88 (décroissant avec la substitution de Ca pour Pb) ; indices de réfraction élevés (supérieurs à 2,30). Éclat subrésineux à subadamantin. Couleur rouge-orangé, rouge rubis à rouge brunâtre mais aussi brun rougeâtre à brune, jaune brunâtre à jaune paille pâle. Subtransparente à presque opaque. Les cristaux montrent parfois des zones concentriques de composition variée (avec Ca, P, As).

Gisements. C'est un minéral secondaire des zones d'oxydation des gisements de plomb, associé à la pyromorphite, la mimétite, la descloizite, etc. Les groupes de cristaux rouges les plus recherchés viennent de Mibladen (Maroc) et d'Old-Yuma Mine (Arizona, U.S.A.).

Huréaulite $(Mn,Fe^{2+})_5H_2[PO_4]_4 \cdot 4H_2O$ - monoclinique

Les cristaux sont prismatiques courts selon [001] quelquefois aussi tabulaires sur (100) ; ils peuvent ne pas avoir de direction privilégiée. Ils sont isolés ou groupés. L'huréaulite est aussi massive, compacte, écailleuse et imparfaitement fibreuse. Elle se clive bien sur {100}.

Propriétés. Dureté : $3\frac{1}{2}$; densité : 3,19 ; indices de réfraction : np = 1,647, ng = 1,660. Éclat vitreux, quelquefois gras, brillant. Couleur orange, rouge orange, orange brunâtre, brun rougeâtre à jaunâtre, rose-violet, rose pâle, rouge ambre mais aussi grise à presque incolore. Transparente à translucide.

Gisements. C'est un minéral secondaire formé par l'altération de la triphylite dans les pegmatites ; on l'a trouvé aux Hureaux et à La Vilate (près de Limoges), à Mangualde (Portugal) et à Branchville (Connecticut, U.S.A.).

Fervanite $Fe_4V_4O_{16} \cdot 5H_2O$ - monoclinique

La fervanite se présente en agrégats fibro-parallèles. Sa couleur est brun doré. Son éclat est brillant. Ses indices de réfraction sont supérieurs à 2,18. C'est un minéral rare de quelques gisements vanadifères du Colorado où il est associé à la carnotite et à d'autres vanadates (Paradox Valley). A Maunana (Gabon) il est associé à la schubnélite ($Fe_2V_2O_8 \cdot 2\ H_2O$), petits cristaux noirs brillants tricliniques.

Volborthite $Cu_3[VO_4]_2 \cdot 3\ H_2O$ - monoclinique

La volborthite se présente en encroûtements écailleux, spongieux ou fibreux et en agrégats qui ressemblent à des rosettes ; elle est aussi réticulée, quelquefois formée

en écailles de pourtour triangulaire ou hexagonal. Elle se clive parfaitement dans une direction.

Propriétés. Dureté : 3 ½ ; densité : 3,6 ; indices de réfraction : np = 2,01, ng = 2,07. Éclat vitreux et perlé sur les faces de clivage. Couleur vert olive foncé à vert et vert jaunâtre. Subtranslucide.

Gisements. C'est un minéral secondaire des zones d'oxydation des gîtes de cuivre. Les pièces de musée viennent de Nijni Taguilsk (Oural, U.R.S.S.) et de Richardson (Utah, U.S.A.).

Variscite $Al[PO_4] \cdot 2H_2O$ - orthorhombique
Strengite $Fe^{3+}[PO_4] \cdot 2H_2O$ - orthorhombique

La variscite se présente rarement en cristaux qui sont alors octaédriques. Généralement, elle se rencontre sous forme finement grenue, en nodules ou en encroûtements. Les cristaux de strengite sont de formes plus variées : octaédriques {111}, tabulaires épais à minces {001} ou encore en gros prismes selon [100] ou [010]. Habituellement elle se trouve en agrégats sphériques et botryoïdaux avec une surface drusique et en encroûtements. Elle se clive bien sur [010]. La variscite massive a une cassure inégale à esquilleuse tendanciellement conchoïdale pour les types finement grenus ou vitreux ; elle est parfois employée comme gemme quand elle présente une belle couleur verte.

Propriétés. Dureté : 3 ½ à 4 ½ (plus élevée pour la variscite) ; densité : 2,57 (variscite) et 2,87 (strengite) ; indices de réfraction : np = 1,56 et ng = 1,59 pour la variscite ; np = 1,71 et ng = 1,75 pour la strengite. Éclat vitreux à un peu cireux pour la variscite dense. La variscite est de couleur vert pâle à vert émeraude, vert bleuâtre ou incolore. La strengite a une couleur rouge fleur-de-pêcher, carmin, violet et aussi faiblement teintée, presque incolore. Transparentes à translucides.

Gisements. Ce sont des minéraux secondaires supergènes rencontrés dans les cavités et brèches proches de la surface, formés par l'action d'eaux phosphatées sur des roches alumineuses. Ils sont associés à la wavellite, la crandalite, la calcédoine, l'apatite, etc. Les meilleures variscites ornementales viennent de l'Utah (U.S.A.), où de très belles masses homogènes vertes zébrées de jaune-brun peuvent dépasser 20 cm de diamètre. Les groupes de cristaux de strengite que l'on peut voir dans les collections proviennent de Pleystein (Bavière, Allemagne).

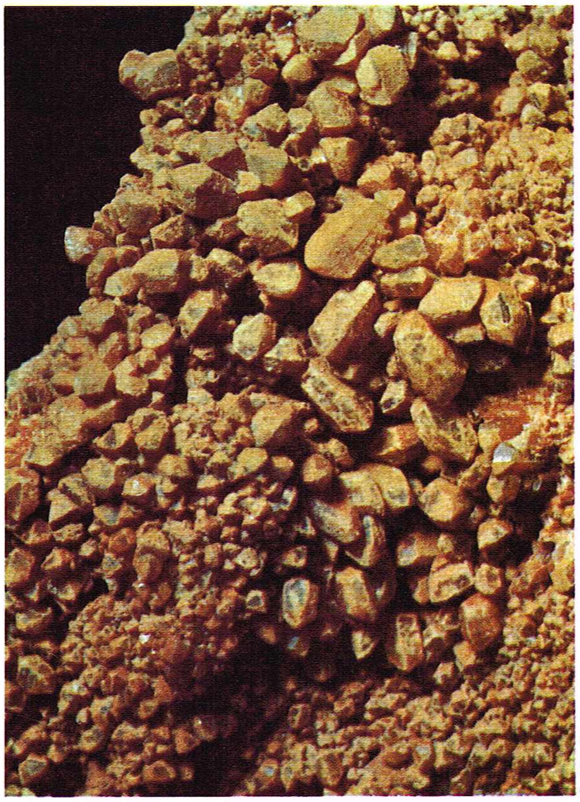
C. Bevilacqua

◄ *Cristaux de* **hopéite** *provenant de Broken Hill (Rhodésie) [Paris, École nationale supérieure des mines].*

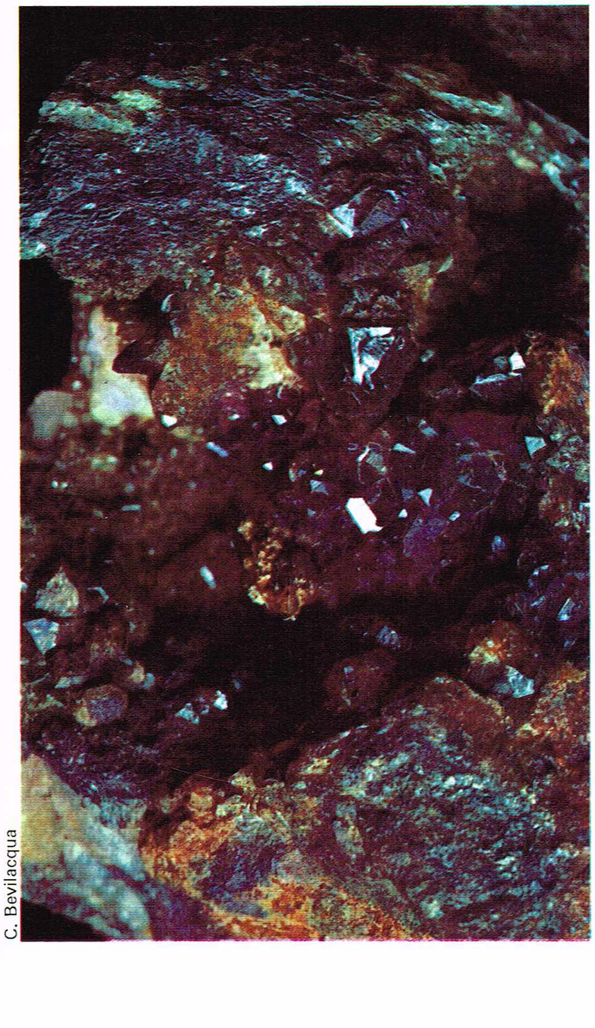
C. Bevilacqua

◄ *Un échantillon de cristaux de* **strengite** *provenant de Bavière (Paris, École nationale supérieure des mines).*

Scorodite $Fe^{3+}[AsO_4] \cdot 2H_2O$ - orthorhombique

Cet arséniate de fer est assez répandu. Ses cristaux sont habituellement pyramidaux avec la forme {111} ; ils sont aussi tabulaires sur (001) ou prismatiques selon [010]. Les cristaux s'assemblent en encroûtements ou en groupes irréguliers. La scorodite est aussi massive, cristalline ou poreuse. Sa cassure est subconchoïdale.

Propriétés. Dureté : 3 ½ à 4 ; densité : 3,28 ; indices de réfraction : np = 1,78, ng = 1,81. L'éclat des cristaux est fortement vitreux à subadamantin et subrésineux ; leur couleur est vert poireau pâle ou vert grisâtre à brun-rouge ; ils sont aussi quelquefois incolores ou bleuâtres, violets, jaunes ; le matériel terreux est vert pâle à vert grisâtre ou brunâtre.

Gisements. Ce minéral secondaire, abondant, est formé par l'oxydation de l'arsénopyrite. Les blocs massifs et zonés du Djebel Debar (Algérie) prennent un beau poli et peuvent être employés comme gemmes et pierres d'ornement. De beaux groupes de cristaux viennent de Puy-les-Vignes (Haute-Vienne) et de quelques mines du Japon et du Mexique.

Phosphophyllite $Zn_2(Fe,Mn)[PO_4]_2 \cdot 4H_2O$ - monoclinique

Ce minéral rare se présente en cristaux tabulaires épais sur (100), qui se maclent sur {100} ; la macle est parfois polysynthétique. Le clivage sur {100} est parfait. C'est un minéral fragile.

Propriétés. Dureté : 3 à 3 ½ ; densité : 3,08 à 3,13 ; indices de réfraction : np = 1,615, ng = 1,595. Éclat vitreux incolore à vert bleuâtre, transparent. Elle est fluorescente dans le violet et dans les courtes longueurs d'onde des radiations ultraviolettes.

Gisements. Ce minéral secondaire très recherché des collectionneurs en cristaux transparents a été rencontré à Hagendorf (Allemagne) et Oruro (Bolivie).

Hopéite $Zn_3[PO_4]_2 \cdot 4H_2O$ - orthorhombique

Elle se rencontre en masses réniformes, compactes. Les cristaux sont tabulaires sur (010) à prismatiques selon [001] ; ils sont isolés ou bien formés en agrégats touffus ou divergents ainsi qu'en encroûtements. Le

développement de leurs faces est souvent irrégulier. Le clivage est parfait sur {010}, de même que sur {100}. La cassure est inégale, et elle est fragile.

Propriétés. Dureté : 3 ½; densité : 3,05; indices de réfraction : np = 1,58, ng = 1,59. Éclat vitreux et perlé sur la face de clivage {010}. Ce minéral est incolore à blanc grisâtre et jaune pâle; transparent à translucide.

Gisements. Ce minéral secondaire a été rencontré en abondance dans la zone d'oxydation du gisement de zinc de Broken Hill (Rhodésie), associé à l'hémimorphite, la tarbuttite, la smithsonite et la parahopéite.

Parahopéite $Zn_3[PO_4]_2 \cdot 4H_2O$ - triclinique

La parahopéite est rare; elle se présente en cristaux allongés selon [001] et tabulaires sur (100), souvent en agrégats subparallèles ou en groupes touffus. La macle polysynthétique sur {100} est commune. Elle se clive parfaitement sur {010}.

Propriétés. Dureté : 3 ½; densité : 3,31; indices de réfraction : np = 1,615, ng = 1,635. Éclat vitreux et un peu perlé sur les faces de clivage. Incolore à transparente.

Gisements. Ce minéral de formation secondaire se trouve dans la mine de zinc de Broken Hill (Rhodésie).

Ludlamite $(Fe^{2+},Mg,Mn)_3[PO_4]_2 \cdot 4H_2O$ - monoclinique

Les cristaux de ludlamite sont très recherchés pour les collections. Ils sont tabulaires sur (001), quelquefois groupés parallèlement. La ludlamite est aussi massive, grenue. Elle se clive parfaitement sur {001}.

Propriétés. Dureté : 3 ½; densité : 3,12 à 3,19; indices de réfraction : np = 1,65, ng = 1,69. Éclat vitreux. Couleur vert brillant à vert pomme; translucide.

Gisements. Les meilleures pièces de collection viennent de Blackbird Mine (Forney, Idaho, U.S.A.) où la ludlamite est associée à la vivianite. Quelques pièces ont été trouvées à Hagendorf (Bavière, Allemagne) et à Truro (Cornouailles, Angleterre).

Anapaïte $Ca_2Fe[PO_4]_2 \cdot 4H_2O$ - triclinique

On rencontre souvent l'anapaïte sous forme de nodules creux et cristallisés à l'intérieur, ou encore sous forme d'agrégats en rosettes ou d'encroûtements de cristaux subparallèles; les cristaux sont tabulaires sur (110) et se clivent parfaitement sur {001}.

Propriétés. Dureté : 3 ½; densité : 3,80; indices de réfraction : np = 1,60, ng = 1,65. Éclat vitreux. Couleur verte à blanc verdâtre. Transparente.

Gisements. Les pièces que l'on peut voir dans les musées viennent de Cerdagna, Lerida (Espagne).

Lindackérite $(Cu, Co, Ni)_5H_2[AsO_4]_4 \cdot 8\text{-}9H_2O$ - monoclinique

La lindackérite est très rare et se présente en lattes minuscules regroupées en rosettes ou en encroûtements. Elle se clive parfaitement sur {010}.

▼ *Cristaux de ludlamite provenant de Blackbird Mine (Ontario) [Paris, École nationale supérieure des mines].*

C. Bevilacqua

Propriétés. Dureté : 2 à 2 ½; densité : 2 à 2,5; indices de réfraction : np = 1,630, ng = 1,725. Éclat vitreux vert pomme.

Gisements. Ce minéral secondaire est associé à l'érythrite; on le rencontre à Joachimsthal (Bohême).

Newbéryite $MgH[PO_4] \cdot 3H_2O$ - orthorhombique

Les cristaux de newbéryite sont équidimensionnels ou bien prismatiques courts selon [001] ou tabulaires sur (100). Ils se clivent parfaitement sur {010}.

Propriétés. Dureté : 3 à 3 ½; densité : 2,10; indices de réfraction : np = 1,515, ng = 1,533. Éclat vitreux, transparent et incolore.

Gisements. Les meilleures pièces de collection proviennent de Skipton Cave, Victoria (Australie).

Vivianite $Fe_3[PO_4]_2 \cdot 8H_2O$ - monoclinique

Ses cristaux sont les plus grands que l'on ait rencontrés pour les phosphates. Habituellement prismatiques, allongés selon [001], quelquefois aussi aplatis sur (010); ils n'ont pas toujours de direction privilégiée, ou bien sont tabulaires sur (010) et souvent arrondis. La vivianite se présente aussi en masses ou concrétions réniformes, globulaires ou tabulaires, ou en incrustations de structure fibreuse, ou encore avec un aspect terreux et pulvérulent. Elle se clive parfaitement sur {010}. Sa cassure, fibreuse, est presque perpendiculaire à [001]. Elle est flexible en fines lamelles sur {010} et sectile.

Propriétés. Dureté : 1 ½ à 2; densité : 2,68 ± 0,01; indices de réfraction : np = 1,58, ng = 1,64. Éclat vitreux et perlé sur (010), terne ou terreux. Incolore et transparente quand elle est fraîche et non altérée, elle devient rapidement bleu pâle ou bleu verdâtre à cause de l'oxydation superficielle et fonce lorsqu'elle reste exposée à l'air (bleu foncé et bleu verdâtre foncé, bleu indigo ou noir bleuâtre). Transparente quand elle est incolore ou faiblement teintée, translucide pour les cristaux profondément colorés.

Gisements. Ce minéral secondaire est formé par l'altération des phosphates de fer-manganèse primaires des pegmatites, ou associé à des matières organiques dans des sédiments. C'est dans les marigots des gisements d'Auloua (Cameroun) que l'on a trouvé d'énormes cristaux de 2 m parfois groupés en rosaces de 4 m de diamètre.

Érythrite $(Co,Ni)_3[AsO_4]_2 \cdot 8H_2O$ - monoclinique
Annabergite $(Ni,Co)_3[AsO_4]_2 \cdot 8H_2O$ - monoclinique

Ces deux minéraux forment une série par remplacement du nickel par le cobalt. L'érythrite donne des cristaux prismatiques à aciculaires selon [001] et aplatis sur (010). Les cristaux sont profondément striés ou cannelés selon [001], striés aussi sur (010). L'annabergite se présente rarement en cristaux qui, généralement, ne sont pas bien formés. L'érythrite forme souvent des groupes étoilés ou radiés; elle est globuleuse ou réniforme avec une surface drusique ou en colonne avec une structure grossièrement fibreuse; elle est aussi terreuse et pulvérulente. Habituellement, l'annabergite forme des recouvrements finement cristallins ou terreux. Elles se clivent toutes deux parfaitement sur {010}. Elles sont flexibles en fines lamelles. Sectile.

Propriétés. Dureté : 1 ½ à 2 ½; densité : 3,06 (érythrite) et 3,07 (annabergite); indices de réfraction : np = 1,63 et ng = 1,70 (érythrite); np = 1,62 et ng = 1,68 (annabergite). Éclat légèrement adamantin, perlé sur {010}; il est aussi terne et terreux. L'érythrite est rouge cramoisi et rouge pêche; la couleur pâlit quand la teneur en nickel augmente; elle est rose pâle pour Co/Ni = 1/1 puis devient blanche ou gris-vert pâle et vert pomme pour le matériel hautement nickelifère. Transparentes à translucides en cristaux.

Gisements. Ces deux minéraux secondaires se forment par oxydation des sulfo-arséniures de cobalt et de nickel; ce sont de bons indicateurs des minéraux primaires de cobalt et de nickel. L'érythrite a été surnommée « fleur de cobalt » par les mineurs. Les plus beaux cristaux ont été trouvés à Bou-Azzer au Maroc, associés à la skuttérudite et à des arséniates de calcium et de magnésium. Les meilleures annabergites viennent du Laurium (Grèce).

Symplésite $Fe_3[AsO_4]_2 \cdot 8H_2O$ - triclinique

Cet arséniate de fer se présente en agrégats sphériques de structure radiée, grossièrement fibreuse, et aussi

en petits cristaux imparfaits, allongés selon [001] et quelquefois aplatis sur (1$\bar{1}$0). Il se macle sur {1$\bar{1}$0} et se clive parfaitement sur {1$\bar{1}$0}. Fragile, la cassure est inégale.

Propriétés. Dureté : 2 ½ ; densité : 3,01 ; indices de réfraction : np = 1,63, ng = 1,70. Éclat vitreux et perlé sur les faces planes de clivage. Couleur vert lumineux à vert poireau, inclinant au noir verdâtre et au bleu indigo profond par oxydation partielle. Transparente quand elle est fraîche.

Gisements. Ce minéral secondaire est associé à la scorodite, la pharmacosidérite et à d'autres arséniates. Les échantillons classiques qu'on peut voir dans les musées viennent de Lobenstein (Allemagne).

Rosélite α -$Ca_2Co[AsO_4]_2 \cdot 2H_2O$ - monoclinique

La rosélite se présente en cristaux prismatiques allongés selon [001]. Les terminaisons sont habituellement simples et d'aspect monoclinique ou orthorhombique avec les formes {122} et ($\bar{1}$22) bien développées. Elle se présente aussi en druses de cristaux engrenés les uns dans les autres et en agrégats sphériques. Elle se macle très communément sur {100}. Le clivage sur {010} est parfait et facile.

Propriétés. Dureté : 3 ½ ; densité : 3,50 à 3,74 (elle augmente avec la teneur en cobalt) ; indices de réfraction : np = 1,70, ng = 1,72. Éclat vitreux rose ou rose pâle à rose foncé violacé. Le matériel le plus foncé est en général celui qui est le plus riche en cobalt. Transparente à translucide.

Gisements. C'est un minéral secondaire des zones d'oxydation des arséniures de cobalt associé à l'érythrite, la skuttérudite, la picropharmacolite. Les meilleurs groupes de cristaux viennent de Bou-Azzer (Maroc) et de Schneeberg (Saxe, Allemagne).

Brandtite $Ca_2Mn[AsO_4]_2 \cdot 2H_2O$ - monoclinique

Cet arséniate rare se présente en prismes allongés selon [001] ; la forme {100} est striée selon [001] ; les cristaux sont souvent réunis en groupes radiés. La brandtite se présente aussi en masses arrondies ou réniformes avec une structure fibro-radiée. Elle se macle sur {100}. Elle se clive parfaitement sur {010}.

Propriétés. Dureté : 3 ½ ; densité : 3,67 ; indices de réfraction : np = 1,71, ng = 1,72. Éclat vitreux, incolore à blanc. Transparente à translucide.

Gisements. On l'a rencontrée associée à la calcite, la baryte, la sarkinite et la galène à Presberg (Suède).

Picropharmacolite $Ca_4MgH_2[AsO_4]_4 \cdot 11H_2O$ - triclinique

Ce minéral, très délicat, se présente en agrégats de forme botryoïdale ou en petites sphères avec une structure foliacée radiée ; on le trouve aussi assez souvent en touffes de fibres soyeuses ou en cristaux aciculaires minuscules.

Propriétés. Densité : 2,58 ; indices de réfraction : np = 1,63, ng = 1,64. Couleur blanche. Éclat perlé faible. Opaque.

Gisements. C'est un minéral secondaire des zones d'oxydation des gîtes contenant des arséniures. Il se forme également dans des mines abandonnées. On le trouve par altération de la calcite au contact des eaux arsénicales associé à la pharmacolite, la sainfeldite et à d'autres arséniates de calcium à Sainte-Marie-aux-Mines (Vosges), et à l'érythrite à Bou-Azzer (Maroc).

Brushite $Ca\,H[PO_4] \cdot 2H_2O$ - monoclinique

Ce phosphate apparaît soit sous forme d'efflorescences et de cavités recouvertes de cristaux minuscules, soit en aiguilles ou en cristaux prismatiques à tabulaires sur (010). Il ressemble parfois au gypse. La brushite est aussi terreuse, poudreuse ou en feuillets. Elle se clive parfaitement sur {010} et {001}.

Propriétés. Dureté : 2 ½ ; densité : 2,33 ; indices de réfraction : np = 1,54, ng = 1,55. Éclat vitreux et perlé sur les faces de clivage, incolore à jaune pâle. Transparente à translucide. Piézo-électrique.

Gisements. D'origine sédimentaire (et organique), des cristaux de 2 cm ont été trouvés dans les phosphates du Quercy (près de Limoges). De grandes plaques de lamelles enchevêtrées viennent de Saint-Chels près de Cajarc (Lot).

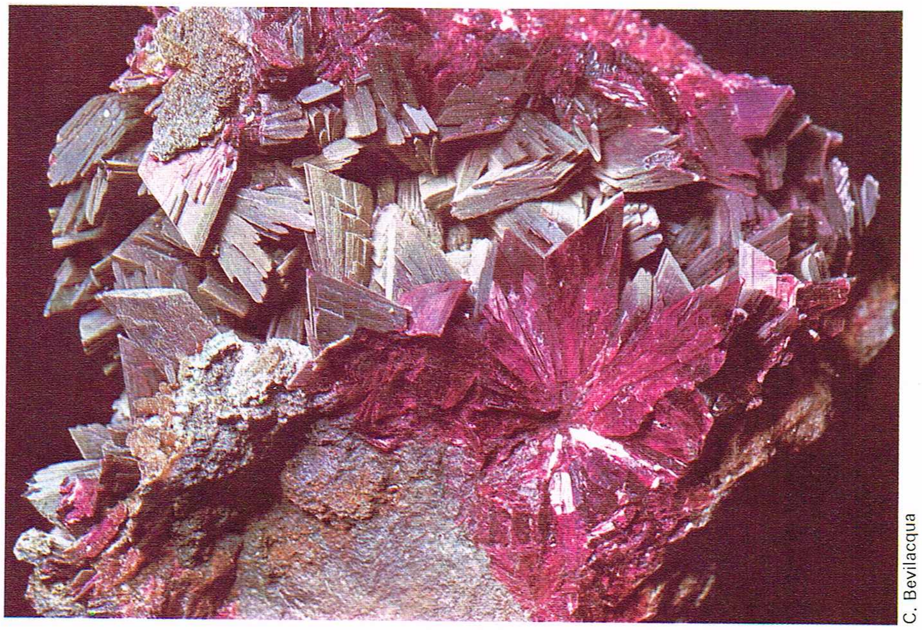

C. Bevilacqua

▲ ***Groupe exceptionnel de cristaux d'érythrite provenant de Bou-Azzer (Maroc) [Paris, École nationale supérieure des mines].***

Tagilite $Cu_2[OH|PO_4] \cdot H_2O$ (?) - monoclinique

Parfois confondu avec la pseudomalachite, ce minéral se rencontre en recouvrements poreux, terreux ou en concrétions réniformes à structure finement fibreuse.

Propriétés. Dureté : 3 ; densité : 3,5 ; indices de réfraction : np = 1,69, ng = 1,85. Couleur vert émeraude à vert montagne.

Gisements. C'est un minéral secondaire associé à la pseudomalachite et à la libéthénite, dans les zones d'oxydation des gisements de cuivre. Les pièces exposées dans les musées viennent principalement de Nijni Tagilk (Oural), localité qui a donné son nom à ce minéral.

Legrandite $Zn_2[OH|AsO_4] \cdot H_2O$ - monoclinique

Très recherchée des collectionneurs, la legrandite se présente en agrégats radiés de cristaux prismatiques allongés selon [001]. Elle se clive sur {100}.

Propriétés. Dureté : 5 ; densité : 4,01 ; indices de réfraction : np = 1,675, ng = 1,735. Incolore à jaune canari très vif. Transparente à translucide.

Gisements. Les plus belles pièces de collection viennent de Mapimi, Durango (Mexique).

Euchroïte $Cu_2[OH|AsO_4] \cdot 3H_2O$ - orthorhombique

Ce minéral rare qui n'est connu que dans une localité, se présente en cristaux prismatiques courts allongés selon

▼ ***Cristaux de rosélite provenant de Bou-Azzer (Maroc) [Paris, École nationale supérieure des mines].***

C. Bevilacqua

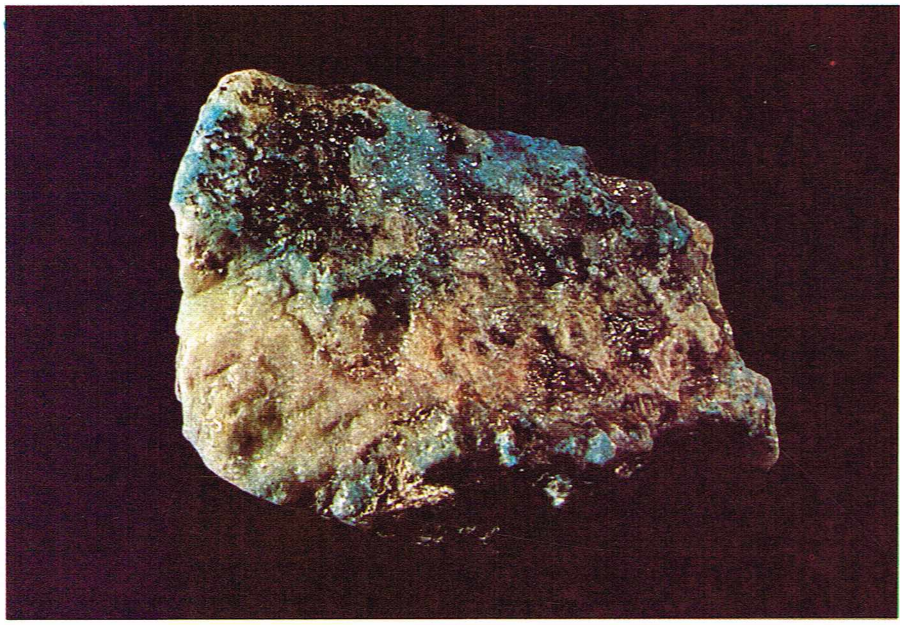

Bousquet - Jacana

▲ ***La turquoise est un minéral très recherché comme gemme depuis l'Antiquité.***

[010] ou sans direction privilégiée. Les cristaux sont ordinairement d'apparence holoédrique. La cassure est inégale à subdonchoïdale. Plutôt fragile.

Propriétés. Dureté : 3 ½ à 4 ; densité : 3,44 ; indices de réfraction : np = 1,695, ng = 1,735. Éclat vitreux vert émeraude brillant. Transparente à translucide.

Gisements. Ce minéral est associé à l'olivénite à Libethen (Hongrie).

Paravauxite $Fe^{2+}Al_2[OH|PO_4]_2 \cdot 8H_2O$ - triclinique

Souvent formée en cristaux prismatiques courts selon [001] à tabulaires épais sur (010), la paravauxite apparaît occasionnellement en agrégats subparallèles ou radiés. Les cristaux se clivent parfaitement sur {010}. La cassure est conchoïdale ; elle est fragile.

Propriétés. Dureté : 3 ; densité : 2,36 ; indices de réfraction : np = 1,55, ng = 1,57. Éclat vitreux et perlé sur les faces de clivage. Incolore à blanc verdâtre pâle. Transparente à translucide.

Gisements. Ce minéral secondaire est très rare ; associé à la vauxite, on l'a rencontré en beaux groupes de cristaux à Llallagua (Colombie).

Cacoxénite $Fe^{3+}{}_4[OH|PO_4]_3 \cdot 12H_2O$ - hexagonal

Ce minéral se présente souvent en agrégats touffus et radiés ou en recouvrements fibreux, sphérolithiques ; ses cristaux aciculaires sont fins selon [001] et ont quelquefois une section transversale hexagonale.

Propriétés. Dureté : 3 à 4 ; densité : 2,2 à 2,4 ; indices de réfraction : np = 1,58, ng = 1,64. Éclat soyeux jaune à jaune brunâtre, jaune doré, jaune rougeâtre, rarement verdâtre.

Gisements. C'est un minéral secondaire associé à la dufrénite, à la wavellite et à la limonite. Les échantillons exposés viennent de Trenic (Bohême), d'Eisenhausen, Weilburg et Hagendorf (Allemagne).

Diadochite ou destinésite $Fe_2[OH|PO_4,SO_4] \cdot 5H_2O$ - triclinique

Elle se présente sous forme microcristalline, en masses réniformes, noduleuses ou terreuses. Elle est aussi amorphe et en gel, en encroûtements colloformes, stalactitiques et botryoïdaux ou en masses pulvérulentes. La cassure est terreuse ou inégale à conchoïdale. Elle est fragile.

Propriétés. Dureté variable : 3 à 4 pour les types vitreux, moins pour le matériel terreux ; la densité est ordinairement de 2 à 2,4 ; elle varie largement avec l'état d'agrégation et la teneur en eau. Couleur jaune à brun jaunâtre et brun ; aussi brun rougeâtre, jaune verdâtre, blanc jaunâtre ou verdâtre pâle. Terne et opaque pour les types terreux, presque transparente avec un éclat cireux ou subvitreux pour le gel en masses.

Gisements. C'est un minéral secondaire de néoformation associé à la mélanthérite, à la vivianite et à la delvauxite ; de grandes masses mamelonnées, à surface terreuse, se trouvent à Litosice (Bohême).

Wavellite $Al_3[(OH)_3|(PO_4)_2] \cdot 5H_2O$ - orthorhombique

Les cristaux sont rares ; ils sont plus ou moins allongés selon [001]. Habituellement, la wavellite est en agrégats hémisphériques ou globuleux dont la structure est fibroradiée ou étoilée ; elle se présente aussi en encroûtements. Les cristaux se clivent parfaitement sur {110} et bien sur {101}. La cassure est inégale à subconchoïdale. Fragile.

Propriétés. Dureté : 3 ¼ à 4 ; densité : 2,36 ; indices de réfraction : np = 1,52, ng = 1,55. Éclat vitreux inclinant à perlé et résineux. Parfois incolore, elle est de couleur blanc verdâtre et vert-jaune, mais aussi brun jaunâtre, brune, noir brunâtre, bleue, ou blanche. Translucide.

Gisements. Minéral secondaire rencontré dans les fissures des roches alumineuses métamorphiques, des roches phosphatées et plus rarement dans les veines hydrothermales. Les meilleures pièces de collection viennent de l'Arkansas (U.S.A.).

Childrénite $(Fe^{2+}Mn^{2+})Al[(OH)_2|PO_4] \cdot H_2O$ - orthorhombique
Éosphorite $(Mn,Fe^{2+})\ Al[(OH)_2|PO_4] \cdot H_2O$ - orthorhombique

Ces deux minéraux forment une série ; ils se présentent en cristaux de même développement dans les trois directions ou bien pyramidaux à prismatiques courts selon [001] et tabulaires épais sur (010) ; ils sont aussi aplatis sur (100). Ils sont souvent formés en groupes radiés de cristaux distincts, évoluant vers des masses botryoïdales et des encroûtements à structure grossièrement fibreuse (rarement massive). Cassure subconchoïdale à inégale.

Propriétés. Dureté : 5 ; densité : 3,25 (childrénite) et 3,06 (éosphorite) ; indices de réfraction : childrénite : np = 1,65, ng = 1,69 ; éosphorite : np = 1,628, ng = 1,655. Éclat vitreux à un peu résineux. Couleur brune et brun jaunâtre. Transparents à translucides.

Gisements. Ce sont des minéraux des pegmatites riches en phosphore et de quelques filons hydrothermaux ; ils sont associés à l'apatite, au quartz et à la pyrite. Des pièces ont été trouvées à Aracuai Minas Gerais (Brésil) qui figurent dans des collections.

Turquoise $CuAl_6[(OH)_2|PO_4]_4 \cdot 4H_2O$ - triclinique
Chalcosidérite $Cu\ Fe_6^{3+}[(OH)_2|PO_4]_4 \cdot 4H_2O$

La turquoise est très recherchée comme gemme depuis l'Antiquité. Ses cristaux sont rares : ils sont prismatiques, courts selon [001], avec des grandes faces (001), (010) et (1$\bar{1}$0). Habituellement, la turquoise est massive, dense, cryptocristalline à finement grenue ; elle se présente aussi en encroûtements et en formes concrétionnées ou stalactitiques. La chalcosidérite se rencontre en encroûtements ou en groupes de cristaux distincts ; les cristaux sont prismatiques courts selon [001] avec des grandes faces (001), (010), (110) et (1$\bar{1}$0). Leur clivage est parfait sur {001} et bon sur {010}. La cassure de la turquoise massive est conchoïdale petite à unie.

Propriétés. Dureté : 5 à 6 (turquoise) et 4 ½ (chalcosidérite) ; la densité de la turquoise massive est 2,6 à 2,8 et 2,84 pour les cristaux ; les cristaux de chalcosidérite ont une densité de 3,22 ; indices de réfraction : turquoise : np = 1,61, ng = 1,65 ; chalcosidérite : np = 1,77, ng = 1,84. L'éclat des cristaux est vitreux et la turquoise massive a un éclat cireux et faible. La couleur de la turquoise massive est bleu ciel, vert bleuâtre à vert pomme, gris verdâtre et subtranslucide à opaque. Les cristaux sont bleu brillant et transparents. La chalcosidérite est vert tarin lumineux et transparente.

La couleur de la majorité des turquoises est altérée par l'action des acides ou de l'ammoniaque et par l'exposition à l'air humide.

Gisements. Minéral de formation secondaire, la turquoise se rencontre dans diverses roches alumineuses (éruptives ou sédimentaires) situées en climat aride. Le gisement de Meydan (Khorassan, Iran) fournit depuis plusieurs siècles de belles turquoises gemmes d'une intense couleur bleu clair. Des rognons utilisables comme gemmes viennent également de Chine, d'Égypte (Sinaï), du sud des États-Unis et du Mexique. La chalcosidérite s'est rencontrée dans les zones d'oxydation des gisement de cuivre de Redruth (Cornouailles).

C. Bevilacqua

◀ *Très belle cristallisation de tyrolite de Penamellera, Espagne (Paris, École nationale supérieure des mines).*

Tyrolite $Ca_2Cu_9[(OH)_{10}|(AsO_4)_4] \cdot 10H_2O$ - orthorhombique

Cet arséniate se présente rarement en cristaux, en lattes ou en écailles aplaties sur (010) et allongées sur [100] ou [001]. Habituellement en éventail et en agrégats foliacés, il peut se rencontrer aussi en encroûtements et en masses réniformes avec une structure feuilletée radiée et une surface drusique. Il se clive parfaitement sur {001}. Flexible en fines lamelles. Sectile.

Propriétés. Dureté : 2; densité : 3 à 3,2; indices de réfraction : np = 1,69, ng = 1,73. Éclat vitreux et perlé sur {001}. Couleur vert pomme pâle à vert-de-gris inclinant au bleu ciel; translucide.

Gisements. C'est un minéral secondaire des zones d'oxydation des gisements de cuivre, associé à la malachite, à la chrysocolle, à l'azurite, etc. Les échantillons exposés dans les musées viennent surtout de Schwartz (Tyrol) et de Penamellera (Espagne) où l'on a trouvé les plus beaux cristaux.

Chalcophyllite $(Cu,Al)_3[(OH)_4|(AsO_4,SO_4)] \cdot 6H_2O$ - rhomboédrique

La chalcophyllite se présente en cristaux tabulaires sur (0001), à 6 côtés, d'aspect rhomboédrique; la forme {0001} est striée triangulairement. La chalcophyllite est aussi massive, feuilletée, en druses, en agrégats en forme de rosettes. Elle se clive parfaitement sur {0001}. Elle n'est pas fragile.

Propriétés. Dureté : 2; densité : 2,67 (pour le matériel très hydraté) et décroissant avec la perte d'eau; indices de réfraction : np = 1,55, ng = 1,62 (augmentant avec le degré d'hydratation). Éclat vitreux à subadamantin devenant perlé particulièrement sur {0001} quand elle est partiellement déshydratée. Couleur vert émeraude, et aussi vert gazon à vert bleuâtre. Transparente à translucide.

Gisements. C'est un minéral secondaire des zones d'oxydation des gisements de cuivre. Les plus beaux exemplaires cristallisés viennent de Saint-Day (Cornouailles) et Cap-Garonne (Var) où ce minéral est associé à d'autres sulfates et arséniates rares.

Liroconite $Cu_2Al[(OH)_4|AsO_4] \cdot 4H_2O$ - monoclinique

Cet arséniate rare forme des cristaux minces ou lenticulaires d'apparence octaédrique aplatie. Sa cassure est inégale à conchoïdale.

Propriétés. Dureté : 2 à 2 ½; densité : 2,9 à 3; indices de réfraction : np = 1,61, ng = 1,67. Éclat vitreux inclinant au résineux. Couleur bleu ciel à vert-de-gris. Transparente à translucide.

Gisements. C'est un minéral secondaire des zones d'oxydation des gisements de cuivre. Les plus belles pièces de collection viennent presque exclusivement de la région de Saint-Day et de Redruth (Cornouailles).

Évansite $Al_3[(OH)_6|PO_4] \cdot 6H_2O$ - gel

L'évansite est massive et forme des recouvrements réniformes, botryoïdaux et opalins avec quelquefois une structure colloforme concentrique; elle est aussi stalactitique. Sa cassure est conchoïdale. Très fragile.

Propriétés. Dureté : 3 à 4; densité variable : 1,8 à 2,2, habituellement 1,9 environ; indices de réfraction variable entre 1,44 et 1,49. Éclat vitreux, inclinant au résineux et au cireux. Incolore à blanc laiteux, quelquefois teintée de bleu, de vert ou de jaune. Les variétés contenant beaucoup de Fe_2O_3 sont brunes, brun rougeâtre ou rouges. Transparente à translucide.

Gisements. C'est un minéral de formation secondaire associé à la limonite et à l'allophane. Entre autres localités connues, on peut citer Alsosajo (Roumanie).

Pharmacosidérite $KFe^{3+}_4[(OH)_4|(AsO_4)_3] \cdot 6\text{-}7H_2O$ - cubique

La pharmacosidérite se présente communément en cristaux cubiques avec des faces striées diagonalement, ou encore tétraédriques; la pharmacosidérite est rarement grenue ou terreuse. Sa cassure est inégale. Elle est plutôt sectile.

Propriétés. Dureté : 2 ½; densité : 2,797; indice de réfraction : n = 1,69. Éclat adamantin à gras. Couleur vert olive passant au jaune miel, brun jaunâtre et brun foncé;

▼ **Liroconite** *de Cornouailles (Paris, École nationale supérieure des mines).*

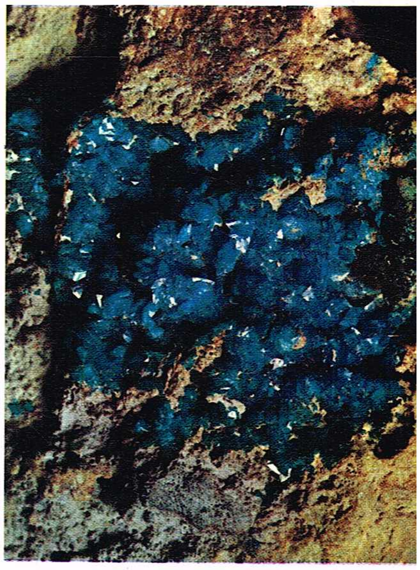

C. Bevilacqua

▶ **Pharmacosidérite**
de Cornouailles en cristaux très nets (Paris, École nationale supérieure des mines).

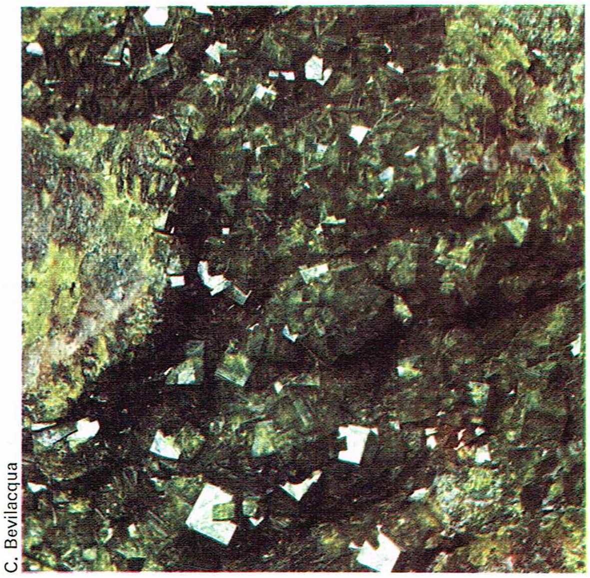

C. Bevilacqua

elle est aussi rouge hyacinthe, rouge brunâtre, vert émeraude. Transparente à translucide. Faiblement piézo-électrique et pyro-électrique.

Gisements. C'est un minéral secondaire assez fréquent dans les gisements d'arsénopyrite; on l'a également reconnu dans des filons hydrothermaux de wolfram. D'intéressants groupes de cristaux proviennent de Wheal-Gorland (Cornouailles).

Arséniosidérite $Ca_3Fe_4[OH|AsO_4]_4 \cdot 4H_2O$ *- hexagonal*

Ce minéral est très caractéristique; on le rencontre presque toujours en agrégats fibro-radiés; les fibres sont aplaties sur (001) et se clivent sur {001}.

Propriétés. Dureté : 4 ½ pour les types grenus, décroissant à 1 ½ pour le matériel de type fibreux; densité : 3,60; indices de réfraction : np = 1,80, ng = 1,88. Éclat sub-métallique à soyeux. Couleur jaune doré à brun rougeâtre (fibreux), et aussi noire ou noir brunâtre. Opaque sauf pour les petits grains.

Gisements. L'arséniosidérite a été trouvée au siècle dernier en abondance à Romanèche (Saône-et-Loire), associée à des hydroxydes de manganèse, à la gœthite et à l'hématite.

▼ **Lavendulanite**
de Meskani, Iran (Paris, École nationale supérieure des mines).

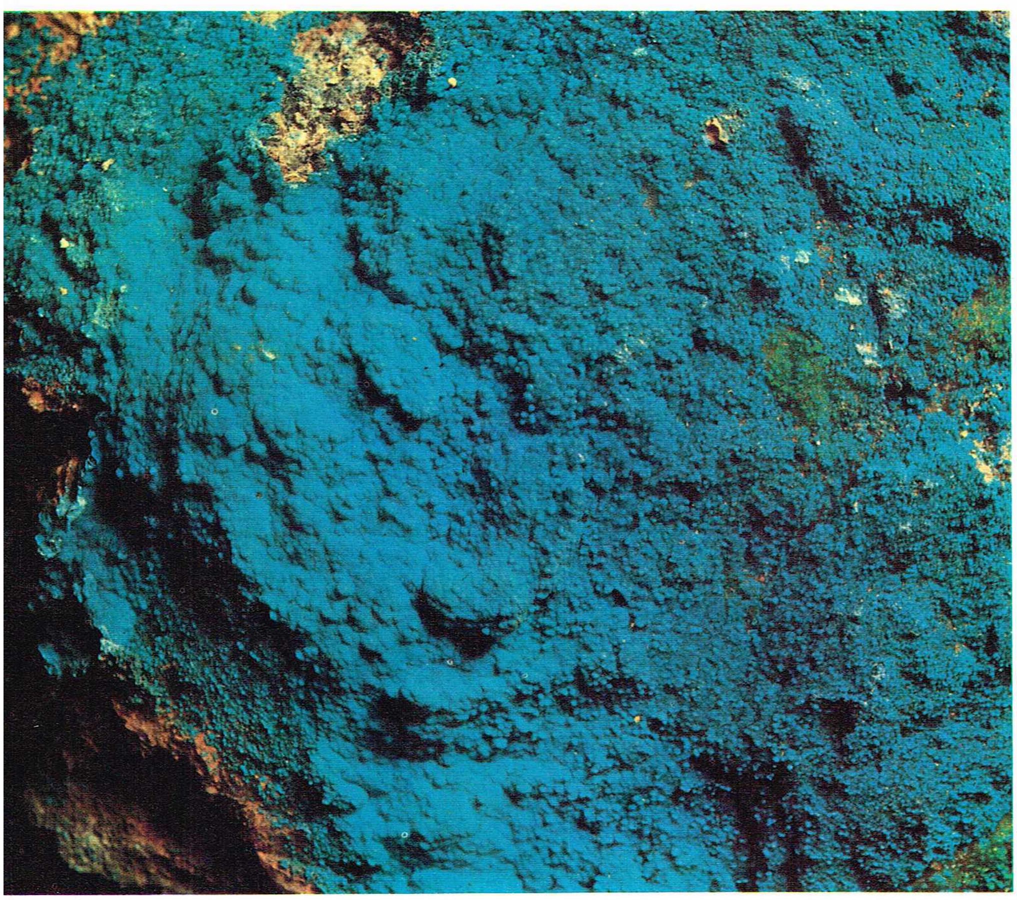

C. Bevilacqua

Lavendulanite $(Ca, Na)_2Cu_5[Cl|(AsO_4)_4] \cdot 5H_2O$ *- orthorhombique*

Très caractéristique par sa couleur, ce minéral se présente souvent en croûtes botryoïdales ou en agrégats formés par des fibres microscopiques ou lamelles radiées.

Propriétés. Dureté : 2 ½ à 3; densité : 3; indices de réfraction : np = 1,715, ng = 1,725. Belle couleur bleu lavande.

Gisements. La lavendulanite a été trouvée à Joachimsthal (Bohême), associée à l'érythrite, et plus récemment à Meskani, Anarak (Iran).

Mixite $(Bi^{3+}, Fe^{3+}, ZnH, CaH)Cu_{12}[(OH)_{12}|(AsO_4)_6] \cdot 6H_2O$ *- hexagonal*

Ce minéral rare se présente le plus souvent en touffes de fibres (allongement suivant [0001]), en incrustations ou en petites masses compactes ou sphérolitiques à structure fibreuse.

Propriétés. Dureté : 3 à 4; densité : 3,75 à 3,80; indices de réfraction : np = 1,73 à 1,74, ng = 1,81 à 1,83. Couleur vert émeraude à bleu-vert de toutes nuances jusqu'au blanchâtre.

Gisements. La mixite est associée au bismuth, à la bismuthite et à la smaltite à Joachimsthal (Bohême), où elle a été découverte pour la première fois. Les beaux exemplaires de musées viennent des mines de la région de Tintic (Utah, États-Unis).

Sabugalite $(AlH)_{0,5}[UO_2|PO_4]_2 \cdot 10H_2O$ *- quadratique*

La sabugalite se rencontre en placages de lamelles allongées, en agrégats cristallins et plus rarement en cristaux distincts; ceux-ci sont allongés en forme de lattes dépassant très rarement 1 cm, ils sont souvent polysynthétiques suivant le plan d'aplatissement (001). Le clivage sur {001} est parfait.

Propriétés. Dureté : 2 à 3; densité : 3,2; indices de réfraction : np = 1,585, ng = 1,567. Translucide avec un éclat nacré; couleur jaune citron ternissant par déshydratation en devenant opaque. Très fluorescent aux ultraviolets en vert-jaune vif. Comme tous les composés d'uranium, la sabugalite est radio-active.

Gisements. C'est un minéral secondaire des zones d'oxydation des gîtes de pechblende, rencontré dans les aplites et les pegmatites, en association le plus souvent avec l'autunite. Les premiers échantillons trouvés venaient de Sabugal (Portugal), mais c'est au gîte de Margnac qu'ont été trouvés les plus beaux exemplaires connus dans les collections.

Torbernite (ou chalcolite) $Cu[UO_2|PO_4]_2 \cdot 10H_2O$ *- quadratique*

Ce minéral est fréquemment sous forme de masses fibro-écailleuses, de cristaux polysynthétiques, d'agrégats de rosettes, de lames carrées et groupements parallèles. Les cristaux isolés sont lamellaires à section carrée et, plus rarement, en bipyramides tronquées avec les faces (101), (001) et (100). Le clivage basal {001} est parfait et facile.

Propriétés. Dureté : 2 à 2 ½; densité : 3,22; les indices de réfraction (np = 1,59, ng = 1,58) augmentent avec la déshydratation, qui conduit à la méta-torbernite ne contenant que $8H_2O$ (théoriquement, la torbernite en contient 12 mais la teneur varie facilement entre 8 et 12 en fonction du degré hygroscopique de l'air). Éclat vitreux à subadamantin, nacré sur (001); transparente en lamelles minces; couleur : vert-jaune à vert malachite, vert émeraude à vert-noir.

Gisements. Ce minéral secondaire des zones d'oxydation des gisements d'uranium, très répandu, est associé à l'autunite, la malachite, etc. Les plus beaux groupes de cristaux brillants viennent de Musonoï (Katanga). D'intéressantes pièces de collection venaient autrefois de Grummislake (Cornouailles). C'est de la mine des

Bois-Noirs à Saint-Priest-la-Prugne (Loire) que proviennent les plus grands groupes de cristaux rencontrés en France.

Autunite $Ca[UO_2|PO_4]_2 \cdot 10H_2O$ ***- quadratique***

C'est l'un des minéraux d'uranium les plus fréquents. On le rencontre le plus souvent en masses écailleuses micacées, en croûtes épaisses ou en formations de tablettes subparallèles crêtées. Les cristaux sont aplatis suivant (001) en lamelles carrées et sont, plus rarement, en bipyramides tronquées. Le clivage basal {001} est parfait; celui sur {100} est indistinct.

Propriétés. Dureté : 2 à 2 $\frac{1}{2}$; densité : 3,1 à 3,2; les indices de réfraction varient suivant le degré d'hydratation et augmentent avec une perte en eau; pour le maximum d'hydratation ($12H_2O$), np = 1,552 et ng = 1,575. L'autunite est transparente en fines lamelles avec une couleur jaune-vert fluorescente. La couleur des échantillons moins hydratés varie du jaune paille au jaune citron, et du jaune-vert (opaque) au vert vif. L'éclat est nacré sur le clivage. La fluorescence vert-jaune aux ultraviolets est très vive.

Gisements. Ce minéral secondaire est fréquent dans les zones d'oxydation des filons hydrothermaux ou des pegmatites contenant de la pechblende sous-jacente; il peut parfois se former très loin des minerais primaires; il est associé à la torbernite et à d'autres minéraux secondaires d'uranium. Trouvée la première fois près d'Autun, l'autunite a été rencontrée en abondance dans les gîtes uranifères français du Massif central et de Bretagne. Du gisement de Spokane (Washington), viennent également de grands groupes de cristaux.

Uranocircite $Ba[UO_2|PO_4] \cdot 10H_2O$ ***- quadratique***

L'uranocircite se présente en lamelles ou cristaux tabulaires carrés, ou encore en agrégats flabelliformes ou micacés ressemblant beaucoup à ceux de l'autunite. Le clivage basal sur {001} est parfait, comme c'est le cas de tous les minéraux de ce groupe.

Propriétés. Dureté : 2 à 2 $\frac{1}{2}$; densité : 3,50; indices de réfraction : np = 1,59, ng = 1,61, variant avec le degré d'hydratation et la teneur en calcium. Transparent à translucide; éclat nacré sur (001); même couleur jaune que l'autunite. Forte fluorescence en vert-jaune vif aux rayons ultraviolets. L'uranocircite se distingue de l'autunite par sa densité plus forte : elle tombe dans l'iodure de méthylène (3,30), alors que l'autunite y flotte.

Gisements. C'est un minéral des zones d'oxydation des gisements d'uranium; il est plus rare que l'autunite. Du Batou (Saône-et-Loire) viennent les meilleurs échantillons français.

Novacekite $Mg[UO_2|AsO_4]_2 \cdot 10H_2O$ ***- quadratique***

La novacekite forme une série avec la saléeite (terme phosphaté) et ses cristaux sont tabulaires. Les plus gros sont allongés suivant [010], donnant des associations de plaquettes rectangulaires dont l'empilement imparfaitement parallèle forme des gerbes. Le clivage est parfait sur (001).

Propriétés. Dureté : 2 $\frac{1}{2}$; densité : 3,6 (le terme intermédiaire [AsO_4, PO_4] a une densité moindre : 3,35); indices de réfraction : np = 1,620, ng = 1,637; couleur jaune paille à jaune vif. Translucide à opaque.

Gisements. Ce minéral secondaire, rare, des zones d'oxydation des gisements de pechblende a été étudié pour la première fois à Schneeberg (Saxe). De splendides cristaux (jusqu'à 4 cm) ont été trouvés dans la magnésite de Brumado (Brésil) il y a quelques années.

Saléeite $Mg[UO_2|PO_4]_2 \cdot 10H_2O$ ***- quadratique***

Elle ressemble beaucoup à la novacekite. Ses propriétés sont plus faibles. Densité : 3,25; indices de réfraction : np = 1,560, ng = 1,574.

Les meilleurs échantillons que l'on peut voir dans les musées viennent de Shinkolobwe (Katanga), où elle est associée à la torbernite.

Zeunérite $Cu[UO_2|AsO_4]_2 \cdot 10H_2O$ ***- quadratique***
Métazeunérite (5 à $8H_2O$***)***

Ce minéral ressemble à la torbernite; les cristaux sont tabulaires sur (001), plus rarement en pyramide quadratique. La zeunérite se rencontre le plus souvent en agrégats micacés minces.

Propriétés. Dureté : 2 à 2 $\frac{1}{2}$; densité : 3,64; indices de réfraction : np = 1,62, ng = 1,64 (variant suivant le degré d'hydratation); éclat vitreux, nacré sur le clivage; couleur vert émeraude; comme la torbernite, elle n'a aucune fluorescence aux rayons ultraviolets.

Gisements. C'est un arséniate rare des zones d'oxydation des gisements de cuivre contenant de l'uranium. La localité la plus classique en France est la mine de Cap-Garonne, où la zeunérite est associée à d'autres arséniates de cuivre.

Uranospinite $Ca[UO_2|AsO_4]_2 \cdot 10H_2O$ ***- quadratique***

Ses cristaux sont tabulaires ou lamellaires sur (001); comme pour l'autunite, le clivage est parfait et micacé suivant cette direction.

Propriétés. Dureté : 2 à 2 $\frac{1}{2}$; densité : 3,45; indices de réfraction : np = 1,560, ng = 1,585. Couleur jaune

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ **Autunite** ***cristallisée dans une fissure de granite altéré (Margnac, Haute-Vienne).***

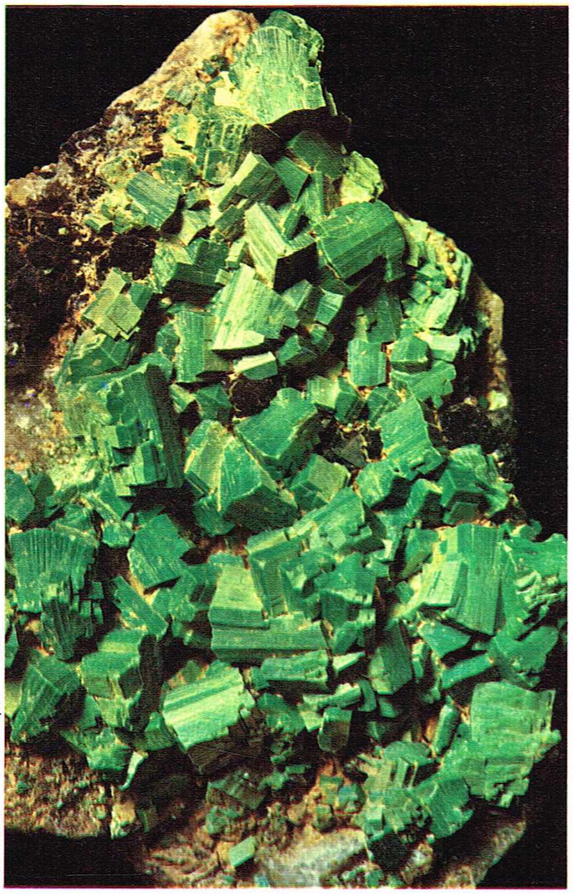

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀▼ ***A gauche,*** **torbernite** ***(chalcolite) cristallisée de Margabal, Aveyron (Paris, École nationale supérieure des mines). Ci-dessous,*** **zeunérite** ***en cristaux quadratiques aplatis (Schneeberg, Saxe) [Paris, École nationale supérieure des mines].***

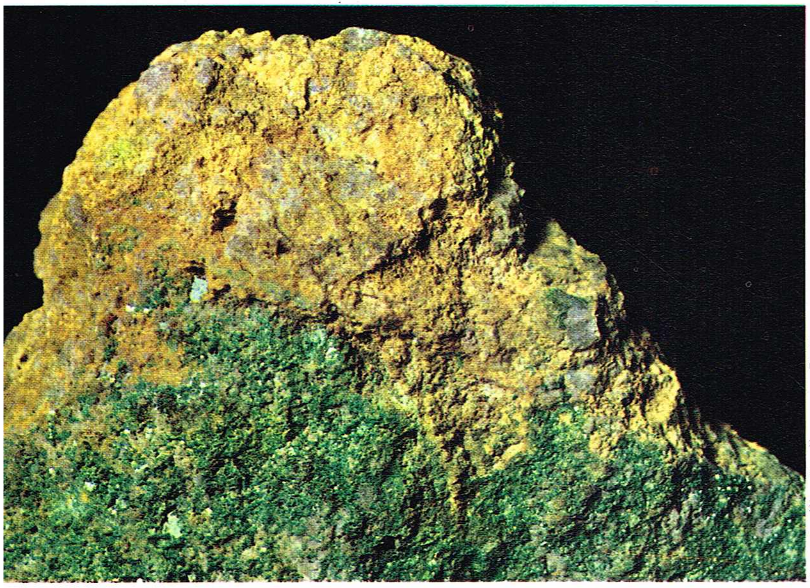

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *A gauche,* renardite *microcristalline, Haute-Vienne (collection privée). A droite, le plus bel exemplaire connu de* vanuralite *de Mounana, Gabon (Paris, École nationale supérieure des mines).*

▼ *Cristaux de* chervetite *associés à de la* francevillite *(rouge) et à de la* curiénite *(jaune vif) sur le grès de Mounana, Gabon (collection privée).*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

vif à jaune pâle ou jaune citron; éclat nacré sur (001); fluorescente en jaune-vert aux rayons ultraviolets.

Gisements. C'est un minéral secondaire rare de la zone d'oxydation du gîte de Schneeberg, associé à la zeunérite, l'uranocircite, etc. On l'a rencontré également à Bou-Azzer (Maroc).

Phosphuranylite $Ca[(UO_2)_4|(OH)_4|(PO_4)_2]\cdot 8H_2O$ - orthorhombique

Fréquents en agrégats minces cristallins, les cristaux sont aplatis suivant (100), minuscules avec les faces (100), (010), (101).

Propriétés. Dureté : 3; densité : 4,10; indices de réfraction : np = 1,68, ng = 1,70. La couleur varie du jaune ambré au jaune d'or. La phosphuranylite n'offre pas de fluorescence (ou légère et orangée), ce qui permet de la distinguer de l'autunite et des autres minéraux fluorescents de ce groupe. Elle forme une série avec la renardite par remplacement du Ca par Pb.

Gisements. C'est un minéral assez fréquent dans les zones d'oxydation des gisements uranifères, où il est associé à l'autunite. En France, les meilleures pièces de musée ont été trouvées aux Bois-Noirs (Loire) et à La Crouzille (Haute-Vienne).

Renardite $Pb[(UO_2)_4(OH)_4(PO_4)_2]\cdot 8H_2O$ - orthorhombique

La renardite se rencontre le plus souvent en agrégats microcristallins. Les cristaux, toujours petits, ont un faciès varié : prisme à six côtés constitué par les faces (100) et (101) et la terminaison d'hexagone allongé (010), ou tablettes avec (010) (100), (001). Clivage parfait suivant {100}.

Propriétés. Dureté : 3 $\frac{1}{2}$; densité : 4,35; indices de réfraction : np = 1,715, ng = 1,735; couleur jaune d'or à jaune verdâtre ou jaune citron. Ce minéral se distingue de la phosphuranylite par la présence de plomb, qui forme des dendrites blanches opaques de nitrate de plomb après séchage d'une goutte d'acide nitrique dilué où l'on a fait dissoudre un grain de renardite (même test pour les autres composés solubles de plomb).

Gisements. C'est un minéral secondaire associé à l'autunite dans les zones d'oxydation des gisements d'uranium contenant du plomb. De beaux placages de petits cristaux ont été rencontrés à la mine de La Faye (Saône-et-Loire).

Vanuralite $Al(OH)(UO_2)_2V_2O_8\cdot 8H_2O$ - monoclinique

Cette espèce doit son nom à sa composition chimique. Elle se présente en filonnets, en imprégnations ou en placages de cristaux, et quelquefois en agrégats ayant la forme de « buissons ramifiés ». Les cristaux aplatis suivant (001) montrent les faces ($\bar{1}$01), (101), (111), ($\bar{1}$11) et (011). C'est un minéral fragile; le clivage {001} est facile.

Propriétés. Dureté : 2; densité : 3,62; indices de réfraction : np = 1,65, ng = 1,90. Couleur jaune d'or.
Gisements. On a rencontré la vanuralite à Mounana (Gabon) dans des grès, associée à la francevillite, la chervetite, la curiénite, etc.

Carnotite $K_2(UO_2)_2(V_2O_8)\cdot 3H_2O$ - monoclinique

La carnotite est rare en cristaux avec les faces (001), (110), (010), (100), (110) et (120) et elle forme surtout des croûtes microcristallines, plus ou moins pulvérulentes. Le clivage sur {001} est parfait.
Propriétés. Dureté : 3 ½ à 4; densité : 4,45; indices de réfraction : np = 1,75, ng = 1,95. La couleur varie du jaune citron au verdâtre. L'éclat est nacré pour les variétés cristallisées.
Gisements. La carnotite forme le minerai d'uranium le plus important des gisements sédimentaires du Colorado. On l'a rencontré au Maroc à Assaïkaidji.

Francevillite $Ba(UO_2)_2(V_2O_8)\cdot 5H_2O$ - orthorhombique

La francevillite forme une série avec la curiénite par remplacement du baryum par le plomb; elle se présente très souvent en enduits, en groupements de cristaux indistincts ou mamelons, et en sphérolites à surface rugueuse. Les cristaux ont les faces (100), (010), (111); le clivage {001} est parfait.
Propriétés. Dureté : 3; densité : 4,55; indices de réfraction : np = 1,750, ng = 1,945, augmentant avec la teneur en plomb. Couleur : jaunâtre à orangé, jaune canari à vert jaunâtre.
Gisements. Ce minéral (décrit en 1957) a été découvert dans les grès du Francevillien de Mounana (Gabon), associé à la curiénite, la chervetite, la schubnélite (décrite en 1970), etc. On l'a trouvé aussi en France, à Saint-Pierre (Cantal).

Curiénite $Pb(UO_2)_2(V_2O_8)\cdot 5H_2O$ - orthorhombique

Ce nouveau minéral (décrit en 1968) se présente sous la forme d'une poudre microcristalline recouvrant la francevillite. Les microcristaux sont aplatis sur (001) avec les faces (201), (112), (221) et (111).
Propriétés. Densité : 4,88; indices de réfraction : supérieurs à 2. Translucide; couleur jaune-orangé à jaune pâle et vert-jaune à jaune-vert. On a rencontré ce minéral dans les grès de Mounana (Gabon), associé à la francevillite, la chervetite, etc.

Chervetite $Pb_2(V_2O_7)$ - monoclinique

La chervetite se rencontre en cristaux prismatiques avec les faces (100), (010), (210), (310) de la zone prismatique et les terminaisons (211), (001), (111), (011). Il existe trois types de macle différents : un plan d'accolement sur (101); un plan sur (100), plus rare; un plan d'accolement sur (100) mais dont le paramètre *b* du premier cristal est dirigé suivant le paramètre *c* du deuxième cristal et réciproquement.
Propriétés. Dureté : 2 ½ à 3; densité : 6,30; indices de réfraction : supérieurs à 2,2. Transparente à translucide; éclat adamantin. Couleur brun pâle à brun foncé, grise à gris clair.
Gisements. La chervetite se rencontre dans les grès à francevillite de la zone d'oxydation du gisement d'uranium de Mounana (Gabon); elle y est associée à la francevillite, la curiérite, la vanuralite, etc.

Silicates

Les silicates (800 espèces minérales) sont très importants en raison du volume qu'ils occupent dans la croûte terrestre (75 %). Principaux constituants des roches magmatiques, sédimentaires, des schistes cristallins, des roches formées par métasomatose ou par métamorphisme de contact, les silicates sont des composés ioniques; leur élément chimique principal est l'oxygène, qui, parmi leurs ions habituels, est le plus gros et admet des empilements presque compacts.
L'ion Si^{4+}, en admettant la coordinence 4, occupe le centre des tétraèdres qui constituent la « charpente » SiO_4, chaque ion silicium étant toujours environné de 4 ions oxygène situés aux sommets d'un tétraèdre. L'union d'un ion Si^{4+} à 4 ions O^{2-} ne compensant que 4

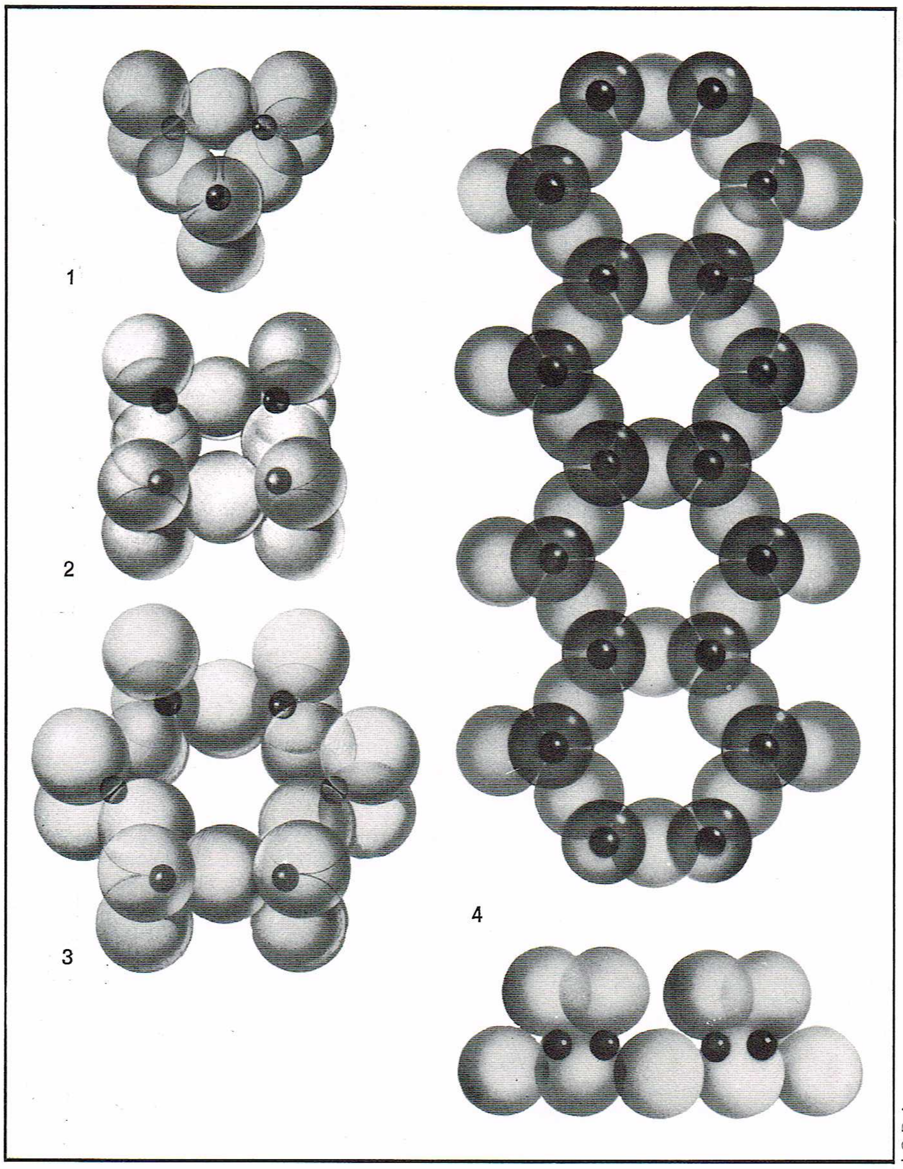

I.G.D.A.

▲ *Représentation schématique des silicates; 1, 2, 3 : anneaux de tétraèdres Si_3O_9—Si_4O_{12}—Si_6O_{18} dans les* cyclosilicates*;*
4, « chaînes » de tétraèdres Si_4O_{11} dans les inosilicates.
▼ *A gauche, association du silicium et de l'oxygène en tétraèdre SiO_4 dans les* néosilicates.
A droite, association du silicium et de l'oxygène en 2 tétraèdres à sommet commun Si_2O_7 dans les sorosilicates.

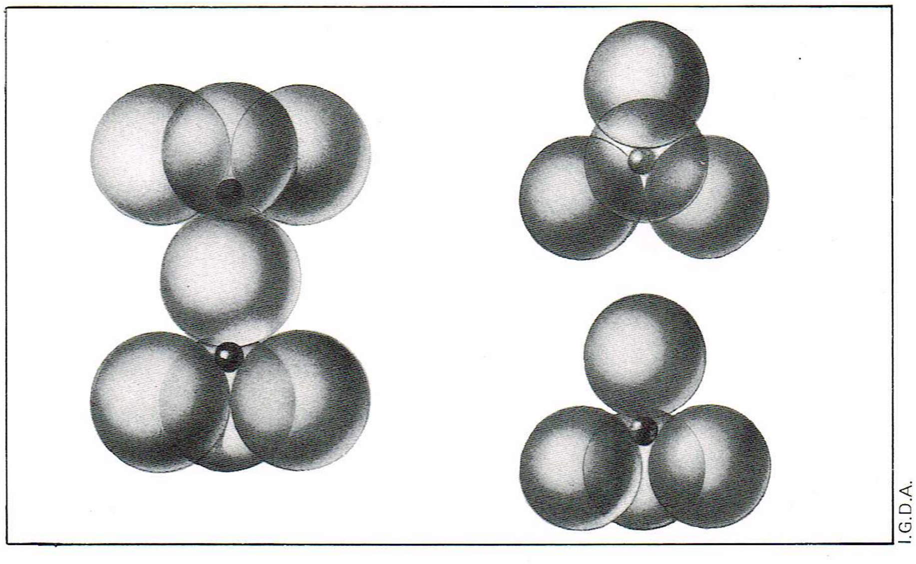
I.G.D.A.

▶ *Représentation structurale de la formation « en feuillet » des tétraèdres de silice et d'oxygène (Si_2O_5) dans les* **phyllosilicates.**

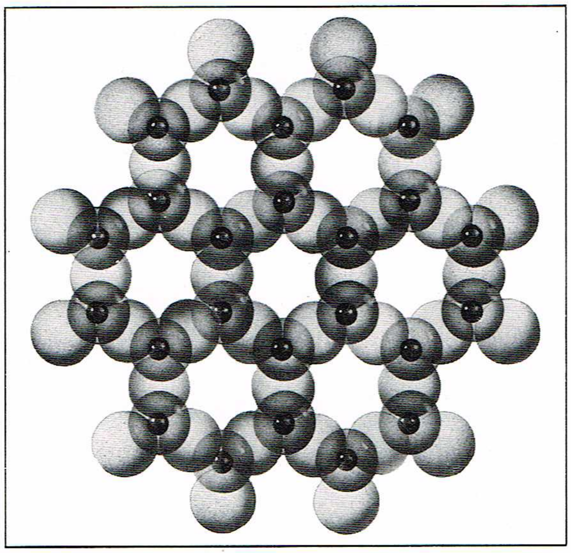

I.G.D.A.

des 8 charges que possèdent les 4 ions oxygène, chacun de ces derniers peut donc encore former liaison avec un cation voisin. Mais l'existence d'un grand nombre de silicates s'explique par le fait que le rayon ionique de l'aluminium se situe à la limite des domaines d'existence de deux coordinences, car l'ion aluminium peut avoir la coordinence 4 ou 6 et avec la coordinence 4 il peut remplacer l'ion silicium; de plus, afin de conserver l'électroneutralité, il faut qu'il y ait, pour chaque ion aluminium introduit dans la charpente de tétraèdres SiO_4 de charge négative (en fait $[Si,Al]O_4$), une substitution correspondante d'un ion positif.

On distingue divers types de silicates suivant l'arrangement des tétraèdres SiO_4.

● **Nésosilicates** (silicates à tétraèdres indépendants). Les tétraèdres SiO_4 n'ont aucun sommet commun et sont liés entre eux par des cations. Les nésosilicates appartiennent le plus souvent à des systèmes cristallins de symétrie élevée. Leur dureté est forte et leurs indices de réfraction sont élevés. Exemple : l'olivine.

● **Sorosilicates.** Le groupe Si_2O_7 est formé par deux tétraèdres ayant un oxygène commun; certains sorosilicates comprennent en plus des tétraèdres isolés. Exemple : l'épidote.

● **Cyclosilicates.** Les groupes ont une forme d'anneaux composés par trois tétraèdres Si_3O_9. Exemple : la bénitoïte BaTi Si_3O_9, quatre tétraèdres Si_4O_{12}, ou six tétraèdres Si_6O_{18}.

● **Inosilicates** (silicates en chaînes). Les tétraèdres forment des chaînes linéaires, infinies, simples ou doubles. Les cristaux sont allongés suivant la direction de la chaîne. Les propriétés optiques sont assez voisines. Les pyroxènes ont une chaîne simple, les amphiboles une chaîne double. Les clivages des pyroxènes forment un angle de 87° et les prismes des cristaux ont une section carrée, alors que les clivages des amphiboles forment un angle de 124° et les prismes de leurs cristaux ont une section losangique (ou pseudo-hexagonale).

● **Phyllosilicates** (silicates en feuillets). Les chaînes de tétraèdres s'associent et forment des réseaux plans (feuillets structuraux). Exemple : le mica. Tous les phyllosilicates ont un bon clivage basal.

● **Tectosilicates** (silicates à charpente tridimensionnelle). Les tétraèdres partagent leurs quatre oxygènes avec les tétraèdres voisins, formant ainsi une charpente continue dans l'espace. Il n'y a jamais plus de la moitié des ions silicium remplacés par des ions aluminium et le rapport Si + Al/O, dans les radicaux anioniques, a toujours la valeur 1/2. Les duretés sont moyennes et les densités assez faibles. Exemple : le feldspath.

★ *Nésosilicates*

■ **Ilots $[ZO_4]$ S** (fonction du degré d'enchaînement des tétraèdres) = 1

● *Groupe des péridots*

Dans ce groupe sont réunies l'**olivine,** la **forstérite,** la **fayalite,** la **téphroïte** et la **monticellite.**

Olivine ou chrysolite, $(Mg, Fe)_2[SiO_4]$ - orthorhombique

L'olivine appartient au groupe des péridots, dont les deux termes extrêmes de la série sont la **forstérite** $Mg_2[SiO_4]$ et la **fayalite** $Fe_2[SiO_4]$. Les cristaux sont aplatis sur (100) ou (010), avec les faces (100), (110), (010), (001), (120), (021), etc., et moins couramment allongés selon l'axe C. Elle est généralement massive, compacte ou grenue et le plus souvent en grains inclus dans les roches. Son clivage est assez bon sur (010).

Propriétés. Dureté : 6 ½ à 7; densité : 3,27 à 3,37 (augmentant jusqu'à 3,57 pour la variété riche en fer); indices de réfraction, variant avec le pourcentage de fer : np = 1,635 à 1,655, ng = 1,670 à 1,690. Transparente à translucide; éclat vitreux; couleur verte, vert olive, quelquefois brunâtre, rouge grisâtre, vert grisâtre (devenant brun jaunâtre ou rouge par l'oxydation du fer).

Gisements. C'est le constituant essentiel des péridotites; les dunites renfermant surtout la forstérite, et les diabases étant constituées d'olivine riche en fer. L'olivine constitue, avec les pyroxènes, les gabbros, les diabases et les basaltes; elle est l'indicateur d'un métamorphisme très fort lorsqu'elle se rencontre avec la magnétite dans les dolomies. Les plus beaux cristaux utilisables comme gemmes viennent de l'île de Zeberget (Saint-Jean) en mer Rouge et également de Ceylan et de Mogok (Birmanie).

Forstérite, $Mg_2[SiO_4]$ - orthorhombique

La forstérite est beaucoup plus rare que l'olivine et se présente en petits cristaux équidimensionnels; son clivage est parallèle à (001) et (010).

Propriétés. Dureté : 6 à 7; densité : 3,21 à 3,33; indices de réfraction : np = 1,635, ng = 1,670. Transparente à translucide; couleur blanche, verdâtre ou jaune.

Gisements. De beaux cristaux ont été trouvés dans les blocs rejetés par le Vésuve (Monte Somma) et au Monte Albano, près de Rome.

Fayalite, $Fe_2[SiO_4]$ - orthorhombique

Les cristaux de ce minéral rare sont tabulaires et ressemblent à ceux de l'olivine. La fayalite est aussi massive ou lamellaire.

Propriétés. Dureté : 6 ½; densité : 4,1; indices de réfraction : np = 1,835, ng = 1,886. Translucide à opaque; couleur jaune verdâtre lumineux mais devenant brune à noire quand le minéral est exposé à l'air.

Gisements. On a rencontré la fayalite pour la première fois à Fayal (Açores), dans les roches volcaniques, et en France à Collobrières (Var).

Téphroïte, $Mn_2[SiO_4]$ - orthorhombique

La téphroïte se présente rarement en petits cristaux semblables à ceux de l'olivine.

Propriétés. Dureté : 6; densité : 4,1; indices de réfraction : np = 1,77, ng = 1,825. Translucide; couleur rouge chair à gris de cendre.

Gisements. Les meilleures pièces de collection viennent de Franklin (New Jersey) et de Vermland (Suède). On a rencontré ce minéral, en France, à Adervielle (Hautes-Pyrénées).

Monticellite, $CaMg[SiO_4]$ - orthorhombique

La monticellite se présente le plus souvent en petits cristaux prismatiques ou en masses grenues.

Propriétés. Dureté : 5; densité : 3,2; indices de réfraction : np = 1,65, ng = 1,67. Incolore à gris.

Gisements. De beaux cristaux ont été rencontrés dans les calcaires métamorphiques du Vésuve (Monte Somma) et à Magnet-Cove (Arkansas).

● *Groupe des grenats $R^{\cdot\cdot}_3R^{\cdot\cdot\cdot}_2[SiO_4]_3$ - cubique*

Le groupe des grenats inclut une série de minéraux **(pyrope, almandin, spessartine, grossulaire, andradite et uvarovite)** qui cristallisent dans le système cubique et présentent les mêmes faciès, le dodécaèdre et le trapézoèdre étant les formes les plus communes. Ils possèdent le même type de structure dont les cations contenus sont extrêmement variés (Mg, Mn, Fe, Cr, Ca, Al, V, Zr). Les cristaux sont habituellement dodécaédriques avec les faces {110}, trapézoédriques avec les faces {211} ou bien présentent la combinaison de ces deux formes. Les formes cubiques et octaédriques sont

C. Bevilacqua

◀ **Forstérite** *dans un bloc rejeté par le Vésuve (Londres, British Museum).*

rares. Le grenat peut être massif, grossièrement lamellaire ou en tables épaisses. Quelquefois compact ou cryptocristallin, il est également fréquent en grains irréguliers inclus dans les roches.

Propriétés. Dureté : 6 ½ à 7 ½; densité : 3,19 à 4,3 (variant avec la composition). Cassure conchoïdale à inégale; fragile, quelquefois friable pour les variétés massives, grenues. Transparent à subtransparent; éclat vitreux à résineux vif. Couleur très variable suivant la composition chimique.

Pyrope, $Mg_3Al_2[SiO_4]_3$ - cubique

Le pyrope est une variété de grenat souvent employée comme gemme quand elle est parfaitement transparente.

Propriétés. Dureté : 7 ¼; densité : 3,51 à 3,80; indices de réfraction : 1,705 à 1,745 (variété ferrifère); couleur rouge foncé à presque noire.

Gisements. Le pyrope est associé au diamant et au diopside chromifère dans les kimberlites d'Afrique du Sud. Le gisement de Trébénice (Bohême) est exploité depuis plusieurs siècles pour les pyropes utilisables en bijouterie.

Almandin, $Fe_3Al_2[SiO_4]_3$ - cubique

Cette variété est également utilisée en bijouterie quand elle est transparente. Les cristaux peuvent dépasser 20 cm de diamètre.

Propriétés. Dureté : 7 ½; densité : 3,9 à 4,2; indices de réfraction : 1,81 à 1,76 (variété magnésienne); une série existant avec le pyrope, les propriétés varient avec la teneur en magnésium. En général la couleur est rouge brunâtre translucide à subtranslucide ou noire; quand l'almandin est transparent, il possède une très belle couleur rouge profond.

Gisements. On trouve ce minéral dans les schistes cristallins et les gneiss. De belles pièces de collection viennent de Zillertal (Tyrol, Autriche), Falun (Suède), Fort Wrangel (Alaska). De très grands cristaux ont été trouvés à Ampandramaika (Mongoky, Madagascar). Les variétés gemmes viennent de l'Inde, de Ceylan et du Brésil.

Spessartine, $Mn_3Al_2[SiO_4]_3$ - cubique

Les cristaux de spessartine peuvent atteindre 10 cm.

Propriétés. Dureté : 7; densité : 4,18; indice de réfraction : 1,80; couleur rouge hyacinthe très foncé avec quelquefois une nuance de violet, ou rouge brunâtre.

Gisements. Ce grenat se rencontre dans les roches acides, granites et pegmatites granitiques, quartzites, etc. Il a été trouvé pour la première fois à Spessart (Bavière); les meilleurs cristaux viennent d'Antsirabé (Madagascar), où il en existe des exemplaires suffisamment transparents pour être taillés comme gemmes.

Grossulaire, $Ca_3Al_2[SiO_4]_3$ - cubique

La grossulaire forme des cristaux dodécaédriques ou des masses (parfois employées à la fabrication de gemmes gravées comme le jade quand elles sont très vertes).

Propriétés. Dureté : 7 ¼; densité : 3,53; indice de réfraction : 1,735. La couleur du grossulaire est très variable : elle peut être incolore à blanche, vert pâle, ambre et jaune miel, jaune brunâtre, rouge-rose ou encore (mais très rarement) vert émeraude (couleur due à la présence de chrome).

Gisements. Ce minéral se rencontre dans les serpentines et les calcaires métamorphiques. De beaux cristaux viennent de la Vilui (Yakutsk, Sibérie), de Xalostoc (Mexique), d'Asbestos (Québec) et du Val d'Ala (Piémont), en association avec le diopside transparent et la vésuvianite.

Andradite, $Ca_3Fe_2[SiO_4]_3$ - cubique

L'andradite est le grenat le plus commun, mais sa belle variété limpide vert vif est rare; elle possède une très forte dispersion qui la fait rechercher comme gemme : le *démantoïde,* taillé à facette, jette des feux comme le diamant.

Propriétés. Dureté : 6 ½; densité : 3,75; indice de réfraction : 1,895. Couleurs variées : jaune verdâtre ou jaune topaze, vert pomme à vert émeraude, rouge brunâtre, jaune brunâtre, vert grisâtre ou vert foncé et très souvent brun, noir grisâtre, noir.

Gisements. C'est un grenat typique des gîtes formés par métamorphisme de contact. Les belles pièces que l'on peut voir dans les collections viennent de Moravicza (Roumanie). La variété jaune (*topazolite*) se rencontre au Val d'Ala (Piémont). Les démantoïdes gemmes proviennent de Nijni-Taghil (Oural) et du Val Malenco (Italie).

Uvarovite, $Ca_3Cr_2[SiO_4]_3$ - cubique

Les cristaux de ce grenat chromifère ne dépassent jamais plus de 3 cm de diamètre.

Propriétés. Dureté : 7 ½; densité : 3,41 à 3,52; indice de réfraction : 1,870; couleur vert émeraude.

Gisements. Ce grenat est associé à du diopside chromifère dans des gîtes de fer chromifère, les serpentinites ou les calcaires métamorphiques. Les cristaux transparents viennent de Zlatooust (Oural); les plus gros dodécaèdres ont été trouvés à Otokumpu (Finlande).

Zircon, $Zr[SiO_4]$ - quadratique

Le zircon se présente presque uniquement en cristaux isolés, généralement en prismes courts, parfois en bipyramides ou encore sous la combinaison de ces deux formes, avec les faces (100), (011), (101), (110), (111), (331), etc. Le zircon se rencontre parfois en grains irréguliers.

▼ *Formes de cristallisation des grenats (dodécaèdre icositétraèdre).*

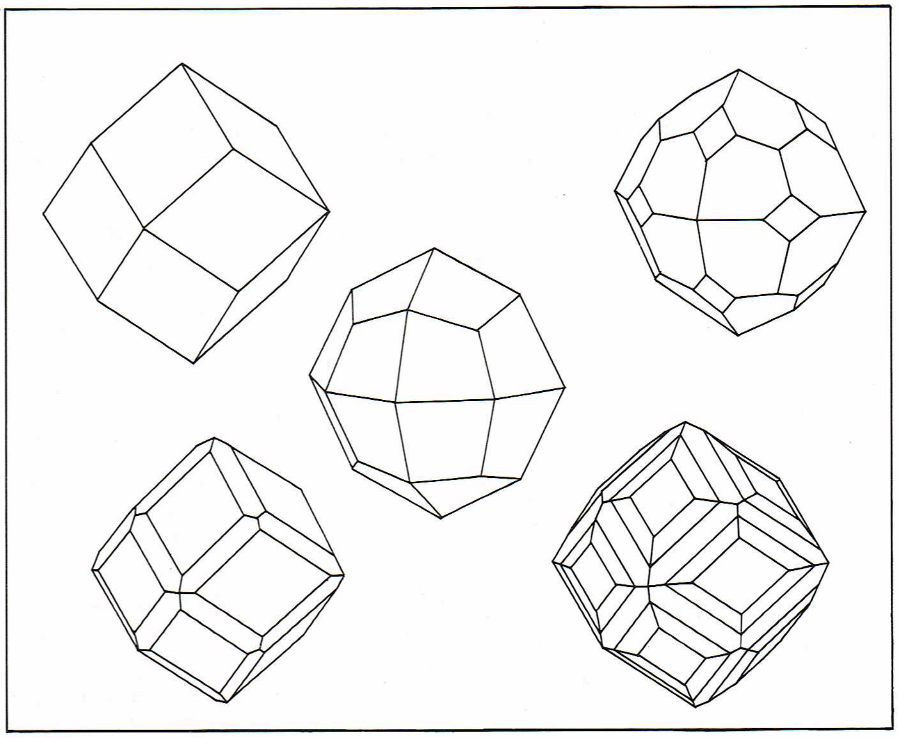

I.G.D.A.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Propriétés. Dureté : 7 ½ ; densité : 4,68 à 4,70 ; indices de réfraction : np = 1,923 à 1,960, ng = 1,968 à 2,015 ; habituellement translucide ou opaque, mais transparent dans quelques cas ; éclat adamantin de différentes nuances de brun ou aussi incolore, gris-vert, rouge ; la couleur bleue est obtenue par chauffage. Utilisé comme gemme, il est assez fragile, sa cassure est conchoïdale.

Gisements. C'est le plus abondant minerai de zirconium ; il est répandu comme minéral accessoire dans les roches éruptives acides, les syénites néphéliniques et les schistes cristallins. Les plus gros cristaux proviennent des basaltes et des calcaires cristallins. Ampangabé (Madagascar) et Mud Tank, Alice Spring (Australie) ont fourni les plus gros exemplaires connus, conservés au Muséum national d'histoire naturelle de Paris.

Thorite, Th[SiO_4] - quadratique

Ce minéral appartient au même groupe structural que le zircon. Ses cristaux, rares, sont prismatiques, bipyramidés ou bien présentent la combinaison des deux formes.

Propriétés. Dureté : 4 ½ à 5 ; densité : 4,5 à 5 (la variété *orangite*, de couleur orange jaune, a une densité de 5,19 à 5,40) ; indice de réfraction : 1,80 (l'indice varie de 1,68 à 1,72 pour le minéral altéré). Habituellement noir ou brun quand il est hydraté, ou alors jaune-orangé.

Gisements. C'est un minéral des syénites et de leurs pegmatites ; les meilleurs cristaux viennent du Langesundfjord (Norvège) ; la variété *uranothorite* se rencontre à Ambatofotsy (Madagascar).

★ ***Nésosubsilicates***

■ **Ilots [ZO_4] S = 1**

Andalousite, Al_2[O|SiO_4] - orthorhombique

Les cristaux d'andalousite sont souvent pseudoquadratiques avec les faces (110), (001), (101), et parfois avec (111) lorsque les cristaux sont modifiés et aplatis. La variété *chiastolite* des schistes argileux montre à l'intérieur de ses cristaux un arrangement d'impuretés carbonées qui forment une croix régulière et colorée sur les sections perpendiculaires à l'axe d'allongement du cristal.

Propriétés. Dureté : 7 ½ ; densité : 3,15 à 3,20 ; indices de réfraction : np = 1,634, ng = 1,643. Transparente à opaque avec un éclat vitreux. Les variétés très transparentes sont employées comme gemmes ; blanchâtre ou de couleur verte, marron à rouge-brun, rose ou grise. La cassure est irrégulière, le clivage est possible sur (110). Ce minéral montre un fort pléochroïsme (vert et brun-rouge) ; il est parfois utilisé comme gemme.

Gisements. Ce minéral typique du métamorphisme se rencontre dans les schistes argileux, les micaschistes et les gneiss, et parfois dans les filons de pegmatites. Les beaux cristaux transparents (rares) viennent du Minas Gerais (Brésil), les pièces les plus répandues dans les collections étant les chiastolites de Salle de Rohan (Bretagne), de Nadera (Californie) et de Lisens (Tyrol).

Disthène (ou cyanite lorsqu'il est bleu) Al_2[O|SiO_4] - triclinique

Recherché pour la fabrication des réfractaires, le disthène se présente en masses clivables, plus rarement en cristaux prismatiques allongés suivant [001] avec les faces (100), (110) et (010). La macle la plus répandue a {100} comme plan de jonction ; un clivage parfait existe sur (100), un autre moins bon sur (010) ; il existe aussi un plan de séparation parallèle à (001). Le disthène est fragile et flexible.

Propriétés. La dureté varie suivant les faces et leur direction ; elle est de 4 à 5 sur (100) parallèlement à l'allongement du cristal et de 6 à 7 perpendiculairement à cet allongement ; densité : 3,56 à 3,67 ; indices de réfraction : np = 1,717, ng = 1,729. Translucide à transparent ; éclat vitreux (nacré sur le clivage). La couleur est variable : vert vif, gris, noirâtre, bleu ciel (cyanite) à bleu vif, blanchâtre. Les belles qualités transparentes bien colorées se taillent comme gemmes.

Gisements. Ce minéral typique du métamorphisme se rencontre dans les gneiss et les micaschistes. De jolis cristaux bleus associés à la staurolite viennent de Pizzo Forno (Saint-Gothard, Suisse). Les gros cristaux verts à bleus de Sultan Hamud (Kenya) sont répandus

C. Bevilacqua

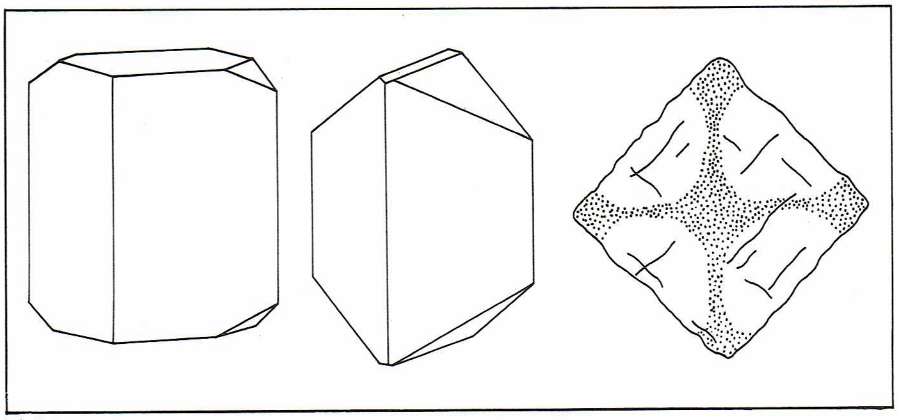

I.G.D.A.

▲ En haut, chiastolite, variété d'andalousite provenant de Bimbowrie, Australie (Londres, British Museum). En bas, formes de cristallisation de l'andalousite et schéma d'une section transversale d'un cristal montrant les inclusions charbonneuses en forme de croix noire.

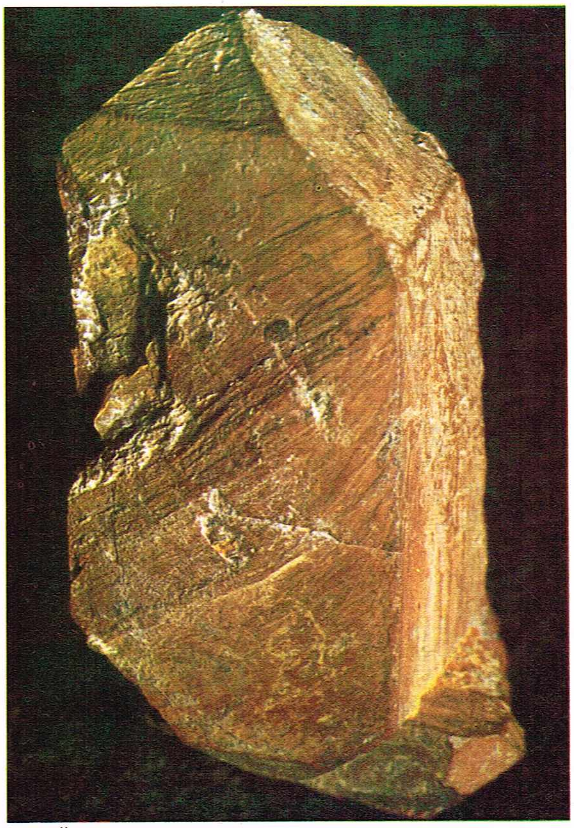

C. Bevilacqua

◀ Rare cristal de thorite d'Arendal, Norvège (Londres, British Museum).

◀ Page ci-contre, combinaison de rhombododécaèdre et icositétraèdre dans un cristal de grossulaire (Milan, musée d'Histoire naturelle).

▶ *A gauche, cristaux allongés de* disthène *bleu (cyanite) et de* staurolite *brune sur schiste à paragonite provenant du Pizzo Forno (Suisse) [Milan, musée d'Histoire naturelle]. A droite, cristal de* staurolite *sur paragonite (Pizzo Forno, Suisse) [Milan, musée d'Histoire naturelle].*

C. Bevilacqua

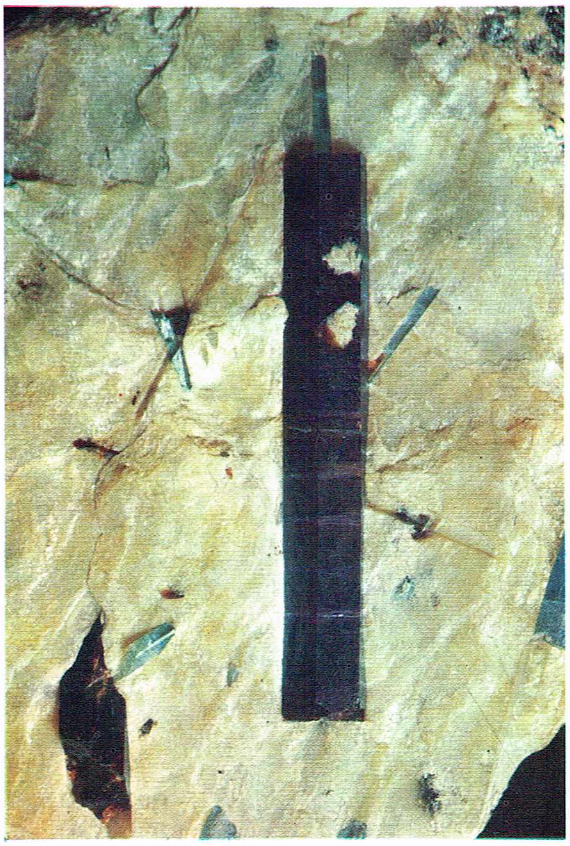

C. Bevilacqua

dans les collections; depuis peu, de grandes masses clivables très bleues viennent du Rio Doce (Minas Gerais, Brésil).

Staurolite, $AlFe_2O_3(OH) \cdot 4Al_2[O|SiO_4]$ - monoclinique

La staurolite, ou staurotide, est bien connue par ses deux types de macle : l'une, dite « croisette », montre deux cristaux interpénétrés à 90°, la seconde, appelée « croix de Saint-André » par les collectionneurs, montre deux cristaux (plus rarement trois) interpénétrés suivant {232} avec un angle proche de 60°. Les cristaux isolés ont les formes simples (110), (001) et (010) avec un allongement suivant [001]. La cassure est irrégulière.

Propriétés. Dureté : 7 à 7 $\frac{1}{2}$; densité : 3,65 à 3,80; indices de réfraction : np = 1,736, ng = 1,746. Rarement transparente (alors taillée comme gemme), translucide à opaque avec des couleurs brun-rouge à brun noirâtre. L'éclat est vitreux et résineux sur la cassure.

Gisements. Ce minéral typique des schistes cristallins dus au métamorphisme régional est associé au disthène, à l'andalousite, aux grenats, à la cordiérite, etc. La staurolite se rencontre en abondance à Coray (Bretagne), en Caroline du Nord (États-Unis) et associée au disthène (variété *cyanite*) au Pizzo Forno (Saint-Gothard, Suisse).

Topaze, $Al_2[SiO_4](F_2, OH_2)$ - orthorhombique

La topaze est très recherchée comme gemme; ses cristaux, souvent bien formés, peuvent atteindre 1 m dans leur plus grande dimension. Leur faciès est varié : prismes allongés biterminés, montrant l'antihémiédrie sur les terminaisons, prismes courts à base souvent clivée (001) avec les faces prismatiques (110), (120), (010) et les troncatures (111), (112), (011), (021), etc., sur la face terminale (001). La topaze est aussi massive (masses laminaires), aciculaire ou grenue. Le clivage (001) est parfait; la cassure est conchoïdale. C'est un minéral pyro-électrique. Il est surtout taillé comme gemme.

Propriétés. La dureté de la topaze définit le degré 8 de l'échelle de Mohs; densité : 3,5 à 3,6; indices de réfraction : np = 1,629, ng = 1,637. Parfaitement transparente à translucide, éclat vitreux à gras; incolore ou jaune pâle à orangée, bleue, verte, rose à saumon pâle ou encore brunâtre. Certaines variétés jaune-orangé deviennent rose violacé par chauffage (topaze brûlée).

Gisements. On rencontre les topazes dans les roches éruptives acides, surtout dans les pegmatites, associées à la tourmaline, au quartz, à la muscovite et à l'albite. Par pneumatolyse, elles se sont formées aussi dans des schistes ou des gneiss encaissants et elles accompagnent la cassitérite dans les greisens. Les plus gros cristaux connus viennent du Minas Gerais (Brésil), les variétés jaune-orangé les plus colorées étant activement exploitées comme gemmes près d'Ouro Prêto. De l'Oural provenaient autrefois de splendides cristaux bleus très appréciés des collectionneurs. Quelques gîtes sibériens produisent encore de gros cristaux, souvent très givreux.

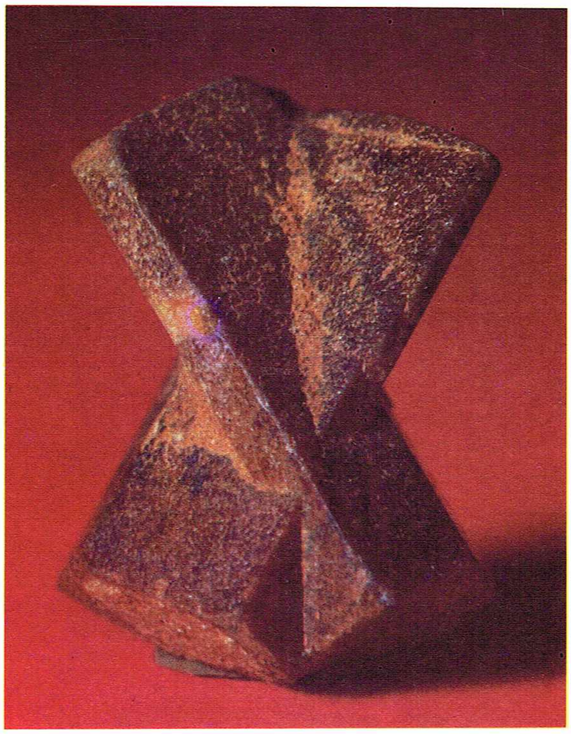

C. Bevilacqua

▶ *Deux cristaux de* staurolite *maclés (Antsirabé, Madagascar) [Milan, musée d'Histoire naturelle].*

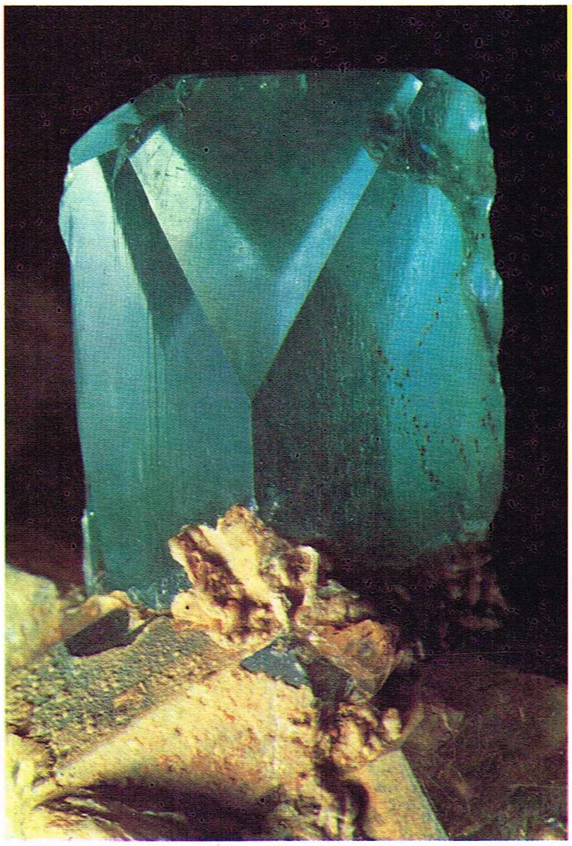

C. Bevilacqua

◀ ***Cristal de* topaze *bleue d'Alabashka, Sibérie (Londres, British Museum).***

Gisements. On rencontre ce minéral au Vésuve, à Pargas (Finlande) dans des calcaires cristallins, et dans la mine de magnétite de Tilly Foster Mine (New York, U.S.A.) associé à des grenats rouges et à de beaux cristaux de magnétite.

Humite, $Mg_7[SiO_4]_3(OH, F)_2$ - orthorhombique

L'humite se présente en petites masses cristallines ou en cristaux isolés avec les faces (011), (001), (013), (015) et (103), (210), (216), etc. Les cristaux du Vésuve sont très riches en formes.

Propriétés. Dureté : 6 à 6 ½; densité : 3,1 à 3,2; indices de réfraction : np = 1,56 à 1,62, ng = 1,58 à 1,65. Transparente à translucide. Couleur jaune miel à jaune-brun; éclat résineux. Fragile.

Gisements. Ce minéral se rencontre dans les calcaires cristallins ou dans les blocs rejetés par le Vésuve ainsi qu'à Tilly Foster (New York); il est associé au méroxène, à la vésuvianite, etc.

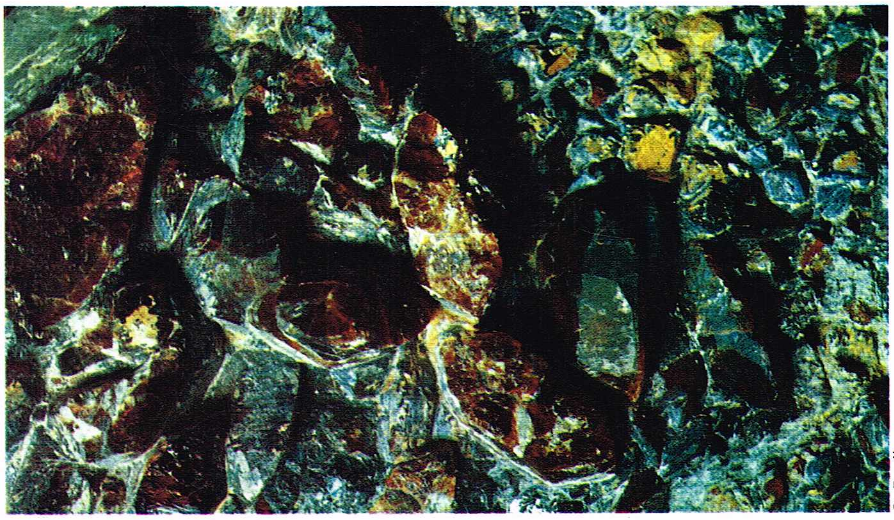

C. Bevilacqua

▲ **Chondrodite *cristallisée de Tilly Foster, New York (Londres, British Museum).***

Saphirine, $Mg_2Al_4[O_6|SiO_4]$ - monoclinique

Les cristaux de saphirine sont tabulaires sur {010} avec les faces (110), (100), (011), (012), (102), et sont généralement indistincts. Habituellement, la saphirine est en grains disséminés ou en petites masses granuleuses. Elle ne présente pas de clivage; la cassure est inégale.

Propriétés. Dureté : 7 ½; densité : 3,42 à 3,48; indices de réfraction : np = 1,704, ng = 1,710. Couleur bleu pâle à bleu foncé ou verte.

Gisements. Ce minéral rare se rencontre en très beaux cristaux à Blinkwatter (Transvaal) et à Anjamiary, Androy (Madagascar).

● ***Groupe des humites***

Les minéraux de ce groupe de fluosilicates de magnésium **(norbergite, chondrodite, humite** et **clinohumite)** ont des propriétés physiques assez proches; ils syncristallisent en lamelles parallèles et ont une couleur jaune miel à brune ou rouge-brun. Leur mode de gisement est identique. Les cristaux sont complexes, de formes variées et souvent maclés. Habituellement, ces minéraux sont en grains isolés ou massifs.

Norbergite, $Mg_3[SiO_4](OH, F)_2$ - orthorhombique

La norbergite se rencontre le plus souvent en grains arrondis fragiles à cassure inégale.

Propriétés. Dureté : 6 à 6 ½; densité : 3,1 à 3,2; indices de réfraction : np = 1,563, ng = 1,590; couleur orangé-brun clair avec un éclat résineux.

Gisements. Les localités classiques sont Norberg (Vastmanland, Suède) et Franklin (New Jersey, États-Unis).

Chondrodite, $Mg_5[SiO_4]_2(OH, F)_2$ - monoclinique

Les cristaux de la chondrodite peuvent dépasser 5 cm; ils sont très riches de faces et particulièrement bien formés, à faces lisses avec (010), (001), (101), (111), (121), (012), ($\bar{1}$03), (125), (123), (12$\bar{1}$), etc.

Propriétés. Dureté : 6 à 6 ½; densité : 3,1 à 3,2; indices de réfraction : np = 1,59 à 1,60, ng = 1,62 à 1,64. Translucide, couleur rouge-brun à brun-rouge; éclat résineux. Fragile.

Clinohumite, $Mg_7[SiO_4]_4(OH, F)_2$ - monoclinique

La clinohumite se présente en cristaux indistincts centimétriques ou en masses grenues à cassure inégale. Certains petits cristaux sont surchargés de facettes (001), (101), (103), (123), (1$\bar{1}$2), (0$\bar{1}$4), (0$\bar{1}$6), (0$\bar{1}$5), etc.

Propriétés. Dureté : 6 à 6 ½; densité : 3,1 à 3,2; indices de réfraction : np = 1,62 à 1,66, ng = 1,65 à 1,69. Translucide à opaque; de couleur brun noisette à ocre jaune; éclat résineux.

Gisements. On trouve la clinohumite associée à la vésuvianite, au méroxène, à la sodalite dans les blocs éjectés par le Vésuve et dans des calcaires cristallins. Les localités classiques de ce minéral sont le Monte Somma (Vésuve), Brewster et Warwick (États-Unis).

Chapmanite, $SbFe_2[SiO_4]_2(OH)$ - orthorhombique

Massive ou microcristalline, la chapmanite présente une cassure conchoïdale lorsqu'elle est intimement associée à de l'opale.

Propriétés. Dureté : 3 à 5 suivant la proportion d'opale intimement associée; densité : 3,58 à 3,75; indices de réfraction : np = 1,85, ng = 1,96. Translucide à opaque; la couleur est vert clair.

Gisements. En France, ce minéral rare s'est rencontré à La Bessade (Haute-Loire).

Braunite, $Mn_7[O_8|SiO_4]$ - quadratique

Les cristaux sont peu fréquents, souvent en doubles pyramides à base carrée, pseudo-octaédriques avec les faces (101) et (011). Ils ne dépassent que très rarement 3 cm. Un clivage existe sur {112}.

Propriétés. Dureté : 6 à 6 ½; densité : 4,75 à 4,82. Opaque, avec éclat métallique noir d'acier. Cassure irrégulière. Elle est faiblement magnétique.

Gisements. C'est un minéral des gîtes de manganèse (gîtes pyrométasomatiques et gîtes de métamorphisme de contact), associé à l'épidote, la polianite. Les meilleures pièces de collection viennent de Kacharvaki (Inde) et de Langban (Suède).

Titanite ou sphène, $CaTi[O|SiO_4]$ - monoclinique

Le faciès des cristaux de titanite est varié : cristaux trapus avec les faces (001), (110) et (111) ; cristaux tabulaires suivant {102}, {001}, allongés suivant [112] ou montrant les faces (100), (001), (102), (111), (021), etc. La macle en « gouttière » parallèlement à [100] est fréquente. Le clivage sur (110) est difficile.

Propriétés. Dureté : 5 à 5 ½ ; densité : 3,4 à 3,56 ; indices de réfraction : np = 1,900, ng = 2,034 avec une forte dispersion qui fait rechercher les qualités transparentes pour être taillées à facettes. La couleur va du vert au jaune et au brun, du gris-brun au noir, également faiblement teinté presque incolore ou rosé. L'éclat est adamantin. Les pierres taillées ont des « feux » scintillants semblables à ceux des diamants verts.

Gisements. C'est un minéral accessoire des roches magmatiques, rencontré dans les granites, les syénites, les trachytes, les andésites, les pegmatites ainsi que dans les fentes alpines, dans les roches métamorphiques (gneiss, micaschistes). Les plus gros cristaux connus viennent des gîtes métasomatiques de Greenville (Canada) ; on trouve des cristaux gemmes de plus de 10 cm à Madagascar. De beaux groupes cristallisés très recherchés pour les collections viennent aussi de Suisse et du Brésil.

Thaumasite, $Ca_3H_2[CO_3|SO_4|SiO_4]$ - hexagonal

La thaumasite est le plus souvent massive, compacte ou fibreuse, parfois cristalline.

Propriétés. Dureté : 3 ½ (elle durcit par exposition à l'air) ; densité : 1,877 ; indices de réfraction : np = 1,468, ng = 1,507. Couleur blanche.

Gisements. Les pièces que l'on peut voir dans les musées viennent de Paterson (New Jersey).

Cérite, $(Ca, Mg)_2(Tr)_8[SiO_4]_7 \cdot 3H_2O$ - hexagonal

Le terme Tr représente les terres rares cériques. Les cristaux sont rares, la cérite étant habituellement massive ou grenue.

Propriétés. Dureté : 5 ½ ; densité : 4,86 ; indice de réfraction : 1,82. Couleur entre brun et rouge cerise à gris.

Gisements. Ce minéral rare a été rencontré à Bastnaëst (Suède).

Chloritoïde, $Fe_2^{2+}Al_4(OH)_4[O_2(SiO_4)_2]$ - triclinique

La chloritoïde se présente rarement en cristaux tabulaires distincts et de pourtour hexagonal (souvent maclés) ; ces cristaux sont parfois groupés en rosettes. Habituellement, la chloritoïde est massive, grossièrement grenue, les feuillets étant incurvés et fragiles ; on la trouve aussi en fines écailles disséminées dans les roches.

Propriétés. Dureté : 6 ½ ; densité : 3,52 à 3,57 ; indices de réfraction : np = 1,714 à 1,731, ng = 1,728 à 1,740. Éclat un peu perlé sur les faces de clivage ; couleur : gris foncé, gris ou noir verdâtre, noir, grisâtre (vert gazon quand la chloritoïde est en fines écailles).

Gisements. Ce minéral des roches sédimentaires et des schistes cristallins faiblement métamorphiques est aussi formé dans le métamorphisme de contact. On peut citer parmi ses localités : Sverdlovsk (Oural) et Éphèse (Turquie).

Ottrélite, $Mn_2Al_4(OH)_4[O_2|(SiO_4)_2]$ - monoclinique

L'ottrélite est très voisine de la chloritoïde. Ses propriétés sont les mêmes. On la rencontre en abondance à Ottré (Belgique) et à Séviscourt (Ardennes), dans les schistes argileux.

Datolite, $CaB^{[4]}(OH)[SiO_4]$ - monoclinique

Les cristaux, de formes variées, sont souvent équidimensionnels ou prismatiques courts avec les faces (110) et (011) dominantes, et sont quelquefois tabulaires sur (201). Les cristaux sont souvent modifiés (111), (011), (012), etc. La datolite est aussi botryoïdale et globulaire avec une structure grossièrement fibreuse, et quelquefois massive, grenue à compacte et cryptocristalline.

Propriétés. Dureté : 5 à 5 ½ ; densité : 2,9 à 3,0 ; indices de réfraction : np = 1,626, ng = 1,670. Transparente à translucide. Éclat vitreux, rarement subrésineux sur les surfaces de cassure. Couleur blanche, quelquefois grisâtre, vert pâle, jaune-rouge ou améthyste, rarement vert olive ou jaune miel. Elle est fragile ; sa cassure est conchoïdale à inégale.

Gisements. Ce borosilicate de formation secondaire, associé à la calcite, la préhnite et à des zéolites dans les cavités des roches éruptives basiques, se rencontre parfois dans les gneiss, les diorites et la serpentine, plus rarement dans les gisements de magnétite. Les meilleures pièces de collection viennent de Wesfield, dans le Massachusetts, de Quincy Mine, près du lac Supérieur (États-Unis), et de Salzbourg (Autriche).

Gadolinite, $Y_2FeBe_2[O|SiO_4]_2$ - monoclinique

Les cristaux, rares, mais pesant parfois plusieurs kilos, sont souvent prismatiques, rugueux et grossiers. Habituellement, la gadolinite est massive ; elle contient parfois du thorium et des terres rares (cérium, lanthane, didyme, etc.)

Propriétés. Dureté : 6 ½ ; densité : 4 à 4,5 ; indices de réfraction : 1,77 à 1,82. Éclat vitreux à gras noir, noir verdâtre et brun. Elle est fragile ; sa cassure est conchoïdale.

Gisements. La gadolinite est un minéral des pegmatites liées aux granites. Les cristaux qu'on peut voir dans les

▼ *A gauche, cristaux* **de datolite** *provenant de Great Noch, New Jersey (Londres, British Museum). A droite,* **sphène** *(titanite) du Rio Torbo (Val d'Aurine, Italie) [Milan, musée d'Histoire naturelle].*

C. Bevilacqua

C. Bevilacqua

collections viennent de Saltersdalen et d'autres localités norvégiennes.

Mélanocérite, $Na_4Ca_{16}(Y, La)_3(Zr, Ce)_6F_{12}(BO_3)_3[SiO_4]_{12}$ - hexagonal

La mélanocérite est le plus souvent massive et compacte. Ses cristaux sont tabulaires et de forme rhomboédrique.
Propriétés. Dureté : 5 à 6; densité : 4,13; indice de réfraction : 1,73. Couleur brune à noire.
Gisements. Minéral des gîtes syénitiques du Langesundfjord (Norvège) et de la mine de Cardiff, Wilberforce (Ontario, Canada).

Dumortiérite, $(Al, Fe)_7(BO_3)[O_3|SiO_4]_3$ - orthorhombique

Les cristaux, rares, sont prismatiques. Habituellement, la dumortiérite se présente en agrégats fibreux plus ou moins grossiers. Un clivage est distinct sur (100); la macle sur {110} est fréquente.
Propriétés. Dureté : 7; densité : 3,26 à 3,36; indices de réfraction : np = 1,678, ng = 1,689. Transparente à translucide. Éclat vitreux; couleur bleu lavande à bleu verdâtre ou rougeâtre, bleu vif à vert-bleu.
Gisements. On rencontre la dumortiérite dans les pegmatites, les granulites et les gneiss. De très beaux cristaux ont été trouvés à Ambatalahinanahary (Madagascar). Une variété violet-rouge, fibreuse, vient de Dehesa, près de San Diego (Californie).

Kornérupine, $Mg_4Al_6[(O,OH)_2|(SiO_4)_4]BO_4$ - orthorhombique

La kornérupine se présente en agrégats de fibres plus ou moins grossières ressemblant à de la sillimanite ou en cristaux prismatiques (110), (010). Le clivage (110) est assez difficile mais donne des surfaces très planes.
Propriétés. Dureté : 6 ½; densité : 3,273 (la variété prismatique possède une densité de 3,341); indices de réfraction : np = 1,665, ng = 1,677. Incolore à blanc ou brun, ou encore vert de mer parfois limpide, cette dernière variété étant utilisée comme gemme. Éclat vitreux un peu gras.
Gisements. C'est un minéral des schistes cristallins. Les meilleurs cristaux viennent d'Itrongahy et de Begogo (Madagascar).

Grandidiérite, $(Mg, Fe)Al_3(BO_4)[O|SiO_4]$ - orthorhombique

La grandidiérite se présente en cristaux tabulaires allongés, fortement striés verticalement, dont la section basale (100), (010) est souvent convexe.
Propriétés. Dureté : 7 ½; densité : 3; indices de réfraction : np = 1,602, ng = 1,638. Transparente à translucide. Éclat vitreux. Couleur vert bleuâtre. Se clive sur (100) et (010).
Gisements. La grandidiérite est associée au quartz, à l'orthose, à la microcline, à l'almandin, à l'andalousite et à la biotite dans la pegmatite d'Andrahomanana (Madagascar).

● ***Silicates d'uranium***

Les silicates d'uranium groupent : la **cuprosklodowskite**, l'α **et le β uranophane**, la **kasolite**, la **soddyite** et la **boltwoodite**.

Cuprosklodowskite, $CuH_2[UO_2|SiO_4]_2 \cdot 5H_2O$ - monoclinique

Ce minéral se présente en agrégats capillaires, cristaux aciculaires allongés selon [001] avec les faces (100), (010), (110), ou en masses mamelonnées à structure fibreuse. Clivage sur (100) et (010).
Propriétés. Dureté : 4; densité : 3,5; indices de réfraction : np = 1,653, ng = 1,665. Translucide. Couleur vert d'émeraude à vert pâle.
Gisements. C'est un silicate d'uranium associé à d'autres minéraux de formation secondaire dans les zones d'altération des gisements de pechblende. Les meilleures pièces de collection viennent de Kolwesi (Katanga).

α uranophane, ou uranotile α, $CaH_2[UO_2|SiO_4]_2 \cdot 5H_2O$ - monoclinique

Les cristaux sont prismatiques allongés selon [001] et disposés en agrégats radiés. L'uranophane est aussi massif, fibreux et se trouve fréquemment à l'état de mélange dans les « gummites » massives jaune-orangé qui accompagnent souvent la pechblende dans les zones superficielles des gisements.
Propriétés. Dureté : 2 à 3; densité : 3,81 à 3,90; indices de réfraction : np = 1,643, ng = 1,669. Couleur jaune. Se clive parfaitement sur (100). Facilement soluble dans les acides.
Gisements. Ce silicate d'uranium est le résultat de l'altération de la pechblende, il est associé à la renardite et à la kasolite. Il se rencontre fréquemment dans les gisements français d'uranium. Les meilleures pièces de musée viennent de Shinkolobwe (Katanga).

β uranophane, ou uranotile β, $CaH_2[UO_2|SiO_4]_2 \cdot 5H_2O$ - monoclinique

Plus rare que l'α uranophane, ce minéral se présente en petits cristaux prismatiques, dépassant rarement 5 mm de long, avec les faces (100), (001), (103).

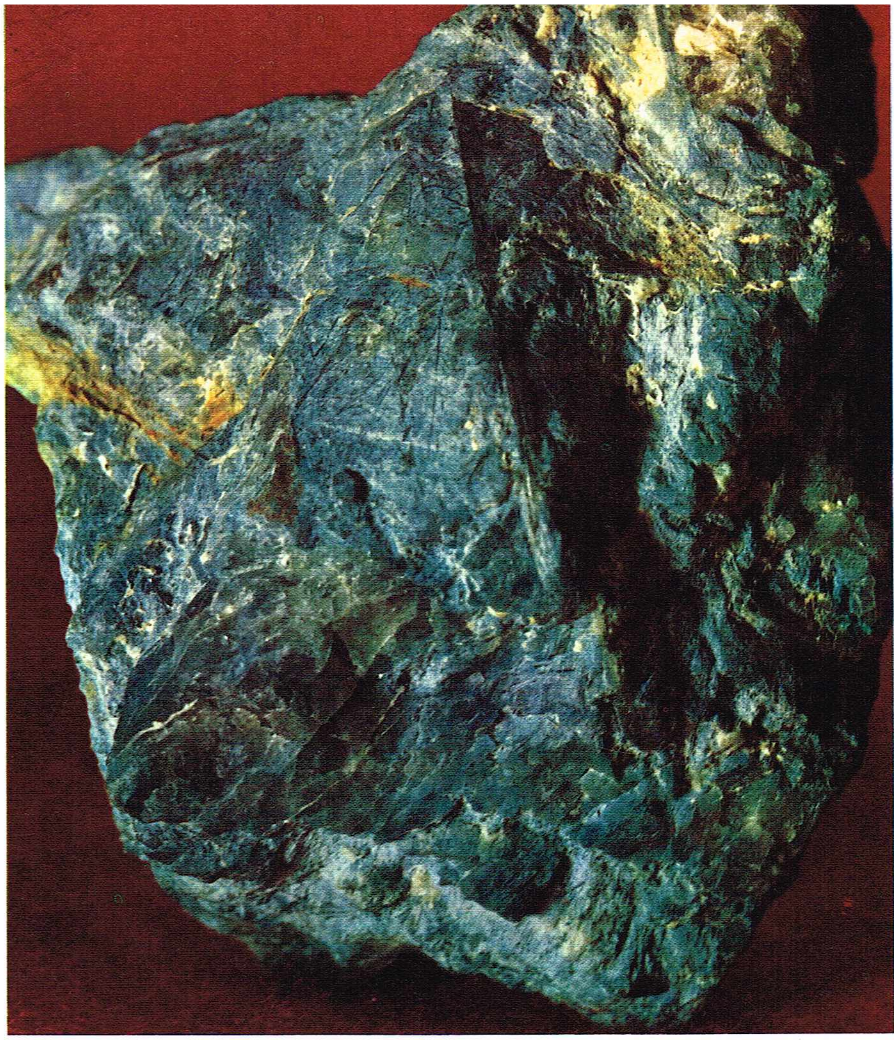

C. Bevilacqua

▲ **Dumortiérite** ***vert-bleu, massive, de Madagascar.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ **Cuprosklodowskite** ***en touffes de cristaux aciculaires, provenant de Musonoi, Zaïre (Paris, École nationale supérieure des mines).***

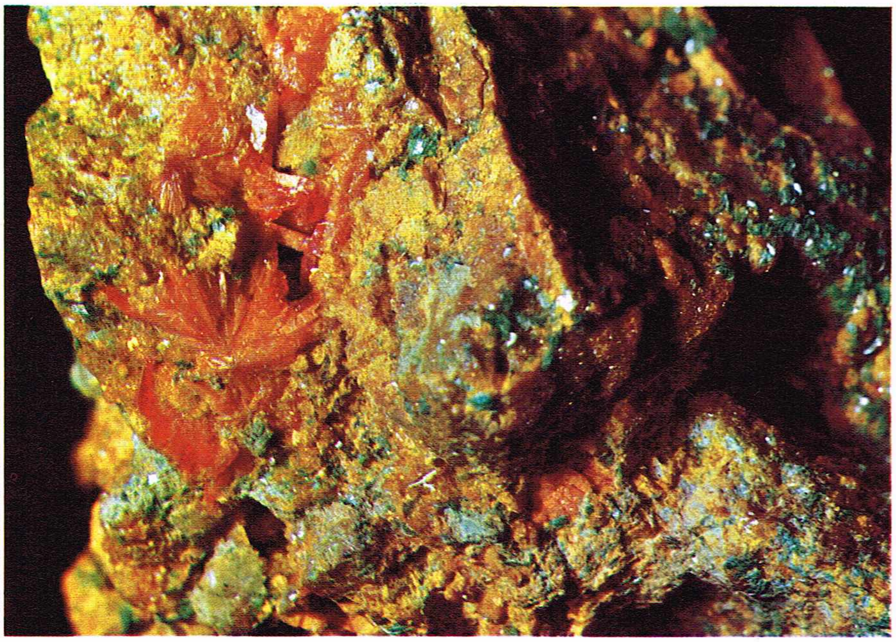

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

C. Bevilacqua

▲ ***A gauche,* kasolite *(rouge) associée à d'autres uranifères provenant du Katanga, Zaïre. Au centre, cristal de* thortvéitite *engagé dans le quartz (Eftevann, Norvège)* [*Londres, British Museum*].**

Propriétés. Dureté : 4 ; densité : 3,98 à 4 ; indices de réfraction : np = 1,668, ng = 1,695. Transparent à translucide. Couleur jaune d'or à jaune brunâtre. Fragile ; clivage net. Facilement soluble dans les acides.

Gisements. Ce minéral est un silicate de formation secondaire des zones d'oxydation de la pechblende. Les meilleurs cristaux connus viennent de Margnac II près de Compreignac (Haute-Vienne).

Kasolite, $Pb_2[UO_2|SiO_4]_2 \cdot 2H_2O$ ***- monoclinique***

Les cristaux, minuscules, sont prismatiques avec les faces (001), (100), (010), (111), et allongés suivant [010]. Mais le plus souvent la kasolite se présente en agrégats fibro-radiés, en rosettes ou en masses microcristallines.

Propriétés. Dureté : 4 à 5 ; densité : 5,85 à 5,96 ; indices de réfraction : np = 1,89, ng = 1,95. Éclat résineux à gras. Couleur jaune à brune. Fragile, clivage net sur (001). Facilement soluble dans les acides.

Gisements. La kasolite est un silicate de formation secondaire des zones d'oxydation des gisements de pechblende. Les meilleures pièces de musée viennent de Shinkolobwe et Swambo (Katanga) et de la mine de La Faye à Grury (Saône-et-Loire).

Soddyite, $(UO_2)_{15}[Si_2O_9]_3 \cdot 18H_2O$ ***- orthorhombique***

On trouve la soddyite en minuscules cristaux prismatiques, les faces du prisme étant striées verticalement, ainsi qu'en minuscules cristaux pyramidaux striés horizontalement ; les faces (001), (110), (111), (113), (114) ont été signalées. Le plus souvent, elle est en agrégats fibro-radiés ou massive. Les clivages {001} et {111} sont bons. Comme les autres silicates d'uranium, la soddyite n'est pas fluorescente aux rayons ultraviolets.

Propriétés. Dureté : 3 à 4 ; densité : 4,631 à 4,70 ; indices de réfraction : np = 1,65, ng = 1,71. Translucide à opaque. Couleur jaune pâle à jaune ambré. Éclat vitreux à résineux.

Gisements. Ce minéral est un silicate de formation secondaire des zones d'oxydation des gisements d'uranium. Swambo (Katanga) a fourni les meilleures pièces exposées dans les musées.

Boltwoodite, $K_2(UO_2)_2(SiO_3)_2(OH)_2 \cdot 5H_2O$ ***- orthorhombique***

Ce nouveau silicate d'uranium se présente en agrégats fibro-radiés de cristaux aciculaires jaune pâle à jaune canari.

Propriétés. Dureté : 3 ½ à 4 ; densité : 3,6 ; indices de réfraction : np = 1,67, ng = 1,70.

Gisements. Les meilleures pièces de collection viennent de Rossing (Namibie).

★ ***Sorosilicates***

■ **Doubles îlots** $[Z_2O_7]$ **S = 1,25**

Thortvéitite, $Sc_2[Si_2O_7]$ ***- monoclinique***

Ce minéral rare se présente en cristaux prismatiques allongés selon [001] et souvent maclés sur {110}. Il contient en plus du scandium, du hafnium et du zirconium en quantités non négligeables. C'est le meilleur minerai de scandium, métal très recherché pour l'industrie nucléaire.

Propriétés. Dureté : 6 à 7 ; densité : 3,57 ; indices de réfraction : np = 1,756, ng = 1,809. Couleur : vert grisâtre à noire.

Gisements. Les cristaux de thortvéitite viennent des pegmatites de Béfanamo (Madagascar) et d'Iveland (Norvège).

Thalénite, $Y_2[Si_2O_7]$ ***- monoclinique***

La thalénite se présente en cristaux monocliniques prismatiques à tabulaires.

Propriétés. Dureté : 6 ½ ; densité : 4,2 ; indices de réfraction : np = 1,731, ng = 1,744. Couleur rouge chair à brune.

Gisements. La thalénite a été trouvée dans les pegmatites alcalines d'Osterby (Suède) et de Hundholmen (Norvège).

Barylite, $BaBe_2[Si_2O_7]$ ***- orthorhombique***

Les cristaux de barylite sont orthorhombiques et très plats.

Propriétés. Dureté : 6 à 7 ; densité : 4,0 ; indices de réfraction : np = 1,69, ng = 1,705. Incolore. Elle se clive sur (001) et (100). Ce minéral s'est rencontré au Langbanshyttan (Suède) et à Franklin (New Jersey), gisement connu par ailleurs pour les beaux minéraux qu'il a fournis en abondance : la franklinite, la zincite, la willémite, etc.

Barysilite, $Pb_8Mn[Si_2O_7]_3$ ***- rhomboédrique***

Ce minéral se présente en masses ayant une structure lamellaire courbe.

Propriétés. Dureté : 3 ; densité : 6,10 à 6,70 ; indices de réfraction : np = 2,015, ng = 2,033. Couleur blanche se ternissant quand il est exposé à l'air. Se clive sur (0001).

Gisements. La barysilite est un minéral rare dont les gisements sont les mêmes que ceux de la barylite.

Lawsonite, $CaAl_2(OH)_2[Si_2O_7] \cdot H_2O$ ***- orthorhombique***

Habituellement, les cristaux sont tabulaires ou prismatiques. Ils se maclent sur {110}.

Propriétés. Dureté : 7 à 8 ; densité : 3,09 ; indices de réfraction : np = 1,665, ng = 1,684. Éclat vitreux à

C. Bevilacqua

▲ ***Groupe de cristaux d'ilvaïte** provenant de Rio Marina (île d'Elbe) [Londres, British Museum].*

gras. Incolore, ou bleu pâle à bleu grisâtre. Se clive parfaitement sur (010) et (001).

Gisements. Ce silicate de formation secondaire se rencontre dans les gabbros et les diorites; c'est aussi un minéral accessoire de schistes et de gneiss contenant du glaucophane. Les plus gros cristaux viennent de Tiburon (Californie).

Ilvaïte, $CaFe_3O(OH)[Si_2O_7]$ - orthorhombique

Les cristaux d'ilvaïte sont prismatiques, allongés selon [001] avec les faces du prisme striées verticalement (110), (120), (010) et les terminaisons (111) et (101).

Propriétés. Dureté : 5 ½ à 6; densité : 3,99 à 4,05; indice de réfraction : 1,915. Opaque. Éclat submétallique, noir de fer ou noir grisâtre foncé. Elle est fragile; sa cassure est inégale.

C. Bevilacqua

◀ **Wohlérite** *dans syénite alcaline de Norvège (collection privée).*

Gisements. L'ilvaïte se rencontre dans les skarns, les syénites néphéliniques et les gîtes de fer métasomatiques. Les plus beaux cristaux viennent de Rio Marina (île d'Elbe), où l'ilvaïte est associée à l'hédenbergite vert foncé. De gros cristaux ont été trouvés dans l'île de Sériphos (Grèce).

Cuspidine, $Ca_4[Si_2O_7](F, OH)_2$ - monoclinique

La cuspidine se présente en tout petits cristaux.

Propriétés. Dureté : 5 à 6; densité : 2,8 à 2,9; indices de réfraction : np = 1,590, ng = 1,602. Couleur rouge-rose pâle. Se clive sur (001).

Gisements. On trouve la cuspidine dans les blocs éjectés par le Monte Somma (Vésuve), où elle est associée à la vésuvianite, la néphéline, la sodalite, etc. Elle a été également signalée à Franklin, New Jersey.

Wohlérite, $Ca_2NaZr[Si_2O_7](F, OH, O)_2$ - monoclinique

La wohlérite se présente en cristaux prismatiques ou tabulaires.

Propriétés. Dureté : 5 ½ à 6; densité : 3,42; indices de réfraction : np = 1,70, ng = 1,726. Couleurs jaune et brune. Se clive sur (010).

Gisements. Ce minéral rare a été trouvé dans les syénites néphéliniques de Brevig (Norvège) et des îles de Los (Guinée).

Rinkite, $Na_2Ca(Ca, Ce)_4(Ti, Nb)[Si_2O_7]_2(F, O)_4$ - monoclinique

Les cristaux de ce minéral rare sont prismatiques ou tabulaires sur (100).

Propriétés. Dureté : 5; densité : 3,5; indices de réfraction : np = 1,665, ng = 1,681. Couleur jaune à brune. Ce minéral se clive sur (100).

Gisements. Les échantillons que l'on peut voir dans les musées viennent des syénites du Groenland (Naujakasik et Narsarsuk).

Mosandrite, $(Ca, Na, Y)_3(Ti,Zr,Ce)[Si_2O_7](F, OH, O)_2$ - monoclinique

Les cristaux imparfaits sont prismatiques, généralement allongés selon [001], parfois aplatis, maclés sur (100).

Propriétés. Dureté : 4; densité : 3 à 3,4; indices de réfraction : np = 1,646, ng = 1,658. Faiblement translucide. Éclat vitreux à gras. Couleur brun rougeâtre, brun verdâtre à jaunâtre quand elle est altérée. Cassure inégale.

Gisements. La mosandrite est un minéral rare des pegmatites de syénites néphéliniques du Brevig, Lövö, au Langesundfjord (Norvège), et d'Umptek (Finlande), où elle est associée à l'eudialyte et l'ægyrine, de Saint-Hilaire (Canada) et de la péninsule de Kola (U.R.S.S.).

▶ *Au centre, groupe de cristaux de clinozoïsite d'Amborompotsy, Madagascar.*

Rosenbuschite, $(Ca, Na)_6Zr(Ti, Mn, Nb)[Si_2O_7](F, O)_4$ - triclinique

Les cristaux de rosenbuschite sont prismatiques à aciculaires, toujours très petits. Le plus souvent, la rosenbuschite est massive avec une structure fibro-radiée.

Propriétés. Dureté : 5 à 6; densité : 3,3; indices de réfraction : np = 1,682, ng = 1,711. Translucide; couleur brun-rouge à orangée. Se clive parfaitement sur (100).

Gisements. Ce minéral rare est associé à la mosandrite, la catapléite, la wohlérite dans les pegmatites des syénites néphéliniques du Langesundfjord (Norvège) et de Lovozero (Kola, U.R.S.S.).

Lamprophyllite, $Na_3Sr_2Ti_3[Si_2O_7]_2(O, OH, F)_4$ - orthorhombique

La lamprophyllite se présente en cristaux tabulaires allongés avec un clivage parfait sur (100) ou en agrégats radiés.

Propriétés. Dureté : 2 à 3; densité : 3,45 à 3,52; indices de réfraction : np = 1,75, ng = 1,78. Translucide de couleur brun-rouge à brun-jaune.

Gisements. Ce minéral rare des syénites néphéliniques d'Umptek (Finlande), associé à la mosandrite, l'eudialyte, l'ægyrine et la néphéline, a été signalé dans les pegmatites du Langesundfjord (Norvège) et dans la péninsule de Kola (U.R.S.S.).

Ganomalite, $Pb_6Ca_4[Si_2O_7]_3(OH)_2$ - hexagonal

La ganomalite présente des cristaux prismatiques; elle est aussi massive et grenue.

Propriétés. Dureté : 3; densité : 5,74; indices de réfraction : np = 1,910, ng = 1,945. Incolore à grise.

Gisements. La ganomalite a été rencontrée à Vermland et près de Nordmark, à Jacobsberg (Suède) dans des skarns.

Kentrolite, $Pb_2Mn_2O_2[Si_2O_7]$ - orthorhombique

La kentrolite se présente en cristaux prismatiques minuscules. Le clivage sur (110) est distinct. Elle est aussi massive.

Propriétés. Dureté : 5; densité : 6,19; indices de réfraction : np = 2,10, ng = 2,31. Couleur brun rougeâtre foncé et noire en surface.

Gisements. La kentrolite est associée à la calcite et à la willémite, à Franklin (New Jersey), ainsi qu'à des minerais de manganèse à Jacobsberg et à Langban (Suède).

Chevkinite, ou tscheffkinite, $(CeLa)_2Ti_2O_4[Si_2O_7]$ - monoclinique

La chevkinite est habituellement massive, amorphe. A Madagascar, on la trouve en cristaux pseudo-orthorhombiques atteignant 10 cm.

Propriétés. Dureté : 5 à 5 ½; densité : 4,5; indices de réfraction : 1,63 à 1,97. Couleur noir de velours à brune. Opaque; éclat résineux.

Gisements. C'est un minéral des roches granitiques et des pegmatites syénitiques. Sa localité la plus classique est Ambatofinandrahana (Madagascar). Dans la péninsule de Kola (U.R.S.S.), on l'a rencontrée comme minéral accessoire dans des granites alcalins et des pegmatites de syénites.

▼ *Agrégats de rosenbuschite dans syénite alcaline de Norvège (collection privée).*

C. Bevilacqua

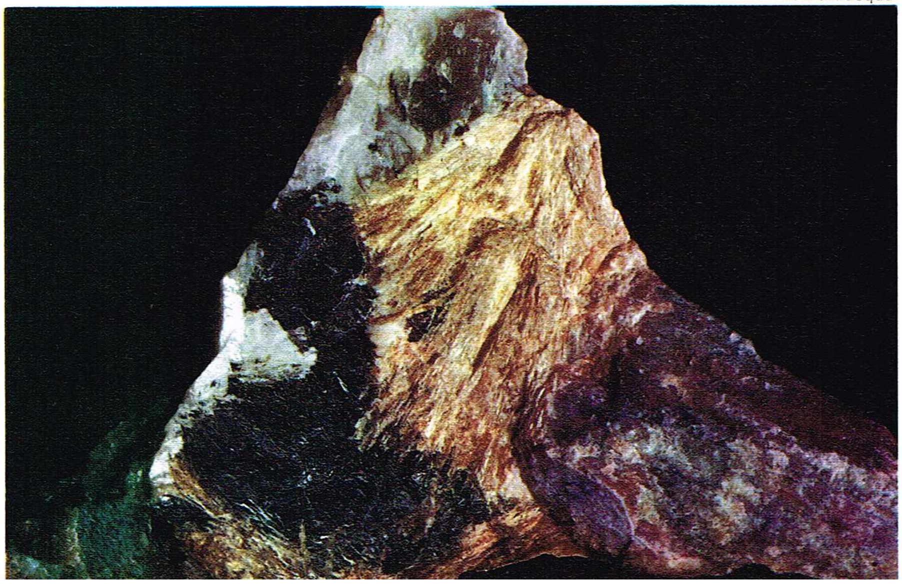

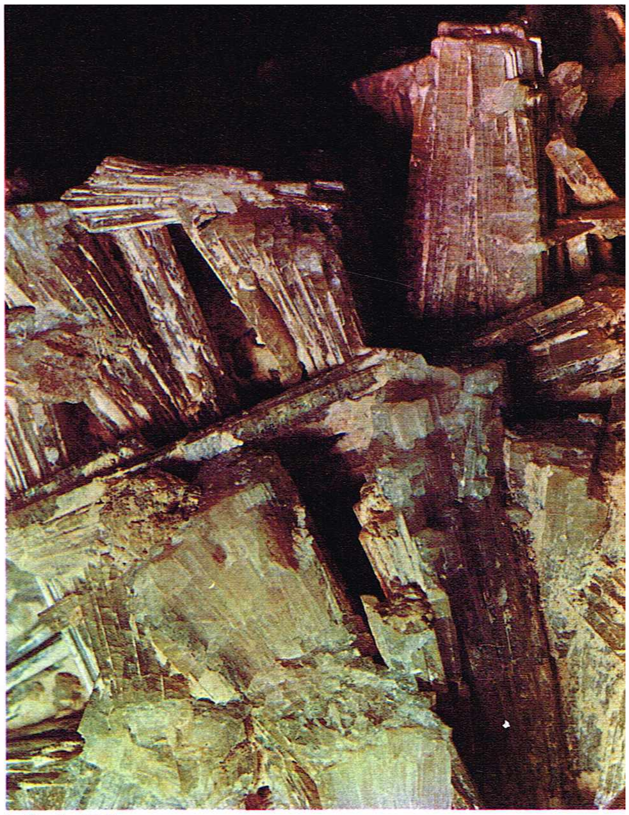

C. Bevilacqua

■ Ilots mixtes $[Z_4]$ et $[Z_2O_7]$

Clinozoïsite, $Ca_2Al_3O[SiO_4][Si_2O_7](OH)$ - monoclinique

La clinozoïsite forme une série continue avec l'épidote. Ses cristaux, semblables à ceux de l'épidote, sont prismatiques allongés selon l'axe [010] avec les faces du prisme striées dans la direction de l'allongement. La clinozoïsite se présente aussi en fibres grossières et en masses grenues. Le clivage est parfait sur (001).

Propriétés. Dureté : 6 ½; densité : 3,20 à 3,35; indices de réfraction : np = 1,724, ng = 1,734. Transparente à translucide. Éclat vitreux, incolore, blanc grisâtre, vert ou rose.

Gisements. C'est un minéral des roches métamorphiques. Les plus beaux groupes de cristaux (bicolores vert et rose) proviennent de Volonandrongo (Madagascar).

Épidote, $Ca_2(Fe, Al)Al_2O[SiO_4][Si_2O_7](OH)$ - monoclinique

Les cristaux d'épidote sont habituellement prismatiques allongés selon [010], avec les faces du prisme bien développées et striées parallèlement à l'axe *b* (faces : (001), (100), (101), (011), (201), ($\bar{1}11$), etc.). Les cristaux sont parfois aciculaires. Elle est aussi en fibres divergentes ou parallèles, en grains de tailles variées, quelquefois finement grenue, ou encore en masses. Elle se clive parfaitement sur (001). Le plan de macle {100} est commun.

Propriétés. Dureté : 6 à 7; densité : 3,25 à 3,50; indices de réfraction : np = 1,728, ng = 1,768. Transparente à opaque, généralement subtranslucide. Éclat vitreux, inclinant à perlé ou résineux sur la face de clivage. Couleur vert pistache ou vert jaunâtre à vert brunâtre, noir verdâtre et noire, quelquefois rouge clair et jaune. Elle est fragile; sa cassure est inégale.

Gisements. Les gisements sont très variés. Les plus belles pièces de collection ont été découvertes dans les fissures et les cavités des roches métamorphiques de contact des skarns, des micaschistes, des gneiss, des serpentines, plus rarement dans des granites. L'épidote résulte aussi de l'altération de minéraux divers : l'augite, la biotite, le grenat, l'hornblende, etc. Les plus beaux cristaux viennent du Knappenwald (Autriche), de l'île Prince of Wales (Alaska). De beaux exemplaires ont été trouvés au Monte Acuto (Piémont) et au Cornillon, dans l'Oisans (Isère), où elle est associée à l'axinite, l'actinote, la chlorite, au feldspath et au quartz.

Piémontite, $Ca_2(Mn, Fe)Al_2O[SiO_4][Si_2O_7](OH)$ - monoclinique

La piémontite est une épidote manganésifère. Elle se présente parfois en prismes fortement allongés et striés

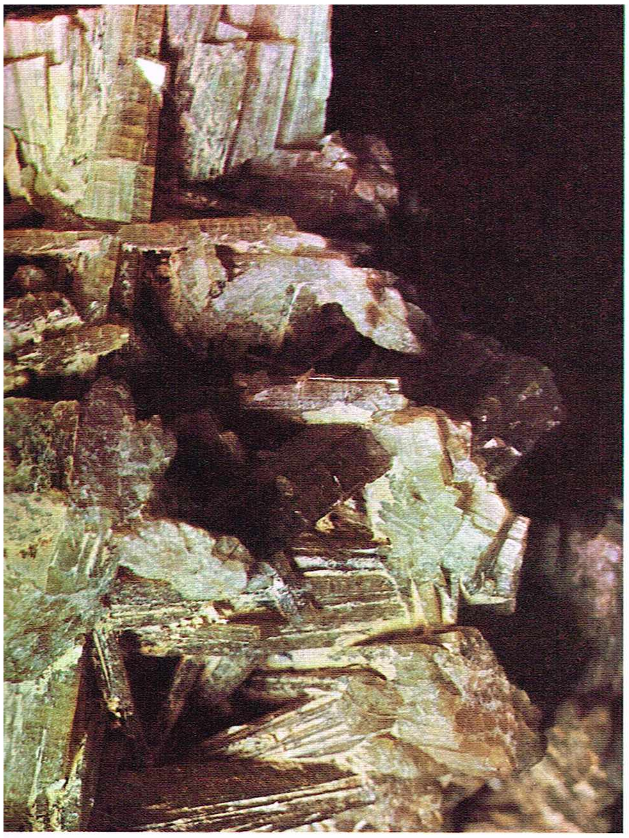

C. Dani

ou en cristaux aciculaires et le plus souvent en agrégats lamellaires.

Propriétés. Dureté : 6 ½; densité : 3,40; indice de réfraction variant entre 1,73 et 1,82. Opaque ou faiblement translucide; éclat vitreux à terne; couleur brun-rouge ou rouge cerise plus ou moins foncé. Elle est fragile.

Gisements. C'est un minéral peu fréquent des schistes cristallins et des gisements de manganèse. Les meilleures pièces de collection proviennent de Saint-Marcel (Piémont, Italie), de l'île de Groix (Morbihan) et de Jacobsberg (Suède).

Allanite, ou orthite $(Ca, Ce)_2Fe_2Al_2O[SiO_4][Si_2O_7](OH)$ - *monoclinique*

Les cristaux ressemblent habituellement à ceux de l'épidote; ils sont souvent tabulaires sur (100) ou allongés, fins et aciculaires selon [010]. Mais généralement l'allanite est massive ou en grains inclus dans les roches. Clivages observés sur (100) et (001). L'allanite contient des métaux, des terres rares et de petites proportions d'uranium et de thorium.

Propriétés. Dureté : 5 ½ à 6; densité : 3 à 4,2; indice de réfraction très variable : entre 1,64 et 1,80. Subtranslucide à opaque; éclat submétallique vitreux ou résineux; couleur brune, brun rougeâtre à noire. Elle est fragile; sa cassure est inégale à subconchoïdale. Légèrement radio-active.

Gisements. Les gisements d'allanite sont variés : granites, syénites (et leurs pegmatites), diorites, gneiss, amphibolites, calcaires cristallins, roches volcaniques récentes, etc. De grands cristaux ont été signalés dans l'Ontario (Canada), à Kragerö et Hiterö (Norvège). La variété *ouralorthite* vient de Miask (mont Ilmen, Oural).

Zoïzite, $Ca_2Al_3O[SiO_4][Si_2O_7](OH)$ - *orthorhombique*

Les cristaux sont prismatiques selon [010], profondément striés ou cannelés verticalement et rarement terminés distinctement. La zoïzite est aussi massive, grossièrement fibreuse à compacte.

Propriétés. Dureté : 6 à 6 ½; densité : 3,25 à 3,37; indices de réfraction : np = 1,700, ng = 1,706. Translucide à opaque. Éclat vitreux et perlé sur la face de clivage. Couleur blanc grisâtre, gris jaunâtre, brunâtre, vert pomme, ou rose. Elle est fragile; sa cassure est inégale à imparfaitement conchoïdale. Elle se clive parfaitement sur (010).

Gisements. C'est un minéral de métamorphisme des amphibolites, éclogites et schistes cristallins riches en hornblende. De très beaux cristaux de qualité gemme ayant une couleur grisâtre bleuté (ils deviennent bleu foncé après chauffage) ont été trouvés en Tanzanie. La variété rose (thulite) provient de Lexwiken (Norvège) et d'Okanogan Co. (Washington, États-Unis).

Pumpellyite, $Ca_2(Mg, Fe, Mn, Al)(Al, Fe, Ti)_2[SiO_4][Si_2O_7](OH, H_2O)_2$ - *monoclinique*

La pumpellyite se présente en minuscules lamelles étroites, aplaties sur (001) et souvent maclées, et aussi en croûtes fibreuses.

Propriétés. Dureté : 5 ½ à 6; densité : 3,2; indices de réfraction : np = 1,700, ng = 1,718. Couleur vert bleuâtre à vert foncé. Ce minéral se clive bien sur (001).

Gisements. La pumpellyite se rencontre dans différents types de roches (traps, schistes à glaucophane, etc.). Les plus belles pièces exposées dans les musées viennent de Groppaggi, près de Gênes (Italie).

Vésuvianite, ou idocrase, $Ca_{10}(Mg, Fe)_2Al_4[SiO_4]_5[Si_2O_7]_2(OH)_4$ - *quadratique*

Les cristaux sont généralement prismatiques, avec les formes {110} et {100} prédominantes et striées verticalement, ou bien pyramidaux avec les formes {111} et

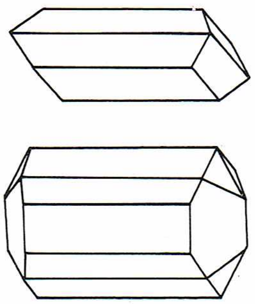

I.G.D.A.

▲ *En haut, groupe de cristaux d'épidote provenant du Val d'Antrone (Piémont). En bas, représentation schématique de deux formes de cristallisation de l'épidote.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◄▼ Allanite *cristallisée de l'Ontario (Londres, British Museum). Ci-dessous, forme de cristallisation de l'*allanite.

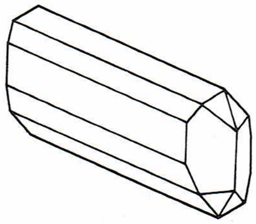

I.G.D.A.

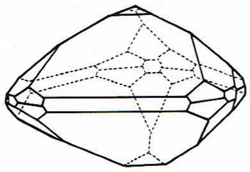

I.G.D.A.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲▶ *Ci-dessus, forme de cristallisation de la* bénitoïde ; *à droite, cristaux de* neptunite *(noire) et de* bénitoïde *(bleue) provenant de San Benito, Californie (Milan, musée d'Histoire naturelle).*

▼ *A gauche,* axinite *cristallisée du Bourg-d'Oisans, Dauphiné. A droite, beau cristal prismatique d'*idocrase *(vésuvianite) d'Ariccia, Rome.*

{001}. Certains cristaux présentent un développement plus complexe : (331), (210), (120), (112), (221), etc. Les cristaux sont fréquents, mais les agrégats grossièrement fibreux et striés sont plus communs. Ce minéral est aussi massif ou grenu.

Propriétés. Dureté : 6 ½ ; densité : 3,35 à 3,45 ; indices de réfraction : np = 1,701, ng = 1,736. Subtransparente à faiblement translucide ; éclat vitreux inclinant souvent à résineux ; couleur brune à verte fréquemment brillante et claire, parfois jaune soufre et bleu pâle. Elle est fragile ; sa cassure est subconchoïdale à inégale. La vésuvianite est parfois taillée en gemme.

Gisements. Ce minéral des roches métamorphiques et des gîtes de contact se rencontre dans les calcaires cristallins de contact, les chloritoschistes, les gneiss et les serpentines. Elle est associée au grossulaire ou au diopside, au clinochlore, etc. Les plus beaux cristaux transparents de vésuvianite ont été trouvés au Val d'Ala (Piémont), au Monte Somma (Vésuve) ; de gros cristaux viennent de la Wilui (Sibérie) et de Magnet Cove (Arkansas).

Zunyite, $Al_{12}Cl[AlO_4][Si_5O_{16}](OH, F)_{18}$ - cubique

La zunyite se présente en cristaux tétraédriques minuscules (petits triangles aplatis), souvent maclés sur {111}.

Propriétés. Dureté : 7 ; densité : 2,875 à 3 ; indice de réfraction : 1,60. Incolore à translucide, blanche à grise avec un éclat vitreux. Elle se rencontre dans les schistes alumineux, à Postmasburg (Afrique du Sud) et à Beni-Embarek (Algérie). A Zuni Mine, San Juan Contez (États-Unis), elle est associée à la guitermanite.

★ *Cyclosilicates*

■ 3 unités $[Z_3O_9]$ S = 1,50

Bénitoïde, $BaTi[Si_3O_9]$ - rhomboédrique

Les cristaux de bénitoïde dépassent rarement 4 cm ; ils sont rhomboédriques avec la forme $\{10\bar{1}1\}$ dominante et un contour triangulaire très développé.

Propriétés. Dureté : 6 ½ à 7 ; densité : 3,6 ; indices de réfraction : np = 1,757, ng = 1,804. Transparente à translucide ; couleur bleu saphir à bleu lumineux, ou incolore. La cassure est inégale. Les cristaux transparents sont taillés comme gemmes.

Gisements. Très recherchée des collectionneurs, la bénitoïde se rencontre en beaux cristaux à San Benito (Californie), associée à la neptunite et à la natrolite dans des serpentines.

Catapléite, $Na_2Zr[Si_3O_9]\cdot 2H_2O$ - hexagonal

Les cristaux, très rares, sont plats, minces à contour hexagonal ou prismatiques à terminaison pyramidale. La catapléite se présente surtout en masses lamellaires. Les macles sur $\{10\bar{1}0\}$ et {0001} sont communes. Le clivage est parfait sur $\{10\bar{1}0\}$ et imparfait sur $\{10\bar{1}1\}$ et $\{10\bar{1}2\}$.

Propriétés. Dureté : 5 ½ à 6 ; densité : 2,60 à 2,80 ; indices de réfraction : np = 1,591, ng = 1,627. Opaque à translucide ; éclat vitreux ; couleur brun jaunâtre pâle. La cassure est écailleuse.

Gisements. Ce minéral des roches alcalines et de leurs pegmatites est associé au zircon, à la néphéline, au sphène, à la mosandrite, etc. Les pièces de collection viennent du Langesundfjord (Norvège) et des îles de Los (Guinée).

Eudialyte, $(Na, Ca, Fe)_6Zr[Si_3O_9]_2(OH, Cl)$ - rhomboédrique

Les cristaux, rhomboédriques, sont équidimensionnels, épais, très rarement prismatiques ; les faces (001), (101) et (100) sont les plus fréquentes. L'eudialyte est aussi massive, compacte ou grenue. La variété *eucolite* est plus riche en calcium.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Propriétés. Dureté : 5 à 5 ½ ; densité : 2,9 à 3 ; indices de réfraction : np = 1,610, ng = 1,613 (pour l'eucolite : np = 1,634, ng = 1,640). Translucide ; éclat vitreux, rose fleur-de-pêcher foncé, rouge brunâtre. Elle est fragile ; sa cassure est conchoïdale à inégale.

Gisements. C'est un minéral des syénites néphéliniques et de leurs pegmatites. Les plus beaux cristaux des collections viennent de Julianehaab (Groenland). De belles masses décimétriques d'eudialyte et d'eucolite viennent de la péninsule de Kola (U.R.S.S.).

■ 4 unités $[Z_4O_{12}]$ S = 1,50

Papagoïte, $Ca_2Cu_2Al_2[Si_4O_{12}](OH)_6$ - monoclinique

La papagoïte se présente en petits cristaux équidimensionnels ou aplatis, et en agrégats microcristallins. Le clivage sur {100} est distinct.

Propriétés. Dureté : 5 à 5 ½ ; densité : 3,25 ; indices de réfraction : np = 1,61, ng = 1,67. Transparente à translucide, d'une belle couleur bleu cérulé.

Gisements. Les pièces de collection viennent d'Ajo (Arizona).

Baotite, $Ba_4(Ti,Nb)_8ClO_{16}[Si_4O_{12}]$ - quadratique

La baotite forme des petits cristaux irréguliers ou des masses clivables orthogonales. Deux clivages existent suivant deux directions à 90°.

Propriétés. Dureté : 6 ; densité : 4,7 ; indices de réfraction : np = 1,944, ng = 2. Translucide à opaque ; de couleur brune à noire ; éclat vitreux.

Gisements. Ce minéral rare des carbonatites, associé à l'æschynite, a été trouvé à Scheep Creek (Montana, États-Unis). Des masses décimétriques ont été trouvées à Baotan (Mongolie), localité qui lui a donné son nom.

Cénosite, ou kainosite, $Ca_2Y_2CO_3[Si_4O_{12}] \cdot H_2O$ - orthorhombique

Les cristaux, prismatiques, plus ou moins allongés, ne dépassent que rarement 2 cm. Deux clivages existent suivant des directions se coupant à 90°.

Propriétés. Dureté : 5 à 6 ; densité : 3,35 à 3,60 ; indices de réfraction : np = 1,66, ng = 1,69. Transparente à translucide ; elle est incolore ou de couleur brun-jaune à marron foncé, jaune-rose ou rouge. Fragile.

Gisements. On trouve ce minéral dans les granites et pegmatites, associé à l'albite, la muscovite et l'euxénite, à Bancroft (Ontario, Canada), à Hitterö (Norvège) et à Nordmark (Suède) dans la mine de magnétite.

Axinite, $Ca_2(Fe,Mn)Al_2(BO_3)(OH)[Si_4O_{12}]$ - triclinique

Les cristaux sont généralement bien développés et aplatis sur (001) et de faciès varié ; les faces les plus fréquentes sont (001), (1$\bar{1}$0) et (110) ; elles sont très souvent striées ou même cannelées. L'axinite est aussi massive, lamellaire, parfois grenue.

Propriétés. Dureté : 6 ½ à 7 ; densité : 3,27 à 3,29 ; indices de réfraction : np = 1,678, ng = 1,688. Transparente à translucide ; éclat vitreux très brillant ; couleur brun-violet ou violet pâle, brun-jaune verdâtre, parfois rose (orange pour les variétés manganésifères). Elle est fragile ; sa cassure est conchoïdale. Se clive facilement suivant (010). L'axinite a été quelquefois taillée comme gemme.

Gisements. C'est un minéral du métamorphisme de contact et métasomatique, fréquent dans les skarns. Les plus beaux cristaux ont été trouvés dans les fentes alpines (schistes cristallins, amphibolites), associés à l'épidote, la calcite, la préhnite et au quartz. Les pièces très recherchées par les collectionneurs proviennent du Bourg-d'Oisans (Isère), du pic d'Espade (Pyrénées), de Toroku, Miyazaki (Japon) et de Scopi (Suisse). Les plus grands cristaux connus viennent du Minas Gerais (Brésil).

■ 6 unités $[Z_6O_{18}]$ S = 1,50

• *Groupe des tourmalines*

Les minéraux du groupe des tourmalines sont caractérisés par la formule : $XY_3Al_6[(OH)_4|(BO_3)_3|Si_6O_{18}]$ avec X = Na, Ca et Y = Fe, Mg, Al, Li. Rhomboédrique.

Les minéraux de ce groupe offrent les mêmes formes cristallines et diffèrent en particulier par leurs couleurs, leurs densités, leurs indices de réfraction et surtout leur composition chimique. Les tourmalines sont fréquemment en prismes allongés suivant l'axe ternaire [0001] et striés verticalement ; ces prismes sont souvent minces à aciculaires, rarement aplatis. Les faces les plus fréquentes de l'extrémité sont (0001) ainsi que (11$\bar{2}$0) et (10$\bar{1}$1). Les cristaux sont hémièdres et ont des terminaisons différentes aux deux extrémités ; parfois isolés, ils peuvent atteindre plusieurs mètres de long et s'assemblent très souvent en groupes radiés ou parallèles. Les tourmalines peuvent aussi être massives, compactes ou en fibres plus ou moins fines, parallèles ou divergentes.

Propriétés. Dureté : 7 à 7 ½ ; densité : 2,98 à 3,32. Transparentes à opaques ; leur éclat est vitreux à résineux. Leurs couleurs sont variables suivant la composition : les plus courantes sont le noir, le noir brunâtre et le noir bleuâtre. Les tourmalines sont fragiles et souvent friables. Cassures subconchoïdales à inégales.

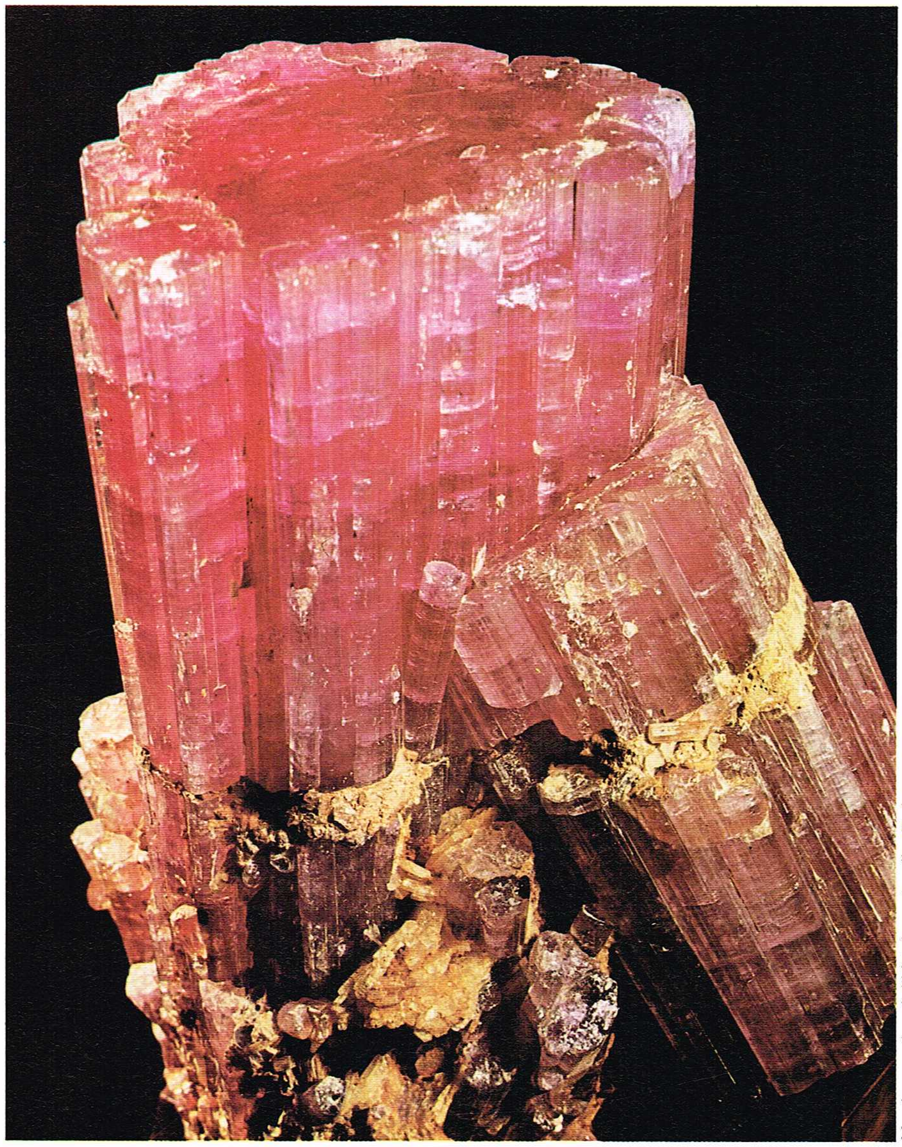

Muséum national d'histoire naturelle, Paris

▲ *Très beau groupe de cristaux de* **tourmaline ; rubellite** *provenant de Californie (Paris, Muséum national d'histoire naturelle).*

Elbaïte, $Na(Li,Al)_3Al_6(BO_3)_3[Si_6O_{18}](OH,F)_4$ - rhomboédrique

L'elbaïte est une tourmaline alcaline contenant du lithium, très recherchée comme gemme en raison de ses couleurs extrêmement vives.

Propriétés. Dureté : 7 à 7 ½ ; densité : 2,98 à 3,10 ; indices de réfraction : np = 1,615 à 1,620, ng = 1,64 à 1,65. Couleurs variées : bleue pour l'*indicolite*, rouge ou rose pour la *rubellite* ou encore verte ou jaune ; peut même être incolore *(archroïte)*. Les cristaux peuvent montrer plusieurs couleurs réparties concentriquement ou en bandes de croissance triangulaires dans les sections perpendiculaires à l'axe [0001] (melon d'eau) ; elles peuvent

▶ *Magnifique géode de dioptase de Renéville, Congo (17× 14 cm) [École nationale supérieure des mines].*

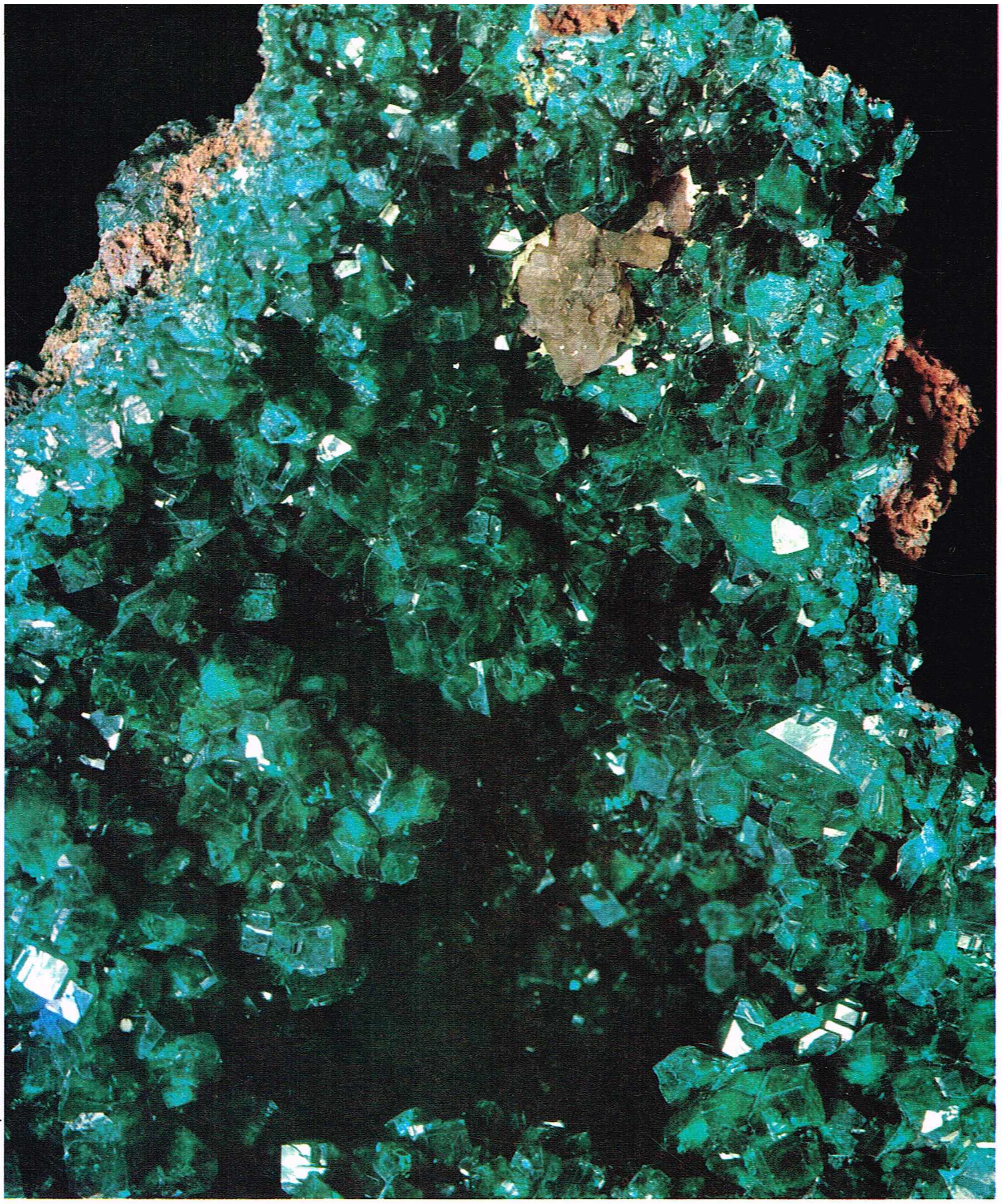

C. Bevilacqua

encore présenter une extrémité noire, verte ou bleue, et l'autre extrémité rose ou rouge.

Gisements. L'elbaïte est un minéral des pegmatites granitiques associé au feldspath, à la lépidolite et au quartz. Les plus beaux cristaux gemmes viennent des pegmatites du Minas Gerais (Brésil), du district de Pala, San Diego Co. (Californie), de la région du mont Bity (Madagascar) et de Murzinsca (Oural), et d'Alto Ligonha (Mozambique). De rares cristaux trouvés autrefois à San Piero in Campo (île d'Elbe) sont très recherchés des collectionneurs. La plus belle série de tourmalines connue dans le monde est conservée par le Muséum national d'histoire naturelle de Paris.

Dravite, $NaMg_3Al_6(BO_3)_3[Si_6O_{18}](OH)_4$ - rhomboédrique

La dravite est une tourmaline magnésienne ; ses cristaux dépassent rarement 20 cm ; ils sont prismatiques et montrent une symétrie ternaire selon l'axe [0001] et l'antihémiédrie par des terminaisons différentes.

Propriétés. Dureté : 7 à 7 $\frac{1}{2}$; densité : 3 à 3,15 ; indices de réfraction : np = 1,610, ng = 1,635. Habituellement brun-jaune à noir brunâtre, mais aussi incolore.

Gisements. Ce minéral de formation métamorphique ou métasomatique se rencontre aussi dans les pegmatites et dans les roches basiques ignées. Les plus gros cristaux viennent de Yinnietharra (Ouest australien). On peut voir dans les musées de beaux groupes provenant de Gouverneur (État de New York, États-Unis).

Schörlite, $Na(Fe,Mn)_3Al_6(BO_3)_3[Si_6O_{18}](OH)_4$ - rhomboédrique

La schörlite est une tourmaline ferrifère commune. Ses prismes sont parfois métriques.

Propriétés. Dureté : 7 ; densité : 3,10 à 3,30 ; indices de réfraction : np = 1,64, ng = 1,67. Opaque et noire (translucide sous faible épaisseur).

Gisements. Ce minéral se rencontre dans les granites et leurs pegmatites, dans les veines pneumatolytiques et quelquefois dans les roches métamorphiques. D'énormes cristaux ont été trouvés dans le Minas Gerais (Brésil) et à Madagascar.

Buergérite, $NaFe^{3+}_3Al_6[F|O_3|(BO_3)_3|Si_6O_{18}]$ - rhomboédrique

Les cristaux sont prismatiques et courts avec les faces $(11\bar{2}0)$, $(02\bar{2}1)$, $(10\bar{1}1)$, $(30\bar{3}0)$, etc.

Propriétés. Dureté : 7 ; densité : 3,30 à 3,32 ; indices de réfraction : np = 1,655, ng = 1,735. Couleur marron à presque noire, et brun-jaune.

Gisements. On a trouvé la buergérite dans les rhyolites de Mexquitic, San Luis Potosi (Mexique).

Dioptase, $Cu_6[Si_6O_{18}] \cdot 6H_2O$ - rhomboédrique

Les cristaux de ce beau minéral, très recherché pour les collections, sont le plus souvent en prismes terminés par les faces du rhomboèdre ; ils sont parfois très allongés suivant [0001] ; les faces $(11\bar{2}0)$ sont cannelées verticalement. Les terminaisons comportent parfois les faces

hémièdres ($13\bar{4}1$) ($21\bar{3}1$), etc. La dioptase se présente aussi en agrégats cristallins; elle est parfois massive.

Propriétés. Dureté : 5 ; densité : 3,28 à 3,35 ; indices de réfraction : np = 1,644 à 1,658, ng = 1,697 à 1,709. Transparente à translucide ; éclat vitreux à faiblement résineux ; couleur vert émeraude quelquefois vert-de-gris ou vert bleuté. Elle est fragile ; sa cassure est conchoïdale ou inégale. Ce minéral se clive parfaitement sur $\{10\bar{1}1\}$.

Gisements. La dioptase est un silicate des zones d'oxydation des gisements de cuivre associé à la planchéite, au quartz, à la calcite, etc. Les plus beaux groupes viennent des gîtes de cuivre du bassin du Niari (Zaïre), de Djoué, de Renéville, de Pimbi, etc., ainsi que du Katanga et du Tsumeb (Namibie). Les premières dioptases connues à la fin du XVIIIe siècle venaient des steppes kirghizes (U.R.S.S.).

★ *Inosilicates*

Les inosilicates sont divisés en :

— **inosilicates à chaînes simples** $[ZO_3]\infty$ comprenant des silicates à 2, 3, 5 ou 7 unités,

— **inosilicates à doubles chaînes** subdivisés en silicates à 1, 2, 3 et 4 unités.

■ Chaînes simples à 2 unités $[Z_2O_6]$ S = 1,50

Ces inosilicates à chaînes simples à 2 unités comprennent les « pyroxènes » que l'on divise en orthopyroxènes (orthorhombiques) et clinopyroxènes (monocliniques).

● *Groupe des orthopyroxènes*

Enstatite, $Mg_2[Si_2O_6]$ - orthorhombique

L'enstatite est un orthopyroxène essentiellement magnésien. Les cristaux distincts sont rares et habituellement prismatiques, avec les faces (100) et (110). Ce minéral se présente surtout en masses lamellaires parfois fibreuses. Le clivage sur {210} est bon.

Propriétés. Dureté : 5 $\frac{1}{2}$; densité : 3,1 à 3,3 ; indices de réfraction : np = 1,650, ng = 1,658. Translucide à presque opaque ; éclat vitreux à résineux faible, un peu perlé sur les surfaces de clivage ; couleur grisâtre, jaunâtre ou blanc verdâtre. Elle est fragile ; sa cassure est inégale. Elle se clive sur {110}.

Gisements. L'enstatite est un constituant des roches basiques et ultrabasiques : gabbros, norites et péridotites (avec l'olivine). On la rencontre aussi dans les zones de métamorphisme, souvent transformée en serpentine ou en talc. De très grands cristaux viennent d'Odegarden (Norvège).

Bronzite, $(Mg,Fe)_2[Si_2O_6]$ - orthorhombique

La bronzite est un orthopyroxène ferromagnésien. Elle cristallise dans le même faciès que l'enstatite mais se présente surtout en masses fibreuses ou lamellaires. Le clivage sur {210} est bon.

Propriétés. Dureté : 5 à 6 ; densité : 3,3 à 3,4 ; indices de réfraction : np = 1,66, ng = 1,68. Couleur jaunâtre, vert olive, brunâtre, avec un éclat submétallique rappelant celui du bronze (d'où son nom).

Gisements. Comme l'enstatite, la bronzite est un constituant commun des roches basiques (gabbros, etc.) et des roches ultrabasiques magnésiennes. De belles masses de cristaux enchevêtrés viennent de Webster Franklin (New Jersey, États-Unis).

Hypersthène, $(Fe,Mg)_2[Si_2O_6]$ - orthorhombique

Les cristaux sont rares, généralement prismatiques ou souvent tabulaires sur (100) et aussi sur (010). L'hypersthène est habituellement massif lamellaire, quelquefois en grains sphériques inclus dans les roches. Il est fragile, et sa cassure est inégale. Se clive distinctement sur {110}.

Propriétés. Dureté : 5 à 6 ; densité : 3,4 à 3,5 ; indices de réfraction : np = 1,692, ng = 1,705. Translucide à presque opaque ; éclat un peu perlé sur les faces de clivage. Couleur vert brunâtre foncé, noir grisâtre, noir verdâtre. Les variétés présentant un chatoiement lumineux brun vif cuivré sont parfois taillées comme gemmes.

Gisements. On rencontre ce minéral dans les charnockites et les norites, et dans certaines laves, associé à l'augite, et aussi dans les roches ultrabasiques ferrifères. De belles masses utilisées en ornementation viennent des côtes du Labrador.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Les cristaux vert clair de* diopside *sur* grenat grossulaire, *rouge, forment l'une des plus belles associations minérales que l'on puisse voir dans les musées (Val d'Ala, Piémont) [Milan, musée d'Histoire naturelle].***

Ferrosilite, $Fe^{2+}_2[Si_2O_6]$ - orthorhombique

La ferrosilite est le terme ferrifère de la série des orthopyroxènes : l'enstatite (terme magnésien), la bronzite, l'hypersthène et la ferrosilite (ferrifères).

● *Groupe des clinopyroxènes*

Clino-enstatite, $Mg_2[Si_2O_6]$ - monoclinique

C'est un minéral très rare. Les cristaux sont monocliniques, tabulaires sur (100) ou prismatiques selon (001). La macle polysynthétique sur {100} est très caractéristique et le clivage est distinct sur {110}.

Propriétés. Dureté : 5 à 6 ; densité : 3,20 ; indices de réfraction : np = 1,651, ng = 1,660. Transparente à translucide. Incolore à jaune, jaune-brun à verdâtre.

Gisements. Ce pyroxène se trouve dans quelques roches ignées.

Diopside, $(Ca,Mg)[Si_2O_6]$ - monoclinique

Les beaux cristaux de diopside sont assez rares ; ils sont en général allongés, avec les faces (100) et (010) bien développées, et leur section est presque carrée ou rectangulaire. Le diopside se présente souvent en groupements de cristaux aciculaires, et aussi en agrégats grenus ou en masses lamellaires.

Propriétés. Dureté : 5 $\frac{1}{2}$; densité : 3,20 à 3,38 ; indices de réfraction : np = 1,66 à 1,68, ng = 1,69 à 1,72. Quelquefois transparent ; couleur blanche, jaunâtre, blanc grisâtre à vert pâle, mais aussi vert foncé à presque noire,

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

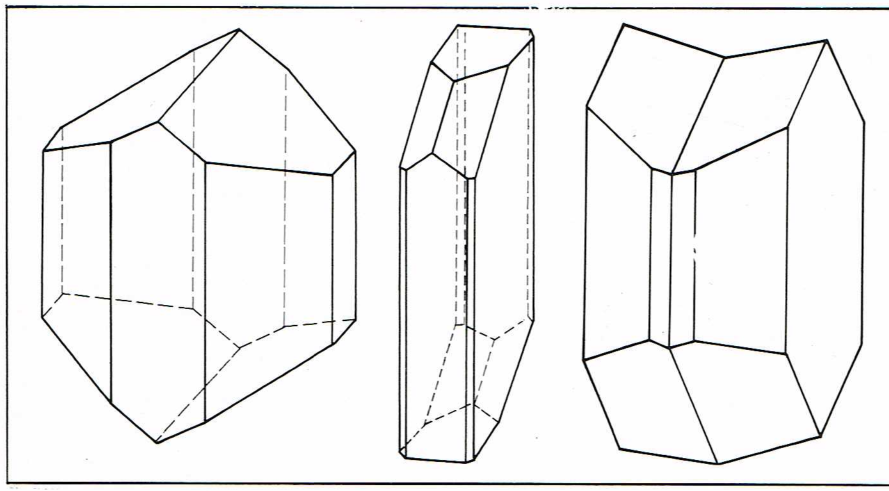

I.G.D.A.

▲ A gauche, cristal d'augite sur le tuf volcanique d'Ariccia, Rome. A droite, formes de cristallisation de l'augite (deux cristaux prismatiques courts) et une macle de deux individus.

quelquefois incolore, et rarement d'un beau bleu. Le clivage est bon sur {110}.

Gisements. Constituant de nombreuses roches basiques et ultrabasiques (pyroxénites, péridotites, gabbros, diabases), le diopside se rencontre aussi dans les skarns, les fissures des roches alpines et parfois dans les schistes cristallins. C'est au Val d'Ala (Piémont) que le diopside vert pâle transparent est en association avec le grossulaire rouge vif et le clinochlore vert sombre. De grands cristaux partiellement transparents viennent de Dekabb (État de New York), de Sljudjinka, Baïkal (Sibérie) ; d'autres, plus opaques, se rencontrent à Hull (Québec), à l'Alpe Schwarzenstein (Tyrol) et à Ampandrandava (Madagascar).

Hedenbergite, CaFe[Si_2O_6] - monoclinique

Les beaux cristaux sont assez rares et ont des formes simples : {001}, {010}, {100}, l'hedenbergite se présentant surtout en masses lamellaires ou en grains inclus dans les roches. Le clivage sur {110} est bon.

Propriétés. Dureté : 5 $\frac{1}{2}$; densité : 3,5 à 3,58 ; indices de réfraction : np = 1,739, ng = 1,757. Translucide à opaque ; éclat vitreux. Couleur noir verdâtre.

Gisements. L'hedenbergite est un silicate des gîtes métamorphiques de contact. De très beaux groupes de cristaux vert-noir à noirs, très brillants, viennent de Nordmarken (Suède).

Johannsénite, CaMn[Si_2O_6] - monoclinique

Ce pyroxène manganésifère est rare en beaux cristaux ; ceux-ci ont des formes simples {100}, {010} et {001}. Plus habituellement, la johannsénite est massive, en agrégats radiés, lamellaires ou fibreux. La macle sur {100} est commune. Le clivage sur {110} est bon.

Propriétés. Dureté : 6 ; densité : 3,45 à 3,58 ; indices de réfraction : np = 1,70 à 1,75, ng = 1,73 à 1,745. Translucide à opaque ; couleur gris verdâtre, verte à noir brunâtre.

Gisements. On trouve ce minéral en association avec la rhodonite et la bustamite dans des calcaires métasomatiques et également dans des veines de quartz et de calcite dans des rhyolites. De beaux groupes de cristaux de couleur vert bronze foncé viennent de Broken Hill (Australie).

Augite, (Ca,Mg,Fe^{2+},Fe^{3+},Ti,Al)$_2$[(Si,Al)$_2O_6$] - monoclinique

L'augite est généralement en cristaux de faciès variés : prismatiques courts, trapus et épais ou tabulaires sur (100) avec les faces (100), (110), (111), etc. Elle peut aussi se présenter en grains ou en agrégats aciculaires. Le clivage est bon sur {110}, imparfait sur {100} et {010}. Le macle sur {100} est commune.

Propriétés. Dureté : 5 $\frac{1}{2}$ à 6 ; densité : 3,25 à 3,5 ; indices de réfraction variables suivant la composition chimique : np = 1,67 à 1,73, ng = 1,70 à 1,76. Translucide à opaque ; couleur noir verdâtre à noir brunâtre.

Gisements. Ce pyroxène ferromagnésien est répandu dans les roches volcaniques (andésites, basaltes, limburgites, téphrites, etc.), dans les roches ultrabasiques et les gabbros, les ophites et les dolérites. Les cristaux classiques des collections viennent des environs de Rome, du Val di Fassa (Italie du Nord) et des environs de l'Allier.

Fassaïte, Ca(Mg,Fe^{3+}Al)[(Si,Al)$_2O_6$] - monoclinique

C'est un pyroxène voisin de l'augite, dont la couleur peut être foncée à pâle ; quelquefois, les cristaux sont vert profond ou vert pistache ; ils ressemblent alors à de l'épidote. Le clivage sur {110} est bon.

Propriétés. Dureté : 6 ; densité : 2,95 à 3,35 ; indices de réfraction : np = 1,675 à 1,71, ng = 1,70 à 1,735. Couleur gris-vert à vert foncé.

Gisements. On rencontre ce minéral dans les zones de contact et dans les calcaires métamorphiques. De beaux groupes de cristaux ont été trouvés à Traversella, dans le Piémont (Italie).

Pigeonite, (Mg,Fe,Ca)$_2$[Si_2O_6] - monoclinique

La pigeonite cristallise avec le même faciès que l'augite et l'hedenbergite. Les cristaux sont prismatiques, souvent courts et épais, ou bien encore en prismes à base carrée avec les faces (100), (010). Ce minéral est aussi grossièrement à finement grenu, rarement fibreux. Le clivage est bon sur {110}.

Propriétés. Dureté : 6 ; densité : 3,30 à 3,45 ; indices de réfraction : np = 1,68 à 1,72, ng = 1,70 à 1,78. Translucide à opaque ; couleur brune, verdâtre ou noire.

Gisements. Ce pyroxène des roches volcaniques basiques a été rencontré pour la première fois à Pigeon Point (Minnesota, États-Unis).

Jadéite, NaAl[Si_2O_6] - monoclinique

La jadéite est habituellement massive avec une texture fibreuse très tenace, une structure quelquefois grenue ou encore nettement compacte. Elle cristallise exceptionnellement en petits prismes allongés. Les variétés homogènes de couleur sont recherchées pour la fabrication d'objets ornementaux et de gemmes gravées (jade précieux).

Propriétés. Dureté : 6 $\frac{1}{2}$ à 7 ; densité : 3,3 à 3,5 ; indices de réfraction : np = 1,640, ng = 1,655. Translucide à subtranslucide ; éclat vitreux et perlé sur les faces de clivage ; couleur vert pomme à vert émeraude, vert bleuâtre, vert poireau, blanc verdâtre à presque blanche. Extrêmement tenace. Cassure esquilleuse. Clivage prismatique pour les petits cristaux.

Gisements. La jadéite se forme par endomorphose de filons de pegmatite dans les serpentinites avec, au contact, des zones albitiques et amphibolitiques. Les meilleures masses utilisables pour l'ornementation viennent de Tawmaw (Haute-Birmanie). On rencontre aussi ce minéral en gros galets roulés au Tibet, au Yun-nan (Chine), au Guatemala et au Mexique.

Ægyrine, ou acmite, [$NaFe^{3+}Si_2O_6$] - monoclinique

Les cristaux sont prismatiques allongés, avec les faces (100) et (110) bien développées. Les faces du prisme sont striées verticalement ; leurs terminaisons, très aiguës, sont caractéristiques. Le clivage est bon sur {110}.

Propriétés. Dureté : 6 à 6 $\frac{1}{2}$; densité : 3,5 à 3,55 ; indices de réfraction : np = 1,75 à 1,776, ng = 1,8 à 1,836. Translucide à opaque ; éclat vitreux à résineux ; couleur brunâtre ou brun rougeâtre, verte et vert noirâtre sur les faces de cassure. Elle est fragile ; sa cassure est inégale.

Gisements. Ce pyroxène caractéristique des roches alcalines (syénites néphéliniques, etc.) se rencontre également dans les carbonatites et dans certaines roches métamorphiques. De beaux cristaux ont été rencontrés à Kangerdluardsuk et à Julianehaab (Groenland), à Beneberg (Norvège) et à Saint-Hilaire (Québec).

Omphacite, $(Ca,Na)(Mg,Fe^{2+},Fe^{3+},Al)[Si_2O_6]$ - monoclinique

L'omphacite est un pyroxène se présentant le plus souvent en masses grenues. Comme la jadéite, il est rarissime en cristaux. Le clivage sur {110} est bon.

Propriétés. Dureté : 5 à 6 ; densité : 3,30 à 3,40 ; indices de réfraction : np = 1,66 à 1,69, ng = 1,69 à 1,72. Translucide, couleur vert gazon à vert épinard.

Gisements. L'omphacite est, avec le grenat almandin, un constituant des éclogites. Les plus beaux cristaux connus ont été récemment découverts à Iveri, dans le val d'Aoste (Italie). De belles masses d'éclogites utilisables en ornementation ont été trouvées en Loire-Atlantique.

Spodumène, $LiAl[Si_2O_6]$ - monoclinique

Les cristaux sont prismatiques aplatis sur (100). Les faces verticales sont striées ou même cannelées. Ces cristaux sont parfois très grands et peuvent atteindre plusieurs mètres de long. Le spodumène se présente également en masses lamellaires. Le clivage est facile sur {110}. Les qualités transparentes qui présentent de belles couleurs sont très recherchées comme gemmes. Le spodumène massif est un minerai de lithium.

Propriétés. Dureté : 6 $\frac{1}{2}$ à 7 ; densité : 3,13 à 3,20 ; indices de réfraction : np = 1,65, ng = 1,68. Translucide à transparent ; éclat vitreux, un peu perlé sur les faces de clivage. Couleur blanc verdâtre ou grisâtre, vert jaunâtre, vert émeraude, jaune, rose à pourpre améthyste. Il est fragile ; sa cassure est inégale à subconchoïdale. La *kunzite* est rose à violet pâle. La variété *hiddenite,* vert vif, n'a été trouvée en cristaux gemmes limpides qu'à Alexander (Caroline du Nord) ; tous les autres cristaux proposés sur le marché sous le même nom ne sont que des spodumènes devenus verts par exposition aux radiations.

Gisements. Ce silicate des pegmatites granitiques est associé au béryl, à la tourmaline, etc. Les plus beaux cristaux gemmes connus viennent du Minas Gerais (Brésil), de Pala (Californie) et du Pakistan. D'énormes cristaux ont été trouvés à Norwich (Massachusetts, États-Unis).

■ Chaînes simples à 3 unités $[Z_3O_9]$ S = 1,50

Wollastonite, $Ca[Si_3O_9]$ - triclinique

La wollastonite est rarement en cristaux tabulaires sur (100) ou sur (001), et plus fréquemment en cristaux prismatiques courts avec les faces (001), (101), (010), (011), (540), (301), etc. Elle se présente généralement en masses clivables ou fibreuses, et en fibres parallèles à réticulées ; elle peut aussi être compacte. Elle se clive facilement sur {100} et {011}.

Propriétés. Dureté : 4 $\frac{1}{2}$ à 5 ; densité : 2,8 à 2,9 ; indices de réfraction : np = 1,616, ng = 1,631. Transparente à translucide ; éclat vitreux et perlé sur les faces de clivage ; couleur blanche inclinant sur le gris, ou encore jaune, rougeâtre ou brunâtre. La wollastonite est fragile ; sa cassure est inégale.

Gisements. On trouve ce minéral dans les calcaires cristallins métamorphisés par les magmas acides. Les pièces de collection viennent du Vésuve (Monte Somma), de Santa-Fé (Mexique) et de divers gîtes de l'État de New York (États-Unis). De grands cristaux ont été trouvés à Madagascar.

Bustamite, $(Mn,Ca)_3[Si_3O_9]$ - triclinique

La bustamite est une variété de *rhodonite* contenant du calcium et formant avec ce minéral une série continue. Ses cristaux sont tabulaires avec les faces (001), (110), $(1\bar{1}0)$ et (221). Le clivage est parfait sur {100} et moyen sur {110} et $\{1\bar{1}0\}$. La bustamite se présente également en agrégats fibro-radiés ou lamellaires.

Propriétés. Dureté : 6 à 6 $\frac{1}{2}$; densité : 3,32 à 3,42 ; indices de réfraction : np = 1,66 à 1,69, ng = 1,67 à 1,70. Transparente à translucide ; couleur rose à rouge vif, gris rosâtre à gris brunâtre.

Gisements. Ce minéral se rencontre dans les gîtes métasomatiques de contact ou les gîtes hydrothermaux. Les plus belles pièces cristallisées exposées dans les musées viennent de Broken Hill (Australie).

Pectolite, $Ca_2NaH[Si_3O_9]$ - triclinique

La pectolite se présente fréquemment en agrégats de cristaux aciculaires ; ses cristaux sont allongés selon [010] et n'ont généralement pas de faces terminales. Elle est souvent massive radiée. Elle se clive parfaitement sur {100} et {001}.

Propriétés. Dureté : 5 ; densité : 2,74 à 2,88 ; indices de réfraction : np = 1,595, ng = 1,633. Subtranslucide à

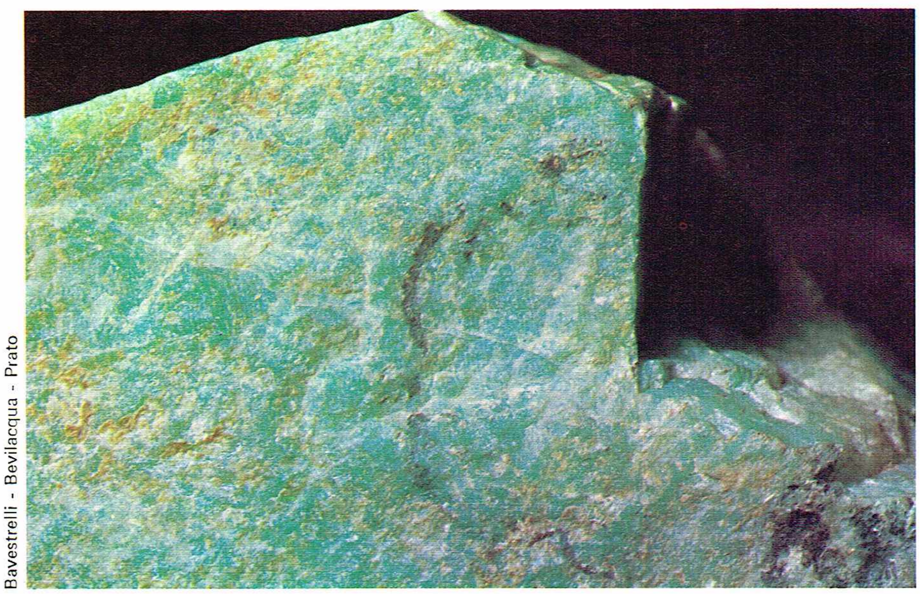

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▼ ***Bloc de jadéite chromifère de Tawmaw, Birmanie : gemme ornementale très utilisée pour la fabrication d'objets précieux.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ **Spodumène** ***rose (kunsite) de Pala, Californie (Milan, musée d'Histoire naturelle).***

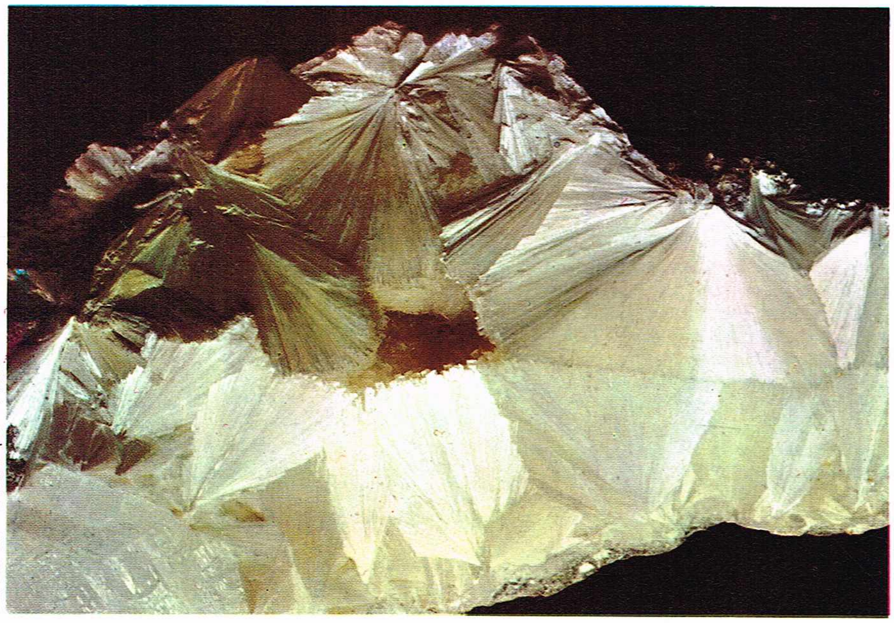

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ **Pectolite** *en agrégats fibro-radiés provenant de Wheehawken, New Jersey.*

▶ *A droite, en haut, deux formes de cristallisation triclinique de la* **babingtonite**; *en bas, petits cristaux de* **babingtonite** *sur orthose de Baveno, lac Majeur (Milan, musée d'Histoire naturelle).*

opaque; éclat soyeux à subvitreux sur les faces de cassure; couleur blanchâtre à grisâtre. La pectolite est fragile; sa cassure est inégale.

Gisements. Ce minéral est associé à la préhnite dans les cavités des roches éruptives basiques et parfois dans des roches métamorphiques. De jolis groupes de cristaux ont été rencontrés à Guttenberg (New Jersey).

Sérandite, $(Mn,Ca)_2NaH[Si_3O_9]$ - triclinique

La sérandite se présente en cristaux tabulaires ou prismatiques allongés parallèlement à l'axe (010), ou en agrégats lamellaires. Les clivages sur {001} et {100} sont parfaits.

Propriétés. Dureté : 4 ½ à 5; densité : 3,30 à 3,33; indices de réfraction : np = 1,660, ng = 1,688. Translucide à opaque; couleur rouge-rose à rose pâle; éclat vitreux, perlé sur les clivages.

Gisements. C'est un minéral rare des carbonatites et des syénites néphéliniques, associé à l'analcime, l'ægyrine, la néphéline, etc. Rencontré la première fois aux îles de Los; les plus beaux cristaux proviennent du Québec.

■ Chaînes simples à 5 unités $[Z_5O_{15}]$ S = 1,50

Rhodonite, $CaMn_4[Si_5O_{15}]$ - triclinique

Les cristaux, rares, sont habituellement grands et tabulaires sur (001), avec des angles arrondis, mais généralement ce minéral est en masses clivables à compactes. On le rencontre aussi en grains inclus dans les roches. Il se clive parfaitement sur {110} et {1$\bar{1}$0}. La variété *fowlérite* contient du zinc. La rhodonite compacte, d'un beau rose ou rouge-rose, est très employée en ornementation.

Propriétés. Dureté : 5 ½ à 6 ½; densité : 3,4 à 3,68; indices de réfraction : np = 1,72 à 1,73, ng = 1,73 à 1,744. Transparent à translucide. Éclat vitreux, un peu perlé sur les faces de clivage. La rhodonite possède une couleur rouge brunâtre lumineuse, rouge chair, rouge-rose, quelquefois verdâtre ou jaunâtre quand elle est impure. Souvent noire extérieurement quand elle est compacte, sa cassure est conchoïdale à inégale.

Gisements. C'est un silicate des gîtes hydrothermaux ou métasomatiques de contact; les plus beaux groupes

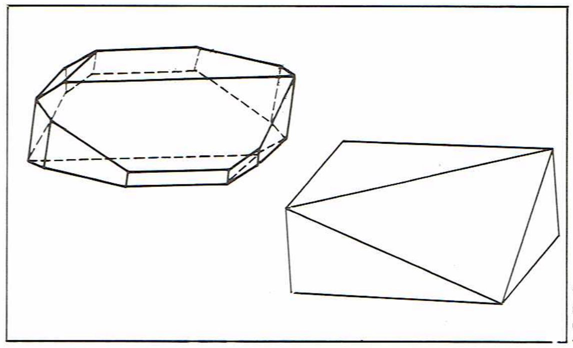

I.G.D.A.

▼▶ *Ci-dessous, schéma d'un cristal de* **rhodonite** *avec deux orientations différentes; ci-contre,* **rhodonite** *associée à de la franklinite et de la calcite (Franklin Furnace, New Jersey) [Milan, musée d'Histoire naturelle].*

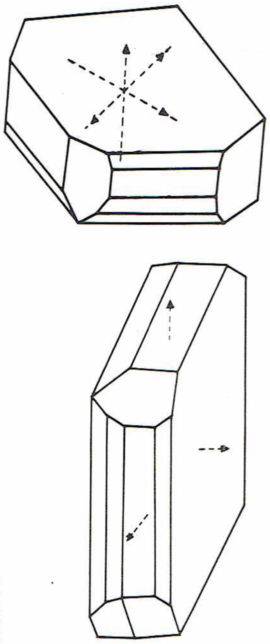

I.G.D.A.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

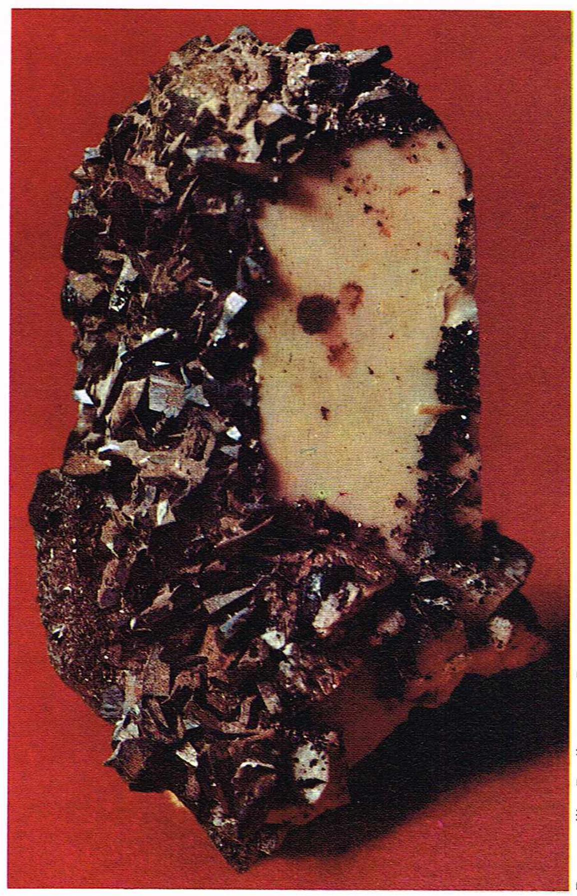

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

de cristaux qu'on peut voir dans les musées viennent de Franklin Furnace (New Jersey).

Babingtonite, $Ca_2Fe_2[Si_5O_{14}OH]$ - triclinique

La babingtonite se présente en petits cristaux noirs tricliniques dont les angles sont très proches de ceux de la rhodonite. Elle se clive sur {110} et {1$\bar{1}$0}.

Propriétés. Dureté : 5 ½ à 6; densité : 3,35 à 3,37; indices de réfraction : np = 1,717, ng = 1,752. Translucide à opaque; couleur gris-noir à brun-noir.

Gisements. La babingtonite se rencontre dans les cavités des granites associés à l'orthose et également dans les gneiss. Les pièces de collection les plus appréciées ont été trouvées à Arendal (Norvège), à Baveno (Italie du Nord) et à Westfield, Hampden Co. (États-Unis).

Inésite, $Ca_2Mn_7[Si_5O_{14}OH]_2 \cdot 5H_2O$ - triclinique

Les cristaux sont petits et prismatiques; l'inésite est aussi fibreuse, radiée ou sphérolitique. Le clivage sur {010} est parfait, celui sur {100} est moins bon.

Propriétés. Dureté : 5 ½ à 6; densité : 3,03; indices de réfraction : np = 1,61, ng = 1,65. Elle est translucide; la couleur est rose à orangé-rose.

Gisements. Ce silicate assez rare, associé à la rhodochrosite à Hale Creek (Californie), a été également trouvé à Jacobsberg, Langban (Suède) et à Hilfe Gottes, Nassau (Allemagne).

■ Chaînes simples à 7 unités $[Z_7O_{21}]$ S = 1,50

Pyroxmangite, $(Fe,Mn)_7[Si_7O_{21}]$ - triclinique

La pyroxmangite est en petits cristaux tabulaires ou en masses clivables ou compactes. Le clivage est parfait sur {110}. Les macles sur {110} et {001} ont été signalées.

Propriétés. Dureté : 5 ½ à 6; densité : 3,60 à 3,8; indices de réfraction : np = 1,73 à 1,745, ng = 1,745 à 1,764. Transparente à translucide; couleur rose pâle à rouge-rose vif.

Gisements. Ce minéral se rencontre dans les roches métamorphiques et métasomatiques, associé à la rhodochrosite et d'autres minéraux manganésifères. Les plus jolis cristaux viennent de la mine de Taguchi, Aichi (Japon).

■ Doubles chaînes à 1 unité $[Z_2O_5]_\infty$ S = 1,75

Sillimanite, $Al[AlSiO_5]$ - orthorhombique

Les cristaux sont souvent allongés et minces, avec des faces terminales non distinctes; les faces du prisme sont striées et arrondies. La sillimanite se présente souvent en groupes parallèles ou en masses plus ou moins grossièrement fibreuses, quelquefois radiées. Le clivage est parfait sur {010}.

Propriétés. Dureté : 6 à 7; densité : 3,23 à 3,24; indices de réfraction : np = 1,638, ng = 1,680. Transparente à translucide; éclat vitreux presque adamantin; couleur brune, brun grisâtre à blanc grisâtre, vert grisâtre à vert olive pâle. La cassure est inégale. De rares cristaux transparents ont été taillés comme gemmes en Birmanie.

Gisements. Ce silicate du métamorphisme de contact est fréquent dans les granulites, les gneiss et les schistes cristallins. De grandes masses fibreuses ont été rencontrées près d'Alger et en Bretagne.

Mullite, $Al_8[O_3|Si_3AlO_{16}](O_{0,5},OH,F)$ - orthorhombique

Ce silicate de « haute température » se présente en cristaux prismatiques, allongés selon [010].

Propriétés. Dureté : 6 à 7; densité : 3,05 à 3,15; indices de réfraction : np = 1,640, ng = 1,654. Transparente à translucide; de couleur rose pâle, ou incolore.

Gisement. Sa localité d'origine est Mull (Angleterre), où on l'a découverte la première fois dans des laves d'âge tertiaire.

■ Doubles chaînes 2 unités $[Z_4O_{11}(OH)]_\infty$ S = 1,62

Anthophyllite, $(Mg,Fe^{2+})_7[Si_8O_{22}(OH)_2]$ - orthorhombique

L'anthophyllite est fibreuse, lamellaire ou massive. Ses cristaux sont rares (prismes {110}). Le clivage sur {110} est parfait, ceux sur {010} et {100} sont imparfaits. Ce minéral s'altère en talc et en serpentine.

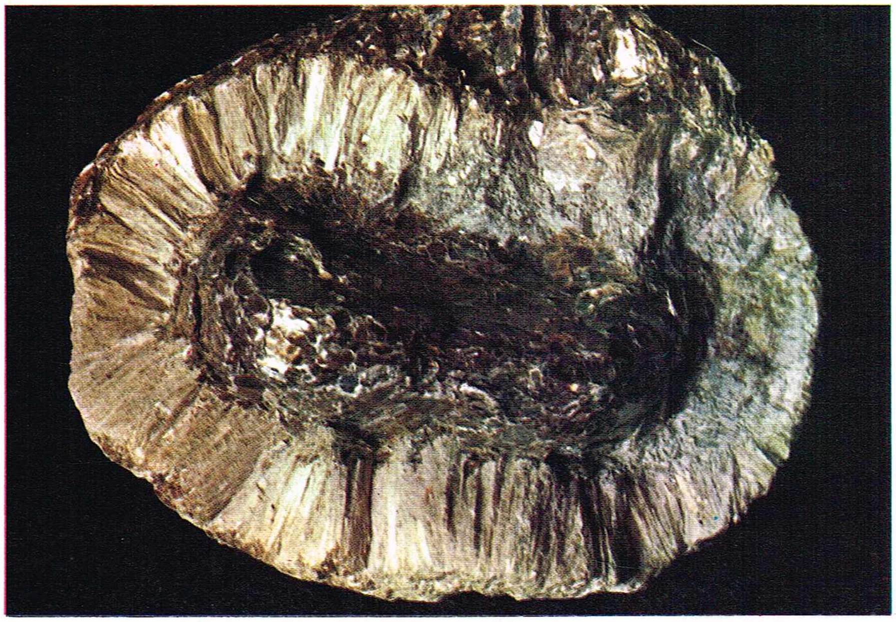

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Propriétés. Dureté : 5 ½ à 6; densité : 2,85 à 3,2; indices de réfraction : np = 1,633, ng = 1,657 pouvant atteindre 1,70 (ils augmentent avec le pourcentage de fer). Transparente à translucide; éclat vitreux, nacré sur les clivages, couleur gris brunâtre, brun-jaune, brun-vert à vert vif, également blanche à gris pâle.

Gisements. Ce silicate typique des roches magnésiennes métasomatiques se rencontre aussi dans les schistes cristallins. Ses localités les plus classiques sont : Kongsberg (Norvège), Hermannschlag (Tchécoslovaquie), Dürrenstein (Donau, Autriche) et divers points du sud du Groenland.

Gédrite, $(Mg,Fe^{2+})_5Al_2[Al_2Si_6(OH)_2]$ - orthorhombique

Les cristaux sont rares, la gédrite étant surtout fibreuse massive ou lamellaire. Le clivage est parfait sur {110} et imparfait sur {010} et {100}.

Propriétés. Dureté : 5 ½ à 6; densité : de 3,15 à 3,57 en fonction de la teneur en fer; indices de réfraction : np = 1,67, ng = 1,69. Transparente à presque opaque; couleur gris-vert à vert-jaune, brune à verdâtre, et également blanche.

Gisements. Ce silicate des roches métamorphiques a été trouvé la première fois à Gèdres (Hautes-Pyrénées), localité qui lui a donné son nom.

Holmquistite, $Li_2(Mg,Fe^{2+})_2(Al,Fe^{2+})_2[Si_8O_{22}(OH)_2]$ - orthorhombique

Ce silicate est proche de l'anthophyllite; les cristaux sont prismatiques étroits ou aciculaires; le clivage {110} est parfait. L'holmquistite est également massive ou en agrégats fibro-radiés.

Propriétés. Dureté : 5 à 6; densité : 3,10 à 3,15; indices de réfraction : np = 1,622 à 1,642, ng = 1,645 à 1,665. Transparente à translucide; couleur bleu ciel à violet foncé presque noir; éclat vitreux.

Gisements. Ce silicate est formé au contact de pegmatites riches en lithium avec des roches basiques; il est associé au plagioclase, à la biotite, au quartz, à la tourmaline, etc. Ses localités les plus classiques sont Utö (Suède) et Barrante (Québec).

Cummingtonite, $(Fe^{2+},Mg)_7[Si_8O_{22}(OH)_2]$ - monoclinique

La cummingtonite se présente en agrégats souvent radiés, lamellaires ou en masses fibreuses ressemblant quelquefois à une texture d'amiante. Le clivage sur {100} est commun. Ce silicate est parfois manganésifère.

Propriétés. Dureté : 5 à 6; densité : 3,10 à 2,47 (variant avec la composition chimique); indices de réfraction : np = 1,64 à 1,66, ng = 1,66 à 1,69. Translucide à presque opaque; couleur verte à grise, vert foncé à brune, rarement blanche.

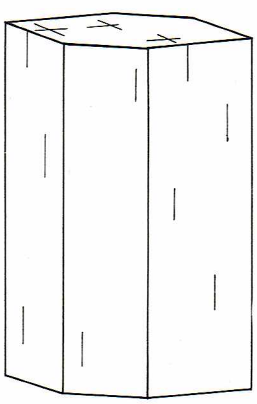

I.G.D.A.

▲ ***En haut, nodule d'anthophyllite** provenant **d'Hermanov, Moravie** (Londres, British Museum); **en bas, une forme de cristallisation de l'anthophyllite.***

Gisements. Ce silicate des roches métamorphiques a été trouvé en abondance aux États-Unis à Homestake (Lawrence Co.), à Cummington, (Hampshire Co.) et dans un grand nombre d'autres localités.

Grünérite, $Fe^{2+}_{7}[Si_8O_{22}(OH)_2]$ - monoclinique

La grünérite se présente en masses radiées, fibreuses ou fibro-lamellaires. Les lamelles sont maclées sur {100}. Le clivage sur {110} est bon.

Propriétés. Dureté : 5 ½; densité : 3,4 à 3,6; indices de réfraction : np = 1,66 à 1,69, ng = 1,70 à 1,73. Translucide à opaque. Couleur gris cendré, vert foncé à brune et rougeâtre pour les variétés manganésifères.

Gisements. La grünérite est un silicate fréquent au contact des roches riches en fer, formées par le métamorphisme régional. Ses localités sont nombreuses.

Tirodite, $Mn_2Mg_5[Si_8O_{22}(OH)_2]$ - monoclinique

La tirodite est une cummingtonite manganésifère, se présentant en agrégats compacts ou, plus rarement, en longs prismes très minces dont la macle sur {100} est commune. Le clivage est parfait sur {110} comme pour les autres amphiboles.

Propriétés. Dureté : 6 à 6 ½; densité : 3,07 à 3,13; indices de réfraction : np = 1,635, ng = 1,660. Transparente à translucide; de couleur blanc verdâtre à vert vif et rose.

Gisements. La tirodite est fréquente à Tirodi (Inde), localité qui lui a donné son nom, et à Talcville (New York, États-Unis).

Dannemorite, $Mn_2Fe^{2+}_{5}[Si_8O_{22}(OH)_2]$ - monoclinique

C'est une amphibole manganésifère de la série grünérite-cummingtonite. Densité : 3,4 à 3,5. Couleur brun-jaune à gris-vert. Elle a été trouvée la première fois à Dannemora (Suède).

Trémolite, $Ca_2Mg_5[Si_8O_{22}(OH)_2]$ - monoclinique

Cette amphibole est très répandue; ses cristaux sont allongés avec les faces prismatiques (110), (010) et (120) et sont très rarement terminés. Le clivage sur {110} est bon; ceux sur {100} et {010} sont moins nets. La trémolite forme le plus souvent des masses fibro-radiées, des agrégats polycristallins massifs et clivables, granuleux ou fibreux (asbeste). Elle est fragile; la cassure est subconchoïdale. Elle forme une série avec la **ferro-trémolite,** par remplacement du magnésium par le fer, l'**actinote** étant le terme intermédiaire.

Propriétés. Dureté : 5 à 6; densité : 2,9 à 3,2; indices de réfraction : np = 1,60, ng = 1,62. Transparente à translucide; couleur blanchâtre, grisâtre, vert pâle ou rose.

Gisements. Les gisements sont nombreux : dans les calcaires cristallins, les dolomies, les talcs-schistes, les schistes cristallins, les serpentines et les fentes alpines. Les beaux cristaux viennent du Tessin (Suisse), de Gouverneur (variété rose : *hexagonite*), Pierrepont et Mac Comb (New York, États-Unis).

Actinote, $Ca_2(Mg,Fe^{\cdot\cdot})_5[Si_8O_{22}(OH)_2]$ - monoclinique

Les cristaux d'actinote sont semblables à ceux de la trémolite; ils se présentent souvent en agrégats de prismes plus ou moins aplatis et allongés, parallèles ou radiés. L'actinote est aussi très fréquente en masses fibreuses plus ou moins fines et enchevêtrées. La variété *néphrite,* très tenace, est recherchée depuis des millénaires pour la fabrication d'objets rituels ou ornementaux appelés « jades », dont les qualités les plus ferrifères sont les plus vert-noir. La variété fibreuse (amiante, asbeste) est souple et blanchâtre.

Propriétés. Dureté : 5 à 6; densité : 3 à 3,4; indices de réfraction : np = 1,60 à 1,68, ng = 1,62 à 1,70; la densité et les indices de réfraction augmentent avec la teneur en fer. Transparente à presque opaque; vert-gris à vert presque noir.

Gisements. L'actinote est un minéral des schistes cristallins et des talcs-schistes provenant aussi de l'altération des pyroxénites des gabbros et dialages. Parmi les localités les plus classiques, on peut citer Zillerthal, dans le Tyrol (Autriche) pour les longs cristaux associés au talc. Les jades proviennent de Chine, de Nouvelle-Zélande, de Sibérie et du Turkestan.

Hornblende, $Na_xCa_2(Mg,Fe^{2+})_{5-y-z}(Al,Fe^{3+})_yTi_z[Al_{x+y+2z}Si_{8-x-y-2z}O_{22}(OH,F)_2]$ - monoclinique

Les cristaux de hornblende sont prismatiques, plus ou moins allongés avec les faces de la zone prismatique (010), (120), (110), (100) et les terminaisons {001}, {001}, {031}. La macle suivant {100} est commune. La hornblende est aussi massive, lamellaire, granulaire ou fibreuse. Le clivage sur {110} est parfait; il existe des plans de séparation plus ou moins imparfaits sur {100} et {001}. Elle est fragile; la fracture est subconchoïdale.

Propriétés. Dureté : 5 à 6; densité : 2,95 à 3,25; indices de réfraction : np = 1,62 à 1,70, ng = 1,63 à 1,72; la densité et les indices de réfraction varient avec la composition chimique. Faiblement translucide à opaque; couleur vert-noir à noire.

Gisements. La hornblende à haute teneur en fer se rencontre dans les basaltes, les tufs basaltiques, les roches éruptives récentes et dans les roches alcalines profondes. Les variétés moins ferrifères sont fréquentes dans certains types de roches métamorphiques. De splendides cristaux ont été trouvés à Ersby (Finlande), à Lukow (Bohême) et à Kragerô (Norvège).

Édénite, $NaCa_2Mg_5[AlSi_7O_{22}(OH)_2]$ - monoclinique
Ferroédénite, $NaCa_2Fe^{2+}_{5}[AlSi_7O_{22}(OH)_2]$

L'édénite forme une série avec la ferroédénite; elle se présente en prismes avec les faces (100), (010), (001) et (011). Ses variétés massives sont assez semblables à celles de la trémolite. Le clivage est parfait sur {110} et imparfait sur {001} et {100}; la macle sur {100} est commune. Elle est fragile; la cassure est subconchoïdale.

Propriétés. Dureté : 5 à 6; densité : 2,78 à 3,06; indices de réfraction variables avec la teneur en fer : np = 1,62 à 1,70, ng = 1,63 à 1,72. Transparente à presque opaque; la couleur est blanchâtre, grisâtre ou vert pâle à vert foncé.

Gisements. L'édénite est une amphibole des roches ignées et des roches métamorphiques. Sa localité d'origine est Edenville (État de New York). De gros cristaux ont été trouvés à Russel (New York).

Tchermachite, $Ca_2(Mg,Fe^{\cdot\cdot})_3(Al,Fe^{\cdot\cdot\cdot})_2[Al_2Si_6O_{22}(OH)_2]$ - monoclinique

Ce minéral de la série des hornblendes se rencontre en cristaux prismatiques ou en masses compactes. Le clivage est parfait sur {110} et imparfait sur {001} et {100}. La macle sur {100} est connue.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ **Trémolite** ***fibreuse sur cristaux d'adulaire (orthose) provenant du Saint-Gothard (Londres, British Museum).***

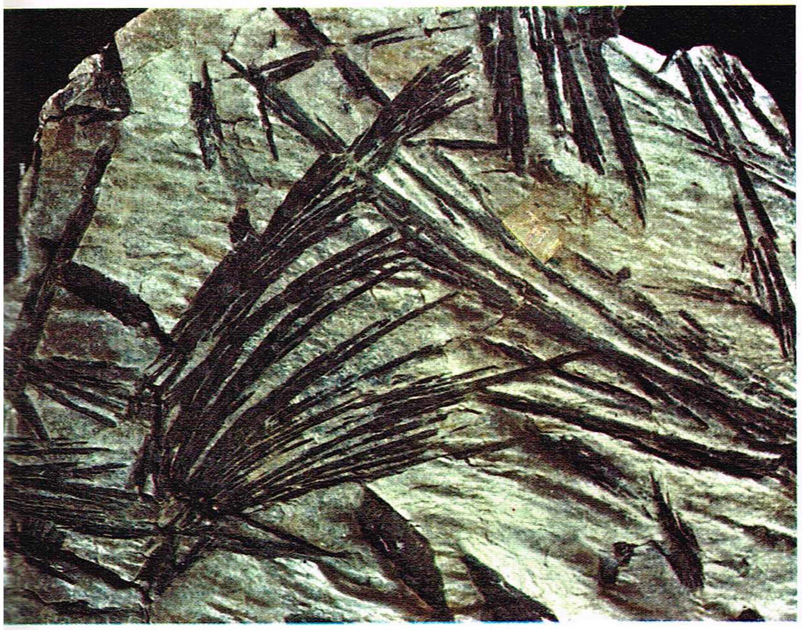

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *A gauche.* **hornblende** ***aciculaire dans un schiste du Zillertaler, Autriche (Londres, British Museum). A droite, cristaux prismatiques de*** **hornblende** ***sur oligoclase (Arendal, Norvège) [Londres, British Museum].***

Propriétés. Dureté : 5 à 6; densité : 3,15 à 3,35; indices de réfraction : np = 1,68, ng = 1,70. Translucide à opaque; couleur verte à vert foncé ou noire.

Gisements. La tchermachite est un constituant de certaines roches métamorphiques et roches ignées. Les échantillons bien cristallisés visibles dans les collections viennent du sud du Groenland.

Pargasite, $NaCa_2Mg_4Al[Al_2Si_6O_{22}(OH)_2]$ - monoclinique

Les cristaux de pargasite sont prismatiques avec les faces (010), (110), et (011). Ce minéral se présente aussi sous une forme massive lamellaire ou compacte. Le clivage est parfait sur {110} et imparfait sur {001} et {100}. Maclé sur {100}, elle forme une série avec la **ferropargasite,** $NaCa_2Fe^{2+}_4[AlAl_2Si_6O_{22}(OH)_2]$.

Propriétés. Dureté : 5 à 6; densité : 3,07 à 3,18; indices de réfraction : np = 1,615, ng = 1,635. Translucide à opaque; couleur brune, vert-bleu ou gris-noir à noire.

Gisements. Ce silicate de la série des hornblendes se rencontre dans les roches métamorphiques. De très beaux cristaux associés à la calcite ont été trouvés à Pargas (Finlande), localité qui a donné son nom à ce minéral.

Hastingsite, $NaCa_2Fe^{2+}_4Fe^{3+}[Al_2Si_6O_{22}(OH)_2]$ - monoclinique

Les cristaux sont prismatiques, plus ou moins allongés. L'hastingsite est aussi massive, lamellaire ou compacte. Le clivage est parfait sur {110}, et imparfait sur {001} et {100}. La macle sur {100} est commune. L'hastingsite forme une série continue avec la **magnésiohastingsite,** $NaCa_2Mg_4Fe^{3+}[Al_2Si_2O_{22}(OH)_2]$.

Propriétés. Dureté : 5 à 6; densité : 3 à 4; indices de réfraction : np = 1,67 à 1,71, ng = 1,69 à 1,73. Translucide à opaque; couleur vert foncé à noire.

Gisements. Ce silicate de la série des hornblendes est l'un des constituants des roches métamorphiques et des roches ignées. On peut citer parmi ses localités les plus classiques : Highwood, dans le Montana (États-Unis), Hasting, dans l'Ontario (Canada) et les îles de Los (Guinée), où on le rencontre, en petits cristaux noirs très brillants, dans les syénites néphéliniques.

Kaersutite, $NaCa_2(Mg,Fe^{2+},Fe^{3+},Al)_4Ti[Al_2Si_6O_{22}(OH)_2]$ - monoclinique

Cette hornblende titanifère se rencontre en prismes allongés. Le clivage est parfait sur {110}.

Propriétés. Dureté : 5 à 6; densité : 3,2 à 3,3; indices de réfraction : np = 1,67 à 1,69, ng = 1,70 à 1,72. Translucide à opaque; couleur brun sombre à noire.

Gisements. Ce minéral est un constituant des camptonites; il est aussi présent dans de nombreuses roches volcaniques. Parmi ses localités on peut citer : Kaersut (l'ouest du Groenland) et Boulder Dam (Arizona).

Richtérite, $NaNaCaMg_5[Si_8O_{22}(OH)_2]$ - monoclinique

Parfois en beaux cristaux prismatiques (fluorichtérite) avec les faces (110), (010), (011), (031) ou en masses lamellaires. Le clivage est parfait sur {110}. Elle forme une série avec la **ferrorichtérite,** $NaNaCaFe^{2+}_5[Si_8O_{22}(OH)_2]$ — monoclinique.

Propriétés. Dureté : 5 à 6; densité : 2,97 à 3,13; indices de réfraction variables avec la composition chimique : np = 1,605 à 1,68, ng = 1,63 à 1,71. Translucide; couleur brun-jaune à brun-rouge, rouge-rose ou vert pâle à vert foncé.

Gisements. Cette amphibole se forme dans les gîtes métasomatiques, les calcaires métamorphiques et certaines roches ignées. De très beaux cristaux viennent de Wilburforce, Ontario (Canada).

Katophorite, $NaNaCaFe^{2+}_4Fe^{3+}[AlSi_7O_{22}(OH)_2]$ - monoclinique

Les cristaux sont prismatiques, parfois maclés sur {100}. Le clivage est parfait sur {110}. Elle forme une série avec la **magnésiokatophorite,** $NaNaCaMg_4Fe^{3+}[AlSi_7O_{22}(OH)_2]$ — monoclinique.

Propriétés. Dureté : 5; densité : 3,33 à 3,48; indices de réfraction : np = 1,64 à 1,68, ng = 1,66 à 1,69 (variant avec la teneur en fer). Translucide à presque opaque; couleur bleu-noir à noir rougeâtre, ou brun-rouge très foncé.

Gisements. La katophorite se rencontre dans les roches basiques alcalines, les théralites, les shonkinites. La localité la plus classique est Mariupol (Ukraine).

Winchite, $NaCa(Mg,Fe^{2+})_4[AlSi_8O_{22}(OH)_2]$ - monoclinique

Cette amphibole est très proche de la richtérite.

Glaucophane, $Na_2Mg_3Al_2[Si_8O_{22}(OH)_2]$ - monoclinique

Les cristaux de glaucophane sont prismatiques, allongés, et possèdent très rarement des faces terminales nettes. Mais le plus souvent ce minéral est massif, grenu ou fibreux. Le clivage sur {110} est parfait. Le glaucophane forme une série avec le **ferroglaucophane** $Na_2Fe^{2+}_3Al_2[Si_8O_{22}(OH)_2]$.

Propriétés. Dureté : 6 à 6 $\frac{1}{2}$; densité : 3 à 3,15; indices de réfraction : np = 1,621, ng = 1,639. Transparent à translucide. L'éclat est vitreux et nacré sur le clivage. Couleur gris bleuâtre à bleu lavande, gris-noir à noire.

Gisements. Constituant de certaines amphibolites, le glaucophane se rencontre parfois dans les calcaires cristallins et dans quelques schistes cristallins. En France, sa

▶ *Photographie d'une lame mince de schiste à* glaucophane *au microscope polarisant (× 25).*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

localité la plus classique est la Pointe-des-Chats dans l'île de Groix (Morbihan).

Riébeckite, $Na_2Fe^{2+}_3Fe^{3+}_2[Si_8O_{22}(OH)_2]$ - monoclinique

Les cristaux de riébeckite sont prismatiques et allongés, fortement striés suivant l'allongement. Le clivage est parfait sur {110}. La riébeckite est également massive ou en lamelles radiées. Elle forme une série avec la **magnésioriébeckite,** $Na_2Mg_3Fe^{3+}_2[Si_8O_{22}(OH)_2]$.

Propriétés. Dureté : 4 ; densité : 3,4 ; indices de réfraction : np = 1,693, ng = 1,697. Translucide à opaque ; couleur gris-bleu foncé à noire. Sa variété fibreuse, la *crocidolite,* ressemble à l'amiante.

Gisements. Minéral des roches alcalines (granites alcalins, syénites et surtout leurs pegmatites). De très grands cristaux indistincts viennent de Salto (Corse). La variété crocidolite, partiellement silicifiée, est employée, sous le nom d'*œil de tigre,* en bijouterie ou pour la fabrication d'objets ornementaux. Son principal gisement est à Crikatown (Afrique du Sud).

Crossite, $Na_2(Mg,Fe^{2+})_3(Al,Fe^{3+})_2[Si_8O_{22}(OH)_2]$ - monoclinique

Les cristaux sont prismatiques ; mais la crossite est surtout fibreuse, en agrégats massifs, lamellaires ou granulaires. Le clivage est parfait sur {110}.

Propriétés. Dureté : 6 ; densité : 3,12 à 3,21 ; indices de réfraction : np = 1,658, ng = 1,673. Translucide à opaque ; couleur grise ou bleu grisâtre.

Gisements. Elle se rencontre dans les schistes cristallins. On peut citer parmi ses localités Custer (Colorado) et San Benito (Californie).

Eckermannite, $NaNa_2Mg_4Al[Si_8O_{22}(OH)_2]$ - monoclinique

L'eckermannite se présente en agrégats prismatiques. Le clivage est parfait sur {110}. Ce minéral forme une série avec la **ferroeckermannite,** $NaNa_2Fe^{2+}_4Al[Si_8O_{22}(OH)_2]$.

Propriétés. Dureté : 5 à 6 ; densité : 3 à 3,15 ; indices de réfraction : np = 1,61 à 1,64, ng = 1,63 à 1,65. Translucide ; couleur gris-bleu foncé.

Gisements. La ferroeckermannite se rencontre dans les syénites néphéliniques. Ses localités les plus classiques sont Norra Karr (Suède) et Camp Albion (Colorado).

Arfvedsonite, $NaNa_2Fe^{2+}_4Fe^{3+}[Si_8O_{22}(OH)_2]$ - monoclinique

Cette amphibole se présente le plus souvent en agrégats lamellaires ou en masses grenues. Les cristaux sont rares, de faciès prismatiques, aplatis sur (010) ou allongés suivant [001]. Le clivage est facile sur {110}. L'arfvedsonite forme une série avec la **magnésioarfvedsonite,** $NaNa_2Mg_4Fe^{3+}[Si_8O_{22}(OH)_2]$.

Propriétés. Dureté : 6 ; densité : 3,44 à 3,45 ; indices de réfraction : np = 1,687, ng = 1,708. Translucide à opaque ; couleur vert-noir à noire.

Gisements. C'est un silicate fréquent des roches alcalines (syénites à sodalite et à néphélines). Les plus gros cristaux ont été trouvés à Langerdluarsuk et Naujukasik (Groenland), dans la presqu'île de Kola (U.R.S.S.) et à Tirodi (Inde).

▼ **Riébeckite** *en prismes allongés (Masokani, Hill, Kenya)* [*Londres, British Museum*].

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

■ Doubles chaînes à 3 unités $[Z_6O_{17}]_\infty$ S = 1,58

Xonotlite, $Ca_6[Si_6O_{17}](OH)_2$ - monoclinique

La xonotlite se rencontre en masses lamellaires clivables ou fibreuses. Dureté : 6 ½ ; densité : 2,7 ; indices de réfraction : np = 1,583, ng = 1,595. Sa localité la plus classique est Xonotla (Mexique), qui lui a donné son nom.

■ Doubles chaînes à 3 unités $[Z_6O_{15}]_\infty$ S = 1,75

Elpidite, $Na_2Zr[Si_6O_{15}] \cdot 3H_2O$ - orthorhombique

Très rare en cristaux distincts, l'elpidite est surtout en masses clivables ou fibreuses. Dureté : 7 ; densité : 2,54 ; indices de réfraction : np = 1,560, ng = 1,674. Les meilleures pièces de collection viennent de Narsarsuk (Groenland).

■ Doubles chaînes à 4 unités $[Z_8O_{20}]_\infty$ S = 1,75

Narsarsukite, $Na_4Ti_2O_2[Si_8O_{20}]$ - quadratique

Les cristaux de ce rare silicate sont tabulaires. Le clivage est parfait sur {010}. Dureté : 7 ; densité : 2,7 ; indices de réfraction : np = 1,609, ng = 1,630. Translucide à opaque ; couleur jaune miel ou gris-brun à ocre jaune. Ce minéral a été rencontré dans les pegmatites de Narsarsuk (Groenland).

Neptunite, $KNa_2Li(Fe,Mn)_2Ti_2[O/Si_4O_{11}]_2$ - monoclinique

Les cristaux sont très nets (prismes à base carrée pseudoquadratique) et allongés suivant [001]. Le clivage sur {110} est bon.

Propriétés. Dureté : 5 à 6 ; densité : 3,23 ; indices de réfraction : np = 1,69, ng = 1,74. Faiblement translucide à opaque ; couleur noire avec une patine brillante.

Gisements. C'est un minéral rare des pegmatites alcalines du Groenland. De splendides groupes de cristaux noir brillant, très bien formés, ont été trouvés en association avec la bénitoïde à San Benito (Californie).

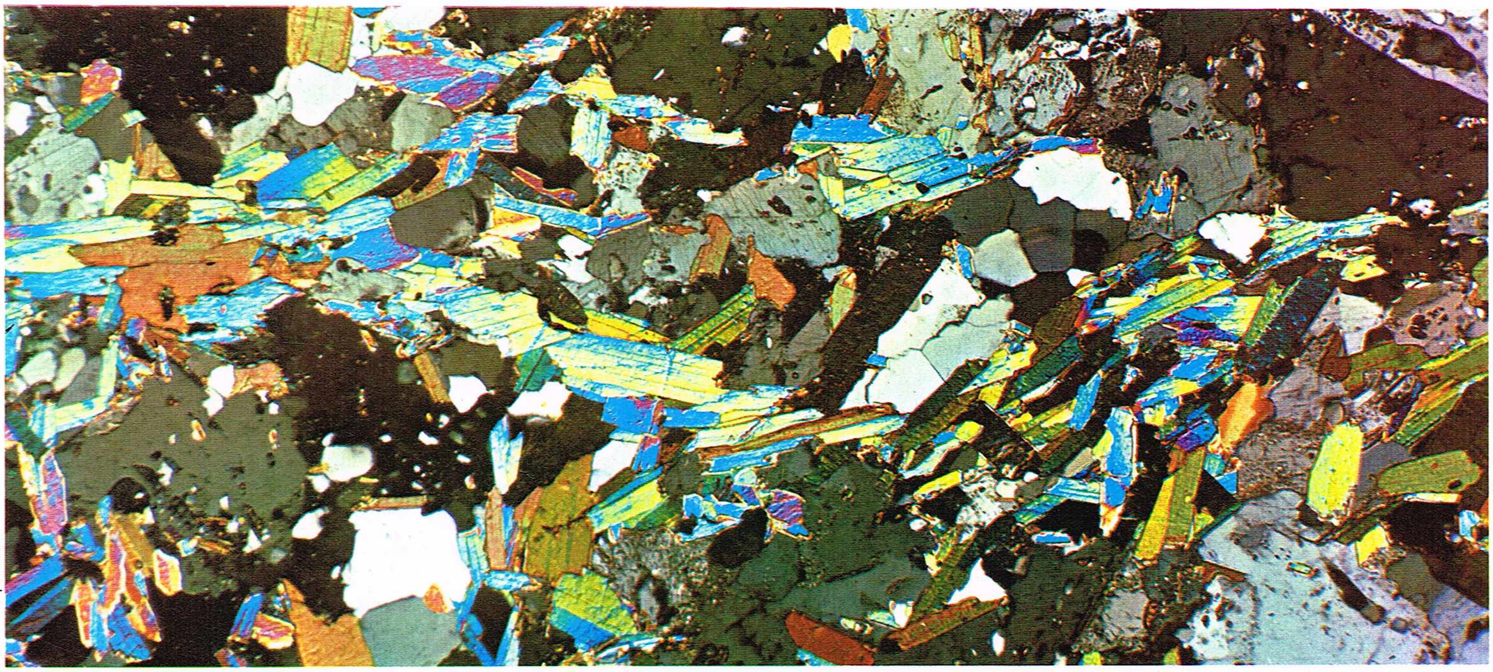

▲ ***Une roche contenant de la* muscovite, *photographiée au microscope à nicols croisés.***

★ ***Phyllosilicates***

Les phyllosilicates sont caractérisés par des feuillets simples ayant la structure : $[Z_{2x}O_{5x}]_{\infty}$. Ils comprennent des silicates à 2, 3 ou 4 unités.

■ **Phyllosilicates à 2 unités**

Sanbornite, Ba[Si₄O₁₀] - orthorhombique

La sanbornite se rencontre en plaques épaisses facilement clivables sur (001).

Propriétés. Dureté : 5; densité : 3,70 à 3,77; indices de réfraction : np = 1,600, ng = 1,625. Transparente à translucide; blanchâtre, jaunâtre, verdâtre, ou incolore; éclat perlé sur le clivage.

Gisements. On peut citer les localités suivantes : Mariposa, Fresno et Rush Creek (Californie).

Talc, $Mg_3[(OH)_2|Si_4O_{10}]$ - orthorhombique

C'est un minéral très recherché par l'industrie (pharmaceutique, textile, papeterie, céramique, caoutchouc). Il est surtout massif, avec un toucher gras très caractéristique qui a donné naissance à l'adjectif « talqueux ». Les cristaux sont lamellaires avec un clivage parfait. Les formes observées sont presque toujours dues à des pseudomorphoses.

Propriétés. Sa dureté sert à définir le degré 1 de l'échelle de Mohs; densité : 2,6 à 2,7; indices de réfraction : np = 1,54 à 1,55, ng = 1,58 à 1,59. Transparent à translucide; couleur blanche, verte, grise, brune. La *stéatite* est une variété servant à la fabrication d'objets ornementaux.

Gisements. Ce minéral d'altération est très fréquent; il se rencontre dans les schistes cristallins peu métamorphiques, les dolomies métamorphiques, et les serpentines magnésiennes. Le gîte de Luzenac (Pyrénées) est l'un des plus grands du monde. C'est de Harford (Maryland, États-Unis) que viennent les plus belles lames feuilletées visibles dans les collections.

Pyrophyllite, $Al_2[(OH)_2|Si_4O_{10}]$ - monoclinique

La pyrophyllite est en masses lamellaires ou fibreuses, radiées ou foliacées. Les cristaux sont tabulaires parallèlement à (010) ou allongés. Le clivage sur (001) est parfait; les lamelles sont flexibles. La pyrophyllite est souvent employée pour la fabrication de petits objets ornementaux.

Propriétés. Dureté : 1 à 2; densité : 2,65 à 2,90; indices de réfraction : np = 1,53 à 1,55, ng = 1,59 à 1,60. Transparente à translucide. Blanche ou de couleurs pâles (vert, jaune, brun, gris, bleu, etc.).

Gisements. Ce minéral provient des roches schisteuses. Parmi ses localités on peut citer Zermatt (Suisse). La variété *pagodite,* massive, est fréquemment utilisée en Chine pour la fabrication d'objets divers.

Muscovite, $KAl_2[AlSi_3O_{10}](OH,F)_2$ - monoclinique

Les cristaux de muscovite, atteignant parfois plusieurs mètres carrés, sont tabulaires à contour hexagonal; les faces du prisme sont fortement striées horizontalement. Mais le plus souvent la muscovite se présente en masses clivables, avec un clivage parfait suivant (001), écailleuses, radiées ou palmées. Les cristaux peuvent présenter une forme d'étoile à six branches ou être en lames convexes. Les lames de clivage sont flexibles. La muscovite est le principal « mica industriel » utilisé comme isolant.

Propriétés. Dureté : 2 à 2 ½; densité : 2,76 à 3; indices de réfraction : np = 1,552, ng = 1,588. Transparente à translucide. Incolore ou grisâtre, jaune à verdâtre ou rosâtre. La *fuchsite* est vert vif (avec 5 % de chrome).

Gisements. C'est un constituant essentiel des granites des greisens, des micaschistes, des phyllites et d'autres roches riches en aluminium et en potassium. Les plus importants gisements industriels sont situés dans les

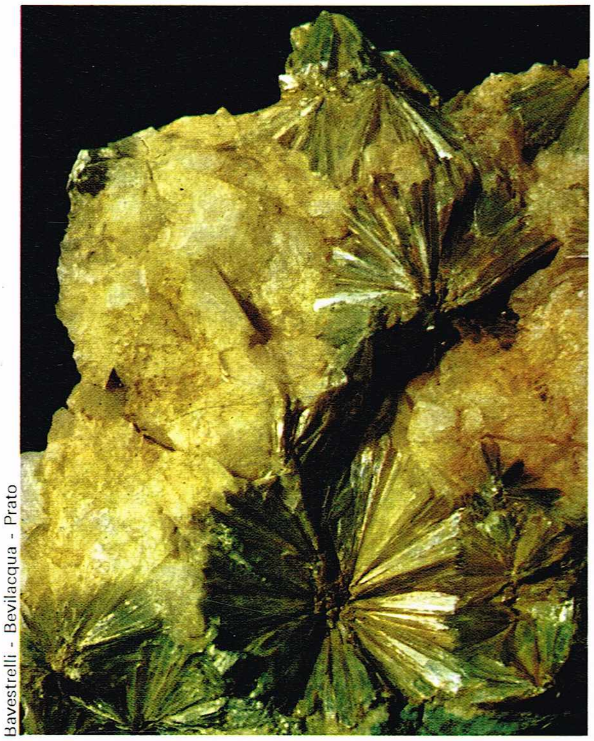

◀ **Pyrophyllite** ***en agrégats lamellaires radiés de l'Oural (Milan, musée d'Histoire naturelle).***

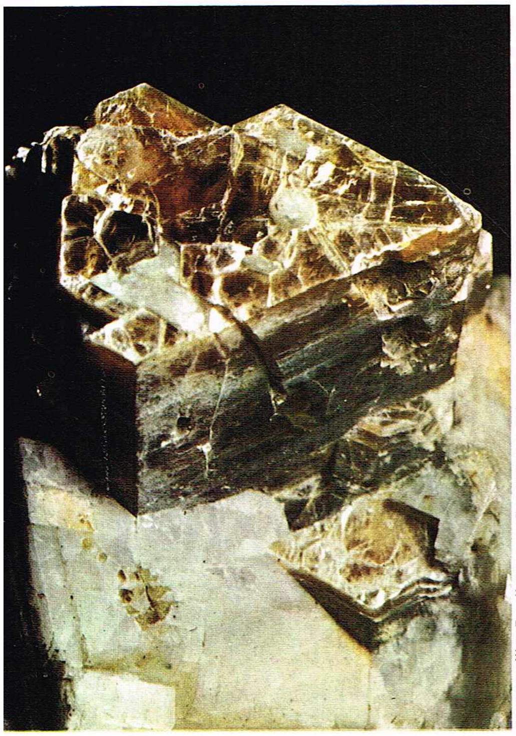

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

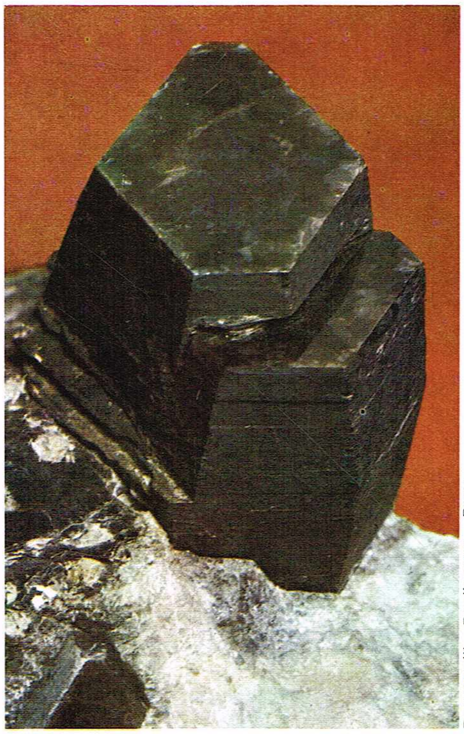

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *A gauche,* **phlogopite** *cristallisée sur calcite, Franklin Furnace, New Jersey (Londres, British Museum). A droite,* **muscovite** *en prismes pseudo-hexagonaux provenant de Bamble, Norvège (Londres, British Museum).*

▼ *Cristaux de* **zinnwaldite** *provenant de Zinnwald (Bohême), localité d'origine de ce minéral (Londres, British Museum).*

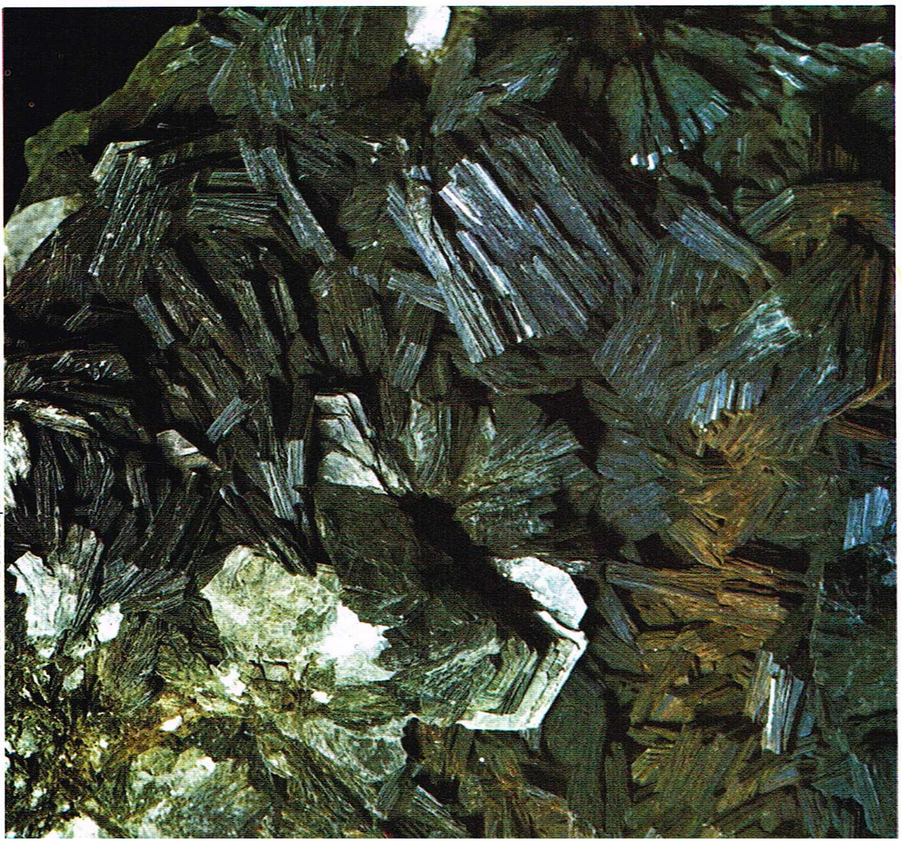

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

pegmatites de l'Inde, du Canada, du Mozambique, de la Caroline du Nord. Les plus belles cristallisations exposées dans les musées viennent de la région de Governador-Valadarès (Brésil), et des pegmatites de Madagascar et de l'Oural.

Phlogopite, $KMg_3[AlSi_3O_{10}](F,OH)_2$ - monoclinique

Ce mica est recherché pour l'industrie ; ses cristaux, en prismes, pseudo-hexagonaux aplatis sur (001) ou en pyramides aiguës très bien formées, atteignent jusqu'à 5 m de diamètre. Comme pour tous les minéraux de ce groupe, le clivage est parfait sur (001).

Propriétés. Dureté : 2 ½ à 3 ; densité : 2,78 à 2,85 ; indices de réfraction : de 1,541 à 1,606. Transparente à translucide ; couleur brune, jaune, marron rougeâtre et gris-blanc ; éclat nacré submétallique.

Gisements. Ce mica est fréquent dans les gîtes métasomatiques de contact avec calcite, dans les pegmatites, dans les roches ignées riches en magnésium et pauvres en fer. D'énormes cristaux métriques ont été trouvés à Madagascar. Les cristaux les mieux formés sont ceux d'Ampandrandava (Madagascar), ceux de North Burgess, dans l'Ontario (Canada).

Biotite, $K(Mg,Fe,Mn)_2[AlSi_3O_{10}](OH,F)_2$ - monoclinique

La biotite se présente le plus souvent en agrégats écailleux ou lamellaires ; ses cristaux sont aplatis avec un contour hexagonal. Le clivage est parfait sur (001). La variété *manganophyllite* est riche en manganèse et la *lépidomélane* en fer.

Propriétés. Dureté : 2 ½ à 3 ; densité : 2,7 à 3,1 ; indices de réfraction : np = 1,58, ng = 1,68. Transparente à opaque ; couleur brune, vert foncé, noire ; lorsqu'elle s'altère, elle peut être rougeâtre, jaunâtre, ou jaune doré vif. L'éclat est submétallique et nacré sur le clivage.

Gisements. La biotite est le mica le plus répandu. Elle est l'un des constituants des granites, des syénites et des diorites ; on la rencontre aussi dans les gneiss, les schistes, les roches métamorphiques et dans certaines roches éruptives. On peut voir dans les collections des cristaux bien formés provenant du Minas Gerais (Brésil), de Franklin Furnace (New Jersey) et de Traversella (Piémont, Italie).

Lépidolite, $KLi_2Al[Si_4O_{10}](F,OH)_2$ - monoclinique

La lépidolite est commune en agrégats lamellaires ou écailleux ; ses cristaux bien formés sont rares avec un faciès prismatique à contour hexagonal ; ces cristaux constituent parfois des groupements en « colonnette » ou en demi-sphère, formés par des empilements parallèles ou concentriques de fines écailles circulaires. Comme chez les autres micas, le clivage est parfait sur (001). La lépidolite est l'un des principaux minerais de lithium.

Propriétés. Dureté : 2 ½ à 3 ; densité : 2,8 à 3,3 ; indices de réfraction : np = 1,530 ; ng = 1,556. Transparente à translucide ; éclat nacré sur le clivage ; couleur rose à rose violacé vif, blanchâtre ou verdâtre.

Gisements. Ce mica des granites et des pegmatites contenant des minéraux riches en fluor (topaze, etc.) est associé aux feldspaths et rubellites dans les greisens. De splendides groupes de lamelles hexagonales (ou prismes allongés) viennent du Minas Gerais (Brésil), et de grandes lames violacées de Madagascar. D'importants gîtes de lépidolite existent au Mozambique et en Californie (associés à la rubellite).

Zinnwaldite, $KLiFeAl[AlSi_3O_{10}](F,OH)_2$ - monoclinique

La zinnwaldite se présente en groupes de cristaux enchevêtrés ou flabelliformes. Les cristaux sont aplatis sur (001) et présentent des contours hexagonaux avec un clivage basal parfait (001).

Propriétés. Dureté : 2 ½ à 3 ; densité : 2,8 à 3,2 ; indices de réfraction : np = 1,54 à 1,56, ng = 1,57 à 1,59. Transparente à translucide ; couleur gris foncé à gris argent, jaunâtre, violet clair ou noirâtre.

Gisements. C'est un mica des granites ou des gneiss à cassitérite formés par pneumatolyse. Sa localité la plus classique est Zinnwald (Bohême).

Bityite, $CaLiAl_2[AlBe_2Si_2O_{10}](OH)_2$ - monoclinique

Ce minéral rare est en rosettes ou en agrégats micassés ; plus rarement en cristaux de plus de 2 mm, ils sont tabulaires et pseudo-hexagonaux. Le clivage sur (001) est parfait.

Propriétés. Dureté : 5 ½ ; densité : 3,02 à 3,07 ; indices de réfraction : np = 1,652, ng = 1,661. Transparente à translucide ; incolore à blanche, jaunâtre, brunâtre ; éclat nacré sur les clivages.

Gisements. Découverte associée à la rubellite sur du quartz à Maharitra (Madagascar), on a reconnu la bityite dans l'ouest de l'Australie associée à l'albite et au béryl dans les pegmatites de Londonderry. Le Muséum de Paris conserve les plus beaux échantillons connus.

Kaolinite, $Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$ - triclinique

La kaolinite se rencontre en masses terreuses ou grenues, en agrégats écailleux, et plus rarement en cristaux petits, indistincts et lamellaires, dont le clivage est facile (001). Le kaolin, utilisé pour la fabrication de la porcelaine

(formant une masse plastique avec l'eau), est un mélange de kaolinite, nacrite, dickite et autres silicates alumineux.

Propriétés. Dureté : 1 ; densité : 2,60 à 2,63 ; indices de réfraction : np = 1,557, ng = 1,566. Translucide ; couleur jaunâtre, verdâtre, bleuâtre ou blanche.

Gisements. C'est un minéral secondaire d'altération des roches très alumineuses (granites, porphyres, gneiss, etc.). Les gisements les plus importants sont situés en Chine, en Saxe, en Tchécoslovaquie et en France près de Limoges (gisement de Saint-Yriex dans la Haute-Vienne).

Chrysotile et antigorite, $Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$ - monoclinique

Ces deux minéraux sont aussi appelés serpentine. Le chrysotile est fibreux ou aciculaire, alors que l'antigorite est lamellaire. Souvent massifs et compacts, ils offrent une certaine analogie d'aspect avec les jades. Lorsqu'ils sont très tenaces, ils sont utilisés pour imiter ces derniers. Ils servent aussi de « réfractaires » en métallurgie. Le « vert antique » est une serpentine contenant de la dolomite et de la calcite. Le chrysotile peut être asbestiforme (amiante). La variété nickélifère est l'un des constituants du minerai de nickel nommé *garniérite*.

Propriétés. Dureté : 3 à 4 ; densité : 2,5 à 2,6 ; indices de réfraction variant entre 1,49 et 1,57 ; translucide. Couleurs très variées : vert clair à vert-noir, rouge-brun, jaune-vert à gris-vert.

Gisements. Ces minéraux se rencontrent dans les schistes cristallins et les roches calcaires. Les gisements sont variés ; parmi les plus classiques citons : Vermon Co. (New Jersey) et Modum (Norvège).

Cronstedtite, $Fe_6[Fe_2Si_2O_{10}](OH)_8$ - monoclinique

La cronstedtite est fibreuse ou en petits cristaux à section triangulaire. Le clivage est parfait sur (001).

Propriétés. Dureté : $3\frac{1}{2}$; densité : 3,34 à 3,45 ; indices de réfraction : nm = 1,80. Translucide à opaque ; de couleur vert-noir à brun-noir.

Gisements. Les plus belles pièces rassemblées dans les collections viennent de Kisbanya (Hongrie) et Przibram (Bohême).

Montmorillonite, $(Al_{1,67}Mg_{0,33}[Si_4O_{10}/(OH)_2]_{0,35}-Na_{0,33}(H_2O)_4$ - monoclinique

Massive, écailleuse, ou friable et grasse ; la montmorillonite est répandue dans les argiles. Sa teneur en eau varie de 12 à 23 %, ce qui provoque de larges variations dans ses propriétés physiques.

Propriétés. Dureté : 1 ; densité : 1,8 à 2,6 ; indices de réfraction : np = 1,48 à 1,56, ng = 1,51 à 1,59. Couleur blanche, grise, rosâtre ou verdâtre.

Gisements. C'est un phyllosilicate secondaire très répandu, formé par altération des silicates ferromagnésiens, des feldspaths calciques, etc. De grandes masses roses proviennent de Montmorillon (Vienne), localité qui a donné son nom à ce minéral.

Vermiculite, $Mg_{2,36}Fe_{0,48}Al_{0,16}[(OH)_2|Al_{1,28}Si_{2,72}O_{10}]_{0,64}-Mg_{0,32}(H_2O)_4$ - monoclinique

La vermiculite se présente en masses foliacées, ou terreuses et friables, assez semblables à des micas altérés. Le clivage est parfait sur (001). La vermiculite est très employée comme isolant thermique.

Propriétés. Dureté : $1\frac{1}{2}$; densité : 2,5 ; indices de réfraction : np = 1,52 à 1,54, ng = 1,54 à 1,56. Translucide ; couleur verdâtre, rougeâtre, jaune d'or à brune. Elle gonfle en s'exfoliant au chalumeau (20 fois le volume primitif).

Gisements. Ce phyllosilicate secondaire est formé par altération des roches ferromagnésiennes.

Kammérérite, $(Mg,Cr)_{<3}[(OH)_2|AlSi_3O_{10}]Mg_3(OH)_6$ - monoclinique

La kammérérite se présente en petits cristaux aplatis et pseudo-hexagonaux, prismatiques ou pyramidaux. Le clivage est parfait sur (001).

Propriétés. Dureté : 2 à $2\frac{1}{2}$; densité : 2,64 ; indices de réfraction : 1,58 à 1,60. Transparente à translucide ; d'une belle couleur rouge violacé (assez semblable à celle de l'érythrite).

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

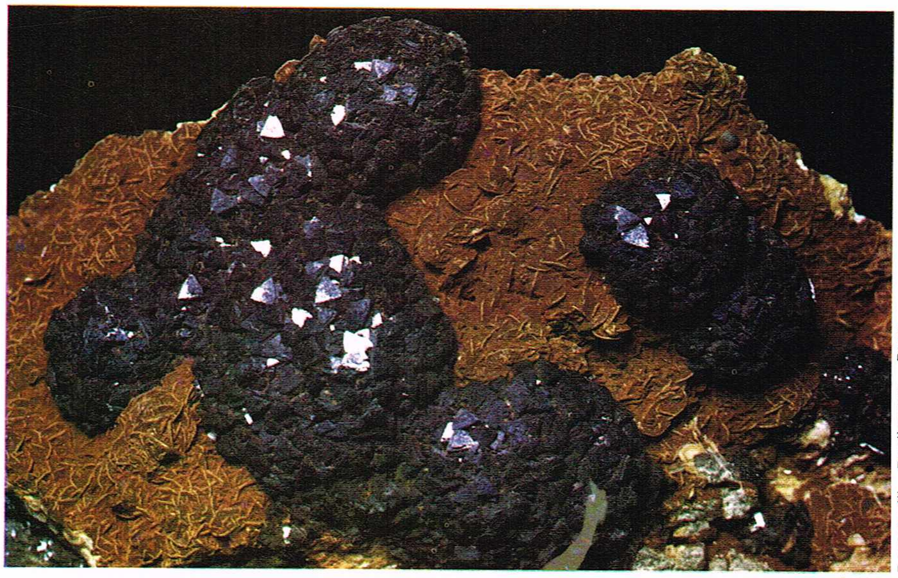

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***En haut,* serpentine (*variété* lizardite) *provenant de Montville, New York. Les variétés massives sont employées pour la fabrication d'objets ornementaux. En bas, très beau groupe de cristaux sombres de* cronstedtite *de Kisbanya, Hongrie (Londres, British Museum).***

Gisements. La kammérérite est associée à l'ouvarovite dans les dépôts de chromite. De jolis cristaux proviennent d'Erzincan (Turquie).

Pennine, $(Mg,Al)_3[(OH)_2|Al_{0,5-0,9}Li_{3,5-3,1}O_{10}]Mg_3(OH)_6$ - monoclinique

La pennine est massive, compacte et assez souvent en cristaux. Le clivage est parfait sur (001). Les lamelles sont flexibles.

Propriétés. Dureté : 2 à $2\frac{1}{2}$; densité : 2,60 à 2,85 ; indice de réfraction : nm = 1,576 à 1,600.

Gisements. La pennine se rencontre dans les serpentines et les schistes cristallins. Les plus beaux cristaux que l'on peut voir dans les collections viennent de Zermatt (Valais, Suisse) et de Hardadinsk (Oural).

Clinochlore, $(Mg,Al)_3[(OH)_2|AlSi_3O_{10}]Mg_3(OH)_6$ - monoclinique

Massif, le plus souvent granulaire, le clinochlore se présente aussi en cristaux tabulaires ou en bipyramides grossières et fortement striées parallèlement à la face (001). Le clivage est parfait sur (001).

Propriétés. Dureté : 2 à $2\frac{1}{2}$; densité : 2,65 à 2,78 ; indice de réfraction : nm = 1,57 à 1,59. Transparent à translucide ; de couleur vert pâle à vert olive, blanchâtre ou jaunâtre.

Gisements. On trouve le clinochlore dans les serpentines et les schistes. Il se forme par altération des amphiboles et des pyroxènes. C'est de Tilly Foster et de Brewster

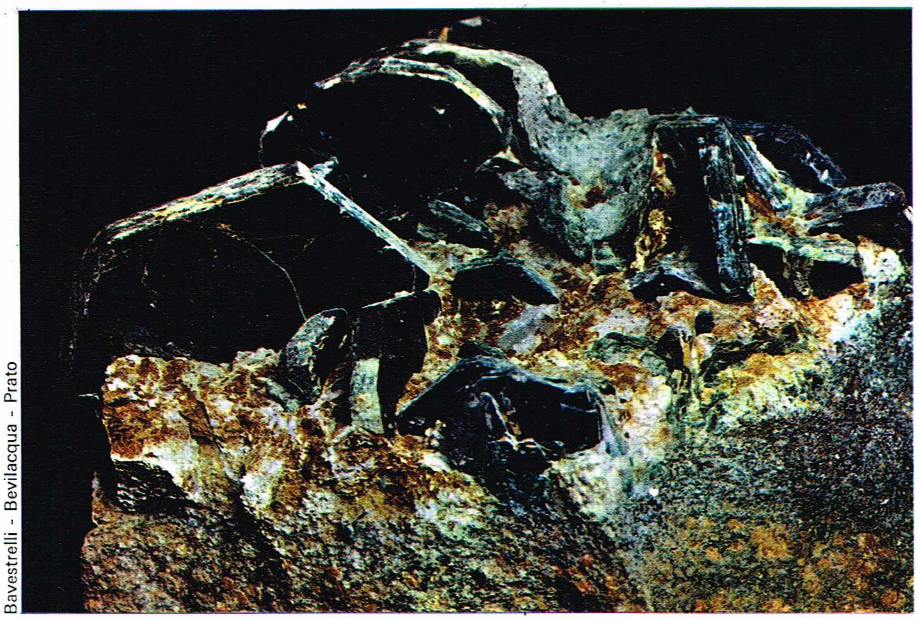

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ **Clinochlore** *en cristaux tabulaires, associé à de la chondrodite, Tilly Foster, New York (Londres, British Museum).*

(New York) que viennent les meilleures cristallisations. Une belle association avec le grossulaire orangé et le diopside vert pâle venant du Val d'Ala (Piémont) est très recherchée pour les collections.

Palygorskite, $(Mg,Al)_2[(OH)|Si_4O_{10}] \cdot 2\,H_2O + 2\,H_2O$ - monoclinique

Le nom de « carton de montagne » donné à ce minéral illustre bien son aspect : il est en effet formé de fibres microcristallines enchevêtrées qui lui donnent une consistance de tissu plus ou moins rigide.

Propriétés. Dureté : 2 ; densité : 2. De couleur blanche ou grise ou encore jaune.

Gisements. Ce phyllosilicate de formation secondaire est fréquent dans les roches riches en magnésium. Une des localités les plus classiques est Fischtel (Bavière), où la palygorskite est associée à la magnétite et à l'apatite.

Sépiolite, $Mg_4[(OH)_2|Si_6O_{15}] \cdot 2H_2O + 4H_2O$ - orthorhombique

La sépiolite forme des masses légères, très poreuses et arrondies.

Propriétés. Dureté : 2 à 2 ½ ; densité : 1,5 à 2 ; indice de réfraction : nm = 1,52 à 1,53. Opaque, blanche, elle est utilisée sous le nom d' « écume de mer » pour la fabrication de pipes et de petits objets ornementaux.

Gisements. Ce phyllosilicate d'origine secondaire se rencontre dans des dépôts sédimentaires. La localité la plus classique est Serisan, Eskicheir (Anatolie, Turquie).

Gyrolite, $Ca_2[Si_4O_{10}] \cdot 4H_2O$ - rhomboédrique

La gyrolite est le plus souvent massive, lamellaire, à structure radiée formant des boules pouvant mesurer 3 cm de diamètre. Le clivage des lamelles est parfait sur (0001).

Propriétés. Dureté : 3 à 4 ; densité : 2,34 à 2,45 ; indices de réfraction : np = 1,536, ng = 1,549. Transparente à translucide, blanchâtre ou jaunâtre.

Gisements. Ce silicate de formation secondaire est associé à l'apophyllite. Les belles pièces des musées viennent de Poona (Inde), où la gyrolite est associée à l'okénite, la calcite et l'apophyllite dans les cavités d'un basalte. Ce minéral a été rencontré en abondance à Fort Point, San Francisco Co. (États-Unis).

▶ *Page ci-contre, en haut, agrégats de microcristaux de* **chrysocolle** *provenant de Cap Calamita (île d'Elbe). Au centre,* **pyrosmalite** *de Nordmark. Ce groupe est l'un des plus beaux qui soient dans le monde pour cette espèce.*

Chrysocolle, $Cu_4H_4[Si_4O_{10}](OH)_8$

Ce silicate de cuivre est microcristallisé. Il forme des masses fragiles plus ou moins compactes, d'aspect terreux ou porcelainé, des stalactites, ou encore des masses collomorphes ou réniformes. La cassure est conchoïdale.

Propriétés. Dureté : 2 ½ ; densité : 2 à 2,24 ; indices de réfraction : np = 1,46, ng = 1,57. Translucide à opaque ; couleur bleu azur à bleu pâle, bleu-vert à vert émeraude, ou encore brunâtre ou noirâtre.

Gisements. Ce minéral secondaire se rencontre dans les zones d'oxydation des gisements de cuivre situés en climats chauds. Il est associé à la malachite, la pseudomalachite, etc. C'est de Ruwe et Likasi (Katanga) que proviennent les meilleures pièces exposées dans les musées.

Pyrosmalite, $(Mn,Fe)_8[(OH,Cl)_{10}|Si_6O_{15}]$ - hexagonal

La pyrosmalite est le plus souvent massive ou grenue. Ses cristaux sont rares et de faciès prismatique (10$\bar{1}$0) et (0001), plus ou moins allongés, les cristaux les plus gros étant tabulaires. Le clivage est facile sur (0001).

Propriétés. Dureté : 4 à 4 ½ ; densité : 3,06 à 3,18 ; indices de réfraction : np = 1,64, ng = 1,68. Translucide à opaque ; couleur brune, olivâtre ou jaunâtre.

Gisements. Ce phyllosilicate formé par métamorphisme de contact est associé à la hornblende et aux silicates de manganèse. Les plus beaux cristaux viennent de Nordmark (Suède). Le British Museum conserve les plus gros cristaux connus.

Friedélite, $(Mn,Fe)_8[(OH,Cl)_{10}|Si_6O_{15}]$ - hexagonal

La friedélite est cryptocristalline, massive, ou en agrégats lamellaires. Ses cristaux, rares, sont tabulaires. Le clivage est parfait sur (0001). Ce minéral a été employé comme gemme taillée en « cabochon ».

Propriétés. Dureté : 4 à 5 ; densité : 3,04 à 3,06 ; indices de réfraction : np = 1,63, ng = 1,66. Translucide, avec une couleur rouge-brun vif à rose pâle.

Gisements. On trouve ce minéral dans la mine de manganèse d'Adervielle (Hautes-Pyrénées) avec de la rhodonite et à Franklin Furnace (New Jersey) associé à la franklinite, à la willémite et à la zincite.

■ Phyllosilicates à 3 unités

Dalyite, $K_2Zr[Si_6O_{15}]$ - triclinique

La dalyite se présente en petits cristaux avec les faces (100), (110), (101), (110) et (111), maclés sur {100}. Les clivages (101) et (010) sont bons.

Propriétés. Dureté : 7 ½ ; densité : 2,82 à 2,86 ; indices de réfraction : np = 1,57, ng = 1,60. Transparente et incolore.

Gisements. C'est un phyllosilicate rare des granites alcalins. Elle est associée à l'ægyrine et à l'amphibole. On la rencontre dans l'île de l'Ascension (océan Atlantique).

Okénite, $Ca_2[Si_4O_{10}] \cdot 4H_2O$ - triclinique

L'okénite se présente en masses fibreuses ou en touffes sphériques de fins cristaux flexibles et élastiques. Le clivage est aisé sur (010).

Propriétés. Dureté : 4 à 4 ½ ; densité : 2,30 à 2,35 ; indices de réfraction : np = 1,53, ng = 1,54. Transparente et blanchâtre avec un reflet soyeux.

Gisements. Les meilleures pièces de collection viennent des amygdales des basaltes de Poona (Inde), où l'okénite est associée à la gyrolite et à la calcite.

Akermanite, $Ca_2Mg[Si_2O_7]$ - quadratique

Le plus souvent elle est massive ou granulaire ; ses cristaux sont prismatiques et maclés sur {100} et {001}. Le clivage est assez bon sur {001}. La fracture est conchoïdale.

Propriétés. Dureté : 5 à 6 ; densité : 2,92 à 2,96 ; indices de réfraction : np = 1,63, ng = 1,64. Transparente à translucide ; incolore ou verte, brune, grise.

Gisements. Ce minéral provient des calcaires cristallins ou des roches basiques éruptives riches en calcium.

Gehlénite, $Ca_2Al[(Si,Al)_2O_7]$ - quadratique

Les cristaux de gehlénite, aux faces souvent rugueuses, sont prismatiques allongés suivant [001]. Les macles sur {100} et {001} sont signalées. Le clivage sur {001} est distinct. La fracture est conchoïdale. Ce minéral est aussi massif ou granulaire.

Propriétés. Dureté : 5 à 6 ; densité : 2,95 à 3,07 ; indices de réfraction : np = 1,66, ng = 1,67. Translucide à presque opaque ; grise, blanchâtre, brunâtre, verdâtre.

Gisements. On trouve la gehlénite dans les calcaires cristallins et certaines roches éruptives basiques riches en

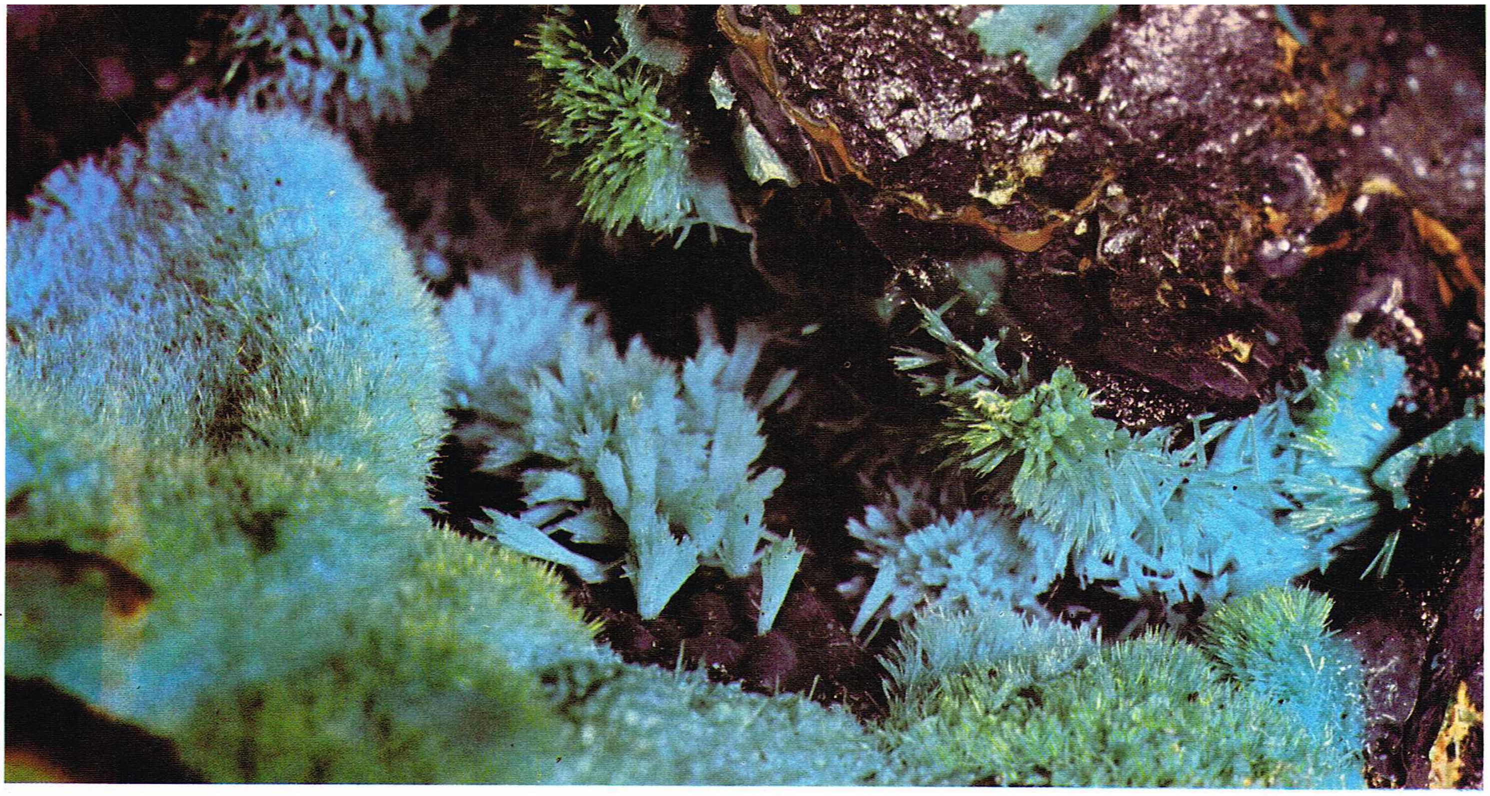

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

calcium. Des groupes de cristaux centimétriques ont été trouvés à Fiemme (Italie du Nord).

Mélilite, $(Ca,Na)_2(Al,Mg)[(Si,Al)_2O_7]$ - quadratique

Ce phyllosilicate est voisin de l'akermanite et de la gehlénite. Dureté : 5 ; densité : 2,90 à 3,10. Translucide à opaque ; blanchâtre ou grisâtre. Des cristaux bien formés ont été rencontrés au Monte Somma (Vésuve, Italie).

■ **Phyllosilicates à 4 unités**

Apophyllite, $KCa_4[F|(Si_4O_{10})_2] \cdot 8H_2O$ - quadratique

Ce minéral cristallise en prismes pseudocubiques {100} et {001} avec les troncatures {111}, ou en pyramides aiguës {111}, ou encore en cristaux tabulaires sur (001). Le clivage sur {001} est parfait. Associée aux zéolites, l'apophyllite est très recherchée des collectionneurs.

Propriétés. Dureté : $4\frac{1}{2}$ à 5 ; densité : 2,3 à 2,4 ; indice de réfraction : 1,535 à 1,537. Transparente à translucide ; éclat vitreux à nacré sur le clivage ; incolore et parfaitement limpide à laiteuse, teintée de vert, de rose et de jaune.

Gisements. Ce phyllosilicate de formation secondaire est associé à la stilbite, la laumontite, la scolécite, etc., dans les cavités des roches basaltiques. Les plus belles pièces de collection viennent de Poona (Inde), du tunnel Das Antas (Rio Grande do Sul, Brésil), d'Andreasberg (Harz, Allemagne) et de Guanajuato (Mexique).

Gillespite, $BaFe[Si_4O_{10}]$ - quadratique

La gillespite se présente en masses compactes ou en grains disséminés dans la roche. Le clivage sur {001} est distinct.

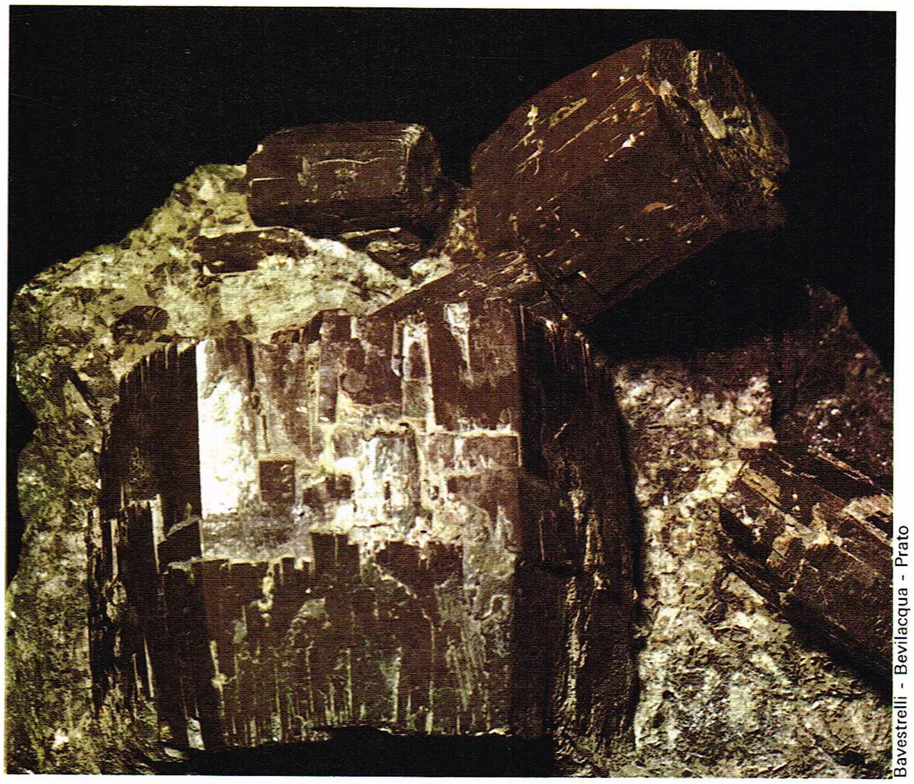

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

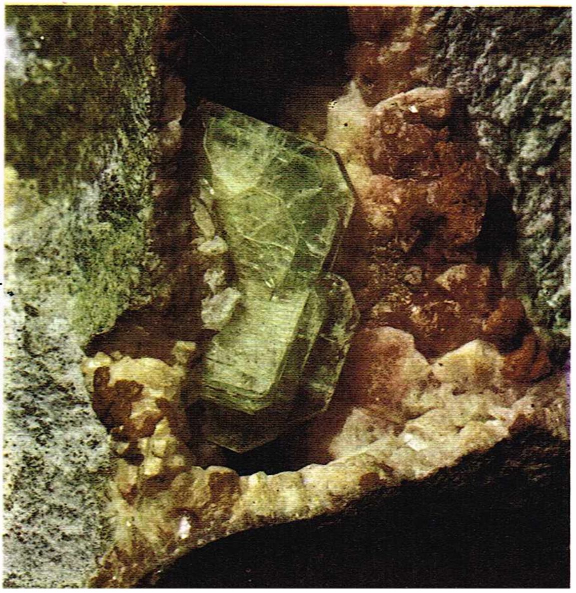

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ ***A gauche, un cristal pseudocubique d'apophyllite de Rio Grande do Sul (Brésil). A droite, apophyllite en cristaux aplatis dans une cavité basaltique, Alpes de Siusi, Bolzano (Milan, musée d'Histoire naturelle).***

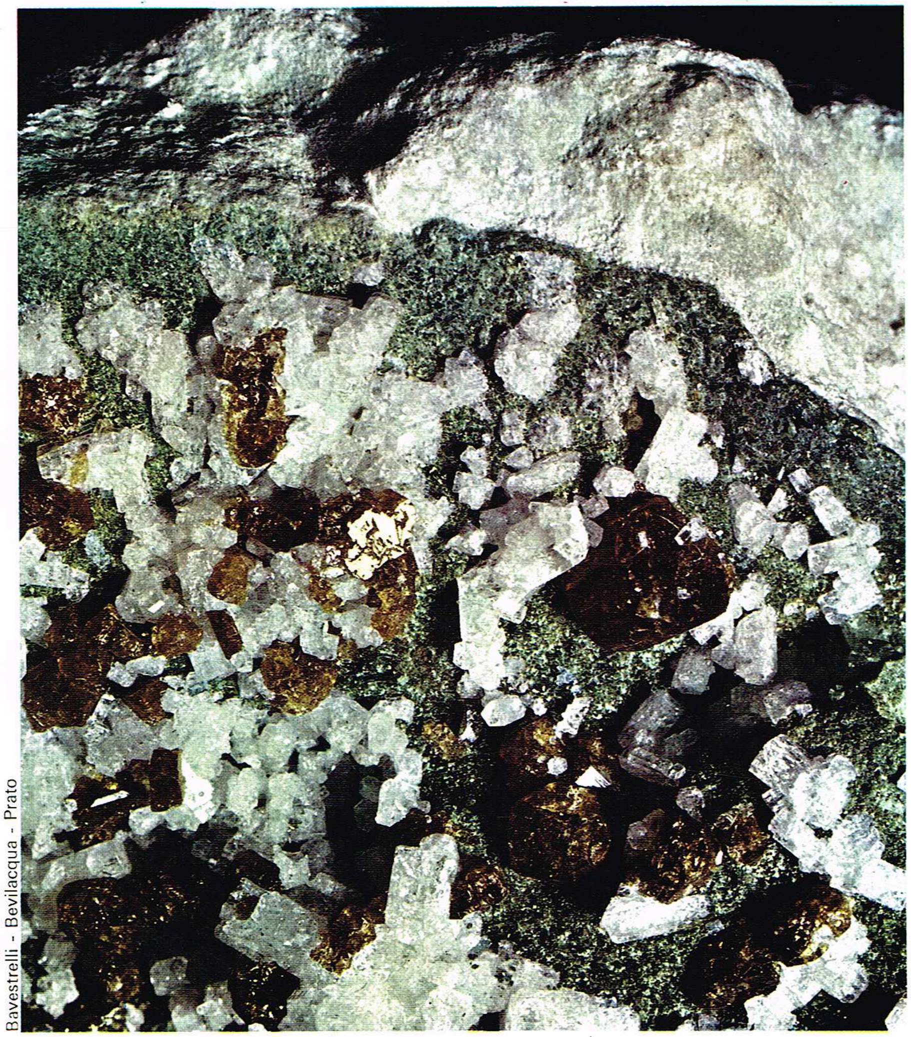

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

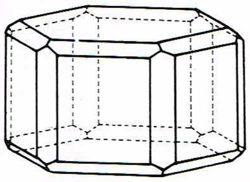

I.G.D.A.

▲ *En haut,* néphéline *(blanche) cristallisée avec de la vésuvianite (brune), provenant de Monte Somma, Vésuve. Ci-dessus, forme de cristallisation de la* néphéline.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ Préhnite *en cristaux divergents constituant des « mamelons » ou des « selles » à pointements cristallins (Alpes de Siusi, Bolzano) [Milan, musée d'Histoire naturelle].*

Propriétés. Dureté : 3 à 4 ; densité : 3,33 à 3,40 ; indices de réfraction : np = 1,619, ng = 1,621. Translucide, de couleur rouge.

Gisements. Ce minéral est associé au quartz, à la sanbornite et à la taramellite, à Rush Creek, Mariposa (Californie).

Préhnite, $Ca_2Al_2[(OH)_2|Si_3O_{10}]$ - orthorhombique

Les cristaux sont tabulaires avec les faces (001), (010) et (100) ; ils sont souvent empilés en gerbes, en « éventails » ou en « selles », en groupes mamelonnés à surface en mosaïque, ou à pointements indistincts, ou encore fibro-radiés. Le clivage des cristaux est facile suivant {001}.

Propriétés. Dureté : 6 à 6 ½ ; densité : 2,80 à 2,95 ; indices de réfraction : np = 1,616, ng = 1,649. Transparente à translucide ; vert pâle à vert pomme, gris verdâtre à jaunâtre, blanche ou incolore.

Gisements. La préhnite provient des géodes, des fissures des roches éruptives basiques et des schistes cristallins. Les meilleures pièces de collection viennent de Paterson (New Jersey, États-Unis), de Balme-d'Auris et du Bourg-d'Oisans (Isère), de Val di Fassa (Italie du Nord) et de Beaufort, près de Kimberley (Afrique du Sud).

★ *Tectosilicates*

Les tectosilicates forment des groupes illimités suivant les trois dimensions (charpentes tridimensionnelles).

■ Tectosilicates à deux tétraèdres par sommet commun $[Z_xO_{2x}]$

Néphéline, $KNa_3[AlSiO_4]_4$ - hexagonal

Ce minéral se présente en masses cristallines grenues et en cristaux prismatiques courts avec les faces $(10\bar{1}0)$ et (0001). Le clivage est indistinct sur $\{10\bar{1}0\}$ et {0001} ; la cassure est conchoïdale.

Propriétés. Dureté : 5 ½ à 6 ; densité : 2,55 à 2,66 ; indices de réfraction : np = 1,525 à 1,54, ng = 1,53 à 1,546. Transparente à opaque ; incolore à blanchâtre, jaunâtre, verdâtre, grisâtre, rougeâtre à ocre rouge.

Gisements. La néphéline est un constituant des syénites néphéliniques, des phonolites et de certaines basaltes. Les pièces recherchées pour les collections viennent de National Bridge (New York) et du Vésuve (Italie).

Analcime, $Na[AlSi_2O_6] \cdot H_2O$ - cubique

Les cristaux sont trapézoédriques {211} et dépassent rarement 15 cm ; cependant l'analcime est aussi massif ou grenu. La cassure est inégale.

Propriétés. Dureté : 5 ½ ; densité : 2,2 ; indices de réfraction : n = 1,48 à 1,49. Éclat vitreux, transparent à presque opaque ; couleur rosâtre, grise, jaunâtre ou rougeâtre, également blanche.

Gisements. L'analcime se trouve dans les cavités des basaltes et les géodes des diabases, ainsi que parfois dans les gîtes métallifères et les syénites néphéliniques, comme minéral d'altération de la néphéline. Ses localités les plus classiques sont le Val di Fassa (Italie du Nord), les îles Cyclopes (Sicile) et Copper Falls (lac Supérieur, États-Unis).

Leucite, $K[AlSi_2O_6]$ - quadratique pseudocubique

La leucite est fréquente en cristaux de faciès cubique trapézoédrique {211} : en effet, au moment de sa formation, elle est cubique et devient quadratique en dessous de 600 °C en gardant sa forme originelle. Sa cassure est conchoïdale.

Propriétés. Dureté : 5 ½ à 6 ; densité : 2,47 à 2,50 ; indices de réfraction : np = 1,510, ng = 1,513. Translucide à opaque ; blanchâtre ou grisâtre avec un éclat vitreux.

Gisements. La leucite se rencontre surtout dans les laves riches en potassium et très pauvres en silicium (basaltes à leucite, phonolites, leucitites, etc.). Les plus gros cristaux viennent de Rocca Monfina et Monte Albano (Italie).

Pollucite, $(Cs,Na)[AlSi_2O_6] \cdot H_2O$ - cubique

Ce tectosilicate rare est le principal minerai de césium. Il se présente en masses vitreuses ressemblant à du quartz carrié ou en cristaux mal formés montrant les faces du trapézoèdre et du cube : {211} et {100}. La cassure est inégale.

Propriétés. Dureté : 6 $\frac{1}{2}$ à 7 ; densité : 2,93 ; indice de réfraction : n = 1,52. Transparente à translucide ; incolore, blanche ou légèrement grisâtre.

Gisements. La pollucite est un minéral des pegmatites granitiques, associé à l'amblygonite, la pétalite (silicate contenant du lithium) et la lépidolite. Les meilleurs cristaux ont été rencontrés à la Grotta d'Oggi (île d'Elbe), associés à la tourmaline rose et au lépidolite. De grandes masses vitreuses viennent de Paris (Maine, États-Unis).

Béryl, $Al_2[Be_3Si_6O_{18}]$ - hexagonal

Cette espèce minérale est maintenant classée parmi les tectosilicates. Elle peut loger dans ses « canaux structuraux » des ions de grande taille, notamment des alcalins (sodium, lithium, césium). Ses cristaux peuvent mesurer plusieurs mètres et peser plusieurs dizaines de tonnes. Les faces prismatiques ($10\bar{1}0$) peuvent être tronquées par ($11\bar{2}0$), et les terminaisons (0001) comportent quelquefois de nombreuses modifications ($10\bar{1}1$), ($11\bar{2}1$), ($21\bar{3}1$), etc. Le béryl peut également former des masses grenues, bacillaires ou radiées ; les prismes sont parfois tordus. La cassure est conchoïdale.

Propriétés. Dureté : 7 $\frac{1}{2}$; densité : 2,68 à 2,88 (variant avec la teneur en césium et en autres alcalins) ; indices de réfraction : np = 1,56 à 1,59, ng = 1,57 à 1,60. Transparent à opaque. Variétés de couleur : *émeraude* vert vif un peu bleuté (colorée par du chrome) ; *aigue-marine* bleu pâle à bleu vif et bleu légèrement vert ; *morganite* rose pâle à rose vif et rose violacé ; *héliodore* jaune d'or à jaune verdâtre. Les béryls peuvent également être rouges, incolores, verdâtres, brun-jaune à vert-jaune ou brunâtres.

Gisements. Le béryl est un excellent minerai de béryllium ; les grands cristaux se rencontrent dans les pegmatites granitiques. Les qualités transparentes sont liées à des pegmatites particulières dans lesquelles elles peuvent se rencontrer, dans les druses des filons pegmatitiques eux-mêmes, dans les épontes de ces filons ou à leur voisinage, et (surtout dans les zones de calcaires métamorphiques) au voisinage des granites ou quelquefois des syénites néphéliniques.

La *gîtologie des émeraudes* semble soumise à deux ou trois types de formation assez distincts :

— les gîtes formés par l'intrusion de venues acides (se situant au contact du domaine pneumatolytique et du domaine hydrothermal) dans des roches basiques, avec formation de roches de contact à micas noirs ;

— les gîtes mis en place à plus basse température (300 °C) par l'action de fumerolles sur des grès et conglomérats calcaires encaissants, sans réaction exomorphique notable sur les roches encaissantes ;

— un autre type de gisement décrit récemment (1972), qui aurait pour origine l'action « métamorphique et métasomatique » d'un filon de pegmatite à

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ **Béryl** *bleu (aigue-marine) en prismes allongés, Aduntschilon (Oural).*

▼ *A gauche,* **analcime** *rose associée de l'apophyllite, Alpes de Siusi, Bolzano (Milan, musée d'Histoire naturelle).*
A droite, cristal de **leucite** *avec deux petits rhombododécaèdres de* **mélanite** *(noire) provenant d'Ariccia, Rome (Milan, musée d'Histoire naturelle).*

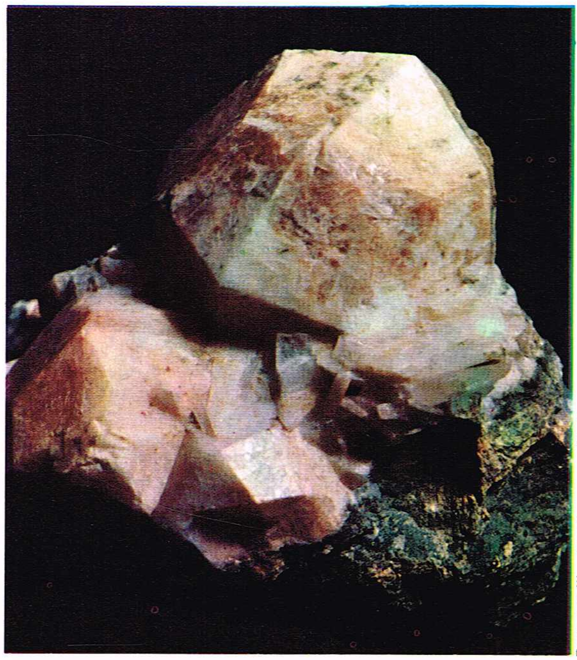

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

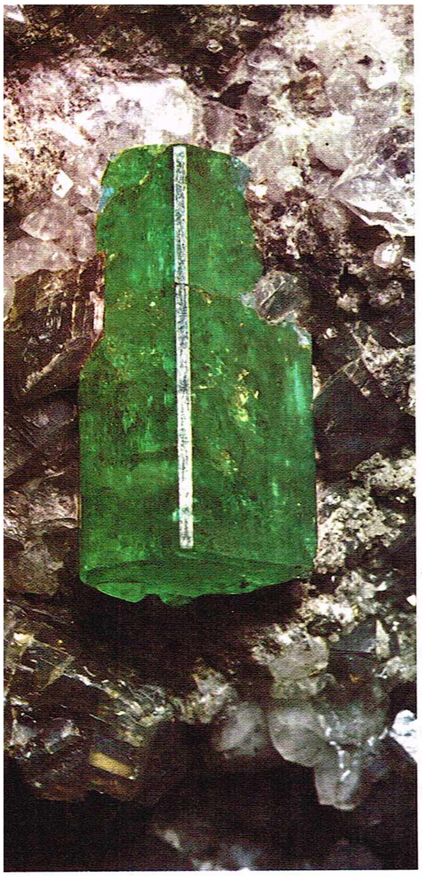

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

tourmaline sur un talc-schiste à magnétite dérivant de roche ultrabasique chromifère.

Les plus belles émeraudes viennent de Colombie (Muzo, Coscuez, etc.) ; elles sont associées à la calcite, la parisite (type de formation n° 2). D'autres mines d'émeraudes ont produit de belles gemmes en Rhodésie (Sandawana), au Brésil (Bom Jésus, Carnaïba), au Pakistan (Swatt), en U.R.S.S. (Takowaja), en Inde (Ajmer).

Les béryls bleus et roses les plus beaux viennent du Minas Gerais (Brésil), de Madagascar, du Mozambique et de Namibie, où ils sont très recherchés comme gemmes.

Cordiérite, $Mg_2[Al_4Si_5O_{18}]$ - orthorhombique

La cordiérite est souvent massive, grenue ; ses cristaux bien formés sont rares, prismatiques avec les faces (001) et (110). Ce minéral est maclé sur {110} ; sa cassure est irrégulière.

Propriétés. Dureté : 7 à 7 ½ ; densité : 2,6 à 2,7 ; indices de réfraction : np = 1,52, ng = 1,53. Transparente à opaque ; couleur bleu vif à bleu-violet, bleu-vert ou grisâtre. Le polychroïsme est très fort et s'observe particulièrement bien dans des directions se coupant à 90° (bleu vif, bleu-violet et gris clair).

Gisements. On rencontre la cordiérite dans les gneiss, les schistes cristallins, ainsi que dans quelques laves et roches métamorphiques. Les variétés transparentes (gemmes) viennent de Madagascar et de Ceylan.

La **sékaninaïte** $_4(Fe,Mg)_2[Al_4Si_5O_{18}]$ est une cordiérite ferrifère. Dureté : 7 à 7 ½ ; densité : 2,75. Indices de réfraction : np = 1,56, ng = 1,57. On rencontre ce minéral dans les pegmatites de Dolny-Bory (Moravie).

▲▶ Ci-dessus, très beau prisme d'émeraude gemme associée au quartz et à la dolomite, Muzo, Colombie (Londres, British Museum). A droite, macle de deux cristaux d'orthose dite « macle de Baveno » (Baveno, lac Majeur).

Euclase, $Al^{[6]}Be^{[4]}[OH|SiO_4]$ - monoclinique

L'euclase doit son nom à son clivage parfait suivant (010). Elle n'est connue qu'en cristaux, lesquels sont allongés suivant [001], aplatis sur (100) et très souvent surchargés de facettes.

Propriétés. Dureté : 7 ½ ; densité : 3 ; indices de réfraction : np = 1,65, ng = 1,67. Transparente, incolore à translucide ; couleur verte, bleu aigue-marine, bleu ou vert très pâle. Quelquefois taillée comme gemme.

Gisements. Ce tectosilicate rare a été rencontré dans quelques pegmatites, schistes cristallins ou dans des fentes alpines. Les plus gros cristaux connus, associés à la muscovite et l'albite, viennent du Minas Gerais (Brésil).

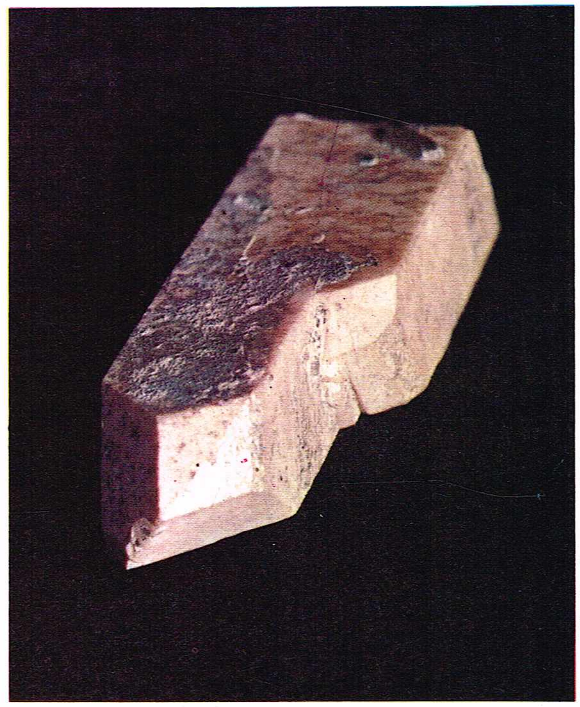

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ **Cordiérite** *en prisme allongé associée à du quartz, Orijärvi, Finlande (Londres, British Museum).*

● *Groupe des feldspaths*

Les feldspaths sont les minéraux les plus répandus ; ils constituent plus de 50 % de l'écorce terrestre. On les classe en deux grands groupes :

— les **feldspaths potassiques** : **orthose, sanidine, microcline, anorthose ;**

— les **feldspaths calco-sodiques,** appelés **plagioclases ;** on distingue les plagioclases sodiques et calciques dont les termes extrêmes sont l'**albite** et l'**anorthite,** et les termes intermédiaires : l'**oligoclase,** l'**andésine,** la **labradorite** et la **bytownite ;**

— un groupe plus rare **(barytique)** est représenté par le **celsian** et l'**hyalophane.**

Orthose, $K[AlSi_3O_8]$ - monoclinique

Le nom orthose a été créé en 1801 par Haüy ; par souci d'antériorité, nous le préférons à son synonyme allemand *Orthoklas* donné par Breithaupt en 1823, par déformation du nom original créé par Haüy et que l'on se doit de conserver dans la littérature d'expression française. L'orthose, très recherché par l'industrie, se présente en masses lamellaires clivables, cryptocristallines, ou en cristaux dont la dimension peut dépasser 2 m. Ceux-ci montrent les faces (001), (010), (021), (110), (11$\bar{1}$) et (130). Les macles sont fréquentes sur {010}, {001} et {021}. Le clivage est facile sur {001} et bon sur {010} et {110}.

Propriétés. Sa dureté sert à définir le degré 6 de l'échelle de Mohs ; densité : 2,56 à 2,60 ; indices de réfraction : np = 1,518 à 1,529, ng = 1,522 à 1,539. Transparente et incolore à opaque ; blanche ou grise, également jaune, rosâtre ou rougeâtre.

Gisements. C'est l'un des constituants des granites, des syénites et des trachytes ; il est rencontré aussi dans les gneiss, les schistes cristallins. Les cristaux géants viennent des pegmatites granitiques (en particulier du Minas Gerais, Brésil). Les cristaux limpides *adulaires* associés à la chlorite et à l'hématite viennent des fentes alpines et sont d'origine hydrothermale. La variété jaune vif se trouve dans le sud de Madagascar. Parmi les pièces les plus recherchées par les collectionneurs, signalons les cristaux maclés de Baveno (Italie du Nord), associés à la fluorite et au quartz.

Sanidine, $K[AlSi_3O_8]$ - monoclinique

Les cristaux de sanidine ont un faciès tabulaire avec les formes simples (001), (010) et (100). Les faces sont rugueuses. Le clivage est bon sur {001}.

Propriétés. Dureté : 6 ; densité : 2,60 ; indices de réfraction : np = 1,52, ng = 1,53. Translucide à opaque, blanche à grisâtre.

C. Bevilacqua

◀ Microcline *vert « amazonite » provenant du Colorado (Paris, École nationale supérieure des mines).*

Gisements. Ce silicate de « haute température » est formé dans les roches porphyriques, volcaniques anciennes ou récentes. La localité la plus classique en France est le Puy-Gros du Sancy (Puy-de-Dôme).

Microcline, K[$AlSi_3O_8$] - triclinique

Souvent massif et lamellaire, le microcline est assez rarement en cristaux. Ceux-ci montrent les faces (001), ($1\bar{1}0$), (110), (010), etc. Le clivage, bon sur {010} et {110}, est facile sur {001}. Le microcline est très recherché par les industries du verre et de la céramique.

Propriétés. Dureté : 6; densité : 2,55 à 2,62; indices de réfraction : np = 1,515 à 1,530, ng = 1,520 à 1,540. Translucide à opaque; couleur blanche à grise, ou d'un beau vert vif à vert pâle pour l'*amazonite*.

Gisements. Le microcline, constituant des granites, syénites, granodiorites et pegmatites granitiques, est associé aux micas, à l'albite et au quartz. Les groupes d'amazonite associée au quartz enfumé de Pikes Peak (Colorado) comptent parmi les pièces les plus recherchées par les collectionneurs. Le plus beau cristal connu d'amazonite, d'un poids de 700 kg et de forme parfaite, est conservé par le Muséum de Paris; il a été trouvé en 1974 dans le Minas Gerais (Brésil).

Anorthose, (Na,K)[$AlSi_3O_8$] - triclinique

Les cristaux sont prismatiques, avec un faciès pseudo-orthorhombique. Cependant, l'anorthose se présente plus communément en masses clivables, lamellaires ou granulaires. Le clivage est parfait sur {001} et {010}.

Propriétés. Dureté : 6; densité : 2,58 à 2,62; indices de réfraction : np = 1,518 à 1,526, ng = 1,520 à 1,530. Transparente à translucide. Blanc grisâtre, verdâtre ou jaunâtre.

Gisements. L'anorthose est un constituant de nombreuses roches volcaniques (phonolites, andésites, trachytes). Les pièces exposées dans les musées proviennent de la localité classique de Cripple Creek (Colorado).

Albite, Na[$AlSi_3O_8$] - triclinique

L'albite peut être massive, lamellaire, grenue, ou en cristaux tabulaires épais sur (010), avec les faces (110), ($1\bar{1}0$), (001), ($\bar{1}01$), etc. Le clivage, parfait sur {001} et {010}, est moins facile sur {110}. Les macles sont communes avec {010} comme plan d'assemblage ou voisin de {001}.

Propriétés. Dureté : 6 à 6 ½; densité : 2,60 à 2,63; indices de réfraction : np = 1,527, ng = 1,535. Transparente et incolore à blanc opaque ou de couleurs grisâtres teintées de rose, bleu et vert.

Gisements. L'albite est l'un des constituants essentiels des granites (et de leurs pegmatites), des rhyolites, des andésites, des syénites; on la rencontre aussi dans les gneiss, les schistes cristallins, etc. Les groupes de cristaux classiques que l'on peut voir dans les collections viennent de Binnen (Suisse), du Tyrol autrichien, et les pegmatites du Minas Gerais (Brésil).

Oligoclase : albite avec 10 à 30 % d'anorthite

L'oligoclase est en cristaux tabulaires ou en masses laminaires.

Propriétés. Dureté : 6 à 6 ½; densité : 2,63 à 2,66; indices de réfraction : np = 1,542, ng = 1,549. Transparente à translucide, incolore, blanche ou grise, avec

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ *Macle de deux cristaux d'orthose dite « macle de Carlsbad », Soriano, Viterbo.*

des teintes variées et légères. La *pierre du soleil* est une oligoclase contenant de fines lamelles d'hématite exsolues.

Gisements. Le mode de gisement est voisin de celui de l'albite. Les localités classiques sont Arendal et Tvedistrand (Norvège).

Andésine : albite à 30 à 50 % d'anorthite

Les cristaux sont tabulaires; mais le plus souvent l'andésine est en masses clivables, granulaires ou compactes.

Propriétés. Dureté : 6 à $6\frac{1}{2}$; densité : 2,66 à 2,69; indices de réfraction : np = 1,543, ng = 1,551. Transparente à translucide; blanche ou grise.

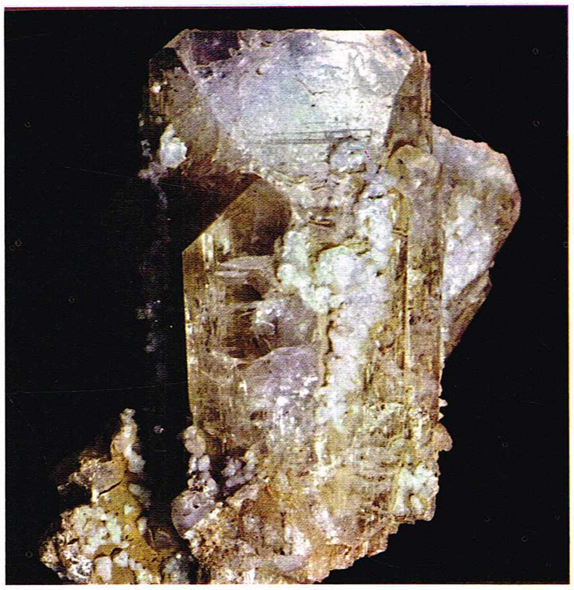

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

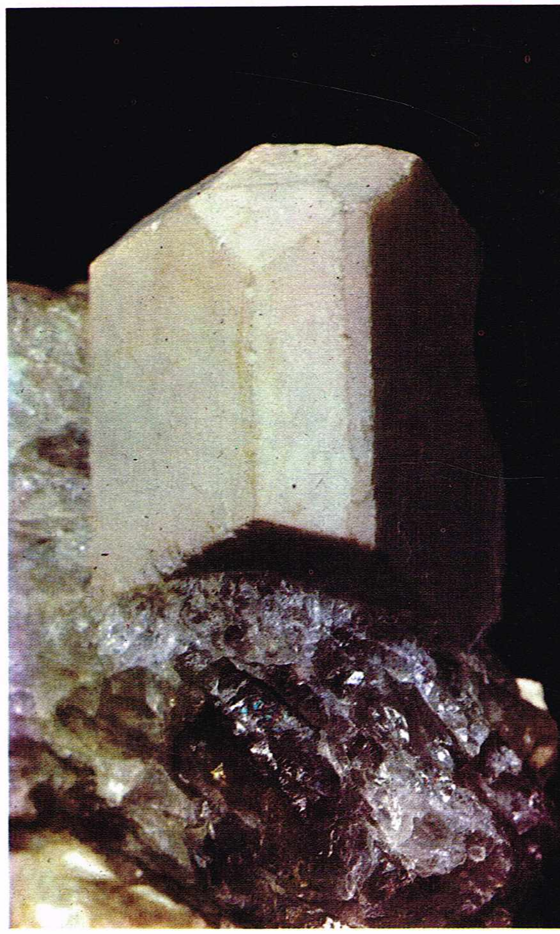

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ *A gauche,* **danburite** ***en prisme orthorhombique montrant la symétrie binaire (San Luis Potosi, Mexique).*** ***A droite, cristal*** **d'oligoclase** ***provenant de Norway, Maine (États-Unis)*** ***[Londres, British Museum].***

Gisements. Ce plagioclase est très répandu dans les roches ignées et les roches métamorphiques (charnockites, amphibolites, etc.). Les localités classiques sont Coirons (Ardèche) et Saint-Raphaël (Var).

Labradorite : anorthite avec 30 à 50 % d'albite

Les cristaux de labradorite sont rares et mal formés. Ce minéral se rencontre souvent en masses lamellaires. Le clivage est parfait sur {001} et {010}.

Propriétés. Dureté : 6 à $6\frac{1}{2}$; densité : 2,69 à 2,72; indices de réfraction : np = 1,565, ng = 1,572. Transparente à translucide. De couleur grise à brune; la labradorite présente très souvent de très vives irisations colorées.

Gisements. Ce plagioclase est un constituant des gabbros, basaltes, norites, diorites, anorthosites, etc. Sa localité la plus classique est Saint-Paul sur les côtes du Labrador.

Bytownite : anorthite avec 10 à 30 % d'albite

Les cristaux sont tabulaires; la bytownite est plus commune en masses clivables ou granulaires. Le clivage est parfait sur {001} et {010}.

Propriétés. Dureté : 6 à $6\frac{1}{2}$; densité : 2,72 à 2,74; indices de réfraction : np = 1,56, ng = 1,57. Transparente à translucide. Blanche à grise, avec parfois de vives irisations, comme la labradorite.

Gisements. Ce plagioclase, constituant d'un grand nombre de roches basiques, est également rencontré dans quelques roches métamorphiques. La localité la plus classique pour les belles masses irisées est Ylamma (Finlande).

Anorthite, $Ca[Al_2Si_2O_8]$ - triclinique

L'anorthite se présente en masses clivables, lamellaires ou grenues. Ses cristaux sont prismatiques, plus ou moins allongés suivant l'axe [001] avec les faces (010), (110), $(\bar{2}01)$, $(\bar{1}10)$, etc. Le clivage est parfait sur {001} et {010}.

Propriétés. Dureté : 6 à $6\frac{1}{2}$; densité : 2,73 à 2,76; indices de réfraction : np = 1,576, ng = 1,590. Trans-

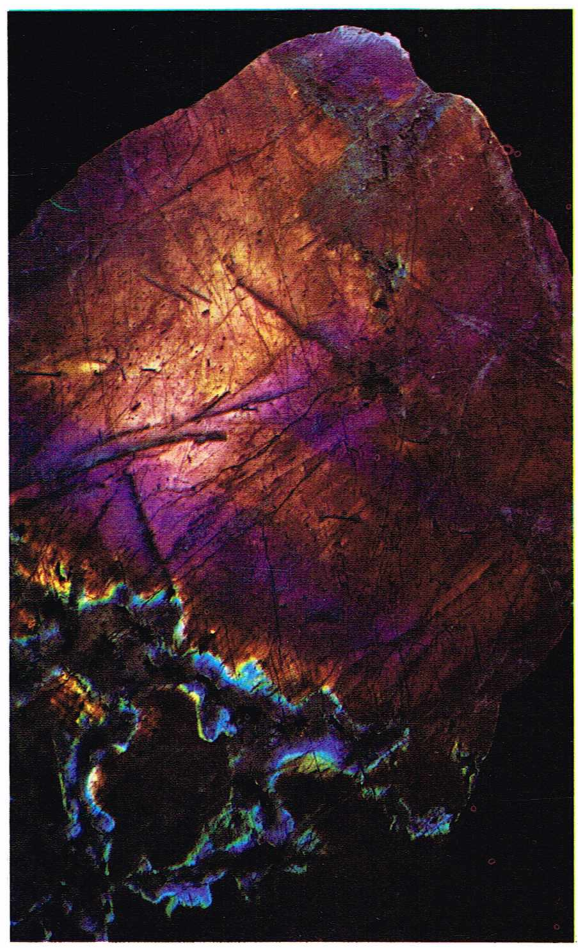

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ ***Plaque polie montrant les irisations de la*** **labradorite** ***de Saint-Paul (Labrador, Canada).***

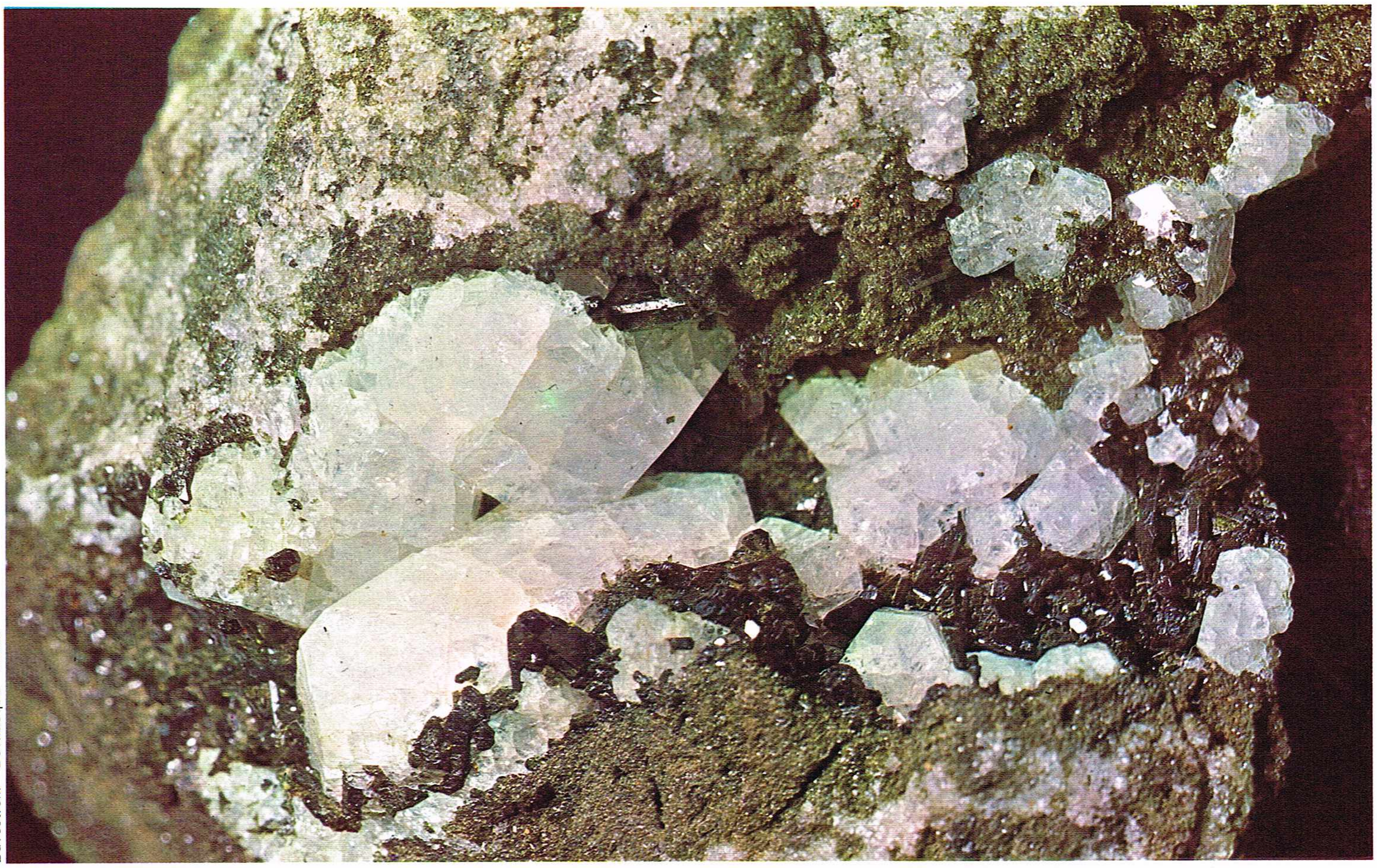

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Cristaux de sodalite blanche associée à de l'augite, Vésuve (Londres, British Museum).***

parente à translucide, incolore, blanche ou grisâtre de teintes diverses.

Gisements. L'anorthite est un constituant de nombreuses roches basiques (magmatiques, volcaniques et métamorphiques). Les plus belles pièces de musée viennent de Miyahe (Islande), du Val di Fassa (Italie du Nord) et du Vésuve.

Hyalophane, (K,Na,Ba)[$Al_2Si_3O_8$] - monoclinique

Ce feldspath barytique se rencontre parfois en très beaux cristaux limpides à section losangique.

Propriétés. Dureté : 6 à 6 ½; densité : 2,60 à 2,80; indices de réfraction : np = 1,52 à 1,54, ng = 1,525 à 1,545.

Gisements. Les plus belles pièces de collection viennent de Busovaca (Yougoslavie).

Celsian, Ba[$Al_2Si_3O_8$] - monoclinique

Le celsian forme des petits cristaux prismatiques ou des masses clivables.

Propriétés. Dureté : 6 à 6 ½; densité : 3,10 à 3,40; indices de réfraction : np = 1,580 à 1,59, ng = 1,59 à 1,60.

Gisements. La localité classique est Caernarvonshire (pays de Galles).

Série des scapolites

On distingue sous le nom de scapolites quatre minéraux. La **marialite** $Na_8[(Cl_2,SO_4,CO_3)|(AlSi_3O_8)_6]$ et la **méionite** $Ca_8[(Cl_2,SO_4,CO_3)_2|(AlSi_3O_8)_6]$ sont les termes extrêmes, et le **dipyre** et la **mizzonite** les termes intermédiaires d'une série continue (Na⇆Ca).

Les cristaux peuvent atteindre 1 m de long; les prismes sont allongés suivant [001] avec les faces (100), (110), (101), (111), (311), etc. Les scapolites sont aussi massives, granulaires ou fibreuses. Le clivage est distinct sur {100} et {110}.

Propriétés. Dureté : 5 à 6; densité : 2,65 à 2,80; indices de réfraction : np = 1,52 à 1,55, ng = 1,56 à 1,58. Les scapolites sont transparentes à opaques, incolores ou grises, roses, jaunes et blanc porcelainé.

Gisements. On trouve ces minéraux dans les géodes des roches volcaniques et dans les gîtes de contact entre les roches acides, alcalines, et les calcaires ou dolomies. Les plus grands cristaux viennent de Madagascar et la rare variété gemme rose de Mogok (Birmanie).

Danburite, Ca[$B_2Si_2O_8$] - orthorhombique

Les cristaux sont prismatiques avec les faces (001), (110), (120), (101), (041), etc.

Propriétés. Dureté : 7 à 7 ½; densité : 3; indices de réfraction : np = 1,629, ng = 1,636. Transparente et incolore ou encore opaque et blanche, jaune ou brunâtre.

Gisements. La danburite se forme dans les dolomies et les gneiss. De jolis cristaux limpides viennent de Charcas, San Luis Potosi (Mexique).

Sodalite, $Na_8[Cl_2|(AlSiO_4)_6]$ - cubique

La sodalite est souvent massive et grenue. Ses cristaux sont dodécaédriques {110}; la macle suivant {111} leur donne une apparence hexagonale.

Propriétés. Dureté : 5 ½ à 6; densité : 2,15 à 2,30; indice de réfraction : 1,48. Transparente à translucide. Incolore, blanche ou jaune, rose, bleue et très rarement violette.

Gisements. La sodalite se rencontre dans les roches éruptives (syénites néphéliniques, etc.). Parmi ses localités classiques on peut citer pour les cristaux : le Vésuve et les îles de Los (Guinée). De très belles masses bleu foncé utilisées en ornementation viennent d'Afrique du Sud, du Minas Gerais et de Bankroft (Canada).

Haüyne, $(Na,Ca)_{8-4}[(SO_4)_{2-1}|(AlSiO_4)_6]$ - cubique

Les cristaux sont dodécaédriques. Le clivage sur {110} est facile.

Propriétés. Dureté : 5 ½ à 6; densité : 2,40 à 2,50; indice de réfraction : 1,49 à 1,50. Transparente à translucide, bleu ciel à bleu roi, verdâtre, jaunâtre, incolore ou blanchâtre.

Gisements. On rencontre ce minéral dans des roches à sanidine, et dans les zones de contact des pegmatites avec les dolomites, ou encore en microcristaux dans les

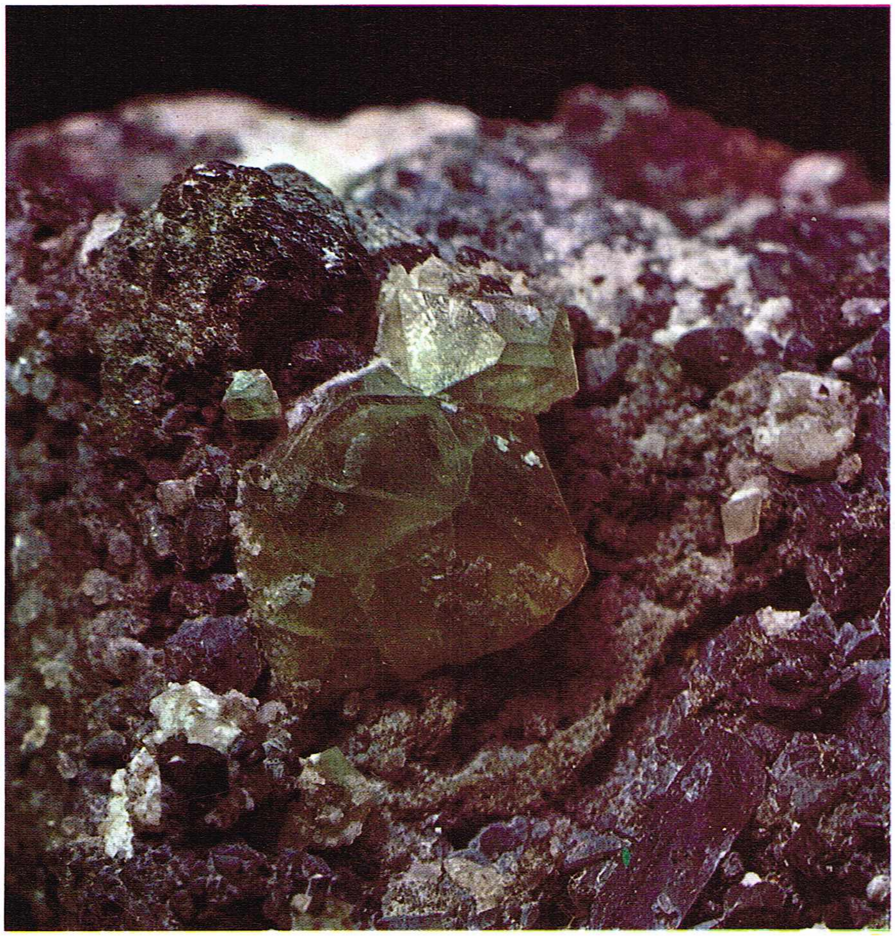

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ Haüyne *cristallisée provenant d'Ariccia, Rome (Milan, musée d'Histoire naturelle); ce minéral est ainsi nommé en l'honneur de R. J. Haüy, père de la cristallographie mathématique.*

phonolites et certains basaltes. Les gisements les plus classiques sont le Vésuve (Italie) et l'Eifel (Allemagne).

Lazurite, $(Na,Ca)_8[(SO_4,S,Cl)_2|(AlSiO_4)_6]$ - cubique

C'est le constituant essentiel du lapis-lazuli. Ses cristaux sont dodécaédriques et ne dépassent que rarement 3 cm. Les masses d'un bleu soutenu sont très recherchées comme gemmes depuis 6 000 ans pour la fabrication de petits objets ornementaux.

Propriétés. Dureté : 5 ½ à 6; densité : 2,40 à 2,45; indice de réfraction : 1,50. Opaque, bleu foncé à bleu roi ou bleu légèrement violacé.

Gisements. La lazurite, associée à la pyrite et à la calcite, se forme au contact de calcaires métamorphiques avec des roches alcalines, et de leurs pegmatites. Les plus beaux cristaux connus viennent de Sar-e-sang (Afghanistan) et sont conservés dans la collection de minéralogie de l'université de Paris VI. Le lapis-lazuli vient aussi du lac Baïkal et du Chili (Ovalle).

● **Groupe des zéolites**

Les minéraux de ce groupe sont fusibles au chalumeau avec bouillonnement. L'eau est liée de façon lâche, et ces minéraux ont la propriété de perdre cette eau *sans destruction de leur réseau* et ensuite de se réhydrater en atmosphère humide. Leurs densités, indices de réfraction et biréfringences sont faibles.

Natrolite, $Na_2[Al_2Si_3O_{10}] \cdot 2H_2O$ - orthorhombique (mésotype)

Ce minéral se présente en prismes allongés (pseudo-quadratiques) avec les faces (110), (111) et parfois (010), (001) et (10.11.11). Les cristaux sont également aciculaires ou forment des masses radiées; la natrolite est aussi compacte. Le clivage {110} est parfait.

Propriétés. Dureté : 5 à 5 ½; densité : 2,20 à 2,25; indices de réfraction : np = 1,480, ng = 1,493. Incolore et transparente à blanchâtre et translucide.

Gisements. Dans les cavités des roches éruptives, la natrolite provient de l'altération de la néphéline, de la sodalite et des plagioclases. Au puy de Marman (Puy-de-Dôme), on l'a trouvée en magnifiques gerbes de cristaux dans les cavités d'un basalte. De grands cristaux ont été trouvés à Kolshiy (U.R.S.S.) et à Bound Brook (New Jersey).

Scolécite, $Ca[Al_2Si_3O_{10}] \cdot 2H_2O$ - orthorhombique

Les cristaux peuvent dépasser 20 cm et ont un faciès voisin de ceux de la natrolite. La scolécite est également massive, fibreuse ou radiée. Le clivage {110} est parfait.

Propriétés. Dureté : 5 à 5 ½; densité : 2,14 à 2,16; indices de réfraction : np = 1,512, ng = 1,519. Transparente à translucide, incolore à blanchâtre.

Gisements. Ce tectosilicate de formation secondaire se rencontre dans les cavités des roches volcaniques et syénitiques. A Poona (Inde) et au Tunnel das Antas, dans le Rio Grande do Sul (Brésil), elle est associée en gerbes à la stilbite, à la laumontite et à l'apophyllite dans les amygdales des basaltes.

Thomsonite, $NaCa_2[Al_2(Al,Si)Si_2O_{10}] \cdot 6H_2O$ - monoclinique

Rare en cristaux prismatiques, elle est surtout massive aciculaire et radiée. Dureté : 5 à 5 ½; densité : 2,3 à 2,4; indice de réfraction : de 1,52 à 1,54. Translucide et blanchâtre. En France, sa localité la plus classique est Pouzac (Hautes-Pyrénées).

Gonnardite, $(Ca,Na)_3[(Al,Si)_5O_{10}]_2 \cdot 6H_2O$ - orthorhombique

La gonnardite se rencontre le plus souvent en petites sphérules fibro-radiées dans les cavités d'un basalte. Dureté : 4 ½ à 5; densité : 2,30; indices de réfraction : np = 1,514, ng = 1,520. Blanche, translucide. La localité la plus classique est Gignat (Puy-de-Dôme).

Édingtonite, $Ba[Al_2Si_3O_{10}] \cdot 3H_2O$ - quadratique

Cette zéolite est rare. Elle est massive ou en cristaux prismatiques pyramidés. Dureté : 4 à 4 ½; densité : 2,694; indices de réfraction : np = 1,538, ng = 1,554. Transparente à translucide. Incolore à blanche, rose ou grise. Les plus beaux cristaux viennent de Bölet (Suède).

Dachiardite, $(K,Na,Ca_{0,5})_5[Al_5Si_{19}O_{48}] \cdot 12H_2O$ - monoclinique

Cette zéolite très rare a été rencontrée en petits cristaux prismatiques maclés dans la pegmatite de San Piero in Campo (île d'Elbe), associée à la rubellite, à la pollucite, à la lépidolite, etc. Dureté : 4 à 4 ½; densité : 2,165; indices de réfraction : np = 1,492, ng = 1,500.

Mordenite, $(Ca,K_2,Na_2)[AlSi_5O_{12}]_2 \cdot 6H_2O$ - orthorhombique

La mordenite se rencontre le plus souvent en touffes de cristaux aciculaires ou en masses fibreuses, ou encore en tout petits cristaux prismatiques. Localités classiques : dans les cavités basaltiques de l'est de l'Islande et à Poona (Inde). Dureté : 5; densité : 2,10; indice de réfraction : 1,472 à 1,474. Transparente à translucide, incolore à blanc grisâtre.

Ferriérite, $(Na,K)Mg[Al_3Si_{15}O_{36}] \cdot 9H_2O$ - orthorhombique

La ferriérite se présente presque toujours en agrégats ou en croûtes de petits cristaux aciculaires dans les cavités des basaltes. Les meilleures pièces de collection viennent de Timonchiello (Vicenza, Italie). Dureté : 3; densité : 2,150; indices de réfraction : np = 1,478, ng = 1,482. Translucide; blanche à ocre rouge ou brun-rouge.

Laumontite, $Ca[AlSi_2O_6]_2 \cdot 4H_2O$ - monoclinique

Cette zéolite s'altère facilement et se désagrège en poudre blanchâtre; il convient donc de vernir les cristaux fraîchement extraits des cavités basaltiques (ou des gangues des filons métallifères) si l'on veut les conserver en collection. Les cristaux sont prismatiques et allongés, avec les faces (110), (001) et ($\bar{2}$01).

Propriétés. Dureté : 3 ½ à 4; densité : 2,25 à 2,36; indices de réfraction : np = 1,513, ng = 1,525. Translucide et blanchâtre.

Gisements. Les plus beaux cristaux ont été trouvés à Pine Creek Mine (Californie), dans les cavités des roches

basaltiques de Poona (Inde) et de Das Antas (Brésil), associés à l'apophyllite, la scolécite et la stilbite. Cette zéolite a été trouvée pour la première fois à Huelgoat (Bretagne).

Heulandite, $Ca[Al_2Si_7O_{18}] \cdot 6H_2O$ - monoclinique (pseudo-orthorhombique)

Le plus souvent massive ou lamellaire, cette zéolite est aussi fréquente en cristaux très bien formés et présentant les faces (010), (001), (110), (201), (021) avec un aplatissement sur (010). Le clivage est parfait suivant {010}.

Propriétés. Dureté : 3 ½ à 4; densité : 2,18 à 2,22; indices de réfraction : np = 1,498, ng = 1,505. Transparente à translucide, incolore ou blanche, rose, rouge brique, grise. L'éclat est très nacré sur le clivage.

Gisements. Cette zéolite est localisée dans les cavités des roches basaltiques et des roches métamorphiques. Les plus beaux groupes cristallisés viennent de Teigarhorn (Islande), de Fort Patrick (Écosse), où ils sont rouge brique, et des îles Kerguélen (océan Pacifique).

Stilbite $Ca[Al_2Si_7O_{18}] \cdot 7H_2O$ - monoclinique (pseudo-orthorhombique)

Les cristaux de stilbite forment le plus souvent des groupements « en éventail » (axes imparfaitement parallèles). Ce minéral est aussi radié, lamellaire ou globulaire. Le clivage des cristaux est légèrement ondulé sur {010}.

Propriétés. Dureté : 3 ½ à 4; densité : 2,094 à 2,205; indices de réfraction : np = 1,494, ng = 1,500. Transparente à opaque, éclat nacré sur le clivage; blanche, rose, grise ou rouge.

Gisements. Cette zéolite est très fréquente dans les cavités des roches basaltiques. Les plus belles pièces de musées viennent de Poona (Inde), Teigarhorn (Islande) et du Rio Grande do Sul.

Épistilbite $Ca[Al_2Si_6O_{16}] \cdot 5H_2O$ - monoclinique (pseudo-orthorhombique)

L'épistilbite se présente en cristaux tabulaires dépassant rarement 1 cm ou en agrégats radiés. Elle est blanche ou rosâtre. Dureté : 4; densité : 2,25; indices de réfraction : np = 1,502, ng = 1,512. Elle est associée à l'heulandite dans les cavités basaltiques de l'est de l'Islande et de Nasick (Inde).

Brewstérite, $(Sr,Ba,Ca)[Al_2Si_6O_{16}] \cdot 5H_2O$ - monoclinique

La brewstérite forme de petits cristaux prismatiques avec un clivage {010} parfait. Elle est blanc-gris ou rosâtre. Dureté : 5; densité : 2,45; indices de réfraction : np = 1,510, ng = 1,523. En France, elle a été rencontrée à Saint-Christophe (Isère) et à Barèges (Hautes-Pyrénées).

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Prismes de* **scolécite** *en faisceaux radiés, Rio Grande do Sul (Brésil) [Milan, musée d'Histoire naturelle].*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ *A gauche,* **natrolite** *fibro-radiée (Alpes de Siusi, Bolzano) [Milan, musée d'Histoire naturelle]. A droite,* **heulandite** *cristallisée de Val di Fassa, Trentin.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *En haut,* harmotome *cristallisée provenant de l'île de Strontian, Argyllshire (Londres, British Museum). En bas, cristaux de* gmélinite *rose de Great Nortch, New Jersey (Londres, British Museum).*

Gismondite, $Ca[Al_2Si_2O_8] \cdot 4H_2O$ ***- monoclinique (pseudo-orthorhombique)***

Ce minéral forme le plus souvent des agrégats fibro-radiés blanchâtres ou grisâtres ou des globules sphériques dans les cavités des roches basaltiques. Dureté : 4 ½ ; densité : 2,265 ; indice de réfraction : nm = 1,539. La localité la plus classique est Capo di Bove (Italie).

Phillipsite $KCa[Al_3Si_5O_{16}] \cdot 6H_2O$ ***- monoclinique (pseudo-orthorhombique)***

Les cristaux de la phillipsite sont très souvent maclés suivant {001}. Le clivage est bon sur {001} et {010}. Elle se présente aussi en agrégats blanchâtres et en sphères radiées se rencontrant dans les cavités des roches basaltiques, associée à la chabasie, la calcite et la thomsonite. Dureté : 4 à 4 ½ ; densité : 2,2 ; indices de réfraction : np = 1,498, ng = 1,503. Parmi les localités les plus classiques, on peut citer Capo di Bove (Italie).

Harmotome $Ba[Al_2Si_6O_{16}] \cdot 6H_2O$ ***- monoclinique***

Cette zéolite est très appréciée des collectionneurs. Les cristaux sont maclés en donnant par interpénétration des groupements cruciformes. Le clivage est facile sur {010}.

Propriétés. Dureté : 4 ½ ; densité : 2,45 à 2,50 ; indices de réfraction : np = 1,503, ng = 1,508. Translucide et blanchâtre ou rougeâtre, grisâtre, et jaunâtre.

Gisements. On rencontre ce minéral dans les gangues des filons métallifères et, plus rarement, dans les cavités des roches éruptives. Les plus belles pièces exposées dans les musées viennent de Strontian (Écosse).

Gmélinite, $(Na_2,Ca)[Al_2Si_4O_{12}] \cdot 6H_2O$ ***- hexagonal***

La gmélinite se présente en cristaux prismatiques bien formés avec les faces $(10\bar{1}0)$ et les terminaisons $(10\bar{1}1)$, $(01\bar{1}1)$ et (0001). Le clivage est parfait sur $\{10\bar{1}0\}$. Dureté : 4 ½ ; densité : 2,04 à 2,17 ; indices de réfraction : np = 1,47, ng = 1,48. Transparente à translucide ; blanche ou rose, verdâtre ou jaunâtre. Elle est associée à d'autres zéolites dans les cavités des roches basaltiques. Les plus beaux cristaux connus viennent de Békiady (Madagascar).

Chabasie, $(Ca,Na_2)[Al_2Si_4O_{12}] \cdot 6H_2O$ ***- rhomboédrique***

La chabasie se présente le plus souvent en rhomboèdres simples ou maclés suivant {1011}. Le clivage $\{10\bar{1}1\}$ est net. Dureté : 4 à 5 ; densité : 2,08 à 2,16 ; indices de réfraction : np = 1,47, ng = 1,49. Transparente à translucide ; incolore, blanche, rose à rouge brique. Se rencontre dans les amygdales des basaltes et dans les cavités des phonolites. Les belles pièces exposées dans les musées viennent de Bohême et des îles Féroé (au nord de l'Écosse).

■ **Tectosilicates à trois tétraèdres par sommet commun** $[Z_{3x}O_{4x}]$

Phénacite, $Be_2[SiO_4]$ ***- rhomboédrique***

La phénacite se présente soit en prismes allongés suivant l'axe [0001] avec les faces $(11\bar{2}0)$, $(10\bar{1}1)$, $(01\bar{1}2)$, soit en cristaux lenticulaires dont les faces prismatiques sont peu développées avec de nombreuses facettes $(11\bar{2}0)$, $(01\bar{1}2)$, $(11\bar{2}3)$, $(21\bar{3}4)$, etc.

Propriétés. Dureté : 7 ½ à 8 ; densité : 2,96 à 3,01 ; indices de réfraction : np = 1,655, ng = 1,670. Transparente à translucide ; incolore ou rosâtre. Cassure conchoïdale à inégale.

Gisements. Ce tectosilicate rare des pegmatites et des schistes cristallins est parfois associé à l'émeraude et au chrysobéryl dans les roches à micas noirs formées au contact d'intrusions acides et des roches basiques encaissantes. Les plus belles pièces de collection viennent de San Miguel de Piracicaba (Brésil), de Kragerö (Norvège) et de Takowaja (Oural).

Willémite, $Zn_2[SiO_4]$ ***- rhomboédrique***

Les cristaux sont prismatiques avec les faces $(10\bar{1}1)$, $(01\bar{1}2)$, $(11\bar{2}0)$; la willémite forme aussi des agrégats

fibreux, granulaires ou mameionnés, à pointements cristallins indistincts. Le clivage est bon sur (0001).

Propriétés. Dureté : 5 ½; densité : 3,90 à 4,15; indices de réfraction : np = 1,69, ng = 1,72. Transparente à translucide, blanche, bleue, verte ou jaune. Fortement fluorescente en jaune-vert aux rayons ultraviolets.

Gisements. Ce tectosilicate des zones d'oxydation des gîtes de zinc est associé à la smithsonite et l'hémimorphite. Il a aussi été rencontré en gros cristaux dans le gîte de Franklin (New Jersey), associé à la zincite et à la franklinite.

■ Tectosilicates intermédiaires entre ceux ayant 2 tétraèdres et ceux ayant 3 tétraèdres par sommet commun

Eudidymite, $Na_2Be_2[Si_6O_{15}] \cdot H_2O$ - monoclinique

Les cristaux de ce minéral rare sont tabulaires avec des macles fréquentes. Elle est transparente et incolore à translucide et blanchâtre. Dureté : 6; densité : 2,55. Indices de réfraction : np = 1,54, ng = 1,55. L'eudidymite a été rencontrée dans les syénites du Langesfjord (Norvège) et de Narsarsuk (Groenland).

Épididymite, $Na_2Be_2[Si_6O_{15}] \cdot H_2O$ - orthorhombique

Ce minéral est en cristaux orthorhombiques; il est aussi rare que l'eudidymite, dont il a l'aspect et le mode de gisement (Norvège, Groenland). Dureté : 5 ½; densité : 2,55; indices de réfraction légèrement inférieurs à ceux de l'eudidymite.

Bertrandite, $Be_4[Si_2O_7](OH)_2$ - orthorhombique

La bertrandite est surtout massive et granulaire, incolore à blanche. Dureté : 6 à 7; densité : 2,60; indices de réfraction : np = 1,59, ng = 1,60. Ce tectosilicate a été trouvé en petits cristaux tabulaires dans les pegmatites de Pisek (Bohême), à Nantes (Loire-Atlantique) et à La Villeder (Morbihan).

Hémimorphite, $Zn_4[Si_2O_7](OH)_2$ - orthorhombique

L'hémimorphite est un minerai de zinc important. Elle est massive, terreuse, botryoïdale, ou stalactitique (le plus souvent). Ses cristaux, riches de formes : {110}, {010}, {001}, {121}, {301}, etc., montrent des terminaisons différentes aux deux extrémités et sont fréquemment polysynthétiques. Le clivage est facile sur (110).

Propriétés. Dureté : 5; densité : 3,4; indices de réfraction : np = 1,615, ng = 1,635. Transparente à translucide; incolore, blanche ou faiblement teintée de bleu, de jaune ou de vert.

Gisements. Ce tectosilicate est fréquent dans les gîtes plombozincifères. Les beaux groupes cristallisés viennent de Zacatecas et de Chihuahua (Mexique), et d'Ogdensbourg (New Jersey).

◀ ***Très beau groupe de cristaux d'eudidymite de Langesfjord, Norvège.***

Minéraux organiques

Whéwellite, $[Ca(C_2O_4) \cdot H_2O]$ - monoclinique

Ses cristaux sont rares : ce sont des tablettes à contours triangulaires et très transparentes. Dureté : 2 ½; densité : 2,22; indices de réfraction : np = 1,49, ng = 1,65. Les cristaux exposés dans les musées viennent de Saint-Sylvestre (Alsace) et de Burgh (Saxe).

Mellite, $[Al_2C_{12}O_{12} \cdot 18H_2O]$ - quadratique

La mellite se rencontre en bipyramides à base carrée, de couleur jaune miel. Dureté : 2 à 2 ½; densité : 1,55 à 1,65; indices de réfraction : np = 1,51, ng = 1,54. De grands cristaux ont été trouvés à Toula (U.R.S.S.).

Ambre, ou succin, (78 % C, 10 % O, 11 % H) - amorphe

C'est une résine fossile transparente à translucide, de couleur orangée, jaune-vert à brun de toutes nuances. Elle brûle en dégageant une odeur très agréable. Dureté : 2 à 2 ½; densité : 1,095; indice de réfraction : 1,54. L'ambre est employée depuis la préhistoire pour la fabrication de petits objets ornementaux. Ses gisements les plus importants sont situés sur les rives de la mer Baltique.

BIBLIOGRAPHIE

LACROIX A., *Minéralogie de la France et de ses anciens territoires d'outre-mer,* Librairie scientifique et technique Albert Blanchard, 1962. - PALACHE CH., BERMAN E. et FRONDEL C., *Dana's System of Mineralogy,* John Wiley and Sons, New York, 1941-1962. - STRUNZ H., *Mineralogische Tabellen,* Leipzig, Akademische verlagsgesellschaft, 5e édition, 1970.

▼ ***Groupe de cristaux d'hémimorphite de Santa Eulalia, Mexique (Londres, British Museum).***

C. Bevilacqua

▶ *Aspect d'une météorite : la* météorite de Tenham *(Londres, British Museum).*

C. Bevilacqua

LES MÉTÉORITES

Les météorites sont des corps solides tombés sur la surface de la Terre et provenant de l'espace interplanétaire. L'intérêt majeur de l'étude des météorites se situe dans la possibilité d'y rechercher des indications sur la formation des planètes et d'étudier l'origine du système solaire.

▼ *Représentation schématique de l'orbite de la* météorite *de* Pribram.

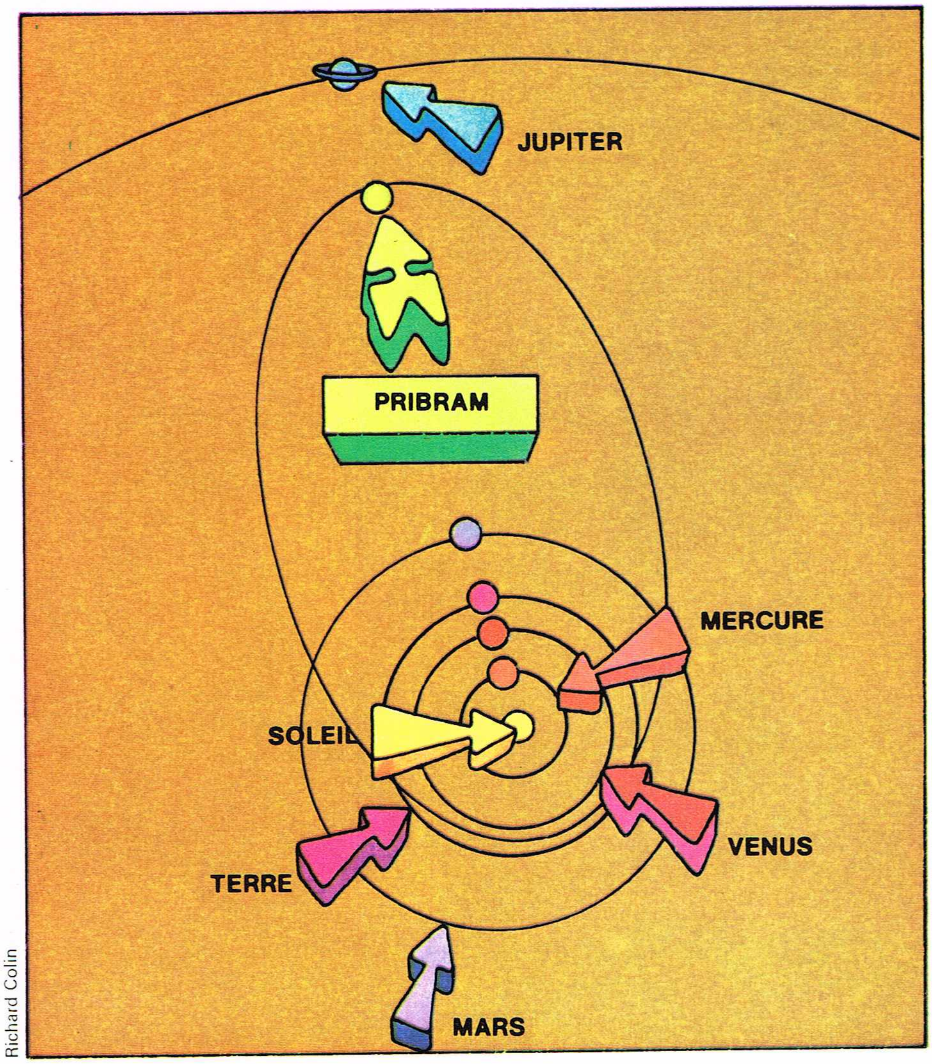

Richard Colin

L'étude des météorites concerne les scientifiques de plusieurs disciplines :

— l'astronome qui cherche à déterminer leurs trajectoires avant l'arrivée dans l'atmosphère terrestre ;

— le minéralogiste qui détermine des minéraux n'existant pas sur la surface terrestre associés à des minéraux communs sur la Terre ;

— le pétrographe qui étudie les associations minéralogiques et leur composition pour essayer d'en déduire le mode probable de formation ;

— le géochimiste qui compare la composition chimique des météorites à celle de la Terre, en présumant que les météorites proviennent de la fragmentation d'un ou de plusieurs corps planétaires analogues à la Terre (voir l'origine des météorites).

Connaissant également, depuis les expéditions vers notre satellite, la composition de certaines roches lunaires, ayant des données approximatives sur la composition du Soleil grâce aux analyses spectrographiques, ces scientifiques essaient d'en déduire la composition du système solaire.

L'estimation de la trajectoire des météorites a longtemps été fondée sur l'observation visuelle du phénomène lumineux qui accompagne l'arrivée dans l'atmosphère. Récemment, des mesures assez précises ont été obtenues par méthode photographique, et surtout par radar, pendant le passage de la météorite dans les régions les plus élevées de l'atmosphère terrestre. Le calcul tend à démontrer que les météorites suivent une orbite elliptique et non hyperbolique, comme quelques études précédentes l'affirmaient. Les météorites appartiennent donc au système solaire et ne sont pas des corps solides provenant d'autres régions de l'espace, comme ce serait le cas si la trajectoire était hyperbolique. La météorite de *Pribram,* tombée dans la nuit du 7 avril 1959, a été photographiée simultanément en deux endroits lors de sa chute ; l'orbite, calculée, correspond à une ellipse passant dans la zone des astéroïdes entre Mars et Jupiter. Les mêmes observations ont été faites pour la météorite de *Lost City* (janvier 1970). Quant aux autres météorites, on peut supposer qu'elles proviennent également de la ceinture des astéroïdes entre Mars et Jupiter.

Il faut faire une distinction entre les météorites dont on observe la chute et les météorites trouvées dans les champs ou sur les sols désertiques et qui ont donc été exposées, parfois pendant des milliers d'années, aux agents atmosphériques. Évidemment, les premières présentent un intérêt primordial car elles n'ont pas eu le temps de subir d'autres altérations que celles provenant de la traversée de l'atmosphère. Savoir reconnaître une météorite parmi toutes les pierres trouvées sur le sol est une tâche difficile pour un profane, surtout en ce qui concerne les météorites pierreuses *(aérolithes)*. D'ail-

leurs, celles-ci s'altèrent facilement et se désagrègent souvent avec le temps. Il est plus facile de reconnaître les météorites métalliques *(sidérites)*, qui attirent plus l'attention ; en effet, elles s'altèrent plus difficilement que les pierres. Il s'ensuit que si parmi les météorites trouvées, il y a davantage de sidérites, par contre, parmi les chutes observées, les aérolithes sont plus nombreuses. Certaines météorites contiennent environ moitié de fer, moitié de pierre ; on les appelle *sidérolithes ;* elles sont relativement rares.

Chutes observées et trouvailles de météorites

Catalogue Prior-Hey 1966	Chutes obser-vées	%	Trou-vailles	%	Total	%
Sidérites	61	7	600	55	661	34
Sidérolithes	12	2	61	5	73	4
Aérolithes	766	91	433	40	1 199	62
Total	839	100	1 094	100	1 933	100

Le passage d'une météorite dans l'atmosphère est accompagné d'un phénomène lumineux et acoustique. La traînée lumineuse est produite par la très forte température à la surface de la météorite, devenue incandescente à son contact avec l'atmosphère. Le phénomène lumineux *(météore)* avertissant du passage d'une météorite peut avoir un aspect spectaculaire, surtout la nuit, avec l'illumination intense de toute la région ; le phénomène dure communément une seconde. De jour, on voit le long de la trajectoire une fumée blanche produite par la pulvérisation de la surface de la météorite. Le phénomène visible est accompagné d'un phénomène acoustique : une ou plusieurs détonations ressemblant au grondement du canon sont dues à l'onde de choc formée à l'avant de la météorite.

Le terme propre désignant les corps solides extraterrestres qui pénètrent dans l'atmosphère est celui de *météoroïdes.* La masse de ceux-ci et leurs dimensions sont faibles; ils forment la grande majorité des corps circulant autour de la Terre et sont complètement vaporisés dans l'ionosphère et la stratosphère avant l'entrée dans l'atmosphère. Ils se manifestent alors seulement par l'effet lumineux qui accompagne leur vaporisation (étoile filante). Beaucoup de météoroïdes sont formés en majeure partie de substances gazeuses à la température existant à la surface terrestre, mais sont des corps solides dans le froid interplanétaire. Les météoroïdes plus gros, de composition pierreuse ou métallique, et dont la vitesse en entrant dans l'atmosphère est moins élevée, arrivent sur la surface terrestre ; ces corps sont alors appelés *météorites* (le terme est souvent improprement utilisé pour les autres corps solides circulant en dehors de l'atmosphère terrestre).

Les météorites subissent une perte de matière pendant la traversée de l'atmosphère. Il arrive que le corps solide éclate ; dans ce cas, au lieu d'une seule pierre, on trouve une série de fragments tombés à l'intérieur d'une zone plus ou moins vaste *(averse de météorites).* L'explosion est probablement causée par l'énorme différence de pression entre les parties postérieure et antérieure de la météorite en mouvement, ainsi que par les différences de température au niveau de la surface de la météorite qui devient incandescente. Les fragments originaires d'une seule chute sont retrouvés sur une aire de forme elliptique, allongée dans la direction du déplacement de la météorite ; les fragments les plus gros sont concentrés à la partie antérieure. Bien que les météorites tendent à la fragmentation durant l'ultime instant de leur choc dans l'atmosphère, il est possible de trouver des météorites de grande dimension tombées sur la surface terrestre. Les météorites, en tombant sur le sol, creusent souvent un trou au fond duquel on les trouve. Dans les rares cas de météorites de très grande dimension et de poids important (pouvant atteindre quelques dizaines ou centaines de tonnes), il se forme un cratère à la surface du sol.

On trouve deux types de cratères :

— Les *cratères d'impact* se forment dans le cas de météorites relativement petites, ayant des vitesses ne dépassant pas 1 à 2 km/s. Ces météorites provoquent des destructions mécaniques, et le cratère ainsi formé ne dépasse pas un diamètre de quelques dizaines de mètres. L'intérieur d'un cratère d'impact est tapissé de petits fragments de météorites mêlés au sol et de poussière météoritique ; mais la météorite reste à l'état solide.

— Les *cratères d'explosion* se forment dans le cas où la météorite explose au moment de l'impact au sol. Dans les cratères d'explosion on ne retrouvera donc pas la masse principale de la météorite mais seulement quelques fragments. Ces cratères sont plus larges que les précédents : ils ont un diamètre minimal de 100 m. Les explosions provoquent la fusion de la roche sous-jacente.

Ces cratères sont généralement trouvés en groupe : quelques cratères d'impact, un ou deux cratères d'explosion associés à des cratères d'impact. Les cratères isolés sont rares. Il est pratiquement certain que les cratères d'explosion isolés font partie d'un ensemble de cratères météoritiques effacés par l'érosion. L'exemple le plus fameux est probablement le *Meteor Crater* dans l'Arizona ; il s'agit d'une dépression presque circulaire de 1 200 m de diamètre et de 175 m de profondeur avec, tout autour, un bord relevé de 50 m. A l'intérieur de ce cratère, on a trouvé des dizaines de milliers de petits fragments de fers météoritiques ; les grès qui ont supporté l'impact ont été fortement choqués ; les grains de quartz qui

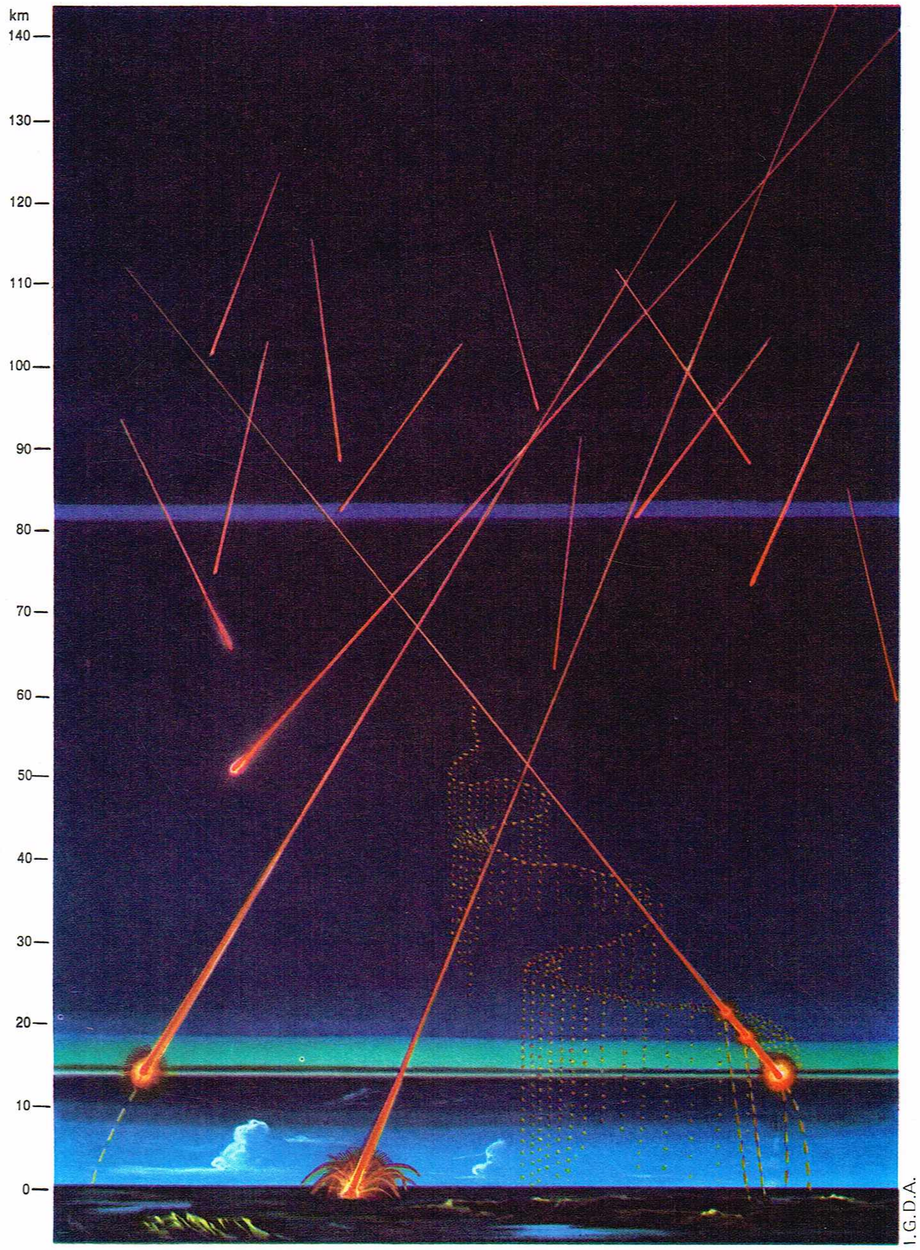

▲ ***Schéma de la trajectoire des météorites : en haut, météoroïdes qui se sont complètement consumés (étoiles filantes) ; en bas à droite, une météorite qui explose et provoque la chute de nombreux fragments et de poussière météoritique ; au milieu, origine d'un cratère météoritique d'explosion ; à gauche, chute d'une météorite (d'après Krinov).***

▶ *Page ci-contre, en haut, le* Meteor Crater *(Arizona, États-Unis). Au centre, cannelures aérodynamiques sur la croûte de fusion de la* météorite de Barwell *(Londres, British Museum).*

composent ce grès montrent des structures planaires caractéristiques et certains ont été transformés en des formes polymorphes de haute pression à densité beaucoup plus élevée que le quartz (2,65) : la coésite (d = 2,93) et la stishovite (d = 4,30). Ailleurs dans le cratère et sur les bords on a trouvé de la silice vitreuse de densité apparente 2,1 produite par la fusion de la roche durant la forte augmentation de température causée par l'impact de la météorite. Sur un rayon de 10 km autour du cratère, plusieurs milliers de fragments ont été récoltés; le plus gros spécimen pèse 640 kg. Sur la surface de la Terre quelques autres cratères ont une origine météoritique presque certaine; ils sont répartis de manière quelconque à la surface du globe.

Plusieurs critères permettent de reconnaître un cratère météoritique et de le distinguer d'éventuelles formations explosives ou terrestres :

— la forme du cratère,

— la transformation du quartz de la roche qui subit l'impact en minéraux de haute pression (coésite, stishovite),

— la présence de brèches dues aux mélanges de roches variées déplacées lors de l'impact et contenant des minéraux déformés par choc,

— la présence de roches vitrifiées,

— à quelque distance du centre de l'impact la formation de Shattercones : ce sont des figures coniques, particulièrement bien visibles sur des roches calcaires, dont les dimensions sont très variables (du centimètre au mètre) et dont l'angle au sommet varie de 75° à 90°. A la surface de la Terre, l'érosion efface relativement vite les reliefs, de sorte que les cratères d'impact perdent leur rebord caractéristique et que leur cuvette se comble. Ils sont plus difficiles à déterminer sur la Terre que sur la Lune et les critères de reconnaissance des roches choquées sont indispensables pour les identifier. On a ainsi pu reconnaître, par exemple, l'impact de Charlevoix, sur les rives du Saint-Laurent (Québec), et celui de Chassenon, dans le Limousin.

Le nom donné à une météorite est celui de la localité dans laquelle on la trouve; tous les fragments sont attribués à la chute d'un seul corps solide. Par exemple, la météorite de *Pultusk,* tombée en 1868 en Pologne, représente un ensemble de 100 000 pierres environ.

Les critères de classification des météorites sont nombreux; c'est pourquoi il a d'abord été compliqué d'établir un système logique. Les critères susceptibles d'être utilisés sont : la composition chimique, la composition minéralogique, la structure interne et la couleur. Les classifications anciennes dépendaient donc de l'intérêt porté par le chercheur à tel ou tel critère.

La classification que l'on adopte maintenant est basée sur la composition minéralogique et la composition chimique.

Classification des météorites

Les pierres, ou aérolithes :

★ les *chondrites,* classées selon leur composition minéralogique :

- chondrites à enstatite,
- chondrites à olivine et bronzite,
- chondrites à olivine et hypersthène,
- chondrites carbonées;

★ les *achondrites,* classées suivant leur teneur en calcium :

— achondrites pauvres en calcium :

- achondrites à enstatite, ou aubrites,
- achondrites à hypersthène, ou diogénites,
- achondrites à olivine, ou chassignites,
- achondrites à olivine pigeonite, ou ureilites;

— achondrites riches en calcium :

- achondrites à augite, ou angrites,
- achondrites à diopside et olivine, ou nakhlites,
- achondrites à pyroxène et plagioclase : eucrites et howardites.

Les sidérolithes ou lithosidérites, classées suivant la nature du silicate :

— pallasites à olivine,
— sidérophyres à bronzite et tridymite,
— lodranites à bronzite et olivine,
— mésosidérites à pyroxène et plagioclase.

Les fers ou sidérites classés suivant leur structure et leur teneur en nickel :

— hexaédrites avec de 4 à 6 % de nickel,
— octaédrites avec de 6 à 14 % de nickel,
— ataxites riches en nickel (plus de 12 % de nickel).

Caractéristiques morphologiques des météorites

Les dimensions des météorites et plus généralement du matériel solide d'origine extraterrestre sont très variables : on observe des poussières météoritiques millimétriques et des météorites dont la dimension est de l'ordre du mètre.

La plus grande météorite connue, qui constitue un bloc unique, est la sidérite de *Hoba* (Sud-Ouest africain) composée d'un alliage de ferro-nickel; cette météorite est un bloc tabulaire de 3 m de long et de large et de 1 m d'épaisseur; elle pèse environ 60 tonnes. Il existe de nombreux fers météoritiques pesant entre 1 et 30 tonnes. La plus grande pierre météoritique connue est celle d'*Allende* (chondrite carbonée) tombée le 8 février 1969 dans le nord du Mexique, d'un poids de 2 tonnes. C'est la seule pierre connue dont le poids soit supérieur à la tonne. D'autres peuvent atteindre des centaines de kilos; citons *Norton County, Long Island, Paragould, Bjurbole,* Parmi les lithosidérites, quelques pallasites pèsent près d'une tonne et la mésosidérite d'*Estherville* (États-Unis) pèse 200 kg.

Les corps les plus petits provenant de l'espace extraterrestre ont une dimension inférieure au 1/10 de millimètre (poussière météoritique). On distingue deux groupes suivant leur forme :

— d'une part, des corpuscules globulaires avec une cavité interne, qui représentent les petites parcelles de fusion de la surface de la météorite pendant sa traversée de l'atmosphère; ce sont les principaux constituants solides de la fumée que les météorites laissent derrière elles et que l'on observe pendant la chute; les particules de ce type se rencontrent communément dans les sédiments océaniques profonds;

— d'autre part, des fragments de dimensions similaires mais de forme polyédrique irrégulière; ce sont des produits de la fragmentation mécanique de la météorite lors de son impact avec la surface terrestre.

Il existe toutes les transitions des micrométéorites, fragments plus petits, jusqu'à des dimensions de l'ordre du millimètre. La poussière cosmique est une association de très petites particules d'aspect similaire aux micrométéorites, qui tombent continuellement et avec lenteur. Elle est très difficile à distinguer des poussières industrielles.

L'examen d'un grand nombre de météorites donne l'impression d'une grande diversité de formes; on note néanmoins, surtout en ce qui concerne les pierres, une tendance vers des formes arrondies et équidimensionnelles. Les fers météoritiques sont d'aspect plus irrégulier avec des protubérances et des cavités; citons le fer météoritique de *Tucson* (États-Unis), qui présente une cavité de 70 cm de diamètre.

La forme d'origine de la météorite a été modifiée par plusieurs facteurs successifs : l'érosion et les collisions interplanétaires, l'ablation et la fragmentation de la météorite pendant son passage à travers l'atmosphère terrestre, l'impact sur la surface de la Terre et enfin l'altération.

La possibilité de modification de la forme de la météorite par collision avec d'autres objets dans l'espace est généralement admise.

La modification de la forme de la météorite au moment de son passage à travers l'atmosphère est probablement la plus importante quant à la détermination de la forme finale. D'une part, la température très élevée qui se développe par friction à la surface de la météorite, et, d'autre part, l'action mécanique très intense au contact de l'atmosphère aboutissent à l'ablation de matériel puis à la fragmentation de la météorite. L'exemple de la météorite de *Boguslavka* est probablement un cas très spectaculaire de fragmentation avant l'arrivée sur Terre : cette météorite est tombée en Sibérie en deux endroits séparés

▶ *Page ci-contre, en bas, à gauche, croûte de fusion d'une aérolithe tombée à Agrigente, en 1853, et présentant des fossettes caractéristiques; à droite, fossettes sur la croûte de fusion qui enveloppe une aérolithe tombée en Moravie, en 1808 (Milan, musée d'Histoire naturelle).*

d'une centaine de kilomètres ; un morceau pèse 199 kg et l'autre 57 kg ; ces deux masses s'emboîtent très bien l'une dans l'autre et la fragmentation s'est faite le long de deux clivages formant un angle de 90° ; or, *Boguslavka* est une hexaédrite ; elle est donc formée de kamacite, minéral cubique (voir les sidérites). Cette météorite est certainement entrée dans l'atmosphère d'une seule pièce, avant d'être fragmentée le long de ses plans de clivage. Les météorites pierreuses qui sont une association de minéraux divers sont très souvent de forme polyédrique. La modification de la forme de la météorite par ablation dans l'atmosphère est conditionnée par l'orientation de la météorite pendant son passage à travers celle-ci. Si la météorite garde une orientation constante, l'ablation se fera surtout dans les angles, et la forme finale sera conique. Cette variation d'orientation de la météorite dépend de sa forme avant l'entrée dans l'atmosphère. L'ablation peut, dans certains cas, représenter une partie importante de la masse de la météorite.

L'impact au sol a normalement un effet minime sur la forme des petites et moyennes météorites, en rapport avec leur vitesse de chute. Par contre, les grandes météorites explosent véritablement à l'arrivée au sol.

Enfin, l'altération sur Terre modifie la forme des météorites, quoique de façon très variable ; elle accentue les irrégularités ; dans le cas de météorites non homogènes, elle attaque certaines parties plutôt que d'autres. Notons que cette altération dépend de la localisation de l'impact et, par suite, des conditions climatiques.

Pratiquement toutes les météorites ont une croûte de fusion formée pendant la traversée de l'atmosphère terrestre. La nature de la croûte de fusion varie avec la composition de la météorite. Pour la plupart des météorites cette croûte est noire, sauf en ce qui concerne les achondrites à enstatite, où la croûte est incolore ou jaune pâle en raison de l'absence presque totale de fer.

L'étude de la surface de la croûte de fusion permet souvent de déterminer l'orientation de la météorite pendant sa chute :

— au niveau de la partie frontale, elle est généralement lisse et ne donne aucune indication de structure ;

— au niveau des parties latérales, elle peut être striée : ces stries indiquent clairement la direction de chute de la météorite ;

— au niveau de la partie dorsale, la croûte présente des dépressions irrégulières et non orientées qui sont pour la plupart aérodynamiques. Sur la partie dorsale de certaines météorites, des cavités de dimensions souvent considérables sont parfois présentes ; elles sont attribuées à la fusion différentielle ou bien à la combustion des inclusions diverses de la météorite, particulièrement celles formées de sulfure de fer ou de substance carbonée.

Composition chimique et minéralogique des météorites

L'analyse chimique des météorites, directement liée aux caractères pétrographiques, peut être la première façon d'identifier et de classer une météorite. Une telle

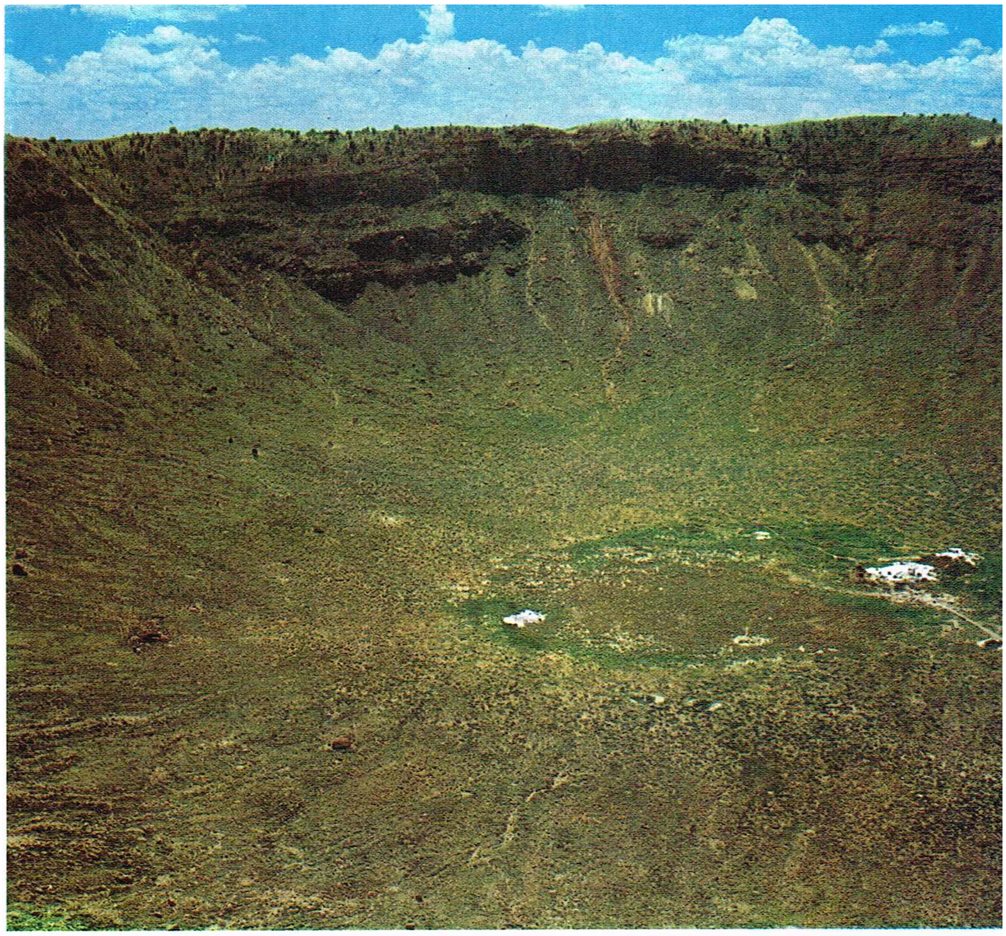

S.E.F.

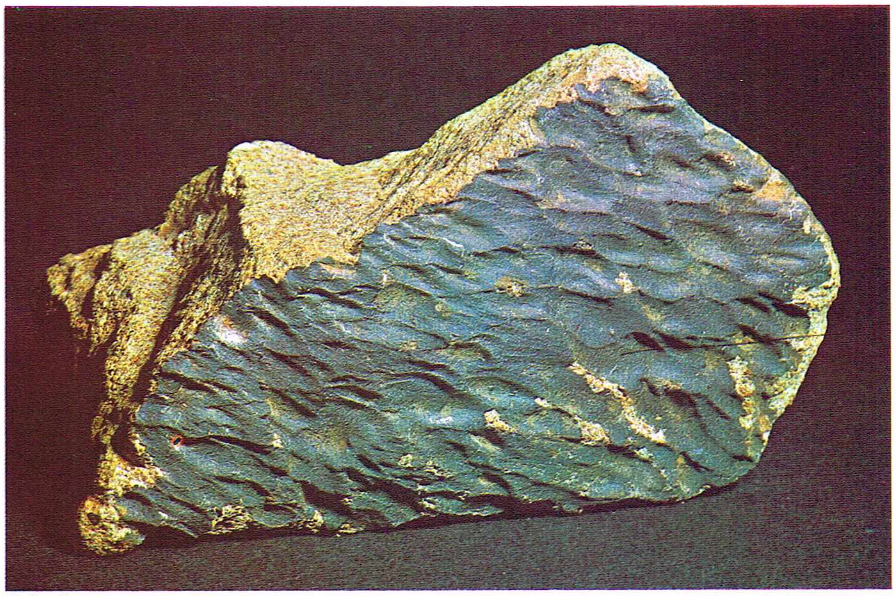

C. Bevilacqua

C. Bevilacqua

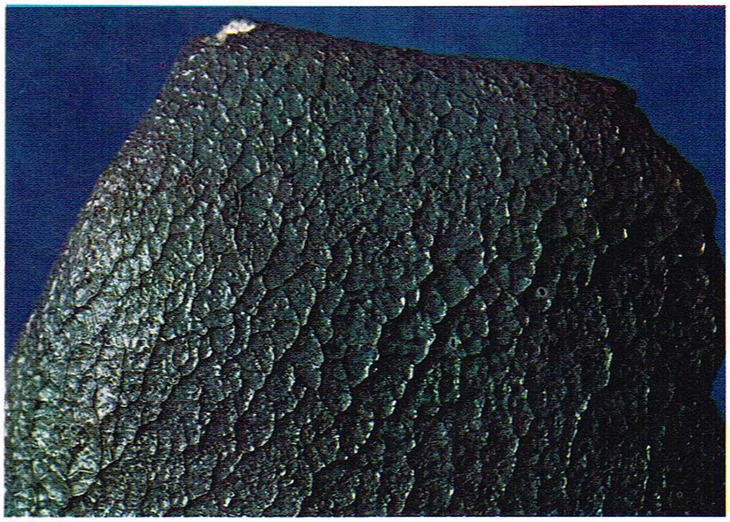

C. Bevilacqua

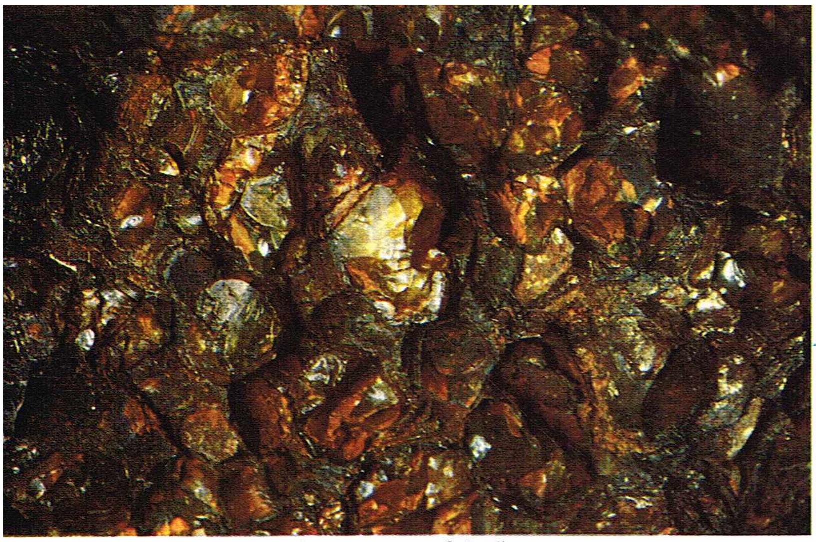

C. Bevilacqua

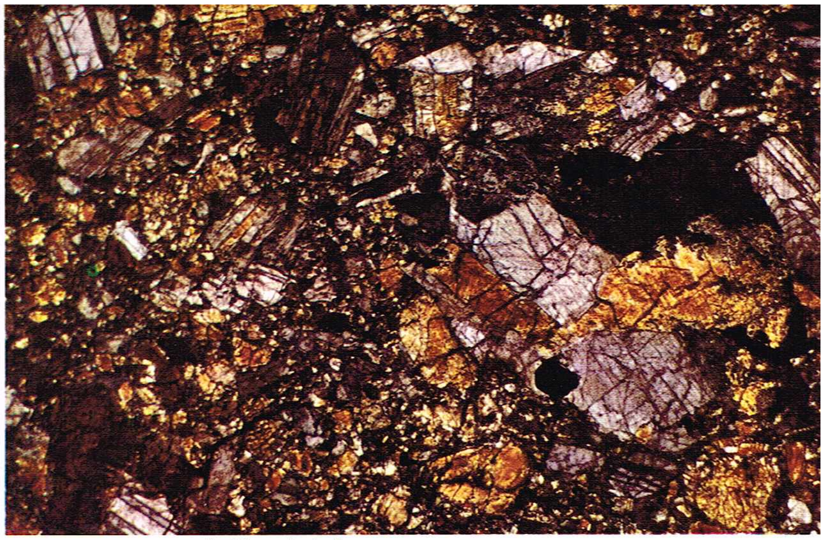

Archives photo B

▲ *A gauche, olivine d'une* **pallasite** *tombée près de Krasnojarsk, Sibérie (Milan, musée d'Histoire naturelle). A droite, cristaux de plagioclase contenus dans une* **achondrite** *(lame mince entre nicols croisés) [Milan, musée d'Histoire naturelle].*

analyse et son interprétation présentent toutefois certaines difficultés par rapport aux analyses de roches terrestres.

Les météorites ont souvent une texture grossière et non homogène; aussi est-il difficile de faire un prélèvement représentatif de la composition chimique moyenne. La présence du fer, qui se trouve à l'état d'élément, prouve que le milieu de cristallisation était beaucoup plus réducteur que celui des roches terrestres. Plusieurs éléments sont donc combinés autrement que dans les minéraux terrestres. On peut trouver, par exemple, du silicium en solution solide dans le ferronickel; le fer se trouve en alliage avec le nickel, en combinaison avec le soufre, oxydé dans les silicates mais seulement sous sa forme bivalente (sauf lorsqu'il y a une oxydation terrestre surajoutée); son analyse est donc particulièrement difficile.

Les sidérites contiennent en moyenne environ 90 % de fer; le reste est en grande partie constitué de nickel, d'un peu de cobalt, de soufre, de phosphore, d'azote, etc., combinés avec le métal.

Dans les *lithosidérites,* météorites formées de métal et de silicates en quantités presque équivalentes, le pourcentage de fer est nettement inférieur (50 %), une petite partie étant combinée aux silicates. Le pourcentage moyen de magnésium atteint 12 % pour 8 % de silicium et près de 20 % d'oxygène.

La composition chimique des *aérolithes* est représentée en pourcentage d'oxyde des divers éléments, comme pour les roches terrestres. Le fer se trouvant à l'état métallique ou combiné au soufre représente moins de 15 % pour les chondrites, moins de 1 % pour les achondrites. La quantité de silice combinée dans les silicates est de l'ordre de 50 %, comme dans les roches terrestres basiques. Les oxydes d'aluminium et de calcium sont surtout présents dans les plagioclases et sont tolérés en quantité limite dans les pyroxènes; ces oxydes ne représentent que quelques unités %. Une petite quantité d'alcalins est contenue dans les feldspaths. Le pourcentage d'oxyde de magnésium est élevé (20 %); le pourcentage d'oxyde de fer est plus faible (15 %); ces deux oxydes sont combinés à la silice dans l'olivine et les pyroxènes.

La composition minéralogique des *météorites* pierreuses ressemble à celle des roches ignées terrestres basiques et ultrabasiques; cependant, comme nous l'avons signalé, le milieu de cristallisation très réducteur a favorisé en outre la formation de minéraux particuliers.

Les principaux minéraux des météorites sont des silicates, des ferronickels et du sulfure de fer. Ce sulfure, la troïlite, est très voisin de la pyrrhotine terrestre et ne s'en distingue que par une composition un peu plus riche en fer. Les chondrites en contiennent 5 à 6 %. Les ferronickels sont composés de deux phases, la kamacite et la taénite :

— la *kamacite,* en termes de métallurgie, correspond au fer alpha; sa structure est cubique centrée; c'est un alliage de ferronickel avec une composition de 6 % de nickel;

— la *taénite,* en termes de métallurgie, correspond au fer gamma. Sa structure est cubique à faces centrées; c'est un alliage de ferronickcl à composition variable de 20 à 65 % de nickel.

Les olivines et les pyroxènes, silicates ferromagnésiens, constituent 90 % de la fraction silicatée de la plupart des météorites. L'olivine, de couleur verdâtre à jaune brunâtre, est toujours plus riche en magnésium qu'en fer. Les pyroxènes orthorhombiques ainsi que les olivines forment une série isomorphe ferromagnésienne. Les noms d'enstatite, de bronzite et d'hypersthène ont été donnés aux variétés renfermant respectivement moins de 10 %, de 10 à 20 %, et plus de 20 % de molécules d'oxyde de fer; ils n'en contiennent généralement pas plus de 35 %. Les pyroxènes monocliniques renferment un peu de calcium (pigeonite) ou beaucoup (diopside) mais n'existent qu'en trace dans les chondrites. Dans les météorites carbonées, riches en eau, on trouve un silicate de magnésium hydraté, la serpentine; celle-ci se présente en très petits grains mal cristallisés, accompagnés de substance organique amorphe.

A côté des silicates ferromagnésiens, on rencontre un alumino-silicate sodicocalcique, un feldspath plagioclase. Il se trouve en petits grains, peu abondants, sodiques dans les chondrites, et en cristaux tabulaires bien développés, calciques dans certaines achondrites. Lorsque la

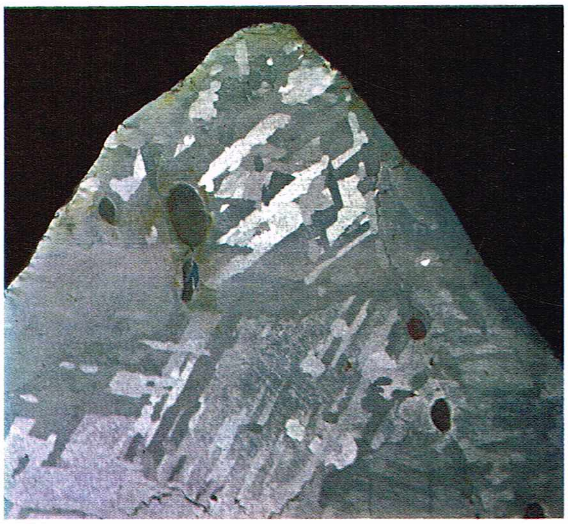

C. Bevilacqua

▶ **Figures de Widmanstätten** *dans une octaédrite (Brendego River) [Londres, British Museum].*

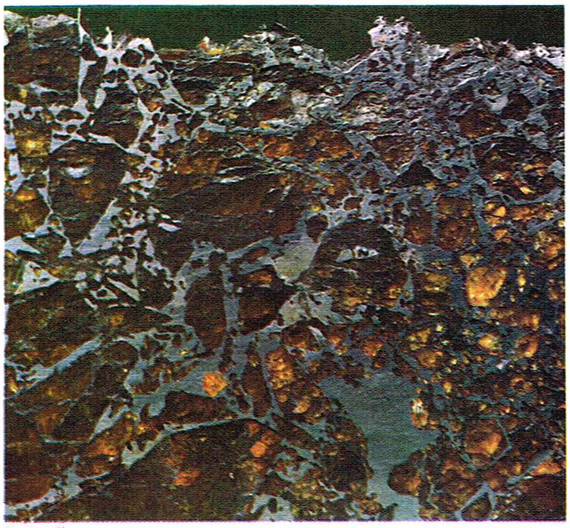

C. Bevilacqua

▶ *Structure bréchique d'une* **pallasite** *tombée dans le Kentucky (États-Unis); les fragments d'olivine sont immergés dans une masse de ferronickel (Milan, musée d'Histoire naturelle).*

météorite a subi un choc violent, le feldspath est vitrifié ; on l'appelle alors maskélynite. Ce nom avait été donné à cette forme vitreuse avant que fût établie sa parenté avec le feldspath.

Parmi les minéraux accessoires, certains sont connus sur Terre : notamment, la chromite, oxyde de fer et de chrome, différentes formes de silice, des phosphates de calcium (apatite et whitlokite) et le carbone sous forme de graphite. On a trouvé dans quelques cas exceptionnels des petits grains de diamant.

D'autres minéraux rares sont exclusivement météoritiques. Dans les sidérites ce sont, par exemple, le carbure de fer appelé cohénite, le phosphure de fer et de nickel appelé schreibersite, un sulfure de fer et de chrome appelé daubréelite. Dans les pallasites, c'est un phosphate de magnésium, la farringtonite. Dans les météorites carbonées, parce qu'elles contiennent de l'eau, on trouve, à côté de la serpentine signalée plus haut, des carbonates et des sulfates tels que l'epsomite, sulfate hydraté de magnésium, le gypse et un sulfate hydraté de sodium et de magnésium, la bloédite. La magnétite est ici un minéral caractéristique des météorites carbonées ; mais elle se trouve aussi dans la croûte des météorites où elle s'est formée par oxydation du fer durant la traversée de l'atmosphère.

Structures des météorites

L'étude des structures des météorites est d'une grande importance pour reconstituer les événements qui ont accompagné leurs genèses et les vicissitudes successives qu'elles ont subies dans l'espace durant les longues périodes de leurs formations jusqu'à leurs chutes sur la Terre. Dans certains cas, une interprétation génétique de la structure est difficile. On fera une distinction générale entre la structure des sidérites et celle des aérolithes.

La structure des fers météoritiques est mise en évidence sur la surface polie par action des acides afin de corroder à des degrés variables les minéraux présents. Une catégorie de sidérites, les octaédrites, présente une structure lamellaire caractéristique ; ces lamelles sont parallèles à certaines directions et sont de longueur centimétrique (figures de Widmanstätten). L'intersection de ces lamelles avec la surface donne une bande constituée d'un cristal de kamacite entouré par une gaine de taénite. D'autres structures lamellaires apparaissent aussi bien dans les hexaédrites que dans les octaédrites car ce sont des marques de choc, dites lignes de Neumann. Les cristaux de certains minéraux accessoires présents dans les sidérites peuvent montrer une disposition orientée respectant la direction de la structure lamellaire des ferronickels. De même, la troïlite peut se présenter en lamelles orientées entre le ferronickel (lamelle de Reichenbach). On rencontre également des inclusions lamellaires de schreibersite (lamelle de Brezina). Les inclusions aciculaires de schreibersite (rhabdites) sont disposées selon les directions cristallographiques de la masse de ferronickel qui les contient.

Dans les sidérites, on observe d'autres structures non orientées : la structure nodulaire consistant en inclusions de graphite ou de troïlite dans la masse principale du ferronickel. Les nodules ont une forme irrégulière et sont de dimensions variables. Un cas particulier de structure grenue microcristalline est fréquent dans les sidérites, et constitué, globalement ou en partie, d'un mélange microcristallin de kamacite et de taénite : la plessite.

Certaines aérolithes présentent une structure porphyrique. Dans certaines lithosidérites ou aérolithes, on a une structure grenue à grains moyens comme dans beaucoup de roches ignées intrusives, la dimension des grains étant de l'ordre du millimètre.

Un autre type de structure, la structure bréchique, est caractéristique de certaines aérolithes ; mais elle peut se présenter dans quelques lithosidérites où des cristaux d'olivine à contours anguleux et irréguliers sont immergés dans une matrice de ferronickel. La structure bréchique, avec ses cristaux à contours anguleux, semble en rapport avec une violente déformation subie par la météorite quand elle faisait encore partie du corps planétaire. Les aérolithes à structure bréchique sont subdivisées en monomictes et polymictes, les unes présentant des fragments semblables en composition et en structure, les autres des fragments plus diversifiés. Les chondrites sont veinées lorsqu'elles sont parcourues par des filonnets remplis de substance vitreuse et contenant des petits globules de troïlite.

La structure chondritique est la principale caractéristique qui distingue beaucoup d'aérolithes des roches terrestres malgré leur composition minéralogique analogue. Cela est dû à la présence de chondres, corpuscules globulaires de dimension généralement inférieure au millimètre, mêlés à des débris cristallins plus fins. Les chondres peuvent être formés de divers silicates (olivine, pyroxène et rarement plagioclase), et contiennent une proportion variable de substance vitreuse. La microstructure interne des chondres, examinée au microscope, est variable : une structure radiale, excentrée, formée de petits cristaux aciculaires de silicate (pyroxène) qui divergent d'un point situé presque à la périphérie du chondre ; on observe également les structures microgrenues, microporphyriques, porphyriques... Certains chondres sont constitués presque exclusivement d'un seul cristal d'une espèce minérale, souvent de l'olivine. Enfin, les chondres peuvent se trouver entourés de ferronickel ou de troïlite.

Les sidérites

Les plus grandes météorites sont des fers (sidérites). La plus grosse est celle de *Hoba*, tombée en 1920 dans le Sud-Ouest africain et qui pèse 60 tonnes. La classification des sidérites est fondée sur leur texture et est étroitement liée à leur composition chimique. On les divise en trois groupes qui sont les suivants :

	chutes	trouvailles	total
Hexaédrites 4 — 6 % Ni	6	49	55
Octaédrites 6 — 14 % Ni	32	434	466
Ataxites > 12 % Ni	1	41	42

Les octaédrites sont le type de sidérite le plus commun. Ces météorites sont composées surtout des deux formes minéralogiques de l'alliage fer-nickel : la kamacite et la taénite. Les minéraux accessoires sont des sulfures (troïlite et sphalérite), des phosphures (schreibersite), des carbures métalliques (cohénite), graphite et chromite.

Les hexaédrites. Elles sont un assemblage de gros cristaux de kamacite cubique (cube = hexaèdre, d'où leur nom). Fréquemment, le corps même de la météorite est composé d'un seul cristal de kamacite qui peut être rompu par impact au sol. La surface d'une hexaédrite attaquée à l'acide présente un fin réseau de bandes orientées régulièrement : ce sont les *lignes ou bandes de Neumann*. Ces lignes ont pour origine une déformation mécanique intense subie par la kamacite à des températures relativement basses, comprises entre 300 °C et 600 °C. Quand la météorite est composée d'une association de plusieurs cristaux de kamacite, les bandes de Neumann présentent des orientations différentes pour chacun des cristaux. Les hexaédrites ont une composition chimique remarquablement uniforme : en moyenne, 93,5 % de fer, 5,5 % de nickel et 0,5 % de cobalt, traces de phosphore, de soufre, de chrome et de carbone.

Le minéral essentiel est la kamacite ; accessoirement, nous trouvons la schreibersite sous forme d'inclusions microscopiques en petites baguettes (rhabdites), la troïlite en nodules arrondis, la daubréelite adjacente à la troïlite ou bien intergranulaire, et enfin le graphite en nodules associés à la troïlite. De cette uniformité de composition résulte une uniformité de densité : $7{,}90 \pm 0{,}02$. On ne connaît pas de sidérites contenant moins de 4 % de nickel ; les teneurs les plus faibles sont probablement dues à des analyses imprécises ou bien à l'analyse d'une fraction de météorite contenant d'autres minéraux communs en quantité accessoire.

Les ataxites pauvres en nickel sont incluses dans le groupe des hexaédrites ; elles en sont proches par leurs compositions chimique et minéralogique, présentent une structure finement granulaire, des bandes de Neumann et un clivage cubique. Elles ont vraisemblablement pour origine le métamorphisme thermique des hexaédrites. Avec l'augmentation de la teneur en nickel (6 %), les hexaédrites évoluent vers les octaédrites. L'excès de nickel permet la formation de la taénite en cristaux

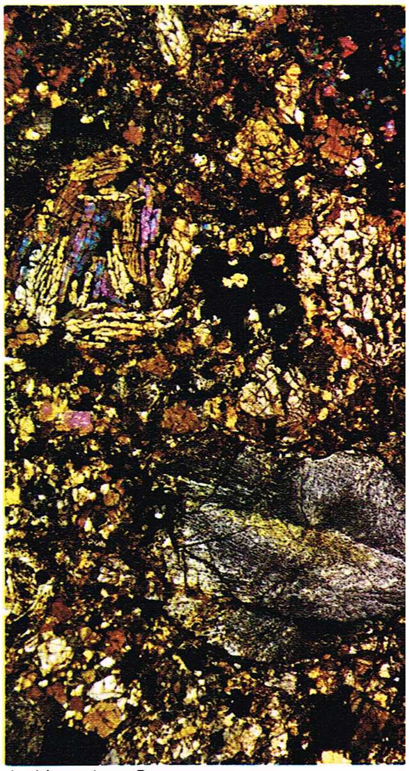

Archives photo B

▲ ***Structure chondrique d'une* chondrite à hypersthène *(l'Aigle) ; les chondres ont des structures internes variées : fibro-radiées, granulaires, etc. (lame mince entre nicols croisés).***

▶ *Aspect des* figures de Widmanstätten *selon l'orientation de la section de l'octaèdre (d'après Mason).*

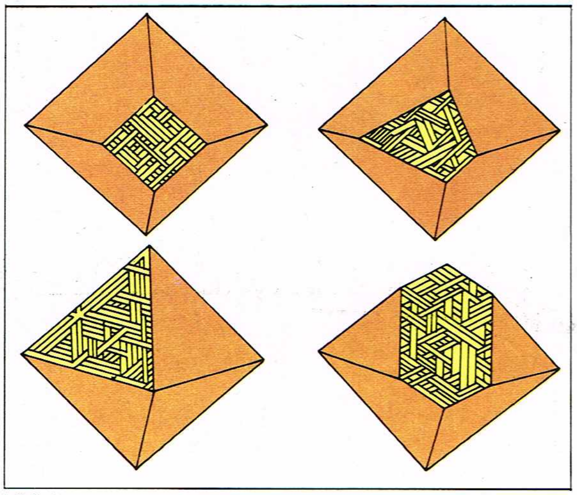

I.G.D.A.

▶ *Diagramme représentant les variations de phases de l'alliage fer-nickel : la phase γ (taénite) est stable dans la zone rose. A la pression de l'atmosphère, lors du refroidissement (le long de la ligne verticale), on rejoint la courbe au point A, alors la phase α (kamacite) se sépare avec une composition correspondant à celle du point B. La composition de ces deux phases varie selon la courbe. Les deux autres courbes, plus vers le bas, représentent le phénomène à pression moyenne. Dans la zone grise est représentée la composition des diverses classes de sidérites (d'après Uhlig).*

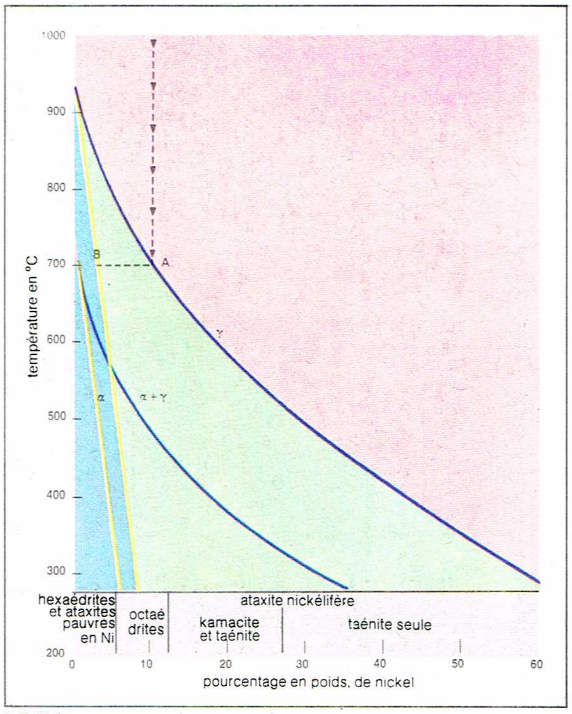

I.G.D.A.

▶ *Page ci-contre, en haut à gauche, section de la* météorite de Springwater *(Saskatchewan, Canada) ; les cristaux d'olivine sont inclus dans le ferronickel (Londres, British Museum). A droite, en haut,* pallasite *tombée dans le Kansas (États-Unis) : les cristaux gris verdâtre d'olivine sont inclus dans une masse de ferronickel. Au centre, deux grands cristaux d'olivine séparés par une plage de ferronickel dans la* pallasite de Brenham *(Kansas, États-Unis) [lame mince entre nicols croisés]. En bas,* mésosidérite de Mincy, *tombée dans le Missouri : plage opaque de ferronickel associée à des cristaux de pyroxène et d'olivine (lame mince entre nicols croisés) [Milan, musée d'Histoire naturelle].*

lamellaires anguleux, bordant les grains de kamacite et disposés parallèlement aux faces de l'octaèdre. La formation de cette taénite marque la transition entre les hexaédrites et les octaédrites. Les hexaédrites sont peu nombreuses.

Les octaédrites. La structure caractéristique des sidérites comprenant en moyenne plus de 6 % de nickel est l'octaèdre. Les octaédrites sont formées de taénite et de kamacite ; cela peut être mis en évidence par une légère attaque de la surface polie à l'acide ; on voit alors quatre systèmes de bandes de kamacite développées parallèlement aux faces de l'octaèdre et bordées par la taénite. Les espaces assez larges, polyédriques, compris entre les lamelles de kamacite et de taénite sont souvent remplis de l'association microcristalline de ces deux minéraux appelée « plessite ». Cette texture particulière des octaédrites, appelée *figure de Widmanstätten,* s'explique bien par l'étude du refroidissement du système fer-nickel. Les figures de Widmanstätten sont donc des bandes qui se croisent suivant deux, trois ou plusieurs directions. Le réseau de ces bandes apparaît différemment suivant l'orientation de la section considérée :

— si la section est parallèle au plan de l'octaèdre, apparaissent trois systèmes de bandes parallèles se coupant avec un angle de 60° ;

— si la section est parallèle au plan du cube, deux systèmes de bandes se coupent avec un angle de 90° ;

— si la section est parallèle au plan du dodécaèdre, trois systèmes de bandes sont visibles, deux se coupant avec un angle de 109°, et le troisième étant selon la bissectrice de cet angle ;

— une section quelconque fera apparaître des bandes se coupant avec des angles variables.

Dans la classification des octaédrites, on distingue plusieurs types basés sur la largeur des bandes de kamacite. Il existe une relation directe entre la largeur de ces bandes et la teneur en nickel de la météorite :

— les octaédrites grossières, avec 6 à 8 % de nickel, ont des bandes de kamacite d'une largeur supérieure à 2 mm ;

— les octaédrites avec 7 à 9 % de nickel ont des bandes de kamacite d'une largeur comprise entre 0,5 et 2 mm ;

— les octaédrites à structure fine, avec 8 à 14 % de nickel, ont des bandes de kamacite d'une largeur inférieure à 0,5 mm.

Les octaédrites grossières forment la transition avec les hexaédrites ; les octaédrites à structure fine évoluent vers les ataxites, riches en nickel. Les minéraux accessoires inclus dans les octaédrites sont la schreibersite, la troïlite, la cohénite (dans les octaédrites grossières) et le graphite. Du diamant a été trouvé dans les météorites de *Canyon Diablo* et de *Magura.* La chromite se rencontre en petites quantités ; elle est généralement associée à la troïlite et à la cohénite.

Les ataxites. Quand le contenu en nickel dans les octaédrites augmente, les bandes de kamacite deviennent de plus en plus étroites ; vers les teneurs de 12 à 14 % de nickel, elles sont extrêmement étroites et discontinues, et la structure en bandes de Widmanstätten disparaît alors. En effet, les ataxites n'ont pas de structure visible à l'œil nu (d'où leur nom) et sont surtout formées de plessite.

Le rapport quantitatif de la kamacite et de la taénite dans les ataxites varie en fonction de la teneur en nickel. La valeur supérieure est de 30 % de nickel ; ce sont alors des ataxites composées entièrement de taénite avec de petites inclusions de kamacite communément arrangées en réseau triangulaire. Les ataxites riches en nickel sont peu nombreuses ; on a trouvé 41 de ces météorites et une chute seulement a été observée.

Structures des sidérites et système fer-nickel. Les diverses structures des sidérites dépendent du rapport quantitatif du fer et du nickel dans la météorite ; ainsi, par l'étude expérimentale du refroidissement du mélange fondu fer-nickel il est possible d'effectuer un certain nombre d'interprétations. Les expériences sont faites à la pression de 1 atmosphère, quand le fer et le nickel constituent un système binaire avec une température minimale de fusion de 1 430 °C pour un mélange contenant 32 % de fer et 68 % de nickel. Les températures de fusion de mélanges de compositions diverses ou bien des métaux purs sont plus élevées : celle du fer est à 1 550 °C ; le mélange fer-nickel avec des teneurs entre 5 et 62 % de nickel (ce sont les valeurs limites du contenu en nickel des alliages des sidérites) se solidifie à une température moyenne de 1 500 °C (variable en fonction du rapport quantitatif des deux éléments) et forme une série ferronickel avec une structure cristalline à faces centrées de la taénite. La grande miscibilité du fer et du nickel à l'état solide existe seulement à haute température ; cette température a d'ailleurs une limite, qui décroît avec l'augmentation de la teneur en nickel et de la pression du système. Quand le ferronickel refroidit lentement dans le champ biphasé (phases alpha + gamma du système), la phase alpha précipite préférentiellement le long des plans octaédriques de la phase gamma. Cela est l'explication des figures de Widmanstätten avec la kamacite en bande bordée par la taénite en lamelle suivant les plans de l'octaèdre de la phase gamma originelle. Des structures analogues aux figures de Widmanstätten sont obtenues expérimentalement par solidification lente du mélange fer-nickel mais sous forme microscopique.

Les sidérites sont ainsi formées par consolidation du mélange liquide de fer et de nickel à l'intérieur d'un ou de plusieurs corps planétaires et à pression assez élevée. D'autre part, la régularité de la structure cristalline des sidérites, la présence commune de cristaux équidimen-

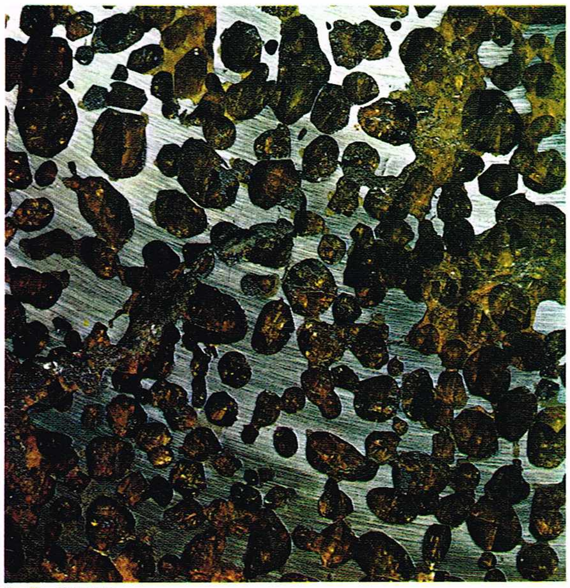

C. Bevilacqua

C. Bevilacqua

sionnels et de lamelles de grande dimension font penser à une série de transformations survenues lentement durant une longue période de temps.

Les lithosidérites

Les lithosidérites sont un groupe peu nombreux, ne représentant que 4 % de l'ensemble des météorites. Elles sont formées de ferronickel et de silicates, surtout magnésiens, en proportion équivalente. Elles se répartissent en deux classes principales :

— les *pallasites :* lithosidérites à olivine;

— les *mésosidérites :* lithosidérites à pyroxène et plagioclase.

A ces deux classes s'ajoutent deux autres types, représentés par une seule météorite :

— la lodranite : lithosidérite à olivine et bronzite;

— le sidérophyre : lithosidérite à bronzite et tridymite.

Les pallasites. Les pallasites ont une structure particulière : le ferronickel y forme une trame tridimensionnelle continue, de couleur claire et brillante, dans laquelle sont immergés des cristaux bruns d'olivine qui ont parfois une dimension considérable (centimétrique). Dans certains cas, les pallasites ont une structure bréchique; les ferronickels occupent les interstices entre les gros cristaux d'olivine, et une grande quantité de fragments d'olivine de dimension variable sont alors présents. La minéralogie des pallasites est assez simple. La teneur moyenne en nickel de la partie métallique est comprise entre 10 et 15 %; minéralogiquement, c'est une association de kamacite et de taénite avec les caractères observés dans les octaédrites : les figures de Widmanstätten sont fréquentes.

Certaines météorites appartenant à ce groupe n'ont pas de structure homogène et présentent des zones uniquement à ferronickels alternant avec des zones à composition pallasitique. Des petites inclusions de troïlite et de schreibersite sont souvent présentes dans le ferronickel. Les cristaux d'olivine anguleux ou arrondis sont très magnésiens. La farringtonite, phosphate de magnésium, est souvent confondue avec l'olivine, à laquelle elle est associée; elle forme des liserés en bordure du silicate.

Le seul *sidérophyre* est la météorite de *Steinbach* (trouvée en 1724), formée de ferronickels où sont inclus des agrégats d'orthopyroxène avec un peu de tridymite. Le ferronickel et le silicate sont approximativement en quantités équivalentes. Les minéraux accessoires sont la schreibersite dans le ferronickel, la chromite et la troïlite. Le ferronickel contient en moyenne 10 % de nickel, et les figures de Widmänstatten sont présentes. L'orthopyroxène est magnésien.

Les mésosidérites. Vingt-cinq mésosidérites sont connues (pour quarante-cinq pallasites) et seulement sept chutes ont été observées (quatre pour les pallasites).

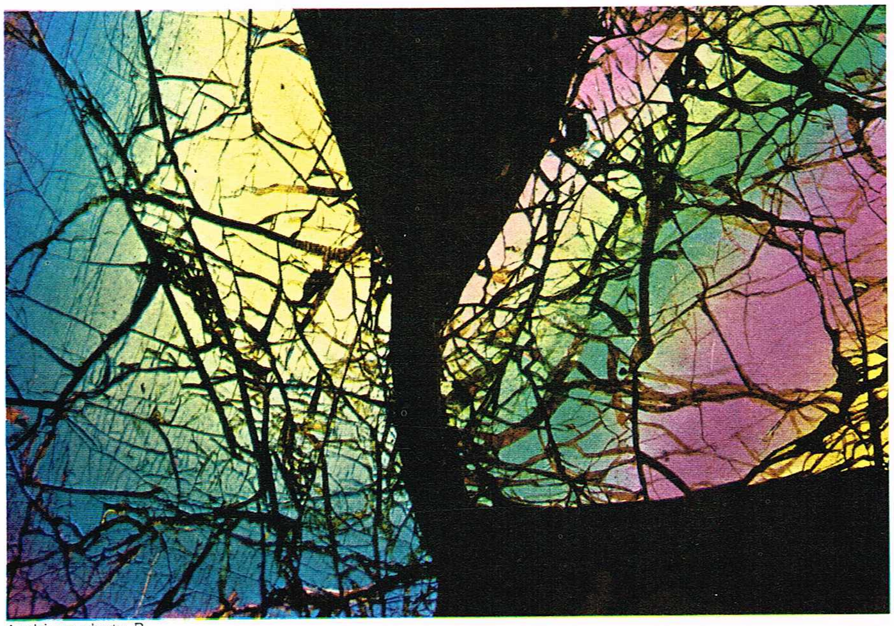

Archives photo B

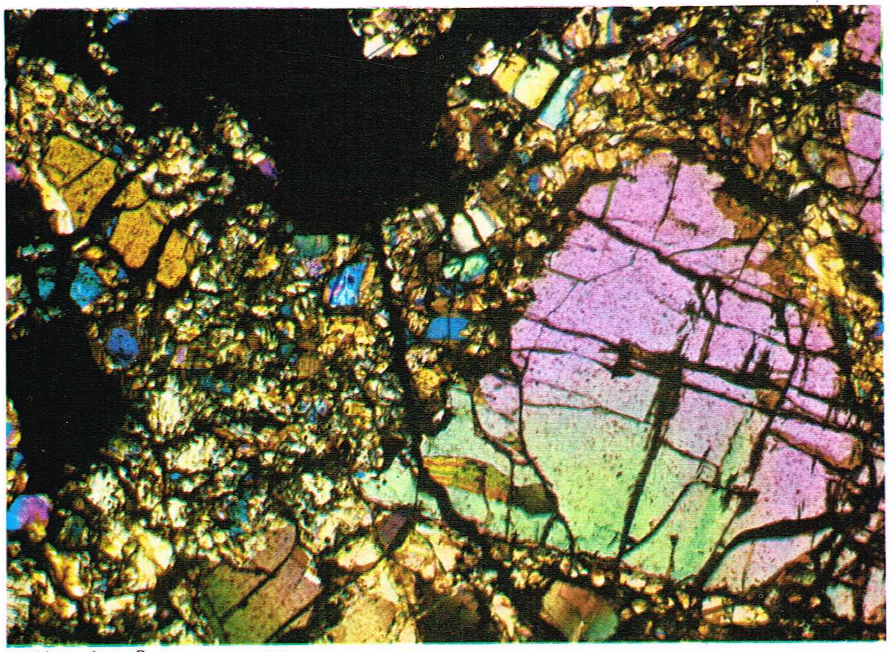

Archives photo B

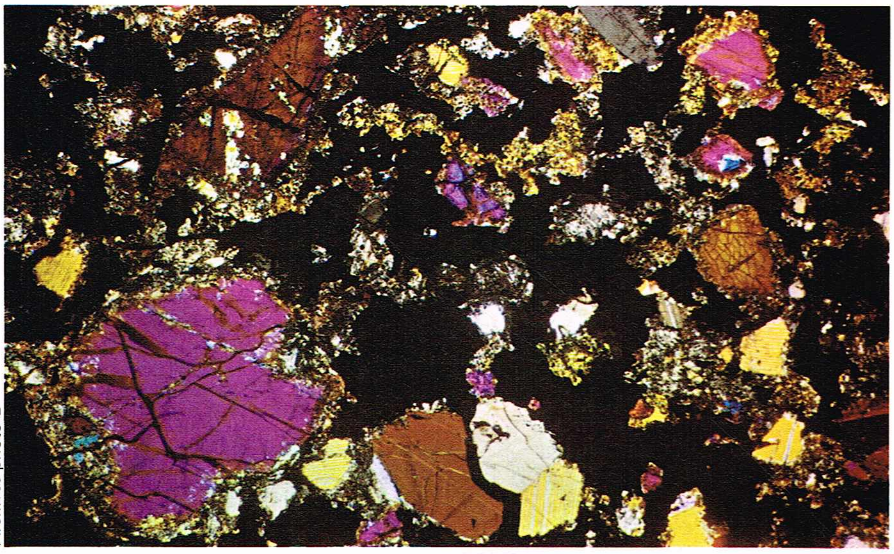

Archives photo B

C. Bevilacqua

Archives photo B

▲ *En haut, association de pyroxène, plagioclase et ferronickel dans une mésosidérite (Crab Orchard, Tennessee) [lame mince entre nicols croisés]. Au centre, chondrite partiellement transparente, les chondres sont associés au ferronickel (Mc Kinney, Texas). En bas, chondrite formée de chondres à structure interne variée (Pultusk, Pologne) [lame mince entre nicols croisés; Milan, musée d'Histoire naturelle].*

Les mésosidérites sont composées approximativement de quantités égales de ferronickel et de silicate. Ces météorites ont une structure grenue : le ferronickel ne forme pas un réseau continu comme les pallasites mais se présente irrégulièrement en grains de tailles différentes; les silicates ont généralement une structure cataclastique : ce sont des fragments de dimension variable dans une masse grenue silicatée. La structure des mésosidérites est comparable à celle de nombreuses roches ignées intrusives terrestres à grains moyens ou fins. Les figures de Widmanstätten ne sont pas observées, en raison de la petite dimension des plages de ferronickel (sauf dans le cas où le ferronickel est en larges nodules). La teneur habituelle en nickel de la phase métallique des mésosidérites, inférieure à celle des pallasites, est de 7 %. Le silicate essentiel de ces météorites est un pyroxène magnésien de forme orthorhombique, parfois monoclinique. On trouve également du plagioclase riche en calcium (anorthite ou bytownite), mais il est en quantité plus faible que le pyroxène. Les minéraux accessoires sont la troïlite, la chromite, la schreibersite, l'apatite, et/ou la whitlockite et l'olivine. Cette dernière est présente en petite quantité (environ 2 %), sous forme de larges grains isolés; elle est plus riche en magnésium que le pyroxène. La composition minéralogique et la structure des mésosidérites rappellent certaines météorites pierreuses : les achondrites, qui se différencient des mésosidérites par la quasi-absence de ferronickel dans leur composition.

Une autre classe de lithosidérites n'est représentée que par une seule météorite, la **lodranite** ou météorite de *Lodran*, tombée près de Multan, au Pakistan, en 1868. Il s'agit d'un agrégat friable d'olivine grenue et d'orthopyroxène dans une masse discontinue de ferronickel. Ces trois phases principales sont présentes en quantités égales. Le ferronickel contient 9 % de nickel. Les minéraux accessoires sont de la chromite, de la troïlite, et il est possible de rencontrer un peu de plagioclase.

Les pierres, ou aérolithes

Les aérolithes sont des météorites composées exclusivement ou en grande partie de silicates; les ferronickels et les autres minéraux métalliques sont absents ou bien en quantités subordonnées. Numériquement, c'est le groupe de météorites le plus important. On distingue deux classes : les *chondrites* et les *achondrites*. Plus de 90 % des pierres ont une structure particulière : elles sont formées de chondres (d'où leur nom de chondrites) et de grains métalliques. On trouve parmi les chondrites tous les intermédiaires entre les pierres formées uniquement de l'accumulation de chondres et de leurs débris, et les pierres où la texture des chondres est presque effacée. Moins de 10 % des pierres ne contiennent pas de chondres et sont appelées pour cette raison achondrites. Elles sont très pauvres en métal; certaines, les *eucrites*, ont la même texture que les dolérites terrestres, avec une composition minéralogique voisine, et se rapprochent de certains gabbros lunaires. La plupart des achondrites ont une texture bréchique plus ou moins prononcée. La présence de chondres dans les chondrites et leur absence dans les achondrites s'ajoutent à des différences minéralogiques et chimiques.

Les chondrites. Elles sont les plus communes des météorites; environ 85 % des chutes ont été observées. Ce type de météorite est caractérisé par sa structure chondritique, généralement bien visible à l'œil nu ou à la loupe, et qui consiste en la présence de petits globules plus ou moins réguliers, les chondres, formés surtout de silicates avec des structures internes différentes. Dans certaines météorites, la structure chondritique est presque totalement effacée par suite de la recristallisation. Le pourcentage des chondres par rapport à la masse totale est variable : certaines chondrites en contiennent beaucoup, alors que d'autres en renferment une quantité assez faible et peuvent même en manquer (chondrites carbonées); ces dernières météorites sont néanmoins classées parmi les chondrites, du fait de l'analogie de leur composition chimique.

Dans certaines chondrites, on observe des réseaux de veines noires, constituées d'une substance vitreuse silicatée, et riches en petites inclusions de troïlite. Les chondrites présentent parfois une structure bréchique; celle-ci est soit monomicte (formée de fragments de chondrites

de composition analogue), soit *polymicte* (formée de fragments à structure et quelquefois à composition variées).

Les compositions minéralogique et chimique des chondrites révèlent qu'elles constituent un groupe distinct des météorites. La quantité d'olivine, de pyroxène et de ferronickel dans les chondrites est en rapport étroit avec leur composition chimique, tandis que l'oligoclase et la troïlite sont en quantités pratiquement constantes. Les minéraux accessoires essentiels sont la chromite et un phosphate : l'apatite et/ou la whitlockite.

★ *Les chondrites à enstatite.*

Elles ne sont représentées que par dix-sept pierres. Ce sont les aérolithes les plus riches en ferronickel. En effet, elles se sont formées dans un milieu si réducteur que presque tout le fer se trouve à l'état métallique ou de sulfure. La quantité totale de fer atteint dans certains cas 35 %. Les éléments tels que le calcium, le manganèse et le chrome sont présents dans les sulfures, et un peu de silicium se trouve également dans la phase métal. Les chondrites à enstatite contiennent environ 0,5 % de carbone.

Ces particularités de composition chimique se reflètent dans la composition minéralogique de ces chondrites. Le minéral principal est l'enstatite, ou clino-enstatite : pyroxène sans fer. Un peu de diopside est parfois présent, l'olivine est rare, et un léger excès de silice peut donner naissance à du quartz ou de la tridymite. Les ferronickels ont une faible teneur en nickel et sont présents sous forme de petits cristaux équidimensionnels de kamacite. Quelques chondrites à enstatite ont une structure chondritique bien développée, avec de gros chondres d'enstatite, alors que d'autres, ne possédant presque pas de chondres, constituent un agrégat grenu d'enstatite associée aux autres minéraux.

★ *Les chondrites ordinaires.*

Ce sont les météorites les plus abondantes; l'olivine, qui en est le minéral fondamental, est accompagnée d'un pyroxène qui contient une certaine quantité de fer. La composition du pyroxène permet de distinguer deux groupes.

— Les chondrites à olivine et bronzite contiennent 25 à 40 % d'olivine, 20 à 30 % de bronzite et 16 à 21 % de ferronickel; le reste est constitué de troïlite, de chromite, de phosphates.

— Les chondrites à olivine et hypersthène sont les pierres les plus communes. Une plus grande partie de leur fer est contenue dans les minéraux silicatés. Minéralogiquement, elles sont proches des précédentes. Les minéraux principaux sont l'olivine (35-60 %) et l'hypersthène : pyroxène orthorhombique (25-35 %) avec une faible quantité de plagioclase ($\simeq$ 10 %), de ferronickel (18 %) et de troïlite (5 %). Les minéraux accessoires sont la chromite, les phosphates et un peu de diopside.

★ *Les chondrites carbonées*

Peu nombreuses, elles occupent une place importante en raison de leur composition minéralogique et chimique particulière, où l'on note la présence de minéraux hydratés et de composants organiques. La première chute observée a été celle d'*Alais* en France (mars 1806), dont on avait d'abord douté de l'origine météoritique. La seconde est celle de *Renazzo* en Italie (1824). On subdivise les chondrites carbonées en trois groupes selon leur composition chimique (Wiik, 1956).

— Le *groupe I* comprend quatre spécimens, dont deux sont tombés en France *(Orgueil* et *Alais)*. Ces chondrites très particulières contiennent 20,1 % d'eau et 3,5 % de carbone; elles sont constituées essentiellement de silicates hydratés phylliteux associés à de la magnétite et des sulfures; on y rencontre des sulfates hydratés, des carbonates et, enfin, des corps organiques : acides gras, porphyrines, hydrocarbures. Ceux-ci ont été étudiés avec beaucoup de soin, certains ayant cru trouver des micro-organismes dans la météorite d'*Orgueil*. Mais tous les corps organiques identifiés peuvent avoir une origine abiotique ou proviennent de contamination terrestre. On n'observe pas de chondres dans ces météorites; leur classification parmi les chondrites vient essentiellement du fait que dans le groupe II ces mêmes minéraux hydratés, formés à basse température, sont associés à des chondres.

— Le *groupe II*. On connaît dix-sept pierres rattachées à ce groupe. Elle contiennent, en moyenne, 13,3 % d'eau et 2,5 % de carbone. Les chondres et les

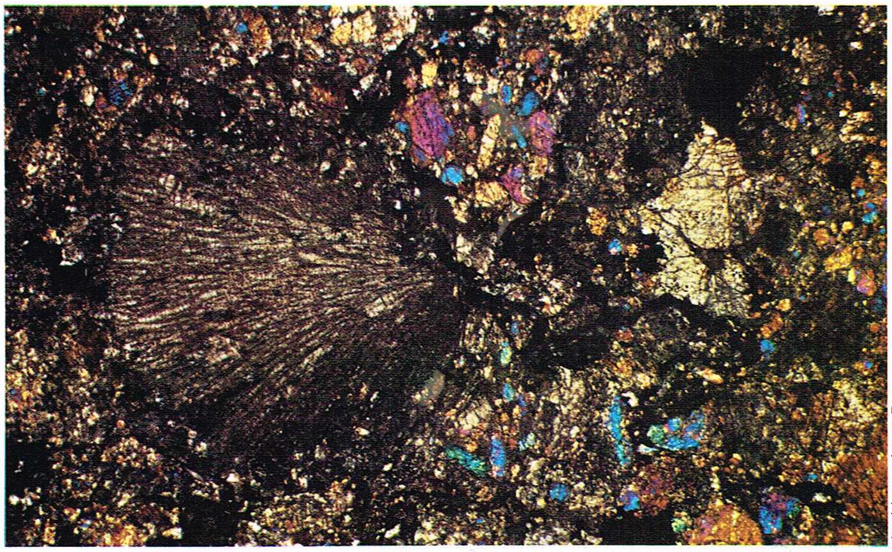

Archives photo B

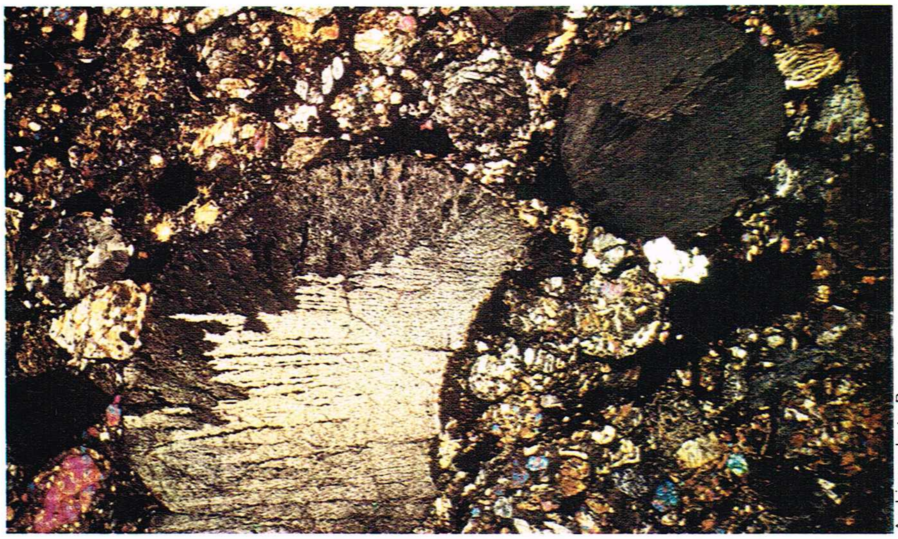

Archives photo B

Archives photo B

▲ ***En haut, chondrite à olivine et hypersthène (Farmington) [lame mince entre nicols croisés; Milan, musée d'Histoire naturelle].***
Au centre, chondrite de Mezö-Madaras tombée en Transylvanie.
En bas, chondrite de Bluff Settlement (Texas), gros chondre polycristallin d'olivine subissant l'empreinte d'un autre chondre (lames minces entre nicols croisés; Milan, musée d'Histoire naturelle).

débris cristallins d'olivine et de pyroxène (à composition variable) formés à haute température sont inclus dans une matrice de même nature que le matériau des chondrites du groupe I.

— Le *groupe III*. Ce groupe comprend une dizaine de chondrites ne contenant que 1 % d'eau et environ 0,5 % de carbone ; ce dernier pourcentage ne justifie pas le terme de chondrite carbonée car certaines chondrites ordinaires, non équilibrées, en contiennent autant; cependant, elles ressemblent aux échantillons du groupe II par la présence de phases de haute température bien cristallisées, incluses dans une matrice microcristalline. Parmi les minéraux de haute température se trouvent ici, à côté de l'olivine et du pyroxène à composition variable, des spinelles $(MgFe)Al_2O_4$ et des aluminosilicates de calcium. La matrice est formée en grande partie d'une olivine microcristalline riche en fer.

Ces météorites carbonées, pourtant rares, servent de référence pour les abondances cosmiques de nombreux éléments, surtout parmi les plus volatils. Plusieurs auteurs considèrent que, malgré leur complexité, les abondances élémentaires de ces météorites les rapprochent le plus de la matière solaire primitive (bien qu'elles soient déficientes en hydrogène et en hélium).

★ *Origine des chondrites.*

Les divers groupes de chondrites pourraient s'expliquer par le mélange en proportions variées de matériaux peu volatils, condensés à haute température, et de matériaux condensés à basse température. Ce schéma est compliqué par le fait que ces mélanges ont subi des recuits à températures plus ou moins élevées, pendant des temps plus ou moins longs, ayant eu pour conséquence l'évaporation d'une partie des éléments volatils. Il est donc difficile de reconstituer la composition d'origine des principaux groupes de chondrites.

Les achondrites

On connaît actuellement soixante-dix-huit achondrites. Ces pierres, très pauvres en métal, sont probablement des produits en fusion ignée après différenciation magmatique. Leur mode de classification est donc totalement différent de celui des chondrites. Le principal critère chimique est le pourcentage de calcium présent, qui varie de 0 à 25 % de CaO. On distingue donc :

— les achondrites pauvres en calcium (0,56 % < CaO < 1,41 %) ;

— les achondrites calciques (6,53 % < CaO < 24,51 %).

Les achondrites ont une grande partie de leur calcium contenu dans des composants fondamentaux : un plagioclase de type anorthite accompagné d'un pyroxène monoclinique calcique (diopside, augite, pigeonite); ces minéraux sont rares ou absents dans les achondrites pauvres en calcium. Le rapport quantitatif du fer et du magnésium dans les silicates varie avec les variations de la teneur en calcium.

★ *Les achondrites pauvres en calcium.*

— Les *achondrites à enstatite,* ou *aubrites,* sont des roches blanches sans calcium. Elles contiennent des quantités égales de silice et de magnésie, d'où leur grande proportion d'enstatite. L'enstatite, pyroxène magnésien, est l'unique minéral fondamental qui les compose; il a une couleur blanche, opaque. L'enstatite est accompagnée de clino-enstatite; les autres minéraux accessoires en petite quantité sont les ferronickels pauvres en nickel (6 %) sous forme de kamacite et la troïlite. Ce sont des météorites à structure communément bréchique, grossièrement granulaire, avec des cristaux bien formés.

— Les *achondrites à bronzite,* ou *diogénites,* sont analogues par leur structure aux précédentes ; le pyroxène orthorhombique y contient de 25 à 27 moles d'oxyde de fer.

— Les *achondrites à olivine,* ou *chassignites,* ne sont connues que par deux pierres. La première en date est tombée en octobre 1815 à *Chassigny* (Haute-Marne) ; elle est formée à 90 % d'olivine ; c'est une pierre de 4 kg. Cette météorite est très proche en composition et en structure des dunites terrestres ; ses minéraux accessoires sont de la chromite, du plagioclase et très peu de ferronickels riches en nickel.

— Les *achondrites à olivine et pigeonite,* ou *ureilites.* C'est un groupe de six météorites distinctes en composition des autres achondrites. Notons la présence de diamant pour trois d'entre elles *(Novo Urei, Goalpara* et *Haverö) ;* ce sont des achondrites contenant une proportion notable de ferronickel (environ 4 %). Les silicates ferromagnésiens sont de l'olivine et du clinopyroxène : la pigeonite. Dans les interstices des grains d'olivine et de clinopyroxène se trouve un enduit noir carboné. En raison de leur teneur en carbone, les ureilites peuvent être rapprochées des chondrites carbonées mais sont formées dans des conditions particulières de température, de pression et de différenciation chimique.

★ *Les achondrites riches en calcium.*

Ces achondrites sont caractérisées par la présence d'un plagioclase calcique (anorthite ou bytownite) comme composant majeur.

— Les *achondrites à pyroxène et plagioclase.* Ce sont les plus abondantes, sur soixante-dix-huit achondrites, quarante-huit appartiennent à ce groupe. Ces achondrites plagioclasiques bréchiques peuvent être divisées en deux groupes selon la nature de la brèche :

- les *achondrites plagioclasiques,* formées d'une brèche polymicte, et appelées *howardites* ;
- les *achondrites plagioclasiques,* formées d'une brèche monomicte, et appelées *eucrites.* Ce dernier terme, d'un auteur anglais, désigne une variété de gabbro terrestre.

En réalité, l'aspect macroscopique et microscopique de ces météorites plagioclasiques est assez semblable aux gabbros, et la distinction avec ces roches terrestres est parfois difficile ; il faut alors se baser sur les caractéristiques macroscopiques propres des météorites (croûte de fusion, etc.). Les howardites sont des brèches hétérogènes qui contiennent des débris rocheux divers dont certains sont eucritiques. On peut souligner leur analogie avec les brèches lunaires, quoique les howardites contiennent beaucoup moins de fragments ayant subi des chocs sévères.

Quant aux eucrites, elles sont formées essentiellement de pigeonite et de feldspath calcique et présentent la texture ophitique. Elles sont bréchiques pour la plupart et ressemblent aux gabbros lunaires. Les minéraux accessoires de ces roches sont la chromite, l'ilménite et la troïlite, des traces de ferronickel et d'olivine.

— Les *achondrites à augite,* ou *angrites,* ne sont représentées que par une seule pierre connue : la météorite d'*Angra Dos Reis,* tombée près de Rio de Janeiro en janvier 1869. Plus riche en CaO (25 %) et en TiO_2 que les autres météorites, elle est composée de plus de 90 % d'augite associée à un peu d'olivine et de troïlite (l'augite est un diopside alumineux et, dans ce cas, titanifère).

— Les *achondrites à diopside et olivine,* ou *nakhlites,* comprennent deux pierres : *Lafayette* dans l'Indiana (États-Unis) et *Nakhla* en Égypte. Après la météorite d'*Angra Dos Reis,* ce sont les météorites les plus riches en CaO. Minéralogiquement, elles sont formées de 75 % de diopside et de 15 % d'olivine avec une petite quantité de plagioclase ; l'olivine est riche en fer.

★ *Origine des achondrites.*

La minéralogie et la texture de nombreuses achondrites suggèrent que celles-ci ont cristallisé à partir d'un magma de façon analogue aux roches ignées terrestres. Cette hypothèse est particulièrement valable pour les achondrites à structure grenue. Un argument en faveur de l'origine intrusive de certaines achondrites est l'orientation caractéristique des cristaux de plagioclase et de pyroxène, produite par la sédimentation régulière des cristaux séparés du magma dans la chambre magmatique, laquelle est analogue à celle des roches ignées intrusives terrestres. Il est vrai que cette orientation n'a été trouvée que dans l'une d'entre elles.

La structure bréchique des achondrites résulterait des multiples chocs subis par ces roches sur le corps planétaire qu'elles constituaient, lorsque, comme la Lune, il recevait à sa surface d'autres météorites.

Les tectites

Ce terme est dérivé d'un verbe grec qui signifie fondre. Les tectites sont des morceaux de verre noirs ou vert foncé, à surface tourmentée, dont les formes (lorsqu'ils ne sont pas brisés) en larmes ou en gouttes montrent qu'ils ont traversé l'atmosphère à l'état fondu. On les trouve dans des sédiments récents.

Contrairement aux météorites répandues sur toute la surface de la Terre, au hasard des points de chute, les

tectites se rencontrent en des aires déterminées. Elles sont particulièrement abondantes en Australie (avec une forme en boutons, à bourrelet caractéristique) et dans le Sud-Est asiatique. Le verre des tectites est très riche en silice (75 %) et leur composition chimique, apparentée à celle de certaines roches terrestres, est totalement différente de celle des météorites connues ainsi que de celle des roches lunaires. Cependant, leur forme ne peut s'expliquer que par le fait qu'elles ont traversé l'atmosphère terrestre à très grande vitesse. C'est pourquoi on a longtemps cru à leur origine extraterrestre (ne connaissant pas la composition des roches lunaires, on a pensé à des éjectats de notre satellite). En observant que leur répartition semblait s'aligner suivant un grand cercle autour de la Terre, on a supposé que notre planète aurait pu être frôlée par un bolide qui aurait perdu ces gouttes de matière fondue. Mais cette interprétation a été rejetée, notamment du fait des légères mais réelles différences chimiques entre les différentes familles de tectites. Actuellement, une explication est avancée. On a remarqué la présence de tectites en Tchécoslovaquie (*Moldavites*), non loin du cratère d'impact du Ries, et en Côte-d'Ivoire près du lac Bosumtwi, supposé être aussi un cratère d'impact ; les tectites pourraient donc être des roches terrestres fondues lors de ces impacts, projetées dans la stratosphère, puis retombées. Les cratères associés aux tectites les plus abondantes d'Australie et du Sud-Est asiatique n'ont cependant pas encore été repérés ; cependant, les analyses des rapports isotopiques de certains éléments chimiques révèlent sans ambiguïté des valeurs terrestres et non extraterrestres. Aussi longtemps que les tectites étaient supposées extraterrestres, on les collectionnait soigneusement. A présent, on les utilise parfois en bijouterie pour faire des pendeloques. Mais on n'a pas pour autant expliqué avec certitude leur mode de formation.

L'origine des météorites

L'origine extraterrestre des météorites ne fut universellement reconnue qu'au siècle dernier. Bien qu'elles aient été signalées dès l'Antiquité, la première des chutes observées, et dont il existe encore des échantillons, est celle survenue le 16 novembre 1492 à *Ensisheim*, en Alsace. Cependant, l'origine extraterrestre des météorites n'a été acceptée par le monde scientifique qu'en 1803, après l'averse de pierres de l'*Aigle* (Orne), lorsque l'Académie des sciences y délégua une commission d'enquête. Ces

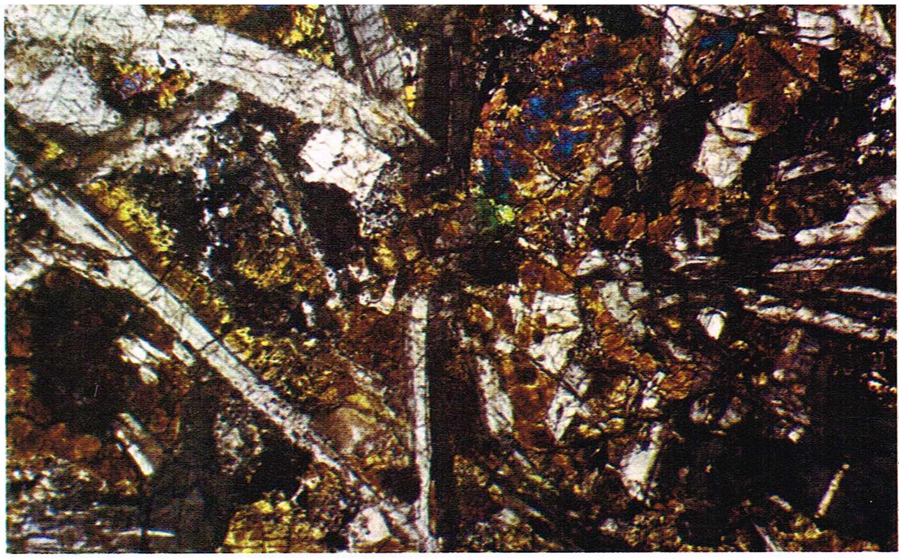

Archives photo B

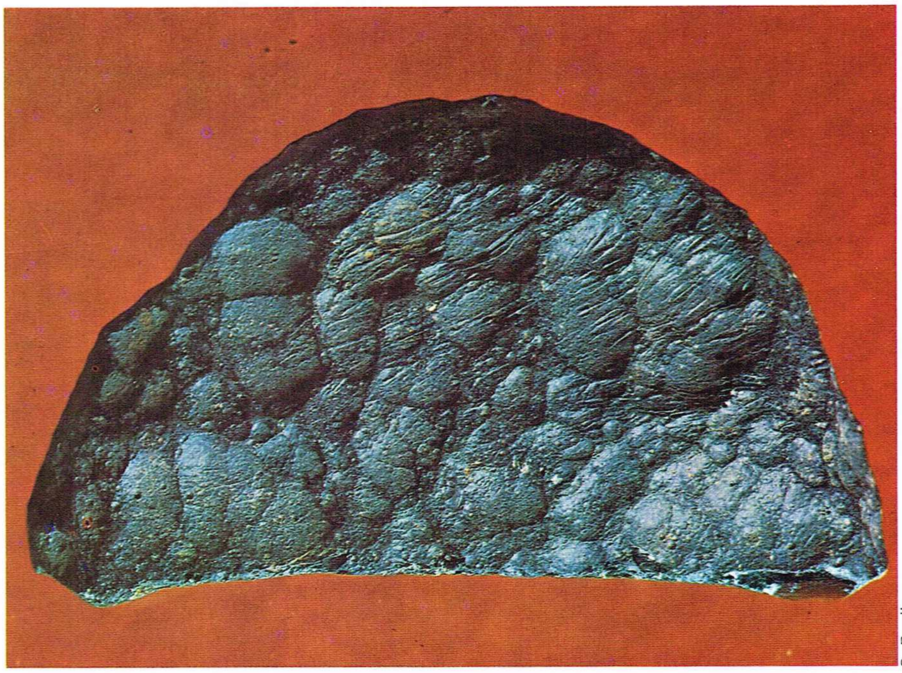

C. Bevilacqua

▲ *En haut,* achondrite *renfermant des cristaux tabulaires de plagioclase et du pyroxène (Stannern) [lame mince entre nicols croisés; Milan, musée d'Histoire naturelle]. En bas,* tectite *de Thaïlande : fossettes et stries fines sur la surface, attribuées à la fusion durant le passage dans l'atmosphère terrestre (Milan, musée d'Histoire naturelle).*

C. Bevilacqua

◀ *Quelques* tectites *provenant de Thaïlande (Milan, musée d'Histoire naturelle).*

▶ *Distribution des tectites sur la surface du globe (points noirs); elles se répartissent sur un cercle autour de la Terre (d'après Barnes).*

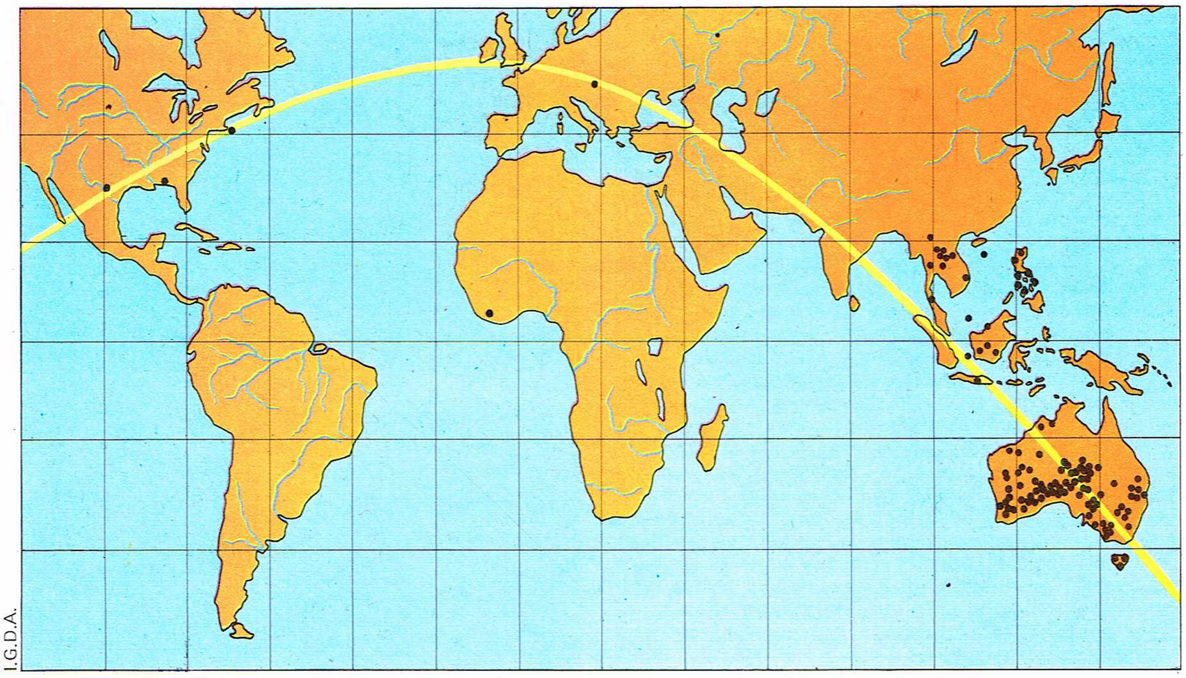

météorites semblent toutes très anciennes : elles se seraient formées il y a 4,6 milliards d'années (les échantillons terrestres les plus anciens ont 3,6 milliards d'années, les échantillons lunaires 4,6 milliards d'années) ; certaines ont peu évolué depuis cette époque reculée, apportant des données précieuses sur la composition du système solaire. Malgré une histoire déjà compliquée, elles ont subi des transformations bien moins poussées que les roches terrestres, soumises à plusieurs cycles sédimentaires et métamorphiques successifs. On peut donc penser que les météorites seraient des témoins, peu différenciés, du matériau qui compose le système solaire, le matériau primitif étant sans doute lui-même peu différent des météorites carbonées. Toutefois, les modalités de l'accrétion de ce matériau sont encore très mal connues.

Il existe quatre théories principales de l'origine du matériau composant les météorites.

— En 1961, Ringwood a imaginé l'existence d'un seul corps parent, de grande dimension, formé par accrétion d'un nuage de composition solaire. Le cœur de ce corps parent aurait atteint une température très élevée, permettant la différenciation chimique du matériau initial. Il se serait alors formé un noyau de fer et de nickel, puis une zone où les silicates et les métalliques auraient été mélangés et, enfin, un « manteau » de composition analogue à celle des chondrites.

— Des objections concernant l'impossibilité de l'existence d'un seul corps parent de grande taille ont conduit Urey à imaginer une formation en deux phases. Selon lui, il y aurait d'abord formation d'objets primaires de grande taille, au sein desquels les phases silicatées et métalliques se différencieraient. Ces objets primaires se briseraient en se choquant et les objets secondaires résulteraient de l'accumulation de leurs débris. Les sidérites, les achondrites et les sidérolithes seraient les témoins de ces objets primaires; quant aux chondrites, elles résulteraient de l'accumulation des particules plus fines après la fragmentation des objets primaires.

— La théorie la plus généralement admise est celle proposée par Fisch, Goles et Anders en 1960. Les corps parents des météorites seraient des astéroïdes formés il y a 4,5 milliards d'années environ; la source de chaleur nécessaire à la différenciation chimique à l'intérieur de ces corps serait due à l'action des radionucléides; le rayon maximal de ces objets serait de 250 km. Ces auteurs ont élaboré un schéma qui donne une représentation de la structure de ces corps parents avant le refroidissement et en ont déduit les régions sources des différents groupes de météorites. Ce schéma est le suivant :

- un cœur à composition métallique, source des sidérites;
- une zone de silicates fondus, source des achondrites;
- un « manteau » inférieur consolidé, source des lithosidérites et de certaines chondrites;
- un « manteau » supérieur, source de certaines chondrites friables;
- une surface non consolidée, origine des chondrites carbonées.

— Une dernière théorie, soutenue par Wasson (1972), ne concerne que les chondrites ordinaires. Pour cet auteur, les corps parents des chondrites ordinaires seraient des astéroïdes de petite taille dont le rayon ne dépasse pas 100 m. Dans ce cas, la source de chaleur ayant induit le métamorphisme ne serait pas interne mais externe.

Les promeneurs peuvent aider les savants à mieux connaître les météorites. Lors de vos promenades, il vous est peut-être arrivé de ramasser des roches dont l'aspect vous faisait penser à une météorite. Ou peut-être avez-vous chez vous une pierre transmise de père en fils et que l'on dit « tombée du ciel »! Peut-être n'est-ce pas une météorite mais, plus prosaïquement, un objet né sur Terre. Ainsi, dans certains sols calcaires, de même que l'on trouve des rognons de silex, on ramasse souvent des boules denses à l'aspect métallique. En les cassant, on voit qu'elles sont formées de fibres rayonnantes dorées ou plus ou moins ternies suivant le degré d'oxydation. Aussi jolies soient-elles, ce ne sont que de vulgaires rognons de marcassite. Autrefois, de nombreux petits gisements de minerais de fer étaient exploités à l'aide de hauts fourneaux rustiques alimentés au charbon de bois. Sur les lieux de ces anciens hauts fourneaux, on peut encore trouver des masses de fer ou de fonte abandonnées : il ne faut pas non plus les confondre avec des météorites. Si, malgré tout, vous avez vraiment un doute sérieux, vous pouvez apporter la pierre que vous avez trouvée dans un laboratoire spécialisé, ou l'y envoyer par la poste si le morceau n'est pas trop lourd. On identifiera alors votre trouvaille et, si c'est bien une météorite, on vous demandera probablement la permission de l'étudier en détail.

Vous pouvez vous adresser aux laboratoires des sciences de la Terre des universités, ou aux musées d'Histoire naturelle.

En France, il existe un service spécialisé au Muséum d'histoire naturelle de Paris.

BIBLIOGRAPHIE

KRINOV E.L., *Principles of Meteoritics,* Pergamon Press, Oxford, 1960. - MASON B., *Meteorites,* Wiley, New York, 1962. - MOORE C.B. (éd.), *Researches on Meteorites,* Wiley, New York, 1962. - NININGER H.H., *Out of the Sky,* Dover, New York, 1959. - PRIOR G.T. et HEY M.H., *Catalogue of Meteorites,* British Museum, Londres, 1966.

E.P.S.

GÉOLOGIE STRATIGRAPHIQUE

La *géologie stratigraphique,* ou *stratigraphie,* est l'étude des matériaux de l'écorce terrestre déposés en strates, ou couches successives. Elle a pour but d'établir la chronologie des dépôts, de réaliser des corrélations entre les affleurements, d'analyser les caractéristiques des sédiments afin de pouvoir définir les milieux, les conditions et l'extension géographique de la sédimentation, c'est-à-dire la *paléogéographie.*

L'analyse de ces données fournit ses éléments de base à la *géologie historique,* dont le but est de reconstituer l'évolution de la croûte terrestre en établissant la chronologie des différents événements et en soulignant l'interdépendance des processus géologiques qui se sont déroulés en des temps et des lieux bien définis.

Subdivisions et corrélations stratigraphiques; chronologie relative et chronologie absolue

Subdivisions et corrélations stratigraphiques

Les **subdivisions stratigraphiques** sont établies à partir des caractéristiques lithologiques et paléontologiques des sédiments.

Celles-ci conduisent respectivement à une *lithostratigraphie,* à une *biostratigraphie* puis à une *chronostratigraphie.*

— Parmi les *unités lithostratigraphiques,* l'unité fondamentale est la *formation.* Celle-ci est un ensemble sédimentaire caractérisé par une uniformité lithologiquc dans toute son étendue et dont l'appellation tiendra compte de sa nature lithologique et du nom de la localité où elle a été observée dans sa totalité (par exemple, calcaires de Champigny, argiles d'Apt, grès des Vosges). Les limites de l'unité lithostratigraphique peuvent être *synchrones,* ce qui suppose que la sédimentation a débuté et s'est achevée simultanément dans toutes les localités où la formation s'est développée; mais elles sont le plus souvent *diachrones,* la sédimentation ayant débuté ou s'étant terminée plus tôt ici que là.

— Les *unités biostratigraphiques* sont des ensembles de strates caractérisées par les associations de fossiles qu'elles contiennent. L'unité fondamentale est la *zone;* une *biozone* est définie par le nom du fossile qui la caractérise (biozone à *Olenellus,* Trilobite du Cambrien, biozone à *Echioceras,* Ammonite du Jurassique inférieur). Si un groupe de strates est subdivisé en zones sur la base d'associations paléontologiques de types divers, leurs limites ne coïncideront presque jamais; mais il peut arriver qu'elles soient parallèles. Ainsi apparaît la notion d'unité chronostratigraphique, qui se rapporte à des ensembles dont les limites sont synchrones.

— Les *unités chronostratigraphiques* sont utilisées dans les subdivisions de l'échelle géologique. Elles sont de deux ordres : *chronologiques* lorsqu'elles sont relatives au temps *(ères, périodes, époques, âges); stratigraphiques* lorsqu'elles se réfèrent à la série des terrains *(groupes, systèmes, séries).* Il existe une étroite correspondance entre les unités des deux ordres; chaque unité (à partir de l'*ère* dans le premier ordre, du *groupe* dans le deuxième ordre) englobe plusieurs unités du rang inférieur, et ainsi de suite; par exemple, une ère comprend plusieurs périodes, une période plusieurs époques, etc.

Les **corrélations stratigraphiques** peuvent être directes ou indirectes. Les *corrélations directes* sont fondées sur la comparaison et la correspondance entre les unités litho- ou biostratigraphiques appartenant à un même bassin de sédimentation. On parle, en revanche, de *corrélations indirectes* lorsque deux séries, bien que ne possédant aucune identité ou correspondance lithologique ou paléontologique, peuvent être comparées à l'aide de corrélations avec une ou plusieurs séries intermédiaires. Toutes les autres conditions étant égales, les possibilités de corrélations sont d'autant plus réduites que les régions où les séries ont été relevées sont plus éloignées; à l'inverse, dans un même bassin, il est possible d'établir une corrélation à l'aide soit d'un *critère lithostratigraphique,* soit d'un *critère biostratigraphique.* Le critère lithostratigraphique n'a le plus

▲ *La* stratigraphie *est l'étude des matériaux de l'écorce terrestre déposés en strates, ou couches successives; ici, la* stratification, *principale structure sédimentaire, des formations paléozoïques du* Grand Canyon *(Colorado, U.S.A.).*

▼ *Représentation schématique des* relations entre formations et unités chronologiques : *les traits noirs, épais, représentent les lignes isochrones; les traits plus minces, les limites de formations. Lorsque les secondes coïncident avec les premières, on dit que les limites sont* synchrones*; dans le cas contraire, elles sont dites* diachrones. *Le schéma montre également des changements latéraux de faciès ou* hétéropies latérales.

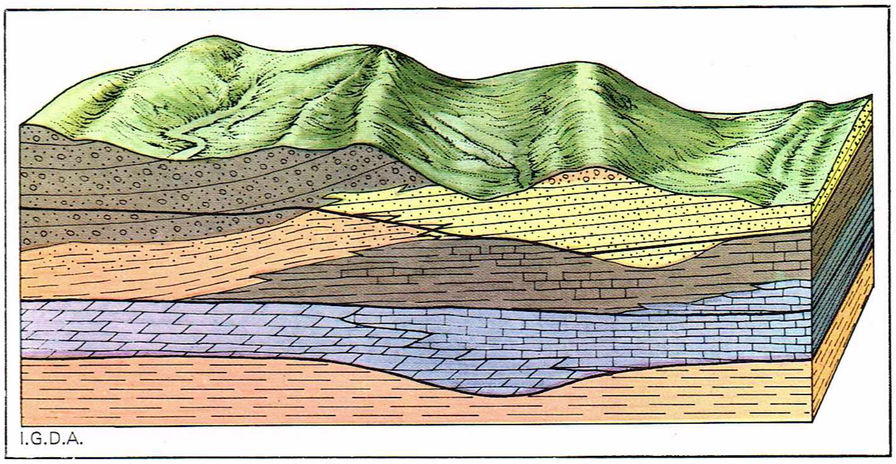

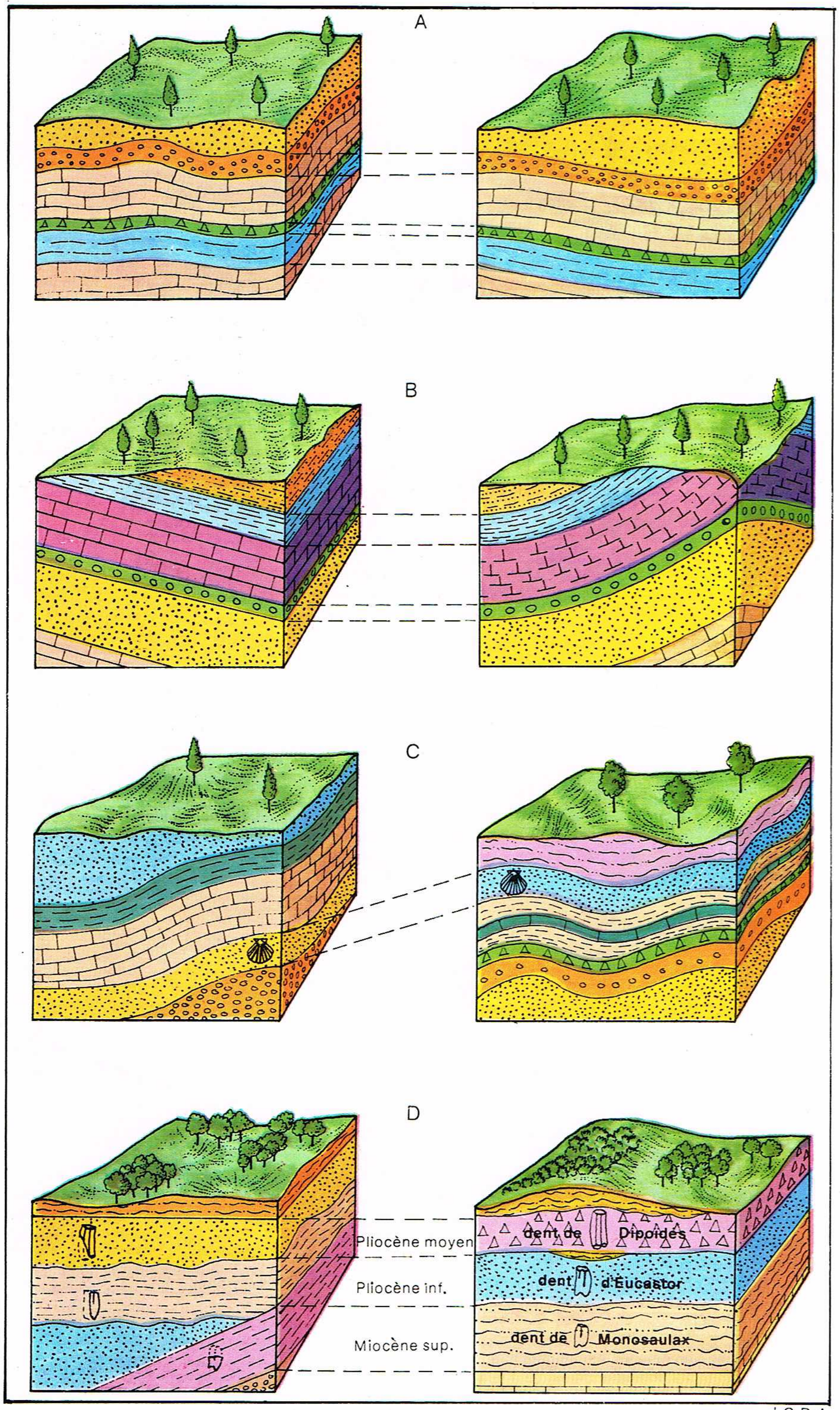

▲ **Différents types de corrélations.** ***A et B, corrélations lithostratigraphiques selon la position dans la série : A, cas de formations identiques; B, cas de formations différentes comprises entre des formations identiques. C et D, corrélations biostratigraphiques : C, par identité d'espèces; D, par niveau évolutif.***

souvent qu'une valeur strictement locale mais il est facilement utilisable, alors que le critère biostratigraphique, de valeur plus sûre, n'est pas toujours applicable car toutes les formations ne sont pas fossilifères.

— *Les corrélations lithostratigraphiques.* On peut établir des corrélations lithostratigraphiques entre plusieurs localités lorsqu'il existe au moins l'un des caractères suivants : continuité latérale, identité lithologique, position relative des différentes unités lithostratigraphiques identique dans la série. Ce dernier caractère permet ainsi d'établir des relations entre des formations de lithologies différentes, mais comprises entre deux formations identiques.

— *Les corrélations biostratigraphiques.* Elles sont basées sur les organismes fossiles dont il est admis que l'évolution générale s'est effectuée avec la même vitesse en tous les points de globe. On peut ainsi établir des corrélations entre les formations de deux localités distinctes, quelle que soit leur nature lithologique, si elles renferment les mêmes faunes et les mêmes flores. Lorsqu'elles sont appliquées à des fossiles caractérisés par une vaste diffusion géographique, les corrélations biostratigraphiques permettent d'établir des corrélations entre des bassins sédimentaires appartenant à des régions éloignées l'une de l'autre, au besoin à l'aide de corrélations indirectes.

— Le critère des *datations absolues* est également utilisé pour définir des correspondances entre des séries éloignées. Par contre, le critère fondé sur la simultanéité de transgressions ou de cycles sédimentaires ne possède aucune valeur, ces phénomènes étant très variables dans le temps à l'intérieur d'un même bassin et présentant de ce fait encore moins de valeur chronologique pour deux bassins différents.

Dans un même secteur géographique, il peut arriver qu'une même unité stratigraphique soit caractérisée par le même sédiment, renfermant les mêmes faunes; le dépôt est dit alors *isopique*. Par contre, dans un bassin sédimentaire, du fait même de la coexistence de plusieurs milieux (côtiers, de plate-forme, pélagiques), des sédiments différents se forment simultanément, chacun caractérisé par un faciès typique ; de tels dépôts sont dits *hétéropiques*. La reconstitution paléogéographique des bassins se fonde justement sur l'interprétation des séries relevées dans les différentes parties qui les constituent. Un autre phénomène d'hétéropie est lié à la formation, dans un bassin, de récifs organogènes. Au récif proprement dit s'associent du côté interne *(back-reef)* et externe *(fore-reef)* des formations qui, bien qu'ayant la même composition essentiellement calcaire ou calcaréo-dolomitique, diffèrent l'une de l'autre, et en même temps du récif, par la stratification, la texture, la structure et le contenu organique.

Le volcanisme externe, qui peut se développer aussi bien en milieu sous-aérien qu'en milieu sous-aquatique, donne également naissance à des formations hétéropiques; en effet, à une série sédimentaire normale peuvent correspondre latéralement des laves ou des roches tufacées, ou bien des roches classiques à composante tufacée (grès tufacés, marnes, argiles tufacées).

Il est par conséquent difficile d'établir des corrélations entre des séries hétéropiques en raison de leur hétérogénéité tant lithologique que paléontologique. Presque toujours, le recours à des méthodes de corrélations indirectes s'impose. En effet, rares sont les cas où les affleurements continus permettent de suivre directement sur le terrain le passage d'un type de sédimentation à un autre. Un autre élément de complication intervient du fait que les *seuils de faciès* (zones où se produisent de brusques changements de faciès), qui coïncident généralement avec des escarpements abrupts, peuvent être intéressés par des mouvements tectoniques, ce qui rend difficile la reconstitution de la série stratigraphique.

Chronologie relative et chronologie absolue

A partir de la deuxième moitié du XIX[e] siècle, parallèlement au développement des théories orogéniques, toutes les sciences liées à la géologie ont pris consistance, et l'on a cherché à établir de diverses manières l'âge des roches et de la Terre, soit au moyen d'une *chronologie relative* (une formation ou un événement est plus jeune ou plus vieux par rapport — relativement — à d'autres), soit au moyen d'une *chronologie absolue*. On était, en effet, arrivé à la constatation que les restes fossiles d'animaux ou de plantes contenus dans les strates indiquaient des changements de faune et de flore au cours des temps, que l'une et l'autre devenaient toujours plus semblables aux faunes et flores modernes au fur et à mesure que l'on s'approchait de notre époque et que de nombreuses formes de vie ont existé pendant des périodes relativement brèves. Pour cette raison les fossiles représentent un moyen utile pour corréler les strates dans des localités éloignées, et il devenait par conséquent possible, sur ces bases, de dater les sédiments.

La chronologie relative

L'institution d'une chronologie relative remonte aux débuts de la géologie et dérive de l'application de méthodes de travail qui sont les méthodes traditionnelles de la géologie stratigraphique, énoncée par Sténon

(superposition des strates) et par Hooke (corrélations au moyen des fossiles) au XVIII^{e} siècle. Cependant, ce n'est qu'avec W. Smith (1769-1831) que l'on trouve, avec l'énoncé du *principe de l'évolution de la faune dans les temps géologiques,* la base de l'affirmation d'une chronologie géologique relative. Ce principe met effectivement en évidence la relation existant entre la transformation des organismes dans le temps et la succession stratigraphique des dépôts sédimentaires. Toujours à la même époque, Élie de Beaumont propose une méthode pour déterminer l'âge relatif des chaînes de montagnes plissées, en se basant sur le fait que l'âge du plissement doit être compris entre celui de la strate la plus jeune impliquée dans le mouvement et celui de la strate la plus ancienne déposée après que le mouvement s'est produit. Dans une série stratifiée, la strate la plus basse est évidemment la plus ancienne, celles qui lui sont superposées étant de plus en plus jeunes du bas vers le haut. En appliquant ce principe, dit *principe de superposition,* il est possible d'établir l'ordre de succession d'une série continue de couches.

La chronologie absolue

Parmi les premiers géologues qui essayèrent de déterminer la *durée* des différentes ères et des différentes périodes *(chronologie absolue),* il faut citer Lyell, qui, en 1867, adopta ce que l'on peut appeler l'*horloge paléontologique*. En étudiant les variations de la faune des Mollusques pendant le Cénozoïque et en les comparant avec celles qui se sont produites depuis le début de l'époque glaciaire (il avait admis pour le Pléistocène, en accord avec Croll, une durée de 1 million d'années et estima que l'évolution subie par les Mollusques pendant ce temps représentait un vingtième de l'évolution totale), il établit la durée du Miocène à 20 millions d'années. Grâce à des calculs analogues, il situa le début du Cénozoïque à 80 millions d'années et le début du Paléozoïque à 240 millions. Ces résultats sont vraiment significatifs quand on les compare avec ceux obtenus grâce aux méthodes actuelles basées sur la radio-activité, qui donnent 30 millions d'années pour le Miocène et 70 pour le Cénozoïque.

En 1914, Matthew, se basant sur l'évolution du cheval, estima la durée du Cénozoïque à 60 millions d'années. D'autres, comme Dana en 1876, Reede en 1879, Walcott en 1893, Goodchild en 1897, Sollas en 1909, se basèrent sur les relations entre l'érosion et la sédimentation. Leur méthode fut critiquée par Barrel en 1917 ; toutefois leurs résultats ne sont pas du tout inacceptables puisqu'ils donnent une durée de plusieurs centaines de millions d'années du début du Paléozoïque à nos jours. Cette méthode a été reprise en 1931 par Schubert, qui évalua à 500 millions d'années le temps parcouru depuis le début du Paléozoïque (720 en y incluant le Protérozoïque). Plus récemment, en 1947, Holmes, se basant sur l'épaisseur maximale relative des sédiments des différentes périodes, établit une échelle chronologique relative qu'il compara avec une échelle absolue fondée sur la *méthode du plomb.*

La *méthode des variations de la salinité des océans* a été proposée par l'astronome Halley (1656-1742), reprise par Joly en 1900, puis élaborée par Sollas de 1905 à 1909. Elle est basée sur l'hypothèse que les eaux des océans n'étaient pas salées à l'origine et que la salinité augmente avec l'apport annuel des fleuves. Elle a donné des valeurs largement inférieures à celles obtenues par d'autres méthodes. En 1938, Spencer et Murata, tenant compte des nombreuses difficultés que comporte cette méthode, établirent un âge de 500 à 700 millions d'années pour les premiers sédiments.

Lord Kelvin, en 1883, se basant sur la théorie du refroidissement uniforme de la Terre depuis l'époque où elle était encore à l'état fondu, trouva un maximum de 400 millions d'années et un minimum de 20 millions d'années, retenant cette dernière valeur comme la plus probable.

Au cours des dernières décennies, les recherches atomiques ont amené de nouvelles méthodes de mesure du temps géologique plus crédibles et plus exactes. Elles sont fondées sur le fait que certains éléments radio-actifs subissent un déclin atomique spontané, lent, donnant ainsi naissance à des produits stables. L'élément fondamental des calculs de datation est le rapport entre la quantité d'atomes de la souche d'une famille radio-

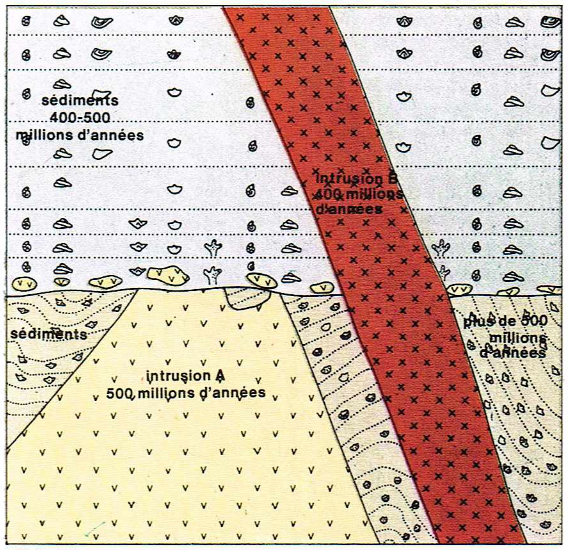

I.G.D.A.

active et la quantité d'atomes du produit final de la dégénérescence, ce qui correspond à la *demi-période* de transformation, temps nécessaire pour qu'une quantité donnée d'isotope radio-actif diminue par déclin de moitié. En résumé, on peut dire que si l'on rencontre dans une roche ou dans un organisme une certaine quantité de produit final, le calcul des années passées depuis que la souche a pris naissance se fait au moyen de la demi-période de transformation.

Parmi ces méthodes de datation, la plus ancienne est la *méthode du plomb.* Elle se base sur la dégénérescence de l'uranium et du thorium en plomb, et considère la transformation des isotopes radio-actifs U^{238}, U^{235} et Th^{232} en trois isotopes distincts et stables du plomb, respectivement Pb^{206}, Pb^{207} et Pb^{208}. U^{238} se transforme en Pb^{206} avec une demi-période de $4{,}5 \cdot 10^{9}$ ans (4,5 milliards d'années) ; U^{235} se transforme en Pb^{207} avec une demi-période de $0{,}71 \cdot 10^{9}$ ans ; Th^{232} donne l'isotope Pb^{208} avec une demi-période de $13{,}9 \cdot 10^{9}$ ans. Si un mélange de ces couples d'isotopes est présent dans un minéral ($U^{238} + Pb^{206}$, $U^{235} + Pb^{207}$, $Th^{232} + Pb^{208}$), des mesures d'âge calculées sur les différents couples offrent la possibilité de confronter les valeurs obtenues et d'en établir la validité. Par exemple, dans l'un des plus anciens échantillons provenant d'Afrique du Sud (Rhodésie), le rapport entre U^{238} et Pb^{206} indiquait un âge de 2 675 millions d'années, celui entre U^{235} et Pb^{207} un âge de 2 680 millions d'années et celui entre Th^{232} et Pb^{208}, un âge de 2 645 millions d'années. Un calcul indépendant exécuté sur le même échantillon et basé sur le rapport Pb^{207}/Pb^{206}, a donné un âge de 2 680 millions d'années. Cet accord entre les différentes méthodes montre que les analyses et les calculs qui en découlent sont fiables.

Les recherches sur l'âge des minéraux radio-actifs et des roches ont été améliorées au cours des dernières années grâce à plusieurs progrès : une détermination plus précise des *constantes de désintégration,* une reconnaissance des différents isotopes des éléments impliqués dans des désintégrations radio-actives, et la découverte d'autres substances que l'uranium et le thorium, substances fournissant des données plus significatives.

La *méthode rubidium-strontium* proposée par Goldschmidt (1938) est basée sur le fait qu'un isotope radio-actif du rubidium (Rb^{87}) se désintègre avec une demi-période d'environ $62 \cdot 10^{9}$ ans et produit du strontium (Sr^{87}) avec émission de particules β.

La *méthode potassium-argon* est basée sur le fait qu'un isotope radio-actif du potassium (K^{40}) se désintègre avec une demi-période de $1{,}3 \cdot 10^{9}$ années et donne 12 % d'argon (A^{40}) et 88 % de calcium (Ca^{40}). Même si le K^{40} représente seulement 0,012 % du potassium qui se trouve dans la nature, cet élément est tellement répandu dans les feldspaths et les autres minéraux des roches que l'utilisation de cette méthode s'avère rentable, et les mesures ainsi obtenues s'accordent bien avec les corrélations faites par les méthodes paléontologiques.

◄ **Chronologie relative** ***et*** **chronologie absolue.** ***Dans une série de sédiments plus anciens (partie inférieure du schéma), plissés au cours d'une orogenèse, une intrusion de magma s'est produite qui a donné naissance à des roches ignées (intrusion A). Cette croûte plissée, primitive, a été soumise à l'érosion, puis recouverte par une nouvelle couche de sédiments (partie supérieure du schéma). Une nouvelle intrusion s'est alors produite (intrusion B), qui a traversé tant les sédiments les plus anciens que les plus récents. L'âge relatif des couches sédimentaires est déterminé en appliquant les critères de la superposition des strates et en comparant les fossiles contenus dans chacune d'elles. Ainsi, l'intrusion A apparaît plus récente que les dépôts inférieurs et plus ancienne que les dépôts supérieurs, tandis que l'intrusion B est plus récente que les deux séries de sédiments. La radio-activité permet de déterminer l'âge absolu des deux intrusions, tandis que l'âge des deux séries de sédiments ne peut être déterminé que de façon approximative, sachant que chacune d'elles est plus ancienne ou plus récente que les intrusions.***

▼ ***Le géologue écossais*** **Charles Lyell** ***(1797-1875).***

N.P.G. - Londres

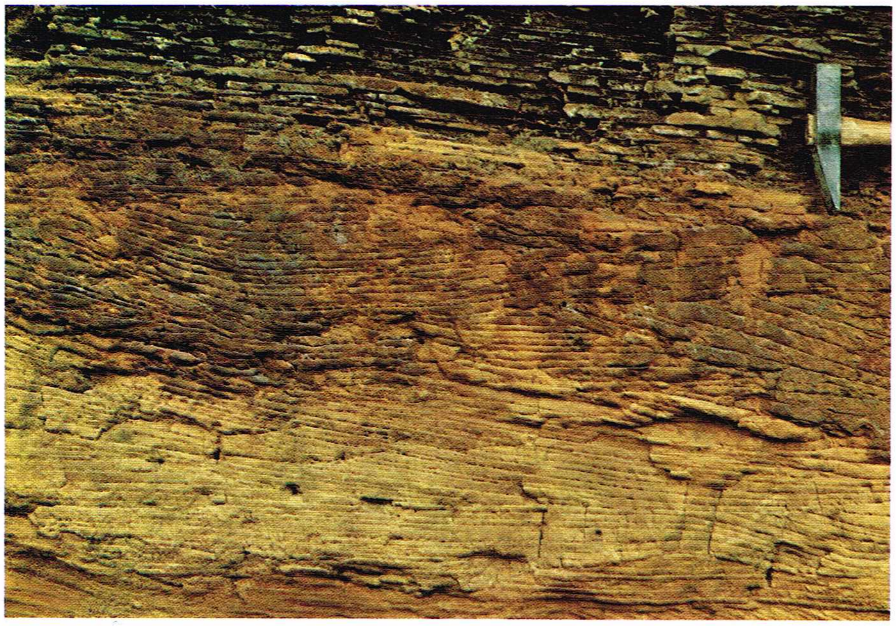

Institute Geological Sciences

▲ ***Exemple de dépôts fluviatiles** : la sédimentation a lieu uniquement tant que le fleuve se trouve en dessous de son propre profil d'équilibre.*

La *méthode du radiocarbone* s'est développée depuis que Libby et ses collaborateurs, en 1947, ont établi que l'isotope C^{14} est produit par l'isotope de l'azote N^{14} dans la haute atmosphère sous l'effet du bombardement des neutrons (rayons cosmiques) venus de l'espace externe. Chaque atome de N^{14} donne un atome de C^{14} et un proton ; le C^{14} se combine avec l'oxygène O pour donner l'anhydride carbonique radio-actif $C^{14}O_2$, qui arrive à la surface de la Terre et est absorbé par la matière vivante. Des observations successives ont mis en évidence que pour chaque type d'organisme, le rapport C^{14}/C^{12} est constant. De même, il a été constaté que quand un animal ou une plante meurt, le C^{14} contenu dans l'organisme se désintègre avec une demi-période de 5 730 ans ; ainsi, cette méthode permet de dater les objets jusqu'à un maximum d'environ 40 000 ans.

Quoi qu'il en soit, toutes les méthodes exposées ci-dessus ont des limites et présentent des complications empêchant leur application immédiate. Ainsi, par exemple, dans la méthode du plomb, il faut savoir que tout le plomb présent dans la croûte terrestre n'est pas d'origine radio-active ; de même, l'application de la méthode du radiocarbone est rendue plus complexe du fait que la quantité initiale de C^{14} présent dans les organismes peut, pour diverses raisons, varier.

Les milieux de sédimentation

Les matériaux de l'écorce terrestre ont pu se déposer dans un *milieu marin,* dans un *milieu continental,* ou dans un *milieu de transition.* Les terrains sédimentaires déposés en milieu marin sont plus répandus et plus fossilifères que ceux du milieu continental. Dans le milieu marin, en effet, l'accumulation de sédiments se produit de manière à peu près continue durant de longues périodes, alors que les processus d'érosion ne se manifestent que dans des conditions exceptionnelles. En revanche, à la surface des continents, les processus de dégradation intéressent de vastes aires durant de longues périodes, tandis que les processus de sédimentation s'effectuent dans des surfaces plus limitées et durant des temps plus courts. Il s'ensuit que les séries continentales sont plus discontinues que les séries marines, et l'on comprend pourquoi, dans la construction de l'échelle chronologique relative, les formations continentales ont été introduites uniquement là où il n'était pas donné de connaître les séries marines correspondantes.

Les milieux marins

Dans les milieux marins, on distingue : une zone néritique, une zone bathyale et une zone abyssale, possédant chacune des caractéristiques bien définies de profondeur, d'étendue, d'origine des matériaux et de types de sédiments.

Les milieux de la **zone néritique,** ou encore de la plate-forme continentale, qui s'étend de la ligne des côtes jusqu'au bord externe du talus continental (en moyenne jusqu'à —200 m), peuvent être très divers, puisqu'ils sont influencés par la nature de l'arrière-pays, l'apport des matériaux terrigènes, l'exposition aux courants et le climat. Certaines séries néritiques peuvent être entièrement organogènes, alors que d'autres sont entièrement détritiques ; toutefois, elles présentent toujours quelques caractères communs, comme l'abondance et la variété des organismes, des discontinuités (diastèmes), fréquentes dans la série, la variabilité du faciès des sédiments. Par ces caractères, elles contrastent avec la monotonie plus grande des milieux plus profonds.

La **zone bathyale** (en moyenne jusqu'à —2 000 m) correspond à la partie supérieure du talus continental, tandis que la **zone abyssale** (au-delà de —2 000 m) correspond à la partie inférieure du talus continental et au plateau océanique. La distinction entre ces deux zones est maintenue par habitude, puisque la détermination de la profondeur de sédimentation des matériaux n'est possible qu'à l'intérieur de certaines limites approximatives. Les sédiments qui se déposent sont essentiellement fins ; cependant, soit du fait de phénomènes tectoniques (formation d'escarpements susceptibles de donner lieu à des éboulements), soit du fait de courants de turbidité provenant essentiellement du talus continental, on peut également noter la présence de matériaux grossiers. Les séries sédimentaires, formées à partir de courants de turbidités, dites encore *turbidites,* prennent aussi le nom de *flysch* (mot d'origine suisse servant à désigner les terrains glissants). Les séries de type flysch ont généralement une forte épaisseur et se présentent comme des séries détritiques stratifiées où les éléments détritiques se distribuent en séquences granoclassées, séparées par des surfaces basales riches en figures de sédimentation.

Les milieux continentaux

Les milieux continentaux présentent une plus grande variété que les milieux marins ; les plus caractéristiques sont les piémonts, les milieux désertiques et lacustres, les dépôts fluviatiles et les dépôts glaciaires.

Le **piémont** est le siège d'une sédimentation très active et, dans ses dépôts, les dimensions des fragments varient dans des limites assez larges.

Les **dépôts fluviatiles** des régions plates, en revanche, présentent une sélection granulométrique beaucoup plus poussée, et la sédimentation a lieu uniquement tant que le fleuve se trouve en dessous de son propre profil d'équilibre ; aussi les sédiments ont-ils une forte épaisseur uniquement dans le cas d'une région soumise à effondrement.

Les **milieux désertiques** présentent, dans des conditions particulières, une sédimentation qui peut être très active ; le sable transporté et accumulé par le vent forme les dunes ; toutefois, aussi étrange que cela puisse paraître, l'agent le plus important d'érosion et de transport est l'eau, sous forme de pluie (rare et à caractère torrentiel). Les sables éoliens présentent des grains arrondis de forme caractéristique et une sélection granulométrique élevée.

Les **dépôts glaciaires** sont représentés par les *moraines* et les *lœss.* Les *moraines* sont des accumulations de matériaux détritiques aux dimensions les plus diverses, non sélectionnés granulométriquement et dépourvus de stratification. Le *lœss* est une accumulation de poussière transportée par le vent, qui a exercé une action de déflation sur les dépôts périglaciaires, et déposée dans des régions où la végétation est suffisante pour la retenir.

Dans les **milieux lacustres,** les dépôts sont conditionnés par la nature lithologique du bassin et par le régime des cours d'eau qui l'alimentent. Un produit typique de la sédimentation des lacs périglaciaires est représenté par les *varves,* constituées de minces couches alternativement silteuses et argileuses. Les premières proviennent de la sédimentation des eaux troubles de la saison estivale, les secondes d'une lente décantation durant la période hivernale. Ce cycle annuel permet d'établir une chronologie absolue des sédiments déposés dans les bassins lacustres aux époques glaciaires.

Les milieux de transition

Des milieux de transition, généralement limités dans l'espace, séparent les milieux marins et continentaux. Les dépôts de ce type se présentent sous forme de bandes allongées le long de la ligne de contact entre la mer et la terre. Les passages d'un milieu à l'autre sont fréquents, car il suffit de faibles variations de la mer par rapport à la terre pour apporter des modifications substantielles dans la zone côtière. Les plus caractéristiques sont les milieux deltaïque, lagunaire et littoral.

Le **milieu deltaïque** s'observe à l'embouchure des cours d'eau se jetant dans la mer ou, éventuellement, dans les bassins lacustres. Il est caractéristique par la composition et la structure de ses sédiments (grès grossiers ou fins à stratifications obliques), ainsi que par ses associations biologiques. On y observe une double transition : d'un côté avec le milieu continental, où souvent il n'existe pas de dépôts (aire de dénudation), de l'autre avec le milieu marin.

En ce qui concerne le **milieu lagunaire,** il faut distinguer les lagunes séparées de la mer par une barrière sédimentaire d'origine clastique (plages sablonneuses) de celles où cette barrière est d'origine organique (barrière corallienne) : les conditions morphologiques ainsi que les sédiments y sont différents. Dans les premières, caractérisées par une faible salinité (du fait de l'apport d'eau douce réalisé par les fleuves), les sédiments sont finement détritiques et, en général, régulièrement stratifiés.

Lorsque la circulation d'eau est faible, des Bactéries peuvent se développer sur le fond et exercer une action réductrice à l'égard des sulfates, déterminant ainsi les conditions qui caractérisent le *milieu euxinique* (marnes et argiles noires sapropéliques).

Dans les climats chauds et arides, lorsque l'évaporation est supérieure à l'apport en eau provenant tant des fleuves que de la mer, on peut observer la formation de *dépôts d'évaporation*. Dans les lagunes délimitées par des barrières coralliennes, la salinité est supérieure à celle de la mer ouverte ; la sédimentation, qui est essentiellement contrôlée par des facteurs thermiques, est typiquement calcaire, de nature chimique ou organique.

Le **milieu littoral** (encore appelé *zone intercotidale*) correspond à la bordure côtière comprise entre les niveaux de la haute et de la basse mer, qui déterminent son émersion et sa submersion périodiques. Les facteurs qui influencent la sédimentation sont éminemment mécaniques ; il s'agit d'un milieu réalisant la transition d'un côté avec le milieu continental, de l'autre avec le milieu néritique. Les plages sont constituées de sables bien sélectionnés, mais on rencontre aussi des plages caillouteuses. Si le pendage du fond est très faible et la dénivellation des marées forte, la zone intercotidale se déploie sur quelques kilomètres : on parle alors de *plateau intercotidal*, caractérisé par des sédiments argileux ou silteux, ne se distinguant des sédiments lagunaires que par une oxydation plus intense.

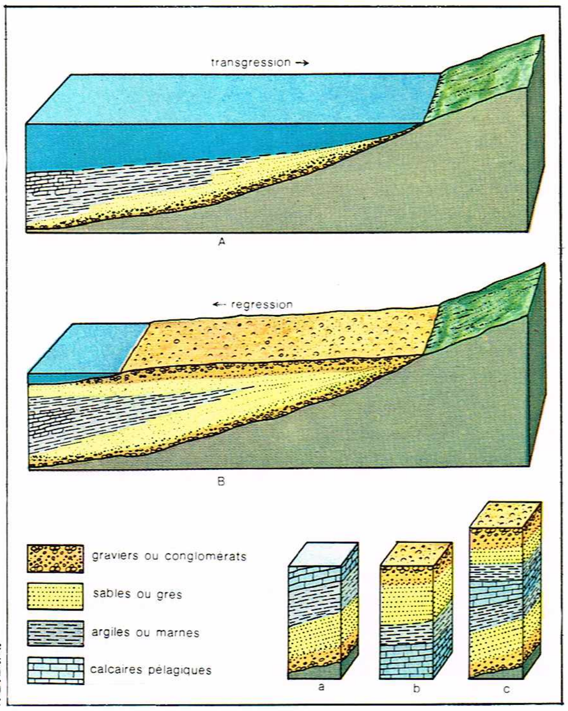

I.G.D.A.

◀ **Trangressions, régressions *et* cycles sédimentaires.** ***Schéma A et coupe a : exemple d'une transgression et d'une série transgressive ; schéma B et coupe b : exemple d'une régression et d'une série régressive ; schéma B et coupe c : exemple d'un cycle sédimentaire.***

Les phénomènes sédimentaires

Transgressions et régressions, cycles sédimentaires

Les variations du niveau de la mer par rapport aux terres émergées prennent le nom de *transgressions* si le milieu marin envahit le milieu précédemment émergé ; dans les cas inverses, on parle de *régressions*. Ces phénomènes peuvent être provoqués respectivement par un abaissement ou un soulèvement de l'aire continentale à la suite de mouvements épirogéniques, ou encore par un soulèvement ou un abaissement du niveau de la mer, en rapport avec des causes épirogéniques et climatiques.

Une série marine débutant par des sédiments détritiques et évoluant, comme cela se produit généralement, vers des types lithologiques de plus en plus marneux et carbonatés prend le nom de **série transgressive.** L'une des plus simples présente des sédiments grossiers près de la côte auxquels succèdent, vers le large, d'abord des sables, puis des argiles. Les séries ne sont pas nécessairement détritiques ; en effet, quelques-unes sont uniquement carbonatées et débutent par des brèches calcaires ou des calcarénites évoluant vers le haut jusqu'aux calcilutites et aux véritables calcaires pélagiques. La présence de conglomérats de base, même d'épaisseur réduite, ou de brèches intercalées (brèches de transgression) n'est pas un élément indispensable pour attester une transgression. Celle-ci peut en effet se traduire par la superposition d'une série marine sur une série continentale ou sur une autre série marine, les deux séries marines étant alors séparées par une discontinuité de sédimentation.

La **série régressive** diffère de la série transgressive par le fait que le passage du milieu sous-aquatique au milieu sous-aérien favorise la démolition des sédiments, tandis que dans les séries précédentes les conditions sont favorables à la sédimentation.

L'ensemble des formations marines comprises entre deux régressions prend le nom de **cycle sédimentaire.** Celui-ci, théoriquement, présente la séquence lithologique suivante : conglomérat de base, grès, argiles, conglomérats sommitaux. Il s'agit, bien entendu, d'une série détritique ; si l'évolution est assez poussée, on peut même arriver au dépôt de calcaires pélagiques, qui constituent le sédiment marin le plus évolué. Les dépôts clastiques représentés sur le schéma ci-dessous sont *gradués* et montrent un granoclassement décroissant dans la phase transgressive et croissant dans la phase régressive.

Une série sédimentaire marine peut être continue ou discontinue.

Elle est considérée comme *continue* lorsqu'elle ne présente ni discordances angulaires, ni phénomènes importants indiquant une interruption dans la sédimentation (conglomérats de base, brèches de transgression, etc.), ni *hard grounds* (niveaux durcis), ni surfaces de discontinuité, ou bien lorsqu'elle est lithologiquement homogène ou montre, d'une manière générale, une continuité lithologique. Ces caractères ne sont cependant pas suffisants pour que l'on puisse affirmer la continuité de la série. Pour en avoir la certitude, il est nécessaire de recourir aux données paléontologiques ou micropaléontologiques ; elles permettent de savoir si tous les plans géologiques, avec leurs zones paléontologiques correspondantes, sont représentés.

La *discontinuité* dans une série (lacune stratigraphique) se présente, en revanche, lorsque se vérifient les cas négatifs cités plus haut, c'est-à-dire : la discordance angulaire *(angular conformity)*, la discordance parallèle *(disconformity)*, la continuité apparente *(paraconformity)* le dépôt sur un substratum cristallin ou cristallophyllin non stratifié *(non conformity)*.

Sédimentation et tectonique

Une relation étroite existe entre la sédimentation et la tectonique, du fait que ce sont les mouvements du sol (substratum) qui régissent en partie l'accumulation des sédiments. La distribution dans l'espace et dans le temps

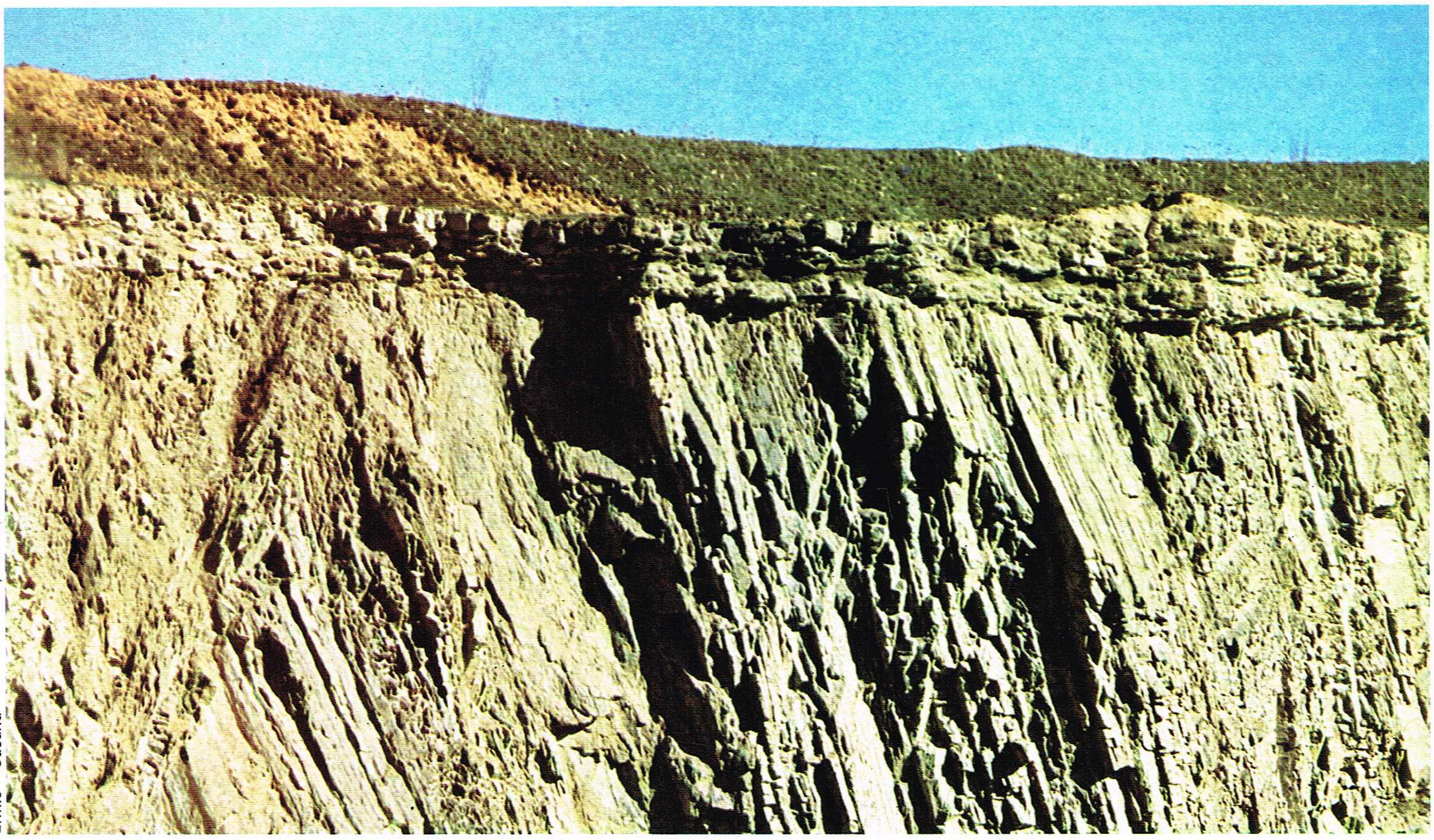

▲ ***Exemple de discordance du Lias sur le Précambrien dans la vallée de la Laize.***

des différents types de séries (continentales, néritiques épicontinentales et de plate-forme, pélagiques, géosynclinales, etc.), caractérisés chacun par l'association de types lithologiques particuliers, n'est pas due au hasard : elle présente des éléments spécifiques qui définissent le caractère géotectonique de chaque région.

Les **séries épicontinentales,** si elles reposent sur un substratum demeuré stable durant de longues périodes, ne présentent généralement pas de discontinuité importante; toutefois, bien que la sédimentation se soit prolongée dans le temps, leurs épaisseurs sont faibles. En revanche, un substratum instable, affecté de soulèvements répétés *(aires tectoniquement positives),* peut donner naissance à des séries minces présentant des hiatus. Ce même substratum instable, mais dont la subsidence est marquée *(aires tectoniquement négatives),* se traduira par des séries plus puissantes. Dans ce cas, la vitesse de dépôt des sédiments peut être supérieure à la vitesse de subsidence du bassin, lequel sera ainsi rapidement comblé. Dans le cas contraire, la série évoluera vers des sédiments caractéristiques d'une région plus profonde; si les deux vitesses sont équivalentes, on aboutira à la formation de puissantes séries monotones.

Les **séries de la plate-forme continentale,** où l'on observe fréquemment d'imposantes accumulations de matériaux de milieu néritique, atteignent généralement des épaisseurs considérables. Dans de nombreux cas, elles se rattachent aux séries épicontinentales, dont elles diffèrent par leur puissance et par le nombre plus réduit des lacunes stratigraphiques, nombre qui tend à diminuer encore en allant du continent vers l'océan. Au fur et à mesure que l'on se déplace vers le large, l'épaisseur des sédiments a tendance à diminuer, et les faciès sont essentiellement pélagiques.

Les **sédiments pélagiques** sont généralement fins, argilo-gréseux, calcaires ou siliceux, de faciès plus homogènes que les sédiments néritiques; leur vitesse de sédimentation est réduite. Ils ne renferment pas de trace d'émersion, mais on peut y rencontrer des lacunes : surfaces durcies, ou *hard grounds,* dues soit à un arrêt temporaire de la sédimentation, soit à la dissolution des sédiments.

Les sédiments déposés dans des aires orogéniques qui évolueront plus tard en chaînes de montagnes se diversifient parfois en harmonie avec les futurs grands domaines structuraux. Schématiquement, ces séries, dites *géosynclinales,* peuvent être regroupées selon deux types fondamentaux de faciès : ceux des *eugéosynclinaux* pour le domaine interne, et ceux des *miogéosynclinaux* pour le domaine externe. Les miogéosynclinaux présentent généralement d'abondantes formations néritiques, les eugéosynclinaux des séries de faciès flysch et des roches basiques ou ultrabasiques (roches vertes, ophiolites), témoins d'une activité magmatique localisée principalement dans la partie interne de l'orogène.

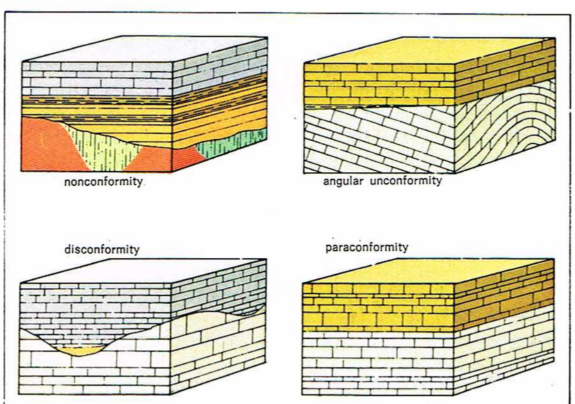

▶ ***Représentation schématique des divers types de discordances.***

BIBLIOGRAPHIE

AZZAROLI A., CITA M.B., *Geologia stratigrafica,* La Goliardica, Milan, 1963-1967. - DUNBAR C.O. et RODGERS J., *Principles of Stratigraphy,* Wiley, New York, 1957. - GIGNOUX M., *Géologie stratigraphique,* Masson, Paris, 1943. - KRUMBEIN W.C., et SLOSS L.L., *Stratigraphy and Sedimentation,* Freeman, San Francisco, 1951. - LOMBARD A., *Géologie sédimentaire,* Masson, Paris, 1956. - *Méthodes et tendances de la stratigraphie,* Mém. B.R.G.M., n° 77, Paris, 1972. - PETTIJOHN F.J., *Sedimentary Rocks,* Harper's, New York, 1957.

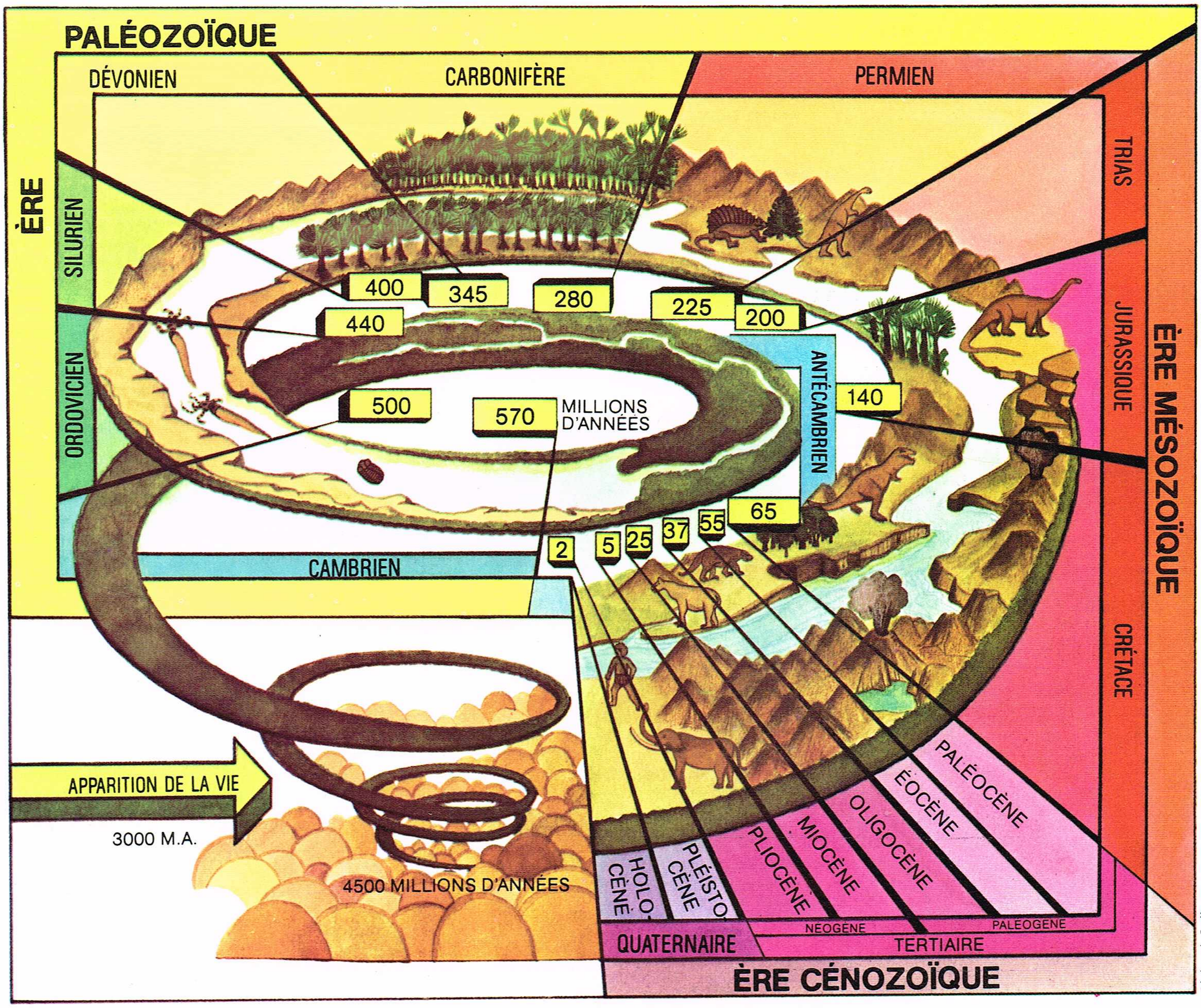

▲ *Représentation schématique des* **temps géologiques** *avec la* **succession des ères et des périodes illustrées par quelques événements marquants.** *On notera que l'échelle des temps n'est pas respectée (en particulier pour les périodes les plus récentes) et que quelques dates sont assez approximatives, notamment pour l'Oligocène (d'après M. Petzold).*

GÉOLOGIE HISTORIQUE ET RÉGIONALE

Les grandes divisions de la stratigraphie ont été basées sur les principales formes de vie à des moments déterminés. Pour tout détail concernant les formes de vie, se reporter au chapitre consacré à la paléontologie.

Les deux principaux systèmes *(Eon)* sont le *Cryptozoïque* (= vie cachée) et le *Phanérozoïque* (= vie évidente).

Le Cryptozoïque a été divisé par certains chercheurs en trois *ères : l'Azoïque* (= sans vie), l'*Archéozoïque* (= vie primordiale), et le *Protérozoïque* (= vie très primitive); d'autres ont considéré comme synonymes Archéozoïque et Protérozoïque; d'autres encore préfèrent le terme *Archaïque* à Azoïque; beaucoup enfin parlent de *Précambrien* (c'est ce terme que nous utiliserons).

Le Phanérozoïque a également été subdivisé en trois ères : le *Paléozoïque* (= vie antique) dominé par les Invertébrés, le *Mésozoïque* (= vie intermédiaire) dominé par les Reptiles, et le *Cénozoïque* (= vie récente) dominé par les Mammifères.

Chacune de ces ères est ensuite partagée en *périodes* qui, à leur tour, sont divisées en *époques,* subdivisées ultérieurement en *âges.* Ce travail d'identification et de reconnaissance des successions s'est déroulé principalement dans la première moitié du XIXe siècle; il a eu pour excellent résultat de donner en peu de temps les traits principaux de la stratigraphie des formations sédimentaires et les principes de base de la *géochronologie* de la croûte terrestre.

Précambrien

Cette partie immense de l'histoire de la Terre représente environ les 5/6 des temps géologiques puisqu'elle s'étend de —4 500 millions à —570 millions d'années. Le Précambrien est essentiellement représenté par des roches métamorphiques (gneiss, micaschistes, phyllades, etc.) et des roches éruptives (principalement des granites) pour la partie inférieure *(Archéen),* tandis que dans la partie supérieure *(Algonkien),* outre les roches précédentes, on observe des sédiments peu altérés, comme des conglomérats, des grès, des schistes argileux, des calcaires avec traces de fossiles (l'apparition de la vie remonterait à environ 3 milliards d'années). En Europe occidentale et au Canada notamment, le Précambrien est surmonté en discordance par les terrains du Cambrien (cependant, le passage se fait parfois sans interruption apparente avec les sédiments fossilifères de cette période). La limite inférieure des terrains précambriens coïncide idéalement avec l'époque de formation de la première croûte terrestre; il est néanmoins très probable

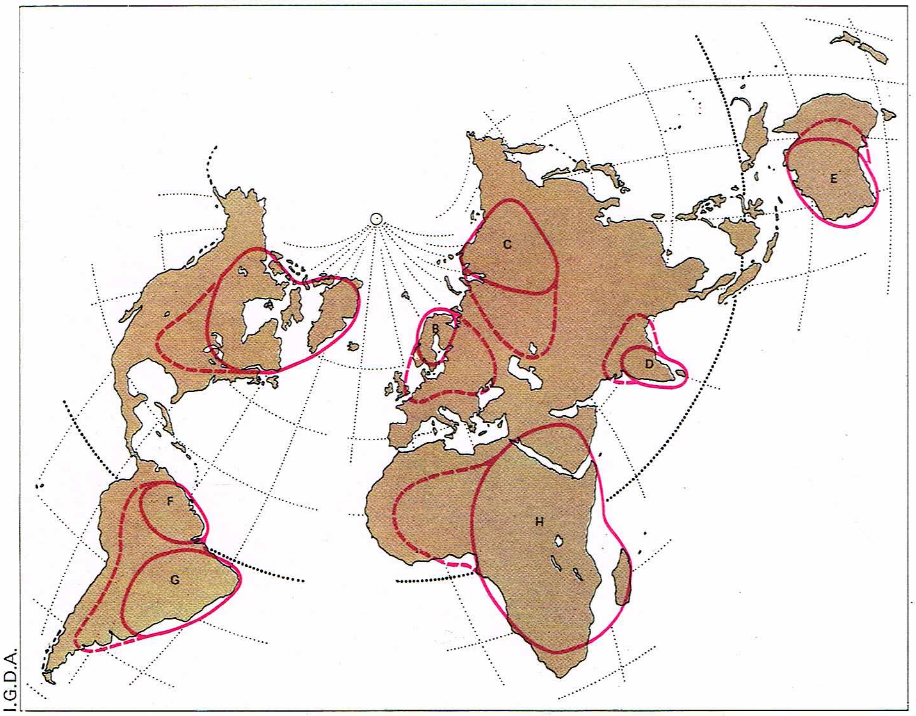

▲ **Boucliers continentaux *(traits rouges pleins), constitués par des roches de l'Antécambrien (les tiretés rouges délimitent les plates-formes correspondantes) : A, Laurentien; B, Baltique; C, Sibérien; D, Indien; E, Australien; F, Guyanais; G, Amazonien; H, Africain;***

qu'il ne reste rien de cette croûte primordiale car elle devait être très mince, facilement désagrégée et refondue par les mouvements du magma.

Au cours du Précambrien se produisirent de nombreux cycles orogéniques importants (sept au moins ont été reconnus en Afrique), signalés par des discordances entre les différents terrains; ils ont été accompagnés d'importantes manifestations magmatiques intrusives et effusives ainsi que d'intenses phénomènes métamorphiques avec des processus de migmatisation, d'anatexie et de palingenèse, lesquels se sont souvent développés à l'échelle régionale. Parmi les principaux cycles orogéniques, il faut signaler ceux qui, en Europe septentrionale, ont donné naissance aux *chaînes* des *Svéco-fennides,* des *Karélides* (on tend cependant aujourd'hui à les considérer comme appartenant à un seul cycle de plissement) et des *Hébrides* et, en Amérique du Nord, aux chaînes *Laurentienne, Algomienne* et *Huronienne*.

Actuellement, les roches précambriennes sont, pour la plupart, profondément enfouies. Cependant, dans quelques zones de la Terre, elles ont été mises au jour, soit par des mouvements orogéniques, soit par érosion des couches sus-jacentes. Elles se trouvent ainsi au centre des chaînes plissées plus récentes ou bien constituent de grands *boucliers* stables, sur des aires immenses. Parmi ceux-ci, les plus connus sont : le bouclier *laurentien* en Amérique du Nord, le bouclier *baltique* en Europe, le bouclier *sibérien* (continent d'Angara), le bouclier de l'*Antarctide,* le bouclier *éthiopien* en Afrique, celui de la *Guyane* et de l'*Amazonie* en Amérique du Sud, ceux de l'*Australie occidentale* et de la *péninsule indienne*. Les boucliers africain, amazonien, de l'Australie et de l'Inde, actuellement séparés, devaient initialement être réunis, constituant le vaste *continent de Gondwana*.

Il existe aussi des formations métamorphiques précambriennes dans les Alpes, en Calabre et en Sicile, dans les Pyrénées, dans le Massif armoricain et le Massif central, où elles ont été reprises dans des orogenèses ultérieures.

Les plus anciennes traces de vie présentes en Amérique du Nord sont des restes d'Algues et de Champignons auxquels on a attribué un âge variant entre 1 et 2 milliards d'années. Dans le bouclier rhodésien, on a trouvé des charbons (provenant vraisemblablement de végétaux) associés à des roches ayant 2,6 milliards d'années. En Australie et au Canada, on a découvert des graphites et des argilites calcaires témoignant de l'existence de matière organique. Le plus ancien organisme trouvé dans le bouclier baltique (Finlande) a été interprété comme une Algue *(Corycium enigmaticum)* et daté d'environ 1 milliard d'années. Dans les gneiss du Canada d'abord, puis dans d'autres régions, ont été signalés des restes d'organismes supposés *(Eozoon canadensis)*.

Les restes fossiles animaux sont également assez fréquents : spicules d'Éponges, organismes proches des Tabulés *(Carelazoon jatulicum),* Stromatopores, Mollusques, Crinoïdes et Annélides. La faune d'Adélaïde (Australie) est plus importante et moins développée, elle comprend des Annélides, des Brachiopodes, des Ptéropodes, et peut-être des Céphalopodes.

Dans les terrains précambriens de nombreuses régions, des conglomérats contenant des blocs striés, noyés dans une matrice argileuse, ont été découverts; ils représentent les traces de moraines anciennes et sont appelés *tillites*. Ces dépôts ont été trouvés en de nombreux endroits. Par contre, en Finlande et en Écosse *(grès de Torridon)* existent des conglomérats et des sables d'origine désertique et, en d'autres régions (en Amérique septentrionale, par exemple), on connaît des sédiments calcaires provenant de mers chaudes. Toutes ces données montrent que depuis l'origine de la Terre, des zones chaudes et des zones couvertes de glaciers ont coexisté avec une distribution variable dans l'espace et le temps.

Les dépôts miniers de l'ère précambrienne ont une importance particulière. C'est le cas, par exemple, des dépôts de fer d'Amérique du Nord, de Suède, d'Afrique du Sud, du Brésil, du Venezuela et d'Ukraine. Au Canada, se trouvent aussi de grands gisements de cuivre, de nickel, d'or (également abondant en Afrique du Sud, en Australie et en Inde), et d'uranium. D'autres gisements uranifères importants existent en Afrique centrale.

Ère paléozoïque, ou Primaire

L'ère paléozoïque (du grec παλαιός = ancien, et ζῷον = vivant), ou Primaire (ère des Poissons), s'étend sur environ 345 millions d'années. Elle est caractérisée par un développement notable des formes vivantes (parmi lesquelles domine le groupe des Invertébrés) et par l'apparition des premiers Poissons, des Amphibiens, des Reptiles, ainsi que celle des plantes terrestres. Autrefois, l'opinion était répandue que le développement subit des organismes au début du Paléozoïque (phénomène qui délimite nettement vers le bas les terrains attribués à l'ère en question) était seulement apparent; on pensait que les terrains précambriens avaient subi un métamorphisme général qui avait fait disparaître toutes traces de fossiles.

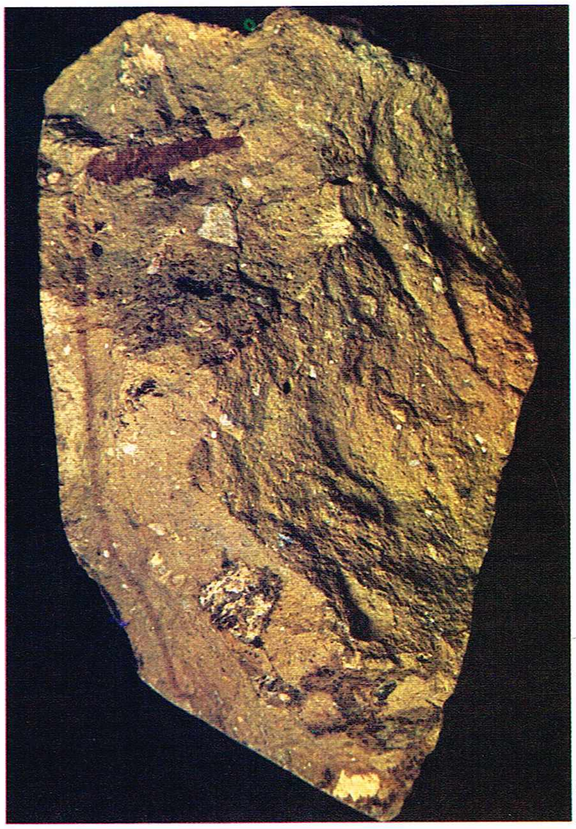

▶ *Les traces de moraines anciennes dans les terrains précambriens de nombreuses régions sont appelées* tillites*; ici une grande tillite du Katanga.*

Cependant, la découverte de roches infracambriennes non métamorphiques, et dans lesquelles les formes de vie existent en nombre réduit, a renforcé le critère utilisé pour définir la limite inférieure du Paléozoïque. Ce développement soudain de la vie est certainement dû à d'autres causes, comme une modification du climat et de la composition atmosphérique qui a permis une multiplication rapide des organismes.

La présence de sédiments clastiques est associée à l'existence de cycles orogéniques, comme le cycle *calédonien* (Silurien supérieur) et le cycle *hercynien* (Permo-Carbonifère). Un autre fait remarquable est l'intense activité magmatique qui a donné naissance à des masses intrusives ou effusives importantes.

Au Paléozoïque, les variations climatiques semblent avoir été moins marquées qu'actuellement, ce qui laisse supposer que les climats devaient être relativement uniformes. Seule la présence de tillites dans le Carbonifère supérieur et le Permien inférieur de l'hémisphère austral indique un climat froid et humide (Amérique du Sud, Afrique centrale et du Sud, Inde et Australie). La distribution dans les deux hémisphères de la flore à *Pecopteris* (climat chaud) et à *Gangamopteris* (climat froid) se rapporte à cette glaciation.

En Europe continentale, le Paléozoïque est habituellement divisé en six périodes : le *Cambrien*, l'*Ordovicien*, le *Silurien*, le *Dévonien*, le *Carbonifère* et le *Permien*. En Amérique, le *Mississippien* et le *Pennsylvanien* remplacent le Carbonifère ; on obtient ainsi une division en sept périodes.

Cambrien (de —570 à —500 M. A.)

Subdivisions et terrains

Le terme de Cambrien, proposé par Segdwick en 1836, dérive de *Cambria*, nom latin du pays de Galles. On y distingue généralement trois étages : le *Géorgien*, l'*Acadien* et le *Potsdamien* (noms provenant de localités d'Amérique du Nord). Ces distinctions correspondent respectivement aux Cambriens inférieur, moyen et supérieur, et sont essentiellement basées sur la succession des faunes à Trilobites. Ces faunes ne sont pas uniformément distribuées sur la Terre et permettent de distinguer deux provinces géologiques : la *province atlantique* (Europe et côtes atlantiques de l'Amérique du Nord) et la *province pacifique* (reste de l'Amérique du Nord, de l'Argentine, de la Chine et de l'Australie).

Au *Cambrien inférieur*, les faunes d'Europe nord-occidentale et d'Amérique du Nord sont caractérisées par les genres *Olenellus* et *Ellipsocephalus*, tandis qu'en Chine, en Australie et dans une partie de l'Europe méridionale, elles le sont par le genre *Redlichia*.

Au *Cambrien moyen*, les genres caractéristiques de la province atlantique sont *Paradoxides* et *Agnostus*, tandis que dans la province pacifique on observe *Olenoides*, *Ptychoparia* et, dans les cordillères d'Amérique du Nord, *Bathyuriscus*.

Enfin, au *Cambrien supérieur*, la province atlantique est caractérisée par le genre *Olenus* et la province pacifique par *Dickellocephalus*.

Les roches de cette période (sables, grès, calcaires, quartzites, etc.) constituent une série pouvant atteindre localement plusieurs milliers de mètres ; elles ont conservé dans de vastes zones les caractères lithologiques sédimentaires originels et sont souvent riches en fossiles, notamment celles du Cambrien moyen.

Événements et paléogéographie

Le Cambrien correspond généralement à un cycle sédimentaire, débutant par une transgression et se terminant par une régression. Excepté quelques manifestations magmatiques acides développées localement (en Europe occidentale notamment), il n'y a pas eu de phénomènes orogéniques importants pendant cette période.

Sur les plates-formes de bordure des boucliers précambriens, là où les chaînes huroniennes ont été érodées, pénéplanées et recouvertes par les mers épicontinentales, la série cambrienne repose naturellement en discordance sur le Précambrien (la plate-forme africaine, le Massif armoricain par exemple). Par contre, à la périphérie des boucliers précambriens, là où il n'y a pas eu de plissement à la fin du Précambrien, la sédimentation ne présente pas de lacune et de puissantes séries ont pris naissance. C'est, notamment, le cas à la périphérie du bouclier baltique, au nord du bouclier saharien, ainsi qu'à l'ouest (futures montagnes Rocheuses) et à l'est (futures Appalaches) du bouclier canadien.

SUBDIVISIONS DE L'ÈRE PRIMAIRE

	Époques		Étages	Phases tectoniques
225 MA	PERMIEN	SUPÉRIEUR	*Thuringien (Zechstein)*	
		MOYEN	*Penjabien (Saxonien)*	
		INFÉRIEUR	*Kungurien*	hercynienne : phase saalienne (Oural)
			Artinskien	
			Sakmarien	
280 MA	CARBONIFÈRE	SUPÉRIEUR PENNSYLVANIEN	*Ouralien (Stéphanien)*	hercynienne : phase asturienne
			Moscovien (Westphalien)	
			Namurien	hercynienne : phase sudète
		INFÉRIEUR MISSISSIPPIEN (Dinantien)	*Viséen*	
			Tournaisien	hercynienne : phase bretonne
345 MA	DÉVONIEN	SUPÉRIEUR	*Famennien*	
			Frasnien	
		MOYEN	*Givétien*	
			Eifélien (Couvinien)	
		INFÉRIEUR	*Coblencien*	
			Gédinnien	calédonienne : phase des Ardennes
400 MA	SILURIEN	SUPÉRIEUR	*Ludlowien*	
			Wenlockien	
		INFÉRIEUR	*Llandovérien (Valentien)*	calédonienne : phase taconique (Appalaches)
440 MA	ORDOVICIEN	SUPÉRIEUR	*Ashgillien*	
			Caradocien	
		MOYEN	*Llandeilien*	
		INFÉRIEUR	*Arenigien (Skiddawien)*	
			Trémadocien	
500 MA	CAMBRIEN	SUPÉRIEUR	*Potsdamien*	
		MOYEN	*Acadien*	
		INFÉRIEUR	*Géorgien*	
570 MA				

▲ ***Division en six périodes géologiques de l'ère paléozoïque, ou Primaire, pour l'Europe continentale.***

En Europe, se trouvent le *géosynclinal de l'Europe du Nord* qui, vers l'est, se divise en deux branches entre lesquelles se situe le bouclier baltique, et le *géosynclinal méditerranéen*, au sud duquel prend place le bouclier saharien. En Amérique du Nord le *géosynclinal des cordillères pacifiques* et le *géosynclinal des Appalaches* embrassent le bouclier canadien ; en ce qui concerne le *géosynclinal de Franklin*, qui traverse la partie septentrionale du continent, on possède peu de données.

Ordovicien (—500 à —440 M. A.) et Silurien (—440 à —400 M. A.)

Subdivisions

Le terme de Silurien a été proposé par Murchison en 1835 ; ce nom dérive des Silures, ancien peuple habitant le Shropshire (pays de Galles) à l'époque romaine. La limite inférieure de cette période est purement paléontologique.

L'Ordovicien est subdivisé en cinq étages : le *Trémadocien*, l'*Arenigien* (le *Skiddawien*), le *Llandeilien*, le *Caradocien* et l'*Asghillien ;* le Silurien en trois : le *Llandovérien*, le *Wenlockien* et le *Ludlowien*.

Événements et paléogéographie

L'*orogenèse calédonienne* (nom dérivé de l'appellation ancienne de l'Écosse septentrionale) débute au Silurien

M. Colchen

▲ ***Les formations paléozoïques** : pli synclinal dans les formations dévoniennes du port d'Aula, Paléozoïque de la zone axiale des Pyrénées ariégeoises. La stratification est ici recoupée par une schistosité de fracture (soulignée par la végétation) apparue lors du plissement.*

supérieur et continue jusqu'au début du Dévonien. Les chaînes calédoniennes se retrouvent en Grande-Bretagne, en Scandinavie, dans les Ardennes, en Rhénanie, dans le Harz et la Bohême du Nord, en Sibérie, dans certaines régions d'Afrique et d'Amérique du Nord, au Groenland et en Australie.

D'après la nature et la répartition géographique des faciès de ces périodes, la paléogéographie y apparaît assez analogue à celle du Cambrien. En Europe occidentale, s'individualise une zone dite de l'*Europe moyenne,* domaine épicontinental séparant la mer de l'Europe du Nord de la Mésogée et qui englobe le Massif armoricain, le Massif central et la Bohême. L'Ordovicien et le Silurien de cette dernière région sont célèbres par leurs riches faunes de Trilobites et de Graptolites.

Les formations siluriennes sont particulièrement développées en Amérique du Nord avec des faunes riches (« calcaires du Niagara », couches salines et gypseuses) et sont également présentes en Argentine ainsi que dans d'autres régions d'Amérique du Sud, en Asie (Sibérie, Chine, etc.) et en Australie.

Dévonien (—400 à —345 M. A.)

Subdivisions

Le nom de Dévonien dérive du comté du Devonshire (sud-ouest de l'Angleterre). La période est subdivisée en trois étages, dont chacun est à son tour divisé en sous-étages. Les subdivisions sont différentes selon que l'on considère les Ardennes, l'Angleterre ou l'Amérique.

Événements et paléogéographie

Au passage du Silurien au Dévonien, la paléogéographie européenne a subi une profonde transformation à la suite de l'orogenèse calédonienne. Au début du Dévonien, la surface occupée par le géosynclinal calédonien a émergé pour former une chaîne montagneuse qui, se soudant avec le bouclier baltique, a donné naissance au *continent des vieux grès rouges*. Les dépôts (qui donnent son nom au continent) sont des grès continentaux, de milieu désertique, avec des intercalations lacustres et lagunaires. Au sud du continent, s'étendait une bande caractéristique sur laquelle les dépôts marins alternaient avec les dépôts continentaux *(région schisto-gréseuse* ou *à faciès des Ardennes)*. Dans l'Europe méridionale et orientale, le Dévonien a, en revanche, un aspect franchement marin : faciès pélagiques, souvent argileux, dans l'Europe du Sud (Alpes orientales, Vosges, Montagne Noire, Pyrénées, Sardaigne, Maroc) appartenant au domaine de la *Téthys,* ou *Mésogée* (grande bande de mer s'étendant d'est en ouest), et dans le *géosynclinal de l'Oural ;* faciès néritiques, par contre, sur la plate-forme russe (ils apparaissent dans certaines localités d'Europe centrale). A l'est du géosynclinal de l'Oural, le *continent d'Angara* émergeait des mers dévoniennes. Dans l'hémisphère boréal existait un vaste complexe de terres émergées : américaines, africaines et indo-australiennes, qui sont regroupées sous le nom de *continent de Gondwana*. En Amérique, le Dévonien se retrouve dans les montagnes Rocheuses, les cordillères pacifiques et au bord du bouclier canadien. La nature des dépôts indique qu'il y a eu une transgression progressive d'est en ouest et du sud vers le nord aux Dévoniens inférieur et moyen, et du nord-ouest vers le sud-est au Dévonien supérieur. Les vieux grès rouges se retrouvent en bordure du *continent nord-atlantique*.

Dans la stratigraphie, une signification particulière a été attribuée au *Downtonien* (du nom du château de Downton, situé près de Ludlow dans le Shropshire en Angleterre) car il présente des caractères de transition entre le Silurien et le Dévonien : présence de faciès lagunaires à Gigantostracés et Ostracodermes, alternant avec des faciès marins à Mollusques et Brachiopodes. Des équivalents du Downtonien se rencontrent dans les Lowlands d'Écosse, dans la région d'Oslo, en Estonie, en Pologne et sur la bordure occidentale du continent des vieux grès rouges (New Brunswick) avec des faunes à Poissons cuirassés, semblables aux faunes européennes.

Carbonifère (—345 à —280 M. A.)

Subdivisions et terrains

Le Carbonifère a été nommé ainsi, en 1882, par Conybeare, car les charbons fossiles y atteignent une fréquence, une puissance et une extension plus grandes qu'à n'importe quelle autre époque. En Europe orientale et en Asie, le Carbonifère est divisé en *inférieur, moyen* et *supérieur*; en Europe occidentale, il est divisé en *inférieur* et *supérieur,* tandis qu'en Amérique la division se fait en *Mississippien* et *Pennsylvanien*. Certains auteurs, se basant sur les analogies entre le Carbonifère et le Permien, réunissent les deux systèmes sous la dénomination d'*Antracolithique* ou *Permo-Carbonifère*.

Si les roches sédimentaires sont les plus répandues, les roches éruptives, intrusives ou effusives, sont également présentes. L'existence de dépôts charbonneux aussi étendus et puissants est sans doute liée soit au développement subit de la vie végétale, soit à l'existence de conditions particulièrement favorables à sa fossilisation. Il existe plusieurs hypothèses quant à l'origine de ces dépôts : l'*autochtonie* (Brongniart et Potonié), l'*allochtonie* (Prévost et Fayol) et l'*allochtonie mitigée* (Grand et Eury), mais il faut remarquer que tous les dépôts présentent des lits de charbon alternant rythmiquement avec des bancs stériles (cyclothèmes). Les dépôts de charbon se sont généralement formés au Carbonifère moyen, mais peuvent être présents dans tous les horizons (comme en Chine) ou manquer dans toute la série (par exemple, dans les montagnes Rocheuses).

Événements et paléogéographie

Au début du Carbonifère, une grande transgression marine s'est produite sur le continent nord-atlantique, avec dépôts de calcaires néritiques (Irlande, Angleterre, Ardennes, plate-forme russe) et de *flysch* (Devon, Europe centrale, péninsule Ibérique et Balkans) auxquels a été donné le nom de *culm*. Au Carbonifère moyen,

M. Colchen

▲ ***Les** formations **paléozoïques** du domaine tibétain de l'Himalaya du Népal. Au premier plan, les formations carbonifères et permiennes de la Thakkhola; au second plan, au-delà de la vallée de la Kali Gandaki, les reliefs du massif de Dhaulagiri (8 172 m) sont édifiés dans l'ensemble de la série paléozoïque plissée et légèrement métamorphisée.*

des conditions continentales ou paraliques se sont installées sur l'Europe centrale et occidentale, avec dépôts de formations palustres, lacustres et lagunaires (à ce complexe a été donné le nom de *Coal Measures* par les Anglais et *houiller* en France), qui ont donné naissance aux grands dépôts de charbon de l'Angleterre et de l'Irlande, des bassins franco-belge, de la Sarre-Lorraine, du Massif central, de la Ruhr, etc. Les dépôts de charbon de la plate-forme russe (bassins de Moscou et de l'Oural) occupent une position analogue, tandis que ceux du bassin du Donetz sont du Carbonifère supérieur.

En Amérique du Nord, on connaît les grands dépôts pennsylvaniens du Mid-continent, de l'Illinois (où les séries carbonifères ne sont pas plissées), des Appalaches et des Alleghany (où le Carbonifère inférieur gréseux est plissé) auxquels sont associés des dépôts de pétrole et de gaz naturels.

Au sud du continent nord-atlantique s'étendait la Mésogée, ou Téthys, caractérisée par des faciès franchement marins et qui séparait le continent nord-atlantique de celui de Gondwana. Sur ce dernier, devaient exister de vastes mers épicontinentales peu profondes, des lagunes étendues et, probablement, de grands lacs d'eau douce. Par contre, vers l'est, le géosynclinal de l'Oural (soulevé en chaîne montagneuse pendant l'orogenèse hercynienne) séparait le continent nord-atlantique du continent d'Angara.

Durant cette période, la physionomie du globe subit encore des mutations par suite de l'*orogenèse hercynienne* qui donna naissance à une série de chaînes de montagnes en diverses parties du globe. En Europe du Centre et de l'Ouest, la chaîne hercynienne se divise en deux branches : l'orientale, avec une direction nord-ouest-sud-est, est appelée *branche armoricaine*, celle d'Europe centrale, avec une direction sud-ouest-nord-est, est dite *branche varisque*. L'Oural, le Timan, les Altaï, le Kuenlum, l'Australie orientale, les montagnes du cap de Bonne-Espérance, les Appalaches, etc., appartiennent aussi aux chaînes hercyniennes. En Europe, l'orogenèse a été accompagnée et suivie d'une intense activité magmatique avec d'importantes intrusions granitiques, comme celles de l'Europe centrale et des massifs externes des Alpes.

Au climat nettement tropical de l'hémisphère Nord faisait pendant un climat froid dans l'hémisphère Sud, comme en témoignent les traces des dépôts glaciaires permo-carbonifères du continent de Gondwana et la présence de la flore à *Glossopteris*.

Permien (—280 à —225 M. A.)

Subdivisions et terrains

Le Permien a été institué en 1841 par Murchison ; son nom dérive de la ville de Perm (aujourd'hui Molotov), en Russie orientale. Il présente des divisions différentes selon que ces faciès sont principalement continentaux ou marins. En Europe du Centre et de l'Ouest, les roches sédimentaires du Permien inférieur sont pour la plupart clastiques (sables, grès, etc.), alors que celles du Permien supérieur ont des faciès lagunaires (dépôts chimiques) avec accumulations de gypse et sel gemme. Les phénomènes volcaniques sont également importants ; on observe des éruptions de porphyres quartzifères en Écosse, en Europe centrale, dans les Pyrénées, les Maures et les Alpes.

Événements et paléogéographie

Sur le continent nord-atlantique, le faciès continental est représenté par les *nouveaux grès rouges* (« new red sandstone » en anglais, ou « Rothliegendes » en allemand). Sur la plaine russe, dans la zone méditerranéenne et dans certaines régions d'Amérique occidentale (montagnes Rocheuses et chaînes pacifiques), les sédiments contemporains ont, par contre, un caractère franchement marin. On observe des dépôts de type continental sur les continents d'Angara et de Gondwana, d'où (Brésil et Karoo) proviennent des faunes à Vertébrés (Amphibiens et Reptiles). En outre, les effets de la glaciation commencée au Carbonifère continuent de se faire sentir sur le continent de Gondwana, tandis que dans l'hémisphère boréal le climat chaud humide de la période précédente se transforme en climat sec.

Au Permien supérieur, en Europe centrale, se produit une transgression qui aboutit au dépôt d'une formation calcaréo-dolomitique, souvent riche en fossiles à caractères lagunaires, recouverte de puissantes formations salines (le *Zechstein* des auteurs allemands). En Russie, par contre, on trouve des faciès continentaux dans les parties méridionale et occidentale, et marins (mais non liés à la mer du Zechstein) à l'est. Dans le bassin de la Méditerranée (Téthys), outre un Permien continental en

SUBDIVISIONS ET CARACTÉRISTIQUES DE L'ÈRE SECONDAIRE

	Époques	Étages	Localités-types		Autres subdivisions		Phases tectoniques
CRÉTACÉ	65 MA						
	CRÉTACÉ SUPÉRIEUR	*Maestrichtien*	Tuffeau de Maestricht (Hollande)	Sénonien	Aturien: Rognacien, Bégudien	Garumnien	laramienne ou arvinche
		Campanien	Calcaire crayeux de de la Grande Champagne (Charente)		Aturien: Fuvélien, Valdonnien		
		Santonien	Calcaire crayeux de Saintes (Charente-Maritime)		Emschérien		
		Coniacien	Calcaire de Cognac (Charentes)				
		Turonien	Craie de Touraine		Angoumien Ligérien		
		Cénomanien	Sables du Mans = *Cenomanum* (Sarthe)				
	100 MA						
	CRÉTACÉ INFÉRIEUR	*Albien*	Sables verts et argiles de l'Aube		Vraconien Albien moyen Albien inférieur	faciès urgonien	autrichienne anté-cénomanienne
		Aptien	Marnes d'Apt (Vaucluse)		Clansayésien Gargasien Bédoulien		
		Barrémien	Calcaire marneux de Barrême (Alpes de Haute-Provence)				
		Hauterivien	Calcaire marneux d'Hauterive près Neuchâtel		Néocomien (Ryazanien)	faciès wealdien	
		Valanginien	Calcaire marneux de Valangin près Neuchâtel				
		Berriasien	Calcaire marneux de Berrias (Ardèche)				néo-cimmérienne
	140 MA						
JURASSIQUE	JURASSIQUE SUPÉRIEUR = Jura blanc = Malm	*Portlandien*	Calcaires et grès de Portland (Dorset)		Purbeckien Volgien Tithonique		néo-cimmérienne ou névadienne
		Kimméridgien	Marnes noires de Kimmeridge (Dorset)		Kimméridgien s.s. Séquanien supérieur	Lusitanien Corallien	andine
		Oxfordien	Marnes noires d'Oxford		Séquanien inférieur Rauracien Argovien		
					Oxfordien s.s.		
	155 MA						
	JURASSIQUE MOYEN = Jura brun = Dogger	*Callovien*	Calcaire gréseux de Kellaways (Wiltshire)				
		Bathonien	Calcaire oolithique blanc de Bath (Somerset)				
		Bajocien	Calcaire oolithique ferrugineux de Bayeux (Calvados)				
		Aalénien	Marnes d'Aalen (Würtenberg)				
	175 MA						
	JURASSIQUE INFÉRIEUR = Jura noir = Lias	*Toarcien*	Calcaires marneux de Thouars (Deux-Sèvres)				
		Domérien	Marnes et calcaires du Monte-Domaro (Prov. de Brescia, Italie du Nord)		Pliensbachien de Pliensbach (Allemagne) ex-Charmouthien		
		Carixien	Marnes de Carixia = Charmouth (Dorset)				
		Sinémurien	Calcaires noirs de Semur (Côte-d'Or)		Lotharingien Sinémurien s.s.		
		Hettangien	Grès d'Hettange (Moselle)				cimmérienne
	200 MA						
TRIAS	TRIAS SUPÉRIEUR	*Rhétien*	Alpes rhétiques (Grisons, Suisse)		Rhétien	Keuper (Allemagne)	cimmérienne
		Norien	Alpes noriques (Styrie, Autriche)		Keuper (France, Angleterre)		
		Carnien	Alpes carniques (Vénétie, Italie)				
		Ladinien	Pays ladin (Grisons, Suisse)		Lettenkohle		
	TRIAS MOYEN	*Anisien* ou *Virglorien*	*Anisus*, nom latin de la rivière Enns (Tyrol, Autriche) Col de la Virgloria (Voralberg, Autriche)		Muschelkalk		
	TRIAS INFÉRIEUR	*Werfénien* ou *Scythien*	Werfen (Tyrol, Autriche) Pays des Scythes entre le Danube et le Don		Buntsandstein		
	225 MA						palatine

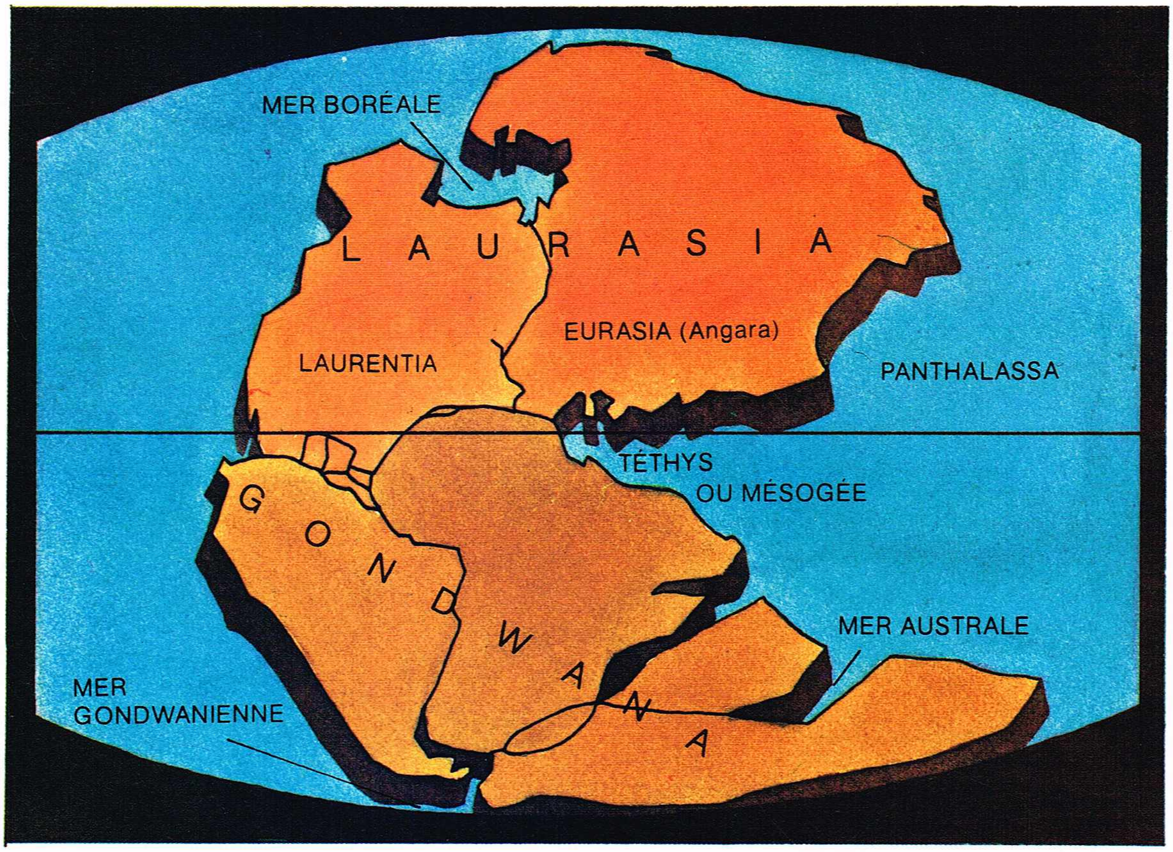

◀ **Le monde au début du Secondaire *(d'après Dietz et Holden). L'ensemble des continents forme la Pangea (Laurasia et Gondwana) entourée par des masses océaniques, Panthalassa et ses annexes (mer Boréale, Téthys ou Mésogée, mer Australe et mer Gondwanienne). Le continent de Gondwana est encore étroitement soudé.***

Corse et en Sardaigne, il existe un Permien marin en Sicile (au sud de Palerme), avec des faunes exceptionnellement riches en Italie du Sud et dans toute la zone allant de la Dalmatie à l'Anatolie.

Ère mésozoïque, ou Secondaire

L'ère mésozoïque (du grec : μέσος = moyen, et ζῷον = vivant), ou Secondaire, doit son nom au fait que sa faune et sa flore représentent une transition entre celles du Paléozoïque et celles du Cénozoïque. Elle s'étend sur un intervalle de temps évalué à environ 140 millions d'années et est caractérisée par le grand développement des Reptiles, qui y dominent sur les terres, dans les mers et dans les airs. Les Ammonites et les Bélemnites prennent également une grande importance, mais, comme les grands Reptiles, disparaissent à la fin de l'ère. Pour cette raison, le Mésozoïque est appelé soit *ère des Reptiles,* soit *ère des Ammonites.* Elle est caractérisée par de nombreuses transgressions et régressions (avec un maximum au Crétacé), ainsi qu'une intense sédimentation marine (calcaires, dolomies, gypses et marnes), avec, localement, des intercalations de porphyres et de mélaphyres et des injections de magmas basiques (ophiolites des Alpes et du Taurus par exemple).

L'activité orogénique a été relativement pauvre en Europe et en Asie (où l'on observe seulement les signes précurseurs des plissements alpin et himalayen), tandis qu'en Amérique se produisaient les principales phases de plissement des Andes et des cordillères d'Amérique du Nord. La mise en place des grands batholites granitiques et granodioritiques de Patagonie et d'Amérique septentrionale se fait à la fin du Mésozoïque ; elle est accompagnée de phénomènes magmatiques. Les grandes effusions de laves basaltiques du Deccan se sont produites vers la fin de cette ère. Parmi les phénomènes de magmatisme basique, rappelons les basaltes du Brésil (Paraná) et d'Afrique australe (Karoo).

C'est également à cette époque que le continent de Gondwana commence à se morceler en même temps que s'ouvre l'Atlantique. Un examen de la flore révèle la disparition de la plupart des Cryptogames vasculaires de type paléozoïque, tandis que les Cycadales et les Conifères dominent ; à la fin de l'ère apparaissent les premières Phanérogames Angiospermes.

En ce qui concerne la faune, il faut noter que, parmi les Invertébrés de milieu marin, diverses formes de Foraminifères apparaissent (prenant la place des Fusulines du Paléozoïque), les Hexacoralliaires remplacent les Tétracoralliaires, les Pélécypodes et les Gastéropodes augmentent en nombre et en importance ; cependant, les organismes les plus significatifs sont les Ammonites et les Bélemnites. Parmi les Vertébrés, chez les Poissons les Téléostéens remplacent les Ganoïdes, les Amphibiens acquièrent des caractères plus modernes ; mais les vrais dominateurs sont les Reptiles, qui, évoluant des Amphibiens vers la fin du Paléozoïque, se sont rapidement adaptés à la vie sur la terre ferme (même s'il existe aussi des Reptiles marins comme l'*Ichtyosaurus*) et dans l'air, et ont atteint des dimensions gigantesques (parmi les dinosaures, certains dépassaient 20 m de long ; parmi les ptérosaures, certains avaient une envergure de 9 m). Un autre fait important est l'apparition, à la fin de l'ère, des premiers Mammifères et des Oiseaux *(Archaeopteryx).*

Le Mésozoïque est divisé en trois périodes : le *Trias,* le *Jurassique* et le *Crétacé.*

Trias (—225 à —200 M. A.)

Subdivisions et terrains

Le nom de Trias, proposé par Alberti en 1834, a pour origine le fait que sur la plus grande partie de l'Europe — en particulier en Allemagne — cette période est représentée par trois formations bien distinctes : le *Buntsandstein* (grès bigarrés), le *Muschelkalk* (calcaires coquilliers) et le *Keuper* (marnes irisées). Le Buntsandstein a un caractère franchement continental, le Muschelkalk un caractère marin, et le Keuper une nature en partie marine et en partie lagunaire.

Le *Trias allemand* à faciès continental a une distribution correspondant à peu près à celle des régions où, pendant le Permien, se trouvaient les nouveaux grès rouges, c'est-à-dire le continent nord-atlantique, la plate-forme russe, le continent de Gondwana (en Australie et en Inde péninsulaire il y a aussi des dépôts de charbon). Le Trias allemand à faciès marin, outre l'Allemagne et l'est du bassin de Paris, la Provence, l'Espagne du Sud et de l'Est, le nord-ouest de la Sardaigne et l'Afrique du Nord, se retrouve également le long de la côte atlantique de l'Amérique du Nord.

◀ ***Page ci-contre, tableau récapitulatif des subdivisions de l'ère* mésozoïque, *ou* Secondaire.**

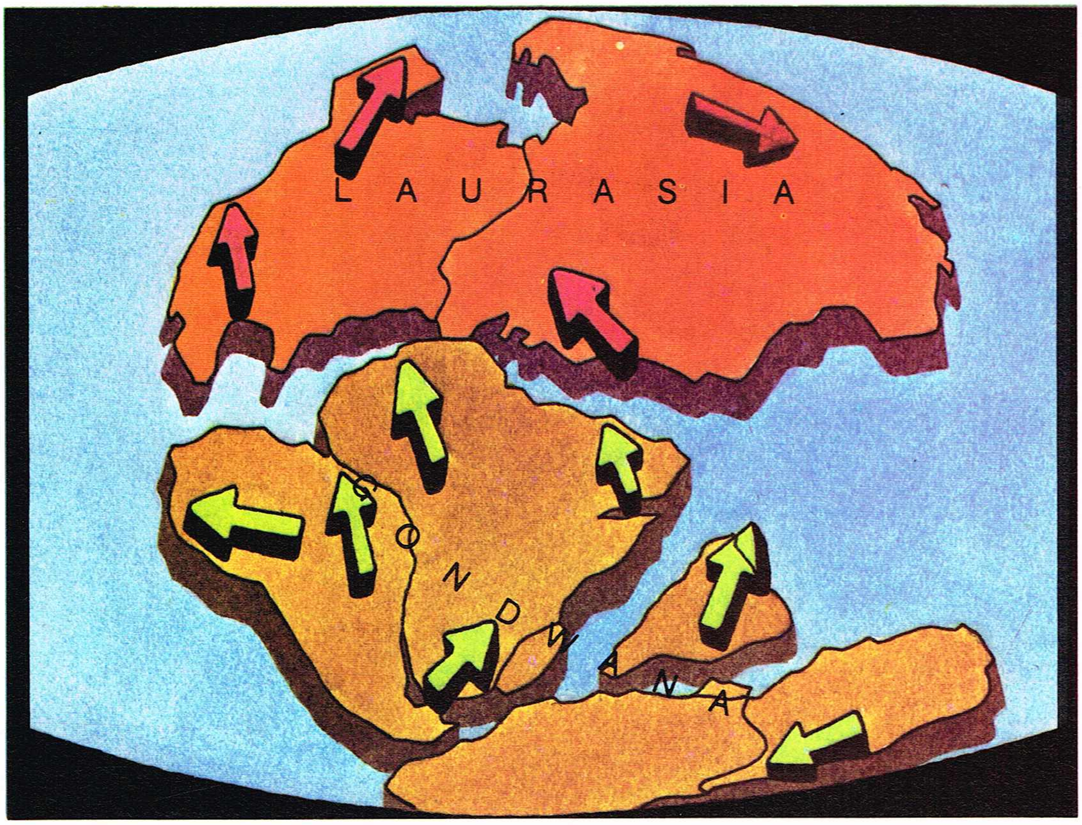

Richard Colin

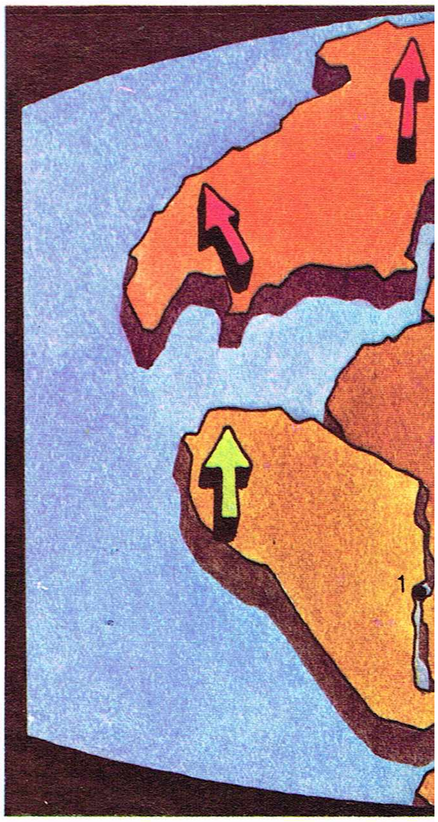

Richard Colin

▲ ***Le** monde à la fin du* **Trias (vers 200 M. A.)** *après le début de la dislocation du Gondwana (d'après Dietz et Holden). La Laurasia est séparée du Gondwana par la mer des Caraïbes et l'ébauche de l'Atlantique Nord.*

Au Trias à faciès continental et épicontinental s'oppose celui à faciès entièrement marin, se déposant en milieu plus profond *(Trias à faciès alpin ou mésogéen)*, développé dans la zone ligure des Alpes, dans les Carpates, en Crimée, dans le Caucase, en Asie Mineure, dans l'Himalaya, l'archipel malais, en Indochine, en Chine du Sud, dans les chaînes pacifiques d'Amérique du Nord, au Pérou, en Nouvelle-Zélande et en Nouvelle-Calédonie.

Entre la mer du Trias alpin et celle du Trias moyen allemand, on avait supposé qu'il existait une séparation sous la forme d'un relief émergé et allongé, appelé *chaîne vindélicienne* ou *seuil vindélicien*. Aujourd'hui, des doutes sont émis, non seulement sur la topographie de cette chaîne, mais aussi sur son existence même, en raison des caractères observés dans le Trias des Alpes occidentales.

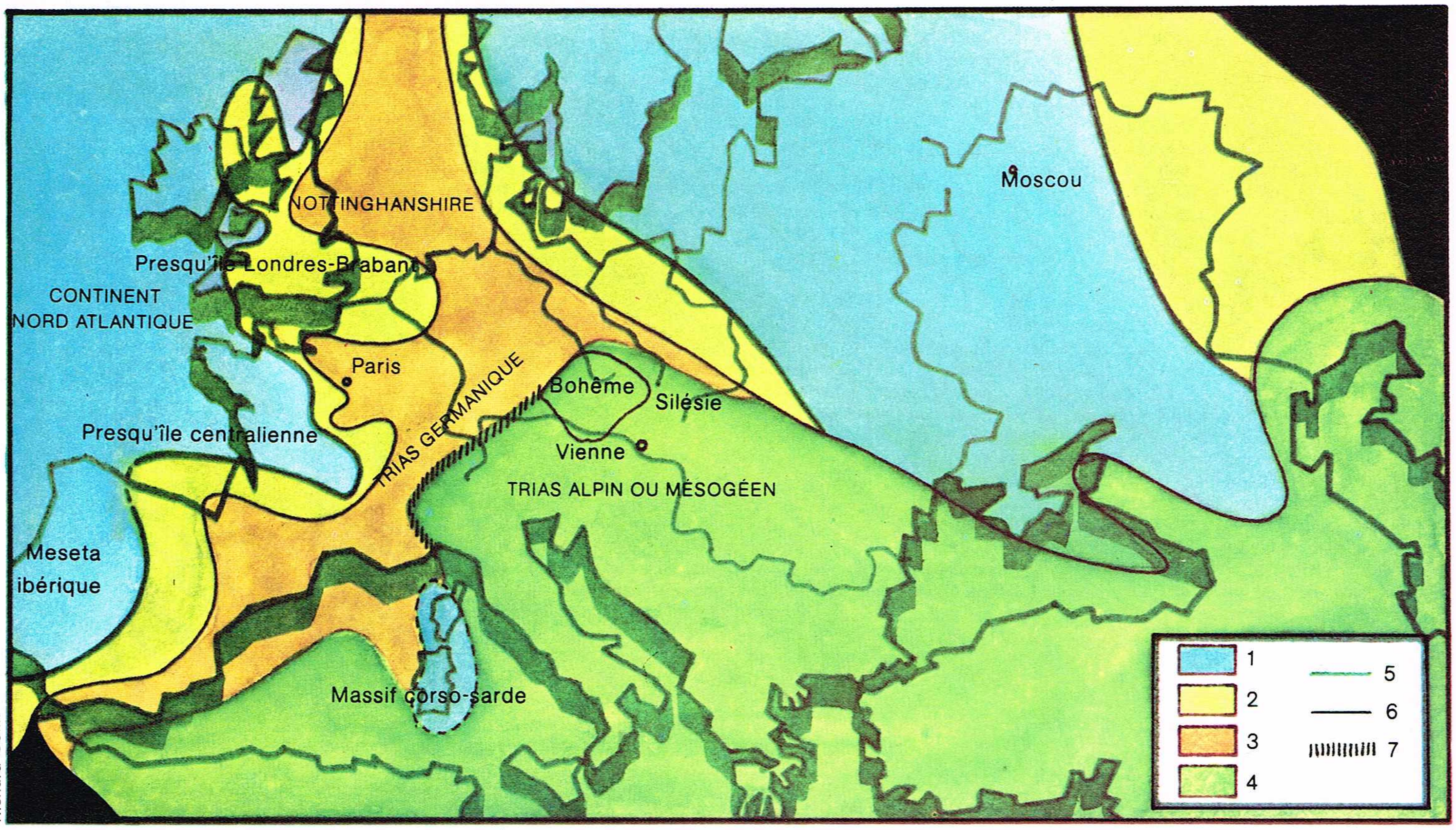

Richard Colin

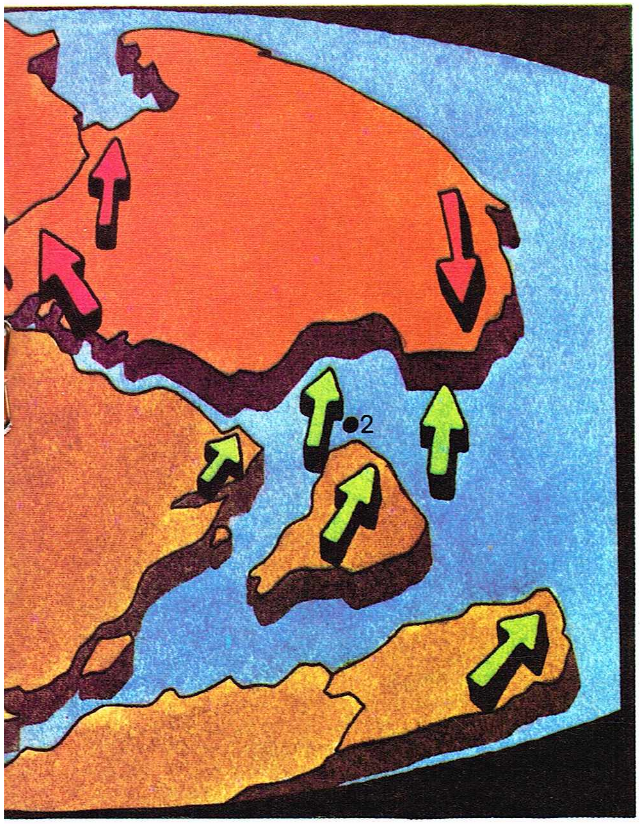

M. Colchen

Les roches les plus répandues à cette période sont celles de faciès continental et lagunaire pour le Trias allemand (grès bigarrés, argilo-schistes, dépôts salins et gypseux), et celles de faciès marin, plus ou moins profond, pour le Trias alpin (calcaires, dolomies — même récifales — marnes et argilites). Parmi les roches éruptives, ce sont les roches basiques qui prédominent : *traps* basaltiques brésiliens (Paraná), s'étendant sur environ 1 000 000 de km^2, et *traps* d'Afrique australe (Karoo). Dans les Dolomites et en Carnie s'est également manifestée une activité magmatique, avec roches porphyriques, porphyres et projections.

Événements

Dans l'ensemble, il s'agit d'une période de calme orogénique ; des phénomènes de plissement se produisent seulement en Indochine et dans les îles japonaises *(orogenèse indochinoise)*. A la fin de la période, on observe des mouvements intéressant différentes zones du globe *(orogenèse cimmérienne inférieure)* et le début du morcellement du continent de Gondwana.

Jurassique (—200 à —140 M. A.)

Subdivisions et terrains

Cette période, dont la durée a été estimée à 60 millions d'années, prend son nom (proposé par Brongniart et Humboldt en 1823) de la chaîne du Jura, où elle présente un développement notable et une abondance de fossiles.

En Europe, le Jurassique est généralement divisé en trois sous-systèmes : le *Lias*, le *Dogger* et le *Malm*, qui sont approximativement équivalents aux *Jurassiques inférieur, moyen* et *supérieur*. En Allemagne, on utilise aussi la subdivision basée sur les couleurs des formations : *Jura noir, Jura brun* et *Jura blanc ;* un dépôt caractéristique de ce dernier est *le calcaire de Solenhofen,* qui contient de nombreux restes fossiles parmi lesquels beaucoup d'Insectes. Chacun de ces sous-systèmes possède une subdivision. Au *Tithonique,* ou *Portlandien* (qui a un caractère marin), correspond le *Purbeckien* pour les faciès lacustres ou saumâtres.

Événements et paléogéographie

Les événements orogéniques les plus significatifs de cette période sont le *plissement andin* au *Jurassique supérieur* en Amérique du Sud, et le *plissement névadien* au *Jurassique terminal* en Amérique du Nord. Le magmatisme de cette période est essentiellement basique, comme en témoignent les éruptions de magmas basiques et ultrabasiques dans le géosynclinal alpin et les grandes coulées porphyriques des Andes.

La paléogéographie du Jurassique est très semblable à celle du Trias ; en ce qui concerne l'Europe, la distinction entre la Téthys et le continent nord-atlantique persiste. Sur ce dernier, existaient des mers épicontinentales d'où émergeaient les *massifs hercyniens* (également appelés *massifs anciens*), lesquels, à la manière d'îles, séparaient certains bassins dont la profondeur augmentait petit à petit. A la fin du Jurassique moyen, un large bras de mer traversait la Russie, séparant le continent d'Angara du bouclier scandinave (qui appartient au continent nord-atlantique). Le morcellement du continent de Gondwana, amorcé au Trias, s'est poursuivi avec, notamment, l'ouverture de l'Atlantique Sud et la migration de l'Inde vers le continent asiatique.

Crétacé (—140 à —65 M. A.)

Subdivision

Le nom de Crétacé vient de *craie* (*Kreide* en allemand, *chalk* en anglais), qui désigne un calcaire blanc, friable, tendre, pulvérulent, de faciès néritique, assez répandu dans le Bassin parisien, en Angleterre et en Allemagne, particulièrement dans le Crétacé supérieur. Cette période a duré environ 75 millions d'années. Elle est généralement subdivisée en *inférieure* et *supérieure,* puis en étages.

Événements et paléogéographie

Les mouvements orogéniques ont été intenses, annonçant la grande orogenèse du Cénozoïque ; la *phase laramienne de l'orogenèse alpine* a seulement donné naissance, en Europe, aux plissements des zones périphériques de la Téthys, alors que ceux qui se sont produits en Amérique (montagnes Rocheuses et Andes) ont été bien plus significatifs. L'activité magmatique a été intense surtout au Crétacé supérieur mais aussi au Cénozoïque inférieur dans les Pyrénées, les Balkans, aux États-Unis (mise en place des grands batholites), dans les Andes, etc. Parmi les manifestations les plus importantes, il faut signaler les traps basaltiques du Deccan de la péninsule indienne (300 000 km^2 pour un volume supérieur au million de kilomètres cubes).

Tandis que le climat montre des signes de différenciation, il n'y a pas de variations sensibles de la paléogéographie par rapport au Jurassique ; un contraste persiste entre la *province boréale* et les mers froides, épicontinentales (séparées entre elles par les massifs hercyniens

▲ *Au centre,* **le monde** *à* **la fin du Jurassique** *(d'après Dietz et Holden). Les tendances esquissées à la fin du Trias s'affirment. Expansion de l'océan Indien et de l'Atlantique Nord qui projettent deux diverticules, l'un entre le Groenland et le Canada, l'autre entre la France et l'Espagne. Un fossé (ou rift) s'établit entre l'Amérique du Sud et l'Afrique, prémices de l'Atlantique Sud. Deux foyers volcaniques sont figurés ; ceux de Walvis (1) et de l'océan Indien (2). Ci-dessus,* **les formations mésozoïques** *: corniche calcaire du Turonien (Crétacé supérieur) des monts Cantabriques.*

◀ *Page ci-contre, en bas,* **paléogéographie de l'Europe au maximum de la transgression triasique** *(Keuper) : 1, continents sans dépôts ; 2, domaine continental (grès rouges) souvent lagunaire au Keuper ; 3, domaine du Trias germanique ; 4, domaine du Trias alpin ou mésogéen ; 5, limite d'extension des faciès rouges continentaux ; 6, limite d'extension de la mer au Keuper ; 7, limite entre les domaines germanique et alpin (ou mésogéen). On notera la position des presqu'îles de Londres-Brabant et Centralienne, qui jouent un grand rôle paléogéographique au Mésozoïque.*

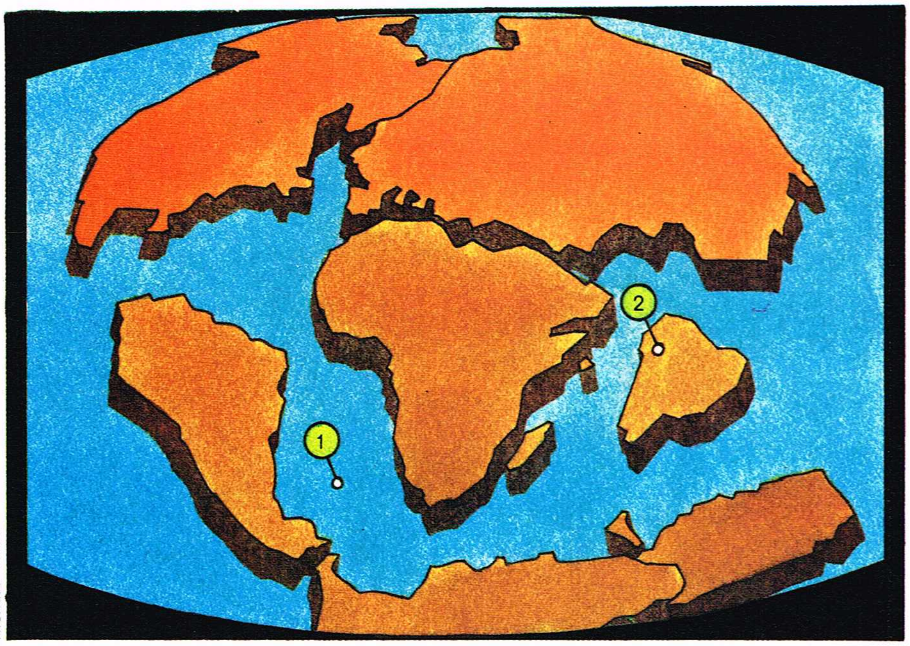

Richard Colin

▲ ***Le* monde à la fin du Crétacé (vers 65 M. A.)** [*d'après Dietz et Holden*]. ***L'Atlantique Sud est désormais largement ouvert, mais l'Atlantique Nord n'a pas encore réussi sa percée vers le nord. En passant au-dessus du foyer volcanique de l'océan Indien (2) l'Inde se charge de basalte (trapps de Deccan).***

émergés), et la *province méditerranéenne* avec des mers plus chaudes, plus profondes, caractérisées par une sédimentation continue. *Le continent saharien* (partie septentrionale du Gondwana) subit, au Cénomanien, l'unique transgression marine de son histoire géologique.

En Amérique, au Crétacé inférieur, on peut distinguer un faciès continental *(formation du Potomac)*, un faciès marin épicontinental *(Comanchien)* et un faciès marin profond *(Knoxville-Beds)*. Au Crétacé supérieur, à la suite d'une transgression, les différences sont moins marquées, et cette période se termine avec la puissante *série lacustre de Laramie,* riche en restes de dinosaures.

Ère cénozoïque, ou Tertiaire

L'ère cénozoïque (du grec : καινός = récent et ζῷον = vivant), ou Tertiaire, ou encore ère des Mammifères, doit son nom au fait que c'est pendant ce temps que sont apparus, ou ont connu un grand développement, les groupes d'organismes annonçant les groupes actuels : Gymnospermes, Monocotylédones, Oiseaux et Mammifères. Elle a une durée d'environ 60 millions d'années.

▼ ***Tableau récapitulatif des subdivisions de l'ère* cénozoïque, *ou* Tertiaire.**

SUBDIVISIONS DE L'ÈRE TERTIAIRE

Systèmes ou périodes	Époques	Étages	Phases tectoniques (orogenèse alpine)
	2 MA		valache = valaque ou pasadénienne
NÉOGÈNE	PLIOCÈNE (pleios : plus)	*Plaisancien*	
	5 MA		rhodanienne
	MIOCÈNE (meios : moins)	*Messinien (Pontien)*	attique
		Tortonien	
		Helvétien	styrienne
		Burdigalien	
		Aquitanien	
	25 MA ?		save
	OLIGOCÈNE (oligos : peu)	*Stampien*	
		Sannoisien	helvète
	37 MA ?		pyrénéo-provençale
PALÉOGÈNE OU NUMMULITIQUE	ÉOCÈNE (eos : aurore)	*Ludien*	
		Marinésien	pré-pyrénéenne ou illyrique
		Auversien	
		Lutétien	
		Yprésien	
	55 MA		
	PALÉOCÈNE (palaeos : ancien)	*Thanétien*	
		Montien	
		Danien	
	65 MA		laramienne ou arvinche

Le phénomène important à signaler est la disparition, à la fin du Mésozoïque, des grands Reptiles (qui ont caractérisé l'ère précédente) et la rapide évolution des Mammifères, ayant déjà derrière eux une longue évolution car ils sont dérivés des Reptiles Thériodontes au Trias, et qui, dès la fin du Paléocène, se différenciaient en Marsupiaux et Placentaires, avec de nombreuses formes à évolution rapide et de durée assez brève. Parmi les Foraminifères, il faut noter la famille des Nummulites, très répandue au Cénozoïque inférieur, dans la Téthys ainsi que l'océan Indien ; pour cette raison, le Paléogène est aussi appelé Nummulitique, spécialement en France.

Au Tertiaire, l'activité orogénique a été très intense. Le phénomène le plus imposant est l'*orogenèse alpine* qui, en plusieurs phases, a formé la plupart des massifs montagneux actuels. Certains massifs avaient déjà été plissés au Mésozoïque, mais le phénomène a continué pendant le Tertiaire et, dans certaines régions, les déformations sont encore actives (îles Aléoutiennes, chaînes côtières de la Californie et Andes chiliennes). D'autres reliefs, comme les chaînes du système alpino-himalayen (Pyrénées, Atlas, Alpes, Apennins, Alpes dinariques, Carpates, Asie Mineure, Caucase, Himalaya, monts de l'Inde orientale, de la Birmanie, du Japon, de la Nouvelle-Guinée et de la Nouvelle-Zélande), sont en majorité, ou entièrement, consécutifs à cette tectonique. Le grand système de fractures de l'Afrique orientale s'est également formé au Tertiaire. Les phénomènes orogéniques ont été accompagnés d'une activité magmatique intense, comme les grandes effusions de laves d'Afrique orientale, les phénomènes néovolcaniques du Massif central, de la mer Égée, d'Asie Mineure, d'Inde orientale, du Japon, de la Nouvelle-Zélande, des Andes et d'Amérique du Nord.

Paléogène (—65 à —25 M. A.)

Sous le nom de Paléogène sont réunies les périodes *Paléocène, Éocène* et *Oligocène,* lesquelles sont caractérisées (excepté la base du Paléocène) par l'abondance des Nummulites dans les sédiments marins. Au Paléocène, la paléogéographie est d'abord semblable à celle de la période précédente ; mais à l'Éocène commence à s'effectuer une *inversion de relief* (là où existaient les plus grandes profondeurs, se créent les plus grands reliefs) ; c'est le début des grandes chaînes du *plissement alpino-himalayen* (chaînes pyrénéo-provençales, cordillères nord-américaines, Andes). A l'Oligocène, le phénomène se poursuit et la physionomie des terres émergées se rapproche de l'actuelle à la suite du soulèvement alpin (Alpes — où se produisent aussi les grands phénomènes de chevauchement — dorsales apennines, Atlas, Himalaya, etc.) ; celui-ci, outre qu'il donne à l'Europe une configuration semblable à l'actuelle, permet aussi la réunion de la plate-forme indienne et du continent asiatique. On assiste également au démembrement du continent nord-atlantique, ce qui complète un cadre paléogéographique se rapprochant de l'actuel.

Les dépôts paléogènes de l'Europe du Centre et du Nord sont de types continental et épicontinental marin avec des alternances locales. Dans de vastes zones d'Allemagne et de Russie, la transgression marine s'observe seulement au début de l'Oligocène ; en France, les dépôts les plus significatifs sont les dépôts à Nummulites du Bassin parisien (où il y a des alternances de sédiments marins et continentaux), les gisements et les phosphorites du Quercy avec d'abondants restes de Mammifères fossiles. Dans le Bassin méditerranéen, les dépôts présentent des faciès essentiellement marins soit de type flysch, soit néritiques organogènes (calcaires coralligènes, calcaires à Nummulites), soit encore terrigènes (grès, sables, argiles). Dans l'Atlas, les Alpes orientales, l'Apennin central, le Paléocène se présente avec un faciès flysch. Dans les Préalpes, la Vénétie (dont les dépôts à Poissons du Monte Bolca sont célèbres), ce sont les faciès calcaires organogènes et marneux qui prédominent.

On trouve des dépôts épicontinentaux dans le Bassin saharien, des phosphates au Maroc, des calcaires à Nummulites et des dépôts fluvio-marins avec une faune à Mammifères en Égypte. En Asie, ce sont les dépôts

continentaux qui dominent, mais en Inde et en Indonésie on observe des dépôts marins à Nummulites et Lépidocyclines avec une régression générale vers la fin de la période. En Amérique, on distingue des domaines naturels divers : les côtes atlantiques et régions côtières du nord du golfe du Mexique avec des sédiments épicontinentaux non plissés ; les Antilles et les chaînes pacifiques avec des dépôts de type géosynclinal plissés ; le Mid-continent avec des dépôts typiquement continentaux caractérisés par des faunes de Mammifères.

L'activité magmatique est caractérisée par la mise en place de grands batholites dans les Andes et au Nouveau-Mexique, des éruptions labradoritiques et andésitiques dans les Carpates ainsi qu'à proximité de la mer Noire, et des éruptions liparitiques en Algérie, microgranitiques en Tunisie. Il faut aussi rappeler les éruptions basaltiques de la région de Vicenza (Italie).

Le climat de l'Europe tend à se différencier. On distingue : un climat tropical (par exemple, les formations coralligènes de Vénétie, les palmiers de la région de Vicenza, les Poissons de Bolca, semblables aux formes tropicales actuelles), un climat tempéré aux latitudes élevées, et, dans les zones continentales, un climat désertique.

Néogène (—25 à —2 M. A.)

On réunit sous la dénomination de *Néogène* le *Miocène* et le *Pliocène*, par lesquels se termine l'ère cénozoïque. Cette période débute (quoique cela ne se produise pas de façon simultanée sur tout le globe) par une transgression suivie d'une régression à la fin du Miocène. Au Pliocène, une nouvelle transgression se produit dans le Bassin méditerranéen, tandis que dans l'est de l'Europe et dans l'ouest de l'Asie, le cycle s'arrête au Miocène, avec un développement de faciès saumâtres et lacustres. Les dépôts les plus caractéristiques sont : la *molasse* (bassin suisse) et le *Nagelfluh* (dépôts deltaïques à conglomérats) du Miocène inférieur ; le *Sarmatien* (formations lagunaires) et le *Pontien* (formations lacustres à congéries [Mollusques Bivalves]) du Miocène supérieur ; de telles formations sont particulièrement développées dans le bassin de Vienne et dans l'Europe orientale. Les dépôts himalayens des Siwaliks sont intéressants pour leurs riches faunes de Mammifères contemporaines de celles de Pikermi (Athènes) et de Samos en Méditerranée, ainsi que de celles du Mid-continent et de l'ouest des États-Unis. Au Pliocène, il faut noter : les sables marins de Belgique, de Hollande et d'Angleterre *(crags)*, avec des Mollusques de type arctique ; les faciès saumâtres et lacustres du centre et de l'ouest de l'Europe, de Russie et d'Asie occidentale, qui prolongent les conditions déjà mises en place au Miocène supérieur. Citons aussi la *formation des gypses soufrés* du Miocène supérieur d'Italie, qui s'étend tout le long des Apennins et en Sicile ; elle est suivie par les *marnes bleues* du Plaisancien et les *sables jaunes* de l'Astien (ces deux faciès sont marins) sur lesquels, à la fin de la période, se sont formés les dépôts ligniteux à Vertébrés (Valdarno, Ombrie, etc.) de faciès continental.

L'orogenèse alpine continue, avec un maximum vers la fin du Miocène et des reprises de mouvements au Pliocène. On observe des phénomènes analogues dans les cordillères nord-américaines, dans les Andes, l'Atlas, l'Himalaya et en Indonésie, tandis que du Taurus à l'Afrique australe se crée un grand système de fractures et qu'en Amérique, les îles des Antilles se morcèlent. Au début du Miocène, la mer entre dans la vallée du Rhône *(dépression périalpine)*, le long du bord externe des Alpes, désormais émergées. A cette époque, la Méditerranée communique encore avec l'océan Atlantique et l'océan Indien, mais vers la fin se crée une séparation entre les Méditerranées occidentale et orientale (cette dernière, présentant des caractères saumâtres, s'étendait de la mer Noire à la mer d'Aral, et était bordée de grands lacs). Puis, successivement, se ferment les détroits nord-bétique et sud-riféen et s'ouvre celui de Gibraltar. En Amérique, l'émersion de l'Amérique centrale met fin à la communication primitive entre le Pacifique et l'Atlantique. Les lacs salés et les lagunes sont fréquents en Europe orientale et en Asie occidentale et persistent pendant tout le Pliocène.

Aux mouvements orogéniques sont associées des manifestations magmatiques avec une activité volcanique

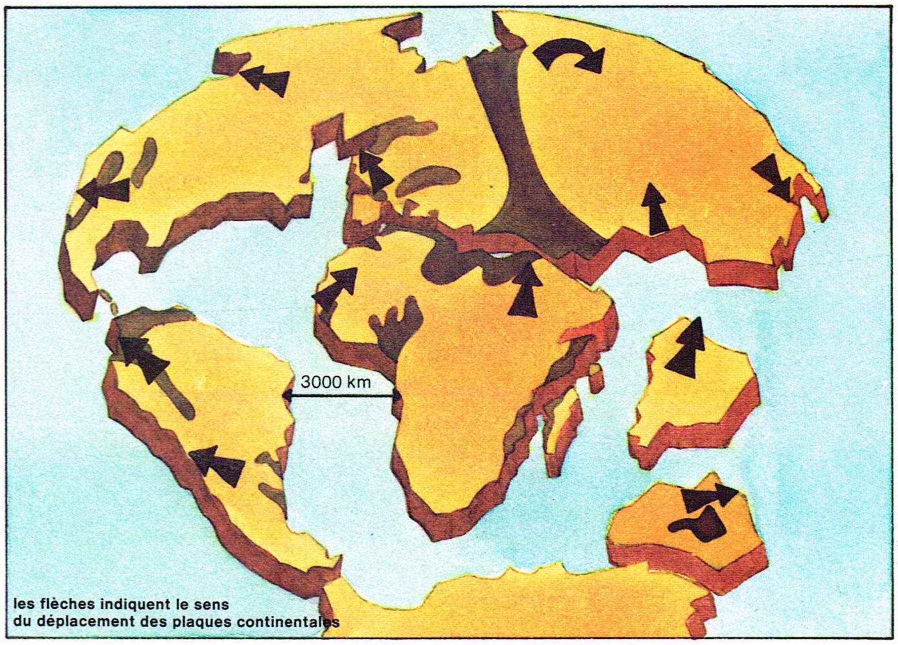

intense (maximum au Pliocène) dans le Massif central, les Carpates, l'Amérique du Nord, les îles et les côtes de Méditerranée occidentale. En Italie, l'activité volcanique est intense (région phlégréenne, Roccamonfina, Ernici), mais atteindra son maximum au Pléistocène.

Le climat présente un refroidissement sensible par rapport au Paléogène, comme en témoignent la flore et la faune continentales, mais toujours avec une température supérieure à celle qui y règne actuellement.

Ère néozoïque, ou Quaternaire

L'ère néozoïque (du grec : νέος = nouveau et ζῷον = vivant), ou Quaternaire, ou encore ère de l'homme, est ainsi nommée car sa flore et sa faune sont constituées de groupes toujours vivants (ou de leurs descendants immédiats) ; elle est dite aussi *anthropozoïque* du fait de l'apparition ou, du moins, de la diffusion de l'homme. Selon les données les plus récentes, la durée de cette ère devrait se situer autour de 2 millions d'années ; sa brièveté empêche les chercheurs d'utiliser pour déterminer les subdivisions les méthodes classiques de la stratigraphie.

▲ ***Le monde au début du Tertiaire** (d'après Dietz et Holden). L'Atlantique Nord s'est ouvert entre Gibraltar et Terre-Neuve. Madagascar est séparée de l'Afrique, par contre l'Arabie lui est soudée et l'Inde n'a pas encore rejoint le continent asiatique. La plus importante des mers épicontinentales, la mer Ouralienne, sépare l'Europe de l'Asie jusqu'à la fin de l'Oligocène, tandis qu'au Paléocène un bras de mer prend en écharpe le continent africain.*

▼ ***Les formations tertiaires** : stratification régulière dans le flysch Éocène de Guetaria (Espagne du Nord).*

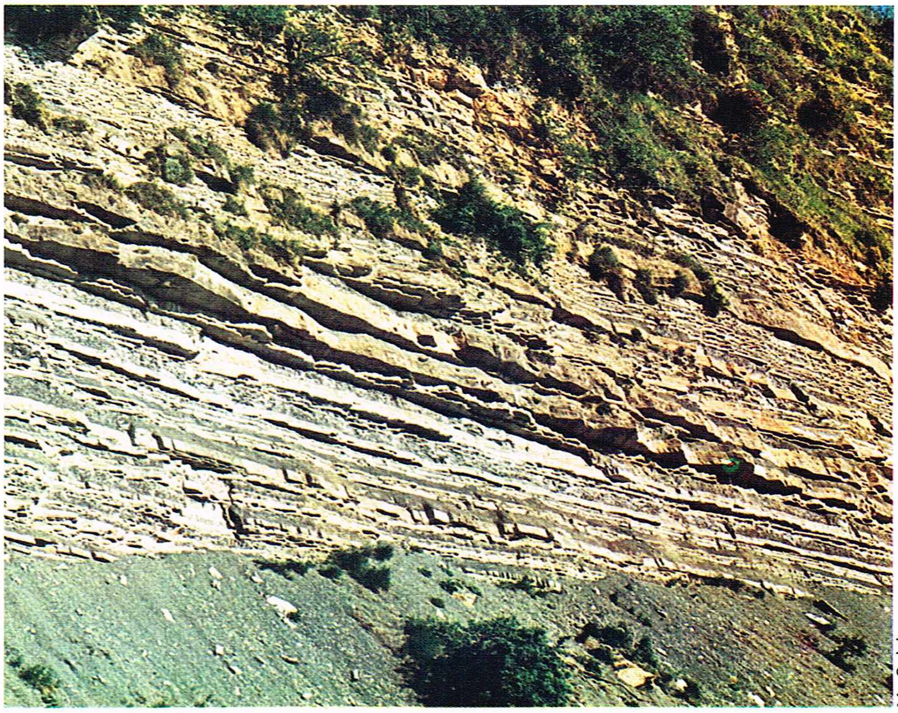

▶ *Tableau récapitulatif des subdivisions de l'ère* **néozoïque,** *ou* **Quaternaire.**

SUBDIVISIONS ET CARACTÉRISTIQUES DE L'ÈRE QUATERNAIRE

Époques	Étages marins	Séquences climatiques et glaciations
HOLOCÈNE	*Dunkerquien*	ACTUEL SUB-ATLANTIQUE
		SUB-BORÉAL
	Flandrien = Versilien	ATLANTIQUE (optimum climatique)
		BORÉAL
10 000 ans	Régression grimaldienne — 100 m	WURM I à IV = VISTULE = WISCONSIN comprenant 3 interstades
	Tyrrhénien II = Eemien = Normannien	RISS-WURM
100 000 ans		RISS = SAALE = ILLINOIS
PLÉISTOCÈNE	*Tyrrhénien I = mer du* Holstein (faune chaude)	MINDEL-RISS
		MINDEL = ELSTER = KANSAS et interstades
0,5 MA		GUNZ-MINDEL
1 MA	*Sicilien* (faune froide)	GUNZ et interstades
1,6 MA	*Calabrien* (faune froide)	DONAU-GUNZ DONAU ?
2 MA		

Par contre, les fossiles fournissent des indications fondamentales pour définir la paléoclimatologie (par exemple, les faunes marines froides et chaudes).

Le Quaternaire est généralement subdivisé en deux périodes : Pléistocène et Holocène; le début de cette dernière se situe environ 10 000 ans avant J.-C. (données basées sur la méthode du radiocarbone) et coïncide avec la disparition des grandes calottes glaciaires.

En dehors de la diffusion explosive des hominiens, cette ère est marquée par les grandes *expansions glaciaires* qui ont recouvert une vaste portion de l'hémisphère boréal. En Europe, on connaît les traces de cinq glaciations : le *Donau,* le *Günz,* le *Mindel,* le *Riss* et le *Würm.* En France, ces différents épisodes ont été reconnus notamment dans les dépôts fluvio-glaciaires du Bas-Dauphiné. Chacune de ces phases est séparée de l'autre par des périodes chaudes, ou *interglaciaires,* où les glaciers se retirent.

Diverses hypothèses ont été émises sur les causes des glaciations. Aujourd'hui, on a tendance à admettre, surtout en se basant sur les études de Milankovitch, qu'elles sont dues en grande partie à des causes astronomiques. Les plus grandes manifestations du développement des glaciers se sont produites dans l'hémisphère boréal, où se trouvaient deux énormes calottes continentales (Amérique du Nord et partie médiane de l'Europe septentrionale). En dehors de ces calottes, les glaciers s'étendaient sur les principales chaînes montagneuses (dont les Alpes) et dans certaines zones de Sibérie. Les *mouvements eustatiques* sont liés aux phénomènes glaciaires; en effet, pendant les phases glaciaires, le niveau marin devait nécessairement s'abaisser, tandis qu'il remontait pendant les phases interglaciaires (pour l'Adriatique, la variation de niveau a été calculée, elle était de 100 m environ). Les *mouvements isostatiques* de la croûte terrestre sont également une conséquence de la fusion des calottes glaciaires; la Scandinavie en est un exemple classique : un abaissement de plus de 500 m s'y est produit sous le poids des glaciers (épais de plus de 2 000 m); elle s'est ensuite soulevée à nouveau (phénomène encore actuel) lors de leur fusion.

La paléogéographie du Néozoïque correspondait pratiquement à l'actuelle; l'orogenèse alpine avait dépassé sa phase paroxysmale et les mouvements orogéniques de tassement ne modifiaient pas la physionomie désormais acquise des continents et des océans. Les manifestations magmatiques furent intenses dans de nombreuses régions du globe; en Europe, on note les centres éruptifs du Massif central, et ceux de l'Italie péninsulaire et insulaire : côtes de la Toscane et du Latium (mont Amiata, Tolfa), groupe du Latium et de la Campanie (Bolsena, Bracciano, collines Albani, champs Phlégréens, Vésuve) avec des laves leucitiques, Sicile (Etna) et Sardaigne (monts Arci et Ferru).

Les dépôts quaternaires connus, en fonction des caractères paléogéographiques, sont seulement les dépôts continentaux et épicontinentaux marins. Les dépôts continentaux les plus significatifs sont sans aucun doute ceux d'origine glaciaire (moraines), auxquels s'ajoutent cependant les dépôts fluviaux en terrasses, éoliens (lœss), organiques (lignites, tourbes), etc. Un des problèmes qui se posent pour établir les corrélations entre les divers sédiments quaternaires est celui de la correspondance entre les glaciations et les étages marins qui subdivisent le Pléistocène du Bassin méditerranéen (Calabrien, Sicilien, Tyrrhénien); il en est de même pour les dépôts analogues des autres parties du globe. Les sédiments marins sont essentiellement représentés par des sables et des argiles fossilifères à Mollusques et Foraminifères, qui, avec la diversité des genres, témoignent de l'alternance des mers froides (*Cyprina islandica, Mya truncata, Trichotropis borealis, Anomalina balthica,* etc.) et chaudes (*Strombus bubonius, Mytilus senegalensis, Tritonidea viverrata,* etc.). En Scandinavie, en se basant sur l'étude des *varves* (alternances de couches minces, déposées dans les lacs périglaciaires, distinctes par les couleurs et les dimensions des particules, et dues à l'alternance des saisons), il a été possible d'établir une chronologie absolue des phénomènes liés aux glaciations avec une précision supérieure à celle du radiocarbone.

La flore est représentée, à quelques rares exceptions près, par des plantes toujours vivantes. Il faut cependant noter

▼ *Le* **fluvio-glaciaire de la Bièvre-Valloire (Bas-Dauphiné).** *Coupe transversale montrant l'emboîtement des dépôts d'une partie du Pliocène et du Quaternaire dans une vallée creusée au Miocène supérieur-Pliocène (Pontien)* [*d'après* F. Bourdier].

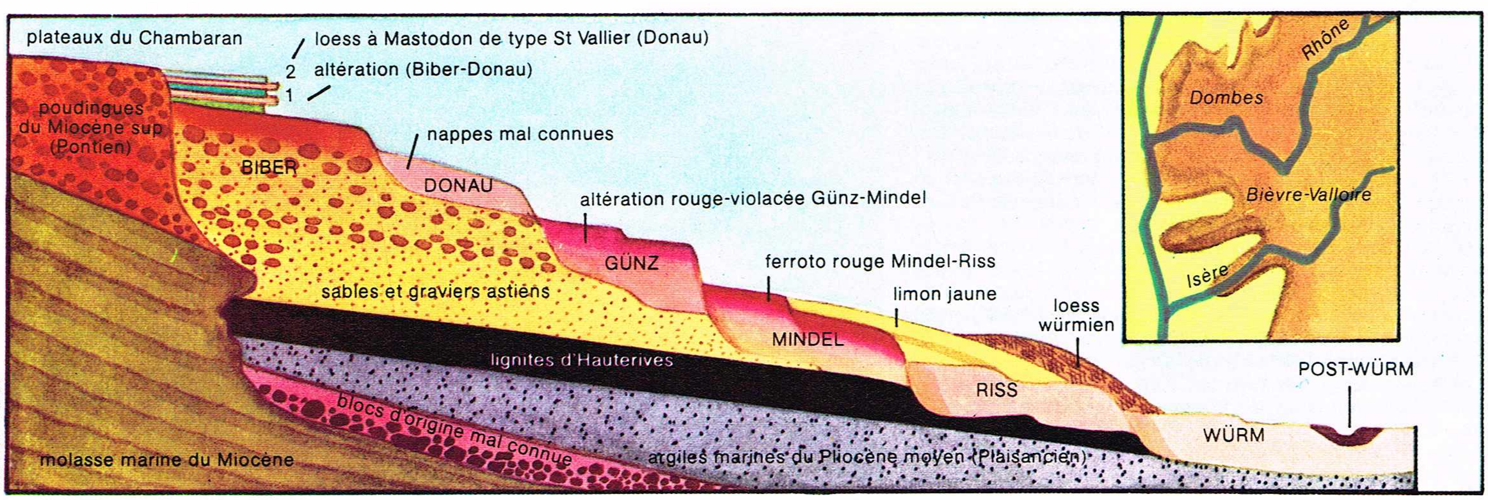

Richard Colin

M. Colchen

▲ ***Les formations** quaternaires continentales dans l'Himalaya du Népal : au nord de la haute chaîne himalayenne, la Kali Gandaki a creusé sa vallée dans les formations quaternaires fluvio-lacustres constituant les terrasses visibles au second plan. Celles-ci sont établies dans une ancienne vallée creusée dans des formations tertiaires continentales (formations rosâtres de l'arrière-plan), et l'ensemble des séries sédimentaires paléozoïques et mésozoïques (reliefs visibles à gauche).*

qu'il existe des alternances de flores « froides » et « chaudes », qui sont en relation avec les variations climatiques caractérisant cette ère. La conséquence en est la présence actuellement en Europe méridionale d'espèces vivant seulement dans les zones subarctiques ou dans les Alpes et, inversement, celle d'espèces subtropicales en Europe septentrionale (par exemple, *Rhododendron ponticum*). L'analyse des pollens fossiles (palynologie), qui permet la reconstitution des associations phanérogamiques, a beaucoup d'importance pour l'étude des fluctuations climatiques.

La faune, outre les formes actuelles, présente aussi des espèces et des genres complètement éteints. Comme pour la flore, on note une alternance de faunes « froides » et « chaudes », soit en milieu marin comme cela a déjà été signalé, soit en milieu continental. Durant les interglaciaires, les animaux de type tropical *(Elephas antiquus, Rhinoceros meridionalis, Hippopotamus amphibius)* s'avancent vers le nord de l'Europe. Par contre, pendant les périodes glaciaires, les formes « froides » se répandent; parmi les Éléphantidés, on trouve d'abord *Elephas trogontherii* et le mammouth *(Elephas primigenius)*, recouvert d'une toison épaisse, qu'accompagnent le rhinocéros laineux *(Rhinoceros antiquitatis)*, le renne *(Rangifer tarandus)* et de nombreux autres animaux de type boréal ou alpin. Parmi les autres formes éteintes de la faune européenne, rappelons : *Megaceros euryceros, Elasmotherium, Bos primigenius, Ursus spelaeus*, etc. La faune d'Amérique du Nord présente des caractères particuliers car les formes pliocènes (*Mastodon americanus, Smilodon*, etc.) y persistent plus longtemps qu'en Europe. En Amérique du Sud, elles persistent encore plus : on observe des espèces autochtones de grandes dimensions *(Megatherium, Mylodon, Glyptodon*, etc.), que l'immigration de faunes nord-américaines fait disparaître.

L'ère quaternaire est caractérisée par la présence des hominiens, dont on fait dériver l'origine d'un rameau du tronc des singes anthropomorphes de l'Oligocène. Au Pliocène, cette branche se serait subdivisée en deux, donnant les grands singes fossiles du Quaternaire *(Australopithecus, Plesianthropus, Paranthropus)* et les préhominiens *(Pithecanthropus, Atlanthropus, Sinanthropus)* de la base du Quaternaire. Selon l'opinion la plus répandue, l'homme n'apparaîtrait qu'au Quaternaire moyen : *Homo neandertalensis*. Il se répand en Europe, en Afrique et en Amérique, d'abord accompagné, puis remplacé par l'*Homo sapiens*. Ce dernier est représenté par des individus possédant déjà les traits essentiels des grandes races humaines, qui se sont ensuite différenciées en races blanche (homme de Cro-Magnon), mongoloïde (homme de Chancelade) et négroïde (homme de Grimaldi). De récentes découvertes semblent reculer l'apparition de l'homme. De nombreux témoignages de l'activité de l'homme nous sont parvenus grâce aux outils et aux armes qui, selon le type de travail, permettent de diviser la préhistoire en deux parties : celle de la pierre grossièrement taillée *(Paléolithique)* et celle de la pierre polie *(Néolithique)*, chacune étant subdivisée en fonction des caractères typiques du travail et des matériaux employés.

BIBLIOGRAPHIE

AZZAROLI A., CITA M. B., *Geologia stratigrafica*, 3 vol., La Goliardica, Milan, 1963-1967. - DEBELMAS J., *Géologie de la France*, t. I : *Vieux Massifs et Grands Bassins sédimentaires;* t. II : *les Chaînes plissées du cycle alpin et leur avant-pays*, Doin, Paris, 1974. - FOURMARIER P., *Principes de géologie*, Masson, Paris-Liège, 1949. - HAMILTON E. T., *Applied Geochronology*, Academic Press, Londres-New York, 1965. - HOLMES A., *The Construction of a Geological Timescale* in *Trans. Geol. Soc. Glasgow*, v. 21, Glasgow, 1947. - MOORE R. C., *Introduction to Historical Geology*, Mc Graw-Hill, New York-Toronto-Londres, 1958. - POMEROL Ch., *Stratigraphie et Paléogéographie : Ère mésozoïque; Ère cénozoïque (Tertiaire et Quaternaire)*, Doin, Paris, 1973-1974. - POMEROL Ch., *Guides géologiques régionaux de la France*, Masson, Paris. - RUTTEN M. G., *The Geological Aspects of the Origin of Life on Earth*, Elsevier, Amsterdam-New York, 1962. - STRAKHOV H. M., *Principles of Historical Geology*, Jérusalem, 1962. - TERMIER H., TERMIER G., *Histoire géologique de la biosphère*, Masson, Paris-Liège, 1952. - ZEUNER F. E., *Dating the Past. An Introduction to Geochronology*, Methuen, Londres, 1950.

C. Bevilacqua

▶ *La fossilisation est l'ensemble des processus physico-chimiques qui conduisent les organismes vivants, par accumulation, mort et enfouissement, à l'état dans lequel nous les trouvons dans les gisements fossilifères; ici une dalle portant plusieurs exemplaires de* Rhynchonella sp., *petits Brachiopodes Articulés du* Carbonifère, *en Angleterre.*

PALÉONTOLOGIE

Dès l'Antiquité, les fossiles (vestiges laissés par les êtres vivants dans les séries géologiques) furent considérés comme des restes d'anciens organismes ; cependant, cette opinion était loin de faire l'unanimité à cette époque. L'influence des idées d'Aristote (384-322 av. J.-C.) se prolongea jusqu'au Moyen Age et jusqu'au début de la Renaissance, sans que des progrès manifestes eussent lieu dans ce domaine.

Au XVI^e^ siècle, comme au temps d'Aristote, on considérait les fossiles le plus souvent non comme des sujets d'étude scientifique, mais comme des objets de curiosité et d'étonnement, ou encore de collections, ce qui donnait d'ailleurs lieu à des iconographies souvent remarquables (celle de Georges Bauer, dit Agricola : *De natura fossilium* [1546] comporte plus de mille figures, minéraux y compris). On parlait aussi de « jeux de la nature » ou de « pétrifications » qui auraient spontanément pris naissance au sein d'une « boue originelle », sous l'influence d'une mystérieuse Force créatrice. Les fossiles étaient aussi considérés comme les témoins du Déluge universel : ainsi pensaient les partisans de la théorie diluvienne.

Cependant, pour certains esprits éclairés, tels Léonard de Vinci (1452-1519), Jérôme Fracastoro (1483-1553) et Bernard Palissy (1510-1590), il s'agissait bien de restes d'organismes. Mais la distinction de ces organismes avec les espèces actuelles fut plus longue à établir. Nicolas Sténon (1638-1686) percevait déjà l'existence de plusieurs mondes successifs disparus; vers 1780, Georges Louis Leclerc de Buffon (1707-1788) exprimait l'idée d'espèces « perdues » (ou disparues).

A cette période essentiellement descriptive succéda ce que l'on peut appeler la période prédarwinienne. William Smith (1769-1839) conçut les bases mêmes de la stratigraphie et le rôle que les fossiles pouvaient jouer dans l'établissement des synchronismes en utilisant les successions de fossiles comme moyen de corrélation à distance. A peu près en même temps, Léopold von Buch (1774-1832) introduisit la notion de fossile « directeur » (ou guide). Georges Cuvier (1769-1832) peut être considéré comme le créateur de la paléontologie moderne, grâce à ses travaux sur l'anatomie comparée des Vertébrés fossiles : *Recherches sur les ossements fossiles* (1812). C'est à la même époque que le terme *paléontologie* fut utilisé pour la première fois, et cela à peu près simultanément par Ducrotay de Blainville en 1825 dans son *Manuel de malacologie et conchyliologie*, Fischer de Waldheim et Brongniart. D'ailleurs, dès 1832, d'Archiac proposait le terme de *paléobiologie*. Jean-Baptiste de Lamarck (1744-1829) amorça de son côté la série des grandes monographies, qui allaient devenir si florissantes dans la première moitié du XIX^e^ siècle et tant servir à la stratigraphie. A côté de Cuvier, essentiellement fixiste, Lamarck fut aussi, avec Geoffroy Saint-Hilaire (1772-1844), un précurseur de la théorie transformiste, bien que le concept évolutionniste ne s'épanouisse que pendant la période suivante, qui débute avec la publication de *l'Origine des espèces* (1859) de Charles Darwin (1809-1882).

Darwin substitue aux états statiques de la vie la notion de dynamisme, de changements continus dans un espace-temps géologique. Les relations entre les études monographiques de fossiles et celles des groupes actuels correspondants se précisent, en même temps que les spécialisations se font de plus en plus strictes et nombreuses. La paléontologie se développe et s'accompagne d'une utilisation pratique, notamment dans la prospection

pétrolière et minière. Les techniques paléontologiques se multiplient tant pour les récoltes et les études de terrain que dans la préparation et surtout l'observation des fossiles. Au cours de la période actuelle (qualifiée d'écologique ou de biologique ou contemporaine), un mouvement se dessine dans le sens d'une étude écologique des fossiles.

Notion de fossile

Le nom de fossile vient du latin *fossilis* = qui est extrait de la terre. Le terme recouvrait à l'origine des notions très variées : il s'agissait aussi bien de restes d'organismes que de minéralisations, ou encore de pétrifications et autres artefacts. Leur étude ne prenait pas toujours en considération leur état de conservation. De nos jours, si le sens du mot est limité, il englobe encore des domaines très divers : il désigne tous les restes d'organismes, y compris les traces de leur activité. Les restes se présentent sous plusieurs aspects. Les parties dures du corps sont plus ou moins bien conservées (minéralisations, etc.). Lorsqu'elles sont dissoutes, le corps ou certaines parties de l'animal peuvent laisser des empreintes *(moule externe)*. Quand l'organisme possède des cavités creuses et une coquille épaisse, il peut y avoir un remplissage de ces cavités *(moule interne)* par le sédiment environnant. Dans d'autres cas, on a un mélange d'ornementations externes et internes (palimpsestes) et, dans le cas de fossiles très plats (fèuilles, ailes d'Insectes), des empreintes ou impressions proches d'un moule externe.

Au cours de la diagenèse, certains fossiles ont été conservés dans des milieux favorables : glace (mammouth de Sibérie), asphalte (rhinocéros de Galicie), ambre (Insectes de l'Oligocène de la Baltique), calcaires lithographiques (*Archaeopteryx*, libellules de Solenhofen), lœss (bisons). Quant à la silicification du bois, elle peut être interprétée comme une pseudomorphose (remplacement de la substance organique par de l'inorganique pouvant être accompagné d'une recristallisation de squelette). Enfin, quelquefois, des substances organiques comme la chitine, la conchyoline, les pigments (chez les Brachiopodes, les coraux...) sont conservées chez les fossiles. Les pistes diverses (chez *Chirotherium* par exemple), traces de logement, perforations, témoignent de l'activité des fossiles. Les « fossiles vivants » (*Ginkgo, Neopilina, Latimeria,* etc.), qui ont peu évolué par rapport à leurs ancêtres, représentent un cas intéressant d'organismes.

Au cours de la fossilisation, les fossiles subissent un certain nombre de transformations qui les conduisent, après enfouissement plus ou moins rapide dans le sédiment, à leur état actuel (voir le paragraphe consacré à la *fossilisation*).

A côté des *macrofossiles,* fréquemment rencontrés, sont susceptibles d'être conservés dans les sédiments : d'une part, des fossiles microscopiques, ou *microfossiles* (taille : 10 μm), comme la plupart des Foraminifères, les Radiolaires, les Ostracodes, les Diatomées, ainsi que les spores et les grains de pollen ; d'autre part, les restes de très petits organismes à éléments squelettiques microscopiques, comme les spicules d'Éponges, les fragments de Cœlentérés, ou encore les stades précoces de croissance de fossiles, de groupes d'organismes plus importants (Mollusques...). Les otolithes, les écailles de Poissons, les dents et les os de petits Mammifères se rattachent aussi au groupe des microfossiles (dont la science est la *micropaléontologie*).

Les *nanofossiles* sont de très petits microfossiles (10 mμ de moyenne), comme les Coccolithes, les Hystricosphères, les Chitinozoaires, les Algues unicellulaires.

L'utilisation des *fossiles caractéristiques,* ou *fossiles repères* (Ammonites, Graptolites, Foraminifères), ou de leurs associations, permet l'établissement de corrélations entre les étages stratigraphiques de niveau géologique déterminé et la délimitation de provinces biogéographiques.

Les *fossiles de faciès,* les Foraminifères par exemple, renseignent sur la nature des conditions physico-chimiques et écologiques du milieu environnant (par exemple, faciès schisteux ou coquillier).

La fossilisation

La fossilisation est l'ensemble des processus physico-chimiques (biologiques et sédimentologiques) qui conduisent les organismes vivants (biocénose), par accumulation, mort (thanatocénose) et enfouissement, à l'état dans lequel nous les trouvons dans les gisements fossilifères (oryctocénose). L'étude de la formation des gisements fossilifères est l'objet de la *taphonomie* (Efremov, 1940), terme provenant de *taphos* = funérailles et de *nomos* = loi.

Les fossiles nous renseignent sur les faits biologiques qui sont intervenus au cours de la fossilisation. Les faits sédimentologiques qui accompagnent ces faits biologiques doivent aussi être pris en considération. La

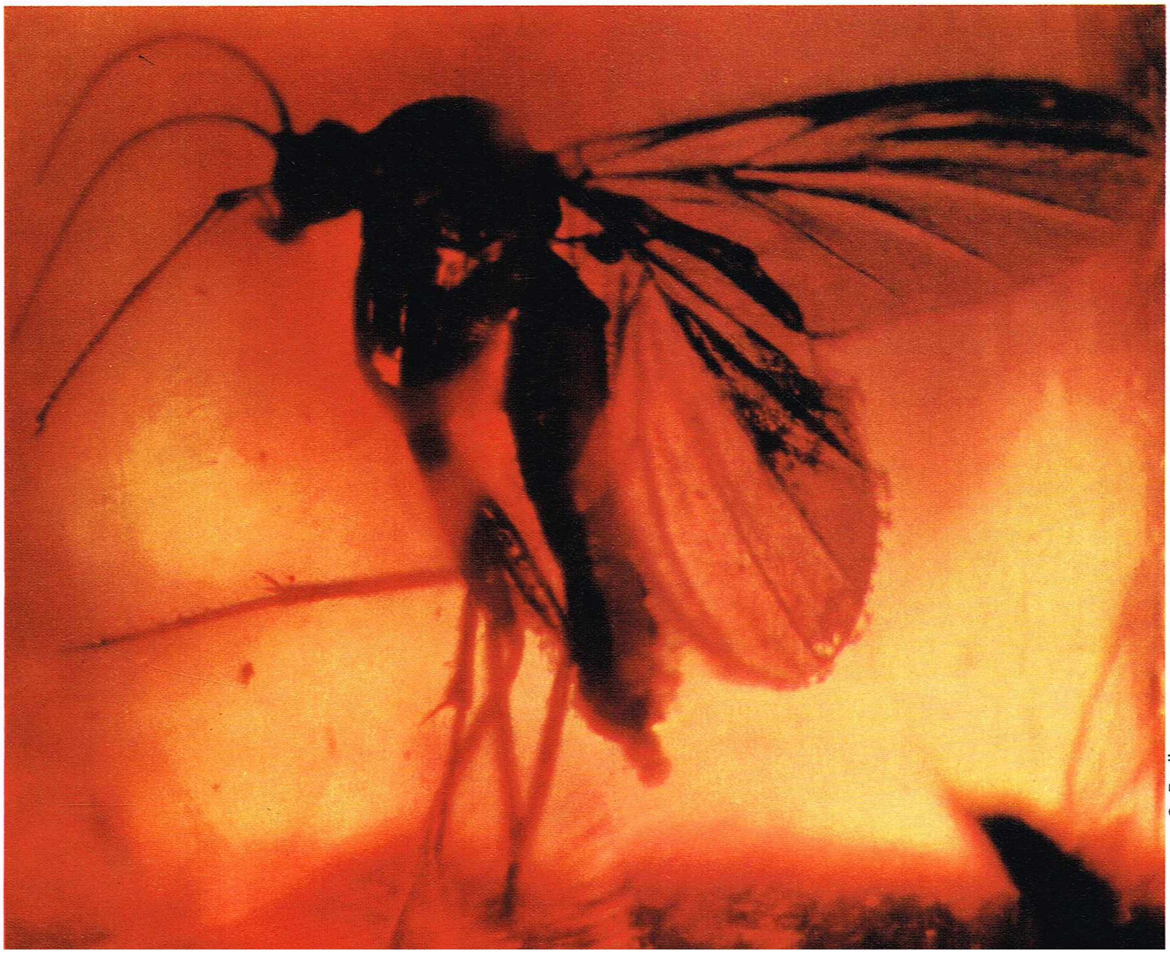

C. Bevilacqua

◀ ***Au cours de la diagenèse, certains fossiles ont été conservés dans des milieux favorables; ici un Insecte de l'Oligocène de la Baltique (Samland) parfaitement conservé dans de l'ambre.***

▲ *Sections naturelles d'Acteonella sp., du Crétacé supérieur (Autriche); on notera la façon dont le sédiment en a rempli les cavités.*

disposition des fossiles dans un gisement témoigne de l'histoire et de la signification du gisement. Quand le fossile se trouve à l'emplacement même où l'organisme a vécu, il est en *position primaire* ou *autochtone* (huîtres fixées sur un substrat à la base des couches par exemple). Si le lieu d'enfouissement ne coïncide ni avec le lieu de vie ni avec celui de la mort, l'organisme est en *position subprimaire* ou *allochtone*. Enfin, après l'enfouissement, il peut y avoir des changements de position ou de situation : la *position* est dite alors *secondaire*.

Les fossiles sont souvent répartis de façon variable; cependant, des renseignements nous sont fournis par les accumulations d'organismes : certains niveaux d'une richesse particulière (otolithes de Poissons) témoignent d'une concentration et d'une sélection d'une partie privilégiée de l'organisme.

Au cours de la fossilisation, les phénomènes de transport interviennent à différents moments, l'enfouissement étant plus ou moins rapide. Les corps allongés et aplatis se disposent suivant les plans de stratification mais prennent aussi une orientation préférentielle dans ce plan (rostres de Bélemnites). Les déformations affectent également les fossiles : la comparaison avec les formes correspondantes actuelles montre un changement de contour et de volume dans la disposition des éléments, ces déformations étant dues le plus souvent à des agents mécaniques. Ainsi certains Brachiopodes, dont les valves demeurent en connexion, peuvent montrer des valves avec de nombreuses fractures dans la région de la commissure frontale. Les organismes peuvent être détruits avant, pendant et après la fossilisation (cas des Trilobites métamorphisés).

La part des phénomènes chimiques au cours des processus de fossilisation n'est pas moins importante (échanges internes et externes). Certains éléments chimiques comme le calcium, le phosphore et le silicium jouent un rôle dominant par leur masse. Les Foraminifères et les Corallinacées sont relativement riches en magnésium. D'autres éléments, comme le strontium, dont la teneur est supérieure à celle de la roche encaissante, sont considérés malgré tout comme éléments en trace. L'origine organique de certaines concentrations de carbone est déterminée par l'étude des isotopes du carbone et de l'oxygène. Cependant, c'est le plus souvent la combinaison de ces éléments que l'on considère chez les fossiles. Les carbonates, en particulier le carbonate de calcium, seul ou associé à d'autres composés comme les phosphates, jouent un rôle important dans de nombreux tests et squelettes, sous forme de calcite ou d'aragonite. Généralement, au cours de la fossilisation, l'aragonite se transforme en calcite; cependant, on a retrouvé des tests aragonitiques jusque dans le Permien (nautiloïde). Les phosphates sous forme d'apatite fluorée se trouvent essentiellement dans les os, mais existent aussi chez les Brachiopodes Inarticulés et les Conodontes. Les Diatomées, la majorité des Radiolaires, une partie des Éponges et les Silicoflagellés ont un squelette siliceux, le plus souvent formé d'opale chez le vivant. A côté de la silicification, ou remplacement de la substance organique par pénétration de silice (bois...), existent des phénomènes de pyritisation (Ammonites, Arthropodes) en relation avec le milieu réducteur. Par dosage et par différentes réactions chimiques, on a pu mettre en évidence chez les fossiles la présence d'hydrates de carbone, de lipides, ou encore de substances organiques sous forme figurée comme des cellules du tégument ou des fibres musculaires (lignites de l'Éocène de Geiseltal).

Après la mort des organismes (destruction des parties molles par putréfaction et fermentation sous l'influence d'agents microbiens), commence l'interaction des processus chimiques entre toutes ces substances. Des produits plus simples que les substances d'origine sont libérés; les graisses, les protéines et les glucides disparaissent plus rapidement que les kératines, cutines, résines, etc. Lors de conditions favorables, relativement exceptionnelles, qui sont en relation avec les premiers stades de destruction plus ou moins complète de la substance organique et des changements chimiques concomitants, se produisent des anéantissements brutaux d'organismes et leur accumulation massive (c'est le cas des Poissons notamment). Enfin, certains milieux sont particulièrement favorables à la conservation des organismes (étangs, grottes, fissures, lœss, glace).

Paléoécologie

La paléoécologie (du grec *palaïos* = ancien, *oïkos* = habitation, et *logos* = conception) est l'écologie des organismes du passé. Le terme écologie (d'*Okologie,* terme inventé par E. Haeckel, 1834-1919) désigne l'étude des relations entre les organismes et le milieu environnant (voir éthologie, mésologie, biogéographie). Son histoire se confond avec celle de la paléontologie.

A la fin du XIXe siècle, Kowalevsky donna une orientation paléoécologique à une étude sur les Mammifères du Cénozoïque. En 1912, O. Abel introduisit le terme paléobiologie pour définir l'orientation écologique de la paléontologie des Vertébrés et les recherches sur l'adaptation. Ce terme allait s'étendre et prendre un sens paléoécologique de plus en plus marqué. L. Dollo avait publié, entre-temps, une série de travaux sous le titre de *Paléontologie éthologique*.

La paléoécologie s'occupe des organismes du passé. Elle s'efforce de découvrir leurs modes de vie, de reconstituer les conditions d'existence, de connaître les réactions des organismes les uns par rapport aux autres et avec le milieu ambiant. Elle fait appel à d'autres disciplines, comme la paléophysiologie et la paléobiochimie. Elle se divise en *paléo-autécologie* (réactions des espèces prises isolément dans le milieu) et *paléosynécologie* (réactions de l'association dans son ensemble).

Les différents milieux sont caractérisés par des facteurs abiotiques (physico-chimiques, dynamiques et sédimentologiques) et biotiques (biologiques, organiques). Ainsi, le milieu marin, le plus étudié, est défini par la salinité, la nature du substrat (facteur édaphique), la distance à la côte, la profondeur (facteur bathymétrique), l'agitation, la turbidité, l'éclairement, la température, la composition chimique de l'eau, les gaz dissous, la turbulence et l'upwelling (remontée des eaux profondes). Les individus qui réagissent à ces facteurs sont : oligo-, méso-, polyhyalins, halophiles ou halophobes. Les organismes eurybiontes sont adaptés aux grandes variations d'un facteur; dans le cas contraire, ils sont sténobiontes.

L'étude du système vie-milieu a nécessité la création de termes qui définissent la répartition des organismes (benthos, pelagos, divisé en plancton flottant passif et necton flottant actif). A chaque domaine sont associés des groupements d'êtres vivants, associations, communautés, biocénoses, le milieu correspondant étant le biotope. Selon le *principe de l'actualisme*, les processus géologiques s'accomplissaient dans le passé de la même façon qu'aujourd'hui, si bien qu'à travers l'observation et l'analyse des manifestions actuelles, on peut avoir une juste représentation des événements passés. L'application de ce principe demande toutefois une certaine prudence : certaines espèces ont pu changer de mode de vie. Pour le Tertiaire et le Quaternaire, la comparaison avec les espèces actuelles peut fournir des données valables; mais à mesure que l'on descend dans la série stratigraphique, il faut s'en tenir aux données livrées par le fossile et le sédiment.

L'intérêt des méthodes statistiques et numériques est évident : ainsi, la présence d'une espèce caractéristique d'un milieu donné peut être fondamentale dans la reconstitution de l'environnement. L'examen des fossiles permet d'envisager leur mode de vie; il nous renseigne aussi sur l'habitat. On peut encore faire des considérations sur le dimorphisme sexuel, la paléopathologie, la reproduction, les premiers phénomènes de croissance, l'alimentation et la nourriture. L'ichnologie étudie de son côté les traces laissées par les organismes (habitat, locomotion, repos) qui nous fournissent des indications sur l'écologie et l'éthologie. Enfin, la paléoécologie nous renseigne aussi sur des phénomènes comme le parasitisme, le commensalisme et la symbiose.

Les récifs au cours des temps géologiques

Édifices de mers chaudes, dus à l'activité d'organismes constructeurs (Cœlentérés, Algues), les récifs sont peuplés, selon les époques, d'Éponges, de Crinoïdes, de Foraminifères, de Bryozoaires et de Mollusques. Ils nécessitent des conditions particulières de milieu : température, profondeur, nature du substrat, distance à la côte, agitation, turbidité et composition chimique de l'eau, gaz dissous et turbulence. On distingue : les *récifs frangeants* en bordure de côte, les *récifs barrières* parallèles à la côte (Australie), les *récifs annulaires*, ou *atolls*.

Au Précambrien, les récifs de Stromatolites ont une extension mondiale (Amérique, Afrique, Sibérie).

A l'ère primaire, les récifs coralliens sont présents sur toute la surface du globe. Aux récifs du Cambrien, essentiellement formés d'Archæocyathidés, succèdent, à l'Ordovicien, les premiers récifs coralliens. Au Silurien, le climat paraît plus uniforme sur la surface du globe et la température semble s'élever progressivement dans toutes les mers. Les récifs prospèrent dans le géosynclinal méditerranéen, les continents nord-atlantique et russo-scandinave (falaises de Gotland) ainsi qu'en Amérique du Nord et en Australie. Au Dévonien, la présence d'un climat chaud sur toute la surface du globe permet l'épanouissement des coraux (développement des Tétracoralliaires et des Tabulés). Au Carbonifère, des mers calmes et profondes où se forment des récifs accompagnent l'orogenèse hercynienne. Le climat est chaud et humide (calcaire de Waulsort en Belgique, développement des coraux en bordure de la mer du Zechstein en Allemagne). Au Permien, il y a séparation entre une région boréale sèche et désertique et une région australe froide et humide. Les récifs sont alors limités à l'hémisphère boréal.

Cette situation persiste jusqu'au Trias. Aux Tétracoralliaires succèdent les Hexacoralliaires. Le climat, chaud et sec (Buntsandstein en Allemagne), est subtropical. Au Trias moyen, il y a approfondissement du géosynclinal alpin (faciès dolomitiques des Alpes orientales); les récifs se développent en bordure de la Mésogée. Au Jurassique, les coraux présents dans le Bassin parisien, au voisinage des massifs émergés (Ardennes, Vosges, Morvan, Jura), abandonnent ces régions; la tendance est à la migration vers le sud. Au Crétacé, ce phénomène de recul s'accentue; les récifs cités précédemment diminuent d'importance et font place à des populations de Rudistes et de Madréporaires. Les migrations peuvent s'expliquer par un abaissement général de la température et par la tectonique. En Europe, les récifs se replient en Méditerranée (à l'exception de ceux de Suède). Le mouvement conduisant à la répartition des récifs de part et d'autre de l'équateur est amorcé.

Au Tertiaire, les récifs sont moins nombreux en Amérique; en Europe, ils sont limités à la partie méridionale, avec une exception en Pologne. La migration vers le sud et le resserrement autour de l'équateur se poursuivent. A partir de l'Oligocène, les provinces récifales actuelles se mettent en place; c'est au Miocène qu'elles sont fixées dans leurs limites actuelles.

Au Quaternaire, leur répartition est intertropicale : Amérique (Amérique centrale, côtes du Brésil), Afrique (côte occidentale, Madagascar, mer Rouge), Asie (Inde, Japon), Pacifique et Australie.

La forêt houillère

La forêt houillère s'installe sur d'anciennes plaines marécageuses lagunaires où le niveau du sol était voisin de celui de la mer *(lagune paralique)*, ou encore dans des bassins intérieurs lacustres *(lagune limnique)*.

Les nombreux restes de végétaux trouvés dans les sédiments houillers (empreintes diverses, fragments de troncs, tiges, racines, spores) témoignent d'une végétation

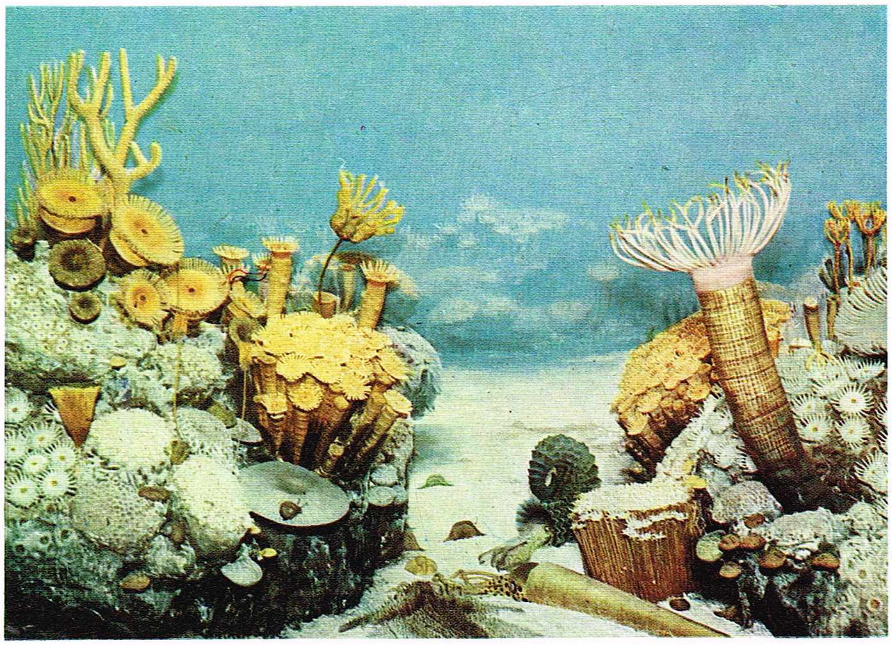

Chicago Natural History Museum

▲ ***Récif corallien du* Dévonien moyen** *: au centre, en bas, on aperçoit deux Céphalopodes, un à coquille conique droite, l'autre à coquille spiralée.*

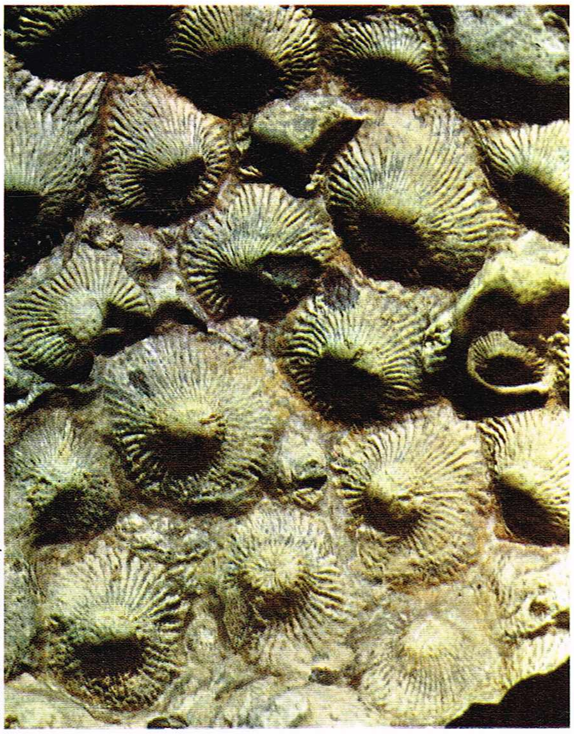

I.G.D.A. - C. Bevilacqua

◄ **Cyathophyllum hypocrateriforme** *du Dévonien (Allemagne).*

abondante. A cette époque, il devait régner toute l'année une température relativement constante avec une forte humidité.

Les plantes décrites comme appartenant à la flore houillère ne vivaient pas toutes dans le même milieu. Sur le fond de la lagune foisonnaient les Bactéries, dont certains restes ont été observés, et qui jouaient un rôle majeur dans les phénomènes aboutissant à la formation du charbon, les Algues unicellulaires (Chlorophycées) et les végétaux inférieurs dont certains flottaient à la surface.

Sur les rivages, les « pieds » dans l'eau, poussaient des forêts de *Calamites*, prêles géantes de 20 à 30 m de haut, dont le diamètre des troncs pouvait atteindre 1 m. Immédiatement en bordure, s'étendaient les vastes forêts de Lépidodendrons, grands arbres atteignant souvent une hauteur de 30 m et un diamètre du tronc de plus de 2 m. Leurs branches et leurs racines étaient régulièrement ramifiées (dichotomie). Des feuilles lancéolées, de taille variable, étaient fixées à ces branches. Elles laissaient après leur chute des cicatrices caractéristiques. Les Sigillaires voisinaient avec les Lépidodendrons ; c'étaient des arbres en forme de colonnes fourchues, terminées aux extrémités par des touffes de feuilles herbacées au-dessous desquelles se trouvaient les épis fructifères. Dans les sous-bois, on apercevait de véritables plantes herbacées parmi les Lycopodes, ancêtres directs des Fougères actuelles, à nervation variée ; elles portaient soit des spores, soit des « graines » (Ptéridospermées) ; certaines devaient avoir le port de liane. Il existait aussi des Mousses. Enfin, sur les collines plus sèches, il y avait des peuplements plus clairsemés de *Cordaites* et de *Walchia*. Outre les végétaux, des animaux évoluaient dans ce cadre.

Les lagunes limniques, comme celles du Massif central, donnaient lieu à l'accumulation, avec les végétaux, de nombreux Insectes, qui atteignaient parfois des tailles gigantesques : l'envergure de certaines libellules pouvait atteindre 75 cm. Dans ces lagunes vivaient aussi des Myriapodes, des Araignées primitives, des blattes et des éphémères ; les Insectes modernes, comme les papillons et les abeilles, n'existaient pas encore. Dans les lagunes paraliques, comme celles du nord de la France, vivaient dans les eaux des Crustacés (esthéries, petits crabes), des Lamellibranches divers comme les moules d'eau douce, comparables aux unios et anodontes actuels, des Amphibiens Stégocéphales comme les *Ichtyostega* (apparus au Dévonien supérieur, ceux-ci seront très abondants au Carbonifère et au Permien). Les Reptiles étaient représentés par les Prosauriens, à l'allure de lézards primitifs, et plus rarement par les Théromorphes, peu communs en Europe occidentale. Les Poissons, notamment les Dipneustes, étaient nombreux. Enfin, dans les sous-bois, devaient rôder les *Arthropleura*.

Un bassin pélagique : la mer à Graptolites

Bien que non strictement localisés dans les schistes noirs, les Graptolites y sont d'une telle fréquence que le faciès « schistes noirs à Graptolites » est largement utilisé en géologie du Paléozoïque. Ces organismes sont souvent les seuls contenus dans une strate géologique ou encore y dominent largement (schistes à Graptolites purs), cependant on y trouve aussi des restes d'Algues, des Éponges, des Brachiopodes Inarticulés *(Paterula, Leptobolus)*, des Vers *(Spirorbis)*, des Crustacés archaïques dont certains ne se trouvent pas ailleurs *(Caryocaris)*, des Trilobites (*Niobe*, etc.) ; les Trilobites, d'après les renseignements fournis par les formes associées, étaient marins et vivaient à une certaine profondeur ; on les situe entre les Brachiopodes, plus littoraux, et les Graptolites, plus profonds ; préférant des milieux fins, ils étaient benthiques ou pélagiques, leurs représentants des grands fonds étant des petites formes aveugles.

Dans le cas des faunes mixtes, les Graptolites sont associés en proportions variables à des groupes divers ; les plantes sont peu abondantes. On trouve des Éponges, Brachiopodes, Mollusques y compris des Céphalopodes, d'ailleurs présents dans les schistes purs, Trilobites, comme dans certains gisements de Scanie où l'on trouve également des Ostracodes. Tous ces organismes possèdent un certain nombre de caractères communs : ils sont en général de petite taille ; leur test mince est peu ou pas calcifié (chitine ou scléroprotéine). ils peuvent avoir une large extension géographique ou même être cosmopolites ; en général, ils ne se retrouvent pas dans les calcaires et grès de même âge. En grande majorité, ces organismes (dont les *Graptoloidea*) sont des épiplanctoniques (ou des planctoniques, comme certains *Dictyonema*). Dans les schistes à Graptolites à faune mixte, ainsi que parmi les Brachiopodes et les Trilobites, on trouve également des benthoniques *(Dendroidea)*, mais le milieu doit y être encore calme.

Le cadre dans lequel vivaient les Graptolites était aussi bien géosynclinal qu'épicontinental avec des peuplements d'Algues flottantes, les courants de surface les amenant, en compagnie de leur faune fixée ou flottante, au-dessus de leur lieu de sédimentation. L'ensemble tombait à profondeur indifférente sur le fond, lui-même très calme (les courants devaient y être très lents : dans les gisements, les colonies sont souvent abondantes dans un même lit et montrent parfois un arrangement régulier ; d'une façon générale, les rhabdosomes sont disposés à plat). L'accumulation rapide de substances organiques en grande quantité engendrait un milieu réducteur (mers intérieures, baies, deltas, lagunes littorales). De telles biocénoses peuvent être comparées à celles des champs d'Algues actuels de certains milieux de la mer des Sargasses ; cependant, dans les mers à Graptolites les Poissons n'avaient pas d'équivalent. Sans correspondants dans la nature actuelle, les Graptolites se comportaient écologiquement comme les Siphonophores actuels. Les Graptolites sont particulièrement abondants dans le Paléozoïque d'Amérique du Nord, de Scandinavie et d'Angleterre.

▼ *A gauche, restes d'une* Pecopteris *provenant des gisements du* Carbonifère *français. A droite, les récifs sont constitués par des colonies d'animaux constructeurs, tels ces* Thecosmilia tricotoma *du* Jurassique supérieur *(Allemagne).*

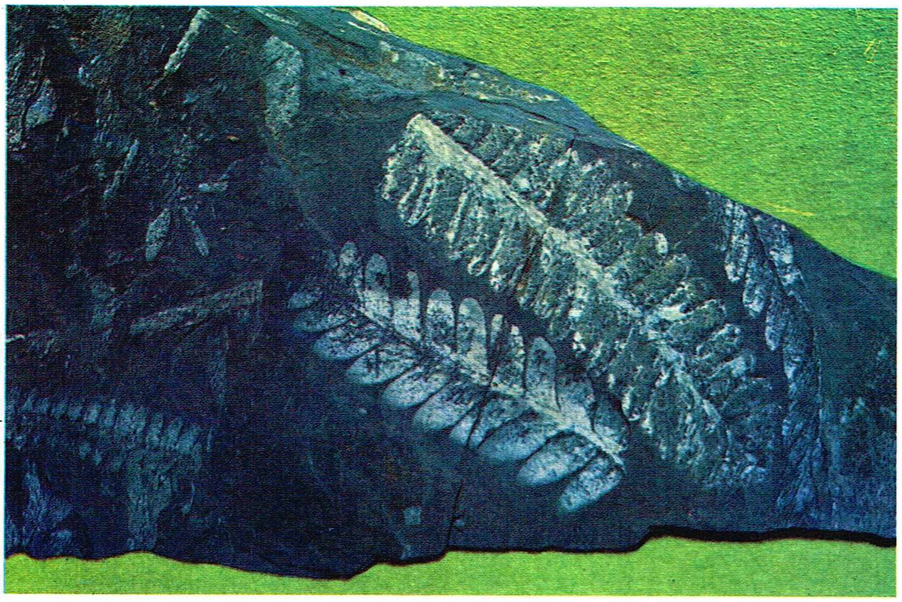

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

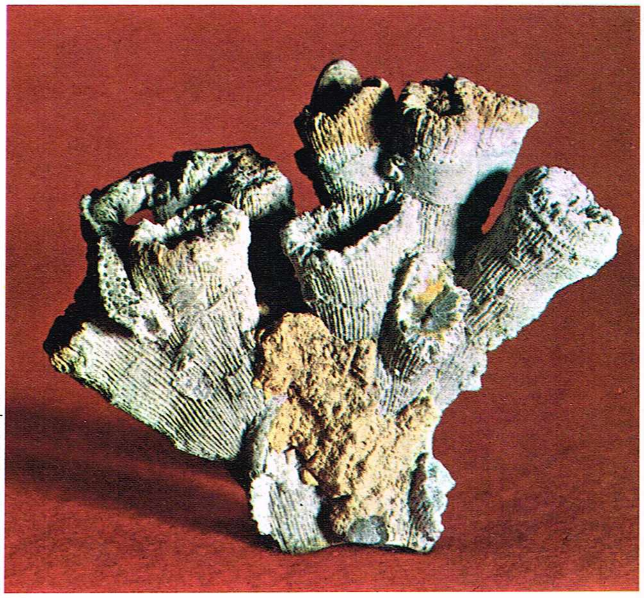

I.G.D.A. - C. Bevilacqua

Rôle des organismes dans la formation des roches sédimentaires

On distingue, schématiquement, les dépôts dus aux organismes vivants ou morts, les accumulations d'origine organique et les transformations du sol par les êtres vivants.

Certains végétaux (Algues) ou animaux (Cœlentérés, Lamellibranches, Bryozoaires, Annélides), fixant le calcium, édifient de véritables récifs que l'on appelle « calcaires construits ».

La photosynthèse des Algues vertes nécessite du gaz carbonique emprunté aux bicarbonates de l'eau de mer. Ceux-ci sont réduits en carbonates et précipités sous forme de cristaux de calcite. Les calcaires construits par les Algues *(Lithothamnium, Halimeda)* se forment dans les hauts fonds ne dépassant pas 80 m. Les thalles se développent en colonies (depuis le Précambrien jusqu'à nos jours).

Les Corallinacées, Algues rouges encroûtantes, constituent des masses pierreuses. Elles forment des encroûtements à proximité des côtes, comme le *maërl* en Bretagne, ou des encorbellements à surface plane appelés « trottoirs » en Méditerranée. Les Botryococcacées (Chlorococcales coloniales unicellulaires d'eau douce), unies par de la gélose, constituent après leur mort des accumulations sous forme de gelée (sapropèle) et participent à la formation des « bogheads » ou du pétrole.

La précipitation du carbonate de chaux sur les thalles d'Algues bleues *(Cyanophycées, Schizophytes)* au cours de leur vie produit des structures rayonnées ou rubanées, appelées stromatolites.

Les récifs sont constitués par des colonies d'animaux constructeurs (Cœlentérés) vivant dans des régions tropicales à mers peu profondes. Ils forment des atolls ou des barrières pouvant atteindre une importance considérable (la Grande Barrière d'Australie a 1 600 km de long). Les jeunes organismes se construisent sur les générations mortes. Ils fixent le carbonate de calcium de l'eau de mer pour édifier leur squelette et déterminent vers les zones équatoriales un véritable appel de calcaire venu des côtes froides et apporté par les fleuves. Ils peuvent aussi fixer le magnésium et le strontium. Les calcaires récifaux sont connus depuis le Dévonien jusqu'à nos jours (exemple des Ardennes). Les Rudistes (Lamellibranches) fixés sur le fond par une valve constituent des calcaires construits (apogée au Crétacé). Les Archæocyathes n'ont vécu qu'au Cambrien; ils ressemblent aux Éponges actuelles; leur squelette, conique, est formé de deux murailles calcaires réunies par des cloisons. Ces organismes, fixés, forment des récifs que l'on rencontre dans de nombreuses régions (Chine, Amérique du Nord, Sibérie, Australie, Europe...). Les calcaires construits à Bryozoaires sont disposés en masses lenticulaires. Les tests constituent d'importantes formations (faluns de Touraine). Certaines Annélides forment des récifs par l'accumulation des tubes leur servant de logement (hermelles de la baie du Mont-Saint-Michel).

Les roches dues à l'accumulation des coquilles et des squelettes peuvent être divisées en quatre catégories :

— Les *nodules phosphatés* provenant de la migration du phosphate squelettique.

— Les *roches siliceuses :* les gaizes, les spongolithes, les chailles dues aux spicules de Spongiaires siliceux. Les diatomites sont des formations marines ou lacustres constituées par des tests siliceux de Diatomées (Chrysophycées) qui se déposent dans les grands fonds des régions froides. Les radiolarites sont constituées par les tests siliceux des Radiolaires marins.

— Les *roches calcaires* dues aux Mollusques et aux Foraminifères. La formation des roches calcaires est due au prélèvement par les êtres marins de calcium des solutions carbonatées ou sulfatées. Le carbonate de calcium se trouve soit sous forme d'aragonite (milieu chaud et peu salin), soit sous forme de calcite. L'aragonite, instable dans les conditions normales, donne de la calcite au cours de la sédimentation ou de la fossilisation. Les formations calcaires les plus abondantes sont dues aux Foraminifères (calcaire nummulitique) ou encore aux Flagellés (Coccolithophoridés). Les organismes planctoniques vivent surtout dans les mers chaudes et disparaissent dans les régions froides (vases à Globigérines et Ptéropodes). L'organisme mort tombe vers le fond, se sédimente, s'enfouit et se fossilise (si les conditions le permettent). Les organismes benthiques donnent des calcaires à entroques et des lumachelles (calcaires coquilliers).

— *Les roches dues aux déchets de la vie.* Sur certaines îles à végétation rase, on constate une grande accumulation d'excréments d'Oiseaux de mer, tels que le guano. Cette roche est poreuse et jaunâtre. L'oxalate d'ammonium du guano se transforme en phosphate et réagit avec le carbonate de calcium du substrat, qui se phosphatise. Les produits solubles sont délavés et entraînés sous l'influence de l'eau chargée en gaz carbonique. Le phosphate se concentre et se concrétionne à l'état de colophanite. Les chauves-souris vivant en colonies souterraines peuvent conduire à des formations identiques.

Les Bactéries entraînent des réactions biochimiques qui leur sont propres et entrent dans la majeure partie des transformations géologiques. La vie des micro-organismes conditionne en partie le potentiel d'oxydo-réduction du milieu.

Il existe certains domaines marins où les eaux sont dépourvues d'oxygène en profondeur (les mers fermées, les lagunes, les baies séparées de la mer par des seuils) mais riches en vie planctonique, où un cycle du soufre peut se réaliser grâce aux Bactéries sulfato-réductrices (anaérobies) de la partie inférieure et aux Bactéries sulfurantes des zones superficielles oxygénées.

Les Bactéries sulfurantes oxydent l'hydrogène sulfuré à l'état de soufre natif (qu'elles fixent) et à l'état d'ion SO_4. Les rivières affluentes apportent de la chaux qui précipite en sulfate au contact de l'acide sulfurique produit. Ce sulfate de calcium descendant au fond est décomposé dans le milieu sulfato-réducteur, en régénérant l'hydrogène sulfuré de la zone inférieure.

Le cycle serait fermé si nous ne faisions pas intervenir les réactions chimiques pures qui entraînent un dépôt des sulfures excédentaires dans les bassins sédimentaires. Dans ces bassins euxiniques, on trouve des couches bitumineuses et des lentilles de gypse résultant d'un excès de sulfate non réduit, sans qu'il soit nécessaire de faire intervenir l'évaporation.

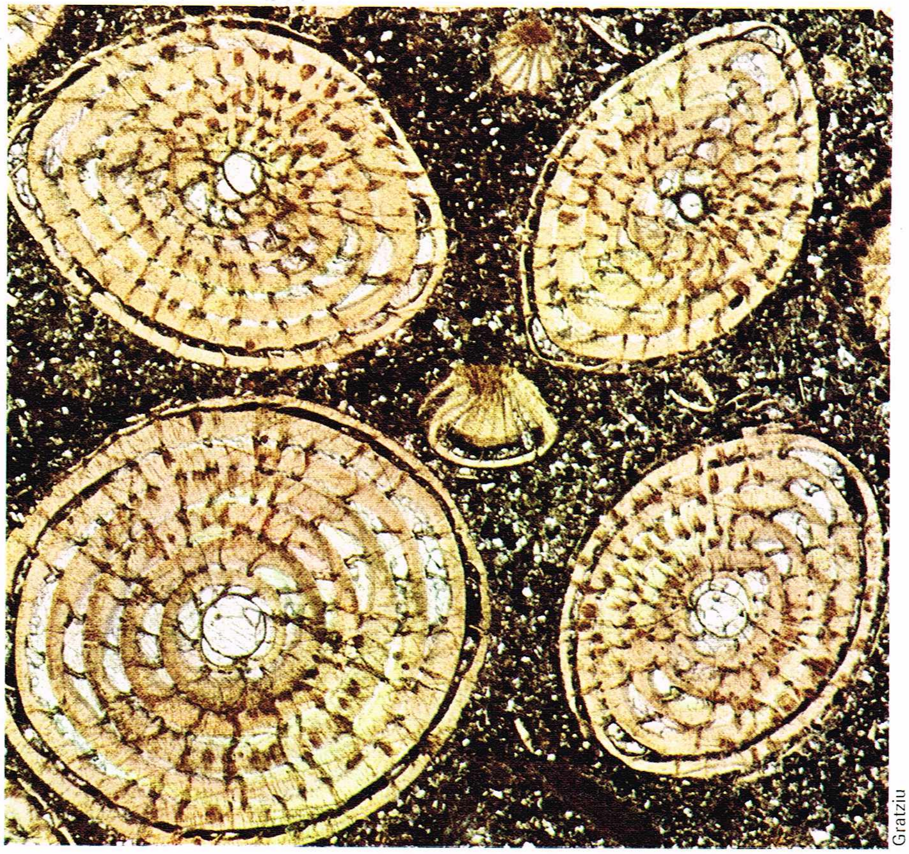

▲ ***Les formations calcaires les plus abondantes sont dues aux Foraminifères; ici,*** ***section de*** **calcaire à Nummulites.**

▶ *A gauche, un échantillon de lignite provenant de Sardaigne; à droite, un charbon terreux formé de fragments végétaux, fossiles (lignite).*

C. Bevilacqua

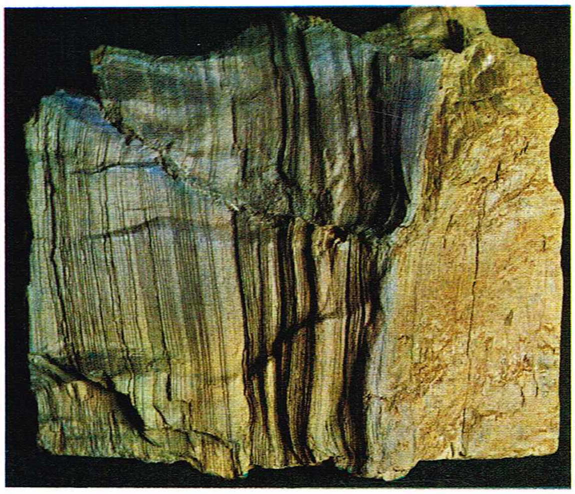

C. Bevilacqua

Selon certains auteurs, les réactions biochimiques des Bactéries sulfurantes auraient plus d'activité que celles des Bactéries sulfato-réductrices.

Dans les bassins sédimentaires marins, la croissance des Bactéries dépend de la photosynthèse planctonique, qui transforme l'énergie lumineuse en énergie chimique. L'intensité de la pyritisation dépend des sédiments littoraux où l'énergie utilisée atteint son maximum.

On rencontre aussi des Bactéries lacustres vivant à la limite des zones aérobies et des zones anaérobies (marécages, lacs à une certaine profondeur). Elles précipitent dans leurs cellules le fer ferrique qu'elles obtiennent en transformant le fer ferreux dissous. Les sédiments noirs, riches en matière organique, donnent des schistes noirs imprégnés de petits cristaux de pyrite associés à des sédiments fins souvent marneux (schiste Toarcien). La poussière calcaire incorporée est due en partie aux réactions biochimiques : réduction du sulfate de chaux, recombinaison du carbonate à partir du sulfure de calcium instable, fixation du carbonate par les Algues.

On connaît encore assez mal la genèse du carbonate de calcium. On constate que les Bactéries aérobies et anaérobies sont abondantes dans les sédiments marins et plus particulièrement à la partie superficielle des dépôts; on leur attribue, sans preuve irréfutable, la précipitation d'aragonite et plus rarement de calcite suivant trois modèles :

— Les nitrates sont réduits en nitrites puis en ammoniaque (NH_4OH), qui, combinée au gaz carbonique (CO_2), donne un carbonate d'ammonium [$(NH_4)_2CO_3$] : $2NH_4OH + CO_2 \rightarrow (NH_4)_2CO_3 + H_2O$ qui lui-même donne, par double décomposition avec le sulfate de chaux, du carbonate de chaux ($CaCO_3$) : $(NH_4)_2CO_3 + CaSO_4 \rightarrow CaCO_3 + (NH_4)_2SO_4$; cela aboutit à la précipitation d'aragonite en fines paillettes. Des processus analogues peuvent entraîner la précipitation du carbonate de magnésium (réaction beaucoup plus lente), ce qui se produit dès que tout le calcium est utilisé.

▼ *Représentation schématique des diverses phases de l'apparition des septes chez les Anthozoaires : A-D, Tétracoralliaires; E-G, Hexacoralliaires; sc, septe cardinal; sv, septe ventral; sl, septe latéral (les septes portant le même numéro d'ordre apparaissent simultanément).*

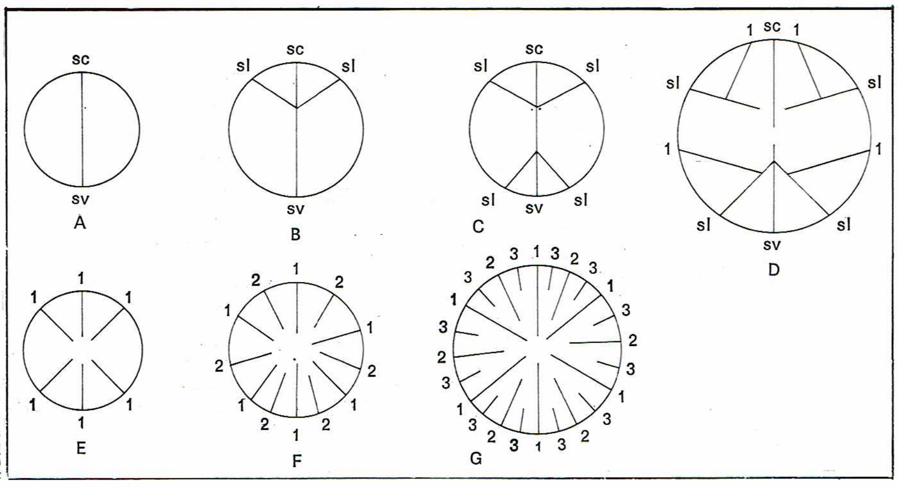

I.G.D.A.

— L'ammoniaque agit directement sur les bicarbonates de chaux en solution, se combine avec l'anhydride carbonique et précipite le carbonate de calcium : $Ca(HCO_3)_2 + 2NH_4OH \rightarrow CaCO_3 + 2H_2O + (NH_4)_2CO_3$.

— Les Bactéries utilisent directement les composés organiques en libérant du CaO qui, uni à l'anhydride carbonique, donne des carbonates. A cela est associée une précipitation d'hydroxyde de magnésium qui passe ensuite à l'état de carbonate. Lorsque l'alcalinité diminue (pendant la nuit) une partie du magnésium repasse en solution, ce qui donne un aspect vacuolaire aux dépôts. Pour tous les combustibles les Bactéries jouent un rôle important.

La formation de la houille est un phénomène complexe, de très longue durée, impliquant de très nombreux facteurs; chaque bassin houiller réclame une explication spéciale, adéquate à ses conditions de gisement. Cependant, certains grands faits se retrouvent partout. Les transformations subies par la matière organique végétale font intervenir des réactions chimiques et biochimiques. Après la mort de la plante, il se produit une macération, puis une fermentation bactérienne sous l'eau, à l'abri de l'oxygène de l'air. L'action des Bactéries diminue et finit par s'arrêter; la transformation en houille s'opère uniquement sous l'action du temps, de la pression et de la chaleur. La tourbe est le résultat de la décomposition sur place d'organismes (notamment, les sphaignes) en milieu très humide et pauvre en oxygène (marais). Le lignite est un charbon terreux formé de gros fragments fossiles végétaux où abondent les tiges et les rameaux. Les « bogheads » sont constitués par des animaux et des végétaux planctoniques ainsi que benthiques.

En ce qui concerne la formation du pétrole, les Bactéries participent activement à la diagenèse biologique de cette roche. Elles transforment les matières organiques fournies par le plancton en hydrocarbures par absorption de l'hydrogène : $CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$.

Comme nous l'avons vu, les dépôts minéraux dus à l'activité des êtres vivants présentent une très grande diversité. Beaucoup d'entre eux interviennent dans la formation des roches sédimentaires; les dépôts d'origine organique demandent des conditions physico-chimiques, écologiques, pétrographiques bien déterminées; si le milieu de vie n'est pas propice, il ne pourra pas y avoir de formation fossilisée. La formation des roches dues aux organismes est une suite de phénomènes liés très étroitement les uns aux autres.

La paléozoologie

La paléontologie est souvent considérée comme l'étude des fossiles selon la classification des êtres organisés. C'est une partie importante de la paléozoologie; celle-ci, par ses rapports avec l'anatomie comparée et les notions évolutives, permet des études monographiques de fossiles, qui sont les bases de travaux paléoécologiques. Nous ne considérerons que quelques aspects de la paléozoologie à travers des exemples pris chez les Invertébrés (Madréporaires) et chez les Vertébrés (Agnathes, différenciation dentaire).

Les Madréporaires

Les Madréporaires sont des animaux pluricellulaires, aquatiques, à tissus indifférenciés, et possédant une symétrie radiée. Ils appartiennent à un groupe systématique très important, celui des Anthozoaires. Ils comprennent les Tétracoralliaires (uniquement fossiles), les Hexacoralliaires (fossiles et actuels) et les Tabulés (paléozoïques). Ces distinctions ont été basées sur l'étude de la septation du squelette. L'insertion du septe sur la muraille avait donné lieu à deux interprétations : l'une cyclique (Milne-Edwards et Haime, 1848), l'autre tétramérale (Kunth, 1869). Les études modernes ont reconsidéré les modes d'insertion, et l'examen des microstructures squelettiques a permis une nouvelle approche des filiations.

Les différents stades de croissance trouvés sur les fossiles ont permis d'élaborer un mode de croissance. Le squelette fossilisé est constitué de calcite; celle-ci n'apparaît que par fossilisation car, à l'origine, le squelette est constitué d'aragonite, c'est-à-dire de calcaire sécrété par des « cellules » spéciales : les *calicoblastes*. La calcification se fait grâce à des centres successifs donnant des couches de calcaire concentriques. Ces centres sont disposés en files radiales et verticales. Les rangées verticales constituent les *trabécules*; selon qu'ils sont jointifs ou non, on a un polypier apore ou poreux. Un *synapticule*, qui réunit deux trabécules, est un centre de calcification. Cependant, entre deux trabécules, une masse calcaire peut jouer le rôle de synapticule sans avoir de centre de calcification. L'ensemble des trabécules peut être recouvert par une véritable muraille, ou *thèque*. Les formes possédant réellement cette dernière sont les *Euthecalia*. Celles qui n'en possèdent jamais peuvent avoir une croûte calcaire sans centre de calcification distinct. Nous ne parlerons pas ici des associations donnant des récifs.

Les évolutions des Tétracoralliaires et des Hexacoralliaires ne furent pas identiques. En effet, les seconds ont encore de nombreux représentants dans la faune actuelle, ils sont intéressants car ils avaient déjà quelques spécimens à l'ère primaire (selon Alloiteau).

L'évolution des Tétracoralliaires a pu être recherchée au moyen de coupes. Celles-ci ont permis de suivre pas à pas l'apparition des cloisons. On a pu déduire qu'elles n'apparaissaient pas toutes en même temps et que la symétrie, d'abord bilatérale, se régularisait chez l'adulte (ordre 4). De plus, ces cloisons présentent une disposition caractéristique et permettent d'orienter le calice. Ce procédé de coupes a permis de rapprocher les genres et les espèces : les travaux de Carruthers sur des calices de *Zaphrentis delanouei* ont permis de suivre le développement et les complications de structure qui se retrouvent fixées chez des espèces successives, ainsi la phylogénie est-elle possible dans le temps. L'évolution de *Zaphrentis* pendant le Carbonifère est très suggestive à cet égard. On peut noter un certain nombre de mutations : parallela, constricta, disjuncta, caractéristiques des niveaux. De nos jours, une partie de la stratigraphie des complexes calcaires du Carbonifère de l'Angleterre et de la Belgique est fondée sur cette méthode.

Quant aux Hexacoralliaires, ce sont des polypiers secondaires, tertiaires et actuels. La classification serait trop longue dans le cadre de ce document. La symétrie radiaire est d'ordre 6 chez l'adulte; il a été montré que la symétrie bilatérale se manifestait au cours de l'ontogenèse pour une famille fossile et actuelle (les Caryophyllidés).

La biologie des polypiers fossiles peut sans aucun doute être déduite de celle des formes actuelles. On sait que celles-ci se trouvent dans toutes les mers, mais les conditions de vie des formes simples et isolées sont différentes de celles des formes coloniales; les premières se trouvent de préférence dans les eaux profondes et froides. Les formes fossiles trouvées peuvent donc être les témoins de ces mers passées. Par contre, ces conditions ne conviennent pas aux polypiers coloniaux, qui vivent dans les eaux chaudes et claires; ils ne supportent pas les apports terrigènes et d'eau douce.

Les formes fossiles sont, on le voit, de bons témoins des biotopes dans lesquels elles ont vécu. Tous les témoins recueillis permettent de constater une évolution générale du groupe. Depuis le Silurien, une véritable orthogenèse semble avoir eu lieu : il y a eu tendance à un allègement du squelette et à une multiplication des cloisons et des calices. Il faut, enfin, noter que la reproduction sexuée prend le pas sur le bourgeonnement.

La différenciation dentaire

Les travaux de G. G. Simpson sont très nombreux. La majeure partie de ses études a porté sur les Reptiles Thérapsides et les Mammifères, et, plus particulièrement,

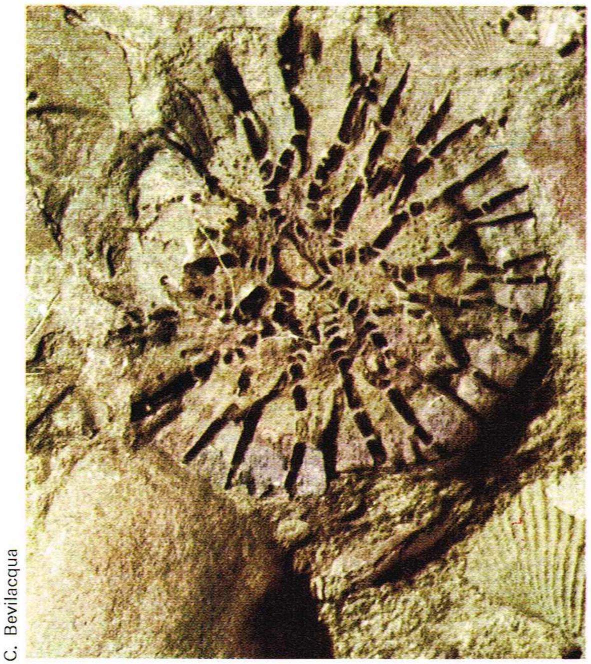
C. Bevilacqua

◀ *Un Tabulé du Dévonien inférieur* **(Pleurodictyum problematicum)** *découvert en Allemagne.*

▼ *Quelques Tétracoralliaires fossiles : A, B,* **Cyatoxonia cornucopiae** *du Carbonifère (A, privé de formations endothécales; B, avec formations endothécales représentées par la table au centre); C,* **Cyatophyllum sp.** *du Silurien-Dévonien; D,* **Lithostrotion sp.** *du Carbonifère; E,* **Cystiphyllum sp.** *du Silurien-Dévonien (ep., épithèque); F,* **Goniophyllum sp.** *du Silurien supérieur; G,* **Calceola sandalina** *du Dévonien moyen.*

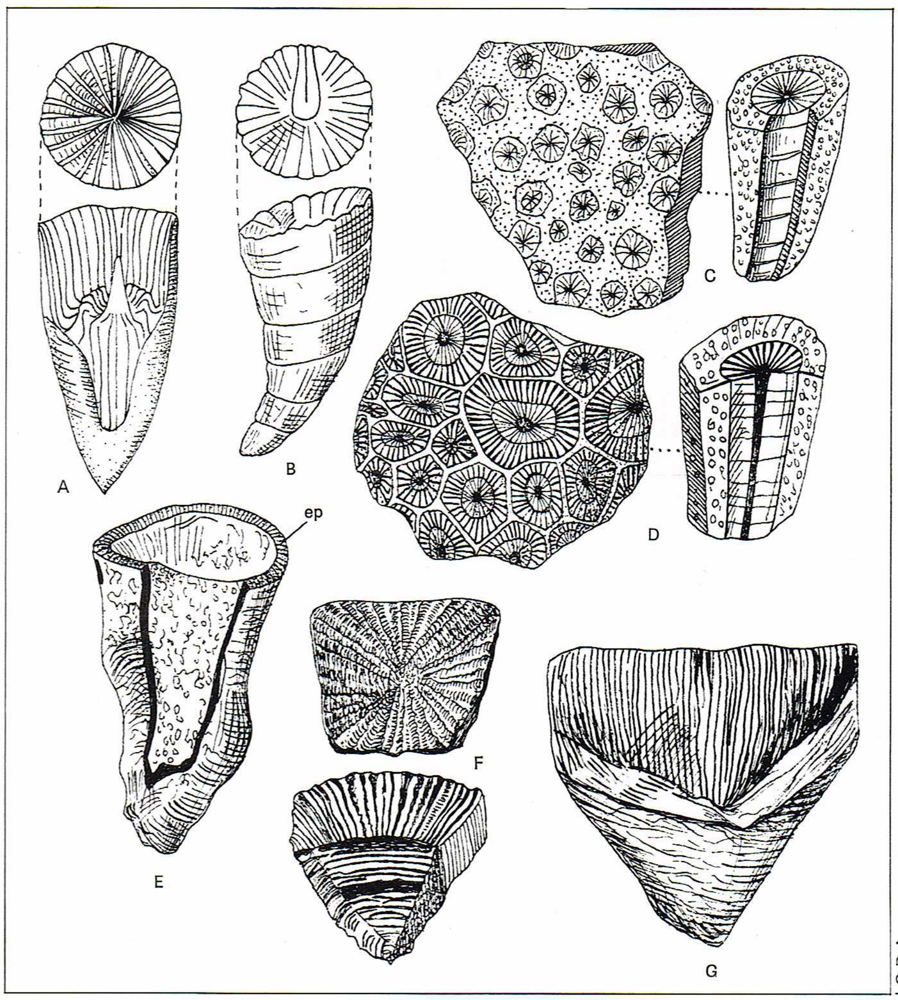

I.G.D.A.

▶ *Reconstitution d'un crâne de Reptile chez lequel les structures sont semblables à celles des Mammifères mésozoïques; il s'agit d'un Reptile Thérapside du sud de l'Afrique.*

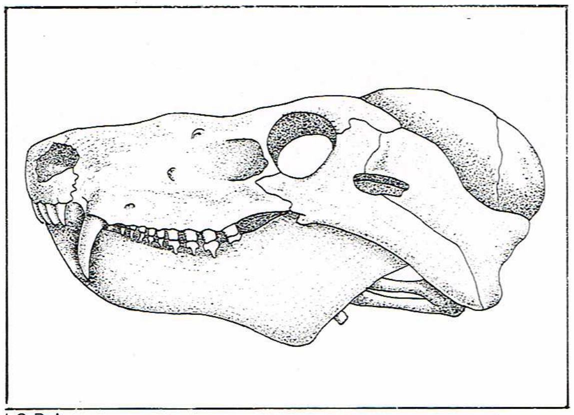

I.G.D.A.

▶ *Crâne d'un Multituberculé* (Ptilodus sp.). *Ces Mammifères Allothériens connurent un grand développement au Mésozoïque.*

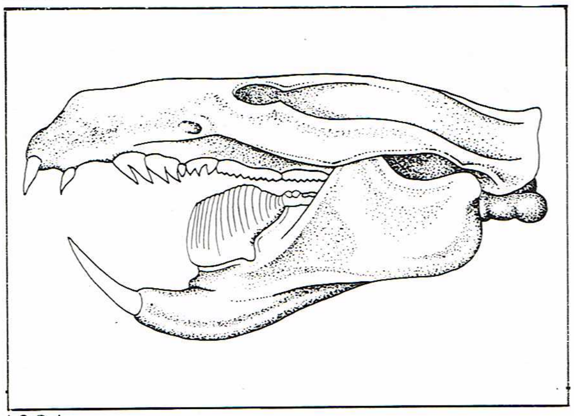

I.G.D.A.

▼ *Un Agnathe :* Drepanaspis gemundenensis.

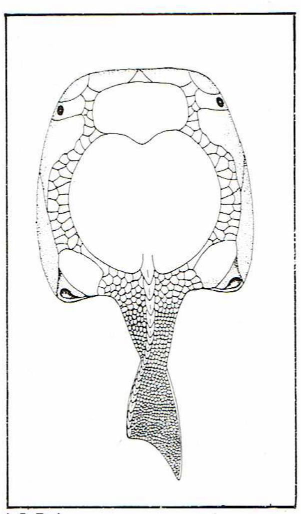

I.G.D.A.

sur leurs mandibules et leurs dents. L'étude de ces dernières est particulièrement importante pour le paléontologiste. Du fait de leur solidité, elles se conservent aisément par fossilisation. Leurs variations nombreuses permettent de caractériser les ordres, les familles, les genres, et même les espèces.

Un début d'hétérodontie est visible chez un Reptile du Permien : *Aelurosaurus felinus.* Simpson y a trouvé l'amorce d'une canine qui divise la dentition en deux parties. Au Trias, la différenciation s'accentue par addition de tubercules.

En ce qui concerne les Mammifères, les dents sont différenciées en canines dès le Mésozoïque. Un autre type de dent a permis des homologies, c'est celui de la molaire : chez les Thérapsides, on peut citer les *Cynodontes* du Trias, chez lesquels les molaires de lait existaient, ainsi que des molaires définitives chez l'adulte.

La molaire primitive des Mammifères, quant à elle, a un schéma appuyé sur une connaissance approfondie des divers ordres des temps mésozoïques et du début de l'ère tertiaire. La disposition fondamentale, dite trituberculaire, est le type primitif ainsi que l'avait pensé Cope. Les crêtes se rencontrent à peu près d'une manière générale chez les formes primitives des Marsupiaux et des Placentaires. On peut donc les considérer comme un caractère d'ensemble et essentiel de la molaire mammalienne primitive. Des denticules analogues sont présents chez les Pantothériens jurassiques. Simpson fit porter un effort tout particulier sur l'étude des Mammifères mésozoïques d'Amérique du Nord, entre autres, sur les docodontes, chez qui il concluait à une ressemblance avec les Pantothériens. Surtout, il les considéra comme étant essentiellement un stade de l'évolution mammalienne.

Il existe quelques groupes de Placentaires pour lesquels la disposition tribosphénique n'a pu être établie. Ce sont les Cétacés, les Édentés et les Tubulidentés. Néanmoins, on peut penser que cette dentition était réalisée au moment où les Marsupiaux et les Placentaires se séparèrent, car leurs molaires sont identiques. Au Paléocène inférieur, les molaires étaient tribosphéniques, sauf chez les Multituberculés. Les sarigues et dasyures actuels montrent ce type, mais rarement. Si chaque phylum a suivi des voies particulières, des homologies laissent supposer que les structures dérivent d'un ancêtre commun.

Simpson n'a pas consacré son étude à la seule recherche des dents. Il a cerné l'important problème des rapports dynamiques entre les organes des mandibules supérieure et inférieure. Ce mécanisme est celui de *l'occlusion.* Là encore, il a trouvé que la forme la plus ancienne était celle des Reptiles Thérapsides. Elle montre une alternance qui évoluera en se compliquant par cisaillement pour atteindre l'opposition chez les Pantothériens. Les Docodontes ont un mode d'occlusion très différent de celui des Pantothériens : il y a presque exclusivement opposition. Cette voie très particulière de l'adaptation a abouti à l'extinction.

Cette étude, entrevue brièvement ici, a permis à Simpson d'attribuer des modes de vie différents et des tendances évolutives. Ainsi qu'Owen, Falconer ou Abel, Simpson apporta d'importantes précisions sur le mode de vie des Multituberculés, dont les derniers se sont éteints au Thanétien (Paléocène). Des caractères crâniens, dentaires, le mode d'occlusion des molaires ainsi que les formes d'usure sont les mêmes que chez les herbivores. Une curieuse convergence a été soulignée par Simpson : un Marsupial actuel, *Bettongia,* offre des ressemblances frappantes avec les Multituberculés; or, ce *Bettongia* se nourrit d'écorces de *Macrozamia* (Cycadée), ce qui peut faire penser que les Multituberculés avaient ce mode de nutrition. Simpson a tiré de toutes les études qu'il fit une tendance évolutive des Multituberculés : pour passer d'un groupe crétacé à un groupe paléocène, la modification de la prémolaire était une voie. Il a montré que rien ne permet de rapprocher les Multituberculés de l'une quelconque des divisions des Mammifères, il les a donc placés dans une sous-classe dénommée *Allotheria* (Marsh). Ces Multituberculés ont sans doute tenu le rôle dévolu aux Rongeurs par la suite.

Les Agnathes

Les diverses études de Stensiö sur les Agnathes ou Cyclostomes sont si riches, qu'il est nécessaire de faire un choix, qui semblera plus que restreint au spécialiste. Nous parlerons de l'ordre des *Drepanaspida*, Cyclostomes appartenant au groupe des Ptéraspidoformes.

Bien sûr, les seules parties suffisamment conservées sont osseuses. Stensiö a réussi à en tirer des conclusions partielles, et parfois même définitives concernant les *Drepanaspida*. On peut parler de la cuirasse dans un ordre général et fondé sur un exemple : *Tesseraspis.* Cette cuirasse, d'ordre général, est large et basse; d'après la position de l'orifice branchial pair, on peut penser qu'elle s'étendait loin vers la queue et enfermait donc une bonne partie de l'abdomen. Tous les groupes de *Drepanaspida* ont été déduits des plaques et des écailles; l'ornementation a permis de les classer. Les plaques sont très importantes car elles sont à l'origine des disques ventral et dorsal, qui prenaient naissance en une seule fois et ne pouvaient donc apparaître qu'une fois que l'animal avait atteint la dimension adulte. Le développement des autres grosses plaques de la cuirasse ne peut être retracé actuellement de façon aussi précise; cependant, selon Stensiö, ces plaques se développaient toutes à partir d'une petite écaille synchronomoriale (écaille sans croissance zonaire). Un caractère intéressant des *Drepanaspida* est celui des zones saisonnières, lesquelles, chez *Psammolepis,* sont nettement délimitées sur la plaque branchiale.

Avec ses recherches sur l'ordre des *Pteraspida*, Stensiö a continué son étude sur les plaques et les boucliers. Ce travail l'a conduit à une révision taxonomique qui lui a permis de distinguer sept nouveaux genres uniquement à partir du matériel de *Pteraspida*. En effet, la partie inférieure de la plaque rostrale et les plaques de l'appareil oral étaient très différentes chez de nombreux *Pteraspida*. Ce fait est d'une grande importance, car il a permis de retirer certains genres qui avaient été introduits par manque de connaissances dans un genre ou un autre. Le travail de Stensiö sur ce plan a donc été primordial. De nos jours encore, certains sont dénommés avec incertitude.

L'ordre *Traquairaspida* a une cuirasse qui rappelle par un certain nombre de points celle des *Tesseraspis*. Les écailles donnaient cinq plaques osseuses, qui finissaient par se réunir pour former un disque dorsal définitif; par contre, à la différence des *Drepanaspida,* la cuirasse apparaissait quand l'animal avait atteint la moitié de sa taille adulte définitive. Toutefois, quelques *Drepanaspida* montrent ce caractère.

Paléobotanique

Seul un des aspects de la paléobotanique, l'étude des anneaux de croissance des arbres, sera développé dans ce chapitre.

Le bois formant le tronc des arbres des latitudes tempérées montre, à la section, une structure en couches concentriques qui reflète le caractère saisonnier du climat sous lequel il vit.

Les arbres de la forêt tropicale humide montrent seulement des anneaux de croissance assez obscurs, où aucune structure périodique n'est reconnaissable. Bien que des nuances soient nécessaires, l'étude des anneaux de croissance peut servir de base à celle des paléoclimats, des paléolatitudes et de la position des pôles.

Les bois fossiles se rencontrent à l'état remanié ou enclavé dans des roches; parfois, les deux états s'observent simultanément dans le même gisement. La minéralisation s'effectue de plusieurs façons : par incrustation de carbonate de chaux, ou par silicification (comme en Arizona où la sécheresse a empêché la putréfaction du bois, qui s'est transformé en agate rouge et grise). De même, dans le Yellowstone National Park (États-Unis), on peut admirer une succession de forêts étagées, détruites par des éruptions volcaniques cendreuses; les troncs restés en place, dressés les uns à côté des autres, sont transformés en améthyste. La silicification est due à un enfouissement dans un milieu siliceux et à des phénomènes volcaniques tardifs (vapeur d'eau minéralisée). A Madagascar, au cours de la formation des latérites, la silice enlevée par les eaux pluviales a localement épigénisé des rhizomes de Nymphéacées vivantes (A. Lacroix).

Unger fut le premier à attirer l'attention, en 1847, sur l'absence des anneaux de croissance dans les bois du Paléozoïque. Il l'interpréta comme le témoignage d'un climat égal et sans saison. Par la suite, H. Potonié et W. Gothan en déduisirent un climat humide et uniforme, donc tropical.

Deux découvertes importantes contribuèrent largement à l'interprétation paléoclimatique de ces anneaux : tout d'abord, la preuve géophysique de mouvements majeurs des continents et des ceintures climatiques, ensuite, l'étude des bases biochimiques et biophysiques de la croissance des végétaux qui bouleversa nos connaissances sur le mécanisme de contrôle de la formation du bois.

Le bois est constitué par une moelle entourée du bois primaire, auquel fait suite le bois secondaire, ou xylème secondaire, qui constitue la masse du tronc ligneux d'une Gymnosperme ou d'une Angiosperme. Celui-ci résulte de l'activité du cambium vasculaire, situé juste sous l'écorce. De nombreux facteurs de l'environnement peuvent causer un arrêt ou un ralentissement de cette activité; il s'ensuit un caractère particulier de la texture du bois, qui peut être continu ou non sur toute la circonférence. La cause la plus évidente en est un changement saisonnier, mais dans certaines circonstances (double saison humide), il peut se former deux anneaux de croissance pour chaque croissance annuelle. C'est pourquoi l'usage sans discrimination du terme « anneau annuel » est inadéquat; il est préférable d'employer le terme « cernes ». Chez les Araucarias, certains individus ne produisent pas d'anneaux. Par contre, chez les Conifères des latitudes tempérées, chaque anneau représente simplement la croissance d'une seule année; on y distingue une zone de bois formé dès le début de la saison de croissance : c'est le *bois précoce*, ou *bois de printemps;* celui-ci est suivi par une portion plus obscure, ou *bois tardif*, déposé au cours de la dernière partie de la saison. Le passage du bois précoce au bois tardif est en général graduel; leurs proportions relatives varient beaucoup, même chez des plantes soumises à des conditions identiques, selon les caractères inhérents à chaque espèce.

La *dendrochronologie*, ou datation des anneaux concentriques des sections d'arbres, permet en utilisant les bois fossiles une datation relative ou absolue. Cette méthode, mise au point par Douglas, est particulièrement efficace lorsque le facteur limitant de la croissance est la sécheresse. Elle est seulement applicable aux 1 000 dernières années de la période postglaciaire.

Lors de la formation du bois, interviennent des facteurs de l'environnement. Le caractère saisonnier de cet environnement ne joue qu'un rôle indirect. L'effet direct

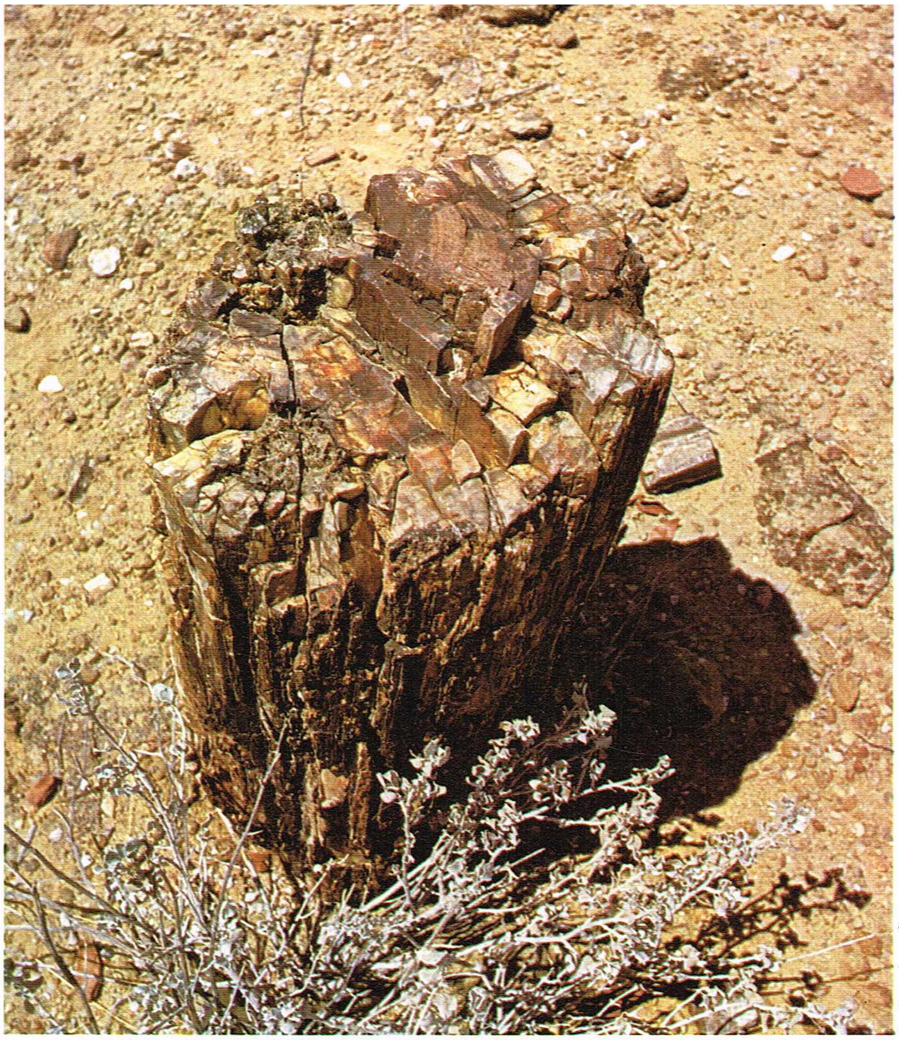

P. Jamain - Jacana

▲▼ *Les bois fossiles se rencontrent généralement sous deux formes; ci-dessus, la minéralisation par incrustation de carbonate de chaux entraîne la pétrification, telle celle que l'on observe dans la forêt d'Aurus (Sud-Ouest africain); ci-dessous un exemple classique de silicification d'un gros tronc de Conifère triasique provenant de la célèbre forêt pétrifiée d'Arizona (États-Unis).*

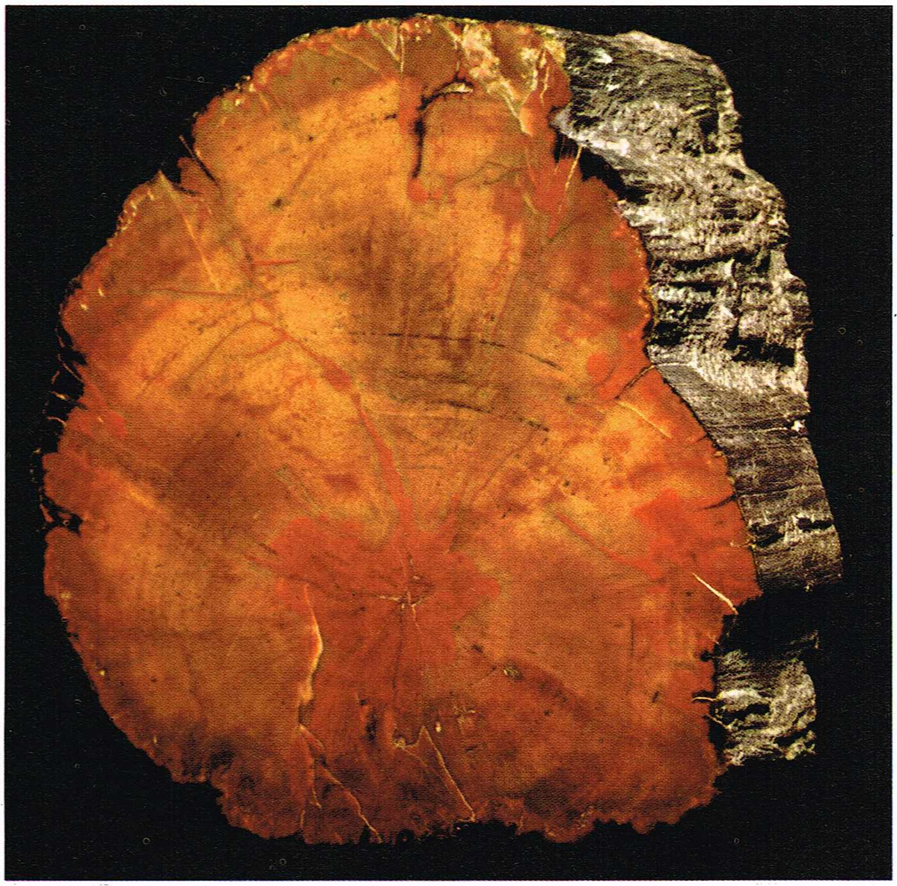

C. Bevilacqua

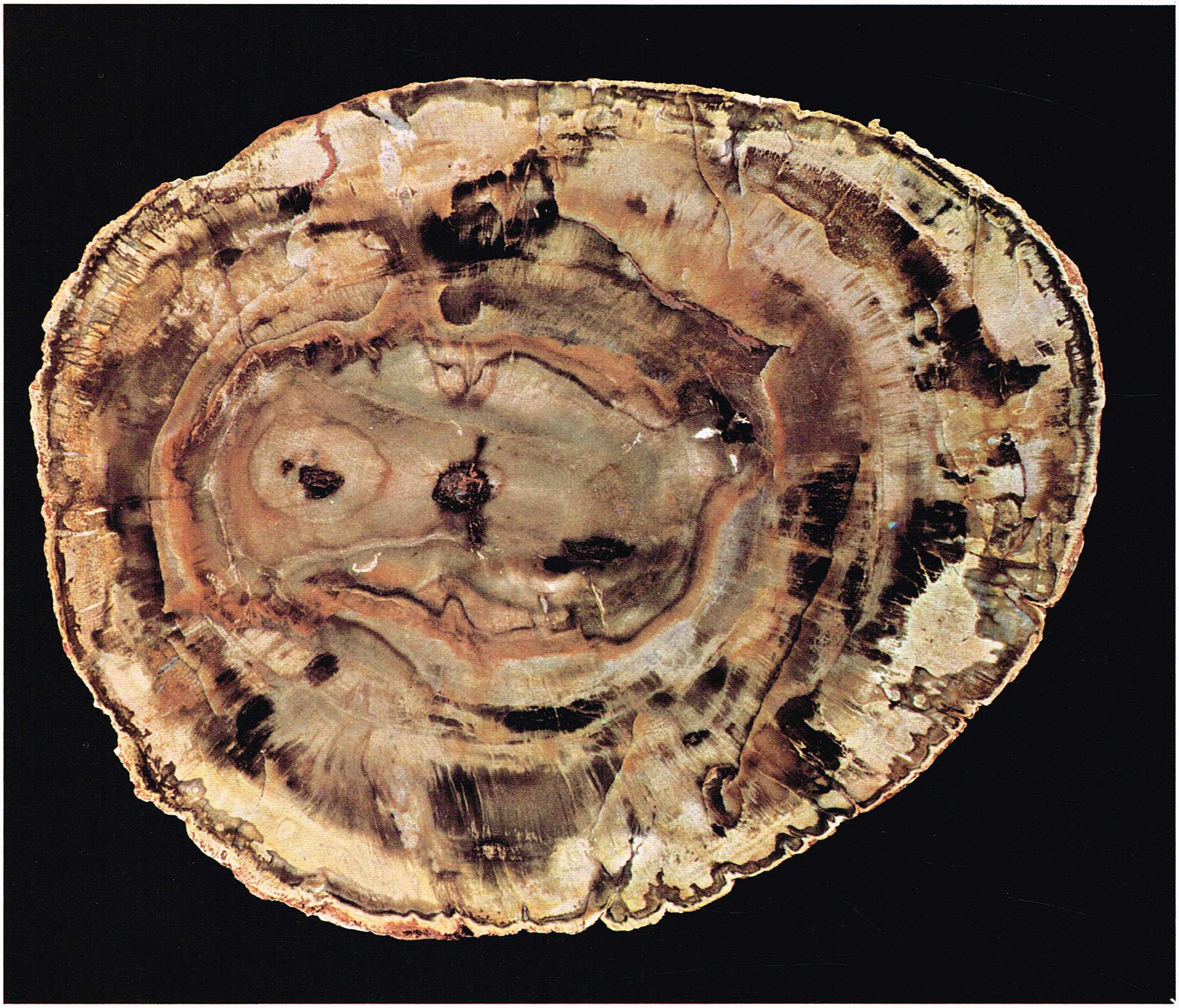

H. Chaumeton - Jacana

▲ *Un autre très bel exemple de* **bois silicifié.**

de l'environnement climatique, agissant sur la cime de l'arbre, dirige à la fois la production de matériel brut (carbohydrates) et la formation des substances de croissance, qui, à leur tour, gouvernent l'épaisseur et le caractère du bois secondaire. Le début d'un anneau de croissance d'Angiosperme ou de Gymnosperme est, à un certain point, induit par une augmentation de la longueur du jour (photopériodisme), tandis que l'ensemble du bois précoce et du bois tardif est contrôlé par l'environnement auquel la cime est exposée.

Trois facteurs non climatiques influencent la formation du bois : d'abord, l'épaisseur du bois déposé au cours d'une année dépend de la position de l'échantillon sur l'arbre entier (l'accroissement annuel est en général important au niveau de l'apex principal, puis il diminue jusqu'à la base) ; ensuite, les conditions locales d'humidité du sol et les facteurs de situation (exposition au vent) affectent aussi ces accroissements ; enfin, le caractère du bois peut être modifié par des événements biologiques ou physiques, tels que l'attaque par les Insectes, les incendies de forêts, les dégâts des tempêtes, etc.

L'absence des anneaux dans les bois euraméricains du Paléozoïque supérieur s'oppose à leur existence dans les bois du Mésozoïque et du Tertiaire. Dans le continent de Gondwana, des anneaux très nets sont visibles dans les bois du Permien ou du Permo-triasique. Ces observations sont compatibles avec l'existence, au Carbonifère et au Permien, d'un équateur traversant le nord-est de l'Amérique et de l'Europe.

La *paléoxylologie,* quoique déjà assez ancienne, ouvre de nombreuses autres voies de recherches, principalement en ce qui concerne le Mésozoïque et le Tertiaire. De plus vastes domaines climatiques devront être envisagés.

La paléontologie stratigraphique

La paléontologie est l'étude des fossiles, qui sont les restes des acteurs de l'histoire de la Terre. Cette histoire elle-même est l'objet de la géologie historique, fondée sur la description des couches de terrains (stratigraphie). Dès son origine, la paléontologie montre des liens avec la stratigraphie. On parle de *biostratigraphie* ou de *biochronologie*.

Au XVII^e^ siècle, l'Angleterre fut un grand foyer de découvertes. Lister (1638-1711) remarqua qu'une même couche de terrain peut s'étendre sur de grandes distances. Il nota aussi que certains fossiles peuvent appartenir à des espèces aujourd'hui éteintes. Parallèlement à la répartition des fossiles dans l'espace, leur répartition dans le temps attirait de plus en plus l'attention : on

cherchait à évaluer les vitesses. En dehors des datations absolues, exprimées en millions d'années, s'élaborait une chronologie relative, fondée sur la superposition et le recoupement des couches et sur les fossiles. Dès 1708, Scheucher montra que les couches sont d'autant plus anciennes qu'elles renferment des familles de fossiles plus différentes des familles actuelles. William Smith (1769-1839), le premier, devina le rôle que peuvent jouer les fossiles dans l'établissement des synchronismes. Ses premières publications (1815-1817) sont les bases mêmes de la stratigraphie. L'histoire géologique disposait désormais d'un moyen de datation qui allait rester le plus pratique pendant plus d'un siècle.

Jusqu'alors, l'étude des fossiles avait été surtout descriptive. Cuvier lui fit faire un pas de plus : en 1812, il montre que les divers organes des Vertébrés ne sont pas distribués au hasard. Ce fut la découverte du *principe de corrélations des formes*.

Une autre application de l'étude des fossiles est la distinction des époques géologiques successives contenant des faunes sans rapport les unes avec les autres. Là où Cuvier avait compté quatre étages, d'Orbigny (1802-1857) en différencia vingt-sept.

Peu à peu, l'étude des fossiles devient orientée. La micropaléontologie, concernant les fossiles microscopiques, se développe beaucoup. Les Foraminifères servent dans les recherches pétrolières ainsi que, de plus en plus, les Ostracodes, petits Crustacés à coquilles. Plus l'étude d'un groupe s'approfondit, plus on s'aperçoit qu'il peut aider, par la succession de ses formes, à dater les terrains. Les spores et les grains de pollen, fines poussières qui servent à la dissémination ou à la reproduction des plantes, renouvellent l'étude des tourbes, des charbons et des vases anciennes.

Les idées évoluent; à la conception d'un état statique de la vie se trouve substituée la notion de dynamisme, de changement continu. La notion de zone et l'idée d'évolution étant admises, le total renouvellement des faunes, au passage de chaque étage, devient alors inadmissible. L'évolution n'est pas constante entre les groupes et même au sein d'un groupe; c'est pourquoi les corrélations à grande échelle, basées sur la notion d'évolution, admettent que les changements évolutifs se font d'une manière synchrone sur toute la surface du globe; cela reste cependant un problème à résoudre.

La paléontologie stratigraphique s'oriente maintenant vers un but final. Se basant sur l'évolution des organismes, elle vise à la reconstitution de l'histoire réelle des étapes du globe. L'idée de cycle sédimentaire, avec une phase de transgression au début de chaque étage et une phase de régression à la fin, fait appel à la paléoécologie et à la paléogéographie. On essaie ainsi d'établir des synchronismes à grande échelle.

L'utilisation des fossiles est un fil conducteur pour l'évaluation de l'âge relatif des strates, même si elles sont éloignées les unes des autres. Plus ou moins combinés, suivant les cas, divers procédés sont en usage. Les méthodes quantitatives remplacent peu à peu les méthodes qualitatives. Leur application aux associations et à la variabilité des organismes est importante pour l'établissement de corrélations à grande échelle.

La *méthode évolutive*, plus ou moins quantifiée, est la plus pratiquée. Pour les corrélations locales, on se base sur les *fréquences relatives* de chaque espèce, calculées en pourcentage, à partir d'un échantillonnage statistiquement valable. On peut également construire des *diagrammes de fréquence*. Les fossiles de zone sont utilisables dans de nombreux cas. Des lignées seront établies, et les tendances évolutives pressenties permettront d'évaluer l'âge des fossiles sur un rameau.

Pourtant, l'élaboration de tables de fréquence ou de pourcentage de formes communes entre faunes n'est pas toujours valable. Des erreurs graves sont possibles dans les niveaux supérieurs de l'échelle stratigraphique et pour des coupures minimes. Les conditions de milieu dont dépend la composition spécifique d'une faune peuvent varier. On a l'impression qu'à certaines périodes des groupes d'êtres vivants disparaissent en masse et que se produisent des modifications rapides dans le monde organique : ce sont des *périodes critiques*, ou *crises*. L'épanouissement de formes nouvelles montre bien une rupture. On analyse celle-ci dans le détail, en essayant de fixer les dates de disparition ou d'apparition. Si le

Ciccione

▲ *Le naturaliste français* **Georges Cuvier** *(1769-1832), à qui l'on doit, notamment, la découverte du* **principe de corrélation des formes.**

phénomène n'est pas simultané, l'impression d'ensemble n'en reste pas moins. Pour expliquer de telles crises, on évoque des causes générales, affectant les milieux, marin et continental, à l'échelle mondiale. L'existence de grandes régressions, pour toute explication, tente de nombreux stratigraphes. Beaucoup d'études seraient encore utiles pour éclaircir ce point.

Cependant, dans les niveaux inférieurs de l'échelle stratigraphique, touchant des niveaux éloignés dans le

G. Leonardi - G. Pinna

◀ *Graptolites* **(Monograptus sp.)** *du* **Silurien supérieur** *en Espagne; ces organismes sont des* **fossiles caractéristiques de zones** *à schistes noirs.*

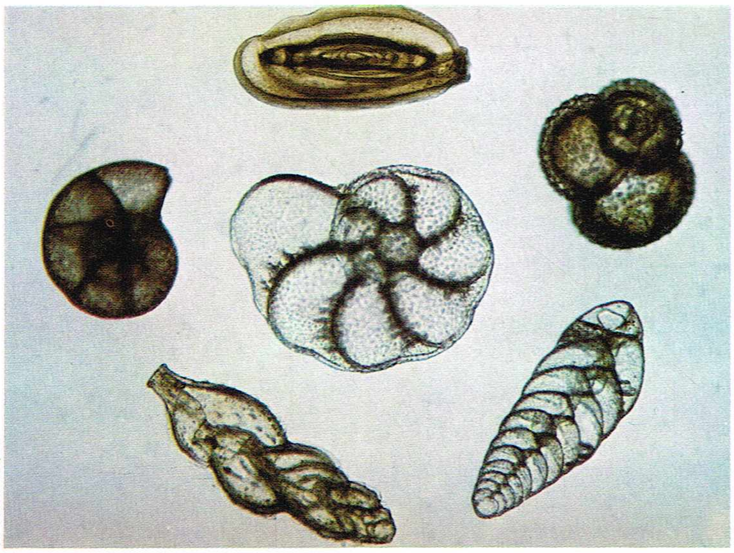

C. Bevilacqua

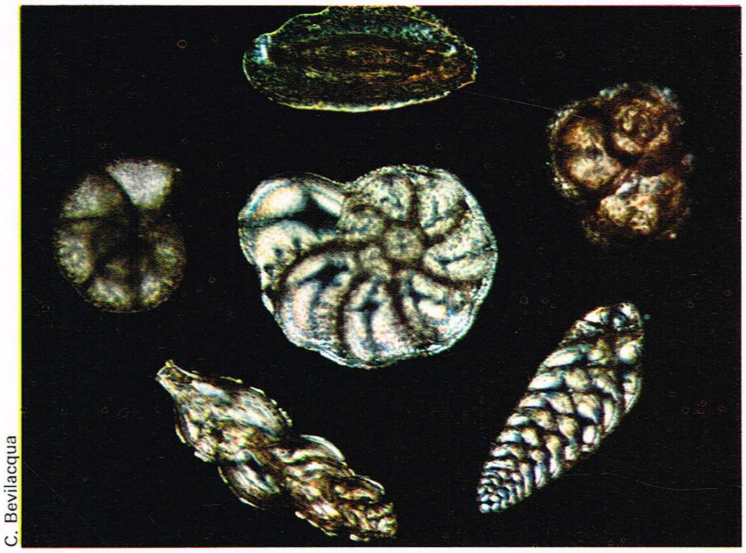

C. Bevilacqua

▲ *Quelques exemplaires de* Foraminifères *fossiles, vus au microscope (ceux de droite, en lumière polarisée [× 100 × 1,4]).*

▶ *Page ci-contre, en haut à gauche, exemple de matériel utilisé pour la* perforation *et le* carottage *de* substrats pollinifères : *A, extrémité inférieure (la chambre est ouverte); B-D, schémas du mécanisme d'ouverture et de fermeture de la chambre; E, portion inférieure de la chambre montrant le fourreau externe et l'anneau commandant la récolte et la conservation du matériau dans la chambre. A droite,* diagramme pollinique de Federsee, *en Bavière méridionale à 580 m; les chiffres romains, à droite, indiquent : I, Subarctique antique; II, Interstade d'Alleröd; III, Préboréal; IV et V, Boréal (Atlantique et Sub-boréal); VI, Subatlantique; les chiffres à gauche indiquent la profondeur; les symboles : cercle avec +* Salix herbacea; *cercle noir,* Pinus silvestris; *cercle blanc,* Betula; ×, Abies; *point noir,* Corylus; *quadratin, bois mixte de* Quercus, Tilia *et* Ulmus; *triangle,* Picea. *En bas,* diagramme pollinique de Kommerner *(Bohême) à 230 m (EMW équivalant à un bois mixte de chênes, tilleuls et ormes).*

temps, les méthodes quantitatives ont leur justification et peuvent prétendre à une grande précision. On fait des essais pour traiter statistiquement l'ensemble des données.

D'autre part, les méthodes de documentation sont primordiales en biostratigraphie. En effet, le paléontologiste se trouve confronté à un grand nombre de données ainsi qu'à de nombreuses répétitions, souvent mal présentées. L'introduction des méthodes de l'informatique dans le traitement des résultats nécessite une coordination avec les mathématiciens. Les systèmes de documentation automatique demandent une synthèse; devant la multiplication des observations précises et fines, il faut savoir généraliser. Il faut cependant rester prudent dans l'application des résultats automatiques et dans la généralisation. Tenir compte de l'évolution est impératif dans l'utilisation stratigraphique des fossiles.

Dans l'immense foule des fossiles, il faut donc s'efforcer de choisir ceux qui seront les meilleurs fossiles stratigraphiques, les plus pratiques pour dater les couches.

— Les *fossiles caractéristiques de zone,* ou *fossiles marqueurs,* doivent être fréquents. Les Graptolites, par exemple, ne sont pas essentiellement localisés aux schistes noirs, mais ils y sont si fréquents que l'on parle de schistes noirs à Graptolites du Paléozoïque.

C. Bevilacqua

▶ *Graptolite du Silurien* (Monograptus colonus) *découvert en Sardaigne (musée d'Histoire naturelle de Milan).*

— Ensuite, il faut qu'au cours du temps le groupe fossile en cause ait eu des variations rapides; ce n'est pas toujours le cas : l'animal marin à deux valves appelé Lingule avait, dès le Cambrien, il y a 550 millions d'années, une forme presque identique à celle d'aujourd'hui.

— La dernière condition favorable aux datations est que le fossile considéré ait été répandu sur une grande surface. Ainsi, certains Trilobites sont connus à la fois en Amérique et en Europe, d'autres au Maroc et au Japon. Ils sont précieux du fait qu'ils permettent d'affirmer la communauté d'âge de couches de pays très éloignés.

Une vue plus large de la paléontologie considère la notion d'« association caractéristique ». Dans chaque domaine, zone ou système, les êtres vivants forment des groupements plus ou moins constants suivant les conditions moyennes du milieu. Ces associations, ou communautés, vivant dans un biotope, sont dites *biocénoses.* Le paléontologiste doit tenir compte du fait que les ensembles de fossiles qu'il trouve dans un gisement ne sont que des restes de biocénoses plus ou moins altérées et mélangées. Ces groupements subissent des déplacements et des variations d'extension, au cours de leur évolution, de même que les êtres vivants.

Au fossile caractéristique de zone se joignent les *fossiles accompagnateurs,* ou *fossiles de faciès,* liés aux conditions de milieu et se prolongeant dans le temps. A partir de telles observations, il est possible de reconstituer le milieu. Toutes les indications récoltées sont précieuses.

L'examen de tout le gisement permet en effet de faire facilement des remarques, souvent négligées, concernant la position des fossiles, soit les uns par rapport aux autres, soit par rapport aux autres éléments de la roche. Sur le terrain, une observation minutieuse doit précéder la collecte de fossiles. Si l'on ne ramasse pas sans discrimination, on ne choisit pas seulement les spécimens remarquables. De nombreux critères permettent de se faire une idée *a priori* de l'intérêt d'un sédiment : les teintes sombres révèlent souvent la présence de restes organiques ou de spores et de pollens; le milieu de dépôt présumé est important. La granulométrie est également révélatrice, les éléments de 10 à 100 μ s'accompagnant souvent de microfossiles ou de matériel palynologique. En conclusion, la nature lithologique du sédiment considéré fournit des précisions primordiales.

Tout travail sur le terrain commence par la levée d'une coupe précise et orientée. L'étude des fossiles en place est indispensable. Le gisement doit être situé dans son environnement. Les techniques de prélèvement demandent une rigueur extrême : il faut échantillonner, avec discernement, à des intervalles non constants; le prélèvement doit conserver rigoureusement la position stratigraphique relative de chaque niveau étudié et éviter toute pollution atmosphérique. Les meilleurs prélèvements se font sur des affleurements frais ou par sondage. Dans les sédiments durs, le carottage donne toutes les assurances. Dans les sédiments meubles, comme les boues lacustres, des sondes spéciales sont utilisées. Très souvent, on ne peut extraire les fossiles de la masse du sédiment qui les enrobe. Les

plus gros fossiles sont dégagés à l'aide d'un marteau piqueur miniature.

Au laboratoire, les fossiles microscopiques sont séparés de la roche qui les entoure. La préparation du sédiment suit différentes phases selon la nature de la roche. Les sédiments meubles, comme les sables, les argiles, les marnes et les grès peu cimentés, sont désagrégés par trempage. Une fois désagrégée, la roche est tamisée, lavée et mise à l'étuve. Une étude à la loupe binoculaire des résidus de lavage permet de faire un tri et de séparer les résidus minéralogiques des restes organiques animaux et végétaux. Les échantillons obtenus peuvent être enrichis par flottation dans des liquides denses ou par séparation électromagnétique. A partir de roches dures, on peut confectionner des lames, en utilisant des lamelles de roches de quelques millimètres d'épaisseur. Quelquefois, on se contente d'orienter la roche, de la scier et de la polir, sans faire de lame mince. Certaines roches dures subissent des traitements mécaniques, tels que le broyage et l'éclatement par ébullition, ou encore des traitements chimiques.

En micropaléontologie, des méthodes spéciales sont utilisées pour étudier les microfossiles dégagés. L'observation par immersion ou par calcination fait ressortir les caractères externes du test des Foraminifères et rend parfois possible une étude par transparence. Il existe des techniques de coloration pour différencier les tests calcitiques et dolomitiques. L'étude systématique de certains microfossiles exige, pour la connaissance de la structure interne, d'avoir des sections orientées.

Tout sédiment riche en matériel pollinique est étudié avec les mêmes techniques que celles utilisées par la micropaléontologie. Les spores et pollens ne souffrent aucunement du délitage ou du broyage. Une technique nouvelle intervient : l'éclaircissement du matériel sporopollinique se fait par centrifugation, décantation ou lavage. Des traitements nouveaux et spéciaux adoptés depuis quelques dizaines d'années ont permis d'élargir le champ de l'analyse pollinique :

— les vibro-séparateurs permettent l'enrichissement des sédiments micacés ;

— les défloculants chimiques ou les ultrasons démolissent les agrégats argileux de même taille et de même densité que les pollens ;

— une agitation prolongée en liqueur, selon la méthode de Frenzel, isole les pollens des sédiments éoliens.

Ces techniques demandent des agencements très simples et une grande discipline de travail, afin de permettre une observation approfondie des fossiles. Les observations doivent se traduire par des dessins, faits directement ou à la chambre claire, par des chiffres et par des descriptions. La détermination des grands spécimens n'étant pas toujours aisée, on peut entrevoir facilement les problèmes que pose la reconnaissance des microfossiles et des spores et pollens. Les descriptions s'illustrent de figurations, comprenant un dessin de la forme dégagée et des schémas, originaux ou empruntés à des publications antérieures. Les schémas sont accompagnés de photographies de plaques minces ou de sections d'individus isolés.

On peut ainsi établir la répartition stratigraphique de chaque genre décrit et indiquer l'association dans laquelle il entre le plus fréquemment. La photographie se heurte aux problèmes de la taille, de la forme et de la couleur des fossiles. C'est un moyen d'étude et non seulement de publication. A la photographie se rattachent les procédés d'agrandissement et de projection. La microscopie et diverses ressources, telles que le contraste de phase, prennent une importance grandissante. Depuis peu, l'utilisation de la microscopie électronique et du stéréoscan s'étend.

Lors de l'observation des échantillons, les limites de toute technique apparaissent clairement, particulièrement en palynologie. Les variations polliniques peuvent se manifester au sein même d'une espèce, et la disparition des caractéristiques d'une espèce ou d'un genre est une source d'erreurs. En outre, la possibilité d'avoir affaire à des espèces totalement disparues aujourd'hui rend difficile toute détermination. En palynologie, on ne peut que classer et grouper en fonction de la morphologie : il ne s'agit plus de détermination botanique mais de morphographie. Les déterminations spécifiques sont

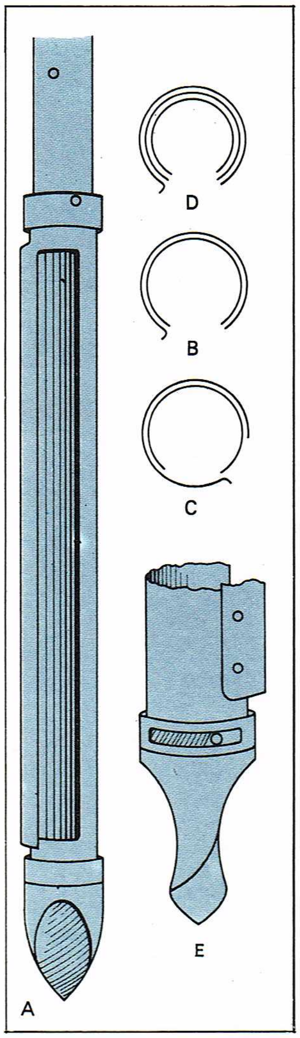

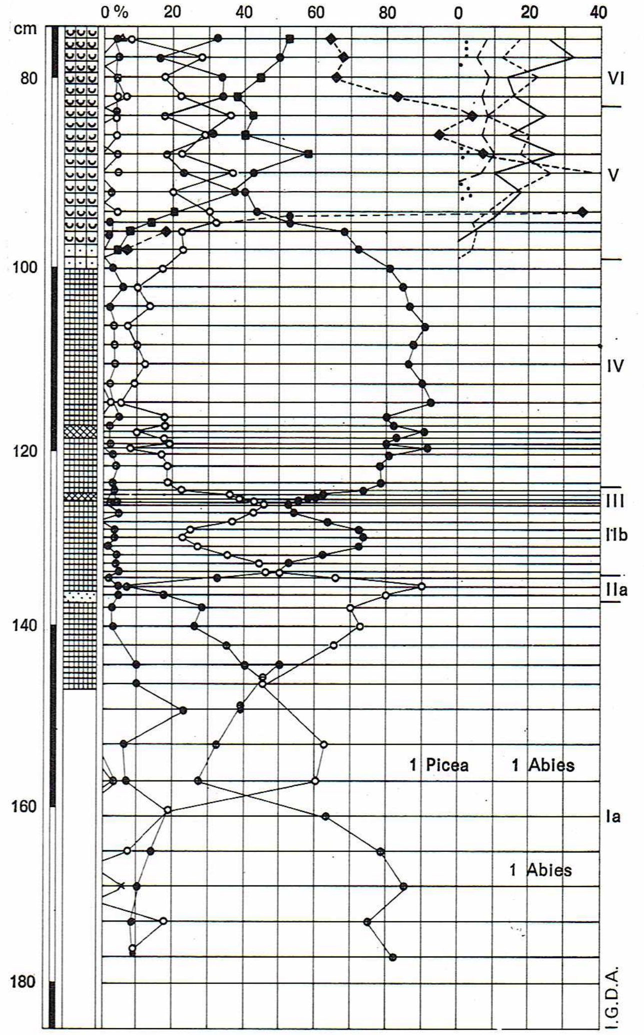

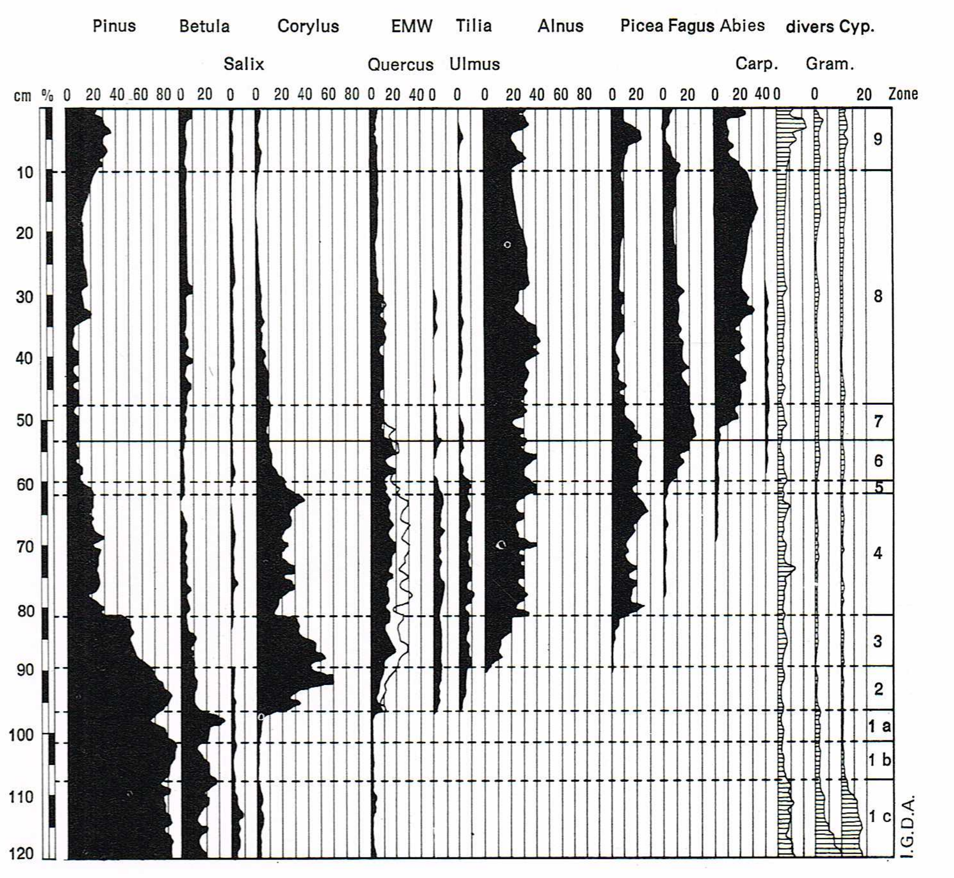

possibles jusqu'à l'orée du Quaternaire, les déterminations génériques jusqu'au début du Pliocène. Des affinités précises au niveau des genres peuvent être notées jusqu'au début du Tertiaire. L'imprécision croît au cours du Crétacé. Quelques spécimens rares, renfermant spores et pollens dans l'organe qui les a produits (fossilisés), permettent une localisation artificielle dans la classification botanique naturelle. L'évolution du monde végétal au cours des temps géologiques a déterminé, pour chaque époque, une flore et une végétation caractéristiques dont témoignent les variations en spores et pollens des sédiments contemporains. Connaître l'identité des végétaux qui ont fourni le matériel palynologique, considéré ici comme marqueur, n'est pas nécessaire. Le stratigraphe utilise tous les microfossiles organiques concentrés par enrichissement. Dans une aire atteignant jusqu'à des centaines de kilomètres de diamètre, les horizons peuvent être reliés avec précision, par sondage. Cette possibilité est précieuse dans les recherches pétrolière et charbonnière : c'est, en effet, un problème fondamental que d'établir à distance une corrélation exacte entre les horizons rencontrés au cours de sondages toujours éloignés les uns des autres. Les indications pratiques ne sont possibles que si l'on considère les variations quantitatives des « associations » de pollens, dans un grand nombre de prélèvements étudiés.

Il apparaît donc que, si toute analyse paléontologique ne peut prétendre à une précision et à une exactitude comparables à celles que l'on attend de disciplines mathématiques, elle permet, si quelques précautions sont prises à tous les stades de l'élaboration et de l'interprétation des résultats, une reconstitution qualitative précise ainsi qu'une reconstitution quantitative approximative des associations faunistiques et végétales passées, fournissant ainsi des renseignements sur leur histoire.

Les biosphères

Dans ce chapitre, nous considérerons l'évolution des conditions de vie au cours des temps et nous développerons l'étude des grands groupes végétaux et animaux de chaque biosphère.

L'origine de la vie

La vie est une forme d'énergie dont la source première est l'énergie solaire. Elle s'est développée progressivement à la surface de la Terre. Elle correspond aux possibilités qu'ont les êtres de se multiplier seuls.

Diverses théories ont été émises sur l'origine de la vie. Des études de laboratoire ont été faites pour synthétiser des molécules organiques à partir de la matière minérale. Une autre partie importante de la recherche en ce domaine est basée sur les restes et sur les traces d'organismes fossiles des premiers temps géologiques.

Pour certains chercheurs, la vie serait née du hasard, à la suite de la rencontre de diverses molécules. La théorie de la *génération spontanée* est basée sur l'existence des virus, signes de vie précellulaire, intermédiaires entre l'inerte et le vivant.

Selon la théorie de la *panspermie,* la vie a été amenée sur la Terre par les météorites. Elle se serait propagée sous la forme d'organismes très résistants, comme les Cyanophycées, pouvant traverser les espaces cosmiques sur les météorites carbonées et ainsi atteindre notre planète.

▼ ***La structure sphéroïdale, silicifiée des calcaires à* Problematica *du Précambrien.***

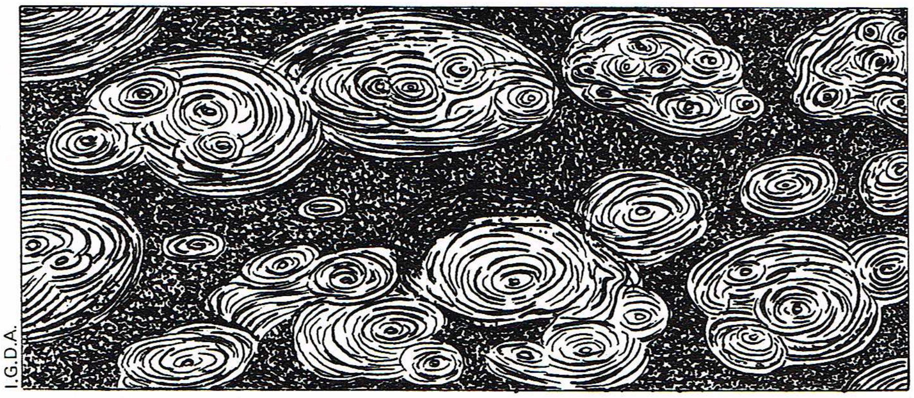

I.G.D.A.

Pour d'autres scientifiques, la vie aurait été transportée sous forme de spores, de pollens, de Bactéries, de gènes, c'est-à-dire de molécules d'ARN et d'ADN, ces acides étant à la base de toutes les cellules connues à l'heure actuelle. De fait, les météorites carbonées, par exemple celle de Murchison, tombée en Australie en 1969, contiennent des acides aminés terrestres très courants, des acides extraterrestres et des hydrocarbures biologiques. Cependant ces corps, représentatifs d'une forme de vie présente en dehors de la Terre ou témoins d'une évolution chimique, ne font que repousser d'un échelon le problème de l'origine de la vie.

De nombreux savants ont cherché à créer la vie à partir des conditions physiques et chimiques du milieu terrestre existant à l'époque de l'apparition de la vie sur la Terre, étape permettant de passer de la matière minérale inerte à la matière organique vivante. L'atmosphère primitive était dépourvue d'oxygène libre et ne possédait donc pas d'écran d'ozone. Elle aurait été composée de vapeur d'eau, de méthane, d'ammoniac et d'hydrogène. Divers savants, dont Oparine, Miller (1953) et Wilson (1959), ont obtenu des corps organiques en soumettant ce mélange à des décharges électriques, à des radiations ultraviolettes, ou à de l'énergie thermique. Ces corps sont des acides aminés (glycocolle, alanine), des substances de croissance et des acides nucléiques. Après cette création de molécules organiques, Oparine a cherché à réaliser le cap de l'organisation cellulaire par des phénomènes de coacervation : dans une solution colloïdale se produit naturellement la séparation en deux phases, l'une de solution liquide pauvre, l'autre de gouttelettes enrichies en substances solubles qui se structurent. Fox a obtenu des protéines ayant formé une membrane et ayant des possibilités de croissance par bourgeonnement.

Le début de la vie se serait donc produit en deux étapes, à partir d'un milieu non oxygéné soumis aux fortes radiations solaires. Ce fut d'abord une *évolution chimique,* vers $-3{,}1 \cdot 10^9$ ans, avec la formation de grosses molécules d'acides et d'enzymes. La molécule de chlorophylle est favorisée dans sa formation par l'ion magnésium présent dans le sima; l'accroissement des molécules se fait par autocatalyse. Suit une *évolution biochimique,* où l'on observe une simplification des radicaux utilisés : carbone, oxygène, azote, hydrogène, calcium, et une grande complexité métabolique avec des phénomènes de croissance et de reproduction. Grâce à l'oxygène biogénique, la vie se développe, et les synthèses abiogènes d'acides aminés sont arrêtées par suite de la formation de l'écran d'ozone. Vers $-2{,}7 \cdot 10^9$ ans, les premiers êtres vivants apparaissent. Ce sont les Schizophytes : les Cyanophycées et les Bactéries.

Précambrien

Les terrains précambriens, longtemps considérés comme azoïques, contiennent diverses traces de déplacements d'organismes, de nutrition, ainsi que des témoins d'organismes ou des fragments sous forme organique ou minérale.

Les fossiles archéens datent d'au moins 2,5 milliards d'années. Les micro-organismes *Problematica,* trouvés dans le Swaziland, en Afrique, sont des structures sphéroïdales silicifiées, rapportées à des Algues et âgées de plus de 3 milliards d'années. D'autres corpuscules, découverts en Australie, sont constitués d'hématite ou de goethite et réunis en amas étoilés ou en forme de framboise. Les Stromatolithes sont des encroûtements calcaires, très proches des structures algaires de mers peu profondes. Ceux de Bulawayo, en Rhodésie, datés de — 2,5 milliards d'années au maximum, sont surtout abondants vers — 1750 millions d'années. La formation de Fig Tree (— 3100 millions d'années), dans le Transvaal, contient des Bactéries, tandis que des constituants de la molécule de chlorophylle existent dans des sédiments vieux de 2,7 milliards d'années dans l'Ontario et au Transvaal.

Au *Protérozoïque inférieur* (jusqu'à — 1750 millions d'années), les Stromatolithes sont catalogués dans le Huronien canadien, dans le Transvaal et en Australie occidentale. Les structures concentriques *(Carelozoon jatulicum)* dans les calcaires dolomitiques de Finlande en sont rapprochées. La formation de Gunflint dans l'Ontario (— 2 milliards d'années) renferme des restes de végétaux : spores, hyphes, Bactéries, Algues bleues,

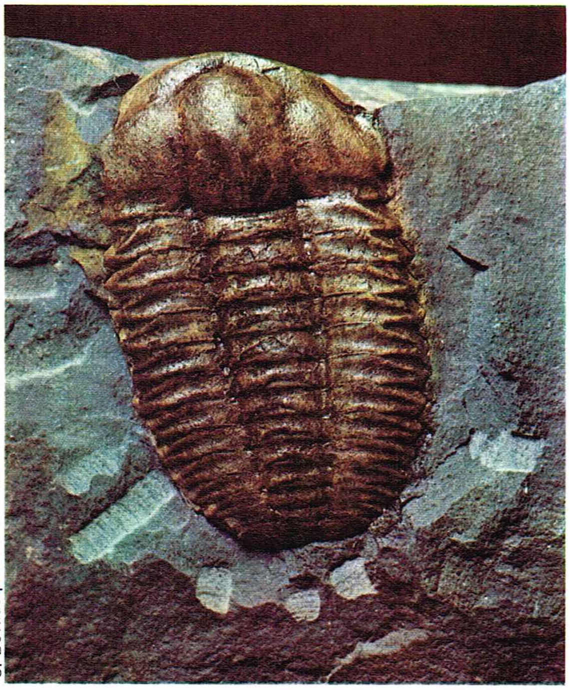

C. Bevilacqua

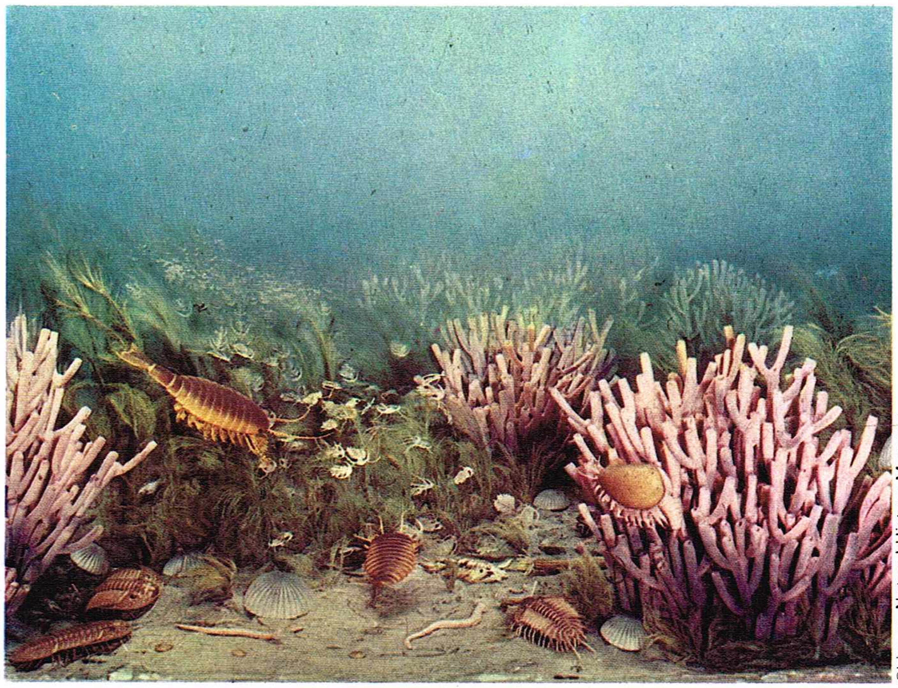

Chicago Natural History Museum

▲ *A gauche, un Trilobite du* **Cambrien (Ellipsocephalus hoffi)** *découvert en Tchécoslovaquie. A droite, un paysage marin du* **Cambrien.**

Algues vertes microscopiques. Quelques mégafossiles sont connus au Transvaal *(Gakarusia addisoni)* sous forme de dépressions circulaires avec onze appendices, et en Australie sous forme de tubes verticaux de 60 cm coiffés de tubes rayonnants.

Au *Protérozoïque moyen* (— 1750 à — 1100 millions d'années), la formation la plus intéressante est le Riphéen russe où les Stromatolithes sont abondants et où la première endofaune a laissé des traces, des pistes, des terriers; cette faune a pu peupler le rivage grâce à la formation de l'écran d'ozone protecteur.

Au *Protérozoïque supérieur,* les Stromatolithes continuent à se développer en Russie; le gisement d'Ediacara, en Australie méridionale, donne une bonne ébauche de la faune : des Cœlentérés, des Annélides *(Spriggina floundersi),* des Vers *(Dickinsonia),* des Spongiaires, des organismes rapprochés des Échinodermes, des Mollusques, c'est-à-dire toute une faune sans squelette, vivant dans la zone tidale, ou zone de balancement des marées.

Ère paléozoïque, ou Primaire

C'est à cette limite qu'apparaissent massivement des organismes hautement organisés, les Vertébrés étant cependant encore absents.

Cambrien

Au Cambrien, les espèces sont rares ou mal conservées, elles représentent néanmoins déjà les principaux types d'Invertébrés. Toutes les espèces sont marines. Divers milieux de vie existent dans cet étage, daté de — 570 à — 500 millions d'années.

Au *Cambrien inférieur,* la transgression téthysienne est favorable à la répartition de la plupart des groupes. Cela explique la constitution des biohermes, ou masses récifales calcaires des Archæocyathidés, abondants en Afrique du Nord, en Amérique du Nord, en Sibérie et en Australie. Ces récifs sont des milieux favorables aux Brachiopodes Inarticulés *(Lingula, Obolus)* et Articulés (Orthacés) ainsi qu'aux Mollusques Monoplacophores, formes benthiques fixées sur le fond, au niveau du large plateau continental bien éclairé et bien oxygéné. Les Échinodermes primitifs font leur apparition *(Stromatocystites).* Le plancton est essentiellement constitué de larves nageuses d'Archæocyathidés, de Trilobites et aussi de Crustacés *(Volborthella).* Les Trilobites, présents dans tous les milieux gréseux ou schisteux, sont très abondants mais limités à la zone boréale. Les Trilobites Olenellidés, comme les Vers *Polymera* et des Mérostomes, vivaient enfouis dans la vase ou le sable et ont laissé des traces de repos, des pistes *(Cruziana)* associées à des terriers tubulaires ou en U.

Au *Cambrien moyen,* les mers se refroidissent, ce qui entraîne la disparition des Archæocyathidés. Les Brachiopodes se diversifient. De nombreux groupes apparaissent : les Conularidés et les Carpoïdes par exemple. Les Trilobites se renouvellent et se répartissent en deux provinces géographiques : pacifique et atlantique.

Au *Cambrien supérieur,* les mouvements orogéniques provoquent une régression en Europe moyenne. Il en résulte un appauvrissement de la faune, et une transgression sur les bords du Pacifique qui sera favorable au développement important de la faune. Le groupe des Graptolites apparaît. Ce sont des organismes coloniaux, fixés le plus souvent à des coquilles ou à des galets trouvés dans les gisements de schistes noirs. Ces milieux noirs étaient des zones calmes, privées d'oxygène, avec de l'acide sulfhydrique en plus ou moins grande proportion, où ne circulaient que quelques courants de fond pouvant entraîner les organismes. Ces fonds pouvaient être colonisés par des Algues de toutes sortes : Rhodophycées, Chlorophycées, Chromophycées et surtout les Cyanophycées, pouvant former de grandes algueraies. Souvent les gisements contiennent essentiellement des Graptolites, avec des restes d'Algues, des Éponges, des Brachiopodes Inarticulés, des Vers, et des Crustacés archaïques ne se trouvant pas ailleurs. D'autres gisements, dits à faune mixte, ont des Algues moins abondantes, des Éponges, des Brachiopodes, des Céphalopodes et des Trilobites. Apparaissent aussi à cette époque les Conodontes et des groupes de Céphalopodes, comme les Ellesmérocératidés. La faune du Cambrien supérieur est donc assez diversifiée.

Ordovicien

Cet étage tire son nom de la tribu des Ordovices, qui vivaient autrefois dans le nord du pays de Galles; il s'est étendu sur une soixantaine de millions d'années (de — 500 à — 440 millions environ). Alors que le Cambrien était une période d' « expérimentation » de la vie, l'Ordovicien voit se développer chez les Invertébrés une deuxième radiation qui s'accompagne d'une modernisation des formes; vers la fin de la période, la plupart des grandes classes d'Invertébrés marins existant à l'heure actuelle étaient apparues; par la suite, les modifications n'interviendront plus qu'à l'intérieur de ces classes. De nombreux groupes, tels les Nautiloïdes, les Échinodermes et les Trilobites, atteignent leur apogée à cette époque. Les Vertébrés apparaissent avec les Agnathes, formes dépourvues de mâchoires.

Dès l'Ordovicien existent tous les grands groupes d'Algues actuels : bleues, vertes (Dasycladacées), rouges (Solénoporacées, qui peuvent constituer de grosses masses calcaires à l'intérieur des bancs coquilliers). Dans

C. Bevilacqua

▲ **Dictyonema flabelliforme**, ***Graptolite Dendroïde caractéristique de l'*Ordovicien inférieur *(Allemagne)* [*Milan, musée d'Histoire naturelle*].**

▼ ***Les Bryozoaires, ici* Pseudohornera bifida*, sont des animaux coloniaux constructeurs qui connurent un grand développement à l'*Ordovicien *puis au* Silurien.**

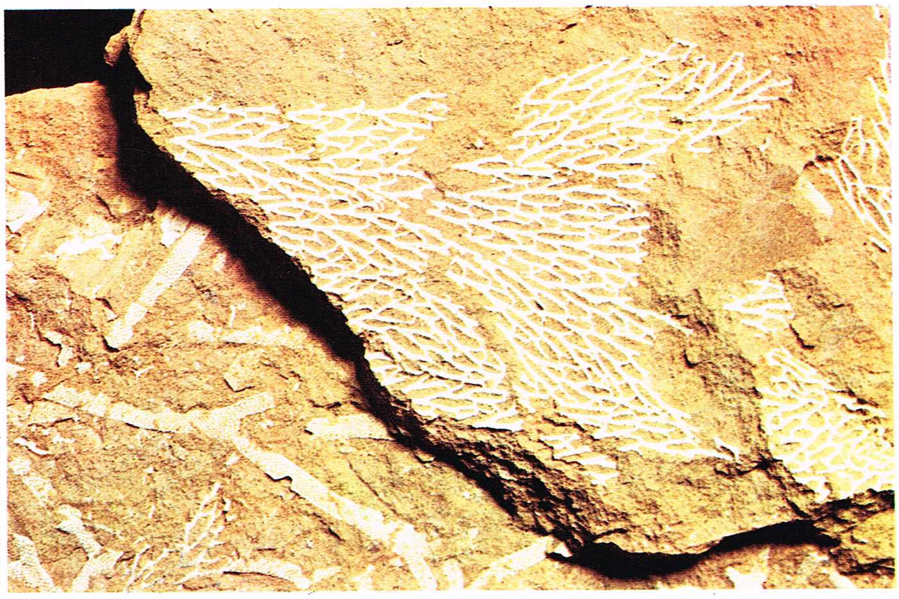

I.G.D.A. - Bevilacqua

les couches de l'Ordovicien moyen et supérieur des pays baltes, on a trouvé de vrais restes de plantes terrestres, les Propsilophytes, sortes de petites mousses de 1 cm environ.

Les Bryozoaires, animaux coloniaux constructeurs, connaissent un grand développement : on en connaît plus de 1 000 espèces datées de cette époque.

Chez les Cœlentérés, on assiste à une véritable explosion évolutive, avec de nombreuses formes nouvelles : les Stromatoporidés (polypiers Hydrozoaires coloniaux en forme de tubes, serrés les uns contre les autres et en couches superposées), les Tabulés (ainsi appelés parce que leur accroissement est marqué par des planchers successifs), les Tétracoralliaires, appelés aussi Rugueux (polypiers généralement isolés, à symétrie bilatérale).

Les Conodontes (fossiles de très petite taille que l'on considère en général comme des mâchoires d'Annélides) existaient déjà au Cambrien, mais ils deviendront importants par la suite.

Les Graptolites (animaux coloniaux fixés sur une tige, et à squelette chitineux externe) sont de très bons fossiles stratigraphiques, surtout à l'Ordovicien et au Silurien (faciès à schistes noirs) : leur évolution fut très rapide et leur distribution très large, comme il s'agissait de formes planctoniques. On distingue deux classes :

— les Dendroïdes, formant des colonies très ramifiées ; ils sont peu utilisables en stratigraphie, à l'exception de *Dictyonema flabelliforme,* caractéristique de l'Ordovicien inférieur ;

— les Graptoloïdes, presque exclusivement représentés à l'Ordovicien et au Silurien (on note quelques formes au Dévonien inférieur) ; ce sont d'excellents fossiles ; les premières formes graptoloïdes ont des branches assez nombreuses (*Dichograptus*, à 8 branches), et ce nombre diminue par la suite (*Tetragraptus,* à 4 branches ; *Didymograptus* et *Diplograptus,* à 2 branches).

Les Brachiopodes présentent une très grande variété ; on distingue les formes inarticulées (sans charnière), et les formes articulées (à charnière), qui connaissent une évolution rapide à l'Ordovicien et au Silurien.

Parmi les Céphalopodes, Mollusques nageurs à tentacules, les Nautiloïdes (formes tubulaires droites ou enroulées, à cloisons concaves vers la bouche, à siphon central ou subcentral) se développent énormément (plus du tiers des genres connus appartiennent à l'Ordovicien).

En ce qui concerne les Arthropodes, les Ostracodes (petits Crustacés enfermés entre deux valves latérales) sont assez nombreux ; les Trilobites sont à leur apogée, avec de nombreuses familles : les Illænidés (avec des formes géantes mesurant jusqu'à 75 cm), les Asaphidés, les Ptychopariidés, les Phacopsidés ; des genres comme *Calymene, Dalmania, Trinucleus* évoluent rapidement et permettent de caractériser des zones.

Les Échinodermes se diversifient beaucoup : les vrais Crinoïdes (constitués par un « calice » porté par un long pédoncule) apparaissent à l'Ordovicien moyen et existent encore actuellement ; les Cystoïdes (au corps sphérique, avec des plaques irrégulières, fixés par une tige) connaissent leur plus grand développement (ils ont vécu du Cambrien au Dévonien) ; les Blastoïdes (de l'Ordovicien au Permien), les étoiles de mer et les oursins apparaissent également, mais seront plus importants par la suite.

On trouve les premières traces de Vertébrés dans les roches de l'Ordovicien moyen ; il s'agit de formes sans mâchoires (= Agnathes), revêtues d'une formation osseuse dermique : ce sont les Ostracodermes, organismes marins.

Silurien

Le nom de Silurien est tiré de l'ancienne tribu des Silures, qui occupait autrefois le pays de Galles. Cette période qui clôt le Paléozoïque inférieur s'étendit sur une quarantaine de millions d'années (de — 440 à — 400 millions d'années environ). On y assiste à un tournant dans l'évolution, et les organismes acquièrent des caractéristiques plus modernes.

Au Silurien supérieur, apparaissent les premières plantes vasculaires, les Psilophytes, plantes sans feuilles ni racines, de 20 à 25 cm, et portant des sporanges à leur extrémité ; un système vasculaire rudimentaire leur permet de s'établir dans le milieu aérien. On trouve aussi

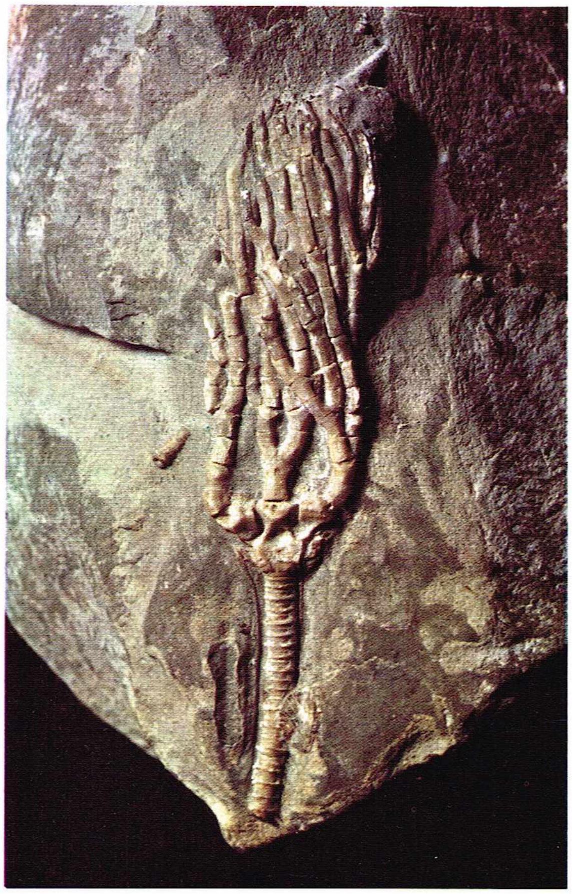

C. Bevilacqua

I.G.D.A.

◀ *A gauche, un Crinoïde fossile,* **Cyathocrinus goniodactylus,** *du* **Silurien** *(Dudley, Grande-Bretagne). A droite, reconstitution de* **Protolepidodendron scharianum** *; ces végétaux (Lycophytes) apparus au* **Silurien supérieur** *se développent au* **Dévonien.**

les *Lycophytes,* représentées par des formes primitives, herbacées.

Dans les mers, les Bryozoaires abondent. Parmi les Cœlentérés, les Tabulés sont importants et constituent des biohermes, récifs vrais, lenticulaires *(Halysites, Favosites, Goniophyllum)* ; les Tétracoralliaires (Rugueux) continuent à se développer. Les Graptolites atteignent leur apogée; ce sont surtout des Graptoloïdes, à une branche *(Monograptus).* Les Brachiopodes évoluent de manière intensive. Les Céphalopodes sont encore des Nautiloïdes, mais les premiers Ammonoïdés (à siphon ventral et à cloisons onduleuses) apparaissent dès le Silurien supérieur. Chez les Arthropodes, les Trilobites déclinent; les Euryptérides, ou Gigantostracés, se développent; ce sont des prédateurs marins; les premiers Scorpions apparaissent (formes marines). Parmi les Échinodermes, les Crinoïdes constituent de véritables « prairies » animales *(Cyathocrinus, Scyphocrinites).*

Les Vertébrés sont d'abord tous Agnathes : Ostéostracés ou Céphalaspides *(Hemicyclaspis, Cephaloaspis),* Anaspidés *(Rhyncolepis),* Hétérostracés ou Ptéraspides. Les Placodermes, Poissons cuirassés pourvus de mâchoires, apparaissent vers la fin de la période, avec des formes primitives.

Dévonien

Le nom de Dévonien est tiré du comté du Devon (Angleterre). Cette période dure une cinquantaine de millions d'années (environ de — 400 à — 345 millions d'années). L'évolution y prend une nouvelle direction : le peuplement des terres émergées, qui avaient connu une grande expansion à la suite de l'orogenèse calédonienne.

Le continent de l'hémisphère Nord est soumis à un climat particulier, subdésertique, probablement caractérisé par l'alternance de pluies torrentielles qui inondent le paysage en formant des lacs, et de périodes arides qui lui donnent un aspect désertique. Des formations continentalo-lacustres s'accumulent : ce sont les *Vieux Grès Rouges.* Au point de vue évolutif, deux événements d'importance primordiale sont à signaler : le développement de la flore continentale, qui annonce le Carbonifère, et l'enrichissement de la faune de Vertébrés, ce qui a permis de surnommer le Dévonien l'« âge des Poissons ».

Au Dévonien, apparaît déjà une véritable végétation. Les Psilophytes sont les végétaux les plus abondants. On a trouvé des tourbières silicifiées dans le Vieux Grès Rouge de Rhynie, en Écosse; elles contiennent des *Rhynia major,* des *Psilophyton* et des *Asteroxylon.* Les Lycophytes, déjà représentées au Silurien supérieur par des formes primitives, se développent *(Protolepidodendron).* Les Sphénophytes, plantes « articulées » dont les tiges sont formées d'articles séparés par des nœuds, débutent au Dévonien (*Archaeocalamites,* du Dévonien moyen au Carbonifère inférieur), ainsi que les premières Fougères *(Aneurophyton, Protopteridium, Archaeopteris).* Apparaissent aussi des Gymnospermes primitives *(Tetraxylopteris)* et des Cordaïtales (Ptéridospermées).

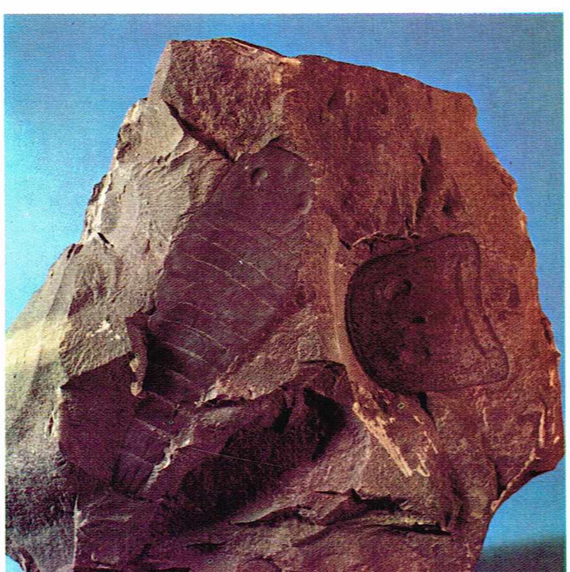

G. Leonardi - G. Pinna

◀ *Arthropode fossile :* **Eurypterus remipes** *du* **Silurien supérieur** *(New York) [Milan, musée d'Histoire naturelle].*

G. Leonardi - G. Pinna

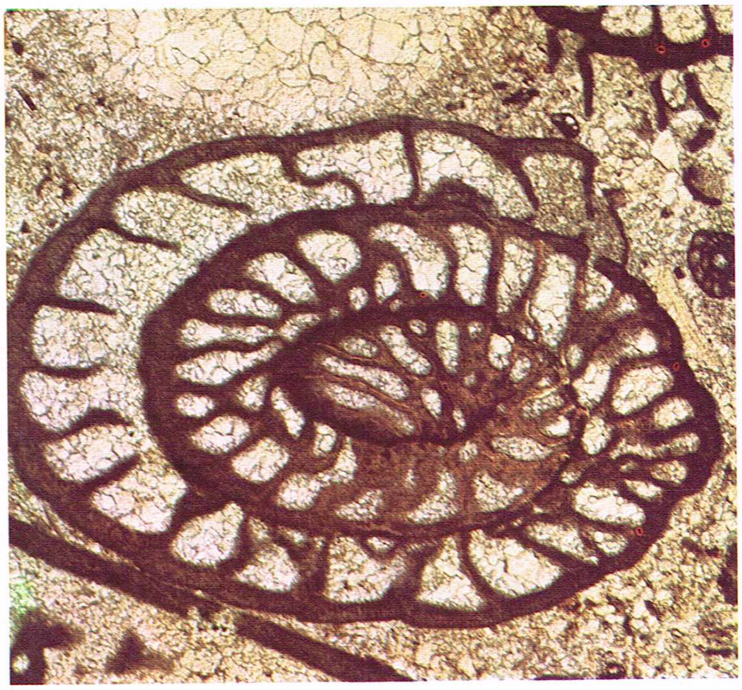

Gratziu

▲ *A gauche,* **Spirifer sp.,** *Brachiopode fossile du* **Dévonien inférieur** *de Coblence* **(Coblencien).** *A droite, un test de Foraminifère dans un calcaire du* **Carbonifère;** *les* **Foraminifères** *sont de bons* **fossiles stratigraphiques et de corrélation.**

Chez les Protozoaires, apparaissent les Endothyridés, Foraminifères considérés comme étant à l'origine des Fusulines du Permo-Carbonifère. Les Éponges, surtout les Éponges siliceuses, sont nombreuses dans certaines parties du Dévonien. Les Bryozoaires abondent, en particulier les Trépostomes et les Cryptostomes. Chez les Cœlentérés, les Stromatoporidés forment de véritables récifs dans les mers chaudes des Ardennes; ils sont souvent associés à des Tabulés *(Favosites* du calcaire récifal de Gibet, *Halisites, Pleurodictyum problematicum).* Les Tétracoralliaires sont solitaires *(Calceola)* ou coloniaux *(Cyatophyllum, Phillipsastrea).* Les Conodontes sont abondants et servent pour la stratigraphie. Les Graptolites, sauf les Dendroïdes, ont disparu. Chez les Brachiopodes, les Spiriféridés connaissent un grand développement. Parmi les Mollusques, les Lamellibranches et les Gastéropodes connaissent un grand accroissement; chez les Céphalopodes, les Orthocères sont en décadence (ils présentent des formes incurvées : *Cyrtoceras, Cyroceras*) ; les Ammonoïdés, apparus dès la fin du Silurien, se développent (premières *Goniatites*) ; les Clyménies (formes à siphon interne) se localisent exclusivement au Dévonien supérieur (calcaires à Clyménies). Chez les Échinodermes, les Cystoïdes déclinent; les Crinoïdes sont abondants et variés; les Blastoïdes, Échinides et Étoiles de mer augmentent. En ce qui concerne les Arthropodes, les Ostracodes sont abondants, les Trilobites sont en décroissance (*Phacops,* à gros yeux à facettes), les Gigantostracés connaissent un grand développement dans les milieux particuliers des Vieux Grès Rouges : *Pterygotus* (jusqu'à 2 m), *Eurypterus*. Les Insectes sont représentés par des formes aptères (Collemboles, tel *Rhyniella praecursor*) et par quelques individus ailés dans les gisements de Rhynie.

Les Vertébrés se développent beaucoup dans les milieux lagunaires. Citons : les Agnathes (Ostracodermes) avec *Pteraspis, Birkenia, Lanarkia;* les Placodermes (Poissons à mâchoires, dont le squelette interne est cartilagineux et la cuirasse dermique osseuse) avec *Pterichtys, Coccosteus;* les Prosélaciens (Poissons cartilagineux, ancêtres des raies et des requins) avec *Climatius;* les Crossoptérygiens (Poissons osseux) avec *Osteolepis, Holoptychius;* les Dipneustes (à respiration branchiale et pulmonaire) avec *Dipterus*. Enfin on note l'apparition des premiers Amphibiens Stégocéphales.

Carbonifère

Cette période, qui s'étend sur environ 65 millions d'années (de — 345 à — 280 millions d'années), est caractérisée par des dépôts houillers importants. On la divise en deux parties : le *Dinantien* (correspondant au Mississippien en Amérique du Nord) et le *Houiller* (équivalant au Pennsylvanien). Ces deux parties sont séparées par une grande épirogenèse, phénomène qui provoque l'émersion de la presque totalité de l'Europe, du nord de l'Afrique, de l'Himalaya et de la Sibérie orientale.

La période commence par une transgression sur le continent arasé des Vieux Grès Rouges dévoniens. Le climat est assez homogène; la flore et la faune ont des répartitions mondiales. Le Carbonifère supérieur est marqué par une grande pluviosité et par la diminution du plateau continental par suite de l'abaissement du niveau de la mer. Du point de vue paléontologique, parmi les faits importants, on note en particulier l'épanouissement de la flore terrestre et le grand développement des Insectes ailés et des Vertébrés Tétrapodes.

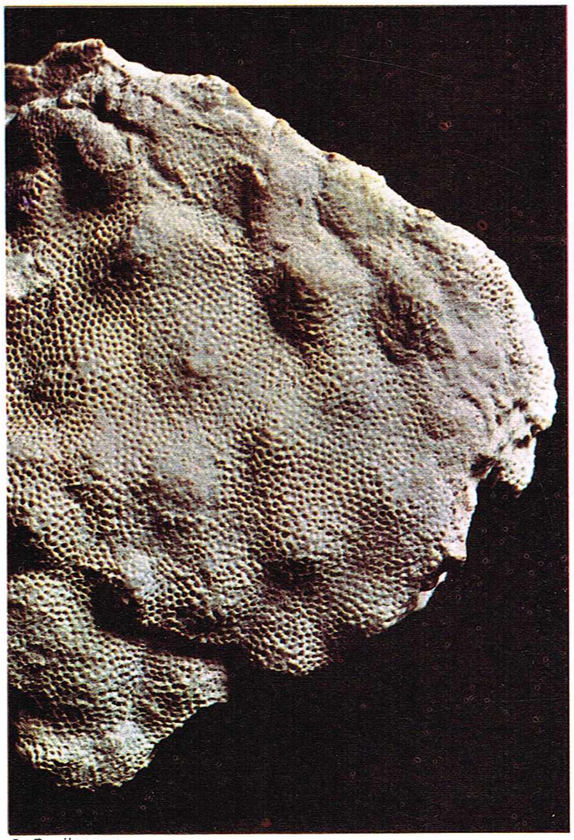

C. Bevilacqua

▶ **Fistulipora carbonaria :** *un Bryozoaire du* **Carbonifère supérieur.**

Domaine marin

L'émersion de la fin du Dévonien a provoqué la disparition de nombreux organismes : la totalité des Clyménies, de nombreux Tétracoralliaires, les Stromatopores et presque tous les Trilobites ; toute la faune néritique traverse une période critique.

Parmi les Protozoaires, les Foraminifères benthiques prennent une grande importance ; il s'agit au départ de petites formes ; puis apparaissent les Fusulines, organismes fusiformes, longs de 1 cm en moyenne, à structure interne complexe, qui peuvent être assez nombreux pour former de puissantes assises calcaires ; ce sont de bons fossiles stratigraphiques et de corrélation. Chez les Spongiaires, on observe les Thalamides et les Calcisponges, composés de loges vides et reliées ou non par un tube central. Les Bryozoaires sont caractérisés par des formes dentelées, très variées ; les Fenestrellidés dominent (*Archimedes*, présentant une forme de vie qui en général est mise en relation avec la vie en symbiose avec une Algue hélicoïdale). Les récifs de Cœlentérés constructeurs ont une importance accrue, avec des Tabulés *(Chaetetes)*, des Stromatoporidés, des Cnidaires *(Lithostrotion, Lonsdaleia, Zaphrentis)*. Parmi les Échinodermes, les Blastoïdes atteignent leur développement maximal au Carbonifère moyen ; les Crinoïdes sont en plein épanouissement au Dinantien, mais disparaissent en grande partie à la fin de cette période ; les Échinides comprennent des formes aux piquants épais *(Miocidaris)* ; ils ne se développeront vraiment qu'au Mésozoïque. Un élément dominant des faunes de Brachiopodes est formé par les Productidés, dont l'ornementation est caractérisée par de grosses côtes et des épines. Parmi les Mollusques, les Lamellibranches sont abondants (*Posidonomya, Aviculopecten* de faciès vaseux) ; chez les Gastéropodes, les Pleurotomariidés atteignent leur apogée (abondance de *Bellerophon*) ; la structure des Céphalopodes devient de plus en plus complexe : les Goniatites sont nombreuses et variées ; les premières Bélemnites apparaissent (*Eobelemnites* du Mississipien des États-Unis). Malgré le déclin des Trilobites, les Arthropodes se développent ; les Ostracodes sont assez différents de ceux du Dévonien.

Chez les Vertébrés, on peut noter la présence des Acanthodiens Placodermes (Crossoptérygiens), le développement des Sélaciens (Poissons cartilagineux) et l'apogée des Brachyodontes, broyeurs de coquilles. Les Amphibiens Stégocéphales occupent de façon massive les milieux marins.

Domaine terrestre

Toute la flore terrestre subit un grand développement, surtout au Carbonifère supérieur ; les schistes du Houiller ont permis une bonne conservation des empreintes ; les associations végétales sont différentes selon leur lieu d'implantation, les plus variées étant situées dans les régions lagunaires. Les Lycopodiacées, qui sont actuellement de petites dimensions, comprennent au Carbonifère des arbres splendides *(Lepidodendron, Sigillaria)*. Les *Calamites* (Arthrophytes) sont des prêles géantes dont les feuilles pouvaient atteindre 3 m de long. Les Fougères portent soit des spores (Ptéridophytes, Fougères vraies), soit des graines (Ptéridospermaphytes, aujourd'hui complètement disparues) ; elles présentent des formes très variées, arborescentes ou en lianes ; suivant la forme des frondes, on distingue *Neuropteris* et *Sphenopteris ; Glossopteris* et *Gangamopteris* sont des Fougères particulières au Gondwana. Les Préphanérogames prennent leur essor ; les *Cordaites*, ou Gymnospermes primitives, s'épanouissent au Pennsylvanien-Permien, surtout sur les terres élevées, mais aussi dans les mangroves ; elles peuvent atteindre 40 m de haut ; les Conifères *(Walchia, Lebachia)*, analogues à nos *Araucaria*, apparaissent. Au voisinage des glaciers (Gondwana dans l'hémisphère Sud), seuls demeurent les Ptéridospermes et les Gymnospermes. L'absence d'anneaux de croissance dans les sections de troncs d'arbres indiquerait l'absence de saisons ; en outre, la répartition très large témoignerait d'une certaine uniformité de climat.

Chez les Invertébrés, les Lamellibranches d'eau douce *(Carbonicola, Anthracomya)* sont très utilisés pour la stratigraphie, ce qui est exceptionnel. Les Insectes connaissent un grand développement au Carbonifère supérieur (formes proches des blattes et des libellules), avec des cas de gigantisme (formes de 70 cm d'envergure). Chez les Arachnides, on voit l'apparition des Scorpions de type actuel ; les Araignées sont nombreuses.

Chez les Vertébrés, les Amphibiens, qui sont déjà connus au Dévonien supérieur, sont très abondants ; ils appartiennent au groupe très particulier des Stégocéphales ; on peut citer : *Eogyrinus, Branchiosaurus, Nasopus, Seymouria*. Avec l'apparition des Reptiles au Carbonifère supérieur (*Petrolacosaurus* du Kansas, aux affinités incertaines), se réalise une nouvelle étape dans l'évolution : la libération du milieu aquatique ; grâce à l'amnios, poche remplie de liquide, l'œuf ne se dessèche pas et peut être abandonné sur terre.

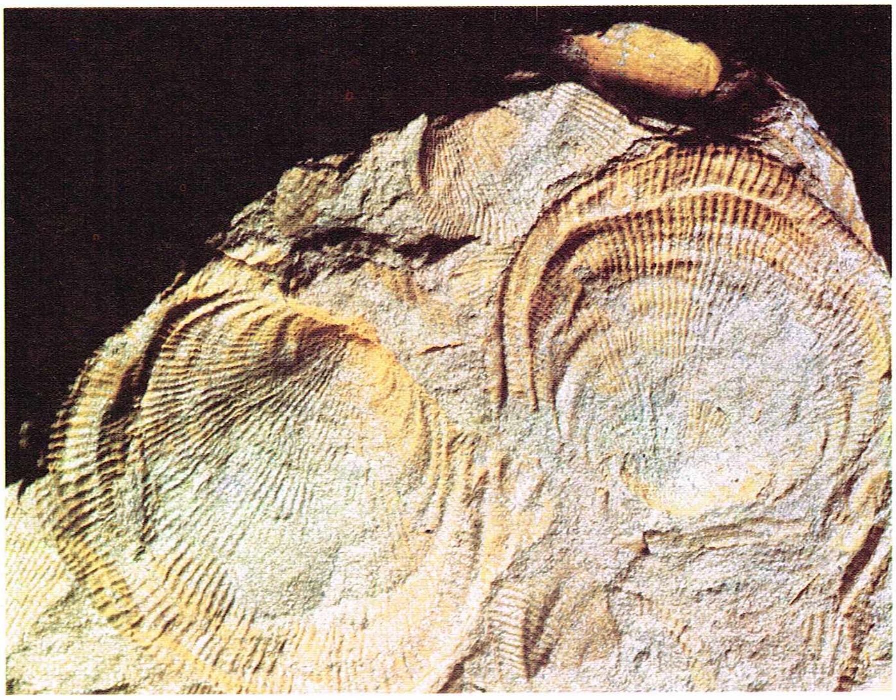

I.G.D.A. - Bevilacqua

▲ *Les Productidés, ici* **Productus cora**, *éléments dominants des Brachiopodes* **du Carbonifère**, *sont caractérisés par de grosses côtes et des épines.*

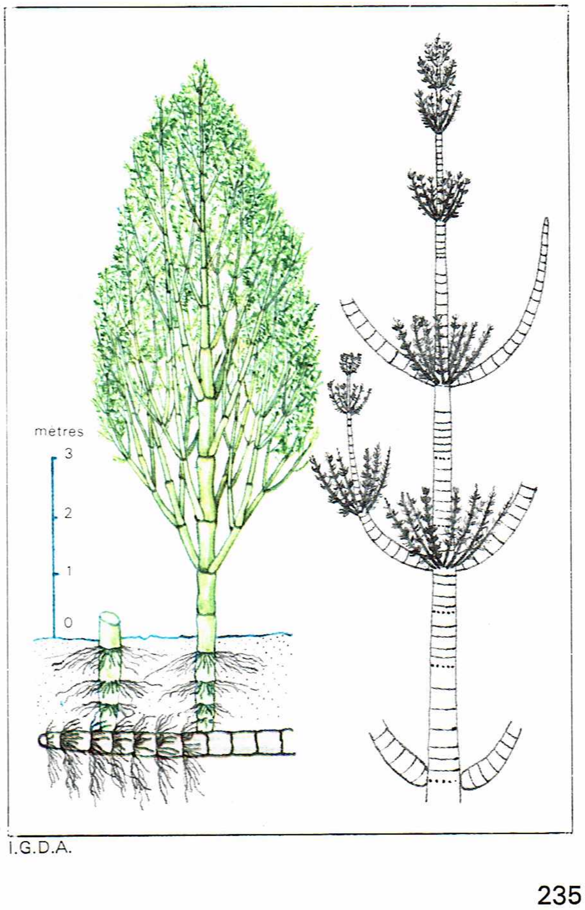

I.G.D.A.

◀ *Reconstitution d'Artrophytes, flore terrestre géante, abondante au* **Carbonifère supérieur :** *à gauche,* **Calamites (Eu-Calamites-Diplocalamites) sp. ;** *à droite,* **Calamites (Calamitina) sp.**

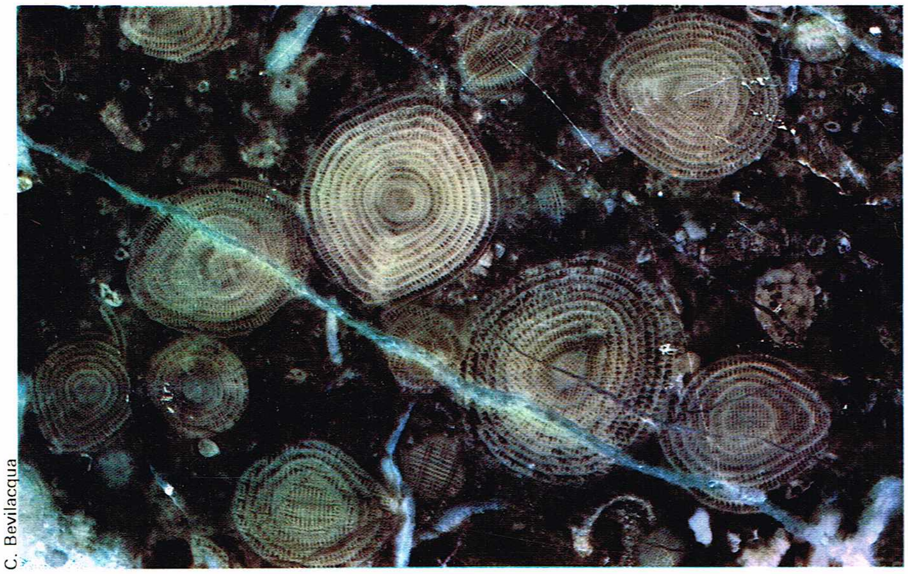

C. Bevilacqua

▲ ***Section polie de roche à Foraminifères :*** **Neoschwagerina craticulifera** ***du*** **Permien supérieur** ***(Japon).***

Le Carbonifère peut donc être subdivisé en deux parties :

— la première, à dominance marine, prolonge le Dévonien ;

— le Carbonifère supérieur, qui voit se développer l'importance de la vie terrestre, inaugure une nouvelle période de l'évolution.

Permien

Cette période, qui s'étend sur une cinquantaine de millions d'années (de — 280 à — 225 millions d'années environ), tire son nom de la région de Perm en U.R.S.S.

Dans les premiers temps persiste encore la calotte polaire de l'hémisphère Sud (Gondwana), tandis qu'au nord, les formations continentales désertiques et les dépôts d'évaporite (sel, gypse) indiquent un climat aride; la faune et la flore continentales s'en ressentent.

▼ ***Fossile de*** **Mesosaurus brasiliensis,** ***Reptile*** **du Permien** ***(Brésil).***

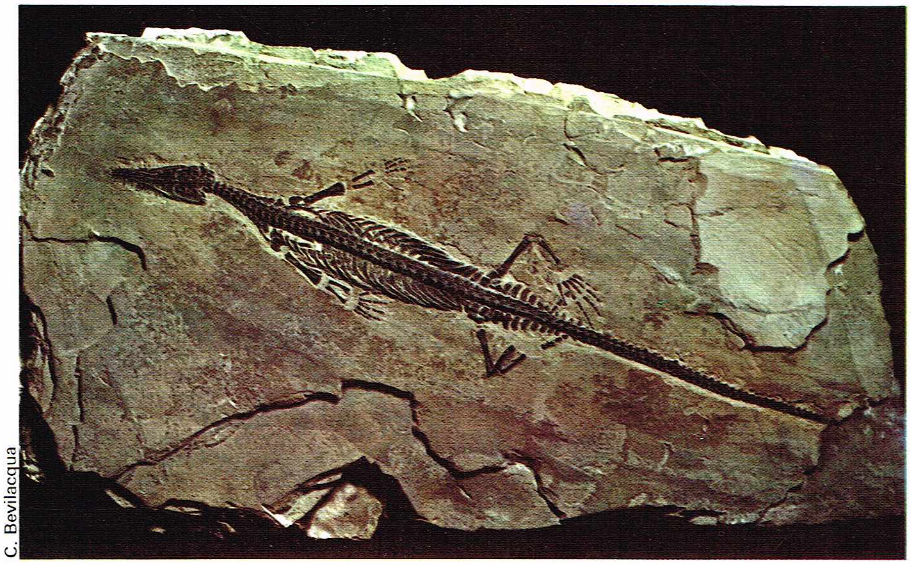

C. Bevilacqua

Domaine marin

Les végétaux sont bien représentés, avec les Dasycladacées *(Mizzia)* et une Algue rouge, *Gymnocodium,* formant des prairies sous-marines.

Toutes les grandes classes d'Invertébrés sont représentées, mais assez appauvries. Parmi les Foraminifères, les Fusulines persistent, avec de nouvelles formes à structure interne complexe *(Neoschwagerina).* Les Bryozoaires conservent une certaine importance, ainsi que les Brachiopodes (*Richthofenia,* Productidés) ; les Crinoïdes s'appauvrissent encore ; les Échinides sont représentés par des espèces à gros tubercules et à forts piquants *(Archaeocidaris).* Les Cœlentérés (Tabulés, coraux) constituent des récifs, associés aux Fusulines, aux Éponges et aux Bryozoaires. Les Mollusques sont assez développés : les Gastéropodes sont plus nombreux; les Ammonoïdes (Céphalopodes) continuent leur évolution, avec des formes aux sutures de plus en plus complexes (premières cératites). Les Trilobites *(Arthropodes)* s'éteignent.

Les Vertébrés marins présentent peu de traits originaux; on trouve des Poissons au squelette cartilagineux (Sélaciens Élasmobranches), d'autres au squelette cartilagineux partiellement ossifié (*Palaeoniscus,* Chondrostéen) et des Acanthodiens *(Acanthodes, Diplacanthus).* Les Placodermes ont pratiquement disparu.

Domaine terrestre

Les végétaux présentent une moins grande diversité qu'au Carbonifère. L'Algue d'eau douce *Pila bibractensis* contribue à former les « bogheads », sortes de charbons bitumineux. Les Lycopodinées deviennent rares; les *Lepidodendron, Sigillaria* et *Cordaites* persistent, ainsi que les Ptéridospermes, les Gymnospermes et certaines Fougères (Glossoptéridales du Gondwana) ; l'apparition en masse des *Callipteris* (Ptéridospermées) caractérise le début du Permien. Les Conifères prédominent, particulièrement en Europe et en Amérique du Nord : la flore à *Walchia piniformis* est pratiquement caractéristique du Permien inférieur; au Permien supérieur, elle fait place au genre *Voltzia,* qui persiste dans le Trias. Enfin, les Ginkgoacées apparaissent.

Chez les Invertébrés, les groupes d'Insectes du Carbonifère deviennent rares; à la place, apparaissent de nouveaux groupes, variés et abondants, dont les Insectes à métamorphose complète.

Parmi les Vertébrés, les Amphibiens sont toujours des Stégocéphales; les Rachitomes sont de grosses formes, chez qui l'adaptation à la vie continentale est maximale *(Eryops, Archegosaurus)* ; les Seymouriamorphes (Anthracosauriens) sont à la limite entre les Amphibiens et les Reptiles : crâne un peu déprimé, un seul condyle occipital (citons *Seymouria* du Permien inférieur du Texas). Les Reptiles se développent beaucoup. Les

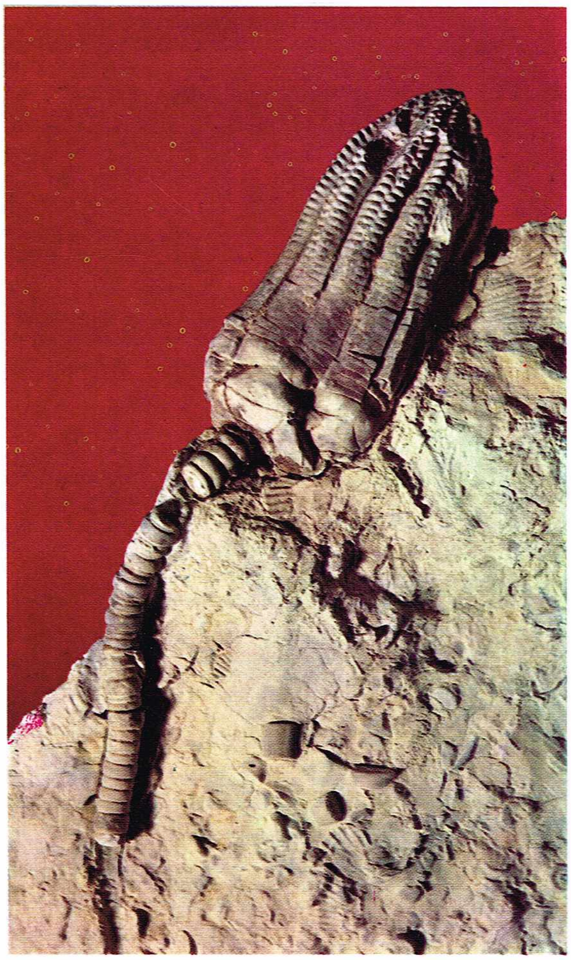

C. Bevilacqua

► ***Calice et pédoncule d'un Crinoïde*** **(Encrinus liliiformis)** ***du Trias moyen découvert dans le Würtemberg, Allemagne (Milan, musée d'Histoire naturelle).***

Anapsides ont un crâne dépourvu de fosses temporales; parmi eux, on peut citer les Cotylosauriens (*Diadectes* du Texas; *Paraieasaurus,* herbivore amphibie d'Afrique du Sud et du Texas); les Synapsides, de tendance mammalienne, ont une seule fosse temporale, tels les Pélycosauriens (*Dimetrodon,* carnivore du Texas; *Edaphosaurus,* herbivore du Texas); enfin, les Thérapsides apparaissent au Permien supérieur, principalement en Afrique du Sud et en U.R.S.S.

Durant le Permien, le climat est plus sec et plus varié qu'au cours des périodes précédentes. La fin de la période, qui clôt le Paléozoïque, est marquée par une émersion des continents à travers le monde; les mers peu profondes se retirent, et la réduction du plateau continental affectera profondément la faune.

Ère mésozoïque, ou Secondaire

Trias

L'ère secondaire correspond avec l'ère tertiaire au cycle alpin. Le Trias, qui se situe à la base du Mésozoïque, est l'époque la plus courte : il s'étend de — 225 millions à — 200 millions d'années. Il doit son nom au fait qu'il est constitué en Allemagne de *trois* formations (Bundstandstein, Muschelkalk et Keuper).

On a parlé de crise pour le Trias, et, de fait, une étude paléontologique montre de grandes différences avec la vie au Paléozoïque. Tous les groupes actuels sont représentés dans cette période, excepté les Angiospermes et les Oiseaux. C'est au Trias que vont apparaître les premiers Mammifères.

Domaine marin

On note l'importance des Algues calcaires : Dasycladacées, Gyroporelles et Diplopores (le calcaire à Diplopores, typique du Trias alpin, se retrouve dans le Muschelkalk).

La vie dans les mers est surtout marquée par la disparition de nombreux Invertébrés bien représentés au Permien : Fusulines, Blastoïdes, Trilobites; beaucoup d'autres groupes sont très fortement réduits : Ostracodes, Foraminifères, coraux, Brachiopodes, Échinodermes et Bryozoaires. Chez les Foraminifères, déjà désorganisés au Permien, deux familles s'éteignent (Endothyridae et Fusulinidae); d'autres apparaissent parmi les pluriloculines (Miliolidae et Ophthalmidiidae); enfin, d'autres explosent (Lagenidae). Parmi les Cœlentérés, les Tétracoralliaires et la plupart des Tabulés disparaissent; il y a apparition des Hexacoralliaires, qui forment quelques récifs, notamment la formation dolomitique du Trias moyen (association Algues-coraux). Les Brachiopodes connaissent aussi une période de crise au Trias moyen; deux familles émergent (les Rhynchonellacées et les Térébratulacées). Chez les Échinodermes, à côté de la disparition des Blastoïdes, on note l'apparition chez les Crinoïdes d'un ordre nouveau : les Articulata (*Encrinus liliiformis* du Muschelkalk). Parmi les Céphalopodes, ce sont les Cératites qui dominent; les Nautiloïdes s'éteignent, sauf *Cenoceras* et *Nautilus,* qui vit encore actuellement; c'est au Trias que le type ammonitique, avec cloison présentant des lobes et des selles, apparaît. A côté de ces groupes où les innovations sont nombreuses, d'autres résistent mieux : ce sont les Lamellibranches *(Daonella)* et les Gastéropodes (*Pleurotomaria* à sinus).

Chez les Invertébrés, on note, par rapport au Paléozoïque, de grandes variations dans les associations. Les Pélécypodes et les Gastéropodes remplacent les Brachiopodes; les Ammonites et les Bélemnites remplacent les Nautiles, et les Crustacés les Trilobites. Alors qu'au Paléozoïque les Trilobites et les Brachiopodes dominaient les mers, au Trias ce sont les Cératites (pour le Trias germanique) et les Ammonites (pour le Trias alpin).

Les Vertébrés aquatiques sont représentés principalement par les Poissons : les Sélaciens sont peu nombreux mais bien répandus partout; quelques Crossoptérygiens Actinistiens se réadaptent au milieu marin (avec transformation du poumon en vessie natatoire); les Holostéens se développent, alors que les Chondrostéens régressent. Les Amphibiens sont issus de Crossoptérygiens du Dévonien; au Trias, certains retournent à la vie aquatique. Il en est de même pour certains Reptiles : l'ère secondaire est l'ère de cette classe, dont l'importance est liée à sa grande variété : Ichthyosauriens, Mixosauriens, Sauroptérygiens (*Nothosaurus,* qui mène une vie amphibie).

I.G.D.A. - Bevilacqua

▲ *Le* **Trias,** *époque la plus courte du* **Secondaire,** *voit de nombreux groupes disparaître, ou se réduire comme les* **Brachiopodes;** *ici, empreintes de* **Tetractinella trigonella,** *du* **Trias.**

Domaine continental

La vie sur terre est mal connue à cause de mauvaises conditions de conservation (milieu oxydant) et aussi des conditions de vie difficiles qui y régnaient (zone tropicale aride, réduction des terres émergées); il en résulte une pauvreté en fossiles terrestres. On note un appauvrissement de la flore terrestre : les Ptéridospermées et les Lycopodinées régressent; certaines flores sont remplacées : ainsi la flore à *Glossopteris* du Gondwana tend à être remplacée par celle à *Thinnfeldia* (Ptéridospermée). Par contre, les Gymnospermes sont en pleine expansion, en particulier les Ginkgoales, les Cycadales et les Bennettitales qui dominent au Trias supérieur; les Coniférales s'établissent avec *Voltzia* et *Araucarioxylon*. A la fin du Trias, les flores paraissent uniformisées sur tout le globe.

Parmi les Poissons d'eau douce, il reste des Dipneustes (genre *Ceratodus*); les requins ont abandonné le continent; certains Crossoptérygiens sont retournés à la mer. Les Reptiles dominent la vie terrestre, avec de nombreuses variétés issues de deux lignées cotylosauriennes du Permien; ces Reptiles sont soit herbivores, soit carnivores (Pseudosuchiens), de petite taille, puis de taille de plus en plus grande. Il y a apparition des Dinosauriens, représentés par des Sauripelviens Théropodes : ce sont des Carnivores bipèdes dont on a retrouvé des traces dans la vallée du Connecticut (États-Unis). A la fin du Trias, la suspension de la mâchoire se fait grâce à l'articulation dentaire articulaire (Ictidosauriens). C'est au Trias supérieur qu'apparaissent les premiers Mammifères (Docodontes), de petite taille. Cependant, la plupart des biotopes étant largement occupés par les Reptiles,

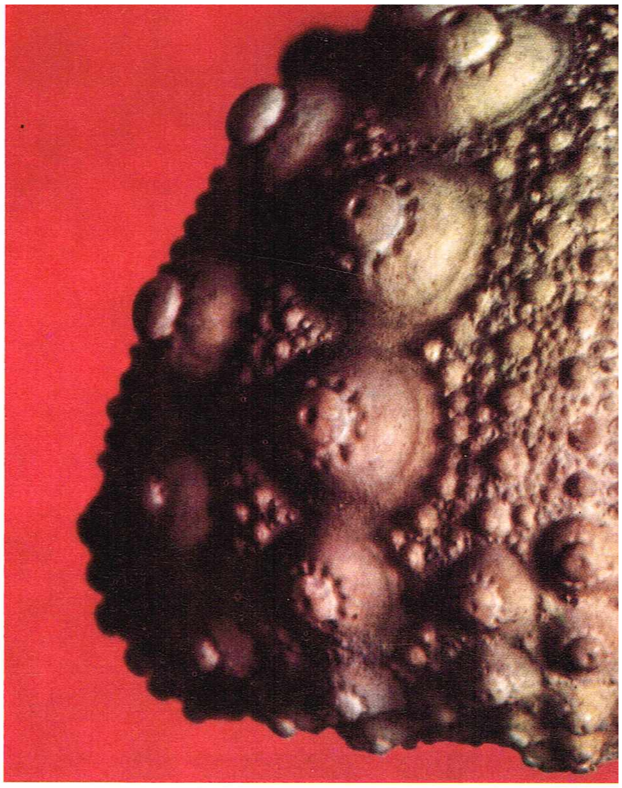

C. Bevilacqua

▲ *Ci-dessus, Ammonite fossile du* Jurassique inférieur : Peranoceras subarmatus. *Au centre, au* Jurassique moyen, *les formes marines se développent pour vivre des coraux; ainsi cet Échinide Régulier* (Hemicidaris crenularis).

▼ *Au Lias, l'importance des Brachiopodes, tel ce* Prionorhynchia quinque plicata, *diminue sensiblement.*

l'épanouissement des Mammifères ne pourra avoir lieu avant le Tertiaire.

La vie au Trias semble bien différente de celle des époques précédentes; cela est dû pour une part à des changements dans les conditions de vie (salinité des mers et augmentation de leur étendue, climat plus aride sur la Terre). Les espèces réagissent, soit en s'adaptant à partir de formes paléozoïques, soit par l'apparition de formes nouvelles. A cet égard, il est possible d'émettre l'idée d'une crise : celle-ci est effectivement perceptible dans chaque groupe. Cependant, il ne faut pas oublier que tout changement se prépare à l'avance et que l'évolution est continue, les formes apparues au Trias ayant leurs ancêtres au Paléozoïque. En tout état de cause, les renseignements apportés par la paléontologie, associés aux connaissances tectoniques et biogéographiques, nous amènent à établir une nette coupure entre le Permien et le Trias, coupure que l'on retrouve à l'échelle mondiale. Le Trias fait figure de début d'une ère nouvelle.

Jurassique

Le Jurassique s'étend sur une période allant de — 200 à — 140 millions d'années. En Europe, il correspond à un grand cycle sédimentaire débutant par une transgression au Lias et se terminant par une régression au Malm. Le Jurassique se divise en trois sous-étages : le Lias, le Jurassique moyen, ou Dogger, et le Jurassique supérieur, ou Malm.

Lias

Dans les mers, les Lamellibranches *(Cardinia, Opisoma, Gervilleioperna, Pachymytilus* et *Megalodus)* et les Gastéropodes sont de grande taille, ce qui témoigne de l'existence de conditions favorables à la sécrétion de coquilles. Les bancs d'huîtres apparaissent, et les gryphées peuplent les fonds vaseux. Les mers peu profondes facilitent le développement de prairies de Crinoïdes *(Pentacrinus, Balanocrinus, Millericrinus)*. L'importance des Brachiopodes devient faible; il ne reste plus que les Inarticulés et, parmi les Articulés, les *Spiriferina* (seul genre qui persiste chez les Spiriféridés), des *Rhynchonella* et des *Terebratula,* qui se rencontrent depuis les formations marines jusqu'aux formations lagunaires. Le climat chaud permet le développement d'une grande quantité de polypiers et d'Algues calcaires vivant dans les lagunes abritées (Afrique du Nord). D'autres lagunes, à fond sablo-vaseux taraudé par des Vers *(Chondrites),* permettaient des associations diverses à Ammonites, Crinoïdes et Ichthyosaures.

Sur terre, les Cryptogames vasculaires laissent la place aux Conifères, aux Ginkgoales, aux Cycadophytes (*Zamia, Podozamia,* etc.) et aux Fougères. Les grands Reptiles apparaissent avec les vrais Crocodiliens, les Ptérosauriens et les Stégosaures. Les Insectes sont fortement représentés au Lias, les Hyménoptères apparaissent et les Mécoptéroïdes se diversifient. Les Permochoristides disparaissent *(Liassophyla)*.

Jurassique moyen

C'est l'époque des récifs coralliens (Hexacoralliaires) à polypiers massifs vivant dans un climat chaud (plus grande surface tropicale) et dans une mer peu profonde, avec un apport terrigène très faible puisque ces polypiers demandent pour vivre une eau très claire. Cela montre que la mer n'a pas progressé sur les terres émergées et que l'érosion est peu importante. Toute la vie s'adapte aux récifs, et les formes marines se développent pour vivre des coraux : Ammonites (parkinsonies), Gastéropodes (nérinées), Brachiopodes, Échinides (Cidaridés et Hémicidaridés) et Lamellibranches fouisseurs (pholadomyes, pleuromyes).

Par endroits, il se produit une légère transgression provoquant des lagunes saumâtres ou sursalées, où se développent des Lamellibranches (*Modiolus, Mytiloperna, Astrate,* etc.). Sur terre, les grands Dinosauriens Sauropodes amphibies vivent presque complètement immergés.

Jurassique supérieur

Dans les mers, se développent des faciès récifaux et subrécifaux. Les Ammonites se diversifient en deux

I.G.D.A. - Bevilacqua

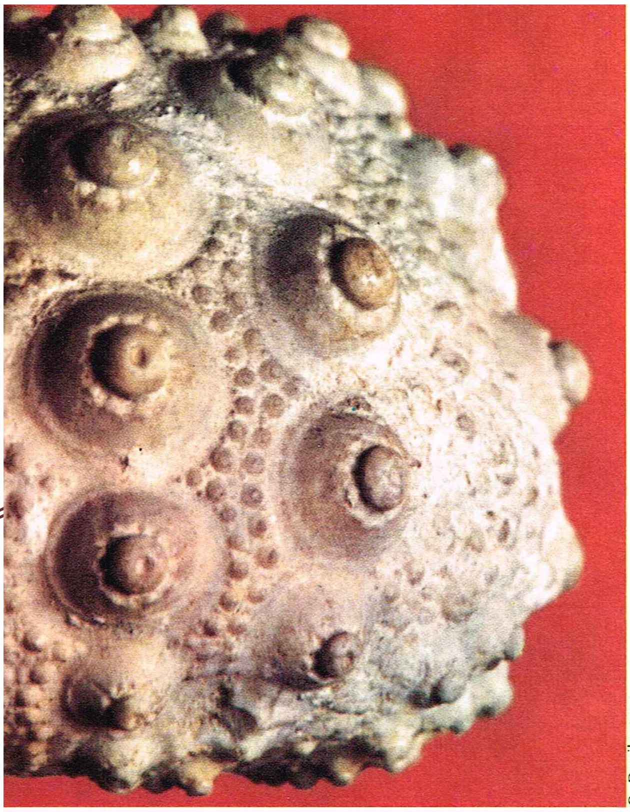

C. Bevilacqua

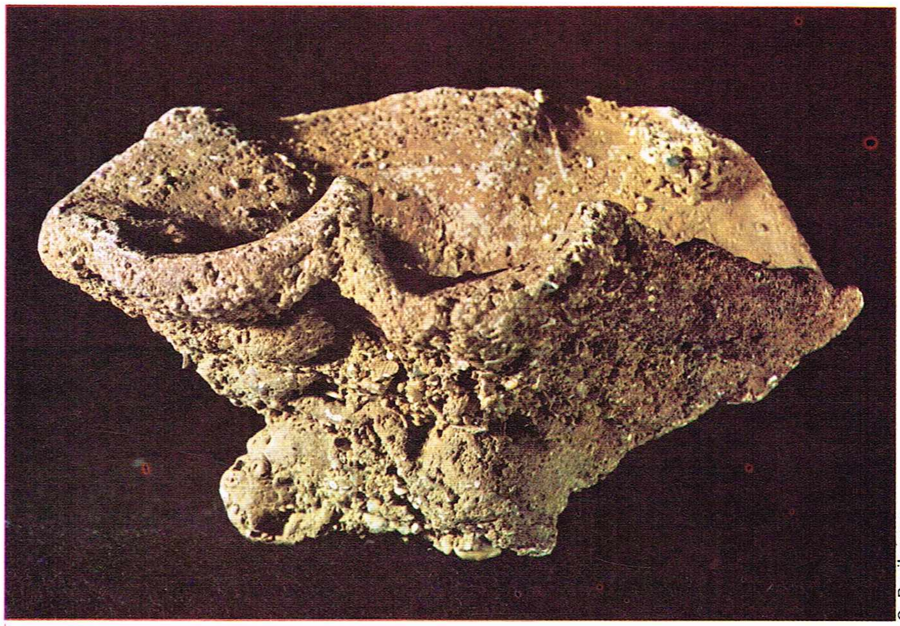

C. Bevilacqua

▲ *Une Éponge calcaire* **(Raphidonema farringdonense)** *du* **Crétacé** *(Grande-Bretagne).*

zones : une zone mésogéenne (Oppélidés, *Waagenia*) et une zone boréale (Cardiocératidés, Périsphinctidés), avec une Bélemnite caractéristique *(Cylindroteuthis)*. On trouve aussi des Térébratulidés associés à des Ammonoïdés. Dans les régions mésogéennes, à la fin de la période, s'épanouissent des Infusoires (Tintinnoïdiens ou calpionelles). Les faciès saumâtres sont caractérisés par des Trigonies, des Characées, des Gastéropodes dulçaquicoles, et par l'apparition du genre *Unio*. Sur terre, dans les régions chaudes et humides les Cycadophytes et les Bennettitales (plantes à fleurs), associées à des Filicales et aux Conifères, connaissent un développement maximal. Les grands Sauropodes herbivores menant une vie amphibie *(Diplodocus, Brontosaurus, Brachiosaurus)* prennent un essor considérable, de même que les Reptiles carnivores *(Ornitholestes, Allosaurus)*. Dans les airs, apparaissent les premiers Oiseaux, qui ont toujours des caractères reptiliens *(Archaeopteryx)*. Les Insectes présentent encore une grande variété. Les Paléoptères s'appauvrissent, tandis que les Coléoptères se diversifient, et que les Plannipennes (Solenhopitilidae, Mesochrysopidae et Kalligrammatidae) se colorent et atteignent des tailles remarquables.

Crétacé

Le Crétacé est une période identique à la précédente (— 140 à — 65 millions d'années). On peut y distinguer trois sous-périodes : le Crétacé inférieur, le Crétacé moyen et le Crétacé supérieur.

Crétacé inférieur

Il y a refroidissement de la mer, diminution des récifs (organismes vivant dans les mers chaudes) et développement de formes nageuses : Poissons Téléostéens Physostomes (Cyprinidés, et anguilles), Ammonites *(Hoplites)*; les Bélemnites s'épanouissent. Les Céphalopodes (Ammonites et Bélemnites) se développent suivant deux zones : la zone boréale *(Polyptychites, Simbirskites, Cylindroteuthis)* et la zone mésogéenne *(Duvalia* et Ammonites déroulées : *Pulchellia,* ammonites à opercule très épais : *Aptychus)*. Sur les côtes, vivent en association des Ammonites de petite taille, des Bélemnites, des Nautiles *(Hadrocheilus)*, des Gastéropodes, des Nuculides et des Polypiers. On trouve aussi des faciès à Éponges *(Barroisia)*, dont les salinités sont différentes de la normale. Les forêts de Crinoïdes disparaissent; les Spatangidés (Échinides), qui se développent *(Heteraster* et *Toxaster)*, vivent dans des milieux sableux avec les

▼ *C'est au* **Jurassique supérieur** *que les grands Sauropodes herbivores, tel ce* **Diplodocus**, *prennent un essor considérable.*

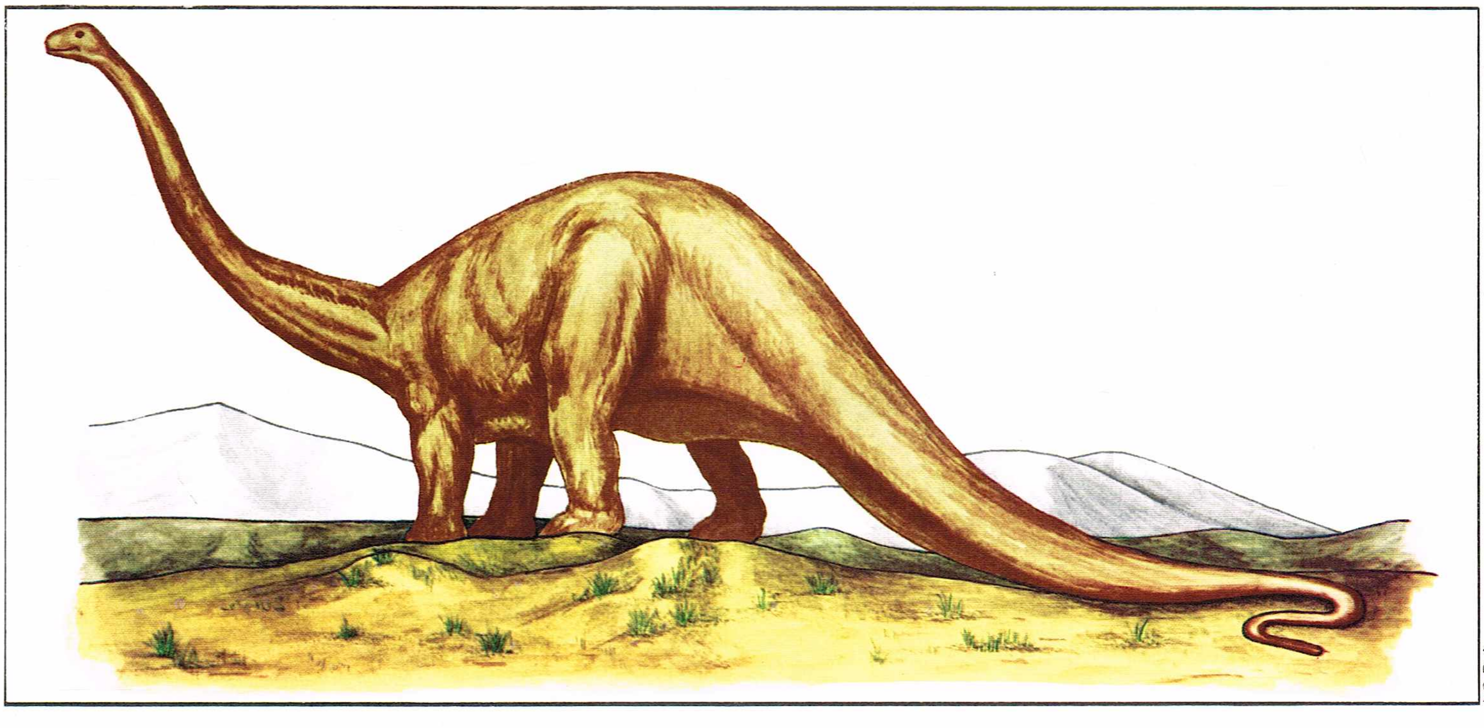

I.G.D.A.

plicatules et les exogyres (huîtres) ainsi qu'avec les pholadomyes (Lamellibranches). Dans les milieux saumâtres, vivent les *Panopea* (Lamellibranches). Chez les grands Foraminifères, se développent les Orbitolines. Sur terre, les Angiospermes Dicotylédones s'épanouissent (lauriers, figuiers, saules, etc.). Les serpents commencent à apparaître, et les iguanodons s'installent sur la terre. La vie des Mollusques se développe dans les lacs *(Viviparus, Unio, Cyrena)*.

Crétacé moyen

Certaines espèces changent de milieu, passant des lagunes aux récifs (actéonelles). Les Ammonites se déroulent de plus en plus et deviennent benthiques *(Heteroceras, Turrilites)*. Les récifs de coraux et de Rudistes (Caprinidés, Hippuritidés, Radiolitidés) évoluent. Les Orbitolines recouvrent une grande partie des régions où il y a un apport en matériaux détritiques. On retrouve encore des Ammonites et des Bélemnites, qui évoluent en donnant des seiches, des calmars, des spirules ainsi que des poulpes ; y sont associés des Crustacés Décapodes et des Poissons.

Sur la terre, s'étendent les Monocotylédones (Palmiers), et des Dicotylédones (tulipier, *Credneria*). Les Angiospermes deviennent les plantes dominantes (arbrisseaux) avec des plantes herbacées. L'évolution des grands Reptiles continue *(Elasmosaurus)* et ils deviennent de plus en plus grands.

Crétacé supérieur

Les Coccolithophoridés (Flagellés) prospèrent en mer ; ils sont associés aux Globigérines et aux *Globotruncana*. Sur les côtes, s'épanouissent des organismes benthiques tels que les spatangues *(Micraster, Holaster)*, les Éponges siliceuses, les inocérames et les huîtres (Lamellibranches), les Brachiopodes (térébratules, rhynchonelles). Dans la mer, vivent les Mosasaures, les Poissons, les Bélemnites, et les Ammonites qui deviennent de plus en plus rares et se déroulent de plus en plus *(Tissotia, Barroisiceras)*. Les Crinoïdes n'ont plus de pédoncule *(Marsupites, Uintacrinus)* et peuvent s'échouer sur des régions peu immergées. Dans ces régions vivent de nombreux bancs d'huîtres *(Ostrea)*, des Vertébrés marins amphibies ou ichthyophages (grands Poissons prédateurs atteignant 3 m de long), des Sauroptérygiens (*Elasmosaurus*, qui mesure 12 m de long), des Lépidosauriens pythonomorphes *(Mosasaurus, Platecarpus, Tylosaurus)*, des Reptiles volants et pêcheurs (*Pteranodon*, dont l'envergure est de 7 m) et des Oiseaux se nourrissant de Poissons *(Ichthyornis, Hesperornis)*. Les Rudistes et les Gastéropodes subrécifaux (nérinées, actéonelles) commencent à disparaître ainsi que les Orbitolines (Foraminifères), qui seront remplacés par les Orbitoïdes.

Sur terre, les Angiospermes s'installent définitivement et forment des forêts (magnolias, chênes, érables, hêtres, bouleaux, noyers, platanes, eucalyptus, lierres, etc.). Dans les régions marécageuses, où poussent des Fougères, des Conifères, des peupliers et des chênes, vivent de grands Reptiles herbivores (*Trachodon*, Cératopsidés) et des Carnivores *(Tyrannosaurus)*, et apparaissent les premiers Marsupiaux. Le Crétacé supérieur voit également l'apparition des premiers Mammifères Placentaires *(Zalambdalestes)*. Les Insectes sont malheureusement très mal connus car très peu de gîtes fossilifères de cette période en livrent des fossiles ; citons les Diptères et les Lépidoptères.

Pour conclure, on peut dire que ces deux périodes géologiques sont définies par les Angiospermes, les Reptiles, les Ammonites ainsi que les Coccolithophoridés.

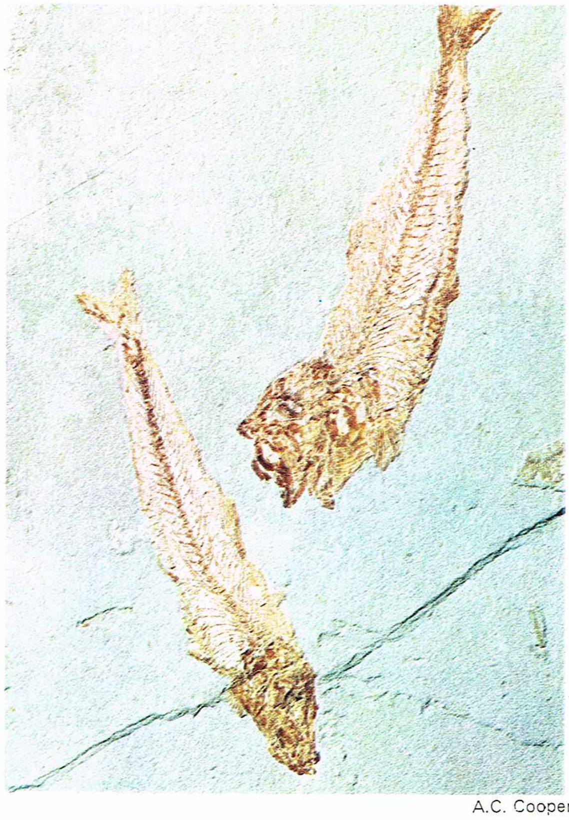

▶ ***Fossiles de* Scombroclupea, *genre de Poissons vivant au* Crétacé.**

A.C. Cooper

Ère cénozoïque, ou Tertiaire

Le terme Tertiaire, ou Cénozoïque (*kainos* = récent), a été proposé par A. Brongniart en 1810 pour grouper tous les terrains plus récents que la craie. Ce n'est qu'en 1929 qu'on en a disjoint le Quaternaire. Le Cénozoïque a une durée totale de 65 millions d'années, dont 2 millions correspondent à la période quaternaire. L'ère tertiaire est donc la plus courte des ères géologiques.

Au point de vue structural, le Tertiaire ne représente que le complément du Secondaire : les deux ères couvrent ensemble le cycle orogénique alpin. Au cours du Tertiaire, on assiste à la mise en place des principales structures alpines et au commencement de leur destruction, d'où l'abondance des formations détritiques auxquelles s'ajoutent dans les aires stables des dépôts carbonatés.

La paléogéographie s'achemine vers la géographie actuelle ; l'Atlantique Nord s'ouvre complètement, tandis que l'Atlantique Sud continue à s'élargir ; ce n'est qu'au Pliocène que la Mésogée prend sa physionomie actuelle.

Au point de vue paléontologique, les animaux et les plantes préfigurent ceux du monde actuel. Mais on assiste à l'apparition et à la grande explosion des Monocotylédones, qui présentent pour les formations continentales du Tertiaire un intérêt stratigraphique comparable à celui des Reptiles pour l'ère secondaire. De même, cette ère a connu une véritable explosion des Mammifères, dont le rôle stratigraphique est également primordial. D'autre part, le Cénozoïque est l'époque de la disparition des grands Reptiles, des Ammonites, des Bélemnites et des Rudistes ; c'est là un net renouvellement de faciès avec l'abondance des dépôts coquilliers néritiques. Dans les bassins sédimentaires épicontinentaux, des nouvelles transgressions ont eu lieu après la grande régression du Crétacé supérieur.

Concernant la limite inférieure de l'ère tertiaire, le terme *Danien* a été créé en 1846 par E. Desor (au Danemark), en principe pour désigner des calcaires zoogènes riches en Bryozoaires qui surmontent la craie maestrichtienne à Faxoe ou Fakse (Danemark). On n'y rencontre plus ni Ammonites, ni Bélemnites, ni inocérames, ni *Globotruncana*, et les Échinides, les Bryozoaires et les Brachiopodes y sont plus près de ceux du Montien que du Maestrichtien. Enfin, c'est dans le Danien qu'apparaissent les premiers organismes planctoniques caractéristiques du Cénozoïque : Foraminifères *(Globotruncana danica)* et nanoplanctons *(Markaluis astroporus)*. Si la base du Danien correspond à la partie extrême supérieure du Crétacé, son sommet correspond d'ailleurs au Montien de Belgique, étage incontestablement tertiaire.

La limite supérieure du Tertiaire est largement discutable. Cependant, on se refère surtout aux formations marines de la base du Calabrien, qui correspondent à une transgression caractérisée par l'apparition d'une faune froide : faune méditerranéenne quaternaire à *Arctica (= Cyprina) islandica* et à *Hyalina (= Anomalina) baltica*. Cette limite correspond à un âge radiométrique égal à 2 millions d'années.

Le Tertiaire est divisé en deux grandes périodes : le Paléogène et le Néogène.

Paléogène

Au début du Tertiaire, tous les grands groupes actuels du monde vivant sont représentés, à l'exception des Monocotylédones, qui s'épanouiront seulement à partir de l'Oligocène. Au cours du Paléocène, les Mammifères connaissent une première radiation, puis une deuxième au cours de l'Éocène; ils demeurent de petite taille, et il faudra attendre le Néogène pour que la chaîne alimentaire Monocotylédones-Herbivores-Carnivores atteigne son apogée.

La flore et la faune du Cénozoïque présentent un grand intérêt stratigraphique et paléontologique : Algues, Foraminifères, Bryozoaires et Ostracodes apportent de précieux renseignements sur la profondeur des eaux, l'agitation, la luminosité, la température, la salinité, etc.

De plus, le Tertiaire est appelé l'ère des coquilles. Parmi les Gastéropodes, les Cérithidés, par leur abondance et la préservation de leur test, sont un matériel de choix pour l'étude de la génétique des populations fossiles. Les Céphalopodes, très abondants au Mésozoïque, sont très rares et ne sont plus représentés que par le genre *Hercoglossa,* voisin des nautiles, et par les rostres des *Belosepia*. Avec les Mollusques, les formations néritiques livrent des Échinodermes, tels les genres *Echinolampas, Scutella* et *Clypeaster,* des Hexacoralliaires, des Bryozoaires et des Algues calcaires. Chez les Foraminifères, les groupes des Nummulitidés (nummulites, assilines) et des Orbitoïdés (orthophragmines, lépidocyclines) sont de bons fossiles pour établir des corrélations à grandes distances et des échelles caractéristiques; c'est en se basant sur celles-ci que l'on a pu établir, en particulier, la stratigraphie de l'Éocène des Alpes. Les géologues pétroliers ont attaché plus d'importance aux Foraminifères planctoniques et aux nanoplanctons qu'aux grands Foraminifères (nummulites, discocyclines, alvéolines), car les premiers ont une aire de répartition mondiale.

Les Insectes n'ont été préservés que dans des conditions exceptionnelles : dépôts de sources, comme les travertins d'âge Thanétien de Sézanne, au sud d'Épernay, ou l'ambre de la Baltique de l'Oligocène, etc. Les familles les mieux représentées sont les Hyménoptères, les Diptères et les Lépidoptères.

Dans la plupart des gisements à formations continentales, on rencontre en outre des débris végétaux (tiges, feuilles, fleurs et fruits), des restes d'Oiseaux, de Reptiles, d'Amphibiens et surtout de Poissons *(Vomeropsis tricerus, Eoplatax papilio, Ceratoichthys pinnatiformis)* [spécialement dans les calcaires schisteux finement lités du Monte Postale près de Bolca, Italie, où l'on trouve des dents et des otolithes de Poissons]. Des débris de téguments de tortues et de crocodiles, plus résistants que le squelette, ne sont pas rares non plus dans les formations néritiques ou lagunaires. Les dents de requins, dont la taille maximale est atteinte par celles de *Carcharodon* (15 cm), sont fréquentes dans les niveaux transgressifs. Les Poissons ont permis une bonne stratigraphie de l'Éocène de Belgique. Alors que les Reptiles survivants n'évoluent guère au cours du Tertiaire et s'acheminent vers la faune actuelle, tous les groupes d'Oiseaux sont représentés dès le Paléocène. A l'Éocène, vivent déjà la plupart des groupes actuels : des Ratites et des Carinates, dont les formes primitives étaient de grande taille, comme le *Gastornis* du bassin de Paris ou le *Diatryma* du Wyoming (États-Unis).

Au Paléocène, les principaux gisements de Mammifères se situent en Amérique du Nord et en Asie. Il n'y a pas encore de représentants des familles actuelles; toutes les formes sont de petite taille (inférieure à 50 cm). Les Multituberculés du Jurassique persistent avec *Neoplagiaulax* et disparaissent à l'Éocène. Au Paléocène, on rencontre des Marsupiaux voisins des sarigues et déjà une assez grande diversité de Placentaires, avec de petits Insectivores dans le Crétacé supérieur de Mongolie.

Voisin des Carnivores, *Arctocyon* possède un corps allongé de 45 cm, supporté par des membres courts et massifs, et terminé par une queue longue et épaisse à démarche plantigrade; cet animal, bon nageur, plus omnivore que carnivore, est un Condylarthre qui se distingue des vrais Carnivores par une carnassière indifférenciée et un encéphale plus petit et lisse.

Les ancêtres des Ongulés sont représentés par d'autres Condylarthres, comme *Phenacodus,* d'âge Paléocène à

C. Bevilacqua

◀ *Plante fossile du* **Paléogène** *(Éocène moyen), provenant du gisement de Bolca (Vérone).*

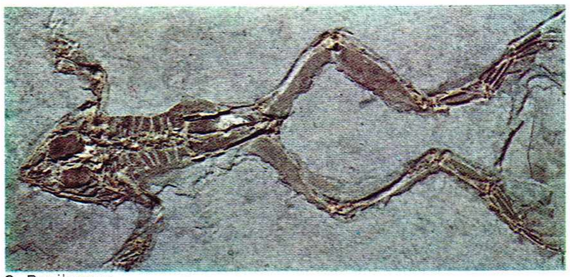

C. Bevilacqua

◀ *Fossile de* **Rana pueyoi,** *du* **Miocène supérieur** *(Libros, Espagne).*

Éocène inférieur, de la taille d'un petit loup à grande queue, à denture sans diastème et aux molaires trituberculées, et *Pleuraspidotherium;* tous deux sont herbivores.

Parmi les Lémuriens, ou Prosimiens, on peut citer *Plesiadapis,* de petite taille, ancêtre des Primates, à fortes griffes et à denture voisine de celle des Rongeurs. Les Amblypodes sont des formes lourdes à denture peu ou pas réduite, dont les molaires courtes présentent des crêtes. Les Dinocérates possèdent de curieuses excroissances céphaliques, plus développées d'ailleurs durant l'Éocène.

Le saut évolutif se situe entre le Thanétien et le Sparnacien. Avec l'extinction ou la régression des Amblypodes, des Condylarthres et des Créodontes, et l'apparition des Édentés, des Cétacés, des Siréniens, des Rongeurs, des Artiodactyles, des Périssodactyles, des Proboscidiens, des Pinnipèdes et des Fissipèdes, l'Éocène annonce vraiment la faune mammalienne actuelle. Il ne manque à cette faune que les Cervidés, les Giraffidés, les Bovidés et les Hominidés (au sens large), qui n'apparaissent qu'au Néogène. Les grands Ongulés caractéristiques de l'Éocène sont *Palaeotherium, Coryphodon* et *Lophiodon.* Les Marsupiaux y sont toujours représentés par les sarigues, le plus commun étant *Peratherium cuvieri.* Les Périssodactyles sont représentés par des Équidés des genres *Eohippus* et *Orohippus,* et des Paléothéridés, tels que *Palaeotherium;* les *Palaeotherium* vrais d'âge Éocène supérieur ont une denture complète rappelant celle des rhinocéros; on trouve aussi des tapirs, avec le genre *Lophiodon* (sans trompe) du Cuisien, des rhinocéros et des Titanothères; ce dernier groupe, caractérisé par des molaires à tubercules en V, débute par des formes sans protubérances céphaliques, lesquelles se développeront surtout à l'Oligocène. Les Lémuriens sont

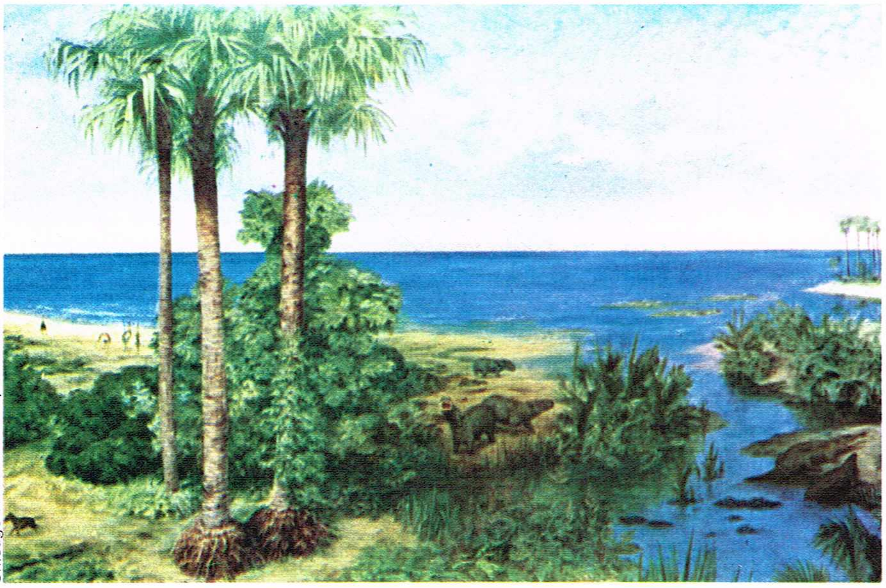

Chicago Natural History Museum

fréquents, et les premiers tarsiers apparaissent. Les Carnivores comprennent encore des Créodontes *(Pterodon)* et des Miacidés, déjà très proches des Fissipèdes avec quelques Fissipèdes vrais, comme *Cynodictis* de l'Éocène supérieur. Les Condylarthres subsistent mais sont en voie de disparition. Les Dinocérates atteignent leur apogée. Enfin, les Rongeurs apparaissent : on observe les Simplicidentés à une seule paire d'incisives à la mâchoire supérieure mais pas encore les Duplicidentés.

Un nouveau saut évolutif est marqué par la grande coupure oligocène. A l'Oligocène inférieur, les Périssodactyles de l'Éocène, avec le genre *Palaeotherium,* disparaissent, ainsi que les Prosimiens, tandis que d'autres groupes apparaissent ou se développent, tels les rhinocéros avec *Aceratherium,* les tapirs et les Artiodactyles, voisins des sangliers, aux fortes incisives et aux grandes canines. Les Équidés, avec les genres *Mesohippus* et *Miohippus,* continuent à augmenter de taille (jusqu'à 65 cm) en même temps qu'ils deviennent tridactyles. Les Proboscidiens, avec le genre *Palaeomastodon* trouvé au Fayoum en Égypte, montrent un développement des quatre défenses et de la trompe. Chez les Primates, un des premiers Simiens, *Propliopithecus* d'Égypte, est à l'origine du phylum menant aux gibbons.

Néogène

Au Néogène, comme au Paléogène, ce sont surtout les Mammifères et les micro-organismes qui apportent des précisions stratigraphiques. Parmi les Foraminifères du Miocène, on cite les Miogypsines (dernière famille du groupe des Orbitoïdidés).

Au Pliocène, les microfaunes sont très variées et très riches; les microflores (avec les pollens) prennent de plus en plus d'importance. Les autres groupes ont aussi une grande importance, en particulier dans les milieux néritiques, lagunaires et lacustres.

Les climats et la paléogéographie sont moins globaux qu'au cours des périodes précédentes, et le paléontologiste devient un paléoécologiste. Ainsi, on s'est aperçu que des associations de Mollusques vivaient dans des mers épicontinentales; dans les faluns de Touraine et du bassin du Rhône, on a mis en évidence une grande richesse de Mollusques, avec *Ostrea crassassima* (plus de 30 cm), *Murex turonensis* et *Cardita jouanneti.* Des Pectinidés, avec les genres *Pecten, Flabellipecten, Amussium* et *Chlamys,* ont permis d'établir une stratigraphie précise dans la vallée du Rhône. Les Bryozoaires aussi sont de bons indicateurs stratigraphiques et paléoécologiques, en particulier *Cyclostoma branchus.* Dans les formations néritiques, on trouve avec les Mollusques des Échinides de types Régulier et Irrégulier, tels que les *Echinolampas,* les clypéastres et les scutelles; seuls les *Echinolampas* et les clypéastres subsistent au Pliocène, et, au Quaternaire inférieur, on ne trouve plus

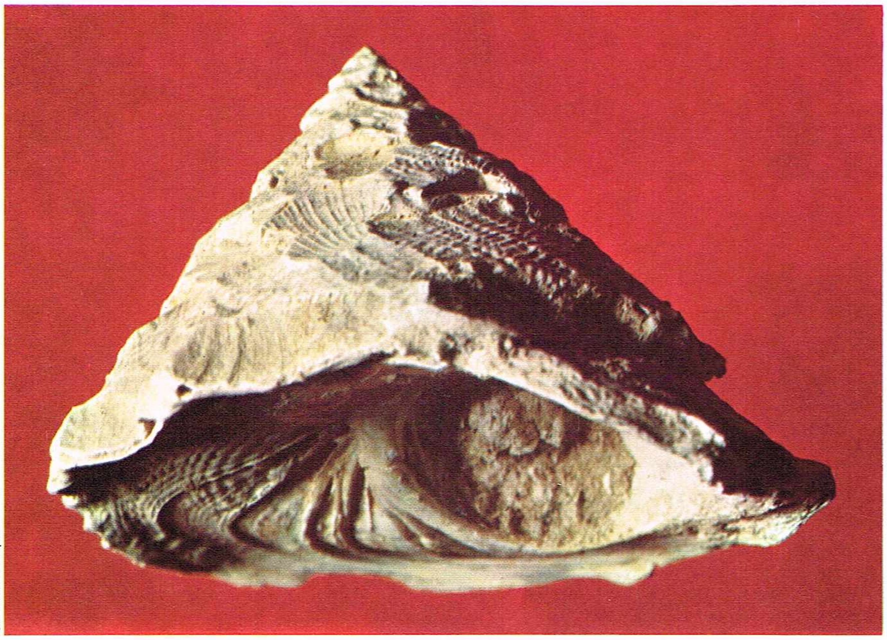

C. Bevilacqua

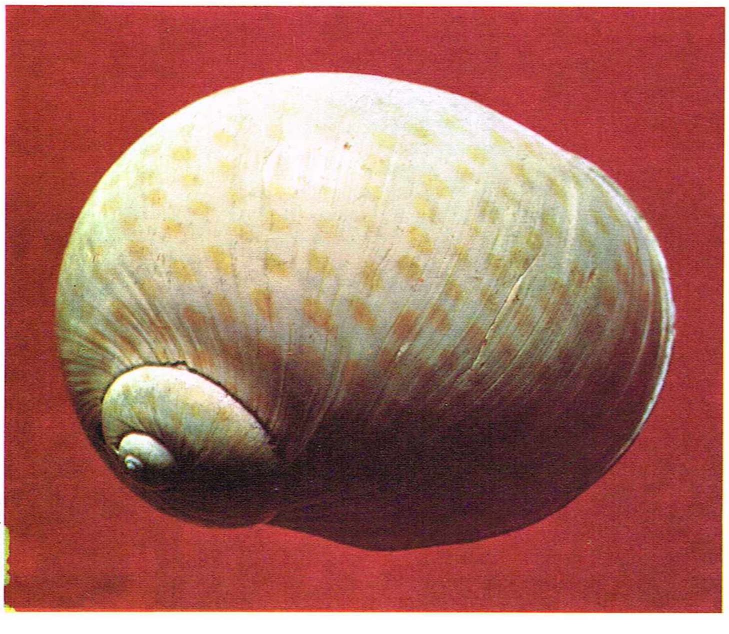

C. Bevilacqua

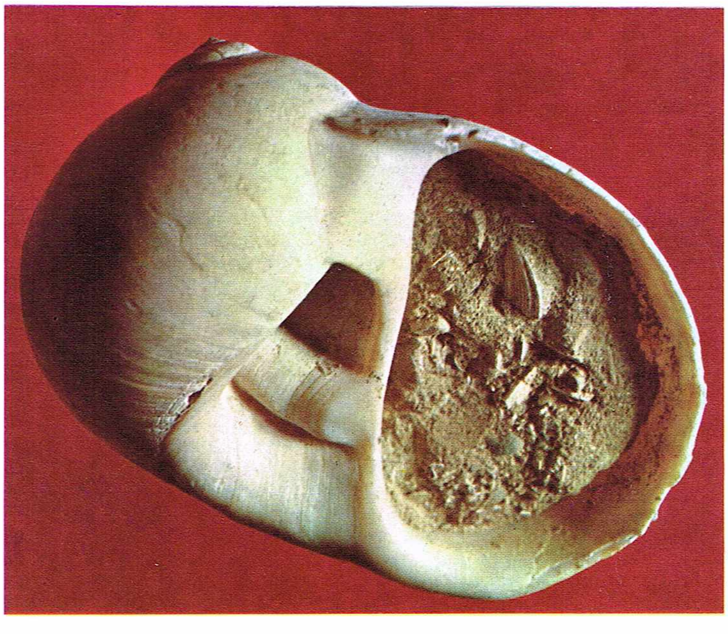

C. Bevilacqua

que les *Echinolampas* (Pléistocène). Un Céphalopode du groupe des Nautilidés, *Aturia aturi,* à spire très embrassante, se rencontre dans les faciès vaseux du Miocène. Les cérithes vivent dans les lagunes de l'Europe centrale et orientale, de même les congéries et les *Limnocardium*.

Au Pliocène, les lagunes sont remplacées par des lacs où évoluent les dreissènes. Parmi les bassins strictement lacustres, celui d'Œningen près du lac de Constance (Suisse) a livré dans la «molasse supérieure d'eau douce», datée déjà du Miocène supérieur, une flore très riche en formes : parmi celles-ci, on cite les genres *Sequoia, Taxodium, Cupressus,* etc., avec une profusion d'espèces à feuilles caduques de pays tempérés. La température devait être de 18 à 20 °C; il s'agissait d'un climat subtropical humide, semblable à celui régnant aux Açores aujourd'hui.

Au Pliocène, la température baisse à peu près partout à la surface du globe. En France, par exemple, la flore de Meximieux montre une diminution de température de 4 à 5 °C par rapport à celle d'Œningen.

En même temps que les terres émergées se couvrent de prairies, les Mammifères (l'homme excepté) atteignent leur apogée. Ils achèvent donc leur croissance vers le gigantisme avant de connaître un lent déclin, qui s'amorce dès la fin du Pliocène pour s'accentuer au Quaternaire. La diversification et l'augmentation de taille des Proboscidiens sont remarquables : après les ébauches paléogènes *(Moeritherium,* puis *Palaeomastodon)* apparaissent successivement, au Miocène, les mastodontes à quatre défenses et les *Dinotherium* de taille gigantesque (5 m), aux incisives inférieures curieusement recourbées vers l'arrière, et, au Pliocène, les mastodontes à deux défenses de très grande taille et à trompe développée (stégodon et éléphant du Villafranchien).

L'orthogenèse des Équidés se poursuit; la taille augmente, les doigts latéraux s'atrophient peu à peu en même temps que les dents deviennent hypsodontes; citons : *Merychippus* au Miocène, *Hipparion,* sa forme dérivée émigrée en Europe au Miocène supérieur, puis, au Pliocène, *Pliohippus* de la taille d'un poney, à un seul doigt fonctionnel, et enfin les *Equus* du Pléistocène.

Parmi les groupes de Carnivores de fin de phylum à individus extrêmement spécialisés, les Félidés du Mio-Pliocène, tels que les genres *Machairodus* en Eurasie et *Smilodon* en Amérique du Nord, possédant de gigantesques canines supérieures, fournissent un bel exemple d'hypertélie. En plus, on rencontre de vrais Carnivores de type intermédiaire *(Amphicyon)* ainsi que des représentants des groupes actuels (chien et chat). Les Ruminants viennent remplacer les Artiodactyles primitifs du Paléogène; ils possèdent des cornes creuses (antilopes et bœufs) ou des cornes pleines, ou bois (cerfs et girafes). A la même époque, parmi les Suidés, on trouve des hippopotames et des porcs. Ces animaux sont précédés par les rhinocéros vrais, qui s'épanouissent au Pliocène avec *Rhinoceros megarhinus,* détenteur d'une seule corne.

Au Néogène, les quatre familles de singes (Anthropomorphes, Cynomorphes, Cébidés et Hapalidés) sont toutes représentées. Dans le Miocène de Sansan, on a trouvé des restes de squelettes de *Pliopithecus,* qui ne possède pas de queue. Le *Dryopithecus* de Saint-Gaudens est un Anthropomorphe; comme lui, l'*Oreopithecus* du Monte Bamboli (Italie) est sans queue. Dans le Pontien de Pikermi (Grèce), on a signalé *Mesopithecus pentilecus* qui possède une queue. Le singe du Pliocène *Semnopithecus* a été trouvé à Montpellier et à Val d'Arno (Italie) ; dans cette dernière localité, a également été signalée l'espèce *Aulaximus florentinus ; Dolichopithecus* du Pliocène a été trouvé dans le Roussillon. Les singes ont été rapprochés de l'homme par certains de leurs caractères.

A la fin du Pliocène et au début du Quaternaire, une partie des grands Mammifères disparaît, tandis qu'apparaissent les genres *Leptobos* du Villafranchien inférieur, *Equus* et *Elephas,* et que va exploser le rameau des Hominidés. Certains caractères de ces derniers ont été annoncés au Miocène supérieur, mais ils s'épanouissent au Pliocène supérieur avec les Australopithèques, dont les ossements vieux de 3 à 4 millions d'années selon les estimations ont été découverts au voisinage du lac Rodolphe (Kenya) et dans la vallée de l'Omo (Éthiopie).

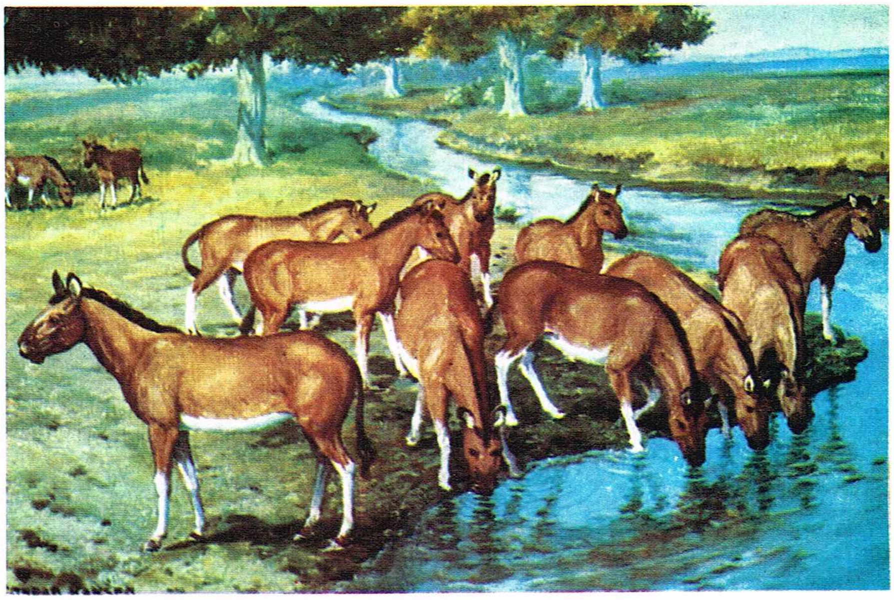

Turtox

▲ ***Un groupe de* Pliohippus, *ancêtres du cheval actuel, à un seul doigt fonctionnel* (Pliocène).**

Ère quaternaire

Le Quaternaire se présente essentiellement comme l'époque de l'apparition de l'Homme et des pulsations glaciaires. L'Homme actuel est le terme ultime des Hominidés, lesquels forment l'ensemble des Primates supérieurs. Ils sont représentés par les Australopithèques, les Archanthropiens, les Paléanthropiens, tous fossiles, et par les Néanthropiens fossiles et actuels. Un ensemble de dispositions anatomiques et morphologiques les caractérise : une attitude verticale de station érigée, un mode de déplacement bipède, permettant à la main de n'avoir qu'un rôle préhenseur, une mâchoire de volume modéré à dents de faible hauteur, une formule dentaire sous la prescription suivante : 2 I, 1 C, 2 PM, 3 M, et un cerveau très développé, avec une boîte crânienne volumineuse. Ce dernier caractère, fondamental, permet la manifestation de capacités nouvelles dues à l'intelligence élevée du sujet, à l'apparition de la pensée réfléchie, phénomène concomitant du processus de l'hominisation; un bon exemple est fourni par l'emploi d'outils, qui suppose une réflexion préalable à son usage.

L'acquisition de tous ces caractères au cours du temps a été progressive et s'est effectuée dans l'ordre suivant : dentition, bipédie et enfin cerveau de grande taille. Toutefois, on peut signaler que de nombreux caractères humanoïdes étaient déjà apparus dès le Miocène supérieur chez les Oréopithèques (l'*Oreopithecus* des lignites pontiens de Toscane ainsi qu'un squelette complet d'*Oreopithecus* du Monte Bamboli furent découverts par Hürzeler). Cet animal présente une face courte, un crâne élevé à bord antérieur assez droit, une denture hominienne avec de petites canines et des incisives verticales, sans diastème; il mesure de 1,10 à 1,20 m et se tenait probablement debout du fait de son bassin peu étroit. Cependant, ses bras, très allongés, servaient pour la brachiation, caractère faisant défaut chez l'homme, qui est caractérisé par la brièveté du bras et de l'avant-bras par rapport à la longueur du tronc. Ainsi, le Dryopithèque du Miocène de Saint-Gaudens et de Sansan montre un caractère humanoïde unique : l'aspect de la couronne de ses molaires inférieures.

On peut rattacher aux Hominidés fossiles le groupe formé par les Australopithèques. Ceux-ci apportent sur les conditions de déroulement du phénomène de l'hominisation de précieuses indications. En 1925, R.A. Dart décrivait, sous le nom d'*Australopithecus africanus,* une portion de crâne (appartenant à un jeune de six ans environ) trouvée près de Taung au nord de Kimberley (Botswana, Afrique du Sud), il s'agissait d'une tête osseuse incomplète avec une face bien conservée et un moulage endocrânien rendu visible par la disposition du revêtement osseux de la cavité cérébrale. Dart conclut que ce fossile, malgré son volume crânien faible et ses mâchoires robustes, représentait le chaînon tant cherché entre les Primates supérieurs et l'Homme, et cela d'autant

◀ ***Page ci-contre, en haut, paysage et animaux du* Paléogène : Hyracotherium *(en bas à gauche)* ; Odontopteryx *(Oiseaux près du rivage)* ; Coryphodon, *semblables à des hippopotames (au centre)* ; *et crocodiles (à droite).***
Au centre,* Xenophora crispa *du Miocène (Modène).
En bas,* Natica tigrina, *du Pliocène, vue par ses deux faces.

plus qu'il possède une dentition incontestablement humanoïde ; ce point de vue a été soutenu par E. Smith, qui, en étudiant le moulage endocrânien, indiquait que la position du *sulcus lunatus* et l'extension du lobe pariétal constituaient des caractères humains. Par la suite, d'autres gisements ont été trouvés grâce aux travaux de Dart, Broom et Robinson. Le *Plesianthropus (= Australopithecus)* a été trouvé à Sterkfontein, et à Makapansgat (près de Prétoria), le *Paranthropus* à Kromdraai à faible distance de Sterkfontein, et à Swartkrans. Cette dernière localité a fourni aussi, dans une brèche plus récente que celle renfermant les Australopithèques, le genre *Telanthropus*.

Dans l'ensemble, ces Australopithèques sont de taille relativement petite et ont été adaptés à la station érigée ainsi qu'à la locomotion bipède. Leur volume endocrânien est faible : il mesure 500 à 550 cm^3 ; ils sont caractérisés aussi par un crâne bas à front fuyant et à bourrelet susorbitaire marqué, par une face prognathe à museau, un plan nucal horizontal (il est oblique chez les singes), une colonne vertébrale présentant des courbures compensatrices opposées, un bassin évasé avec l'ilion en forme de plaque (et non pas en forme d'une barre étirée comme chez les chimpanzés), la crête iliaque qui s'incurve (comme chez l'Homme) vers l'arrière avec un sacrum proche de l'acétabulum ; antérieurement, les incisives sont verticales, les canines sont volumineuses et ne dépassent pas les autres dents ; dans la région jugale, les prémolaires et les molaires sont puissantes.

Au point de vue chronologique, ont été datés du Villafranchien supérieur les Australopithèques de Taung, Sterkfontein et Makapansgat, c'est-à-dire le genre *Plesianthropus (= Australopithecus)*, qui représente une forme gracile *(A. africanus, A. transvaalensis, A. prometheus)* ; ceux de Swartkrans et de Kromdraai sont un peu plus récents que les *Plesianthropus* : ce sont les *Paranthropus (P. robustus, P. crassidens, P. palaeojavanicus* qui a été considéré par la suite comme un *Pithecanthropus)*. La forme *Zinjanthropus,* trouvée par Leakey à Oldoway et près du lac Natron, représente une espèce à part d'Australopithèque à crête sagittale, à molaires énormes et à palais fortement bombé. Dans la couche où se trouve cette forme, on a trouvé des outils très frustes, des masses de frappes anguleuses comparables à la « pebble culture ».

On a aussi retrouvé les restes d'un autre Primate fossile, d'aspect beaucoup plus moderne, appelé *Homo habilis,* auteur de la « pebble culture » ; des restes attribuables à cette forme moderne existeraient depuis un niveau datant de 1 850 millions d'années jusqu'à un niveau beaucoup plus récent datant de 375 000 ans. On se demande si toutes ces pièces osseuses trouvées à des profondeurs assez différentes appartiennent à une même espèce. Quoi qu'il en soit, cet *Homo habilis* avait les caractères suivants : le crâne dépourvu de crête sagittale, les mâchoires plus petites que celles des Australopithèques, le menton faisant défaut ou peu marqué, le crâne non rétréci en arrière des orbites et la face non encore concave, les molaires non élargies transversalement, les incisives assez grandes ; la main ressemble à celle de l'Homme actuel, mais les os sont plus robustes ; le crâne a un volume de 675 cm^3. Les auteurs ont inclus dans l'espèce *Homo habilis* le *Telanthropus* d'Afrique du Sud, d'abord considéré comme un Australopithèque, et le *Tchadanthropus,* découvert par Coppens au Tchad.

En conclusion, chez les Australopithèques, l'appareil dentaire a atteint un degré assez net de spécialisation et l'appareil locomoteur est en voie d'achèvement, alors que le cerveau paraît en retard dans son évolution.

Les Archanthropiens constituent le deuxième groupe principal des Hominidés fossiles : ils renferment le *Sinanthropus* de Chine et le *Pithecanthropus* de Java. Alors que les Australopithèques constituent la forme préhumaine, les Archanthropiens correspondent à la forme humaine vraie. Ils se distinguent des premiers par une morphologie plus évoluée et par l'acquisition d'une capacité crânienne supérieure (900 à 1 000 cm^3), donc d'un développement culturel supérieur qui se démontre par l'utilisation d'une industrie lithique (pierre taillée) et osseuse. Ainsi, à Choukoutien, près de Pékin, on a découvert une grotte en foyer avec des traces de l'utilisation du feu par les Sinanthropes. Le crâne, plat, est à bourrelet susorbitaire massif et à constriction postorbitaire marquée ; le front est fuyant ; les os du crâne sont épais ; la mandibule et les dents sont robustes ; les canines ne dépassent pas le niveau des autres dents ; les os des membres sont comparables par leur forme et leurs proportions à ceux de l'*Homo sapiens* (station bipède bien réalisée). Les Pithécanthropes de Java sont : le *Pithecanthropus erectus,* trouvé dans les horizons du Trinil (Pléistocène moyen) et de Djetis, et le *Meganthropus (= Pithecanthropus) palaeojavanicus* (l'Homme géant paléojavanais). Le Sinanthrope de Chine est *Sinanthropus pekinensis*. Toutefois, dans la province d'Oran en Algérie, on a trouvé *Atlanthropus mauritanicus*. Dans la localité de Swartkrans en Afrique du Sud, on a découvert *Telanthropus capensis*. Toutes ces formes se trouvent dans des couches qui datent de 600 000 à 350 000 ans. Divers savants britanniques ont proposé de réunir tous les Pithécanthropiens dans une seule espèce, *Homo erectus,* laquelle serait une étape de l'évolution humaine faisant suite à l'*Homo habilis* et précédant l'*Homo sapiens*.

Le troisième et principal groupe des Hominidés est celui des Paléanthropiens, chez qui se dessinent des traits aboutissant au faciès particulier du Néandertalien classique (l'Homme de Néandertal trouvé près de Düsseldorf en Allemagne).

Les Hommes de Néandertal forment un groupe hétérogène, dont les caractères communs sont les suivants : une meilleure adaptation à la station droite (les membres antérieurs sont plus courts que les postérieurs, et la brièveté du pouce est à noter), un crâne très allongé, bas (218 mm de long, de 144 à 156 mm de large et de 118 à 131 mm de hauteur), avec un fort bourrelet susorbitaire, un encéphale volumineux (1 650 cm^3).

▼ ***Confrontation entre les crânes des Australopithèques, de l'Homme de Néandertal et des divers groupes d'Homo : A,* Australopithecus (Plesianthropus) transvaalensis *(Sterkfontein, Transvaal) de face ; B, vu de profil ; C,* Homo erectus *(IV)* modjokertensis *(Sagiran, Java) ; D,* Homo erectus soloensis *(Ngandong, Java) ; E,* Homo erectus pekinensis *(Chukut'ien, Chine) ; F,* Homo rhodesiensis *(Broken Hill, Afrique) ; G,* Homo neanderthalensis *(La Chapelle-aux-Saints, France) vu de face ; H, vu de profil. I,* Homo neanderthalensis *(Saccopastore, Italie) ; J,* Homo neanderthalensis sapiens? *(mont Carmel, Palestine) ; K,* Homo (prae) sapiens *(Steinheim, Allemagne) ; L,* Homo (prae) sapiens *(Swanscombe, Angleterre).***

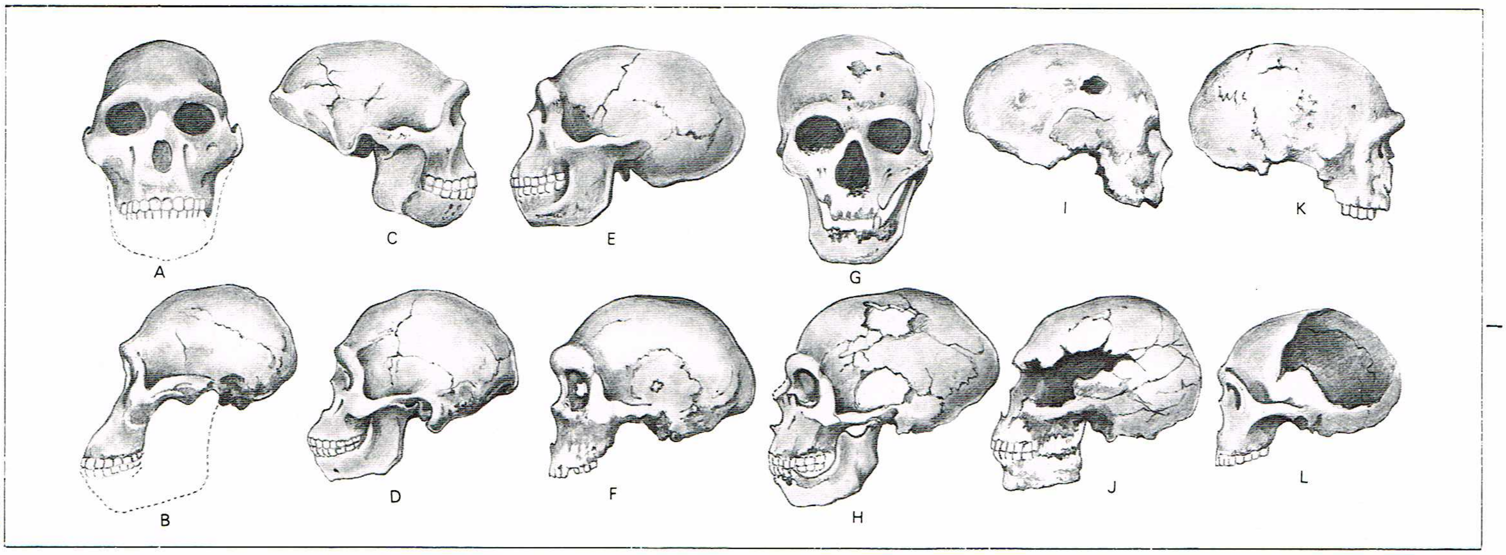

I.G.D.A.

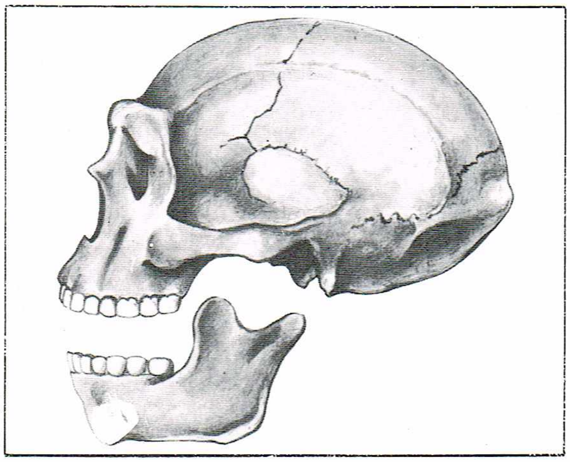

I.G.D.A.

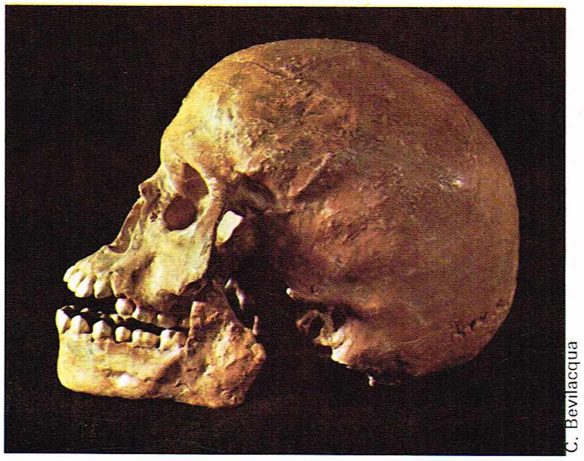

C. Bevilacqua

◀ *A gauche, crâne et mandibule d'une forme asiatique d'*Homo erectus (Phithecanthropus pekinensis) *d'après une reconstitution de Weidenreich.*
*A droite, crâne de l'*Homme de Grimaldi.

Ces formes ont une aire de répartition considérable : Espagne, Italie, Grèce, Maroc, Palestine, Irak et Java. Ils datent de la première partie du Pléistocène, ou Würm ancien, ou du Pléistocène moyen rapporté à 500 000 ans et se sont éteints il y a 35 000 ans. Certains pensent que l'Homme de Néandertal ne peut être un ancêtre de l'*Homo sapiens* et représenterait plus probablement un rameau latéral éteint. Enfin, le spécimen de Mauer (la mandibule de Mauer), trouvé près de Heidelberg et décrit sous le nom d'*Homo heidelbergensis,* a été considéré à part. Il est plus ancien, semble-t-il, que les autres Paléanthropiens, et d'une morphologie bien spéciale : dimensions remarquables, allure massive et robuste, largeur importante de la branche verticale de la mandibule et dents petites.

Le dernier groupe des Hominidés est celui des Néanthropiens.

Les Néanthropiens apparaissent depuis le Pléistocène supérieur, qui correspond à la période du Würm récent (35 000 ans) ; on les désigne aussi sous le nom de fossiles, ou Hommes du Paléolithique. Avec ces formes, les facultés intellectuelles indiquent que le cerveau a atteint le niveau évolutif important. Les caractéristiques sont : la face non saillante, la mâchoire de petite taille le crâne ovoïde et haut, la capacité cérébrale de 1 350 cm^3; toutefois, la bascule occipitale n'a pas encore atteint son plein épanouissement.

On peut citer la race de Cro-Magnon (trouvée aux Eyzies), de haute taille et dont le crâne rappelle parfois celui des Esquimaux actuels, la race de Grimaldi, de type négroïde, découverte dans la « grotte des enfants », en Italie, près de la frontière française, et l'Homme de Chancelade (près de Périgueux).

Apports de la paléontologie en tant que science de la vie et pour la stratigraphie

Le plus souvent, on considère que la paléontologie est tout simplement l'étude des fossiles en suivant la classification des êtres organisés (d'où la notion de systématique). Cependant ce n'est là qu'une partie essentiellement descriptive, faisant intervenir l'anatomie comparée et les notions évolutives. Une autre face de la paléontologie doit être approfondie, maintenant que de nombreux fossiles, dans tous les niveaux et de toutes les régions, sont connus. Cet aspect vise les problèmes généraux propres aux êtres organisés du passé, leurs associations diverses et leur évolution, c'est-à-dire la vie elle-même et ses enchaînements au cours des temps géologiques.

Les fossiles sont des organismes qui ont été vivants; ils nous permettent de reconstituer l'histoire de la vie. A cette fin, ils doivent alors être étudiés dans les moindres détails de leur anatomie, selon les méthodes classiques de l'anatomie comparée.

La méthode des sections sériées permet, en particulier, de reconstituer des modèles agrandis des fossiles étudiés (elle consiste à user le fossile suivant des sections parallèles souvent très rapprochées : 25 μ) ; elle a été appliquée avec succès à l'étude des Brachiopodes (pour déchiffrer la configuration de leur appareil brachial), à celle des appendices des Trilobites et surtout à celle des endocrânes de petites dimensions.

La paléontologie cherche aussi à comprendre la biologie des êtres disparus (d'où la notion de paléobiologie). Ainsi, les coprolithes et la denture permettent de connaître le régime alimentaire à quelques exceptions près. On peut même imaginer le mode de déplacement de certains groupes animaux disparus. Par exemple, par comparaison avec le nautile, qui se trouve vivant dans certaines des mers actuelles, et en admettant que seule la dernière loge était occupée par l'animal, on a pu déduire que les Ammonites nageaient en général avec l'orifice de la chambre d'habitation orienté vers le haut (interprétation proposée par Truemann). Toutefois, l'étude morphologique, anatomique et biologique des fossiles reste l'outil de travail qui nous permet essentiellement de reconstituer l'histoire de la vie, c'est-à-dire l'évolution proprement dite des êtres organisés. Il est ainsi possible de retrouver et de représenter la série de chaînons entre les différents groupes animaux et végétaux, implicitement et explicitement.

Les fossiles peuvent aussi nous donner des précisions concernant le milieu dans lequel ils ont vécu. Ils permettent de savoir si le sédiment qui les contient est d'origine marine ou d'eau douce : certains Invertébrés, tels que, par exemple, les Brachiopodes, les Céphalopodes, les Échinodermes, les Bryozoaires, etc., sont presque exclusivement marins. De plus, la répartition des fossiles selon les divers groupes zoologiques dans une formation géologique d'origine marine peut nous permettre de savoir si la faune est littorale, bathyale, ou abyssale ; ainsi, en se référant toujours au mode de vie des groupes actuels, les Foraminifères se répartissent de nos jours, selon la profondeur et la température, en zones distinctes de composition faunique différente. De

▼ *Fossile sectionné de* Nautilus striatus (Jurassique inférieur, *Angleterre*). *Le genre* Nautilus, *encore vivant aujourd'hui dans certaines mers, permet à la paléontologie de comprendre la biologie de certains groupes disparus.*

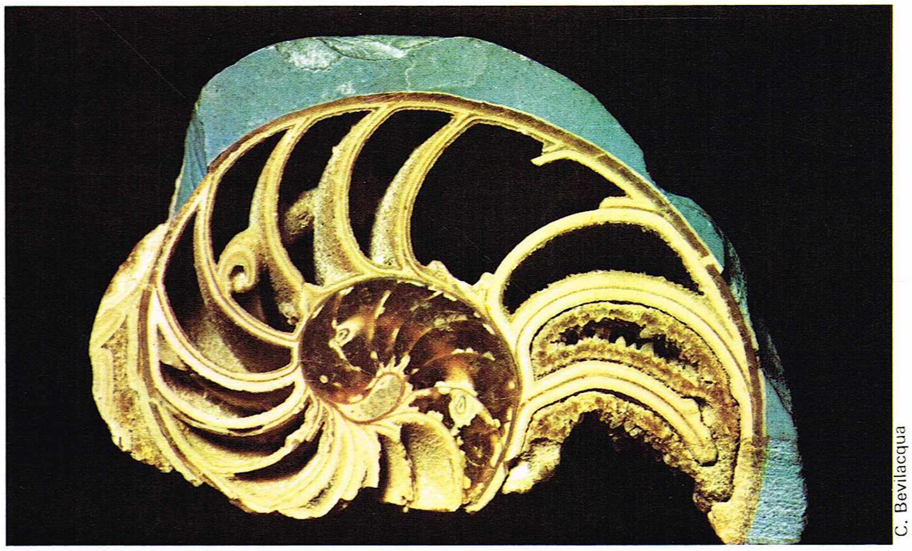

C. Bevilacqua

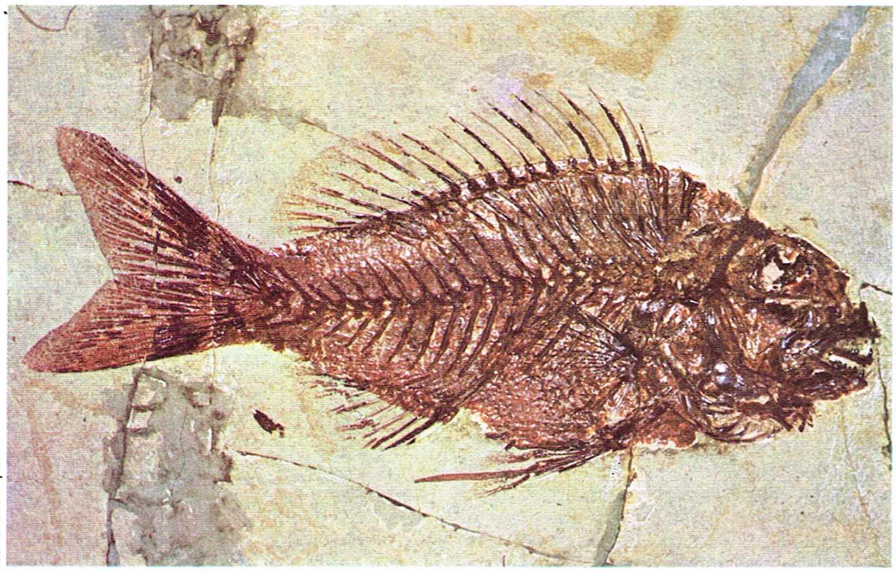

C. Bevilacqua

▲ **Pagellus centrodontos,** ***Sparidé fossile des mers chaudes et tempérées.***

ce point de vue, les fossiles sont des indicateurs de faciès. Ils nous renseignent également sur les conditions de climat qui prévalaient à l'époque de leur formation. Les Poissons de l'Éocène de Monte Bolca étaient surtout tropicaux et montrent que la température de la mer dans laquelle ils nageaient était plus élevée que celle de la Méditerranée actuelle ; de même, la flore du bassin de Paris au début du Tertiaire est une flore de pays chaud.

Mais les indications climatiques que les fossiles peuvent fournir sont parfois plus précises puisque, grâce à leur teneur en isotopes de l'oxygène, O^{16} et O^{18}, certaines coquilles peuvent nous permettre d'évaluer avec précision la température des mers dans lesquelles ont vécu les espèces auxquelles elles appartenaient. Cette méthode d'évaluation des paléotempératures est fondée sur le fait que la proportion des isotopes de l'oxygène dans la mer est actuellement fonction de la température. Les coquilles qui dans leur carbonate de calcium contiennent de l'oxygène présentent une proportion de O^{16} et O^{18} en relation avec celle de l'eau de mer dans laquelle elles vivaient.

Certains fossiles peuvent nous apporter des renseignements sédimentologiques intéressants. Ainsi, quand on recueille des fossiles, on peut parfois mettre en évidence l'orientation des individus, et celle-ci peut prouver l'existence d'un courant d'eau (par exemple, le cas des Cérithes et des Bélemnites) ; il faut cependant savoir si leur assemblage est originel ou dû à un groupement mécanique secondaire. Les relations d'un organisme avec son milieu impliquent déjà une reconstitution partielle de son mode de vie.

D'autre part, historiquement, la stratigraphie et la paléontologie ont toujours été étroitement liées et leurs progrès se sont poursuivis conjointement. Cependant, ce rapport est par essence encore plus profond, issu de la nécessité et non simplement fortuit. D'un côté, le matériel est pour une large part le même, et, d'autre part, la dimension temps leur est commune. Les fossiles sont utilisés par les géologues pour dater les couches de terrains, ils servent donc de repères stratigraphiques. Ce sont, d'ailleurs, les associations de fossiles qui sont en général caractéristiques d'un niveau géologique, plutôt que telle ou telle espèce de fossile considérée isolément. Les exemples à cet égard abondent ; citons l'utilisation des Céphalopodes, et les zones définies grâce à ces fossiles (cas du Dévonien rhénan et marocain, avec les goniatites et les clyménies). Dans le Lias de Wurtemberg (à Ammonites), les zones définies ont été l'objet de discussions nombreuses entre les chercheurs, qui attribuent plus ou moins d'importance à telle ou telle espèce.

C. Bevilacqua

▶ **Chrysodomus contrarius,** ***Gastéropode indicateur de climat chaud du*** **Pliocène.**

BIBLIOGRAPHIE

AGER D.V., *Principles of Paleoecology,* Mc Graw-Hill, 1963. - AUBOIN J. & Al., *Précis de géologie,* Doin éd., 1967. - BASSE DE MENORVAL E., *les Fossiles,* P.U.F. « Que sais-je », 1963. - BRADLEY S., *Environmental Parameters for the Origin of Life* in *Proc. geol. assoc. G.B.,* vol. n° 82, pp. 87-135, 1971. - CHALLINOR J., *A Dictionary of Geology,* Univ. Wales Press, 1964. - CRIMES T.P. & HARPER J.C., *Trace Fossils,* Seel House Press, Liverpool, 1970. - DEFLANDRE G., *la Vie créatrice de roches,* P.U.F. « Que sais-je », 1941. - ECHLIN P., *Photosynthesis Organisms* in *Adv. geochem.,* p. 523-537, 1972. - EFREMOV J.A., *Taphonomie et annales géologiques* in *Trav. Inst. Paléont. Acad. Sci. U.R.S.S.,* vol. 24, n° 1, 1950. - GIGNOUX M., *Géologie stratigraphique,* Masson éd., 1963. - GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie,* Masson éd., 1949. - LEHMAN U., *Paläontologisches Wörterbuch,* Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1964. - MOORE R.C., *Treatise on Invertebrate Paleontology,* Geol. Soc. America & Univ. Kansas Press, 1953-1955. - MORET L., *Manuel de paléontologie animale,* Masson éd., 1966. - MORET L., *Manuel de paléontologie végétale,* Masson éd., 1964. - NEUMANN M., *Manuel de micropaléontologie des Foraminifères,* Gauthier-Villars éd., 1967. - OPARIN A.I., *l'Origine de la vie sur terre,* Masson éd., 1965. - PIVETEAU J., *Traité de paléontologie,* Masson éd., 1952. - POMEROL C. et FOUET R., *les Roches sédimentaires,* P.U.F. « Que sais-je », 1965. - PONS A., *le Pollen,* P.U.F. « Que sais-je », 1970. - RAGUIN E., *Géologie des gîtes minéraux,* Masson éd. - ROGER J., *Paléontologie générale,* Masson éd., 1974. - RUTTEN M.G., *The Origin of Life by Natural Causes,* Elsevier, 1971. - TERMIER H. & G., *Histoire géologique de la biosphère,* Masson éd., 1952. - *Paléontologie stratigraphique,* Masson éd., 1960. - *Évolution et biocinèse,* Masson éd., 1968. - THENIUS E., *Versteinerte Urkunden,* Springer-Verlag, 1972. - THEOBALD N. & GAMA A., *Paléontologie. Éléments de paléobiologie,* Doin éd., 1969. - ZITTEL K.A., *Traité de paléontologie,* 1883.

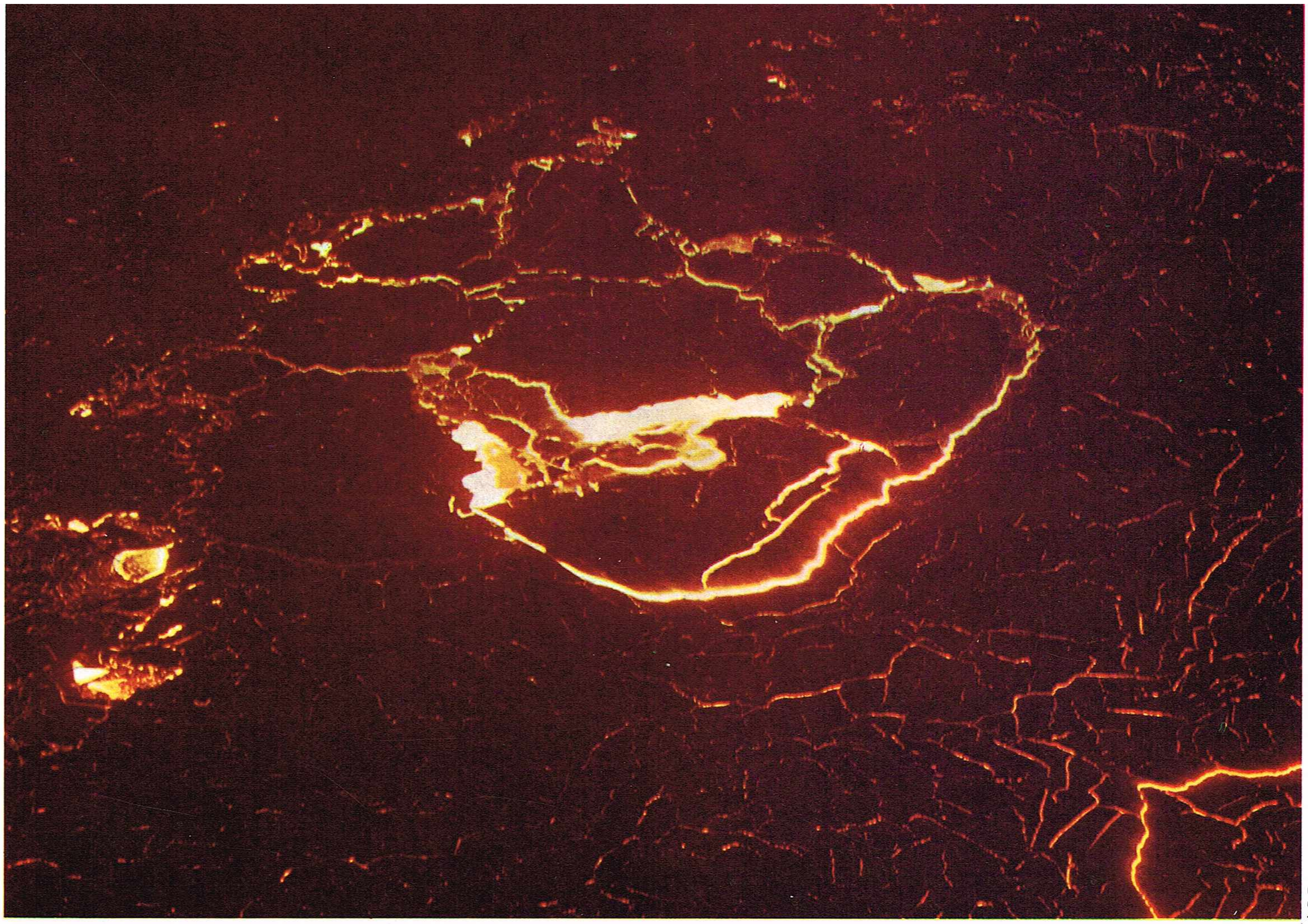

▲ *Le cratère du Kilauea Iki (Hawaii) rempli de lave provenant d'une fissure éruptive ouverte en son voisinage au mois de mars 1965. Le lac de lave ainsi formé montre dans des déchirures de sa croûte la lave fluide incandescente.*

PHÉNOMÈNES ET ROCHES IGNÉS

Le magmatisme

On désigne par *magmatisme* l'ensemble des caractères et des propriétés physiques et chimiques des magmas. Le *magma* (du grec μάγμα = mélange) est une quantité de matière incandescente, complètement ou partiellement fondue, que l'on trouve dans ou sous l'écorce terrestre et qui est essentiellement formée par plusieurs types de silicates, par de petites quantités de gaz (éléments volatils, comme la vapeur d'eau, l'anhydride carbonique, l'hydrogène, l'hydrogène sulfuré [H_2S], l'acide chlorhydrique, etc.). Les proportions entre tous ces composants varient dans des limites assez larges, et permettent une classification en plusieurs types de magmas. (On distingue ainsi en fonction des teneurs en silice les *magmas acides* [$SiO_2 > 60$ %] et les *magmas basiques* [$SiO_2 < 55$ %].)

Si les conditions tectoniques de la croûte terrestre sont favorables, les magmas, grâce à leur mobilité, peuvent monter et s'épancher à la surface de la Terre sous formes de laves et de gaz volcaniques. L'ensemble des phénomènes liés à la montée et à l'épanchement des magmas est appelé *volcanisme;* les phénomènes intratelluriques sont regroupés sous le terme de *plutonisme.*

Les laves fondues, en se refroidissant, se consolident en *roches volcaniques.* Si les magmas se refroidissent au sein de la croûte terrestre, ils cristallisent complètement et forment des *roches plutoniques.* Mais il faut remarquer que certaines roches holocristallines, très semblables aux plutons magmatiques, peuvent se former aussi à la suite de processus métamorphiques. En effet, pendant l'orogenèse se développent dans les parties profondes de l'écorce terrestre des pressions et des températures relativement hautes; ainsi, les roches préexistantes, imbibées de solutions pegmatitiques, acquièrent les propriétés d'un *migma* et recristallisent sans passer par un état fondu, donnant naissance à des plutons d'origine ultramétamorphique, que l'on appelle *métaplutons* (migmatites) pour les distinguer des *orthoplutons,* ou magmas vrais. Les métaplutons (migmatites), plus répandus, ont une composition granitique ou dioritique; le processus de recristallisation ultramétamorphique qui leur donne naissance prend le nom de *granitisation.* Avec l'accroissement de la température, le migma est fondu et devient progressivement un magma de composition analogue à celle du migma. La distinction entre ortho- et métapluton, souvent difficile, fait l'objet de discussions. Il convient donc de nommer les différents types de magmas à partir des noms des roches volcaniques correspondantes qui sont certainement d'origine magmatique et non à partir de ceux des plutons, dont l'origine est plus incertaine.

La composition chimique des roches volcaniques est identique à celle de la partie non volatile des magmas et les caractérise avec une précision assez bonne du point de vue chimique. Les propriétés physiques des magmas dépendent en partie de leur composition chimique, mais surtout de la température, de la pression et de la teneur en éléments volatils. La viscosité des magmas acides est plus grande que celle des magmas basiques, mais dans les deux cas elle augmente de manière exponentielle avec la pression et diminue exponentiellement avec la température.

Un magma, étant toujours un mélange de plusieurs substances, n'a pas un point de fusion mais un domaine de températures de fusion. Si la température est plus élevée que la limite supérieure de ce domaine, le magma est complètement fondu : il est alors en surfusion. Dans le domaine de fusion, au contraire, il contient des cristaux intratelluriques (phénocristaux). En ce qui concerne l'état physique d'un magma par rapport aux éléments volatils, on peut distinguer trois cas : *hypomagma* si la pression extérieure est plus élevée que la tension de vapeur, les gaz restant ainsi dissous et leurs molécules étant dispersées dans la masse fondue; *pyromagma* si la pression extérieure est inférieure à la tension de vapeur, auquel cas il existe une phase gazeuse sous forme de petites bulles (magma mousseux); *épimagma* si, à la surface de la colonne magmatique, les gaz se sont libérés en majeure partie dans l'atmosphère par suite de la pression extérieure très faible; l'épimagma venu à la surface est aussi appelé *lave.*

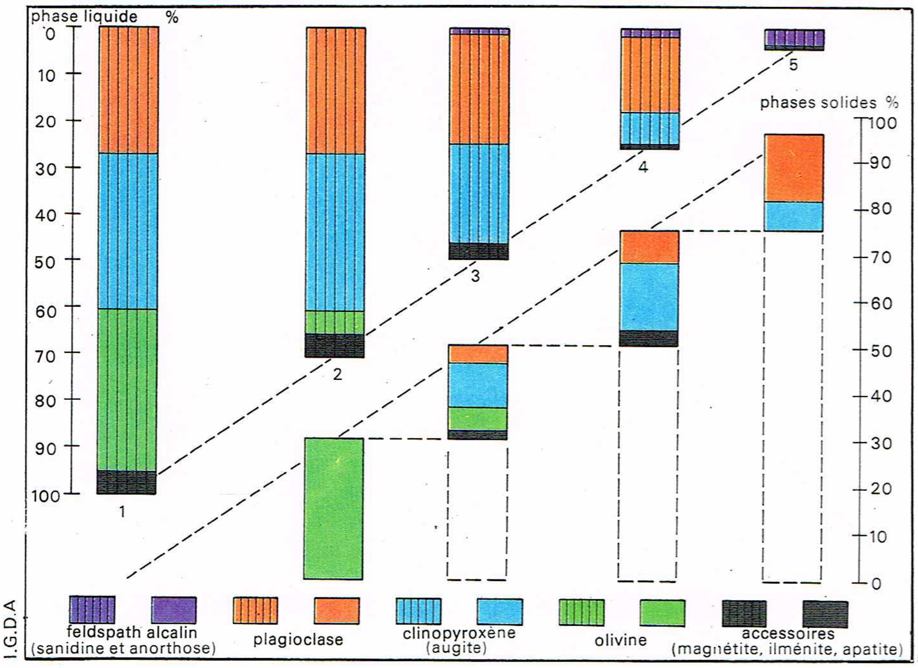

▲ Représentation schématique d'une différenciation gravitative : 1, magma parent océanique ; 2, magma de type basalte à olivine provenant du précédent par suite de la séparation de 30 % d'olivine ; 3, basalte dérivant du précédent par séparation de cristaux d'olivine, d'augite, de plagioclase et de minéraux accessoires ; 4, magma latitique-andésitique dérivant du précédent par séparation des cristaux d'augite, de plagioclase et accessoires ; 5, magma sodi-trachytique résultant du précédent par séparation de plagioclases et d'augite. Les colonnes inférieures en tiretés représentent la somme des cristaux séparés précédemment. Les couleurs sans traits représentent les minéraux cristallisés dans le magma, les couleurs avec traits les minéraux virtuels.

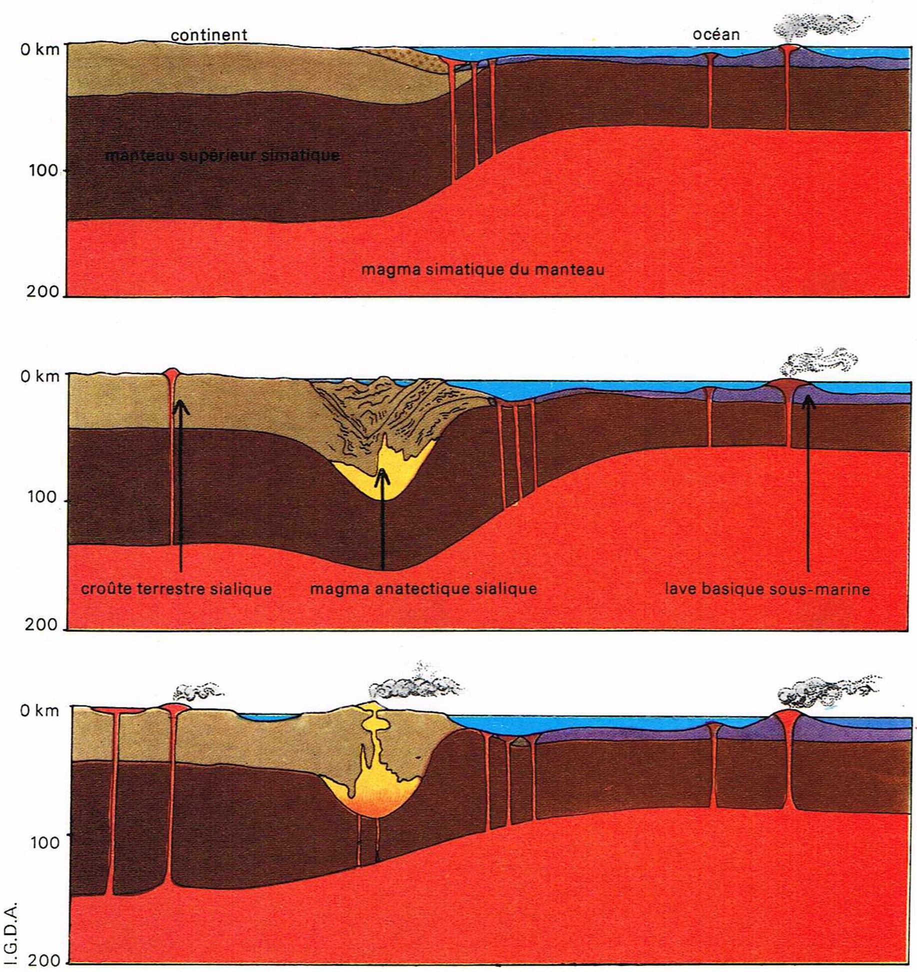

L'ascension des magmas

Le mécanisme de montée des magmas dépend, en plus de leurs propriétés physiques intrinsèques (densité, viscosité, tension de vapeur), des conditions tectoniques et de la nature des formations rocheuses qu'ils doivent traverser.

Les magmas acides sont en général très visqueux et plus légers que les roches traversées. Ils ont donc un pouvoir ascensionnel propre, correspondant à la poussée d'Archimède, qui les rend capables de s'introduire à travers les formations de la croûte terrestre et de soulever les couches sus-jacentes. Ainsi prennent naissance les *bassins magmatiques,* qui, dans les zones orogéniques, peuvent atteindre des dimensions très importantes. A partir de ces régions montent vers la surface des masses qui soulèvent les roches sus-jacentes, les soumettant à des tensions si importantes qu'elles provoquent des fractures et s'y injectent pour arriver à la surface. C'est ainsi que prend naissance le volcanisme explosif avec ses éruptions ignimbritiques et ses éruptions centrales qui construisent les volcans formés essentiellement de matériel pyroclastique.

A l'opposé des magmas acides, les magmas basiques ont une densité plus élevée que les roches encaissantes. Ils seraient donc incapables de monter vers la surface, si les tensions tectoniques ne se traduisaient pas par des fractures très profondes qui favorisent leur ascension. De telles fractures sont responsables d'une très forte dépression qui agit sur le magma par une brusque chute de viscosité ; c'est ainsi que le magma plus fluide pénètre dans les cassures. La phase gazeuse se sépare dans la partie plus élevée de la masse magmatique ; cela revient à dire que l'*hypomagma* se transforme en *épimagma* bulleux. Ce dernier, étant très léger, acquiert la poussée d'Archimède nécessaire pour monter en surface. La différence, dans les mécanismes d'ascension, des magmas acides et basiques se traduit par une grande extension latérale des bassins magmatiques acides, tandis que les bassins basiques se limitent plutôt au remplissage de fractures.

La différenciation magmatique

Par différenciation magmatique, on désigne le processus qui aboutit à la formation d'un magma ayant une composition chimique différente de celle du *magma originel,* ou *magma primaire*. Nous aborderons ici les grandes lignes de l'étude de cette différenciation, sur laquelle nous reviendrons ultérieurement.

La différenciation gravitative

Si un magma se refroidit lentement, il y a une ségrégation des cristaux dont la composition chimique est différente de celle du magma. Il s'ensuit que le bain fondu change continuellement de composition. Par exemple, dans un magma de type basalte à olivine, au cours du refroidissement se forment d'abord des cristaux d'olivine $(Mg,Fe)_2SiO_4$. Ils sont plus lourds que le bain fondu et tendent donc à descendre ; en même temps, ils appauvrissent le magma en magnésium, en fer et relativement peu en silice. En conséquence, le bain fondu résiduel du magma parent, de type basalte à olivine, s'enrichit de manière passive en silice, aluminium, calcium et alcalins, et devient ainsi un magma basaltique. Si la cristallisation continue, il se forme des cristaux de pyroxènes $(Mg,Fe)SiO_3$ et $Ca(Mg,Fe)Si_2O_6$ et, presque en même temps, des plagioclases qui à leur tour peuvent précipiter vers le fond du magma ; ainsi, le bain fondu résiduel change une nouvelle fois de composition et forme, dans les parties plus élevées de la chambre, un magma qui est trachy-andésitique au début, puis trachytique. La séparation des cristaux relativement lourds produit de nouveaux magmas *différenciés* qui, dans certaines conditions, peuvent s'épancher en surface et former des roches *volcaniques comagmatiques*.

La différenciation pneumatolytique

Dans le pyromagma peu visqueux, les bulles, formées essentiellement de vapeur d'eau et de CO_2, migrent vers le haut et transportent en solution gazeuse certaines *substances pneumatophiles,* parmi lesquelles les plus importantes sont des composés de sodium, de fer, de titane et de phosphore. La solubilité de ces composés dans les gaz magmatiques diminue avec la pression. Donc, si les bulles arrivent dans la partie haute de la

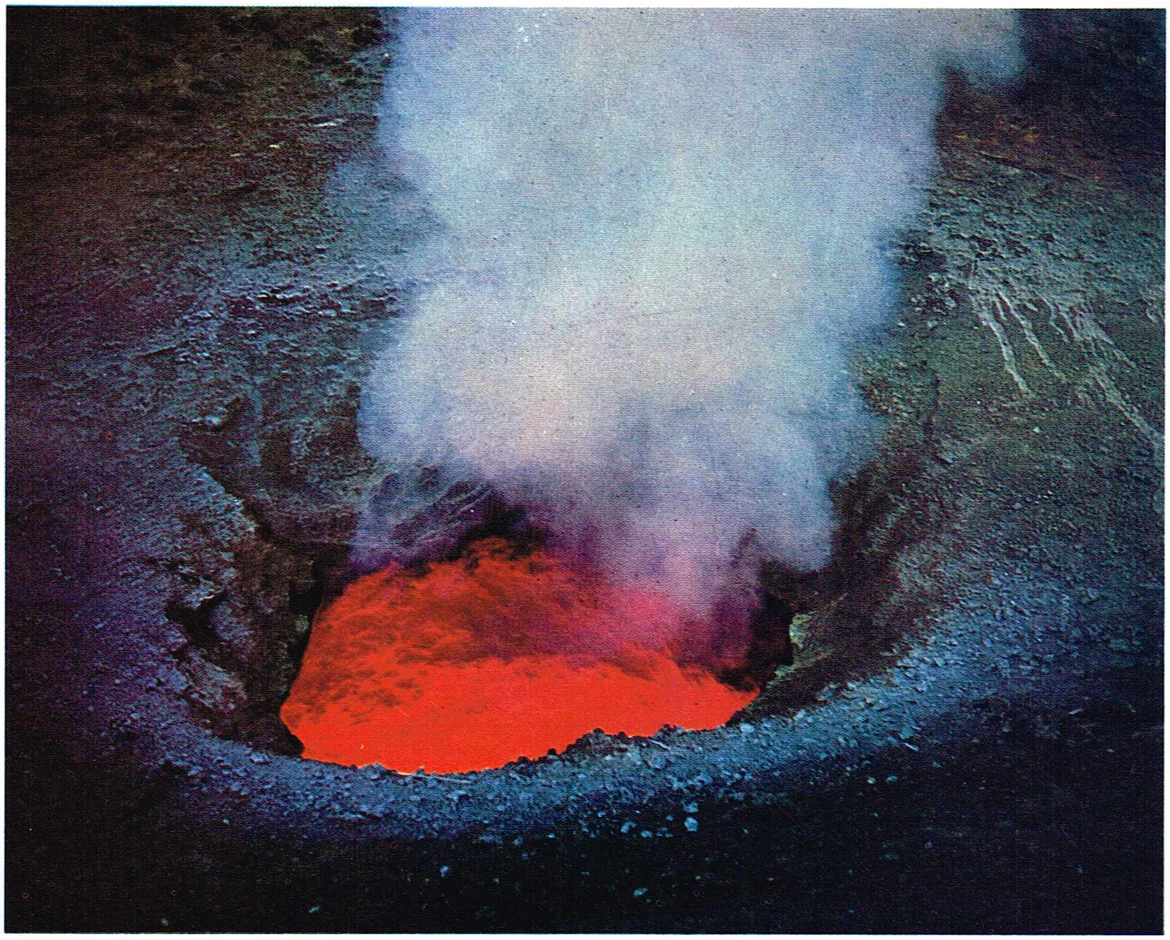
O. Geddo

◀ *Un exemple de fumerolle : les meilleures conditions pour avoir une* différenciation pneumatolytique *sont réunies lorsque dans le volcan se manifeste une faible activité fumerollienne.*

◀ *Page ci-contre, représentation schématique des relations entre le volcanisme et la tectonique (orogenèse). En haut,* formation d'un géosynclinal : *en bordure du continent, par suite de déplacements du magma profond dirigés vers le continent, la croûte terrestre soumise à des tensions s'abaisse (géosynclinal); le long de fractures abyssales (profondes), le magma basaltique (sima) monte vers la surface. On a ainsi un volcanisme géosynclinal. La croûte océanique peut aussi être traversée par des fractures qui permettent au magma basaltique de s'épancher sous les océans et de former des couvertures de hyaloclastites et de coulées, construisant des volcans en boucliers (Hawaii). Au centre, la* tectogenèse : *dans l'orogenèse, la croûte terrestre entraînée en profondeur est comprimée et plissée; par suite de l'augmentation de pression et de température, les roches sont métamorphisées et partiellement fondues. Les magmas acides anatectiques prennent ainsi naissance. En bas, l'orogenèse : pour rétablir l'équilibre isostatique, la chaîne de montagnes est soulevée; les magmas anatectiques légers montent jusqu'à la surface et provoquent un volcanisme orogénique explosif.*

cheminée où la pression est plus faible, elles cèdent une partie des substances dissoutes au magma, qui change ainsi sa composition chimique. Ce processus, désigné par le terme de *transfert gazeux* (*gazeous transfer,* C.N. Fenner), a pour conséquence une différenciation pneumatolytique du magma, lequel est enrichi en éléments pneumatophiles dans ses parties hautes et appauvri dans les parties basses. Ainsi, par suite d'un tel phénomène, un magma parent de type basalte à olivine acquiert vers le bas une composition basaltique sans olivine, tandis que vers le haut le magma devient téphrytique. Souvent les deux processus de différenciation se superposent et donnent d'autres types de magmas différenciés. Par exemple, un magma parent de type basalte à olivine, par différenciation gravitative, devrait donner en dernier terme un magma trachytique, tandis que, par la superposition de la différenciation pneumatolytique, on aura un magma de type phonolitique.

Les conditions favorables à la différenciation

Dans un bain fondu, la vitesse de chute des cristaux et celle de l'ascension des bulles de gaz sont inversement proportionnelles à sa viscosité. Il s'ensuit que les processus de différenciation ne se développent facilement que dans les magmas fluides et sont difficiles dans les magmas visqueux, voire impossibles dans les bains fondus très visqueux. La vitesse des magmas ainsi que celles de leur ascension et des mouvements de convection sont des facteurs importants du phénomène de différenciation.

Une expérience très simple met en relief l'action de ces mouvements : si deux verres sont remplis le premier avec de l'eau trouble, le second avec de l'eau gazeuse, et si on les laisse ainsi, dans le premier les particules en suspension se déposent peu à peu sur le fond et l'eau devient de plus en plus claire, tandis que dans le second on n'observe aucun changement. Lorsqu'on agite le contenu des deux verres avec un objet quelconque, dans le premier la sédimentation sera arrêtée, tandis que dans le second les bulles de gaz monteront vers la surface. Le même phénomène se passe pour les magmas : les mouvements du bain fondu sont un obstacle pour la différenciation gravitative; par contre, ils favorisent la différenciation pneumatolytique, le calme produisant l'effet opposé.

La stagnation du magma dans la croûte terrestre ou son ascension très lente sont des facteurs favorables à la différenciation gravitative, tandis que les mouvements de convection la rendent difficile.

Les meilleures conditions pour avoir une différenciation pneumatolytique sont réunies lorsque dans le volcan se manifeste une faible activité fumerollienne, qui maintient dans le magma une lente convection biphasée. Si celle-ci devient trop importante par suite de l'ouverture de la cheminée, on n'aura pas une différenciation pneumatolytique efficace, car les gaz se libéreront rapidement dans l'air avec presque tous les éléments pneumatophiles dissous.

Anatexie, assimilation, hybridisme

Outre les deux types de différenciation déjà cités (gravitative et pneumatolytique), il existe d'autres processus donnant naissance à des magmas différenciés : l'anatexie, l'assimilation et l'hybridisme.

L'anatexie

On distingue par ce terme la fusion partielle ou totale de roches préexistantes. Les magmas qui en résultent prennent le nom de *magmas anatectiques*. L'augmentation de température, nécessaire à la fusion anatectique, peut avoir deux origines : ou bien des roches de l'écorce terrestre, généralement des granites ou des gneiss, sont poussées pendant la formation des chaînes de montagnes par des forces tectoniques en profondeur (au-delà de 40 km) où les températures sont importantes, ou bien des magmas basaltiques très chauds envahissent la croûte terrestre et fondent les roches encaissantes. Dans le premier cas, on parle d'*anatexie régionale* car elle intéresse d'importantes régions orogéniques (longues de plusieurs milliers de kilomètres et larges de plusieurs dizaines ou centaines de kilomètres). Dans le second cas, on a une *anatexie de contact* bien localisée au contact entre le magma basaltique et les roches encaissantes.

Dans les deux cas d'anatexie, la fusion des roches acides en présence de vapeur d'eau commence à moins de 700 °C.

Les magmas anatectiques qui se forment pendant l'anatexie régionale ont la composition chimique de la roche préexistante, laquelle est presque toujours dacitique ou rhyolitique, plus rarement andésitique. Dans l'anatexie de contact, qui se développe surtout dans les zones de fissuration de l'écorce terrestre, le magma basaltique, lourd, ne se mélange pas ou se mélange peu avec le magma acide anatectique, beaucoup plus léger. Ainsi, les deux types de roches peuvent s'épancher à la surface séparément et donner naissance à de grandes couvertures basaltiques avec de petits dômes de matériaux pyroclastiques rhyolitiques ou dacitiques, sans ou presque sans termes intermédiaires.

Des exemples d'anatexie de contact se trouvent notamment en Islande, à l'île de Pantelleria (Italie) et dans le Tibesti.

L'assimilation

Au contact des grandes quantités de matière fondue, plus particulièrement des magmas anatectiques acides, avec les roches encaissantes ayant une composition très différente de celle du magma, prennent naissance des échanges dans les deux sens : la roche encaissante réchauffée est envahie par les gaz magmatiques et subit un métamorphisme de contact (elle se transforme en une roche pyrométamorphique) ; à son tour, le magma dissout et assimile une partie de la roche encaissante et modifie ainsi sa composition chimique. Ce processus prend le nom d'assimilation, et les magmas qui en découlent sont appelés *magmas synthétiques*.

Les transformations qui affectent la composition chimique des magmas sont évidentes si leur composition chimique et celle de la roche encaissante sont très différentes. Par exemple, au contact entre magma et roches carbonatées s'effectue une assimilation très forte : l'anhydride carbonique est éliminé, tandis que les oxydes de calcium et de magnésium sont assimilés par le magma. Il s'ensuit pour le magma une très forte perte passive en silice. Un exemple classique d'un processus analogue d'assimilation combinée avec une différenciation gravitative est celui du Monte Somma (Vésuve). Le magma originel, trachytique, est très probablement anatectique; par suite de l'assimilation de calcaires, il se transforme au fur et à mesure en un magma leucitotéphrytique et finalement leucitique.

L'hybridisme

On appelle hybridisme le mélange de deux magmas de composition chimique différente.

Les exemples d'hybridisme où un magma acide et un magma basaltique, très différents, se sont mélangés sans former un magma complètement homogène sont très nombreux. Dans d'autres cas, l'origine hybride des magmas homogènes de composition intermédiaire est encore l'objet de discussions.

L'origine des magmas

On sait actuellement avec certitude, grâce aux recherches géophysiques et géologiques, que la Terre est constituée par une croûte externe discontinue sous laquelle se trouve le manteau supérieur.

La croûte externe a, au niveau des continents, une épaisseur d'environ 35-40 km ; elle est constituée essentiellement par des granites et des granodiorites qui, chimiquement, correspondent aux rhyolites et aux dacites. Les composants les plus importants de ces roches sont le silicium et l'aluminium, d'où le nom de *sial* que Suess a attribué à la croûte externe. Le manteau supérieur, étant riche en silice et en magnésium, est appelé *sima*.

La limite entre le sial et le sima est caractérisée par une discontinuité qui porte le nom du savant qui l'a découverte : c'est la *discontinuité de Mohorovicic* ou plus simplement *Moho*. La composition du manteau supérieur est encore discutée. De nombreux géophysiciens croient qu'il est formé de roches péridotitiques ou de dunites, composées par de l'olivine avec des quantités variables de pyroxènes, tandis que les volcanologues et les géochimistes lui attribuent une composition de basalte très riche en olivine. Il existe, dans le manteau, une zone dans laquelle les ondes sismiques se propagent avec une vitesse décroissante, appelée couche de basse vitesse ou *Low Velocity Layer* (LVL). La LVL se trouve sous les océans à environ 60 km de profondeur, et sous les continents à environ 140 km. Les observations géophysiques et volcanologiques démontrent que les magmas basaltiques proviennent de la LVL. Pendant leur montée vers la surface, ils peuvent subir des différenciations qui, en dernier lieu, aboutissent à la formation de magmas trachytiques et phonolitiques en quantités relativement faibles.

Il serait absurde de vouloir expliquer de la sorte les très grandes quantités de magmas acides dacitiques ou rhyolitiques qui se trouvent dans les zones orogéniques. En effet, les plus récentes recherches pétrographiques et magmatologiques démontrent toujours plus clairement que les magmas acides sont engendrés par l'anatexie des roches sialiques, lesquelles, amenées à des profondeurs plus élevées (jusqu'à 80-90 km), subissent, pendant l'orogenèse, un réchauffement suffisant pour que leur fusion se produise.

La double origine des magmas, à partir du manteau supérieur pour les magmas basiques, et à partir de la croûte continentale pour les magmas acides, fournit une explication de la dualité du volcanisme.

Le plutonisme

Toutes les roches d'origine magmatique qui se sont solidifiées à l'intérieur de la croûte terrestre prennent le nom de *plutons,* ou *corps intrusifs*. On parle de *batholites* si de tels amas rocheux se développent en profondeur au-dessous de toutes les roches avoisinantes, de façon qu'ils ne paraissent pas renfermés dans ces dernières, qui les enveloppent uniquement dans leur partie sommitale. On parle, au contraire, de *corps injectés* lorsque les roches magmatiques sont complètement interstratifiées dans les roches avoisinantes (exception faite des « cheminées » qui ont rendu possible leur alimentation et leur injection).

Les batholites

Les batholites, dont l'origine semble liée aux magmas anatectiques, sont généralement localisés dans les aires de la croûte terrestre qui ont subi les plus intenses phénomènes de plissements orogéniques et, plus particulièrement, dans les zones qui constituent les « racines » des déformations (dans le cœur des grandes chaînes de montagnes). Toutefois, selon Daly, les batholites plus anciens (précambriens) peuvent aussi se trouver en dehors de ces aires et se développer, comme dans la plate-forme soviétique, au-dessous de sédiments à structure tabulaire (c'est-à-dire avec des couches subhorizontales).

Les batholites peuvent atteindre des dimensions énormes (si leurs dimensions sont inférieures en surface à 100 km, on utilise plus couramment le terme de *stok*) : le plus grand batholite, localisé dans les cordillères nord-américaines, atteint une largeur de 1 100 km et se développe sur une bande de 2 000 km de long. Le batholite des Andes (en Patagonie) est aussi de dimensions gigantesques : il mesure 1 100 km de long et environ 110 km de large. Des batholites d'âge hercynien se trouvent au cœur de la chaîne alpine : les plus grands, même si leurs dimensions sont beaucoup plus modestes que celles que nous venons de signaler, sont ceux des massifs du Mont-Blanc, de l'Aar-Gothard, de l'Argentera et du Pelvoux. Les batholites sont généralement discordants avec les roches de la couverture. De toute façon, il faut préciser que leur surface limite supérieure n'est jamais régulière ; elle présente de nombreuses apophyses et coupoles secondaires, ainsi que d'autres accidents, et résulte souvent de la connexion avec différentes formes d'intrusions qui se propagent à partir d'elle. Toutefois, de manière générale, la partie sommitale des batholites a la forme d'une énorme coupole (dômes) entourée par son *auréole de métamorphisme* avec des flancs peu inclinés. Leur inclinaison augmente avec la profondeur et se termine de manière subverticale.

Les corps injectés

Les corps injectés se subdivisent en *corps injectés concordants* si leurs épontes sont parallèles aux plans

S. Boroli

▲ **Sill** *dans le parc national de Yellowstone (Wyoming).*

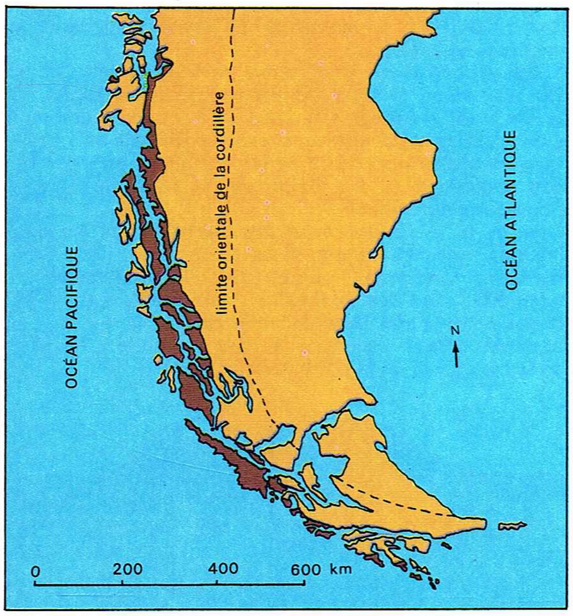

I.G.D.A.

◀ *Le grand* **batholite** *de Patagonie qui s'étend, le long de la partie chilienne de la cordillère des Andes, sur une longueur de plus de 1 100 km et une largeur de 110 km.*

structuraux (de stratification, de schistosité, de texture fluidale, etc.) des roches qui les renferment et en *corps injectés discordants* dans le cas contraire.

Les corps injectés concordants

Parmi les corps injectés concordants, les *filons couches* ou les *sills* sont assez caractéristiques : l'exemple le plus connu est celui de Whin-sill, il s'agit d'un filon couche qui s'étend sur une surface de 3 500 km^2, et qui touche cinq comtés d'Angleterre. La propriété principale de ces corps magmatiques est de se développer en harmonie avec la surface structurale (généralement la stratification) et d'avoir une épaisseur extrêmement réduite (de quelques centimètres à quelques centaines de mètres) par rapport au développement de leur surface. Il faut les relier à des injections, généralement horizontales, de magmas très fluides, qui provoquent souvent un phénomène de métamorphisme sur les roches encaissantes. Cette dernière condition, jointe au fait que les sills présentent souvent des apophyses pénétrant dans les roches du plancher et du toit du filon, permet de les distinguer des coulées de laves recouvertes par des dépôts postérieurs. Il faut également signaler le filon couche du Karoo (Afrique du Sud), long de 160 km et s'étendant sur une surface de 13 000 km^2.

Les filons couches, bien qu'analogues aux sills, ont une puissance très importante et sont généralement

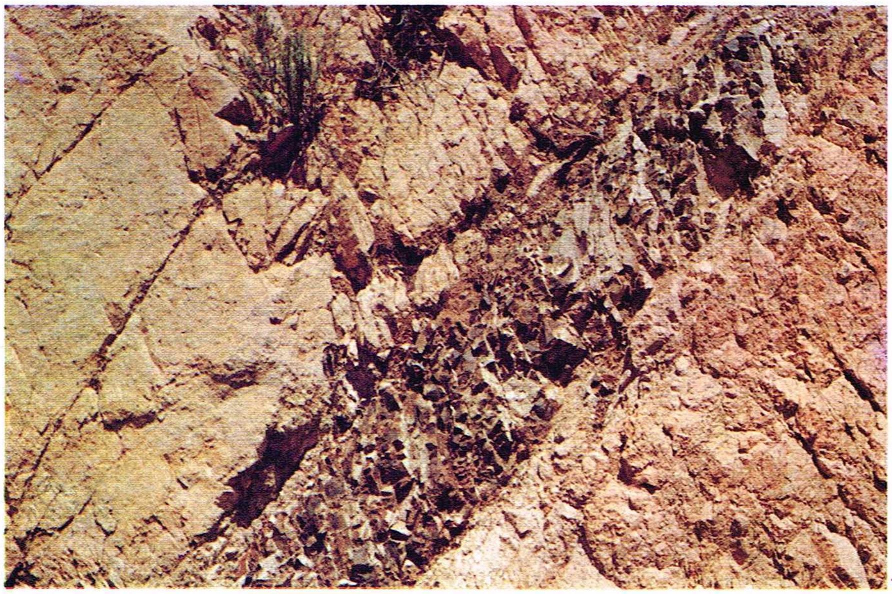

▲ ***Les** dykes : en haut, filon spessartinisé dans un granite (Arbatax, Sardaigne); ci-dessus, filon de microgranite dans un granite partiellement arénisé.*

localisés le long de plans correspondant à des discordances stratigraphiques et présentant une orientation parallèle à l'une des deux formations discordantes. Un exemple classique est celui du pluton de Sudbury (Ontario).

Les *laccolites,* comme les sills, se développent parallèlement à un plan de stratification, et ils prennent la forme d'une lentille plane-convexe ou bien biconvexe. Une forme semblable résulte du fait que le magma, au moment de l'injection, était très visqueux (soit du fait que son refroidissement était déjà commencé, soit, et c'est le cas le plus fréquent, parce qu'il s'agit de magmas acides) et ne pouvait pas se répandre librement : il finissait donc par se bomber sur place et provoquait contemporainement le soulèvement des roches de son toit (et parfois un abaissement des roches de son plancher). Les laccolites sont caractéristiques des régions à structure tabulaire, ainsi qu'en témoignent celles d'Amérique (Wyoming, Utah, Montana, Colorado, etc.), mais n'y sont pas confinés. Il existe aussi des localités caractérisées par la présence de digitations correspondant à des sills. Les structures en dôme ou à coupole de certaines régions sont souvent attribuables à la présence de laccolites dans le substratum.

Il faut signaler parmi les corps injectés concordants les *lopolites,* dont l'origine est, dans la majorité des cas, liée à des injections de magmas basiques (gabbros). Ils sont beaucoup plus rares que les laccolites et, comme ces derniers, ils ont une forme lenticulaire (leur épaisseur correspond à environ 1/10-1/20 de leur diamètre). Leur forme doit être attribuée, plus qu'à un gonflement par accumulation de la masse magmatique, à un effondrement des roches du substratum. Le lopolite de Duluth (lac Supérieur) est assez célèbre (il a un volume de 200 000 km^3) ainsi que celui du Bushweld (Transvaal).

Les *phacolites,* enfin, correspondent à des injections concordantes qui se réalisent en correspondance avec les vides créés le long des zones de charnières anticlinales et synclinales au moment des plissements. La morphologie des roches encaissantes n'est pas liée, comme dans le cas des laccolites, à la pression et aux poussées du magma; c'est, au contraire, ce dernier qui s'adapte aux vides créés par la tectonique.

Corps injectés discordants

Les exemples de corps injectés discordants sont également importants et variés; signalons les formes les plus importantes qui vont des *filons* aux *dykes,* aux *bysmalites,* aux *etmolites,* aux *arpolites* et finalement aux *chonolites.* Leur caractère commun est d'avoir une orientation transversale par rapport aux surfaces structurales des roches encaissantes.

Les *dykes* ou les *filons* présentent des propriétés assez semblables à celles des filons couches déjà décrits et s'en différencient uniquement par leur mode de gisement, justement discordant. Ils peuvent avoir des épaisseurs variables de quelques centimètres à plusieurs mètres (si les dimensions sont inférieures, on parle de *veines intrusives*), et être isolés ou regroupés en faisceaux différemment orientés. Il s'agit, en effet, d'injections magmatiques qui se réalisent le plus souvent en liaison avec des plans de fracture affectant les roches préexistantes (ignées, métamorphiques ou sédimentaires), plans de fracture qui, en liaison avec les causes génératrices, peuvent présenter des dispositions variées : en faisceaux, en essaims, à éléments subparallèles, rayonnants, réticulés, en anneaux, etc. Les *filons annulaires* sont assez caractéristiques. Ils s'injectent dans des fractures arquées ou annulaires qui, selon Anderson, se produiraient par effondrement de parties coniques de la croûte terrestre dans les roches magmatiques sous-jacentes incapables d'en supporter le poids. De tels filons sont, en effet, disposés le long de surfaces coniques avec les sommets dirigés vers le haut. Aux filons annulaires sont souvent associés des *filons coniques,* mais ceux-ci ont les sommets dirigés vers le bas. Toujours selon Anderson, le second type de filon doit être rattaché aux pressions exercées par le magma sur sa couverture rocheuse. Les filons de plus grandes dimensions, mis en relief par l'érosion des roches encaissantes généralement plus tendres, donnent au paysage un aspect très caractéristique.

Les *bysmalites* sont des corps injectés de forme cylindrique, concordants au sommet, et exclusivement dans cette partie, avec les roches de la couverture. L'exemple le plus connu est celui du mont Holmes (National Park de Yellowstone, États-Unis).

Les *etmolites* ont, contrairement aux bysmalites, une épaisseur qui décroît vers le bas, de telle façon qu'ils présentent en section verticale la forme d'un entonnoir. Selon Dal Piaz, le massif de l'Adamello en serait un exemple typique.

Les *arpolites* ont une forme de faucille très arquée. De tels corps prendraient naissance, selon Cloos, par la remontée du magma le long de fractures tectoniques subverticales et par son expansion horizontale successive. Leur caractère discordant serait dû, en grande partie, à des étirements et des déformations subis pendant les poussées orogéniques.

Enfin, le terme de *chonolites* désigne tous les corps injectés, essentiellement discordants, non classifiables dans les catégories précédentes. Ils présentent des analogies avec les batholites, bien qu'ils soient certainement injectés. Comme les laccolites, ils ont, de plus, souvent donné naissance à des structures en dôme dans les roches de la couverture.

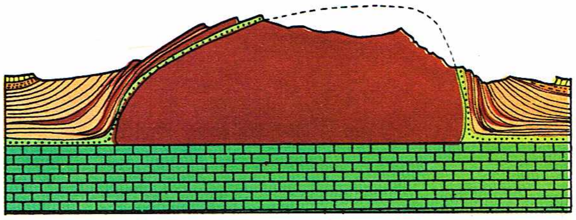

▶ ***Section du** laccolite de Mountain Hillers, dans la région du mont Henry (Utah).*

World Photo Service

▲ *Vue panoramique spectaculaire de la région volcanique et du mont Azuma dans la préfecture de Fukushima (Japon).*

Le volcanisme

On désigne par *volcanisme* l'ensemble des phénomènes liés à la montée et à l'épanchement sur la surface de la Terre de magmas. Ainsi que nous avons eu l'occasion de le signaler précédemment, on désigne par magma les masses silicatées, partiellement ou totalement fondues, qui se trouvent dans ou sous la croûte terrestre et qui contiennent en solution des gaz (vapeur d'eau, CO_2, H_2S, ClH, H_2, etc.).

Activité volcanique

N'importe quelle activité volcanique, qu'elle soit paroxysmale ou d'intensité modérée, est due, directement ou indirectement, à la libération plus ou moins violente des gaz dissous dans le magma. La manière selon laquelle se manifeste la séparation de la phase gazeuse à partir de la phase fondue dépend avant tout de la viscosité du magma et, en plus, des conditions géologiques qui en déterminent l'ascension. Il faut tenir compte avant tout de la différence entre l'activité des magmas fluides et celle des magmas visqueux. En effet, dans les magmas fluides l'activité explosive est très réduite, car les gaz peuvent se séparer facilement du bain fondu, qui arrive en surface et flue en formant une coulée de lave. Dans les magmas visqueux, au contraire, la libération des gaz, rendue difficile par les phénomènes de frictions internes, se fait pour cette raison de manière explosive; le magma fondu est ainsi morcelé et même pulvérisé, projeté dans l'air et déposé sous forme de matériaux pyroclastiques. Des recherches statistiques sur l'activité volcanique démontrent que les volcans qui ont une *activité* essentiellement *effusive* et ceux qui ont une *activité explosive* sont fréquents, tandis que ceux qui ont une *activité mixte* sont rares.

Pour comprendre le mécanisme fondamental de l'activité volcanique, il est nécessaire de comprendre la rivalité entre la pression interne, due aux tensions partielles des gaz dissous dans le magma, et la pression extérieure. A grande profondeur, la pression extérieure est égale à la somme de la pression hydrostatique de la colonne magmatique sus-jacente et de la résistance due à la viscosité du magma. Elle dépasse la tension de vapeur due aux gaz dissous dans le magma. Le magma, contenant les gaz dissous à l'état moléculaire et donc pourvu de bulles, prend le nom d'*hypomagma*. A des profondeurs plus faibles, la pression extérieure diminue et devient moins élevée que la tension de vapeur. Par conséquent, une partie des gaz, pour rétablir l'équilibre entre la pression extérieure et la pression intérieure, se libère sous forme de bulles. Le magma bulleux et parfois mousseux est appelé *pyromagma*. Dans la partie la plus haute de la cheminée volcanique, presque tous les gaz se libèrent ; il reste le magma dégazé, appelé aussi *épimagma*, qui, s'il est suffisamment fluide, peut s'épancher et former une coulée.

Activité continue

L'activité continue s'observe le plus clairement dans les volcans ayant un magma très fluide et un conduit ouvert. Elle consiste dans la libération de gaz qui s'effectue à intervalles réguliers à la surface de la colonne magmatique, avec de faibles explosions entraînant de petits morceaux de magmas.

La visibilité du phénomène externe dépend du niveau de la colonne magmatique dans la cheminée. Si le niveau

National Park Service

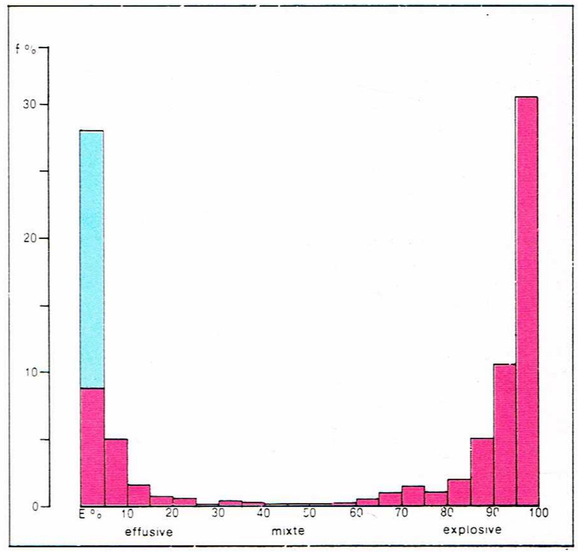

I.G.D.A.

▲ ***Ci-dessus,*** **une fontaine de lave** *durant l'éruption du Kilauea (Hawaii) en 1959.*
A droite, ***fréquence*** *en % (f %) de l'indice d'explosivité (E = 100 téphras/ téphras + lave) de tous les volcans actifs qui démontre clairement le dualisme du volcanisme (en bleu, les volcans sous-marins; en rouge, les volcans subaériens).*

du magma est à une profondeur telle que les *petits morceaux de lave* lancés en l'air par les explosions ne peuvent rejoindre la gueule du volcan, mais retombent dans la cheminée, le phénomène se réduit à l'émission à intervalles réguliers de *bouffées de vapeur*. Si le niveau du magma est beaucoup plus près de la gueule, les projections de lave se refroidissent et se consolident pendant leur trajectoire : on a alors des *projections de scories* non incandescentes qui retombent autour de la gueule. Enfin, si le niveau du magma a presque rejoint le fond du cratère, les morceaux de lave, encore liquides et incandescents, sont envoyés à quelques centaines de mètres de hauteur au-dessus du bord du cratère et donnent lieu à de spectaculaires *fontaines de lave*. Parfois, le magma peut déborder du cratère et former de petites coulées de lave très dégazées ou même s'infiltrer parmi les couches de scories du cône et réapparaître à une bouche plus ou moins éloignée du cratère.

Quelle que soit la variabilité des phénomènes visibles de l'extérieur, le *mécanisme de l'activité continue* reste pour l'essentiel le même. Dans une cheminée remplie de pyromagma, ce dernier se refroidit en surface et s'alourdit. Il en résulte une convexion thermique : le magma plus froid descend généralement le long des parois, et le plus chaud monte dans l'intérieur de la cheminée. Le pyromagma, en montant, se trouve à des pressions de plus en plus faibles; sa phase gazeuse se sépare donc sous forme de petites bulles. On a donc une *convexion biphasée* si efficace qu'elle maintient une activité constante. La perte de gaz en surface transforme le pyromagma mousseux en épigmama dégazé plus lourd, lequel, par un mouvement de convexion, va en profondeur; là il s'enrichit de nouveau en gaz par diffusion et se retransforme en pyromagma. Les grandes fluctuations de l'activité continue sont essentiellement dues à ces processus de dégazage-regazage, de refroidissement et de réchauffement.

Les bulles, pendant leur montée, augmentent de volume par suite de la diminution de pression et aussi parce qu'une nouvelle quantité de gaz leur est cédée par le magma. Par ailleurs, une bulle plus grande monte plus rapidement et englobe les autres bulles qui se trouvent sur son chemin. Elle s'agrandit et acquiert ainsi une vitesse beaucoup plus élevée que les autres bulles : ainsi se forment des *trains de bulles* avec une grosse bulle en tête. A son arrivée près de la surface, le train de bulles est gêné par une couche d'épimagma visqueux formé lors de la dernière explosion et non encore entraîné par la convexion biphasée. Lorsque la pression des bulles est plus élevée que la résistance et la tension superficielle de la couche d'épimagma, les bulles explosent violemment et lancent des morceaux de lave en l'air. Ces derniers retombent en partie dans la colonne magmatique et forment une couche d'épimagma qui gêne temporairement la libération du train de bulles suivant; c'est ainsi que l'on explique les intervalles plus ou moins longs entre les explosions. Si l'épimagma, au lieu de descendre le long des parois de la cheminée, s'injecte dans un conduit latéral et arrive à la surface, on a une *effusion lente subterminale,* qui représente une autre forme d'activité continue. Le mécanisme des coulées subterminales s'explique de la manière suivante : quand le niveau du magma dans la cheminée est très haut, celui-ci exerce sur les parois une pression hydrostatique qui facilite sa pénétration dans les strates moins cohérentes du cône éruptif formé par l'accumulation de scories et fragments de lave plus ou moins soudés. Au fur et à mesure que le magma descend le long de la pente de la couche, la pression hydrostatique augmente à tel point qu'elle finit par vaincre la résistance du matériel sus-jacent. Il s'ouvre alors une gueule magmatique effusive, à partir de laquelle le magma, déjà dégazé dans le cratère, flue en formant une coulée, alimentée plus ou moins en fonction du niveau atteint par le magma dans la cheminée.

La libération des gaz se fait aussi, dans ce cas, dans le cratère en haut de la colonne magmatique, tandis qu'à la bouche subterminale on n'observe aucune libération violente de gaz.

Une autre variété d'activité continue des magmas très fluides est la formation d'un *lac de lave* dans le cratère. C'est le cas du Kilauea (Hawaii) et du Niragongo (Congo) où la surface de la colonne magmatique s'est élevée jusqu'au cratère. La libération des gaz, dans un lac de lave, se fait de manière plutôt tranquille, non seulement parce que la surface de lac est suffisamment vaste, mais aussi parce que les réactions exothermiques entre les gaz volcaniques et l'oxygène atmosphérique provoquent une augmentation de la température, d'où une diminution de la viscosité du magma.

Dans tous les cas, l'activité continue est due à une fluctuation concernant l'équilibre dynamique entre la pression extérieure et la pression interne qui peut durer aussi longtemps que des phénomènes extérieurs ne viennent pas la troubler.

Si le mécanisme de l'activité continue dans les volcans à magmas visqueux est fondamentalement semblable à celui des magmas fluides, la phénoménologie en est par contre différente. En effet, la viscosité élevée du magma n'a pas empêché seulement la libération des gaz, qui s'effectue alors de manière explosive et très violente ; elle provoque aussi un énorme ralentissement des mouvements de convexion et des éventuels épanchements à la surface. De ce fait, la cheminée ne peut rester, comme dans le cas des magmas fluides, continuellement ouverte, mais doit être ouverte une nouvelle fois à chaque explosion. Il en résulte qu'il ne peut se produire d'émission de scories ou de petits morceaux de lave, ni d'épanchements lents subterminaux. L'activité continue se manifeste ici par la formation dans le cratère d'un *bouchon*. Avec l'accroissement de ce bouchon, la couche superficielle déjà consolidée se brise en plusieurs morceaux roulant le long de la pente et s'accumulant tout autour du dôme. Parfois, le magma situé à l'intérieur du dôme atteint la surface, le long des cassures, et forme des coulées réduites qui accroissent le dôme. Si la viscosité du magma est très élevée, des colonnes de magma presque solide sont injectées vers le haut de la cheminée. Un exemple classique est celui de l'« Aiguille » de la montagne Pelée à la Martinique qui atteignit 350 m de haut.

La croissance des dômes peut se poursuivre avec des fluctuations pendant des années ; elle est parfois accompagnée de phénomènes explosifs qui peuvent prendre un caractère catastrophique si la pression des gaz à l'intérieur du conduit est très élevée. C'est dans des conditions analogues que prennent naissance les *nuées ardentes*, qui sont des suspensions incandescentes de particules solides et partiellement fondues dans la masse gazeuse très mobile. La nuée ardente est si lourde qu'elle dévale le flanc du volcan à une vitesse très élevée et détruit tout ce qu'elle rencontre sur son chemin. Un exemple classique de ce phénomène est la catastrophe de 1902, où une nuée ardente, descendue de la montagne Pelée, détruisit la ville de Saint-Pierre avec ses 29 000 habitants.

Les éruptions à conduit ouvert

Les éruptions de ce type s'observent uniquement dans les volcans ayant une lave très fluide, par suite de la rupture de l'équilibre dynamique qui existe pendant l'activité continue. Pour rompre cet équilibre, il est nécessaire de faire varier de manière brusque soit la tension interne des gaz, soit la pression hydrostatique. Un changement brusque de la tension des gaz doit être exclu, alors que cela est très possible pour la pression hydrostatique. Pour qu'une éruption se produise, il suffit qu'une fissure s'ouvre en profondeur : le magma qui s'y injecte provoque un abaissement de la colonne magmatique dans la cheminée. La diminution de la pression hydrostatique qui en découle a pour conséquence une rapide transformation de l'hypomagma en pyromagma mousseux, lequel se traduit par une *éruption terminale* si la fracture rejoint la surface, ou *latérale* si une fracture radiale arrive sur le flanc du cône volcanique.

● *Les éruptions « terminales »*

Les éruptions terminales de magmas fluides constituent une réaction violente à la brusque chute de la colonne magmatique, à la suite de l'ouverture en profondeur d'une fissure qui n'atteint pas la surface. L'intensité de l'éruption terminale dépend de l'ampleur de la fracture et de la rapidité de son ouverture. La quantité d'hypomagma qui se transforme en pyromagma éruptible est proportionnelle à ces deux facteurs. La phénoménologie d'une éruption terminale peu violente est la suivante : un peu avant l'éruption, et par suite de l'abaissement de la colonne magmatique, le phénomène d'activité continue se réduit à l'émission de vapeur à partir de la cheminée centrale. Souvent, le matériel incohérent du cratère s'éboule et bouche la cheminée ; on a alors l'impression que le volcan est inactif. Le magma plus profond, saturé en gaz, devient sursaturé et commence à mousser. L'éruption débute par une forte explosion qui vide la cheminée du matériel éboulé précédemment ; puis suivent des émissions de scories et de petites quantités de lave, qui augmentent au fur et à mesure jusqu'à former une *fontaine de lave,* laquelle alterne avec l'émission de coulées de laves. L'intensité de cette activité diminue progressivement avec des fluctuations, jusqu'au moment où tout le pyromagma est dégazé. Après une éruption semblable, vient une période de repos. Un exemple d'éruption terminale est celle qu'a connue l'Etna le 4 juillet 1964.

Si l'éruption terminale est très violente, les gaz qui se dégagent brisent et pulvérisent le magma ; au lieu d'assister à des fontaines de lave, on observe des émissions de cendres, qui peuvent atteindre plusieurs kilomètres de haut et, transportées par le vent, se déposer à des centaines de kilomètres du lieu d'émission. L'éruption du Vésuve en 1944 en est un très bon exemple.

● *Les éruptions latérales*

Les éruptions des magmas fluides de ce type sont précédées par des secousses sismiques locales dues à la formation de fractures radiales en profondeur qui s'ouvrent par à-coups et se propagent jusqu'aux flancs du volcan. Le pyromagma de la cheminée pénètre immédiatement dans la fissure et favorise son ouverture jusqu'à la surface. Les violentes explosions qui suivent lancent en l'air la brèche d'ouverture, puis des scories et des petits morceaux de lave qui s'accumulent le long de la fissure et constituent de petits cônes adventifs alignés. Tandis que par les gueules plus hautes se libèrent des gaz chargés de particules solides et fondues, par les

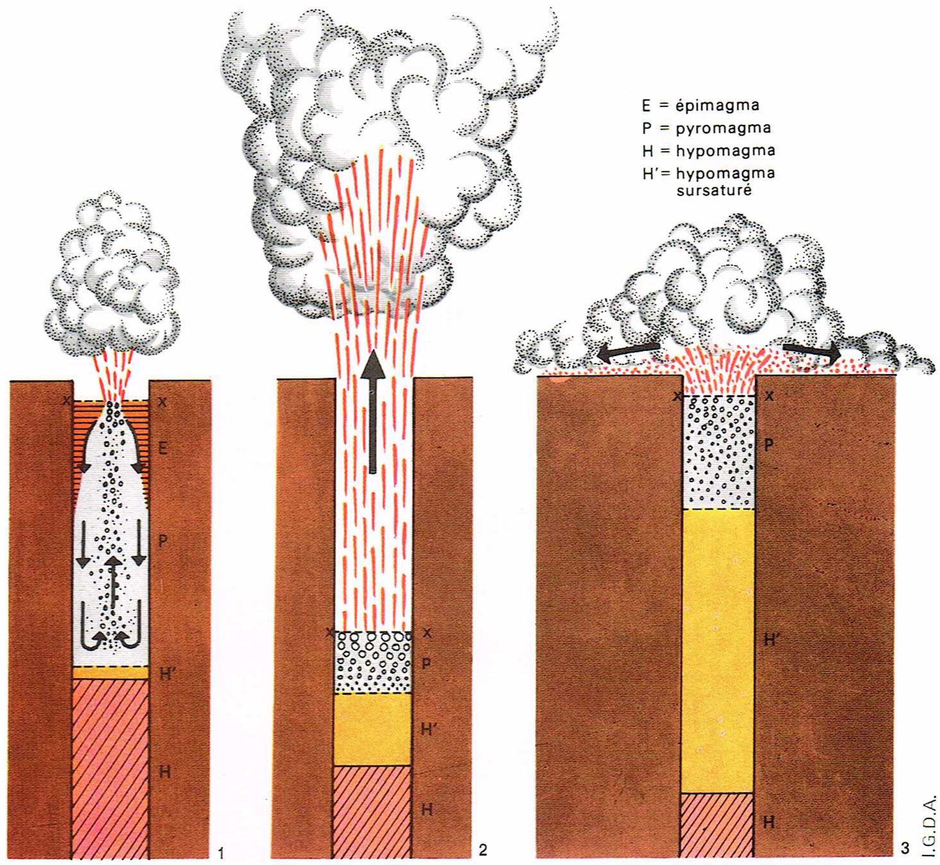

▲ ***Représentation schématique*** **des mécanismes éruptifs à cheminée ouverte.** **1,** ***activité continue : viscosité peu élevée ; peu de H' ; dans P, convexion biphasée ; le niveau d'explosion*** **(x-x)** ***est près de la surface ; épisodiquement, par explosion de trains de bulles, on a injection de débris de lave.*** **2,** ***éruption de cendres : viscosité moyenne ; le niveau d'explosion*** **(x-x)** ***s'abaisse progressivement dans le conduit pendant l'éruption ; rapide transformation de H en P ; dans la cheminée qui agit comme un canon, l'expansion continue des gaz accélère le mouvement ascendant des cendres qui sont éjectées très haut.*** **3,** ***éruption ignimbritique : viscosité très élevée ; grande quantité de H' ;*** **P** ***devient une mousse (foam lava) ; le niveau d'explosion*** **(x-x)** ***est à la surface ; l'expansion des gaz s'effectue en dehors de la cheminée et dans toutes les directions ; la lourde suspension s'étale latéralement (nuée ardente débordante).***

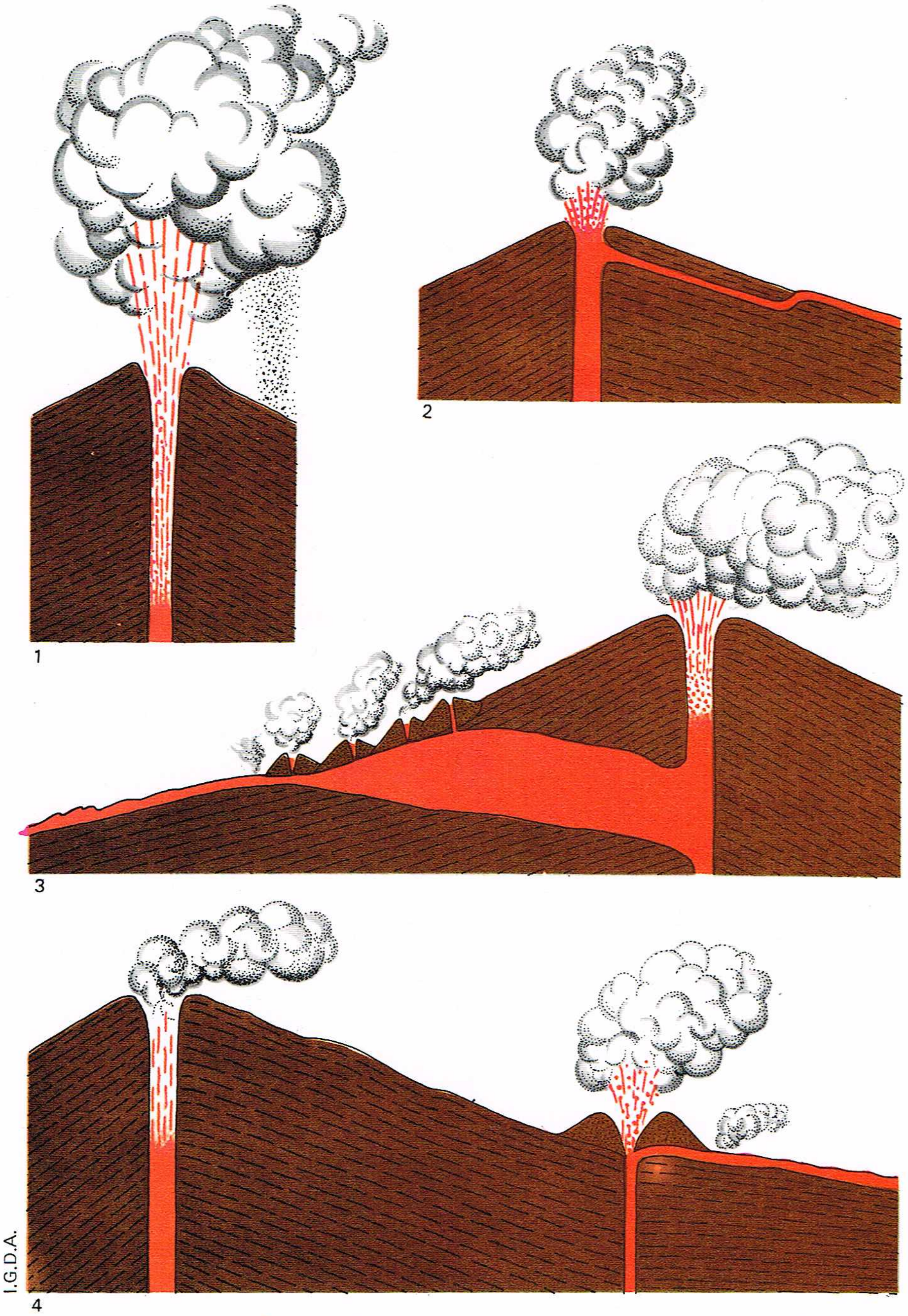

▲ *Représentation schématique des* **éruptions à conduit ouvert :** **1,** ***éruption terminale; 2, éruption subterminale; 3, éruption latérale; 4, éruption excentrée.***

▼ *Tableau de quelques-unes des plus violentes* **éruptions à conduit fermé.**

Volcans	Années	Energie libérée en ergs*	Auteurs des calculs de l'énergie
TAMBORA (Indonésie)	1815	$8{,}4 \cdot 10^{26}$	YOKOYAMA
SAKURAJIMA (Japon)	1914	$4{,}6 \cdot 10^{25}$	MATUZAWA
BEZYMIANNY (Kamtchatka, URSS)	1956	$2{,}2 \cdot 10^{25}$	GORSHKOV
KRAKATOA (Indonésie)	1883	10^{25}	YOKOYAMA
* L'énergie libérée par une bombe H est $1{,}4 \cdot 10^{21}$ ergs			

parties plus basses de la fracture s'échappent de puissantes coulées de lave de magma partiellement dégazé. Il en résulte une diminution de la pression hydrostatique et un abaissement de la colonne magmatique dans la cheminée centrale. Une grande quantité d'hypomagma se transforme en pyromagma qui laisse échapper, de manière très violente, une importante quantité de gaz, entraînant ainsi une éruption de cendres à partir du cratère central. Les épanchements de lave à partir des cratères latéraux et les éruptions de cendres du cratère central peuvent se répéter plusieurs fois. Après cette phase, le volcan rentre en période de repos. Le Vésuve, en 1906, et l'Etna, en 1892 et 1928, ont eu des éruptions latérales classiques. Si le magma est très visqueux, les laves ne peuvent s'épancher par les fractures latérales et les éruptions ne peuvent pas s'effectuer selon un processus analogue à celui que nous venons de décrire.

Éruptions à conduit fermé

Les éruptions à cheminée fermée sont aussi appelées *reprises d'éruptions* car la réouverture de la cheminée s'effectue après une période de calme plus ou moins longue.

Nous avons déjà souligné que, pendant l'activité continue des magmas fluides, la manifestation visible de l'extérieur est réduite à une émission plus ou moins rythmée de vapeur si le niveau de la colonne magmatique se trouve très bas dans la cheminée. Dans un cas semblable, il peut arriver que les parois de la cheminée et du cratère s'éboulent et constituent un *bouchon* qui obture la cheminée. L'activité continue est alors arrêtée et remplacée par une légère *activité fumerollienne.* Le bouchon est imperméabilisé par l'altération chimique, par la fusion et l'infiltration de magma qui se solidifie et se soude par refroidissement. Au-dessous du bouchon, naturellement, la tension des gaz qui s'accumulent augmente jusqu'à vaincre sa résistance mécanique. Après une série de secousses sismiques prémonitoires, le bouchon est brisé et éjecté avec une violence très grande. Suivent des émissions de scories, de lambeaux de magma, puis de lapilli et de cendres jusqu'à la libération de l'excès de gaz. Après un arrêt plus ou moins long, l'activité continue reprend.

Un type particulier de reprise d'activité est désigné par le nom d'*éruption plinienne.* C'est le cas de l'éruption du Vésuve de l'an 79 qui détruisit les villes de Pompéi et d'Herculanum, provoquant la mort de Pline l'Ancien (d'où son nom).

Le caractère principal d'une telle éruption est la très longue période de calme qui la précède et pendant laquelle s'effectue une importante différenciation du magma. Après l'expulsion du bouchon, on assiste à une éruption très violente de ponces et de cendres qui, par différenciation, acquièrent une composition chimique changeant progressivement. Dans le cas des magmas visqueux, les reprises d'éruptions terminales sont fortement explosives. Avant l'éruption, la cheminée est bouchée par de la lave consolidée qui, au fur et à mesure, est réchauffée et refondue à sa base. Lorsque la tension des gaz dans le pyromagma dépasse la résistance mécanique du bouchon, ce dernier est brisé et éjecté. Les gaz chargés de ponces et de cendres sont émis jusqu'au moment où se rétablit l'équilibre entre la pression extérieure et la pression intérieure. Le volcan entre alors en période de calme. Des éruptions de ce type sont très fréquentes (tableau ci-contre en bas).

Éruptions initiales

Par le terme d'éruption initiale, on désigne la naissance d'un nouveau volcan. Un très bel exemple de la naissance d'un volcan à magma très fluide est celle du Paricutin (Mexique) en 1943. Elle fut précédée par de violentes secousses sismiques locales et par le bombement du sol, au sommet duquel est apparue une fracture qui a émis, mélangé à des eaux souterraines, du matériel de la couverture. Suivirent des émissions de scories qui s'accumulèrent autour de la fissure et édifièrent un cône. Plusieurs émissions de lave se produisirent successivement.

Les *éruptions périphériques,* sur les flancs ou les parties basses du volcan actif à magma fluide, peuvent être considérées comme des éruptions initiales. De la même façon, une série de secousses sismiques locales provoque l'ouverture de fractures par lesquelles le magma fluide profond parvient à la surface. Les fractures, qui

s'ouvrent de bas en haut, sont complètement indépendantes de la cheminée centrale. Cela est confirmé par le fait que l'activité de la cheminée centrale n'enregistre pas immédiatement l'éruption périphérique. Mais si l'émission de lave est importante au niveau des bouches périphériques, il se produira, en profondeur, une dépression dont l'effet sera ressenti après un temps plus ou moins long, même au niveau de la colonne magmatique centrale, qui s'abaissera. Parfois, la dépression sera suivie de l'effondrement de la partie sommitale du volcan. Le cas se produisit à l'Etna en 1669, où un petit cône volcanique se forma à partir duquel se déversèrent trois coulées dont l'une détruisit partiellement Catane.

Les éruptions initiales dans les cas des volcans à magma visqueux sont semblables dans leurs grandes lignes aux éruptions terminales explosives, avec la différence que la cheminée déjà existante ne se rouvre pas et qu'il s'en forme une nouvelle. Après des tremblements de terre précurseurs, l'éruption commence par la projection de brèches qui libèrent la cheminée, à partir de laquelle des explosions de plus en plus violentes envoient à plusieurs dizaines de kilomètres de haut des ponces et des cendres en grandes quantités. Après ce stade paroxysmal, on assiste à des périodes caractérisées par une activité décroissante avec émission de cendres jusqu'à extinction. Dans le cratère en forme d'entonnoir une activité fumerollienne peut persister pendant quelque temps; le plus souvent, le cratère est envahi par des eaux phréatiques : il se forme alors un petit lac, dit *maar*. Parfois dans le cratère, après une période de calme, un dôme se forme, à la suite d'une très lente émission de magma fortement dégazé.

Des éruptions initiales peuvent aussi avoir lieu en mer. Le mécanisme est le même que celui des éruptions subaériennes. En revanche, les phénomènes observés changent. Lorsque le magma vient au contact avec l'eau de la mer, on observe de très forts dégagements de vapeur qui traversent la surface marine et lancent en l'air des jets chargés de scories (noires) accompagnés de bouffées de vapeur (blanches). Les scories s'accumulent au fur et à mesure autour de la gueule sous-marine et constituent un cône qui peut s'élever au-dessus de la surface de la mer. Il en résulte que les éventuelles éruptions seront de type aérien.

Volcanisme fissural

Dans ce cas, on peut parler aussi de la naissance de volcans qui, au lieu de se placer sur une ouverture centrale, sont localisés sur une fracture abyssale pouvant mesurer plusieurs dizaines de kilomètres. Après l'explosion des brèches d'ouverture, suivent des éjections de cendres et de scories et enfin des fontaines de lave, avec des épanchements de coulées qui peuvent couvrir de grandes surfaces. Vers la fin des grandes effusions, l'activité se réduit à l'éjection de scories, avec des petites coulées de lave, non plus le long de la fissure, mais à partir de chaque bouche.

Contrairement aux volcans à cheminée centrale, dont les nombreuses éruptions se suivent à intervalles réguliers toujours à partir du même évent, les éruptions fissurales ne se répètent presque jamais à partir de la même fissure qui est définitivement bouchée par la lave consolidée. L'éruption du Laki (Islande), en 1783, se fit, selon Thoroddsen, par une fracture dont la longueur avoisina 25 km; environ 12 km^3 de lave furent émis qui couvrirent une surface de plus de 565 km^2.

● *Éruptions fissurales sous-marines*

Très fréquentes dans les fossés marins et océaniques, ces éruptions sont des émissions tranquilles sans phénomènes explosifs. En effet la pression hydrostatique élevée de la colonne d'eau empêche la formation de vapeur d'eau, tandis que les autres gaz volcaniques sont dissous par l'eau de mer. Si à la surface ces éruptions passent inaperçues, elles provoquent par exemple la rupture de câbles téléphoniques immergés. Les recherches géophysiques et surtout l'étude géologique des zones océaniques fossiles émergées mettent en évidence leur existence.

● *Éruptions fissurales ignimbritiques*

Seuls les magmas visqueux peuvent donner des éruptions ignimbritiques. Il n'en existe pas d'observation directe, et leur allure est reconstituée par l'étude des produits émis. Des tremblements locaux précèdent l'ouverture d'une ou plusieurs fissures à partir desquelles, après l'émission des matériaux encaissants, s'échappent, avec des explosions violentes, des cendres et des ponces. Le pyromagma mousseux qui remplit la fissure présente, un peu avant de déborder, l'aspect d'un amas ponceux incomplètement rigide. Au fur et à mesure que la viscosité du magma augmente, les parois des bulles éclatent; ainsi, le pyromagma se transforme en une suspension d'esquilles de verre, de débris de ponces et de phénocristaux isolés dans une masse gazeuse incandescente. La suspension ainsi formée, du fait de la faible quantité de gaz éjectée par unité de temps et de surface, ne peut être envoyée en l'air et déborde de la fissure, d'où le nom de *nuées ardentes débordantes*. Sa mobilité est si forte qu'en un temps très bref elle se répand comme un fluide et couvre des surfaces très grandes. Pendant le dépôt des

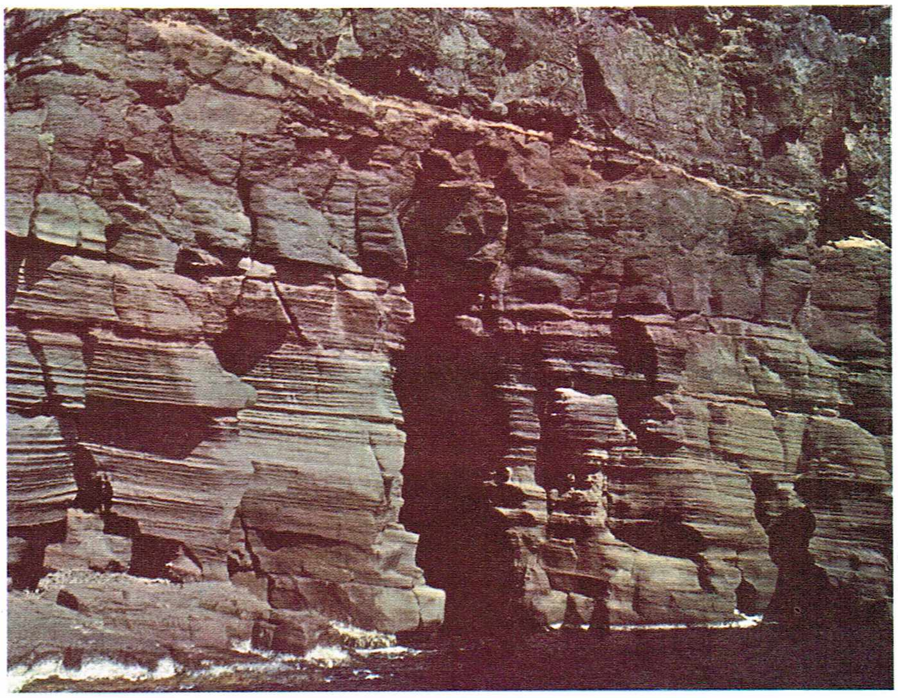

Rittmann - Gottini

▲ Flux laminaire dans les ignimbrites de Pantelleria.

▼ Naissance de l'île volcanique de Surtsey (au sud de l'Islande); la photographie a été réalisée le 16 novembre 1963, deux jours après la naissance de l'île, alors que le cratère était encore au-dessous du niveau de la mer et que l'île avait atteint 40 m de haut.

G. Mairani

matériaux en suspension, la température est suffisante pour que les esquilles de verre et les ponces encore visqueuses soient, dans les parties inférieures et à l'intérieur du dépôt, écrasées et soudées à tel point que la roche qui en résulte ressemble à une coulée de lave. Vers le sommet et sur les bords de la formation, la roche, moins soudée, passe progressivement à un tuf cinéritique. Dans certains cas, à la fin de l'éruption, le magma dégazé monte le long de la fissure et forme, dans ou sur la couverture ignimbritique, des intrusions tardives. Le Monte Amiata, en Toscane, en est un exemple; on y rencontre en plus des *rhéo-ignimbrites,* c'est-à-dire des ignimbrites qui ont flué le long de terrains inclinés.

L'activité fumerollienne

Les *fumerolles* sont des sources de vapeur et de gaz chauds. Dans les cratères et les fissures des volcans actifs, on trouve des fumerolles dont la température peut dépasser 1 000 °C et qui contiennent, en plus de la vapeur d'eau surchauffée, une quantité plus faible d'anhydride carbonique, d'acide chlorhydrique, d'hydrogène, de chlorures et de très petites quantités d'autres substances volatiles. Les sulfates sont prédominants dans les fumerolles dont la température est inférieure à 650 °C.

Dans toutes les régions volcaniques, les fumerolles dont la température varie entre 90 °C et 300 °C sont très fréquentes. On les désigne sous le nom de *solfatares* car elles contiennent, en plus de la vapeur d'eau, de l'hydrogène sulfuré, lequel, au contact de l'air, s'oxyde et dépose du soufre autour des évents. La solfatare de Pozzuoli en est un exemple classique.

Des fumerolles plus froides, caractérisées par des températures inférieures à 90 °C, prennent le nom de *mofettes;* elles produisent une grande quantité d'anhydride carbonique.

On trouve des fumerolles éphémères sur les coulées de lave en cours de refroidissement. Dans certains cas, elles déposent des *sels ammoniacaux,* qui proviennent de la distillation sèche de certaines substances végétales couvertes par les coulées.

Un type particulier de fumerolles est celui qui résulte de l'évaporation d'eaux phréatiques réchauffées par les plutons magmatiques existant en profondeur.

L'activité hydrothermale

Cette activité consiste en une émission d'eau, dont la température élevée peut être liée à des phénomènes volcaniques, géothermiques ou provoqués par des réactions chimiques entre les eaux vadoses et les roches encaissantes.

Les geysers sont un type particulier de sources intermittentes localisées dans les régions volcaniques. Trois régions sont particulièrement riches en geysers : l'Islande, la Nouvelle-Zélande et le National Park de Yellowstone aux États-Unis. Le mécanisme de l'activité des geysers s'explique si l'on admet qu'une fissure remplie d'eau, à une certaine profondeur, reçoit des gaz volcaniques chauds et de la vapeur d'eau. Au fur et à mesure, ces derniers élèvent la température de la fissure jusqu'à l'ébullition qui correspond à la pression régnant dans cet endroit. L'eau bouillante expédie en l'air la colonne d'eau sus-jacente, qui forme ainsi le jet du geyser. Cela se traduit par une chute de la pression qui transforme l'eau surchauffée en vapeur. Le geyser le plus fameux est celui de Wainmangu en Nouvelle-Zélande. Il était capable de lancer en l'air une colonne de 800 000 kg d'eau et de pierres jusqu'à 460 m de hauteur. Son activité dura cinq années et cessa en 1904, lorsque le niveau du lac voisin (Tarawera) s'abaissa par suite de la rupture d'une digue naturelle.

▼ ***Fumerolle de haute température qui dépose des chlorures alcalins (blancs) et de fer (orange) [cratère de l'Etna].***

V. Barbagallo

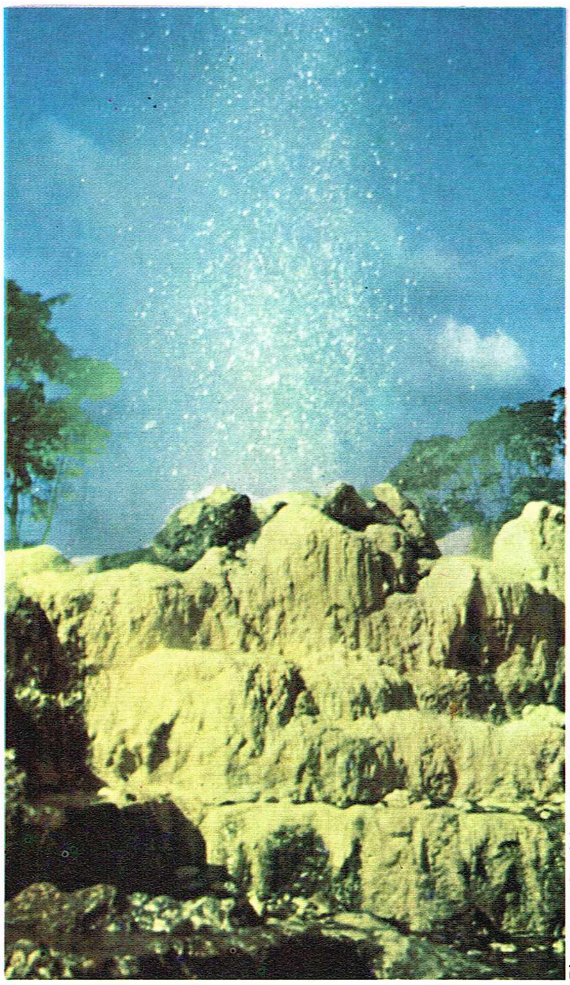

Rittmann - Gottini

▶ **Geyser** ***avec terrasses en geysérite (essentiellement opale, c'est-à-dire silice amorphe qui se sépare des eaux thermales pendant le refroidissement) [Wairakei, Nouvelle-Zélande].***

Les produits de l'activité volcanique

En fonction de leur état de consolidation, on distingue deux types de produits volcaniques : les *laves* et les *produits pyroclastiques,* aussi appelés *téphras.*

Les laves

● *Morphologie des laves*

Les laves sont des amas compacts d'épimagma consolidé. Les formes superficielles des coulées de lave dépendent, en plus de la viscosité de l'épimagma, de leur mode d'écoulement. Les laves très chaudes et fluides forment très rapidement une croûte visqueuse qui, trouée par la coulée de lave sous-jacente, est plus ou moins déformée sans pour cela se briser. Ainsi prennent naissance différents types morphologiques, comme les *laves cordées,* les *laves en boyaux* et les *laves lisses,* qui sont dans leur ensemble regroupées par le terme hawaïen de *laves pahoehoe.* Si la croûte ainsi formée, et devenue suffisamment rigide, est soumise à des tensions provoquées par un mouvement accéléré de la lave sous-jacente encore liquide, elle se morcelle et forme une *lave en dalles.* Si, au contraire, l'écoulement de la coulée est ralenti, la croûte déjà solidifiée est poussée vers le haut et, en se cassant, elle forme des *protubérances.* Des coulées noires fluides, mais encore relativement riches en gaz, se recouvrent de scories découpées ou plus ou moins arrondies; on les désigne sous le nom hawaïen de *lave aa.* Les coulées très visqueuses présentent un aspect nettement différent : leurs surfaces sont recouvertes de blocs anguleux et non scoriacés. On les appelle *laves à blocs.*

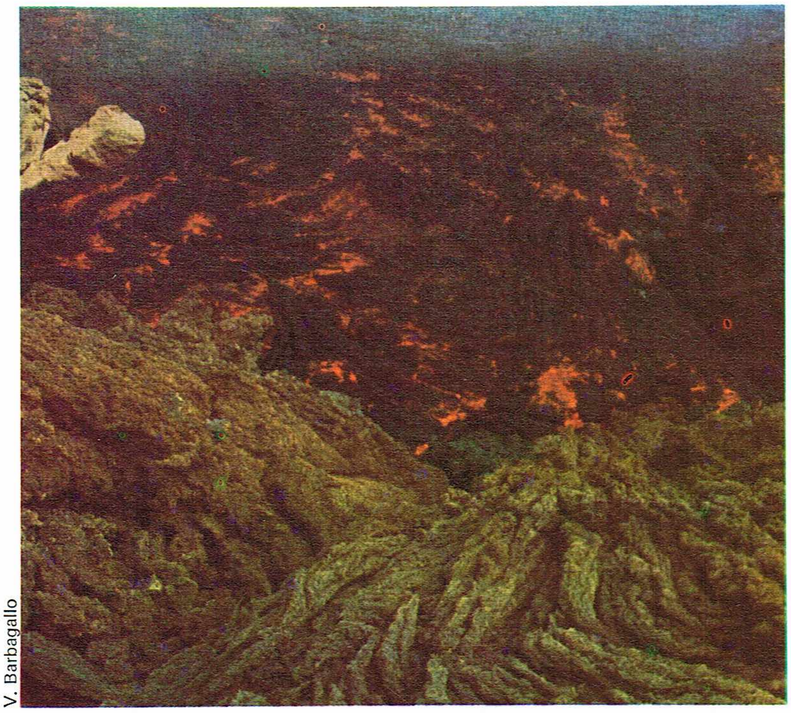

V. Barbagallo

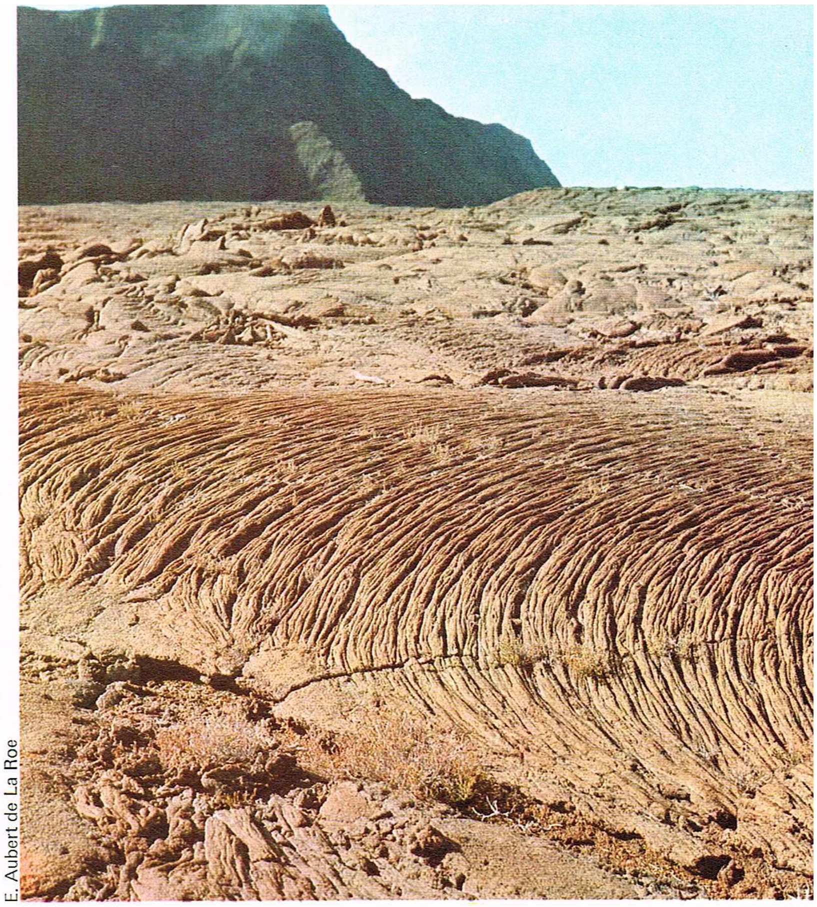

E. Aubert de La Roe

La partie interne des coulées et des dômes est formée par de la roche compacte, souvent traversée de fractures orientées normalement aux surfaces de refroidissement et provoquées par la contraction thermique. Il en résulte la *structure prismatique* bien connue.

Très souvent, on peut observer dans les coulées une séparation parallèle à la surface, due à l'écoulement laminaire de la lave devenue déjà très visqueuse, ce qui lui confère un aspect stratifié.

● *Structure des laves*

La structure d'une roche qui résulte de la solidification d'une masse magmatique complètement fondue, dépend de la vitesse du refroidissement. En effet, si celui-ci est très lent, les cristaux ont le temps de se former; la roche

▲ ***A gauche, coulée de lave en train d'avancer dans la* Valle del Bove, *Etna; la coulée est de type* aa *et avance sur d'anciennes laves cordées* (pahoehoe). *A droite, deux types de* lave pahoehoe *: au premier plan, lave cordée; au fond, lave boudinée (Piton de la Fournaise, île de la Réunion).***

S.E.F.

◀ ***La fameuse « chaussée des géants » du comté d'Antrim (Irlande du Nord) est un exemple typique de fissuration en colonnes dans une coulée basaltique solidifiée.***

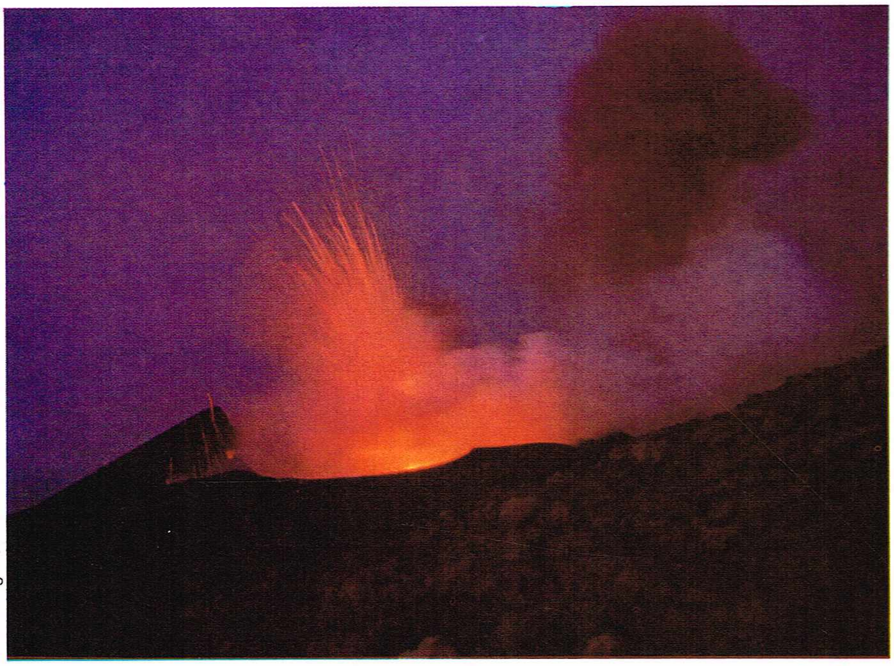

V. Barbagallo

▲ *Éjections de cendres et de lave accompagnées de « bouffées » de vapeur (Etna, cratère nord-est).*

qui en résulte sera donc complètement cristallisée et aura une structure *holocristalline à grain fin*. Si, au contraire, le refroidissement est très rapide, les cristaux n'auront pas le temps de se former, et la masse fondue se consolidera en une roche complètement vitreuse *(obsidienne)*. Entre les deux types de structures, holocristalline et vitreuse, on rencontre des types intermédiaires, dans lesquels de très petits cristaux (microlites) sont disséminés dans une pâte vitreuse (mésostase) : ce sont les structures *microlitiques*.

Mais le magma commence souvent à cristalliser très lentement, en profondeur, avant l'effusion. Au moment de l'éruption, existent déjà des cristaux qui sont entraînés à la surface par la lave fondue. Ces *cristaux intratelluriques,* plus grands que ceux qui se forment pendant le refroidissement de la coulée, prennent le nom de *phénocristaux*. La masse fondue dans laquelle se trouvent les phénocristaux se consolide, en fonction de sa vitesse de refroidissement, en une *pâte de fond* vitreuse, microcristalline, ou holocristalline à grain fin. Toutes ces structures à phénocristaux sont appelées *porphyriques*. Si la masse de fond est vitreuse, la structure est *vitrophyrique*.

● *Composition minéralogique des laves*

Les minéraux qui se séparent dans un magma en cours de refroidissement sont, pour la majeure partie, des silicates de différentes espèces. En fonction de leur teneur dans la roche, ils se divisent en *minéraux essentiels, minéraux accessoires* et *minéraux accidentels*. Les *composants essentiels* se divisent à leur tour en *minéraux sialiques* (Si, Al), très fréquemment incolores, et en *minéraux fémiques* (Fe, Mg) colorés en vert, marron et noir.

La classification systématique des roches ignées se base sur les proportions de *minéraux sialiques*. Des subdivisions supplémentaires peuvent intervenir en fonction de la quantité globale de minéraux fémiques, exprimée en pourcentage par volume, appelée aussi I.C., ou *indice de coloration*. Les composants sialiques principaux (ou alumino-silicates) sont les feldspaths, les feldspathoïdes et le quartz. Les feldspaths sont les minéraux les plus abondants des roches ignées, dont ils forment en moyenne 60 %. Ce sont des alumino-silicates d'alcalins (Na et K) et de calcium formant des séries isomorphes, c'est-à-dire des cristaux à composition moyenne, entre les pôles : *orthose* Or ou feldspath potassique $KAlSi_3O_8$; *albite* Ab ou feldspath sodique $NaAlSi_3O_8$; *anorthite* An ou feldspath calcique $CaAl_2Si_2O_8$.

La miscibilité entre ces trois minéraux n'est pas complète. On peut ainsi distinguer deux séries : a) les feldspaths alcalins ou sodipotassiques avec la *sanidine* $Or_{100}Ab_0$ à $Or_{40}Ab_{60}$ et l'*anorthose* $Or_{39}Ab_{61}$ à $Or_{10}Ab_{90}$; b) les feldspaths calco-sodiques ou série continue des plagioclases (Ab, An avec un peu d'Or).

Dans les roches ignées pauvres en silice (roches basiques), à côté des feldspaths apparaissent des alumino-silicates que l'on appelle *feldspathoïdes*. Les types les plus importants sont la *leucite* $KAlSi_2O_6$ et la *néphéline* $NaAlSiO_4$.

Dans les roches acides, si la quantité de SiO_2 présente est supérieure à celle qui est nécessaire pour former des silicates saturés (f), il se forme du quartz SiO_2.

Les minéraux fémiques ou ferromagnésiens les plus importants sont les pyroxènes, les amphiboles, la biotite, les olivines et les mélilites. Parmi les pyroxènes les plus importants, se trouvent les pyroxènes monocliniques, ou clinopyroxènes, où l'on distingue des espèces minéralogiques caractéristiques des différents magmas : *augites, pigeonites, ægyrine-augites, titano-augites*.

Chez les minéraux fémiques, on assiste également à la substitution d'un minéral par un autre, chimiquement très voisin, si dans le bain fondu la quantité de silice est peu élevée. Ainsi l'*olivine* $(Mg, Fe)_2 SiO_4$ remplace un pyroxène riche en SiO_2.

Dans les roches volcaniques, assez rares, caractérisées par des teneurs élevées en calcium parallèlement à des teneurs déficitaires en silicium, apparaît la *mélilite*, mélange isomorphe de $Ca_2(Mg, Fe)Si_2O_7$ et de $NaCaAlSi_2O_7$. Une quantité excédentaire de calcium en présence de CO_2 aboutit à la formation de *calcite* ($CaCO_3$).

Il faut remarquer que les formules chimiques que nous venons d'utiliser sont approximatives. En effet, outre les substitutions isomorphes indiquées, il en existe d'autres plus complexes, notamment dans le cas des clinopyroxènes.

Les minéraux signalés sont stables dans les roches volcaniques qui ont cristallisé à basse pression après effusion de la lave. Ils sont caractéristiques des roches *volcaniques stricto sensu*. Dans les *faciès subvolcaniques,* c'est-à-dire à des pressions plus élevées et en présence de nombreux gaz volcaniques, des minéraux intratelluriques se forment à leur place, et l'on retrouve ceux-ci sous forme de phénocristaux dans les roches volcaniques. Parmi les minéraux caractéristiques du faciès subvolcanique, les *amphiboles,* qui remplacent partiellement les clinopyroxènes du faciès volcanique, constituent des cristaux de composition chimique très complexe, caractérisés par la présence d'un groupement oxhydryle OH. La *hornblende* est l'un des plus importants représentants de cette famille $(OH)_2Ca_2(Mg, Fe)_4Al_2Si_7O_{22}$.

La *biotite,* ou mica noir, appartenant à la famille des phyllosilicates, est aussi caractérisée par la présence du groupement OH : $(OH)_2KAl(Mg,Fe)_3Si_3O_{10}$; elle remplace dans le faciès subvolcanique la leucite et l'olivine du faciès volcanique.

Enfin, il faut signaler qu'en présence de gaz et à pression élevée, la pigeonite ne peut se former. A sa place apparaissent l'*augite* et l'*hypersthène*.

Les produits pyroclastiques

On désigne par ce terme tout le matériel brisé émis par les éruptions à caractère explosif. Selon la nature et la grosseur des fragments, on distingue différents types de produits pyroclastiques.

— *Les cendres,* improprement appelées ainsi, sont le matériel le plus fin, constitué de petites esquilles de verre volcanique frais, auxquelles viennent s'ajouter des matériaux provenant de l'usure et de la pulvérisation des roches constituant les parois de la cheminée; parfois, pendant les éruptions de ce produit, des gouttes de pluie englobent des particules de cendre, les cimentent et forment ainsi de petits globules, que l'on appelle des *pisolithes*.

— *Les sables* diffèrent des cendres uniquement par les dimensions de leurs particules; les cristaux isolés sont fréquents.

— *Les lapilli* sont de petits fragments de taille comprise entre 0,2 et 2 cm de diamètre.

— *Les scories* sont des fragments bulleux de lave relativement fluide refroidie à l'air pendant l'éruption.

— *Les ponces* sont des fragments bulleux de lave si légers qu'ils peuvent flotter.

— *Les blocs* sont des fragments de roches plus gros que les lapilli, arrachés aux parois de la cheminée.

— *Les bombes* sont des débris de lave qui pendant leur vol dans l'air acquièrent, par leurs mouvements de rotation, des formes caractéristiques. Si le magma est assez fluide, des bombes en *fuseau ou rubanées* se

forment. Si au moment de la chute elles sont encore visqueuses, elles se déforment, s'incurvent et s'écrasent. Souvent elles contiennent un noyau de matière étrangère.

Si le magma est très visqueux, des *bombes en croûte de pain* ou des *bombes explosives* prennent naissance. Les premières se forment lorsque l'on a un noyau encore visqueux, qui gonfle, prend un aspect ponceux et provoque dans la croûte presque solide de nombreuses fissures lui conférant l'aspect d'une croûte de pain. Dans les secondes, au contraire, la croûte de la bombe étant déjà solidifiée, lorsque le noyau se gonfle, les fragments anguleux de la croûte sont éjectés; il reste ainsi un noyau en forme de bombe en croûte de pain polygonale.

Les *gouttes* ou *billes de lave* pédonculées peuvent aussi être considérées comme de très petites bombes de lave très fluide. Pendant la chute, les filaments se détachent des billes et, transportés par le vent, s'accumulent pour former les *cheveux de Pelé* (laquelle était la déesse du Feu pour les Hawaïens).

— *Les tufs* résultent de l'accumulation de matériaux incohérents cimentés par des circulations d'eau. En fonction du matériel qui les constitue, on distingue : les *tufs cinéritiques*, les *tufs ponceux* et les *tufs bréchiques*. Ils sont généralement stratifiés; cependant, il faut également signaler les *tufs chaotiques* et les *tufs soudés*. Les premiers sont formés par des matériaux cimentés, de nature et de dimensions très variées, sans aucune stratification. Les seconds prennent naissance lorsque les esquilles vitreuses sont encore suffisamment plastiques au moment du dépôt pour se souder les unes aux autres, ce qui ne peut avoir lieu qu'à une température encore relativement élevée. On aboutit ainsi à des *bancs de scories soudées* et à des dépôts constitués par des cendres et des particules de lave.

Les ignimbrites sont aussi des couches très étendues de tufs soudés, déposés par des nuées ardentes émises pendant les éruptions fissurales de magmas acides très visqueux. Les parties centrales de ces dépôts sont facilement confondues avec des coulées de laves; elles en diffèrent toutefois : vers le haut, elles passent progressivement à des cinérites peu ou non soudées.

Les produits volcaniques sous-marins

La lave fluide qui s'épanche vers le fond de la mer est brusquement refroidie par l'eau et se désagrège en formant des amas de fragments vitreux, que l'on appelle *hyaloclastites*. La lave, protégée par ces couches superficielles, forme un peu plus profondément des coulées compactes qui, par suite du refroidissement, acquièrent une structure prismée. Les coulées, entraînant de manière irrégulière la couche hyaloclastique sus-jacente, provoquent ainsi des fractures dans lesquelles pénètre la lave sous-jacente liquide; celle-ci forme ainsi des *dykes*. Au contact des hyaloclastites imbibées d'eau, ces intrusions se recouvrent aussi d'une couche vitreuse qui est, à son tour, partiellement désagrégée. Près de la surface de la coulée, par suite du brusque refroidissement, des amas de lave arrondis et recouverts d'une enveloppe vitreuse se forment fréquemment. Ils sont caractérisés par une

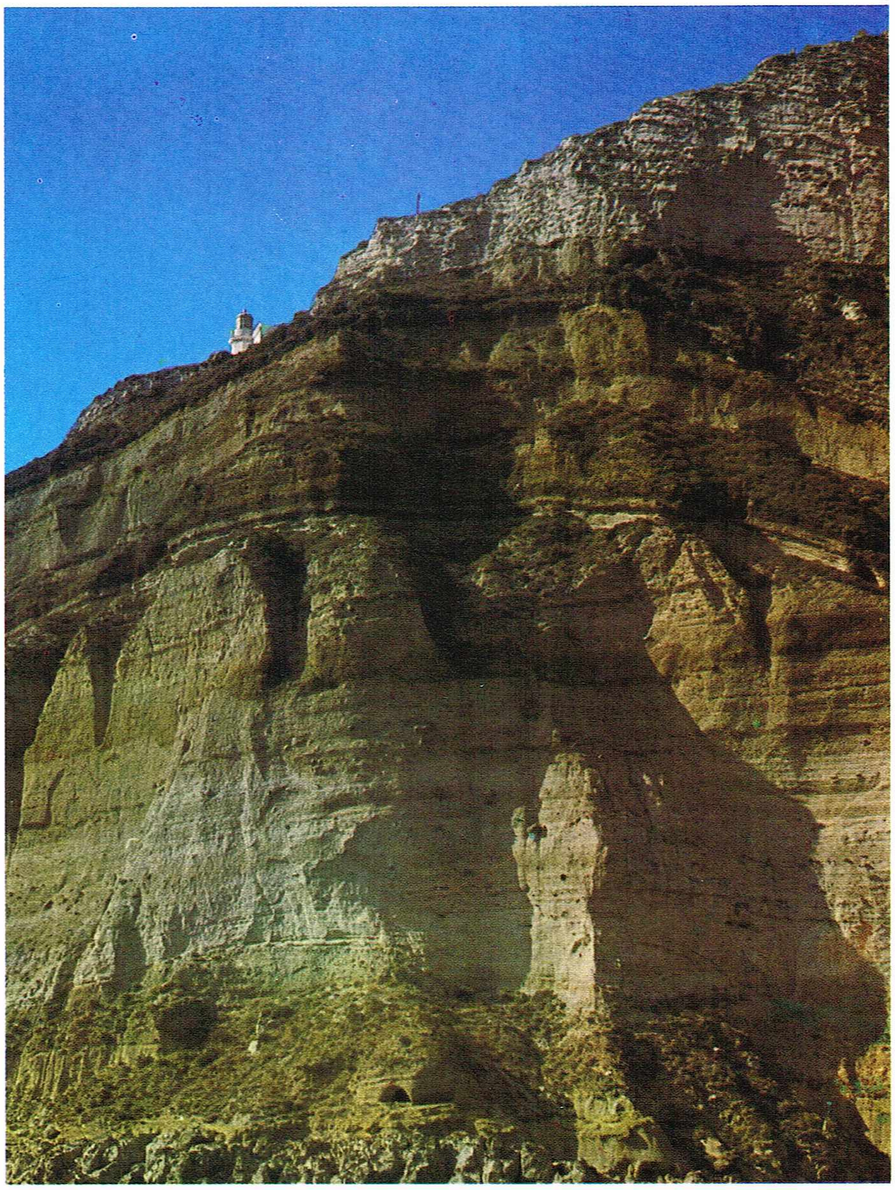

Gottini

▲ *Un exemple de* **tufs stratifiés** *: au-dessus de la discordance on observe un* **banc de scories soudées** *en alternance avec les* **tufs**; *en haut, des* **tufs ponceux** *(Punta dell'Imperatore, Ischia).*

▼ *A gauche, une* **bombe volcanique** *en « croûte de pain » (île de Vulcain, îles Éoliennes). A droite, l'illustration montre la superposition d'une coulée subaérienne de l'Etna sur une coulée sous-marine, dite en « pillow lavas » ou laves en oreiller.*

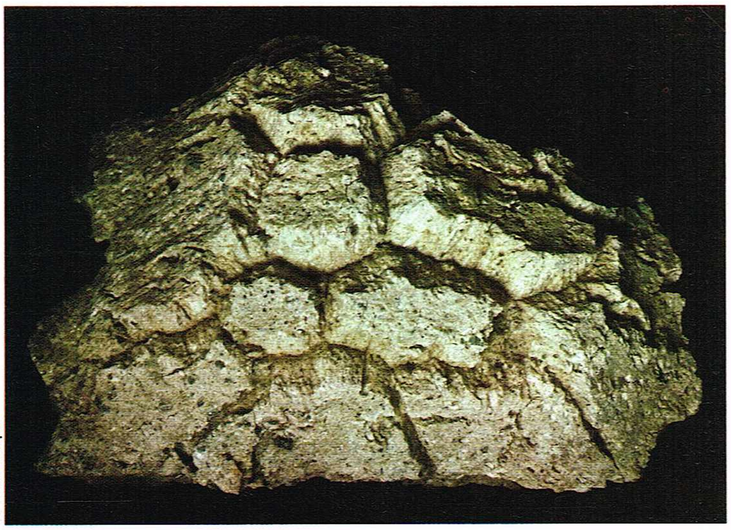

C. Bevilacqua

Rittmann - Gottini

Ostman - E. Muench

▲ *Vue aérienne du Mauna Loa (Hawaii), imposant exemple de* **volcan en bouclier.**

structure interne rayonnante dont le refroidissement est responsable. En raison de leur forme, ils prennent le nom de *pillowlavas*, ou *laves en oreiller*.

Les hyaloclastites sont souvent remaniées par des courants sous-marins et par des mouvements de convexion dus au réchauffement de l'eau lors de l'éruption. Les hyaloclastites remaniées ne doivent pas être confondues avec les *tuffites*. Celles-ci sont, au contraire, constituées par du matériel pyroclastique subaérien, soit tombé dans l'eau, soit, plus fréquemment, érodé et transporté du continent vers la mer ou dans les lacs où il se mélange avec les matériaux sédimentaires.

▼ *Représentation schématique de divers types d'édifices volcaniques : volcan en bouclier (en haut); stratovolcan (au centre); volcan de scories (en bas, à gauche); dôme endogène (en bas, à droite).*

Morphologie et structure des volcans

La morphologie et la structure des édifices volcaniques sont déterminées par des types d'éruptions qui dépendent de la nature des magmas, et en particulier de leur viscosité. D'autres facteurs très importants, comme l'état tectonique de la croûte terrestre, la stratigraphie, la topographie et le milieu (continental ou marin), interviennent de manière non négligeable. Le nombre de ces facteurs est à la base de la diversité des édifices volcaniques. Ainsi, chaque grand volcan présente des caractères qui lui sont propres, en raison non seulement des caractères cités ci-dessus, mais également de leur variation dans le temps. Chaque volcan résulte de l'histoire des éruptions qui l'ont construit avec les matériaux laviques ou pyroclastiques, ainsi que de l'évolution du milieu dans lequel il s'est agrandi.

Une systématique rigide des volcans est donc extrêmement difficile et subjective, car elle dépend du choix des caractères considérés comme les plus importants, tels que : la forme de la voie d'ascension de la lave (faille ou cheminée), la nature des produits (laves ou pyroclastites), le milieu (subaérien, sous-marin, sublacustre, périglaciaire), etc. Dans le cas des grands volcans, on constate souvent un changement de ces facteurs avec le temps; c'est pourquoi l'édifice qui en résulte est très complexe. Malgré ces difficultés s'opposant à une classification systématique des volcans on peut distinguer, à côté des types complexes, des prototypes de volcans simples.

Les plateaux basaltiques

Les plateaux basaltiques sont des « volcans tabulaires » dus à des effusions successives de magmas basaltiques, très fluides, le long de fractures ou de failles très importantes. La structure de tels volcans est caractérisée par la superposition de puissantes couches basaltiques, traversées çà et là par de grands dykes. Le long de la faille même, on trouve de nombreux petits cônes de scories alignés, formés vers la fin de l'éruption, qui seront ensevelis successivement par les éruptions ultérieures.

Les plateaux basaltiques atteignent d'énormes dimensions. Au Deccan (Indes), où ils prennent le nom de *trapps*, ils couvrent environ 1 000 000 de km², au Paraná (Brésil) plus de 750 000 km²; ils peuvent dépasser des épaisseurs de 3 000 m.

Les volcans en bouclier

Les volcans en bouclier, construits par de nombreuses éruptions centrales, ont la forme d'un cône très aplati avec des cratères sommitaux à parois presque verticales que l'on appelle *pit craters*, ou *puys*, lesquels sont parfois remplis par un lac de lave.

En fonction de leurs dimensions et de leurs structures, on distingue des volcans en bouclier de *type islandais*, qui sont les plus petits, et des volcans en bouclier de *type hawaïen*, dont les gigantesques dimensions sont dues à des éruptions le long des flancs du volcan par un système de fractures rayonnantes. Si les éruptions latérales se répètent, l'édifice volcanique s'élargit et la partie la plus haute devient ainsi presque plane.

Le plus grand volcan en bouclier actif est le Mauna Loa Hawaii, dont le sommet se situe à 4 200 m d'altitude et la base à plus de 5 500 m sous la mer.

Des volcans moins importants, formés par des magmas fluides pendant une seule éruption, sont constitués par un cône et une seule coulée de lave. La forme de cette dernière et sa longueur ne dépendent pas uniquement de la quantité de lave émise, mais aussi et surtout de la configuration topographique.

Les stratovolcans

Les stratovolcans sont constitués par la superposition de strates pyroclastiques et de coulées de laves. La forme classique est conique avec des flancs convexes et, au sommet, un cratère *en forme d'entonnoir*.

En fonction de l'importance relative des bancs pyroclastiques et des coulées, on peut distinguer : des *stratovolcans à lave dominante*, des *stratovolcans où la quantité des deux produits est équivalente* et *des stratovolcans à matériel pyroclastique dominant*. Les deux premiers types de volcans sont le résultat d'éruptions de magmas relativement fluides. Leur structure stratifiée *périclinale* est souvent compliquée par la présence de *dykes couches* localisés dans la partie centrale du volcan et par des *dykes rayonnants*. Le troisième type de stratovolcan, dû à des éruptions de magma très visqueux, est très fréquent. Souvent le cône est constitué essentiellement de couches de ponces, cendres et tufs chaotiques déposés par des nuées ardentes et des *lahars*, tandis que dans les cratères se forme un dôme parfois traversé par une aiguille solide.

Les stratovolcans les plus importants sont localisés dans les zones orogéniques autour du Pacifique, en Indonésie, etc. Les massifs du Mont-Dore et du Cantal, le Vésuve et le Stromboli sont des stratovolcans typiques,

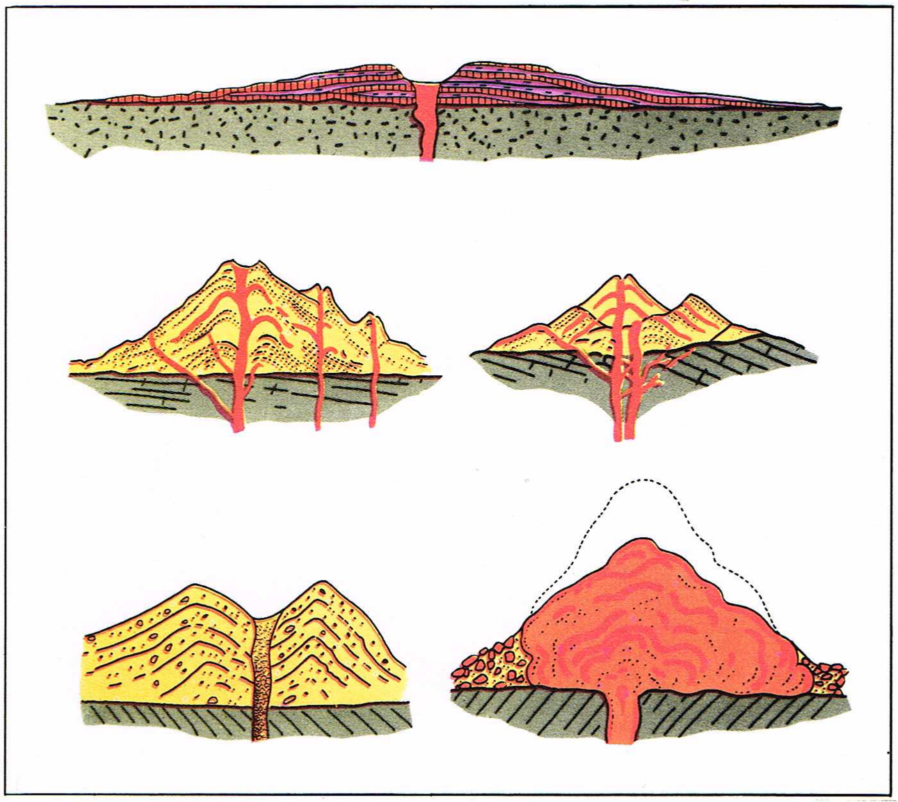

I.G.D.A.

▲ ***Lac formé dans la** caldeira **sommitale du volcan Sete Cidades, à l'ouest de l'île de San Miguel (Açores).***

tandis que l'Etna est un stratovolcan riche en coulées qui se rapproche des volcans en bouclier.

Les couvertures ignimbritiques

Ces couvertures sont dues à des éruptions fissurales de magmas très visqueux. Le matériel qui les forme est émis sous forme de nuées ardentes débordantes. La structure interne des couches ignimbritiques, compacte dans les parties inférieures, plus poreuse vers le haut et les bordures, passe enfin progressivement à des tufs friables et stratifiés. La partie soudée, compacte, présente un débit grossièrement prismatique et irrégulier. Les fractures qui ont émis le matériel sont remplies par ce débit ; elles sont toutefois invisibles car elles sont recouvertes par la couche ignimbritique.

Cependant, des dômes de lave formés dans ou sur la couverture lorsque le magma était déjà dégazé, soulignent la direction de la fissure.

D'énormes couches ignimbritiques engendrées par la superposition des produits de plusieurs éruptions linéaires recouvrent des surfaces très vastes, comme Taupo-Rotorua (26 000 km^2) en Nouvelle-Zélande, et le lac Toba (25 000 km^2) dans l'île de Sumatra.

Les caldeiras et les effondrements volcano-tectoniques

Les caldeiras sont des zones topographiquement déprimées, de forme subcirculaire, créées par l'effondrement d'une partie de l'édifice volcanique à la suite d'éruptions ayant vidé la cheminée ainsi que, parfois, également les parties les plus hautes du réservoir magmatique. Si les effondrements postéruptifs se succèdent, il en résulte des caldeiras plus complexes avec des *contours festonnés*, comme celle des champs Phlégréens près de Naples. Dans de nombreux cas, l'activité volcanique continue après la formation de la caldeira et se manifeste par l'installation dans celle-ci d'un certain nombre de petits cônes ; c'est le cas des champs Phlégréens, un autre exemple fameux étant la caldeira du Tengger (Java), où l'on compte sept petits volcans.

Des caldeiras semblables, mais de dimensions plus grandes et de contours polygonaux, correspondent à des effondrements volcano-tectoniques qui se forment lors des grandes éruptions ignimbritiques le long des fractures. Le lac Toba, précédemment cité, en est un exemple : son diamètre maximal atteint presque 90 km.

▼ ***Le pic de Teide (Tenerife),* stratovolcan *avec au premier plan une coulée de* lave à blocs.**

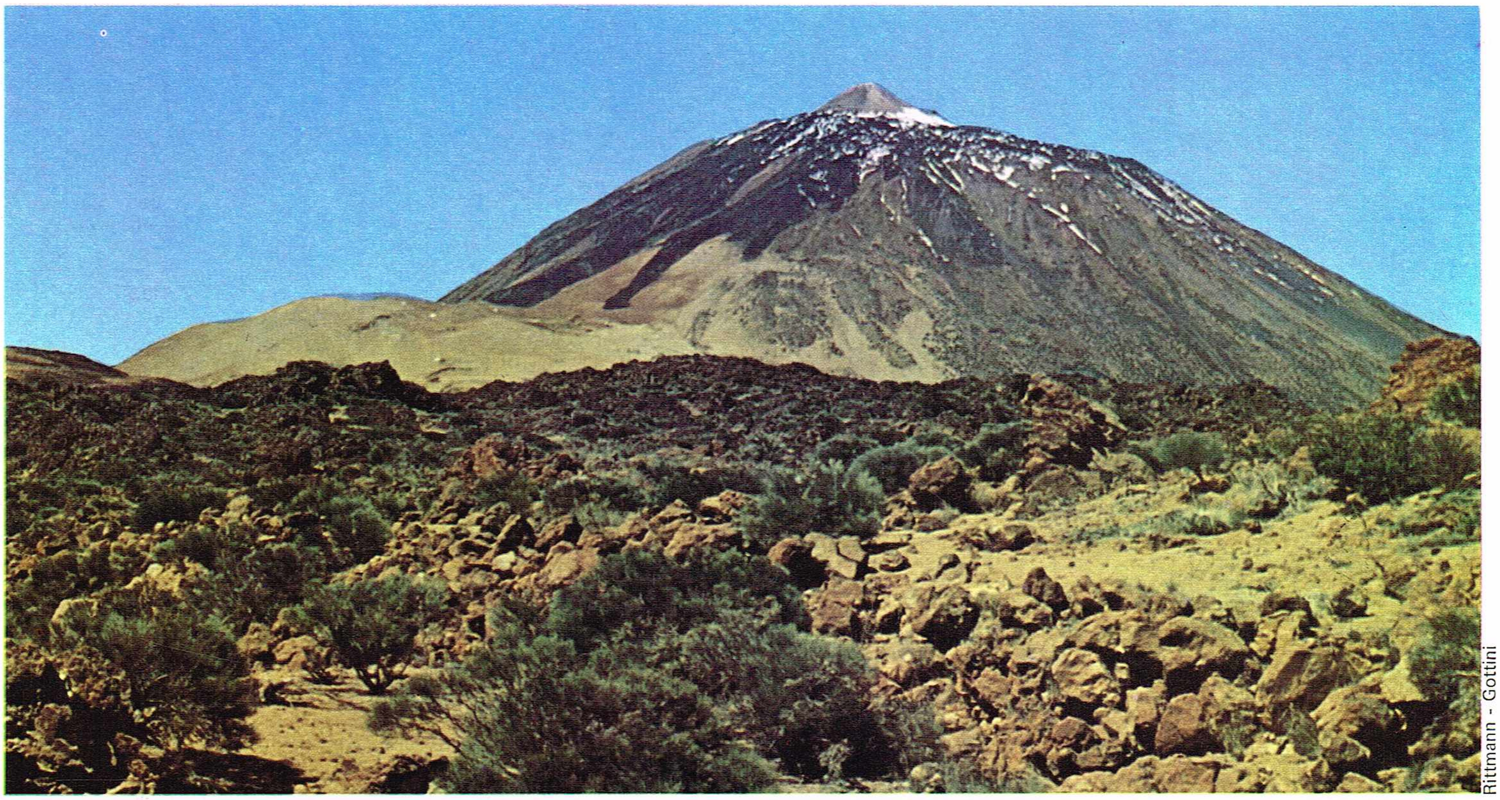

▶ *Le cratère central de l'Etna a surgi sur le flanc occidental de la* Valle del Bove, *nom donné à la caldeira sommitale du Trifoglietto. Cette structure volcanique complexe constitue un exemple de* volcan composite.

▶ *Page ci-contre, de haut en bas : 6 coupes théoriques, dont 5 de* volcans composites *à évolution normale; on observe le passage de l'effusion de laves basiques fluides aux phénomènes explosifs, avec dépôt de matériaux pyroclastiques dus à la forte viscosité des magmas acides; dans les troisième et cinquième dessins, l'activité volcanique se termine par la formation d'un dôme endogène. Le sixième et dernier schéma, en bas, représente un* volcan composite *avec une aiguille terminale.*

Les horsts volcano-tectoniques

Si une masse magmatique s'insère à une profondeur de quelques kilomètres dans des roches de poids spécifique plus élevé, elle exerce une poussée d'Archimède suffisante pour fracturer le toit du bassin magmatique. Les lambeaux de roche ainsi formés sont ensuite soulevés à différents niveaux; on les appelle aussi des horsts volcano-tectoniques. Souvent, le long des fractures et des failles qui délimitent les différents panneaux ou lambeaux, se manifestent des éruptions volcaniques qui construisent de petits volcans. Un exemple classique est celui du horst de l'île d'Ischia.

Les volcans composites

Dans de nombreux volcans, l'axe éruptif se déplace, latéralement, provoquant ainsi la formation de différents cônes qui se recoupent. Des volcans très complexes prennent ainsi naissance : on les qualifie de composites.

L'Etna est un exemple de *volcan composite,* formé par différents appareils volcaniques ensevelis sous les projections plus récentes. A la base de l'Etna, il y a des basaltes sous-marins sur lesquels se forment des stratovolcans, parmi lesquels le Calanna et le Trifoglietto avec sa vaste caldeira sommitale que l'on appelle *Valle del Bove*. L'ensemble a subi un soulèvement intense par à-coups, dû à la tectonique régionale. C'est sur le flanc occidental de la *Valle del Bove* que s'est formé l'Etna actuel en activité. Cette structure volcanique, déjà très complexe, a été encore compliquée par de nombreuses éruptions excentriques qui ont construit des petits volcans de scories avec d'importantes coulées de lave.

▶ *Le cratère de l'Asamayama (Japon).*

Le Vésuve est un autre exemple de volcan composite. Son activité a commencé par la formation de couches ignimbritiques et de dômes trachytiques sur lesquels s'est installé un grand stratovolcan : le Monte Somma ; ensuite, la partie centrale du volcan s'est effondrée, formant ainsi la caldeira sommitale dans laquelle, à une époque historique, est apparu l'actuel volcan actif.

Les chaînes de volcans installés sur une même fracture sont assez fréquentes. Les alignements de volcans construits par différentes éruptions ne doivent pas être confondus avec les petits cônes qui se forment sur une seule fracture au cours d'une éruption fissurale. Un exemple caractéristique de volcans alignés est celui de la chaîne des Puys, en Auvergne.

Les volcans sous-marins

Les *hyaloclastites* désignent les produits tabulaires d'émission sous-marine. On connaît aussi, spécialement dans l'océan Pacifique, des volcans à cône central, appelés *sea mounds,* dont les flancs sont peu inclinés (10 à 12°) et qui sont formés par des hyaloclastites. Si la couche d'eau est faible, de tels édifices peuvent rejoindre et dépasser le niveau de la mer : ils constituent ainsi des îles. Dans ce cas, le volcanisme prend un caractère subaérien, avec des scories et des fontaines de lave. Des exemples d'îles volcaniques sont l'île de Capelinhos (Açores), l'île de Surtsey (Islande) et l'île Ferdinandea (Sicile).

Distribution géographique des volcans et relations entre le volcanisme et la tectonique

On considère qu'un volcan est actif s'il a été en éruption pendant une époque de l'histoire, même s'il semble éteint actuellement. On connaît plus de 700 volcans, dont environ 60 % forment autour de l'océan Pacifique la « ceinture de feu ». Dans cette dernière ils sont ainsi répartis : 116 dans les îles Kouriles (Japon) ; 123 des Philippines à la Nouvelle-Zélande ; 80 dans les Amériques ; 107 en Alaska, dans les îles Aléoutiennes et dans la péninsule de Kamtchatka. La ceinture de feu compte donc, au total, 426 volcans actifs circumpacifiques qui appartiennent pour la plupart au type explosif, c'est-à-dire avec un magma visqueux, très souvent acide. Les 108 volcans de l'Indonésie sont du même genre ainsi que les 2 du Caucase, ceux du Santorin (Méditerranée orientale) et les 8 des Petites-Antilles. Tous ces volcans sont situés dans des régions orogéniques.

Les volcans effusifs, contrairement aux volcans explosifs, produisent des magmas fluides et basiques (généralement des basaltes et leurs produits de différenciation) et se situent dans des zones non orogéniques, mais *cratoniques* (craton : aire stable de grande taille, ainsi nommée par Stille [1936]), où la croûte terrestre est soumise à des phénomènes de distension et de fracturation. Les volcans de ce type se répartissent ainsi : 23 dans les îles Hawaii et d'autres îles de l'océan Pacifique ; 70 dans les îles de l'océan Atlantique et de l'océan Indien ; parmi ces derniers, 27 se trouvent en Islande. En outre, environ 50 volcans de type basique effusif, liés aussi à des zones de distension et de fracture, se placent le long des grands fossés d'effondrement africains. Aux zones cratoniques doivent aussi être rattachés les plateaux basaltiques et de nombreux volcans sous-marins très profonds.

La distribution des volcans explosifs dans les zones orogéniques et des volcans effusifs dans les zones cratoniques montre clairement que le *dualisme du volcanisme* est intimement lié à la structure et la tectonique de l'écorce terrestre.

Cette subdivision fondamentale en volcans caractéristiques des régions orogéniques et volcans des régions cratoniques a été faite par des pétrographes qui, au début de ce siècle, ont introduit la notion de *provinces pétrographiques* (F. Becke et J.W. Judd) ou *régions comagmatiques* (H.S. Washington) ; plus précisément, ils ont distingué la *province pacifique,* qui regroupe les volcans des zones orogéniques, et la *province atlantique* pour les produits des régions cratoniques. Par la suite, Niggli a créé la *province méditerranéenne* pour les volcans de l'Italie centrale et méridionale. En se basant plus particulièrement sur la composition chimique des feldspaths dans ces roches, d'autres auteurs ont parlé de *série calco-alcaline* (Pacifique), de *série alcaline* ou *sodique* (Atlantique) et d'une *série potassique* (Méditerranée).

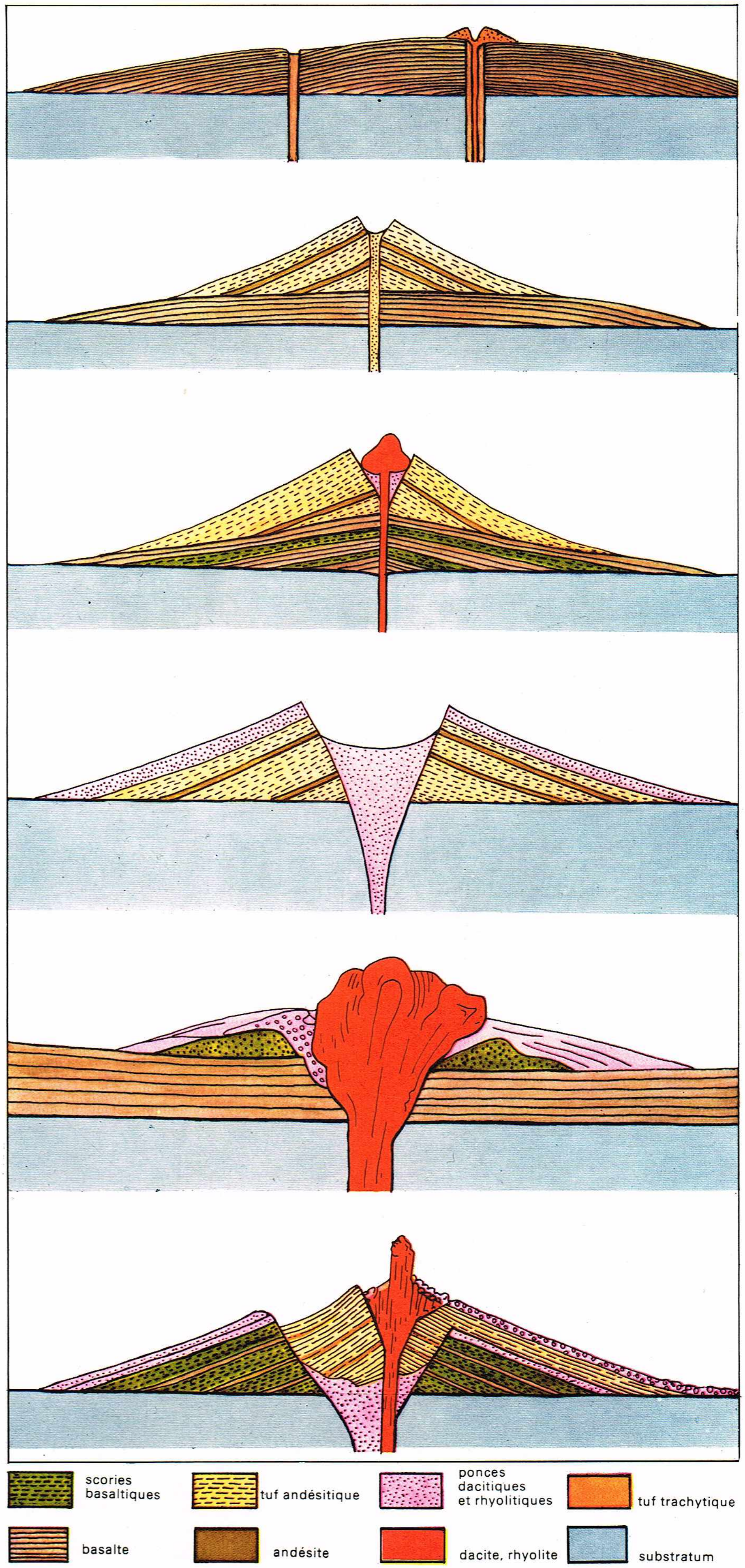

G. Ganna

H. Tazieff

I.G.D.A.

PROCESSUS PÉTROGÉNÉTIQUES DANS LA LITHOSPHÈRE

Les propriétés chimico-physiques des éléments majeurs, des éléments mineurs et des éléments traces aboutissent à leur localisation dans des niveaux bien précis de la croûte terrestre et dans des roches de composition chimique bien définie. Leur comportement est donc déterminé par les différents processus pétrogénétiques.

On peut distinguer trois processus pétrogénétiques principaux : le *processus magmatique,* donnant naissance aux roches ignées ou éruptives, intrusives et effusives que nous étudierons en premier lieu ; le *processus métamorphique,* qui provoque, par une augmentation de température et de pression, la transformation plus ou moins importante des roches sédimentaires ou éruptives en roches métamorphiques ; enfin, le *processus sédimentaire,* qui résulte de l'altération, du transport et de la sédimentation de roches préexistantes et aboutit à la formation des roches sédimentaires (argiles, calcaires, grès, etc.). Les lois cristallochimiques et les propriétés thermodynamiques de la matière gouvernent l'affinité des éléments pour l'un ou l'autre type de roches.

Si l'on observe la composition chimique des trois principaux types de roches de la lithosphère, on constate que la composition moyenne des roches sédimentaires est très voisine de la composition chimique moyenne des roches métamorphiques ; par ailleurs, ces valeurs sont très semblables à la moyenne de celles des roches éruptives, ce qui est assez logique car elles en dérivent. Par contre, la composition chimique moyenne des roches éruptives se rapproche énormément de celle des laves andésitiques (voir tableau ci-dessous) :

	%		%
SiO_2	59,14	CaO	5,08
Al_2O_3	15,34	Na_2O	3,84
Fe_2O_3	3,08	K_2O	3,13
FeO	3,80	H_2O	1,15
MgO	3,49	TiO_2	1,05

Les autres éléments entrent en quantité mineure.

▼ ***Cette* dunite *est composée presque exclusivement par de l'olivine (lame mince en nicols croisés).***

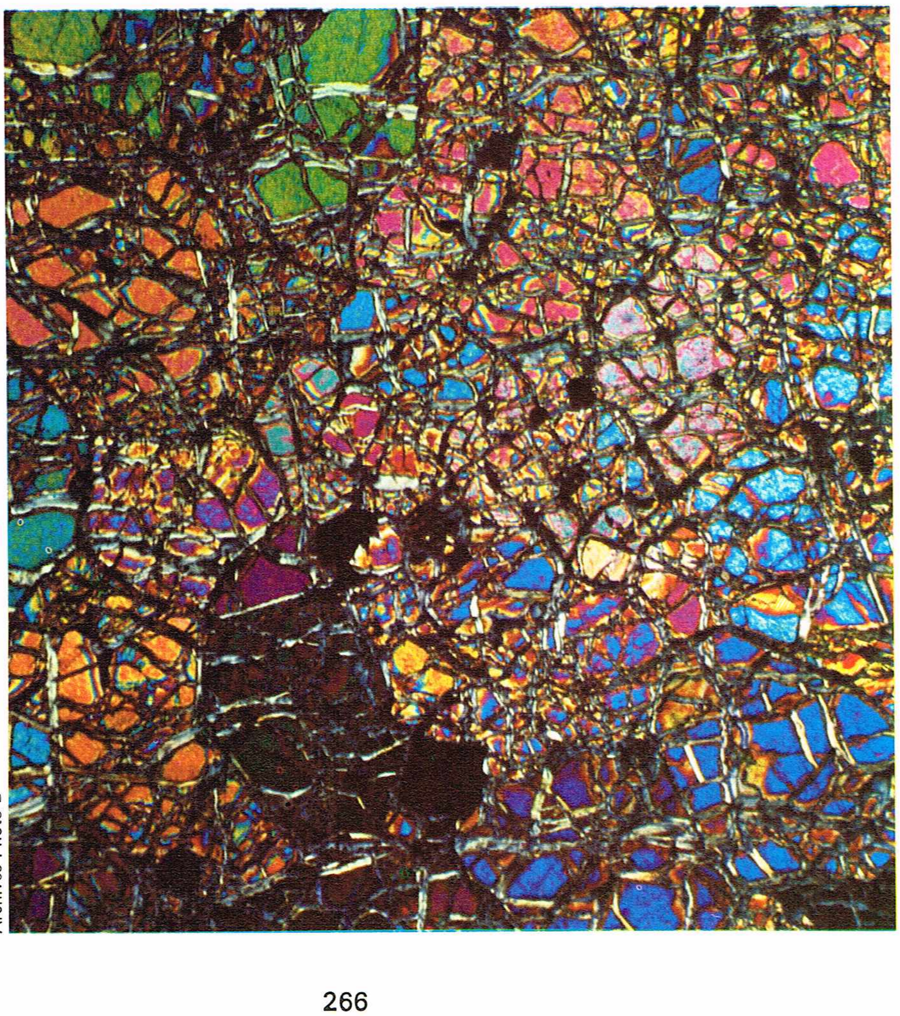

Archives Photo B

A l'intérieur de chacun des trois grands groupes de roches il existe une répartition marquée des éléments majeurs, mineurs et des traces. C'est du fait de cette répartition que se forment des concentrations particulièrement élevées en un ou plusieurs éléments. Par exemple, dans le groupe des roches sédimentaires, les latérites sont très riches en aluminium et en fer, alors que les calcaires et les dolomies sont caractérisées par des teneurs très élevées en calcium et en magnésium. Contemporainement, on trouvera dans ces roches tous les éléments mineurs ou les traces qui, par leurs propriétés chimiques (affinité, solubilité, nature des solutions, etc.) ou par leurs propriétés cristallochimiques (nature des liaisons, dimensions ioniques, coordinence, électronégativité), suivent géochimiquement l'aluminium, le calcium et le magnésium.

Les trois processus pétrogénétiques principaux sont donc responsables de la répartition et du fractionnement des éléments dans les différentes roches. Dans les processus magmatiques, les propriétés physico-chimiques, telles que le point de fusion, l'entropie, l'enthalpie, le type de liaison, la polarité, les dimensions ioniques, sont déterminantes. Il en va de même pour le processus métamorphique proprement dit, pour le processus métasomatique, ainsi que pour le processus sédimentaire de nature chimique et biochimique. Par contre, les propriétés minéralogiques sont le facteur essentiel qui détermine la concentration des éléments majeurs et mineurs dans le processus sédimentaire résiduel générateur des roches détritiques. Dans ce cas, les deux propriétés essentielles sont : la dureté des minéraux ainsi que leur résistance aux phénomènes d'altération et de lessivage. Les éléments en trace se répartissent en fonction des caractères physico-chimiques et minéralogiques des minéraux dans lesquels ils sont dispersés.

Les roches ignées ou magmatiques

Les roches ignées ou magmatiques résultent de la solidification des magmas, c'est-à-dire de quantités importantes de matière partiellement ou entièrement fondue. Le magma se trouve à une température qui varie entre 700 et 1 300 °C dans les niveaux les plus profonds de l'écorce terrestre. On utilise les termes de *roches éruptives* ***effusives*** ou ***volcaniques*** pour désigner celles qui arrivent à la surface du globe où elles se solidifient, et ceux de *roches éruptives* ***intrusives*** ou ***plutoniques*** lorsque la solidification du magma se fait en profondeur.

On peut aussi utiliser le terme plus large de *roches ignées,* qui souligne l'origine commune de ces roches à une température élevée quelles que soient leurs conditions de refroidissement. Le terme de *roches magmatiques,* également utilisé au sens large, suppose qu'elles se sont formées aux dépens d'un bain fondu. Certains auteurs s'opposent à cette définition et pensent que les granites se sont formés par transformation de roches préexistantes à l'état solide.

L'origine et la nature exacte des magmas ne peuvent être étudiées que de manière indirecte car on ne peut observer le magma liquide, sauf dans le cas des coulées de lave. En profondeur, le magma se trouve dans des réservoirs ou chambres magmatiques qui ne communiquent pas directement avec la surface. Le seul moyen de connaître sa nature consiste à étudier la composition chimique, la minéralogie, les structures et textures des roches intrusives qui dérivent de sa consolidation et que l'érosion des couches sus-jacentes amène à l'affleurement.

Étant donné que les roches ignées, aussi bien intrusives qu'effusives, sont constituées essentiellement par des minéraux silicatés (ou par du verre ayant la même composition que les silicates), il est logique de penser que le magma est constitué par un bain fondu de silicates (silicaté). On peut fondre en laboratoire des échantillons de roches ignées en les chauffant à des températures élevées (1 000 °C à 1 300 °C). Si l'on opère sous pression et en présence d'éléments volatils, la température de fusion de la roche et de ses minéraux est beaucoup plus basse (650 °C à 950 °C). On sait que les magmas contiennent des quantités variables d'*éléments volatils* qui abaissent le point de fusion de nombreux silicates, donnant ainsi

la possibilité au magma de rester liquide même à des températures inférieures à celles requises pour fondre les roches en laboratoire. En effet, les températures qui existent dans les différents niveaux de la croûte terrestre ne sont pas suffisantes pour fondre des roches en l'absence d'éléments volatils.

Les principaux éléments volatils rencontrés dans les magmas peuvent être communément observés à l'état gazeux aux évents des volcans actifs. Il s'agit essentiellement de vapeur d'eau, d'anhydride carbonique, d'hydrogène, de chlore, de fluor (sous forme d'acides) et de nombreux autres gaz. A l'origine, ces gaz sont en solution dans les magmas en raison de la pression élevée; ils contribuent à diminuer la viscosité du bain fondu et à augmenter leur pouvoir intrusif. Les teneurs en éléments volatils présents dans les magmas atteignent quelques unités pour cent en poids; les derniers résidus de cristallisation sont enrichis en éléments volatils.

Les structures des roches ignées démontrent qu'au moment de l'intrusion du magma dans les roches encaissantes et de son éruption sous forme de lave, celui-ci contient déjà des phases solides sous forme de *phénocristaux intratelluriques*. L'état normal du magma en profondeur est celui d'une suspension de cristaux dans un liquide plus ou moins visqueux. Des substances qui, à pression ordinaire et à la température du magma, devraient se trouver à l'état gazeux, sont dissoutes dans le bain fondu en raison de la pression élevée. L'origine primaire du magma est encore mal connue et fait l'objet de discussions entre les chercheurs. La question qui se pose est la suivante : dérivent-ils des niveaux les plus profonds de l'écorce terrestre où l'état physique de la matière est mal connu, ou bien proviennent-ils, comme le pensent certains, de la fusion plus ou moins complète de roches préexistantes amenées par des dislocations de la croûte dans des niveaux profonds où la température élevée provoque la liquéfaction des minéraux à point de fusion bas. En tout cas, chaque type de magma a certainement un mode de genèse qui lui est propre.

Selon C.E. Wegmann et ses disciples la plupart des roches plutoniques de composition granitique et granodioritique dériveraient de la granitisation des roches préexistantes métamorphiques ou sédimentaires ou ignées de compositions différentes de celle du granite. Il se produirait un processus métasomatique dans les niveaux inférieurs de la croûte terrestre, avec l'apport de certains éléments chimiques et le départ d'autres dans des conditions physico-chimiques différentes de celles des magmas liquides. Par contre, le cas des granites intrusifs, capables de traverser brutalement les roches encaissantes, doit être rapproché du mode de formation des magmas liquides.

Les éléments chimiques présents dans le bain fondu sous forme de groupements ioniques s'unissent pendant le processus de cristallisation pour former des structures ordonnées qui sont à l'origine des édifices cristallins des minéraux. Les groupements ioniques sont représentés par des tétraèdres SiO_4 et AlO_4, auxquels se joignent des groupements ioniques complexes de composition voisine ($AlSiO_4$, $AlSi_2O_6$, $AlSi_3O_8$, SiO_2, etc.), analogues à ceux des réseaux cristallins des silicates. Les éléments volatils dissous dans le magma diminuent le degré de liaison des groupes ioniques, provoquant ainsi une diminution de la viscosité du magma. Le bain fondu renferme aussi des cations métalliques libres (sodium, potassium, calcium, fer, magnésium) qui se placeront dans les réseaux cristallins au cours du refroidissement de la roche.

Les roches ignées, intrusives et effusives, sont regroupées en *sialiques* et *fémiques*, selon la division créée par le géologue autrichien E. Suess. Ce chercheur désignait par ***sial*** la partie supérieure de l'écorce terrestre caractérisée par des roches riches en quartz et en alumino-silicates de sodium et de potassium, le ***sima*** étant la partie située sous le sial et caractérisée par des roches riches en silicates de magnésium et de fer. Les roches sialiques sont aussi appelées *acides* du fait de leur richesse en silice libre (le quartz SiO_2) ou combinée dans les silicates; la silice libre, en solution ou à l'état fondu, se présente sous forme de tétraèdres SiO_4, isolés ou associés de manière différente. Les roches fémiques sont aussi appelées *basiques* par *opposition* aux roches acides et sont caractérisées par l'abondance en éléments métalliques et alcalino-terreux (fer, magnésium, calcium) dont les oxydes ont une fonction basique. Naturellement, on trouve tous les stades de passage entre ces deux types extrêmes de roches.

I.G.D.A. - Archives B

▲ ***Ignimbrite rhyolitique (Predazzo, Val di Fiemme, Dolomites italiennes); cristaux de quartz lacunaires et corrodés, feldspaths et biotite dans une mésostase recristallisée (lame mince en nicols croisés [collection privée]).***

La composition minéralogique des roches ignées

La composition minéralogique des roches ignées constitue l'un de leurs principaux critères de classification; nous allons brièvement signaler les caractères des principales familles de minéraux présents dans les roches.

Le **quartz** (SiO_2) est sans doute le minéral le plus commun des roches sialiques. Il est généralement absent dans les roches fémiques et présent en faibles quantités dans les roches intermédiaires.

Dans les roches plutoniques, le quartz est présent sous sa forme α, avec un réseau à symétrie rhomboédrique, stable au-dessous de 573 °C sous pression atmosphérique. Il est généralement xénomorphe, car il cristallise dans les espaces laissés libres par les minéraux ayant cristallisé avant lui.

Dans les roches effusives, le quartz se présente en cristaux automorphes ou idiomorphes sous forme de deux pyramides accolées par une base hexagonale commune (dihexaèdre). Stable au-dessus de 573 °C (forme β), son réseau est hexagonal, il se transforme en quartz α au cours du refroidissement.

La silice peut aussi cristalliser sous forme de *tridymite* et de *cristobalite* dans les roches de type effusif où, en petites quantités, elles représentent des formes métastables. Ces formes sont généralement le résultat d'un début de cristallisation arrêtée par le brusque abaissement de température qui transforme le magma liquide en une masse vitreuse surfondue.

Les **feldspaths** sont des constituants fondamentaux des roches ignées. Ils sont présents dans presque tous les types pétrographiques intrusifs et effusifs, avec des compositions chimiques assez différentes. Ils se regroupent en deux familles : les *feldspaths alcalins* et les *plagioclases*, ou feldspaths calco-sodiques.

— Les principaux *feldspaths alcalins* présents dans les roches ignées sont, outre l'albite (voir plus loin), l'orthose, l'anorthose, le microcline et la sanidine. On peut tous les ramener à la formule (K, Na) $AlSi_3O_8$, mais ils diffèrent par la symétrie de leur réseau cristallin et par les substitutions isomorphes entre K et Na. Dans l'*orthose,* la plus grande partie des sites du réseau destinés à accueillir les ions alcalins est occupée par des ions potassium et seulement une petite partie par des ions sodium. Dans le cas de l'*anorthose,* c'est le contraire qui se produit, mais ce minéral est beaucoup moins répandu dans les roches ignées. Le *microcline* cristallise dans le système triclinique, tandis que l'orthose et la sanidine cristallisent dans le système monoclinique; il est reconnaissable à sa macle très caractéristique. Le réseau cristallin de la *sanidine*

Archives Photo B

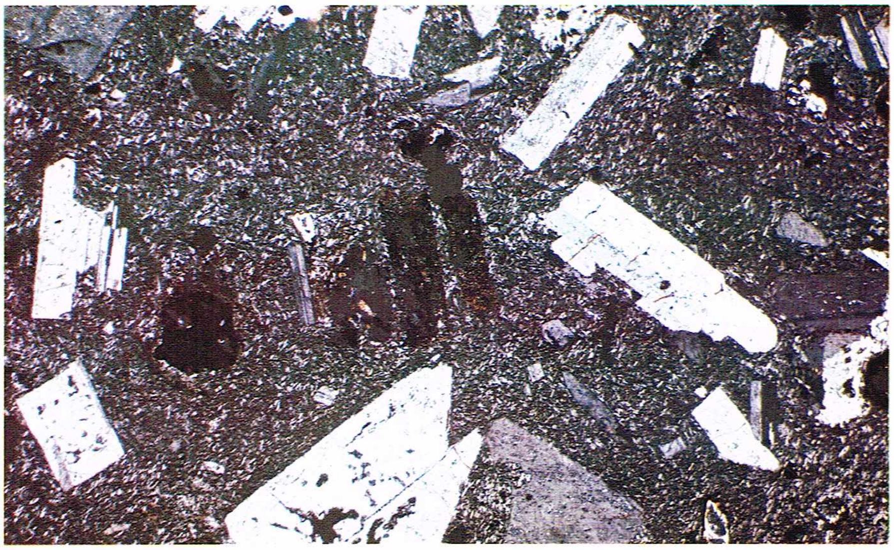

Archives Photo B

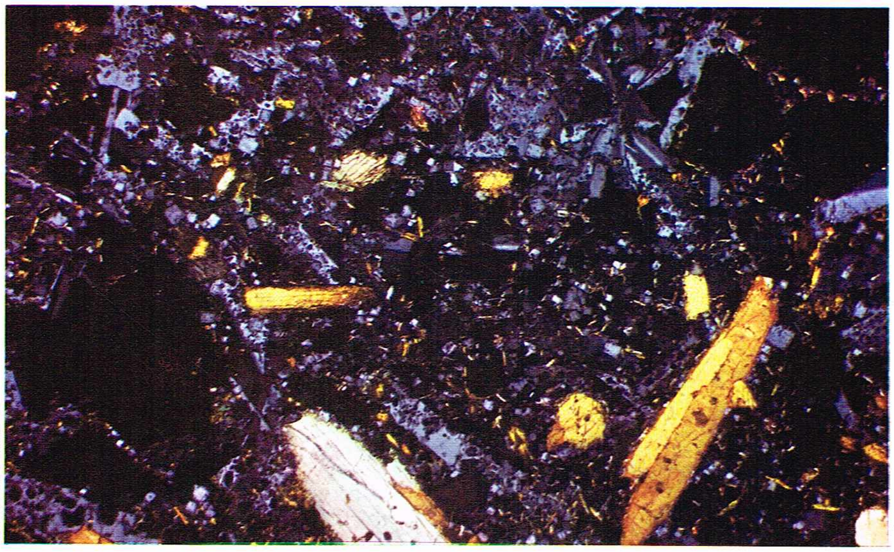

Archives Photo B

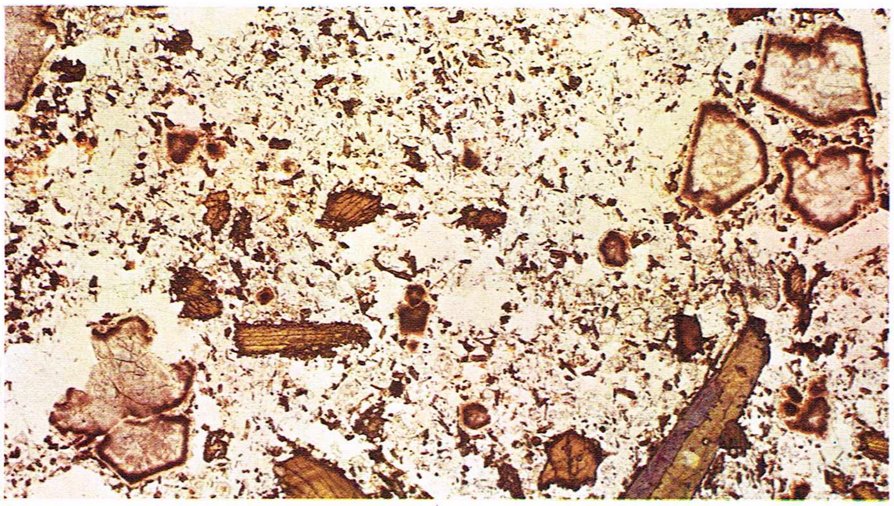

▲ ***En haut, phénocristaux de plagioclase plongés dans une mésostase, constituée elle-même de plagioclases microlitiques, dans une*** **porphyrite** ***(lame mince en nicols croisés).***
Au centre, prismes allongés de sanidine, de néphéline, plus courts, et de feldspathoïdes (sombres) dans un **leucitophyre** ***(lame mince en nicols croisés).***
En bas, la même section photographiée en nicols parallèles : dans la mésostase, on distingue de petits cristaux arrondis de leucite et d'autres, plus courts, de néphéline. Les phénocristaux sont de l'augite et un feldspathoïde du groupe noséanite-haüynite, avec une forte auréole sombre

résulte d'une modification du réseau de l'orthose, stable à haute température (au-delà de 900 °C) ; pour cette raison, elle est le feldspath communément présent dans les roches effusives. L'anorthose est aussi un minéral stable à haute température, tandis que le microcline est stable à basse température.

— Les *plagioclases* constituent une famille minéralogique dont les différents termes ont une composition intermédiaire entre celle de l'*albite* ($NaAlSi_3O_8$) et celle de l'*anorthite* ($CaAl_2Si_2O_8$). Les termes intermédiaires sont désignés par : l'*oligoclase* ($Ab_{90-70}An_{10-30}$), l'*andésine* ($Ab_{70-50}An_{30-50}$), la *labradorite* ($Ab_{50-30}An_{50-70}$) et la *bytownite* ($Ab_{30-10}An_{70-90}$) ; les pourcentages de sodium et de calcium présents dans les plagioclases, estimés par l'analyse chimique classique, sont, dans ce symbolisme, recalculés en pourcentages moléculaires d'albite (Ab) et d'anorthite (An). L'albite, l'oligoclase et l'andésine se rencontrent dans les roches ignées sialiques. Dans les roches fémiques, les plagioclases sont calciques ; ils correspondent donc à des termes labradoriques ou bytownitiques, plus rarement anorthitiques.

On rencontre fréquemment dans les roches intrusives des *perthites* résultant de la séparation en deux feldspaths différents d'un minéral, stable à température plus élevée. Par exemple, dans le réseau de la sanidine, le potassium peut facilement être remplacé par le sodium ; le réseau de l'orthose, qui provient de la transformation de la sanidine au-dessous de 900 °C, permet une substitution très limitée du potassium par le sodium. Par conséquent, un cristal d'orthose peut contenir des petites veines d'albite, matérialisant les endroits où, pendant le refroidissement, s'est formé un réseau cristallin différent qui a accepté les ions sodium ne pouvant faire partie du réseau de l'orthose. Dans le cas des *antiperthites,* on observe de petites faccules de feldspath potassique dans des cristaux de feldspath sodique ; elles peuvent résulter d'une démixtion à partir de cristaux d'anorthose.

Les **feldspathoïdes** sont des minéraux dont la composition chimique est assez voisine de celle des feldspaths, mais dont le rapport silice/alcalins est plus petit ; on les trouve uniquement dans des magmas alcalins pauvres en silice. La *leucite* ($KAlSi_2O_6$) se présente en cristaux trapézoédriques ou arrondis de couleur blanche ; elle est caractéristique de certaines roches effusives fémiques, comme les laves du Vésuve. La *néphéline* ($NaAlSiO_4$) se trouve dans les roches alcalines effusives et intrusives. La *kaliophylite* présente une formule identique à la néphéline, mais le potassium remplace le sodium. On trouve, plus rarement, d'autres minéraux : la *sodalite,* la *noséane,* l'*haüyne,* avec une composition proche de celle des feldspathoïdes, mais plus complexe. Ils sont caractéristiques des roches effusives et contiennent dans leur réseau cristallin des éléments volatils (Cl, S). On trouve parfois, associée aux feldspathoïdes dans les roches ultrabasiques, la *mélilite,* qui est un silicate de calcium, de magnésium et d'aluminium à faible teneur en silicium. Ces roches à mélilite contiennent souvent de la *pérovskite* ($CaTiO_3$). Dans les roches intrusives alcalines, on trouve aussi des *zéolites* sodiques primaires, dont la plus importante est l'*analcime* ($NaAlSi_2O_6H_2O$). Elles résultent généralement de la cristallisation du dernier résidu fluide des magmas basiques et alcalins.

Les **micas,** représentés par la biotite (mica noir) et la muscovite (mica blanc), sont très fréquents, bien qu'en petites quantités, dans les roches ignées. La *biotite* est un aluminosilicate de fer, magnésium et potassium, abondant surtout dans les roches filoniennes, c'est-à-dire dans les filons injectés dans des roches préexistantes. On la trouve aussi dans des roches de composition intermédiaire entre les roches sialiques et fémiques, tant intrusives qu'effusives. La *muscovite* a une composition analogue à celle de la biotite, mais elle est quasiment dépourvue de fer et de magnésium ; on la trouve surtout dans les roches plutoniques sialiques. La *phlogopite* est un mica magnésien souvent associé aux roches riches en olivine ; *la paragonite* sodique accompagne les feldspaths alcalins ; la *lépidolite,* contenant du lithium, se trouve le plus souvent dans les pegmatites. On trouve parfois la *chlorite* dans les roches fémiques et intermédiaires, où elle dérive de la transformation de minéraux ferromagnésiens (pyroxènes ou amphiboles).

Les **amphiboles** sont des silicates et aluminosilicates de calcium, magnésium et fer, avec parfois des petites

quantités d'alcalins, caractéristiques des roches de composition intermédiaire. Analogues aux pyroxènes par la composition chimique et l'habitus cristallin, elles en diffèrent par la présence de petites quantités d'eau magmatique sous forme d'oxhydryles. Les amphiboles sont représentées essentiellement par la *hornblende,* dont la composition est complexe. Celle-ci comprend plusieurs espèces parmi lesquelles la hornblende verte, ou commune, et diverses hornblendes sodiques dont la plus connue est la barkévicite. Les *amphiboles sodiques* proprement dites se distinguent par une teneur plus élevée en sodium. Elles sont représentées par l'arfvedsonite, la riébeckite, etc. On les trouve dans des roches qui résultent de la cristallisation de magmas hyperalcalins (à très forte teneur en sodium).

Les **pyroxènes,** silicates et aluminosilicates de fer et de magnésium, avec parfois de faibles teneurs de calcium et de sodium, sont les constituants essentiels des roches intermédiaires et fémiques. Ils se subdivisent en plusieurs familles qui cristallisent dans les systèmes orthorhombique et monoclinique et montrent des compositions chimiques assez différentes.

La série *enstatite-hypersthène* constitue un premier groupe de pyroxènes formés par des silicates de magnésium et de fer $(Mg, Fe)_2Si_2O_6$. Ils appartiennent au système orthorhombique et sont stables à des températures inférieures à 1 000 °C. A des températures supérieures, ils deviennent instables et se transforment en pyroxènes monocliniques, analogues aux *pigeonites ;* celles-ci sont des pyroxènes monocliniques de fer et de magnésium, avec de petites quantités de calcium ; elles sont stables à des températures élevées et sont caractéristiques de certains basaltes.

Un second groupe comprend les pyroxènes calciques : c'est la série *diopside-hedenbergite* $Ca (Mg, Fe) Si_2O_6$, qui est caractéristique des roches métamorphiques bien que l'on puisse rencontrer certains termes proches du diopside dans les roches ignées. Les *augites* sont les pyroxènes $(Ca, Mg, Fe, Al)_2 (Si, Al)_2O_6$ que l'on rencontre communément dans les roches ignées, avec des termes plus ou moins calciques. Enfin, dans les roches qui dérivent des magmas hyperalcalins, on rencontre des pyroxènes sodiques et ferriques appartenant au groupe de l'*ægyrine* avec tous les termes de passage aux augites.

Dans le cas des pyroxènes, comme dans celui des feldspaths, on observe de nombreux exemples d'inversion de formes stables à haute température à des formes stables à plus basse température. Ce phénomène s'accompagne d'une démixtion des éléments qui ne peuvent plus trouver place dans le réseau cristallin.

L'**olivine** $(Mg, Fe)_2SiO_4$ est un minéral fondamental des roches fémiques et ultrafémiques ; elle est cependant généralement absente dans les autres roches ignées. En fait, il s'agit de solutions solides entre deux termes extrêmes : un silicate de magnésium, la *forstérite,* et un silicate de fer, la *fayalite*.

En plus des minéraux signalés jusqu'ici, qui constituent selon différentes proportions les minéraux fondamentaux pour la classification des roches ignées, on trouve d'autres minéraux en quantités plus faibles. On les nomme *minéraux accessoires.* Dans de très rares cas, ils peuvent constituer à eux seuls les composants essentiels de certaines roches. L'*apatite,* phosphate de calcium avec du chlore, du fluor et des oxhydryles, se retrouve dans toutes les roches intrusives ou effusives. Le *zircon* $(ZrSiO_4)$ et le *rutile* (TiO_2) sont des minéraux accessoires des roches acides, tandis que la *magnétite* (Fe_3O_4), la *titanomagnétite,* l'*ilménite* et la *chromite* sont particulièrement fréquentes dans les roches fémiques et ultrafémiques ; le *sphène* se trouve surtout dans les roches intermédiaires, tandis que la *pyrite* se trouve surtout dans les roches basiques. On peut trouver de nombreux autres minéraux accessoires, par exemple, ceux qui sont associés aux roches pegmatitiques et se distinguent par des teneurs élevées en éléments volatils (la tourmaline, le béryl, etc.).

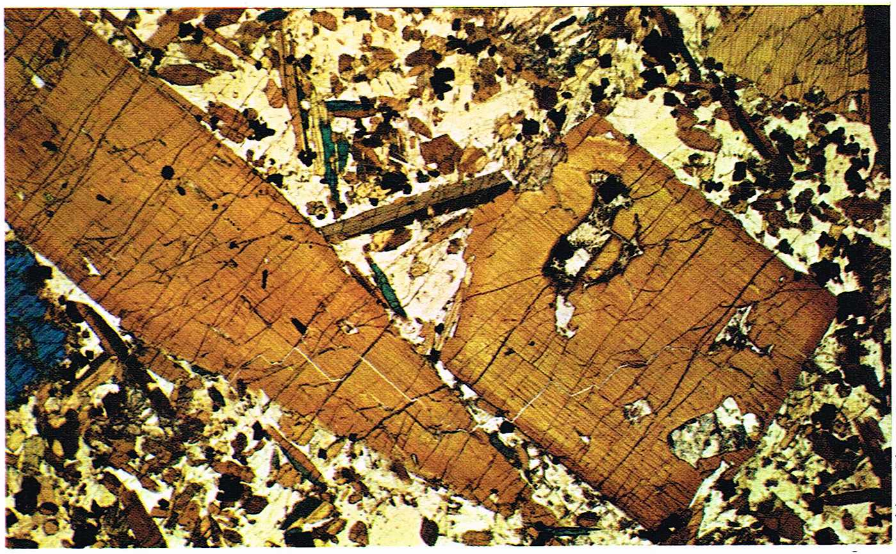

Archives Photo B

▲ **Hornblende *basaltique* *dans de la camptonite (Norvège)* [*lame mince en nicols presque parallèles*].**

Le **verre volcanique** est un des composants les plus importants des roches ignées effusives, il peut former à lui seul des roches comme les obsidiennes ou les rétinites. Le verre n'est pas un minéral car il est dépourvu de réseau cristallin ordonné, et il représente le liquide magmatique qui, brutalement refroidi, n'a pas eu le temps de cristalliser, donc d'acquérir une structure cristalline organisée.

La composition chimique des roches ignées

La composition chimique des roches ignées peut être obtenue par des analyses chimiques quantitatives basées sur l'analyse par voie humide, l'analyse des poudres (fluorescence X, quantométrie, etc.). Les résultats sont donnés en pourcentages pondéraux exprimés en oxydes. En général, la composition chimique obtenue traduit la qualité du magma à partir duquel les roches ont cristallisé ; toutefois, il existe de nombreux facteurs qui modifient sa composition initiale. Citons parmi ceux-ci :

— la fuite des constituants volatils du magma, d'autant plus nette que ces roches ont un caractère subvolcanique ou effusif ;

— le changement de composition de certains minéraux de roches magmatiques par suite des processus métasomatiques ou submétasomatiques ;

— enfin, les cumulats (accumulation) de minéraux qui se séparent du magma par gravité ou bien au cours d'une phase de refroidissement (fréquents dans les roches basiques et ultrabasiques).

L'étude de la composition chimique des roches ignées est très importante : d'une part, elle aboutit à une meilleure classification de la roche ; d'autre part, elle permet de classer les roches dont les minéraux ne sont pas identifiables au microscope polarisant ainsi que celles qui sont constituées essentiellement par du verre volcanique. Dans le cas des roches effusives formées entièrement ou presque entièrement par du verre, l'analyse chimique est le seul critère de classification. La connaissance de la composition chimique des roches magmatiques est nécessaire pour établir des rapports génétiques (parenté) entre les différentes familles d'une région. Une variation régulière de certains éléments dans différentes roches de la même région appartenant au même cycle volcanologique indique que ces dernières résultent de la différenciation d'un même magma initial au cours des temps. Parmi les

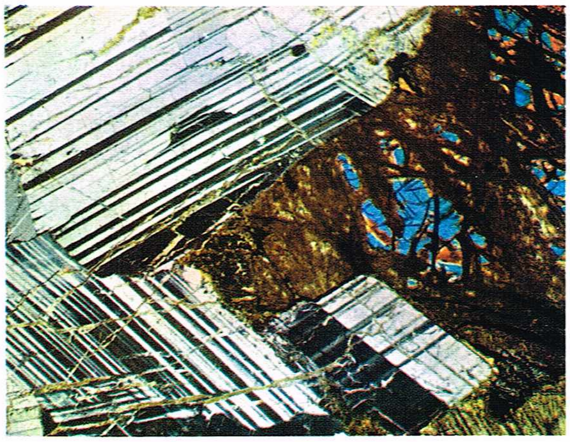

C. Bevilacqua

◀ **Gabbro *à olivine (Harz, Allemagne)* [*lame mince en nicols croisés*].**

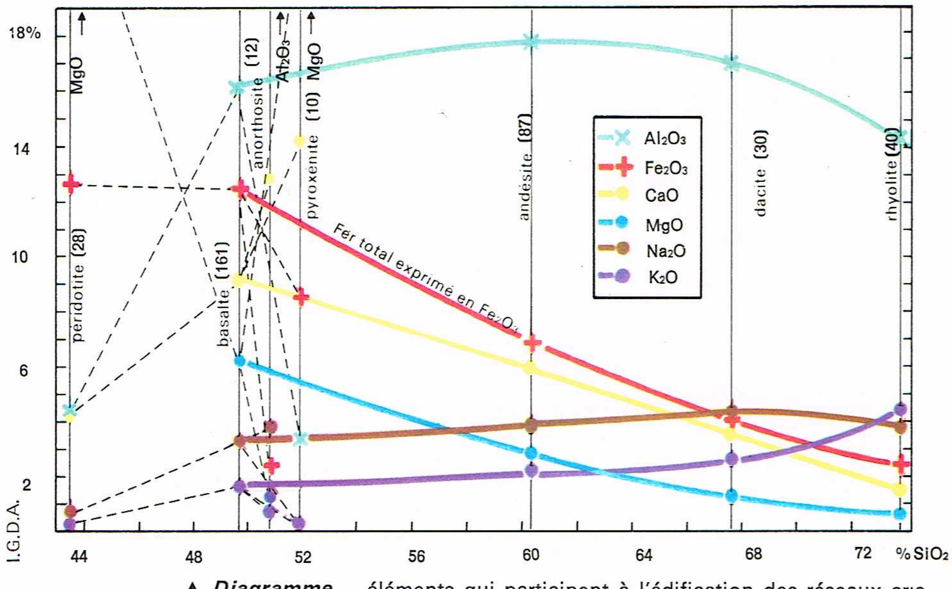

▲ ***Diagramme de variation de la teneur en oxydes dans la série des roches calco-alcalines en fonction de la teneur en silice. Les chiffres à côté du nom de la roche indiquent le nombre d'analyses à partir desquelles ont été effectuées les analyses moyennes. On constate que la composition moyenne des péridotites, anorthosites et pyroxénites tombe en dehors des lignes normales de variations, vraisemblablement parce que ces roches résultent d'un phénomène de différenciation gravitative (d'après Bowen).***

éléments qui participent à l'édification des réseaux cristallins, l'oxygène est le plus abondant en poids et en volume. Cependant, si les résultats sont exprimés en pourcentages des différents éléments calculés en oxydes, l'oxyde de silicium (SiO_2) est certainement le plus abondant : il constitue en effet l'élément fondamental (tétraèdre silice-oxygène) des réseaux cristallographiques des minéraux silicatés, qui représentent la grande majorité des minéraux. Dans les roches, les teneurs en silice (SiO_2) varient entre 35 et 75 % environ. C'est en fonction de cette variation de la teneur en silice que l'on peut effectuer la subdivision des roches magmatiques en *acides* ou *sialiques,* ou encore *hypersiliceuses* ou *sursaturées* (teneur en SiO_2 toujours supérieure à 66 %), en roches *intermédiaires* ou *mésosiliceuses* (teneur en SiO_2 comprise entre 66 et 52 %), en *basiques* ou *fémiques* ou *hyposiliceuses* (teneur en SiO_2 comprise entre 52 et 45 %), roches *ultrabasiques* ou *ultrafémiques* ou *sous-saturées* (teneur en SiO_2 inférieure à 45 %).

Pour définir les relations réciproques entre des roches de composition chimique différente, les chercheurs ont l'habitude de reporter dans des diagrammes les pourcentages en poids des éléments autres que le silicium exprimés en oxydes en fonction de la teneur en silicium ou en silice. On a ainsi pu dégager des associations naturelles de roches ignées dans lesquelles la composition chimique varie de manière progressive et présente des caractères qui lui sont propres. Les pourcentages de chaque oxyde varient entre des limites bien définies par rapport aux teneurs des autres oxydes et en fonction de la composition minéralogique de la roche.

L'alumine (Al_2O_3) vient après la silice par ordre d'importance ; sa teneur varie entre 10 et 18 %. Les teneurs les plus élevées correspondent à des roches à teneur moyenne en silice (andésites, syénites, diorites, etc.). Le fer et le magnésium s'associent dans les réseaux des minéraux, qui prennent le nom de minéraux *ferromagnésiens* ou *fémiques* (biotites, amphiboles, pyroxènes). Leurs teneurs dans les roches magmatiques varient entre 1 % dans les roches acides (rhyolites, granites) et 10 à 13 % pour chaque oxyde dans les roches ultrabasiques. L'oxyde de magnésium peut atteindre 40 % dans les péridotites, où l'olivine représente le minéral le plus magnésien. Le calcium varie aussi de manière régulière dans le même domaine que le fer et le magnésium (1 à 10 %) ; toutefois, dans les roches ultrabasiques, la quantité d'oxyde de calcium diminue par rapport à la teneur en calcium des roches fémiques ou basiques par suite de la disparition du plagioclase de type anorthosique. Le sodium et le potassium sont d'autant plus abondants que les roches étudiées ont une acidité marquée (roches granitiques et rhyolitiques) : leurs teneurs peuvent en effet atteindre quelques unités (2 à 6 %) [le total des alcalins se situant en général aux environs de 7 à 8 %]. Les roches basiques et ultrabasiques se révèlent généralement très pauvres en potassium ; le sodium, par contre, peut atteindre des teneurs élevées (8 à 9 %) dans certaines roches mésosiliceuses hyperalcalines (pantellérites, comendites, granites, etc.).

On peut, pour les différentes associations de roches ignées, construire des diagrammes mettant en évidence les variations de la composition chimique. Les variations des différents oxydes par rapport à la teneur en silice présentent presque toujours la même allure, mais les courbes de variation sont d'autant plus régulières que la roche résulte de la solidification complète du magma. Ce phénomène est particulièrement net dans le cas des roches effusives à structure vitreuse qui résultent de la solidification de magmas ayant leur composition chimique originelle. La cristallisation fractionnée, essentiellement en ce qui concerne les roches basiques intrusives, prend une importance très grande dans la fabrication de roches dont la composition chimique ne correspond pas à celle du magma parent. Les phénomènes de séparation par gravité et de concentrations minérales à des stades différents de l'évolution du magma sont responsables de ce fait.

L'analyse chimique des roches magmatiques permet, par ailleurs, de reconstituer la *composition minéralogique théorique* de la roche : des calculs aboutissent à la distribution des éléments et des oxydes pour constituer les minéraux qui, théoriquement, auraient dû cristalliser à partir d'un magma de composition donnée. Cette méthode s'applique essentiellement aux roches partiellement ou totalement vitreuses, mais elle est également utile dans le cas des roches holocristallines pour lesquelles la *norme,* ou *composition normative* (c'est-à-dire la composition minéralogique théorique), peut correspondre totalement ou non à la composition minéralogique réelle. Elle révèle ainsi les anomalies dans le processus de cristallisation du magma, ou attire l'attention sur la présence de minéraux non individualisables par l'examen microscopique ou bien encore sur la présence éventuelle de minéraux appartenant à des séries isomorphes non déterminables directement par les moyens optiques.

Le calcul de la norme peut être effectué de diverses façons. Toutes ces méthodes, mises au point par différents chercheurs, ont en commun le passage des pourcentages pondéraux exprimés en oxydes à des pourcentages moléculaires, que l'on effectue par le rapport entre le pourcentage pondéral de l'oxyde et son poids moléculaire. On obtient ainsi des rapports quantitatifs entre les différents oxydes présents dans le magma originel, qui sont ensuite répartis selon des rapports quantitatifs entre les différents oxydes présents dans les minéraux. Par exemple, les pourcentages de phosphore et de titane donnés par l'analyse chimique sont transformés en pourcentages d'apatite (phosphate de calcium) et de sphène (silicate de titane et de calcium) en soustrayant les quantités nécessaires de chaux et de silice aux quantités présentes dans l'analyse chimique totale de la roche. Les pourcentages de potasse, de soude et de chaux sont transformés en pourcentages de feldspaths en enlevant à chaque fois, suivant la formule du minéral construit (lois stœchiométriques), les quantités nécessaires de silice et d'alumine. Le fer est, de manière analogue, retransformé en magnétite ; avec le magnésium, il se trouve redistribué sous forme de pyroxènes orthorhombiques (série enstatite-hypersthène). Si la quantité de silice qui résulte de l'analyse chimique est insuffisante pour qu'elle se joigne à d'autres oxydes et forme les pyroxènes orthorhombiques, le fer et le magnésium sont recalculés pour former de la forstérite et de la fayalite (celles-ci sont les termes extrêmes de la série isomorphe des péridots). Mais si la quantité de silice est encore plus faible, une partie ou la totalité des feldspaths est transformée en feldspathoïdes. Si, au contraire, l'analyse montre un excès de silice après le calcul de tous les minéraux riches en silice, on transforme cet excès en quartz normatif.

On arrive ainsi, par des transformations successives soumises aux lois stœchiométriques et obéissant à des théories universellement reconnues sur la cristallisation des minéraux magmatiques (suite d'apparition des différentes espèces minérales en fonction de la température), à une composition minéralogique théorique. La composition minéralogique normative ne correspond pas complètement à la composition minéralogique réelle pour différentes raisons qui résultent de l'impossibilité de calculer les pourcentages de minéraux silicatés à composition chimique complexe et variable : c'est le cas, par exemple, des pyroxènes monocliniques, des amphiboles et des micas. La discordance résulte aussi du fait que les pour-

centages de minéraux théoriques que l'on peut calculer sont présentés comme des teneurs extrêmes de mélanges isomorphes, qui n'existent jamais sous cette forme dans les roches. Nous allons maintenant considérer un certain nombre de données concernant les principales familles pétrographiques, en réunissant les roches intrusives et les roches effusives de composition chimique analogue. Les pourcentages des différents éléments seront toujours exprimés sous forme d'oxydes.

La famille intrusive des **granites** et leurs correspondants effusifs, les **rhyolites** ou **porphyres quartzifères,** sont caractérisés par une teneur élevée en silice, laquelle varie approximativement entre 65 et 75 %. Dans les faciès intrusifs, la limite supérieure est représentée par les granites *sensu stricto,* et la limite inférieure par les adamellites et les granodiorites ; dans les équivalents effusifs, le terme le plus acide est représenté par les rhyolites, le terme le plus pauvre en silice par les dacites, voire les andésites quartzifères. La silice est présente sous forme de quartz ou bien associée à d'autres éléments dans le réseau des silicates.

L'alumine, qui varie entre 10 et 15 %, est présente dans le réseau de certains silicates ou aluminosilicates. Les types pétrographiques les plus siliceux ont une teneur en alumine moins importante ; on pourrait aussi dire que la teneur en alumine y est inversement proportionnelle à la teneur en silice. Par contre, la teneur en alumine augmente dans les roches plus basiques, où apparaissent les plagioclases riches en termes anorthitiques et en minéraux ferromagnésiens. Des pourcentages importants d'alumine peuvent résulter de l'assimilation, de la part de la roche granitique, de xénolites de type argileux qui aboutissent à la formation de minéraux alumineux, riches en alumine, comme la cordiérite et la sillimanite.

Les teneurs en fer qui participent à la construction de la magnétite, de la biotite et d'éventuelles amphiboles varient de 1 à 3 %. Le fer ferreux prédomine dans les faciès intrusifs, alors que le fer ferrique est fréquent dans les faciès effusifs (couleur rouge des porphyres) par suite de phénomènes d'oxydation qui accompagnent l'éruption.

Le magnésium est assez rare (moins de 1 %) ; il se place dans les quelques minéraux ferromagnésiens que l'on rencontre dans les granites. Le fer et le magnésium sont absents ou présents sous forme de traces dans les aplites et dans les granites aplitiques ou leucocrates, dépourvus de minéraux ferriques.

Le calcium ne dépasse pas des teneurs supérieures à 1 % dans les granites alcalins dans lesquels le feldspath est potassique (orthose) ou bien sodique (albite, ou orthose) ; il atteint des teneurs de l'ordre de 3 à 4 % dans les roches appartenant à la famille des granites qui passent progressivement aux diorites (granodiorites, etc.) et dans les granites calco-alcalins dans lesquels apparaît le plagioclase, caractérisé par de faibles teneurs en anorthite (oligoclase).

Les alcalins, c'est-à-dire le sodium et le potassium, sont présents en quantités équivalentes. Leur somme avoisine 8 % : l'un ou l'autre prédomine légèrement, en fonction de la teneur en feldspath sodique ou potassique. Les alcalins se placent aussi dans les micas, et le sodium dans certains pyroxènes (ægyrine) et amphiboles (riébeckite) sodiques que l'on peut rencontrer comme minéraux accessoires de certaines variétés de granites et de porphyres quartzifères.

Certains porphyres quartzifères, spécialement les obsidiennes, sont particulièrement riches en eau. Ainsi, les rétinites de la région de Fréjus contiennent jusqu'à 6 à 7 % d'eau, et les laves acides contiennent couramment de 3 à 4 % d'eau de constitution. Il s'agit évidemment du constituant volatil le plus abondant qui, par suite du brusque refroidissement de la lave et de la viscosité élevée, n'a pu s'échapper complètement du magma au cours de l'éruption. Il faut toutefois signaler que l'eau n'est pas le seul constituant volatil : l'anhydride carbonique est aussi présent, et les rapports pondéraux entre ces deux constituants sont encore mal connus. Les granites contiennent des quantités d'eau très limitées, présentes généralement sous forme d'oxhydryles (OH^-) liés aux structures de certains minéraux ou bien sous forme de fluides piégés dans des défauts de structure de minéraux.

Parmi les éléments présents en faibles teneurs, signalons : le titane, qui se présente généralement sous forme d'aiguilles de rutile ; le manganèse, associé ou substitué partiellement au fer et au magnésium dans certains minéraux ; le phosphore dans l'apatite ; le baryum, substitué partiellement au potassium dans les feldspaths alcalins.

La composition chimique globale des granites et des porphyres quartzifères est très voisine, à l'exception de faibles variations résultant de l'état d'oxydation du fer, ainsi que des teneurs en eau qui dépendent essentiellement du mode de mise en place de la roche. Toutefois, il est intéressant de comparer la composition chimique des granites avec celle des roches effusives qui se forment par consolidation d'un magma de composition granitique mais dont la structure est entièrement ou partiellement vitreuse. Les obsidiennes ont une composition chimique beaucoup plus homogène que les granites ou les porphyres quartzifères. Par exemple, la teneur en silice des obsidiennes ne dépasse jamais 77 %, ce qui n'est pas le cas de tous les granites. On peut expliquer cette observation par le fait que les obsidiennes représentent un magma granitique brusquement saisi par le refroidissement. Dans le cas des granites, par contre, la cristallisation étant beaucoup plus lente, ceux-ci peuvent s'enrichir ou bien

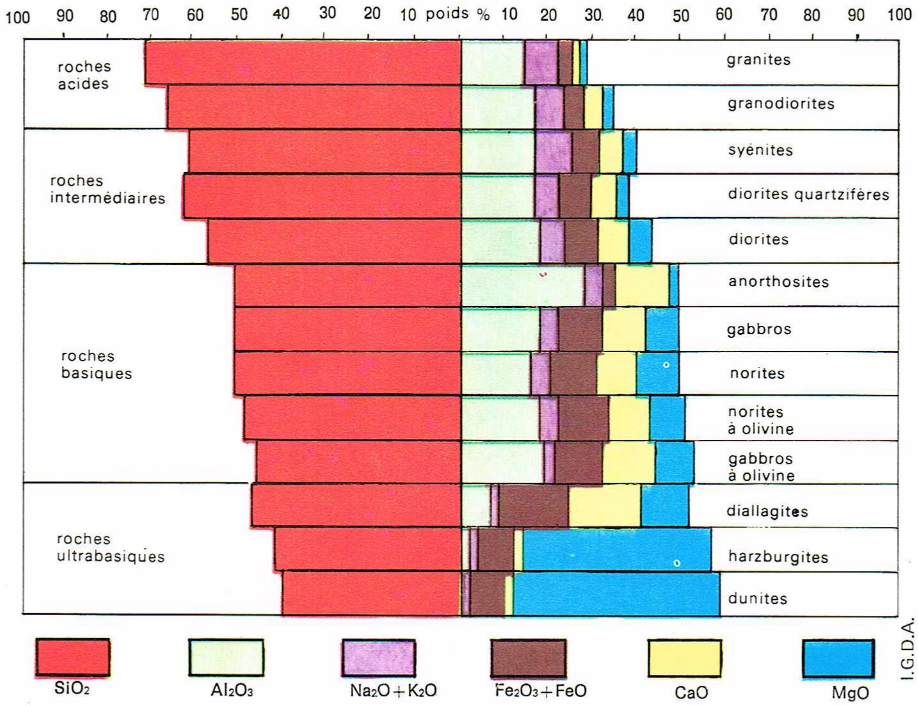

▲ ***Représentation graphique montrant les variations chimiques des éléments majeurs, exprimés en oxydes, des principaux groupes de roches ignées intrusives (d'après Daly et Schneiderhöhn).***

▼ ***Variations de la composition chimique des principales roches de la série calco-alcaline.***

(1) Granite de Baveno
(2) Diorite à amphibole
(3) Andésite à augite
(4) Gabbro à amphibole et pyroxène
(5) Basalte à augite et olivine
(6) Péridotite (Lherzolite)

	Granite (1)	Diorite (2)	Andésite (3)	Gabbro (4)	Basalte (5)	Péridotite (6)
SiO_2	74,70	51,09	52,57	47,76	48,58	42,78
TiO_2	0,03	0,95	1,98	1,26	2,18	0,34
Al_2O_3	13,08	19,57	15,05	16,80	14,43	3,86
Fe_2O_3	1,53	3,64	5,52	0,98	5,32	1,50
FeO	0,93	4,72	2,70	3,90	6,26	6,82
MnO	tr	0,14	0,13	tr	0,19	0,04
MgO	0,10	4,47	3,44	12,15	6,94	38,06
CaO	0,84	9,92	7,66	12,95	8,92	3,61
Na_2O	3,66	3,70	4,09	1,75	3,08	0,88
K_2O	4,26	0,96	2,23	0,82	0,96	0,28
P_2O_5	tr	0,15	0,71	—	0,37	0,26
H_2O — 110°	0,16	0,28	1,85	1,64 (pour les deux lignes)	0,76	0,79
H_2O + 110°	0,56	0,72	2,32		2,15	—
Éléments en traces	—	—	0,03	—	0,03	0,63
Total	99,85	100,31	100,28	100,01	100,17	99,85

I.G.D.A.

	Syénite (1)	Trachyte (2)	Phonolite (3)	Téphrite (4)	Leucitite (5)	Haüynophyre (6)
SiO_2	56,55	61,24	55,42	48,39	45,99	39,55
TiO_2	0,58	0,84	0,83	1,16	0,37	1,28
Al_2O_3	18,35	16,14	18,49	18,65	17,12	18,61
Fe_2O_3	3,16	2,97	1,73	3,57	4,17	5,00
FeO	2,07	1,85	2,44	5,12	5,38	2,94
MnO	0,10	tr	0,11	0,10	—	—
MgO	2,07	0,91	1,75	3,82	5,30	3,04
CaO	2,93	3,68	4,37	8,83	10,47	10,86
Na_2O	5,35	6,41	3,84	3,98	2,18	7,11
K_2O	7,92	4,21	9,64	3,31	8,97	5,59
P_2O_5	0,14	0,42	0,19	0,43	—	0,78
H_2O — 110°	0,02	0,60	0,10	0,56	0,45	0,41
H_2O + 110°	0,88	1,14	0,39	2,45		0,61
Éléments en traces	0,25	0,02	0,11	0,11	0,25	4,50(*)
Total	100,37	100,43	99,41	100,48	100,65	100,28

(1) Syénite alcaline
(2) Trachyte alcalino-sodique
(3) Phonolite leucitique
(4) Téphrite
(5) Leucitite
(6) Haüynophire, * SO_3 2,39; CO_2 1,22; Cl 0,54 etc.

I.G.D.A.

▲ ***Composition chimique de quelques roches ignées de la série alcaline.***

▶ ***Page ci-contre, en bas, classification des roches magmatiques par la méthode du double triangle proposée par Steckeisen (1967).***

s'appauvrir en certains éléments par suite de phénomènes métasomatiques ou autométasomatiques tardifs. De même, certains granites peuvent résulter de la granitisation de roches préexistantes (par exemple, des quartzites dans les cas des granites hypersiliceux) ou bien de phénomènes de différenciation magmatique, c'est-à-dire de la variation de composition d'un magma granitique originel au cours des différentes phases de la cristallisation.

Les **diorites** et leurs équivalents andésitiques résultent de la cristallisation d'un magma calco-alcalin. Ces roches sont caractérisées par des teneurs en silice variant entre 65 % (termes dacitiques) et 55 % (termes andésitiques). L'alumine peut atteindre des teneurs de l'ordre de 15 à 18 %; les oxydes de fer se situent aux environs de 6 %; le magnésium varie entre 3 et 5 %. Le fer et le magnésium apparaissent à la faveur de minéraux ferromagnésiens, comme la biotite, les amphiboles et les pyroxènes. La teneur en calcium, liée essentiellement à la présence de plagioclases et d'apatite, varie entre 3 et 6 %. Les teneurs en sodium et potassium diminuent par rapport à celles observées dans les roches acides; le premier est localisé dans les plagioclases, le second essentiellement dans les biotites. La diminution de la quantité de potassium accompagne la disparition des feldspaths alcalins, les teneurs en sodium étant de l'ordre de 3 à 4 %. Les autres oxydes montrent des teneurs assez voisines de celles des granites.

Dans les **gabbros**, la teneur en silice est voisine de 50 %; celle de l'alumine varie entre 15 et 18 %; le fer et le magnésium montrent des valeurs élevées dépassant 10 % dans le cas du fer, et fluctuant entre 10 et 5 % dans le cas du magnésium (valeurs exprimées en oxydes). La teneur en calcium est toujours très élevée et dépasse fréquemment 10 %; cet élément est présent dans les plagioclases et dans les pyroxènes monocliniques. Les alcalins, par contre, sont assez rares; le potassium dépasse rarement 1 %, tandis que le sodium peut atteindre 2 %. Les **anorthosites** sont caractérisées par des teneurs très élevées en alumine (jusqu'à 30 %) et par leurs faibles teneurs en fer et magnésium. Les **basaltes** ont une composition chimique assez voisine de celle des gabbros; ils sont toutefois caractérisés par une teneur beaucoup plus élevée en titane (2 à 3 %) et par une forte concentration du fer ferrique par rapport au fer ferreux. Certains géologues pensent que la différence entre les basaltes tholéitiques et les basaltes à olivine peut être déterminée sur la base de critères chimiques : les basaltes tholéitiques, caractéristiques des zones continentales, sont plus siliceux et plus pauvres en alumine que les basaltes à olivine, caractéristiques des zones océaniques; cependant, on connaît de nombreux exemples de basaltes qui semblent correspondre à des stades intermédiaires. Les basaltes picritiques, très riches en olivine, possèdent une composition chimique caractérisée par des teneurs plus faibles en silice, en alumine et en calcium, compensées par une importante augmentation des teneurs en fer et en magnésium.

Les **roches ultrabasiques,** qui se forment essentiellement par concentration gravitative de minéraux, sont généralement des roches intrusives. Ainsi, les péridotites contiennent environ 40 % de silice, le magnésium (MgO) montre des teneurs très élevées (comprises entre 30 et 40 %) et les oxydes de fer dépassent 10 %. Les serpentinites possèdent une composition chimique très voisine de celle des péridotites, mais les teneurs en eau sont très élevées. Les pourcentages en alumine sont très faibles (entre 2 et 3 %). Il en va de même pour le calcium présent dans les pyroxènes de type augite, tandis que les éléments alcalins sont complètement absents, à l'exception du potassium, présent dans certains faciès micacés (kimberlites).

Les **syénites** et leurs équivalents effusifs, les **trachytes,** sont parmi les roches alcalines les plus siliceuses avec environ 60 % de SiO_2. Si les teneurs en alumine et en oxydes de fer sont très comparables à celles que l'on rencontre dans les granites, par contre, les quantités d éléments alcalins sont élevées : exprimées en oxydes, elles peuvent dépasser 10 %. Généralement, les teneurs en calcium sont faibles (1 à 2 %). Font exception à cette règle les roches comme les monzonites, qui marquent la transition entre les granites et les diorites. Dans ces roches, les teneurs en calcium peuvent atteindre 8 %; on remarque, parallèlement, une diminution de la teneur en alumine s'accompagnant d'une augmentation en fer et en magnésium. Enfin, les syénites riches en minéraux ferromagnésiens montrent des caractères chimiques assez analogues à ceux que nous venons de signaler.

Les **syénites à feldspathoïdes** et les **phonolites** sont caractérisées par des teneurs en silice de l'ordre de 50 %. Les quantités d'aluminium y sont très élevées : elles atteignent fréquemment 20 %. Les éléments alcalins y sont présents en teneurs assez analogues à celles que l'on trouve dans les syénites normales (de l'ordre de 10 %); la teneur en sodium est toujours plus élevée que celle en potassium, même dans le cas des syénites de type leucitique.

Les **gabbros alcalins** et les **basaltes alcalins** sont caractérisés par des teneurs en silice légèrement inférieures à celles des gabbros normaux (entre 45 et 50 %). La teneur moyenne en alumine est de 15 %, parfois inférieure. La teneur en oxydes de fer est généralement élevée (10 %), celle en magnésium non négligeable (environ 5 %). Les alcalins sont également bien représentés avec des teneurs dépassant 5 %; toutefois, dans ce cas, les teneurs en sodium sont parfois plus importantes que celles en magnésium. Le calcium est toujours présent en teneurs élevées (8 à 10 %) [les valeurs que nous donnons étant toujours exprimées en pourcentages d'oxydes].

Les **lamprophyres** sont caractérisées par des teneurs en silice comprises entre 40 et 50 % et par des teneurs en titane très élevées dans les faciès les plus ferromagnésiens (3 à 4 % en TiO_2). La teneur en alumine varie entre 10 et 15 % et celles en fer, magnésium et calcium sont très élevées (environ 10 % pour chacun de ces éléments). Les éléments alcalins atteignent quelques unités pour cent, et la teneur en eau est élevée en raison de la présence de minéraux hydroxylés.

La distribution des éléments au cours des processus magmatiques

Les roches éruptives, qui constituent environ 94 % de la croûte terrestre, se subdivisent en *roches effusives,* ou volcaniques, qui s'épanchent à la surface du globe sous forme de laves, et en *roches intrusives,* ou plutoniques, qui cristallisent en profondeur à cause de leur refroidissement très lent.

Nous l'avons vu, la composition chimique moyenne de 98 % des roches effusives est de type andésitique. Cette composition chimique est extraordinairement uniforme à la surface de la Terre. Les roches éruptives contiennent comme éléments pétrogénétiques majeurs le silicium, l'aluminium et le calcium. Le fer et le magnésium sont abondants surtout dans les termes basaltiques. Les éléments alcalins, par contre, décroissent progressivement lorsque l'on se déplace vers les roches basiques. Le titane, le manganèse et le phosphore représentent les

éléments mineurs. Le titane est particulièrement abondant dans les termes basiques et intermédiaires, par suite de la présence dans ces roches d'augites titanifères. Parmi les éléments en trace, signalons le strontium, le scandium, le vanadium, le cobalt, le cuivre, le nickel et les terres rares.

La composition chimique moyenne de 95 % des roches intrusives correspond à celle de la famille des granites et des granodiorites ; il s'agit donc de roches sialiques hétérogènes dont les éléments majeurs sont le silicium, l'aluminium, le sodium et le potassium (la proportion totale de ces quatre éléments exprimés en oxydes dépasse généralement 90 %). Les autres éléments majeurs ainsi que les mineurs, comme le titane et le phosphore, représentent moins de 10 %. Parmi les éléments en trace, on constate la présence de zirconium, d'hafnium, de rubidium, de terres rares, de strontium, de césium, d'étain, de baryum, de plomb, de lithium, de chlore, de gallium et de germanium. Les concentrations de ces éléments présentent des domaines de variation assez larges.

Pour comprendre les caractères géochimiques généraux des différentes familles de roches, et notamment pour obtenir une idée de leur composition minéralogique approximative, on peut utiliser divers types de diagrammes construits à la suite de l'étude pétrographique et chimique de nombreux échantillons. Dans le type de diagramme ci-contre, on trouve en abscisse les principaux types de roches intrusives avec leurs équivalents effusifs (par exemple, granite-rhyolite) ; en ordonnées sont reportés, exprimés en pourcentages, les minéraux cardinaux qui sont à la base de la classification des roches éruptives. Par exemple, si l'on trace une verticale à partir du point granite, on obtient une roche formée par environ 40 % de feldspath potassique, 30 % de quartz, 15 % de plagioclase acide, 10 % de biotite et environ 5 % d'amphibole hornblende. Cette représentation permet d'avoir une vue rapide de la variation de composition minéralogique des différentes roches, mais elle ne permet pas de classer les roches avec précision.

Actuellement, les magmatologues ont adopté à l'échelle internationale la classification du double triangle proposée par Steckeisen en 1967 (ci-contre en bas). Cette classification est basée sur la composition minéralogique réelle, ou analyse modale, des roches ignées contenant de 0 à 90 % de minéraux ferromagnésiens. Les roches caractérisées par des teneurs en minéraux mafiques supérieures à 90 %, c'est-à-dire les mafites, sont traitées à part.

Les deux triangles *QAPF* présentent une base commune *AP* : *A* = feldspaths alcalins avec albite An_{0-5} comprise ; *P* = plagioclases An_{5-100} avec comme apex du triangle supérieur le pôle quartz *(Q)* et sommet du triangle inférieur le pôle feldspathoïdique *(F)*. On peut définir de cette manière six grands groupes de roches.

- Dans le premier groupe, défini par la surface supérieure du triangle *AQP,* se regroupent les roches dont la teneur modale en quartz est supérieure à 60 %. Ces roches sont dites *quartziques*.
- Dans le second groupe, on trouve cinq subdivisions qui correspondent, selon l'axe des abscisses, à des roches plus ou moins calciques ou alcalines, et selon les ordonnées, à des roches plus ou moins siliceuses. Ces roches sont appelées *quartzo-feldspathiques*. En allant des termes les plus alcalins vers les termes plus calciques se succèdent : les rhyolites alcalines (2), les rhyolites (3a), les rhyodacites ou latites quartziques (3b), les dacites (4) et les andésites quartziques (5).
- Le troisième groupe comprend les roches *feldspathiques dépourvues de quartz,* qui s'échelonnent entre le pôle alcalin avec les trachytes alcalins (6), les trachytes (7) et un pôle calcique avec les andésites latitiques (9), les basaltes tholéitiques (10), en passant par un terme intermédiaire latitique (8). Trachy-basaltes et trachy-andésites se situeraient en (8) et (9).
- Le quatrième groupe appartient au triangle inférieur *AFP ;* il est caractérisé par des roches *feldspatho-feldspathoïdiques* (contenant simultanément des feldspaths et des feldspathoïdes). Ces roches, qui renferment de 10 à 60 % de feldspathoïdes, vont d'un pôle alcalin, représenté par les phonolites (11) et les phonolites téphritiques (12), à un pôle calcique, avec les téphrites phonolitiques (13) et les basanites (14).
- La cinquième subdivision comprend les *roches à feldspathoïdes seules,* généralement regroupées sous le nom de *foïdites* (15). Les foïdites sont subdivisées en trois sous-groupes, parmi lesquels le (15 c) contient des roches quasiment monominérales (de 90 à 100 % de feldspathoïdes) comme les néphélinites, les leucitites, les haüynites, etc.
- Enfin, dans le sixième groupe, qui se trouve en dehors du double triangle, ont été regroupées les *roches à minéraux ferromagnésiens* (90 à 100 %), ou *mafites,* comme les piérites, les mélilitites, etc. Steckeisen a introduit en outre un certain nombre de qualificatifs ; par exemple, en fonction de sa teneur en quartz, on dira d'une roche qu'elle est riche en quartz (de 45 à 60 %) ou bien qu'elle est quartzifère (5 à 20 % de Q modal). En fonction de sa

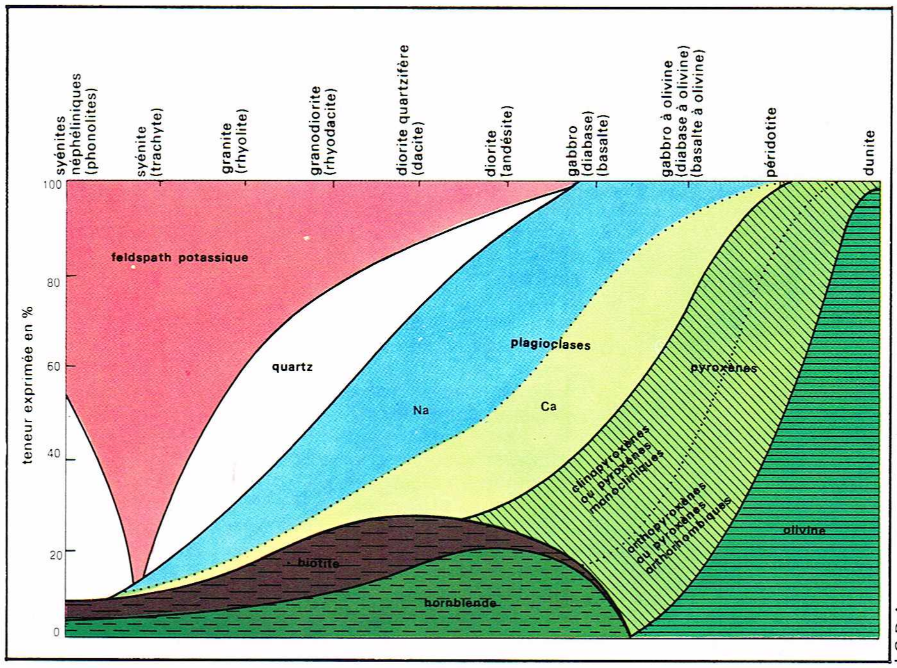

I.G.D.A.

▲ ***Composition minéralogique, approximative, des roches magmatiques. La lecture du schéma donne ainsi pour le granite (rhyolite) : 40 % de feldspath potassique ; 30 % de quartz ; 15 % de plagioclase ; 10 % de biotite ; 5 % de hornblende.***

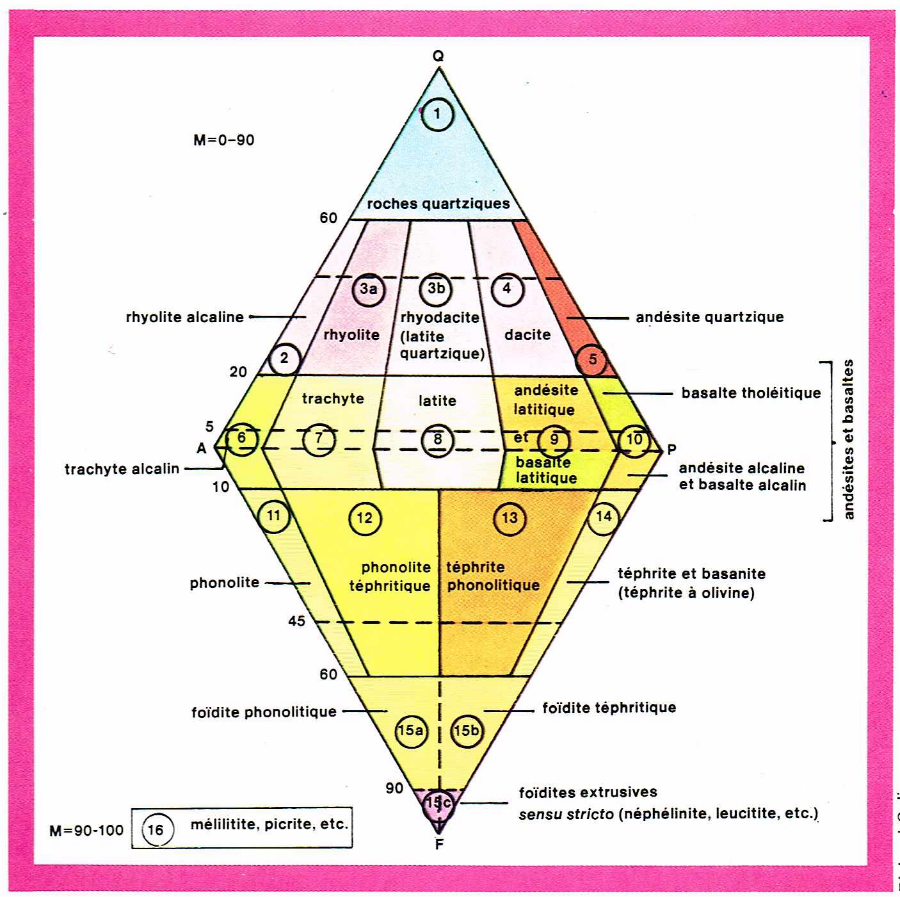

Richard Colin

▶ *Variation de la teneur moyenne des éléments chimiques dans les principaux types de roches magmatiques : à gauche, les courbes, ascendantes vers la gauche du diagramme, indiquent les éléments les plus concentrés dans les* roches *magmatiques* ultrabasiques *(péridotites). Données numériques en ppm (parties par million). A droite : variation de la teneur moyenne des éléments chimiques dans les principaux types magmatiques : les courbes, caractérisées par un maximum (bosse vers le haut) correspondant à la position centrale de gauche, indiquent les éléments les plus concentrés* des roches *magmatiques* basiques *(gabbros-basaltes)* [*données en ppm*].

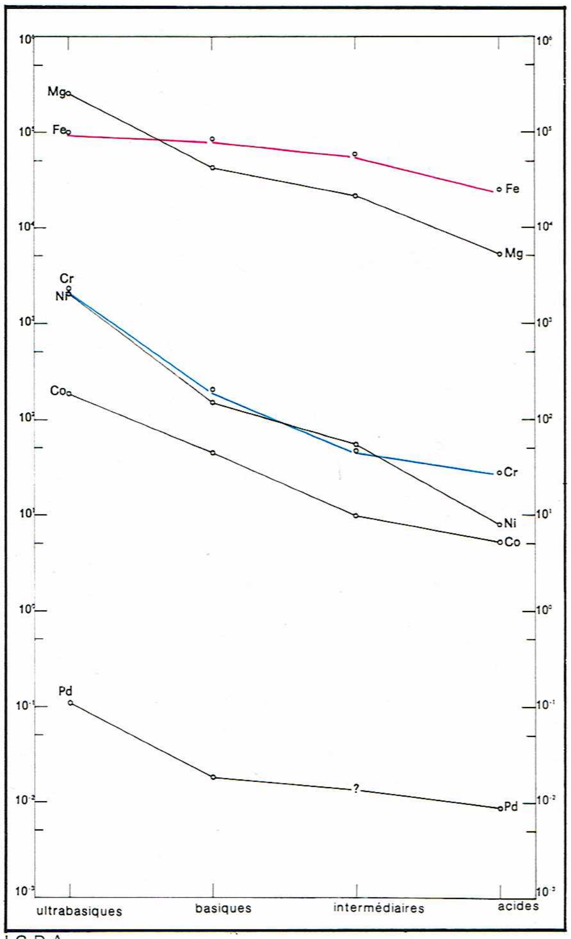

I.G.D.A.

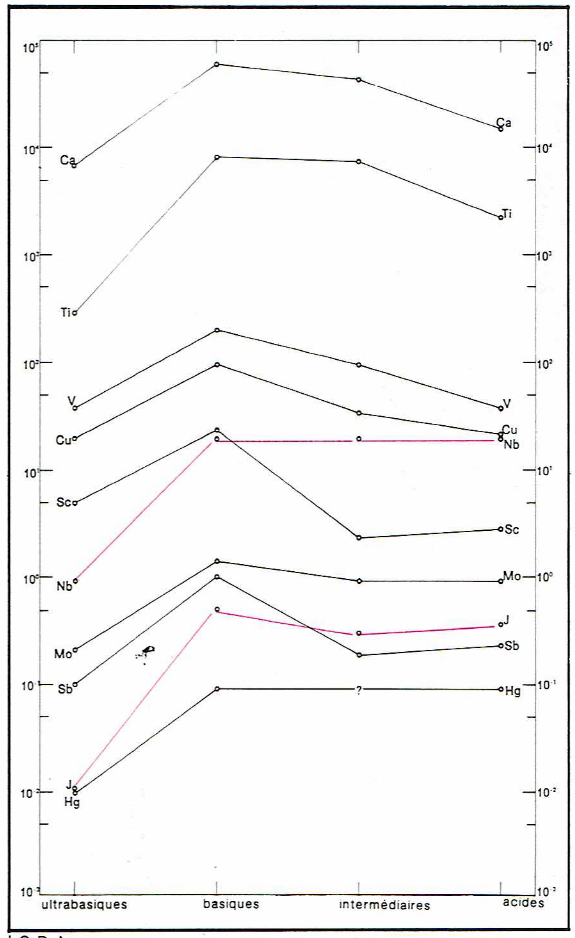

I.G.D.A.

▶ *Variation de la teneur moyenne des éléments chimiques dans les principaux types magmatiques : à gauche, les courbes caractérisées par un maximum correspondant à la position centrale, droite, indiquent les éléments les plus concentrés dans les roches magmatiques* intermédiaires *(diorites). A droite, les courbes, dont le maximum est situé en position d'extrême droite, indiquent les éléments les plus concentrés dans les roches magmatiques* acides *(granites).*

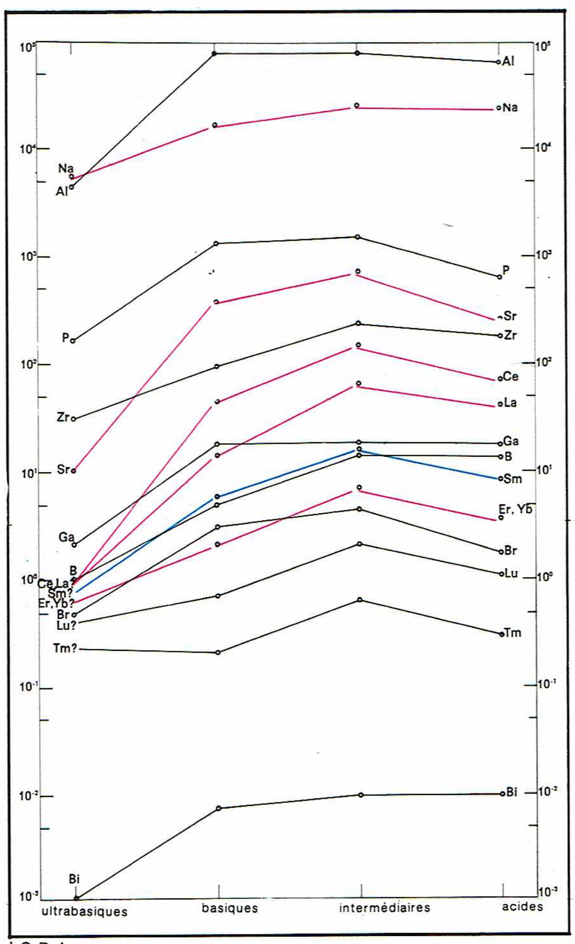

I.G.D.A.

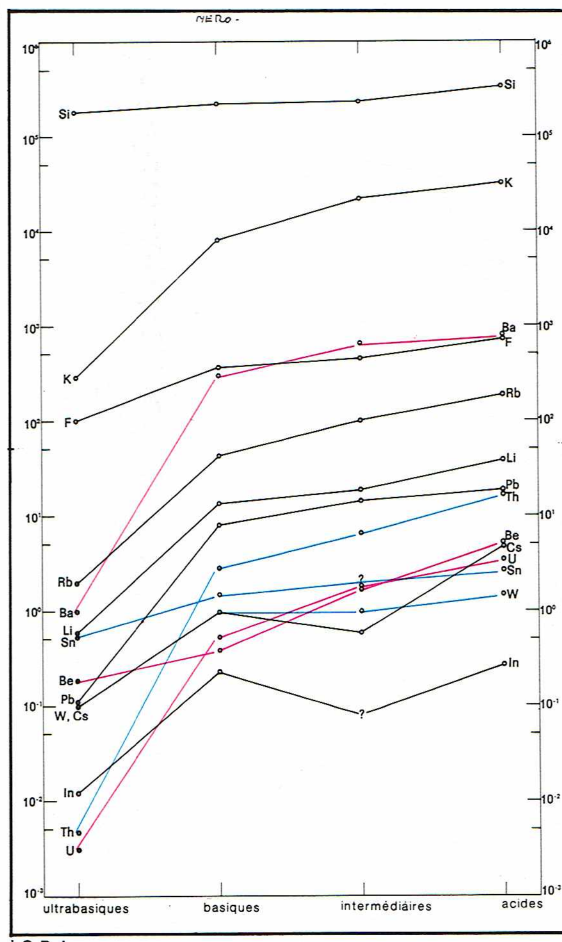

I.G.D.A.

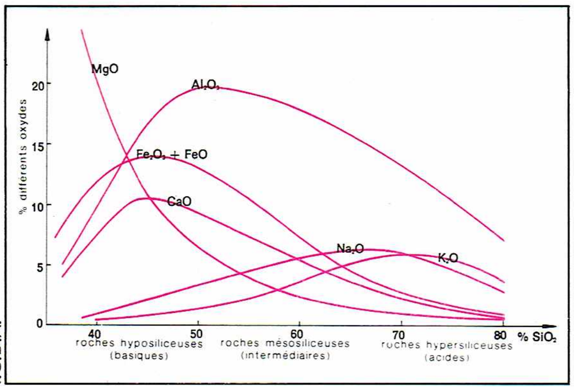

I.G.D.A.

teneur en feldspathoïdes, on aura une roche feldspathoïdique (de 0 à 10 %) et une roche riche en feldspathoïdes (de 45 à 60 %). Une roche mafitique contiendra de 75 à 90 % de minéraux ferromagnésiens.

Ainsi, une vingtaine de noms et cinq adjectifs permettent de qualifier n'importe quel type de roche volcanique. De ce fait, la nomenclature très compliquée, ayant souvent un caractère régional en désignant parfois avec le même terme des roches différentes chimiquement, se trouve codifiée et simplifiée.

Dans la suite intrusive, granite, granodiorite, diorite, gabbro-diorite, gabbro, ou bien dans la suite effusive équivalente, rhyolite, rhyodacite, dacite, andésite, basalte, la teneur en silice décroît de manière régulière de 80 % à 40 %. L'oxyde de magnésium croît de façon inversement proportionnelle à la teneur en silice selon une distribution hyperbolique (de 0,30 % à 25 %). Les autres oxydes varient selon une fonction caractérisée par un maximum, qui correspond à un type particulier de roche dans lequel l'élément considéré est concentré. Le diagramme ci-dessus montre que le magnésium est particulièrement concentré dans les roches hyposiliceuses (péridotites), l'aluminium, le fer et le calcium dans les roches intermédiaires (andésites, basaltes tholéitiques), tandis que le sodium et le potassium sont concentrés dans les laves hypersiliceuses. Les éléments mineurs et les traces ne se distribuent pas au hasard : ils montrent des relations très nettes avec les éléments majeurs qui caractérisent chimiquement les roches mères. Ainsi, les éléments qui ont le même comportement géochimique que le fer et le magnésium, comme le chrome (Cr), le nickel (Ni), le cobalt (Co), le palladium (Pd), le platine (Pt), se trouvent concentrés dans les roches ultrabasiques comme les péridotites. Les éléments qui suivent géochimiquement le calcium (Ca) et le titane (Ti), tels que le vanadium (V), le cuivre (Cu), le scandium (Sc), le niobium (Nb), le molybdène (Mo), l'antimoine (Sb) et le mercure (Hg), se trouvent concentrés dans les roches basiques. Les éléments qui se comportent comme le sodium (Na), l'aluminium (Al) et le phosphore (P) [par exemple, le zirconium (Zr), le strontium (Sr), le gallium (Ga), le bore (B), certaines terres rares, le brome (Br), le lutétium (Lu), le thulium (Tm), le bismuth (Bi)] se concentrent dans les roches de type intermédiaire comme les andésites. Enfin, les éléments qui suivent le silicium (Si) et le potassium (K) comme le fluor (F), le rubidium (Rb), le baryum (Ba), le lithium (Li), l'étain (Sn), le béryllium (Be), le plomb (Pb), le wolfran (W), le césium (Cs), l'indium (In), le thorium (Th) et l'uranium (U), se concentrent dans les roches acides. D'autres éléments montrent une distribution relativement uniforme dans toutes les roches : il s'agit du manganèse (Mn), du soufre (S), du chlore (Cl), du zinc (Zn), de l'azote (N), du germanium (Ge), de l'arsenic (As), du cadmium (Cd), de l'argent (Ag) et de l'or (Au). Les diagrammes de la page ci-contre montrent les relations existant entre les éléments mineurs et les traces ainsi que les caractères chimiques des principaux types de roches magmatiques.

La classification générale des roches ignées

On classe les roches ignées en fonction de leur composition minéralogique. Cela signifie que l'on établit des rapports quantitatifs entre les différents minéraux des groupes précédemment décrits. La structure et la texture de la roche, c'est-à-dire les relations morphologiques, les dimensions et l'orientation réciproque des minéraux qui dépendent du mode de genèse de la roche, permettent de diviser les roches ignées en roches intrusives et effusives. Les conditions de gisement et les rapports avec la roche encaissante apportent des renseignements supplémentaires pour la classification.

Cette classification, comme tous les schémas artificiels imposés par l'homme aux phénomènes naturels, n'a pas une valeur absolue car la composition minéralogique et les conditions de refroidissement des roches ignées varient progressivement. Ainsi, très souvent, on a affaire à des roches qui s'insèrent, par leurs caractères, à la limite de deux groupes voisins. Toutefois, une classification minéralogique assez schématique des roches ignées permettra d'établir un cadre général. Chaque famille sera traitée plus amplement dans la partie descriptive.

Les critères fondamentaux de la classification minéralogique sont les suivants :

— le rapport quantitatif entre les principaux minéraux sialiques (quartz, feldspaths, feldspathoïdes) et fémiques (pyroxènes, amphiboles, olivine), qui reflète la composition chimique du magma d'origine ;

— la présence ou l'absence de quartz, celle de silicates pauvres en silice, comme les feldspathoïdes et l'olivine, qui dépend des rapports quantitatifs entre la silice, l'alumine et les oxydes de fer dans le magma originel. Il est exceptionnel qu'une roche contienne à la fois du quartz et des feldspathoïdes, du quartz et de l'olivine, car ces silicates se forment dans les magmas pauvres en silice (sous-saturés) ;

— pour effectuer des subdivisions plus poussées, la détermination de la nature des feldspaths des roches sialiques et de celle des minéraux fémiques des roches basiques.

La **famille** des **granites** (roches intrusives) et des **porphyres à quartz** (roches effusives) comprend des roches qui sont caractérisées par l'association minéralogique quartz-feldspaths alcalins, potassiques et/ou sodiques. Le feldspath sodique est une albite pure ou, plus souvent, légèrement calcique (10 à 30 % d'anorthite) qui prend alors le nom d'oligoclase. Souvent, dans le cas des granites, on a de petites quantités de mica blanc (muscovite) et de biotite (mica noir) avec, dans les faciès de transition aux diorites, un peu d'amphibole. Les variétés lithologiques sont définies par les rapports quantitatifs entre les différents feldspaths ; ainsi, dans le *granite* proprement dit, le feldspath potassique (orthose ou microcline) est plus abondant que le plagioclase (oligoclase). Dans l'*adamellite,* ou *monzonite quartzifère,* il y a autant de feldspath alcalin que de plagioclase ; dans les *granodiorites* le plagioclase est dominant. Les *granites sodiques* contiennent plus de feldspath alcalin (albite) que de feldspath potassique (orthose), avec parfois des petites quantités de pyroxènes et amphiboles sodiques (ægyrine-riébeckite). Les *pegmatites,* roches filoniennes caractérisées par de très gros cristaux (plusieurs phénocristaux), et les *aplites,* roches filoniennes caractérisées par un grain très fin, appartiennent par leur composition chimique au groupe des granites.

Les roches effusives qui résultent de la consolidation d'un magma de type granitique en surface prennent le nom de *porphyres quartzifères.* Une détermination minéralogique plus précise est possible si ces roches présentent des phénocristaux. Parfois, les roches effusives sont formées uniquement par du verre volcanique (obsidiennes, rétinites, ponces) ; on doit recourir dans ce cas au critère de classification chimique. Les *rhyolites* sont des roches de composition analogue au granite mais de structure différente. Les *rhyolites sodiques* sont le correspondant effusif des granites sodiques, avec de l'albite ou de l'anorthose, des pyroxènes et des amphiboles sodiques ; elles prennent aussi le nom de *comendites.* Les *rhyodacites* et les *dacites* sont les équivalents effusifs des *adamellites* et des *granodiorites.*

La **famille** des **diorites** (plutoniques) et des **andésites** (effusives) est caractérisée par l'association entre un plagioclase (andésine) et une amphibole (hornblende), avec des quantités accessoires de biotite et quelquefois de pyroxènes. Si le quartz est présent, il s'agit de roches de transition aux granites, c'est-à-dire des *diorites quartzifères,* ou *tonalites.* La présence de quantités notables de

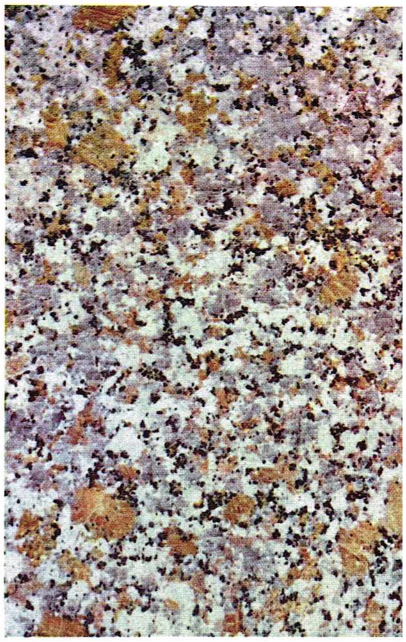

C. Bevilacqua

◀▲ ***A gauche,*** ***variation chimique moyenne*** ***des*** **oxydes métalliques** ***en fonction de la quantité de silice*** ***dans les*** **roches éruptives.** ***Ci-dessus,*** **granite** ***de la région sarde (Gallura).***

Archives Photo B

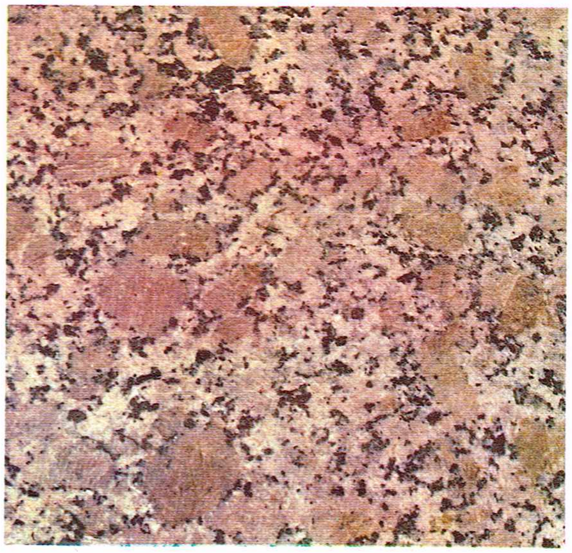

C. Bevilacqua

▲ *A gauche, lame mince d'une* **andésite** *de Hongrie, vue en nicols croisés : phénocristaux de plagioclase zonés et maclés dans une mésostase partiellement vitreuse ; le principal minéral accessoire est la biotite. A droite, une* **syénite porphyroïde** *avec de gros cristaux d'orthose, des paillettes de biotite et des aiguilles d'amphibole noires (Verceil).*

▼ *Élément isolé (prisme à section hexagonale) d'une colonnade basaltique (Vicence).*

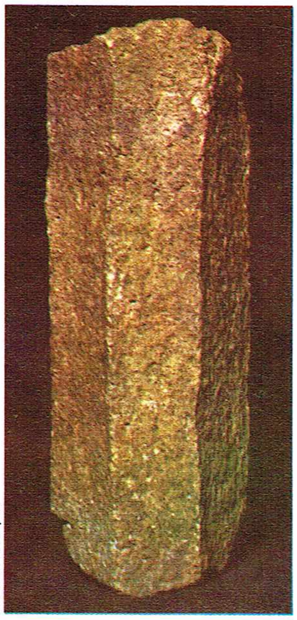

C. Bevilacqua

pyroxènes marque le passage à la famille des *gabbros.* Les roches formées presque exclusivement de hornblende et étroitement liées aux diorites prennent le nom de *hornblendites.* Les *porphyrites* sont des roches filoniennes à composition dioritique, tandis que les formes effusives correspondant aux diorites du point de vue composition minéralogique prennent le nom d'*andésites.*

La **famille** des **syénites** (intrusives) et des **trachytes** (effusives) ainsi que les familles voisines des **syénites à feldspathoïdes** (intrusives) et des **phonolites** (effusives) sont caractérisées par une composition minéralogique riche en éléments alcalins, avec des teneurs moyennes ou faibles en silice. Pour cette raison, le quartz est généralement absent, et, dans les magmas très peu siliceux, à côté des feldspaths apparaissent les feldspathoïdes. On trouve dans les syénites des feldspaths sodiques ou potassiques, de la hornblende et de la biotite, plus rarement de l'augite en faibles quantités. Dans les monzonites, à côté du feldspath potassique, l'apparition d'un plagioclase (andésine) a pour résultat que ces roches ont une composition intermédiaire entre celle des syénites et celle des diorites. Le quartz peut se trouver en faibles quantités dans les syénites et les monzonites, marquant ainsi le passage progressif de ces roches à la famille des granites. Les *syénites à feldspathoïdes* cristallisent dans des conditions intrusives à partir d'un magma alcalin pauvre en silice ; elles sont caractérisées par un feldspathoïde sodique (généralement la néphéline) avec un feldspath et des variétés sodiques de ferromagnésiens.

Les *trachytes* sont le correspondant effusif des roches syénitiques. Le feldspath alcalin (sanidine ou anorthose) et les autres minéraux des syénites sont présents en petites quantités ; les *kératophyres* sont analogues aux trachytes sodiques, mais le feldspath est dans ce cas l'albite. Les roches effusives composées essentiellement de feldspath potassique et de plagioclase (andésine) prennent le nom de *trachy-andésites,* ou *latites ;* elles sont les équivalents effusifs des monzonites. Dans les *phonolites,* équivalents effusifs des syénites alcalines, les feldspaths sodiques et potassiques sont accompagnés par des feldspathoïdes.

Une **famille** très importante est représentée par les **gabbros** (plutoniques) et les **basaltes** (effusifs). Ce sont des roches ferromagnésiennes constituées de plagioclases basiques (labradorite ou bytownite), de pyroxène et souvent d'olivine. En fonction des proportions respectives de ces minéraux on distingue les *gabbros,* caractérisés par un pyroxène monoclinique, avec ou sans olivine, et les *norites,* caractérisées par la présence d'un pyroxène orthorhombique, également avec ou sans olivine. Dans certains gabbros et norites sans olivine, on peut trouver un peu de quartz. Les *anorthosites* sont des roches formées essentiellement de plagioclase basique, tandis que les *troctolites* sont des gabbros dépourvus de pyroxènes et formés essentiellement par un plagioclase basique ainsi que par de l'olivine, abondante et visible à l'œil nu. Les *diabases* sont des roches filoniennes ou subvolcaniques formées par le refroidissement d'un magma gabbroïque, et qui peuvent renfermer ou non de l'olivine, comme les gabbros et les basaltes. Elles sont caractérisées par une structure ophitique ou intersertale.

Parmi les roches effusives, le groupe des *basaltes* est le mieux représenté d'un point de vue volumétrique ; leur composition minéralogique est analogue à celle des gabbros, mais la masse de fond dans laquelle baignent les phénocristaux est souvent constituée par du verre. A côté de certains basaltes très riches en olivine, on trouve des basaltes et des diabases pauvres ou dépourvus d'olivine, parfois avec de petites quantités de quartz (basaltes tholéitiques).

La **famille** des **gabbros alcalins** et des **basaltes alcalins** est caractérisée par la présence, en plus des minéraux typiques des gabbros (plagioclase basique, augite et olivine), de minéraux riches en éléments alcalins comme la biotite, l'amphibole sodique, l'orthose, les feldspathoïdes et les zéolites.

Les représentants plutoniques de cette famille *(gabbros alcalins)* sont assez rares : les *essexites* sont des roches largement grenues à plagioclase et néphéline, les ferromagnésiens sont de l'augite violette et de la barkévicite (amphibole sodique) et un peu de biotite. Les *théralites* (du grec *thêr* = monstre) contiennent généralement plus d'orthose que les essexites ; il en résulte un déficit en silicium qui se traduit par l'apparition de néphéline. Les *teschénites* sont des roches analogues aux théralites, mais la néphéline y est remplacée par une zéolite sodique : l'*analcime.*

La famille des *basaltes alcalins* est beaucoup plus répandue que celle des gabbros, elle regroupe des roches de compositions minéralogiques très différentes. Les *trachybasaltes* se caractérisent par l'excès d'éléments alcalins, qui se traduit par la présence de feldspath potassique, avec parfois de la hornblende sodique (barkévicite) et de la biotite.

Les *trachy-andésites* sont très voisines des trachy-basaltes, auxquels elles passent progressivement par substitution du plagioclase labrador au plagioclase andésine. Les *spilites* sont des basaltes sodiques pauvres en olivine, et le feldspath acide (albite ou oligoclase) pourrait résulter d'un phénomène métasomatique postérieur à l'éruption.

Des teneurs encore plus élevées en éléments alcalins aboutissent à l'apparition de feldspathoïdes et de mélilite dans les basaltes. Les *téphrites* et les *basanites* sont des roches effusives dont la composition minéralogique est analogue à celle des basaltes et des basaltes à olivine, qui contiennent en plus de la leucite (téphrites et basanites leucitiques) ou de la néphéline (téphrites et basanites néphéliniques). Les *néphélinites* et les *leucitites* sont des roches effusives formées par l'association du pyroxène monoclinique respectivement avec de la néphéline et de la leucite ; l'adjonction d'olivine aboutit aux *leucitites* et *néphélinites à olivine,* improprement appelées « basaltes leucitiques et néphéliniques ». Les basaltes à mélilite, plus correctement appelés *mélilitites,* s'apparentent à ces roches.

La **famille des roches ignées ultrafémiques,** ou **roches ultrabasiques,** est formée essentiellement par des roches contenant un ou plusieurs minéraux fémiques. Ces roches semblent résulter de la différenciation d'un magma basaltique. Ainsi, les *pyroxénites* sont formées par un pyroxène orthorhombique ou monoclinique seul ou associé ; les *péridotites* contiennent de l'olivine seule ou avec des pyroxènes ; les *picrites* sont des péridotites dans lesquelles on trouve un peu de plagioclase basique (riche en Ca). On trouve toutes ces roches dans des gisements de type intrusif ou plutonique, exception faite pour les picrites, auxquelles correspondent les *basaltes picritiques,* riches en olivine.

Les roches magmatiques filoniennes, c'est-à-dire sous forme de corps intrusifs d'épaisseur réduite par rapport à leur extension, peuvent avoir la même composition minéralogique et chimique que les roches plutoniques dont elles dérivent. Elles s'en distinguent par leur structure, porphyrique ou micro-cristalline. Lorsque cette différenciation de structure s'effectue dans le cas des roches sialiques ou acides (donc riches en silice), on a des *aplites.* Les aplites, ou filons aplitiques, sont le plus souvent liées à des intrusions granitiques et sont caractérisées par l'absence (ou la quasi-absence) de minéraux ferromagnésiens et par une structure très finement grenue. Si la différenciation se fait en présence d'éléments volatils concentrés, les cristaux atteignent des dimensions importantes, souvent décimétriques. La roche filonienne s'enrichit alors en minéraux accessoires rares (tourmaline, béryl, topaze) et prend le nom de *pegmatite.* Les *lamprophyres* sont des roches filoniennes qui proviennent de la différenciation de roches fémiques. Ils sont formés par l'association de minéraux ferromagnésiens, parmi lesquels on notera la biotite, les amphiboles, les pyroxènes et l'olivine, ainsi que par des aluminosilicates, comme les feldspaths et les feldspathoïdes.

Les roches *pyroclastiques* s'apparentent de manière générale aux roches effusives. Elles résultent de l'accumulation de projections constituées par des débris de verre volcanique contenant des minéraux intratelluriques et des débris de roche arrachés aux formations traversées, éjectés pendant les phases explosives du volcanisme. Les plus connus sont les *tufs,* qui se déposent en milieu subaérien ou subaqueux, et qui montrent souvent des structures analogues à celles des roches sédimentaires déposées par le vent ou les courants aqueux.

Les différents stades de la cristallisation magmatique

Solidification des magmas

Les processus de solidification des masses fondues varient en fonction de leur composition chimique originelle et des conditions de refroidissement. Il est possible de reconstituer ces processus par l'étude de la composition minéralogique des roches ignées, de leur texture et de leur structure. Les différentes associations de minéraux des roches ignées ainsi que leurs rapports morphologiques et géométriques, qui dépendent de l'ordre de cristallisation dans le magma, constituent les *paragenèses minéralogiques.*

Les structures et les textures des roches intrusives et filoniennes permettent de penser que la cristallisation du magma à l'intérieur de la croûte terrestre s'effectue à travers différents stades. Ces stades correspondent à des conditions de pression et de température décroissantes et à l'épuisement par cristallisation de toutes les substances chimiques présentes dans le magma. Les éléments volatils s'échappent du magma à l'état gazeux ou sous forme de solutions aqueuses, provoquant ainsi des modifications importantes des roches encaissantes, et arrivent à la surface de la croûte terrestre.

C. Bevilacqua

▲ **Essexite** *de Bohême (Londres, British Museum).*

Dans le premier stade, appelé *orthomagmatique,* il y a séparation de presque tous les minéraux silicatés, selon un ordre déterminé par les différentes températures de solidification et par la composition chimique globale du magma. Avec la progression de la cristallisation, la tension de vapeur des éléments volatils augmente, car ils se trouvent exclus des réseaux cristallins des minéraux formés pendant ce stade. Ils se concentrent alors dans le liquide résiduel, qui occupe un volume de plus en plus petit. L'état physique des éléments volatils (essentiellement l'eau) au cours de ce stade est probablement celui des vapeurs supercritiques. Les éléments volatils, au-dessus de la température critique qui pour l'eau est de 374 °C possèdent de grandes affinités avec les liquides dans lesquels sont dissous les silicates.

Les stades successifs de la cristallisation magmatique *(pegmatitique, pneumatolytique* et *hydrothermal)* se développent à des températures de plus en plus basses : le stade pegmatitique correspond à des températures supérieures à 450 °C ; le stade pneumatolytique est compris entre 450 °C et 374 °C ; le stade hydrothermal se situe au-dessous de 374 °C. En fait, les limites de température ne sont pas aussi nettes : elles dépendent de la composition chimique du magma et de la pression à laquelle il est soumis ; de plus, la transition entre les différents stades est progressive. Les roches qui se forment au cours de ces stades sont différentes de celles qui se solidifient pendant le stade orthomagmatique. Elles présentent généralement des conditions de gisement filoniennes.

Dans les stades pegmatitique et pneumotolytique, les éléments volatils se trouvent au-dessus de la température critique de l'eau et forment une solution avec les silicates. La phase fluide se trouve à une pression très élevée, plus élevée que celle qui existe pendant le stade orthomagmatique, et elle tend à remonter à travers les roches encaissantes sous forme de veines et de filons. Au cours de la remontée des fluides, la température et la pression baissent progressivement.

● Dans le *stade pegmatitique,* la phase fluide est formée essentiellement par des silicates, qui cristallisent sous forme de minéraux analogues à ceux des roches ignées mais de dimensions bien supérieures. On remarque dans ce stade la richesse des minéraux hydratés (micas) et enrichis en éléments volatils comme le bore (tourmaline), le fluor (fluorine, apatite), le chlore (apatite) et en nombreux autres éléments présents en faibles teneurs dans le magma. Les minéraux des pegmatites sont recherchés et intensément exploités. Les pegmatites généralement

C. Bevilacqua

◀ **Péridotite.** *Cette roche est formée par de l'olivine (cassures irrégulières souvent courbes) et par un pyroxène monoclinique (clivages réguliers)* [*lame mince en nicols croisés*].

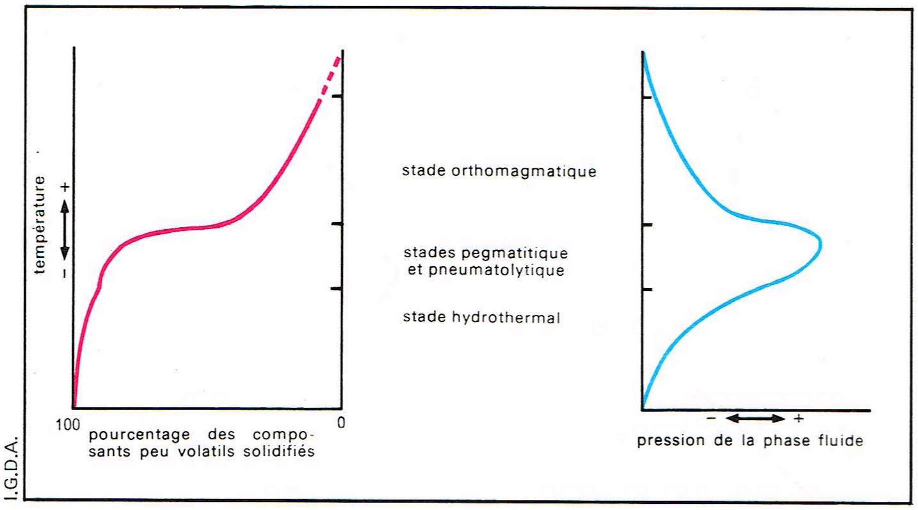

▲ ***Diagramme de la solidification d'un magma : la courbe en rouge représente la solidification progressive des composants peu volatils du magma au cours du refroidissement; la courbe en bleu montre la variation de la tension de vapeur des composants volatils du magma : son augmentation est très rapide dans les stades pegmatitique et pneumatolytique, à cause de la solidification de la plupart des résidus fondus, peu volatils (d'après Niggli).***

associées à des roches intrusives sialiques, sont comme les granites et les syénites, mais on connaît aussi des roches à faciès pegmatitique dans les magmas intermédiaires et basiques. Les phénomènes anatexiques, c'est-à-dire la fusion plus ou moins complète de roches préexistantes dans des conditions d'ultramétamorphisme, aboutissent à la formation d'un liquide granitique qui, par cristallisation, donne une roche de composition chimique et de structure analogues à celles des pegmatites.

● Dans le *stade pneumatolytique*, la phase fluide résiduelle, constituée essentiellement par des éléments volatils, migre d'abord à travers le pluton (roche intrusive) presque totalement cristallisé, puis à travers les roches encaissantes (veines et filons). Cette migration provoque des modifications minéralogiques de la roche ignée par suite des échanges qui s'opèrent entre le fluide et la phase déjà cristallisée *(autométasomatisme)*. Parmi les phénomènes les plus importants, nous signalerons l'*albitisation* des roches granitiques, c'est-à-dire la transformation du feldspath potassique en feldspath sodique, ou albite; la *chloritisation* des roches fémiques et à composition intermédiaire, qui correspond à la transformation de certains minéraux ferromagnésiens (amphiboles) en chlorite; la *serpentinisation*, c'est-à-dire la transformation de l'olivine en serpentine dans le cas des roches basiques et ultrabasiques.

● Le *stade hydrothermal* prend le relais du stade pneumatolytique au-dessous de la température critique de l'eau (374 °C). Les transformations autométasomatiques se poursuivent également. Certains éléments s'échappent des réseaux cristallins des minéraux; un exemple d'un tel processus est la *kaolinisation* des feldspaths potassiques, qui correspond à un départ des éléments alcalins. Le quartz et les carbonates sont des minéraux typiques de la phase hydrothermale. Certaines sources thermales minéralisées pourraient provenir de l'eau qui s'échappe des magmas au cours des derniers stades de solidification. En fait, le plus souvent, il s'agit d'eaux vadoses, c'est-à-dire d'origine superficielle, infiltrées dans les profondeurs de l'écorce terrestre où elles se réchauffent et se minéralisent.

Les fluides aqueux et gazeux sont responsables, lors des derniers stades de la solidification du magma, de la mobilisation et du dépôt dans les roches encaissantes de minéraux métalliques sous forme concentrée ou disséminée. C'est ainsi que se forment certains gisements de minerais exploitables. Les minéralisations se présentent sous forme d'imprégnations des roches encaissantes au contact du corps intrusif, et, lorsqu'il y a pneumatolyse, un échange d'éléments chimiques s'établit entre le magma et les roches encaissantes *(métasomatisme)*. Elles peuvent aussi se présenter sous forme de filons lorsque la migration et le dépôt des substances minérales s'effectuent pendant la phase hydrothermale. Dans ce cas aussi, se développent des échanges réciproques entre les roches qui constituent les épontes de la fracture et la minéralisation qui la remplit, ou filon.

La solidification des magmas dans le cas des roches effusives (qui montent jusqu'à la surface du globe) se fait dans des conditions totalement différentes de celles des roches intrusives. Deux phénomènes en sont responsables : d'une part, le refroidissement y est beaucoup plus rapide; d'autre part, les éléments volatils s'échappent presque totalement du magma au moment de l'éruption par suite de la brusque chute de pression. Ces deux facteurs aboutissent à une augmentation de la viscosité du magma; il en résulte que les groupements d'ions n'ont ni le temps, ni la possibilité de s'ordonner pour former des réseaux cristallins. La partie du magma qui était à l'état fondu (avec les propriétés d'un liquide) se fige au moment de l'éruption sous forme d'un verre volcanique. Lorsque le refroidissement de la lave n'est pas très rapide et que la perte des éléments volatils n'est pas totale, comme c'est le cas à la base des coulées épaisses ou dans le cas des laves basiques assez fluides, le magma fondu cristallise sous forme de petits cristaux généralement allongés *(microlites)*.

Dans le magma érupté *(lave)*, sont souvent présents des cristaux formés dans des conditions intratelluriques *(phénocristaux)*, qui baignent dans une masse de fond vitreuse ou microlitique *(mésostase)*. Les phénocristaux montrent parfois des signes de corrosion superficielle provoquée par la chaleur de cristallisation, par l'augmentation de la température de la lave au moment de l'éruption et par l'oxydation de la phase gazeuse qui s'échappe de la masse fondue. Ce dernier phénomène est responsable de la structure bulleuse de certaines laves; les cavités en forme de bulle peuvent rester vides ou bien être remplies, dans un stade postérieur à la mise en place, par des minéraux de type hydrothermal (zéolites, chlorites, calcite, etc.) qui se déposent à partir de solutions aqueuses d'origine profonde (eau magmatique) ou bien d'infiltration (eaux vadoses).

Les caractères de solidification des magmas dans des conditions filoniennes sont intermédiaires entre ceux que l'on observe dans les conditions intrusives d'une part et éruptives d'autre part. Lorsque le magma s'introduit dans les fractures des roches encaissantes, il contient une quantité non négligeable de minéraux cristallisés dans des conditions intratelluriques; la masse fondue se solidifie plus lentement que dans le cas des laves et en présence de teneurs plus importantes d'éléments volatils. Le refroidissement est plus rapide aux épontes du filon *(salbandes)*, ce qui se traduit par la présence de verre ou de microlites plus abondants vers l'extérieur du filon, ou dans tout le filon lorsque son épaisseur est très faible. Dans le cas de filons épais, le grain de la roche est d'autant plus important que l'on s'approche de la partie centrale du filon.

On trouve aussi des conditions de solidification voisines de celles des filons dans le cas des parties profondes de certaines coulées de lave très épaisses, ou dans des intrusions de moyenne profondeur qui établissent une communication partielle entre le magma profond et la surface. Les roches de ce type ont été nommées *hypoabyssales*, ou *subvolcaniques*. Elles présentent des structures intermédiaires entre celles des roches intrusives et celles des roches effusives. Le plus souvent, elles se rapprochent de ces dernières par leur structure porphyrique, mais avec une distinction moins nette entre les phénocristaux et la masse de fond.

Les processus de cristallisation magmatique

Bien que l'on connaisse un certain nombre de roches intrusives constituées par une seule espèce minérale (anorthosites, pyroxénites, péridotites), on admet qu'il n'existe pas de magma ayant une composition monominérale. Les roches signalées précédemment résultent de la concentration d'un minéral qui se sépare du magma à un moment précoce ou tardif de sa solidification.

Les roches ignées résultent de l'association de certains minéraux fondamentaux avec d'autres plus accessoires. Les roches ultrabasiques et basiques sont souvent constituées par deux ou trois espèces minérales seulement. La pétrogenèse (étude de la naissance des roches) a été abordée par les expériences de cristallisation en autoclave de mélanges obtenus par la fusion de plusieurs phases minérales. On peut, au cours de ces synthèses, faire varier les proportions relatives des composants chimiques, la pression d'H_2O, la température, la vitesse de refroidissement, etc. Les expérimentateurs ont observé des phénomènes totalement différents selon que les minéraux obtenus forment des solutions solides, totales ou partielles

La notion de solution solide tient à l'analogie de structure des réseaux cristallins de deux minéraux différents. Ces minéraux sont *isotypes*. Dans certains cas d'isotypie, les ions ou les groupements ioniques, qui occupent des emplacements bien précis dans le réseau cristallin du minéral, peuvent être remplacés par des ions différents, localisés de la même façon et dans le même type de réseau cristallin d'un minéral différent. Si la substitution est possible en toutes proportions, on a une solution solide entre deux minéraux, lesquels constituent alors les termes extrêmes d'une série isomorphe. Leur composition chimique ainsi que leurs propriétés physiques varient progressivement d'un terme à l'autre de la série. L'exemple le plus classique est celui de la famille des plagioclases. Un nombre important de minéraux des roches ignées appartiennent à des séries isomorphes (le quartz fait exception à cette règle).

Analysons la cristallisation d'un mélange synthétique ayant la composition chimique d'un pyroxène (diopside) et d'un plagioclase (anorthite) en différentes proportions. Les températures de cristallisation des minéraux purs, 1 550 °C pour l'anorthite et 1 391 °C pour le diopside, sont abaissées de manière considérable par la présence dans le mélange fondu de petites quantités de substances chimiques appartenant à l'un des deux minéraux et jouant le rôle de fondants. La température minimale de solidification du mélange (1 270 °C) correspond à un liquide fondu composé par 42 % d'anorthite et 58 % de diopside ; le mélange correspondant à cette composition est appelé mélange *eutectique* du système binaire anorthite-diopside. Si l'on refroidit lentement ce mélange eutectique, on observe qu'à 1 270 °C précipitent simultanément des cristaux d'anorthite et de diopside ; la température reste alors constante jusqu'à cristallisation totale de l'ensemble. Si le liquide fondu a une composition chimique correspondant à des pourcentages de l'un et de l'autre minéral, différents de la composition eutectique (42 % d'anorthite, 58 % de diopside), le minéral qui cristallise le premier est celui dont la teneur dans le liquide est plus élevée par rapport à sa teneur dans l'eutectique. Cela reste valable même si sa température de solidification à l'état pur est inférieure à celle de l'autre minéral dans le mélange binaire. La composition du liquide varie progressivement vers celle de l'eutectique car, à partir du liquide, se séparent les éléments constitutifs du minéral présent initialement en teneurs plus élevées ; lorsque la composition de l'eutectique est atteinte, les deux minéraux cristallisent simultanément.

Des études analogues ont été effectuées dans le cas de systèmes ternaires ou quaternaires, c'est-à-dire en présence de trois ou quatre minéraux non miscibles à l'état solide et avec un joint eutectique commun : la solidification s'effectue de la même façon que dans les systèmes binaires.

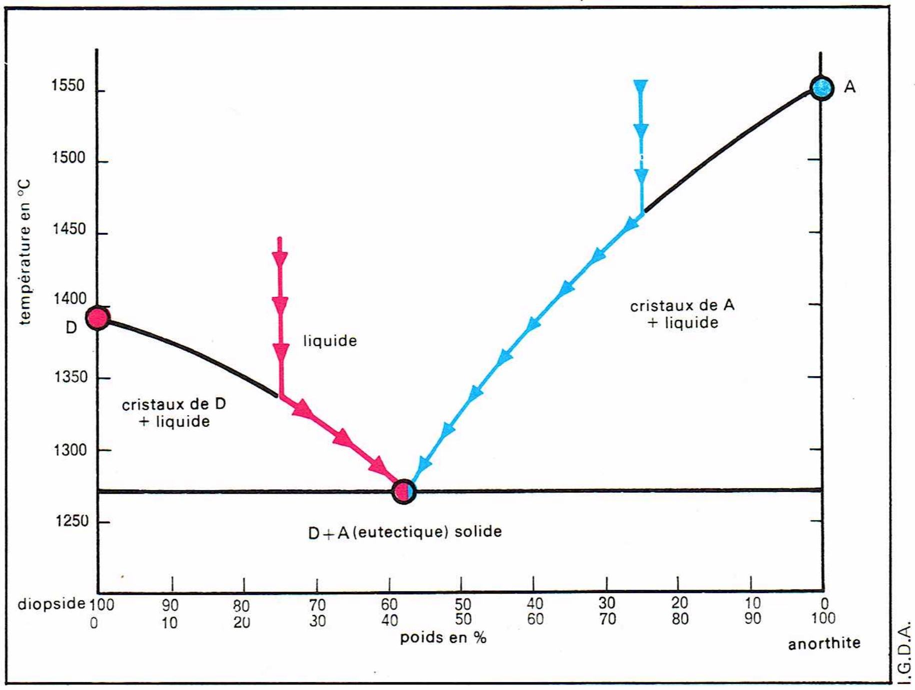

▲ ***Diagramme représentant*** **le système binaire anorthite-diopside :** ***au cours du refroidissement, la composition du liquide fondu, riche en diopside (D), varie selon la ligne rouge, le diopside cristallisant avant le mélange diopside-anorthite ; le processus est le même pour un liquide plus riche en anorthite (ligne bleue), mais cette fois les cristaux d'anorthite apparaissent les premiers.***

On retrouve le même phénomène dans le cas inverse, c'est-à-dire lors de la fusion partielle d'une roche formée par un mélange de minéraux constituant de multiples systèmes analogues à ceux que nous venons de décrire. Ce résultat se vérifie dans la nature lorsqu'une roche est portée, à la suite de dislocations tectoniques, dans les niveaux profonds de la croûte terrestre. La température élevée qui existe à ces niveaux provoque une fusion partielle des minéraux ; ainsi prend naissance un magma secondaire ou *anatexique*. La fusion débute par des minéraux qui constituent le mélange eutectique dans un système à plusieurs composants, et cela à des températures inférieures à celle de chaque minéral. Ainsi, un mélange ternaire constitué par du quartz, de l'orthose et de l'albite en quantités égales, fond aux environs de 700 °C, en présence d'eau et à une pression élevée (3 Kb). Les premiers produits d'anatexie ont donc la composition d'un magma granitique même s'ils proviennent de la fusion partielle d'une roche dont la composition globale n'est pas celle d'un granite.

La cristallisation des minéraux qui constituent des *séries isomorphes* suit une évolution différente. Dans le cas des plagioclases qui forment une série continue entre deux pôles extrêmes, représentés d'une part par l'anorthite $CaAl_2Si_2O_8$ (dont le point de fusion est de 1 550 °C) et d'autre part par l'albite $NaAlSi_3O_8$ (dont le point de fusion se situe à 1 100 °C), les températures de cristallisation des différents mélanges sont intermédiaires entre celles des deux corps purs. Les premiers minéraux qui se séparent du bain fondu n'ont pas la même composition chimique que le liquide. Le premier minéral qui cristallise n'est pas présent en excès par rapport à un mélange eutectique, comme dans le cas des mélanges binaires examinés précédemment.

Dans le cas des séries isomorphes, les premiers minéraux qui se séparent du liquide ont une composition chimique intermédiaire entre celle du liquide et celle du minéral pur à plus haut point de fusion. Ainsi, dans un mélange à 50 % d'anorthite et 50 % d'albite, précipitent, à partir de 1 450 °C, des cristaux correspondant à une solution de composition comptant 82 % d'anorthite et 18 % d'albite. Le liquide résiduel s'enrichit alors en albite par rapport au liquide initial. Au cours du refroidissement, les premiers minéraux formés ne sont plus en équilibre avec le liquide : il se crée alors une réaction d'échange réciproque entre la phase solide (cristaux) et le liquide (sans destruction des réseaux cristallins formés antérieurement). La composition chimique des cristaux varie continuellement ; elle est toujours enrichie dans le composant à plus haut point de fusion par rapport à la composition initiale du magma. Au fur et à mesure que la cristallisation avance, la composition chimique des cristaux se rapproche de celle du

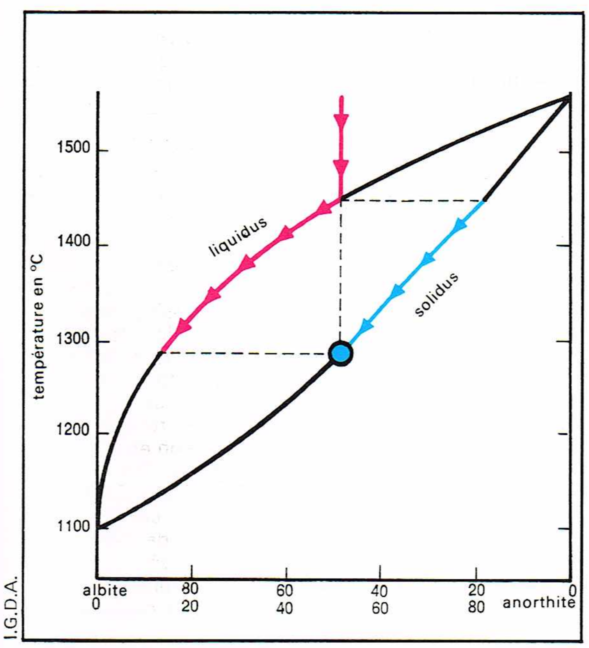

◀ ***Diagramme représentant*** **le système binaire albite-anorthite :** ***au cours du refroidissement du mélange liquide des deux composants, la composition du liquide varie selon la courbe rouge*** **(liquidus),** ***celle des cristaux séparés varie selon la courbe bleue*** **(solidus).** ***A la suite de réactions continues entre la phase liquide et la phase solide, la phase résiduelle, à la fin de la cristallisation, a la même composition que le liquide fondu initial (d'après Bowen).***

liquide initial ; dans le cas examiné ci-devant, elle est atteinte à 1 285 °C (50 % d'anorthite, 50 % d'albite).

La composition chimique du résidu fondu varie également de manière continue ; elle s'enrichit progressivement par rapport au liquide initial dans le terme à point de solidification le plus bas. La dernière goutte de liquide dans l'exemple traité a une composition correspondant à environ 86 % d'albite et 14 % d'anorthite. Ce liquide réagit avec des cristaux dont la composition chimique est voisine de celle du liquide initial. Inversement, si l'on fait fondre un plagioclase dont la composition chimique correspond à 50 % d'albite et 50 % d'anorthite, il se forme un liquide enrichi en albite et un solide dont la composition va progressivement évoluer vers celle de l'anorthite.

La réaction entre cristal et liquide, qui dans le cas des plagioclases correspond à un échange double entre Ca et Al de la phase solide et Na et Si de la phase liquide, est possible uniquement si le refroidissement est lent et continu. Si le refroidissement est rapide et discontinu, on obtient des *cristaux zonés,* avec le centre enrichi dans le terme à plus haut point de fusion (An) et la bordure enrichie dans le terme à point de fusion le plus bas (Ab). Le phénomène que nous venons de décrire se rencontre non seulement dans la famille des plagioclases, mais aussi dans celles des pyroxènes et des olivines.

Les expériences sur les systèmes qui font intervenir un minéral à *fusion incongrue* sont très importantes. Le minéral se décompose et forme un liquide et un minéral de composition chimique différente, aucunement lié au minéral originel par des rapports isomorphiques comme dans le cas des plagioclases. Si, par exemple, on fond un pyroxène (clinoenstatite $Mg_2Si_2O_6$), à 1 557 °C il se décompose en donnant une olivine (forstérite Mg_2SiO_4) et un liquide plus riche en silicium par rapport à la composition de l'enstatite ; à une température plus élevée, la forstérite se dissout dans le liquide. Inversement, si l'on part d'un liquide fondu dont la composition est celle de la clinoenstatite, se déposent d'abord des cristaux de forstérite, et le liquide s'enrichit en silice ; à la température d'inversion, la forstérite réagit avec le liquide et se transforme en clinoenstatite.

Ces quelques exemples fondamentaux, relatifs aux transformations d'état physique dans les systèmes silicatés, donnent un aperçu de la complexité des processus de solidification des magmas intrusifs. De plus, dans les milieux naturels interviennent d'autres facteurs, comme les modifications polymorphes des minéraux, les variations irrégulières de la pression, la température et la tension de vapeur des éléments volatils, la contamination du magma par fusion des roches encaissantes. Dans les études expérimentales, on ne peut tenir compte de tous ces facteurs, qui compliquent les schémas théoriques de cristallisation et les rapports entre les différentes phases.

On peut considérer qu'il existe trois processus de cristallisation distincts : les systèmes avec eutectique, les séries de réactions continues et les réactions discontinues. Seuls les derniers produits de la cristallisation, c'est-à-dire la roche formée par les derniers minéraux apparus, sont accessibles à notre investigation. Les différents stades de la cristallisation peuvent être déduits uniquement à partir des rapports entre les différents minéraux présents. Dans les systèmes avec eutectique, il ne doit y avoir aucune réaction entre le cristal et le liquide ; la composition de la phase minérale doit rester toujours la même, sans qu'il y ait de substitutions isomorphes dans les réseaux cristallins. Toutes ces conditions réunies ne se vérifient que rarement dans les milieux naturels. C'est pourquoi on pense que ce type de cristallisation est assez rare et qu'il devrait donner naissance à une structure micropegmatitique, telles celles que l'on observe dans les granophyres, ou de type ophitique comme dans les diabases. Dans les systèmes avec un point eutectique, il n'existe pas un ordre défini d'apparition de phases minérales, mais le minéral en excès par rapport à la composition de l'eutectique se sépare en premier. Cela est contraire aux observations les plus courantes car les minéraux montrent toujours un ordre d'apparition bien déterminé, même si les premières phases qui apparaissent sont quantitativement négligeables.

On distingue les premiers minéraux qui se séparent du magma par leur forme bien cristallisée *(minéraux idiomorphes* ou *automorphes)* car les faces cristallines ont pu se développer librement. Les minéraux qui apparaissent tardivement cristallisent dans les espaces laissés libres par les autres minéraux ; ils ne peuvent donc acquérir leur forme cristalline *(minéraux xénomorphes).* Fréquemment, dans les roches intrusives, les minéraux qui apparaissent les premiers (généralement des minéraux ferromagnésiens) montrent des signes d'instabilité ou de résorption, parfois sous forme d'auréoles réactionnelles (la bordure du cristal est remplacée par de nouveaux minéraux) ; ce phénomène rappelle qu'ils appartiennent à une série de réactions discontinues, analogues à celles de la série forstérite-clinoenstatite. Les premiers minéraux qui se séparent du magma ne se trouvent plus en équilibre avec le liquide résiduel qui se forme au fur et à mesure que le processus de cristallisation avance. Ils vont donc réagir avec lui pour former de nouveaux minéraux. Ainsi, souvent, les amphiboles forment une auréole autour des pyroxènes et les biotites autour des amphiboles.

La cristallisation de certains minéraux fondamentaux, suivant des processus de réaction discontinue, est prouvée par l'observation des séquences minéralogiques de différentes roches dérivant de la solidification d'un même magma. Cette notion, qui sera plus amplement développée dans la partie concernant la différenciation magmatique, s'applique aux roches qui, bien que différentes, montrent des analogies de composition chimique et de conditions de gisement. Les minéraux apparaissent suivant un ordre défini : les minéraux ferromagnésiens précèdent toujours les minéraux sialiques ; au fur et à mesure que la différenciation progresse, leur disparition s'effectue suivant le même ordre. En d'autres termes, au cours de la cristallisation, les premiers minéraux apparus réagissent avec le bain fondu résiduel pour former de nouveaux minéraux. De plus, dans la série isomorphe des plagioclases, les termes plus riches en anorthite, qui se séparent à température élevée, sont généralement associés à des minéraux fémiques, tandis que les termes albitiques s'associent aux minéraux sialiques.

C'est à la suite d'observations de cet ordre et de longues études sur les systèmes artificiels silicatés, que le pétrographe américain N.L. Bowen formula l'ordre de séparation des minéraux dans les magmas, appelé *suite de Bowen*. La cristallisation procède, par diminution de la température, selon deux séries de réactions presque totalement indépendantes : la série continue des plagioclases, qui va des termes calciques aux termes sodiques, et la série discontinue des minéraux fémiques, qui commence avec les olivines, passe aux pyroxènes ferriques et magnésiens d'abord, calciques ensuite (augites), et se poursuit avec les amphiboles et les biotites. Dans la suite discontinue, chaque terme, pendant la période dans laquelle il est en équilibre avec le liquide, voit sa composition changer progressivement. Dans les olivines et les pyroxènes, par exemple, la teneur en magnésium diminue tandis que la teneur en fer augmente. Dès que l'équilibre est rompu, la phase solide réagit à une température inférieure avec les résidus liquides pour donner naissance à un nouveau minéral de la série. Les deux séries sont indépendantes et se développent en même temps ; mais la présence, surtout aux températures élevées, de minéraux des deux séries comme l'anorthite et le diopside provoque un abaissement de la température du solidus ; par ailleurs, on ne peut affirmer qu'il existe un eutectique correspondant aux deux termes extrêmes des deux séries. Les derniers minéraux qui apparaissent dans le magma sont les feldspaths potassiques (orthose), la muscovite (mica blanc) et le quartz. Les relations de ces minéraux tardifs avec ceux des deux séries ne sont pas évidentes ; il est probable qu'ils ne proviennent pas d'une réaction continue ou discontinue des minéraux déjà formés avec le résidu fondu, mais représentent le produit de la cristallisation de ce résidu. De ce point de vue, ils présentent quelques analogies avec les minéraux des séries eutectiques, bien que leur cristallisation ne soit pas simultanée.

Le principe de la suite de Bowen ne prend pas en considération les changements de composition chimique, essentiellement de celle des feldspaths, pendant les derniers stades de cristallisation du magma (pneumatolytique et hydrothermal). Par contre, elle fournit une explication valable des phénomènes observés dans les roches filoniennes et effusives dans lesquelles les processus de cristallisation sont souvent interrompus par des phases précoces, suivies d'un refroidissement si rapide que le résidu fondu se fige en un verre volcanique.

▲ **Structure myrmékitique** ***au contact d'un cristal de feldspath potassique (en haut) avec des cristaux maclés de plagioclase (en bas). Les couleurs d'interférence des minéraux ont été rehaussées en interposant une lame de quartz sur le trajet des rayons lumineux (microphotographie en nicols croisés).***

Les structures et les textures des roches ignées

Les rapports de formes et de dimensions entre les différents minéraux ainsi que, parfois, le verre qui les entoure constituent la structure et la texture des roches ignées. On utilise souvent ces deux termes sans les différencier. En fait, le terme de *structure* désigne les rapports de formes et de dimensions entre les différents minéraux, surtout observables en lame mince au microscope, mais parfois aussi à l'œil nu sur un échantillon. Quant au terme de *texture*, il désigne certains caractères d'ensemble de la roche, déterminés par l'orientation des cristaux aplatis et lamellaires et que l'on peut observer sur des affleurements d'une certaine dimension (parfois aussi en lame mince). Signalons que les pétrographes anglo-saxons utilisent les deux termes dans des sens inverses de ceux que nous venons d'expliciter.

Les structures et textures fournissent d'intéressants renseignements sur le mode de formation des roches, c'est-à-dire sur la cristallisation et la mise en place du magma. Ainsi, grâce aux caractères structuraux et texturaux, on peut différencier les roches ignées intrusives des roches ignées effusives. La structure des roches intrusives ou plutoniques est grenue, alors que celle des roches effusives est porphyrique. Le mode de refroidissement dicte ces différences structurales : lorsqu'il est lent, comme dans le cas des roches intrusives, tout le magma cristallise; par contre, un refroidissement brusque provoque la trempe du magma, sous forme de verre, avec parfois des cristaux qui ont pris croissance en profondeur *(cristaux intratelluriques)*.

Structures des roches ignées

La structure classique des **roches plutoniques** est dite *grenue holocristalline*, la roche étant entièrement formée de cristaux de dimensions presque égales (structure *équante*). Les cristaux des différents minéraux peuvent avoir leurs formes cristallines (faces, arêtes, etc.) bien exprimées; ils sont alors appelés *idiomorphes* ou *automorphes* (structure panautomorphe). Si, par contre, leurs contours sont quelconques, on dit qu'ils sont *xénomorphes* (structure xénomorphe). Généralement, les roches ignées intrusives ont une structure *grenue* avec des minéraux automorphes qui se séparent les premiers du magma et des minéraux xénomorphes qui, plus tardifs, occupent les espaces restant entre les minéraux déjà cristallisés (par exemple, le feldspath potassique et le quartz dans le cas des roches granitiques, ce qui confirme la suite de Bowen). Une telle structure est dite aussi *hypidiomorphe*.

La structure grenue est caractéristique des roches granitiques et assimilées; de ce fait, on l'appelle *structure granitique*. Dans les aplites qui sont des roches filoniennes périplutoniques, la structure xénomorphe à grain très fin est fréquente. Dans les pegmatites qui sont des roches à conditions de gisement analogues à celles des aplites, la structure est grenue, mais à grain très grossier *(structure pegmatitique)*.

La *structure graphique* résulte de la croissance simultanée de prismes allongés de quartz et d'orthose simulant une plaque sculptée avec des caractères cunéiformes. Selon certains auteurs, elle résulterait d'une cristallisation de type eutectique binaire car le quartz et le feldspath sont présents en pourcentages pondéraux constants. La *structure micrographique* est analogue à la structure graphique mais uniquement observable en microscopie par suite de la dimension de ses cristaux. La *structure micropegmatitique* ou *granophyrique* est caractérisée par de petits cristaux de quartz et d'orthose qui ont grandi simultanément autour de phénocristaux ayant cristallisé antérieurement. La *structure granophyrique* peut aussi résulter d'une cristallisation de type eutectique à partir du dernier résidu fondu des magmas granitiques. Elle est caractéristique des granophyres qui sont des microgranites aphanitiques de semi-profondeur.

La *structure rapakivique*, typique du granite rapakivi du sud de la Finlande, est caractérisée par la présence

C. Bevilacqua

▲ ***A gauche, curieux aspect d'un granite « graphique » provenant de l'Inde (Londres, British Museum). A droite, structure micropegmatitique (croissance régulière simultanée, de quartz et de feldspath potassique) dans un granophyre de la région de Varèse. Les phénocristaux sont du quartz et du feldspath potassique (lame mince en nicols croisés).***

de porphyroblastes (phénocristaux) arrondis dont le cœur est fait d'orthose et l'enveloppe de plagioclase. La couleur rose de l'orthose ressort de manière nette par rapport à la couleur blanche de la couronne de plagioclase.

La *structure myrmékitique* s'observe parfois au contact entre des cristaux d'orthose et de plagioclase dans le cas des roches granitiques riches en éléments minéralisants. Le plagioclase avec des inclusions vermiculées de quartz pénètre le feldspath potassique avec des diverticules en forme de bourgeons. On attribue cette structure auréolée à une cristallisation de silice excédentaire libérée par la substitution à l'orthose du plagioclase (plus pauvre en silice).

La *structure pœcilitique,* que l'on rencontre dans certaines roches ignées intrusives, résulte de l'inclusion de nombreux cristaux généralement lamellaires, mais non forcément orientés, dans une plage monocristalline d'un autre minéral. Par exemple, dans certaines roches, les cristaux de pyroxènes sont si grands qu'ils forment un noyau englobant plusieurs lattes feldspathiques. Dans la *structure ophitique,* les espaces polygonaux délimités par les lattes de feldspaths sont occupés uniquement par du pyroxène. Les structures ophitique et pœcilitique sont des variétés de la *structure doléritique.*

Les *structures perthitique, microperthitique* et *antiperthitique* des feldspaths (petites faccules ou veinules de feldspath sodique dans le feldspath potassique et inversement) résulteraient d'un phénomène de séparation à basse température de ces deux minéraux, solubles entre eux à l'état solide à haute température. On attribue une origine semblable à la séparation de minéraux métalliques (oxydes de fer, etc.) sous forme de minces lamelles dans les feldspaths et les pyroxènes. Le même phénomène peut se produire entre pyroxènes orthorhombiques et pyroxènes monocliniques. Les structures que nous venons de signaler confèrent aux minéraux et aux roches qui les présentent un aspect chatoyant et irisé.

▼ **Structure porphyrique** ***d'une porphyrite dioritique à amphibole provenant de la région de Bergame (Milan, musée d'Histoire naturelle).***

C. Bevilacqua

Les **roches effusives** montrent des structures différentes de celles des roches plutoniques; ces structures permettent de reconstituer l'allure de la cristallisation dans les laves. La *structure porphyrique* résulte du contraste entre, d'une part, des cristaux de grandes dimensions, ou *phénocristaux,* automorphes qui se séparent du magma dans des conditions intratelluriques, et, d'autre part, la pâte de fond, ou *mésostase,* formée soit de verre volcanique, soit de petits cristaux, ou *microlites.* Les microlites sont le résultat d'une cristallisation rapide du bain fondu constituant la lave, par suite du refroidissement brusque qui succède à l'éruption; ils sont généralement semblables aux minéraux présents sous forme de phénocristaux, mais leur composition peut être légèrement différente, surtout dans le cas des plagioclases. Les *cristallites,* que l'on rencontre parfois dans le verre volcanique, sont des formes embryonnaires de cristaux développés quand le verre volcanique était encore fluide, mais extrêmement visqueux. Ils présentent des formes variées et sont appelés *globulites, trichites,* etc. La structure porphyrique se retrouve dans de nombreuses roches filoniennes, ainsi que dans des roches intrusives consolidées à faible profondeur (granites porphyriques), ou bien encore dans les zones périphériques des massifs granitiques où le refroidissement est plus rapide; cette structure est bien visible à l'œil nu.

La structure des roches effusives contenant du verre volcanique est appelée *structure vitreuse* si le verre est dominant, et *structure hypocristalline* si la quantité de verre est moins importante mais toujours notable par rapport à la structure holocristalline. La structure hypocristalline se confond avec la structure porphyrique fondamentale; si la mésostase est constituée essentiellement par du verre, on a une *structure hyaline,* et si les microlites sont dominants, une *structure microlitique.* La *structure trachytique* est une variante très répandue de la structure microlitique dans laquelle les microlites sont disposés avec leur plus grand allongement dans le sens de la fluidité de la lave.

La structure porphyrique est souvent moins bien exprimée dans les roches fémiques que dans les roches sialiques. La *structure intersertale* est caractéristique de certains basaltes; les microlites sont disposés d'une façon quelconque, de telle sorte qu'ils ménagent entre eux des espaces occupés par le verre. La *structure ophitique* est caractéristique des dolérites qui sont des roches subvolcaniques et filoniennes. Les espaces laissés libres par les lattes de plagioclases sont occupés par des pyroxènes

très largement cristallisés, xénomorphes par rapport aux plagioclases de la même roche.

La structure vitreuse montre au microscope optique des caractères de fluidité, soulignés par des microlites allongés ou par des bandes enrichies en oxydes de fer et plissées. La *structure perlitique* est une variante de la structure vitreuse ; le verre en refroidissant se contracte et se fissure suivant des structures concentriques en pelures d'oignon. La *structure sphérolitique* est assez voisine de la structure perlitique ; elle est formée par des sphérolites constitués par des fibres radiales de quartz et de feldspath, qui divergent à partir d'un noyau central. La structure sphérolitique est secondaire et traduit un phénomène de recristallisation du verre, par exemple, sous l'influence du passage de fumerolles. La *structure variolitique,* que l'on rencontre dans certains basaltes, est semblable à la structure sphérolitique, mais les sphérolites fibro-radiés sont noyés dans une mésostase sombre à grain très fin, essentiellement chloritique.

Textures des roches ignées

Les textures des roches ignées résultent de l'ensemble des caractères généraux observables sur un affleurement, comme l'orientation préférentielle de certains cristaux ou groupements de cristaux. La *texture tabulaire* ou *planaire* montre une stratification assez grossière, due à l'orientation préférentielle de minéraux allongés, tels que les feldspaths et les amphiboles, ou aplatis, comme les micas, ou bien d'enclaves provenant soit des roches encaissantes, soit même d'agrégats de minéraux fémiques séparés dans des stades précoces de la cristallisation. On peut confondre cette texture avec celle des roches gneissiques ; mais, en fait, elle résulte de la solidification du magma dans des conditions intrusives lorsque celui-ci, déjà partiellement cristallisé, montait parallèlement aux épontes du réservoir magmatique. Habituellement, la texture planaire est concordante avec les parois du corps intrusif. Souvent, la texture gneissique prend naissance peu après la consolidation du magma granitique. Les contraintes tectoniques exercées sur la masse rocheuse, encore à température élevée, aboutissent à sa déformation et à la recristallisation de ses minéraux.

La *texture cataclastique primaire,* que l'on rencontre dans certaines roches monominérales comme les anorthosites et les péridotites, ne résulte pas de déformations tectoniques tardives. Elle est matérialisée par la fracturation des bords des cristaux par suite d'un phénomène de friction entre les individus cristallins au moment de l'intrusion. En effet, lors de son ascension, la roche est déjà fortement cristallisée, et son déplacement au sein des roches encaissantes est rendu possible grâce à l'existence d'une mince couche liquide (fondue) intercristalline.

La *texture orbiculaire* des roches ignées intrusives résultant d'un mode de cristallisation particulier est très rare. La roche est formée par des orbicules pouvant atteindre plusieurs centimètres de diamètre. Chaque orbicule est constitué par des enveloppes concentriques, alternativement de couleur blanche (plagioclase, bytownite) et verte (amphibole fibreuse) ; la disposition des minéraux est à la fois fibro-radiée et zonée. La genèse des orbicules, qui font penser, à une échelle différente, aux oolites des roches sédimentaires, est mal connue. On peut penser à la séparation alternée de minéraux à partir d'un magma fondu autour de germes de cristallisation, ou bien par des processus métasomatiques intervenus après la consolidation de la roche.

Certaines roches intrusives ont une *texture myarolitique,* caractérisée par la présence de cavités remplies partiellement par des minéraux ayant cristallisé au cours des dernières phases de consolidation du magma. Les cavités peuvent être petites, mais atteignent parfois le décimètre, plus rarement le mètre (druses) ; elles sont tapissées de cristaux automorphes très recherchés par les amateurs de pierres. La texture myarolitique se rencontre aussi dans les roches sialiques effusives. Dans les coulées plus épaisses, les druses sont le résultat de la diminution de volume du magma par suite du refroidissement ou de la séparation de bulles de gaz retenues par la viscosité du magma.

Les *textures bulleuses* ou *vacuolaires,* engendrées par le départ des éléments volatils du magma par suite de la diminution de pression lors de l'éruption, sont très fréquentes dans les roches effusives. Dans les roches vitreuses, les bulles très petites et très rapprochées définissent la *texture ponceuse,* tandis que des cavités plus grosses déterminent la *texture vacuolaire* du sommet des coulées basaltiques où la perte des éléments volatils prédomine. La *texture amygdalaire* résulte d'un remplissage secondaire des vacuoles des roches effusives par des minéraux (calcite, zéolites) déposés par des eaux vadoses ou magmatiques. La *texture à lithophyses,* fentes concentriques analogues à celles de la structure perlitique mais de dimensions plus grandes, se rencontre dans certaines roches vitreuses acides. Les lithophyses sont remplies de minéraux secondaires bien cristallisés.

Archives photo B

C. Bevilacqua

▲ ***Aspect caractéristique de la « diorite orbiculaire » de Santa Lucia di Tallano (Corse) ; sa structure est à la fois fibro-radiée et zonée.***

Les différents types de roches ignées

LES GRANITES

Les roches ignées intrusives constituées de feldspaths alcalins et de quartz forment la famille des granites au sens large.

Le minéral caractéristique de ces roches est le quartz ; sa teneur peut varier de 20 à 40 % (de 10 à 40 % selon certains auteurs) ; sa présence traduit une cristallisation dans un milieu très riche en silice et, de manière moins importante, en alumine et en éléments alcalins (sodium et potassium). La silice, qui ne participe pas avec les éléments alcalins à l'édification des feldspaths, cristallise tardivement sous forme de quartz.

Les limites entre les différents types lithologiques de cette famille ne sont pas nettes et ne correspondent pas forcément à des différences génétiques. Très souvent,

▼ ***Un fragment de ponce dont la texture montre des bulles très petites et très rapprochées.***

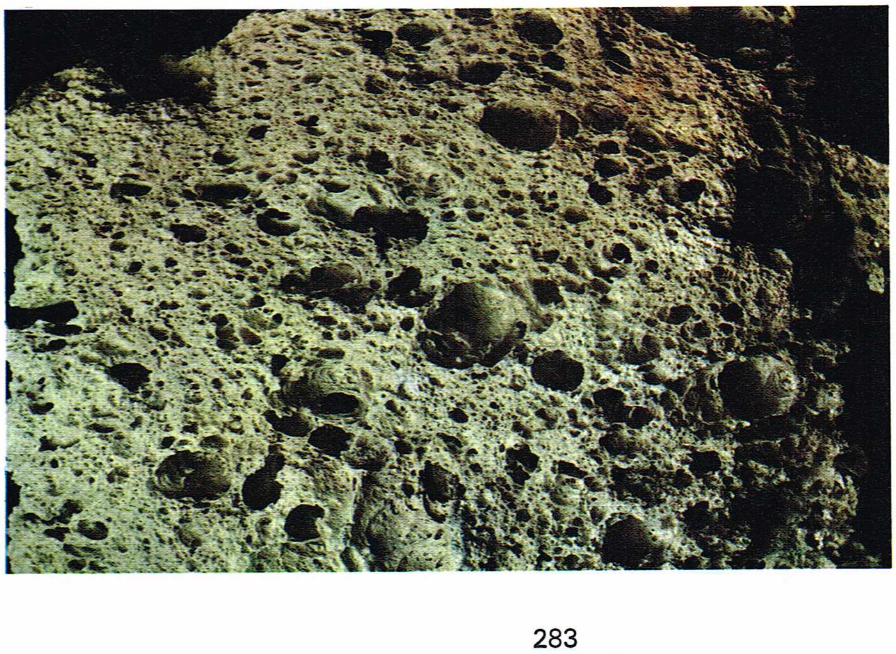

C. Bevilacqua

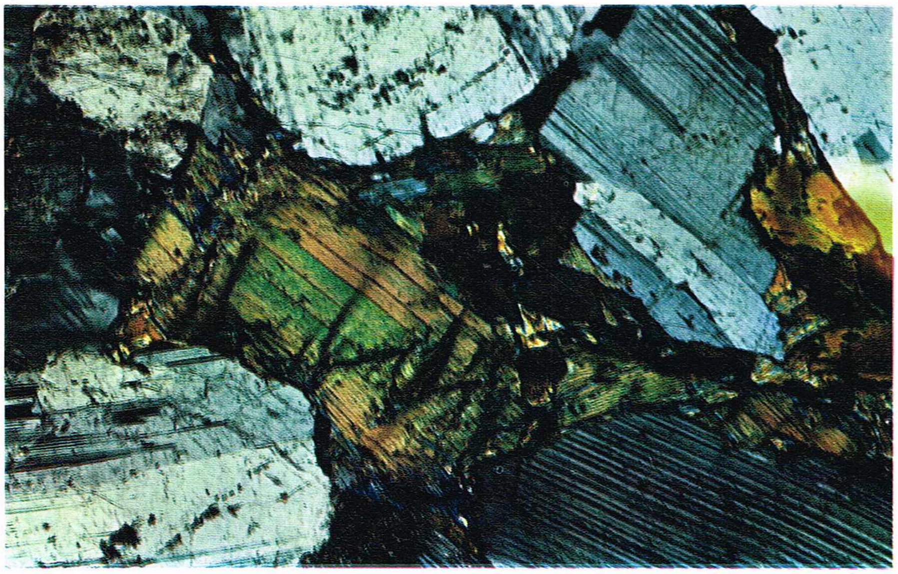

Archives photo B

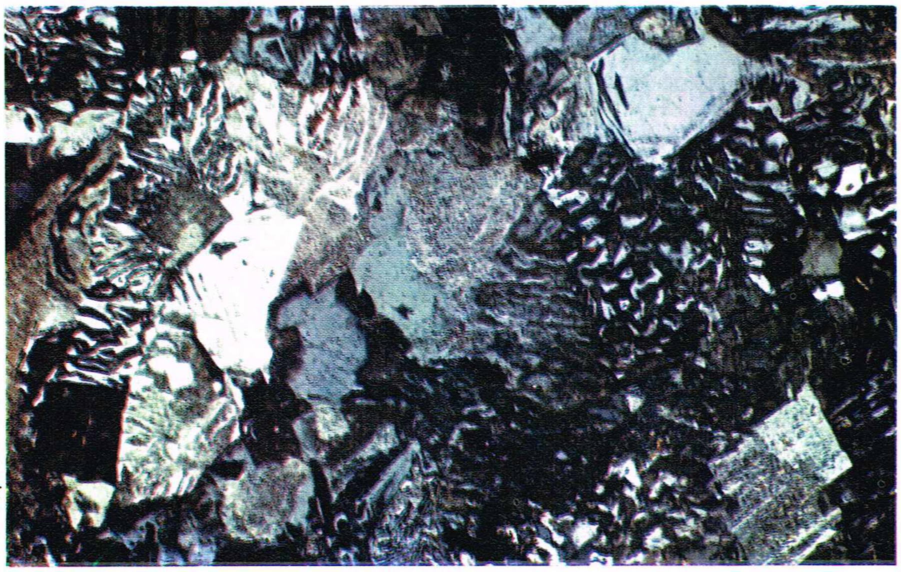

Archives photo B

▲ ***En haut,* granodiorite de l'île d'Elbe : *au centre, cristal de biotite clivé et légèrement plissé entouré de plagioclases à macle polysynthétique.* *Ci-dessus,* granophyre, *structures de type micropegmatitique correspondant à des exolutions quartz-feldspath (lames minces en nicols croisés).***

▶ ***Bloc diagramme montrant la structure d'un corps intrusif pegmatitique de Bavière (d'après Schneiderhöhn).***

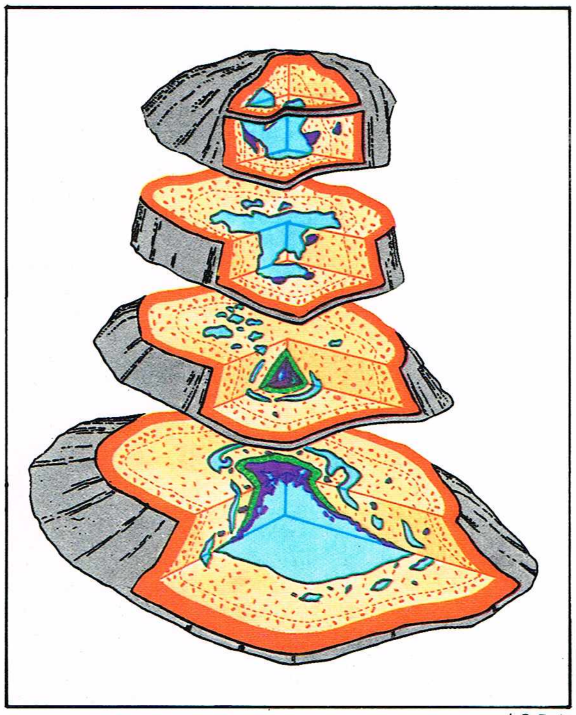

I.G.D.A.

elles traduisent des différences de cristallisation du même réservoir magmatique, dans l'espace ou dans le temps. Par exemple, le même massif peut être formé en partie par du granite, en partie par de la granodiorite.

Le quartz étant le constituant fondamental, on parle de granite si plus des 2/3 des feldspaths sont de type alcalin (orthose), le tiers restant étant un plagioclase légèrement calcique (oligoclase). Les adamellites sont caractérisées par une augmentation de la teneur en plagioclases, qui constituent 1/3 à 2/3 des feldspaths. Dans les granodiorites, le plagioclase (andésine) devient dominant par rapport au feldspath alcalin ; sa teneur dépasse les 2/3 du feldspath total. Les adamellites et les granodiorites sont caractérisées par des teneurs en quartz plus faibles que celles observées dans les granites ; le plagioclase devient plus calcique (andésine). Parallèlement, apparaissent des minéraux ferromagnésiens, comme la biotite et l'amphibole, qui marquent la transition vers les diorites. Les minéraux accessoires, tels l'apatite et le sphène, traduisent le caractère calcique de ces roches ; on rencontre aussi du zircon et de la magnétite ; quelques paillettes de mica blanc (muscovite) subsistent parfois.

Les **granites proprement dits** se subdivisent en granites normaux et en granites alcalins et hyperalcalins.

● Dans le cas des *granites normaux,* les deux feldspaths peuvent cristalliser simultanément (dans ce cas il s'agit de perthite orthose-albite) ou séparément sous forme d'individus cristallins isolés. Les granites caractérisés par des feldspaths perthitiques se forment par refroidissement rapide d'un magma intrusif dans les niveaux supérieurs de l'écorce terrestre. Les granites à deux feldspaths, par contre, se forment à partir d'un magma qui se refroidit lentement en profondeur. La démixtion entre feldspath sodique et feldspath potassique s'effectue progressivement avec cristallisation d'individus séparés. Le feldspath potassique est en général l'orthose ; on rencontre plus rarement le microcline. Le feldspath sodique n'est que rarement une albite pure ; le plus souvent, il s'agit d'oligoclase, plagioclase légèrement calcique. Pour cette raison, les granites normaux sont aussi appelés *granites calco-alcalins.* Le quartz cristallise en dernier sous forme de cristaux *xénomorphes* qui occupent les espaces libres entre les feldspaths et les micas. Il est caractérisé par la présence d'aiguilles submicroscopiques de rutile (TiO_2) et par des petites cavités (10 à 50 μm) remplies de fluides à l'état liquide et gazeux (H_2O, CO_2). Parfois, les inclusions fluides montrent, dans une cavité essentiellement remplie d'eau à l'état liquide, une bulle de vapeur agitée par un mouvement brownien. Les inclusions fluides qui se forment au moment de la croissance du cristal sont dites primaires, ou syngénétiques ; celles qui se forment après la cristallisation du quartz, par suite de fractures dues à des contraintes tectoniques par exemple, sont dites secondaires, ou épigénétiques. Les inclusions fluides fournissent des renseignements intéressants sur la température et la pression au moment de la cristallisation ainsi que sur la composition chimique des fluides générateurs. C'est pourquoi la discipline qui étudie les lacunes de cristallisation et leur remplissage prend le nom de *géothermobarométrie.*

— Les granites pauvres en éléments ferromagnésiens sont appelés **leucogranites,** ou granites clairs, car ils sont formés essentiellement de minéraux blancs et transparents.

— D'autres granites, par contre, contiennent des minéraux ferromagnésiens et parfois même des pyroxènes. Les granites à deux feldspaths contenant quelques % de pyroxène orthorhombique (orthopyroxène) et de pyroxène monoclinique, de l'amphibole, de la biotite, parfois des grenats, prennent le nom de **granites charnockitiques,** ou **charnockites.** Les charnockites sont des roches acides de type intrusif, très répandues dans les complexes métamorphiques précambriens. Aux termes sialiques s'associent souvent des termes de type intermédiaire et de type fémique. Les charnockites sont caractérisées par la présence de pyroxène orthorhombique ; le feldspath le plus abondant est le microcline ; le quartz contient, dans ces roches, de très fines aiguilles de rutile. Les *adamellites charnockitiques* et les *granodiorites charnockitiques,* que l'on appelle aussi *enderbites* car elles sont très bien représentées dans la région d'Enderby en Antarctide, sont des charnockites caractérisées par la présence de plagioclase. Les relations entre les charnockites et les roches

avoisinantes sont difficilement étudiables du fait du métamorphisme très intense qui les affecte.

● Les *granites alcalins* sont caractérisés par la présence de plagioclase sodique : l'albite ou bien l'antiperthite, c'est-à-dire une albite contenant des faccules d'orthose. Les minéraux qui accompagnent le quartz et les feldspaths sont un pyroxène sodique (ægyrine) et de l'amphibole sodique (riébeckite), qui remplacent la hornblende et la biotite des granites normaux. Les roches filoniennes pegmatitiques s'associent fréquemment aux granites sodiques. Elles se forment au cours des stades tardifs de consolidation du magma, notamment pendant le stade pneumatolytique, et sont caractérisées par des concentrations parfois exploitables de minéraux rares comme la fluorine, la chryolite, les minéraux des terres rares et les minéraux radio-actifs.

Les **adamellites** sont des roches intrusives analogues aux granites, mais où le plagioclase est présent en pourcentages analogues au feldspath potassique. Leur nom provient du massif de l'Adamello (Alpes).

Les **granodiorites** sont les roches les plus répandues parmi les roches grenues intrusives; elles ressemblent beaucoup aux granites, et un simple examen macroscopique ne suffit pas pour les différencier des granites. Le feldspath dominant volumétriquement est le plagioclase de type oligoclase-andésine; le quartz est toujours présent en teneurs avoisinant 20 %. Par diminution progressive du quartz, on passe aux roches de type *tonalite,* qui appartiennent à la famille des diorites. Les **trondhjemites** sont des roches formées par un plagioclase (oligoclase-andésine), du quartz, mais totalement dépourvues de feldspath potassique. Elles peuvent contenir un peu de biotite et de la hornblende.

Les **microgranites,** anciennement appelés **porphyres,** sont des roches de compositions chimique et minéralogique analogues à celles des granites. Ils se distinguent de ces derniers par leur structure porphyrique ou microgrenue. Les roches résultent de la cristallisation du magma granitique dans des conditions filoniennes ou subvolcaniques. Il ne faut pas confondre les microgranites avec les rhyolites, qui sont des roches effusives résultant de la cristallisation du magma granitique en surface, donc sous forme de coulées. Anciennement, les microgranites, caractérisés par la présence de quartz automorphe, étaient appelés *porphyres quartzifères,* ou *microgranulites,* et les microgranites aphanitiques étaient désignés sous le nom de *porphyres pétrosiliceux,* ou *pétrosilex*. Les granites porphyriques sont caractérisés par une structure grenue normale et par de très gros cristaux (phénocristaux) de feldspath alcalin, ou porphyroblastes.

Les **granophyres** sont des granites porphyriques subvolcaniques caractérisés par une structure micropegmatitique (structure micrographique) et sphérolitique. Les proportions respectives de quartz et feldspaths correspondent au point eutectique du système quartz, orthose, albite. Leur structure est analogue à celle de certains alliages métalliques qui représentent des systèmes eutectiques à plusieurs composants.

Les **pegmatites** et les **aplites** sont des roches filoniennes accompagnant très fréquemment les roches granitiques. Les pegmatites se présentent sous forme de filons trapus, ou sous forme de lentilles ou poches à contours irréguliers. Elles sont localisées soit dans la bordure de l'intrusion granitique, soit dans les roches encaissantes avoisinantes. Leur structure montre des grains très gros, et certains cristaux ont des dimensions qui peuvent dépasser la dizaine de centimètres. Leur composition minéralogique est analogue à celle des granites; le feldspath (orthose, microcline, albite) se présente sous forme de larges plages contenant des cristaux de quartz prismatiques disposés parallèlement les uns par rapport aux autres (structure graphique). Les minéraux riches en éléments volatils (Cl, B, F) sont caractéristiques des roches pegmatitiques; le mica blanc est souvent une muscovite lithinifère (lépidolite); les autres minéraux riches en lithium sont le spodumène, la tourmaline, la fluorine et l'apatite; on rencontre aussi de la cassitérite, du béryl, de la wolframite, ainsi que de nombreux minéraux riches en éléments radio-actifs et en terres rares.

Les *pegmatites* sont généralement subdivisées en deux catégories en fonction de leur richesse en minéraux accessoires : les pegmatites simples et les pegmatites complexes. On constate que les pegmatites liées à une seule intrusion granitique ont une composition minéralogique constante. Dans le cas des pegmatites complexes, la structure est concentrique zonée. La partie la plus périphérique, d'épaisseur limitée, présente une structure et une composition aplitiques. Dans l'enveloppe plus interne, le grain de la roche augmente progressivement et l'on observe l'apparition de minéraux accessoires, parfois en concentrations exploitables. Les principaux minéraux de cette zone sont le mica muscovite et le béryl. Les minéraux métallifères sont concentrés dans la troisième enveloppe, qui est parfois absente dans certaines pegmatites. Les minéraux contiennent des éléments recherchés par l'industrie, comme l'uranium, le thorium, le lithium, le césium, le tantale, le niobium et certaines terres rares. Le noyau central est souvent formé de quartz, parfois associé à de l'orthose, mais dépourvu de minéraux accessoires. Les pegmatites résultent de la cristallisation du résidu fluide qui reste après la cristallisation de la majeure partie du corps intrusif magmatique. C'est la raison pour laquelle dans le réseau cristallin des minéraux qui apparaissent à ce stade, on trouve des éléments volatils (OH, Cl, F) et d'autres éléments (béryllium, bore, rubidium, césium, etc.), qui, du fait de leur rayon ionique très important, ne peuvent entrer dans le réseau des minéraux formés pendant le stade orthomagmatique. Les dimensions très importantes des cristaux de pegmatites pourraient être le résultat d'une viscosité très basse du bain silicaté d'une part, et de son renouvellement continuel d'autre part. Les actions métasomatiques, c'est-à-dire le remplacement de certains minéraux déjà existants

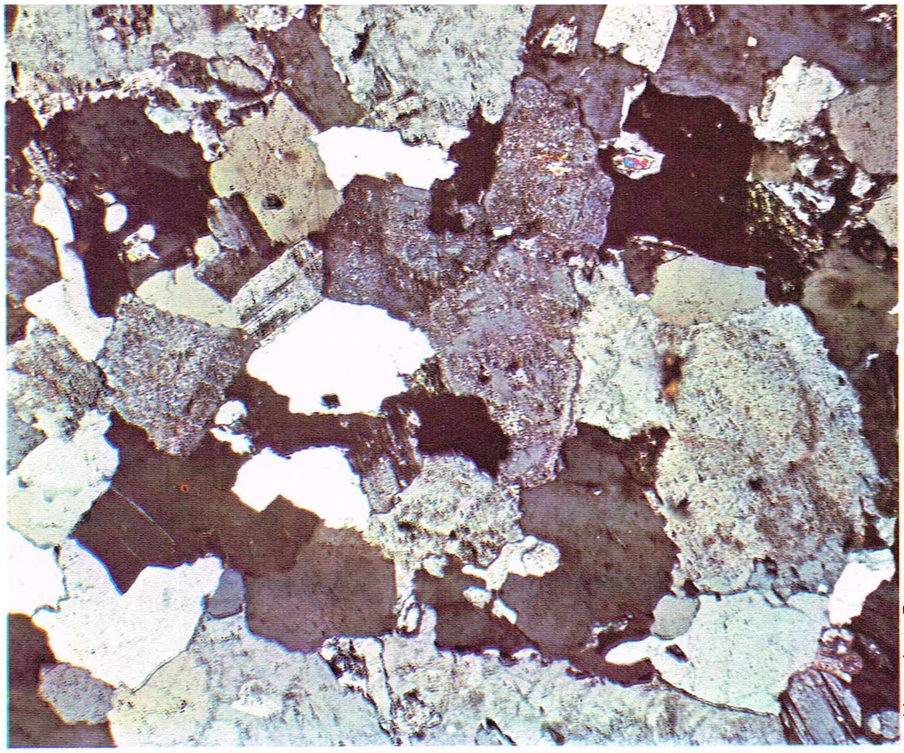

Archives photo B

C. Bevilacqua

▲ ***En haut,*** **une aplite :** ***cristaux de quartz (très limpides) et feldspaths alcalins (avec petites inclusions de séricite); la roche a une structure microgrenue xénomorphique. On notera l'absence de minéraux ferromagnésiens accessoires (lame mince en nicols croisés). Ci-dessus,*** **une pegmatite à sodalite** ***(Canada); la sodalite est bleue tandis que le feldspath alcalin est blanc laiteux (Londres, British Museum).***

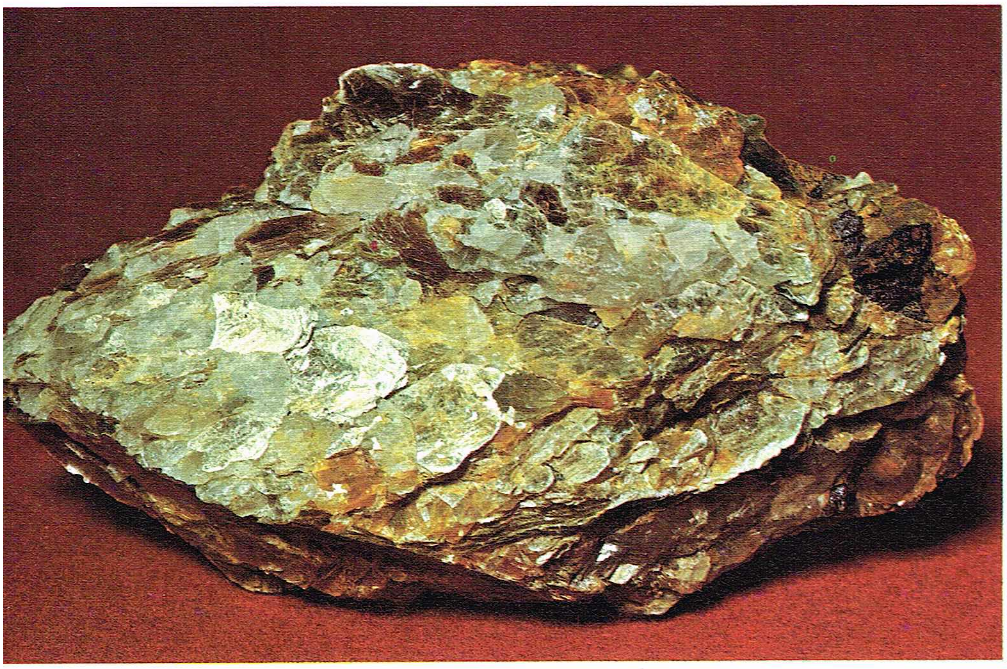

C. Bevilacqua

▲ **Greisen** *provenant du sud du Dakota (États-Unis); le minéral dominant est la muscovite avec des quantités accessoires de quartz et de minéraux métallifères.*

▼ *A gauche,* **luxullianite** *(Luxullian, Cornouailles); la tourmaline est présente sous forme d'agrégats fibro-radiés qui forment des gerbes très colorées. On y remarquera des cristaux de quartz presque automorphe; celui-ci peut pseudomorphoser l'orthose (lame mince en nicols croisés). A droite, une* **luxullianite**, *roche assez peu répandue, correspondant à un granite à tourmaline (zone sombre); l'orthose est le minéral rose.*

par d'autres nouvellement formés à la suite d'un apport de matière, sont parfois évidentes; ainsi, les pegmatites complexes contiennent de l'albite qui se forme par remplacement de microcline cristallisé dans un stade antérieur. Les pegmatites peuvent montrer des cavités myarolitiques résultant de la dissolution de certains minéraux. Une pegmatite du Dakota (États-Unis) contient des cristaux de spodumène qui atteignent 15 m de long, des béryls de 6 m et des feldspaths (microcline) dont le diamètre dépasse 1 m.

Les *aplites* sont des roches de composition granitique qui se présentent en filons d'épaisseur peu importante au cœur ou à la bordure des massifs granitiques. Elles se forment simultanément aux pegmatites à partir des derniers jus résiduels et montrent une structure microgrenue composée de quartz et feldspath. Les minéraux ferromagnésiens y sont très peu représentés. Les variétés très riches en quartz passent progressivement aux filons monominéraux de quartz hydrothermal. Les aplites se placent préférentiellement à la bordure ou au cœur des filons pegmatitiques, et le filon aplitique renferme parfois des poches irrégulières de pegmatite. Ce phénomène montre nettement que l'aplite et les pegmatites résultent de la cristallisation d'un même résidu fluide, les différences minéralogiques étant dues aux variations des teneurs en éléments volatils des fluides générateurs.

Les **lamprophyres** sont des roches filoniennes fémiques qui peuvent accompagner les pegmatites et les aplites. Ils se forment aussi par différenciation de bains résiduels tardifs et sont très riches en minéraux sombres, comme la biotite et la hornblende. Les lamprophyres seront étudiés en particulier ultérieurement.

La composition minéralogique et la structure des granites peuvent être modifiées après solidification des minéraux silicatés par la pénétration de fluides résiduels. Les fluides sont composés essentiellement de vapeur d'eau à l'état hypercritique ou d'un liquide à température élevée associé à d'autres éléments volatils. Les fluides traversent la masse cristallisée et se dispersent à travers les fissures des roches encaissantes. Leur passage est marqué par un ensemble de réactions métasomatiques qui aboutissent à la modification de la composition chimique et minéralogique de la roche traversée. Les réactions entre certains éléments des minéraux préexistants et les éléments des fluides métasomatiques, ainsi que l'entraînement de certains éléments par les fluides et leur remplacement, aboutissent à la formation de nouveaux minéraux. L'ensemble de ces phénomènes est désigné par le terme d'*autométasomatisme*.

Les **greisens** sont des roches formées par du quartz et de la muscovite (cette dernière provenant généralement de la modification pneumatolytique des feldspaths). Ils se placent en bordure des massifs granitiques et montrent des conditions de gisement de type intrusif et filonien. Dans ce dernier cas, ils peuvent résulter de la différenciation tardive d'un massif granitique très sialique, suivie d'un phénomène d'autométasomatisme. Dans d'autres cas, les filons présentent des conditions de gisement analogues à celles des pegmatites et sont vraisemblablement d'origine primaire. Ils résultent donc de la cristallisation d'un fluide de nature pegmatitique-pneumatolytique très riche en vapeur d'eau à l'état hypercritique. Mais, le plus souvent, le greisen constitue une enveloppe d'altération des massifs granitiques et se trouve associé à de nombreux filons de quartz d'origine pneumatolytique et hydrothermale parfois minéralisés. Les greisens, à proximité des filons minéralisés, peuvent contenir des variétés de micas lithinifères ou fluorifères, comme la zinnwaldite, avec d'autres minéraux pneumatolytiques, comme la fluorine et la topaze.

La **luxullianite,** ou granite à tourmaline, est aussi considérée comme une roche d'origine autométasomatique. L'observation microscopique montre que la tourmaline, qui se présente en agrégats fibro-radiés, remplace d'abord la biotite, puis le feldspath. Il existe aussi des roches grenues formées uniquement de quartz et de tourmaline, qui ne résultent pas de la transformation de roches préexistantes, mais de la cristallisation d'un résidu magmatique enrichi en éléments volatils, notamment en composés borés. L'autométasomatisme hydrothermal peut se traduire dans certaines roches granitiques par la transformation du feldspath potassique en kaolinite

Archives photo B

Archives photo B

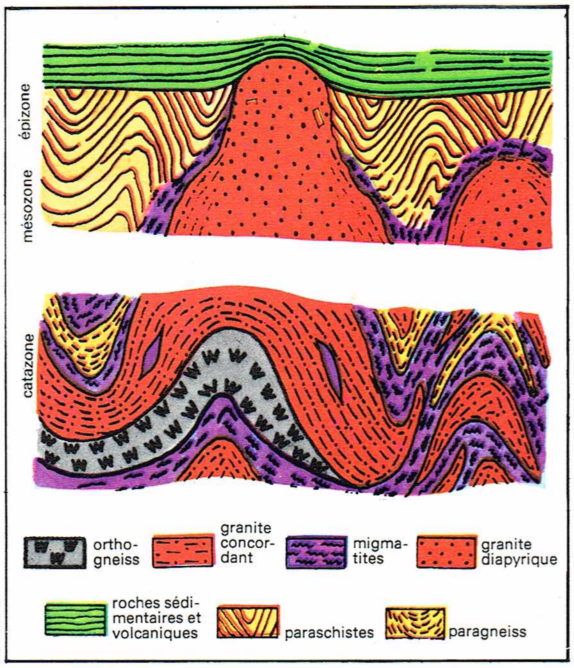

I.G.D.A.

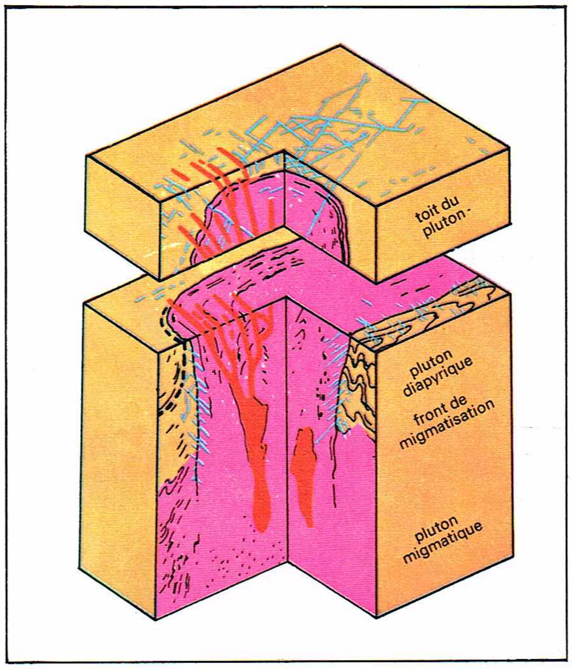

I.G.D.A.

◄ *A gauche, schéma théorique montrant les différences entre les conditions de gisement des granites intrusifs diapyriques ou granites circonscrits (en haut), et les granites concordants (en bas) [d'après Buddington]. Dans le premier cas, le pluton recoupe les strates à l'emporte-pièce ; dans le second, il y a concordance et passage progressif entre les différents faciès. A droite, batholite granitique concordant d'origine migmatique, à partir duquel débute l'ascension d'un pluton diapyrique discordant par rapport aux roches encaissantes qui montrent, au contact, de nombreuses fractures dans lesquelles s'injecte le magma (d'après Cloos).*

(minéral argileux) ; l'albite est moins sensible à l'altération hydrothermale. Une partie du potassium libéré par le réseau cristallin de l'orthose se recombine pour former un minéral phylliteux voisin de la muscovite : la séricite.

Origine des roches granitiques

La théorie de l'origine des roches acides de type granitique par cristallisation d'un magma intrusif, à l'état fluide ou au moins partiellement, a été, et est encore de nos jours, refusée par un certain nombre de chercheurs. Ces derniers pensent, en effet, que les principales intrusions granitiques sont le résultat d'une transformation métasomatique à l'état solide de roches préexistantes. Les partisans des deux explications, appelés les « magmatistes » et les « transformistes », apportent différents arguments à l'appui de leurs hypothèses.

Généralement, les granites sont subdivisés en deux grands types.

Les granites du premier groupe sont caractérisés par des limites très nettes avec les roches encaissantes qui montrent une auréole de métamorphisme bien délimitée. La transition entre pluton granitique et encaissant s'effectue en quelques mètres, même dans le cas de massifs très importants. Ces granites montrent des contours nettement discordants par rapport à la tectonique générale des roches encaissantes qu'ils recoupent à l'emporte-pièce. Pour les différentes raisons signalées, les *granites intrusifs*, ou *granites diapyriques*, sont presque toujours considérés comme étant d'origine magmatique. Leur ascension dans les niveaux supérieurs de l'écorce terrestre a eu lieu après les principales phases tectoniques, d'où leur désignation de *granites post-tectoniques*.

Les granites du second groupe montrent des limites très floues, et le passage aux roches encaissantes se fait de manière progressive par le biais d'une large bande de *migmatites*. Celles-ci sont des roches constituées partiellement par du matériel granitique et des résidus de roches préexistantes intimement mélangés. Les roches encaissantes sont affectées par un intense métamorphisme régional que l'on retrouve dans le granite même, sous forme d'une texture de type gneissique (orientation préférentielle de certains minéraux). Les contours des *granites anatexiques* sont généralement concordants avec la tectonique des roches encaissantes. Les *granites concordants* se forment probablement dans les zones profondes de l'écorce terrestre, contemporainement aux déformations orogéniques (d'où leur nom de *granites syntectoniques*), par injection de magma et cristallisation sous une pression orientée (selon les magmatistes) ou bien par métasomatisme de roches préexistantes (selon les transformistes).

La difficulté théorique qui s'oppose au phénomène intrusif est la nécessité de trouver la place utile au pluton parmi les roches encaissantes. Les injections forcées avec dislocation de l'encaissant sont bien connues dans le cas des laccolites ; cependant, très souvent, on n'observe aucune déformation attribuable à la montée de la masse granitique. Selon R.A. Daly, le pluton peut s'injecter, même dans ce cas, car il y aurait *effondrement* du toit de l'encaissant sous forme d'énormes blocs qui seraient plus ou moins assimilés par le magma. Le phénomène peut s'observer fréquemment à la bordure des massifs granitiques.

La théorie transformiste par métasomatisme à l'état solide ainsi que la théorie par fusion partielle ou différentielle (anatexie) de certains minéraux à point de fusion très bas (quartz et feldspaths) et leur recristallisation *in situ* ne rencontrent pas l'objection du volume déplacé. Certains granites intrusifs montrent une texture orientée, et les cristaux allongés de biotite et d'amphibole se disposent parallèlement aux contours du massif, surtout dans sa bordure. On admet, dans ce cas, que le magma était à l'état liquide et que des minéraux déjà cristallisés

▼ **Greisen,** *provenant de Zinnwald (Erzgebirge), observé en nicols croisés. Les greisens sont des roches associées aux intrusions granitiques et formées essentiellement de quartz et de muscovite (mica blanc) ; cette dernière est présente sous forme de cristaux lamellaires caractérisés par une teinte de biréfringence de premier ordre (couleurs vives, jaune, rouge et bleu) [Milan, musée d'Histoire naturelle].*

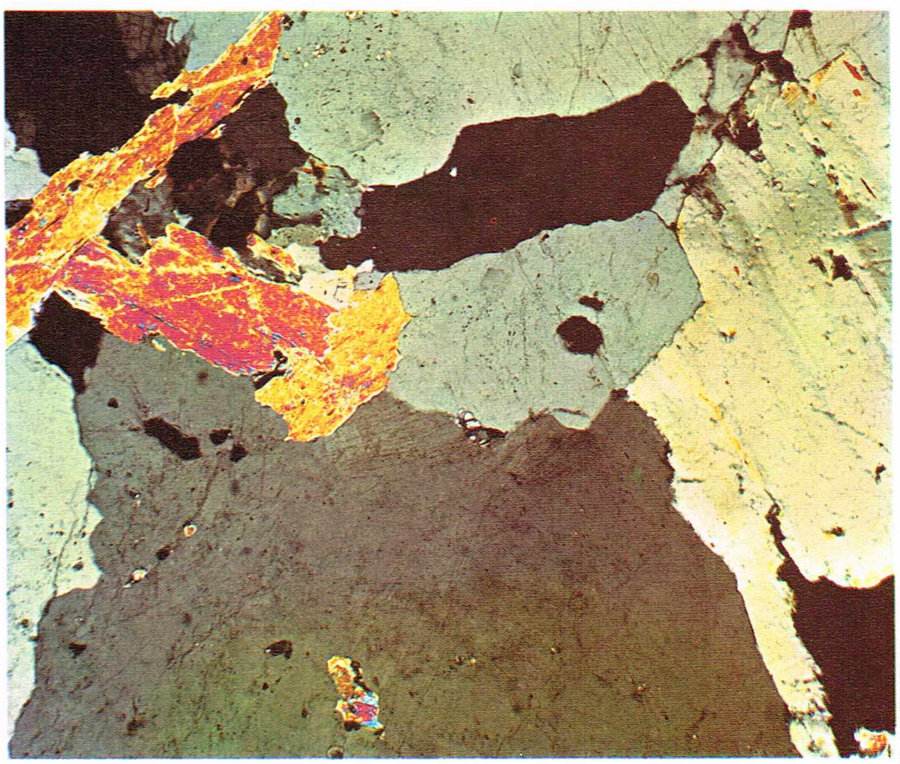

C. Bevilacqua

▶ *Page ci-contre, en haut, à gauche,* diorite *de Reichenbach (Saxe) : le plagioclase maclé est nettement dominant et partiellement transformé en saussurite; on reconnaît, en outre, de la hornblende (brune) et de la biotite, caractérisée par des teintes vives et un clivage très net, parallèle à son allongement (lame mince en nicols croisés). A droite, aspect macroscopique d'une* diorite.

ont été repoussés parallèlement aux parois de la chambre magmatique. Cette texture ne correspond pas, en général, à la schistosité des roches encaissantes ; elle n'est donc pas d'origine métamorphique.

Les variations de compositions chimique et minéralogique que l'on peut observer au contact entre le granite et la roche encaissante ont été interprétées différemment par les deux écoles.

Lorsqu'une intrusion granitique affecte un encaissant formé de roches ignées ou métamorphiques basiques (gabbros, amphibolites), au niveau du contact des minéraux des roches acides apparaissent des plagioclases sodiques, des feldspaths potassiques et du quartz. La composition chimique du granite change aussi, surtout dans sa bordure, où elle devient analogue à celle des tonalites et des granodiorites. Cela est dû à un phénomène de *contamination* réciproque. On pense que pour la roche encaissante les modifications se font à l'état solide, avec un apport d'éléments alcalins et de silice provenant du magma ; de la même façon, certains éléments des roches encaissantes comme le fer et le magnésium migrent vers le magma granitique. Les roches calcaires au contact des granites intrusifs sont transformées en *skarn,* ou *marbres à minéraux,* très riches en silicates de calcium, de fer et de magnésium. Aussi, dans ce cas, on a une migration d'éléments du magma vers l'encaissant. Au cours de ces échanges, le magma granitique peut s'appauvrir en silice ; et s'enrichir par conséquent en autres oxydes (notamment, la teneur en alcalins croît) ; il s'ensuit qu'au contact des roches calcaires, des syénites peuvent cristalliser avec des pyroxènes, des amphiboles sodiques et des feldspathoïdes.

La contamination réciproque entre encaissant et magma granitique peut être en accord avec l'origine du granite à l'état liquide ; on observe, en effet, le même phénomène dans le cas des roches basiques, dont l'origine magmatique ne fait aucun doute. Par ailleurs, les mêmes phénomènes sont expliqués de manière différente par les partisans de la théorie métasomatique. L'étude minéralogique et chimique détaillée du contact granite-roche encaissante a permis de quantifier la contamination réciproque par le biais des « gradients géochimiques ». La première modification de la roche initiale est une diminution de la teneur en silice qui traduit une « feldspathisation » des roches riches en quartz (notamment des grès) ou une introduction de fer, de magnésium et de calcium. La teneur en éléments alcalins augmente dans cette première phase ; il en est de même pour le fer et le magnésium, ainsi que pour les éléments caractéristiques des roches granitiques, comme le titane, le phosphore et le manganèse.

Selon les partisans de la théorie transformiste, les éléments légers (sodium, potassium) proviendraient des niveaux profonds de l'écorce terrestre. Leur migration pourrait s'effectuer à travers les cristaux des roches préexistantes, mais surtout le long des surfaces de discontinuité comme les intergrains. Le front de granitisation provoque des variations minéralogiques dans les roches qu'il traverse ; elles acquièrent, notamment, une composition chimique assez proche de celle du granite. Certains éléments, par contre, sont expulsés des roches granitisées et forment un front fémique (fer, magnésium, calcium) qui précède le front de granitisation et transforme temporairement les roches traversées en roches basiques. Ce fait est en accord avec la présence de concentrations de minéraux ferromagnésiens en bordure des plutons granitiques. Par ailleurs, l'auréole de métamorphisme de contact des plutons granitiques ne montre aucune trace de métasomatisme, c'est-à-dire d'échange de substances (apport et départ), mais seulement un métamorphisme thermique sans modification de la composition chimique initiale des roches.

Par ailleurs, certains phénomènes qui varient de manière progressive semblent appuyer l'hypothèse de l'école transformiste. Parfois, les roches métamorphiques qui entourent les granites (roches encaissantes) sont riches en gros cristaux de feldspath potassique (orthose), analogue à celui que l'on rencontre sous forme de phénocristaux dans le granite au voisinage de la zone de contact et entre les enclaves des roches préexistantes. Ce phénomène pourrait résulter de la « feldspathisation » de la roche préexistante à l'état solide par diffusion des ions potassium ou bien à la faveur de solutions pneumatolytiques provenant du magma en voie de cristallisation.

Dans les régions formées essentiellement de roches sédimentaires intensément transformées par un métamorphisme régional, on trouve souvent des massifs granitiques stratiformes qui passent latéralement à des grès métamorphisés (quartzites). Cette observation a poussé certains chercheurs à émettre l'hypothèse que le granite provient de la fusion partielle de roches de compositions minéralogique et chimique analogues à celles du granite, ou bien que la granitisation métasomatique correspondant à un apport d'éléments alcalins et d'alumine affecte préférentiellement les roches d'origine gréso-sableuse. Même dans ce cas, il peut s'agir d'une intrusion de magma ayant suivi certains niveaux, qui seront fondus et assimilés de manière sélective. Souvent, on constate que les granites stratiformes englobent des lentilles et des strates de roches dont la composition est très différente de celle du granite.

L'existence de magmas granitiques fluides est prouvée par les effets du métamorphisme thermique (thermométamorphisme) sur l'encaissant, par l'aspect de la bordure des massifs granitiques caractérisés par des roches à structure microgrenue résultant d'un refroidissement rapide, et enfin par les conditions de gisement de type filonien. La composition chimique des plutons granitiques correspondant à l'eutectique quartz-orthose-albite (c'est-à-dire au mélange qui reste le plus longtemps fluide pendant le refroidissement), l'homogénéité chimique des masses granitiques, l'analogie de composition avec les roches effusives acides (rhyolites) qui se forment par refroidissement à la surface de la Terre sont autant d'arguments en faveur de l'hypothèse d'une origine magmatique.

D'après les travaux du géologue finlandais P. Eskola et du Suisse C. Wegmann, une série d'hypothèses relie la formation des massifs granitiques à d'importants phénomènes métamorphiques très profonds (20 à 30 km) qui peuvent être étudiés là où la tectonique et l'érosion ont amené les couches les plus profondes de l'écorce terrestre à l'affleurement. Bien que différentes dans les détails, ces théories concordent et admettent l'origine du magma granitique par fusion sélective de roches préexistantes amenées par des phénomènes de subsidence dans des zones où la pression et la température (environ 700 °C) permettent la fusion des minéraux sialiques.

Une partie du *migma* ainsi formé cristallise *in situ* et donne naissance aux migmatites formées par des résidus non fondus des roches préexistantes (minéraux fémiques à haut point de fusion) et par des veines de minéraux sialiques fondus et recristallisés. Là où la fusion ou l'anatexie (fusion partielle) est la plus intense, il se forme un *magma d'anatexie,* c'est-à-dire une masse mobile fondue formée par un mélange de minéraux sialiques fondus et par des minéraux fémiques qui ont résisté à la fusion. Le magma anatectique peut s'injecter dans les roches susjacentes, former des granites intrusifs discordants par rapport aux roches encaissantes et cristalliser à proximité du lieu où s'effectue la fusion différentielle. Généralement, les granites qui se forment dans les zones profondes de la croûte terrestre sont concordants avec les roches encaissantes, auxquelles ils passent progressivement par le biais de vastes régions migmatitiques. Granites et roches encaissantes contiennent des minéraux stables aux pressions élevées ; tous les deux se sont donc formés à grande profondeur.

Une partie du magma anatectique, avec une quantité plus ou moins importante de minéraux non dissous (résidus de fusion), peut migrer dans des niveaux plus élevés que ceux où s'effectue la fusion et s'injecter de manière discordante dans les roches préexistantes. Dans ce cas, les roches encaissantes montrent un métamorphisme régional d'intensité moindre par rapport à celui des gneiss qui bordent les granites concordants. Les intrusions de magma granitique peuvent être précédées ou accompagnées de la formation de magmatites qui résultent de l'injection de petites quantités de magmas et non de l'anatexie et de la recristallisation *in situ* de minéraux à bas point de fusion. On peut aussi admettre l'existence de fronts métasomatiques créés par la migration d'éléments légers (métaux alcalins, silicium), par diffusion ionique ou bien par pneumatolyse, provenant du magma et responsables de la granitisation des roches encaissant les intrusions granitiques. On attribue une origine de ce type aux massifs circonscrits, dont l'origine magmatique est universellement reconnue.

Un certain nombre de chercheurs s'opposent à la théorie générale exposée ci-dessus. Selon eux, la majeure partie des granites se formerait par un phénomène métasomatique de roches préexistantes, et cela uniquement par diffusion ionique à l'état solide. Néanmoins, cette théorie n'est pas encore appuyée par des arguments suffisamment solides pour être retenue.

LES DIORITES

Les diorites sont des roches de compositions chimique et minéralogique intermédiaires entre celles des granites et celles des gabbros. Elles sont formées essentiellement par un plagioclase acide (sa composition est enrichie en sodium), de type oligoclase ou andésine. Dans le cas des gabbros, par contre, le plagioclase est enrichi en calcium et se situe près du pôle anorthitique (labrador ou bytownite). Le plagioclase des diorites est souvent zoné. L'amphibole verte est le minéral ferromagnésien caractéristique des diorites, alors que dans les gabbros on trouve des pyroxènes. Dans les gabbros, on peut parfois trouver de l'amphibole; mais, dans ce cas, elle provient de la transformation du pyroxène, qui peut être seul ou accompagné par de l'olivine. Dans les diorites, on rencontre fréquemment de la biotite et parfois de petites quantités de pyroxènes; l'olivine est toujours absente. Il peut y avoir des quantités accessoires de quartz, qui deviennent de plus en plus importantes lorsque l'on se rapproche de la famille des granites. Le pourcentage de minéraux ferromagnésiens par rapport aux plagioclases est variable; généralement, les plagioclases dominent nettement. On connaît, en plus des diorites normales formées par du plagioclase et de l'amphibole, des diorites dont la composition chimique est un peu particulière.

Les **tonalites,** ainsi appelées car on les trouve dans les Alpes de Tonale, sont des diorites quartziques, qui contiennent, en plus du plagioclase (oligoclase-andésine), de la hornblende, de la biotite ainsi que de petites quantités de quartz (moins de 10 %) et de feldspath potassique. Leur composition minéralogique est très voisine de celle des granodiorites, dont elles se différencient surtout par les teneurs plus faibles en quartz et par la présence de feldspath potassique.

Les **hornblendites** sont des roches extrêmement rares, formées presque uniquement de gros cristaux de hornblende dans des conditions de type pegmatitique. Elles peuvent représenter le résultat de différenciations locales de magmas dioritiques et se présentent en niveaux stratifiés, comme les pyroxénites et certaines péridotites. Parfois, elles résultent de la métasomatose de roches originellement pyroxéniques.

La célèbre **diorite orbiculaire** de Corse, ou **corsite,** se caractérise par sa texture. Les minéraux sont disposés d'une manière à la fois zonaire et fibro-radiée. Le plagioclase est une bytownite (80 % d'anorthite, donc très calcique), ce qui fait que cette roche peut être considérée comme un gabbro, et l'amphibole est une ouralite fibreuse.

Les **anorthosites** sont des roches très rares, formées principalement par du plagioclase. Leur nom prête à confusion : en effet, ce ne sont pas des roches à plagioclase anorthose, mais des roches dépourvues *(an-)* d'orthose. Leur origine et leur mode de formation sont encore mal connus.

La **plumasite,** dont le nom dérive d'une localité de Californie, est une roche filonienne composée d'oligoclase et de corindon. Des roches analogues sont connues dans les grands boucliers précambriens de Scandinavie, d'Amérique du Nord et d'Afrique du Sud où elles présentent des structures de type pegmatitique par la texture des grains et la zonation minéralogique des filons.

LES GABBROS ET LES ROCHES INTRUSIVES BASIQUES ET ULTRABASIQUES

Les roches intrusives basiques et ultrabasiques sont formées d'un ou de plusieurs minéraux appartenant à la famille des plagioclases basiques, de pyroxènes, d'olivine, et de quantités accessoires de chromite, d'ilménite et de magnétite.

Dans les gabbros, le *plagioclase* est le minéral cardinal, accompagné par d'autres minéraux; si le plagioclase est absent, on a des roches intrusives ultrabasiques, formées uniquement de pyroxènes et d'olivine, seuls ou associés.

Les gabbros sont l'équivalent intrusif des roches les plus répandues de l'écorce terrestre, les basaltes. Ce sont

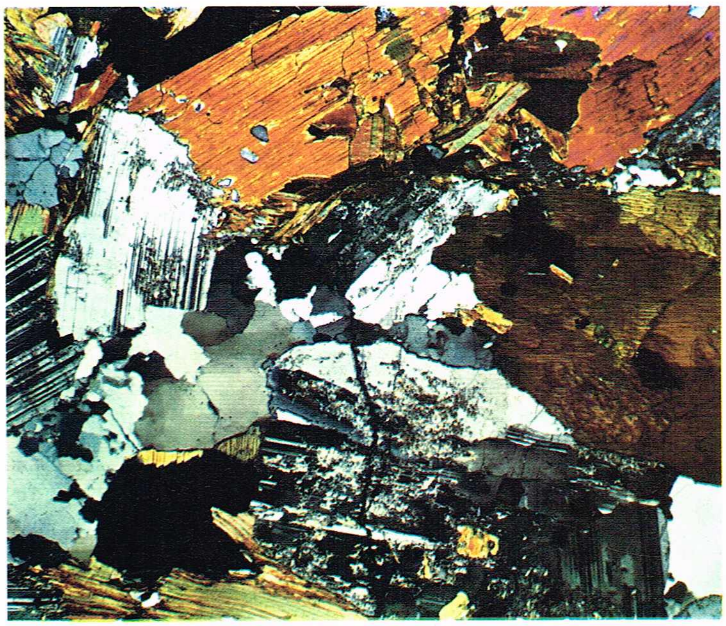

Archives photo B

C. Bevilacqua

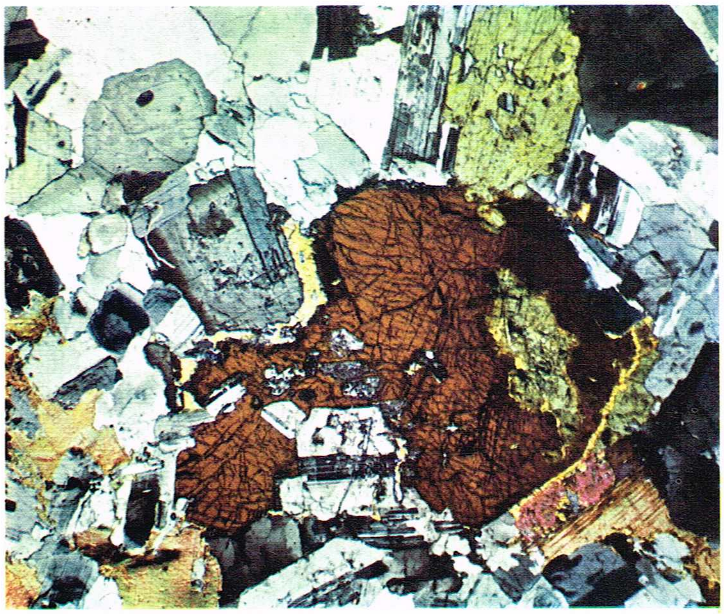

Archives photo B

C. Bevilacqua

▲ ***Ci-dessus, à gauche,*** **tonalite** ***du massif de l'Adamello : au centre, section basale clivée d'amphibole et lamelles de biotite clivée de couleur vive; on observe aussi du plagioclase maclé ainsi que du quartz transparent et un peu d'orthose (lame en lumière polarisée et analysée). A droite, aspect macroscopique d'une*** **tonalite** ***(Alpes de Tonale).***

Archives photo B

◀ ***Un échantillon macroscopique de*** **gabbro** ***: en blanc, les plagioclases; en noir, les pyroxènes.***

C. Bevilacqua

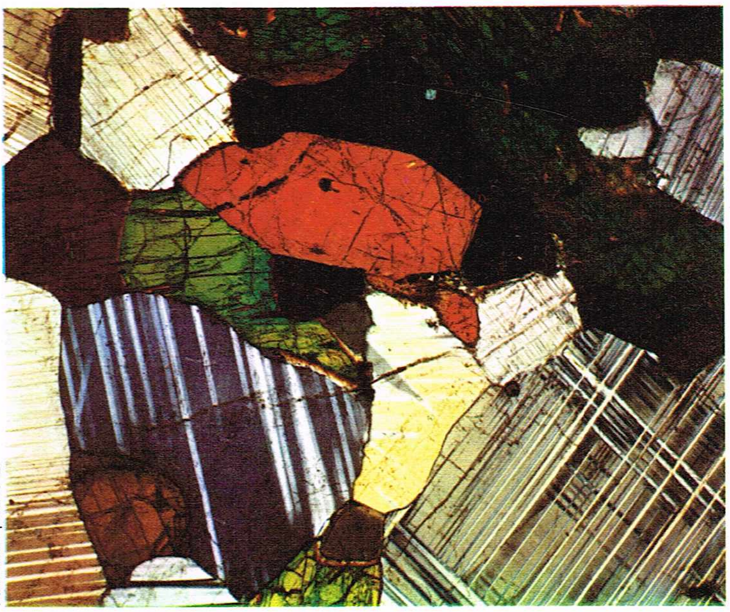

Archives photo B

▲ *A gauche,* **gabbro** *de Norvège : on observe des plagioclases maclés et un pyroxène caractérisé par des teintes de polarisation très vives (lame mince en nicols croisés). A droite,* **gabbro à amphibole** *(hornblende de couleur verte) et plagioclase maclé de type labrador (lame mince en nicols croisés).*

▼ **Troctolite :** *cette roche, comme son nom l'indique, a l'aspect de la peau d'une truite; les taches noires sont dues à l'olivine, la petite masse blanche est du plagioclase.*

des roches sombres à structure grenue, holocristalline, analogue à celle de ces derniers. Volumétriquement, le plagioclase constitue environ 50 % des minéraux du gabbro ; il s'agit, en général, de labrador en cristaux de forme aplatie, analogues à ceux que l'on rencontre dans les équivalents effusifs des gabbros, les dolérites. Leur couleur est souvent blanche, mais la présence de minuscules inclusions de minéraux ferrifères peut leur conférer une couleur noir-gris et un éclat métallique.

Les *pyroxènes* sont les minéraux les plus abondants après les plagioclases. Ils peuvent être orthorhombiques ou bien monocliniques. Dans un **gabbro stricto sensu,** le pyroxène est monoclinique (clinopyroxène) ; dans une **norite,** il est orthorhombique (orthopyroxène). Tous les passages entre gabbro et norite peuvent exister dans la nature. Les pyroxènes monocliniques sont généralement de l'augite, du diallage ou de l'augite titanifère. L'orthopyroxène est généralement représenté par des termes plus ou moins ferrifères de la famille enstatite-bronzite-hypersthène. Les deux types de pyroxènes peuvent contenir des inclusions lamellaires de minéraux ferrifères ou bien des inclusions de pyroxènes de composition chimique différente de celle du minéral hôte (par exemple, l'augite dans le pyroxène orthorhombique et *vice versa*). L'étude de leur composition exacte et de leurs rapports réciproques est importante pour déterminer leur ordre de cristallisation dans le magma.

C. Bevilacqua

On peut trouver des amphiboles dans certains gabbros ; toutefois, en général, il s'agit de minéraux secondaires provenant de l'altération des pyroxènes, par suite d'un métamorphisme général ou par des phénomènes d'auto-métasomatisme, accompagnés d'un apport d'eau.

L'*olivine* peut être un des composants essentiel des gabbros ; elle se présente en cristaux trapus, souvent transformés partiellement ou entièrement en serpentine. La présence d'olivine dans le gabbro signifie que le magma originel était pauvre en silice ; l'olivine a, en effet, une composition plus pauvre en silice que les pyroxènes.

Certains gabbros à plagioclases et pyroxènes peuvent contenir du quartz qui cristallise très tardivement à partir d'un liquide résiduel enrichi en silice. La présence d'olivine, même en petites quantités, exclut totalement la présence de quartz.

On connaît des variétés de gabbros où l'olivine peut devenir très importante volumétriquement ; le cas extrême est représenté par des gabbros à plagioclases et olivine, les pyroxènes étant absents. Ces roches, qui cristallisent à partir de magmas très pauvres en silice par rapport aux teneurs en magnésium et fer ainsi qu'en calcium et sodium, présentent un aspect tacheté qui rappelle la peau de certaines truites, d'où leur nom de **troctolites.** On connaît tous les termes de transition entre gabbros, norites et troctolites.

L'**euphotide** est un très beau gabbro que l'on rencontre dans les Alpes dauphinoises. Il est constitué par de grands cristaux de plagioclase vert, altéré en saussurite, et par des cristaux de diallage à reflets bronzés. Les gabbros sont souvent altérés par suite d'un faible métamorphisme : le plagioclase se transforme en saussurite, qui est un mélange microcristallin d'albite, de zoïsite, d'épidote et de calcite, tandis que le pyroxène est remplacé par de minces aiguilles d'amphibole et par de la chlorite. L'altération météorique se superpose à ces changements minéralogiques et se traduit par l'apparition d'oxydes et d'hydroxydes de fer, qui confèrent à la roche un aspect rougeâtre.

Les **dolérites** sont des roches de composition chimique analogue à celle des gabbros, mais qui se présentent dans des conditions de gisement filoniennes ou subvolcaniques. On les rencontre en filons discordants, mais aussi en filons couches *(sills)* en raison de la faible viscosité du magma gabbroïque (basaltique) qui favorise leur épanchement le long des surfaces de discontinuité des roches encaissantes. Certains filons concordants de dolérite peuvent présenter une épaisseur notable et passer latéralement à des corps intrusifs, que l'on appelle des *lopolites.* La partie inférieure de certaines coulées basaltiques épaisses montre parfois, par suite du refroidissement très lent, des structures doléritiques. Les dolérites sont caractérisées par la structure ophitique qui résulte de l'enchevêtrement de cristaux aplatis de plagioclase. Dans les interstices laissés libres par les plagioclases, du pyro-

xène monoclinique cristallise sous forme de grandes plages englobant souvent plusieurs plagioclases.

Les différents types de *structure ophitique* (dimensions des cristaux, agencements, etc.) permettent de reconstituer les processus de solidification du magma.

Le plagioclase calcique et le pyroxène monoclinique constituent un système binaire avec un point eutectique. Si la composition chimique du magma est très proche de l'eutectique, les deux minéraux cristallisent simultanément : on obtient ainsi la structure ophitique normale. Le plagioclase précipite un peu avant le pyroxène sous forme de noyaux ou agrégats de cristallisation, tandis que le pyroxène forme de larges plages.

Dans d'autres cas, le plagioclase peut cristalliser bien avant le pyroxène (le magma est beaucoup plus riche en plagioclase par rapport à la composition de l'eutectique) ; on observe alors deux générations de plagioclases de dimensions différentes. Les plagioclases inclus dans les pyroxènes sont tous orientés de la même façon, phénomène attribué à la fluidité très grande du magma. La présence ou non de l'olivine dans les dolérites peut influencer l'ordre de cristallisation des minéraux fondamentaux.

Les **anorthosites** sont des roches constituées par plus de 80 % de plagioclases de composition analogue aux plagioclases des gabbros. Ces roches peuvent représenter les termes extrêmes d'une série qui passe par des leucogabbros très pauvres en minéraux fémiques. Les minéraux ferromagnésiens des anorthosites sont analogues à ceux des gabbros ; on constate même qu'il existe un rapport entre la composition du plagioclase et celle des minéraux fémiques accessoires ; l'olivine s'associe à des plagioclases de composition voisine de l'anorthite, à des pyroxènes orthorhombiques et monocliniques, ainsi que parfois à des plagioclases de type labrador. Les amphiboles sont présentes dans les anorthosites de type andésitique, ce qui met en relief l'analogie entre ces roches et les diorites. Les anorthosites se présentent sous forme de batholites de grandes dimensions, intrusifs dans les complexes métamorphiques précambriens (bouclier baltique, bouclier canadien, etc.).

Plusieurs hypothèses ont été émises quant à l'origine de ces roches monominérales.

L'existence d'un magma de composition anorthositique semble difficilement acceptable car la température de fusion des minéraux constituant la roche est très élevée (1 400 °C pour les plagioclases les plus calciques), nettement supérieure aux températures existant dans les niveaux où se sont injectées les anorthosites. De plus, il faut remarquer que l'on ne connaît pas de laves ayant la composition des anorthosites. On pense donc que ces roches, à l'instar de nombreuses autres roches ignées monominérales, représentent des cumulats de cristaux qui se seraient séparés à partir d'un magma originel dont la composition correspondait à plusieurs minéraux à l'état fondu, donc avec une température de fusion inférieure à celle de chaque minéral.

Des études de laboratoire ont démontré que la présence de vapeur d'eau sous forte pression abaisse de façon notable la température de solidification de l'eutectique anorthite-diopside et aboutit à une composition de 70 % d'anorthite et 30 % de diopside. Il est évident que les anorthosites ne peuvent se former par cristallisation eutectique d'un bain fondu de composition anorthite-diopside. Il faut donc admettre une concentration préalable de cristaux plagioclasiques, que l'on attribue à des phénomènes de différenciation gravitative dans le liquide originel. Un tel phénomène est bien connu dans le cas des intrusions basiques et ultrabasiques.

Selon l'hypothèse de la séparation par gravité dans une chambre magmatique remplie d'un bain fondu de composition gabbroïque, les cristaux d'olivine et de pyroxène, formés avant le plagioclase et plus denses, se concentreraient dans la partie inférieure de la chambre. Dans la partie supérieure de la chambre, le plagioclase formerait une suspension solide au sein du magma liquide qui s'injecterait dans les roches susjacentes à la faveur des mouvements tectoniques. Ce mode de mise en place pourrait expliquer la texture protoclastique que l'on rencontre dans de nombreuses anorthosites.

Les roches formées essentiellement de pyroxènes monocliniques orthorhombiques prennent le nom de **pyroxénites.** Elles sont localisées dans les parties inférieures des grandes intrusions de gabbros et résultent de la séparation, par gravité, des minéraux de plus forte densité. On attribue à ces roches le nom du minéral qui les compose suivi du suffixe -ite ; ainsi, l'on obtient les *bronzitites,* les *diallagites,* les *hypersténites,* etc. On peut rencontrer des pyroxénites contenant deux pyroxènes différents auxquels s'associent, assez fréquemment, des minéraux métalliques comme la chromite.

Les **péridotites** sont des roches intrusives constituées essentiellement par de l'olivine, minéral appartenant à la famille des péridots. Les péridotites contenant uniquement de l'olivine sont aussi appelées **dunites** (du mont Dune, en Nouvelle-Zélande). Elles peuvent contenir aussi des quantités accessoires de minéraux métalliques. Les péridotites caractérisées par la présence de pyroxènes sont très répandues ; si le pyroxène est orthorhombique, on parle de *harzburgites ;* si le pyroxène est une augite, on a des *wehrlites,* roches beaucoup plus rares que les précédentes. Dans les *cherzolites,* orthopyroxènes et clinopyroxènes sont associés. Les péridotites contenant de la hornblende sont extrêmement rares.

Les **picrites** sont des roches assez semblables aux péridotites, mais à côté de l'olivine, il y a un pyroxène calcique toujours en faible teneur. Si la quantité de plagioclase devient importante, on passe progressivement aux gabbros riches en olivine. Dans certaines picrites, on peut trouver de l'orthopyroxène ; d'autres peuvent contenir un peu de hornblende.

Les pyroxénites, les péridotites et les picrites se présentent en gisements de type stratiforme, ce qui fait penser à une différenciation par gravité à partir d'un magma de type gabbroïque. Les péridotites se présentent parfois sous forme de filons ou de corps intrusifs subverticaux qui pourraient constituer les cheminées d'alimentation des magmas ultrabasiques. Il convient de noter que l'on ne connaît pas de laves ayant une composition correspondant aux péridotites (sauf les basaltes picritiques correspondant aux picrites). Dans ce type de péridotite, on rencontre des fragments et des blocs de roches intrusives de composition inhabituelle, comme certaines des roches que nous venons de décrire.

De plus, on observe des roches ultrabasiques micacées. Parmi celles-ci, les **biotitites** sont composées exclusivement de mica noir, et les **péridotites micacées** contiennent des teneurs notables de phlogopite (mica fortement magnésien). Elles sont mieux connues sous le nom de **kimberlites** (de Kimberley, en Afrique du Sud) et exploitées pour la recherche du diamant. Les **pyroxénites à biotite** constituent des enclaves, que l'on rencontre dans certaines laves alcalines à leucite. Toutes ces roches sont en relation avec des magmas alcalins différents des gabbros à partir desquels se forment les roches analogues non micacées.

Les **éclogites** sont des roches ultrabasiques de composition chimique assez voisine de celle des gabbros à olivine, mais très différentes de ces derniers par leur

C. Bevilacqua

▲ ***Aspect macroscopique d'une* dolérite *(avec quartz accessoire) d'Édimbourg (Londres, British Museum).***

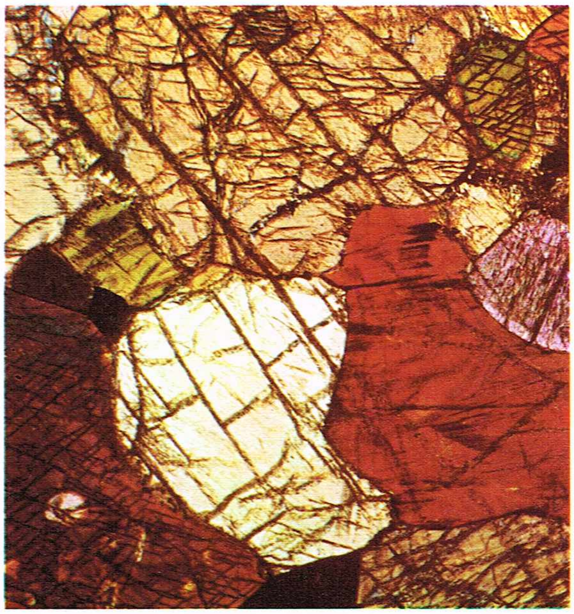

C. Bevilacqua

C. Bevilacqua

▼ ***A gauche, une* péridotite *: la roche est formée par de l'olivine en gros cristaux craquelés (cassures courbes) et par du pyroxène monoclinique caractérisé par ses clivages (lame mince en nicols croisés). A droite, aspect macroscopique d'une* anorthosite.**

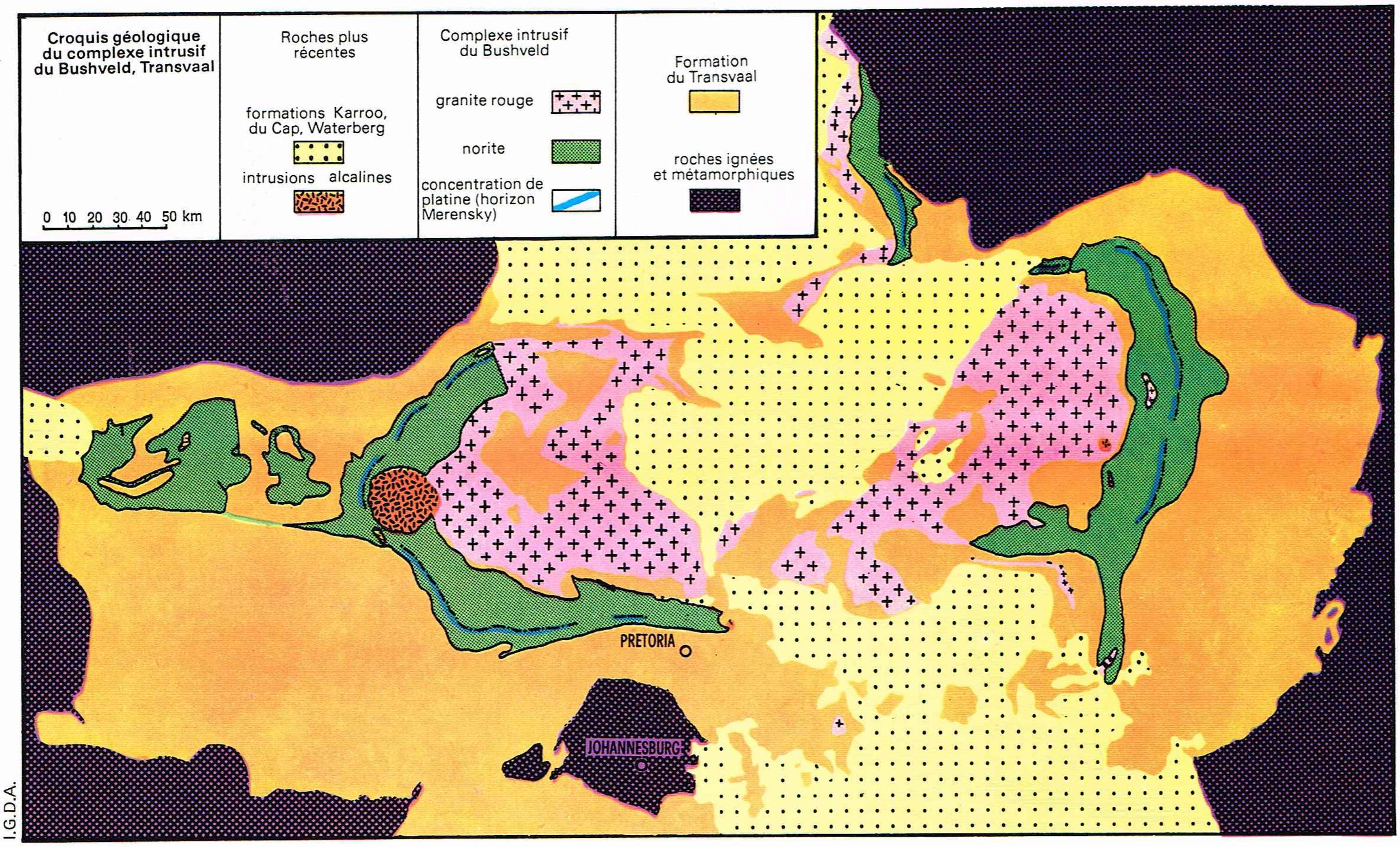

▲ *Le complexe intrusif de Bushveld dans le Transvaal : on remarque la disposition en synclinal du grand lopolite de gabbro (en vert) qui a fait intrusion dans la plus haute partie de la formation du Transvaal et est recouvert de roches granitiques [d'après Schneiderhöhn].*

▶ *Page ci-contre, en bas, variation lithologique d'un rythme du corps intrusif gabbroïque de la Sierra Leone (Afrique occidentale) : 1, péridotite; 2, troctolite; 3, gabbro troctolitique; 4, gabbro à olivine; 5, leucogabbro ou anorthosite; 6, pegmatite; 7, minéraux ferrifères. On remarque le passage progressif des roches à olivine, en bas, aux roches à plagioclase, en haut (d'après Hatch, Wells et Wells).*

minéralogie. Elles sont constituées principalement d'un pyroxène (omphacite) et d'un grenat. Les minéraux accessoires sont le diopside, le quartz et parfois le disthène. Certaines éclogites sont considérées comme des roches d'origine métamorphique correspondant à des roches basiques soumises à un métamorphisme régional, alors que d'autres sont comprises comme le résultat de la cristallisation à de très grandes profondeurs de magmas de type gabbro. On retrouve là un phénomène de convergence analogue à celui que nous avons décrit dans le cas des granites. On connaît des blocs d'éclogite enclavés dans les pipes de kimberlite d'Afrique du Sud.

Les **serpentinites** sont des roches constituées par des minéraux de la famille de la serpentine, qui est un silicate hydraté de magnésium. Elles résultent de l'altération des roches ultrabasiques par des processus métasomatiques ou autométasomatiques.

Origine des roches intrusives basiques et ultrabasiques

Les gabbros résultent de la cristallisation en profondeur de magmas de composition identique à ceux qui donnent naissance, en surface, aux basaltes. L'origine magmatique des roches basiques et ultrabasiques est admise par tous les chercheurs. Les corps intrusifs de gabbros (lopolites) métamorphisent légèrement les roches encaissantes; de plus, au contact avec les roches encaissantes la structure grenue est plus fine, ce qui indique un refroidissement plus rapide.

Toutes les formations gabbroïques montrent des variations minéralogiques régulières de la base au toit; on remarque, notamment, vers le bas de l'intrusion une accumulation de minéraux denses (ferromagnésiens) qui disparaissent vers le haut de l'intrusion. Le grand lopolite du Bushveld (Transvaal) en est un exemple classique : il affleure sur une surface de 50 000 km^2 et son épaisseur maximale dépasse 8 km. On note la présence de norites et de pyroxénites à sa base, de gabbros noritiques au centre et de gabbros, de diorites et de granodiorites au sommet.

L'ordre de cristallisation des minéraux est évident : en particulier, on observe que les orthopyroxènes se séparent avant les clinopyroxènes et que la différenciation gravitative se trouve confirmée par cet exemple. Le toit du lopolite est recouvert par des granites et des porphyres quartzifères qui se sont formés au cours du même cycle magmatique précambrien. La base d'autres corps intrusifs est constituée par de l'olivine, ce qui montre clairement que ce minéral est le premier à cristalliser dans le magma gabbroïque. Dans le cas du Bushveld, on rencontre des niveaux essentiellement formés de minéraux métalliques (chromites) qui sont présents dans les roches basiques et ultrabasiques en tant que minéraux accessoires.

Outre la stratification à l'échelle de la dizaine voire de la centaine de mètres et même plus, on rencontre une stratification à l'échelle centimétrique. Chacune des subdivisions pétrographiques majeures que nous venons de définir se retrouve dans les niveaux mis en évidence par l'alternance de bandes blanches (plagioclases dominants) et de bandes sombres (ferromagnésiens dominants). Ces niveaux qui rappellent par leur épaisseur les strates sédimentaires, sont caractérisés par une extension horizontale très importante ; parfois ils montrent des structures analogues aux structures sédimentaires, par exemple, le « gradded bedding », terme qui désigne la diminution du diamètre des grains du bas vers le haut de la couche. De plus, on observe parfois des discordances angulaires entre deux niveaux différents ; aux niveaux des enclaves, les couches de gabbro subissent une inflexion vers le bas. L'ensemble des phénomènes décrits est interprété comme le résultat de la « sédimentation » des différents minéraux qui se séparent dans le même liquide magmatique.

La sélection minéralogique a été attribuée par les chercheurs à des causes différentes, qui vraisemblablement ont toutes joué un rôle plus ou moins important.

— Selon certains chercheurs, le magma se serait injecté en une seule fois et les niveaux fins seraient dus à des courants de convexion du magma ou bien à une alimentation latérale du magma provoquant des mouvements de turbulence localisés. La diversité des conditions dynamiques d'un endroit à l'autre et à des moments successifs peut être responsable d'une sélection des cristaux en fonction de leur densité et de leur forme, ainsi

que cela se passe au cours des processus sédimentaires. Pour que ces hypothèses soient valables, il faut admettre que le magma qui a donné naissance au gabbro avait une viscosité très faible, analogue à celle des coulées basaltiques.

— D'autres auteurs, en raison de la rythmicité très régulière des différents niveaux fins, ont pensé à un processus de cristallisation par pulsations brèves et très rapprochées des conditions physico-chimiques (température, pression, etc.) du système au cours du refroidissement. Ainsi, l'ordre de cristallisation des minéraux se trouverait continuellement renversé, ce qui aboutirait à la rythmicité des couches.

— Pour d'autres encore, la subdivision des complexes gabbroïques en niveaux de composition chimique de plus en plus acide vers le haut de la série ne résulterait pas de la cristallisation progressive d'une seule intrusion, mais de plusieurs intrusions de magmas de plus en plus profonds et différenciés vers le pôle sialique. Cette théorie est basée sur l'observation de roches très différenciées, comme les anorthosites, même dans les niveaux inférieurs des complexes basiques et ultrabasiques.

Le corps intrusif de la Sierra Leone (Afrique occidentale) est constitué par la succession de plusieurs niveaux dont chacun a une épaisseur comprise entre 60 m et 150 m. On observe pour chaque niveau la succession suivante : à la base, il y a alternance de minces strates de péridotite et de troctolite, puis les passées de troctolite deviennent plus épaisses et alternent avec des couches de gabbro troctolitique (olivine, plagioclase plus un peu de pyroxène). Par augmentation de la teneur en pyroxènes et en plagioclase, on passe à un gabbro à olivine, qui se place au milieu de chaque niveau. Au-dessus, l'olivine disparaît progressivement ainsi que le pyroxène ; on a d'abord un gabbro, puis une anorthosite. Le sommet du niveau est marqué par une structure pegmatitique formée essentiellement par des cristaux de plagioclases, avec par endroits des concentrations de minéraux ferrifères. La stratification à petite échelle est nette à la base de chaque niveau où les cristaux tabulaires se disposent à plat. Ce type de structure disparaît progressivement vers le haut du niveau ; parallèlement la structure grenue devient de plus en plus grossière. Ce phénomène reflète l'ordre de cristallisation des minéraux et la concentration, par gravité, des minéraux les plus lourds vers le bas. Parallèlement, on assiste à une variation de la composition chimique du bain résiduel, qui s'enrichit en éléments volatils et alcalins, ainsi qu'en fer (l'enrichissement en fer vers le sommet a été observé dans de nombreux autres exemples).

L'origine des *péridotites,* très souvent transformées en serpentinites, constitue un problème pétrographique et géologique (rapports avec la naissance des chaînes de montagnes) très intéressant. En effet, ces roches sont souvent localisées au sein de séries sédimentaires fortement plissées et métamorphisées qui remplissent les bassins géosynclinaux. Généralement, les roches encaissantes sont peu ou pas métamorphisées au contact des intrusions péridotitiques. Dans certains cas, on observe des effets thermométamorphiques assez limités, dus à une augmentation de température de quelques dizaines de degrés ; dans d'autres, les serpentinites sont en contact avec des schistes à glaucophane. On pense que l'amphibole sodique (glaucophane) résulte d'un phénomène métasomatique lié à l'intrusion de péridotite.

Le magma péridotitique, formé par de l'olivine fondue, ne peut exister qu'à de très grandes profondeurs. En effet, une olivine magnésienne (forstérite) fond à des températures de l'ordre de 1 800 °C ; même la présence d'eau dans le magma n'est pas suffisante pour abaisser sa température par rapport aux températures qui existent dans les zones où les péridotites ont fait intrusion. De plus, il faut remarquer que les péridotites se sont mises en place à des températures peu élevées car elles ne métamorphisent pas les roches encaissantes.

— Selon N.L. Bowen, les péridotites se seraient injectées sous forme d'agrégats cristallins (de cristaux d'olivine) lubrifiés par un résidu magmatique fluide, peut-être en partie constitué d'eau. Cette hypothèse expliquerait, d'une part, la structure des péridotites où les cristaux sont très brisés, d'autre part, les températures de mise en place assez basses. Les péridotites résulteraient donc de la différenciation gravitative d'un magma de type gabbro.

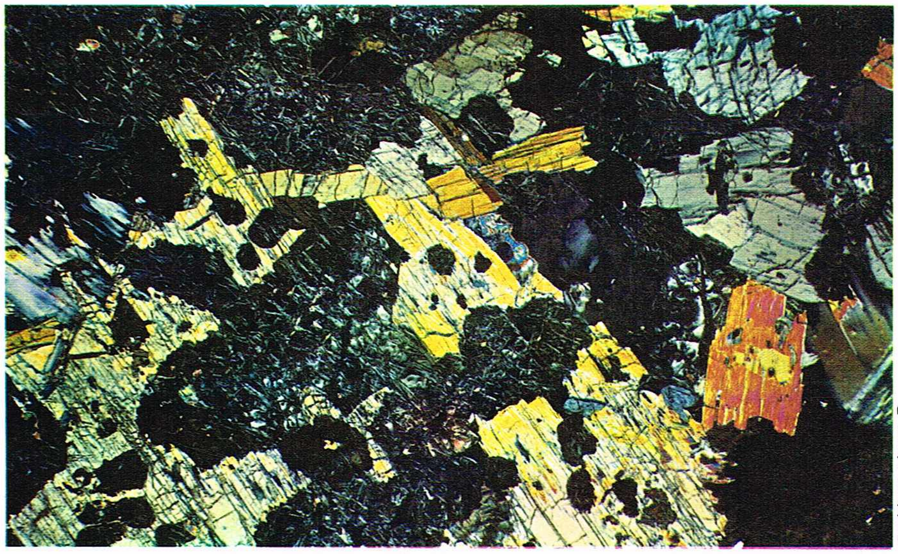

Archives photo B

▲ **Péridotite serpentinisée** ***(Odenwald, Baden) : la roche est formée par des cristaux de pyroxène caractérisés par les traces de clivage très nettes et par de la serpentine qui remplace les cristaux d'olivine ; la serpentine se présente sous forme de fines lamelles avec des teintes de polarisation allant du gris au bleu (lame mince en nicols croisés).***

— Selon d'autres auteurs, les péridotites pourraient exister sous forme de magmas liquides caractérisés par des températures relativement basses en rapport avec une teneur élevée en eau et par une composition chimique analogue à celle des serpentinites. Cette hypothèse pourrait expliquer la présence de filons de péridotite à la bordure des grands massifs intrusifs et les péridotites à grain fin caractéristiques des bordures de massifs qui résulteraient d'un refroidissement rapide du magma. L'absence de laves péridotitiques serait due au fait que les péridotites peuvent rester à l'état liquide uniquement en présence d'eau et à des pressions très élevées.

Les *serpentinites* se forment par hydratation des péridotites. Les causes de cette hydratation ne sont pas encore très claires. Certains chercheurs pensent que l'eau est absorbée par les roches sédimentaires dans lesquelles se sont injectées les péridotites ; ils apportent comme preuve les exemples de péridotites serpentinisées à leur bordure et saines dans la zone centrale. D'autres pensent que l'eau nécessaire à la serpentinisation est d'origine magmatique ; ainsi, la serpentinisation pourrait être considérée comme un phénomène d'autométasomatisme. Les massifs péridotitiques sont souvent transformés en serpentine dans des zones qui ne présentent aucun rapport avec la morphologie de l'intrusion.

L'olivine est presque toujours transformée en serpentine, même dans les gabbros où elle est présente en faibles teneurs. Dans la nature, la transformation en serpentine s'effectue sans variations de volume décelables, les cristaux d'olivine conservant intacte leur morphologie initiale. Cette observation est en contradiction avec les calculs stœchiométriques qui montrent que la transformation olivine-serpentine s'accompagne d'une importante variation de volume, si l'on admet un apport d'eau et de silice et aucune perte de magnésium. Pour justifier l'absence de variations de volume, il faut admettre qu'une partie du silicium et du magnésium est entraînée par la solution aqueuse. Un tel processus doit faire intervenir des quantités d'eau énormes et provoquer des effets métasomatiques magnésiens sur les roches encaissantes, ce qui n'est, en réalité, que rarement observé. L'olivine se transforme en serpentine à température peu élevée car, au-delà de 800 °C et en présence d'eau susceptible d'apporter du silicium et d'entraîner le magnésium, elle se transforme en orthopyroxène ; à des températures plus basses, elle se transforme en talc. La serpentinisation s'effectue avec un apport d'anhydride carbonique, peut-être d'origine magmatique, qui réagit avec le magnésium libéré par le réseau de l'olivine, pour former des veines et des agrégats de magnésite. Certaines serpentines montrent des structures qui simulent des brèches dont les éléments sont cimentés par des carbonates.

LES SYÉNITES

Les syénites sont des roches intrusives formées essentiellement par du feldspath alcalin, le plus souvent potassique (orthose) mais aussi sodique (albite). L'oligoclase (plagioclase un peu calcique) peut s'associer à l'orthose.

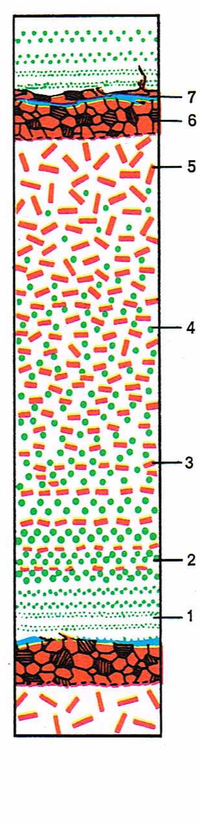

I.G.D.A.

Archives photo B

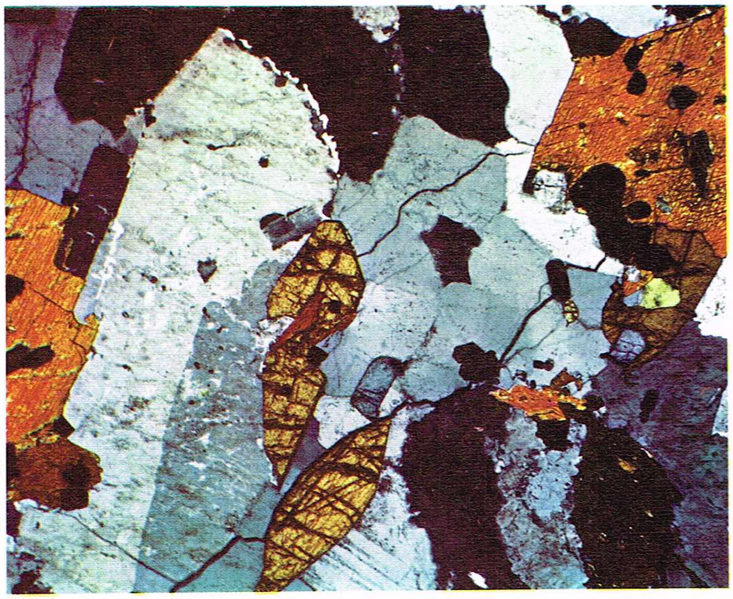

Archives photo B

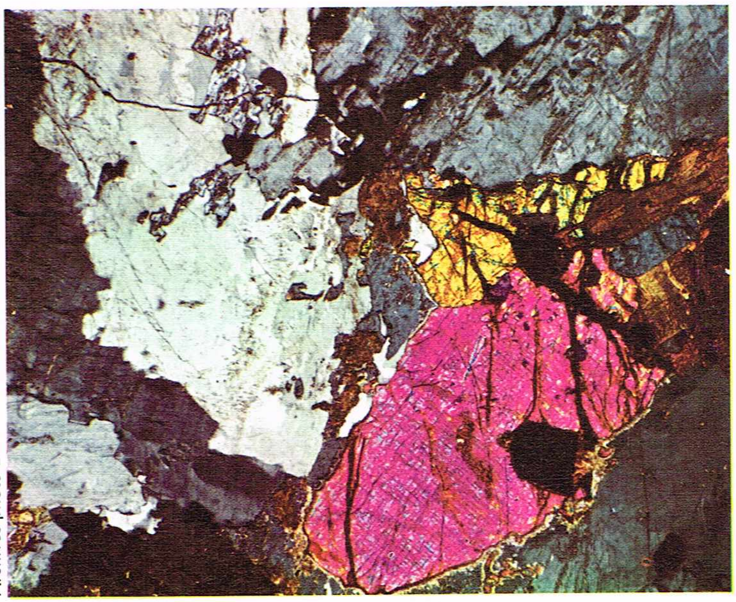

▲ *A gauche* **syénite à amphibole** *(Dresde, Allemagne) : l'orthose perthitique est le principal constituant de la roche (en gris bleuté), accompagné de plagioclase et d'amphibole (section longitudinale avec des sections hexagonales d'apatite, à gauche, et section basale, à droite, avec clivages à 120°). On remarque, au centre, deux cristaux losangiques de sphène avec un cristal d'apatite (lame mince en nicols croisés).*

▼ *Aspect caractéristique d'une* **syénite** *en section épaisse polie (Milan, musée d'Histoire naturelle).*

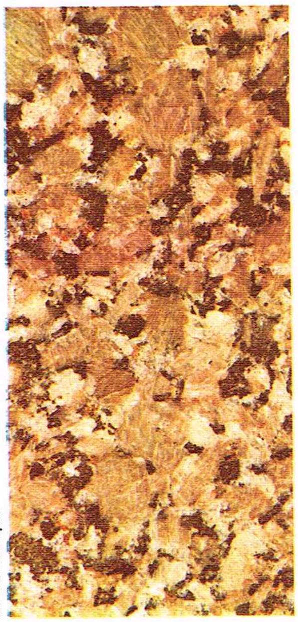

C. Bevilacqua

Les minéraux ferromagnésiens sont représentés par la biotite (mica noir) et par les amphiboles, mais leur pourcentage est nettement inférieur à celui des feldspaths. Certaines syénites à caractère fémique peuvent contenir de nombreux minéraux ferromagnésiens et même des pyroxènes et de l'olivine. Certaines syénites à caractère légèrement acide peuvent contenir du quartz en très faible quantité (minéral accessoire). Si la teneur en silice du magma originel n'est pas suffisante pour former des feldspaths avec les éléments alcalins et l'alumine du magma, il se forme des aluminosilicates plus pauvres en silice que les feldspaths, que l'on appelle feldspathoïdes.

Les syénites présentent généralement une couleur rose à violacée due à l'orthose, avec des taches de couleur sombre ou verte dues aux minéraux ferromagnésiens. Ces roches doivent leur nom à la ville antique de Syène en Égypte (aujourd'hui, Assouan), où il existe une roche intrusive très utilisée autrefois à des fins ornementales mais qui, en réalité, est un granite à amphiboles. C'est dans cette roche qu'est taillé l'obélisque de Louqsor, placé à la Concorde. Par ailleurs, les syénites peuvent, par augmentation de la teneur en quartz, passer progressivement aux granites.

Les **syénites riches en sodium** constituent des raretés pétrographiques qui résultent de différenciations locales de roches à composition originelle très variable. Le feldspath est de l'albite constituant à elle seule presque toute la roche, le quartz pouvant être, dans ce cas, un minéral accessoire ; ces syénites sont donc aussi appelées **albitites.** De la même façon, les syénites formées uniquement par de l'orthose ou du microline sont très rares. Dans le type de syénite plus commun, on rencontre le feldspath potassique avec des ségrégations d'albite (perthite) ou bien des ségrégations d'orthose dans l'albite (antiperthite). Les deux feldspaths peuvent être présents en individus séparés, comme cela se produit dans les granites.

Les minéraux ferromagnésiens des syénites sont généralement des pyroxènes (ægyrine) et des amphiboles alcalins (arfvedsonite ou riébeckite), en plus de la biotite. Lorsque le pourcentage de minéraux ferromagnésiens augmente, on a des syénites mélanocrates (de couleur sombre à noire) comme la **larvikite,** qui prend son nom d'une ville de Norvège (Larvik). Cette roche est formée par de gros cristaux feldspathiques lamellaires à inclusions de minéraux métalliques, qui confèrent à la roche une couleur bleutée avec des reflets métalliques. Le feldspath est représenté par une antiperthite, l'oligoclase contenant des faccules d'orthose. Les autres minéraux sont de l'augite titanifère, de l'olivine, une variété de biotite disposée autour des cristaux de magnétite titanifère, et de l'apatite.

La **shonkinite** est une syénite mélanocrate, riche à la fois en néphéline et en orthose. Elle contient, en outre, du diopside, de l'olivine et une biotite rouge titanifère. Son nom dérive d'une localité du Montana aux États-Unis.

Les **monzonites** sont des roches intrusives formées par du plagioclase, de l'orthose et des minéraux ferromagnésiens. Leurs compositions minéralogique et chimique sont intermédiaires entre celles des diorites, auxquelles elles s'apparentent par la présence de plagioclase, et celles des syénites, par la présence de l'orthose. Les monzonites, qui doivent leur nom au massif de Monzoni dans les Alpes dolomitiques, contiennent un plagioclase de composition oligoclase-andésine qui constitue environ un tiers de la roche. Un autre tiers est formé par l'orthose en grosses lattes qui piègent des plagioclases et des ferromagnésiens. Le dernier tiers est constitué par de l'augite, de l'amphibole et de la hornblende. Certaines variétés de monzonites contiennent du quartz, ou de l'olivine.

Les **syénites à feldspathoïdes** peuvent être subdivisées en deux groupes, en fonction de la présence de pseudoleucite (agrégat d'orthose et de néphéline) ou de néphéline (feldspathoïde sodique). Ces minéraux sont accompagnés par des feldspaths alcalins et des minéraux ferromagnésiens en quantités variables. Feldspaths alcalins et feldspathoïdes sont présents en proportions respectives très variables ; à la limite, le feldspath peut disparaître au profit du feldspathoïde, mais dans ce cas la roche ne peut plus être classée dans la famille des syénites. La limite n'existe pas dans les roches intrusives, car si le refroidissement est lent en présence d'éléments volatils, la leucite se transforme en un mélange d'orthose et de néphéline ; néanmoins, elle conserve les contours

Archives photo B

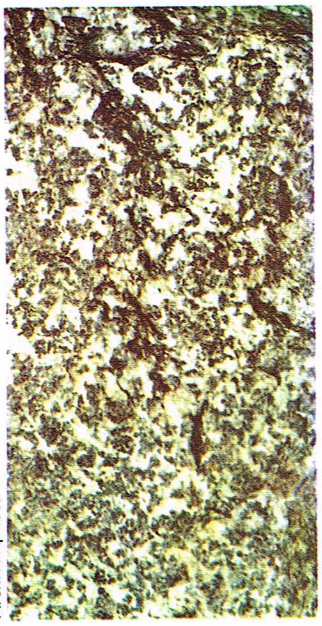

C. Bevilacqua

du cristal initial (trapézoèdre ou leucitoèdre). Selon certains auteurs, la néphéline capterait le sodium qui remplace de manière isomorphe le potassium dans le réseau de la leucite. Il est plus vraisemblable que les leucites précoces sont pauvres en sodium et qu'elles réagissent avec le magma contenant de la silice et du sodium pour former de l'orthose et de la néphéline.

La **borolanite** est une syénite à pseudoleucite qui doit son nom à une localité d'Écosse. Elle est constituée par de l'orthose, de la pseudoleucite et par de nombreux minéraux ferromagnésiens parmi lesquels l'augite, la biotite et le grenat mélanite.

La **malignite** est une syénite néphélinique provenant de la province canadienne de l'Ontario. Comme la borolanite, elle est formée par de très nombreux minéraux : de l'orthose, de la néphéline, un autre feldspathoïde très voisin de la noséane, de l'augite ægyrinique, de l'apatite et de la magnétite, certaines variétés peuvent contenir aussi de l'olivine.

La **foyaïte** qui provient de la Sierra Monchique au Portugal est assez voisine de la malignite, dont elle se distingue par la plus grande teneur en orthose et la plus faible teneur en ferromagnésiens.

Un autre groupe de syénites à feldspathoïdes est caractérisé par une teneur élevée en sodium, nettement dominant par rapport au potassium. Le feldspath alcalin est alors de l'albite et le feldspathoïde de la néphéline, en différents rapports quantitatifs : dans la **mariupolite,** l'albite est prédominante; dans le **monmouthite,** la néphéline est plus importante. Les minéraux fémiques sont présents en faibles teneurs : il s'agit d'ægyrine, parfois d'amphibole sodique et de mica lépidomélane.

Les syénites néphéliniques peuvent contenir des minéraux rares en quantités assez importantes : c'est le cas des **syénites à cancrinite;** la cancrinite est un minéral très voisin de la néphéline, avec laquelle il se trouve associé. Dans les **syénites à zircon,** le minéral, qui est accessoire et de très petite taille dans les roches granitiques, se trouve associé à la néphéline et se présente en gros cristaux dans les faciès pegmatitiques. Les **syénites à eudialite** (silicate complexe contenant du zirconium) sont connues dans le Groenland et dans la péninsule de Kola (U.R.S.S.). Dans certaines syénites, se trouvent associées la sodalite, la néphéline et la cancrinite.

Au Groenland, on connaît des **syénites** où la **sodalite** est le minéral dominant.

Les **syénites à analcime** sont des roches riches en ferromagnésiens, surtout en pyroxènes et amphiboles sodiques avec de l'analcime (zéolite sodique) et des feldspaths alcalins.

Enfin, il faut signaler les **syénites à corindon,** qui résultent de la cristallisation d'un magma pauvre en silice et caractérisé par un excès d'alumine. Les autres minéraux dans cette roche sont le feldspath potassique et la biotite.

Origine des roches à composition syénitique

Les syénites sont des roches peu répandues. Leur composition chimique varie énormément. Généralement, elles sont considérées comme le résultat d'une différenciation très poussée de magmas de composition chimique analogue à celle des basaltes à olivine, ce qui laisse supposer que le magma syénitique primaire n'existe pas dans les profondeurs de l'écorce terrestre. L'origine des syénites suivant un processus de différenciation à partir de magmas basaltiques alcalins est confirmée par la structure d'un certain nombre de corps intrusifs, caractérisés par une succession lithologique analogue à celle des intrusions de gabbro. On trouve à leur base des gabbros et des pyroxénites, puis des roches de composition intermédiaire ou sialique. Ces dernières sont souvent localisées dans la partie supérieure et représentées par des syénites à analcime.

Les relations entre les syénites à feldspathoïdes et les roches encaissantes sont beaucoup plus complexes que dans le cas précédent. Les syénites à feldspathoïdes sont généralement associées à des roches granitiques. Elles se mettent en place au cours du même cycle magmatique que dans le cas des syénites normales, ce qui laisse à penser qu'elles dérivent de la différenciation des magmas granitiques. La présence de feldspathoïdes est attribuée à un appauvrissement en silice du magma granitique par suite de l'assimilation de roches carbonatées. La silice du magma granitique se combine alors avec le calcium et le magnésium des roches digérées pour former des silicates de calcium et de magnésium (diopside, etc.). Les feldspathoïdes sous-saturés en silice cristallisent alors à la place des feldspaths.

La théorie exposée ci-dessus, formulée par R.A. Daly dès 1910, est appuyée par de nombreux arguments géologiques. Elle ne suffit cependant pas à expliquer la genèse de toutes les syénites. Par exemple, les syénites que l'on rencontre dans les formations métamorphiques précambriennes de Scandinavie et des différentes régions d'Afrique montrent des conditions de gisement nettement intrusives discordant avec les formations encaissantes. Elles sont formées par des syénites normales au contact de l'encaissant gneissique et par des syénites néphéliniques dans les niveaux les plus internes. De nombreux indices laissent supposer que ces roches dérivent d'un phénomène métasomatique : le gneiss aurait, en effet, fourni les éléments alcalins par le biais de solutions hydrothermales et pneumatolytiques. Les syénites habituelles de ces complexes précambriens prennent le nom de **fénites** du nom de Fé, localité près d'Oslo. Elles résultent de la disparition de la silice libre, qui était présente dans le gneiss sous forme de quartz, alors que les syénites néphéliniques sont dues à une remobilisation de la silice, déjà combinée à du feldspath, qui va former avec les éléments d'origine métasomatique d'autres silicates. Les roches du complexe syénique ne conservent aucune trace de la texture du

◀ ***Page ci-contre, en haut à droite,* larvikite *(Larvik, Norvège) : le feldspath alcalin perthitique est le minéral dominant; on trouve également de l'augite titanifère, avec son clivage caractéristique des pyroxènes à 90°, de la biotite et des cristaux noirs de magnétite titanifère. On peut y trouver parfois de l'olivine (lame mince en nicols croisés).***

C. Bevilacqua

◀ ***De gauche à droite : aspect macroscopique d'une monzonite (Val di Fassa, Trente); au centre, une* monzonite *montrant de gros cristaux idiomorphes de plagioclase maclé et des plages xénomorphiques de feldspath potassique avec une petite quantité de quartz, biotite et calcite d'origine secondaire; ci-contre, une* syénite à feldspathoïdes *(péninsule de Kola) : le principal composant est la néphéline, en association perthitique avec de la kaliophylite, accompagnée d'albite finement maclée et d'augite (lames minces en nicols croisés).***

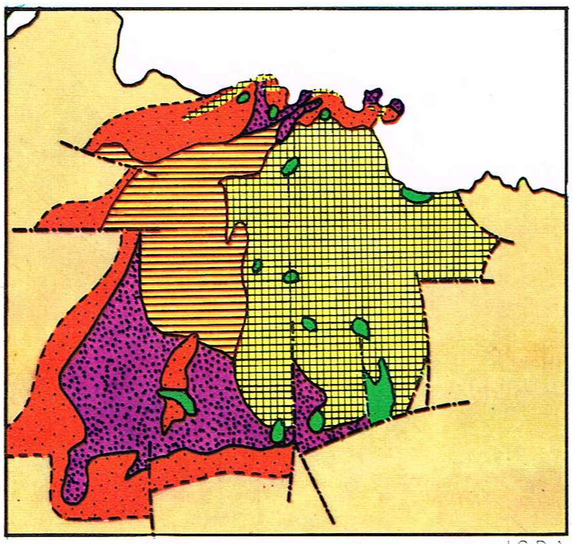

▶ *Cartographie du complexe des roches ignées alcalines de Fen (Norvège méridionale); la base du schéma correspond à environ 4 km (d'après Saether).*

gneiss dont elles dérivent. Elles présentent un aspect intrusif, parfois filonien par suite d'un phénomène de remobilisation avec formation d'un *magma granitique*.

La partie centrale des complexes est occupée par des roches formées essentiellement de carbonates : calcite, dolomite ou ankérite. Ces roches, appelées **carbonatites**, constituent des raretés pétrographiques (leur origine pose un intéressant problème géologique). Très semblables à des marbres par leur structure grenue en mosaïque, elles furent pendant longtemps considérées comme des roches métamorphiques d'origine sédimentaire ayant pris naissance au contact du magma syénitique. On constate par la suite que les carbonatites se présentent sous forme de colonnes cylindriques (pipes), intrusives, entourées par des enveloppes concentriques de syénites normales ou à feldspathoïdes. Dans d'autres cas, les carbonatites se présentent dans les roches encaissantes, sous forme de filons disposés selon des surfaces coniques renversées ou bien sous forme de filons irréguliers. Les **kimberlites** sont des roches à feldspathoïdes appartenant à la famille des gabbros alcalins ou péridotites micacées et occupant la zone centrale des complexes intrusifs signalés ci-dessus.

Les carbonatites peuvent être pures ou contenir en proportions variables des minéraux silicatés; certaines carbonatites contiennent de la néphéline en teneurs élevées, le pôle extrême étant représenté par des roches presque uniquement formées par de la néphéline avec des quantités subordonnées de calcite. La calcite existe en tant que minéral primaire mais accessoire dans certaines syénites à feldspathoïdes. Les carbonatites renferment aussi des terres rares et d'autres éléments en traces que l'on rencontre dans les roches magmatiques et non dans les roches sédimentaires.

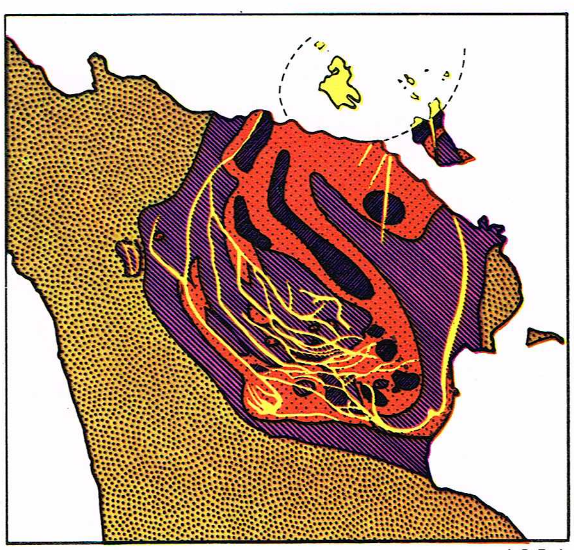

▶ *Cartographie du complexe des roches ignées alcalines de l'île d'Alnö (golfe de Botnie); la base du schéma correspond à environ 6 km (d'après Eckermann).*

De nombreux chercheurs pensent qu'il existe des magmas essentiellement formés de carbonates à l'état fondu, mais aussi riches en éléments alcalins et volatils, lesquels auraient contribué à la transformation des roches encaissantes en fénites. La nature du magma responsable du métasomatisme à partir duquel se sont formées les carbonatites, par cristallisation du dernier résidu, n'est pas directement déterminable. Il s'agit probablement d'un magma ultrabasique, ainsi que semblent le prouver les intrusions de péridotites micacées qui parfois traversent le complexe intrusif. L'anhydride carbonique dont est très riche le magma péridotitique provoque la mobilisation du calcium essentiellement présent dans les roches encaissantes, parallèlement à un appauvrissement en silice qui se combine avec les éléments provenant du magma. Ainsi la fémitisation des roches granitiques est suivie de la cristallisation de calcite et d'autres carbonates.

La possibilité de l'existence d'un magma formé par de la calcite à l'état fondu a été récusée par certains auteurs, qui pensent que les carbonatites peuvent résulter de la substitution hydrothermale de roches cristallisées antérieurement. La calcite fond en effet à des températures très hautes (plus de 1 300 °C), à condition que la tension de vapeur de l'anhydride carbonique soit très élevée; sinon, même à des températures inférieures, elle se dissocie en oxyde de calcium et anhydride carbonique. L'existence d'une phase gazeuse sous pression très élevée dans le magma carbonatitique est prouvée par la texture bréchique des gneiss encaissants. De plus, en présence de vapeur d'eau, la calcite fond à 700 °C, température envisageable pendant la formation des carbonatites.

Les carbonatites sont très recherchées car elles constituent les roches mères des gisements de diamants.

LES ROCHES INTRUSIVES ALCALINES, CALCO-ALCALINES, BASIQUES ET ULTRABASIQUES

Les *roches basiques* ou *fémiques alcalines* sont constituées par un plagioclase calcique ou calco-sodique (anorthite, labrador, bytownite) et par des minéraux ferromagnésiens (pyroxènes, amphiboles, biotite et parfois olivine) associés avec des minéraux appartenant à la famille des feldspathoïdes et des zéolites. Lorsqu'il y a un excès d'éléments alcalins par rapport à la composition chimique d'un gabbro normal, on y rencontre aussi des feldspaths alcalins. Ces roches peuvent donc être considérées comme des gabbros alcalins.

La **kentalénite** est un gabbro à caractère alcalin qui ressemble beaucoup aux monzonites mésocrates à augite et olivine. Cette roche est classée parmi les gabbros en raison de son plagioclase basique (labrador); de plus, les minéraux ferromagnésiens y sont présents en plus grandes proportions que dans les monzonites à olivine. Néanmoins, le caractère alcalin de ce gabbro est démontré par la présence de feldspath potassique.

Les *roches calco-alcalines* peuvent contenir des feldspathoïdes, avec ou sans feldspaths, en raison du caractère sous-saturé en silice du liquide initial. Elles se trouvent souvent associées à des roches assez semblables mais beaucoup plus acides, comme les syénites à feldspathoïdes, et occupent, avec les carbonatites, la partie centrale des complexes intrusifs ou métasomatiques des roches à feldspathoïdes.

L'**essexite** est une roche largement grenue à plagioclase et néphéline, qui doit son nom à la localité d'Essex, dans le Massachusetts, États-Unis. Outre le plagioclase et la néphéline, on y trouve aussi de l'augite et de l'olivine en petites quantités ainsi que de l'ilménite et des minéraux accessoires. Dans les faciès les plus siliceux, on rencontre parfois du feldspath alcalin. Les **théralites** sont des roches analogues aux essexites mais avec une quantité plus grande de néphéline, un plagioclase calco-sodique et une augite titanifère. On connaît des théralites à olivine et des théralites à hornblende.

Les **teschénites** (du nom d'une localité à la limite de la Silésie et de la Moravie) sont des variétés de gabbros alcalins contenant de l'analcime, zéolite sodique qui cristallise dans les derniers résidus fluides du magma. L'analcime y constitue la mésostase entre les autres cristaux. Comme dans les théralites, on rencontre une amphibole sodique, qui prend le nom de barkévicite, et de la biotite; certaines variétés peuvent contenir de petites quantités de feldspath alcalin.

Archives photo B

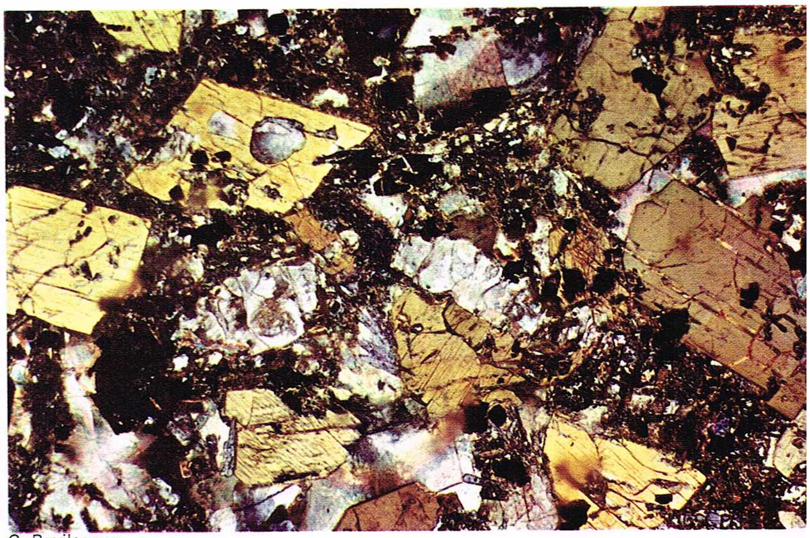

C. Bevilacqua

Les *roches ultrabasiques* à feldspathoïdes sont formées par des minéraux ferromagnésiens et des feldspathoïdes en proportions différentes. Plagioclases et feldspaths alcalins sont absents; leur présence marque le passage aux gabbros alcalins ou aux syénites basiques.

— Une première série de ces roches est caractérisée par la présence de néphéline associée à un pyroxène sodique, l'ægyrine.

L'**urtite,** qui doit son nom à une localité de la péninsule de Kola (U.R.S.S.), est presque uniquement constituée par de la néphéline. On pourrait aussi l'appeler néphélinite, si ce terme ne désignait déjà les roches effusives très riches en néphéline. Dans les **ijolites,** la néphéline constitue à peu près la moitié de la roche, le restant étant formé de pyroxènes (augite ou ægyrine) et d'une zéolite appelée cancrinite. Les ijolites sont des roches assez répandues avec les syénites néphéliniques dans les associations pétrographiques associées aux carbonatites. La **melteigite** s'apparente à ces roches, mais contient des quantités plus faibles de néphéline et des teneurs plus fortes en ferromagnésiens.

— Une autre série de roches ultrabasiques à feldspathoïdes est formée essentiellement par de la pseudoleucite associée à des minéraux ferromagnésiens.

La pseudoleucite est un mélange d'orthose et de néphéline pseudomorphosant des cristaux de leucite, que l'on rencontre en teneurs plus élevées que le pyroxène sodique dans les **fergusites.**

La **missourite** est une roche très semblable à la précédente, mais avec des teneurs en pseudoleucite inférieures aux teneurs en pyroxènes; on y rencontre parfois aussi de l'olivine.

Les **limburgites** sont des roches filoniennes composées de cristaux d'augite et d'olivine, qui baignent dans une mésostase vitreuse ou microlitique de composition ultrabasique alcaline, avec parfois de la néphéline et de la sodalite; la composition chimique de certaines limburgites peut être très alcaline.

Origine des roches intrusives alcalines, calco-alcalines, basiques, et ultrabasiques

Les roches intrusives basiques et ultrabasiques à feldspathoïdes sont étroitement liées aux basaltes à olivine et à leurs produits de différenciation : les exemples de filons et de filons couches caractérisés par des variations verticales de composition sont dus à des processus de différenciation gravitative. Généralement, les bordures des filons présentent une structure vitreuse ou microcristalline qui traduit un refroidissement rapide du magma originel non encore différencié. Elles montrent une structure porphyrique avec des cristaux d'olivine et la composition des teschénites. Le niveau inférieur des filons est très riche en olivine, qui se concentre par gravité pour former une péridotite et contient un certain nombre de minéraux caractéristiques des laves ultrabasiques alcalines, comme la barkévicite, la biotite et l'augite dans les niveaux supérieurs. Plus en haut, dans les niveaux à picrite, on rencontre des petites quantités de plagioclase calcique et de l'analcime. Encore plus haut, apparaissent les niveaux de théralite, plus ou moins riches en olivine, avec de la néphéline et de l'analcime. L'analcime et les autres zéolites augmentent quantitativement au fur et à mesure que l'on se déplace vers le sommet des filons différenciés, représentés par des teschénites riches en analcime et en feldspaths alcalins. La teschénite présente très souvent des alternances de lits sombres, riches en augite, et d'autres plus clairs, avec des plagioclases (andésine) et de l'analcime. Dans les parties plus élevées des filons différenciés, on trouve aussi des niveaux et des veines de syénite discordants, généralement à feldspathoïdes, avec en plus des feldspaths alcalins, de la néphéline, de l'analcime et des pyroxènes sodiques.

Dans certains corps intrusifs, les roches basiques alcalines occupent la partie centrale de l'intrusion, ce qui prouve qu'elles se forment par auto-intrusion et concentration de résidus sialiques et alcalins cristallisant dans les zones de moindre pression de la chambre magmatique presque totalement remplie de magma déjà consolidé.

Les filons composés résultent de la différenciation par cristallisation fractionnée d'un magma primaire de type basalte à olivine dans des conditions intrusives et dans des circonstances qui favorisent la cristallisation des feldspathoïdes et des zéolites. La différenciation gravitative peut être constatée par les variations de la densité (*d*) des différentes roches; on observe de bas en haut les valeurs suivantes : péridotite ($d = 3{,}1$), picrite ($d = 3$), théralite ($d = 2{,}95$), teschénite ($d = 2{,}8$). La cristallisation des zéolites qui contiennent de l'eau dans leur réseau montre que le magma du filon était plus riche en eau que le magma basaltique. Cela a pu favoriser la différenciation par gravité des cristaux formés les premiers et les plus lourds. La présence d'eau peut, de plus, diminuer la température de cristallisation de certains minéraux

▲ *A gauche, une* **théralite** *: de gros cristaux d'olivine baignant dans une mésostase partiellement vitreuse avec des prismes allongés de pyroxène et d'autres, plus courts, de néphéline (gris). On y rencontre aussi du plagioclase et, dans certaines variétés, un feldspath potassique très abondant. A droite, une* **teschénite** *(Moravie) : de grands cristaux prismatiques d'augite titanifère baignant dans une mésostase formée essentiellement par de la calcite secondaire (cristaux rosés) et de l'analcime; quelques cristaux corrodés de plagioclase et de nombreux cristaux opaques de magnétite (lames minces en nicols croisés).*

▼ *Une* **limburgite** *; roche filonienne à structure porphyrique : phénocristaux d'olivine (en bas, à droite) et d'augite dans une mésostase vitreuse (lame mince en nicols croisés).*

Archives photo B

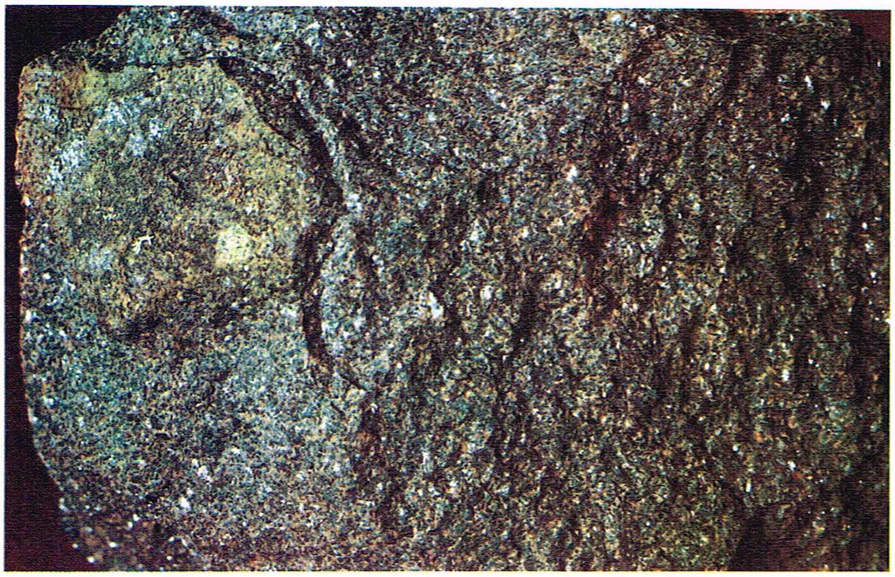

C. Bevilacqua

Archives photo B

▲ *En haut, un échantillon de* **lamprophyre** *(minette)* [*Cumberland, Grande-Bretagne*]. *Ci-dessus, une* **kersantite** *(Erzgebirge) : dans la pâte de fond de ce lamprophyre partiellement vitreux, on observe des microlites de plagioclase, les phénocristaux sont essentiellement de la biotite; on peut remarquer, sur la droite, un cristal arrondi d'olivine complètement remplacé par des carbonates et de la serpentine (au centre)* [*lame mince en nicols croisés*]

et provoquer le regroupement des autres éléments du magma pour former des feldspathoïdes et des pyroxènes sodiques, au lieu de feldspaths et pyroxènes normaux. L'eau concentrée dans le résidu fluide favorise la cristallisation tardive, parfois hydrothermale, des zéolites.

LES LAMPROPHYRES

Les lamprophyres sont des roches filoniennes basiques associées aux roches intrusives de compositions variées; dans d'autres cas, ils représentent les produits de différenciation intrusifs à la périphérie des amas magmatiques. Les lamprophyres présentent généralement une structure de type porphyrique. Les cristaux sont essentiellement la biotite, qui est le minéral caractéristique des lamprophyres, des amphiboles, des pyroxènes monocliniques, parfois de l'olivine et de l'apatite.

Les phénocristaux montrent des signes évidents de corrosion magmatique et de réaction avec le liquide qui va former la mésostase. Ces phénomènes de corrosion se traduisent par des golfes sur les faces des cristaux, par la décoloration des cristaux de biotite et par des granulations d'amphiboles autour des pyroxènes. Les cristaux d'olivine sont presque toujours remplacés par d'autres minéraux, généralement des carbonates (calcite, dolomite, etc.).

De plus, les lamprophyres, qui sont normalement de couleur foncée du fait de la teneur élevée en minéraux ferromagnésiens, sont très souvent altérés et formés par des minéraux secondaires comme les carbonates, la chlorite, le quartz, les oxydes de fer. Cela a lieu à la suite de modifications tardives de type autométasomatique, par la circulation de fluides magmatiques riches en substances volatiles, essentiellement représentées par de l'eau et de l'anhydride carbonique. La mésostase des lamprophyres est constituée par un agrégat feldspathique microcristallin d'orthose, avec parfois du plagioclase. Le feldspath forme aussi de larges plages pouvant inclure d'autres minéraux (structure pœcilitique). La mésostase est partiellement ou totalement vitreuse, ou bien formée par des microlites de mélilite et d'analcime, qui remplacent les feldspaths dans les lamprophyres dérivant de magmas sous-saturés.

Les lamprophyres sont classés en fonction des phénocristaux ferromagnésiens qu'ils contiennent ou, plus rarement, en fonction des minéraux de la mésostase.

Parmi ces roches, citons : la **minette**, caractérisée par de nombreux cristaux de biotite; la **vogesite**, sorte de minette où la biotite est remplacée par des aiguilles d'amphibole; l'**alnoïte** et la **monchiquite**, caractérisées respectivement par la présence de mélilite et d'analcime dans la mésostase. Les **kersantites** sont des lamprophyres très fréquents, caractérisés par la présence de plagioclases dans la mésostase et de biotite en phénocristaux. Dans les **spessartites**, la biotite est remplacée par de la hornblende; dans les **camptonites**, on rencontre des amphiboles sodiques de type barkévicite.

Les lamprophyres sont généralement considérés comme des roches hybrides contenant des phénocristaux provenant d'une cristallisation précoce et d'une mésostase ayant cristallisé aux dépens des derniers résidus fluides. Pour cette raison, les cristaux présentent des signes d'instabilité vis-à-vis de la pâte qui les englobe. L'origine de ces roches n'est pas encore très claire et fait l'objet de nombreuses recherches de la part des chercheurs et de discussions entre eux.

LES PORPHYRES QUARTZIFÈRES, LES ROCHES A PHÉNOCRISTAUX DE QUARTZ

Les porphyres quartzifères sont des roches effusives sialiques, qui résultent du refroidissement en surface de magmas de composition granitique. Contrairement aux granites, ils présentent une structure porphyrique avec des cristaux de quartz et de feldspath baignant dans une mésostase vitreuse ou microcristalline. Les phénocristaux présentent souvent des contours irréguliers que l'on attribue généralement à une corrosion par le verre, liée à une élévation de température au moment de l'éruption. Le quartz se présente en cristaux dihexaédriques, caractéristiques des hautes températures (forme β, formée à plus de 573 °C, puis transformée en quartz α au refroidissement). On rencontre souvent les formes métastables de la silice, c'est-à-dire la tridymite et la cristobalite, formées aussi à température élevée, mais qui n'ont pas eu le temps de se transformer en quartz par suite du refroidissement trop brusque. Le quartz et les feldspaths peuvent être présents dans la mésostase sous forme de très petits microlites.

La classification des porphyres est basée sur la nature du ou des feldspaths que ces roches contiennent.

Le plus souvent, le feldspath est représenté par de la sanidine, équivalent de l'orthose pour des températures élevées. Les sanidines peuvent contenir de petites quantités de sodium dans leur réseau; elles ont ainsi des compositions chimiques rappelant celles des microperthites des formations granitiques. La sanidine se présente généralement en individus tabulaires, maclés Carlsbad. Ces roches sont généralement appelées **rhyolites.** Lorsqu'à la sanidine vient s'associer un plagioclase (le plus souvent de l'oligoclase) en quantités comparables, on parle de **rhyo-dacites.** Dans les **dacites**, par contre, le plagioclase devient dominant. Ces roches sont les correspondants effusifs des adamellites et des granodiorites. La biotite et les pyroxènes sont les minéraux ferromagnésiens accessoires des porphyres quartzifères. Les amphiboles, qui constituent le principal minéral ferromagnésien des granites, sont rarement représentées, probablement en raison de la faible teneur en éléments volatils du magma qui cristallise dans des conditions effusives. L'absence de muscovite tient à des raisons semblables. Les températures élevées favorisent, en fait, la cristallisation du pyroxène, ainsi que le montre la suite réactionnelle de Bowen. On rencontre aussi des minéraux accessoires communs aux granites, comme l'apatite, le zircon, les oxydes de fer, etc.

Les **comendites** sont des porphyres quartzifères très riches en sodium; elles contiennent des pyroxènes et des amphiboles sodiques, comme l'ægyrine et la riébeckite. Leur nom vient de Comenda, petit village de l'île de Saint-Pierre (Sardaigne). Les **pantellérites** sont également des roches sodiques contenant des cristaux d'anorthose, de pyroxène et d'amphibole sodique, avec de rares quartz noyés dans une mésostase vitreuse.

La classification des roches effusives est basée sur des critères minéralogiques; c'est pourquoi l'attribution d'une roche à un groupe pétrographique donné n'est possible que lorsque les cristaux sont présents en quantités notables dans la lave. En effet, très souvent, les porphyres ont une structure vitreuse; ils sont donc essentiellement formés par une pâte vitreuse dans laquelle baignent quelques rares cristaux. La composition du verre des laves acides est toujours très voisine du minimum eutectique du système ternaire quartz-orthose-albite, ce qui se traduit par le fait que les phases vitreuses sont plus fréquentes et importantes dans les roches porphyriques acides que dans les autres roches effusives. La température de cristallisation de l'eutectique étant très basse, la viscosité de la masse fondue sera si élevée qu'elle va gêner l'agencement des groupements ioniques qui aboutissent à la formation des réseaux cristallins des minéraux.

Les **obsidiennes** sont des roches effusives totalement ou essentiellement vitreuses de couleur noire à brune. Leur fracture conchoïdale donnant des arêtes très tranchantes, elles furent utilisées comme outils et comme armes par les hommes préhistoriques. Les obsidiennes ont généralement une composition chimique analogue à celle des granites et des porphyres quartzifères; cependant, elles peuvent correspondre aussi à d'autres types de roches effusives ayant refroidi très rapidement. Seules l'analyse chimique et la mesure de l'indice de réfraction du verre permettent de classer ces roches dans les familles précédemment décrites. La mésostase vitreuse est généralement caractérisée par des structures fluidales, soulignées par l'orientation des microlites qu'elle contient ou par des lits plus ou moins foncés de fer. Le verre recristallise très lentement après la consolidation de la roche. Pour cette raison, les porphyres quartzifères les plus anciens sont caractérisés par une mésostase finement recristallisée sous forme de très petites aiguilles de quartz et de feldspaths difficilement déterminables au microscope (ce que les auteurs appelaient autrefois la structure pétrosiliceuse, ou pétrosilex).

Les rhyolites très anciennes, ayant subi un léger métamorphisme, acquièrent par dévitrification une structure grenue; les roches ainsi formées sont appelées des **felsites.** Leur nature effusive est déterminable par des restes de structure perlitique ou porphyrique.

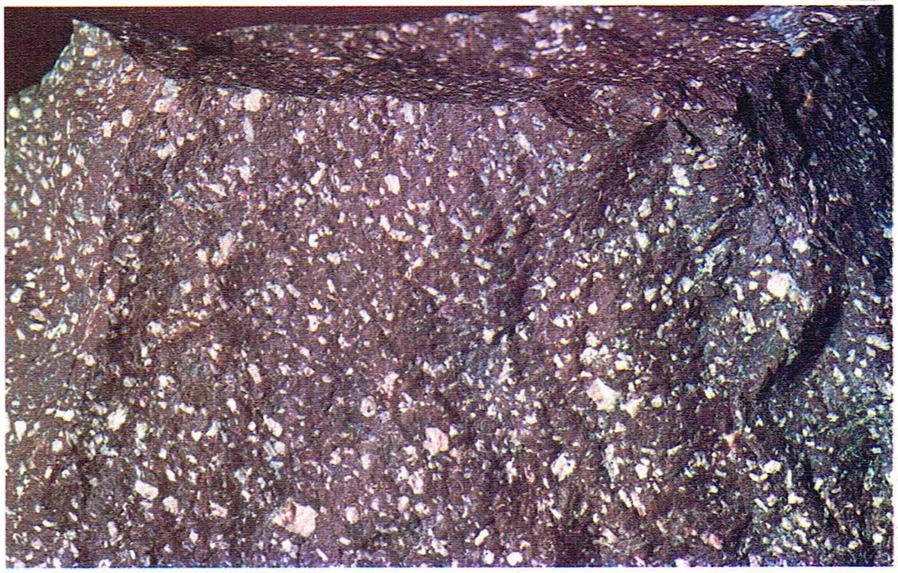

Archives photo B

C. Bevilacqua

▲ En haut, échantillon de **dacite** *(Égypte) [Londres, British Museum]. Ci-dessus, un échantillon d'***obsidienne** *avec cassure conchoïdale caractéristique des laves vitreuses.*

Archives photo B

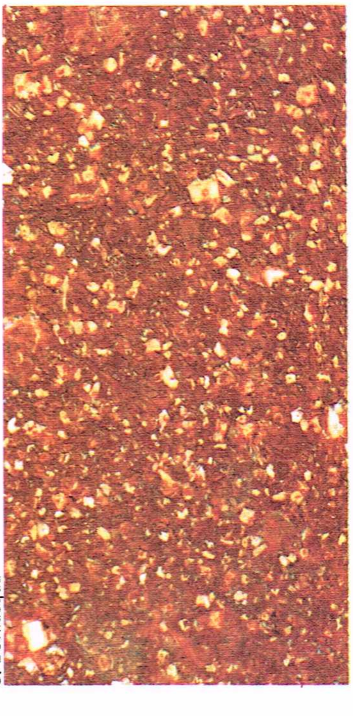

C. Bevilacqua

◀ A gauche, une **spessartite** *(val de Sesia, Piedmont, Italie); les principaux composants de ce lamprophyre sont la hornblende en cristaux prismatiques clivés et un plagioclase (lame mince en nicols partiellement croisés). A droite, aspect macroscopique d'une* **rhyolite** *en section polie; en réalité, la plupart des roches désignées par le terme « rhyolites » ou « porphyres quartzifères » sont des ignimbrites.*

C. Bevilacqua

C. Bevilacqua

▲ *A gauche, échantillon d'andésite provenant des îles Salomon (océan Pacifique). A droite, échantillon de* **basalte** *avec des cristaux vert-jaune d'olivine disséminés dans la mésostase microgrenue de couleur grise.*

Les **ponces** sont des fragments de verres acides analogues par leur composition aux obsidiennes, mais caractérisés par un très grand nombre de vacuoles qui résultent de la démixtion de la phase gazeuse. Les ponces sont très légères et ont la propriété de flotter.

Les porphyres quartzifères sont le plus souvent de couleur rouge ou violacée du fait de la présence d'oxydes de fer dans la pâte; c'est le cas général des rhyolites anciennes. Les rhyolites plus récentes, celles de Lusclade (Mont-Dore) par exemple, ont une couleur beaucoup plus claire. Les **liparites** (de l'île de Lipari) sont des rhyolites calco-alcalines potassiques à oligoclase, sanidine et biotite.

Les rhyolites sont très exploitées, notamment en Italie, pour la construction et les revêtements routiers.

LES ANDÉSITES

Les andésites sont des roches à teneur moyenne en silice (environ 60 %), formées par des plagioclases, des ferromagnésiens de type amphibole, biotite et par des ortho- et clinopyroxènes. Elles sont donc, par leurs compositions minéralogique et chimique, l'équivalent effusif des diorites. Leur structure est porphyrique, avec des phénocristaux de feldspaths et d'amphiboles noyés dans une mésostase vitreuse. Le plagioclase est généralement représenté soit par l'oligoclase, soit par l'andésine, en fonction de la composition chimique de la roche totale. En fait, on parle de composition globale du plagioclase car, généralement, ces minéraux sont zonés, leur cœur étant plus riche en calcium que leur bordure. La même différence se manifeste entre les phénocristaux de plagioclase et les microlites de la mésostase.

La présence de quantités de plus en plus importantes de quartz marque le passage progressif des andésites quartzifères aux **dacites**, qui sont, comme nous l'avons signalé précédemment, l'équivalent éruptif des granodiorites. Les andésites plus acides sont généralement caractérisées par la présence de biotite et de hornblende, tandis que les pyroxènes sont nettement dominants dans les andésites à hypersthène et augite qui marquent la transition avec les roches basaltiques. L'olivine peut être présente en petites quantités. Les phénocristaux de biotite et de hornblende sont souvent corrodés au contact de la mésostase. Ils sont remplacés dans leurs bordures par des agrégats microgranulaires de pyroxènes et de magnétite. Les cristaux de pyroxène, par contre, ne montrent aucun signe d'instabilité, ce qui a conduit les auteurs à penser que la transformation des amphiboles en pyroxènes s'effectue par une brusque élévation de la température au moment de la mise en place de la roche.

Les andésites sont particulièrement bien représentées dans les montagnes Rocheuses et dans les Andes. Ces deux chaînes de montagnes se trouvent le long d'un « arc andésitique » qui parcourt la côte occidentale des deux Amériques, descend le long des îles Aléoutiennes, les îles Kouriles, le Japon, les îles Mariannes, la Nouvelle-Guinée, les îles Salomon et Tonga, pour aboutir à la Nouvelle-Zélande et aux côtes de l'Antarctique. L'axe andésitique sépare le fond basaltique de l'océan Pacifique des blocs continentaux avoisinants. Il est depuis longtemps le siège d'une subsidence très marquée de la croûte terrestre, manifeste près de la bordure occidentale de l'océan Pacifique le long de laquelle on constate surtout la présence d'importantes anomalies gravimétriques.

Origine des andésites

Selon certains auteurs, l'épaississement de la croûte sialique aurait comme conséquence une augmentation de la température des niveaux inférieurs de celle-ci. Ce phénomène serait étroitement lié à la radio-activité élevée des roches acides et se traduirait par une fusion partielle de ces roches (anatexie). L'anatexie, dans le cas présent, provoquerait aussi la fusion de minéraux ferromagnésiens, contrairement à ce qui se passe dans le cas de la fusion partielle plus ménagée qui donne naissance aux magmas granitiques. Les processus de cristallisation fractionnée et d'hybridisme, par assimilation de roches préexistantes ou par mélange de plusieurs magmas présentant des stades de différenciation plus ou moins avancés, sont souvent invoqués pour expliquer la genèse des magmas andésitiques. Ceux-ci, par rapport aux magmas granitiques et basaltiques, ne sont pas représentés en tant que magmas primaires. De nombreux géologues pensent que les andésites résultent de la différenciation progressive d'un magma basaltique ayant assimilé du matériel sialique. On constate, de fait, que les laves andésitiques sont souvent associées à des basaltes.

▼ **Andésite à amphibole** *(Siebengebirge, Rhénanie) : la mésostase, caractérisée par une structure fluidale et formée par des microlites de plagioclase, contient des phénocristaux de plagioclase en partie remplacés par de la calcite d'origine secondaire et par de l'amphibole [lame mince en nicols croisés].*

Archives photo B

LES BASALTES

Les basaltes sont les roches volcaniques les plus répandues sur notre planète. Leur composition chimique correspond à celle des gabbros qui, contrairement aux basaltes, sont des roches intrusives peu fréquentes. La composition minéralogique des basaltes comprend un plagioclase riche en calcium allant généralement du labrador à la bytownite, un pyroxène orthorhombique ou monoclinique, de l'olivine mais seulement dans certains basaltes, et des minéraux accessoires parmi lesquels la magnétite titanifère est très fréquente.

Anciennement, on appelait basaltes des roches à composition minéralogique différente car on se basait essentiellement sur des critères chimiques. Ainsi, des roches riches en minéraux ferromagnésiens, en plagioclase oligoclase-andésine et en feldspath potassique, d'aspect macroscopique très semblables aux basaltes et très pauvres en silice, étaient classées parmi les basaltes. Actuellement, ces roches sont regroupées, en fonction de critères minéralogiques, dans les familles des trachytes, trachyandésites et trachy-basaltes. Les basaltes passent progressivement aux andésites à pyroxènes, la distinction macroscopique entre ces deux types de roches est souvent très difficile.

Le *plagioclase* est présent sous forme de phénocristaux zonés, souvent lacunaires, et de microlites tabulaires dans la mésostase. Le *pyroxène* peut être ortho- ou monoclinique; l'orthopyroxène appartient généralement à la série enstatite-hyperstène; il se présente en phénocristaux qui se séparent de manière précoce dans certains basaltes. L'augite est le pyroxène monoclinique que l'on rencontre le plus souvent dans les basaltes, sous forme de phénocristaux ou bien de microlites dans la mésostase. La pigeonite est un pyroxène monoclinique moins calcique et plus magnésien que l'augite. L'*olivine* est le premier minéral à cristalliser dans les magmas basaltiques; elle est présente en phénocristaux très craquelés et en quantités remarquables dans les basaltes à olivine; par contre, elle est absente ou présente en faibles teneurs dans les basaltes tholéitiques. La présence d'olivine peut indiquer un refroidissement très rapide de la lave, si rapide que l'olivine n'a pas le temps de réagir avec la mésostase pour donner les autres minéraux de la série discontinue de Bowen; si l'olivine est présente en grandes quantités, le pyroxène qui cristallise est généralement une augite pauvre en magnésium.

Parmi les minéraux accessoires, on rencontre la hornblende basaltique et, plus fréquemment, la biotite. L'apatite, la magnétite titanifère, l'ilménite se présentent sous forme de petits cristaux dans la mésostase. Dans certains basaltes, la mésostase est entièrement vitreuse, dans d'autres entièrement cristalline. La composition chimique de la mésostase interstitielle est très souvent différente de la composition chimique moyenne de la roche. Elle correspond, en effet, à un résidu fondu dont la composition chimique se rapproche de celle des roches sialiques;

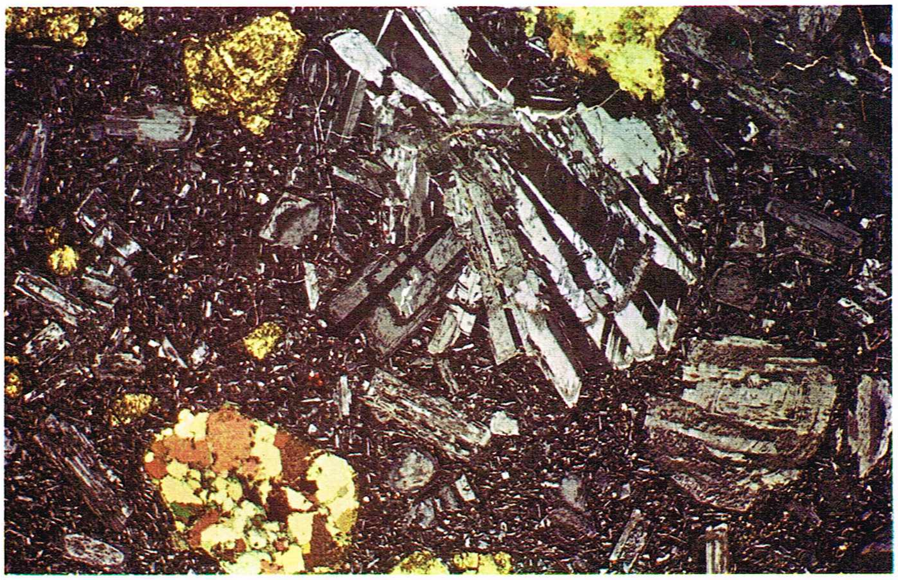

Archives photo B

▲ *Les phénocristaux de plagioclase de cette roche, connue sous le nom de « mélaphyre », ont une composition andésino-labradorique; les plages colorées avec des teintes de biréfingence élevée sont formées de cristaux de calcite et autres carbonates remplaçant (pseudomorphosant) des cristaux d'olivine. Ces roches sont le terme de transition entre les basaltes et les andésites.*

C. Bevilacqua

◀ *Lame mince, en lumière polarisée et analysée, d'un* **basalte** *: on observe des cristaux gris-noir lamellaires de plagioclase entrelacés et des cristaux plus trapus et très colorés de pyroxène avec une structure de type intersertal.*

Archives I.G.D.A.

◀ *Lame mince, en lumière polarisée et analysée, d'un* **basalte** *: on observe des cristaux de plagioclase caractérisés par une macle polysynthétique, et des pyroxènes clivés parallèlement à l'allongement des cristaux (cristal orange en bas); les zones noires sont constituées par du verre volcanique qui se comporte comme un minéral isotrope.*

cela est d'autant plus net que la phase cristallisée est importante. Si, par contre, le magma basaltique est figé sous forme de verre sans minéraux exprimés, sa composition chimique est caractéristique des roches basaltiques, c'est-à-dire pauvre en silice et très riche en fer, en magnésium et en calcium.

Le verre volcanique est aussi appelé **palagonite,** d'une localité de Sicile située sur le versant sud de l'Etna. Macroscopiquement, la palagonite est semblable aux verres d'obsidienne, mais par recristallisation elle se transforme en un agrégat microcristallin, essentiellement formé de chlorite.

Des enclaves de nature xénolitique, c'est-à-dire non cristallisées dans le magma basaltique mais empruntées par celui-ci au cours de son ascension, se rencontrent souvent dans les coulées basaltiques. Les enclaves de péridotite sont très caractéristiques des laves basaltiques; elles résultent de la cristallisation de roches ultrabasiques dans les profondeurs de l'écorce terrestre. On rencontre parfois des xénocristaux de quartz, corrodés ou avec des auréoles réactionnelles, qui proviennent aussi des séries acides traversées par les laves basaltiques. Il ne faut pas confondre les xénolites de quartz avec le quartz pouvant cristalliser dans les derniers résidus de cristallisation des magmas basaltiques, qui se forment dans des conditions filoniennes ou subvolcaniques. C'est le cas de certaines labradorites quartzifères ou de certains basaltes tholéitiques.

Les basaltes sont des roches sombres, très souvent noirâtres; du fait de phénomènes d'altération, elles peuvent se colorer en rouge-brun ou vert-brun, comme certains gabbros et certaines dolérites. Leur structure est fréquemment porphyrique, plus rarement vitreuse ou sphérolitique. La texture bulleuse ou alvéolaire qui résulte de la démixtion des gaz dissous dans le verre est très fréquente. Les alvéoles sont généralement remplis par des minéraux déposés par des solutions hydrothermales ou des eaux vadoses. Il s'agit essentiellement des différentes formes de la silice (opale, calcédoine, etc.), de calcite et surtout de minéraux de la famille des zéolites.

On subdivise généralement les basaltes en deux grandes catégories : les basaltes tholéitiques et les basaltes à olivine, caractérisés par de légères différences dans leurs compositions chimique et minéralogique.

- Les **basaltes tholéitiques** doivent leur nom à une localité de la Sarre. Ils résultent de la cristallisation d'un magma saturé en silice, donc dépourvu d'olivine. En effet, si le refroidissement est lent, l'olivine réagit avec la mésostase très siliceuse pour former un pyroxène ferromagnésien dépourvu ou pauvre en calcium, c'est-à-dire un pyroxène orthorhombique de type pigeonite. Souvent, cette réaction est bloquée par l'épanchement et le refroidissement de la roche.
- Les **basaltes à olivine** sont caractérisés par des teneurs élevées en olivine ne réagissant que partiellement avec la mésostase pour donner des pyroxènes calciques, comme le diopside ou l'augite titanifère. Les pyroxènes orthorhombiques et la pigeonite sont rares. Lorsque l'olivine constitue environ 50 % de la roche, on a des **basaltes picritiques,** ou *basaltes océaniques,* très répandus dans les fonds et les îles océaniques. L'enrichissement en olivine résulterait d'un phénomène de concentration par gravité de ce minéral, qui se séparerait dans différents niveaux du réservoir magmatique. Les **ankaramites** sont des basaltes très riches en augite et auraient une origine semblable.

La plupart des chercheurs attribuent les différences de composition minéralogique entre les deux types de basaltes aux matériaux originels.

— Dans le *magma basaltique de type océanique, sous-saturé en silice,* l'olivine cristallise en premier. En raison de l'importance du domaine thermique de cristallisation, elle va présenter une zonation, les parties les plus externes du cristal devenant de plus en plus riches dans le terme ferrifère (fayalite). La précipitation d'olivine provoque un appauvrissement en magnésium et en fer du liquide résiduel dans lequel vont apparaître des pyroxènes calciques, comme le diopside ou l'augite. La cristallisation du pyroxène provoque à son tour une baisse de la teneur en calcium et en silice du liquide résiduel, qui va se trouver enrichi en éléments alcalins et en alumine; c'est ainsi que prennent naissance les trachytes et les phonolites qui accompagnent les basaltes à olivine.

— La cristallisation du *magma basaltique tholéitique, saturé en silice,* commence par la cristallisation de l'olivine, presque immédiatement suivie par sa transformation en pyroxènes orthorhombiques ou en pigeonites, mais parfois aussi associée à des termes augitiques. La cristallisation des pyroxènes se prolongeant pendant un certain intervalle de température, il s'ensuit une zonation des pyroxènes, qui s'enrichissent en fer au fur et à mesure que la cristallisation avance. Le liquide résiduel enrichi en calcium, aluminium et alcalins donne naissance à des roches de la série calco-alcaline (dacites, rhyolites) généralement associées aux basaltes tholéitiques. On pensait autrefois que les basaltes à olivine existaient exclusivement dans les aires océaniques, et les basaltes tholéitiques dans les zones continentales. Des études poussées ont montré que cette règle n'a pas une valeur absolue, bien que l'un ou l'autre type domine respectivement dans les milieux océaniques et continentaux. Par ailleurs, au cours d'un même cycle volcanologique, peuvent s'épancher successivement ou alternativement des coulées appartenant aux deux types de basaltes, avec parfois de nombreux types de roches à composition intermédiaire.

Toutefois, les basaltes océaniques sont très abondants sous les sédiments actuels des fonds océaniques; les laves constituées de basaltes à olivine s'épanchent au niveau des rides océaniques, où s'effectue l'écartement des plaques tectoniques. Cela laisse supposer que sous les océans affleure un niveau de roches ferromagnésiennes (sima) constitué de péridotites, niveau recouvert par du matériel de composition sialique sur les continents. C'est à partir de la fusion locale et de la différenciation de ce matériel que prendraient naissance les magmas basaltiques. Les xénolites de péridotite rencontrés dans les basaltes à olivine proviendraient, selon certains auteurs, de ce niveau. Pour d'autres au contraire, les modèles de péridotite constitueraient des cumulats de minéraux concentrés par des phénomènes de gravité. Dans les basaltes à olivine, on ne trouve pas d'autres types d'enclaves indiquant l'existence de niveaux sialiques en dessous des océans. Les basaltes de l'île de l'Ascension, placée sur la dorsale médio-atlantique, contiennent des xénolites de roches ignées intrusives de nature granitique hyperalcaline, ce qui pourrait prouver l'origine continentale de cette dorsale.

Les basaltes à olivine sont aussi appelés basaltes alcalins bien que leur teneur en éléments alcalins soit analogue à celle des basaltes tholéitiques des régions continentales. Cette dénomination s'explique par les termes de différenciation qui prennent naissance à partir des magmas basaltiques à olivine, comme les trachytes et les phonolites. La cristallisation fractionnée du magma donne des laves enrichies en minéraux ferromagnésiens, par des fractionnements par gravité, et, à l'opposé, des roches différenciées vers les pôles acides, c'est-à-dire des **mugéarites** (basaltes à plagioclases acide ou neutre, oligoclase ou andésine) et des **trachy-basaltes** (avec sanidine). L'évolution se produit donc vers les pôles alcalins sodiques et potassiques, les produits de différenciations sialique et alcaline se trouvant particulièrement enrichis en éléments volatils. Ces roches se mettent en place de manière explosive sous forme de tufs et de laves de composition trachytique qui peuvent, par différenciation, évoluer vers des termes encore plus acides, comme des rhyolites alcalines. Le plus souvent, en raison du magma originel sous-saturé en silice, elles évoluent vers les termes à feldspathoïdes comme les phonolites à néphéline. Lorsqu'il y a enrichissement en éléments ferromagnésiens, on aboutit à des téphrites et à des basanites à néphéline.

Dans certaines îles volcaniques, l'érosion a mis en évidence les roches intrusives correspondant aux magmas basiques cristallisés dans les cheminées d'alimentation des volcans : il s'agit d'essexites, de théralites et de syénites néphéliniques qui correspondent aux roches effusives rencontrées dans les parties supérieures des édifices volcaniques.

Les basaltes à olivine analogues à ceux que l'on rencontre dans les zones océaniques se trouvent aussi dans des zones continentales, souvent en bordure des bassins océaniques, au voisinage de la « ceinture de feu ».

L'association pétrographique dans laquelle dominent les basaltes tholéitiques, aussi appelés « basaltes de plateau », est caractéristique des aires continentales

stables. L'exemple le plus classique est celui des trapps du Deccan (Inde) d'âge crétacé à éocène, qui s'étendent actuellement sur une surface de 5 000 km^2; les basaltes miocènes de l'Oregon (États-Unis) et des États voisins ont une extension à peu près semblable; les basaltes jurassiques du Parana, en Amérique du Sud, s'étendent sur 750 000 km^2. Les épaisseurs maximales de ces couvertures basaltiques atteignent environ 3 000 m.

Des filons et des sills de dolérite, qui résultent de la cristallisation du magma basaltique présent dans des cheminées ou injecté le long de surfaces de discontinuité des roches encaissantes, sont souvent associés aux coulées basaltiques. Les filons couches de dolérite sont caractérisés par une stratification selon l'ordre d'apparition des minéraux et leur densité; dans leurs parties supérieures, ils peuvent passer progressivement à des roches grenues caractérisées par des structures de type micropegmatitique.

Les basaltes tholéitiques, généralement localisés dans les aires continentales stables, peuvent se trouver associés aux basaltes à olivine dans certaines régions océaniques. C'est le cas, par exemple, des îles Hawaii, qui sont constituées par d'énormes volcans boucliers formés essentiellement de basaltes tholéitiques avec de l'olivine, auxquels succèdent des basaltes alcalins avec leurs termes de différenciation parfois sous-saturés en silice (mugéarites, trachytes, laves à feldspathoïdes). Les rapports entre les deux types de basaltes et leurs termes de différenciation sont analogues mais beaucoup plus compliqués dans les plaques basaltiques de l'océan Atlantique, qui s'étendent du Groenland à la Grande-Bretagne en passant par l'Islande.

Un certain nombre de chercheurs ont interprété l'association basaltes à olivine-basaltes tholéitiques comme le résultat d'une origine unique. A partir d'un magma basaltique à olivine se serait différencié un magma tholéitique, par suite de la séparation précoce de l'olivine; ensuite, les deux magmas auraient évolué vers les deux séries de différenciation déjà soulignées. Mais on peut aussi penser que le magma tholéitique est primaire et que le magma à olivine résulte de ce dernier par concentration gravitative des cristaux d'olivine.

D'autres auteurs pensent que les différences entre les deux séries pourraient être dues soit à différents niveaux de la couche basaltique fondue à partir de laquelle, dans des chambres magmatiques réduites, prennent naissance les laves, soit à la fusion différentielle d'un même niveau péridotitique dans des conditions de température et de pression variables, soit encore à la contamination d'un magma primaire de type basalte océanique, qui assimilerait des roches sialiques au cours de son ascension vers la surface.

D'autres chercheurs, encore, ont émis l'hypothèse d'une diffusion des éléments alcalins au cours du transfert gazeux (démixtion des éléments volatils à partir du bain fondu sous forme de petites bulles) avec différenciation à partir du magma initial de niveaux plus ou moins alcalins et siliceux. Un troisième type fondamental de basalte, très riche en alumine, pourrait résulter de l'accumulation sélective de cristaux de plagioclase à partir d'un magma basaltique primaire.

Les **spilites** constituent un groupe de roches très voisines des basaltes par leur aspect macroscopique, leurs conditions de gisement et leur origine. Comme les basaltes, ce sont des roches effusives riches en minéraux fémiques et à basse teneur en silice, mais le plagioclase en est l'albite (plagioclase très acide, contrairement aux plagioclases basiques des basaltes). Les spilites sont fréquemment associées aux basaltes et se présentent le plus souvent sous forme de « laves en oreiller », ou *pillow lavas* des auteurs anglo-saxons. Les basaltes peuvent aussi présenter cet aspect considéré comme caractéristique des épanchements sous-marins.

La composition chimique des spilites est assez particulière car ces roches sont constituées essentiellement par de l'albite et de la chlorite. Parfois, on rencontre des résidus de plagioclases calciques et de pyroxène (augite) ayant échappé à la transformation en chlorite. Dans certains cas, on observe des indices manifestes de l'albitisation d'un plagioclase originellement calcique. Dans d'autres cas, l'albite a un caractère nettement primaire; il s'agirait donc d'un minéral cristallisé directement à partir du magma. L'épidotite et la calcite, qui sont des minéraux classiques dans les basaltes et les gabbros affectés par des processus métamorphiques ou métasomatiques, se rencontrent généralement en faibles teneurs dans les spilites. Mais cette règle est parfois transgressée et certaines spilites « en oreiller » sont presque entièrement constituées de calcite, seule l'enveloppe des boules de lave conservant la composition spilitique. Généralement les compositions chimique et minéralogique des roches spilitiques subissent de fortes variations du centre vers les bordures des « oreillers ».

Les spilites, ainsi que les autres roches qui leur sont associées, sont interstratifiées dans des sédiments, préférentiellement d'origine clastique, qui constituent le remplissage des bassins marins à forte subsidence et de forme très allongée appelés géosynclinaux. Après avoir traversé les sédiments accumulés sur plusieurs kilomètres d'épaisseur, les laves spilitiques se sont épanchées sur le fond marin sous une couverture d'eau très importante, qui aurait empêché la démixtion des gaz dissous dans la lave. Les spilites sont souvent associées à des roches sédimentaires formées en milieu marin profond, comme les radiolarites; elles ont par la suite été recouvertes de nouveaux sédiments.

De nombreux chercheurs pensent que les spilites dérivent de la cristallisation d'un magma basaltique enrichi en eau et, peut-être, en sodium et en anhydride carbonique au cours de la traversée des sédiments déposés au fond des océans. La cristallisation primaire des minéraux caractéristiques des spilites à partir du magma basaltique modifié est rendue possible par la présence dans le

Bavaria

▲ ***Fissuration en colonnes des basaltes en Irlande.***

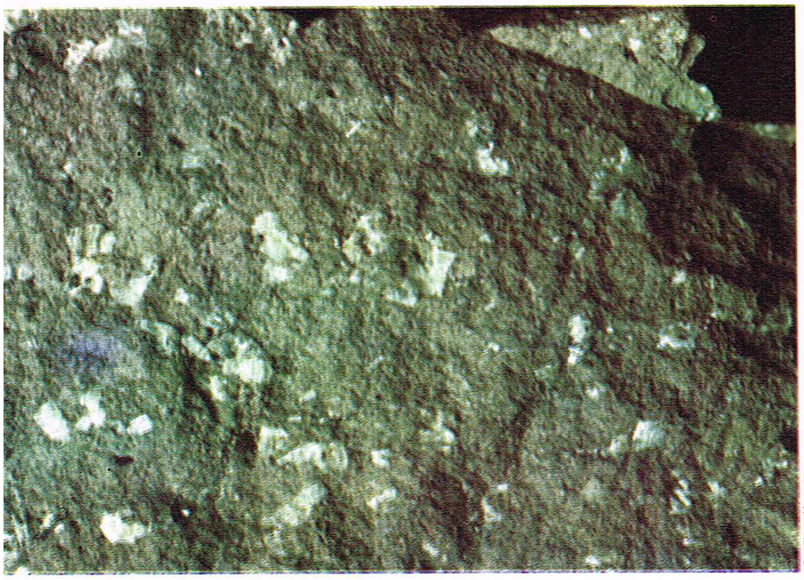

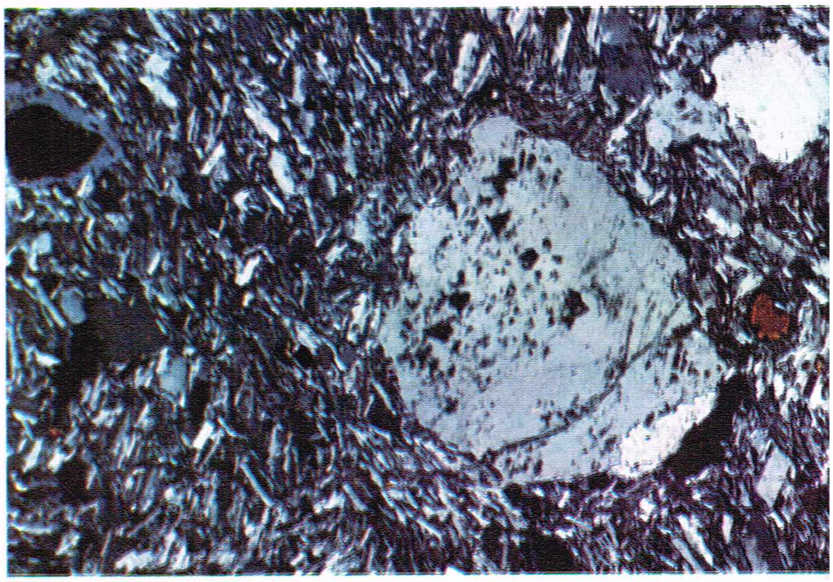

C. Bevilacqua

▲ *A gauche, échantillon de* **trachyte** *avec des cristaux blancs de feldspath potassique (île d'Ischia, Italie). A droite, un* **trachyte** : *le feldspath potassique (sanidine) en phénocristaux gris et en microlites lamellaires dans la mésostase est le principal et presque unique minéral de cette roche; on rencontre aussi quelques minéraux bruns de biotite. Les microlites soulignent une structure fluidale dont est responsable le mouvement de la lave (lame mince en nicols croisés).*

liquide magmatique de nombreux éléments volatils qui ne peuvent s'échapper du fait de la pression hydrostatique exercée par la colonne d'eau. Le magma basaltique originel pourrait s'enrichir en sodium à la suite de la fusion partielle et de l'assimilation de sédiments quartzo-feldspathiques caractéristiques des zones géosynclinales, comme les *grauwackes proprement dits,* qui sont des grès quartzo-feldspathiques grossiers, de couleur vert sombre, formant des bancs massifs alternant avec des niveaux plus fins. Ces roches sont en quelque sorte des sédiments équivalant aux flyschs hercyniens. Les grauwackes au sens international du terme ne doivent pas être confondus avec les grauwackes de décalcification, qui sont des pélites ayant contenu de nombreux fossiles disparus par décalcification. Les grauwackes proprement dits sont caractérisés par une teneur en sodium plus élevée que la teneur en potassium, cela en raison de la présence d'albite. De plus, ces roches se trouvent, après leur formation, enrichies en sodium contenu dans l'eau de mer interstitielle.

Certains auteurs pensent que les spilites résultent de la modification de basaltes normaux, juste après leur épanchement et leur solidification sous les fonds marins. Cette modification serait due à la percolation de solutions fluides riches en sodium et en anhydride carbonique provenant directement de la chambre magmatique ou bien prenant naissance au cours de la traversée de la puissante série de sédiments océaniques encore imprégnés d'eau de mer. L'existence de solutions sodiques responsables du métasomatisme est prouvée par la transformation des roches argileuses voisines des filons spilitiques intrusifs en *cornéenne* à grain très fin et ayant l'aspect du silex. L'observation microscopique montre que ces roches métasomatiques, que l'on appelle *adinoles,* sont constituées par de très fins cristaux de quartz et d'albite. Le métasomatisme sodique peut s'observer également en relation avec des roches doléritiques normales (équivalents intrusifs des basaltes). De plus, l'association des spilites et des basaltes normaux, épanchés pendant les phases initiales d'un cycle orogénique avec des radiolarites et des roches sédimentaires riches en manganèse, laisse penser que l'éruption des laves spilitiques s'accompagne ou est suivie de termes de solutions fluides enrichies en silice, en fer et en manganèse.

De très nombreuses roches souvent considérées comme des spilites en raison de leur composition minéralogique peuvent résulter de la transformation de basaltes normaux ou de dolérites à la suite de phénomènes métamorphiques régionaux. Cela se traduit par une transformation des minéraux originels et par l'apparition d'albite, d'épidote et de calcite (qui dérivent de l'altération du plagioclase calcique) ainsi que de chlorite (qui dérive de l'altération des pyroxènes).

Les spilites sont les constituants essentiels d'une association pétrographique dont font aussi partie des roches à caractère acide nettement sodique, que l'on appelle *kératophyres* quartzifères ou non. Les kératophyres sont essentiellement formées par un feldspath sodique et par du quartz en teneur variable; chimiquement, leur composition se rapproche de celle des rhyolites et des trachytes mais leur teneur en sodium est toujours plus élevée que leur teneur en potassium. Par ailleurs, on connaît des roches analogues aux spilites et aux kératophyres; souvent associées à ces dernières, elles montrent des signes évidents du remplacement d'un feldspath sodique (albite) originel par un feldspath potassique. Ces phénomènes résultent probablement de la répartition tardive du sodium et du potassium entre les différents termes du complexe effusif, à la suite de venues magmatiques de type hydrothermal.

LES TRACHYTES ET LES PHONOLITES

Les trachytes et les phonolites sont les équivalents effusifs des syénites et des syénites néphéliniques. Ils sont essentiellement formés par un feldspath alcalin, potassique ou sodique, accompagné de feldspathoïdes dans les phonolites. On rencontre aussi dans ces roches des minéraux accessoires ferromagnésiens.

Les **trachytes** doivent leur nom, dérivé du grec, au toucher rugueux qui résulte de leur texture très finement bulleuse ou vacuolaire. Ce sont des roches de couleur blanchâtre ou claire; leur structure est porphyrique, généralement hypocristalline ou microlitique, plus rarement vitreuse. Généralement, le quartz est absent dans les trachytes, comme d'ailleurs dans les syénites, mais on le rencontre parfois sous forme de microlites ou de plages

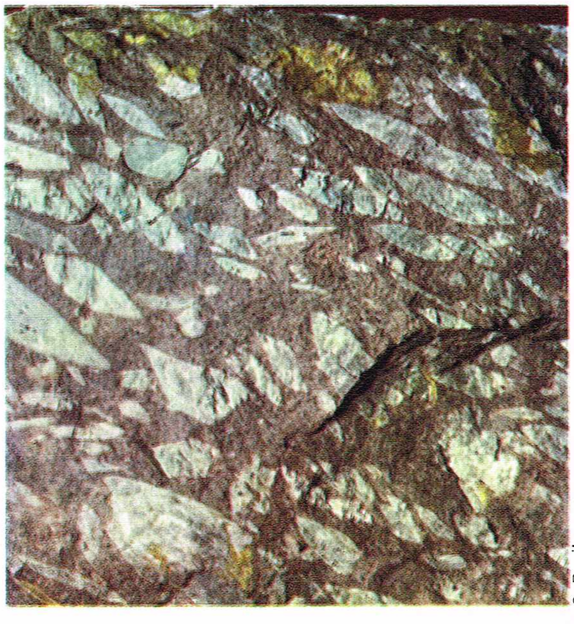

C. Bevilacqua

▶ *Échantillon de* **porphyre** *rhombique du sud de la Norvège; la roche doit son appellation à la forme rhomboédrique des sections des phénocristaux feldspathiques (Londres, British Museum).*

un peu plus étendues dans la mésostase, ou pâte de fond. Le feldspath est représenté par des phénocristaux et des microlites qui constituent la partie principale de la mésostase : il s'agit généralement de sanidine dans les trachytes potassiques et d'albite ou, plus souvent, d'anorthose dans les variétés sodiques. Les microlites feldspathiques de la mésostase et les phénocristaux de feldspaths, de forme aplatie et allongée, sont généralement tassés les uns contre les autres et disposés de manière parallèle (structure trachytique). C'est aussi cette disposition que l'on appelle structure fluidale ; elle résulte de l'iso-orientation des cristaux au cours de l'écoulement de la lave.

Les **porphyres rhombiques** de Scandinavie sont ainsi nommés car sur leurs échantillons on voit à l'œil nu des sections de feldspaths de forme losangique. Ces cristaux, de couleur blanche à verte, baignent dans une pâte aphanitique de composition anorthosique. Les feldspaths sont des antiperthites (plagioclase sodique contenant des veines d'un feldspath sodi-potassique) ; ils baignent dans une pâte aphanitique de composition anorthosique. Ces roches sont caractéristiques du sud de la Norvège, où elles sont associées aux larvikites dont elles sont souvent considérées comme les équivalents effusifs. Les feldspaths sodiques sont prédominants dans les trachytes alcalins, qui s'associent souvent à d'autres roches contenant de l'albite, les spilites, lesquels dans ce cas prennent le nom de **kératophyres.**

Les trachytes renferment aussi des minéraux ferromagnésiens, c'est-à-dire de la biotite, des orthopyroxènes et des amphiboles ; parfois, les variétés plus basiques qui résulteraient de l'hybridation avec des roches basaltiques contiennent un peu d'olivine. Dans de nombreux trachytes, on rencontre des pyroxènes et des amphiboles sodiques (actinite-ægyrine-cossirite-ænigmatite), et cela non seulement dans les trachytes hyperalcalins mais aussi dans les trachytes normaux potassiques. Dans l'île de Pantelleria, on rencontre, associés aux pantellérites qui sont des rhyolites hyperalcalines avec des faibles quantités de quartz, des trachytes sodiques constitués essentiellement par de l'anorthose et de la cossyrite, qui est une amphibole sodique très rare. Les **trachytes pantellériques** sont dépourvus de quartz mais peuvent contenir des petites quantités d'olivine.

Les phonolites sont des roches grisâtres, d'aspect assez semblable à celui des trachytes ; elles doivent leur nom au fait que lorsqu'elles sont percutées par un marteau elles émettent un son particulier. Généralement, ce sont des roches compactes qui ne montrent pas la texture bulleuse de nombreux trachytes. L'association de feldspaths et de feldspathoïdes est caractéristique des roches phonolitiques ; ces minéraux sont nettement prédominants sur les minéraux ferromagnésiens, les phonolites sont donc les équivalents effusifs des syénites à feldspathoïdes. Les phonolites résultent de la cristallisation de magmas sous-saturés en silice et très riches en éléments alcalins ainsi qu'en aluminium. On connaît tous les stades de transition entre les trachytes et les phonolites proprement dites, riches en feldspathoïdes. Les termes de passage sont appelés **trachytes phonolitiques** s'ils contiennent des petites quantités de feldspathoïdes et de zéolites sodiques associées à des quantités plus ou moins importantes de feldspath potassique ou sodipotassique (anorthose), et à des minéraux ferromagnésiens en faible teneur, c'est-à-dire des amphiboles et des pyroxènes sodiques ainsi que, parfois, des petites quantités d'olivine.

Les phonolites proprement dites contiennent des pourcentages notables de feldspathoïdes avec des zéolites et sont classées en fonction du feldspathoïde dominant.

— Le type le plus commun est représenté par des **phonolites à néphéline** dans lesquelles la néphéline est associée à de la sanidine ou à de l'anorthose avec, en plus, les minéraux ferromagnésiens que l'on rencontre dans les trachytes. Dans certaines phonolites néphéliniques, on trouve aussi de l'analcime, qui est une zéolite sodique ; d'autres contiennent, outre de la néphéline, des feldspathoïdes comme la sodalite et la noséane.

— Un second groupe est représenté par les **phonolites à leucite,** dans lesquelles on rencontre, en plus des minéraux des phonolites à néphéline, la leucite. La leucite peut être présente en faibles quantités ou bien en quantités prédominantes par rapport à la néphéline ; on parle alors de **leucitophyres,** composées essentiellement de phénocristaux de leucite, parfois accompagnés d'autres feldspathoïdes, comme la noséane et l'haüyne, avec de nombreux minéraux ferromagnésiens représentés par des pyroxènes et des amphiboles sodiques, de la biotite, noyés dans une mésostase formée de microlites de sanidine et, en moindre quantité, de néphéline. Si la quantité de néphéline est très élevée, on a des **leucitophyres néphéliniques ;** l'accroissement de la teneur en haüyne aboutit à la formation de roches que l'on appelle des **haüynites ou haüynophyres.**

La majeure partie des trachytes et des phonolites possède une structure porphyrique ; leur mésostase est essentiellement ou entièrement cristallisée. Toutefois, on connaît des trachytes à structure vitreuse et parfois caractérisés par une texture très bulleuse, qui prennent le nom d'obsidiennes et ponces trachytiques ; les obsidiennes trachytiques sont de couleur foncée contrairement aux trachytes normaux qui sont très clairs.

Les trachytes alcalins ou sodiques sont bien représentés en France ; ils jouent un rôle important dans le volcanisme du Velay. Ils se présentent sous forme de pitons, ou « sucs », qui dominent les plateaux voisins. Ces pitons se forment par concentration *in situ* de la lave extrêmement visqueuse qui n'arrive pas à s'écouler.

LES TRACHY-ANDÉSITES ET LES TRACHY-BASALTES

Les trachy-andésites et les trachy-basaltes sont des roches effusives constituées par l'association d'un plagioclase sodico-calcique (oligoclase-andésine) ou calco-sodique (andésine-labrador) avec un feldspath alcalin, généralement de la sanidine, et des minéraux ferromagnésiens. La différenciation entre trachy-andésites et trachy-basaltes est fonction de la composition du plagioclase.

Dans les **trachy-andésites,** le plagioclase est acide (oligoclase, voire andésine) ; il se présente sous forme de phénocristaux analogues à ceux que l'on rencontre dans les andésites. La sanidine se situe généralement dans la mésostase sous forme de microlites. Mais cette disposition n'a pas un caractère général et, parfois, on rencontre la sanidine sous forme de phénocristaux et le plagioclase en microlites dans la pâte, ce qui rend cette roche très semblable aux trachytes. Les minéraux ferromagnésiens sont assez peu représentés dans ces types de roches ;

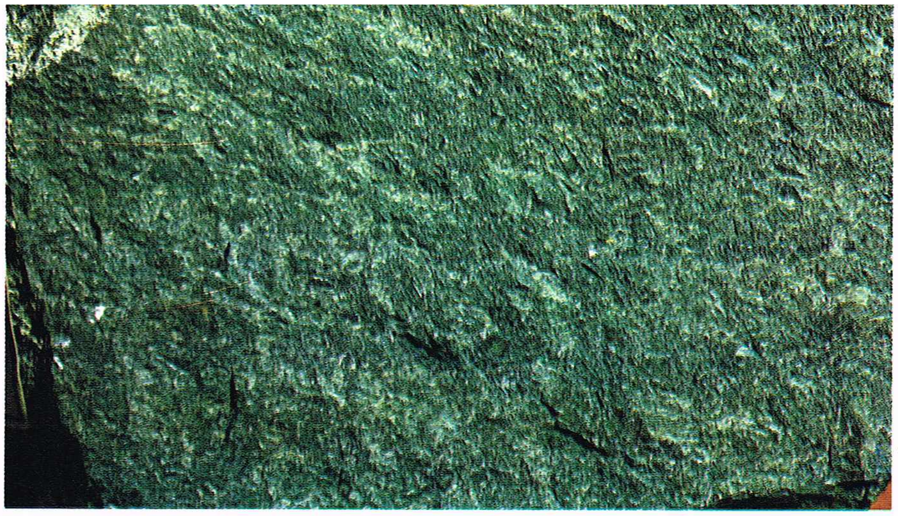

C. Bevilacqua

Archives photo B

▲ *En haut, aspect macroscopique d'une* **phonolite** *des îles Canaries. Ci-dessus,* **phonolite à néphéline :** *la pâte de fond (mésostase) est essentiellement formée par des microlites allongés de sanidine et des petits prismes trapus de néphéline ; le gros cristal est un plagioclase sodique de type albite avec une zone externe ou auréole de sanidine. La présence de l'albite dans ces roches est inhabituelle (lame mince en nicols croisés).*

Archives photo B

R. Clochiatti — Archives photo B

▲ *Dans le Massif central, les trachytes calco-alcalins, auxquels on a attribué des dénominations locales, constituent l'ensemble des volcans d'Auvergne.*
▼ *Ci-dessous, un échantillon de* téphrite *montrant une structure bulleuse nette. En bas,* téphrite à néphéline : *le plagioclase (cristaux gris) et l'augite (cristaux de teintes vives) se présentent sous forme de lamelles, la néphéline sous forme de plages irrégulières. On remarque un peu de calcite d'origine secondaire (lame mince en nicols croisés).*

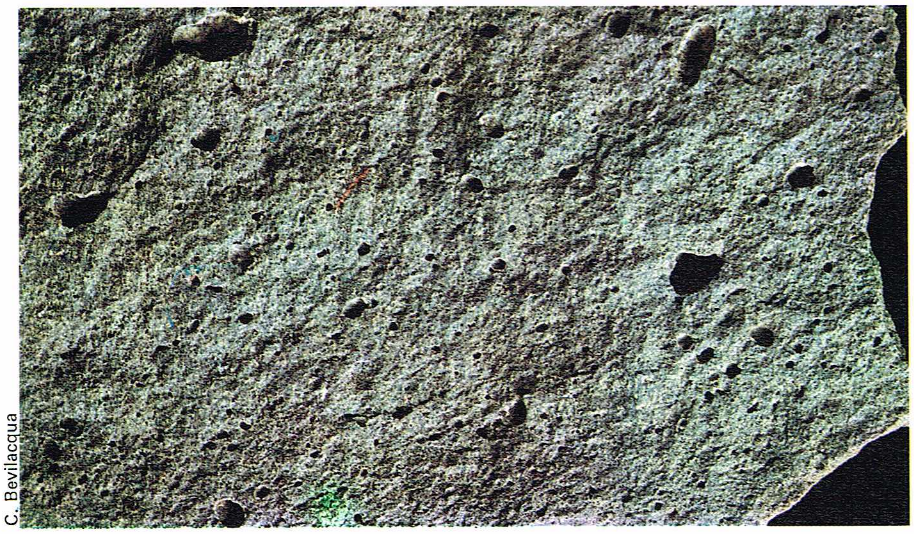

C. Bevilacqua

Archives photo B

ils sont constitués essentiellement de biotite et, de manière plus accessoire, d'amphibole. Les trachy-andésites sont les équivalents effusifs des monzonites, et constituent un terme de transition entre les roches effusives intermédiaires de la série alcaline (trachytes) et celles de la série calco-alcaline (andésites). Ils peuvent se trouver associés avec des laves appartenant à ces deux groupes auxquels ils passent progressivement. Dans les Andes et les montagnes Rocheuses, ils sont associés avec des andésites. Ils constituent avec ces roches les équivalents effusifs des batholites granodioritiques et monzonitiques de cette région. Les auteurs anglo-saxons désignent souvent les trachy-andésites sous le nom de **latites** (du Latium, région de l'Italie centrale où ces roches sont assez abondantes).

Les **trachy-basaltes** sont des roches effusives d'aspect très semblable aux basaltes, avec lesquels elles sont souvent associées. La différence entre les trachy-basaltes et les basaltes est fondée sur la présence de feldspath potassique (généralement sanidine ou anorthose), d'un plagioclase de type labrador ou bytownite et de minéraux ferromagnésiens caractéristiques des basaltes, c'est-à-dire des pyroxènes et parfois de l'olivine. Certains auteurs rangent parmi les trachy-basaltes des roches d'aspect et de composition chimique voisins de ceux des basaltes mais qui contiennent, en plus des minéraux ferromagnésiens des basaltes, un plagioclase de type oligoclase ou andésine. On donne à ces roches le nom de **mugéarites.** Celles-ci sont généralement associées à des basaltes à olivine, dont elles pourraient résulter par différenciation fractionnée vers un pôle alcalin. Certains auteurs désignent les trachy-basaltes par le nom d'**hawaiites.**

Les définitions des trachy-andésites et des trachy-basaltes sont souvent différentes en fonction des auteurs considérés. Cela est dû au fait que certains tiennent compte de la composition chimique des roches, et d'autres de leur composition minéralogique, critère habituellement utilisé. La distinction entre les deux familles s'effectue, le plus souvent, en fonction de la qualité du plagioclase. Des roches appartenant aux deux familles se trouvent parfois dans un même complexe volcanique, où elles peuvent constituer une suite de différenciation continue entre le pôle andésitique et le pôle basaltique. Leur origine est encore incertaine. Souvent, elles sont considérées comme le résultat d'un phénomène d'hybridisme entre un magma basaltique et un magma trachytique, ce dernier pouvant provenir par différenciation fractionnée du même basalte.

En France, les trachytes calco-alcalins (trachy-andésites et trachy-basaltes) sont très répandus en Auvergne, où ils forment une suite presque continue allant d'un pôle hololeucocrate (roches complètement blanches de type trachytique) jusqu'à un pôle mésocrate (roches sombres à tendance basaltique). Dans le Massif central, on leur a attribué une dénomination locale distinguant quatre types : les *domites,* les *sancyites,* les *doréites* et les *trachy-basaltes.*

La **domite** constitue l'ensemble du volcan du puy de Dôme. Il s'agit d'un trachy-andésite de couleur blanche à l'aspect et à la consistance crayeux. Les phénocristaux

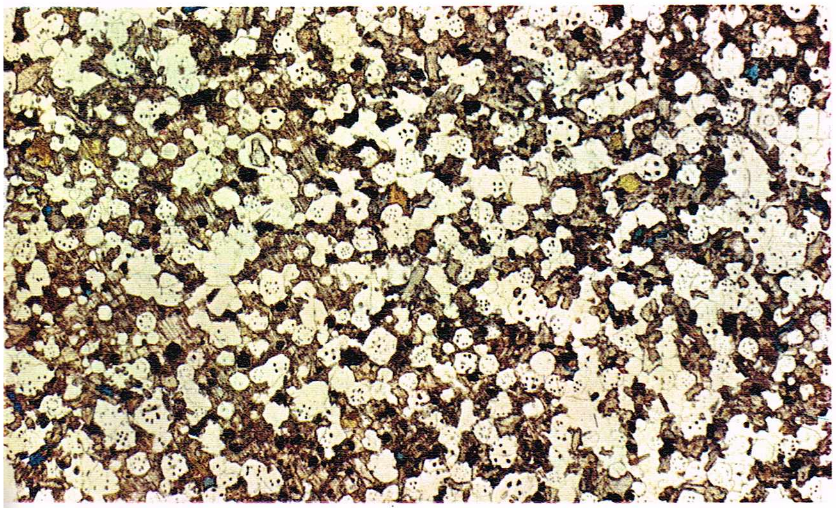

sont très rares et la mésostase est constituée par des microlites d'oligoclase dominants et par de la sanidine. On rencontre quelques paillettes de biotite, qui constitue le seul minéral ferromagnésien, et parfois de la silice sous forme de cristobalite et de tridymite.

La **sancyite** doit son nom au pic du puy de Sancy. C'est aussi un trachy-andésite, mais de couleur grise et au toucher rugueux; sa structure est nettement porphyrique. Les phénocristaux sont constitués de sanidine et d'andésine; la pâte contient un peu de verre ainsi que de nombreux microlites de feldspath, de biotite, d'amphibole et un peu d'augite. La cristobalite et la tridymite sont toujours présentes.

Dans la **doréite**, dont le nom dérive du massif du Mont-Dore, la couleur sombre est accentuée par l'apparition de quantités de plus en plus importantes de minéraux ferromagnésiens; les minéraux ferromagnésiens sont la hornblende, l'augite et parfois l'olivine.

Les **trachy-basaltes** sont des trachytes mésocrates à faciès basaltiques, sans nom particulier. Ce sont des roches constituées par du labrador en phénocristaux et microlites entourés par une couronne de sanidine; les minéraux ferromagnésiens sont, comme dans les basaltes vrais, de l'augite violette titanifère et de l'olivine.

LES ROCHES BASIQUES ET ULTRABASIQUES A FELDSPATHOIDES

Il convient de réunir dans une catégorie unique les différentes roches effusives basiques et ultrabasiques à feldspathoïdes, car un grand nombre de ces roches se trouve associé dans les mêmes appareils volcaniques. Ce sont généralement des roches de couleur sombre, très riches en minéraux ferromagnésiens. Lorsque les feldspathoïdes et les zéolites sont représentés, ils se détachent du fond de la roche sombre par leur couleur claire. La subdivision en roches basiques ou ultrabasiques s'effectue en fonction de la présence ou non du plagioclase calcique.

Les **téphrites** et les **basanites** sont des roches basiques à feldspathoïdes; elles ont une composition minéralogique assez voisine mais les premières sont dépourvues d'olivine. Ces roches sont semblables aux basaltes, macroscopiquement et microscopiquement, la seule différence fondamentale étant la présence de feldspathoïdes et de zéolites. Elles contiennent des minéraux caractéristiques, comme la néphéline, la leucite et l'analcime, seuls ou associés; on rencontre parfois aussi d'autres feldspathoïdes, comme l'haüyne.

Les téphrites et les basanites ont une structure porphyrique avec des phénocristaux de leucite, d'augite et de plagioclase. Le plagioclase est aussi présent dans la mésostase sous forme de microlites (la mésostase est très souvent vitreuse); le plagioclase est généralement un labrador ou une bytownite zonée. La leucite se présente en trapézoèdres ou leucitoèdres, caractérisés par des contours arrondis et des inclusions vitreuses disposées régulièrement dans des plans de croissance du cristal. Les minéraux ferromagnésiens sont présents en quantités variables, mais toujours assez importantes : il s'agit d'augite normale ou sodique, plus rarement de hornblende basaltique, de biotite et parfois d'olivine. L'analcime est généralement disposée dans les espaces laissés libres par les autres minéraux par suite de sa cristallisation tardive. Cela est également valable pour la néphéline, qui peut aussi se présenter en cristaux idiomorphes.

Les **leucitites** appartiennent à un groupe de roches effusives caractérisées par l'association de feldspathoïdes et de minéraux ferromagnésiens ainsi que par l'absence totale de plagioclase. Il s'agit de roches alcalines sous-saturées en silice qui accompagnent souvent les phonolites, dont elles dérivent par différenciation vers le pôle ferromagnésien. Elles ne peuvent être considérées comme des basaltes car elles sont dépourvues de plagioclases; les variétés à olivine sont parfois appelées basaltes leucitiques, néphéliniques ou mélilitiques. Les leucitites sont, sans aucun doute, les plus répandues parmi ces roches; souvent associées aux téphrites, elles renferment, outre la leucite, du pyroxène monoclinique, de la biotite et quelques autres minéraux en quantités accessoires, comme la néphéline, l'haüyne et la mélilite. L'**italite** est un terme régional qui désigne une leucitite presque exclusivement formée de cristaux de leucite et de verre volcanique. C'est une roche résultant d'une différenciation gravitative avec accumulation des cristaux de leucite très légers dans les parties hautes de la lave. Elle constitue une roche intrusive à caractère superficiel, voire subvolcanique. Les **leucitites à olivine**, appelées aussi improprement *basaltes leucitiques*, sont assez répandues; elles contiennent sou-

▲ *A gauche,* **leucitite** *de Capo Bove (Rome) : de petits cristaux de leucite montrent des inclusions vitreuses disposées parallèlement aux faces des cristaux; des plages de verre volcanique incolore sont accompagnées de petits cristaux d'augite et de mélilite ainsi que des cristaux opaques de magnétite (lame mince en nicols croisés).*
A droite, **néphélinite** *: la néphéline se présente sous forme de petits cristaux avec des teintes de biréfringence du gris foncé au noir, associés à des cristaux d'augite colorés et de plus grandes dimensions (lame mince en nicols presque croisés).*

▼ *Un macro-échantillon de* **leucitite** *(Latium, Italie).*

▶ Superposition dans le temps et l'espace de coulées et de projections pyroclastiques de composition chimique différente pendant l'évolution du mont Somma (Vésuve). Du haut vers le bas : le Somma Primitif constitué de projections tufacées et de coulées trachytiques; dans sa caldeira s'est construit le Somma Ancien formé de coulées de téphrites leucitiques avec un feldspath potassique; puis l'Ancien Somma a été détruit par de nombreuses explosions qui se sont accompagnées du dépôt de matériaux pyroclastiques de même composition que les téphrites leucitiques (Jeune Somma). Dans la vaste caldeira sommitale du Jeune Somma, formée au cours de la terrible explosion de 79 après J.-C. qui détruisit Pompéi et Herculanum, s'est construit l'actuel Vésuve formé de leucites téphritiques (d'après Rittmann).

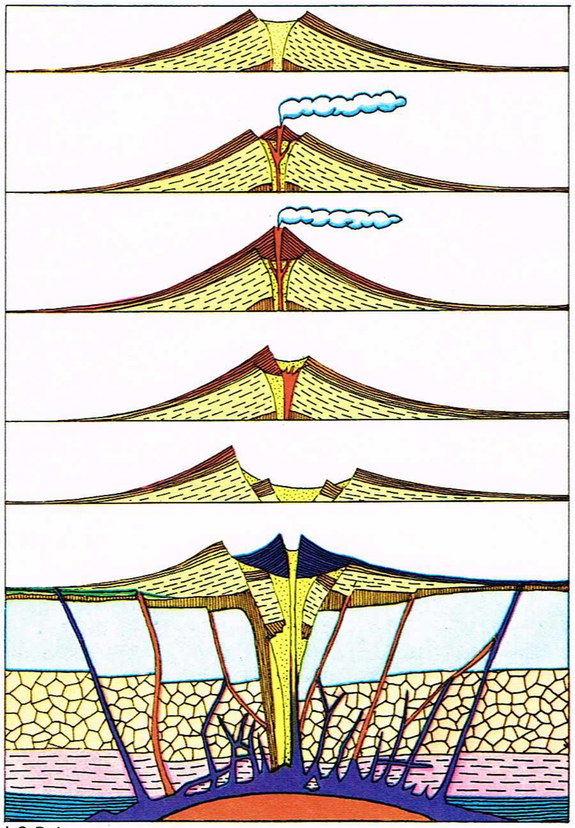

I.G.D.A.-

vent de la phlogopite, un mica magnésien. Certaines leucitites contiennent un verre volcanique très siliceux, le résidu magmatique surfondu n'ayant pas réagi avec la leucite pour la transformer en orthose. D'autres roches leucitiques contiennent des petites quantités de sanidine et marquent le stade de passage entre les phonolites et les leucitophyres.

Les **néphélinites** contiennent de la néphéline avec de très nombreux minéraux ferromagnésiens, parmi lesquels l'augite sodique ou titanifère est prédominante. L'olivine caractérise les **néphélinites à olivine,** parfois appelées de manière impropre *basaltes néphéliniques.* Le mica phlogopite et le sphène forment de vastes plages qui emprisonnent des petits cristaux de néphéline primaire; la néphéline peut se présenter aussi bien en cristaux xénomorphes qu'automorphes. Les pyroxènes montrent parfois des auréoles d'accroissement tardives qui piègent des cristaux de néphéline et de magnétite. Des roches de même composition chimique, mais totalement vitreuses, se rattachent à cette catégorie.

La néphéline peut être remplacée par de la kalsilite ou par de la kaliophylite. Ces minéraux ont une famille chimique et un réseau cristallin assez semblables à ceux de la néphéline, mais le sodium se trouve remplacé par du potassium. Dans le cas de la néphéline, les possibilités de substitution du sodium par le potassium sont limitées. A température très élevée, ces minéraux peuvent se mélanger en toutes proportions; à des températures plus basses, il y a démixtion de deux phases comme dans le cas des perthites et des antiperthites. Les roches à kalsilite résultent de la cristallisation d'un magma encore plus pauvre en silice que celui qui donne naissance aux roches basiques à leucite. La formule chimique de la kalsilite $KAlSiO_4$ montre en effet une molécule de SiO_2 de moins que celle de la leucite $KAlSi_2O_6$.

Les **mélilitites** sont des laves contenant de la mélilite, minéral voisin des feldspathoïdes car très pauvre en silice mais dans lequel les alcalins sont remplacés par du calcium et du magnésium. Elles peuvent être prises en considération avec les roches à feldspathoïdes. Elles comprennent de la mélilite et de l'olivine dominantes (ce qui leur a valu longtemps le nom de basaltes à mélilite) avec parfois du pyroxène, de la néphéline, de la chromite et de la pérowskite. Dans certaines mélilitites, la biotite titanifère peut devenir le minéral fondamental ou cardinal, la calcite étant souvent présente comme minéral accessoire. Les mélilitites caractérisées par une teneur élevée en calcium se présentent sous forme de gisements filoniens et sont associées à des carbonatites.

Des études de synthèse ont montré que l'association pyroxène monoclinique-néphéline, caractéristique des néphélinites, se transforme à température élevée en association olivine-mélilite, caractéristique des mélilitites. Les mélilitites sont donc des roches hyposiliceuses alcalines qui résultent d'un refroidissement brutal. Elles sont liées à des phénomènes d'appauvrissement en silice d'un magma de type basaltique analogue à ceux qui donnent naissance aux roches sialiques à feldspathoïdes.

Origine des roches basiques et ultrabasiques à feldspathoïdes

Les roches basiques et ultrabasiques contenant de la leucite se trouvent dans certaines provinces pétrographiques bien délimitées, localisées dans des zones continentales; les zones les plus classiques de ce type de volcanisme sont le Latium et la Campanie en Italie.

Les auteurs qui ont étudié les provinces pétrographiques potassiques ont émis plusieurs théories pour expliquer ce type particulier de différenciation des magmas primaires.

Le volcanologue A. Rittmann a appliqué aux laves leucitiques du Vésuve la théorie de R.A. Daly. Selon Rittmann, les leucitites du Vésuve résulteraient de l'assimilation par un magma originellement trachytique de roches calcaires et dolomitiques qui constituent le substratum du Vésuve. A partir de ce magma enrichi en calcium et magnésium se seraient séparés par gravité des cristaux appartenant essentiellement à la famille des pyroxènes, ce qui aurait provoqué un appauvrissement en silice du magma. Ce magma se serait, par la suite, enrichi en éléments alcalins provenant de la chambre magmatique profonde et transportés par les éléments volatils. Le sodium, toujours par l'effet des gaz, se serait échappé à travers les parois de la chambre magmatique. L'ensemble de ces phénomènes complexes de différenciation a abouti en premier lieu à l'effusion de roches de type trachytique, suivie, après une période de calme, par l'effusion de téphrites leucitiques avec un feldspath potassique qui ont construit le Vieux Somma. Ce dernier a été recouvert par un stratovolcan de téphrites leucitiques qui ont construit le Nouveau Somma. Le Vésuve actuel a pris naissance, dans des temps historiques, dans la caldeira terminale du Nouveau Somma; il est formé par des leucitites contenant un peu de plagioclase. Les fréquents phénomènes explosifs qui ont secoué ce volcan ont amené à l'affleurement des enclaves calcaires thermo-métamorphosées et des enclaves de syénites et de syénites néphéliniques qui représenteraient les produits de cristallisation du magma en profondeur. L'hypothèse de Rittmann ne peut s'appliquer aux autres complexes effusifs leucitiques, dépourvus de xénolites calcaires, épanchés sous les phénomènes éruptifs caractéristiques du mont Somma.

D'autres chercheurs pensent que les laves leucitiques dérivent des magmas ultrabasiques alcalins de type péridotique (kimberlites), dépourvus des minéraux de première cristallisation. Ces magmas auraient donné naissance dans des conditions intrusives et à haute pression à des dunites et des éclogites. Le résidu magmatique alcalin, après avoir assimilé les minéraux potassiques des roches sialiques, aurait par la suite donné naissance à des laves leucitiques feldspathiques et non feldspathiques. Cette hypothèse se heurte au fait que les magmas péridotitiques n'existeraient pas à l'état fondu dans la croûte terrestre. On a aussi émis l'idée d'une fusion sélective et d'une assimilation de roches préexistantes par des magmas de type carbonatitiques, ainsi que l'hypothèse d'un processus essentiellement métasomatique avec enrichissement en potassium et en autres éléments d'origine profonde avec fusion successive.

Dans l'ensemble, on admet que les laves leucitiques dérivent de magmas basaltiques alcalins, à la suite de l'assimilation de roches sialiques potassiques, ainsi que le confirment les xénolites que l'on rencontre dans les laves leucitiques; ces enclaves xénolitiques sont souvent cristallines ou même vitreuses. L'enrichissement en potassium se traduit par la cristallisation de la leucite à partir des produits de différenciation du magma basaltique alcalin, au lieu de la néphéline observée normalement dans les cas où il n'y a pas assimilation de roches sialiques.

(Suite dans le volume II de Géologie.)

ENCYCLOPÉDIE DES SCIENCES

GÉOLOGIE

II

GRANGE BATELIÈRE

GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

GÉOLOGIE

II

GRANGE BATELIÈRE, PARIS - ÉDITIONS KISTER, GENÈVE - ÉRASME, BRUXELLES-ANVERS

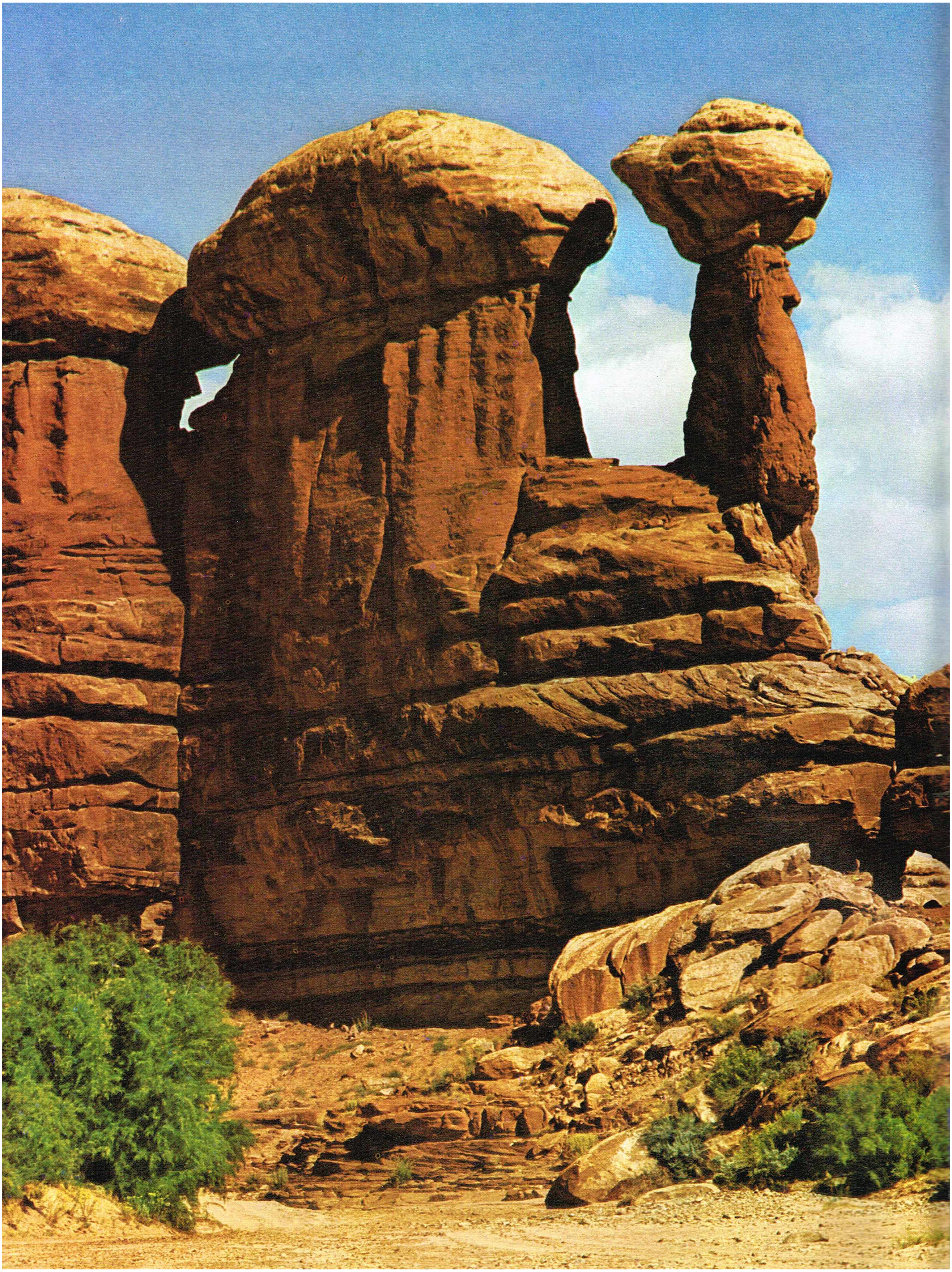

Publiée sous le haut patronage de :
Messieurs les professeurs :
Jean DORST, membre de l'Institut,
Charles FEHRENBACH, membre de l'Institut,
Roger HEIM, membre de l'Institut,
Monsieur l'amiral André JUBELIN,
Messieurs les professeurs :
Pierre LÉPINE, membre de l'Institut,
Louis LEPRINCE-RINGUET, de l'Académie française,
Jean-François LEROY, professeur au Muséum national d'histoire naturelle,
Henri NORMANT, membre de l'Institut,
Monsieur Jacques PICCARD, docteur ès sciences h.c.

Réalisation	IDÉES ET ÉDITIONS 16, avenue de Friedland, 75008 Paris
Comité de direction	Simone DEVAUX, Uberto TOSCO.
Rédaction	Patrick PHLIPONEAU, Françoise MENU, Marie-Noëlle PAILLETTE, Vanina DORÉ.
Recherche de l'illustration	Mathilde RIEUSSEC.
Mise en pages	Tito TOPIN et Serge BROCHE.
Illustrations techniques	Richard COLIN.
Coordinateur des dessins	Mario LOGLI.
Fabrication	Sylvia COLIN, Sylvie MARCHAND, Jocelyne DUCHESNE, Jocelyne TÉPÉNIER.
Directeur de la publication	J.-P. BRÉVOST.

N. Cirani

Ont collaboré à ce volume :

D. et J. BOURLOTON,
avec la collaboration de A. PUYFAUCHER, pour la géomorphologie.

R. MAIGNIEN, pour la pédologie.

G. CASTANY, pour l'hydrogéologie.

B. ALPERN,
pour l'introduction aux roches combustibles et les roches combustibles solides.

A. COMBAZ, pour les hydrocarbures naturels.

A. BOITEAU,
pour le métamorphisme et les roches métamorphiques, et pour la tectonique.

Vulcain - Explorer

▲ *Les roches pyroclastiques sont le résultat de l'activité explosive des volcans; ici, les* ***cendres volcaniques*** *du Helgafell (au fond) ont, en retombant, recouvert la zone de Heimay en Islande.*

PHÉNOMÈNES ET ROCHES IGNÉS (suite)

LES ROCHES PYROCLASTIQUES

Les roches pyroclastiques sont le résultat de l'activité explosive des volcans. Le moteur de l'activité explosive résulte de l'énorme quantité de gaz magmatique, qui fracture et pulvérise aussi bien la lave fluide que les roches consolidées au voisinage de l'appareil volcanique. Les matériaux pyroclastiques se déposent en milieu subaérien ou subaquatique et sont souvent remaniés par les eaux météoriques (pluies), par les fleuves ou par les courants marins. Ces roches acquièrent de cette façon les caractères et les structures propres aux roches sédimentaires détritiques. En fonction des dimensions des fragments, on distingue les brèches et les agglomérats volcaniques (fragments supérieurs à 32 mm de diamètre), les tufs (de 32 à 0,25 mm) et les cendres volcaniques (moins de 0,25 mm).

Les **brèches volcaniques** sont composées de fragments anguleux de dimensions assez variables au sein du même dépôt, généralement formés par les débris de roches encaissantes de la cheminée volcanique, ou consolidées dans le magma dans des conditions intrusives. Elles étaient donc déjà à l'état solide au moment de la fragmentation. Les **agglomérats volcaniques** sont, par contre, formés par des fragments de lave qui étaient encore plastiques au moment de l'explosion volcanique et qui, retombant sur le sol, se sont modelés les uns sur les autres.

Les **brèches d'explosion** sont analogues aux brèches volcaniques par leur aspect, mais leur origine est différente. Elles sont constituées par des blocs énormes de roches fragmentés avant l'explosion, noyés dans un ciment formé par de très fins fragments de verre volcanique et de roches encaissantes. Les brèches d'explosion se présentent sous forme de corps colonnaires, ou « pipes », subverticaux, avec des conditions de gisement intrusives. Elles représentent le remplissage de cheminées éruptives le long desquelles s'est effectué le départ des gaz magmatiques. Dans certaines brèches d'explosion, les blocs ont été émoussés par le passage de grandes quantités de gaz volcaniques qui transportaient du matériel pyroclastique très fin. Ce phénomène de fluidification d'une masse détritique solide par un balayage de gaz a donné naissance à des **brèches** et **tufs intrusifs**, qui sont des roches pyroclastiques particulièrement hétérogènes du point de vue granulométrique et concordantes du point de vue des conditions de gisement.

Les **tufs volcaniques** proprement dits se sont déposés à la surface du globe, généralement par retombée de fragments qui résultent d'une explosion volcanique. On observe donc parmi les fragments une diminution de leur granulométrie lorsque l'on s'éloigne du centre éruptif.

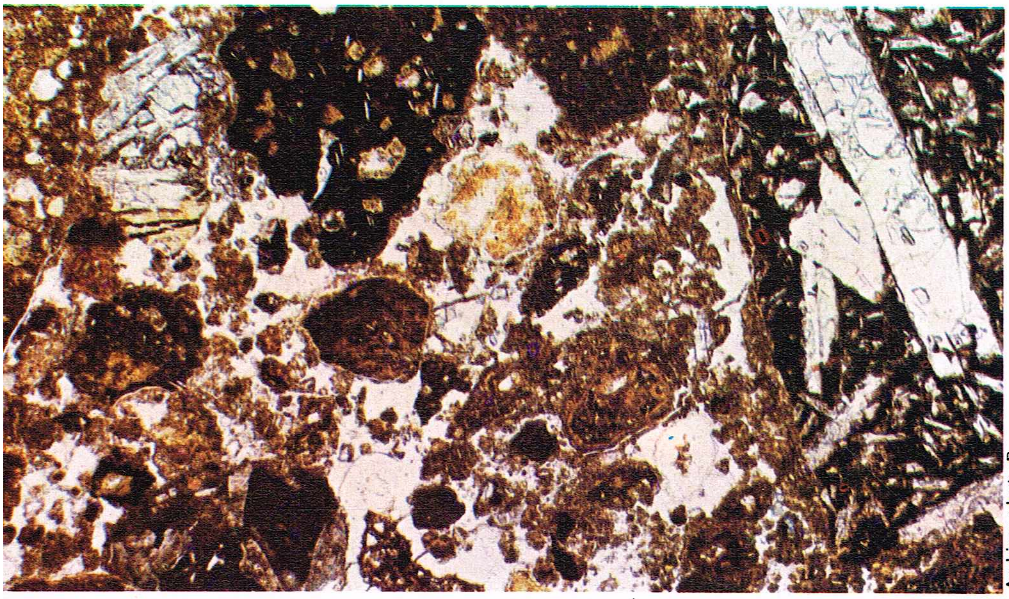

Archives photo B

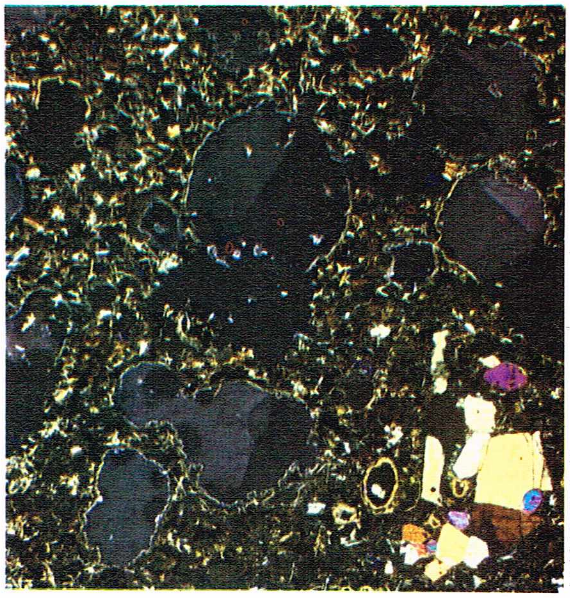

Archives photo B

▼ *A gauche,* **ignimbrite** *renfermant des enclaves de roche volcanique et montrant, en haut de la photographie, un début de stratification. A droite, un* **ignimbrite** *: la roche est formée essentiellement de phénocristaux de quartz (jaune pâle), de feldspaths, de fragments de ponce (verre bulleux) et d'esquilles de verre, en forme de biseaux, déformées et soudées les unes aux autres. Le verre est partiellement dévitrifié; on remarque de la séricite dans la mésostase (lame mince en nicols croisés).*

Les éléments composants des tufs peuvent être divisés en trois catégories.

— En premier lieu, les fragments de verre volcanique qui résultent de la pulvérisation du magma à l'état fluide. Ces débris, souvent allongés et filiformes ou en forme de gouttes par suite de leur trajet dans l'atmosphère, sont aussi appelés « cheveux de Pelée » car ils abondent dans les projections des volcans hawaiiens. Généralement, les fragments de verre sont très poreux par suite de la démixtion de la phase gazeuse dissoute dans le verre; les débris sont alors appelés « pierres ponces »; ils flottent et peuvent être amenés par les courants marins à de très grandes distances. Dans les tufs pulvérulents à grains fins, les fragments vitreux ont une morphologie caractéristique : il s'agit d'esquilles courbes (demi-lune) qui résultent de la pulvérisation de morceaux de ponce bulleuse.

— Le second composant des tufs est représenté par des minéraux intratelluriques parfaitement automorphes et libérés de la lave au moment de l'explosion volcanique. Ces minéraux sont souvent recouverts par une gaine de verre bulleux. Le Vésuve a émis des tufs caractérisés par la présence de cristaux d'augite et de néphéline; il existe aussi des tufs à plagioclases.

— En troisième lieu, les tufs sont constitués par des fragments de roches antérieures ou non à l'explosion volcanique.

En fonction de la quantité relative de l'un ou de l'autre de ces composants, on distingue les **tufs vitreux,** les **tufs à cristaux** et les **tufs lithoïdes.**

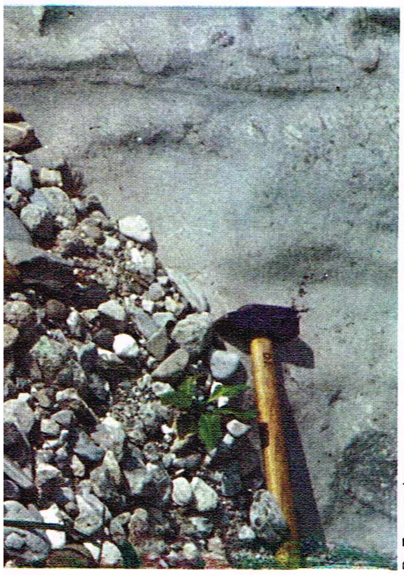

D. Fernandez

Archives photo B

La composition chimique des tufs est généralement analogue à celle des roches magmatiques auxquelles ils sont associés. Du point de vue quantitatif, les tufs correspondant aux roches acides sont beaucoup plus répandus : ils prennent naissance à partir de magmas plus visqueux, donc plus facilement sujets à des éruptions de type explosif. Les tufs de composition intermédiaire ou fémique existent aussi mais sont beaucoup plus rares.

Les tufs volcaniques subissent des changements importants au cours de la diagenèse, notamment de composition chimique. De nombreux tufs fins déposés en milieu marin sur des surfaces très vastes, et constitués essentiellement par des fragments vitreux, se transforment en minéraux phylliteux, notamment en minéraux de la famille des montmorillonites. C'est ainsi que prennent naissance les **bentonites,** qui sont des argiles très recherchées pour leurs applications industrielles (boues de forages, etc.). Les fragments de verre d'autres tufs vont libérer de la silice colloïdale, provoquant ainsi une cimentation (silicification) importante de la roche; ensuite, cette silice cristallisera sous forme de quartz microcristallin ou sous forme de cristaux authigènes. On attribue une origine semblable à de très anciennes roches caractéristiques du Précambrien de nombreuses régions, notamment de Scandinavie, et qui sont appelées **halleflints.**

L'activité hydrothermale et pneumatolytique peut provoquer le dépôt d'opale ou calcédoine et de calcite dans les zones vacuolaires des tufs et transformer certains minéraux volcaniques (ferromagnésiens) et le verre en chlorite.

Les **cendres volcaniques** les plus fines peuvent être transportées par le vent à des distances considérables et rester en suspension très longtemps. Ainsi, les cendres du Krakatoa se sont élevées jusqu'à 15 km de haut et les poussières les plus fines ont été satellisées et ont effectué plusieurs fois le tour du globe; elles ont même été observées à plusieurs reprises en France. En retombant, ces cendres recouvrent de vastes zones mais sur des épaisseurs assez faibles.

Les **ignimbrites** (pluie de feu) sont des roches semblables aux roches effusives mais résultent d'un phénomène intermédiaire entre celui qui donne naissance aux laves et les processus explosifs qui engendrent les tufs. Les ignimbrites ont une composition acide généralement assez marquée, composition chimique de type rhyolitique pouvant atteindre les termes andésitiques en passant par les dacites. Ces roches couvrent de vastes régions et atteignent parfois des épaisseurs considérables. Les laves acides très visqueuses ne peuvent assumer de telles conditions de gisement que par un processus physique semblable à celui qui donne naissance aux nuées ardentes. Le magma fondu est pulvérisé par la brusque démixtion de la phase gazeuse originellement dissoute dans le bain fondu. Les fragments de lave encore incandescents forment une suspension solide dans le milieu transporteur gazeux, les gaz continuant à s'échapper de chaque

fragment. Cette masse incandescente dévale rapidement les pentes du volcan pour former une strate de tufs, dont les fragments encore plastiques peuvent se souder les uns aux autres et mimer ainsi la structure d'une roche effusive. Un processus analogue, bien que moins spectaculaire et moins violent, peut être à l'origine de très grandes coulées rhyolitiques et acides, lesquelles proviendraient de laves rendues moins visqueuses par la démixtion continuelle des gaz pendant l'éruption. Ces phénomènes peuvent aussi se produire sous une couche d'eau. La plupart des rhyolites permiennes de France (Estérel, Vosges) sont actuellement considérées comme d'anciennes ignimbrites ; il en va de même pour les paléolaves du Massif armoricain. La seule éruption ignimbritique acide connue a eu lieu au Katmaï (Alaska) en 1912 : en quelques heures, la couche d'ignimbrites a rempli la vallée de l'Urak sur plus de 20 km de long et 4 km de large et a formé une épaisseur dépassant 100 m.

Les magmas primaires et les processus de différenciation magmatique

La diversité des compositions minéralogique et chimique des roches magmatiques est atténuée par les rapports existant entre les différents types d'associations. En effet, dans chaque région du globe où l'on rencontre des roches ignées, intrusives et effusives (formées pendant un laps de temps identique, même très long, correspondant à une même activité magmatique), celles-ci possèdent certains caractères de composition chimique communs aux différents types pétrographiques. Ces roches constituent donc une association pétrographique, et l'on peut penser qu'elles dérivent d'un seul magma générateur.

Les chercheurs pensent que le magma granitique et le magma basaltique représentent les deux seuls types de magmas primaires. La genèse de roches ignées de composition différente de celle des granites et des basaltes est expliquée par le biais des processus de différenciation à partir des magmas primaires qui auraient donné naissance à des magmas dérivés (de composition chimique différente) ou bien qui résulteraient de l'accumulation de minéraux cristallisés à partir du magma primaire.

Le magma granitique et le magma basaltique sont considérés comme primaires car ils existeraient dans les profondeurs depuis les premiers temps de l'origine de la Terre. En effet, les granites au sens large et les basaltes constituent respectivement les roches intrusives et les roches effusives de loin les plus abondantes : le rapport quantitatif entre les granites et les gabbros est de 20 à 1, alors qu'entre les rhyolites et les basaltes il est de 1 à 50.

Les basaltes montrent dans les différentes régions de la Terre une grande analogie de composition chimique même s'ils se sont épanchés au cours d'époques différentes. La différence des compositions chimiques des basaltes tholéitiques et des basaltes à olivine ne correspond vraisemblablement pas à une substantielle diversité du magma primaire dans des zones différentes : en effet, les deux types se trouvent souvent associés et l'on connaît tous les termes de passage entre les deux.

Pour cette raison, la majorité des chercheurs suppose l'existence, juste au-dessous de la croûte sialique, constituée essentiellement par des roches cristallines de composition granitique, d'un « niveau basaltique » à l'état cristallin ou fondu, caractérisé par une viscosité très élevée et par une composition chimique assez homogène. La limite entre le *sial* et le *sima* se situerait à une profondeur variable, généralement voisine de 30 km sous les continents et beaucoup moins profonde sous les océans, où, par endroits, le sial manquerait.

— Aux différentes époques géologiques, le niveau basaltique aurait donné naissance à des réservoirs magmatiques par suite de la fusion partielle de certains foyers magmatiques profonds. La fusion de ces niveaux résulterait soit d'une augmentation locale du degré géothermique, soit de déformations tectoniques liées à des phénomènes orogéniques, soit encore, par suite de la radioactivité, des niveaux sialiques sus-jacents. A partir de ces foyers, le magma basaltique remonte le long des fractures de la croûte terrestre, surtout du fait de la diminution de pression et donc de la diminution de densité du magma même. Ce magma vient s'épancher en surface sous forme de coulées. Il cristallise en partie dans les fractures, sous forme d'essaims de filons subverticaux de dolérite que l'on rencontre généralement sous les coulées de basaltes. Le magma basaltique peut aussi cristalliser sous forme de filons concordants ou de corps intrusifs de dimensions importantes qui donnent naissance à des roches de composition gabbroïque volumétriquement subordonnées aux basaltes. La prédominance des basaltes tholéitiques sur les continents peut s'expliquer par une assimilation partielle des roches sialiques traversées par le magma.

Le magma primaire granitique dériverait de la fusion totale ou partielle de matériel sialique, qui cristallise ensuite sur place ou bien par intrusion dans les roches sus-jacentes. Dans les temps les plus lointains de l'histoire de la Terre, c'est-à-dire au Précambrien, se formèrent, par une fusion généralisée et par la recristallisation des roches sialiques, de très grandes quantités de granites et de migmatites à la faveur d'un gradient géothermique beaucoup plus élevé que le gradient actuel. Ces roches occupèrent alors de très vastes surfaces. Au contraire, les roches granitiques formées depuis le Paléozoïque se placèrent dans d'étroites bandes orogéniques. Dans ces zones, les phénomènes de plissement et de subsidence ont porté des lambeaux de la croûte terrestre à des niveaux profonds, où la température élevée en a provoqué la fusion partielle.

A partir du magma basaltique, tholéitique ou à olivine, ainsi que du magma granitique, les processus de différenciation magmatique, qui diffèrent en fonction de l'environnement géotectonique dans lequel le magma a progressivement cristallisé, aboutissent à la formation de magmas de compositions différentes ou bien à des cumulats de cristaux qui se sont séparés successivement

◀ *Page ci-contre, en haut, à gauche,* **tuf basaltique :** *dans les espaces entre les esquilles de verre basaltique et dans les petites cavités du verre, on observe des minéraux de la famille des zéolites (lame mince en nicols presque croisés). A droite,* **tuf palagonitique :** *les zéolites remplissent de petites cavités ; dans la mésostase vitreuse, on reconnaît de petits microlites et quelques cristaux isolés d'olivine très colorés (lame mince en nicols croisés).*

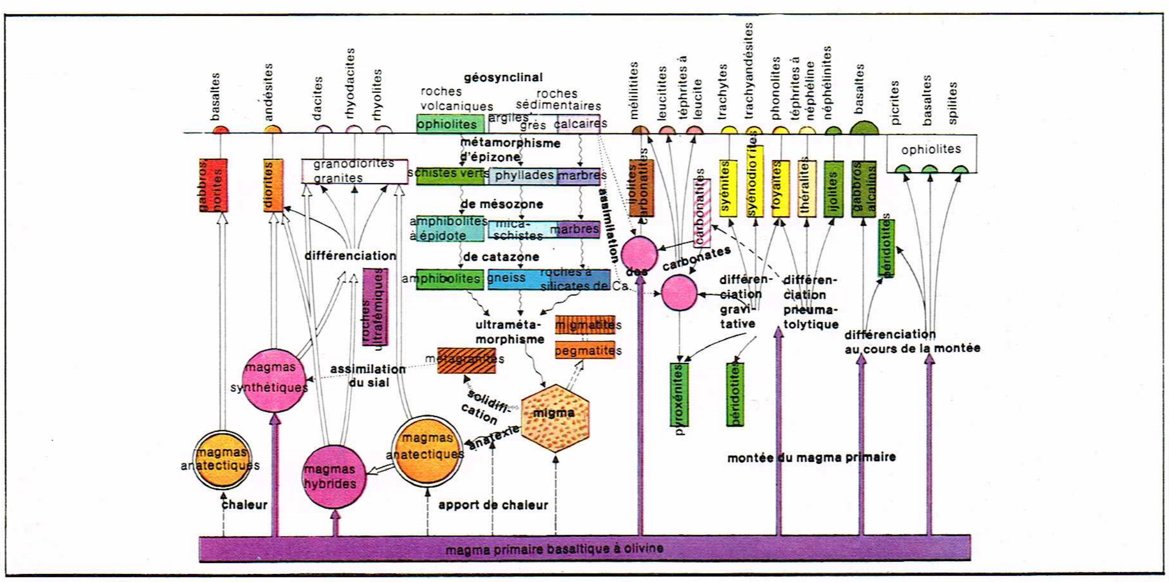

I.G.D.A.

◀ *Schéma théorique montrant les rapports possibles entre les principaux groupements de roches ignées et métamorphiques (d'après Rittmann).*

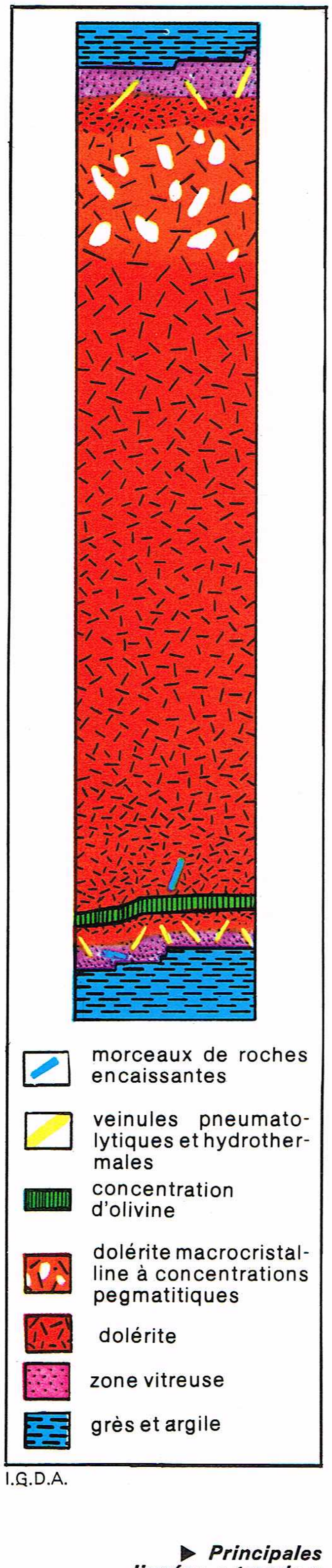

I.G.D.A.

▶ ***Principales lignées « trends » de différenciation magmatique des roches de la série calco-alcaline à partir d'un magma de type basaltique à olivine. Dans le diagramme triangulaire, on considère uniquement la teneur en fer ferrique et ferreux, la teneur en magnésium et la somme des éléments alcalins des roches (d'après Daly et Schneiderhöhn).***

du bain fondu. Tous les types de roches ignées appartenant à la série calco-alcaline ou à la série alcaline peuvent provenir, selon différentes lignées, de la cristallisation fractionnée du magma basaltique ; les magmas granitiques évoluent vers des termes de différenciation plus alcalins que le magma originel.

Il faut signaler, de plus, la formation de *magmas hybrides* par le mélange de deux magmas primaires distincts ou de deux fractions du même magma primaire à différents stades de différenciation, ou bien encore par des processus d'assimilation des roches encaissantes. Le magma andésitique est généralement considéré comme un magma hybride, formé selon l'un des processus signalés ci-dessus. Toutefois, certains chercheurs considèrent que ce magma primaire serait formé par une fusion très poussée (anatexie) de roches car elle s'effectuerait à une température supérieure à la température de genèse du magma granitique.

Les géologues ne s'accordent pas complètement sur les caractères des différents processus de **différenciation magmatique** et sur leurs rapports réciproques. La difficulté tient au fait que les processus pétrogénétiques peuvent être déduits uniquement de l'interprétation des caractères pétrographiques des roches constituant une association. Les processus théoriques de différenciation magmatique peuvent appartenir à deux types : ceux que l'on suppose s'être développés dans le magma fondu à l'état liquide et ceux qui sont liés aux différentes phases de la cristallisation. Une différenciation de la composition chimique du magma encore à l'état liquide peut résulter de *différences de température* entre les différentes parties du réservoir magmatique. Notamment, on constate, par suite d'une plus rapide déperdition de température, une température plus faible dans les niveaux supérieurs du réservoir magmatique. Ce phénomène pourrait provoquer une migration des éléments qui constituent les minéraux ferromagnésiens vers ces zones bordières, ce qui expliquerait les différenciations fémiques parfois existantes aux bordures des massifs intrusifs. Selon d'autres auteurs, les différences de poids atomique entre les éléments chimiques pourraient produire une chute des groupements ioniques plus lourds vers les parties les plus basses du réservoir magmatique. L'efficacité de ces processus est toutefois généralement contestée à cause des vitesses de migrations ioniques très réduites, notamment en raison de la viscosité élevée du magma. Les différenciations ferromagnésiennes des bordures de certains corps intrusifs granitiques sont expliquées par certains auteurs par la théorie des fronts métasomatiques.

Une autre hypothèse de processus de différenciation magmatique à l'état liquide, également contestée par la plupart des chercheurs, est fondée sur la possibilité théorique de l'immiscibilité de deux phases liquides de composition différente, miscibles entre elles à température élevée et immiscibles à basse température. Des études de laboratoire ont montré que les différents composants du magma sont complètement miscibles entre eux aux températures auxquelles se trouvent les magmas. Les défenseurs de cette théorie apportent comme preuve l'exemple des roches intrusives à structure orbiculaire qui pourraient résulter d'un début d'immiscibilité de deux phases liquides du magma, suivi par la cristallisation avant même que les deux phases liquides puissent constituer deux niveaux distincts dans le réservoir magmatique. Une immiscibilité à l'état liquide doit en effet commencer, comme une cristallisation, par un grand nombre de germes dans lesquels se concentre une des deux phases. A l'appui de cette hypothèse, on peut signaler l'existence de certaines laves basaltiques présentant des concentrations de calcédoine et de silicates de fer, interprétées comme des cristallisations de noyaux différenciés, plus riches en silice et en fer par rapport au magma originel.

Selon une autre interprétation, ces corps orbiculaires résulteraient du remplissage secondaire de cavités amygdalaires des laves basaltiques. Un processus de démixtion à l'état liquide est probablement responsable de certaines concentrations de sulfures parfois présents dans les roches intrusives ferromagnésiennes.

Le *transfert gazeux* constitue le troisième et dernier type de différenciation dans un magma qui se trouve, à l'état liquide, en présence d'une phase gazeuse se séparant de ce même magma. Cette phase peut se déplacer très facilement ; elle monte vers les parties hautes des réservoirs magmatiques sous forme d'un essaim de petites bulles formées essentiellement de vapeur d'eau et d'anhydride carbonique. La phase volatile véhiculerait certains éléments ou groupements ioniques, généralement peu mobiles, qui seraient transportés dans les niveaux supérieurs des réservoirs. Les études des propriétés physiques des magmas au cours de leur consolidation ont démontré que la démixtion de la phase gazeuse ne s'effectue pas au stade orthomagmatique, lorsque le magma est encore essentiellement à l'état liquide et que le réservoir magmatique ne communique pas encore avec la surface. La démixtion est possible uniquement lorsque la plus grande partie du magma est déjà cristallisée et que les constituants volatils sont confinés dans un volume de liquide nettement inférieur en liquide originel (phénomène du second point d'ébullition), ou bien lorsque la pression diminue par suite de la communication qui s'établit avec la surface à travers une ou plusieurs cheminées volcaniques. Ce processus peut donc être efficace dans la différenciation des roches effusives et subvolcaniques.

Toutefois, on pense que le facteur le plus important de la différenciation des magmas est le processus de *cristallisation fractionnée,* qui résulte de la séparation des minéraux les uns après les autres selon un ordre déterminé. Des roches de composition minéralogique différente pourraient résulter, par l'accumulation de minéraux formés au cours des différents stades, de la consolidation d'un même magma. Ce fait est particulièrement net dans le cas des complexes intrusifs basiques formés par des stades et des niveaux de minéraux qui se sont séparés à des moments différents, à partir d'un magma de type gabbro, et se sont accumulés au fond de la chambre magmatique. Inversement, on suppose que les minéraux les plus légers, qui se séparent en dernier lieu du magma, pourraient s'accumuler dans les parties hautes du magma et donner naissance à des roches de type anorthosique, formées essentiellement de plagioclases se séparant à partir d'un magma gabbroïque, ou bien à des roches de type leucitique concentrées à partir d'un magma basaltique alcalin.

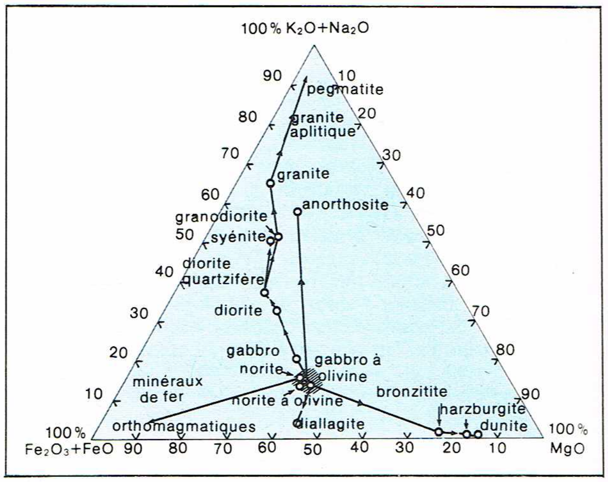

I.G.D.A.

La concentration des minéraux moins denses vers le haut du réservoir peut être favorisée par la démixtion de la phase gazeuse, qui s'effectue parfois en même temps que les éruptions volcaniques de type explosif.

Un autre facteur de la différenciation magmatique est l'*expulsion* du liquide magmatique résiduel qui reste entre les interstices de la phase déjà cristallisée. Cette expulsion peut résulter de l'action de contraintes de caractère tectonique ; inversement, une diminution locale de la pression peut aboutir à la concentration du liquide résiduel différencié entre certaines parties de la roche cristalline presque totalement cristallisée par suite d'un mécanisme d'*auto-intrusion*.

La composition initiale d'un magma peut également changer par suite de l'**assimilation** de roches encaissantes. Une telle contamination du magma donne naissance à des roches contenant des minéraux différents de ceux contenus dans les roches qui proviennent du même magma non contaminé ; elle peut aussi provoquer un changement de la composition des minéraux appartenant

à des séries isomorphes (par exemple, les plagioclases) ou bien encore changer les proportions des différents minéraux.

Le *magma basaltique* peut assimiler des roches de composition granitique, car la température de fusion de l'eutectique quartz-feldspaths alcalins est sensiblement inférieure à la température du magma basaltique. Les températures de certaines laves basaltiques et andésitiques ont été mesurées pendant l'éruption : elles sont comprises entre 900 °C et 1 100 °C, et peuvent arriver à des degrés plus élevés (jusqu'à 1 350 °C) pour des laves basaltiques assez riches en gaz en cours d'oxydation. Dans des conditions intrusives, les températures des magmas basaltiques sont probablement un peu moins élevées. Le processus d'assimilation provoque une variation de la composition du magma basaltique et aboutit à la cristallisation de roches de composition intermédiaire, comme les diorites et les andésites. Lorsque ce processus d'assimilation n'est pas porté à terme, dans le cas de xénolites granitiques inclus dans des roches de type gabbroïque par exemple, on observe que la diminution locale de température du magma (provoquée par la fusion partielle du corps étranger) a engendré la cristallisation de petites aiguilles de pyroxène qui forment une sorte de couronne autour du xénolite ou du xénocristal du minéral sialique (auréoles réactionnelles).

Le magma basaltique peut aussi assimiler des roches sédimentaires qui diffèrent très peu, par leur composition chimique, des roches ignées acides. C'est le cas, par exemple, de certains grès arkosiques. Si, au contraire, la roche sédimentaire ou métamorphique assimilée a une composition chimique très différente de celle des roches ignées acides, l'assimilation s'effectue selon d'autres lignées. Les roches très riches en alumine (argiles, schistes argileux, etc.) sont rapidement dépourvues du composant quartzo-feldspathique, qui se dissout le premier dans le magma. Ces roches sont transformées en enclaves xénolitiques riches en alumine résiduelle, laquelle apparaît dans des minéraux caractéristiques du thermométamorphisme, comme le corindon, l'andalousite, etc. Si l'assimilation est plus poussée, l'excès d'alumine peut être incorporé par le magma basaltique à partir duquel vont se séparer des minéraux très riches en alumine. C'est le cas, par exemple, de termes riches en anorthite de la série isomorphe des plagioclases et aussi de minéraux généralement absents dans les laves, comme la cordiérite (alumino-silicate de fer et de magnésium).

Si le magma basaltique vient au contact des roches calcaires et les digère, des silicates riches en calcium se séparent dans le nouveau magma, avec, en outre, du fer et du magnésium comme les pyroxènes de type diopside. Ce processus de cristallisation aboutit à un appauvrissement en silice du magma se traduisant par l'apparition de roches sous-saturées à feldspathoïdes.

Le magma basaltique assimile difficilement les roches à teneur élevée en silice, telles certaines quartzites constituées presque uniquement de quartz. La température élevée de fusion du quartz pur (plus de 1 700 °C) est responsable de cette difficulté. C'est pour cette raison que l'on rencontre souvent dans les roches basaltiques des xénolites quartzeux, qui peuvent aussi représenter des résidus ayant échappé à la fusion et à l'assimilation de la fraction « granitique » du xénolite. Toutefois, on pense que la fusion des xénolites quartzeux est rendue possible par le rôle de fondant que jouent certaines substances chimiques (vapeur d'eau, éléments alcalins, etc.) : ce type d'assimilation est suivi par la cristallisation de pyroxènes orthorhombiques plus riches en silice que l'olivine.

Les phénomènes d'assimilation liés aux magmas de type granitique sont différents en raison de la température beaucoup plus basse de ce magma par rapport au magma basaltique. On peut déduire la température de formation de certains minéraux considérés comme des *thermomètres géologiques*. Par exemple, le quartz des rhyolites est cristallisé originellement dans sa forme β : le magma rhyolitique devait donc se trouver à des températures supérieures à 573 °C ; par contre, le quartz des pegmatites ou de certains granites se présente sous la forme α : le magma avait donc une température inférieure à 573 °C (voir *Composition minéralogique*). Certains types de biotite (mica noir) se décomposent au-dessus de 800 °C (la biotite est un des premiers minéraux cristallisant dans les granites), alors que la muscovite (mica blanc) ne cristallise pas au-dessus de 700 °C. En se basant sur des considérations de cet ordre ainsi que sur d'autres arguments, tels que l'influence des constituants volatils, on estime que la température de formation des magmas granitiques, indépendamment de leur origine, est comprise entre 600 °C et 700 °C. Pour cette raison, les roches de composition chimique très différente de celle des granites, comme les roches basiques ou intermédiaires ou encore comme certaines roches sédimentaires et métamorphiques, ne peuvent être assimilées par les magmas de type granitique. L'assimilation, dans ce cas, se traduit par un échange d'éléments, donc par un phénomène de métasomatisme, entre l'inclusion se trouvant à l'état solide et le magma granitique qui l'entoure. A la fin de cet échange, l'inclusion montre une composition chimique assez analogue à celle du granite, car les minéraux ferromagnésiens qui la composaient originellement se sont transformés dans les termes de la suite de Bowen correspondant à des températures plus basses. Ces transformations sont rendues possibles grâce à la présence de teneurs très élevées en éléments volatils qui facilitent les échanges élémentaires et ioniques, notamment au niveau des joints intergranulaires. Pour cette raison, les phénomènes signalés sont plus nets et mieux exprimés sur les bordures des intrusions granitiques où se concentrent les éléments volatils au cours des derniers stades de cristallisation. En effet, le minéral le plus caractéristique que l'on rencontre dans les xénolites en cours d'assimilation est la biotite. Ce minéral, caractérisé par la présence d'oxhydryles (OH^-), peut résulter de la transformation de minéraux ferromagnésiens occupant des places plus élevées dans la série réactionnelle de Bowen, comme les amphiboles et surtout les pyroxènes.

Si l'assimilation n'a pas été totale, les roches ignées basiques sont transformées en enclaves de composition dioritique ; parallèlement, la composition de la roche granitique change à proximité des enclaves. Le granite s'enrichit en minéraux provenant de la désagrégation du xénolite (biotite), ou bien en minéraux calciques (le

◀ *Page ci-contre, en marge, exemple de différenciation dans un filon couche de dolérite : dans sa partie inférieure sont concentrés des minéraux ferromagnésiens (olivine), alors que dans la partie supérieure les plagioclases sont prédominants (New Jersey, U.S.A.) [d'après Walker].*

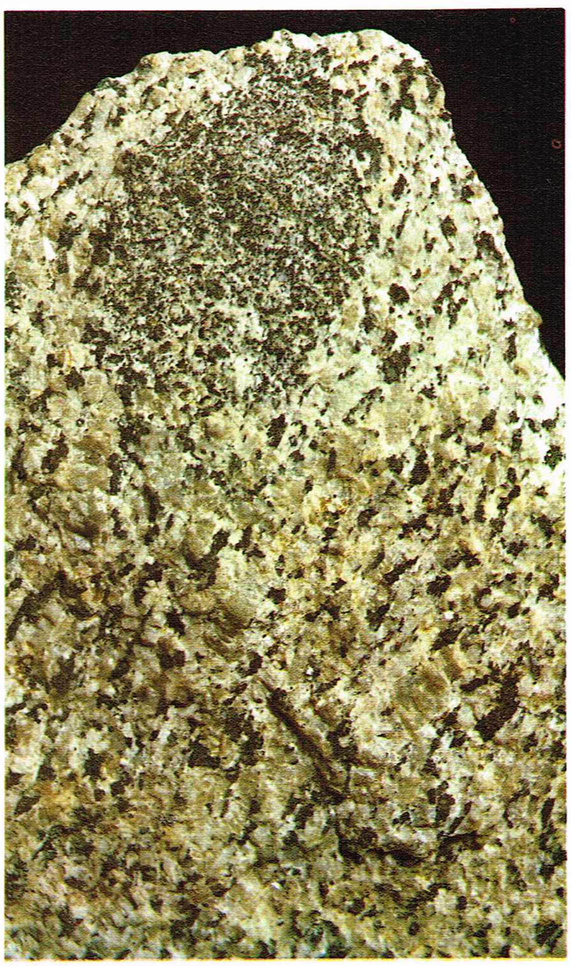

C. Bevilacqua

◀ *Enclave basique de couleur sombre partiellement assimilée par une syénite de couleur claire (Biella, Italie).*

calcium provenant du xénolite par migration ionique, par exemple, à partir de l'amphibole hornblende), et s'appauvrit en même temps en potassium provenant de l'orthose, potassium qui va migrer dans le xénolite et participer à la cristallisation de biotite. Au contact des roches sédimentaires argileuses et calcaires, le magma granitique s'enrichit respectivement en alumine et en chaux; à partir de ce magma se déposent donc des minéraux riches en ces deux oxydes, comme la cordiérite et les grenats, voire la biotite dans le premier cas, des pyroxènes (diopside), des amphiboles calciques (hornblende), du sphène et des plagioclases calciques dans le second cas. Les enclaves partiellement assimilées sont transformées en roches thermométamorphiques caractérisées par des aluminosilicates et des silicates de calcium. Au contact des roches granitiques, les calcaires peuvent être transformés en roches métasomatiques formées essentiellement par des amphiboles et du plagioclase calcique, tandis que le granite acquiert une composition dioritique, voire granodioritique. Dans certains cas, l'appauvrissement en silice du magma granitique par suite, notamment, d'une cristallisation précoce de silicates de calcium peut provoquer la formation de syénites normales ou à feldspathoïdes.

Les associations de roches ignées et les provinces magmatiques

Les roches ignées, intrusives ou effusives, localisées dans une même région et formées au cours d'une période géologique bien déterminée, présentent habituellement certains caractères communs (compositions chimique et minéralogique) laissant supposer qu'elles dérivent d'un même magma primaire par des processus de différenciation magmatique. En effet, les compositions minéralogique et chimique des roches qui composent ces séries varient de manière progressive. La série des roches alcalines et la série calco-alcaline constituent les deux principaux groupements de séries de roches individualisables, la région dans laquelle se situe une série de roches prenant le nom de *province pétrographique*.

La *série alcaline* est caractérisée par des roches très riches en éléments alcalins (sodium et potassium) et pauvres en calcium, notamment les termes riches en silice dans lesquels les plagioclases sont subordonnés aux feldspaths alcalins et aux feldspathoïdes (qui sont les aluminosilicates caractéristiques de ces séries). Lorsque les éléments alcalins sont abondants et que la silice et l'alumine font défaut, on constate l'apparition de minéraux colorés sodiques (pyroxènes et amphiboles comme l'ægyrine, l'arfvedsonite, la riébeckite) ou de feldspathoïdes absents dans la série calco-alcaline.

Les roches de la *série calco-alcaline* sont caractérisées par la prédominance du calcium par rapport aux éléments alcalins dans les termes intermédiaires et basiques; dans les roches ultrabasiques, la quantité de calcium décroît. Le minéral caractéristique de la série calco-alcaline est le plagioclase de plus en plus riche en calcium lorsque l'on se déplace vers les termes basiques; il est absent uniquement dans les séries ultrabasiques.

Les roches de la série alcaline sont situées surtout dans la bordure des continents baignés par l'océan Atlantique, tandis que la série calco-alcaline serait caractéristique de la bordure de l'océan Pacifique : d'où les noms de *série atlantique* et *série pacifique* pour ces deux associations de roches. D'autres chercheurs ont distingué une *série alcaline sodique de type atlantique* et une *série alcaline potassique méditerranéenne* par opposition à la série pacifique calco-alcaline. L'accroissement des connaissances acquises sur le terrain ainsi qu'au laboratoire tend à montrer que si dans les grandes lignes on peut reconnaître la prédominance de roches à tendance alcaline ou calco-alcaline dans les régions signalées, il y a toutefois une transition continue entre les termes de l'une et l'autre série. De plus, on a reconnu que les termes de la série alcaline et calco-alcaline sont associés dans une même province géographique et qu'ils se sont formés au cours d'un même cycle magmatique. Actuellement, on a tendance à penser que les associations magmatiques dépendent des caractères géotectoniques de la province où elles sont situées. Il se dessine ainsi un rapport entre la structure générale de la croûte terrestre ainsi que le

▼ *Distribution géographique des principales provinces pétrographiques des roches ignées (d'après Rittmann).*

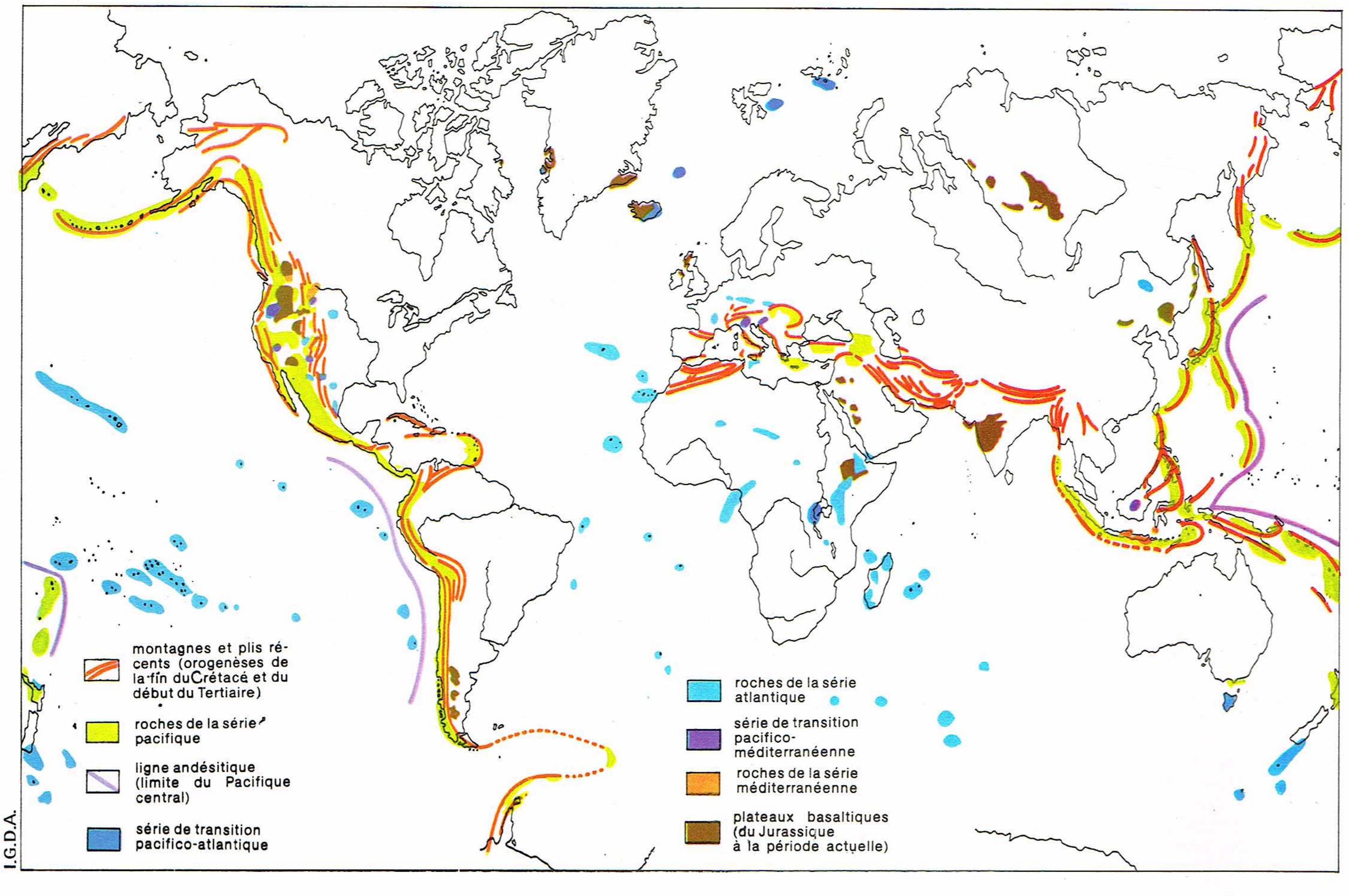

type de la formation qu'elle a subie dans une région pendant un certain laps de temps d'une part, et l'association de roches ignées formées au cours de la même période d'autre part.

Les principales associations lithologiques qu'il est possible d'individualiser à l'aide de ce critère sont formées par des roches intrusives et effusives, généralement avec prédominance de l'un ou de l'autre groupe, et consolidées au cours du même cycle magmatique. On a, de cette façon, décrit les associations essentiellement effusives des basaltes alcalins, ou basaltes à olivine, des roches à leucites qui dérivent vraisemblablement de ces derniers, l'association des basaltes tholéitiques, ainsi que les associations intrusives des roches granitiques, des roches syénitiques d'origine métasomatique et des roches basiques et ultrabasiques.

Des associations lithologiques différentes mais présentant d'évidents rapports réciproques caractérisent les régions orogéniques, c'est-à-dire des bandes étroites et allongées de la croûte terrestre sujettes à un enfoncement prolongé *(géosynclinaux)*. Dans ces régions s'accumulent, en milieu marin, de puissantes séries de sédiments clastiques (flysch) qui vont se disloquer et se plisser; enfin l'ensemble se trouvera soulevé et viendra former une chaîne de montagnes (orogenèse). Chaque phase du cycle orogénique s'accompagne de phénomènes magmatiques intrusifs et effusifs. L'orogenèse et la magmatologie se trouvent donc intimement liées.

Parallèlement au dépôt de sédiments clastiques qui constituent le remplissage du géosynclinal, ou du moins dans les étapes les plus tardives, lorsque le degré de remplissage est très important, on remarque dans de très nombreuses structures géosynclinales l'épanchement de roches spilitiques et de kératophyres. Parfois, dans les mêmes régions, on rencontre des basaltes normaux et des rhyolites; ce sont les « coulées en oreiller » déjà signalées, dont l'aspect en boule est attribué à l'épanchement sous-marin des coulées. Le magma spilitique dérive directement du magma basaltique de type alcalin. Il n'est pas nécessaire pour l'expliquer de faire intervenir une fusion sélective au niveau du *sima* à composition chimique particulière, selon une ligne de différenciation qui aboutit à la formation des mugéarites (basaltes à oligoclase souvent associés aux basaltes à olivine des zones océaniques). Par contre, les phénomènes de contamination par des sédiments saturés en eau de mer sont très importants. Pendant ou immédiatement après l'effusion des spilites et des roches qui les accompagnent (roches vertes au sens large), prennent naissance dans les séries sédimentaires des roches intrusives ultrabasiques (péridotites). Ces roches, par suite de phénomènes de type autométasomatique, sont transformées en serpentines. Certains auteurs pensent que les péridotites pourraient représenter un produit de différenciation du magma basaltique alcalin, complémentaire des roches spilitiques. Les roches basiques et ultrabasiques intrusives et effusives qui se mettent en place au cours de la phase préorogénique subissent ensuite les effets du métamorphisme provoqué par les dislocations se produisant au cours de la phase principale de l'orogenèse. Ces roches sont alors transformées en roches métamorphiques caractérisées par la présence de minéraux comme les plagioclases, les amphiboles, l'épidote et la chlorite. Cet ensemble de roches ignées et métamorphiques prend le nom de *roches vertes* ou, encore plus couramment, d'*ophiolites*. Les ophiolites se rencontrent dans la zone du géosynclinal où l'épaisseur des sédiments accumulés est maximale, ce qui est probablement lié au fait que le magma basique et ultrabasique pouvait atteindre par le biais de fractures uniquement les parties du géosynclinal soumises à une subsidence très intense.

Lorsque le fossé géosynclinal a atteint son degré maximal de remplissage par les sédiments, par les coulées de laves sous-marines et par les intrusions ultrabasiques, les processus de plissement et de métamorphisme deviennent prédominants. Le substratum cristallin, au cours du phénomène de subsidence, se trouve porté à des profondeurs telles que la température élevée de ces zones en provoque la fusion partielle. C'est ainsi que prend naissance un magma formé par des minéraux ferromagnésiens résiduels et par un liquide interstitiel de composition granitique correspondant au minimum du système eutectique quartz-orthose-albite. La texture cristalline qui constitue le résidu de fusion va être soumise et va résister à la *pression hydrostatique* (poids de la colonne sédimentaire et des roches cristallines sus-jacentes à la zone soumise à la fusion partielle) ainsi qu'aux contraintes orientées résultant des forces tangentielles qui provoquent le plissement tectonique et le métamorphisme. Lorsque la quantité de liquide interstitiel augmente ou que les contraintes tangentielles provoquent la rupture du bâti cristallin, le liquide magmatique va être soumis à la pression due à la charge et aux contraintes tangentielles.

L'affaiblissement soudain du substratum partiellement fondu d'une structure géosynclinale peut être à la base du commencement de l'activité magmatique de type intrusif et du plissement des séries qui remplissent la fosse géosynclinale. Le fluide granitique est pressé et éjecté du bâti cristallin représenté par les minéraux non fondus; il s'injecte alors de manière concordante dans les surfaces structurales de moindre pression, c'est-à-dire le long des surfaces de schistosité et de stratification des roches sus-jacentes plissées. C'est de cette manière que se forment les migmatites. Par la suite, celles-ci peuvent être soumises à une fusion encore plus poussée; en effet, la quantité de liquide granitique augmente par suite de l'abaissement du minimum thermique de l'eutectique quartzo-feldspathique. Cet abaissement est provoqué en partie par la diminution de la pression hydrostatique due aux plissements des séries sus-jacentes et, surtout, par l'introduction dans le système d'eau provenant en grande partie des séries sédimentaires du géosynclinal. Ce phénomène est à l'origine des massifs granitiques intrusifs qui recoupent à l'emporte-pièce les séries géologiques traversées un peu comme les diapyrs salins. Ces granites sont aussi appelés tardi-tectoniques par opposition aux granites syntectoniques, qui sont, pour leur part, concordants avec les séries géologiques encaissantes.

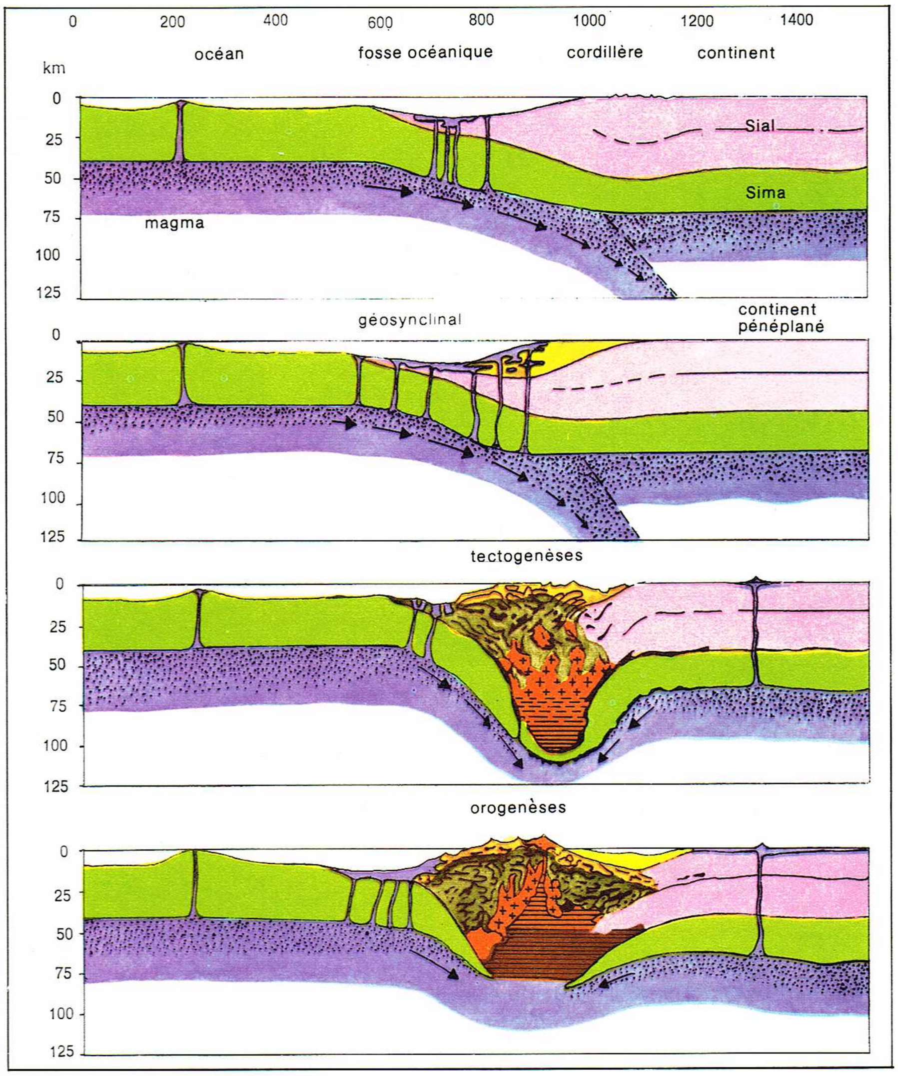

▲ ***Différentes phases d'un cycle magmatique en rapport avec l'orogenèse. Dans les premières phases du cycle orogénique, le magma basaltique, qui provient des niveaux situés sous la croûte terrestre (violet), remonte le long des fractures, s'épanche sur le fond océanique et fait intrusion dans les sédiments qui remplissent la fosse géosynclinale. Pendant la phase de plissement de roches qui occupent le géosynclinal, et qui s'accompagne d'autre part de phénomènes métamorphiques dans les niveaux plus profonds, la fusion sélective des différentes roches donne naissance à un migma (rouge avec petites croix). Par la suite, peuvent se former des magmas hybrides par contamination entre un magma basaltique et un magma anatectique; des manifestations volcaniques ont lieu dans la zone bordière de la chaîne de montagnes soulevée (d'après Rittmann).***

▶ *Au centre, les forces tectoniques et les éruptions volcaniques édifient le relief sur lequel s'exerce l'érosion ; ici, dans le parc national de Bryce Canyon (Utah) la désagrégation a façonné sur la structure tabulaire du haut plateau un modelé de formes singulières (tours et pinacles) au pied desquelles s'accumulent les débris; les différentes couleurs sont dues à l'action de l'altération chimique sur les diverses formations rocheuses.*

La dernière phase magmatique, liée à un cycle orogénique, est séparée de la précédente phase magmatique par une longue période de temps pendant laquelle débute le démantèlement par l'érosion de la chaîne de montagnes. Pendant cette phase, dite post-tectonique, les laves qui s'épanchent ont une composition variable, mais dans l'ensemble essentiellement andésitique. Les séries de roches de type effusif avec une prédominance des termes andésitiques se placent préférentiellement en bordure de l'océan Pacifique car cette zone bordière des continents est soumise à des plissements intenses de la croûte terrestre (montagnes Rocheuses, Andes, archipels de l'Asie orientale, etc.). On trouve, associés aux roches andésitiques, des basaltes et des roches plus acides mais qui appartiennent toujours à la série calco-alcaline, comme les dacites et les rhyolites. Les basaltes postorogéniques ont des compositions chimique et minéralogique assez proches de celles des basaltes à olivine. Ils en diffèrent toutefois, notamment parce qu'ils sont assez riches en plagioclase calcique; d'où, aussi, leur nom de « basaltes riches en alumine », ou *high alumina basalts* chez les auteurs anglo-saxons. L'association des différents types pétrographiques est complexe, surtout si l'on considère les rapports dans le temps entre les différentes laves émises par un même centre volcanique. Dans certaines provinces calco-alcalines postorogéniques, celles qui sont situées le long des montagnes Rocheuses, par exemple, il n'est pas possible d'établir une lignée correspondant à une variation continue de compositions chimique et minéralogique qui, à partir de basaltes, aboutisse aux termes rhyolitiques. On observe souvent des laves basaltiques et rhyolitiques émises de manière intermittente à partir du même volcan ou bien des laves basaltiques qui apparaissent très tardivement dans le cycle magmatique.

De plus, on constate que dans les différents types lithologiques apparaissent des associations minérales inhabituelles, par exemple, des phénocristaux de plagioclases de composition très différente dans la même roche, ou bien des cristaux de quartz et de feldspath potassique dans des laves de type basaltique. De nombreux chercheurs ont considéré ces faits comme la preuve que le magma primaire des régions orogéniques est andésitique et se serait formé par anatexie très poussée. Ainsi, à partir de ce magma primaire se formeraient, selon différents processus de différenciation, des magmas plus acides et des magmas plus basiques; ces derniers seraient situés dans des foyers magmatiques placés aux racines de la zone orogénique. Les différents magmas pourraient se mélanger au cours de leur remontée, donnant ainsi naissance à des roches de composition chimique anormale. Selon d'autres auteurs, les magmas qui se mettent en place pendant la phase post-tectonique représentent des produits de différenciation des magmas granitiques qui se forment par anatexie au cours de la phase syntectonique. Il est toutefois difficile d'expliquer la différence entre la température de formation des magmas granitiques syntectoniques, voisine de 700 °C, et celle des laves post-tectoniques qui, au moment de l'émission, est voisine de 1 100 °C.

BIBLIOGRAPHIE

ARTINI E., *Le rocce,* Hoepli, Milan, 1941. - BARTH T. F. W., *Theoretical Petrology,* Wiley, New York, 1952. - BARTH T. F. W., CORRENS C. W., ESKOLA P., *Die Entstehung der Gesteine,* Springer, Berlin, 1939. - BOWEN N. L., *The Evolution of the Igneous rocks,* Dover, New York, 1956. - CAVINATO A., *Giacimenti minerari,* Utet, Turin, 1964. - DAL PIAZ Gb., *Corso di geologia,* Cedam, Padoue, 1954. - DALY R. A., *Igneous Rocks and the Depths of the Earth,* McGraw-Hill, New York, 1933. - DE SITTER L. U., *Structural Geology,* McGraw-Hill, Londres, 1956. - HATCH F. H., WELLS A. K., WELLS M. K., *Petrology of the Igneous Rocks,* Murby, Londres, 1961. - RAGUIN E., *Géologie du granite,* Masson, Paris, 1957. - RITTMANN A., *Volcanoes and Their Activity,* Interscience (Wiley), New York, 1962. - ROSENBUSCH H., *Elemente der Gesteinslehre,* Schweitzerbart, Stuttgart, 1923. - TURNER F. J., VERHOOGEN J., *Igneous and Metamorphic Petrology,* McGraw-Hill, New York, 1960. - WAHLSTROM E. E., *Introduction to Theoretical Igneous Petrology,* Wiley, New York, 1950.

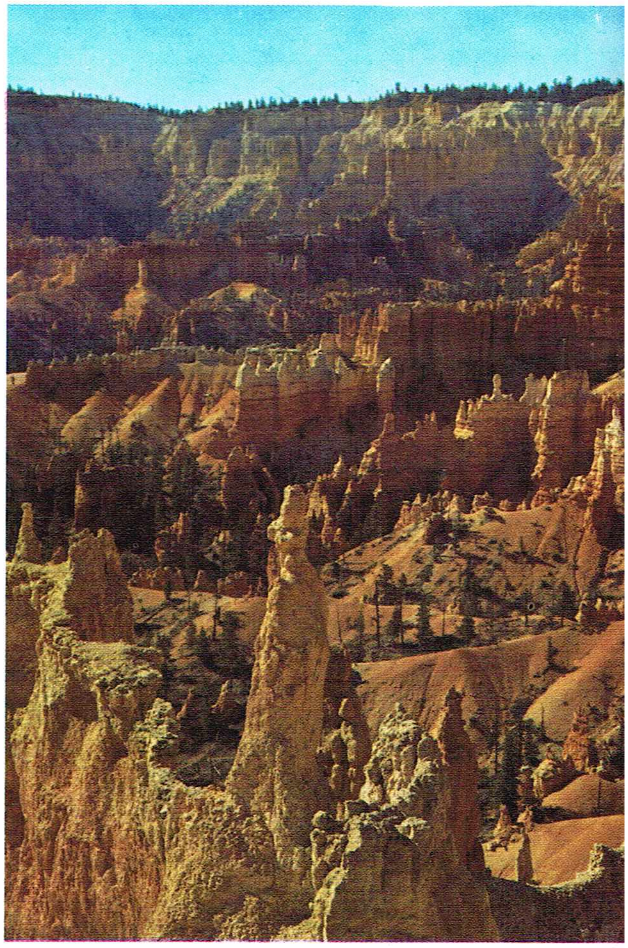

GÉOMORPHOLOGIE

Le propre de la géomorphologie est d'observer, de décrire et d'expliquer les différentes formes du *relief,* qu'il est possible de définir comme l'ensemble des saillies de l'écorce terrestre. Les forces constructrices, dites *forces tectoniques,* et les éruptions volcaniques édifient le relief, sur lequel s'exerce l'*érosion ;* celle-ci se traduit par l'enlèvement et l'accumulation de matériaux et agit en fonction de la nature des roches (facteurs lithologiques), de l'agencement des terrains (facteurs structuraux) et de l'aire d'action (facteurs climatiques).

Le relief

Le relief peut être considéré comme un ensemble de systèmes de pentes. A l'échelle locale, les pentes s'associent pour donner des *formes élémentaires de relief.* Ces formes élémentaires se combinent pour former à l'échelle régionale des *ensembles* plus ou moins complexes, classés en quelques grands *types de relief.* Formes élémentaires et types de relief sont caractérisés par leur modelé, qui est l'agencement des éléments qui les constituent.

● *Les formes élémentaires* sont la vallée, l'interfluve, le talus, la colline, la butte et la cuvette.

La **vallée** est la plus commune. C'est une dépression allongée et inclinée de l'amont vers l'aval, résultant du recoupement vers le bas de deux pentes en sens contraire, les versants, le long d'une ligne de points bas, le talweg. Le modelé d'une vallée se caractérise par son ampleur (un vallon est une petite vallée, courte et peu profonde, aux versants à faible pente; un ravin est une simple incision sur une pente forte), son tracé (rectiligne ou sinueux), la forme de ses versants et de son fond (une gorge est une vallée étroite et profonde aux versants raides; une auge est une vallée large à fond plat et à versants abrupts), la présence ou l'absence de drainage (dans ce dernier cas, la vallée est dite sèche) et les données de l'écoulement.

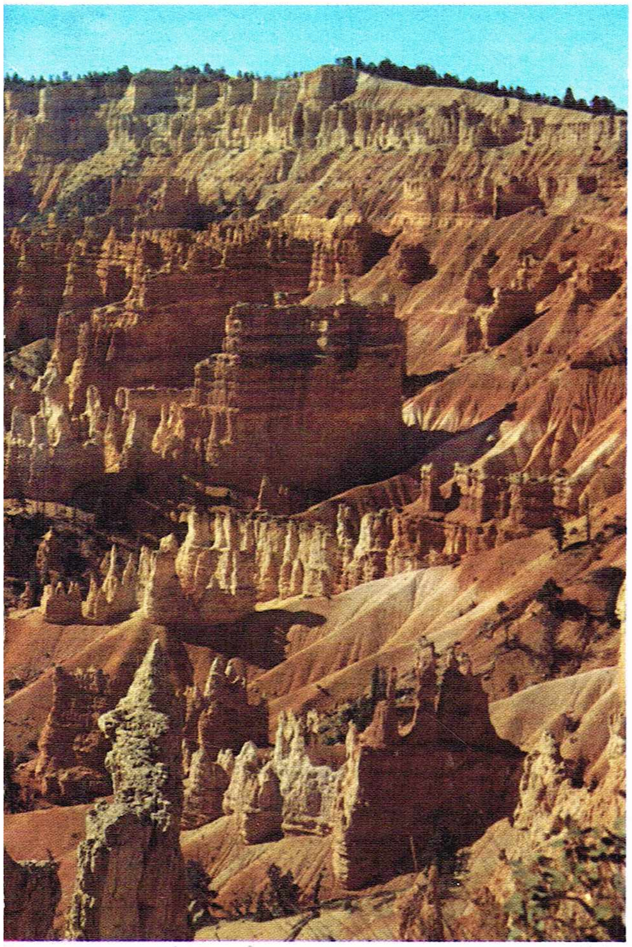

J. Muench

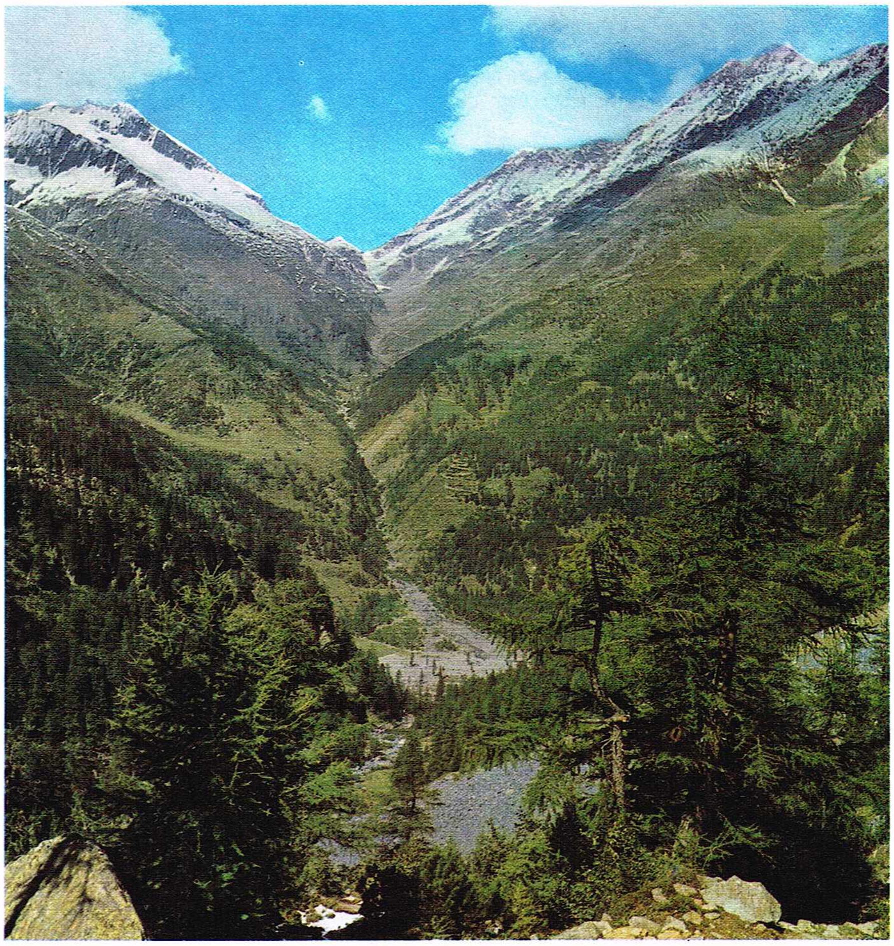

C. Saibene

▲ ***Une vallée fluviale typique en V dont les versants symétriques se recoupent suivant le talweg très net de l'amont vers l'aval.***

L'**interfluve** est la partie haute de l'espace compris entre deux vallées. Il montre généralement un modelé de croupe, de forme convexe, ou de crête (recoupement, selon un angle plus ou moins aigu, de deux versants).

Un **talus** est une portion de versant à pente forte reliant deux reliefs à peu près plats d'altitudes différentes. Un talus raide est un escarpement; son tracé, le plus souvent sinueux, montre des indentations (rentrants) et des éperons (saillants). Le talus est également caractérisé par sa dénivellation (différence entre le haut et le bas) et son profil (une pente très raide située à la partie supérieure est une corniche).

Une **colline** est une éminence de forme plus ou moins circulaire, souvent isolée, de faible hauteur (100 à 300 m), à sommet arrondi et dont les versants ne comportent généralement pas d'escarpements.

Une **butte** est une petite colline isolée, à sommet plat et à versants plus ou moins raides.

Une **cuvette** est un creux fermé vers le fond duquel convergent de tous côtés les pentes.

● Les *types de relief* concernent les plaines, les plateaux et les montagnes.

Une **plaine** est une surface étendue, plane ou légèrement ondulée sur laquelle les cours d'eau s'écoulent sans s'encaisser. Les dénivellations sont donc faibles et les pentes infimes.

Un **plateau** est également une surface étendue, plane ou légèrement ondulée, mais, à l'inverse d'une plaine, les cours d'eau s'écoulent en s'y encaissant. Plaines et plateaux se différencient ainsi non par l'altitude mais par l'encaissement des cours d'eau.

Les **montagnes** sont des régions élevées et étendues présentant de grandes dénivellations, des pentes déclives, des crêtes élevées et des vallées profondes. Une montagne est caractérisée par son altitude, son aération (largeur et profondeur des vallées), par l'orientation de ses crêtes et par la disposition de son réseau hydrographique.

● A l'échelle mondiale, le relief se divise en quelques *grands ensembles :* les chaînes plissées, les socles, les massifs anciens et les bassins sédimentaires.

Une **chaîne plissée** est un relief de structure complexe caractérisé par : les *plis,* qui concernent les ondulations de couches géologiques d'ampleur et de forme variables; les *chevauchements,* superpositions anormales et partielles d'ensembles géologiques sur d'autres; les *charriages,* chevauchements de grande ampleur composés d'une nappe formée de plusieurs couches déferlant sur d'autres couches sur une longue distance. Selon l'agencement des roches qui les constituent, il existe différents types de chaînes.

Un **socle** est une chaîne plissée transformée en plate-forme par l'érosion. Il est rigide et incapable de subir des plissements. Seules des déformations à grandes échelles et des cassures peuvent l'affecter.

Un **massif ancien** est un socle porté à une certaine altitude (le Massif central par exemple). Si le socle est recouvert par la mer et si les sédiments qui s'y déposent provoquent l'affaissement ou la subsidence du socle, celui-ci est alors surmonté d'un **bassin sédimentaire** dont les couches peuvent être affectées par des plis et des cassures.

L'érosion

L'érosion est définie par l'ensemble des phénomènes exogènes (c'est-à-dire extérieurs à l'écorce terrestre) qui contribuent à modifier les formes créées par les phénomènes endogènes (forces tectoniques et volcanisme). Cette modification se traduit non seulement par l'érosion proprement dite, c'est-à-dire l'usure, mais aussi par accumulation (par exemple, les dunes).

L'érosion s'exerce par l'intermédiaire d'*agents d'érosion,* tels que les agents atmosphériques et les agents biologiques; leurs modalités d'action sont les *processus d'érosion,* très divers, classés en processus d'érosion mécaniques d'une part, et en processus d'érosion chimiques d'autre part. L'ensemble des formes qui résulte de l'érosion est le *modelé.* Si les processus d'érosion concourent à réduire les points hauts du relief, le modelé est dit « d'aplanissement »; si, au contraire, ils tendent à les creuser, le modelé est dit « de dissection ».

M. Leigheb - Archives I.G.D.A.

▲ ***Au premier plan, les blocs noirâtres d'origine volcanique sont écaillés (desquamation) sous l'effet des variations thermiques (Aïr, Niger central).***

Le **modelé de dissection** est créé par l'érosion des eaux courantes, ou *érosion fluviatile,* qui a pour agent l'écoulement concentré des eaux courantes et qui s'exerce le long des talwegs.

Le **modelé d'aplanissement** est créé par l'*érosion aréolaire,* dont les agents sont multiples et qui s'exerce en surface, sur les interfluves.

L'érosion sur les interfluves, ou érosion aréolaire

L'interfluve, constitué de deux versants séparés ou non par une surface plus ou moins plane, est soumis à l'*altération sur place* des roches qui le composent. L'altération sur place concerne l'ensemble des phénomènes de désagrégation physique et de décomposition chimique des minéraux et des roches dus à l'action des eaux, aux variations de température, à la présence d'oxygène et d'anhydride carbonique, ainsi qu'à l'importance des organismes.

Les processus de **désagrégation physique** comprennent, d'une part, la désagrégation mécanique et, d'autre part, la désagrégation thermique.

— La *désagrégation thermique* résulte du réchauffement et du refroidissement inégaux des roches. Quand la température varie, les grains constituant les roches se dilatent ou se contractent. Comme la chaleur ne pénètre que lentement, la dilatation n'affecte que la partie superficielle de la roche : telle est l'origine de la fissuration parallèle de la surface externe de la roche et de son *écaillement,* ou desquamation. Les roches de composition minérale hétérogène sont les plus susceptibles d'être soumises à la désagrégation thermique puisque les coefficients de dilatation sont variables d'un minéral à l'autre.

— La *désagrégation mécanique* a pour principal agent le gel. L'eau s'infiltre dans les *diaclases,* fissures de moindre résistance dont l'origine est liée aux variations de température et de pression pendant les mouvements tectoniques. A une température inférieure à 0 °C, l'eau augmente de volume (environ de 10 %) et fait éclater la roche. C'est le processus de *gélifraction,* ou *gélivation.* La gélifraction est d'autant plus intense que la température oscille fréquemment autour du point de congélation de l'eau, ce qui conduit à la *fragmentation* en blocs anguleux de roches cohérentes comme le basalte et les roches cristallines à grains fins. La fragmentation est également favorisée par la cristallisation des sels, par les racines des arbres agissant comme des coins et par certains animaux fouisseurs.

La désagrégation physique est toujours accompagnée d'une **altération chimique** dont les actions principales sont l'oxydation, l'hydratation, la dissolution et l'hydrolyse.

— L'*oxydation* est due à la présence d'oxygène actif libre, d'autant plus efficace que son action se produit au sein d'un milieu aqueux. Les phénomènes d'oxydation se produisent aux dépens de presque tous les minéraux ferromagnésiens. Le protoxyde de fer, qui s'oxyde rapidement, recouvre les minéraux d'une croûte brune. De même, les sables, les grès, les argiles, les marnes comportant des inclusions ferrugineuses sont souvent colorés en brun ou en ocre.

— L'*hydratation* consistant dans l'absorption de l'eau par les minéraux s'observe, notamment, dans les silicates et alumino-silicates et se traduit par une augmentation de volume.

La *dissolution* complète des minéraux par l'eau, accompagnée de gaz carbonique qui augmente considérablement son pouvoir de dissociation, s'observe dans les bancs de sel, de gypse et surtout dans les calcaires. Dans ces derniers, la dissolution est à l'origine d'un type de relief particulier, le relief karstique.

— L'*hydrolyse* menée conjointement par l'eau chargée de gaz carbonique conduit à la décomposition des silicates, notamment des feldspaths, minéraux les plus répandus dans les poches plutoniques. Ainsi, l'orthose donne par hydrolyse le kaolin et l'opale. Les minéraux ferromagnésiens se décomposent plus énergiquement que les feldspaths.

— Le rôle des *organismes* dans l'altération chimique n'est pas à négliger : les plantes exercent non seulement une action mécanique par l'intermédiaire des racines mais également une action chimique par dégagement d'acides organiques à partir des radicelles, par absorption des éléments minéraux nécessaires à leur développement, par émission d'oxygène et de gaz carbonique, et par dégagement d'acides humiques pendant leur décomposition. L'altération sur place des roches entraîne la formation d'un manteau de débris superficiel, appelé *régolite,* soumis au transport par gravité et par ruissellement, notamment sur les versants.

Le mouvement sur les versants s'effectue différemment selon la nature, rocheuse ou non, du versant.

— Sur les *versants rocheux,* les mouvements sont brutaux. L'*éboulement* concerne la chute instantanée de grandes masses donnant un chaos de rochers. La formation d'*éboulis* est due à la chute successive de blocs. Les blocs constituent généralement soit des cônes d'éboulis, soit des talus d'éboulis quand les cônes entrent en coalescence.

— Sur les *versants non rocheux,* certains mouvements sont lents, d'autres brutaux.

Le *ruissellement concentré,* qui ne s'exerce que sur les versants dépourvus de végétation, entraîne la formation de ravins, ce qui suppose que l'eau n'a pas eu le temps de s'infiltrer (à l'occasion notamment d'averses violentes).

Le *ruissellement diffus* est le fait des versants couverts de végétation. Son action érosive est très faible. Cependant, les débris fins sont emportés et déposés au pied du versant. Ce sont des dépôts éluviaux.

La *solifluxion,* ou descente des débris sous forme boueuse, concerne les formations plastiques. Au-delà d'un certain seuil de plasticité, correspondant à la teneur en eau au-dessus de laquelle le terrain devient plastique, le glissement de boue, lent, se traduit par des loupes. Au-delà d'un certain seuil de liquidité, une coulée boueuse se produit avec un arrachement en forme de niche à l'amont de la coulée, tandis que celle-ci présente des bourrelets et des bosses.

Le *glissement à sec,* observé dans des formations pulvérulentes et en l'absence d'eau, se produit lorsque le versant n'est plus en équilibre soit du fait d'une accumulation à son sommet, soit à cause d'une érosion à sa base. Les formations plus compactes et susceptibles de compression sont à l'origine des terrassettes (gradins de petite taille) quand une pente forte entraîne ces formations vers le bas.

La *reptation,* ou *creeping,* sur un versant consiste en une lente descente des débris. Ce mouvement général est dû à la pesanteur, aux processus de désagrégation physique et de décomposition chimique. La résultante de ces divers mouvements est une descente progressive de toute la masse de débris. Les mouvements sur les versants, qu'ils soient lents ou rapides, liés ou non à la présence de l'eau, ou encore qu'ils résultent de mouve-

ments divers dans le détail, modifient leur profil. Certains versants, comme les versants à terrassettes, sont irréguliers. D'autres, au contraire, présentent un profil régulier car recouverts de débris, lisses et sans ravinement; le profil est alors convexe en haut et concave en bas : le versant réglé, ou *versant de Richter,* correspond à une pente assez forte (25 % environ) avec une longue section rectiligne entre la section convexe et la section concave.

L'érosion par les eaux courantes, ou érosion linéaire

L'érosion linéaire est la forme d'usure la plus connue. Elle concerne principalement l'*érosion torrentielle,* agressive, et l'*érosion fluviatile,* calme.

Les **torrents** sont des cours d'eau à régime spasmodique des montagnes ou secteurs montagnards à couverture végétale discontinue. Un torrent est constitué de trois secteurs : son cours supérieur correspond au *bassin,* ou *entonnoir de réception,* son cours moyen au *canal,* ou *chenal d'écoulement,* son cours inférieur au *cône de déjection.* Un torrent présente l'aspect d'un sablier dont les deux hémisphères seraient l'entonnoir de réception et le cône de déjection, mais il en a rarement la symétrie parfaite.

Le bassin de réception est le secteur de rassemblement des multiples ruisseaux où chacun de ceux-ci creuse, recule sa source, se charge de matériaux. Le chenal d'écoulement est le collecteur du torrent qui érode et accumule au gré de la pente. Le cône de déjection est une forme d'accumulation à l'arrivée du torrent dans la vallée. Le torrent, en exhaussant son lit par dépôt des matériaux transportés, oscille sur le cône à la faveur de crues. Les cônes peuvent repousser le cours d'eau qui coule dans la vallée contre le versant opposé. Deux cônes qui se rencontrent jouent le rôle de barrage dans la vallée, entraînant l'existence d'un lac. Le torrent, qui possède une triple fonction d'érosion, de transport et d'accumulation, constitue un matériel naturel pour l'étude de l'érosion linéaire du fait du caractère brutal et instantané de son activité. Il crée un *profil d'équilibre* qui convient mieux à l'écoulement de ses eaux, profil d'équilibre plus difficile à appréhender en ce qui concerne l'écoulement fluviatile.

L'écoulement fluviatile. Un cours d'eau est caractérisé par sa *puissance.* Celle-ci, *brute,* est proportionnelle à la surface de la section mouillée et au cube de sa vitesse. Sa *puissance nette* correspond à la puissance brute diminuée de la puissance absorbée par les frottements et le transport de la charge. Si la puissance nette est positive, le cours d'eau a tendance à creuser. Si elle est négative, il dépose une partie de sa charge. Si elle est nulle, il ne creuse ni ne dépose. Le cours d'eau tend à établir, par creusement ou par remblaiement, une pente dite *pente d'équilibre;* celle-ci est telle qu'il ne creuse ni ne remblaie. A ces considérations théoriques il faut toutefois ajouter l'influence des caractères fluctuants du cours d'eau tels que sa vitesse non constante sur toute la section mouillée, l'écoulement en partie laminaire, en partie turbulent (la turbulence concerne les tourbillons et les rides de surface, qui deviennent parfois des vagues), la profondeur dont l'influence est mal connue. D'autre part, le rôle de la charge est également mal interprété. Cependant, une approximation permet de dire que le poids limite des matériaux transportés par le cours d'eau est proportionnel à la sixième puissance de la vitesse. La charge limite du courant est le poids maximal qu'il peut transporter, tandis que sa compétence est la possibilité qu'il a de transporter des matériaux de la dimension maximale en fonction de la vitesse.

— Le *transport* des matériaux s'effectue au fond par *saltation* et au sein du cours d'eau par *suspension* (troubles). La charge en troubles est parfois considérable. Les cours d'eau charrient également des substances dissoutes, comme le carbonate de calcium. Au total, la charge au fond, en suspension et en dissolution, ne mobilise qu'une faible partie de la puissance du cours d'eau qui dépense dix fois plus d'énergie absorbée par les frottements et les tourbillons, ceux-ci étant des facteurs d'érosion latérale parmi les plus importants du lit fluvial.

— Le *lit fluvial* est l'espace occupé par un cours d'eau. Il s'élargit à la faveur d'inondations : c'est le *lit majeur,* ou *d'inondations,* plus large que le *lit ordinaire,* ou *apparent*

I.G.D.A. - Relini

▲ ***Les produits de désagrégation, soumis au transport par gravité et par ruissellement sur les versants, s'accumulent soit en cônes d'éboulis, soit, comme ici, en un talus continu plaqué sur le versant.***
▼ ***Le torrent, qui possède une triple fonction d'érosion, de transport et d'accumulation, constitue un modèle naturel pour l'étude de l'érosion linéaire; ici, un cours d'eau traversant le Belvédère du Viso dans le parc naturel régional du Queyras.***

Binois - Pitch

Inst. of Geol. Sciences, London

▲ ***Une série de marmites de géants, cavités taillées dans la roche par les tourbillons.***

le plus souvent bien marqué entre deux berges. Dans le cas de rivières au régime irrégulier, les eaux n'occupent qu'une partie du lit apparent : c'est le *chenal d'étiage,* sans berges nettes et oscillant à l'intérieur du lit apparent.

Les matériaux des lits peuvent être soit la roche en place, soit des matériaux transportés par le cours d'eau. Les creux taillés dans le roc par les tourbillons sont des *marmites de géants*. Les secteurs alluviaux, dans le lit apparent du cours d'eau, montrent des matériaux de plus en plus petits roulés de l'amont vers l'aval (en effet, la pente se réduisant vers l'aval, le dépôt des matériaux les plus gros s'effectue progressivement). Les lits majeurs sont occupés par du matériel fin issu des champs cultivés.

▼ ***Un bel exemple de méandre encaissé du fleuve San Juan (Utah).***

Ostman - J. Cannon

Le chenal présente toujours des sinuosités liées aux courbures et aux profondeurs. Dans chaque courbe, il existe un secteur plus profond que ceux qui se trouvent immédiatement à l'aval et à l'amont : c'est la *mouille,* qui présente un profil en travers dissymétrique, accentué contre la rive concave. Entre chaque mouille, les secteurs moins profonds sont les *seuils,* dont le profil est symétrique. Après chaque mouille, le fond du lit présente une contre-pente.

Si le fleuve a une pente telle qu'il n'alluvionne ni ne creuse sur toute la largeur de son lit et sur toute la longueur de son cours, il acquiert un profil d'équilibre. Si, pour une raison quelconque, le plan d'eau s'abaisse en un point donné, à l'aval la pente se réduit, le courant ralentit et dépose une partie de sa charge en exhaussant ainsi son lit. A l'amont de ce point, au contraire, la pente s'accroît, le courant s'accélère et entraîne une reprise d'érosion qui se propage de proche en proche vers l'amont : c'est l'*érosion régressive*. Le profil d'équilibre s'élabore en fonction d'un niveau restant fixe pendant une période assez longue : c'est le *niveau de base,* qui est en général l'aboutissement du fleuve à la mer. L'allure générale du profil est concave, car le débit augmente vers l'aval tandis que la charge diminue. A un profil donné correspondent plusieurs types de tracés, dont les méandres représentent les sinuosités les plus fréquentes.

— Un *méandre* est une sinuosité régulière décrite par le lit ordinaire du cours d'eau, au chenal bien calibré mais dissymétrique. Il existe deux types de méandres : le *méandre encaissé* (la vallée sinue comme la rivière) et le *méandre de plaine alluviale* (le tracé de la rivière est indépendant du tracé de la vallée). Par la simple force centrifuge, le courant creuse la rive concave du méandre, tandis qu'il dépose sa charge sur la rive convexe par diminution de sa vitesse. Le méandre a, par conséquent, tendance à s'exagérer. Ainsi, la rive concave est abrupte, et la rive convexe basse. Deux méandres consécutifs peuvent se recouper, soit par débordement à l'occasion d'une crue, soit par contact quand le pédoncule disparaît. Lorsque le recoupement est réalisé, l'ancien méandre devient un bras mort (c'est le phénomène d'*autocapture*). En même temps qu'il s'exagère, le méandre entreprend une migration vers l'aval qui calibre la vallée aux dimensions des méandres. Le méandre se forme ainsi en fonction d'un état d'équilibre entre la puissance nette du cours d'eau et la résistance soit de la roche en place en ce qui concerne les méandres encaissés, soit des alluvions pour les méandres de plaine alluviale. Les méandres se groupent généralement par *trains* quand les conditions d'équilibre sont réalisées. Les tracés se modifient lorsqu'un cours d'eau en capture un autre.

— Une *capture* est un détournement naturel de la partie amont d'un cours d'eau vers un cours d'eau voisin, le premier devenant l'affluent du second. Deux mécanismes principaux provoquent des captures. Le premier est l'érosion de l'interfluve séparant deux vallées voisines soit par ravinement *(capture par recul de tête),* soit par sapement à la base du ou des versants limitant l'interfluve étroit entre deux cours d'eau proches l'un de l'autre *(capture par osculation)*. Le second mécanisme concerne l'exhaussement du lit par accumulations d'alluvions qui entraîne une capture par déversement dans une vallée voisine restée basse.

— Les captures contribuent à hiérarchiser le *réseau hydrographique,* défini comme l'ensemble des cours d'eau constitué par un fleuve, ses affluents et sous-affluents, drainant une région plus ou moins vaste appelée *bassin-versant*. La *densité de drainage* est le rapport entre la longueur totale des cours d'eau et la surface du bassin-versant.

Un réseau hydrographique est caractérisé par son type de relations avec la mer. Quand les eaux atteignent la mer, le drainage est dit *exoréique*. Quand elles n'atteignent pas la mer soit par évaporation, soit par infiltration, le drainage est dit *endoréique*. Enfin, lorsque l'écoulement est occasionnel et limité, il n'y a pas de drainage organisé : c'est l'*aréisme*.

Un réseau hydrographique est également caractérisé par son type d'organisation. Le réseau est hiérarchisé lorsque chaque drain est tributaire d'un drain plus important, cela jusqu'au collecteur central qui mène à la mer. Un réseau peut être désorganisé, notamment par le phénomène karstique et par l'aréisme. Il peut être tota-

lement anarchique, diffluences et confluences se multipliant sur un trajet très court. Les formes des réseaux sont très variées. Le réseau idéal serait de forme ovoïde avec un drain central. Il existe des réseaux déformés, dissymétriques, se rapprochant plus ou moins de la forme ovoïde. La forme est soit indépendante de la structure, auquel cas le réseau peut être dendritique, soit dépendant de la structure (c'est-à-dire de l'agencement des terrains), le réseau se présentant alors en treillis, orthogonal, radial, centripète, parallèle, annulaire, en peigne, etc. Le fleuve se jette dans la mer à l'embouchure, secteur caractérisé par des interactions complexes entre les eaux douces et les eaux marines.

— Les *embouchures* apparaissent sous l'influence de nombreux facteurs qui sont, notamment, le débit et la charge du cours d'eau, les courants de marée et la salinité. Les divers modes d'interaction entre les fleuves et les mers aboutissent à la formation de deux types principaux d'embouchures : les deltas et les estuaires.

Le *delta* est le cône de déjection des matériaux apportés par le fleuve qui progresse vers la mer. Lorsque le fleuve atteint la mer, sa vitesse diminue. Les matériaux traînés sur le fond se déposent alors, ainsi que les matières en suspension sous le processus de la floculation provoquée par le contact de l'eau de mer. Il s'établit, de ce fait, un large cône alluvial. Si la mer est peu profonde, le lit fluvial est rapidement remblayé par les dépôts sur lesquels le fleuve s'exhausse et multiplie les chenaux, qui sont les bras du delta. A chaque crue, le delta change de forme en s'élargissant, s'exhaussant et s'allongeant vers la mer, donnant ainsi naissance à de vastes plaines deltaïques. Cette progression est discontinue. Un delta est caractérisé par de fréquentes migrations de son lit principal.

Les deltas sont formés par des dépôts de nature différente : dépôts alluviaux des fleuves, dépôts argileux des eaux stagnantes renfermant le plus souvent une quantité importante de matière organique, dépôts des tourbières et sédiments marins. Tous ces dépôts subissent des modifications notables dans le sens horizontal et dans le sens vertical à cause des migrations fréquentes des bras qui conditionnent le transport et l'accumulation des dépôts fluviatiles d'une part, et par suite de la formation de lacs ou dépressions où s'entassent les argiles et la tourbe d'autre part. Les dépôts présentent ainsi un profil caractéristique en quatre couches : une partie immergée, renfermant surtout des dépôts fluviatiles, lacustres et marécageux; une partie immergée sous-marine, à strates horizontales et constituée d'alluvions déposées au-dessous du niveau de la mer; une partie centrale, à stratifications obliques et à dépôts accumulés sur une pente assez forte et remaniés par la dérive littorale et les déferlements; enfin, une partie sous-marine inférieure, formée pour l'essentiel de matières en suspension apportées par le fleuve et précipitées dans les eaux marines. Ce schéma théorique de l'agencement des dépôts subit le plus souvent des modifications, surtout du fait de l'exhaussement et de l'affaissement du sol, mouvements qui rompent l'équilibre entre la mer et le fleuve. Cependant, les dépôts deltaïques conservent ce caractère particulier de stratification oblique. Les conditions favorables à l'édification des deltas sont les suivantes : une faible profondeur de la mer à l'endroit où se jette le fleuve; une charge importante de débris; une mer sans marée et sans courants puissants capables d'emporter les alluvions.

L'*estuaire,* partie terminale d'un organisme fluvial où la marée et ses courants se font sentir, se présente le plus souvent sous la forme d'une embouchure évasée caractérisée par des dépôts fins de nature vaseuse. Des courants de marée puissants, en particulier le courant de jusant qui renforce celui du fleuve, et un faible alluvionnement du cours d'eau sont les conditions favorables à sa formation.

L'érosion par les eaux souterraines

Les *eaux souterraines,* dont les exutoires naturels à la surface sont les *sources,* remplissent les pores et les vides des roches au-dessous du sol. Leur action est à l'origine, d'une part, des phénomènes karstiques dans les roches solubles et en particulier dans les calcaires, et d'autre part des *glissements de terrains* sur les versants.

L'infiltration des eaux est fonction de la perméabilité des roches, c'est-à-dire de leur capacité à laisser passer l'eau. Les roches perméables comprennent surtout : les sables, les graviers, les galets, les calcaires et les conglomérats; les roches de perméabilité moyenne, les argiles sableuses et le lœss; les roches imperméables, les argiles, les roches cristallines massives, les roches sédimentaires cimentées et non fissurées. Les **eaux souterraines** sont classées, selon différents critères (origine, gisement, propriétés, composition chimique), en quatre types : les *nappes suspendues,* qui gisent à une faible profondeur; les *eaux de fond,* qui ont une plus grande extension que les nappes suspendues; les *nappes captives non artésiennes,* situées entre deux couches imperméables; les *eaux artésiennes,* formant des bassins artésiens.

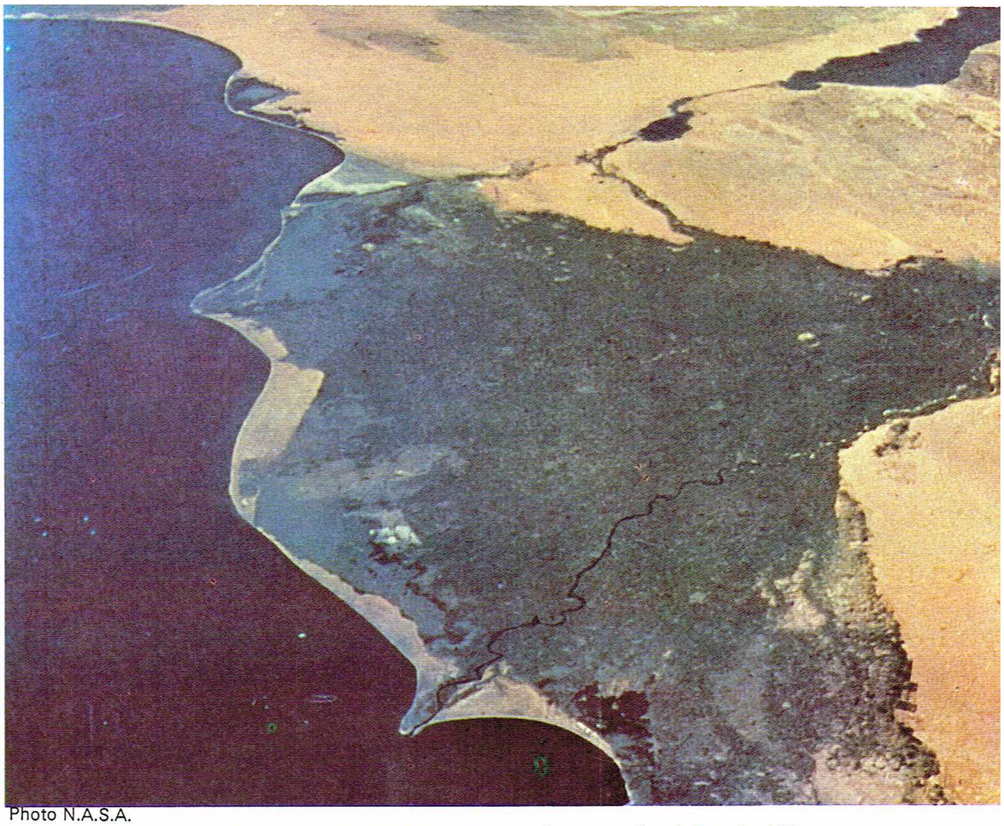

Photo N.A.S.A.

▲ *Le delta du Nil photographié depuis la capsule « Gemini 4 »; remarquer le bras principal du delta. Sont également visibles le canal de Suez, une partie de la mer Rouge et la péninsule du Sinaï.*
▼ *Exemple d'un long et vaste estuaire, celui de la Garonne et de la Dordogne qui se réunissent à l'aval du bec d'Ambès.*

Alain Perceval

La pression hydrodynamique et le mouvement d'usure exercés sur le versant par les eaux souterraines peuvent provoquer son brusque **glissement.** Le versant peut alors prendre l'aspect d'un versant de glissement simple ou de glissement complexe. Ce dernier est composé d'une série de blocs de terrain appuyés les uns contre les autres, à la partie inférieure de laquelle les roches déplacées sont écrasées par le poids des blocs supérieurs (partie détritique du glissement). Habituellement, un glissement est signalé, d'une part, par l'apparition sur le sol de *fentes d'arrachements* situées à l'amont du versant et s'élargissant progressivement et, d'autre part, le plus souvent, par l'inclinaison de la végétation arborée (forêt dite « ivre »).

Roches et modelé

L'érosion, qu'elle entraîne un modelé de dissection ou un modelé d'aplanissement, s'exerce sur des roches d'origine, de nature et de propriétés différentes. Leur origine permet de les classer en plusieurs catégories : les *roches endogènes,* comptant les roches plutoniques consolidées en profondeur et les roches volcaniques solidifiées en surface ; les *roches exogènes,* ou *roches sédimentaires,* résultant de l'érosion des roches préexistantes, de l'activité d'êtres vivants ou de phénomènes physiques et chimiques externes ; les *roches métamorphiques,* issues de la transformation des roches endogènes et exogènes. Au sein de chaque groupe, leurs propriétés permettent de les classer en roches plus ou moins résistantes à l'érosion, en fonction principalement de leur cohérence.

Les **roches sédimentaires à grains non liés par un ciment** concernent, notamment, les sables et les argiles.

— Les *sables* sont constitués de grains de quartz résistants. L'érosion, qui n'a aucun effet sur chaque grain, s'exprime par l'entraînement des grains les uns par rapport aux autres et dépend par conséquent du caractère plus ou moins meuble de la formation. Dans le cas d'un sable cohérent (sable humide ou sable à composition hétérogène), le déplacement s'effectue par masses de grains ; les agents d'érosion étant la solifluxion et le ruissellement. Dans le cas d'un sable plus meuble (sable sec, sable à composition homogène, uniquement quartzeux), il s'effectue par grains indépendants et le creeping remplace alors la solifluxion et le ruissellement.

— Les *argiles,* résultant d'une altération, ont le pouvoir de s'hydrater. Elles sont imbibées profondément d'eau (quand elles se dessèchent, elles présentent des craquelures) et solifluent. La pénétration de l'eau est ordinairement très lente, si bien que l'argile est pratiquement imperméable en l'absence de fentes de dessiccation. L'eau ruisselle alors, entraînant la formation des ravins les plus nets quand les pluies sont violentes et rares *(reliefs de bad-land).*

Les **roches sédimentaires à grains cimentés** sont principalement les conglomérats et les grès.

— Les *conglomérats* sont des ensembles cimentés de grains de tailles diverses, de cailloux, de galets et de blocs. Ils sont cohérents et donnent en général des abrupts verticaux. Quand la pente est forte, l'érosion linéaire est à l'origine d'un relief en bad-land si le conglomérat est argileux, avec apparition de cheminées de fées là où les blocs protègent du ruissellement.

— Les *grès* sont formés de grains de sable, de composition homogène (par conséquent, de perméabilité moyenne) et assez résistants. Les plus résistants, les *quartzites,* grès à ciment siliceux, donnent souvent des crêtes aiguës.

Les **calcaires,** roches essentiellement formées de carbonate de calcium, sont sujets à la *dissolution.* Celle-ci est d'autant plus élevée que l'eau est chargée de gaz carbonique. Le bicarbonate de calcium, terme des réactions chimiques, est instable et soluble dans l'eau. L'érosion par dissolution entraîne un type de relief particulier, le *relief karstique,* qui s'observe dans des calcaires résistants mais permettant la pénétration de l'eau par de larges fissures.

— Les *formes superficielles* les plus simples de la topographie karstique concernent les *lapiez,* formes très diverses, en creux, ayant l'aspect de sillons, de cannelures, de tranchées, et dont la profondeur varie de quelques centimètres à une dizaine de mètres. Disposés soit parallèlement dans le sens de la pente, soit irrégulièrement avec des ramifications, les lapiez résultent de l'action dissolvante des eaux atmosphériques qui attaquent les parois des fissures. Les lapiez, nus, couverts ou perforants, se présentent le plus souvent en groupements denses : les champs de lapiez.

C'est à partir des fissures élargies par dissolution et par éboulement que se forment les *avens,* qui présentent la forme d'entonnoirs. L'aven conduit généralement à une *grotte* au plafond de laquelle les eaux infiltrées déposent par les fissures la calcite, carbonate pur de calcium cristallisé, sous la forme de *stalactites,* tandis qu'au fond de la grotte les *stalagmites* prennent naissance par le même processus.

▼ A gauche, un exemple de* cavité karstique :** ***une grande* doline** ***près d'Altamura dans les Pouilles (Italie) ; au premier plan des* lapiez** ***de petite taille. A droite, les « cheminées de fées » (Segonzano dans le Trentin).

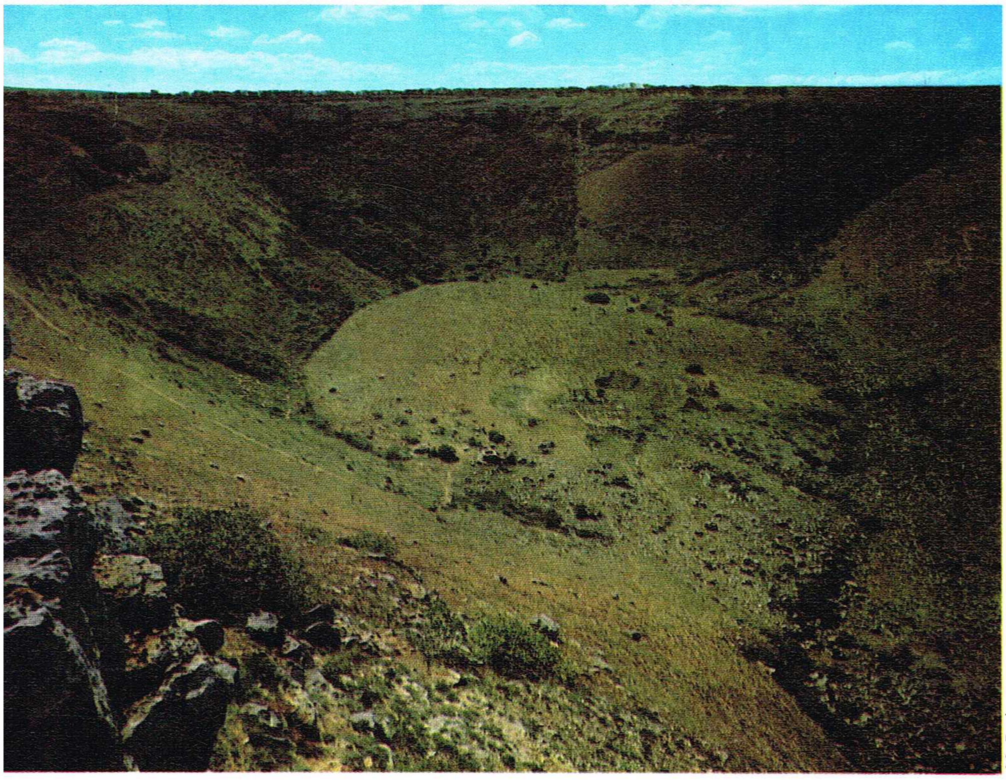

M. Pedone

S. Micheloni

Les *dolines* sont des dépressions fermées, de forme circulaire, qui présentent souvent un profil en baquet; leur bord est généralement abrupt et leur fond remblayé de terre. Leur diamètre varie de quelques dizaines de mètres à quelques hectomètres, tandis que leur profondeur peut aller jusqu'à 200 m. Les dolines, comme les lapiez, se groupent soit en champs, soit par coalescence en *ouvalas,* dont l'origine est encore confuse.

Les formes les plus vastes du relief karstique sont les *poljés,* qui sont des dépressions fermées où s'organise un écoulement. Larges de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres et longs de quelques kilomètres à quelques dizaines de kilomètres, les poljés présentent généralement des bords en pente assez forte et un fond plat tapissé de terre et accidenté de buttes rocheuses, les *hums.* Les poljés sont souvent parcourus par une rivière qui se perd dans un gouffre, le *ponor,* et occupés par des lacs ou marais quand la nappe phréatique remonte en surface. La réalisation d'un poljé résulte de la coalescence d'ouvalas dont les bords recoupés deviennent les hums.

Les formes précédentes sont le produit de l'érosion par dissolution. Cependant, il existe une forme fréquente due à l'écoulement en surface : le *canyon,* vallée encaissée à versants raides parcourue par un cours d'eau allogène (dont la source est extérieure au karst). L'essentiel de l'érosion se produit au fond du lit car les versants montrant, selon l'alternance des bancs calcaires, une succession d'abrupts, de surplombs et de talus plus ou moins raides, sont durs et perméables. Le canyon présente son aspect caractéristique dans des bancs de calcaires épais. Si le cours d'eau atteint une roche imperméable, la vallée s'élargit par le fond et présente alors un profil en *U* montrant un fond évasé et des versants verticaux qui reculent parallèlement à eux-mêmes. En amont, la vallée peut aboutir à une *source vauclusienne,* au contact de la couche imperméable et des calcaires sus-jacents et au-dessus de laquelle la vallée se termine par un abrupt : c'est une vallée en cul-de-sac, appelée une *reculée.* Le recul de la tête de vallée est très actif. Outre les formes superficielles, le karst présente un grand nombre de cavités aux formes les plus diverses, associant des conduits tubulaires ou coudés ainsi que des galeries ou des cavernes horizontales.

— Les *cavernes* qui apparaissent généralement au niveau des nappes karstiques montrent un réseau de galeries présentant soit des ramifications irrégulières réunies par des passages étroits, soit des élargissements brusques débouchant dans des grottes, soit encore des rétrécissements aboutissant à des boyaux étranglés. La caverne la plus développée est la caverne du Mammouth située sur le plateau du Kentucky (États-Unis), dont le réseau ininterrompu de galeries s'étend sur plus de 50 km, tandis que le plateau est accidenté de quelque 60 000 entonnoirs karstiques. Le fond des cavernes karstiques comporte ordinairement des cours d'eau ou de petits lacs.

— Le niveau de ces *eaux karstiques* est en liaison avec le niveau du *cours d'eau allochtone* qui traverse le karst. L'*émergence* est le phénomène selon lequel les eaux karstiques apparaissent sur un versant ou au fond d'une vallée. L'*émergence* ou *exsurgence* peut prendre la forme soit d'un suintement, soit d'une source isolée ou d'une ligne de sources, soit d'une fontaine à débit continu ou intermittent (fontaines vauclusiennes). Le cours d'eau allochtone peut disparaître par infiltration et absorption au sein du karst : la *résurgence* concerne la réapparition de ses eaux à la surface. Ainsi, près d'Immendingen (Allemagne), les eaux du cours supérieur du Danube s'engouffrent dans des ponors, coulent sous terre sur plus de 12 km en suivant des chenaux karstiques et réapparaissent à la surface par une grosse exsurgence qui donne naissance au fleuve.

Les roches éruptives de massif, ou roches plutoniques, sont des **roches cristallines** d'origine endogène consolidées à une certaine profondeur. Selon les minéraux qui les composent, elles sont caractérisées par leur acidité (granite) ou leur alcalinité (gabbro). Leurs *textures* sont variables : de petits grains définissent des roches aplitiques, des grains moyens et égaux des roches grenues, des cristaux de grande taille des roches porphyroïdes, et des cristaux géants des roches pegmatitiques. Il existe divers modes de gisement.

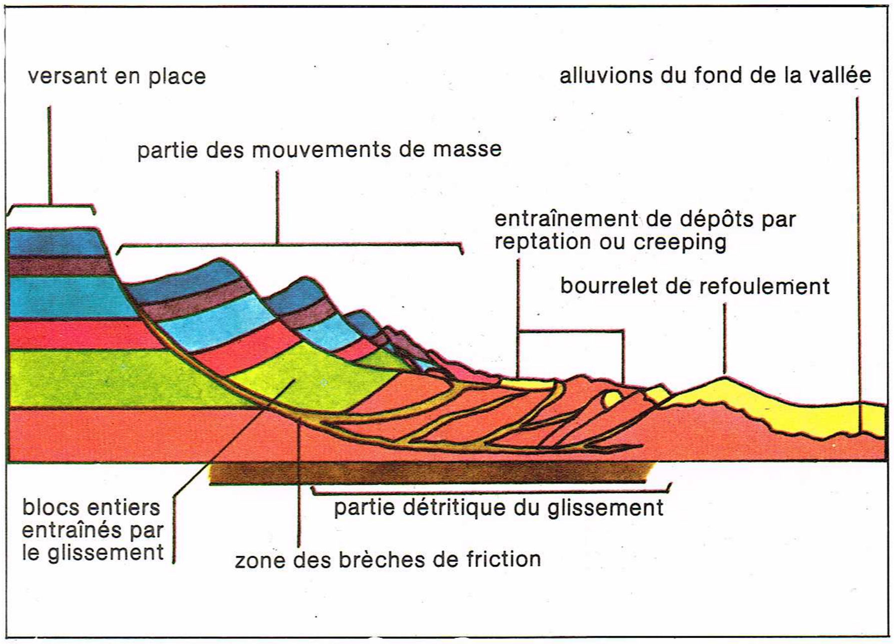

▲ ***Représentation schématique d'un versant de glissement complexe.***

Les roches métamorphiques sont celles qui ont subi une transformation, qui résulte de la chaleur et de la pression, et qui consiste en une cristallisation selon un plan tel que les cristaux des roches métamorphiques sont orientés. Il existe trois types de métamorphisme : le *métamorphisme de contact,* ou *local,* qui engendre des roches dites cornéennes, le *métamorphisme lié à la présence de failles,* qui donne naissance à des mylonites, et le *métamorphisme général,* qui s'effectue en profondeur, intéressant de vastes surfaces, et entraînant la formation notamment des schistes, des micaschistes et des gneiss.

Les roches cristallines, qu'elles soient plutoniques ou métamorphiques, présentent un trait général caractéristique : elles sont assez imperméables alors que les sols qui en découlent sont perméables. Par conséquent, les sources sont nombreuses et les vallées rapprochées. Les interfluves se réduisent en *croupes* ou échines généralement convexes en relation avec le creeping, prépondérant sur les versants. Ceux-ci présentent des formes variées : ils peuvent être peu accusés et à l'origine d'un paysage de collines, rectilignes, à boules, en zigzag ou à crêtes.

Les formes les plus typiques sont les *dômes* (pains de sucre), en pente forte, dissymétriques, hauts de 100 à 200 m, qui sont formés le plus souvent d'une roche plus résistante que la roche environnante. Les régions cristallines sont caractérisées également par des fractures se traduisant dans la topographie par des escarpements (versants rocheux à très forte pente, supérieure à 45°) et, si les cours d'eau s'installent à l'endroit d'une fracture, par des vallées de ligne de fracture.

Les *filons,* formés de roches différentes de celles qu'ils traversent, très minces mais parfois d'une longueur considérable, constituent d'autres accidents typiques des régions cristallines. Ils correspondent le plus souvent à une ligne de résistance plus grande que la roche encaissante et se traduisent dans le paysage par un alignement de hauteurs ou un rétrécissement des vallées. Les roches cristallines diffèrent cependant par leur résistance à l'érosion aréolaire, que celle-ci s'exprime par gélivation ou par altération chimique.

Le *granite* est ainsi tantôt une roche dure tantôt une roche tendre. Il est d'autant plus résistant que sa texture est fine, sa porosité faible, que les diaclases sont rares, que le quartz est en forte proportion et que les feldspaths calco-sodiques ainsi que le mica noir sont peu abondants. Il donne des formes typiques en *boules* et en *blocs.* Les formes en creux sont les *taffoni,* cavités hémisphériques dues à la dissolution chimique et à l'altération liées à la différence d'humidité à l'ombre et au soleil. La désagrégation totale du granite donne naissance à l'*arène granitique.* La *granulite,* granite à deux micas, est généralement plus résistante que le granite en raison de la présence du mica blanc peu altérable.

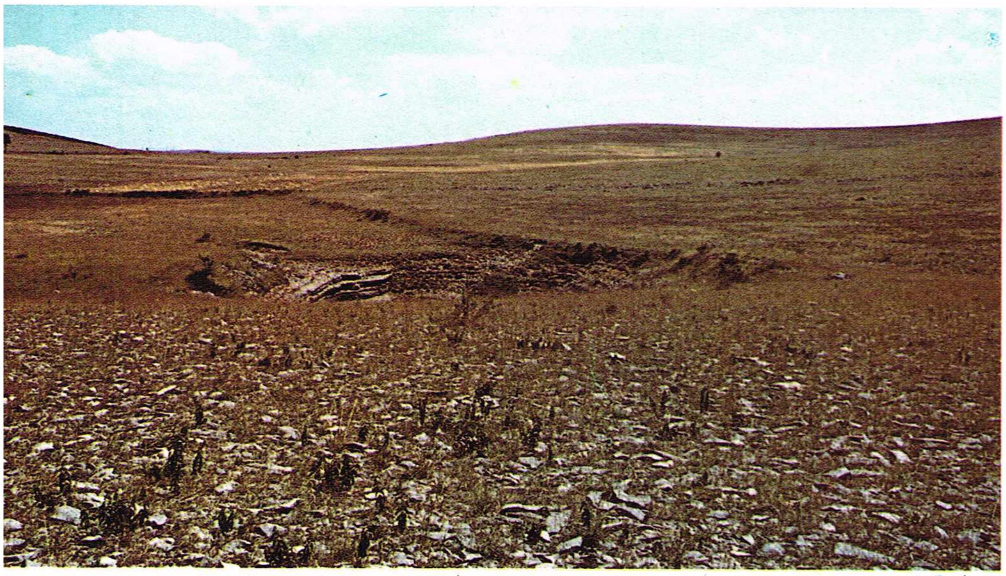

R. H. Noailles - Explorer

▲ *Les avens se forment à partir des fissures par dissolution et par éboulement; ici, un aven dans le causse Méjean.*

▼ *Le Stromboli au cours d'une explosion; ce volcan est caractérisé par l'existence d'un cône de scories.*

Les *diorites,* plus basiques que le granite, contiennent un minéral noir, l'amphibole, inaltérable en l'absence d'eau et particulièrement hydrolysable en sa présence. Aussi, quand la pente est forte, les diorites sont-elles peu attaquées car l'eau ruisselle. Au contraire, quand la pente est faible, l'eau séjourne et l'hydrolyse se produit. Ainsi, les diorites donnent soit des reliefs, soit des formes en creux.

Les formes liées aux roches métamorphiques sont très variables en fonction du degré de résistance d'une part, et de la plus ou moins grande netteté de la schistosité d'autre part.

Les *micaschistes* présentent une nette schistosité, qui est à l'origine de crêtes, de versants heurtés; leur résistance varie avec leur teneur en quartz, les concentrations en quartz pur correspondant aux secteurs les plus résistants.

Vulcain - Explorer

Les *gneiss* montrent des plans de schistosité beaucoup moins nets que les micaschistes. Leur relief est semblable à celui des granites malgré l'absence de boules.

Les *leptynites* sont très résistantes, caractère qui est lié à l'abondance de quartz et de feldspaths non calciques et à la rareté des minéraux noirs ainsi que du mica noir. Les versants montrent des pentes de l'ordre de 45°.

Les roches formées de nombreux minéraux noirs, comme les *amphibolites,* qui rappellent les diorites, entraînent des reliefs saillants quand la pente est forte et que l'eau ne peut stagner. En effet, l'amphibole est attaquée quand l'eau ne ruisselle plus. C'est pourquoi le relief engendré par les amphibolites est contrasté et présente des reliefs isolés et de larges vallées.

Roches et relief volcaniques

A la différence des roches éruptives de massif et des roches métamorphiques, les roches volcaniques ou éruptives de surface présentent un degré de cristallisation plus ou moins grand suivant qu'elles arrivent plus ou moins rapidement en surface. Les roches volcaniques non cristallisées sont les roches vitreuses, comme l'obsidienne et la pierre ponce. Les roches volcaniques les plus abondantes, les basaltes, sombres et denses, présentent une pâte constituée de cristaux microscopiques de feldspaths, les microlithes, de péridots et de pyroxènes dont certains, plus gros, sont visibles à l'œil nu. Parmi les autres roches volcaniques, citons l'andésite, riche en plagioclases et en ferromagnésiens, et la rhyolite, roche claire où dominent le quartz et le feldspath.

Les laves ne sont pas les seules manifestations de l'éruption. En fonction d'une part des caractères propres à l'émission de laves, et d'autre part de la nature des roches émises, de la violence de l'explosion ainsi que de la proportion de matériaux solides de projection, il existe cinq types caractéristiques de relief volcanique.

Les boucliers et plateaux de laves. Le type le plus pur en est le *volcan hawaiien,* caractérisé par un mécanisme effusif, c'est-à-dire par émission de laves fluides à partir du cratère où la lave bouillonne constamment et s'épanche par débordement. Cette émission se produit généralement sans explosions. L'épanchement de la lave peut s'arrêter quand celle-ci ne parvient plus à monter aussi haut que le volcan. La lave s'écoule alors plus bas à partir d'un nouveau lac (cas du Mauna Loa). Le cratère du volcan hawaiien présente le plus souvent une morphologie en gradins, tandis que le volcan lui-même présente la forme d'une vaste galette de lave (l'ensemble du Mauna Loa atteint 100 km de diamètre), généralement en pente faible. L'extrême perméabilité du basalte explique que les vallées n'apparaissent que très tardivement sur les pentes du bouclier de laves. Les fentes de retrait dans lesquelles l'eau s'infiltre s'observent à la surface des laves ridées, dites *laves pahoehoe.* Le réseau hydrographique, souvent rayonnant à partir du centre du volcan, découpe le plateau de laves en *planèzes,* plateaux de laves triangulaires.

Les trapps. Ils se présentent sous la forme d'un empilement horizontal de couches de laves séparées par des niveaux intermédiaires de type argileux et montrent donc un profil en marches d'escalier. Les reliefs de trapp, plus anciens que les autres phénomènes volcaniques, sont les plus importants en superficie (650 000 km^2 au Deccan) et en épaisseur (2 000 m en Éthiopie). Les laves sont des basaltes, d'épaisseur variable (10 à 15 m en moyenne), très résistants, mis en place à une température très élevée et solidifiés en gros polygones. L'épanchement s'opère par l'intermédiaire de fissures en contact direct avec la base de l'écorce terrestre. Au sein de la fissure apparaissent des petits cônes dans lesquels la lave monte et descend (c'est le débourrage de la fissure). Lorsque la pression est suffisante, la lave s'épanche. Une fois la lave écoulée, la fissure s'oblitère par solidification et une autre fissure peut apparaître parallèlement à la précédente.

Les volcans stromboliens. Ce type de volcan, dont le meilleur exemple est le Stromboli, est caractérisé par l'existence d'un *cône de scories* dû à la retombée sous forme de lambeaux de la lave embrasée. Les laves sont

plus visqueuses que le basalte ; aussi les gaz éprouvent-ils plus de difficultés à se frayer un passage et donnent-ils naissance à de petites explosions. L'existence d'un cône explique que les pentes du volcan strombolien soient fortes (avec des éboulements fréquents). Les pentes des versants oscillent entre 30° et 35°, tandis que les scories soudées à l'intérieur du cratère montrent des abrupts de 60° à 70°. Selon la force des explosions, les scories sont envoyées plus ou moins loin dans l'atmosphère. Soudées, elles accomplissent un trajet court, retombent à l'état pâteux et se soudent aux précédentes. Sur le bord des cratères, elles forment une couche plus résistante. Les scories meubles se figent pendant leur parcours aérien et présentent un aspect bulleux. Les *bombes torsadées* proviennent d'une lave qui, par rotation dans l'espace, prend la forme d'une poire. Selon les moments, l'émission volcanique concerne l'un ou l'autre des deux types de scories ; c'est ce qui explique l'aspect stratifié du volcan. Les projections volcaniques varient de quelques grammes à des dizaines de kilos mais les cônes ne sont jamais de grande taille.

La force de projection d'un volcan strombolien est faible ; aussi l'obstruction du cratère par les laves visqueuses est-elle à craindre. Des explosions peuvent alors détruire le cône, une nouvelle éruption faisant naître un nouveau cône souvent emboîté dans le précédent ou excentré. Si les laves sont plus fluides, elles tendent à sortir à travers le cône lui-même, qui devient alors un cône égueulé. Un tel épanchement de lave signifie en général la fin de l'activité du volcan.

Ce type de volcan émet également des coulées de laves nettement plus résistantes que les cônes, et présentant le même aspect que les laves des boucliers du fait de leur grande perméabilité liée aux larges fissures de refroidissement. Ainsi, ces laves sont presque insensibles au gel. Le ruissellement n'apparaît que lorsque la lave devient moins perméable.

Les volcans d'explosion. Dans le cas de ces volcans, l'explosion se produit parce que la lave, siliceuse et très visqueuse, donne naissance à un bouchon sous la forme d'un *culot de lave*. Il existe deux types de volcanisme explosif : le type vulcanien et le type ignimbritique.

— Le *type vulcanien* est caractérisé par des cendres qui ont le temps de se refroidir avant de retomber. Le matériel émis comprend des pierres et des cendres projetées très haut en raison de l'importance des gaz et de la vapeur d'eau. Les débris, en général très fins, sont emportés par le vent (transport à l'origine de la dissymétrie du cône, comme à Krakatoa) et retombent à l'état solide en donnant des *tufs*. Les éruptions entraînent des chutes de pluies qui provoquent simultanément la destruction partielle du volcan. Elles sont également entrecoupées de longues périodes d'arrêt, au cours desquelles peuvent naître des lacs d'eau. Lorsqu'une nouvelle éruption se produit, le volume total de l'eau est projeté sur les versants, qui sont ainsi érodés. Les débris emportés se déposent plus loin et sont à l'origine de la formation des *tufs*. La montagne Pelée présente un cas particulier : l'explosion verticale n'a pas eu lieu car le culot a résisté, entraînant une puissance accrue des gaz. Ceux-ci, alourdis de matières en suspension et devenus très chauds, se sont échappés par une issue latérale. A la suite des gaz, les poussières se sont répandues, incandescentes, sur les flancs du volcan (nuées ardentes). Les cendres, trop lourdes, ont formé une épaisse couche blanchâtre.

— Le *type ignimbritique* est caractérisé par l'émission de *nuées ardentes* (cendres retombant à l'état incandescent). Ce type de volcan se présente sous l'aspect d'un bouclier aux pentes très faibles au centre duquel existe un vaste secteur déprimé, la *caldeira*. Au microscope, la lave apparaît comme un amalgame de poussières. Il n'existe pas de coulée, et la lave ne forme qu'une masse plus ou moins épaisse. La caldeira n'est pas le résultat d'une explosion, mais d'un effondrement. En effet, les gaz qui ne peuvent s'échapper se sont réchauffés sous la lave avant de pulvériser celle-ci sous forme de nuées ardentes par l'intermédiaire de fissures existant dans la lave.

Les formes volcaniques particulières. Si le gaz intervient seul sans émissions, il est à l'origine d'un relief de caldeiras. Ce type de relief correspond au fait que le magma parvient à quelque distance de la surface terrestre. S'il rencontre une nappe d'eau, il transforme celle-ci en vapeur et une explosion se produit immédiatement. D'où l'existence d'une *caldeira d'explosion* (explosion phréatique).

Si la lave intervient seule, elle est à l'origine d'extrusions : les aiguilles et les dômes. Les *aiguilles* peuvent s'élever très haut et revêtir des formes diverses. Les *dômes* sont, d'une part, les *bulles* édifiées par la dacite, lave excessivement visqueuse, peu apte à donner des épanchements (le centre des bulles conserve le plus souvent des gaz, ce qui explique l'érosion plus facile de la partie centrale), et, d'autre part, des constructions comparables à celles de châteaux forts, la lave refroidie donnant d'énormes polygones.

Relief et structure

La structure correspond à l'organisation des roches dans l'écorce terrestre. On distingue d'une part les *structures massives*, notamment dans les roches éruptives de massif, et, d'autre part, les *structures sédimentaires*, dont la disposition des couches permet d'étudier les déformations.

Les déformations de l'écorce terrestre sont classées en deux types : les *déformations souples*, observées uniquement dans les roches sédimentaires, et qui sont à l'origine des *structures plissées ;* les *déformations brisantes*, présentes dans toutes les roches, et qui donnent les *structures faillées*.

Les structures tabulaires. Les sédiments déposés dans les mers ou dans les lacs se présentent selon des couches le plus souvent horizontales si aucune déformation n'est venue les affecter. Sur ces couches, l'érosion se fait à partir du réseau fluvial, qui s'encaisse dans les roches dures ou s'élargit dans les roches tendres. Le profil longitudinal d'un cours d'eau présente ainsi une série de ressauts correspondant aux couches dures et une série de biefs calmes liés aux couches tendres. Le profil des versants montre une succession de *corniches* (couches dures) et de *banquettes* (couches tendres) quand les couches sont épaisses. Il est plus rectiligne quand les bancs sont plus minces. Le réseau hydrographique est *inséquent :* il ne présente pas de direction particulière puisque les couches sont horizontales. Une déformation de grande ampleur ou un basculement entraînent l'inclinaison des couches.

L'érosion est à l'origine d'un relief dissymétrique : le relief de cuesta.

Le relief de cuesta comprend un *front* formé par un abrupt lié à la couche dure, une dépression située au pied de l'abrupt appelée *dépression subséquente*, et un revers qui correspond généralement à la couche dure. Le front présente un profil latéral différencié : la partie supérieure est une corniche, tandis que la partie inférieure est un talus concave. Le profil longitudinal est généralement régulier, interrompu par endroits par les *percées* des *cours d'eau conséquents*, qui suivent le pendage général des couches. Le front est fréquemment précédé de *buttes*, restes de l'ancienne extension de la cuesta. Couronnées de couche dure, il s'agit de *buttes témoins*.

Il existe différents types de cuestas. Si la différence de dureté entre les deux couches est grande, la cuesta est bien marquée dans le paysage avec une corniche très vive. Si cette différence est faible, la cuesta est peu nette avec un profil convexo-concave. Le profil longitudinal est très rectiligne quand une couche dure épaisse surmonte une couche tendre mince ; par contre, si une couche dure mince repose sur une couche tendre épaisse, le tracé est sinueux, la couche dure étant attaquée rapidement. Le réseau hydrographique comprend des cours d'eau qui coulent dans le sens du pendage des couches (cours d'eau conséquents), parfois dans le sens opposé (cours d'eau obséquents), et plus rarement au pied du front (cours d'eau subséquents). Les cours d'eau obséquents posent un problème car ils coulent dans le sens opposé au pendage. Ils ne sont par conséquent pas adaptés à la structure. Il existe deux cas d'*inadaptation à la structure :* la *surimposition*, où le cours d'eau s'établit sur une surface ou des dépôts masquant le relief sous-jacent, et l'*antécédence*, où le cours d'eau s'établit alors que le relief n'est pas encore érigé. La surimposition et l'antécédence sont des phénomènes dits *épigéniques*.

Les structures plissées. Les déformations les plus courantes affectant les couches sédimentaires sont les *plis*, définis comme les ondulations d'une couche de

Max Jonin - Explorer

▲ ***Un anticlinal** dans **la presqu'île de Crozon.***

forme et d'ampleur variables. Lorsque ce sont les couches les plus anciennes qui se trouvent au cœur du pli (noyau), le pli est un *anticlinal;* quand ce sont les couches les plus récentes, le pli est *synclinal.* Le *plan axial du pli* est le plan de symétrie qui le divise en deux parties égales. La *charnière* est l'intersection du pli avec le plan axial : si elle se trouve au point le plus élevé du pli, elle forme sa crête (cependant, charnière et crête ne coïncident pas toujours). L'*axe du pli* est la ligne d'intersection du plan axial avec le plan horizontal : les flancs sont les parties du pli qui plongent de part et d'autre du plan axial. L'altitude de l'axe varie le long du pli : il peut s'abaisser *(ensellement)* ou se relever *(surélévation).* Le pli se termine dans la direction de son axe par une *terminaison périclinale,* qui correspond soit à la retombée de l'anticlinal, soit au relèvement de l'axe synclinal. On distingue différentes sortes de plis en fonction de leurs dimensions, formes et origines. Si la longueur du pli est voisine de sa largeur, le pli est *brachyanticlinal* ou *brachysynclinal.* Si le plan axial est vertical, le pli est dit *droit.* Le pli *coffré* offre une crête plane et des flancs verticaux. Si le plan axial est dissymétrique, les plis sont *déjetés, en genou, déversés* ou *couchés.* L'érosion attaque les plis. Si l'anticlinal est conservé, il correspond à des voûtes appelées *monts.* Si le synclinal reste intact, il donne naissance à des berceaux appelés *vaux.*

— L'attaque peu avancée de l'érosion est à l'origine d'un type particulier de relief, le *relief jurassien.* Ce relief est caractérisé par la *combe,* dépression formée au sommet de l'anticlinal, le *crêt,* qui représente la couche dure de l'anticlinal de chaque côté de la combe, et la *cluse,* passage d'un cours d'eau perpendiculaire au mont. L'attaque plus avancée de l'érosion entraîne l'*inversion du relief plissé :* en effet, les anticlinaux, par élargissement des combes, sont évidés et dominés par les synclinaux qui se trouvent ainsi perchés. L'érosion finit par mettre sur un même plan anticlinaux et synclinaux qui sont alors arasés.

— Si l'érosion reprend, elle donne naissance au *relief appalachien :* les roches dures situées à une même altitude constituent les sommets de ce relief, tandis que les roches tendres sont creusées en sillons. Le réseau hydrographique des régions plissées présente un *tracé en baïonnette :* les sections adaptées des cours d'eau coulent dans les vaux, les secteurs inadaptés parcourant les cluses. Celles-ci sont dues aux captures et aux phénomènes épigéniques. Le plus souvent, elles correspondent à des ensellements. Elles peuvent être fonctionnelles ou mortes : dans ce dernier cas, elles sont appelées *wind-gaps.*

Les structures faillées. Les régions faillées sont affectées par trois types d'accidents structuraux : la *flexure,* brusque ployage avec étirement des couches, la *fracture,* correspondant à une cassure sans dénivellation tectonique, et la *faille,* cassure à laquelle est liée une dénivellation tectonique.

La faille est le plus caractéristique des accidents. Elle est définie par son *rejet,* mesure de la dénivellation, son *regard,* côté vers lequel est situé le bloc affaissé, sa *direction* et son *tracé.* Le découpage d'une région par des failles montre le plus souvent des blocs surélevés, appelés *horsts,* et des compartiments affaissés, les *fossés d'effondrement.* Les lignes de failles, qui présentent généralement des formes géométriques, se groupent parfois pour donner une mosaïque de blocs et se relaient plus ou moins en enfilades. Dans le paysage, la faille engendre un relief ou ne donne pas d'abrupt. L'absence d'abrupt s'explique soit par le nivellement du bloc soulevé, surtout s'il est formé de roches tendres, soit par le remblaiement du bloc affaissé jusqu'au niveau du compartiment surélevé. Toutefois, en règle générale, les failles donnent naissance à des escarpements : si ceux-ci résultent directement de la dislocation verticale, l'érosion n'intervenant que pour les abaisser ou pour les faire reculer sans jamais les faire disparaître, ils sont appelés *escarpements de faille.* Quand l'escarpement est dû à l'action

▼ ***Un synclinal** sur les **bords de la Meuse (Waulsort, Belgique).***

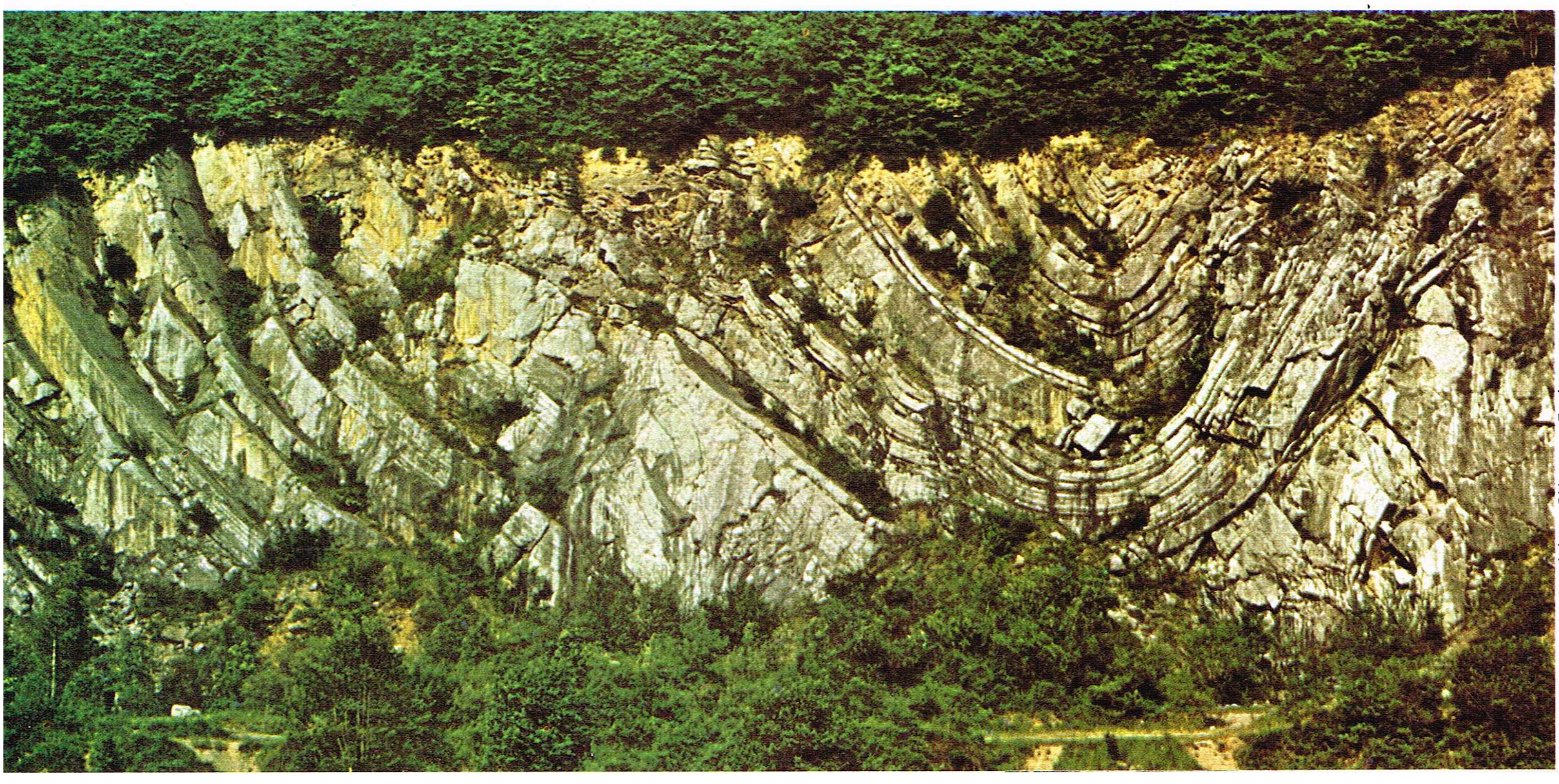

Dominique Clément - Explorer

exclusive de l'érosion le long de la ligne de faille, il est appelé *escarpement de ligne de faille*.

Le réseau hydrographique adapté aux structures faillées concerne les cours d'eau qui s'installent à l'emplacement de la ligne de faille (la vallée est alors appelée *vallée de ligne de faille*). Il concerne également les cours d'eau parcourant les fossés d'effondrement. Quand une rivière passe d'un fossé sur le compartiment surélevé voisin, elle est inadaptée et son tracé s'explique soit par antécédence, soit par surimposition, soit encore par les deux phénomènes réunis.

Les contacts. Au contact des bassins sédimentaires et des massifs anciens, il existe des types de relief particuliers. Le passage des couches d'un bassin sédimentaire au socle a lieu à travers une *discordance*. La couverture sédimentaire est dite discordante par rapport au socle parce qu'elle repose sur une surface tranchant les anciennes racines de la chaîne érodée qui a donné naissance au socle. Deux grands types de contacts peuvent être distingués : les contacts sans faille et les contacts avec failles.

— Les *contacts sans failles* se divisent en plusieurs sous-types. Il y a *contact en glacis* lorsque le passage du massif ancien à sa couverture sédimentaire discordante est en continuité topographique. La surface du massif ancien est basculée, et les couches sédimentaires vont en s'épaississant vers l'extérieur. Le *contact par dépression périphérique* présuppose que la surface du massif ancien est basculée, qu'il existe un binôme constitué d'une couche tendre surmontée d'une couche dure, et que cette dernière est tranchée en cuesta au-dessus de la dépression. Lorsque la surface du massif ancien n'est pas basculée, le rebord de la couverture sédimentaire restée quasi horizontale est appelé glint : c'est un *contact par glint*.

— Les *contacts avec failles* sont les plus fréquents mais toutes les failles bordières n'apparaissent pas dans la topographie. Quand le relief de contact est directement lié aux failles, il s'agit le plus souvent d'un contact par escarpement de ligne de faille ou d'un contact par vallée de ligne de faille.

Le contact d'une chaîne alpine et d'une plaine subalpine donne également des formes particulières : les formes de *piedmont*. Un modelé de piedmont s'élabore en avant d'une montagne qui s'élève au-dessus d'une plaine par le jeu d'une faille ou flexure unique, véritable front au contact de la plaine. L'érosion intense qui s'exerce sur la montagne en voie de surrection fournit des matériaux qui s'accumulent au pied de la montagne à l'air libre, sous les eaux lacustres ou marines. La surrection de la chaîne s'accompagne d'une subsidence, les matériaux où prédominent les faciès grossiers étant entassés sur des centaines ou des milliers de mètres (à l'échelle des temps géologiques), l'avant-pays ou piedmont peut être incorporé à la chaîne; les sédiments détritiques sont alors à leur tour plissés.

Le piedmont, lorsqu'il apparaît à l'air libre, donne un paysage de croupes. Les rivières sortant de la montagne y déposent leur forte charge et créent des *glacis alluviaux* appelés *piedmonts alluviaux*.

Dans le cas d'un encaissement des cours d'eau, par suite d'une surrection, d'un changement de niveau de base ou d'une fluctuation climatique, le piedmont est découpé en lanières; c'est alors un *piedmont à serres*.

Si les interfluves sont plus larges, un relief de plateau apparaît. L'élargissement des vallées conduit à la destruction du piedmont et à l'élaboration d'une *plaine d'érosion*.

L'évolution du relief

La théorie du cycle d'érosion de Davis

Les différents éléments présentés précédemment sont trop épars pour permettre de comprendre l'évolution des paysages de la Terre. Aussi la nécessité d'une synthèse fut-elle ressentie depuis longtemps par les géomorphologues.

A la fin du XIXe siècle, l'Américain W.M. Davis élaborait une théorie cohérente, la *théorie du cycle d'érosion*, qui connut un véritable succès. De nombreuses critiques lui ont été adressées depuis, mais son influence reste grande chez de nombreux géomorphologues. Il est donc nécessaire de l'exposer avant d'aborder les nouvelles orientations de la géomorphologie.

Vulcain - Explorer

▲ ***La faille est l'un des trois types d'accidents structuraux qui affectent les régions faillées; ici en Islande.***

Le **cycle d'érosion** comprend une longue phase d'érosion à laquelle succède un brusque rajeunissement. La phase d'érosion se décompose en plusieurs stades : la jeunesse, la maturité et la vieillesse. Le phénomène commence dans une région soulevée uniformément par rapport au niveau de base. Les fleuves et les rivières doivent s'encaisser près de l'embouchure car la pente a augmenté; l'érosion remonte ensuite vers l'amont (érosion régressive); les lits des cours d'eau et les versants subissent une forte érosion : c'est le stade de la *jeunesse*. Puis le profil du cours d'eau se régularise, l'érosion aréolaire devient égale à l'érosion linéaire, et le réseau hydrographique se hiérarchise : c'est le stade de la *maturité*. Lors du dernier stade, dit de la *vieillesse*, le sommet des croupes se rapproche de l'altitude des talwegs sans jamais l'atteindre, car les débris doivent toujours être évacués.

Cependant si, parvenue à ce stade de l'évolution, la région est brusquement soulevée par des mouvements tectoniques, si le niveau de la mer s'abaisse *(mouvement eustatique)*, le creusement peut reprendre. Dans ce cas, la région est à nouveau au stade de la jeunesse. Le cycle d'érosion présuppose les conditions de l'érosion dite **érosion normale.** L'érosion normale est celle qui est commandée par les eaux courantes, l'évolution des talwegs déterminant toute la *morphogenèse* (création ou évolution des formes du relief). L'eau courante apparaît, selon Davis, comme le seul véritable facteur du modelé des continents, tous les autres systèmes étant loin d'avoir la même importance : l'action des glaces aux hautes latitudes, ou celle du vent dans les régions arides, ne s'exercent que sur des portions limitées de la surface de la Terre. Lorsque ces systèmes d'érosion, à la suite d'une oscillation climatique, mordent sur les régions d'érosion normale, ils représentent seulement des accidents que le retour à « la normale » tend à effacer. L'érosion chimique ne s'exerce que dans certains pays où le sous-sol offre des conditions favorables. L'érosion marine se borne à faire reculer les rivages sans influer sur le relief continental.

Le cycle d'érosion tel qu'il a été défini réalise une **pénéplaine,** où le relief est réduit à une surface sans grandes dénivellations. Son élaboration nécessite un temps très long (sans doute plusieurs millions d'années si les roches sont de résistance moyenne), et cela à condition qu'aucun accident n'ait perturbé l'évolution du cycle. Les pénéplaines présentent parfois dans les régions tempérées des reliefs résiduels sensibles, appelés *monadnocks :* il s'agit de buttes surbaissées qui se

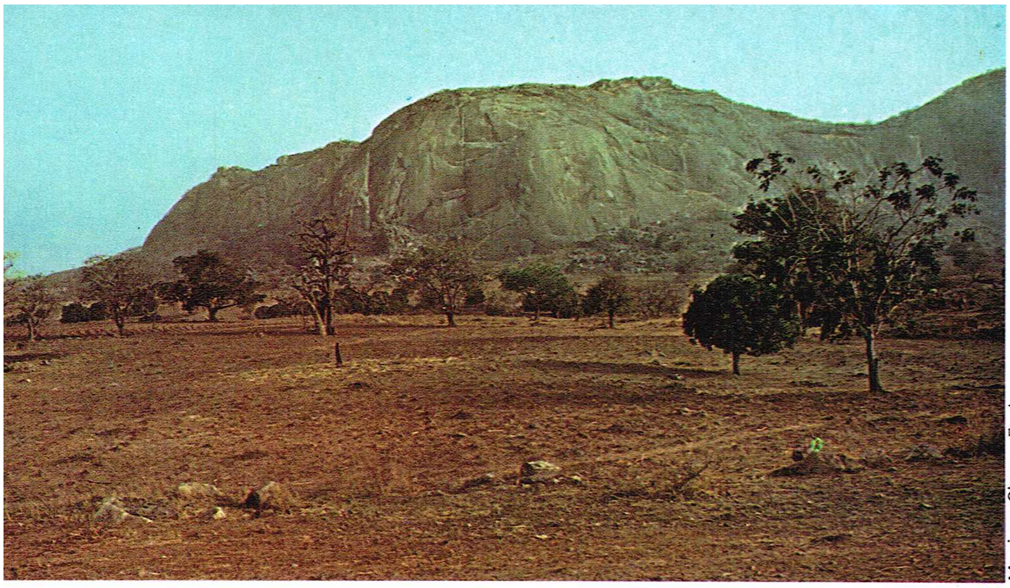

Monique Claye - Explorer

▲ *Sous climat tropical, ici dans le Nigeria, la topographie d'érosion a conservé un relief résiduel dans le granite : un inselberg au sud-est d'Oussao.*

▶ *Représentation schématique de l'emboîtement de modelés cycliques : a, pénéplaine du cycle 1 (modelé sénile) ; b, rupture de pente cyclique ; c, replat du cycle 2 (modelé de maturité) ; d, vallée du cycle 3 (jeunesse) ; e, rupture de pente cyclique du profil ; f, l'incision née du cycle 2 se développe à l'amont (d'après H. Baulig).*

▼ *La succession des cycles de creusement et d'alluvionnement donne deux types de terrasses : des terrasses étagées et des terrasses emboîtées, moins répandues. Ici, terrasses du Río Veral près de Jaca (Espagne).*

raccordent progressivement à la base de la surface de la pénéplaine. Leur conservation au-dessus de la surface générale d'érosion s'explique soit par la dureté des roches qui les constituent *(monadnocks de résistance)*, soit par leur situation sur la ligne de partage des eaux *(monadnocks de position)*. Sous climat tropical, les topographies d'érosion, plus parfaitement réalisées que sous climat tempéré, forment de véritables plaines d'érosion *(pédiplaines)* qui portent aussi des reliefs résiduels, plus vigoureux, aux versants souvent abrupts : les *inselbergs*. Le niveau de base actuel s'étant fixé à une époque récente, lors de la *transgression flandrienne* il y a environ 10 000 ans, il n'existe pas de pénéplaines en rapport avec le niveau actuel. Les portions de pénéplaines qui

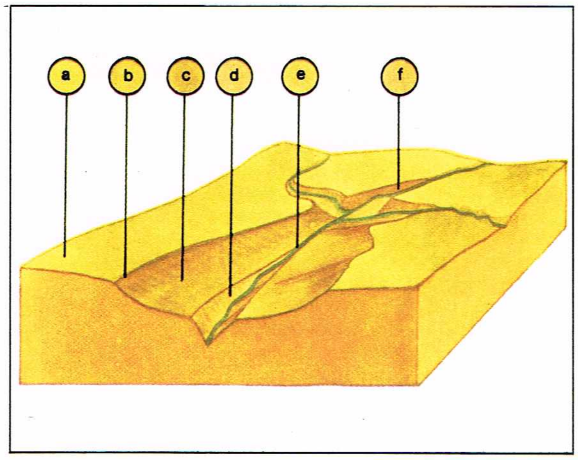

Richard Colin

subsistent sont des surfaces anciennes conservées. Pour les dater, on dispose de différents éléments : une surface qui nivelle des blocs dénivelés par une phase tectonique est postérieure à cette phase ; une surface est plus ancienne que les dépôts qui reposent sur elle sauf si ces dépôts sont des dépôts d'altération contemporains de l'élaboration de la pénéplaine, auquel cas la pénéplaine est de même âge que les dépôts d'altération.

La succession des cycles d'érosion

La plupart des topographies ont été modelées par une succession de cycles d'érosion ; toutefois, les traces des plus anciens cycles n'ont pas été effacées par les plus récents. Un nouveau cycle est déclenché à la suite d'un mouvement relatif du niveau de base, qu'il soit positif ou négatif.

— Lors d'un mouvement positif, une partie du continent est submergé, la pente du cours d'eau diminue vers l'aval, et les cours d'eau remblaient leur cours en progressant vers l'amont. Le cycle est alors un **cycle de remblaiement.**

Lorsque le mouvement est négatif, c'est le contraire qui se produit : les cours d'eau s'encaissent à l'aval, puis l'encaissement progresse vers l'amont. C'est alors un **cycle de creusement.**

— L'alternance des cycles de remblaiement et de creusement successifs est à l'origine de formes d'étagements du relief : le **relief** est dit **polycyclique.** Il faut néanmoins nuancer cette affirmation : la succession des cycles peut donner, dans certains cas, des surfaces en continuité les unes des autres : de telles surfaces sont dites *polygéniques*. Dans les régions affectées au cours d'une longue histoire géologique par des mouvements très lents, une même surface peut se conserver, sans cesse retouchée par les cycles successifs mais par une érosion modérée : une telle surface est dite *surface de regradation*.

Les formes polycycliques se reconnaissent dans les profils en long et en travers des vallées. Lors d'un cycle de creusement, la vague d'érosion régressive laisse coexister le long d'un même cours d'eau des tronçons façonnés par le cycle en cours et des tronçons issus du modelé antérieur. Sur le profil en long, cela se traduit par une rupture de pente au point où la vague cyclique est parvenue. Sur le profil en travers, une gorge d'érosion régressive s'inscrit dans la surface cyclique antérieure, la forme récente étant littéralement emboîtée dans la forme ancienne.

Les versants présentent également des ruptures de pente au contact des deux cycles, appelées *épaulements* (le même nom s'applique également lorsque la gorge régressive s'inscrit non dans une ancienne vallée alluviale mais dans une surface d'érosion du cycle précédent).

— L'ancien fond alluvial qui domine le nouveau talweg constitue une *terrasse*. Si le lit abandonné conserve une couche plus ou moins épaisse d'alluvions recouvrant le substratum de roche en place, il s'agit d'une *terrasse alluviale*. Lorsque la pellicule alluviale fait défaut, il s'agit d'une *terrasse rocheuse*. La succession des cycles de creusement et d'alluvionnement donne deux types de terrasses : des **terrasses étagées**, qui ont un substratum et un talus de roche en place et sur lesquelles reposent ou non des alluvions (terrasses de la Garonne), et qui sont les plus répandues ; des **terrasses emboîtées**, sculptées dans la masse des alluvions superposées.

La succession des formes d'étagement et d'emboîtement dans le relief permet d'étudier et de reconstituer l'histoire morphogénétique d'une région. Toutefois, l'utilisation de la théorie cyclique de Davis pour expliquer ces formes s'est traduite bien souvent par de véritables aberrations, qui ont conduit à la critique de cette théorie.

Critique de la théorie davisienne. Nouvelles théories de remplacement. Introduction à la géomorphologie climatique

— Les premières critiques formulées à l'égard de la théorie davisienne ont un point de départ commun : la remise en question de l'hypothèse que les périodes de stabilité génératrices de surfaces d'érosion sont longues et que les changements de niveau de base sont des périodes très brèves.

Prenant le contre-pied de Davis, les géographes allemands A. et W. Penck ont tenté de prouver que les

Binois - Pitch

surfaces d'érosion pouvaient se développer indépendamment d'un niveau de base fixe, donc hors des périodes de stabilité. Dans la *théorie du niveau des crêtes* (*Gipfelflur* en allemand), A. Penck s'inscrit en faux contre la théorie de Davis qui supposait que les indices d'une ancienne planation étaient fournis par la présence d'une série de crêtes culminant à des niveaux sensiblement égaux; il démontre que cette subégalité peut être réalisée dans une montagne en pleine surrection. Les cours d'eau de bassins sensiblement comparables s'enfonçant à une vitesse égale lors d'un creusement consécutif à une surrection, les crêtes formés par le recoupement des versants ont une altitude comparable.

Le fils d'A. Penck, W. Penck, a tenté de démontrer que les surfaces d'aplanissement pouvaient se réaliser en même temps que des mouvements tectoniques et a ainsi élaboré la *théorie des plates-formes de piedmont* (*Piedmonttreppen* en allemand), théorie abandonnée depuis.

— Par-delà ces critiques théoriques, des auteurs se sont plus spécialement attachés au *rejet de l'explication de certaines formes* de relief selon la théorie de Davis. L'érosion régressive ne se transmet pas, comme le supposait Davis, jusque sur le cours supérieur, la puissance de creusement dans la gorge régressive s'accompagnant d'un plus fort apport de débris en provenance des versants; la charge des cours d'eau devient plus importante, et donc le cours d'eau devient moins érosif vers l'amont. Les terrasses fluviatiles ne peuvent s'expliquer uniquement par des changements de niveau de base; il faut faire intervenir des mouvements tectoniques régionaux et surtout des changements climatiques qui influent sur la charge des cours d'eau et leur puissance érosive. C'est ainsi que les alternances d'alluvionnement et d'incision résultent des changements liés aux crises climatiques du Quaternaire. Les périodes de *rhexistasie* sont les moments d'usure des versants, la couverture végétale étant en régression sous l'effet de causes tectoniques, climatiques ou anthropiques. Les cours d'eau ont alors une charge grossière, formée par les matériaux issus des versants, et leur puissance de creusement diminue : c'est une phase de remblaiement. Lors d'une phase de stabilité biologique, pendant laquelle se réalise sous couvert forestier une altération sur place sans apport (hormis les apports solubles) d'éléments de charge au cours d'eau, il y a *biostasie*. Les cours d'eau, moins chargés, peuvent alors être érosifs. Le modelé des pénéplaines ne peut s'expliquer qu'en faisant intervenir des processus étrangers à l'érosion fluviatile, tel *le sheetflood* (ruissellement en nappe) observé dans les régions arides et tropicales.

— Ensuite et surtout, les critiques ont été adressées au *postulat de l'* « *érosion normale* ». La morphologie de la zone tempérée, attribuée à l'érosion fluviatile par Davis, est devenue la « morphologie normale ». Or, les recherches ont montré que l'érosion normale agit très faiblement sous le climat tempéré et qu'elle est ralentie par le tapis végétal. On n'observe nulle part une région évoluant vers la planation fluviatile; l'évolution est arrêtée. Les reliefs de la zone tempérée sont en fait, pour l'essentiel, l'*héritage* de périodes anciennes dont le climat était différent de l'actuel. Ainsi, seule l'étude des paléoclimats peut permettre de comprendre la majorité des formes de la zone tempérée. Contrairement à ce qu'affirment les hypothèses de Davis, les mécanismes morphogénétiques propres au climat tempéré apparaissent donc maintenant comme des facteurs de faible ampleur comparés à ceux des climats aux types de temps antinomes actuels (climat polaire, équatorial, etc.), et surtout comparés aux types de temps, plus fortement antinomes encore, des paléoclimats.

Le postulat de l'érosion normale se révélant faux, l'explication des formes de relief doit s'insérer dans un cadre différent de celui proposé par Davis. Synthèse prématurée, la théorie davisienne ne s'était pas attachée à une analyse suffisante des différents facteurs qui modèlent le relief.

— Enfin, à l'élaboration théorique de Davis se substitue une étude des *facteurs de différenciation morphoclimatique*.

— La notion de *zone* apparaît en géomorphologie : est qualifié de *zonal* tout phénomène ou processus qui se répartit à la surface du globe de manière grossièrement conforme à la latitude. Chacune de ces zones constitue une *zone morphoclimatique*. Le relief doit alors ses traits caractéristiques à son élaboration dans un milieu particulier (par exemple, l'inlandsis de climat polaire). Certains phénomènes sont néanmoins *azonaux* (mondiaux), par exemple, les formes volcaniques, la répartition des eaux courantes; c'est ce qui a conduit Davis à croire qu'elles étaient le facteur essentiel du modelé mondial. Enfin, les phénomènes *extrazonaux* sont des mécanismes caractéristiques d'une zone qui se manifestent dans une autre zone de manière sporadique; citons les glaciers sous l'équateur et les phénomènes périglaciaires qui les accompagnent.

Le caractère zonal de certaines formes du relief étant admis, il importe d'établir ses conséquences dans les grandes zones morphoclimatiques et d'étudier les paysages glaciaires, périglaciaires, arides et tropicaux. L'étude des paysages littoraux, enfin, permettra l'approche des combinaisons des phénomènes zonaux et extrazonaux.

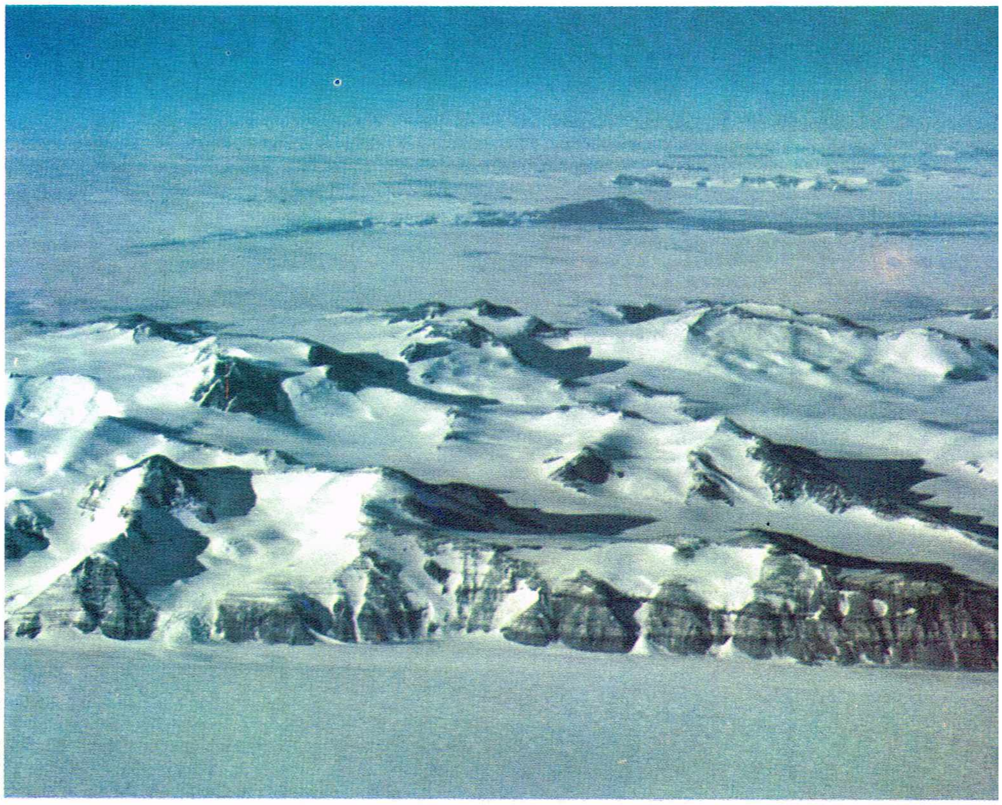

Bavaria - H. Betzler

▲ *Un aspect de l'inlandsis antarctique; remarquer au premier plan deux langues glaciaires qui s'échappent de l'inlandsis.*

Les paysages glaciaires

Les glaciers occupent une superficie de 15 millions de kilomètres carrés, dont 97 % dans l'Antarctique et au Groenland. Au maximum de l'extension quaternaire, cette superficie était trois fois plus grande et embrassait l'Amérique du Nord jusqu'au confluent de l'Ohio et du Mississippi, et l'Eurasie jusqu'à une ligne reliant Londres, les bouches du Rhin, le pied des montagnes de l'Allemagne moyenne, le cours moyen du Dniepr et du Don, alors que la Sibérie était libre de glaces.

Les glaciers actuels sont de dimensions très variées, depuis les plaques de neige persistantes, appelées *névés*, jusqu'aux *inlandsis*, immenses étendues continentales (l'Antarctique occupe environ 14 millions de kilomètres carrés). Les glaciers résultent de l'accumulation de neige d'une année sur l'autre. La neige persiste au-dessus d'une limite qui est fonction de l'altitude et de la latitude. Au-dessus de cette limite, cependant, certains pics sont trop raides pour que la neige y subsiste : ce sont les *nunataks*. Par contre, d'un glacier peut s'échapper une *langue glaciaire* qui débordera la limite des neiges à une altitude souvent très inférieure. L'extension des glaciers est fonction des conditions d'alimentation et de fusion.

Le **bilan glaciaire** est la somme algébrique des quantités positives, représentant l'*alimentation*, et des quantités négatives, représentant l'*ablation*. Si ce bilan est nul,

Photo Ag. Zürich

▲ Le glacier du mont Rose (Italie); on remarque, au centre, la langue glaciaire résultante et sa moraine médiane.
▼ A gauche, les matériaux issus de la gélifraction et tombés sur le glacier forment les moraines latérales (mer de Glace, Haute-Savoie). A droite, roches moutonnées correspondant à un verrou glaciaire.

le volume de glace reste identique. Un bilan négatif se traduit par un recul, un bilan positif par une avancée du glacier. L'ablation résulte de plusieurs facteurs, notamment, la fusion et l'évaporation. En fonction du bilan glaciaire, de la nature de la glace et de l'extension du glacier, il existe plusieurs types de glaciers.

Les divers types de glaciers

— Les *inlandsis* ont la forme de lentilles biconvexes. Leur épaisseur moyenne est de l'ordre de 2 kilomètres. Cette accumulation énorme de glace s'explique plus par la faiblesse de l'ablation sous les climats froids que par l'abondance des précipitations. L'alimentation est en effet très faible en raison de la sécheresse du climat, ce qui explique que le Groenland soit actuellement considéré comme une survivance remontant à des périodes plus humides. Chaque été, la glace superficielle de l'inlandsis fond en creusant des canyons de quelques mètres, les *bédières,* et l'eau disparaît dans des puits appelés « moulins » dans les Alpes. La fonte atteint particulièrement les langues glaciaires qui s'échappent de l'inlandsis. Si elles atteignent la mer, elles se fragmentent sous l'action de la houle et des marées en *icebergs.*

— Les *calottes glaciaires* revêtent des montagnes (système glaciaire du mont Rainier) et émettent des langues divergentes à leur périphérie, des cuvettes, des plateaux (Vatna-Jokull, en Islande, a 8 400 kilomètres carrés de superficie).

— Les *glaciers de cirque,* de dimensions réduites, occupent les montagnes dont le sommet dépasse de peu la limite des neiges persistantes. Ces glaciers sont dominés par des parois rocheuses abruptes, d'où descendent des avalanches qui les alimentent.

Institut de géographie alpine, Grenoble

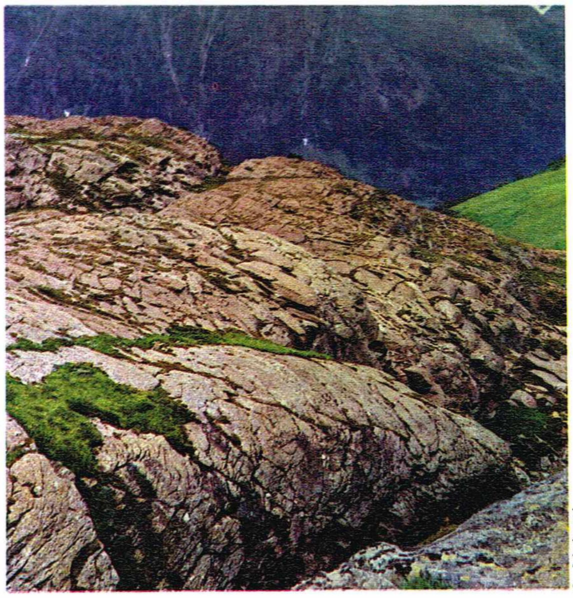

G. Mairani

— Les *glaciers de vallée,* nombreux dans les chaînes alpines, ont la forme d'un réseau dendritique. Le secteur d'alimentation est constitué de plusieurs langues issues des cirques supérieurs. Ces langues s'unissent par des *confluences.* La langue résultante, de forme convexe car l'ablation est plus forte sur les bords en raison du frottement sur le rocher, descend vers l'aval ; elle est plus ou moins recouverte de dépôts, les *moraines.*

Les *moraines latérales* sont constituées par les matériaux tombés sur le glacier ou arrachés aux parois de la vallée. Quand deux langues glaciaires confluent, leurs moraines latérales rentrent en coalescence pour former une *moraine médiane.* La *moraine interne* est formée de pierres que le glacier transporte dans sa masse. Sur le fond, le glacier transporte des blocs représentant un volume appréciable : c'est la *moraine de fond.* Le glacier déplace sur son front des matériaux qui constituent la moraine de front, ou *vallum morainique.*

— Les *glaciers de piémont* s'observent quand les glaciers de vallée sortent de la montagne et forment des *lobes de piémont.* Ces lobes présentent alors un phénomène de fusion grandissant, surtout s'ils arrivent dans un secteur tiède, comme le glacier alaskien de Malespina.

Les processus de l'érosion glaciaire sont mieux connus grâce à la **cristallographie** et à la **dynamique** du glacier. La neige tombe sous la forme de cristaux enchevêtrés, de forme plus ou moins dentelée. Immédiatement après sa chute, la neige qui contient beaucoup d'air a une densité très faible (0,1). Sa densité augmente sous l'influence de la pression, des changements de température et des réarrangements à l'échelle moléculaire. La neige peut ainsi fondre, puis regeler. Elle se modifie plus vite sous les climats maritimes, caractérisés par une succession de redoux qui fondent la neige et de retours au froid, que sous les climats à gel durable, polaires ou continentaux. La neige qui a tenu pendant l'été est la neige de névé (densité : 0,6). Pour que la densité augmente, il faut plusieurs dizaines d'années, la glace pure ayant une densité de 0,91.

La glace coule de l'amont vers l'aval. La vitesse en surface est plus forte au centre que sur les bords. Cette vitesse, très lente sur les inlandsis, devient très forte sur leurs émissaires et sur les langues alpines ou alaskiennes. Elle peut être augmentée considérablement par une accumulation de glace : ainsi, dans la partie amont, la vitesse hivernale est généralement plus élevée que la vitesse estivale. Dans la partie aval, l'eau de fonte sous le glacier et l'appel au vide créé par l'ablation accroissent la vitesse en été.

Le mouvement de la glace est complexe : il procède à la fois du mode visqueux (ne conservant pas sa forme après avoir subi des efforts), du mode plastique (conservant les déformations) et du mode élastique. Ainsi, la glace peut soit ne pas mouler tous les creux de son lit, le vide existant alors entre les parois et le glacier étant la *rimaye,* soit épouser les obstacles, soit s'individualiser en courants juxtaposés, superposés ou emboîtés, soit enfin se casser en surface par des crevasses et en profondeur.

Le **travail de la glace** a donné lieu à des controverses. Les *ultraglacialistes* font de la glace le plus actif des agents d'érosion : elle peut creuser profondément et indépendamment de la topographie préglaciaire de la même façon que les eaux courantes agissent. C'est l'*hypothèse du lit fluvial.* Au contraire, les *antiglacialistes* admettent que les glaciers protègent le relief qu'ils recouvrent, et que leur action se limite au transport des débris issus de la fragmentation par le gel des matériaux situés au bord du glacier ainsi que sur l'espace occupé plus tard par le glacier. C'est l'*hypothèse du défonçage périglaciaire.* Enfin, les *transactionnels* admettent le creusement mais nient que la surface préglaciaire soit totalement remodelée. Le glacier se contenterait d'aménager le lit fluvial, transformant les bassins de réception en cirques et les vallées fluviales en auges. Sur la surface préglaciaire, le glacier débite en gros blocs les roches diaclasées surtout sur les secteurs inclinés vers l'aval, tandis que le frottement et l'abrasion seraient moindres sur les contre-pentes et les roches non diaclasées.

L'existence de ces différentes théories montre le caractère complexe du mouvement du glacier, qui peut agir soit en érodant considérablement, soit en agissant par légères touches.

Aerofilms Limited

▲ ***Une région aujourd'hui libre de glaces : les environs du lac Hawes (Angleterre). Au premier plan, une ancienne auge glaciaire en U, en amont de laquelle on peut voir un cirque suspendu, barré par un verrou gradin ; à gauche, un cirque à parois raides barré par un verrou isolant un lac.***

Le glacier façonne le lit rocheux par les processus de raclage et de polissage. Le *raclage* résulte du frottement exercé sur la roche en place par les blocs et les débris contenus dans la glace. Sur les parois, le raclage crée des cannelures larges de 5 à 50 cm et de deux à cinq fois moins profondes. Sur les parois et sur le fond, les pierres emportées créent des stries profondes de quelques millimètres. Sur le fond, les pierres donnent naissance à des griffures, sillons étroits, qui fournissent des indications quant à la direction et au sens de l'écoulement de la glace. Le *polissage* est l'œuvre d'une glace peu chargée en matériaux grossiers. S'il dure longtemps, il entraîne une usure en arrondissant les saillies et donne naissance aux *roches moutonnées.* La glace érode également par *quarrying,* c'est-à-dire par déchaussement de blocs (surtout dans le cas des roches diaclasées). La glace façonne les matériaux transportés : les matériaux de la moraine de fond *(till* ou *duft)* sont plus triturés que ceux de la moraine de surface et contiennent par conséquent plus de limon. Les matériaux glaciaires sont peu aplatis et peu émoussés.

Les formes glaciaires

— Une des formes glaciaires les plus simples est le *cirque,* qui se présente sous la forme d'une dépression semi-circulaire dominée par des parois abruptes. Il existe des cirques en forme de niches accrochés au flanc de la montagne, présentant pour les plus étendus un fond plat occupé parfois par un lac et pouvant se terminer à l'aval par une contre-pente qui les barre, et des cirques en escalier comme le cirque de Gavarnie. Les cirques, rarement isolés, se groupent et leurs fonds sont à des altitudes voisines. Dans les régions de moyenne montagne, comme les Vosges, ils entaillent les croupes. Dans les hautes montagnes, ils entaillent des crêtes aiguës modelées non par l'érosion glaciaire, puisque la glace n'y subsiste pas, mais par le gel. Le niveau des crêtes reste sensiblement à la même altitude : cependant, une pyramide, ou *horn,* formée au point d'intersection des crêtes peut dominer. Une *niche de nivation* est sans doute à l'origine d'un cirque, le creux du cirque s'approfondissant par gélivation, d'abord entre les flaques de neige qui s'accumulent dans la niche, ensuite sur les parois.

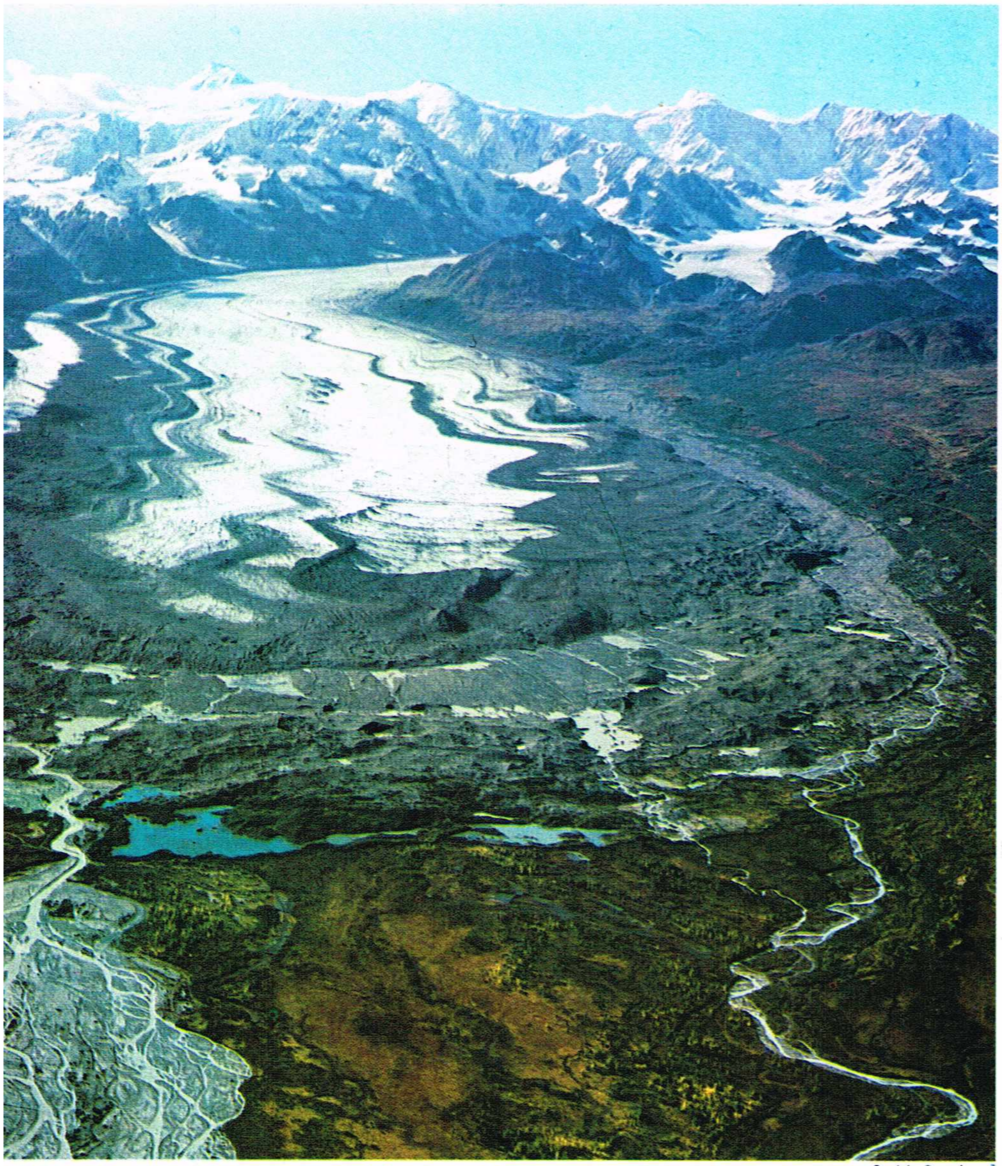

S. McCutcheon

▲ ***Vue d'un front glaciaire montrant des torrents alimentés par les eaux de fusion, et la zone d'accumulation de la marge glaciaire (glacier de Capps, Alaska).***

— La *vallée glaciaire,* due à l'action d'une langue glaciaire, affecte une *forme d'auge* caractéristique avec des flancs abrupts et un fond le plus souvent plat. Il existe également des vallées glaciaires en *V* dues soit au travail du *torrent sous-glaciaire,* soit au travail de la glace incapable de creuser une large vallée.

La vallée glaciaire, dont la largeur est importante par rapport à sa profondeur, présente des profils en long et transversal caractéristiques. Le profil en long de la vallée glaciaire montre une succession de secteurs approfondis et élargis, les *ombilics,* et de secteurs de moindre creusement le plus souvent rétrécis, les *verrous.* Les ombilics, résultat du surcreusement par la glace, sont souvent occupés par des lacs. Les verrous, saillies rocheuses moutonnées, peuvent soit barrer totalement la vallée et ne laisser le passage qu'à une gorge fluviatile, soit laisser d'assez larges passages quand ils sont constitués de bosses rocheuses juxtaposées. A l'aval, une irrégularité très nette est due le plus souvent au vallum morainique, qui peut barrer la vallée, tel l'amphithéâtre d'Ivrée au débouché de la vallée d'Aoste. L'origine des ombilics et des verrous pose le problème du surcreusement glaciaire, qui est fonction à la fois de l'épaisseur et de la vitesse du glacier. Le profil transversal montre également des irrégularités : celles-ci sont dues non seulement aux dépôts de moraines de fond et aux crêtes allongées des moraines latérales mais aussi à des épaulements qui dominent le fond de la vallée de quelques centaines de mètres. Ces *replats* peuvent être multiples et superposés, comme si les auges successives s'étaient emboîtées les unes dans les autres. L'*épaulement* s'explique par l'emboîtement d'une auge modelée par un glacier réduit dans une large vallée modelée par un grand glacier ou une vallée fluviatile. Les vallées glaciaires ne se raccordent pas toujours sur le même plan comme les vallées fluviales : on parle alors de *vallée suspendue.* Si un glacier dans sa vallée trouve un col de flanc dont le niveau est inférieur au niveau de la surface de la glace, il émet une digitation qui peut passer le col et le modeler en berceau : il s'agit alors des *cols de transfluence ou de diffluence,* nombreux dans les Alpes et plus rares dans les Pyrénées où la haute crête était un obstacle au franchissement des glaces.

— Les *plaines et plateaux glaciaires,* appelés *fjells,* ou *fjelds* en Scandinavie, présentent une topographie moins chaotique que les formes précédentes, bien que les vallées ne soient pas absentes de ces vastes espaces. Leur paysage est fonction de l'opposition entre des roches moutonnées par l'érosion et des zones d'accumulation : les *formes d'érosion* dominent dans la zone de départ des glaces (nord du Canada, nord de la Suède et de la Finlande), tandis que les *formes d'accumulation* se situent à la périphérie du glacier (Allemagne du Nord, nord de la plaine centrale des États-Unis). Les deux types de formes interfèrent souvent par suite des avancées et reculs des glaciers.

Les régions où dominent les **formes d'érosion** se présentent comme des ensembles bosselés dominant de petites dépressions, occupées le plus souvent par des lacs ou des étangs. Les formes d'accumulation sont diverses et dépendent de leur origine, qui se trouve soit sous le glacier, soit sur sa marge. Dans le premier cas, les paysages de drumlins et de plaines de moraines de fond dominent.

Les *drumlins* sont des collines en forme de dos de baleine généralement longues de quelques dizaines à quelques centaines de mètres, trois fois plus longues que larges en moyenne, et d'une hauteur ne dépassant pas 50 m, allongées dans le sens de l'écoulement de la glace et séparées par des dépressions le plus souvent marécageuses. Les drumlins correspondent à des épaississements de la moraine de fond que le glacier a modelés mais ils s'appuient le plus souvent sur un noyau rocheux. Si la moraine de fond n'est pas localisée par paquets, elle donne un relief moins différencié, tantôt plat, tantôt ondulé en collines. Le manteau morainique est généralement peu épais.

Les **formes d'accumulation** liées à la marge glaciaire sont plus complexes car le travail de l'eau de fonte et celui de la glace combinent les formes. Les eaux peuvent couler sur le glacier, sous le glacier, le long du glacier, ou encore contre le front du glacier. Dans ce dernier cas, les eaux sont dites *proglaciaires :* c'est l'origine des grandes vallées de la plaine germano-polonaise au Quaternaire ; elles peuvent également former des lacs, cas des Grands Lacs américains.

Les *osar* (au singulier, *os*) sont des collines à sommet irrégulier, dont les flancs vont de 5° à 20°, à profil transversal aigu ; ils peuvent s'étirer en bandes sinueuses sur des dizaines de kilomètres, alors que leur largeur varie de quelques dizaines de mètres à 500 m et que leur hauteur n'excède pas 50 m. Il semble que les osar soient des formes de recul glaciaire dues à des eaux de fusion.

Les autres formes d'accumulation sur la marge sont les *kames,* buttes à sommet généralement plat, et les *eskers,* associant des formes complexes filiformes et dilatées. Les moraines frontales donnent des formes plus ou moins compliquées suivant leur évolution. Les moraines de la dernière glaciation sont les plus fraîches ; elles forment ainsi les croupes baltiques.

En avant des moraines, les matériaux fluvio-glaciaires forment des nappes de matériaux fins (plus grossiers au pied des montagnes), appelés *sandurs.* Ils sont actuellement affectés par l'érosion postglaciaire qui crée des terrasses dans les nappes alluviales. La fonte des glaces lors des réchauffements climatiques se traduit par un *mouvement eustatique* positif, qui élève le niveau des mers, et par un *mouvement isostatique* également positif, qui soulève les blocs continentaux n'ayant plus à supporter le poids des inlandsis. Le relèvement eustatique est plus rapide que la compensation isostatique ; aussi une partie du continent ennoyée lors d'une transgression marine, postérieurement exondée par mouvement isostatique, peut-elle garder des traces d'une érosion marine.

S. Prato

▲ ***Le domaine périglaciaire est celui des hautes altitudes et des hautes latitudes; le processus d'érosion qui explique cette forme de paysage est le gel.***

Les paysages périglaciaires

Le processus d'érosion qui explique les paysages périglaciaires est le gel. Il est d'autant plus efficace que la végétation se fait de plus en plus rare avec l'altitude d'une part, et la latitude d'autre part. Le matelas d'air constitué par la forêt entre le feuillage et le sol atténue en effet les contrastes thermiques dans le sol. De même, les régions gazonnées, telles que la prairie alpine, sont protégées vis-à-vis des effets du gel.

Caractères et domaines du gel

Le gel s'exerce dès que le sol ou la roche apparaît.

● Le gel est caractérisé par son *intensité* et par sa *durée*. La glace exerce le maximum de pression autour de — 25 °C. A ces températures, le gel, très intense, fend les roches les moins gélives. A des températures situées autour de 0 °C, la succession des *cycles gel-dégel* devient l'agent morphologique principal qui affecte surtout les roches poreuses, comme la craie. La durée du gel peut être le facteur primordial de l'érosion car la glace agit par ségrégations. La durée affecte principalement les roches diaclasées.

Selon les régions touchées par le gel, le sous-sol est soit gelé en permanence, soit dégelé entièrement en été. Les régions au sous-sol continuellement gelé correspondent à des températures moyennes annuelles très inférieures à 0 °C. Entre la couche superficielle (0,60 m d'épaisseur en moyenne) qui gèle en hiver et dégèle en été, appelée *mollisol,* et la couche profonde toujours dégelée par rayonnement interne, il existe une couche toujours gelée et appelée indifféremment *tjale,* ou *merzlota,* ou *permafrost,* ou encore *pergélisol.*

● Les régions actuellement affectées par le gel représentent environ 1/6 des terres émergées, auxquelles il faut adjoindre les régions situées au sud des premières et touchées par le gel pendant les périodes froides du Quaternaire. Actuellement, le domaine périglaciaire est celui des hautes altitudes et des hautes latitudes.

— Le *domaine des hautes altitudes* comprend l'étage de la prairie alpine et des crêtes. Plusieurs mois ont une moyenne thermique inférieure à 0 °C, mais les hivers ne sont pas aussi rigoureux que dans les régions polaires. Le gel joue cependant un rôle important, bien que le permafrost soit exceptionnel. Vers l'équateur, le nombre

de cycles gel-dégel augmente : il peut ainsi devenir quotidien à 5 000 m d'altitude (Andes équatoriales). Dans les Alpes, les faces Nord, recouvertes de verglas qui les protège du gel, s'opposent aux faces Sud, où les cycles gel-dégel sont fréquents et destructeurs.

— Le *domaine des hautes latitudes* comprend deux types. Le *type polaire continental* (Sibérie du Nord-Est) connaît un hiver sec et rigoureux au cours duquel la neige joue un rôle effacé devant le gel intense et durable, l'amplitude annuelle l'emportant sur l'amplitude diurne ; le permafrost y est actuel. Le *type polaire océanique* (Islande) connaît des hivers moins rigoureux mais plus humides. Le gel, moins intense que dans le type précédent, est prolongé, plusieurs cycles gel-dégel apparaissant pendant l'année. L'existence du permafrost est fonction de la moyenne thermique annuelle, dont les variations sont liées à la plus ou moins grande rigueur de l'hiver : celui-ci est marqué et froid au Spitzberg, peu rigoureux dans les îles antarctiques, toutes les transitions pouvant exister entre ces types extrêmes.

Processus d'action du gel

Le gel dans le sol et dans les roches, la fonte des neiges et le dégel sont les processus d'action primordiaux liés aux régions périglaciaires, alors que le ruissellement et l'érosion éolienne tiennent un rôle secondaire. Le gel du sol dépend de la température du sol, qui est elle-même fonction de la température de l'air. A la surface du sol, l'amplitude des variations de température est supérieure à celle que l'on observe dans l'atmosphère car le sol se refroidit et se réchauffe plus vite que l'air. En profondeur, cette amplitude diminue. Quand les variations de température pénètrent moins profondément que le gel, il reste en profondeur le permafrost. Quand elles pénètrent plus profondément que le gel, celui-ci n'affecte qu'une couche peu profonde qui gèle ou qui dégèle soit quotidiennement, soit saisonnièrement : c'est le cas des régions où la température moyenne annuelle de l'air est supérieure à 0 °C.

Formes de ségrégation de la glace

Dans le sol, quand le gel est homogène, la glace se répartit entre les grains en les cimentant et en laissant ou non des vides. Cependant, le plus souvent, la glace agit par *ségrégations* selon les formes suivantes.

Les *pipkrakes :* ce sont des amas fibreux formés par la glace sous les grains ou les petites pierres du sol. La glace soulève ainsi ces matériaux de quelques centimètres. Les amas de glace qui se forment à l'occasion d'un gel brutal se groupent par paquets plus ou moins continus.

Les *lentilles de glace :* en profondeur, parallèlement à la surface du sol, la glace se fixe en lentilles ou en strates au contact de grains de taille différente. Quand le gel est durable, les lentilles prennent une grande dimension.

▼ Un exemple de dégradation de la roche sous l'effet des agents atmosphériques, et en particulier sous l'action du gel.

T. Poggio

Les *coins de glace :* quand la glace occupe des fentes verticales, qui sont soit des diaclases, soit des fentes de dessiccation ou de contraction thermique, elle forme des coins qui agrandissent les fissures. Le réseau de fissures présente en plan une forme polygonale. Les coins apparaissent lors d'un gel plus durable que rigoureux.

Les *pingos :* ce sont des buttes de quelques mètres à quelques dizaines de mètres de haut, de forme circulaire et contenant une grosse lentille de glace. Ces buttes, qui apparaissent dans les roches meubles, sont dues à une circulation d'eau entre un permafrost et le sol superficiel gelé : l'eau, qui ne peut donner une source, gèle sous la forme d'une lentille qui enfle en soulevant la couverture végétale. En été, quand la glace fond, la butte disparaît progressivement pour donner naissance à une mare.

Le rôle du gel

Ce rôle se traduit par une augmentation de volume. Il est ainsi à l'origine des bombements superficiels dans les argiles et les limons, des soulèvements de blocs, des mouvements internes (quand l'augmentation de volume s'effectue en profondeur, elle entraîne des modifications dans la disposition des couches ; ces modifications sont réunies sous le terme de *cryoturbation*), de la fragmentation des roches *(gélifraction)*. Si la roche donne des éléments granuleux, il s'agit d'une microgélivation, alors que la macrogélivation concerne les roches qui se fragmentent en blocs. Sur les versants rocheux, la gélivation entraîne par conséquent l'existence d'éboulis.

Les processus du dégel et de la fonte des neiges

Ils entraînent le ramollissement des sols et des roches sous forme de boues pâteuses. La *solifluxion* provoque la formation de coulées boueuses localisées. De plus, au moment du dégel, les petites pierres des pipkrakes peuvent se déplacer en tombant sur le sol à un endroit différent du lieu de soulèvement, et ce déplacement peut être à l'origine d'un tri des éléments.

Rôles du ruissellement et du vent

Le *ruissellement,* paralysé sur les versants pendant la saison du gel, reste secondaire pendant la fonte puisque la roche et le sol s'imbibent d'eau. Cependant, il peut être actif si des pluies violentes tombent sur le sol encore gelé, entraînant ainsi des ravinements.

Le *vent* a un rôle plus significatif, notamment sur les îles. Il peut déchirer la couverture végétale encore gelée, creuser des cuvettes dans les roches tendres, déchiqueter les roches résistantes, exercer une action de déflation sur les nappes alluviales. Il est aussi responsable du dépôt de *lœss,* formation d'époque froide qui est un limon jaune de nature calcaire. Le lœss s'est déposé soit sur la neige, soit sur le sol.

Les formes dues aux processus périglaciaires

Elles s'observent tant sur les espaces plats que sur les versants.

— Sur les *espaces plats,* les *sols polygonaux* sont les plus typiques : ils existent principalement dans les pays arctiques mais aussi dans les montagnes des régions tropicales et tempérées. Formés sur des roches très différentes, comme les basaltes, les calcaires, les moraines, ils se présentent sous la forme de polygones juxtaposés dont les dimensions varient de quelques décimètres à quelques mètres. Les polygones peuvent être limoneux en leur centre et pierreux sur les côtés *(cercles de pierres)* ou, au contraire, pierreux au centre et limoneux sur les côtés *(roses de pierres)*. Les polygones homogènes sont des polygones dits de terre. L'origine des sols polygonaux est confuse. Cependant les processus de rétraction à l'origine du réseau de fentes et les bombements sont sans doute primordiaux.

Hormis les sols polygonaux, les espaces plats montrent des *champs de boue,* formés sur du matériel fin. On les observe surtout dans les Andes et en Islande. Ils se présentent sous l'aspect de grumeaux juxtaposés, fixés parfois par la végétation.

Les *champs de pierres,* constitués par les débris issus de la gélifraction des roches, forment un chaos de blocs anguleux. Les pierres posées à plat sur un sol mou, tel le mollisol après le dégel, forment un dallage nival. Quand le sol gèle, les pipkrakes soulèvent les pierres, qui peuvent alors soit retomber à plat, soit se redresser les unes contre les autres si elles sont trop nombreuses. Les buttes gazonnées, ou *thufurs,* sont des monticules de dimensions réduites qui se groupent géné-

ralement en champs de buttes : elles résultent également d'une autre forme de ségrégation de la glace.

— Sur les *versants* le processus de gélifraction est à l'origine des accumulations de pierres, tandis que le processus de solifluxion donne des accumulations boueuses. Quand seule la gravité agit sur le versant, les amas pierreux forment *des éboulis de gravité*. Si l'action des pipkrakes s'y ajoute, les éboulis sont plus ordonnés et montrent une alternance de lits grossiers et de lits fins.

Les *coulées de blocs* se produisent sur des pentes faibles (les blocs sont entraînés par la boue). Ces *rock-glaciers* sont des coulées de blocs présentant un relief particulier de bourrelets transversaux convexes vers l'aval. La solifluxion des boues fines donne des formes différentes, comme les sols striés, sols polygonaux allongés dans le sens de la pente, les pieds de vache, les terrassettes et les coulées boueuses. Sous l'action du gel et de la solifluxion, le versant périglaciaire, à la fin de son évolution, est recouvert par un manteau de matériaux fins, à pente très faible et constante.

Le réseau hydrographique

Dans les pays arctiques, il est caractérisé par un drainage inorganisé où les dépressions fermées analogues aux dolines sont nombreuses. Les lacs, en général peu profonds, se forment à partir des mares dues à la fusion de la glace entre les bourrelets du sol. Ils s'agrandissent du fait du sapement des berges dû aux vagues et par fusion du pergélisol au contact de l'eau. Les vallées fluviales sont souvent ennoyées par les matériaux descendus des versants. Cependant, l'incapacité des cours d'eau périglaciaires à évacuer les débris issus de la gélifraction n'est pas générale : ainsi, dans les pays humides et peu gélifs parce que la couverture herbeuse s'est conservée, la charge n'est pas élevée et le débit peut être abondant. Les remblaiements s'observent quand la pente devient plus faible.

Les grands fleuves d'orientation méridienne, tels le Mackenzie (Canada) et les fleuves sibériens, sont caractérisés par une *crue de dégel* dont la progression est gênée par les glaces situées à l'aval et fondant plus tardivement : la crue s'étale ainsi sur plusieurs kilomètres de large et se traduit par des remblaiements. Quant aux petits cours d'eau coulant dans des régions planes, sèches, très froides et gélives, ils sont le plus souvent paralysés par leur charge.

Les paysages arides

Les régions arides ou désertiques sont caractérisées par les traits suivants : un climat défini par des températures extrêmes à l'échelle du jour comme à l'échelle de l'année; des précipitations faibles (inférieures à 200 mm par an) et irrégulières à l'origine, d'une part, d'un écoulement spasmodique dont l'*oued* représente le type caractéristique du désert, et, d'autre part, de la rareté ou de l'absence de végétation ; des vents fréquents et très forts qui sont l'agent principal de l'érosion désertique, les autres agents étant d'une part la température, dont l'amplitude diurne entraîne la désagrégation mécanique, et d'autre part le ruissellement sauvage.

L'action érosive du vent se traduit par la déflation et la corrasion. La *déflation* concerne le déblayage de débris meubles et secs provenant de la désagrégation physique ou chimique des roches. Elle entraîne ainsi un véritable tri *(vannage)* des matériaux, les débris les plus lourds restant sur place. La *corrasion* est l'attaque des roches grâce aux débris transportés.

Les grains, projetés par le vent, et qui acquièrent un aspect mat caractéristique par usure les uns contre les autres, érodent tous les reliefs à ras du sol, donnant ainsi des formes particulières, en champignon, ciselant des cannelures dans les argiles tendres (*yardangs* du Turkestan), façonnant des cailloux à facettes appelés *dreikanters*. Les champs de cailloux sont les *regs*.

Les aspects des **regs** sont très variés : il existe des regs de dreikanters, des regs de cailloux anguleux, des regs de composition hétérogène avec des cailloux anguleux de quelques centimètres de diamètre et des grains ronds de sable de l'ordre du millimètre qui, seuls, peuvent être déplacés par le vent. Le reg peut se présenter sous la forme d'un pavage serré de cailloux : dans ce cas, il n'évolue plus. Par contre, s'il existe des grains de sable entre les cailloux, le tri par le vent peut continuer.

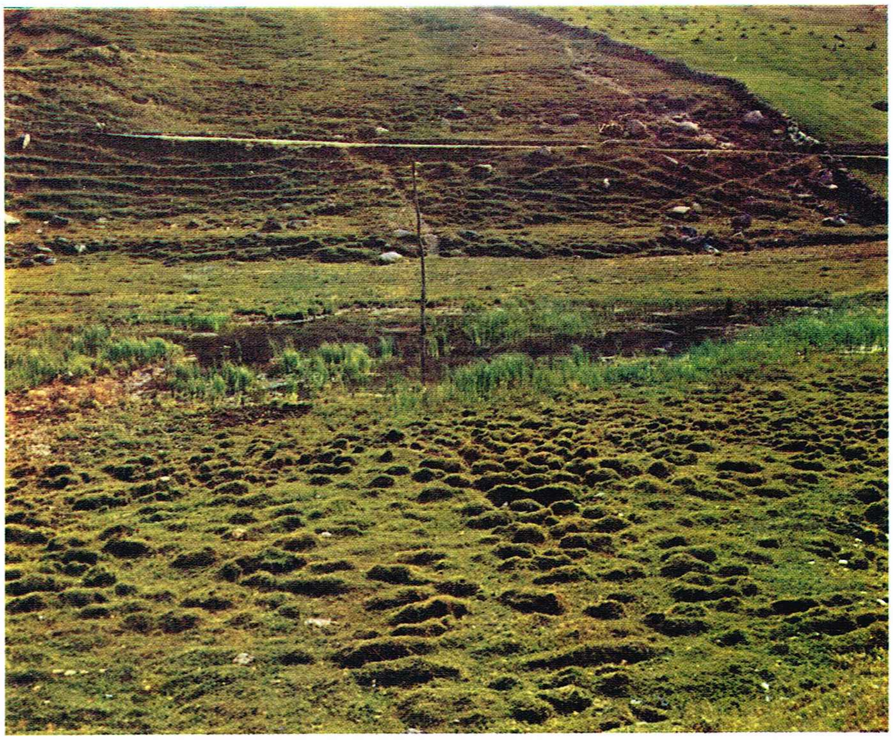

S. Prato

▲ ***Un champ de buttes gazonnées ou thufurs. Ces formes sont issues de ségrégations de la glace.***

Le transport des débris par le vent s'effectue de trois façons différentes : par *suspension*, les débris les plus fins, les poussières, étant aspirés par des tourbillons ascendants et se déposant soit par diminution de vitesse du tourbillon, soit par précipitation ; par *saltation*, les grains plus gros ou mus par un vent moins fort effectuant des bonds successifs selon une courbe dissymétrique tendue au départ et aplatie à l'arrivée ; par *reptation*, les grains les plus gros qui ne peuvent être pris en charge par le vent se déplaçant quand les grains effectuant leur trajet par bonds successifs tombent sur eux.

La saltation et la reptation, se produisant généralement à ras du sol, conduisent à l'élaboration des grandes accumulations de sable classées en trois types. Les **plaines de sable** s'observent quand l'accumulation en sable est insuffisante. Les étendues informes, appelées **gozes**, résultent de l'accumulation de sable dans une région occupée par la végétation. Le troisième type, de loin le plus représenté, concerne les **champs de dunes**, ou **ergs**, dont l'origine est due à l'accumulation abondante de sable non cohérent.

▼ ***Les niches sculptées dans ces formations arénacées résultent de l'action érosive du vent (Ayers Rock, Australie centrale).***

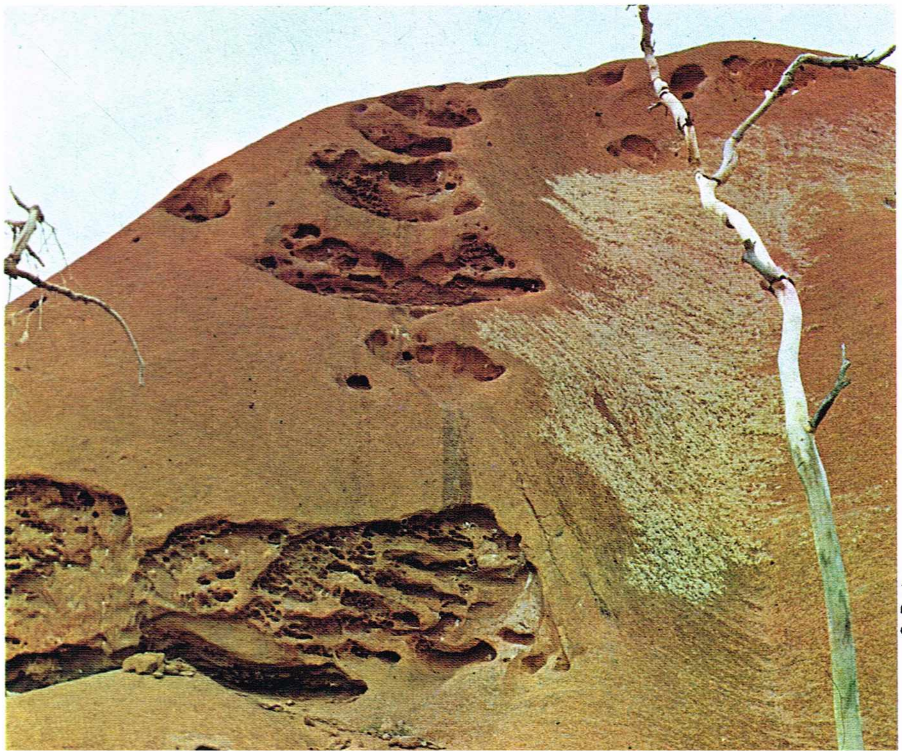

S. Prato

J.-Ph. Charbonnier

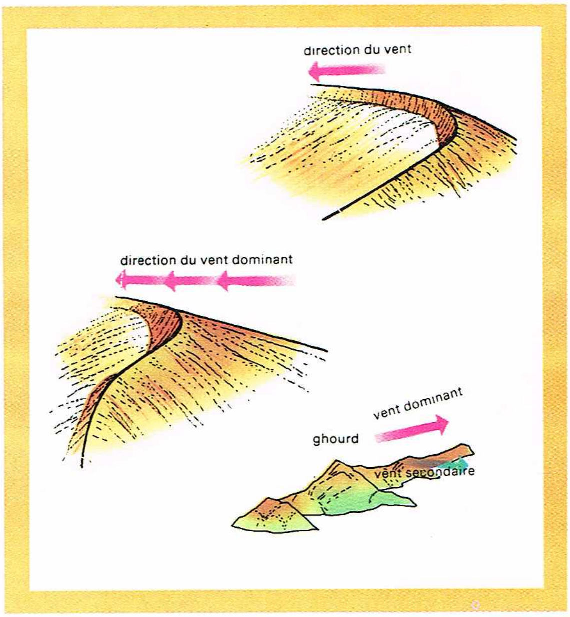

I.G.D.A.

▲ ***A gauche, un exemple de dunes en croissant : les* barkhanes. *A droite, différents aspects de dunes : en haut, une* barkhane*; au centre, un* sif*; en bas, une* dune *à crête de coq avec* ghourd.**

La forme d'une *dune* varie en fonction de la force et de la direction des vents dominant et secondaire. La dune affecte d'abord la forme d'un bouclier, puis devient ovoïde à surface ridée et présente bientôt, dans le sens du vent, un profil en trois sections : la section d'accumulation, au vent, qui est en pente douce et se termine en biseau (*sif* au Sahara) ; une section en pente très raide, talus de retombée des sables, sous le vent ; une section en pente plus douce, due au placage du sable issu de la section supérieure par le tourbillon de retour. Le tracé de la dune affecte la forme d'un croissant dont les cornes sont situées au vent car elle progresse plus vite au centre qu'à ses extrémités. Ces dunes en croissant sont des *barkhanes* (Turkestan).

Le tracé prend également la forme d'un S et la dune est alors appelée *sif*. Un tel tracé s'explique par la variabilité des vents. Quand le vent est fort et l'alimentation insuffisante, la dune peut se scinder en son milieu et former deux longues chaînes parallèles au vent. Les couloirs dans lesquels s'engouffre alors le vent sont des *gassis*. Le vent secondaire soufflant sur les chaînes est responsable de la formation de dunes secondaires, de bras rattachés à la dune principale, laquelle montre alors des formes en crêtes de coq, en dents de scie, avec le plus souvent apparition de *ghourds*, pyramides formées par la coalescence d'un bras avec la dune principale.

La **désagrégation mécanique**, accentuée dans les régions désertiques par l'absence de végétation ainsi que de manteau de sol, et due aux variations thermiques considérables s'observant au cours d'une journée, entraîne dans les roches de fortes tensions allant jusqu'à l'éclatement. Ces éclatements brusques sont favorisés par l'humidification, si faible soit-elle, par la rosée ou par la pluie, qui élargit les diaclases. Le gel joue un rôle, en particulier sur les hauts sommets plus humides qui montrent ainsi, à leur pied, des talus d'éboulis. De même, les sels encastrés dans les pores des roches désintègrent celles-ci par hydratation ; le granite, notamment, se désagrège en arène.

Le **ruissellement**, excessivement rare dans un désert absolu, est actif dans les régions subdésertiques. Le paysage est transformé en quelques heures par une averse violente qui entraîne d'une part un ruissellement de type diffus, et d'autre part la crue des oueds, pourtant à sec toute l'année ; elle aboutit à une érosion puissante donnant un *relief de bad-land*.

Le ravinement de type *bad-land* montre un réseau dense de ravins séparés par des croupes ou des crêtes, notamment sur les marnes et les argiles en pente forte. Une plaine désertique peut être traversée par un cours d'eau allochtone permanent (comme le Nil) ; cependant, les cours d'eau éphémères, les *oueds*, dont les eaux se perdent rapidement par évaporation et par infiltration, sont les plus caractéristiques. L'oued montre parfois des terrasses alluviales liées à des changements de climat.

Le paysage désertique n'est pas composé uniquement de formes d'accumulation, tels les ergs, et de formes dues à la déflation, comme les regs. Les **montagnes**, sans couverture végétale et sans sol, présentent un aspect raviné, décharné et pierreux. Les **plateaux**, appelés *hamadas* au Sahara, également nus, sont constitués à leur sommet d'une croûte durcie et mince, dont les bordures donnent soit des festons, soit des cuestas très raides, précédées le plus souvent de buttes témoins. Le paysage désertique montre également de grandes plaines, appelées **pédiplaines**, dominées par des reliefs isolés, les **inselbergs**, et de grandes surfaces inclinées mais transversalement planes, appelées **glacis**. Pédiplaines, glacis et inselbergs ne sont pas particuliers au paysage désertique. Ces formes sont également représentées au sein des régions tropicales humides.

Les paysages tropicaux humides

Le climat des régions tropicales humides est caractérisé par des températures moyennes annuelles élevées et uniformes pendant l'année, ainsi que par de très abondantes précipitations. Ces conditions favorables assurent une très forte activité végétale. Des nuances apparaissent de l'équateur vers les tropiques. Deux grandes zones se différencient :

— La *zone équatoriale*, sans saison sèche (pluies réparties sur toute l'année) et sans oscillations thermiques annuelles. Le sol est gorgé d'eau toute l'année ; c'est le domaine de la *forêt dense*.

▼ ***Vue caractéristique d'un* sif*, avec le tracé en S de la crête de dune.***

Rapho

Afrique Photo

— La *zone tropicale humide*, caractérisée par l'alternance d'une saison sèche (sans précipitations) et d'une saison humide. La forêt dense fait place à la forêt claire et à la *savane* (formation herbacée). Lorsque la sécheresse s'accentue (allongement de la saison sèche et faible total des pluies de saison humide), la savane fait place à des formations discontinues à épineux ou à cactées. On passe ainsi progressivement aux zones arides et aux déserts.

Cette succession des climats suivant la latitude peut être modifiée par la proximité de la mer : plus grande sécheresse des zones continentales, plus grande humidité des domaines océaniques (exemple de la zone sahélienne en Afrique).

Les **processus d'érosion** physico-chimiques et biologiques sont particulièrement efficaces du fait de l'abondance de l'eau et de la chaleur. Il s'agit essentiellement des phénomènes suivants :

— l'*hydratation;* sous l'effet de l'augmentation de volume qui en résulte, les roches se désagrègent et deviennent meubles; un très épais manteau d'arène recouvre les roches saines;

— la *réduction et l'oxydation :* sous l'action d'eau très chargée en produits organiques le fer est solubilisé;

— l'*hydrolyse des minéraux :* les ions H^+ et OH^- des solutions du sol remplacent les cations alcalins et alcalino-terreux des minéraux. Les structures cristallines sont détruites. Outre les bases, une part très importante de la silice est lessivée. Le fer et l'aluminium, également libérés mais peu mobiles, tendent à s'accumuler. La pédogenèse est très active. D'énormes quantités de débris fins sont produites (les profils d'altération atteignent 50 m d'épaisseur sur les pentes les plus faibles);

— les *éboulements en masse* sur les pentes supérieures à 40°;

— la *solifluxion* des matériaux fins sur les pentes plus douces;

— le *ruissellement* en film et le *creeping,* qui assurent difficilement l'évacuation des débris sur les versants.

L'*érosion fluviale* est inefficace bien que les quantités d'eau écoulées par les rivières soient les plus élevées du globe (de 0,3 à 2 m par unité de surface). D'une part, les grands fleuves ne connaissent pas de crues saisonnières comparables à celles des rivières des zones tempérées et périglaciaires, qui sont les périodes les plus efficaces du travail d'un cours d'eau. D'autre part, les versants ne fournissent pas de galets et de blocs indispensables au creusement du lit. Dans le lit, même les débris arrachés par la rivière se réduisent très rapidement en sables et en argiles.

Dans les régions tropicales à saison sèche, les énormes variations saisonnières des débits favorisent l'érosion latérale par étalement hors du lit mais non le creusement longitudinal. Par conséquent, le profil en long des rivières présente de multiples paliers qui se traduisent par des cascades, ou *rapides,* même à faible distance du niveau de base (exemple du Zambèze). Ces ressauts reculent très lentement, la rivière se bornant à nettoyer la roche saine des produits d'altération.

Dans les régions les plus humides, certains fleuves coulent non dans des vallées à versants nets, mais dans d'immenses plaines si plates que le sens de l'écoulement peut varier suivant l'importance des pluies d'un point à l'autre de la vallée.

Le modelé de la forêt dense

La pédogenèse et l'altération étant plus actives que l'érosion mécanique, il faut signaler les divers types de sols. La forêt dense est le domaine des *sols ferrallitiques.* Ces sols varient suivant les conditions de drainage.

— Dans les secteurs très bien drainés, les bases (Ca, Mg, K) et la silice libérées par l'hydrolyse des silicates sont entraînées par lessivage oblique. Les sesquioxydes de fer et d'aluminium (Fe_2O_3 et Al_2O_3), moins mobiles, s'accumulent : ces sols sont des *ferrallites.* Si la concentration en alumine est très forte, on a de la bauxite.

— Dans les secteurs à drainage médiocre, la silice n'est que partiellement exportée; de grandes quantités d'argiles de type *kaolinite* sont néoformées.

Ostman - E. Muench

▲ En haut, le profil en long des rivières présente de multiples paliers qui se traduisent par des cascades (ici une cascade sur le Nil Bleu). Ci-dessus, relief de bad-land, développé en roches tendres, dans la vallée Owens à la base du versant oriental de la sierra Nevada (Californie).

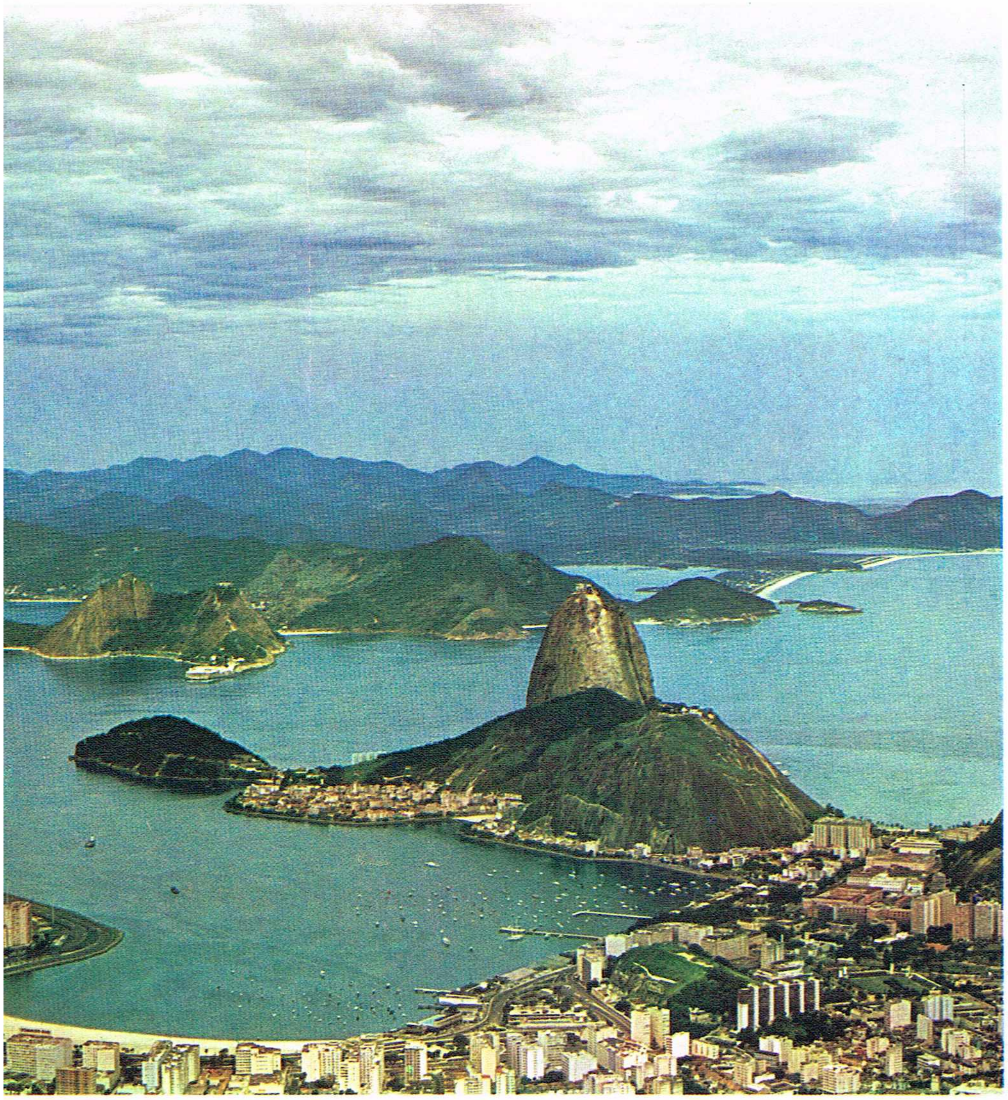

Danièle Flotard - Explorer

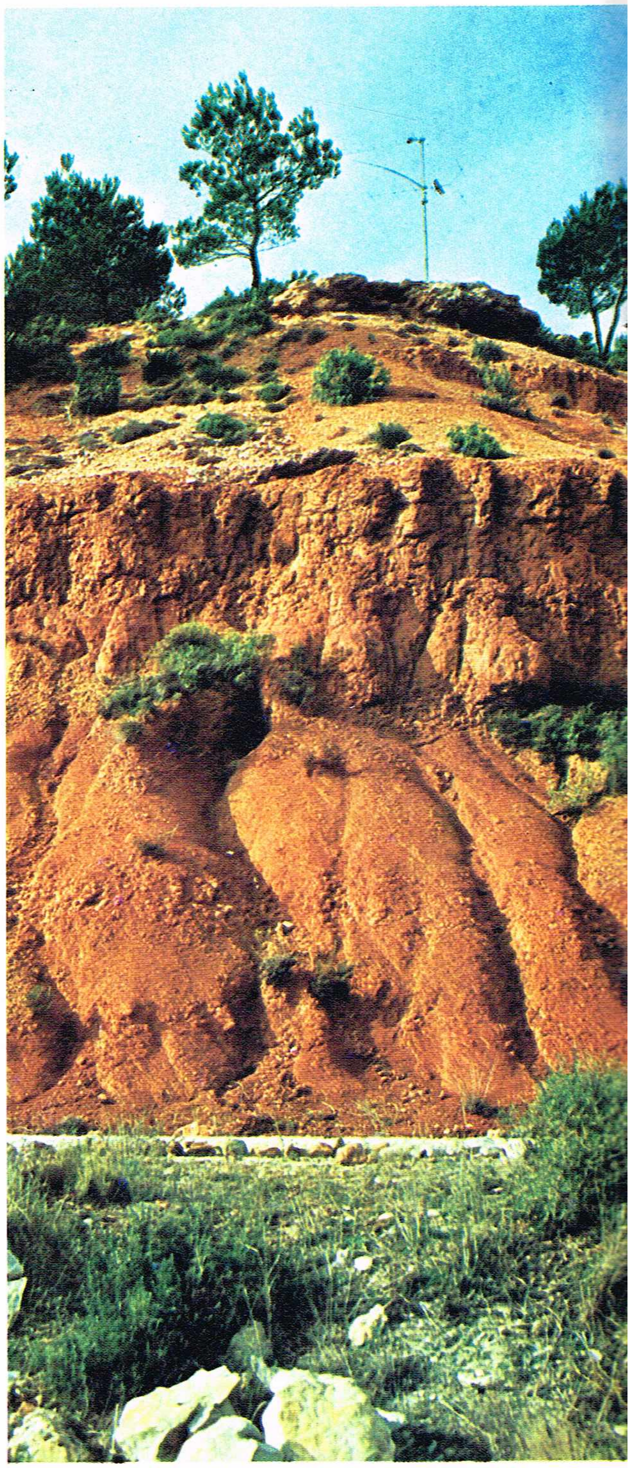

▲ *Une vue sur le* **pain de sucre** *de Rio (Brésil).*

▶ *Un exemple de* **cuirasse bauxitique** *en Provence; l'aluminium s'accumule avec un peu de fer au contact de la roche mère.*

— Dans les secteurs mal drainés et les bas-fonds, le milieu riche en bases et en silice favorise la genèse d'argiles de type *montmorillonite*. Lorsque la forêt est détruite et que l'équilibre climat-végétation est rompu, apparaissent des *cuirasses ferrallitiques*. On trouve aussi de grandes poches de roches pourries et d'épaisses couvertures d'arène. La topographie, confuse, est composée d'un dédale de croupes : les *demi-oranges*, croupes rondes à versants convexes doux; les *pains de sucre*, dômes très aigus à versants convexes très raides. La concavité basale de ces versants est très peu développée par suite de l'amenuisement rapide des débris.

Le modelé des savanes

Pendant la saison humide, les conditions d'altération sont très comparables à celles qui règnent en zone équatoriale. Inversement, durant les quatre à huit mois de la saison sèche, la nappe phréatique disparaît en profondeur et l'altération des roches est arrêtée.

La savane est le domaine des *sols ferrugineux tropicaux* et des *cuirasses ferrugineuses*. Dans ces sols, la silice n'est que partiellement lessivée; elle se combine avec l'alumine pour former principalement de la kaolinite et de l'illite. Pendant les périodes humides (engorgement des sols), le fer est entraîné et se concentre dans la partie inférieure des profils. Pendant la saison sèche, le fer se déshydrate et précipite. Il peut même se produire une induration de l'horizon riche en oxydes de fer, d'aluminium et de manganèse cristallisés. De vastes surfaces sont couvertes de carapaces et de cuirasses ferrugineuses. Si l'on peut briser à la main cet horizon induré, on parle de *carapace;* si le durcissement est plus important, on est en présence d'une *cuirasse* que l'on brise au pic. Trois grands types de cuirasses sont couramment distingués :

— les *cuirasses d'érosion;* lorsque la forêt dense ou la savane sont détruites, les sols sont érodés; les horizons meubles supérieurs sont décapés, et les horizons B d'accumulation des sesquioxydes, exposés au soleil, durcissent;

— les *cuirasses de nappe;* dans les dépressions, sur les plateaux à mauvais drainage, le fer s'accumule et précipite. Ces cuirasses sont très riches en fer et pauvres en aluminium;

— les *cuirasses d'accumulation relative,* qui représentent l'évolution extrême des sols ferrallitiques et sont moins fréquentes.

— Le moins mobile des éléments, l'aluminium, s'accumule avec un peu de fer au contact de la roche mère pour donner des *cuirasses bauxitiques*.

Toutes ces cuirasses, très résistantes, couronnent de nombreux plateaux, replats et glacis étagés. Les terrasses alluviales des fleuves sont souvent cuirassées par le fer

qui migre des versants. L'érosion mécanique l'emporte sur l'altération chimique dans la destruction des cuirasses : écroulement des bords par soutirage, ruissellement, etc. L'érosion isole de petites buttes et des lambeaux de glacis appelés *bowals*.

Formes d'aplanissement

Les paysages présentent des formes de relief communes aux pays tropicaux humides et tropicaux secs (le glacis, la pédiplaine, l'inselberg).

Le **glacis** est une étendue plane, de pente latérale nulle, de pente longitudinale sensible (de 1 à 5 %). Il est balayé par des chenaux sinueux, les *rills,* qui coulent à sa surface sans s'y encaisser. Lorsqu'une rivière s'y encaisse, cela signifie que le glacis est ancien et en voie de destruction. Plusieurs glacis anciens peuvent s'emboîter les uns dans les autres. Vers l'amont, le glacis peut se raccorder à la montagne par des cônes d'accumulation ou être coupé de l'arrière-pays par un col de flanc. L'arrière-pays peut être une montagne, une zone de versants peu élevés ou un relief isolé : l'inselberg. Le contact glacis-montagne suit une ligne droite ou présente de nombreux rentrants : les *embayments*. Vers l'aval, le glacis débouche sur un oued, sur une plaine d'épandage, la *playa,* à lagune temporaire : la *sebkra;* dans certains cas, le glacis passe insensiblement à une pédiplaine. On distingue les *glacis d'érosion* et les *glacis d'accumulation*. Si le glacis est développé en roche tendre, on parle d'érosion; s'il est développé sur roche cristalline, on parle de *pédiment*. Lorsque la forme plane du glacis est acquise par remblaiement des creux et étalement d'alluvions ou de colluvions, le glacis est dit d'accumulation. Un même glacis peut passer d'un type à l'autre.

La **pédiplaine** présente une pente presque nulle dans toutes les directions. Comme le glacis, elle est immense et se raccorde à une montagne ou à un inselberg. Les rivières ne s'encaissent pas dans la faible couverture de débris qui la recouvre. En zone tropicale humide, elle porte parfois une cuirasse ferrugineuse. Les processus de formation des pédiplaines, des pédiments et des glacis sont assez semblables. Les pédiplaines résulteraient de l'altération des roches sous climat tropical humide. Les cours d'eau déblaieraient et étaleraient simplement les débris fins. Lorsque la saison sèche s'accentue, l'altération diminue au profit de la désagrégation mécanique des roches. La violence des précipitations favorise l'*érosion aréolaire :* de véritables nappes d'eau s'étalent au débouché des montagnes et décapent de larges surfaces de roches altérées ou désagrégées. Le sapement des rills et des oueds contribue à élargir ces glacis. Les pédiplaines et les glacis situés actuellement en zone sèche évoluent très lentement et sont presque immunisés. Ces formes caractérisent des climats plus humides, anciens, et sont héritées. De même, dans les régions équatoriales, les pédiplaines et les glacis ne sont pas en équilibre avec le climat actuel, mais représentent un héritage de climats anciens à saisons plus contrastées.

L'**inselberg** est un relief vigoureux, haut de quelques dizaines de mètres à plus de 500 m, dominant une pédiplaine, un glacis ou un relief de croupes. Il se présente isolé ou en massifs. Ses formes sont diverses : à sommet plat (témoin d'un ancien aplanissement) parfois cuirassé, effilé, en dos de baleine, à bosses, en pain de sucre (forme caractéristique des pays équatoriaux). Les pentes latérales varient de la pente moyenne au surplomb. En pays tropical sec, les flancs de l'inselberg évoluent lentement par desquamation et formation de boules et de taffoni. En pays tropical humide, le recul des versants est plus rapide. La résistance de la roche sur les parois de l'inselberg en climat équatorial est mal expliquée. On distingue deux types d'inselberg : les *inselbergs de dureté,* correspondant à un noyau de roche particulièrement résistante; les *inselbergs de position,* situés très loin des talwegs, et issus du recoupement de versants raides reculant parallèlement à eux-mêmes. La formation des inselbergs reste un problème controversé. Il est cependant probable que leur dégagement s'est produit pendant des crises climatiques anciennes. Les pentes furent débarrassées de leur couverture d'altération et les noyaux rocheux résistants mis en relief. Le cas des inselbergs confirme la complexité de la morphologie des pays tropicaux, où les formes climatiques actuelles ou récentes s'associent aux formes héritées de climats légèrement différents.

Fabius Henrion - Explorer

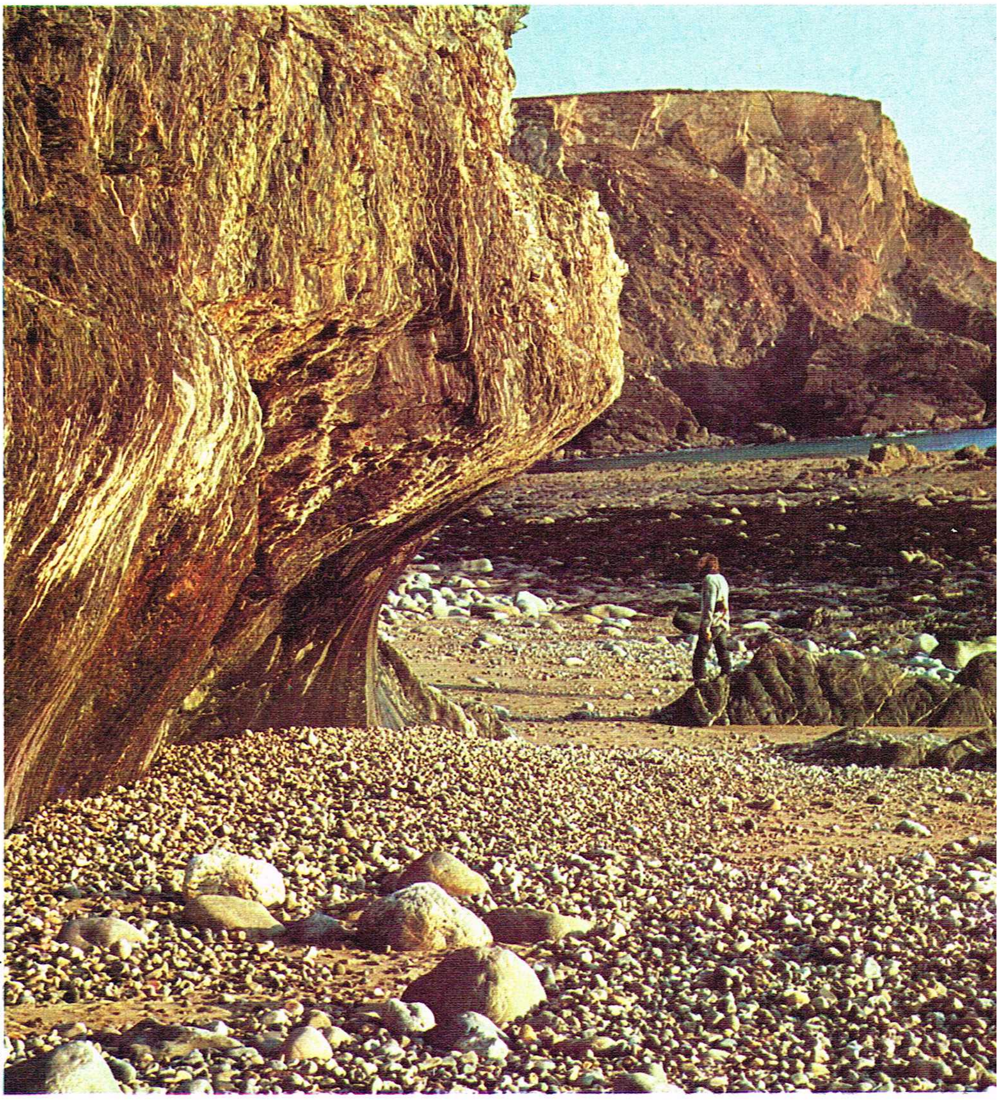

Max Jonin - Explorer

▲ ***Le domaine intertidal est soumis d'une part à l'action de la mer, d'autre part aux processus d'actions terrestres; ici, un type d'érosion marine dans la presqu'île de Crozon.***

Les paysages littoraux

Le **domaine intertidal** est le domaine de contact entre la terre et la mer : il est compris entre les plus hautes et les plus basses mers et correspond, au sens strict, à l'*estran*.

Le *marnage,* différence entre les plus hautes et les plus basses mers, oscillant généralement autour de 2-3 m, peut présenter des valeurs inférieures (quelques décimètres en Méditerranée) ou nettement supérieures (plus de 10 m au Mont-Saint-Michel et près de 20 m dans la baie de Fundy, au Labrador). De la même façon, l'estran extrêmement étroit en ce qui concerne les mers à marées peu sensibles, peut s'élargir considérablement (20 km pour les veys normands). Le domaine intertidal, compris au sens large et englobant ainsi une partie des fonds toujours immergés et une partie de la côte exceptionnellement submergée, est soumis d'une part à l'action de la mer, et d'autre part, dans une moindre mesure, aux processus d'actions terrestres.

Parvenues à la côte, les **vagues,** après avoir subi des changements de direction (réfraction, réflexion et diffraction) et des variations de caractères relatifs à un phénomène ondulatoire (longueur d'onde, vitesse, cambrure), déferlent (c'est le déferlement, ou *surf*) soit en volutes *(pluging breaker),* soit par déversements *(spilling breaker),* et, enfin, se transforment en *ondes de translation,* le *swash,* décomposé en *jet de rive (uprush)* et *retrait (backwash)*.

Sur une plage, la vague exerce une action d'érosion double : creusement dans le cas du déferlement en volutes, et érosion laminaire ou en nappe lors du retrait. Elle transporte les matériaux soit par roulage, soit par mise en suspension, en particulier lors du déferlement et

du jet de rive. D'autre part, dans le swash elle exerce une action de répartition et de triage de matériaux.

Au pied d'une falaise, la vague agit par pression sur la roche et sur l'air comprimé par l'eau dans les fissures, par succion lors du retrait, par chocs de blocs déplacés, par mitraillage d'éléments moins grossiers et par jaillissement sur un obstacle.

Les vagues donnent naissance à des **courants,** tels les *courants d'arrachement,* perpendiculaires au rivage, étroits, rapides, affectant toute la tranche d'eau. La *dérive littorale,* ou *courant de débris,* est un agent de transport fondamental : elle résulte de l'arrivée en incidence oblique des vagues au rivage, les matériaux cheminant alors en dents de scie. Les *courants de marée,* très rapides aux rivages, sont particulièrement puissants dans les détroits de chaque côté desquels l'heure de la marée est différente (détroit de Messine) ainsi que dans les détroits où le courant de marée est canalisé. Les courants de marée peuvent être renforcés par des *courants de décharge* assurant une vidange. Les autres courants, dus soit aux vents, soit aux différences de densité, jouent un rôle mineur en morphologie littorale.

Processus subaériens

Les parties rocheuses situées au-dessus de l'estran sont soumises au ruissellement des eaux de pluie et aux paquets de mer. L'*eau* infiltrée provoque surtout la dissolution des calcaires par l'intermédiaire de fissures, et des éboulements quand une couche argileuse forme la base d'une falaise. Le *gel,* qui élargit les fissures du haut des falaises, joue un rôle plus significatif encore à la base de celles-ci où il est à l'origine, dans les mers froides, d'un *pied de glace* dont les glaçons sont constitués d'eau de mer gelée et de neige tassée. L'action principale du pied de glace est l'éclatement de la base de la falaise par gel de l'eau de fonte qui a pénétré les fissures. En outre, le pied de glace amortit le déferlement des vagues.

Le *vent* a une double action : indirecte par l'intermédiaire des vagues, directe par l'édification des dunes littorales. Les *processus chimiques* concernent particulièrement les calcaires, dont le facteur essentiel de dissolution semble être les variations diurnes de la quantité de gaz carbonique dissous au niveau des eaux littorales et des mares. La désagrégation de ces dernières est liée à l'alternance humidification-assèchement. Les *influences biologiques* ne sont pas négligeables : ainsi, les coraux et les Algues calcaires construisent des récifs. Les Algues jouent un rôle de freinage sur les vagues, tandis que les Algues pourvues de crampons transportent les pierres auxquelles elles sont fixées. Enfin, les animaux perforants taraudent certaines roches, les animaux triturants et fouisseurs assimilent certains sédiments, et les Poissons, les Mollusques et les Crustacés disloquent les roches diaclasées.

L'interaction des processus d'origines marine et terrestre conduit à des formes littorales *d'érosion,* comme les falaises, *d'accumulation,* comme les plages, et *de construction,* comme les récifs coralliens.

▼ ***Exemple de falaise verticale taillée dans du basalte : la falaise de Moher (Islande).***

Michel Hétier

Une **falaise** est un ressaut littoral en pente plus ou moins forte, de hauteur variable et dépourvu généralement de végétation. A son pied, elle est le plus souvent précédée d'une plate-forme rocheuse de pente plus faible, mais celle-ci peut manquer (la falaise est alors dite *plongeante* et la côte *accore*). L'élaboration d'une falaise ne résulte pas seulement de l'affouillement du relief continental par la mer mais aussi de l'intervention de processus subaériens divers. L'érosion marine agit à la base des falaises en donnant des surplombs, tandis que l'infiltration des eaux atmosphériques ainsi que les conséquences des variations de température et des cycles gel-dégel entament les parties surplombantes, qui finissent par s'écrouler à l'occasion de tempêtes ou de pluies violentes et par former, à la base de la falaise, un talus d'éboulis. La mer déblaye les débris, tandis que les matériaux plus résistants deviennent par roulage et usure des *galets.*

Le recul d'une falaise est fonction de la nature des roches qui la composent et de l'orientation des couches. L'érosion est d'autant plus rapide que les couches sont inclinées vers la terre. Dans les matériaux meubles, tels les sables, les alluvions, les cendres volcaniques, l'évolution est rapide et se fait par glissements *(landslips).*

Les falaises de type argileux sont découpées par des ravins (bad-lands). Les coulées boueuses s'étalent sur la plage en loupes rapidement déblayées par la mer. Les falaises composées d'une roche cohérente et rigide au sommet et d'une roche imperméable à la base sont sujettes à d'énormes glissements et présentent un profil comparable à celui de blocs faillés, au pied desquels s'étirent des loupes de solifluxion.

Les falaises constituées de roches cohérentes montrent soit un profil vertical (basaltes à structure colonnaire, schistes, calcaires) et évoluent par éboulements brutaux, soit un profil convexe (grès durs). Ces falaises sont recouvertes de végétation de telle sorte que seule la partie inférieure de la falaise subit l'action des vagues : il s'agit par conséquent de *fausses falaises.*

Une *falaise morte* (par opposition à une *falaise vive*) est située en retrait du rivage ou en position perchée par rapport à celui-ci. Les falaises, protégées de l'érosion littorale par une végétation dense, évoluent surtout par glissement de masses de sol.

Une **plage** est une accumulation sableuse littorale, le terme *grève* s'appliquant aux accumulations de galets. Une plage montre trois grandes zones.

La *plage off-shore,* ou *sous-marine,* est toujours immergée ; sa partie la plus littorale est entaillée par des *sillons prélittoraux* (bâches) se formant sous l'action des houles perpendiculairement à leur direction de propagation et dont l'origine serait les remous sur le fond. La plage sous-marine montre également des rides plus ou moins symétriques qui donnent aux fonds sableux l'aspect de tôles ondulées : ce sont *les ripple-marks* dues aux vagues et aux courants et dont la distance entre les crêtes est de l'ordre du décimètre. Les ripple-marks sont soit symétriques, soit dissymétriques quand le courant est turbulent, soit encore rhomboïdales quand plusieurs trains de rides interfèrent.

La *plage proprement dite,* ou *estran,* correspond à la zone qui ne se découvre qu'à marée basse et présente également des ripple-marks ainsi que *des croissants de plage.* Ces derniers présentent la forme de festons de 0,5 à 1 m de profondeur et de plusieurs mètres d'amplitude. Leur origine est encore mal connue.

La *haute plage* ou *back-shore,* est formée de sable sec (sauf à l'occasion de tempêtes) et se distingue des dunes littorales par l'absence de végétation. Parallèlement à la ligne de rivage se répartissent sur la haute plage les *gradins de plage,* ou *berms,* qui sont les témoins de l'engraissement de la plage et sont recouverts par des ripple-marks de petite taille dues à l'action du vent. L'engraissement de la plage est lié aux courants et aux vents. Les sédiments que les courants acheminent ont une origine soit littorale (par érosion de la côte par la mer), soit sous-marine (par dragage des fonds par la houle et les courants de marée), soit encore fluviatile. Les apports éoliens sont particulièrement importants sur les côtes désertiques.

Immédiatement en arrière de la plage s'étendent généralement les **dunes littorales,** résultant de l'accumulation par le vent de sable sec soustrait à l'estran. La forme des

◀ *Les vagues et les courants sont à l'origine des* ripple-marks *; ici une plage de l'Alaska.*

Mc Cutcheon

▼ *Un exemple de dune* littorale : *la dune du Pilat, près d'Arcachon ; c'est la plus haute dune côtière d'Europe (100 m environ).*

Pierre Petit - Explorer

dunes est fonction d'une part de l'alimentation en sable, et d'autre part de la force du vent.

Un vent de force moyenne et une alimentation abondante sont à l'origine de petites dunes *(nebkhas)* qui se réunissent en un cordon parallèle au rivage. Un vent fort et une alimentation plus faible en sable donneront naissance à des *dunes paraboliques* qui, à la différence des régions arides, présentent la concavité au vent. Par coalescence, les dunes paraboliques constituent des *dunes en râteaux*. La permanence d'une dune est liée à sa fixation par la végétation naturelle (joncs) ou plantée (pins). La disparition de la couverture végétale provoque la reprise de l'érosion éolienne qui ouvre des brèches de forme semi-circulaire, les *caoudeyres*. Le sable arraché donne des *pourrières,* dunes de reconstitution, puis des *dunes en traînée*. La dune initiale prend le nom de *croc*.

Outre les plages, il faut signaler les **dépôts littoraux** se présentant sous la forme de rides et de *flèches littorales,* reliées ou non à la terre ferme.

Les *crêtes d'avant-côte émergées* apparaissent dans les régions où les houles dominantes sont obliques par rapport à la côte et se raccordent à celle-ci par des festons. Si les apports sédimentaires sont abondants, il se crée une flèche littorale reliée au rivage ; la présence de cette flèche est toujours liée, d'une part, à un courant de direction constante transportant les sédiments, et, d'autre part,

Photair - A. Perceval

▲ *Derrière le long cordon sableux édifié en bordure de la côte languedocienne, les* lagunes *et les* étangs saumâtres *s'envasent peu à peu (environs de Palavas-les-Flots).*

▼ *Un exemple de* marais maritime : *on distingue au premier plan le* schorre, *ou herbu, submergé exceptionnellement et recouvert de végétation, séparé de la* slikke, *située dans la zone de balancement des marées, par une microfalaise, le* talard.

Flip Morton

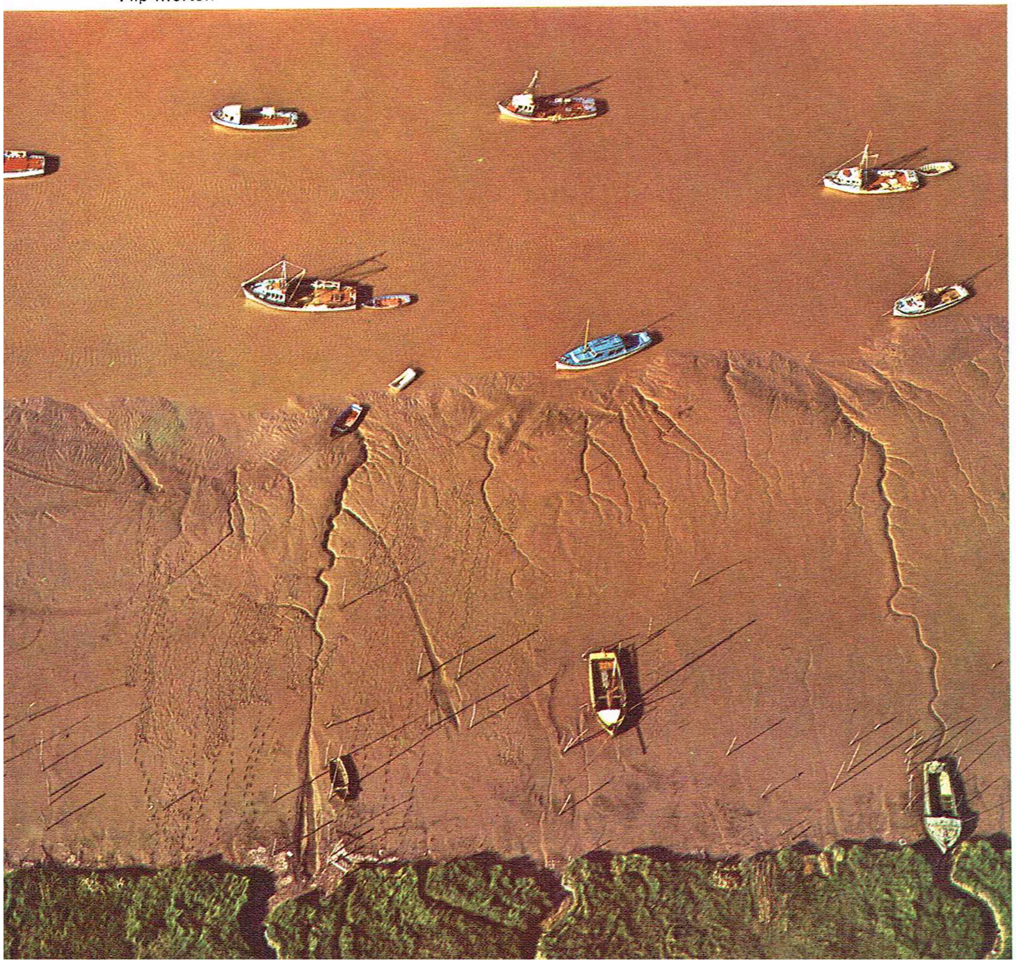

à l'existence d'un point d'appui (îlot rocheux) et de profondeurs faibles.

Les flèches tendent fréquemment à barrer une baie ou un estuaire. Dans ce cas, elles prennent le nom de *poulier* (nom picard) et progressent par allongement sous la forme de *crochets*.

Dans l'estuaire, au poulier fait face *le musoir,* qui est soumis à une érosion active. La flèche peut isoler une nappe d'eau, qui se transforme en lagune.

Le *tombolo* est une autre forme classique d'accumulation littorale unissant la côte à une île voisine. Il s'explique par la réfraction des vagues derrière l'île ou par l'interférence de deux trains d'ondes qui déposent les sédiments. Les tombolos sont fréquemment simples (Quiberon), parfois doubles (Giens) et rarement triples (Ortebello). La création d'un tombolo suppose une faible profondeur du chenal séparant l'île de la côte et l'absence de courant dans ce chenal.

Les autres formes d'accumulation littorale concernent en particulier les flèches sableuses appelées *queues de comètes*. Celles-ci s'appuient sur une île isolée en mer et se développent en triangle effilé vers la mer sur la rive de l'île abritée par rapport à la houle.

Séparée de la mer par une construction littorale, une **lagune** est une étendue d'eau salée ou saumâtre communiquant avec la mer par des passes (les *graus* du Languedoc) qui se maintiennent par l'action érosive des courants de marée.

Lorsqu'elle est colmatée, la lagune se transforme en **marais maritime.** L'accumulation de vase d'origine marine ou continentale, soit en arrière d'une flèche littorale, soit dans une baie, soit encore par colmatage de la partie abritée d'un estuaire, forme un marais maritime qui se divise classiquement en deux parties : une partie basse, située dans la zone de balancement des marées et dépourvue de végétation, la *slikke* (vasière en Vendée) ; une partie haute, submergée exceptionnellement, formée de vase desséchée, et portant une végétation de plantes halophiles : le *schorre,* ou herbu. Une microfalaise marque la limite entre la slikke et le schorre : c'est le *talard*. Un réseau de chenaux caractérisés par des branches de flot et de jusant sillonne le marais maritime. Dans les pays tropicaux humides, les vasières se fixent d'autant plus rapidement qu'une végétation aquatique d'arbres à racines aériennes (palétuviers) y prend pied, constituant une zone de végétation dense : la *mangrove*.

D. Faulkner

◀ *Vue d'un **récif-barrière** ; on observera la passe qui mène au lagon (île de Western Carolina, du groupe des Manihiki, Polynésie).*

Les formes de construction littorale concernent principalement les **édifications coralliennes.** Les coraux ne sont constructeurs de récifs que dans des limites assez étroites déterminées par la température des eaux (jamais inférieure à 18 °C), la profondeur des eaux (jusqu'à 25 m), la salinité (entre 27 et 40 $^0/_{00}$) et la turbidité. Cette écologie explique que les coraux croissent dans les mers tropicales mais non sur les côtes orientales des océans, où le phénomène d'*upwelling* refroidit les eaux de surface.

La forme élémentaire des récifs coralliens est l'*atoll,* constitué d'une couronne de corail entrecoupée de passes plus ou moins larges et entourant un *lagon* dont la profondeur excède rarement 100 m. La zonation d'un atoll est la suivante : une pente externe abrupte (45°) avec des surplombs ; une *crête* constituée d'Algues calcaires formant la partie la plus haute de l'atoll sur laquelle viennent se briser les vagues déferlantes, ce qui empêche la formation de colonies de coraux de grande taille ; en arrière de la crête, se développe le *platier* récifal, large en moyenne de plusieurs centaines de mètres, et constitué en partie de corail mort recouvert de corail vivant entre les creux desquels s'accumule du sable ; vers le lagon, le platier récifal plonge selon une pente interne douce portant des colonies de corail. Le lagon, à fond parfois plat et tapissé de sable calcaire, est parsemé le plus souvent de *pinacles* coralliens qui affleurent à sa surface ou qui sont totalement immergés.

Les autres formations coralliennes sont les *récifs-barrières,* qui enferment des îles non coralliennes (Queensland), les *récifs frangeants,* bordant de très près une terre non corallienne et protégés ou non par une barrière, *les récifs annulaires* à lagon peu profond, qui sont de petits atolls, les *platures coralliennes,* récifs isolés sans forme particulière, et *les récifs immergés ou surélevés,* de formation ancienne. La formation d'un atoll semble résulter de l'affaissement progressif d'une île dans la mer, le récif frangeant devenant d'abord un récif-barrière, lequel devient enfin un atoll par disparition totale de l'île.

La classification des **types de côtes** est compliquée par l'excessive variété des rivages. Il est possible cependant de distinguer deux grandes catégories : les côtes primaires, dans l'élaboration desquelles la mer n'a qu'un rôle mineur, et les côtes secondaires, où les actions marines sont responsables des formes dominantes.

● Les *côtes primaires* comprennent les côtes modelées par l'érosion continentale, en particulier celles qui ont subi la transgression flandrienne (submersion se traduisant par une avancée du trait de côte sur le continent), la plus récente, les côtes résultant de l'accumulation de dépôts continentaux, les côtes d'origine volcanique, les côtes d'origine tectonique.

— Les *côtes d'érosion continentale* sont de trois types : les *côtes à rias,* vallées fluviales envahies par la mer, présentant ainsi en coupe un profil en V et décrivant des méandres et ramifications analogues à ceux

▼ *Vue aérienne de la* ria *d'Étel dans le Morbihan, montrant à l'aval un goulet étroit et à l'amont un véritable golfe.*

Alain Perceval

▲ ***Un exemple de vallée glaciaire envahie par la mer : le Loch Ness (Écosse).***

des affluents (les rias les plus typiques s'observent en Galice et en Bretagne) ; les *côtes à fjords,* vallées glaciaires envahies par la mer présentant un profil en U et dont la profondeur augmente d'aval en amont; les *côtes à calanques,* qui semblent être des cavités karstiques envahies par la mer (les calanques de Cassis sont renommées).

— Les *côtes d'accumulation* présentent les types suivants : les *côtes à deltas ;* les *côtes de plaine alluviale,* la plaine alluviale basse étant édifiée par les apports des fleuves côtiers plus ou moins parallèles et étant bordée par une longue plage rectiligne (côte orientale de la Corse) ; les *côtes de dépôts glaciaires,* les côtes à drumlins étant facilement reconnaissables par l'émersion d'îlots de forme ovoïde.

— Les *côtes d'origine volcanique* sont des côtes circulaires ou à grands lobes : en effet, d'une part, une île volcanique montre, si l'édifice n'a pas été défiguré, un contour plus ou moins circulaire ou elliptique (côte occidentale de l'Écosse), et, d'autre part, certaines îles peuvent comprendre plusieurs volcans, la côte offrant alors autant de lobes qu'il y a d'appareils (Hawaii). L'ennoiement des caldeiras par la mer crée un type de côte originale avec des parois vertigineuses dominant une baie centrale (par exemple, l'île de Santorin dans la mer Égée).

— En ce qui concerne les *côtes d'origine tectonique,* le type le plus simple est celui d'une côte bordée et formée par une faille récente (golfe de Californie). Des blocs faillés parallèles au rivage donnent naissance à une côte d'escarpement de faille précédée d'îles (la côte provençale entre Sicié et Cavalaire). Sur la côte dalmate, les îles parallèles au rivage correspondent aux anticlinaux, tandis que les synclinaux sont à l'origine des chenaux et des baies.

● Les *côtes secondaires,* côtes primaires remaniées par les actions marines, comprennent les côtes en voie d'érosion, telles les côtes à falaises, et les côtes à tendances d'accumulations de sédiments détritiques ou organiques. Celles-ci concernent les côtes à flèches littorales, les côtes à tombolo et les côtes construites, telles les côtes coralliennes.

L'évolution littorale, pour autant qu'il est possible de l'appréhender puisque la transgression est un phénomène récent, tend vers la *régularisation* du rivage par sapement des caps d'une part, et par colmatage des lagunes formées en arrière de flèches barrant les baies d'autre part. Cette régularisation se produit de telle façon que la côte tend à prendre une direction perpendiculaire par rapport à la houle dominante. Celle-ci est déterminée en fonction de la direction résultante des vents les plus forts et les plus fréquents venant de la mer ainsi que du trajet maximal effectué sur la mer par le vent (ce trajet est le *fetch*). Ainsi, il est possible de prévoir l'orientation que tend à prendre la côte.

Les applications de la géomorphologie

L'observation, la description et l'explication des paysages restent les préoccupations essentielles de la géomorphologie. Toutefois, depuis une décennie, la géomorphologie traditionnelle s'est muée en une géomorphologie dynamique qui s'attache surtout à démonter les ressorts inhérents aux processus actuels et passés et déterminant l'évolution d'un paysage par rapport aux divers éléments qui le constituent. Aussi la prévision de l'évolution d'un paysage est-elle aujourd'hui l'une des tâches majeures de la géomorphologie, dont les applications sont multiples à la surface du globe. Dans le domaine géologique, les morphologues se sont particulièrement efforcés de préciser les structures, les modelés, les discontinuités des couches, les affleurements des gisements rocheux ainsi que l'organisation et le type de drainage des réseaux hydrographiques. C'est dans le domaine de la construction (barrages, digues, etc.) que les enseignements de la géomorphologie s'avèrent très utiles : en effet, la nature des dépôts et des sols doit faire l'objet d'études poussées déterminant leur mobilité, leurs caractères vis-à-vis d'un système d'érosion donné, etc. Les aménagements agricoles, surtout dans les pays en voie de développement, supposent un véritable quadrillage morphologique relatif, notamment, aux formations superficielles.

Ainsi, la géomorphologie appliquée peut rendre de grands services à l'homme dans tous les domaines où la prévision à long ou moyen terme est possible grâce, d'une part, aux connaissances théoriques et, d'autre part, aux observations et aux expériences effectuées sur le terrain.

BIBLIOGRAPHIE

ARCHAMBAULT M., LHENAFF R., VANNEY J.R., *Documents et méthode pour le commentaire de cartes,* T.P. Masson, Paris, 1967. - BIROT P., *Précis de géographie physique générale,* Masson, Paris, 1965. - COLL., *Géographie générale,* Encyclopédie la Pléiade, Gallimard, Paris, 1965. - COLL., *la Mer,* Encyclopédie Alpha, fascicules 18, 51, 74, 121, Paris, 1971-1975. - DERRUAU M., *Précis de géomorphologie,* Masson, Paris, 1962. - DUCHAUFOUR Ph., *Précis de pédologie,* Masson. - GEORGE P., *Dictionnaire de la géographie,* P.U.F., Paris, 1954. - GORCHKOV G., YAKOUCHOVA A., *Géologie générale,* Mir, Moscou, 1967. - GUILCHER A., *Morphologie littorale et sous-marine,* P.U.F., Paris, 1954. - STIGLIANO, *Encyclopedia italiana delle Scienze,* nos 76 et 77. - TRICART J., CAILLEUX A., *Introduction à la géomorphologie climatique,* t. 1, S.E.D.E.S., Paris, 1965. - VIERS G., *Éléments de géomorphologie,* Nathan, Paris, 1967.

◀ *« Le sol est un milieu vivant et dynamique qui permet l'existence de la vie animale et végétale... Il est un élément fondamental de la biosphère et contribue, avec la végétation et le climat, à régler le cycle hydrologique et à influencer la qualité des eaux. » Ici, un paysage dans le massif de Maiella (Italie), montrant l'étagement altitudinal de la végétation; au premier plan, le village de Campo di Giove.*

PÉDOLOGIE

La pédologie (du grec πέδον = plaine) est la partie de la science du sol qui étudie la formation et l'évolution des sols. Sa finalité repose sur les faits suivants : quand une roche est mise à nu et subit l'action des agents atmosphériques, en un temps plus ou moins long elle se transforme profondément : elle s'effrite, sa structure s'effondre, ses constituants se décomposent et se modifient. Des organismes vivants se développent dans les produits ameublis et apportent de la matière organique qui se mélange plus ou moins intimement aux minéraux de surface. En drainant, les eaux de pluie entraînent des matériaux qui sont exportés au loin ou déposés à certains niveaux, où ils s'accumulent. La roche de départ, relativement homogène d'aspect, se différencie progressivement en un milieu nouveau, constitué de couches superposées de natures variées. Il se forme ainsi un *sol* caractérisé par la succession de ces couches, appelées *horizons.*

Même s'il est souvent transformé par l'homme, le sol est un objet naturel et dont l'étude doit être globale. Pour le pédologue, il apparaît comme un corps organisé qui est à la fois le résultat et le siège de processus complexes. La pédologie se différencie par conséquent de la géologie ou de la géochimie, qui considèrent le sol comme le terme ultime de la transformation et de la dégradation de la roche, et aussi de l'écologie, de la botanique, et de l'agrologie (édaphologie), pour lesquelles il est le milieu permettant le développement de la végétation ou des cultures.

Historique

La pédologie, en tant que science indépendante, est de création récente (fin du XIXe siècle). Pourtant, la notion de sol a attiré l'attention des hommes depuis fort longtemps. Les sols ont d'abord été considérés comme le support des plantes utiles, contribuant par là à la subsistance de l'humanité. En effet, on s'est aperçu très tôt qu'ils n'étaient pas tous comparables et, en particulier, qu'ils n'étaient pas tous capables de fournir les mêmes produits en quantité et en qualité. A partir de ces observations, des choix s'appuyant sur une certaine connaissance du milieu naturel ont été faits par les agriculteurs. Ces choix peuvent être constatés depuis la plus haute antiquité. Ils expliquent pour une grande part la distribution des berceaux de civilisation. Ainsi, la Bible fait de fréquentes allusions à des tractations sur la valeur des terres. Dans ses *Géorgiques,* Virgile fournit de précieux renseignements sur leur estimation. Les Romains savaient qu'une terre est d'autant plus riche qu'elle est plus noire et que cette couleur est due à une substance, *l'humus,* qui fut pendant très longtemps considérée comme l'unique aliment des plantes.

Ce n'est qu'au XVIe siècle que Bernard Palissy signala l'importance des « sels » du sol. Au XVIIIe siècle, Van Helmond nota le rôle du gaz carbonique (CO_2) de l'eau du sol dans l'alimentation des plantes. De Saussure étudia les rapports entre les compositions des plantes et celles des sols dont elles sont le reflet. Les travaux de Liebig en Allemagne, de Boussingault en France et de Lawes en Angleterre montrant que les produits enlevés par les récoltes doivent être restitués au sol, ouvrirent la voie à l'industrie des engrais. Au XIXe siècle, le développement rapide de la chimie donna une impulsion considérable aux études des sols qui restèrent dominées en Europe occidentale par le souci de l'amélioration des techniques agricoles. On utilisa pour cela les méthodes de la chimie, de la physique et de la microbiologie.

Cependant, des considérations économiques allaient amener les chercheurs à développer des systèmes d'évaluation de la valeur des terres débouchant sur la cartographie des sols. Les premiers essais (Rissler-Lagatu) n'étaient en fait que des cartes géologiques détaillées des formations de surface qui montrèrent rapidement leurs limites.

Il fallut attendre la fin du XIXe siècle pour que la pédologie naquît en tant que science spéciale. Le terme est dû à Dokouchaev, géologue russe, qui le premier a considéré le sol comme une entité naturelle susceptible d'être étudiée pour elle-même, et a commencé à la décrire et à la classer en tant que telle. Lors de travaux dans les grandes plaines d'Ukraine (d'où la racine du mot, signifiant plaine) et à l'est de Moscou dans la région de Gorki, il étudia des terres noires, ou tchernozems, puis des sols à horizon couleur de cendre, ou podzols, noms vernaculaires passés depuis dans le langage scientifique.

En comparant ces différents profils, Dokouchaev arriva aux conclusions fondamentales suivantes : dans une région donnée, la nature du sol est pratiquement indépendante de la roche mère; sa formation est liée à la végétation; entre diverses régions, le sol est d'abord fonction du climat. Et il donne la définition suivante : « Les sols sont des corps naturels indépendants, dont chaque individu présente une morphologie particulière résultant d'une combinaison spécifique du climat, de la matière vivante, de la roche, du relief et de la durée d'évolution. La morphologie de chaque sol, telle qu'elle se manifeste dans le profil, reflète les effets combinés d'une série particulière de facteurs génétiques déterminant son développement. »

Partant de ce concept, il présenta un nouveau système de classification s'appuyant sur les principaux facteurs de la formation du sol, à savoir le climat et la végétation. La cartographie des sols se trouva alors facilitée. De quelques points d'observation bien choisis, on pouvait dès lors extrapoler les résultats sur les bases connues des facteurs généraux du milieu. Les travaux de Dokouchaev eurent un très grand retentissement et ses idées

Richard Colin

▲ ***Représentation cartographique de la répartition mondiale des grands types de sol (d'après Duvigneaud), dont elle illustre la zonalité climatique.***

se développèrent rapidement en Russie d'abord, en Europe centrale et aux États-Unis ensuite, c'est-à-dire dans des pays vastes et peu peuplés où les besoins du développement obligeaient à définir rapidement les sols et à en reconnaître la répartition.

Ce n'est que vers les années 1925-1930 que les concepts pédologiques firent leur apparition en France (Agafonoff-Erhart). La première Carte générale des sols fut éditée en 1934. Les nouvelles idées ne se développèrent d'abord que très lentement, même si la cartographie pédologique, très limitée en France, commençait déjà à avoir plus d'importance en Afrique du Nord. Ce n'est qu'après la Seconde Guerre mondiale qu'elles allaient prendre une rapide extension, d'abord dans les régions tropicales francophones, où il était nécessaire de dresser un inventaire rapide des ressources naturelles, et en particulier des sols, puis en France pour les besoins d'aménagements planifiés.

Le développement de la pédologie dans le monde entier depuis 25 ans est remarquable. Cette science est étudiée et enseignée dans tous les pays. Une Association internationale de la science du sol (A.I.S.S.), dont le secrétariat général est à Rome (Italie), regroupe l'action des diverses sociétés nationales (pour la France : Association française pour l'étude du sol, ou A.F.E.S.). Un congrès international réunit tous les quatre ans des milliers de spécialistes répartis en plusieurs commissions : physique des sols; chimie des sols; biologie des sols; fertilité des sols et nutrition des plantes; génétique des sols, classification et cartographie; technologie des sols. Sous l'égide de la F.A.O., les cartes pédologiques des cinq continents ont été réalisées à l'échelle du 1/5 000 000 et de très nombreuses cartes à plus grande échelle existent dans la plupart des pays du monde. En se développant, la pédologie devient chaque jour plus complexe et fait appel aux techniques les plus avancées des sciences de la Terre, des sciences biologiques, de l'informatique, etc. Elle est ainsi, et de plus en plus, une des bases fondamentales de la connaissance du milieu naturel et, de ce fait, de l'aménagement des territoires.

Les contraintes que lui imposent la vie moderne ont amené à dresser une charte européenne des sols, dont le libellé liminaire est le suivant :

« Le sol est un milieu vivant et dynamique qui permet l'existence de la vie animale et végétale. Il est essentiel à la vie de l'homme en tant que source de nourriture et de matières premières. Il est un élément fondamental de la biosphère et contribue, avec la végétation et le climat, à régler le cycle hydrologique et à influencer la qualité des eaux.

« Le sol constitue une entité en lui-même. Comme il contient les traces de l'évolution de la Terre et des êtres vivants et constitue par ailleurs le support des paysages, son intérêt scientifique et culturel doit être pris en considération. »

Le sol est l'un des biens les plus précieux de l'humanité.

La notion de sol

Lorsque les roches sont mises à l'affleurement et se trouvent en contact avec l'atmosphère, elles sont soumises à des conditions de milieu très différentes de celles sous lesquelles elles se sont formées. C'est le cas d'un granite qui s'est normalement constitué en profondeur dans l'écorce terrestre, dans des conditions de fortes pressions et de hautes températures; c'est également le cas d'un calcaire qui s'est édifié dans les conditions d'une mer tropicale. Soumises aux actions du climat, ces roches vont subir des contraintes liées à des échanges d'énergie qui vont tendre à les transformer vers un nouvel équilibre. Les roches sont détruites. On dit qu'elles *s'altèrent*. Cette *altération* se traduit par une division de la masse initiale en matériaux de plus en plus fins, et par une transformation des constituants élémentaires qui vont plus ou moins disparaître (par dissolution par exemple), se modifier et se réorganiser entre eux. Dans un premier stade, la roche est ébranlée mécaniquement mais sa structure se conserve (c'est un *régolithe*); cependant, très rapidement, dans un second stade la structure s'effondre (on a alors un *saprolithe*).

En même temps que cette croûte d'altération se transforme et pénètre en profondeur dans la roche, elle est soumise à un certain nombre de mécanismes qui provoquent un mélange plus ou moins complexe de ces matériaux. Il se produit des remaniements mécaniques par effondrement, par érosion, par tassement et par glissement, qui sont liés au façonnement des formes du relief. Certains produits sont triés, d'autres sont entraînés sur des distances plus ou moins grandes, d'autres encore viennent contaminer le milieu, tels les colluvions, les alluvions, les poussières volcaniques, les sables éoliens, etc. Ainsi, le matériau meuble résultant de l'altération d'une roche en place se différencie de plus en plus de celle-ci; c'est ce qu'on appelle le *matériau originel*.

Très tôt, souvent au tout premier stade de l'altération, des organismes vivants (micro-organismes, végétaux

inférieurs) prolifèrent. Ils introduisent dans le milieu des éléments nouveaux, le carbone et l'azote, inconnus du monde minéral originel. Cette activité biologique et les produits qui en dérivent agissent sur les constituants minéraux pour les solubiliser, les transformer ou les stabiliser. Des végétaux supérieurs ainsi que des animalcules divers se développent à leur tour, participant à la formation d'une couche de matière organique qui se différencie dans les niveaux supérieurs des produits altérés.

Les eaux de pluie qui tombent sur cet ensemble suivent des trajets variés : ruissellement en surface, percolation en profondeur sous l'action de la gravité, mouvements latéraux internes. Elles entraînent certains matériaux, tels que les sels, le calcaire, le fer, l'argile, etc., pour les déposer ailleurs. Certains niveaux sont ainsi appauvris, alors que d'autres sont enrichis. Les différents constituants s'organisent et se disposent les uns par rapport aux autres suivant des modalités déterminées qui sont fonction du climat, de la pesanteur et de la perméabilité. Ces modalités varient avec le temps de sorte que, peu à peu, s'individualisent des couches à propriétés particulières mais bien définies, qui sont grossièrement parallèles à la surface du terrain et qui se superposent suivant un ordre déterminé. Un *sol* s'est formé, qui se caractérise par une tranche verticale, ou *profil,* différencié en une succession de couches horizontales : les *horizons*. Ces derniers traduisent donc l'anisotropie verticale moyenne du sol.

Les horizons successifs sont d'autant mieux différenciés que le profil est plus évolué. En effet, le sol n'est pas un milieu stable, inerte, limité à quelques décimètres de terre végétale, présentant certaines propriétés physiques et chimiques déterminées par une roche sous-jacente : c'est un *complexe dynamique* (Duchaufour). Il s'agit d'un milieu complexe qui doit être considéré dans tous ses aspects, physiques, chimiques et biologiques, et surtout d'un milieu dynamique, qui s'individualise progressivement sous l'influence des facteurs du milieu. Il prend naissance à partir d'un matériau minéral (la roche), et il évolue jusqu'à atteindre une certaine stabilité qui correspond à un équilibre nouveau ; il peut disparaître lorsque des conditions différentes apparaissent. Ainsi, lorsqu'on étudie un sol en place, on ne saisit que l'expression instantanée de l'action des différents facteurs. Il est donc indispensable de situer ce stade le long d'une chaîne évolutive.

Les sols jeunes sont très superficiels, peu épais, très voisins de la roche mère initiale. Aucun horizon n'est différencié. Les sols faiblement évolués sont caractérisés seulement par une couche enrichie en humus (horizon A), reposant sur la roche mère altérée (horizon C). Le profil est du type AC. Lorsque l'évolution se poursuit, un horizon résultant de l'altération plus poussée de la roche mère mais pauvre en matière organique, se constitue [horizon (B)]. Le profil est alors du type A (B) C. Enfin, les phénomènes de translocation, de migration de substances caractérisent les sols encore plus évolués. Les horizons supérieurs s'appauvrissent en éléments fins ou solubles par suite de leur entraînement par les eaux d'infiltration (éluviation). Ils sont dits *horizons lessivés,* ou *éluviaux,* et sont toujours désignés par la lettre A. Suivant leurs teneurs en humus, on les subdivise en A_1, horizon où se trouvent en mélange matières organiques et minérales, et A_2, horizon essentiellement minéral. Les horizons inférieurs sont, au contraire, enrichis en éléments venant de la surface. Ce sont les *horizons d'accumulation,* ou *illuviaux,* désignés par la lettre B. Le profil est du type A B C. Il correspond au degré maximal de développement du profil.

Dans les faits, le problème est souvent plus complexe : les sols peuvent se former sur un substratum hétérogène, constitué de strates variées susceptibles d'interférer sur la morphologie des profils, et l'interprétation est alors difficile. C'est ainsi que la superposition de couches sédimentaires peut simuler une succession d'horizons pédologiques : un apport sableux superficiel rappelle un horizon A_2 lessivé; une couche argileuse profonde simule un horizon B d'accumulation. On croit se trouver en présence d'un sol très évolué, alors qu'il s'agit ici d'un *pseudo-profil* qui peut être très jeune. Parfois, aussi, certains sols se forment à l'emplacement même où existe un sol plus ancien, *sol fossile* appelé souvent *paléosol,* qui s'est développé dans des conditions différentes de celles du milieu actuel. Le sol fossile joue le rôle de matériau originel, et il est délicat de distinguer ce qui revient à la pédogenèse actuelle de ce qui est hérité de la pédogenèse ancienne. Des profils pédologiques bien différenciés peuvent se trouver modifiés après coup, de sorte que la succession normale des horizons n'est plus visible. Par exemple, l'érosion peut enlever les horizons humifères de surface, le sol est alors *tronqué*. Inversement, un sol peut être *enterré* par des matériaux alluviaux ou ruisselés. En surface, les horizons peuvent être perturbés par des engins divers, instruments agricoles ou de génie civil.

R. Maignien

▲ ***Un type d'altération du granite : un sol rouge fersiallitique sur des roches vertes, basiques, au Cameroun. La présence de ce sol suggère des influences de type méditerranéen au Quaternaire récent.***

Si tous ces phénomènes rendent l'étude des profils délicate, il s'agit cependant d'une opération fondamentale qui est à la base de toute pédologie. Cette importance a amené les pédologues à établir un vocabulaire et à mettre au point des glossaires pour les descriptions des horizons du profil, glossaires qui permettent actuellement des traitements informatiques des données de sol. Les variables descriptives sont standardisées, ordonnées ou quantifiées. Les plus couramment utilisées sont les suivantes : profondeur en centimètres, humidité, couleur (d'après un code international), matière organique, carbonates, sesquioxydes, éléments grossiers, texture (composition mécanique de la terre fine), structure (arrangements en édifices élémentaires des constituants du sol), porosité, consistance, revêtements divers (argile, fer, matière organique), figuration de sels solubles, distribution des racines, traces d'activités biologiques, formes de transition d'un horizon à l'autre.

De même, les pédologues ont été amenés à donner une valeur synthétique à chaque horizon et à établir une nomenclature. Suivant les pays, les définitions changent légèrement. Mais elles sont actuellement suffisamment convergentes pour qu'une liste minimale en soit fournie. En France, une Commission nationale (Commission de pédologie et de cartographie des sols ou C.P.C.S.) donne les définitions suivantes.

— *Horizon A*. Les horizons A_{00}, A_0 d'une part et l'horizon A d'autre part se superposent dans l'ordre indiqué quand ils sont présents simultanément dans le profil.

★ A_{00}, horizon de surface, formé de débris végétaux (feuilles, brindilles et autres), facilement identifiable, parfois désigné par les lettres L (litière) ou O (organique).

★ A_0, horizon constitué de débris végétaux partiellement décomposés et pratiquement non reconnais-

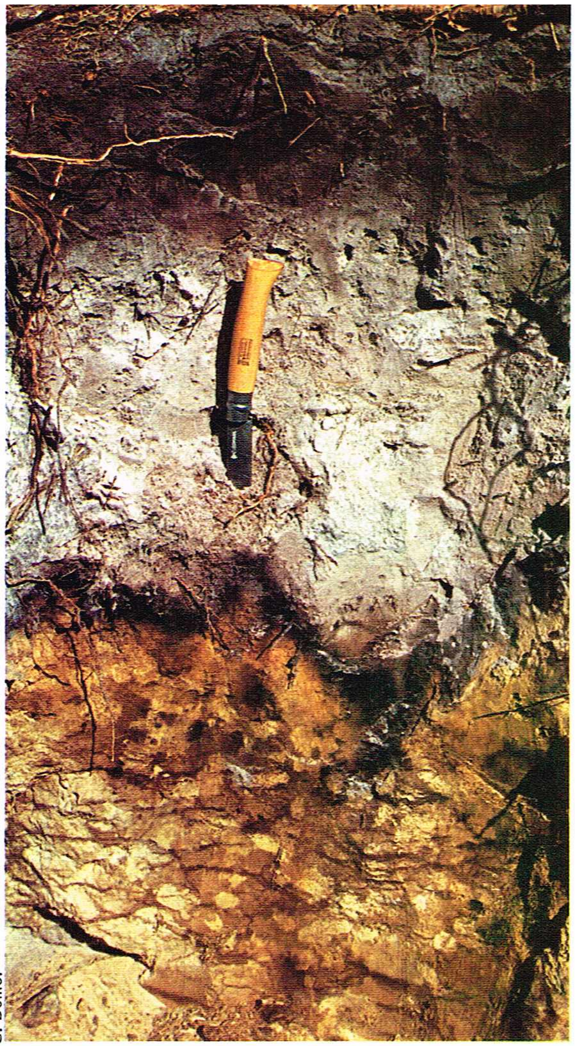

G. Bellier

▶ *Les pédologues ont été amenés à établir une nomenclature ainsi qu'un glossaire des horizons qui permettent toutes les descriptions des horizons de profil; ici, un podzol humoferrugineux, près de Rambouillet, nettement caractérisé par sa litière mal décomposée, des horizons A_2 cendreux, et B_2 d'accumulation de matière organique et de fer.*

sable sur le terrain. Cet horizon peut être subdivisé en F (fermentation) et H (humus). La couche H se distingue de F par l'absence complète de structure végétale.

Ces deux horizons sont mesurés de bas en haut à partir du sommet de A_0. L'un ou l'autre peut manquer. Ils sont les produits d'accumulation, au-dessus de la partie minérale du sol, de débris organiques dont la décomposition est lente et qui ne s'incorporent pas au sol proprement dit.

L'horizon A est un horizon majeur occupant la partie supérieure ou l'ensemble du profil du sol et présentant soit l'un ou l'autre des caractères suivants, soit les deux en même temps : la présence de matière organique et l'appauvrissement en constituants tels que l'argile, le fer, l'alumine, etc. Il se subdivise de haut en bas en horizons A_1, A_2 et A_3.

★ L'horizon A_1 est un horizon le plus souvent de couleur sombre, comportant en général moins de 30 % de matière organique bien mélangée à la partie minérale. Cet horizon peut être éluvié ou non. Il est parfois surmonté ou imprégné d'une mince couche de substance soluble.

★ L'horizon A_2 est un horizon de couleur plus claire que l'horizon sus-jacent; il est appauvri en fer, en argile, en aluminium, avec une concentration corrélative de matériaux résistants. C'est un horizon d'éluviation par lessivage de constituants en solution ou en suspension. Les éléments se déplacent généralement soit à l'état dissous, soit dispersés vers l'horizon B ou hors du profil.

★ L'horizon A_3 est un horizon de transition entre A et B mais plus proche de A que de B. Si l'horizon de transition ne peut être valablement attribué à l'un ou l'autre, on l'appelle A B.

— *Horizon B*. L'horizon B est un horizon majeur, situé au-dessous de A et caractérisé par des teneurs en argile, en fer, en humus plus élevées qu'en A, ou par une couleur, une structure ou un comportement différents de A. Ces différences peuvent être dues soit à des transformations sur place des minéraux préexistants, soit à des apports illuviaux. Si la variation de teneurs en argile et en fer est très faible et que la différenciation avec A ou C ne porte que sur la consistance, la structure ou la couleur, on désigne cet horizon par (B). Une lettre minuscule placée après B précise la nature de l'enrichissement ou de la différenciation. L'horizon B est subdivisé en :

★ B_1, horizon de transition avec A mais plus proche de B que de A.

★ B_2, horizon constituant la partie essentielle de B, correspondant soit à l'accumulation principale, soit au développement maximal de la différenciation.

★ B_3, horizon de transition avec C, mais plus proche de B que de C.

On peut affecter les horizons A et B d'un nouveau chiffre secondaire (tel que A_{11}, A_{12} ou B_{21}, B_{22}, etc.), qui n'a d'autre signification que d'introduire une subdivision. Lorsqu'un nouveau sol se développe sur un sol plus ancien, les horizons de ce dernier sont désignés par des lettres affectées du signe prime : A', B', etc.

— *Horizon C*. L'horizon C correspond à une roche en voie d'altération dans laquelle les transformations sont surtout d'ordre physique. C'est donc un horizon minéral, autre que la roche brute, analogue ou différent du matériau dont dérive le couple A B; il est relativement peu affecté par les processus pédogénétiques ayant conduit à l'individualisation des horizons A et B sus-jacents et ne présente pas leurs caractéristiques. Il peut être subdivisé en ajoutant un chiffre arabe, qui n'a d'autre importance que de signaler une succession de haut en bas.

— *Horizon R*. L'horizon R correspond à la roche non altérée sous-jacente au profil, qui peut fort bien ne pas être la roche mère du sol ou ne l'être que partiellement.

Il peut arriver que des sols se forment à partir de plusieurs couches de roches ou de sédiments et que le pédologue puisse reconnaître la trace de ces diverses couches au sens sédimentaire du terme. On signale ces discontinuités lithologiques en désignant chaque matériau originel par un chiffre romain précédant l'horizon. S'il n'y a qu'un seul matériau, on omet ce chiffre. Dans le cas de plusieurs matériaux, celui du dessus (I) peut être également omis. Par exemple, on peut très bien avoir un profil noté de la façon suivante :

A_1—A_2—B_1—B_{21}—II B_{22}—IIC_1—III R.

Si la culture a profondément modifié les horizons de surface, on note Ap (A perturbé). Un tel horizon peut également être subdivisé en Ap_1, Ap_2, etc., le chiffre n'indiquant qu'une succession vers la profondeur.

Certaines caractéristiques particulières des horizons peuvent être précisées en utilisant des symboles en lettres minuscules, à savoir :

- Ca : pour l'accumulation du calcaire.
- Cs : pour l'accumulation du sulfate de calcium (gypse).
- Cn : pour l'accumulation de concrétions ferro-alumineuses.
- g : pour le pseudo-gley (succession des taches de sesquioxydes oxydés et réduits de couleurs variées).
- G : pour le gley, horizon réduit de couleur uniforme gris bleuté à gris verdâtre.
- Sa : pour les sols plus solubles que le sulfate de calcium (chlorure de sodium par exemple); Sa = salé.
- B_2h : pour l'horizon d'accumulation humique en profondeur.
- B_2fe : pour l'horizon profond d'accumulation ferrugineuse.
- Bt : pour l'horizon illuvial d'accumulation d'argile (t = textural).
- X : fragipan (de fragile), niveau à faible porosité et forte densité qui limite le drainage en profondeur, principalement en sols limoneux.
- m : horizon massif à forte cimentation, par exemple:
  Cam = croûte calcaire ou caliche.
  fem = cuirasse ferrugineuse ou latérite.

D'une façon générale, les descriptions sont complétées par une série de résultats analytiques précisant les caractéristiques des constituants, leur organisation et leurs propriétés : par exemple, la nature minéralogique des matériaux argileux, le type et les quantités d'éléments fixés sur le complexe argilo-humique et, plus généralement, les teneurs en calcium, magnésium, potassium, sodium, l'acidité, le pH, etc.

Mais le sol n'est pas défini par un seul profil : il a une certaine extension spatiale, qui permet d'ailleurs de le cartographier. C'est un volume qui peut être représenté par des séries de profils possédant la même organisation, les mêmes propriétés et résultant de la même pédogenèse.

T. Poggio

▲ *Le* **relief** *est l'un des cinq facteurs qui contribuent à la différenciation et à l'évolution des sols; lui-même dépend à la fois de la* **roche**, *du* **climat** *et de la* **durée d'évolution**. *Ici, un paysage sauvage en Sardaigne où la pluie, rare, limite le développement des sols.*

Il est un des éléments du paysage. Aucun sol ne peut être isolé dans la nature. Chaque sol est lié à ceux qui l'entourent, et il existe d'étroites relations entre sols voisins. Dans certains cas, leur position et leurs propriétés peuvent être dues aux variations de certains de leurs facteurs d'évolution : ils forment une *séquence*. Par exemple, le long d'une pente qui recoupe une série de formations différentes de roches, on peut observer une succession de sols liés à l'affleurement des différents niveaux géologiques : c'est une *toposéquence*. Dans d'autres cas, leur liaison tient à ce que certains éléments de chacun proviennent de l'un au moins des autres sols : ils sont alors en *chaîne,* ou *catena*. Les sols sont liés entre eux en *unités dynamiques*.

Donc, si le sol peut être défini en lui-même dans sa totalité, il n'existe pourtant qu'en fonction de son environnement et, en particulier, des sols qui l'entourent. Corps à trois dimensions, il se transforme cependant aussi dans le temps. Pour le connaître, il faut comprendre également sa genèse, son évolution, en bref son histoire, et déterminer les rôles respectifs des différents facteurs intervenant dans le système. Si l'étude du sol commence par l'examen du profil, elle doit obligatoirement se compléter par une analyse globale des différents niveaux qui définissent le paysage, ce qui oblige généralement à le cartographier. Une telle étude est *génétique* parce que le sol a une histoire et une genèse. Il faut toutefois bien comprendre qu'il n'y a ni descendance, ni multiplication possible de sols et que les études pédogénétiques consistent seulement à tenter de relier les sols à leurs facteurs de formation.

Les facteurs de la pédogenèse

Cinq facteurs de l'environnement contribuent à la différenciation et à l'évolution des sols : les roches, le climat, la durée d'évolution, le relief et l'ensemble des actions biologiques. On peut remarquer immédiatement que si les trois premiers sont strictement indépendants les uns des autres, par contre, les deux derniers sont partiellement liés aux précédents; le relief dépend à la fois de la roche, du climat et de la durée d'évolution; les facteurs biologiques sont en relations complexes avec l'ensemble des autres données.

Les roches

Le matériau de départ, appelé aussi *roche mère,* fournit au sol ses constituants minéraux. Certains sont presque inertes et constituent le squelette minéral : ce sont des débris de roches qui ont plus ou moins résisté à l'altération. Il est courant de les classer, d'après leurs dimensions, en éléments grossiers dont la taille est supérieure à 2 mm (cailloux, graviers) et en éléments fins, inférieurs à 2 mm (sables, limons et argiles). Suivant la proportion d'éléments fins et d'éléments grossiers, le sol possède des propriétés physiques (perméabilité, cohésion, plasticité) plus ou moins accusées. On appelle *texture du sol* l'ensemble des propriétés physiques qui résultent directement de la taille de ses constituants.

Les argiles sont des constituants particulièrement importants du sol. Leur taille extrêmement réduite (quelques Å) leur confère une surface spécifique considérable, de l'ordre de 20 à 800 m^2/g, ce qui pour un sol contenant 20 % d'argile donne, pour 1 ha et sur 1 m d'épaisseur, une surface étalée de 300 000 km^2, soit plus de la moitié de la surface de la France. Il en résulte que ces argiles se comportent en colloïdes. D'autre part, elles ont une capacité d'échange car leurs charges électriques libérées peuvent être équilibrées par des ions qui s'échangent avec les solutions ambiantes (l'eau du sol). Cette capacité peut être très différente suivant les types : ainsi, les kaolinites, encore appelées argiles 1/1, ont une capacité d'échange de 10-12 milliéquivalents (meq) pour 100 grammes. Les illites et les montmorillonites, ou argiles 2/1, ont une capacité d'échange de 40 meq/100 g pour les premières et de 120 meq/100 g pour les secondes, qui, en outre, ont la capacité de se gonfler fortement sous l'action de l'eau. Ces caractéristiques conditionnent en grande partie la valeur agronomique des sols dont elles sont les constituants.

Certains caractères minéralogiques de la roche mère déterminent bon nombre des propriétés des sols, surtout des sols jeunes. Ce sont la résistance à la décomposition, la porosité, la richesse en divers éléments, principalement en cations (Ca, Na, Mg, Fe, Al, ...) ou en minéraux argileux préexistants. Pendant longtemps on a cru que les propriétés chimiques exerçaient une influence majeure sur l'évolution des sols; en effet, sur les roches riches en

bases les sols sont généralement plus fertiles que sur les roches acides. Mais les travaux récents insistent davantage sur l'importance de la perméabilité de la roche et sur la vitesse de la circulation des solutions du sol. Un mauvais drainage, une circulation ralentie des solutions du sol déterminent la formation d'argiles à forte capacité de rétention, de type montmorillonite. Au contraire, une forte perméabilité et la percolation de grandes quantités d'eau diluent les solutions en contact avec les roches, et les produits de l'altération évoluent vers des types kaolinitiques à faible capacité d'échange. Cependant, la richesse en calcium et en magnésium joue un rôle particulier, car elle conditionne en grande partie le taux de saturation du complexe absorbant, agit sur l'activité biologique et freine le lessivage.

Dans les faits, les sols que nous observons gardent plus ou moins certains des caractères hérités du matériau dont ils dérivent. Ces caractères sont très marqués dans les sols jeunes, peu évolués. Ils s'effacent progressivement avec le temps, pour disparaître presque totalement dans les sols très évolués, les plus anciens. Ainsi en France, où du fait des glaciations quaternaires les sols sont relativement jeunes et où le climat est modéré, l'action des roches est souvent très marquée.

Il est intéressant de regrouper les roches d'après leur rôle possible dans l'évolution des sols. On distingue ainsi (Boulaine) :

— Les *roches friables* facilement pénétrées par l'air, l'eau et les racines des plantes. Comme elles se désagrègent aisément, elles peuvent donner rapidement des sols (deux siècles sous nos climats), généralement profonds et dont la valeur agronomique dépend de la nature chimique des constituants (argiles, marnes, sables) ;

— Les *roches massives acides* (granites et roches voisines, quartzites, grès siliceux), dont la pauvreté en ions métalliques amène surtout la formation d'argiles de type kaolinite ou vermiculite. Le quartz, difficilement altérable, donne des sables qui allègent la masse et facilitent le lessivage. L'évolution pédologique est dominée par la matière organique à tendance acide ;

— Les *roches massives basiques* (basaltes, gabbros, péridotites), à fortes teneurs en ions alcalino-terreux qui orientent les néosynthèses vers la formation d'argiles à forte capacité d'échange. Les sols formés sont généralement fertiles, mais parfois difficiles à travailler du fait de leur texture plus lourde ;

— Les *roches calco-magnésiennes* (calcaires divers et dolomies), dont les carbonates sont peu à peu dissous par les eaux et les acides organiques. Le calcium et le magnésium favorisent la formation d'un humus très stable qui freine le lessivage et se traduit par une structure grenue très favorable au développement des plantes. Mais la nutrition azotée est déficitaire, le phosphore et les oligo-éléments y étant souvent peu assimilables ;

— Les *roches consolidées à base d'argiles* (schistes, micaschistes), qui restituent leurs argiles de constitution et leurs produits de dégradation. Elles se débitent facilement, mais donnent ordinairement naissance à des sols peu différenciés ;

— Les *roches salines* (sels, gypse, etc.), dont la richesse en sels modifie l'état des argiles et perturbe la physiologie des plantes.

En résumé, les facteurs les plus importants sont la nature des minéraux altérables, le bilan des ions basiques et les propriétés physiques qui orientent les processus de formation des argiles.

Le climat

Le climat a une importance tout à fait particulière dans l'évolution des sols. Sur des roches identiques, mais sous des climats différents, les sols ne sont pas les mêmes. C'est d'ailleurs à partir d'une telle observation que Dokouchaev a introduit la notion de pédologie. Sur du lœss, il a reconnu en Ukraine des sols noirs, très fertiles, les tchernozems, alors que dans la région de Gorki, plus humide et plus froide, les sols, des podzols, sont pauvres et à humus acide. A très petite échelle, si l'on superpose une carte mondiale des sols à celle des climats, la coïncidence est presque parfaite.

La **température** et les **précipitations atmosphériques** sont les causes premières de la formation des sols. La température influe sur l'évolution de deux façons :

— par son action sur la vitesse et le mode d'altération des roches ; très rapide en climat chaud, cette action ne progresse que lentement en climat froid. Ainsi, les sols tropicaux sont très évolués et épais de plusieurs mètres alors qu'en régions boréales les sols sont très superficiels (quelques décimètres) et leurs minéraux originels peu transformés ;

— par son action sur la rapidité de la décomposition de la matière organique. Celle-ci s'accumule dans les sols de climats froids ; elle disparaît très vite des sols des régions chaudes et humides.

L'**humidité** intervient aussi dans l'altération. Dans les déserts secs, chauds ou froids, les sols ne se développent pratiquement pas. Les sols des climats très humides sont toujours très profonds. Mais l'humidité joue un rôle essentiel surtout par son action sur les processus d'entraînement et de redistribution de la matière. La quantité d'eau qui traverse le sol a ainsi une influence considérable sur la pédogenèse. Elle dépend à la fois des précipitations et de la température, laquelle induit les conditions d'évaporation soit directement, soit par le canal de la transpiration des plantes. C'est le *drainage climatique* (c'est-à-dire la différence pluviosité moins évaporation) qui régit l'importance du lessivage.

D'autres paramètres du climat, comme le *vent*, l'*humidité de l'air*, la *lumière*, exercent une influence indirecte sur les sols par l'intermédiaire des végétaux. C'est pourquoi, très tôt, les pédologues ont cherché à relier les sols aux différents types de climats et plus particulièrement à divers indices climatiques, par exemple, les indices de Lang et de Martonne qui sont des indices d'aridité, ceux de Birot, d'Emberger, de Gaussen qui mesurent le degré de sécheresse du climat, ainsi que des indices d'activité chimique et d'activité biologique. D'une façon générale, ces indices ont l'inconvénient de ne prendre en compte que les valeurs moyennes des éléments du climat, alors que ceux-ci jouent beaucoup plus par leur répartition en cours d'année et leurs variations d'une année sur l'autre. Ce sont précisément les valeurs exceptionnelles qui ont une influence moyenne sur l'évolution des sols. Ainsi, au Sahara, dont le climat est exceptionnellement aride, les griffes d'érosion par l'eau sont fréquentes, et il suffit pour cela d'une seule pluie très violente (100-150 mm) tous les 5 à 10 ans. De la même façon, en régions tropicales, les sols sont d'autant mieux différenciés que les saisons sont plus contrastées. Il en est de même en régions tempérées, où les caractères de « continentalité » (périodes de transition très raccourcies entre l'hiver et l'été) orientent des évolutions à caractères steppiques-tchernozems en U.R.S.S. et sols de prairies aux États-Unis, alors qu'en domaine atlantique, à climats plus modérés et tamponnés, les sols lessivés deviennent la règle.

Ces relations entre sols et climats se traduisent, sur le plan mondial, par une zonation évidente qui est à la base de la classification soviétique. C'est le principe de la zonalité climatique des sols.

La durée d'évolution

Le temps est aussi un facteur très important. Dans la vie d'un sol on peut distinguer différents stades d'évolution temporelle : néoformation, jeunesse, maturité, sénilité. Cette évolution est assez lente, mais de durée variable d'un type de sol à l'autre. C'est ainsi que des observations déjà anciennes, effectuées en U.R.S.S., ont montré qu'une rendzine d'une quinzaine de centimètres d'épaisseur pouvait se former en moins de 800 ans. Il est intéressant d'avoir des renseignements précis sur les différentes vitesses des processus mis en cause qui fournissent, outre l'âge du sol, des informations sur les phases de son évolution. Les méthodes utilisées dans ce but sont nombreuses. Elles relèvent plus de l'observation des phénomènes naturels que de données expérimentales. L'étude des sols formés sur les moraines parfaitement datées est instructive à cet égard. Sur les sables glaciaires du lac Michigan, les pédogenèses s'échelonnent entre 2 250 ans et 10 000 ans. Il se forme un podzol à A_2 cendreux qui s'approfondit jusqu'à l'âge de 4 000 ans environ ; puis l'évolution se poursuit plus lentement, par l'épaississement de l'horizon B, l'équilibre étant atteint vers 8 000 ans.

L'étude des pollens (palynologie) permet de connaître les conditions successives de climat et de végétation qui ont présidé à l'évolution des sols.

	Age	Végétation
Tardiglaciaire	plus de 8.500 BC.	toundra
Préboréal	8.500 - 7.500	pin - bouleau
Boréal	7.500 - 2.500	pin - noisetier
Atlantique	5.500. - 3.000	chênaie mixte noisetier
Subboréal	3.000 - 800	hêtre - sapin (montagne)
Subatlantique	800 BC - 2.000 AD	hêtre - sapin bouleau (montagne)

▲ *A gauche, tableau récapitulatif des différents stades de l'évolution temporelle des sols dans les régions de France. A droite, phénomène de cryoturbation ayant affecté la région de la Champagne humide.*

Signalons que c'est à l'âge du bronze (1000 ans environ av. J.-C.) qu'a commencé le défrichement massif des forêts par l'homme.

L'étude des sols de ruines fournit également des renseignements précieux. Des données recueillies dans la région de Halle (R.D.A.), à la surface d'un tumulus, permettent de préciser que le lessivage de l'argile dans un tchernozem brunifié s'effectue en moins de 4 500 ans. On peut également mesurer, à partir de la vitesse connue de processus physico-chimiques particuliers, le temps nécessaire à l'altération de certaines roches. En Côte-d'Ivoire le temps de formation d'un sol ferrallitique à partir d'un granite et sur 1 m d'épaisseur est de l'ordre de la centaine de millénaires. Des datations de la matière organique au carbone 14 ont permis de déterminer l'âge moyen des horizons de surface de certains sols; pour les sols bruns et les tchernozems il est de l'ordre de 300 à 1 000 ans.

Les recoupements entre ces méthodes permettent actuellement d'avoir une assez bonne idée de la vitesse des principaux processus pédologiques. L'entraînement de l'argile est un processus lent, et le temps nécessaire pour que le profil d'équilibre d'un sol brun lessivé soit atteint est d'environ 5 000 ans. La podzolisation est, au contraire, dès le départ beaucoup plus rapide; l'équilibre est atteint en un temps nettement plus court que celui qui caractérise les sols lessivés. Les podzols atlantiques formés à la suite de l'invasion de la callune (bruyère), qui a succédé aux défrichements de l'âge du bronze, datent de — 2000 à — 3000 ans. Les processus d'hydromorphie, dus à la mauvaise circulation de l'eau du sol, marquent leurs effets encore plus rapidement (quelques décades).

Les sols ont donc des âges très divers, se chiffrant souvent à plusieurs milliers d'années. Or, pendant des périodes de temps aussi longues, les conditions climatiques ont généralement varié et au cours de ces variations, certains processus de l'évolution des sols ont pu être accélérés ou freinés et même, dans les cas extrêmes, une pédogenèse différente de l'actuelle a pu avoir lieu. Les sols âgés gardent les traces de ces différentes phases climatiques : leur genèse est alors particulièrement complexe.

Les *paléosols* sont des sols anciens qui présentent uniquement des caractères hérités des climats antérieurs; les sols *polycycliques* ou *polygénétiques* offrent à la fois des caractères hérités d'un ou plusieurs cycles antérieurs et des caractères acquis au cours du cycle postglaciaire actuel. Les sols *fossiles* sont des sols anciens, enterrés sous des dépôts plus récents.

Dans le nord de la France et plus encore dans toute l'Europe septentrionale, des phénomènes de remaniement périglaciaires (cryoturbation) ont détruit ou tout au moins modifié considérablement les différenciations pédologiques plus anciennes. Les sols actuels sont le plus souvent postglaciaires et moyennement évolués.

Dans les régions méditerranéennes, au contraire, les sols anciens se sont conservés. Ils n'ont pas été rabotés par les glaciers et, malgré l'érosion provoquée par l'action de l'homme, ils montrent encore très nettement les traces des pédogenèses antéquaternaires (sols rouges).

Les alluvions récentes déposées dans les vallées portent des sols jeunes peu évolués. En comparant les différents niveaux, il devient possible de reconstituer l'histoire des sols.

Mise en place du matériau	Sols	Niveau
Moderne	Sols minéraux bruts	I
Versilien	Sols bruns légèrement calcaires	II
Würm récent	Sols bruns décarbonatés très légèrement brunifiés	III
Würm ancien	Sols bruns décarbonatés légèrement lessivés	IV
Riss	Sols lessivés à accumulation argileuse rouge peu colmatée	V
Mindel	Sols lessivés à accumulation argileuse rouge colmatée	VI
Günz	Sols lessivés à accumulation argileuse bariolée	VII
Pliocène terminal	Sols très lessivés très profonds à accumulation argileuse bariolée	VIII

▲ *Tableau récapitulatif de l'histoire pédologique, dressée à partir de l'étude des sols développés sur les différentes terrasses quaternaires de la vallée de l'Orb.*

On constate que les sols gardent les cicatrices d'événements historiques d'un passé plus récent encore (sites de batailles) ou la marque de différents types d'exploitations anciennes (traces de cultures dans les anciennes forêts royales).

Ainsi, à l'échelle géologique comme à l'échelle humaine, le temps intervient dans les caractéristiques et les différenciations pédologiques. Pour les comprendre, il est indispensable d'en reconstituer l'histoire. Le sol actuel n'est qu'un maillon d'une longue chaîne évolutive dont il convient de connaître les différents éléments. Plus l'équilibre d'un sol est atteint rapidement, plus il est indépendant de l'âge. Les sols humiques à gley, qui peuvent atteindre leur plein développement en quelques dizaines d'années, s'observent même sur les alluvions les plus récentes. Les sols lessivés, au contraire, ne peuvent être que polygénétiques.

F. Mancini - G. Sanesi - G. Ferrari

D. Giussani

▲ A gauche, le temps est un facteur pédogénétique d'une très grande importance; ainsi, sur le sommet de ce petit glacier dans le Trente (Italie), le calcaire dolomitique et les sédiments morainiques se sont déposés il y a peu de temps, alors que le sol où s'est installée la végétation remonte aux tout premiers stades de l'évolution. A droite, les animaux jouent un rôle déterminant dans la formation des sols : les excréments déposés, ici par des lombrics, modifient les propriétés physiques et chimiques du sol et déterminent, notamment, sa fertilité.

Le relief

La connaissance du facteur relief est également importante et cela à différents points de vue. En effet, on ne peut le considérer comme un facteur indépendant, comparable aux précédents, car il dépend de la plupart des autres facteurs de formation du sol. Il est à la fois une manifestation particulière de variations de roches, de climat, de durée d'évolution et une cause d'évolution propre du sol.

Aux petites échelles, le relief est surtout en relation avec les phénomènes tectoniques et avec la distribution des domaines géologiques. Il y a des régions montagneuses, comme les Alpes; des zones de plaines comme le Bassin parisien, etc. Mais la forme du terrain dépend aussi de la roche mère. Sous un même climat, des surfaces d'âges identiques présentent des topographies différentes suivant qu'il s'agit d'affleurements granitiques (dômes, vallées plates) ou de calcaire dur (karst avec dolomies). Le relief est également lié au climat : sous un climat tempéré un calcaire donnera une morphologie karstique en creux, alors qu'en régions tropicales le même présentera une topographie en pitons. Le relief est aussi en relation avec le facteur temps. En effet, les diverses parties d'un territoire donné ont été formées à des époques parfois très différentes. Un relief accentué évolue en s'érodant et en comblant les creux avec les matériaux déblayés. Les grandes surfaces d'érosion, les glacis, les terrasses des fleuves sont autant de traces qui matérialisent le façonnement du modelé au cours des temps et sous des conditions pédogénétiques spécifiques mais variées. L'étude du façonnement du terrain est donc pour le pédologue d'une grande utilité. C'est pourquoi il est indispensable que celui-ci possède de bonnes notions en géomorphologie.

Mais le relief est aussi une cause d'évolution propre du sol. Il exerce une action directe en mettant en jeu par ses différences de niveaux l'action de la gravité sur les sols en pente. Deux processus différents peuvent intervenir :

— les eaux courantes qui ruissellent à la surface du sol entraînent tout ou partie des constituants de celui-ci; parfois des tranches complètes d'horizons sont décapées, ce qui met à nu soit des horizons profonds, soit la roche mère; l'érosion rajeunit le sol et s'oppose ainsi à son évolution normale; d'une façon générale, on observe un entraînement des éléments fins des hauteurs vers les fonds, et les parties hautes contiennent toujours une plus grande quantité d'éléments grossiers;

— dans la masse des profils, les eaux de percolation entraînent les matériaux colloïdaux ou en solution du haut vers le bas; il y a redistribution des constituants le long des pentes; c'est le lessivage oblique ou latéral; il en résulte une succession topographique composée à l'amont d'un domaine lessivé, qui s'oppose à l'aval à un domaine d'accumulation.

Le résultat de ce double processus (érosion, lessivage oblique) est un étagement régulier des sols du haut en bas des pentes. Cette succession de sols variant de façon continue est appelée *chaîne de sols (catena)*. La nature des chaînes (leur composition et leurs proportions) est fonction du climat, de la roche mère, de la longueur et du pourcentage de pente.

Le relief joue aussi directement sur le climat du sol (pédoclimat). Les effets de l'altitude, qui augmentent les teneurs en matière organique dans les horizons de surface, sont bien connus (rankers montagnards). Les pentes interviennent aussi par leur exposition, c'est-à-dire leur orientation, qui influe sur le régime thermique des sols : les pentes exposées au sud sont plus chaudes; celles exposées à l'ouest sont plus humides, etc.

Le relief joue aussi un rôle indirect par son action sur la vitesse de circulation des eaux à travers les sols. Les topographies plates favorisent l'engorgement par l'eau. Au contraire, les pentes fortes favorisent la sécheresse par suite du ruissellement et de l'écoulement latéral interne des eaux d'infiltration. Ces modifications du régime hydrique exercent une action importante sur l'évolution des sols, parce qu'elles influencent le degré d'hydromorphie, les possibilités de percolation, d'enlèvement, d'apport, de concentration et de confinement.

Il en résulte que si une surface présente une hétérogénéité topographique, cette dernière correspond généralement à des différenciations dans la nature du sol; aussi l'examen des cartes à courbes de niveau peut-il apporter de nombreux renseignements. A chaque fois que la pente n'est pas régulière, il y a possibilité de variation du sol. On a donc intérêt à déceler sur le terrain les moindres changements de pente. A cette fin, les pédologues utilisent actuellement les techniques de la photo-interprétation. En regardant sous un stéréoscope une même surface provenant de deux clichés successifs pris d'avion, on distingue parfaitement le relief. On dessine ainsi des limites qui doivent être ensuite vérifiées sur le terrain, où l'on précise la nature des sols concernés. Ces techniques très rapides sont améliorées par l'utilisation d'émulsions nouvelles pour les clichés : infra-

rouge, couleurs, fausses couleurs. Elles se prolongent aussi par celles de la télédétection : scarners, radars thermiques, etc.

Les facteurs biologiques

De tous les facteurs de formation des sols les facteurs biologiques sont les plus importants; on a même pu dire que sans vie il n'y avait pas de sol. De nombreux pédologues accordent aux facteurs biologiques une priorité absolue, car les êtres vivants apportent au milieu minéral, à travers des cycles biologiques complexes, deux éléments nouveaux fondamentaux : le *carbone organique* et l'*azote*. Les facteurs biologiques sont les animaux, les végétaux, les micro-organismes et l'homme. Les produits de leur activité, les résidus qu'ils ajoutent à la masse minérale, évoluent en donnant de l'*humus* et ses divers constituants (produits organiques hydrosolubles, acides fulviques, acides humiques et humine) en proportions dépendant des conditions de climat, de roche, de topographie, de végétation, qu'elle soit naturelle ou transformée par l'homme. Ces facteurs biologiques présentent donc un caractère de dépendance évident. Mais ce caractère de dépendance ne diminue en rien l'importance de leurs rôles dans la pédogenèse. Chacun des constituants organiques a, sur les matériaux du sol, une action particulière de stabilisation, d'entraînement, de désaturation, de dégradation, etc., qui conditionne fondamentalement les diverses expressions pédologiques.

Les **animaux** exercent une action encore mal connue mais qui, dans certains cas, peut être considérable. Ils provoquent des transports de matière, mélangeant les horizons et rendant le sol plus perméable à l'air et à l'eau. Les vers de terre, les termites et les fourmis jouent un rôle déterminant en la matière. C'est principalement en ingérant leurs aliments que ces animaux modifient les qualités du sol. Ils contribuent en particulier à la transformation de la matière organique, d'abord en la pulvérisant, puis en la mélangeant intimement à la matière minérale. La matière organique est ainsi souvent digérée par de petits animaux (Collemboles et autres animalcules de quelques dixièmes de millimètre de longueur) avant d'être transformée en humus. Dans certaines régions d'Afrique tropicale, on estime que la totalité des horizons organiques de surface transite à travers le tube digestif des termites tous les deux ans. Les excréments déposés soit en surface, soit dans le sol, modifient les propriétés physiques et chimiques. Les qualités structurales en particulier peuvent être améliorées. La structure granulaire de certains sols steppiques n'est en fait que le produit de déjections animales. Les quantités d'excréments pouvant être apportées à la surface de certains sols du Ghana ont été appréciées à 200 tonnes par hectare et par an. Ces déjections sont souvent enrichies en calcium, en acide phosphorique, d'où l'action non négligeable qu'elles ont sur la fertilité. C'est d'ailleurs un fait bien connu qu'un sol riche en vers de terre est généralement fertile. Les gros animaux eux-mêmes (marmottes, souris, taupes, etc.) jouent également un rôle certain dans la dispersion des constituants du sol en construisant tunnels et terriers. Les « crotovinas » des tchernozems sont caractéristiques à cet égard.

Le rôle de la **végétation** est beaucoup mieux connu. On peut admettre qu'elle agit en favorisant d'abord le microclimat du sol. Sous forêt, l'ambiance ombragée et humide favorise la conservation de l'humus. Lorsque la forêt est détruite, l'insolation accélère sa minéralisation et les teneurs en matière organique diminuent fortement. La végétation agit aussi par ses racines qui favorisent les conditions de circulation des eaux, ce qui facilite le lessivage des éléments colloïdaux. Dans les sols de pelouse à enracinement superficiel, le lessivage est moins accusé. De même, l'altération est plus profonde et plus rapide sous forêt que sous pelouse.

Mais la végétation agit surtout par l'humus qu'elle produit. Suivant les types de peuplements végétaux, les humus peuvent être très variés et, par suite, provoquent des actions différenciées sur les sols. Ainsi, l'humus de Légumineuses est riche en azote et à décomposition très rapide; celui des forêts de feuillus est moyennement acide et à décomposition assez rapide; celui des forêts de résineux ou de la lande est très acide et à décomposition lente.

Enfin, la végétation contrôle étroitement les possibilités et les modalités d'érosion et de remaniement du sol. Le rôle des forêts dans ce domaine est bien connu. La végétation agit aussi activement en récupérant dans le sol l'eau et les éléments minéraux qui lui permettent de se développer; ces derniers retournent au sol lors de la décomposition de la litière. Ce *cycle biogéochimique* des éléments minéraux est déterminant pour l'évolution du sol. Lent en régions tempérées, il est très rapide en zone tropicale humide.

L'action des **micro-organismes** est prépondérante dans l'évolution de la matière organique du sol. Ce sont essentiellement des hétérotrophes qui agissent par voie enzymatique sur l'ensemble des phénomènes de dégradation et de synthèse des produits organiques. Ces phénomènes sont favorisés par une humidité convenable, par l'aération du sol, la chaleur et la présence d'aliments. Ils sont au contraire réduits en l'absence d'oxygène, dans les milieux trop secs, par les faibles températures, l'absence d'éléments nutritifs et la présence de substances inhibitrices. Dans les podzols par exemple, la biodégradation de la matière organique est fortement ralentie par la présence dans la litière de composés hydrosolubles antimicrobiens. D'une façon générale, les micro-organismes sont les transformateurs de nombreuses substances chimiques et ils interviennent à ce titre dans le cycle d'éléments importants : azote, carbone, fer, soufre, etc. L'action de ces micro-organismes fait l'objet d'une science spéciale : la **microbiologie du sol.**

L'**homme**, par les modifications qu'il impose à la végétation, exerce une action puissante sur l'évolution du sol. Il agit essentiellement par la mise en culture. Sous l'influence du travail du sol, les horizons supérieurs des profils sont transformés; ils sont homogénéisés;

G. B. Lee

▲ Les gros animaux jouent un rôle certain dans la dispersion des constituants du sol en construisant tunnels et terriers; ici un exemple de crotovina creusé par un chien de prairie dans une steppe (Nebraska, U.S.A.).

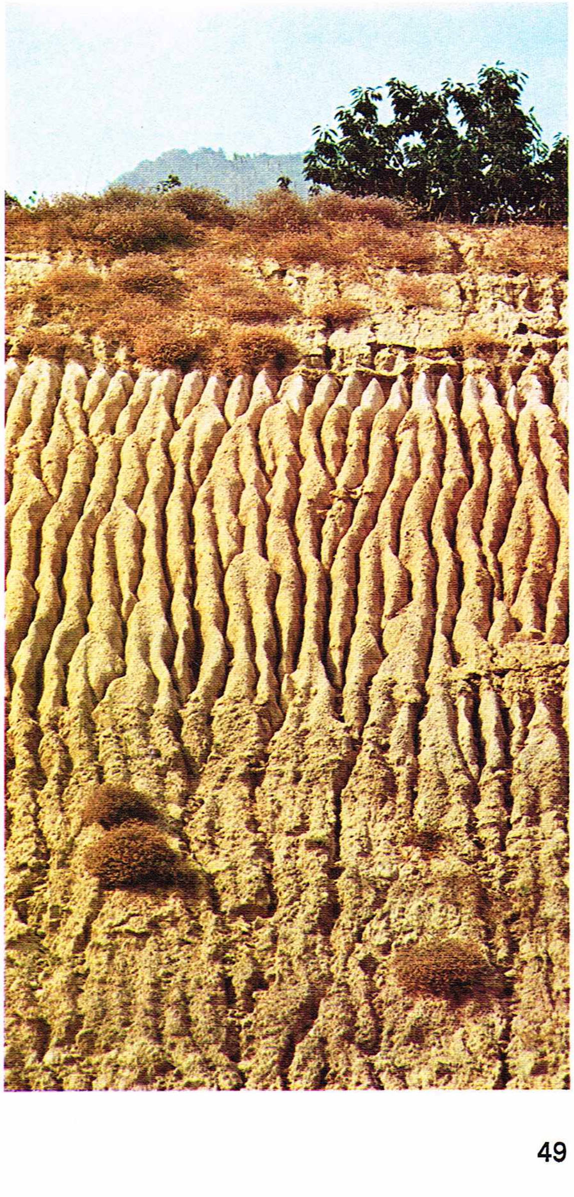

Paul Starosta

◀ La végétation contrôle étroitement les possibilités et les modalités d'érosion et de remaniement du sol; ici, ravinement intensif d'une pente non recouverte de végétation.

M. Pedone

▲ *L'homme, lorsqu'il agit par la mise en culture, exerce une action puissante sur l'évolution du sol; transformé, homogénéisé, l'horizon cultivé est désigné par le symbole* Ap (perturbé).

▼ *L'action des* différences de température *comme facteur d'altération des roches : une pierre éclatée au Sahara.*

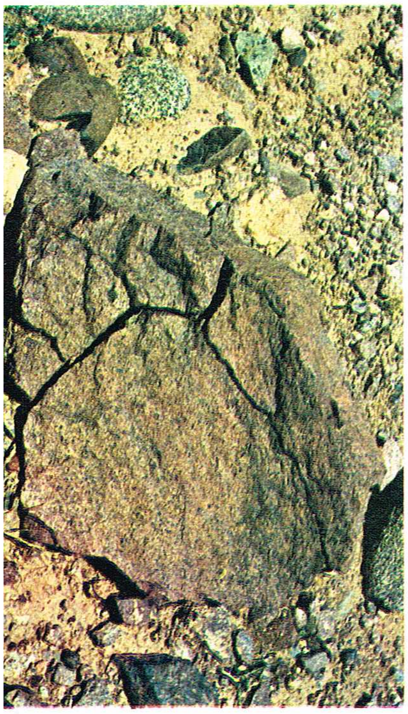

Paul Starosta

ces horizons cultivés sont désignés par le symbole Ap (perturbé). L'homme peut également modifier la nature et la topographie du sol par ses travaux : défoncements, constructions de banquettes, planages, assainissements, etc., et agir ainsi sur les mécanismes de l'érosion qu'il peut contrôler. Il peut aussi accumuler des résidus, au voisinage des agglomérations par exemple, transformer le milieu en apportant des amendements, du fumier, des engrais minéraux et améliorer la fertilité du sol. Mais si dans certains pays il sait rendre le sol plus productif, ailleurs, par contre, dans le bassin méditerranéen, dans les régions tropicales, il peut le dégrader rapidement, par acidification, érosion ou salinisation.

Pour un sol donné, il est impossible d'indiquer *a priori* quel est le facteur de formation le plus important. Chacun d'eux intervient avec des intensités différentes suivant les cas. Les rapports entre les cinq facteurs sont variables, mais la constance de leur intervention ne l'est pas. A des intensités et un rapport donnés correspond un sol spécifique. Ce fait détermine l'attitude du pédologue qui, dans l'étude du sol, ne doit jamais omettre celle de l'un quelconque des facteurs de l'environnement pédogénétique.

Les processus pédogénétiques

Sous l'action des facteurs du milieu se réalise une série de transformations qui aboutissent à la formation du sol. Trois ensembles de phénomènes contribuent à cette évolution : l'*altération des roches,* la *décomposition de la matière organique,* le *transfert* et *l'organisation des matériaux formés.* Ces phénomènes mettent en œuvre des mécanismes complexes, très dépendants les uns des autres. Ils ne sont pas successifs, mais simultanés; leurs effets s'additionnent et il est souvent difficile de les dissocier. Leurs interférences à différents niveaux définissent les grands types de sols.

Les minéraux des roches, tels qu'ils se trouvent à la surface de la Terre, se décomposent sous l'influence des agents atmosphériques et biotiques. Ces derniers, très actifs dans les horizons de surface, n'interviennent pratiquement plus lorsque le sol s'épaissit. Les processus de transformation de la roche primitive sont complexes et variés. On doit distinguer ceux qui provoquent la destruction des matériaux frais *(altération)* de ceux qui amènent la création des produits nouveaux *(néoformation).*

Altération des roches

Parmi les mécanismes de l'altération, on peut citer les **effets du gel et du dégel,** dont l'action sur la fragmentation des roches est très importante. L'eau pénètre dans les fissures et les pores; son augmentation de volume au cours du gel disjoint les cristaux et ébranle la structure. Les roches s'effritent. C'est le facteur principal de l'altération dans les pays froids et en haute montagne.

Les **différences de température** lorsqu'elles sont marquées ont un rôle certain. Au Sahara, des variations de 50 à 70 °C entre le jour et la nuit ne sont pas rares. Les variations sont aussi brutales lorsqu'une pluie tombe sur une roche exposée au soleil. Les roches ayant une faible conductibilité thermique, et celle-ci étant variable suivant les minéraux constitutifs, il en résulte des tensions entre le cœur et l'extérieur des blocs, ou entre les parties exposées et celles qui sont à l'abri : les pierres éclatent. Les variations de température de l'eau à l'intérieur des fentes de la roche provoquent aussi une certaine désagrégation parce que le coefficient de dilatation de l'eau est supérieur à celui des minéraux. La transformation par dessèchement des films d'eau en gouttelettes modifie également les tensions superficielles, ce qui disjoint les cristaux.

Les effets de l'**hydratation** des minéraux sont également bien connus. La cristallisation de l'anhydride en gypse s'accompagne d'une augmentation de volume et du développement d'une pression de 1 100 atmosphères. La croissance des cristaux peut ainsi développer des pressions importantes. Les chancres qui rongent les monuments publics sont les conséquences de ces effets. De la même manière, certaines roches sont plus sensibles que d'autres à l'eau de mer, ce qui interdit leur utilisation dans les ports.

La **dissolution** affecte surtout les matériaux à ciment ou à masse soluble (calcaire, gypse, évaporite). Dans le cas de nombreuses roches calcaires, le carbonate de calcium est dissous par les eaux du sol chargées en gaz carbonique qui transforme ce carbonate en bicarbonate plus soluble, suivant la réaction :

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \rightleftharpoons Ca(HCO_3)_2.$$

Sa disparition laisse un résidu qui constitue la majeure partie des constituants des sols sur roches calcaires. Des réactions comparables se réalisent pour les carbonates de magnésium ou de fer.

Les phénomènes d'**oxydation** et de **réduction,** en particulier du fer, contribuent très largement aussi à l'altération des roches. Dans celles-ci, surtout dans les silicates, le fer se trouve le plus souvent sous forme réduite Fe^{2+}. Au contact de l'air, il prend sa forme oxydée Fe^{3+} et l'équilibre du réseau cristallin est rompu. C'est un fait d'observation commune que les roches de couleur foncée, riches en minéraux ferromagnésiens, sont facilement altérables.

Cependant, le mécanisme chimique fondamental de l'altération est celui de la décomposition des cristaux par l'eau, ou **hydrolyse.** Il faut d'abord savoir que, dans la nature, aucun minéral n'est insoluble; certains sont très peu solubles, en particulier les silicates, mais mis en présence d'eau tous voient une partie de leurs ions constitutifs se déplacer de la surface cristalline vers le milieu aqueux. Dans la couche d'hydratation qui s'organise autour du cristal, les ions hydrogène de l'eau tendent à se lier aux ions oxygène du minéral. Les cations alcalins et alcalino-terreux (Na, Mg, Ca) sont libérés et migrent vers l'extérieur, où la concentration est faible. Le réseau cristallin se déforme au fur et à mesure que la réaction se poursuit. Cet échange est facilité par l'agitation thermique, donc l'élévation de la température, et par la circulation de l'eau qui exporte les éléments dissous. Les effets de « déchaussement » vis-à-vis des alcalins et des alcalino-terreux se poursuivent aussi vis-à-vis du silicium et de l'aluminium, mais beaucoup plus lentement, et la structure s'effondre. Le minéral est peu à peu pulvérisé. Il ne reste que des fragments extrêmement fins de la charpente silicatée primitive qui se comportent comme un gel. Avec le temps, ces édifices microscopiques passent à leur tour en solution, et la roche est complètement dissoute. L'altération de la roche par hydrolyse est liée à la fois aux conditions physico-chimiques du milieu ambiant et à la composition cristallographique des minéraux concernés.

La *température,* qui augmente l'agitation thermique, accélère les migrations dans les deux sens. Pour une élévation de température de 10 °C la dissociation de l'eau et la vitesse des réactions sont approximativement doublées. Il en résulte que des variations de 3 à 4 °C en milieu tropical ont autant d'effets que des variations de 10 °C dans les climats tempérés. Le *lessivage* renouvelle l'eau qui imprègne les cristaux et donc la sortie des cations libérés. Si, par contre, le drainage se bloque, la réaction s'arrête. De la même manière, la présence d'alcalins et d'alcalino-terreux dans la solution du sol gêne l'évacuation des ions libérés et même parfois la stoppe. Enfin, l'échange des cations avec les H^+ du milieu ambiant est facilité par l'*acidité* des solutions, qui peut être liée à la présence de gaz carbonique ou de grosses molécules minérales et surtout organiques. Le transport du fer pose un problème particulier. Il peut migrer en milieu très acide, mais cela correspond rarement aux conditions naturelles. Par contre, la matière organique est réductrice et aide au transport sous forme ferreuse. De plus, le fer donne aisément des complexes avec les anions organiques *(chélation)* ainsi qu'avec la silice; ces complexes sont solubles dans les conditions physico-chimiques du sol.

En additionnant ces effets, on a pu calculer qu'entre un pays tempéré à température annuelle de 10 °C (la région parisienne par exemple) et un pays tropical humide à température moyenne annuelle de 30 °C (la Côte-d'Ivoire par exemple), les vitesses de décomposition des roches étaient multipliées au moins par 200. On comprend que les pays tropicaux sont d'abord, sur le plan pédologique, des pays d'altération chimique.

Tous les minéraux ne s'altèrent pas avec la même rapidité. Cette altération est essentiellement fonction de leur constitution minéralogique. Leur vulnérabilité est d'abord liée à la présence dans le réseau cristallin d'alcalins et d'alcalino-terreux ainsi que de fer et de manganèse : par exemple, les roches basiques (basaltes, péridotites, gabbros, etc.) sont toujours plus profondément altérées que les roches acides (granites, quartzites, etc.). Elle est aussi fonction de l'abondance des liaisons Si—O—Al, plus fragiles que les liaisons Si—O—Si. D'autre part, les polyèdres de coordination qui constituent les silicates sont d'autant plus stables que leur nombre de sommets est plus faible. Ainsi, les tétraèdres sont les polyèdres les plus stables, et, plus ils sont nombreux, plus la structure est résistante. C'est le cas du quartz, constitué d'un assemblage de tétraèdres de silice (SiO_2); il est aussi l'un des minéraux les plus résistants du sol.

Sous l'effet des hydrolyses, une partie importante de matière se trouve solubilisée. Les éléments dissous peuvent être lessivés et disparaître totalement avec les eaux de drainage. Mais le plus souvent, du fait de la solubilité différentielle des constituants, ceux-ci sont éliminés plus ou moins rapidement.

Certains éléments s'accumulent par dépôt des plus solubles : c'est une *accumulation relative*. Ces éléments peuvent aussi se recombiner entre eux, en proportions variables, pour donner des minéraux nouveaux : c'est la *néoformation*. Hydrolyses et néoformations transforment radicalement la structure de départ. Elles sont caractéristiques des milieux tropicaux humides. Sous climat tempéré, les conditions sont moins agressives et plus nuancées. La transformation des minéraux est plus lente et plus ménagée. La structure initiale se conserve partiellement; seule une faible fraction est dissoute et donne lieu à un lessivage. Qu'ils soient de néoformation ou de transformation, les minéraux nouveaux ont une structure en feuillets caractéristique; ce sont les argiles (minéraux phylliteux) du sol au sens minéralogique. La transformation d'un minéral en argile varie par son intensité et son degré. Si elle est très faible, il y a *héritage*. Si elle est progressive, deux cas peuvent se présenter : s'il y a perte d'éléments, c'est une *dégradation;* au contraire, s'il y a une addition d'éléments, c'est une *agradation*. Enfin, si elle est complète, suivie d'une synthèse, il s'agit d'une *néoformation*.

La nature des argiles néoformées est fonction de la vitesse de circulation des eaux de percolation et de la concentration en ions divers, calcium et magnésium surtout. En milieu vigoureusement lessivé, donc acide, la silice est exportée; l'aluminium et le fer restent seuls et cristallisent. C'est le phénomène de l'*allitisation*. Si le lessivage est plus modéré, la silice présente en solution s'associe à l'aluminium pour donner de la kaolinite ($SiO_2/Al_2O_3 = 2$). C'est la *monosiallitisation*. En milieu encore moins lessivé, les cations subsistent et la silice est aussi plus abondante. Il y a formation de montmorillonite ($SiO_2/Al_2O_3 > 2$). C'est la *bisiallitisation*. Quant à la quantité d'argiles formée, elle dépend surtout de l'intensité des hydrolyses et de la constitution minéralogique des roches.

Sous des climats chauds et humides et sur les roches alumino-silicatées équilibrées, les néoformations d'argiles sont importantes. Sous climats froids, elles sont stoppées. Sous les climats tempérés, prédominent les transformations ménagées. C'est le processus normal d'évolution des minéraux phylliteux types micas, dont le schéma structural est très proche de celui des argiles.

Du fait de leur structure cristalline (tectosilicates), les feldspaths en revanche sont moins sensibles. Ils peuvent cependant donner naissance à des séricites (phyllosilicates) par rétromorphose. En milieu faiblement acide, la biotite (mica noir) se transforme facilement en illite ou en vermiculite par élimination du potassium, du magnésium et du fer. A un stade plus poussé, l'alumine est aussi progressivement lessivée et l'on passe à une montmorillonite mal cristallisée, souvent interstratifiée. Celle-ci peut à son tour, quand le milieu devient très acide, se détruire avec libération et lessivage des constituants. Le schéma est le suivant :

biotite → illite → vermiculite → montmorillonite → éléments solubilisés ou amorphes.

En résumé, deux grands types d'altération peuvent être opposés :

— une *altération à caractère physique dominant.* Il y a désagrégation des roches qui livrent un matériau détritique non transformé, caractéristique des climats froids et des climats secs; l'hydrolyse est paralysée;

quartz
muscovite
feldspaths potassiques
biotite — plagioclases Na
hornblende — plagioclases Na Ca
augite — plagioclases Ca Na
olivine — plagioclases Ca

La nature de ces matériaux règle les possibilités d'altération des roches.

◄ ***Tableau représentatif de l'ordre croissant de vulnérabilité (en partant du quartz) des minéraux, établi par Goldich.***

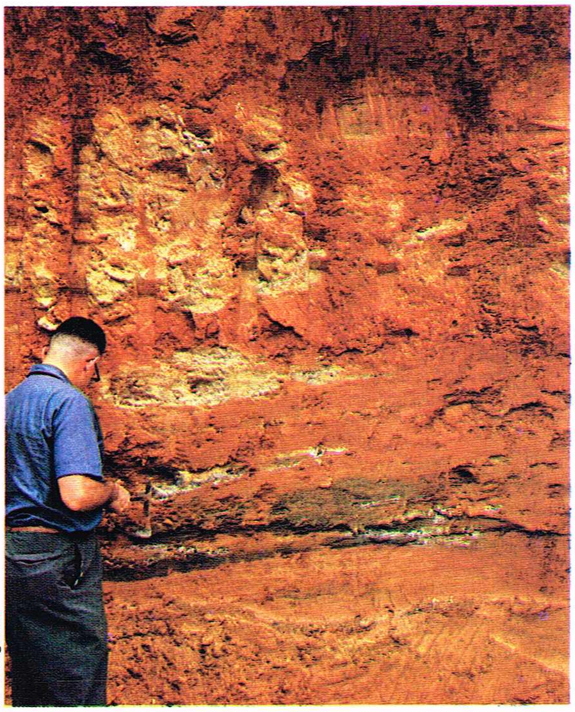

R. Maignien

◄ ***Un exemple d'altération par* hydrolyse *profonde de gneiss, à Yaoundé (Cameroun).***

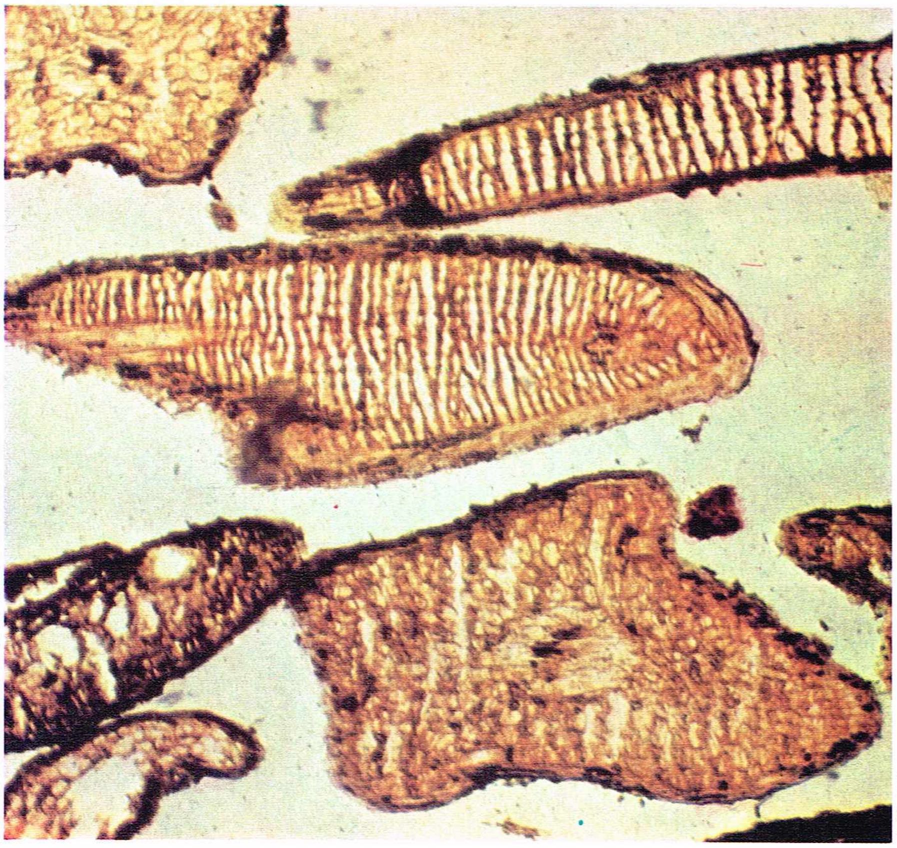

J. Boyer

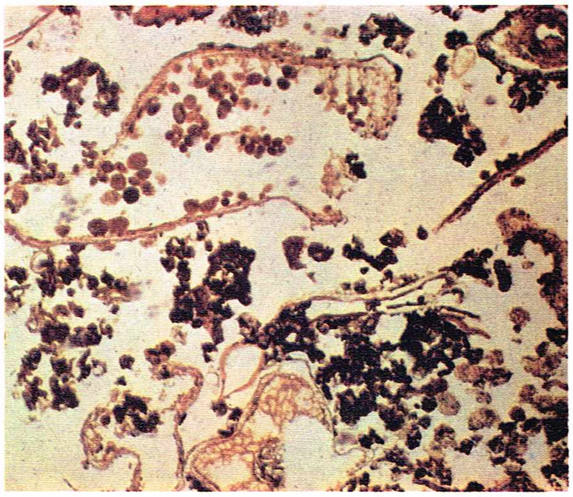

J. Boyer

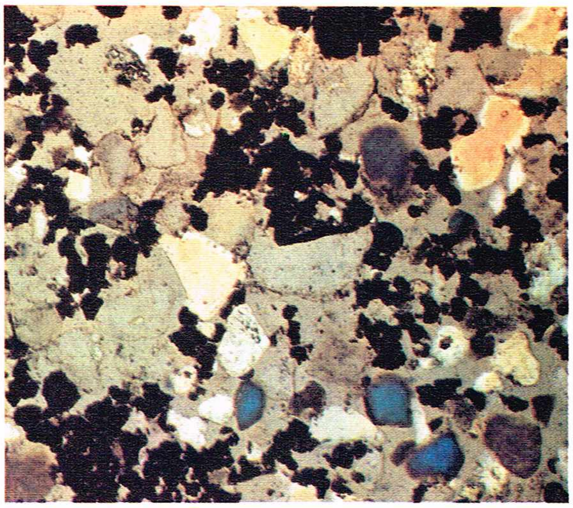

J. Boyer

▲▶ *Ces trois illustrations montrent les différentes étapes de formation d'un humus formé en aérobiose : le* moder *(sous sapins de Douglas). En haut, horizon A_0 : les aiguilles de* Pseudotsuga, *attaquées par des Champignons (ouverture cuticule) et des Bactéries, constituent la litière (on observe les bordures noires d'humidification). Ci-contre, en haut, horizon A_0 subdivisé en F (fermentation) : boulettes fécales d'Acariens (en jaune) et agglomérats noirs de ces boulettes après digestion par les larves de Diptères et d'Enchytridae. Ci-contre, en bas, horizon A_1 : des agglomérats de boulettes fécales (leur forme primitive est parfois visible) commencent à se dégrader.*

— une *altération à caractère chimique dominant,* discrète en pays tempérés, mais qui devient la règle en régions tropicales et subtropicales humides; elle produit des dissolutions, des transformations et des néoformations.

Au terme de son évolution, l'altération des roches livre à la pédogenèse :

— des matériaux résiduels, fragments non modifiés de la roche primitive;

— des silicates transformés, produits de l'altération des phyllites originelles, vermiculite, interstratifiés;

— des produits colloïdaux, dits amorphes, mais qui sont des morceaux très fins de charpentes de silicates et d'hydroxydes;

— des phyllites de néoformation : illite, chlorite, kaolinite, montmorillonite, etc.;

— des éléments en solution : Si, Al, Fe, Mg, Ca, K, Na, dont les proportions sont variables suivant les climats.

Les processus d'altération des roches et les produits qui en résultent sont rarement indépendants des **actions biologiques.** Très tôt, on assiste à une colonisation rapide des matériaux minéraux. Ce sont d'abord des organismes inférieurs, Bactéries, Champignons, Algues, Lichens qui introduisent un élément nouveau pris à l'atmosphère, l'azote, et qui synthétisent des chaînes carbonées organiques plus ou moins complexes. Les organismes supérieurs peuvent alors se développer. Il se constitue une flore et une faune du sol, qui contribuent puissamment à la pédogenèse. Par exemple, la vitesse d'altération des roches peut être multipliée par 10 à 100 en présence d'activité biologique (force des racines qui font éclater les roches, action dissolvante de leurs oxydats, etc.).

Décomposition de la matière organique

L'action biologique principale est liée surtout à la matière organique résiduelle d'origine végétale et aux micro-organismes qui s'en nourrissent. Tous les sols contiennent dans leurs horizons supérieurs de la matière organique plus ou moins transformée, dont la quantité, la qualité et la répartition le long des profils varient considérablement d'un sol à l'autre.

Les sources de matière organique sont d'origine aérienne (les tiges, les feuilles et les fruits qui tombent à la surface et constituent la litière) et souterraine (les racines). Les proportions de ces apports varient sensiblement suivant la végétation, les différences les plus marquées s'établissant entre les formations herbacées et les formations arborescentes. On a estimé que la masse végétale de la forêt est constituée pour 20 à 30 % de racines, alors que ces dernières représentent 50 % des formations herbacées. Sous forêt, l'apport au sol se fait principalement par la surface; sous nos climats tempérés, il est de 2,7 t/ha/an pour une forêt de feuillus, de 4,1 pour une pinède, de 6 pour une sapinière. En forêt équatoriale ombrophile, il atteint et dépasse 10 t/ha/an. Sous peuplement herbacé, l'apport principal se fait par les racines dans la masse même du sol; dans les steppes russes, il est de 5 à 20 t/ha/an.

La matière organique qui retourne au sol se transforme plus ou moins rapidement suivant sa nature et les caractéristiques physico-chimiques du milieu : une partie se *minéralise* en libérant du gaz carbonique, de l'ammoniaque, des nitrates, etc.; une autre se transforme en complexes colloïdaux, relativement stables et résistants à l'action microbienne, les *composés humiques.* La rapidité de cette minéralisation et de cette humification est variable; une feuille de frêne se décompose en moins d'une année; une aiguille de pin peut mettre plus de dix ans pour disparaître. Cette évolution est le fait surtout de micro-organismes. La faune, elle, joue plutôt par son action mécanique; elle pulvérise les débris organiques et les mélange à la matière minérale en les ingérant et en les rejetant. Elle tend aussi à homogénéiser le milieu par des remontées biologiques et, de la sorte, à freiner la différenciation en horizons. L'action des vers de terre et des termites est à cet égard remarquable; on a mesuré, par exemple, que pour certains pays tropicaux, ces remontées peuvent dépasser 400 t/ha/an.

La formation de l'humus comporte deux phases. La première est une phase rapide et courte résultant de l'action principale des micro-organismes et de leurs enzymes : c'est la phase de *décomposition initiale.* Les composés solubles des substances végétales (les sucres, les peptides, les acides phénoliques) sont lessivés,

pénètrent les horizons minéraux en profondeur et se dégradent plus ou moins rapidement. Les composés insolubles (la cellulose, la lignine) évoluent plus lentement; ils forment la litière du sol, qui va disparaître à son tour en se mélangeant plus ou moins intimement aux minéraux, en donnant des types spécifiques d'humus. Ces humus vont alors subir la seconde phase, dite *phase de maturation,* de durée beaucoup plus longue, liée essentiellement aux conditions climatiques et, plus particulièrement, aux contrastes saisonniers humidité/sécheresse, froid/chaleur.

Suivant le régime hydrique des sols, on distingue deux types d'humus : les humus formés en aérobiose et ceux, hydromorphes, formés en anaérobiose.

Les *humus formés en aérobiose* sont :

— le *mor.* Ici, l'horizon A_0 est net et épais; il résulte d'une transformation très ralentie des débris végétaux par l'action dominante de Champignons; l'incorporation de la matière organique à la matière minérale est nulle. C'est l'*humus brut* des forêts à sols très acides;

— le *moder.* La séparation entre A_0 et A_1 est peu nette; la transformation biologique, qui est forte, se fait principalement sous l'action d'Arthropodes, associés à des Champignons et des Bactéries. Il n'y a pas association d'argile et d'humus, mais juxtaposition de micro-agrégats organiques aux particules minérales. C'est l'*humus des sols lessivés acides;*

— le *mull.* Il n'y a pas d'horizon A_0; l'humus est incorporé intimement à la matière minérale, avec laquelle il forme des *complexes argilo-humiques.* La transformation biologique est forte; elle est le fait des lombrics associés aux Bactéries. C'est l'*humus doux* des sols bien structurés et aérés.

Les *humus formés en anaérobiose* sont de deux types principaux :

— la *tourbe,* dont la structure fibreuse est due à une transformation biochimique faible; l'incorporation de la matière minérale est pratiquement nulle. C'est la matière organique des sols saturés par l'eau en permanence;

— l'*anmoor,* mélange intime de matière organique très humifiée et d'argile, dû à une transformation biochimique forte; mais la structure est massive; la couleur est noire et l'horizon très collant. C'est l'humus des sols engorgés temporairement en surface et à gley de profondeur.

▲ ***La tourbe,** humus formé en anaérobiose, a une structure fibreuse due à une transformation biochimique faible; ici une tourbière alpine dans les Alpes orientales.*

▼ ***Lame mince d'un mull** (Hollande du Sud) effectuée au niveau de l'horizon A_1 : on observe un mélange intime du plasma et des matières organiques (la transformation accélérée est due aux vers de terre).*

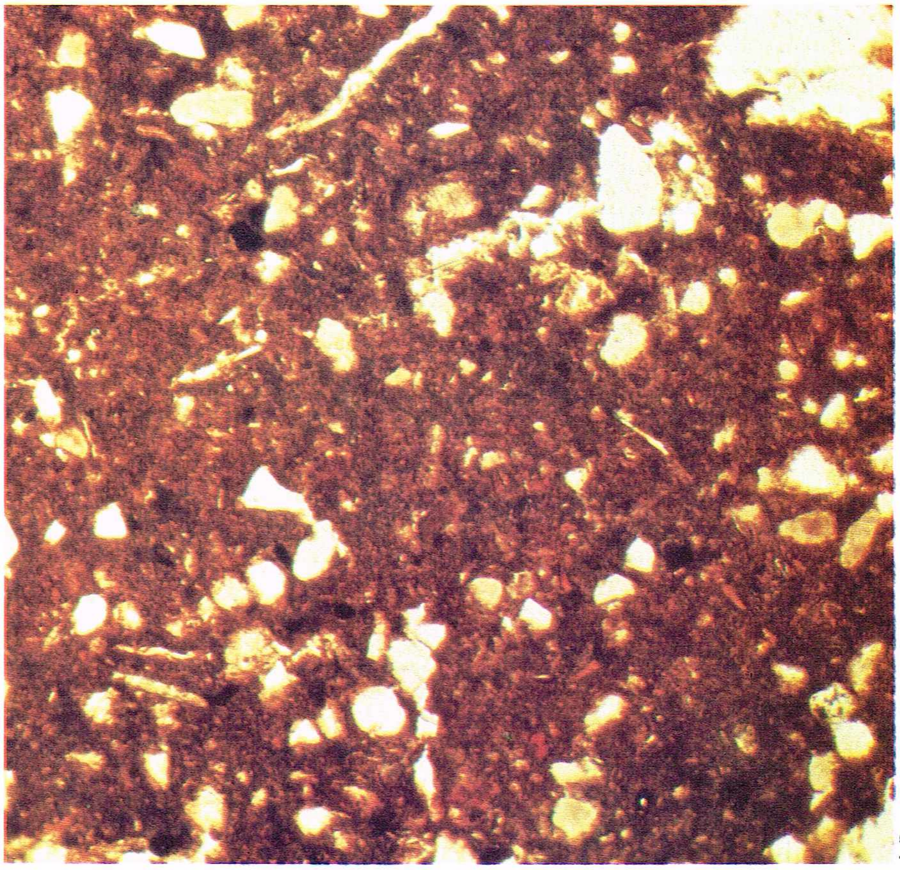

La matière organique conditionne par son évolution un certain *cycle biologique* des éléments nutritifs. Ce cycle est plus ou moins rapide. Il est rapide lorsque les conditions sont favorables à l'activité biologique : la litière disparaît très vite en libérant des quantités importantes d'éléments nutritifs, et une partie seulement donne de l'humus de type mull. Par contre, quand les conditions sont défavorables, le cycle est lent : une couche épaisse de débris organiques noirâtres incomplètement transformés s'accumule à la surface du sol; les éléments nutritifs sont bloqués dans cette litière et libérés très progressivement; l'humus est de type mor.

C'est la *phase rapide d'évolution biologique* qui oriente l'humification vers l'un des types fondamentaux. Cette phase est conditionnée d'abord par la nature de la matière végétale : ainsi, le frêne, l'aune, le robinier, les Graminées, les Légumineuses sont des espèces dites *améliorantes,* génératrices de mull, alors que les résineux, les fougères, les bruyères sont dites *acidifiantes* et favorisent la formation du mor. Cette phase est également favorisée par l'aération du milieu, la présence de calcaire actif, celle de fer et d'argiles en quantités suffisantes mais sans excès.

La *phase de maturation* donne des résultats variés suivant les conditions du climat. Quand les saisons sont contrastées (climats continentaux, tropicaux), il y a polymérisation des noyaux organiques élémentaires et il se forme des *humus gris* très résistants à grosses molécules, qui sont caractéristiques des sols isohumiques. Quand les saisons sont peu tranchées, fraîches et humides, en climat atlantique par exemple, il se forme préférentiellement des *acides fulviques* à petites molécules très mobiles et acidifiantes, qui sont caractéristiques des sols lessivés ou dégradés. Cependant, la maturation dépend aussi de la présence de certains stabilisateurs minéraux. Ainsi, les allophanes et le calcaire actif peuvent bloquer la minéralisation des composés humiques et provoquer leur accumulation dans le profil (andosols, rendzines noires). Il en est partiellement de même pour certaines argiles gonflantes, type montmorillonite, comme dans les vertisols.

Les composés humifères peuvent se combiner facilement à certains minéraux du sol, aux argiles, au fer, à l'aluminium, etc., pour donner des complexes organo-minéraux variés. Ceux-ci sont très différents suivant que les sols sont peu acides, aérés, à forte activité biologique ou, au contraire, très acides ou mal aérés, à activité biologique faible. Dans les premiers, les sols à mull, l'humus et l'argile se combinent, par l'intermédiaire de ponts calcium et de fer en proportions variées suivant les types, pour donner un complexe insoluble, souvent floculé et rassemblé en agrégats plus ou moins gros : c'est le *complexe argilo-humique*. Dans les seconds, sols à moder ou à mor, les composés organiques peu polymérisés forment avec les bases, le fer, l'aluminium, des complexes pseudo-solubles qui migrent facilement. Lorsqu'il existe des complexes argilo-humiques, les liens cationiques sont éliminés par ce processus; l'argile est libérée de ses agrégats et peut se déplacer; la structure se dégrade, le milieu se tasse. Ces complexes organo-minéraux jouent un rôle capital dans la formation et la différenciation des sols. Ils peuvent bloquer sur place certains éléments qui s'accumulent ou, au contraire, faciliter le départ de certains autres, contribuant ainsi à la formation des horizons. Ils conditionnent en grande partie les possibilités d'organisation de la matière altérée.

Transfert des matériaux formés

La décomposition minérale et organique conduit à la formation de composés plus ou moins solubles qui vont pouvoir se déplacer. Dans le manteau d'altération les mouvements de l'eau, liés à la fois aux lois de la gravité et à celles de l'évaporation, entraînent ces éléments et provoquent d'abord une perte de matière. Les niveaux altérés deviennent poreux. Ils peuvent alors servir de milieu de transit ou de milieu de réception pour les matériaux venant d'ailleurs. Ils peuvent aussi s'effondrer sous leur propre poids et former des assemblages plus compacts, partiellement cisaillés. La matière en circulation conduit ainsi à une différenciation de niveaux de caractères variés (les horizons) aussi bien dans le plan vertical que latéral; cette différenciation définit le sol. Certains horizons perdent de leurs constituants et sont creux : ce sont les *horizons éluviaux,* encore appelés *lessivés.* D'autres gagnent de la matière par des apports exotiques qui bourrent les cavités; ils sont plus ou moins compacts et colmatés : ce sont les *horizons illuviaux,* ou *horizons d'accumulation.* D'autres, enfin, sont remaniés dans leur masse par des mouvements divers qui mélangent horizons et constituants : ce sont les *horizons perturbés.*

Les processus qui contribuent à cette distribution sont variés. Ce sont successivement :

— les *mouvements des éléments en solution ou en pseudo-solution* qui sont étroitement dépendants du régime hydrique des sols;

— les *mouvements de matières sous forme figurée,* d'abord les plus fines, en particulier les argiles, mais parfois aussi les limons et les sables (on parle alors de *lessivage*), des constituants de taille de plus en plus grosse, les graviers, les cailloux, tous très sensibles aussi aux mouvements de l'eau, mais tendant également à descendre sous l'action de leur propre poids (on parle alors d'*érosion,* de *remaniement,* de *colluvionnement*) ;

— les *mouvements internes de convexion,* liés aux propriétés qu'ont certaines argiles de se gonfler fortement à l'eau et de se rétracter vigoureusement à l'état sec (les horizons profonds plus humides et plus plastiques voient l'ensemble de leurs constituants menés en surface par les fentes qui se ferment en coins). De tels mouvements peuvent dépendre aussi, dans les régions froides du globe, de la présence d'un niveau gelé en profondeur : le *permafrost;*

— enfin, les *remontées mécaniques d'origine biologique,* qui tendent à homogénéiser et ameublir les horizons de surface.

Sur un plan très général, on constate que la différenciation des horizons est étroitement dépendante des processus de lessivage. En revanche, l'érosion, le remaniement, le colluvionnement, la convection et les remontées biologiques tendent à effacer les traits pédologiques majeurs que sont les horizons.

Les transports par **dissolution,** ou **soluviation,** intéressent principalement les sulfates, les chlorures et les carbonates.

Les chlorures du sol, en particulier, sont très solubles, ainsi que les sulfates, mais à un degré moindre. Dans les régions humides et bien drainées, ils sont complètement évacués des profils. Mais en zones arides et dans les bas-fonds mal drainés, ils s'accumulent et peuvent précipiter et cristalliser à des niveaux variés quand les solutions salines sont concentrées par évaporation. Si l'immobilisation a lieu en surface, il se forme des *efflorescences* blanches ou jaunâtres qui constituent un horizon plus ou moins épais. Cependant, les sels peuvent aussi imprégner la masse du sol pour donner des accumulations diffuses; ils peuvent également former des traînées filiformes, des *pseudomycéliums,* ou des *amas* de petits cristaux. Les *encroûtements* des sols du sud de la Tunisie et de l'Algérie par le gypse relèvent de processus comparables.

Le devenir des carbonates de calcium et de magnésium du sol est également très dépendant des mécanismes de dissolution. La solubilité de CO_3Ca, qui n'est que de 10-15 mg/l, augmente considérablement en présence de gaz carbonique, et l'on peut rappeler que dans les sols les tensions en CO_2 sont plus de 100 fois supérieures à celles de l'atmosphère. Ainsi, un litre d'eau chargé d'anhydride carbonique peut dissoudre 10 g de carbonate de calcium et 13 g de carbonate de magnésium. La solubilité du calcaire augmente très peu avec la température, alors que la tension en CO_2 diminue fortement. Il en résulte que les eaux fraîches dissolvent lentement plus de calcaire que les eaux chaudes, mais celles-ci le dissolvent plus vite. La durée d'imprégnation de la roche par de l'eau chargée en CO_2 est donc un facteur très important de cette évolution. Sous climat tempéré, la *décarbonatation* est progressive; elle est plus brutale en climat méditerranéen, où les contacts sol décarbonaté-roche sont bien soulignés.

Les carbonates entraînés par les eaux peuvent s'accumuler, mais la précipitation ne se réalise que dans les sols où les solutions sont très concentrées (climat aride), ou quand ces solutions rencontrent des conditions physico-chimiques qui favorisent leur précipitation : horizon profond plus chaud en hiver que les horizons de surface, horizon plus riche en sulfates, etc. Il s'agit alors de phé-

F. Mancini - G. Sanesi - G. Ferrari

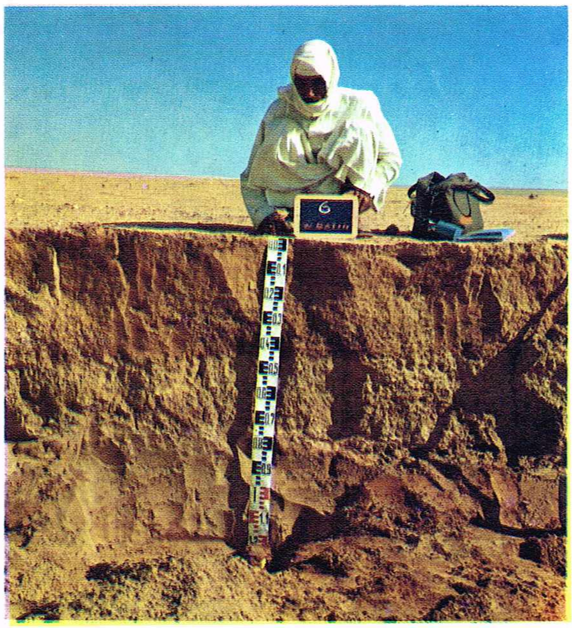

I.G.D.A

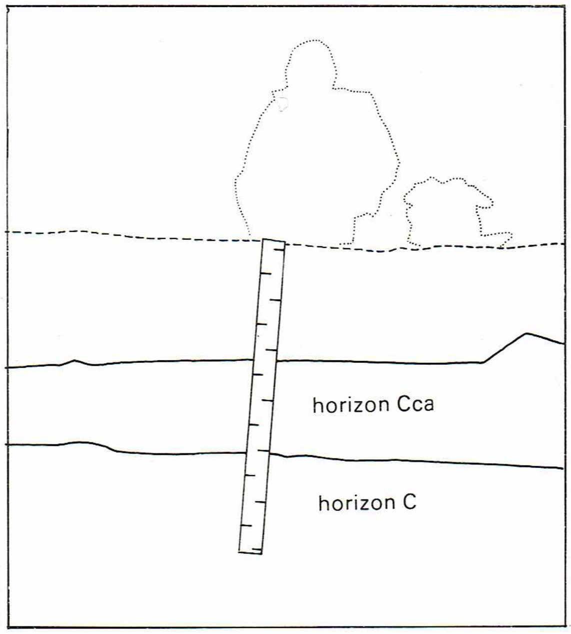

◀ *Les* **horizons d'accumulation** *de carbonate de calcium sont fréquents dans les sols des régions à climats à saison sèche marquée : ici, un horizon C avec accumulation de carbonates et de sels* **(Cca)** *en Arabie.*

nomènes toujours beaucoup plus lents que ceux de la dissolution. Les accumulations sont fréquentes dans les sols des régions à climats à saison sèche marquée : climat méditerranéen, climats continentaux de steppes, franges désertiques, etc. Elles peuvent y atteindre des épaisseurs importantes, allant de quelques décimètres à plus d'un mètre, et les migrations obliques ont un rôle important dans leur formation. Ces dépôts peuvent prendre des aspects variés : cristallisation de calcite dans les cavités du sol, pseudomycélium, amas plus ou moins friables et diffus, nodules, croûtes plus ou moins durcies, parfois même de véritables dalles très dures qu'il faut faire sauter à la dynamite quand on veut utiliser le sol à des fins agricoles. Les teneurs en carbonates, variables, sont fonction des processus mis en cause ; elles peuvent parfois atteindre des valeurs très élevées, proches de 100 %. L'estimation de la charge en carbonate s'effectue sur le terrain en traitant un échantillon par de l'acide chlorhydrique dilué (1/3) ; c'est le test d'effervescence. La quantité de carbonates est déterminée par l'importance du foisonnement. La décarbonatation des sols est un processus majeur de leur évolution. Les hydroxydes de fer et aussi de manganèse peuvent également subir les effets de la soluviation. Les hydroxydes ferriques précipitent à une acidité très basse (pH proche de 2) ; par contre, l'ion ferreux peut rester solubilisé jusqu'à pH = 6,2. Ainsi, quand les conditions du milieu sol sont très réductrices, le fer peut exister à l'état réduit là où le fer ferrique précipite. Pour l'alumine, cette valeur critique se situe à pH = 5,0.

Mais certains composés organiques, et parfois aussi minéraux (acides siliciques), offrent la propriété importante de former avec les cations lourds Fe^{++}, Fe^{+++}, Mn^{++}, Al^{+++}, etc., des complexes pseudosolubles de type chélate susceptibles de migrer dans les sols. C'est la **chéluviation.** Ainsi, le fer est facilement mobilisé en milieu acide, réducteur et riche en matière organique peu polymérisée. Inversement, la précipitation du fer complexé au cours de la migration peut être provoquée par une élévation du pH en profondeur ou par l'oxydation ou la destruction des chélates par la vie microbienne. Cette succession de phase de mobilisation et d'immobilisation peut se réaliser le long d'un profil, le fer étant lessivé des horizons de surface et s'accumulant en profondeur. Elle peut se réaliser aussi entre les sols qui se distribuent le long d'une pente ; les sols de l'amont sont appauvris en fer alors que ceux à l'aval en sont enrichis. Parfois, par vieillissement, les formes évoluent vers une plus grande cristallisation, et il se forme des concrétions, des cuirasses plus ou moins indurées. Ainsi, dans les climats tropicaux, les hydroxydes de fer envahissent des formes basses du relief pour donner naissance aux *latérites.* Cette succession peut se réaliser aussi en cours d'année dans un même horizon. En saison humide, l'anaérobiose favorise la formation de substances organiques complexantes en même temps que la réduction du fer ; il y a mobilisation. En période sèche, le manque d'eau provoque l'oxydation, la remontée du pH par concentration des solutions salines et le ralentissement de l'activité biologique ; la précipitation intervient.

C'est dans les sols qui présentent certains de leurs horizons engorgés par l'eau, dits *horizons hydromorphes,* que ces processus sont les plus marqués. Lorsque la saturation par l'eau est prolongée, la réduction l'emporte sur l'oxydation, le fer est réduit, et l'horizon est caractérisé par des teintes gris verdâtre à bleuâtre : c'est un *gley.* Quand l'hydromorphie est périodique, il se produit des alternances d'oxydation et de réduction ; le fer se redistribue sur place, et forme des taches ocre rouille (oxydées) et blanchâtres (réduites) : c'est un *pseudo-gley.*

Le **lessivage** concerne l'entraînement mécanique de l'argile et des éléments qui lui sont liés. Pendant ce transfert, il n'y a aucune transformation chimique. A l'origine, on supposait que le lessivage concernait uniquement des mouvements verticaux de haut en bas. On sait aujourd'hui que les entraînements latéraux sont

▼ *A gauche, en nicols parallèles, et, à droite, en nicols croisés, lames minces d'un* **horizon A_2** *de sol lessivé ; au centre, sur le schéma, on observe une grande quantité de squelette* **(s)** *transparent par rapport au plasma* **(p)** *plus opaque. Ce dernier est constitué de cristaux de petites dimensions, de matière organique humifiée et de composés non cristallins, montrant tous de nettes propriétés colloïdales et capables de se mouvoir, de se réorganiser et de se concentrer dans le profil. La présence de granules qui saillent dans la cavité des pores* **(c)** *est caractéristique des* **horizons éluviaux.**

F. Mancini - G. Sanesi - G. Ferrari

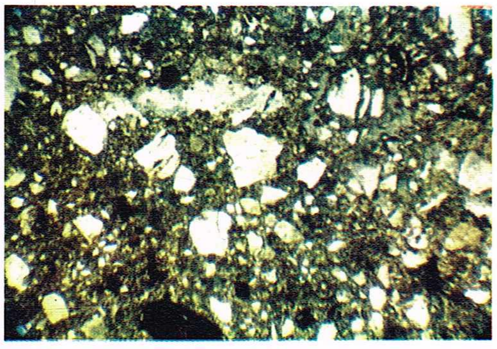

I.G.D.A.

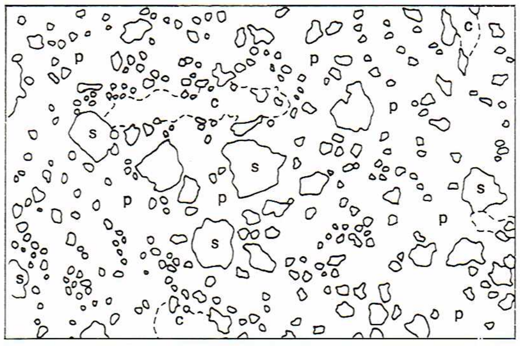

F. Mancini - G. Sanesi - G. Ferrari

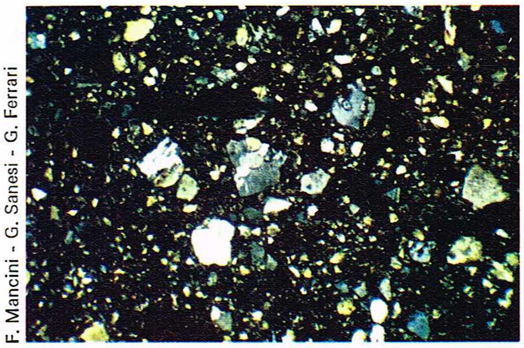

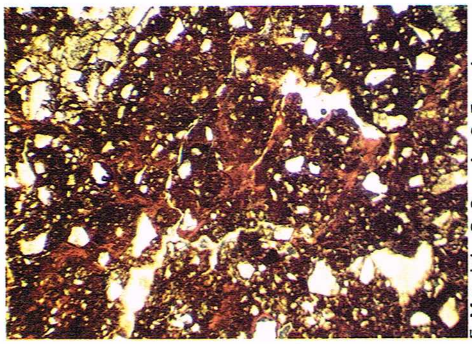

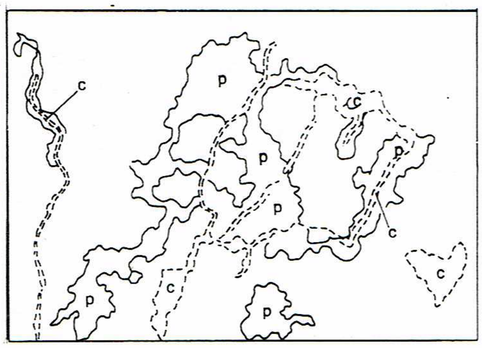

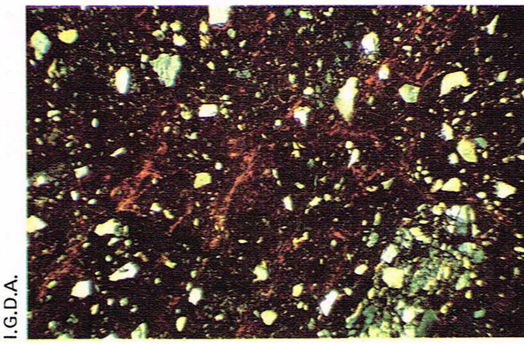

F. Mancini - G. Sanesi - G. Ferrari — I.G.D.A. — F. Mancini - G. Sanesi - G. Ferrari

▲ *Lames minces d'un* **horizon Bt** *de sol lessivé (à gauche, en nicols parallèles; à droite, en nicols croisés). On observe une quantité de plasma plus élevée et d'origine* **illuviale** *(orientation des particules). Le schéma, au centre, permet de déterminer la part du plasma* (p) *et de voir son association, étroite, aux pores* (c). *Il s'agit d'un plasma formé en place (horizon* B *d'altération) et donnant des revêtements à molécules orientées.*

aussi importants et qu'ils intéressent également les limons et les sables fins. Les migrations s'effectuent le long des fentes et des pores du sol, sous l'effet combiné de l'eau et de la pesanteur. Les horizons de surface s'allègent de leurs constituants les plus fins et leur texture est plus grossière. Les matériaux entraînés migrent en profondeur, où ils se font généralement piéger. Ils constituent un horizon plus argileux, appelé aussi B argilique, ou Bt (de l'allemand *Ton* = argile). L'étude microscopique de ces horizons d'accumulation montre que la matière en mouvement se dépose à la périphérie des unités structurales en formant des revêtements plus ou moins épais, à molécules orientées : ce sont les *argilanes* lorsqu'elles sont constituées uniquement d'argile, les *ferri-argilanes* si l'argile et le fer sont liés. On distingue également des *ferranes* (revêtements de fer), des *manganes* (revêtements de manganèse), etc. L'étude de ces revêtements, ou *cutanes,* leur nature, leur constitution et leur position, leur succession par rapport au squelette du sol renseignent sur l'histoire du lessivage, des accumulations et des remaniements éventuels (les revêtements sont alors brisés).

Les limons et les sables fins sont libres, sans charge chimique. Ils sont entraînés par l'eau par simple turbidité et tombent en profondeur à l'occasion d'un vide; ils sont arrêtés lorsque la porosité est faible ou nulle. Les argiles peuvent aussi migrer par simple gravité, mais elles sont le plus souvent assemblées en agrégats et ont besoin pour se déplacer d'être mises en suspension. Cela suppose des conditions physico-chimiques favorables, en particulier la désaturation plus ou moins poussée du complexe absorbant. Cette désaturation se fait par acidification, les ions Ca^{++} floculants étant chassés par les ions H^{+} dispersants. Il y a destruction des agrégats, et la structure s'effondre. Les conditions inverses provoquent l'immobilisation et donc l'accumulation, d'où la présence d'un niveau plus saturé en profondeur. Si le fer est lié à l'argile, il migre avec elle. Ces migrations ont lieu dans les sols neutres et acides des pays tempérés. Elles sont absentes des sols calcaires. Pour qu'elles apparaissent, il faut qu'il y ait décarbonatation totale. Le lessivage est un phénomène lent qui demande plusieurs milliers d'années pour se réaliser, surtout en sols peu acides. Lorsque l'acidité augmente, la dégradation de la structure amène une diminution de l'aération et le fer tend à être complexé par des composés organiques. Les liens entre l'argile et la matière organique sont détruits; le fer et l'argile migrent rapidement et séparément, et se déposent de même en profondeur. Le fer ainsi individualisé forme les taches et les traînées colorées caractéristiques de la *marmorisation.*

▶ *Particularité d'un pore d'un* **horizon Bt** *de* **sol lessivé** *: on observe que les migrations* **illuviales** (p) *sont particulièrement nettes le long des fissures* (c) *et qu'à la partie inférieure du pore s'est accumulée de l'argile orientée; noter également, à gauche dans la lame mince en nicols parallèles, la distribution totale du plasma* (p).

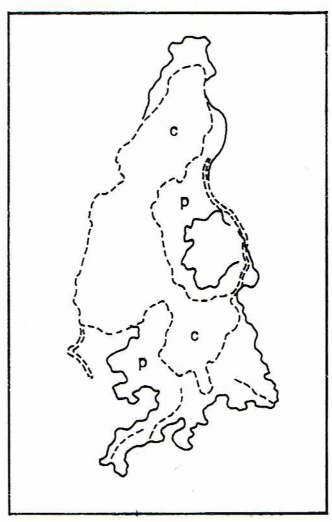

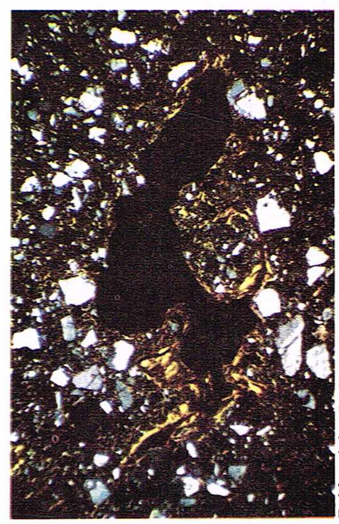

F. Mancini - G. Sanesi - G. Ferrari — I.G.D.A — F. Mancini - G. Sanesi - G. Ferrari

▼ *L'orientation et la biréfringence du plasma* (p) *sont encore mieux visibles : noter la stratification des dépôts plasmatiques accumulés dans le pore* (c) *à la suite de sédimentations successives et les bandes d'extinction en nicols croisés (à droite);* s, *squelette.*

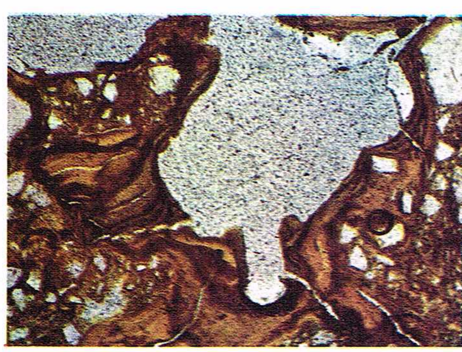

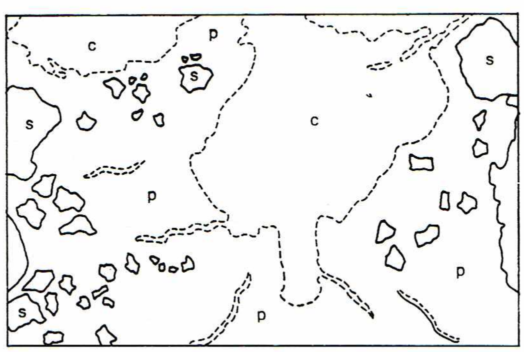

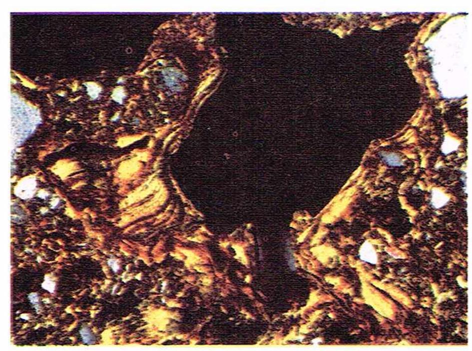

F. Mancini - G. Sanesi - G. Ferrari — I.G.D.A. — F. Mancini - G. Sanesi - G. Ferrari

R. Maignien

▲ ***De nombreux sols sont travaillés par des animaux fouisseurs; c'est le cas, ici au Tchad, des vers de terre qui ont déposé en quelques minutes des tortillons formant un horizon spécifique.***

Parmi les mouvements de transfert, il faut signaler ceux qui sont liés à des **remontées** et à des **brassages.**

— *La plupart des remontées sont d'origine biologique.* De nombreux sols sont travaillés par des animaux fouisseurs (souris, termites, etc.), qui creusent des galeries, construisent des nids, digèrent de la matière organique et dispersent déblais et déjections à des distances plus ou moins grandes. Le travail est parfois considérable et se matérialise par des apports en surface importants : c'est le cas de certains vers de terre et de termites qui manipulent des centaines de tonnes de terre fine par hectare et par an. Au Cameroun par exemple, les tortillons de vers de terre peuvent former un horizon spécifique de surface de 20 à 30 cm d'épaisseur. Cet horizon est de texture homogène, finement sableuse, et les matériaux plus grossiers s'accumulent à sa base en formant un niveau pierreux caractéristique. De la même manière, on explique la présence d'horizons meubles, pouvant dépasser 2 m d'épaisseur, au-dessus d'une ligne de cailloux, ou *stone-line,* dans les régions équatoriales humides (au Gabon par exemple). Dans ce cas, ce seraient les termites qui interviendraient.

— Mais *certaines remontées dépendent de mécanismes strictement physiques.* Elles sont liées à des mouvements de brassage, de convection, caractéristiques des sols riches en argiles gonflantes. Quand de tels sols s'humidifient, les argiles gonflent en développant des pressions latérales considérables; il en résulte une structuration verticale très développée. En saison sèche, il se forme de grosses fentes de retrait (parfois plus de 10 cm de large et près de 1 m de profondeur) qui se remblaient partiellement de produits divers (débris organiques, cailloux, éléments terreux effrités, etc.). Une nouvelle humidification, qui progresse de la base (l'eau de pluie pénétrant le sol par les fentes de retrait), provoque une fermeture en coin de ces vides. Les matériaux de profondeur, pris dans une masse boueuse, sont progressivement rejetés vers les lèvres supérieures d'où ils s'épandent en surface en dessinant des formes polygonales caractéristiques. Les matériaux grossiers remontés sont de natures diverses : des cailloux pris aux niveaux sous-jacents, des nodules calcaires, des concrétions ferrugineuses, normalement formés dans des horizons profonds, plus ou moins colmatés. Ces produits sont parfois simplement mélangés à la masse du sol qui homogénéise ses horizons; la différenciation s'efface. La fermeture en coin des fentes ajoute aux tensions latérales des tensions obliques qui développent une nouvelle structuration, perpendiculaire à ces forces. Il en résulte la formation de plaquettes obliques de très grosse taille (jusqu'à 10 cm de long) qui montrent des faces lustrées et striées caractéristiques (les *slickensides*). Ces faces correspondent à des plans de glissement, chaque face glissant sur sa voisine lors du gonflement sous l'action de l'eau. La matérialisation de ces lents mouvements de convection est démontrée par la reconnaissance au microscope polarisant de nombreux revêtements argileux brisés. Les sols à montmorillonite sont très sensibles à ces effets. Dans les vertisols (de *verto* = je bascule) en particulier, les forces latérales provoquent un bombement de la surface du sol entre les fentes principales. Il se forme un micro-modelé de bosses, très particulier, ou *modelé gilgaï.* Les buttes construites atteignent 30 à 40 cm de haut, pour un diamètre moyen de 50 à 100 cm. Par contre, les sols à kaolinite ne présentent aucun de ces mécanismes.

Des formes identiques sont à rattacher aux effets du gel et du dégel : les *sols polygonaux* des pays nordiques, les *sols à pustules de boue,* etc. On les observe aussi parfois dans les sols salés des déserts, les *tackyres.* Plus discrets sont les processus d'autobrassage de certains horizons B d'accumulation argileuse : les revêtements sont brisés et peu à peu mélangés à la masse de l'horizon; les traits illuviaux s'effacent.

A ces mécanismes de gonflement doivent être rattachés les lents mouvements de migration *(creep)* qui s'effectuent à la surface de certains sols pentus. Les agrégats sont soulevés en période humide; ils s'affaissent lors du dessèchement et boulent légèrement le long de la pente, sous l'effet de la gravité. Il en résulte un effet progressif et global vers l'aval des horizons de surface. Sur ces terrains, les troncs d'arbres se coudent à la base, l'effort de déplacement se produisant au niveau du collet; les piquets, les poteaux de clôture sont déchaussés, et les constructions se lézardent.

Mais l'eau de pluie qui arrive au sol peut avoir des effets plus brutaux. La simple énergie cinétique des gouttes qui frappent les agrégats provoque une certaine destruction mécanique de la structure. Les argiles ainsi que les limons sont séparés des matériaux grossiers et bouchent les pores; l'horizon de surface se *glace.* Ce phénomène est particulièrement marqué en sols limoneux, dans le Bassin parisien par exemple : on dit que les sols sont *battants.* La diminution de la perméabilité

R. Maignien

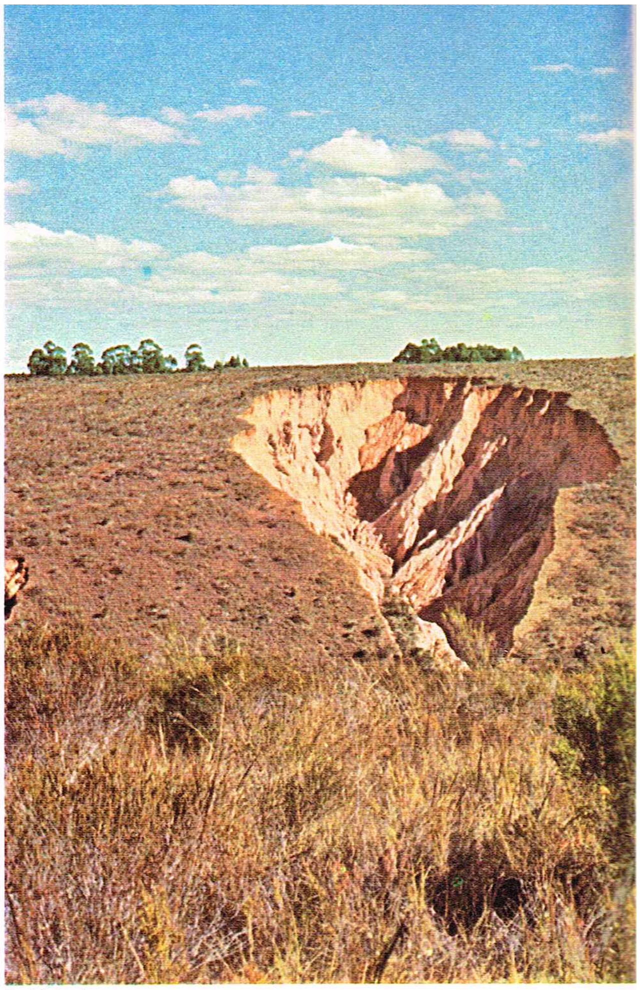

R. Maignien

▲▶ *Les conséquences de l'érosion sont souvent importantes et leur intensité est liée notamment aux caractéristiques de pente : ci-dessus, une* érosion en ravins *sur* solonetz *dans le nord du Cameroun (pente de 2 à 3 %); au centre, un aspect remarquable de cette forme d'érosion : les* « lavakas » *de Madagascar; ci-contre, un exemple d'érosion en nappe en cultures d'arachide au Sénégal (pente < 1 %).*

de la surface permet à l'eau de s'accumuler et de former une nappe libre, plus ou moins épaisse : le sol est *noyé*. S'il y a une pente, la nappe s'évacue; elle se met en mouvement, et l'eau *ruisselle* en prenant de la vitesse; par ce jeu, elle rabote les horizons supérieurs, arrache et entraîne des matériaux : c'est l'**érosion** par l'eau, qui façonne les pentes. Les matériaux transportés se distribuent, se trient le long du paysage sur des distances plus ou moins longues; ils se déposent lorsque la turbidité de l'eau diminue. Les sols de l'amont sont décapés sur des épaisseurs variables, parfois très importantes. Les différents horizons et même le profil entier peuvent être entraînés, mettant les roches à nu. A l'aval, le *colluvionnement* recouvre les sols en place; il les épaissit par le haut.

Les conséquences de l'érosion sont souvent importantes, parfois même catastrophiques (glissements de terrain, éboulements, etc.). Elles dépendent de l'intensité des mécanismes mis en œuvre. Ceux-ci sont liés à l'*intensité des précipitations :* ainsi, une pluie violente de quelques minutes est plus efficace qu'un crachin de plusieurs heures. Ils sont liés également aux caractéristiques de la pente, à son pourcentage (l'érosion en montagne est plus forte qu'en plaine), à sa longueur (les effets sont moindres sur une pente courte que sur une très longue pente, même à pourcentage faible), à sa forme (sur les pentes convexes, l'eau ronge les bas de pente, alors que sur les pentes concaves il y a accumulation et inondation, donc colluvionnement). Pour lutter contre l'érosion, il faut briser le flux liquide par des fossés, des haies, etc., et évacuer les excès d'eau par des collecteurs appropriés.

Les formes de l'érosion sont variées : battance, érosion en nappe où le ruissellement est étalé et diffus, érosion en rigoles à ruissellement concentré en petites rigoles, érosion en ravins où le canal d'écoulement se creuse et s'élargit parfois de façon catastrophique. Les « lavakas » de Madagascar sont remarquables à cet égard. Toutefois, les formes de l'érosion peuvent aussi être plus insidieuses. Souvent, les particules les plus fines sont enlevées des horizons de surface par érosion différentielle. Il y a *appauvrissement*. L'humus peut ainsi disparaître, entraînant une perte de fertilité. Mais plus fréquente est l'augmentation des matériaux grossiers en surface : les pierres « poussent » dans les champs, et la mise en valeur impose un épierrage qui entraîne des frais supplémentaires d'exploitation.

R. Maignien

Ces phénomènes sont très marqués dans les sols des régions sèches, en particulier en régions méditerranéennes, où des pays entiers ont vu, à l'échelle historique, leur potentiel agricole disparaître. En régions tropicales, ces mécanismes freinent le développement de nombreux pays; ils provoquent, en particulier, la mise à l'affleurement de nombreux niveaux cuirassés ferrugineux qui se sont normalement formés en profondeur. De vastes surfaces ont ainsi été rendues stériles. En régions tempérées, le développement de la culture mécanisée qui conduit à augmenter la grandeur des parcelles, les rotations de plus en plus accélérées, l'acidification, le non-renouvellement du stock organique augmentent la susceptibilité des sols à l'érosion par l'eau. Les sols s'amincissent et se dégradent. Ils demandent des interventions de plus en plus onéreuses.

Le vent, dans les régions sèches, a les mêmes effets. Mais les conséquences les plus néfastes concernent les ensablements. Aux confins du Sahara, des régions entières ont ainsi disparu à la suite de la destruction, surtout par les troupeaux, d'une maigre végétation qui avait au moins l'avantage de retenir le sol. Sols enterrés, sols décapés sont autant de traces de l'histoire pédologique du monde. Leur étude est aussi indispensable que celle des sols non dégradés.

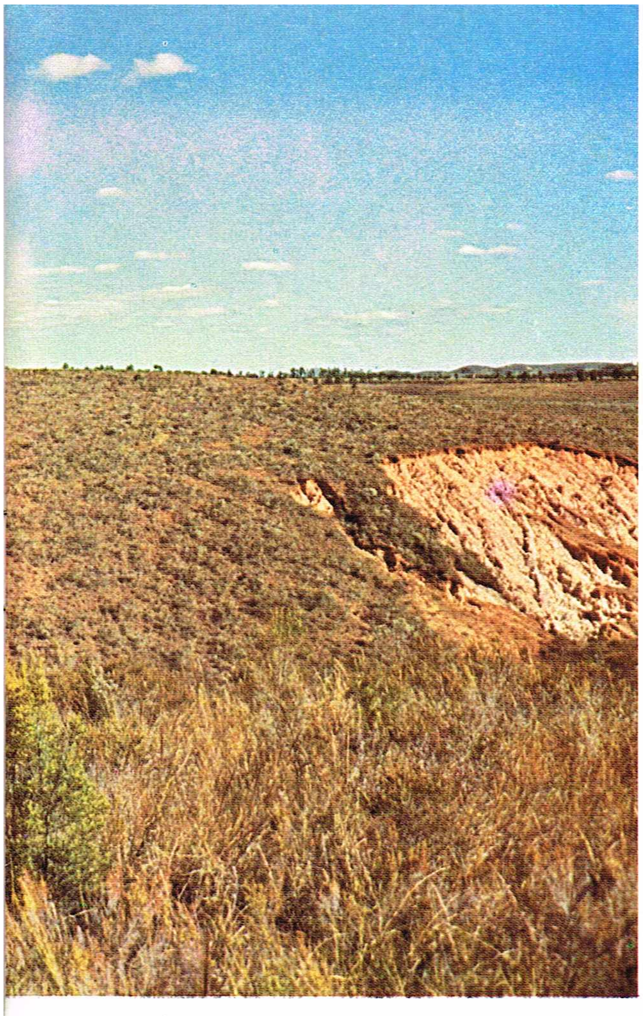

Si les processus pédogénétiques contribuent d'abord à la formation et à l'évolution des sols, ils peuvent aussi les détruire. C'est plus particulièrement le cas de l'érosion, qui peut arriver à arracher la totalité de la couverture pédologique. C'est pourquoi l'on oppose parfois la *pédogenèse,* formation et évolution des sols en place, à la *morphogenèse*, façonnement des pentes par destruction des pentes. Si l'on se place à l'échelle de l'histoire de la surface de la Terre, on peut distinguer des périodes alternantes de formation et de destruction des sols. En fait, ces effets sont souvent concomitants, et l'on n'observe que des dominances, des sommations.

Lorsque le socle constitutif est stable, que la pédogenèse est active, les roches se transforment en sols et la végétation est bien développée, ainsi que l'activité biologique. Il s'établit un équilibre, se caractérisant par un tri physicochimique des constituants les moins stables qui sont exportés jusqu'aux cuvettes. C'est une phase de *biostasie,* ou encore d'érosion géologique. Si un déséquilibre se produit (mouvements tectoniques, changements climatiques, actions de l'homme), le sol va soit évoluer vers une nouvelle pédogenèse si les conditions ne sont pas trop différentes des premières, soit se détruire si les conditions de l'érosion deviennent prépondérantes. Il y aura perte de matière sous formes figurées : c'est l'érosion accélérée, ou *rhexistasie*.

La différenciation de ces périodes est également fonction des possibilités de développement du couvert végétal. La présence de celui-ci permet aux processus de pédogenèse de s'intensifier; sa destruction laisse, par contre, le champ libre à l'érosion, et la morphogenèse domine. Ici apparaît le rôle possible dans cet équilibre de l'action de l'homme sur la végétation.

La théorie de la *biorhexistasie* éclaire d'un jour nouveau la géologie sédimentaire : ainsi, les sédiments de précipitations chimiques, calcaires par exemple, correspondent dans les bassins à des apports en solution des périodes de pédogenèse, les sédiments solides à celles de la morphogenèse. On peut donc relier l'histoire des sols à celle des sédiments et en tirer des conclusions paléoclimatiques importantes.

Les principaux sols et leur genèse

Les classifications pédologiques

Le nombre des classifications des sols peut troubler les non-initiés. En fait, elles ne correspondent pas toutes aux mêmes objectifs, certaines mettent l'accent sur le sol isolé de tout contexte, d'autres sur la géographie des sols, d'autres encore sur les diverses possibilités d'utilisation, etc., d'où des schémas, des organisations variés. Cette diversité résulte surtout du fait que l'on ne peut pas appliquer aux sols le principe de parenté et de filiation. Les éléments les moins éloignés qui en tiennent lieu sont les facteurs de formation. De plus, les caractéristiques intrinsèques et extrinsèques sont étroitement liées. Les sols constituent un continuum et l'on passe plus ou moins rapidement d'un sol à l'autre. Il est difficile d'en préciser les limites et, malgré des règles de choix plus ou moins logiques, il reste toujours une certaine part d'arbitraire : le problème est le même que celui de toute classification écologique. Actuellement, aucune classification ne peut être considérée comme seule valable. Quoi qu'il en soit, une classification pédologique doit présenter les qualités suivantes : être logique, être généralisable à toutes les parties du monde et à toutes les échelles, être utilisable directement sur le terrain, et apporter des informations valables aux utilisateurs.

Sur un plan très général, les classifications pédologiques se regroupent autour de trois écoles :

— le système soviétique, qui prend en compte les facteurs du milieu, le climat principalement, pour déterminer et hiérarchiser les unités pédologiques;

— le système américain, qui repose sur la reconnaissance d'horizons diagnostiques parfaitement définis dans leur morphologie et leurs caractéristiques analytiques;

— le système morphogénétique, auquel se rattache l'école française, dans lequel les critères de différenciation sont les caractères morphologiques qui expriment les processus ou les conditions de formation des sols.

Chacun de ces choix, qui correspond à des dispositions différentes de l'esprit suivant les civilisations, a ses avantages et ses inconvénients. Le concept russe est surtout orienté vers les synthèses générales; le concept américain est plus particulièrement adapté à des inventaires détaillés; le concept morphogénétique tente de concilier ces deux aspects apparemment opposés.

Toutes ces classifications font référence aux seuls profils. Or, les sols ont aussi une dimension latérale et ils évoluent dans le temps; à ce jour, et malgré plusieurs essais, ces données n'ont pu encore être prises en compte. Les classifications actuelles sont donc avant tout des systèmes de référence.

Les principaux sols du monde

Pour la description des sols nous suivrons la classification française (C.P.C.S., 1967) ; c'est une *classification morphogénétique* qui utilise comme éléments de regroupement les caractéristiques morphologiques des profils qui matérialisent leurs processus de formation et de différenciation. Elle est, à ce titre, intrinsèque puisqu'elle ne prend en compte que les données propres aux sols. En allant des niveaux les plus élevés aux plus bas, on distingue des classes, sous-classes, groupes, sous-groupes, faciès, familles, séries, types qui sont autant d'étapes de regroupement, chacune d'elles retenant toute l'information des niveaux immédiatement inférieurs. Chaque unité est considérée comme un *orthotype*, donc comme un concept central, autour duquel on tolère certains écarts; elle diffère en cela des horizons diagnostiques de la classification américaine, qui sont définis dans leur totalité et qui sont donc des *épitomés*.

La classification française comprend douze classes qui sont ordonnées des profils les moins aux plus différenciés.

Les sols minéraux bruts

Les sols minéraux bruts sont caractérisés par une absence presque totale d'évolution. Il s'agit de roches saines ou désagrégées qui n'ont pas encore subi ou qui ne peuvent subir les actions de la pédogenèse. Leur profil est du type (A) C R. Ils ont un horizon de surface à peine marqué, pratiquement dépourvu de matière organique, bien que la vie n'y soit jamais totalement absente (présence de Lichens, de Mousses, etc.). Cette ébauche d'horizon A surmonte la roche saine. Celle-ci peut avoir ou non subi une simple fragmentation mécanique suivie parfois d'un certain réagencement. Les sels minéraux présents peuvent être solubilisés et redistribués (évaporation, cristallisation). Les profils sont d'épaisseur variable, mais le plus souvent très faible (moins de 20 cm)

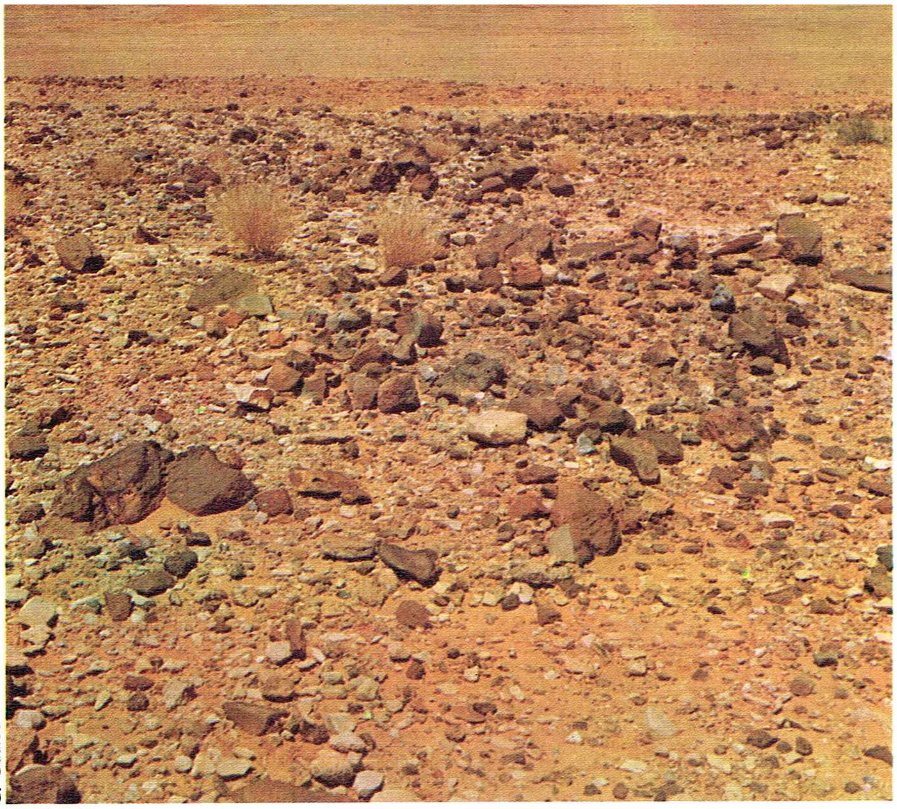

G. Gualco

▲ ***Un « reg » algérien, près d'El-Goléa, caractéristique des sols de déserts chauds que le vent transforme en pavements désertiques.***

et parfois même réduits à une simple roche. Ils n'ont aucune valeur agronomique. Leur caractéristique principale est une absence d'évolution de la matière minérale. Cette absence peut être due à des causes climatiques : abrasion constante d'une roche par l'érosion, apports de sédiments minéraux, vie ralentie sinon absente en climats très froids (régions arctiques, hautes montagnes) ou très secs (déserts).

On a alors des *sols bruts climatiques,* qui comprennent : les curieux *sols polygonaux arctiques,* sols pierreux présentant un arrangement géométrique de pierres et de masses boueuses sous l'effet des alternances de gel et de dégel, et les sols de déserts chauds soit d'apport, tels les *ergs* ou déserts de sables, soit de déflation, comme les *regs* qui sont des pavements désertiques parfois cimentés par une croûte durcie.

L'absence d'évolution peut être due aussi à une trop faible durée d'évolution, au fait que la roche est mise à nu, à des accumulations d'apports récents (cendres volcaniques, dunes, etc.) : ce sont alors des *sols bruts non climatiques.* Mais il s'agit là d'un caractère provisoire, dû à une trop grande jeunesse : avec le temps le matériau évoluera vers des différenciations plus spécifiques.

Suivant le degré de friabilité du matériau on distingue : les sols minéraux bruts meubles, ou *régosols,* et les sols minéraux bruts massifs, ou *lithosols.* Les premiers peuvent évoluer plus vite que les seconds et, à ce titre, ont parfois une certaine valeur organique.

Les sols peu évolués

Les sols peu évolués sont encore faiblement transformés par rapport à leur matériau originel, mais ils montrent déjà un horizon humifère nettement défini. Ils se différencient par un profil A C R. Ils ne présentent jamais d'horizon (B), encore moins d'horizon A_2 ou d'horizon B. L'altération de la roche mère, peu poussée, est localisée en surface, de sorte que la zone altérée se fond avec l'horizon de surface coloré par la matière organique. Le matériau lithique est fragmenté et désagrégé par des phénomènes mécaniques, même s'il est originellement dur et massif. Cependant, la matière minérale n'a pas subi d'altération sensible. Les sels minéraux, y compris les carbonates et les sulfates, sont soumis à des migrations et des redistributions ; par contre, la structure des minéraux silicatés n'est pas modifiée, tout au plus certains cations alcalins ou alcalino-terreux peuvent-ils se déplacer et le fer s'individualiser faiblement. La matière organique peut exister en quantités élevées, et une partie peut être bien humifiée.

L'absence d'altération des minéraux primaires est le fait soit d'un climat de type désertique froid ou sec, soit d'une durée d'évolution trop courte. On doit remarquer à ce sujet qu'au cours de son histoire un sol passe toujours par une phase de jeunesse où il est peu évolué. Ces sols sont donc souvent des têtes de phylum vers des types évolués, et il est important de connaître les causes et les mécanismes de ces premières orientations.

On distingue plusieurs sous-classes de sols peu évolués.

Les *sols à permagel* présentent en profondeur des niveaux gelés en permanence mais, en été, dégèlent en surface de quelques centimètres à plus de 2 m. Les plus caractéristiques d'entre eux sont les *sols de toundra,* à humus brut, souvent tourbeux, des climats froids des régions circumpolaires. Les alternances de gel et de dégel entraînent aussi un fractionnement intense et rapide des roches. Lors du dégel, les horizons de surface deviennent fluants. Il se crée des mouvements de convection qui rejettent les matériaux les plus grossiers à la périphérie des coins de glace. Ce sont les *cryosols,* à buttes, à pustules de boue, à réseaux polygonaux ou circulaires de pierres, à réseaux parallèles (sols striés).

Dans les régions tempérées, à climat frais et humide, plus rarement en régions tropicales, certains sols peu évolués peuvent comporter des teneurs élevées en matière organique : ce sont les *rankers.* Leur horizon A_1 est constitué d'un mélange intime de matière organique partiellement humifiée et de petits fragments plus ou moins finement divisés de roche mère non altérée et qui n'est jamais calcaire. Leur pH se place toujours vers le pôle acide. Il n'y a pas formation d'argile ; la matière organique n'est jamais liée à la matière minérale.

Sur des roches mères riches en bases (en calcaire par exemple), le pH de l'horizon organique de surface reste aussi légèrement acide, même si des fractions de la roche sous-jacente existent dans l'horizon. Il n'y a pas d'horizon C et le contact avec R est parfois brutal. Ce sont les *sols humifères lithocalciques.* Quand le matériau de départ est une roche silicatée amorphe d'origine volcanique (basalte, cendres, etc.), il peut se développer des *sols peu évolués à allophanes,* sols riches en matière organique et à capacité d'échange élevée. Ils possèdent de plus la propriété de retenir de grandes quantités d'eau. Tous ces sols, rankers, sols humifères, lithocalciques, sols peu évolués à allophanes, sont principalement des sols d'altitude (1 200-1 500 m).

Quand le climat est chaud et sec les teneurs en matière organique de l'horizon A sont beaucoup plus faibles ; la structure de ce dernier est peu développée. La différenciation du profil est moins poussée et l'on n'observe jamais d'accumulations de calcaire. Ce sont les *sols peu évolués xériques,* dont les plus caractéristiques sont les *sols gris subdésertiques* des marges des déserts chauds et les *xérorankers,* souvent argileux, des régions à saison sèche marquée. La matière minérale fragmentée est simplement mélangée à 1 à 2 % de matière organique, sur quelques décimètres d'épaisseur, sans autre évolution visible.

Les *sols d'apports récents* sont souvent peu évolués, quel que soit le climat, lorsque la durée d'évolution reste faible (quelques années). On distingue ces sols d'après les mécanismes d'apport : sols alluviaux, colluviaux, éoliens, volcaniques, anthropiques. Les sols alluviaux peu évolués présentent souvent une nappe phréatique en profondeur. Ils peuvent être de nature très différente suivant leur composition minéralogique et sont parfois très fertiles. Leur utilisation exige des aménagements importants, car ils sont inondables. Enfin, sur les fortes pentes, l'érosion peut mélanger les horizons des sols et les déplacer le long des versants, donnant des *sols peu évolués d'érosion.*

Les vertisols

Le nom de vertisol (de *verto* = je bascule) a été proposé en 1960 par les pédologues américains pour regrouper de nombreux sols de régions chaudes assez humides mais à climat contrasté, et qui ont en commun le fait d'être argileux, de couleur sombre, fortement structurés et de montrer, à l'état sec, les caractéristiques de grosses fentes de retrait. Ce sont les sols d'argiles noires tropicales, les tirs marocains, les régurs indiens, certaines smonitzas des pédologues russes.

Les vertisols se caractérisent par une quasi-absence d'horizons due à des mouvements de convection interne liés à la présence d'argiles à fort pouvoir d'expansion, qui se gonflent et se rétractent alternativement sous l'action successive de périodes très humides et très sèches.

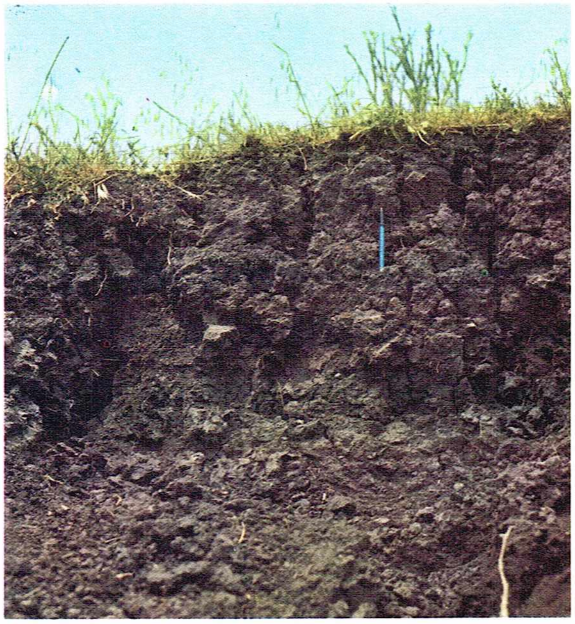

F. Mancini - G. Sanesi - G. Ferrari

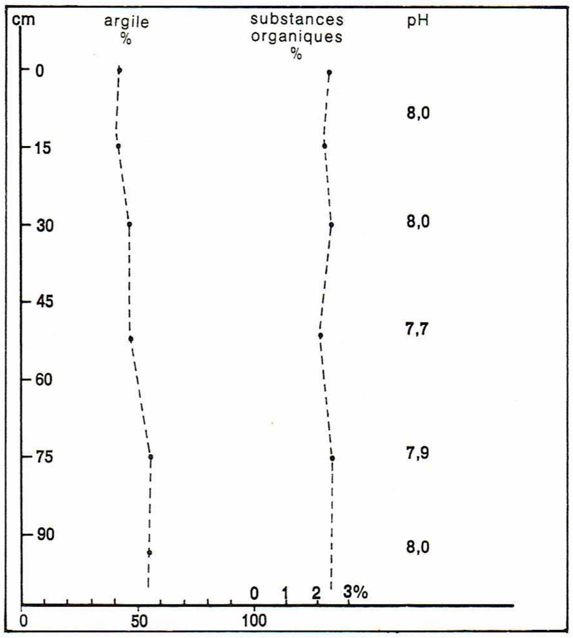

I.G.D.A.

◄ ***Les vertisols** se caractérisent par une quasi-absence d'horizons, due à des mouvements internes de convection; ce sont des sols de régions chaudes à climat contrasté, alternativement sec et humide, argileux et sombres, qui montrent, à l'état sec, de larges fentes de retrait. Le schéma montre la forte proportion d'argile de ces sols et leur faible teneur en matière organique.*

Ce sont des sols à profils A (B) C, A (B)g C ou A (B) Cg, plus ou moins homogénéisés ou irrégulièrement différenciés par ces mouvements internes, mouvements qui s'expriment par la présence de larges agrégats gauchis et à faces striées au moins à la base du profil et, en surface, par celle d'un microrelief gilgaï, ou d'effondrement. Les horizons ne se différencient que par leur structure mais, du fait des mouvements internes qui les affectent, ils comportent souvent aussi des éléments grossiers, irrégulièrement remontés à travers l'ensemble du profil. De plus, à l'état sec, ils montrent de larges fentes de retrait qui dessinent à la surface un vague réseau polygonal. La macroporosité des agrégats est très faible, mais leur cohésion et leur consistance sont élevées. Ils contiennent en moyenne de 35 à 40 % d'une argile de type montmorillonitique. Il en résulte que leur capacité d'échange en bases est élevée. Ils sont de couleur foncée (noirs, gris) bien que leurs teneurs en matière organique soient relativement peu élevées (de 2 à 6-8 %). C'est une matière organique très polymérisée, surévoluée, en partie piégée entre les feuillets d'argile et donc peu disponible pour la nutrition des plantes.

Bien que peu différenciés en tant que profils, les vertisols sont minéralogiquement très évolués. Ce sont des sols de milieux confinants. Sous l'action de la concentration cumulée en Ca^{++} et Mg^{++}, la silice et l'aluminium, libérés par hydrolyse des structures minérales originelles, se réorganisent en argiles 2/1. L'hydrolyse et la néosynthèse sont poussées. Il ne reste pratiquement rien des minéraux primaires : du quartz, quelques débris de roches remontées du fond, des matériaux pédologiques figurés, tels des nodules calcaires, des concrétions ferrugineuses ou manganésifères qui matérialisent un milieu profond colmaté, partiellement hydromorphe. Ces traits soulignent le régime hydrique de ces sols, alternativement gorgés d'eau et complètement desséchés.

La richesse en argiles gonflantes (smectites) n'est pas toujours le fait d'une évolution en place. Il peut s'agir d'un héritage sédimentaire, comme dans les cas des marnes à attapulgites de certains pellosols; il peut s'agir aussi d'une illuviation. Il est malheureusement difficile de faire la part de ces divers mécanismes, même par des examens microscopiques, et, très souvent, il faut avoir recours à une interprétation globale du milieu.

Certains horizons de surface de vertisols possèdent la propriété remarquable de se diviser en se desséchant en une sous-structure finement polyédrique. C'est le *self mulching* (autobrassage), qui contribue parfois à un ameublissement naturel de la partie supérieure de ces sols.

Suivant les conditions du drainage externe, c'est-à-dire de la façon dont l'eau de pluie s'évacue de la surface du sol, on distingue deux grandes catégories de vertisols : les *vertisols à drainage externe nul* ou *réduit*, qui se développent en zones planes ou déprimées; les *vertisols à drainage externe possible,* sur pentes plus ou moins prononcées mais sur des roches riches en Ca^{++} et Mg^{++} (marnes, basaltes, roches ultrabasiques). En fait, ces conditions apparemment opposées interfèrent fréquemment. Dans les situations de drainage externe nul, il faut qu'il y ait un apport de silice et d'alumine dans un milieu suffisamment saturé en calcium et en magnésium. Une certaine hydrolyse sur les versants, donc de l'humidité et de la chaleur, et, lui succédant, une évaporation dans le bas-fond pour concentrer Ca^{++} et Mg^{++} sont nécessaires. Ce sont ainsi les régions chaudes, relativement humides, mais à saison sèche marquée, qui sont favorables au développement de ces sols : on parle alors de *vertisols topomorphes*. Mais si la roche mère est particulièrement riche en ces éléments, le bilan sur place peut être le même. Il faut pour cela que la vitesse de libération des cations, de la silice et de l'alumine soit plus rapide que leur exportation par drainage : il s'agit alors de *vertisols lithomorphes*. De toute façon, l'augmentation des teneurs en argiles, en freinant le drainage, crée à son amont un domaine confinant où vont se développer de nouvelles argilogenèses. Il y a « invasion remontante » de la montmorillonite.

▼ ***Un paysage de vertisol** au Tchad; remarquer la topographie très plane et la végétation arborée — ici, des acacias — très clairsemée.*

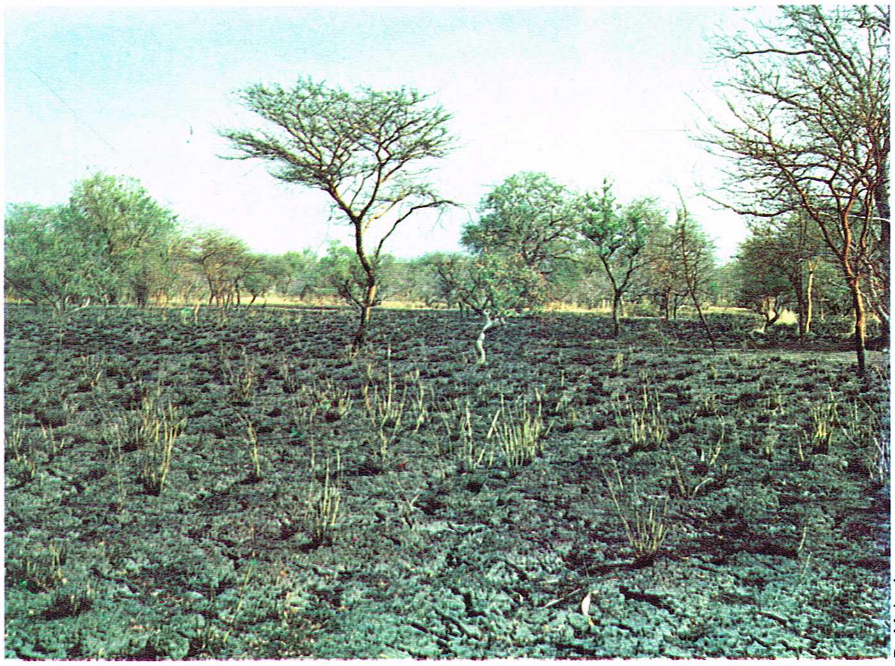

R. Maignien

▶ *Les* andosols *s'observent dans de nombreuses régions du globe à roches volcaniques récentes; ici, un andosol de l'Ankaratra (Madagascar) : sol sur cendres volcaniques altérées en matériaux amorphes ou* allophanes.

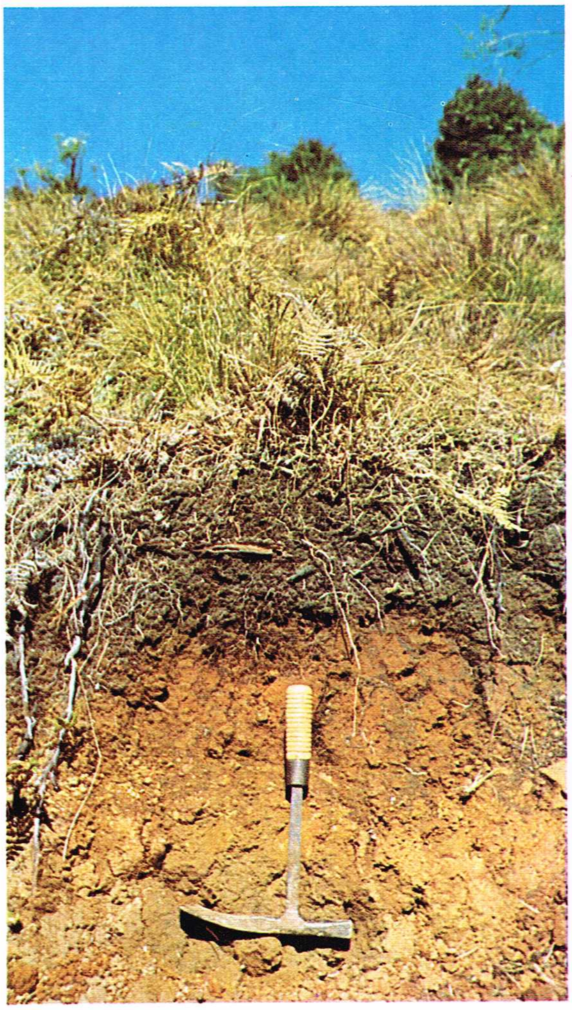

Les vertisols n'existent ni dans les régions froides et humides (hydrolyses trop ralenties), ni dans les régions équatoriales (milieux trop lessivants), mais on les observe sous des climats chauds très variés, à pluviométrie inférieure à 1 500 mm/an et à saison sèche marquée. Ils couvrent de vastes surfaces en zones méditerranéennes, en Espagne, en Italie, au Maroc, en Syrie, etc. On les observe en Australie, au Texas, au Tchad, au Soudan, aux Indes et dans de nombreuses autres régions d'Afrique et d'Amérique.

Ce sont des sols souvent riches sur le plan chimique, mais qui présentent des propriétés physiques défavorables : cohésion trop forte des agrégats, qui limite la pénétration des racines, teneur en eau utile très faible, etc. Par contre, si l'horizon superficiel est à structure fine et suffisamment épais, ces sols peuvent être très fertiles (sols à cotonnier en particulier). D'une façon générale, les mouvements mécaniques dont ils sont le siège sont la cause de grandes difficultés pour les travaux de génie civil : constructions de routes, d'aéroports, de bâtiments lourds, etc.

Les andosols

Les andosols constituent un ensemble de sols qui doivent l'originalité de leurs propriétés à l'abondance dans leur fraction minérale des silicates amorphes, les *allophanes,* associés à des teneurs variables mais souvent élevées de matière organique. Le nom de ces sols vient de *ando,* qui signifie terre noire en japonais. Ces sols ont un profil de type A C ou A (B) C avec passage progressif du A au (B).

L'horizon de surface, d'importance variable, est épais de 15 à 60 cm; il est de couleur foncée, le plus souvent noire. La matière organique, en quantité importante (3-30 %), est très transformée. Les composés humiques, résistants à l'activité biologique, pénètrent en profondeur; ils forment avec les allophanes, et parfois aussi avec les argiles, des complexes de stabilité variable. Cette insolubilisation par les allophanes, en particulier des produits hydrosolubles, s'accompagne d'une certaine polymérisation qui transforme les acides fulviques en acides humiques. Cette polymérisation reste cependant limitée en l'absence de saison sèche. L'horizon est friable et doux au toucher.

L'horizon (B) a une épaisseur de 30 à 100 cm. Il est de couleur brun jaunâtre; sa texture paraît limoneuse au toucher; sa structure est soufflée; peu collant à l'état sec, cet horizon devient glissant, savonneux et graisseux à l'état humide. S'il se dessèche, il est très lent à se remouiller.

L'ensemble du profil présente une grande porosité, une faible densité apparente (inférieure à 0,8), une extrême perméabilité, une consistance thixotropique à l'état humide; il est finement granuleux et même poussiéreux à l'état sec. Le sol présente une énorme capacité pour l'eau (elle atteint 200 %), mais il perd cette propriété s'il se dessèche trop; la teneur s'abaisse alors à 30-40 %.

L'ensemble de ces caractéristiques est lié à la présence d'allophanes, qui dérivent de l'altération d'éléments vitreux, non cristallisés, dans les roches mères. Les cendres volcaniques et en général tous les produits pyroclastiques, qui s'altèrent rapidement, constituent un matériel de choix pour la genèse de ces sols. A coté de ces « amorphes », on décèle la présence de produits secondaires cristallisés : l'halloysite, la montmorillonite pour les minéraux argileux, la gibbsite pour les hydroxydes d'alumine et, naturellement, les matériaux résiduels de la roche de départ qui appartiennent presque exclusivement au domaine volcanique. La qualité et les quantités d'allophanes, dont le rapport silice/alumine varie entre 1 et 2, règlent les propriétés chimiques de ces sols, qui sont généralement acides : on note un pH = 5 à 6 s'il y a peu d'allophanes, pH = 4 à 5 s'il y en a beaucoup. Leur capacité d'échange est aussi très variable mais toujours élevée (supérieure à 25 meq %). Enfin, l'acide phosphorique y est fortement rétrogradé, d'où la nécessité de fortes fumures phosphatées pour leur mise en valeur.

Les andosols s'observent le plus souvent en domaines montagnards, sous des climats constamment humides et assez chauds, sur roches effusives (chaînes volcaniques, équatoriales en particulier), car les processus d'hydrolyse y sont rapides et poussés. Il y a libération massive de gels mixtes amorphes qui évoluent ensuite lentement vers des formes cristallines. Cette évolution est encore plus ralentie en milieu acide et constamment humide. Les phases de dessiccation, par contre, accélèrent les néoformations d'argile et font perdre aux andosols une partie de leurs propriétés. En climat tempéré, on observe un début d'évolution vers les sols bruns; en climat tropical, celle-ci s'effectue vers les sols ferrallitiques si le milieu est acide, vers les vertisols s'il est riche en bases. On voit que l'on a aussi ici des têtes de phylum.

Ces considérations permettent le classement des andosols :

— En conditions très favorables, climat équatorial humide, cendres vitreuses à altération rapide, on trouve les andosols les plus typiques, presque dépourvus d'argiles. La matière organique ne dépasse pas 10 % et l'horizon humifère est peu épais. Le profil est de type A (B) C. Ce sont les *andosols des pays tropicaux,* qui peuvent être *saturés* ou *désaturés.* Dans le premier cas, des minéraux 2/1 accompagnent l'allophane et le degré de saturation est élevé; dans le second cas, c'est de l'halloysite accompagnée fréquemment de gibbsite, qui constituent le cortège des « amorphes ».

— En conditions moins favorables, roches éruptives dures (basalte), climat tempéré humide, les andosols présentent souvent des caractères de transition vers des *andosols brunifiés* ou des *sols bruns andiques,* parfois même des *sols podzolisés.* Ce sont les *andosols des pays froids,* qui se caractérisent par l'abondance de la matière organique très évoluée (celle-ci peut atteindre 30 %). Les profils sont principalement de type A C. Ces sols s'observent dans de nombreuses régions du globe à roches volcaniques récentes : en Afrique, au Japon, en Nouvelle-Zélande, dans les Andes, mais aussi en France (chaîne des Puys), en Italie (en Sicile en particulier).

Les andosols sont souvent des sols très fertiles, faciles à travailler, et ils portent des cultures variées, généralement riches, qui sont fonction des climats (caféiers arabicas, agrumes, plantes à parfums, plantes médicinales, etc.).

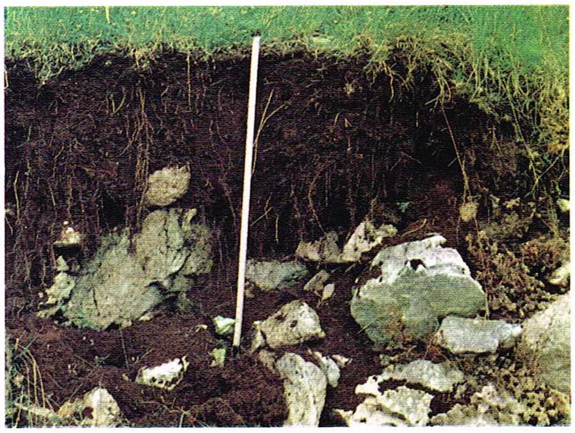

F. Mancini - G. Sanesi - G. Ferrari

substances organiques %	pH	$CaCO_3$ %
21,7	7,9	7,0
15,4	8,1	20,0
3,0	8,4	25,0

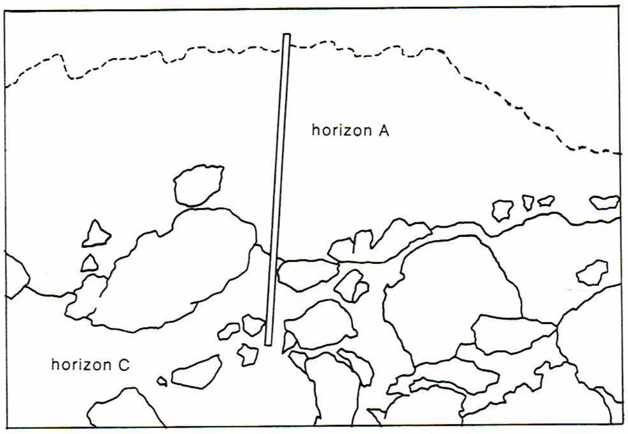

I.G.D.A.

▲ ***Les sols calcimagnésiques les plus typiques sont des* rendzines *: ici, un sol à profil* A C *de couleur foncée, à nombreux cailloux calcaires montrant la transition rapide entre l'horizon* A *et l'horizon* C *sous-jacent.***

Les sols calcimagnésiques

La genèse des sols calcimagnésiques est déterminée par la présence d'ions alcalino-terreux dérivant de l'altération de roches carbonatées ou sulfatées. Ce sont des sols à complexe saturé par Ca^{++} et Mg^{++}, comportant un horizon superficiel relativement riche en matière organique intimement liée au calcaire et aux argiles. Des horizons sous-jacents peuvent exister, mais ce ne sont que des horizons (B) et C qui ne montrent jamais les caractères des vertisols, ni ceux des sols isohumiques. Le profil est de type A R, A C, A (B) R, ou encore A (B) C. Le ravitaillement du sol en ions bivalents est assuré par une roche sous-jacente carbonatée (calcaire dolomitique ou craie par exemple) ou très basique, ou encore par des apports latéraux. Ces cations exercent sur la pédogenèse une empreinte très particulière qui contrarie souvent l'évolution climatique; ces sols sont considérés parfois à ce titre comme des *sols intrazonaux*. L'excès d'ions alcalino-terreux a les conséquences suivantes :

— un rôle de frein à l'égard des processus d'altération; le fer est peu libéré; le profil est mince, peu épais;

— une orientation des néosynthèses argileuses, si elles existent, vers la formation de montmorillonites ou d'illites;

— une action floculante énergique sur les argiles et surtout sur les colloïdes humiques; il se forme un « mull » calcique; la structure est très marquée, souvent grumeleuse, parfois même grenue, très stable;

— une transformation rapide de la matière organique fraîche; il n'y a pas de litière; les composés organiques sont fixés sous une forme très stable par les carbonates, ce qui, lié à la forte activité biologique, provoque une incorporation profonde et masque la couleur brune du fer;

— si la matière organique s'accumule facilement, par contre, sa dégradation est lente; le rapport carbone/azote est généralement bas, inférieur à 10; les plantes peuvent y souffrir d'un manque d'azote, même si les teneurs totales en cet élément sont élevées.

Les sols calcimagnésiques ont leur complexe saturé à plus de 90 % par les cations alcalino-terreux. Leur pH est supérieur à 6,8 et atteint parfois 8-8,5. Ils font effervescence à l'acide. La transition entre l'horizon A et l'horizon sous-jacent est rapide. Les horizons profonds ne montrent jamais de faces de glissement, et leur teneur en matière organique est très faible par rapport à celle des horizons de surface. En revanche, ils peuvent présenter des traces d'hydromorphie, d'une accumulation de carbonates ou de sulfates, ainsi que, parfois, une altération notable des minéraux primaires.

Les sols calcimagnésiques les plus typiques sont les *rendzines* qui montrent un seul horizon A, de 10 à 30 cm d'épaisseur, de couleur foncée (grise à brun-noir), à nombreux cailloux calcaires dans tout le profil. La structure est grenue. On observe les traces d'une activité biologique intense; les vers de terre sont abondants. Les teneurs en *calcaire actif* sont élevées; le pH atteint et même dépasse 8. Ces rendzines sont riches en humus de néoformation microbienne (5-8 %). Suivant la couleur, on distingue : les *rendzines grises ou blanches*, très riches en carbonate de calcium mais pauvres en humus, situées sur craie (en Champagne par exemple); les *rendzines rouges*, à rubéfaction ancienne, recalcarifiées secondairement par remaniement, localisées sur les pentes (dans le Barrois par exemple); les *rendzines noires forestières*, sur les éboulis qui, en montagne, font transition vers les sols humiques carbonatés.

Fréquemment, les carbonates sont progressivement dissous et il s'ensuit une accumulation relative de matériaux silicatés résiduels; un horizon (B) à structure plus grossière (polyédrique), de couleur brune, se développe. Le sol évolue vers un sol brun; on dit qu'*il se brunifie*. Il existe ainsi toute une série d'intermédiaires. Si l'horizon superficiel reste riche en matière organique et sa structure grenue, on a une *rendzine brunifiée*. Si, au contraire, l'horizon humifère est moins développé, on a un *sol brun calcaire*. Dans la pratique, ces évolutions sont étroitement dépendantes du type de roche mère, de sa dureté, de sa pureté et du pourcentage de sa pente. Les rendzines sont des sols d'érosion, donc de pente, alors que les sols calcaires ne le sont pas. Si la décarbonatation est encore plus poussée, il arrive un moment où il n'y a pratiquement plus trace de carbonates : le pH s'abaisse jusque vers 6,8, les teneurs en matière organique diminuent encore et la structure devient polyédrique. C'est un *sol brun calcique*, qui peut être *mélanisé* lorsqu'il prend une structure proche de celle des vertisols, sans jamais présenter cependant de faces de glissement.

▼ ***A gauche, un type de* rendzine rouge, *recalcarifiée secondairement par remaniement; à droite, une* rendzine blanche, *riche en carbonate de calcium mais pauvre en humus.***

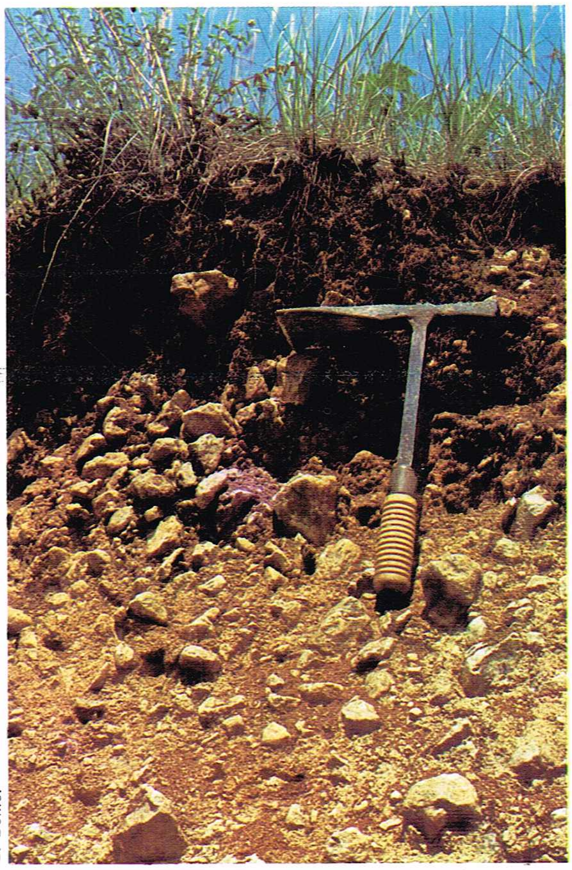

G. Bellier

G. Bellier

Dans les régions plus fraîches, en montagne par exemple, la matière organique augmente très nettement et dépasse 20 % ; l'humus est toutefois moins bien mélangé aux éléments minéraux grossiers ; le sol est moins profond ; le pH avoisine 7. C'est un *sol humique carbonaté*.

Enfin, il existe des sols calcimagnésiques dans lesquels l'horizon supérieur contient des sulfates de chaux. La couleur est généralement gris clair, parfois beige. La structure est souvent finement grumeleuse. Ce sont les *sols gypseux rendziniformes* s'ils sont à profil A R et les *sols bruns gypseux* s'ils ont un horizon (B).

Les sols calcimagnésiques, en particulier les rendzines et leur cortège brunifié, sont très connus dans la plupart des régions tempérées et tempérées chaudes du globe, riches en carbonates et à relief légèrement accusé. Ce sont des sols largement utilisés en agriculture : cultures céréalières et betteravières sur craie en Champagne, vignes sur les pentes, etc. Ils conviennent à toutes les plantes résistantes au calcaire, mais ils sont souvent carencés en azote et en oligo-éléments. L'acide phosphorique y est bloqué par le carbonate. Leur mise en valeur exige des fumures bien équilibrées.

Les sols isohumiques

Les sols isohumiques se caractérisent par une incorporation profonde et régulière de matière organique très évoluée le long de leur profil. Cependant, alors que dans les sols précédents les horizons profonds en étaient pratiquement dépourvus, ici les teneurs sont progressivement décroissantes et elles restent toujours notables même dans les horizons profonds, d'où le nom de sols isohumiques. De plus, ces sols sont associés à une végétation de steppe herbacée et sont parfois appelés aussi *sols steppiques*.

Ce sont des sols humifères à complexe saturé. Les ions bivalents, calcium et magnésium, qui saturent le complexe, jouent un rôle incontestable dans la stabilisation de l'humus imprégnant la totalité du profil. Ce dernier est moyennement ou peu différencié, de type A (B) C, parfois A B C; il s'agit le plus souvent d'un (B) de structure, mais il peut parfois être plus argileux que A, sans être un véritable B illuvial. Ces sols peuvent comporter en profondeur un horizon de pseudo-gley ou un horizon induré, croûte calcaire ou gypse. Ils peuvent aussi être plus ou moins alcalinisés ou salinisés en surface.

L'ensemble des horizons est nettement marqué par la matière organique. Les teneurs en sont souvent élevées, surtout dans les horizons superficiels. Cette matière organique est caractérisée par une évolution et une polymérisation poussée des composés humiques, qui se stabilisent en contractant des liaisons étroites avec les argiles. Les acides humiques, nettement plus importants que les acides fulviques, comportent une proportion élevée d'acides humiques gris. La maturation climatique liée à l'importance de la saison sèche oriente fondamentalement l'évolution de cet humus de steppe dont les sources sont essentiellement les racines de Graminées. L'activité biologique, intense, est due notamment aux micro-organismes et aux petits Rongeurs.

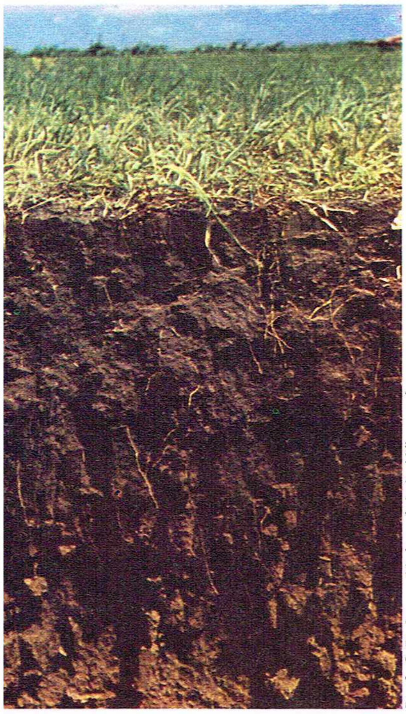
Prof. G.B. Lee - Université du Wisconsin

▲ ***Exemple de tchernozem, ou terre noire d'Ukraine; c'est le plus caractéristique des sols isohumiques, et l'une des meilleures terres à grains du monde.***

Le complexe absorbant est saturé principalement par le calcaire et secondairement par le magnésium; le sodium s'y trouve parfois en proportions assez élevées. Les horizons de surface sont partiellement désaturés (jusqu'à 50-60 %), à l'inverse des horizons profonds qui sont toujours saturés, même s'ils se développent sur roche mère calcaire (souvent un lœss). Ces sols sont toujours fortement décarbonatés dans leurs horizons supérieurs; la décarbonatation n'est jamais brutale, mais progressive; elle doit être rattachée à l'activité biologique qui augmente la tension en gaz carbonique du sol (jusqu'à 100 fois celle de l'atmosphère). Il s'agit d'un véritable « lessivage biologique », qui se réalise au cours de la saison humide. Le calcaire entraîné se dépose à nouveau à plus ou moins grande profondeur dans le profil suivant les climats (équilibre érosion/évaporation). Ce lessivage s'atténue et s'arrête même dans les sols des steppes sèches.

La structure en A est le plus souvent grenue ou grumeleuse; elle est polyédrique ou prismatique en profondeur. L'argile paraît bien stabilisée. Il est cependant fréquent d'observer des horizons superficiels appauvris en cet élément. Les teneurs plus élevées en argile des horizons moyens ne résultent pas d'une illuviation, mais correspondent à une certaine néogenèse *in situ*, dans des horizons plus humides et plus chauds à certaines périodes de l'année. L'altération des silicates est réduite ou nulle, et les argiles sont surtout héritées.

La pédogenèse des sols isohumiques est donc dominée par l'existence d'une végétation herbacée, ainsi que par l'accumulation de l'humus lié à une alternance d'hivers froids ou frais et humides et d'étés très secs. Les contrastes saisonniers paraissent déterminants. Ces sols sont avant tout des sols de climats continentaux : on ne les observe jamais en climat atlantique.

Le plus célèbre des sols isohumiques est le *tchernozem* ou terre noire d'Ukraine. C'est un sol profond (plus de 100 cm), à l'horizon A_1 épais (60 cm), de couleur noire, composé de matière minérale mélangée à de l'humus calcique, le tout floculé en grumeaux de la grosseur de grains de blé. Les teneurs en matière organique sont élevées : de 5 à 12 %; elles décroissent régulièrement avec la profondeur. L'horizon est décarbonaté; vers 60 cm, il s'éclaircit et prend une couleur ocre jaune; il est plus compact; la structure est moins exprimée et il présente des filaments blanchâtres de carbonate de calcium *(pseudomycélium)* et de grosses concrétions calcaires partiellement indurées *(crotovinas)*. A une profondeur variable, on passe à la roche mère qui est un lœss. Dans tout le profil, il n'y a aucun lessivage de fer ou d'argile. Ce sol se développe sous une pluviométrie de 500-600 mm/an.

Lorsque l'on passe vers des régions plus sèches, mais toujours sous des climats à hiver froid, les teneurs en humus des horizons superficiels diminuent tandis que les accumulations calcaires se réalisent de plus en plus près de la surface. On distingue ainsi les *sols châtains* (4 % de matière organique), les *sols bruns* (2 % de matière organique), et les *sierozems* (1 %), ces deux derniers étant pratiquement carbonatés sur toute l'épaisseur du profil.

Si les climats sont plus humides (700-800 mm/an), les sols isohumiques sont partiellement désaturés en surface; les accumulations calcaires sont beaucoup plus profondes et souvent associées à des actions d'hydromorphie. Ce sont les *brunizems*, ou sols de prairie du Canada et des États-Unis (Corn Belt).

Lorsque les régions sont plus chaudes, sous le climat méditerranéen par exemple, l'accumulation d'humus est moins forte et les accumulations calcaires sont plus superficielles; ces dernières sont aussi parfois beaucoup plus intenses, voire excessives, et donnent naissance à des niveaux indurés, des croûtes et des dalles calcaires qui constituent un obstacle sérieux à la mise en valeur. L'importance de cette évolution a conduit à les appeler parfois *sols à profil calcaire différencié*. Mais l'altération minérale, également plus forte, provoque une certaine argilitisation à moyenne profondeur : ce sont les *sols marron*.

Enfin, dans les régions tropicales semi-arides (300/500 mm/an) sous une végétation de pseudo-steppe à épineux, se développent des sols isohumiques pauvres en matière organique et en carbonates, mais souvent rubéfiés : les *sols bruns et brun-rouge subarides*.

Ces sols sont pour la plupart très fertiles. Ce sont des terres à grains, mais leur utilisation nécessite fréquemment l'irrigation, ce qui les appauvrit en matière organique et amène des risques d'alcalinisation. En Afrique du Nord, la présence de dalles calcaires à faible profondeur oblige parfois à des traitements énergiques (sous-salages, explosifs, etc.).

Les sols brunifiés

Les sols brunifiés sont des sols évolués à mull (humus doux). Ils sont biologiquement actifs et caractérisés par un humus de décomposition rapide qui se limite aux horizons de surface. Leur profil est de type A (B) C ou A B C. Les horizons (B) structuraux et B texturaux sont pauvres en matière organique et colorés en brun par des oxydes de fer hydratés. Ce fer provient d'une altération ménagée des minéraux primaires. La plupart des hydroxydes servent de liant au complexe argilo-humique floculé en agrégats peu stables. Il en découle des possibilités de migration mécanique de l'argile. Les argiles sont le plus souvent héritées, parfois de transformations; elles appartiennent à la famille des illites. Il y a peu ou pas de dégradation chimique de celles-ci dans l'épaisseur du profil.

F. Mancini - G. Sanesi - G. Ferrari

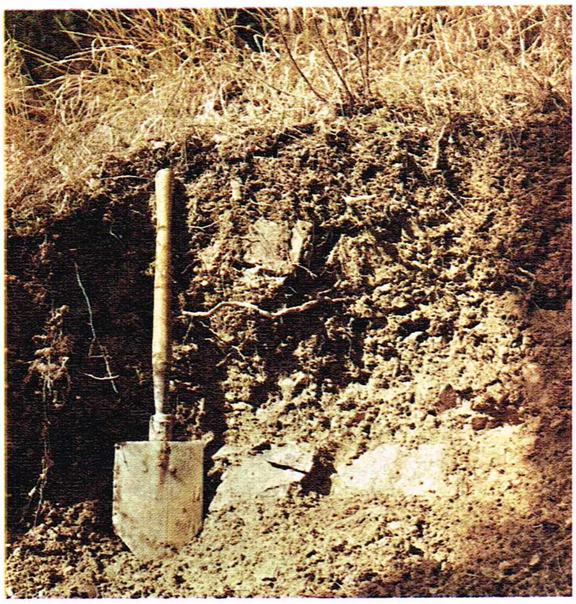

I.G.D.A.

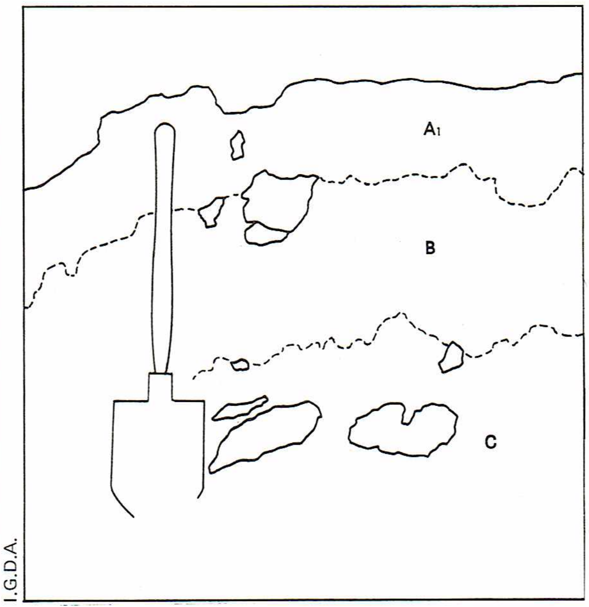

I.G.D.A.

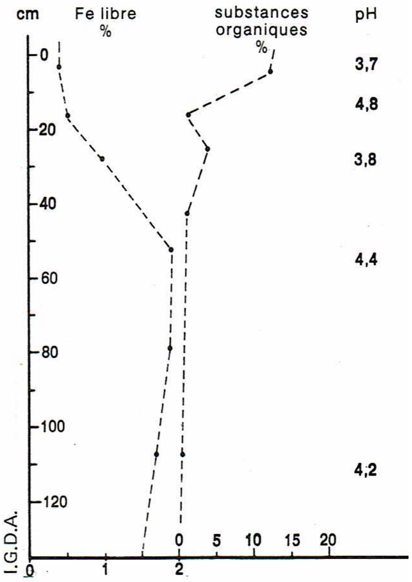

Les sols brunifiés se développent principalement en régions tempérées humides, là où la saison sèche n'est jamais accusée. Ils s'opposent en cela aux sols isohumiques. Suivant l'importance du lessivage des argiles et des oxydes de fer, on distingue deux grandes catégories : les *sols bruns s. s.* et les *sols lessivés.*

— Les *sols bruns s. s.* sont caractérisés par un lessivage faible, sinon nul, des colloïdes minéraux. L'horizon (B) se distingue en général difficilement de l'horizon A_2. Le profil est toujours décarbonaté, au moins dans les horizons A et B, même sur roches calcaires. Ces sols se forment normalement sous végétation forestière de feuillus, mais on peut également les trouver sous prairie. La roche mère est riche en matériaux fins et/ou calciques. L'épaisseur du profil est souvent réduite. On constate toujours une légère migration mécanique, même extrêmement limitée, d'argile, parfois même de limons et de sables fins. Cependant, on n'observe pas de revêtement d'illuviation en profondeur. La résistance des sols bruns au lessivage est conditionnée par la stabilité des complexes floculés argile-fer-humus. Les composés organiques solubles qui sont les agents actifs du lessivage sont rapidement minéralisés par la forte activité biologique d'un milieu bien aéré et sont rendus inactifs par les conditions biochimiques du profil : dans les *sols bruns eutrophes,* c'est le calcaire qui freine le lessivage; dans les *sols bruns acides,* la floculation résulte d'un équilibre entre l'argile (électro —), le fer et l'alumine (électro +). Si les quantités d'argiles ainsi que les teneurs en fer sont insuffisantes, le sol tend à se lessiver et parfois même à se podzoliser. Si elles sont en excès, il y a évolution vers l'hydromorphie. En fait, les vrais sols bruns non lessivés sont extrêmement rares. Ils résultent le plus souvent d'un équilibre entre des processus antagonistes, en particulier entre l'érosion qui enlève les horizons appauvris et les remontées biologiques qui homogénéisent les niveaux conservés. Il s'agit alors de *sols bruns anthropiques* (l'érosion étant une conséquence de la mise en culture). Les *sols bruns faiblement lessivés* sont les plus différenciés de la série; ils montrent un B textural bien développé; l'indice de lessivage de l'argile entre horizons de surface et d'accumulation est supérieur à 1/1,2.

— Les *sols lessivés* sont comme les sols bruns caractérisés par une décomposition rapide de l'humus, en principe de type mull, mais qui passe au type moder dans les plus évolués. Le lessivage de l'argile et du fer est marqué et ces éléments migrent en association étroite. Les horizons A_2 et B se différencient facilement à l'œil nu. L'horizon B, dit aussi « horizon argillique », a une structure prismatique ou polyédrique nette; les agrégats présentent des enrobements d'argiles orientées, parfaitement reconnaissables au microscope polarisant. Il s'agit de ferri-argilanes qui confirment la migration de concert de l'argile et du fer. Ces revêtements donnent un aspect luisant à l'horizon, et ils sont souvent de couleur plus foncée que l'intérieur des mottes. L'horizon A_2 s'éclaircit; il peut parfois légèrement blanchir. Sa texture s'allège et il prend une structure en lamelles horizontales, caractéristique des milieux lessivés. L'indice de lessivage est inférieur à 1/1,4. L'argile ne subit pas de dégradation au cours du transport. Celui-ci est purement mécanique;

▲ ***Les* sols brunifiés *se développent principalement en régions tempérées humides; ce sont des sols évolués à mull : ici un* sol brun s. s. *à profil* A (B) C *peu différencié.***

▼ ***Les* sols lessivés *appartiennent aux sols brunifiés mais l'importance du lessivage des argiles et des oxydes de fer est plus marquée que pour les* sols bruns s. s. *On observe nettement la différence entre les horizons superficiels* A_1 *et* A_2 *pauvres en argile et les horizons inférieurs d'accumulation sur ce sol lessivé photographié près de Tanger (Maroc).***

F. Mancini - G. Sanesi - G. Ferrari

I.G.D.A.

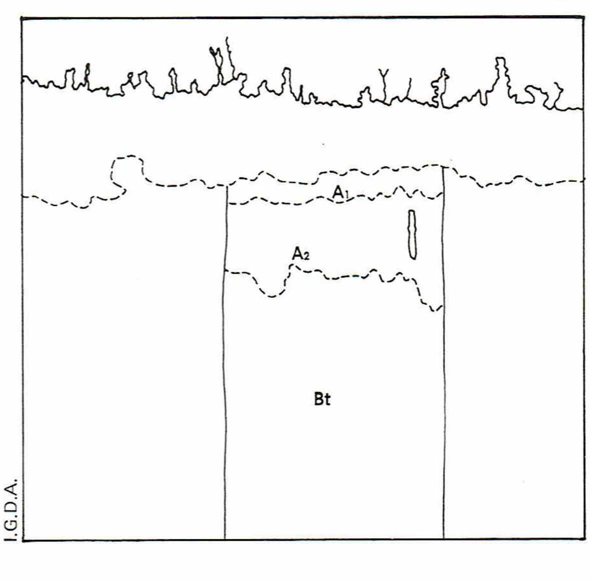

I.G.D.A.

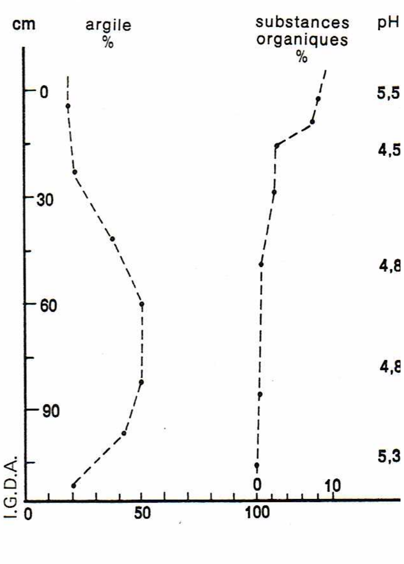

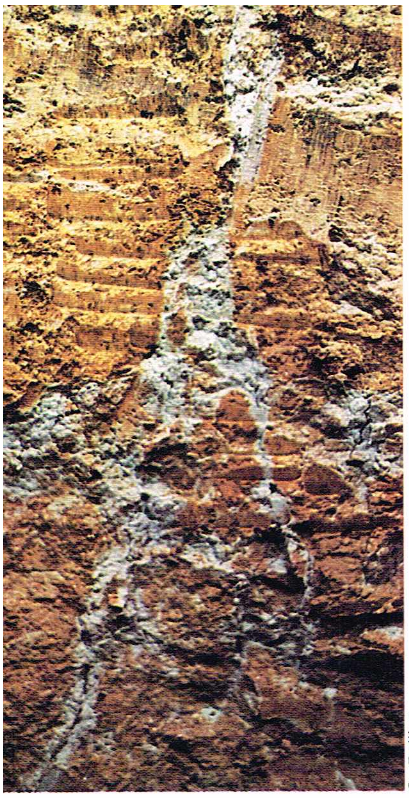

G. Bellier

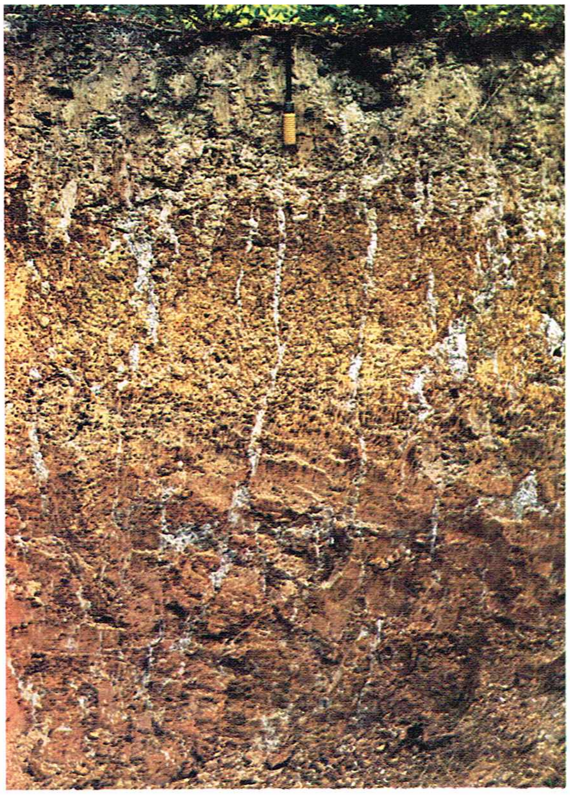

G. Bellier

▲ *Suivant le degré de lessivage et d'accumulation, se développe toute une série de types de sols lessivés à caractéristiques d'hydromorphie marquées : ici, un* **sol lessivé glossique** *dont des langues d'horizon* A_2*, blanchies, pénètrent l'horizon* **B** *; à gauche, un détail de cette marmorisation où le fer, libéré de ses complexes par réduction et acidification, est entraîné par les eaux de drainage.*

il survient et s'accuse par acidification progressive et disparition des ions « basiques » (en particulier, du calcium) du complexe absorbant. Cette acidification s'accompagne presque toujours d'une diminution de l'activité biologique ; la structure se dégrade, l'horizon se tasse. Le manque d'aération provoque des phénomènes de réduction qui favorisent la complexation du fer par la matière organique. Le fer tend alors à se séparer de l'argile et à migrer séparément. L'horizon blanchit. Cette solubilisation du fer a pour effet de rompre les agrégats ; une certaine quantité d'argile, ainsi libérée, peut migrer plus facilement. Cet apport d'argile, dans un horizon B déjà peu poreux, entraîne un colmatage encore plus prononcé et une imperméabilisation qui permet la mise en place d'une nappe perchée en saison humide. Cet engorgement temporaire provoque une véritable dégradation, avec un blanchiment le long des racines et des fentes de retrait où circule l'eau : il y a marmorisation. Ainsi, suivant le degré de lessivage et d'accumulation, se développent toute une série de types de sols lessivés : d'abord, les *sols bruns lessivés à mull*, à A_2 peu différencié, à B textural net, et à indice d'entraînement compris entre 1/1,2 et 1/1,4 ; puis les *sols lessivés modaux*, à A_2 clair, à B textural marqué, et à indice d'entraînement inférieur à 1/2 toujours à mull ; les *sols lessivés faiblement podzoliques*, à moder, à A_2 très clair et même blanchi, à B marqué (indice 1/3,0), teinté d'ocre ou de rouille, le fer étant plus entraîné que l'argile ; les *sols lessivés hydromorphes*, qui présentent en B et à la base d'A_2 des taches ou des concrétions de pseudogley ; enfin, les *sols lessivés glossiques*, dont des langues d'horizon A_2, blanchies, pénètrent l'horizon B.

Vers les climats tempérés continentaux, on observe un type particulier qui marie l'isohumisme et le lessivage : c'est le *sol gris forestier*, à profil A B C, à A_2 riche en matière organique et peu différencié de A_1, de teinte grise, à B textural prononcé, bien structuré et relativement perméable, et les *sols dernopodzoliques* à A_1 riche en matière organique, formé par des Graminées, et à B glossique. Sous les climats boréaux, l'acidification est moins poussée et l'hydromorphie de surface est plus prononcée, d'où un A_2 décoloré mais encore argileux et des revêtements argileux très généralisés en B : ce sont les *sols lessivés boréaux*. Enfin, en pays tropicaux humides, les processus de brunification intéressent des sols en début d'évolution sur roches basiques, ou des sols de bas de pente enrichis par des solutions drainant des reliefs : ce sont les *sols bruns eutrophes tropicaux*.

Les sols lessivés, très répandus en Europe occidentale, en particulier sur les limons de plateaux, sont généralement fertiles. Cependant, il faut parfois corriger leur excès d'acidité par le chaulage. Ils sont aussi souvent battants, c'est-à-dire qu'ils présentent une tendance au glaçage superficiel sous l'action des pluies. L'horizon d'accumulation argileux permet une bonne rétention de l'eau, mais celle-ci devient parfois excessive et il faut alors drainer. L'horizon B peut reposer sur un horizon plus profond, tassé, compact, très dense, que les racines pénètrent difficilement : c'est le *fragipan*, qui développe parfois des mouillères. Les engrais chimiques et les aménagements fonciers permettent de relever très fortement leur niveau de fertilité. Ce sont d'excellentes terres à grain, à betteraves sucrières, à prairies, etc.

Les sols podzolisés

Les sols podzolisés résultent d'une pédogenèse de sols très acides à faible activité biologique entraînant la formation d'un horizon A_0 plus ou moins épais de type mor ou, éventuellement, de type moder. Ces types d'humus engendrent des composés organiques solubles, difficilement biodégradables, responsables d'une altération poussée des silicates allant jusqu'à la destruction des argiles, et d'une complexation importante du fer et de l'aluminium. Ces deux processus sont caractéristiques de la podzolisation. Les sols podzolisés sont des sols évolués, à profil A B C ; l'horizon A de dégradation est souvent éluvié et blanchi, fortement appauvri en fer et en argile ; l'horizon B, parfois appelé horizon « spodique », présente des teneurs élevées en fer, en alumine libre (principalement sous forme amorphe) et en matière organique à rapport carbone/azote supérieur à 14, et aussi des enrobements de fer et de matière organique autour des particules minérales, des petits granules d'oxyde de fer et de matière organique visibles à la loupe. Parfois, l'horizon A_2 manque et B succède directement à A_1 ou A_0.

Sur un plan général, les sols podzolisés sont caractéristiques des climats froids et humides. Ils se développent sous une végétation forestière de Conifères parfois mêlés de feuillus, ou de landes (bruyères) génératrices d'humus brut dont les débris, à rapport C/N élevé et pauvres en éléments organiques hydrosolubles, se décomposent lentement. Ces sols évoluent sur roche mère filtrante, pauvre en argiles et en minéraux altérables. Lorsque la quantité de fer libéré dépasse un certain seuil, elle freine le processus en insolubilisant les complexes formés qui restent en place. Pour qu'il y ait entraînement, il faut des conditions particulières de pédoclimat favorisant la réduction et la complexation du fer à l'état ferreux par anaérobiose. Ces conditions sont dues soit à la fonte des neiges *(podzolisation boréale)*, soit à une saturation temporaire du profil par l'eau en climat très humide *(podzolisation atlantique)*. L'intensité de l'altération est variable suivant les horizons : maximale en A_0 et A_1, elle est réduite en B en raison des revêtements d'amorphes qui ont migré de la surface et qui protègent les minéraux primaires. La production de silice, de fer et d'humine l'emporte de beaucoup sur l'argilogenèse, et, dans les podzols les plus typiques, il y a disparition complète de l'argile en A soit par lessivage, soit par dégradation et destruction.

La migration en profondeur des complexes est rapide lorsque le milieu est filtrant et lorsqu'aucun piège chimique (bases, oxydes de fer ou d'alumine trop abondants) ne vient les bloquer. Ce processus est particulièrement marqué sur sables quartzeux grossiers, pauvres en fer (sables de Fontainebleau par exemple). Il se forme un A_2 cendreux caractéristique des *podzols vrais*. Sinon, la migration est ralentie, parfois même bloquée, et l'horizon prend une couleur ocreuse caractéristique des *sols ocre podzoliques*.

Les matériaux entraînés s'accumulent en profondeur pour former un horizon B, très coloré, aux formes souvent festonnées, mais fréquemment aussi en traînées verticales, en raies horizontales, etc. Cet horizon illuvial s'édifie par précipitation et adsorption des complexes organo-minéraux par les hydrates de fer et d'aluminium. L'insolubilisation est facilitée par une certaine action biologique profonde. L'humus se dépose le premier pour donner avec le fer un Bh de couleur brun-noir, riche en grosses molécules organiques ; le fer s'accumule sur une plus grande épaisseur vers la base du profil, en dessinant des traits de couleur rouille. La silice solubilisée peut également être adsorbée par les hydroxydes. L'ensemble des composés amorphes, minéraux et organiques, constitue un ciment pour les particules les plus grossières et est à l'origine des granules des horizons spodiques. Quand ils sont très abondants et partiellement déshydra-

F. Mancini - G. Sanesi - G. Ferrari

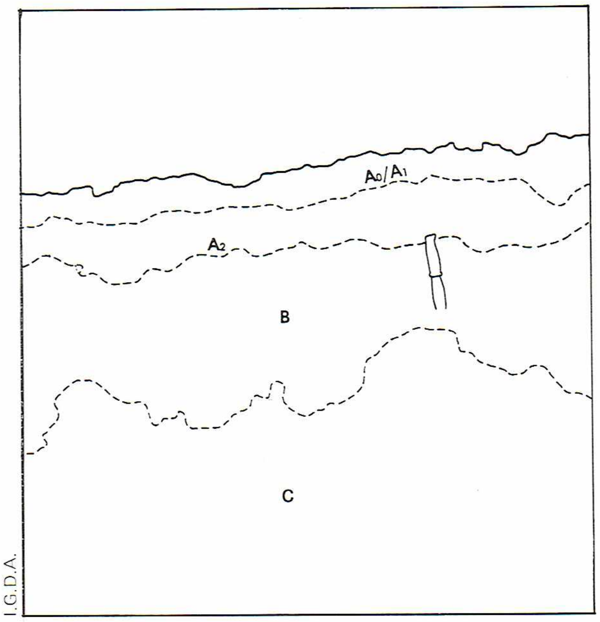

I.G.D.A.

◀ ***Les* sols podzolisés *sont caractéristiques des climats froids et humides; ici un aspect* de podzol vrai *sur lequel on observe nettement un* A_2 *cendreux caractéristique.***

tés, ils provoquent une prise en masse de l'horizon qui se durcit en *alios*.

Les processus de podzolisation peuvent se réaliser directement sur un matériau adéquat ou suivre la dégradation d'un sol. C'est, en particulier, le cas de certains sols brunifiés intensément lessivés et appauvris. Sous l'action de pratiques culturales abusives (coupes répétées, pâturage en forêt, incendies, ratissage de litière, etc.), la flore améliorante (Graminées à mull) cède la place à une flore moins exigeante, mais aussi plus acidifiante (fougères, bruyères, etc.), et du mor s'accumule qui amorce la podzolisation. Ces phénomènes sont d'autant plus marqués que les sols sont plus acides et plus pauvres en argile et en fer. On observe alors de véritables podzols dans d'anciens horizons A_2 de sols lessivés.

Ce sont en définitive le climat général et l'ambiance physico-chimique qui déterminent la différenciation des sols podzolisés.

— En climat tempéré, cette différenciation est essentiellement liée au développement de l'horizon A_2, donc au lessivage des sesquioxydes individualisés et de la matière organique. Dans cette optique, les plus évolués sont les *podzols*, à profil A_0, A_1, A_2, B, C ; A_2 est complètement décoloré et cendreux ; B peut manquer par lessivage oblique, mais il est plus souvent soit humique, soit ferrugineux, soit encore les deux à la fois. Les *sols podzoliques* marquent un degré de moins dans le lessivage ; le type de profil est le même, mais A_2 est seulement blanchi et non cendreux ; il n'y a pas de Bh net, mais un Bfe qui contient une quantité importante de matière organique ; ces sols montrent souvent une hydromorphie à pseudo-gley en profondeur. Les *sols ocre podzoliques* ont un profil A B C, mais pas d'horizon A_2 ; B, de couleur ocre vif, est riche en oxyde de fer et en matière organique. Il n'y a jamais de Bh, il n'est jamais concrétisé. Les *sols crypto-podzoliques* ont un profil A B C, mais sans A_2 ; l'horizon B est brun-rouge à gris-noir, la podzolisation n'apparaissant morphologiquement que dans la microconstruction (enrobements). Ces sols marquent le passage vers certains *sols bruns acides* qui peuvent apparaître ainsi comme une tête de phylum des sols podzolisés.

— En climat froid, la désaturation est moins prononcée et l'horizon A_2 est souvent beaucoup moins épais (10-15 cm). Ce sont les *podzols boréaux* et les *podzols alpins*.

— Quand le drainage est déficient, l'hydromorphie se superpose à la podzolisation et l'on a des *podzols à gley*, soit humiques, soit ferrugineux. Enfin, il faut signaler quelques *podzols de nappe, tropicaux,* à A_2 très épais mais peu différencié de C.

Les sols podzolisés, quoique assez profonds, sont chimiquement très pauvres et présentent une mauvaise structure. Ils sont donc peu fertiles. Ils peuvent être utilisés pour des boisements mixtes de feuillus et de Conifères ; toutefois, ces derniers accroissent les processus de podzolisation. Après amendement et parfois drainage, certains peuvent porter des cultures à enracinement profond (asperges par exemple). Ils sont très carencés en oligo-éléments.

Les sols à sesquioxydes de fer

Les sols à sesquioxydes de fer résultent d'une pédogenèse de climat chaud, moyennement humide (600-1 200 mm/an), méditerranéen ou tropical semi-humide. Sous ces conditions, le processus d'évolution fondamental est l'hydrolyse, mais une hydrolyse neutre ou peu acide, provoquée par une eau peu chargée en gaz carbonique et en composés organiques solubles. Le fer est fortement libéré, mais il s'immobilise presque immédiatement sur place ; ces sols contiennent donc toujours beaucoup plus de cet élément que les sols tempérés sur roches mères comparables. Cependant, si le niveau d'altération est neutre ou peu acide, le profil subit, quant à son pH et à sa richesse en bases, une évolution très variable suivant les climats et en particulier suivant le rythme hydrothermique. Le lessivage est lent ou nul, sous climat méditerranéen, marqué par une saison humide relativement froide et un été sec et chaud. Il est plus rapide en climat tropical subhumide, où la saison pluvieuse correspond à une période chaude. Le bilan influence fortement la conservation et la néoformation des argiles. En milieu peu lessivé, donc peu acide ou même saturé en bases, les argiles sont riches en silice ; ce sont des illites et des montmorillonites souvent ferrifères. Quand le milieu s'acidifie, les argiles évoluent vers les kaolinites et le fer tend à se séparer. Dans le premier cas, les sols sont nettement structurés, surtout en B ; dans le second, ils le sont beaucoup moins.

Ces différences ont conduit les pédologues à reconnaître deux grandes catégories de sols à sesquioxydes de fer : les *sols fersiallitiques* et les *sols ferrugineux tropicaux*. Ce sont tous deux des sols évolués à profils A (B) C ou A B C ; l'individualisation des sesquioxydes de fer (et de manganèse) leur confère une couleur très accusée : rouge, ocre, rouille, etc. Cette coloration peut intéresser les horizons A et B, ou seulement les horizons B. Les oxydes peuvent se trouver sous formes figurées : concrétions, carapaces, cuirasses. La matière organique se décompose très vite et les teneurs en humus des horizons de surface sont peu élevées. Ces sols sont entièrement dépourvus de carbonates de calcium.

— Les *sols fersiallitiques* sont parfois appelés *sols rouges méditerranéens*. Leur fraction argileuse prend génétiquement et morphologiquement une importance prépondérante. L'horizon A est faiblement coloré par une matière organique à rapport C/N bas. L'horizon B est à structure polyédrique moyenne, parfois légèrement cubique. Il présente souvent des revêtements d'illuviation argileuse. Le fer et l'argile migrent de concert, avec parfois

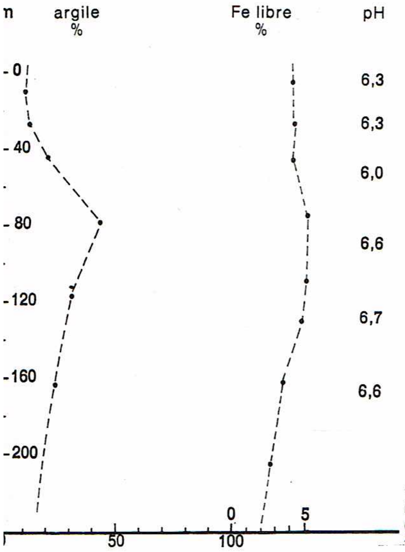

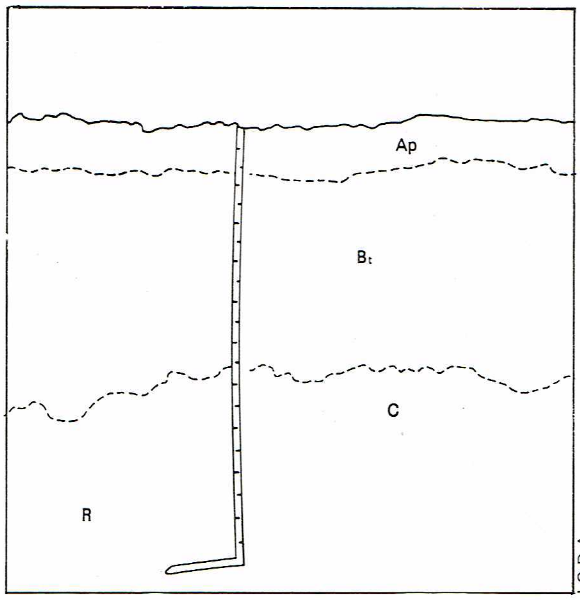

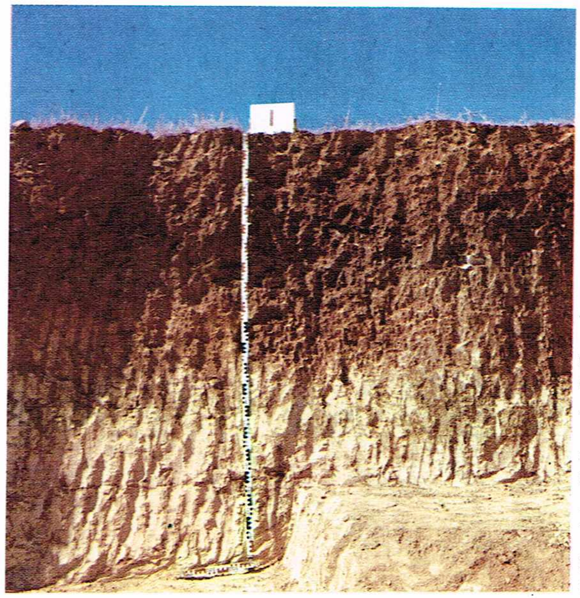

F. Mancini - G. Sanesi - G. Ferrari

▲ ***Les sols rouges méditerranéens, appelés parfois* terra rossa, *se développent principalement sur sols basiques et calcaires consolidés; sur ce profil caractéristique d'Espagne centro-méridionale, on observera l'accumulation d'argile dans l'horizon* B, *l'élévation du pH et la régularité de la teneur en fer libre.***

du limon et des sables très fins. Il s'agit d'un déplacement mécanique. De plus, les variations texturales entre A et B sont accusées par un déplacement des fines des horizons supérieurs dû à l'érosion latérale différentielle. Il y a appauvrissement. Le taux de saturation en bases, toujours élevé, est supérieur à 65 % et souvent voisin de 100 %; leur réaction pH varie de 6 à 7,5 dans tout l'ensemble du profil.

Le lessivage des bases et de l'argile amène à distinguer : les *sols fersiallitiques à réserve calcique, le plus souvent peu lessivés,* où les réserves compensent les pertes par drainage, le profil étant de type A (B) C; les *sols fersiallitiques sans réserve calcique et lessivés,* à A_2 bien développé, parfois très éclairci, et dont la désaturation peut atteindre 65 %, le rapport de lessivage étant inférieur à 1/1,4. Ces derniers sols sont du type A B C. En situation plus humide, en milieu légèrement acide et sous végétation forestière, on observe, au bout d'un temps assez prolongé, une brunification des profils. Ce sont les *sols bruns méditerranéens,* qui marquent le passage aux sols brunifiés tempérés.

Les sols rouges, appelés parfois *terra rossa,* se développent principalement sur roches basiques et sur calcaires consolidés. On les observe également sous les tropiques, dans les mêmes conditions. Ce sont pour la plupart des sols très anciens. Dans le midi de la France, ils ont été marqués par les variations climatiques du Quaternaire. Ils sont polycycliques.

Ces sols peuvent être très fertiles. Ils manquent parfois de profondeur. Ils sont pauvres en azote et en acide phosphorique et sont sensibles à l'érosion. Ils conviennent bien aux cultures arbustives : fruitiers, agrumes, vignes.

— Les *sols ferrugineux tropicaux,* caractéristiques des zones soudanaises, sont aussi très riches en fer libre, mais la matière organique y est moins évoluée, plus complexante; le rapport C/N varie de 14 à 17. Ces sols sont aussi plus acides (pH 5,5 à 6,5) et plus désaturés (60-70 %). Ils sont remarquables par la facilité de migration de l'argile et du fer, sous formes séparées. Les limons et les sables fins peuvent également être entraînés dans les horizons B, ce qui signale des mécanismes physiques comparables à ceux des sols rouges. L'horizon A, de structure massive, est tassé et compact; son manque d'aération favorise des engorgements en saison des pluies et, par suite, la réduction ainsi que la complexation du fer qui est mobilisé et exporté. Les horizons B sont colmatés par les fines des horizons supérieurs qui s'y accumulent; leur perméabilité diminue, ce qui provoque des phénomènes d'hydromorphie secondaire et développe même parfois la mise en place de nappes perchées qui s'écoulent latéralement. L'ensemble de ces processus provoque une redistribution du fer à travers le paysage par lessivage oblique le long des pentes.

Suivant l'importance de ces différenciations, on reconnaît des *sols ferrugineux tropicaux peu lessivés* à (B) de couleur ou de consistance, et des *sols ferrugineux tro-*

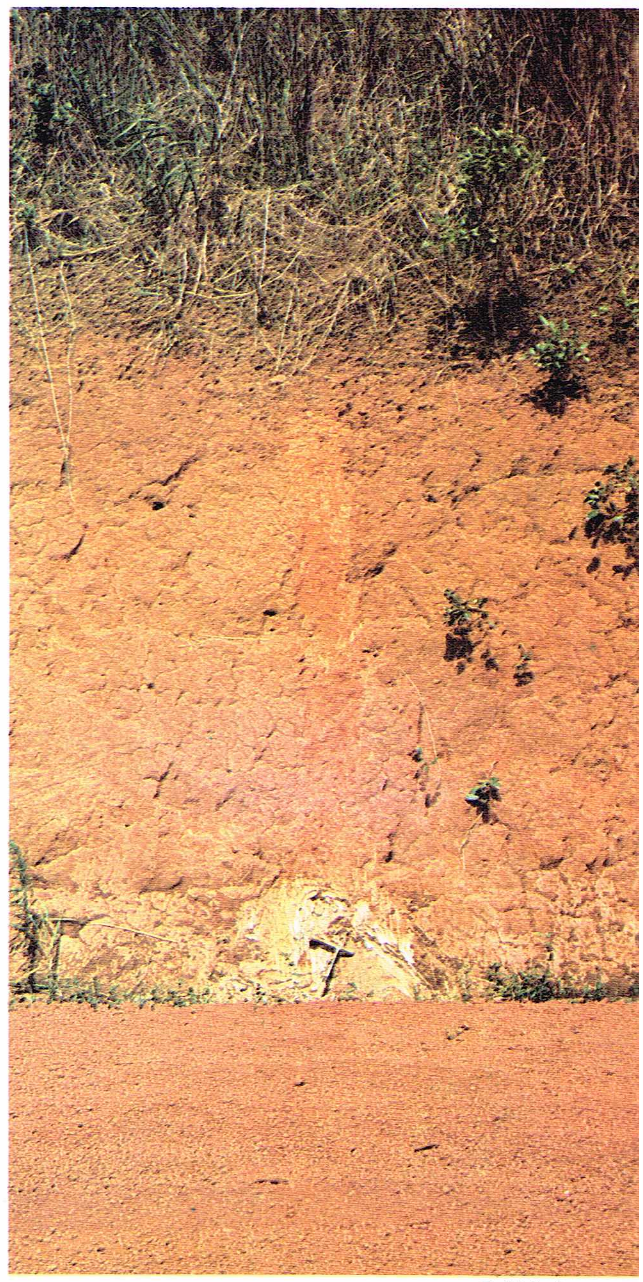

R. Maignien

▶ ***Un aspect de sol rouge ferrallitique développé sur granite au Cameroun; ces sols sont caractéristiques des régions chaudes et humides de la zone intertropicale; ils sont profonds mais leur profil est peu différencié.***

picaux lessivés à taches, à concrétions ferrugineuses, à pseudo-gley, et même à cuirasse quand les quantités de fer sont suffisantes pour cimenter l'horizon.

Sauf si le concrétionnement ou le cuirassement sont près de la surface, les sols ferrugineux tropicaux sont en général des sols assez profonds. Ils sont moyennement pourvus en bases mais pauvres en acide phosphorique. Ils ont de mauvaises qualités physiques en surface et sont très sensibles à l'érosion. Les horizons meubles sont parfois entièrement décapés, laissant apparaître la *latérite*. On utilise ces sols à la culture du mil, du sorgho, de l'arachide, du manioc, du tabac, du sisal et parfois du cotonnier.

Les sols ferrallitiques

Les sols ferrallitiques sont caractéristiques des régions chaudes et humides de la zone intertropicale. Autrefois appelés *sols latéritiques,* ils présentent des profils de type A B C, peu différenciés, profonds (parfois plus de 10 m), à horizons de limites diffuses, peu marqués mais de couleurs vives (rouges, jaunes).

L'accumulation en leur sein de produits néoformés alumineux et ferriques peut conduire aux *cuirasses latéritiques* et entraver leur mise en valeur. L'horizon A de surface est peu épais (10-15 cm), avec des teneurs faibles à moyennes en matière organique bien évoluée. L'horizon B, beaucoup plus épais, est remarquable par la présence abondante de kaolinite, de gibbsite (hydrate d'alumine), de gœthite et d'hématite (oxydes de fer), ainsi que de produits amorphes. L'horizon C est variable et dépend du type de roche mère. Il est caractérisé par des matériaux primaires totalement décomposés et s'écrasant entre les doigts. Sur roches cristallines acides l'altération est progressive, profonde de plusieurs mètres; sur roches basiques elle est brutale et complète en quelques millimètres. Ce sont des sols généralement bien drainés. Si le drainage est ralenti à certains niveaux, il se fabrique des concrétions ou des horizons cuirassés.

Les sols ferrallitiques sont typiques des milieux forestiers et se développent sur les roches les plus variées. Ils sont souvent très vieux; certains ont plusieurs centaines de millénaires et conservent les traces de pédogenèses anciennes.

La formation de ces sols dépend essentiellement de processus d'altération. Sous l'influence de pluies chaudes et abondantes, les roches sont complètement décomposées. Les silicates sont totalement hydrolysés, et les éléments cardinaux (Si, Al, Mg, Ca, K, Na) sont libérés et pour la plupart évacués. Au contact de l'eau ou par réaction entre eux, ces ions donnent naissance à des produits nouveaux. La silice peut s'éliminer complètement ou se combiner à l'aluminium pour donner de la kaolinite. L'alumine non combinée s'immobilise sous forme d'hydroxyde. La proportion relative de ces produits est fonction du drainage. Si celui-ci est excessif, la silice est éliminée et la gibbsite est abondante; si le drainage se ralentit, la silice est mal éliminée et les néosynthèses kaolinitiques dominent. Le fer, réductible, complexable, est susceptible de déplacements plus ou moins importants dans le profil ou entre les profils le long des pentes; il s'accumule dans les horizons profonds et dans les parties basses du relief, où il peut concrétionner. L'épaisseur des matériaux néoformés peut atteindre plusieurs mètres.

La disposition des minéraux des roches s'accompagne de celle des bases. Le complexe adsorbant s'appauvrit en alcalino-terreux et s'enrichit en ions H^+ et Al^{3+}. Le sol s'acidifie (pH = 4 à 6). La capacité d'échange est très faible et le degré de saturation très bas (quelques %).

Les 10 à 15 tonnes à l'hectare de matière organique qui tombent tous les ans à la surface de ces sols sont rapidement transformées. La teneur en matière organique, peu de A_1, est élevée et concentrée seulement dans les quelques centimètres supérieurs. La vie animale, intense, assure un brassage efficace des horizons superficiels qui s'appauvrissent en argile.

A ces processus généraux se superposent parfois des processus secondaires : les effets de l'altitude ou la présence de roches basiques, qui augmentent l'épaisseur et les teneurs en matière organique de l'horizon A_1; le dessèchement, qui favorise la peptisation du fer et le développement d'une structure de pseudo-sables; le lessivage et l'acidification, qui font apparaître une podzolisation de surface; des engorgements par l'eau à des profondeurs variables, qui provoquent des concrétionnements ou des cuirassements; le décapage par érosion des horizons supérieurs qui entraîne la mise à nu de ces horizons indurés.

Ces différentes expressions définissent les divers types de sols ferrallitiques. Sauf exception (cuirassement de surface), ce sont des sols profonds qui présentent de bonnes propriétés physiques, mais ils sont très acides, pauvres en bases et chimiquement déséquilibrés. Ils sont bien adaptés aux cultures arbustives : hévéa, palmier, cacaoyer, caféier, théier. Les cultures annuelles, à faible enracinement, sont difficiles à réussir.

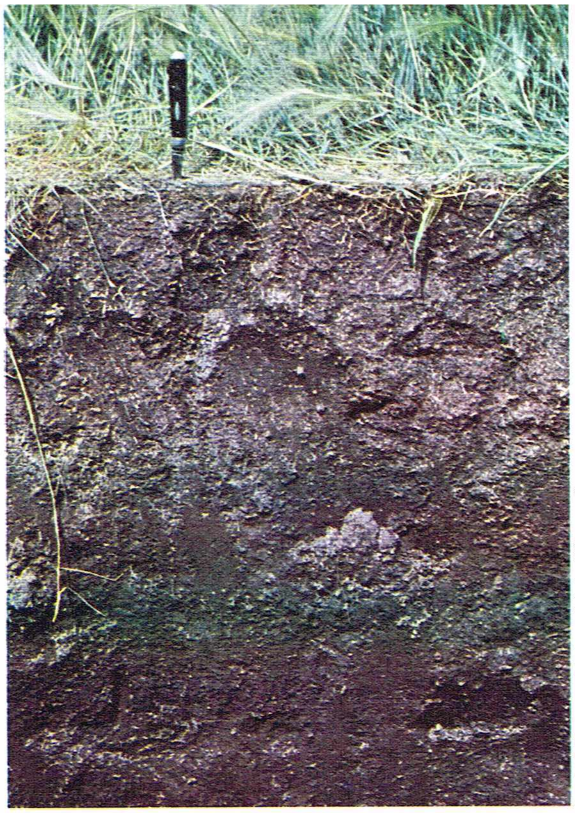

Prof. G.B. Lee - Université du Wisconsin

◀ **Un solontchak :** ***la forte évaporation due au climat aride associée à la remontée de sels provoque le dépôt ascendant du chlorure de sodium (Dakota du Sud; U.S.A.).***

Les sols sodiques

Les sols sodiques, parfois appelés *sols halomorphes,* ont une évolution dominée soit par la présence de sels solubles (chlorures, sulfates et carbonates de sodium et/ou de magnésium) en quantités suffisantes pour provoquer une modification importante de la végétation, soit par la présence de sodium et/ou de magnésium échangeables provoquant l'apparition d'une structure massive, diffuse et une compacité élevée à un niveau quelconque du profil. Il s'agit là, en fait, de deux familles de sols génétiquement différents. Dans les premiers, les *sols salins* proprement dits, l'ion sodium se trouve sous forme de sels solubles (chlorure, sulfate); le complexe adsorbant est généralement saturé par les ions bivalents et, en particulier, par le calcium; le profil, peu différencié, est bien structuré et généralement stable; le pH ne s'élève pas de façon excessive. Dans les seconds, l'ion sodium se trouve sous forme échangeable et la structure se dégrade; les sols deviennent souvent asphyxiants et le pH peut s'élever excessivement, jusqu'à plus de 9; c'est l'*alcalinisation.* Ces sols sont sensibles à l'action des eaux pluviales, qui les hydrolysent, et ils donnent des profils variés, nettement différenciés.

L'ion sodium peut être libéré par l'altération de certains minéraux alcalins; il peut résulter aussi d'une solution saline contenant du chlorure de sodium, l'eau de mer par exemple. C'est pourquoi les sols sodiques se développent le plus souvent dans les bas-fonds ou dans les plaines littorales. Ils sont fréquents en zones désertiques, où l'évaporation permet la remontée de sels. La nature particulière de la végétation permet souvent un diagnostic rapide.

— Le sol le plus caractéristique des *sols sodiques à structure non dégradée* est le *solontchak,* à profil A C qui montre à sa surface, en saison sèche, des efflorescences ou des encroûtements salins d'épaisseurs variables.

— Dans les *sols sodiques à structure dégradée,* les profils sont de type A B C; on distingue les *solonetz,* à horizon B très compact, à structure souvent en colonnes, pratiquement sans sels solubles, et les *solods,* à horizon A_2 blanchi, fortement acidifié en surface, mais à horizon B très compact, neutre à alcalin.

Tous ces sols sont très difficiles à utiliser. Il est parfois possible de les améliorer par drainage, par submersion d'eau douce ou par des apports d'engrais appropriés. Ainsi, en Camargue, des surfaces importantes sont utilisées pour la culture du riz.

Les sols hydromorphes

Les sols hydromorphes résultent d'une pédogenèse dominée par l'effet d'un excès d'eau en raison d'un engorgement temporaire ou permanent d'une partie ou de la totalité du profil. Cet excès d'eau est dû soit à la présence ou à la remontée de la nappe phréatique, soit au manque d'infiltration des eaux pluviales provoquant une nappe perchée ou un engorgement de surface. L'hydromorphie se traduit selon les conditions d'anaérobiose par une accumulation de matière organique de type tourbeux, anmoor, hydromor, etc., et/ou par la présence de gley ou de pseudo-gley. Elle peut aussi être accompagnée, de manière irrégulière, par une redistribution de calcaire, de gypse, et parfois par l'induration de ces éléments. Ces différentes expressions morphologiques définissent les principaux sols hydromorphes.

— Les *sols hydromorphes organiques* comprennent les différents types de *tourbes,* fibreuses ou altérées, pauvres ou riches en bases. L'hydromorphie y est totale le long du profil et permanente.

— Les *sols hydromorphes moyennement organiques* sont caractérisés par la présence de 8 à 30 % de matière organique de type anmoor ou hydromor (C/N < 20). L'hydromorphie intéresse encore tout le profil, mais elle n'est plus que temporaire en surface. Ce sont les *sols humiques à gley* à profil A G.

— Les *sols hydromorphes minéraux* ont des teneurs en matière organique en général faibles (4-5 %). Si la nappe phréatique ne subit que de faibles oscillations, et si elle est à faible profondeur et permanente, la réduction l'emporte sur l'oxydation ; on a alors un *sol à gley*. Si l'hydromorphie est temporaire et partielle, l'alternance de réduction et d'oxydation provoque une certaine redistribution du fer ; l'horizon est caractérisé par une juxtaposition de taches et de traînées grisâtres, ocre ou rouille ; le sol hydromorphe est dans ce cas un *sol à pseudo-gley*.

Les sols tourbeux sont difficiles à utiliser. Les sols humiques à gley peuvent être améliorés par drainage, surtout s'ils sont calciques et non salés. Les sols hydromorphes peu humifères sont parfois très fertiles après aménagements, ceux-ci devant être plus importants pour les sols à gley que pour les sols à pseudo-gley. Le niveau de fertilité est fonction de la composition minéralogique et des réserves en bases.

▶ ***Un type de* sol hydromorphe organique : *l'hydromorphie y est totale le long du profil et permanente.***

R. Maignien

BIBLIOGRAPHIE

AUBERT G., BOULAINE V., *la Pédologie,* Que sais-je ?, P.U.F., Paris, 126 p., 1967. - *Classification des sols,* Travaux C.P.C.S., Paris, Travail collectif, 1967. - DUCHAUFOUR Ph., *Précis de pédologie,* Masson et Cie, Paris, 481 p., 1965. - DUCHAUFOUR Ph., *Processus de formation des sols,* Coll. Études et recherches, Centre de pédologie C.N.R.S., Nancy, 182 p., 1972. - MAIGNIEN R., *Manuel de prospection pédologique. Initiatives,* Documentation technique n° 11, O.R.S.T.O.M., Paris, 132 p., 1969. - MILLOT G., *la Géologie des argiles,* Masson, Paris, 1964. - MARGULIS H., *Pédologie générale,* Gauthier-Villars, Paris, 1963.

▶ ***Un type de* sol hydromorphe minéral : *un* sol à pseudo-gley *caractérisé par une tendance au concrétionnement du fer.***

G. Bellier

HYDROGÉOLOGIE

L'hydrogéologie est la science des eaux souterraines. Elle étudie le rôle des matériaux constituant le sol et le sous-sol et des structures géologiques dans l'origine, la distribution, le mode de gisement, les modalités de l'écoulement et les propriétés physico-chimiques de ces eaux. Elle se préoccupe également de leur exploitation et de leur conservation en qualité et en quantité.

C'est une science pluridisciplinaire, basée sur le travail en équipe de nombreux spécialistes : géologues, hydrologues, hydrodynamiciens, météorologistes, géochimistes, foreurs, géophysiciens, etc. Cependant, la géologie occupe une place privilégiée.

L'eau, présente en tous lieux dans le sol et le sous-sol, joue trois rôles essentiels.

— *L'eau, substance minérale.* C'est un constituant du sol et du sous-sol au même titre que les roches décrites habituellement, comme les calcaires, les sables ou les granites. Elle doit, sous cet aspect, être étudiée à deux échelles de grandeur : d'une part, en laboratoire sur échantillon pour déterminer ses propriétés physiques, mécaniques et chimiques, et, d'autre part, dans son gisement souterrain dont la localisation, les dimensions et la richesse en eau sont à considérer.

— *L'eau, agent géodynamique et géochimique.* C'est le véhicule de transport de substances minérales dans le sol et le sous-sol et entre l'atmosphère et le sous-sol. Par ses propriétés particulières, l'eau souterraine est un matériau privilégié. Son état liquide favorise ses mouvements et son aptitude à dissoudre ou à mettre en suspension les autres substances minérales, permettant ainsi leur transport et leur dispersion. En particulier, étant le véhicule des déchets de l'activité de l'homme, elle joue un *rôle primordial dans la propagation de la pollution.*

— *L'eau, ressource minérale renouvelable.* L'eau, première ressource minérale indispensable à l'homme, conditionne son existence dans sa constitution et son environnement. Mais si les ressources en eau sont renouvelables dans des limites nettement définies, elles ne sont pas inépuisables ; leur exploitation et leur gestion exigent des méthodes et des techniques appropriées en vue de leur conservation en quantité et en qualité. La détérioration de la qualité, souvent méconnue, est le danger le plus grave de la limitation des ressources.

Il est donc indispensable de connaître les conditions et les modes de gisement des eaux souterraines, leurs origines et leurs mouvements dans le sol et le sous-sol. C'est un des buts de l'hydrogéologie.

L'importance des eaux souterraines

Les eaux souterraines occupent une place importante dans la satisfaction des besoins en eau douce de l'activité humaine, ainsi que le mettent en évidence les tableaux I et II.

L'examen de ces tableaux montre que l'utilisation actuelle des eaux souterraines en France est anormalement basse. En effet, si dans quelques pays, comme la Suède, la faible utilisation des eaux souterraines s'explique par la nature défavorable du sous-sol, ce n'est pas le cas en France dont le territoire est aussi bien pourvu que celui des États européens voisins.

Les avantages des eaux souterraines

Les eaux souterraines présentent des avantages importants par rapport aux eaux de surface :

Tableau II. Prélèvements actuels d'eau en France, en milliards de m^3/an*.

Utilisations	Eau souterraine	Eau de surface (y compris les sources)	Totaux
distributions d'eau potable	1,3	2,7	4
agriculture (irrigation)	1	4	5
industrie	1,5	2,5	4
centrales thermiques	0,5	9,5	10
total	4,3	18,7	23

**1 milliard de m^3/an ou 1 km^3/an = 2,6 millions de m^3/jour équivalent à un débit constant de 30 m^3 par seconde, soit les besoins en eaux de l'agglomération parisienne.*

▲ **Tableau II :** ***prélèvements actuels d'eau en France, en milliards de m^3/an.***

Tableau I. Utilisation des eaux souterraines, exprimée en pourcentages, dans différents pays.

Pays	Eau souterraine captée	Eau de source	Total	Eau de surface
Allemagne de l'Ouest	75	17	92	8
Autriche	47	52	99	1
Belgique	73	0	73	27
Espagne	27	2	29	71
Finlande			30	70
France	30	16	46	54
Grande-Bretagne			34	66
Italie	55	33	88	12
Luxembourg			90	10
Pays-Bas			80	20
Suède			44	56
Suisse	44	31	75	25
U.R.S.S.			30	70

◀ **Tableau I :** ***utilisation des eaux souterraines, exprimée en pourcentage, dans différents pays.***

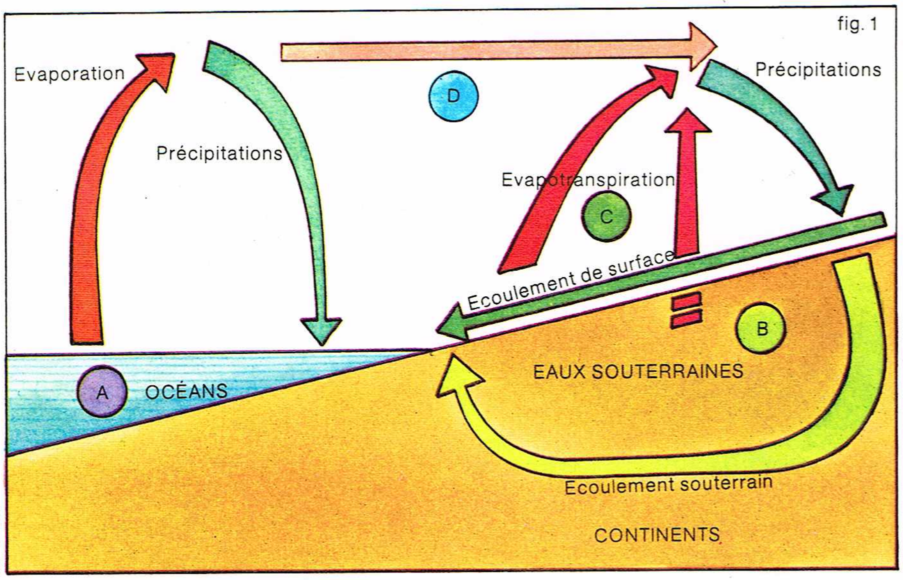

▲ Cycle général de l'eau ; *des réserves d'eau assurent l'équilibre hydrologique en quatre points du système (voir tableau III) : les océans* A, *les eaux souterraines* B, *les eaux de surface* C *et l'atmosphère* D.
▼ *Ci-dessous,* tableau IV : *masses en mouvement, en milliards de m³/an.*
En bas, cycle général de l'eau - bilan du cycle de l'eau : *l'étude de ce cycle est traitée par l'hydrologie, au sein de laquelle la surface du sol permet de distinguer deux grandes disciplines, l'hydrologie de surface et l'hydrogéologie.*

Tableau IV. Masses d'eau en mouvement, en milliards de m^3/an.

Nature	Océans	Continents	France
précipitations	411 000	109 000	460
évaporation	448 000	72 000	260
écoulement		37 000	200
eaux de surface		22 000	80
eaux souterraines		15 000	120

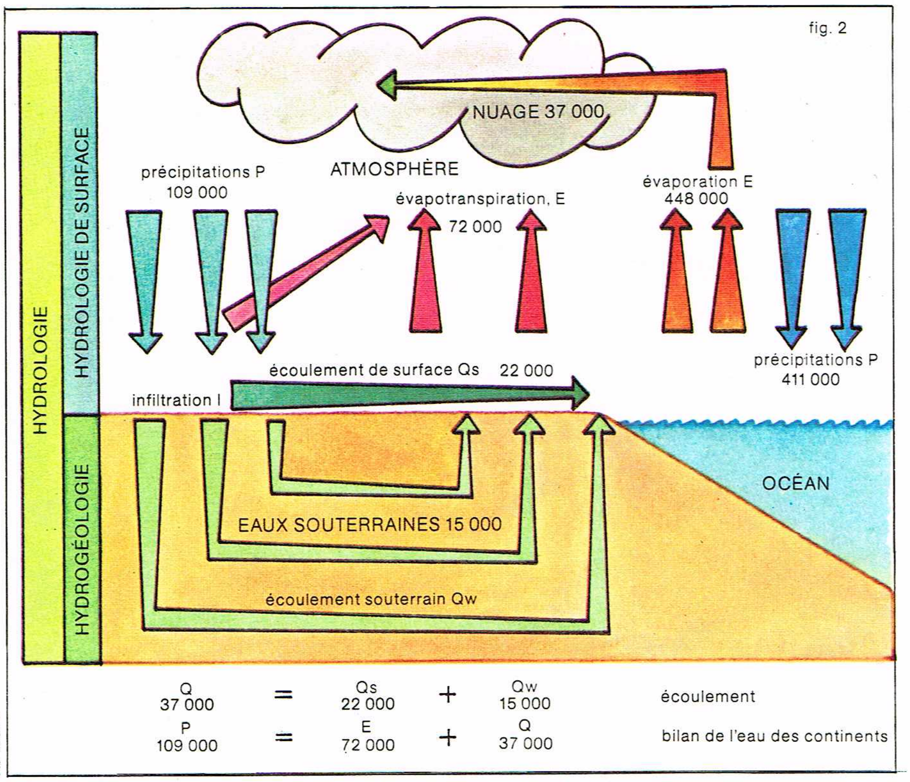

— une surface d'extension plus grande que celle des cours d'eau, donc une meilleure répartition géographique ;

— une meilleure qualité, car elles sont en général protégées de la pollution par les recouvrements de surface et le sol joue un rôle d'épuration biologique. En outre, leurs propriétés physico-chimiques sont sensiblement constantes, d'où une économie notable sur le coût du traitement des eaux (0,05 à 0,10 F par m^3 contre 0,30 à 0,40 F pour les eaux de surface) ;

— les dimensions des aquifères (gisements d'eau souterraine utilisables comme sources d'eaux), qui assurent le rôle de réservoirs souterrains naturels (plusieurs dizaines de milliards de m^3 contre quelques milliards pour les retenues par barrages).

C'est pourquoi l'usage des eaux souterraines devrait être réservé, en priorité, à l'alimentation humaine.

Le cycle de l'eau

Afin de mieux comprendre l'origine et le mouvement des eaux souterraines, il est utile de les replacer dans leur cadre général à l'échelle du globe terrestre, dont elles constituent une étape inséparable d'un vaste ensemble : le cycle général de l'eau. Le cycle de l'eau assure le renouvellement des masses d'eau accumulées dans les grands réservoirs répartis à la surface du globe (fig. 1 et tableau III).

En ce qui concerne les eaux de surface, qui occupent 30 000 000 km^3, le stockage concerne essentiellement les masses d'eau à l'état solide, glaciers et neiges éternelles (calottes glaciaires). Le rôle des lacs et des réservoirs d'eau douce (125 000 km^3) ainsi que des cours d'eau (1 700 km^3) est négligeable.

Le cycle général de l'eau

L'eau, dans la nature, suit un vaste cycle. Elle s'y présente sous deux états principaux : gazeux et liquide-solide, et dans deux milieux distincts : au-dessus et en dessous de la surface du sol (fig. 1 et 2). La surface du sol est ainsi une zone de contact privilégiée, d'où l'importance des sciences de la Terre, et en particulier de la géologie, de la pédologie et de la géomorphologie.

Comme dans tout mouvement, une source d'énergie est nécessaire pour actionner le cycle de l'eau : elle est fournie par le Soleil et la gravité terrestre. L'énergie solaire transforme l'eau en vapeur. La nature réalise ainsi une véritable pompe solaire, dépensant 400 000 milliards de kW, soit 1/5 de l'énergie solaire qui atteint la Terre et 1/3 de celle qui parvient à la surface du sol. Sous l'action de la chaleur, l'eau est transformée en vapeur, au cours de toutes les étapes de son cycle. Mais c'est surtout sur les étendues d'eau libre (océans, lacs, cours d'eau) et à la surface du sol des continents (sur une tranche de quelques mètres de profondeur, exceptionnellement jusqu'à 50 m) que l'*évaporation* (E) joue un rôle important (520 000 km^3/an, dont 72 000 pour la surface des continents). A cette action s'ajoute la *transpiration* des êtres vivants, végétaux et animaux. L'évaporation et la transpiration sont habituellement groupées en un seul phénomène : l'*évapotranspiration* (E).

La vapeur d'eau ainsi formée se condense dans les nuages, lesquels engendrent les *précipitations* (P) sous forme de pluie, neige ou grêle. Les précipitations par condensation des brouillards, dites occultes, sont en cours d'étude. Dans cette phase, l'eau est mise en mouvement par l'action des forces de gravité. Au contact du sol, l'eau des précipitations, exception faite de l'évapotranspiration, donne naissance à l'*écoulement* (Q = environ 37 000 km^3/an), lequel se fractionne en deux parties inégales : l'*écoulement de surface* (Q_s = 22 000 km^3/an) et l'*infiltration* (I), origine de l'*écoulement souterrain* (Q_w = 15 000 km^3) [fig. 2 et 3]. Les eaux de l'écoulement de surface s'écoulent à la surface du sol dans le réseau hydrographique (cours d'eau) et les étendues d'eau libre (lacs, océans). Les eaux d'infiltration, franchissant la surface du sol, pénètrent dans le sol et le sous-sol. Elles alimentent les eaux souterraines et entretiennent l'*écoulement souterrain*. Les eaux souterraines se déversent dans le réseau hydrographique et les étendues d'eau libre continentales et océaniques. Le cycle de l'eau est ainsi bouclé.

Sur les continents, il est possible de distinguer deux circuits d'écoulement de l'eau, dont la surface du sol constitue une frange de contact et de répartition (fig. 3) :

— un *circuit rapide* à la surface du sol (de quelques heures à quelques jours) : précipitations — écoulement

de surface — cours d'eau — océan. Le volume d'eau ainsi écoulé correspond à la crue des rivières ;

— un *circuit lent, différé,* plus complexe, dans les aquifères (de longue durée, de l'ordre de quelques années à des centaines de millénaires) : précipitations — infiltrations — écoulement souterrain — émergences — cours d'eau. Cet écoulement est à l'origine du débit des cours d'eau en absence de précipitations (bas débit, étiage).

Ainsi, après un laps de temps très court succédant aux précipitations, le débit des rivières n'est plus alimenté que par les eaux souterraines. En particulier, leur débit d'étiage correspond au débit des aquifères de leur bassin versant. Dans ce circuit nous pouvons considérer que la surface du sol joue le rôle de répartiteur, alors que les aquifères remplissent ceux de conducteur et de régulateur. Le débit de l'écoulement global (Q), dans les cours d'eau, mesuré aux stations de jaugeage, est ainsi la somme des débits de l'écoulement de surface (Q_s), et de l'écoulement souterrain (Q_w).

On constate donc l'importance des caractéristiques de la surface du sol dans l'étude de l'alimentation des eaux souterraines. Cinq ensembles de facteurs conditionnels interviennent : les facteurs hydroclimatiques (précipitations, évapotranspiration), les facteurs géomorphologiques (relief), les facteurs géologiques (lithostratigraphie, perméabilité verticale, structures), les facteurs hydrogéologiques du sol et les facteurs de la couverture végétale. Il faut également tenir compte des interactions physico-chimiques de l'eau avec les facteurs précédents. L'importance de la géomorphologie et de la géologie sera soulignée ultérieurement.

Les eaux juvéniles

Depuis l'Antiquité, de longues controverses ont eu lieu sur la production d'eau en profondeur qui vient alimenter le cycle de l'eau. Ces *eaux juvéniles* se manifesteraient dans les émissions de vapeur d'eau (éruptions volcaniques, geysers, mofettes, etc.) et les sources thermominérales. Les hydrogéologues admettent aujourd'hui leur existence. Si leur apport, à l'échelle humaine, est négligeable par comparaison avec les masses d'eau considérées (quelques km³/an), à long terme, il présente cependant de l'intérêt.

En effet, si l'on considère que ce processus géologique continu s'est poursuivi durant les quelques milliards d'années de vie de la Terre, il suffit à justifier le volume d'eau actuel. Deux sources principales d'eaux juvéniles sont à considérer :

— la cristallisation et la formation des minéraux dans la croûte terrestre (environ 3 km³ d'eau par an) ;

— le refroidissement du magma pénétrant localement dans les couches supérieures de l'écorce terrestre. Une masse de magma de 1 000 m d'épaisseur, en se refroidissant, produirait un million de km³ d'eau par an et par km².

Les caractéristiques fondamentales du cycle de l'eau

La synthèse des données exposées permet de formuler les caractéristiques fondamentales du cycle de l'eau :

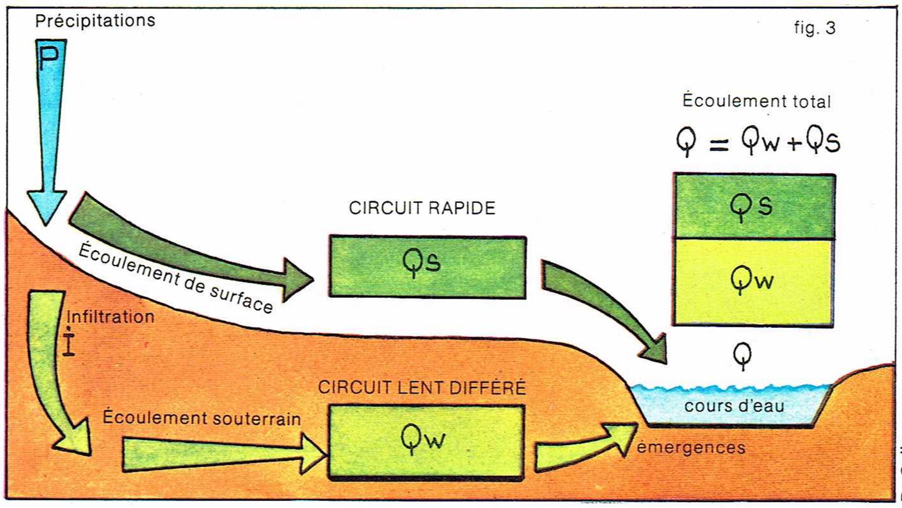

Tableau III. Masses d'eau accumulées dans les grands réservoirs naturels, en milliards de m³ (km³)

Réservoirs	Surfaces (km²)	Volumes d'eau (km³)
océans	361 000 000	1 370 000 000
continents	149 000 000	90 000 000
eaux de surface		30 000 000
eaux souterraines		
– à une profondeur de 800 m		5 000 000
– à une profondeur de 5 km		60 000 000
atmosphère (vapeur d'eau)		13 000
terre	510 000 000	1 500 000 000*

Total approximatif, compte tenu du manque de connaissances sur le volume des eaux souterraines.

▲ *En haut, une des manifestations des* eaux juvéniles : *un geyser en Islande.*
Au centre, circuit de l'eau à la surface du sol et dans le sol : *le rôle répartiteur du sol montre l'importance de la géomorphologie et de la géologie.*
Ci-dessus, tableau III :
masses d'eau accumulées dans les grands réservoirs naturels, en milliards de m³ (km³).

▶ **Répartition verticale des eaux souterraines.** ***La répartition verticale, localisation et profondeur, des eaux souterraines est déterminée par la lithologie des formations géologiques. Celles-ci se répartissent en*** **formations perméables, 1,** ***donnant naissance aux aquifères, et en*** **formations imperméables, 2,** ***les séparant sans les isoler car elles ne sont pas étanches. Un type intermédiaire est représenté par les*** **formations semi-perméables, 3,** ***lesquelles laissent circuler l'eau.***

— La masse d'eau totale répartie à la surface du globe est constante à l'échelle humaine, les apports d'eaux juvéniles étant négligeables (certainement inférieurs aux erreurs de calcul des évaluations).

— La masse d'eau en mouvement est très faible comparée à celle qui est stockée dans les différents réservoirs (37 000 km³/an contre 1 500 000 000) dont le principal est le réservoir océanique, lequel joue un rôle régulateur (tableau III).

A l'échelle humaine, elle est constante, ses deux sources d'énergie, le Soleil et la gravité, étant elles-mêmes constantes. Le rôle de cette masse d'eau en mouvement est important, soit sous forme de vapeur d'eau dans les échanges atmosphériques, soit à l'état liquide à la surface du sol, où elle représente un agent mécanique et de transport à l'origine des phénomènes géologiques, géomorphologiques et physiographiques. Ce sont ces phénomènes qui donnent à la surface de la Terre son aspect actuel, sans cesse changeant. Il faut y ajouter la propagation de la pollution.

Par rapport aux facteurs naturels évoqués ci-dessus, l'action de l'homme sur le cycle de l'eau est négligeable. Toutefois certaines de ses activités, comme l'intensification de l'irrigation et le détournement des grands fleuves, peuvent modifier le régime des eaux de grandes régions. De telles observations ont été notées par les hydrogéologues. Citons à ce sujet les travaux des spécialistes soviétiques.

Le bilan du cycle de l'eau

Le bilan du cycle de l'eau à tous les stades a pour but, comme un bilan comptable, d'établir la balance annuelle entre ses différentes phases. Pour l'ensemble de la Terre, les deux phases correspondant aux deux sources d'énergie (le Soleil et la gravité), à savoir l'évapotranspiration (E) et les précipitations (P), sont équilibrées, étant donné l'absence d'apports extérieurs (eaux juvéniles négligeables) et de pertes notables dans la haute atmosphère. Sur les continents, les précipitations (P) équilibrent l'évapotranspiration et l'écoulement (Q), les variations des stocks des réservoirs (atmosphère, surfaces d'eau libre, cours d'eau, eaux souterraines) étant négligeables par rapport à leur masse totale (fig. 2) :

$$P = E + Q$$
$$109\,000 \text{ km}^3/\text{an} = 72\,000 \text{ km}^3/\text{an} + 37\,000 \text{ km}^3/\text{an}$$

L'eau souterraine, substance minérale

La géologie de l'eau

La localisation, le stockage et l'exploitation des eaux souterraines sont déterminés par les caractéristiques géologiques, stratigraphiques et structurales du sous-sol. La géologie régionale joue donc un rôle primordial dans l'évaluation et l'exploitation des ressources en eaux. C'est pourquoi certains auteurs limitent le domaine de l'hydrogéologie à la géologie appliquée à l'eau.

Les matériaux constituant le sol et le sous-sol ont la propriété, à des degrés divers selon leur nature *lithologique*, d'emmagasiner, de favoriser l'écoulement de l'eau souterraine et de la restituer. Les sels solubles qu'ils renferment contribuent à la composition chimique des eaux, limitant par un critère de qualité les zones d'exploitation. Des exemples seront cités ultérieurement. Ces matériaux constituent des couches lithologiques, ou *formations géologiques*. La géologie de l'eau repose donc sur l'étude des caractéristiques de la succession verticale et de l'étendue horizontale des formations géologiques.

La répartition régionale des gisements d'eaux souterraines montre deux grands types de *provinces hydrogéologiques :*

— les provinces hydrogéologiques des formations sédimentaires (grands bassins sédimentaires, comme le bassin de Paris, et le bassin d'Aquitaine) et les régions montagneuses (Alpes, Pyrénées) ;

— les provinces hydrogéologiques des socles anciens : le Massif central, la Bretagne, les Vosges.

Les eaux souterraines des bassins sédimentaires

Les caractéristiques géologiques déterminent la répartition verticale et l'extension horizontale des eaux souterraines.

● *Répartition verticale des eaux souterraines*

Une coupe verticale dans un bassin sédimentaire montre, de haut en bas, une succession de gisements

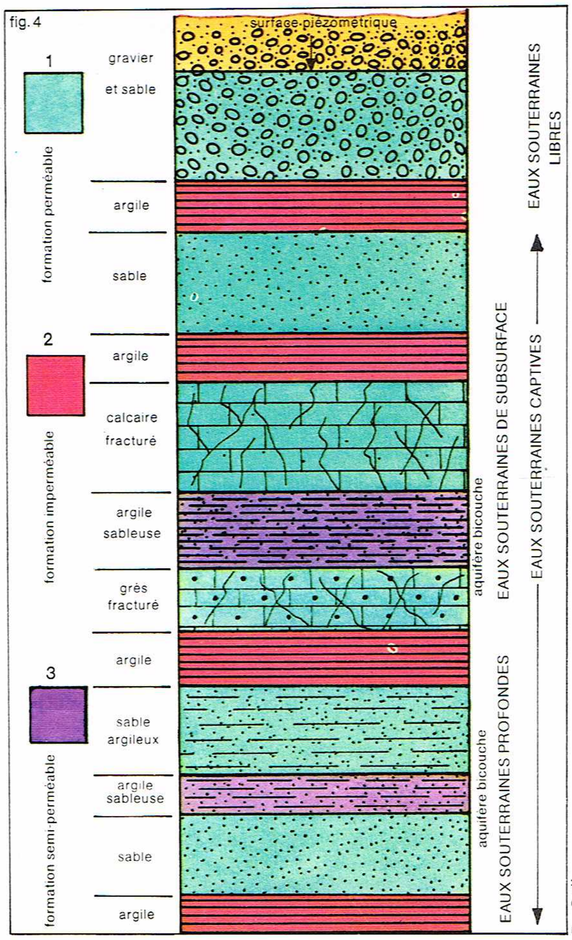

d'eaux souterraines, exploitables, superposés (fig. 4). Leur localisation est déterminée par la nature et la position des formations géologiques. Un forage recoupe des assises de roches productrices d'eau, dites *formations perméables*, séparées par des couches non productrices, ou *formations imperméables*.

— Les formations perméables constituent les gisements d'eau souterraine, ou *aquifères*, appelés souvent *nappes d'eau souterraine*. Ce sont les sables, graviers, sables argileux, calcaires, grès, etc.

— Les formations imperméables, comme les argiles, quoique renfermant de l'eau en grande quantité, ne peuvent alimenter les puits et séparent les aquifères. Contrairement à une opinion courante, elles ne sont pas étanches et constituent rarement des écrans isolant les aquifères. Simplement, la vitesse d'écoulement de l'eau y est très lente : quelques millimètres par an. Des transferts d'eau verticaux sont donc possibles. En outre, certaines roches de perméabilité faible, dites *semi-perméables*, même si elles ne permettent pas le captage de quantités d'eau appréciables, se laissent traverser par l'eau, favorisant les intercommunications entre aquifères. Ce phénomène naturel est appelé la *drainance*. Les échanges d'eau ainsi provoqués représentent des débits non négligeables, compte tenu des échelles d'espace et de temps considérées (des milliers de km² et des siècles, voire des millénaires). Il faut donc éviter d'associer le terme imperméable à celui d'étanchéité.

Deux ou plusieurs aquifères séparés par des assises semi-perméables constituent un *aquifère multicouche* (fig. 4 et 15). D'après les études récentes, les roches imperméables seraient peu fréquentes. Il en résulte que les différents aquifères d'un bassin sédimentaire constituent un complexe hydrologique unique, comme l'ont mis en évidence les travaux des dernières années sur le bassin de Paris.

La formation albienne du bassin de Paris peut être étudiée comme exemple d'aquifère multicouche (fig. 10). Elle a été décrite depuis plus d'un siècle sous le terme de *nappe des Sables verts*. Couvrant près de 100 000 km² sur une épaisseur pouvant atteindre parfois jusqu'à

160 m, avec des réserves estimées à 425 milliards de m³ c'est l'aquifère le plus important du bassin et même d'Europe occidentale. Les géologues qui ont étudié cette formation, d'après les coupes des affleurements et surtout de nombreux forages de recherches d'eau et de pétrole, ont individualisé trois formations argilo-sableuses aquifères, séparées, mais non isolées, par des formations semi-perméables (tableau V). Ainsi, du point de vue des eaux souterraines, nous sommes en présence d'une unité hydrogéologique.

Toutes les formations perméables d'un grand bassin sédimentaire renferment des nappes d'eaux souterraines. Toutefois, leur exploitation est limitée en profondeur par des impératifs techniques et par la qualité de l'eau. Ainsi, dans le bassin de Paris, les hydrogéologues ont reconnu dix aquifères mono- ou multicouches productifs d'eau souterraine potable. La profondeur des sondages d'alimentation en eau est maximale (600 à 800 m) dans la région parisienne. En effet, les eaux plus profondes présentent des teneurs en sels dissous (résidu sec) élevées qui les rendent impropres à l'utilisation. Par exemple, au sondage de Chailly-en-Bière, le résidu sec est de 8 500 mg/l dans le Jurassique supérieur, puis, dans le Jurassique moyen, de 9 000 mg/l à 1 690 m de profondeur et de 11 000 mg/l à 1 710 m. Pour les eaux souterraines du Jurassique moyen, on note des résidus secs de 14 000 mg/l à Nangis (1 900 m de profondeur), de 18 000 mg/l à Perthes (1 815 m), de 29 000 mg/l à Coulommès (1 890 m), une teneur en chlorure de sodium de 18 000 mg/l à Saint-Pierre-lès-Nemours (1 826 m). Quant aux eaux plus profondes, elles dépassent la teneur moyenne de l'eau de mer (35 000 mg/l) avec 80 000 mg/l à Nangis (2 265 m), 91 000 mg/l à 2 320 m, puis 117 000 mg/l à 2 440 m à Château-Landon.

Dans de grands bassins, plus favorables, comme le Sahara du Sud algérien, les eaux souterraines sont captées à des profondeurs supérieures à 1 000 m.

Actuellement, les aquifères profonds présentent un intérêt économique du fait de la présence d'eaux chaudes (70 °C et plus) exploitables pour l'*énergie géothermique*. L'élévation de la température de l'eau est provoquée par l'échauffement des roches dû au gradient géothermique, lequel caractérise l'élévation de la température du sous-sol en relation avec la profondeur. Variable selon les conditions géologiques, il est en moyenne de 1 °C par 30 mètres.

En fonction de leur profondeur de gisement nous pouvons distinguer, de bas en haut, trois grandes zones d'eaux souterraines (fig. 4) :

— les eaux souterraines libres localisées dans le premier aquifère sous la surface du sol ;
— les eaux souterraines de subsurface ;
— les eaux souterraines profondes.

La zone des eaux souterraines libres (aquifères libres), de la surface du sol à quelques dizaines de mètres de profondeur, est caractérisée par des relations directes avec les eaux de surface : précipitations, écoulement de surface (cours d'eau), surfaces d'eau libre (lacs, étangs). Les interactions avec l'air et le milieu biologique y sont actives. C'est la zone des échanges où les eaux souterraines acquièrent leurs caractéristiques hydrogéochimiques de base (y compris celles dues à la pollution). Le régime de l'écoulement des eaux souterraines est imposé par la géomorphologie, principalement par le réseau hydrographique. Les zonalités régionales climatiques ont des répercussions hydrologiques. Les ressources en eaux souterraines sont importantes par l'apport direct, souvent à forts débits, des aquifères sous-jacents, des cours d'eau et des précipitations.

En dessous des aquifères à nappe libre, dans une zone profonde de 200 à 300 m, les structures hydrogéologiques imposent la présence généralisée d'eaux souterraines captives. Les transferts de volumes d'eau et de pressions, latéraux ou verticaux, sont importants. Les communications verticales entre les formations aquifères superposées, plus ou moins séparées par des intercalations semi-perméables, constituent des aquifères multicouches. L'influence des facteurs géomorphologiques sur le régime de l'écoulement souterrain s'estompe ; elle est réduite à celle des cours d'eau principaux, l'impact des structures hydrogéologiques régionales étant prédominant. Le renouvellement des ressources en eaux souterraines est plus faible que dans la zone supérieure, les apports directs des eaux de surface étant moins importants mais toujours appréciables.

Dans la zone plus profonde, seule la structure hydrogéologique générale du bassin impose le régime des eaux souterraines. Il faut tenir compte toutefois des transferts verticaux, plus importants que l'écoulement latéral des eaux souterraines, très lent. Malgré des réserves en eau souterraine, souvent considérables, les ressources renouvelables sont faibles par suite de l'alimentation très limitée.

● *L'extension latérale des eaux souterraines.*

L'extension latérale des aquifères est liée étroitement aux caractéristiques lithostratigraphiques et structurales régionales. Le bassin de Paris est, là encore, un exemple type (fig. 5 et 10). La disposition des formations géologiques en « pile d'assiettes » creuses, déformées par des plissements et accidentées de fractures, détermine l'extension des nappes d'eaux souterraines. Les dix aquifères, mono- ou multicouches, identifiés dans la répartition verticale, présentent une extension géographique variable selon les formations perméables qui en constituent la roche réservoir. Cette structure hydrogéologique régionale se complique localement par suite des variations lithologiques dues aux discontinuités de sédimentation et aux accidents tectoniques.

▼ *Ci-dessous,* tableau V : *formations géologiques de l'aquifère multicouche albien du bassin de Paris. En bas,* coupe géologique transversale du bassin de Paris : *l'extension latérale des aquifères est commandée par la lithologie et la tectonique.*

Tableau V. Formations géologiques de l'aquifère multicouche albien du bassin de Paris.

Épaisseurs en m	Aquifères	Semi-perméables
10-80	formation argilo-sableuse supérieure des sables de Frécambault	
5-10		argiles tégulines
1-50	formation argilo-sableuse moyenne des sables des Drillons	
3-30		argiles de l'Armance
10-30	formation argilo-sableuse inférieure des sables verts	

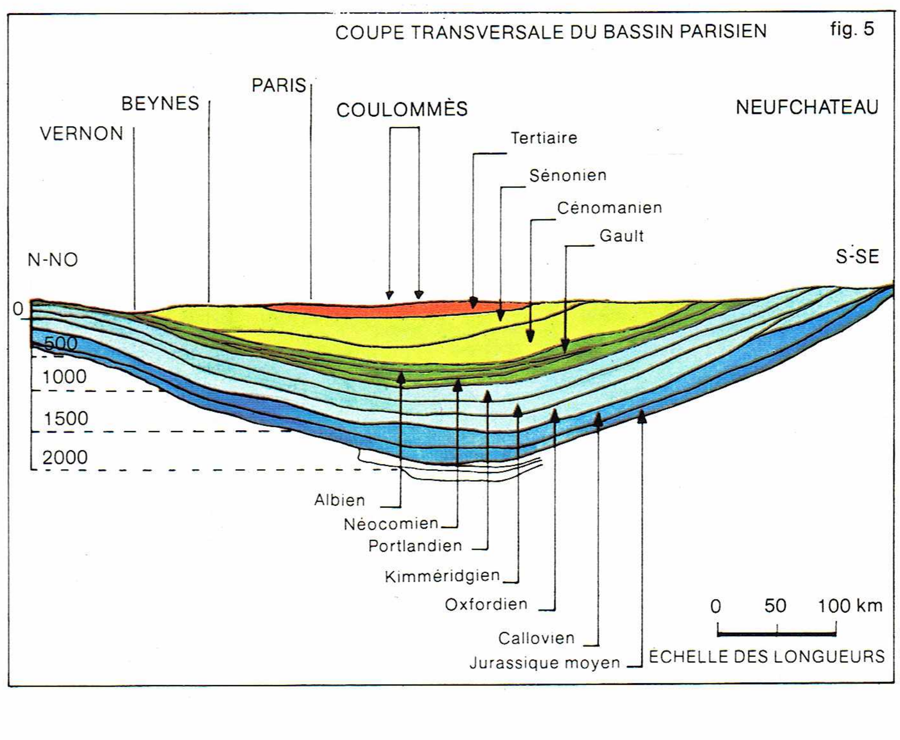

R. Colin

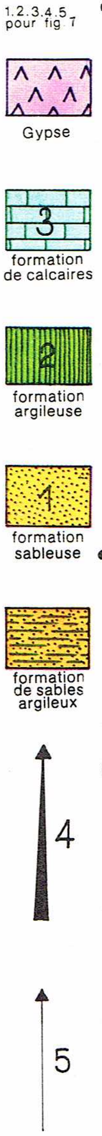

fig. 6

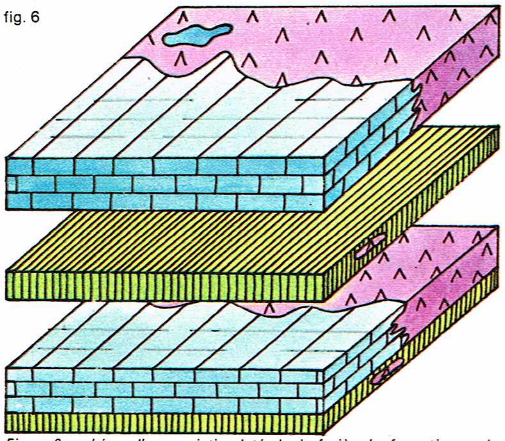

Figure 6 : schéma d'une variation latérale de faciès. *La formation supérieure montre celle de calcaires à des gypses, d'où modification importante dans la géochimie de la roche réservoir. La présence des sels solubles (sulfates) provoque des eaux séléniteuses.*

fig. 7

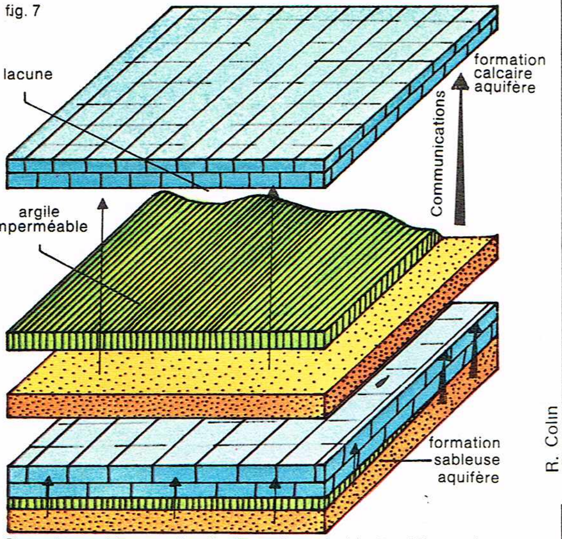

Figure 7 : schéma explicatif d'une discontinuité de sédimentation accompagnée d'une lacune de dépôts et son rôle hydrogéologique. *La formation imperméable d'argile (2), ou semi-imperméable, interstratifiée entre une formation sableuse (1) à la base et une formation calcaire (3) au sommet, n'est pas continue latéralement. Il y a lacune de dépôt en arrière. Ainsi des communications s'établissent entre les deux aquifères (4), communications directes entre aquifères par lacunes de dépôt, échanges par drainance à travers les argiles (5).*

fig. 8

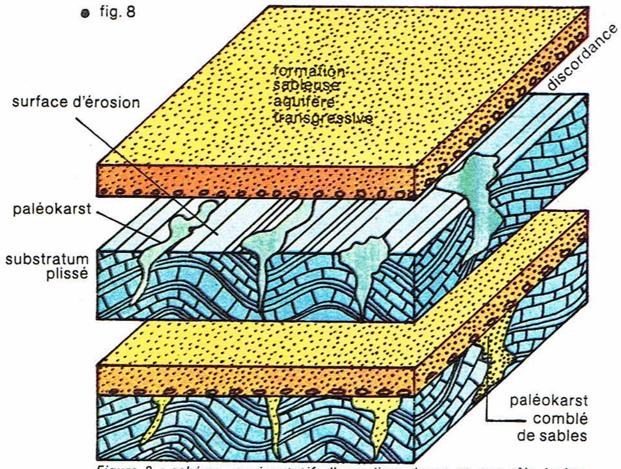

Figure 8 : schéma représentatif d'une discordance et son rôle hydrogéologique. *La formation aquifère sableuse horizontale repose en discordance sur un soubassement de calcaires plissés; la formation sableuse est transgressive sur les calcaires. Les épisodes qui se sont succédé sont le plissement de la formation calcaire, son érosion ayant créé une surface d'érosion et des paléokarsts, la transgression marine et le dépôt de sables.*

fig. 9

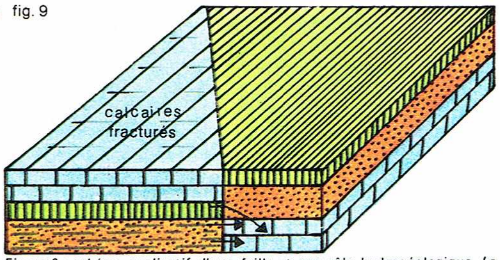

Figure 9 : schéma explicatif d'une faille et son rôle hydrogéologique. *La faille, par le décalage d?s formations, met en contact latéral des aquifères favorisant les communications.*

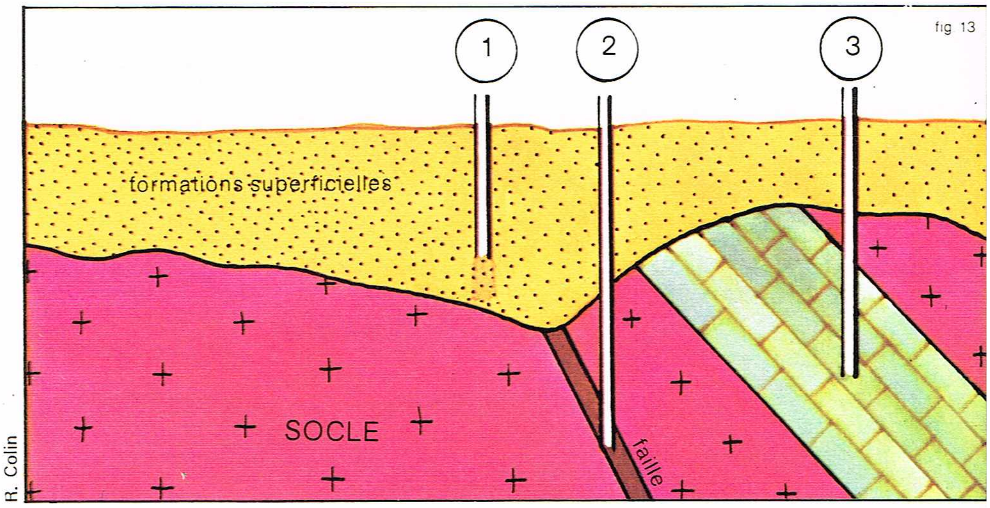

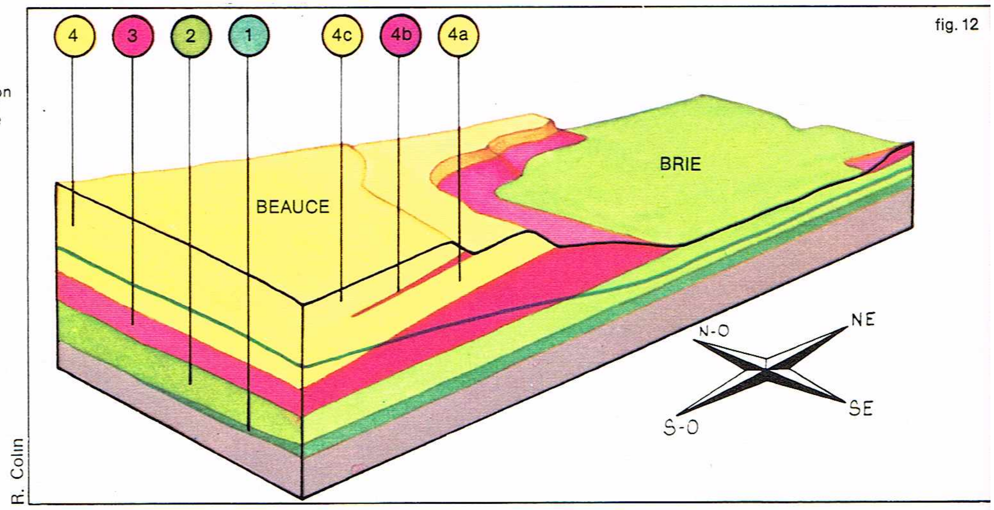

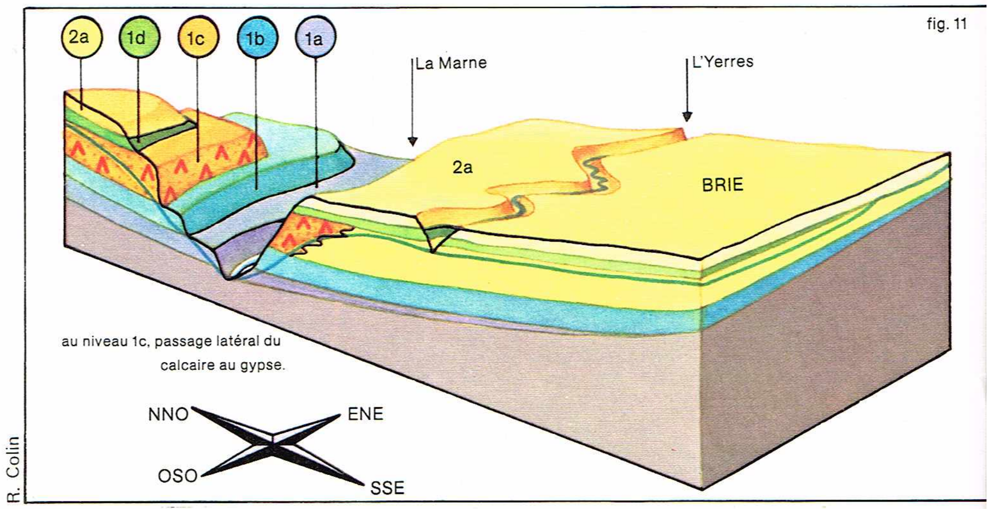

Tableau VI. Relations entre la lithologie de la formation géologique et la qualité des eaux souterraines dans le calcaire karstique de Saint-Ouen (Éocène supérieur), de Brie et de Beauce.

Zones lithologiques (faciès)	Eaux souterraines	Provinces hydrogéochimiques (qualité des eaux)
calcaire de Brie et de Beauce	aquifère important	province de Brie - Beauce (eaux carbonatées calciques)
gypses en Parisis, Valois et Soissonnais	aquifère eaux inutilisables	province Parisis - Valois - Soissonnais (eaux séléniteuses)
marnes à l'ouest avec gypses argiles magnésiennes	aquifère médiocre	province occidentale eaux fortement minéralisées (en magnésium et sulfates)

R. Colin

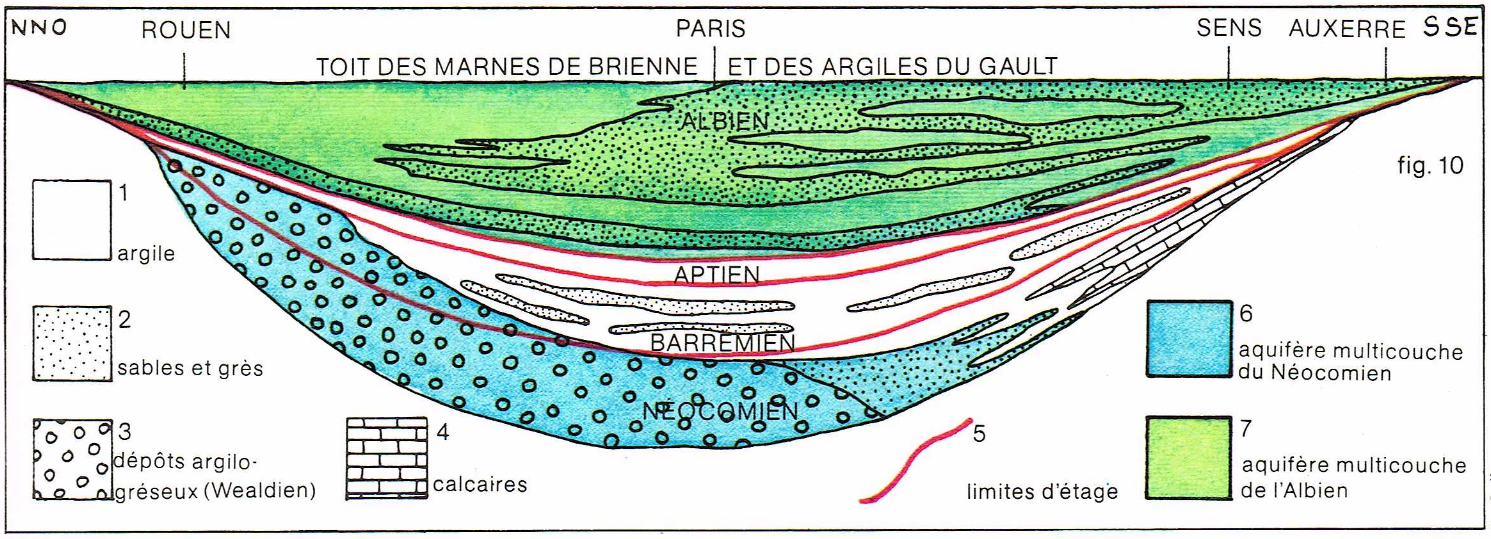

▲ ***Coupe transversale du bassin de Paris montrant les* formations géologiques et les aquifères du Crétacé inférieur :** ***noter que la formation géologique des argiles et grès du Néocomien ne correspond pas à l'étage et déborde même à l'ouest vers le haut dans le Barrémien.***

◀ ***Page ci-contre, à droite. Figure 11 : bloc diagramme schématique représentant la* succession des formations géologiques sous la Brie, constituant le réservoir de l'aquifère multicouche du Calcaire de Champigny. 1a,** ***formation semi-perméable des Sables de Beauchamp (Auversien);*** **1b,** ***formation calcaire karstique du Calcaire de Saint-Ouen (Marinésien);*** **1c,** ***formation du Calcaire de Champigny (Ludien);*** **1d,** ***formation semi-perméable des marnes supragypseuses;*** **2a,** ***formations du Calcaire de Brie (Oligocène); en bleu, surface piézométrique. Figure 12 : bloc diagramme schématique représentant la* succession des formations géologiques constituant le réservoir de l'aquifère multicouche de l'Oligocène :** ***1, marnes vertes supragypseuses; 2, Calcaire de Brie; 3, Sables de Fontainebleau (Stampien); 4, Calcaire de Beauce; en bleu, la surface piézométrique. Figure 13 : schéma des* gisements d'eau souterraine dans les régions de socle ;** ***ces gisements sont localisés dans les formations superficielles, 1, les zones de failles, 2, et les formations sédimentaires compactes ou indurées interstratifiées, 3. Tableau VI : relations entre la lithologie de la formation géologique et la qualité des eaux souterraines dans le Calcaire karstique de Saint-Ouen (Éocène supérieur), de Brie et de Beauce.***

Parmi les discontinuités de sédimentation citons les variations latérales de faciès (fig. 6), les lacunes de dépôts (fig. 7), les érosions anciennes, les discordances et les transgressions marines (fig. 8). Quant aux accidents tectoniques, ils comprennent les plissements et failles (fig. 9). Deux conséquences importantes pour l'hydrogéologie en découlent : la difficulté de délimiter et d'identifier les aquifères, lesquels ne présentent pas de continuité géographique, et les *intercommunications* fréquentes entre les nappes. C'est pourquoi la totalité de la région géographique, intéressée par un étage (ou un sous-étage) géologique (unité chronostratigraphique), présente rarement un aquifère continu.

Il est nécessaire, en hydrogéologie, de définir des *unités lithostratigraphiques*, qui déterminent les *formations géologiques perméables*. Celles-ci, identifiant les roches réservoirs, permettent de délimiter les aquifères et les zones hydrogéologiques. Ainsi, l'aquifère multicouche des sables albiens du bassin de Paris est lié à la formation géologique complexe argilo-sableuse stratigraphiquement rattachée à l'Albien inférieur et moyen. L'importance des variations latérales de faciès est démontrée par l'aquifère multicouche des sables néocomiens (fig. 10). L'étage de base du Crétacé inférieur, le Néocomien, est connu sous deux faciès : en affleurement à l'est et dans la région de Troyes et de Sens, les dépôts marins de calcaires et marno-calcaires constituent une formation semi-perméable sans intérêt hydrogéologique; par contre, vers le nord-nord-ouest et à l'ouest, au-delà d'une ligne Reims-Fontainebleau, la sédimentation marine fait place en profondeur à des dépôts continentaux (faciès wealdien) de sables et de grès aquifères.

Les *caractéristiques géochimiques de la roche réservoir* sont également une cause de la limitation de l'exploitation des eaux souterraines, les sels solubles provoquant une altération de la qualité des eaux. Ces caractéristiques, qui résultent fréquemment de variations latérales de faciès, sont mises en évidence dans l'aquifère multicouche du Calcaire de Champigny (Éocène supérieur), principale ressource en eau souterraine de la Brie (fig. 11 et tableau VI). La formation calcaire karstique de base (Calcaire de Saint-Ouen) présente des variations latérales de faciès permettant de localiser trois zones lithologiques de roche réservoir dont les caractéristiques géochimiques déterminent, par la qualité de leurs eaux, trois provinces hydrogéochimiques. De même, la présence de gypse dans la formation calcaire karstique du Calcaire grossier (Lutétien), au centre du bassin de Paris, se traduit par des eaux à minéralisation élevée, surtout en sulfates (eaux séléniteuses) impropres à la consommation.

Ainsi la délimitation géographique d'un aquifère peut, même dans des formations perméables, riches en eau, être limitée par la nature des roches; celles-ci, par dissolution des sels solubles, rendent les eaux impropres à l'utilisation.

La nature des formations géologiques étant déterminée essentiellement par les faciès, les conditions techniques d'exploitation des eaux souterraines, en particulier la profondeur des captages, dépendent des structures géologiques. Ainsi, pour l'aquifère des sables albiens du bassin de Paris, la structure de la formation montre trois grandes zones structurales : une structure monoclinale régulière, orientale, occupant les bassins de l'Aube et de l'Yonne, où la formation albienne plonge en pente régulière, des affleurements (Puisaye, Champagne humide, Argonne) vers le sud-est et l'est; elle y rejoint la grande fosse centrale, située au nord-est de Paris, sous les régions de Brie-Pontault-Combault et Saint-Denis à des profondeurs de 800-900 m; enfin, la zone occidentale du pays de Bray et de la basse Seine, de structure très complexe, dessine une série d'ondulations parallèles déterminant des profondeurs de quelques dizaines à plusieurs centaines de mètres.

L'étude de la localisation et des dimensions des aquifères, bases de l'exploitation des eaux souterraines, exige donc des recherches stratigraphiques et structurales régionales détaillées et précises.

Les eaux souterraines des régions montagneuses

La localisation des gisements d'eaux souterraines obéit aux mêmes lois que dans les bassins sédimentaires, mais ils sont plus fragmentaires du fait de la complexité des structures géologiques.

Les eaux souterraines des régions de socle

Dans les régions de socle (Massif central, Vosges, Bretagne), les eaux souterraines sont moins abondantes que dans les bassins sédimentaires. Les gisements sont localisés, sans extension régionale, dans trois types de structures (fig. 13) : les formations sédimentaires compactes ou indurées, les formations superficielles (arènes, couches d'altération, alluvions, etc.) et les zones de fractures et de broyage. Leur prospection exige des études géologiques très détaillées où la géologie du Quaternaire et l'analyse structurale tiennent une place importante. Il faut signaler que, contrairement à certaines opinions, l'eau circule dans ces régions jusqu'à de grandes profondeurs. Ce fait a été démontré par l'étude des galeries et des tunnels.

Étude morphologique des aquifères

Nous avons montré que la localisation dans le sous-sol et les dimensions des roches réservoirs favorables à la présence de gisements d'eaux souterraines dépendent étroitement des conditions géologiques régionales. Cependant, dans notre introduction, nous avons insisté sur le rôle important de l'eau, dont les caractéristiques de l'écoulement, étudiées par l'hydrodynamique souterraine, conditionnent également les structures hydrogéologiques.

Définition de l'aquifère

Un gisement d'eau souterraine utilisable comme source d'eau est appelé un aquifère (*aqua* = eau, *fero* = je porte). Un aquifère est une formation géologique perméable qui renferme, dans ses vides, de l'eau circulant à une vitesse significative et susceptible d'être extraite en quantité appréciable par des moyens de captage économiques. Il comprend la *roche réservoir* (sous forme de trame ou de squelette solide : des grains de silice d'un sable par exemple) et l'*eau*. L'eau en écoulement constitue une *nappe d'eau souterraine*. Ainsi, les deux termes, aquifère et nappe d'eau souterraine, ne sont pas synonymes. On peut négliger les *gaz*, essentiellement dissous ou en suspension dans l'eau (air et gaz carbonique). Nous avons montré que les deux phases, solide et liquide, indissociables, constituaient un complexe physico-chimique unique.

La dénomination d'un aquifère comporte la lithologie de la roche réservoir (sable, calcaire, alluvions, etc.) et, lorsque la précision est nécessaire, le nom de la formation géologique : aquifère des sables albiens, aquifère calcaire karstique du Jurassique moyen, aquifère des alluvions, aquifère de la Craie, aquifère du Calcaire de Champigny, etc.

▶ *Schéma d'un* **aquifère bicouche.** *L'aquifère à nappe captive est séparé à son sommet de l'aquifère à nappe libre qui le surmonte par une assise semi-perméable. Le niveau piézométrique de la nappe libre étant plus élevé que celui de la nappe captive, il y a percolation de haut en bas, ou drainance descendante.*

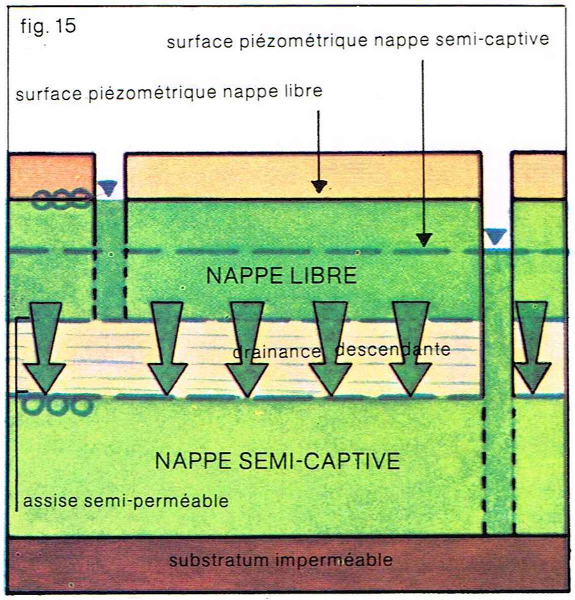

▼ **Un aquifère à nappe captive.**

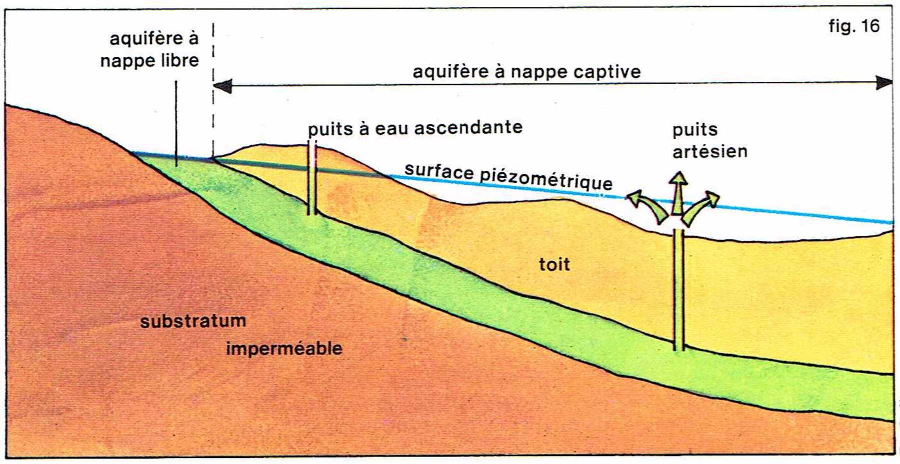

Il est nécessaire d'insister sur les interactions chimiques entre la roche réservoir et l'eau souterraine. En effet, les sels solubles des terrains contribuent à la composition chimique de l'eau souterraine. Citons, à ce sujet, les eaux sulfatées calciques des formations gypseuses, les eaux chlorurées sodiques des terrains renfermant du sel gemme, et les eaux carbonatées ou bicarbonatées des formations calcaires.

L'aquifère joue un double rôle : d'une part de réservoir souterrain (emmagasinement et restitution de l'eau) et d'autre part de conducteur d'eau ou de transmission de pressions.

Les types hydrauliques d'aquifères libres et captifs

Si l'on étudie les puits et forages du premier aquifère rencontré sous la surface du sol (fig. 14, 15 et 16) on observe la présence d'un niveau d'eau dont l'altitude (élévation au-dessus de la cote 0) est, par définition, le *niveau piézométrique* (fig. 1 et 14). L'ensemble des niveaux piézométriques d'un aquifère, mesurés en différents points, détermine la *surface piézométrique*. Celle-ci constitue la limite supérieure de l'aquifère et peut être assimilée également à la surface libre, lieu des points où la pression est égale à la pression atmosphérique, d'où la qualification d'*aquifère à nappe libre* (fig. 14). L'ancien terme, d'aquifère phréatique (*phrear* = puits), parfois utilisé, est à déconseiller.

En revanche, dans les aquifères plus profonds, les eaux souterraines sont emprisonnées dans la formation géologique entre deux formations imperméables fixes, le substratum imperméable à la base et le toit au sommet (fig. 14). Du fait de la profondeur, l'aquifère, roche réservoir et eau, subit une pression verticale, dirigée de haut en bas, égale au poids de la colonne de terrains qui le surmonte jusqu'à la surface du sol. Cette pression est équilibrée par celle qui règne à l'intérieur de l'aquifère. Lorsqu'un sondage perce la couverture du gisement, le remplacement de la colonne de terrains de densité élevée (2,6 en moyenne) par une colonne d'eau (densité 1) entraîne une chute de pression dans l'aquifère. L'eau de celui-ci, expulsée par décompression, s'élève dans l'ouvrage jusqu'à équilibre, à une altitude déterminée : le niveau piézométrique. Ce sont les *aquifères à nappe captive* (fig. 14 et 16). Les eaux sont *ascendantes*. Si le niveau piézométrique est au-dessus de la surface du sol, les eaux souterraines jaillissent naturellement : c'est l'*artésianisme* (fig. 16).

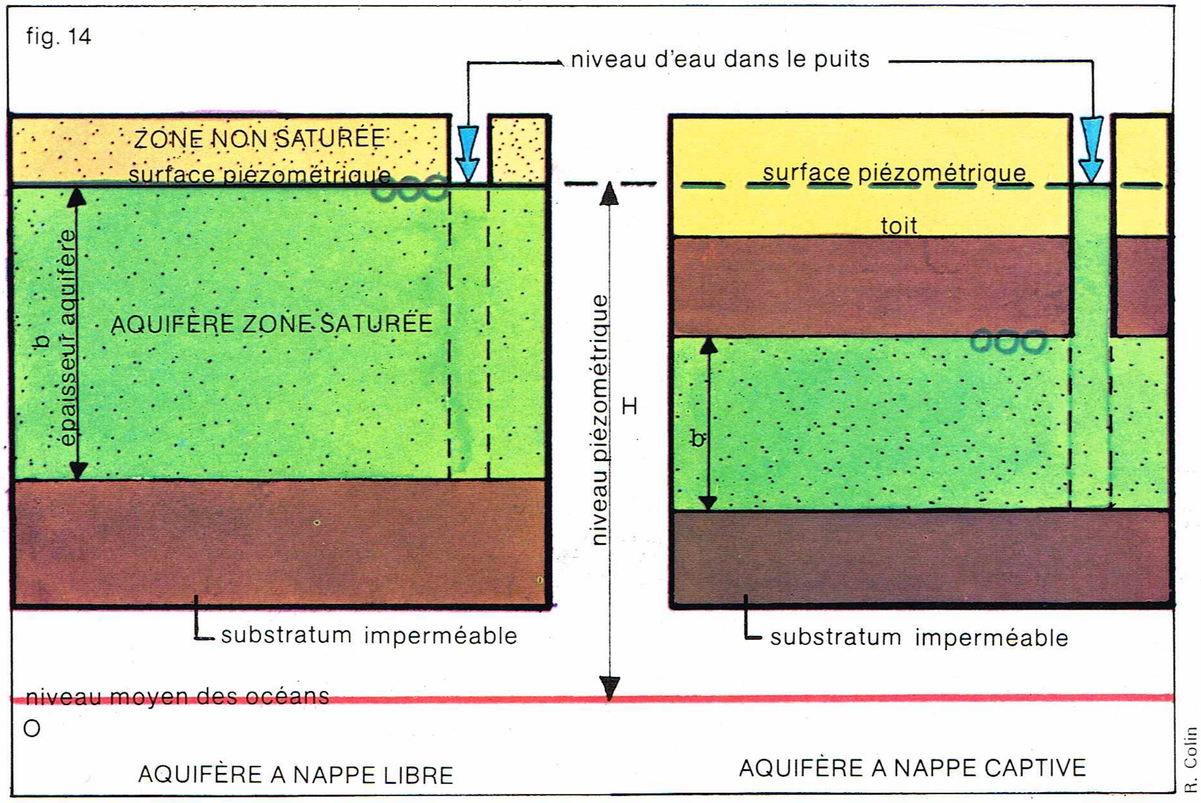

▶ **Types hydrauliques d'aquifères à nappe libre et à nappe captive.** *Dans l'aquifère à nappe libre, la surface piézométrique se confond avec la surface libre ; dans l'aquifère à nappe captive, l'eau s'élève dans le puits au-dessus du toit, jusqu'à l'équilibre avec le niveau piézométrique.*

Ainsi, si le captage des aquifères de subsurface et des profonds nécessite des sondages importants et coûteux, l'exploitation s'effectue souvent à une faible profondeur et parfois même sans pompage lorsque les conditions d'artésianisme produisent un débit naturel en surface.

La présence d'un toit constitué d'une *formation semi-perméable* permettant des échanges d'eau et de pression avec l'aquifère superposé, implique un type d'*aquifère à nappe semi-captive* (fig. 15). Dans ce cas, les deux aquifères superposés constituent un *aquifère bicouche,* où toute action sur l'une des nappes d'eau souterraine (pompage ou pollution) a des répercussions sur l'autre. Un *aquifère multicouche* est formé de plusieurs formations perméables avec des intercalations d'assises semi-perméables (fig. 4). L'une des nappes d'eau souterraine de ces aquifères complexes ne pouvant donc être considérée comme une entité hydrogéologique, il est nécessaire pour la gestion, en qualité et en quantité, des ressources en eau d'étudier l'ensemble.

L'étude de la surface piézométrique des aquifères

La surface piézométrique des aquifères, à nappe libre ou captive, en est la caractéristique la plus importante. Toujours possible à établir par l'observation directe des ouvrages de captages et des sources, elle est à la base de l'étude globale de l'écoulement souterrain, de l'évaluation des réserves et ressources ainsi que des études sur modèles. Toute étude hydrogéologique, même sommaire, comporte donc l'établissement et l'analyse de cette surface. Elle présente deux caractéristiques : sa morphologie générale et ses fluctuations, ces dernières étant surtout importantes pour les nappes libres.

● *Morphologie de la surface piézométrique. Cartes piézométriques.* La morphologie de la surface piézométrique est étudiée à l'aide de cartes piézométriques et de coupes hydrogéologiques. De la même façon que l'on figure la topographie terrestre par des courbes d'égal niveau la surface piézométrique est représentée par des courbes d'égal niveau piézométrique, dites *courbes équipotentielles*. Les coupes hydrogéologiques sont des sections transversales verticales des aquifères. Elles permettent en particulier de figurer, lorsque ces sections sont perpendiculaires aux courbes équipotentielles, le profil piézométrique.

L'étude morphologique de la surface piézométrique permet de déterminer les caractères généraux de l'écoulement souterrain : zones d'alimentation et de drainage, directions de l'écoulement souterrain, vitesses et débits relatifs. En général, les cartes piézométriques sont dressées sur des cartes en courbes de niveau topographique. Ces documents permettent donc de déterminer la profondeur de l'eau par rapport à la surface du sol et, par conséquent, la profondeur et l'équipement des ouvrages de captage (le niveau des pompes en particulier).

L'exemple de l'aquifère multicouche des sables albiens, dans le bassin de Paris (fig. 17), illustre ce type d'études pour une nappe captive. Cet aquifère est bien défini hydrauliquement par la morphologie de sa surface piézométrique. L'écoulement général des eaux souterraines s'effectue des limites nord, est, sud et ouest vers un grand axe central de drainage E.-S.-E. - O.-N.-O. correspondant approximativement à la vallée de la Seine à l'aval de Paris, accentué dans la basse Seine. Cinq zones d'exutoire peuvent être identifiées : la région parisienne, la basse vallée de la Seine, la Manche entre la Seine et la Somme, la basse vallée de la Somme et le Val de Loire.

L'étude de la carte piézométrique permet de localiser trois grandes unités piézométriques caractérisant trois grandes zones hydrogéologiques, qui correspondent d'ailleurs aux grandes unités structurales.

— Une *zone hydrogéologique orientale* s'étend à l'est, dans l'Yonne en particulier, où les courbes équipotentielles traduisent une zone d'alimentation, avec un gradient hydraulique (pente de la nappe) régulier de 0,002 5 vers le nord jusqu'aux vallées de l'Yonne et de l'Armançon. Les niveaux piézométriques, de + 210 à Saint-Fargeau, s'abaissent à + 90 dans la haute vallée du Loing. Dans l'Aube, le gradient hydraulique est de 0,001 6 (de + 140 à + 90 d'est en ouest). Des affleurements orientaux à la région parisienne, les courbes équipotentielles montrent une nette convergence vers Provins, puis vers Paris. Cette morphologie générale prouve l'écoulement régulier des eaux souterraines dans les nappes profondes du bassin de Paris.

— Dans la *zone hydrogéologique centrale* de la région parisienne, déprimée par surexploitation, les courbes équipotentielles fermées indiquent une grande zone déprimée dans la surface piézométrique. Située sous Paris et sa banlieue Nord (de niveau piézométrique + 9), elle draine la quasi-totalité des eaux souterraines de la région parisienne et provoque, entre Mantes et Paris, un écoulement local de sens inverse (O.-E.) du drainage naturel. Correspondant aux secteurs où les forages sont les plus nombreux, cette dépression met en évidence la surexploitation locale des eaux souterraines. Au nord, la limite avec le bassin hydrogéologique de la Somme passe par Beauvais-Reims. Au sud, le bassin hydrogéologique de la Loire commence avec le secteur méridional de la Beauce, très proche de la Loire, 10 à 20 km au nord et au N.-E. d'Orléans.

— La *zone hydrogéologique de drainage de la basse Seine,* à l'aval de Mantes, dont l'axe est marqué approximativement par le fleuve, est bien déterminée. Les niveaux piézométriques décroissent d'amont vers l'aval : on note + 30 à Mantes et + 5 à Tancarville. Ainsi, par un effet hydraulique, les prélèvements importants effectués dans la région parisienne ont interrompu les apports en provenance de la zone orientale. La basse Seine est donc alimentée uniquement par l'impluvium des affleurements du pays de Bray et de la zone périphérique méridionale. Une autre remarque s'impose. Le drainage important des aquifères libres de la première nappe par la Seine se répercute en profondeur, à plusieurs centaines de mètres, malgré la présence de formations imperméables. Ce fait souligne les intercommunications entre aquifères signalées précédemment.

L'étude de cette surface piézométrique met en évidence les secteurs d'*alimentation* de l'aquifère par infiltration des eaux de surface. Dans les zones de bordure, en particulier au S.-E. en Puisaye et en Gâtinais, au sud et à l'ouest, des dômes piézométriques indiquent des zones importantes d'alimentation. Celles-ci ne coïncident pas nécessairement avec les affleurements albiens. C'est le cas pour le S.-O., où la formation albienne est recouverte d'une soixantaine de mètres d'assises semi-perméables. Cette alimentation, traduite par la piézométrie, a été confirmée par l'étude des radio-isotopes naturels. A l'ouest, une zone d'alimentation est marquée par le pays de Bray. L'étude détaillée de la surface piézométrique montre donc que l'alimentation de l'aquifère n'est pas associée systématiquement à l'infiltration sur les affleurements.

▼ ***Carte piézométrique de l'aquifère multicouche de l'Albien du bassin de Paris.***

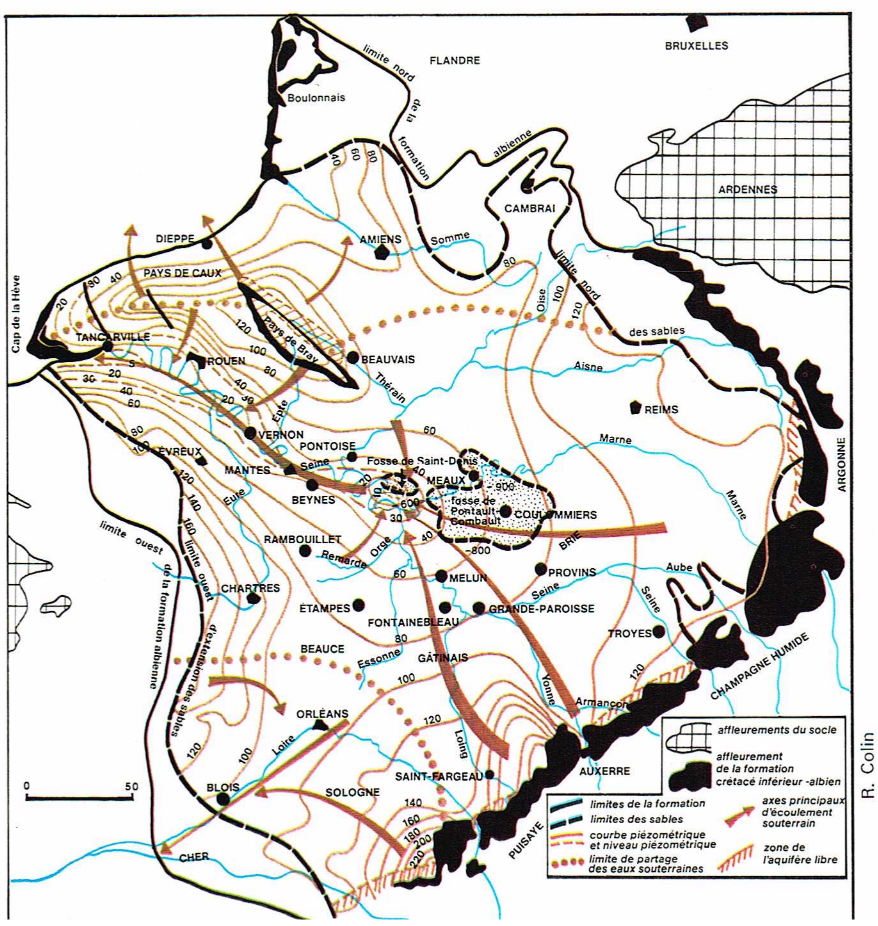

▶ *A gauche, étude des* **relations nappe-rivière par analyse de la surface piézométrique.** *A droite,* **fluctuations de la surface piézométrique.** *En haut, courbe de variations du niveau piézométrique dans un piézomètre. Noter le cycle annuel, lequel est décalé dans le temps par rapport à l'année calendaire, d'où définition de l'année hydrologique. En bas, variations des hauteurs de précipitations montrant leur influence et les corrélations avec les fluctuations du niveau piézométrique.*

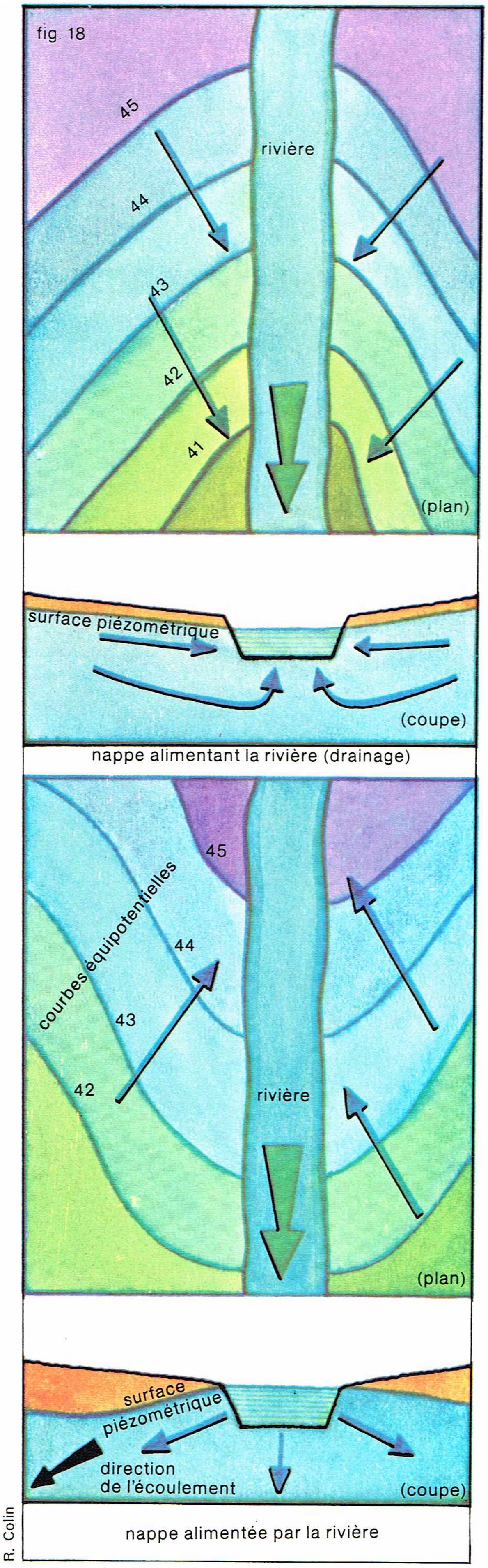

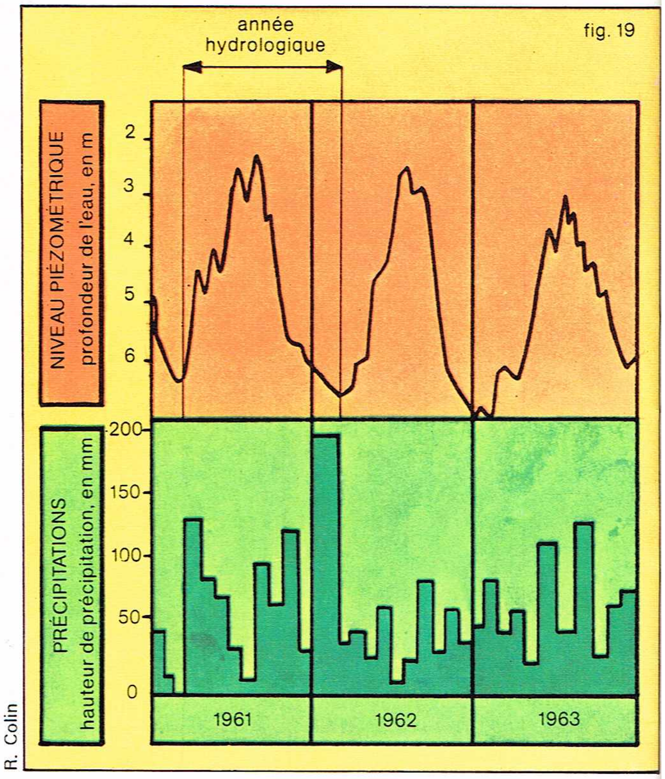

Un exemple d'utilisation plus restreinte est fourni par l'étude des relations entre les nappes et les rivières (fig. 18). Les cours d'eau présentent fréquemment des relations avec les nappes libres contenues dans leurs alluvions. La nappe peut soit alimenter la rivière (drainage), soit être alimentée par elle : dans le premier cas, le plus fréquent, les courbes équipotentielles marquent une inflexion vers l'amont (c'est le cas de la basse Seine) ; la disposition inverse caractérise l'alimentation.

● *Les fluctuations de la surface piézométrique.* Les études hydrogéologiques montrent des fluctuations de la surface piézométrique (fig. 19). Naturelles ou provoquées par l'action de l'homme, elles entraînent, dans les nappes libres, des modifications du volume de l'aquifère. Celles-ci sont utilisées dans l'étude des réserves en eau souterraine et dans le contrôle de l'exploitation afin d'éviter la surexploitation.

Il est possible de distinguer deux types de cycles de fluctuations naturelles, en relation essentiellement avec les cycles annuel et pluriannuel des précipitations. Le premier permet de définir l'*année hydrologique* correspondant au temps séparant deux minimums, et la hauteur de *fluctuation* délimitant une *zone de fluctuation* (fig. 20), égale à l'amplitude comprise entre les niveaux les plus bas et les plus élevés. Au second correspondent l'*année hydrologique moyenne* et la *hauteur annuelle moyenne de fluctuation.*

Des fluctuations sont provoquées par la surexploitation des eaux souterraines, celle-ci se manifestant le plus souvent par une baisse moyenne continue des niveaux piézométriques. C'est le cas des zones à potentiels industriel et démographique élevés. Ainsi, la surface piézométrique de l'Albien, si elle s'est peu modifiée au cours des cinq dernières années grâce aux mesures légales de protection, avait subi auparavant une baisse importante. Lors de l'exécution du forage de Grenelle, premier ouvrage profond exécuté à Paris en 1841, le niveau piézométrique atteignait + 120; sa cote était tombée à + 19 en 1965 dans un forage voisin, ce qui montre un abaissement de plus de 100 m en 124 ans (fig. 21).

Cette chute importante est générale, avec quelques variantes, à tout le centre du bassin.

Les dimensions et la géométrie des aquifères

Les dimensions des aquifères sont déterminées par deux types de limites, géologiques et hydrauliques.

Les limites géologiques, fixes, sont la base (ou substratum) imperméable et le toit des aquifères à nappe captive.

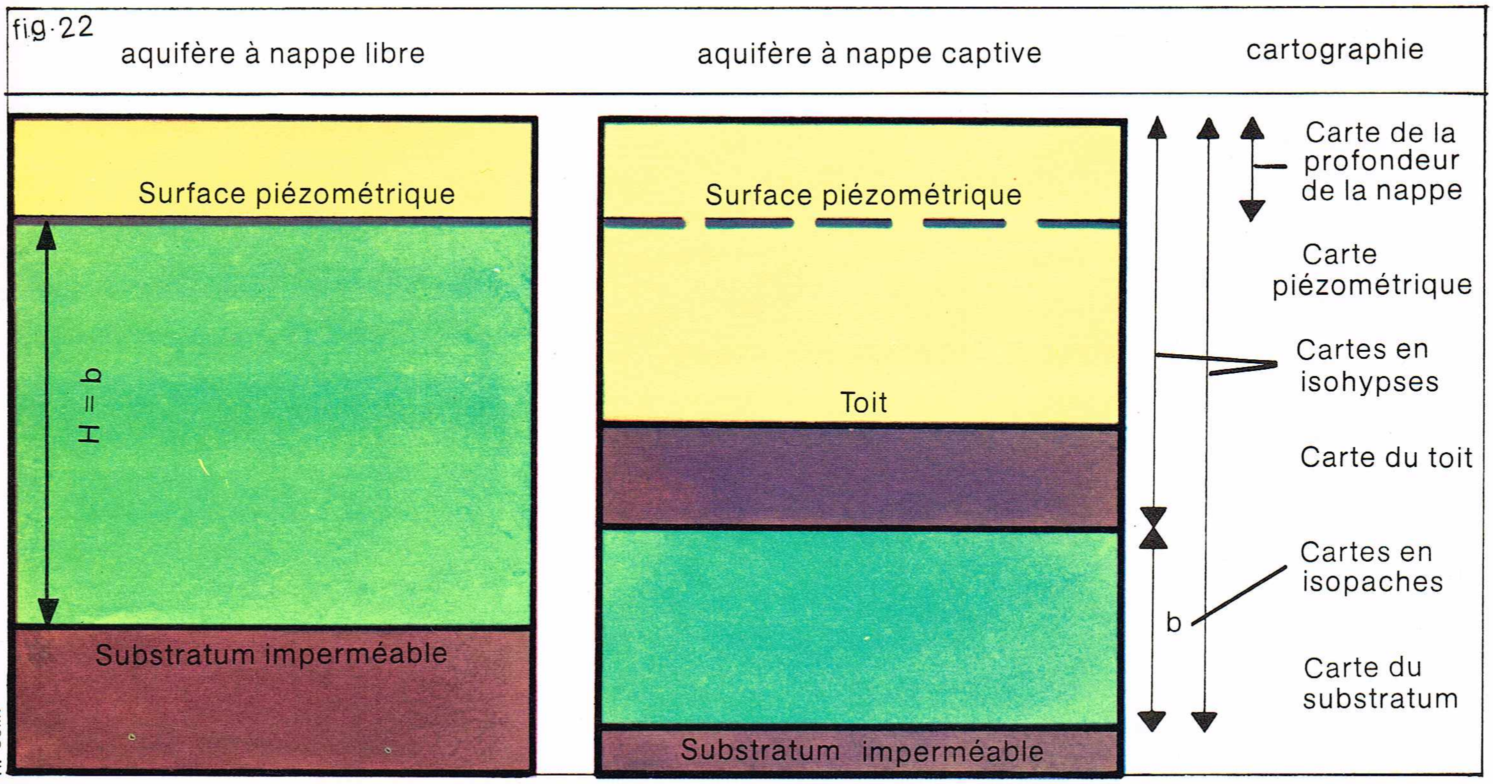

▲ ***Principales cartes des*** **surfaces limites des aquifères.**

Les limites hydrauliques occupent des positions variables dans le temps. La principale est la surface piézométrique des nappes libres. Les données géométriques, importantes pour le calcul des réserves et la détermination des conditions d'exploitation, sont nombreuses : la profondeur du substratum imperméable déterminant la profondeur maximale des ouvrages de captage; la profondeur de la surface piézométrique, indiquant la profondeur du niveau d'eau dans les puits (hauteur de refoulement des pompes), la puissance aquifère (épaisseur de la nappe), à l'origine de la production des captages et de la longueur des parties captantes ou crépines; la largeur et la longueur permettant de calculer leur surface.

Les données sur les limites des aquifères sont reportées sur des cartes de synthèse (fig. 22). Ces données sont habituellement exprimées en altitude : base et toit de l'aquifère, niveaux piézométriques. Il est donc possible d'établir des cartes d'égale altitude (cartes isohypses) de ces surfaces limites, les principales étant les cartes isohypses du substratum et du toit et la carte piézométrique. L'interprétation d'un couple de cartes permet de dessiner des cartes en courbes isopaches (d'égale épaisseur) directement utilisables pour le calcul du volume des aquifères. Tous ces documents constituent les *cartes des eaux souterraines*. La synthèse de toutes les données : lithologie, position des limites, emplacements des points d'eau, surface piézométrique, etc., est donnée par les *cartes hydrogéologiques*.

Conclusions

Les études entreprises montrent que la détermination des caractéristiques géométriques (épaisseur et surface) des aquifères permet de préciser leur localisation dans le sous-sol, de calculer leur volume et, par suite, la quantité d'eau exploitable (qualité et quantité) qu'ils renferment, appelée la réserve. Ces caractéristiques géométriques conditionnent également les caractéristiques techniques des ouvrages de captage. Leur détermination repose sur les études de géologie régionale. Elles exigent des prospections précises et détaillées du sous-sol qui font intervenir tous les moyens : études des affleurements, prospections géophysiques, forages. Les données obtenues servent à l'établissement de cartes thématiques : lithostratigraphie, faciès, égale altitude, égale épaisseur ou isopaches. L'inventaire des points d'eau (forages, puits, sources, etc.) aboutit à des cartes piézométriques. Enfin, la synthèse de toutes ces données permet l'établissement de cartes des eaux souterraines, dont le document le plus élaboré est la carte hydrogéologique.

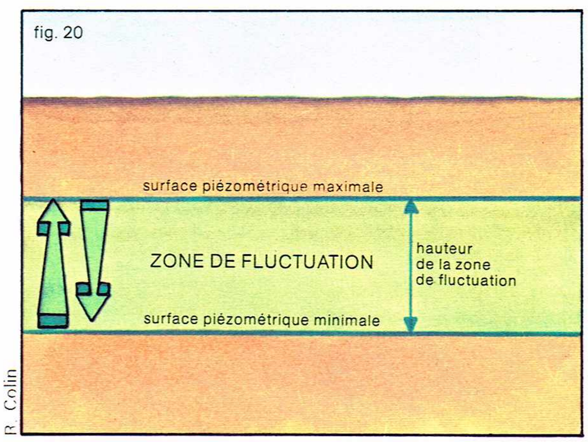

◀ ***Détermination de la*** **zone de fluctuation.**

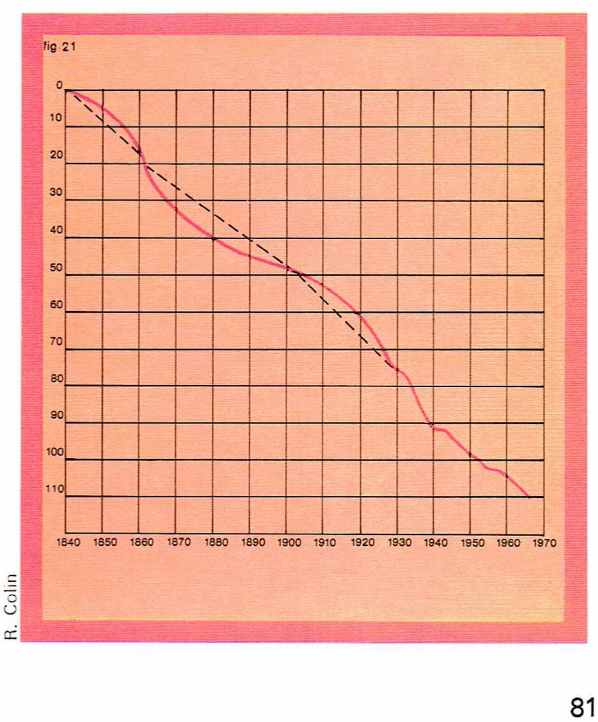

◀ ***Représentation graphique de l'*****abaissement de la surface piézométrique de l'aquifère multicouche** ***de l'Albien du bassin de Paris de 1841 à 1970.***

Tableau VII. Caractéristiques des vides des roches réservoirs.

Échelles	Types de vides		Types de milieu
microscopique	pores	intercristaux intergrains	continu
	microfissures	diaclases joints schistosité	
macroscopique (> 2,5 mm)		macrofissures chenaux cavités	discontinu

▲ Tableau VII : *caractéristiques des vides des roches réservoirs.*

▼ ***Représentation schématique des différents* types *de vides.***

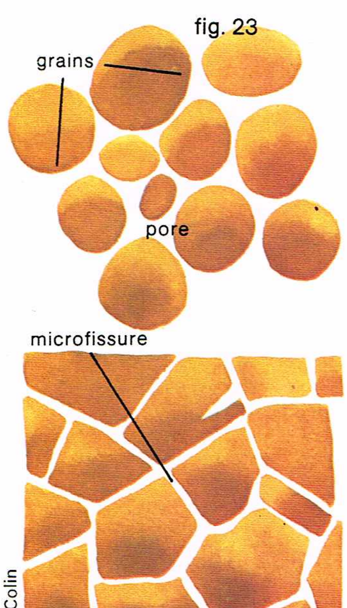

La roche réservoir et l'eau souterraine. Les paramètres hydrauliques

L'aquifère comporte deux phases principales indissociables : la roche réservoir et l'eau. Pour une meilleure compréhension du comportement de l'eau souterraine, leurs caractéristiques seront étudiées successivement. Une analyse globale permettra ensuite de définir les paramètres hydrauliques.

Les caractéristiques physiques de la roche réservoir — L'étude des vides

● *La morphologie, les dimensions et l'intercommunication des vides*

Les caractéristiques physiques de la roche réservoir concernent essentiellement la morphologie, les dimensions et l'intercommunication des vides dans lesquels est emmagasinée et circule l'eau souterraine. L'hydrogéologue distingue deux grands types de vides : les pores et les fissures (fig. 23 et tableau VII).

— Les *pores* sont des vides de forme plus ou moins sphérique, de petites dimensions (de l'ordre de 0,5 à 1 mm en général, et encore plus réduites pour les argiles avec 0,0001 à 0,002 mm), constitués entre les grains de la roche. L'ensemble constitue le *milieu poreux,* où les pores sont reliés entre eux, réalisant, selon leur diamètre moyen, des *tubes capillaires* (0,5 à 1 mm de diamètre) ou des *tubes subcapillaires* (0,001 à 0,5 mm de diamètre). Le milieu poreux est dit continu. Cette propriété de continuité est importante car elle est une des conditions de base de l'étude de l'écoulement des eaux souterraines, les lois de l'hydrodynamique n'étant applicables qu'à ce type de roche réservoir.

— Les *fissures* sont des fentes de forme allongée, plus ou moins étroites, d'origine essentiellement mécanique. Elles se classent en microfissures et en macrofissures. Les *microfissures,* d'une ouverture de l'ordre de quelques dixièmes de millimètre à quelques millimètres, sont les diaclases, les joints de stratification (lits minces entre les bancs), les mailles cristallines, les plans de schistosité, etc. Groupées en *réseaux de microfissures,* découpant régulièrement la roche réservoir, elles jouent un rôle hydrogéologique comparable à celui des pores constituant un *milieu fissuré continu.* Un exemple typique est la craie du bassin de Paris. Les *macrofissures,* d'une largeur supérieure à 2 mm, sont les zones de broyage, les failles, etc. Dans les roches solubles (roches carbonatées et gypseuses essentiellement) apparaissent des conduits, chenaux et cavités souterraines constituant les *réseaux karstiques.* L'étude hydrodynamique de ces formations géologiques est complexe, le milieu étant discontinu.

● *Classement hydrogéologique des roches réservoirs*

Les deux types de vides permettent de distinguer deux grandes catégories de roches du point de vue hydrogéologique : les roches meubles et les roches compactes (ce dernier type présente toutefois souvent des caractères mixtes).

— Les *roches meubles,* ou non consolidées, présentent uniquement des pores. Ce sont les graviers, graviers sableux, sables, sables argileux, argiles sableuses. Elles constituent la plupart des grands aquifères exploités.

— Les *roches compactes,* ou consolidées, où les fissures dominent, sont des calcaires, grès, basaltes, granites, etc. Ces roches peuvent renfermer des pores, dont le rôle n'est pas négligeable. C'est le cas, par exemple, des calcaires oolithiques, des grès, de la craie. Un exemple typique de ces *roches mixtes* est représenté par la craie, qui présente des pores et des fissures, ce qui explique ses bonnes propriétés aquifères. C'est l'aquifère principal de grandes zones hydrogéologiques du bassin de Paris (Sénonais, Champagne, Picardie-Normandie), du nord de la France, du S.-E. de la Belgique et du bassin de Londres.

Les roches compactes carbonatées, comme les calcaires, les calcaires dolomitiques et les dolomies, présentent à l'origine des fissures. Lorsque l'action chimique (dissolution des carbonates) et mécanique des eaux souterraines est importante, les fissures sont agrandies jusqu'à réaliser des chenaux et des cavités souterraines. C'est la *karstification,* qui donne naissance à des *réseaux karstiques.* Des exemples en sont fournis par les massifs calcaires des Causses, du Jura, du Vercors, de Grèce, d'Italie, de Floride, etc. Les massifs calcaires karstifiés constituent dans toutes les régions du globe, et plus particulièrement sur les rives de la Méditerranée, des aquifères constituant les principales ressources en eau.

Dans les roches compactes cristallines, volcaniques et métamorphiques, l'eau souterraine est surtout localisée dans les zones de discontinuités (fissures, failles, plans de schistosité) et dans les couches d'altération superficielles (les arènes en particulier).

En conclusion, les matériaux du sous-sol favorables à la formation d'aquifères sont les sables et les grès, les graviers et les alluvions, les roches carbonatées fissurées, les basaltes récents. Il en résulte que les propriétés aquifères des matériaux, constituant les formations géologiques, sont liées étroitement à la lithologie et à la géologie structurale, lesquelles constituent la base fondamentale de l'hydrogéologie.

● *L'étude des vides*

L'étude des vides, fondamentale pour la connaissance des caractéristiques physiques des roches réservoirs, est effectuée en laboratoire sur échantillons intacts et sur le terrain.

Les différentes études en laboratoire sur échantillons intacts, prélevés dans les formations géologiques par des techniques appropriées (affleurements, tranchées, galeries, puits et forages à carottage), sont les suivantes : la morphologie des vides (microscopes), l'analyse granulométrique, l'analyse structurale et les mesures de la porosité.

Sur le terrain, l'importance primordiale revient à la géologie structurale.

L'application de la géologie structurale en laboratoire et sur le terrain est essentielle pour les roches compactes, alors que l'analyse granulométrique est réservée aux roches meubles. Si la seconde est d'une utilisation courante en hydrogéologie, la première a vu par contre ses applications progresser au cours des dernières années ; elle est à la base de l'étude des vides dans les roches compactes fracturées.

— *L'analyse et les paramètres granulométriques.* L'analyse granulométrique a pour but l'étude de la nature pétrographique, de la forme, des dimensions et de l'arrangement des grains constituant les roches meubles. Elle permet de déterminer les paramètres granulométriques, qui constituent la base de l'étude des caractéristiques physiques des roches meubles, utilisées en hydrogéologie.

Le principe de l'*analyse granulométrique* est la séparation des grains de la roche en fractions (phases granulométriques) de diamètres déterminés. Une première donnée est donc la *classification granulométrique* des grains selon leur diamètre.

Parmi les nombreuses classifications granulométriques, la plus utilisée par les hydrogéologues est celle qui distingue quatre classes et cinq sous-classes granulométriques de la façon suivante :

Classes	Diamètres en mm
Cailloux, pierre, bloc	> 16
Gravier	16 à 2
Sables	2 à 0,05
Silts	0,05 à 0,005

Sous-classes	Diamètres en mm.
Sables très gros	2 à 1
Sables gros	1 à 0,5
Sables moyens	0,5 à 0,25
Sables fins	0,25 à 0,125
Sables très fins	0,125 à 0,05

L'échantillon à étudier est passé successivement sur des tamis à mailles normalisées, de plus en plus fines, afin de séparer les grains en fractions déterminées. La fraction de l'échantillon retenue sur chaque tamis représente un ensemble de grains dont les diamètres s'étalent dans l'intervalle des mailles du tamis précédent et de celui servant de récipient. Par exemple, si le premier tamis standard présente une maille de 5 mm et le second de 3,15 mm, la fraction granulométrique de sédiment retenue sur le 2e tamis est constituée de grains de diamètres compris entre 5 mm et 3,15 mm : ce *tamisat* sera coté 3,15 mm. Pour le troisième tamis à maille de 2 mm, le tamisat, coté 2 mm, représente la fraction granulométrique étalée entre 3,15 et 2 mm. La fraction recueillie sur chaque tamis est pesée, et l'on calcule son poids en pourcentage du poids total de l'échantillon analysé.

Les résultats de l'analyse granulométrique (poids de sédiment exprimé en pourcentage) sont portés sur un graphique, avec en abscisses logarithmiques les diamètres des grains en millimètres (maille des tamis), et en ordonnées arithmétiques les poids cumulés en pourcentage (un graphique de ce type est dit semi-logarithmique). On obtient aussi la *courbe granulométrique cumulative* utilisée par les hydrogéologues et les géotechniciens (fig. 24).

L'interprétation de cette courbe permet de placer le sédiment dans une classe granulométrique, de déterminer le type de granulométrie et de calculer ses paramètres granulométriques. La position de la courbe dans l'ensemble du graphique, par la détermination de la classe granulométrique, précise la nature lithologique du sédiment : gravier, sable et gravier, sable gros ou fin, etc. La pente de la droite donne le type de granulométrie. Si la courbe est voisine de la verticale, les grains sont sensiblement de même diamètre et la granulométrie est dite uniforme; dans le cas contraire, elle est variée. La courbe granulométrique permet de calculer les paramètres granulométriques principaux, le diamètre caractéristique et le coefficient d'uniformité.

Le *diamètre caractéristique* est le diamètre des grains, en millimètres, en abscisses, correspondant à une valeur en pourcentage arbitrairement choisie en ordonnées. Il est désigné par le symbole d_x. Nous retiendrons le *diamètre efficace*, d_{10}, déterminé par l'abscisse correspondant sur la courbe à l'ordonnée 10 % (fig. 24). Il est considéré en hydrologie comme le diamètre moyen, caractérisant le milieu poreux

Le *coefficient d'uniformité*, U, est égal au rapport des diamètres caractéristiques d_{10} et d_{60} ($U = d_{60}/d_{10}$). La granulométrie est dite uniforme lorsque U est inférieur à 2, et variée lorsque U est supérieur à 2. Les paramètres granulométriques présentent l'intérêt de donner des valeurs numériques aux caractéristiques granulométriques. Les données granulométriques sont importantes pour l'expression des caractéristiques physiques des roches meubles en relation soit avec l'écoulement des eaux souterraines, soit avec la réalisation technique des parties filtrantes des ouvrages de captages (crépines et massifs de gravier).

La forme des grains, déterminée au microscope, peut être cubique ou sphérique (gravier, sable), en plaquettes (argiles) et plus rarement, en bâtonnets ou en aiguilles.

— Les *études de géologie structurale*. La géologie structurale, et en particulier l'analyse structurale, bien développée dans les travaux et recherches en tectonique, appliquée à l'hydrogéologie, en laboratoire sur échantillon et sur le terrain, permet une étude plus précise de la fissuration et de ses relations avec l'écoulement souterrain, lequel s'effectue en général selon des directions de fissures privilégiées.

Par exemple, une étude de la fissuration de la craie du bassin de la Vanne (est de Paris), en particulier des diaclases en affleurement et dans les ouvrages souterrains (galeries de captage, puits, cavités karstiques), a mis en évidence deux réseaux d'âges différents (fig. 25). L'un, de diaclases verticales dont le grand axe correspond au pendage moyen, n'entraîne pas de venues d'eau. L'autre, de diaclases obliques, joue un rôle préférentiel dans la circulation des eaux souterraines; ainsi, les galeries de captage perpendiculaires à ce réseau sont les plus productives. Dans la craie, la disparition ou l'oblitération des fissures en profondeur crée un substratum réel aux limites imprécises, indépendant des formations imperméables. Des études effectuées dans le nord de la France par des pompages d'essai à différentes profondeurs, lors du creusement de puits de mine, ont montré qu'au-dessous de 40-50 m la craie était improductive. Près de Rouen, des galeries creusées à 150 m de profondeur, sous la vallée de la Seine, n'ont rencontré que de faibles venues d'eau isolées. En général, le développement de la fissuration dans la craie du bassin de Paris, faible sous les plateaux, s'intensifie à l'aplomb et au voisinage des vallées. Ces études permettent d'implanter avec des chances de succès accrues les ouvrages de captage.

Des études analogues, exécutées récemment dans les massifs calcaires de la région montpelliéraine, ont également donné des résultats encourageants. Une analyse fine de la fracturation sur photographies aériennes, puis l'analyse structurale sur le terrain et quelques stations de forage permettent de mettre en évidence des familles de fractures statistiquement prépondérantes, liées aux

▼ ***A droite, schémas montrant la* fissuration de la craie dans le bassin de la Vanne *(est de Paris); en haut,* a, *fissuration à l'échelle du massif (diaclases, joints, faille); en bas,* b, *mise en évidence de deux réseaux de diaclases, verticales et obliques (seules ces dernières sont aquifères). A gauche,* courbe granulométrique cumulative : *elle montre que le sédiment est un sable grossier à granulométrie variée, elle permet de calculer le diamètre efficace* d10 *et le diamètre* d60.**

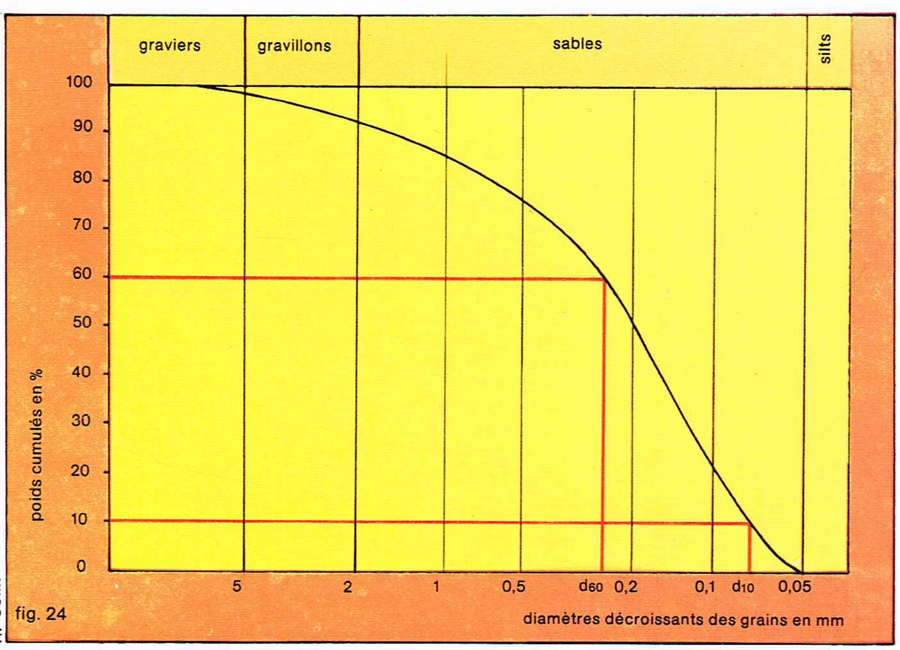

fig. 24

R. Colin

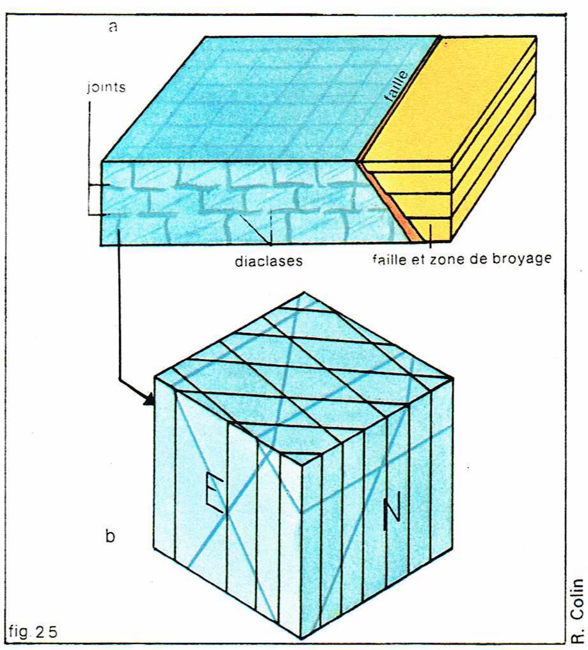

fig. 25

R. Colin

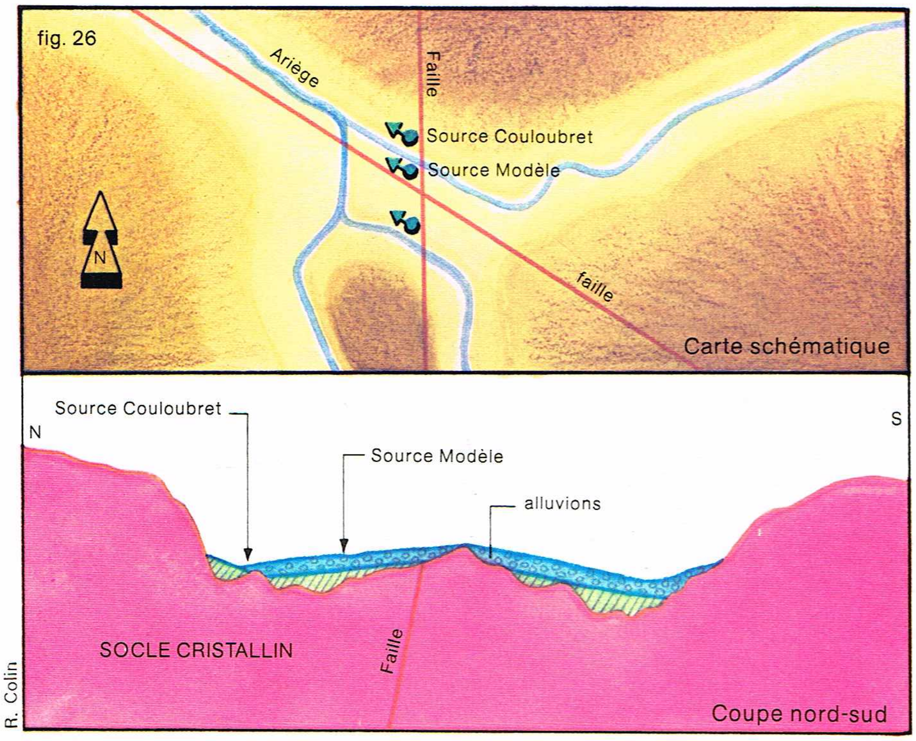

▲ **Aire d'émergences hydrominérales d'Ax-les-Thermes** ***(Ariège). Les sources thermominérales s'alignent selon la faille nord-sud, la plus récente; les zones hydrogéologiques les plus favorables se situent à l'intersection des fractures.***

▼ **Porosité totale et porosité efficace :** ***par égouttage, le volume d'eau gravitaire*** V_e ***recueilli permet de déterminer la porosité efficace,*** n_e.

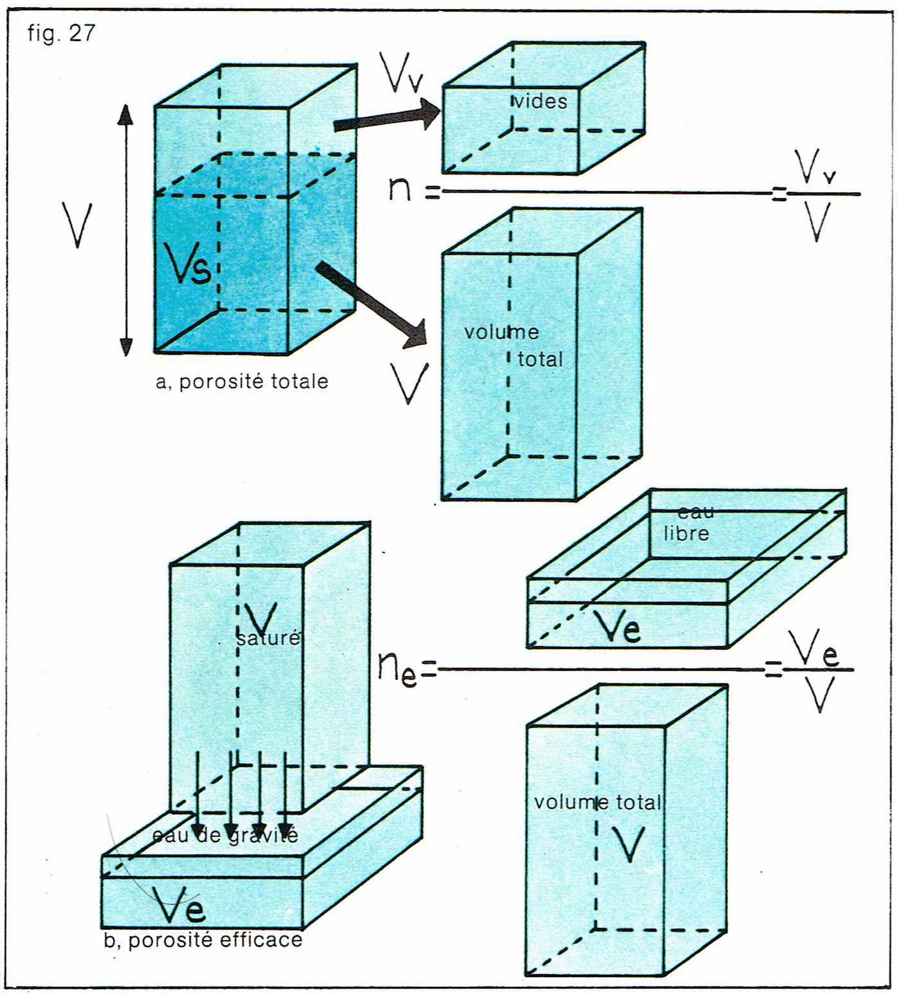

phases tectoniques de contrainte. Le karst s'est développé dans trois directions principales de fractures en relation avec trois phases tectoniques : deux phases de compression séparées par une phase de distension. Ensuite, l'étude des topographies des cavités souterraines et des directions de fractures, favorisant leur développement, a permis de préciser les directions préférentielles des écoulements souterrains anciens et actuels dans le karst.

Il a été possible de distinguer deux types de karst, d'âge, de degré d'activité et de direction différents : un karst fossile aligné selon la direction des failles normales liées à la phase de distension, et un karst actif développé sur les décrochements, en relation avec la phase de compression plus récente. De même, l'étude hydrogéologique des gîtes de sources d'eaux thermominérales (aires d'émergences hydrominérales) dans les massifs anciens français (Vosges, Massif central et Pyrénées) a mis en évidence le rôle primordial de la fracturation dans la localisation des sources. Ainsi, dans l'aire d'émergences hydrominérales d'Ax-les-Thermes (Ariège), deux grandes fractures de directions orthogonales, l'une N.-S., l'autre N.-N.-O - S.-S.-E affectant le socle granitique, ont été mises en évidence (fig. 26). Les sources s'alignent sur la fracture subméridienne la plus récente. Les zones hydrogéologiques les plus favorables se situent à l'intersection des fractures. De tels exemples pourraient être multipliés.

L'histoire géologique joue également un rôle parfois important. De nombreux exemples sont cités dans les zones hydrogéologiques de la craie du bassin de Paris, et des massifs calcaires karstiques. Une longue période d'érosion accompagnée souvent d'altération, postérieure aux dépôts plus anciens, favorise l'ouverture des fissures. Cette action augmente les propriétés aquifères de la formation géologique. C'est ainsi que dans le Gâtinais, les dépôts tertiaires, très développés, ont été précédés d'une altération profonde du soubassement crayeux, accentuée au cours du Quaternaire avec le creusement des vallées actuelles. Il en résulte que dans cette région la craie est particulièrement aquifère. Inversement, le recouvrement de la craie, directement par des formations plus récentes et notamment par les argiles à silex, réduit fortement la fissuration.

● *Les paramètres des vides. La porosité totale*

Le développement des vides, dans une roche réservoir, est exprimé par trois principaux paramètres : la porosité totale, l'indice des vides et la surface spécifique.

— La *porosité totale,* ou porosité, *n,* est la propriété d'un matériau de comporter des vides, interconnectés ou non. Elle est égale au rapport, exprimé en pourcentage, du volume des vides V_v, au *volume total* V de l'échantillon (fig. 27) :

$$n = \frac{\text{volume des vides}}{\text{volume total}} = \frac{V_v}{V} \quad (\%).$$

Certains hydrogéologues distinguent la *porosité d'interstices,* due à l'existence de pores interconnectés, et la *porosité de fissures* des roches compactes fracturées. La *porosité close,* due à des pores ne communiquant pas entre eux, s'oppose à la *porosité ouverte* permettant la circulation de l'eau.

— L'*indice des vides, e,* est le rapport, exprimé en pourcentage, du volume des vides V_v, au volume des grains ou du solide, V_s :

$$e = \frac{\text{volume des vides}}{\text{volume du solide}} = \frac{V_v}{V_s} \quad (\%).$$

— La *surface spécifique* des grains est la surface totale des grains rapportée à l'unité de volume : elle s'exprime donc en cm^2/cm^3 ou en m^2/m^3. Un exemple permettra de préciser ce paramètre. Soit un cube de 1 cm d'arête (volume de 1 cm^3) ; sa surface totale est de 6 cm^2 et sa surface spécifique de 6 cm^2/cm^3 ; si l'on divise ce volume en cubes d'arêtes de 0,1 cm, on obtient 1 000 petits cubes de 0,1 cm d'arête et d'une surface de 0,06 cm^2. La surface totale des 1 000 cubes, contenus dans un cm^3, sera de 60 cm^2 et la surface spécifique de 60 cm^2/cm^3. Avec des cubes de 0,01 cm d'arête, elle atteindrait 600 cm^2/cm^3. La surface spécifique des grains augmente donc en fonction inverse de leur diamètre. Pour des argiles, elle atteint de 400 à 700 cm^2/cm^3.

Les facteurs de ces paramètres seront étudiés avec la porosité efficace.

Binois - Pitch

◀ *Les eaux souterraines sont en mouvement dans toutes les zones du sol et du sous-sol : ici, une source dans la vallée de la Névache.*

Les types d'eaux souterraines et leurs caractéristiques

● *Définitions : eau gravitaire et eau de rétention*

En prélevant un échantillon dans un aquifère, et en recueillant par égouttage (drainage naturel) un volume d'eau déterminé (fig. 27), on obtient une eau libérée de l'aquifère sous l'action de la gravité : c'est l'*eau gravitaire*. L'échantillon, ne mouillant plus, est dit sec. Placé dans une centrifugeuse il libère pourtant un volume d'eau qui est fonction de la force centrifuge, donc de la vitesse de rotation de l'appareil (jusqu'à 50 000 tours par minute). C'est l'*eau de rétention,* retenue, *adsorbée* par la trame solide de l'aquifère (surface des grains, parois des microfissures). Les forces qui agissent, plus élevées que l'accélération de la gravité, relèvent de l'attraction moléculaire (1 000 à 100 000 bars). L'effet de la centrifugation est d'obtenir des forces d'attraction de cet ordre de grandeur (tableau IX).

Au lieu d'utiliser l'action de la gravité pour extraire l'eau gravitaire par drainage, il est possible de l'évaporer par chauffage dans une étuve à température constante de 108 °C, jusqu'à poids constant, en général pendant 24 heures.

Ainsi, un échantillon prétendu sec, c'est-à-dire ne libérant plus d'eau par écoulement naturel, est constitué de trois phases : la matière minérale (trame solide ou squelette), l'eau de rétention et l'air. La trame solide et l'eau de rétention constituent un *complexe solide unique*.

— *Eau de rétention*. Les caractéristiques de l'eau de rétention sont dues aux propriétés particulières de la structure moléculaire de l'eau (fig. 28). La molécule d'eau, de modèle triangulaire avec des ions H chargés positivement et des ions O négatifs, se comporte comme un *dipôle* doté d'un moment électrique permanent. Cette propriété explique l'existence de forces électromoléculaires, ou d'attraction moléculaire, de quelques milliers de bars. Ces forces agissent entre les molécules d'eau d'une part, et entre celles-ci et les particules du sol chargées électriquement d'autre part. Les molécules, fortement liées entre elles, constituent des chaînes ou des particules (fig. 28). La formule moléculaire de l'eau est donc complexe, du type $(H_2O)_n$, avec $n = 2,3,4,...$, $n = 2$ étant le plus fréquent.

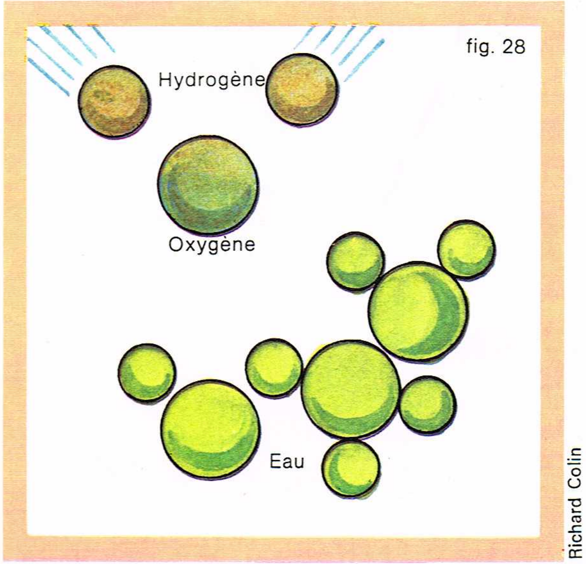

Richard Colin

◀ **Figure 28 : structure de la molécule d'eau.** *En haut, la molécule d'eau; en bas, une chaîne de trois molécules formant une particule.*

▼ **Tableau IX :** ***les grands types d'eau souterraine.***

Tableau IX. Grands types d'eau souterraine

	Types d'eau souterraine	Extraction	
		moyens	forces mises en jeu
eau disponible	eau gravitaire	gravité dessiccation (108 °C)	gravité chaleur
eau non disponible	eau de rétention	centrifugeuse calcination	attraction moléculaire

Dans le milieu poreux il existe un champ électrique naturel provoquant une polarisation de la surface des grains, lesquels attirent les dipôles. Il se constitue ainsi, à la surface des grains, une pellicule continue d'eau adsorbée, d'une épaisseur de quelques dixièmes de micron. Ces faits expliquent les propriétés physiques de l'eau de rétention : une densité élevée variant de 1,25 à 1,70 et une forte viscosité voisine de celle de la glycérine. Le volume d'eau de rétention dépend essentiellement de la taille des grains : représentant de 40 à 45 % du volume total pour les argiles constituées de grains très fins, il n'est plus que de 3 à 10 % pour les sables.

— *Eau gravitaire*. L'eau gravitaire peut se déplacer sous l'action des forces de gravité, donc des différences de pression. Elle seule contribue, pratiquement, à l'écoulement des eaux souterraines dans les aquifères ainsi que vers les sources et les ouvrages de captage. La libération de l'eau de gravité d'un aquifère est un phénomène complexe. Des expériences récentes ont montré que le volume d'eau drainé était fonction du temps de drainage. Il faut plusieurs mois pour extraire la totalité de l'eau de gravité d'un échantillon. Le volume d'eau de gravité contenu dans une roche réservoir croît en fonction des paramètres caractéristiques des vides : la porosité totale et le diamètre efficace.

— *Eau capillaire*. Mention doit être faite d'un type particulier, l'eau capillaire, qui occupe une partie des vides en milieu non saturé, c'est-à-dire comprenant trois phases, solide, eau et air. Elle obéit aux lois de la capillarité dues à l'action des forces interstitielles (tension superficielle), de l'ordre de 104 bars. Elle est à rattacher à l'eau de rétention.

Les paramètres hydrauliques caractéristiques de l'eau contenue dans les aquifères. La porosité efficace et l'emmagasinement

Après avoir étudié, successivement, les propriétés de la roche réservoir et de l'eau souterraine, il est nécessaire de considérer le complexe solide-eau. Ce complexe est caractérisé par cinq principaux paramètres déterminés, soit en laboratoire, la *porosité efficace* (n_e), la capacité de rétention (n_r) et le coefficient de saturation (S_r), soit sur le terrain, le *coefficient d'emmagasinement* (S) et l'emmagasinement spécifique (S_s).

— La *porosité efficace* (n_e) est le rapport du volume d'eau gravitaire (V_e) qu'un milieu poreux peut contenir en état de saturation puis libérer sous l'effet d'un drainage complet d'une part, à son volume total (V) d'autre part (fig. 27). Elle s'exprime en pourcentage :

$$n_e = \frac{\text{volume d'eau gravitaire}}{\text{volume total}} = \frac{V_e}{V} \quad (\%).$$

La porosité efficace est déterminée par les dimensions, l'arrangement et la surface spécifique des grains constituant les roches meubles.

Si le diamètre des grains joue un rôle essentiel, souligné par le tableau X (les valeurs décroissent comme le diamètre), les dimensions respectives (proportion des petits grains) ont leur importance. En effet, les éléments fins, entraînés par l'écoulement de l'eau, viennent combler les pores ménagés entre les gros grains et diminuent ainsi le volume des vides. La porosité efficace d'un mélange de sable et de gravier est inférieure à celle de chacun de ces matériaux purs. Les deux paramètres granulométriques à considérer sont le diamètre efficace et le coefficient d'uniformité.

L'arrangement des grains caractérise leurs positions dans l'espace. Or, suivant l'arrangement, la porosité totale varie, pour une granulométrie identique, de 26 à 48 %. Cette constatation est importante. Elle explique — l'arrangement le plus favorable étant le moins stable — les erreurs de mesure provenant des prélèvements et des transports d'échantillons ainsi que la diminution de la porosité avec la profondeur (influence des tassements de terrains).

La surface spécifique des grains joue un grand rôle, par la production d'eau de rétention qui diminue le volume des vides, donc de l'eau gravitaire. Nous avons montré, en effet, que l'eau de rétention se fixait à la surface des grains. Cette surface augmente lorsque la granulométrie devient plus fine. La porosité efficace décroît donc en fonction de la surface spécifique. A titre d'ordre de grandeur, la surface des grains de 0,147 mm de diamètre contenus dans 1 m^3 couvrirait une surface de 32 ha.

— La *capacité spécifique* (n_r) est le rapport du volume maximal d'eau de rétention (V_r) que peut contenir un milieu poreux à son volume total (V). Elle s'exprime en pourcentage :

$$n_r = \frac{\text{volume de l'eau de rétention}}{\text{volume total}} = \frac{V_r}{V} \quad (\%).$$

C'est le terme complémentaire de la porosité efficace, la porosité totale étant égale à la somme de deux paramètres :

$$n = n_e + n_r.$$

— Le *coefficient de saturation* (S_r) est le rapport du volume d'eau contenu dans le milieu poreux à sa porosité. Il varie de 0 à 100 (tableau XI).

— Le *coefficient d'emmagasinement* (S) et l'*emmagasinement spécifique* (S_s) caractérisent la propriété de l'aquifère d'emmagasiner ou de libérer, sous l'action des variations de pression, l'eau qu'il renferme. Ils sont obtenus sur le terrain, essentiellement par des pompages d'essais. Les causes de l'emmagasinement ou de la libération de l'eau dans les aquifères à nappe captive sont les phénomènes de compression ou de décompression, en relation avec les propriétés mécaniques (coefficient de compressibilité) de l'eau et du solide. Dans les aquifères à nappe

▼ ***A gauche,* tableau X : *porosité efficace de quelques matériaux, en %; à droite,* tableau XI : *valeurs du coefficient de saturation pour un sable, exprimées en %.***

Tableau X.

Porosité efficace de quelques matériaux, en %

Types de matériaux	n_e	Types de matériaux	n_e
gravier grossier	25	alluvions	5 à 10
gravier moyen	22	alluvions du Rhin	8 à 10
gravier fin	20	silt	2
gravier sableux	18	argile	1
sable grossier	20	vases récentes	0,1
sable moyen	15	calcaire fissuré	2 à 10
sable fin	10	craie	2 à 5
sable argileux	5	grès	2 à 15
sable de dune	25	basalte fracturé	8

Tableau XI.

Valeurs du coefficient de saturation pour un sable, exprimées en %

Dénominations	S_r
sable sec	0
sable légèrement humide	1 à 25
sable humide	25 à 50
sable mouillé	50 à 75
sable détrempé	75 à 100
sable saturé	100

libre, le mécanisme est complètement différent : seule la gravité agit.

Le *coefficient d'emmagasinement* (S) est le rapport du volume d'eau libérée ou emmagasinée par unité de surface d'une part, à la variation de charge hydraulique (niveau piézométrique) correspondante d'autre part. Pour l'aquifère à nappe libre, il équivaut en pratique à la porosité efficace.

— L'*emmagasinement spécifique* (S_s) est le volume d'eau libérée ou emmagasinée par unité de volume et par unité de charge hydraulique correspondante. Les valeurs du coefficient d'emmagasinement pour les aquifères à nappe captive sont très faibles : de 10^{-3} à 10^{-6}. Dans les nappes libres, égalant la porosité efficace, il est 100 à 1 000 fois plus grand. L'exemple de l'aquifère multicouche de l'Albien du bassin de Paris, avec pour la partie captive $S = 0{,}004$ et $n_e = S = 0{,}2$, pour le secteur libre, montre la différence des phénomènes de libération de l'eau.

La zonalité sol-eau souterraine

L'étude du premier aquifère, sous la surface du sol, montre la présence de deux zones de répartition de l'eau souterraine : de haut en bas, la zone non saturée et la zone saturée, séparées par la *surface de la nappe* qui ne doit pas être confondue avec la surface piézométrique, ou surface libre (fig. 29).

— La *zone saturée,* avec le complexe solide-eau, renferme la nappe d'eau souterraine. Si les deux types, l'eau de rétention et l'eau gravitaire, y sont présents, c'est toutefois le domaine de l'eau gravitaire. Tous les vides sont remplis d'eau. Le coefficient de saturation est égal à 100 % et l'humidité atteint sa valeur maximale. La surface supérieure de cette zone est la surface de la nappe.

— La *zone non saturée* est caractérisée par la présence du complexe solide-eau-air. Elle renferme essentiellement l'eau de rétention et l'eau capillaire. La quantité d'eau gravitaire est très faible, sinon nulle. En fonction des valeurs du coefficient de saturation et de l'humidité, qui, sommairement, décroissent vers le haut, elle est subdivisée, de haut en bas, en trois sous-zones : d'évapotranspiration, de transition et frange capillaire. Cette dernière est alimentée par les eaux de la zone saturée, montant par capillarité (ascension capillaire). Il faut remarquer que, si la surface de la nappe, notion théorique, correspond bien au sommet de la zone où les vides sont saturés (c'est-à-dire incluant une partie de la frange capillaire), par contre, la surface piézométrique, mesurée dans les ouvrages et sources, se place en dessous de la limite supérieure de la zone saturée.

L'eau souterraine, agent géodynamique et hydrogéochimique

Les eaux souterraines sont en mouvement dans toutes les zones du sol et du sous-sol. Cependant, les vitesses d'écoulement sont très variables suivant la profondeur : de quelques kilomètres à quelques millimètres par an. L'étude de cet écoulement souterrain, caractérisé en un point donné par sa direction, sa vitesse et son débit, est basée sur l'*hydrodynamique souterraine.*

Par son pouvoir de dissoudre ou de mettre en suspension les substances minérales, l'eau souterraine en mouvement est un agent de transport, donc d'échanges, entre la surface du sol et toute l'étendue du domaine souterrain et *vice versa.* D'où son rôle important et souvent méconnu dans la pollution. Cette action est étudiée par l'*hydrogéochimie*.

Au cours de son parcours souterrain (alimentation par l'eau de surface — infiltration — aquifère — émergences — eau de surface) et selon une durée plus ou moins longue (de quelques années à quelques dizaines de millénaires), le véhicule eau joue deux rôles, géodynamique et hydrogéochimique.

— L'eau souterraine est un *agent géodynamique* par l'écoulement souterrain, par son action mécanique, la corrosion des roches carbonatées par exemple, et, à un moindre degré, par le transport des matières en suspension. Elle assure également les transferts de chaleur.

— L'eau souterraine est aussi un puissant *agent hydrogéochimique* par son pouvoir dissolvant ; elle assure de ce fait le transport et les échanges des substances minérales.

S. Ferri - Ricchi

▲ ***Au cours de son parcours souterrain, le véhicule eau joue deux rôles, géodynamique et hydrogéochimique. Ici, dans la grotte de Neptune, près de Capo Caccia (Sardaigne), la couleur vert glauque des parois, des concrétions et du fond est due à la présence de multiples Cyanophycées.***

▼ **Figure 29 : zonalité sol-eau souterraine.** ***Remarquer que la limite entre la zone saturée et la zone non saturée est située au-dessus de la surface piézométrique, laquelle est également la surface libre.***

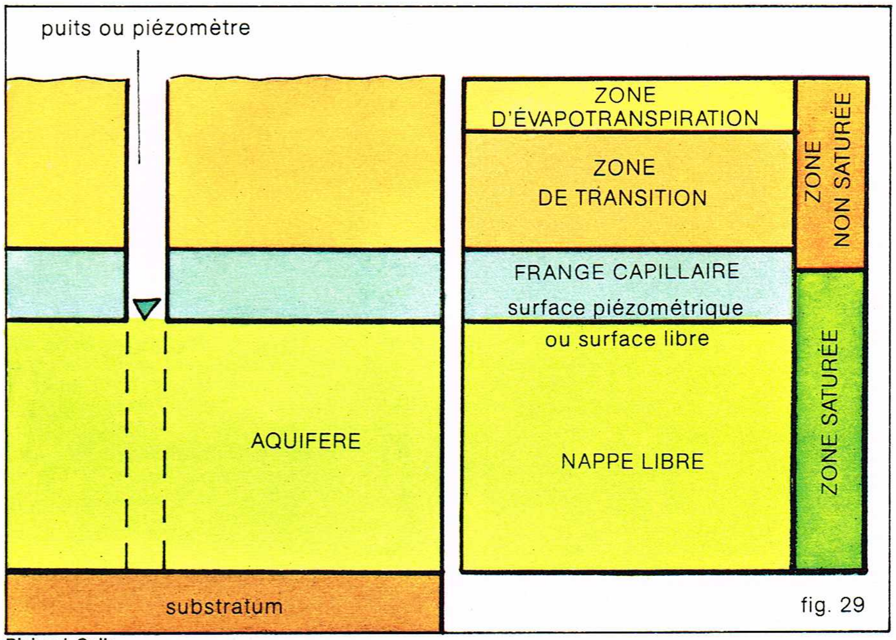

Richard Colin

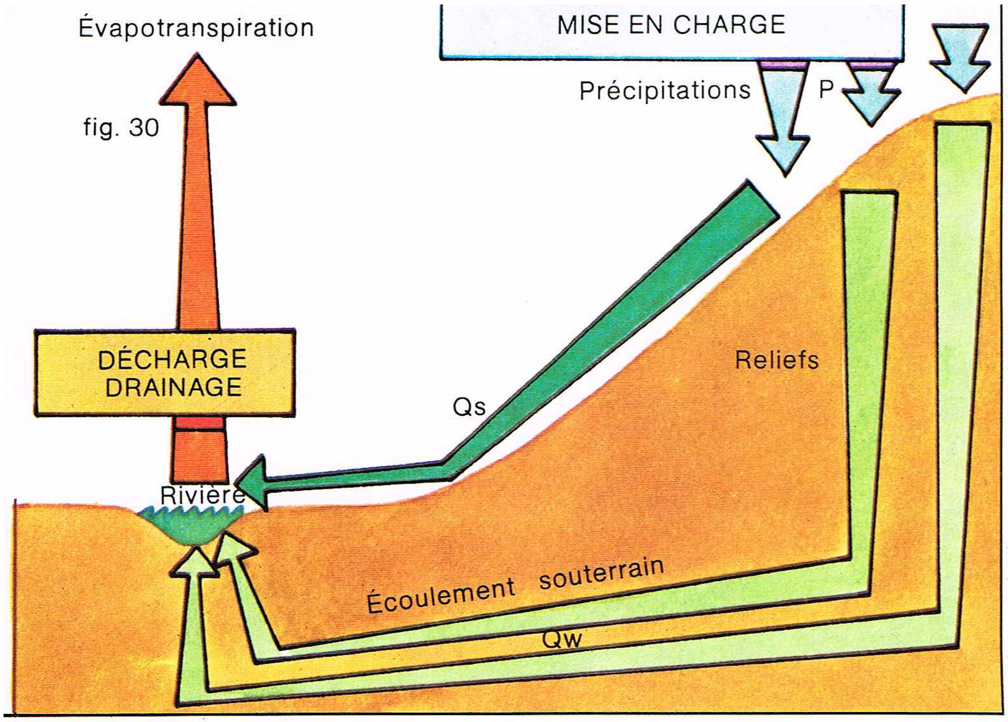

Richard Colin

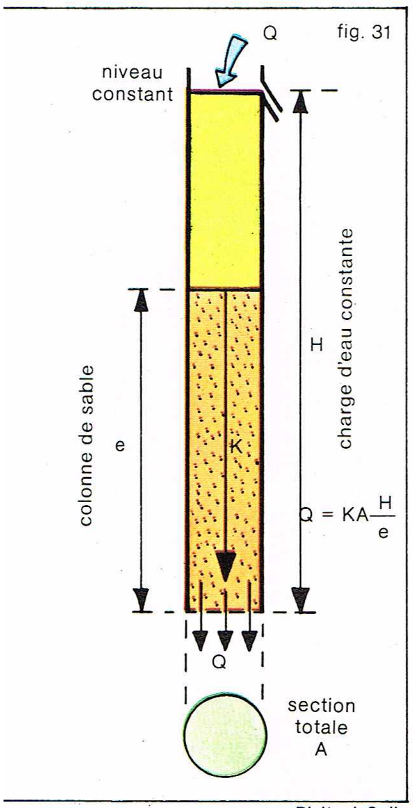

Richard Colin

▲ ***En haut,* figure 30 : schéma général de l'écoulement souterrain. *Sous l'action de la gravité, les eaux souterraines s'écoulent des reliefs vers les dépressions et vallées où le drainage et l'évapotranspiration intenses créent une zone de décharge. Ci-dessus,* figure 31 : *noter que, dans ce schéma de l'appareillage utilisé pour l'établissement de la loi de Darcy, les calculs sont rapportés à la section totale A.***

L'écoulement des eaux souterraines, hydrodynamique souterraine, perméabilité et vitesses d'écoulement

Schéma général de l'écoulement souterrain

Les hydrogéologues ont mis au point, au cours des vingt dernières années, le schéma général de l'écoulement des eaux souterraines (fig. 30). Celles-ci, alimentées par l'infiltration de l'eau des précipitations sur les reliefs, s'écoulent vers les vallées. La charge motrice est ainsi constituée par les élévations topographiques. De ces points, l'eau pénètre subverticalement dans le sous-sol, formant une branche descendante. Elle s'écoule ensuite avec une faible pente, traduite par la surface piézométrique, vers les points bas. Dans le fond des vallées, le drainage des cours d'eau et les pertes par évapotranspiration constituent des zones de décharge, formant la branche ascendante. Entre les reliefs et les vallées, une alimentation des eaux souterraines s'effectue par infiltration des eaux de surface. En général, ce schéma est plus complexe, surtout dans les grands bassins sédimentaires. Quoi qu'il en soit, il est possible de faire une première observation : *les eaux souterraines sont toujours en mouvement quelle que soit la nature lithologique et la profondeur des formations géologiques*. On note uniquement des variations importantes de la vitesse d'écoulement (de quelques millimètres à quelques milliers de mètres par an). La théorie des eaux profondes stagnantes ne rencontre plus actuellement que quelques rares adeptes.

Afin de mieux comprendre les modalités de l'écoulement des eaux souterraines, isolons un secteur dans le circuit général et étudions en détail les phénomènes dont il est le siège.

La loi de Darcy, base de l'hydrodynamique souterraine

L'hydrodynamique souterraine est la partie de l'hydrogéologie et de l'hydraulique relative à l'écoulement des eaux souterraines, aux lois qui le régissent et à leurs applications. Elle représente l'ensemble des aspects quantitatifs de l'hydrogéologie.

La base fondamentale de l'hydrodynamique souterraine est la loi de Darcy. L'écoulement de l'eau à travers une colonne verticale de sable naturel a été étudié expérimentalement, en 1856, par H. Darcy, ingénieur des Eaux de la ville de Dijon. Il a utilisé des tubes verticaux de 2,50 m de haut et de 0,35 m de diamètre intérieur, remplis de sable naturel sur une épaisseur, *e*, et sous une charge d'eau (hauteur d'eau), constante, *h* (fig. 31). Il a montré que le volume d'eau, Q (en m^3/s), filtrant de haut en bas de la colonne de sable, à travers la section totale intérieure A (en m^2), pendant l'unité de temps (seconde), est fonction d'un coefficient K, caractéristique du milieu poreux et de la perte de charge par unité de longueur du cylindre de sable, H/*e* :

$$Q = KA\frac{H}{e}.$$

Ultérieurement, K a été appelé le *coefficient de perméabilité*. La perte de charge par unité de longueur, H/*e*, est également définie comme le *gradient hydraulique*, I. L'expression de Darcy devient alors :

$$Q(m^3/s) = KA(m^2)I.$$

Le *débit unitaire*, q = K/A, ou débit traversant l'unité de section perpendiculaire à la direction de l'écoulement dans un milieu aquifère saturé, dans l'unité de temps, est donné par l'expression : q = KI.

Ce paramètre, quotient d'un débit par une surface, a les dimensions d'une vitesse.

La *vitesse de filtration*, V, rapportée à la section totale, A, est de même égale à V = KI.

On notera l'analogie de la loi de Darcy avec la loi d'Ohm, base de l'écoulement d'un fluide électrique dans un milieu conducteur (q ou V analogues à l'intensité et I analogue à la différence de potentiel).

La loi de Darcy a été vérifiée expérimentalement pour toutes les directions du courant (fig. 32), tous les liquides et tous les milieux poreux. L'*expression généralisée*, applicable dans tous les cas que peuvent présenter les structures hydrogéologiques, est :

$$\vec{q} = \vec{V} = -K\,\overline{\text{grad}}\,H.$$

Le signe — est introduit devant le deuxième membre de cette expression car la charge diminue dans le sens de l'écoulement, et q ou V ne peuvent être négatifs. K est le coefficient de perméabilité, au sens large, tenant compte de toutes les caractéristiques du milieu poreux (géométrie interne, granulométrie) et du liquide qui le traverse (viscosité et poids spécifique). L'expression $\overline{\text{grad}}$ H est assimilable au gradient hydraulique.

La loi de Darcy s'applique aux aquifères remplissant les conditions suivantes : roche réservoir homogène et continue ; écoulement laminaire.

— Une *roche réservoir* est *homogène* lorsque ses caractéristiques physiques (caractéristiques des vides, granulométrie, etc.) restent constantes dans le sens de l'écoulement. Leur constance dans toutes les directions de l'espace caractérise l'*isotropie*. Elle est *continue* lorsqu'il y a intercommunication des vides favorisant l'écoulement, dans un volume dit élémentaire, de dimensions minimales (50 à 100 fois le diamètre moyen des grains). L'écoulement s'effectue alors à l'échelle macroscopique, condition de base des lois de l'hydrodynamique.

— L'*écoulement laminaire* est constitué de filets liquides, juxtaposés et parallèles, les vitesses étant toutes égales sur une même section orthogonale.

Ces conditions de validité peuvent paraître très restrictives, surtout en ce qui concerne les roches réservoirs si l'on considère les nombreuses variations lithologiques des formations lithologiques (stratification, passage latéral de faciès, schistosité, etc.). En fait, les cas où la loi de Darcy n'est pas applicable sont limités aux formations fortement hétérogènes, aux roches compactes très faiblement fissurées, aux formations à réseaux karstiques très développés et au voisinage des captages (écoulement non laminaire).

Les paramètres hydrauliques de l'écoulement des eaux souterraines. Perméabilité et vitesses d'écoulement

La loi de Darcy permet de dégager les principaux paramètres hydrauliques de l'écoulement des eaux souterraines : coefficient de perméabilité, gradient hydraulique et vitesses d'écoulement.

● Le *coefficient de perméabilité*

La *perméabilité* est l'aptitude d'un milieu à se laisser traverser par un fluide (l'eau en particulier) sous l'effet d'un gradient hydraulique. Elle s'exprime quantitativement par le *coefficient de perméabilité* K, et la *perméabilité intrinsèque, k*. Le coefficient de perméabilité, K, est défini comme le volume d'eau gravitaire (en m^3) traversant en une unité de temps (seconde) l'unité de section (en m^2) orthogonale à la direction de l'écoulement, sous l'effet d'une unité de gradient hydraulique (à la température de 20 °C). Il est assimilé à une vitesse (dans V = KI, si V = 1, V = K) et doit être exprimé en m/s (le cm/s est toléré).

— Les *facteurs de la perméabilité*. Les expériences de laboratoire ont montré que le coefficient de perméabilité était déterminé par deux groupes de facteurs, les uns propres à la roche réservoir, les autres au liquide en mouvement.

— Les *facteurs propres à la roche réservoir*. La

perméabilité intrinsèque. L'eau circulant dans les vides de la roche réservoir rencontre une résistance qui est fonction de leur forme, de leurs dimensions et de leurs intercommunications (continuité des vides). On accède aux caractéristiques des vides par celles des grains, donc par l'étude granulométrique. Les travaux effectués ont montré que l'influence de la granulométrie pouvait être schématisée par l'expression $k = Nd^2_{10}$, où k est la *perméabilité intrinsèque,* d_{10} le diamètre efficace des grains et N un facteur de forme groupant les autres caractéristiques granulométriques (forme, arrangement et surface spécifique des grains). La perméabilité intrinsèque, exprimée en m^2 ou en darcys, indépendante des caractéristiques du fluide, est une constante de la roche réservoir. Sa détermination est nécessaire à l'étude des aquifères profonds. Ses facteurs sont la forme des grains, le diamètre efficace, la surface spécifique et la porosité efficace.

Le *diamètre efficace* des grains, d_{10}, est le facteur principal car il exprime le diamètre moyen des grains et leur distribution. L'expression générale de la perméabilité intrinsèque étant $k = N\ d^2_{10}$, certains auteurs, après des études en laboratoire, ont proposé une valeur moyenne de $N = 100$, d'où :

$$k(\text{cm}^2) = 100d^2_{10}\ (\text{cm}).$$

Cette expression, applicable dans certaines limites, donne des résultats peu précis et très dispersés. Elle montre que le coefficient de perméabilité varie en fonction inverse du diamètre des grains. Avec des diamètres inférieurs à 1/100 mm, le milieu poreux est imperméable. D'où l'importance en hydrogéologie des études de la granulométrie en laboratoire et de la lithologie sur le terrain. Cette dernière est un guide pour la prospection des eaux souterraines permettant de déterminer les réserves aquifères.

Les valeurs de k sont inversement proportionnelles à la *surface spécifique*, M, des grains (selon 6/M).

Enfin, l'écoulement des eaux souterraines s'effectuant dans les vides occupés par l'eau gravitaire et n'affectant que ce type d'eau, la *porosité efficace* est également à considérer.

— Les *facteurs propres au liquide en mouvement*. Les facteurs du coefficient de perméabilité propres au liquide sont la viscosité dynamique et le poids spécifique, lesquels varient en fonction de la température et de la teneur en sels dissous dans l'eau.

L'effet de la température est prédominant, la viscosité dynamique de l'eau décroissant fortement lorsque la température s'élève. Le coefficient de perméabilité, K, variant en fonction inverse, augmente donc avec la température de l'aquifère (environ 3 % par degré entre 10 et 50 °C). Autre conséquence, le coefficient de perméabilité croît avec la profondeur (degré géothermique) [tableau XII]. Les *sels dissous* ont également, au-dessus d'une certaine teneur, une influence sur la viscosité (elle augmente).

Le *poids spécifique* varie en fonction de la pression, de la teneur en sels dissous et de la température.

On constate donc que si dans l'étude des eaux souterraines dites normales (faible profondeur, faible teneur en sels dissous, température peu élevée) nous pouvons négliger les effets de la viscosité et du poids spécifique, il n'en est pas de même dans celle des aquifères profonds (température et teneur en sels élevées).

— *Valeurs du coefficient de perméabilité*. Les valeurs du coefficient de perméabilité, K, s'échelonnent de 10^1 à 10^{-11} m/s (tableau XIII). Toutes les roches étant perméables à des degrés divers, la limite inférieure de la perméabilité a été fixée, par convention, à une valeur du coefficient de perméabilité de 10^{-9} m/s.

— La *transmissivité*. La productivité d'un aquifère est fonction de son coefficient de transmissivité et de son épaisseur, b. C'est pourquoi un paramètre nouveau a été créé, la transmissivité, T, égale au produit du coefficient de perméabilité, K, par la puissance aquifère, b ($T = Kb$). Elle s'exprime en m^2/s. Incluant la puissance aquifère, elle permet de représenter sur des cartes les zones de productivité.

● Le *gradient hydraulique*

Le gradient hydraulique, I, est la différence de charge hydraulique entre deux points d'un aquifère, par unité de distance, selon la direction générale de l'écoulement. La

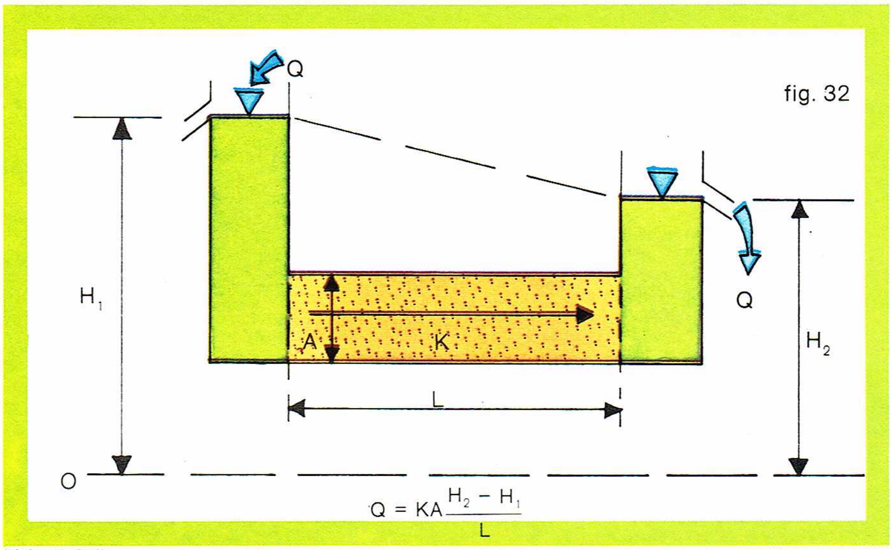

Richard Colin

▲ **Figure 32 :**
schéma de l'*appareillage de laboratoire utilisé pour la vérification de la validité de la loi de Darcy *avec un écoulement latéral. Ce dispositif est plus proche de l'écoulement souterrain dans les aquifères.

▼ *Ci-dessous* **tableau XII :**
accroissement de la perméabilité de l'eau avec la profondeur et avec la température.
En bas, **tableau XIII :**
valeurs en m/s du coefficient de perméabilité K et classement des matériaux poreux.

Tableau XII. Accroissement de la perméabilité de l'eau avec la profondeur et avec la température.

Profondeurs (m)	Températures (°C)	Viscosités (poise 10^{-2})	Perméabilités relatives
0	10	1,308	1
100	13	1,207	1,08
200	16	1,112	1,18
500	25	0,894	1,46
1 000	40	0,656	2
2 000	70	0,406	3,22
3 000	100	0,284	4,61

Tableau XIII. Valeurs en m/s du coefficient de perméabilité, K et classement des matériaux poreux

10 · 10^{-1}	10^{-2} · 10^{-3} · 10^{-4}	10^{-5} · 10^{-6} · 10^{-7} · 10^{-8}	10^{-9} · 10^{-10} · 10^{-11}
graviers gravillons sans éléments fins	sables purs graviers et sables	sables très fins sables et argiles limons	argiles
perméabilité très bonne	perméabilité bonne	perméabilité mauvaise	
matériaux perméables		semi-perméables	imperméables

▶ ***A gauche,* figure 33 : influence de la section d'écoulement sur la vitesse d'écoulement.**
A la section totale, retenue par Darcy, correspond la vitesse de filtration. Dans la réalité, l'eau gravitaire s'écoule dans les vides ménagés par la porosité efficace. La section efficace, plus petite, entraîne une vitesse effective plus grande.
***A droite,* figure 34 : vitesse intergranulaire et dispersion.**
L'eau souterraine, en milieu poreux, s'écoule dans les vides ménagés entre les grains du complexe solide-eau de rétention, décrivant des trajectoires tortueuses. Il en résulte que les trajets à partir du point d'origine, A, étant différents les particules d'eau n'arrivent pas en même temps à la sortie, d'où dispersion.

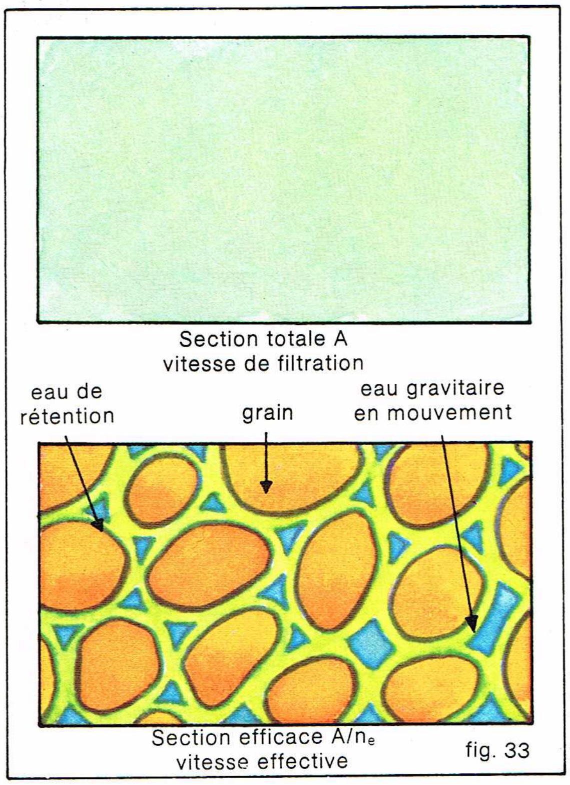

fig. 33

Richard Colin

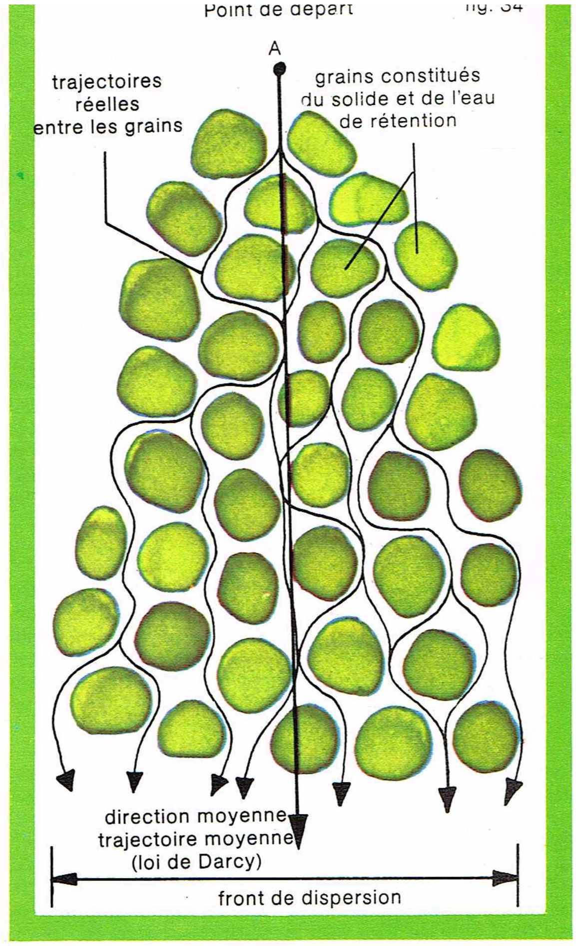

fig. 34

Richard Colin

charge hydraulique étant mesurée par le niveau piézométrique, il est assimilable à la pente de la surface piézométrique. Dans la pratique, il est calculé sur le terrain à partir des niveaux piézométriques, mesurés dans deux ouvrages : l'un amont, H_1, l'autre aval, H_2, situés sur une même ligne de courant et séparés d'une distance L :

$$I = \frac{H_1 - H_2}{L}.$$

Ces données peuvent également être obtenues par une carte piézométrique. Les valeurs du gradient hydraulique, mesurées dans des conditions normales de l'écoulement souterrain, sont faibles : de 10^{-3} à 10^{-5}.

● *Vitesses d'écoulement des eaux souterraines*

Il est possible, selon la méthode de calcul ou de mesure, de distinguer plusieurs types de vitesses d'écoulement des eaux souterraines. Les calculs, basés sur la loi de Darcy, permettent d'obtenir la vitesse de filtration et la vitesse effective. Des mesures par traçage, en laboratoire ou sur le terrain, déterminent la vitesse intergranulaire et la vitesse de terrain.

— La *vitesse de filtration et la vitesse effective.* La vitesse de filtration, V, est calculée par la loi de Darcy :

$$V = Q/A = KI.$$

La vitesse de filtration, définie par Darcy, se rapporte donc à la *section totale* d'écoulement, A, constituée de grains solides (trame solide) et d'eau (eau de rétention et eau gravitaire) [fig. 33]. Par exemple, un débit d'écoulement souterrain de 1 m^3/s à travers une section de 200 000 m^2 correspond à une vitesse de filtration calculée de :

$$V = Q/A = 1/200\,000 = 0{,}000\,005 \text{ m/s} = 0{,}4 \text{ m/jour} = 150 \text{ m/an}.$$

Mais seule l'eau gravitaire participe à l'écoulement souterrain. La section d'écoulement est donc égale à la section totale moins celle des grains solides et de l'eau de rétention, c'est-à-dire aux vides exprimés par la porosité efficace n_e. La *section efficace* (fig. 33) est donc $A \cdot n_e$ et l'expression de la loi de Darcy devient :

$$V_e = Q/A \cdot n_e = KI/n_e.$$

On obtient ainsi la vitesse effective, V_e, plus élevée que la vitesse de filtration. Dans l'exemple précédent, en tenant compte d'une porosité efficace de 10 %, on calcule :

$$V_e = Q/A \cdot n_e = 1/200\,000 \times 0{,}1 = 0{,}000\,05 \text{ m/s} = 4 \text{ m/jour} = 1\,500 \text{ m/an}.$$

La vitesse de filtration est reliée à la vitesse effective par l'expression : $V_e = V/n_e$.

— La *vitesse intergranulaire. La dispersion hydrodynamique.* L'hydrodynamique suppose que l'écoulement à travers un milieu poreux, homogène et continu, s'effectue selon des *trajectoires rectilignes* (une trajectoire est le chemin parcouru par les molécules ou les particules d'eau constituant des filets liquides), indépendantes de la structure interne, microscopique des vides (fig. 34). C'est pourquoi la loi de Darcy s'applique à des ordres de grandeur macroscopiques.

En réalité, les molécules ou particules d'eau empruntent les vides continus, alignés selon la direction moyenne de l'écoulement, et contournent ainsi les grains solides recouverts de l'eau de rétention, décrivant des *trajectoires tortueuses* (fig. 34). Étant donné la complexité de la structure des vides, les trajets parcourus entre deux points ne sont pas égaux, les itinéraires étant différents. Il en résulte que toutes les particules d'eau issues d'une même origine, la vitesse étant toujours constante par hypothèse, n'arrivent pas en même temps, après avoir traversé une longueur déterminée de milieu poreux. Ce phénomène est la *dispersion hydrodynamique*, ou *dispersion*.

Cette conception de l'écoulement, basée sur l'étude des trajectoires réelles, est abordée par une discipline de la mécanique des fluides, la *cinématique.* Alors que l'hydrodynamique étudie l'écoulement à une échelle macroscopique, la cinématique s'applique à l'échelle microscopique. Les conceptions sont donc très différentes. Or, pour l'étude de l'écoulement des eaux souterraines relative au transport des substances minérales et organiques par l'eau, c'est-à-dire pour la prévention de la pollution, ce sont les trajets réels qui doivent être considérés. La *vitesse intergranulaire,* V_i, tient compte des trajectoires réelles, affectées par la dispersion. C'est la vitesse qui est déterminée, approximativement, par les *traceurs,* ou substances qui marquent la molécule d'eau et l'accompagnent dans son parcours.

Une expérience simple de laboratoire précisera cette notion. Soit une colonne verticale de sable à l'intérieur d'un tube de 1 m de haut et de 0,10 m de diamètre (fig. 35). On introduit un traceur (fluorescéine par exemple) à la concentration C_o (poids de traceur par unité de volume de solution) en haut de la colonne. Deux techniques d'injection du traceur peuvent être pratiquées : continue ou par bouffées. La concentration, C, est mesurée en bas de colonne à des intervalles de temps échelonnés. Si l'on porte sur un graphique les temps écoulés entre

l'introduction du traceur et son apparition à la base en abscisses, et les rapports des concentrations C/C_0 en ordonnées, on obtient la courbe de la variation de la concentration en fonction du temps (fig. 35). C'est une courbe étalée et non une droite verticale correspondant à un écoulement conforme à la loi de Darcy. Cette expérience montre que le transfert du traceur à travers la colonne de sable s'effectue progressivement et qu'il arrive à la base en une sorte de nuage étalé dans l'espace et dans le temps.

— La *vitesse de terrain*. La vitesse à considérer pour les études pratiques d'hydrogéologie est celle déterminée sur le terrain par des techniques se rapprochant le plus possible des conditions réelles, c'est-à-dire par l'*emploi de traceurs :* c'est la vitesse de terrain, V_t. La vitesse de terrain est la vitesse moyenne d'un ensemble de vitesses intergranulaires. Elle a donc une signification cinématique statistique et ne peut être reliée d'une façon rigoureuse aux vitesses calculées par la loi de Darcy. Toutefois, elle est du même ordre de grandeur que la vitesse effective. La vitesse de terrain doit obligatoirement être prise en compte pour l'étude de la propagation des pollutions de tous ordres (tableau XV).

● *La grandeur de la vitesse d'écoulement des eaux souterraines dans les aquifères et ses conséquences pratiques*

Ainsi que le montre le tableau XIV, les vitesses d'écoulement dans les aquifères sont *faibles :* de quelques mètres à quelques milliers de mètres par an. Elles sont plus petites dans les aquifères profonds. Il y a donc une diminution, avec la profondeur, de la vitesse, qui peut être réduite à quelques centimètres, voire quelques millimètres à très grande profondeur. Théoriquement, une vitesse nulle n'est jamais atteinte.

Les faibles valeurs des vitesses ont des conséquences importantes. Elles expliquent le rôle régulateur des aquifères vis-à-vis de l'écoulement souterrain et le faible renouvellement des réserves en eau souterraine lors de leur exploitation. Un exemple, choisi dans le bassin de Paris, avec l'aquifère multicouche des sables albiens, illustre ces faits. La distance séparant des affleurements de l'est du bassin (Argonne-Champagne humide-Puisaye) des zones d'exploitation de la région parisienne est, en moyenne, de 140 000 m. Si l'aquifère n'était alimenté que par les affleurements, avec une vitesse de terrain de 4 m par an, il faudrait environ 35 000 ans pour que l'eau des bordures remplace (renouvelle) celle extraite dans le sous-sol de la capitale. D'autres méthodes, plus précises, comme les mesures avec le carbone 14, ont confirmé ces calculs.

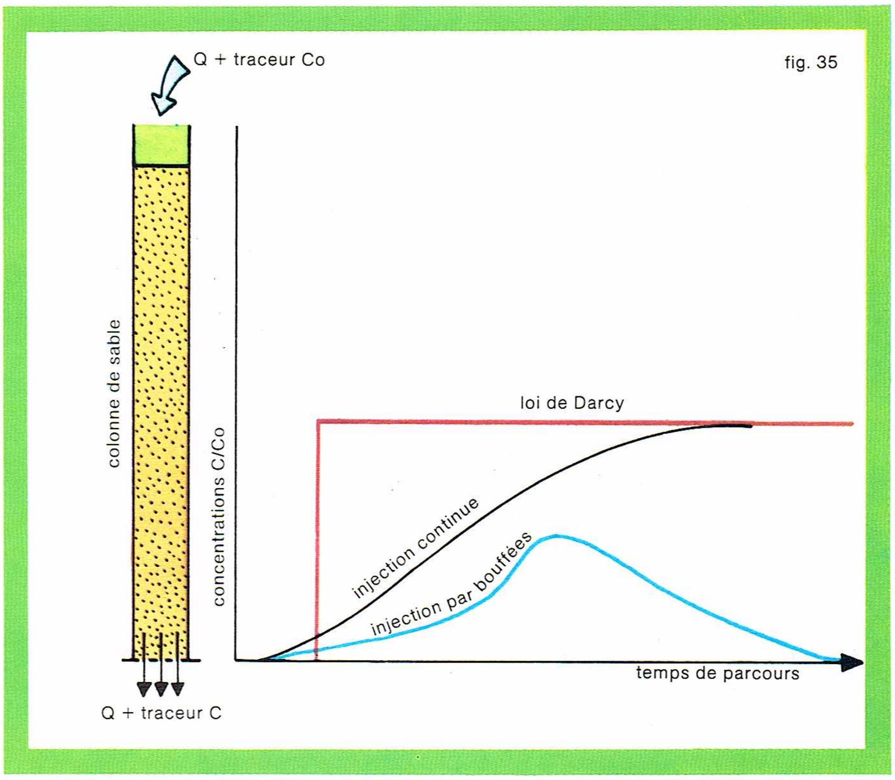

Tableau XV. Quelques valeurs de la vitesse de terrain obtenues sur des stations d'essai

Roches réservoirs	Vitesses de terrain (m/jour)
calcaire fissuré	0,6
alluvions	1 à 5
alluvions grossières	5 à 10
sable fin	3 à 4

Tableau XIV. Quelques valeurs de la vitesse d'écoulement dans les aquifères

Types d'aquifère	Vitesses calculées (Darcy) (m/an)	Vitesses mesurées (traceurs) (m/an)	Temps de parcours* (an/km)
Aquifères profonds			
sables paléocènes du bassin d'Aquitaine	2 à 3		300 à 500
sables albiens du bassin de Paris	3	4	250 à 300
sables du Continental intercalaire du Sahara	2 à 3		300 à 500
grès de Nubie (Egypte)		15	66
bassin du nord de l'Ukraine		3 à 35	30 à 300
sables du littoral des Pays-Bas		5	250
Aquifères libres			
alluvions de la vallée du Rhin à Kehl	1 700		0,6
alluvions de la vallée du Rhin à Bâle		1 000-2 000	0,5 à 1
alluvions de la vallée du Rhône à Pierrelatte		1 800	0,5

* temps écoulé pour parcourir un kilomètre, évalué en années

▲ *En haut,* **figure 35 :** *schéma d'***appareillage de laboratoire pour l'étude de la vitesse intergranulaire et de la dispersion.** *Sur le graphique donnant les variations de la concentration en fonction du temps de parcours, la dispersion est très nette par comparaison à la droite obtenue par application de la loi de Darcy.* *Ci-dessus,* **tableau XV :** *quelques valeurs de la vitesse de terrain obtenues sur des stations d'essai.*

◀ **Tableau XIV :** *quelques valeurs de la vitesse d'écoulement dans les aquifères.*

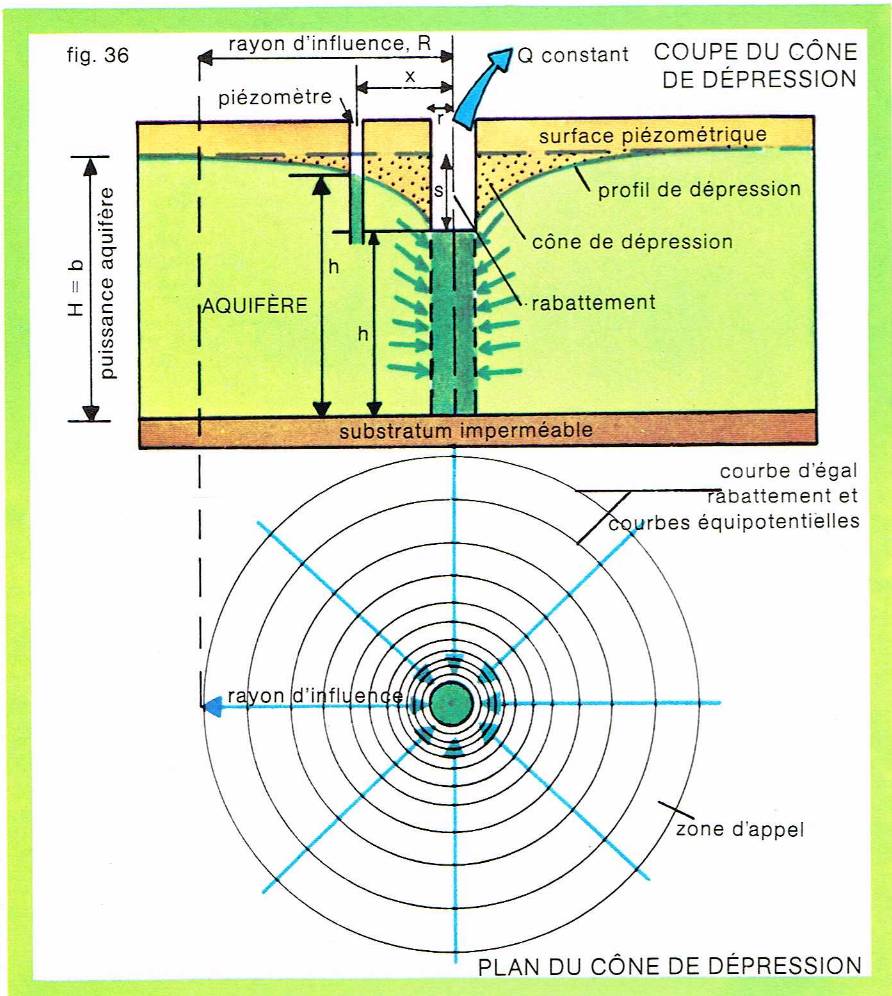

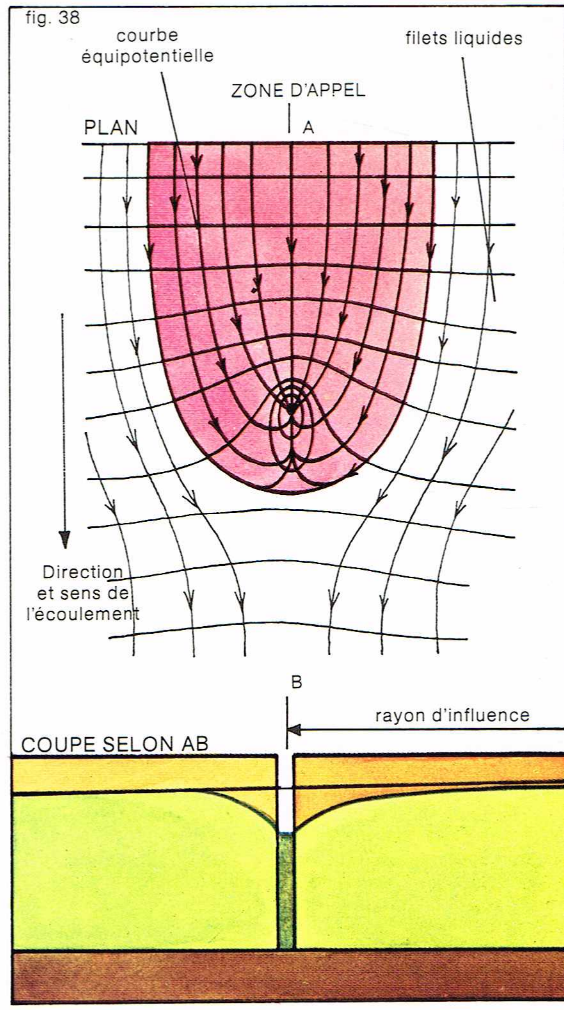

▲ *A gauche,* **figure 36** *: schéma de l'effet du pompage dans un puits, sur l'aquifère à nappe libre et à surface piézométrique horizontale; schéma du cône de dépression à un instant donné.*
A droite, **figure 38** *: schéma du cône de dépression avec surface piézométrique inclinée. Les eaux souterraines étant en écoulement, la surface piézométrique est inclinée et le cône de dépression est déformé et dissymétrique; dans les faits, l'eau pompée provient presque exclusivement de la partie amont de l'aquifère.*
▼ **Tableau XVI** *: paramètres hydrauliques de l'aquifère et leur emploi en hydrogéologie.*

Tableau XVI - Paramètres hydrauliques de l'aquifère et leur emploi en hydrogéologie.

	Paramètres hydrauliques de l'aquifère		
	Emmagasinement	Perméabilité	Vitesses
	Porosité efficace n_e (%) Coefficient d'emmagasinement S	Coefficient de perméabilité K (m/s) Perméabilité intrinsèque k (m^2) Transmissivité T (m^2/s)	Débit unitaire q (m/s) Vitesse de filtration V (m/s) Vitesse effective V_e (m/s) Vitesse intergranulaire V_i (m/s) Vitesse de terrain V_t (m/s)
		Diffusivité T/S	
Rôle de l'aquifère à la base des calculs	Emmagasinement	Conducteur d'influence	Conducteur de fluide
	Réserve	Propagation d'influence	Débit d'écoulement de l'eau souterraine Propagation de la pollution

Conclusions sur les paramètres hydrauliques de l'aquifère

Les paramètres hydrauliques de l'aquifère sont, en fonction de leur spécificité (tableau XVI) :

— les paramètres de la roche réservoir déterminant notamment l'emmagasinement ou la libération de l'eau (rôle d'emmagasinement de l'aquifère) : porosité efficace, n_e, et coefficient d'emmagasinement, S;

— les paramètres de l'écoulement des eaux souterraines (rôle conducteur de l'aquifère) : coefficient de perméabilité, K, et transmissivité, T; vitesse effective, V_e, et vitesse de terrain, V_t.

Il faut y ajouter la *diffusivité,* T/S, paramètre régissant la propagation d'influence dans l'aquifère.

L'écoulement des eaux souterraines vers un puits

Les effets du pompage dans un puits sur l'aquifère. Le cône de dépression

Le pompage dans un puits exploitant la totalité de l'aquifère, ou puissance aquifère, *b,* abaisse le niveau d'eau dans l'ouvrage (niveau dynamique) et crée dans l'aquifère une *aire d'influence* en forme d'entonnoir, le *cône de dépression* (fig. 36 et 37). Avec une surface piézométrique horizontale, ce cône est caractérisé par son *rayon d'influence,* R, et son *rabattement,* s. Le rabattement est égal à la différence H entre la surface piézométrique au repos mesurée au-dessus du substratum, d'une part, et le niveau dynamique dans le puits ou le niveau d'eau dans un ouvrage d'observation, ou *piézomètre,* creusé à une distance *x* de l'axe du puits d'autre part. Si *h* est la hauteur d'eau dans l'ouvrage mesurée au-dessus du substratum, le rabattement *s* est égal à H — *h*.

Sur une coupe transversale, le cône de dépression est limité à sa partie supérieure par la surface piézométrique, et à sa base par le *profil de dépression.* En plan, le cône de dépression est représenté par des courbes de dépression circulaires concentriques (fig. 36). Mais en réalité, les

eaux souterraines étant en écoulement, la surface piézométrique est inclinée et le cône de dépression est déformé et asymétrique (fig. 38). La *zone d'appel*, c'est-à-dire la partie de l'aire d'influence où l'eau aboutit au puits, est très étalée vers l'amont. Il en résulte que le rayon d'influence, réduit à l'aval et latéralement, est difficile à limiter vers l'amont. Tout se passe comme si l'eau alimentant le puits provenait d'un front amont distant parfois de plusieurs kilomètres.

Ces faits sont importants pour la lutte contre la pollution des eaux souterraines captées, donc pour la délimitation des périmètres de protection. La différence essentielle entre l'aquifère à nappe libre et l'aquifère à nappe captive est que dans le premier cas le cône de dépression affecte l'aquifère, alors que dans le second il est virtuel. Les *dimensions du cône de dépression* (profil de dépression), rayon d'influence, R, et rabattement, *s*, sont à débit constant, Q, fonction du coefficient de perméabilité, K (ou de la transmissivité, T) et de la porosité efficace, n_e (ou du coefficient d'emmagasinement) [tableau XVII]. Ainsi, sur deux stations d'essai, après le même temps de pompage :

R = 5 500 m et s = 6,7 m, avec T = $1{,}5 \cdot 10^{-3}$ m²/s ;
R = 12 200 m, s = 0,76 m, pour T = $1{,}5 \cdot 10^{-2}$m²/s.

Des études précises sur station d'essai, confirmées par l'analyse mathématique, ont montré qu'à débit constant, *le rayon d'influence et le rabattement croissent en fonction du temps* de pompage. Ce fait permet de distinguer deux régimes d'écoulement de l'eau souterraine vers le puits, en relations étroites avec l'évolution dans le temps du cône de dépression : le *régime permanent* et le *régime transitoire*.

Dans le régime permanent le rayon d'influence et le rabattement sont constants ; il y a équilibre entre le débit sortant du puits et le débit entrant dans l'aquifère. Dans le régime transitoire, le plus fréquent, ces deux paramètres croissent en fonction du temps de pompage ; l'équilibre entre le débit sortant et le débit entrant est rompu. Théoriquement, si l'on pompe à débit constant dans une nappe captive, horizontale, illimitée et de puissance aquifère constante, on observe toujours un régime transitoire ; le rayon d'influence se propage jusqu'aux limites de l'aquifère. En réalité, après une certaine durée de pompage, l'accroissement des rabattements, très faible, n'est plus mesurable ; pratiquement, on obtient une stabilisation caractérisant un *régime semi-permanent*, puis permanent.

Le *débit spécifique*, q_s, dans un puits est le débit obtenu par mètre de rabattement (q_s = Q/s) ; il s'exprime en m³/h·m, ou en m³/s·m.

Expressions mathématiques de l'écoulement des eaux souterraines vers un puits

Deux démarches de traitement mathématique des données Q et *s* de la dynamique de l'écoulement des eaux souterraines vers un puits ont été entreprises. La première, adoptée par J. Dupuit en 1863, est basée sur le régime permanent ; la seconde, plus récente (1936), est à l'origine des expressions modernes de l'école américaine, en particulier de C.V. Theis puis C.E. Jacob. Ces dernières expressions sont à la base de l'exécution et de l'interprétation des pompages d'essai sur station d'essai (puits de pompage entourés de piézomètres). Les expressions de Dupuit, utilisées pour les pompages d'essai sur un puits (essais de puits), aboutissent à la détermination du débit spécifique et du débit maximal d'exploitation. Ces données permettent d'équiper l'ouvrage de captage (hauteur de refoulement et puissance des pompes, profondeur des pompes). Les expressions de Theis et de Jacob, les plus utilisées, permettent de calculer la transmissivité, T, et le coefficient d'emmagasinement, S.

● *Expressions mathématiques du régime permanent.* Dupuit a admis que lors du pompage à débit constant, Q, les dimensions du cône de dépression (rabattement, *s*, et rayon d'influence, R) sont constantes. Il a calculé les expressions :

— pour le puits en nappe libre,

$$Q = 1{,}366K \frac{H^2 - h}{\log R/r}$$

K étant le coefficient de perméabilité et *r* le rayon du puits ;

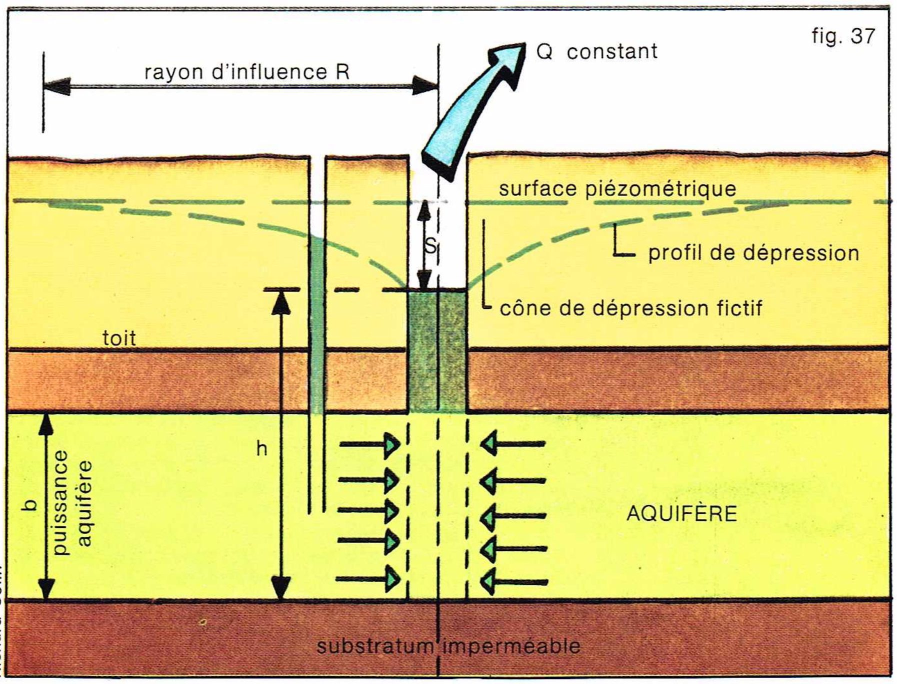

Tableau XVII. Influence des paramètres hydrauliques sur les dimensions du cône de dépression

Paramètres hydrauliques	Variations du paramètre	Variations du rabattement	Variations du rayon d'influence
K ou T	croît décroît	décroît croît	croît décroît
n_e ou S	croît décroît	décroît croît	décroît croît

▲ *En haut,* **figure 37 :**
***schéma de l'effet du pompage** dans un puits,*
sur l'aquifère à nappe captive. Le cône de dépression fictif n'affecte pas l'aquifère.
Ci-dessus, **tableau XVII :**
influence des paramètres hydrauliques
sur les dimensions du cône de dépression.

▼ *Un vieux puits dans la région de Provins.*

Guy Plessy - Explorer

— pour les nappes captives avec de faibles rabattements,

$$Q = 2{,}73Kb \frac{H-h}{\log R/r}$$

b étant la puissance aquifère.

Les expressions 1,366 K/logR/*r* et 2,73 K*b*/logR/*r* sont par hypothèse des constantes. Il en résulte que le débit du puits est fonction du rabattement, *s*, et de la puissance aquifère, *b*. Le rayon du puits, intervenant comme l'inverse de son logarithme, a une importance secondaire. S'il est doublé, de 1 à 2 m par exemple, l'augmentation de débit n'est que de 18 % environ. Les autres paramètres étant constants, l'importance de la puissance aquifère apparaît nettement, d'où la nécessité de la capter sur toute sa hauteur (puits complet) afin d'assurer le maximum de rendement.

● *Expressions mathématiques du régime transitoire*

Dès 1936, les hydrogéologues américains, en particulier C.V. Theis, puis C.E. Jacob, ont calculé des expressions où, conformément à la théorie du régime transitoire, une troisième donnée variable, le temps de pompage *t*, intervient. La prise en considération du temps permet d'établir des programmes d'exploitation à long terme. L'expression fondamentale est une exponentielle intégrale :

$$s = \frac{Q}{4T} W(u), \text{ avec } u = \frac{x^2 S}{4tT}.$$

Les valeurs de W (*u*), ou *fonction du puits*, sont données par des tables : *x* est la distance en mètres de l'axe du puits au piézomètre où a été mesuré le rabattement; *t* est le temps de pompage en secondes. L'application de cette méthode exige de disposer de puits d'observation ou de piézomètres.

Cependant, dans la plupart des cas, surtout en station d'essai, avec un temps de pompage de longue durée (en général supérieur à 12 heures) et pour une distance d'observation *x* proche du puits (inférieure au rayon d'influence), on utilise une expression simplifiée, la *formule d'approximation logarithmique* de C.E. Jacob :

$$s = \frac{0{,}183Q}{T} \log \frac{2{,}25\,Tt}{x^2 S}.$$

Après arrêt du pompage l'eau remonte dans le puits et l'aquifère, effaçant le cône de dépression, jusqu'à rétablissement de la surface piézométrique initiale. La durée de ce phénomène est plus ou moins longue, selon les caractéristiques de l'aquifère. Les mesures des rabattements dans le puits et les piézomètres permettent de déterminer la transmissivité, T, par application de l'expression :

$$s' = \frac{0{,}183Q}{T} \log \frac{t}{t'};$$

t est la durée du pompage en secondes, *t'* le temps écoulé depuis l'arrêt du pompage et *s'* le rabattement résiduel en mètres mesuré à l'instant *t'*. L'observation de la remontée est donc importante. Elle aboutit au calcul d'une seconde valeur de la transmissivité, permettant le contrôle des calculs effectués par ailleurs. En outre, contrairement à l'interprétation de la descente, elle n'exige pas l'emploi de piézomètres et peut être appliquée aux rabattements dans le puits.

— *Limites d'application des expressions mathématiques du régime transitoire*. Les expressions du régime transitoire s'appliquent à un aquifère à nappe captive, homogène et isotrope, d'extension illimitée, de puissance aquifère constante et non alimenté par son toit ou son substratum (épontes étanches). Toutefois pour des cas bien précis : nappe libre étendue, présence d'une limite latérale étanche ou d'une ligne d'alimentation à potentiel constant (eaux de surface), épontes semi-perméables (drainance), des expressions mathématiques et des solutions graphiques sont données par différents auteurs. *L'interprétation des pompages d'essai exige donc une connaissance précise de la structure hydrogéologique de l'aquifère étudié.*

En conclusion, les pompages d'essai permettent de déterminer les caractéristiques du puits, base de l'équipement du captage, et de calculer les paramètres hydrauliques de l'aquifère : le coefficient d'emmagasinement, la transmissivité et le coefficient de perméabilité. Ces mesures, exécutées sur le terrain, sont plus proches des conditions naturelles que celles effectuées en laboratoire.

La qualité de l'eau souterraine. L'hydrogéochimie

L'hydrogéochimie, ou géochimie de l'eau, traite de la teneur en éléments chimiques dans l'eau (dissous ou en suspension), des paramètres physico-chimiques qui conditionnent leur mise en solution et de leur comportement au cours de l'écoulement souterrain (interactions entre l'eau et la roche réservoir). L'hydrogéochimie englobe les substances minérales dissoutes et les isotopes naturels stables et radioactifs (isotopes du milieu). C'est un moyen de prospection hydrogéologique complémentaire, permettant en particulier d'identifier l'origine de l'eau souterraine et de définir les modalités de l'écoulement souterrain. Elle apporte également une grande contribution à la cartographie hydrogéologique par les cartes hydrogéochimiques. En outre, déterminant la qualité de l'eau, l'hydrogéochimie peut en limiter les possibilités d'utilisation et réduire ainsi les ressources. Des exemples de cette détérioration naturelle de la qualité par dissolution des sels de la roche réservoir ont déjà été décrits.

Les principales substances dissoutes dans l'eau souterraine

L'eau souterraine renferme, en solution, de nombreuses substances minérales, gaz et sels solubles.

Les *principaux gaz* dissous (parfois en suspension à l'état libre) sont : les composants de l'air (oxygène, hydrogène, azote), l'anhydride carbonique (CO_2), l'ammoniac (NH_3), le sulfure d'hydrogène et, en moindres teneurs, l'argon, le xénon, l'hélium et le méthane. La plupart de ces gaz ont une solubilité faible, comprise entre 0,01 et 0,02 cm^3/cm^3 à la température ordinaire, exception faite de CO_2, H_2S et NH_3, qui ont une solubilité respectivement 40, 200 et 60 000 fois plus grande.

Les principaux *sels solubles*, qui sont la cause de la *minéralisation* de l'eau, sont le calcaire $CaCO_3$, la dolomie (Ca, Mg) CO_3, le gypse $CaSO_4$, $2H_2O$, la halite NaCl, la sylvinite KCl, les nitrates, la silice SiO_2. Ces sels, fréquents dans les formations géologiques, sont à l'origine de la minéralisation de l'eau souterraine.

Ces sels dissous sont à l'état ionisé et les principaux *éléments chimiques* analysés en laboratoire, ou *éléments majeurs*, sont les cations Ca^{++}, Mg^{++}, Na^+, K^+ et les anions SO_4^{--}, Cl^-, CO_3^{--}, CO_3H^- (exprimé en CO_3 combiné). Il faut y ajouter des éléments importants pour la qualité de l'eau et la détection de pollutions accidentelles : NO_3^-, NH_4^-, le fer, le manganèse, le magnésium, le fluor, la silice.

Toutefois, des techniques analytiques très poussées permettent de doser ou de déceler des éléments en très faibles concentrations *(éléments-traces)*. Leur intérêt hydrogéologique est considérable, par exemple, pour l'étude des eaux thermominérales, de la circulation des eaux souterraines et de la métallogénie : plomb, zinc, cuivre, cobalt, nickel, etc.

Les paramètres de la minéralisation de l'eau souterraine

Les données des analyses chimiques de l'eau permettent de déterminer quatre paramètres principaux : les éléments chimiques, le résidu sec, la dureté et l'agressivité.

— Les *éléments chimiques* sont exprimés en milligrammes par litre (mg/l) ou en parts par million (ppm).

— Le *résidu sec*, RS, exprimé en mg/l, représente la totalité des sels dissous. Correspondant à la minéralisation, il est obtenu par dessiccation de l'eau à 110 °C.

— La *dureté* d'une eau est sa propriété, causée principalement par les ions Ca^{++} et Mg^{++}, de provoquer un résidu insoluble au contact d'une liqueur de savon et un dépôt de carbonate sous l'effet de l'ébullition. Elle est exprimée quantitativement par le *degré, ou titre, hydrotimétrique total*, TH. Le degré hydrotimétrique total français correspond à 10 mg de $CaCO_3$ par litre. Il est sensiblement égal à 10 ppm.

— L'*agressivité* qualifie une eau naturellement acide, principalement par sa teneur en CO_2, et pouvant exercer une action corrosive sur des roches ou des matériaux comme les tubages et crépines de forage ou les conduites.

L'interprétation des données de l'analyse chimique

Les données de l'analyse chimique sont interprétées d'abord pour définir les types d'eau (faciès hydrogéochimiques) et ensuite pour les comparer entre eux. Ces interprétations sont la base de la cartographie hydrogéochimique. Les principales interprétations sont : les milliéquivalents, les quantités en réaction et les diagrammes.

— La première opération nécessaire pour interpréter les résultats de l'analyse chimique consiste, en partant des teneurs en milligrammes par litre des ions, à calculer les *milliéquivalents* par litre (meq) de chacun d'eux. La masse de chaque élément, ou *équivalent chimique*, est obtenue en divisant sa masse atomique (pour un ion simple) ou la somme des masses atomiques (pour un radical) par sa valence (par exemple, l'équivalent Ca^{++} = masse atomique/valence = 40/2 = 20; l'équivalent CO_3^{++} = 60/2 = 30).

— Le nombre de milliéquivalents d'un ion s'obtient en divisant le poids de l'élément en solution, en mg/l, par son équivalent chimique (par exemple, meq Ca^{++} = 124/20 = 6,2). Les nombres ainsi obtenus représentent les *quantités en réaction, r.*

— Les résultats des analyses chimiques sont portés sur des diagrammes. Quatre représentations graphiques sont couramment utilisées : les graphiques en colonnes, les diagrammes rayonnants, triangulaires et verticaux. Le plus expressif est le *diagramme logarithmique* vertical de H. Scœller et E. Berkaloff (fig. 39). L'étude hydrogéochimique de l'aquifère multicouche de l'Albien du bassin de Paris est un bon exemple d'application du diagramme logarithmique. Trois faciès hydrogéochimiques sont définis : le faciès bicarbonaté calcique, 1, le faciès bicarbonaté sodique, 2, et le faciès chloruré sodique, 3.

L'acquisition et l'évolution des caractéristiques hydrogéochimiques

L'eau souterraine acquiert ses caractéristiques hydrogéochimiques de base au cours de l'infiltration en zone non saturée, dans les premiers mètres du sol. Par la suite, sa minéralisation subit des modifications avec l'écoulement souterrain, sous l'action des sels solubles de la roche réservoir ou d'influences extérieures (invasion marine d'eau salée ou pollutions accidentelles par exemple). Le graphique de la figure 39 montre l'évolution de l'hydrogéochimie des eaux souterraines, de l'amont vers l'aval, en relation avec les pollutions naturelles. Les régions périphériques du bassin de Paris (Est, Sud-Est, Ouest), alimentées par l'eau des précipitations, sont caractérisées par un faciès bicarbonaté calcique, 1. Dans la région parisienne apparaît un faciès bicarbonaté sodique, 2, traduisant des échanges d'ions avec les argiles (échanges de base) ; ces roches fixent les ions Ca^{++} et libèrent les ions Na^{+}. Ce phénomène est favorisé par la drainance à travers les assises semi-perméables. Dans la basse Seine, ce type évolue, à proximité de la mer, en faciès chloruré sodique résultant d'une invasion marine récente actuellement stabilisée.

L'influence de la roche réservoir dépend de la solubilité des roches, de la grandeur de la surface et du temps de contact. C'est pourquoi les eaux se chargent d'autant plus rapidement que la porosité totale est plus élevée et la vitesse plus lente. Ce cas est réalisé pour les sables ou les calcaires très fracturés des nappes captives. Il existe donc une relation étroite entre les caractéristiques physiques et géochimiques des roches réservoirs et l'hydrogéochimie des eaux souterraines.

Les caractéristiques physiques de l'eau souterraine

Les principales caractéristiques physiques de l'eau souterraine sont : la température, la conductivité et la résistivité électriques, et le pH.

— L'étude systématique des *températures* des eaux souterraines, mesurées aux émergences ou dans l'aquifère, apporte des données sur leur origine et leur écoulement. Cette mesure est obligatoire pour les études de résistivité. La température de l'eau s'équilibre avec celle de la roche réservoir. L'influence de la température de l'air s'atténue très rapidement en profondeur, avec une limite maximale d'une quarantaine de mètres (zone d'hétérothermie). Au-delà, elle est fonction du degré géothermique.

— La *conductivité* électrique et son inverse, la *résistivité,* sont des moyens importants d'investigation en hydrogéologie. Leur mesure, rapide et précise, n'entraîne ni difficultés de prélèvement, ni appareillage compliqué. La conductivité s'exprime en micromhos par cm. L'unité de résistivité est l'ohm·cm, qui est la résistivité d'un prisme d'eau de 1 cm² de section et de 1 cm de haut à la température de 20 °C. La résistivité, à température constante, est liée au résidu sec.

— La molécule d'eau est légèrement ionisée en ions H^{+} et OH^{-} (ou plus exactement en hydronium H_3O^{+} et OH^{-}). Le pH d'une solution est le logarithme de l'inverse de la concentration en ions H_3O^{+} (cologarithme). L'eau pure renferme 10^{-7} ions H_3O^{+}, ou OH^{-}, ce qui correspond à une molécule dissociée pour 10 millions de molécules d'eau; la valeur du pH est par convention exprimée par l'exposant, pH = 7. Au-dessus de 7, le milieu est acide, au-dessous il est basique. La mesure du pH est effectuée rapidement sur les lieux de prélèvements avec des indicateurs colorants liquides ou imprégnant des papiers spéciaux.

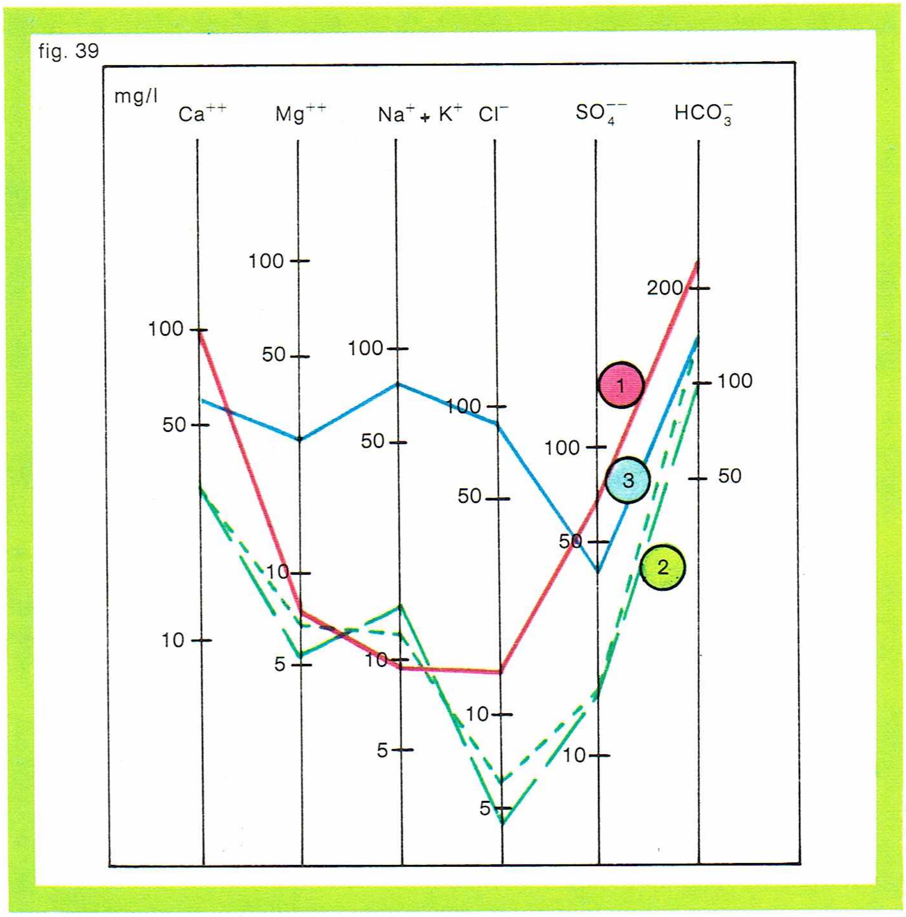

▲ **Figure 39 :** ***diagrammes logarithmiques de la composition chimique des eaux de l'aquifère multicouche de l'Albien du bassin de Paris. Ces diagrammes montrent, d'une part, la parenté des eaux souterraines (les deux diagrammes, 2) et, d'autre part, l'évolution hydrogéologique des eaux des affleurements, 1, à la basse Seine, 3, en passant par la région parisienne, 2.***

L'eau souterraine, ressource minérale renouvelable

La gestion des nappes d'eau souterraine

La gestion des nappes d'eau souterraine a pour but de fixer les conditions de leur exploitation, tout en assurant leur conservation en quantité et en qualité. Basée sur le principe de l'unité des ressources en eau, elle repose sur l'évaluation des réserves ainsi que des ressources et leur régularisation, en particulier par des stockages souterrains et l'alimentation artificielle des nappes.

Unité des ressources en eau

L'étude du cycle de l'eau montre l'unité des ressources en eau, en quantité et en qualité, quelles que soient leur fractionnement et leur localisation en surface ou dans le sous-sol et sans considération de profondeur.

Les relations entre les eaux de surface et les eaux souterraines montrent leur interdépendance. Toutes deux ne sont que les fractions d'un seul volume total d'eau disponible. De ce fait, tout prélèvement sur les unes s'effectue au détriment des autres. Par exemple, l'exploitation des eaux souterraines diminue le débit de l'écoulement souterrain, donc des émergences, puis des cours d'eau qu'elles alimentent; ces actions se répercutent en profondeur, surtout dans les bassins sédimentaires, les intercommunications et les échanges verticaux entre les aquifères, jusqu'aux niveaux les plus profonds, constituant une unité hydrologique.

▶ **Figure 40 :** ***définitions des*** **types de réserve.**

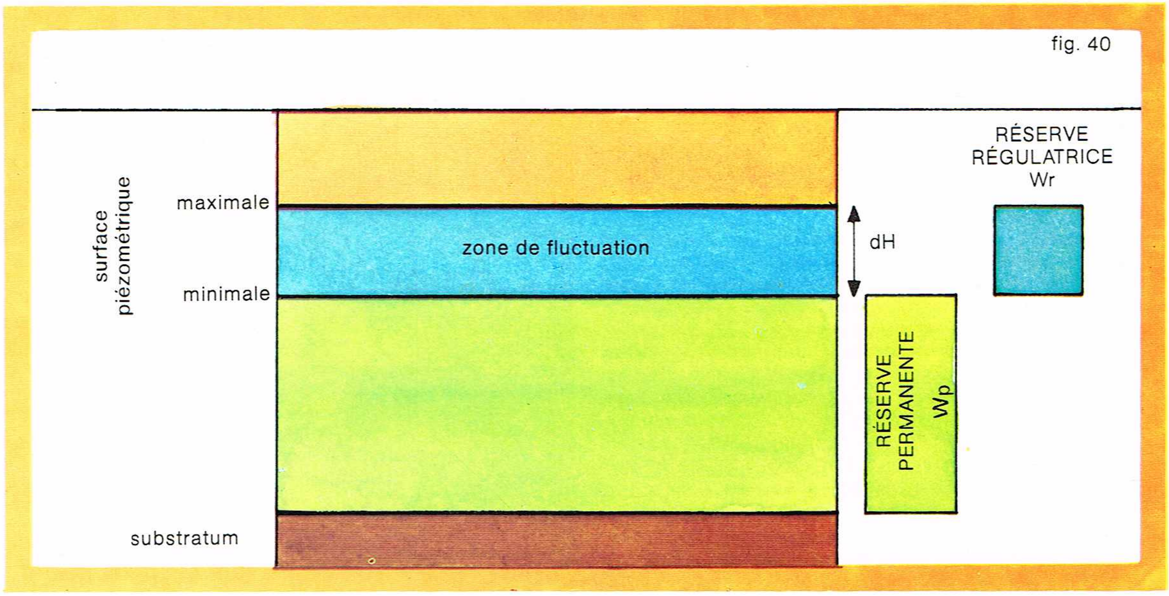

Cette notion d'unité est importante pour la *prévention* des pollutions car elle montre que l'eau est un agent de transport et de dispersion des substances polluantes, quel que soit leur point d'introduction dans le circuit de l'eau : air, surface du sol, eau de surface, sol et sous-sol.

● *Réserves en eau souterraine*

— *Définitions et types de réserves*. La réserve en eau souterraine, W, représente le volume d'*eau gravitaire* contenu, à une date donnée, dans un aquifère. Elle s'exprime en unités de volume, généralement en millions de m³ (fig. 40).

Dans les aquifères à nappe libre, le volume de la roche réservoir varie en fonction des fluctuations de la surface piézométrique, d'où la nécessité d'une référence à une période définie, en général pluriannuelle, le substratum restant fixe. Il est possible de distinguer la *réserve totale*, W_t, délimitée par la surface piézométrique moyenne, la *réserve permanente*, W_p, limitée par la surface piézométrique la plus basse, et la *réserve régulatrice*, W_r, qui est la quantité maximale d'eau gravitaire contenue dans la zone de fluctuation (entre la plus haute surface piézométrique et la plus basse). La réserve régulatrice est la partie variable de la réserve d'un aquifère. Elle peut être comparée, pour la même période de référence, au débit global d'une nappe, Q_w (somme des quantités d'eau débitées naturellement dans l'aquifère pendant la période de référence).

Dans les aquifères à nappe captive, les épontes imperméables étant fixes, seule la réserve totale peut être définie.

— *L'évaluation des réserves en eau souterraine*. La réserve en eau souterraine, W, est déterminée par le volume de la tranche de roche réservoir, V, correspondant au type de réserve, et la porosité efficace n_e ($W = V \cdot n_e$). Le volume de la roche réservoir peut être calculé par son épaisseur moyenne, *b*, et sa surface, A, ou, avec plus de précision, par la planimétrie des cartes en courbes isopaches.

Exemples de calcul de la réserve totale, W_t.

Aquifère à nappe libre du bassin hydrogéologique de Ber-Rechid (Maroc) [tableau ci-dessous] :

Tableau XVIII : calcul du volume de la roche réservoir de la réserve totale du bassin hydrogéologique de Ber-Rechid (Maroc)

courbe isopache (m)	volume (*) (10^6 m³)	volume total (10^6 m³)
0 à 10	218,5	
10 à 20	291,8	14 000
20 à 30	172,2	
30 à 40	29,5	
etc.		

* Ces valeurs sont le produit de la surface calculée par planimétrie des courbes colonne 1 et de l'épaisseur correspondante.

W_t = volume planimétré $\times n_e$;
$W_t = 14\,000 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \times 0{,}05 = 700 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

Aquifère à nappe captive des sables miocènes de la région de Zarzis-Djerba (Sud tunisien) :

W_t = épaisseur moyenne × surface $\times n_e$;
$W_t = 100 \text{ m} \times 5\,000 \cdot 10^6 \text{ m}^2 \times 0{,}2 = 100\,000 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

Exemples de calcul de la réserve régulatrice, W_r.

La méthode la plus simple consiste à utiliser la hauteur moyenne, *dh*, de la zone de fluctuation de la surface piézométrique et la surface. C'est le cas de la nappe libre de la craie de la Vanne (S.-E. de Paris) :

$W_r = dh \times \text{surface} \times n_e$;
$W_r = 5 \text{ m} \times 480 \cdot 10^6 \text{ m}^2 \times 0{,}05 = 120 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

La seconde méthode repose sur la planimétrie de la carte en courbes d'égale hauteur de la zone de fluctuation. Un exemple en est la nappe alluviale libre de la Crau :

$$W_r = 110 \cdot 10^6 \text{ m}^2 \times 0{,}1 = 11 \cdot 10^6 \text{ m}^3.$$

La réserve en eau souterraine est souvent très élevée : 60 000 milliards de m³ (équivalent d'un débit de 1 000 m³/s pendant 2 000 ans) pour les sables du Continental intercalaire du Sahara, 425 milliards de m³ pour la nappe des sables albiens du bassin de Paris, 800 millions de m³ pour les alluvions de la plaine d'Alsace, 160 pour la Crau.

— *Le renouvellement de la réserve en eau souterraine*. La réserve en eau souterraine d'un aquifère se renouvelle par l'apport des eaux d'alimentation. Au cours d'une période déterminée, en général l'année hydrologique, un volume d'eau, *d*W, est introduit dans l'aquifère et y transite.

Le *taux de renouvellement* est le rapport de ce volume d'eau, *d*W, à la réserve totale, W_t (soit dW/W_t). Il exprime le volume d'eau qui transite dans l'aquifère (rôle conducteur). L'emmagasinement souterrain est fonction directe de ce paramètre.

La *durée de renouvellement* est la durée théorique nécessaire pour que le volume d'eau d'alimentation, *d*W, soit égal à la réserve totale, W_t (soit W_t/dW). C'est donc le temps requis pour reconstituer la réserve totale si celle-ci est épuisée. Il varie directement en fonction de la rétention naturelle des roches réservoirs (rôle d'emmagasinement).

● *Les ressources en eau souterraine*

— *Définitions et types de ressources*. La ressource en eau souterraine est la quantité d'eau utilisable qu'il est physiquement possible et économiquement avantageux de prélever dans les aquifères, dans un domaine et pendant une période définis, compte tenu de diverses contraintes

▶ *Page ci-contre, en bas :* **la ressource** *en eau souterraine est la quantité d'eau utilisable qu'il est physiquement possible et économiquement avantageux de prélever dans les aquifères, compte tenu de diverses contraintes techniques et pratiques; ici, une noria sur les bords du Nil.*

techniques et pratiques. Leur estimation fait intervenir des données économiques et un choix opérationnel. Elles présentent des caractères conventionnels, imposés par des contraintes économiques, techniques et prévisionnelles. Elles sont exprimées en m^3/an.

Les *ressources potentielles en eau totales* représentent la totalité des ressources potentielles, fractionnées, suivant leur localisation, en ressources potentielles en eau de surface et en *ressources potentielles en eau souterraine*. Ces deux fractions ne peuvent être additionnées car il existe des doubles emplois. Dans ses diverses utilisations l'eau n'est que partiellement consommée, des restitutions apparaissent, après une dégradation plus ou moins accentuée de la qualité de l'eau. Par exemple, une fraction souvent importante des débits d'eau souterraine prélevés est restituée, après avoir servi de fluide de refroidissement, aux cours d'eau, accessoirement aux aquifères eux-mêmes, mais plus ou moins en aval, voire dans un autre bassin.

Les ressources potentielles totales en eau se subdivisent en *ressources en eau renouvelables* et en *ressources en eau non renouvelables*. Les premières, permanentes, sont sensiblement égales au débit moyen de l'écoulement total, mesuré par le jaugeage des cours d'eau.

Les *ressources renouvelables en eau souterraine* doivent pouvoir être exploitées en conservant l'équilibre avec l'alimentation et sans dépenser les réserves. Elles proviennent essentiellement des captages d'eau en nappe libre. Dans ce cas, l'équilibre est traduit par la stabilisation de la surface piézométrique moyenne. Elles sont approximativement égales au débit moyen de l'écoulement souterrain.

Les *ressources non renouvelables en eau souterraine* proviennent essentiellement de l'exploitation des réserves des nappes captives à faible renouvellement. Elles peuvent également dépenser la réserve permanente des nappes libres. Leur durée est limitée dans le temps. La proportion de la réserve ainsi consommée est la *réserve exploitable*.

S.E.F.

▲ ***Sédiments sableux de la côte de Flat Rock en Afrique du Sud.***

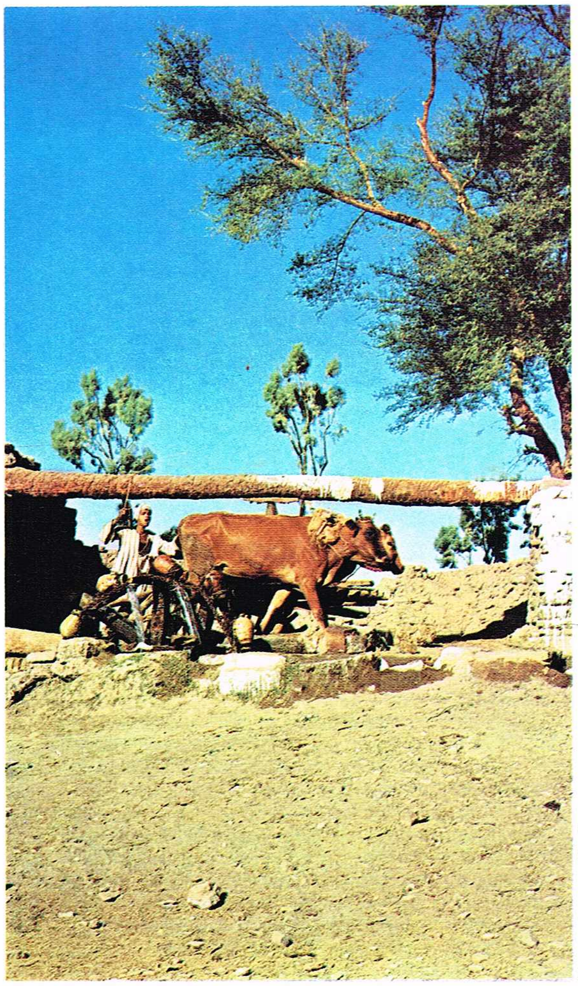

Desmarteau - Explorer

LES ROCHES SÉDIMENTAIRES ET LA SÉDIMENTATION

Les roches sédimentaires

Les roches sédimentaires se forment à partir de matériaux (sédiments) qui se déposent à la surface du globe suivant des modalités différentes et dans des milieux continentaux et marins. Les sédiments résultent souvent de l'accumulation de matériaux hétérogènes des points de vue chimique, minéralogique et pétrographique. Les sédiments, continuellement soumis au poids de nouveaux dépôts, subissent des modifications de texture et de composition qui aboutissent à la formation de roches compactes. L'ensemble des changements de texture ainsi que de composition minéralogique et chimique des sédiments prend le nom de *diagenèse*. Les processus diagénétiques n'aboutissent pas forcément à la consolidation totale de la roche. Ainsi, on connaît des exemples de roches sédimentaires très anciennes restées incohérentes et friables comme le sont certains sédiments actuels. A l'inverse, certains dépôts sédimentaires actuels, comme les travertins et les calcaires récifaux, sont consolidés au moment de leur formation. Les principaux processus sédimentaires sont observables actuellement et étudiables directement ou indirectement sur les terres émergées comme dans les profondeurs océaniques.

Le *cycle sédimentaire*, considéré comme l'ensemble des processus aboutissant à la formation des sédiments, commence sur les terres émergées par la *production de matériaux* qui résultent de l'altération météorique des formations appartenant aux trois grandes subdivisions lithologiques : roches sédimentaires, métamorphiques et éruptives. Deux types de matériaux se forment au cours de l'altération météorique : en premier lieu, le matériel détritique solide, constitué essentiellement par des fragments plus ou moins modifiés des roches altérées et par des minéraux néoformés dans les profils d'altération ; en second lieu, les substances en solution dans les eaux

Archives I.G.D.A.

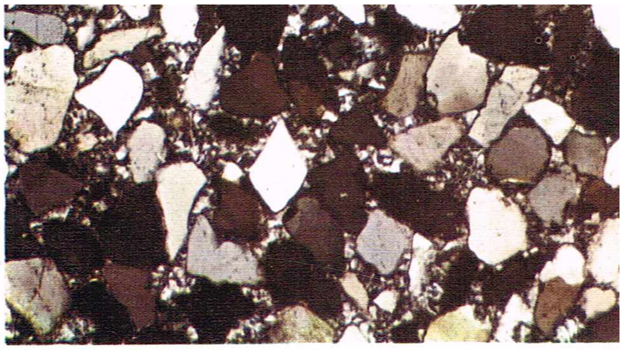

Archives photo B

Archives photo B

Archives photo B

Archives photo B

▲ Grès *oligocènes résultant de la cimentation des sédiments sableux. Cassinelle, Alexandrie (Italie).*

▶ *Ci-contre, de haut en bas : lames minces en lumière polarisée et analysée. Grains détritiques de quartz soudés les uns aux autres par un ciment de calcédoine dans un grès quartzeux de l'Éocène inférieur (Mons, Belgique). Grains détritiques de quartz (jaunes à gris), de feldspaths maclés et clivés, paillettes de muscovite de teinte très vive et cristaux néogénétiques de calcite dans un grès du Crétacé supérieur (Bergame, Italie). Fragments polycristallins de roches quartzeuses (débris de couleur sombre pointillés de blanc) et quartzo-séricíteux (débris de couleur sombre pointillés de jaune) avec éléments détritiques quartzeux et feldspathiques dans un grès à ciment calcaire crétacé (Sarnico, Italie). Fragments anguleux de serpentine dans un grès à ciment carbonaté* oligocène *(Alexandrie, Italie).*

d'altération, comme les ions et les particules colloïdales. La seconde phase du cycle sédimentaire consiste dans le *transport* du matériel, détritique et en solution, vers la mer; ce transport est surtout l'œuvre des fleuves. La troisième phase est la *sédimentation* du matériel, qui s'est différencié au cours du transport, dans les divers milieux sédimentaires. Enfin, les changements subis par les sédiments après le dépôt, et qui en produisent souvent la lithification, constituent la quatrième et dernière phase du cycle sédimentaire : la phase de la *diagenèse*.

Les sédiments continentaux tendent à être érodés et transportés ultérieurement vers la mer au cours du même cycle sédimentaire. On connaît toutefois des exceptions notables à cette règle : certaines roches sédimentaires déposées en milieu continental durant des ères géologiques parfois assez reculées (au Précambrien). Les sédiments marins déposés dans des milieux à profondeur limitée et intermédiaire (néritique et bathyal) sont souvent soumis à l'érosion sous-marine et redéposés en milieu plus profond avant la lithification; quand ils sont lithifiés (à la fin du cycle sédimentaire), ils subissent fréquemment des plissements et des soulèvements tectoniques qui produisent leur émersion et ils sont attaqués par l'érosion aérienne. Seuls les sédiments océaniques abyssaux s'accumulent de manière permanente, loin des continents.

Les sédiments océaniques d'âge géologique plus ancien que le Tertiaire n'ont pas été jusqu'à présent accessibles à l'observation directe.

Classification et composition minéralogique des roches sédimentaires

Les roches sédimentaires sont subdivisées en deux grands groupes : les *roches détritiques* ou *clastiques* et les *roches chimiques,* selon qu'elles sont constituées de matériel transporté jusqu'au lieu de sédimentation définitive sous forme solide, granulaire, ou bien en solution. Les roches sédimentaires chimiques comprennent aussi les *roches biochimiques* ou *organogènes,* formées surtout de résidus solides, calcaires ou siliceux, d'organismes végétaux ou animaux, accumulés dans le milieu même où vivaient les organismes.

Ce schéma de classification n'a pourtant pas valeur absolue : de nombreuses roches sédimentaires sont composées de matériaux d'origines diverses (détritique et organogène par exemple). De plus, dans certains cas particuliers, fréquents surtout parmi les roches calcaires, un sédiment organogène ou chimique peut avoir subi un transport prolongé avant son dépôt définitif; dans ce cas, il prend toutes les caractéristiques des sédiments clastiques. Un autre exemple est offert par certaines argiles kaoliniques (argiles résiduelles), qui ont le caractère des dépôts d'origine chimique, et non détritique comme les autres argiles. Les roches sédimentaires comprennent donc plusieurs grands groupes. Ceux-ci, désignés par des noms utilisés depuis longtemps, sont fondés surtout sur la composition granulométrique pour les roches clastiques et sur la composition chimique pour les chimiques.

Les *roches clastiques* sont traditionnellement divisées en trois groupes : les *conglomérats,* les *grès* et *sables,* et les *argiles*, auxquels correspondent des sédiments récents : les *graviers,* les *sables* et les *boues détritiques;* le terme d'argile s'adresse plutôt, selon l'usage le plus commun, soit aux sédiments incohérents (boues), soit aux roches sédimentaires plus ou moins consolidées.

Les principaux groupes de *roches d'origine chimique* sont les *calcaires,* qui comprennent aussi des roches détritiques, les *dolomies,* les *roches siliceuses non détritiques* et les *évaporites.* Il n'existe pas de termes particuliers pour désigner les sédiments correspondants non

consolidés, car ils ne sont pas fréquents dans l'ère géologique actuelle, où dominent largement les sédiments clastiques.

Les constituants minéralogiques fondamentaux des roches sédimentaires sont en partie communs aux roches ignées et métamorphiques, en partie caractéristiques ou très répandus dans cette catégorie de roches seulement. Tous les minéraux fémiques des roches ignées (à l'exception de la chlorite) manquent ou sont présents en quantités accessoires (minéraux lourds) car ils se sont formés à des températures élevées et sont rapidement détruits par hydrolyse durant l'altération météorique des roches. Il en est de même pour un groupe de minéraux exclusifs des roches métamorphiques stables eux aussi dans des conditions de température et de pression très différentes de celles existant à la surface de la Terre.

Le **quartz** est commun soit dans les roches détritiques, spécialement dans les grès, les sables et les limons, soit dans les roches siliceuses non détritiques, dont beaucoup sont composées essentiellement de quartz microcristallin. Ce minéral constitue, en outre, le ciment de certains grès. On trouve fréquemment dans les roches siliceuses non détritiques de la **calcédoine** et de **l'opale,** autres formes minéralogiques de la silice, laquelle a une origine organogène (tests d'organismes siliceux) ou bien précipite directement à partir de la solution, au cours de la sédimentation et de la diagenèse. La **cristobalite,** modification polymorphe du quartz, semble présente dans les roches argileuses et dans certains types de roches siliceuses constituées d'opale, où elle se présente comme un agencement partiel des tétraèdres élémentaires SiO_4, dont la disposition peut parfois se rapprocher de la symétrie du réseau de la tridymite.

Les **feldspaths alcalins** sont fréquents dans les roches détritiques. Les plagioclases contenant des quantités notables de calcium sont détruits au cours de l'altération météorique, tandis que les feldspaths alcalins sont plus résistants et ne s'hydrolysent complètement qu'en climat chaud ou humide et dans les régions de plaine présentant un puissant manteau d'altération (sol). Les feldspaths alcalins, en particulier l'*albite,* peuvent, de plus, se former pendant la diagenèse des sédiments, par réaction entre les différentes substances contenues en solution dans les eaux interstitielles. Cela se produit surtout dans les sédiments à grain fin, tant calcaires qu'argileux.

Les **fragments de roches** sont les composants caractéristiques des roches sédimentaires détritiques à grain grossier et moyen, c'est-à-dire de certains conglomérats et grès. Dans les conglomérats, on peut trouver des galets appartenant à différents types lithologiques, selon la nature des roches affleurant dans la zone d'alimentation et les processus d'altération météorique dominants. En général, les galets de roches ignées et métamorphiques sialiques sont plus fréquents que ceux des roches fémiques, du fait de la plus grande altérabilité de ces dernières. De plus, les fragments provenant de roches à texture fine, microcristalline (serpentinites, silex, etc.) sont communs en raison de leur plus grande résistance à la désagrégation. Les galets calcaires sont plutôt rares. Parmi les fragments de roches présents dans les grès, les types lithologiques à grain fin dominent, les roches à grain grossier ne pouvant pas donner naissance à des grains de sable polyminéralogiques; en effet, ceux-ci se désagrègent et donnent les minéraux simples qui les constituent. Un type particulier de fragment de roche est le matériel détritique d'origine pyroclastique (lapilli et cendres volcaniques), qui peut provenir d'éruptions contemporaines de la sédimentation ou de l'érosion de dépôts pyroclastiques préexistants.

Les **micas** sont présents en quantité accessoire dans les roches sédimentaires clastiques à grain moyen et fin et surtout dans les limons. Ils sont représentés principalement par la *muscovite,* assez résistante à l'altération météorique, tandis que la *biotite* s'altère plus facilement, surtout dans les régions à climat chaud et humide. Les *chlorites* se forment généralement pendant la diagenèse des sédiments, mais sont présentes également dans le matériel détritique.

Les **minéraux des argiles** (*kaolinite, montmorillonite, illite,* etc.) sont les composants fondamentaux des argiles, surtout de celles à grain très fin, et sont souvent présents, en quantités moindres, dans beaucoup d'autres roches sédimentaires. Ils prennent naissance au cours des processus d'altération météorique et de diagenèse; ils peuvent, en outre, dériver de l'altération physique des roches argileuses déjà existantes et ont parfois une origine hydrothermale. La composition définitive des minéraux des argiles dans les roches sédimentaires est donc déterminée pendant la diagenèse des sédiments.

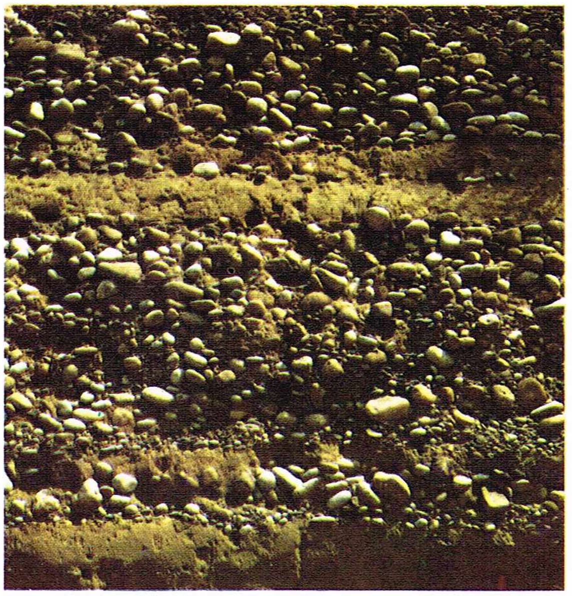
C. Bevilacqua

Archives photo B

▲ ***A gauche,* roches sédimentaires détritiques *à caractère conglomératique; ce sont des galets faiblement soudés par un ciment sablo-argileux (Chiusi, Italie). A droite,* carbonates *(essentiellement calcite) montrant différentes textures dans un calcaire triasique (lame mince en nicols croisés; collection privée).***

Les **hydroxydes de fer** (*goethite,* etc.) et d'**aluminium** (*boehmite,* etc.) peuvent être concentrés dans les dépôts continentaux qui représentent le résidu insoluble ou peu soluble de l'altération météorique des roches (latérites). De plus, l'hydroxyde de fer est présent originellement dans les sédiments actuels de différents types, déposés en milieu continental ou côtier, mais se transforme généralement pendant la diagenèse en *hématite (oxyde ferrique)* et autres minéraux ferrifères.

Les **carbonates,** minéraux assez répandus dans les roches sédimentaires, sont les constituants fondamentaux des calcaires et des dolomies; ils sont aussi présents dans les roches clastiques, sous forme de résidu ou comme ciment chimique secondaire. La genèse des minéraux carbonatés des roches sédimentaires est variée. L'*aragonite* prend naissance par précipitation chimique ou organogène, mais elle se transforme rapidement en calcite lors des premières phases de la diagenèse. La *calcite* peut avoir une origine chimique, organogène ou détritique, tandis que la *dolomite* se forme surtout pendant la diagenèse et présente rarement un caractère détritique ou chimique. La *sidérite* et l'*ankérite* sont des minéraux diagénétiques, tandis que la *magnésite,* rarement identifiée comme telle dans les roches sédimentaires, est surtout organogène.

Les **évaporites,** sédiments et roches produits par précipitation chimique de sels provenant de l'évaporation de masses d'eaux marines ou continentales, sont constituées de minéraux très solubles. En dehors de certains carbonates qui peuvent se former selon ce processus, les minéraux des évaporites comprennent les *sulfates de calcium (anhydrite* et *gypse),* le *chlorure de sodium (sel gemme)* et divers *sels de sodium, potassium* et *magnésium* à solubilité élevée et ne précipitant donc que dans des solutions assez concentrées.

La **matière organique,** d'origine animale ou végétale, est présente seulement en quantité accessoire dans les sédiments et des roches sédimentaires. Elle se dépose en même temps que le matériel inorganique, sous forme de cadavres et de fragments d'organismes morts et sous forme de matériel en solution adsorbé à la surface des minéraux argileux. La matière organique a un rôle assez important dans les processus diagénétiques; dans certains cas, elle peut donner naissance aux gisements d'hydrocarbures et de carbone.

Les **minéraux diagénétiques,** ou minéraux formés pendant la diagenèse des sédiments, ont un intérêt notable. Ils peuvent comprendre presque tous les minéraux d'origine détritique ou chimique, lesquels sont soumis au cours de la diagenèse à des phénomènes de

Archives photo B

dissolution et de reprécipitation, ainsi que d'autres minéraux se formant principalement ou uniquement pendant la diagenèse. Par ordre d'importance, après la *dolomite* et les autres carbonates *(sidérite, ankérite),* d'origine principalement ou uniquement diagénétique, et les *minéraux des argiles* dont la composition finale, presque toujours illitique dans les sédiments marins, est déterminée par la diagenèse, viennent les *minéraux ferrifères,* les *phosphates* et les *zéolites.*

Les **minéraux ferrifères,** qui ne sont généralement présents qu'en quantités accessoires dans certaines roches, surtout d'origine chimique, peuvent cependant être les composants fondamentaux des roches sédimentaires ferrifères. Ils se forment pendant la diagenèse des sédiments qui contiennent du fer, lequel est déposé presque toujours sous forme d'hydroxyde ferrique colloïdal. Selon les diverses conditions diagénétiques, il peut se former : des *sulfures de fer (pyrite, marcassite),* des *carbonates (sidérite, ankérite),* des *silicates* (*glauconite, chlorites ferrifères* et minéraux analogues) et des *oxydes (hématite, magnétite).* Un composant caractéristique des sédiments océaniques actuels est représenté par des nodules constitués essentiellement d'*oxydes* et d'*hydroxydes* de fer et de manganèse, produits par un accroissement direct au contact avec les eaux du fond enrichies en ces éléments ou bien à l'intérieur du sédiment pendant la diagenèse.

On trouve, disséminé en petites quantités dans certaines roches sédimentaires mais surtout concentré dans les phosphorites, un *phosphate de calcium colloïdal (la collophanite)* ayant la composition chimique de l'apatite, qui se forme pendant la diagenèse mais aussi par précipitation directe. La *vivianite,* d'origine diagénétique, est un phosphate de fer plus rare.

Les *zéolites* se forment spécialement pendant la diagenèse des sédiments qui contiennent du matériel vitreux d'origine volcanique et des dépôts pyroclastiques ; parmi les zéolites ainsi produites, l'*analcime* est commune. La *phillipsite,* zéolite de calcium, sodium et potassium, est également présente dans les sédiments océaniques profonds, dont elle peut être un composant fondamental.

L'origine du matériel sédimentaire

Sur les terres émergées, le cycle sédimentaire commence avec l'altération météorique des roches affleurantes ou situées à des profondeurs de quelques mètres à quelques dizaines de mètres, et avec la production de matériel détritique résiduel, de minéraux des argiles néoformées et de substances en solutions ionique ou colloïdale. Pour les distinguer des sédiments constitués de matériel sédimentaire provenant de l'altération météorique d'un ou de plusieurs types de roches, ces dernières sont désignées sous le nom de *roches mères.*

L'altération météorique se fait grâce à des processus assez divers qui peuvent être classés en deux catégories : les phénomènes physiques et les phénomènes chimiques. Parmi les facteurs des premiers se trouvent les variations de température, surtout entre le jour et la nuit, le gel et le dégel de l'eau contenue dans de minuscules fissures de la roche et l'action de la gravité. Les seconds comprennent principalement l'hydrolyse des silicates et la mise en solution des autres minéraux des roches, c'est-à-dire des carbonates, des sulfates, etc. Aux processus chimiques sont associés les processus biologiques, qui provoquent l'enrichissement des eaux superficielles en anhydride carbonique et en colloïdes organiques (acides humiques, etc.), augmentant grandement la solubilité de certaines substances.

Il résulte de l'action des divers processus d'altération météorique, qui se développent avec une intensité assez variable selon le climat de la région et sa géomorphologie, que la composition chimique et minéralogique des roches change graduellement à des profondeurs allant de quelques mètres dans les zones à climats tempérés à plusieurs dizaines de mètres dans les climats intertropicaux assez pluvieux. Les facteurs favorisant la formation de ce *manteau d'altération,* appelé aussi *éluvium,* ou *sol* (bien que ce dernier terme soit souvent réservé à ses niveaux supérieurs), sont surtout l'abondance des précipitations, et donc des eaux vadoses qui s'infiltrent dans le niveau superficiel des roches désagrégées par l'altération physique, et la température élevée qui augmente la rapidité des réactions chimiques. Dans les climats froids des zones périglaciaires et dans les climats arides (désertiques), l'altération météorique agit surtout par les processus physiques et produit presque uniquement du matériel détritique ayant la même composition que les roches dont il dérive.

Le changement notable de composition chimique et minéralogique des roches provoqué par les processus chimiques d'altération météorique peut être étudié en déterminant la nature du matériel situé à différents niveaux du manteau d'altération et en la comparant avec celle des roches sous-jacentes non altérées. On a ainsi pu observer que les changements les plus importants concernent surtout les roches ignées et métamorphiques, tandis que la composition minéralogique de nombreuses roches sédimentaires, surtout détritiques, ne varie pas substantiellement; souvent, il leur manque seulement un éventuel ciment calcitique.

L'altération de la plupart des minéraux des roches ignées et métamorphiques est due à leur instabilité dans les conditions de température et pression existant à la surface de la Terre, ces minéraux s'étant formés pendant les processus magmatiques et métamorphiques, à des températures élevées. Les feldspaths et les minéraux fémiques sont totalement détruits par l'altération météorique si celle-ci se déroule dans des régions de plaines à forte pluviosité et à climat chaud, tandis que les feldspaths alcalins peuvent échapper à l'altération dans les régions tempérées ou dans les zones montagneuses à érosion rapide. Parmi les minéraux fondamentaux des roches ignées et métamorphiques, seul le quartz résiste à l'altération météorique, bien qu'il soit parfois attaqué par des eaux fortement alcalines.

Alors que la *dissolution* de certains minéraux fondamentaux des roches, comme les minéraux des évaporites et des carbonates, est facilement compréhensible, la disparition progressive de la plupart des minéraux silicatés du manteau d'altération se produit selon un mécanisme plus complexe : l'*hydrolyse.* Jusqu'à ces dernières années, on pensait que l'hydrolyse des silicates produisait essentiellement la désagrégation de leur réseau cristallin et la libération des cations métalliques que celui-ci contenait (calcium, sodium, potassium, fer, magnésium, manganèse, etc.) sous forme de solution de bicarbonates, sulfates et chlorures, tandis que la silice et l'alumine, insolubles, étaient entraînées sous forme de solution colloïdale. On a cependant reconnu que durant l'hydrolyse la silice et l'alumine se libéraient du réseau des silicates, essentiellement sous forme d'ions ou de groupes ioniques, et constituaient donc des solutions vraies; leur éventuelle polymérisation, qui donne des particules plus grandes, colloïdales, est un phénomène secondaire.

L'hydrolyse des silicates est semblable à la mise en solution de la calcite et des autres minéraux solubles. En particulier, des considérations théoriques sur l'hydrolyse des feldspaths ont montré que le phénomène débute par la formation d'une pellicule composée de molécules polaires d'eau, orientées sur le cristal de façon à ce que

▼ ***Ce diagramme montre la différence de composition chimique entre un gneiss sain et la même roche altérée en faisant intervenir le rapport entre les pourcentages de chaque élément exprimé en oxydes multipliés par 100 dans une roche et dans l'autre. Les éléments dont les points représentatifs tombent à droite de la verticale noire (100) sont évacués au cours de l'altération météorique, ceux qui sont à gauche de cette verticale se concentrent dans le profil d'altération (d'après Goldich).***

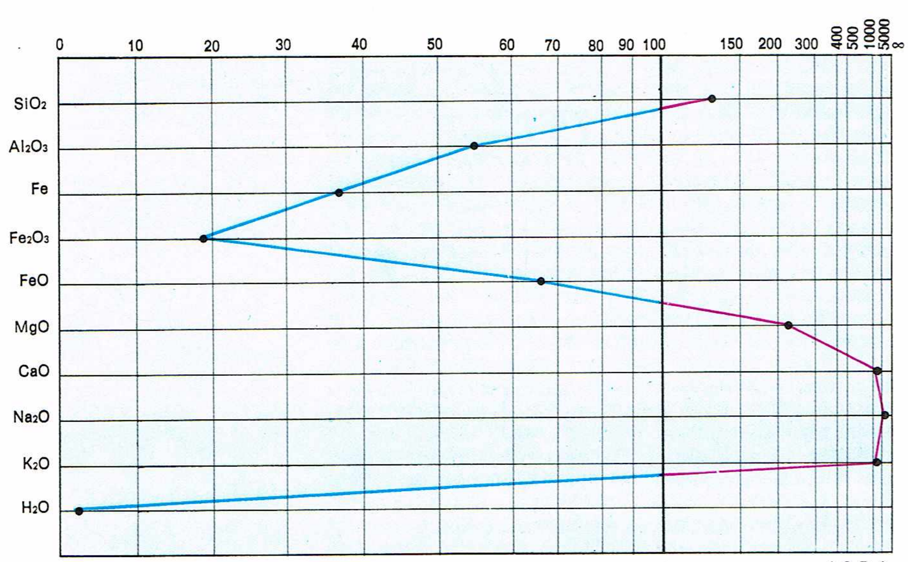

I.G.D.A.

leurs atomes d'hydrogène, avec une charge électrique résiduelle positive, soient proches des atomes d'oxygène du réseau cristallin, lesquels possèdent des charges électriques négatives déterminées par l'interruption du réseau. Certains ions d'hydrogène, produits par la dissociation de l'eau ou d'acides inorganiques ou organiques *(acides humiques)* présents dans les eaux vadoses, pénètrent dans le réseau du silicate et vont se substituer aux gros cations métalliques (sodium, potassium, calcium). Les cations métalliques sortent du cristal et passent dans la phase liquide qui l'entoure; le processus continue grâce à la circulation des eaux vadoses.

La structure fondamentale des silicates, formée par l'association de tétraèdres SiO_4 réunis par leurs sommets (parfois, quelques ions silicium sont remplacés par des ions aluminium), est déformée par la substitution des ions hydrogène par des cations métalliques. Ensuite, l'édifice cristallin est détruit par la rupture des liaisons entre l'oxygène et le silicium, et surtout par celle des liaisons entre l'oxygène et l'aluminium. Des solutions vraies de silice et d'alumine (dans le premier cas sous forme d'ions SiO_4^{----} tétravalents, dans le second sous forme d'ions aluminium trivalents, libres ou hydratés) ainsi que de fragments du réseau cristallin submicroscopiques prennent ainsi naissance. En effet, on a observé au microscope électronique dans la fraction granulométrique la plus fine des sols des petites billes amorphes représentant vraisemblablement des résidus du réseau cristallin des silicates appauvris ou dépourvus des cations métalliques. Ces globules, qui constituent la phase dispersée d'une solution colloïdale, passent ensuite en solution vraie par suite de la libération de la silice et de l'alumine.

La solubilité de l'alumine dans des eaux à peu près neutres est inférieure à celle de la silice; pour cette raison l'alumine a tendance à se concentrer dans le résidu insoluble provenant de l'altération de la roche dans les niveaux supérieurs des profils d'altération. Les eaux très acides (comme celles de certaines tourbières) provoquent une dissolution préférentielle de l'alumine par rapport à la silice, tandis que les eaux fortement alcalines provoquent le passage en solution aussi bien de la silice que de l'alumine (celle-ci sous forme d'ion hydraté).

L'aptitude des éléments chimiques présents dans les réseaux cristallins à passer en solution pendant l'hydrolyse est variable.

Les *ions* des *métaux alcalins* et *alcalino-terreux* (potassium, sodium, calcium), caractérisés par de grandes dimensions, une charge électrique faible et une coordinence élevée, sont facilement expulsés des interstices qu'ils occupent entre l'échafaudage de tétraèdres SiO_4 et AlO_4.

Le *fer*, le *magnésium* et l'*aluminium*, caractérisés par un rayon ionique plus faible et par une coordinence moins élevée, sont expulsés par la suite.

Le *silicium* et l'*aluminium*, qui occupent le centre des tétraèdres SiO_4 ou AlO_4, peuvent migrer seulement après la destruction totale du réseau silicaté.

La vulnérabilité des principaux minéraux silicatés par rapport à l'hydrolyse peut être mesurée par l'estimation de leur disparition progressive dans les roches de niveaux de plus en plus élevés du manteau d'altération. L'*échelle d'altérabilité* ainsi établie est identique à la suite réactionnelle de Bowen pour les minéraux magmatiques. Les minéraux sont d'autant plus sensibles à l'hydrolyse que leur température de formation est élevée : l'olivine, les pyroxènes, les plagioclases calciques et calco-sodiques s'hydrolysent beaucoup plus rapidement que les minéraux formés à des températures plus basses, comme les micas et les feldspaths alcalins; le quartz, qui est le dernier minéral à cristalliser dans les magmas, est assez stable.

Tous les éléments chimiques des roches soumises à l'altération météorique passent en solution mais en proportions différentes.

Si l'on prend en considération uniquement les éléments principaux, on constate que les *alcalins* et les *alcalino-terreux* passent totalement en solution et sont en grande partie évacués du profil d'altération. Toutefois, un petit nombre de ces éléments (surtout le calcium et le potassium) reste, même si l'altération est très poussée. Ils se combinent avec d'autres éléments pour former des minéraux argileux de néoformation, ou bien ils sont adsorbés à la surface des minéraux argileux.

Le *fer* passe totalement en solution : le fer ferrique sous forme d'hydroxyde colloïdal, tandis que le fer ferreux soluble, sous forme ionique surtout dans les eaux enrichies en anhydride carbonique, est oxydé rapidement et transformé en oxyde de fer colloïdal. Au cours de la traversée des différents horizons pédologiques, le fer colloïdal peut, avec une intensité qui diffère en fonction des conditions climatiques, floculer et donc se fixer sous forme d'hydroxydes dans le sol (sols latéritiques, *terra rossa*, etc.). Mais, au fur et à mesure que l'altération se poursuit, les sols sont érodés et le fer est de nouveau transporté en solution ou en suspension vers les bassins marins.

L'*aluminium*, qui est un des éléments essentiels des réseaux silicatés, se déplace en solution vraie en très faibles teneurs; il se concentre généralement en tant que résultat de l'hydrolyse des silicates. Sous les climats intertropicaux, il se fixe dans les sols latéritiques plus ou moins riches en hydroxydes ferriques, sous forme d'hydroxydes (boehmite, gibbsite, etc.). Dans le cas des climats tempérés, l'entraînement de la silice et des cations métalliques du manteau d'altération est beaucoup moins important; la plus grande partie de l'alumine se combine alors avec ces éléments pour former des minéraux argileux.

La *silice* en solution, qui résulte de l'hydrolyse des silicates et, en proportion moindre, de la dissolution du quartz, ne précipite pas directement dans les sols. Elle se combine avec l'aluminium et les cations métalliques pour former les réseaux des minéraux argileux, ou bien est transportée en solution, notamment dans les régions intertropicales où les eaux sont chargées de substances organiques colloïdales favorisant la solubilité de la silice.

La mobilité des principaux éléments chimiques des roches pendant l'altération météorique peut être exprimée à partir des résultats des analyses chimiques des sols à différents niveaux par rapport à la roche mère saine. Dans le même but, on peut effectuer des comparaisons entre la composition chimique moyenne des roches de la lithosphère et la composition chimique moyenne des éléments dissous dans les eaux douces. On constate ainsi que le sodium, le calcium et le potassium, le chlore, les sulfates sont entièrement transportés en solution. Le magnésium, la silice, le phosphore, le manganèse et un certain nombre d'autres éléments sont plus difficilement entraînés. L'alumine montre des teneurs qui restent constantes, tandis que le fer se concentre dans les profils d'altération.

Au cours de l'altération se forment, en plus des substances en solution, des *minéraux nouveaux* qui peuvent rester dans les sols ou bien être transportés, après érosion, dans différents milieux marins ou continentaux où ils se sédimentent. Les minéraux néoformés les plus courants sont les *hydroxydes d'aluminium* et de *fer* et en partie les *minéraux argileux*.

Les deux premiers groupes de minéraux s'associent pour former les sols latéritiques actuels ou fossiles, dans lesquels on peut trouver aussi l'oxyde ferrique (hématite).

Les minéraux argileux ont une très grande importance dans tous les profils d'altération. Leur composition chimique et leur réseau cristallin sont en équilibre avec les conditions physico-chimiques existant à la surface du globe. Les minéraux argileux sont caractéristiques des roches sédimentaires, mais on les rencontre aussi dans des roches métamorphiques (métamorphisme très légers anchyzone) comme les schistes argileux, dans des roche-magmatiques altérées par des phénomènes hydrothers maux métasomatiques et dans les dépôts pyroclastique, diagénisés.

Les minéraux argileux se forment essentiellement pendant l'altération météorique des roches et la formation des sols, selon des processus physico-chimiques encore mal connus. Ils dérivent en partie de l'altération physique de roches primitivement argileuses ou argilo-schisteuses (héritage), en partie de la réorganisation du réseau cristallin de certains phyllosilicates contenus dans les roches ignées (micas, chlorites) ou métamorphiques. Dans ces roches, par ailleurs, les processus métamorphiques ou hydrothermaux aboutissent à la chloritisation des minéraux ferromagnésiens et à la séricitisation des feldspaths. Pendant la formation des sols, les muscovites et les chlorites sont assez stables ou subissent de légères modifications : par exemple, la muscovite s'appauvrit en potassium. L'illite présente un réseau cristallin assez

◀ Page ci-contre, en haut, oolithes formées par des auréoles concentriques d'hydroxydes de fer dans un minerai de fer jurassique de Lorraine (minette). Le centre des oolithes est parfois occupé par des grains de quartz ou des débris de coquilles (lame mince en lumière transmise non polarisée).

D. Fernandez

▶ *L'énorme énergie de certains agents de transport du matériel sédimentaire est mise en évidence par la présence de gros blocs dans les dépôts clastiques oligocènes (Acqui, Piedmont, Italie).*

▶ *Lors du transport du matériel sédimentaire, les éboulements d'amas rocheux, les glissements de matériaux incohérents, argileux, sont fréquents et communs dans les régions montagneuses; ici un aspect de ce transport important dans la vallée du Drac-Blanc (dans le fond, le mont Sirac, 3 440 m).*

semblable à celui de la muscovite (séricite), et on n'exclut pas la possibilité d'un lien de parenté entre ces deux minéraux.

Les minéraux argileux, par modification de leurs réseaux, donnent naissance à des mélanges que l'on appelle des *minéraux interstratifiés,* composés par une alternance plus ou moins ordonnée de feuillets élémentaires de composition différente (par exemple : chlorite-illite, illite-montmorillonite, etc.). Les minéraux interstratifiés sont un témoignage des changements progressifs que peuvent subir les minéraux argileux : c'est ainsi que, par exemple, se forment la vermiculite et les smectites.

Enfin, une partie des minéraux argileux (néogenèse) se forment par synthèse des éléments (alumine, silice, cations métalliques) dissous dans les eaux vadoses, de manière analogue aux autres minéraux diagénétiques. Si les eaux vadoses sont pauvres ou dépourvues d'ions métalliques en solution par suite d'un drainage très intense, le minéral argileux dominant qui se forme est la kaolinite. Une altération météorique particulièrement intense, avec évacuation même de la silice, aboutit à la formation d'hydroxydes d'aluminium (origine des bauxites). Si, au contraire, les conditions morphologiques et climatiques sont telles que le drainage des sols est incomplet, des smectites, caractérisées par la présence de cations métalliques (sodium, calcium) dans leur réseau, peuvent se former. L'illite et la chlorite peuvent aussi se former par la synthèse de substances en solution.

Le transport du matériel sédimentaire

Le matériel sédimentaire, formé par des substances en solutions ionique et colloïdale dans les eaux continentales et par des éléments détritiques de dimensions très variées, est transporté à partir des lieux d'érosion vers différents milieux où il se sédimente temporairement ou définitivement. Le transport se fait par le biais d'agents naturels : les eaux continentales (fleuves) et les eaux marines, le vent, les glaciers et un certain nombre d'organismes vivants. Pendant le transport s'effectuent de nombreuses transformations des caractères du matériel sédimentaire qui vont persister au cours des temps et permettre des reconstitutions paléogéographiques.

Le transport du matériel sédimentaire commence dans les lieux où il se forme par altération météorique des roches, essentiellement sous l'action de la force de gravité. Les éboulements d'amas rocheux, les glissements de matériaux incohérents, argileux, sont fréquents et communs dans les régions montagneuses. Le lent cheminement vers le bas des pentes du matériel incohérent formé pendant les éboulements, ainsi que des matériaux qui résultent de la désagrégation de la roche altérée sur place, constitue un phénomène moins spectaculaire que les éboulements mais aussi important du point de la quantité de matière transportée.

Dans les régions périglaciaires, l'action du gel et du dégel de l'eau qui imbibe les matériaux superficiels

Binois - Pitch

facilite le mouvement de ces derniers vers le bas des pentes lors du dégel (solifluxion), même si le matériel détritique est dépourvu d'une matrice interstitielle argileuse.

Dans les régions à climat semi-aride, caractérisées par de fortes précipitations pendant des périodes brèves de l'année, le **transport par gravité** prend une forme particulière dans le cas de sédiments argileux gorgés d'eau. Il s'agit de coulées de boue qui glissent rapidement vers le bas des pentes en transportant, du fait de leur densité élevée, d'énormes blocs rocheux. La fluidité des alluvions boueuses peut varier de manière considérable en fonction du rapport entre le volume de matériel argileux et le volume d'eau qui l'imbibe. Ainsi, les coulées denses parcourent des distances assez faibles, de l'ordre de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres; par contre, les coulées fluides, comme les alluvions des fleuves, peuvent parcourir des distances très importantes. Les coulées de boue sont caractérisées par l'absence totale de classement granulométrique.

Le transport par gravité peut aussi être appelé *transport de masse,* car il ne produit aucune sélection granulométrique, les fragments détritiques de toutes tailles étant transportés simultanément sur des distances semblables. Le transport prend fin lorsque la pente sur laquelle glissent les alluvions devient insuffisante. La distance du transport, qui ne dépasse pas quelques kilomètres, suffit généralement pour que les sédiments atteignent le fond de la vallée, où ils constituent des accumulations temporaires, ou *colluvions.* L'érosion des cours d'eau endigués emporte les fractions argileuses, les limons et laisse sur place uniquement les blocs; les galets et les graviers sont transportés sur un trajet limité, au régime torrentiel.

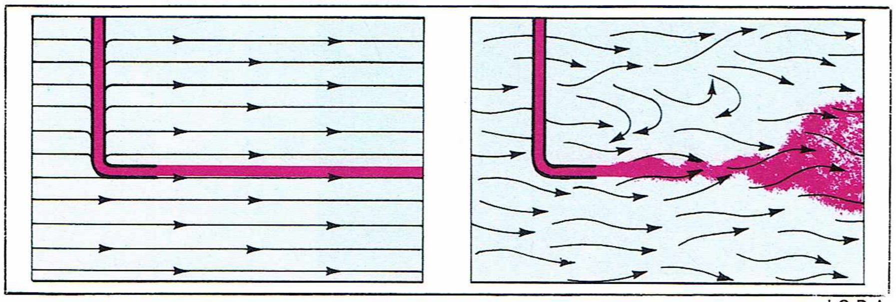

I.G.D.A.

▲ ***Comparaison entre un flux* laminaire *(à gauche) et un flux* turbulent *(à droite). Dans ce second cas le liquide coloré, injecté par un petit tube immergé, diffuse dans toute la masse fluide en mouvement par suite des mouvements tourbillonnaires des filets d'eau (d'après Krumbein et Sloss).***

Un mécanisme analogue au transport de masse se rencontre dans certains milieux marins. Il s'y manifeste par le glissement de couches ou d'amas de sédiments incohérents le long des talus continentaux. Les phénomènes s'accompagnent parfois de courants de turbidité capables de provoquer un certain classement granulométrique dans le sédiment pendant son transport.

Transport par les eaux continentales

Les eaux continentales exercent déjà leur action de transport du matériel sédimentaire au cours du transport de masse. Les eaux de ruissellement sauvages, c'est-à-dire non canalisées, emportent la fraction détritique fine et surtout les matériaux solubles résultant de l'altération météorique et les déversent dans les ruisseaux et les torrents de montagne. Dès le commencement du transport sédimentaire s'établit une distinction très nette entre le matériel transporté en solution et le matériel détritique. Les substances en solution et les matériaux en suspension, comme les particules argileuses, sont très rapidement évacués des régions originelles. Les vitesses du transport des éléments en solution et de celui des argiles sont comparables.

Le transport du matériel détritique grossier et moyen s'effectue plus lentement, par étapes successives, qui alternent avec des moments d'immobilité donc de dépôt des éléments détritiques dans les milieux sédimentaires continentaux (fleuves, lacs, etc.). Une partie importante du matériel sédimentaire grossier reste immobilisé sur les continents, où il se sédimente définitivement; seul un rehaussement régional peut provoquer la reprise de l'érosion par suite d'un relèvement du niveau de base des rivières.

Par contre, les éléments détritiques en suspension comme les particules argileuses et les éléments en solution sont directement amenés vers la mer (c'est également le cas de la fraction sableuse la plus fine). Les cours d'eau transportent les divers types de matériaux détritiques suivant des processus différents.

Les substances en solution (c'est-à-dire les chlorures, les sulfates, les bicarbonates, etc., de sodium, de potassium, de calcium, de magnésium, de fer, etc.) sont généralement présentes en teneurs suffisamment faibles pour qu'il n'y ait pas de précipitation des sels respectifs moins solubles. Une exception doit toutefois être signalée : le *carbonate de calcium,* dans certains fleuves, peut atteindre des concentrations proches ou dépassant le taux de saturation. Il précipite alors sous forme de très fins cristaux de calcite ou bien sous forme de précipités colloïdaux qui sont transportés en suspension. La teneur en calcium des eaux continentales et marines est fortement augmentée par la présence d'anhydride carbonique provenant de la décomposition de substances organiques; pour cette raison, les fleuves qui coulent dans les régions tropicales où la couverture végétale est très importante montrent des teneurs notables en sels dissous.

La silice est transportée par les cours d'eau, soit sous forme de solutions ioniques (anions tétravalents SiO_4) en teneurs faibles ne dépassant pas le taux de saturation, soit, dans certaines conditions, sous forme de précipités colloïdaux.

Différentes substances en solution colloïdale sont signalées dans les eaux continentales. L'*hydroxyde de fer,* formé essentiellement par oxydation de fer ferreux en solution dans l'eau, est certainement la plus importante d'entre elles. Il en va de même pour l'*hydroxyde de manganèse* et le *phosphate de calcium;* ce dernier, toutefois, peut aussi se présenter sous forme de solution ionique. Les substances en solution colloïdale sont transportées à la même vitesse que les substances ioniques si elles restent à l'état de sol; la floculation, c'est-à-dire le passage à l'état de gel, se traduit par leur sédimentation. Si la quantité de gel floculé est peu importante et si l'agent de transport a une vitesse suffisante, le transport s'effectue sous forme de suspension. La persistance des solutions colloïdales est favorisée par la présence de colloïdes protecteurs qui empêchent la floculation.

Les composés organiques qui dérivent de la décomposition des substances végétales jouent un rôle de colloïdes protecteurs vis-à-vis des hydroxydes de fer, de manganèse et de la silice colloïdale. Lorsque ces colloïdes disparaissent, par exemple s'ils sont absorbés comme nourriture par des organismes vivants, on assiste à la floculation et la sédimentation de nombreuses substances colloïdales. Une partie des substances organiques contenues en solution vraie dans les eaux fluviales peut former des ions complexes avec les éléments métalliques peu solubles (fer, manganèse, etc.). L'adsorption de ces substances à la surface de minuscules particules d'hydroxydes ou de minéraux argileux constitue aussi un mécanisme important de transport.

Le matériel sédimentaire détritique est transporté vers le lieu final de sédimentation, essentiellement par les eaux douces et marines. La *capacité de transport* des courants est mesurée par la charge totale des matériaux clastiques. Elle dépend de plusieurs facteurs, parmi lesquels les plus importants sont la vitesse du courant et les dimensions des éléments détritiques. La *compétence* des cours d'eau est, par contre, définie par le diamètre maximal des fragments transportés; elle dépend aussi de nombreux facteurs, parmi lesquels la turbulence est certainement le plus important.

On distingue deux types fondamentaux d'écoulement des eaux : l'écoulement laminaire et l'écoulement turbulent. Dans l'*écoulement de type laminaire,* le fleuve a une direction constante et une vitesse constante (quelques mm/s) ou progressivement variable au voisinage des obstacles ou du lit du fleuve. L'*écoulement de type turbulent* se distingue par des courants de vitesses très variables et des directions qui changent d'un endroit à l'autre de la masse fluide en mouvement. Ce phénomène se traduit par l'apparition de tourbillons résultant du frottement des filets d'eau les uns contre les autres et contre le fond du lit. On peut donner, dans ce cas, uniquement une vitesse et une direction moyenne d'un volume d'eau assez important. La plupart des courants aériens et aqueux se déplacent suivant les lois du régime turbulent, les valeurs de turbulence étant estimées en fonction de la dimension des tourbillons. L'écoulement laminaire peut se produire

uniquement dans les courants de faible vitesse ; c'est, par ailleurs, un régime hydrodynamique instable qui tend à se transformer en écoulement turbulent par suite de faibles augmentations de vitesse ou du frottement des filets d'eau sur le fond.

La capacité de transport des cours d'eau est étroitement liée à l'écoulement turbulent car les éléments détritiques les plus fins sont maintenus en suspension par les composantes verticales de la vitesse des tourbillons. Celles-ci, dirigées du bas vers le haut, s'opposent à la sédimentation des particules. Même dans les courants caractérisés par un écoulement turbulent, il existe au contact du fond une mince couche de liquide soumise à l'écoulement laminaire (son épaisseur ne dépasse pas le dixième de millimètre). La connaissance de cette zone est importante pour pouvoir déterminer le mode de transport des éléments détritiques fins. Les particules argileuses et les limons sont transportés en suspension par les courants d'eau fluviatiles et marins, tandis que les sables ont une vitesse de chute trop élevée pour pouvoir rester en suspension lorsque la vitesse du cours d'eau est relativement faible. Le transport du sable se fait alors par entraînement ou traction sur le fond.

La vitesse V de sédimentation des particules dans un milieu fluide dépend de la loi de Stokes :

$$V = \frac{2}{9} g \frac{ds - dl}{n} r^2.$$

Elle est proportionnelle au carré de leur rayon, pour les particules de dimensions inférieures au 1/10 de millimètre et à la racine carrée du rayon pour des particules de dimensions plus importantes ; g désigne l'accélération de la pesanteur, ds la densité du solide, dl celle du liquide et n sa viscosité. V est exprimée en mètres par seconde.

L'analyse de la granulométrie des éléments détritiques en suspension à différentes profondeurs montre qu'il s'agit d'une suspension granulométriquement classée, dans laquelle les particules de plus petit diamètre sont également réparties à tous les niveaux, tandis que les particules plus grossières se concentrent vers le bas. Les éléments détritiques plus grossiers transportés en suspension atteignent habituellement les dimensions des sables. Les grains étant concentrés sur le fond, ils le percutent et rebondissent ; ce mode de transport, dit par *saltation,* est relativement peu important dans les milieux aqueux. Le mode de déplacement des fragments sur le fond du cours d'eau varie en fonction de la forme des galets. Les galets aplatis se déplacent par *traction,* les galets arrondis par *roulement ;* ces éléments s'immobilisent dès que la vitesse et la turbulence du cours d'eau diminuent. Dans l'ensemble, le transport par entraînement est beaucoup plus lent que le transport par suspension.

Les matériaux transportés en suspension se déposent seulement si la vitesse du cours d'eau devient presque nulle. Ils forment alors un dépôt homogène, mal classé granulométriquement. Les matériaux détritiques sableux sont très sensibles aux variations de vitesse du courant ; les structures et les textures de sédiments gréseux montrent clairement ces variations.

L'étude du transport des matériaux solides s'effectue expérimentalement en laboratoire ; on utilise des canaux artificiels avec des parois transparentes et on fait varier les différents paramètres qui conditionnent le transport (vitesse du courant, diamètre et densité des grains de sable, etc.). Ces études ont des applications directes dans la lutte contre l'ensablement des canaux navigables et des ports, contre l'érosion des côtes, etc.

Ainsi, il a été découvert que l'entraînement des éléments détritiques débute lorsque la vitesse du cours d'eau dépasse une *première valeur critique,* qui dépend essentiellement de la dimension des grains. Par exemple, pour des grains de 1 mm de diamètre, cette vitesse est voisine de 20 cm/s. L'entraînement des grains provoque sur le fond sableux la formation d'ondulations parallèles les unes aux autres, les *ripple marks,* caractérisées par un profil asymétrique ; celles-ci sont perpendiculaires à la direction du courant et leur flanc, caractérisé par une pente douce, est orienté dans le sens du courant. Les grains de sable roulent le long du flanc à pente faible, puis dépassent la côte et tombent le long du flanc le plus abrupt. De cette façon, le transport se traduit par la migration des ripple marks dans la direction du courant. Des structures comme les ripple marks et les stratifications inclinées ou entrecroisées restent décelables dans des formations géologiques gréseuses très anciennes.

Si la vitesse du courant dépasse une *deuxième valeur critique,* qui varie en fonction des caractères du sédiment et du courant (dans le cas des sables cette valeur est d'environ 1 m/s), les ripple marks sont érodées et le sable est entraîné sur le fond plat. Il se forme alors des petites rides parallèles à la direction du courant, constituées par des alignements de grains plus grossiers. Ces structures, caractéristiques des fonds, sont souvent conservées dans les formations gréseuses anciennes.

S. Prato

▲ ***Ondulations* (ripple marks) *provoquées par la houle sur un fond sableux plat. Au centre, on remarquera la trace laissée par le déplacement d'un organisme vivant.***

Dans des conditions particulières, correspondant à des vitesses élevées du courant, donc à une charge importante de sédiments, il se développe une *troisième phase de transport,* au cours de laquelle se forment sur le fond des rides parallèles beaucoup plus grandes et présentant un profil différent de celui des ripple marks. La surface supérieure du courant forme, au-dessus des rides, des ondulations caractérisées par un important mouvement tourbillonnaire sur le flanc dirigé vers l'aval. Ainsi, la ride se déplace dans le sens contraire du courant (d'où le nom d'*antidune*) car son flanc aval par rapport à la direction du courant est érodé par les tourbillons. Parallèlement, le matériel détritique se dépose sur les flancs de la ride situés en amont. Le transport des matériaux détritiques qui forment la ride est rapide et violent ; c'est pourquoi les structures sont rarement conservées dans les sédiments.

Les cours d'eau continentaux apportent dans les milieux marins, lieux permanents ou prolongés de dépôt des sédiments, la majeure partie du matériel sédimentaire. Certains chercheurs ont calculé, en se basant sur un grand nombre de fleuves, l'importance relative des matériaux transportés en solution, en suspension et par entraînement. Ces calculs aboutissent à la conclusion que le matériel clastique transporté est quatre fois supérieur en quantité au matériel transporté en solution ; les limons et les argiles transportés en suspension sont volumétriquement supérieurs aux autres éléments détritiques. Ces rapports quantitatifs varient dans les régions de montagne, où le matériel clastique peut être sept à huit fois plus abondant que les substances en solution, et s'inversent dans les régions de plaine, où les substances en solution représentent en volume le double de la quantité d'éléments détritiques. Dans ces estimations, on ne tient pas compte du matériel sableux et graveleux qui se dépose dans les milieux continentaux pendant des périodes de longue durée.

J. Muench

▲ *Un aspect de l'action modélatrice du vent : les caractéristiques « pedestal rocks » de la vallée de Goblin dans l'Utah.*

Transport par le vent

Le transport des sédiments par le vent a une importance quantitative moindre que le transport en milieu aqueux, mais son étude, aussi intéressante pour établir des comparaisons entre les courants aqueux et les courants aériens, est plus facile. Le matériel transporté est de nature détritique : il s'agit de sables et de poussières (limons aériens), ces dernières caractérisées par des particules dont les dimensions ne dépassent pas 1/16 de mm. Dans les régions côtières, le vent peut transporter vers l'arrière-pays des éléments détritiques calcaires constitués par des tests d'organismes et des oolithes. Le rapport entre la densité des grains détritiques et le milieu fluide est beaucoup plus élevé dans l'air que dans l'eau; pour cette raison, les courants d'air ont une compétence inférieure à celle des courants d'eau et cela malgré leur vitesse plus élevée. Les courants aériens sont susceptibles de déplacer les sables, mais arrivent très rarement à faire rouler des petits galets. Les propriétés dynamiques des courants aériens sont analogues à celles des courants aqueux; leur turbulence est particulièrement élevée.

Les éléments détritiques fins, autrement dit les poussières, sont transportés en *suspension ;* ils peuvent atteindre des hauteurs au sol très importantes et parcourir des distances énormes. On rencontre dans les sédiments océaniques au large des îles du cap Vert (océan Atlantique) des poussières transportées par les vents provenant du Sahara; ces poussières peuvent traverser la Méditerranée et atteindre l'Italie du Sud. Par ailleurs, le vent transporte en suspension de minuscules particules de sels marins (formées par évaporation des embruns) jusqu'à l'intérieur des continents et à des niveaux très élevés de l'atmosphère.

Les grains de sable sont essentiellement transportés par *saltation,* suivant un processus analogue à celui décrit

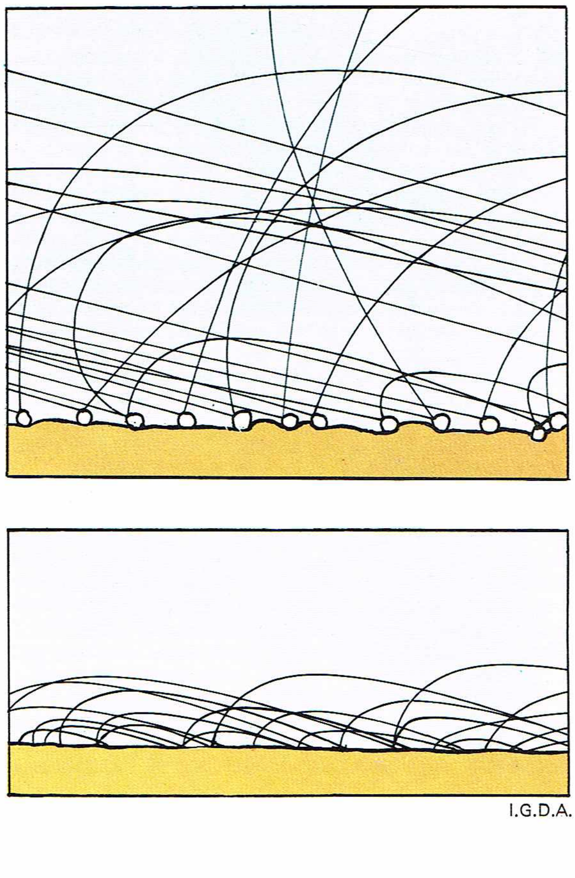

I.G.D.A.

▶ *Représentation schématique de la saltation des grains de sable transportés par le vent : en haut, sur une surface couverte de galets; en bas, sur une surface sableuse. Le vent souffle de la gauche vers la droite pour les deux dessins qui représentent une surface de sol d'environ 20 cm (d'après Bagnold).*

pour le milieu aqueux. Toutefois, du fait de la viscosité inférieure de l'air par rapport à celle de l'eau, les grains de sable qui roulent et rebondissent contre d'autres grains atteignent dans leurs trajectoires des hauteurs assez importantes. Dès que le mouvement par saltation est amorcé (au-dessus d'une vitesse minimale du vent), il se conserve car les grains de sable, en retombant sur le sol, rebondissent ou transmettent leur énergie à d'autres grains qui se mettent en mouvement. Des études expérimentales ont montré que les grains de sable parcourent une trajectoire courbe qui commence au point d'impact des grains avec la surface du sol et s'élève sur quelques centimètres à la verticale, et parfois même dans le sens contraire au courant aérien lorsque l'impact s'effectue sur une surface non horizontale. Lorsque le grain s'élève, il est pris en charge par le courant d'air et monte à des hauteurs de plus en plus importantes, avant de suivre une trajectoire de chute caractérisée par une pente assez faible. Les impacts des grains contre la surface sableuse en provoquent le mouvement lent par frottement. Ce sont essentiellement les grains de dimensions importantes qui se déplacent par petits bonds. La quantité de sable déplacée de cette manière est peu importante.

Dans les régions désertiques recouvertes par des sables bien classés, dépourvus de poussières, les vents plus forts peuvent provoquer des tempêtes de sable. Ces tempêtes affectent une couche d'air qui ne dépasse pas 1 m au-dessus du niveau du sol car le transport des grains s'effectue essentiellement par saltation. Par contre, lorsqu'il y a de la poussière en suspension, l'atmosphère est obscurcie jusqu'à une centaine de mètres au-dessus du sol et l'on ne peut plus observer la saltation des grains. Le transport de sable à une hauteur déterminée au-dessus du sol provoque une érosion très caractéristique sur les blocs de roches isolées, qui acquièrent la forme d'énormes champignons pédonculés. Les grains de sable qui se déplacent par saltation et par frottement sont très sensibles aux petites variations de vitesse du vent, qui déterminent les dimensions maximales des grains susceptibles d'être déplacés. Pour cette raison, les dépôts éoliens montrent des structures très semblables à celles des sédiments sableux transportés par les cours d'eau avec des ripple marks, des structures parallèles ou obliques, etc. Toutefois, on constate dans les textures un meilleur classement granulométrique des grains ronds et mats par suite des nombreuses traces de chocs qui guillochent leur surface. La poussière transportée en suspension se sédimente lorsque les courants d'air s'affaiblissent ou bien cessent totalement dans des localités très éloignées de leur point de départ. C'est de cette manière que se forment les dépôts de *lœss* dans les régions continentales.

Les courants d'air et d'eau transportent le matériel détritique selon des modalités très semblables. Il en résulte des dépôts avec des caractères sédimentologiques très voisins.

Variations des propriétés du matériel sédimentaire

Au cours du transport, interviennent *d'importantes variations des propriétés du matériel sédimentaire ;* il en résulte que les dépôts clastiques qui se forment à différentes distances du lieu d'origine des éléments détritiques montrent des textures et des compositions différentes. Ce fait a une importance fondamentale lorsque l'on établit des reconstitutions paléogéographiques. En effet, il permet de déterminer dans les sédiments anciens l'éloignement de la zone d'alimentation, l'agent et la direction de transport du matériel sédimentaire.

Les études sur les matériaux fluviatiles et marins actuels ont démontré qu'au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la zone d'alimentation, les dimensions des fragments détritiques suivent une loi exponentielle. La diminution des dimensions des grains s'explique par la réduction progressive de la vitesse du vecteur de transport, donc de la diminution de la compétence des courants (dans la direction du transport). Il en résulte que les éléments détritiques plus grossiers, transportés par frottement et en suspension, se déposent progressivement. La variation des dimensions des éléments détritiques pendant le transport résulte aussi de l'usure des grains par les chocs réciproques et par les frottements. Le frottement sur des roches dures est très efficace dans le cas des galets et des sables grossiers ; son importance diminue dans le cas des sédiments plus fins. En se basant sur la diminution du diamètre des grains dans la direction de transport (ce phénomène est aussi valable dans le cas des sédiments éoliens, et dans le cas des sédiments marins), on peut reconstituer la direction originelle et la longueur approximative du trajet effectué par les sédiments aériens.

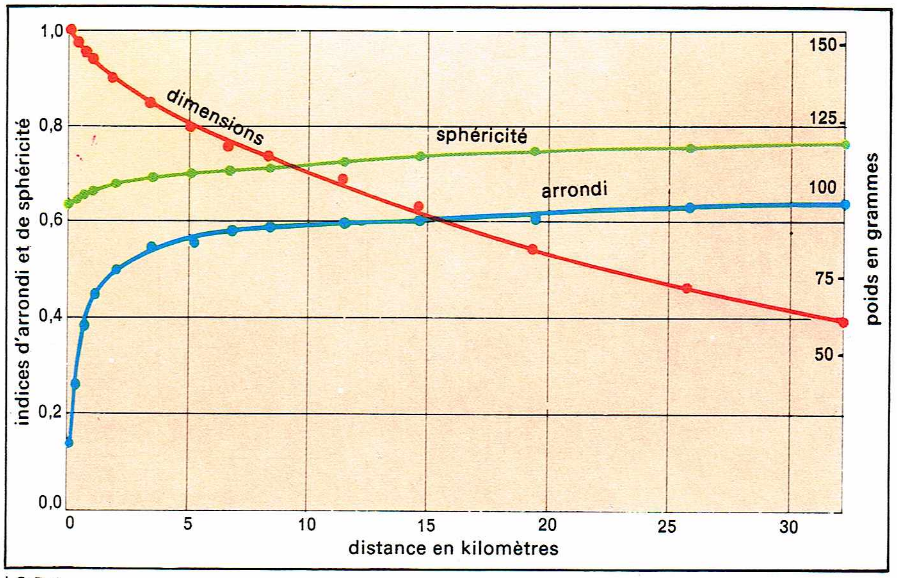

I.G.D.A.

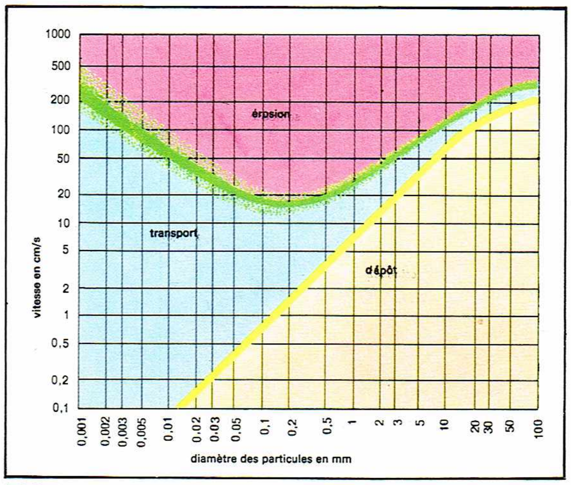

I.G.D.A.

▲◄ Ci-dessus, variations des dimensions des éléments détritiques transportés par un cours d'eau (dimensions estimées en fonction du poids et de la forme des fragments) en fonction de la distance du transport. Courbes expérimentales obtenues au laboratoire en simulant les conditions de transport dans les milieux naturels. A l'aide de ces courbes, le savant suédois Ph. Hjulström a exprimé, ci-contre, la relation qui existe entre la vitesse d'un cours d'eau et le comportement des particules solides de différentes dimensions transportées.

Un certain nombre de facteurs contrarient la diminution progressive du diamètre des grains ; c'est le cas, par exemple, des irrégularités du fond sur lequel ils se déplacent. Le facteur le plus important est la différence entre l'énergie servant au transport d'un sédiment formé par des grains de dimensions données d'une part, et l'énergie nécessaire pour mettre en mouvement le même sédiment d'autre part. La deuxième valeur est généralement supérieure à la première. Par exemple, dans le cas des sédiments vaseux et des argiles, les deux valeurs (vitesse de transport et vitesse de mise en mouvement) sont très différentes. Cette observation a été effectuée pour la première fois par le Suédois Hjulström. Elle résulte non seulement de la cohésion très particulière des sédiments argileux, mais en outre de l'écoulement laminaire d'une couche liquide très mince au contact du fond. Dans l'écoulement laminaire, les filets d'eau s'écoulent parallèlement les uns aux autres, de manière régulière ; cet écoulement est dépourvu des phénomènes de turbulence nécessaires pour éroder et mettre en mouvement les particules qui se trouvent sur le fond de la rivière. Si le fond est parfaitement lisse et recouvert par des particules fines qui ne dépassent pas la zone d'écoulement laminaire, l'érosion est pratiquement impossible ou au moins très difficile. On explique de cette façon la présence de sédiments argileux même en amont des plaines alluviales : en effet, ces sédiments, qui se déposent au moment des hautes eaux, ne sont plus érodés par les courants des plaines successives. Des considérations analogues sont valables pour les côtes vaseuses et pour certaines surfaces au large des estuaires en milieu marin néritique.

M. Pedone

▲ ***Les courants côtiers transportent le matériel sédimentaire parallèlement à la ligne de la côte et construisent ainsi des plages sableuses.***

La forme des fragments détritiques subit aussi une variation dans la direction du transport. L'usure superficielle des éléments détritiques augmente au cours du transport par suite des phénomènes d'abrasion qui estompent en premier lieu les arêtes et les angles. Ce phénomène est particulièrement net dans le cas des galets et des sables grossiers. Il en va de même pour la *sphéricité,* c'est-à-dire l'aptitude des éléments détritiques à acquérir par abrasion une forme sphérique au cours du transport. Toutefois, la sphéricité augmente de manière assez lente au cours du transport. Souvent, l'augmentation de sphéricité des éléments détritiques transportés par roulement et saltation sur le fond d'un fleuve s'accentue en raison du trajet assez long parcouru par les grains arrondis. Par contre, dans le cas de particules caractérisées par des dimensions moins importantes, donc transportées en suspension, on observe une diminution de la sphéricité dans la direction du transport. Cela tient au fait que, à poids égal, les particules de forme aplatie ont une vitesse de sédimentation inférieure à celles des particules de forme sphérique ; elles restent donc plus longuement en suspension. Ainsi, les lamelles de mica peuvent parcourir des distances plus grandes que les grains de quartz de mêmes dimensions.

Certains changements de la composition du matériel sédimentaire clastique ont lieu pendant le transport par les cours d'eau. Les changements les plus évidents dépendent du diamètre des matériaux sédimentés : on passe ainsi des galets formés par des roches polyminérales à des grains de quartz, de feldspaths, à des paillettes de mica constituant les sables et les limons grossiers, et à des vases formées essentiellement par les minéraux argileux. L'hydrolyse prolongée de certains silicates instables, comme les minéraux ferromagnésiens et les feldspaths, pendant le transport en milieu aqueux, aboutit également à des changements de composition du sédiment. L'abrasion différentielle provoque, par contre, dans la fraction sableuse, une augmentation de la teneur en quartz par rapport à la teneur en feldspaths. Cela tient à la plus grande clivabilité et à la moindre dureté des feldspaths, dont les dimensions finissent par atteindre celles des limons. La surface ainsi exposée à l'hydrolyse augmente de manière très sensible.

Transport marin

Lorsque le matériel sédimentaire charrié par les fleuves arrive à la mer, le relais dans le transport vers le lieu de sédimentation définitif ou temporaire est assuré par différents types de *courants marins :* les *courants côtiers,* les *courants de marée,* les *courants de turbidité* et probablement aussi les *courants de fond,* qui, bien qu'encore mal connus, doivent être des agents efficaces du transport des sédiments.

Les *grands courants océaniques* permanents, comme le Gulf Stream, n'ont pas une grande importance dans le transport des sédiments clastiques ; tout au plus transportent-ils sur de grandes distances des particules très fines et des micro-organismes (Foraminifères, Coccolithophoridés, etc.) qu'ils déposent sur des fonds très éloignés de leur lieu d'origine. Le Gulf Stream, par exemple, amène jusqu'aux côtes anglaises des Foraminifères de type tropical ; inversement, le courant froid des îles Falkland emporte des Foraminifères caractéristiques des zones froides antarctiques en pleine zone tropicale, à la latitude de Rio de Janeiro.

Les *courants côtiers* ou *littoraux* résultent de l'action des houles obliques par rapport aux rivages. Leur développement est limité à une houle côtière, et ils ont une importance très grande dans les phénomènes de transport des matériaux et des limons apportés par les fleuves. Les courants littoraux répartissent les sables de part et d'autre de l'embouchure des fleuves, ils construisent des édifices comme les tombolos, les lidos et les côtes sableuses. Les sables déplacés par traction forment généralement des cordons sableux peu profonds ou bien des flèches littorales, subparallèles à la direction de la côte. L'étude des courants côtiers (courants d'entraînement, undertows ou courants de retour, rip currents, etc.) a été entreprise pour des raisons économiques : ces courants modèlent en effet les plages, les érodent et provoquent l'ensablement des ports. Les caractères sédimentologiques des sédiments sableux marins varient de manière progressive comme les sédiments transportés par les fleuves. Cette variation débute à l'embouchure des fleuves et s'étend le long d'une direction parallèle à la côte. Les estuaires et les deltas représentent ainsi les points d'entrée dans le milieu marin de la plus grande partie des sédiments clastiques.

Les *courants de marée* ont une direction perpendiculaire à la côte, contrairement aux courants côtiers qui se déplacent parallèlement à celle-ci. Leur sens change régulièrement avec le flux et le reflux de la marée. Sur les fonds sableux, les courants de marée ont une action dynamique assez réduite. Ils peuvent déplacer les sables par roulement sur le fond, aboutissant ainsi à la formation de longs bancs de sable parallèles au courant. Pendant une phase de marée, l'extrémité de ces bancs située face au courant s'érode, tandis que l'autre s'allonge, et le phénomène s'inverse à la marée suivante. Les courants

plus faibles se bornent à transporter les sables sur des courtes distances, avec formation de ripple marks ou bien de dunes hydrauliques dont les crêtes sont orientées perpendiculairement au courant. Les courants de marée sont aussi capables d'éroder les fonds et de transporter des quantités importantes de sédiments car le volume d'eau qu'ils déplacent dans un temps assez court leur confère des vitesses élevées. Pour cette raison, ils peuvent transporter des sables et des petits galets et laisser *in situ* les éléments détritiques plus grossiers (gros galets et blocs). Les fonds sont alors constitués, notamment dans les passes et les chenaux, de roches dénudées parsemées de galets, appelées *hard grounds*.

Les *courants de turbidité* constituent un agent de transport considérable qui amène les matériaux déposés à proximité de la côte jusqu'aux profondeurs abyssales. Les premières hypothèses sur l'existence des turbidités dans les milieux marins ont été émises par le géologue américain R.A. Daly. Leurs caractères ont été étudiés en se basant sur les structures et les textures de roches sédimentaires (probablement transportées par des courants de turbidité) analogues aux sédiments actuels. Selon la plupart des théories acceptées de nos jours, les courants de turbidité prendraient naissance sur le plateau continental ou vers sa bordure la plus externe, par suite de la fluidalisation de sédiments sableux et argileux à peine déposés et encore gorgés d'eau. Les causes qui provoquent une telle fluidalisation, semblable à celle qui donne naissance aux glissements de terrain par ramollissement de matériaux argileux dans les milieux continentaux, peuvent être très diverses : tremblements de terre et raz de marée (tsunamis) en pays sismiques, excès de sédimentation et par conséquent instabilité des sédiments accumulés sur la plate-forme continentale, très fortes tempêtes et crues de certains fleuves, etc. Les variations du niveau de la mer, liées aux glaciations du Pléistocène et à la transgression marine holocène ont vraisemblablement provoqué l'érosion des dépôts clastiques incohérents du plateau continental et la formation de courants de turbidité.

La masse d'eau chargée en sédiments sableux et argileux acquiert une densité supérieure à celle de l'eau (d'où le nom aussi de *courants de densité*) ; elle va donc s'écouler par gravité sur la pente du talus continental à la manière d'une avalanche, et sa vitesse augmente au fur et à mesure que la pente devient plus importante. Quand il y a rupture de pente ou lorsque le fond océanique est atteint, l'écoulement s'arrête et les sédiments se déposent. L'écoulement des courants de densité est turbulent ; les tourbillons maintiennent facilement le sable en suspension, ainsi que des galets dont le diamètre dépasse la dizaine de centimètres. Cela est rendu possible par la faible différence de densité qui existe entre les fragments détritiques et la suspension. Ainsi, des matériaux grossiers sont entraînés dans un milieu marin bathyal et abyssal. Le matériel détritique plus grossier forme une suspension granulométriquement classée, avec concentration des éléments plus grossiers dans la partie inférieure.

La capacité d'érosion des courants de turbidité est assez mal connue. Pour certains chercheurs, le pouvoir érosif des turbidites est quasiment nul car les éléments détritiques se trouvant en suspension ne peuvent éroder le fond vaseux. Selon eux, cette hypothèse est démontrée par la persistance de pistes très fragiles d'animaux benthoniques dans des formations anciennes analogues aux turbidites. D'autres auteurs pensent que les courants de turbidité concentrés dans les lits qui suivent les lignes de plus grande pente des talus continentaux auraient construit, par leur action érosive, les grandes vallées sous-marines qui descendent jusqu'aux fonds océaniques.

▼ Profil représentant le parcours du courant de turbidité des bancs de Terre-Neuve (en ocre) allant de la zone de décrochement (en rouge) jusqu'aux profondeurs abyssales ; certains câbles, représentés par des points rouges, se sont brisés simultanément dans la zone de décrochement (AB), les autres (le long du parcours BC) ont été arrachés à des intervalles de temps connus (l'heure de coupure des communications est indiquée sur le schéma pour chaque câble). Cela a permis de déduire la vitesse du courant de turbidité, vitesse exprimée en nœuds/heure.

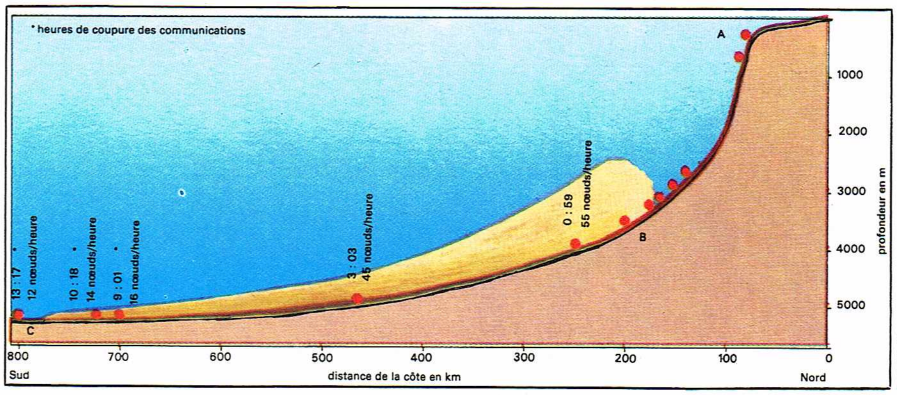

I.G.D.A.

L'existence des courants de turbidité a été prouvée par les nombreuses observations recueillies lors des récentes campagnes des bateaux océanographiques. Un bon nombre des aspects importants de la morphologie des fonds océaniques, comme les accumulations en forme de deltas ou de bouches de certains canyons sous-marins, ou encore comme les plaines abyssales parfaitement plates et sillonnées par des canaux semblables aux cours d'eau continentaux, peuvent être attribués à l'action des courants de densité. Des échantillons du fond de l'océan Atlantique recueillis au large des côtes de l'Amérique septentrionale ont montré que les sédiments récents sont formés par des alternances de passées argileuses et sableuses, souvent granulo-classées. Les sables marins profonds ont généralement une composition analogue à ceux recouvrant le plateau continental qui surmonte de quelques milliers de mètres la plaine abyssale. Dans le cas de côtes sableuses calcaires, on remarque que les fonds océaniques sont aussi recouverts par des sables calcaires contenant des restes d'organismes qui vivent uniquement en milieu côtier.

En 1929, un tremblement de terre a provoqué un éboulement sous-marin au large du talus continental qui borde l'Amérique du Nord. L'épicentre du séisme, situé au large de la bordure externe du plateau continental au voisinage de Terre-Neuve, a donné naissance à un courant de turbidité qui a dévalé jusqu'au fond, où il a déposé une

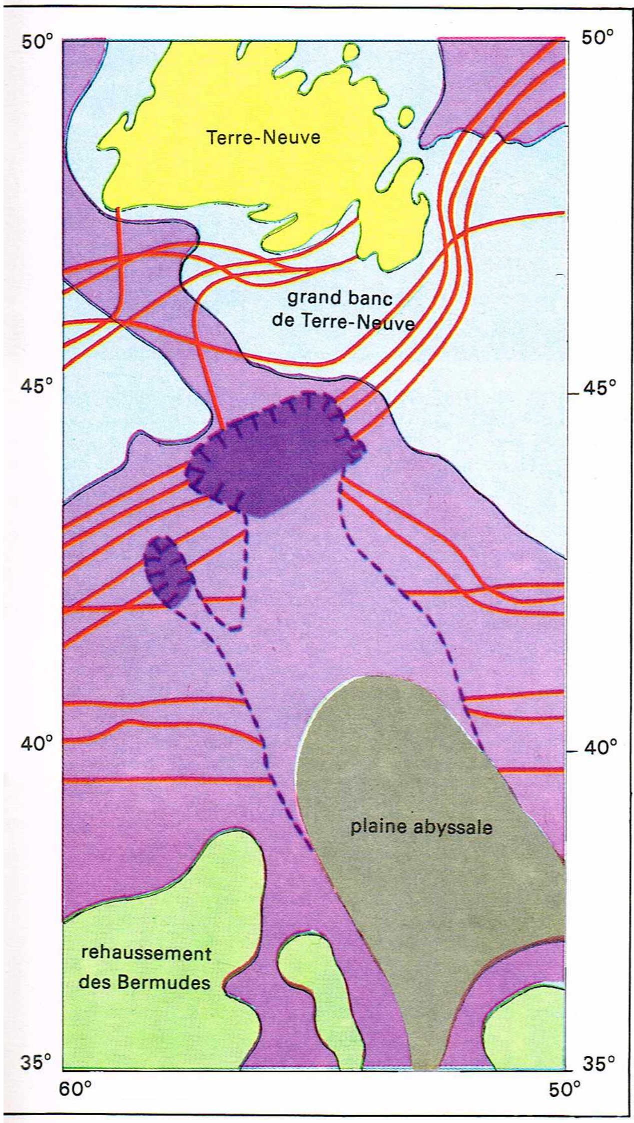

I.G.D.A.

◀ Parcours (zone en violet) effectué par le courant de turbidité provoqué en 1929 par un tremblement de terre au voisinage de l'île de Terre-Neuve. En tiretés violets est représentée la zone d'arrachement. Les sédiments incohérents ont dévalé vers la plaine abyssale ; à leur passage, ils ont sectionné les câbles téléphoniques sous-marins (lignes rouges). Le dépôt de sable et de vase a eu lieu dans la zone grisée (d'après Heezen, Ericson et Ewing).

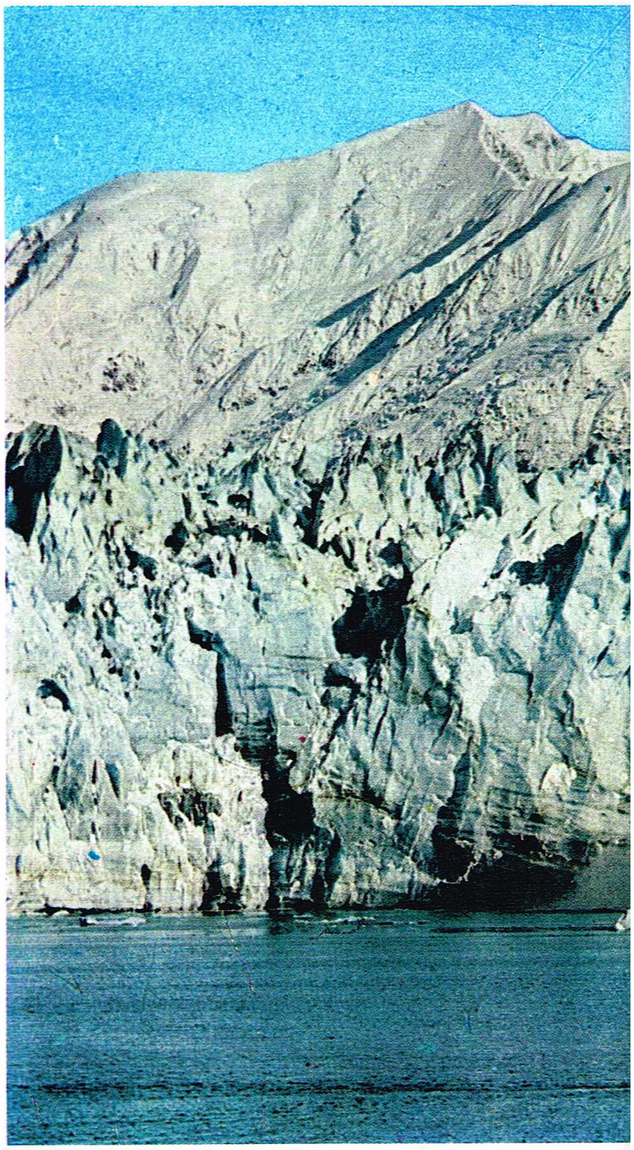

D. Fernandez

▲ ***Couches massives de grès déposées par des courants de turbidité au Crétacé supérieur.***

couche de sable fin et de limon sur une épaisseur d'environ 1 m et sur une surface estimée à environ 250 000 km². Le courant de turbidité a provoqué, en un certain laps de temps, la rupture de plusieurs câbles téléphoniques intercontinentaux placés au fond de l'Océan. Ces câbles étaient posés à des distances et des profondeurs connues du continent; en connaissant avec précision le moment de leurs ruptures, on a pu calculer que le courant de turbidité a atteint des vitesses voisines de 100 km/h le long du talus continental.

Les courants de turbidité représentent un agent très efficace du transport des éléments détritiques grossiers vers les grandes profondeurs. L'étude des puissantes séries de sédiments qui constituent le remplissage des bassins sédimentaires caractérisés par une forte subsidence (aussi appelés géosynclinaux) a laissé penser que les sédiments grossiers et moyens de ces séries ont été transportés par des courants de turbidité. Pour cette raison, les roches grossières qui remplissent les fosses géosynclinales sont aussi appelées *turbidites*. Les turbidites sont constituées par des alternances de grès, d'argiles et parfois de conglomérats; l'ensemble de ces faciès est aussi désigné par le terme de *flysch*.

Les courants de turbidité peuvent également déposer des sédiments carbonatés qui sont, en quelque sorte, des calcaires d'origine détritique formés par des matériaux clastiques carbonatés. Les turbidites présentent des structures et des figures de sédimentation, comme la structure granuloclassée, ou *graded bedding,* des figures de glissement, ou *slumping,* des figures de charge et des chenaux de ruissellement. Certains auteurs font toutefois remarquer que toutes les formations sédimentaires qui possèdent les caractères d'un flysch n'ont pas nécessairement été déposées par des courants de turbidité.

L'étude des turbidites anciennes et les résultats des campagnes océanographiques récentes montrent que les turbidites ont un pouvoir de classement nettement inférieur à celui des cours d'eau. Ce fait est particulièrement net dans les grauwackes, formations nettement hétérométriques par rapport aux arkoses et aux grès sédimentés par des cours d'eau normaux. De plus, la fraction limoneuse et argileuse est volumétriquement très importante. Un certain classement s'effectue quand même au cours du transport car le matériel le plus grossier se dépose plus près de la zone d'origine des turbidites que la fraction argileuse, qui se déplace par inertie lorsque le courant arrive sur un fond plat. La compétence des courants de turbidité peut atteindre des valeurs très élevées, surtout en raison de la teneur élevée en argile et de la densité très élevée de la suspension. On rencontre dans certains conglomérats associés aux turbidites des blocs de dimensions notables pouvant atteindre 1 m³; toutefois, les dimensions des blocs les plus nombreux ne dépassent pas quelques décimètres cubes.

Les *courants de fond* sont également un agent de transport possible du matériel sédimentaire; leur importance est encore mal connue car les mesures sont peu nombreuses et assez imprécises. Des vitesses de l'ordre de 50 cm/s ont fréquemment été mesurées immédiatement au-dessus du fond de la mer, à des profondeurs très variables; elles sont responsables de la formation de ripple marks, que l'on peut rencontrer même dans des grands fonds (4 000 à 5 000 m). En milieu néritique, ces courants peuvent représenter la base de courants perma-

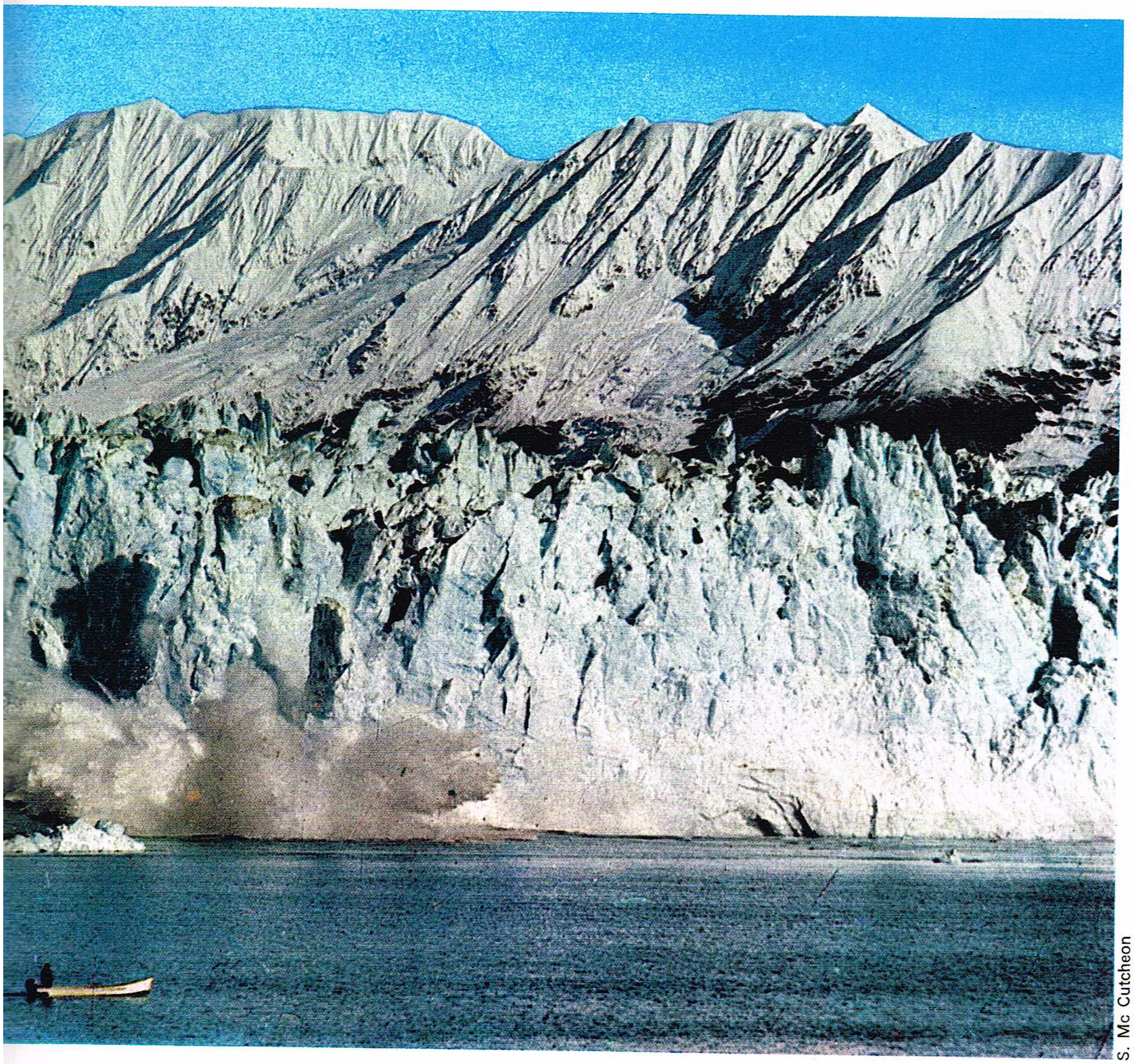

S. Mc Cutcheon

Front d'un inlandsis, au moment où se détache une portion de glace. Celle-ci, entraînée par les courants, constituera au cours de sa fonte un agent de transport et de dépôt de sédiments non négligeable.

nents de surface dus aux vents. A des profondeurs plus importantes, il s'agit vraisemblablement de *courants de densité* qui se déplacent par suite des différences de densité dues aux variations de salinité et de température des eaux océaniques. Les courants de fond peuvent provoquer par leur vitesse assez importante l'absence de sédimentation sur des surfaces du fond marin. L'origine des hard grounds déjà signalés (encroûtements ferrugineux et les niveaux riches en nodules d'hydroxydes de fer et de manganèse qui se forment dans ces zones caractérisées par l'absence de sédimentation) doit être recherchée parmi les conséquences des courants de turbidité.

Transport par les glaciers

Le transport des matériaux détritiques par les glaciers est limité aux régions à climat froid, mais leur action peut se manifester aussi par des caractères anormaux dans les roches sédimentaires anciennes et dans les sédiments actuels déposés dans les régions caractérisées par un climat tempéré. Les glaciers de type alpin et continental transportent de grandes quantités de matériaux détritiques piégés dans la glace, se trouvant devant le glacier ou bien entre le glacier et le fond rocheux sur lequel il se déplace. L'accumulation de ces sédiments dépourvus de tout classement granulométrique aboutit à la formation de moraines.

Dans les régions polaires, les glaciers arrivent à la mer; ils déposent donc des matériaux morainiques qui se mélangent aux sédiments marins du milieu néritique : les courants marins peuvent parfois emporter la fraction fine des sédiments glaciaires. Les sédiments fluvio-glaciaires, souvent associés aux moraines, résultent du transport de sédiments glaciaires par les eaux de fusion des glaces. Certains de ces dépôts, qui se forment dans des chenaux à la surface ou à l'intérieur du glacier, sont constitués par des galets de petites ou moyennes dimensions. Les sédiments sableux et les limons sont très abondants, surtout au front du glacier ou à une certaine distance de celui-ci. Le transport aqueux provoque une sélection granulométrique assez nette; on observe une diminution progressive du diamètre des éléments détritiques lorsqu'on s'éloigne du front du glacier.

Les icebergs, qui proviennent des grandes calottes glaciaires (Antarctide, Groenland), sont aussi des agents de transport non négligeables. Ils charrient des quantités importantes d'éléments détritiques mal classés granulométriquement, de dimensions très variables, allant des blocs immenses aux particules argileuses. Dès leur arrivée dans des eaux tempérées, les icebergs fondent et déposent les sédiments *(ice-rafted detritus)* qui se sont déposés sur eux au cours de leur descente des régions montagneuses ou bien pendant la formation des calottes de glace dans les régions côtières. Dans ces régions, les eaux gèlent dans le sol jusqu'à des profondeurs assez importantes; ainsi, une partie du sol située à la base de la calotte est arrachée au moment de la fracturation de la glace et de la formation de l'iceberg. Les éléments détritiques du substratum peuvent remonter dans les parties supérieures de l'iceberg par dissolution et évaporation du niveau superficiel; parallèlement, l'iceberg peut s'accroître par formation de glace à sa base.

Le transport du matériel sédimentaire par les organismes vivants est peu important du point de vue quantitatif, mais il peut, comme dans le cas des icebergs, provoquer des anomalies dans la granulométrie d'autres sédiments.

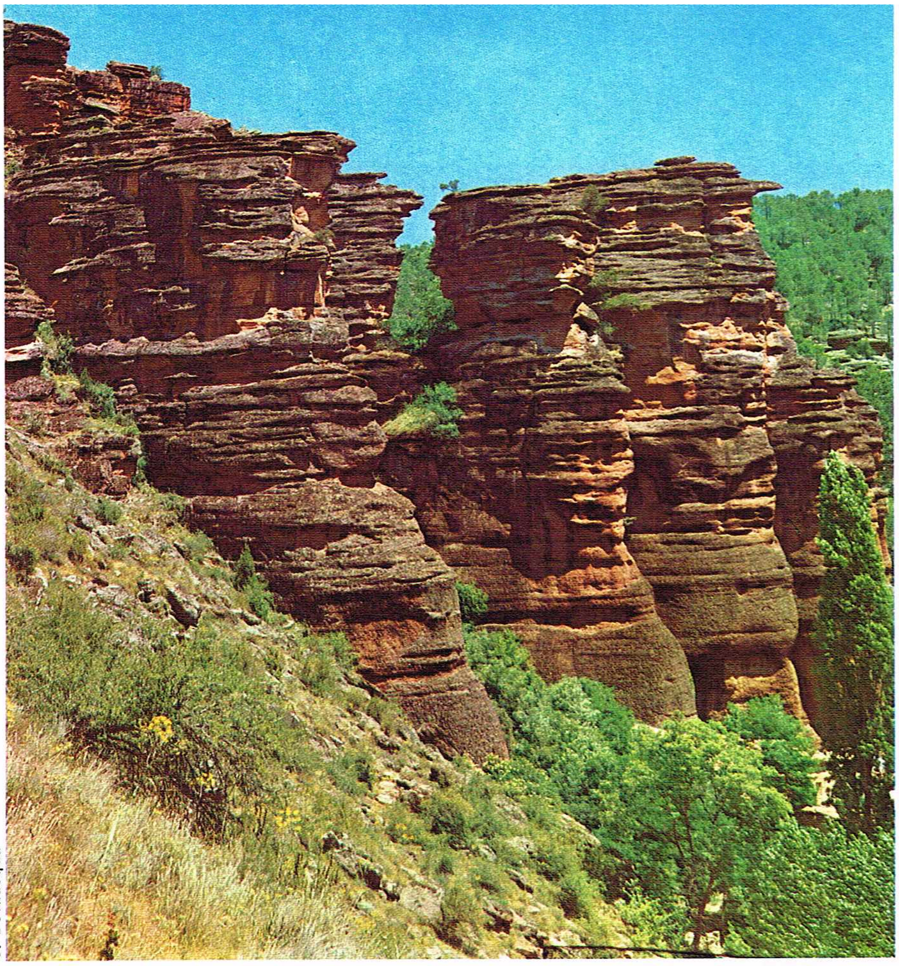

C. Bevilacqua

D. Fernandez

▲ *A gauche, des roches conglomératiques stratifiées près de Molina de Aragon (Espagne). A droite, la diagenèse transforme les sédiments siliceux gélatineux et très riches en eau en roches très dures comme ces silex du Jurassique (le côté de la photographie représente environ un mètre).*

La diagenèse

On désigne par le terme de diagenèse l'ensemble des changements de composition et de structure qui affectent et transforment les sédiments en roches compactes. La diagenèse peut intéresser aussi les dépôts pyroclastiques et provoquer d'importants changements de leur composition minéralogique.

Certains auteurs font une distinction entre *diagenèse stricto sensu* et *lithification :* ils désignent par ce dernier terme les phénomènes de cimentation et de tassement qui transforment un sédiment plus ou moins diagénisé en une roche compacte. Les processus qui aboutissent à la lithification du sédiment ont lieu dans les dernières phases du cycle diagénétique, souvent longtemps après que se sont effectués les principaux changements de composition par rapport au sédiment originel. On peut ainsi effectuer une distinction entre les *processus diagénétiques de nature chimique* et ceux de *nature physique ;* certaines réactions chimiques peuvent se poursuivre pendant le tassement des sédiments.

La diagenèse commence immédiatement après la sédimentation, dans des conditions de pression et de température qui, pour les sédiments marins, sont celles qui existent au fond des mers.

Pendant la subsidence du bassin, le sédiment, soumis à la diagenèse et plus ou moins rapidement compacté, est progressivement porté à des températures et des pressions croissantes, par suite de l'augmentation continuelle de la série de sédiments sus-jacents. Lorsque la température atteint ou dépasse des valeurs de 200 °C à 300 °C (qui caractérisent, si l'on tient compte du degré géothermique, des profondeurs comprises entre 7 et 10 km) et des pressions de l'ordre de 2 000 à 3 000 bars, les réactions entre les différents composants de la roche sont accélérées. C'est ainsi que l'on passe de manière continue de la diagenèse au métamorphisme.

Les sédiments clastiques et les dépôts pyroclastiques sont généralement formés par des minéraux qui ne sont pas chimiquement équilibrés les uns par rapport aux autres. Si la pression et la température étaient plus élevées, on assisterait à des réactions réciproques et à la formation de nouveaux minéraux, ainsi que cela se produit pendant le métamorphisme. Toutefois, ces réactions ne sont pas envisageables à la surface du globe ou même à des profondeurs limitées. Seuls les sédiments d'origine chimique ou biochimique dépourvus de matériel détritique sont composés par des minéraux stables dans les conditions existant à la surface. Les processus diagénétiques sont accélérés, même dans ce cas, par la différence de composition entre les eaux marines libres et celles qui sont retenues dans les interstices du sédiment. Il s'agit alors de simples phénomènes de recristallisation ou de métasomatisme, c'est-à-dire d'échanges entre les substances en solution dans les eaux interstitielles et les éléments chimiques qui constituent les minéraux du sédiment.

Les roches formées pendant la diagenèse sont souvent entraînées dans un cycle orogénique ; elles sont soulevées, plissées et amenées à l'affleurement après érosion des couches sus-jacentes. Au cours de l'orogenèse des échanges chimiques peuvent se produire, par suite de la circulation des eaux météoriques, avec des résultats diamétralement opposés à ceux que l'on observe pendant la diagenèse. Par exemple, le ciment de certaines roches clastiques est dissous, les roches deviennent meubles et une partie des minéraux qu'elles contiennent commence à s'altérer. L'intensité des processus diagénétiques et leur vitesse dépendent de nombreux facteurs, notamment la nature des sédiments et les événements géologiques qu'ils vont subir après leur dépôt.

Les roches les plus fortement diagénisées se trouvent généralement au centre des bassins géosynclinaux où elles sont recouvertes par de très importantes épaisseurs de sédiments (généralement plusieurs kilomètres). Pendant et après la phase diagénétique principale, elles subissent des plissements et sont parfois métamorphisées. La diagenèse des sédiments déposés dans les régions géosynclinales est donc caractérisée par des pressions et des températures relativement élevées qui aboutissent souvent aux processus métamorphiques.

Les roches sédimentaires qui se déposent dans des régions plus stables de la croûte terrestre, par exemple sur les plateaux continentaux, ne sont pas ensevelies sous d'épaisses couches de sédiments, ni entraînées dans des processus orogéniques. Les phénomènes diagénétiques se développent alors sans qu'il y ait cimentation des éléments détritiques, même après des périodes géologiques très longues. En effet, on connaît des sables et des argiles du Paléozoïque inférieur (500 millions d'années) qui montrent les mêmes caractéristiques que certains sédiments actuels. Les sédiments qui se déposent dans les bassins intracratoniques ne subissent pas de déformations de type orogénique ; cependant, ils sont soumis au poids important des séries sédimentaires sus-jacentes. Ces sédiments sont donc généralement bien consolidés, et dans les parties inférieures des séries ils peuvent présenter les premiers effets du métamorphisme de charge.

L'étude des phénomènes diagénétiques présente, outre son intérêt scientifique, une valeur économique. En effet, la diagenèse contrôle la porosité des roches, caractère déterminant la migration et l'accumulation des hydrocarbures ainsi que la formation de certains gisements de minerais d'origine sédimentaire.

◀ *La teneur en eau est d'autant plus élevée que la granulométrie du sédiment est fine. Les sables, par exemple, peuvent contenir jusqu'à 25-30 % d'eau intergranulaire.*

Les processus diagénétiques primaires

La phase principale, qui s'accompagne d'une variation de la composition chimique, débute tout de suite après la sédimentation sous une charge de sédiments quasiment nulle ou très limitée. Ces études ont été effectuées sur des sédiments marins actuels, prélevés sur une épaisseur de plusieurs mètres de sédiments. On a ainsi défini avec plus de précision le milieu diagénétique. La dissolution de certains minéraux du sédiment, la précipitation dans ses pores d'un ciment d'origine chimique, la substitution métasomatique de minéraux originels par des minéraux d'origine diagénétique sont possibles grâce à la présence d'eau interstitielle dans le sédiment fraîchement déposé. La teneur en eau est d'autant plus élevée que la granulométrie du sédiment est fine. Les sables, par exemple, peuvent contenir jusqu'à 25-30 % d'eau intergranulaire; celle-ci atteint 80 % et plus dans les sédiments argileux plus fins et dans les boues calcaires d'origine chimique.

Immédiatement après la sédimentation, l'eau intergranulaire se trouve fossilisée, c'est-à-dire qu'elle n'est plus en contact avec l'eau de mer et le milieu extérieur au sédiment. La nature des substances dissoutes dans l'eau subit alors un changement important, notamment sous l'action des Bactéries. En effet, les sédiments récents, marins ou lacustres, contiennent, outre la faune benthonique normale caractérisée par des animaux dépourvus de test comme certaines Annélides, etc., une flore bactérienne très riche. La quantité de cellules bactériennes est énorme : une estimation donne des chiffres de l'ordre de plusieurs dizaines de millions de Bactéries par gramme de sédiment dans les niveaux les plus superficiels et de plusieurs milliers par gramme à quelques dizaines de centimètres dans le sédiment. La flore bactérienne est beaucoup plus abondante dans les sédiments de type argileux que dans les sédiments sableux, car les argiles sont beaucoup plus riches en matières organiques, provenant de la décomposition de divers organismes marins planctoniques, adsorbées notamment à la surface des particules argileuses.

Les Bactéries utilisent comme source d'énergie les composés organiques les plus facilement oxydables ainsi que l'oxygène dissous dans l'eau de mer. Pour cette raison, le premier changement important dans les eaux interstitielles est la disparition de l'oxygène qui s'effectue dans les premiers centimètres du sédiment. L'appauvrissement en oxygène des eaux interstitielles provoque une

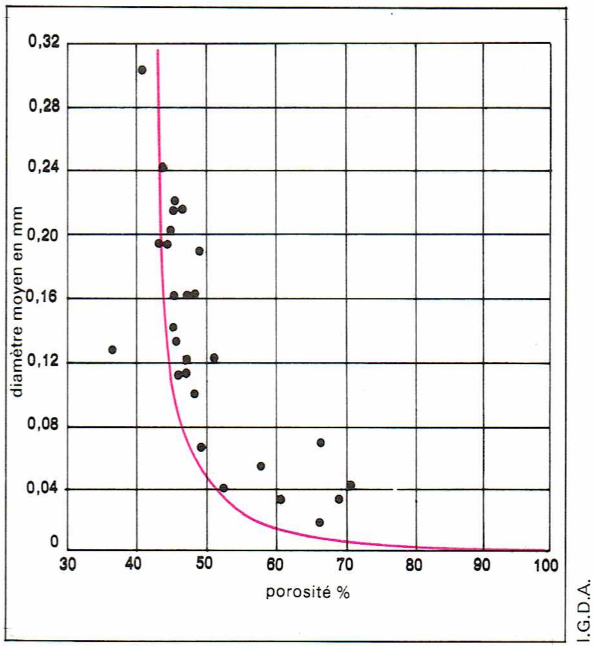

◀ ***Courbe montrant les variations de la porosité en fonction du diamètre des éléments constitutifs du sédiment.***

migration, vers l'intérieur du sédiment, de l'oxygène en solution dans les eaux du fond marin. Dans le cas d'eaux faiblement agitées ou stagnantes, c'est-à-dire non renouvelées, donc non oxygénées, l'appauvrissement en oxygène dans les quelques centimètres qui se trouvent au-dessus du fond rend l'activité biologique difficile.

Au-delà des premiers centimètres de sédiment, les Bactéries aérobies sont remplacées par des Bactéries anaérobies. Ces dernières puisent une partie de l'oxygène nécessaire à leur vie à partir de l'ion sulfate qui se trouve dissous dans les eaux interstitielles. Elles réduisent ainsi le sulfate en sulfure et parfois même en soufre libre. Les hydroxydes colloïdaux de fer et de manganèse qui se trouvent dans les sédiments sont aussi des sources d'oxygène pour les Bactéries. Ces éléments sont ainsi réduits de l'état trivalent et tétravalent à l'état bivalent et passent en solution ionique.

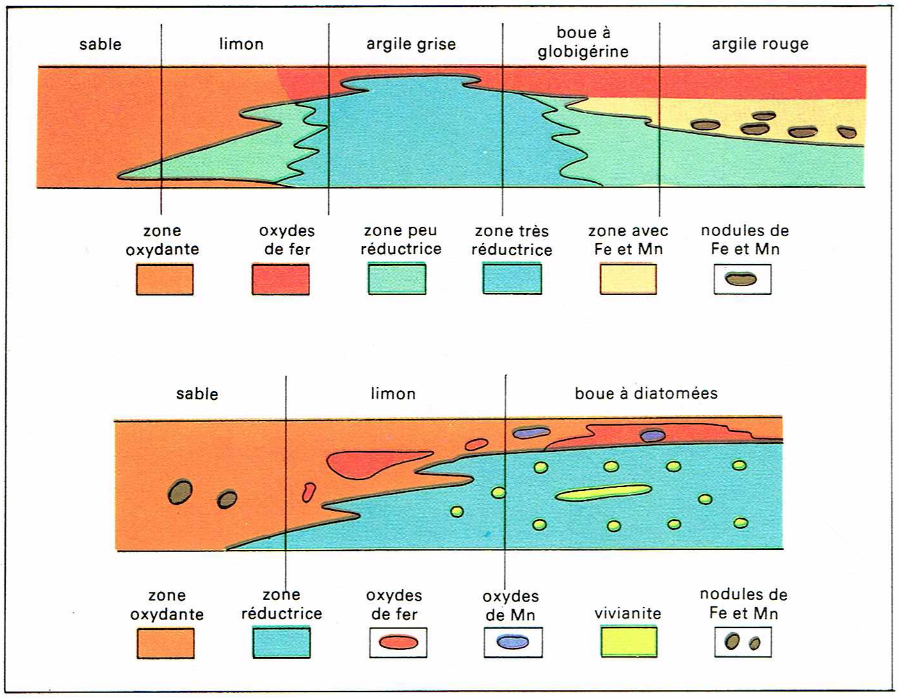

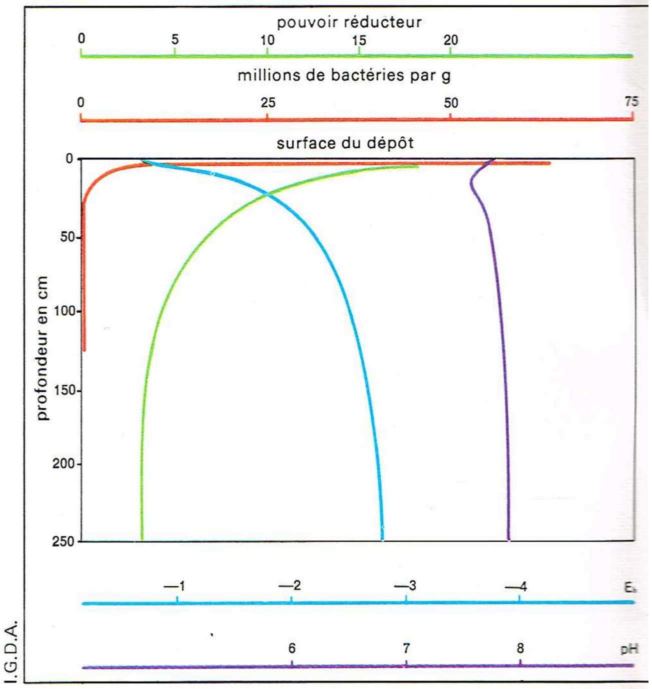

▲ ***A gauche, représentation schématique des différentes couches de sédiments dans un bassin océanique (en haut) et dans un bassin lacustre (lac Baïkal, en bas). La profondeur du milieu croît de la gauche vers la droite (d'après Strakhov). A droite, dans les premiers centimètres de sédiments déposés depuis peu, un certain nombre de caractères physiques, chimiques et biologiques varient de manière importante. Le pouvoir réducteur du milieu est mesuré par la quantité d'une substance (bleu de méthylène) qui peut être réduite par le sédiment (d'après Zobell dans Krumbein et Sloss).***

Les fonctions biologiques des Bactéries, rendues possibles par l'oxygène diversement puisé dans les substances en solution des eaux interstitielles et dans les substances organiques (donc riches en carbone), se traduisent par la formation d'anhydride carbonique; ce dernier, en solution dans les eaux, provoque la formation des ions carbonatés et bicarbonatés. De plus, l'altération bactérienne de la substance organique provoque la libération d'hydrogène et d'hydrogène sulfuré (très fortement réducteurs), de méthane, d'ions ammoniaqués (avec l'azote, qui dérive des protéines) et la formation d'ions phosphatés. Les différences de composition entre l'eau interstitielle des sédiments et l'eau de mer résultent donc de la prolifération des Bactéries dans les premiers centimètres du sédiment. Certaines réactions chimiques peuvent s'effectuer à des profondeurs de plusieurs mètres, là où la flore bactérienne est peu importante. On pense que ces réactions sont favorisées par la présence d'enzymes provenant des Bactéries mortes. Les principales caractéristiques des eaux interstitielles sont donc l'absence d'oxygène et la faible teneur en ions sulfates.

Le calcium est présent en solution sous forme de bicarbonate, lequel précipite sous forme de carbonate insoluble, ou *calcite* diagénétique.

Le magnésium s'unit en partie avec le calcium pour former de la *dolomite* diagénétique, une autre partie du magnésium passant dans le réseau des minéraux argileux *(chlorites* et *montmorillonites)*.

On remarque, dans les eaux interstitielles, une augmentation de la teneur en *silice* provenant essentiellement de la dissolution de matériel organique siliceux (spicules d'Éponges, tests de Radiolaires et de Diatomées) par les eaux de mer, qui sont nettement sous-saturées en silice.

Les teneurs de fer et de manganèse en solution, également très élevées, résultent de l'activité bactérienne précédemment signalée. Les teneurs de sodium et de potassium en solution dans les eaux interstitielles des sédiments sont généralement supérieures aux teneurs moyennes rencontrées dans les eaux marines. Ces éléments proviennent en général de l'altération, en présence d'anhydride carbonique, de certains silicates détritiques présents dans le sédiment.

Les argiles marines sont caractérisées par la présence d'*illite,* minéral phylliteux assez voisin du mica muscovite par sa composition chimique et par son réseau cristallin. Les argiles marines anciennes sont essentiellement illitiques; toutefois, on rencontre aussi des minéraux de la famille des *smectites,* dont certains ont tendance au cours de la diagenèse à se transformer en chlorites, et des *kaolinites,* caractérisées par des feuillets élémentaires à deux couches dépourvues d'ions métalliques échangeables.

La diagenèse agit de deux manières sur les minéraux argileux : tout d'abord, on assiste à des échanges de base entre la phase solide et la phase liquide du sédiment qui s'accompagnent de modifications structurales des réseaux cristallins des argiles détritiques. Ces modifications sont favorisées par les augmentations de pression et de température dues à l'enfouissement de la série sédimentaire. Ensuite, il est vraisemblable que certains minéraux argileux peuvent se former au cours de la diagenèse, par synthèse à partir des substances dissoutes dans les eaux interstitielles. De nombreuses synthèses de minéraux argileux ont été réalisées en laboratoire. Les *bentonites* sont des minéraux argileux de la famille des smectites qui se forment par transformation diagénétique de tufs volcaniques vitreux déposés sur le fond des océans. La réduction des sulfates en sulfures s'accompagne de la précipitation de pyrite FeS_2 en quantité toujours plus élevée que celle que l'on peut calculer d'après la teneur en sulfates des eaux interstitielles : cela s'explique par la pénétration dans le sédiment d'ions sulfates provenant de l'eau de mer. On explique de la même façon la concentration en magnésium nécessaire pour aboutir à la dolomitisation.

Parallèlement, d'autres éléments beaucoup plus concentrés dans les eaux interstitielles que dans l'eau de mer passent en solution dans la couche d'eau qui se trouve juste au-dessus du fond. Ce processus est très net pour des éléments comme le silicium, le fer, le manganèse et l'hydrogène sulfuré. Les eaux marines situées juste au-dessus du fond sont donc particulièrement enrichies en ces éléments qui peuvent précipiter sous forme de sulfures métalliques, de concrétions silicatées et de nodules de fer et de manganèse. La précipitation de ces éléments n'est réalisable que si les eaux du fond ne sont pas agitées par des courants; ceux-ci provoqueraient, en effet, la diffusion des éléments considérés dans des eaux plus superficielles.

La différence de composition entre les eaux interstitielles et l'eau de mer normale, les variations entre la surface du sédiment et les zones plus profondes se traduisent par une variabilité verticale des propriétés physico-chimiques des eaux interstitielles dont dépendent de nombreux processus diagénétiques. Par exemple, leur *potentiel d'oxydo-réduction,* c'est-à-dire leur pouvoir oxydant ou réducteur, varie de la surface vers le fond du sédiment. Autrement dit, le sédiment est oxydant en surface, réducteur en profondeur. Ce phénomène est lié à l'activité des Bactéries qui puisent l'oxygène en solution.

La profondeur où le milieu devient réducteur dépend de la nature et de la granulométrie du sédiment.

Le milieu diagénétique est oxydant dans les sables côtiers, dont la faible teneur en éléments organiques

empêche la prolifération des Bactéries et dont la granulométrie permet des échanges faciles entre l'eau interstitielle et l'eau de mer, se traduisant par une bonne oxygénation du milieu. Le fer et le manganèse subsistent donc sous forme d'oxydes et d'hydroxydes. Généralement, ces sédiments sont de couleur claire en raison de la faible teneur en matières organiques et en sulfures.

Les sédiments argileux du talus continental sont très enrichis en substances organiques provenant essentiellement d'organismes planctoniques (Foraminifères, Coccolithophoridés, etc.). L'activité bactérienne très intense détruit l'oxygène et provoque l'apparition d'un milieu fortement réducteur juste au-dessous des premiers centimètres de sédiment. Les sulfures de fer dispersés dans le sédiment lui confèrent une couleur grise à verdâtre, exception faite des premiers centimètres qui présentent une teinte rouille due aux hydroxydes de fer. Le niveau oxydé, formé par une mince pellicule d'oxydes et d'hydroxydes de fer, se rencontre dans les argiles grises actuelles du talus continental ; il est absent dans les boues noires des bassins à circulation réduite, comme celui de la mer Noire, car la frange d'eau qui se situe immédiatement au-dessus du fond est dépourvue d'oxygène.

Les argiles rouges abyssales constituent un exemple de sédiment déposé dans un milieu diagénétique oxydant. La partie inférieure de ces sédiments, à une certaine profondeur, devient réductrice. A la limite entre la zone oxydante et la zone réductrice se déposeraient, selon certains auteurs, des concrétions formées d'oxydes de fer et de manganèse, qui résulteraient de l'oxydation de composés réduits de fer et de manganèse provenant de la zone réductrice profonde. Selon d'autres chercheurs, les champs de nodules, visibles dans les photos des fonds océaniques, se formeraient sur le fond, au contact entre l'eau de mer et le sédiment. L'acidité des eaux interstitielles, mesurée par leur pH, varie avec la profondeur et selon la nature lithologique des sédiments. Les sédiments calcaires ou calcaro-argileux contiennent des eaux interstitielles qui sont toujours légèrement alcalines. Dans les sédiments pourvus ou dépourvus de carbonates, il existe un niveau où le pH est voisin de la neutralité ou légèrement acide : ce niveau constitue la limite entre la zone oxydante et la zone réductrice.

Les réactions chimiques qui se développent pendant la première phase de la diagenèse sont conditionnées et dépendent de la composition chimique et des propriétés physico-chimiques des eaux interstitielles. Les minéraux contenus dans le sédiment, qui ne sont pas en équilibre avec la composition des eaux, sont dissous et de nouveaux minéraux précipitent à partir de la solution. La composition minéralogique des roches sédimentaires à grain très fin, d'origine détritique (argiles) ou biochimique ou chimique (roches carbonatées, siliceuses, ferrugineuses, évaporites, etc.), est plus déterminée par les processus diagénétiques que par les processus sédimentaires.

La texture originelle de la roche peut également être masquée par les phénomènes diagénétiques. Au cours de la diagenèse, les sédiments sont d'abord en milieu oxydant ; puis, recouverts par des épaisseurs croissantes de sédiments nouveaux, ils se trouvent alors en milieu réducteur. Les minéraux diagénétiques stables se forment donc en milieu réducteur. Le fer, réduit à l'état ferreux, se combine avec l'hydrogène sulfuré, qui provient de la réduction des sulfates, pour former de l'*hydrotroïlite* (monosulfure de fer hydraté), laquelle se transforme dans les phases plus tardives de la diagenèse en *marcassite* et en *pyrite*. Dans les sédiments récents et dans les roches sédimentaires, on peut trouver aussi des petites quantités de sulfures d'autres éléments (manganèse, cuivre, zinc, nickel, etc.). Les ions métalliques, nécessaires à la formation de sulfures diagénétiques, passent progressivement en solution dans les eaux interstitielles ; ils proviennent des minéraux instables présents dans le sédiment au fur et à mesure que s'effectue la précipitation des sulfures correspondants. De nombreux chercheurs pensent que la précipitation primaire des sulfures est possible dans les eaux enrichies en hydrogène sulfuré. La dolomite et l'ankérite précipitent directement à partir des carbonates de fer, de magnésium et de calcium qui se trouvent en solution dans les eaux interstitielles. La *célestine* (sulfate de strontium), parfois présente dans certains sédiments, peut se former par précipitation biochimique ou au cours de la diagenèse. L'ion phosphate, qui résulte, au moins en partie, de l'altération bactérienne des substances organiques, se combine avec le calcium pour former de l'*apatite* et avec le fer pour former de la *vivianite*. Dans certains sédiments océaniques actuels et dans certaines roches sédimentaires, on rencontre de la *barytine* (sulfate de baryum) d'origine diagénétique. La plupart des minéraux argileux qui se trouvent dans les sédiments peuvent être considérés comme des minéraux diagénétiques dérivant de phyllosilicates détritiques. On attribue une origine analogue à la *glauconie,* ou *glauconite,* phyllosilicate ferrifère formé par la modification diagénétique de la biotite ou d'autres silicates, ou encore par synthèse directe ; il en va de même pour les chlorites ferrifères. L'*albite,* et parfois aussi les feldspaths potassiques, sont des minéraux diagénétiques assez fréquemment représentés dans les roches sédimentaires, où ils se développent sous forme de petits cristaux automorphes, se formant parfois autour de grains de feldspaths d'origine détritique.

Les *zéolites* (analcime, phillipsite, etc.), que l'on rencontre très fréquemment dans les sédiments océaniques actuels (par exemple, dans les nodules de manganèse), se forment très probablement au cours de la diagenèse à partir des projections volcaniques vitreuses. On connaît, par exemple, des roches stratifiées formées essentiellement par de l'analcime (analcimolites, tuffites à analcime) associée à des oxydes de fer, du quartz détritique, des carbonates, etc. Ces roches possèdent une structure apparemment oolithique, l'analcime se présentant sous forme de globules de 1 mm de diamètre, à structure concentrique, vraisemblablement formés pendant la diagenèse. Il s'agit toujours de dépôts continentaux, comprenant parfois des restes d'organismes. L'analcime a pu se former à la suite du lessivage (par des eaux très sodiques) de dépôts sédimentaires lacustres de régions à climat aride.

H. Chaumeton - Jacana

▲ **Grès à glauconie.** ***La glauconie, phyllosilicate ferrifère, est formée par la modification diagénétique de la biotite ou d'autres silicates, ou encore par synthèse directe.***

▶ *Page ci-contre à gauche, les grains de quartz de ce grès quartzite, dont on peut reconnaître dans certains cas les contours originels marqués par des alignements d'impuretés, sont cimentés par du quartz qui s'est orienté cristallographiquement sur le réseau des éléments détritiques. Dévonien inférieur des Ardennes (Belgique). Lame mince en nicols croisés. Au milieu, les contours des éléments détritiques carbonatés et dolomitiques présents dans ce grès ont été presque complètement masqués par la recristallisation diagénétique et se confondent avec le ciment calcitique. Permo-Trias. Lame mince en nicols croisés. A droite, la texture originelle de ce calcaire triasique, fortement recristallisé pendant la diagenèse, est représentée par les fins alignements horizontaux d'impuretés argileuses. Lame mince en nicols croisés.*

L'origine de la formation des différents minéraux diagénétiques peut être mise en évidence par l'étude microscopique des roches sédimentaires et, en particulier, par l'étude des rapports entre la forme cristalline et la position réciproque des substances déposées dans les pores des roches clastiques ou formées par substitution métasomatique des minéraux originels du sédiment. Par exemple, l'étude de certains gisements de fer sédimentaires a montré que l'hydroxyde de fer colloïdal, présent dans le sédiment primaire au cours de la diagenèse, se transforme, au passage de la zone oxydante à la zone réductrice, en glauconite, chlorite ferrifère, sidérite ou pyrite. L'érosion sous la couche d'eau peut provoquer une interruption de la diagenèse; les fragments érodés se trouvent en milieu oxydant, mais avec le processus normal recommence l'accumulation de nouveaux sédiments. Selon certains auteurs, la texture oolithique que l'on rencontre fréquemment dans les dépôts de fer sédimentaire serait diagénétique, alors que selon d'autres les oolithes seraient primaires, c'est-à-dire construites originellement à partir d'hydroxyde ferrique ou de carbonate de calcium.

Les minéraux diagénétiques ne sont pas toujours uniformément répartis dans la roche; ils se concentrent dans certains niveaux où les conditions physico-chimiques sont favorables à leur précipitation dans les eaux interstitielles. Par exemple, dans une série sédimentaire constituée par l'alternance de couches sableuses et argileuses, l'anhydride carbonique qui résulte de l'activité bactérienne dans les niveaux argileux riches en matière organique provoque une dissolution du carbonate de calcium qui s'infiltre dans les niveaux sableux. L'anhydride carbonique s'échappe facilement des niveaux sableux et se disperse dans l'eau de mer; cela provoque la précipitation de calcite dans les espaces intergranulaires car la solubilité du carbonate de calcium dépend de la quantité d'anhydride carbonique en solution. La diminution d'anhydride carbonique et de calcium en solution dans les eaux interstitielles des sables provoque un appel (par diffusion) de ces substances à partir des niveaux argileux où leur concentration est plus élevée. C'est ainsi que le carbonate de calcium migre des niveaux argileux vers les niveaux sableux, où il se dépose sous forme de ciment intergranulaire.

Les concentrations de *sidérite* et d'*ankérite* dans les séries argilo-calcaires contenant des couches de charbon sont expliquées par le même processus. L'altération de la substance organique végétale provoque un développement d'anhydride carbonique, qui augmente la solubilité du fer sous forme de carbonate ferreux. Au contraire, le caractère alcalin des eaux interstitielles des couches carbonatées diminue la solubilité du fer et provoque sa précipitation sous forme d'ankérite ou de sidérite. Ces minéraux se trouvent en remplacement métasomatique de la calcite, ou sous forme de ciment dans le cas de sables calcaires. La différence de concentration du fer en solution dans les eaux interstitielles des couches argileuses et dans celles des couches carbonatées provoque une diffusion de cet élément vers les couches carbonatées.

▼ *Dans ce calcaire du Jurassique supérieur, les spicules siliceux de Spongiaires ont été partiellement transformés en calcite au cours de la diagenèse. Pour le spicule qui figure au centre de ce cliché la substitution a commencé par les extrémités et le canal axial. Lame mince en nicols croisés.*

Archives Photo B

La sidérite est un ciment assez commun des roches gréseuses, mais elle peut aussi constituer des concentrations qui, en surface, s'altèrent en *limonite*. La silice est aussi susceptible de migrer au sein des masses sédimentaires soumises à la diagenèse; c'est ainsi que certains dépôts de Diatomées et de matériaux pyroclastiques sont localement cimentés par de la silice micro-cristalline qui leur confère une dureté très élevée. La silice peut également cimenter des roches de natures différentes, intercalées dans ces sédiments. Dans les roches argilo-calcaires caractérisées par un faible apport de matériaux détritiques, la silice et le carbonate de calcium originellement mélangés de manière homogène peuvent se redistribuer. Quand les eaux interstitielles sont alcalines, la silice passe en solution et les tests d'organismes siliceux sont remplacés par de la calcite. L'inverse se produit dans les zones acides, où la silice en excès précipite sous forme de nodules tandis que le carbonate passe en solution. Les nodules phosphatés que l'on rencontre dans les sédiments calcaires et argileux ont une origine semblable.

La formation de minéraux diagénétiques par précipitation à partir des solutions interstitielles, ou par réaction entre ces dernières et les minéraux détritiques, joue un rôle important dans la détermination de la composition chimique finale de la roche sédimentaire. Dans de nombreux cas, la diagenèse provoque une lithification partielle du sédiment qui se limite à des concentrations et des structures secondaires. Pour la majeure partie des sédiments, le principal facteur de lithification dépend de la pression due à la charge des sédiments sus-jacents, et peut-être aussi des pressions orientées qui se développent au cours de l'orogenèse.

Les processus diagénétiques tardifs

La diminution de volume des sédiments qui résulte de l'expulsion d'une grande partie de l'eau interstitielle est très importante dans le cas des sédiments argileux; en effet, la teneur en eau des argiles passe de 80 % à 20 % au cours du processus diagénétique; cette perte est beaucoup moins importante dans le cas des sédiments sableux. Au cours du tassement, les minéraux phylliteux accentuent leur orientation parallèle aux surfaces de stratification; par contre, les grains de sable et les limons, indépendamment de leur orientation, sont tassés les uns contre les autres. Aux points de contact, la solubilité de chaque espèce cristalline se trouve fortement augmentée (principe de Riecke). Ainsi, on aboutit à une dissolution des cristaux aux points de contact et à un redépôt des substances dissoutes sur les surfaces libres des grains. Le processus que nous venons de décrire est très actif dans le cas des grès quartzeux et dans les calcarénites (grès calcaires) : il provoque un aplatissement progressif des grains qui sont soumis à des tassements importants et qui se cimentent le long de surfaces de dissolution irrégulières, que l'on appelle des *microstylolites*. Le redépôt simultané de quartz et de calcite sur les grains provoque une oblitération progressive de leurs contours originels. Ces phénomènes sont plus marqués et plus rapides dans le cas des sédiments calcaires (beaucoup plus solubles) que dans celui des sédiments siliceux. Dans le cas des sédiments calcaires à grain très fin, le processus de dissolution-recristallisation dépend plus des variations physico-chimiques des eaux interstitielles que de la pression due au poids des sédiments sus-jacents.

Les dimensions des grains ont également une certaine importance. En effet, les grains et les cristaux les plus petits d'un minéral sont plus solubles que les cristaux plus gros de la même espèce; de cette manière, les cristaux plus importants s'accroissent aux dépens des plus petits. Ce phénomène explique l'augmentation progressive de la structure grenue des roches sédimentaires au cours de la diagenèse et même du métamorphisme. La transformation de la silice amorphe des sédiments (opale) en calcédoine, puis en quartz, celle de l'aragonite en calcite suivent un processus analogue. En effet, ces formes cristallines ont une solubilité décroissante.

Enfin, la circulation des eaux interstitielles est un facteur très important de la diagenèse. Pendant l'enfouissement de la série sédimentaire, les eaux qui proviennent en grande partie du sédiment sont expulsées à la suite du tassement et de la réduction de volume des sédiments. Elles vont donc, après avoir traversé d'épaisses séries sédimentaires et s'être chargées en éléments dissous,

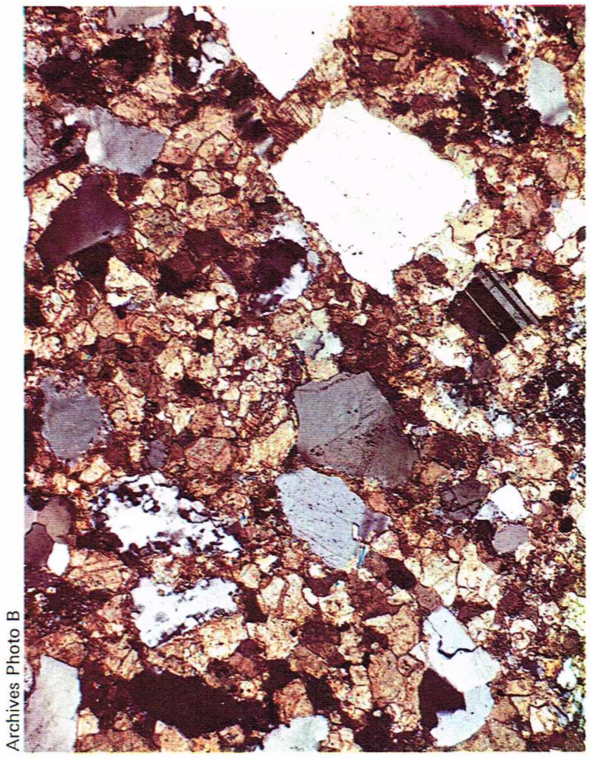

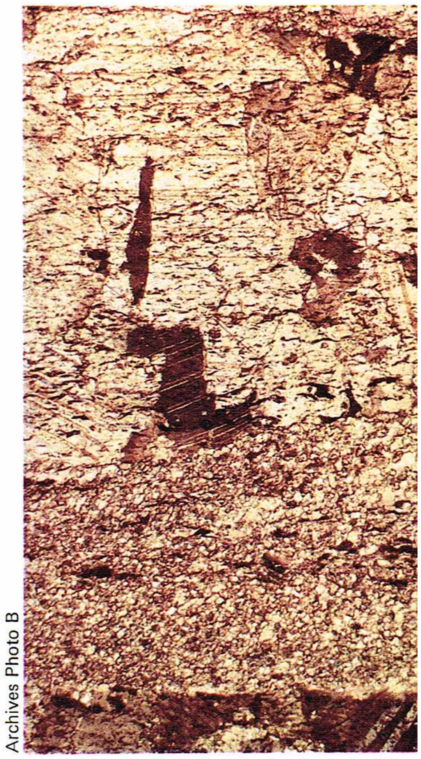

essayer de rejoindre la surface. Les eaux minéralisées peuvent déposer différentes substances comme des carbonates et des sulfates (anhydrite, barytine, célestine) qui contribuent à la cimentation des roches qu'elles traversent. Au cours de cette phase diagénétique tardive, se forment des minéraux de titane (comme le rutile), des feldspaths, et sur des grains détritiques comme la tourmaline et le zircon peuvent se former de nouvelles zones de croissance. La température élevée qui existe dans les parties plus profondes de la série diagénisée accélère les processus de dissolution-recristallisation. Les phénomènes de dissolution et de précipitation de certains minéraux se poursuivent même après lithification de la série, au cours de l'orogenèse et de l'érosion ; les eaux souterraines arrivent alors à la surface par infiltration. Au cours de cette phase, des dissolutions partielles peuvent se produire, surtout dans les cargneules, les calcaires et les dolomies qui acquièrent une structure caverneuse (dans ces roches, la dolomite peut être remplacée).

La lithification des principaux types de sédiments

Dans les **roches clastiques,** les plus importants changements de la nature minéralogique du sédiment originel précèdent la cimentation et la lithification se développant au cours des phénomènes de tassement. La cimentation des graviers, qui aboutit à la formation de *conglomérats,* s'effectue par lithification de la fraction interstitielle, sableuse et argileuse. Les galets et autres éléments détritiques grossiers ne participent pas à ce processus, exception faite des galets carbonatés qui peuvent présenter des figures de dissolution.

La consolidation des sables aboutit à la formation des *grès ;* elle s'effectue essentiellement par précipitation dans les pores intergranulaires d'un ciment d'origine chimique, généralement formé de calcite ou de silice sous leurs différentes formes minéralogiques. La précipitation du ciment peut avoir lieu dans les phases précoces ou tardives de la diagenèse. Dans le premier cas, la roche déjà cimentée ne subit pas ou subit peu l'effet du tassement dû aux sédiments sus-jacents ; dans le second cas, vraisemblablement plus fréquent, le sable est tassé et l'espace intergranulaire se trouve réduit avant le phénomène de cimentation. Un grès peut être cimenté par un ou par plusieurs minéraux : très souvent, on observe une première génération de ciment formant un voile de petits cristaux enveloppant la surface des grains à laquelle succède un second dépôt de même nature ou de nature différente, qui oblitère complètement les pores de la roche.

La diagenèse débute, dans les *sables quartzeux,* par une dissolution de la surface des grains qui devient opaque et corrodée. La silice dissoute recristallise ensuite sous forme de quartz à la périphérie des grains détritiques ; en s'orientant sur le réseau cristallin déjà existant, elle construit des faces et des arêtes parfaites ; à ce stade, la roche est faiblement cimentée et encore friable. La phase principale de cimentation a lieu lorsque la roche se trouve sous une importante charge de sédiments : il y a alors mise en solution de silice provenant des contacts intergranulaires et des petits cristaux, puis recristallisation presque immédiate. Dans les phases encore plus tardives, une partie du quartz peut être remplacée par de la calcite si à proximité du grès ou dans celui-ci se trouvent des débris de roches ou d'organismes carbonatés.

La lithification des *sables à matrice argilo-carbonatée* aboutit à la formation de grauwackes ou de subgrauwackes et au développement dans la matrice de phyllosilicates et de carbonates (calcite et parfois sidérite). On n'observe pas de dépôts siliceux autour des grains de quartz ; par contre, ces derniers sont souvent imbriqués, peut-être à la suite de phénomènes de dissolution réciproque. Les grains de quartz sont souvent bordés de calcite ou de minéraux micacés.

▼ A gauche, pendant les phases tardives de la diagenèse, de nombreux cristaux de quartz de ce grès ont été remplacés par de la calcite le long des fractures. Les éléments carbonatés de la roche (fragments de calcaire et ciment calcitique) ont été partiellement dissous et remplacés par des substances argileuses. Lame mince en nicols croisés.
A droite, grès quartzite essentiellement composé par des grains de quartz cimentés par un ciment siliceux. Les zones microcristallines sont des fragments de roches schisteuses essentiellement chloritiques. Dévonien des Ardennes (Belgique). Lame mince en nicols croisés.

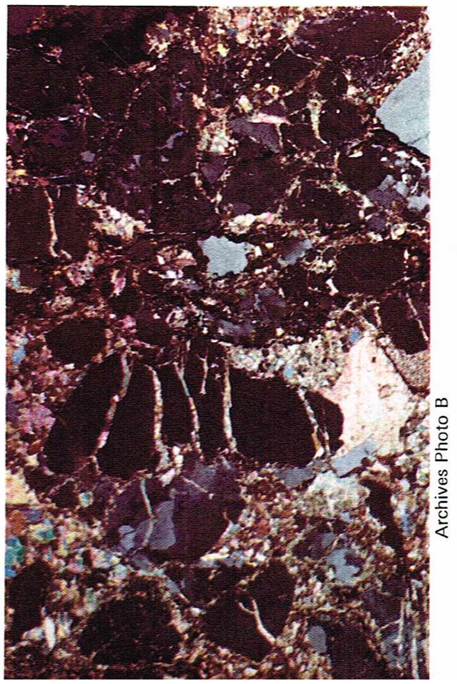

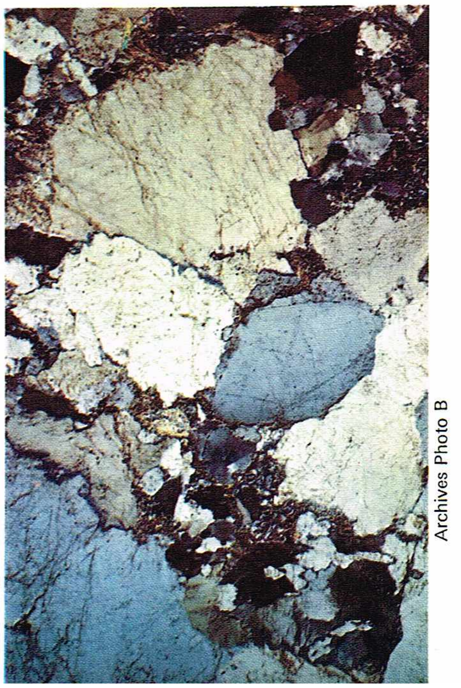

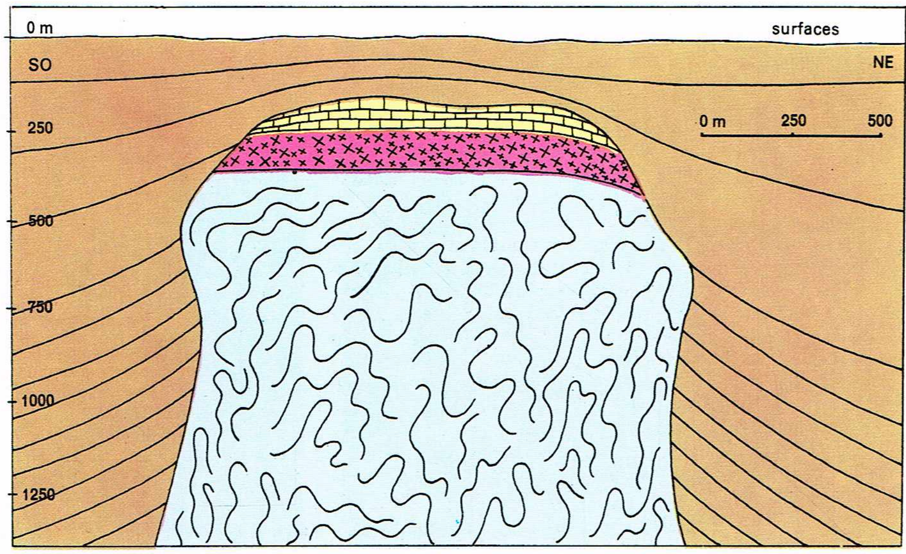

▲ *Le « chapeau » de ce dôme de sel est constitué par une zone d'anhydrite et de gypse (couleur rose foncé), surmontée par une zone calcaire assez poreuse. La masse de sel gemme est représentée en bleu. Golfe du Mexique (d'après Eby, Halbouty et coll.).*

Les *arkoses (ou grès feldspathiques)* prennent naissance grâce à une faible consolidation de sables feldspathiques. Le ciment des arkoses est formé par des carbonates et des minéraux des argiles qui se déposent au cours de la compaction de la série. Les carbonates (calcite, ankérite, etc.) dérivent essentiellement de l'altération des plagioclases et des minéraux ferromagnésiens; quant aux minéraux des argiles, qui appartiennent souvent à la famille des kaolinites (parfois aussi aux illites et chlorites), ils résultent de l'altération par hydrolyse des feldspaths. Les micas détritiques sont aussi altérés et transformés en minéraux argileux.

La lithification des *sédiments calcaro-argileux* se fait essentiellement par tassement et expulsion des eaux interstitielles; les transformations des minéraux argileux ont toutefois une importance notable. La kaolinite et la montmorillonite (les smectites) se transforment en fonction de la composition des eaux interstitielles en illite, en séricite ou en chlorite. Les paillettes de phyllites s'accroissent et le processus se développe même au cours du métamorphisme. La lithification des argiles peut être accentuée par la précipitation de silice colloïdale ou de calcite au cours de la diagenèse.

La diagenèse et la lithification des **sédiments d'origine chimique et biochimique** se développent beaucoup plus rapidement que dans le cas des dépôts clastiques car leur solubilité est plus importante et la granulométrie des grains beaucoup plus fine.

La lithification des *sédiments carbonatés* se fait très rapidement, et certaines roches calcaires sont solidifiées dès leur dépôt; c'est le cas, par exemple, des travertins et des calcaires récifaux. Il y a dissolution et recristallisation de calcite par le biais des eaux interstitielles; l'*aragonite,* que l'on rencontre dans certains sédiments d'origine chimique ou organogène, se transforme rapidement en calcite. Dans certaines conditions, au cours de la diagenèse, les sédiments carbonatés peuvent se transformer partiellement ou totalement en dolomite (dolomitisation). Lorsque le sédiment calcaire contient de la silice à l'état diffus, celle-ci peut se concentrer sous forme de concrétions ou nodules de silex. Dans les roches calcaro-dolomitiques contenant des nodules de silex, la silicification vient généralement après la dolomitisation; dans certains sédiments, toutefois, on observe l'inverse.

La lithification des *sédiments siliceux* non détritiques est aussi très rapide, comme le montrent les débris de silex anguleux que l'on rencontre dans les conglomérats intraformationnels résultant d'éboulements sous-marins légèrement postérieurs à la sédimentation.

La diagenèse provoque dans les *dépôts évaporitiques* des changements de composition minéralogique notables, surtout en raison de la très grande solubilité des minéraux. L'augmentation de température pendant la diagenèse tardive favorise la transformation du *gypse* en *anhydrite* et la dissolution dans les eaux interstitielles de certains sels qui cristallisent tardivement. Les solutions sursaturées traversent les masses évaporitiques et provoquent, surtout lorsque les températures sont élevées, de nombreuses réactions de type métasomatique. On peut dire que la composition minéralogique finale des évaporites dépend essentiellement de la diagenèse, qui provoque aussi la disparition totale de certaines espèces minérales formées pendant la sédimentation.

Des processus diagénétiques tardifs (hydratation de l'anhydrite avec formation de gypse) sont provoqués par des eaux d'origine superficielle ruisselant sur les dépôts évaporitiques pendant l'orogenèse ou au cours de la remontée des diapirs salins. Le « chapeau » des dômes salins peut être attribué également à des phénomènes diagénétiques. Il s'agit d'un corps rocheux lenticulaire dont l'épaisseur moyenne atteint la centaine de mètres, constitué à sa base par de l'anhydrite et au sommet par du gypse grossièrement cristallisé. Ce niveau, qui contient des concrétions de soufre, peut être recouvert par une couche essentiellement calcaire à texture poreuse. Le « chapeau » se formerait par concentration, au sommet du diapir et pendant sa remontée, de niveaux de carbonates et d'anhydride contenus dans la masse de sel gemme mais beaucoup moins solubles que cette dernière. Toutefois, ces matériaux peuvent être dissous, puis recristalliser à la suite de lessivages par les eaux superficielles qui provoquent, par exemple, la transformation en gypse de l'anhydrite et la réduction des sulfates en soufre (peut-être en liaison avec des actions bactériennes).

Les sédiments déposés dans les milieux continentaux subaériens subissent, au début, des processus diagénétiques différents de ceux qui se développent dans les milieux aqueux. Il s'agit essentiellement de processus de type pédogénétique résultant de l'infiltration et de la remontée par capillarité en saison sèche des eaux de nature météorique. Toutefois, les processus diagénétiques tardifs, qui se développent sous une importante couche de sédiments, sont analogues à ceux qui affectent les dépôts subaqueux.

Les textures des roches sédimentaires

On désigne par le terme *texture* l'ensemble des caractères comme les dimensions, la forme, les relations géométriques entre les différents éléments (dans les roches clastiques) et entre les minéraux (dans les roches d'origine chimique). Dans les roches d'origine organique, on considère les caractères des tests d'organismes qui les constituent. Les textures des roches clastiques sont très variées et intéressantes car elles permettent de reconstituer le milieu de sédimentation de la roche. Les textures des roches d'origine chimique reflètent essentiellement les conditions physico-chimiques de la diagenèse, les textures liées à la sédimentation précédant la diagenèse étant généralement effacées par cette dernière. Les textures des roches organogènes peuvent indiquer, par exemple, si les organismes sont *autochtones* (développés dans le milieu) ou *allochtones* (repris à des formations déjà existantes, donc remaniés).

Les **dimensions des fragments** qui constituent un sédiment ou une roche sédimentaire clastique sont déterminées grâce à l'*analyse granulométrique*. On mesure les pourcentages, généralement pondéraux, des différentes classes granulométriques présentes dans le sédiment et dans la roche clastique. Chaque *classe granulométrique* regroupe les fragments de roche et les grains de dimensions comprises entre deux valeurs limites choisies de manière arbitraire mais disposées selon une échelle donnée; le plus souvent, on utilise l'échelle de Wentworth, dans laquelle les limites des classes sont des puissances entières, positives ou négatives, de 2. La série des valeurs généralement utilisées dans les analyses granulométriques par tamisage, exprimées en millimètres, est la suivante : 4, 2, 1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16 de mm.

La détermination des pourcentages des différentes classes granulométriques s'effectue de plusieurs façons en fonction de la nature du matériel analysé. Par exemple, pour les graviers, on mesure les trois dimensions de chaque galet (habituellement, l'épaisseur maximale, moyenne et minimale); on effectue la moyenne de chaque série de valeurs et on les regroupe dans les intervalles définissant chaque classe granulométrique. Pour les sables, on effectue un tamisage sur une colonne de tamis avec des mailles décroissantes de haut en bas suivant l'échelle de Wentworth ou toute autre échelle préalablement choisie, puis on pèse la fraction retenue par chaque tamis.

Étant donné qu'il est impossible de construire des tamis avec des ouvertures de maille inférieures à 1/16 mm, on utilise pour analyser les particules inférieures à ces dimensions des systèmes basés sur les différences de vitesse de sédimentation des particules, placées dans un liquide, en fonction de leur diamètre (loi de Stokes).

Les résultats des analyses granulométriques, c'est-à-dire les pourcentages des différentes classes granulométriques qui constituent un sédiment clastique, sont ensuite exprimés graphiquement de différentes façons.

L'*histogramme* constitue l'expression graphique la plus immédiate et la plus facilement réalisable de la composition granulométrique. L'histogramme est un diagramme dans lequel on reporte en abscisses les valeurs limites données par les tamis entre les différentes classes granulométriques (de cette façon, les limites entre les classes sont équidistantes) et en ordonnées le pourcentage de chaque classe. Ce pourcentage se trouve donc représenté par un rectangle, dont la base est constituée par un segment unissant chaque valeur limite et dont la hauteur est proportionnelle au pourcentage de la même classe. L'histogramme a une forme comparable à celle des tuyaux d'un orgue ; on y distingue immédiatement la *classe modale* (celle qui montre le pourcentage le plus élevé) et la distribution générale des classes granulométriques dans un sédiment.

La *courbe de fréquence* est une autre représentation assez simple de la distribution granulométrique : sa conception est analogue à celle de l'histogramme. On peut, en effet, concevoir un histogramme constitué par un grand nombre de classes granulométriques avec des limites très proches les unes des autres et réunir les sommets de chaque rectangle représentant le pourcentage (ou fréquence) de chaque classe. La courbe de fréquence a une forme en cloche. L'apex de la courbe représente la valeur du diamètre le plus fréquent dans le sédiment analysé. Cette valeur, que l'on appelle *mode*, est considérée comme représentative du diamètre moyen du sédiment ; elle est directement en rapport avec l'intensité des agents de transport du milieu sédimentaire.

En plus du diamètre moyen des particules qui le composent, un sédiment se distingue par d'autres caractères granulométriques qui peuvent être exprimés numériquement et mesurés directement sur les graphiques. Par exemple, l'*obliquité* de la distribution granulométrique est visible sur la courbe de fréquence par une prédominance des fractions plus grossières du mode sur les fractions plus fines (obliquité positive) ou *vice versa* (obliquité négative). C'est une donnée utilisée pour reconstituer les propriétés dynamiques du milieu sédimentaire ; une obliquité positive peut résulter de l'entraînement des particules plus fines du sédiment par un courant de vitesse considérable, tandis qu'une teneur très élevée en fraction plus fine du mode peut être attribuée à une sédimentation dans un milieu caractérisé par une turbulence élevée.

La *courbe cumulative* permet une représentation graphique d'une distribution naturelle (comme celle de la fréquence des fragments de différents diamètres dans un sédiment clastique) moins évidente que l'histogramme et la courbe de fréquence. Toutefois, elle permet d'exprimer différentes propriétés de la distribution granulométrique par des indices numériques et donc d'effectuer des comparaisons quantitatives des différentes distributions granulométriques. Cette courbe se construit avec un système d'axes identique à celui utilisé dans les histogrammes et les courbes de fréquence. On porte une échelle logarithmique sur l'axe des abscisses (axe horizontal), où l'on indique les diamètres, et une échelle arithmétique sur l'axe des ordonnées (axe vertical), où l'on reporte les pourcentages. La courbe cumulative peut être construite en dessinant un histogramme dans lequel les bases des rectangles qui représentent les fréquences de différentes classes granulométriques ne s'appuient pas toutes sur l'axe horizontal ; la base de chaque rectangle est au même niveau que le sommet du rectangle précédent. En unissant les points de contact entre les différents rectangles, on obtient une courbe cumulative en forme de S. A partir de la courbe cumulative, on peut déterminer sur l'axe des abscisses le diamètre moyen du sédiment *(médiane)* qui correspond à 50 % sur l'axe des ordonnées, et mesurer différentes caractéristiques de la distribution granulométrique. Par exemple, le classement d'un sédiment est exprimé par la forme de la courbe cumulative. Les sédiments clastiques *bien classés,* c'est-à-dire formés par des fragments qui ont presque tous le même diamètre, sont représentés par une courbe de forte pente ou presque verticale. Dans un sédiment *mal classé,* c'est-à-dire formé par des débris de diamètres différents, on aura une courbe cumulative aplatie, tendant à se développer selon l'axe horizontal. De nombreuses distributions granulométriques de sédiments clastiques, exprimées en fonction du logarithme du diamètre des fragments, correspondent à une distribution gaussienne, laquelle est aussi applicable à d'autres phénomènes naturels (caractéristiques biologiques d'une population, etc.) et indique un rapport bien déterminé entre la fréquence et le logarithme du diamètre.

Les courbes de fréquence gaussiennes ont une forme en cloche symétrique. Elles sont plus ou moins ouvertes en fonction de la déviation standard de la distribution granulométrique. La distribution polymodale ou à tendance polymodale qui constitue une exception assez fréquente à la distribution classique unimodale (courbe à un apex) est caractérisée par une courbe de fréquence avec deux apex (courbe bimodale) ou plusieurs apex (courbe polymodale). Ces courbes, assez caractéristiques des sédiments graveleux, peuvent s'expliquer par des transports de masse par les glaciers ou bien par des

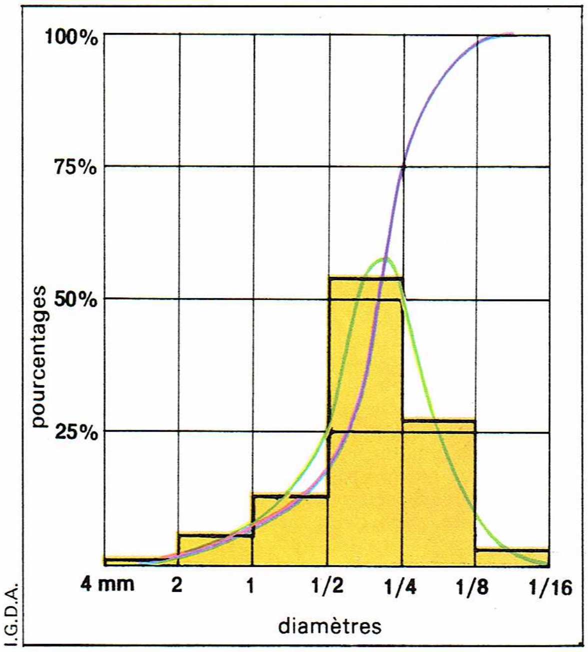

◄▼ Ci-contre, trois représentations différentes de l'analyse granulométrique d'un sédiment. En ocre, on a un* histogramme, *en vert la* courbe de fréquence *et en violet la* courbe cumulative *(d'après Pettijohn et Ridge dans Dumbard et Rodgers). En bas, les histogrammes roses représentent trois distributions granulométriques symétriques. Le second sédiment (en partant de la gauche) est moins bien classé que le premier, le troisième montre une très forte concentration d'éléments de dimensions comprises entre 1 et 2 mm. Les histogrammes bleus montrent des pentes de sens opposé ; l'histogramme de couleur ocre est bimodal (d'après Pettijohn).

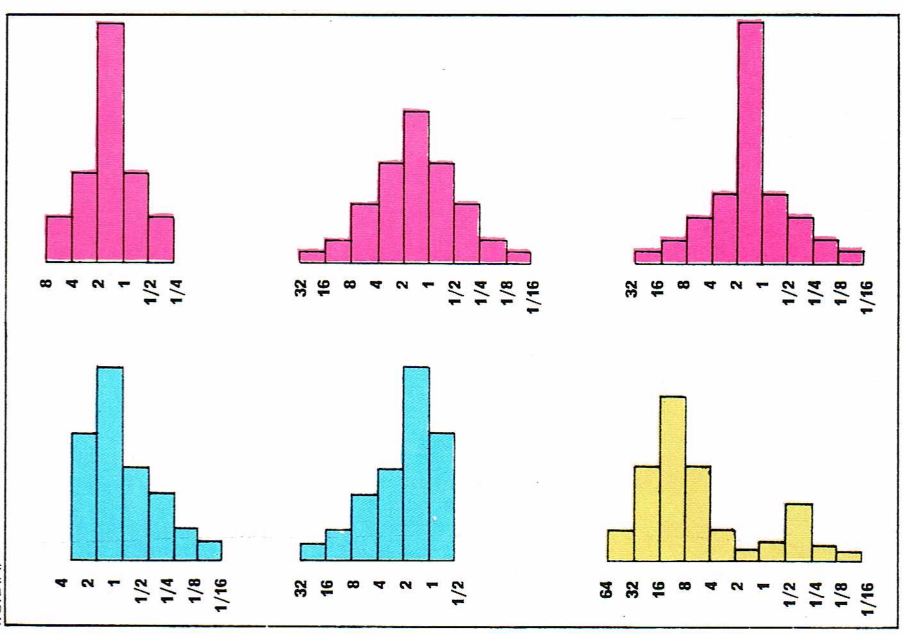

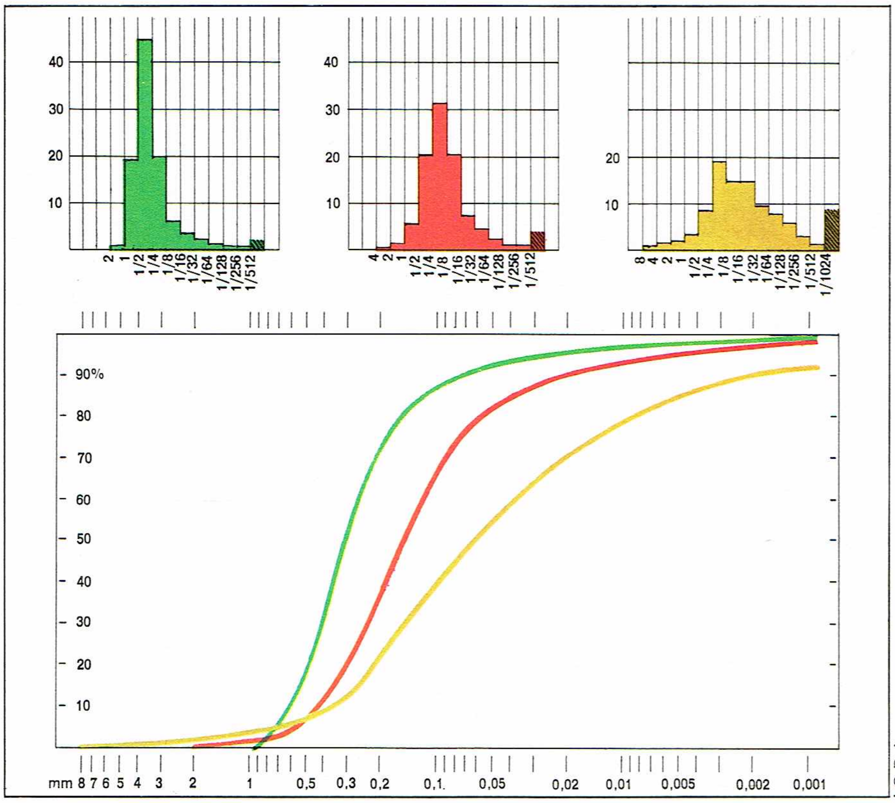

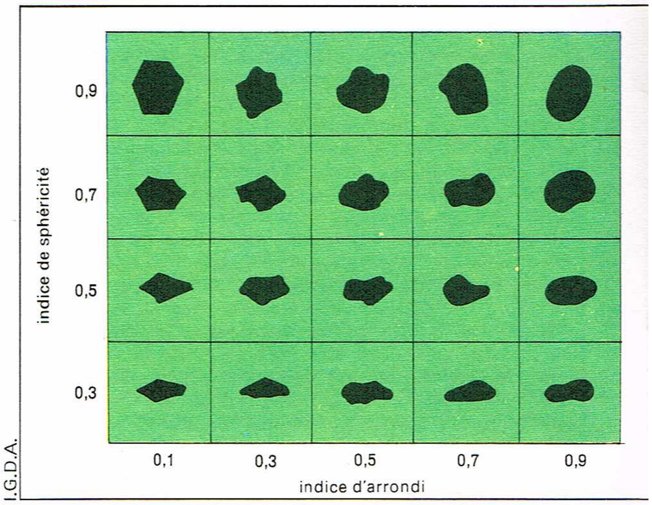

▲ ***A gauche, la* diversité de texture *de trois formations gréseuses est exprimée par la différence de forme des histogrammes et des courbes cumulatives. Le granoclassement est de plus en plus mauvais lorsque l'on va du sédiment vert (60 % des grains entre 0,5 et 0,2 mm) au sédiment ocre (10 % pour les mêmes dimensions) [d'après* Fernandez*].***
A droite, grâce à des cibles comme celle-ci on peut évaluer de manière visuelle les valeurs de la sphéricité et de l'arrondi des fragments détritiques (d'après Krumbein et Sloss).

courants de turbidité caractérisés par l'absence de classement du matériel détritique. Souvent, la présence d'une répartition bimodale dans une formation conglomératique traduit l'infiltration parmi les galets d'un sable déposé au-dessus du conglomérat. Cette distribution est assez rare dans les formations sableuses. Lorsqu'elle existe, elle traduit des phénomènes de contamination ou de mélange dus à deux stocks de matériaux d'origines diverses. La courbe de fréquence montre deux apex distincts uniquement lorsque la différence entre les deux modes est plus importante que les intervalles choisis comme limite entre deux classes granulométriques. Si cela ne se vérifie pas, les deux apex se confondent et la courbe de fréquence montre uniquement une irrégularité ; ce cas est très fréquent dans la nature. Les sédiments fins, comme les limons et les argiles, possèdent souvent une distribution à tendance bimodale, la courbe de fréquence ayant un seul apex. Toutefois, pour des diamètres de particules inférieurs à la vingtaine de microns, on remarque une inclinaison plus faible de la courbe que l'on peut attribuer à une fréquence des particules fines supérieure à celle présentée par l'équation de Gauss. Ce phénomène est dû à une particularité de la sédimentation des argiles, la *floculation*.

Le diamètre des débris clastiques détermine leur comportement au cours du transport et de la sédimentation, mais on ne peut faire abstraction de la forme des fragments, exception faite pour les particules sphériques, comme les oolithes et certains grains de quartz. Généralement, les résultats des analyses granulométriques sont aussi influencés par la forme des fragments. Il est, par exemple, évident qu'à volume égal un galet arrondi et un galet plat ne se comporteront pas de la même façon au cours du transport. De la même façon, des grains de formes très différentes (plats, arrondis, cylindriques) passent dans les mailles d'un même tamis lors d'un tamisage et se comportent de manières diverses au cours du transport. Enfin, les méthodes d'analyse des fractions argileuses admettent comme postulat que la forme des particules est sphérique, ce qui en réalité est presque toujours faux car les particules argileuses montrent le plus souvent un aspect lamellaire.

La **forme,** ou **morphologie,** joue un rôle essentiel dans le comportement des éléments détritiques au cours du transport et du dépôt et peut aussi être considérée comme un caractère essentiel de la texture des roches. Elle peut être exprimée par deux indices : l'indice de sphéricité et l'indice d'arrondi.

L'*indice de sphéricité* se réfère à la forme d'ensemble des fragments détritiques ; il est défini par la racine cubique du rapport entre le volume du fragment et le volume de la sphère circonscrite. La mesure s'effectue en général visuellement à l'aide de tableaux, les valeurs pouvant varier de 1 (grains sphériques) à 0 (grains aciculaires ou lamellaires).

L'*indice d'arrondi* exprime les caractères de la surface des fragments ou le contour des fragments, projeté sur le plan d'appui. Cet indice est défini comme le rapport entre le rayon moyen des cercles inscrits dans les irrégularités du contour du grain et le rayon du plus grand cercle inscrit dans le contour même. Sa mesure s'effectue visuellement avec une cible ; elle varie entre 1 (grains à surface parfaitement lisse) et 0 (grains dont la surface est très accidentée).

Les textures des roches clastiques

Il existe une relation, assez mal précisée, entre les deux indices de forme : en effet, les fragments sphériques sont aussi les fragments les plus émoussés. Les fragments nettement différents de la forme sphérique que l'on rencontre dans les sédiments et dans les roches se disposent parfois en quinconce, ou montrent des orientations préférentielles *(textures orientées)* que le sédiment acquiert au cours de la sédimentation et qui reflètent les propriétés dynamiques du milieu de transport. Les orientations préférentielles des fragments de forme allongée ou de forme aplatie peuvent être exprimées dans un système de coordonnées polaires : on mesure l'azimut et l'inclinaison de la plus grande dimension pour les fragments allongés et de la normale au plan d'aplatissement pour les fragments plats. Les données sont ensuite reportées sur des diagrammes analogues à ceux que l'on utilise dans l'analyse structurale des roches métamorphiques.

L'*imbrication,* ou *texture imbriquée,* est caractéristique des formations graveleuses et des conglomérats ; elle résulte de la disposition des galets qui se recouvrent partiellement les uns les autres. Le plan d'aplatissement des galets forme un angle donné avec le plan de stratification. La texture imbriquée existe dans les dépôts de galets formés en milieu continental fluviatile et en milieu marin néritique ; elle est due à un transport par frottement ; elle est absente dans les dépôts qui se font par transport de masse (éboulements, turbidites, etc.). Cette texture permet de déduire la direction et le sens du courant car les galets plats sont inclinés selon la direction originelle du courant. L'imbrication peut également exister dans des dépôts côtiers, mais elle n'a pas une orientation constante.

Les lamelles ou paillettes de phyllosilicates contenues dans les sédiments argileux tendent à prendre une orientation identique, parallèle aux surfaces de stratification *(texture parallèle)* lorsque la sédimentation s'est faite dans des eaux tranquilles. L'iso-orientation est absente si le matériel argileux a été déposé par des agents de transport turbulents, comme les courants de turbidité, ou bien si le sédiment a été remanié par des organismes benthoniques. Les effets de la diagenèse tardive et un métamorphisme débutant provoquent, toutefois, une recristallisation des minéraux micacés parallèlement aux plans de stratification ; cette texture peut donc être considérée

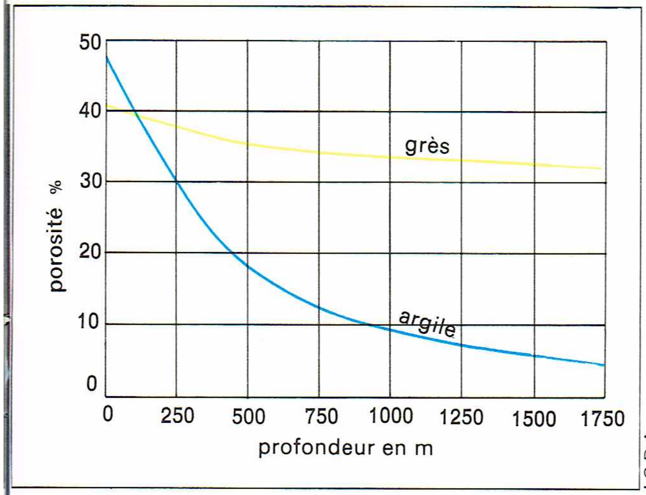

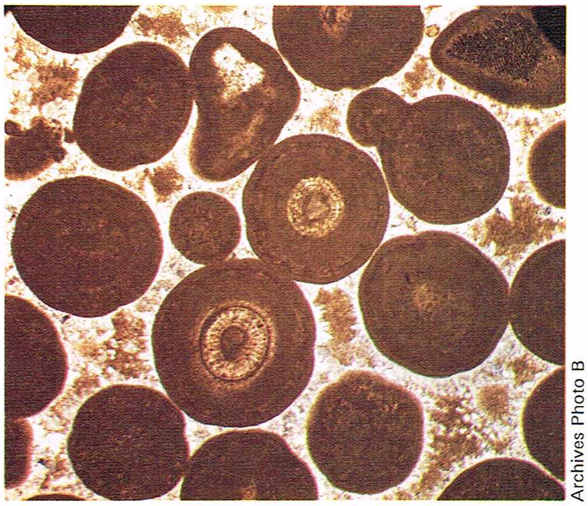

◀ ***A gauche,*** **courbes de variation de la porosité en fonction du tassement** ***pour l'argile et le grès. On observe une assez grande différence. A droite,*** **les oolithes ont** ***un noyau composé de fragments de calcite et une très belle couleur concentrique. La matrice calcaire est recristallisée autour des oolithes en prismes de calcite (lame mince en nicols croisés).***

comme secondaire dans certains cas (par exemple, dans les schistes argileux).

La texture originelle de nombreuses argiles peut engendrer une *texture fluidale* dans laquelle les paillettes se sont déposées selon les lignes de flux du sédiment plastique encore incohérent, soumis à la charge des sédiments sus-jacents.

Les fragments de forme allongée ont tendance à se déposer avec leur plus grand axe parallèle à la direction du courant *(texture linéaire)*. Ce phénomène se vérifie non seulement dans le cas de dépôts marins ou fluviatiles, mais aussi dans le cas des *moraines :* il permet donc de reconstituer le sens du mouvement des glaciers. Cette observation est très importante dans la reconstitution, à partir de moraines fossiles, du sens des déplacements des glaces antérieures au Quaternaire. Dans ces cas, en effet, on ne dispose plus des critères géomorphologiques. La texture linéaire se rencontre aussi dans les sables et dans les grès où elle peut être étudiée en lame mince.

Les textures des roches d'origine organique

Les restes organiques (tests d'animaux essentiellement représentés par des Lamellibranches) peuvent aussi attester des orientations préférentielles provoquées par les courants. Les restes de forme allongée se disposent sur les surfaces de stratification, en direction parallèle ou, plus rarement, en direction perpendiculaire au sens du courant. Par ailleurs, si ces restes possèdent une extrémité plus aiguë que l'autre, comme cela se produit pour certains Gastéropodes spiralés et certains Céphalopodes (turitelles, cérithes, orthocères, bélemnites), elle tend à se placer du côté d'où provient le courant. Les restes allongés des Graptolithes, les radioles des Échinodermes (oursins), les spicules de Spongiaires sont fréquemment orientés de la même façon. Parfois, on a observé, sur des surfaces de stratification, des Échinodermes (ophiures) avec leurs longs bras pliés dans le sens du courant. Les fragments d'origine organique aplatis, comme les valves de Lamellibranches, de Brachiopodes et les plaques d'Échinodermes, peuvent donner lieu à des *textures imbriquées*. Les valves de formes concave et convexe se disposent avec la concavité dirigée indifféremment vers le haut ou vers le bas dans le cas de courants d'énergie moyenne, et uniquement vers le bas dans le cas de courants de forte énergie.

Les textures des roches d'origine chimique

Les *roches sédimentaires d'origine chimique* ont des textures analogues à celles des roches intrusives et de certaines roches métamorphiques, car elles se forment par précipitation de substances à partir d'une solution sursaturée. Cette première étape est suivie par des réactions de type métasomatique entre le matériau cristallisé et les eaux interstitielles. Il s'agit de phénomènes de recristallisation et d'augmentation progressive de la dimension des cristaux au cours de la diagenèse. On rencontre, dans certains dépôts évaporitiques (gypse, anhydrite, sel gemme), des *textures cristallines primaires* qui ne sont pas soumises à une importante recristallisation diagénétique : la forme et les dimensions des cristaux résultent uniquement de leur précipitation. Ces textures montrent parfois un accroissement des dimensions des cristaux de la base vers le sommet de chaque lit de roche et rappellent en quelque sorte les textures de certaines roches intrusives basiques. Le plus souvent, la texture cristalline des roches sédimentaires est le résultat de processus diagénétiques qui débutent à partir d'un dépôt de gel colloïdal ou d'une vase cryptocristalline. Dans le premier cas, commun dans certaines roches siliceuses non détritiques, la *texture est cristalline finement grenue (à grain fin)* et irrégulière, semblable à la structure *pétrosiliceuse* résultant de la dévitrification des verres volcaniques. Dans le second cas, fréquent parmi les roches carbonatées, se produit une augmentation progressive de la dimension des grains : d'une *texture* originelle *cryptocristalline,* on passe à une *texture microcristalline* (diamètre de chaque cristal supérieur à 20 μ), puis *mésocristalline,* et enfin *macrocristalline* dans laquelle la calcite forme des plages monocristallines de diamètre supérieur à 1 mm et pouvant inclure des minéraux détritiques présents dans le sédiment. Dans les périodes initiales ou tardives de la diagenèse, les roches carbonatées peuvent subir la dolomitisation; celle-ci s'accompagne presque toujours de la disparition des structures primaires.

Certaines roches sédimentaires d'origine chimique peuvent présenter des *textures grumeleuses* ou *globulaires,* comme c'est le cas de certains calcaires et des dépôts phosphatés. Les grumeaux sont dépourvus de toute structure interne; ils représentent, selon les cas, soit des agglomérats de vase absorbés et expulsés par des organismes benthoniques qui en ont assimilé les matières organiques, soit des globules dus à l'agglomération de fines particules ou à la recristallisation non homogène de précipités chimiques cryptocristallins.

La *texture oolithique,* caractéristique surtout des formations carbonatées mais que l'on rencontre aussi dans des roches sédimentaires ferrugineuses, se formerait par adhésion de précipités très fins d'origine chimique, sous forme de voiles, autour d'un noyau solide en mouvement. Selon certains auteurs, cette structure ne pourrait se former qu'au cours de la diagenèse. Les caractères structuraux des roches sédimentaires contrôlent deux propriétés essentielles de ces roches : la *porosité* et la *perméabilité*. La *porosité* peut être définie comme le rapport du volume des vides au volume total de la roche ou du sédiment exprimé en %. La porosité est assez élevée dans les sédiments argileux récents, où le volume occupé par l'eau peut atteindre 80 % de la roche. La porosité des sables et des graviers est de l'ordre de 20 à 30 % de la roche; elle décroît, comme pour les argiles, à la suite de phénomènes de tassement et de cimentation jusqu'à des valeurs de l'ordre de 10 % (ou même moins dans le cas des grès). La porosité des calcaires est souvent inférieure aux valeurs que nous venons de signaler, mais elle peut augmenter par suite de processus de dissolution liés à la diagenèse tardive. La *perméabilité* d'une roche peut être considérée comme son aptitude à se laisser traverser par les fluides. Elle dépend donc, en plus de la porosité, de la dimension des pores, de la viscosité des fluides, de la nature des minéraux qui constituent la roche (certains minéraux ont tendance à adsorber les liquides), des textures orientées de certaines roches clastiques et de nombreux autres facteurs.

La quantification et la détermination de l'origine de la porosité et de la perméabilité des roches sédimentaires sont très importantes dans le cadre de la recherche des hydrocarbures et des eaux souterraines.

Les structures des roches sédimentaires

Les processus sédimentaires et diagénétiques aboutissent à la formation de structures que l'on peut observer sur de très grands affleurements, et qui sont caractéristiques des roches sédimentaires. Seules certaines structures de dimensions réduites sont visibles sur des échantillons isolés de roches. En ce qui concerne les roches sédimentaires, nous utiliserons le terme *structure* avec une signification différente de celle qu'on lui attribue dans le cas des roches ignées et métamorphiques. Appliqué aux sédiments, il possède un sens voisin de celui que l'on donne à *texture* dans le cas des roches ignées et métamorphiques. Signalons que les auteurs anglo-saxons, par contre, n'effectuent aucune différence entre les deux termes et les utilisent indifféremment pour les roches ignées, métamorphiques et sédimentaires.

On peut subdiviser les structures sédimentaires en *primaires* (formées pendant la sédimentation) et *secondaires* (formées pendant la diagenèse). Les structures sédimentaires primaires présentent une variété plus grande et surtout un intérêt scientifique plus grand car elles permettent de remonter aux conditions de dépôt des sédiments. Elles sont donc d'une importance fondamentale pour la reconstitution des anciens bassins sédimentaires et de la paléogéographie d'une région donnée. Les structures secondaires peuvent masquer et effacer complètement les structures primaires.

Les structures sédimentaires primaires

La **stratification,** c'est-à-dire la disposition des roches en strates ou couches (corps tabulaires de très grande extension horizontale par rapport à leur épaisseur en extension verticale) est la principale structure sédimentaire primaire. Les strates de sédiments ou de roches sédimentaires ont une extension latérale indéfinie, mais leur épaisseur varie : elle diminue dans une ou plusieurs directions et finit par devenir nulle; ainsi, toutes les strates ont une forme lenticulaire. Il existe toutefois des strates lenticulaires, de conglomérat, par exemple, dont l'extension latérale se limite à quelques mètres, tandis que certaines couches de calcaire ou d'argile peuvent recouvrir des surfaces de plusieurs centaines de kilomètres carrés. La géométrie tridimensionnelle des strates est déterminée par des facteurs du milieu au moment de leur formation : ainsi, les dépôts clastiques qui résultent de l'action de chenaux canalisés, comme les fleuves, se présentent sous forme de rubans allongés dans le sens du courant, leur section transversale étant grossièrement lenticulaire. Les dépôts clastiques, déposés par des courants non canalisés ou par des vagues, et les sédiments d'origine chimique, déposés par sursaturation d'un milieu aqueux, se disposent en strates d'épaisseur relativement constante dans les différentes directions.

▼ L'affleurement de niveaux siliceux de couleur verte et brun rougeâtre montre, sur des bancs fortement inclinés, des figures de sédimentation préexistantes à la diagenèse.

D. Fernandez

Par ailleurs, de nombreuses strates sont formées par des sédiments ou des roches dont la composition varie latéralement, et cela jusqu'à constituer un dépôt totalement différent aux deux extrémités de la strate. Ce phénomène est déterminé par la diversité des conditions physico-chimiques qui peuvent exister au sein du même bassin sédimentaire. La stratification des roches sédimentaires est partiellement mise en évidence par l'altération météorique et l'érosion différentielle sur une série de roches stratifiées de nature différente; certaines strates, plus résistantes à un type déterminé d'altération, restent en relief tandis que d'autres couches sont érodées beaucoup plus facilement.

Ainsi, la stratification qui, habituellement, est déterminée par les différences de composition minéralogique des roches et des sédiments dont elles dérivent, devient évidente et reflète la succession chronologique des conditions de genèse du milieu de sédimentation. Nous pouvons donc définir le terme de *strate* comme l'épaisseur de sédiments déposés dans des conditions de sédimentation constantes. L'alternance de couches ou strates de grès et d'argiles est généralement déterminée par une succession de périodes d'agitation (courants turbulents ou vagues) et de calme du milieu sédimentaire (marin, lacustre, etc.) : ainsi le sable est maintenu en suspension dans un milieu sédimentaire tant que la vitesse du courant aqueux reste supérieure à une valeur limite (seuil) au-dessous de laquelle il se sédimente, tandis que l'argile est encore transportée en suspension. Dans le cas des roches sédimentaires d'origine chimique, se rencontrent des alternances de roches évaporitiques de nature différente (anhydrite, sel gemme, gypse, etc.) qui reflètent une saturation successive des eaux du bassin par rapport aux différents sels dissous.

La stratification n'est pas toujours déterminée par la superposition de matériaux de nature minéralogique différente; elle peut également l'être par la superposition de dépôts identiques sous forme de différentes strates déposées à des moments différents. C'est le cas, par exemple, de strates de grès directement superposées et séparées par des surfaces planes, ou *surfaces de stratification,* caractérisées par de petites différences minéralogiques, telle une plus grande abondance des minéraux micacés. Les surfaces de stratification marquent simplement un arrêt de la sédimentation au toit de la strate; ou bien, elles peuvent représenter des surfaces d'érosion résultant de l'ablation d'une partie du sédiment déposé par un courant très énergique, suivies par un nouveau dépôt de sable lorsque l'énergie du cours d'eau diminue. Le cas des strates calcaires déposées les unes sur les autres sans interposition de couches de nature différente est très fréquent. Les surfaces de stratification qui séparent les strates résultent de l'interruption plus ou moins longue de la sédimentation. On connaît aussi des surfaces de stratification interne qui séparent les différentes couches constituant la strate.

Les roches sédimentaires sont caractérisées par le fait qu'elles se débitent en feuillets ou dalles qui sont parallèles aux surfaces de stratification. Lors d'un arrêt de sédimentation de longue durée, le sommet de la couche est recouvert par une patine d'oxydes de fer, souvent accompagnés par des phosphates, de la silice, des oxydes de manganèse (hard ground). Les hard grounds sont fréquents dans les roches calcaires formées en milieu marin; ils prennent naissance à la suite d'un arrêt de sédimentation provoqué par une période d'agitation prolongée, due, vraisemblablement, à l'existence de courants sous-marins. Certains hard grounds montrent de nombreuses perforations remplies par les sédiments sus-jacents qui résultent de l'action d'organismes fouisseurs benthoniques (Vers, etc.).

L'ensemble des caractères du milieu pendant le dépôt d'une strate de sédiment varie entre des limites bien définies. Il en résulte que la structure interne d'une strate n'est pas toujours uniforme : elle montre des variations rythmiques. Ce type de structure peut être appelé **stratification interne,** ou **litage;** chaque *lit,* ou *microcouche,* correspond à l'épaisseur du sédiment qui s'est déposé pendant une oscillation des conditions du milieu. Les

lits, toujours parallèles au sein de la même strate, peuvent aussi être parallèles à la base et au sommet de la strate (stratification, ou litage, parallèle) ou bien former entre eux un certain angle, notamment dans les dépôts clastiques (stratification inclinée). Par exemple, les strates de grès sont souvent formées par plusieurs couches superposées qui se différencient par le diamètre de leurs grains et aussi par leur composition minéralogique : cela dépend des variations rythmiques de la vitesse du courant et donc du diamètre et de la densité des éléments détritiques entraînés. De manière analogue, certains dépôts organogènes, comme les diatomites, peuvent se présenter avec des lits par suite de la variation dans le temps du rapport quantitatif entre les restes d'organismes et le sédiment inorganique. Dans les dépôts chimiques, le litage résulte souvent des variations physico-chimiques du milieu sédimentaire.

Certains auteurs ont proposé de réserver le terme de *strate* aux niveaux d'épaisseur supérieure à 1 centimètre, et le terme de lit aux niveaux d'épaisseur inférieure. L'épaisseur des strates peut varier latéralement; de plus, il est important de laisser aux deux termes leur valeur génétique. Par exemple, les sédiments varvés, ou *varves,* sont constitués par des alternances de petites couches de sables et d'argile, d'épaisseur souvent inférieure au centimètre, déposées dans les lacs d'origine glaciaire. Les sables se forment l'été, pendant la période de fonte des glaces, et les argiles pendant la période hivernale, lorsque les eaux sont tranquilles. Malgré leur épaisseur réduite, il s'agit de strates en raison des caractères génétiques que nous venons de décrire; dans les niveaux sableux, on peut distinguer, au microscope, de fins *litages* dus aux fluctuations de la vitesse du courant. Toutes les roches sédimentaires sont caractérisées par la disposition en couches superposées, ou strates, à l'exception des dépôts morainiques qui résultent de l'action érosive des glaciers. Toutefois, même dans les moraines, on peut distinguer des textures différenciées et des compositions variables en fonction de l'avancement progressif du glacier, et selon que l'on prend en considération des moraines de fond ou bien des moraines superficielles. Les roches pyroclastiques sont, aussi, fréquemment stratifiées; cela tient au fait que leur mode de dépôt est comparable à celui des roches sédimentaires. Cette structure stratifiée se retrouve aussi dans certaines roches fémiques intrusives, par suite de la grande fluidité des magmas qui s'épanchent sous forme de coulées caractérisées par le fait que tous les minéraux allongés s'orientent de la même façon, mimant ainsi des plans de stratification.

Les couches ou strates peuvent montrer, en plus de la stratification horizontale, deux autres types de structures primaires internes que l'on appelle *stratification granoclassée* et *stratification inclinée,* ou *entrecroisée.* Ces structures sont caractéristiques de certaines roches détritiques, calcaires détritiques compris.

La **stratification granoclassée** peut exister également dans certaines roches évaporitiques, comme le gypse et l'anhydrite, ainsi que dans des roches intrusives. Le *granoclassement* se traduit par une diminution progressive des éléments détritiques du bas vers le haut de la strate. Beaucoup plus rarement, on observe un granoclassement inverse, c'est-à-dire une augmentation de la taille des éléments détritiques du bas vers le haut de la couche. La structure granoclassée normale résulte de la diminution progressive de la vitesse du cours d'eau, donc d'un abaissement progressif de sa compétence; cela est aussi valable pour les courants aériens. En conséquence, les éléments détritiques les plus gros se déposent d'abord, puis, au fur et à mesure que l'énergie du milieu de transport décroît, viennent ceux de plus faibles dimensions. D'éventuelles fluctuations de la vitesse du courant provoquent l'apparition de lits au sein de la couche. La structure granoclassée (*graded bedding,* ou *grading,* des auteurs anglo-saxons) est caractéristique des turbidites; elle s'y traduit par un très mauvais classement des éléments détritiques car le dépôt contient des éléments fins à tous les niveaux de la strate. Dans les dépôts clastiques des cours d'eau, le classement est généralement meilleur, les éléments détritiques fins étant peu représentés ou absents dans les niveaux inférieurs de la couche. Le granoclassement inverse est rare dans les roches clastiques, où il résulte d'une augmentation progressive de l'énergie du courant, qui, toutefois, n'érode pas les sédiments déposés

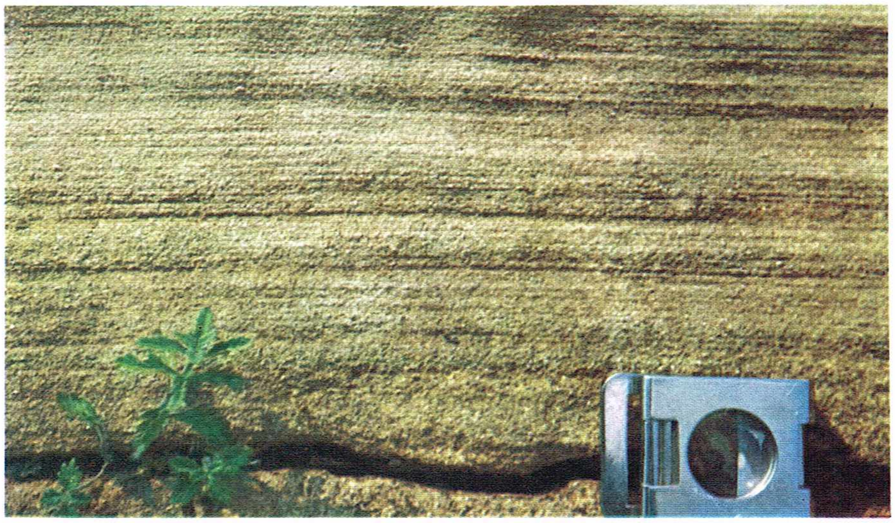

D. Fernandez

▲ *Dans ce banc gréseux, on peut voir la* structure granoclassée *(diminution progressive du diamètre des grains) et la* disposition en lits *(alternance de niveaux de composition granulométrique légèrement différente) mise en évidence par l'altération météorique différentielle.*

▼ *Différents types de* structure granoclassée *sont représentés graphiquement dans cette coupe d'une turbidite du Crétacé supérieur. En rose, les zones avec un graded bedding très net, en jaune des niveaux gréseux bien classés, en bleu des argiles, en vert des niveaux calcaires. A droite, en bas, on observe un pseudofilon couche gréseux avec une terminaison en biseau. A droite, en haut, divers chenaux d'érosion superposés avec à leur base des fragments argileux (d'après Fernandez).*

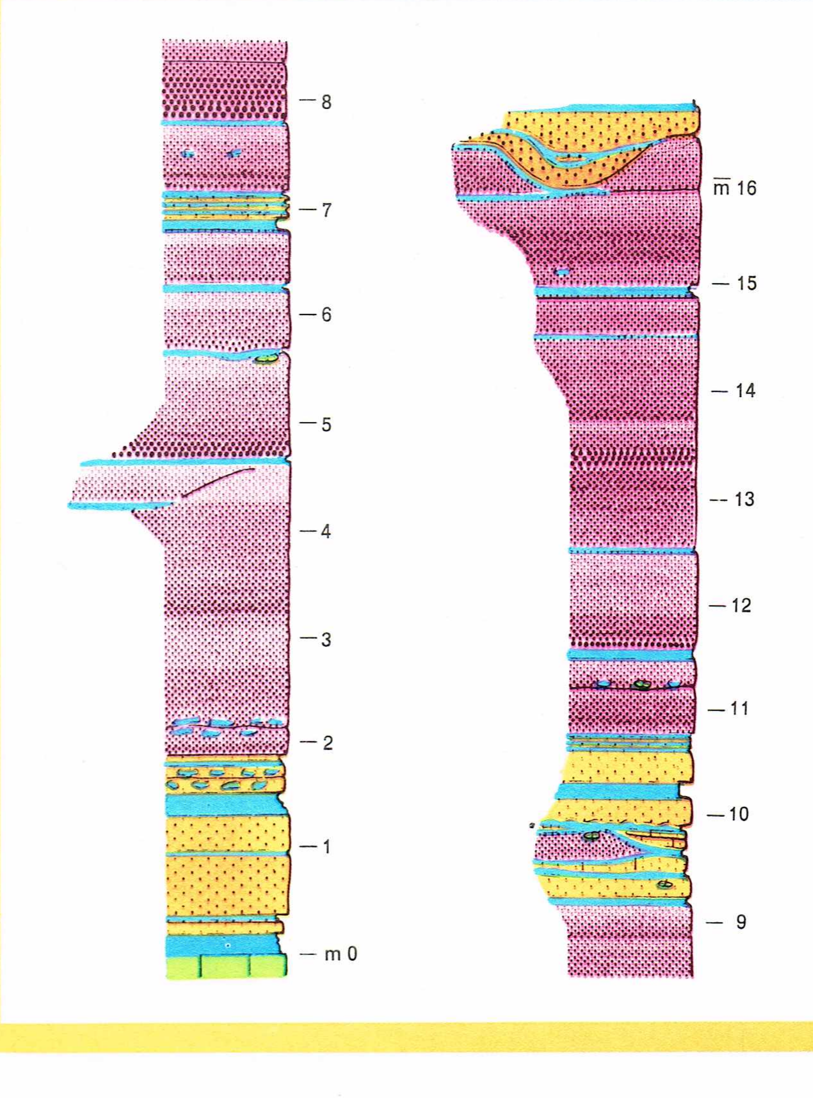

I.G.D.A.

▶ ***Grès à* stratification *oblique près de la cité de Petra (Jordanie).***

S. Prato

précédemment. Il existe dans les roches évaporitiques, où il a cependant une origine indépendante du transport.

La **stratification entrecroisée** est déterminée par la présence de lits disposés de façon non parallèle aux surfaces inférieures et supérieures de la strate, et faisant avec la direction de ces dernières un angle d'environ 30°. Le terme de stratification inclinée doit être remplacé par stratification entrecroisée ; en effet, la couche de sédiments clastiques formée pendant un intervalle de temps durant lequel le courant avait une énergie et une direction constantes est délimitée par des surfaces originellement horizontales, tandis que les lits qui constituent la couche se sont formés grâce à de petites variations d'énergie du courant et se sont déposés suivant des surfaces inclinées. Chaque lit se distingue de ses voisins par de légères variations de la composition minéralogique et granulométrique ; souvent, les grains montrent des dimensions légèrement plus importantes près des surfaces inférieures des lits et les surfaces supérieures sont enrichies en lamelles micacées. Par ailleurs, les grains de dimensions plus élevées se concentrent dans les parties des lits les plus proches de la surface inférieure de la couche avec laquelle les lits se raccordent de manière très progressive, tandis qu'ils font un angle beaucoup plus net avec le sommet de la couche ; ils présentent donc un profil légèrement concave vers le haut. L'origine de la stratification entrecroisée doit être attribuée à un transport de matériel sableux sur un fond recouvert par des ondulations normales à la direction du courant, comme des boues sableuses, des dunes, etc. Certains auteurs pensaient pouvoir distinguer la stratification entrecroisée due aux courants d'eau de celle obtenue par les courants aériens. En effet, dans le premier cas les couches seraient délimitées par des surfaces planes, tandis que dans le second elles montreraient des profils lenticulaires. Actuellement, cette différence peut être observée très facilement par l'étude des figures de transport et de dissolution chimique sur les surfaces des grains de quartz, notamment par l'étude au microscope électronique à balayage.

Les stratifications entrecroisées présentent des dimensions très variables. Habituellement, elles ne dépassent pas quelques dizaines de décimètres, mais elles sont parfois limitées à quelques centimètres. Dans des conditions tout à fait exceptionnelles, leur envergure peut dépasser la dizaine de mètres. C'est le cas, par exemple, de certains grès éoliens, comme les dunes fossiles d'âge jurassique du Zion National Park dans l'Utah (États-Unis) ainsi que de certains deltas de petites dimensions.

La stratification entrecroisée est une structure sédimentaire très utilisée dans les reconstitutions paléogéographiques car elle permet de retrouver le sens des courants qui ont transporté et déposé les sédiments. Pour cette raison, on effectue des relevés très précis de la direction géographique dans laquelle est orientée la ligne de plus grande pente des lits : elle correspond à la direction du courant qui a transporté les éléments détritiques sableux. La moyenne des valeurs mesurées sur un affleurement indique la direction moyenne des courants dans une localité pendant un intervalle de temps limité. A une échelle régionale, il est possible d'individualiser la direction dominante des courants à une époque donnée. Ces études paléogéographiques ont été conduites surtout dans le cas de sédiments déposés en milieux aqueux marin ou fluviatile, mais aussi dans le cas de sédiments éoliens. On a pu ainsi individualiser la direction prédominante des vents, même au cours d'époques géologiques anciennes.

Autres structures primaires.

● Un autre groupe de structures sédimentaires primaires réunit des caractéristiques observables non plus à l'intérieur des strates, mais sur les surfaces de stratification qui les délimitent. Ces structures résultent également des différentes formes d'énergie dynamique du milieu sédimentaire (courants, vagues, etc.) ; elles permettent donc de déterminer la direction moyenne des paléocourants et surtout la polarité de la couche. Il est toutefois nécessaire de bien garder à l'esprit que les strates se sont déposées horizontalement mais qu'elles peuvent avoir subi des plissements à la suite de mouve-

ments tectoniques postérieurs à leur genèse. Les surfaces supérieures des couches de grès montrent parfois des séries d'ondulations, ou rides, à peu près parallèles et équidistantes; cette structure peut également être rencontrée, exceptionnellement, dans les formations grossières (conglomérats) et dans les sédiments très fins (argiles).

Les rides résultant de l'action de courants marins se distinguent par leur profil de celles dues à l'action des vagues : les premières ont un profil asymétrique avec un flanc plus incliné que l'autre (ripple marks), alors que les secondes possèdent un profil symétrique. On peut mesurer la distance entre deux crêtes d'ondulations successives (longueur d'onde) et leur relief (amplitude); le rapport entre ces deux longueurs serait, selon certains auteurs, caractéristique et permettrait de distinguer les rides résultant de l'action des eaux de celles produites par l'action des vents. Les premières seraient caractérisées par un indice plus faible (donc par un relief plus marqué). Les rides dues aux courants, appelées aussi *ripple marks*, ne sont pas caractéristiques d'un milieu donné : elles ont été observées dans des milieux continentaux aussi bien que marins, et dans ces derniers à des profondeurs variant entre quelques décimètres et plusieurs milliers de mètres (fonds abyssaux). Les ripple marks sont importantes car elles permettent de reconstituer la direction du courant qui les a engendrées. Ce courant est généralement perpendiculaire à l'allongement des crêtes, son sens étant dirigé suivant une direction qui va du flanc à pente faible vers celui à pente raide. Les rides montrent généralement des dimensions relativement réduites, avec une longueur d'onde de quelques centimètres et une amplitude d'environ 1 ou 2 cm. Très rarement, la longueur d'onde de rides gigantesques atteint 1 m; dans ce cas, on peut aisément observer que la structure interne de la couche sableuse montre un *litage incliné* (stratification entrecroisée).

D'après ce que nous venons d'exposer, il est évident que les rides de courant et le litage incliné sont des structures étroitement liées résultant d'un même mécanisme de transport du matériel détritique. Les rides, en effet, représenteraient la structure superficielle d'un dépôt sableux à *litage incliné*. Parfois, on peut observer des couches de grès formées par des rides avec une structure interne à lits inclinés qui se superposent les uns aux autres en conservant leur profil asymétrique et marquent une migration progressive du sédiment. Le sens du courant est marqué par le déplacement des crêtes de chaque ride.

Si la quantité de sable déplacé n'est pas suffisante pour former une couche continue, des *rides discontinues* se forment, c'est-à-dire que les crêtes sableuses sont séparées et s'appuient, généralement, sur une couche argileuse. Les rides des surfaces de stratification sont conservées dans les roches sédimentaires seulement lorsqu'elles n'ont pas été érodées peu de temps après leur formation, notamment lorsqu'elles sont rapidement recouvertes par une couche d'argile. Les *ripple marks* symétriques constituent un premier indice de reconnaissance du milieu de sédimentation car elles se forment uniquement le long de la ligne de côte des bassins marins et lacustres, jusqu'à des profondeurs assez limitées qui ne dépassent pas quelques mètres. Toutefois, ce sont des structures rares dans les roches sédimentaires car elles sont très rapidement érodées.

Les *rides rhomboïdales* sont également rares. Il s'agit de structures des surfaces de stratification, constituées par une juxtaposition régulière de fossettes en forme de losanges, qui résultent de la superposition de deux systèmes de ripple marks formés successivement par des courants de directions différentes.

● D'autres structures sédimentaires affectent uniquement les surfaces de stratification; elles résultent généralement d'une érosion partielle d'un sédiment déjà déposé par les courants d'eau. L'érosion donne naissance à une surface accidentée qui est, par la suite, fossilisée; les empreintes produites par le courant aqueux sur le substratum, généralement argileux, sont ensuite comblées par un dépôt sableux. Après lithification, ces structures apparaissent comme des moulages en relief sur la base des niveaux sableux; toutefois, originellement, ces figures étaient des dépressions de la surface supérieure des niveaux argileux sous-jacents.

D. Fernandez

D. Fernandez

▲ *En haut,* **stratification entrecroisée** *dans des conglomérats superposés à des argiles. On constate la présence d'un bloc énorme dans la partie supérieure de cette formation de l'Oligocène.*
Ci-dessus, grès calcaires montrant une **stratification entrecroisée** *caractéristique. En section on peut reconnaître la structure interne des ondulations sableuses formées au moment du dépôt sur le fond de la mer (Crétacé supérieur).*
▼ **Un chenal d'érosion** *dans des sédiments argilo-sableux du Crétacé supérieur a été rempli par un sable grossier calcaro-quartzeux bien classé et fortement cimenté. L'érosion l'a mis en relief.*

D. Fernandez

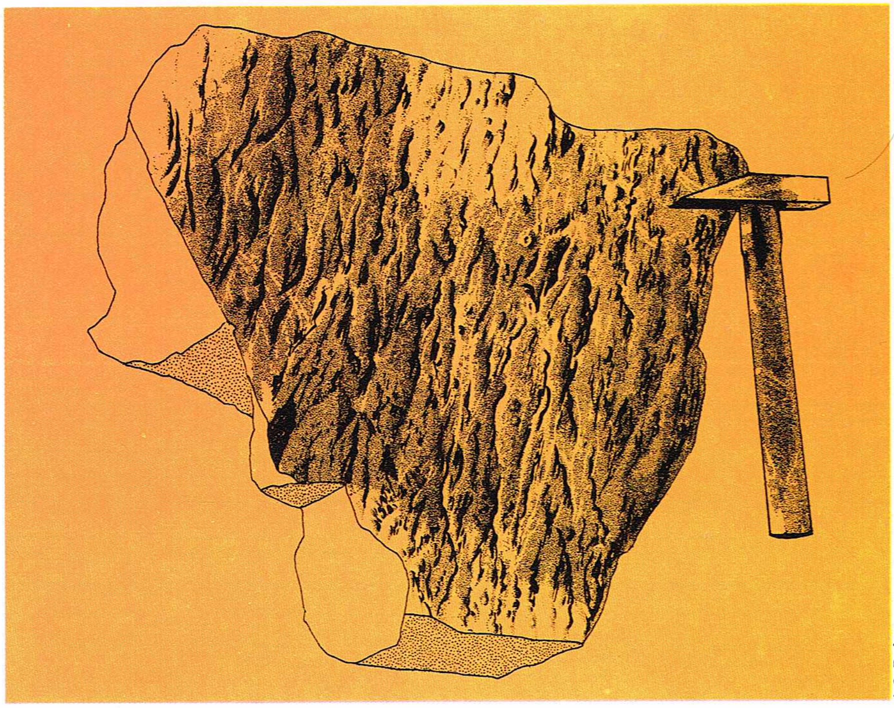

I.G.D.A.

D. Fernandez

▲▶ ***En haut,* moulage de chenaux hydrodynamiques provoqués par des courants sur un fond vaseux de la mer au Crétacé, et conservés sur la base d'une couche de sable calcaire (transformé en grès par diagenèse). *Ci-dessus,* couches de calcaire (foncées) et de dolomie (claires) déformées et plissées au cours de glissements sous-marins lorsque les sédiments étaient encore meubles. *Ci-contre,* empreintes de charge à la base de trois couches superposées de grès posées sur une couche d'argile. La profondeur des empreintes augmente avec l'épaisseur et la granulométrie des couches (d'après Kuenen).**

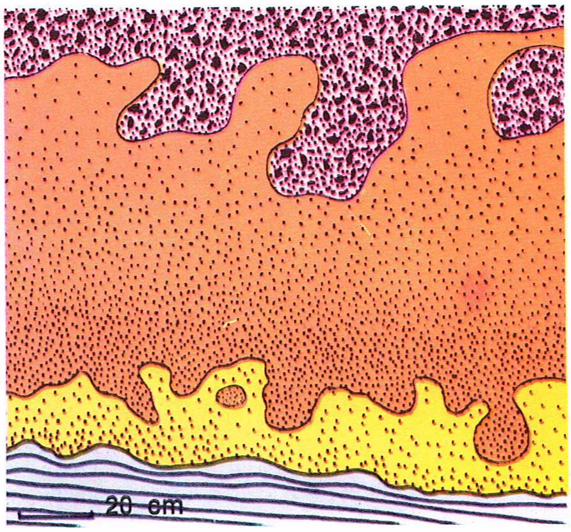

I.G.D.A.

Les *cordons littoraux,* que l'on appelle aussi *bancs* en français (*off shorebars* en anglais), résultent du dépôt d'éléments détritiques plus grossiers que les sables, qui se disposent en alignements parallèles entre eux et au sens du courant ayant transporté le sédiment. Ces structures ne sont pas en creux mais en relief; elles sont bien visibles dans les structures internes des sédiments. Elles résultent de l'action de courants caractérisés par une vitesse élevée, lorsque le transport du sable s'effectue par traction sur un fond plat et non par roulement et saltation sur un fond recouvert par des rides sableuses. Dans de telles conditions, les grains plus grossiers se déposent suivant des alignements, ou bien les grains plus fins sont emportés à la suite des fluctuations de vitesse du courant.

Les empreintes qui résultent de l'*action des courants sous-marins* peuvent être divisées en deux groupes : celles qui proviennent des mouvements tourbillonnaires de l'eau et celles qui résultent du déplacement d'objets solides entraînés par l'eau.

— Les mouvements tourbillonnaires d'un courant aqueux ou aérien prennent naissance par suite du frottement du milieu en mouvement contre un fond solide et immobile. Leur pouvoir érosif est augmenté par la présence de matériel détritique grossier transporté par entraînement sur le fond, mais il est diminué par la charge totale des sédiments transportés en suspension. De ce fait, certaines turbidites n'érodent pas ou érodent peu les fonds vaseux sur lesquels elles se déplacent. L'action érosive des filets aqueux provoque la formation sur le fond argileux de petits sillons allongés dans le sens du courant, de quelques décimètres de long et de 2 ou 3 cm de profondeur. Les sillons hydrodynamiques sont caractérisés par une extrémité bien marquée du côté d'où vient le courant et par une extrémité beaucoup plus estompée du côté où il se dirige. L'extrémité amont est fortement érodée par les filets liquides et présente parfois un décrochement en forme de virgule. Tous les sillons se disposent de manière subparallèle les uns par rapport aux autres; on rencontre quelquefois deux séries de sillons de direction différente. Les courants aqueux peuvent s'écouler sur des surfaces très vastes, aussi bien en milieu marin que continental (alluvions fluviatiles), ou bien être canalisés, c'est-à-dire concentrés dans des chenaux de dimensions réduites, comme le chenal d'étiage des fleuves. Cela est vrai également dans les milieux marins ou de transition, lorsque la vitesse de la masse d'eau en mouvement est très élevée suivant des directions bien définies, comme c'est le cas des courants de marée, ou des courants de turbidité. Dans les cas signalés ci-dessus, l'érosion est accentuée à proximité des lignes de plus grande vitesse du courant et la couche sous-jacente de sédiments est partiellement ou totalement érodée le long de ces chenaux, qui ont une section transversale de un à plusieurs mètres. Ensuite, ils sont remplis par les sédiments grossiers transportés par le courant. La surface inférieure des couches sableuses ou conglomératiques présente un profil nettement concave vers le haut; cette poche concave est généralement remplie par du matériel détritique grossier comprenant, souvent, des fragments provenant de la couche sous-jacente.

— L'autre groupe de structures sédimentaires que l'on rencontre sur les surfaces de sédimentation réunit les empreintes résultant de l'action des objets solides entraînés sur le fond argileux. Les sillons, ou marques de frottement, sont des dépressions de 1 ou 2 cm de large et de quelques mètres de long qui traduisent le frottement sur le fond argileux mou d'objets solides, comme les galets, les débris de coquilles, etc. Ces marques sont orientées parallèlement aux sillons d'origine hydrodynamique. On retrouve parfois, en fin de sillon, l'objet qui a marqué le fond et qui a fini par se planter dans celui-ci. Les empreintes de *rebondissement* ont une origine analogue, mais elles sont dues à des objets transportés par saltation. Chaque rebond dans la vase est marqué par une empreinte ou dépression dissymétrique très voisine de celles laissées par les sillons hydrodynamiques, mais généralement de dimensions plus petites et d'orientation différente. L'extrémité plus marquée indique le sens du mouvement de l'objet et, par là-même, celui du courant. Les vertèbres de Poissons donnent des empreintes de rebondissement très particulières, de forme presque circulaire, se succédant le long d'une ligne.

De nombreux facteurs indépendants de l'action des courants provoquent la formation de figures sur les surfaces de sédimentation. Les croissants de plage (*beach cups* des auteurs anglo-saxons) sont des festons de plusieurs mètres d'amplitude que l'on rencontre sur les grandes plages actuelles et qui marquent les limites de déferlement des vagues. Ils se présentent sous forme d'une série de lignes incurvées, anastomosées, avec leur concavité dirigée vers la mer, en relief par rapport aux surfaces de stratification ; ils sont formés par des grains sableux plus grossiers et par des débris divers (Algues, coquilles, etc.). Ces structures sont rarement conservées dans les séries sédimentaires.

Les *empreintes de ruissellement*, représentées par de petits sillons ramifiés et confluents engendrés par l'eau qui sort du sable et retourne à la mer, sont très caractéristiques des zones littorales. On rencontre parfois, sur les surfaces de stratification des roches clastiques à grain fin, des petites dépressions circulaires que l'on interprète comme des empreintes de gouttes de pluie ou bien de grêlons. La présence de ces empreintes dans des roches sédimentaires traduit l'origine continentale subaérienne du milieu ; toutefois, des empreintes semblables se forment en milieu littoral par libération, sous forme de bulles, de l'air contenu dans les pores entre les grains de sable, lors de la remontée de la nappe aquifère (par exemple, pendant la marée montante).

● Un important groupe de structures sédimentaires réunit les modifications des structures primaires intervenant immédiatement après la sédimentation mais avant le commencement du processus diagénétique. A ce stade, les sédiments sont encore incohérents et plastiques. Parmi ces empreintes, signalons les *figures de charge*, qui sont des inflexions vers le bas des surfaces inférieures de stratification des couches sableuses. Elles résultent du dépôt rapide du sédiment sur un substratum constitué par une argile assez plastique car très riche en eau interstitielle.

Les *glissements par gravité* aboutissent à des déformations très importantes. Ces glissements peuvent intéresser une couche ou un ensemble de couches de sédiments de nature clastique ou chimique, déposés depuis peu sur un fond incliné, aussi bien en milieu marin qu'en milieu lacustre. Le mouvement des sédiments, imbibés d'eau et encore plastiques, provoque la formation de plis couchés ou renversés dans les surfaces de stratification. Par exemple, le glissement par gravité de niveaux sableux à stratification entrecroisée peut provoquer le renversement de la partie supérieure des lits et renverser ainsi le sens originel du courant. Dans le cas de couches sableuses interstratifiées dans des niveaux argileux, les glissements gravitatifs intéressent uniquement les niveaux sableux, les niveaux argileux conservant leur structure originelle. Si le glissement intéresse plus d'une strate, il se forme un amas chaotique, ou pseudobrèche, dans lequel on rencontre des fragments de toutes les dimensions, généralement de nature calcaire, immergés dans un ciment argileux. Ces dépôts sont assez semblables par leur aspect aux dépôts conglomératiques déposés par les courants de turbidité. Toutefois, ils se mettent en place de manière différente car le matériel se déplace lentement, comme une masse hétérogène de viscosité très élevée. Ces dépôts, qui peuvent dépasser aisément une douzaine de mètres d'épaisseur et couvrir de vastes surfaces, sont désignés par le terme d'*olistostromes* ; les blocs de plus grandes dimensions sont appelés *olistolithes*.

La mobilité des sédiments sableux encore gorgés d'eau peut donner naissance à des conditions de gisement assez analogues à celles des filons et des filons couches des roches ignées. Les masses sableuses peuvent s'introduire dans des fentes ou fractures discordantes avec la stratification ou bien le long de surfaces de stratification. Ce phénomène est fréquent dans les séries argilo-sableuses, comme le flysch, qui se sédimentent très rapidement.

● Une autre catégorie de structures sédimentaires réunit les figures résultant de la dessiccation des surfaces de sédimentation de sédiments fins, argileux ou calcaires, déposés en milieu aqueux, puis placés en milieu aérien. Ces structures s'observent dans les milieux sédimentaires continentaux (fluviatiles, lacustres, désertiques) ou dans des milieux de transition (lagunaires, lagons, etc.). La perte d'eau interstitielle provoque une diminution de volume du sédiment qui se traduit par la fissuration de la croûte superficielle selon un réseau polygonal. Les *fentes de dessiccation* ou de retrait sont ensuite remplies par du sable apporté par la crue successive ou bien par le vent. Si la couche d'argile qui donne naissance au sol polygonal est très mince, elle se fragmente en de nombreux morceaux de forme polyédrique qui sont rapidement érodés ou transportés et peuvent donner naissance à un conglomérat intraformationnel.

● De nombreuses structures des roches sédimentaires résultent de l'activité des organismes qui vivent dans le sédiment ou sur sa surface.

Les *pistes* des organismes benthiques, souvent dépourvus de squelettes (Annélides, holothuries, etc.), sont des figures limitées à la surface du sédiment, alors que les galeries creusées par les Vers ou par certains Mollusques intéressent l'ensemble de la couche. Les pistes sont des petits sillons dus au déplacement de l'animal sur le fond ; par exemple, certains flyschs sont caractérisés par des traces en zigzag (flysch à Helminthoïdes). Les formes des pistes sont très variées et caractéristiques des espèces animales qui les ont produites.

Les *galeries* montrent une section circulaire dont le diamètre mesure environ 1 cm ; elles résultent de l'action d'organismes fouisseurs qui se déplacent à l'intérieur du sédiment frais, soit pour s'y réfugier (galeries d'habitation), soit pour chercher de la nourriture. De nombreux organismes marins se nourrissent en avalant les sédiments incohérents qu'ils rejettent après en avoir extrait la substance organique. Cette action peut provoquer un remaniement très important du sédiment qui s'accompagne de la disparition de la structure originelle.

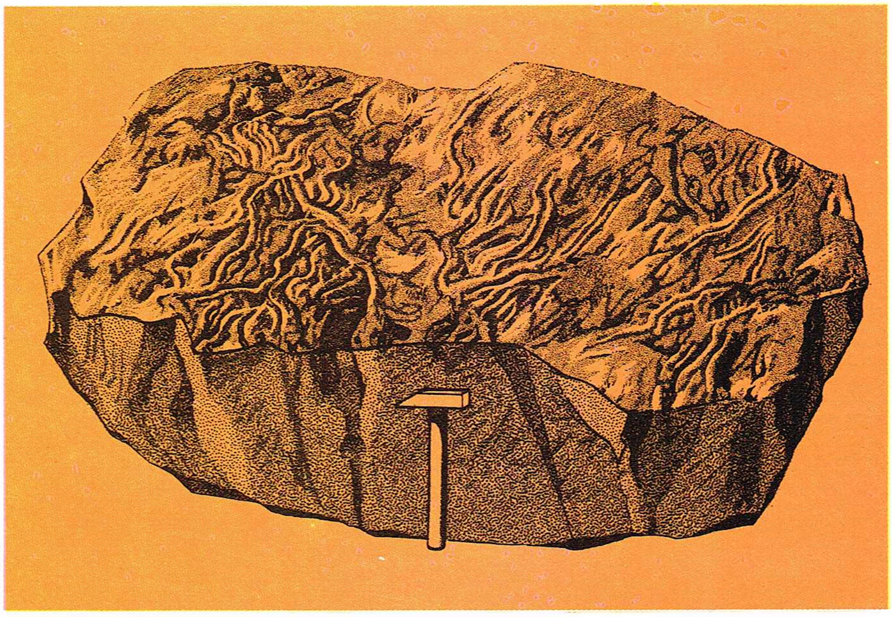

I.G.D.A.

▲ **Pistes d'organismes benthoniques,** ***formées par frottement sur le fond marin argileux et conservées en moulage sur la base du dépôt sableux qui les a recouvertes et a été, par la suite, induré.***

Parfois, le sédiment est agglutiné et expulsé par les organismes sous forme de petits tortillons (fragments dans les roches calcaires) auxquels on donne le nom de *coprolithes*.

D'autres organismes peuvent donner naissance à des structures sédimentaires particulières mais à la suite de processus de type biochimique (organismes constructeurs). Certaines colonies d'Algues peuvent provoquer la précipitation de carbonates de calcium à partir de l'eau de mer au cours de la photosynthèse, c'est-à-dire lors de l'absorption de l'anhydride carbonique dissous dans l'eau. Le carbonate de calcium, qui se dépose sous forme de couches régulières sur les colonies d'Algues, peut donner naissance à des couches de calcaire caractérisées par une structure laminaire ondulée ou concentrique. Ces structures, que l'on appelle aussi des *stromatolithes*, sont très fréquentes dans les colonies du Précambrien terminal et du Cambrien inférieur. La structure appelée *Eozoon canadensis* est formée par une alternance de petits niveaux calcaires et serpentineux assez analogue à celle des stromatolithes. Elle se situe dans des roches métamorphiques d'âge précambrien, qui, selon certains chercheurs, sont les plus anciens témoignages de la vie sur la Terre.

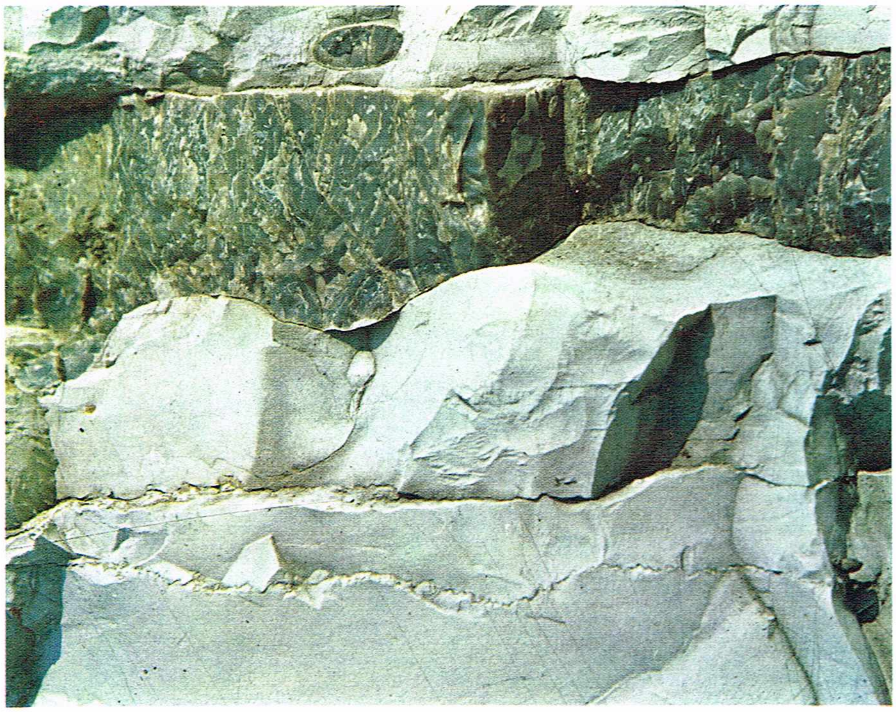

D. Fernandez

Photo Haas

▲ *A gauche,* **banc et nodules de silex gris** *dans un calcaire lithographique (Jurassique supérieur, Crétacé inférieur). On peut observer des points stylolitiques (lignes persillées) dans le calcaire.*
A droite, une **« poupée »**, *caractéristique du lœss ; il s'agit d'une concrétion carbonatée de petite taille que l'on trouve dans certaines couches décalcifiées.*
▼ **Nodule de silex** *jaunâtre (avec la zone externe calcaire et pulvérulente) dans un calcaire. On peut observer la surface stylolitique sur laquelle s'appuie le nodule.*

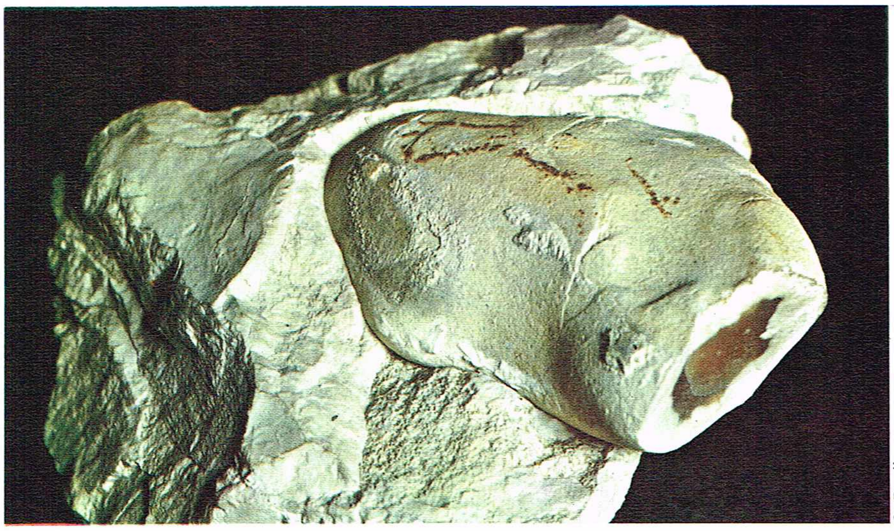

C. Bevilacqua

Enfin, certaines colonies d'Algues lacustres ou marines de forme globulaire peuvent rouler sur un fond formé par une boue calcaire d'origine chimique et servir de noyau pour la formation de *pisolithes*. Celles-ci sont constituées par des couches concentriques de calcite inorganique, qui s'altère en formant des voiles caractérisés par des structures cellulaires (pisolithes algaires).

Les structures sédimentaires secondaires

Les structures sédimentaires secondaires prennent naissance au cours de la diagenèse des sédiments ; elles se superposent parfois aux structures primaires et parfois les masquent partiellement ou totalement. On peut subdiviser ces structures en deux groupes en fonction du moment de leur formation : les premières, qui se forment au cours du début de la diagenèse, sont essentiellement liées à la précipitation d'un ciment d'origine chimique ; les secondes, qui se forment après la lithification du sédiment, résultent pour la plupart de phénomènes de dissolution.

Pendant la diagenèse des sédiments détritiques, la quantité de ciment d'origine chimique peut être insuffisante pour combler tous les pores du sédiment. Le ciment se concentre alors et forme des noyaux de forme irrégulière, d'une roche assez compacte, noyés dans un matériel plus friable ou complètement incohérent. Ces corps irréguliers sont appelés des *concrétions* lorsqu'ils se développent dans des dépôts clastiques habituellement sableux, plus rarement argileux. Le ciment est généralement de la calcite et, à l'intérieur de certaines concrétions, on peut rencontrer des fossiles bien conservés (Poissons, feuilles, etc.) ou des restes organiques non reconnaissables. Cet ensemble de faits suggère que la précipitation du ciment peut être déterminée par la diversité des conditions physico-chimiques du milieu diagénétique à proximité des substances organiques. Les concrétions sont souvent concentrées dans une couche particulière ; elles montrent parfois une forme aplatie et circulaire, alors que dans d'autres cas elles se présentent sous forme de « rognons » mal définis morphologiquement. Leurs dimensions varient du centimètre au mètre ; elles peuvent parfois même dépasser le mètre.

Les *poupées,* caractéristiques du lœss, sont des concrétions carbonatées de petite taille ; il en est de même des *concrétions sphérolithiques* qui montrent une structure radiée analogue à celle des *oolithes*. Les oolithes ont une structure concentrique et se seraient constituées au cours de la diagenèse, notamment dans le cas des dépôts de fer oolithique, il s'agirait donc de petites concrétions.

Plus rarement, les dépôts sableux contiennent des zones cimentées par de la calcite en gros cristaux, fréquemment maclés, ou en associations régulières montrant des faces et des arêtes recouvertes par des grains de sable. Les concrétions peuvent être constituées par des minéraux autres que la calcite, tels que la sidérite, la barytine, la pyrite, la fluorine, etc. L'intérieur des concrétions peut être creux et tapissé de cristaux automorphes ; il s'agit des *géodes* tant recherchées par les collectionneurs de minéraux.

Les *septarias* sont des concrétions carbonatées associées à certaines roches argileuses ; elles présentent une morphologie globulaire, parfois aplatie, et leurs dimensions peuvent être assez importantes (1 mètre et plus). Formées par un mélange intime d'argile et de calcaire, elles sont souvent traversées par des veines de calcite, que l'on interprète comme le remplissage de fentes de dessiccation.

On peut attribuer une origine analogue aux *lentilles de calcaire* recouvertes par des séries de cônes co-axiaux, ou *cone-in-cone* ; hauts de quelques dizaines de centimètres, les cônes, parfois annelés, s'appuient par leur base sur des plans de stratification de roches à grain fin.

D. Fernandez

▲ *Dans cette formation essentiellement conglomératique, la* **stratification** *est soulignée par des niveaux arénacés et par des alignements de galets de plus grande taille (Oligocène).*

Les *nodules* sont des concentrations des substances présentes en faibles quantités dans les dépôts d'origine chimique; parfois, les concrétions calcaires dans les argiles portent aussi ce nom. Si l'origine des nodules est partiellement semblable à celle des concrétions, ils peuvent toutefois représenter des structures sédimentaires primaires. Les nodules de silice de la craie peuvent être considérés comme des concentrations de silice colloïdale, originellement présente à l'état diffus dans le sédiment non lithifié, par réduction de la surface totale des particules du gel de silice dispersées dans le sédiment. Les silex peuvent avoir une origine totalement différente de la précédente et représenter le dépôt primaire d'un gel de silice. Les phosphorites se présentent aussi sous forme de nodules; dans les fonds océaniques actuels, les nodules d'hydroxydes de fer et de manganèse sont fréquents.

Les *stylolites* sont des structures sédimentaires secondaires (épigénétiques) qui résultent de la dissolution partielle de roches déjà lithifiées. Il s'agit de surfaces planes ou très finement accidentées, le long desquelles s'est effectuée la dissolution. Généralement situés dans des roches monominérales d'origine sédimentaire ou métamorphique (calcaires à grain fin, marbres, quartzites), les stylolites se caractérisent par des surfaces souvent parallèles à la stratification, mais aussi transversales par rapport à celle-ci, et s'étendent sur des surfaces de plusieurs mètres carrés. En section transversale, ils se présentent comme des points caractérisés par des contours persillés le long desquels les panneaux supérieurs et inférieurs de la roche s'interpénètrent. La surface stylolitique est caractérisée par la concentration de substances insolubles de la roche, notamment de minéraux argileux. Le microscope polarisant permet de voir que, dans une section normale à la surface stylolitique, les structures primaires (fossiles, oolithes, etc.) sont recoupées par le stylolite. Ces observations montrent de manière nette que les stylolites se forment après consolidation de la roche, dans des phases tardives de la diagenèse, par dissolution des surfaces de sédimentation originelles. La dissolution est favorisée par la charge des sédiments susjacents, mais aussi par des pressions orientées d'origine tectonique, notamment dans le cas de stylolites non parallèles aux plans de stratification.

D'autres structures secondaires résultent de la dissolution différentielle des roches sédimentaires : c'est le cas des *cavités sphériques* laissées par la dissolution des oolithes ou bien des *cavités cubiques ou prismatiques* qui résultent de la disparition de cristaux de sel gemme ou de gypse. Les roches calcaires ou dolomitiques présentent souvent une porosité secondaire résultant également d'une dissolution tardive.

Les différents types de roches sédimentaires

LES CONGLOMÉRATS

Les *graviers* et leur équivalent consolidé, les **conglomérats**, sont des dépôts clastiques grossiers composés de fragments ayant un diamètre supérieur à 2 mm. La limite supérieure de taille des fragments n'est pas définie mais la majeure partie de ces dépôts est formée de galets dont la dimension moyenne ne dépasse pas la dizaine de centimètres. Les conglomérats contiennent également du matériel clastique plus fin (sable et limon) qui se dépose dans les interstices entre les composants majeurs. Souvent, ces dépôts plus fins peuvent représenter 50 % de la roche totale. Ce ciment est composé soit de matériel détritique ayant subi une diagenèse plus ou moins poussée, soit de substances de précipitation chimique entre les galets, ces deux types de ciment pouvant exister simultanément.

Les critères de classification des conglomérats sont basés sur deux types de phénomènes : les propriétés dynamiques de l'agent de transport qui a amené les fragments détritiques dans les zones de sédimentation finale, et la nature pétrographique des galets.

Le *transport des galets* demande une énergie dynamique importante; il arrive souvent que les fragments les plus grossiers restent près des zones où ils ont été formés par fragmentation mécanique des roches. Ils conservent alors des arêtes aiguës, les conglomérats qui sont formés par ces éléments anguleux étant appelés des **brèches.** Elles se forment, par exemple, au niveau des cônes de déjection des torrents de haute montagne ou par action des vagues sur les falaises. Les conglomérats résiduels sont donc composés de fragments grossiers qui sont restés près de leur lieu d'origine alors que la fraction plus fine a été exportée plus loin.

Les conglomérats constitués de fragments plus ou moins arrondis (s'ils sont très arrondis, on appelle ces roches des **poudingues**), de dimension inférieure à une dizaine de centimètres et en contact les uns avec les autres, se forment à la suite d'un transport à distance variable, effectué sous l'action de courants fluviatiles et marins. Ils sont souvent interstratifiés avec des dépôts sableux comme des quartzo-arénites, des arkoses, et correspondent à une augmentation de la vitesse des courants par rapport à ceux qui ont transporté le matériel sableux.

Comme nous l'avons dit, les blocs et les galets de dimensions supérieures à une dizaine de centimètres peuvent être transportés très loin de leur lieu d'origine

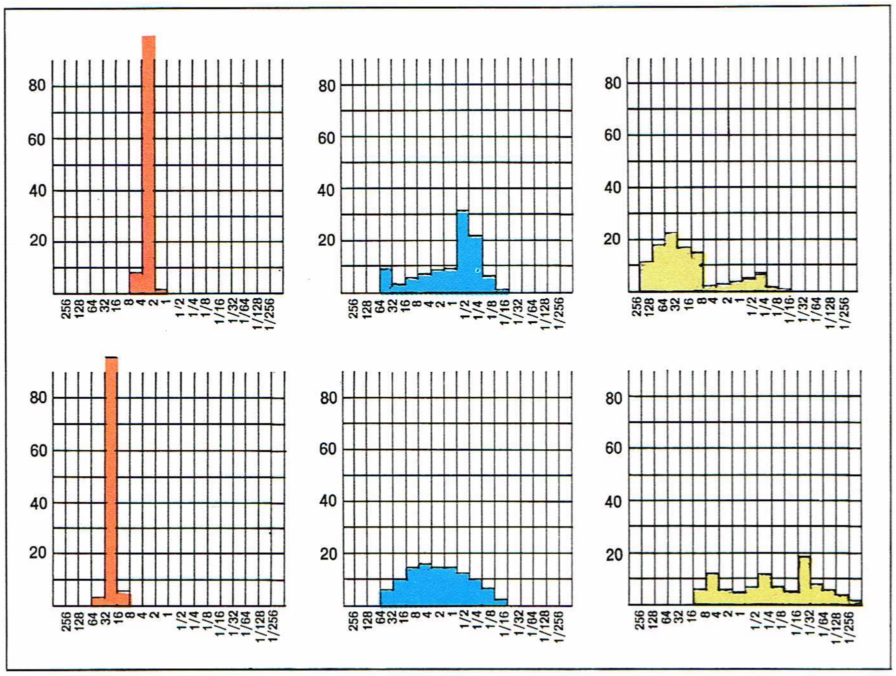

I.G.D.A.

▲ *A gauche,* **histogramme granulométrique des graviers et des conglomérats.** *En rouge, des graviers côtiers bien classés; en bleu, des graviers fluviatiles; en jaune, un dépôt fluvio-glaciaire (en haut) et une moraine (en bas) [d'après divers auteurs, dans Pettijohn]. A droite,* **conglomérat polygénique** *du Crétacé supérieur constitué de galets de composition variable. Les galets sont tous en contact réciproque.*

sous l'action de phénomènes de transport analogues au « transport en masse ». Dans les milieux sédimentaires continentaux ce type de transport est effectué par les glaciers et les coulées boueuses, dans les milieux marins par les courants de turbidité et l'action des icebergs. Les dépôts qui en résultent sont presque toujours caractérisés par du matériel sableux et/ou de type limon plus abondant que les galets et les blocs de dimensions variées et parfois importantes.

La *composition pétrographique* des conglomérats dépend tout d'abord des *types lithologiques* qui affleurent dans les régions d'alimentation des bassins.

D'autres facteurs peuvent intervenir, en particulier les *conditions climatiques*. En effet, les roches qui, par désagrégation physique, s'altèrent sous forme de galets ne sont pas très nombreuses. Par exemple, sous climat chaud et humide, l'altération chimique est très importante et la majorité des roches se désagrège sous forme de substances en solution ionique ou colloïdale, ou sous forme d'hydroxydes de fer et d'aluminium. Au contraire, sous climat froid, aride ou même tempéré, la désagrégation physique est importante et dépend en grande partie de la texture des roches. Celles qui ont un grain moyen ou grossier produisent du matériel détritique sableux, alors que les galets proviennent plutôt de roches monominérales ou polyminérales à grain fin. C'est pourquoi les rapports quantitatifs entre les types pétrographiques auxquels appartiennent les galets produits par la fragmentation des roches dans une région donnée ne correspondent pas aux rapports entre les surfaces d'affleurement des différentes roches. Ils sont liés à la plus ou moins grande résistance de ces roches à l'altération météorique.

Un troisième facteur déterminant la composition pétrographique des galets des conglomérats est la notion de *relief géomorphologique* de la région soumise à l'altération. Lorsque le relief est élevé et l'érosion très rapide, les différences de résistance à l'altération entre les divers types de roches ont tendance à s'atténuer. Il faut étudier l'influence de ce facteur sur des périodes géologiques suffisamment longues et ce pour deux raisons : d'une part, l'érosion intense tend à aplanir les reliefs; d'autre part, ces derniers peuvent être rajeunis par l'activité tectonique, qui peut provoquer un soulèvement général de la région. Si l'érosion a lieu dans une zone d'intense activité tectonique, la composition pétrographique des galets sera le reflet direct des différents types lithologiques à l'affleurement. Si elle a lieu dans des régions calmes du point de vue tectonique, la composition des galets sera fonction de la résistance des roches mères à l'altération.

Suivant la composition pétrographique des galets, les conglomérats sont divisés en *conglomérats monogéniques* ou *polygéniques*. Les premiers sont composés principalement (90 %) de galets appartenant à un seul type lithologique résistant à l'altération (quartzite, silex...) ; les seconds ont des galets provenant de types lithologiques variés.

Les **conglomérats monogéniques** à galets quartziques représentent parfois une augmentation locale de la taille des grains des grès quartziques et se présentent sous forme de lentilles dans un sédiment; leur épaisseur ne dépasse généralement pas quelques mètres. Ils proviennent de la sédimentation de matériel clastique arraché à des zones de relief peu élevé et se déposent en milieu fluviatile ou côtier, alors que le matériel plus fin est entraîné par les courants. Les galets ont souvent une forme arrondie provoquée par des remaniements successifs avant la sédimentation finale. L'arrondissement plus ou moins prononcé dépend évidemment de la dureté des galets.

Parmi les conglomérats monogéniques, on peut citer les *conglomérats résiduels,* constitués de nodules arrondis de silex ou de phosphate de calcium (phosphorite) primitivement inclus dans du calcaire. La dissolution de celui-ci provoque la libération des nodules qui sont remaniés et transportés, puis sédimentent. Les conglomérats monogéniques à galets calcaires sont rares et peuvent être considérés comme intraformationnels.

Les **conglomérats polygéniques** sont beaucoup plus répandus que les conglomérats monogéniques. Ils se déposent dans divers milieux, continentaux et marins, et sont associés avec des grès. Les arkoses et les grès feldspathiques, qui proviennent de la désagrégation de granites ou de gneiss, sont souvent associés aux conglomérats arkosiques à galets de granite ou à d'autres roches magmatiques et métamorphiques acides.

Les conglomérats arkosiques et les arkoses proviennent habituellement de l'érosion de batholites granitiques et de massifs gneissiques des chaînes de montagnes récentes. Ces conglomérats proviennent d'une érosion rapide des terres émergées ayant un relief géomorphologique très accentué; ils se forment préférentiellement pendant les périodes d'activité tectonique intense qui suivent la phase paroxysmale des cycles orogéniques.

Un type très courant de conglomérats est constitué par les **moraines,** qui sont des dépôts clastiques produits par l'érosion et le transport des glaciers. Ils sont typiquement polygéniques car le climat froid inhibe l'altération chimique des roches dont ils dérivent (roches mères). Il est généralement possible de faire la distinction entre la moraine de fond et la moraine de surface à partir de la granulométrie des dépôts.

La *moraine de fond* a subi l'écrasement de la masse du glacier en mouvement et est donc constituée essentiellement de limon qui contient des débris extrêmement fins des minéraux de la roche mère. Si la moraine n'a pas subi d'altération météorique sous climat chaud ou tempéré

D. Fernandez

D. Fernandez

◀ **Conglomérat monogénique** ***du Trias inférieur composé uniquement de galets quartzeux; il a subi une diagenèse très poussée.***

après sa formation, elle ne contient pas de minéraux argileux, ou si elle en contient, ils ont une origine détritique et proviennent de la désagrégation mécanique de roches argileuses. On rencontre parfois des galets isolés dans la masse de limon plus ou moins sableux.

La *moraine superficielle,* au contraire, est formée de fragments et de blocs qui sont tombés sur la surface du glacier. Ces blocs proviennent des parois rocheuses environnantes et se déposent sur la moraine de fond au moment de la fonte du glacier. Cette moraine superficielle est souvent transportée et remaniée par les mouvements d'avancée successifs du glacier et par conséquent ne subsiste pas toujours dans les dépôts morainiques.

Les *moraines sous-marines* se développent actuellement dans les régions circumpolaires où les glaciers s'étendent au large des côtes (Antarctique, Groenland). Elles sont parfois dépourvues de matériel fin, celui-ci ayant été entraîné par les courants marins.

Les caractéristiques des galets morainiques sont généralement bien étudiées car elles constituent un indice précieux pour les études paléoclimatiques. Les périodes glaciaires n'ont pas seulement eu lieu au Quaternaire mais également au Permo-Carbonifère et au Précambrien; chacune d'entre elles a laissé comme témoins ses dépôts morainiques. Les galets morainiques ont souvent une forme aplatie et très arrondie; ils présentent également des stries caractéristiques provoquées par le frottement du glacier qui avance sur la roche en place. Les galets ont une forme allongée et cet allongement est disposé parallèlement au mouvement du glacier. Le sens d'allongement des galets et les stries permettent de reconstituer la direction du mouvement du glacier.

Pendant les périodes interglaciaires, sous climat chaud et humide, les moraines subissent souvent des phénomènes de pédogenèse et d'argilification à cause de la finesse des grains de la matrice et de la présence de minéraux facilement altérables. Dans les Préalpes italiennes, les moraines de la période Mindel sont totalement altérées en amas argileux imprégnés d'oxydes de fer et constituent le « ferretto », sorte de sidérolithique, de l'interglaciaire Mindel-Riss. Au contraire, certaines moraines glaciaires anciennes (au Canada, en Australie, en Afrique du Sud) sont compactées par la diagenèse; un léger métamorphisme a transformé la matrice en une masse microcristalline de chlorite, séricite et quartz.

Les **conglomérats glacio-marins** et **glacio-lacustres** ont un aspect sensiblement identique à celui des moraines. On en rencontre quelques exemples dans les milieux périglaciaires anciens, mais ils sont surtout répandus dans les sédiments actuels au large des côtes antarctiques, dans les régions septentrionales des océans Atlantique et Pacifique et dans l'océan Arctique. Ils proviennent de la sédimentation de débris transportés par les

C. Bevilacqua

◀ **Conglomérat polygénique** ***à galets arrondis dont certains portent l'empreinte d'autres galets (en bas à droite).***

▼ **Galets de moraine** ***présentant des stries caractéristiques provoquées par le frottement du glacier qui avance.***

C. Bevilacqua

▶ **Conglomérat intraformationnel** *composé de fragments anguleux de silex dans un calcaire blanc.*

▶ **Grès** *consolidé constitué de fragments polycristallins de roche effusive acide et de grains de quartz noyés dans une matrice essentiellement constituée par de la séricite. Lame mince en lumière polarisée.*

▼ *A gauche, ce conglomérat du Crétacé supérieur s'est formé à la suite d'un éboulement sous-marin provoqué par un courant de turbidité : c'est un* **paraconglomérat de turbidité** *; remarquer un lambeau tordu d'argile près du marteau. A droite, classification des grès en fonction de leur composition (d'après Pettijohn dans Krumbein et Sloss).*

icebergs à l'intérieur de sédiments marins normaux. Ils se présentent sous forme de dépôts bien stratifiés, plus ou moins argileux, ayant un bon classement granulométrique ; ils contiennent parfois des restes d'organismes, et les galets perturbent la stratification du sédiment fin en créant une distorsion des petits lits.

Certains conglomérats, ou mieux des grès grossiers, peuvent être appelés *tillites* par analogie avec les dépôts morainiques (*till* = moraine), et d'autres *conglomérats de turbidites,* parce qu'ils sont engendrés par des courants de turbidité. Ces courants ont une capacité de transport élevée et peuvent emporter le sable et les galets des zones côtières jusqu'à des profondeurs de centaines, voire de milliers de mètres où les dépôts normaux sont habituellement très fins.

Les conglomérats de turbidites sont caractérisés par une matrice sableuse abondante et des quantités importantes de limon et d'argile par rapport aux blocs et aux galets, qui peuvent atteindre des dimensions de quelques décimètres. Ils se présentent sous forme de strates épaisses d'une dizaine de mètres intercalées avec des couches de sable gréseux et d'argiles. Un seul courant de turbidité peut déposer une couche très épaisse et très étendue dans un intervalle de temps très bref (quelques dizaines de minutes). Cette vitesse de sédimentation, la plus forte que l'on connaisse, est remarquable par rapport à la sédimentation des argiles pélagiques dont la vitesse est de l'ordre de quelques millimètres tous les 1 000 ans.

Un aspect analogue à celui des conglomérats de turbidites se rencontre dans des dépôts formés par l'écoulement sous l'eau d'une masse de sédiments sur des fonds inclinés sous l'action de la pesanteur *(olitostromes)*. La vitesse du mouvement peut augmenter et il se transforme ainsi en un courant de turbidité ; au contraire, si le mouvement cesse avant que la masse de sédiment ait acquis une fluidité suffisante, le dépôt a une structure chaotique et contient divers fragments (calcaire, argile) de toutes tailles, noyés dans une matrice limoneuse. Ces dépôts ne sont pas de véritables conglomérats mais résultent de l'éboulement des couches sédimentaires.

Les conglomérats décrits précédemment, exception faite des turbidites, sont formés de matériel détritique provenant des terres émergées situées en dehors des zones de sédimentation, qu'elles soient marines ou continentales. Il existe également des conglomérats qui proviennent de l'érosion, puis de la resédimentation après un bref transport, de fragments de sédiments clastiques ou chimiques déposés depuis peu et plus ou moins cohérents. Tous ces phénomènes surviennent à l'intérieur des bassins de sédimentation : on parle de **conglomérats intraformationnels**.

Les conglomérats de turbidites peuvent également contenir des galets provenant des terres émergées et déposés près des côtes avant d'être transportés à grande profondeur par les courants de turbidité. Les conglomérats intraformationnels, qui pourraient être considérés comme

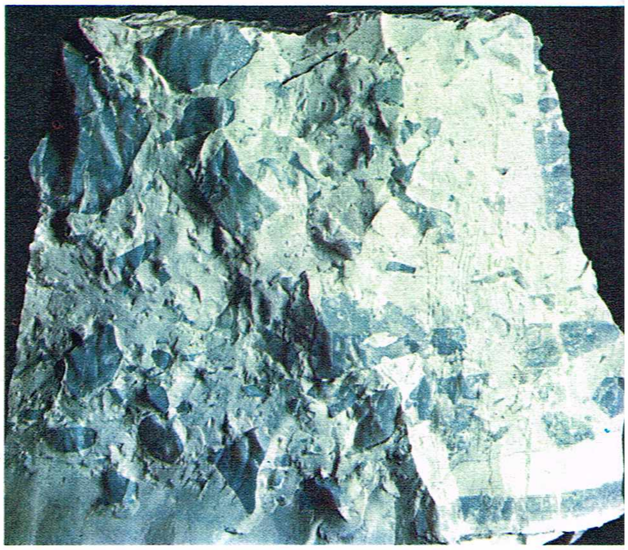

C. Bevilacqua

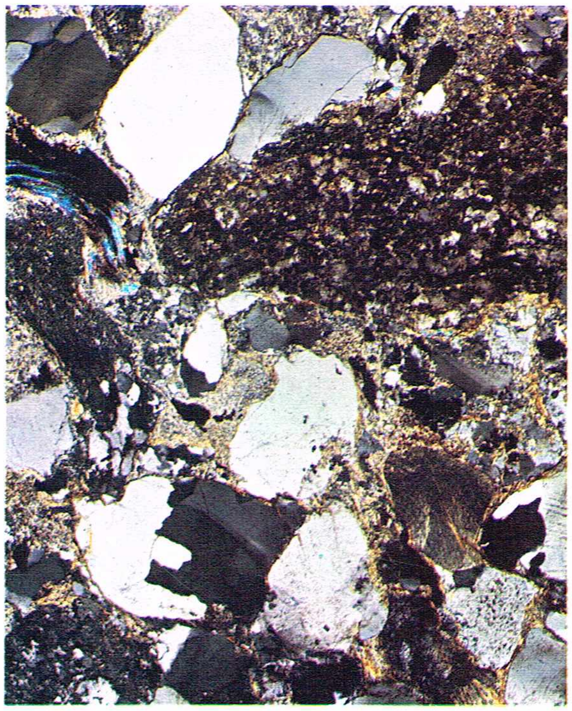

Archives Photo B

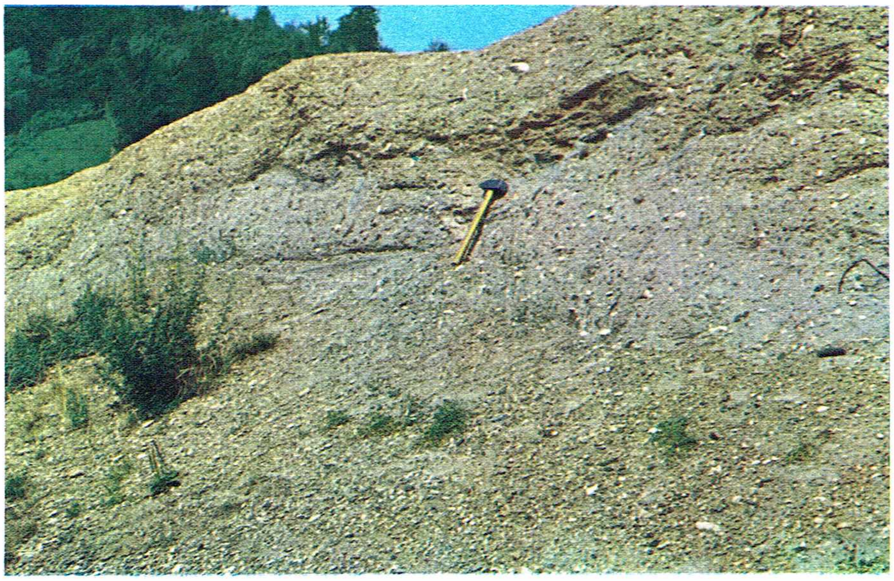

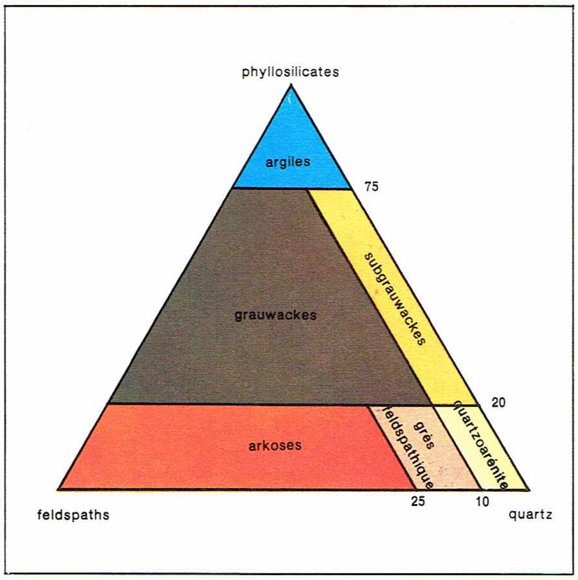

I.G.D.A.

D. Fernandez

◀ *Échantillon de cargneule (calcaire caverneux). Il s'agit d'un pseudoconglomérat dans lequel les fragments d'anhydrite ont été dissous ; il ne reste plus que les parties calcaires ou dolomitiques de la roche.*

une structure sédimentaire plutôt qu'un type lithologique distinct, se forment dans des milieux sédimentaires variés et se déposent en strates épaisses d'extension latérale limitée. Ils sont constitués de fragments de composition uniforme, analogue à celle des formations immédiatement sous-jacentes dans la série sédimentaire. Les fragments sont aplatis et souvent tordus car ils étaient encore plastiques au début de la sédimentation.

On rencontre souvent des conglomérats intraformationnels dans les roches calcaires, aussi bien d'origine organique que chimique. C'est le cas, par exemple, des conglomérats calcaires qui se forment en bordure des barrières de coraux exposés à la mer libre, là où les vagues démantèlent la construction organique.

Les **pseudoconglomérats** sont, comme leur nom l'indique, des roches de même aspect que les conglomérats ou les brèches, mais se formant par des processus totalement différents de ceux qui donnent naissance aux vrais conglomérats. De nombreux facteurs, comme des processus diagénétiques, d'altération météorique, tectoniques ou magmatiques, peuvent donner un aspect conglomératique à des roches d'origine variée. Par exemple, certains pseudoconglomérats argileux se forment par dessèchement d'alluvions argileuses et remplissage successif des fractures par du sable ou du limon, et ce sans qu'il y ait eu transport des argiles, si bref fût-il.

Les *phénomènes d'hydratation par les solutions hydrothermales* sont à l'origine de la structure pseudoconglomératique assez fréquente des serpentinites. La roche se présente sous forme de blocs polyédriques, imbriqués les uns dans les autres, parfois roulés ou déplacés, et séparés par un réseau dense de fractures remplies de minéraux secondaires souvent carbonatés.

Dans les roches sédimentaires, l'aspect pseudobréchique résulte souvent de phénomènes de recristallisation différentielle qui ont lieu au cours de la diagenèse. Par exemple, dans les dépôts calcaires à grain très fin d'origine chimique, il existe des centres de recristallisation plus rapide à l'intérieur desquels la calcite forme des cristaux plus importants qui isolent des plages résiduelles de calcaire fin ; ces plages peuvent être assimilées à des galets mais s'en distinguent par leurs contours irréguliers. Cela peut se produire dans des roches soumises à des silicifications ou à des dolomitisations incomplètes.

Les **cargneules** sont des roches pseudoconglomératiques ou pseudobréchiques constituées d'une matrice calcitique jaunâtre imprégnée d'oxydes de fer, dans laquelle sont individualisés des fragments de dolomie noirâtre à grain fin. Ces roches se forment au cours de la diagenèse de sédiments évaporitiques constitués de niveaux de dolomie primaire et d'anhydrite. L'augmentation de volume produite par la transformation de l'anhydrite en gypse provoque une fragmentation des niveaux interstratifiés de dolomie, de la calcite se substituant ensuite au gypse. Là encore, le processus de formation est bien différent d'un remaniement de roche détritique. Les cargneules peuvent également contenir des fragments de roches cristallines : il s'agit alors de *brèches tectoniques*.

Celles-ci se forment par fracturation des roches à proximité des plans de faille et des surfaces de glissement ; les fragments qui en résultent sont ensuite englobés dans les niveaux le long desquels s'est produit le mouvement.

Parmi les formations conglomératiques importantes en France, citons le poudingue de Palassou (Oligocène), dont les éléments sont surtout des calcaires Crétacé et Jurassique. Ce poudingue provient du démantèlement de la jeune chaîne des Pyrénées et s'étend sur tout le front de cette chaîne. Un autre exemple est constitué par le poudingue de Nemours (Sparnacien) qui s'étend au sud du Bassin parisien ; c'est un conglomérat de pénéplanation formé par des galets de silex de la craie, noyés dans un ciment siliceux.

LES GRÈS

Les **grès** sont des roches sédimentaires clastiques qui proviennent de la cimentation diagénétique de sables. Pour pouvoir désigner une roche par le terme *grès,* il est nécessaire qu'un pourcentage important de ses fragments détritiques (plus de 50 %) ait des dimensions comprises entre les valeurs limites de la classe granulométrique « sable », c'est-à-dire entre 2 mm et 1/16 mm selon l'échelle de Wentworth. D'autre part, la majeure partie des grains doit être représentée par du quartz ou des silicates. Dans le cas contraire, il ne s'agit pas de grès mais de *calcarénite* si les grains sont calcaires, ou de *dolarénite* s'il s'agit de dolomie, et ces roches sont alors considérées comme des calcaires ou des dolomies.

Les grès sont des roches relativement répandues. Ils sont classés suivant des critères analogues à ceux que l'on utilise pour les conglomérats, c'est-à-dire granulométriques et minéralogiques.

On distingue tout d'abord les *grès à ciment chimique* et les *grès à matrice détritique*. Les premiers proviennent de la diagenèse d'un sable bien classé dans lequel les pores intergranulaires étaient vides ou remplis d'eau au début de la sédimentation. Au cours de la diagenèse, ces pores ont été remplis par des minéraux divers, calcite ou quartz, déposés à partir des eaux interstitielles. Pour les seconds, la matrice détritique s'est déposée en même temps que des grains de sable ; les pores intergranulaires étaient donc remplis de substance solide, et le ciment provient de la recristallisation diagénétique de cette matrice fine composée surtout de minéraux argileux. Il existe, bien sûr, des grès intermédiaires entre ces deux types dans lesquels on trouve simultanément du limon interstitiel et un ciment provenant d'une précipitation chimique au cours de la diagenèse.

Les deux groupes de grès, à ciment détritique et à matrice chimique, correspondent à deux types de transport différents. Les sables bien classés ayant des vides intergranulaires sont déposés après avoir subi des transports variés : par des courants fluviatiles ou marins, en eau limpide de densité et de viscosité normales, ou encore par des courants aériens. Par contre, les sédiments sableux à matrice détritique abondante (plus de 15 % du matériel détritique) sont déposés par des courants aqueux

ayant une densité et une viscosité supérieures à la normale car ils contiennent des quantités importantes de matériel fin en suspension. Il s'agit par exemple de courants de turbidité qui ont lieu en milieu marin profond pendant des périodes de temps très brèves.

Un premier critère de classification des grès est donc donné par les *caractéristiques dynamiques des courants* qui ont transporté le sable. La transition entre sables et grès est souvent progressive; en effet, certains courants (fluviatiles ou de turbidité) peuvent déposer du sable avec une quantité limitée de matrice détritique et avec une classification granulométrique intermédiaire entre les deux groupes. On a donc une distribution granulométrique continue et la distinction entre grains et matrice est délicate. Certains auteurs proposent de prendre comme matrice la fraction inférieure à 50 μ, ce qui est inférieur à la limite de 62 μ des sables d'après Wentworth. D'autres proposent de mettre la limite à 20 μ, en incorporant une certaine partie du limon aux sables.

La *composition minéralogique* des grès dépend des mêmes facteurs que ceux qui déterminent la composition des conglomérats. Ces facteurs sont les suivants : la nature de la roche mère qui affleure sur le continent et

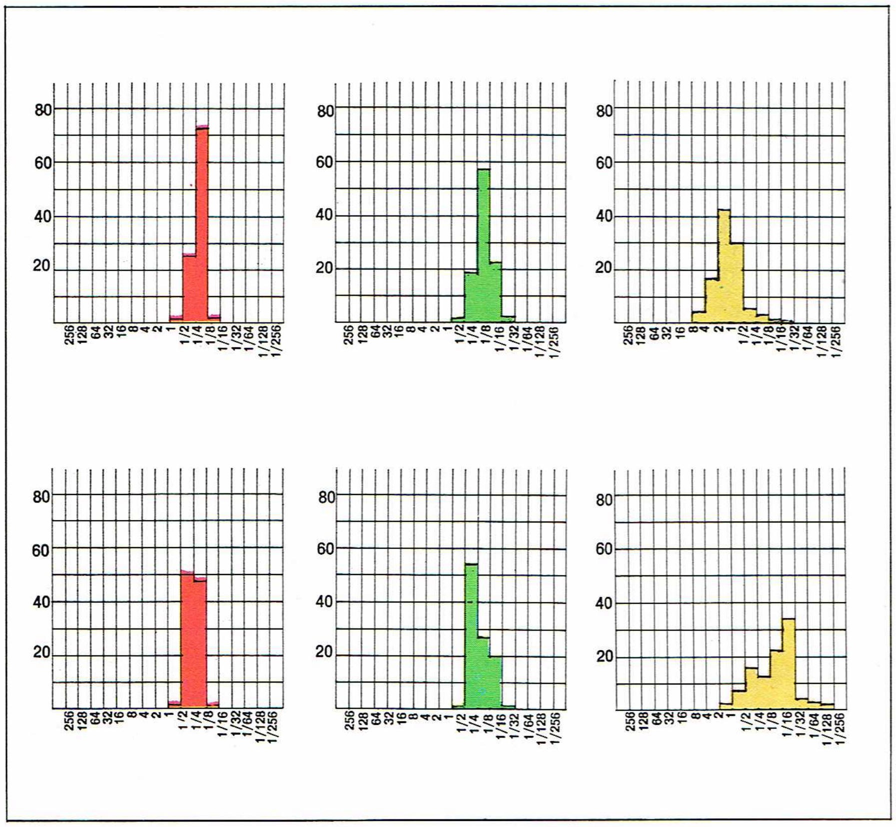

▲ **Histogrammes granulométriques des sables et des grès.** ***En rouge, sable de plage marine (en haut) et d'une dune côtière (en bas). En vert, quartzo-arénite paléozoïque. En jaune, dépôts fluvio-glaciaires (en haut) et fluviatiles (en bas)*** **[*dans Pettijohn*].**

dont l'altération donne naissance aux grains de sable, le climat qui détermine l'altération météorique, la plus ou moins grande résistance à l'altération des différents minéraux des roches mères, et enfin l'activité tectonique de la zone d'alimentation et du bassin de sédimentation qui gouverne la vitesse d'érosion et de sédimentation. Les derniers facteurs déterminent l'évolution des grès, alors que le premier détermine leur origine propre.

En ce qui concerne la composition pétrographique des régions d'alimentation, on peut diviser les roches qui les composent en deux grands groupes.

— Le premier groupe est constitué par les roches d'origine profonde, c'est-à-dire les roches ignées intrusives acides (granite, etc.) et les roches métamorphiques qui ont une composition minéralogique équivalente (gneiss). Les roches basiques ne sont pas prises en compte car elles subissent généralement une altération chimique, et seule une partie très faible de leurs minéraux se transforme en sable. Par désagrégation physique, ces roches acides se transforment en sable le plus souvent monominéral. Les minéraux les plus fréquents sont le quartz et le feldspath alcalin.

— Le second groupe comprend les roches formées dans les zones superficielles de l'écorce terrestre, c'est-à-dire les roches sédimentaires, certaines roches métamorphiques du type des schistes, et enfin les roches effusives acides. Les grains de sable qui en dérivent sont polyminéraux; on y trouve, par exemple, des grains d'argiloschiste, de phyllade, de porphyre, de silex, de calcaire, etc.

On peut essayer, pour les sables et les grès, de trouver un *indice d'origine* en déterminant le rapport entre le nombre de grains de feldspath (indice de la présence d'une roche profonde) et le nombre de fragments polycristallins des roches d'origine superficielle. Le quartz n'est pas un bon indice car il peut exister aussi bien dans l'un ou l'autre groupe de roches; on peut parfois distinguer son origine d'après ses caractéristiques optiques et exoscopiques au microscope électronique.

Comme pour les conglomérats, l'origine du sable est masquée par l'*évolution* que subissent les sédiments clastiques en général. La composition minéralogique du sable se différencie progressivement de celle des roches dont il provient, pour atteindre une paragenèse minérale essentiellement formée de quartz aux stades ultimes de l'évolution. Les conditions de climat et d'activité géotectonique de la région d'alimentation règlent cette évolution. Sous climat chaud et humide et dans des régions à faible activité tectonique, l'altération chimique domine; au contraire, sous climat froid ou aride à forte activité tectonique, on obtiendra un sable non évolué composé de minéraux et de grains issus de roches facilement altérables.

Les rapports quantitatifs entre un minéral détritique stable et un autre instable par rapport à l'altération peuvent permettre d'établir un *indice d'évolution minéralogique*. Par exemple, pour le sable provenant de roches superficielles ou formées à faible profondeur, qui contiennent peu ou pas de feldspath, on peut prendre comme indice d'évolution le rapport entre les fragments de roches stables (silex) et instables (toutes les autres roches superficielles). Pour le sable d'origine mixte, qui provient aussi bien de roches profondes que de roches superficielles, on peut considérer le rapport entre les grains de quartz et de silex (composants stables) d'une part, et les grains de feldspath et les fragments de roches (composants instables) d'autre part. L'évolution minéralogique est généralement accompagnée d'une *évolution dans la texture* du sable. Le sable quartzeux possède un bon classement granulométrique et il est composé de grains bien arrondis, alors que les sables non évolués présentent des caractères opposés.

En dehors de la composition minéralogique des composants majeurs, celle des minéraux accessoires peut également donner des indications sur l'origine et l'évolution des sables et des grès. Ces minéraux accessoires sont surtout représentés par les *minéraux lourds*, qui doivent leur épithète à leur forte densité (nettement supérieure à celle des minéraux majeurs comme le quartz et les feldspaths, qui est d'environ 2,7). Les minéraux lourds représentent habituellement moins de 1 % en poids du sable; ils peuvent atteindre 10 % et même 50 % dans des sédiments sableux déposés dans un milieu très agité, comme les zones littorales où les courants exportent les particules fines vers le large.

De nombreuses espèces minéralogiques sont présentes dans les minéraux lourds : par exemple, les pyroxènes, les amphiboles, la biotite, l'olivine, l'épidote et les grenats. Cependant, les premiers sont facilement altérés et se rencontrent rarement dans les sables alors que les deux derniers sont relativement plus résistants. On rencontre aussi fréquemment dans les sables des minéraux lourds, accessoires dans les roches mères mais assez résistants à l'altération. C'est le cas de la magnétite, de l'ilménite, des zircons, etc. La détermination des minéraux lourds permet de connaître la nature des roches mères de façon plus précise que par l'étude des minéraux légers car le quartz et le feldspath peuvent provenir de roches extrêmement diverses. L'étude de ces minéraux permet d'effectuer des reconstitutions paléogéographiques et des corrélations stratigraphiques entre différentes séries sédimentaires.

La composition des minéraux lourds d'un sable ne reflète pas toujours celle de la roche mère. En effet, elle dépend en premier lieu de la résistance à l'altération de ces différents minéraux suivant les conditions climatiques.

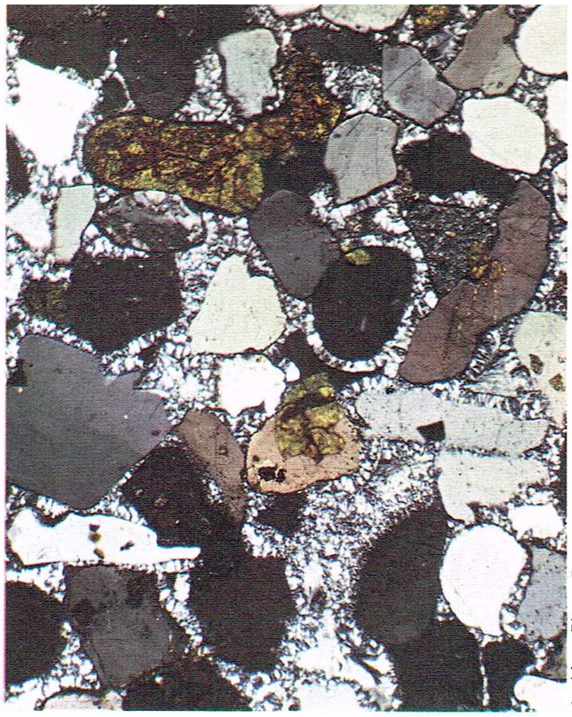

Archives Photo B

I.G.D.A.

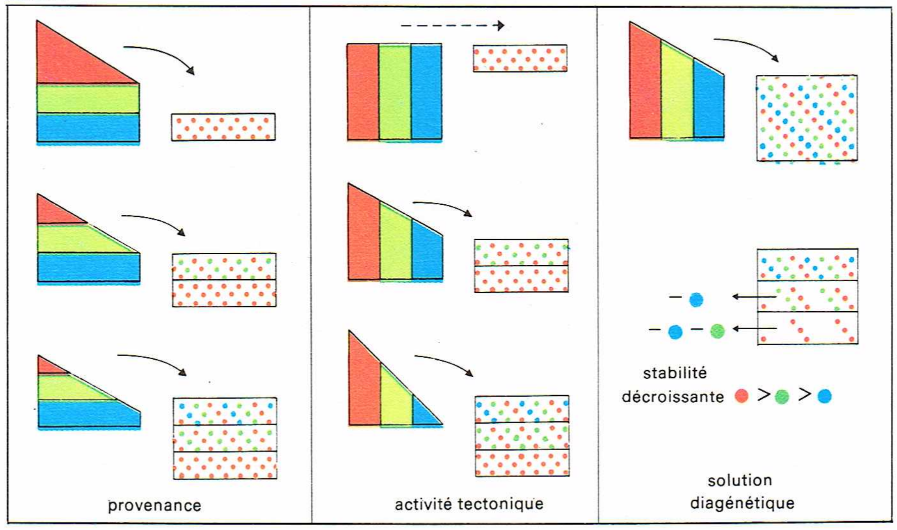

▲ ***Exemples de trois phénomènes qui déterminent les teneurs en minéraux lourds des formations géologiques. Les blocs de gauche représentent les roches mères (en différentes couleurs uniformes) qui s'altèrent pour donner des sédiments où la répartition des minéraux lourds est représentée par des points dont les couleurs correspondent à celles des roches mères (d'après Pettijohn).***

Archives Photo B

◀ ***En haut,*** **quartzo-arénite** ***de l'Éocène moyen : les grains détritiques de quartz et de glauconite (jaune-vert) sont cimentés par de la calcédoine. Lame mince en lumière polarisée. En bas, cette*** **quartzo-arénite** ***du Cambrien est formée de grains de quartz de dimensions très variables. Lame mince en lumière polarisée.***

D'autre part, l'hydrolyse des minéraux lourds se poursuit au cours de la sédimentation et de la diagenèse et les sédiments gréseux anciens peuvent s'appauvrir progressivement en minéraux lourds. Le phénomène inverse se produit lorsque le sédiment subit un métamorphisme ; il peut alors y avoir cristallisation de nouveaux minéraux de métamorphisme qui n'ont aucun rapport avec l'origine détritique primaire du sédiment.

Il est possible de distinguer trois types principaux de grès : les *quartzo-arénites*, très évoluées, les *arkoses*, riches en feldspaths détritiques, et les *grauwackes*, peu évolués.

Les **quartzo-arénites,** ou **grès quartzites,** sont constitués en majorité (plus de 90 %) de grains de quartz. Le ciment est également formé de quartz ou d'autres formes de la silice (opale, calcédoine), parfois de calcite ou d'autres minéraux. Les grains de quartz sont généralement très arrondis et le classement granulométrique est bon. L'aspect superficiel des grains dans un sable quartzeux incohérent ou peu cimenté peut fournir des indications sur le mode de transport et le milieu de sédimentation. Certains auteurs pensent que si la surface des grains est opaque, ceux-ci ont été soumis à un transport éolien qui, par suite des chocs des grains les uns contre les autres, leur a donné cet aspect mat. Cela n'est pas toujours le cas ; en fait, des études récentes ont montré que les traces de chocs se révèlent sur la majorité des quartz, qu'ils aient subi un transport fluviatile, glaciaire, éolien ou marin. Le dépoli de la surface n'est donc pas un critère caractéristique d'un transport aérien des grains.

Les grains de quartz de diverses provenances peuvent être distingués au microscope d'après les caractères suivants : ceux qui proviennent de roches intrusives sont en général formés d'un cristal unique, ayant une extinction nette ou légèrement roulante (variation des propriétés optiques due à la déformation physique du minéral) ; ils contiennent de minuscules cristaux de rutile, de zircon et d'autres minéraux, ainsi que des inclusions vitreuses avec parfois des bulles de gaz plus petites.

Les grains de quartz provenant des roches ignées ont généralement des formes automorphes, alors que ceux qui dérivent de roches ayant subi un métamorphisme régional sont souvent allongés ou aplatis. Ils présentent une extinction roulante très nette et sont constitués de petits individus parfois intercalés avec des lits de micas ou d'autres minéraux du métamorphisme (épidote, sillimanite). Les grains de quartz qui forment une mosaïque de cristaux à contours polygonaux dérivent plus ou moins de quartzite métamorphique, alors que ceux qui sont microcristallins à grain fin sont des fragments de roche effusive.

Tous ces types de grains de quartz peuvent provenir de l'altération et de la désagrégation de roches ignées ou métamorphiques ; dans ce cas, ils constituent des dépôts primaires. Ceux-ci peuvent être de nouveau érodés avant la cimentation par suite de phénomènes d'émersion des régions côtières d'un bassin sédimentaire. Ensuite, ce sable incohérent pourra être transporté puis déposé et constituer des dépôts dits secondaires. La majorité des quartzo-arénites se forme en plusieurs cycles d'érosion et de sédimentation, l'évolution de ces dépôts étant progressivement de plus en plus poussée.

On rencontre parfois dans les quartzo-arénites des minéraux particuliers, comme la *glauconite*. Celle-ci est intraformationnelle, c'est-à-dire qu'elle prend naissance dans le bassin de sédimentation où se dépose le sable quartzeux. Cette glauconite prend naissance généralement au cours de la diagenèse de sédiments argileux, mais elle peut se séparer des argiles et se concentrer avec le sable dans un milieu néritique peu profond.

Les minéraux lourds qui sont présents dans les quartzo-arénites sont les plus résistants à l'altération ; il s'agit surtout de zircon et de tourmaline. Il n'y a généralement pas de fossiles dans les grès quartzites car les débris d'organismes calcaires sont fragmentés par les remaniements successifs, puis dissous et exportés. La calcite se redépose parfois sous forme de ciment au cours de la diagenèse ; quelques rares spicules d'éponges siliceuses sont parfois conservés.

Certaines quartzo-arénites peuvent contenir des feldspaths alcalins, reconnaissables en lame mince par leur limpidité inférieure à celle du quartz. Si le pourcentage de

▶ ***Échantillon d'arkose.*** *Les arkoses représentent un groupe de grès à grains grossiers contenant un pourcentage élevé de feldspaths : plus du quart de la fraction détritique.*

R. Bousquet - Jacana

feldspaths alcalins dépasse 10 % de la fraction détritique, on parle de *quartzo-arénites feldspathiques,* ou *subarkoses,* qui font la transition entre les quartzites et les arkoses.

Le ciment des quartzo-arénites est généralement constitué de silice sous forme de calcédoine, d'opale ou de quartz. Les vides intergranulaires sont remplis successivement d'une couche d'opale, puis d'une couche de calcédoine disposée perpendiculairement aux parois des pores, et enfin de quartz qui occupe la partie centrale.

Il est fréquent que le ciment soit constitué uniquement de quartz. Il se présente alors sous forme d'une mosaïque microcristalline où les pores sont remplis de petits cristaux de quartz disposés selon une orientation cristallographique plus ou moins régulière. Quand l'accroissement secondaire des grains de quartz est incomplet, le grès est friable et les grains isolés ont une forme prismatique ou rhomboédrique. Dans certains cas, la limite entre le grain de quartz détritique et son enveloppe secondaire est soulignée par une ligne d'oxyde de fer ou de phase argileuse.

Au cours du passage progressif de la diagenèse au métamorphisme régional, la recristallisation des grains de quartz détritiques et de leur enveloppe secondaire fait disparaître les contours des grains. La roche métamorphique résultante est constituée d'une mosaïque régulière de quartz, donc recristallisée en une quartzite identique à celle produite par le métamorphisme thermique.

Les quartzo-arénites sont des roches blanchâtres à fracture granulaire dans les variétés les moins cimentées, écailleuse dans les types à texture quartzitique bien développée, et conchoïdale quand le ciment est constitué d'opale ou de calcédoine. Elles sont déposées en strates régulières et couvrent de vastes étendues, alors que l'épaisseur des formations de quartzo-arénite est souvent limitée à quelques dizaines de mètres ; elles se trouvent, en effet, sous forme de dépôts côtiers qui se distribuent sur les grandes surfaces des transgressions marines.

Les quartzo-arénites présentent souvent des structures sédimentaires à stratification oblique et un plissement des surfaces de stratification dû aux courants et aux vagues. De vastes étendues de sable quartzeux se rencontrent actuellement dans les déserts, et certaines formations de grès quartzeux ont probablement une origine continentale éolienne. Les quartzo-arénites et les termes de passage à des quartzites métamorphiques sont fréquents dans

Archives Photo B

▶ *Les grains de feldspaths détritiques plus ou moins altérés contenus dans ce grès arkosique de l'Oligocène sont reconnaissables à leurs clivages. On voit aussi des quartz et des fragments de calcaire. Le tout est noyé dans un ciment calcaro-argileux. Lame mince en lumière polarisée.*

les dépôts du Précambrien supérieur et du Paléozoïque inférieur dans les régions de plate-forme, comme le bouclier canadien ou le bouclier baltique. Ces formations peuvent parfois atteindre des épaisseurs de quelques centaines à quelques milliers de mètres. Elles prennent naissance à la fin d'un cycle géomorphologique qui a provoqué la pénéplanation des vastes zones continentales dans des conditions tectoniques calmes.

Les **arkoses** représentent un autre groupe de grès; elles contiennent un pourcentage élevé de feldspaths : ceux-ci représentent plus du quart de la fraction détritique. Les grès qui contiennent entre 10 % et 25 % de feldspath sont appelés des **subarkoses**. La teneur en feldspath des arkoses approche très souvent la moitié de la fraction détritique sableuse. Le reste est constitué, pour l'essentiel, de quartz dont on peut reconnaître l'origine granitique ou gneissique en lame mince. On y trouve également des paillettes détritiques de micas, muscovite ou parfois biotite plus ou moins altérées (en général, quelques %). Les feldspaths sont des orthoses, microcline et plagioclases acides (albite ou oligoclase); ils sont le plus souvent limpides mais peuvent être altérés; les fragments de granite et de gneiss (feldspath alcalin + quartz) sont fréquents. Les fossiles y sont très rares.

Les grains de quartz, de feldspaths et de micas des arkoses sont noyés dans une matrice à grain fin dont il est difficile de préciser l'origine. Formée de minuscules fragments des minéraux qui composent les grains, elle est généralement plus riche en micas. Cette matrice contient également des minéraux argileux, comme la kaolinite, des carbonates et des oxydes de fer formés au cours de la diagenèse du sédiment sableux.

L'évolution minéralogique des arkoses est assez faible d'une part à cause de leur forte teneur en feldspaths, et d'autre part à cause du faible arrondissement des grains. Le classement granulométrique est peu marqué et inférieur à celui des quartzo-arénites. On pense donc que les arkoses proviennent d'une sédimentation dans un milieu suffisamment agité pour permettre le transport des particules fines. La présence de feldspath montre que le transport avant la sédimentation est relativement court. Les minéraux lourds sont assez nombreux; parmi ceux-ci, on trouve des zircons, de la tourmaline, de l'apatite, de la hornblende, de la monazite, etc. Les espèces de minéraux lourds les moins résistants à l'altération ne se rencontrent que dans les parties très fortement cimentées de la roche.

Les arkoses sont des grès à grain grossier, de couleur blanchâtre à rouge, se déposant en couches épaisses. Elles sont moins cimentées et donc plus friables que les quartzo-arénites et les grauwackes. On peut diviser les arkoses en deux types : les arkoses résiduelles et les arkoses postorogéniques.

— Les *arkoses résiduelles* forment des dépôts dont l'épaisseur est limitée à quelques mètres et qui contiennent souvent des lentilles et des niveaux de conglomérats arkosiques. Elles se trouvent à la base des séries sédimentaires transgressives, juste au-dessus de la surface de discordance stratigraphique. L'extension latérale des arkoses résiduelles est très irrégulière; elles forment souvent des lentilles discontinues, localisées là où le substrat est formé de granite ou de gneiss. Souvent, le manteau d'arkose ne se distingue pas du granite sous-jacent et la transition entre les deux est très progressive. Cependant, l'examen microscopique révèle un certain arrondi des grains de feldspaths et des ébauches de stratification. En outre, ces arkoses ont une teneur en quartz plus élevée que le granite normal.

— Les *arkoses postorogéniques* apparaissent sous forme de dépôts épais et à forte extension. Leur milieu normal de sédimentation est continental (fluviatile ou même deltaïque), et le dépôt provient de l'érosion rapide d'une chaîne de montagnes récemment formée. Les arkoses sont interstratifiées, avec des argiles, et ont une couleur rougeâtre qui témoigne d'une sédimentation en milieu oxydant. La résistance des feldspaths, même sous climat chaud et humide, est due à la rapidité de l'érosion et de la sédimentation. Les arkoses postorogéniques se situent à proximité de grandes chaînes de montagnes actuelles ou anciennes. Par exemple, on les rencontre au Tertiaire en Suisse et en Bavière du Sud, où elles proviennent de l'érosion de la chaîne alpine en cours de soulèvement. En Europe occidentale, les « Vieux Grès Rouges » du Dévonien proviennent de l'érosion de la chaîne calédonienne, et les « Nouveaux Grès Rouges » du Permien proviennent de l'érosion de la chaîne hercynienne.

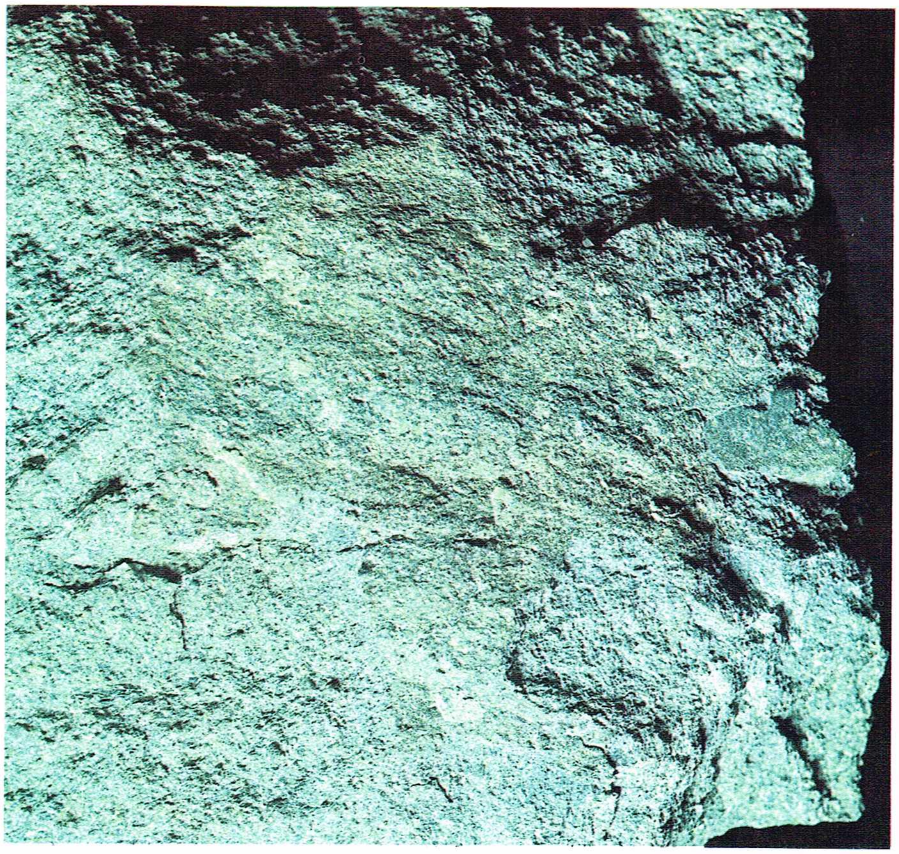
Archives Photo B

▲ ***Échantillon de*** **grauwacke** ***provenant du Tyrol : les grauwackes sont des grès contenant des quantités importantes de matrice détritique (argile et limon fins) - déposée simultanément avec les grains de sable.***

Dans certains grès, des grains de roches carbonatées (calcaire et dolomie) peuvent être présents en quantités importantes (mais inférieures à 50 % car on parle alors de calcarénite) parmi les fragments détritiques. Ces grains calcaires et dolomitiques sont généralement extraformationnels, c'est-à-dire qu'ils représentent des fragments de roches émergées sur la terre ferme qui ont été soumises à l'érosion.

Les **grès volcaniques** (terme abrégé des grès à éléments volcaniques) contiennent des débris de roches et de verres volcaniques, de composition variable, et des minéraux fémiques (pyroxènes, amphiboles, etc.). La composition de ces grès est analogue à celle des **grès tufacés**, qui sont des dépôts mixtes de matériel pyroclastique produit par les éruptions volcaniques et de matériel détritique normal. La distinction entre ces deux types de grès est délicate et nécessite des études géologiques et pétrographiques régionales détaillées. Les grès volcaniques et les grès tufacés sont fréquents dans les séries géosynclinales, surtout au Précambrien et au Paléozoïque. On en rencontre actuellement sur les marges de l'océan Pacifique où l'activité volcanique est importante.

Les **grauwackes** sont des grès contenant des quantités importantes (supérieures à 15 %) de matrice détritique, argiles et limon fin, déposée simultanément avec les grains. La composition minéralogique des grauwackes, assez variable, se rapproche de celle des grès peu évolués. La forme des grains est anguleuse; l'évolution minéralogique et granulométrique est donc très faible. Les grains de quartz représentent environ la moitié de la roche, les fragments polycristallins de roche et les feldspaths sont abondants (plus d'un quart du volume total); le reste est constitué par la matrice détritique fine. Le passage des grauwackes aux quartzites se fait par l'intermédiaire des **subgrauwackes**. Les grains de quartz y sont plus abondants et mieux roulés, alors que le pourcentage de feldspaths et de matrice détritique diminue.

Les feldspaths ont la même composition que dans les arkoses; ils sont presque toujours limpides et non altérés. Les fragments de roches appartiennent à des roches superficielles de la croûte terrestre : roches sédimentaires

C. Bevilacqua

▲ **Argiles** *d'un paysage typique des Bad Lands (Dakota du Sud, États-Unis). La stratification apparaît très nettement.*

▼ **Grauwacke** *du Dévonien supérieur. Il s'agit ici d'un grès formé de fragments de roches métamorphiques (phyllades), de quartz et de feldspaths, de forme anguleuse. Le classement granulométrique est mauvais. Lame mince en lumière polarisée.*

(calcaires, dolomies, etc.), roches volcaniques et roches métamorphiques du type des argilo-schistes et phyllades.

Dans la majorité des grauwackes, les fragments de roches sont prédominants sur les feldspaths ; dans le cas contraire, on parle de *grauwackes feldspathiques*. Ces roches se rapprochent beaucoup des arkoses par leur composition minéralogique mais présentent une texture et une structure sédimentaire différentes. La caractéristique des grauwackes est l'abondance d'éléments détritiques fins qui sédimentent en même temps que la fraction sableuse, alors que les arkoses ont un meilleur classement granulométrique et une proportion d'argile et de limon réduite. L'absence de classement granulométrique ainsi que l'abondance d'argiles et de limon déposés en même temps que le sable indiquent des conditions de dépôts marins profonds où les courants de turbidité sont les principaux agents de transport.

Les grauwackes sont généralement compacts et bien lithifiés car la matrice détritique fine est compactée et parfois recristallisée au cours de la diagenèse. La présence de cette matrice dès le commencement du dépôt confère à ces roches une porosité assez faible, et les précipitations chimiques (de calcite par exemple) sont pratiquement inexistantes.

Archives Photo B

Les grauwackes se déposent en couches régulières d'environ 1 m d'épaisseur et d'extension latérale assez grande. Ils sont généralement dépourvus de fossiles, à l'exception de quelques tests brisés par les courants de turbidité. Dans les séries géosynclinales, on les rencontre souvent en alternance avec des lits d'argiles ; ils constituent alors des formations très épaisses (jusqu'à quelques milliers de mètres) de type *flysch*. Ils sédimentent au cours des phases maximales de subsidence des bassins et proviennent de l'érosion des reliefs, parfois volcaniques, émergés. Cela explique la prédominance des fragments de roches : l'érosion attaque des roches superficielles (sédimentaires ou métamorphiques d'épizone, ou encore volcaniques et pyroclastiques) mais n'atteint pas les roches ignées et métamorphiques profondes. Ces dernières sont érodées seulement à la fin du cycle orogénique, et il y a sédimentation des arkoses.

On connaît de grandes formations de grès rouges à plusieurs niveaux stratigraphiques : Précambrien au Maroc, Cambrien en Afrique du Nord et en Normandie (grès de May-sur-Orne), les grès armoricains du Silurien et les arkoses permiennes du cap Fréhel. Enfin, les quartzites sont bien représentées par les grès de Fontainebleau (Tertiaire du bassin de Paris).

LES ARGILES

Les **argiles** représentent environ la moitié des dépôts sédimentaires anciens et se rencontrent très fréquemment dans les sédiments récents continentaux et marins ; elles sont donc, à ce titre, les roches sédimentaires les plus courantes. Elles proviennent de l'altération d'autres sédiments clastiques et il est difficile de leur appliquer une classification générale. En effet, les sédiments qui sont constitués de fragments de dimensions inférieures à celles du sable ne forment un groupe unique ni du point de vue de leur composition minéralogique ni de celui de leur mode de transport et de sédimentation. Ils peuvent toutefois être divisés en deux groupes suivant la taille de la fraction détritique.

Dans la fraction la plus grossière, on trouve les composants minéralogiques du sable, c'est-à-dire essentiellement des quartz et des feldspaths accompagnés de micas détritiques. Selon l'échelle de Wentworth, cette fraction plus grossière est comprise entre 62 μ (1/16 mm) et 4 μ. Les fragments de dimension inférieure à 4 μ sont en majorité composés de minéraux argileux proprement dits ; ce sont des phyllosilicates qui prennent naissance au cours de l'altération météorique des roches et de la formation des sols.

Le passage entre deux fractions granulométriques de composition minéralogique différente peut être très progressif. Ainsi, les minéraux argileux proprement dits peuvent être abondants dans la fraction de 15-20 μ, alors que le quartz détritique peut constituer des fragments de dimension inférieure à 4 μ.

Le terme d'argile est très largement répandu et peut être utilisé aussi bien pour des sédiments incohérents gorgés d'eau que pour des roches plus ou moins consolidées sous l'effet de la diagenèse. Au fur et à mesure que celle-ci augmente, il y a expulsion de l'eau interstitielle et recristallisation des phyllosilicates; la subsidence des bassins sédimentaires provoque l'enfouissement progressif des sédiments et, lorsque la température atteint une certaine limite (environ 300 °C), les minéraux argileux subissent de profondes modifications. Il existe ainsi toutes les transitions depuis les argiles jusqu'aux argiloschistes et phyllades, qui sont des roches métamorphiques.

Le terme *argilite* désigne une roche formée en majeure partie d'un ou de plusieurs minéraux argileux sans litage notable; il est plus précis que le mot argile, qui peut désigner à la fois la roche, des altérations et des boues, voire les minéraux argileux eux-mêmes. Le terme *shale* désigne une argilite litée, le litage étant dû principalement à la sédimentation elle-même; s'il provient d'un métamorphisme, on parlera de *schiste*.

Les argiles de dimensions granulométriques plus importantes qui constituent la moitié, voire les 2/3, du matériel détritique sont comprises entre 62 et 4 μ et sont appelées *argiles des limons*. Elles correspondent au sédiment incohérent qu'est le limon et sont encore appelées *silts*. Les argiles des limons ont un aspect granuleux, alors que les *argiles fines* sont homogènes. Dans la nomenclature utilisée pour les réfractaires et les céramiques, ces deux types lithologiques sont connus sous le nom d'*argiles maigres* (avec limon quartzeux) et d'*argiles grasses* (à grain très fin et essentiellement formées de phyllosilicates).

Ces deux groupes granulométriques n'ont pas le même comportement au cours du transport et du dépôt. Le limon est habituellement transporté avec la fraction la plus grossière et se dépose sous forme de grains isolés, de façon analogue au sable. Les argiles fines (et généralement le matériel inférieur à 15-20 μ) obéissent aux lois des colloïdes : elles sont transportées en suspension quasi uniforme et la floculation exerce une très grande influence sur la sédimentation. Le phénomène de floculation dépend principalement des caractéristiques physico-chimiques de l'eau, et en particulier de sa teneur en électrolytes. Quand le matériel argileux fin, qui se trouve sous forme de particules isolées dans les eaux douces continentales, arrive dans un bassin marin, il flocule sous forme de micelles, ou agrégats de matériel, d'une certaine taille (15-20 μ). La vitesse de sédimentation de ces micelles est évidemment plus grande que celle des particules simples qui les composent; le dépôt s'effectue donc plus rapidement à l'embouchure des grands fleuves. Une autre partie du matériel fin s'éloigne plus au large et se dépose dans le milieu marin profond.

I.G.D.A.

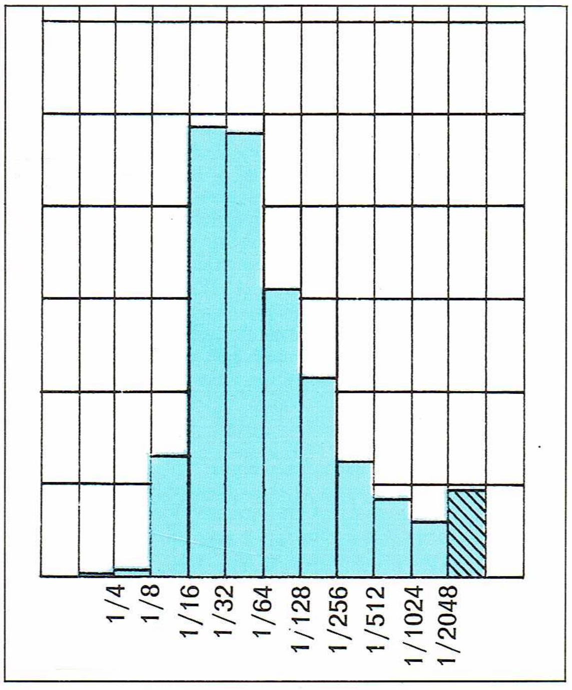

◀ **Histogramme granulométrique** ***d'une*** **argile** ***oligocène (Alexandrie). La colonne à l'extrême droite, hachurée, représente le pourcentage en poids de la fraction inférieure à 0,5 μ.***

C. Bevilacqua

▲ ***Un échantillon d'*****argile** ***très consolidée*** **(argilite).**

Le phénomène de floculation confère aux argiles certaines caractéristiques granulométriques qui sont déterminées par les conditions dynamiques du milieu de transport au moment de la floculation et qui, ultérieurement, ne changent pas et ne sont pas influencées par les facteurs dynamiques du milieu de sédimentation. Ainsi, les courbes de fréquence granulométrique des argiles marines présentent un « pic » pour les diamètres fins qui n'existe pas dans les courbes correspondant à des argiles sédimentées en milieu continental.

La texture extrêmement fine des roches argileuses rend leur étude et leur classification très délicates. Contrairement à la plupart des autres roches, leur observation en lame mince au microscope ne fournit pas les données suffisantes; il faut avoir recours aux analyses chimiques pour pouvoir distinguer les différents types d'argiles. Cependant, même les analyses chimiques donnent peu de renseignements sur la minéralogie car les résultats dépendent de la pureté des échantillons analysés. En effet, les argiles des limons, par exemple, sont plus riches en silice en raison de la présence de quartz détritique dans cette fraction granulométrique. En réalité, le meilleur critère de classification des argiles est celui de la minéralogie dont l'étude s'effectue par l'analyse aux rayons X. On peut également distinguer les argiles d'après leur milieu de sédimentation (marin, lacustre, fluviatile, etc.) mais cette méthode, qui se heurte à de nombreuses difficultés dans les séries anciennes, n'est applicable en toute sécurité qu'aux sédiments actuels.

Les composants minéralogiques des argiles peuvent être divisés en trois groupes : les minéraux clastiques, que l'on rencontre aussi dans les sables mais qui sont de plus petite taille, les minéraux argileux proprement dits, et certains composés comme le carbonate de calcium, des substances organiques, des composés ferrifères, etc. La proportion de ces trois groupes est variable selon les types de formations argileuses.

Dans les **argiles des limons,** les minéraux « du sable » comme le quartz, les feldspaths et les micas sont prédominants. Ces argiles peuvent se déposer dans n'importe quel milieu sédimentaire mais elles nécessitent la présence de courants assez forts et continus, susceptibles de les transporter dans le cas où elles ne sont pas accompagnées de quantités importantes de matériel plus fin. Les argiles des limons sont fréquentes dans les milieux continentaux fluviatiles, en milieu côtier près de l'embouchure de grands fleuves, et dans les milieux marins néritiques. Les argiles des limons peuvent présenter de nombreuses structures sédimentaires caractéristiques des sables (stratifications parallèles et obliques, graded-bedding, etc.); toutefois, ces structures sont moins nettes en raison de la finesse de la texture et probablement de leur fréquence moindre. L'enfouissement et les modifications diagénétiques de la matrice argileuse plus fine provoquent la lithification de la roche.

Un type particulier d'argiles des limons est le **lœss,** dépôt éolien de couleur jaunâtre qui se présente sous forme de strates massives assez épaisses et mal individualisées. Le lœss résulte d'un dépôt à partir de courants aériens transportant du matériel détritique fin en suspension. Les dépôts peuvent atteindre une épaisseur de quelques dizaines de mètres; ils sont généralement bien granoclassés, la taille des particules diminuant rapidement lorsque l'on s'éloigne de la région d'origine du limon. Les minéraux argileux sont présents en quantités variables et constituent une matrice interstitielle entre les grains de limon.

Avant d'aborder l'étude des argiles fines, il est nécessaire de rappeler brièvement la composition chimique et la structure cristalline de ces minéraux car elles jouent un rôle beaucoup plus important que dans les argiles des limons. Le réseau des phyllosilicates est constitué d'une série de feuillets élémentaires empilés les uns sur les autres.

Un premier type de minéral argileux est la **kaolinite,** dont la formule chimique peut s'écrire $Al_2Si_2O_5(OH)_4$. Le feuillet élémentaire est constitué de deux couches : l'une formée de tétraèdres dont le sommet est formé d'atomes d'oxygène et le centre d'atomes de silicium; l'autre couche est formée d'octaèdres ayant des oxygènes (ou oxhydryles) au sommet et de l'aluminium au centre. Le réseau cristallin provient de la superposition de ces feuillets élémentaires. Au microscope électronique, les cristaux de kaolinite se présentent sous forme de lamelles pseudo-hexagonales généralement bien délimitées.

L'**halloysite** est formée de feuillets de kaolinite séparés par des couches d'eau. Au microscope électronique, elle présente souvent l'aspect de tubes cylindriques dû à l'enroulement des feuillets.

Pour les autres minéraux argileux les plus importants, le feuillet élémentaire est constitué de trois couches : une couche octaédrique, avec de l'aluminium au centre et des oxygènes ou oxhydryles au sommet, située entre deux couches de tétraèdres SiO_4. Dans les minéraux du groupe de la **montmorillonite,** les atomes trivalents d'Al sont partiellement substitués par des atomes bivalents comme le Mg ou par des atomes trivalents comme le Fe^{3+}, et le silicium, tétravalent, est remplacé en partie par de l'aluminium. Ces substitutions créent dans le réseau un déficit de charge électrique qui est compensé par l'adsorption de cations métalliques (Na, Ca) entre les feuillets élémentaires. Des molécules d'eau se trouvent également en position interfoliaire, ce qui donne au minéral une capacité de gonflement ou de rétraction perpendiculairement aux feuillets élémentaires. On retrouve cette caractéristique dans un autre minéral argileux, de structure analogue, la **vermiculite,** dans laquelle les cations interfoliaires sont surtout représentés par le magnésium.

Dans les minéraux du groupe de l'**illite,** le feuillet élémentaire est identique à celui de la montmorillonite mais les substitutions isomorphiques intéressent les tétraèdres SiO_4 (Al^{3+} à la place de Si^{4+}) alors qu'il n'y a pas de substitution au niveau des octaèdres. Le déficit de charge est compensé par du potassium interfoliaire.

Dans les minéraux du groupe de la **chlorite,** le réseau est constitué d'une alternance de feuillets de type illite et de couches de $Mg(OH)_2$ ayant une structure identique à celle de la brucite. Les substitutions isomorphiques sont extrêmement variées : on observe, par exemple, la substitution du Si par Al dans les tétraèdres, et d'Al par Mg, Fe, Ni ou Cr dans les couches octaédriques.

Certaines argiles sédimentées dans des milieux à forte salinité (par exemple, dans des lagunes ou des lacs de régions arides) contiennent des minéraux comme l'**attapulgite,** la **sépiolite** et la **palygorskite,** qui n'existent pas habituellement dans les argiles communes. On rencontre également des minéraux interstratifiés à couches mixtes; ils sont formés par la superposition, plus ou moins régulière, de feuillets élémentaires ayant une composition et une structure caractéristiques des diverses familles des minéraux argileux (par exemple, interstratification d'illite-montmorillonite, d'illite-chlorite, de montmorillonite-vermiculite, etc.).

Les minéraux argileux se forment en grande partie au cours de l'altération météorique des roches et surtout pendant les processus de pédogenèse (formation des sols); ils sont ensuite transportés en milieu aqueux vers les zones de sédimentation. Contrairement à celle des autres minéraux détritiques, la composition des minéraux argileux subit d'importantes modifications au cours du transport et de la diagenèse. D'autre part, ils peuvent se former par synthèse à partir des ions présents dans les solutions interstitielles. Ainsi, la composition minéralogique des argiles fines est le résultat de processus très divers : elles peuvent être en partie détritiques (il y a alors héritage); elles peuvent provenir de la modification des réseaux cristallins d'autres phyllosilicates (il y a dans ce cas transformation); enfin, si elles précipitent directement à partir des substances en solution, il y a néoformation. Les minéraux interstratifiés représentent les divers stades de transformation des phyllosilicates et se rencontrent aussi bien dans les sols que dans les sédiments et les roches argileuses.

Les associations minéralogiques présentes dans les argiles représentent les conditions dans lesquelles a eu lieu la diagenèse mais conservent généralement des traces importantes de la composition minéralogique qui existait au début de la sédimentation. Par exemple, dans les sédiments argileux marins actuels, on observe souvent une diminution progressive et régulière de la teneur en kaolinite quand on s'éloigne de la côte. Ce phénomène se rencontre également dans les formations anciennes; il permet ainsi d'effectuer une reconstitution paléogéographique de la ligne de côte au moment de la sédimentation.

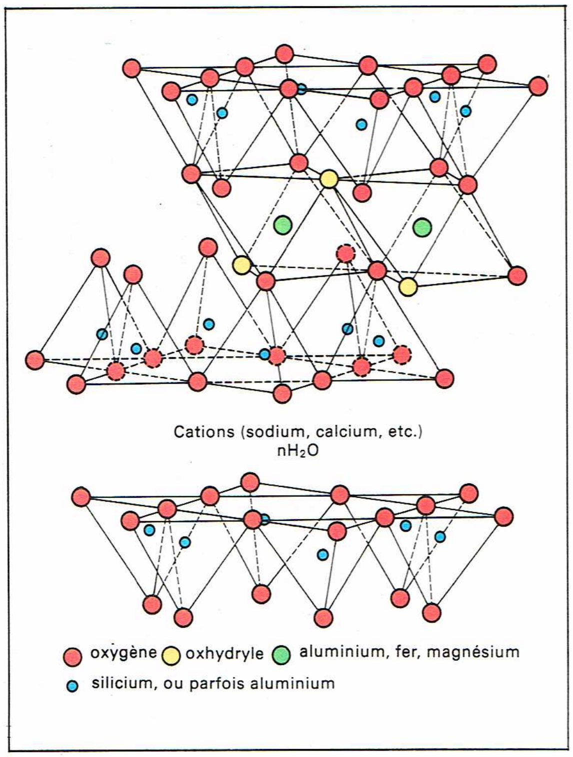

I.G.D.A.

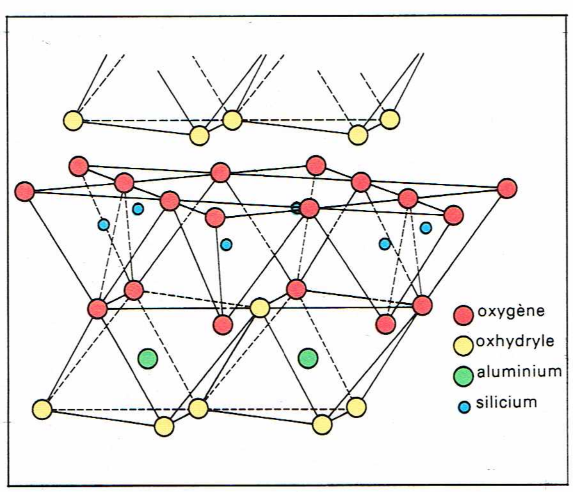

I.G.D.A.

▶ *En haut, réseau de la* montmorillonite *(d'après Grim L.E.)* [Clay Mineralogy, *Mac Graw Hill Book Corp, 1953*]. *Au-dessous, réseau cristallin de la* kaolinite *(d'après Gruner et Grim).*

Binois - Pitch

▲ ***Les* argiles fines *sont subdivisées en* argiles résiduelles, *formations d'étendue limitée, et en* argiles transportées *qui comprennent des dépôts formés dans divers milieux sédimentaires, continentaux ou marins. Ici, des traces laissées dans l'argile par la faune des zones humides.***

Les **argiles fines** sont classiquement subdivisées en *argiles résiduelles,* qui restent sur le continent, et en *argiles transportées,* sédimentées dans des zones diverses. Le groupe des argiles transportées, très vaste, peut être subdivisé suivant le milieu de sédimentation si la composition chimique et minéralogique des argiles est caractéristique de ce milieu.

— Les *argiles résiduelles* anciennes constituent des formations d'étendue très limitée et très variable. Elles sont différentes des autres roches sédimentaires détritiques car elles n'ont pas subi de transport et peuvent donc être considérées comme des paléosols. Par la suite, un transport à courte distance peut intervenir (il s'agit, le plus souvent, d'un transport de type éluvial ou colluvial) avant le dépôt définitif. La composition minéralogique des argiles résiduelles est caractéristique : la kaolinite domine, et les autres minéraux argileux sont pratiquement absents dans le cas où les processus de pédogenèse sont suffisamment longs, et où les conditions climatiques et géomorphologiques provoquent une dégradation très importante des sols avec une exportation complète des cations métalliques. Une altération encore plus poussée conduit à l'élimination de la silice et à la formation de dépôts d'hydroxydes de fer et d'aluminium (bauxites et latérites). Les argiles résiduelles ont une couleur blanc laiteux et contiennent parfois du limon et du sable quartzeux en quantités assez importantes. Elles sont massives et dépourvues de stratification. Elles peuvent également contenir des hydroxydes de fer et d'aluminium, ce qui confère au dépôt une couleur rouge.

— Les *argiles transportées* comprennent les dépôts formés dans divers milieux sédimentaires, continentaux ou marins. L'attribution d'une roche argileuse à un milieu de sédimentation déterminé s'effectue selon des critères minéralogiques, chimiques et granulométriques. Cette détermination est souvent délicate et peut être confirmée par l'étude d'un éventuel contenu paléontologique de la roche.

Les **argiles glaciaires** sédimentent dans les lacs des régions glaciaires et présentent généralement la structure caractéristique des varves. Sous des conditions climatiques froides, l'altération chimique est pratiquement inexistante; seule l'altération à caractère physique a lieu. L'action de broyage des glaciers en mouvement sur le matériel détritique donne naissance à une grande quantité de matériaux clastiques très fins, constitués des principaux minéraux présents dans la roche de départ. La composition minéralogique des argiles glaciaires est la suivante : parmi les minéraux détritiques, le quartz, la calcite, la muscovite et la chlorite prédominent dans la fraction sableuse; parmi les minéraux argileux, l'illite et la chlorite dominent. Les principaux facteurs qui influencent la composition des argiles glaciaires sont : la nature des anciennes couvertures sédimentaires ou des manteaux d'altérations préglaciaires ou interglaciaires qui participent à l'alimentation des moraines; l'altération physique dominante des climats préglaciaires.

Les **argiles fluviatiles** sont assez répandues et se déposent sur de grandes surfaces au moment des crues des fleuves. Ces argiles transportées ont une composition identique à celle des roches mères ou des sols des bassins versants. On y trouve généralement des quantités assez abondantes de limon, et parfois des matières organiques provenant de la végétation palustre et de petites quantités d'hydroxydes de fer.

Les **argiles lacustres** présentent des caractéristiques analogues à celles des argiles fluviatiles et une composition minéralogique variable. Les minéraux argileux sont généralement hérités et sont accompagnés d'autres minéraux comme la calcite, la pyrite ou la sidérite. A cette sédimentation détritique s'ajoute une sédimentation chimique qui provoque la transformation des argiles héritées. On y rencontre, en effet, de la kaolinite héritée et des montmorillonites et illites transformées. D'autre part, dans certains lacs salés de régions désertiques, des néoformations peuvent apparaître. L'attapulgite, l'illite et

D. Fernandez

▲ *Les argiles sont très répandues dans les Apennins et provoquent la morphologie caractéristique des calanques (Toscane).*

d'autres minéraux évaporitiques sont très fréquents dans les **argiles lagunaires.**

Les **argiles marines** constituent le type le plus courant parmi les argiles transportées : elles se distinguent des argiles continentales par les fossiles et microfossiles qu'elles contiennent. La composition minéralogique des argiles marines est très variable : les phyllosilicates à trois couches, c'est-à-dire illite et montmorillonite, chlorite et parfois kaolinite, sont prédominants, surtout près des côtes. On y trouve également une certaine quantité de sulfures, d'hydroxydes ou de carbonates de fer. Le carbonate de calcium est fréquent et provient d'une précipitation chimique ou de tests de microfossiles. Quand la teneur en calcaire est comprise entre 25 et 75 %, les roches argileuses peuvent être appelées des **marnes.** Si les teneurs sont inférieures ou supérieures à ces pourcentages, on parle respectivement d'*argiles calcaires* et de *calcaires argileux.*

D. Fernandez

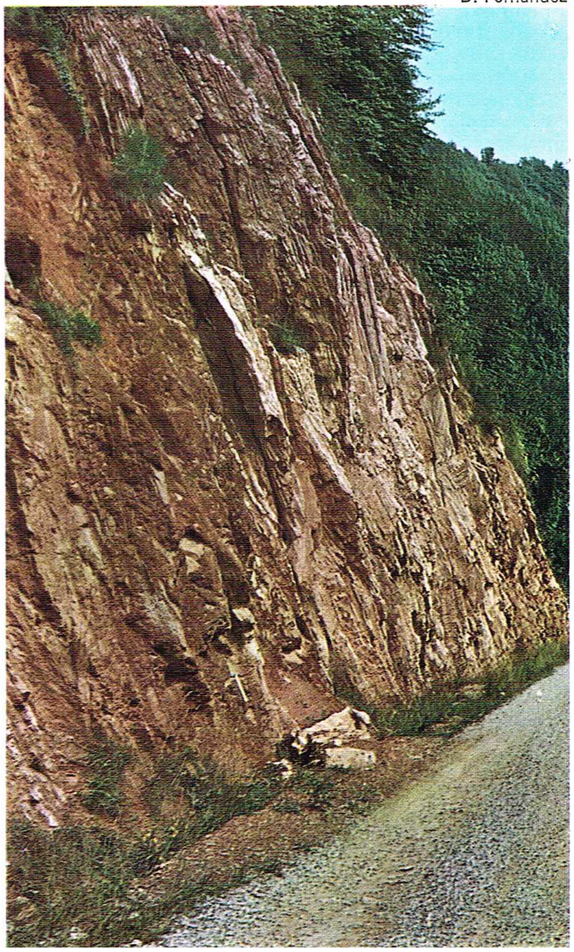

▶ *Couches subverticales d'argiles rouges du Crétacé supérieur (Lombardie).*

Les argiles marines peuvent contenir de la silice amorphe soit sous forme de restes d'organismes (spicules d'Éponges, tests de Radiolaires et de Diatomées), soit en imprégnations d'opale. La silice qui est présente en solution ionique ou colloïdale peut précipiter en même temps que le matériel argileux; il y a alors formation d'argiles siliceuses. Celles-ci contiennent, en effet, un pourcentage de silice trop important pour être attribué aux seuls minéraux argileux et qui est dû à la présence de quartz détritique ou de débris siliceux d'organismes. Au fur et à mesure de l'augmentation de la teneur en silice, on passe à des « silex » contenant des impuretés argileuses et appelés **porcellanites.**

Les **argiles noires** constituent un type particulier. Elles doivent leur couleur aux quantités importantes de matière organique et de sulfure de fer qu'elles contiennent. Ce type d'argiles est relativement rare car il requiert des conditions de milieu très particulières. En effet, l'apport clastique doit être réduit et les eaux ne doivent pas être renouvelées par la circulation normale des courants. Elles s'appauvrissent ainsi en oxygène et l'activité organique, faible ou nulle sur le fond, n'y permet pas l'élimination des matières animales. D'autre part, la présence d'hydrogène sulfuré dans l'eau profonde et dans l'eau interstitielle des sédiments provoque la précipitation de sulfure de fer et parfois de sulfures d'autres éléments (cuivre...). Ces conditions se rencontrent dans des mers intérieures à faibles marées et dans des bassins fermés dits euxiniques.

Les argiles noires représentent un type exceptionnel; en effet, les argiles ont habituellement une couleur grise à verte, ou parfois rouge. Dans ce dernier cas, relativement fréquent, elles sont souvent associées à des grès et parfois à des conglomérats de même couleur. Ces formations détritiques, brun-rouge, étaient considérées comme ayant une origine continentale. En réalité, toutes les argiles rouges ne sont pas continentales. Leur couleur est due à la présence d'oxydes et d'hydroxydes de fer adsorbés à la surface des particules argileuses, et elles existent actuellement en milieu marin profond sous forme de boues rouges.

LES CALCAIRES

Les **calcaires** sont des roches sédimentaires d'origines diverses (chimique, organique, détritique) qui ont, en général, un pourcentage élevé de $CaCO_3$ sous forme de calcite, celle-ci pouvant constituer plus de 50 % de la roche. Dans le cas de roches détritiques, il est nécessaire de considérer la composition des fragments par rapport au pourcentage de ciment secondaire. Dans les calcaires, peuvent exister des termes de transition avec les autres groupes de roches sédimentaires. S'ils contiennent des quantités importantes de matériel argileux, on passe progressivement à des marnes puis aux argiles. Au contraire, si la phase non calcaire est constituée par du quartz ou des silicates détritiques de la taille de grains de sable, on a un calcaire gréseux. Les calcaires peuvent aussi contenir de la dolomite, en quantités variables, et constituer ainsi les stades de transition jusqu'au groupe des dolomies; enfin, s'ils sont imprégnés de silice diffuse sous forme d'opale, on a le terme de passage aux silexites (calcaire siliceux).

La solubilité du carbonate de calcium dans l'eau est assez faible et augmente en présence de HCO_3^- formé par dissolution de l'anhydride carbonique dans l'eau et l'ionisation de l'acide carbonique H_2CO_3. Le calcium est le cation le plus abondant en solution dans les fleuves et les lagunes, ainsi que dans l'eau de mer. Si les conditions physico-chimiques sont telles que l'eau s'appauvrit en anhydride carbonique, la solubilité de $CaCO_3$ diminue et il y a précipitation. Le carbonate de calcium peut précipiter sous deux formes minéralogiques : l'aragonite, orthorhombique, et la calcite, rhomboédrique. La structure cristalline de l'aragonite est instable dans les conditions diagénétiques primaires : ce minéral se forme très facilement à partir de sels en solution mais a tendance à se transformer en calcite.

Les processus sédimentaires qui sont à l'origine de la formation calcaire sont souvent de nature biochimique ou chimique. Dans le premier cas, le carbonate de calcium en solution dans les eaux marines ou lacustres est fixé par les organismes dont il constitue le squelette plutôt sous forme d'aragonite que de calcite. Après la diagenèse,

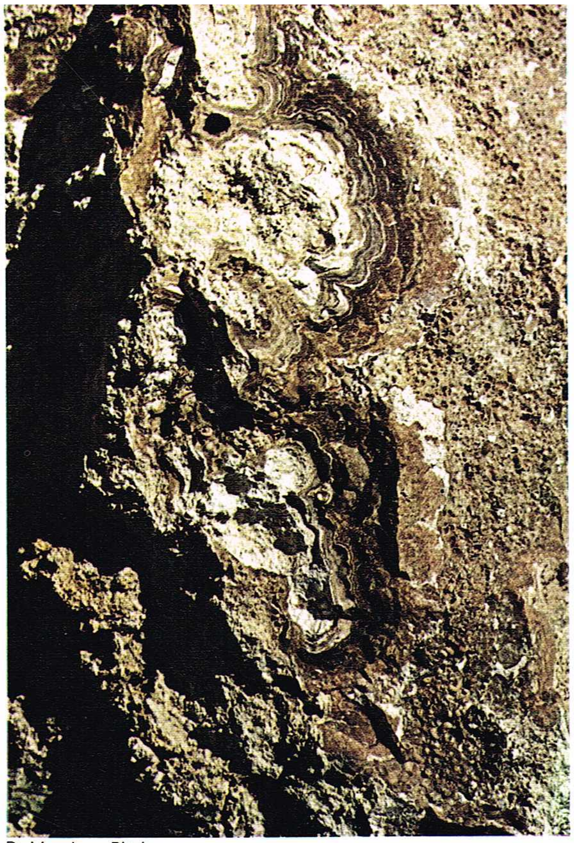

D. Mercier - Pitch

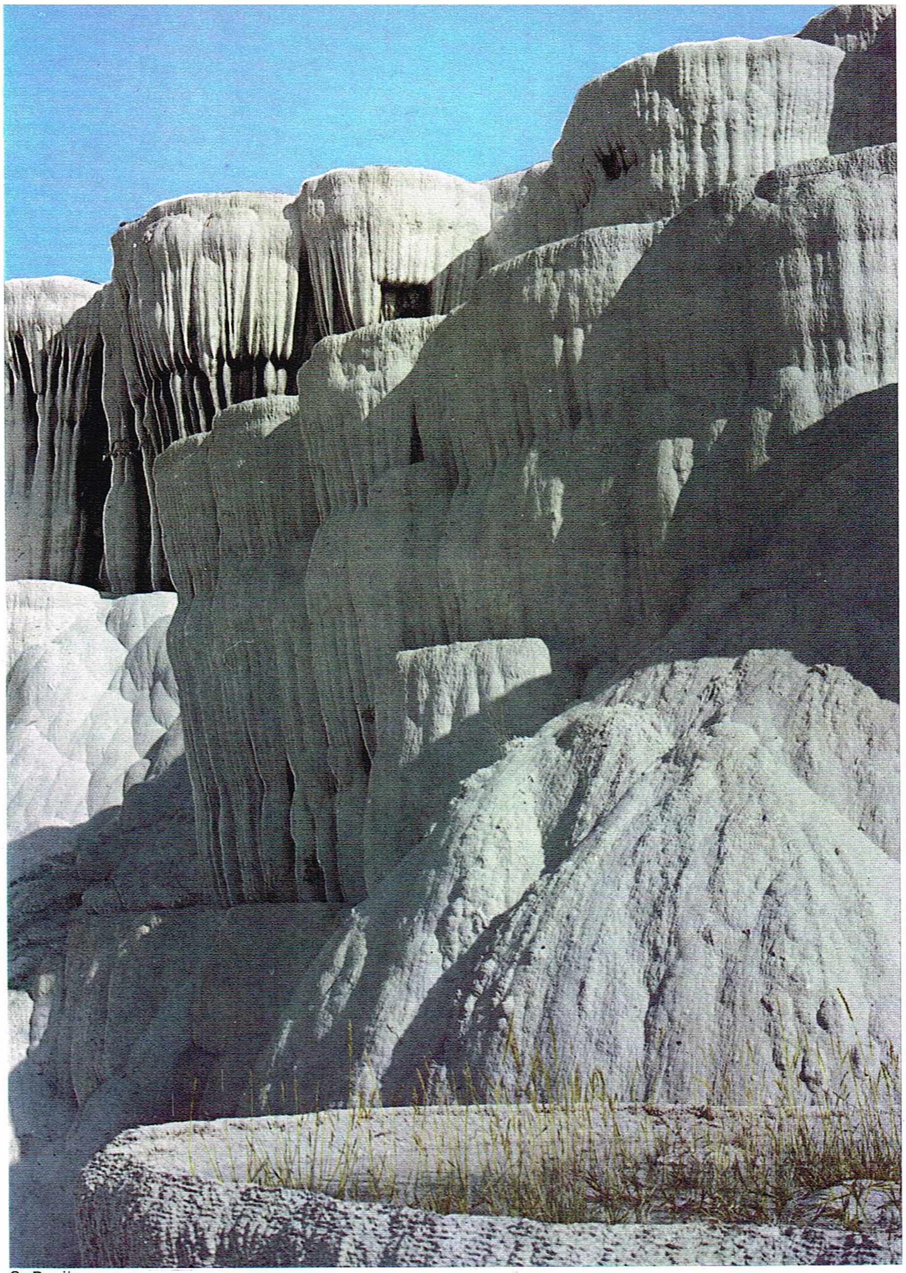

C. Bevilacqua

▲ ***A gauche, un type de*** **calcaire de biostrome :** ***un calcaire en « chou-fleur » constitué de restes d'Algues et d'indusies de phryganes (Oligocène; Montaigu-le-Blin, Limagne).***
A droite, **dépôts calcaires** ***formés à partir d'eaux thermales sursaturées en carbonate de calcium (Pamukkale, Turquie).***

les dépôts calcaires organogènes sont uniquement formés de calcite. Ces organismes à squelette calcaire peuvent être fixés (coraux, Algues calcaires, etc.) ou libres. Les tests de ces organismes se sédimentent à la mort des individus ou sont libérés pendant les périodes de reproduction. L'accumulation des parties calcaires des organismes, surtout marins, peut produire des dépôts très épais et de grande extension.

Le carbonate de calcium sédimente également à la suite de processus biologiques, comme ceux dus aux Algues. Celles-ci absorbent par photosynthèse l'anhydride carbonique en solution, ce qui modifie les conditions physico-chimiques du milieu et provoque la précipitation d'une fine poudre d'aragonite se déposant sur le fond. De même, les processus biologiques de certaines espèces de Bactéries provoquent une libération d'ammoniac et donc une alcalinisation du milieu qui peut causer la précipitation de carbonate de calcium. Les calcaires d'origine organogène sont assez semblables à ceux de sédimentation chimique pure du carbonate de calcium. Cette précipitation chimique se produit à la suite d'une sursaturation des eaux favorisée par un climat chaud et aride, soit dans un milieu continental, soit dans un milieu marin sans communication avec la mer ouverte (bassins à circulation faible). Ce type de calcaires, assez répandu, peut être associé à des évaporites, bien que la précipitation de $CaCO_3$ dépende beaucoup plus de la perte d'anhydride carbonique du milieu que de l'évaporation de l'eau.

Les calcaires d'origine biochimique et chimique sont également appelés *autochtones,* parce qu'ils ont sédimenté à l'endroit de la formation du carbonate de calcium sans qu'il y ait eu transport. Il existe un second groupe de calcaires, appelés *allochtones,* qui sédimentent à la suite de l'érosion et du transport, sous forme détritique, de matériel calcareux préexistant. L'érosion peut survenir après la diagenèse et l'émersion des calcaires, à cause d'une érosion intense sur le continent. Cependant, elle peut également avoir lieu juste après la sédimentation du matériel calcaire autochtone; dans ce cas, il y a resédimentation après un transport plus ou moins long à l'intérieur du bassin sédimentaire. Les calcaires allochtones ont généralement l'aspect de roches détritiques à grains plus ou moins grossiers.

Il arrive souvent qu'une roche ou un sédiment calcaire ait une origine mixte parce qu'il est constitué de matériel d'origine diverse. Par exemple, les *calcaires oolithiques* sont constitués de petites sphérules : les oolithes, qui proviennent de l'agrégation de boue calcaire d'origine chimique autour d'un noyau; par la suite, elles ont été transportées et déposées à la façon d'un sédiment détritique sableux. Il en est de même pour les calcaires détritiques organogènes, qui sont sédimentés en partie près du lieu d'origine et qui proviennent, d'autre part, de différents endroits du bassin sédimentaire après un transport plus ou moins long (matériel bioclastique).

La classification des calcaires est complexe car les phénomènes diagénétiques (circulation de solutions, recristallisations, etc.) masquent les caractères primaires, surtout pour les calcaires fins. Ils sont généralement séparés en quelques groupes d'après leurs caractéristiques macroscopiques et leur origine.

● Parmi les **calcaires autochtones,** les calcaires de bioherme, les calcaires de biostrome et certains types de calcaires pélagiques ont une origine organique.

Les **calcaires de bioherme** ou de récifs sont constitués de restes squelettiques d'organismes aquatiques. Les biohermes sont des amas de ces organismes constructeurs qui se développent dans certaines zones des fonds marins, à faible profondeur et dans des conditions de milieu favorables à la vie. Certains biohermes peuvent également se former en milieu lacustre. Le fond marin entourant le bioherme est constitué de sédiments variés (détritiques ou organiques). Les biohermes sont en relief par rapport aux bassins de sédimentation, et leur sommet est en général émergé (atolls, barrières de coraux). Leurs dimensions peuvent varier de quelques mètres pour les plus petites associations d'organismes constructeurs jusqu'à des dizaines, voire des centaines de mètres pour les grandes barrières. Un très bel exemple de bioherme se rencontre en Bourgogne aux environs de Mailly-le-Château.

Dans les séries géologiques, les biohermes sont souvent plus ou moins dolomitisés; l'aspect caractéristique est lentiforme ou en intercalations massives dans des roches sédimentaires stratifiées (calcaires, argileuses). Les calcaires qui les constituent sont formés de restes calcitiques d'organismes constructeurs fixés ou parfois libres.

▶ *Lame mince en lumière polarisée de* calcaire pélagique. *Les débris calciques organogènes sont dispersés dans une masse calcaire cryptocristalline. Au centre, un article de* Saccocoma, *Crinoïde pélagique. Les fragments en dents de scie en bas à gauche sont des aptychus (opercule d'Ammonite) [Jurassique; Bergame]. Page ci-contre, en haut à gauche, section polie* d'albâtre calcaire; *à droite, couches verticales de* calcaire argileux *séparées par des lits plus argileux (Jurassique; Bergame).*

Les espaces situés entre ces organismes sont parfois vides, ce qui confère à la roche une très grande porosité. Cependant, le plus souvent, les espaces sont totalement remplis par des débris de calcaire organogène provenant des organismes de surface. Le remplissage peut également être constitué par du calcaire de précipitation chimique à la suite d'un déficit important en anhydride carbonique de l'eau de mer. Ce phénomène donne naissance à un ciment secondaire de calcite limpide, bien cristallisée, formée au cours de la diagenèse. La porosité primaire élevée des calcaires de bioherme facilite la dolomitisation et la circulation des eaux interstitielles à partir desquelles se fait la précipitation. C'est pourquoi la structure originelle, essentiellement de nature organique (fossiles), est masquée.

Les organismes constructeurs de biohermes appartiennent à divers groupes biologiques dont certains existent encore à l'heure actuelle. Parmi eux, les Algues constituent le groupe le plus important. Elles peuvent fixer le carbonate de calcium dissous dans l'eau; ainsi, leur thalle, qui durcit, est imprégné de sédiment calcaire fin d'origine variable (détritique, chimique ou biochimique). Depuis le Tertiaire jusqu'à l'époque actuelle, les organismes constructeurs les plus fréquents dans les biohermes sont les Algues du genre *Lithothamnium* (Rhodophycée) et *Halimeda* (Chlorophycée). Les calcaires construits contiennent des organismes fixés comme les coraux, des organismes fossiles comme les Stromatopores et les Archéocyatidés (Paléozoïque), des Bryozoaires et des Rudistes (Crétacé supérieur). Les Lamellibranches, Gastéropodes et Brachiopodes s'y trouvent également en grandes quantités. Parmi les Foraminifères (organismes unicellulaires généralement microscopiques), on trouve des Fusulines de grande taille dans des biohermes paléozoïques et des Alvéolines très développées au Tertiaire.

Les **calcaires de biostrome** se forment dans un milieu analogue à celui qui favorise la croissance des biohermes. Il s'agit donc de fonds marins peu profonds (néritiques), avec des eaux limpides sans apports détritiques et sursaturées en CO_3Ca en raison de la température élevée. Ces dépôts sont essentiellement constitués de restes calcaires d'organismes benthoniques du type Mollusques, Échinodermes, Brachiopodes, Algues, etc., sédimentés dans leur milieu de vie sans avoir subi ni transport ni action des courants.

Les calcaires de biostrome se distinguent des calcaires de bioherme par le fait qu'ils s'étendent sur des zones très vastes comparativement à leur épaisseur, et surtout par le fait qu'ils sont stratifiés en bancs d'épaisseur variable (quelques mètres) séparés par des lits de calcaire plus argileux et pauvres en fossiles. Les bancs calcaires représentent l'accumulation de restes d'organismes sur de grandes étendues des fonds marins, alors que les niveaux plus argileux sont le résultat d'une sédimentation chimique ou détritique pendant des périodes défavorables à la vie. Les calcaires de biostrome contiennent également des quantités importantes de matrice calcaire fine, interstitielle entre les restes fossiles, provenant de la diagenèse d'une boue calcaire (plus ou moins argileuse) de précipitation chimique ou biochimique. Le rapport quantitatif entre la matrice et les restes d'organismes peut varier à l'intérieur d'une couche suivant les changements des conditions de milieu au cours de la sédimentation. Les stromatolithes (Précambrien supérieur et base du Paléozoïque) constituent un type particulier. Ces roches sont constituées de couches régulières de calcaire ayant une structure laminée caractéristique, que l'on interprète comme résultant de l'action d'organismes végétaux fossiles ou comme le produit de leur activité biologique.

Les calcaires de biostrome sont donc assez semblables aux autres roches calcaires (lumachelle, etc.) formées de restes d'organismes sédimentés en milieu marin. La distinction entre autochtonie et allochtonie est délicate car le transport qu'ont pu subir ces organismes est très variable.

Les **calcaires pélagiques** sont des roches à grain fin, généralement compactes (parfois pulvérulentes), de couleur grise à blanchâtre. Ces calcaires, d'origine organogène, proviennent de l'accumulation de minuscules tests calcaires d'organismes unicellulaires planctoniques ou benthoniques en milieu marin, à profondeur variable. Le carbonate de calcium qui forme les tests de ces organismes est extrait de l'eau de mer, sans qu'il y ait eu de transport. La roche qui en dérive est par conséquent autochtone. La quantité de matière organique de ces roches est assez faible parce que les organismes qui s'y déposent ont déjà abandonné leur protoplasme au cours de la reproduction.

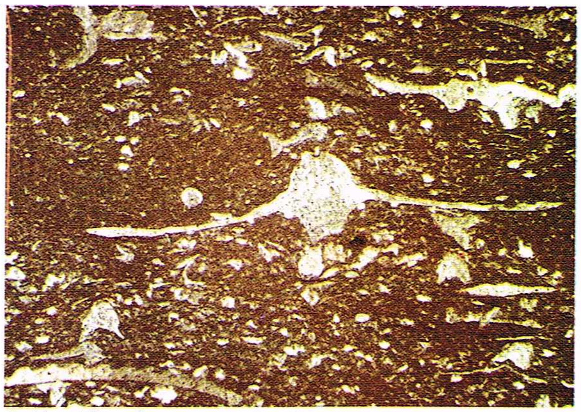
Archives Photo B

Les organismes participant à la formation des calcaires pélagiques sont des Foraminifères planctoniques et benthoniques, ainsi que des Flagellés planctoniques parmi lesquels les Coccolithophoridés sont les plus importants. Les coccolithes sont des petites plaques elliptiques à structure fibro-radiée qui ont la dimension du micron. Elles peuvent constituer des formations géologiques très importantes, comme celle de la craie (calcaire blanc et friable) mésozoïque qui s'étend dans le bassin de Paris et en Angleterre méridionale.

Du point de vue paléogéographique, on peut essayer de rapprocher les calcaires pélagiques des actuelles boues à Globigérines (Foraminifères planctoniques) qui recouvrent de grandes zones des fonds océaniques éloignées des côtes, à des profondeurs comprises entre 2 000 m et 5 000 m. En fait, le point essentiel, à cet égard, est l'absence d'apports détritiques au cours de la formation des calcaires pélagiques. Il faut alors imaginer la présence d'un haut-fond sous-marin ou partiellement émergé (chapelet d'îles parallèles à la côte) qui protégerait la zone de sédimentation des apports détritiques venant du continent. Cependant, les actuelles boues à Globigérines n'existent pas à des profondeurs supérieures à 5 000 m car les petits fragments calcaires sont dissous dans les eaux océaniques profondes, riches en anhydride carbonique.

Certains types de calcaires pélagiques ont une origine purement chimique. Ils sont macroscopiquement identiques aux calcaires d'origine organique mais sont toujours compactés et cimentés par recristallisation diagénétique du carbonate de calcium. En lame mince, au microscope, on peut voir qu'ils sont constitués de calcite microcristalline, sans aucune trace de débris organiques.

La sédimentation chimique du carbonate de calcium est favorisée par la circulation océanique, qui amène en surface les eaux profondes riches en ce sel. La diminution de la pression hydrostatique, l'augmentation de la température et l'agitation provoquent la dispersion d'une partie de l'anhydride carbonique dissous dans l'atmosphère et donc la précipitation de $CaCO_3$. Pour que la sédimentation de calcaires pélagiques d'origine chimique ait lieu, il est nécessaire d'avoir un bassin marin à circulation limitée dont la concentration en sels dissous augmente progressivement du fait de l'évaporation. Ces conditions sont parfois réalisées dans des mers peu profondes sous climat chaud (par exemple, les côtes du golfe Persique, les îles Bahamas, les lagunes des atolls coralliens). La concentration en $CaCO_3$ atteint et dépasse la saturation, et il y a précipitation brusque sous forme d'une fine poudre d'aragonite. D'autre part, si les eaux des fonds océaniques sont sursaturées en carbonate de calcium, de grandes surfaces des fonds marins peuvent être recouvertes d'une fine boue calcaire d'origine chimique. La diagenèse de ce type de sédiments conduit à des calcaires pseudoconglomératiques car les apports détritiques, de tailles diverses, sont englobés dans un ciment secondaire.

Les calcaires blancs purs, microcristallins, se délitent généralement selon des surfaces de stratification extrê-

▶ *Page ci-contre, dans la marge : en haut, section polie de* lumachelle *(Trieste); en bas,* calcarénite *à grains calcaires et dolomitiques; on peut voir des prismes calcitiques correspondant à des restes de Lamellibranches, du quartz et des phyllosilicates (Crétacé supérieur; Bergame) [lame mince en lumière polarisée].*

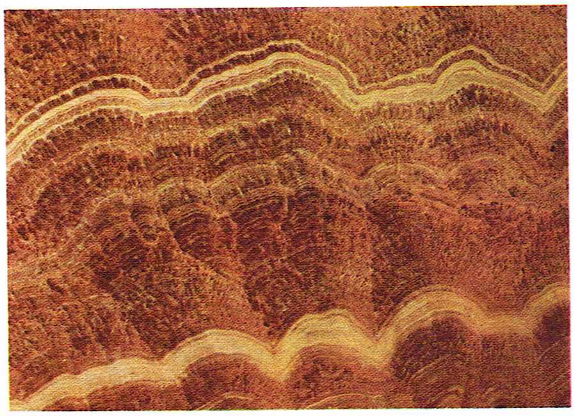

C. Bevilacqua

D. Fernandez

mement planes. Cette particularité donne à beaucoup de calcaires pélagiques d'origine chimique les qualités de pierre lithographique : c'est, par exemple, le cas du calcaire de Solenhofen (Bavière) déposé dans une lagune corallienne au Jurassique. Des fossiles et les structures d'organismes comme les méduses sont conservés dans ce calcaire, ce qui témoigne de l'extrême finesse du sédiment originel.

Certains calcaires pélagiques peuvent avoir une origine détritique qu'il est difficile de reconnaître, car la diagenèse masque la texture originelle.

Souvent, les calcaires pélagiques contiennent des quantités variables d'argiles : ils sont alors appelés des *marnes*. Ce terme, qui regroupe des roches d'origines diverses, correspond en fait à un mélange de minéraux argileux et de calcaire organogène ou de précipitation chimique. Les marnes, les calcaires argileux et les argiles calcaires sont les roches sédimentaires les plus fréquentes en milieu marin et en milieu lacustre. En effet, les *calcaires lacustres* sont généralement argileux et la calcite est d'origine chimique.

Souvent, les calcaires lacustres ont une couleur noirâtre due au pourcentage élevé de matière organique provenant du plancton, abondant dans les eaux lacustres. Les calcaires lacustres peuvent contenir des oogones (organes reproducteurs) de Characées, plantes imprégnées de calcaire qui poussent encore actuellement sur les rives de certains lacs. La recristallisation qui a lieu au cours de la diagenèse donne un aspect conglomératique aux calcaires lacustres.

Les **travertins** et les **albâtres calcaires** sont également des calcaires autochtones déposés en milieu continental (fluviatile et dans les grottes). Ils sont assez fréquents au Quaternaire. Les travertins sont des dépôts lités, vacuolaires, qui se forment aux émergences des sources calcaires. Ils renferment souvent des débris végétaux bien conservés (empreintes de feuilles), dans le travertin de Sézanne d'âge éocène par exemple. Les albâtres calcaires sont des dépôts compacts, zonés, qui se forment à partir de la dissolution et de la reprécipitation de la calcite en région karstique (stalactites et stalagmites des eaux souterraines).

● Les **calcaires allochtones** ou **détritiques** sont formés de fragments de carbonate de calcium d'origine variée qui sont transportés, puis déposés, de la même façon que les autres sédiments clastiques. D'après la taille des grains, on distingue : les *calcirudites* à grain grossier analogues aux conglomérats, les *calcarénites* à grain moyen, et, enfin, les *calcilutites* à grain fin.

Les *conglomérats extraformationnels à galets calcaires,* ou **calcirudites extraformationnelles,** se forment par sédimentation de galets en milieu continental ou marin. Cette formation demande des conditions climatiques et géomorphologiques exceptionnelles ; en effet, en climat tempéré, le calcaire a tendance à passer en solution, le seul résidu solide étant du matériel argileux. Les galets calcaires peuvent provenir d'une érosion glaciaire ou d'une érosion fluviatile très rapide.

Les *conglomérats intraformationnels à galets calcaires,* ou **calcirudites intraformationnelles,** proviennent d'une érosion sous l'eau, du transport puis du dépôt de sédiments calcaires non encore lithifiés. On distingue, suivant l'origine chimique ou organique des fragments calcaires, les lithocalcirudites et les biocalcirudites.

Les **lithocalcirudites** intraformationnelles sont constituées de fragments calcaires fins noyés dans une matrice de même nature. Les fragments peuvent être accolés les uns aux autres ou isolés dans la matrice selon le type de courant qui les a transportés.

Les **biocalcirudites** intraformationnelles sont des calcaires clastiques constitués de restes d'organismes transportés puis déposés sous l'action des courants. Les *lumachelles* sont les plus typiques. Elles sont constituées de coquilles de Mollusques et de Brachiopodes, parfois de restes d'Ammonites, de Trilobites, de Nummulites (calcaires nummulitiques) et d'autres organismes en général de mêmes dimensions. Elles se distinguent des calcaires de biostrome sous plusieurs aspects : la fragmentation de certains fossiles, la présence de valves isolées, les organismes qui ne sont pas en position de vie alors qu'ils le sont dans les biostromes, et surtout une dimension uniforme des organismes qui confère un certain classement granulométrique au dépôt. En outre, le ciment qui se trouve entre les fragments est constitué de calcite grossièrement cristallisée. Notons que dans les calcaires de biostrome, les fossiles ont des dimensions variables et sont noyés dans une matrice de calcite microcristalline plus ou moins argileuse. En outre, les associations rencontrées dans la roche correspondent aux associations biologiques de ces animaux vivants (biocénose). En revanche, dans les lumachelles, la dimension uniforme des fossiles est une conséquence du transport et il n'est pas possible d'effectuer une reconstitution paléoécologique ou une datation paléontologique.

Les biocalcirudites peuvent également être formées de débris d'organismes constructeurs (Algues, coraux...). Certaines Algues présentent une structure concentrique entourant un noyau de calcaire microcristallin. Ce type de calcaire, appelé *calcaire pisolithique,* se forme dans des conditions identiques à celles des calcaires oolithiques.

Les **calcarénites** sont des roches calcaires détritiques dont les grains ont la taille du sable et sont noyés dans un ciment de calcite grossièrement cristalline.

Les *calcarénites extraformationnelles* sont peu répandues et proviennent de l'érosion de calcaires sur le continent. Elles sont formées de sable calcaire pouvant contenir des microfossiles, et parfois de grains de quartz, de feldspath et de silicates, ce qui les distingue des calcarénites intraformationnelles qui en sont dépourvues. Les *calcarénites intraformationnelles* sont constituées de grains calcaires à texture fine, de microfossiles ou d'oolithes (corpuscules calcaires sphériques à structure concentrique).

Les **lithocalcarénites** (intraformationnelles) sont formées de calcaire à grains très fins qui proviennent de l'érosion de calcaires d'origine chimique en milieu aquatique. Les grains, de forme arrondie, sont noyés dans une matrice calcaire microcristalline ou, parfois, dans un ciment de calcite limpide macrocristalline si le sable calcaire a été déposé dans une zone agitée avec un apport de limon calcaire interstitiel. La recristallisation diagénétique provoque la transformation de la majeure partie du calcaire fin en calcite macrocristalline.

Les **biocalcarénites** (intraformationnelles) sont principalement constituées de tests de microforaminifères ou de fragments calcaires d'organismes de plus grande taille. Les Foraminifères sont aussi bien planctoniques que

C. Bevilacqua

Archives Photo B

Archives Photo B

▲ ***Lame mince en lumière polarisée de* calcarénite organogène *avec des restes de* Globotruncana *(Foraminifère pélagique) dans une matrice calcaire cryptocristalline (Crétacé supérieur; Lombardie).***
▼ ***A gauche, lame mince en lumière polarisée de* calcaire à encrines *composé d'articles de Crinoïdes, cylindriques avec le canal axial, cimentés dans de la calcite microcristalline (Dévonien des Ardennes, Belgique). A droite,* calcaire oolithique *formé de petits grains arrondis, les oolithes, cimentés par de la calcite.***

benthoniques, il existe un classement granulométrique, et ils peuvent être accolés les uns aux autres comme dans les lumachelles. Il existe également des biocalcarénites à Ostracodes, formées par l'accumulation des squelettes de ces petits Arthropodes, transportés par les courants. Les biocalcarénites formées de fragments de squelettes d'organismes benthoniques (Lamellibranches, Inocérames, Crinoïdes, etc.) sont très fréquentes. Les **calcaires à encrines** sont composés d'articles et de tiges (entroques) de Crinoïdes transportés par des courants marins. Chaque article a une forme cylindrique avec un vide central, par lequel passait la tige axiale du Crinoïde; il est formé d'un cristal unique de calcite et baigne dans un ciment de calcite microcristalline, qui est souvent en continuité cristallographique avec le grain.

Les **calcaires oolithiques** sont formés de petits grains arrondis, les oolithes, cimentés par du calcaire. Ces oolithes ont une taille de l'ordre du millimètre; elles sont formées de couches concentriques déposées autour d'un nucléus : grain minéral (quartz, feldspath), fragment de coquille ou d'oolithes brisées. Au cours de la diagenèse, les oolithes peuvent acquérir une structure rayonnante où la calcite se dépose de façon radiale par rapport au noyau tout en conservant une allure concentrique. Les zones concentriques se distinguent les unes des autres par des différences de granulométrie et de couleur. Leur présence est indispensable pour que l'on puisse parler d'oolithe. Les grains arrondis des calcaires fins, des lithocalcarénites intraformationnelles et parfois des biocalcarénites, qui n'ont pas cette structure concentrique, sont des pseudo-oolithes. Au cours de la diagenèse, le ciment calcaire se transforme en une matrice de calcite limpide bien cristallisée. Les oolithes peuvent recristalliser et le noyau qui les constitue, s'il s'agit de quartz ou de feldspath, peut s'accroître et envahir l'enveloppe calcaire. Le pourtour des oolithes peut subir des dissolutions ou des recristallisations de calcite, ou encore rester intact.

Les calcaires oolithiques se déposent en couches régulières, interstratifiées avec d'autres calcarénites, des calcaires pélagiques ou encore des marnes. Les stratifications obliques, fréquentes, sont la preuve d'un transport sous l'action de courants. Le dépôt s'effectue probablement par suite du roulement du noyau sur une fine boue calcaire d'origine chimique à une profondeur de quelques dizaines de mètres.

Les oolithes que l'on peut observer dans la nature actuelle sont formées d'aragonite tangentielle à la surface des enveloppes, alors que les oolithes des calcaires anciens présentent des couches calcitiques concentriques faites de calcite radiale, en très fins cristaux. La taille des noyaux, et par conséquent celle des enveloppes, sont variables. Ces observations laissent à penser que les oolithes s'accroissent par roulement sur un fond recouvert d'une boue calcaire. Ce phénomène a lieu jusqu'à ce qu'elles atteignent une taille ne permettant plus leur maintien en mouvement par les courants. Les grains calcaires de plus grande dimension ne sont pas recouverts de couches de calcite parce qu'ils ne peuvent être roulés sur le fond. Les oolithes sont, en général, caractéristiques d'une sédimentation en milieu très agité. Les stratifications obliques montrent qu'elles peuvent subir un transport, et même être reprises par l'action des vents et emportées sur le continent, où elles forment des dunes.

Compte tenu de la grande diversité des roches calcaires, nous ne citerons que quelques exemples typiques. Le calcaire lithographique le plus célèbre est celui de Solenhofen (Bavière), qui contient des empreintes des parties molles d'animaux très bien conservées. Les calcaires construits sont abondants depuis le Dévonien. Les calcaires à Rudistes sont très développés au Crétacé et constituent le faciès Urgonien dans les Alpes. Les calcaires d'Algues se rencontrent depuis le Précambrien jusqu'à l'époque actuelle (les calcaires pisolithiques du bassin de Paris rentrent dans cette catégorie). Les calcaires à entroques sont appelés « petit granit » dans le Carbonifère belge et le Jurassique supérieur de la Meuse. Les calcaires à Foraminifères sont très répandus : on les trouve à Fusulines au Permo-Carbonifère, à Orbitolines au Crétacé, à Milioles au Lutétien; les calcaires nummulitiques connaissent leur développement maximal au Tertiaire. Les faluns, roches formées par l'accumulation de coquilles noyées dans une matrice argilo-sableuse, sont typiques au Tertiaire en Touraine. Enfin, la craie blanche à silex est caractéristique dans le bassin de Paris et se rencontre plus particulièrement à Étretat, sur les côtes de la Manche, et à Douvres, en Angleterre.

LES DOLOMIES ET LES CALCAIRES DOLOMITIQUES

Les **dolomies** sont des roches sédimentaires assez courantes qui sont formées essentiellement d'un minéral, la dolomite, carbonate double de calcium et magnésium (Ca, Mg $(CO_3)_2$). Souvent associées aux calcaires, elles présentent toutes les transitions entre les **dolomies pures** (contenant moins de 10 % de calcite), les **dolomies calcaires** (où le pourcentage de calcite est compris entre 10 et 50 %) et les **calcaires dolomitiques** (où la calcite représente plus de 50 % de la roche). Certains calcaires ne contiennent pas de dolomite mais montrent à l'analyse chimique une certaine quantité de magnésium en substitution du calcium dans le réseau cristallin de la calcite.

Archives Photo B

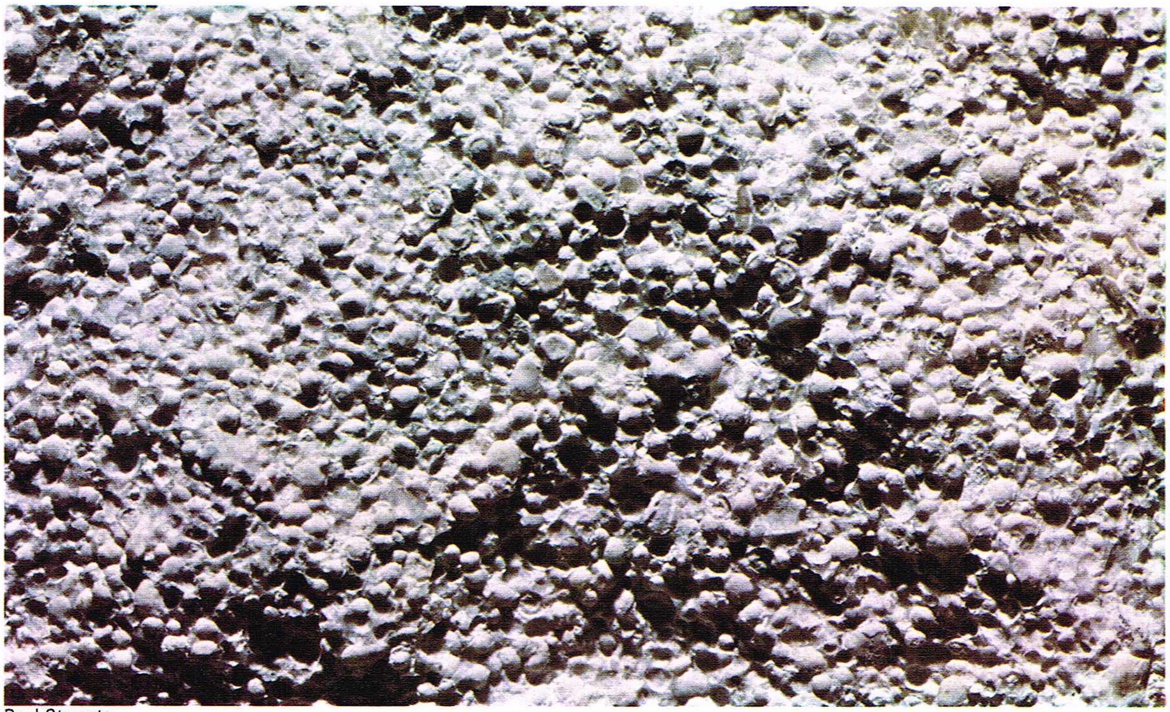

Paul Starosta

Un premier groupe de dolomies, peu répandues dans les séries géologiques, correspond à des roches probablement d'origine *évaporitique,* au sens large du terme. Ces dolomies se formeraient par précipitation chimique directe à partir d'eau saturée en substances dissoutes soumise à une forte évaporation. Ces dolomies ont un aspect analogue à celui des calcaires pélagiques à texture très fine. De couleur brune (présence de matière organique), elles se présentent en formations de faible puissance, régulièrement stratifiées et dépourvues de fossiles. La dolomie de précipitation ne se rencontre qu'accidentellement dans des dépôts lagunaires, en association avec le gypse, l'anhydrite ou le sel gemme.

Un deuxième groupe, plus répandu, est constitué par des dolomies à grain grossier ayant une porosité élevée à cause des espaces intergranulaires. Ces roches, de couleur blanche à rose, représentent des variations locales dans les calcaires qui les entourent. Ces amas de dolomies plus ou moins calcareuses ont une forme et un volume variables; ils se situent dans les surfaces de discontinuité plus ou moins tectoniques (failles) des calcaires, sur les plans de stratification ou les surfaces de discordance stratigraphique. Ce type de dolomies *(dolomie secondaire)* provient de la substitution métasomatique de la calcite par la dolomite, due à des phénomènes diagénétiques tardifs avec apport de Mg par des eaux hydrothermales.

Certains auteurs ont montré que la transformation de calcite en dolomite se fait de façon stœchiométrique, c'est-à-dire qu'il y a un rapport direct entre la quantité de calcium qui passe en solution et celle de magnésium qui se fixe dans le réseau. La dolomite étant plus dense que la calcite, la dolomitisation provoquerait une diminution de volume de la roche, ce qui expliquerait la structure vacuolaire et la porosité de nombreuses dolomies secondaires. Cependant, si l'on admet que la transformation s'effectue « de volume à volume », la porosité proviendrait d'une dissolution de la calcite résiduelle au cours des phases tardives de la diagenèse.

Les dolomies les plus courantes sont constituées de couches régulières relativement épaisses et étendues qui passent latéralement à des calcaires. On y rencontre aussi bien des dolomies pures que des dolomies calcaires et des calcaires dolomitiques, voire des calcaires francs, mais le pourcentage de calcite et de dolomite reste constant dans toute la formation. Au contraire, dans les dolomies secondaires, le rapport calcite-dolomite peut varier même à courte distance. Des restes de structures organiques (fossiles) et inorganiques (oolithes, etc.) sont encore bien visibles, surtout dans les dolomies calcaires et les calcaires dolomitiques, ce qui prouve que ces roches sont des *dolomies primaires,* formées probablement au cours des phases initiales de diagenèse de sédiments calcaires.

En effet, l'uniformité de composition dans chaque couche correspond aux caractéristiques physico-chimiques du milieu de sédimentation et de diagenèse. Compte tenu des produits de solubilité des sels de magnésium, la précipitation de cet élément (sous forme carbonatée ou hydroxydée) requiert des conditions de concentration et de pression partielle d'anhydride carbonique qui n'existent pratiquement pas dans les bassins sédimentaires, même évaporitiques. En réalité, un sédiment calcaire peut être transformé en dolomie par un

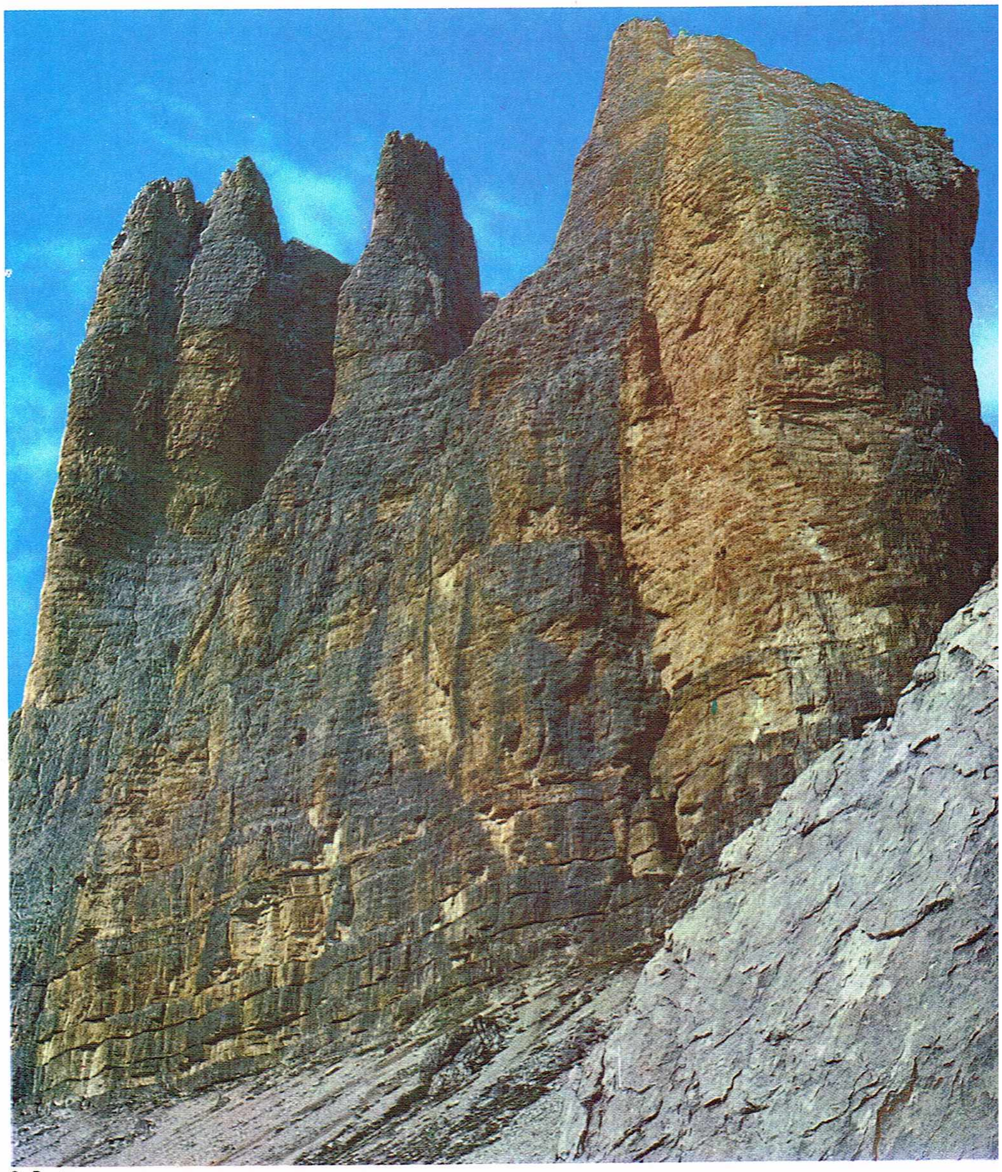

S. Prato

▲ ***Dolomie à stratification massive (cime de Lavaredo, haut Adige).***

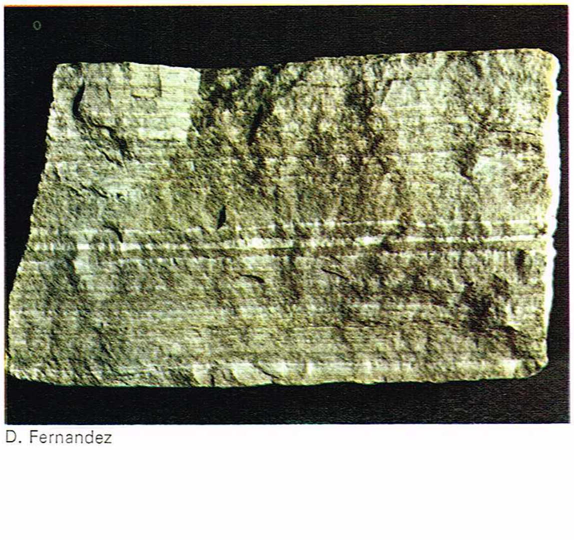

D. Fernandez

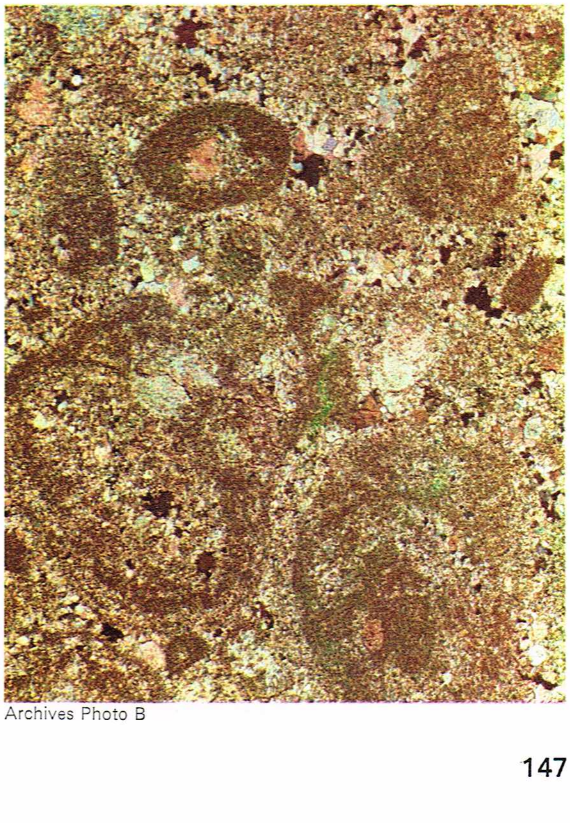

Archives Photo B

◄ *A gauche,* **dolomie** *finement stratifiée (Trias moyen près de Varèse). A droite, lame mince en lumière polarisée de* **calcaire oolithique dolomitisé :** *la dolomitisation a affecté toute la roche en masquant la texture originelle; seules certaines parties des oolithes sont restées calcaires à structure microcristalline (Trias supérieur; Bergame).*

C. Bevilacqua

▲ **Roche gypseuse** *d'âge miocène près d'Agrigente.*

▼▶ *Ci-dessous, alternance* **de dolomies et de calcaires dolomitiques** *(Trias; Alpes maritimes). Ci-contre, représentation schématique de la répartition des divers* **types de sédiments évaporitiques** *sur le fond d'un bassin lagunaire; les courbes indiquent les différentes densités de l'eau, les flèches la direction des courants (d'après Briggs dans Huang).*

C. Bevilacqua

phénomène d'échange entre le magnésium de la solution et le calcium de la calcite si les eaux sont saturées en sels de Mg et sont continuellement appauvries en anhydride carbonique, soit par l'assimilation chlorophyllienne des Algues, soit par dispersion dans l'atmosphère dans un milieu agité.

Les dolomies primaires se forment donc dans des mers épicontinentales de faible profondeur, dans des eaux agitées et riches en Algues planctoniques et benthoniques, sous climat chaud. Le passage latéral aux calcaires s'effectue le long d'une bande étroite, assez régulière et bien localisée, qui souligne la limite des zones du bassin où la précipitation de la dolomite peut avoir lieu. Le carbonate de calcium, d'origine chimique ou organique, est plus ou moins transformé en dolomite au cours du transport et de la sédimentation; cela conduit à une dolomie à tendance détritique (sable formé de rhomboèdres de dolomites) appelée *dolarénite*.

Les études effectuées sur les atolls coralliens actuels ont montré que les calcaires organogènes passent progressivement à des dolomies en profondeur. Certains organismes constructeurs contiennent des quantités importantes de Mg soit en solution solide dans la calcite, soit sous forme de magnésite. Les teneurs peuvent atteindre 10 % chez certains Foraminifères, Échinodermes et Crustacés, et presque 25 % dans les Algues. On rencontre, dans le massif des Dolomites, de nombreux exemples de récifs dolomitiques, mais également des couches de dolomie bien stratifiée riche en restes d'Algues (Diplopore).

Les *dolomies pures* ont toujours une texture cristalline à grains grossiers, un seul cristal pouvant atteindre une taille supérieure au millimètre. La texture originelle du sédiment calcaire dont elles dérivent est généralement totalement oblitérée, et il est difficile de reconnaître au microscope les restes d'organismes ou d'oolithes. Au contraire, dans les calcaires dolomitiques et les dolomies calcaires, on peut voir les stades intermédiaires de la dolomitisation et les restes de la texture originelle.

Dans les *calcaires dolomitiques,* la dolomite apparaît sous forme de petits rhomboèdres parfaits. Elle peut contenir des quantités importantes de fer en substitution isomorphique (ankérite). Les rhomboèdres ont une disposition quelconque entre les fragments calcaires (pseudo-oolithes, oolithes ou fossiles) ou sont noyés dans une matrice calcaire fine. Si les rhomboèdres de dolomite constituent la majeure partie de la roche, on passe aux *dolomies calcaires,* où restent seulement quelques plages de calcite résiduelle.

Les dolomies les plus célèbres sont, bien sûr, celles du Trias du massif des Dolomites. En France, les dolomies de remplacement sont représentées dans les gorges du Tarn (Jurassique). Parfois, la dolomitisation est incomplète; on observe des beaux exemples de remplacement partiel dans le Carbonifère marin du Boulonnais.

LES ÉVAPORITES

Les **évaporites** sont des roches sédimentaires qui proviennent de la précipitation chimique de sels dissous dans l'eau de bassins lagunaires à la suite d'une forte évaporation sous un climat chaud et aride. Les évaporites proprement dites sont constituées de sulfate de calcium (gypse et anhydrite), de chlorure de sodium (sel gemme) et de sels variés de potassium et de magnésium. La solubilité des sels détermine l'ordre progressif de précipitation au cours de l'évaporation.

Le premier composant qui précipite à partir de l'eau de mer soumise à l'évaporation est le carbonate de calcium accompagné d'une petite quantité d'hydroxyde ferrique. Ensuite, le sulfate de calcium commence à précipiter, sous forme de gypse ou d'anhydrite selon les conditions physico-chimiques du milieu.

Au cours d'expériences au laboratoire, la précipitation du chlorure de sodium commence lorsque le volume du liquide a atteint 1/10 du volume initial; puis les sulfates, chlorures et bromures plus solubles précipitent à leur tour. Dans le milieu naturel, une telle diminution de volume n'est pas nécessaire car il y a une concentration progressive dans les bassins côtiers ayant une communication

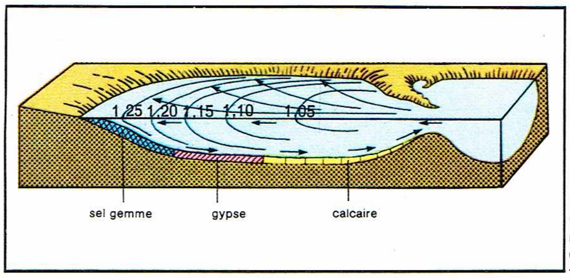

I.G.D.A.

assez étroite avec la mer ouverte. L'évaporation est intense dans le bassin en même temps qu'il y a un apport permanent d'eau de mer, ce qui provoque une forte augmentation de la salinité alors que le volume de liquide reste sensiblement le même. La diminution importante du liquide intervient dans les bassins évaporitiques continentaux et aboutit assez rapidement à un assèchement temporaire ou définitif.

La succession régulière des évaporites, depuis le carbonate de calcium jusqu'aux sels potassiques, ne se rencontre que rarement dans les séries géologiques. Le dépôt d'évaporites peut, en effet, être interrompu à cause de la disposition morphologique du bassin ou de variations des conditions climatiques ou géomorphologiques des terres émergées avoisinantes. Le rétablissement d'une circulation marine normale, ou des apports d'eau douce continentale et de matériel détritique, vont provoquer l'arrêt de la sédimentation évaporitique.

D'autre part, une série évaporitique peut commencer par du sel gemme sans qu'il y ait eu dépôt de sulfates et de carbonates au préalable. Il existe souvent une répétition cyclique de séries évaporitiques partielles, séparées par de fines couches de dépôts clastiques terrigènes qui témoignent d'un apport d'eau douce provoquant une dilution des eaux de la lagune.

Le **gypse** et l'**anhydrite** ($CaSO_4$ hydraté et anhydre) sont très courants et se présentent en couches régulières intercalées avec des argiles. Certains dépôts d'anhydrite contiennent de la dolomite en lits irréguliers et discontinus ou en rhomboèdres isolés, ainsi que de la magnésite. Les fossiles sont généralement absents, excepté quelques débris végétaux (feuilles et formes naines adaptées au milieu sursalé).

On peut se poser la question de savoir quelle était la composition minéralogique primitive des dépôts de sulfate de calcium qui sont actuellement constitués de gypse et d'anhydrite. Certains travaux montrent que le gypse se forme par hydratation secondaire de l'anhydrite pendant les derniers stades de la diagenèse. Cependant, il existe des dépôts de gypse primaires par précipitation sous forme hydratée à partir de la solution. On sait que l'anhydrite prend naissance par précipitation à partir de 40 °C, même à partir de solutions diluées. Cependant, si d'autres sels (NaCl) sont présents dans la solution, la température nécessaire à la précipitation est abaissée à 25-30 °C, de sorte que, dans les conditions normales, c'est l'anhydrite qui se dépose et non le gypse. D'autre part, l'anhydrite précipite d'autant plus facilement que la concentration en sels dissous est élevée. Ainsi, dans les formations évaporitiques, le gypse devrait précipiter d'abord et laisser place à l'anhydrite au fur et à mesure du confinement du bassin. Au total, compte tenu de la solubilité élevée de ces minéraux, les changements minéralogiques qui surviennent au cours de la diagenèse sont très importants et la structure originelle est masquée.

Lorsque la cristallisation du gypse se produit au sein de marnes, c'est-à-dire lorsque les germes de cristallisation sont rares, de gros cristaux se forment (en fer de lance ou en pied d'alouette). Ce type général de cristal est parfois désigné par le terme de sélénite.

Le **sel gemme** (NaCl) se rencontre souvent sous forme d'amas en forme de dômes (diapirs) de dimensions importantes (diamètre de l'ordre du kilomètre) ; cela est dû à une déformation plastique de la roche et à son ascension dans les roches encaissantes plus denses. Il existe également du sel gemme déposé en couches régulièrement stratifiées. La solubilité très grande du sel gemme interdit son existence en profondeur, et il apparait à la surface terrestre sous climat très aride. Certains dépôts de sel gemme qui n'ont pas été altérés par la diagenèse et les remaniements tectoniques se présentent en lits alternés de sel gemme limpide et opaque, interstratifiés avec de petits niveaux d'anhydrite et de dolomite.

Les lits de sel gemme opaque contiennent de nombreux pores remplis d'une solution aqueuse de chlorure de sodium et d'autres sels. Les pores délimitent la forme des cristaux de sel gemme précipités directement à partir de la solution concentrée. Ces petites pyramides concaves, avec une surface en escaliers, sont produites par des phénomènes de tension superficielle au cours de la cristallisation du chlorure de sodium à la surface de la solution qui s'évapore, de la même façon que ce que l'on observe actuellement dans les marais salants. Ces couches de sel gemme opaque proviennent donc de la sédimentation d'une croûte superficielle de sel gemme, croûte craquelée par le mouvement de l'eau. Le sel gemme limpide, dépourvu de pores, est constitué de minéraux cubiques et se forme directement sur le fond des bassins évaporitiques pendant des périodes où toute la masse d'eau, et non seulement la couche superficielle, est saturée en chlorure de sodium.

Les petits lits d'anhydrite, avec des quantités variables de dolomite et de pyrite, correspondent à une dilution des eaux lagunaires par l'eau de mer normale. La pyrite, dispersée dans les lits de sulfates et de carbonates, indique l'existence de conditions réductrices au cours de la diagenèse, dues à la présence de matière organique, alors que les niveaux de sel gemme contiennent du fer sous forme oxydée.

Quelques rares périodes géologiques sont riches en évaporites. Par exemple, les dépôts de sels de la mer du

Archives Photo B

C. Bevilacqua

▲ *A gauche, la texture de cette* roche gypseuse *est due à une recristallisation diagénétique qui a oblitéré les caractéristiques originelles du sédiment (lame mince en lumière polarisée ; Vaud, Suisse). A droite, une* anhydrite *appelée* volpinite *(de Volpino).*

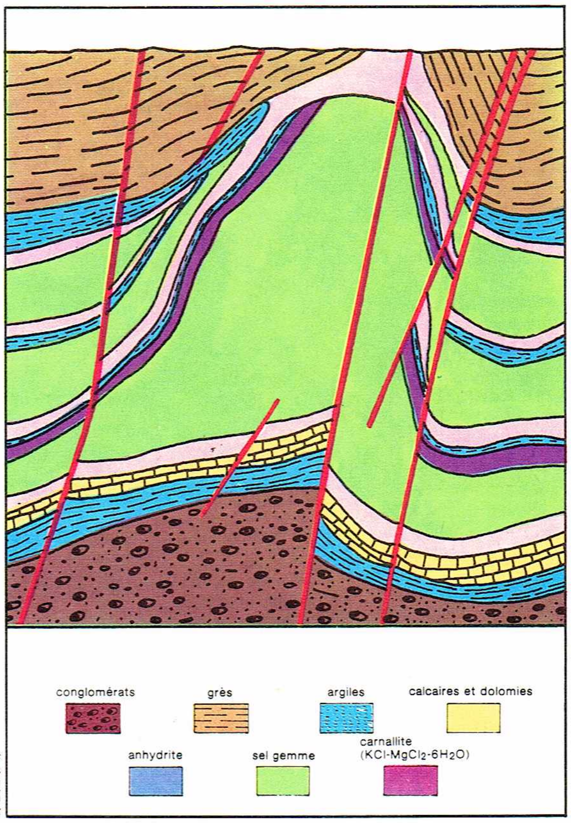

I.G.D.A.

◀ *Coupe schématique du gisement évaporitique de Stassfurt. Les lignes rouges sont les traces des plans de failles (d'après Everding).*

Zechstein (Permien) sont exploités en Alsace. La période du Trias est également très riche en sels, qui sont exploités en Lorraine, dans le Jura et sur la bordure des Pyrénées. Enfin, dans le bassin de Paris, le Ludien (Tertiaire) est la période du dépôt du gypse de Montmartre et de Cormeilles-en-Parisis.

LES ROCHES SILICEUSES NON DÉTRITIQUES

Outre les roches détritiques formées essentiellement de silice (quartzo-arénites et conglomérats à ciment quartzeux), il existe d'autres roches siliceuses d'origine organique ou chimique. Elles sont principalement composées des trois formes minéralogiques de la silice : le *quartz*, la *calcédoine* et l'*opale*. Dans certains cas, ces roches font la transition avec les grès quartzeux ; mais elles sont, le plus souvent, associées avec des roches sédimentaires tout à fait différentes, comme des calcaires pélagiques. Elles proviennent de la sédimentation de tests ou de

▶ *A gauche,* spongolithe *arénacée composée d'une masse calcaro-argileuse imprégnée de silice amorphe avec des grains de quartz et de glauconie. Les trous proviennent de la dissolution diagénétique de spicules d'Éponges (Éocène inférieur, Belgique; lame mince en lumière polarisée). A droite,* diatomite *avec des empreintes de feuilles (Santa Fiora, M. Amiata, Toscane).*

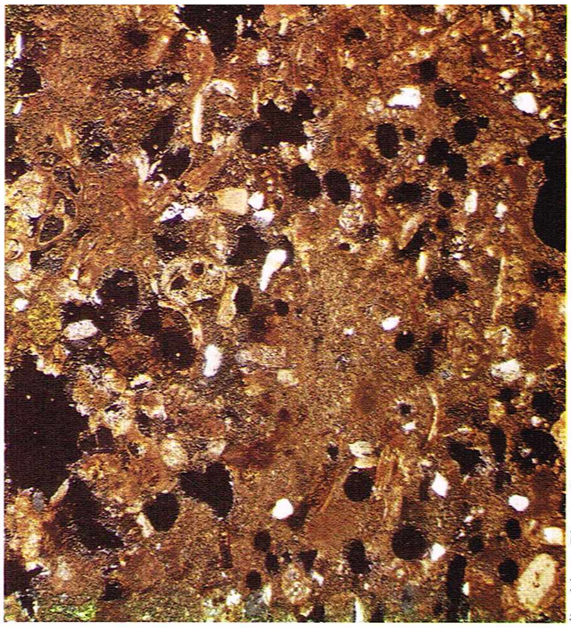

Archives Photo B

C. Bevilacqua

parties squelettiques siliceuses d'organismes appartenant au groupe des Éponges, des Diatomées, et des Radiolaires, ou bien de la sédimentation chimique de la silice en solution.

La silice est transportée dans les bassins sédimentaires par les cours d'eau sous forme plus ou moins ionique mais surtout colloïdale. Elle provient de l'altération météorique des silicates constituant les roches et est libérée, en particulier au moment de la formation des sols. La teneur en silice des cours d'eau est très importante dans les régions qui ont un couvert végétal épais et sont soumises à un climat chaud et humide. Si la silice passe à l'état colloïdal, par un processus de polymérisation à partir de la solution ionique, la présence de matière organique (acides humiques) n'empêche pas sa floculation, c'est-à-dire sa transformation en gel. Une certaine quantité de silice peut également provenir de phénomènes volcaniques. On peut, en effet, rencontrer certaines roches sédimentaires siliceuses superposées ou intercalées dans des roches effusives sous-marines (basaltes, spilites).

La teneur en silice de l'eau de mer est nettement inférieure, en valeur absolue mais également par rapport aux autres substances dissoutes, à celle des eaux fluviatiles. Le plus souvent, la silice d'origine organique ou chimique se dépose à l'intérieur d'un matériel sédimentaire variable, ce qui donne naissance à des argiles ou à des calcaires pélagiques anormalement riches en silice. Les sédiments qui ont un pourcentage élevé de silice libre non détritique se forment uniquement quand l'apport d'autres substances est ralenti ou empêché par les conditions morphologiques du bassin de sédimentation ou par les caractéristiques géomorphologiques et climatiques des zones émergées.

▼ *Cette roche siliceuse est formée de tests sphériques de Radiolaires (dont un, plus grand que les autres, est rempli de calcédoine fibro-radiée) noyés dans une masse de silice amorphe ou cryptocristalline. Les teintes de polarisation sont rehaussées par l'intercalation d'une lame de gypse sur le trajet du faisceau lumineux dans le microscope (Jurassique, Bergame; lame mince en lumière polarisée).*

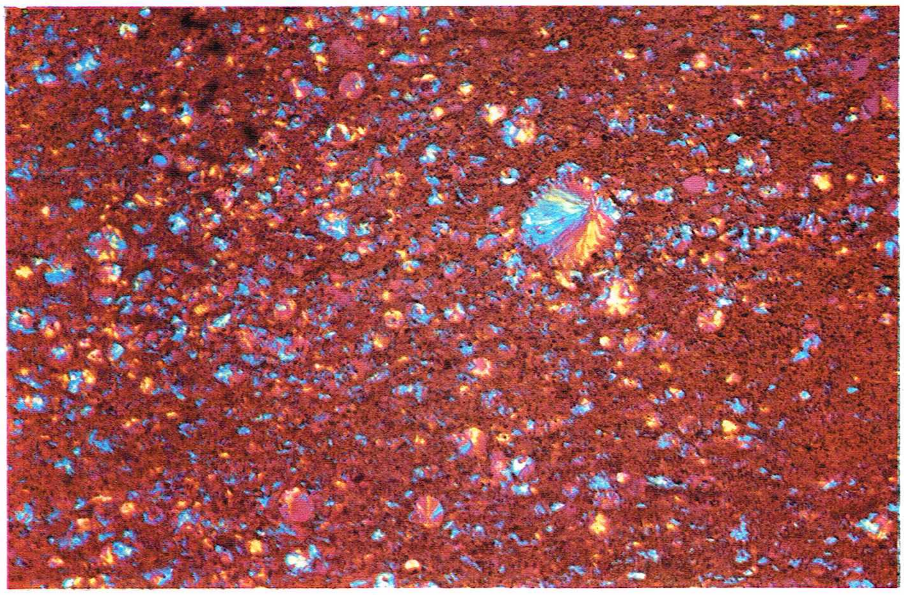

Archives Photo B

Un premier type de roches siliceuses organogènes est représenté par les **spongolithes.** Celles-ci sont principalement constituées de spicules d'Éponges siliceuses, cimentées par de l'opale ou de la calcédoine. Ce sont des roches bien stratifiées, de couleur gris foncé, et à grain assez fin. Les spicules peuvent être accompagnés de minéraux détritiques, comme des grains de quartz, de feldspaths ou de micas, etc., qui, s'ils sont en quantités importantes, constituent le terme de passage aux grès (spongolithes gréseuses). La glauconie est presque toujours présente dans les spongolithes; elle peut prendre naissance au cours de la diagenèse, mais le plus souvent elle résulte d'une resédimentation d'un dépôt provenant d'autres parties du bassin. Si elle est synsédimentaire, elle indique que les spongolithes se sont formées à des profondeurs allant de quelques dizaines à quelques centaines de mètres, et que leur présence est limitée au milieu de sédimentation néritique.

Le ciment des spongolithes est principalement constitué de silice, avec parfois des traces de calcaire ou d'argiles. Ces plages calcaires résiduelles font penser à une substitution d'une matrice calcaire ou calcaro-argileuse par la silice au cours de la diagenèse. Le ciment peut également être formé d'un gel siliceux de précipitation chimique qui a lieu au moment de la sédimentation des spicules.

Un second type de roches siliceuses organogènes est représenté par les **diatomites;** ce sont des roches poreuses, très légères et tendres, de couleur blanchâtre, finement litées. Elles sont constituées de minuscules restes de Diatomées, Algues unicellulaires vivant en milieu aqueux, continental ou marin. Ces restes, libérés au cours des processus de reproduction ou à leur mort, s'accumulent au fond des bassins de sédimentation. Dans les diatomites marines, ils sont généralement associés à quelques tests de Foraminifères, de Radiolaires et à des spicules d'Éponges. Les minéraux détritiques sont rares mais les argiles peuvent être présentes en assez grande quantité (diatomites argileuses).

La plupart des diatomites ont une origine marine; elles se déposent dans des conditions sensiblement identiques à celles de sédimentation des calcaires pélagiques. Souvent, les diatomites sont associées et interstratifiées avec des tufs qui sont des dépôts sous-marins ou lacustres consécutifs à des émissions volcaniques. Celles-ci peuvent d'ailleurs enrichir l'eau en silice et faciliter ainsi la construction des tests des Diatomées. Généralement, la sédimentation des diatomites est directement liée à la prolifération de ces petites Algues; celle-ci est facilitée par la montée des eaux océaniques profondes, riches en substances nutritives (phosphates et nitrates), jusqu'aux couches superficielles, où la lumière solaire permet l'assimilation chlorophyllienne et donc la vie de ces Algues.

La porosité élevée des dépôts de Diatomées empêche parfois la cimentation locale sous forme de silice (opale, calcédoine ou quartz), qui provient de la dissolution partielle de ces Diatomées ou qui est libérée au cours de la diagenèse des niveaux intercalaires de tufs. Souvent, les tests des Diatomées sont transformés en phosphate ou en calcite, ou encore totalement dissous. Il reste alors de petites cavités (qui représentent leurs empreintes)

dans une matrice argilo-siliceuse. Dans les cas extrêmes, les couches de diatomites peuvent être entièrement dissoutes et la silice libérée va cimenter les autres sédiments interstratifiés.

Un troisième groupe de roches siliceuses d'origine biochimique est constitué par les **radiolarites** qui ont un aspect analogue aux spongolithes; elles sont dures et stratifiées en couches de quelques dizaines de centimètres d'épaisseur séparées par des lits argileux. Il est parfois possible de distinguer à l'œil nu de minuscules globules dans les radiolarites; il s'agit des tests des Radiolaires, qui constituent la plus grande partie de la roche. En lames minces, au microscope, les détails d'ornementation des tests sont parfois encore visibles; ils ont, le plus souvent, une forme sphérique ou conique. Les fines épines qui ornent le test sont également parfois conservées, mais généralement on ne peut distinguer que le contour général des tests, formés de quartz microcristallin et remplis de quartz, de calcédoine ou d'opale. Le ciment est aussi constitué de ces différentes formes de la silice, avec des traces d'oxydes et de silicates de fer, ainsi que de matière organique, ce qui confère à la roche des couleurs allant du brun-vert au noir.

Si les radiolarites sont soumises à des déformations tectoniques ou à un léger métamorphisme, le grain de la roche augmente et il est difficile de distinguer les tests des Radiolaires de la matrice siliceuse dans laquelle ils sont noyés. Les Radiolaires se présentent alors sous forme de petits nodules de quartz polycristallin, aplatis et étirés par les déformations qu'a subies la roche. Ces roches sont alors appelées des *phtanites*.

L'origine des radiolarites pose encore un problème, surtout lorsqu'on les compare aux boues à Radiolaires qui recouvrent de grandes étendues des fonds des océans Indien et Pacifique. Les boues à Radiolaires contiennent des quantités notables de matériel argileux que l'on ne rencontre pas dans les radiolarites anciennes. La majeure partie du dépôt est constituée de tests de Radiolaires parfois associés à d'autres petits organismes siliceux (Flagellés); pour cette raison, l'origine des radiolarites est analogue à celle des autres roches siliceuses biochimiques. L'origine de la silice du ciment est, par contre, très incertaine : elle peut provenir des fragments des tests, de la diagenèse des minéraux argileux ou encore de la précipitation chimique d'un gel siliceux.

De la même façon que les diatomites, les radiolarites sont parfois associées à des roches volcaniques et pyroclastiques formées en milieu sous-marin. La silice pourrait, dans ce cas, être libérée au cours des éruptions sous-marines. Si, au contraire, les radiolarites ne sont pas associées à des roches volcaniques, la silice provient des processus normaux de transport en solution ionique ou colloïdale par l'action des fleuves et des courants sous-marins; elle provient donc de l'altération du continent. Une autre possibilité consiste en un processus de mise en solution, par hydrolyse, de la silice contenue dans les réseaux des minéraux argileux; cela peut se produire si la sédimentation est lente dans les grands fonds océaniques. L'origine de la silice des radiolarites fait, à l'heure actuelle, l'objet d'études détaillées et il est difficile de pouvoir apporter plus de précisions.

Il existe des roches sédimentaires siliceuses non détritiques contenant peu ou pas de restes d'organismes siliceux mais dont l'origine peut être rapprochée de celle dont nous venons de parler. Ces roches, d'aspect identique aux radiolarites, sont assez dures et à cassure conchoïdale; elles se déposent en couches relativement régulières mais se présentent, contrairement aux radiolarites, sous forme de nodules. Elles sont composées de quartz microcristallin associé plus ou moins avec de la calcédoine et de l'opale. On les trouve interstratifiées ou noyées dans des roches diverses, le plus souvent dans des calcaires pélagiques, des dolomies, des argiles siliceuses ou des phosphorites : ce sont les **silex**.

Les nodules de silex ont une forme lenticulaire et mesurent une dizaine de centimètres. Ils sont localisés sur des plans stratigraphiques bien déterminés, et, s'ils sont très abondants, ils peuvent former des couches continues (bancs) presque planes. Les nodules et les bancs sont constitués de silice pure ou contenant une certaine proportion de roche encaissante (le plus souvent calcaire) uniformément répartie ou concentrée en quelques endroits. La surface des nodules est lisse et le contact nodule-roche encaissante est net, surtout lorsque l'encaissant n'est pas siliceux. Cette limite peut être progressive lorsque l'on a affaire à un calcaire siliceux ou à une diatomite.

Plusieurs hypothèses ont été avancées sur l'origine de ces roches.

Selon certains auteurs, les **silex au sens strict** se forment au cours de la diagenèse, par concentration en bancs ou en nodules isolés (disposés presque toujours le long des plans de stratification) de la silice colloïdale primitivement diffuse dans le sédiment. Cette silice peut avoir des origines variées : organique sous forme de tests de Radiolaires, de Diatomées, de Silicoflagellés ou de spicules d'Éponges, ou encore coagulation d'un gel siliceux. Les nodules de silex impurs qui contiennent des quantités importantes de calcaire seraient dus à une substitution incomplète du calcaire par la silice; en effet, certaines structures sédimentaires sont en continuité entre la roche encaissante et le silex. Ce phénomène constitue un argument en faveur de la substitution

D. Fernandez

◀ ***Couches verticales* de silex *avec des plages calcaires dans le calcaire* maiolique *(Jurassique supérieur-Crétacé inférieur, près de Torre de Busi, Bergame).***

F. Peuriot - Pitch

▼ ***Une falaise à Étretat montrant des nodules de* silex *interstratifiés dans la craie.***

N. Cirani

▲ *Les « milieux de sédimentation » se différencient entre eux par leur extension et leur durée d'existence. Dans ce paysage du haut du cours du Rio Xingui (Mato Grosso, Brésil) on observe des bras morts du fleuve et la formation de marais.*

secondaire du sédiment calcaire par la silice. Par exemple, certaines concentrations en nodules dans les diatomites présentent les mêmes laminations que la roche encaissante. Ces concentrations siliceuses dans des roches siliceuses d'origine biochimique ne doivent cependant pas être considérées comme des silex au sens strict. Bien qu'elles aient le même aspect que ceux-ci, ces concentrations accidentelles sont à rapprocher des types de roches dans lesquels elles se trouvent.

Les silex proprement dits sont interstratifiés dans des roches non siliceuses ou contenant de faibles quantités de silice. L'origine de certains silex, en nodules ou en bancs continus, est attribuée à divers processus : sédimentation chimique d'un gel siliceux, coagulation à partir de la silice présente en solution ionique ou colloïdale dans l'eau de mer.

Les conditions de sédimentation de la silice ne sont pas bien connues. Le phénomène de la précipitation primaire de la silice se produit au contact des eaux douces avec l'eau de mer surtout en raison de la présence de cations (le calcium, par exemple), qui agissent comme des floculants. La silice qui précipite au large de l'embouchure des grands fleuves forme des amas de gel rendus très impurs par la présence de matériel argileux. Les sédiments siliceux purs existent seulement dans les milieux pélagiques, loin des zones de dépôts clastiques. Dans ce cas, la précipitation de silice colloïdale peut survenir dans les conditions physico-chimiques particulières qui règnent dans les fonds marins, peut-être par un phénomène d'échange avec les eaux interstitielles des sédiments.

La structure sédimentaire de nombreux dépôts de silex montre que leur formation est pratiquement contemporaine du dépôt du sédiment encaissant. Par exemple, dans certains cas, les nodules de silex sont perforés par des organismes marins juste après leur formation, et les perforations sont remplies par le sédiment sus-jacent. Cependant, l'origine des silex n'est pas encore rigoureusement établie.

Les roches siliceuses d'origine chimique sont fréquentes dans certains boucliers continentaux (Canada, Brésil, Ukraine, etc.) et se sont formées au Précambrien par suite d'une altération intense du continent qui livrait dans les bassins une grande quantité de substances en solution, et également pendant des périodes où l'activité volcanique sous-marine était intense. Ces silex sont régulièrement interstratifiés avec des carbonates, oxydes et silicates de fer, et leur origine semble être due à une précipitation chimique primaire.

Les milieux de sédimentation

L'expression « milieu de sédimentation » désigne les zones où se déposent les sédiments après leur transport et où ils restent suffisamment longtemps pour pouvoir se consolider. L'étude des milieux de sédimentation actuels permet d'effectuer des corrélations entre les caractéristiques du milieu (sa forme, son extension, la force des courants aqueux ou aériens, la concentration des solutions, les conditions biologiques, etc.) d'une part et la composition, la structure ainsi que la texture des sédiments qui s'y déposent d'autre part. Les applications de telles études sont très développées dans le domaine du génie civil pour résoudre les problèmes d'aménagement du littoral et, d'une façon générale, pour tous les ouvrages dont le fonctionnement peut être perturbé par une accumulation trop importante de sédiments.

L'étude des milieux de sédimentation actuels permet aussi de faire des reconstitutions des milieux anciens : cette branche particulière de la géologie s'appelle la *paléogéographie*. Elle consiste à établir de véritables cartes paléogéographiques à diverses époques géologiques et ainsi à suivre l'évolution des différents milieux de sédimentation. Par exemple, si des roches sédimentaires marines peuvent être recouvertes par d'autres roches formées en milieu continental, cela indique un déplacement de la ligne de côte, consécutif à une transgression ou à une régression marine. Les études paléogéographiques ont également un intérêt économique : en effet, elles permettent de déterminer les zones et les milieux susceptibles de présenter des gisements miniers. La porosité et la perméabilité de certaines roches anciennes leur permettent d'être des réservoirs naturels d'hydrocarbures.

Les séries sédimentaires sont généralement divisées en *formations* définissant un certain volume de roches déposées dans un milieu de sédimentation donné. Ces roches ont des caractéristiques communes mais pas nécessairement la même composition; il s'agit plutôt d'une association lithologique typique du milieu. Certaines formations sédimentaires peuvent cependant montrer une lithologie parfaitement monotone. Elles passent latéralement à d'autres types de roches sédimentaires, qui correspondent à d'autres milieux. Une formation sédimentaire est donc une unité stratigraphique analogue, à l'origine, aux couches sédimentaires mais dont l'échelle de temps, l'extension géographique et les conditions de milieu sont plus développées.

Les milieux de sédimentation se différencient entre eux par leur extension et leur durée d'existence. Par exemple, un marais fluviatile qui se forme dans un méandre abandonné représente un micro-milieu de sédimentation. Il possède des caractéristiques physico-chimiques et biologiques qui ont encore des relations avec celles du milieu fluviatile. Cependant, la durée de vie de ce marais est très réduite, au moins à l'échelle de temps géologique, parce qu'il est rapidement rempli de sédiments caractéristiques comme des argiles, de la tourbe, des dépôts de fer et de manganèse, etc. Au contraire, le milieu marin néritique s'étend sur de grandes zones de la plate-forme continentale et peut s'y maintenir pendant de très longues périodes. Les sédiments qui s'y déposent ont des caractéristiques granulométriques et fossilifères qui permettent de les reconnaître dans les dépôts anciens.

Les caractéristiques des sédiments qui se déposent dans un milieu sont essentiellement l'*extension,* l'*épaisseur,* la *composition minéralogique* et *chimique,* la *structure* et la *texture,* le *contenu paléontologique,* etc. Elles sont en relation directe avec les facteurs qui déterminent le type du milieu de sédimentation. L'extension latérale d'une formation sédimentaire dépend de l'extension géographique du bassin de sédimentation, alors que son épaisseur est déterminée par l'importance de l'enfouissement au cours du temps et de la quantité de matériel sédimentaire apportée dans le bassin. Suivant la nature de ce matériel (détritique ou en solution), les sédiments seront différents; ils le seront également selon les conditions du milieu. En effet, un abondant apport de matériel en solution ne donne pas nécessairement naissance à des sédiments chimiques ou biochimiques. Il suffit que les conditions du milieu de sédimentation soient défavorables à la précipitation, par exemple que la température soit trop élevée.

Un autre facteur est constitué par le *type d'énergie* qui règne dans le milieu. Il s'agit de *facteurs thermiques* et *chimiques* pour les sédiments d'origine chimique et de facteurs mécaniques pour les sédiments détritiques. Les conditions plus ou moins favorables à la vie d'organismes participant à la formation des sédiments sont en relation directe avec les facteurs du milieu. Ces *facteurs dits organiques* dépendent de la concentration des solutions, de l'importance du matériel détritique en suspension, de la température, de la force des courants, etc.

Les milieux de sédimentation sont classiquement divisés en trois grands groupes : les milieux continentaux, les milieux marins, et les milieux dits de transition, intermédiaires entre les deux premiers. Les sédiments qui se déposent en milieu continental ont généralement une épaisseur et une extension limitées, et leur analyse se prête bien à l'étude des processus sédimentaires. Ils sont souvent partiellement ou totalement érodés (par action des fleuves) ou masqués (par les transgressions marines qui suivent la dislocation des terres émergées) ; c'est pourquoi les roches sédimentaires formées en milieu continental sont relativement rares dans les séries géologiques anciennes. D'autre part, la distinction entre sédiments purement marins et sédiments appartenant à des milieux de transition est parfois délicate et il est nécessaire de tenir compte de toutes les caractéristiques du milieu de sédimentation.

Les *milieux continentaux* sont subdivisés en milieux fluviatile, lacustre, palustre, glaciaire et désertique. Les trois premiers sont caractéristiques des régions soumises à des climats tempérés et humides, alors que les deux autres correspondent à des caractéristiques climatiques strictement opposées. On fait généralement la distinction entre les dépôts continentaux résiduels, qui ne subissent pratiquement aucun transport (comme les latérites et les *terra rossa*), et les dépôts colluviaux, qui résultent du transport plus ou moins long de matériel résiduel. Les dépôts se formant dans les grottes par précipitation à partir des eaux souterraines sont très rares; on ne les rencontre que dans les formations quaternaires; ils sont constitués d'albâtre calcaire, de brèches ossifères et d'argiles. Ce sont essentiellement des roches détritiques (conglomérats, grès) et des roches organogènes qui prennent naissance dans les milieux continentaux. La sédimentation chimique, très rare, ne se rencontre que sous la forme de calcaires lacustres, de dépôts évaporitiques et de silicifications dans les zones désertiques.

Les principaux *milieux de transition* sont les milieux côtiers, lagunaires et deltaïques. Certains auteurs y ajoutent le milieu estuarien, où les sédiments ne séjournent que peu de temps. Les roches sédimentaires formées dans les milieux de transition, très répandues dans les séries géologiques, ont une très grande importance dans les

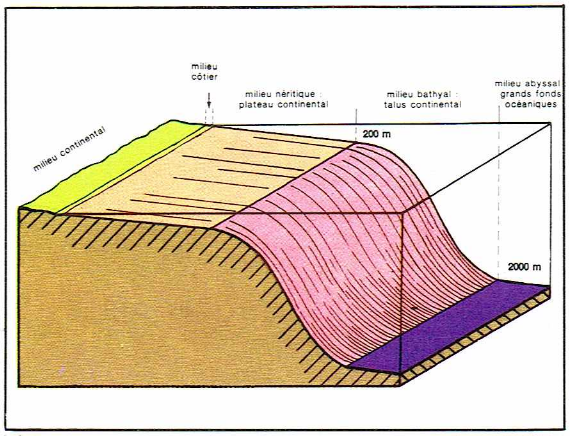

I.G.D.A.

◀ ***Représentation schématique des milieux de sédimentation marins et leurs relations avec le milieu continental par l'intermédiaire de la zone côtière (d'après Krumbein et Sloss).***

E. Sappa

◀ ***Une plage près du cap Teulada en Sardaigne. Les milieux de sédimentation situés le long des côtes constituent les milieux de transition entre les milieux continentaux et marins.***

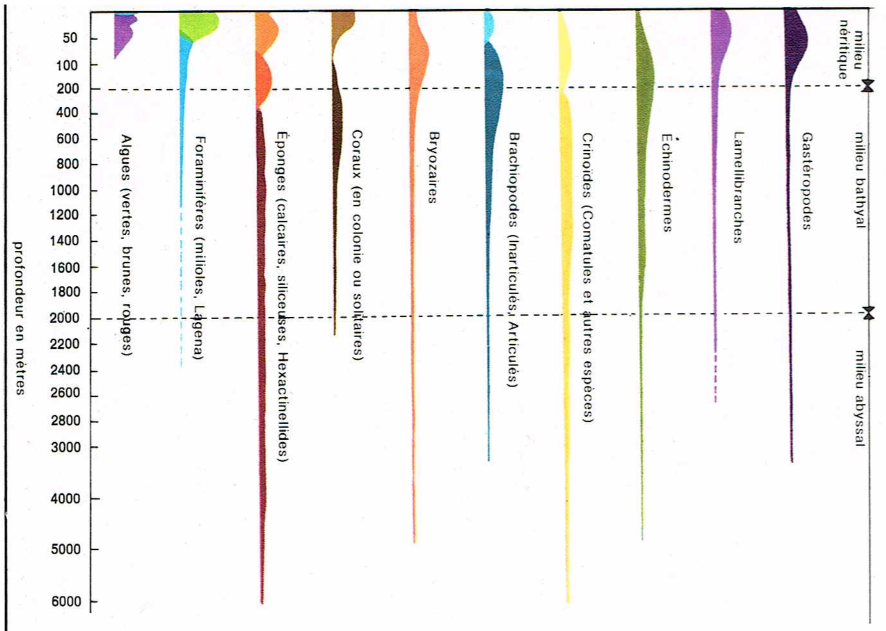

Ce diagramme représente les profondeurs auxquelles vivent certains groupes d'organismes marins (la zone la plus large des couleurs correspond au maximum de densité de population des organismes). Cette variation de la faune avec la profondeur permet parfois d'estimer la profondeur de formation des dépôts d'après leur contenu fossilifère (d'après Strakhov).

I.G.D.A.

problèmes de reconstitutions paléogéographiques. Ces roches sont essentiellement détritiques (grès côtiers) et évaporitiques. Les sédiments organogènes sont pratiquement absents, mis à part des sédiments carbonés déposés dans des marais côtiers. A ces milieux de transition peut se rattacher le milieu corallien, qui peut parfois se trouver en mer ouverte. On y rencontre surtout des dépôts organiques (calcaires plus ou moins dolomitisés) et bioclastiques (c'est-à-dire qui résultent de la fragmentation de calcaires organogènes).

Les *milieux marins* se subdivisent suivant leur profondeur en milieux néritiques bathyaux et abyssaux. Les sédiments qui s'y déposent sont les plus fréquents dans les séries géologiques. La nature des roches sédimentaires marines est extrêmement variable : elles peuvent être détritiques (grès, calcarénites, argiles), chimiques et/ou organiques (calcaires pélagiques, biostromes, roches siliceuses phosphatées ou ferrugineuses). Les sédiments abyssaux qui se déposent dans les grands fonds océaniques ne sont pas toujours amenés à l'émersion par des phénomènes orogéniques; dans l'ensemble, les roches sédimentaires formées en milieu marin qui affleurent actuellement ne se sont pas formées à des profondeurs très importantes. Il est nécessaire d'avoir des phénomènes orogéniques et épirogéniques de grande ampleur pour pouvoir trouver des roches formées dans les fosses abyssales à l'affleurement.

La détermination d'un milieu de sédimentation repose non seulement sur les caractéristiques lithologiques de la roche, mais également sur son contenu fossilifère éventuel. En effet, les débris organiques fournissent parfois de bonnes indications sur le milieu de sédimentation, soit par analogie avec l'habitat actuel d'organismes semblables, soit par leur rapport constant avec un type lithologique représentatif d'un milieu de sédimentation donné. L'étude des conditions de vie des organismes fossiles fait l'objet d'une branche particulière de la paléontologie : la *paléoécologie*.

La distinction fondamentale entre formations sédimentaires marines et continentales est basée sur l'absence d'Invertébrés et de Protozoaires fossiles dans le milieu continental, alors qu'ils sont très abondants en milieu marin. On peut cependant trouver des Mollusques et des restes de Poissons dans certains dépôts lacustres continentaux. Il s'agit, en général, d'espèces différentes de celles que l'on rencontre en milieu marin. Les informations fournies par le contenu paléontologique des roches sédimentaires doivent être utilisées avec précaution : par exemple, des restes de Vertébrés terrestres, donc typiquement continentaux, peuvent être transportés par les courants fluviatiles et déposés au large de la côte en milieu franchement marin. L'étude paléontologique ne doit donc pas être dissociée de toutes les autres caractéristiques des roches sédimentaires qui reflètent certaines conditions de milieu.

Les associations biologiques de fossiles marins permettent parfois d'estimer la profondeur de sédimentation de la roche qui les contient. Cette estimation bathymétrique est d'autant moins précise que la profondeur du dépôt est plus grande, car la faune a tendance à devenir uniforme dans les grands fonds. D'autre part, la précision des estimations diminue progressivement lorsque l'on a affaire à des roches plus anciennes car les analogies avec l'habitat actuel des organismes sont beaucoup plus lointaines. Citons deux exemples : la présence de Foraminifères comme les Milioles, de colonies de coraux et de Brachiopodes non Articulés est l'indice d'un milieu néritique peu profond; à l'inverse, certaines espèces de Radiolaires, des coraux isolés, des Éponges (Hexactinellides) se rencontrent en milieu marin profond.

La minéralogie de certaines roches sédimentaires marines donne également des indications sur leur profondeur de mise en place. Ainsi, des hydroxydes de fer et de manganèse à texture oolithique se déposent dans un milieu dont la profondeur n'excède pas 100 m. Quant à la glauconite, elle existe dans la partie la plus externe du plateau continental et sur la bordure du talus. La composition minéralogique des sédiments des milieux bathyal et abyssal, beaucoup plus uniforme, est essentiellement carbonatée et argileuse.

Les milieux continentaux

Le milieu fluviatile

Le milieu sédimentaire fluviatile couvre des étendues relativement importantes des terres sous climat tempéré et humide actuellement émergées. Ce type de dépôts se rencontre également dans les formations anciennes, surtout dans celles des cours inférieurs des cours d'eau, près de leurs embouchures. Le milieu fluviatile peut se diviser en deux parties : le milieu de piedmont et celui des plaines alluviales.

Les *dépôts de piedmont* sont surtout constitués de graviers et de sables grossiers; les roches anciennes qui en découlent sont donc des conglomérats et des grès. Le cours d'eau torrentiel provenant des régions montagneuses est très chargé en matériel détritique; lorsqu'il arrive dans la plaine, sa vitesse et sa compétence diminuent rapidement, et la sédimentation des fragments les plus grossiers a lieu à cet endroit, le matériel plus fin, de dimension égale ou inférieure à celle du sable, étant entraîné plus loin. Les graviers de piedmont forment des ensembles sédimentaires de forme triangulaire et dont la surface est légèrement convexe; ils sont appelés des *cônes de déjection,* dont la pointe est dirigée vers la montagne. Les sédiments détritiques ont une taille régulièrement décroissante au fur et à mesure que l'on va vers la plaine, les galets plus grossiers se déposant dans la partie supérieure du cône. La sédimentation s'effectue dans les zones de dépression qui se situent le plus souvent sur les bords du cône de déjection. Les galets se déposent sous forme de rubans à section transversale lentiforme, allongés dans le sens du cours d'eau.

En section, les dépôts de piedmont présentent une stratification très irrégulière, peu visible : ce sont des *dépôts chaotiques*. Les zones de graviers grossiers alternent avec des niveaux plus sableux, aussi bien horizontalement que verticalement. On rencontre souvent des structures d'érosion typiques, qui proviennent du creusement de nouveaux canaux et de leur remplissage postérieur. La base de chaque strate lentiforme est soulignée par un niveau de galets dont la taille est un peu plus grande que la moyenne; cette structure permet de reconnaître la stratification des conglomérats. Les galets ont une forme irrégulière à faible arrondi, à cause de la brièveté du transport, mais leurs arêtes sont cependant rapidement émoussées à cause de leur grande taille. On rencontre parfois des galets aplatis qui proviennent de l'érosion de roches stratifiées ou schisteuses; ceux-ci peuvent se déposer de façon à former une texture imbriquée.

La couleur des dépôts conglomératiques varie suivant la nature lithologique des galets; elle est généralement rougeâtre du fait de l'oxydation des minéraux ferrifères, qui a lieu surtout au sein de la matrice argilo-sableuse. Le ciment des conglomérats varie avec la composition du

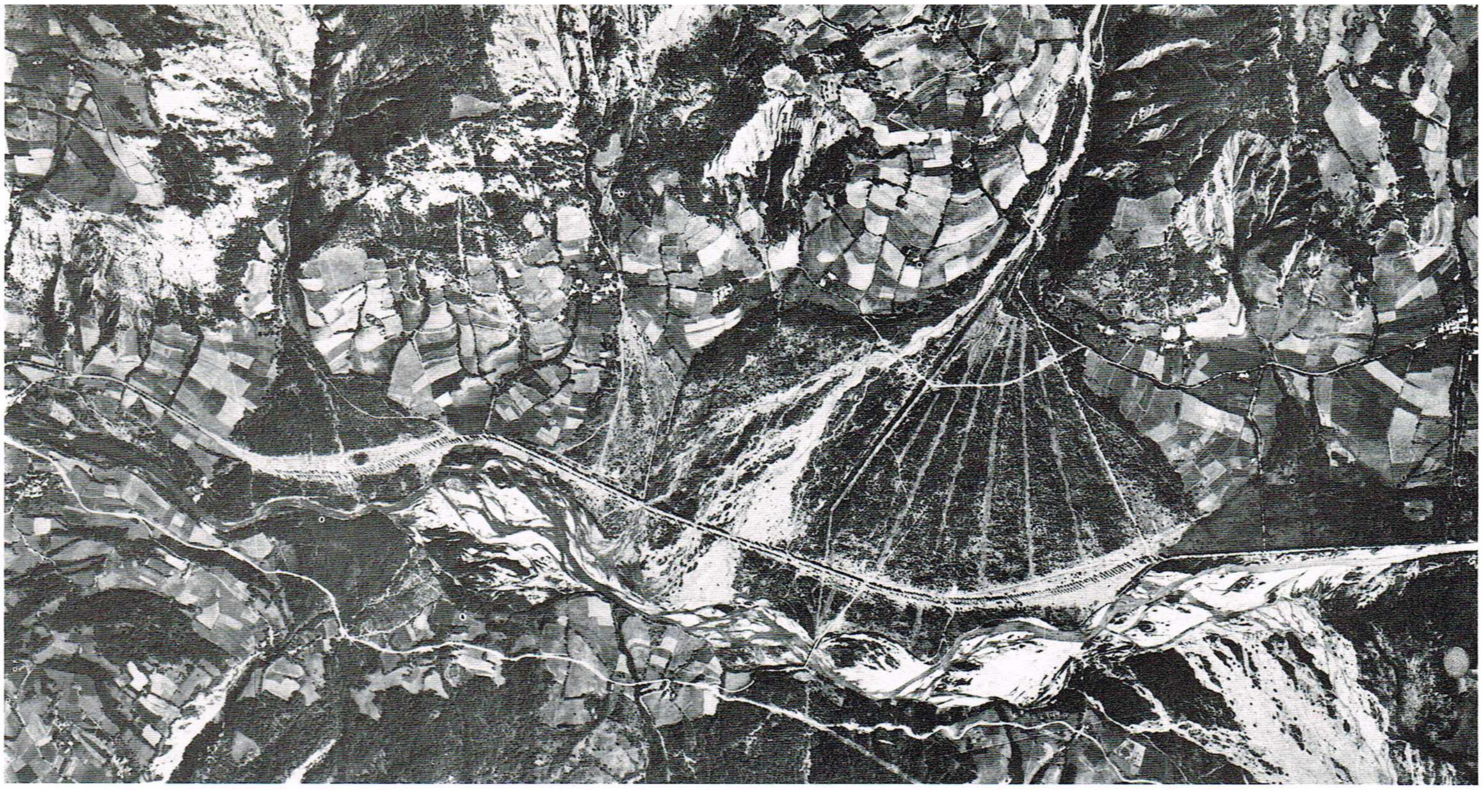

Institut géographique national

matériel détritique; la présence de galets et de sable calcaires favorise une bonne cimentation au cours de la diagenèse.

Le classement granulométrique des conglomérats de piedmont est nettement supérieur à celui des dépôts colluviaux, surtout si l'on considère chaque niveau lenticulaire du dépôt, car, dans l'ensemble, la granulométrie est assez hétérogène. Les couches de conglomérats qui contiennent des quantités importantes de matériel argilo-sableux peuvent provenir d'alluvions boueuses, apportées par des courants violents mais de courte durée, et recouvrant la surface du cône de déjection. Les alluvions boueuses, souvent caractéristiques des régions à climat aride ou semi-aride, parcourent la partie supérieure du cône de déjection en restant canalisées et se répartissent sur la partie la plus basse du cône et dans la plaine alluviale sous-jacente.

Les phénomènes d'érosion sont relativement actifs le long des dépôts détritiques de piedmont, et dans les phases ultimes des cycles géomorphologiques, ils prédominent sur les phénomènes de sédimentation. En effet, les cours d'eau sont alors moins chargés en matériel détritique et peuvent donc acquérir un pouvoir érosif important; c'est pourquoi les conglomérats de piedmont sont assez rares dans les séries géologiques. La plupart d'entre eux sont représentés dans les formations continentales déposées au pied des grandes chaines de montagnes après la phase principale du cycle orogénique qui leur a donné naissance. Les conglomérats de piedmont sont polygéniques car ils contiennent des galets provenant des différents types lithologiques qui affleurent dans les chaînes de montagnes. Cependant, ils peuvent être arkosiques et donc composés essentiellement de galets de granite et de gneiss, ces deux roches affleurant dans les parties centrales et les plus élevées (donc les plus intensément érodées) des chaînes de montagnes.

Sans parler des dépôts récents qui remplissent les vallées et les plaines alluviales, les roches sédimentaires qui se forment dans les *plaines alluviales* sont beaucoup plus répandues. Leur composition granulométrique est différente de celle des dépôts de piedmont : les graviers sont rares et les galets de petite taille; le sédiment qui prédomine est composé d'un limon fin et de sable disposé en rubans allongés à section lenticulaire.

Pendant les périodes d'*étiage*, les eaux fluviatiles circulent entre les berges naturelles qui constituent deux reliefs délimitant le lit d'étiage du fleuve. Le dépôt, essentiellement sableux, contient parfois des graviers; la granulométrie du sédiment est bonne. La majeure partie de ces dépôts est temporaire car chaque crue provoque de nouvelles érosions et remises en mouvement du matériel. Le lit d'étiage du fleuve change continuellement de place et, ainsi, les dépôts sableux se disposent en rubans. Dans les fleuves qui possèdent des méandres, ce phénomène s'appelle la divagation des méandres. Si

▲ **Cône de déjection** *du Riou Bourdou dans les basses Alpes; noter la forme triangulaire des ensembles sédimentaires à surface légèrement convexe (photographie aérienne).*

▼ *Ci-dessous, coupe schématique des sédiments argileux (en vert) et sableux (en jaune) déposés dans un cours d'eau. L'échelle verticale est très accentuée par rapport à l'échelle horizontale (d'après Dunbar et Rodgers). En bas, dépôts de graviers dans le lit du fleuve Vomano.*

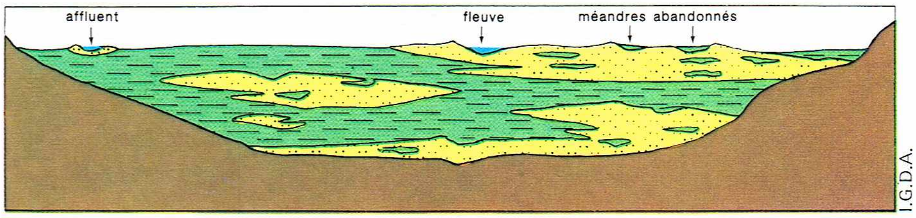

I.G.D.A.

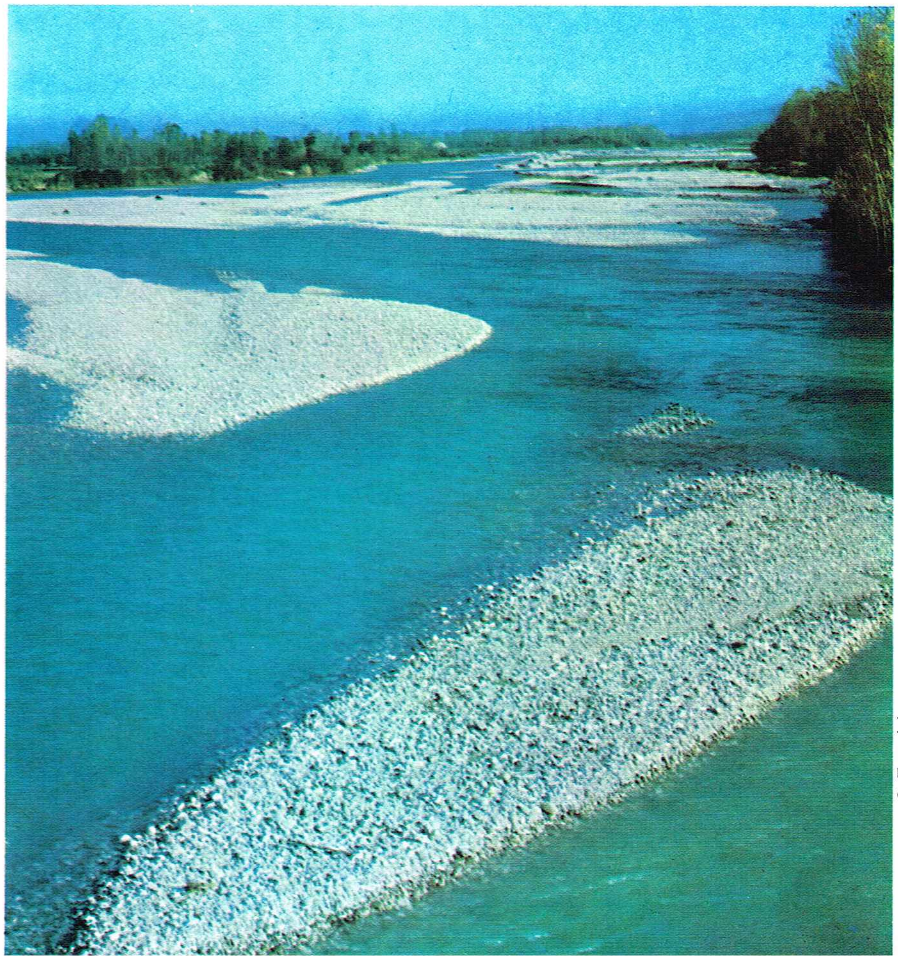

G. Tomsich

le processus s'accentue, certains méandres peuvent être abandonnés; il y règne alors une sédimentation palustre caractérisée par d'importants apports de matière organique (tourbe), intercalés avec des niveaux détritiques de limon apporté par les crues.

Pendant les *crues* les eaux fluviales couvrent totalement la plaine alluviale en dépassant latéralement le lit d'étiage. La diminution soudaine de la vitesse du courant provoque le dépôt de limon et de sable fin, qui forment deux reliefs sur les côtés du lit d'étiage. Ces terrasses naturelles peuvent être localement brisées au cours de nouvelles crues. Au niveau de rupture, les eaux acquièrent une vitesse plus grande qu'au niveau des berges et il se dépose du matériel détritique beaucoup plus grossier. Ces accumulations forment des cordons allongés transversalement par rapport au lit du fleuve, que l'on retrouve intercalés dans les sédiments argileux de la plaine alluviale.

Au-delà des berges naturelles, la vitesse du flux aqueux est plus faible et seul le matériel en suspension est transporté. Quand les eaux de crues se retirent vers la mer ou par infiltration dans le sol, il y a dépôt de limon et d'argile. On obtient donc un sédiment constitué par une argile à stratification massive et de granulométrie hétérogène. La vitesse du courant peut être localement supérieure à la moyenne et le dépôt argileux, plus grossier, présente des microlaminations parallèles ou obliques. Certaines structures sont caractéristiques des argiles fluviatiles. Il s'agit, par exemple, des fentes de dessiccation, produites par le dessèchement de l'argile après le retrait des eaux. On rencontre également parfois des lentilles de tourbe ou d'hydroxyde de fer dans les formations fluviatiles. Elles sont dues au fait que des conditions palustres peuvent s'installer, pendant des périodes plus ou moins longues, dans les dépressions de la plaine alluviale.

▼ Le fleuve Baghmati près de Katmandou (Népal); on observe, à droite, un méandre abandonné.

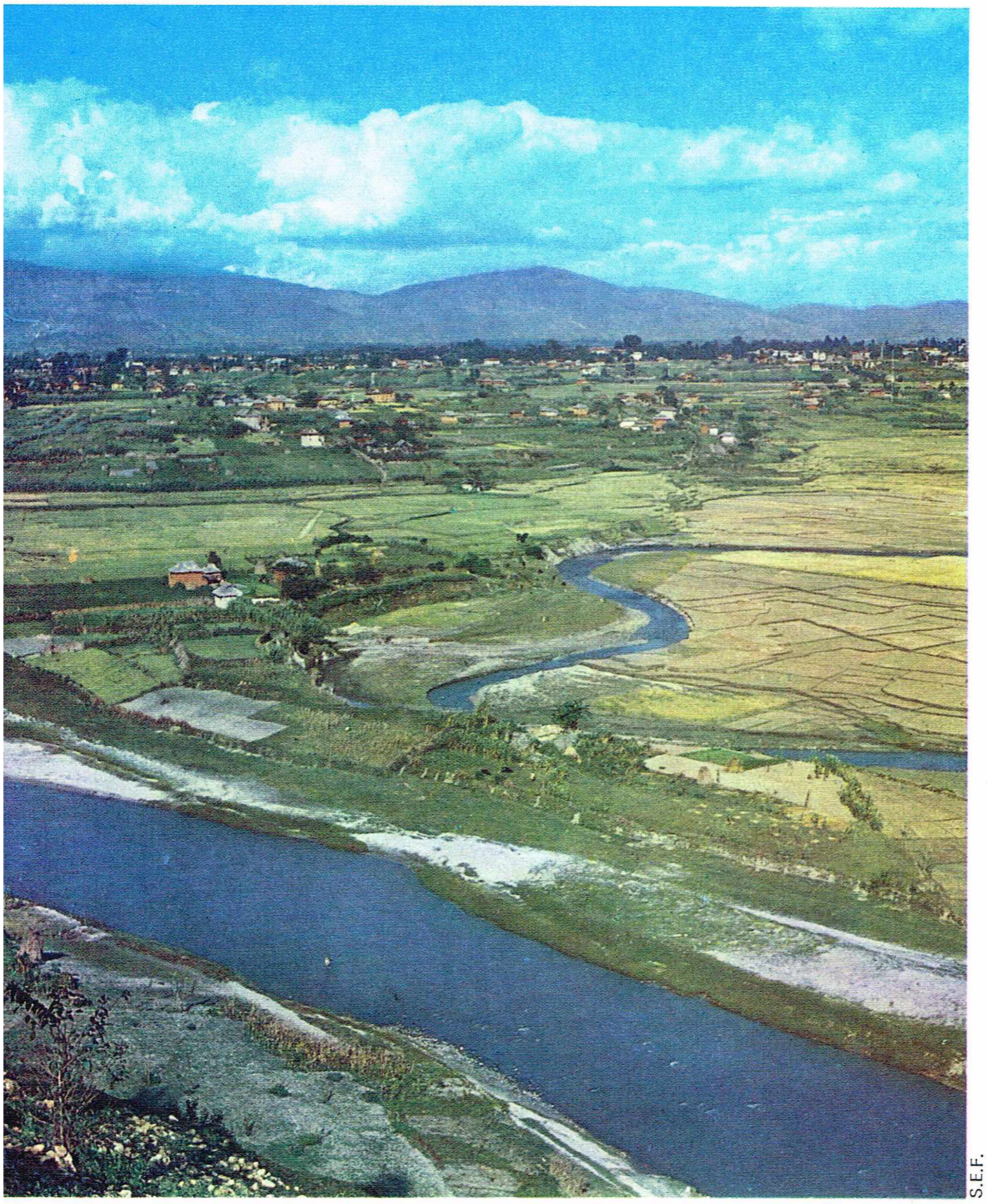

S.E.F.

La distinction entre les sédiments sableux du lit d'étiage et les argiles plus ou moins limoneuses de la plaine alluviale ne peut être faite que pour les fleuves qui ont un cours bien défini et dont la divagation des méandres ne s'effectue que dans la partie centrale de la plaine. Si le régime hydrographique est moins régulier, par exemple dans les régions de passage avec les zones arides, la sédimentation est beaucoup plus uniforme : en effet, le transport ne s'effectue que pendant de très courtes périodes de l'année, au moment des crues qui déchargent essentiellement des graviers et du sable grossier sur toute la surface de la plaine alluviale.

Dans les régions tempérées, les périodes d'étiage sont caractérisées par un cours d'eau qui s'étale sur la plaine alluviale en suivant un réseau complexe de chenaux anastomosés. Au contraire, sous climat semi-aride, le transport éolien peut prendre une place assez importante et certaines parties de la plaine alluviale sont recouvertes de dunes sableuses analogues aux dunes désertiques.

Les grès qui se déposent en milieu fluviatile sont, le plus souvent, des arkoses ou des subgrauwackes; les argiles ont parfois une couleur rougeâtre due à l'oxydation du fer à l'air libre. Ces roches ne contiennent pas de fossiles, excepté quelques fragments de Vertébrés terrestres et de restes de Mollusques ou d'Ostracodes. Les fossiles calcaires sont généralement mal conservés car ils sont dissous dans les nappes d'eau phréatique au cours de la diagenèse. L'épaisseur des sédiments fluviatiles aussi bien de piedmont que de plaine alluviale, dépend essentiellement de la subsidence plus ou moins importante des aires continentales. Dans les zones de type géosynclinal et plus particulièrement sur la bordure des zones orogéniques, l'enfouissement est très important et les formations fluviatiles peuvent atteindre de grandes épaisseurs. C'est, par exemple, le cas de la molasse oligo-miocène des Alpes du Nord et des grès rouges permiens du nord-ouest de l'Europe. Dans les zones de plate-forme, l'épaisseur des formations fluviatiles se limite à quelques dizaines de mètres.

Les milieux lacustres et palustres

Le milieu de sédimentation lacustre est souvent associé avec le milieu fluviatile de plaine alluviale et, dans les séries géologiques, on rencontre des dépôts lacustres interstratifiés ou passant latéralement à des formations fluviatiles. La différenciation entre ces deux types de formations est surtout basée sur des reconstitutions paléogéographiques régionales, où la sédimentation varie selon sa situation en bordure ou au centre du bassin.

Le faciès de bordure d'un bassin lacustre a une largeur limitée car l'énergie des courants qui existent le long des lacs est relativement faible par rapport à celle des courants marins. D'autre part, l'action de ces courants ne se fait sentir qu'en surface et leur importance est beaucoup moins forte que celle des courants de marée du littoral. En fait, le facteur climatique est très important. Citons, à ce sujet, deux exemples : en climat tempéré, les bassins lacustres ont tendance à se transformer en marais; dans les régions glaciaires et périglaciaires, ainsi que dans les régions désertiques, les caractéristiques des dépôts lacustres sont telles qu'il faut considérer ces sédiments à part.

Les sédiments de bordure des lacs varient selon la morphologie des rives. De petits deltas, formés essentiellement de graviers et de sable à stratification oblique, se forment à l'entrée des fleuves dans les lacs. Sur les rives exposées à l'action des courants, les sédiments sont essentiellement sableux et bien classés, alors que dans les zones calmes et peu profondes se développe une végétation palustre installée sur des dépôts de limon.

D'une façon générale, si la profondeur est limitée à une dizaine de mètres, les sédiments lacustres sont surtout argileux et contiennent des quantités importantes de matière organique provenant de restes de micro-orga-

nismes végétaux ou animaux (Diatomées, Flagellés, etc.) qui prolifèrent dans les lacs. Les endroits où les conditions sont favorables à la vie des organismes aquatiques sont appelés des *lacs eutrophiques*. Ils se rencontrent essentiellement dans les régions tempérées; le développement des organismes benthoniques et des Bactéries y est favorisé. Ceux-ci utilisent l'oxygène dissous dans l'eau interstitielle des sédiments et dans les eaux profondes pour réaliser leur cycle biologique. Ces eaux sont donc appauvries en oxygène dissous et peuvent s'enrichir en hydrogène sulfuré qui provient de l'activité biologique des Bactéries.

Le régime thermique de l'eau, qui contrôle le mélange plus ou moins important des masses d'eau, exerce une influence importante sur la nature des sédiments. La température des eaux d'un lac est en relation plus ou moins directe avec sa profondeur. Dans les lacs assez profonds, on distingue généralement deux parties : une couche d'eau supérieure, appelée *épilimnion*, épaisse de quelques mètres, où la température est presque constante, et une couche d'eau inférieure, appelée *hypolimnion*, où la température est également constante mais diminue parfois au fur et à mesure que la profondeur augmente. La séparation entre les deux masses d'eau est marquée par un changement brutal de la température qui s'effectue sur une épaisseur de quelques mètres. Cette stratification thermique des eaux lacustres n'existe en permanence que dans les régions où la température atmosphérique est

S.E.F.

Ostman - G.R. Roberts

toujours supérieure ou toujours inférieure à 4 °C. Ces conditions sont réunies dans les zones circumpolaires et intertropicales où les eaux superficielles des lacs ont une densité inférieure aux eaux profondes. En effet, ces dernières sont à une température d'environ 4 °C, laquelle correspond à la densité maximale de l'eau. Au contraire, sous climat tempéré, les eaux superficielles peuvent atteindre une température de 4 °C une ou deux fois par an selon les variations climatiques. On constate alors un mélange des eaux lacustres car les eaux superficielles ayant une densité maximale descendent sur le fond sous l'action de courants. Elles apportent ainsi de l'oxygène en profondeur et rendent possible la vie d'organismes benthoniques et de Bactéries aérobies.

Les roches sédimentaires qui se forment dans la partie centrale des grands bassins lacustres sont essentiellement des argiles; elles contiennent des quantités importantes de matière organique, que l'on extrait pour obtenir des hydrocarbures liquides. Ces argiles sont appelées *argiles bitumineuses*. Elles sont finement litées avec des niveaux plus grossiers et plus pauvres en matière organique. Le litage est d'autant plus marqué que le régime thermique du milieu provoque un mélange annuel régulier des eaux. Au contraire, sous climat tropical, les débris organiques et inorganiques qui s'accumulent dans des eaux profondes stagnantes se retrouvent sous forme d'argiles bitumineuses massives.

Dans de nombreux lacs des régions à climat tempéré assez chaud, les eaux sont saturées en carbonate de calcium précipitant pendant les mois les plus chauds. Celui-ci forme des intercalations de calcaire argileux dans les lits d'argiles qui se déposent pendant les mois les plus

▲ ***En haut, un petit golfe sur la rive d'un lac au Tennessee (U.S.A.). Ci-dessus, un delta lacustre formé à l'entrée du fleuve dans le lac. La diminution de vitesse du courant provoque le dépôt du matériel transporté, sur lequel s'effectue une divagation importante du lit du fleuve.***

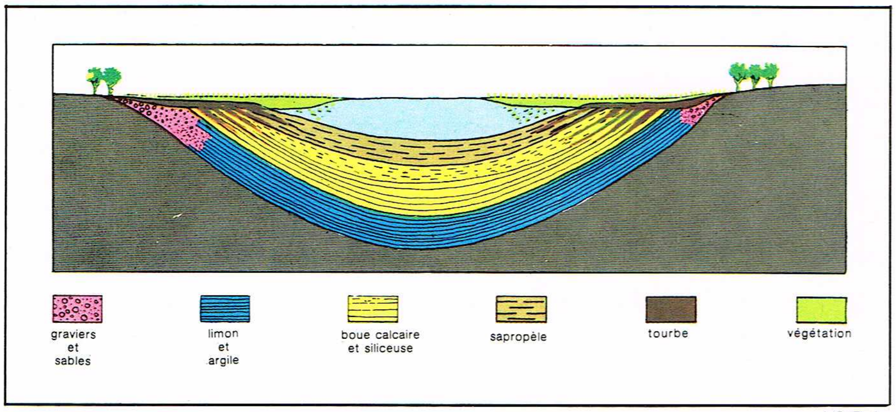

I.G.D.A.

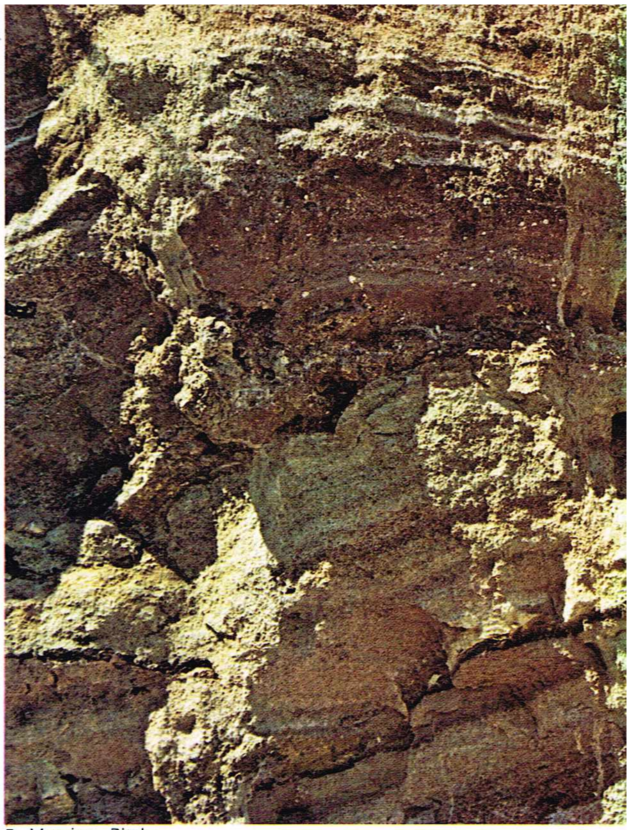

D. Mercier - Pitch

▲▶ *Ci-dessus, superposition des divers sédiments dans un* bassin lacustre *(l'échelle des hauteurs est très exagérée)* [*d'après Twenhofel W.H.*]. *Ci-contre au centre, calcaires et argiles lacustres d'âge oligocène dans un paysage de Limagne (Montaigu-le-Blin).*

froids. Ces lits peuvent être riches en matière organique et contenir des tests de Diatomées; d'autre part, on rencontre souvent des restes de Poissons bien conservés à la surface des bancs de calcaire et d'argile.

Dans les régions tropicales, les eaux sont pratiquement toujours saturées en anhydride carbonique et en hydrogène sulfuré, qui proviennent respectivement de l'altération des substances organiques et de la réduction des sulfates par les Bactéries anaérobies. Le carbonate de calcium, qui pourrait éventuellement précipiter à partir des eaux superficielles, est alors dissous quand il arrive en profondeur et il n'y a pas de dépôt.

Sous climat chaud, voire subdésertique, les dépôts calcaires peuvent se présenter sous forme de calcaire oolithique, en couches régulières à stratification oblique. Des oolithes d'aragonite se forment d'ailleurs actuellement dans les régions côtières du Grand Lac Salé (États-Unis) et dans la mer Caspienne. Si les conditions de milieu sont favorables à la vie d'Algues calcaires, des calcaires stratifiés sous forme de biostrome ou de petits biohermes peuvent se développer. Souvent lentiformes, ils sont constitués essentiellement par les thalles calcaires d'Algues appartenant au groupe des Cyanophycées.

Des dépôts ferrugineux se rencontrent parfois dans les lacs actuels et dans les formations lacustres anciennes. Ils sont constitués de limonite (hydroxyde de fer), apportée sous forme colloïdale par les fleuves. Le fer précipite par floculation ou par action bactérienne dans les zones côtières, près de l'embouchure des fleuves. L'hydroxyde ferrique qui se dépose dans les parties plus centrales des lacs peut être réduit sous forme de carbonate (sidérite) ou de sulfure (pyrite) ; en effet, les conditions de milieu y sont réductrices en raison de la présence d'anhydride carbonique provenant de l'altération et de l'oxydation de la matière organique.

Les formations sédimentaires lacustres anciennes sont souvent interstratifiées avec des dépôts fluviatiles. Ce phénomène s'explique facilement si l'on considère qu'un bassin lacustre se forme dans une plaine alluviale et s'y maintient tant que la région est soumise à une subsidence plus importante que la vitesse d'accumulation des sédiments. Lorsque la subsidence diminue ou cesse totalement, le bassin lacustre est rempli par les sédiments et un nouveau réseau hydrographique peut s'installer dans la région.

Il est possible de définir un cycle de sédimentation lacustre correspondant à une succession verticale de sédiments déposés en milieu lacustre pendant des périodes successives. Prenons, par exemple, des lacs soumis à des changements climatiques. Sous un climat primitivement semi-aride, les premiers dépôts sont constitués de graviers et de sables avec des alternances de calcaire oolithique, de calcaire alguaire et d'argile calcaire. Ces lits calcaires proviennent de la précipitation du carbonate de calcium apporté en solution par suite de l'altération des sols du bassin.

Viennent ensuite des argiles qui contiennent des concrétions ferrugineuses de limonite et de sidérite. Ces concrétions correspondent à la diagenèse d'hydroxyde de fer, provenant également de l'altération des sols du bassin. Si le climat devient humide pendant une durée assez longue, une couverture végétale importante s'installe. Les eaux lacustres s'enrichissent en matière organique nutritive qui favorise la prolifération des organismes ; on observe ainsi, selon les cas, des dépôts de Diatomées ou d'argiles bitumineuses. Dans la dernière phase du cycle, le lac est progressivement rempli de sédiments ; il a une profondeur relativement faible et une végétation palustre peut s'installer à partir des rives, pour finalement couvrir toute la surface de l'eau. Les formations lacustres peuvent donc être totalement recouvertes par des dépôts palustres.

Le *milieu palustre* a, le plus souvent, une extension géographique limitée et une durée d'existence très brève à l'échelle géologique. Il est caractérisé par un développement très important de la végétation aquatique dans des eaux peu profondes. Les formations palustres sont associées à des formations fluviatiles et lacustres aussi bien sur le plan géographique que chronologique. Le milieu palustre correspond à un climat humide dans des régions où les conditions sont telles que les apports détritiques sont réduits. Les sédiments palustres caractéristiques sont organiques, formés par l'accumulation de matériel végétal. Dans les très grands marais, souvent situés en bord de mer, les dépôts sont pour l'essentiel du carbone. Au contraire, dans les marais plus petits, associés à des milieux fluviatiles ou lacustres, les dépôts se présentent sous forme de lentilles de tourbe ou de carbone.

Le milieu glaciaire

Le milieu de sédimentation glaciaire s'étend sur les régions continentales couvertes de glaciers et sur les zones avoisinantes, où le climat et l'hydrographie sont fortement influencés par la présence des glaciers.

Les sédiments typiques de ces régions (qu'elles soient continentales ou de type alpin) sont les moraines, qui contiennent du matériel graveleux et sableux transporté par les eaux de fonte des glaciers. Ces *dépôts,* appelés *fluvioglaciaires,* se rencontrent dans les zones couvertes par les glaciers et peuvent être accompagnés d'accumulations éoliennes de lœss. Les dépôts glaciaires et fluvioglaciaires, essentiellement continentaux, se rencontrent au Précambrien, au Permo-Carbonifère et au Pléistocène. Les moraines pléistocènes sont assez faciles à reconnaître car elles possèdent les caractéristiques typiques des dépôts glaciaires, telles que la disposition en forme d'amphithéâtre, ou cirque glaciaire. Par contre, il est plus difficile de déterminer les moraines anciennes car on peut les confondre avec des sédiments chaotiques qui proviennent d'éboulements sous-marins ou de transport en masse. Cette confusion entraîne parfois des erreurs importantes dans les reconstitutions paléogéographiques et paléoclimatologiques : il est donc nécessaire de tenir compte de toutes les caractéristiques de la roche sans se limiter à sa texture, sa structure ou à la présence de galets striés par exemple.

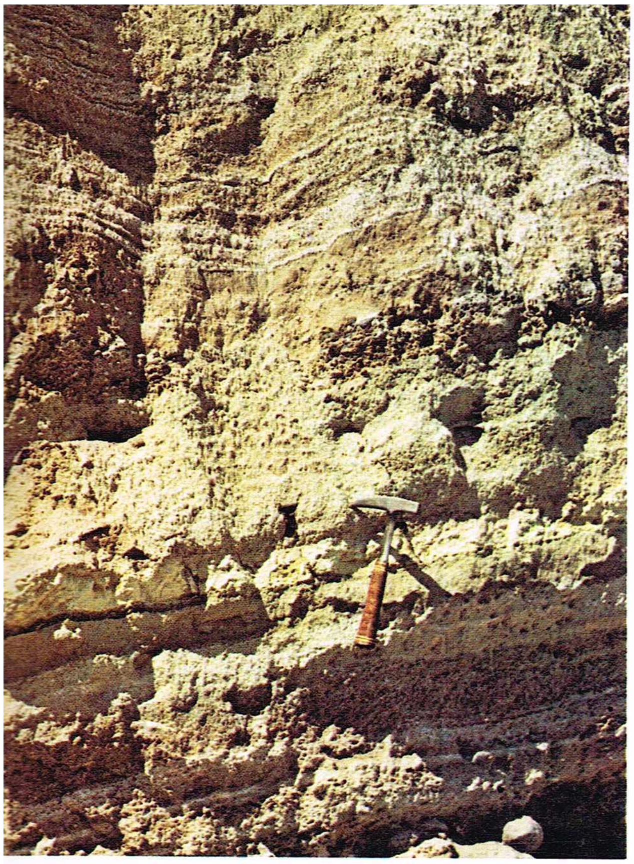

Les principaux éléments qui permettent de déterminer qu'un conglomérat est une ancienne moraine sont :

— la présence d'un substrat rocheux strié et moutonné sous l'action du glacier ;

— l'absence de couches possédant une structure graduelle comme on en rencontre dans les éboulements sous-marins ;

— la possibilité de distinguer la moraine superficielle de la moraine de fond ;

— la présence d'autres dépôts, comme les varves ou le lœss, en association avec les conglomérats ;

— la composition pétrographique de ces conglomérats, qui doivent posséder des fragments de roches et des minéraux facilement altérables sous climat chaud et tempéré.

La moraine frontale se dispose en forme d'arc de cercle qui souligne la limite d'avancement du glacier. Les torrents d'eau de fusion de la glace sont situés soit à la surface du glacier, soit dans des « galeries » à l'intérieur et au fond du glacier. Ils transportent des graviers et du matériel détritique fin qui se déposent en rubans allongés dans la direction du mouvement du glacier et, par conséquent, perpendiculairement à la moraine frontale. Les torrents glaciaires qui se situent au front des glaciers sont chargés en matériel sableux et limoneux se déposant parfois sous forme deltaïque. En réalité, un tel dépôt est souvent chaotique car le glacier peut avancer au cours d'une phase postérieure, auquel cas ces dépôts sont repris et modifiés. Un dépôt typique de cette zone est connu sous le nom de *varves*. Il s'agit de couches d'une épaisseur constante de quelques centimètres et qui se divisent en deux parties :

— une base sableuse de couleur claire se déposant pendant les périodes de printemps et d'été, au moment de la fonte de la glace ;

— un sommet argileux de couleur sombre, d'épaisseur plus faible, qui représente un dépôt plus lent pendant les mois froids.

Les argiles apportées en solution dans les lacs glaciaires ont une répartition uniforme et se maintiennent longtemps en suspension. En effet, la pauvreté des eaux douces en électrolytes empêche la floculation de ces argiles qui ne précipitent qu'au cours du gel hivernal lorsque les courants sont très faibles. Cette alternance saisonnière des dépôts de varve permet d'effectuer des corrélations stratigraphiques entre les formations glaciaires d'une région donnée. Elle permet également d'établir une chronologie absolue des événements pour les périodes glaciaires les plus récentes, c'est-à-dire celles du Quaternaire terminal (Holocène).

Le lœss est un dépôt éolien de limon. Il a une structure massive et constitue des formations étendues mais

D. Fernandez

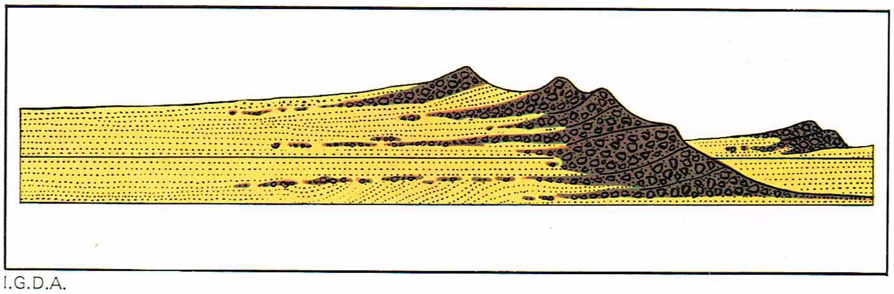

I.G.D.A.

▲ En haut, intercalation fluvioglaciaire dans une moraine ; les niveaux de sable sont finement lités et présentent une stratification oblique alors que la moraine est massive et hétérométrique (Turin).
Ci-dessus, représentation schématique des relations entre la moraine terminale (en marron) et les dépôts fluvioglaciaires (en jaune). Le glacier progresse de gauche à droite (d'après Niggli).
▼ Ci-dessous, histogrammes granulométriques d'une moraine (à droite) et d'un dépôt fluvioglaciaire (à gauche). Noter l'absence de matériel détritique fin dans les dépôts fluvioglaciaires alors que la moraine en contient une quantité relativement importante (d'après Krumbein et Sloss).
En bas, des alternances de sable fin et d'argiles se déposent généralement au fond des lacs glaciaires (dépôt de varves). La moraine est représentée en ocre jaune et le front du glacier en bleu. Les flèches rouges indiquent la circulation de l'eau, les flèches vertes celle des vents prédominants (d'après Antevs).

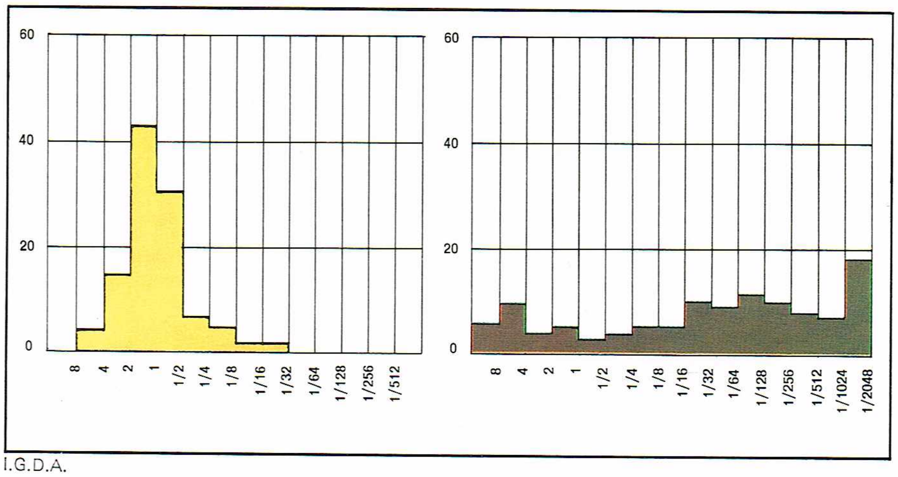

I.G.D.A.

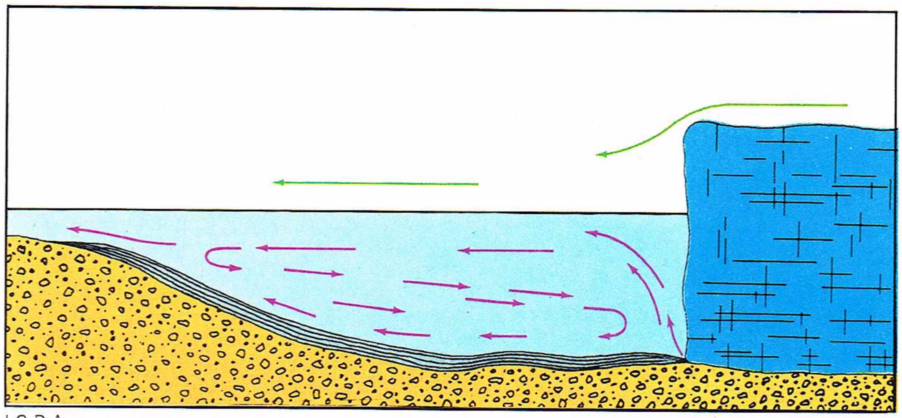

I.G.D.A.

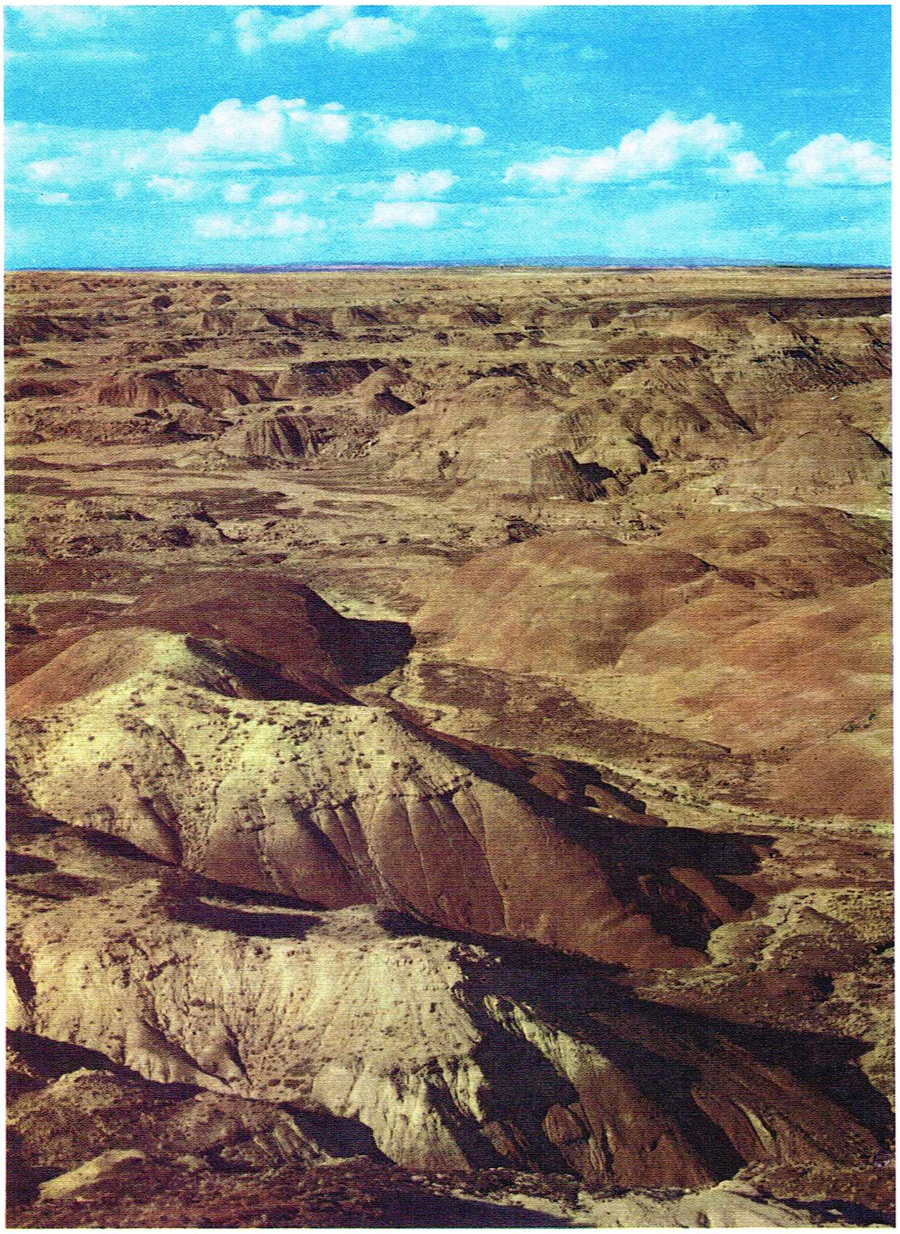

E.P.S.

▲ ***Un exemple de** milieu* **sédimentaire continental désertique :** *le « désert rouge » en Arizona (U.S.A.).*
▼ ***Une plage en Turquie avec la morphologie typique des croissants de plage.***

E. Sappa

d'épaisseur limitée. Il est situé dans les régions désertiques qui sont à la périphérie des zones recouvertes par des sédiments fluvioglaciaires. Si le limon provient des régions ayant subi des glaciations, l'érosion a lieu pendant les périodes où le climat est subaride et le dépôt est formé uniquement de sédiments fluvioglaciaires.

Le milieu désertique

Le milieu sédimentaire désertique est caractérisé par la rareté des précipitations atmosphériques, qui sont regroupées pendant des périodes très brèves de l'année. Dans les zones les plus proches des reliefs orographiques, l'agent de transport est constitué par de violents écoulements boueux, alors que dans les autres parties du désert c'est principalement le vent. Les déserts recouvrent actuellement plus d'1/5 des terres émergées et les phénomènes d'érosion y prédominent sur ceux de sédimentation. Celle-ci n'a lieu que dans les parties les plus basses du point de vue topographique.

Actuellement, on peut distinguer deux types morphologiques de déserts suivant les processus d'érosion et de sédimentation qui y règnent. Le plus important est représenté par les dépressions existant entre les chaînes de montagnes assez récentes, par exemple, les zones désertiques du sud-ouest des États-Unis (Californie du Sud, Arizona, Utah) et du centre de l'Asie (désert de Gobi, etc.). L'autre type correspond aux déserts qui s'étendent sur de très grandes surfaces, comme la majeure partie du Sahara, et dont la morphologie est très plane.

Les sédiments qui se trouvent dans les dépressions entre les chaînes de montagnes proviennent de l'érosion des roches qui les constituent. Sous climat aride, ces roches subissent une désagrégation mécanique et sont transportées en masse vers les dépressions par des éboulements boueux qui surviennent lors de pluies torrentielles de courte durée. Le manque d'eau qui sévit pendant la majeure partie de l'année rend l'altération chimique pratiquement nulle malgré une température moyenne élevée. C'est pourquoi les minéraux instables sous climat humide, comme les feldspaths, peuvent encore être abondants dans ce type de matériel détritique. Les sédiments du faciès de raccord entre la chaîne de montagnes soumise à l'érosion et la dépression sont formés de graviers qui se disposent en un cône similaire aux cônes de déjection dans les régions à climat tempéré. Ce sont des dépôts chaotiques ne possédant aucun classement granulométrique. Pendant les périodes de sécheresse, ces sédiments subissent une érosion éolienne importante. Le vent transporte le sable et le limon, alors que les galets restent sur place et forment un conglomérat résiduel. Ces galets sont souvent dépolis par la corrosion éolienne, due au frottement des grains de sable transportés par le vent. Ils ont souvent une forme aplatie caractéristique, avec trois faces dépolies séparées par des arêtes. Les galets désertiques actuels et anciens peuvent également présenter une surface recouverte par une mince pellicule translucide, appelée vernis du désert. Cette patine est formée d'oxydes de manganèse et de fer qui se déposent par évaporation de l'eau interstitielle.

Les sédiments de la partie centrale des bassins désertiques sont formés de sable bien classé, transporté par le vent. Les grains de quartz, très arrondis, sont dépolis en raison des nombreux chocs qu'ils subissent les uns contre les autres au cours de leur transport aérien.

La partie centrale de certaines dépressions désertiques actuelles est occupée par une couche d'eau salée peu épaisse dont l'extension varie selon les périodes de l'année. L'eau provient des régions montagneuses, s'infiltre entre les galets et le sable en suivant un cours plus ou moins souterrain et reste dans la partie centrale des dépressions. Les sédiments de cette partie centrale sont bien stratifiés et ont une texture plus fine que celle du sable des dunes. On rencontre également dans cette zone des sédiments évaporitiques provenant de la précipitation des sels dissous dans l'eau ; les plus fréquents sont le carbonate de calcium, la dolomite, le sulfate de calcium (gypse et anhydrite), et des sels de sodium (chlorures, sulfates et carbonates). Les sels de potassium sont très rares.

Les sédiments actuels des zones désertiques présentent souvent une couleur noirâtre due à un sulfure de fer colloïdal, l'hydrotroïlite, qui se forme dans un milieu riche en hydrogène sulfuré, lequel provient de la réduction des ions sulfate de la solution sous l'action des Bactéries sulfato-réductrices. Les restes organiques sont rares, hormis quelques os de Vertébrés sur les rives du lac central. Les figures de dessèchement sont évidemment très fréquentes (fentes de retrait, conglomérats intraformationnels) ; cependant elles se rencontrent également dans les sédiments lacustres déposés sous climat tempéré.

Les milieux de transition

Les milieux côtiers et lagunaires

Le milieu côtier ou littoral forme la transition progressive entre le milieu marin peu profond dit néritique d'une part, et le milieu continental fluviatile ou palustre d'autre part. Il est très important de pouvoir distinguer les sédiments de ces divers milieux pour effectuer des reconstitutions paléogéographiques précises. De plus, certains sédiments, comme des grès déposés en milieu littoral, peuvent accumuler des hydrocarbures et des minéraux ferrifères, ce qui leur confère un intérêt économique certain.

Il faut tout d'abord distinguer du point de vue morphologique les côtes formées de falaises élevées et celles qui sont planes et formées par une plage.

Au large des côtes formées de falaises, s'accumulent des blocs arrachés à la côte rocheuse sous l'action des vagues. Les dépôts ont une épaisseur et une extension très limitées et forment une bande étroite qui, d'un côté, se termine contre la roche en place, et de l'autre passe à des sédiments marins arénacés ou limoneux vers la mer. Les roches constituant ce type de côte sont le plus souvent très résistantes, magmatiques ou métamorphiques; elles se délitent en blocs dont le diamètre diminue très rapidement quand on va vers la mer. Ce type de dépôts est très rare dans les séries géologiques. On ne retrouve, le plus souvent, qu'une formation arénacée présentant localement un aspect conglomératique avec des galets de même nature lithologique que la roche sous-jacente. Ce phénomène se produit au cours de transgressions marines sur les continents.

Les dépôts de plage sont essentiellement constitués par du sable quartzeux et représentent des formations importantes dans les séries géologiques anciennes. Leur épaisseur est cependant limitée à quelques dizaines de mètres. Ils se forment au cours de transgressions marines sur un continent aplani de type plate-forme, comme en témoigne l'évolution importante des dépôts sableux.

Le *milieu littoral proprement dit* comprend une zone située entre les niveaux de basse mer et de haute mer, et qui est appelée *zone de balancement des marées,* ou *estran*. D'autre part, plus proche du continent, se trouve une zone qui n'est atteinte par l'eau qu'au cours des très grandes marées; cette zone peut être appelée *haut de plage*. Sur l'estran, le sable se dépose en couches légèrement inclinées vers la mer et formées de petits lits parallèles à la surface de la plage. Chaque lit se différencie par sa granulométrie et par sa composition minéralogique : les zones les plus sombres sont riches en minéraux lourds (magnétite, grenat, etc.), qui se concentrent là où l'énergie de la houle est suffisante pour exporter les autres constituants. Le sable côtier contient généralement un pourcentage de minéraux lourds nettement supérieur à la normale : certains lits peuvent en contenir jusqu'à 50 %.

Le sable côtier présente généralement des structures sédimentaires typiques. Si celles-ci sont malheureusement rarement conservées dans les grès anciens, elles sont très remarquables sur les plages actuelles. Il s'agit, par exemple, de certaines figures dues au ressac ou au ruissellement ainsi que de perforations des surfaces de

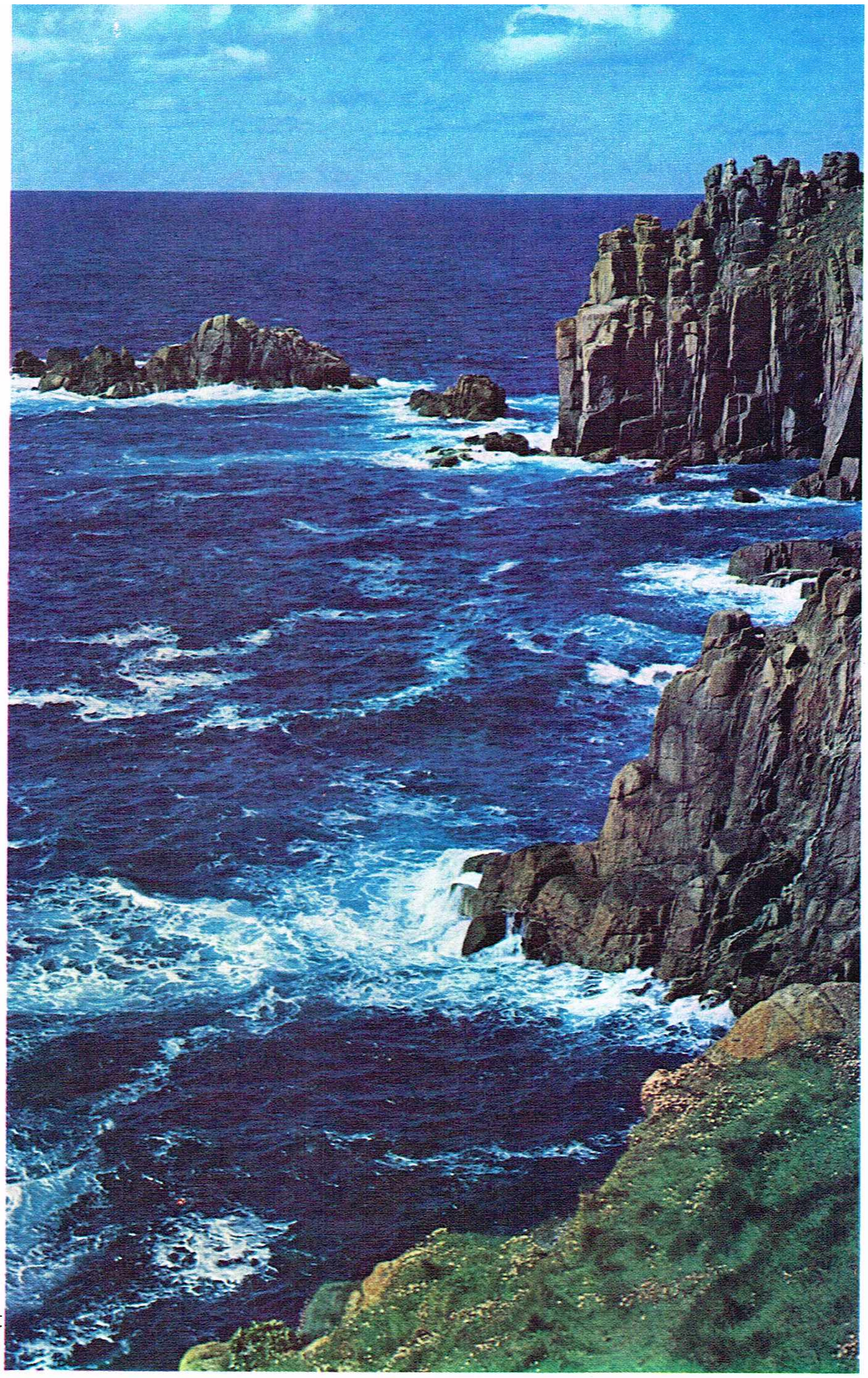

P. Popper

▲ *Les falaises abruptes de la côte à Land's End Point en Cornouailles : on observe des blocs arrachés à la côte rocheuse sous l'action des vagues.*

▼ *Un lac désertique en voie d'assèchement en Iran.*

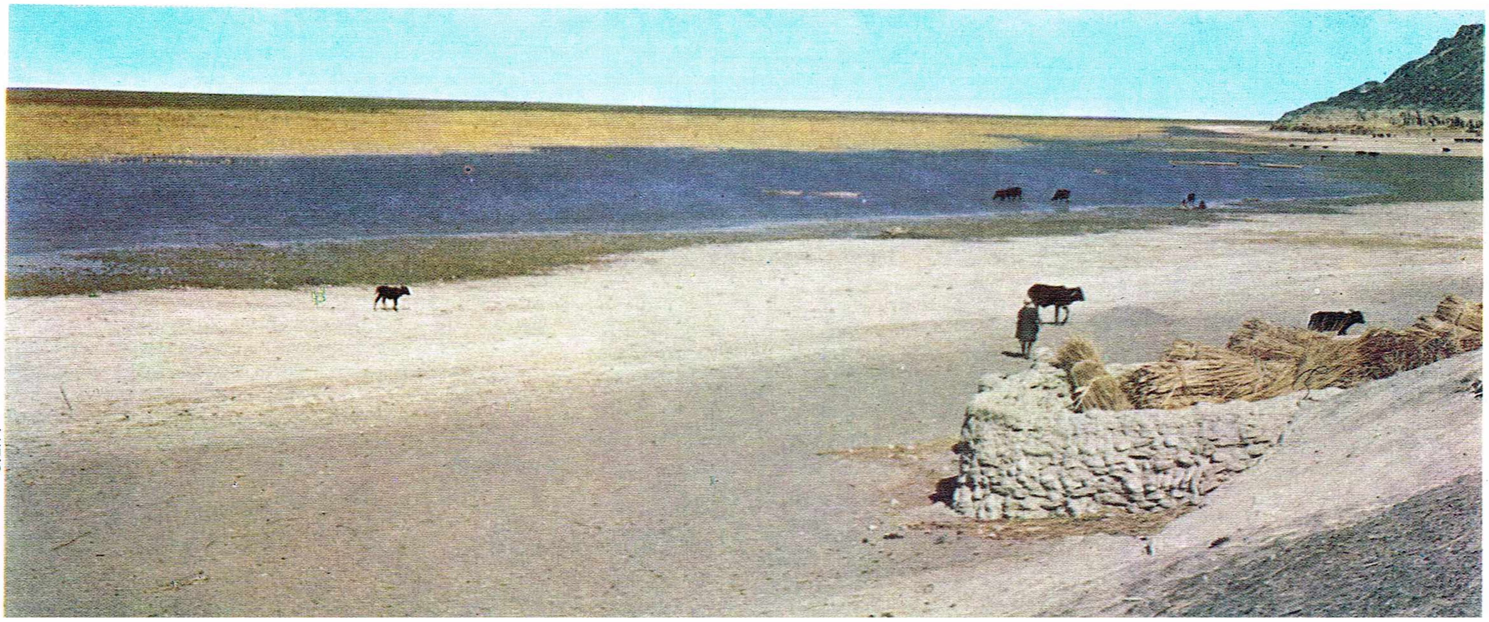

S.E.F.

Beaujard - Cedri - Poggio

▲ *Un exemple de côte marine sableuse au nord du Cap-Ferret (Gironde).*

▼ *Coupe perpendiculaire à la ligne de côte montrant les différentes parties du milieu littoral (d'après Dunbar et Rodgers).*

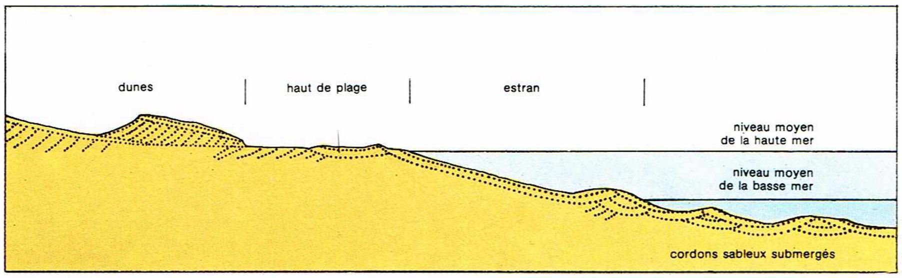

I.G.D.A.

stratification, résultant le plus souvent de l'activité biologique d'organismes. D'autre part, certains organismes comme des Mollusques, des Crustacés ou des Annélides vivent enfouis dans le sable et y creusent des galeries. Ces galeries ont un trajet et une forme variables suivant les espèces et sont souvent bien conservées dans les dépôts anciens. Elles se présentent dans ces cas sous forme de tubes remplis de sable plus ou moins limoneux dont la texture est différente de celle du grès qui l'entoure.

Le sable qui se sédimente dans les premiers mètres de profondeur du milieu néritique se différencie du sable littoral par un développement moins important des stratifications parallèles, lesquelles sont progressivement remplacées par des stratifications obliques. En effet, les fonds marins actuels qui sont situés juste au large de la ligne de côte sont souvent couverts de sortes de barres sableuses allongées parallèlement à la côte. Les courants côtiers peuvent également provoquer la formation d'autres barres de sable allongées obliquement par rapport à la côte. D'autre part, le fond sableux présente des ondulations typiques dues aux courants de houle ; celles-ci sont très nettes sur le littoral actuel mais très mal conservées dans les séries anciennes. La faune est rare et se concentre dans les petites dépressions, à l'abri de l'action des courants.

La limite entre la zone de balancement des marées, ou zone intertidale, et la terre ferme est soulignée par une bande étroite de sable grossier, de petits galets et de débris de coquilles. De part et d'autre de ce faciès, le pendage de la plage varie ; en effet, du côté de l'estran la surface est légèrement inclinée, alors que du côté du haut de plage elle est accidentée mais plane. Cette limite entre l'estran et le haut de plage est parfois formée par une succession de croissants de plage dont la morphologie est typique. Les dépôts du haut de plage, dont la structure est moins régulière que les sables de l'estran, peuvent être inclinés vers le continent.

Si l'on s'éloigne encore vers l'intérieur des terres, on trouve des dépôts sableux plus développés que sur la ligne de côte proprement dite, qui s'organisent en système dunaire. En fait, le sable de ces dunes est du sable littoral repris par le vent. Il présente les caractères d'un sable éolien avec des stratifications entrecroisées, mais sa texture (forme des grains, diamètre moyen) n'est que

légèrement différente de celle du sable littoral. Par exemple, si la plage est calcaire, oolithique ou pseudo-oolithique avec des fragments de coquilles, la dune aura la même composition.

Le sable n'est pas le seul sédiment qui se dépose en milieu littoral. En certains points de la côte, la sédimentation peut être essentiellement limoneuse et argileuse, avec parfois une accumulation importante de matière organique provenant d'Algues ou de végétaux supérieurs aquatiques. Ce phénomène se produit surtout à l'embouchure des fleuves, dans les estuaires, où la quantité de matériel en suspension est très importante. Le milieu estuarien représente un cas particulier du milieu littoral, et il y règne généralement une sédimentation spécifique ; en effet, les circulations d'eau y sont la résultante des courants marins de flux et de jusant ainsi que du courant fluviatile. Ce jeu complexe de courants ne facilite pas toujours la sédimentation dans l'estuaire lui-même, et les dépôts s'effectuent le long de la côte sur les bords de l'embouchure du fleuve.

Le phénomène de floculation est une des causes importantes de la sédimentation des particules argileuses à leur entrée dans les eaux salées. Les sédiments vaseux actuels présentent parfois des alternances de lits plus grossiers et de lits à granulométrie plus fine. La sédimentation a lieu, le plus souvent, à proximité des chenaux de marée dont les nombreuses ramifications entaillent la côte. Au cours de la marée montante, le flux progresse le long de ces chenaux et s'étend sur toute la surface, généralement plane, de la côte. Il s'y dépose alors des argiles, qui sont noires à cause des conditions très réductrices du milieu de sédimentation.

Les *lagunes* proprement dites sont des étendues d'eau situées derrière les barres sableuses (tombolos) et n'ayant qu'une communication restreinte avec la mer ouverte. Ce terme désigne également les eaux isolées au milieu des atolls ou entre les barrières récifales et la terre ferme.

Sous climat tempéré, les sédiments qui se déposent dans les lagunes sont essentiellement des débris clastiques, constitués d'argiles et de limon. Ces sédiments peuvent avoir plusieurs origines : d'une part, ils peuvent être apportés par les fleuves ; mais surtout, ils se déposent à la suite de grandes marées qui peuvent envahir la lagune en traversant le cordon sableux. On trouve dans ces lagunes des chenaux de marée ramifiés de même type que ceux qui se développent dans la vase. Les sédiments argileux se déposent à la périphérie de ces chenaux, alors que du limon et du sable grossier emplissent la partie centrale. L'aspect général du dépôt est assez semblable à celui que l'on rencontre dans les dépôts fluviatiles classiques.

Sous climat aride, l'absence de cours d'eau permanents et la très forte évaporation provoquent la précipitation de sédiments évaporitiques (évaporites, calcaire, etc.) dans les lagunes. La faune est pratiquement absente dans les dépôts lagunaires car ces milieux sont soumis à des variations importantes de salinité en fonction des apports plus ou moins abondants d'eau douce ou d'eau marine. Certains Poissons ou organismes marins peuvent être apportés dans les lagunes au cours de grandes marées ; mais si les conditions de salinité sont défavorables, ils meurent et l'on retrouve leurs restes englobés dans les sédiments.

Le milieu deltaïque

Lorsqu'un cours d'eau pénètre dans un bassin lacustre ou marin, la vitesse du courant diminue brutalement, ce qui provoque la sédimentation des particules transportées. Les sédiments s'accumulent donc préférentiellement dans cette zone que l'on appelle un *delta*. Si le fleuve se jette à la mer, l'énergie mécanique des marées, des houles et des vagues peut provoquer une dispersion des sédiments. L'embouchure du fleuve acquiert alors les caractéristiques d'un *estuaire*, et le matériel détritique se dépose latéralement et tend à former une côte vaseuse.

Le milieu deltaïque se développe pour sa plus grande part sous l'eau, seules quelques zones étant émergées. Dans les petits deltas, c'est-à-dire essentiellement les deltas lacustres, les sédiments de ces deux parties, aérienne et aquatique, se différencient nettement. Au contraire, dans les grands deltas marins, les dépôts présentent des caractéristiques beaucoup plus uniformes.

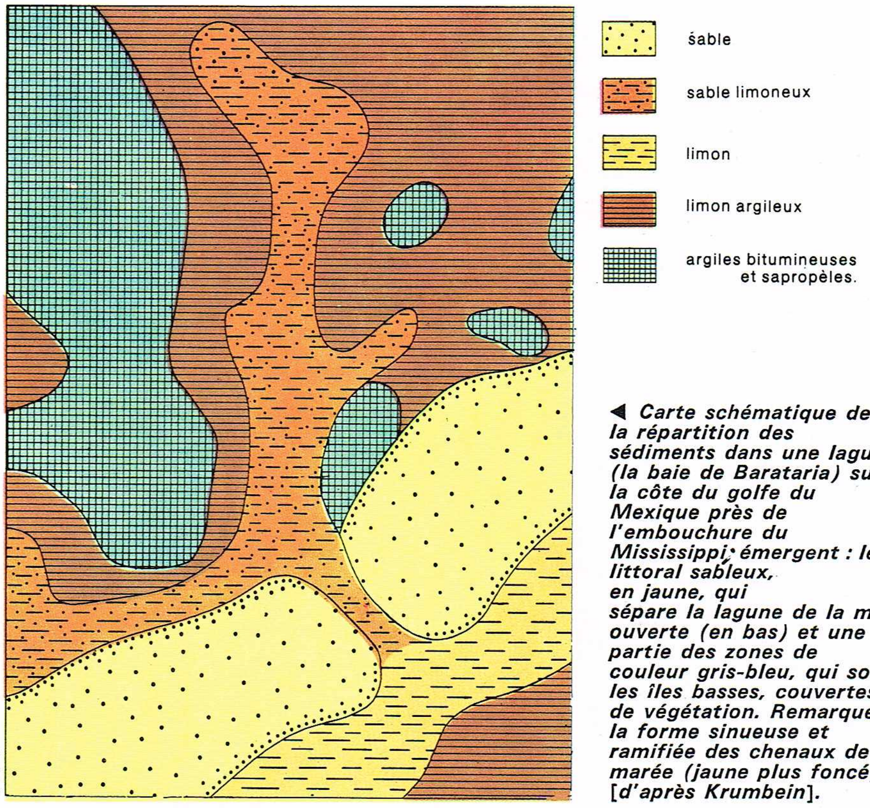

◀ *Carte schématique de la répartition des sédiments dans une lagune (la baie de Barataria) sur la côte du golfe du Mexique près de l'embouchure du Mississippi ; émergent : le littoral sableux, en jaune, qui sépare la lagune de la mer ouverte (en bas) et une partie des zones de couleur gris-bleu, qui sont les îles basses, couvertes de végétation. Remarquer la forme sinueuse et ramifiée des chenaux de marée (jaune plus foncé) [d'après Krumbein].*

Une zone deltaïque peut se diviser en plusieurs parties :

Les *dépôts horizontaux supérieurs, qui se développent en milieu subaérien,* sont analogues aux sédiments fluviatiles. Ils sont constitués de limon et d'argile apportés par les fleuves pendant les crues. On y trouve également des lentilles sableuses disposées en rubans, qui correspondent au remplissage des chenaux ramifiés du cours d'eau. Les caractéristiques de ces dépôts dépendent de la quantité des apports détritiques et de la distribution de ces apports au cours de l'année. Par exemple, si l'apport en matériel détritique s'effectue pendant une crue de courte durée, les eaux envahissent la totalité du delta ; toutefois, en période d'étiage, les courants côtiers et les vagues provoquent une redistribution des sédiments. Une côte sableuse rectiligne s'édifie, tandis que le matériel détritique fin est exporté vers le large. Au contraire, lorsque la capacité de transport des eaux

▼ *Carte d'une partie du delta du Mississippi. Les zones émergées sont en vert, celles qui sont sous l'eau en jaune ou ocre suivant la nature des sédiments (d'après Fisk et coll.).*

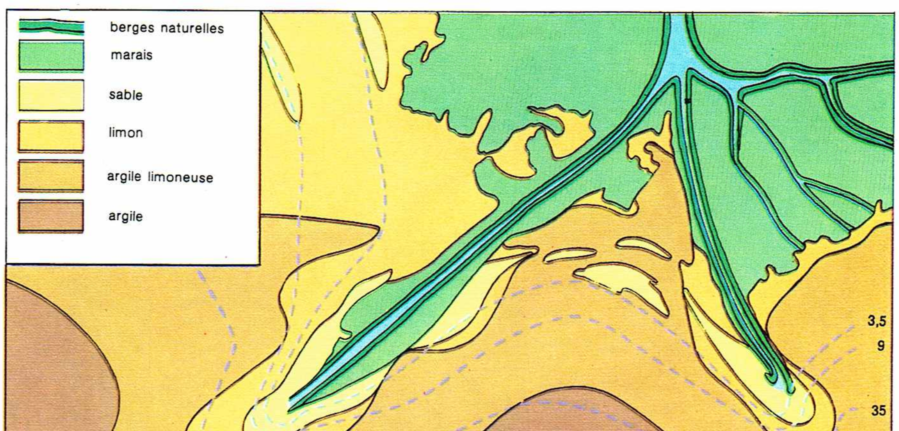

S. Prato

▲ *Vue aérienne d'un atoll corallien en Polynésie. Les îles recouvertes par la végétation sont formées de sable calcaire accumulé par les courants et le vent. En bordure de ces îles, on trouve la plate-forme organogène recouverte d'une mince pellicule d'eau; cette plate-forme se développe aussi bien du côté de la lagune, ou lagon (à gauche), que vers la mer ouverte.*

▶ *Page ci-contre, en bas, les études sur les formes de vie océanique et les sédiments marins sont effectuées d'une part par des bateaux océanographiques et d'autre part à l'aide de submersibles et de bathyscaphes comme celui utilisé par l'équipe du commandant J. Y. Cousteau.*

fluviatiles ne varie pas au cours de l'année, l'embouchure de chaque chenal du delta progresse vers la mer ouverte, et il se forme un delta digité. La ligne de côte est sinueuse; des anses se forment entre chaque chenal du delta. Le plus souvent, dans ces anses recouvertes d'un film d'eau très mince, la végétation s'installe. Dans ce cas, le matériel détritique apporté par le fleuve se dépose dans les chenaux, ce qui provoque un rehaussement du fond près de l'embouchure. Le dépôt peut également « engraisser » les berges naturelles qui se forment latéralement à la suite de certaines crues, de la même façon que dans les plaines alluviales. Ces berges peuvent être rompues localement et les eaux envahissent les anses, qui ont les caractéristiques de marais côtiers.

Les *dépôts horizontaux supérieurs, qui se développent en milieu subaquatique,* ont des caractéristiques assez analogues à celles des sédiments marins néritiques. On y trouve des petites couches horizontales de sable fin et de sable plus grossier près de l'embouchure des principaux chenaux du fleuve. Les variations importantes de salinité empêchent le développement de la faune; les sédiments sont donc surtout détritiques. Cependant, certaines substances, comme la silice ou des hydroxydes de fer, transportées en solution ou sous forme colloïdale, peuvent floculer et donner naissance à des dépôts d'origine chimique. Elles ne représentent, toutefois, qu'une faible part des dépôts qui sont essentiellement clastiques, et on ne les retrouve que rarement dans les formations actuelles et anciennes.

Les *dépôts obliques* sont formés de limon et de sable fin; on rencontre parfois du sable plus grossier dans les petits deltas lacustres, et l'inclinaison des couches est importante (jusqu'à 30°). Dans les grands deltas marins, le pendage des couches est très faible (quelques degrés), et le changement lithologique par rapport aux dépôts horizontaux supérieurs est très progressif. La faune benthique ainsi que les sédiments détritiques provenant de la terre ferme sont parfois abondants. La sédimentation chimique est moins perturbée par le matériel détritique.

Les *dépôts horizontaux inférieurs*, composés de limon et d'argile, ne se distinguent des sédiments marins profonds que par une vitesse de sédimentation légèrement plus grande. Les formations sédimentaires déposées en milieu deltaïque sont assez fréquentes dans les séries géologiques. Les dépôts supérieurs horizontaux peuvent être érodés à la suite d'une transgression marine; toutefois, s'ils sont conservés, ils se présentent sous forme d'argiles et de grès rougeâtres de structure identique à celle des dépôts fluviatiles. La couleur rouge s'atténue et disparaît dans les roches formées en milieu subaquatique. Il s'agit de grès fins, grisâtres, bien stratifiés et dépourvus de fossiles; ils passent latéralement à des dépôts de limon et d'argile assez épais.

Le milieu récifal

Le milieu de sédimentation corallien représente un aspect particulier du milieu côtier, dont il possède de nombreuses caractéristiques. Il se rencontre dans les régions où l'apport détritique est très faible et où la température moyenne annuelle est relativement élevée. Les récifs coralliens se développent également en pleine mer, loin des côtes, autour d'édifices volcaniques submergés. Les sédiments qui précipitent en milieu corallien sont d'abord calcaires et subissent souvent une dolomitisation au cours de la diagenèse. Leur structure et leur texture varient selon les caractéristiques morphologiques du récif.

Les récifs tabulaires sont formés de l'accumulation d'organismes de dimensions assez limitées et qui ne sont pas obligatoirement émergés. On les retrouve dans les séries géologiques sous forme de biohermes lentiformes, calcaires ou dolomitiques. Ils se distinguent des calcaires de biostrome qui les entourent par le fait qu'ils ne possèdent pas de stratification.

Les barrières coralliennes et les atolls sont beaucoup plus développés. Les premières se situent le long d'une ligne de côte, comme la Grande Barrière australienne; les seconds sont en mer ouverte. Ces deux types de milieu corallien ont une morphologie fondamentale commune : ils sont constitués par une barrière proprement dite qui émerge partiellement et par une lagune enfermée dans l'atoll dont la communication avec la mer ouverte est limitée. Dans le cas des barrières coralliennes, la lagune se situe entre la barrière et la terre ferme et il est très rare que la barrière se construise contre la terre ferme sans laisser place à cette lagune.

Si l'on fait une coupe en partant de la mer ouverte et en allant vers le récif, on rencontre tout d'abord une plate-forme organogène située au niveau moyen des marées et partiellement découverte à basse mer. Cette plate-forme, large de quelques centaines de mètres, s'aggrade vers la mer libre grâce à la reproduction des organismes calcaires qui la constituent; il s'agit essentiellement d'Algues calcaires (Lithothamniées) et de quelques coraux. La croissance des récifs est gênée par l'action destructrice des vagues qui arrachent des blocs de roches du front du récif; ceux-ci s'éboulent sur la pente et forment des cônes de débris calcaires (biocalcirudites intraformationnelles dans les séries géologiques anciennes).

Dans la plate-forme récifale, recouverte par une mince couche d'eau à marée haute, vivent certains Bivalves et Foraminifères. On retrouve leurs tests associés à ceux des coraux et aux thalles des Algues, l'ensemble étant rapidement brisé par l'action des vagues. Il se forme donc un sable calcaire grossier qui, par le jeu des courants, peut constituer une île qui se couvre ensuite de végétation. Ces îles, très fragiles, peuvent être érodées à la suite d'une grande marée ou d'une tempête.

Au-delà de la barrière récifale elle-même se trouve la lagune, située juste avant la terre ferme. L'eau de la lagune est relativement calme et sa profondeur constante. Le fond est recouvert de sable et de limon calcaire qui proviennent de l'érosion des zones émergées du récif ou d'une précipitation chimique directe à partir du carbonate de calcium en solution. Un très grand nombre de colonies de coraux peut se développer sur le fond du lagon; parfois, ces colonies émergent. Dans les barrières récifales, le fond de la lagune peut être totalement ou partiellement occupé par des sédiments clastiques terrigènes, gréseux ou argileux.

Dans les formations récifales anciennes, il est souvent possible de reconnaître un calcaire de bioherme proprement dit. Massif et poreux, il constitue une partie importante du récif. Les roches sédimentaires qui se forment dans les lagunes récifales sont constituées de calcaires

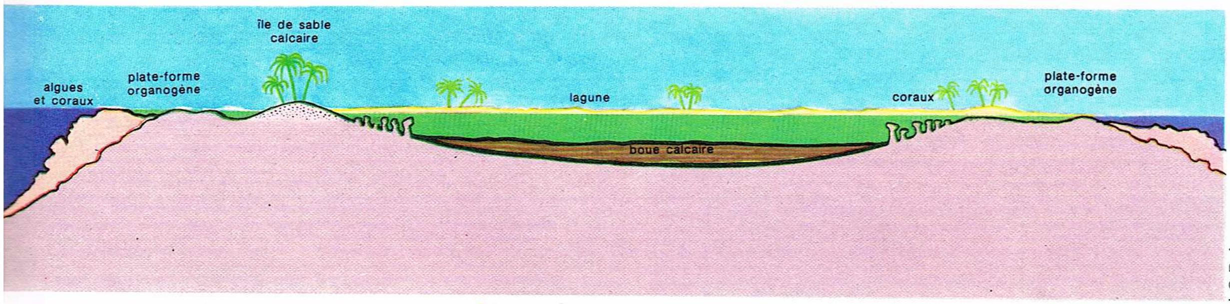

I.G.D.A.

◀ **Coupe schématique d'un atoll.** *En réalité, les amas d'Algues calcaires et de coraux qui constituent la plate-forme organogène sont peu à peu remplacés par des brèches calcaires quand on s'éloigne vers le large.*

pélagiques à texture très fine et finement lités (calcaire lithographique). Dans les atolls, on observe des calcaires pélagiques souvent argileux, qui passent progressivement à des argiles et des grès rouges. Des dépôts évaporitiques s'y associent parfois quand on se rapproche de la terre ferme, dans les cas des barrières récifales.

Les milieux marins

Les milieux de sédimentation marins sont divisés en trois grandes parties : au fur et à mesure que la profondeur augmente, on rencontre successivement le *milieu néritique*, le *milieu bathyal* et le *milieu abyssal*. Les limites entre ces trois zones sont arbitraires et ne correspondent pas toujours à des changements morphologiques ou à des variations dans le type de sédimentation, surtout pour les sédiments profonds. Classiquement, le milieu néritique s'étend depuis le niveau de basse mer jusqu'à une profondeur d'environ 200 m, le milieu bathyal de 200 à 2 000 m de profondeur, et le milieu abyssal au-delà de 2 000 m.

Le milieu néritique occupe la zone appelée *plateau continental*; il s'agit d'une plate-forme sous-marine très étendue qui entoure les terres émergées. Elle peut même constituer la totalité de certaines mers épicontinentales, comme la mer Baltique. La limite inférieure du plateau continental correspond à un brusque changement de pente des fonds marins qui souligne le début du *talus continental*. Dans certaines régions, ce changement de pente a lieu à une profondeur de quelques centaines de mètres, alors que dans d'autres zones, il peut s'effectuer à une profondeur moins importante (quelques dizaines de mètres) ; c'est pourquoi la limite bathymétrique de 200 m est relativement arbitraire.

Une partie très importante des roches sédimentaires marines des séries géologiques anciennes se sont probablement formées dans le milieu néritique, sur des fonds marins parfois très étendus de type épicontinental. En effet, les sédiments océaniques très profonds des fosses abyssales ne sont pas toujours soumis à des phénomènes orogéniques de plissement et de soulèvement qui les amènent à former des chaînes de montagnes. Ils peuvent rester dans les fonds océaniques pendant de longues périodes géologiques sans être amenés à la surface. Dans le milieu bathyal, la sédimentation est limitée et ce sont surtout les phénomènes de transport qui ont lieu, sauf dans le cas de bassins sédimentaires proches des continents et séparés de la mer ouverte par la présence d'un haut-fond.

L'étude des sédiments néritiques actuels, réalisée au cours de missions océanographiques, a montré que leur composition était très variée. En effet, on observe rarement un passage progressif entre les sables côtiers, le limon et les argiles, et enfin les sédiments calcaires d'origine chimique ou organique. Souvent, les dépôts détritiques sableux se trouvent à proximité de la bordure externe du plateau continental, alors que les sédiments plus fins, comme le limon, peuvent recouvrir de grandes surfaces dans des zones peu profondes relativement proches du continent.

La distribution actuelle des sédiments néritiques est directement influencée par l'histoire géologique de l'ère quaternaire et, plus particulièrement, par l'abaissement général du niveau des océans. Cet abaissement, dû aux glaciations pléistocènes, a probablement eu une amplitude de 100 à 200 mètres. C'est pourquoi le plateau continental était presque totalement émergé pendant les glaciations; il était couvert de sédiments de toute origine : continentaux, lacustres, glaciaires ou éoliens.

Depuis la fin du Pléistocène jusqu'à nos jours (quelques millions d'années), le niveau de la mer a eu tendance à remonter par suite de la fonte d'une grande partie des calottes glaciaires. La mer a donc recouvert les zones côtières, ce qui a provoqué un remaniement des sédiments; mais, en fait, ceux-ci ont conservé la composition et les caractéristiques de la sédimentation continentale pléistocène. On les retrouve dans le milieu néritique actuel, parfois recouverts d'une pellicule de sédiments holocènes qui peut être localement érodée. C'est ainsi que l'on retrouve les dépôts de graviers d'anciennes moraines submergées au large de la côte atlantique en Amérique septentrionale, ou les dunes submergées du Dogger Bank en mer du Nord. De même, la remontée du niveau marin à l'Holocène est à l'origine de la mise en place de la majorité des grands deltas actuels qui se sont édifiés sur des sédiments sableux fluviatiles.

Dans les régions qui n'ont pas été soumises aux glaciations pléistocènes, les sédiments holocènes néritiques sont très variés. Leur nature dépend essentiellement des conditions géomorphologiques et climatiques qui régnaient dans les zones d'alimentation. Au large des embouchures des grands fleuves, on trouve des quantités importantes de sable quartzeux, de limon et d'argile; leurs distributions respectives sont assez irrégulières et

▼ *Ci-dessous, coupe d'une* **barrière récifale** *permienne au Texas; la coupe est perpendiculaire à la direction d'accroissement de la barrière. En rouge, le bioherme proprement dit; en jaune, les calcaires et dolomies qui se déposent dans la lagune entre le récif et la terre émergée (à gauche); en violet, les calcaires détritiques qui se forment sur la pente du récif; en beige, les arénites; en vert foncé, les calcaires et les argiles de mer profonde; leur limite supérieure représente le niveau marin à la fin de la sédimentation (d'après King).*

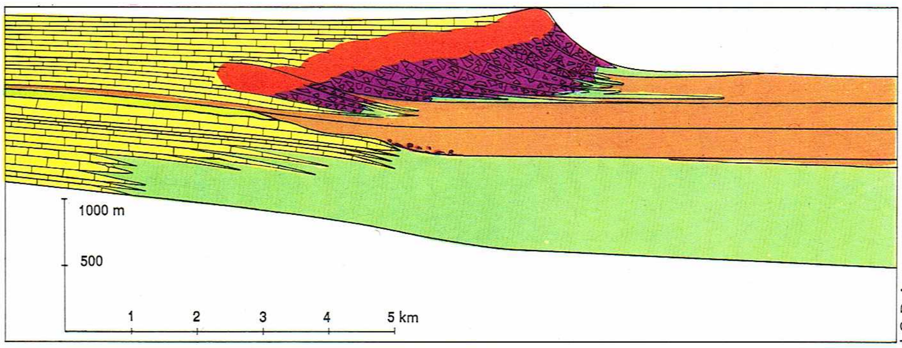

I.G.D.A.

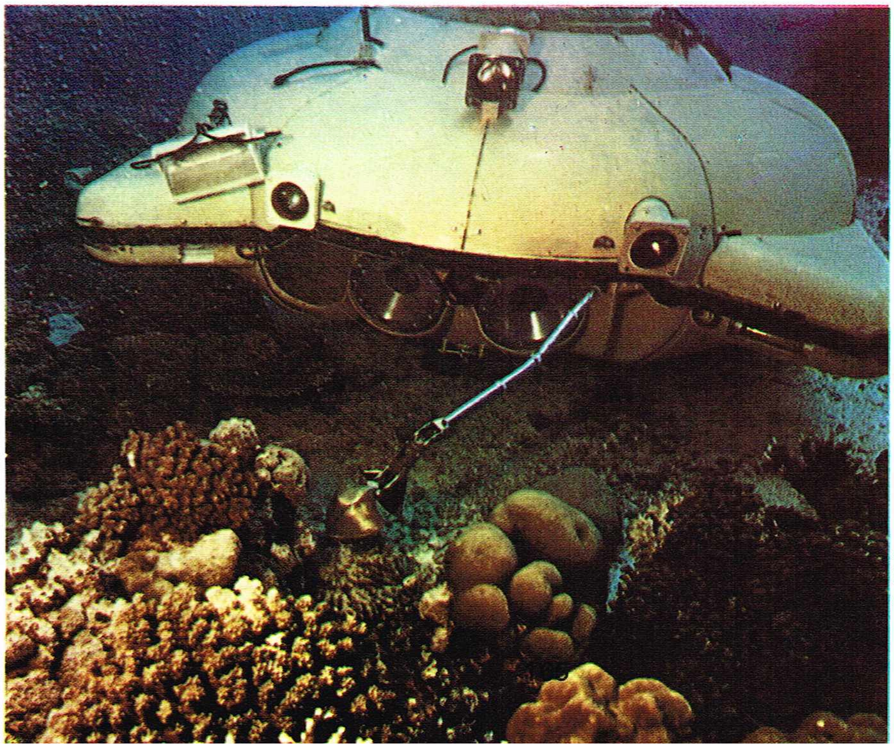

B. Richner

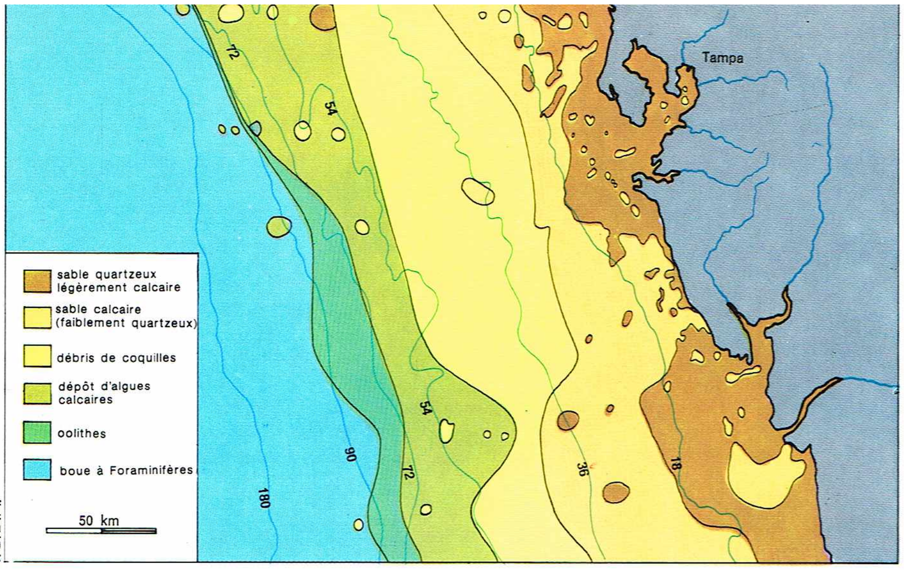

I.G.D.A.

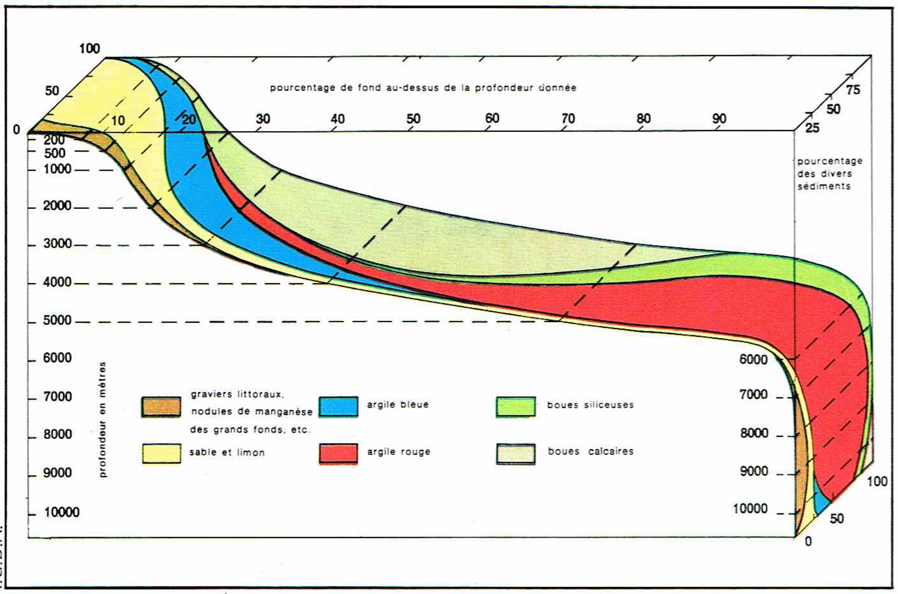

I.G.D.A.

▲ *En haut, nature des sédiments néritiques au large des côtes ouest de Floride (U.S.A.). Les lignes isobathymétriques représentent la profondeur en mètres (d'après Gould et Stewart).*

Ci-dessus, répartition des principaux types de sédiments marins en fonction de la profondeur (d'après Bruun).

▼ *Parmi les roches les plus caractéristiques du milieu néritique,* **les phosphorites** *dont on observe ici une lame mince en lumière polarisée.*

Archives Photo B

dépendent surtout de la morphologie des fonds ainsi que de la répartition des courants. Au large des régions soumises à un climat chaud et aride, les sédiments d'origine organique et chimique sont prédominants : il s'agit de sables calcaires à Mollusques et à Foraminifères, de constructions récifales, et de boues calcaires organogènes ou de précipitations chimiques. Dans les régions situées sous des latitudes élevées, le matériel détritique transporté par les icebergs contribue de façon importante à la sédimentation marine néritique ou même plus profonde. Les sédiments ont alors les caractéristiques de dépôts glaciaires repris en milieu marin.

La topographie des fonds sous-marins détermine la répartition des courants ; elle a donc une grande influence sur le type de sédiments qui peuvent se déposer. Si le plateau continental présente une topographie très plane et s'il est ouvert vers la mer libre, le fond est balayé par les courants qui vont assurer le renouvellement de l'eau en oxygène. Au contraire, dans les mers épicontinentales encerclées par les terres, comme la mer Baltique, la topographie du plateau continental est accidentée et des hauts-fonds sous-marins empêchent la circulation des eaux avec la mer ouverte. Les eaux profondes sont donc très pauvres en oxygène car elles ne sont agitées que par des courants très faibles. Dans ces conditions, les sédiments néritiques sont surtout constitués d'argiles noirâtres, riches en matière organique, et les dépôts calcaires sont pratiquement absents. En effet, les eaux profondes et les eaux interstitielles des sédiments sont acides en raison de l'anhydride carbonique et de l'hydrogène sulfuré produits par l'activité biologique.

Le milieu néritique profond et la partie supérieure du milieu bathyal correspondent à une sédimentation plus intense de la matière organique. En effet, les organismes planctoniques et benthoniques pullulent dans cette zone où pénètre la lumière solaire, et qui est riche en substances nutritives apportées par les fleuves ou provenant de niveaux plus profonds. Toutes ces conditions sont extrêmement favorables au développement de la vie animale et végétale, et celle-ci est particulièrement intense à ce niveau du milieu marin.

L'accumulation de matière organique dans la partie du milieu néritique plus proche du continent est masquée par l'accumulation importante de substances non organiques dans cette zone. Dans les mers épicontinentales à circulation ouverte, les débris organiques sont presque totalement assimilés par le benthos, c'est-à-dire par des organismes qui vivent sur le fond. Au contraire, dans les mers à faible circulation où les organismes benthiques sont pratiquement absents à cause de la toxicité des eaux profondes (pauvreté en oxygène et présence d'hydrogène sulfuré), la matière organique s'accumule dans les sédiments.

Les roches sédimentaires qui se forment dans le milieu néritique sont extrêmement variées tant par leurs compositions lithologiques que par leurs textures ou leurs structures. Ces variations correspondent aux variations des conditions de sédimentation, qui sont fréquentes dans ce milieu. Parmi les roches les plus caractéristiques, on rencontre des *grès quartzeux* ou *feldspathiques* en couches bien régulières, des *argiles* parfois noirâtres, des *calcaires détritiques*, *biologiques* ou de *précipitation chimique*, des *phosphorites* et des *dépôts ferrifères*.

Les sédiments qui se déposent dans les milieux bathyaux et abyssaux sont moins variés que les sédiments néritiques et ont une vitesse de sédimentation plus faible. Ils correspondent respectivement à la zone du talus continental à des profondeurs comprises entre 200 et 2 000 m, et à la partie inférieure de ce talus à des profondeurs supérieures à 2 000 m. Il est difficile de distinguer les roches sédimentaires qui se forment dans ces deux types de milieu : en effet, les sédiments marins profonds sont très uniformes et ne possèdent pas de caractéristique typique du milieu bathyal, ni du milieu abyssal ; d'autre part, il est probable que les phénomènes de sédimentation en milieu profond dans les temps géologiques anciens ont été différents de ceux que l'on observe à l'époque actuelle.

La limite bathymétrique entre le milieu bathyal et le milieu abyssal est relativement arbitraire car il n'existe que des différences minimes entre les sédiments qui se déposent sur le talus continental et ceux des grands fonds océaniques. Sur le talus continental, on trouve

des sédiments détritiques assez fins, apportés par les vagues et les courants depuis les régions côtières et néritiques. Il s'agit, en général, d'argiles grisâtres ou de boues calcaires si la sédimentation de la zone néritique est calcaire. La teneur en matière organique de ces sédiments peut être élevée; elle est souvent formée par des organismes planctoniques microscopiques (Foraminifères, Radiolaires, etc.) dont les tests se déposent en même temps que le matériel détritique terrigène. C'est ainsi que l'on rencontre souvent des boues à Globigérines ou parfois à Ptéropodes (petits Gastéropodes planctoniques) dans le milieu bathyal. Des boues constituées de minuscules tests siliceux de Diatomées sont également très répandues sur les fonds océaniques actuels, principalement dans les régions froides, comme la zone antarctique. De même, des dépôts de Diatomées actuels ou anciens sont très fréquents dans le milieu néritique, dans les régions où l'apport détritique est faible et où les eaux sont enrichies en substances nutritives (nitrates, phosphates).

La teneur en matière organique des sédiments bathyaux qui se forment à des profondeurs supérieures à 1 000 m est assez faible, sauf s'il s'agit de composés résistants à l'altération. En effet, les tests de Protozoaires sont abandonnés au cours des processus de reproduction et les débris organiques qui proviennent des eaux superficielles où les conditions sont favorables à la vie (la lumière solaire pénètre jusqu'à 200 m de profondeur) sont en grande partie transformés ou assimilés par des organismes du type des Bactéries au cours de leur descente vers les grandes profondeurs.

Un des sédiments clastiques les plus typiques du milieu abyssal actuel est représenté par les *argiles rouges,* qui recouvrent de grandes surfaces du fond des trois océans. Leur origine pose un problème : il s'agit probablement de matériel détritique fin transporté par les courants et analogue aux argiles grises du milieu bathyal. Leur couleur rouge est due aux hydroxydes de fer qui peuvent précipiter au cours de la diagenèse. La composition chimique des argiles rouges est identique à celle de la moyenne des roches ignées, avec, cependant, de légères différences pour certains éléments : par exemple, un déficit en sodium, calcium et potassium qui sont solubles dans l'eau de mer, et un enrichissement en d'autres éléments insolubles comme l'aluminium, le fer ou le manganèse. (Ces deux derniers éléments peuvent d'ailleurs se concentrer sous forme de nodules métalliques.)

Les argiles rouges des grands fonds ne contiennent généralement pas de tests calcaires de Globigérines ou d'autres organismes; ceux-ci sont en effet dissous du fait de la teneur élevée des eaux abyssales en anhydride carbonique, due à une importante pression hydrostatique et à la température très basse. Par contre, ces argiles peuvent être localement riches en tests siliceux de Radiolaires : c'est pourquoi on les appelle des *boues à Radiolaires*. A la différence des débris calcaires, les tests siliceux ne sont pas dissous, même à grande profondeur.

Un autre type de dépôts des zones bathyales et abyssales est constitué par du sable et du limon, transportés par des courants de turbidité. Ils recouvrent de grandes surfaces au pied du talus continental atlantique en Amérique septentrionale et s'étendent parfois dans des zones encore plus profondes. Les *turbidites* sont relativement fréquentes dans la partie occidentale de l'Atlantique. Ce phénomène est attribué à l'érosion des sédiments clastiques déposés sur le plateau continental américain, presque totalement émergé au cours des glaciations pléistocènes et progressivement recouvert par une transgression marine à l'Holocène.

La vitesse de dépôt des sédiments marins profonds est relativement faible : on peut considérer que l'épaisseur des argiles rouges des grands fonds augmente de 1 mm environ tous les 1 000 ans, alors que la vitesse de sédimentation des boues organogènes à Globigérines en milieu bathyal peut atteindre 2 cm tous les 1 000 ans. Par contre la sédimentation des turbidites est extrêmement rapide : une couche de 1 m d'épaisseur peut se déposer en quelques heures. Dans l'intervalle séparant deux courants de turbidité, qui peut être de l'ordre d'une dizaine à une centaine d'années, la sédimentation des argiles profondes est très lente.

Il est difficile d'attribuer avec certitude une profondeur de sédimentation aux roches sédimentaires marines anciennes. Les dépôts bathyaux sont probablement les plus fréquents. Certains calcaires pélagiques qui ont de la silice diffuse ou sous forme de rognons ou de lits de silex, et des roches comme des radiolarites sont considérés comme appartenant au milieu profond. Au contraire, les calcaires à Globigérines, les grandes formations

▼ Répartition géographique des sédiments abyssaux; en gris : les milieux néritiques et bathyaux, les mers internes et les régions peu connues comme la mer glaciale Arctique (d'après Gould et Stewart).

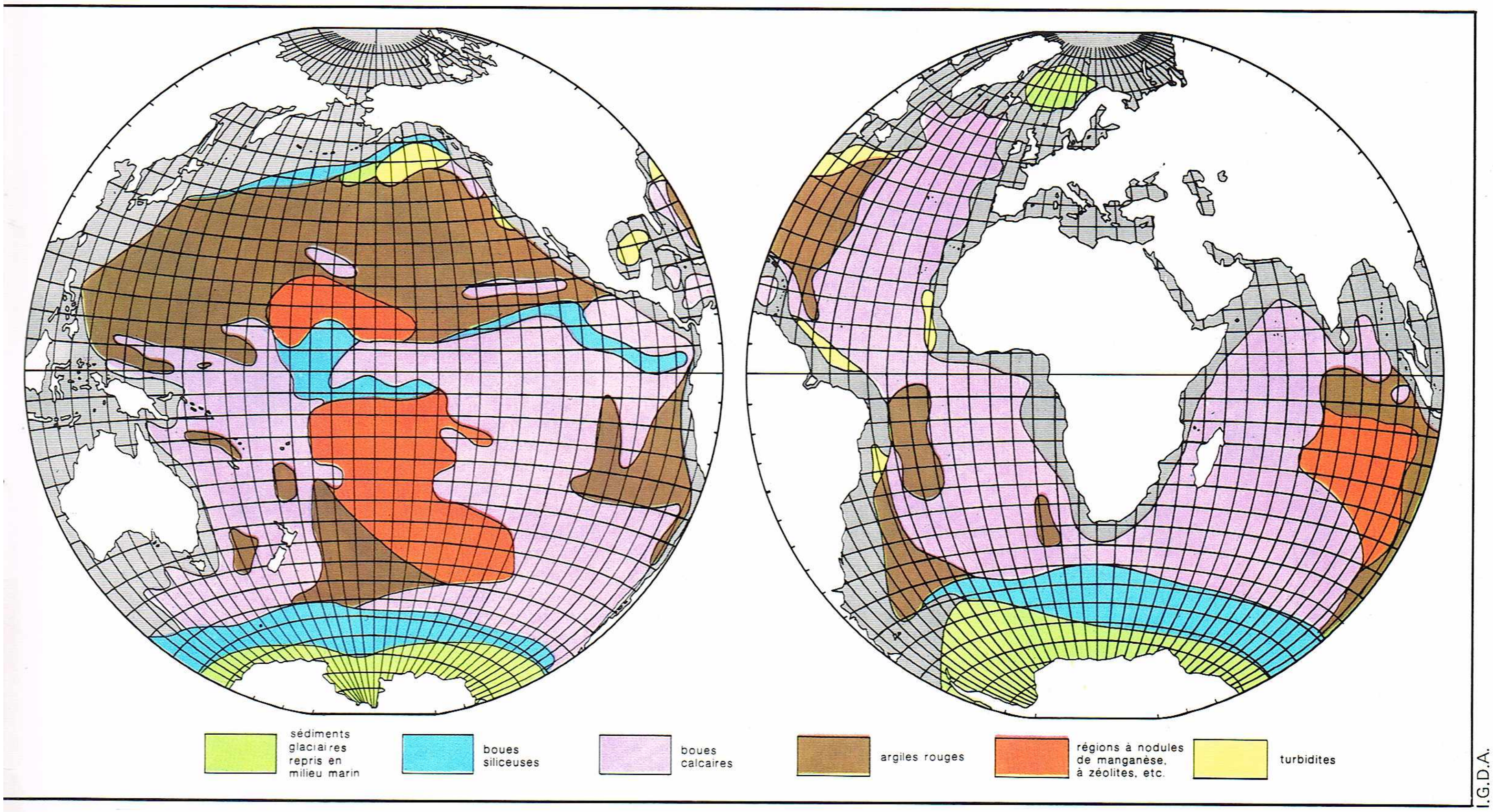

d'argiles grises, et les séries argilo-gréseuses de type flysch sont considérés comme des dépôts de milieu bathyal. En l'état actuel des recherches dans ce domaine, la distinction entre sédiments du talus et sédiments des grands fonds océaniques reste très délicate et réclame l'examen de toutes les caractéristiques des formations anciennes et actuelles.

Sédimentation et géotectonique

Le cycle sédimentaire dans son ensemble, depuis l'altération et l'érosion des terres émergées jusqu'à la sédimentation du matériel après son transport, est conditionné par deux facteurs : d'une part, l'existence de dénivelés entre les régions d'origine et les lieux de dépôt définitif, d'autre part, la permanence dans le temps de ces dénivelés qui seraient rapidement annulés par l'érosion ainsi que par la sédimentation s'ils n'étaient pas rajeunis par des mouvements tectoniques. La géotectonique s'intéresse à l'étude des structures fondamentales de la croûte terrestre et de l'évolution de ces structures. Elle s'efforce de déterminer pourquoi certaines parties de la croûte terrestre sont soumises à la subsidence (enfouissement, bassins, géosynclinaux...) pendant certaines périodes géologiques, alors que d'autres régions sont pratiquement stables ou ne subissent que de très faibles mouvements. D'autre part, une zone donnée de la croûte terrestre peut avoir un comportement géotectonique variable au cours du temps; en particulier, on constate habituellement que les zones soumises à une subsidence importante (géosynclinaux) sont ensuite le siège de remaniements et de mouvements qui les transforment en chaînes de montagnes.

L'étude de l'évolution du comportement géotectonique d'une région au cours des temps géologiques repose sur les caractéristiques des roches sédimentaires qui s'y sont formées. En effet, leur composition minéralogique, leurs structure et texture dépendent du comportement géotectonique du bassin de sédimentation et des terres émergées avoisinantes qui fournissent ce matériel. L'application pratique de ce type de recherche consiste surtout à trouver les conditions de formation et les rapports réciproques entre les séries géologiques susceptibles d'accumuler des hydrocarbures (roches poreuses, perméables et enrichies en matière organique).

On distingue trois types fondamentaux d'associations lithologiques, formées dans trois milieux géotectoniques principaux : les séries de plate-forme, les bassins intracratoniques et les zones géosynclinales.

Les plates-formes

Les *plates-formes* sont des zones où la sédimentation est généralement marine. Elles s'étendent sur de vastes boucliers ou cratons stables et constitués essentiellement de roches granitiques ou gneissiques très anciennes. Elles sont soumises à une subsidence très lente, qui peut parfois être interrompue par des dislocations vers le haut. Par conséquent, cette zone de sédimentation ne descend généralement pas à des profondeurs supérieures à celles du milieu néritique (au maximum, 200 m) et est presque constamment exposée aux agents marins de transport.

Les sédiments de plate-forme proviennent plus ou moins des zones émergées du bouclier continental, lesquelles ont une morphologie très plane. Ils peuvent parfois dériver de régions adjacentes au bouclier fortement soulevées et constituant des chaînes de montagnes. Les sédiments se déposent dans diverses parties du milieu de sédimentation, et le matériel détritique plus fin est exporté dans les milieux marins profonds qui peuvent appartenir à des régions dont le comportement géotectonique est différent. Les roches clastiques les plus fréquentes sont des quartzo-arénites où l'on peut parfois reconnaître des structures sédimentaires typiques des milieux côtier, continental ou éolien. Les argiles, de texture fine, sont souvent fossilifères et peuvent contenir un pourcentage important de kaolinite. Les sédiments continentaux fluviatiles (argiles et sable) peuvent également se déposer sur la plate-forme; il en est de même des calcaires, souvent très fossilifères, qui sont soit stratifiés (calcaires de biostrome ou calcaires pélagiques), soit massifs (calcaires récifaux).

Les formations sédimentaires déposées sur la plate-forme ont généralement une épaisseur limitée à une dizaine, voire une centaine de mètres, mais leur extension latérale est très importante. Les caractéristiques lithologiques de ces formations sont très uniformes sur de vastes étendues, ou, s'il existe des changements, ceux-ci sont très progressifs. Les variations d'épaisseur des formations de plate-forme dépendent de l'intensité de la subsidence : les zones où la subsidence est forte reçoivent des quantités importantes de sédiments, alors que dans les régions faiblement subsidentes ou au contraire en voie de soulèvement, l'épaisseur des dépôts est très limitée. La sédimentation peut même totalement cesser; une telle absence de dépôts est à l'origine des lacunes stratigraphiques que l'on observe dans certaines régions.

Les formations sédimentaires de plate-forme recouvrent généralement diverses zones des grands boucliers continentaux. Parmi ceux-ci, les principaux sont : le bouclier canadien et le bouclier baltique en Europe septentrionale qui constituent la Laurentia, le bouclier sibérien dit l'Angara, les boucliers de l'hémisphère Sud (boucliers brésilien, patagonien, africain, indien et australien appelé la Nigritia qui préfigure le continent du Gondwana).

Les séries sédimentaires sont surtout développées dans la partie centrale de l'Amérique du Nord, en Russie et en Sibérie.

Les bassins intracratoniques

Il existe dans les boucliers continentaux des régions bien délimitées qui ont une subsidence plus importante que les zones avoisinantes pendant des périodes géologiques plus ou moins longues : il s'agit des bassins intracratoniques. Ces bassins ont le plus souvent une forme arrondie ou elliptique et sont caractérisés par une sédimentation plus importante que sur la plate-forme avoisinante pendant la même période de temps géologique. La subsidence dans son ensemble et, par conséquent, l'épaisseur des sédiments accumulés atteignent une valeur maximale au centre du bassin cratonique. La subsidence diminue progressivement au fur et à mesure que l'on va vers la bordure du bassin, et l'épaisseur ainsi que les caractéristiques des sédiments varient et évoluent graduellement pour finalement se raccorder aux dépôts continentaux de la plate-forme. Cette zone de transition est appelée plate-forme instable. Sur les plates-formes instables, la subsidence est relativement importante; elle peut cependant être irrégulière et interrompue par des phases de soulèvement et il se produit alors des phénomènes d'émersion et d'érosion sous-aqueuse; on observe ainsi des lacunes de sédimentation.

On distingue plusieurs types de bassins d'après leurs relations réciproques avec les milieux géotectoniques avoisinants.

Les *bassins isolés* sont entourés par la plate-forme et sont situés loin des terres émergées qui ont un relief important. Ces bassins reçoivent donc des sédiments clastiques assez fins mais la sédimentation chimique et biochimique y est prédominante.

Les *bassins marginaux* sont situés à la limite externe des cratons et peuvent ou non être en communication avec une fosse géosynclinale. Les sédiments qui s'y accumulent sont essentiellement clastiques et proviennent du démantèlement des zones plissées et soulevées.

Les principaux types lithologiques que l'on rencontre dans les formations des bassins intracratoniques sont des grès, exprimés sous forme de subgrauwackes, des argiles contenant des quantités importantes de limon, et des calcaires le plus souvent argileux.

Cependant, les associations lithologiques des bassins intracratoniques et des plates-formes instables varient en fonction des conditions géomorphologiques et climatiques qui y règnent. Par exemple, sous un climat chaud et aride et dans des zones où la circulation des eaux marines est limitée par la présence de hauts-fonds, d'une barrière récifale ou d'un chapelet d'îles, on peut voir apparaître des dépôts évaporitiques, des calcaires pélagiques de précipitation chimique ou des calcaires oolithiques et des dolomies aussi bien dans le bassin intracratonique que sur la plate-forme qui l'entoure. Si l'évaporation est réduite, la sédimentation chimique des évaporites et des carbonates n'a pas lieu et le bassin ne reçoit que de très faibles apports de matériel détritique argileux. La faible circulation des eaux marines facilite l'installation d'un régime euxinique, et des argiles noires se déposent sur de faibles épaisseurs.

Binois - Pitch

Les géosynclinaux

Les géosynclinaux sont de vastes régions de la croûte terrestre, généralement de forme elliptique allongée, soumises à une subsidence très importante pendant des périodes géologiques prolongées. La subsidence est compensée par une accumulation très importante de sédiments, et ces phénomènes s'accompagnent de venues magmatiques intrusives et effusives. Ces formations sédimentaires sont ensuite intensément plissées, puis soulevées et métamorphisées, pour donner naissance finalement à une chaîne de montagnes.

Les déformations tectoniques extrêmement importantes qui suivent la sédimentation sont caractéristiques des zones géosynclinales ; elles se différencient de celles que l'on rencontre dans les sédiments des bassins intracratoniques par une intensité de déformation et un métamorphisme beaucoup plus poussés. En outre, si l'épaisseur des formations sédimentaires des bassins intracratoniques atteint parfois quelques kilomètres, celle des séries géosynclinales peut dépasser 10 km. De même, les phénomènes magmatiques contemporains ou successifs à la sédimentation sont caractéristiques de certaines zones des fosses géosynclinales, alors qu'ils n'existent généralement pas dans les bassins intracratoniques.

Les formations sédimentaires qui se déposent dans les aires géosynclinales peuvent être facilement étudiées au niveau des grandes chaînes de montagnes. Par exemple, la chaîne plissée qui s'étend de la Méditerranée à l'Asie orientale correspond à un immense complexe géosynclinal, ou mieux à un ensemble de géosynclinaux. La sédimentation a eu lieu principalement au Mésozoïque, et la phase de plissement orogénique est advenue au Tertiaire. Les Alpes et les Apennins font partie de cette chaîne. Les Appalaches (États-Unis) sont constitués de roches sédimentaires et volcaniques déposées dans un géosynclinal au Paléozoïque, plissées et métamorphisées à la fin de cette ère. Les montagnes Rocheuses correspondent à un géosynclinal mésozoïque, et l'Oural à une chaîne paléozoïque.

Dans les vieux boucliers, il est parfois possible de reconnaître des roches métamorphiques d'origine sédimentaire ou volcanique qui ont conservé, dans leurs rapports réciproques de composition et d'épaisseur, les caractéristiques originelles de la sédimentation dans les diverses parties du géosynclinal. Cependant, les chaînes de montagnes qui se sont formées à partir du plissement et du soulèvement de ces formations sédimentaires et volcaniques déposées dans ces géosynclinaux extrêmement anciens sont souvent totalement arasées par l'érosion. Par exemple, la chaîne de montagnes précambrienne scandinave correspond actuellement en Finlande à une région dont la topographie est très plane.

Les caractéristiques du milieu géotectonique d'un géosynclinal varient en fonction des différentes phases de la sédimentation et de l'endroit où elles ont lieu. Il est difficile de reconstituer ces caractéristiques, et cela pour deux raisons principales : d'une part, les roches subissent un important métamorphisme qui masque leur nature première, et d'autre part, d'énormes masses rocheuses subissent des déplacements très importants (charriages) par rapport à leur lieu de formation au cours de l'orogenèse. Pour pouvoir reconstituer la disposition et la structure originelles des anciens géosynclinaux, il est nécessaire de faire abstraction de façon idéale des phénomènes de métamorphisme qui n'ont pas la même intensité dans les différentes parties du géosynclinal, et également des charriages. Les géosynclinaux sont situés en bordure des boucliers continentaux (par exemple, les Appalaches et les montagnes Rocheuses autour du bouclier canadien) ou encore entre deux boucliers, comme l'Oural, géosynclinal paléozoïque situé entre les boucliers baltique et sibérien.

▲ *Les formations sédimentaires qui se déposent dans les* **aires géosynclinales** *peuvent être facilement étudiées au niveau des grandes chaînes de montagnes, telles les Alpes dont on voit, ici, un paysage dans le parc naturel régional du Vercors où la sédimentation a eu lieu principalement au Mésozoïque.*

▼ *La sédimentation dans les diverses parties d'un géosynclinal : de droite à gauche, en vert, le* **bouclier** *continental émergé ; puis le* **miogéosynclinal** *où prédominent les calcaires (en jaune) et les argiles (en bleu) ; vient ensuite l'***eugéosynclinal** *avec des conglomérats (en bistre), des grès (en ocre) et des roches volcaniques (en rouge). La partie la plus externe peut être occupée par un chapelet d'***îles volcaniques** *émergées (d'après Eardley).*

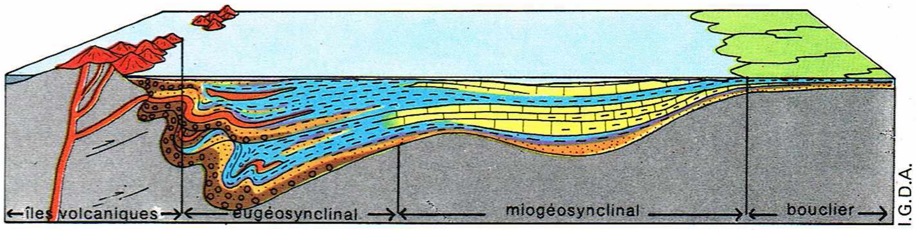

I.G.D.A.

Les géosynclinaux de type marginal ou asymétrique peuvent se diviser en deux zones parallèles au plus grand axe de la fosse subsidente. Ces deux zones sont caractérisées par deux types de sédimentation différents.

La zone la plus proche du continent est appelée *miogéosynclinal*. Elle a une subsidence moyenne et les phénomènes magmatiques y sont absents. Les dépôts qui s'y accumulent sont constitués par du matériel qui vient essentiellement du continent, et leur épaisseur est plus faible que celle des dépôts des zones plus externes. Si la morphologie du continent est assez plane, le matériel apporté dans le miogéosynclinal est constitué d'argiles et de substances en solution. Dans les régions plus proches du continent, qui ont souvent les caractéristiques géotectoniques d'une plate-forme instable, on trouve parfois des dolomies et des évaporites. Le plus souvent, ce sont des argiles et des grès rougeâtres qui se déposent soit en milieu côtier, soit en milieu marin néritique, et qui ont conservé la pigmentation des oxydes et hydroxydes ferriques au cours de la diagenèse en milieu oxydant.

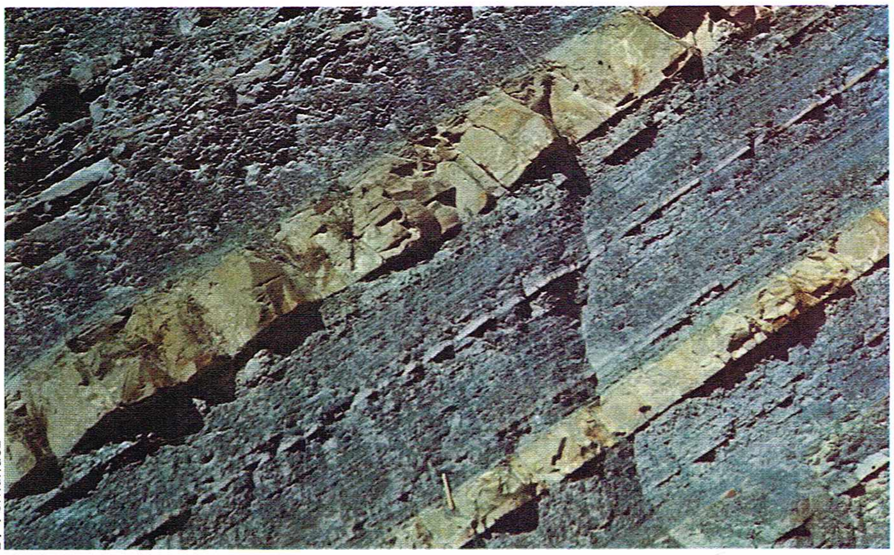

D. Fernandez

▲ *La régularité et la persistance des stratifications sont particulièrement développées dans les formations de type* flysch. *L'alternance des couches de grès (en relief), de calcaire pélagique et d'argile grise est caractéristique de cette formation généralement très épaisse (Crétacé supérieur; Lombardie).*

▼ *Esquisse lithologique des Alpes suisses et répartition des formations molassiques et des niveaux conglomératiques (d'après Niggli). 1, roches ignées et métamorphiques; 2, conglomérats permo-triasiques; 3, dolomie triasique; 4, calcaires; 5, flysch; 6, molasse; 7, conglomérats.*

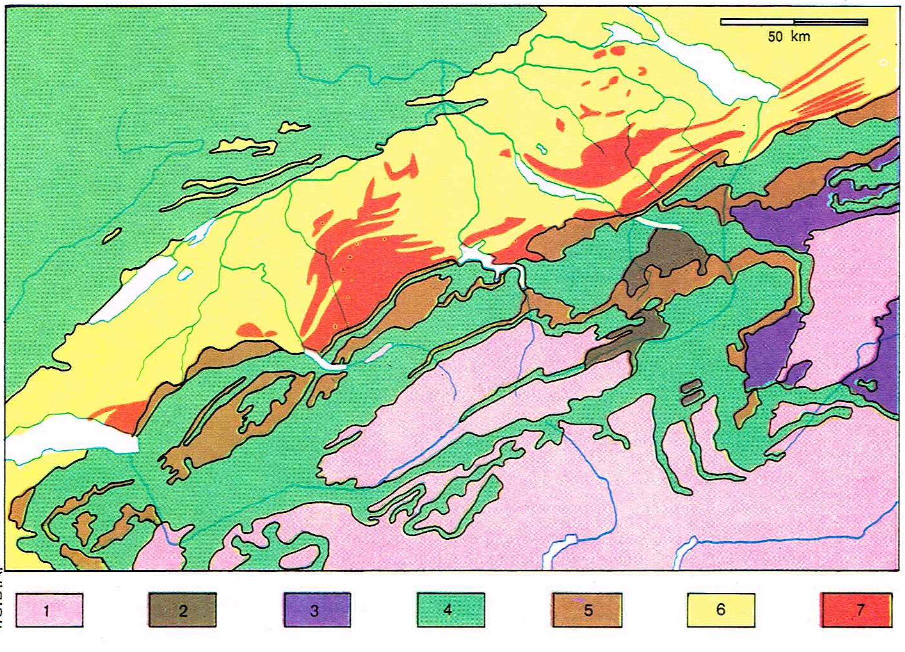

I.G.D.A.

Le milieu miogéosynclinal est séparé des zones externes par une zone étroite à faible subsidence *(géanticlinal)*. Cette zone est parfois le siège de dislocations, et des hauts-fonds peuvent partiellement émerger. Des éruptions volcaniques peuvent également avoir lieu, avec remontée du magma le long des fractures subverticales.

Dans la zone la plus externe, ou *eugéosynclinal*, la subsidence est extrêmement forte; ainsi, des formations sédimentaires très puissantes s'y accumulent. Contrairement à la zone miogéosynclinale, où la sédimentation est argilo-gréseuse mais également carbonatée, ici, les séries sont surtout détritiques, formées d'argiles, de grès (grauwacke), et parfois de conglomérats. On y rencontre de nombreuses passées de roches ignées à composition basique. Ces roches sont aussi bien volcaniques (basaltes, spilites, etc.) en épanchement sur le fond, que plutoniques (gabbros, péridotites, etc.) en intrusion dans les dépôts sédimentaires. Les roches ignées mafiques se forment essentiellement au cours de la phase flysch du cycle sédimentaire du géosynclinal. Elles sont, le plus souvent, métamorphisées au cours de l'orogenèse. Le matériel sédimentaire qui remplit la zone eugéosynclinale provient d'une part du continent par l'intermédiaire de la zone miogéosynclinale, et d'autre part d'îles volcaniques situées tout à fait à l'extérieur par rapport au bouclier continental. Ce faciès volcanique externe est le siège d'un démantèlement intense et continu. En effet, dans certains géosynclinaux anciens, on observe des roches clastiques de plus en plus grossières au fur et à mesure que l'on s'éloigne du bouclier, comme c'est également le cas quand on va des Appalaches vers l'Atlantique.

Quand la subsidence du géosynclinal diminue et cesse, les séries lithologiques très épaisses qui constituent le remplissage de l'eugéosynclinal sont soumises à des déformations tectoniques intenses, accompagnées d'un métamorphisme général. Elles sont, en quelque sorte, poussées par les forces orogéniques et recouvrent sous forme de grandes écailles tectoniques les roches du miogéosynclinal qui, elles, sont soumises à des plissements et à un métamorphisme moins intenses. Tout ce complexe rocheux plissé, métamorphisé et injecté d'intrusions granitiques tardives est ensuite soulevé au cours des phases terminales de l'orogenèse pour finalement constituer une chaîne de montagnes.

Les roches sédimentaires formées dans les aires géosynclinales peuvent être directement étudiées au niveau des chaînes de montagnes qui ont été attaquées par l'érosion à divers niveaux. On peut ainsi définir un *cycle sédimentaire d'aire géosynclinale* qui correspond à plusieurs phases successives, caractérisées par divers types de sédimentation.

La *première phase*, dite *préorogénique*, est caractérisée par une sédimentation de plate-forme : les formations sont peu épaisses, souvent fossilifères, avec des argiles et des calcaires souvent oolithiques. Ces dépôts correspondent à une sédimentation à faible profondeur, en milieu néritique.

Progressivement s'instaure une *seconde phase*, dite *euxinique*, où peuvent se déposer pendant un certain temps des argiles noires analogues aux sédiments actuels de la mer Noire (ancien Pont-Euxin). Ces argiles noires ne sont pas très abondantes, et on rencontre surtout des calcaires et des dépôts siliceux de milieu marin profond, bathyal ou abyssal. C'est au cours de cette phase que commence à s'individualiser le bassin géosynclinal. Il a une subsidence plus marquée que les zones qui l'entourent; ces dernières ne sont pas encore suffisamment soulevées pour avoir un relief dont l'érosion fournirait du matériel détritique en quantité suffisante dans le bassin.

Le remplissage sédimentaire d'un géosynclinal s'effectue au cours d'une *troisième phase*, dite *flysch*, qui est *synorogénique*. Le flysch correspond à des formations très épaisses, de quelques milliers de mètres, qui ont des caractéristiques assez typiques à l'affleurement. Il s'agit d'une alternance monotone de couches de grès et d'argiles (relativement plus abondantes). On y rencontre

également des calcarénites et des conglomérats. De teinte généralement grisâtre, il peut parfois présenter des couches plus rouges. Une partie des grès et des conglomérats des flyschs est déposée par des courants de turbidité mais il existe aussi d'autres modes de transport, comme les courants de fond.

La profondeur de sédimentation du flysch est encore actuellement l'objet d'études et de discussions. Malgré la grande diversité de ce type de formation, on peut penser que le flysch se forme en milieu néritique car on ne voit pas comment le sable et les graviers pourraient être sédimentés en milieu marin profond. La profondeur limitée des fonds marins au cours de l'accumulation des sédiments sur des milliers de mètres serait due au maintien de la subsidence à l'intérieur du géosynclinal. Cependant, certains auteurs attribuent à la sédimentation du flysch une profondeur importante correspondant au milieu bathyal, voire abyssal. Cette hypothèse repose sur le fait que l'on trouve actuellement des dépôts détritiques profonds au large de la côte atlantique d'Amérique du Nord. La question de la profondeur de sédimentation du flysch n'est pas encore résolue car il est probable que ce faciès est profondément remanié par des courants comme le sont les turbidites.

La phase sédimentaire du flysch est généralement accompagnée d'importantes montées magmatiques, se produisant dans diverses parties de la fosse géosynclinale. Cette phase se termine par des apports détritiques grossiers (conglomérats), qui ont lieu en milieu moins profond en raison du ralentissement de la subsidence et du remplissage du géosynclinal. Les plissements et les charriages des séries sédimentaires et volcaniques deviennent de plus en plus importants, en même temps que des migmatites et des batholites granitiques se mettent en place dans les parties les plus centrales et profondes de la fosse géosynclinale. Ensuite, on observe des phases successives de soulèvement et d'érosion des parties les plus centrales et les plus élevées, où affleurent surtout du granite et du gneiss.

La *quatrième phase,* qui est la dernière, de la sédimentation géosynclinale est une phase dite *postorogénique,* où se développe surtout le faciès molasse. La molasse est essentiellement constituée de grès feldspathiques (arkoses) qui se sont déposés en milieu fluviatile, deltaïque, côtier ou marin peu profond. Ils proviennent de l'érosion des chaînes montagneuses en cours de soulèvement. On rencontre, également, dans les formations molassiques des conglomérats formés en milieu fluviatile de piedmont à proximité des zones de relief. L'épaisseur des molasses est généralement très importante (2 000 à 3 000 m) car ces formations correspondent à des dépôts dans des régions à forte subsidence situées entre la zone géosynclinale plissée et le craton.

BIBLIOGRAPHIE

CAROZZI A., *Microscopic Sedimentary Petrography,* Wiley, New York, 1960. - CAROZZI A., *Pétrographie des roches sédimentaires,* Le Griffon, Neuchâtel. - CAVINATO A., *Giacimenti minerari,* Utet, Turin, 1964. - CAYEUX L., *Introduction à l'étude pétrographique des roches sédimentaires,* Imprimerie nationale, Paris, 1916. - CAYEUX L., *les Roches sédimentaires de France : Roches siliceuses,* Imprimerie nationale, Paris, 1929. - CAYEUX L., *les Roches sédimentaires de France : Roches carbonatées,* Masson, Paris, 1935. - KRUMBEIN W. C., SLOSS L. L., *Stratigraphy and Sedimentation,* Freeman, San Francisco, 1951. - LOMBARD A., *Géologie sédimentaire : les Séries marines,* Masson, Paris, 1956. - MILLOT G., *Géologie des argiles,* Masson, Paris, 1964. - MILNER H. B., *Sedimentary Petrography,* Allen & Unwin, Londres, 1962. - NIGGLI P., *Gesteine und Minerallagerstätten. Zweiter Band : Exogene Gesteine und Minerallagerstätten,* Birkhäuser, Basilea, 1952. - PETTIJOHN F. J., *Sedimentary Rocks,* Harper, New York, 1957. - LE RIBAULT L., *Thèse 3e cycle,* Orsay, 1973. - TWENHOFFEL W. H., *Principles of Sedimentation,* McGraw-Hill, New York, 1950 - WILLIAMS H., TURNER F. J., GILBERT C. M., *Petrography. An Introduction to the Study of Rocks in Thin Sections,* Freeman, San Francisco, 1955. - VATAN A., *Manuel de Sédimentologie,* Technip, Paris, 1967.

S.E.F.

▲ ***Exploitation de charbon à ciel ouvert à Gillette (Wyoming, U.S.A.).***

LES COMBUSTIBLES FOSSILES

Pour présenter les combustibles fossiles, il est classique de distinguer : les ***charbons,*** combustibles solides, les ***hydrocarbures,*** liquides et gazeux, et enfin les ***schistes bitumineux*** (autres roches carbonées solides) promis depuis le début de la crise énergétique à un important développement.

Cette classification est cependant un peu sommaire et requiert au moins quelques commentaires. Le concept classique de *roche combustible fossile,* ou *kaustobiolithe* (H. Potonié, 1910) n'implique pas nécessairement dans les roches ainsi désignées une prédominance de la matière organique sur la matière minérale. En fait, le terme « combustible » introduit une notion, certes physique, mais également basée sur un usage technique qui tend à l'heure actuelle à s'élargir et à se diversifier. Ainsi, on commence dans certains bassins houillers à récupérer les anciens terrils pour les envoyer en centrale thermique après lavage. Des schistes de lavoirs à basse teneur en carbone, autrefois rejetés, ainsi que, peut-être, certains schistes bitumineux pourront être utilisés prochainement dans l'industrie des matériaux de construction et pour la fabrication de granulats expansés, et réintégreront ainsi la catégorie des roches à contenu carboné utilisable.

Sur le plan de la diversification, on constate un élargissement dans la gamme des utilisations possibles. Des sommes considérables sont investies dans le monde entier dans les recherches sur la gazéification et la liquéfaction du charbon (déjà utilisée pendant la guerre pour fabriquer de l'essence synthétique) ; inversement, on brûle du fuel dans les centrales thermiques et on en incorpore dans des mélanges à coke ; les schistes bitumineux peuvent être soit brûlés, soit distillés pour la fabrication d'hydrocarbures. La pétrochimie et la carbochimie sont, dans une très grande mesure, comparables.

Finalement, le concept de *combustible fossile* recouvrirait l'ensemble des roches dont le contenu organique est susceptible d'être utilisé en tant que tel pour la combustion ou pour tout autre usage.

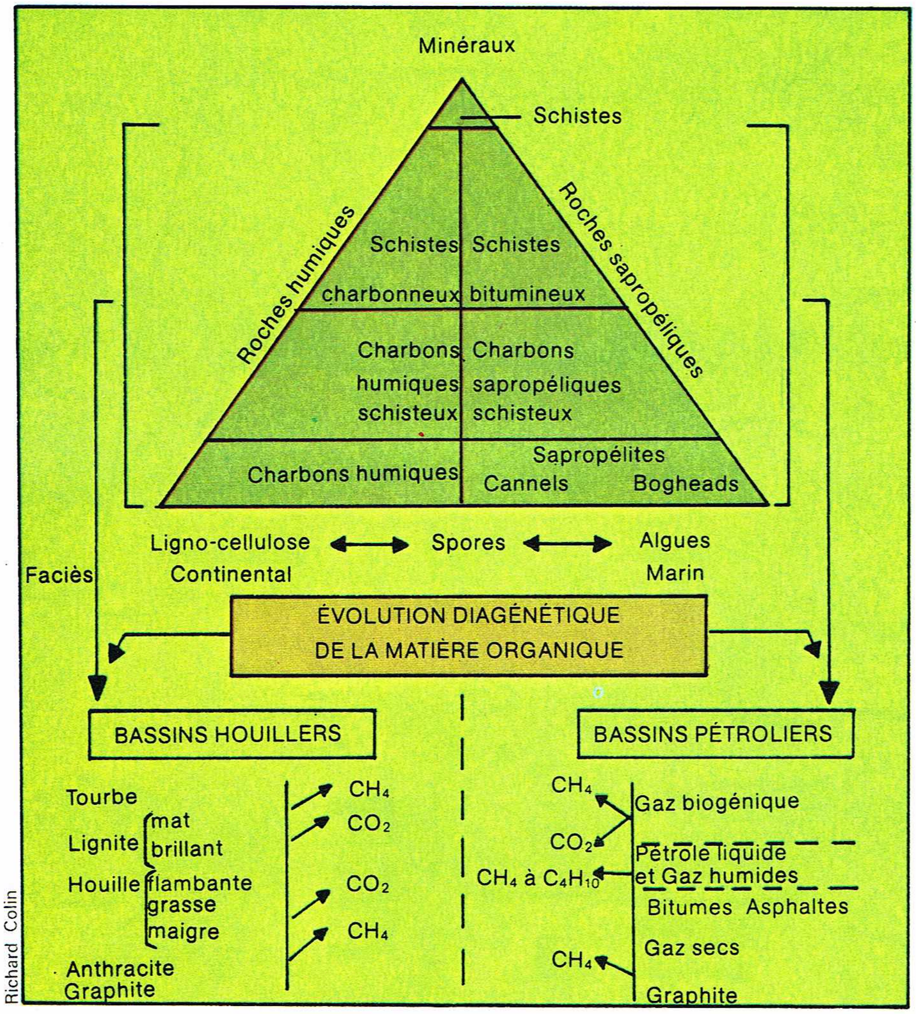

▲ *Formation et évolution des gisements de combustibles solides, liquides et gazeux dans les bassins sédimentaires.*

▼ *Représentation schématique de la photosynthèse et de la genèse des sédiments organiques; les teneurs en carbone sont exprimées en tonnes de CO_2. A titre de complément d'information citons quelques autres sources : roches ignées, $3,25 \cdot 10^{16}$ t/an; production en CO_2 des volcans, $1,4 \cdot 10^7$ t/an; des usines, $1,6 \cdot 10^9$ t/an (d'après A. Combaz, 1973).*

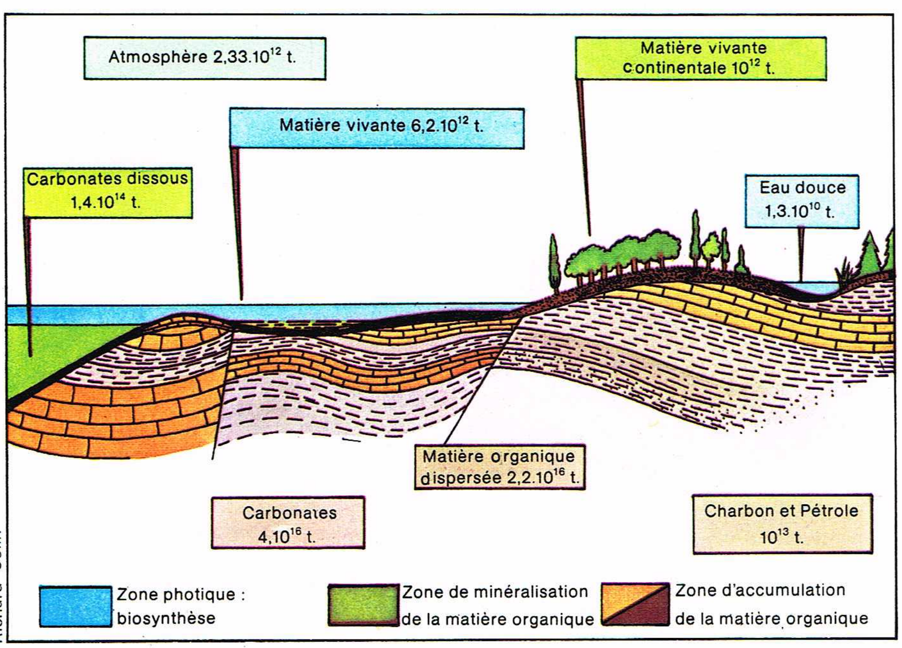

En dehors de l'aspect technologique que nous venons d'évoquer, la diversité apparente des roches combustibles fossiles recouvre une profonde unité. Tous ces combustibles sont issus du monde vivant; ils résultent du dépôt et de l'accumulation dans le milieu aquatique, puis de la transformation dans les roches (diagenèse) de matière organique à l'abri de l'air. Cependant, cette accumulation ne peut se produire que si le phénomène de la fossilisation l'emporte sur celui de la destruction.

Fossilisation ou destruction

La conservation, dans les sédiments en cours de constitution, des substances carbonées, est un processus qui n'est ni normal ni fréquent, principalement lorsque ces dépôts se font sur les aires continentales. Le processus le plus courant est celui de la destruction totale ou partielle par oxydation et dégradation biochimique aérobie. Les hydrates de carbone sont alors transformés en gaz carbonique et en eau; ainsi, les feuilles qui se déposent chaque année sur la couche humique des forêts disparaissent en deux ou trois années.

La fossilisation, prélude à l'accumulation ultérieure éventuelle, ne se produira que si les substances carbonées sont protégées de l'oxydation destructrice par une couverture, généralement d'abord aqueuse, puis sédimentaire. Celle-ci, déterminée par le mouvement relatif des eaux et des masses continentales, permet l'amorce d'un processus de transformation, au cours duquel les actions anaérobies jouent un rôle important.

Sans entrer dans le détail, on peut retenir que, loin d'être exceptionnel, le processus de destruction des matières organiques sur les continents et également sur les fonds marins est de loin le plus important puisque, d'après certains calculs (Rubey, 1951), le *carbone fossile total* ne correspondrait qu'au double du carbone de tous les organismes vivant à l'heure actuelle. C'est bien peu si l'on considère que les substances carbonées se sont formées et déposées pendant plus de 500 millions d'années.

Les substances de départ et le faciès

Les substances qui sont à l'origine d'un dépôt carboné sont, à l'image du monde vivant, extrêmement diverses.

Sur les continents, les charbons proviennent surtout de restes de plantes supérieures constituées principalement de cellulose et de lignine. La série ligno-cellulosique aboutit aux charbons dits *humiques,* reconnaissables à l'alternance de lits brillants (débris de tiges et de racines houillifiés), et de lits mats (accumulations de spores mélangées à des microfragments ligneux et à des substances minérales). Lorsque ces dernières deviennent prédominantes, on passe aux schistes charbonneux.

En bordure des continents, le matériel est différent : un classement granulométrique s'est opéré dans les eaux et les plus gros fragments ligneux sont absents; l'ensemble est plus fin, l'alternance des lits mats et brillants n'est plus visible, et l'aspect est devenu homogène. On est en présence de la série *sapropélique,* formée surtout de microspores dans les *cannel-coals* et d'Algues dans les *bogheads,* enrobées dans une matrice mixte, organique et inorganique.

Dans les lacs et dans les mers épicontinentales, les Algues, les spores et pollens, et les substances diverses de décomposition, venant des continents ou déposées sur place à partir de phyto- et zoorestes, sont mélangés à des proportions importantes de matière minérale. Sur le fond de ces mers peu profondes se dépose, en effet, une quantité importante de matière organique (1 000 à 2 500 tonnes par km² de surface et par an) dont une partie est d'ailleurs apportée par les fleuves. Ceux-ci amènent en même temps des sels minéraux (nitrates et phosphates), nécessaires à la prolifération du phytoplancton et du zooplancton qui s'en nourrit. Le phytoplancton ne peut se multiplier que dans la couche d'eau superficielle, de 50 à 100 m d'épaisseur (zone euphotique), dans laquelle la lumière est capable de pénétrer, rendant ainsi possible la fonction chlorophyllienne.

Au cours de la chute vers le fond du phyto- et du zooplancton, le processus de destruction est très sévère : dès 200 m, il ne subsiste plus que 2 à 5 % du matériel organique initial, et au-dessous de 800 m, il ne reste pratiquement plus rien (dans des conditions normales). Lorsque, dans les roches sédimentaires, la proportion de matière organique sapropélique dans la substance minérale atteint une valeur suffisante (plus de 4 à 5 % en

poids), on a affaire à des *schistes bitumineux*. Ces schistes, qui peuvent donner des hydrocarbures par traitement thermique, sont également capables de « distiller » des produits pétroliers, liquides puis gazeux, par des processus d'évolution diagénétique naturels sous l'action de la température et du temps dans les cuvettes sédimentaires. Ce sont, en fait, de véritables roches mères de pétrole ; elles constituent le chaînon illustrant l'unité des combustibles fossiles dont nous avons parlé ci-dessus. Il manque encore les processus de compaction, d'expulsion et de migration vers les pièges poreux pour aboutir aux concentrations économiques des gisements pétroliers classiques.

Ressources en combustibles fossiles et problèmes énergétiques

Au début du XXe siècle, l'énergie dépendait des seuls combustibles fossiles ; ainsi, en 1900, 95 % de l'énergie venait du charbon et 4 % du pétrole. Malheureusement, cette énergie, contrairement aux énergies éolienne, solaire, marémotrice ou géothermique, ne se reconstitue pas. Depuis cette époque, la production d'énergie a plus que décuplé, tandis qu'au cours des 50 dernières années, la population a doublé et que l'énergie consommée par habitant a été multipliée par 3.

Face à cette consommation croissante, que peut nous offrir notre planète ?

La quantité totale de carbone élémentaire à la surface de la Terre serait de 10 milliards de mégatonnes (10^{16} t) [Bowen, 1966]. La masse totale des roches sédimentaires est estimée à 2 500 milliards de mégatonnes ($2{,}5 \cdot 10^{18}$ t) dont 82 % de schistes parmi lesquels 85 % sont postcambriens et contiennent en moyenne 0,7 % de carbone organique (Garrels et Mackenzie, 1971).

Le total des combustibles fossiles disponibles (tourbe comprise) s'élèverait à 11 millions de mégatonnes ($11 \cdot 10^{12}$ t) ; les réserves prouvées récupérables de pétrole seraient de 91 600 mégatonnes, et celles de gaz naturel de 37 400 mégatonnes.

Il y aurait, en outre, 2,3 millions de mégatonnes de pétrole ($2{,}3 \cdot 10^{12}$ t) récupérables à partir des schistes bitumineux à plus de 10 % de kérogène, et $44{,}3 \cdot 10^{12}$ t si cette limite était abaissée à 4 %. Si une telle perspective se réalisait, le rapport entre les ressources et les besoins qui est environ 100 fois plus grand pour les combustibles solides (3 686) que pour le pétrole (38) se trouverait probablement beaucoup plus équilibré, les ressources pétrolières se trouvant multipliées au minimum par 20.

Ajoutons encore que le carbone (exprimé ici en tonnes de CO_2) ne se trouve pas seulement dans les roches mais aussi dans l'atmosphère ($2{,}33 \cdot 10^{12}$ t) et dans l'hydrosphère ($1{,}4 \cdot 10^{14}$ t dans les mers, et $1{,}3 \cdot 10^{10}$ t dans les lacs) [A. Combaz, 1973].

Dans les roches, une grande partie du carbone ($4 \cdot 10^{16}$t) est fixée sous forme de carbonates.

RESSOURCES MONDIALES EN COMBUSTIBLES FOSSILES
(Conférence mondiale de l'Énergie, Detroit, 1974)

COMBUSTIBLES		Ressources totales milliards de tonnes (10^9 t)	Utilisation mondiale en 1972 milliards de tonnes (10^9 t)	Rapport entre ressources et besoins
Combustibles solides	Ressources	11 000	2,984	3 686
	Réserves récupérables	500		
Pétrole	Réserves récupérables	92	2,408	38
Gaz Naturel	Réserves récupérables	37	0,940	40
Schistes bitumineux	Réserves récupérables	230		
	Ressources totales (Hubbert) ⩾ 10 % Kérogène	2 300		
	⩾ 4 % Kérogène	44 300		

PRODUCTION MONDIALE D'ÉNERGIE DES DIFFÉRENTS SECTEURS EN 10^6 T.E.C.
(Conférence mondiale de l'Énergie, Detroit, 1974)

	1950	1972
Charbon (houille + lignite)	1605	2430
Pétrole brut	700	3350
Gaz naturel	261	1630
Électricité primaire (hydr. nucl. etc.)	41	175
TOTAL :	2607	7585

▲ ***En haut, tableau des ressources mondiales en combustibles fossiles, établi à Detroit, en 1974, lors de la Conférence mondiale de l'énergie. Ci-dessus, tableau de la production mondiale d'énergie des différents secteurs calculée et comparée pour les années 1950 et 1972.***

▼ ***A gauche, tableau de la répartition géographique de la consommation mondiale d'énergie calculée et comparée pour les années 1950 et 1972. A droite, tableau de la production mondiale d'énergie calculée et estimée dans l'intervalle des années 1900 à 1985.***

RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE DE LA CONSOMMATION MONDIALE D'ÉNERGIE (10^6 T.E.C.)

	1950	1972
1/ Europe occidentale	600	1600
2/ Amérique du Nord	1221	2680
3/ Japon	49	440
4/ URSS, Europe de l'Est et Chine	560	2100
5/ Reste du monde	239	780
TOTAL :	2669	7600

PRODUCTION MONDIALE D'ENERGIE
(Conférence mondiale de l'Energie, Detroit, 1974)

ANNÉE	ÉNERGIE PRODUITE en milliards de T.E.C.* par an	POPULATION MONDIALE en milliards d'habitants	ÉNERGIE par habitant et par an
1900	0,775	1,571	0,49
1925	1,565	1,965	0,80
1950	2,765	2,486	1,11
1970	6,990	3,632	1,92
1985	13,700	4,838	2,83

*T.E.C. : tonnes d'équivalent charbon

Composition élémentaire comparée du bois et de ses constituants chimiques (d'après Francis, 1961)			
	Carbone	Hydrogène	Oxygène
Cellulose	44,4	6,2	49,4
Lignine	63,2	6,1	30,7
Ligno-cellulose	49,1	6,2	44,7
Bois séché	49,2	6,1	44,7

ÉVOLUTION ESTIMÉE DE LA CONSOMMATION MONDIALE D'ÉNERGIE DE 1970 A 1985 (10^6 T.E.C.)		
	1970	1985
C.E.E. (9 pays)	1234	2430
Espagne	64	169
États-Unis	2447	4230
Japon	380	1080
Reste du monde	2905	8091
TOTAL :	7030	16 000

▲ *A gauche, tableau de la composition élémentaire du bois et de ses constituants chimiques (d'après Francis, 1961). A droite, tableau de l'évolution estimée de la consommation mondiale d'énergie de 1970 à 1985.*

La matière organique vivante se concentre ainsi :
— dans les mers $6{,}2 \cdot 10^{12}$ t
— sur les continents 10^{12} t.
A l'état fossile, on la rencontre :
— sous forme accumulée 10^{13} t
— sous forme dispersée $2{,}2 \cdot 10^{16}$ t.

En 1972, les 2/3 de l'énergie produite étaient consommés par l'Europe occidentale, l'Amérique du Nord et le Japon. Le charbon est la source d'énergie fossile la plus abondante dans le monde. En supposant que 90 % des réserves prouvées sont exploitables, l'extraction pourrait durer un siècle au rythme actuel, et cette proportion des réserves prouvées par rapport aux réserves probables augmente constamment.

Si l'on adopte l'hypothèse d'une demande mondiale de 29 milliards de T.E.C. en l'an 2000 et de 3 260 MW pour l'énergie nucléaire, les combustibles fossiles devront couvrir 80 % des besoins à cette époque. Leur volume devrait donc tripler dans la production et passer de 7,4 à 23 milliards de T.E.C. (tonne équivalent charbon).

Les charbons fossiles

La qualification correcte d'un charbon fossile suppose que l'on puisse répondre à deux questions fondamentales :
— quel est son *faciès* ou, plus précisément, quelle est sa *constitution pétrographique* (qui en est le reflet) ?
— quel est le *degré d'évolution*, ou *rang*, atteint par ce charbon ? (Cette évolution est souvent nommée *diagenèse* pour les phases précoces et *catagenèse* pour les phases plus tardives, l'ensemble correspondant à l'anchimétamorphisme [Kubler].)

Avant d'aborder ces deux points, il convient de définir quelles sont les substances qui sont à l'origine des accumulations de houille et dans quelles conditions géologiques elles ont pu se concentrer et évoluer.

Les substances de départ, la résistance à la destruction et les causes de dégradation des substances végétales

Il est bien établi que les charbons proviennent de l'accumulation de matière végétale, plus ou moins fragmentée et transportée, et ayant subi une décomposition sous une certaine couverture d'eau. Cette matière végétale est principalement représentée par des tissus formés de cellules, dont les constituants essentiels pour la fossilisation ultérieure sont la cellulose et la lignine.

Les substances de départ

La cellulose

Elle est formée d'une longue chaîne d'hexagones saturés, $(C_6H_{10}O_5)n$, reliés par des ponts oxygène. Ce type de structure se prête particulièrement bien à la destruction totale, d'abord par hydrolyse en glucose, puis par oxydation en CO_2 et H_2O. Cependant, il existe en fait de nombreux types de celluloses : ligno-cellulose, pecto-cellulose (pectine), subéro-cellu ose (subérine) ou cuto-cellulose (cutine). Ces produits intermédiaires sont autant de modifications chimiques de la membrane végétale destinées à retarder la dégradation.

Les principaux processus de protection sont :
— la *lignification ;*
— la *cutinisation,* qui transforme la cellulose périphérique en cuticule superficielle, protectrice, imputrescible et imperméable ;
— la *subérification,* qui atteint plusieurs couches de cellules et les transforme en liège ;
— la *cérification,* qui recouvre la cuticule d'une couche de cire imperméable ;
— la *minéralisation,* qui est surtout notable dans certains types végétaux, comme les prêles.

Lors de la dégradation du tissu cellulosique, la lamelle secondaire est détruite la première, puis c'est la lamelle primaire plus lignifiée et, enfin, en dernier, c'est au tour

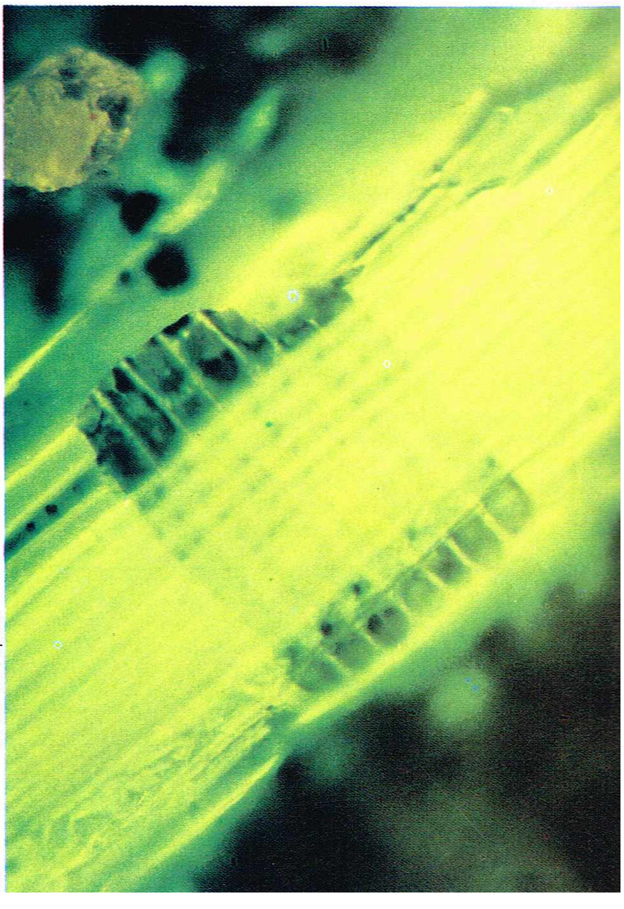

Cours B. Alpern

▶ *Microphotographie en fluorescence par réflexion (G = 480) d'un fragment de tissu ligneux à peine transformé (stade tourbe). On notera le croisement des fibres longitudinales (fluorescence jaune) et des rayons ligneux radiaux (en sombre) [cours B. Alpern].*

de la lamelle pectique interstitielle qui se trouve entre les feuillets de la lamelle primaire.

Cependant, la structure botanique se maintient, même après une perte de 90 % de cellulose. L'évolution de la matière végétale vers le lignite puis vers la houille se caractérise fondamentalement par une perte progressive de cellulose, laquelle forme le tiers des végétaux vivants mais ne se retrouve plus au stade des houilles. Sont rattachés à la cellulose : les *pectines, l'acide alginique* (Algues) et la *chitine*.

La lignine

Contrairement à la cellulose, la lignine a un motif plus complexe, à base de noyaux aromatiques phénoliques qui lui confèrent un caractère plus résistant à la destruction et une aptitude à la condensation par rapprochement des noyaux. La formule chimique de la lignine, extrêmement complexe, fait encore l'objet d'études et de discussions. Divers modèles ont été proposés à partir de trois motifs élémentaires principaux qui diffèrent par leur teneur en groupes méthoxyl ($-OCH_3$). Pour une unité élémentaire ($n = 1$), de la formule proposée par Hibbert (1942), on aurait : $C_{30}H_{34}O_{11}$.

Autres substances

Outre la cellulose et la lignine, on trouve dans la matière végétale de très nombreuses substances parmi lesquelles il faut citer :

— les *protéines* et les *composés azotés,* comme la *chlorophylle* ($C_{55}H_{72}O_5N_4Mg$), qui sont des polymères dérivés d'acides aminés surtout aliphatiques et très facilement dégradables ;

— les *huiles, graisses, cires, résines* et *tanins.* Cet ensemble, qui constitue de 2 à 2,5 % des plantes vertes, est particulièrement résistant à la destruction car peu hydrolysable. On peut citer, par exemple, la cire de Carnauba qui provient d'un palmier dont les feuilles sont coupées deux fois par mois : avec 2 000 à 4 000 feuilles, on obtient 16 kg de cire. Le chimisme de ces produits est varié et complexe. Les huiles fixes et les graisses sont dérivées des acides et alcools gras et de la glycérine ; les huiles essentielles (volatiles) sont des terpènes $(C_5H_8)n$ et des camphres $(C_{10}H_{16}O)n$ qui laissent des résines par évaporation. Les résines sont des produits de sécrétion, abondants chez certains Conifères, formés d'acides insaturés : l'acide abiétique ($C_{19}H_{29}COOH$) et l'acide succinique $(CH_2COOH)_2$. Les plus connues sont l'ambre, le copal, le succin et le dammar. La production annuelle totale de cette famille de produits serait de $2\,141 \cdot 10^6$ t pour les graisses, $1\,453 \cdot 10^6$ t pour les cires, et $428 \cdot 10^6$ t pour les résines.

La résistance à la destruction

Il est intéressant au total de connaître l'ordre de résistance à la destruction des substances végétales, cet ordre étant directement lié aux probabilités de fossilisation.

Waksman et Stevens (1928) ont établi l'ordre de résistance croissante à la destruction :
1 - protoplasme ; 2 - chlorophylle ; 3 - huiles ; 4 - cellulose ; 5 - lignine ; 6 - épidermes ; 7 - enveloppes de graisses ; 8 - pigments ; 9 - cuticules ; 10 - exines ; 11 - cires ; 12 - résines. Les trois premiers constituants sont rapidement détruits, tandis que les quatre derniers sont très résistants.

Les causes de la dégradation des substances végétales

La décomposition de la matière végétale est provoquée par des agents divers : oxygène, enzymes, Champignons, Bactéries, dont l'activité dépend de la présence d'une certaine quantité d'air (sauf pour les Bactéries anaérobies). La décomposition de la cellulose en glucose est une source d'énergie pour les micro-organismes. Après la destruction de la cellulose des tissus, celle de la lignine devient plus facile car elle est alors plus accessible à l'oxygène.

La vitesse de décomposition des tissus dépend de la composition du milieu environnant ; ainsi, en présence de composés azotés la destruction de la cellulose et de la lignine est accélérée mais celle de la cellulose devient quinze fois plus rapide que celle de la lignine. Cette dernière peut donc être considérée comme l'une des substances initiales de ce qui aboutira ultérieurement aux charbons humiques.

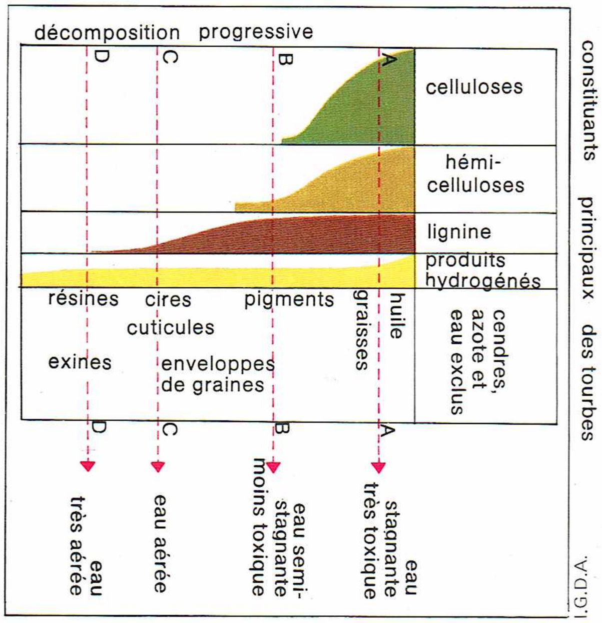

◀ *Représentation schématique des modifications de la composition d'un dépôt tourbeux dans diverses conditions de la couverture aqueuse. Les quatre lignes rouges représentent un apport croissant d'oxygène du haut vers le bas ; on observe des changements corrélatifs de composition et la conservation des substances les plus résistantes au niveau inférieur (d'après White).*

Nombre de micro-organismes par gramme de tourbe ligneuse					
Profondeur en cm	Bactéries				Champignons
	aérobies	anaérobies	destructrices de cellulose	azotées	
0	6 200 000	6 000	12 000	18 000	26 000
26-40	25 600 000	12 000	12 000	12 000	2 000
56-62	2 300 000	12 000	12 000	12 000	0
110 - 120	1 600 000	18 000	6 000	6 000	0

▲ *Évolution du nombre de micro-organismes par gramme de tourbe ligneuse en fonction de la profondeur.*

Le processus de destruction des tissus n'est pas seulement chimique, il est aussi *biochimique*. De nombreux microbes et Champignons, adaptés à la destruction des substances organiques, sont capables de décomposer la cellulose et même de briser les noyaux aromatiques. Ainsi, les *Actinomycètes* décomposent les acides humiques, les *Flavobacteria* décomposent le méthane, les *Pseudomonas* dégradent les hydrocarbures polycycliques, etc. Dans une tourbière, la proportion de micro-organismes, variable avec la profondeur, est très élevée dans les premiers décimètres.

En surface, le milieu est aérobie ; les Champignons Actinomycètes et les Bactéries aérobies sont très abondants. En profondeur, les Bactéries anaérobies jouent très rapidement le rôle principal.

C'est la cellulose, dont la destruction est rapidement presque totale, qui fournit l'oxygène nécessaire aux réactions. L'étude microscopique des tissus végétaux que l'on trouve en abondance dans les lignites et dans les houilles avec une structure encore bien reconnaissable montre que la cellulose en est totalement absente (disparition de la fluorescence).

En résumé, le processus de décomposition chimique et surtout biochimique est essentiellement un phénomène de dégradation de la cellulose, de concentration relative en produits dérivés de la lignine et surtout en lipides, cires et résines.

Classification des charbons

La classification des charbons peut être envisagée sous de nombreux aspects : géologique ou chimique, scientifique ou pratique, régional ou international, etc.

Cependant, il importe au préalable de définir, dans tous les cas, les paramètres qui ont été retenus pour élaborer telle ou telle classification. Cette sélection de paramètres implique d'abord un *choix*, ensuite une *hiérarchie* entre les caractères retenus. Nous définirons les divers caractères utilisés ou utilisables pour une classification des charbons. En les énumérant nous serons conduits à passer en revue un assez grand nombre de propriétés fondamentales des charbons dans les domaines de la chimie, de la physique et de la pétrographie.

Quelques remarques préalables s'imposent encore. Les classifications qui se voudraient générales ne furent souvent dans le passé que pragmatiques et locales : l'industrie houillère, développée autour des mines, ne classait bien en détail que les produits qu'elle extrayait du sous-sol immédiat. A l'heure actuelle, où les industries sont devenues souvent portuaires (Dunkerque, Fos) et à base d'importation, la nécessité s'impose de disposer de systèmes de classification aussi universels que possible et capables de traiter les productions charbonnières de provinces paléogéographiques très différentes les unes des autres. C'est dans cette perspective que nous nous placerons pour sélectionner les divers paramètres de classement.

Notre conception de la classification des charbons est résolument globale et unitaire. Les tourbes étant exclues, car elles dépendent essentiellement de processus plus biochimiques que géologiques, les autres catégories : lignites, houilles, anthracites, graphites, sont considérées comme une seule série continue évoluant au cours d'une phase géochimique (anchimétamorphisme) en fonction de deux paramètres essentiels et indissociables : la *température* et le *temps*. Cette évolution, connue depuis longtemps, a été décrite, semble-t-il, pour la première fois par Hilt (1873), d'où l'expression « loi de Hilt » généralement citée dans la littérature pour caractériser ce processus continu de transformation physico-chimique.

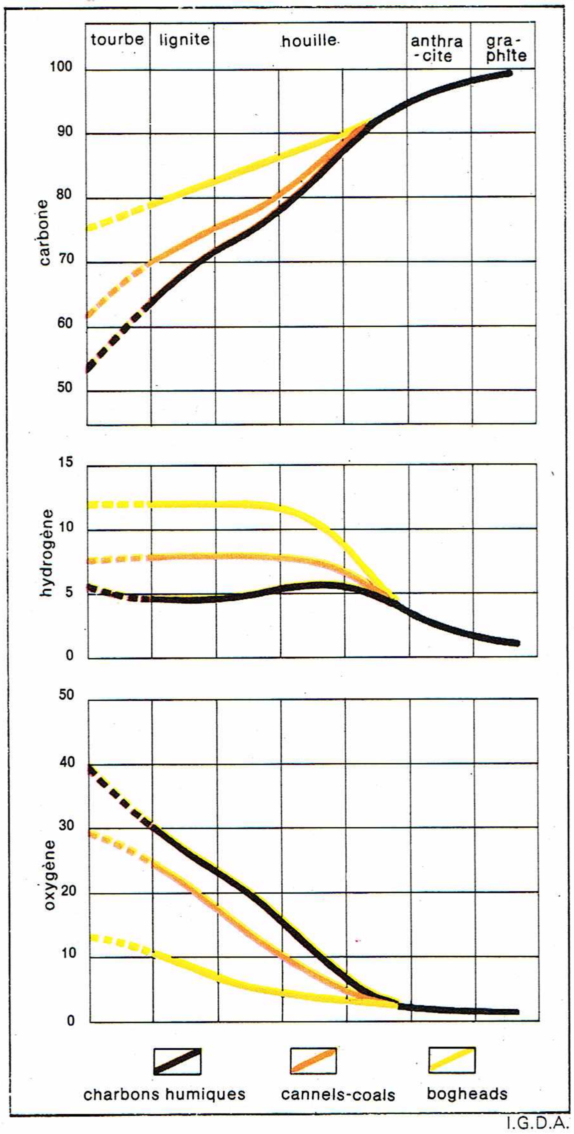

▶ ***Représentation graphique de la variation de la composition chimique élémentaire des charbons humiques et sapropéliques avec la houillification.***

Les indices chimiques et techniques de l'évolution

Les indices chimiques de mesures de RANG sont très nombreux ; il est commode pour les classer de considérer séparément l'analyse élémentaire, l'analyse immédiate et les propriétés cokéfiantes.

Analyse élémentaire

Il est classique d'établir, pour la caractérisation chimique d'un charbon, les teneurs en carbone, en hydrogène, en oxygène, en azote et en soufre. Ces teneurs sont ramenées par le calcul à une matière organique pure et sèche. En fait, elles sont établies sur des produits décendrés dont la teneur en cendres doit être toujours inférieure à 10 %.

C'est la *teneur en carbone* qui constitue le test chimique de référence le plus couramment utilisé pour classer un charbon. Le carbone est dosé, en même temps que l'hydrogène, par voie pondérale après transformation en CO_2 et en H_2O. Le C varie d'environ 50 % à près de 100 % de la tourbe jusqu'au graphite ; la limite entre le lignite et la houille est franchie à 77 % de C.

L'*hydrogène*, par contre, reste à peu près constant (5-6 %) pendant une grande partie de l'évolution et ne commence à baisser que dans le stade final (anthracitique) de celle-ci. Il devient alors dans cette zone un excellent paramètre de classement, sa teneur s'abaissant de 4 % (limite maigre-anthracite) à 0,2 % dans les graphites vrais.

L'*oxygène*, calculé le plus souvent dans le passé par différence, est à l'heure actuelle dosé directement. Il varie, assez régulièrement, d'environ 25 % au stade lignite tendre à moins de 2,5 % au stade anthracite, en passant par une teneur d'environ 15 % à la frontière lignites-houilles.

L'*azote* et le *soufre* (ce dernier très important du point de vue de l'utilisation industrielle ultérieure du combustible) sont d'un très faible intérêt du point de vue de la mesure du rang. Le soufre caractérise en fait la fraction minérale, sulfates et surtout sulfures (pyrite) ; on considère que sa teneur doit rester, après lavage, si possible inférieure à 1 %.

Analyse immédiate

La *teneur en cendres*, établie après combustion à 825 °C, d'une grande importance pour la valeur d'usage du charbon, est liée aux conditions locales de genèse des bassins houillers, mais ne traduit en rien le rang d'évolution.

Un charbon naturel contient toujours une certaine proportion, parfois importante, de substances minérales ; *quartz, silicates, carbonates, sulfures*, etc. Le problème consiste, sur le plan pratique, à les éliminer par lavage. L'opération est parfois facile pour les cendres secondaires, postgénétiques, ayant rempli les fissures par voie hydrothermale. Elle n'est cependant pas toujours possible : en effet, certaines fractions, les plus fines, des matières minérales déposées en même temps que la matière organique et qualifiées de ce fait de « syngénétiques » ne sont pas éliminables par lavage industriel classique. C'est souvent le cas des charbons des bassins superficiels des territoires de l'ancien continent de Gondwana, où matière organique et phyllites argileuses sont intimement mélangées.

Ajoutons à cela l'existence de cendres d'origine végétale, dites aussi cendres « intrinsèques », qui peuvent atteindre dans certains cas des valeurs non négligeables.

Par ailleurs, enfin, il est bien connu que le charbon est un collecteur très efficace d'éléments en traces *(oligo-éléments)* qui se retrouvent dans la matière organique dans un état beaucoup plus concentré que dans la moyenne des roches. Ce phénomène se produit dès le stade précoce de formation de l'humus, par lessivage fractionné et concentration par évaporation de l'eau dans les tissus épidermiques des feuilles (cuticules).

Le tableau ci-dessous donne la concentration des oligo-éléments dans l'humus de forêt, d'après Goldschmidt (1935) :

	NiO	GeO_2
sol de forêt	20	5
feuilles de chêne	50	5
humus de chêne	100	70

Parfois, il s'agit d'une concentration secondaire après formation et compaction des gisements, mais pour que le phénomène de concentration se produise il est nécessaire que le passage des solutions hydrothermales minéralisées se soit produit au moment où la matière organique était encore à un stade précoce d'évolution. Le cas des lignites de Dakota est, à cet égard, très démonstratif : ces lignites ont concentré l'uranium des grès radioactifs qui les surmontent. Le collectage de l'uranium a été si efficace que la radioactivité est totalement concentrée dans les premiers décimètres situés au toit de la couche la plus élevée du gisement. Au mur de la couche et dans les autres couches inférieures, la radioactivité est nulle. En dehors de l'uranium les facteurs de concentration les plus élevés (1 000 à 1 600 fois) sont, d'après Goldsmith, ceux de l'arsenic, du germanium, de l'argent, du bore et du bismuth. A la limite, certains gisements houillers pourraient être valorisés par les éléments métalliques concentrés qui s'y trouvent.

Le rendement en *matières volatiles,* contrairement aux cendres, est un test de mesure de la diagenèse, très couramment utilisé. Il est établi, à l'abri de l'air, à une température de 960 °C. Ce test, normalisé dans tous les pays, a été retenu dans la Classification internationale de Genève comme devant fournir le premier chiffre (classe) d'un nombre qui en comporte trois. Au-dessus de 33 %, il est admis que les matières volatiles perdent de leur signification en tant que paramètre de classement. Elles sont alors relayées, dans la Classification internationale, par le *pouvoir calorifique,* qui permet d'établir un certain nombre de divisions importantes, notamment entre lignite et houille à 7 200 calories/gramme. Notons ici que le pouvoir calorifique est lié, non seulement au rang, mais aussi à la teneur en cendres ; lorsque celle-ci, s'élève, le pouvoir calorifique s'abaisse proportionnellement.

Certaines classifications accordent une grande importance à l'*humidité,* non pas celle de la mine qui ne traduit que les conditions locales par rapport à la nappe phréatique, mais celle qualifiée d'« humidité de rétention », mesurée dans des conditions toujours comparables (30 °C et 96 % d'humidité). Cette teneur en eau varie de plus de 70 % pour les tourbes à moins de 8-10 % pour les houilles. Elle constitue pour les lignites un excellent paramètre de classement.

La capacité de rétention d'eau est liée, d'une part au volume des pores accessibles, et d'autre part au caractère chimiquement actif de la surface de ces pores. Au cours de l'évolution, du fait de la compaction, la *porosité* s'abaisse fortement tandis que, par ailleurs, les surfaces, d'abord chimiquement actives, deviennent progressivement inertes. Cette porosité s'exprime en cm^3/g (volume des pores accessibles dans des conditions opératoires déterminées) ou en m^2/g (surface accessible). A titre d'exemple, un lignite peu évolué (71,7 % de C) a un volume poreux de 0,052 cm^3/g et une surface accessible de 2,60 m^2/g, tandis qu'une houille grasse (88,6 % de C) présente un volume poreux de 0,025 cm^3/g et une surface accessible de 0,24 m^2/g.

Propriétés cokéfiantes

Celles-ci jouent un grand rôle dans toutes les classifications internationales du fait de la grande valeur marchande et industrielle des charbons à coke. Un charbon à coke est caractérisé par le fait qu'il est capable, au

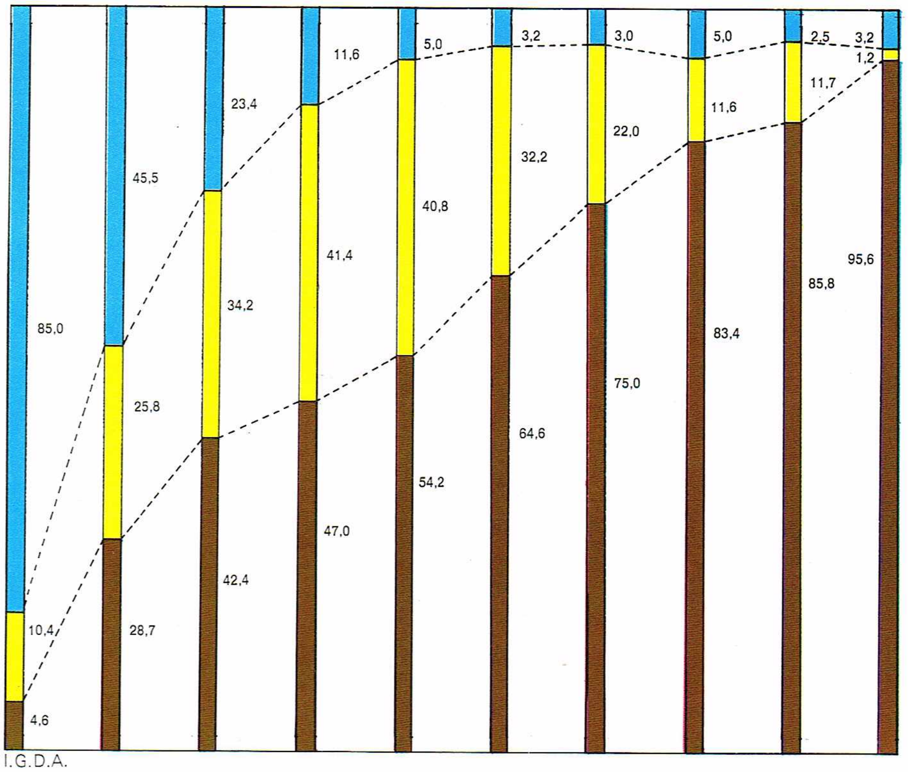

▲ *Évolution de la composition chimique des charbons (analyse immédiate) avec la houillification : en bleu, humidité ; en jaune, matières volatiles ; en marron, carbone fixe (d'après Campbell).*

◄ *Charbon de Zauckerode (R. D. A.). Modification de la matière organique autour des inclusions radioactives. L'action des particules alpha augmente la réflectance (B. Alpern, 1965 ; lumière réfléchie, immersion d'huile, G = 300).*

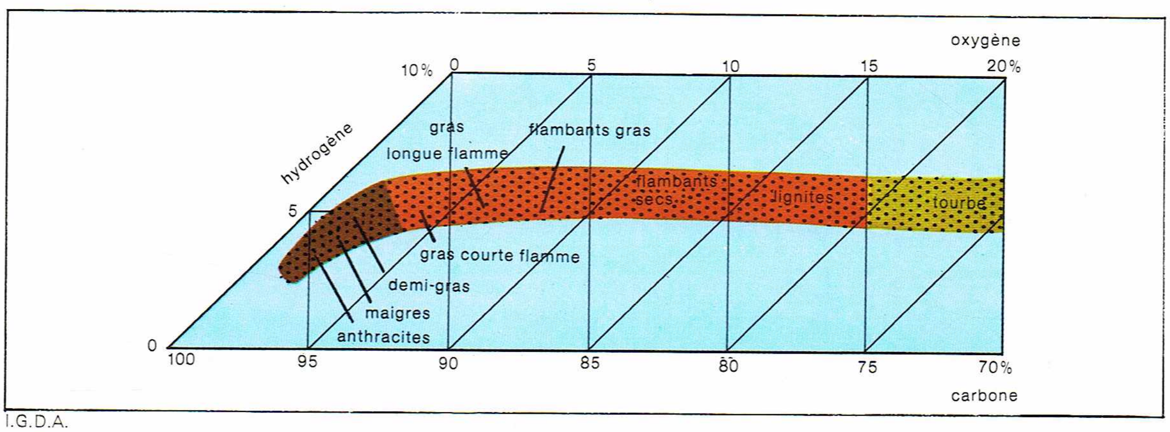

◄ *Composition chimique des charbons humiques et évolution durant la houillification. On notera la stabilité de la teneur en hydrogène des lignites aux anthracites (exclus) [d'après Stutzer].*

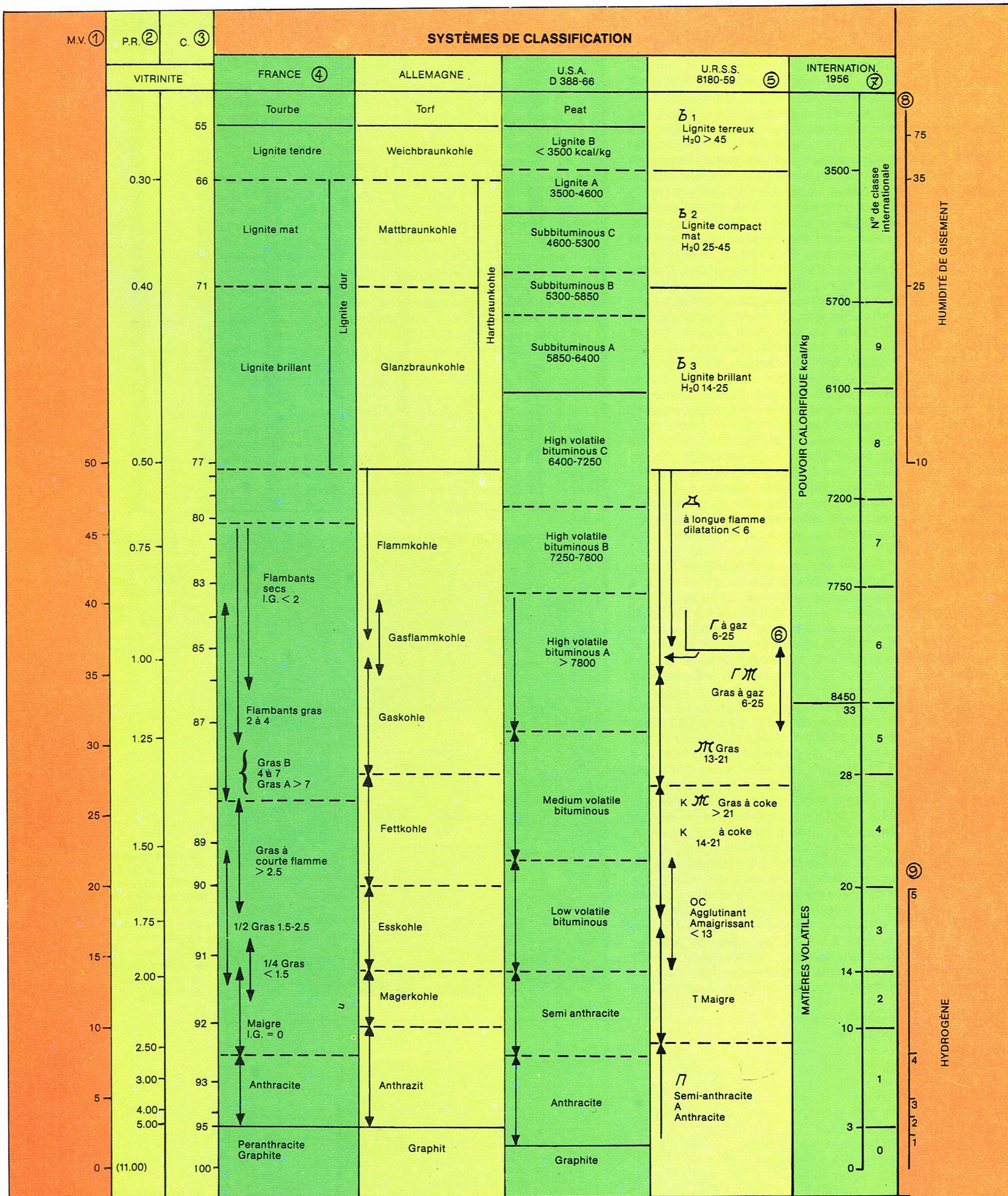

① Matières volatiles (960°) sur charbon pur et sec

② Pouvoir réflecteur, courbe Alpern (1969)

③ Carbone d'après Patteisky et Teichmüller (1957), Kötter (1960)

④ Norme NF 10.001, (houilles)

⑤ Norme du Donetz (houilles)

⑥ Norme du Kouznetz (houilles)

⑦ d'après la classification de Genève

⑧ d'après Patteisky et Teichmüller (1957)

⑨ d'après Ergun et Coll. (1960), Francis (1961)

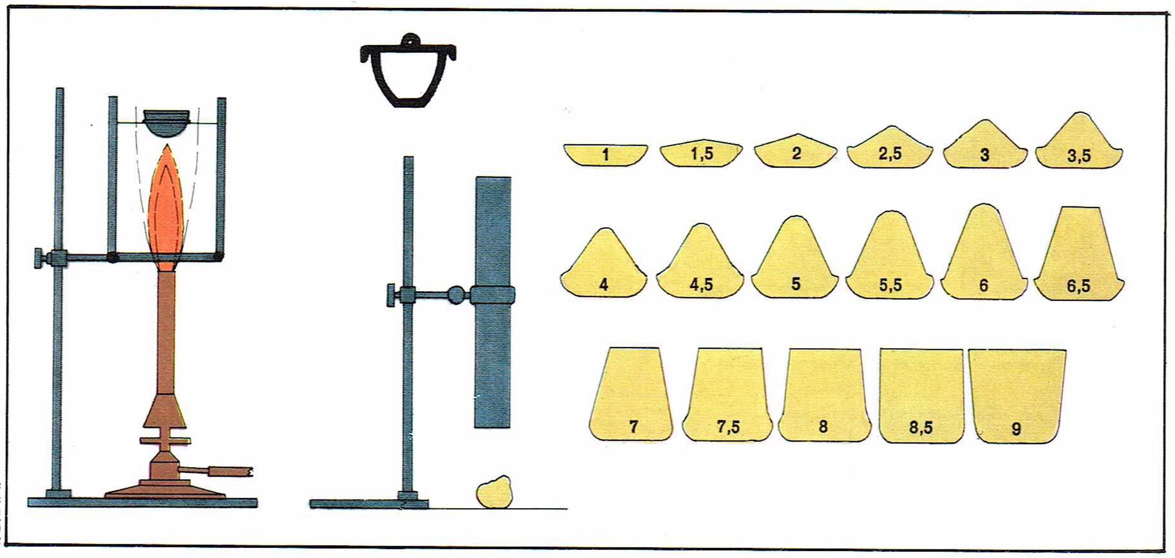

◀ *Détermination de l'indice de gonflement des houilles. Après chauffage à 820 ± 5 °C dans des conditions standards, on compare optiquement le profil du culot obtenu à une série de profils de référence (d'après Van Krevelen).*

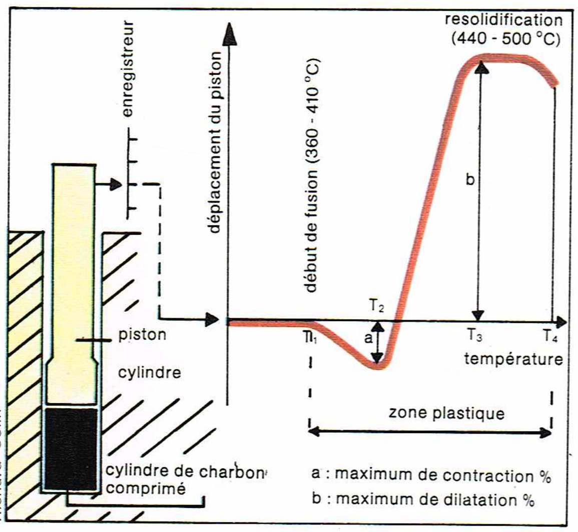

◀ *Schéma et principe du* **dilatomètre** *: un cylindre de charbon comprimé est chauffé lentement (2 à 3 °/mn) en atmosphère inerte, on enregistre le déplacement du piston.*

cours de son chauffage à l'abri de l'air, de fondre dans une zone de température dite « zone plastique » puis de se resolidifier en un système vacuolaire, le semi-coke, qui, chauffé au-dessus de 1 000 °C, donnera finalement le coke industriel. La zone plastique se situe en général entre 360 et 410 °C pour le début de fusion et 440 et 500 °C pour la resolidification.

Pendant cette phase où le produit est visqueux, les matières volatiles (MV) produites par la pyrolyse ont tendance à s'échapper. La poussée des gaz inclus dans la masse fondue aboutit au phénomène du *gonflement*. Celui-ci est le plus intense pour les charbons « gras à coke », qui ont une teneur en matières volatiles d'environ 20 à 25 %. De part et d'autre de ce maximum, le gonflement est moins intense et, pour les charbons flambants d'un côté (> 35 % MV), pour les charbons maigres et anthraciteux de l'autre (< 15 % MV), il devient, sauf exceptions, quasi nul.

Le gonflement est mesuré en chauffant brutalement du charbon à l'abri de l'air et en comparant la forme obtenue à des profils de référence, gradués de 1 à 9. On peut aussi mesurer le gonflement au *dilatomètre,* qui inscrit les variations de longueur d'un cylindre de charbon au

▼ *Classification des houilles d'après leur nature. (B. Alpern, 1969)*

GROUPES DÉTERMINÉS D'APRÈS LE POUVOIR AGGLUTINANT		CLASSIFICATION DES HOUILLES D'APRÈS LEUR NATURE.										SOUS-GROUPES DÉTERMINÉS D'APRÈS L'APTITUDE A LA COKÉFACTION	
Indice de gonflement au creuset	Numéro du groupe	Nombres conventionnels										Numéro du sous-groupe	Dilatation maximale
Supérieur à 4	3					435	535	635				5	Supérieure à 140
					334	434	534	634				4	50 à 140
					333	433	533	633	733			3	0 à 50
					332 (a | b)	432	532	632	732	832		2	0 et au-dessous
2.5 à 4	2				323	423	523	623	723	823		3	0 à 50
					322	422	522	622	722	822		2	0 et au-dessous
					321	421	521	621	721	821		1	Contraction seulement
1 à 2	1			212	312	412	512	612	712	812		2	0 et au-dessous
				211	311	411	511	611	711	811		1	Contraction seulement
0 à 1,5	0		100 (A | B)	200	300	400	500	600	700	800	900	0	Ne se ramolissant pas
Numéro de la classe		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Indice des matières volatiles		0 à 3	3 à 10 (A: 3 à 6.5 | B: 6,5 à 10)	10 à 14	14 à 20	20 à 28	28 à 33	Sup. à 33	Sup. à 33	Sup. à 33	Sup. à 33		
Pouvoir calorifique supérieur								Sup. à 7 750	7 200 à 7 750	6 100 à 7 200	5 700 à 6 100		
Classes déterminées d'après l'indice de matières volatiles ou d'après le pouvoir calorifique supérieur.													

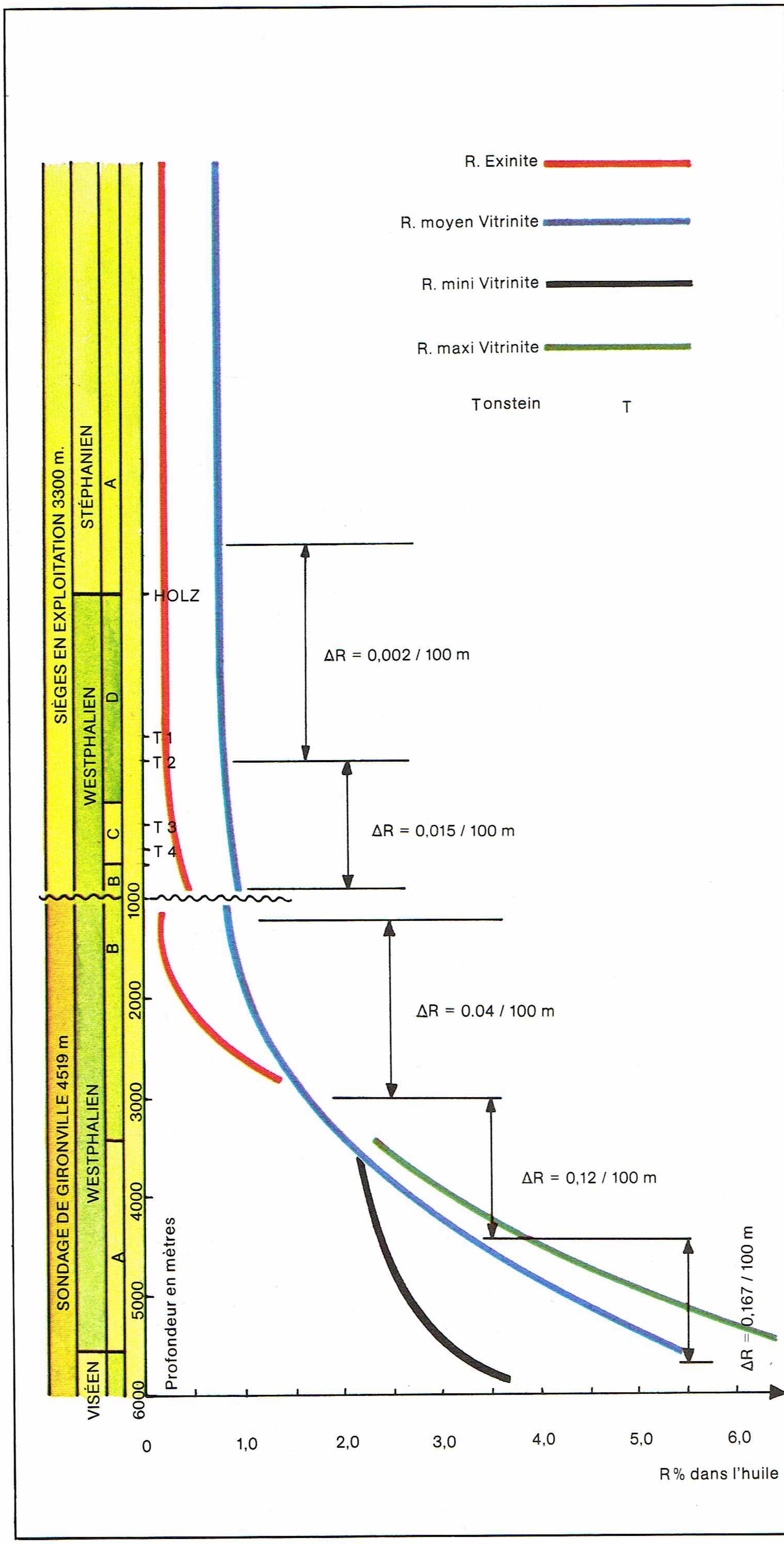

Richard Colin

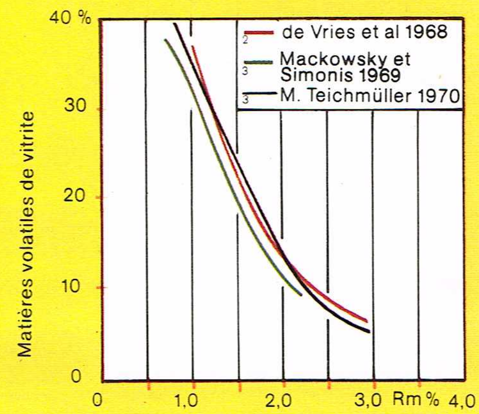

Relation entre R moyen % (vitrinite) et MV% (concentré de vitrite)

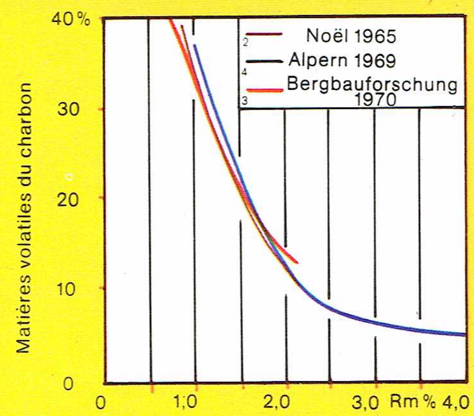

Relation entre R moyen % (vitrinite) et MV% sur charbon global.

1 sur pur et sec
2 MV% calculées selon la norme allemande (875 °C) Duhameau 1968 2
3 MV% déterminées à 875 °C ou 900 °C
4 MV% déterminées à 960 °C

Richard Colin

cours de l'échauffement. Le gonflement au creuset donne le deuxième chiffre de la Classification internationale, celui du groupe, tandis que le dilatomètre donne le troisième, celui du sous-groupe.

Les indices physiques de l'évolution

Parmi ceux-ci, les plus importants sont liés aux propriétés optiques de la matière organique, base du développement considérable de la microscopie des charbons.

La réflectance

L'examen, simplement visuel, d'une série d'échantillons de degrés d'évolution croissants montre que les produits sont brun-rougeâtre, ternes et mats au niveau des lignites tendres, qu'ils deviennent noirs, puis de plus en plus brillants dans les étapes suivantes. Ce phénomène, facilement décelable à l'œil nu, peut être mesuré avec une très grande précision au moyen d'un *photomètre* sur des surfaces soigneusement polies. On opère dans des conditions normalisées à l'échelle internationale, avec un objectif × 25 ou × 50 en immersion d'huile, une lumière incidente soigneusement stabilisée et filtrée à 546 nm. Les mesures se font sur des plages de 10 μ environ et toujours sur le même constituant de référence : la *vitrinite*. Les chiffres sont calculés en valeur absolue par rapport à un étalon synthétique dont les indices de réfraction, *n*, et d'absorption, *k*, sont connus. La formule théorique de calcul du *pouvoir réflecteur* est (Fresnel-Beer) :

$$R = \frac{(n - N)^2 + n^2k^2}{(n + N)^2 + n^2k^2}$$

dans laquelle n et k sont les indices de réfraction et d'absorption du charbon, et N l'indice de réfraction du milieu d'immersion. A titre d'exemple, pour un charbon gras à 89 % de carbone, n = 1,88, k = 0,07. L'indice de l'huile d'immersion est N = 1,515 à 20 °C. Le pouvoir

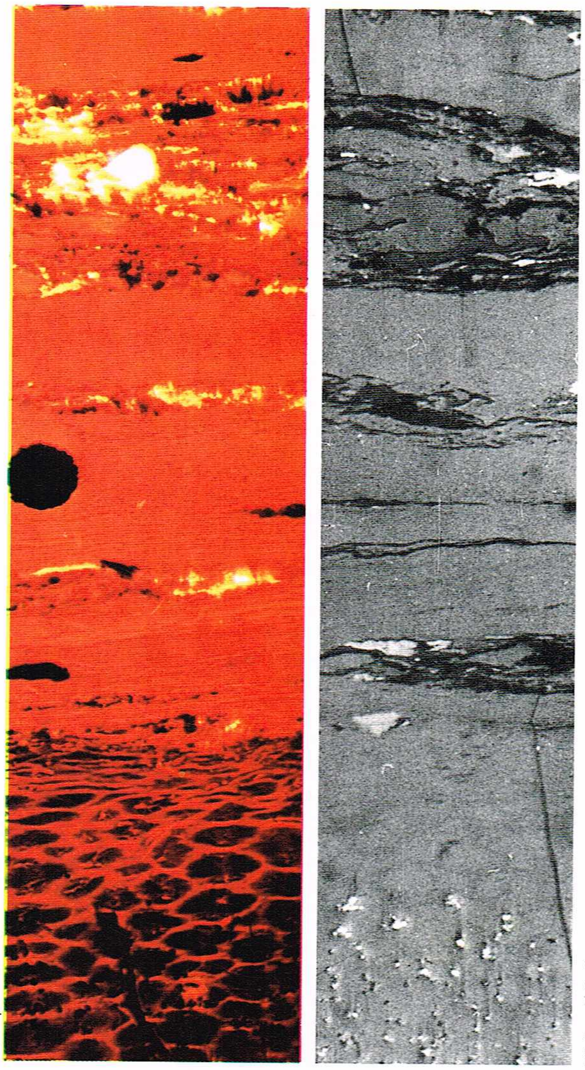

B. Alpern - 1957

Richard Colin

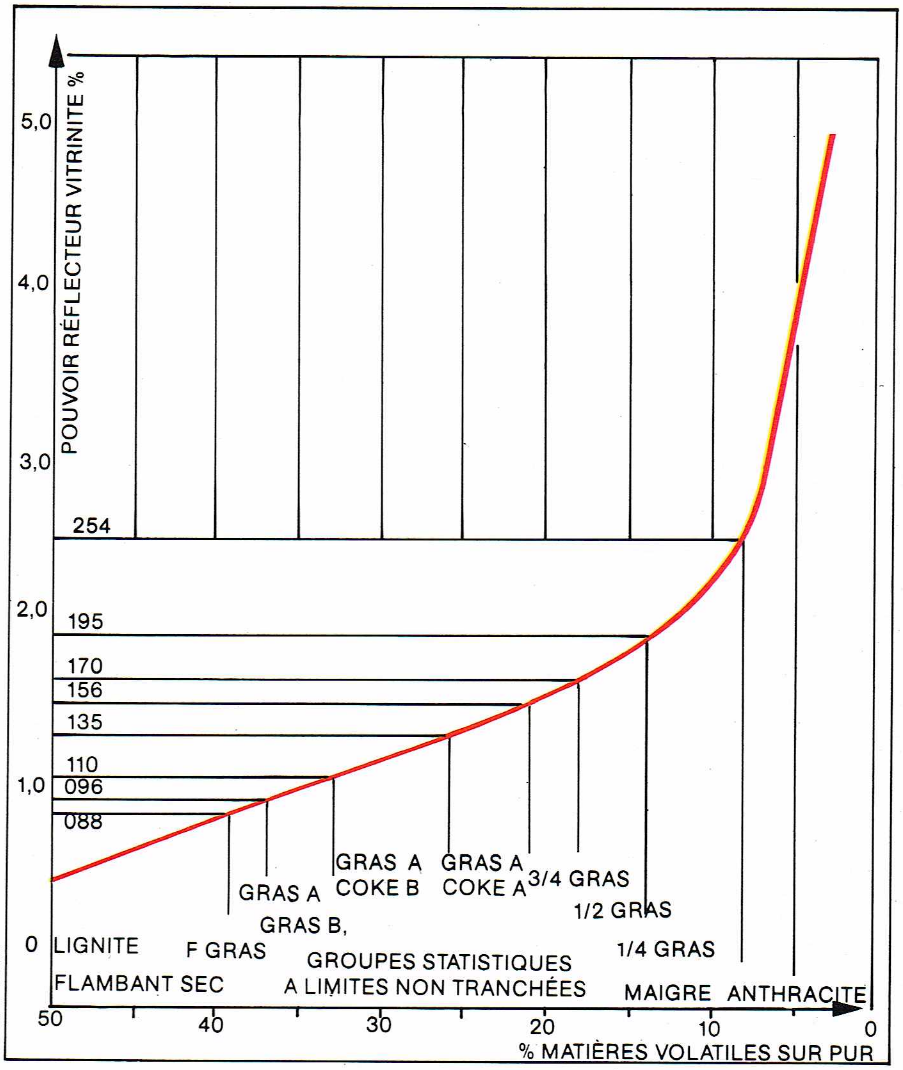

réflecteur mesuré dans ces conditions varie de 0,3 % pour les lignites tendres à 11 % pour le graphite. La limite lignites-houilles est située à environ 0,5 % de réflectance.

Les avantages du pouvoir réflecteur sont les suivants : la mesure est non destructive ; elle s'établit sur de très faibles quantités de produits (cas des sondages). Le test couvre d'une manière satisfaisante toute la série évolutive, sauf dans les tout premiers stades de la diagenèse ($R < 0,3$ %), où il est difficile de distinguer avec précision ce qui revient aux conditions biochimiques de ce qui est dû à l'évolution.

Si l'on mesure la variation des valeurs de réflectance sur une même verticale (cas des sondages), on observe dans tous les cas normaux (sans perturbations tectoniques) une augmentation de celles-ci avec la profondeur. Prenons le cas du Bassin lorrain : on y exploite près de la surface des houilles flambantes du Stéphanien et, plus en profondeur, des houilles à gaz puis grasses du Westphalien D, C puis B. Un sondage effectué à Gironville au sud-ouest de la partie exploitée a permis de recouper en outre, à la base des séries précédentes, des veines de charbon jusqu'à une profondeur de 6 000 m et qui appartiennent à l'étage Namurien. Ces dernières veines sont de l'anthracite. Ainsi, sur une même verticale représentant l'accumulation d'environ 7 000 à 8 000 m de sédiments comportant de nombreuses intercalations charbonneuses, le degré d'évolution passe du stade des houilles flambantes à celui des anthracites.

Sur le plan des propriétés optiques, on constate d'importants changements :

— la réflectance s'élève pour la vitrinite de 0,7 % à plus de 5 % ;

— la réflectance des spores (exinite) évolue de 0,2 % à 1,6 %, et à ce niveau rejoint la courbe évolutive de la vitrinite ;

— après cette convergence, on observe une anisotropie de réflexion ; il faut alors distinguer un pouvoir réflecteur maximal et un pouvoir réflecteur minimal déterminés en lumière polarisée selon des positions parallèles ou perpendiculaires au plan de stratification.

Si l'on considère alors non plus les veines de charbon sur une même verticale mais les charbons de toute provenance géographique, on s'aperçoit qu'ils se placent sur une courbe évolutive analogue à celle du Bassin lorrain avec les mêmes valeurs successives depuis les lignites jusqu'aux anthracites.

On constate, en outre, que les courbes évolutives établies séparément par les pétrographes de chaque pays sur leurs propres bassins sont pratiquement superposées. On peut en conclure que *les indices de réflectance ont une valeur universelle* et constituent de ce fait un paramètre de mesure du rang irremplaçable, surtout si l'on rappelle que la mesure de ce paramètre n'est pas destructive et qu'elle porte sur un constituant simple qu'on isole par l'observation sans avoir nécessairement à l'extraire de la roche.

La transparence

La transparence, comme la réflectance, est liée aux indices *n* et *k*. Au lieu de mesurer la quantité de lumière réfléchie, on mesure (le même appareillage étant valable) la quantité de lumière absorbée par l'objet étudié par rapport au même faisceau lumineux traversant la préparation sans passer par l'objet. Théoriquement, il faudrait travailler à épaisseur constante.

Certains auteurs ont utilisé des lames minces de charbon et mesuré l'absorption lumineuse de la vitrinite, qui est rouge au stade des charbons flambants, puis brune et ensuite opaque. D'autres chercheurs utilisent le matériel, spores et pollen, des préparations palynologiques (c'est la voie la plus explorée actuellement).

▲ A gauche, photographies d'une même plage, vue en transparence à gauche et en réflexion à droite, sur une lame mince. On observe, dans le bas, le tissu ligneux gélifié, surtout visible en transparence, et, en haut, la vitrinite (photo B. Alpern ; G = 350). A droite, représentation graphique du pouvoir réflecteur des charbons français (B. Alpern ; 1969).

◀ Page ci-contre, à gauche, représentation graphique de l'évolution du pouvoir réflecteur des macéraux dans le Bassin lorrain (B. Alpern, 1966). A droite, courbes établies séparément par des pétrographes dans leurs pays respectifs ; on observe qu'elles sont pratiquement superposables, ce qui permet de conclure que les indices de réflectance ont une valeur universelle (Lexique international de pétrographie des charbons, C. N. R. S., Paris, éd. 1963 et 1971).

Cours B. Alpern

Il est nécessaire dans ce cas de travailler *toujours sur la même espèce* en choisissant si possible une spore sans ornements ni épaississements de la paroi. La méthode comporte de ce fait une limite : il n'est, en effet, pas toujours possible de trouver la même espèce dans toute la série géologique et dans tous les bassins. Il existe une autre limitation à cette méthode : comme la vitrinite, mais un peu plus tard, les spores deviennent totalement opaques au cours de la catagenèse et bien avant que celle-ci soit achevée. L'opacité des spores est en effet quasi totale au niveau des charbons gras (25 % de matières volatiles environ). La transparence n'a donc pas de valeur universelle pour la mesure de l'évolution mais elle peut être intéressante à utiliser dans ses premiers stades.

Cours B. Alpern

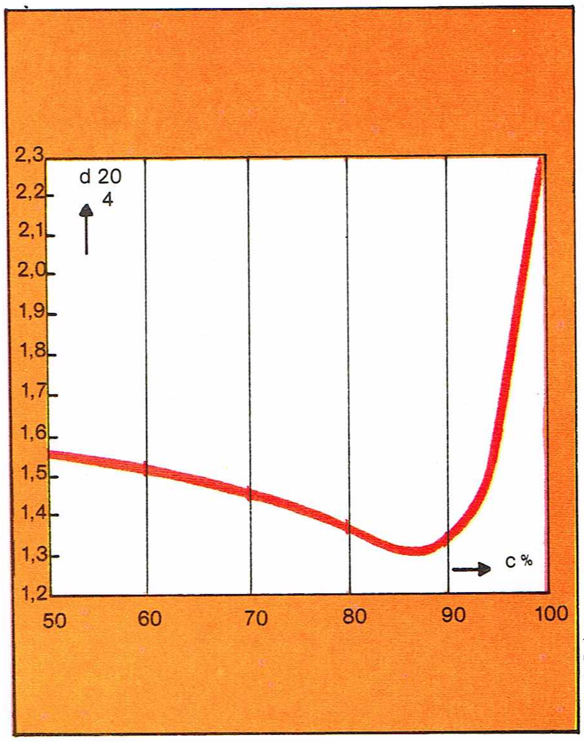

Richard Colin

▲ *Ci-dessus, dans la marge, même particule charbonneuse, vue, en haut, en réflexion et, en bas, en fluorescence : les inclusions résineuses apparaissent en jaune en fluorescence; la partie supérieure de la particule a été attaquée par un mélange oxydant pour mettre en évidence la structure cellulaire (G = 350; cours B. Alpern). A droite, représentation graphique de l'évolution de la* **densité du charbon** *avec le rang (Van Krevelen).*

La fluorescence

C'est la dernière née des techniques d'observation microscopique. Elle revêt à l'heure actuelle une grande importance, tant pour la reconnaissance des constituants des houilles que pour la mesure de leur évolution. La fluorescence est un phénomène provoqué dans une substance inorganique ou organique par un rayonnement de courte longueur d'onde focalisé sur l'objet. Pour la matière organique, on utilise une radiation bleue (longueur d'onde $\lambda = 390$ nm). On pourrait exciter la matière organique par un rayonnement ultraviolet ($\lambda = 250$ nm) beaucoup plus énergique, mais il faudrait alors disposer d'une optique en quartz, ce qui n'est pas nécessaire pour la fluorescence par excitation dans le bleu. La matière organique ainsi irradiée émet un autorayonnement (autofluorescence, ou fluorescence primaire) dans le spectre visible. Cette autofluorescence est caractéristique du *constituant* observé ainsi que de son *degré d'évolution*. Ce sont surtout les constituants du sapropèle, notamment les Algues, les spores et leurs produits de dégradation, qui sont fluorescents.

Au cours de l'évolution, la fluorescence émise passe des longueurs d'onde courtes (bleu, puis vert), aux longueurs d'onde plus élevées (jaune, rouge, puis brun). A partir d'un certain stade, toute fluorescence disparaît (charbons gras de réflectance 1,3 % environ). Ce paramètre, comme la transparence, n'est donc pas universel mais utilisable seulement dans la diagenèse et dans les premiers stades de la catagenèse.

Il n'est pas facile de mesurer l'intensité absolue de la fluorescence organique : on ne dispose pas d'étalon et, en outre, l'épaisseur de l'objet intervient. Par contre, la forme du spectre émis, la position du maximum, le rapport bleu/rouge et l'évolution du signal d'autofluorescence au cours du temps (fading) sont autant de moyens de mesurer l'évolution diagénétique ou de caractériser les familles chimiques de produits. Les chimistes appellent généralement « bitumes » la fraction organique de la roche extractible au chloroforme.

Récemment, l'application de la fluorescence a permis de découvrir, dans les charbons, des constituants qui n'avaient jamais été observés auparavant et qui font partie de la famille des *« bitumes »*, soit primaires *(bituminite)*, soit secondaires et partiellement migrés *(exudatinite)*. Ces découvertes peuvent avoir une grande importance dans la compréhension de l'évolution des houilles et même dans celle de la formation des pétroles.

Autres propriétés physiques

Parmi les autres propriétés intéressantes, nous avons retenu : la densité, la microdureté, l'anisotropie optique, le comportement sous le rayonnement X.

● *La densité*. Celle-ci doit être mesurée sur un produit sec; en outre, il faut tenir compte de la microporosité, qui peut être élevée au stade lignite, et la déduire afin de passer de la densité *apparente* à la densité *vraie*

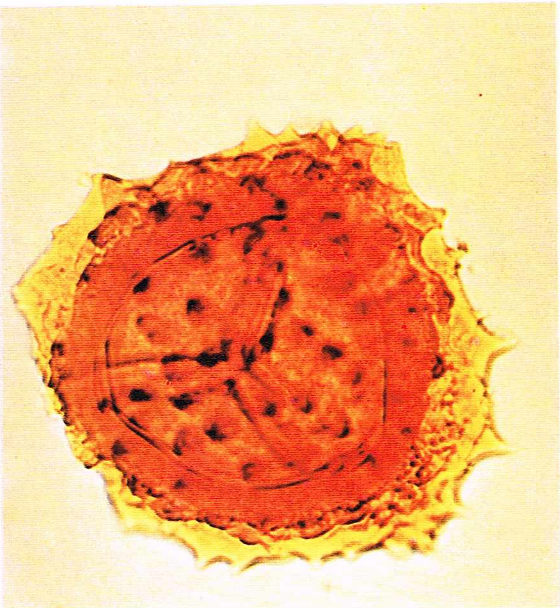

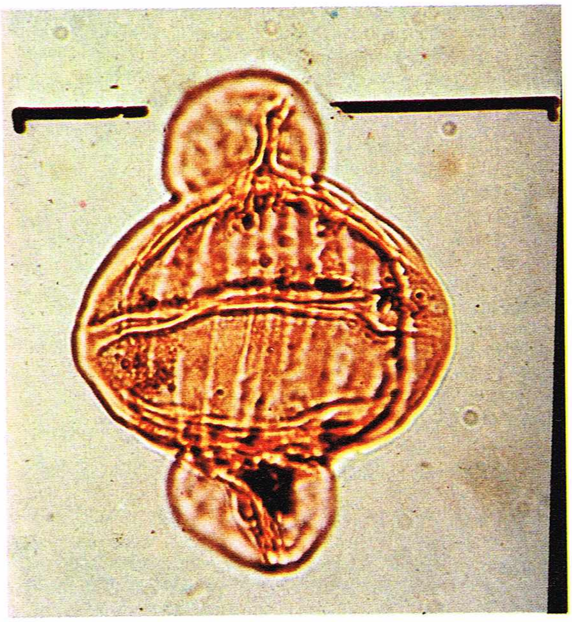

Coll. internationale de diapositives, d'holotypes et cotypes de la CIMP. Éditions B. Alpern. F. Fleury

(volume poreux accessible exclu). En moyenne, on obtient des valeurs inférieures à 1,5 pour les lignites tendres, à 2,25 pour les graphites. Entre ces deux valeurs la courbe passe par un minimum de 1,28-1,30 environ au stade des charbons gras à 87 % de carbone. Du fait de cette allure avec minimums, la densité n'est pas un bon paramètre de rang, sauf dans des portions limitées de l'évolution situées de part et d'autre du minimum. Ajoutons également que la valeur obtenue est très sensible à la teneur en cendres et que celle-ci doit être, bien entendu, aussi basse que possible, la teneur nulle n'étant pratiquement jamais atteinte ne serait-ce que du fait des cendres végétales intrinsèques; celles-ci, qui sont inférieures à 1 % dans des substances ligneuses, s'élèvent, par exemple, à 4 % en moyenne pour *Pinus sylvestris,* à 5,4 % pour *Lycopodium complanatum* et à 18,7 % avec *Equisetum arvense*.

● *La microdureté*. Celle-ci peut être établie sur les charbons au moyen d'un « indenteur », généralement constitué par un diamant pyramidal à base carrée ayant un angle de 136° au sommet. On applique une certaine pression sur cet indenteur, soit par des poids (de 4 à 100 g), soit au moyen d'un ressort étalonné. L'enfoncement du diamant dans le charbon détermine la formation d'une empreinte losangique dont on mesure les diagonales. La longueur de celles-ci, généralement comprise entre 1 et 50 μ, est proportionnelle à la charge mais inversement proportionnelle à la microdureté du constituant. La *microdureté* est exprimée en kg/mm² selon la formule :

$$mD = 1\,854{,}4 \cdot \frac{P}{d^2}$$

P étant la charge évaluée en grammes, et d la longueur de la diagonale mesurée en microns. La microdureté atteint des valeurs de 10 à 30 kg/mm² pour les lignites et de 40 (charbons flambants) à plus de 120 kg/mm² pour les anthracites. Comme celle de la densité, la courbe de la microdureté présente un minimum de 33 kg/mm² environ dans le domaine des charbons gras (20 % de matières volatiles).

Signalons, en outre, que l'on passe du domaine *plastique* dans les lignites et les houilles au domaine *élastique* au niveau des anthracites. En effet, l'empreinte disparaît dès que l'on relève l'indenteur, et il faut utiliser des artifices pour la mesurer au maximum de la position d'enfoncement.

● *L'anisotropie optique*. Cette propriété n'est pas la biréflectance que nous avons mentionnée précédemment à propos du pouvoir réflecteur et qui se caractérise par l'existence de deux valeurs, maximale et minimale, par rapport au plan de stratification. Il s'agit ici d'une anisotropie mise en évidence au moyen de deux polariseurs dont les plans principaux sont croisés. Dans ces conditions d'observation, tous les charbons restent noirs (isotropes) en microscopie par réflexion, sauf les anthracites qui réapparaissent avec une intensité lumineuse d'autant plus élevée qu'ils sont plus évolués. Ce phénomène, lié à la compression physique due au poids des sédiments, est maximal lorsque le plan de stratification est à 45° des plans principaux de polarisation. On ne peut l'observer et le mesurer que lorsque la section polie est perpendiculaire à la stratification.

● *Le comportement aux rayons X*. Soumis au rayonnement X le graphite montre l'existence de plans réticulaires orientés se traduisant sur le diagramme d'enregistrement par un certain nombre de raies, dont la principale est la raie 002. Le graphite est formé d'un empilement de lamelles hexagonales de 1,417 Å de côté, équidistantes de 6,695 Å. Soumis au même rayonnement, les charbons montrent une organisation d'autant plus graphitique et une raie 002 d'autant plus marquée que le stade d'évolution est plus avancé. Ce n'est donc, en fait, que dans le domaine des anthracites, des « méta- » ou « peranthracites », et des graphites que le rayonnement X peut fournir un bon paramètre de mesure de l'évolution. Dans ce domaine, la teneur en carbone, qui varie entre 92 et 98 %, est peu utilisable; l'hydrogène, au contraire, est le paramètre idéal pour étalonner l'indice de graphitisation aux rayons X car dans la même zone il passe de 2 % à 0,2 %, soit un rapport de 1 à 10.

Conclusions sur l'ensemble des propriétés physico-chimiques

Nous venons de voir que les propriétés qui permettent de mesurer l'évolution des charbons sont très nombreuses. Certaines sont générales (teneur en carbone et réflectance), d'autres sont intéressantes dans les stades précoces d'évolution (humidité, pouvoir calorifique, fluorescence), d'autres enfin caractérisent mieux les stades terminaux de celle-ci (teneur en hydrogène, indice de graphitisation aux rayons X, anisotropie optique et biréflectance).

Cependant, nous avons parlé du charbon comme s'il s'agissait d'un corps élémentaire pur alors qu'en réalité nous sommes en présence d'un mélange de constituants divers, aux propriétés parfois très différentes. Une importante coupure doit être introduite au niveau méthodologique selon que la mesure porte sur un constituant élémentaire simple (réflectance, fluorescence, microdureté) ou qu'elle porte sur le mélange sans le décomposer (teneur en matières volatiles, densité, carbone, hydrogène, etc.). En toute rigueur, une propriété chimique n'est valable que si elle a été déterminée sur un constituant homogène, extrait par une méthode quelconque de séparation. Le carbone, par exemple, doit être mesuré sur la vitrinite pure séparée par voie physique. Cette remarque, de grande importance pour une bonne qualification des combustibles, nous conduit directement à considérer maintenant le charbon sous l'angle des constituants naturels très divers qui le composent.

◀ *Page ci-contre, en bas, évolution de la transparence des spores avec la diagenèse au cours du Paléozoïque supérieur : de gauche à droite,* Emphanisporites annulus *(McGregor, 1961; Dévonien, Canada);* Hymenozonotriletes inaequus *(McGregor, 1960; Dévonien, Canada);* Hamiapollenites bifurcatus *(Jansonius, 1962; Permien, Canada).*

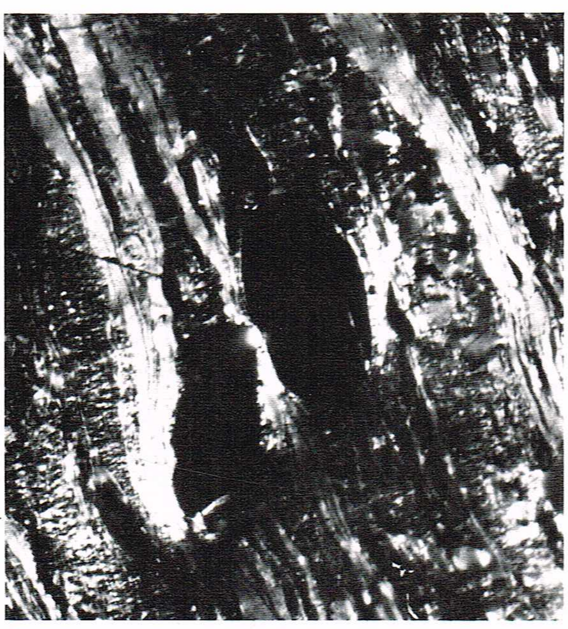

Cours B. Alpern

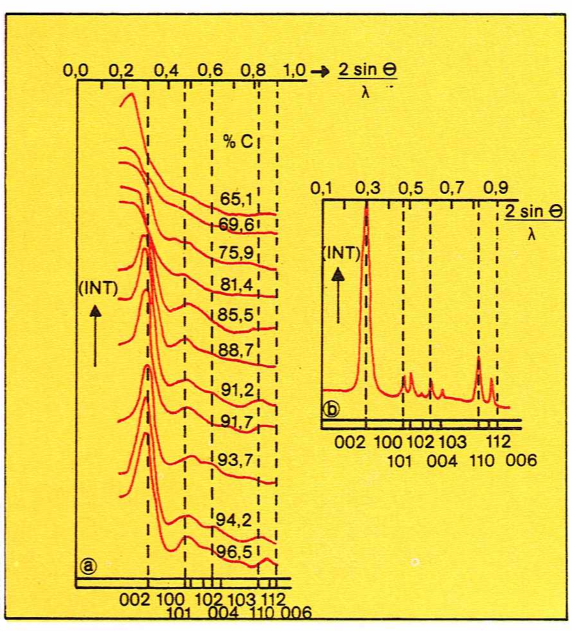

Richard Colin

◀ *A gauche,* anthracite *de La Mure (lumière réfléchie, nicols croisés, G = 180) [cours B. Alpern]. A droite, spectre de diffraction du rayonnement des vitrinites et du graphite (a, les stades de houillification du charbon; b, le graphite [100 % C]).*

▶ *Page ci-contre, les* macéraux des lignites : *1, textinite A (bois de Conifère) - lignite tendre - Miocène - Dellingen, Main; 2, eu-ulminite - lignite brillant - Oligocène - Peissenberg; 3, lévigélinite - lignite tendre - Miocène - Bas-Rhin; 4, porigélinite - lignite tendre - Miocène - Bas-Rhin; 5, porigélinite dans fusite - lignite tendre - Miocène - Bas-Rhin; 6, attrinite - lignite tendre - Miocène - Bas-Rhin; 7, densinite - lignite brillant - Oligocène - Manosque, Provence; 8, corpohuminite - lignite tendre - Miocène - Bornhausen, Harz; 9, phlobaphinite tabulaire typique - lignite tendre - Miocène - Bas-Rhin (B. Alpern, 1971).*

Les constituants microscopiques des charbons

Les constituants microscopiques des charbons sont théoriquement indépendants du mode d'observation choisi : réflectance, transparence ou fluorescence. En fait, cependant, chaque groupe relève de modes d'investigation préférentiels, et les constituants découverts le plus récemment ne sont visibles qu'en fluorescence. Cela démontre que, d'une certaine manière, le développement de la nomenclature a été, dans ce domaine comme dans beaucoup d'autres, conditionné par celui des méthodes physiques d'investigation, dans le cas présent surtout celui de l'optique : microscope biologique, microscope métallographique, microscope en fluorescence, microscope électronique, etc.

Avant d'aborder la partie descriptive proprement dite, quelques données concernant l'historique de la pétrographie des charbons doivent être présentées. La nomenclature des constituants des houilles a été longtemps caractérisée par la coexistence de nombreuses classifications locales plus ou moins équivalentes, dont aucune ne parvenait à s'imposer à toutes les autres. Dans cet ensemble, émergent quelques travaux dont la marque se retrouve encore dans la nomenclature actuelle.

Après Fayol (1887) en France, et Thiessen (1920) aux États-Unis, M.C. Stopes (1919-1935) crée les termes de vitrain, clarain, durain, fusain, et introduit le concept de macéral; elle publie la première Classification internationale (dite de Heerlen). Les auteurs décrivaient alors soit des constituants macroscopiques, soit des constituants microscopiques vus en transparence sur des lames amincies de charbon.

Postérieurement, les techniques par réflexion à sec ont été développées par Duparque (1933) en France, tandis qu'E. Stach (1931) utilisait le premier l'examen en immersion d'huile et que l'anglais Seyler liait réflectométrie et chimie (1938). En Russie, Jemchoujnikov, puis Ammosov suivaient des chemins parallèles mais aboutissaient à des nomenclatures génétiques très différentes actuellement développées par Timofeev et Bogoliubova.

En 1952, s'est créé, à Heerlen (Hollande), lors du Congrès international de géologie du Carbonifère, un Comité international de pétrographie des charbons, sous la présidence de R. Potonié, qui s'est fixé pour tâche la création d'une nomenclature internationale unifiée. Celle-ci, pratiquement achevée à l'heure actuelle, a fait l'objet d'une édition en 2 volumes par le C.N.R.S. et constitue la base de ce qui est présenté ci-dessous.

On a donné aux constituants élémentaires des houilles le nom de *macéraux*. Ce terme est la synthèse des termes macération et minéral. Normalement, la terminologie employée change du stade lignite au stade houille. Cependant, étant donné qu'il s'agit de lignes évolutives continues, nous avons choisi de les présenter par groupes naturels plutôt que par tranches successives de la diagenèse.

Les macéraux des lignites et des houilles sont généralement rassemblés en trois grands groupes en fonction de leurs propriétés optiques :

— le groupe de l'*huminite-vitrinite,* qui rassemble les produits ligno-cellulosiques gélifiés (tissus et gels);

— le groupe de l'*inertinite,* qui dérive des mêmes tissus originels mais par une voie au moins partiellement aérobie (fusinisation);

— le groupe de l'*exinite-liptinite,* qui rassemble des éléments assez disparates, comme les spores, les cuticules, les résines, les Algues, etc.

Si l'on examine la classification d'ensemble des macéraux des lignites et des houilles, on remarque :

— que le nombre des macéraux diminue pour le groupe huminite-vitrinite des lignites vers les houilles; il y a réduction par convergence et homogénéisation;

— que ce nombre diminue également pour le groupe de l'exinite, par absence de la subérinite et de la chlorophyllinite dans les houilles;

— que pour l'inertinite, au contraire, il y a augmentation significative d'un constituant : la micrinite, qui n'apparaît, par néoformation, qu'au stade des houilles.

Le groupe huminite-vitrinite

Ce groupe, le plus important, est composé de tissus gélifiés, de gels vrais et de mélanges (attritus) gélifiés très fins. Le caractère optique commun des macéraux constitutifs est la couleur grise en réflexion et rouge en transmission, ces teintes étant, bien entendu, variables avec la diagenèse.

Les tissus : série humotélinite-télinite

Si un tissu végétal ligno-cellulosique est rapidement protégé de l'oxydation aérienne et de l'attaque des Bactéries aérobies ainsi que des Champignons, il subit un phénomène dit de « gélification » au cours duquel les membranes secondaires sont partiellement décomposées avec, corrélativement, un gonflement des parois et une disparition progressive de la structure cellulaire. Si la structure est encore très proche de l'état initial, on est en présence de **textinite;** si, au contraire, la gélification est quasi totale et la structure non ou peu discernable, on a affaire à l'**ulminite.**

MACÉRAUX DES LIGNITES				MACÉRAUX DES HOUILLES		
SUBMACÉRAL	MACÉRAL	SOUS-GROUPE	GROUPE	GROUPE	MACÉRAL	SUBMACÉRAL
	TEXTINITE	HUMOTÉLINITE	HUMINITE	VITRINITE	TÉLINITE	Télinite 1 Télinite 2
Texto-ulminite Eu-ulminite	ULMINITE					
Porigélinite Levigélinite	GÉLINITE	HUMOCOLLINITE			COLLINITE	Télocollinite Desmocollinite
Phlobaphinite Pseudophlobaphinite	CORPOHUMINITE					Gélocollinite Corpocollinite
	ATTRINITE DENSINITE	HUMODÉTRINITE			VITRODÉTRINITE	
	SPORINITE CUTINITE SUBÉRINITE RÉSINITE ALGINITE LIPTODÉTRINITE CHLOROPHILLINITE (BITUMINITE)* (FLUORINITE)* (EXUDATINITE)*		LIPTINITE	EXINITE	SPORINITE CUTINITE RÉSINITE ALGINITE LIPTODÉTRINITE (BITUMINITE)* (FLUORINITE)* (EXUDATINITE)*	
	FUSINITE SEMI-FUSINITE MACRINITE SCLÉROTINITE INERTODÉTRINITE		INERTINITE	INERTINITE	FUSINITE SEMI-FUSINITE MACRINITE MICRINITE SCLÉROTINITE INERTODÉTRINITE	Pyrofusinite Dégradofusinite

*Terme en cours de discussion.

▶ *Tableau de la nomenclature des macéraux des lignites et des houilles (d'après* le Lexique international de pétrographie des charbons, *C.N.R.S.).*

De nombreuses transitions existent entre ces deux pôles. Si la diagenèse s'accroît et que le pouvoir réflecteur de la vitrinite dépasse 0,5 %, les tissus sont presque toujours partiellement gélifiés; on est dans ce cas au stade de la **télinite**, qui ne se reconnaît bien que lorsque les cavités sont remplies de résinite plus sombre que les parois cellulaires. Au stade complet de gélification, toute structure botanique a disparu et il ne reste du crypto-tissu que son contour périphérique, prouvant qu'il s'agit bien d'un fragment autonome. On est alors au stade de la *télocollinite*, un des submacéraux de la collinite. En toute rigueur ce submacéral, qui est l'équivalent de l'ulminite, devrait être placé dans les tissus et non dans les gels.

Les gels : série humocollinite-collinite

Au stade lignite, les gels vrais qui constituent la **gélinite** sont d'abord poreux *(porigélinite)* puis lisses et compacts avec des fissures de retrait fréquentes *(lévigélinite)*. Au stade houille, les gels sont toujours compacts mais on distingue une sous-catégorie pure, la *gélocollinite*, et une sous-catégorie mixte, la *desmocollinite*, contenant de fines imprégnations submicroscopiques d'argile ou de résinite qui en baissent très légèrement le pouvoir réflecteur. C'est dans cette catégorie des gels impurs que se trouvent concentrés les oligo-éléments métalliques.

On peut également placer dans ce groupe des corps ronds ou ovales désignés par les termes : **corpohuminite** (macéral des lignites) et **corpocollinite** (submacéral des houilles).

Les attrituts mixtes : série humodétrinite-vitrodétrinite

Au stade lignite, ils commencent par être poreux et formés de microfragments de parois cellulaires enrobés ou imprégnés de gelée cellulosique : c'est l'**attrinite**. Ce même mélange après compaction donne la **densinite**.

Au stade houille, il n'y a pas de mixtes vrais de ce type; le seul constituant dérivant probablement de la densinite est la *desmocollinite* (voir ci-dessus dans les gels).

Il existe d'autres mixtes dans les houilles, de même d'ailleurs que dans les lignites, mais ils sont plus grossiers et, comme leurs constituants élémentaires deviennent reconnaissables, on ne les considère plus comme des macéraux simples mais comme des mélanges vrais : les *microlithotypes* (par exemple, la *clarite*, la *durite*, etc.).

La **vitrodétrinite** au sens strict est constituée de particules broyées de vitrinite enrobées dans un ciment quelconque.

Le groupe de l'inertinite

Ce groupe comporte, comme le groupe précédent, surtout des tissus et des fragments de tissus plus ou moins finement broyés, mais ayant subi la fusinisation au lieu de la gélification.

Au stade initial de leur dépôt, ces particules ont été atteintes par l'oxygène de l'air, par des Bactéries aérobies et même des Champignons dont on retrouve d'ailleurs la trace dans les tissus, à l'état de *sclérotes* (formes de résistance). Le caractère optique commun des macéraux du groupe est la réflectance élevée en section polie et l'opacité en lame mince.

La **fusinite** est le macéral correspondant à un tissu à structure très conservée et très reconnaissable. Les parois sont fines, dures et cassantes, en relief sur la préparation et de forte réflectance. On pourrait comparer de tels fragments à du charbon de bois fossile. On suppose que la fusinite s'est formée au cours d'incendies de forêts *(pyrofusinite)* ou par décomposition principalement aérobie *(dégradofusinite)*.

La **semi-fusinite** correspond à un tissu dont la structure botanique est moins bien conservée que celle de la fusinite. La réflectance est plus basse, et les parois sont plus épaisses (gélification partielle). On peut d'ailleurs dans un même tissu trouver des transitions avec la dégradofusinite d'une part, et avec la télinite et même la télocollinite complètement gélifiée d'autre part.

L'**inertodétrinite** correspond à l'ensemble des particules fragmentées provenant de la destruction mécanique des tissus fusinisés et semi-fusinisés. On reconnaît encore, par la forme étoilée ou à trois branches, qu'il s'agit d'éléments de parois cellulaires.

La **macrinite** est un gel massif enrobant les autres macéraux, surtout les microspores; le contour n'est plus discernable. La réflectance est élevée, contrairement à celle de la série gélifiée gélinite-gélocollinite, et atteint celle de la semi-fusinite ou de la fusinite.

La **sclérotinite** est formée soit de mycéliums tubulaires (hyphes) de Champignons, soit de formes de résistance, les *sclérotes*, caractérisés par une paroi généralement épaisse, de réflectance le plus souvent élevée, de couleur gris clair à blanc jaunâtre, entourant une cavité centrale mono- ou pluriloculaire. Certains auteurs, comme E. Stach, ont tenté une classification paléontologique, de type linnéen, de ces formes fossiles.

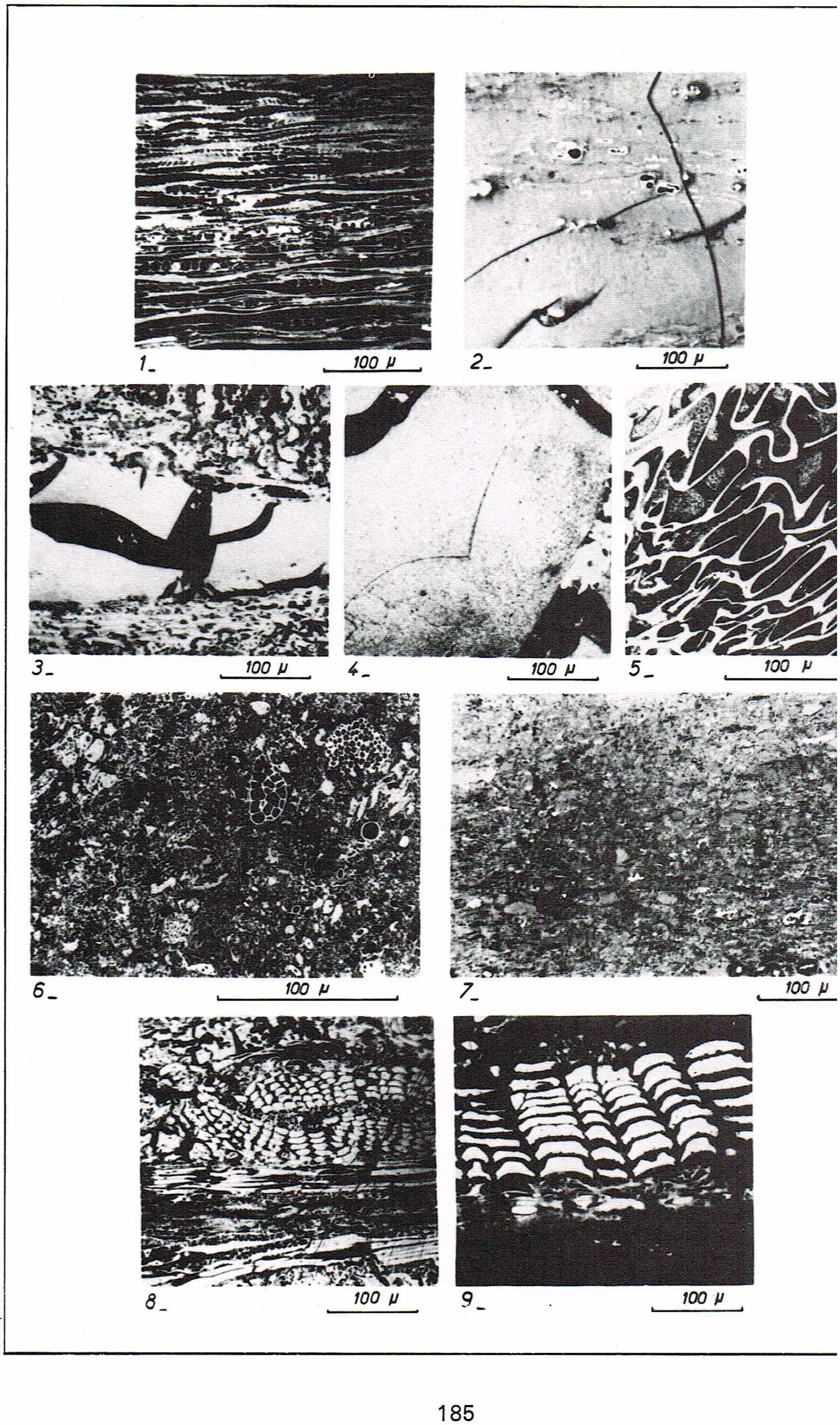

B. Alpern - 1971

B. Alpern - 1971

▲ Microspore *vue en fluorescence; lignite de Moscou (G = 480; in B. Alpern* et al., *1971).*

▶ *Page ci-contre, en haut, Algues et produits de décomposition du sapropèle (fluorescence, G = 350).*

▼ *Ci-dessous,* mégaspore *(fragment) vue en fluorescence; Decazeville (G = 480; cours B. Alpern).*
En bas, cuticule *vue en fluorescence (G = 350; cours B. Alpern).*

Cours B. Alpern

Cours B. Alpern

La **micrinite** est, comme son nom l'indique, formée de microgranules de l'ordre du micron de couleur blanche et dont l'origine a été longtemps controversée. On en trouve dans les parois de certains tissus gélifiés ou en remplissage de cavités ou encore sur des globules résineux. On savait depuis longtemps que ce macéral était particulièrement abondant dans les cannel-coals et les bogheads; en outre il est frappant de constater qu'il ne se rencontre qu'à partir d'un certain stade d'évolution : en effet il n'est pas visible dans les lignites. Une observation très récente (M. Teichmüller, 1974) a permis d'établir la liaison très fréquente de la micrinite avec les macéraux fluorescents de la liptinite et en particulier avec un nouveau macéral, la bituminite. L'évolution de la bituminite donnerait d'une part des hydrocarbures fluorescents de type pétrolier, et d'autre part un résidu granulaire : la micrinite, ce qui expliquerait à la fois sa localisation et son apparition au cours de la diagenèse.

Le groupe de l'exinite-liptinite

Ce groupe comprend un ensemble d'organes ou d'organismes figurés caractérisés par un bas pouvoir réflecteur, d'où une couleur noir rougeâtre à gris foncé en lumière réfléchie et jaune en lumière transmise.

La **sporinite** est formée par l'ensemble des parois (exines) des microspores et des mégaspores. Il s'agissait en fait à l'origine de cellules dont par la suite tout le contenu protoplasmique interne a été détruit. Il ne reste dans les charbons que leur membrane aplatie, la cavité centrale étant, en section transversale, réduite à une simple ligne. Ces cellules avaient pour fonction la reproduction de l'espèce, les organes mâles étant, au Carbonifère, les microspores (de 10 à 15 μ environ), et les organes femelles, les mégaspores (de 200 μ à plusieurs mm), cette hétérosporie n'étant d'ailleurs apparue qu'à la fin du Dévonien. Les exines de spores sont lisses ou ornementées; elles sont destinées à protéger la cellule en attendant les conditions favorables de germination et possèdent, de ce fait, des propriétés extraordinaires de résistance à la destruction.

Ainsi, les palynologistes qui les concentrent par macération pour en faire l'étude paléontologique les extraient de la houille après dissolution du ciment vitrinitique qui les enrobe, par une attaque au mélange chlorate de potassium — acide nitrique concentré. Pour éliminer la phase argileuse et les silicates éventuellement présents on utilise l'acide fluorhydrique, parfois jusqu'à ébullition. Les exines de spores (au stade houille) résistent à tous ces traitements extrêmement énergiques; seul leur spectre de fluorescence est légèrement modifié.

Vues en plan, à l'état isolé dans les préparations palynologiques, les spores sont généralement rondes; leur couleur, d'abord jaune clair au Tertiaire, devient rougeâtre puis brunâtre au Paléozoïque; enfin, elles deviennent opaques à un certain stade de la diagenèse. La fluorescence évolue parallèlement du jaune-vert vif au brun foncé.

La germination de la spore se faisait par ouverture d'une fente germinale de forme triradiée : groupe des *spores « Trilètes »*, ou d'allure rectiligne : groupe des *spores « Monolètes »*. En section polie transversale, les caractères de la fente germinale ne sont généralement pas visibles. Les spores, plus ou moins abondantes selon les charbons, caractérisent surtout les houilles peu évoluées (flambantes et à gaz); on les trouve concentrées dans les lits de « clarite », où elles sont cimentées par la vitrinite, et dans les lits de « durite », où elles sont associées à l'inertinite. Dans certains cas, elles sont extrêmement abondantes; par exemple, il a été possible d'en extraire 30 millions par gramme de charbon lorrain. De ce fait elles constituent un outil paléontologique particulièrement précieux, tant pour les zonations biostratigraphiques que pour les corrélations de couches.

Le **cutinite** correspond à la couche cutinisée, ou cuticule, qui se trouve à la surface supérieure des feuilles ou à la périphérie de certains tissus ligno-cellulosiques. C'est une membrane protectrice, élastique, imperméable, très résistante à la destruction. Elle moule les tissus sous-jacents qu'elle protège et, de ce fait, en révèle souvent la forme en section plane. En section transverse, elle est surtout reconnaissable par la longueur de ses membranes et par l'indentation caractéristique de sa surface interne. En lumière réfléchie, la teinte est noire; par transparence, la couleur est rougeâtre; la fluorescence varie du jaune intense au brun selon le degré de diagenèse.

Certains tissus gélifiés sont reconnaissables par leurs cavités remplies d'une substance gris foncé à noire, de fluorescence jaune à brune d'intensité variable : c'est la **résinite.** La résinite se présente également en imprégnations diffuses dans la collinite. Certains globules résineux isolés présentent une modification périphérique caractéristique de leur réflectance et de leur fluorescence due à l'oxydation. Sur d'autres, on note parfois la présence de vacuoles de dévolatilisation par distillation thermique.

Ce n'est que très récemment que les inclusions huileuses ou cireuses de certaines Coniférales, de fluorescence beaucoup plus vive que celle de la résinite, ont été appelées « **fluorinites** » (M. Teichmüller, 1974). Ce terme n'est pas encore intégré officiellement dans le Lexique international de pétrographie des charbons.

L'alginite comprend un groupe particulièrement important : il correspond à l'ensemble des Algues fossiles que l'on retrouve en abondance dans les roches sapropéliques, surtout les bogheads, et dans les schistes bitumineux. Dans les charbons du Permien, les Algues sont surtout représentées par les *Botryococcus,* souvent décrits dans la littérature (Bertrand et Renault) sous les noms de « Pila » (Autun) et « Reinschia » (Australie). Les faciès sont variables mais l'aspect le plus fréquent est celui d'un faisceau divergent de canaux sécréteurs d'huile (en forme de chou-fleur ou de bouquet rayonné).

Les mêmes Algues ont été retrouvées dans les lacs actuels près de Stettin (Pologne) et ont été décrites sous le nom de *Botryococcus brauni ;* elles font partie des Volvocacées.

En section polie et vues en lumière normale, les Algues sont noires et peuvent parfois être confondues avec de la matière argileuse. Par transparence, elles sont jaunes à brunâtres, mais c'est en fluorescence qu'elles sont le plus reconnaissables par leurs teintes jaune-vert intenses (au stade lignite tendre) à brun rougeâtre (au stade houille). Ces Algues sont souvent accompagnées de leurs produits de dégradation, sapropèle ou saprocolle, surtout dans les schistes bitumineux et les roches mères de pétrole, mais on ne peut les observer qu'avec des objectifs à sec, l'huile d'immersion ayant tendance à dissoudre les hydrocarbures formés.

La **liptodétrinite** comprend l'ensemble des micro-débris de liptinite dont l'attribution précise à un macéral du groupe est devenue impossible du fait de la fragmentation poussée.

Les nouveaux macéraux du groupe de la liptinite

La mise en œuvre systématique des examens en fluorescence a permis à l'école de Krefeld (Mme Teichmüller), en Allemagne occidentale, de mettre en évidence de nouveaux constituants sur lesquels le Comité international de Pétrographie des Charbons n'a pas encore eu le temps de se prononcer, mais qu'il est intéressant de signaler compte tenu de leurs répercussions sur la genèse des pétroles. Ces nouveaux constituants sont la bituminite, l'exudatinite et la fluorinite.

La **bituminite** correspond à des constituants qui, antérieurement, étaient confondus soit avec de la matière minérale argileuse, soit avec la liptodétrinite. Sa fluorescence, seul moyen de reconnaissance, est plus faible que celle de la liptinite : la bituminite est amorphe et forme le ciment, très foncé en réflexion (entre la sporinite et la vitrinite), de constituants divers, notamment, la micrinite avec laquelle la bituminite serait génétiquement liée. La bituminite est fréquente dans les cannel-coals, les bogheads, les schistes bitumineux et les roches mères de pétrole.

L'**exudatinite** est, comme son nom l'indique, un constituant formé par des hydrocarbures migrés remplissant des microfissures et provenant de masses de bituminite. Sa fluorescence est un peu moins brune et un peu plus intense que celle de la bituminite.

La **fluorinite** est constituée de remplissages cellulaires huileux de fluorescence très vive.

Ces trois constituants montrent l'existence dans les charbons de véritables hydrocarbures dont certains sont capables de se déplacer, sans que pour autant le charbon puisse être considéré comme une véritable roche mère de pétrole du fait des faibles quantités formées, de l'absence de microporosité et de l'impossibilité d'une migration vraie. Cependant, le processus de formation des hydrocarbures est bien le même que dans les bassins sédimentaires pétroliers ; la preuve en est faite, ne serait-ce que par le gaz de la mer du Nord émis par les bassins houillers sous-jacents.

Les autres constituants microscopiques des houilles ; leur liaison avec l'aspect macroscopique

Le concept de macéral ne recouvre pas toute la réalité de la structure microscopique des houilles. En effet, les macéraux sont groupés selon des associations préférentielles aboutissant à la formation de certains lits particuliers : les *lithotypes*.

Ces lits sont caractérisés par un aspect reconnaissable à l'œil nu. On peut distinguer ainsi en observant un charbon humique ayant déjà atteint un certain stade d'évolution :

— des lits vitreux, brillants, comportant une fissuration orthogonale favorisant le bris en grains anguleux. Ce sont les lits de *vitrain ;*

— des lits semi-brillants, moins vitreux, moins fissurés, formant le *clarain ;*

— des lits mats, ternes, compacts, formant le *durain ;*

— des lits pulvérulents, ternes ou d'aspect soyeux, tachant les doigts et formant le *fusain.*

Observé au microscope, chacun de ces lits présente une constitution spécifique, et ces associations préférentielles ont reçu le nom de *microlithotypes.*

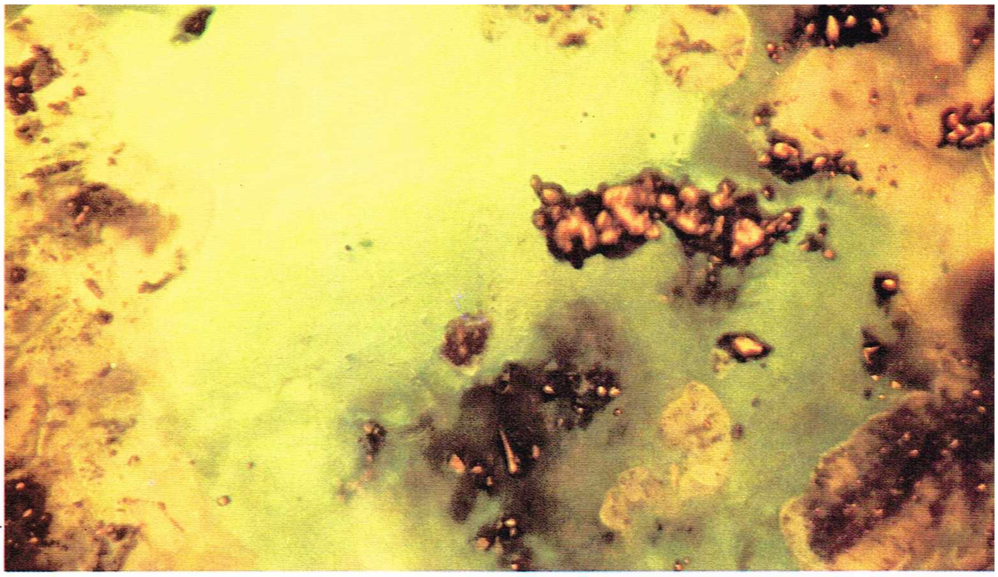

B. Alpern - 1971

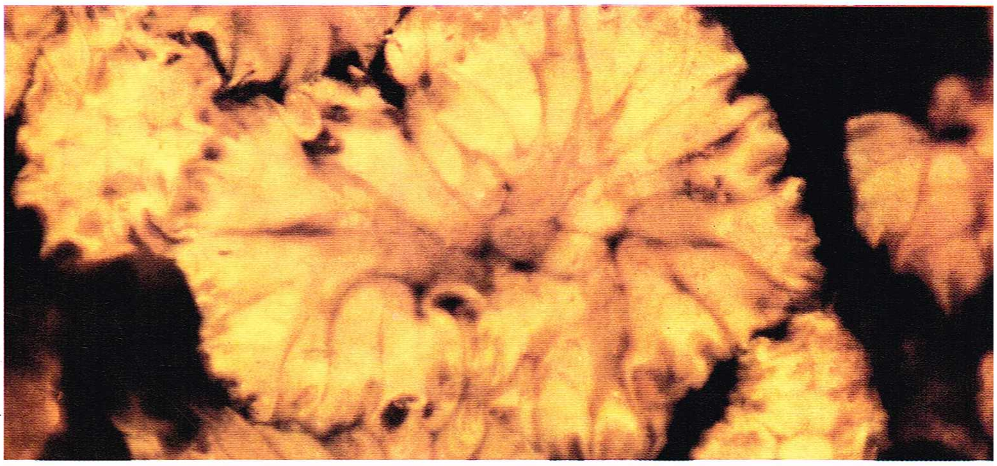

B. Alpern - 1971

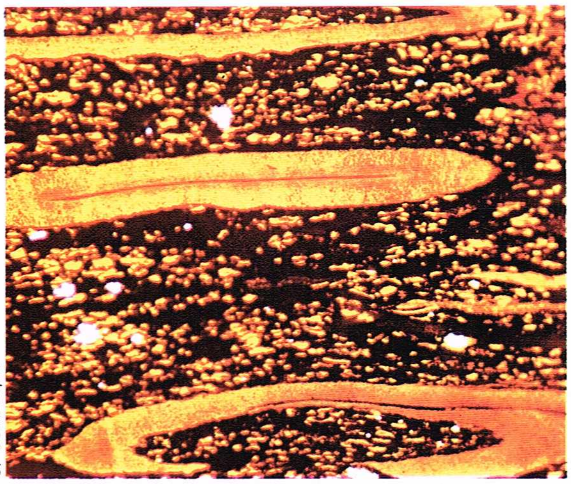

C. Bevilacqua

▲ *Ci-dessus, Algue* **Botryococcus brauni ;** *boghead d'Autun (fluorescence, G = 480 ; B. Alpern, 1971).*

◀▼ *Ci-contre,* **durite** *à mégaspores et microspores dans un ciment opaque d'inertinite (G = 150) ; en bas, à gauche,* **duro-clarite** *à microspores et cuticules (jaune) dans un ciment de vitrinite (rouge) [G = 120] ; ci-dessous,* **duro-clarite** *à microspores (jaune) et inertodétrinite (opaque) coupée par un lit de fusinite (noire). Yorkshire, lames minces en lumière transmise (G = 120).*

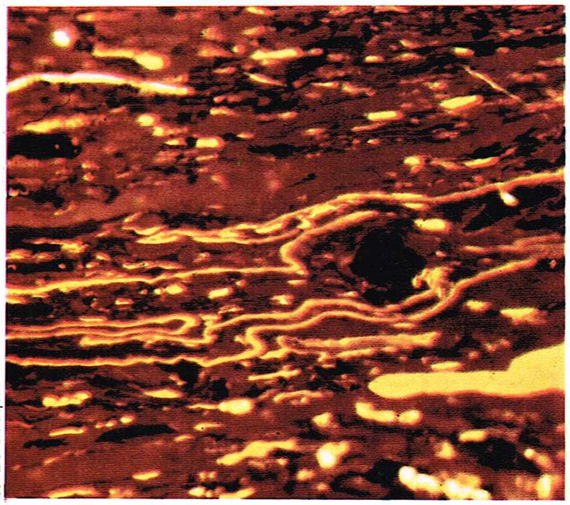

C. Bevilacqua

C. Bevilacqua

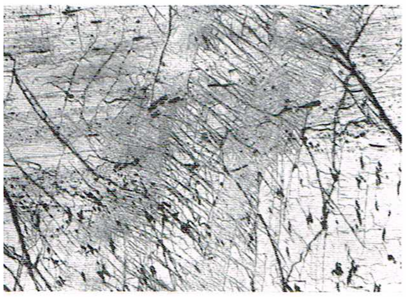

B. Alpern - 1969

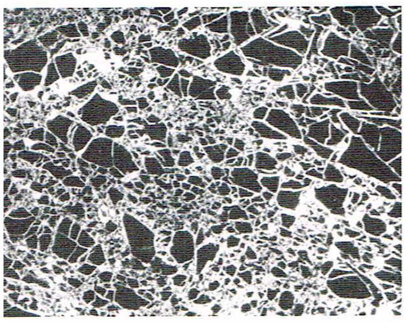

▲ *Fissuration d'un charbon du Nord-Pas-de-Calais, vue en lumière réfléchie fond clair en haut, fond noir en bas (B. Alpern, 1969).*

▼ *Inclusions d'argile (noire) et de pyrite (granules blancs) dans de la vitrinite (grise). Lumière réfléchie, immersion d'huile, G = 350 (cours B. Alpern).*

Cours B. Alpern

Les principaux microlithotypes, au stade houille, sont les suivants :

— la *vitrite,* formée de vitrinite ;
— la *clarite,* formée de vitrinite et d'exinite ;
— la *durite,* formée d'exinite et d'inertinite ;
— la *fusite,* formée de fusinite, de semi-fusinite et de sclérotinite.

On remarquera ainsi que :

— les macéraux prennent la terminaison *-inite,*
— les microlithotypes la terminaison *-ite,*
— les lithotypes la terminaison *-ain.*

Les microlithotypes ont une largeur minimale de 50 μ et peuvent comporter au maximum 5 % de macéraux étrangers à leur formule théorique.

Conséquences pratiques de la constitution des houilles

Il y a un lien important entre la structure microscopique des houilles et certaines propriétés physiques et chimiques.

Aptitude au broyage et aux dégagements instantanés

Le broyage est facilité par la présence de vitrinite du fait de la fissuration préexistante de ce constituant. On compte une moyenne normale de 10 à 12 fissures par centimètre linéaire. Lorsque ce nombre est plus élevé, il s'agit d'une fissuration d'origine tectonique. On peut alors atteindre des fissurations de plusieurs centaines de fissures par centimètre. Dans un tel cas, lorsque la couche contient encore du gaz (CH_4 et/ou CO_2), la veine présente une particularité dangereuse dite « aptitude aux dégagements instantanés ». Lorsque le mineur débouche pour la première fois dans une veine naturellement prébroyée et riche en gaz, celle-ci explose littéralement en dégageant avec violence un mélange de fine poussière de charbon, la « folle farine », et de grisou ou de gaz carbonique. Ce mélange peut remplir les galeries sur des distances importantes et asphyxier les mineurs qui s'y trouvent.

Les auteurs russes ont classé les couches en fonction de cette aptitude et créé des classes de fissuration en fonction du nombre de fissures par centimètre (Ammosov) :

	Fissures/cm	*Maille*
Classe 1 :	6,25	1,6 mm
Classe 2 :	20	0,5 mm
Classe 3 :	71	0,14 mm
Classe 4 :	200	0,05 mm
Classe 5 :	1 225	0,008 mm

L'exinite, lorsqu'elle est abondante dans les clarites et les durites, constitue un obstacle à la propagation des fissures du fait de son élasticité et de sa résistance mécanique. Dans ce cas, la fissuration est beaucoup moins fréquente, l'aptitude à la microfragmentation diminue et les frais de broyage augmentent corrélativement d'une manière sensible lors de la préparation mécanique.

Les lentilles de fusain, lorsqu'elles ne sont pas minéralisées (ce qui les rend très dures), sont facilement pulvérulentes et augmentent l'aptitude au broyage et à la formation de fines poussières. Lorsque le fusain est minéralisé, il devient au contraire mécaniquement résistant.

D'une manière générale, les charbons sapropéliques sont beaucoup moins fissurés que les charbons humiques du fait de leur richesse en exinite et de leur pauvreté en vitrinite.

Aptitude au gonflement et à la cokéfaction

Les macéraux ont des propriétés physiques et chimiques, donc cokéfiantes, extrêmement différentes. Ainsi, la teneur en matières volatiles, en hydrogène, la densité et le gonflement varient d'un groupe de macéraux à l'autre. A titre d'exemple, dans le cas de charbons lorrains flambants secs à gras B, on a obtenu les chiffres suivants :

	Matières volatiles %	*Densité*	*Hydrogène* %
Vitrinite	32-35	1,25-1,30	5,5-6
Exinite	75-85	1,05-1,10	8-9
Inertinite	8-12	1,40-1,50	3,5-4

En se fondant sur les différences de densité, on peut préparer des concentrés pétrographiques à peu près purs.

Il ressort des chiffres obtenus à partir de nombreux essais de ce type (travaux de l'école d'Aix-la-Chapelle, C. Kröger) que :

— l'*exinite* est le groupe de macéraux le plus léger, le moins broyable, le plus riche en goudrons, en matières volatiles ainsi qu'en hydrogène, et le plus fluide ;

— l'*inertinite* est le groupe de macéraux le plus dense, le plus pauvre en matières volatiles, le moins fusible et le moins gonflant. Les propriétés cokéfiantes sont, de ce fait, pratiquement nulles (d'où le nom inertinite), et le rôle anticokéfiant (on dit « amaigrissant ») est d'autant plus accusé que la teneur et surtout la granulométrie de l'inertinite (principalement fusinite et semi-fusinite) sont plus élevées ;

— la *vitrinite* est un groupe de macéraux de densité et de teneur en matières volatiles intermédiaires. Du point de vue de la cokéfaction, c'est le groupe le plus gonflant et le plus agglutinant dans la catégorie des charbons gras ; l'exinite est plus fluide mais moins agglutinante.

La structure des cokes correspondants est le reflet de ces propriétés ; le coke a des cavités d'autant plus grandes et plus ouvertes que la teneur en vitrinite et en exinite est plus élevée. Cette structure particulière correspond à un fort dégagement de gaz (matière volatile) pendant la zone de fusion ou « phase plastique ». La fusion ne suffit pas à provoquer le gonflement si la matière fondue est trop fluide et trop peu agglutinante, les gaz s'échappant alors sans entraîner de gonflement.

Conséquences sur la classification chimique des charbons

Il ressort des chiffres donnés précédemment que les résultats de l'analyse élémentaire d'un charbon sont le reflet non seulement de l'évolution, mais aussi de la constitution pétrographique. Ainsi, pour un même degré d'évolution, un charbon flambant de réflectance 0,75 par exemple, la teneur en matières volatiles, qui est de 40 % environ pour un charbon européen moyen à vitrinite dominante, peut descendre à 25 % environ pour un charbon gondwanien de même rang mais à inertinite dominante. La relation réflectance/matières volatiles n'est donc pas universelle lorsqu'il s'agit de charbons globaux ; elle ne l'est que lorsqu'il s'agit *des matières volatiles de la vitrinite prise isolément,* les propriétés établies dans ce cas devenant indépendantes du faciès et de la constitution pétrographique.

Par ailleurs, enfin, le principal résultat de l'hétérogénéité et de la variabilité de constitution pétrographique est qu'il est impossible de classer chimiquement un charbon complexe par un seul indice, par exemple, la teneur en carbone ou en matières volatiles. En effet, il est impossible de résoudre à la fois deux questions, celle du faciès et celle du rang, avec une seule équation.

La constitution moyenne des charbons européens ou nord-américains est de type : vitrinite $= 80 \pm 10$, exinite $= 10 \pm 5$, inertinite $= 10 \pm 5$. Dans les provinces de Gondwana (Brésil, Madagascar, Inde, etc.) les proportions peuvent être très différentes, la vitrinite diminuant au profit de l'inertinite, laquelle peut devenir alors le constituant dominant, par exemple : vitrinite $= 40 \pm 5$, exinite $= 10 \pm 5$, inertinite $= 50 \pm 10$. Dans certains cas, l'inertinite peut même atteindre 90 % ; reportées sur un diagramme triangulaire, les provinces paléogéographiques s'individualisent bien.

Si le problème du faciès a été longtemps oublié au XIX[e] siècle, c'est que l'industrie charbonnière avait un *caractère régional marqué,* les usines se développant autour et sur des bassins miniers de constitution pétrographique à peu près constante. A l'heure actuelle, les usines sidérurgiques se développent dans les ports et consomment des charbons de toutes provenances, donc de constitution pétrographique variable. Le problème du faciès se retrouve posé et, pour le résoudre, des laboratoires de pétrographie ont été adjoints à toutes les unités sidérurgiques portuaires basées sur l'importation.

Les inclusions minérales dans les charbons

Les minéraux inclus dans le charbon peuvent s'y être déposés au cours de l'accumulation de la masse végétale pendant la constitution de la future veine (minéraux syngénétiques) ou en remplissages postérieurs des fractures (minéraux épigénétiques ou secondaires). Il faut, en outre, mentionner les cendres végétales intrinsèques et les éléments rares, ou oligo-éléments, qui peuvent se concentrer par adsorption physico-chimique

dans la masse du charbon au cours des premières phases de la diagenèse, lorsque les surfaces internes de celui-ci sont encore chimiquement actives (cas de l'uranium).

Cela étant précisé, les inclusions minérales dans les charbons sont extrêmement diverses. Les plus fréquentes sont :

— les *argiles,* le plus souvent interstratifiées dans la collinite ou autour des spores dans la durite, ou encore autour des Algues dans les bogheads ;

— la *pyrite* en microgranules, en sphères ou en remplissages de fissures ;

— les *carbonates,* fréquemment en filonnets ou en inclusions dans les cavités cellulaires (sidérite, calcite).

La formation des tourbières et des bassins houillers

Après avoir examiné les aspects physico-chimiques et diagénétiques de la formation de la houille, nous allons traiter maintenant de la formation des bassins houillers du point de vue géologique. Nous décrirons sommairement les divers types de tourbières, puis nous examinerons les divers types de bassins qui résultent de leur évolution : de plate-forme, de fosse géosynclinale, limnique ou paralique, et leur *mode d'enfoncement,* ou *subsidence,* celle-ci étant marquée par un certain nombre de séquences caractéristiques ou *cyclothèmes.*

Rappelons que le charbon est une roche sédimentaire qui s'est formée dans des conditions particulières mais *toujours en surface et sous une faible couverture d'eau.* Il nous faudra expliquer comment un bassin peut comporter un grand nombre de veines sur une même verticale, parfois très en profondeur alors qu'elles se sont formées toutes très superficiellement. Ajoutons enfin que l'étage Carbonifère, malgré son nom, n'a pas l'exclusivité de la formation de la houille ; bien au contraire, c'est dans les couches du Tertiaire que l'on trouve le maximum de gisements de charbon.

Formation des tourbières

Les tourbières se forment *in situ,* en présence d'eau, et dans des conditions telles que la croissance des plantes dans la partie supérieure est plus rapide que la décomposition des fragments végétaux dans la partie inférieure. Croissance végétale et décomposition microbienne sont gouvernées par les mêmes facteurs, la chaleur et l'humidité ; cependant, si les Bactéries n'ont pas besoin de lumière pour se développer, par contre, elles sont plus affectées que les végétaux par les baisses de température de telle sorte que c'est dans les zones les plus froides de la Terre que la croissance végétale l'emporte sur l'activité bactérienne et que la tourbe se forme le mieux (au-delà du 45e parallèle au nord ou au sud).

Sous les tropiques (Afrique tropicale, Bornéo, Sumatra), la croissance végétale peut cependant également l'emporter sur l'activité bactérienne, celle-ci étant fortement réduite par la formation massive de produits toxiques. D'une manière générale, l'activité bactérienne est elle-même productrice de déchets toxiques qui viennent la contrarier et finalement l'arrêter.

Fraser, en 1943, a énuméré les facteurs qui gouvernent la formation des tourbières :

— l'*humidité :* c'est l'excès d'eau qui abaisse l'activité bactérienne à un niveau minimal, par expulsion de l'air tandis que les plantes aquatiques se développent. Les variations du niveau aqueux sont suffisantes pour permettre une aération partielle, celle-ci étant insuffisante, toutefois, pour permettre une décomposition complète de la matière végétale ;

— la *température :* les basses températures, les zones nuageuses et pluvieuses avantagent la formation végétale au détriment de l'activité bactérienne et permettent la formation de tourbières sur la côte atlantique de l'Europe ;

— les *apports nutritifs :* les Bactéries ont besoin de sels nutritifs (phosphates, potasse, calcium) comme les plantes, mais les matières organiques elles-mêmes sont une nourriture essentielle des Bactéries ;

— l'*acidité :* c'est l'absence ou la présence de carbonate de calcium qui détermine le caractère acide ou basique de la tourbière. Des taux élevés d'acidité ou de basicité contrarient l'activité bactérienne, qui se développe surtout dans la zone de neutralité du pH. Les Champignons ont besoin, de leur côté, de conditions légèrement acides ; cependant d'une manière générale, une forte acidité des sols diminue le taux de décomposition végétale.

D'après Nissenbaum et Kaplan (1972), on assiste dans les sols aux étapes suivantes :

— dégradation du matériel cellulaire ;

— formation de complexes hydrosolubles contenant des amino-acides et des carbohydrates ;

— formation d'acides fulviques (solubles dans les acides et les alcalis) ;

— formation d'acides humiques (solubles dans les alcalis, insolubles dans les acides) ;

— formation d'humines ou ulmines (insolubles dans les alcalis et les acides) ;

— formation de kérogène.

L'activité enzymatique est inhibée par les acides fulviques et surtout humiques qui protègent la matière organique d'une dégradation trop poussée (Welte, 1973).

Les types de tourbières

On distingue divers types de tourbières selon leur localisation géographique péri- ou intracontinentale ou selon leur constitution végétale, herbacée ou arborescente.

D'après la localisation géographique, on distingue :

- les *tourbières paraliques,* caractérisées par une communication avec la mer et se trouvant donc dans d'anciennes lagunes en voie de dessalure. Elles correspondent à ce qui deviendra par évolution les bassins houillers paraliques, comme le bassin franco-belge ou celui du Donetz (U.R.S.S.), caractérisés par des intercalations à faune marine marquant l'invasion épisodique de la mer dans la lagune ;
- les *tourbières limniques,* qui se forment à l'intérieur des terres sur des plateaux ou dans des vallées. Elles correspondent à ce qui deviendra par évolution les bassins houillers limniques, avec flore continentale et faune lacustre, du type de ceux du Massif central français.

D'après la constitution botanique, on distingue :

- les *tourbières de forêt,* ou *tourbières ligneuses,* composées surtout de débris d'arbres, de fragments de troncs et de branches, s'accumulant sur un sol humide avec des eaux généralement toxiques. La tourbe de ce type est fibreuse, non plastique, irrégulière, avec des éléments montrant une structure botanique à peine altérée. Découpée et séchée, elle ne présente qu'une faible contraction ;
- les *tourbières herbacées ;* on les rencontre surtout dans les prairies humides des pays tempérés ou des régions boréales. On distingue deux types :

— les *tourbières de plateau* ou *de montagne* (le *hochmoor* de H. Potonié, le *highmoor* de Fraser) non submersibles et constituées surtout de sphaignes et de plantes herbacées *(Eriophorum, Phragmites),* hydratées seulement par les eaux de pluie pauvres en calcium et de forte acidité ;

COMPOSITION ÉLÉMENTAIRE DE TOURBES SÈCHES SANS CENDRES d'après Hausding (1921) in Francis (1961)

TOURBE DE :	CARBONE	HYDROGÈNE	AZOTE	OXYGÈNE
Labian	51,13	6,05	1,83	40,99
Kurisch Haff :				
0 - 60 cm	55,52	5,7	1,49	37,29
60 - 120 cm	55,29	5,6	1,92	37,19
120 - 180 cm	55,02	5,6	1,52	37,85
Waldan	57,15	5,94	3,59	33,32
Wolla	58,48	5,64	2,34	33,54

▲ ***Tableau de la composition élémentaire de tourbes sèches sans cendres (d'après Francis, 1961).***

▶ *A gauche, exemple de tourbière montagneuse, près du Passo del Tonale. A droite, lac d'Okefenokee, Géorgie (U. S. A.). La matière végétale détritique est préservée de l'oxydation par une couche d'eau stagnante qui permettra une décomposition biochimique bactérienne. Un milieu sédimentaire analogue est à la base de la formation de la majeure partie des dépôts houillers.*

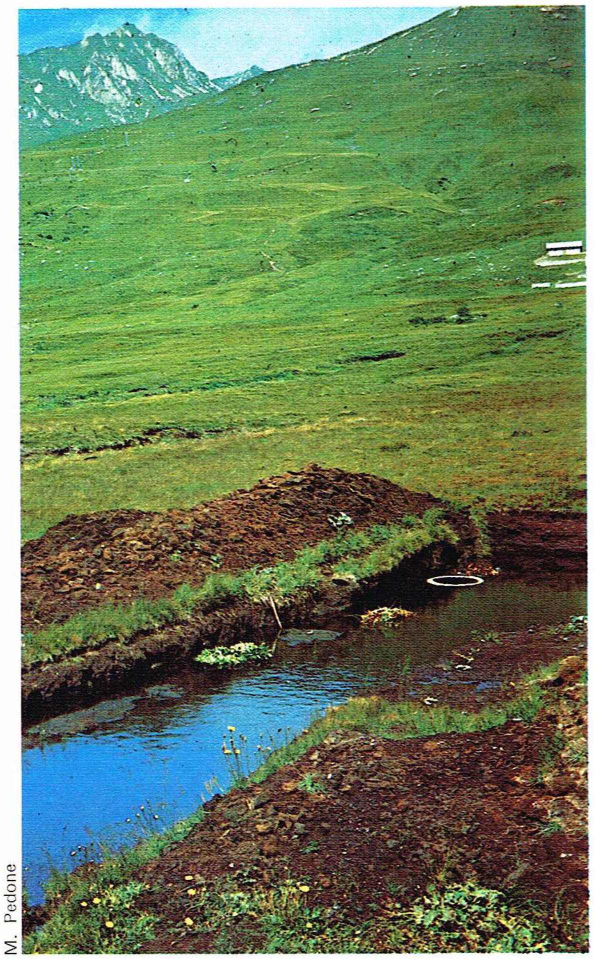

M. Pedone

S.E.F.

▶ *Page ci-contre dans la marge : en haut, colonne stratigraphique théorique d'un cyclothème à une seule couche de charbon (d'après Wleman et Payne) ; en bas, représentation d'une série de cyclothèmes superposés, l'échelle verticale est exagérée comparativement à l'échelle horizontale. Noter la configuration des couches d'arénites due à l'érosion des dépôts de base par des chenaux fluviatiles (d'après Wanless).*

▶ *Page ci-contre, en bas à gauche : série de coupes montrant (de haut en bas) l'évolution au cours du temps d'un bassin lacustre en graben (fosse tectonique) et l'accumulation dans ce fossé de sédiments tourbeux se transformant en houille. En jaune, dépôts marins ; en vert, dépôts lagunaires et palustres ; en violet, dépôts lacustres ; en marron, charbon ; en vert ocre, socle plissé (d'après Falini).*

— les *tourbières de vallée* ou *de côtes basses* (le *flachmoor* de H. Potonié, le *lowmoor* de Fraser) le plus souvent submergées, composées surtout de roseaux et que l'on divise en calciques (eutrophiques) et acides (oligotrophiques) ;

● les *tourbières mixtes : herbacées et ligneuses ;* elles comportent à la fois une zone à végétation herbacée en partie submergée et des zones boisées émergées avec, notamment, des saules, des aulnes et parfois des bouleaux. L'exemple le plus classique est le Kurisch Haff décrit par H. Potonié sur la côte baltique de l'Allemagne. Aux États-Unis, les tourbières de la côte orientale ou Dismal Swamp ont également fait l'objet de nombreuses études et descriptions. Ce marécage, de 60 km sur 40 km, comporte un lac en son centre ; il est formé surtout d'espèces arborescentes, comme le cyprès chauve *(Taxodium distichum)*, le cornouiller *(Nyssa sylvatica)* et le *Juniperus*. *Taxodium* et *Nyssa* vivent dans les parties constamment immergées grâce aux dispositifs d'aération (pneumatophores) de leurs rhizomes. L'épaisseur de tourbe varie de 0,30 à 6 m (672 millions de tonnes). D'autres marais sont également très bien connus sur la côte atlantique des États-Unis : citons l'Okefenokee (Géorgie) et surtout les Everglades de Floride, dont la surface atteint environ 20 000 km².

La tourbe

La vitesse d'accumulation de la tourbe est très variable : 3 cm par an environ en surface, et seulement 10 cm par siècle à 8 m de profondeur. On peut admettre en moyenne 30 cm en 75 ans à 8 m de profondeur avec environ 45 % d'eau. En surface, la tourbe est brun clair ou jaunâtre avec des débris ligneux encore intacts ; ensuite, elle devient brune avec de la matière humique mélangée aux débris végétaux ; en profondeur, enfin, la tourbe est noire, plus compacte et souvent stratifiée.

Rappelons que, du fait qu'elle précède les autres sédiments charbonneux dans l'évolution diagénétique, la tourbe est le combustible le moins riche en carbone (60 %) mais le plus riche en eau (jusqu'à 80 %), le plus poreux et le plus riche en oxygène. Par rapport au poids frais, le poids sec d'une plante herbacée représente 10 % et celui d'une plante ligneuse 50 % (dont 10 % de cendres).

Dans une étude publiée en 1968 par Mme Teichmüller et consacrée à une tourbière de Macédoine (Philippi), le passage tourbe-lignite est décrit. La superficie est de 55 km² ; l'horizon est à la limite Holocène-Pléistocène (datation C^{14} et palynologique), et l'épaisseur de tourbe est de 200 m.

Les propriétés sont les suivantes :

H_2O	69 à 89 %
cendres	3,9 % (bois)
	54,6 % (gyttja argileux)
matières volatiles	60 à 66 %
carbone	55 à 61 %
hydrogène	4,8 à 55,6 %
pouvoir calorifique	5 410 à 5 475 cal/g
réflectance	0,14 à 0,23 %.

En surface, il y a une zone « torfogène » de 5 m d'épaisseur ; c'est là que l'on observe la réflectance la plus basse et la fluorescence la plus élevée.

Cependant, le meilleur paramètre de classement diagénétique est la teneur en eau qui baisse de 89 % à 69 % en 200 m, soit de 10 % par 100 m, contre 3 à 4 % dans le bassin de Cologne. La limite tourbe-lignite tendre pourrait être située à 75 % d'eau.

La dopplérite

La dopplérite est une substance ayant l'aspect d'un gel. Elle a été découverte en 1849 par Doppler, dans les dépôts tourbeux de Bad Aussee (Autriche), environ 2 m au-dessous de la surface du marais. Cette substance perd 75 % d'eau par dessiccation et se transforme en une substance solide noire à fracture conchoïdale. Ce produit, insoluble dans l'eau, l'alcool et l'éther, contient de l'azote, est soluble dans les alcalis et par conséquent analogue aux substances humiques (acides). La composition moyenne de ces produits, dopplérite incluse, est la suivante :

$$C = 56{,}5\ \%,\ H = 5{,}5\ \%,\ O = 36\ \%,\ N = 2\ \%.$$

La formation des bassins houillers

Les divers types de bassins que l'on décrit dans la littérature classique se distinguent surtout par leurs conditions de sédimentation et par la manière dont leur fond s'effondre sous le poids des sédiments, ce phénomène ayant reçu le nom de subsidence (P. Pruvost, 1930).

La sédimentation houillère

Dans un bassin houiller, on trouve en alternance trois grands types de dépôts : charbons, schistes et grès (plus rarement des calcaires), ainsi que tous leurs degrés de transition : charbons schisteux, schistes charbonneux, schistes gréseux, grès schisteux, grès grossiers passant éventuellement aux conglomérats, brèches et poudingues. Cet ensemble représente une sédimentation détritique très active, de type « mollasse » et de nature essentiellement continentale (Bouroz, 1970). Suivant la position de l'aire de sédimentation par rapport au rivage marin, on distingue les bassins limniques (internes) ou paraliques (de bordure).

Dans tous les cas, les niveaux houillers, qui peuvent être d'épaisseur très variable, allant du centimètre à la centaine de mètres, sont situés entre un niveau de base, ou « mur », et un niveau supérieur, ou « toit ». Le toit est formé, le plus souvent, de schistes fins comportant de nombreux débris de plantes. Le mur, au contraire, est irrégulier, peu stratifié, souvent gréseux, perforé de nombreuses racines ou radicelles : les *stigmaria* (rhizomes de Lépidophytes), qui témoignent du fait qu'il est un véritable *paléosol de végétation,* trace de l'existence d'une forêt houillère vivante et partiellement immergée sous une lame d'eau d'épaisseur variable, probablement de l'ordre de quelques décimètres. Dans de nombreux bassins européens, on peut trouver des centaines de sols de végétation se répétant sur des séries de sédiments de plusieurs milliers de mètres d'épaisseur. Il a donc existé un mécanisme d'enfoncement des plates-formes houillères qui a permis, dans un bassin à niveau d'eau toujours faible, l'accumulation des sédiments sur des milliers de mètres.

Ce mécanisme est la *subsidence*. Celle-ci, quelle qu'ait été sa vitesse, était constamment compensée par l'apport phytogène au moment de la formation des couches.

L'interruption du dépôt charbonneux par un apport stérile formant le toit est soit graduelle, avec parfois des récurrences d'apports végétaux dans le cas des faux-toits de schistes charbonneux, soit brutale, par arrivée d'un sédiment grossier, grès ou poudingue, capable de raviner le sommet du dépôt organique. Cependant, dans la majeure partie des cas, le toit est schisteux et remarquable par l'*absence totale de radicelles.* C'est la preuve que la hauteur d'eau était suffisante pour que les végétaux ne pussent s'y développer.

Tout démontre que la vitesse de subsidence a été variable : rapide, régulière et de grande extension avec, par exemple, présence d'un niveau marin ou, au contraire, lente avec retour en arrière et balancement entre les dépôts inorganiques puis organiques. En fait, on peut définir une *vitesse critique de subsidence* (A. Bouroz, 1958) à laquelle le dépôt torfogène augmente d'une quantité égale à l'enfoncement de l'aire de dépôt. Au-dessous de cette vitesse, l'accumulation végétale compense constamment l'enfoncement, et la formation d'intercalaires à radicelles et de sols de végétation est permanente. Au-dessus de cette vitesse, l'enfoncement l'emporte sur le remplissage et le marécage tourbeux est totalement noyé, le sol de végétation étant alors rapidement remplacé par un toit stérile franc. La subsidence était donc un phénomène continu pouvant atteindre, dans certains cas, une très grande ampleur.

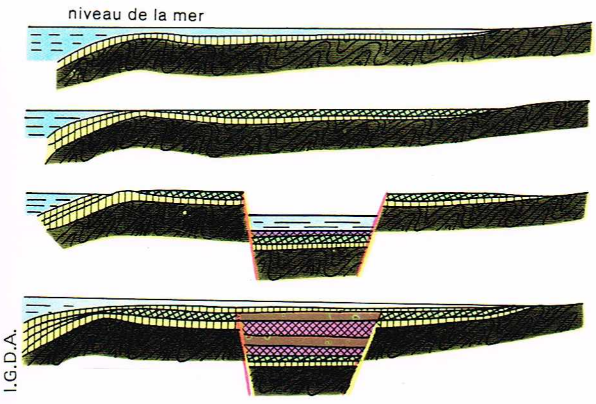

Types de bassins houillers

Selon les caractères de la subsidence, Prigorovsky (1936) a proposé une classification des bassins houillers.

- Les *bassins géosynclinaux*. Ces bassins ont une grande importance économique et comptent en moyenne 17,8 · 10^6 t/km^2 (Stepanov), la Ruhr constituant un maximum avec 53 · 10^6 t/km^2. Le rapport charbon/stériles y atteint la valeur de 5 %. Ils sont caractérisés par des mouvements de subsidence amples et par une grande extension latérale. Les séries y sont épaisses et peuvent dépasser 5 000 m ; les couches de charbon sont nombreuses et de grande étendue ; la houillification a pu y être notable. Cette catégorie a été subdivisée en :

— *gîtes synclinaux vrais,* ayant subi une tectonisation intense et une catagenèse poussée jusqu'au niveau des anthracites (Pottsville dans les Appalaches, le Briançonnais dans les Alpes) ;

— *les gîtes d'avant-fosse* de chaînes plissées, où ces caractères, tectonique et houillification, sont moins marqués tandis que l'importance économique est plus grande ;

— les *gîtes de subsidence mais non géosynclinaux,* comme le Kouznetz et le Donetz.

- Les *bassins de plate-forme.* Ils comportent en moyenne 1,31 · 10^6 t/km^2 ; il s'agit de dépôts non subsidents formés sur des plates-formes rigides, affectées seulement de mouvements de faible amplitude. Les couches sont peu nombreuses, peu épaisses, souvent discontinues, avec des marques importantes d'érosion, une faible houillification et un passage fréquent aux charbons schisteux et schistes charbonneux.

Des tentatives ont été faites pour calculer l'amplitude des mouvements descendants, puis ascendants par reprise de la tectonique, dans le cas de certains bassins houillers.

On a calculé ainsi que pour le bassin de la Ruhr la formation de la houille s'était produite à 3 000 m de profondeur maximale pendant une durée de 20 millions d'années au Westphalien (Karweil, 1956). L'enfoncement, d'après Krenow, se serait fait à raison de 0,25 mm par an ; la profondeur de 3 000 m aurait donc été atteinte en 12 millions d'années. Ensuite, le bassin se serait relevé de 1 500 m en 1 million d'années, à raison de 1,5 mm par an à la fin du Carbonifère au cours de la phase hercynienne.

Des mouvements d'une telle amplitude retentissent nécessairement sur les bords rigides du bassin qui sont affectés de grandes failles parallèles à l'axe longitudinal du dépôt, permettant à la partie plus centrale de la cuvette sédimentaire de s'enfoncer.

Rythmes et accidents de sédimentation

On observe dans la série sédimentaire houillère une certaine répétition des mêmes phénomènes, une alternance répétée des mêmes séquences : — grès, schistes, charbons — grès, schistes, charbons — etc., d'où la notion de *rythme sédimentaire,* de *cycle,* ou *cyclothème.*

Le cyclothème est régi par les mouvements successifs, transgressifs puis régressifs, du niveau de l'eau sur le continent avec dépôt corrélatif de la charge détritique transportée par les eaux. Si les mouvements tectoniques de surélévation de la partie émergée continentale sont importants, l'érosion sera plus violente et la charge détritique sera grossière et massive ; des grès grossiers, poudingues et conglomérats se déposeront brutalement, érodant parfois le sommet des épisodes précédents. Si, au contraire, les mouvements sont de faible amplitude, on aura des séquences de dépôts schisteux et de grès fins.

Si l'on observe une série de bancs de grès successifs, même séparés par des sédiments intercalaires, schistes et charbons, on observe une parenté sédimentaire entre les bases des bancs de grès qui semblent dériver les unes des autres par granoclassement mieux réalisé et usure plus poussée des éléments constitutifs. La roche mère dont proviennent ces éléments par transport détritique semble de plus en plus érodée et altérée (P. Dollé, 1970).

Dans les schistes, le rythme est marqué par des lits de quartz : séquence détritique, puis des lits d'argile et de mica, séquence de repos.

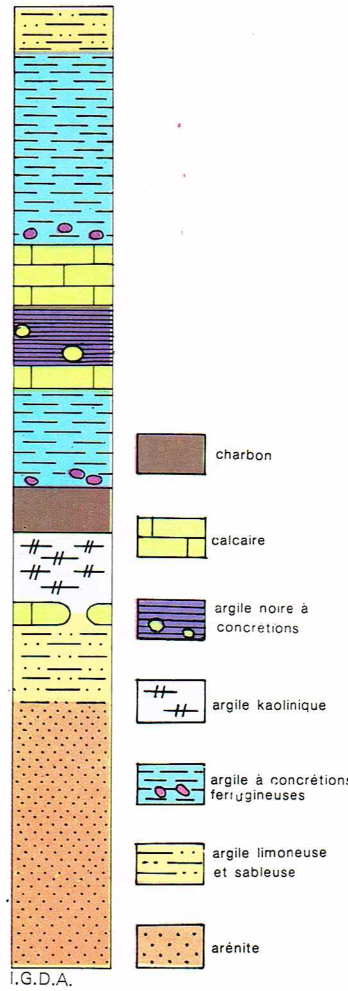

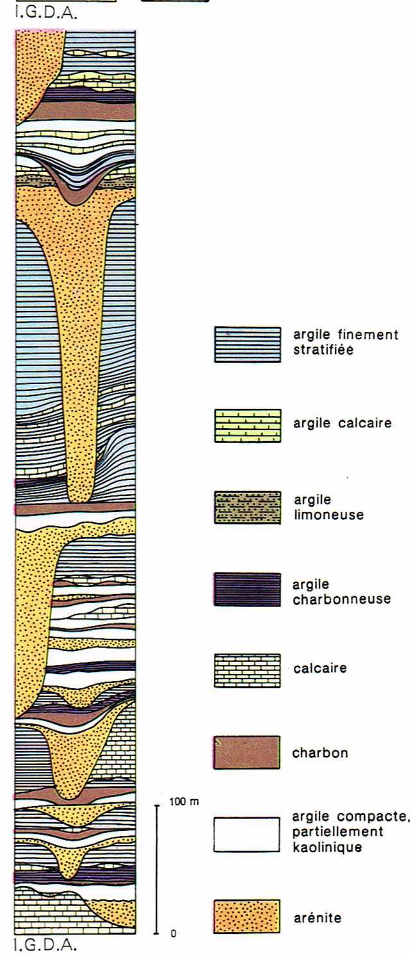

POSITION SYSTEMATIQUE DES ESPECES VEGETALES A L'ORIGINE DES DEPOTS HOUILLERS DU CARBONIFERE
d'après P. Laveine

Groupe	Embranchement	Ordre	
Cryptogames vasculaires (Ptéridophytes)	Lycophytes (Lycopsida)	Lycopodiales	F A l h
		Sélaginellales	F A H h
		Pleuroméiales (incl. Isoétacées)	F A H a h
		Lépidophytales { Lépidodendracées, Sigillariacées, Bothrodendracées }	F H a
	Arthrophytes (Sphenopsida)	Protoarticulatales	F l h
		Equisétales (incl. Calamariacées)	F A H l a h
		Sphénophyllales	F l h
	Filicophytes (Filicopsida)	Coenoptéridales (incl. Cladoxylacées)	F H l a h
		Marattiales (fougères Eusporangiées)	F A l a
		Filicales } (fougères Leptosporangiées)	F A l h
		Hydroptéridales } (fougères Leptosporangiées)	F A H h
Préphanérogames ou Préspermaphytes	Ptéridospermaphytes	Lyginoptéridales } Fougères à graines	F H a h
		Médullosales } Fougères à graines	
		Caytoniales	F H
	Cycadophytes	Cycadales	F A H a
		Nilssoniales	F H a
	Cordaïtophytes	Cordaïtales	F H a
	Gingkophytes	Gingkoales	F A H a
Phanéro-games pro-parte (Spermaphytes)	Bennettitophytes	Bennettitales (Gymnospermes s.s.)	F H a
	Coniférophytes	Lebachiales (Gymnospermes s.s.)	F a H
		Pinales (Gymnospermes s.s.)	F A a H
		Cupressales (Gymnospermes s.s.)	F A a H
		Podocarpales (Gymnospermes s.s.)	F A a H
		Araucariales (Gymnospermes s.s.)	F A a H
		Taxales (Gymnospermes s.s.)	F A a H
	Chlamydo-spermaphytes	Ephédrales	F A H
		Gnétales	A H
		Welwitschiales	F A H

F : fossile — A : actuel — H : hétérosporé — l : isosporé — a : arborescent — h : herbacé

▲ *Tableau de la position systématique des espèces végétales à l'origine des dépôts houillers du Carbonifère.*

▶ *Page ci-contre, en bas corrélations entre les divers bassins houillers de l'Europe occidentale du Nord par niveaux marins et tonsteins* (Lexique international de pétrographie des charbons, *C.N.R.S., Paris, éd. 1963 et 1971.*)

Si l'on considère une séquence deltaïque normale, complète, comportant une invasion marine puis une immersion lente se terminant par un dépôt phytogène avec formation de couche de houille, on aboutit, par exemple, à un cycle de 20-35 m comprenant la succession suivante :

Succession	Phase
calcaire marin fossile, schiste calcaire, schiste noir à fossiles marins	immersion
schiste gréseux, grès	remplissage détritique
sol de végétation, charbon	émersion

Dans le cas d'une série détritique s'affinant régulièrement pour se terminer par une séquence phytogène et chimique, on a, de bas en haut, la série suivante :

1 - conglomérat
2 - grès grossier
3 - grès moyen
4 - grès fin
5 - schiste grossier
6 - schiste fin
7 - charbons
8 - carbonates

Les rythmes sédimentaires comportent de nombreuses anomalies et exceptions. Ainsi, la houille peut passer latéralement à des stériles : c'est la *schistification*. La veine peut aussi avoir été, en partie ou totalement, enlevée par des cours d'eau sur une certaine surface puis remblayée par des sables : c'est le *wash-out*. Certaines couches, plus ou moins épaisses, se subdivisent en sous-couches par apparition d'intercalaires stériles : c'est la *dichotomie*.

Plus simplement, certaines veines présentent latéralement des variations d'épaisseur parfois considérables et non liées à l'érosion. Il s'agit de *phénomènes de compaction différentielle*. En effet, le dépôt organique est fortement compressible (ainsi, 10 m de tourbe humique donneront moins de 1 m de houille) tandis que les dépôts de schistes le sont moins et ceux de grès, notamment, ne sont pas compressibles du tout. D'où une distorsion au cours du temps entre des dépôts, qui à l'origine avaient la même épaisseur. Rappelons que la compaction étant liée à l'expulsion d'eau et à la baisse de porosité, il est compréhensible qu'elle touche plus fortement les matières végétales et les argiles que les accumulations de grains de quartz incompressibles qui constituent les grès.

Associations végétales et marqueurs botaniques

De tout temps, la flore bien conservée, retrouvée dans les schistes fins des toits ou plus rarement au mur des veines de houille (et non dans le charbon lui-même, sauf dans certaines concrétions : les coal-balls), a servi de repère paléobotanique dans les bassins houillers et de moyen pour établir une chronologie dans la succession des dépôts. Elle a permis d'effectuer des corrélations inter-bassins et d'élaborer ce qu'on qualifierait aujourd'hui de « biostratigraphie ».

Notons, à ce propos, que les plantes ayant été trouvées à l'état de fragments dispersés, chacun de ceux-ci est parfois traité comme un groupe paléontologique distinct; la reconstitution totale d'une plante complète n'est en effet pas toujours possible, surtout en ce qui concerne la liaison entre le sporophyte et le gamétophyte (spores).

Ainsi, une même plante peut servir en paléobotanique :
— par ses troncs et ses branches *(Lepidodendron, Lepidophloios)* ;
— par ses troncs décortiqués *(Knorria, Aspidiaria)* ;
— par ses rhizophores (racines) [*Stigmaria* et *Stigmariopsis*] ;
— par ses feuilles *(Lepidophyllum)* ;
— par ses strobiles *(Lepidostrobus)* ;
— par ses pinnules et ses frondes ;
— par ses microspores et ses mégaspores.

La flore houillère a été formée essentiellement par les **Cryptogames vasculaires** comprenant des formes arborescentes uniquement fossiles, comme les *Lépidophytales* (avec principalement les Lépidodendracées et Sigillariacées pouvant atteindre des hauteurs de 20 à 30 m, caractérisées par une vitesse de croissance très rapide et une lignification peu poussée des tissus), et des formes herbacées, à la fois fossiles et actuelles, comme les *Sélaginellales* et les *Lycopodiales*. A côté de ces groupes, on peut citer celui des *Équisétales* qui comprend des formes exclusivement fossiles comme les Calamariacées arborescentes ou des formes à la fois fossiles et actuelles comme les Équisétacées, et le groupe des *Sphénophyllales* aux formes exclusivement fossiles. Signalons également l'ensemble des Filicophytes, avec les *Filicales* comprenant de nombreux types de fougères.

Citons aussi l'ensemble des **Préphanérogames** avec les *Cordaïtales*, formes arborescentes uniquement fossiles, et les *Ptéridospermaphytes*, ou fougères à graines.

Enfin, l'ensemble des **Phanérogames** est représenté à la fin du Carbonifère par les Cycadophytes *(Cycadales)*, les Chlamydospermaphytes *(Gnétales)* et les premières Gymnospermes *(Coniférales)*.

Parmi tous ces végétaux, certains étaient *isosporés* et ne fournissaient que des microspores ou isospores (Lycopodiacées et Sphénophyllées), alors que d'autres étaient *hétérosporés*, et fournissaient des mégaspores et des microspores (Sélaginellacées et Calamariacées). Ces spores sont retrouvées en grande abondance dans la masse même du charbon (lits de durite et de clarite) ; on peut les isoler par macération chimique, puis les monter entre lame et lamelle pour observation et comptage.

Au Carbonifère, ce sont les *formes « trilètes »* qui sont les plus abondantes; les genres les plus fréquents sont *Densosporites, Lycospora, Calamospora*, etc. Certaines

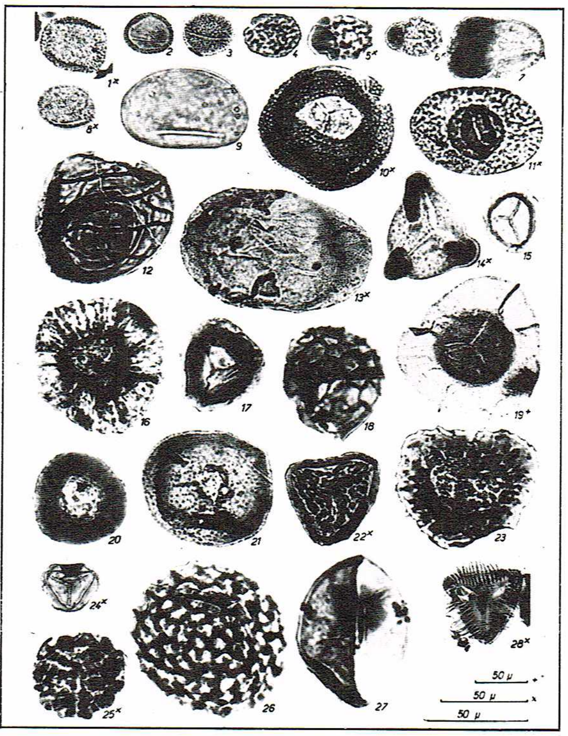

B. Alpern

formes « monolètes » ont cependant pris une grande extension au Westphalien supérieur puis au Stéphanien avec des formes d'abord lisses *(Laevigatosporites)* devenant ensuite ornementées *(Punctatosporites* et *Thymospora).*

Ce sont cependant les restes de fougères, pinnules et frondes qui ont servi principalement de base à la paléobotanique, pour la stratigraphie des étages du Carbonifère avec des genres purement morphographiques définis par la forme des folioles, leur nervuration, leur mode de fixation sur l'axe et leurs interrelations. Parmi les groupes les plus connus, on peut citer : les Sphénoptéridés, les Pécoptéridés, les Aléthoptéridés et les Neuroptéridés.

Dans les bassins paraliques, *les niveaux marins* marquant l'invasion périodique de la mer dans toute la lagune constituent d'excellents niveaux repères pour les corrélations intra- et inter-bassins. Ainsi le niveau marin de Rimbert dans le bassin du Nord-Pas-de-Calais est l'équivalent du niveau Petit-Buisson en Belgique et Aegir dans la Ruhr ; il est caractérisé par *Anthracoceras aegyranum* et constitue la limite entre le Westphalien B et le Westphalien C. De même, le niveau marin de Poissonnière (France), ou Quaregnon (Belgique), ou Katharina (Allemagne occidentale) à *Glyphioceras katharinae,* constitue la limite entre le Westphalien A et le Westphalien B.

Les marqueurs pétrographiques

L'évolution biologique des morpho-espèces de la paléobotanique n'est pas toujours suffisante pour permettre des corrélations précises entre des bassins éloignés évoluant dans des conditions paléogéographiques différentes. Aussi la recherche de *repères* véritablement *isochrones* a-t-elle constitué pour beaucoup de stratigraphes un but essentiel.

Celui-ci paraît avoir été atteint avec la découverte des *tonsteins,* dont l'origine volcanique — au moins pour certains d'entre eux — a été démontrée (A. Bouroz) sur la base de caractères minéralogiques spécifiques (quartz aciculaire, etc.). Les tonsteins sont, par ailleurs, des roches argileuses très fines, souvent claires (gores du Massif central), à kaolinite vermiculaire, bien visibles dans certains lits charbonneux. Le fait qu'il s'agirait de pluies de cendres volcaniques expliquerait leur grande extension latérale et leur valeur pour les corrélations. Dans le Nord-Pas-de-Calais, de nombreux tonsteins ont été décrits et servent à délimiter certains faisceaux ; ainsi, le faisceau d'Ernestine est compris entre le tonstein Talence et le tonstein Patrice. En Lorraine, des dizaines de tonsteins ont été décrits ; d'autres, dans les bassins du Stéphanien du Massif central, ont permis d'établir des corrélations interrégionales presque impossibles à déterminer par d'autres méthodes.

Les réserves de charbon

Réserves brutes

La notion de réserve a beaucoup varié et a été l'objet de nombreuses discussions. Il ne suffit pas de préciser quel est le total du potentiel géologiquement *en place* mais, en outre, un certain nombre de données techniques et économiques sont à prendre en considération. On passe ainsi de la notion de *ressources potentielles* à celle de *réserves.* En effet, l'épaisseur de la couche et sa situation en profondeur jouent un rôle important dans la définition des réserves dites « récupérables ».

◀ ***Principales espèces de microspores du Carbonifère (Alpern ; Streel, 1970) ; pour chaque espèce sont donnés le nom, le bassin et l'étage :***
1. Spinosporites spinosus, *Loire, Autuno-Stéphanien ;*
2. Speciososporites minutus, *Decize, Stéphanien moyen ;*
3. Punctatosporites rotundus, *L'Aumance, Stéphanien moyen ;*
4. Thymospora obscura, *Lorraine, Stéphanien inférieur ;*
5. Torispora perverrucosa, *Lorraine, Stéphanien inférieur ;*
6. Torispora verrucosa, *Lorraine, Stéphanien inférieur ;*
7. Torispora securis, *Lorraine, Westphalien C-D ;*
8. Punctatosporites granifer, *Lorraine, Westphalien C-D ;*
9. Laevigatosporites vulgaris, *Lorraine, Stéphanien inférieur ;*
10. Vestispora fenestrata, *Lorraine, Stéphanien inférieur ;*
11. Florinites junior, *Blanzy, Stéphanien moyen ;*
12. Vestispora costata, *Lorraine, Westphalien B ;*
13. Schulzospora ocellata, *Haute Silésie, Westphalien B ;*
14. Triquitrites CF pulvinatus, *Lorraine, Westphalien C-D ;*
15. Lycospora pellucida, *Lorraine, Stéphanien infér. ;*
16. Radiizonates aligerens, *Durham, Westphalien A ;*
17. Cingulizonates loricatus, *Shropshire, Westphalien A ;*
18. Dictyotriletes bireticulatus, *Lorraine, Westphalien B ;*
19. Endosporites globiformis, *Jura, Stéphanien moyen ;*
20. Densosporites pseudoannulatus, *West Fife, Namurien A ;*
21. Crassispora kosankei, *HBNPC, Auchel, Westphalien B-C ;*
22. Callisporites nux, *Group of Fife, Namurien A ;*
23. Cristatisporites indignabundus, *Blanzy, Stéphanien moyen ;*
24. Rotaspora crenulata, *Northumberland, Viséen ;*
25. Grumosisporites verrucosus, *Group of Fife, Namurien A ;*
26. Convolutispora sp., *Lorraine, Westphalien B ;*
27. Calamospora sp., *Blanzy, Stéphanien moyen ;*
28. Reinschospora triangularis, *Northumberland, Viséen.*

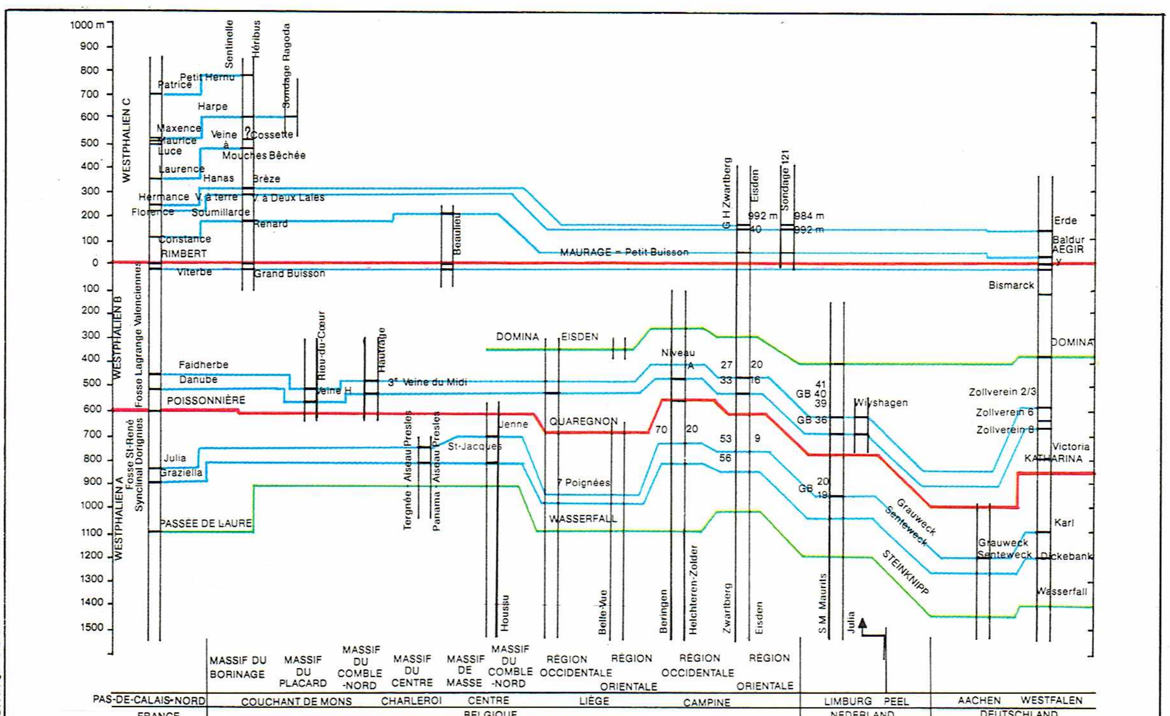

Richard Colin

Ainsi, la 4e Conférence mondiale de l'énergie (Londres, 1950) a décidé de ne pas compter comme réserves :

- pour les *lignites :*
  - — tout ce qui est à plus de 500 m ;
  - — entre 0 et 500 m, tout ce qui est inférieur à 30 cm ;
- pour les *houilles :*
  - — tout ce qui est à plus de 1 200 m ;
  - — entre 0 et 1 200 m, tout ce qui est inférieur à 30 cm.

A l'heure actuelle, les variations du prix de l'énergie, qui ont été considérables en 1974, jouent un rôle important dans la détermination de la notion et de la quantité de *réserves économiquement exploitables*. Par exemple, un charbon dont l'exploitation revient à 100 F la tonne fournit une énergie thermique à moins de 2 centimes la thermie. Si on plaçait la limite économique d'exploitabilité à ce niveau, en France, seules la Provence et une petite partie de la Lorraine seraient comptées dans les réserves ; à 2,5 centimes la thermie les réserves passeraient à 500 millions de tonnes ; à 4 centimes elles seraient de 1,5 milliard de tonnes, etc.

Cette référence au prix de la thermie montre également l'importance de la notion de *pouvoir calorifique* du charbon ; ainsi, il y a environ deux fois plus de calories dans un anthracite que dans un lignite ; on ne peut donc calculer correctement les réserves sans intégrer ce paramètre.

Par ailleurs, un même volume de charbon mis en évidence dans une formation géologique ne fournira pas nécessairement toujours le même poids de combustible. Il faut faire intervenir la *densité*, qui fluctue d'environ 1,28 pour les lignites à 1,50 pour les anthracites.

On devra également tenir compte, entre autres paramètres, de la bonne tenue des épontes qui permettra la mécanisation, de l'aptitude à un bon lavage (certaines cendres syngénétiques sont impossibles à éliminer), de la continuité des couches qui déterminera le volume des panneaux réguliers non tectonisés, etc. Enfin, la quantité de charbon reconnue par sondages n'est jamais intégralement récupérée et le taux de récupération est très variable d'un gisement à l'autre (il n'est souvent que de 50 %).

Signalons qu'il faut également parler des mêmes unités d'un pays à l'autre. C'est la tonne métrique de 1 000 kg qui, théoriquement, a cours, mais chez les auteurs anglo-saxons, de nombreux calculs sont donnés en tonnes courtes (short-ton = 907 kg).

La dernière Conférence mondiale sur l'énergie (Detroit, 1974) a établi le tableau suivant des réserves des principaux pays producteurs.

Tableau des réserves (1974)
en mégatonnes (10^6 tonnes)

Pays	Réserves récupérables	Réserves totales	Ressources totales (potentielles)
U.R.S.S.	136 600	273 200	5 713 600
Chine	80 000	300 000	1 000 000
Reste de l'Asie	17 549	40 479	108 053
États-Unis	181 781	363 562	2 924 503
Canada	5 537	9 034	108 777
Amérique latine	2 803	9 201	32 928
Europe	126 775	319 807	607 521
Afrique	15 628	30 291	58 844
Océanie	24 518	74 699	199 654
Total mondial	591 191	1 402 274	10 753 880

Ce tableau permet de constater que 90 % des ressources mondiales sont situées sur les territoires de l'U.R.S.S., des États-Unis et de la Chine (les évaluations relatives à ce pays sont encore incertaines). L'Europe ne vient qu'au 4e rang. En ce qui concerne plus particulièrement les pays européens, le classement par ressources s'établit de la façon suivante :

Pays	Réserves récupérables	Réserves totales	Ressources
1 Allemagne fédérale	39 571	99 520	286 150
2 Angleterre	3 871	98 877	162 814
3 Pologne	22 640	38 874	60 600
4 Finlande	4 290	33 000	33 000
5 Allemagne de l'Est	25 300	30 200	30 050
6 Yougoslavie	16 870	17 976	21 751
7 Tchécoslovaquie	6 363	13 774	21 430
8 Suède	30	9 460	9 490
9 Hongrie	1 675	3 350	6 400
10 Bulgarie	4 387	4 387	5 230
11 Pays-Bas	1 840	3 705	3 705
12 Espagne	1 643	2 202	3 562
13 Islande	—	2 000	2 000
14 Roumanie	1 150	—	1 960
15 Grèce	680	908	1 575
16 France	458	1 407	1 407

Ainsi, et quelles que soient les réserves que l'on puisse émettre sur cette classification pondérale qui ne tient pas compte des qualités respectives des charbons, la France n'arriverait qu'à la 16e place parmi les pays européens pour les ressources charbonnières. Si l'on examine plus dans le détail les données réelles des gisements, il est possible de dresser le tableau suivant pour quelques-uns des principaux pays producteurs du monde et d'Europe.

DÉTAIL DES RÉSERVES ET RESSOURCES PAR QUALITÉS DE CHARBONS DE CERTAINS PAYS DU MONDE.
(Conférence mondiale de l'Énergie, Detroit, 1974).

Pays	Année de Réf.	Rang	Réserves récupérables 10^6 t	Réserves récupérables 10^9 calories	Ressources totales épais.	Ressources totales prof	Ressources totales 10^6 t	Production
États-Unis	1972	AN	5 755	46 064	0,71	305	19 375	7 891
		BT	117 688	827 393	0,71	305	1 224 380	495 040
		SB	35 282	233 028	1,52	305	1 042 006	1 088
		LN	23 056	110 722	1,52	305	638 746	8 095
	Total		181 781	1 217 207			2 924 503	512 114
U.R.S.S.	1971	HC	82 900	431 080	0,60	1 000	3 993 300	461 500
		LC	53 700	155 730	0,80	430	1 720 300	179 500
	Total		136 600	586 810			5 713 600	641 000
Grande-Bretagne	1973	AN	69	522	0,61	1 219	6 035	3 353
		BT	3 802	26 614	0,61	1 219	156 779	135 737
	Total		3 871	27 166			162 814	139 090
Pologne	1967	HC	17 800	99 680	1,00	1 000	45 741	150 700
		LC	4 840	12 334	3,00	300	14 862	38 200
	Total		22 640	112 014			60 603	188 900
Allemagne de l'Ouest	1971	HC	30 000	210 000	0,60	1 500	230 300	102 470
	1972	BC	9 571	17 706	2,00	450	55 850	110 400
		P	900	1 800	2,00	12	900	400
	Total		40 471	229 506			287 050	213 270
Allemagne de l'Est	1956	HC	100	700	0,30.	1 200	50	1 198
	1966	BC	25 200	105 000	2,00	150	30 000	246 000
	Total		25 300	105 700			30 050	247 198
France	1973	HC	443	3 101	0,70	1 250	1 380	29 740
		BC	15	53	2,00	600	27	1 510
	Total		458	3 154			1 407	31 250
Total Mondial		AN	7 146	57 144			28 488	79 127
		BT	233 361	1 613 631			2 640 871	1 191 113
		SB	40 348	259 593			1 065 259	24 327
		HC	15 012	859 031			4 395 350	885 268
		BC	47 090	151 088			176 784	403 550
		LN	44 620	166 929			678 660	56 994
		LC	68 614	203 181			1 768 472	365 133
	Total		591 191	3 310 597			10 753 884	3 005 512

AN : anthracite — BC : brown coal — BT : bituminous coal — LN : lignite — SB : subbituminous coal — P : peat (tourbe) — HC : high calorific (7 000 cal/g) — LC : low calorific (3 000 cal/g)

▲ *Tableau du détail des réserves et ressources par qualité de charbons de certains pays du monde.*

▼ *Tableau des réserves des houillères françaises au 1er janvier 1974 (en Mt) établi par les Charbonnages de France.*

RÉSERVES DES HOUILLÈRES FRANÇAISES au 1-1-1974
(en Mt) Document CdF

BASSINS	Réserves techniquement exploitables	Réserves planifiables — Ancienne évaluation	Réserves planifiables — Nouvelle évaluation
Nord-Pas-de-Calais	460	67	80-120
Lorraine	800	331	350-355
Centre-Midi	110	62	70-90
Fond	102	58	63-83
Découvertes	8	4	7
Total CdF	1370	460	500-565

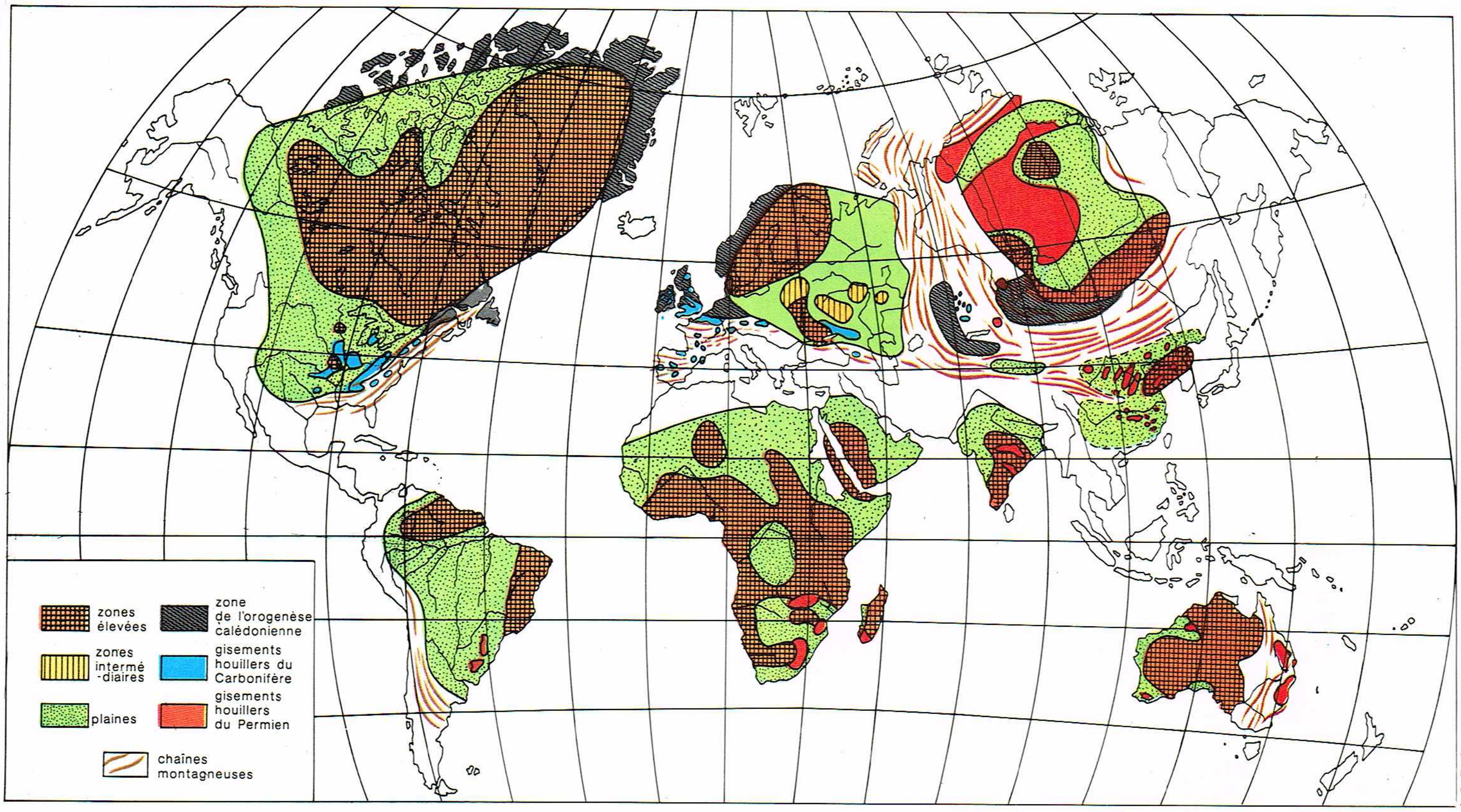

On remarque à propos du tableau page ci-contre en haut :

— que les épaisseurs moyennes pour les houilles vont de 0,60 à 1,00 m selon les pays,

— que celles des lignites vont de 1,50 à 3,00 m,

— que la profondeur maximale d'exploitation varie de 305 m aux États-Unis à 1 500 m en Allemagne fédérale pour les houilles et de 300 à 450 m pour les lignites.

Pour la France, le tableau page ci-contre, en bas, a été établi par les Charbonnages de France à partir des considérations de rentabilité économique dont certaines ont été évoquées précédemment.

Réserves par étages stratigraphiques

Cette manière d'envisager les réserves est géologiquement plus intéressante que la précédente car elle permet de mettre en évidence d'importantes discontinuités dans le volume des dépôts et l'existence de périodes d'accumulation privilégiées.

Ces calculs, qui sont principalement le fait de l'école russe (Stépanov, 1936), sont un peu anciens mais ils sont intéressants à signaler.

Si l'on dresse le tableau des tonnages disponibles par million d'années ramenés à la tonne-équivalent tourbe, on obtient ce qui suit :

Étage	Durée 10^6 années	Orogenèse	Tonnages (équivalent tourbe) 10^9 t
Quaternaire	2		69,5
Tertiaire + Crétacé terminal	58	alpine ↕	76,2
Crétacé	61	méditer-ranéenne	1,7
Jurassique	30	↕	13,7
Trias	26	hercynienne	2,4
Permien	35	↓	52,7
Carbonifère supérieur et moyen	45		54,5
Carbonifère inférieur	35		3,45
Dévonien	42		faibles
Silurien	65		négligeables

◀ ***Tableau des tonnages disponibles par million d'années ramenés à la tonne - équivalent tourbe.***

Ainsi, le phénomène de l'accumulation végétale fossilisée, loin d'être exclusif à l'époque dite Carbonifère pour des raisons purement historiques, connaîtrait son maximum au Tertiaire et se poursuivrait encore actuellement.

Les tableaux de Stépanov mettent en évidence plusieurs maximums correspondant aux phases orogéniques (en 10^9 t/an).

— Quaternaire (69) et Tertiaire + Crétacé terminal (76) ;

— Jurassique (13,7) ;

— Carbonifère (54) et Permien (52).

Les minimums se trouvent au Trias et au Crétacé supérieur. Les faibles valeurs du Carbonifère inférieur et surtout celles du Dévonien doivent être liées au fait qu'à cette époque l'explosion des plantes supérieures sur les continents ne s'était pas encore produite.

Au Dévonien, on ne connaît que de rares gisements (0,002 % des réserves mondiales), tous situés dans l'hémisphère boréal : île aux Ours (Spitzberg), Ellesmere (Canada) et chaîne de Timan (U.R.S.S.).

Au Carbonifère, les gisements se trouvent dans toutes les parties du monde, surtout dans l'hémisphère boréal ; l'essentiel se trouve concentré dans l'étage Westphalien (22 %), qui renferme les gisements les mieux connus d'Europe, d'Amérique du Nord et d'U.R.S.S.

Au Permien, les bassins sont plutôt concentrés en Asie et dans l'hémisphère austral sur le continent ancien de Gondwana, avec les gisements de l'Inde, d'Australie, d'Afrique australe et d'Amérique du Sud.

Les charbons du Jurassique (4,03 %) se retrouvent également surtout en Asie : Iran, Kazakhstan, Afghanistan, Oural, Kouznetz, Iénisséi, Irkout, Léna, Sibérie du Nord-Est, etc.

Au Tertiaire (54,4 %), on trouve les plus importantes accumulations du monde ; elles sont situées en Amérique du Nord (52 %) : aux États-Unis, au Canada et en Alaska, et en Amérique du Sud (0,4 %) : au Chili, en Colombie, au Venezuela.

En résumé, on compte stratigraphiquement sept centres majeurs d'accumulation (Barrabé-Feys, 1965) :

Carbonifère supérieur
1 - Amérique du Nord 13 %
2 - Europe de l'Ouest 9 %
Permien
3 - Sibérie 11,7 %
4 - Chine 2 %
5 - Australie 1,7 %
Jurassique
6 - Sibérie 2,47 %
Crétacé supérieur et Tertiaire
7 - Amérique du Nord 52 %

Notons toutefois que les calculs de Stépanov ne tenaient compte que des 7 736 milliards de tonnes recensées à cette époque contre 10 753 actuellement.

▲ ***Distribution géographique des gisements houillers du Carbonifère (en bleu) et du Permien (en rouge) d'après Strakhov.***

Dégradation des propriétés cokéfiantes de deux charbons				
Types de charbon	Dilatomètre 2 °C/minute			
	Témoin	Durée du stockage		
		3 mois	11 mois	14 mois
Blumenthal MV* = 20,8 %	91	36	16	15
Pocahontas MV* = 19,3 %	142	91	78	40

*MV : matières volatiles

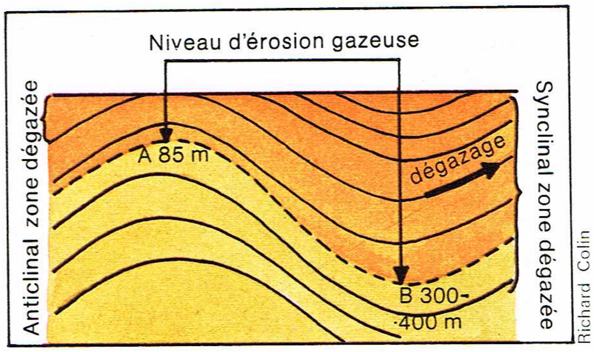

▲ *A gauche, tableau montrant la dégradation des propriétés cokéfiantes mise en évidence par le dilatomètre (Alpern et Maume, 1969). A droite, représentation schématique de la répartition du gaz dans les zones plissées (région de Lisichansk-Donetz) [B. Alpern, 1969].*

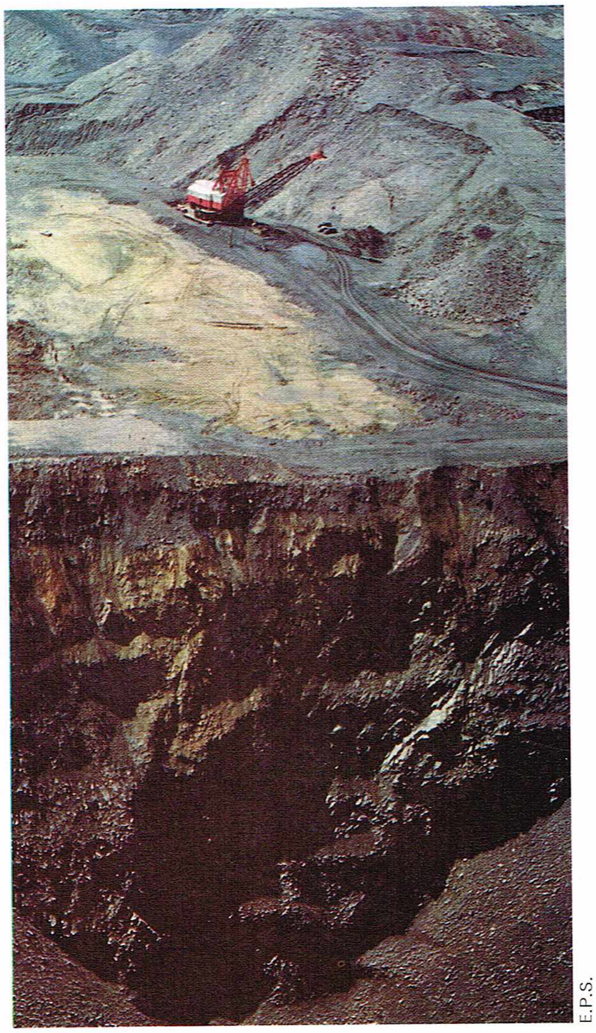

▶ *Mine de charbon à ciel ouvert de Pennsylvanie (U. S. A.) montrant le phénomène d'altération météorique.*

▼ *Aspect microscopique d'un grain de charbon oxydé (lumière réfléchie, immersion d'huile, G = 70) [Alpern et Maume, 1969].*

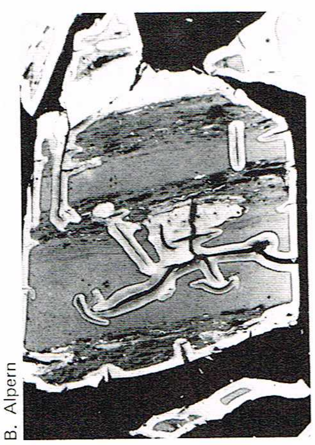

Altération météorique des charbons

Les affleurements de charbon non rafraîchis présentent, à l'état naturel, un aspect très différent du charbon venant d'être extrait. La surface est terne, pulvérulente, grise ou blanchâtre au lieu d'être noire, brillante, massive et cohérente; en outre, l'épaisseur apparente des veines est sensiblement réduite. Les échantillons qui seraient prélevés sur de tels affleurements ne sont ni physiquement ni chimiquement représentatifs du charbon frais tel qu'il existe en profondeur.

L'oxydation et l'altération météorique se traduisent sur le plan physique par la formation de nombreuses fissures de dessiccation, expliquant l'apparition du faciès terne pulvérulent et la dégradation poussée des propriétés mécaniques. Ce même phénomène se produit également lors de la conservation prolongée sur parc de stocks de charbons peu évolués (lignites) contenant initialement une proportion d'eau assez élevée. Les charbons plus évolués et surtout les anthracites résistent mieux à cette dégradation.

Optiquement, l'oxydation se détecte par un taux de fissures plus élevé que la normale et par l'apparition, le long de ces fissures et sur la périphérie des grains, de zones d'oxydation durcies, donc en relief, de réflectance plus élevée que le centre non altéré des particules, et de largeur constante.

Chimiquement, l'altération météorique se traduit par une variation parfois sensible de la composition élémentaire. Même pour un charbon très évolué, comme le charbon anthraciteux du bassin de Messeix (Massif central), les matières volatiles, qui ont un taux de 14 % sur un échantillon prélevé à 3,78 m de profondeur, augmentent jusqu'à 29 % en surface. Sur une telle base, le charbon aurait été enregistré comme charbon gras et non comme anthraciteux. Par contre, la réflectance, si elle est établie sur le centre non altéré des particules, permet une estimation correcte du degré d'évolution aussi bien en surface ($1{,}94 \pm 0{,}18$) qu'en profondeur ($2{,}09 \pm 0{,}09$).

C'est cependant pour les charbons cokéfiants, surtout ceux à haute teneur en matières volatiles (de type lorrain), que le problème de l'oxydation météorique revêt la plus grande importance. En effet, du fait de la création de cokeries portuaires basées sur l'importation, le temps qui s'écoule entre la sortie de la mine et l'enfournement s'est, en moyenne, considérablement allongé : il peut atteindre plusieurs mois lorsque, en plus du stockage au départ puis à l'arrivée, il faut ajouter le temps de transport par bateau.

La dégradation des propriétés cokéfiantes est particulièrement mise en évidence par le dilatomètre. Nous donnons ci-dessus à gauche un exemple de deux charbons à coke classiques d'excellente qualité.

Pour les charbons lorrains, la dégradation est encore plus sensible. Ainsi, pour un charbon gras A (Wendel) la valeur donnée par le dilatomètre s'abaisse de 96 à 48 en 6 mois, mais une baisse déjà sensible se produit en 1 mois (88).

Le contact avec l'atmosphère ne comporte cependant pas que des aspects négatifs. Ainsi, le gaz (CH_4 et CO_2), produit en quantité par le charbon au cours de toute son évolution géologique et dangereux pour le mineur lorsqu'il est piégé, se dilue et s'échappe dans l'atmosphère aux affleurements et même jusqu'à une certaine profondeur dans les bassins lorsque la position des couches est favorable : c'est le cas des synclinaux ou des couches pentées intersectant la surface topographique; le gaz peut alors s'échapper jusqu'à des profondeurs de 300 m à 400 m dans le gisement (B. Alpern, 1967).

Mentionnons, enfin, un dernier aspect relatif au contact charbon-air atmosphérique : celui des *inflammations spontanées.* Elles se produisent aussi bien dans certaines mines que sur les terrils, où elles se remarquent par des fumées et la formation de croûtes blanchâtres. Cette auto-inflammation serait principalement due à l'oxydation du charbon et à celle des pyrites syngénétiques finement dispersées dans la vitrinite. La formation de composés peroxydés est, en effet, exothermique et si la chaleur n'est pas évacuée, le processus devient autogène. Par ailleurs, la transformation en sulfates des sulfures pyritiques est fortement exothermique aussi bien par voie sèche :

$$FeS_2 + 3O_2 \rightarrow FeSO_4 + SO_2 + 250\ \text{kcal},$$

que par voie humide :

$$2FeS_2 + 7O_2 + 2H_2O \rightarrow 2FeSO_4 + 2H_2SO_4 + 671\ \text{kcal}.$$

Dans ces processus, il est très probable que l'activité bactérienne joue un rôle non négligeable.

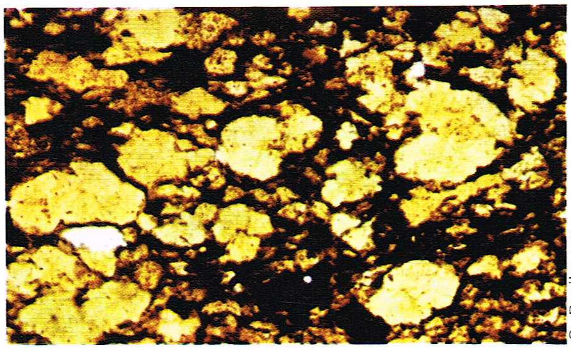

C. Bevilacqua

C. Bevilacqua

Cours B. Alpern

Les charbons sapropéliques et les schistes bitumineux

Les charbons sapropéliques

Nous avons vu que les charbons sapropéliques et les schistes bitumineux contiennent une matière organique formée d'Algues microscopiques (Botryococcacées, Tasmanacées, etc.) ainsi que d'autres micro-organismes et de restes d'animaux supérieurs (Poissons, Crustacés).

C'est H. Potonié qui, en 1903, a nommé *sapropèle* une gelée d'Algue de couleur brune atteignant 17 m d'épaisseur dans un petit lac près de Stettin (Pologne). La différence avec les charbons humiques est l'absence de stratification visible à l'œil nu, due à l'absence de lits importants de vitrinite et de grandes lentilles de fusinite. Lorsque les charbons d'Algues sont purs et peu évolués (type kuckersite), ils sont de couleur beige, tandis que les lignites sont brun-rouge.

Dans les *cannel-coals,* le ciment est surtout formé de collinite ; en plus des Algues, on y trouve de l'inertodétrinite, de la micrinite et des microspores, en éléments classés de granulométrie comparable.

Dans les *bogheads* (littéralement, tête de marécage), le ciment est surtout argileux.

Le caractère commun des charbons sapropéliques est leur grain fin, leur compacité, leur cassure conchoïdale. Chimiquement, leur teneur élevée en matières volatiles (souvent plus de 50 %), et en hydrogène (8 à 10 %), leur confère une combustion aisée avec production de longues flammes (cannel-coal vient de l'expression anglaise « candle-coal » = charbon de chandelle). Enfin, ils se caractérisent par leur capacité de fournir des hydrocarbures par distillation.

Les charbons du type sapropélique ont, en général, reçu des noms locaux. Les principales variétés sont :

— La *torbanite,* de couleur brun-noir, facile à découper en lamelles, est exploitée à Torban Hill, non loin de la localité de Boghead près de Bathgate (Écosse). C'est un exemple classique et une localité de référence pour ce type de charbon, qui renferme à la fois des Botryococcacées et des spores. Le gisement, qui couvre une superficie

▲ A gauche, en haut,* boghead *avec Algues jaunes* (Botryococcus) *dans un ciment argilo-gréseux opaque (lame mince ; G = 150). Fife (Écosse).

A gauche, en bas,* cannel-coal *en section transverse avec microspores (jaunes),* micrinite *et inertodétrinite (noire) dans un ciment rouge de vitrinite (lame mince ; G = 180). Ayrshire (Écosse).

Ci-dessus,* schistes bitumineux, *formation d'Irati, Permien ; carrière pilote de São Mateus do Sul (Brésil).

de 200 km², se trouve sur la bordure méridionale du Firth of Forth. Il était déjà exploité en 1875 à raison de 1,7 million de tonnes par an. Les couches, de 1,25 à 5 m d'épaisseur, étaient extraites par galeries inclinées et puits verticaux. Le rendement atteignait 72 à 180 litres d'huile par tonne de schiste pyrolysé (raffinerie et procédé Pumpherston).

— La *kuckersite* se trouve en Estonie, au sud-ouest de Leningrad, dans des couches de l'Ordovicien moyen affleurant le long de la côte du golfe de Finlande, sur une superficie de 3 600 km². Les réserves sont élevées (estimées à 21 milliards de tonnes en 1971) et font l'objet d'une exploitation industrielle. La kuckersite contient 40 % de matières organiques, dont 80 % sont volatiles par pyrolyse. Par pyrogénation vers 500 °C, les 2/3 environ de la substance organique se transforment en huile de schiste à raison de 200 l/t traitée. L'exploitation, d'abord souterraine par chambres et piliers, se fait maintenant pour 37 % à ciel ouvert. Une partie de la kuckersite, qui servait initialement à alimenter en gaz de ville Leningrad et Tallinn (Reval), est utilisée directement dans les centrales thermiques du fait de son pouvoir calorifique relativement élevé : 3 000 cal/g.

— La *coorongite* vient des rives des lagunes du détroit de Murray en Australie. Le produit, dont l'aspect rappelle celui du caoutchouc, se présente en couches de couleur brun-noir, inférieures à 30 cm. La coorongite s'est formée à partir des dépôts annuels successifs de masses d'Algues desséchées, mélangées à des débris organiques et minéraux divers formant des amas élastiques verdâtres devenant brun foncé par vieillissement. Ces Algues, nommées par Thlessen *Elaeophyton coorongina,* sont en réalité des *Botryococcus*. La coorongite est fusible; elle brûle facilement et donne par distillation une proportion élevée d'hydrocarbures.

— La *n'hangellite* est une variété de coorongite qui se dépose en bordure du lac N'Hangella (Est africain).

— Le *dysodile* est un charbon sapropélique très inflammable et malodorant qui se trouve en lamelles fines, flexibles et élastiques.

— La *tasmanite* est une variété brun rougeâtre de schiste bitumineux contenant des spores et des Algues du groupe des Tasmanacées. Ces Algues sont formées d'une coque de diamètre souvent supérieur à plusieurs millimètres, à membrane épaisse traversée par de fins canaux radiaux, et contenant des spores à double flagelle généralement non conservées. La tasmanite se trouve en Tasmanie (Australie); elle est d'âge permien.

Il existe encore de nombreux noms locaux de bogheads, notamment en U.R.S.S. : l'*olénikite* (rivière Léna), la *balkhashite* (lac Balkhask), la *cheremchite* (district de Cheremchovo, Sibérie), et au Brésil : la *marahuite* (Marahu, État de Bahia). Leur composition est similaire à celle des principaux types déjà cités.

La constitution microscopique des bogheads a d'abord été étudiée par Bertrand et Renault, qui ont décrit, en 1892, les Algues d'Autun sous le nom de *Pila* et celles d'Australie sous le nom de *Reinschia*. Nous avons vu que ces Algues permiennes ont été assimilées postérieurement (Zalessky, 1913) aux Algues actuelles, *Botryococcus brauni*. C'est ensuite Paul Bertrand qui, en 1930, a repris la question à partir du gisement d'Autun et défini le boghead comme un mélange de gélose (cellulose) et d'huile. Les Algues vivent en colonie; elles possèdent une structure rayonnée avec des cellules sécrétrices d'huile, ce qui leur permet de flotter en surface. A Autun, P. Bertrand a compté 166 lits d'Algues sur 24 mm de boghead compact.

Les schistes bitumineux

Ce groupe de roches combustibles a été évoqué plusieurs fois dans les chapitres précédents; ils ne se distinguent des charbons sapropéliques que par une proportion moindre de matière organique et non par une nature fondamentalement différente de celle-ci. *Leur nom* — comme d'ailleurs celui des charbons dits « bitumineux » de la classification américaine — *n'implique nullement qu'ils contiennent du bitume autonome et séparable,* mais signifie qu'ils renferment une certaine proportion de matière organique appelée « kérogène » par les chimistes, qui, lors de la distillation à l'abri de l'air vers 500 °C, fournit une certaine quantité de pétrole liquide, généralement de 40 à 150 litres par tonne de schiste. Ce chiffre peut s'élever jusqu'à plus de 300 litres lorsque l'on passe des schistes bitumineux aux charbons sapropéliques proprement dits. Dans le passé, les schistes bitumineux ont été appelés aussi, à tort, « schistes bitumeux » ou encore « pyroschistes ».

Le kérogène qu'ils contiennent peut être défini chimiquement ou pétrographiquement.

Chimiquement, nous reprendrons la définition de Welte (1972) : « Le kérogène est formé par un mélange de macromolécules très polymérisées avec une proportion notable de chaînes à structure aliphatique conjuguées avec des systèmes diversement condensés de noyaux de type aromatique. Il présente quelques analogies avec l'exinite des charbons d'un côté et la fraction asphaltique des pétroles de l'autre. Par définition le kérogène est insoluble dans les solvants organiques. »

Pétrographiquement, nous avons déjà vu que les schistes bitumineux contenaient les mêmes constituants que les charbons sapropéliques mais à l'état plus dilué. Parfois, la masse sapropélique est si décomposée qu'aucun élément figuré n'est plus reconnaissable; c'est souvent le cas, par exemple, des schistes du Colorado. Cependant on peut souvent reconnaître dans la masse des schistes :

— des microspores (ou miospores ou grains de pollen);

— des Algues;

— des fragments de tissus gélifiés ou oxydés, en proportions variables selon les gisements;

— de la matière organique amorphe massive ou colloïdale;

— des microdébris divers non reconnaissables;

— des restes de Poissons (écailles, vertèbres, épines), surtout au Permien;

— des restes de Crustacés (Ostracodes);

— des Lamellibranches, des coprolithes, etc.

Malgré cette grande diversité apparente, c'est le groupe des Algues qui est, de loin, le plus important.

Au Carbonifère et au Permien, les Algues planctoniques sont surtout des *Botryococcus brauni Kützing* 1849 (anciennes *Pila* et *Reinschia* de Bertrand et Renault) actuellement reconnues comme étant des Chlorophycées, petites Algues de 10 μ de diamètre, groupées en colonies de 600 à 700 cellules, communes en toutes saisons et dans tous les milieux (eau douce, saumâtre ou salée).

Au Lias (Toarcien) et au Mésozoïque en général, ce sont surtout des *Tasmanites Newton* 1875 ou des genres considérés comme analogues ou synonymes : *Crassosphaera, Tytthodiscus, Schizosporis* et *Pachysphaera* (genre actuel), etc.

Les *Botryococcus* seraient formées de botryococcène (et isobotryococcène) $C_{34}H_{58}$ à l'état polycondensé en chaînes insaturées à plusieurs centaines d'atomes de carbone, de poids moléculaire 1 500 à 2 000, tandis que les *Tasmanites* seraient formées de tasmanine $C_{90}H_{138}O_{17}$ se présentant en longues chaînes aliphatiques.

Toutes ces Algues planctoniques sont productrices de carbone organique à raison de 0,5 à 1 g de C/m²/jour dans les mers fertiles. La production des forêts de pins est de 4 à 6 fois plus grande, mais la superficie des mers productives est 10 fois supérieure à celle des aires continentales fertiles, soit au total 10^{10} t de carbone par an. En milieu marin, c'est dans la zone euphotique que se produit le développement maximal du phytoplancton. Celui-ci est favorisé par l'apport en sels nutritifs (phosphates et nitrates) des fleuves; il se produit donc principalement sur la plate-forme continentale, en bordure des terres émergées. Dans l'ensemble, toutes ces Algues sont productrices d'acides gras dont on admet aujourd'hui qu'ils sont parmi les principaux précurseurs du pétrole, mais qui sont également parmi les constituants importants du kérogène des schistes bitumineux.

Cependant, malgré cette prédominance, toute la matière organique n'est pas distillable en hydrocarbures liquides lors de la pyrogénation industrielle; parfois, seulement 50 % environ de la matière organique présente peut être transformée en pétrole liquide. Ainsi, un schiste contenant 22 % de carbone organique ne produira que 100 kg d'huile par tonne de schiste au cours du traitement (cas de Saint-Hilaire-Aumance).

Gisements et réserves

Les principaux gisements de schistes bitumineux actuellement connus sont les suivants :

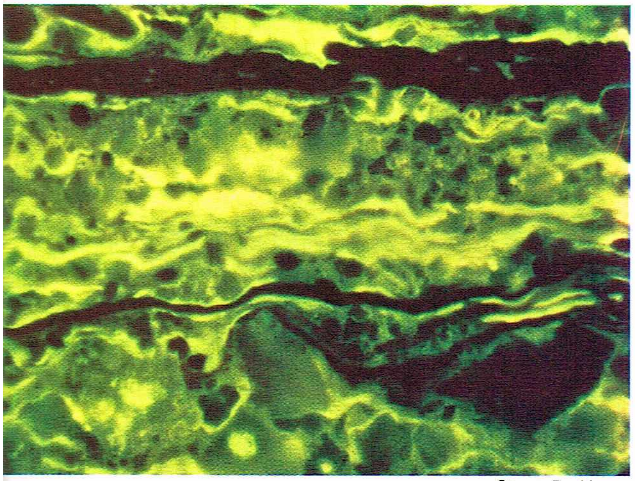

Cours B. Alpern

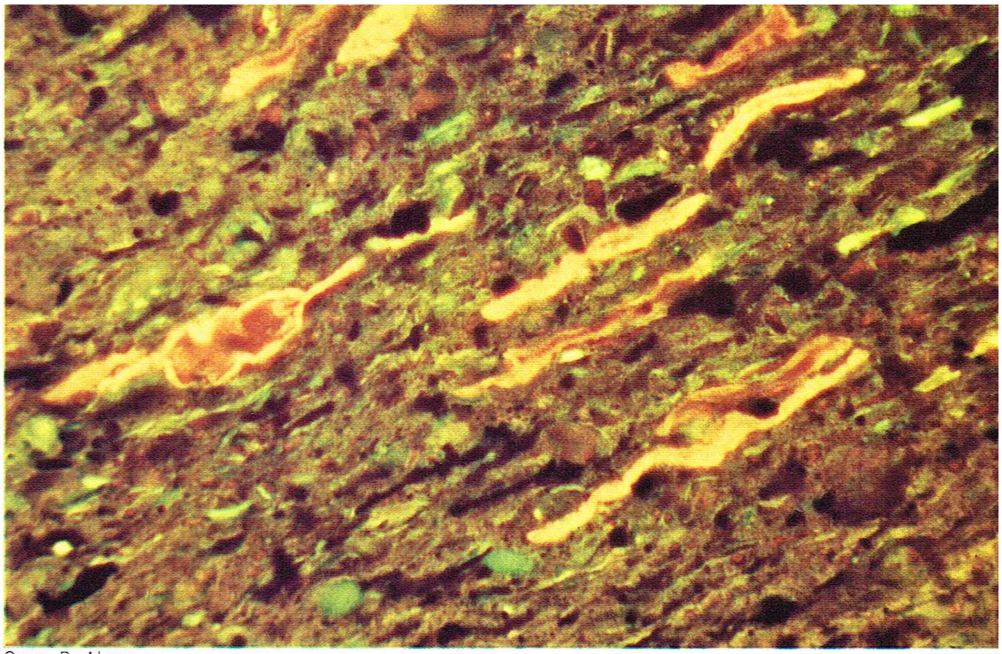

Cours B. Alpern

▲ *A gauche,* **schiste bitumineux** *du Colorado (Green River Shales) : en jaune, imprégnation de matière organique amorphe d'origine algaire (vue en fluorescence par réflexion, G = 550).*
A droite, **schiste bitumineux** *permien d'Irati (Brésil) : en jaune, sections transversales de microspores (vue en fluorescence par réflexion, G = 480).*

▼ *Ci-dessous, propriétés et réserves de quelques bassins de schistes bitumineux (en partie d'après Burger, 1973).*

Propriétés et réserves de quelques bassins de schistes bitumineux (en partie d'après Burger, 1973).

	Australie Glen Davis	Brésil Irati	Chine Fushun	États-Unis Colorado	France Autun	France St-Hilaire	Ecosse Westwood	U.R.S.S. Estonie	France Toarcien
Carbone organique %	39,7	–	7,9	11,3	18,8	22,2	12,3	–	10
Rendement huile l/t	34,6	79	32	102	108	104	93	226	50
Pouvoir calorifique sup.	4 500	1 400	810	1 220	2 115	2 405	1 410	3 210	1 100
Densité à 15 °C	1,6	2,1	2,29	2,23	2,03	2,01	2,22	–	2,30
Cendres %	51,6	76,5	82,7	66,9	70,8	66,3	77,8	47	77
Cendres : SiO_2 %	81,5	66,0	62,3	43,6	55,1	47,0	55,7	31,0	47,4
Cendres : Al_2O_3 %	10,1	17,4	26,7	11,1	27,6	18,3	25,1	7,8	15,0
Cendres : Fe_2O_3 %	3,0	10,8	6,1	4,6	9,3	7,6	9,9	5,8	6,1
Cendres : CaO %	0,8	1,9	0,1	22,7	1,7	17,8	2,6	39,0	22,8
Soufre % dans l'huile	0,4	1,7	–	0,5	0,3	0,5	–	1,1	3,0
Azote % dans l'huile	0,5	–	–	1,8	0,8	0,6	–	0,1	0,9
Réserves 10^6 m^3	40	127 000	330	318 000	10	20	160	3 500	1 000

— Aux *États-Unis,* il existe une série de bassins dont les principaux se trouvent dans les États du Colorado, du Wyoming et de l'Utah. Il s'agit de roches improprement appelées schistes car elles renferment une proportion non négligeable de carbonates (CaO = 23 %), mais correctement désignées comme bitumineuses car leur rendement dans les parties riches est, en moyenne, de 30 gallons/t environ, soit 120 l à 150 l/t. Géologiquement, il s'agit de bassins tertiaires éocènes, les Green River Shales, dont l'horizon le plus riche est la Mahogany Zone de 20 m environ d'épaisseur.

Dans la région de Rifle et Grand Valley (Colorado), les schistes affleurent à flanc de montagne dans des zones topographiquement élevées. Des mines pilotes, creusées par le Bureau of Mines, puis reprises par les groupes pétroliers qui ont acquis les concessions, extraient le schiste par galeries horizontales selon la méthode dite des « chambres et piliers »; ces derniers, qui soutiennent le toit de la galerie, sont abandonnés (d'où une perte partielle des réserves).

Dans la région de Rock Springs (Wyoming), beaucoup plus plate, des essais sont tentés pour l'exploitation *in situ* des schistes, sans extraction minière. D'autres procédés (Occidental Oil) utilisent des méthodes mixtes par foudroyage des galeries de mines à la base de la couche puis combustion dans des cheminées *in situ,* utilisant les fractures ainsi créées. Ni ces procédés ni la pyrogénation *ex situ* des schistes intégralement extraits n'ont atteint aux États-Unis la phase industrielle. Cependant, des fours comme ceux de Tosco (caloporteur solide) ou de Paraho (caloporteur gazeux) ont déjà largement atteint la phase pilote. Les problèmes écologiques et d'approvisionnement en eau dans les régions désertiques et peu industrialisées du centre des États-Unis constituent un gros handicap pour des schistes qui, par ailleurs, sont pourtant riches.

Les Green River Shales occuperaient une surface de 42 000 km² et contiendraient 320 milliards de m³ d'huile. Il y a aux États-Unis de nombreux autres bassins dans divers étages géologiques, du Paléozoïque moyen au Tertiaire. Le total des *current economic reserves* (réserves « économiques » actuelles) du National Petroleum Council s'élèverait, pour la fraction à plus de 120 l/t, à $160 \cdot 10^9$ barils d'huile qui, avec un taux de récupération de 50 %, permettraient d'extraire $80 \cdot 10^9$ barils de pétrole, soit environ 12 milliards de tonnes d'huile. Quant aux *ressources potentielles,* elles s'élèveraient à $590 \cdot 10^9$ barils, soit environ 100 milliards de tonnes d'huile.

— Au *Brésil,* on connaît depuis 1881 le gisement tertiaire de Trémembé-Tambaté dans l'État de São Paulo, dont les réserves connues sont de 320 millions de m³. C'est cependant la formation d'Irati, dans le Permien, qui est de loin la plus importante avec deux couches ayant une épaisseur totale d'une dizaine de mètres, malheureusement séparées par un banc de stériles en partie calcaire. La richesse en huile est moyenne, de l'ordre de 80 l/t de schistes. La zone la plus intéressante est celle de São Mateus do Sul car elle permet l'exploitation à ciel ouvert, environ deux fois moins onéreuse que l'exploitation en mine. La carrière et l'usine pilote créées par la Pétrosix sont à un stade plus avancé que les travaux équivalents aux États-Unis (capacité de 2 000 t de schistes/jour). Les réserves connues de la formation d'Irati seraient de 127 milliards de m³; les réserves probables pourraient s'élever à 500 milliards.

— En *Chine,* à Fushun, dans la région de Moukden (Mandchourie), une industrie schistière est en activité depuis 1909. Actuellement, la Chine est, avec l'U.R.S.S., le seul pays à traiter industriellement les schistes bitumineux. La production, en 1963, y couvrait le 1/5 des besoins en hydrocarbures. La superficie du gisement de Fushun est de 36 km² environ (18 × 2 km) avec une épaisseur de 135 m. Les réserves atteindraient 5,5 milliards de tonnes de schistes dont plus de 300 millions exploitables à ciel ouvert, en même temps que le charbon qui se trouve associé aux schistes. La teneur en huile des schistes est cependant assez faible; avec une valeur moyenne de 5,5 %, les réserves de Fushun s'élèveraient à 330 millions de m³ d'huile. En dehors de la Mandchourie (120 milliards de tonnes de réserves probables de schistes), il y a en Chine des gisements dans le Ho-nan, le Yunnan, le Chan-si et le Kouan-toung. Au total, ce pays possèderait des réserves prouvées de 4,5 milliards de m³ d'huile et 22 milliards de réserves probables.

— En *U.R.S.S.* (Estonie) les gisements de kuckersite, et en *Écosse* ceux de torbanite ont été mentionnés dans la partie réservée aux charbons sapropéliques.

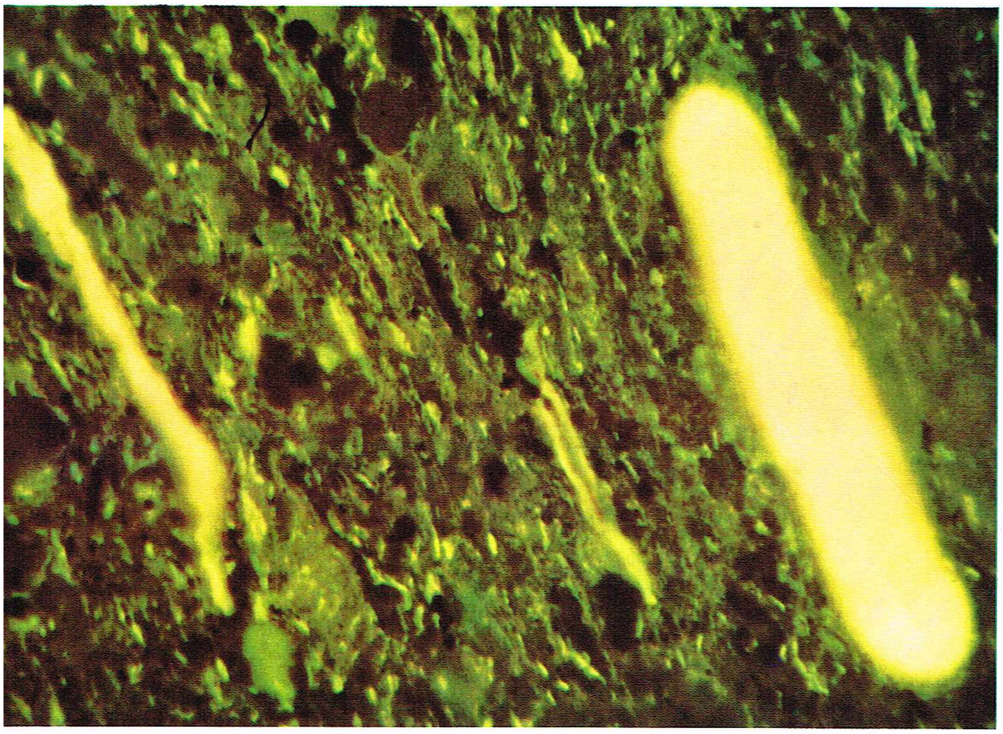

Cours B. Alpern

▲ ***Schiste bitumineux du Toarcien français (Creveney) : on observe, à droite, une section transversale de Tasmanites (fluorescence par réflexion, G = 480).***

— En *France,* l'industrie schistière est, semble-t-il, la plus ancienne du monde. Divers gisements ont été exploités au cours du XIX[e] siècle, puis, pour certains, repris pendant la dernière guerre. L'un des plus connus est celui d'Autun, exploité depuis 1893 et (avec des interruptions) jusqu'en 1957 ; les schistes y sont d'âge permien et associés avec des couches de boghead, riches en huile, mais peu épaisses (25 cm). Le faisceau principal, dit « des Thélots », était exploité en mine souterraine et comprenait une dizaine de couches dont quatre seulement contenant 60 à 100 litres d'huile/tonne de schistes furent extraites. Il y avait également un étage moyen, dit « de Comaille », avec une couche de 3 m de teneur 95 l/t et un étage inférieur dit « d'Igornay » contenant également trois couches. Au total, les réserves d'Autun auraient atteint 400 millions de tonnes jusqu'à 600 m de profondeur (Berthelot).

En dehors du bassin d'Autun, il faut citer également le bassin de l'Aumance (Allier), également du Permien, exploité dans le passé à Saint-Hilaire puis fermé en 1948. Les schistes bitumineux, de 1 à 2 m d'épaisseur avec une teneur de 80 l/t, sont au toit presque immédiat d'une couche épaisse de charbon encore exploitée à l'heure actuelle (Buxières-les-Mines).

En France, les schistes ont également été reconnus et exploités à Séverac-le-Château jusqu'en 1949 et à Créveney (près de Vesoul). Il s'agit là de schistes du Toarcien (Lias) appelés encore « schistes-cartons » du fait de leur fissilité, se présentant en bancs assez épais (28 m à la carrière de Créveney) mais à basse teneur en huile (35 à 50 l/t). Ces réserves d'huile seraient considérables (plus de 1 milliard de tonnes) et exploitables en partie à ciel ouvert. Les schistes affleurent tout autour de la cuvette parisienne, surtout à l'est dans la région de Nancy, puis se poursuivent au Luxembourg et en Allemagne, où ils ont également été exploités dans le passé (Wurtemberg).

Évolution diagénétique du charbon et prospection pétrolière

La liaison entre le degré d'évolution des charbons et les possibilités de trouver du pétrole liquide est connue depuis longtemps. L'Américain D. White a vu le premier, dès 1915, puis très bien expliqué en 1935 que les hydrocarbures liquides disparaissaient lorsque le rang des charbons associés dépassait un certain niveau défini à l'origine par un taux de carbone fixe de 65 % environ, correspondant à peu près à celui de nos charbons flambants. Cependant cette méthode impliquait la proximité de gisements de charbon et de pétrole dans les mêmes cuvettes sédimentaires, ce qui n'est pas le cas le plus fréquent. En outre, la corrélation impliquait l'extraction du charbon et son analyse chimique.

C'est l'application de la *méthode réflectométrique* à ce problème qui a permis à la relation découverte par White d'être pleinement développée et utilisée, comme c'est le cas à l'heure actuelle. Il existe, en effet, dans presque toutes les roches sédimentaires, assez de particules organiques pour que, après concentration et photométrage, elles indiquent le degré d'évolution diagénétique des sédiments qui les contenaient.

L'existence de bassins houillers et de couches de charbon constituées n'est donc plus nécessaire, la matière organique, *même dispersée finement,* jouant parfaitement son rôle de paléothermomètre géologique irréversible, donc à maximums. Autre avantage de la réflectométrie, les quelques fractions de gramme nécessaires à la mesure n'ont pas toujours besoin d'être extraites de la roche : on peut procéder à la mesure directe sur surface polie si la matière organique est assez abondante ; en outre, la mesure est non destructive et peut être répétée de nombreuses fois si nécessaire. Dans le cas des roches très pauvres, les méthodes de concentration (macération palynologique ou par voie physique) sont presque toujours assez efficaces pour permettre une mesure statistiquement représentative. En général, cent points sont suffisants pour caractériser un niveau, surtout dans une succession continue bien inventoriée.

Presque toutes les roches devenant ainsi parlantes, il est possible et facile de calculer un gradient paléogéothermique en mesurant le $\Delta R/100$ m de sédiments, et de reconstituer l'épaisseur des terrains érodés lorsque les particules autochtones trouvées en surface sont déjà évoluées et impliquent une couverture aujourd'hui disparue.

Dans tous les cas, les mesures sont faites sur des particules de la famille huminite-vitrinite, et de préférence sur les gels (gélinite-collinite). On peut utiliser également la fluorescence des spores mais cette méthode est beaucoup plus récente (M. Teichmüller).

En utilisant la réflectométrie, on s'est aperçu que la « dead line » (ligne de destruction du pétrole liquide) de White correspondait à une réflectance de 0,8 % environ. Cette limite d'existence des gisements pétroliers a été l'objet de nombreuses discussions, et en particulier d'un Colloque international en 1973 (voir bibliographie). Actuellement, elle est plutôt située à la réflectance 1,35 % (Vassojevitch-Teichmüller) ; d'un autre côté, la *ligne de génération* des hydrocarbures liquides est placée le plus souvent à 0,5 % de réflectance, ce qui correspond à peu près à la limite optique entre les lignites et les houilles.

Entre ces deux lignes, de génération et de destruction, se situe la « *fenêtre pétrolière* », dont la position dépend de la température (approximativement entre 65 et 150 °C) et du temps. L'évolution des bassins houillers, comme celle des bassins pétroliers, ne dépend que de ces deux facteurs du métamorphisme général. La pression ne jouerait qu'un rôle secondaire ou même négatif (retardateur), tandis que le métamorphisme de contact ne produirait que de minimes anomalies locales (transformation en coke).

Du fait de l'importance primordiale de la température, la conductivité thermique des sédiments minéraux encaissants joue évidemment un rôle non négligeable dans la diagenèse organique. La fenêtre pétrolière est d'autant plus vite atteinte que le degré géothermique est plus fort. Ainsi, pour atteindre 60 °C, il ne faut que 600 m de sédiments, si la température augmente de 10 °C/100 m. Avec un degré géothermique moyen de 3 °C/100 m, 2 000 m de couverture sont nécessaires.

Inversement, la disparition des hydrocarbures liquides par « craking » thermique et transformation en gaz se produit d'autant plus vite que le degré géothermique est fort.

La même méthode peut être appliquée à la recherche du gaz dont l'existence est reconnue jusqu'à des niveaux d'évolution diagénétique nettement plus élevés.

En résumé, par le biais de la matière organique dispersée, les lois de la diagenèse des charbons fournissent un outil de première valeur pour la prospection du pétrole et du gaz.

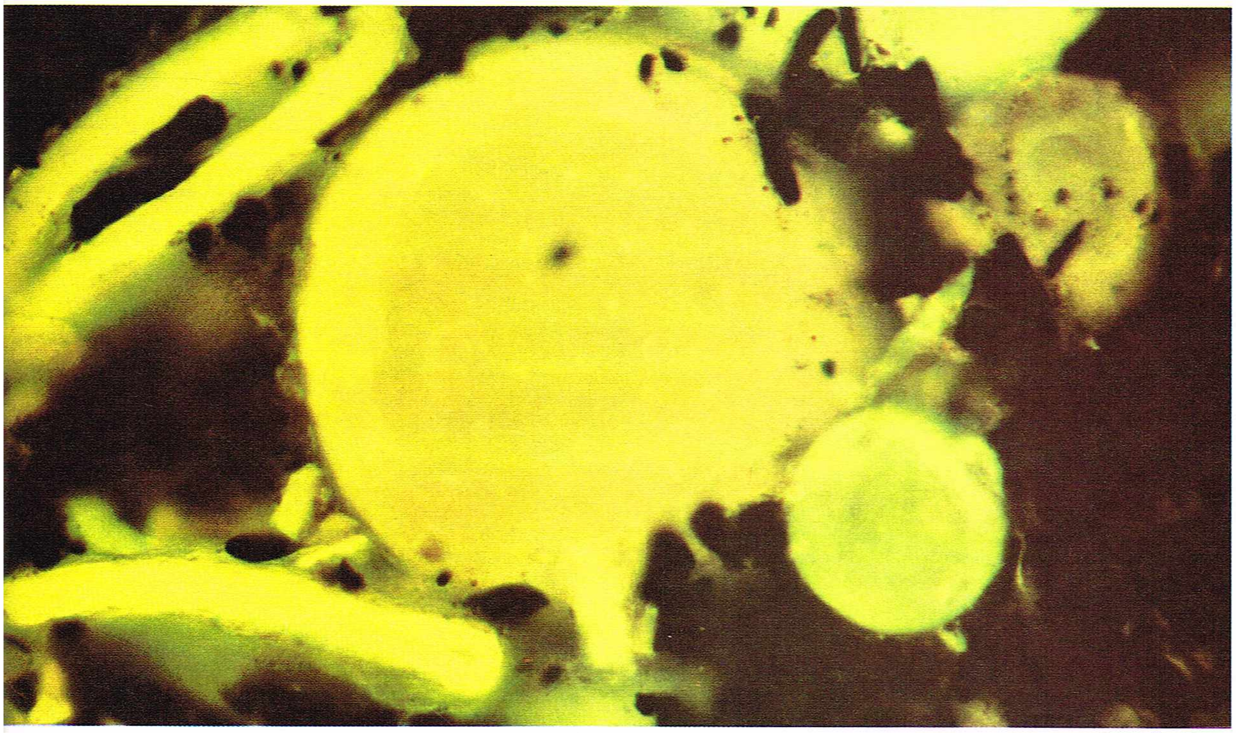

◀ ***Concentré de* Tasmanites *préparé à partir d'un schiste bitumineux du Toarcien français (fluorescence par réflexion, G = 480).***

Cours B. Alpern

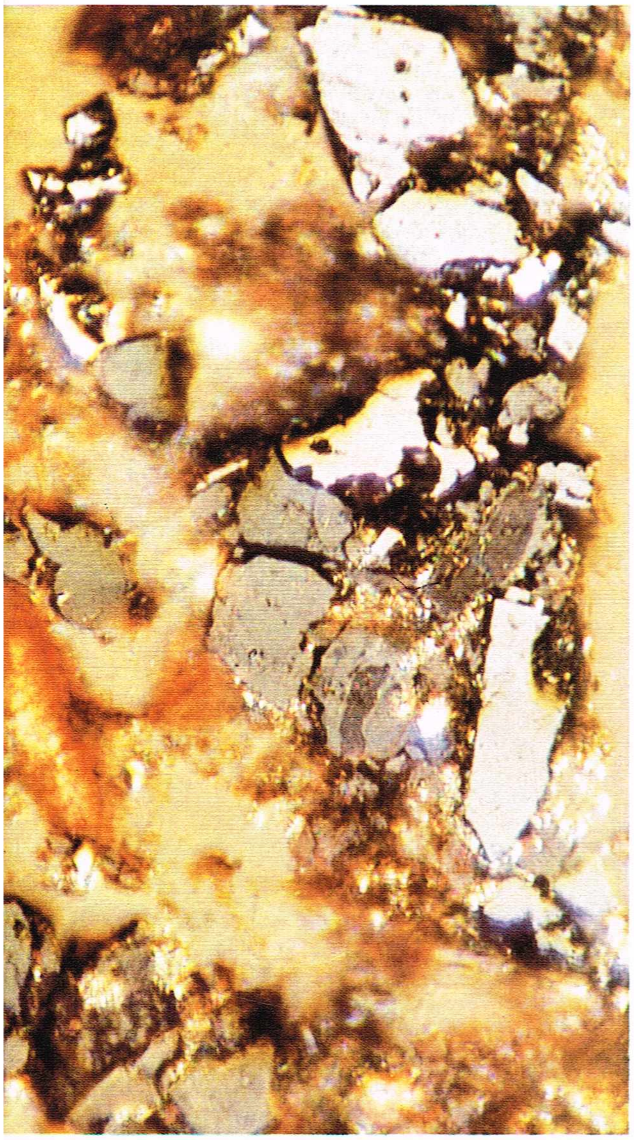

B. Alpern

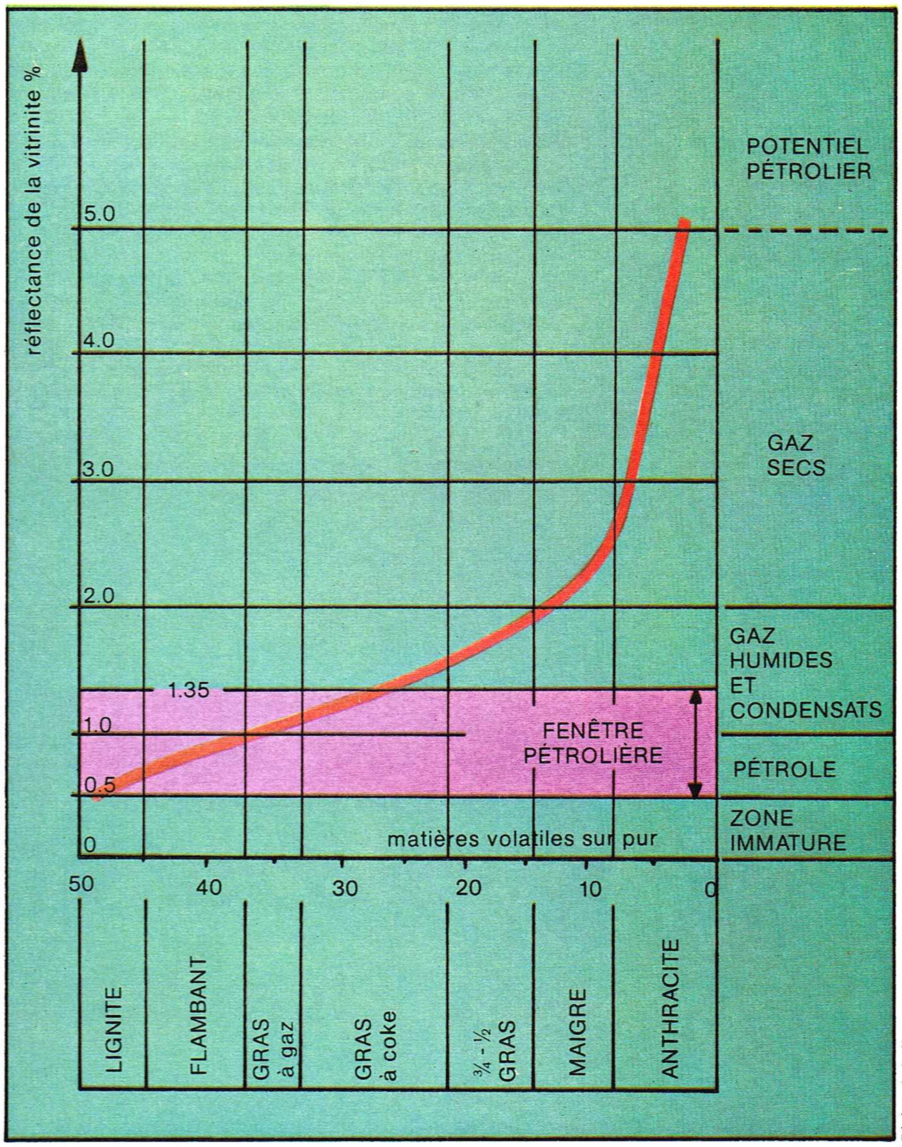

Richard Colin

▼ ***A gauche, concentré de gélinite (gris rougeâtre) et de vitrinite remaniée (grise) à partir de cuttings pétroliers (lumière réfléchie, immersion d'huile, G = 550). A droite, représentation graphique de l'évolution des charbons et du potentiel pétrolier.***

Les hydrocarbures naturels

Cette appellation moderne rassemble les formes gazeuse, liquide et solide des substances naturelles combustibles constituées en très grande partie de composés d'*hydrogène* et de *carbone*. C'est à l'Antiquité que nous devons les termes d'usage courant. *Pétrole,* du latin *petroleum* (utilisé tel quel par les Anglo-saxons), est issu du grec πετρελαιοα = huile de pierre. *Naphte,* synonyme beaucoup plus désuet, est peu utilisé. Il dérive du grec νάφθα, qui l'empruntait déjà au babylonien *naptu*. En langage technique moderne — chez les raffineurs notamment, le mot *naphta* est cependant d'un emploi courant, mais il désigne les fractions légères de distillation, ou « essences » (jusqu'à 280 °C environ). *Asphalte,* qui désigne les produits visqueux et solides, est également issu de l'Antiquité chaldéo-babylonienne avant d'appartenir à la langue grecque : ασφαλτος. Quant au *bitume,* du latin *bitumen,* il dérive du celte ; c'est un synonyme d'asphalte.

Tous ces termes courants sont marqués d'une imprécision évidente. Ils correspondent à un vocabulaire traditionnel en usage depuis toujours, mais sont souvent inadéquats dans le contexte de nos connaissances actuelles. Par ailleurs, le langage professionnel désigne le produit de départ sous le nom de « pétrole brut », et plus souvent encore de « brut » tout court, ou simplement d' « huile » (« crude » et « oil » en anglais).

Aperçu historique

En certaines contrées du monde, les hydrocarbures naturels se manifestent spectaculairement à la surface du sol sous la forme de feux éternels, de sources de pétrole et de bitume, ou encore d'épanchements de ces mêmes produits à la surface d'étangs et de lacs.

L'Humanité préhistorique ne peut pas avoir ignoré ces produits. Au contraire, tout laisse supposer que l'imagination de ces hommes a été frappée par des manifestations aussi insolites, et que leur sens pratique a été sollicité par les propriétés de l'asphalte et du naphte.

Aussi, dès les premières lueurs de l'Histoire trouve-t-on diverses allusions à ces phénomènes. Dans le *Livre des Morts,* qui remonte au début de la civilisation égyptienne (Ire dynastie, vers 2 800 avant J.-C.), il est question de lacs de feu, de bassins de flammes, dans un paysage d'opulentes cultures et de hautes montagnes. Le pays légendaire ainsi décrit pourrait, selon certains auteurs, désigner la région caucasienne d'où serait issu le peuple égyptien avant sa migration vers le Nil. Il existait en effet au Caucase et dans la région de Bakou (presqu'île d'Apscheron) des « fontaines ardentes » et des « feux perpétuels » comme à Baba Gurgur (près de Kirkouk, en Irak).

On trouve dans la littérature égyptienne de nombreuses mentions de l' « huile verte », l' « huile sacrée », l' « huile de la pierre noire ». La notion d'huile minérale était donc assez familière à ce peuple depuis l'Ancien Empire, de même que le bitume *(menenini),* ou « huile phénicienne », dont le principal usage était la momification des défunts. Le port exportateur vers l'Égypte était Byblos (au nord de l'actuel Liban), mais le produit provenait probablement du Caucase et également de la mer Morte (ou lac Asphaltite) en pays de Canaan. Ce gisement, un des plus fameux de l'Antiquité, se limitait à la moitié sud du lac. Selon Diodore de Sicile, « tous les ans une masse d'asphalte solide formant une île plus ou moins importante surgissait du milieu du lac Asphaltite. Les riverains se disputaient alors le butin pour en faire commerce ». La tradition biblique rapporte qu'en ces mêmes lieux s'élevaient, dans une vallée boisée, Sodome et Gomorrhe entourées de douze autres villes, soudain détruites par des tremblements de terre et l'éruption de matières ignées, d'eaux brûlantes, bitumineuses et sulfureuses, avant d'être recouvertes par les flots.

Autre berceau d'anciennes et brillantes civilisations, la Mésopotamie est riche en produits pétroliers qui se manifestent spectaculairement en surface. Depuis la plus haute antiquité historique, tant à Suse, à Ur qu'à Babylone, naphte et asphalte sont cités par les textes et observés dans les industries découvertes en ces lieux.

En Elam, dès les origines de Suse, probablement avant le IVe millénaire, on utilisait le bitume extrait des montagnes du Luristan et des confins du Khuzistan. Les briques des tombeaux sont souvent cimentées au bitume et les urnes funéraires recouvertes d'une couche de ce produit. Celui-ci servait aussi au scellement des outils dans leur manche comme au sertissage des pierres précieuses en joaillerie. On l'utilisait encore pour assurer l'étanchéité des récipients et des adductions, ainsi que pour calfater les embarcations.

A Babylone, l'asphalte servait surtout dans le bâtiment, comme ciment entre les pierres ou les briques. Les fameux murs de Babylone et sa célèbre tour étaient construits de la sorte. Selon Xénophon, les portes des maisons de cette ville étaient faites de bois de palmier enduit de bitume. En outre, l'asphalte était utilisé sec comme combustible et comme moyen d'éclairage. Il servait encore au revêtement des chaussées.

Dans ces régions, l'exploitation du bitume et du naphte remonte certainement à la préhistoire. Les réserves de surface étaient relativement abondantes sur des sites tels que Baba Gurgur (sources, suintements et feux éternels), Hit (lacs d'asphalte, etc.).

Cependant, à Wadi Maghara (Basse-Mésopotamie), on peut observer les traces d'une exploitation par chambres

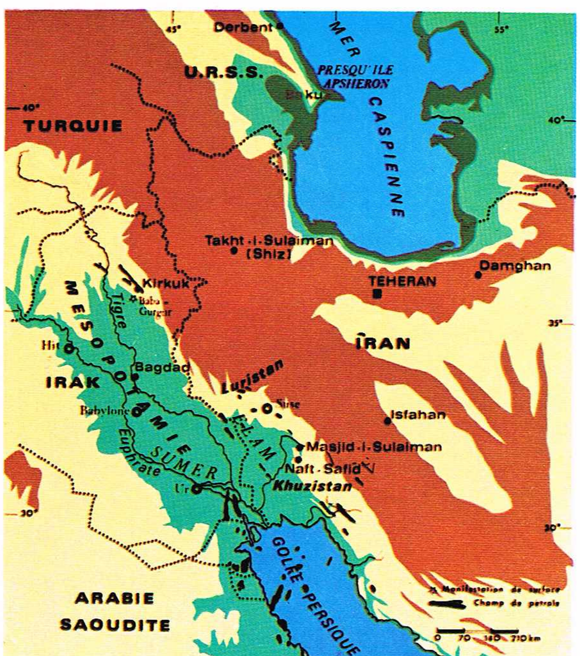

▶ *Le cœur du Moyen-Orient pétrolifère de l'Antiquité à nos jours.*

dessin A. Combaz

A. Combaz

▲ ***Récolte de bitume à la surface de la mer de Sicile (gravure du XVIe siècle).***

et piliers, à plus de 100 m de profondeur, ce qui laisse penser que les Anciens ont dû être d'excellents mineurs.

L'un des témoignages les plus célèbres de l'emploi du bitume dans ces régions est celui qui a trait au Déluge survenu vers 2 500 av. J.-C. Dans l'épopée de Gilgamesh, Khasis-Atra, le Noé de la tradition hébraïque, prévenu par les Dieux, construit un navire suivant leurs indications précises, notamment en ce qui concerne le calfatage de la coque de l'Arche par le bitume, sur ses faces interne et externe.

Les Hittites connaissaient également l'usage de l'asphalte, dont ils faisaient des vases destinés au vin et à la bière, des statuettes, etc. Quant aux autres peuples de l'Antiquité moyen-orientale, ils ne semblent pas avoir eu la même pratique des hydrocarbures naturels. Parfois, en Canaan comme en Babylonie, on entourait les défunts de nattes imprégnées de bitume pour la crémation. Plus tard, vers la fin de leur histoire, les Carthaginois ont pratiqué, seuls parmi les Sémites, l'embaumement de leurs morts, en utilisant l'asphalte à l'instar des Égyptiens.

Rappelons encore qu'en Perse, dès les premières civilisations, les feux naturels, considérés comme des manifestations divines, sont devenus des lieux sacrés et ont fait l'objet de culte (Adorateurs du feu). Feu et lumière apparaissent comme des notions dominantes de ces religions. Aussi des temples ont-ils souvent été construits autour de ces feux *axvarishank*, c'est-à-dire « qui s'entretiennent eux-mêmes ». (Il s'agit bien entendu d'émissions permanentes de gaz naturel enflammé.) On a retrouvé leurs ruines à Bakou, à Damghan (250 km à l'est de Téhéran), à Takht-i-Sulaiman (Shiz) au nord-ouest de Téhéran, etc.

Les Antiquités grecque et latine, si elles n'ont pas méconnu le naphte et le bitume, ne leur ont pas accordé le même intérêt que les peuples d'Orient. Les contemporains connaissaient cependant des sources de bitume (les Grecs nommaient « pissasphalte » ce produit qui avait à la fois les caractères de la « poix » et de l'asphalte) et même les feux éternels en Appolonie, à Zante pour la Grèce, et près d'Agrigente en Sicile. De nombreux auteurs (Hérodote, Aristote, Diodore de Sicile, Plutarque, etc.) en ont témoigné, et une drachme du Ier siècle av. J.-C. montre trois Nymphes faisant la ronde autour d'une source de pétrole enflammée. Quant aux produits eux-mêmes, tant chez les Grecs que chez les Romains, ils restent confinés à des emplois mineurs (magie, médecine, réparation de bateaux) sans commune mesure avec ce qui est évoqué plus haut à propos des civilisations du Moyen-Orient.

Cependant, les Arabes devaient hériter de l'expérience des peuples anciens. Ils apportèrent une attention particulière aux fractions légères et donc à l'art de distiller l'huile brute, qui avait été déjà décrit au Ier siècle après J.-C. par les alchimistes coptes. Du IIIe au VIe siècle ils firent des progrès considérables; au point de commercialiser la « gazoline » : dès le XIe siècle existait à Damas une véritable industrie de distillation. On mentionne à cette époque des stocks de 100 à 200 tonnes de « naphta » ou de gazoline au palais du Sultan du Caire. Outre l'usage d'un équipement déjà fort élaboré de distillation fait de pierre et de plomb, avec colonnes de fractionnement, etc., les Arabes pratiquaient une méthode dite *distillatio per discensorium*, appliquée directement aux roches asphaltiques, capable de « craking » et de distillation des produits pétroliers.

Pendant cette même période, l'art militaire des Byzantins, des Arabes et des Francs utilisait aussi abondamment cette arme incendiaire redoutable qu'est le « feu grégeois ». Au XIIe siècle, Saladin en usa largement contre ses adversaires; et au siècle suivant, en 1249, ses successeurs arrêtèrent Saint Louis devant Mansourah avec des moyens défensifs de même nature.

En Extrême-Orient, les Japonais exploitaient gaz et pétrole dès le VIIe siècle. Au XVIIe siècle, leurs puits, creusés par un ouvrier descendu au bout d'une corde, pouvaient atteindre 100 m de profondeur. Quant aux Chinois il semble qu'ils aient été d'excellents foreurs plusieurs siècles avant J.-C. Cherchant du sel en profondeur, ils rencontraient parfois du gaz naturel, qu'ils mettaient en exploitation en le captant par des tubes de bambou à partir de la tête de puits. Il servait à l'alimentation des chaudières des salines, à l'éclairage des rues et des halles. L'excédent était brûlé à l'air libre.

▼ ***Les « feux éternels » de Baba Gurgur; au fond, la lueur de la torche du Kirkuk (Irak).***

A. Combaz

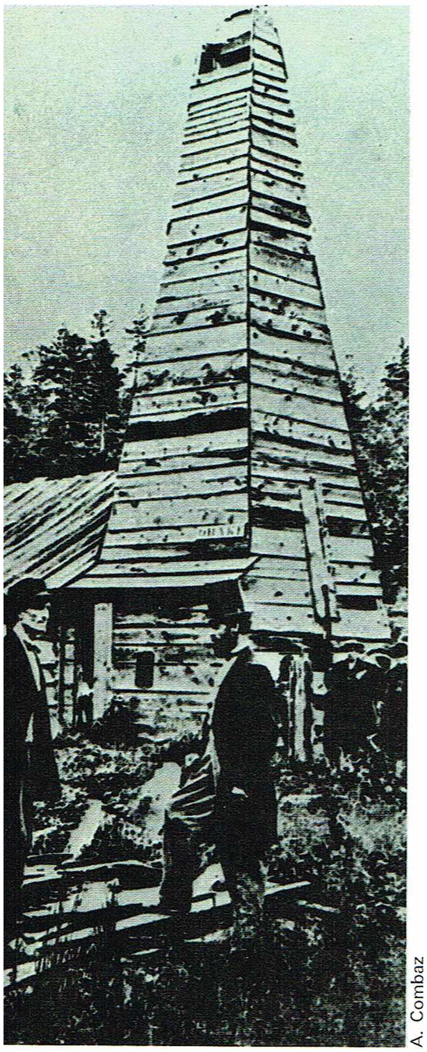

▲ ***Le colonel Drake devant l'un des tout premiers derricks, en 1859 (Pennsylvanie).***

En Europe, on connaît de petits gisements d'huile et de bitume à partir desquels prennent naissance de très petites industries locales dès le XVI^e siècle en Italie (Modène), en Roumanie (Galicie), en Pologne (région subcarpathique), en Allemagne (Tegernsee, Weitz) et en France (Pechelbronn).

Sur le continent américain, des indices de pétrole sont observés à Cuba, au Mexique, au Pérou, en Bolivie et en Équateur; Sir Walter Raleigh décrit le fameux lac d'asphalte de la Trinité.

Au Proche-Orient, les sites célèbres de Hit et de Bakou, entre autres, sont également décrits. Le premier pétrole brut est importé en Hollande, de Sumatra, en 1632.

Dès le début du XVI^e siècle, divers ouvrages ont décrit en détail les méthodes anciennes de production du pétrole et du bitume. On savait notamment creuser des puits de quelques dizaines de mètres de profondeur, dont les parois étaient maintenues par des fascines. Le pétrole y était puisé à l'aide de seaux de bois et conservé dans des cuves.

En 1694, en Grande-Bretagne, une usine de bitume extrayait déjà de l'huile à partir de roches bitumineuses par un procédé breveté. C'est de cette époque que datent les premiers travaux scientifiques sur la nature et l'origine des substances bitumineuses. Cependant, la demande était très limitée, et les produits extraits voyaient leur emploi limité à la peinture, au calfatage des navires, à la médecine, et parfois à l'éclairage et à la lubrification. Le XVIII^e siècle en Europe, qui voit l'aube de la révolution industrielle, entrevoit maintes applications pour les produits bitumeux. Le Grec d'Eyrinis est l'apôtre de ces idées. On découvre d'autre part de nouveaux gisements en Birmanie, en Chine, en Amérique du Nord.

Enfin, sur le plan scientifique, la plupart des théories modernes sur l'origine du pétrole circulent déjà à l'état embryonnaire vers le début du XIX^e siècle. Dans la région de Modène, en Italie, une industrie pétrolière est déjà née. Depuis le XVIII^e siècle, fonctionnent une petite installation de raffinage en cuivre et des pipe-lines. Le brûleur d'Argand, inventé en 1784, permet une meilleure utilisation du pétrole pour l'éclairage. Vers 1800, plusieurs villes du nord de l'Italie sont éclairées par ce moyen.

En Pologne, dès 1815, les rues de deux villes, Drohobycz et Preuag, sont éclairées au pétrole lampant. En 1853, l'apothicaire Lukasiewicz améliore beaucoup ce produit et la lampe qui l'emploie.

En France, sous l'impulsion du comte de Sassenay, puis de Malo, se développe l'asphaltage des rues et des routes à partir notamment des calcaires asphaltiques de Seyssel (Haute-Savoie) et du Val Travers (Jura suisse), exploités dès 1837. Après Paris et Londres, plusieurs villes d'Allemagne acquièrent des rues asphaltisées. Divers gisements en Italie, en Grande-Bretagne, etc., sont alors mis en exploitation.

Le premier sondage pétrolier est effectué en France à Pechelbronn (1812). L'industrie locale qui en résulte comporte tous les stades de l'exploitation à la distribution. Les schistes d'Autun sont exploités à leur tour pour produire du pétrole lampant, des lubrifiants et du gaz d'éclairage (avec lequel Dijon est entièrement éclairé dès 1837).

Par distillation on produit également de la paraffine, destinée surtout à la fabrication de bougies (1860). Mais l'utilisation du pétrole lampant, qui se développe rapidement, exige des productions croissantes de pétrole brut. Sous la pression de cette demande, les concessions vont se multiplier, en France (dans la région d'Autun), en Grande-Bretagne, etc., tandis qu'aux États-Unis le colonel Drake, en 1859, ouvre la voie à la recherche et à l'exploitation des champs de pétrole souterrains avec sa découverte de Titusville, à 26 m de profondeur. Six ans plus tard, dans l'est des États-Unis, on ne comptait pas moins de 190 raffineries produisant du pétrole lampant (ou « kérosène »).

Une première cargaison de pétrole brut américain est raffinée en France en 1860 par Charles Despeaux, bientôt suivi par divers autres industriels. La production principale était alors le pétrole lampant. Jusqu'en 1900, les raffineurs écoulaient difficilement leur essence, dont les emplois se limitaient au dégraissage des étoffes, aux « lampes-Pigeon » et comme solvant des peintures et vernis.

Outre son usage principal pour l'éclairage, le pétrole raffiné commence à servir de combustible pour la propulsion des locomotives et des bateaux. Dès 1868, on procède à des essais de chauffe rudimentaires. Commençant par le pétrole lampant, on essaie des produits de plus en plus lourds; en 1869, l'Allemand Otto Lenz invente le premier brûleur à pulvérisation, auquel s'intéresse immédiatement la marine. Celle-ci pourra ainsi doubler le rayon d'action de ses navires à poids égal de combustibles et, dans de bien meilleures conditions d'emploi, réduire le nombre d'escales. Ainsi, la marine britannique, dès 1910, décide sa transformation, bientôt suivie par toutes les marines de guerre, puis par les flottes de commerce. En même temps va se développer l'emploi industriel et domestique de ce nouveau combustible, qui concurrence directement le charbon et le bois, en présentant d'évidents avantages d'économie, de propreté, de souplesse et de facilité d'alimentation ainsi que de stockage.

A côté du fuel, l'essence voit s'ouvrir un marché de plus en plus large avec le développement, d'abord timide, de l'automobile à la fin du XIX^e siècle. Elle constitue bientôt la demande prépondérante, et il devient nécessaire d'adapter les procédés de raffinage (craking) pour augmenter sa production au détriment des termes plus lourds, notamment du pétrole lampant, dont l'emploi régresse avec l'avènement de l'éclairage électrique.

L'apparition du transport aérien requiert un nouveau type de carburant, tandis que les perfectionnements techniques du moteur automobile exigent un « indice d'octane » très élevé. Ainsi, les supercarburants sont mis sur le marché. Puis, vers 1930, intervient le moteur Diesel, consommateur modeste et efficace de produits lourds (gas-oil) moins taxés, qui va s'imposer sur route, sur rail et sur mer.

En même temps, les huiles minérales conquièrent le marché des lubrifiants au détriment des huiles végétales. D'abord tributaire de la Russie et des États-Unis, d'où elle importe ses huiles minérales de graissage, la France construit à partir de 1928 des raffineries capables de produire toute la gamme des produits pétroliers nécessaires à ses besoins.

Après la Seconde Guerre mondiale, l'avènement des moteurs à réaction révolutionne l'aviation, et un nouveau type de carburant, le kérosène, prend la vedette. Il embrasse la gamme des distillats compris entre les essences lourdes et les gas-oils légers.

Dernier-né des grands emplois industriels, la pétrochimie, depuis un peu plus de dix ans, connaît un développement rapide à partir de produits analogues, dans la catégorie des « naphta », ou de composés particuliers tels que les aromatiques, également issus des pétroles bruts.

Parmi les hydrocarbures légers, le propane et le butane, aisément liquéfiables par compression, sont commercialisés et largement répandus dès 1922 aux États-Unis, dix ans plus tard en Europe, puis dans le reste du monde. Quant aux gaz les plus légers, le méthane et l'éthane, souvent associés aux gisements de pétrole, mais constituant aussi parfois d'immenses champs de gaz sec, ils vont progressivement trouver un emploi industriel et domestique comme source d'énergie. Le gaz naturel se substitue progressivement au gaz de houille du fait de l'importance des champs découverts (en Europe : Lacq, Groningue, mer du Nord), de son pouvoir calorifique élevé et de son moindre coût. La première exploitation, en Occident, avait débuté en 1821 dans l'État de New York. En 1872, une conduite en tubes métalliques est posée entre Titusville et Newton (Pennsylvanie). Progressivement les usages se répandent et les installations se multiplient : en 1890, la production commercialisée atteint 7 Gm^3/an (milliards de m^3). En 1938 elle est de 65 Gm^3/an pour les seuls États-Unis alors qu'elle n'est que de 73 Gm^3/an pour l'ensemble du monde.

Les hydrocarbures dans la vie moderne

Jusqu'à la fin du XIX^e siècle, rien ne laissait supposer, au cours de la longue histoire des hydrocarbures, l'immense importance qu'ils allaient prendre au cours de notre siècle. De simple matière première pendant des millénaires, ils sont finalement devenus le symbole même de l'énergie dont dépend notre vie quotidienne et peut-être même le sort de l'Humanité. Si la révolution industrielle s'est accomplie au cours du XIX^e siècle grâce au charbon, la vertigineuse évolution technologique du XX^e siècle est largement due au développement de l'industrie pétrolière.

Ainsi, c'est aux hydrocarbures, énergie primaire beaucoup plus souple et condensée que le charbon, que l'on doit :

— la généralisation des moyens de transport autopropulsés sur terre (automobiles, camions, etc., et corrélativement le développement considérable des réseaux routiers asphaltisés), dans les airs (avions à moteurs et à réacteurs) et sur mer (navires abandonnant le charbon pour le fuel) ;

— le développement de l'agriculture grâce à la mécanisation des outils aratoires et notamment grâce aux tracteurs ;

— l'accroissement des moyens de production industrielle par l'emploi du fuel et du gaz naturel ;

— l'amélioration du confort domestique par le chauffage au fuel et au gaz naturel ;

— le développement de la chimie des dérivés du pétrole et l'introduction de l'industrie du plastique, etc.

La vie des sociétés industrialisées en a été profondément transformée, et à un rythme sans précédent. Depuis ces vingt-cinq dernières années en particulier, le monde est en proie à une véritable soif de pétrole.

Les hydrocarbures naturels ont donc été, et demeurent plus que jamais, un des moteurs déterminants de la vie contemporaine depuis le début du siècle, tant dans la paix que dans la guerre. Si l'on considère leur rôle vital dans les nations modernes, les réseaux de distribution où ils circulent dans le monde, alimentant les zones de consommation, par gazoducs, oléoducs, tankers et méthaniers, ils sont véritablement devenus le « sang noir » de la Terre des Hommes. Leur recherche, qui exige des investissements de plus en plus importants (près de 200 milliards de francs de 1966 à 1975), reste cependant très aléatoire (15 % de succès en moyenne). Aux risques techniques s'ajoutent les risques politiques (guerres, nationalisations). Cela implique que toute société pétrolière est vouée au gigantisme ou à la disparition, sauf si elle jouit de la protection spéciale d'un État. Elle nécessite donc un chiffre d'affaires et des profits très importants.

Jusqu'à ces dernières années, à part des mesures conservatoires pour les gisements de leurs propres territoires, les États intervenaient peu dans le jeu mondial des grandes compagnies pétrolières. Mais ce temps est désormais révolu. Les anciennes colonies productrices sont devenues des États indépendants dont la politique est désormais en conflit avec celle des compagnies, qui ne connaissent plus guère que des contrats en exploitation conjointe ou des contrats d'entreprise. Les compagnies ne sont plus alors que de simples prestataires de services dans les domaines technique, commercial et financier.

Après les crises de 1970-1971 et surtout de 1973-1974, à l'issue desquelles l'organisation des pays exportateurs (OPEP) a décidé unilatéralement de l'augmentation du coût du brut, jusqu'à son quadruplement, une situation de crise mondiale aiguë s'est installée entre les pays exportateurs et consommateurs. Une telle situation, qui met en péril l'équilibre économique du monde, doit nécessairement conduire à une négociation globale qui tienne compte non seulement des intérêts des interlocuteurs directs, mais aussi de ceux des pays du Tiers monde non producteurs. Leur développement serait, en effet, à jamais interdit sans un accès abordable aux sources d'énergie primaire.

Nature des hydrocarbures naturels

Les hydrocarbures stricto sensu

Pour les chimistes, les hydrocarbures, ou carbures d'hydrogène, correspondent à une famille de substances très étendue exclusivement constituées, par définition, de carbone et d'hydrogène.

Le composé le plus simple est le méthane CH_4 ; toutes les valences du carbone y sont saturées par un atome d'H. Les choses commencent à se compliquer dès que la molécule compte deux atomes de carbone.

L'éthane C_2H_6 :

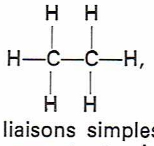

ne compte que des liaisons simples entre les C ; c'est un *carbure saturé,* comme toutes les substances ayant cette caractéristique, quel que soit le nombre des atomes de référence (carbone).

Certaines chaînes sont linéaires (structure aliphatique) :

—C—C—C ... C—.

Ce sont les paraffines normales, ou *n-alcanes*. D'autres sont plus ou moins ramifiées :

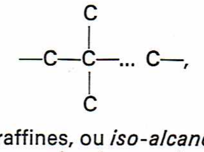

Ce sont les iso-paraffines, ou *iso-alcanes*. D'autres encore sont cyclisées, les *cyclo-alcanes* (ou « cyclanes », ou encore « naphtènes ») :

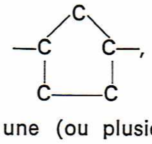

pouvant comporter une (ou plusieurs) chaîne latérale linéaire ou ramifiée

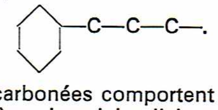

Si les chaînes carbonées comportent une ou plusieurs doubles (oléfines), voire triples liaisons :

—C=C—C— et —C—C≡C—,

on a affaire à des *hydrocarbures insaturés*, encore nommés *alcènes*, pour rendre compte des doubles liaisons, et *alcynes,* s'il y a des triples liaisons. Dans le cas des cycles à trois doubles liaisons, les substances correspondantes sont les *hydrocarbures aromatiques*.

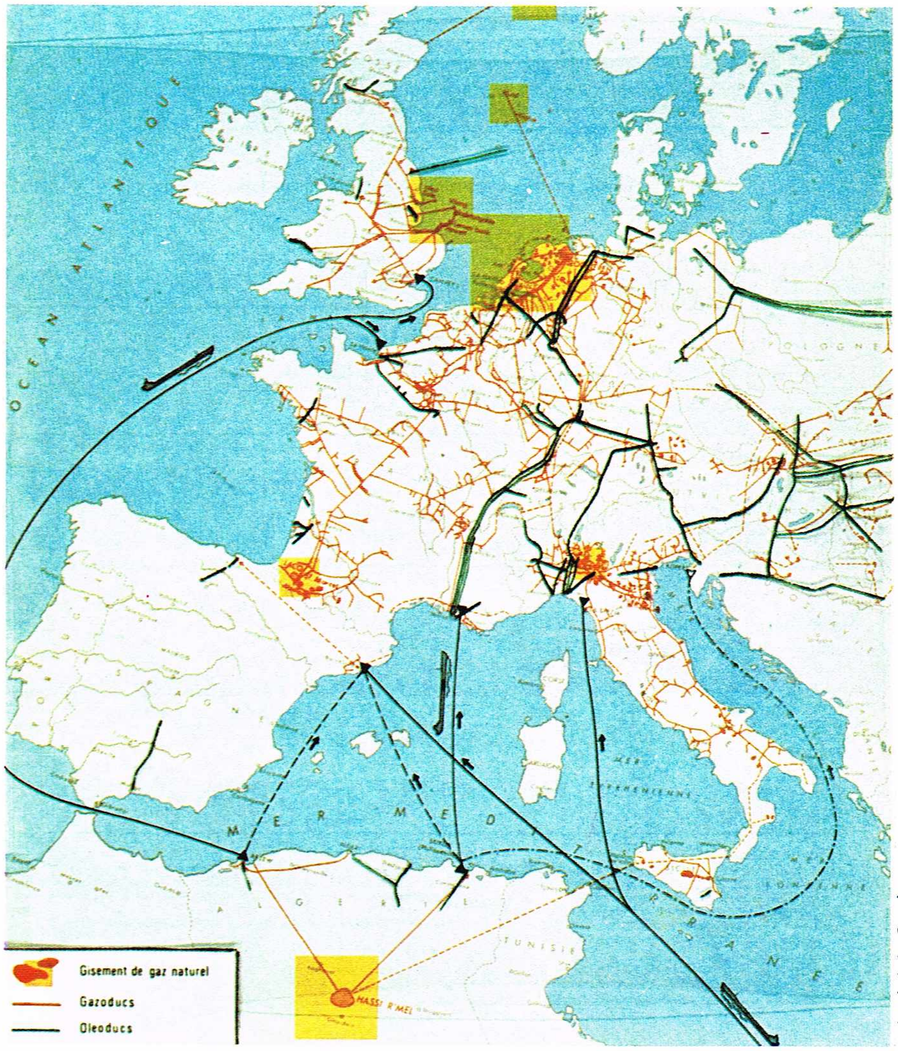

redessiné A. Combaz

▲ ***Le réseau (gazoducs et oléoducs) des approvisionnements en hydrocarbures de l'Europe occidentale (1973)* [*d'après* Pétrole 73, *C. P. P.*].**

	Température de distillation en °C	Nombre d'atomes de carbone
– Gaz	−161,5° / − 88,6°	C_1 / C_2
– Gaz condensables	−42° / − 0,5°	C_3 / C_4
– Éther de pétrole	20- 70°	C_5 -C_6
– Essences	80-180°	C_6 -C_{10}
– Kérosène	180-240°	C_{10}-C_{13}
– Gas-oil	240-350°	C_{14}-C_{20}
– Fuel lourd - Mazout	350-500° et plus	C_{21}-C_{35+}
Distillation sous vide		
– Lubrifiant léger	350-400°	C_{20}-C_{24}
– Lubrifiant moyen	400-450°	C_{24}-C_{31}
– Lubrifiant lourd	450-500° et plus	C_{31}-C_{45}
Résidu		
– Bitume pour usage routier.	> 500°	> C_{45}

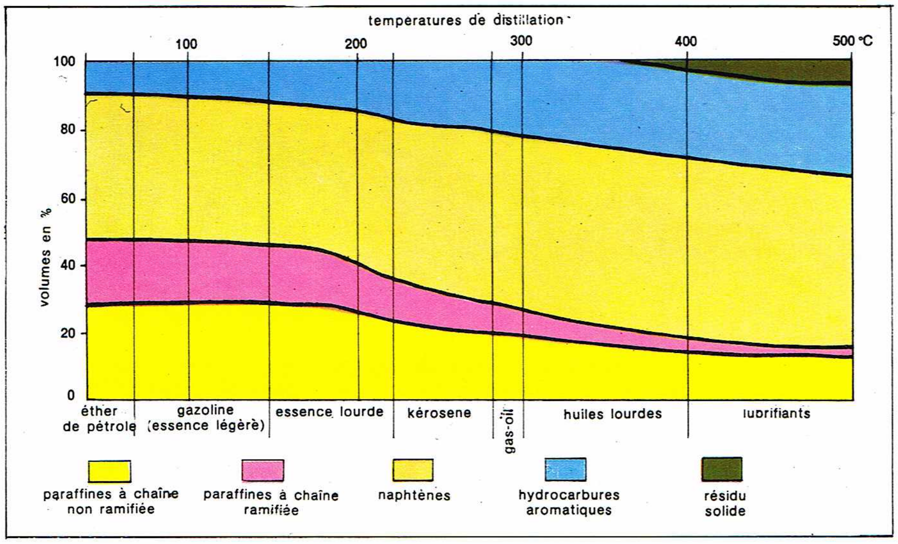

I.G.D.A.

▲ En haut, tableau des classes de composés du pétrole obtenues par distillation fractionnée. En bas, composition moyenne des diverses fractions obtenues par distillation des pétroles (d'après Levorsen).

Bien entendu, tous les cas de figures évoqués jusqu'ici peuvent se combiner entre eux, et/ou à d'autres composés organiques. Aussi le champ des substances possibles est-il considérable.

Composition des « hydrocarbures naturels »

En ce qui concerne les *hydrocarbures naturels,* il s'agit précisément de mélanges très complexes. Si les composés ne comportant que des atomes de C et H sont largement majoritaires, ils sont cependant toujours accompagnés de composés dits « hétéroatomiques » comportant, en nombre variable, des atomes d'oxygène, d'azote, de soufre, mais aussi, à l'état de traces, des métaux divers tels que vanadium, fer, cuivre, molydbène, chrome, etc.

En ce qui concerne l' « insaturation », il n'existe pas de composés naturels dans les pétroles comportant des triples liaisons. Toutefois, on rencontre fréquemment les doubles liaisons dans les molécules cycliques (composés aromatiques), mais très rarement dans les molécules linéaires : hydrocarbures éthyléniques, ou oléfines.

Le pétrole est donc un mélange complexe de très nombreux composés correspondant à des arrangements différents des atomes de carbone (isomères) et à des combinaisons plus ou moins complexes entre molécules. Dans la série la plus simple, celle des *alcanes*, le nombre d'isomères théoriquement possibles croît très vite en fonction du nombre de C de la molécule : de C_1 à C_3, 1 isomère ; C_4, 2 isomères ; C_5, 3 isomères ; C_{10}, 75 isomères ; C_{20}, 366 319 ; C_{30}, 4 111 346 763 ; C_{40}, 62 491 178 805 831.

Bien que tous ces types théoriques de molécules n'existent pas simultanément dans les pétroles, on imagine quel nombre considérable de composés différents on peut atteindre, si l'on ajoute les composés au-delà de C_{40}, les autres familles de constituants du pétrole et les diverses combinaisons possibles entre les termes de ces familles...

Pratiquement la connaissance de la composition d'un pétrole comporte deux étapes : la distillation fractionnée, chère aux raffineurs ; l'analyse chimique par diverses méthodes complémentaires.

La *distillation fractionnée* sélectionne des classes de composés en fonction de leurs températures d'ébullition, lesquelles croissent en gros selon les poids moléculaires. Les « coupes », ou « fractions », obtenues correspondent aux divers produits d'usage courant (tableau ci-contre, en haut).

Chaque fraction contient de nombreux composés, différenciés selon leurs critères physiques. Du point de vue chimique par contre, les familles fondamentales restent d'autant plus mêlées que les fractions sont plus lourdes.

L'*analyse chimique* s'adresse le plus souvent non au pétrole brut mais aux « coupes » de distillation qui représentent déjà une certaine sélection. Les principales techniques mises en œuvre sont la chromatographie en phase gazeuse et liquide, et la spectrométrie de masse, qui permettent l'identification des composés moléculaires dont l'étude va suivre.

Les alcanes

De formule générale C_nH_{2n+2}, les alcanes acycliques se subdivisent en :

— *alcanes normaux* à chaîne linéaire ;

— *iso-alcanes* à chaîne plus ou moins ramifiée, parmi lesquels on distingue le groupe particulier des « isoprénoïdes », qui porte un groupement méthyle (—CH_3) sur chaque 4e atome de carbone (C_{15} = farnesane, C_{19} = pristane, C_{20} = phytane, etc.) ; leur structure typique les apparente aux chaînes phytol, habituellement greffées sur les prophyrines du type chlorophylle, etc. ;

— *cyclo-alcanes (ou cyclanes, ou naphtènes)* $C_n H_{2n}$, formés de cycles comportant théoriquement 3 à 8 atomes ; dans le pétrole on en connaît surtout :

en C_5 (le cyclopentane)

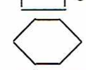 en C_6 (le cyclohexane)

ainsi que leurs homologues méthylés et à chaîne latérale ; Il existe également de nombreux composés polycycliques :

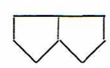 bicyclo-octane

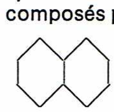 décaline

Certaines structures particulières telles que les *stéranes* (tétracycliques) et les *triterpanes* (pentacycliques) sont considérées comme de véritables « fossiles géochimiques » car elles témoignent de leur origine biologique.

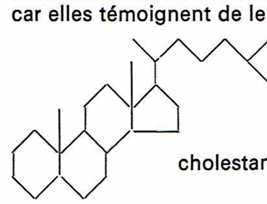 cholestane

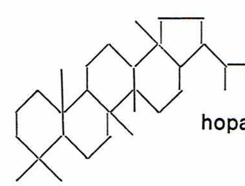 hopane

Les alcènes

De formule générale C_nH_{2n}, les alcènes, de structure linéaire, sont des produits très rares. Leur insaturation est un état d'instabilité peu compatible avec les immenses durées géologiques. Au cours des milliers d'années en effet, les échanges chimiques sont suffisamment nombreux pour que les composés en présence aient atteint des états stables. C'est pour cette raison qu'on n'observe pas d'alcynes (encore plus instables) dans les pétroles.

Les aromatiques

Ce sont les composés cycliques à 6 atomes de C, avec trois doubles liaisons conjuguées qui leur confèrent des propriétés spéciales et notamment une grande stabilité (délocalisation des électrons π).

On distingue :

— les *monoaromatiques* C_nH_{2n-6} :
le chef de file de cette série est le benzène,

C_6H_6,

qui comporte divers homologues méthylés, ou *alkylaromatiques,* tels que le toluène

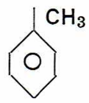

et les xylènes — ortho-, méta- et para-...

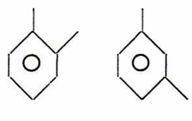

— les *polyaromatiques* (ou aromatiques polycycliques) constituent une large famille avec les *diaromatiques* tel le naphtalène

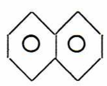

et les *triaromatiques* avec

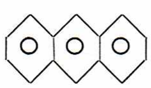

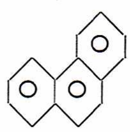

l'anthracène et le phénanthrène.

Les noyaux aromatiques peuvent non seulement augmenter en nombre, mais également comporter d'autres arrangements entre eux, et des chaînes latérales.

En outre, les familles des cyclanes et des aromatiques, en combinant leurs termes, donnent naissance à une nouvelle famille :

— les *cyclano-aromatiques,* tels que :

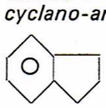

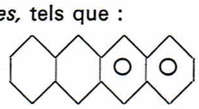

l'indane l'octahydropentacène,

comprennent les *stéroïdes,* comportant 1 cycle à double liaison et 3 cycles saturés, et les *triterpénoïdes,* comportant 5 cycles plus ou moins saturés.

Tous les composés évoqués jusqu'ici, qui forment la fraction principale du pétrole, sont des hydrocarbures *stricto sensu* dans la molécule desquels n'entrent que des atomes de carbone et d'hydrogène. Il existe, en plus, de très nombreux composés comportant de l'oxygène, de l'azote, du soufre et divers métaux. Ils font figure d'impuretés. L'analyse élémentaire des pétroles révèle les compositions suivantes :

C	H	O	N	S	Métaux
82,0 à 86,5 %	10,0 à 13,6 %	0,01 à 3,5 %	0,03 à 1,2 %	0,06 à 5,5 %	1 à 2 000 ppm

Les composés oxygénés

Ils se rattachent à quelques grandes familles principales :

— les *acides gras* $CH_3(CH_2)_nCOOH$;

— les *acides naphténiques* avec un ou plusieurs cycles en C_5 ou C_6

... COOH

COOH

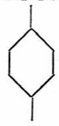

(aromatiques ou saturés) et avec, ou sans, chaînes latérales; leur teneur dans les pétroles varie de 0,03 à 2, voire 3 %;

— les *phénols*

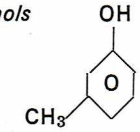

métacrésol;

— les *alcools*

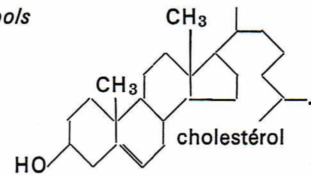

cholestérol

La plupart de ces produits présentent un intérêt génétique; d'autres peuvent résulter de l'oxydation des pétroles.

Les composés azotés

Ils se rattachent essentiellement à deux groupes de substances : à azote basique et à azote non basique.

— *Composés à azote basique :*

R—CO—NH$_2$: amides

R—NH$_2$, R—NH—R′, R—N(R′)—R″ : amines

R—CH(NH$_2$)—COOH : acides aminés.

— *Composés à azote non basique :*

Nitriles : R—C ≡ N

Hétérocycles azotés

monocycliques :

en C_4 et en C_5

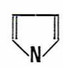

pyrrole

pyridine

polycycliques :

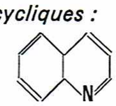

quinoléine

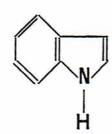

indol

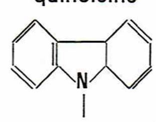

carbazole

et leurs dérivés méthylés et avec chaînes latérales.

Ces substances, qui n'existent pas dans la nature à l'état libre, semblent résulter de la dégradation thermique de molécules beaucoup plus complexes. Parmi celles-ci, certaines sont observées parfois en relative abondance dans les pétroles : ce sont les *porphyrines* dérivées des pigments biologiques, tels que la *chlorophylle,* l'*hémine,* etc.

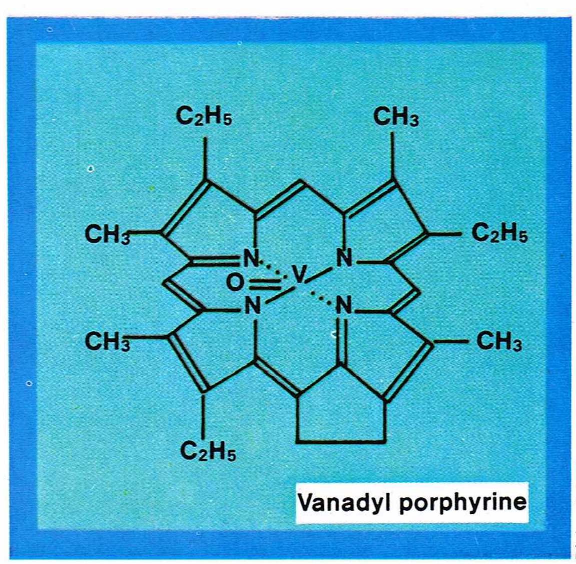

Richard Colin

◄ ***Structure de la vanadyl porphyrine.***

Les composés soufrés

Le soufre existe même parfois à l'état dissous (pétroles d'Égypte, de l'ouest du Texas), et l'H_2S entre parfois dans la composition du gaz naturel. Mais le plus souvent on observe :

— des *sulfures* (R CH_2—S—CH_2R' : monosulfures ; R CH_2—S—S—CH_2R' : disulfures) ;

— des *mercaptans* R—CH_2—SH

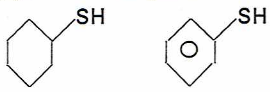

— des *thiophènes*

thiophène

thiocyclohexane

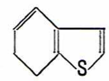
benzothiophène

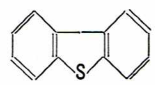
dibenzothiophène

et diverses combinaisons entre ces molécules.

Les processus de formation des huiles soufrées ne sont encore pas vraiment élucidés. L'introduction du soufre peut se faire soit au stade primaire, à partir de la matière première des hydrocarbures, soit secondairement par action de l'H_2S et du S sur le pétrole déjà formé.

Composés azotés et composés soufrés sont tous indésirables dans les pétroles, d'où la nécessité de les éliminer par des traitements spéciaux (hydrogénation, etc.). A défaut de quoi, ils seraient responsables non seulement de l'empoisonnement des catalyseurs, mais encore de la formation de produits particulièrement polluants au moment de la consommation.

Les composés organométalliques

Plus de vingt métaux peuvent être décelés dans les pétroles bruts, le plus souvent sous forme de combinaisons organiques liées à l'origine même du pétrole (c'est le cas des porphyrines).

Les métaux les plus abondants sont le vanadium, le nickel et le fer suivis par le germanium, cobalt, étain, molybdène, silicium, aluminium, calcium, magnésium, sodium, cuivre, chrome, thallium, mercure, plomb, manganèse, zinc, rubidium, strontium, uranium, radium.

Le rapport V/Ni est souvent utilisé comme un caractère spécifique régional. D'un bassin à l'autre il peut varier de 0,2 à 16.

Les « produits lourds », ou constituants à poids moléculaire élevé

Les produits les plus lourds, de poids moléculaire supérieur à 800 (jusqu'à plusieurs dizaines de milliers), constituent la dernière classe des composés du pétrole.

— Les *résines* sont des constituants très visqueux dont l'aspect rappelle celui des résines naturelles et dont la densité est voisine de 1. Selon les huiles, leur teneur varie de 0,1 à 20 % ; elles sont formées surtout de composés polycycliques contenant des cycles aromatiques et des hétéroatomes (S, O et N).

— Les *asphaltènes* se présentent sous forme de poudres noires ou brunâtres, de densité > 1,1. Leur poids moléculaire varie de 1 000 à plusieurs dizaines de milliers. Leur teneur dans les bruts est très variable. Solubles dans le benzène, on les sépare facilement par précipitation à l'aide d'un solvant paraffinique léger (pentane, hexane, heptane).

Ces produits lourds constituent l'essentiel des résidus de distillation sous vide du pétrole brut. Ils sont aussi très abondants dans les asphaltes naturels. On y trouve les plus fortes teneurs de composés hétéroatomiques ; par contre la teneur en H y est bien moindre que dans les constituants huileux.

▼ *A gauche, divers types de pétroles bruts ; de gauche à droite : pétrole lourd (Gela, Sicile) ; pétrole léger (El Borma, Tunisie) ; condensat (Spilamberto, Modène) ; pétrole paraffinique (Libye) ; pétrole de Cortemaggiore (Piacenza) ; pétrole moyen (Iran). A droite,* pétrole *paraffinique (Libye) et paraffine solide qui en est extraite.*

P. Martini

P. Martini

▶ *Diverses fractions d'un pétrole brut ; les chiffres que l'on aperçoit sur les étiquettes indiquent les températures correspondant à chaque « coupe de distillation » (photo C. F. P.).*

A. Combaz

— Les *carbènes* et *carbénoïdes*, composés à structure plus condensée et plus pauvre en H, sont observés non plus dans les pétroles, mais dans les asphaltes naturels. Ils sont insolubles dans les solvants habituels. Ce sont des produits fortement polymérisés à structures cycliques essentiellement aromatiques, associées en feuillets, où les teneurs en hétéroatomes et en organométalliques sont particulièrement élevées.

Caractères physiques des « hydrocarbures naturels »

Les hydrocarbures gazeux observés en accumulations plus ou moins importantes ont toujours le méthane pour constituant principal, voire exclusif (gaz sec). Lorsqu'ils constituent un « gaz cap » associé à un champ de pétrole, on observe toujours la présence d' « homologues supérieurs » c'est-à-dire de termes légers de C_2 à C_6. Parfois il s'agit de gaz humide, dit encore « à condensat » sans qu'il existe, à proprement parler, de pétrole associé. Enfin, les hydrocarbures gazeux peuvent être associés en proportions variables à des gaz non combustibles : le gaz carbonique (CO_2), l'azote, (N_2), l'hélium (He), ou encore à de l'hydrogène sulfuré (H_2S) et même de l'hydrogène (H_2).

Le pétrole proprement dit, selon sa pression et ses conditions de gisement, contient des quantités variables de gaz dissous. Sa composition contrôle enfin sa densité et sa viscosité (tableau ci-contre).

voisinage de la surface; enfouissement et actions géothermiques vers les profondeurs.

Les accumulations de gaz et d'huile n'existent que grâce à l'étanchéité de la couche qui joue le rôle de « couverture », obturant le volume de roche poreuse qui les contient. Dans la mesure où l'étanchéité est imparfaite, au long des millions d'années qui mesurent les durées géologiques, les hydrocarbures les plus mobiles, en

	Densité à 15 °C	API	Viscosité à 20 °C en centistockes	Exemples
Condensats	0,70-0,76	65°-54,7°	1,0-1,5	Hassi R'Mel (Algérie)
Huiles légères	0,76-0,80	54,7°-45,4°	1,5-5	Hassi Messaoud (Algérie)
Huiles moyennes	0,80-0,88	45,4°-29,3°	4 -20	Kirkuk (Irak)
Huiles lourdes	0,88-1,00	29,3°-10°	19 400 à 37,8 °C	Boscan (Venezuela)

▲ ***Tableau montrant que la composition du pétrole contrôle sa densité et sa viscosité.***

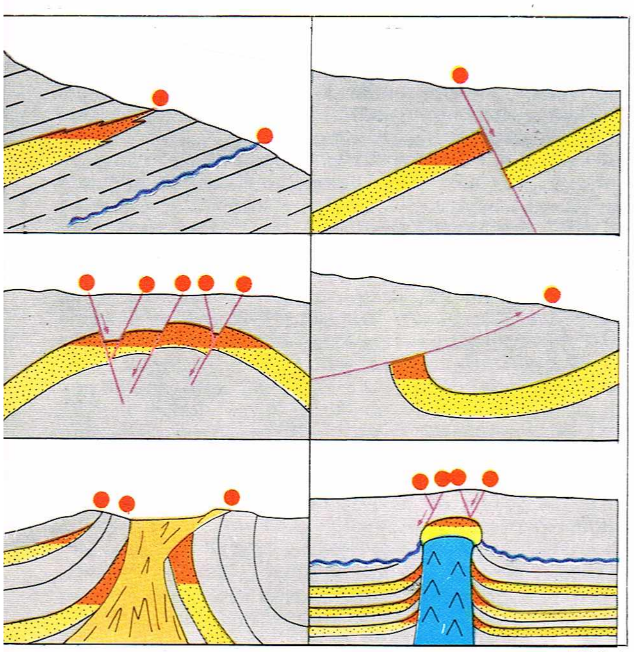

I.G.D.A.

◀ ***Représentation schématique des indices de pétrole et gisements : le pétrole s'écoule, où affleure la roche-réservoir, le long d'une surface de discordance, ou le long de failles ou de fractures.***

particulier le méthane, tendent à diffuser et à fuir vers la surface du sol. Si, par suite de mouvements tectoniques, des fissurations se produisent dans la couverture, ou s'il se produit un basculement du « piège », celui-ci va se vider progressivement. De nombreux gisements, dont certains indices subsistent actuellement, ont ainsi été détruits dans le passé.

Les mouvements de déformation des séries pétrolifères peuvent aussi être beaucoup plus importants et entraîner l'action de l'érosion. Ainsi, l'usure de la surface du sol peut atteindre, entamer, et percer la couverture de l'accumulation, entraînant sa destruction. Les termes les plus volatils disparaissent les premiers dans l'atmosphère. Il arrive qu'ils s'enflamment en atteignant la surface du sol (feux éternels). Dès le voisinage de cette surface, et *a fortiori* sur celle-ci, des actions oxydatives importantes s'exercent sur les terrains et les fluides qu'ils contiennent. Les hydrocarbures y sont très vulnérables. Les Bactéries, notamment, consomment les hydrocarbures, en commençant par les *n*-alcanes, puis les iso-alcanes. Il en résulte, d'une part, la production de CO_2, H_2O, N_2, SH_2, CH_4 et, d'autre part, de produits lourds résiduels : les bitumes et asphaltes.

A l'inverse des actions superficielles, un autre type d'évolution affecte les accumulations d'hydrocarbures : c'est la transformation géothermique par suite de l'enfouissement progressif des séries pétrolifères. Les proportions des constituants du pétrole varient constamment en

Les teneurs en soufre sont d'autant plus importantes que la densité est plus élevée. Certains bruts font cependant exception en restant dépourvus de soufre malgré une densité élevée (Indonésie, Chili).

La couleur du pétrole brut est généralement brunâtre à noirâtre, avec parfois des reflets verts. Toutefois, certains bruts légers (Camiri et Caramba en Bolivie), ou condensats, ont une belle couleur jaune foncé à jaune clair. Ces mêmes produits légers (Bolivie, Modène) ont une agréable odeur de gazoline. Les huiles lourdes, surtout très soufrées, ont par contre une odeur forte et désagréable. Enfin, les bitumes naturels, formés surtout de composés hétérocycliques très lourds, sont noirs et visqueux, voire solides et cassants (asphaltes).

Transformation des hydrocarbures dans la nature

A l'échelle des durées géologiques, les accumulations d'hydrocarbures subissent une évolution qui tend à modifier la nature même des produits qu'ils contiennent et, au terme de cette évolution, à les faire disparaître. Les causes de ces transformations sont de natures diverses : diffusion des gaz, action des mouvements tectoniques, érosion, actions bactériennes, oxydation, au

▼ ***Mares de « bitume » et sources de pétrole brut à Baba Gurgur, près de Kirkuk (Irak).***

A. Combaz

fonction des apports d'énergie thermique subis. Ainsi, la proportion d'alcanes, puis d'alcanes moyens et légers, puis d'alcanes légers seulement, augmente avec la profondeur du gisement. Ces processus s'opèrent au détriment des cyclanes, cyclo-aromatiques et autres molécules plus complexes portant des chaînes latérales. Les pétroles les plus profonds sont donc aussi les plus légers.

Parallèlement, on observe une condensation thermocatalytique d'alcanes lourds en cires et résines et une aromatisation concomitante. La polycondensation des aromatiques et alcanes conduit à la formation de molécules très lourdes, arrangées en feuillets, tandis qu'avec le méthane, les hétéroatomes sont éliminés sous forme de CO_2, H_2O, NH_3, N_2 et SH_2. Au terme de l'évolution thermique, seuls subsistent le graphite et le méthane. C'est bien ce qu'indiquent l'expérience des forages les plus profonds et celle des champs découverts dans les terrains ayant connu des actions géothermiques importantes et durables. David White, vers 1915, fut un des premiers à exprimer cette loi d'extinction des gisements de pétrole en fonction des températures subies. Dans telle région pétrolière, au-delà d'une certaine *dead-line,* seules subsistent des accumulations de gaz à condensat, puis seulement de gaz sec. C'est la théorie du *carbone-ratio*, exprimée dans son principe par H. D. Rogers un demi-siècle plus tôt à propos des charbons et pétroles de Pennsylvanie. Il existe donc une corrélation entre le degré de transformation « anchimétamorphique » des terrains, la teneur en matières volatiles (ou corrélativement en carbone fixe) des charbons qu'ils contiennent, et l'existence dans ces terrains de gisements de pétrole ou de gaz.

Au « rang » des charbons bitumineux correspondent les gisements de pétrole, à celui des houilles maigres correspondent les gisements de gaz humide, et, à partir du rang de l'anthracite, même les gisements de gaz paraissent voués à la destruction. Ce stade implique des températures supérieures à 150 °C pendant de longues durées. Les termes lourds du pétrole ainsi que les hétéroatomes, ayant perdu leur hydrogène, évoluent à l'instar du charbon vers le graphite, limite extrême de cette évolution.

Cette théorie, amplement vérifiée depuis Rogers et White et désormais universellement admise, peut être considérée comme un acquis de la connaissance moderne.

A. Combaz

▶ ***Fragment de carotte de dolérite dont les fractures sont imprégnées d'huile lourde.***

Origine des hydrocarbures naturels

Après les explications mythologiques des premiers âges, les hommes, toujours acharnés à expliquer l'origine des choses et des phénomènes, ont professé au Moyen Age, par la bouche des alchimistes, que le pétrole et le bitume proviennent de la condensation du « mercure » et du « soufre » dans les crevasses des montagnes... Pour le XVIII^{e} siècle, leur origine était due à la distillation du charbon. Au siècle dernier, enfin, apparaissaient les hypothèses *abiogéniques,* qui trouvent dans certaines réactions chimiques une explication suffisante à l'origine du pétrole. Depuis cette époque, les théories *biogéniques*, de leur côté, n'ont cessé de progresser à la faveur de très nombreux travaux de chimie, biochimie et géochimie organique menés depuis un siècle : ce sont elles qui rassemblent actuellement le plus grand nombre de partisans.

Les hypothèses abiogéniques

Ces hypothèses attribuent une origine entièrement inorganique aux hydrocarbures naturels, lesquels seraient donc issus de réactions purement chimiques entre composés minéraux. Elles présentent une certaine diversité.

La théorie cosmique

Les hydrocarbures ont une origine extraterrestre. En effet, les études spectroscopiques des corps célestes dans les années 1930 ont révélé l'existence de méthane en quantité importante dans les atmosphères de Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. Plus récemment, des hydrocarbures sous forme de CH_4 et de radicaux libres accompagnés de molécules d'eau, de formol, etc., ont été découverts dans les masses de gaz interstellaire de notre galaxie.

Ainsi, selon les vues déjà anciennes de Sokolov (1890), les bitumes terrestres seraient le résultat de l'union directe de l'hydrogène et du carbone au moment de la formation de notre planète. Depuis cette époque, ils diffuseraient du magma interne vers la croûte terrestre. La preuve de cette origine céleste des hydrocarbures serait apportée par leur présence dans certaines météorites. Fred Hoyle, en 1955, défendait encore cette hypothèse et imaginait que les nuages de l'atmosphère de Vénus pouvaient être formés de gouttelettes d'huile... En fait, les récentes explorations par sondes spatiales n'ont rien montré de semblable. Cependant, Mueller (1963), qui a examiné les cas de 25 météorites dans lesquelles des hydrocarbures ont été identifiés, conclut que ceux-ci « ressemblent à ceux qui ont été décrits sur terre comme ayant une origine abiogénique ».

La théorie cosmique, qui compte ses partisans surtout parmi les astronomes, rejoint l'hypothèse d'assez rares géologues, mais surtout de certains chimistes, pour lesquels le pétrole et les hydrocarbures gazeux ont une origine ignée profonde.

Théories volcanique et magmatique

Depuis le début du siècle dernier, elles ont compté des défenseurs résolus; mais ceux-ci sont devenus assez rares de nos jours. Von Humbolt (1804) supposait que le pétrole distille des profondeurs de la Terre à partir des roches primitives. Berthelot (1866) précisait que l'action de l'eau sur les carbures métalliques produit d'abord l'acétylène, qui va ensuite donner toute la gamme des hydrocarbures saturés et aromatiques par simple polymérisation et hydrogénation. L'hydrogène nécessaire proviendrait alors de la dissociation de l'eau vers 1 100 °C. En outre, l'hydrogène réduit le CO (issu de la dissociation de CO_2) pour produire des hydrocarbures saturés.

Pour Mendeleiff (1877), Le Bel, Moissan (1896), etc., c'était encore l'action de l'eau sur les divers carbures métalliques qui était la source des hydrocarbures. Berthelot (1866) croyait à la réduction possible du CO_2 au contact de métaux alcalins dans les profondeurs du globe.

La présence de méthane dans les gaz des volcans, d'une sorte de bitume dans les laves du Vésuve et diverses autres roches volcaniques témoignent en faveur de la théorie volcanique. Parmi les auteurs français ayant défendu cette théorie, E. Coste, au début du siècle, était catégorique : pétrole, gaz combustible et bitume, souvent associés au soufre, constamment observables dans les roches et manifestations volcaniques, proviennent des roches profondes en fusion. Ils diffusent vers la surface à la faveur de failles et fractures, et imprègnent les roches poreuses rencontrées dans leur cheminement.

Mais la faiblesse de cette théorie, déjà soulignée par les contemporains de Coste, est son incapacité d'argumenter sur l'origine — la matière première — des hydrocarbures et le processus de formation de ceux-ci. Par ailleurs, les « volcans de boue » contenant des hydrocarbures ont été abusivement considérés comme des phénomènes volcaniques proprement dits. En fait, leur origine est due à l'expansion de méthane sous pression. Quant aux hydrocarbures associés aux roches et phénomènes volcaniques, ils n'existent qu'en proportions très réduites, et rien ne prouve qu'ils aient trouvé leur origine dans le magma profond. Il est vrai que des accumulations commerciales de pétrole existent dans des massifs éruptifs ou métamorphiques. Mais aucune relation génétique n'existe entre celles-ci et les hydrocarbures migrés dans l'espace poreux des fractures ou de la trame minérale altérée. Pourtant, certains cas restent encore douteux : l'huile découverte dans les vésicules d'un dyke de dolérite à Dyvika (Norvège) ; les hydrocarbures gazeux et les bitumes observés dans un massif de roches alcalines de la péninsule de Kola (U.R.S.S.). De tels cas sont cependant très rares.

En résumé, les théories abiogéniques peuvent effectivement rendre compte de la formation d'hydrocarbures naturels, notamment de méthane, mais elles ne peuvent expliquer la composition des hydrocarbures naturels dans leur abondance et leur diversité.

Les hypothèses biogéniques

Avec la science naissante du XVIII^e^ siècle, il est généralement admis à cette époque que le pétrole et ses dérivés sont issus des restes végétaux et animaux.

Plantes terrestres et charbons

P.-J. Mouquer (1758) enseignait que le pétrole était dû à l'interaction des lipides végétaux sur des acides. Quant à M. V. Lomonosov (1763), il attribuait l'origine des bitumes et du pétrole à l'action de la température et de la pression sur le charbon. Cette idée persista longtemps au XIX^e^ siècle, et jusqu'à notre époque, avec les observations de L. M. Banks (1959) sur la « formation Oficina » du Venezuela oriental, où les hydrocarbures paraissent bien issus de lits de charbon.

Hedberg (1968) admet que l'huile observée provient de la matière organique des plantes terrestres. Déjà, Reichenbach, en 1834, voyait l'origine du pétrole non dans la distillation de la houille, mais dans celle du bois et des aiguilles de pin. Forbes (1958) pense également que le pétrole est issu non des plantes terrestres, mais des résines qu'elles sécrètent. (Charles Lyell, en 1837, Peckman, en 1844, etc., avaient également attribué l'origine des hydrocarbures du lac d'Asphalte de l'île de la Trinité aux végétaux terrestres.)

La production de méthane, voire d'hydrocarbures liquides et solides dans les marais a été soulignée par certains auteurs et interprétée comme un modèle de milieu pétroligène (Peckham, 1884).

Selvig (1950), Hubard (1950), Hedberg (1968) insistent sur l'importance des cires végétales comme précurseurs d'hydrocarbures.

Substances chimiques issues du continent et sédimentées en milieu marin

La masse de matière organique issue du continent et transportée dans les mers par les fleuves, qui représente 1,4 Mt par an, constitue une quantité importante d'hydrocarbures potentiels. Hedberg (1968) note en outre les caractères typiquement continentaux (teneur élevée en cires, faible teneur en soufre) des huiles issues des sédiments d'origine terrestre. Cette observation s'applique tout particulièrement aux terrains d'âges dévonien, carbonifère, crétacé et tertiaire, périodes pendant lesquelles la végétation terrestre était particulièrement abondante. On a attribué un rôle significatif aux « vapeurs » terpéniques (essences végétales), mêlées aux débris végétaux, dans la production finale des hydrocarbures (Went, 1960).

Toutefois, les auteurs russes (Skopintsev, 1950; Bordovskiy, 1965) n'accordent qu'une importance mineure au matériel organique terrestre dans la genèse du pétrole. Ils attribuent, par contre, une grande importance aux sels nutritifs transportés dans la mer par les rivières.

Algues et phytoplancton

Sir R. Murchison (1854) fut l'un des premiers à défendre l'origine algaire des pétroles. Lesquereux (1866) soutint la même thèse en insistant sur le rôle des Algues fucoïdes dans la formation des huiles de Pennsylvanie. Ainsi, en Sardaigne et en Sicile notamment, des amas d'Algues en cours de décomposition sont observés dans les marais salants; ils donnent naissance à un produit voisin du pétrole.

Les bogheads (formés d'Algues microscopiques), les schistes dévoniens à *Sporangites huronensis* (Dawson), qui sont des sporanges d'Algues, sont particulièrement aptes à produire des hydrocarbures sous l'effet de la chaleur.

Selon Ehrenberg (1839), puis Whitney (1868), Clarke (1924), Bordovskiy (1965), le phytoplancton, en particulier les Diatomées et les Dinophycées, jouerait un rôle primordial dans la formation des roches mères du pétrole. L'exemple type, devenu classique, est la série pétrolifère du Miocène de Californie (Monterey Shales).

Animaux marins

Les moules, les Poissons, les Bryozoaires, les Foraminifères, les Lamellibranches, les Orthocères, etc., ont été considérés comme étant à l'origine du pétrole parce qu'on les trouve dans certaines roches bitumineuses. Edouard Suess (1918), Forbes (1958) et divers autres auteurs ont soutenu cette thèse. L'azote observé dans ce type de roches s'est vu attribuer une origine animale.

Warren et Storer (1865), puis Engler et Höfer (1888) ont tenté d'apporter la preuve expérimentale de l'origine du pétrole en distillant (300 à 400 °C) des huiles de Poissons sous pression (10 atm). L'huile ainsi obtenue contenait en particulier des alcanes (C_5 à C_8), des oléfines et des aromatiques.

Parmi les arguments décisifs utilisés par les partisans de la théorie biogénique figure celui de l'activité optique des pétroles. Certains de leurs composés ont en effet le pouvoir de dévier le plan de polarisation de la lumière. De tels composés ne peuvent avoir qu'une origine biologique.

Actuellement, à quelques exceptions près, tous les géologues sont partisans d'une origine biogénique. Quel-

A. Combaz

▲ ***Diatomées : leurs frustules sont siliceux (échantillon issu d'un fjord des îles Kerguelen) [G = 300].***

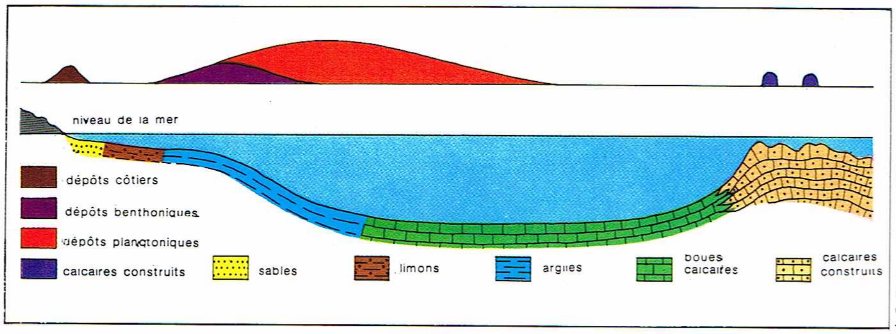

I.G.D.A.

▲ ***Profil schématique de la distribution des sédiments argileux, particulièrement riches en matière organique dans un bassin sédimentaire (d'après Strakhov).***

ques-uns relient plutôt le pétrole, au moins dans certains bassins, à la matière organique d'origine terrestre. La relation génétique la plus sûre relierait certains composés du pétrole aux acides gras observés dans les organismes vivant en milieu aquatique marin, saumâtre et d'eau douce. Quelques divergences d'opinions demeurent au sujet d'une migration précoce de l'huile dans les réservoirs ou d'un produit intermédiaire, d'abord stocké dans la roche mère, avant d'être transformé et de migrer dans les réservoirs.

On sait par exemple que des hydrocarbures sont produits directement par certains organismes, tels que les Diatomées, le varech et également diverses plantes terrestres. Quelque 12 Mt/an d'hydrocarbures seraient produits dans les mers par la seule photosynthèse. Même s'il n'en subsiste que 0,01 %, une période de 100 millions d'années a pu largement contribuer aux réserves existantes. Cependant, l'abondance des aromatiques dans le pétrole prouve bien qu'il a fallu des transformations biochimiques et thermochimiques du matériel organique d'origine.

La genèse des hydrocarbures à la lumière des connaissances modernes

Milieux du dépôt et matière organique

Les milieux dans lesquels prennent naissance les sédiments organogènes (roches mères) susceptibles de donner naissance au pétrole sont variés. Ils intéressent aussi bien le domaine marin que le domaine continental aquatique.

En ce qui concerne le premier, ce sont les marges côtières : lagunes, deltas, zones récifales, bassins confinés, qui se prêtent le mieux à la concentration du matériel organique. Le talus continental en certaines régions privilégiées (côtes occidentales du Pérou, de l'Afrique du Sud, de l'Inde...) paraît également concentrer des quantités considérables de matière organique.

▼ ***Les constituants des roches sédimentaires.***

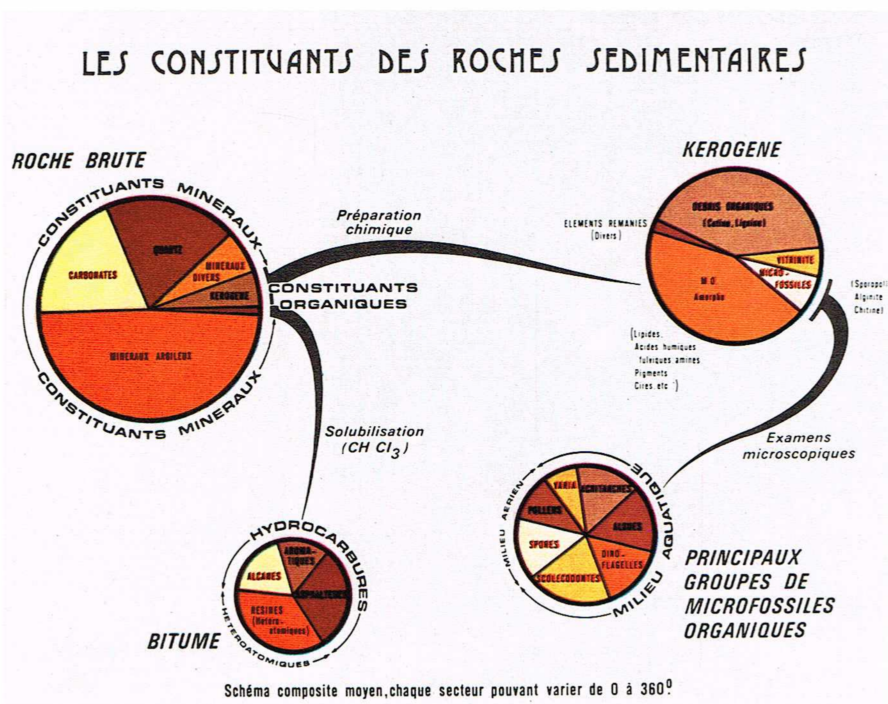

A. Combaz

Sur les continents, les zones marécageuses et les lacs représentent d'importants réservoirs de matière organique sédimentée.

Les conditions de dépôt les plus favorables en milieu marin sont observées dans les embouchures des grands fleuves apportant quantité de sels nutritifs du continent associés à des sédiments fins, dans les bassins intérieurs, les zones de lagunes et les aires récifales ; ajoutant à une forte productivité primaire les conditions d'une sédimentation confinée, ces milieux se comportent en générateurs privilégiés de matière organique végétale et animale. En conséquence, la vie bactérienne est très active et, par suite du confinement, le milieu tend à devenir réducteur, contribuant à la préservation de la matière organique du sédiment. Celle-ci pourra ainsi être enfouie, fossilisée et subir ultérieurement les transformations chimiques conduisant au pétrole.

En milieu lacustre, les conditions favorables sont fondamentalement identiques : l'abondance de lumière solaire et de sels nutritifs provoque une abondance de matière organique dans les sédiments où les conditions biochimiques et physico-chimiques favorisent sa préservation. Certains types de sédiments organiques lacustres et saumâtres sont d'ailleurs remarquables. Par exemple, dans les lacs Balkach et Beloë (Russie) se dépose une vase organique abondante, pétrie de *Botryococcus* (Algue Chlorophycée microscopique). Ce même phénomène est à l'origine des « charbons d'Algues » (bogheads), où les grappes microscopiques innombrables de *Botryococcus* représentent un potentiel considérable d'hydrocarbures : jusqu'à 400 ou 500 l d'huile par tonne de roche. Un potentiel analogue est observé dans la « tasmanite » (Australie, Alaska...), roche formée d'autres Algues microscopiques, les *Tasmanites* analogues aux *Sporangites huronensis*. Dans les grands lacs africains, se dépose, à raison d'un pied par millénaire, une vase formée surtout de matière algaire à l'état de petites pelotes fécales de Crustacés, etc. Ces vestiges organiques sont tout à fait semblables à ceux des « Green River Shales » de l'Éocène du Colorado. Dans le Mud Lake (Floride), la faible quantité de corps bactériens, par opposition à la grande abondance de spores bactériennes, suggère l'existence d'un inhibiteur qui suspend la décomposition des composés organiques. Les Algues sécrètent en effet des substances *antibiosiques* qui diffusent dans le milieu, modifiant considérablement l'écologie des micro-organismes.

Grâce à la limitation de l'activité microbiologique dans les sédiments en formation, une partie de la matière organique se trouve préservée de la minéralisation (transformation en CO_2, H_2O et N_2). Elle se fossilise et reste prisonnière des sédiments : c'est le *kérogène,* qui ne représente en général qu'un faible pourcentage de la quantité initiale de matière organique sédimentée et également, en général, de la roche qui la contient. Actuellement, 4 % de la matière organique totale, d'origine presque exclusivement photosynthétique et autochtone, sont conservés dans les sédiments qui se déposent en mer Noire.

Les roches mères des hydrocarbures sont donc celles qui contiennent la « matière première » de ceux-ci, c'est-à-dire le kérogène. Celles qui, comme le boghead, la tasmanite, etc., sont de véritables roches combustibles (charbons d'Algues) et sont capables de produire jusqu'à 40 et 50 % de leurs poids d'hydrocarbures, restent évidemment exceptionnelles. Les « schistes bitumineux », qui sont capables de produire 25 à 250 kg d'huile par tonne (5 à 25 % de carbone organique), sont au contraire beaucoup plus répandus, et leurs réserves représentent d'énormes quantités d'huile potentielle. Mais les roches mères les plus communes sont beaucoup plus pauvres. Leur registre est en général compris entre 0,5 et 5 % de carbone organique. Les constituants minéraux qui se comportent surtout comme un « diluant » de la matière organique sont le plus souvent la calcite, la dolomite, le quartz finement divisé, et les minéraux argileux. Ces derniers, surtout s'il s'agit de montmorillonite, peuvent avoir un rôle important de catalyseur dans la génération des hydrocarbures.

De telles roches à grain fin proviennent de sédiments formés en eaux calmes. La matière organique s'y dépose généralement en lits très fins, en alternance avec les constituants minéraux, suivant des rythmes probablement

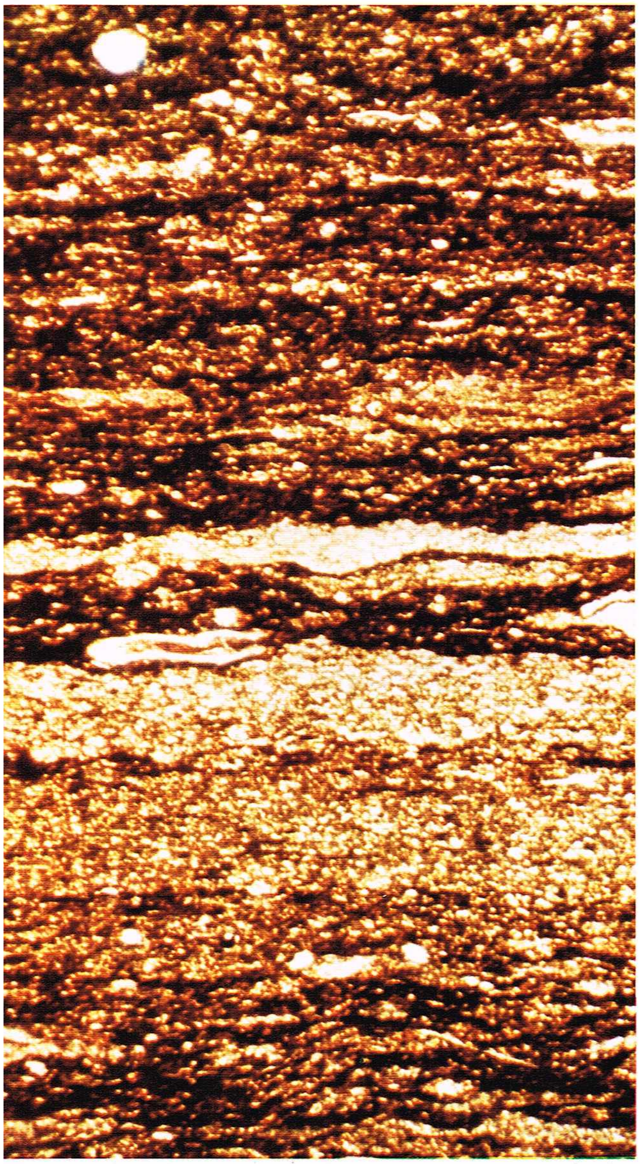

A. Combaz

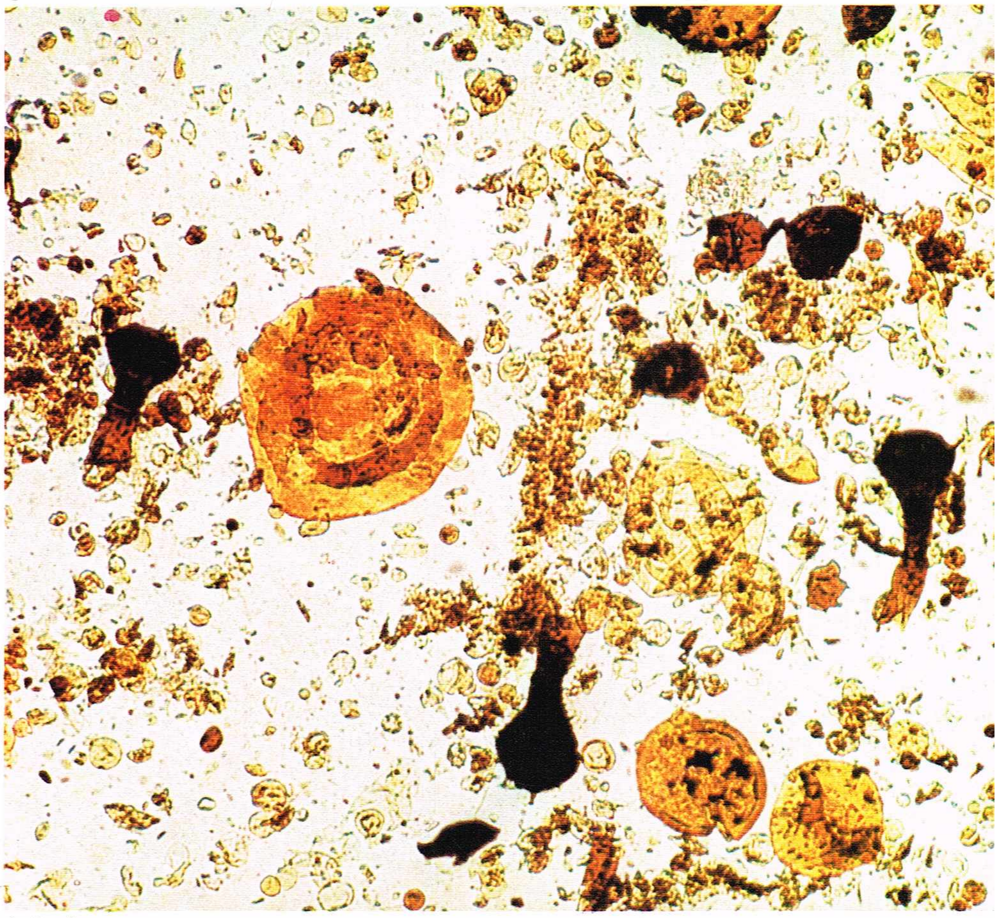

A. Combaz

▲▼ *A gauche, section mince de roche mère où l'on distingue des laminations diversement enrichies en kérogène (G = 40). Dévonien du Canada.*

Ci-dessus et ci-dessous, kérogène à microfossiles organiques *(Silurien du Sahara) : en haut, état de maturation correspondant au début de la zone principale de formation du pétrole (les microfossiles jaunes sont des* Tasmanites, *les bruns en forme de massues sont des* Chitinozoaires*); en bas, état de maturation correspondant à la zone de formation du gaz (les* Tasmanites *sont noircies et craquelées).*

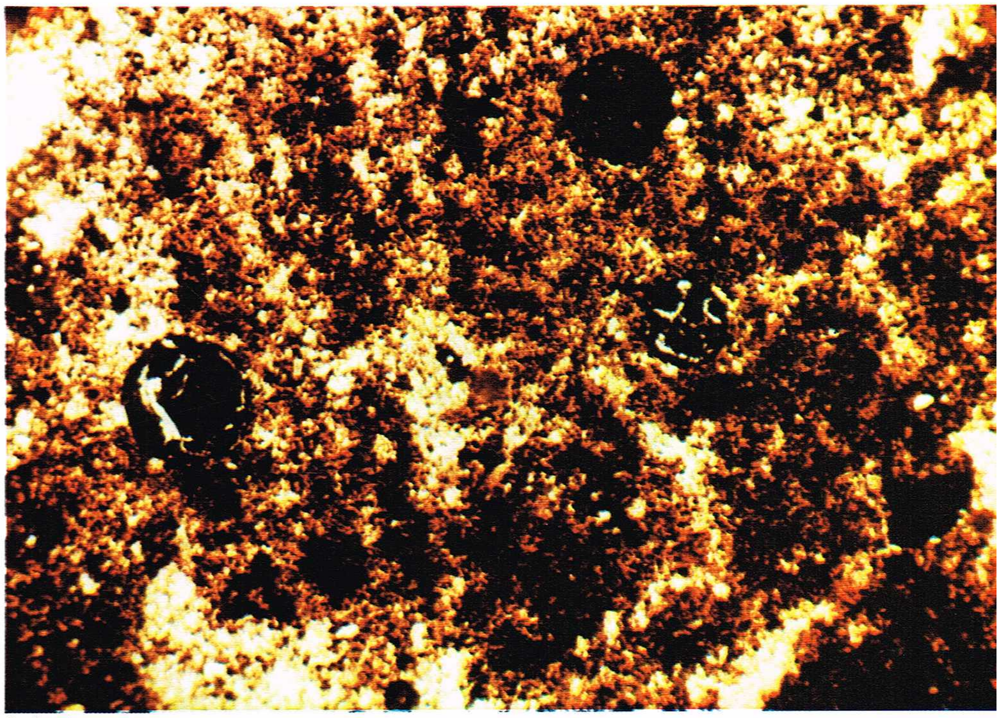

A. Combaz

saisonniers. Ainsi, la roche présente une structure en fines laminations nettement visibles à l'œil nu. Dans d'autres cas, notamment dans les carbonates, les matières minérale et organique sont beaucoup plus mêlées, ou, au contraire, par effet de vannage au moment du dépôt, les particules organiques sont concentrées sur elles-mêmes, donnant naissance à des roches dont le taux de carbone est élevé.

Protopétrole et kérogène

Dans les années 1930, aux États-Unis, un très important travail portant sur 2 000 échantillons de sédiments actuels, parmi les plus riches en matière organique issus de fonds marins du monde entier, de mers chaudes et froides, profondes ou non, a permis à P. D. Trask de conclure que les hydrocarbures liquides n'existaient dans ces sédiments qu'à l'état de traces : 3 pour 100 000 dans les dépôts algaires, moins de 1 pour 100 000 dans les autres sédiments marins.

Les techniques modernes ont cependant permis de mettre en évidence l'existence dans les sédiments actuels, non de pétrole, mais d'un *protopétrole*. Il s'agit d'un liquide ayant l'apparence d'un pétrole lourd, mais formé surtout de produits riches en oxygène et en azote. Directement issu de la biodégradation des vestiges organiques animaux et surtout végétaux, il comporte surtout des acides gras, des alcools, des acides aminés, des pigments végétaux, etc. Il se forme précocement dans le sédiment, avant et au début de sa compaction, sous l'action de Bactéries aérobies et anaérobies. Bien que peu mobile, le protopétrole peut imprégner les horizons poreux (sables en particulier) au contact de la roche. Transformé

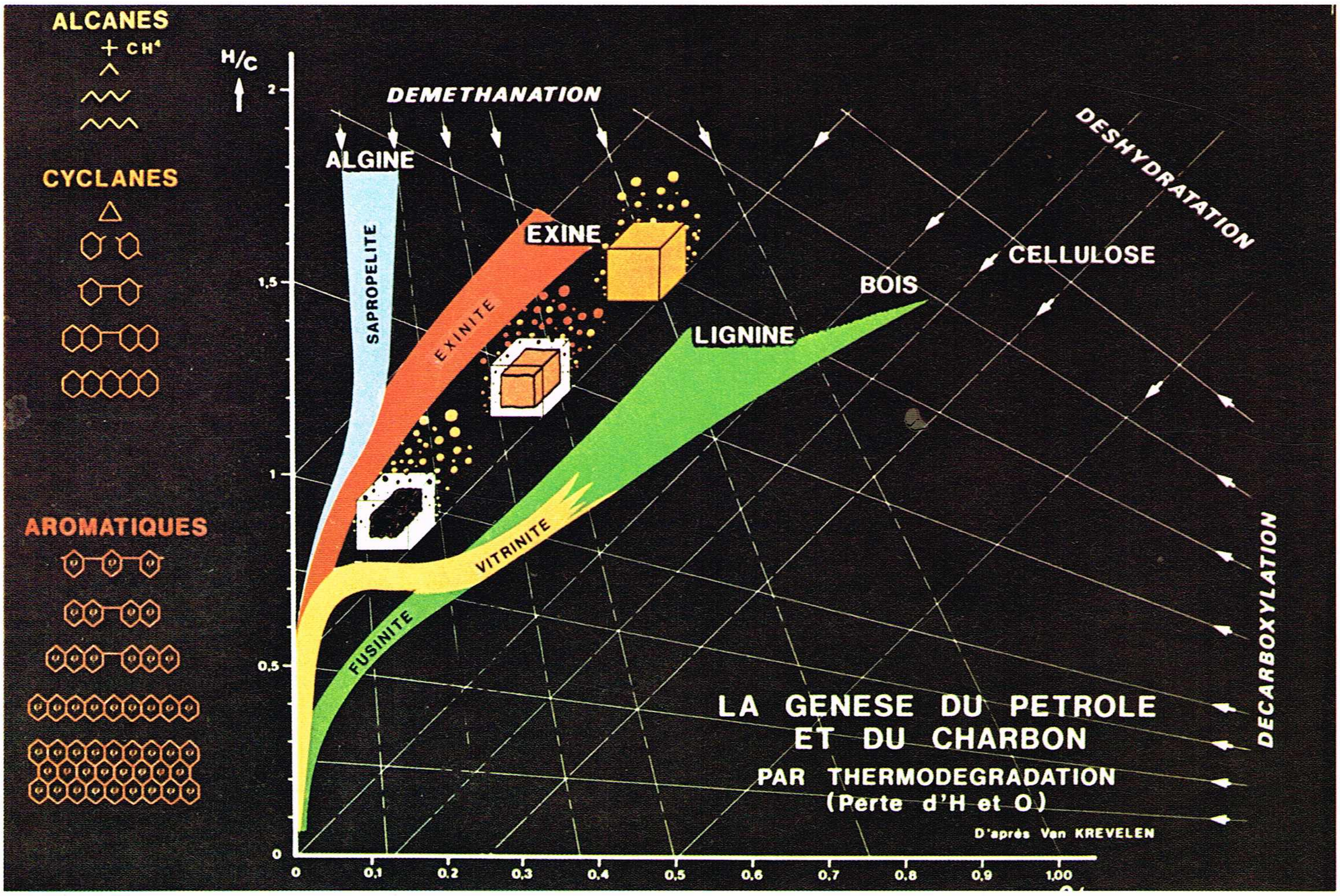

dessin A. Combaz

▲ *La genèse du pétrole (et du charbon) par thermodégradation : perte de CO_2, H_2O et CH_4 (d'après Van Krevelen).*

▶ *Ci-contre,* kérogène de type sapropélique, *d'origine aquatique : matière amorphe - lignée I (Turonien du Sénégal).*

▼ *Ci-dessous,* kérogène de type détritique, *d'origine terrestre : débris de bois et de feuilles - lignée III (Maestrichtien du Sénégal).*

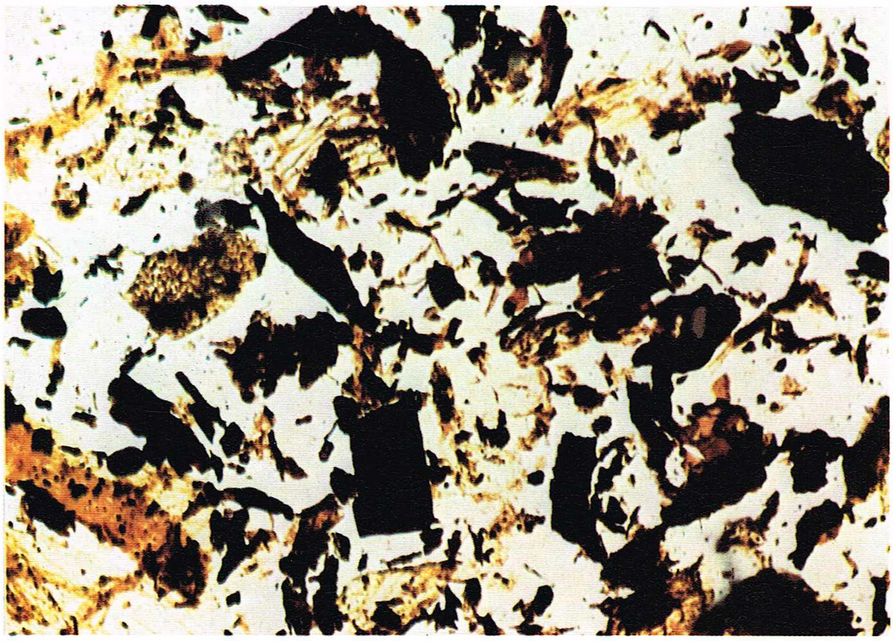

A. Combaz

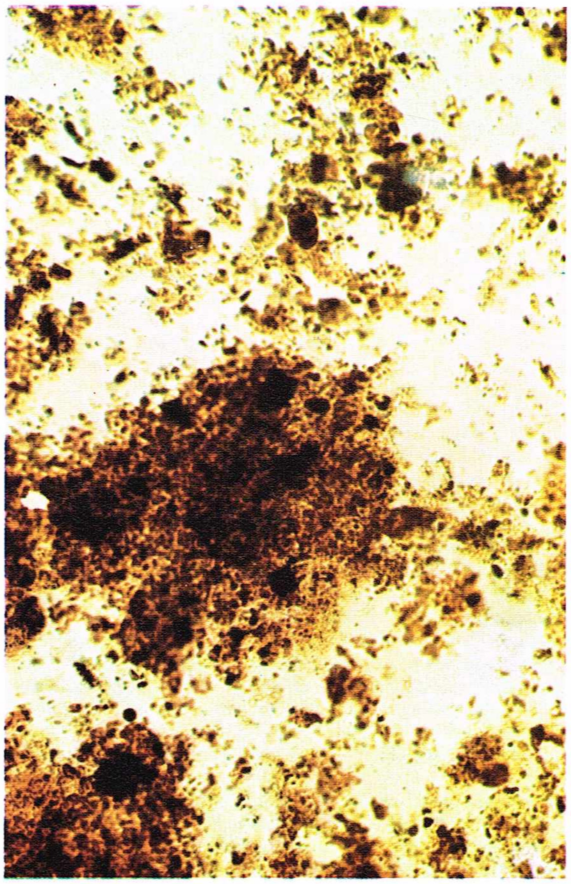

A. Combaz

progressivement au cours de l'enfouissement, il devient finalement du pétrole vrai par perte de l'azote, et de l'oxygène sous forme de CO_2.

On appelle *diagenèse* cette phase de transformation précoce de la matière organique entraînant la formation du protopétrole. Celle-ci dépend de la nature du matériel organique ainsi que des conditions physico-chimiques et biochimiques du milieu de sédimentation.

A côté de la fraction liquide native ou néoformée, demeure la fraction solide résiduelle : le *kérogène*. C'est la matière organique fossile, plus ou moins abondante, des roches sédimentaires. Elle résiste aux solvants habituels et présente une assez grande diversité de composition chimique. L'analyse élémentaire permet d'en distinguer des types significatifs que l'on observe aisément sur le diagramme de Van Krevelen. Ainsi, lorsque le rapport H/C est fort tandis que O/C est faible, ces kérogènes se placent sur des lignées évolutives productrices de pétrole. Dans le cas contraire (H/C faible et O/C fort), il s'agit de kérogènes appartenant à des lignées conduisant au charbon.

Par des expériences de pyrolyse de ces mêmes types de kérogènes jusqu'à des températures supérieures à 300 °C, on a pu vérifier l'aptitude de ceux-ci à produire des hydrocarbures gazeux et liquides avec très peu de carbone résiduel dans le premier cas, ou au contraire peu d'hydrocarbures — et surtout du méthane — avec un résidu carboné important dans l'autre cas.

En plus des moyens d'étude physico-chimiques, on dispose en outre de l'observation microscopique, précieux moyen de connaissance du kérogène. Divers constituants peuvent être ainsi directement reconnus. Ce sont notamment les Algues planctoniques : Dinophycées, Botryococcacées..., les spores et sporanges d'Algues diverses, les spores et pollens de plantes terrestres, des vestiges animaux (rares), les débris variés de plantes terrestres (cuticules de feuilles, fragments de vaisseaux, etc.).

Toutefois, la plus grande partie de la masse du kérogène est formée de matière organique amorphe brunâtre, d'aspect floconneux, plus ou moins divisée. Son origine n'est pas évidente : floculation de matière organique dissoute dans l'eau, de produits humiques, vestiges de végétaux et/ou d'Algues benthiques biodégradées... Selon les cas, les possibilités de produire des hydrocarbures vont donc varier considérablement.

A la « lignée haute » la mieux pourvue en hydrogène, donc la plus apte à générer du pétrole, correspondent les substances algaires d'origines planctonique et benthique, sous forme « figurée » ou « amorphe ». Issue des Algues benthiques, cette dernière, selon Hackford (1932), subit dans le sédiment frais l'hydrolyse acide des carbohydrates, et perd ainsi son oxygène.

A la « lignée basse », la plus oxygénée, qui conduit aux charbons, correspondent les substances d'origine terrestre : débris végétaux divers et produits humiques.

Entre les deux, compte tenu surtout des mélanges en toutes proportions des constituants du kérogène, existent des voies moyennes capables de produire plus ou moins d'hydrocarbures. Les spores et pollens des végétaux terrestres, les cuticules de feuilles, les cires végétales ont des productivités voisines de celles des Algues. Mais, pour l'essentiel, les masses de matière organique produite sont d'origine algaire en milieu aquatique, d'origine surtout cellulosique et ligneuse en milieu terrestre. Les milieux de dépôt rapprochent parfois ces matières, notamment dans les deltas et les marais côtiers ou continentaux, donnant naissance à des sédiments organiques mixtes. Assez souvent, ils sont distincts : zones récifales, lagunes, lacs et étangs.

En bref, le pétrole est issu des matières organiques vivantes aquatiques élaborées par l'assimilation chlorophylienne, profondément biodégradées mais préservées de la minéralisation au fond de l'eau. Comme on l'a déjà vu, c'est aussi l'énergie solaire agissant en milieu aérien à travers le développement des plantes terrestres, survenues bien après les Algues dans l'histoire géologique, qui est à l'origine des charbons.

Transformation du kérogène en hydrocarbures. Après la sédimentation, dès les premiers stades de la compaction, la diagenèse de la matière organique (biodégradation) est pratiquement arrêtée. Lorsque l'enfouissement dépasse 1 500 à 2 000 m, la température des sédiments atteint, dans la moyenne des cas, 60 °C. C'est alors que commence la pétroléogenèse à partir du protopétrole et du kérogène. Cette transformation croît jusqu'à 100 °C environ, température à laquelle elle atteint son maximum pour décroître ensuite jusqu'à 135-150 °C. En profondeur et en température, la principale zone de formation du pétrole se situe donc à 3 000 m en moyenne et entre 80 et 110 °C. La transformation de la « matière première » organique en pétrole s'opère à travers un ensemble de réactions chimiques consistant en ruptures des chaînes moléculaires carbonées et des groupements fonctionnels.

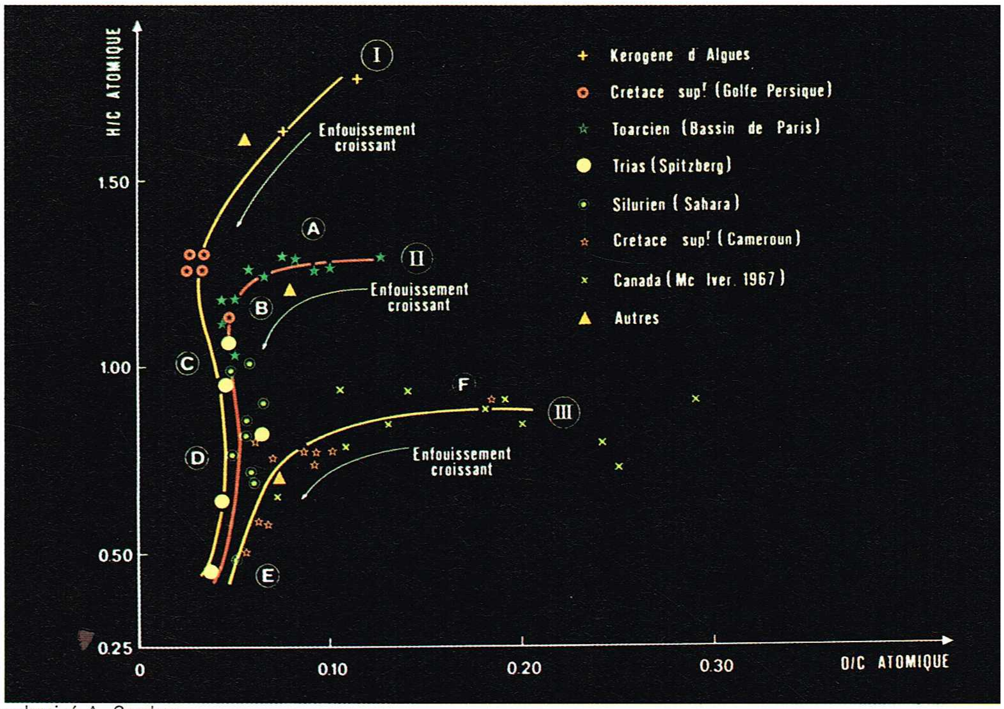

redessiné A. Combaz

▲ ***Les chemins d'évolution des trois lignées fondamentales du kérogène :***
I - lignée « haute », riche en hydrogène (matière algaire);
II - lignée « moyenne » (type sporopollénine);
III - lignée « basse » (type ligno-humique)
[d'après Tissot, Durand, Espitalie et Combaz; Bull. A. A. P. G., U.S.A.].

▼ ***Schéma général de la génération des hydrocarbures en fonction de la profondeur d'enfouissement (d'après Tissot, Durand, Espitalie et Combaz; Bull. A.A.P.G., U.S.A.).***

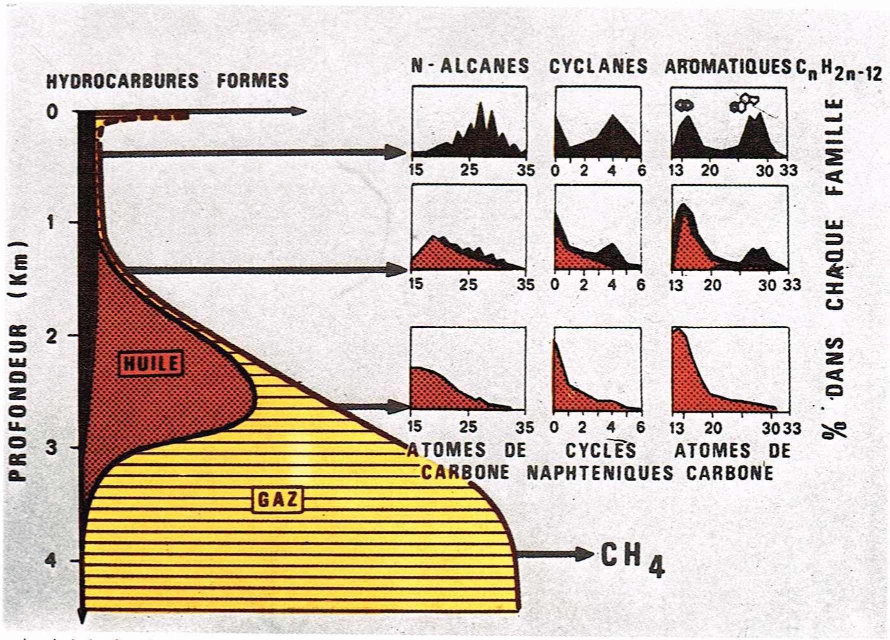

redessiné A. Combaz

▶ ***Évolution de la composition de la matière organique en fonction de la profondeur d'enfouissement : vers 1 500 m, le kérogène se transforme progressivement en hydrocarbures (surtout en alcanes) [document Tissot].***

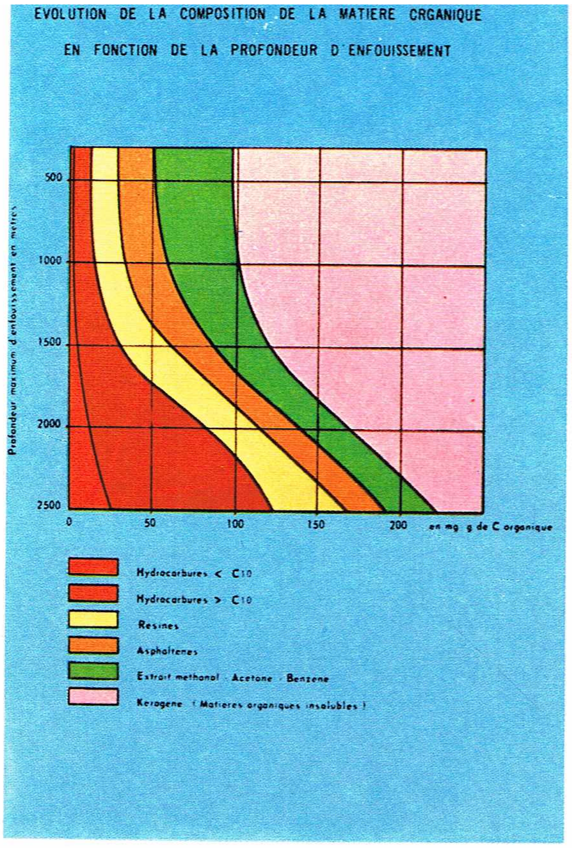

A. Combaz

Elles se traduisent par la perte de CO_2, d'H_2O et de N_2 au niveau de ces derniers, en même temps que des hydrocarbures de plus en plus légers se libèrent au fur et à mesure de l'accroissement de la température.

Les spores et pollens et les Algues microscopiques diverses perdent peu à peu leur couleur jaune clair et présentent des teintes de plus en plus sombres, passant du jaune foncé à l'ambre puis au brun, brun foncé et finalement au noir jusqu'à la carbonisation complète. Les particules gélifiées (vitrinite) enregistrent elles aussi cette évolution par un « pouvoir réflecteur » (quantité de lumière réfléchie) qui passe progressivement de 0,3 à 2 %. Dans le même temps, les constituants organiques les plus vulnérables à la chaleur sont « craqués », et les produits formés, liquides et gazeux, s'ajoutent au milieu aqueux qui baigne la roche dans laquelle ils prennent naissance.

Les premiers termes libérés forment une *huile juvénile,* constituée surtout de produits lourds résinoïdes primaires, puis polyaromatiques, cyclano-aromatiques et polycyclaniques. Sa densité est élevée : 0,88 à 1,00 (soit 29 à 10° API).

Au stade suivant, l'huile est surtout *naphténique :* les cyclanes dominent (éventuellement avec les aromatiques), les alcanes sont peu représentés. Il s'agit encore d'un brut lourd : 0,83 à 0,88 (39 à 29° API).

Une *huile mature* est généralement de nature mixte : les alcanes sont abondants et tendent à l'emporter sur le caractère naphténo-aromatique du produit; c'est un brut moyen : 0,80 à 0,83 de densité (39 à 46° API).

Dans l'*huile paraffinique,* les alcanes dominants sont parfois accompagnés de termes lourds paraffiniques et de résines secondaires. Une telle huile, comme celle d'Hassi-Messaoud, est légère; sa densité est comprise entre 0,76 et 0,80 (55 à 45° API).

Enfin, au dernier stade, on observe des *condensats,* de densité 0,72 à 0,76 (65 à 55° API). Ce sont ici les termes légers qui l'emportent : alcanes gazeux et liquides, monoaromatiques, alkylaromatiques. En fonction de la profondeur, les bruts sont donc de plus en plus légers. Ils sont aussi de moins en moins soufrés, le soufre étant éliminé sous forme de SH_2 par craquage des molécules soufrées. Finalement, aux profondeurs, c'est-à-dire aux températures élevées (> 150 °C), il ne subsiste que les gaz secs et, à la limite, du méthane qu'accompagne un carbone fixe solide résiduel.

Ainsi, la zone de destruction des gisements de pétrole se situe aux profondeurs correspondant à des températures comprises entre 115 et 135 °C. On connaît cependant quelques exceptions : le gisement le plus chaud du monde atteint 170 °C à 7 000 m de profondeur, le champ de Minas à Sumatra, bien que peu profond (400m), 94 °C.

Nous avons vu plus haut qu'un autre processus naturel est capable de détruire les gisements de pétrole : les actions d'altération au voisinage de la surface du sol, par évaporation des fractions légères et par attaque bactérienne des alcanes, des iso-alcanes, puis des cyclanes, à partir des termes les plus légers. Ce processus conduit à la formation d'huiles lourdes et visqueuses, dont la constitution, à densité égale, n'est pas du tout comparable à celle d'un brut préservé de ces actions.

D'autres processus ont été invoqués dans la génération du pétrole, tels que les influences de la pression, de la radioactivité, des actions catalytiques. Des expériences diverses réalisées pour vérifier celles-ci, on peut désormais conclure que ni l'une ni l'autre des deux premières ne paraît être importante. Quant au rôle des actions catalytiques, dans les conditions naturelles, il est considéré comme probable mais non déterminant; les mécanismes en cause ne sont en tout cas pas connus.

En résumé, si des hydrocarbures « natifs » ayant une origine végétale existent dans les sédiments lacustres et marins, et si d'autres peuvent être issus de certaines biodégradations de matériel organique en milieux confinés, il n'en existe que des quantités très faibles, non significatives en regard des réserves de pétrole en place dans les bassins sédimentaires. Celles-ci résultent de la transformation, après enfouissement au cours des temps géologiques, de masses importantes de matière organique, d'origine essentiellement algaire, préservée d'une dégradation totale grâce aux conditions réductrices des milieux de dépôt. Le facteur déterminant de cette transformation est la chaleur. Ainsi, la zone principale de formation du pétrole est comprise entre 1 500 à 3 500 m de profondeur, soit à des températures variant de 60 à 120 °C, au cours de durées s'exprimant en millions d'années. La matière organique fossile d'origine perd une partie de sa masse sous forme d'hydrocarbures gazeux et liquides, tandis qu'au terme de ces transformations, aux grandes profondeurs, ne subsiste plus dans la roche qu'un résidu de carbone fixe, lorsque les conditions de température et de pression deviennent progressivement celles du métamorphisme régional.

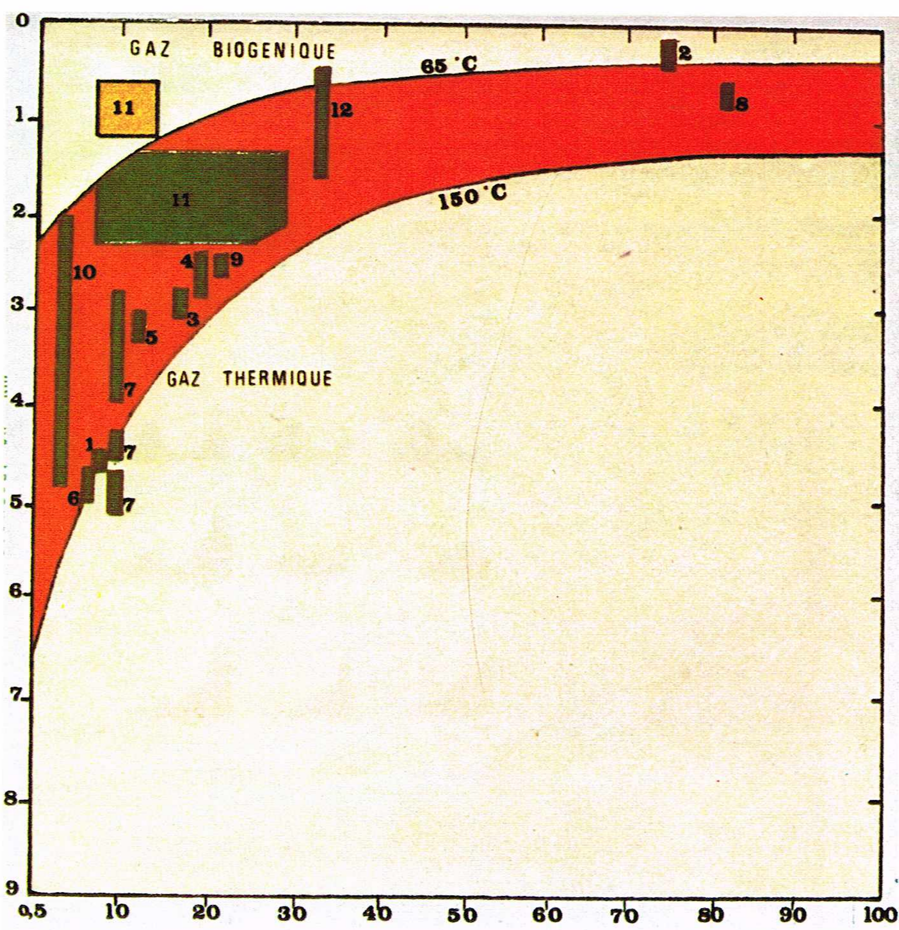

redessiné A. Combaz

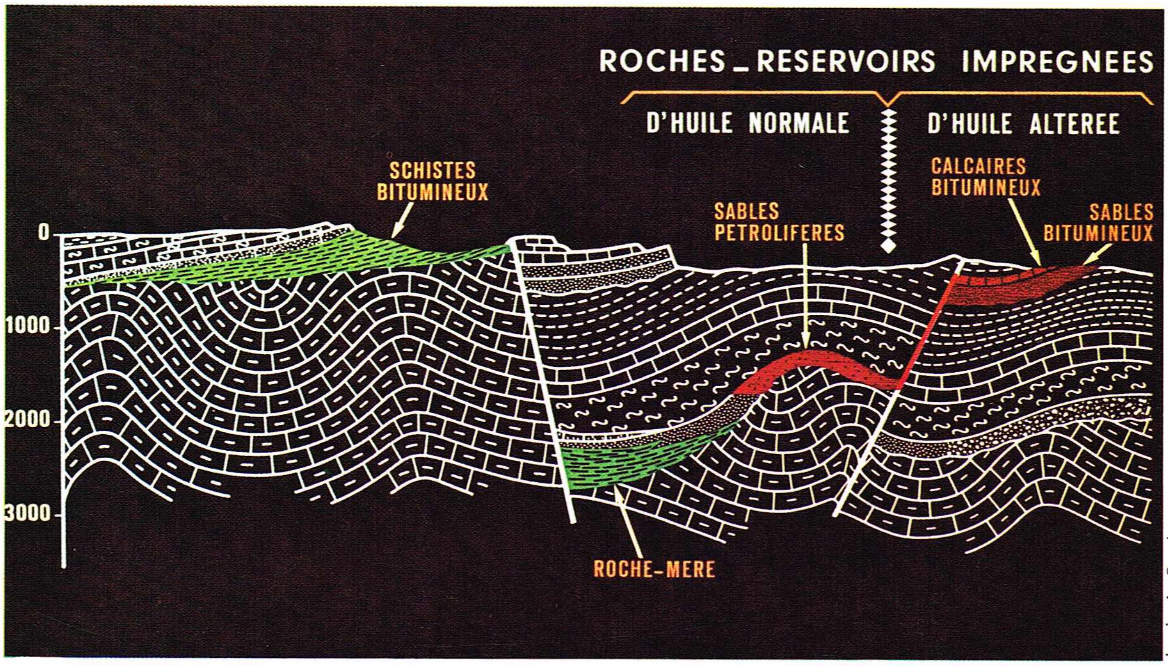

◀ *Sources et réservoirs d'hydrocarbures. « Schistes bitumineux » (roche mère) et « sables bitumineux » (roche magasin imprégnée d'huile lourde) sont des termes extrêmes de l'évolution naturelle de la matière organique des roches sédimentaires.*

La migration primaire

Certaines roches mères riches en hydrocarbures liquides paraissent avoir conservé dans leur trame tout le contingent formé. On constate qu'elles sont le plus souvent peu enfouies et/ou peu compactées. D'autre part, elles ne communiquent avec aucun réservoir.

Cependant, des expériences classiques et diverses observations sur le terrain ont montré que des hydrocarbures et autres produits de formation précoce (protopétrole) se rassemblent dans les niveaux poreux et perméables des formations fraîchement compactées. De même, au toit d'une couche de roche mère sur laquelle repose un horizon sableux (niveau réservoir), on observe un appauvrissement de son contenu en hydrocarbures par rapport à la teneur observée dans le milieu de la couche. Corrélativement, la teneur en produits lourds — résines et asphaltènes — est plus importante qu'au sein de la couche. Il se produit donc bien un drainage des produits les plus mobiles formés dans la roche mère par l'espace poreux du niveau réservoir, qui s'imprègne de pétrole au détriment de la source de celui-ci. Ce phénomène de déplacement du pétrole est la *migration primaire*.

Les mécanismes physiques concernés sont encore mal connus. Diverses hypothèses ont été avancées qui font état de forces de gravité s'appliquant à des fluides de densité différente, de capillarité, de diffusion, de l'action de gaz vecteur, voire de l'action des tremblements de terre par ébranlement du milieu aqueux imprégnant tout le sous-sol. L'agent dynamique le plus probablement responsable de la mise en place du pétrole paraît être un système de courants dus à des gradients de pression d'origine diverse dans le milieu aqueux. Au fur et à mesure de l'accroissement de la pression géostatique, les argiles perdent une grande partie de leur porosité et expulsent l'eau absorbée. Par contre, la porosité des niveaux sableux est faiblement affectée par la compaction. La première phase d'expulsion de l'eau des argiles (eau absorbée) se situe entre 0 et 1 000 m, et la seconde (eau adsorbée) à la profondeur de 2 000 à 2 500 m. Il y a donc concomitance entre les phénomènes de formation de l'huile par l'action géothermique et la deuxième phase d'expulsion de l'eau des sédiments argileux, auxquels se trouvent le plus souvent associées les roches mères. Dans ce cas, les fluides expulsés des roches mères argileuses se déplacent vers les couches poreuses non compressibles. Si celles-ci sont enfermées dans des argiles imperméables (lentille de sable ou de grès), les forces de capillarité et de gravité vont permettre la formation d'une accumulation d'huile. Si, par contre, les couches poreuses et perméables sont illimitées en direction de la surface, les hydrocarbures vont être entraînés jusque-là et détruits par biodégradation et évaporation.

Géologie des hydrocarbures

Matière première issue du monde vivant, les hydrocarbures ont une origine associée aux notions de milieu de genèse et de milieu de dépôt (sédimentologie).

La géologie des hydrocarbures est inséparable de la lithologie et de la tectonique, et finalement de toute la géologie des bassins sédimentaires au cours des âges.

Sédimentation des roches mères

Les roches organiques où domine la matière carbonée de type sapropélique (d'origine algaire) sont des raretés. Dans la généralité des cas, les roches mères sont argileuses ou argilo-carbonatées. Elles sont formées de minéraux très fins, déposés en milieux calmes et confinés, correspondant à quelques modèles particuliers dans les domaines continental et marin. Leur teneur en matière organique est conditionnée par deux facteurs : une vie aquatique abondante et des conditions de dépôt favorables à sa préservation.

Ce sont les Algues planctoniques et benthiques qui constituent les principaux pourvoyeurs des sédiments en matière organique. Cette *productivité primaire* issue de la photosynthèse (assimilation chlorophyllienne) est limitée à la zone photique : de 0 à 20 m. Elle dépend de la teneur en sels nutritifs (nitrates et phosphates) du milieu aquatique.

La vie animale contribue dans une moindre mesure à l'apport organique ; toutefois ses vestiges et excrétions, riches en phosphates, contribuent à la prolifération algaire (courants marins ascendants ou *upwellings*).

Enfin, les apports considérables de matériel organique terrestre : débris de bois, de feuilles, acides humiques, etc., viennent augmenter de façon sensible, aux embouchures des fleuves, la teneur en carbone organique des sédiments. Leur potentiel gazogène s'en trouve fortement enrichi. Leur potentiel pétroligène peut en être augmenté, mais c'est surtout la qualité des huiles qui se trouve transformée par les produits issus des plantes supérieures.

A la condition d'une abondante productivité primaire s'ajoute celle de la préservation de la matière organique sédimentée. En effet, si celle-ci est réintégrée dans le cycle du carbone par « minéralisation », le sédiment sera privé de potentiel pétroligène ou gazogène. Le confinement, qui entraîne des conditions de sédimentation réductrices, favorise l'élimination de l'oxygène des molécules organiques. C'est l'étape de la formation du kérogène et/ou du protopétrole. De telles conditions sont réalisées en de nombreux endroits du globe et en particulier dans les quelques exemples suivants.

Domaine continental

Dans les grands lacs actuels d'Afrique et de Floride se dépose, à raison d'un pied par millénaire, une vase

◀ *Page ci-contre, en bas, diagramme illustrant les relations entre le gradient thermique, la profondeur d'enfouissement et les zones de génération et de destruction du pétrole : 1, Libye - bassin de Syrte - A. 10; 2, Sumatra - Duri; 3, mer du Nord - Ekofisk; 4, Arabie - Ghawar; 5, Algérie - Hassi-Messaoud; 6, Floride - Jay; 7, Maracaïbo - Lamar; 8, Sumatra - Minds; 9, Alaska - Prudhoe Bay; 10, U. S. A. - South Pass - Bock 27; 11, Sibérie occidentale - huile et gaz; 12, Californie - Wilmington (d'après Pusey).*

surtout formée de matière algaire, très semblable à celle qui se déposait à l'Éocène au Colorado pour former les fameux « schistes bitumineux », qui représentent la plus considérable réserve potentielle d'hydrocarbures du monde.

A la limite des domaines marin et continental, les régions lagunaires à eau saumâtre, tel que le Coorong en Australie (à l'est d'Adélaïde), sont souvent très prolifiques en substance organique. Le « caoutchouc australien », ou « coorongite », représente une sorte de « tourbe algaire » formée de *Botryococcus*. Cette substance naturelle représente un véritable hydrocarbure condensé solide, qui brûle très aisément à la flamme d'une bougie et se transforme en hydrocarbures liquides si on le chauffe entre 200 et 300 °C.

Le modèle le plus typique est le lac Maracaïbo, qui occupe environ un quart de la superficie du bassin de Maracaïbo, et présente probablement les mêmes conditions de sédimentation depuis le Crétacé moyen. L'eau de ce lac est réputée la plus productive du monde en matière organique. La vase noire qui s'y dépose a une forte odeur d'hydrogène sulfuré. La teneur en carbone organique est de l'ordre de 5 %. Dans ce bassin pétrolier fameux, on saisit donc actuellement le processus sédimentaire qui produit, accumule, enfouit et transforme la matière organique en pétrole depuis près de 100 millions d'années.

Domaine marin

Ce sont les marges continentales, et sur celles-ci certains milieux particuliers, qui présentent les caractères les plus favorables.

— *Les deltas*. Ils sont le siège d'une active sédimentation (avec ou sans subsidence) et d'une importante productivité organique. Les matières organiques apportées par le fleuve s'ajoutent à la prolifération des organismes aquatiques dus aux sels nutritifs issus du continent. Les alternances de milieux marins peu profonds, marins saumâtres, marécageux-mangrove se répètent dans le temps, avec un système de canaux fluviatiles divagants généralement marqués par des dépôts sableux.

Au Venezuela, la formation Oficina (Oligocène-Miocène) présente ces caractères. On les retrouve dans le Miocène du delta du Niger, ainsi que dans le Miocène du delta de la Mahakam (Bornéo). Toutes ces régions sont productrices de pétrole dans les corps sableux imbriqués dans les séries. Et, bien que charbons et lignites soient de nature très différente, ils se trouvent inextricablement mêlés aux hydrocarbures dans ces formations. Corrélativement ceux-ci contiennent les plus importantes teneurs en cires de tous les pétroles connus. Ces substances sont, en effet, typiques des végétaux terrestres supérieurs.

— *Les bassins semi-fermés*. Certains bassins marginaux sont partiellement séparés du domaine marin par un seuil, c'est-à-dire une zone de moindre profondeur que le bassin lui-même. De tels bassins sont plus ou moins étendus. Divers exemples de mers de ce type existent dans la nature actuelle : la mer Noire, la Méditerranée elle-même, la Baltique, certaines parties des fjords de Norvège et des îles Kerguelen, etc. La communication avec la mer ouverte n'est établie qu'au niveau des eaux superficielles au-dessus du seuil. Ainsi, une vie active peut se développer en surface tandis que les fonds connaissent des conditions de dépôt réductrices et donc propices à l'accumulation et à la préservation de la matière organique. Le cas de la mer Noire est particulier, car elle reçoit les masses d'eaux fluviales du Danube et du Dniepr chargées de matière organique détritique terrestre en même temps que de sulfates dissous. Leur réduction en milieu confiné anaérobie produit d'importantes quantités de SH_2, qui rendent le milieu impropre à la prolifération de la vie sous toutes ses formes.

— *Les bassins fermés*. Lorsqu'il n'existe pas de communication avec le domaine marin ou, d'une manière générale, lorsque l'alimentation du bassin est déficitaire par rapport à l'évaporation, il se forme des dépôts évaporitiques : carbonates (calcaires, dolomies), sulfates (anhydrite, gypse) et chlorures (halite, sylvinite). Les accumulations de pétrole sont souvent liées à ce type de dépôts. Le golfe de Kara-Bogaz sur la mer Caspienne fournit un exemple actuel du fonctionnement de ces systèmes sédimentaires.

Au stade initial, où la communication avec la mer subsiste très partiellement, la salinité est déjà nettement plus forte dans le bassin que dans la mer ouverte alors que s'y déposent argiles et carbonates. Les apports de matière organique se font en surface à partir de la mer ouverte, sous forme de plancton qui ne survit pas au milieu sursalé et qui se sédimente au fond de la lagune, où les conditions biochimiques et physico-chimiques sont propices à la conservation de la substance organique.

Aux stades suivants, lorsque cesse la communication avec la mer, les dépôts évaporitiques d'anhydrite puis de sel succèdent aux dépôts argilo-carbonatés et organiques. En effet, si le climat est aride, les apports d'eau douce sont inexistants ; et la concentration du milieu lagunaire croît avec l'évaporation. Si des réservoirs ont pu se former en même temps que les roches mères, la couche salifère qui les recouvre ensuite assure la meilleure protection aux accumulations éventuelles d'hydrocarbures.

— *Les milieux récifaux*. On désigne ainsi les zones où l'activité biologique est à l'origine de constructions sédi-

I.G.D.A.

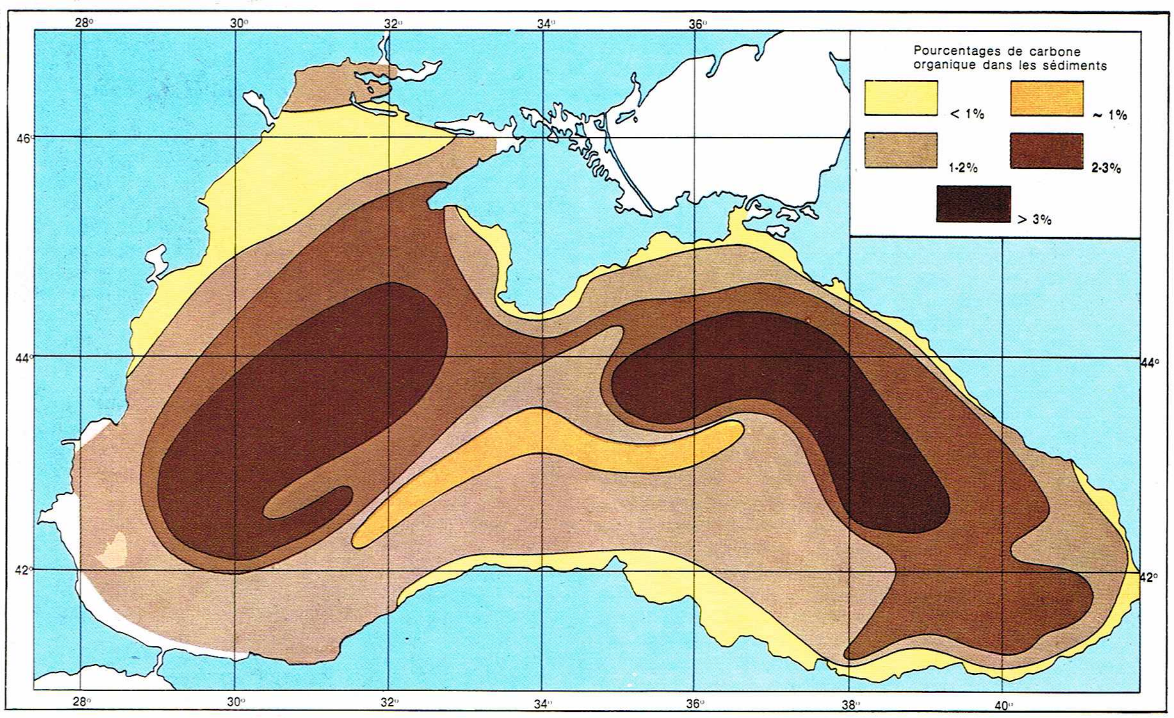

▶ ***Carte de la concentration en matière organique dans les sédiments récents de la mer Noire.***

mentaires carbonatées capables de résister aux vagues. La structure topographique des fonds ainsi créés est telle que divers types de dépôts carbonatés (clastiques, chimiques, construits) et organiques se différencient entre la pleine mer et la côte.

Outre les récifs à polypiers, il existe diverses constructions issues de l'activité d'organismes tels que les Mollusques, les Algues, etc.

Les récifs calcaires du Permien de l'ouest du Texas présentent une grande ressemblance avec ceux des mers tropicales actuelles. Ces aires récifales représentent un biotope complexe où foisonne la vie aquatique et où les conditions de sédimentation confinée sont réunies localement, tandis qu'à côté, dans l'espace et/ou le temps, se forment des niveaux réservoirs.

Certains petits bassins de ces complexes, d'abord semi-fermés, peuvent connaître une évolution qui les isole complètement de la mer, provoquant les conditions d'une sédimentation évaporitique.

Les milieux les plus favorables à la conservation de la matière organique et donc à la formation de roches mères sont situés dans les lagunes de l'arrière-récif. Quant à l'huile formée après enfouissement, elle vient imprégner les niveaux poreux de la barrière récifale, où on la trouve accumulée à notre époque.

— *Le talus continental.* En différentes régions du monde, une grande quantité de matière organique s'accumule dans les sédiments actuels. C'est le cas le long de la côte occidentale de l'Afrique, dans le golfe de Guinée et surtout dans la Walvis Bay (Afrique du Sud-Ouest), ainsi que le long du littoral occidental de l'Inde, où la teneur en carbone organique atteint 10 %. Dans la mer de Béring, les teneurs de C_{org} les plus élevées sont observées au pied du talus du golfe d'Alaska.

Ces concentrations élevées en C_{org} sont liées au foisonnement des Diatomées, lequel est dû à des courants verticaux (upwellings) ramenant en surface des phosphates dissous. Le même phénomène est observé le long des côtes de Californie et du Pérou ($C_{org} > 7$ %). Les dépôts sont donc intimement liés à la bio-productivité de l'eau de surface dans les régions concernées.

Alors que la terre ferme produit 4.10^8 t/an de C_{org}, l'ensemble des océans en produit 23.10^9 t/an, soit 60 fois plus. Plus des 2/3 de cette masse sont créés le long des marges continentales. La distribution des zones de sédimentation organique maximale dépend des conditions géomorphologiques, climatiques et surtout océanologiques (courants marins). Les reconstitutions paléogéographiques des talus continentaux (ainsi que des autres environnements propices au dépôt des matières organiques) des époques géologiques passées constituent un problème particulièrement important pour la recherche pétrolière.

Roches réservoirs ou magasins

Objectifs de la recherche pétrolière puisqu'elles sont le siège des accumulations d'hydrocarbures, les roches réservoirs sont les plus étudiées, et donc les mieux connues, des complexes pétrolifères. Toute roche comportant des vides reliés entre eux, donc capable de contenir et de laisser circuler des hydrocarbures, est un magasin potentiel. Son rôle essentiellement passif de « contenant » rend son étude beaucoup plus facile que celle d'une roche mère qui se comporte en source complexe des hydrocarbures.

Caractéristiques physiques des roches réservoirs

Les « vides » de la roche entre les grains minéraux sont en fait toujours occupés, dans les conditions du sous-sol, par un fluide : hydrocarbures liquides ou gazeux, eau douce ou eau salée. C'est l' « espace poreux de la roche », la propriété correspondante étant la *porosité*, qui conditionne le volume de fluide en place exprimé en % du volume total de la roche.

La *porosité utile*, qui rend compte des possibilités de drainage de la roche, correspond aux seuls vides reliés entre eux (par opposition à la porosité totale). Selon Levorsen (1956), on convient de l'échelle suivante : 0 à 5 % = porosité négligeable; 5 à 10 % = faible; 10 à 15 % = moyenne; 15 à 20 % = bonne; > 20 % = très bonne.

La *perméabilité* est l'aptitude d'une roche à laisser circuler les fluides. Elle s'exprime en millidarcys (1 darcy = 1 cm^3 de fluide de viscosité 1 passant par seconde, par

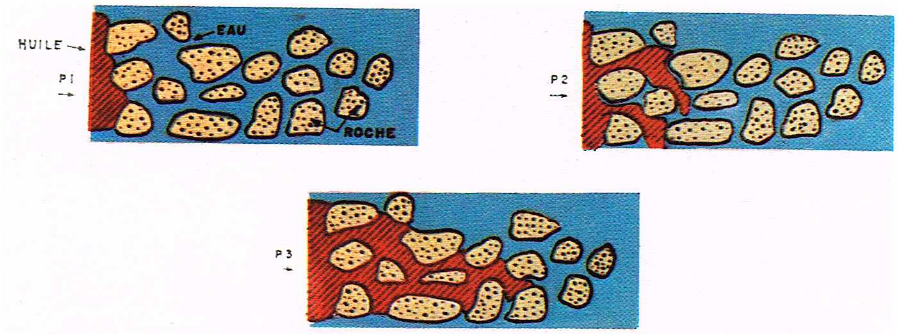

redessiné A. Combaz

▲ ***Séquence montrant la pénétration progressive de l'huile dans les pores d'un grès sous l'influence d'une pression croissante (d'après G. A. Hill; A. Perrodon,* Géologie du pétrole, *P. U. F., 1966).***

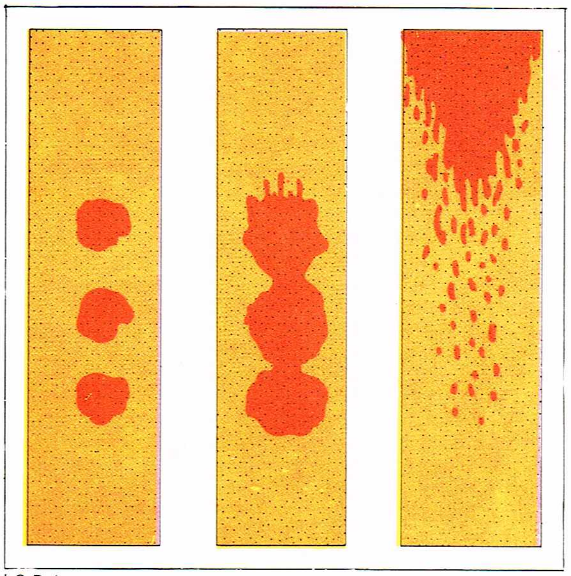

I.G.D.A.

◀ ***Expérience montrant comment la différence de densité entre le pétrole et l'eau peut vaincre les forces de capillarité qui s'opposent au mouvement du pétrole. Dans du sable imprégné d'eau, le pétrole (en orange) ne se déplace d'une tache vers l'autre, et l'ensemble ne commence à se mouvoir, qu'à partir d'une certaine masse d'huile (d'après G. A. Hill).***

cm^2 de section, sous 1 atmosphère de pression différentielle). On distingue la perméabilité horizontale : parallèlement au litage, de la perméabilité verticale : perpendiculairement au litage. Celle-ci est presque toujours plus faible que celle-là. Dans les gisements, on observe de grandes variations de ce paramètre : 5 à 1 000 millidarcys, selon le degré de cimentation des grains de la roche et selon le degré de fissuration de celle-ci.

La relation entre ces degrés est vague et dépend du type de roche et de porosité. En général, un terrain très poreux est perméable. Pour la production, le facteur perméabilité est le plus important. Certaines roches sont en effet incapables de libérer l'huile qui les imprègne : il devient alors nécessaire de les fracturer pour les exploiter.

Porosité et perméabilité sont liées à la nature et/ou au calibre des constituants de la roche mais également aux phénomènes secondaires qui l'ont modifiée : cimentation, dissolution, fissuration, recristallisation, etc. Il existe deux types de méthodes pour mesurer ces paramètres : soit directement (en laboratoire sur échantillon plus ou moins calibré), soit indirectement (par diagraphies dans les sondages).

Pétrographie des roches réservoirs

Il existe deux types principaux de roches réservoirs :

— les roches détritiques, sables et grès, qui représentent la majeure partie des magasins connus et des réserves d'huiles mondiales; Hassi-Messaoud (Algérie) est un exemple de gisement appartenant à cette catégorie;

— les roches carbonatées, calcaires et dolomies, qui représentent le tiers des champs connus et environ 40 % des réserves mondiales; c'est le cas de nombreux champs du Moyen-Orient;

— les autres réserves imprègnent des magasins de natures variées (cap-rock des dômes de sel, silexites, roches volcaniques et métamorphiques).

● *Roches détritiques.* Elles sont formées des débris de roches érodées, transportés à l'état plus ou moins divisé à des distances variables, sédimentés et plus ou moins cimentés après enfouissement. La juxtaposition de ces débris et la consolidation de la roche, par tassement

et cimentation, laissent subsister plus ou moins de porosité.

Du point de vue minéralogique, l'élément dominant est le quartz, qui représente les 2/3 de la roche. Les autres composants sont les feldspaths, micas, minéraux argileux, minéraux lourds, calcite, etc.

Les facteurs lithologiques intervenant sur les caractéristiques du réservoir sont : la taille, le classement, la forme des grains, l'influence du constituant non siliceux et le tassement.

La *taille des grains*. La porosité est d'autant plus élevée que le sable est plus fin. La perméabilité, par contre, est d'autant plus forte que les grains sont plus gros. La surface spécifique des pores augmente rapidement quand diminue le diamètre des grains : (2 500 m^2/m^3 de roche pour des grains de 1,6 mm de diamètre, 83 000 m^2/m^3 de roche pour des grains de 0,05 mm de diamètre). Dans un gisement, la surface des pores porte toujours un film d'eau dont le volume finit par être très important par rapport au volume d'huile en place lorsque le diamètre des pores diminue. A la limite, le magasin ne sera pas producteur.

Le *classement des grains*. Ce caractère est très important. Les sables à classement uniforme ont la meilleure porosité, et la perméabilité est fonction du diamètre moyen des grains.

La *forme des grains*. L'arrondi des grains joue un rôle appréciable dans les caractéristiques physiques des sables. La porosité est d'autant plus élevée que les grains sont plus anguleux.

L'*influence du constituant non siliceux*. Les *argiles* interviennent notamment sur la rétention des fluides dans les magasins, donc sur les possibilités de drainage et de récupération. Elles réduisent sensiblement aussi la porosité et la perméabilité et introduisent une anisotropie dans les horizons magasins, en particulier entre les directions verticale et horizontale.

Les *ciments des grès* peuvent être *siliceux* (opale ou calcédonite provenant du dépôt de la silice dissoute dans l'eau d'imprégnation ayant circulé dans la roche), *carbonatés* (calcite ou dolomie provenant également des eaux de circulation) ou *argileux*, d'origine détritique ou de néoformation.

Des minéraux plus rares peuvent cimenter localement les grains de quartz : barytine, anhydrite, pyrite, etc. Tous ces ciments contribuent à diminuer, voire à annuler à la fois la porosité et la perméabilité.

Tassement. Il semble que les sables atteignent, dès le dépôt, leur arrangement le plus compact, de sorte que, au contraire des argiles, ils demeurent sensiblement incompressibles au cours de l'enfouissement.

● *Roches carbonatées*. Calcaires, dolomies ou calcaires dolomitiques, les réservoirs carbonatés comportent une grande variété de types différents selon que la roche est issue :

— d'une précipitation chimique, qui donne une roche à grain fin ou une structure oolithique ;

— d'une précipitation biochimique : calcaire construit par l'action métabolique de certains organismes, dits constructeurs ;

— d'une destruction mécanique des édifices calcaires préexistants : récifs calcaires, coquilles diverses donnant naissance à des amas de débris de taille variable, plus ou moins dissous, plus ou moins cimentés ;

— d'une altération physico-chimique des formations calcaires préexistantes ou en cours de sédimentation : dissolution, minéralisation et diagenèse par l'apport de magnésium (dolomitisation) ou de silice (silicification).

Il résulte de ces phénomènes génétiques et diagénétiques que la plupart des roches carbonatées sont capables de jouer le rôle de réservoir pour les hydrocarbures au titre de la porosité et de la perméabilité primaires aussi bien que secondaires.

Les porosités primaires les plus fortes apparaissent dans les calcaires à débris de coquilles, les calcaires oolithiques, les calcaires construits à polypiers et à Algues.

Les porosités et perméabilités secondaires les plus fortes, dues à des dissolutions, à la dolomitisation ou à des fractures, font souvent des roches carbonatées d'excellents magasins.

— *Magasins calcaires dus à des phénomènes de dissolution*. La dissolution due à la circulation d'eaux riches en CO_2 dans le réseau fissural amène parfois la formation de véritables petites cavernes dans les calcaires. C'est le même phénomène qui est à l'origine des karsts. Ainsi, au nord-est des États-Unis et dans l'Ontario (Canada), 90 % des gisements correspondent à ce type de magasin. Le fait qu'ils se situent à 30 m sous une surface de discordance montre bien que les phénomènes de dissolution sont liés à la circulation d'eaux chargées de CO_2 issues de la surface.

— *Magasins formés par dolomitisation*. Les dolomies diagénétiques résultent d'une transformation précoce de la calcite en dolomite, avant la consolidation des sédiments. Leur porosité est faible. Par contre, les dolomies épigénétiques, résultant de la transformation du sédiment consolidé où circulent des eaux magnésiennes dans un réseau de fractures, présentent en général une bonne porosité. Parfois, dans un deuxième temps, la calcite résiduelle, plus soluble que la dolomite, est dissoute par les eaux de circulation : la porosité et la perméabilité s'en trouvent considérablement augmentées. Le gisement de Parentis (Aquitaine) offre un exemple de magasin dolomitique.

— *Magasins dus à la fissuration ou la fracturation*. Ce sont, généralement, des roches compactes, carbonatées ou non, qui ne doivent qu'aux fissures leur qualité de magasin. Dans certains cas, celles-ci ne sont qu'un appoint aux porosité et perméabilité matricielles de la roche.

Fissures et fractures peuvent avoir des dimensions très variables, de l'état potentiel (quelques dizaines d'angströms) à quelques millimètres de largeur. Leur longueur linéaire ne dépasse généralement pas quelques mètres. Elles offrent souvent la voie de passage la plus facile, et les fluides de circulation y déposent fréquemment calcite, anhydrite ou asphalte. Aussi peuvent-elles être totalement colmatées par des dépôts secondaires.

La stimulation des puits producteurs a pour effet l'ouverture et le développement du réseau fissural par fracturation hydraulique et acidification.

L'origine des fissures est souvent liée à la tectonique ; les roches rigides, telles que les carbonates, atteignent vite leur limite d'élasticité au cours des déformations des terrains. Des réseaux de fractures accompagnent souvent les failles. D'autre part, on admet que sous l'effet du tassement, au cours de l'enfouissement, les contraintes subies entraînent des fissurations en même temps que l'expulsion de l'eau d'imbibition des roches à texture fine.

La reconnaissance des magasins fissurés peut se faire au niveau des affleurements. Dans la mesure où la formation y présente de nombreuses diaclases, il est probable que le même caractère se conserve en profondeur. En cours de forage, les pertes de boue sont un signe certain de fissuration des formations traversées par l'outil. L'examen des carottes montre clairement aussi ce caractère. Enfin, la productivité des magasins fissurés est très supérieure à celle des autres réservoirs. A Kirkuk (Irak), de tels magasins produisent de 3 à 5 000 m^3 d'huile par jour et par puits.

● *Autres types de roches magasins*. Chaque fois qu'une roche quelconque, à la faveur des phénomènes d'altération ou de fracturation, présente au sein d'une série stratigraphique un espace poreux, elle joue le rôle de magasin pour les fluides imprégnant la série.

— *« Cap-rock » des dômes de sel*. Dans son ascension, un dôme de sel entraîne souvent une calotte rocheuse formée d'anhydrite et de calcite à la base, puis d'un complexe bréchique comportant des minéraux variés, notamment du soufre, des sulfures et de la barytine. Ce « cap-rock », qui dépasse parfois 100 m de puissance, est abondamment fracturé. Il s'y ajoute souvent des vides provenant de la dissolution de sel par les eaux de circulation. Il peut donc constituer un excellent réservoir. De nombreux exemples de gisements de ce type existent, en particulier dans le Texas.

— *Roches siliceuses*. Les argiles silicifiées de l'Éocène du Gabon, les cherts du Miocène des bassins de Santa Maria et San Joaquin (Californie) sont des magasins exploités correspondant à ce type.

— *Roches métamorphiques et éruptives*. Plusieurs cas de roches de ce type sont connus ; elles sont fracturées ou altérées, et forment des réservoirs productifs en Californie, au Venezuela, au Maroc. Dans ce dernier cas, en bordure de la plaine du Rharb (Maroc du Nord), une partie de la production provient d'une formation

gréso-schisteuse métamorphique, une autre d'un granite fissuré et altéré, sous la discordance du Miocène.

— *Roches volcaniques.* Enfin, quelques rares gisements concernent des roches intrusives, des basaltes. On en connaît à Cuba, aux États-Unis, en Sibérie, au Mexique.

Roches couvertures

L'espace poreux du magasin doit nécessairement être clos vers l'amont pour permettre l'accumulation des hydrocarbures issus des roches mères. Il faut donc une couche imperméable pour coiffer la roche réservoir et retenir les hydrocarbures dans le piège. Cette couche imperméable est une *roche couverture ;* elle est un des éléments clés permettant l'existence d'un gisement d'hydrocarbures liquides ou gazeux. Il en existe différents types, dont le trait commun est l'imperméabilité qui assure l'étanchéité d'un gisement. Une bonne couverture devra, en outre, résister à la fracturation, donc être plastique.

Les couches argileuses

Les couches argileuses constituent la plupart des couvertures des gisements exploités. Dans le cas des gisements sableux lenticulaires, elles sont souvent à la fois roche mère et roche couverture. L'imperméabilité des argiles résulte de la structure en feuillets des minéraux qui les composent en un arrangement très compact et souple, ne ménageant que des pores de très petite taille, remplis d'eau.

Souvent, une certaine proportion d'argile dans la roche couverture suffit à assurer une étanchéité suffisante à un piège pour permettre une accumulation : c'est le cas, notamment, des calcaires argileux.

Les évaporites

Les évaporites, c'est-à-dire le sel et l'anhydrite, constituent d'excellentes couvertures, très étanches et plastiques. Il en existe de nombreux exemples : citons le Tertiaire évaporitique couvrant le réservoir calcaire de l'Asmari en Iran et en Irak, le Trias salifère du Sahara couvrant le réservoir gréseux cambrien d'Hassi-Messaoud.

Dans la mesure où une région est faiblement tectonisée, une couverture de quelques mètres à quelques dizaines de mètres est suffisamment efficace. Par contre, il faut une couverture importante pour maintenir en place les hydrocarbures d'une région fortement tectonisée.

Dans de très nombreux cas, les hydrocarbures surtout gazeux diffusent, même faiblement, au travers des couvertures vers la surface, où l'on peut détecter des teneurs anormales dans les roches superficielles par des méthodes de prospection adaptées.

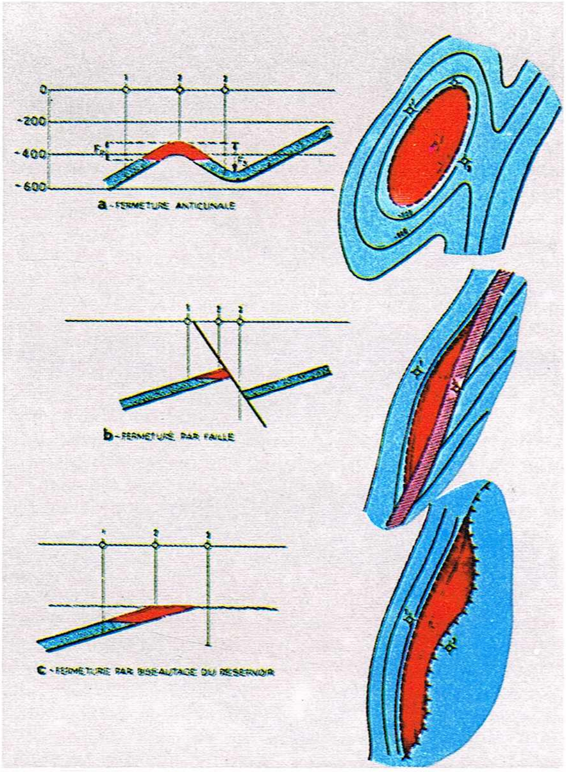

redessiné A. Combaz

◀ ***Fermeture des différents types de pièges (d'après J. Guillemot - Cours de géologie du pétrole ; Technip, 1964).***

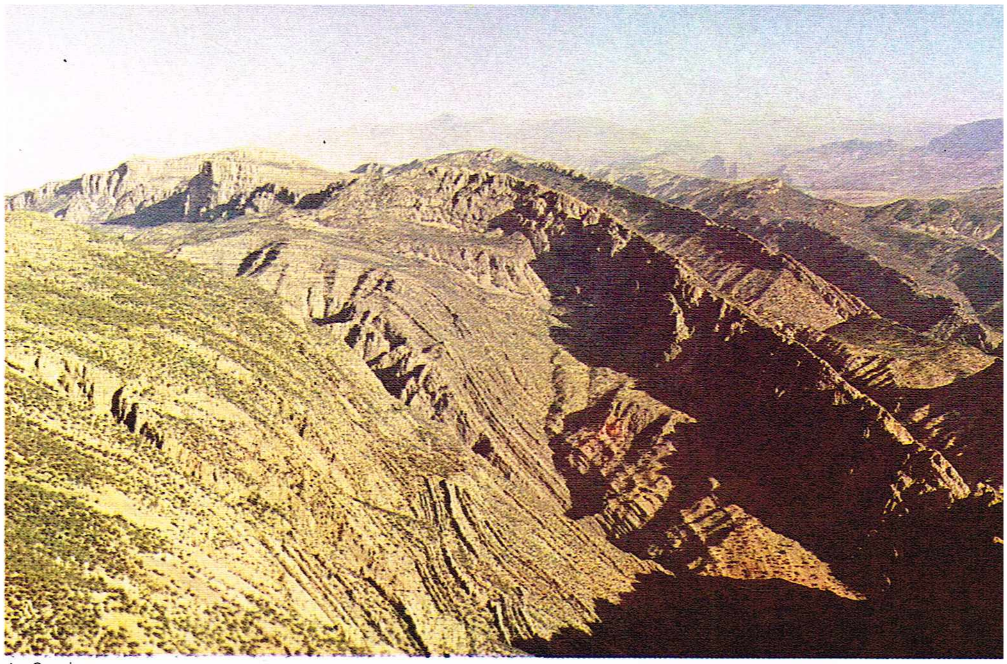

A. Combaz

▲ ***Pli anticlinal dans le sud de l'Iran (Fars) montrant la surface structurale et la coupe de la formation Asmari, principal réservoir dans le sud-ouest du pays (Dezful Nord et Sud).***

Les pièges

Toutes les fois qu'un réservoir affecte la forme d'un volume fermé dans le haut par une quelconque barrière de perméabilité, on est en présence d'un *piège*, c'est-à-dire d'un gisement potentiel d'hydrocarbures. Ce concept élargit celui de « structure anticlinale », introduit par White au siècle dernier, et qui ne représente finalement qu'un cas de figure parmi d'autres.

La *fermeture d'un piège* est donc un paramètre de base que l'on peut mesurer et qui intervient directement dans l'évaluation du volume des hydrocarbures en place dans un gisement. La *fermeture structurale* est la dénivelée comprise entre le sommet du piège et sa base (courbe de niveau fermée autour de celui-ci). La *fermeture pratique,* inférieure ou égale à la précédente, représente la hauteur de la zone imprégnée d'huile et/ou de gaz.

Ces valeurs varient de quelques dizaines à quelques centaines de mètres et conditionnent en partie l'importance des gisements. Cependant, certaines structures fermées sont stériles dans la mesure où elles ne drainent aucune roche mère, ou quand elles se sont vidées par déformation tectonique ou rupture de la couverture.

Un autre paramètre, important, conditionnant également le volume piégé est la *surface fermée.* Parmi les gisements géants, existent en effet des pièges dont la fermeture pratique est modeste mais dont la surface fermée est très grande. Mentionnons par exemple Burgan et Hassi-Messaoud :

Gisements	Fermeture	Surface fermée	Réserves en barils
Burgan (Koweït)	400 m	1 165 km^2	66 milliards
Hassi-Messaoud (Algérie)	300 m	1 300 km^2	35 milliards

Les pièges comportant plusieurs couches imprégnées de gaz et/ou d'huile sont des *champs,* par opposition aux *gisements,* qui n'en comportent qu'une. Ainsi, on parle du « gisement d'Hassi-Messaoud » et du « champ de Burgan ».

Le *type d'un piège* ressort des diverses classifications proposées, des « cas de figure » résultant surtout de la tectonique (pièges structuraux), de la nature et du mode de dépôt des roches magasins (pièges stratigraphiques) ou d'autres phénomènes, érosion, variation de perméabilité dans le réservoir, etc. Les premiers sont, de loin, les plus importants puisqu'ils représentent plus de la moitié des réserves mondiales de pétrole. Notons, toutefois, qu'ils sont aussi les plus faciles à trouver et que l'avenir conduira certainement à la découverte d'une proportion plus grande de gisements appartenant aux deux autres catégories.

Pièges structuraux

Ils sont formés par un pli anticlinal, par une ou plusieurs failles — ou la combinaison des deux sortes d'accidents structuraux, — et par la tectonique salifère.

● *Les anticlinaux.*

Ils illustrent le cas classique et le plus anciennement reconnu du pli allongé, ou très court (dôme), convexe vers le haut, piège idéal pour les hydrocarbures. Leurs formes et leurs dimensions dépendent du style tectonique

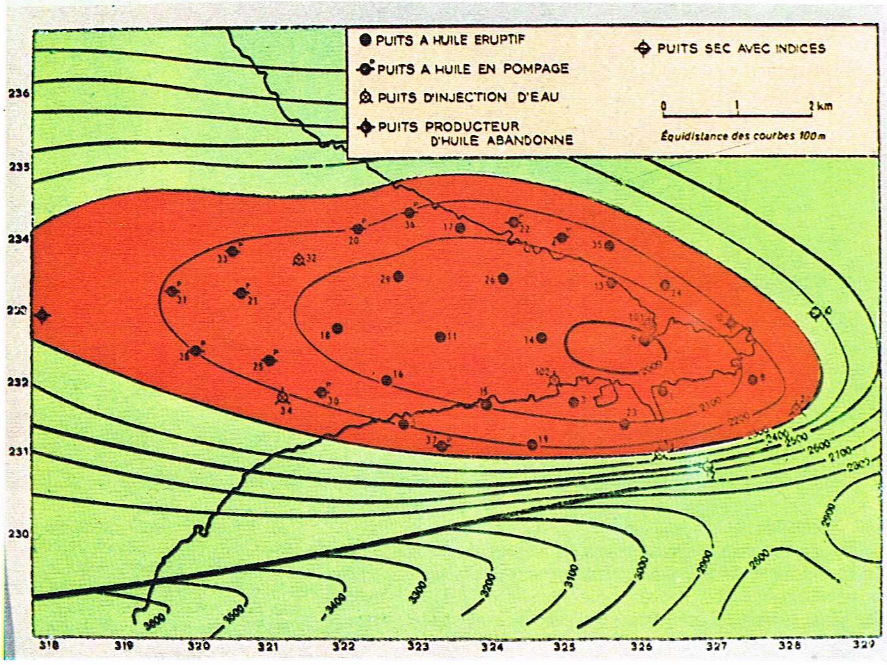

redessiné A. Combaz

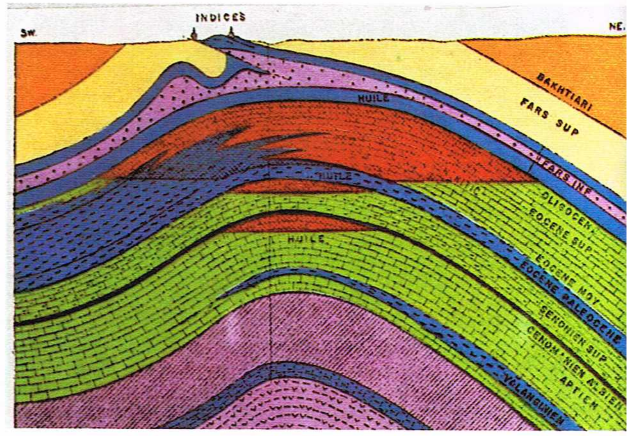

redessiné A. Combaz

◄▲ *Ci-contre, le gisement de Parentis, France. Isobathes du toit du réservoir (d'après rapport J. Guillemot; B. R. P., 1959). Ci-dessus, le gisement de Kirkuk (Irak)* [*d'après Alain Perrodon,* Géologie du pétrole, *P. U. F., 1966*].

▼ *Coupe ouest-est de la structure d'Hassi-Messaoud (Sahara) au niveau réservoir (hauteurs × 25)* [*d'après Malenfer et Tillous; Alain Perrodon,* Géologie du pétrole, *P. U. F., 1966*].

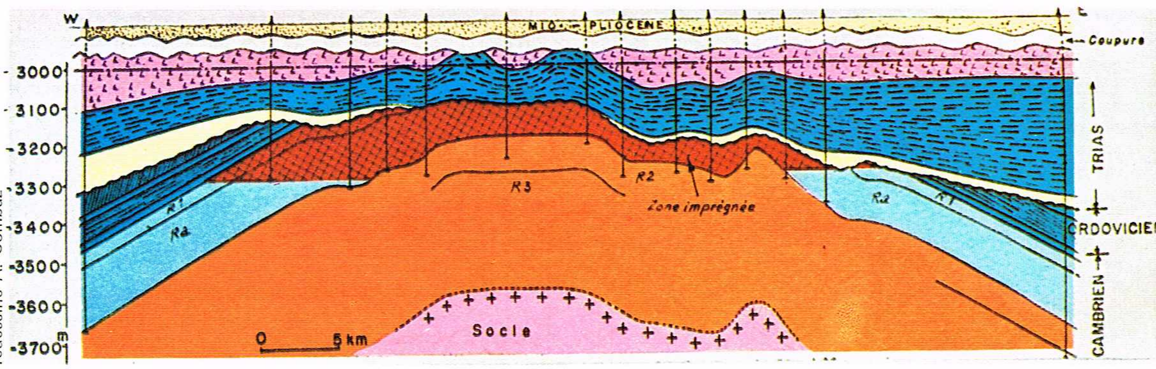

redessiné A. Combaz

► ***La formation de gisements par piège anticlinal successivement lors de la phase principale de migration du pétrole. Après plissement, celui-ci est drainé vers le toit des anticlinaux, là où existe le réservoir gréseux. Seuls les pièges stratigraphiques non situés dans la zone de drainage des anticlinaux conservent une accumulation d'huile (d'après Levorsen).***

▼ *Pièges par failles dans le champ de gaz de Corregio (Émilie, Italie)* [*d'après A. G. I. P. Mineraria*].

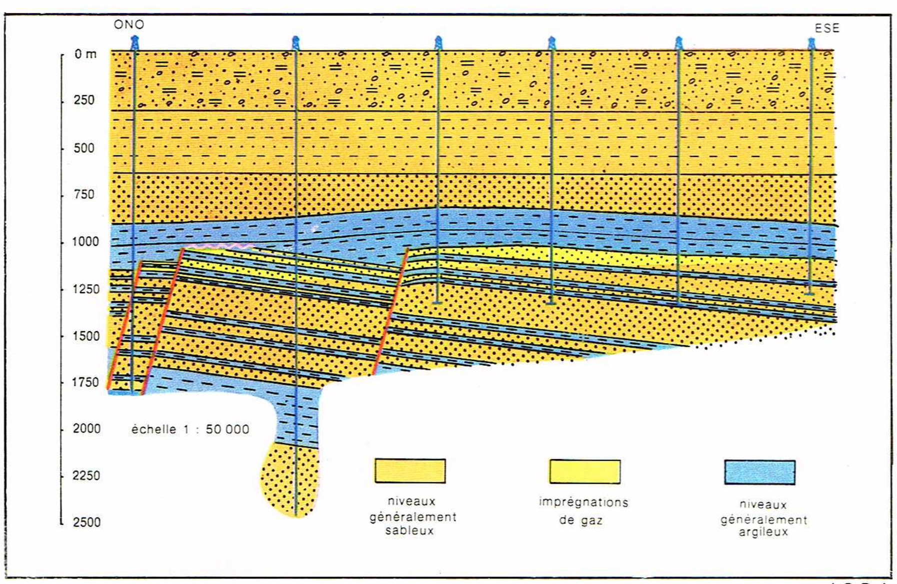

I.G.D.A.

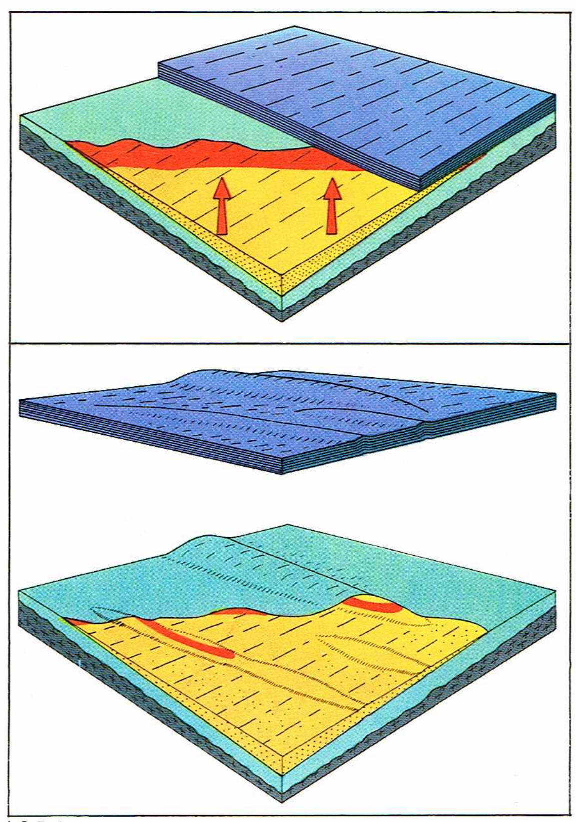

I.G.D.A.

régional ; ils résultent de phénomènes orogéniques, épirogéniques, ou liés à l'halokinèse (montée des dômes de sel).

Aux phénomènes orogéniques (plis de couvertures) résultant d'efforts tangentiels correspondent des anticlinaux étroits et le plus souvent dissymétriques, voire *faillés,* et même *chevauchants* quand on se rapproche de l'axe des chaînes montagneuses.

Les mouvements épirogéniques (plis de fond) sont des déplacements verticaux du socle profond entraînant la déformation de la couverture sédimentaire autour d'un noyau compact et rigide, tel qu'un récif calcaire.

Les exemples de gisements de type anticlinal sont particulièrement nombreux. En France, c'est le cas de Lacq, de Parentis, de Coulommes.

Au Sahara, Hassi-Messaoud (500 millions de m^3 de réserves) représente un bon exemple de bombement à grand rayon de courbure lié à un accident du socle. Le réservoir est constitué par les grès du Paléozoïque ancien érodé, recouvert par un Trias transgressif salifère qui assure une couverture efficace du piège.

Les gisements d'Irak et d'Iran illustrent bien la tectonique de couverture avec des plis anticlinaux allongés et alignés datant de l'orogenèse pliocène qui a conduit à l'érection du Zagros. Les champs de Kirkuk (Irak), d'Ahwaz, d'Agha-Jari, de Gash-Saran (Iran) et de nombreux autres sont des exemples très typiques de pièges anticlinaux. La formation réservoir est constituée par les calcaires oligocènes de l'Asmari recouverts par l'assise salifère du Miocène inférieur (Fars). Un décalage de l'axe profond par rapport à l'axe de surface est souvent observé par suite du décollement de près de 2 km de la série des Fars salifères sur le réservoir Asmari. Ainsi, des forages verticaux implantés sur la structure de surface n'atteindraient pas le réservoir imprégné.

Dans les pays de tectonique complexe à composante tangentielle importante, des écailles, voire des nappes de charriage peuvent constituer des pièges productifs : citons la Turner Valley (Canada occidental) et divers champs des Carpates (Pologne et Roumanie).

Enfin, une discordance peut masquer complètement les structures profondes ; c'est le cas de divers gisements, tels que celui de Parentis, qui n'apparaît absolument pas en surface.

● *Pièges par failles.*

Une faille peut déterminer la formation d'un gisement en fermant par son rejet une couche réservoir par un terrain imperméable. Peu de gisements sont exempts d'une ou de plusieurs fractures, mais les cas où celles-ci assurent elles-mêmes la fermeture sont moins fréquents. Celle-ci dépend de l'importance du rejet, qui doit être supérieur à l'épaisseur du réservoir.

Souvent, le rôle des failles est au contraire destructeur : elles favorisent la dismigration des hydrocarbures et l'introduction d'eau douce dans un gisement. Cependant, elles constituent également des voies de migration par lesquelles peuvent être alimentés des gisements.

Les pièges par faille, « noses » faillés ou monoclinaux faillés, sont liés à des failles normales ou inverses. Les failles normales se traduisent par un éloignement latéral des strates. Les accumulations se trouvent alors souvent dans les compartiments hauts : Pechelbronn en France, Hohne (220 000 t/an) en Allemagne, Zarzaïtine (7 Mt/an) au Sahara, etc., mais aussi dans les compartiments abaissés : Hankensbüttel en Allemagne, Velasquez et Cantagallo (500 000 t/an) en Colombie, etc.

Contrairement aux failles normales, les failles inverses marquent une tectonique tangentielle ; les pièges qui leur sont associés sont souvent complexes. Les accumulations liées au compartiment élevé se situent en général dans un repli de la couche faisant figure d'anticlinal faillé. Dans les régions à tectonique complexe, il existe souvent des accumulations dans le compartiment bas, par exemple dans la région de Bakou et en Californie.

En fait, la plupart des pièges structuraux combinent les plis et les failles, et le rôle de ces dernières est relativement mineur. Certains systèmes de pièges plissés et compartimentés présentent une complexité particulière, par exemple, le champ d'East-Penal à Trinidad, de Boryslaw en Pologne... Lorsque les conditions tectoniques sont trop complexes, outre la difficulté de conduire une exploration efficace, il se produit une dispersion plutôt qu'une concentration des hydrocarbures, et ces structures ne renferment que rarement des gisements commercialement exploitables.

● *Les structures intrusives.*

Les intrusions susceptibles de produire des pièges concernent les roches plastiques à basse température, telles que les argiles et surtout le sel.

La tectonique salifère ou halokinèse est très particulière : le sel s'y comporte comme une substance plastique, de faible densité (2,2), subissant en profondeur sous l'effet de la température et de la pression d'importantes déformations conduisant à son injection dans les séries sus-jacentes. Cette migration entraîne un retrait du sel sur le pourtour de l'anomalie, provoquant un épaississement périphérique des couches sus-jacentes qui peut atteindre plusieurs milliers de mètres. L'accroissement de pression qui en résulte, dès que l'épaisseur des sédiments est de 600 m, favorise la montée du dôme de sel qui traverse à l'emporte-pièce les terrains sus-jacents. La forme en dôme du diapir évolue alors en « champignon » ou en « doigt de gant ».

D'après les études sur modèles réduits, l'ascension est lente au début puis s'accélère jusqu'aux 3/4 de la hauteur finale, et se ralentit ensuite au voisinage de la surface du sol. On connaît en Iran de telles formations ayant atteint la surface du sol (glaciers de sel).

La naissance et l'évolution de ces intumescences jouent un rôle important dans le piégeage des hydrocarbures. D'une part, les variations de faciès sédimentaires au voisinage des structures salifères ascendantes sont

▼ ***Ci-dessous, deux types de pièges mixtes. En haut, coupe à travers deux champs pétrolifères de Californie : anticlinal faillé à gauche, pli renversé faillé érodé à droite où l'huile a subi l'altération bactérienne du fait de la pénétration des eaux de surface dans les réservoirs (d'après Bailey) ; en bas, exemple de pli chevauchant faillé à niveaux imprégnés dans l'Alberta (Canada). Pétrole et gaz sont piégés dans les horizons dolomitiques du toit de la formation calcaire du Paléozoïque (d'après Levorsen). En bas, coupe dans la région du delta du Mississippi montrant la perforation des séries sédimentaires sus-jacentes par la montée des diapirs de sel. Les hauteurs sont fortement exagérées (d'après Carsey).***

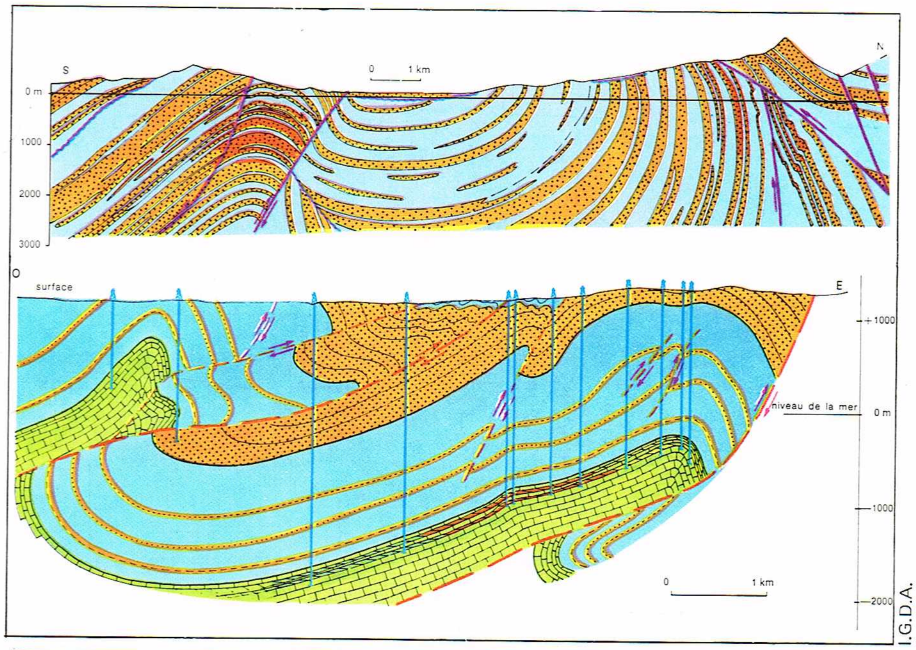

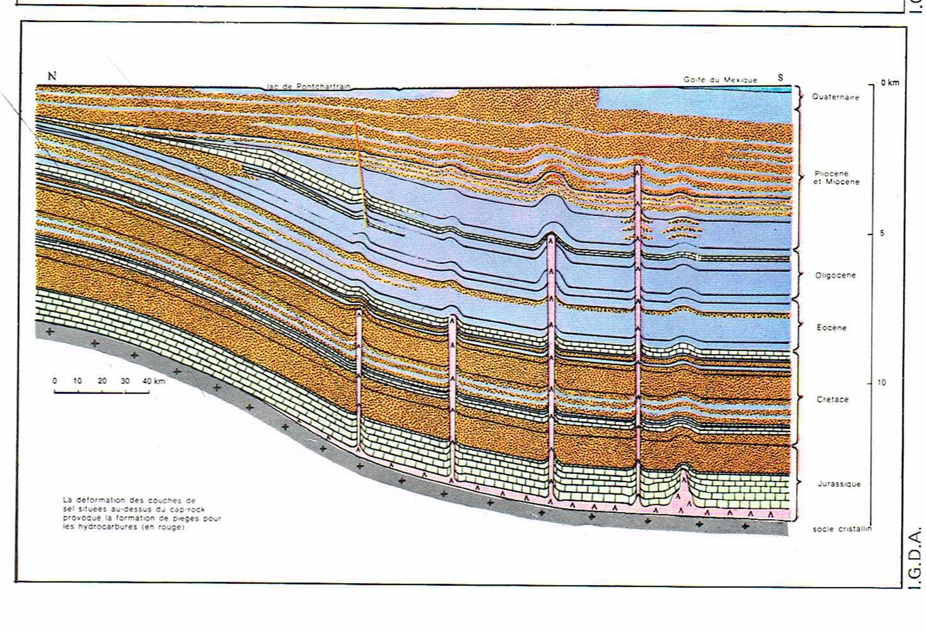

▶ *Section au niveau d'un sommet de diapir salin (zone du cap-rock) du Texas. De nombreux niveaux gréseux soulevés, étirés et obturés par le sel, ont empiégé des hydrocarbures (d'après Russel).*

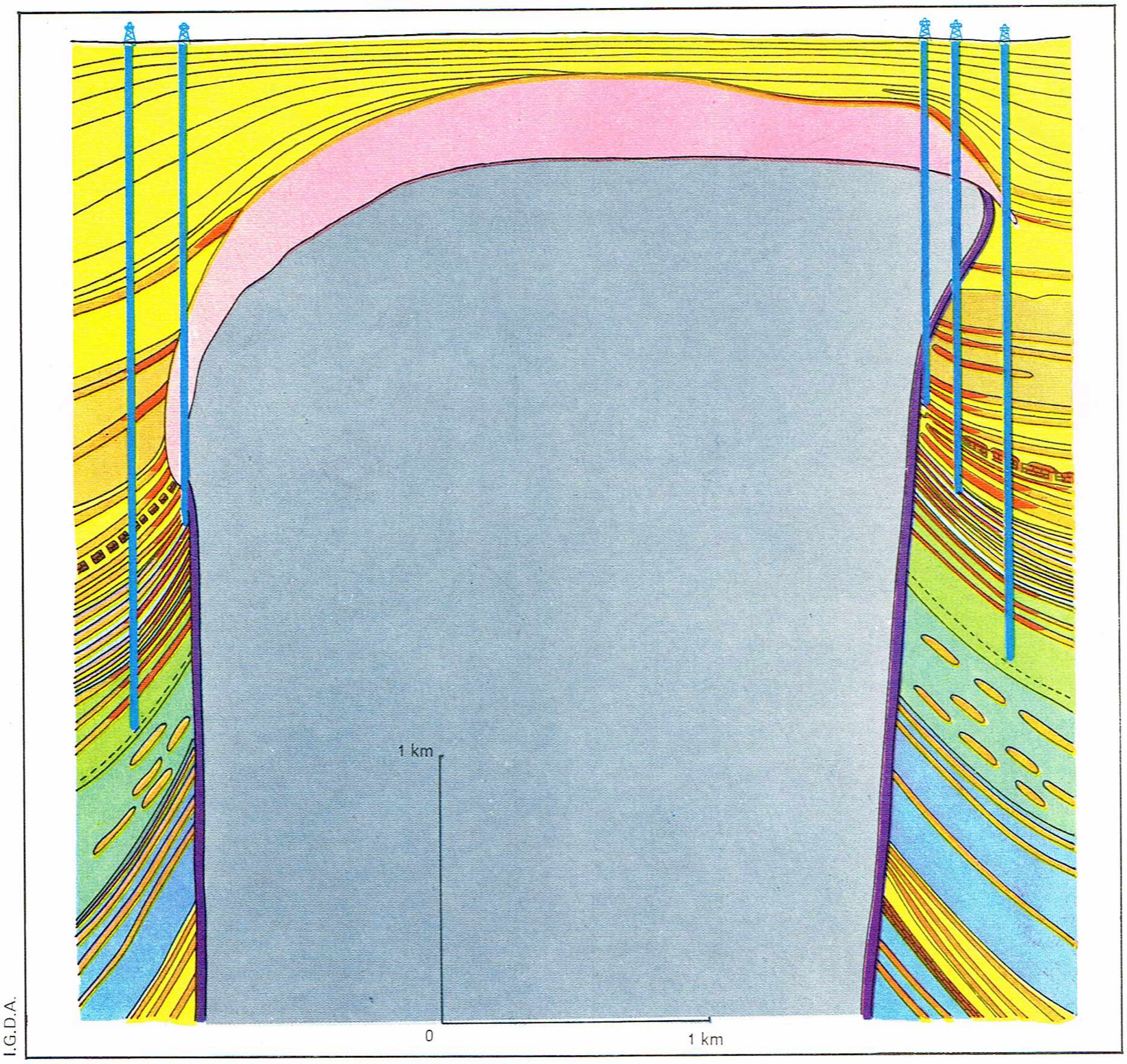

I.G.D.A.

▶ *Différents types de dômes de sel en fonction de l'épaisseur du dépôt - en Allemagne du Nord (d'après Trusheim; Alain Perrodon, Géologie du pétrole, P. U. F., 1966).*

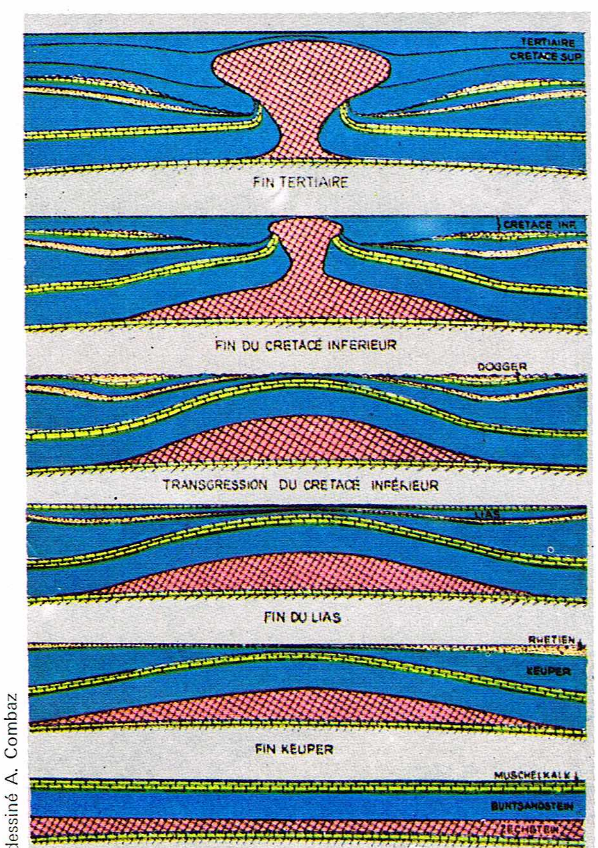

redessiné A. Combaz

souvent à l'origine de roches magasins (corps sableux en particulier). D'autre part, au stade perçant, les dômes de sel provoquent un système de failles très complexe favorisant la migration. Au stade final de l'ascension se forme le *cap-rock* qui coiffe certains dômes de sel, formé surtout de gypse, d'anhydrite, de calcaire et de dolomie, résidus insolubles de la masse saline, qui peut constituer un réservoir. En outre, plusieurs types de pièges sont associés aux dômes de sel. Certains concernent le cap-rock qui est naturellement placé en position structurale haute et fermée par rapport aux terrains encaissants. La répartition des zones productrices y est très capricieuse mais leur productivité est en général très élevée.

Les *pièges de super-cap* se placent dans les couches réservoirs sus-jacentes, déformées par la tectonique salifère : les gisements gabonais (Ozouri et Pointe-Clairette) entrent dans cette catégorie. Ces gisements sont généralement très faillés.

Par suite du relèvement des niveaux poreux traversés par le diapir, apparaissent également des *pièges de flanc*. D'autre part, la croissance des dômes étant en général synsédimentaire, la variation des épaisseurs et des faciès des sédiments déposés dans les synclinaux périphériques entraîne le développement de corps poreux biseautés, relevés sur les flancs de la structure, que l'on doit considérer comme des *pièges stratigraphiques*.

Citons certaines des régions classiques où est observée la tectonique salifère :

— la Gulf Coast, avec des diapirs en doigts de gants de plusieurs milliers de mètres de haut et un sel d'âge jurassique :

— l'Allemagne du Nord, aux intumescences allongées souvent complexes de sel du Permien Supérieur ;

— le bassin côtier du Gabon, où le sel d'âge aptien forme avec des diapirs profonds des pièges de super-cap.

Les gisements de ce type se caractérisent par une grande variétés de pièges, une productivité importante, des pressions élevées et des huiles généralement lourdes.

Pièges stratigraphiques

Lorsque la fermeture permettant une accumulation d'hydrocarbures n'est pas due à une déformation de la couche réservoir mais à une barrière de perméabilité d'origine lithologique, le piège est dit *stratigraphique*.

● Les *pièges stratigraphiques primaires* sont liés à la nature pétrographique du magasin. Un corps poreux et perméable est ainsi individualisé au sein d'une formation imperméable. On en distingue deux types principaux.

— Les *pièges primaires détritiques,* ou *corps sableux,* aux éléments plus ou moins grossiers et cimentés. Les

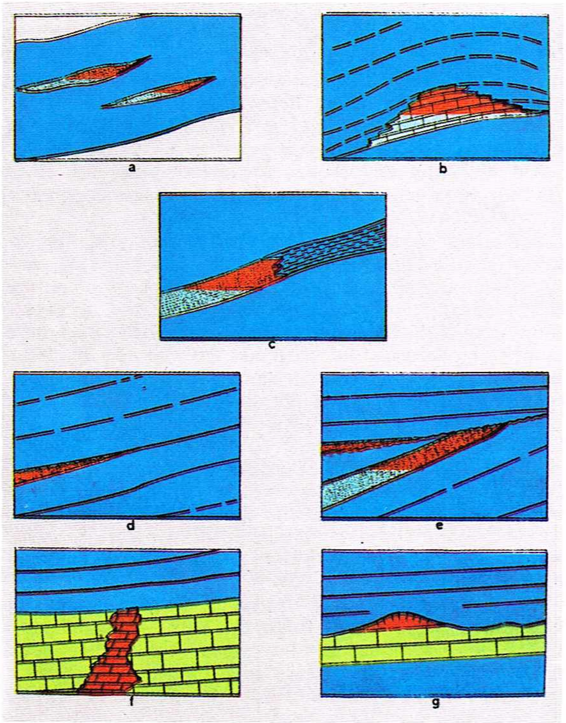

redessiné A. Combaz

◀ *A gauche, principaux types de pièges stratigraphiques : a, lentilles sableuses ; b, récif ; c, passage latéral à un niveau imperméable ; d, biseau sédimentaire ; e, biseau d'érosion ; f, dolomitisation d'une formation calcaire ; g, altération de la roche (karstification) [d'après J. Guillemot,* Cours de géologie du pétrole, *Technip, 1964].*
A droite, une installation de forage dans le delta du Niger, zone où les hydrocarbures formés se sont concentrés dans les chenaux sableux qui matérialisent les bras du fleuve aux époques antérieures.

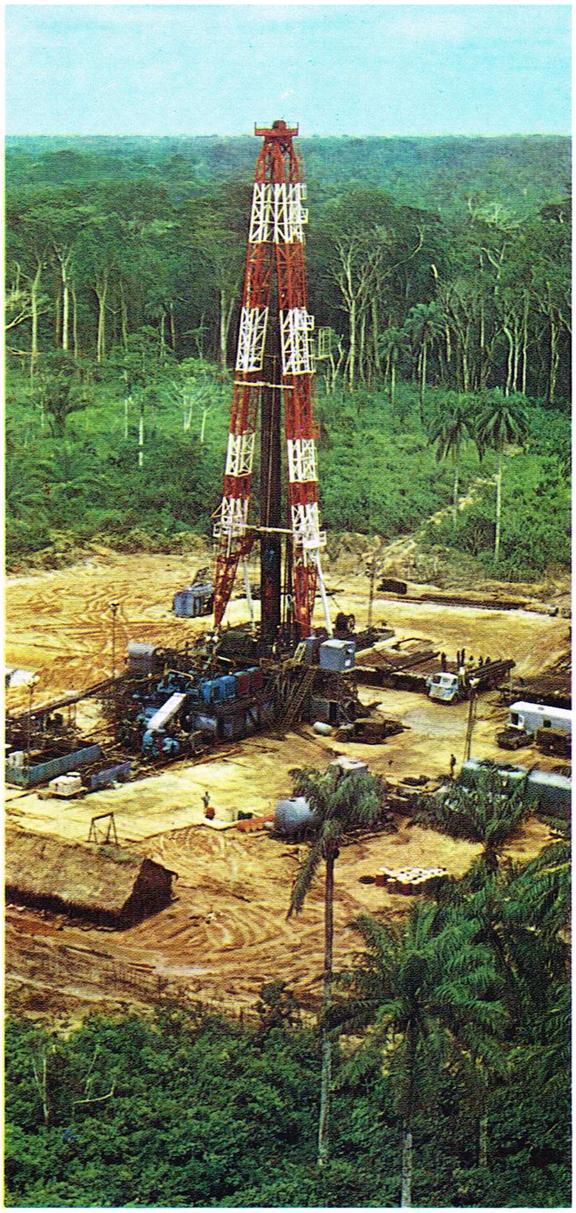

E.N.I.

lentilles de sables ou *de grès,* immergées dans une formation argileuse, peuvent affecter des dimensions et des formes variables. Elles correspondent à des sables éoliens, à des bancs de sable de plages, ou des barres littorales, à des dépôts profonds, dus à des courants de turbidité, ou encore à des dépôts formés au voisinage des reliefs sous-marins. Les formations lenticulaires apparaissent principalement sur le plateau continental, non loin des sources d'apports terrigènes.

A ce type de dépôt correspondent généralement des pièges discontinus, irréguliers et d'une prospection difficile. Le champ de Pechelbronn (Alsace) se rattache à cette catégorie. Aux États-Unis, on en connaît de nombreux exemples : en Pennsylvanie, au Kansas, au Texas, en Oklahoma... Certains corps sableux reproduisent fidèlement les cordons littoraux que nous observons dans la nature actuelle ; c'est le cas des sables de Burbank (Kansas), du gisement de gaz de Six Lakes (Michigan), ou encore du champ de Bisti (Nouveau-Mexique), qui est peut-être l'exemple le plus typique. Ces corps sableux, au large du rivage, déposés parallèlement à celui-ci, affectent une forme allongée assez régulière. Les grains de quartz bien classés leur confèrent, en général, de bonnes qualités de réservoir. En France, dans le Bassin parisien, les sables de Griselles et de Châteaurenard, d'âge néocomien, sont assimilables à ce type de dépôt.

Le champ de Cazaux (Aquitaine) correspond à un type de dépôt plus profond, dû à des courants de turbidité récurrents au cours du dépôt de l'Albien. On y observe sept séquences successives, formant autant de magasins indépendants.

Les chenaux sont surtout typiques des formations deltaïques. Correspondant à d'anciens bras de fleuve, ils sont étroits et allongés. Leur allongement suit une direction perpendiculaire ou oblique par rapport à la côte. Les sables sont généralement mal classés et argileux, et présentent des contacts souvent brutaux avec les formations encaissantes. Les deltas proprement dits

▼ *Champ de Cazaux, France. Bloc diagramme montrant l'imbrication des corps gréseux conglomératiques de l'Albien (d'après Duprey et al. ; J. Guillemot,* Cours de géologie du pétrole, *Technip, 1964).*

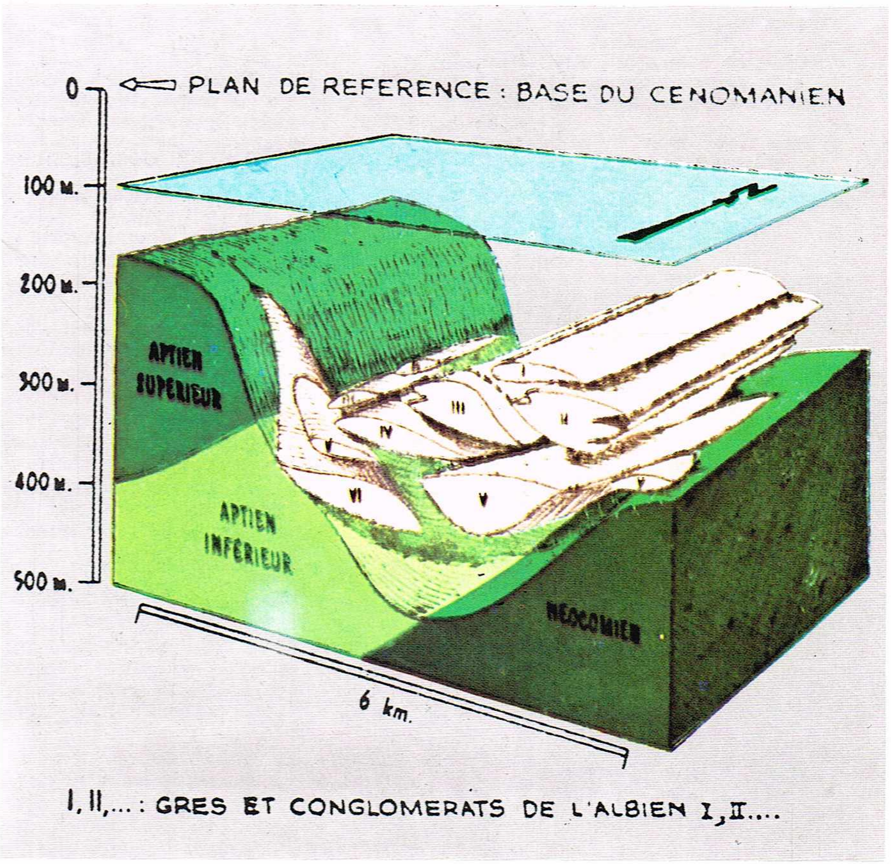

redessiné A. Combaz

▶ *Carte et coupe du gisement d'East Texas (U. S. A.) [d'après Minor et Hanna; A. Perrodon, Géologie du pétrole, P. U. F., 1966].*

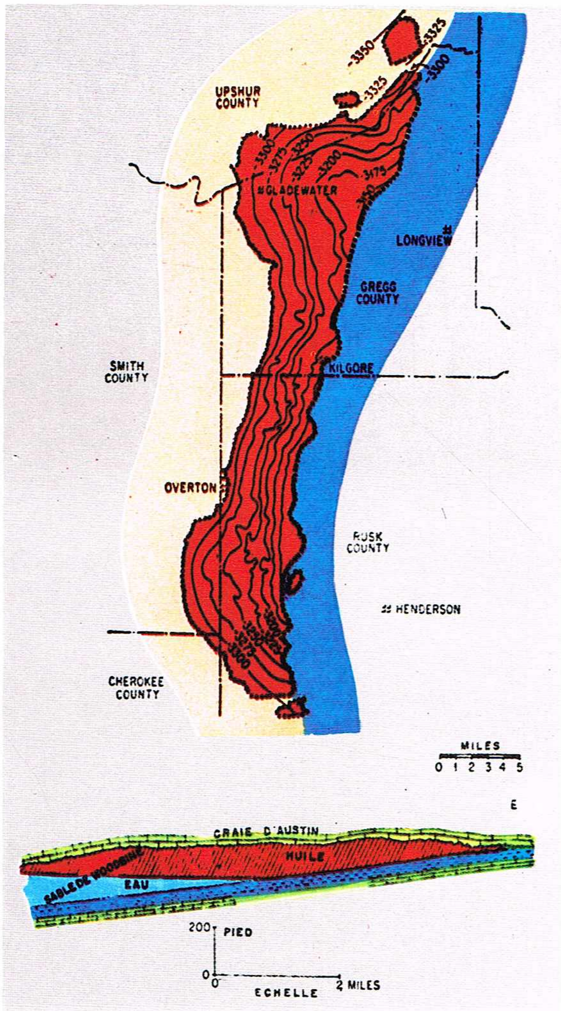

redessiné A. Combaz

correspondent à des dépôts peu profonds en milieu saumâtre, où les dépôts sableux forment un réseau complexe imbriqué dans un ensemble argileux, souvent très riche en matière organique et jouant donc à la fois le rôle de roche mère et de roche couverture.

Le delta du Niger (Afrique occidentale), ainsi que celui de la Mahakam (Bornéo) constituent à cet égard de remarquables exemples. Formés dès le Miocène, ils ont accumulé jusqu'à nos jours des sédiments de ce type sur des milliers de mètres, et les hydrocarbures formés se sont concentrés, notamment à la faveur de déformations structurales, dans les chenaux sableux qui matérialisent les bras de fleuve à diverses époques.

— Les *pièges primaires carbonatés,* ou *formations récifales,* diffèrent radicalement des précédents, non seulement par la nature pétrographique des magasins mais surtout par leur processus de formation. Par opposition aux faciès détritiques, il s'agit ici de formations construites. Il s'ensuit, notamment, des caractéristiques physico-chimiques très différentes et une géométrie d'ensemble du piège également très différente. Enfin, les roches couvertures ne sont plus systématiquement des argiles : elles peuvent être des évaporites, mais sont le plus souvent de nature argilo-carbonatée.

Les calcaires bioclastiques (formés de débris) et oolithiques, capables de présenter une bonne perméabilité, peuvent être mis en parallèle avec les pièges en lentilles gréseuses. Mais l'essentiel de ce chapitre se rapporte aux *récifs calcaires,* formés des restes d'organismes coloniaux constructeurs essentiellement marins, vivant à faible profondeur ou au voisinage de la surface de l'eau, sous un climat chaud.

Le terme de *bioherme* s'applique aux constructions récifales typiques dues aux polypiers (coraux), Algues calcaires, Spongiaires, Crinoïdes, Lamellibranches, Brachiopodes, Bryozoaires, Foraminifères. Elles forment des atolls, des récifs frangeants, des récifs-barrières. Sur les flancs des biohermes peuvent s'accumuler des débris d'organismes constructeurs et de coquilles variées (biostromes). Latéralement, ces formations passent généralement à des lits calcaires ou argilo-calcaires dont l'épaisseur est considérablement réduite par rapport à celle de l'édifice construit. Il s'ensuit le développement local, lié à la topographie du fond sous-marin et à diverses conditions associées, d'une protubérance calcaire, dominant les sédiments avoisinants dont la flèche et l'étendue sont très variables.

Dans le monde actuel, des *récifs frangeants* sont connus dans la mer Rouge, le long du littoral. Les *récifs-barrières,* à l'écart du littoral, présentent un développement considérable sur la Grande barrière d'Australie, qui longe la côte nord-est sur 2 000 km et peut atteindre 200 km de large. En Polynésie, les atolls, constructions récifales circulaires autour d'un haut fond, représentent des exemples typiques de biotopes marins nés de l'activité des coraux.

On distingue encore des *récifs tabulaires* (en plateforme), sans lagon différencié et sans développement vertical accusé.

Au cours des temps géologiques, depuis le Précambrien jusqu'à l'époque actuelle, tous ces types de récifs ont existé. Citons, parmi les plus connus, ceux de l'époque dévonienne : en France, dans les Ardennes et dans la montagne Noire; en Afrique du Nord, dans le Sud marocain et le Sahara; en Australie. Au Canada (Alberta), les récifs du Leduc Member sont producteurs. Le calcaire récifal peut atteindre une épaisseur de l'ordre de 250 m. Chaque récif constituant un gisement (Leduc, Redwater, Golden Spike, Rainbow...), correspond à un bioherme particulier recouvert par les argiles vertes de l'Ireton Member. La porosité est différente suivant la zone biologique considérée : 5 à 15 % dans la zone à coraux et stromatopores, 3 à 5 % seulement dans la zone interne du lagon. Mais, parfois, la dolomitisation fait disparaître les structures primaires.

La structure biologique des récifs est maintenant bien connue, tant par l'étude des modèles actuels que par le travail des géologues sur les récifs fossiles. En résumé, les organismes constructeurs se développent du côté de la haute mer où l'eau est claire et oxygénée. Cependant, l'action plus ou moins destructrice des vagues tend à limiter la construction, et les débris s'accumulent sur le talus récifal (calcarénites). Les plus fins débris se répandent alentour en boues calcaires où abondent les micro-organismes à test carbonaté. La crête récifale est formée par les organismes constructeurs, eux-mêmes installés sur les squelettes de leurs prédécesseurs. Le lagon, ainsi protégé des vagues, est propice au foisonnement d'organismes de toutes sortes. Il s'y dépose un calcaire organogène, voire des dépôts de précipitation physico-chimique : des carbonates et même des sulfates. De plus, l'apport des cours d'eau, la végétation aérienne (mangrove) mêlent des dépôts détritiques et organiques terrestres à cette sédimentation.

Ainsi, dans un complexe récifal fossile, on distingue successivement en partant de la haute mer :

— les sédiments marins normaux (argiles plus ou moins calcaires, sables fins) ;

— l'avant-récif (formé de calcaires clastiques à débris plus ou moins grossiers), à pendages sédimentaires souvent très accentués;

— le récif proprement dit avec des coraux (ou Algues, etc.) en place, édifiant le « mur récifal »; on n'y distingue pas de stratification, et le contact est abrupt avec les formations de l'avant-récif ;

— l'arrière-récif, correspondant aux sédiments du lagon (calcaires fins oolithiques, évaporitiques), régulièrement stratifiés et comportant des épisodes de dépôts terrigènes (sables fins, argiles, lignites) ; il s'y ajoute épisodiquement des petits développements récifaux.

A la faveur des déplacements de la ligne du rivage ou de la turbidité des eaux au cours des temps, on assiste, dans les régions de permanence des constructions récifales, à une migration des récifs. Si ceux-ci, au cours des temps, se déplacent vers le continent, marquant ainsi une avancée marine, ils sont dits *transgressifs ;* inversement, ils sont *régressifs* s'ils se déplacent en direction du bassin. Ces conditions influent notablement sur les capacités de piégeage du récif et sur la localisation des accumulations dans celui-ci. Suivant que les masses calcaires sont

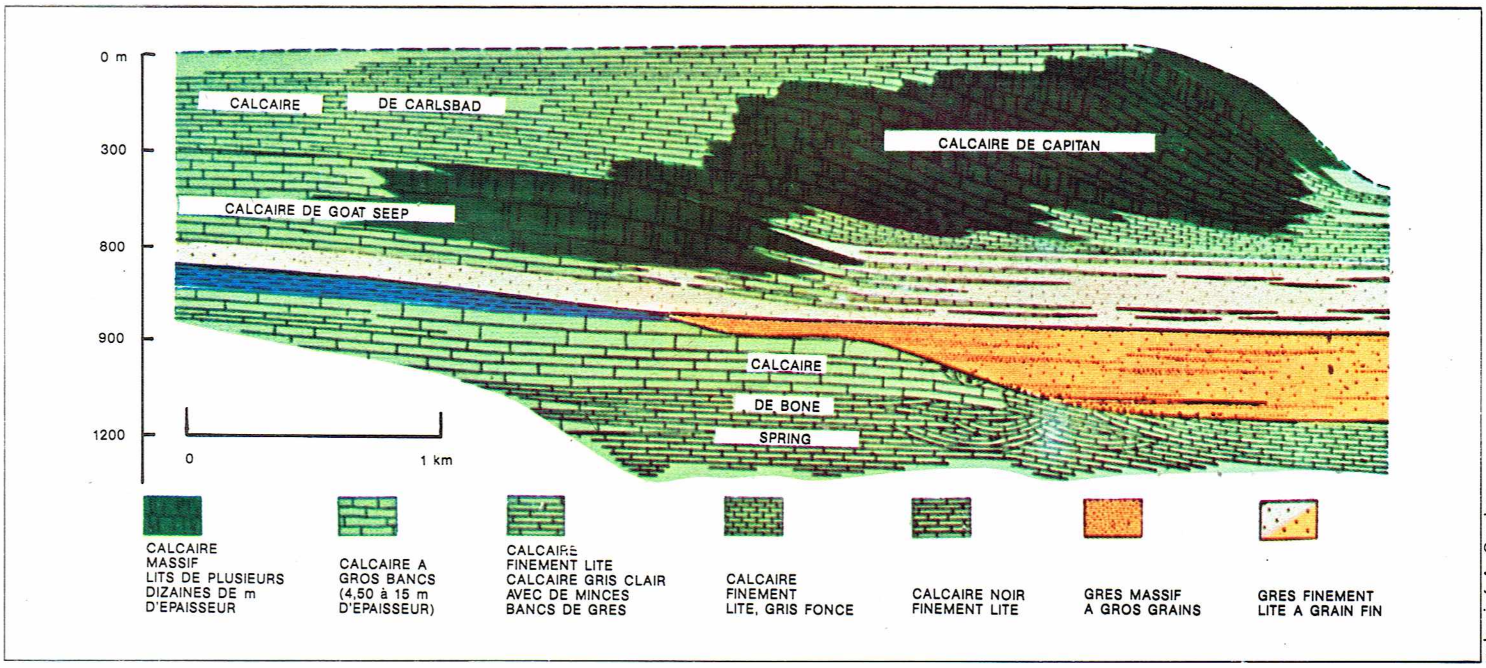

redessiné A. Combaz

en relation ou non, les volumes poreux perméables offerts aux hydrocarbures vont permettre des migrations plus ou moins complexes et des accumulations diversement réparties.

Les calcaires d'origine récifale sont souvent de très bons magasins; mais la porosité a toutefois un caractère capricieux dans la masse du récif, ce qui entraîne parfois des différences de productivité d'un puits à l'autre sur un même champ. D'une manière générale, le récif proprement dit est plus compact et ses flancs sont plus poreux.

Bien que difficiles à déceler, les pièges récifaux constituent des « prospects » de choix. En effet, de par leurs conditions mêmes de formation en eau peu profonde, ils sont nécessairement placés en position structurale haute par rapport aux sédiments contemporains. Et les hydrocarbures formés dans les faciès roches mères associés au lagon sont aisément drainés dans ces pièges en relief par rapport à leur entourage. Les sédiments postérieurs viennent alors se mouler sur cette protubérance, assurant sa couverture et pouvant même donner lieu à des pièges d'allure anticlinale.

Parmi les régions productrices à pièges récifaux, le Texas et le Nouveau-Mexique sont célèbres. Il s'agit de récifs du Carbonifère et du Permien. Le champ de Scurry, au Texas, forme un vaste ensemble en forme d'atoll en fer à cheval de 150 km de long; la formation récifale atteint 600 m d'épaisseur; l'huile occupe toute la partie supérieure du récif en plusieurs zones discontinues qui dépendent de la porosité de la roche. Au Mexique, le champ de Faja de Oro, dans un chapelet de récifs du

redessiné A. Combaz

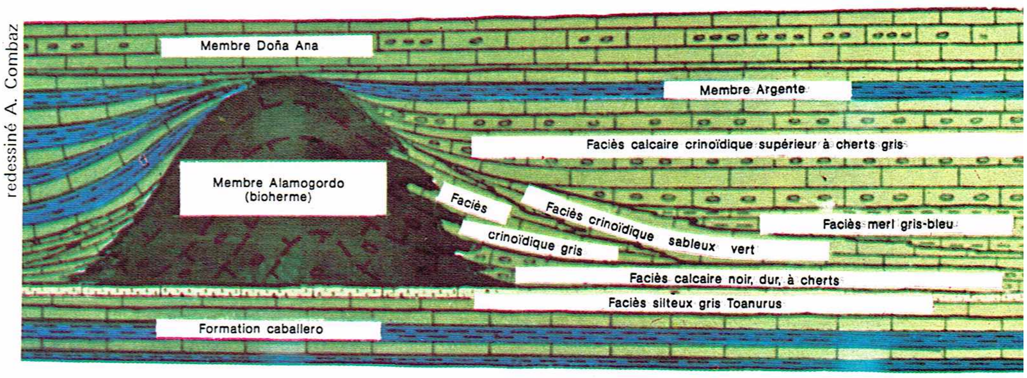

▲ ***En haut, coupe d'un récif ancien, El Capitan (Nouveau-Mexique) [d'après Levorsen; J. Guillemot,*** **Cours de géologie du pétrole,** ***Technip, 1964].***
Ci-dessus, coupe d'un bioherme (récif) typique dans le « Membre Alamogordo » de la « Formation Lake Valley » (Mississippien) du Nouveau-Mexique. Des biohermes similaires sont producteurs d'huile dans le Texas central du Nord (d'après Laudon et Bowsher, A. A. P. G., 1941).
▼ ***A gauche, récifs pennsylvaniens productifs du Texas du Nord-Ouest dans la région de Surry (Horse Shoe Atoll) [d'après Myers, Stafford et Burnside; J. Guillemot,*** **Cours de géologie du pétrole,** ***Technip, 1964].***
A droite, migrations des récifs : a, récif transgressif; b, récif régressif (d'après Henson; J. Guillemot, **Cours de géologie du pétrole,** ***Technip, 1964).***

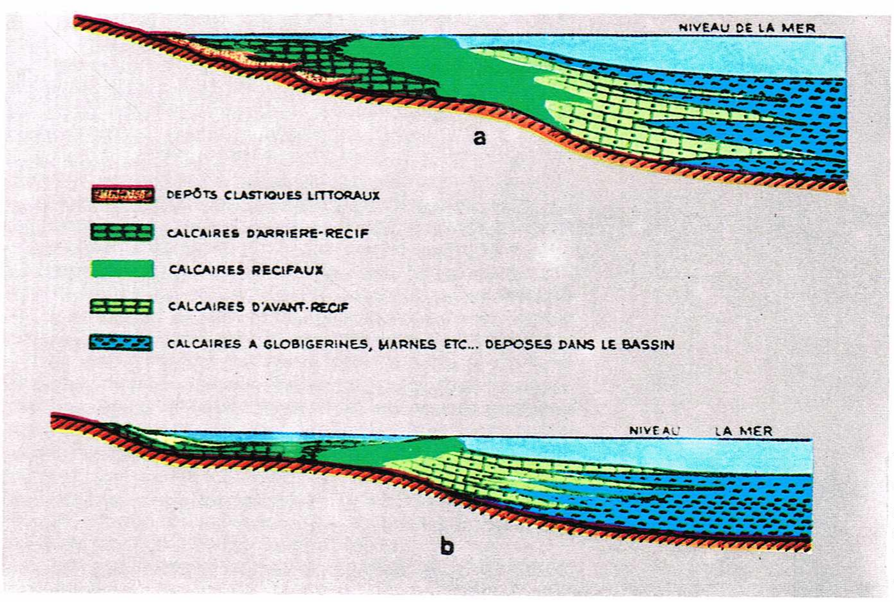

redessiné A. Combaz

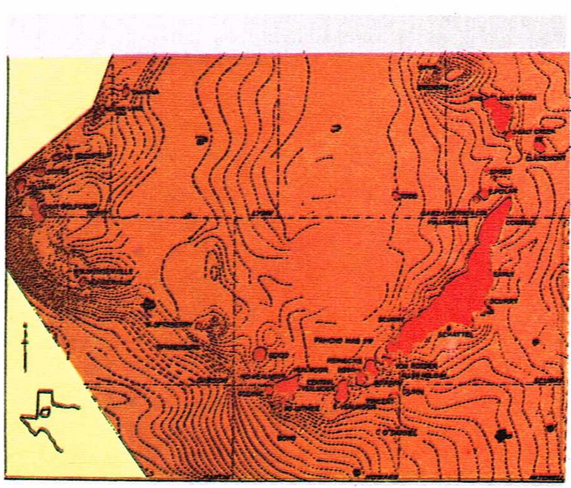

redessiné A. Combaz

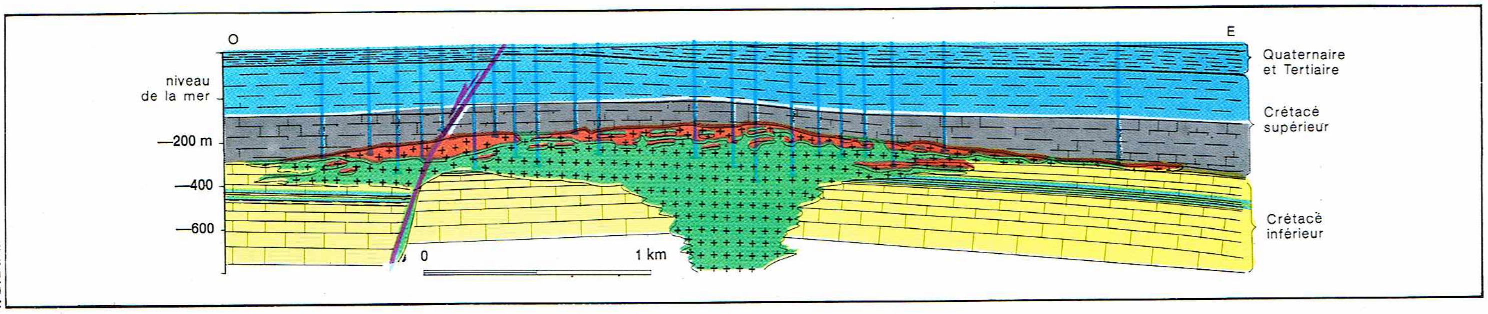

▲ ***Section d'un gisement du Texas dans une roche volcanique pyroclastique. Le pétrole (en orange) occupe l'espace poreux dû à l'altération du toit de la roche (d'après Collingwood et Rettger).***

Crétacé inférieur, s'allonge sur 200 km en bordure de la côte du golfe du Mexique. Le réservoir, qui dépasse 2 500 m d'épaisseur, a des caractéristiques très favorables puisqu'un seul puits a pu dépasser le débit de 42 000 m³ d'huile par jour.

De nombreux autres gisements dus à des pièges récifaux sont connus dans le monde, notamment au Moyen-Orient (Iran, Irak, Turquie), en U.R.S.S. et en Afrique (Égypte, Libye).

● *Les pièges stratigraphiques secondaires* ne sont pas contemporains de la sédimentation mais procèdent de phénomènes post-sédimentaires tels que des transgressions ou des discordances.

— *Pièges de discordance*. On découvre dans cette catégorie quelques-uns des plus grands champs du monde :

* le gisement d'East-Texas, d'une capacité de production de 800 millions de m³ d'huile, est formé par un biseau des sables du Crétacé supérieur entre deux surfaces de discordance. Sa superficie productive représente 520 km²;

* au Venezuela, les champs de la côte Bolivar, dans le bassin de Maracaïbo, couvrent une superficie de 1 250 km². Le piège est formé par une série sableuse transgressive d'âge miocène, discordante sur une série éocène, elle-même productive par biseau sous discordance.

— *Pièges formés par altération chimique*. Les eaux météoriques d'infiltration chargées de gaz carbonique exercent une action dissolvante, notamment sur les carbonates. Les surfaces de discordance peuvent donc acquérir de bonnes caractéristiques de réservoir. Postérieurement, des eaux magnésiennes viennent souvent dolomitiser les zones altérées tout en conservant de bonnes porosité et perméabilité au réservoir. Les champs de Lima (Indiana), dans les calcaires de l'Ordovicien, appartiennent à cette catégorie. Leur production cumulée dépasse 80 millions de m³. Le champ de Deep River (Michigan), dans une étroite bande dolomitisée le long d'un système de fractures des calcaires dévoniens, se rattache aussi à ce type de pièges.

Pièges divers

Dans cette catégorie sont regroupés les pièges qui ne rentrent pas dans les précédentes ou qui se rattachent à plusieurs d'entre elles *(pièges mixtes)*. Une telle ambiguïté s'explique aisément si l'on considère qu'une anomalie structurale est souvent à l'origine d'une variation d'épaisseur ou même de faciès sédimentaire. Ainsi les facteurs structuraux et stratigraphiques contribuent-ils parfois également à la formation d'un piège.

Dans certains cas, la fracturation à l'origine du réservoir constitue elle-même un piège sans déformation tectonique ni changement de faciès. C'est le cas, par exemple, du gisement de Florence (Colorado) dans des argiles fracturées du Crétacé (« Pierre Dhales ») et du champ de Spraberry (Texas) avec 45 millions de m³ d'huile, formé d'argilites et de siltstones fracturés.

Au Maroc, le gisement de l'Oued-Beth, dans le Rharb, est installé dans un schiste métamorphique fracturé.

Enfin, dans certains riches bassins pétrolifères, des couches monoclinales peuvent être obturées par des huiles oxydées formant bouchon. C'est le cas des gisements de Calinga, en Californie, et de Merre Grande, au Venezuela.

Eaux de formation et hydrodynamisme

● *Eaux de formation.*

L'espace poreux des roches du sous-sol est entièrement imprégné d'eau, en général d'autant plus salée que la profondeur est plus grande. Les accumulations d'hydrocarbures liquides et gazeux restent donc relativement exceptionnelles par rapport à cet aquifère fondamental. On conçoit que le rôle des eaux de formation soit capital à tous les stades d'évolution d'un gisement d'hydrocarbures.

Dans une roche magasin, l'eau est présente sous forme d'*eau libre*, capable de mouvement en fonction des gradients de pression, et d'*eau interstitielle*, qui tapisse les pores, isolant les hydrocarbures de la trame minérale et restant en place par le jeu des forces de capillarité.

Les *eaux de gisement* (comme dans le cas général des eaux de formation) sont diversement minéralisées. Elles dissolvent divers minéraux au cours de leurs cheminements souterrains, et héritent, du fait des pressions croissant avec la profondeur, des ions éliminés par la compaction des argiles, et échangent enfin leurs cations avec les minéraux qu'elles imprègnent. Tous ces processus complexes sont étudiés dans le cadre de l'hydrogéochimie.

Si certains gisements renferment des eaux douces, comprenant quelques centaines de milligrammes de sels par litre (Châteaurenard = 117 mg/l), d'autres ont des aquifères très chargés en sels, dépassant 300 g/l. Certaines eaux sursaturées atteignent 400 et même 600 g/l : c'est le cas de la dolomie triasique du Sahara et de la dolomie de Salina (Michigan). Les éléments dissous sont essentiellement le sodium, le calcium, le potassium, le magnésium, le fer (cations). Quant aux principaux anions, ce sont

$$Cl^-, Br^-, SO_4^=, S_2^=, S_2O_3^=, CO_3^=, CO_3H^=.$$

Les variations régionales de salinité sont mises en évidence par des cartes d'isosalinité qui montrent les zones envahies par l'eau douce. Celles-ci sont souvent à l'origine du déplacement, voire de la destruction des gisements. En effet, la présence des sulfates dissous provoque la prolifération des bactéries sulfato-réductrices, qui les transforment en SH_2 au détriment des hydrocarbures dont elles consomment préférentiellement les alcanes.

En règle générale, les accumulations sont observées dans les zones n'ayant pas subi l'invasion des eaux de surface.

En outre, la différence des densités des fluides en présence joue un rôle non négligeable sur la fermeture : celle-ci devra être d'autant plus importante que la densité de l'huile sera plus élevée.

● *Facteurs hydrodynamiques.*

Les aquifères sont rarement immobiles, et leur flux, même très lent, notamment dans le cas des pièges anticlinaux non faillés, peut infléchir les surfaces équipotentielles, modifiant ainsi les conditions de piégeage.

Selon King Hubbert, les gisements d'hydrocarbures sont déformés ou déplacés dans le sens de l'écoulement de l'aquifère, d'autant plus que la pente hydraulique de la nappe et la densité de l'huile sont plus fortes. Ainsi, pour une huile lourde de densité 0,93 et une pente piézométrique de 5 m/km, on a une dénivelée du plan d'eau de 75 m/km, suivant la formule de King Hubbert :

$$tg\theta = \frac{dw}{dw - do}\,\frac{dh}{dx}$$

dw étant la densité de l'eau,
do celle de l'huile,
$\frac{dh}{dx}$ la pente hydraulique de la nappe.

Dans l'exemple considéré, avec une perméabilité moyenne de 100 millidarcys, la vitesse de la nappe est de 15 m/an.

L'étanchéité critique des pièges stratigraphiques est latérale plutôt que perpendiculaire à la couche. Elle est

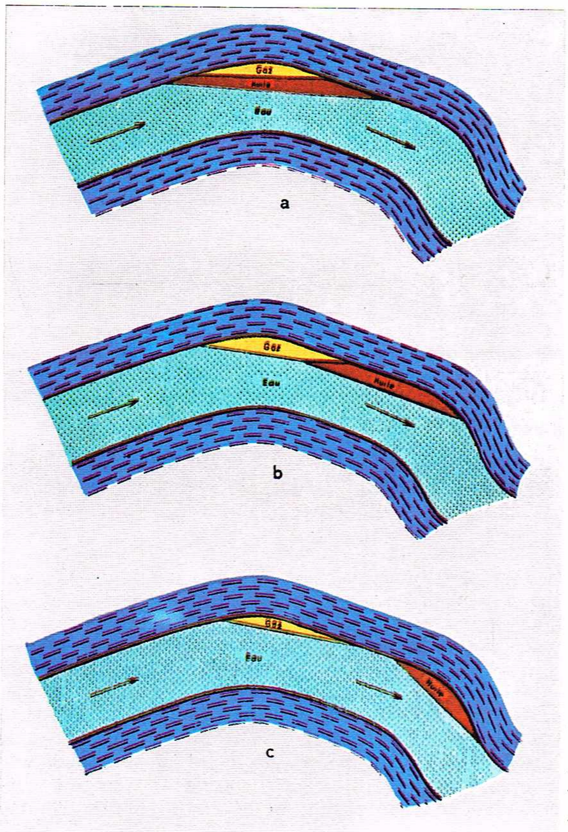

▲ ***A gauche, influence du mouvement de l'eau sur la répartition des fluides dans un piège (figure théorique) : a, pente hydraulique peu accentuée, le gisement n'est pratiquement pas déplacé; b, pente hydraulique importante, séparation partielle des gisements de gaz et d'huile; c, séparation complète en deux gisements (d'après King Rubbert; J. Guillemet,*** **Cours de géologie du pétrole** ***Technip, 1964).***

redessiné A. Combaz

donc difficile à assurer, d'autant qu'il existe peu de roches vraiment imperméables. Aussi la plupart des pièges ne sont-ils pas vraiment étanches et laisseront-ils s'échapper une certaine quantité d'hydrocarbures si le flux est orienté vers l'amont. Par contre, l'existence d'un biseau ou simplement une réduction de perméabilité se combinant à l'action d'un gradient hydrodynamique dans le sens du pendage peut suffire à provoquer une accumulation d'hydrocarbures.

Dans le cas des pièges par faille, l'accumulation se produit au niveau du potentiel le plus bas, c'est-à-dire, quel que soit le sens du rejet, dans le panneau situé en aval-écoulement. Si la couche est artésienne, les failles sont, au contraire, des exutoires d'hydrocarbures vers la surface.

● *Migration secondaire et chronologie du piégeage.*

On appelle *migration secondaire* le déplacement des hydrocarbures dans les réservoirs, par opposition à la migration primaire, qui désigne le passage des hydrocarbures de la roche mère dans la roche magasin. Les hydrocarbures se déplacent dans l'aquifère au travers des niveaux perméables tant que leur pression capillaire reste inférieure à la pression d'entrée des canalicules de communication entre les pores de la roche. Les barrières de perméabilité permettent ainsi des fuites d'hydrocarbures, notamment les plus légers, quand augmente la pression capillaire de ceux-ci. Il s'opère donc une sélection progressive de ces substances, les gaz pouvant seuls atteindre les pièges les plus éloignés ou franchir les zones de faible perméabilité. Les gisements d'huile, par contre, sont normalement observés dans les pièges offrant, au moins du fait de fractures, de fortes perméabilités. Selon Gussow, les hydrocarbures cheminent selon des chemins privilégiés, et seuls les pièges situés sur ces itinéraires contiennent de l'huile et/ou du gaz. Par ailleurs, une « préséance » existe entre les substances du fait des densités relatives. Le gaz peut déplacer l'huile et l'eau, l'huile peut déplacer l'eau, mais l'eau ne peut déplacer ni l'huile ni le gaz, et ce dernier ne peut être déplacé par l'huile. On connaît, en fait, divers exemples de champs (Iran, Sahara...) illustrant ce principe.

Toutefois, les choses sont souvent compliquées par l'addition de phénomènes successifs dont les effets interfèrent. Ainsi, les actions tectoniques, notamment le basculement de séries, perturbent souvent ce schéma simplifié. Cela contraint le géologue pétrolier à s'interroger sur la chronologie générale du bassin étudié pour suivre les mouvements des hydrocarbures à travers les stades de formation, d'accumulation et de distribution au fur et à mesure de l'enfouissement et des déformations tectoniques des séries. Le schéma de Levorsen illustre différents épisodes de l'empiégeage de l'huile selon les époques de formation des pièges.

Outre la chronologie tectonique, que l'on peut reconstituer selon des méthodes qui seront évoquées plus loin, l'étude pétrographique du réservoir peut apporter d'utiles indications sur l'époque de mise en place des hydrocarbures. En effet, la présence d'huile dans une roche poreuse bloque les échanges ioniques entre l'eau d'imprégnation et les minéraux, notamment argileux. Ainsi, au Sahara et en mer du Nord, l'observation de tels phénomènes a-t-elle permis de dater l'accumulation d'huile dans le réservoir.

▼ ***Schéma théorique illustrant les étapes de la mise en place de l'huile dans un ensemble de pièges au cours de l'histoire géologique d'un secteur donné. L'ordre stratigraphique est celui des couches a, b, c, d, e; l'ordre chronologique des accumulations est 1, 2, 3, 4, 5, 6***

(d'après Levorsen, Freeman and Co., 1957).

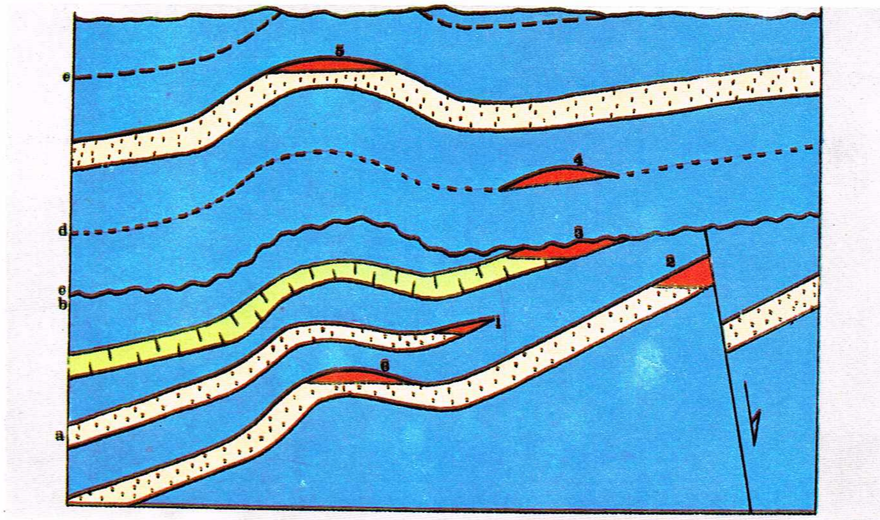

redessiné A. Combaz

D'autres considérations, telles que la pression observée dans le gisement, le GOR *(Gas-Oil Ratio)* : teneur en gaz dissous dans l'huile à la pression atmosphérique, l'existence ou non d'un gas-cap, le degré de remplissage des structures vont permettre également de tirer des conclusions sur l'importance, l'époque et la durée de l'alimentation en huile d'un gisement ou d'un champ.

● *Distances parcourues par les hydrocarbures.*

Bien des gisements, en particulier dans certains pièges stratigraphiques (lentilles sableuses, récifs), sont complètement emballés dans des sédiments imperméables comportant notamment des roches mères. Ainsi isolés d'autres roches poreuses et perméables, ils ne peuvent avoir été approvisionnés en hydrocarbures que directement à partir des roches mères contiguës, par migration primaire et donc à courte distance.

Mais ce cas est loin d'être général, et l'on connaît des gisements parfois fort importants : East-Texas, Hassi-Messaoud, etc., dont la roche mère la plus proche est distante de plusieurs dizaines de kilomètres et parfois même de plus de 100 km. Il faut donc bien admettre la réalité de migrations secondaires à longue distance, par exemple à la faveur d'une surface de discordance, comme c'est le cas pour Hassi-Messaoud. Le drainage des hydrocarbures issus de la roche mère peut encore s'effectuer par migration dans la couche réservoir, même si la perméabilité de celle-ci est faible. En effet, les caractéristiques de l'huile en profondeur, par suite des conditions de température (60 à 150 °C) et de pression élevées (20 à 600 kg), sont très différentes de celles que l'on connaît en surface, en particulier la quantité de gaz dissous, la densité, la viscosité, la tension superficielle. Aussi l'aptitude de ces fluides au déplacement dans les milieux peu perméables est-elle beaucoup plus importante. De plus, les durées géologiques sont grandes..., même l'eau s'écoule trois fois plus vite dans un milieu poreux donné à 3 000 m de profondeur qu'en surface, et six fois plus vite à 6 000 m.

A priori, la roche mère à l'origine d'un gisement est la plus proche, notamment dans le sens vertical; cependant,

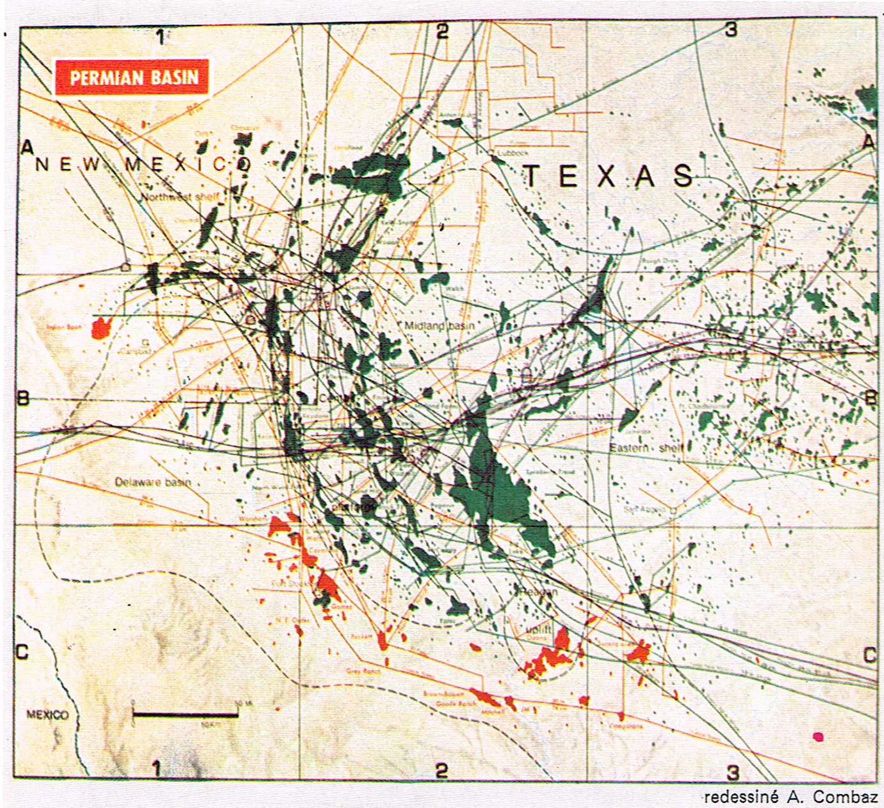

▲ *La province pétrolifère « Bassin permien » au Texas : en vert, champs de pétrole et oléoducs; en rouge, champs de gaz et gazoducs* (Encyclopédie internationale du pétrole, *The Petroleum Publishing Co., 1974*).

la vérification par les méthodes de la géochimie s'impose, car il peut exister plusieurs niveaux de roches mères. A la faveur de failles et des réseaux de fractures qui les accompagnent souvent, une roche mère profonde peut en effet approvisionner un réservoir concurremment à une autre insuffisamment enfouie. Enfin, un réservoir peut être alimenté par plusieurs sources, et plusieurs réservoirs superposés peuvent aussi être interconnectés, permettant le cheminement des hydrocarbures de l'un à l'autre.

Les provinces pétrolifères

A priori, tout bassin sédimentaire peut contenir des gisements d'hydrocarbures, et bien peu dans le monde actuel ont échappé aux investigations des pétroliers. Or, on constate que malgré de nombreux travaux, certains, tel le bassin de Paris, sont très pauvres en pétrole, alors que d'autres, tel le bassin permien du Mid-Continent (États-Unis), en regorgent.

La formation et la préservation des accumulations d'huile qui font d'un bassin une « province pétrolifère » exigent donc un ensemble de conditions particulières :

— roches mères enfouies à des profondeurs égales ou supérieures à 2 000 ou 2 500 m pour un gradient géothermique moyen ou faible, pendant une durée suffisante;

— roches magasins au contact ou en communication avec les premières;

— pièges divers au niveau de ces roches magasins (tectonique modérée);

— couverture étanche de ceux-ci, au moins depuis la dernière mise en place des hydrocarbures;

— absence de phénomènes tectoniques, volcaniques ou métamorphiques intenses dans la région concernée depuis la mise en place de l'huile.

Il manque au bassin de Paris un enfouissement suffisant de ses roches mères, des réservoirs bien situés, des pièges vastes et nombreux. Aussi sa production cumulée avec quatre petits gisements (Coulommes, Chailly-en-Bière, Saint-Martin-de-Bossenay, Châteaurenard) est-elle inférieure à 2 millions de tonnes. Dans le bassin permien du Mid-Continent, l'enfouissement des roches mères dépasse actuellement 3 000 m, et toutes sortes de pièges y sont observés. La production cumulée de cette province pétrolifère est de l'ordre de 7 000 millions de tonnes.

Bien qu'un grand nombre de bassins, tous différents, existent à la surface du globe, on peut les classer en trois grandes catégories, que nous allons étudier à présent.

Les provinces de plate-forme (bassins intracratoniques)

Ces bassins comportent 2 000 à 4 000 m de sédiments discordants sur le substratum. De forme sensiblement circulaire ou elliptique, leur diamètre varie de quelques centaines à un millier de kilomètres. Leur tectonique, plutôt calme, est surtout cassante, et la sédimentation, surtout néritique, est très homogène. Fréquents au Paléozoïque (bassins du Michigan, du Mid-Continent, de Williston, etc., en Amérique du Nord, de l'Amazone et du Parana en Amérique du Sud, de Polignac au Sahara, etc.), il s'en forme aussi au Mésozoïque : bassin de Paris, plate-forme arabique.

On a généralement dans ce cas une grande variété de pièges, des gisements dispersés et des pressions généralement faibles.

Au Sahara, les deux seules provinces pétrolifères sont des bassins intracratoniques :

— le bassin paléozoïque d'Illizi (ex Fort-Polignac) au nord-est du Hoggar; huile et gaz, issus de roches mères du Silurien et du Dévonien moyen et supérieur, sont produits principalement dans le Dévonien gréseux;

— le bassin triasique du nord-est du Sahara est productif d'huile dans les grès de base du Trias (Hassi-R'Mel, Haoud-Berkaoui) et dans le Cambrien (Hassi-Messaoud). Huile et gaz proviennent de la roche mère silurienne (« zone γ »). Celle-ci, très largement représentée au Sahara septentrional, atteste de la grande uniformité des conditions de sédimentation qui caractérisent les bassins intracratoniques. Malgré sa faible épaisseur : quelques mètres à quelques dizaines de mètres, elle représente un énorme potentiel théorique d'hydrocarbures.

Les provinces de type miogéosynclinal

Ce sont des aires subsidentes dissymétriques où la sédimentation s'épaissit le long d'une plate-forme basculée vers un sillon contenant jusqu'à 6 000 et 8 000 m de sédiments. L'autre versant est généralement très tectonisé. Les sédiments sont surtout argileux, argilo-carbonatés dans la zone de subsidence, carbonatés, avec des épisodes gréseux sur la plate-forme. Leur nature est directement liée à l'évolution orogénique de l'ensemble.

Les bassins de ce type sont surtout nombreux dans le Mésozoïque et le Cénozoïque (Tertiaire). Le bassin du golfe Persique, la plus riche province pétrolifère du monde, existe depuis le Mésozoïque, et la formation du Zagros, à la fin du Cénozoïque, illustre bien l'activité orogénique de la marge orientale de ce bassin.

Les provinces de ce type offrent un intérêt pétrolier tout particulier puisqu'elles contiennent plus de la moitié des réserves d'hydrocarbures du globe. En effet, la récurrence des faciès superposant roches mères et roches magasins, l'abondance des pièges stratigraphiques et structuraux, l'enfouissement rapide des sédiments favorisent la formation des hydrocarbures en abondance et leur empiégeage tant en direction de la plate-forme que dans les plis de couverture de la zone de piedmont. L'exemple de l'Iran est, à cet égard, remarquable : dans de nombreux champs tels que Ahwaz, Marun, Agha-Jari, Gash-Saran, les colonnes d'huile peuvent atteindre 1 000 et même 2 000 m de hauteur.

Parmi les autres bassins de ce type, citons encore : aux États-Unis, la province des Appalaches; au Mexique, le bassin de Tampico; au Venezuela, le bassin oriental et le bassin de Maracaïbo; ce dernier, formé de sédiments du Crétacé et du Tertiaire, contient en moyenne quelque 66 000 m^3 d'huile par km^2; sa superficie s'étend sur 56 000 km^2.

Les bassins d'effondrement

Ce sont généralement des aires subsidentes allongées entre deux systèmes de failles ou de flexures, et de dimensions plus modestes que les miogéosynclinaux.

La puissance des sédiments peut cependant dépasser 5 000 m dans certains grabens. Leurs faciès sont très variables. Les bassins régulièrement subsidents se remplissent de séries monotones surtout argileuses, tandis que les fossés, dont l'affaissement est plus irrégulier, présentent une sédimentation assez variée. Formant aux

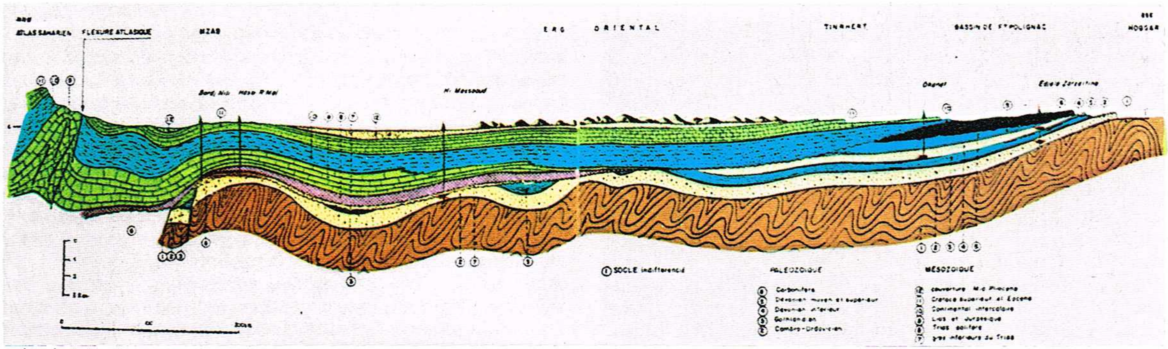

redessiné A. Combaz

◀ *Coupe schématique N.N.O.-S.S.E. à travers le Sahara septentrional passant par Hassi-R'Mel, Hassi-Messaoud, Ohanet et Zarzaïtine. Exemple type de province de plate-forme (d'après A. Perrodon,* **Géologie du pétrole,** *P. U. F., 1966).*

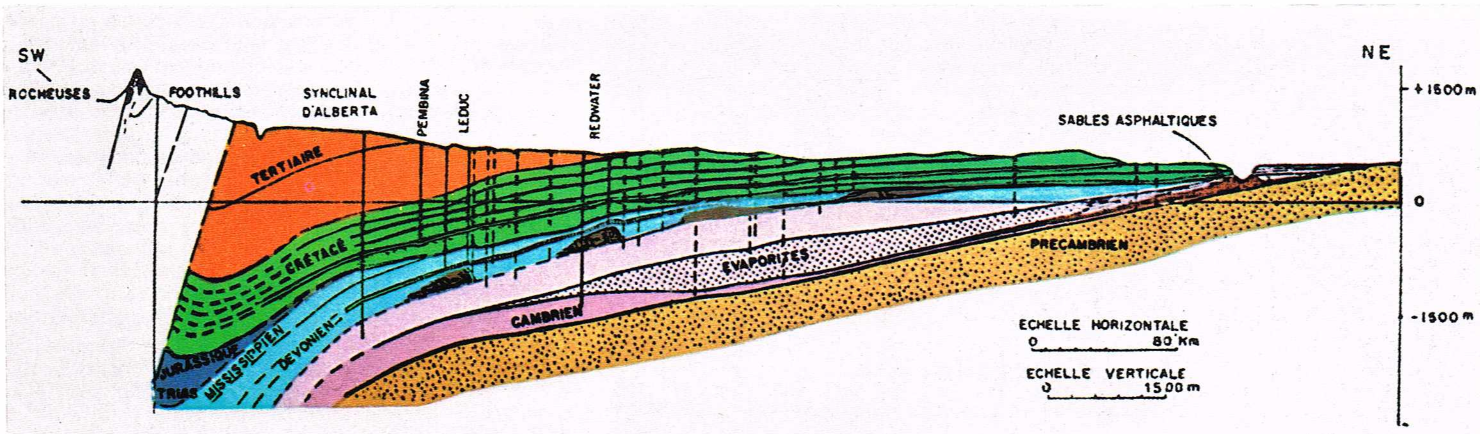

redessiné A. Combaz

▲ *Coupe du bassin de l'Alberta (Canada occidental). Exemple de province de type miogéosynclinal (d'après A. Perrodon,* **Géologie du pétrole,** *P. U. F., 1966).*

premiers stades de leur évolution des zones déprimées marécageuses puis lacustres, ils contiennent ainsi, avant l'installation des sédiments de type marin plus ou moins profonds, des niveaux enrichis en matériel organique susceptibles de devenir des roches mères.

En position marginale, ces bassins, dits alors *péricratoniques,* comportent des gradins de type talus continental (marge océanique actuelle) où les upwellings provoquent la prolifération du phytoplancton et un net enrichissement des sédiments en matière organique.

Les bassins d'effondrement sont bien connus dans le Cénozoïque : bassins néogènes de Californie, bassin de la Cuanza en Angola, bassin de Reconcavo au Brésil, fossé Rhénan, etc.

Les pièges les plus fréquents dans ce type de bassin sont formés par les compartiments faillés. Les réservoirs détritiques associés aux bordures et aux aires émergées sont fréquents; dans certains cas, des formations récifales peuvent se développer.

Sur la bordure occidentale de l'Afrique se succèdent les bassins de ce type, consécutifs à la séparation des masses continentales de l'Amérique et de l'Afrique depuis le Crétacé inférieur. On y observe de nombreux et parfois très importants indices d'hydrocarbures qui attestent de l'existence de roches mères. Toutefois, les pièges et couvertures font souvent défaut, d'où les phénomènes de dismigration observés. Au Gabon cependant, la tectonique salifère entraîne la formation d'un certain nombre de gisements (Pointe-Clairette : 3,38 Mt d'huile; Lopez : 1,2 Mt; Anguille : 13 Mt; Grondin : 30 Mt).

Les plus riches provinces de cette catégorie sont encore les bassins intramontagneux, illustrations typiques des fossés d'effondrement. Citons : le bassin pliocène de Los Angeles, dont la concentration en huile atteint 90 000 m^3 par km^3 de sédiment; le bassin néogène de Vienne (75 millions de m^3 pour 7 000 km^2 de surface) ; la vallée du Pô; le Cook Inlet en Alaska; le fossé Rhénan, qui, surtout à Pechelbronn, a fourni dans les sables oligocènes 6 Mt d'huile.

En résumé, les bassins paléozoïques, surtout intracratoniques, aux États-Unis, en Russie, au Sahara... représentent environ 9 % de la production mondiale d'huile avec 30 % des champs. Celle-ci est habituellement légère, paraffinique non soufrée par suite de sa longue maturation. Les principales roches mères connues sont d'âges silurien moyen, dévonien supérieur, carbonifère

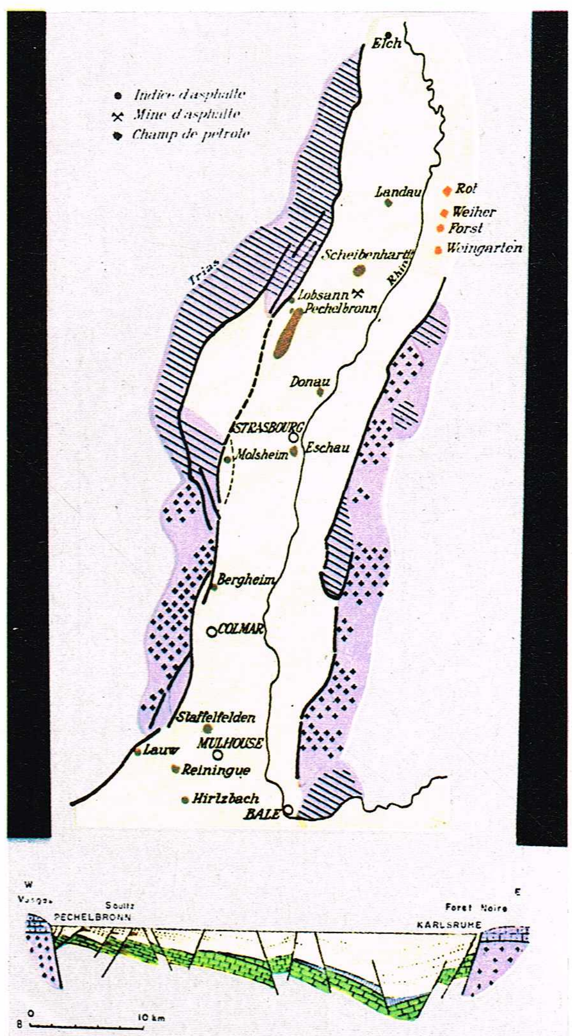

redessiné A. Combaz

◀ *Le fossé Rhénan. Exemple de fossé d'effondrement : en haut, esquisse géologique (d'après M. Louis,* **Cours de géochimie du pétrole,** *Technip, 1967); en bas, coupe transversale passant par Pechelbronn (d'après Bruderer et Louis; A. Perrodon,* **Géologie du pétrole,** *P. U. F., 1966).*

▶ *Page ci-contre, tir sismique à terre effectué dans la région du delta du Nil.*

supérieur et permien. Les bassins mésozoïques correspondent principalement à des zones de plate-forme. Avec 19,7 % des champs connus, ils représentent 52,7 % des réserves mondiales. Le Crétacé supérieur est le plus productif (14 % de la production des États-Unis, contre 2,6 % pour le Crétacé inférieur, 1,3 % pour le Jurassique et 1,5 % pour le Trias). Les causes de cette forte productivité sont probablement liées à l'étape transgressive cénomano-turonienne : celle-ci, en offrant de nouvelles et vastes surfaces au domaine marin, a permis la prolifération des Algues, en particulier du phytoplancton, et donc la formation d'abondantes roches mères.

Les nombreuses allées et venues de la mer qui ont suivi ont permis la formation de pièges stratigraphiques (biseaux, récifs) capables de recevoir l'huile formée. Celle-ci présente des caractères mixtes : cycloparaffinique en général, parfois plutôt naphténique, parfois plutôt paraffinique. Du point de vue de la densité et de la teneur en soufre, elle présente la même position intermédiaire, en moyenne.

Les bassins cénozoïques ou tertiaires : fossés d'effondrement, miogéosynclinaux, sont étroitement associés à l'orogenèse alpine. Ils sont riches en pièges structuraux (plis anticlinaux, faillés et stratigraphiques) par variations de faciès. Les présentes séquelles de l'orogenèse sont à l'origine des dismigrations et donc des indices de surface observés dans les régions concernées. Les roches mères les plus notoires sont (pal) éocènes et miocènes. L'huile représentative de ces périodes présente le plus souvent les caractères de l'immaturité : elle est lourde, visqueuse, naphténique et soufrée. Les champs tertiaires (50 % du total des champs) renferment 38 % des réserves mondiales.

L'exploration pétrolière

Sous cette expression un peu plus large et plus moderne que « prospection pétrolière », on regroupe l'ensemble des activités essentiellement géologiques ayant pour finalité la découverte des accumulations de pétrole ou de gaz.

Si à l'époque héroïque on pouvait, en certains lieux, jeter en l'air son chapeau pour décider d'un emplacement de sondage ou se contenter de l'installer à proximité d'un indice, ce temps est bien révolu. La somme des connaissances acquises permet, dans une large mesure, de faire échec au hasard. Au-delà des pièges faciles à découvrir parce qu'inscrits dans le paysage, il a fallu chercher les mieux cachés en améliorant toujours plus les techniques, et à des coûts toujours plus élevés. Les moyens mis en œuvre sont nombreux et parfois compliqués. Certains sont utilisés systématiquement, d'autres viennent en complément. Tous concourent à la prise de décision des géologues responsables, consistant en un choix initial : la demande d'un permis minier, et un choix final : les points d'implantation d'un minimum de sondages utiles dans le dit permis. Travail d'équipe par excellence, l'exploration pétrolière nécessite de nos jours un ensemble organique de géologues généralistes et spécialisés, de géophysiciens, et même d'économistes et de juristes.

Seules des sociétés dotées de moyens puissants permettant d'affronter de gros risques financiers et de « jouer » sur l'échiquier mondial peuvent désormais s'adonner à cette activité. Sous la pression croissante des besoins, les régions les plus inhospitalières ont été systématiquement prospectées : déserts brûlants et déserts glacés, lagunes et marécages, forêts tropicales et équatoriales. Tout le domaine terrestre sera bientôt exploré, tandis que les mers jusqu'à 200 m de profondeur d'eau ont déjà reçu des milliers de sondages et permis la découverte de nombreux et importants gisements de gaz et d'huile : golfe du Mexique, mer du Nord, golfe Persique, etc.

Dans quelques années, les moyens techniques de sondage en eaux profondes seront opérationnels, et tout un nouveau domaine s'ouvrira encore à la prospection du pétrole.

Le choix des permis de recherche

Dans le monde entier, la recherche pétrolière est réglementée. Le premier soin d'une société est de constituer et de maintenir le « domaine minier » (ensemble des permis de recherches) dans lequel elle peut exercer sa prospection. Si elle effectue elle-même cette activité, seule ou avec la participation financière d'associés, elle est « opératrice ». Si elle laisse ce soin à l'un de ses associés, elle se contente de suivre les travaux et de participer aux prises de décisions et aux frais, en attendant de participer aux bénéfices éventuels, sous forme de pétrole brut ou de rentrées d'argent.

Le choix d'une région à explorer implique donc d'abord que le gouvernement dont elle dépend soit disposé à accorder des permis de recherche et que ceux-ci ne soient pas déjà accordés. Si, d'autre part, les contraintes politico-économiques et financières ne s'opposent pas, du moins temporairement, à toute prise de permis, place est faite aux considérations géologiques et pétrolières.

Si tout bassin sédimentaire mérite attention, il va de soi que son intérêt est apprécié très différemment en fonction des informations recueillies à son sujet. Le choix va donc dépendre de l'enjeu qu'il représente, rapporté à la probabilité de découverte qu'on lui attribue.

En termes généraux, un bassin doit présenter les caractères décrits dans les chapitres précédents : une épaisseur suffisante de sédiments (> 1 500 m) ; l'absence de métamorphisme ; l'existence de roches mères et de réservoirs ; la probabilité d'existence de pièges structuraux ou stratigraphiques suffisamment couverts.

A ce stade, s'impose une reconnaissance préliminaire par une équipe de géologues ayant préalablement pris connaissance de toute la documentation nécessaire. L'intérêt pétrolier apprécié rapidement sur le terrain à partir des grands critères indiqués peut permettre de choisir avant les concurrents les zones paraissant les plus favorables pour le dépôt des titres miniers. La mise en œuvre des méthodes géologiques et géophysiques peut éventuellement commencer avant la demande ou l'attribution de permis, avec cependant le risque d'avoir engagé des frais inutiles si le permis est accordé à un concurrent.

La prospection pétrolière

Pour être en mesure de décider des meilleurs emplacements de sondage, il faut connaître aussi bien que possible la série sédimentaire par les études géologiques de surface, ainsi que la configuration des couches en profondeur par les études géophysiques. S'il existe des données géologiques et géophysiques acquises à l'occasion de recherches pétrolières antérieures, elles sont le plus souvent obtenues à titre onéreux par le nouveau titulaire du permis. Le coût des documents correspondants (profils sismiques, rapports de sondages) représente en général une fraction appréciable du prix de revient.

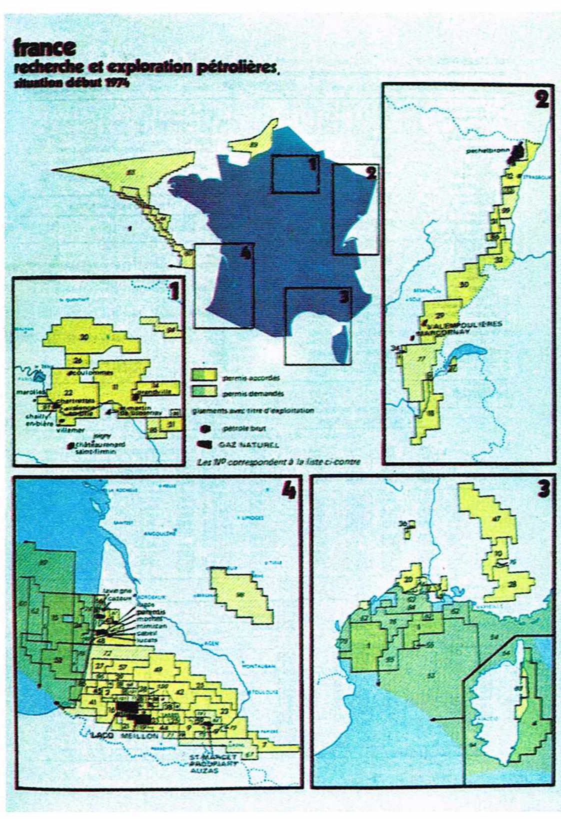

redessiné A. Combaz

▶ *Aperçu des activités d'exploration et de production en France (situation au début de 1974) [d'après* **Pétrole 73, C. P. P.].**

La géologie

La géologie de terrain (ou de surface) comporte plusieurs volets. Elle consiste d'abord à établir sur un fond topographique (au 1/100 000e par exemple) la carte géologique et structurale des régions à explorer. L'image des couches à l'affleurement permet des représentations de celles-ci en profondeur par des profils, ou coupes géologiques.

Pour préciser la nature lithologique des formations, le géologue effectue encore diverses « coupes de terrain » représentatives de la série sédimentaire du secteur étudié. Par l'emploi des procédés topographiques et la mesure des pendages, il dessine ces coupes en restituant les épaisseurs exactes des couches dont il fait la description lithologique, et signale les niveaux fossilifères. Les prélèvements d'échantillons de roches et de fossiles sont ultérieurement étudiés en laboratoire : ainsi peuvent notamment être repérés les faciès-clés de toute série pétrolière : roches mères, roches réservoirs et couvertures.

La *géomorphologie,* qui utilise les ressources des photographies aériennes et, depuis peu, des photographies par satellite, apporte une aide précieuse à l'analyse structurale du bassin.

Si les affleurements sont rares ou inexistants, on a recours à de petits sondages, de préférence carottés *(core-drills),* pour échantillonner au-delà de la zone de recouvrement.

Les échantillons issus des campagnes de terrain sont ensuite étudiés avec les moyens du laboratoire d'exploration par toute une série de méthodes qui enrichissent considérablement la somme des informations déjà obtenues sur le terrain. Les disciplines paléontologiques, par l'étude des macrofaunes et microfaunes (micropaléontologie), voire des microfossiles organiques (palynologie) permettent tout d'abord d'établir la zonation stratigraphique et d'apporter d'utiles interprétations des conditions du milieu de sédimentation.

A ces moyens s'ajoutent les ressources de la *pétrologie :* l'étude pétrographique des sections minces de roches, l'étude diffractométrique des argiles. Les réservoirs carbonatés et gréseux font l'objet d'une attention particulière.

Enfin, la *géochimie organique* recherche les roches mères caractérisées par une teneur appréciable en carbone organique et la nature sapropélique de celui-ci. Les hydrocarbures contenus en faible quantité dans les roches mères, ou imprégnant éventuellement les roches magasins (indices divers) sont étudiés par chromatographie. L'étude microscopique du kérogène complète cet ensemble d'informations essentiel à toute étude géopétrolière, en apportant un coefficient de maturation des roches mères (réflectométrie) et un diagnostic sur la nature plus ou moins sapropélique du kérogène. On peut ainsi apprécier les possibilités pétroligènes d'une région au triple point de vue de la quantité (et de la concentration) du kérogène, de sa qualité pétroligène et de son degré de maturation (suffisant, insuffisant ou excessif).

La géophysique

Elle regroupe un certain nombre de méthodes très différentes dans leur principe, qui ont en commun de mesurer des paramètres physiques concernant non plus les couches superficielles mais les couches profondes du sous-sol. Cette discipline constitue donc le complément indispensable à la géologie pétrolière.

Les méthodes les plus employées, dans l'ordre de leur utilisation, sont l'aéromagnétisme, la sismique-réfraction et surtout la sismique-réflexion.

— L'*aéromagnétisme* est tout indiqué, aussi bien sur mer que sur terre, pour les reconnaissances rapides, apportant à un prix modéré les grandes lignes structurales du socle magnétique d'un bassin de sédimentation. Cette méthode consiste à promener par avion, à moyenne altitude, un magnétomètre, appareil sensible capable de mesurer les variations de la susceptibilité magnétique du champ magnétique terrestre. Celles-ci apportent une indication sur la nature des roches du socle et la profondeur de celui-ci, donc sur l'épaisseur des sédiments qui le recouvrent.

— La *sismique-réfraction* est également un outil de grande reconnaissance mais applicable à la surface du sol, donc beaucoup moins rapide. Utilisée suivant de grands profils, elle révèle l'existence de marqueurs profonds caractérisés par leur vitesse de transmission des ondes,

E.N.I.

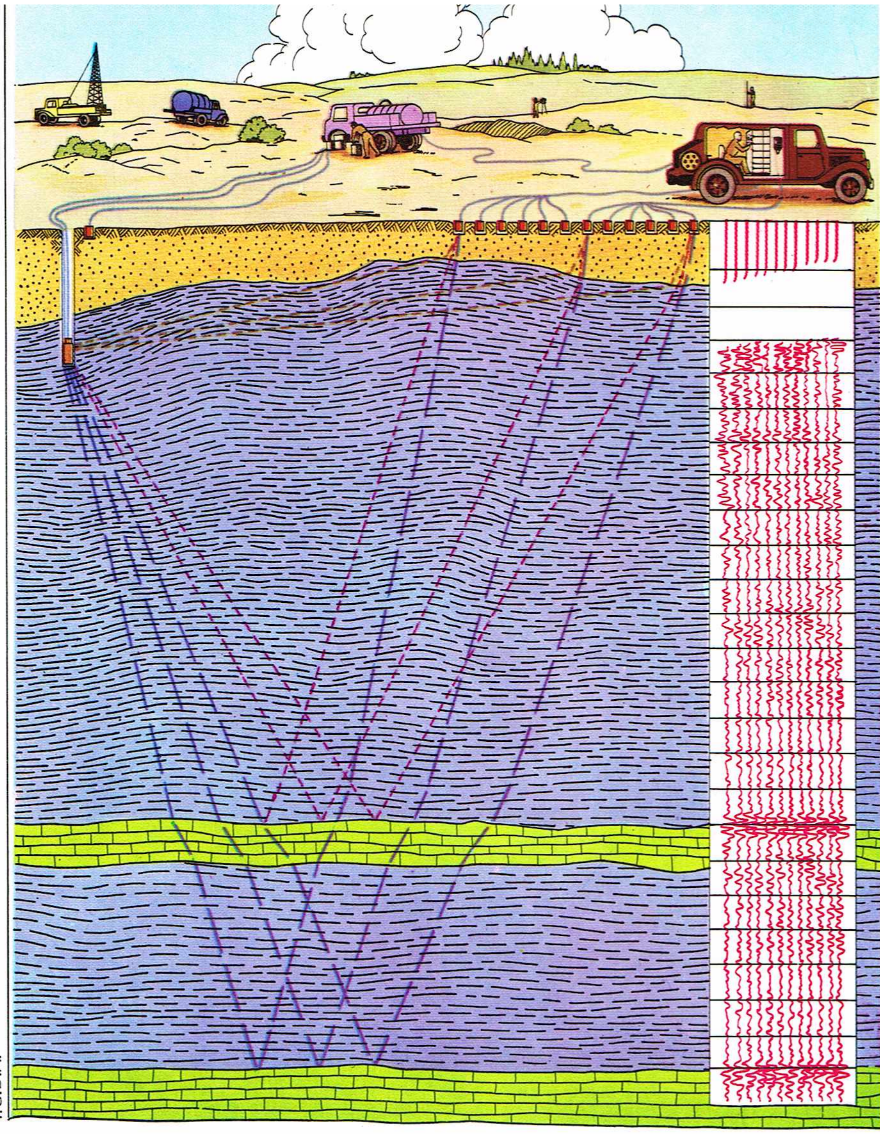

I.G.D.A.

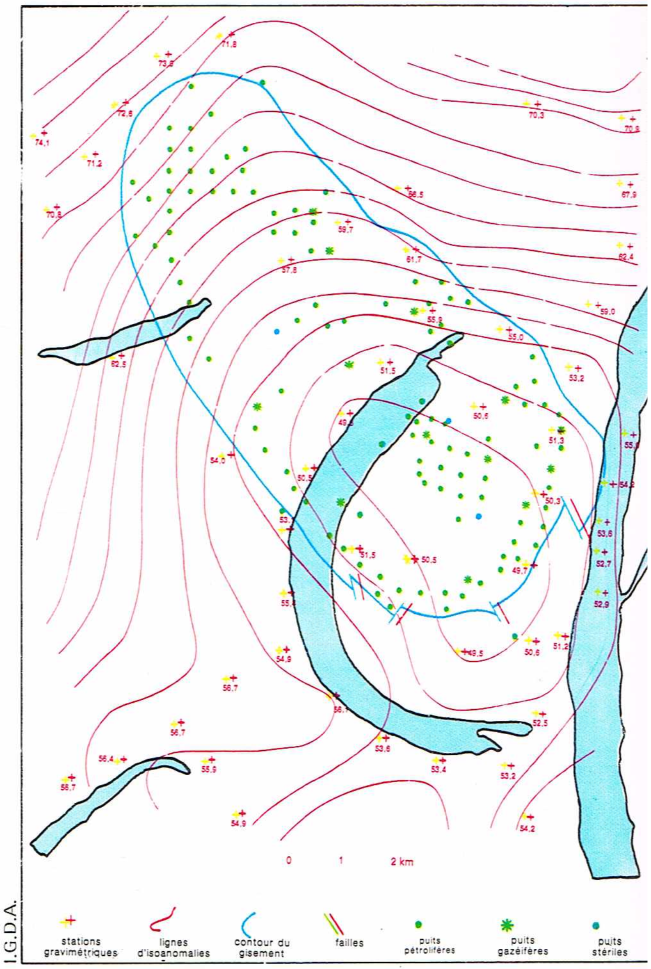

I.G.D.A.

▲ *A gauche, parcours de l'énergie en sismique-réflexion. A partir de la charge explosive, en haut à gauche, l'énergie se propage dans le sous-sol où elle est réfléchie au niveau de « miroirs » qui représentent des discontinuités dans la masse des terrains. Les géophones, en haut à droite, enregistrent (film en rouge) l'énergie en retour. L'ensemble du dispositif parcourt ainsi des « profils sismiques » (d'après Heiland). A droite, carte d'une anomalie gravimétrique sur un anticlinal pétrolifère lié à un diapir de sel. Le gisement coïncide avec les valeurs relatives plus basses de l'accélération de la gravité, mesurées en dixièmes de milligal (un gal est l'accélération d'un cm/s²). En bleu, le fleuve Mississippi avec des méandres abandonnés (d'après Smith et Gulman).*

▶ *Page ci-contre, en bas, une plate-forme de forage en mer.*

et renseigne sur la nature lithologique ainsi que sur la forme des grandes unités structurales d'un bassin.

— La *sismique-réflexion* est de loin la méthode la plus employée. Elle apporte, grâce à de récents progrès, des informations de plus en plus précises sur la série sédimentaire. On l'applique aussi bien au tir de grands profils de reconnaissance qu'à la solution de problèmes de détail, tels que la définition d'un piège structural. Son emploi est plus facile en mer qu'à terre, où les contraintes topographiques, la végétation, la nature des recouvrements superficiels grèvent beaucoup son prix de revient en ralentissant l'exécution des profils.

En plus de l'image structurale du sous-sol qu'apporte la sismique, l'étude des vitesses de transmission des ondes donne de précieuses indications sur la nature lithologique des séries traversées.

En complément, viennent des méthodes géophysiques d'emploi moins systématique.

— La *gravimétrie,* qui consiste à mesurer les variations locales du champ de pesanteur (g) provoquées par les différences de densité des terrains, permet d'obtenir des cartes d'anomalies gravimétriques et ainsi de localiser les grands accidents structuraux, les venues volcaniques, les dômes de sel, voire les récifs. L'emploi d'un appareillage très délicat et la nécessité de nombreux points de mesures en font une méthode lente à mettre en œuvre.

— Les *méthodes électriques,* qui permettent de mesurer les résistivités des couches et d'interpréter leurs contrastes en termes de lithologie, peuvent apporter d'utiles indications à peu de frais.

Les études de synthèse

Ces différentes méthodes d'étude étant choisies en fonction du terrain, du temps disponible et du budget, leurs résultats font l'objet de travaux de synthèse en vue d'une interprétation géologique de l'ensemble du bassin et du permis, qui va permettre l'implantation des sondages d'exploration. Pour cela seront établis divers documents fondamentaux, tenus à jour au fur et à mesure de l'acquisition des données nouvelles.

— *Cartes structurales,* établies tant à partir des données géologiques de surface que des données géophysiques, puis complétées et corrigées par les résultats des sondages.

— *Cartes d'isopaques,* concernant successivement plusieurs unités stratigraphiques représentant les épaisseurs de sédiments entre deux repères chronologiques. Ainsi apparaissent les variations d'épaisseur réparties dans l'espace marquant les déformations successives du fond du bassin. On constate de cette manière la coïncidence des zones hautes avec les zones d'épaisseur minimale. Des cartes d'isopaques cumulatives à partir d'un niveau de base constant permettent d'observer la formation progressive des structures. On peut ainsi obtenir une série de cartes paléostructurales permettant la reconstitution de l'histoire des migrations.

— *Cartes paléogéographiques,* permettant d'intégrer, pour une unité stratigraphique donnée qui présente une certaine homogénéité, les données de documents préalablement établis (cartes de lithofaciès et de biofaciès) de façon à reconstituer la géographie de l'époque considérée : ligne de rivage sur terre ; nature des paléoaffleurements (carte paléogéologique) et du manteau végétal ; sur mer : nature des dépôts et types d'environnements.

— *Cartes paléotectoniques,* montrant la configuration structurale d'un bassin à une période donnée : zones de subsidence, d'effondrement, de surrection, de volcanisme.

Assorties de coupes sériées, ces différentes cartes, toujours rapportées au même fond topographique, permettent d'atteindre à une connaissance dynamique du bassin. Dans ce cadre, il devient possible de suivre l'histoire de la formation et de l'empiégeage des hydrocarbures ainsi que de délimiter les zones les plus favorables à leur découverte, grâce aux apports complémentaires de la géochimie organique et de l'hydrodynamisme.

— *Cartes isocarbes.* Parmi les cartes d'isofaciès les plus utiles pour la recherche pétrolière, on doit placer celles des isoconcentrations en carbone organique ou, au moins, des isopaques des roches mères pour une séquence stratigraphique donnée. Elles permettent, en effet, de localiser les sources d'hydrocarbures dans un bassin aux époques successives de son évolution.

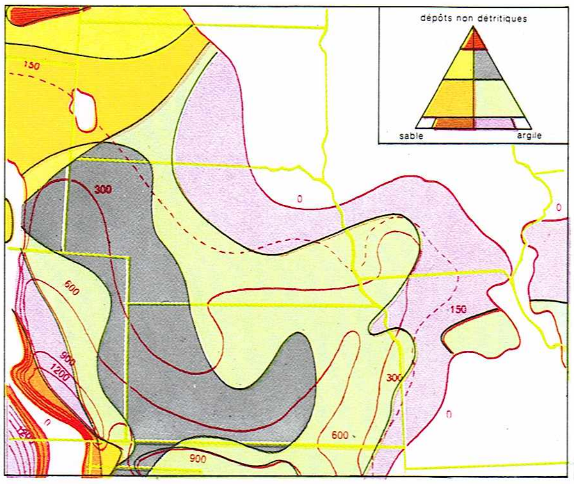

I.G.D.A.

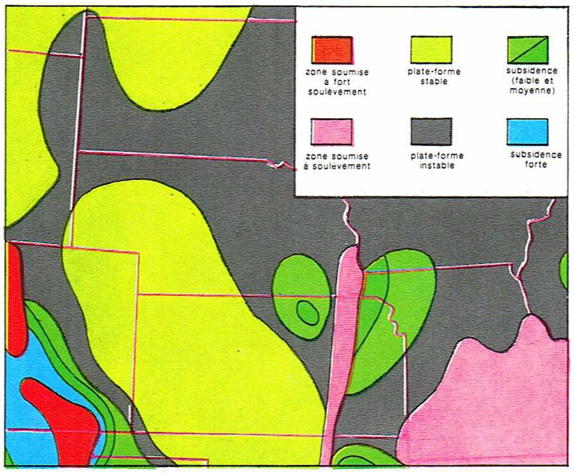

I.G.D.A.

◀ ***Ensemble de cartes interprétant les diverses catégories de données concernant une série géologique profonde : le Carbonifère supérieur du centre des États-Unis.*** **Carte de lithofaciès** ***(en haut, à gauche) : les lignes rouges sont les isopaques des dépôts (lignes d'isoépaisseurs). On constate que la ligne*** **0**, ***du côté gauche de la figure, est accompagnée d'importantes variations lithologiques et peut même correspondre à une absence de sédimentation au cours de la période considérée. Au contraire, du côté droit de la figure, la nature lithologique des formations ne change pas dans la zone traversée par la ligne*** **0**. ***De plus, les faciès, qui, dans le cas précédent, sont de type côtier, sont ici nettement marins; la ligne*** **0** ***est donc ici une limite d'érosion.*** **Carte paléotectonique** ***(en haut, à droite) : comparer avec la précédente. Le coin sud-ouest était donc bien émergé à cette époque, tandis qu'au nord-est se formaient des dépôts marins de plate-forme.*** **Carte paléogéologique** ***(en bas, à gauche) à la fin du Carbonifère inférieur et donc avant le dépôt du Carbonifère supérieur dont le contour est rappelé par les lignes rouges (d'après Levorsen).***

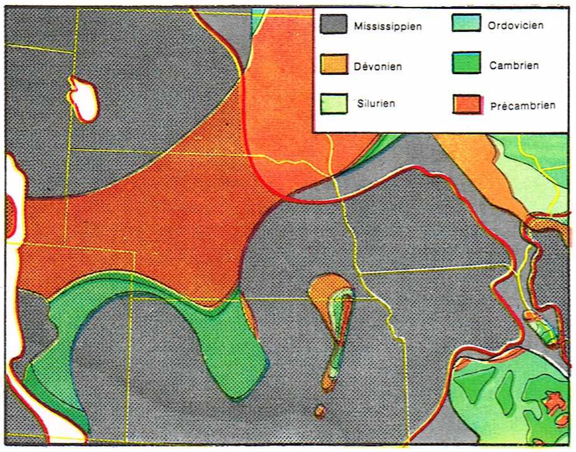

I.G.D.A.

— *Cartes isopepses,* ou cartes d'iso-« maturation », utilisant notamment le pouvoir réflecteur de la vitrinite.

Ces documents permettront : de n'accorder qu'une faible probabilité de découverte de gisements d'huile dans les régions de PR > 1,3 (« dead-line ») et de PR < 0,6 (immaturité) ; de considérer comme zones à accumulations de gaz possibles celles où 1,3 < PR < 2,5 ; de rejeter comme probablement stériles les régions où PR > 2,5. Resteront donc comme zones favorables aux accumulations d'huile celles où 0,6 < PR < 1,3.

— *Cartes piézométriques* ou *potentiométriques :* les premières utilisent les pressions exprimées en hauteur d'eau douce ou salée, les secondes les expriment en hauteur d'eau douce (après correction des salinités). Elles sont établies à partir des données de surface (altitudes des sources, cours d'eau, profondeurs des puits d'eau) et des mesures de pression lors des essais de couches dans les sondages. Les indices d'hydrocarbures éventuellement observés en surface complètent très utilement ce type de carte.

Le forage d'exploration

C'est le premier aboutissement du travail d'exploration. Outre la sanction de celle-ci — découverte ou échec —, il représente un apport capital d'informations géologiques qui enrichit la somme des connaissances déjà acquises.

En moyenne, les profondeurs atteintes par les sondages pétroliers sont de l'ordre de 2 000 à 2 500 m ; elles peuvent être plus modestes. Elles atteignent assez couramment 4 000 m et peuvent, exceptionnellement, dépasser 6 000 et même 7 000 m. Le coût du mètre foré étant très élevé, surtout en mer ou dans les régions arctiques, les opérations sont menées aussi vite que possible, ce qui, au désespoir du géologue, n'autorise que rarement le prélèvement de « carottes ». Le plus souvent, celui-ci ne dispose que de déblais *(cuttings)* issus du forage rotary ou du turboforage. L'échantillonnage du puits peut cependant être complété par le prélèvement de petites « carottes latérales » dans les couches qui le justifient.

L'analyse lithologique des matériaux issus du puits, à laquelle s'ajoutent les diverses informations recueillies

E.N.I.

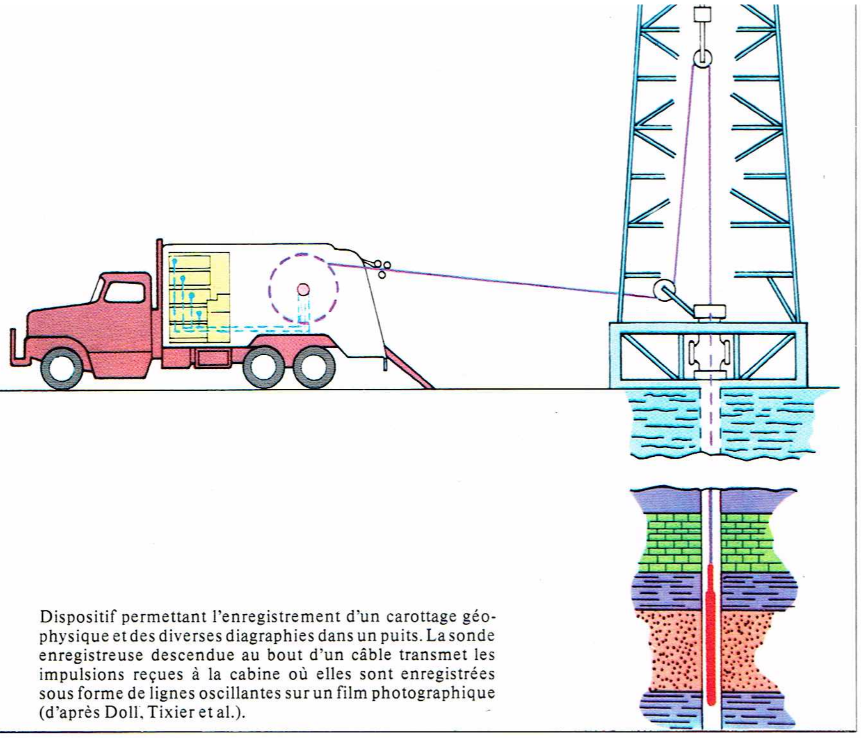

Dispositif permettant l'enregistrement d'un carottage géophysique et des diverses diagraphies dans un puits. La sonde enregistreuse descendue au bout d'un câble transmet les impulsions reçues à la cabine où elles sont enregistrées sous forme de lignes oscillantes sur un film photographique (d'après Doll, Tixier et al.).

I.G.D.A.

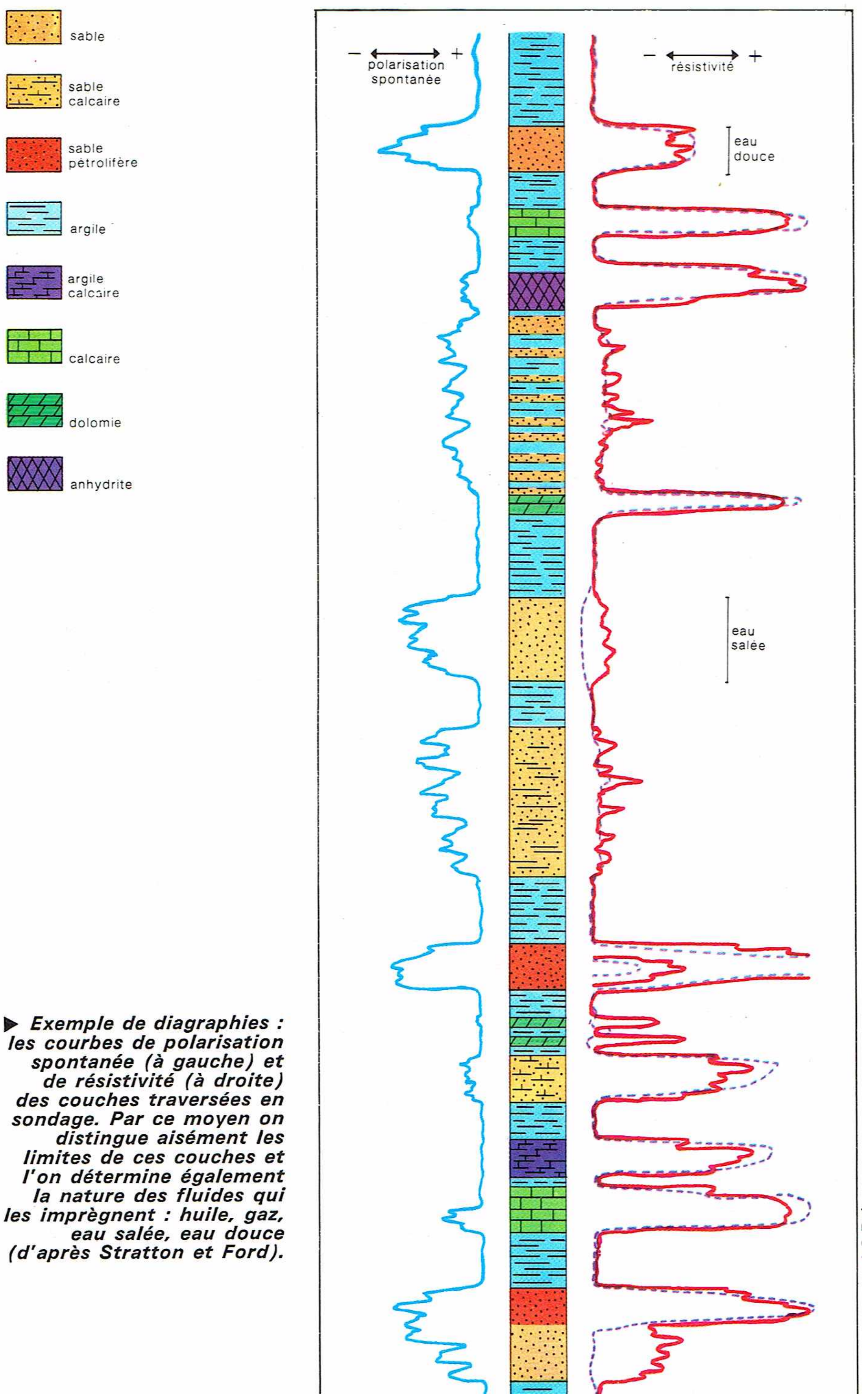

▶ *Exemple de diagraphies : les courbes de polarisation spontanée (à gauche) et de résistivité (à droite) des couches traversées en sondage. Par ce moyen on distingue aisément les limites de ces couches et l'on détermine également la nature des fluides qui les imprègnent : huile, gaz, eau salée, eau douce (d'après Stratton et Ford).*

I.G.D.A.

par les diagraphies, permettent d'établir le *log* du sondage c'est-à-dire sa coupe lithologique.

Les *diagraphies* consistent à enregistrer, à l'aide d'une sonde spécialisée, le long des parois du puits, les variations de divers paramètres physiques, telles que la résistivité électrique, la radioactivité γ naturelle, la radioactivité induite, la conductibilité sonique, etc. Ces enregistrements apportent une connaissance précise des limites des couches traversées, de leur nature, de leurs porosité et perméabilité, des fluides qui les imprègnent. D'autre part, le puits est également mis à profit pour procéder au « carottage sismique », qui assure la mesure des vitesses de propagation. Cette opération permet ensuite l'identification des marqueurs sur les profils sismiques. Enfin, et surtout, le forage donne accès aux réservoirs qui sont systématiquement essayés, particulièrement s'ils sont imprégnés d'hydrocarbures.

A l'occasion de ces essais, ou tests, sont mesurés la pression, la température, le débit des fluides contenus dans la couche. Ceux-ci font également l'objet d'un échantillonnage en surface, ainsi qu'en profondeur au moyen d'une capsule spéciale qui conserve son contenu dans les conditions du fond. Étudiés en laboratoire, les fluides obtenus (huile, gaz ou eau de formation) donnent lieu à toute la série d'analyses décrites précédemment.

L'entrée éventuelle de l'outil dans un réservoir imprégné d'huile ou de gaz donne lieu à une surveillance permanente par le truchement de la boue de forage qui, le cas échéant, ramène vers la surface, avec les déblais, une teneur aisément détectable de gaz et/ou d'huile. C'est la *diagraphie instantanée* qui, à l'aide d'un détecteur de gaz, permet ce contrôle permanent.

A la fin du sondage et selon le planning d'emploi de l'appareil de forage, les autres structures ou pièges repérés sont systématiquement forés. En cas de découverte, le rôle de l'équipe d'exploration s'estompe progressivement devant celui de l'équipe des « producteurs ». S'écartant du domaine de la géologie, on entre alors dans celui de la technique.

Les chances de succès

Faute de pouvoir maîtriser toutes les lois qui commandent la genèse, la répartition et la préservation du pétrole, on s'en remet parfois au calcul statistique, comme si le hasard restait la clé du succès. Il en ressort que, dans une province où les chances de découverte varient de 1 à 10, il faut en moyenne forer :

— 1 puits pour avoir 10 % de chances de succès ;
— 5 puits pour avoir 40 % de chances de succès ;
— 22 puits pour avoir 90 % de chances de succès ;
— 28 puits pour avoir 95 % de chances de succès ;
— 44 puits pour avoir 99 % de chances de succès.

Dans les zones dites « prouvées », c'est-à-dire déjà productrices et où les travaux effectués sont abondants, les chances de découvertes sont sans doute plus élevées mais les objectifs sont petits, et le profit sera faible. Par contre, dans les régions vierges, les risques sont importants mais les chances de découvrir un gros gisement ne sont pas négligeables. Une telle optique de la recherche pétrolière ne peut cependant être retenue car elle paraît ignorer la part désormais déterminante des connaissances acquises sur les hydrocarbures en général, et du raisonnement géologique dans cette activité.

Considérations économiques et statistiques

Si les coûts de production de l'huile et du gaz baissent, indépendamment des charges ajoutées, seules responsables des hausses spectaculaires que ces produits ont subies à partir de 1973, les investissements nécessaires à la découverte et à la mise en exploitation d'un gisement sont de plus en plus élevés.

Prix de revient de l'exploration pétrolière

Il n'est ici question que du coût des opérations proprement dites, à l'exclusion des frais généraux de gestion de l'entreprise concernée, et du coût du personnel au siège de la filiale et de la société mère.

Prix de revient du développement d'un gisement

Pour atteindre l'étape de la production commerciale optimisée, il est nécessaire de « développer » le gisement par les travaux et installations adaptés. Les investissements requis, notamment pour les travaux en mer, peuvent

Prix de revient de l'exploration pétrolière				
	Coûts unitaires (F)		Unités	Durée moyenne*
	A terre	En mer		
Phologéologie	120	50	km²	+ 12 mois d'interprétation (5 000 F/mois)
Géologie de terrain	10 000		mois	100 mois
Core-drills	80 000	150 000	mois	20 mois
Aéromagnétisme	60-70		km	25 mois
Gravimétrie	100	600	station	
Sismique	10 000	1 000/1 200	km	100 mois (100 km/mois)
Forage	15 000	50 000	jour	2 mois/forage

*Pour un permis théorique d'une durée de 5 ans.

◀ *Tableau du prix de revient de l'exploration pétrolière.*

être très élevés. A terre, un gisement d'importance moyenne peut demander un investissement compris entre 500 F et 1 000 F/baril d'huile. En mer, dans le golfe Persique on compte 4 000 F/baril, en mer du Nord de 15 à 25 000 F/baril.

Prix de vente du pétrole en France

Tel que le pétrole est écoulé sur le marché français en 1974, sous forme de produits finis, il coûtait 828 F par tonne consommée. Cette somme se décompose ainsi :

			Pourcentage
— Coût de production et marge des compagnies	20,45	353 F	2,44
— Part des pays producteurs	332,55		40,20
— Fret	26,00		3,14
— Raffinage	27,00		3,26
— Mise en place, distribution et divers	116,00		13,98
— Fiscalité en France	306,00		36,96
Total	828,00		

20,45 F, soit 2,44 % du prix, reviennent à :

— l'amortissement des dépenses d'exploration, de développement et de production de l'huile ;

— la marge bénéficiaire des compagnies productrices et distributrices. Cette marge, récemment négociée à 45 cents par baril, n'est plus que de 35 cents soit 10,5 F par tonne, en prenant à 4,30 F le cours du dollar.

Eléments statistiques

Les données, aussi récentes que possibles, présentées ici, concernent le pétrole brut et le gaz naturel :

— *Les plus grands champs de pétrole du monde*

Parmi les « géants », le tableau ci-dessous présente les dix plus grands producteurs d'huile.

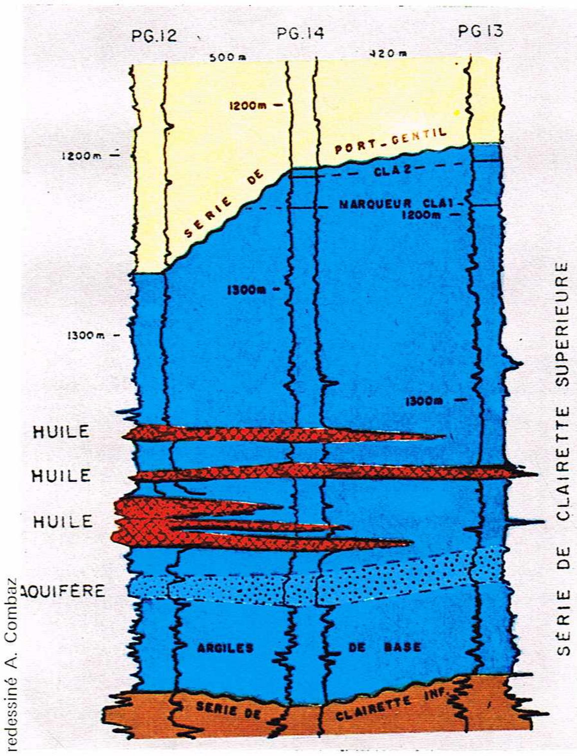

◀ *Exemple de corrélation entre sondages, grâce aux diagraphies électriques (d'après Pegand et Reyre; A. Perrodon,* **Géologie du pétrole,** *P. U. F., 1966).*

Les 10 plus grands champs de pétrole du monde							
Champ	Pays	Type de piège - Age	Nature du réservoir	Profondeur moyenne en mètres	Année de découverte	Production annuelle (1974)	Réserves récupérables (1.1.75)
						en millions de m³	
GHAWAR	Arabie Saoudite	Anticlinal Jurassique	Carbonates	2 200-2 800	1948	270	10 300
BURGAN	Koweït	Dôme Crétacé	Grès	1 600	1938	150	8 800
Côte BOLIVAR	Venezuela	Stratigraphie Eocène, Miocène	Grès	200-2 800	1917	133	4 750
PRUDHOE BAY	Alaska	Anticlinal Trias, Carbonifère	Grès Carbonates	2 200-3 300	1967	0,3	3 150
SAFANIYA-KHAFJI	Arabie (zone neutre)	Anticlinal Crétacé	Grès	1 700	1953	17	2 250
SAMOTLOR	URSS	Anticlinal Crétacé	Grès	1 800-2 300	1966	71	2 166
RUMAILIA	Irak	Anticlinal Crétacé	Grès	3 500-3 600	1953	36	1 860
KIRKUK	Irak	Anticlinal Oligocène, Eocène	Carbonates	900-1 400	1927	54	1 490
ABQAIQ	Arabie Saoudite	Anticlinal Jurassique	Carbonates	2 000-2 300	1941	51	1 200
ROMASHKINO	URSS	Anticlinal Dévonien	Grès	1 600-1 700	1948	72	636

◀ *Tableau des dix plus grands champs de pétrole du monde.*

▼ *Ci-dessous, tableau récapitulatif des dix plus grands champs de gaz du monde.*
En bas, tableau récapitulatif des réserves, de la production et de la consommation de pétrole et de gaz naturel dans le monde.

On appelle « géant » un champ dont les réserves d'huile récupérables dépassent 100 millions de m³. On dénombre un peu moins de deux cents champs et gisements méritant cette appellation. A eux seuls ils représentent 80 % de la production mondiale.

— *Les plus grands champs de gaz du monde.*

Il existe environ quatre-vingts gisements géants de gaz, c'est-à-dire contenant plus de 100 milliards de m³ récupérables. Les dix plus grands sont recensés ci-dessous.

Les 10 plus grands champs de gaz du monde

Champ	Pays	Type de piège - Age	Nature du réservoir	Profondeur moyenne en mètres	Année de découverte	Production annuelle (1974)	Réserves récupérables (1975)
						Milliards de m³	
URENGOISKOYE	URSS (Ouest Sibérie)	Anticlinal Crétacé	Grès	1 150-1 300	1966	-	4 942
MEDVEZH'YE	URSS (Ouest Sibérie)	Anticlinal Crétacé	Grès	1 300-1 400	1967	19	1 651
ORENBURGS-KOYE	URSS (Bassin Oural - Volga)	Anticlinal Permien inférieur	Carbonates	1 300-2 000	1967	8,4	1 626
ZAPOLYARNOYE	URSS (Ouest Sibérie)	Anticlinal Crétacé	Grès fin	1 100-1 500	1965	-	1 601
HASSI-R'MEL	Algérie (Sahara)	Anticlinal Trias	Grès	2300	1956	5,6	1 500
GRONINGEN	Pays-Bas	Piège/faille Permien	Grès	2 900-3 400	1959	74	1 367
PAZANAN	Iran	Anticlinal Oligocène, Miocène	Carbonates	1 200-2 000	1938	-	1 400
SHATLYK	URSS (Turkmenistan)	Anticlinal Crétacé inférieur	Grès	4 000	1968	5,9	1 478
HUGOTON	Etats-Unis (Kansas, Texas)	Barrière porosité Permien	Carbonates	800-1 100	1926	21	1 137
YAMBURG	URSS (Ouest Sibérie)	Dôme Cénomanien	Grès	1 200-1 350	1969	-	1 977

Réserves, production et consommation de pétrole et de gaz naturel

Pétrole brut				Gaz naturel			
Pays	Réserves reconnues (1.1.75)	Production annuelle (1974)	Réserves théoriques en années	Pays	Réserves reconnues (1.1.75)	production annuelle (1974)	Réserves théoriques en années
Arabie Saoudite	22 260	418	53	U.R.S.S.	22 993	261	88
U.R.S.S.	11 286	452	25	Iran	9 345	26	359
Koweït	9 851	126	78	Etats-Unis	6 718	633	11
Iran	8 931	297	30	Algérie	6 485	0,6	
Irak	4 736	91	52	Pays-Bas	2 685	81	33
Etats-Unis	4 636	434	11	Canada	1 606	95	17
Abu-Dhabi	4 060	69	59	Arabie Saoudite	1 557	92	17
Libye	3 599	74	49	Royaume Uni	1 416	34	42
Chine	3 383	59	57	Nigéria	1 274	1,7	749
Zone neutre (Arabie)	2 341	22	106	Australie	1 076	4,5	239
Autres pays	21 107	732	29	Autres pays	16 914	115	147
Total mondial	96 190	2 774	35	**Total mondial**	72 069	1 344	54

La Sibérie occidentale est très riche en gisements de gaz qui commencent à être mis en production.

Les champs de la mer du Nord ne comptent pas parmi les plus grands mais certains sont des « géants » : Léman (350 milliards de m³), Indéfatigable (230), Hewett (116).

En Aquitaine, Lacq et Meillon représentent respectivement 200 et 100 milliards de m³ de réserves récupérables.

— *Réserves, production et consommation de pétrole et de gaz naturel.*

Les quantités sont exprimées en millions de tonnes pour le pétrole et en milliards de m³ pour le gaz. Le tableau ci-contre, en bas, indique les principaux pays producteurs.

Il est évident que ces chiffres varient d'année en année, étant fonction : de l'activité de l'exploration pétrolière qui tend à accroître — mais non indéfiniment ! — les réserves ; de la demande, pour les pays exportateurs ; de la consommation intérieure, c'est-à-dire de la croissance de l'économie des pays considérés.

De sorte que les « réserves théoriques en années » sont nécessairement surestimées. Calculées pour le pétrole sur les données mondiales de 1970, elles s'élevaient encore à 34 années. En 1973, le crédit n'était plus que de 28 ans.

— *Zones géographiques de production et d'utilisation.*

Les États-Unis, l'Europe occidentale et le Japon, qui ne produisent pas 21 % de la production mondiale de pétrole, en consomment à eux seuls plus des 2/3. Par contre, ils ne consomment pas plus de gaz qu'ils n'en produisent. Les pays socialistes sont également en équilibre production-consommation tant pour l'huile que pour le gaz. C'est bien du Moyen-Orient que dépend le sort des pays occidentaux du point de vue énergétique.

— *Surplus et déficits en pétrole dans la présente décennie.*

On constate le très lourd et croissant déficit des pays les plus industrialisés et, en particulier, des perspectives alarmantes pour l'Europe, qui importe 95 % de ses besoins en pétrole. Il faut savoir, de plus, que ce même pétrole est appelé à satisfaire la plupart des besoins nouveaux qui apparaîtront dans la prochaine décennie et que le Moyen-Orient peut seul pourvoir à l'accroissement de la demande.

BIBLIOGRAPHIE

Les charbons fossiles :
Ressources en combustibles

Conférence mondiale de l'énergie. Enquête sur les ressources énergétiques, U.S. National Committee of the World Energy Conference, New York, 1974. - *L'Énergie en Europe et l'Importance du charbon,* Assoc. charbonnière europ. et C.E.P.C.E.O., Bruxelles, 1974. - *Pétrographie organique et Potentiel pétrolier,* Colloque intern. B. Alpern, Paris, 1973, C.N.R.S., 1975. - VAN KREVELEN D.W., *Coal,* Elsevier, Amsterdam, 1961.

Classification

VAN KREVELEN, *Coal,* Elsevier, Amsterdam, 1961. - HILT, *Des rapports entre la composition des charbons et leurs propriétés industrielles,* in *Ann. Ass. Ing.*, Liège, 1873. - ALPERN B., *Un exemple intéressant de houillification dans le Bassin lorrain et ses prolongements,* in *Adv. in Organic Geochem.*, 1964. - ALPERN B., *le Pouvoir réflecteur des charbons français,* in *Ann. Soc. géol. Nord,* 1969.

Constituants microscopiques

ALPERN B. et alias, *Pétrologie des charbons,* in *Ann. Soc. Géol. du Nord,* 4, 1971. - ALPERN B., *Pétrographie des charbons,* C.R. 7ᵉ Congrès intern. Géol. Carbonifère, Krefeld, 1971. - ALPERN B. et alias, *Localisation, caractérisation et classification pétrographique des substances organiques sédimentaires fossiles,* C.R., 5ᵉ Réunion intern. Géochimie organique, Hanovre, 1971. - ALPERN B., Thèse, Paris, 1957. - KRÖGER C., *Betrachtungen Zum Inkohlungsablauf,* Erdöl u. Kohle., 19, 1966.

Formation des bassins houillers

BARRABÉ L. et FEYS R., *Géologie du charbon et des bassins houillers,* Masson, 1965. - PRUVOST P., *Sédimentation et subsidence,* Livre Jub. Soc. Géol. de France, Paris, 1930. - STÉPANOV P., *Sur certaines régularités dans la distribution stratigraphique et paléogéographique sur le globe des réserves de charbons*

Surplus et déficits en pétrole dans la présente décennie

Zones géographiques	1970	1980
Europe occidentale	− 647	− 1 055
Etats-Unis	− 181	− 390
Japon	− 191	− 435
Amérique latine	+ 151	+ 100
Afrique	+ 215	+ 400
Europe de l'Est et Asie communiste	+ 60	− 50
Moyen-Orient	+ 590	+ 1 530

fossiles, 17e Congr. intern. Géol., Moscou, 1937. - DOLLÉ P., *Sédimentation rythmée dans les charbons du bassin du Nord-Pas-de-Calais,* in *Ann. Soc. Géol. Nord,* t. XC, 1970. - BOUROZ A., *Sur la pluralité d'origine des Tonsteins,* in *Ann. Soc. Géol. Nord,* 82, 1962.

Charbons sapropéliques et schistes bitumineux

BERTRAND P., *les Charbons d'algues,* Congrès intern. des Mines, Liège, 1930. - BERTHELOT C., *les Schistes bitumineux,* Dunod, 1943. - BURGER J., *l'Exploitation des pyroschistes ou schistes bitumineux,* in *Revue I.F.P.,* Vol. 28, n° 3, 1973.

Prospection

WHITE D., *Some Relations in Grigin between Coal and Petroleum,* in *Jal. Washingt. Acad. Sciences,* Vol. 5, 1915. - *Pétrographie organique et Potentiel pétrolier,* Colloque intern., B. Alpern, C.N.R.S., Paris, 1975.- TEICHMÜLLER M., *Generation of Petroleum — Like Substances in Coal Seams as Seen under the Microscope,* 6e Congr. intern. Geoch. Org., Rueil-Malmaison, 1973. - ALPERN B., *Classification pétrographique des constituants organiques fossiles des roches sédimentaires,* in *Revue Inst. français du Pétrole,* n° 11, 1970.

Les hydrocarbures naturels :

Actes du 6e Congrès international de géochimie organique, Éd. Technip, Paris, 1973. - *Activité de l'industrie pétrolière,* DICA - DGE, 1973. - *Annales du 2e Congrès mondial du pétrole,* Paris, 1937. - ANDREEV P.F., A.I. BOGOMOLOV, A.F. DOBRYANSKII, A.A. KARTSEV, *Transformation of Petroleum in Nature,* Pergamon, 1968. - BREGER I.A., *Organic Geochemistry,* Pergamon, 1963. - *Comité professionnel du pétrole,* in *Pétrole,* 1973. - DOTT H. et REYNOLDS MERRIL J., *Source Book for Petroleum Geology,* AAPG, Tulsa, 1969. - GUILLEMOT J., *Cours de géologie du pétrole,* Éd. Technip, 1964. - HALBOUTY M.T., *Geology of Geant Petroleum Fields,* AAPG, 1970. - *International Petroleum Encyclopedia,* Petr. Publis. Cy., Tulsa, 1974. - LEVORSEN A.I., *Geology of Petroleum,* Freeman and Co, 1956. - LOUIS M., *Cours de géochimie du pétrole,* Éd. Technip, Paris, 1967. - PERRODON A., *Géologie du pétrole,* P.U.F., 1966.

Principaux pays consommateurs de pétrole et de gaz naturel

Pétrole brut		Gaz naturel		
Pays	Consommation annuelle (1974)	Pays	Consommation annuelle 1971	1972
Etats-Unis	829	Etats-Unis	650	
(Europe occidentale)	(687)	(Europe occidentale)	(105)	(277)
U.R.S.S.	342	U.R.S.S.	215	
Japon	261	Pays-Bas		68,3
République fédérale allemande	137	Royaume-Uni		61,6
France	120	République fédérale allemande		57
Royaume-Uni	106	Canada	46	
Italie	99	Italie		33,3
Canada	92	France		30,5
Chine	49	Mexique	18	
Autres pays	532	Autres pays	94	26,30
Total mondial	2 792	**Total mondial**	1 128	

▲ *A gauche, tableau estimatif des surplus et déficits en pétrole dans la présente décennie.*
A droite, tableau des principaux pays consommateurs de pétrole et de gaz naturel.

▼ *Tableau récapitulatif des zones géographiques de production et d'utilisation du pétrole et du gaz naturel (en millions de tonnes pour le pétrole; en milliards de m³ pour le gaz; en italique, pourcentage du total mondial).*

Zones géographiques de production et d'utilisation du pétrole et du gaz naturel

Zones géographiques	Pétrole			Gaz naturel		
	Réserves reconnues (1974)	Production annuelle (1973)	Consommation annuelle (1973)	Réserves reconnues (1974)	Production annuelle (1973)	Consommation annuelle (1971)
Europe	2 162 *2,6*	18,2 *0,6*	719,5 *26,0*	5 488 *9,8*	147,7 *10,8*	105,0 *9,3*
Afrique	9 096 *10,8*	291,2 *10,6*	48,6 *1,8*	5 317 *9,5*	9,6 *0,7*	1,5 *0,1*
Amérique du Nord	6 044 *7,2*	541,9 *19,8*	915,9 *33,1*	8 502 *15,2*	738,9 *54,3*	695,0 *61,5*
Amérique du Sud	4 277 *5,1*	253,0 *9,2*	172,2 *6,2*	2 592 *4,6*	97,5 *7,2*	43,0 *3,8*
Moyen-Orient	47 118 *56,1*	1 068,6 *39,0*	72,5 *2,6*	11 663 *20,9*	54,6 *4,0*	18,5 *1,6*
Extrême-Orient	2 112 *2,5*	111,3 *4,1*	405,6 *14,7*	3 231 *5,8*	17,8 *1,3*	11,0 *1,0*
Pays communistes	13 191 *15,7*	456,1 *16,6*	432,9 *15,6*	19 050 *34,1*	295,8 *21,7*	256,0 *22,7*
Total mondial	84 000 *100*	2 740,13* *100*	2 767,2* *100*	55 843 *100*	1 361,8 *100*	1 130,0 *100*

*La différence de ces deux valeurs, toutes deux issues de l'I.P.E. 1974, souligne la difficulté d'obtenir des chiffres rigoureux.

O. Geddo

▲ ***Les roches métamorphiques, ici une paroi rocheuse constituée d'orthogneiss près de Macugnaga (Italie), se forment par transformation à l'état solide de roches préexistantes; cette transformation se traduit par des changements de la composition minéralogique ou, au moins, de la structure des roches.***

MÉTAMORPHISME ET ROCHES MÉTAMORPHIQUES

Le métamorphisme

Les roches métamorphiques se forment par transformation à l'état solide de roches préexistantes magmatiques, sédimentaires ou déjà métamorphiques, par suite d'un changement des conditions physico-chimiques du milieu où elles se trouvent, sous l'influence de facteurs endogènes. Cette transformation se traduit par des changements de la composition minéralogique ou, au moins, de la structure des roches.

Les transformations qui se produisent dans les roches sous l'action de phénomènes exogènes, comme l'altération superficielle ou la cémentation par les eaux météoritiques, ne font pas partie du métamorphisme. Elles constituent une adaptation de la composition des roches aux conditions existant à la surface de la Terre et font donc partie du début du cycle sédimentaire.

La diagenèse des sédiments est également exclue de la définition du métamorphisme; ayant lieu à de très basses températures, elle en constitue la limite inférieure, qui peut être graduelle. La limite supérieure du métamorphisme est déterminée par la fusion des roches à très hautes températures, les transformations métamorphiques ayant lieu à l'état solide.

Les roches métamorphiques représentent certainement le constituant le plus important en volume de l'écorce terrestre dans les régions continentales. Sur une carte géologique du monde, on constate qu'elles affleurent principalement dans les boucliers continentaux anciens et dans les chaînes de montagnes récentes, occupant ainsi plus de la moitié de la surface des continents. De plus, il est probable qu'elles ont une extension plus grande encore sous les bassins sédimentaires, à une profondeur de quelques kilomètres. On connaît également des roches métamorphiques dans les régions océaniques.

Les phénomènes métamorphiques et les facteurs du métamorphisme

Les phénomènes métamorphiques ne sont pas observables directement. On peut seulement les reconstituer d'après les caractéristiques des roches qui ont subi leur influence à de grandes profondeurs et qui affleurent actuellement à la surface terrestre, par suite de mouvements verticaux de surrection et de l'érosion des roches qui les surmontaient originellement. D'après l'étude des roches métamorphiques, il paraît évident que le métamorphisme consiste essentiellement en une réorganisation des minéraux et de la structure des roches, en réponse à une variation des conditions physico-chimiques où elles se trouvent, principalement de la température et de la pression.

Les modifications des roches ont lieu entièrement à l'état solide et sont rendues possibles par l'existence de petites quantités de fluides intercristallins constitués principalement par de l'eau. Ils forment une fine pellicule, probablement discontinue, qui met en contact les différents minéraux composant la roche et permet l'échange d'ions ainsi que de groupes ioniques entre les réseaux cristallins, ce qui donne lieu aux réactions métamorphiques. Les minéraux originels de la roche disparaissent, et les éléments chimiques qui les formaient se réordonnent en de nouveaux réseaux cristallins pour former d'autres minéraux. Les réactions métamorphiques sont, en un certain sens, analogues aux réactions chimiques ayant lieu en solution, mais la quantité de solvant est très petite. Les phénomènes métamorphiques que nous avons considérés de manière simplifiée comme une série de réactions entre les minéraux d'une roche, rendues possibles par la présence d'une petite quantité d'eau interstitielle, ne produisent aucun changement de la composition chimique globale de la roche. A l'exception de l'eau et du gaz carbonique, les concentrations des autres constituants de la roche restent inchangées après le métamorphisme.

Métamorphisme isochimique et métasomatisme

Le *métamorphisme proprement dit* est donc un phénomène isochimique, à la différence du *métasomatisme*, au cours duquel a lieu un changement de la composition chimique globale de la roche par addition ou perte d'un ou plusieurs constituants, la composition de la roche métasomatique formée ne dépendant pas de la composition de la roche initiale.

Température et pressions

Les principaux minéraux qui constituent les roches sédimentaires ou les roches magmatiques ne sont pas chimiquement en équilibre entre eux, à la différence de ceux des roches métamorphiques qui tendent à un tel état. En effet, les minéraux des roches magmatiques se forment à des températures variables : les premiers, cristallisés à partir du magma fondu, ne sont pas en équilibre avec ceux qui sont cristallisés en dernier. En outre, excepté le quartz, tous ces minéraux se sont formés à haute température et ne sont plus stables aux températures existant à la surface terrestre ou à faible profondeur. De même, les roches sédimentaires clastiques sont composées de minéraux non stables entre eux puisqu'ils proviennent de roches formées dans des conditions qui peuvent être très différentes. Les roches sédimentaires d'origine chimique sont généralement composées de minéraux en équilibre, mais stables seulement dans les

conditions de pression et de température très basses habituelles à la surface terrestre.

A l'exception des réactions diagénétiques, en dessous d'une certaine limite de température aucune réaction ne peut avoir lieu dans un temps géologique appréciable entre les différents minéraux de ces roches, même s'ils ne sont pas en équilibre, car les vitesses de réaction sont alors extrêmement petites. A partir d'environ 250 °C, ont lieu les premières réactions métamorphiques. Au cours de ces réactions, les minéraux néoformés à partir des minéraux originels de la roche tendent à être en équilibre chimique entre eux, au moins à l'échelle des grains cristallins, dans les conditions de température et de pression auxquelles ont lieu les réactions. Si ces conditions changent, l'association minérale peut, à son tour, devenir instable, et de nouveaux minéraux de métamorphisme se forment. La rapidité et l'importance des réactions augmentent pour des températures croissantes jusqu'à intéresser tous les minéraux de la roche, car le pouvoir dissolvant des fluides et la diffusion à l'état solide augmentent également en fonction de la température.

Souvent, les minéraux de métamorphisme ont un champ de stabilité très limité par rapport à la température et à la pression; une formation rocheuse initiale de composition lithologique uniforme, une formation argileuse, par exemple, peut acquérir durant le métamorphisme des compositions minéralogiques et structurales très différentes dans des régions voisines si celles-ci sont soumises à des conditions de température et de pression différentes. Seules les roches monominérales, comme les calcaires purs, les grès quartziques et les silex, sont stables dans des conditions variées de température et de pression; au cours du métamorphisme, leur composition minéralogique ne change pas, à moins que n'interviennent des apports métasomatiques d'autres substances.

La limite inférieure du métamorphisme est définie dans les roches pélitiques par le degré de cristallisation d'un minéral argileux, l'*illite*, déterminé par les méthodes de rayons X. Dans les roches de composition basique, cette limite inférieure est définie par l'apparition de certains minéraux zéolitiques.

La limite supérieure du métamorphisme est déterminée par la fusion des roches, le métamorphisme ayant lieu dans les roches à l'état solide. Cette limite est située entre 700 et 1 000 °C, suivant la composition chimique de la roche considérée et la présence ou l'absence d'eau.

L'augmentation de température nécessaire aux réactions métamorphiques peut être due à la présence locale d'intrusions magmatiques de très hautes températures *(métamorphisme de contact)*, ou à l'enfouissement des roches à grande profondeur durant les phénomènes géologiques *(métamorphisme régional)*.

L'augmentation de la température avec la profondeur, appelée *gradient géothermique*, est due à des causes qui ne sont pas clairement définies et qui dépendent de la constitution interne du globe terrestre. On admet que des températures élevées règnent dans le noyau et le manteau, parties internes du globe terrestre, par suite de la formation de la Terre à de très hautes températures, ou en raison de réactions radio-actives dégageant de la chaleur et ayant lieu principalement dans les parties profondes de la croûte terrestre continentale, composée essentiellement de roches éruptives et métamorphiques acides dans lesquelles sont concentrés les éléments radio-actifs.

Le gradient géothermique a d'abord été mesuré lors de sondages profonds. Actuellement, il est calculé par des méthodes analogues, mais plus précises, de mesure du flux de chaleur interne émis à la surface de la Terre. Le gradient géothermique moyen dans les régions superficielles de l'écorce est d'environ 3 °C pour une augmentation de la profondeur de 100 m, mais il est variable suivant la constitution profonde des différentes régions. Dans les régions géotectoniques stables, c'est-à-dire les boucliers continentaux, le gradient géothermique est moindre (entre 1,5 °C et 2 °C pour 100 m), alors que dans les régions géotectoniques actives, il atteint des valeurs de plus de 6 °C pour 100 m. De plus, la température existant en un point de la croûte terrestre dépend également de la conductivité thermique des roches, de la transformation locale d'énergie mécanique en énergie thermique, etc.

Un autre facteur important du métamorphisme est la pression, ou plutôt les différents types de pression.

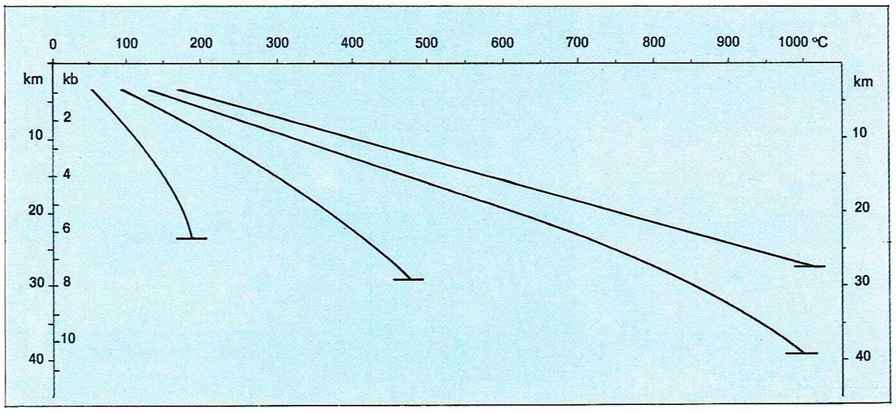

▲ ***Représentation schématique de l'augmentation supposée de la température avec la profondeur dans différentes régions du Japon jusqu'à la base de la croûte terrestre (indiquée par les petits traits horizontaux qui terminent les courbes). Sur l'échelle verticale, à gauche, est également représentée l'augmentation de la pression (en kilobars, Kb) [d'après Uyeda].***

▼ ***Représentation cartographique des variations du gradient géothermique en Hongrie. Dans les aires violettes, ce gradient est supérieur à 70 °C/km; en marron, il est compris entre 60 et 70 °C/km; en orange, il se situe entre 50 et 60 °C/km; en rouge, il est inférieur à 50 °C/km (d'après Boldiszar).***

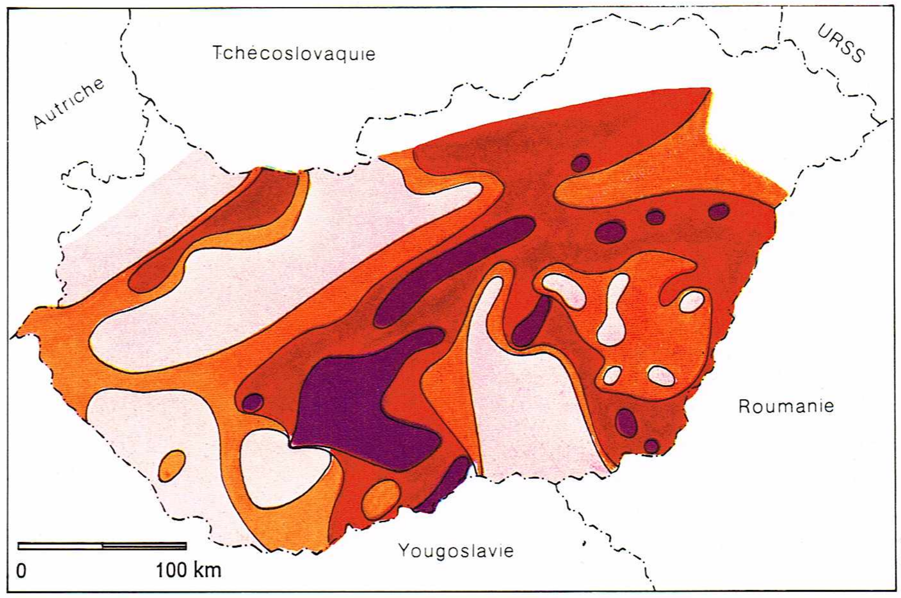

Le premier type, le plus évident, est la *pression lithostatique*, encore appelée *pression de charge*, due à la masse des roches et des sédiments sus-jacents à la roche considérée lors du métamorphisme; sa valeur dépend de la profondeur et de la densité des roches; l'augmentation moyenne de la pression lithostatique est d'environ 250 à 300 atmosphères par kilomètre. La pression lithostatique peut être considérée comme isotrope, c'est-à-dire comme ayant des valeurs égales dans toutes les directions.

Un autre type est constitué par les *pressions orientées* dues aux déformations orogéniques. Elles sont anisotropes (leur intensité varie suivant les directions de l'espace considérées). Les pressions orientées sont toujours présentes dans le métamorphisme régional, contemporain des déformations orogéniques, alors qu'elles sont absentes dans le métamorphisme thermique de contact. L'existence de pressions orientées durant le déroulement des phénomènes métamorphiques détermine les structures orientées des roches du métamorphisme régional (schistosité, linéations), alors que les roches du métamorphisme de contact présentent des structures et des textures isotropes. Les pressions orientées influent également sur la composition minéralogique des roches, favorisant l'apparition de tel ou tel minéral métamorphique. Il est probable que les effets des pressions orientées se font sentir principalement à des profondeurs limitées. En effet, à très grande profondeur (plus de 20 km), les roches ont des comportements très plastiques du fait

des températures très élevées, et la pression qu'elles subissent est essentiellement de type isotrope.

Dans beaucoup de réactions métamorphiques, un troisième type de pression joue également un rôle important : la *pression de la phase fluide interstitielle,* située entre les cristaux. Dans le cas où les fluides interstitiels peuvent migrer librement dans les roches et communiquer avec la surface terrestre, la pression de la phase fluide est égale environ au tiers de la pression lithostatique; mais dans le cas où les fluides ne sont pas en communication avec la surface terrestre, elle peut être égale à la pression lithostatique; elle peut même, localement, être supérieure à celle-ci quand la phase fluide provient d'intrusions magmatiques voisines riches en eau, ou quand les réactions métamorphiques en cours provoquent la libération d'une phase fluide (eau ou gaz carbonique) hors des réseaux cristallins des minéraux.

Les températures auxquelles ont lieu les réactions métamorphiques faisant intervenir des phases fluides dépendent de la pression de celles-ci. En général, une réaction qui comporte la libération d'une phase fluide requiert une température d'autant plus forte que la pression de la phase fluide est plus grande. Les observations pétrographiques sur le métamorphisme de roches dont la composition varie d'un point à un autre, même sur de faibles distances comme c'est généralement le cas pour les roches sédimentaires, ont montré que les phases fluides ont souvent une diffusion limitée : la pression partielle de chacun de leurs constituants dépend de la quantité qui est libérée localement, et, ordinairement, les divers constituants ne se mélangent pas dans des volumes très importants de roches. Cependant, globalement, le métamorphisme provoque, pour des températures croissantes, un appauvrissement des roches en eau et en gaz carbonique. A faible température, les minéraux métamorphiques néoformés sont des minéraux hydratés ou contenant des oxhydryles dans leur réseau cristallin; à haute température, les minéraux néoformés sont anhydres.

▼ *Le mont Viso est un des massifs montagneux des Alpes occidentales constitués de roches vertes intercalées dans les schistes lustrés et qui dérivent du métamorphisme de roches ignées basiques.*

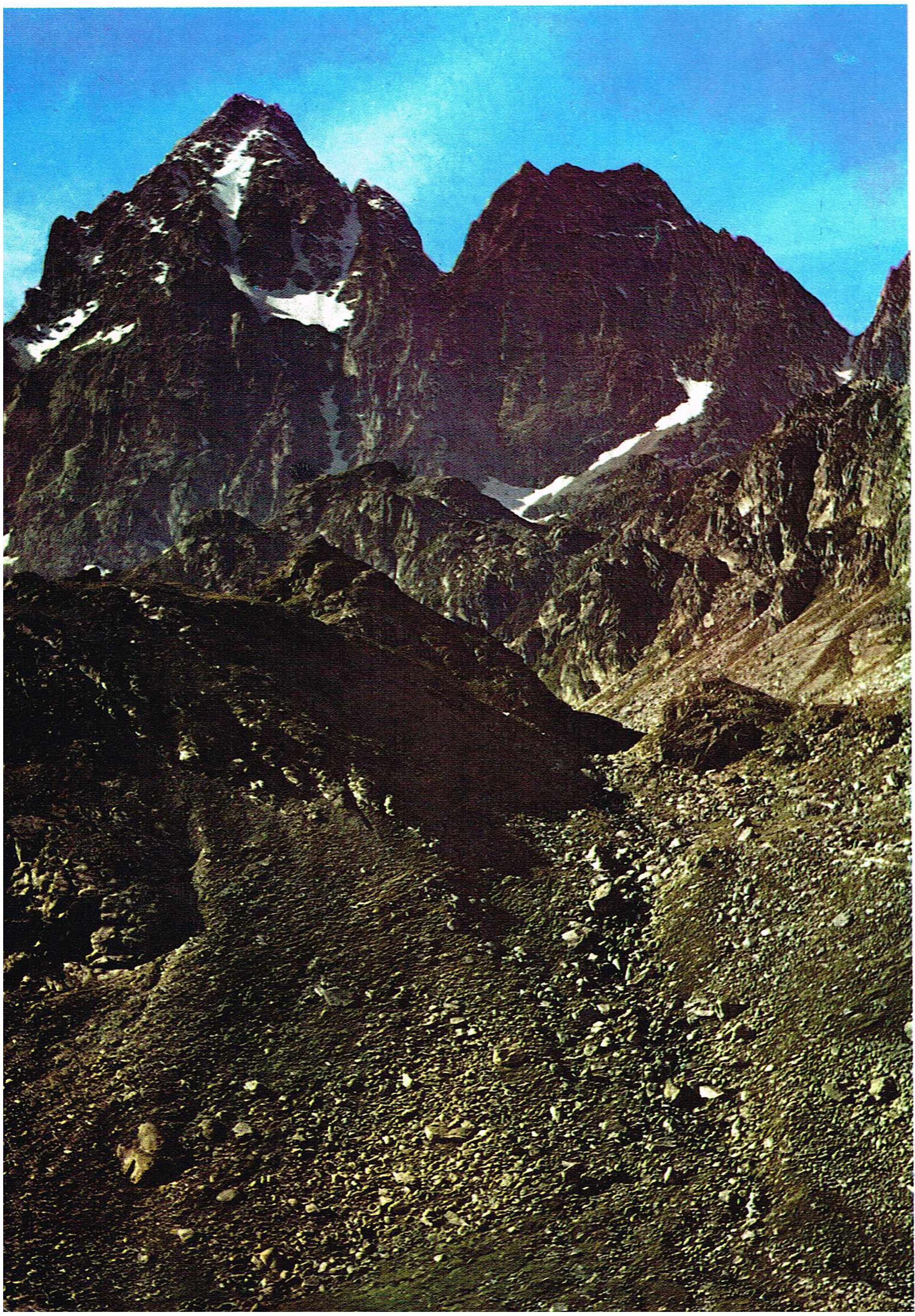

S.E.F.

Dans les réactions métamorphiques ayant lieu à des températures d'environ 300 °C, seuls quelques minéraux préexistants dans la roche sont transformés. A des températures plus fortes, un pourcentage plus élevé de minéraux est affecté par les réactions, jusqu'à ce que, à partir d'une certaine limite, tous les minéraux de la roche prennent part aux réactions, de telle manière que la composition minéralogique de chaque roche représente un équilibre chimique entre tous ses constituants. Généralement, la composition minéralogique d'une roche reflète les valeurs les plus élevées atteintes par les températures et les pressions au cours du métamorphisme. Ces valeurs peuvent être évaluées, car il est possible de reproduire et d'étudier en laboratoire un grand nombre de réactions métamorphiques.

Si l'élévation maximale de température n'a pas été suffisante pour mobiliser tous les minéraux de la roche, il persiste dans la roche métamorphique des *minéraux reliques*. Il peut s'agir de minéraux qui se sont formés à très hautes températures durant la cristallisation de roches ignées et qui restent stables lors de l'élévation ultérieure de la température au cours du métamorphisme : on peut citer, par exemple, le plagioclase calcique des basaltes et des gabbros qui persiste dans les amphibolites produites par le métamorphisme de ces roches *(reliques stables)*. Le quartz est un minéral relique stable qui persiste dans les roches provenant du métamorphisme de grès; dans celles-ci, il est en excès par rapport aux autres minéraux avec lesquels il pourrait se combiner pour donner naissance à des minéraux néoformés. Le zircon est un minéral qui possède un champ de stabilité très étendu et qui n'est pas détruit même à des températures et des pressions très élevées.

Les *reliques instables* sont, au contraire, des minéraux à intervalle de stabilité thermique restreint, mais qui persistent dans des roches métamorphiques formées à des températures non comprises dans cet intervalle. Ces minéraux sont relativement fréquents dans le cas de roches faiblement métamorphiques où les réactions ne se sont pas entièrement effectuées, et dans les cas de métamorphisme rétrograde où ils se présentent souvent « blindés », c'est-à-dire entourés d'une enveloppe de produits d'altération qui a empêché l'accomplissement des réactions métamorphiques en isolant le cœur du cristal.

Puisque le métamorphisme représente un phénomène d'équilibre entre les constituants d'une roche et les conditions physiques du système, on peut se demander pourquoi les roches métamorphiques exposées à la surface terrestre par suite de phénomènes de dislocations et d'érosion ont conservé la composition minéralogique qu'elles avaient acquise dans des conditions de température et de pression très élevées existant dans les profondeurs de la croûte terrestre. Pourquoi cette composition n'a-t-elle pas changé lors de la diminution progressive de profondeur (et, par conséquent, de température et de pression) que les roches ont subie postérieurement? Les observations montrent que les roches métamorphiques conservent généralement la composition chimique correspondant à l'équilibre avec les températures et les pressions maximales auxquelles elles ont été soumises. Cela s'explique d'une part par le fait que, lors du métamorphisme à hautes températures, les minéraux hydratés et ceux qui contenaient de l'eau combinée dans leur réseau cristallin sous forme d'oxhydryles se sont transformés en minéraux anhydres, et, d'autre part, par le fait que les petites quantités d'eau interstitielle à l'état de vapeur supercritique ont été expulsées presque complètement lors du métamorphisme. C'est pourquoi, lors

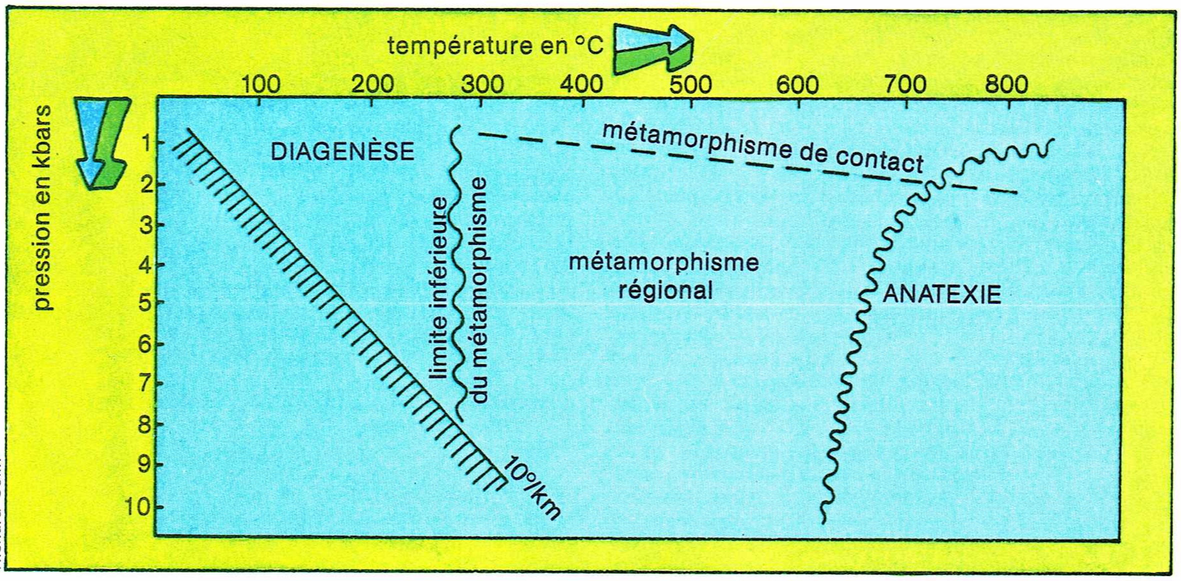

Richard Colin

◀ ***Diagramme schématique des différents types de métamorphisme en fonction de la pression et de la température (d'après Winkler, 1965).***

de la diminution progressive de la température qui suit les phénomènes métamorphiques, du fait de l'absence de phase fluide, les minéraux formés à haute température ne peuvent généralement pas réagir entre eux pour produire d'autres minéraux stables à plus faible température.

Il existe toutefois assez fréquemment des cas de *métamorphisme rétrograde,* c'est-à-dire de réactions entre minéraux stables à hautes températures pour former des minéraux stables à des températures inférieures. Ces réactions sont rendues possibles par l'apport, lors de la diminution de température, de petites quantités de fluides provenant d'intrusions magmatiques ou de phénomènes métamorphiques ayant lieu dans des régions voisines.

La présence de vapeur d'eau à l'état supercritique, dérivée des petites quantités d'eau présentes dans les interstices intercristallins des roches et en partie expulsée lors des réactions métamorphiques, rend possible les réactions accompagnées de phénomènes de dissolution et de diffusion ionique; ces réactions, peu claires encore dans le cas des vapeurs supercritiques, sont probablement analogues à celles qui se produisent dans les solvants liquides. La diffusion ionique est efficace, lors du métamorphisme, sur des distances très petites (de l'ordre du centimètre). En effet, les différences de composition originelle des roches soumises au métamorphisme se reflètent dans les différentes associations minéralogiques des roches métamorphiques, même sur des distances inférieures au centimètre. C'est pourquoi la stratification caractéristique des roches sédimentaires, c'est-à-dire la présence de niveaux de composition différente, est souvent bien conservée après le métamorphisme, particulièrement dans le cas où les pressions orientées n'ont pas atteint des valeurs élevées. On connaît des paragneiss où la stratification parallèle ou oblique des grès dont ils dérivent a été conservée, bien qu'ils soient constitués de minéraux complètement différents des minéraux originels. Ainsi, l'équilibre entre les minéraux composant une roche métamorphique ne se réalise-t-il que sur des distances petites, qui peuvent être parcourues par la diffusion ionique; ces distances augmentent légèrement avec l'élévation de température.

Les réactions métamorphiques se représentent graphiquement de manière analogue aux réactions chimiques, c'est-à-dire en écrivant l'ensemble des minéraux et des phases fluides prenant part à la réaction, et en les égalisant avec l'ensemble des minéraux et des substances fluides produits par la réaction. Au lieu d'écrire la formule chimique des minéraux, aussi exprimée sous forme d'oxydes, on peut simplement écrire leur nom. Ainsi :

$$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2 + SiO_2 \rightleftharpoons KAlSi_3O_8 + Al_2SiO_5 + H_2O$$

Muscovite + Quartz ⇌ Feldspath + Sillimanite + Eau.

Comme dans toutes les réactions chimiques, il existe une *température d'équilibre* à laquelle les deux associations minérales sont stables en même temps; si la température augmente, l'équilibre se déplace vers l'association écrite à droite du signe d'égalité, ce qui s'indique par une flèche entre les deux associations minérales, et *vice versa*. Il se forme alors l'association minérale stable dans les conditions considérées, au détriment de l'autre association. La vitesse de réaction augmente avec l'élévation de température au-dessus de la température d'équilibre, jusqu'à ce que l'un des minéraux réagissant ait complètement disparu. La température d'équilibre varie en fonction de la pression, ou plutôt en fonction des trois types de pression qui ont été distingués. D'ordinaire, la température d'équilibre augmente avec la pression, surtout si, parmi les produits de la réaction, il existe des phases fluides (dans ce cas, on considère la pression de la phase fluide interstitielle). Cependant, pour quelques réactions métamorphiques, la température d'équilibre décroît avec l'élévation de la pression, lithostatique ou orientée.

Les réactions métamorphiques peuvent être étudiées en laboratoire et leurs courbes d'équilibre représentées graphiquement en fonction de la température et de la pression.

Les différents types de métamorphisme

Les facteurs qui produisent les changements de composition minéralogique et de structure caractéristiques du métamorphisme, et qui sont essentiellement la température et les pressions, peuvent agir simultanément ou l'un d'eux peut prévaloir sur les autres, ce qui provoque des effets divers sur les roches. Ainsi, on distingue habituellement deux types principaux de métamorphisme : le *métamorphisme thermique,* principalement dû à une élévation de température localisée autour d'une intrusion magmatique, et le *métamorphisme régional,* dû à l'augmentation simultanée des températures et des pressions par suite de mouvements de dislocation et d'enfouissement de vastes zones de l'écorce terrestre.

Les différents types de métamorphisme se distinguent par leur localisation ainsi que par les structures et les compositions minéralogiques des roches correspondant à chaque type.

Dans le **métamorphisme thermique,** ou **de contact,** le facteur principal de la transformation des roches est une forte élévation de température, localisée dans l'« auréole de contact » qui entoure les intrusions magmatiques dans les niveaux relativement superficiels de l'écorce terrestre (jusqu'à quelques kilomètres de profondeur). La recristallisation des roches, due aux très fortes températures de l'intrusion, provoque l'apparition de nouveaux minéraux généralement de petite taille et non orientés. La température décroît au fur et à mesure qu'on s'éloigne du contact intrusif, ce qui donne lieu à la formation de différentes zones concentriques, caractérisées par des associations minérales et des degrés différents de recristallisation des roches. L'auréole de contact ne dépasse pas quelques centaines de mètres.

Le métamorphisme thermique est souvent associé à des phénomènes *métasomatiques,* c'est-à-dire à l'introduction dans les roches au contact de l'intrusion de substances provenant du magma et fixées dans les réseaux de quelques minéraux métamorphiques, ce qui provoque un changement de la composition chimique initiale de la roche. Quand ces réactions intéressent les minéraux de la roche magmatique elle-même, à peine consolidée, elles font partie de l'*autométasomatisme,* étudié avec les phénomènes magmatiques.

Dans le **métamorphisme régional,** les roches sont soumises à des augmentations de température et de pressions (lithostatique et orientée). Les pressions orientées déterminent une orientation de la texture et de la structure des roches. Les minéraux sont alignés ou aplatis dans un plan de schistosité, plan selon lequel les roches se rompent plus facilement. Ce type de métamorphisme se rencontre dans les zones orogéniques où les roches sont soumises à des pressions aboutissant à la surrection de chaînes de montagnes plissées. Au contraire du métamorphisme de contact, le métamorphisme régional n'est pas en relation avec des intrusions magmatiques et s'étend sur des centaines ou des milliers de kilomètres carrés dans les chaînes de montagnes récentes et les boucliers continentaux anciens.

Durant le métamorphisme régional, les roches sont fréquemment soumises à différents épisodes de cristallisation superposés, pendant lesquels règnent des conditions physico-chimiques différentes. Si ces épisodes de cristallisation ont lieu au cours d'un même cycle orogénique, il s'agit d'un **métamorphisme polyphasé ;** s'ils ont lieu lors de deux cycles différents, on parle de **polymétamorphisme.**

L'**ultramétamorphisme** est associé au métamorphisme régional et se rencontre dans les zones les plus profondes, là où agissent de très fortes températures provoquant une fusion partielle des roches, ou *anatexie,* et la formation de migmatites. Celles-ci sont des roches mixtes dans lesquelles on observe des éléments de roches métamorphiques de couleur sombre et des bandes de matériel leucocrate magmatique, sans structure orientée, composé de quartz et de feldspath potassique.

Le **métamorphisme d'enfouissement** désigne un ensemble de transformations minéralogiques et structurales que subissent les roches soumises à grande profondeur à de fortes pressions dues au poids des roches sus-jacentes, mais sans qu'interviennent des compressions orogéniques. Ce type de métamorphisme est peu répandu. On observe un passage très progressif entre les roches sédimentaires soumises seulement à la diagenèse et les roches métamorphiques.

Le **métamorphisme dynamique,** ou **cataclastique,** intéresse de faibles volumes de roches, situées à proximité de surfaces importantes de mouvements tectoniques (failles, charriage). Dans les roches ainsi soumises à des déformations intenses, les changements se traduisent surtout au niveau des structures et consistent en un écrasement des grains cristallins. Les roches résultantes sont des mylonites. Cependant, dans certains cas, il peut aussi se produire des changements de la composition minéralogique des roches. Généralement, la température est très basse dans ce type de métamorphisme car celui-ci est limité aux niveaux supérieurs de l'écorce terrestre.

Au cours du développement d'une zone orogénique, les différents types de métamorphisme décrits précédemment peuvent avoir lieu. Le métamorphisme régional affecte des régions particulières de l'écorce terrestre où se sont généralement déposées d'épaisses séries sédimentaires, soumises par la suite à un flux de chaleur et à des compressions tectoniques. Lors des déformations de ces séries sédimentaires, plusieurs phases de cristallisations métamorphiques peuvent se succéder, donnant lieu à un métamorphisme polyphasé. Dans les parties les plus profondes, se forment des migmatites. En même temps, des intrusions granitiques se mettent en place dans les couches superficielles de l'écorce et provoquent la formation d'auréoles de contact. A la fin du cycle orogénique, les températures et les pressions diminuent ; le métamorphisme régional devient rétrograde et les minéraux métamorphiques précédemment formés peuvent être en partie détruits.

Les roches métamorphiques

Les minéraux des roches métamorphiques

Les minéraux les plus abondants des roches métamorphiques correspondent aux minéraux principaux des roches ignées : **quartz, feldspath, biotite, muscovite, hornblende.** Mais certains minéraux des roches ignées, comme l'**olivine** et les **feldspathoïdes,** sont très peu fréquents dans les roches métamorphiques, alors que d'autres, accessoires dans les roches ignées, se rencontrent en grandes quantités dans les roches métamorphiques. De plus, certains minéraux sont caractéristiques des roches métamorphiques : la **jadéite,** l'**omphacite** (pyroxènes sodiques), la **trémolite-actinote,** la **cummingtonite,** le **glaucophane** (amphibole sodique), le **stilpnomélane** (phyllosilicate), le **chloritoïde,** les **grenats,** l'**épidote,** la **lawsonite,** la **pumpellyite,** et les silicates d'alumine, comme l'**andalousite,** le **disthène** et la **sillimanite.**

La présence de tel ou tel minéral de métamorphisme dépend de la composition chimique de la roche initiale et des conditions de température et de pression qui régnaient lors du métamorphisme.

Dans les roches fortement alumineuses, formées à partir de roches sédimentaires pélitiques, on rencontrera des minéraux alumineux, comme la **staurotide,** la **sillimanite,** l'**andalousite,** la **cordiérite,** le **disthène,** le **chloritoïde,** etc. Dans les roches basiques et les grauwackes, qui contiennent beaucoup de fer et de magnésium, apparaîtront la **hornblende,** la **trémolite,** l'**actinote,** le **grenat almandin,** la **biotite,** l'**hypersthène,** la **chlorite,** le **talc** et la **forstérite.** Dans les roches calcaires se forment le **grenat grossulaire,** l'**idocrase,** la **wollastonite** et l'**épidote.**

La composition chimique de certains minéraux varie en fonction de la température à laquelle est soumise la roche durant sa cristallisation métamorphique. Ainsi, pour les plagioclases, les termes sodiques albitiques sont stables à faible température, alors qu'à une température plus élevée, on y observe un fort pourcentage calcique, anorthitique si la composition de la roche le permet. De même, les grenats des roches formées à faible température sont riches en manganèse *(spessartine)* ou en calcium *(grossulaire),* tandis qu'à des températures plus fortes, il se forme du grenat riche en fer *(almandin).* Les micas blancs *(muscovite, paragonite)* sont stables à des températures plus basses que les micas bruns *(biotite,*

▼ *A gauche, lame mince en nicols croisés de* **gneiss.** *Les minéraux aux couleurs d'interférence blanches et grises sont du quartz et des feldspaths; ceux aux couleurs vives sont des cristaux lamellaires de muscovite et de biotite. Au centre, lame mince en nicols presque croisés de* **gneiss dioritique** *(Lombardie). La roche a une* **texture œillée**; *ses principaux constituants colorés sont de l'amphibole, de la biotite et de l'épidote. A droite, l'observation de la même roche en nicols croisés montre la macle polysynthétique des cristaux de plagioclase.*

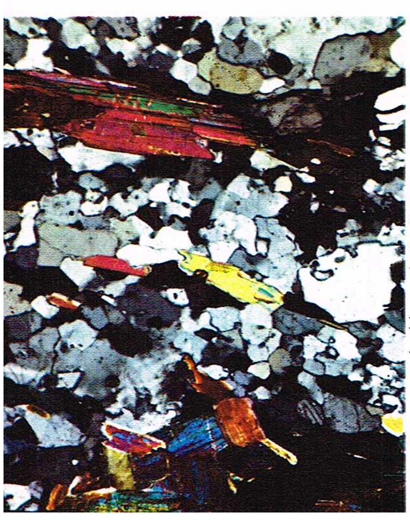

Archives photo B

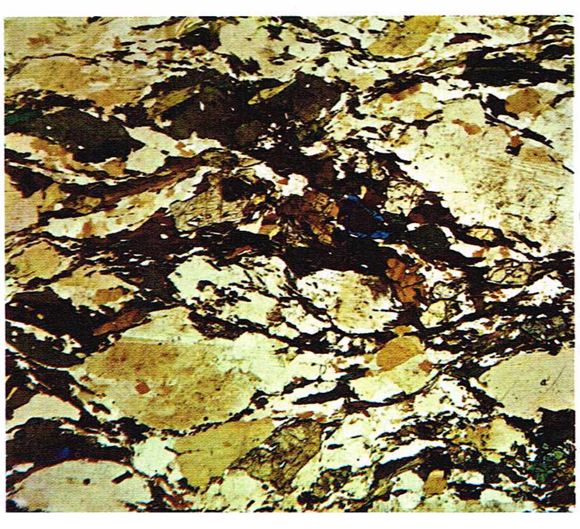

Archives photo B

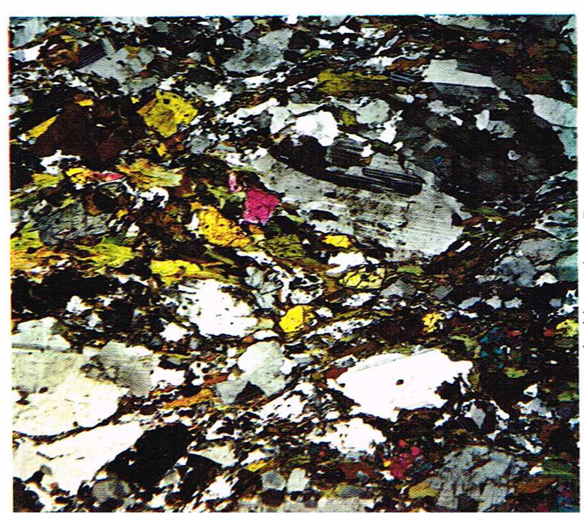

Archives photo B

phlogopite). L'augmentation de température favorise l'expulsion de l'eau contenue dans les réseaux cristallins sous forme de molécules ou d'oxhydryles. C'est pourquoi les minéraux formés à basse température (*zéolites, chlorite, micas,* etc.) sont généralement hydratés, alors que ceux qui apparaissent à haute température sont anhydres.

En se fondant sur le fait que certains minéraux ne sont jamais présents dans les roches du métamorphisme régional formées en conditions de pressions orientées, alors que d'autres ne sont jamais représentés dans les roches du métamorphisme de contact, on distingue, respectivement, les *minéraux anti-stress* et les *minéraux stress* (« stress » désigne en anglais la contrainte appliquée à un corps solide). La pression orientée augmente l'instabilité du réseau cristallin de certains minéraux; elle provoque leur recristallisation suivant une orientation différente ou facilite la formation de nouveaux minéraux à réseau cristallin plus dense et plus résistant à la pression orientée. Ainsi, les minéraux qui cristallisent à forte pression ont une grande densité ionique; c'est le cas, par exemple, de la *jadéite,* de la *lawsonite,* du *disthène,* du *grenat,* de l'*épidote,* du *chloritoïde* et du *talc.* D'ailleurs, les roches formées à hautes pressions, comme les éclogites, ont généralement une densité élevée (3,4 à 3,6). D'une manière générale, les minéraux qui présentent une structure cristalline en chaînes (inosilicates), comme les amphiboles et les pyroxènes, ainsi que ceux qui ont une structure cristalline en feuillets (phyllosilicates), comme les micas, cristallisent sous de fortes pressions; par contre, une grande partie des minéraux anti-stress, instables sous de fortes pressions, comme l'*andalousite,* la *cordiérite* et les *feldspaths,* sont des tectosilicates ou des nésosilicates.

Des expériences de laboratoire ont permis de synthétiser différents minéraux et de connaître les conditions de pression et de température dans lesquelles ces minéraux cristallisent. On peut ainsi délimiter les champs de stabilité des différents minéraux en fonction de la température et de la pression. Par exemple, les trois silicates d'alumine polymorphes (qui ont la même composition chimique mais non la même structure cristalline), l'*andalousite,* la *sillimanite* et le *disthène* cristallisent dans des conditions différentes. L'andalousite cristallise uniquement si les pressions sont faibles, alors que le disthène cristallise pour des valeurs élevées de la pression.

Structures et textures des roches métamorphiques

La formation et l'accroissement des minéraux d'une roche métamorphique quelconque ont lieu en milieu solide.

Les minéraux néoformés remplacent graduellement ceux qui constituaient la roche avant que soient atteintes les conditions de température et de pression provoquant l'instabilité de l'association minérale originelle et le début des réactions métamorphiques.

Structures des roches métamorphiques

Les structures des roches métamorphiques sont appelées d'une manière générale *structures cristalloblastiques,* car elles sont dues à la « germination » des cristaux des nouveaux minéraux à partir de différents nucléi de cristallisation. La croissance des différents minéraux qui composent l'association minéralogique stable dans les nouvelles conditions de température et de pression a lieu simultanément, à la différence de la cristallisation des minéraux des roches ignées qui se produit dans un ordre bien défini et pendant un intervalle de temps très long. L'espace occupé par les minéraux néoformés provient de la disparition simultanée des minéraux de l'association minéralogique originelle, dont les éléments (ions et groupes d'ions) sont utilisés pour la construction des réseaux des minéraux néoformés.

Les minéraux des roches métamorphiques ont souvent des formes cristallines irrégulières; ils s'interpénètrent du fait qu'ils croissent en milieu solide et que les minéraux préexistants ou les autres minéraux en cours de formation font obstacle à leur croissance. Cela constitue une autre différence par rapport aux roches ignées, dans lesquelles les premiers minéraux cristallisés ont des formes cristallines parfaites du fait qu'ils se sont formés dans un milieu fluide.

Cependant, parmi les minéraux des roches métamorphiques, on peut distinguer ceux qui ont généralement des formes cristallines bien développées (faces, angles), et ceux qui ont presque toujours des formes irrégulières : les premiers sont appelés *idioblastes,* les seconds *xénoblastes.* Les minéraux idioblastes croissent, durant le développement des phénomènes métamorphiques, suivant des faces cristallines régulières, repoussant et déformant mécaniquement les autres minéraux; les minéraux xénoblastes cristallisent simultanément dans les espaces irréguliers existant entre les cristaux idioblastes.

D'après de nombreuses observations faites sur des lames minces des roches, il a été possible de définir un ordre cristalloblastique, c'est-à-dire une liste des minéraux les plus courants des roches métamorphiques, en commençant par ceux qui montrent le plus souvent des formes cristallines parfaites et en continuant par ceux qui montrent des formes de plus en plus imparfaites.

Les minéraux présentant les formes cristallines les mieux exprimées sont le *rutile* et la *magnétite.* Les *grenats,* la *tourmaline,* le *disthène,* la *sillimanite,* l'*andalousite,* la *staurotide* et le *chloritoïde* ont aussi des formes cristallines bien développées. Suivent ensuite les *épidotes,* les *pyroxènes* et les *amphiboles,* les *micas* et les *chlorites,* l'*albite* et la *dolomite.* La *calcite,* les *feldspaths* (sauf l'*albite*), la *cordiérite* et le *quartz* montrent généralement des formes irrégulières et imparfaites.

Parmi les structures cristalloblastiques, la **structure granoblastique,** analogue à la structure granulaire holocristalline des roches ignées, mais formée par croissance simultanée et sans orientation préférentielle des cristaux des différents minéraux qui composent la roche, est assez répandue. Les cristaux ont généralement des formes isométriques, c'est-à-dire ni prismatiques, ni aplaties, et des dimensions analogues, souvent petites. La structure granoblastique est caractéristique des *cornéennes,* roches du métamorphisme de contact.

Si les cristaux des différents minéraux s'interpénètrent irrégulièrement, il s'agit d'une **structure diablastique.**

La **structure myrmékitique,** voisine de cette dernière structure, existe dans les roches gneissiques et également dans les roches ignées granitoïdes. Elle consiste en petits cristaux vermiculaires de quartz en inclusions dans le plagioclase, au contact de ce dernier avec un feldspath potassique.

La **structure lépidoblastique** est caractéristique des roches formées par des cristaux lamellaires (*micas, chlorite)* en quantités notables et disposés parallèlement les uns aux autres. La **structure nématoblastique** est propre aux roches métamorphiques contenant des minéraux à formes prismatiques allongées et disposés parallèlement. Les structures lépidoblastique et nématoblastique se rencontrent fréquemment dans les roches métamorphiques du métamorphisme régional.

La **structure kéliphytique** est déterminée par le développement d'un minéral ou d'un agrégat de minéraux à la périphérie des cristaux d'une autre espèce minéralogique, qui est ainsi partiellement remplacée. On la trouve également dans les roches magmatiques; mais là elle se forme par réaction entre un cristal et le résidu fondu qui l'entoure. Un exemple de structure kéliphytique est donné par les cristaux de *grenat* entourés d'une enveloppe de *chlorite* microcristalline.

Une autre structure commune est la **structure porphyroblastique,** analogue par son aspect à la structure porphyrique des roches ignées. Elle consiste en la présence de quelques cristaux, appartenant généralement à la même espèce minéralogique, de dimensions plus grandes que les autres cristaux de la roche, lesquels sont de taille moyenne.

Les porphyroblastes peuvent inclure de nombreuses petites plages, à contours irréguliers, d'un ou de plusieurs autres minéraux : ils possèdent alors un aspect criblé formant la structure **pœciloblastique** (analogue à la structure pœcilitique des roches ignées).

La structure **hélicitique** est caractérisée par la présence à l'intérieur d'un cristal, le plus souvent d'un porphyroblaste, de fines surfaces d'inclusions formées par de petits cristaux d'autres minéraux ou de matière charbonneuse. Ces surfaces sont disposées en spirale par

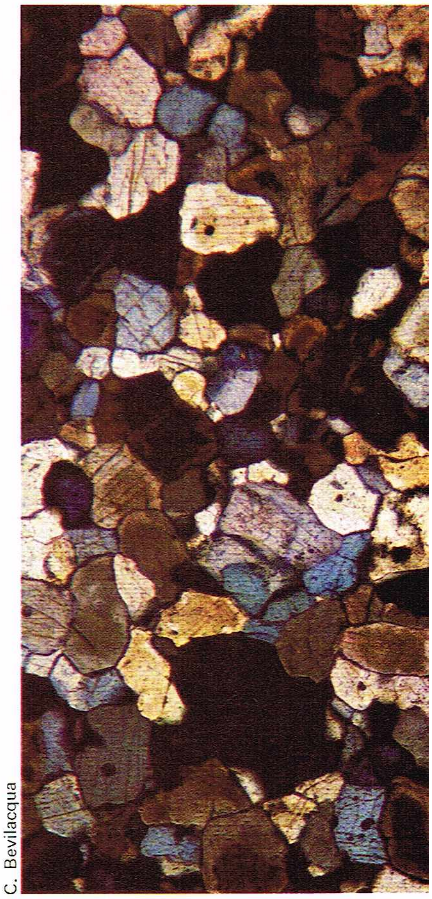

C. Bevilacqua

▲ ***Structure granoblastique** caractéristique des cornéennes, roches du métamorphisme de contact. Les cristaux de formes isométriques, aux couleurs d'interférence jaunâtres et bleuâtres, sont ceux d'un minéral du groupe de l'épidote (lame mince en nicols croisés).*

▼ ***Structure porphyroblastique caractérisée par de gros porphyroblastes de grenat inclus dans une masse constituée d'amphibole (prismes montrant de nettes traces de clivage), de plagioclase, d'épidote, de phyllosilicates et de magnétite (lame mince en nicols partiellement croisés).***

Archives photo B

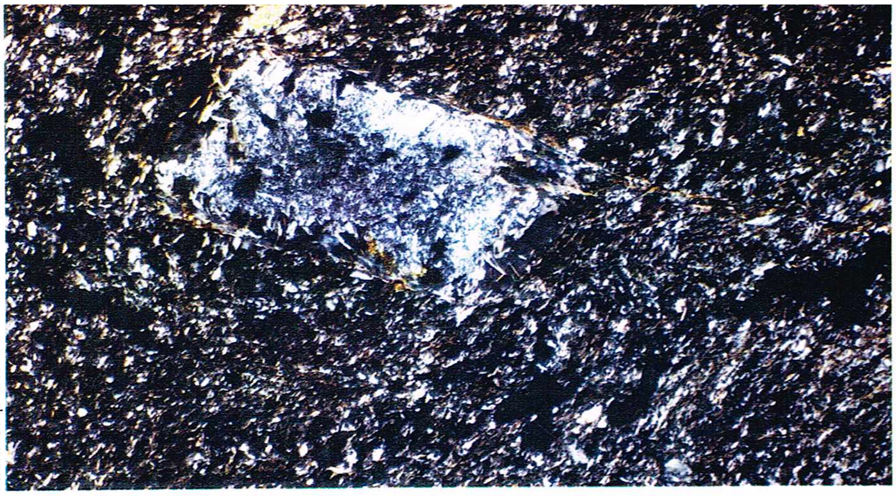

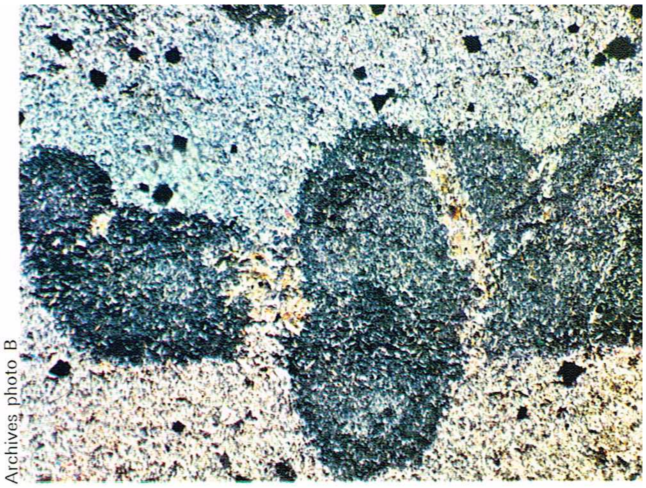

▲ A gauche, un schiste à chiastolite (Bavière) [lame mince en nicols croisés]. Un porphyroblaste d'andalousite chargé d'impuretés au cœur du prisme (chiastolite) s'est formé dans la roche quartzo-séricitique, excluant en les repoussant les minéraux qui gênaient sa croissance. A droite, texture tachetée d'un argiloschiste (Vosges) [lame mince en nicols presque croisés]. La masse microcristalline quartzo-séricitique faiblement recristallisée, parsemée de petits cubes de magnétite néoformée, comprend des zones reliques noirâtres dans lesquelles les phénomènes métamorphiques ne sont pratiquement pas entamés et où s'est concentrée la matière organique qui était à l'origine disséminée dans la roche.

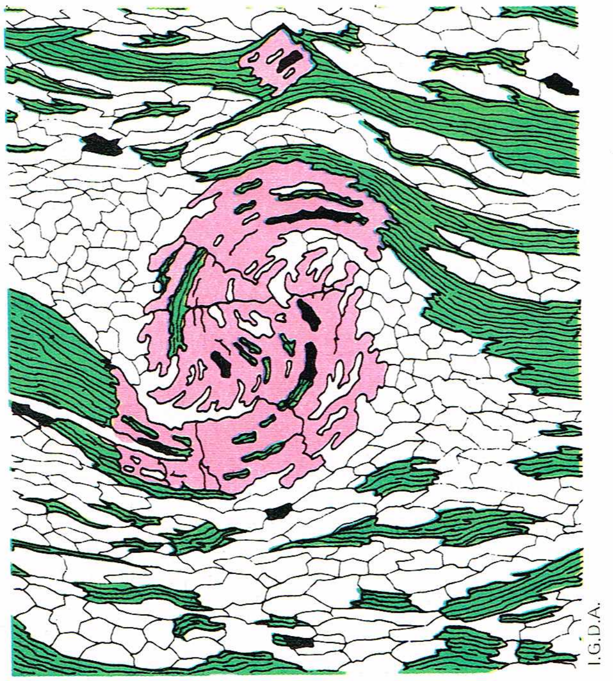

▶ Représentation schématique d'une structure hélicitique due à la rotation en sens antihoraire d'un porphyroblaste de grenat (en rose) dans une phyllade; en vert, les phyllosilicates; en blanc, quartz prédominant; en noir, sulfures et oxydes métalliques (redessiné d'après une lame mince; d'après Niggli).

suite d'une rotation progressive du porphyroblaste au cours de sa croissance et de la distorsion provoquée par cette rotation des surfaces d'inclusions originellement planes. La structure hélicitique, fréquente dans les porphyroblastes de *grenat,* par exemple, rend évidente l'existence de mouvements différentiels dus à la pression orientée dans les roches lors du métamorphisme.

Les inclusions contenues dans les minéraux des roches métamorphiques sont souvent disposées régulièrement, par suite du mode de croissance particulier des cristaux. Elles sont le plus souvent des résidus de la structure originelle des roches, comme les impuretés charbonneuses disposées le long de surfaces parallèles ou déformées en spirale dans la structure hélicitique, mais elles se forment parfois lors de phénomènes métamorphiques tardifs, rétrogrades, comme certaines concentrations de paillettes de *muscovite (séricite)* à l'intérieur des cristaux de *feldspath,* disposées le long de certains plans cristallographiques du minéral hôte. Les cristaux de nombreux minéraux métamorphiques sont riches en inclusions, du fait que le nouveau minéral, lors de son apparition, a une force de cristallisation peu élevée et inclut dans son réseau des matières microcristallines ou amorphes présentes dans la roche. Durant sa croissance, le minéral devient capable d'exclure les impuretés solides, en les repoussant, surtout le long des faces cristallines qui s'accroissent le plus rapidement; cependant, les impuretés peuvent persister dans les plans le long desquels le cristal s'accroît plus lentement. Un cas typique est celui de l'*andalousite,* minéral à forme prismatique, qui, dans la variété *chiastolite,* présente des inclusions au cœur du prisme et le long de deux plans passant par les arêtes longitudinales opposées, par suite de l'accroissement plus rapide du cristal suivant les quatre faces du prisme. Le *grenat,* la *staurotide* et la *cordiérite* présentent souvent des inclusions analogues dans leur cœur ou dans des plans orientés régulièrement.

Textures des roches métamorphiques

Les textures des roches métamorphiques sont déterminées par la disposition de l'ensemble des minéraux qui les composent. Le métamorphisme de contact ne produit pas dans les roches de textures particulières car les minéraux, souvent de grain fin, n'ont pas d'orientation préférentielle, et l'association minéralogique est habituellement uniforme, sans concentration de minéraux particuliers dans des niveaux distincts.

La seule exception est la **texture tachetée** de certains argiloschistes et phyllades, métamorphosés ultérieurement par une légère augmentation de température que produit une intrusion magmatique qui a induit les premières réactions métamorphiques seulement en quelques endroits de la roche, endroits qui se distinguent comme de petites taches de couleurs différentes. Avec l'augmentation du degré de métamorphisme thermique, la texture des roches devient uniforme. Cependant, il est quelquefois possible de reconnaître dans les roches du métamorphisme de contact des reliques de textures magmatiques ou sédimentaires qui persistent même à des degrés moyens et élevés du métamorphisme.

Les roches soumises au métamorphisme régional présentent, au contraire, des textures caractéristiques, provoquées essentiellement par la pression orientée d'origine tectonique.

La texture principale, la plus fréquente, des roches du métamorphisme régional est la **texture schisteuse,** déterminée par la présence de plans de schistosité. Cette dernière peut être définie comme l'orientation préférentielle de la forme, ou du réseau cristallin, de quelques-uns ou de tous les minéraux principaux de la roche suivant des surfaces parallèles d'origine mécanique. Les *textures tabulaires* observées dans certaines roches ignées peuvent être d'aspect assez semblable à la texture schisteuse, mais elles ont pour origine les mouvements lents de la masse magmatique à demi consolidée durant son refroidissement, et non la cristallisation orientée des produits des réactions métamorphiques dans une roche déjà solide.

Il est quelquefois difficile de distinguer ces deux types de texture, d'autant plus que la *texture cataclastique* caractéristique de nombreux gneiss, qui consiste en la fracturation des grains cristallins produite par des déformations tectoniques ultérieures, est souvent non différenciable de la texture cataclastique primaire ou protoclastique produite durant le refroidissement d'une masse magmatique. De même, la disposition parallèle des micas et des minéraux argileux dans les roches sédimentaires détritiques a des origines tout à fait différentes de celles de la schistosité; celle-ci peut cependant se développer par recristallisation mimétique de ces minéraux, déjà orientés parallèlement lors de la sédimentation. La texture schisteuse se manifeste de manière particulièrement évidente dans les roches riches en minéraux de forme lamellaire, comme les micas et les chlorites. Le terme de « schistes cristallins », amplement utilisé pour définir les roches du métamorphisme régional, s'applique plus spécialement aux roches riches en phyllosilicates (micaschistes, chloritoschistes, etc.).

Les minéraux à forme prismatique (amphibole, staurotide, etc.) peuvent aussi posséder une orientation préférentielle et sont alors disposés avec le grand axe des prismes dans les plans de schistosité. Dans le cas de roches presque entièrement formées de minéraux tous allongés suivant la même direction, parallèlement à leur grand axe, comme c'est fréquemment le cas pour les amphibolites, on parle de **texture linéaire.** Cette

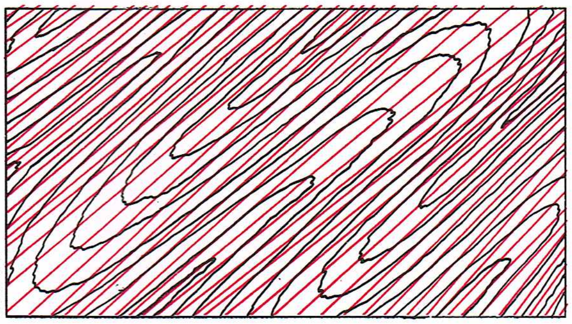

I.G.D.A.

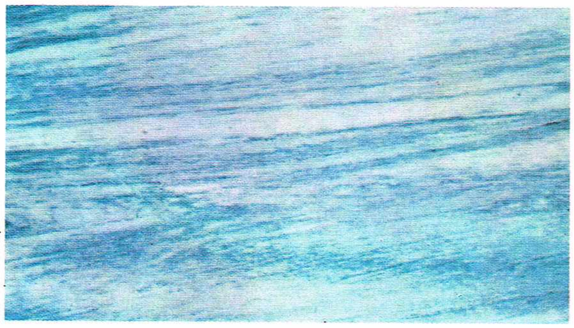

C. Bevilacqua

◀ *A gauche, coupe schématique d'une série métamorphique replissée et présentant une* texture schisteuse, *principale texture des roches du métamorphisme régional. On observe notamment les rapports entre les plans de schistosité (en rouge) et les plans de stratification (en noir) dans les différentes parties des plis (d'après Moret). A droite, section polie de marbre cipolin de Carrare. Les bandes vertes, fortement replissées par suite de la plasticité des marbres durant leur recristallisation, sont formées par des minéraux de métamorphisme silicatés (micas) et reflètent l'ancienne stratification.*

texture peut aussi être déterminée dans les roches par l'orientation des éléments tectoniques (axes des plis, etc.) suivant des lignes parallèles, ou linéations. Même les minéraux qui normalement n'ont pas de forme prismatique ou lamellaire, comme le quartz, la calcite et d'autres, peuvent acquérir une forme lenticulaire et aplatie suivant les surfaces de schistosité.

Mais il existe un autre élément de la schistosité des roches du métamorphisme régional, élément qui peut être révélé seulement par un examen pétrographique au microscope avec des équipements et des méthodes spéciaux (platine universelle). Il s'agit de la disposition dans des surfaces parallèles de certaines directions cristallographiques (axes, plans de symétrie) des minéraux de forme cristalline équidimensionnelle ou irrégulière, lesquels s'adaptent ainsi à la symétrie générale de la texture de la roche par l'orientation non de leur forme, mais de leur réseau cristallin. L'analyse structurale des roches au microscope a révélé que le quartz forme souvent, lors des phénomènes métamorphiques, des cristaux ayant leur axe optique disposé dans des surfaces parallèles, qui coïncident avec les surfaces de schistosité générale de la roche ou qui en sont différentes, ou encore en alignements parallèles qui peuvent se trouver sur les surfaces de schistosité sans qu'il y ait allongement correspondant de la forme cristalline. Des dispositions analogues avec orientation parallèle ont été observées pour le réseau cristallin de la calcite et de la dolomite, bien que ces minéraux aient généralement des cristaux de forme équidimensionnelle.

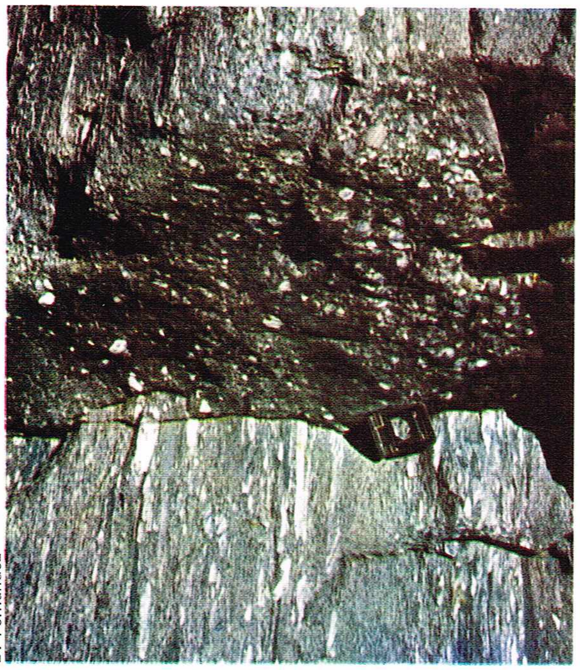

D. Fernandez

◀ *La* texture linéaire *de ce paragneiss conglomératique est déterminée par l'étirement des galets originels de la roche suivant une direction privilégiée.*

La texture schisteuse des roches soumises au métamorphisme régional se forme dans les profondeurs de l'écorce terrestre où les roches sont soumises à des compressions orogéniques latérales, donnant lieu à des plissements de vaste échelle et à la formation de failles et de surfaces de chevauchements tectoniques. Les grands phénomènes tectoniques déterminent dans les roches des efforts de cisaillement. Il se forme dans les roches des surfaces de glissement le long desquelles les minéraux sont plus ou moins broyés, dissous, et recristallisent de manière orientée lors des réactions métamorphiques.

La conséquence la plus évidente de la schistosité des roches du métamorphisme régional est leur *fissilité*. Celle-ci est la propriété d'une roche de se rompre suivant des plans parallèles quand on la frappe ou simplement quand elle est exposée à l'altération atmosphérique. Ces plans de rupture coïncident en général avec les plans de schistosité et sont d'autant mieux marqués que les roches sont plus riches en minéraux micacés. Il peut cependant exister plusieurs plans de fissilité dans les roches.

Une autre texture très commune des roches du métamorphisme régional est la **texture foliée.** La foliation consiste en la séparation des minéraux d'une roche en deux groupes, qui forment des bandes alternantes parallèles, distantes de quelques millimètres dans les roches métamorphiques à grain moyen et de l'ordre du centimètre dans les roches à grain plus grossier. Les bandes sont alternativement de couleur claire et obscure. On parle aussi de **texture gneissique** car elle est caractéristique des gneiss, où elle se traduit par une alternance de niveaux biotitiques et de niveaux quartzo-feldspathiques. La foliation est un effet de la diffusion ionique, phénomène important dans le métamorphisme qui consiste en la migration d'ions ou de groupes ioniques libérés des réseaux cristallins des minéraux antérieurs au métamorphisme, et qui tendent à se regrouper de manière différente pour former de nouveaux réseaux cristallins. L'ampleur de la diffusion ionique, c'est-à-dire la distance sur laquelle les ions peuvent migrer, croît avec le degré de métamorphisme. La genèse de la foliation est probablement favorisée par les différences de comportement des minéraux d'une roche soumise à une déformation tectonique et par la concentration en niveaux lentiformes des minéraux les plus résistants aux déformations. Dans les gneiss, où la foliation est bien développée et où les minéraux micacés sont en quantité moindre que dans les micaschistes, la fissilité diminue ; elle devient irrégulière et s'effectue suivant des surfaces plus distantes.

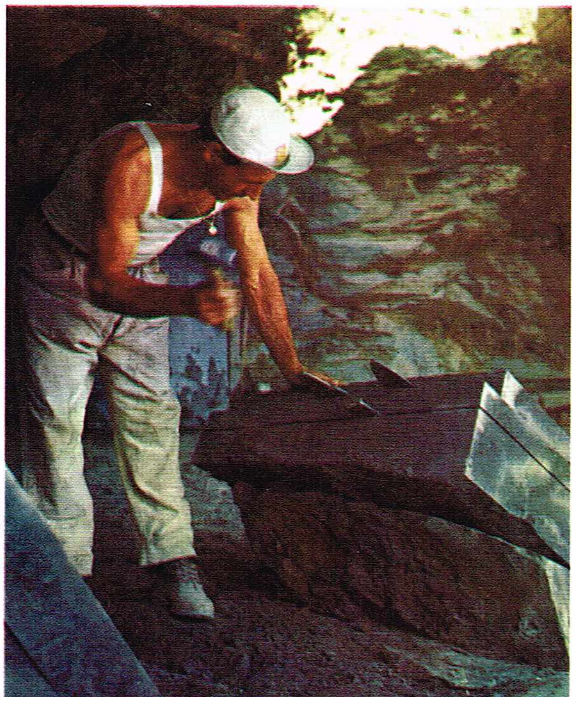

M. Pedone

◀ *La* fissilité, *mise en évidence ici sur un bloc d'ardoise, est une des conséquences les plus évidentes de la schistosité des roches du métamorphisme régional.*

Archives photo B

▲ **Gneiss œillé :** ***au centre, un « œil » de composition essentiellement feldspathique autour duquel se moulent des niveaux de muscovite. La roche contient, en outre, du quartz.***

D. Fernandez

▼ **Texture relique :** ***la stratification, principale structure des roches sédimentaires, se conserve parfois à travers le métamorphisme, comme on le voit sur cette paroi constituée de paragneiss où alternent des niveaux d'origines gréseuse et conglomératique.***

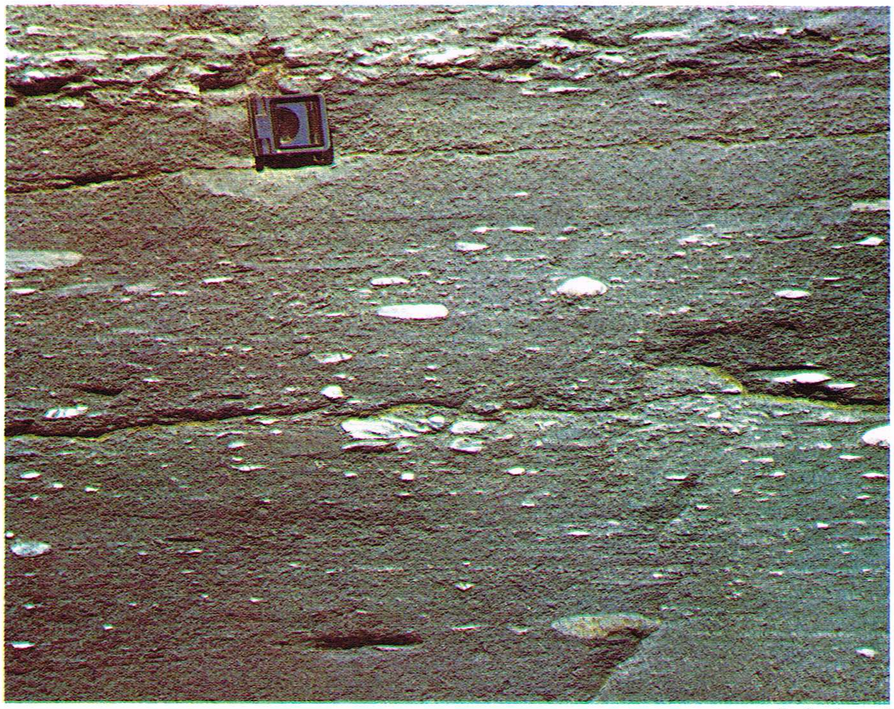

C. Bevilacqua

La **texture œillée** présente quelques analogies avec la texture foliée. Elle est caractérisée par la présence dans certains gneiss de porphyroblastes ou d'agrégats polycristallins, le plus souvent de feldspath, aplatis suivant les surfaces de schistosité. Ceux-ci se forment soit par des phénomènes cataclastiques déformant les phénocristaux originels de roches magmatiques (orthogneiss), soit par des phénomènes d'accroissement des cristaux par des réactions métamorphiques ayant lieu sous pression orientée.

Sous le nom de **texture migmatitique,** on peut réunir les principales caractéristiques macroscopiques d'un groupe important de roches, les migmatites, constituées par l'interpénétration d'un matériel granitoïde et d'un matériel métamorphique sous des formes diverses (veines parallèles ou obliques à la schistosité, etc.).

La **texture rhéomorphique,** assez fréquente dans les migmatites et dans d'autres roches formées à haute température (par exemple, les granulites), est caractérisée par la déformation en petits plis serrés et irréguliers des filonnets pegmatitiques (plis ptygmatiques) ou de bandes de compositions minéralogiques différentes. Cette déformation a lieu dans des conditions physiques particulières de plasticité des masses rocheuses, à très forte température, probablement en présence de petites quantités de matière fluide produites lors de la fusion commençante des roches (anatexie) ou lors des réactions métamorphiques.

Structures et textures reliques

Les roches formées lors du métamorphisme thermique et du métamorphisme régional présentent parfois des *structures* et des *textures reliques,* caractéristiques des roches à partir desquelles elles se sont formées et qui n'ont pas été complètement détruites lors du métamorphisme.

La structure sédimentaire la plus fréquente qui se conserve parfois à travers le métamorphisme est la **stratification.** La composition chimique différente des strates des roches sédimentaires provoque la formation de roches métamorphiques de compositions minéralogiques différentes, même si elles sont formées dans des conditions identiques de température et de pression. La conservation de la stratification à petite échelle a lieu surtout lors du métamorphisme thermique, au cours duquel les roches ne sont pas déformées. Les textures sédimentaires les mieux préservées lors du métamorphisme sont celles des roches détritiques (grès et conglomérats). Les conglomérats, même s'ils sont soumis à un métamorphisme de degré élevé (gneiss conglomératiques), conservent leur texture détritique, mais les galets sont déformés et aplatis suivant la schistosité de la roche et se transforment en agrégats minéralogiques différents des agrégats originels.

Parmi les structures et les textures des roches ignées se conservant partiellement dans les roches métamorphiques qui en dérivent, la principale est la *structure porphyrique* de nombreuses roches effusives et de quelques roches intrusives. Elle se transforme en **structure blastoporphyrique,** qui ne doit pas être confondue avec la structure porphyroblastique, d'aspect analogue (présence de quelques cristaux de dimensions supérieures aux autres) mais d'origine purement métamorphique. On reconnaît fréquemment l'origine ignée des roches métamorphiques à structure blastoporphyrique d'après leur gisement et la persistance d'autres propriétés communes aux roches ignées effusives, comme la texture amygdalaire.

Nomenclature des roches métamorphiques

Une classification systématique des roches métamorphiques est très difficile à établir du fait de la composition chimique et des conditions de formation très variées de ces roches, qui induisent une grande diversité de compositions minéralogiques et de structures. La classification actuelle des roches métamorphiques, élaborée à partir de l'observation au microscope des associations minérales stables de ces roches, est fondée sur l'hypothèse suivante : une association minérale observée dépend uniquement des conditions de métamorphisme auxquelles a été

soumise une roche de composition chimique donnée, quelle que soit sa composition minéralogique originelle. C'est une *classification génétique,* qui regroupe dans une même famille des roches métamorphiques de compositions chimiques et minéralogiques variées et formées dans les mêmes conditions de température et de pressions.

Mais ce mode de classification rend nécessaire une détermination complète et précise des minéraux présents dans une roche métamorphique, ce qui ne peut se faire par un simple examen macroscopique. Aussi une nomenclature faisant appel à l'aspect macroscopique des roches et aux minéraux reconnaissables à l'œil nu est-elle indispensable pour le travail de terrain.

La nomenclature usuelle groupe les roches métamorphiques d'après leurs types lithologiques produits à partir des principaux groupes de roches ignées et sédimentaires, mais elle donne des indications peu précises quant à l'origine de ces roches et à leur degré de métamorphisme.

Le métamorphisme thermique de roches de natures variées, mais le plus souvent d'origine sédimentaire et constituées de minéraux argileux, donne lieu à la formation de **cornéennes,** roches métamorphiques à texture massive, non schisteuse, à grain fin, très dures. Suivant la température maximale atteinte au cours du métamorphisme, elles sont constituées de différentes associations minérales.

Les **schistes tachetés** sont le résultat d'un métamorphisme de contact peu intense provoquant un début de recristallisation des minéraux argileux de la roche et une concentration de certaines substances (graphite, andalousite, cordiérite) qui forment de petites taches sombres. Leur fissilité, qui justifie l'utilisation du terme de schistes à leur égard, est d'origine sédimentaire ou bien est due à un métamorphisme régional de faible intensité, antérieur au métamorphisme de contact et qui a transformé les roches en argiloschistes.

Les roches constituées presque uniquement par de la silice (grès quartziques, silex) sont transformées par le métamorphisme de contact en **quartzites,** très semblables à ceux formés lors du métamorphisme régional mais privés de toute orientation des grains cristallins.

De même, les calcaires sont transformés en **marbres,** roches constituées de calcite granulaire, non orientée. Les calcaires impurs, contenant du matériel argileux ou siliceux, se transforment en marbres à minéraux, où la calcite est accompagnée de divers silicates (idocrase, grossulaire, diopside, etc.).

Le métamorphisme de contact des roches ignées donne lieu à des réactions et à des changements de structures dans les roches beaucoup moins importants que ceux qui adviennent dans les roches sédimentaires soumises à une augmentation de température. En effet, les roches ignées sont composées d'associations minérales formées à haute température, donc stables à la température du métamorphisme. Elles peuvent se transformer en cornéennes à amphibole ou à pyroxène.

On appelle **skarns** des roches développées surtout au contact entre un calcaire et une roche magmatique intrusive et formées par métasomatose pneumatolytique avec introduction, dans la roche calcaire, de fer et de silice. De grain grossier, les skarns ont une texture granoblastique ou rubanée en raison de la tendance qu'ont les minéraux formés (grenat, pyroxène, etc.) à se grouper en bandes monominérales parallèles.

Les roches produites par le métamorphisme régional présentent généralement des textures anisotropes, schisteuses, à la différence des roches produites par le métamorphisme thermique, par suite des pressions orientées qui agissent sur les roches au cours du métamorphisme. C'est pourquoi on leur donne le nom général de **schistes cristallins.** Parmi ceux-ci, il est quelquefois possible de distinguer ceux qui dérivent du métamorphisme de roches ignées *(orthoschistes)* et ceux qui sont d'origine sédimentaire *(paraschistes).* Par les préfixes *ortho-* et *para-,* on désigne aussi les gneiss et les amphibolites provenant respectivement du métamorphisme de roches ignées et de roches sédimentaires. Quand une roche métamorphique conserve encore de nombreux caractères de son origine ignée ou sédimentaire, qui n'ont pas été complètement détruits lors du métamorphisme, on lui donne le nom de la roche originelle précédé du préfixe *méta-* : méta-arkoses, métabasaltes, etc.

M. Pedone

▲ ***L'ardoise** est un argiloschiste souvent utilisé pour couvrir les toits, car sa très bonne fissilité permet de la débiter en fines dalles.*

Le métamorphisme régional de roches sédimentaires argileuses produit, pour une faible intensité du métamorphisme, des **argiloschistes** dont la composition minéralogique est peu différente de celle de la roche originelle, mais dont la texture est caractérisée par un développement important de la schistosité. Celle-ci induit une bonne fissilité des roches qui se rompent suivant des surfaces planes et parallèles, très proches les unes des autres, en formant de fines dalles souvent utilisées comme tuiles ou à d'autres fins. L'*ardoise* est un argiloschiste charbonneux de couleur noire. Le passage des argiles aux argiloschistes est graduel. La schistosité se forme en général parallèlement aux plans axiaux des plis qui déforment la stratification originelle des roches. Elle est parallèle à cette dernière dans les flancs des plis, mais la recoupe sous divers angles dans les zones de charnière. Le système de surfaces parallèles de schistosité des roches a donc une disposition variable par rapport à la stratification ; celle-ci est quelquefois visible sous forme de bandes de couleur différente (rosé et gris par exemple) qui intersectent les surfaces de schistosité.

Les **phyllades** ressemblent aux argiloschistes mais s'en différencient par un grain cristallin moins fin. On peut y distinguer à l'œil nu de petites paillettes de séricite ou de chlorite qui donnent aux surfaces de schistosité un

◀ *Page ci-contre, au milieu, cette section polie de migmatite montre une **texture rhéomorphique** caractérisée par l'aspect fluidal des replis affectant les lits de granitoïde et due à un début de fusion des roches.*

C. Bevilacqua

◀ *Un échantillon de* **phyllade.**

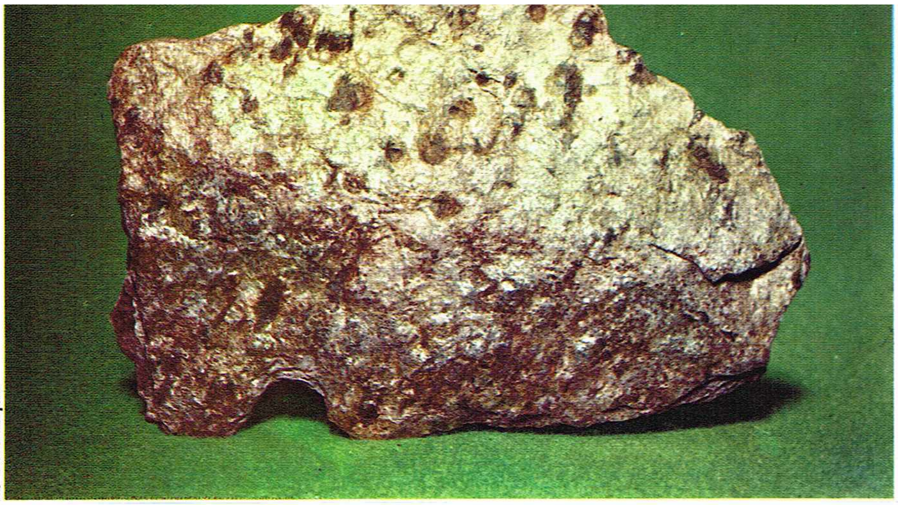

C. Bevilacqua

▲ *Un échantillon de* micaschiste *montrant une surface de schistosité recouverte de mica blanc.*

▼ *Ci-dessous, un échantillon de* talcschiste *; cette roche, composée principalement de talc, est peu compacte.*

En bas, à gauche, un échantillon de gneiss *constitué essentiellement de petits niveaux alternés quartzo-feldspathiques et micacés (foliation).*

A droite, un échantillon de prasinite *ou schiste vert, dérivant du métamorphisme de roches magmatiques basiques.*

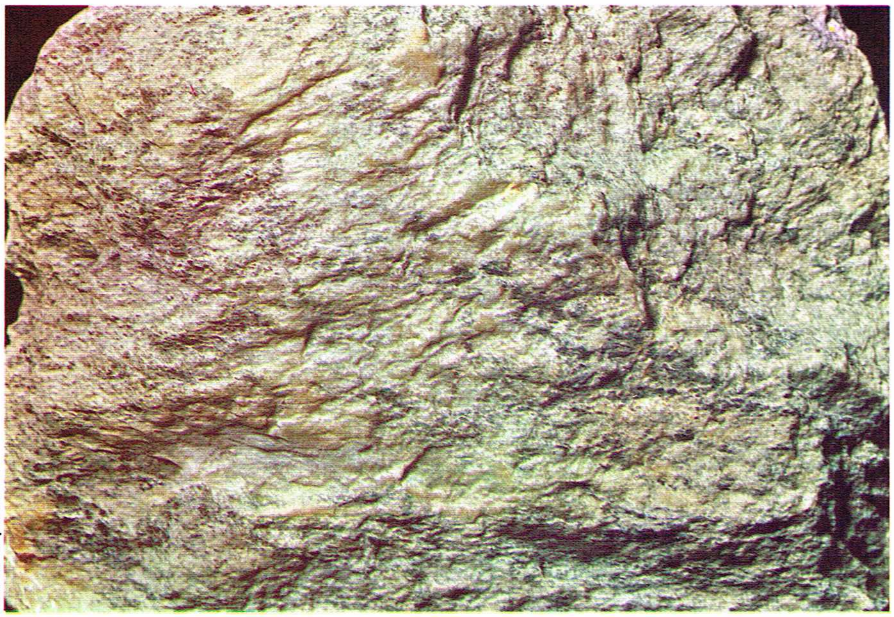

Archives photo B

aspect brillant. En outre, elles peuvent contenir du quartz, de l'albite et d'autres minéraux en quantité mineure. En France, les phyllades sont très abondantes dans les Pyrénées, les Ardennes, en Bretagne, etc.

Les **micaschistes** sont également très communs (Massif central, Alpes, etc.). Ils se distinguent des phyllades principalement par leur grain cristallin plus grossier, par la présence de muscovite ou de biotite et d'autres minéraux, parmi lesquels le quartz, visibles à l'œil nu. La schistosité y est moins régulière, mais bien marquée ; on peut parfois observer l'intercalation de petits niveaux de quartz de forme lenticulaire parallèlement à la schistosité, et formés par la concentration du quartz durant les phénomènes métamorphiques. En plus du quartz et des micas, ils peuvent contenir quelques cristaux isolés de feldspath et d'autres minéraux suivant la composition originelle de la roche et les conditions particulières de métamorphisme : micaschistes à grenat, à disthène, à cordiérite, etc. Comme les phyllades et les argiloschistes, ils proviennent du métamorphisme régional de roches sédimentaires argileuses.

Les **séricitoschistes** sont des phyllades ou des schistes à séricite dominante, laquelle donne un aspect argenté brillant aux surfaces de schistosité de ces roches.

Les **chloritoschistes** sont des schistes constitués principalement de chlorite. Ce sont des roches de couleur vert sombre, formées à partir de roches sédimentaires argileuses de composition particulière, telles que les roches à glauconie abondante, ou, plus fréquemment, à partir de roches ignées basiques et ultrabasiques. Les *schistes verts* sont une variété de chloritoschistes, de couleur plus claire et de composition basique, contenant, outre la chlorite et le quartz, de l'épidote et de l'actinote. Les *prasinites* sont des schistes verts, dérivant des roches magmatiques basiques, comme les gabbros, les diabases et les basaltes, ou de roches pyroclastiques de composition correspondante, ou encore de grauwackes. Elles sont caractérisées par la présence, en plus de la chlorite et de l'actinote, d'albite, en cristalloblastes ou en porphyroblastes non maclés. Elles contiennent généralement peu de quartz, mais des minéraux accessoires abondants, comme la magnétite et l'apatite. Associées à des chloritoschistes et des serpentinites, on les trouve dans les Alpes et en Corse.

Les **talcschistes** ont une couleur vert clair ou blanchâtre et sont composés principalement de talc. Comme minéraux accessoires, on trouve la magnétite et des carbonates magnésiens, ainsi que parfois de l'antigorite et de la trémolite. Les talcschistes, de texture schisteuse ou plus souvent fibreuse, sont peu compacts.

Les **calcschistes** sont des roches schisteuses, de couleur grise, noire ou verdâtre, formées de niveaux à calcite prédominante alternant avec des niveaux quartzo-micacés. Ils se forment à partir de roches calcaires ou

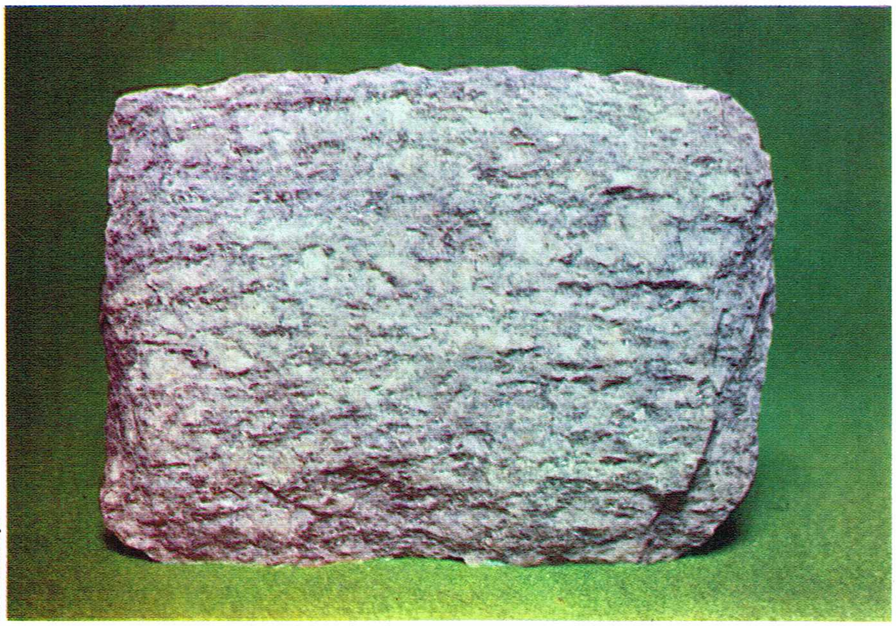

C. Bevilacqua

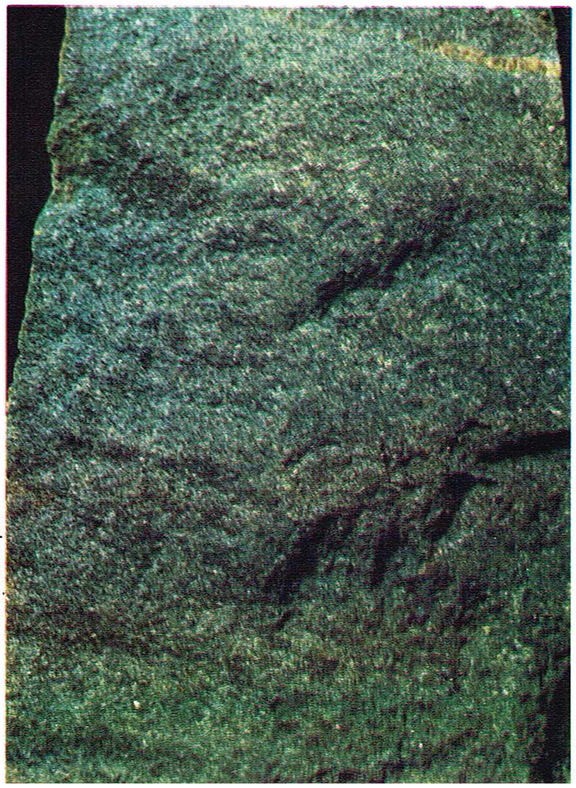

C. Bevilacqua

dolomitiques impures (siliceuses ou argileuses). On les trouve en abondance dans les Alpes *(schistes lustrés)*.

Les **gneiss** sont des roches du métamorphisme régional à grain généralement grossier, à fissilité moins parfaite que les micaschistes et constituées essentiellement de quartz et de feldspath, ainsi que de micas et de minéraux ferromagnésiens en quantités mineures. Ils se caractérisent par leur texture foliée, dite aussi gneissique. Les gneiss ont une fissilité irrégulière, suivant des surfaces plus espacées que dans les micaschistes, desquels ils se différencient également par leur composition minéralogique (abondance des feldspaths et rareté des micas). Mais il existe des termes de passage entre ces deux types de roches.

Les gneiss peuvent se former à partir de roches d'origine sédimentaire ou magmatique : *paragneiss* formés à partir de grès feldspathiques, de pélites ou de grauwackes, et *orthogneiss* formés à partir de granites, de rhyolites, de porphyres quartzifères, etc. Leur aspect est identique, mais leur distinction est parfois possible d'après leurs conditions géologiques de gisement et leur association avec d'autres types de roches métamorphiques, ou d'après certaines particularités de composition chimique ou minéralogique. Les orthogneiss constituent habituellement de grandes masses de formes et de dimensions semblables à celles des batholites de roches granitiques, alors que les paragneiss forment des bancs ou des masses tabulaires alternant avec d'autres roches métamorphiques de composition différente (quartzites, micaschistes, amphibolites, etc.). Toutefois, les phénomènes tectoniques associés au métamorphisme obscurcissent souvent les relations existant primitivement entre les différentes roches. On peut parfois observer des textures sédimentaires reliques dans les paragneiss, par exemple, des textures conglomératiques où les galets quartzeux originels ont recristallisé en agrégats polycristallins de quartz, de forme aplatie suivant les surfaces de schistosité.

Les orthogneiss forment en grande partie les massifs cristallins des Alpes (Mont-Blanc, Argentera, Pelvoux, Dora Maira, etc.). Les paragneiss, associés à des micaschistes et à d'autres roches du métamorphisme régional, forment la majeure partie des massifs anciens français (Massif central, Vendée, Bretagne, etc.). S'il existe dans un gneiss un minéral accessoire abondant, son nom sert à caractériser la roche : gneiss à cordiérite, à sillimanite, etc. Les *kinzigites* sont des paragneiss à grenat, biotite et sillimanite. On en connaît dans les Alpes italiennes, où elles affleurent en deux bandes allongées, la première située entre Aoste et le Cervin, la deuxième le long de la zone chloritico-kinzigitique entre Biella et l'extrémité septentrionale du lac de Côme. Les *leptynites* sont des gneiss à grain fin, de couleur claire, très peu micacés.

Les *gneiss œillés* sont des gneiss où s'observent de grands cristaux ou agrégats polycristallins de feldspath (associé parfois à du quartz), de forme lenticulaire et qui se détachent sur un fond plus fin. Ils peuvent se former par croissance de cristalloblastes durant le métamorphisme ; mais, plus souvent, ils se forment à partir des phénocristaux de feldspath d'une ancienne roche porphyrique, qui subissent un aplatissement et un étirement parallèlement à la schistosité, avec un phénomène de granulation suivi de recristallisation.

Les **amphibolites** sont des roches du métamorphisme régional, de couleur vert sombre, composées essentiellement d'amphibole hornblende et de plagioclase calcique. Elles sont produites par le métamorphisme de diverses roches : roches ignées et pyroclastiques basiques (gabbros, basaltes, etc.) ou roches sédimentaires (grauwackes, argiles calcaires, etc.).

La distinction entre ortho-amphibolites et para-amphibolites est généralement très difficile à établir. Elle est basée sur le mode de gisement et l'association avec d'autres roches métamorphiques ainsi que sur la composition chimique. Les ortho-amphibolites sont des roches très communes, en massifs d'extension et d'épaisseur relativement importantes et de composition souvent uniforme, alors que les para-amphibolites sont souvent intercalées dans d'autres paraschistes et ont une composition variable d'un point à l'autre. Les amphibolites présentent une texture schisteuse qui n'est pas toujours bien marquée du fait que les minéraux micacés y sont rares. Mais les prismes de hornblende sont généralement allongés suivant une direction privilégiée dans des plans subparallèles et déterminent une texture linéaire. On rencontre souvent également des amphibolites foliées, où des niveaux sombres essentiellement amphiboliques alternent avec des niveaux plagioclasiques de couleur claire *(amphibolites gneissiques)*. Les amphibolites peuvent contenir des minéraux accessoires en quantité variable. Les plus fréquents sont le grenat almandin et l'épidote. On rencontre des amphibolites dans les Alpes, où elles sont associées à des prasinites et des serpentinites, et dans le Massif central, où elles sont associées à des micaschistes et des gneiss. Si une roche est composée essentiellement d'une autre amphibole que la hornblende, on la désigne du nom de cette amphibole : *actinolitite, glaucophanite*, etc.

Les **éclogites** sont des roches de composition basique essentiellement constituées de pyroxène sodique (omphacite) et de grenat (pyrope), accompagnés parfois de petites quantités de disthène, de pyroxène orthorhombique ou de quartz. Ce sont des roches vert sombre, à structure granoblastique, très denses. Chimiquement équivalentes des gabbros à olivine, elles se forment dans des conditions de métamorphisme très élevées; elles se trouvent cependant souvent associées à des roches formées dans des conditions de métamorphisme moins élevées, constituées par des minéraux stables à des températures et des pressions relativement plus basses, par

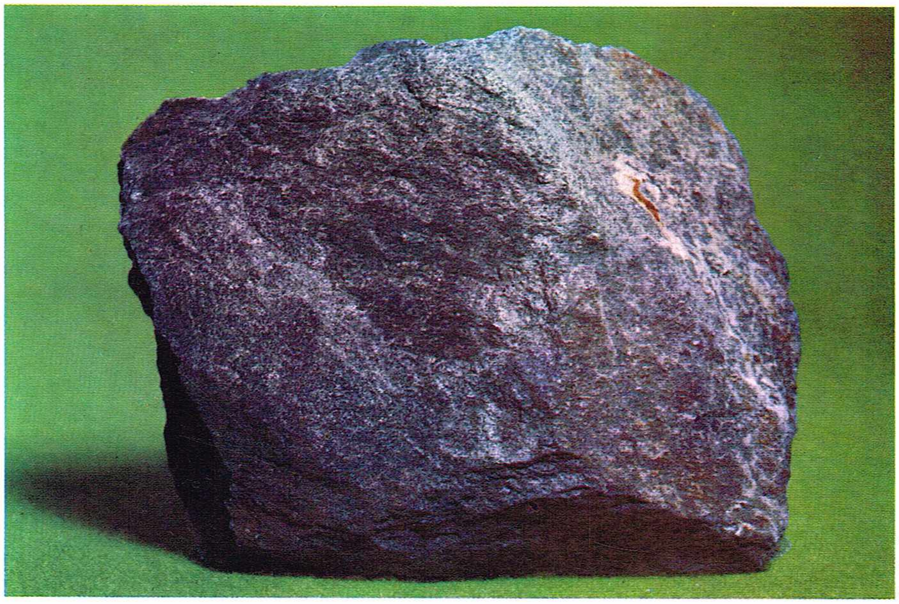

C. Bevilacqua

▲ ***Un échantillon d'amphibolite, roche du métamorphisme régional composée essentiellement d'amphibole hornblende et de plagioclase calcique.***

▼ ***Un échantillon d'éclogite, roche du métamorphisme régional composée essentiellement de pyroxène (vert) et de grenat (rouge).***

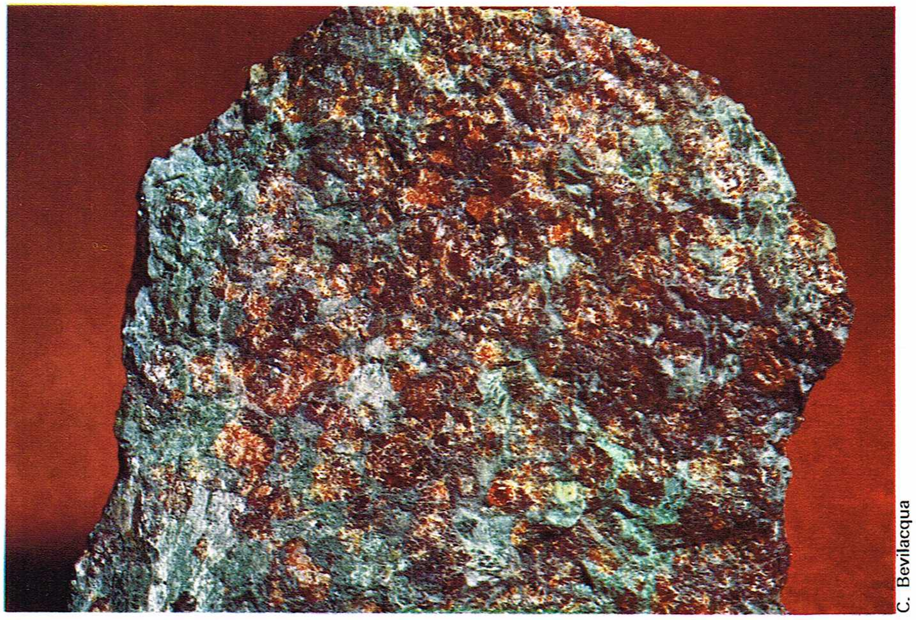

C. Bevilacqua

exemple, sous forme de lentilles ou de bandes dans des amphibolites ou des schistes à glaucophane, par suite de phénomènes de dislocation tectonique. Les minéraux des éclogites sont souvent partiellement détruits; dans ce cas, on observe des couronnes de réaction autour du grenat, au contact avec le pyroxène, constituées d'un agrégat de hornblende et de plagioclase. De plus, on peut rencontrer des éclogites sous forme de blocs (xénolithes) dans les péridotites provenant de magma d'origine profonde. En France, on trouve des éclogites dans le Massif central, le Massif armoricain et en Vendée.

Les **granulites** sont une variété de gneiss à grain moyen, pauvres en micas et à fissilité très fruste. En plus du quartz, du feldspath potassique et du plagioclase calcique qui sont les principaux minéraux de ces roches, elles comprennent du grenat et parfois du pyroxène (hypersthène, diopside). La structure des granulites est granoblastique; cependant, le quartz et le feldspath se présentent souvent en grains fortement aplatis suivant les plans de schistosité; leur foliation est plus ou moins bien développée, le quartz se présentant en petits lits lentiformes. Ces roches sont relativement rares et se forment dans des conditions de température et de pression très élevées. En Europe, on connaît des granulites typiques en Saxe et en Scandinavie.

C. Bevilacqua

▲ *Un échantillon de* quartzite micacé *montrant une surface de schistosité recouverte de mica blanc.*

▼ *Section polie de* migmatite, *roche hybride composée de lits de matériel métamorphique et de lits de matériel granitoïde. Des filonnets granitiques recoupent la roche.*

C. Dani

Les **quartzites** sont des roches métamorphiques composées exclusivement ou en grande partie de quartz et produites par le métamorphisme régional (ou thermique) de roches sédimentaires siliceuses comme les grès quartziques, les silex, etc. De couleur blanche ou verdâtre, les quartzites sont constitués d'une mosaïque de cristaux de quartz, parfois accompagnée d'autres minéraux en quantités mineures, formés par réactions métamorphiques entre les minéraux accessoires de la roche siliceuse originelle (micas, chlorite, épidote, etc.). Les quartzites produits par le métamorphisme régional, à la différence de ceux d'origine purement thermique et des grès quartzites sédimentaires, possèdent généralement une texture schisteuse; celle-ci est conférée à la roche par la forme aplatie des cristaux de quartz et accentuée par l'orientation parallèle des paillettes de mica éventuellement présentes et concentrées dans certains niveaux, reliques de la stratification. Le degré de métamorphisme des quartzites peut être révélé seulement par le grain de la roche, qui tend à devenir plus grossier s'il était fin à l'origine, et par la nature des minéraux accessoires éventuellement présents. De nombreux quartzites contiennent des minéraux lourds, provenant des grès originels, et qui sont stables dans un ample intervalle de température (zircon, tourmaline, etc.). Les quartzites formés par le métamorphisme régional de grès sont fréquents dans les Alpes internes, dans les niveaux stratigraphiques appartenant au Trias inférieur.

Les **marbres** se forment par métamorphisme régional de roches calcaires, pures ou à impuretés siliceuses ou argileuses. Ils sont souvent identiques par leur aspect aux marbres formés par métamorphisme thermique. Mais à la structure granoblastique, due à la recristallisation de la calcite, est généralement associée une texture schisteuse, produite par les pressions orientées et caractérisée par la forme aplatie des cristaux de calcite, de manière analogue à ce qui se produit dans certains quartzites. Les *cipolins* sont des marbres dont la couleur verdâtre est due à la présence de micas. Par recristallisation, les impuretés originelles des roches calcaires (minéraux argileux, feldspaths détritiques) se transforment en micas, chlorite, albite, et autres minéraux silicatés (épidote, diopside, etc.). Les minéraux accessoires des marbres sont parfois dispersés de manière uniforme dans la roche, mais le plus souvent ils se concentrent en bandes de couleur obscure, planes ou replissées. Ces bandes correspondent généralement à la stratification originelle des roches calcaires, c'est-à-dire à des strates de calcaires impurs intercalées dans les strates de calcaires purs.

Le métamorphisme régional de dolomies produit des *marbres dolomitiques* à structure granoblastique analogue à celle des marbres, mais présentant parfois des formes cristallines bien développées et des idioblastes isolés de dolomite. Si la roche originelle contenait en outre de la silice, il se forme par réactions métamorphiques avec la dolomite des minéraux magnésifères tels que la trémolite, le diopside ou l'olivine (forstérite).

Les **serpentinites** sont constituées presque uniquement de minéraux du groupe des serpentines, avec quelques cristaux reliques de pyroxène ou d'olivine. Ce sont des roches vert sombre à noires, à texture schisteuse mal marquée, produites par l'autométasomatisme de péridotites.

Les **migmatites** sont des roches hybrides, composées de deux termes pétrographiques, en général bien distincts macroscopiquement mais étroitement interpénétrés : il s'agit d'une roche métamorphique à texture schisteuse plus ou moins prononcée et d'une roche magmatique à structure granulaire, parfois pegmatitique, et à composition granitique. Différents noms sont donnés à ces roches d'après la manière selon laquelle les deux types pétrographiques sont associés, mais non d'après leurs compositions chimique et minéralogique globales, qui peuvent être très variables. L'origine de ces roches fait l'objet de nombreuses hypothèses.

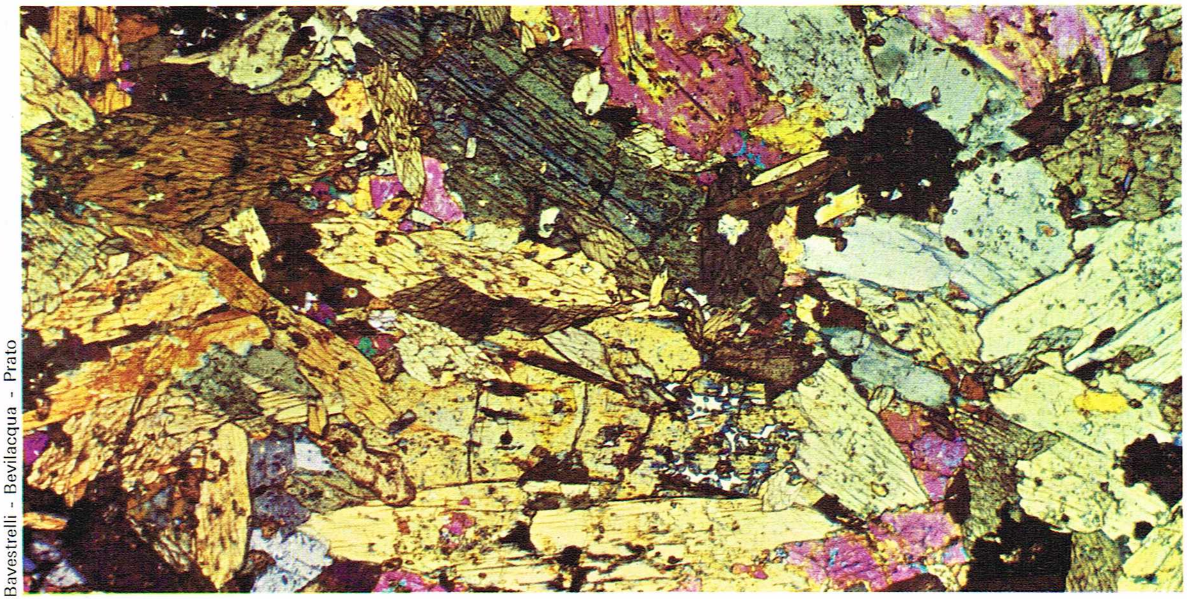

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ *Lame mince d'amphibolite observée en nicols croisés.*

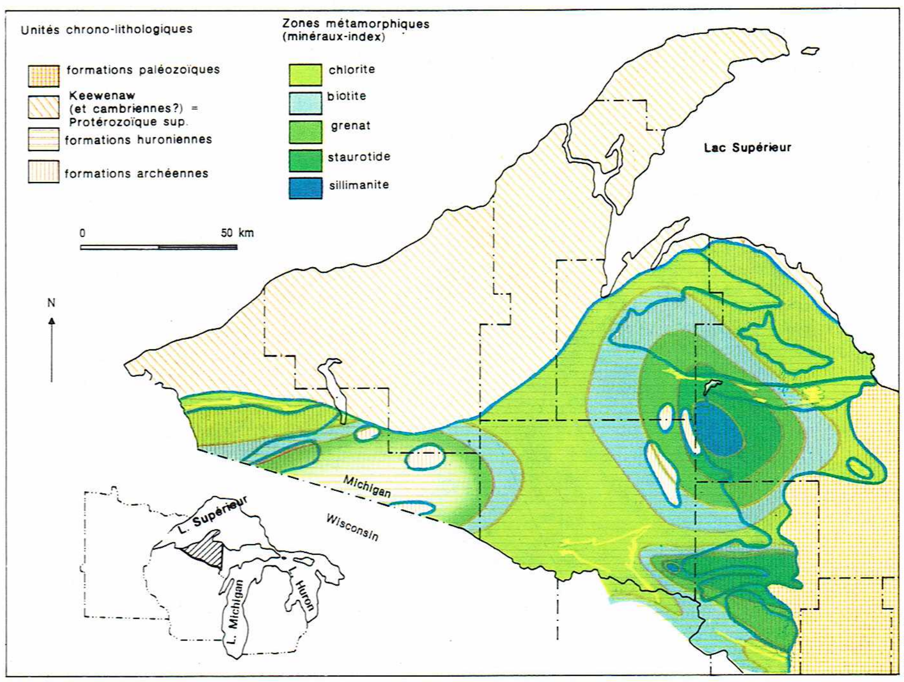

▲ *Distribution des faciès métamorphiques dans les formations précambriennes du lac Supérieur (États-Unis) : les lignes bleues indiquent les limites entre les unités chrono-lithologiques ; les hachures rouge-orangé indiquent les affleurements des dépôts sédimentaires ferrifères précambriens ; les lignes rouge sombre délimitent les zones métamorphiques.*

Classification des roches métamorphiques

C'est en 1795 que J. Hutton décrivit pour la première fois les changements qui peuvent se produire dans une roche sous l'influence de la chaleur et de la profondeur. Il décrivit les phénomènes métamorphiques sans toutefois employer ce terme, qui fut créé par Ch. Lyell en 1833. C'est seulement dans la seconde moitié du XIX^{e} siècle que fut observée pour la première fois une transition progressive entre des sédiments fossilifères et des roches métamorphiques formées à partir de ces sédiments et que fut introduit le terme de métamorphisme régional ou général pour désigner les phénomènes de transformation des roches à grande échelle.

Zones de métamorphisme

En 1893, en Écosse, G. Barrow mit en évidence, pour la première fois, différentes *zones de métamorphisme* correspondant à des intensités différentes de métamorphisme. Dans la région qu'il étudia existent des gneiss à biotite et à muscovite, qu'il attribua à la transformation d'un ancien granite ; les autres roches métamorphiques ont toutes une composition pélitique. En se fondant sur leur composition minéralogique, Barrow détermina et reporta sur une carte géologique les limites de différentes zones successives, définies chacune par un *minéral caractéristique,* ou *minéral-index.* Il montra que les variations minéralogiques observées dans les différentes zones ne sont pas dues à des variations originelles des roches ; en effet, celles-ci ont toutes à peu près la même composition chimique ; de plus, on peut observer un niveau repère de quartzites qui traverse les différentes zones et qui contient successivement les différents minéraux-index caractéristiques des zones successives. Ces minéraux sont donc produits par des intensités différentes du métamorphisme ; chaque minéral-index indique le *degré de métamorphisme* des roches qui le contiennent, ces roches étant exposées à la surface terrestre par suite de phénomènes de dislocation et d'érosion postérieurs à leur formation.

Barrow établit ainsi la *première échelle relative des degrés du métamorphisme,* en distinguant six zones successives, qui sont, en partant du degré de métamorphisme le plus faible : les zones à chlorite, à biotite, à grenat, à staurotide, à disthène, et à sillimanite. Entre deux zones contiguës, il existe une limite caractérisée par l'apparition ou la disparition d'un minéral-index. Cette limite est appelée *isograde* ou *surface d'isométamorphisme ;* son intersection avec la surface terrestre peut être cartographiée. En général, il s'agit d'une zone de transition plus ou moins large correspondant au domaine où a lieu une réaction chimique, pour certaines valeurs de températures et de pressions, avec transformation d'une association minérale en une autre.

Toutefois, cette zonéographie n'est valable que dans la région étudiée par Barrow et pour des roches de composition pélitique. Du fait de la diversité des conditions de température, de pression lithostatique, de pression fluide et de pressions orientées à l'intérieur de la croûte terrestre, qui provoque une très grande diversité d'associations minérales et de structures des roches métamorphiques, elle ne peut pas se généraliser à d'autres régions.

En 1904, H. Grübenmann classifia, à partir de zonéographies établies en différentes régions, les roches du métamorphisme régional en trois zones, définies par rapport à la profondeur.

L'*épizone,* ou zone supérieure, est caractérisée par des températures et des pressions lithostatiques basses et de fortes pressions orientées. Sont caractéristiques de cette zone : les minéraux phylliteux hydratés, comme la séricite, la chlorite, le talc, et d'autres minéraux, comme l'albite, l'épidote, etc. Les roches de l'épizone sont les phyllades, les séricitoschistes, les chloritoschistes, les talcschistes, les serpentinites et les schistes à glaucophane.

La *mésozone,* ou zone intermédiaire, est caractérisée par des températures plus fortes que celles de l'épizone. Les minéraux-index sont la biotite, la hornblende, la

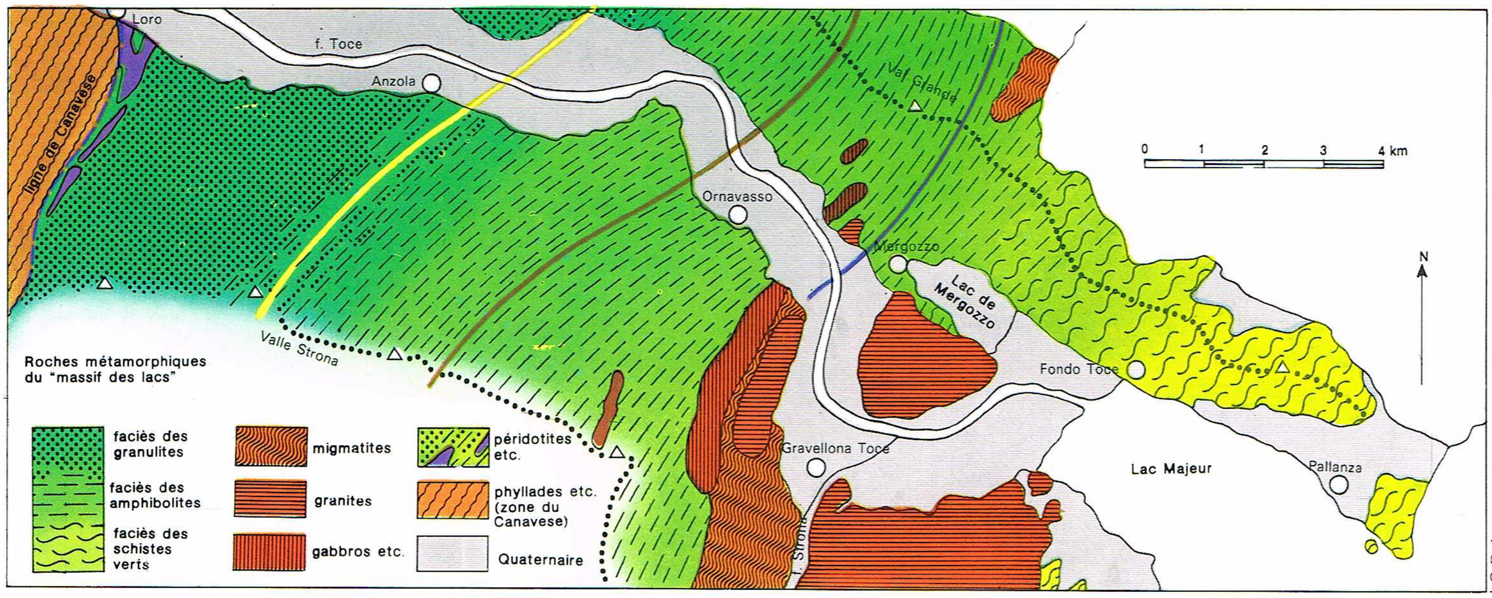

▲ ***Carte de la distribution des faciès métamorphiques dans les roches de la « série des lacs » dans la basse vallée d'Ossola. Le métamorphisme régional d'intensité croissante est indiqué par des nuances de vert de plus en plus sombres. La ligne bleu-violet est l'isograde de la sillimanite; la ligne marron est l'isograde de l'association sillimanite-feldspath potassique; la ligne jaune est l'isograde du pyroxène orthorhombique (d'après Peyronel, Pagliani et Boriani).***

staurotide, l'oligoclase, le disthène, le grenat almandin, etc. Il se forme des roches à grain cristallin plus grossier que dans l'épizone, par exemple, des micaschistes et certains gneiss.

Dans la *catazone,* ou zone inférieure, la température est encore plus élevée, la pression lithostatique forte et les pressions orientées négligeables. Les minéraux typiques de cette zone sont le feldspath potassique, la sillimanite, le plagioclase basique, les pyroxènes monocliniques et orthorhombiques, le grenat, la cordiérite, l'olivine, etc. Les roches de la catazone sont les gneiss, les granulites, les éclogites, certaines amphibolites et les roches à jadéite.

Cette classification, établie en fonction de la profondeur, ne tient pas assez compte de l'indépendance relative des différents facteurs provoquant le métamorphisme. De plus, elle est très imprécise. Cependant, on continue à l'utiliser car elle est d'usage pratique sur le terrain, quand on ne peut reconnaître les roches que d'après leur aspect macroscopique et leurs minéraux visibles à l'œil nu.

Faciès métamorphiques

La classification actuellement en vigueur est la *classification en faciès métamorphiques,* formulée en 1914 par le pétrographe finlandais P. Eskola : chaque faciès métamorphique comprend toutes les roches métamorphiques d'origine et de compositions chimique et minéralogique très diverses mais formées dans le même intervalle de températures et de pressions.

Paragenèse minérale

La classification des roches métamorphiques en faciès correspond à ce que l'on observe dans la nature. En effet, on constate souvent, plus particulièrement pour les paraschistes et les paragneiss, formés par métamorphisme de roches sédimentaires où les strates ont des compositions souvent différentes, la juxtaposition de roches métamorphiques de natures variées (marbres, quartzites, amphibolites, gneiss, etc.), mais qui se sont formées dans les mêmes conditions et appartiennent donc au même faciès.

D'autre part, l'étude pétrologique des roches métamorphiques a permis de conclure que l'association minérale, ou *paragenèse minérale,* stable dans un intervalle déterminé de températures et de pressions, dépend plus de la composition chimique de la roche que de sa composition minéralogique initiale. Par exemple, des roches de compositions minéralogiques complètement différentes, comme les gabbros et les argiles calcaires, mais très semblables par leur composition chimique, peuvent se transformer en roches métamorphiques identiques si elles sont soumises à des conditions analogues de températures et de pressions.

Règle des phases

La classification en faciès métamorphiques est basée sur la *règle des phases,* loi thermodynamique qui indique le nombre de phases, c'est-à-dire de minéraux et de substances fluides physiquement séparables, produites par une réaction chimique entre plusieurs éléments dans des conditions externes variables. La règle des phases est exprimée par la formule simple :

$$v = n - f + 2,$$

où n est le nombre de constituants indépendants entrant en réaction entre eux, f le nombre de phases indépendantes produites par la réaction, et v la variance du système, c'est-à-dire le nombre de conditions physiques (pressions et température) qui peuvent varier sans que les produits de la réaction changent.

La règle des phases permet donc de connaître combien de minéraux différents se formeront lors d'une réaction métamorphique, à condition que soient déterminés la variance du système et le nombre de constituants indépendants, c'est-à-dire de substances entrant dans la réaction.

La variance des réactions métamorphiques est au moins égale à 2 puisque les associations minérales normales sont stables dans un certain intervalle aussi bien de températures que de pressions, et non pour des valeurs strictement déterminées de ces deux variables. Mais la variance peut également être supérieure à 2, puisque la stabilité des produits de nombreuses réactions métamorphiques dépend de différents types de pression : lithostatique, orientée, pression de la phase fluide. Dans ces conditions, le nombre f des minéraux produits au cours des réactions métamorphiques est généralement égal ou inférieur au nombre n de constituants indépendants des réactions.

Les principaux éléments chimiques présents dans les roches et pouvant participer aux réactions métamorphiques peuvent être déterminés sous forme d'oxydes, par des analyses chimiques. Ils sont au nombre d'environ une dizaine. Cependant de nombreuses roches métamorphiques, même si elles se sont formées à partir de roches de composition minéralogique plus complexe, sont constituées par l'association de trois ou quatre minéraux seulement. Par conséquent, tous les éléments chimiques présents dans les roches ne jouent pas le rôle de constituants indépendants au cours des réactions métamorphiques. Cela est dû au fait que certains éléments isomorphes peuvent se substituer l'un à l'autre dans les réseaux cristallins des minéraux et ont un comportement géochimique analogue.

Si l'on passe rapidement en revue les principaux éléments chimiques présents dans les roches (en les considérant sous forme d'oxydes), on constate que la *silice,* la substance la plus abondante, se combine avec les autres oxydes pour construire le réseau cristallin de tous les minéraux silicatés; puis, si elle est présente en quantité supérieure à celle qui est nécessaire à la formation des silicates les plus riches en silice, la silice en excès cristallise sous forme de quartz. Dans les roches métamorphiques, les minéraux nettement sous-saturés

en silice, comme les feldspathoïdes, sont très rares; l'olivine est aussi très peu fréquente. La silice y est très souvent en excès sous forme de quartz.

L'*alumine* peut former à elle seule un minéral, le corindon, ou se combiner avec la silice pour former les silicates d'alumine (andalousite, disthène, sillimanite) ou encore avec d'autres oxydes pour former une grande variété de minéraux silicatés aluminifères. Elle a donc une grande importance dans la détermination de la composition minéralogique d'une roche.

Le *fer trivalent* (ferrique) peut se substituer à l'aluminium dans le réseau de nombreux minéraux à cause de la similitude du rayon ionique de ces deux ions. Son comportement lors des réactions métamorphiques est en partie semblable à celui de l'aluminium.

Le *fer bivalent* (ferreux) a un rayon ionique plus grand que le fer trivalent et se combine avec l'alumine et la silice pour former différents minéraux basiques. Le *magnésium* se substitue fréquemment au fer bivalent dans le réseau cristallin de nombreux minéraux, ainsi que le *manganèse,* constituant important de certains grenats.

Le *calcium* peut se combiner (sous forme d'oxyde) avec le gaz carbonique pour former la calcite, ou avec la silice (wollastonite), ou encore avec d'autres oxydes dans le réseau de plusieurs minéraux (pyroxènes, amphiboles, épidotes, etc.). De plus, il entre dans la composition des plagioclases, dans le terme anorthitique de cette importante série isomorphe. Le pourcentage de calcium qui va former de la calcite dépend surtout, pour chaque intervalle de température, de la pression du gaz carbonique intercristallin. Le calcium peut donc aussi former différents minéraux, suivant la composition chimique globale de la roche et les conditions de métamorphisme.

Le *sodium* entre surtout dans la composition des plagioclases, dans le terme albitique de la série; il peut se substituer au potassium dans certains micas. Des quantités significatives de sodium peuvent entrer dans le réseau des amphiboles, des pyroxènes et d'autres minéraux.

Le *potassium* est un constituant fondamental de la muscovite, de la biotite et des feldspaths potassiques. A hautes températures, il entre parfois dans le réseau cristallin de la hornblende.

Le *phosphore* entre dans le réseau de l'apatite.

L'*eau* est un constituant des minéraux hydratés (comme les zéolites) formés à basse température; elle est présente sous forme d'oxhydryles dans les minéraux stables à des températures intermédiaires comme les épidotes, les micas, les amphiboles; elle est absente du réseau des minéraux stables à des températures élevées.

De ces observations, il résulte que les éléments chimiques les plus importants dans la détermination de la composition minéralogique des roches métamorphiques, par combinaison entre eux ou avec la silice, sont l'*aluminium*, substitué par le fer trivalent, le *calcium*, et le *magnésium*, associé au fer bivalent.

La composition chimique d'une roche peut donc être exprimée, en ce qui concerne les principales réactions métamorphiques possibles, avec les seuls pourcentages de ces trois éléments ou groupes d'éléments, ou mieux de leurs oxydes, ce qui suppose que la silice est présente en quantité suffisante pour se combiner à eux pour former des silicates et des aluminosilicates (présence de silice en excès dans les roches sous forme de quartz). Cela explique pourquoi les roches métamorphiques ne sont, le plus souvent, formées que de deux ou trois minéraux.

On distingue généralement, parmi les roches, six grands groupes de compositions chimiques différentes :

— les *roches argileuses*, riches en alumine;

— les *roches quartzo-feldspathiques,* c'est-à-dire les roches granitoïdes, les roches effusives correspondantes et certains grès (arkoses);

— les *roches calcaires et dolomitiques;*

— les *roches ignées basiques* et *intermédiaires,* leurs tufs, et certains grès (grauwackes) de composition chimique analogue;

— les *roches ultrabasiques,* riches en magnésium;

— enfin, les *roches ferrifères,* d'origine sédimentaire (cas particulier peu fréquent).

Chaque faciès métamorphique comprend des roches appartenant à ces différents groupes de compositions chimiques différentes. A partir de nombreuses observations réalisées sur des roches métamorphiques de différentes compositions chimiques, fréquemment associées entre elles et qui se sont donc formées dans les mêmes conditions physico-chimiques, on a pu définir pour chaque faciès métamorphique un certain nombre de minéraux caractéristiques, reconnaissables au microscope. Parmi les minéraux caractéristiques de chaque faciès métamorphique, on peut distinguer les *minéraux critiques,* qui ne se rencontrent que dans un faciès donné, et les *minéraux typiques,* qui sont stables dans ce faciès mais peuvent également exister dans d'autres faciès.

Cependant, la présence effective dans une roche métamorphique des minéraux critiques du faciès dans lequel elle a été métamorphisée, stables dans les conditions de températures et de pressions de ce faciès, est conditionnée par la composition chimique globale de la roche, laquelle ne change pas au cours du métamorphisme (exception faite des phénomènes de métasomatisme). Aussi certains minéraux critiques d'un faciès peuvent-ils manquer dans une roche appartenant à ce faciès si les éléments chimiques qui les composent étaient absents dans la roche originelle ou s'ils étaient présents dans des proportions très différentes de celles qui sont nécessaires à la formation de ces minéraux. C'est un cas fréquent dans les marbres et les quartzites, difficiles à placer dans un faciès déterminé par suite de l'absence de minéraux-index.

Dans la détermination des minéraux caractéristiques d'une roche métamorphique, on ne tient pas compte des *minéraux reliques;* mais ces minéraux fournissent parfois des indications utiles sur l'état de la roche avant le métamorphisme.

La paragenèse d'une roche métamorphique est donc déterminée par sa composition chimique globale et par les conditions de températures et de pressions les plus élevées auxquelles la roche a été soumise lors du métamorphisme. De nombreuses expériences de laboratoire ont été réalisées dans le but de déterminer les conditions de cristallisation des minéraux caractéristiques des différents faciès métamorphiques, et par conséquent les conditions physico-chimiques correspondant à l'apparition de chaque faciès. On synthétise les minéraux caractéristiques des différents faciès en partant de mélanges de composition chimique connue et en faisant varier les conditions de températures et de pressions; ou bien on étudie les conditions d'équilibre de certaines associations minérales. Par exemple, on a étudié en laboratoire les conditions d'équilibre des trois silicates d'alumine : l'andalousite, la sillimanite et le disthène, et de la transformation de l'albite en jadéite et en quartz, etc.

On a ainsi défini les limites de stabilité des différents minéraux ou associations minérales, en fonction de la composition chimique globale de la roche, de la température, de la pression lithostatique et de la pression des différentes phases fluides présentes lors des réactions métamorphiques, et l'on a pu déterminer les conditions de températures et de pressions correspondant à chaque faciès. Toutefois, il faut remarquer que les conditions naturelles sont beaucoup plus complexes que les conditions expérimentales : on ne peut pas toujours évaluer l'influence sur les réactions métamorphiques de facteurs tels que la pression orientée, la présence éventuelle dans la nature de catalyseurs, etc.

Diagramme triangulaire

La composition chimique d'une roche, avec certaines simplifications, peut être représentée sur un *diagramme triangulaire* équilatéral dont les trois sommets représentent respectivement le contenu en alumine et en oxyde de fer trivalent, en oxyde de calcium et en oxydes de magnésium, fer bivalent et manganèse, qui sont les éléments chimiques les plus importants des roches. La composition chimique est indiquée par un point dont la distance aux trois sommets, mesurée le long des perpendiculaires aux trois côtés opposés, est inversement proportionnelle aux pourcentages de ces trois groupes d'oxydes dans la roche. C'est le *diagramme ACF* (Aluminium, Calcium, Fer). Par exemple, un calcaire pur, dépourvu de minéraux contenant de la silice, de l'alumine ou d'autres oxydes, est représenté par un point situé au sommet C.

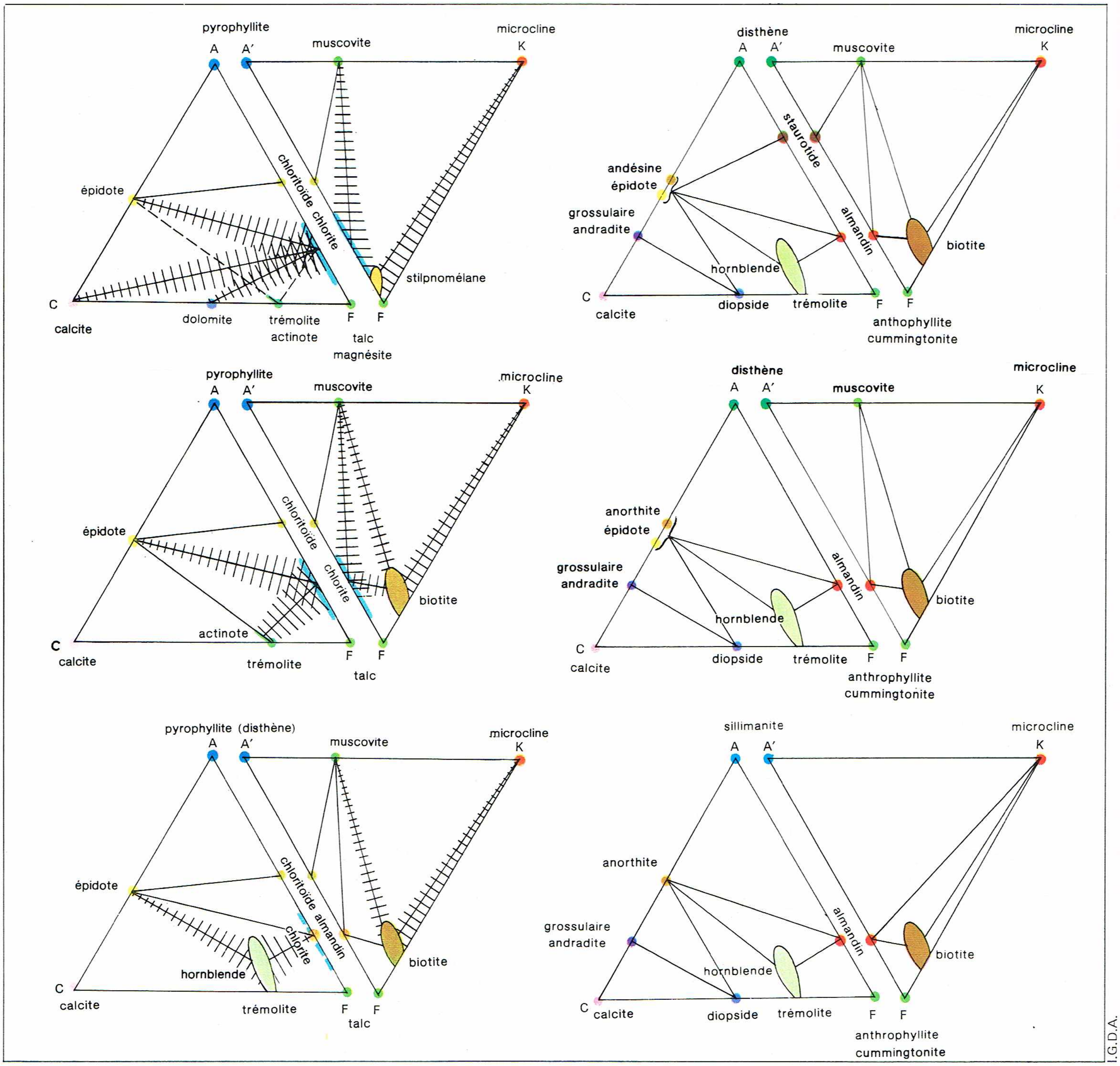

▲ *Diagrammes triangulaires de six subfaciès du métamorphisme régional : à gauche, le* **faciès des schistes verts** *avec, de haut en bas, les subfaciès à quartz-albite-muscovite-chlorite, à quartz-albite-épidote-biotite, et à quartz-épidote-almandin; à droite, le* **faciès des amphibolites** *avec, de haut en bas, les subfaciès à staurotide-almandin, à disthène-almandin-muscovite et à sillimanite-almandin-orthose (d'après Winkler).*

Sur le diagramme ACF, on peut également indiquer les minéraux, suivant leur composition chimique simplifiée, en calculant les pourcentages des trois groupes d'oxydes pour chaque minéral. Cependant, pour représenter graphiquement les minéraux qui contiennent une quantité importante de potassium (feldspath potassique, biotite, muscovite, etc.), il est nécessaire d'employer un autre diagramme triangulaire, le *diagramme A'KF,* dans lequel la potasse occupe le troisième sommet, à la place de l'oxyde de calcium. En outre, la composition de certains minéraux, comme les micas, les amphiboles, les chlorites, etc., ne peut pas être représentée par un simple point mais par un segment de droite ou une portion de surface, en raison de la variabilité importante de leur composition chimique.

Pour certaines roches ayant une composition chimique particulière, il n'est pas possible d'utiliser les diagrammes ACF-A'KF, en particulier pour les roches à défaut de silice. On a alors recours à d'autres diagrammes : par exemple, pour un calcaire métamorphique à défaut de silice, on peut utiliser un diagramme dont les sommets représentent le contenu en oxyde de calcium, en oxyde de magnésium et en silice. Pour d'autres roches, on est obligé de considérer un quatrième constituant indépendant (le sodium par exemple), et la représentation graphique des différentes compositions chimiques possibles des roches et des minéraux devient très complexe.

Pour chaque faciès métamorphique, à partir des observations pétrographiques complétées par les expériences de synthèse en laboratoire, on a construit des diagrammes ACF et A'KF, sur lesquels on a représenté les minéraux stables dans ce faciès. Chaque diagramme est subdivisé en quelques aires triangulaires plus petites, obtenues en joignant les points qui représentent la composition chimique des minéraux, deux à deux. Si une roche quelconque, dont la composition chimique est représentée par un point qui tombe à l'intérieur d'une

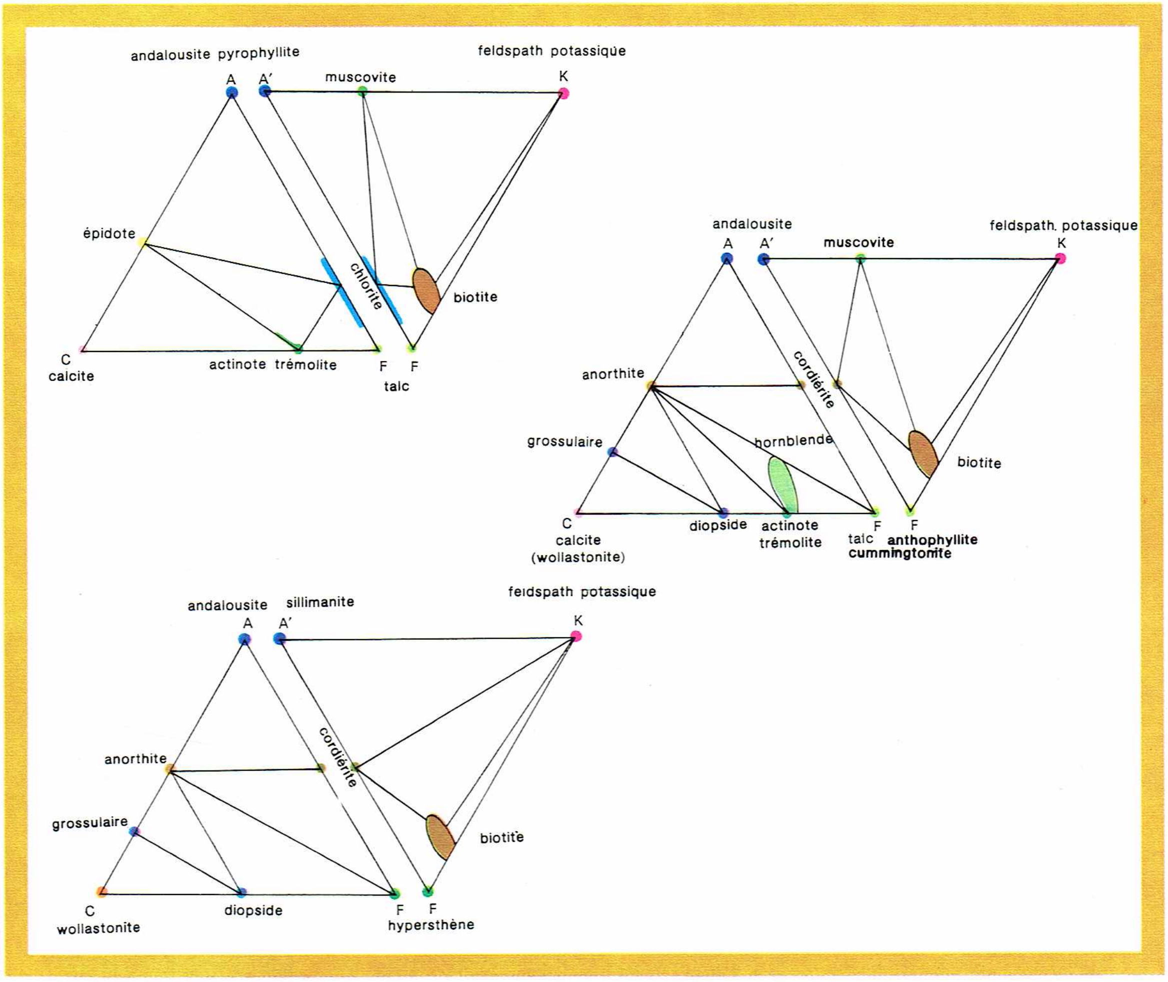

I.G.D.A.

◀ ***Diagrammes triangulaires des trois faciès principaux du métamorphisme de contact : de haut en bas, cornéennes à albite et épidote, cornéennes à hornblende, cornéennes à pyroxène (d'après Winkler).***

de ces aires triangulaires, est soumise à un métamorphisme de type et d'intensité correspondant au faciès déterminé du diagramme, elle se transforme en une roche métamorphique composée des trois minéraux se trouvant aux sommets de l'aire triangulaire, sans compter les minéraux accessoires (apatite, etc.), le quartz et les minéraux reliques instables.

Ainsi, grâce aux diagrammes paragénétiques établis pour les différents faciès, on peut, à partir de la simple détermination au microscope de la paragenèse minérale d'une roche métamorphique, avoir une idée de sa composition chimique et déterminer son faciès, c'est-à-dire les conditions auxquelles elle a été soumise lors du métamorphisme. Il est également possible de prévoir les paragenèses que l'on pourra rencontrer dans des roches de composition chimique différente mais formées dans les mêmes conditions.

Un *faciès* recouvre un champ relativement vaste de pressions et de températures. On peut le subdiviser en un certain nombre de *subfaciès,* correspondant chacun à des conditions plus délimitées de pressions ou de températures. Il arrive qu'à la suite de données expérimentales ou d'observations de terrain détaillées, un subfaciès soit à son tour considéré comme un véritable faciès. La classification en faciès peut donc être modifiée et précisée. Ainsi, lorsque Eskola créa la notion de faciès, il ne distingua tout d'abord que 5, puis 8 faciès. J. Turner (1968) dénombre 11 faciès principaux : 4 pour le métamorphisme de contact et les 7 autres pour le métamorphisme régional. Ces différents faciès sont dénommés d'après les roches ou les minéraux les plus caractéristiques qui s'y rencontrent. Ce sont : les faciès des cornéennes à albite et épidote, des cornéennes à hornblende, des cornéennes à pyroxène, des sanidinites, pour le métamorphisme de contact; pour le métamorphisme régional, ce sont les faciès à zéolites, à prehnite et à pumpellyite, les faciès des schistes verts, des schistes à glaucophane, des amphibolites, des granulites et des éclogites.

Les roches du métamorphisme de contact

Les roches du métamorphisme de contact ont une structure granoblastique et sont privées de schistosité, à moins que cette texture schisteuse n'ait été présente dans les roches avant le métamorphisme et n'ait pas été complètement oblitérée lors de celui-ci. Ces roches sont généralement très dures et à grain fin. En outre, parmi les minéraux qui les composent, les espèces minéralogiques stables seulement dans des conditions de forte pression, lithostatique ou orientée (minéraux stress), sont absentes ou très rares; en effet, les phénomènes du métamorphisme de contact se déroulent essentiellement lors d'une augmentation de température produite par une intrusion magmatique dans les couches superficielles de la croûte terrestre et, le plus souvent, lors des phases tardives des cycles orogéniques, lorsque les poussées tangentielles ont déjà cessé. Le facteur principal de ce type de métamorphisme est donc l'augmentation de température qui provoque un déséquilibre des minéraux des roches.

Les pressions existant lors du métamorphisme de contact sont de deux types : la pression lithostatique due à la charge des formations rocheuses sus-jacentes, et celle de la phase fluide intercristalline. La pression lithostatique, lors du métamorphisme de contact, n'atteint généralement pas des valeurs très élevées; en effet, celui-ci n'a lieu que s'il existe un déséquilibre thermique entre l'intrusion magmatique et les roches encaissantes, par conséquent dans les couches superficielles de la croûte terrestre, à faible profondeur. Les intrusions magmatiques ayant lieu à de grandes profondeurs, lors des phases intermédiaires des cycles orogéniques (granites concordants), amènent le magma au contact de roches qui sont elles-mêmes déjà à des températures très élevées; ces roches sont peu différentes de celles du magma, et par conséquent constituées d'associations minérales à peu près en équilibre avec la température de l'intrusion. Dans ce cas, il n'y a donc pas de phénomène de métamorphisme de contact.

Auréole métamorphique autour du granite à amphibole de Flamanville (d'après L. Chauris, 1964 et J. Goni, 1966).

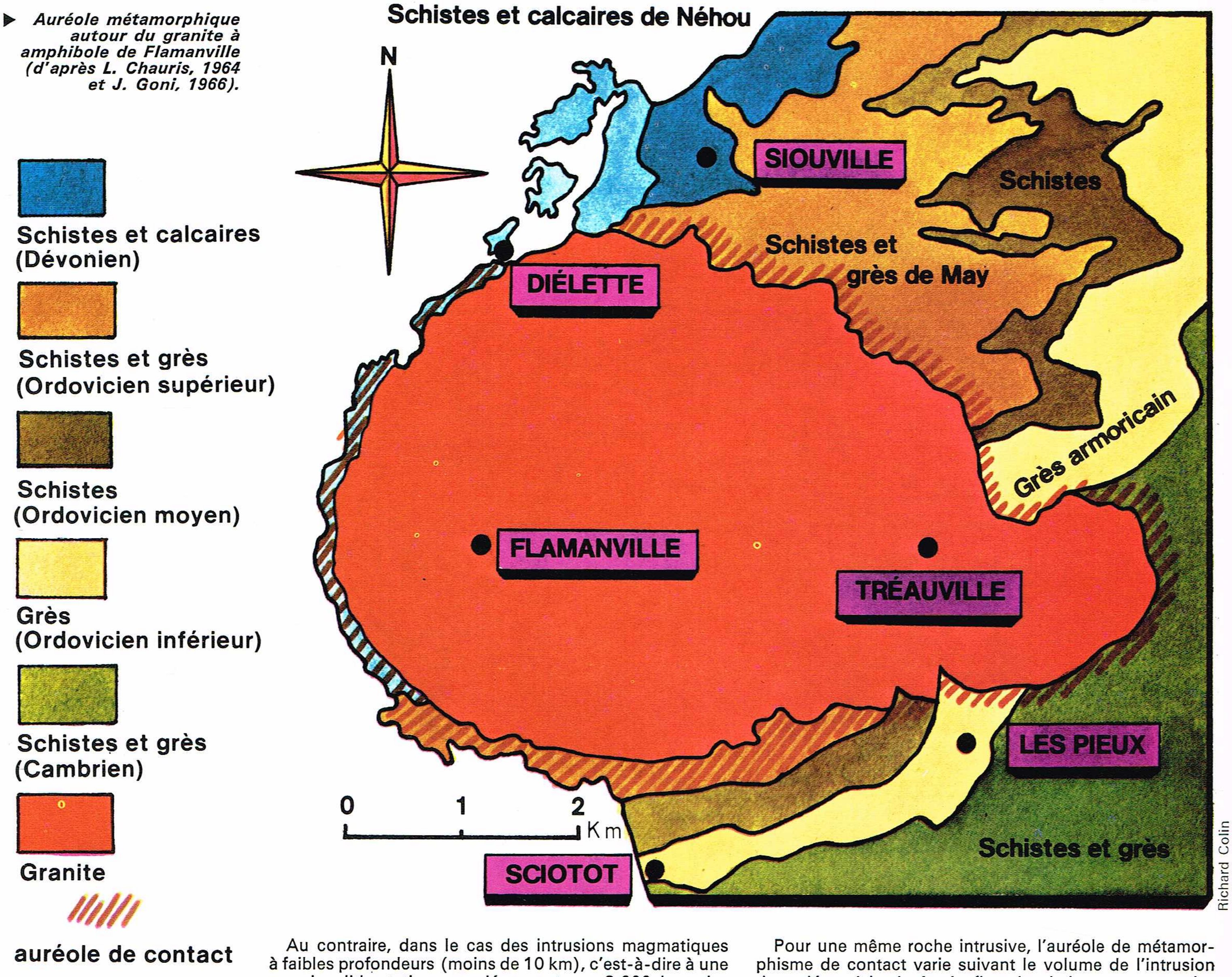

Au contraire, dans le cas des intrusions magmatiques à faibles profondeurs (moins de 10 km), c'est-à-dire à une pression lithostatique ne dépassant pas 3 000 bars, les roches encaissantes sont soumises à une augmentation sensible de température, qui décroît régulièrement en fonction de la distance à l'intrusion. Les réactions métamorphiques sont, de plus, favorisées par la pénétration à travers les roches de fluides magmatiques à pression élevée, constitués principalement par de l'eau. Quand d'autres substances provenant du magma se fixent dans les réseaux cristallins des minéraux formés lors du métamorphisme, ou quand des quantités sensibles de certaines substances originellement présentes dans les roches leur sont soustraites lors du passage des fluides magmatiques, le métamorphisme thermique est accompagné de phénomènes métasomatiques.

Les roches du métamorphisme de contact forment une auréole continue autour des intrusions magmatiques. La largeur des auréoles de contact n'est, le plus souvent, que de quelques centaines de mètres et varie en fonction de différents facteurs. Ces facteurs sont : la composition chimique et lithologique des roches soumises au métamorphisme, la composition chimique du magma et les dimensions de l'intrusion.

Les variations de largeur des auréoles de métamorphisme de contact suivant la texture, la composition chimique et le mode de gisement des roches s'expliquent par les différences de conductivité thermique et de porosité aux fluides magmatiques. Par exemple, les auréoles ont une extension plus grande dans les roches argileuses qui se transforment en cornéennes que dans les calcaires transformés en marbres ou les grès transformés en quartzites.

Pour une même roche intrusive, l'auréole de métamorphisme de contact varie suivant le volume de l'intrusion dont dépend la durée du flux de chaleur traversant les roches encaissantes. Les roches adjacentes à des intrusions magmatiques filoniennes, de faible volume, ne montrent que des signes de fusion et de vitrification partielles, dans une zone très limitée au contact du filon, mais il n'y apparaît pas de minéraux nouveaux, car la dissipation rapide de la chaleur ne permet pas aux réactions métamorphiques de se produire.

Lors du métamorphisme de contact, les températures varient de 300 °C (température minimale aux environs de laquelle la vitesse des réactions métamorphiques devient assez grande pour que ces réactions aient lieu efficacement), à des valeurs comprises entre 600 et 900 °C, immédiatement au contact de la masse magmatique. Les valeurs les plus élevées de température sont atteintes par les roches au contact des intrusions basiques, par suite de la température de fusion plus élevée des magmas gabbroïques par rapport aux magmas granitiques, ce qui se traduit par des associations minéralogiques différentes dans les roches métamorphisées au contact de ces deux types de magmas. Mais les auréoles de contact associées aux intrusions granitiques sont plus larges que celles qui sont associées aux intrusions basiques, lesquelles ne dépassent généralement pas quelques dizaines de mètres. Cela s'explique par le fait que le métamorphisme thermique dépend de manière déterminante de l'apport de substances fluides en provenance du magma, qui facilitent les réactions métamorphiques et sont le principal agent de transmission de la chaleur. Comparés aux magmas granitiques, les magmas basiques sont pauvres en matières volatiles;

aussi l'auréole de contact est-elle moins large autour des intrusions basiques, même si la température de ces intrusions est plus élevée.

L'augmentation de température à laquelle sont soumises les roches est plus forte près du contact intrusif et décroît en fonction de la distance à l'intrusion, ce qui se traduit par des variations progressives de la composition minéralogique, de la texture et de la structure des roches, même dans des formations rocheuses originellement homogènes. A des distances progressivement décroissantes par rapport au corps intrusif, apparaissent soudain dans les roches métamorphiques des minéraux et des associations minérales qui persistent dans une zone plus ou moins large. Cet aspect zoné des auréoles du métamorphisme de contact est déterminé par les différents intervalles de stabilité des associations minérales qui se forment à partir d'une même roche pour une élévation progressive de la température. La nature de la paragenèse minérale en un point de l'auréole dépend de la composition chimique de la roche en ce point et de la température maximale qui a régné en ce point durant le métamorphisme.

Suivant la classification des roches métamorphiques en faciès, on distingue pour les roches du métamorphisme de contact 4 faciès métamorphiques. Ce sont, énumérés dans l'ordre des températures de formation croissantes : le faciès des cornéennes à albite et épidote (300-500 °C) ; le faciès des cornéennes à hornblende (500-670 °C) ; le faciès des cornéennes à pyroxène (670-775 °C) ; et le faciès des sanidinites (775-900 °C). Chaque faciès comprend toutes les roches de composition chimique et d'origine différentes, mais formées dans les mêmes conditions de métamorphisme.

Faciès des cornéennes à albite et épidote

Ce faciès est typique des zones extérieures des auréoles de contact. Par suite des faibles températures auxquelles elles sont soumises, les roches ne recristallisent pas complètement et conservent de nombreux minéraux reliques, instables, présents dans la roche avant le métamorphisme. Les minéraux néoformés de métamorphisme sont de petites dimensions. Les minéraux néoformés stables dans ce faciès sont la *muscovite*, l'*andalousite*, l'*épidote*, la *calcite*, l'*actinote*, le *talc*, la *biotite*, la *chlorite*, le *quartz* et l'*albite*. Tous ces minéraux n'apparaissent pas simultanément dans les roches de ce faciès, mais en associations qui dépendent de la composition chimique de la roche considérée.

Les roches sédimentaires argileuses, riches en aluminium, se transforment en cornéennes ou en schistes tachetés, à *muscovite* ou *andalousite, chlorite, épidote*. La fissilité des schistes tachetés n'est pas d'origine tectonique, mais d'origine sédimentaire ou elle est due à un métamorphisme régional de faible intensité, antérieur au métamorphisme thermique. La texture tachetée de ces roches, examinée au microscope, apparaît comme produite par différents processus. Il peut s'agir de petites concentrations de substances organiques noires, primitivement dispersées dans toute la roche et transformées en graphite, ou de minéraux néoformés (muscovite ou chlorite) à partir des minéraux argileux de la roche, ou encore d'andalousite formant des plages globuleuses de quelques millimètres, à bords flous, remplies d'inclusions.

Les roches quartzo-feldspathiques sont composées principalement de minéraux stables dans des conditions de température élevée, comme le quartz et les feldspaths. A la température de formation du faciès des cornéennes à albite et épidote, ces minéraux ne réagissent pas entre eux, mais ils peuvent recristalliser. Les autres minéraux éventuellement présents en petite quantité dans ces roches peuvent réagir entre eux et donner naissance aux mêmes minéraux que ceux qui apparaissent dans les argiles métamorphisées dans ce faciès.

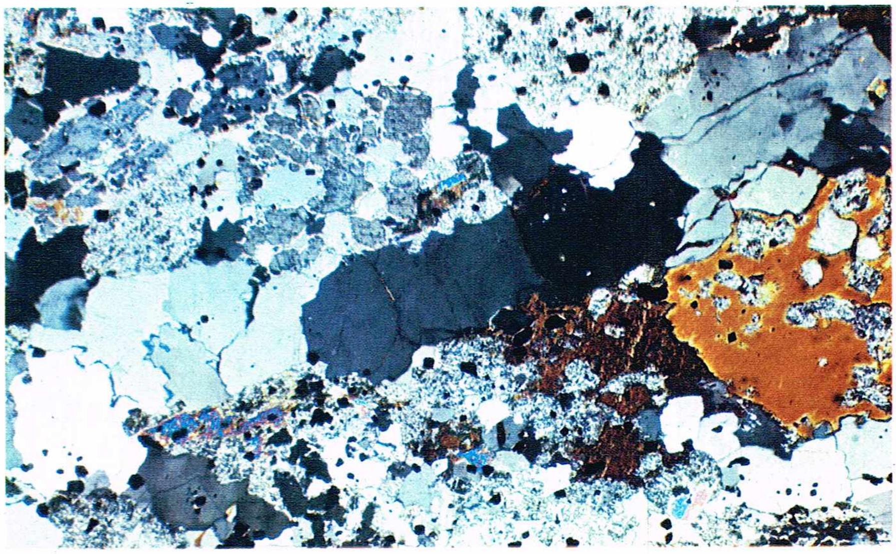

Archives photo B

▲ **Une cornéenne à andalousite :** ***les premiers effets du métamorphisme de contact sur la roche apparaissent dans la croissance de porphyroblastes de biotite, à droite, et d'andalousite, au centre, à gauche, avec une tendance à la structure pœciloblastique, c'est-à-dire à englober d'autres minéraux précédemment existants. Le reste de la roche est composé de quartz et de phyllosilicates (lame mince en nicols croisés).***

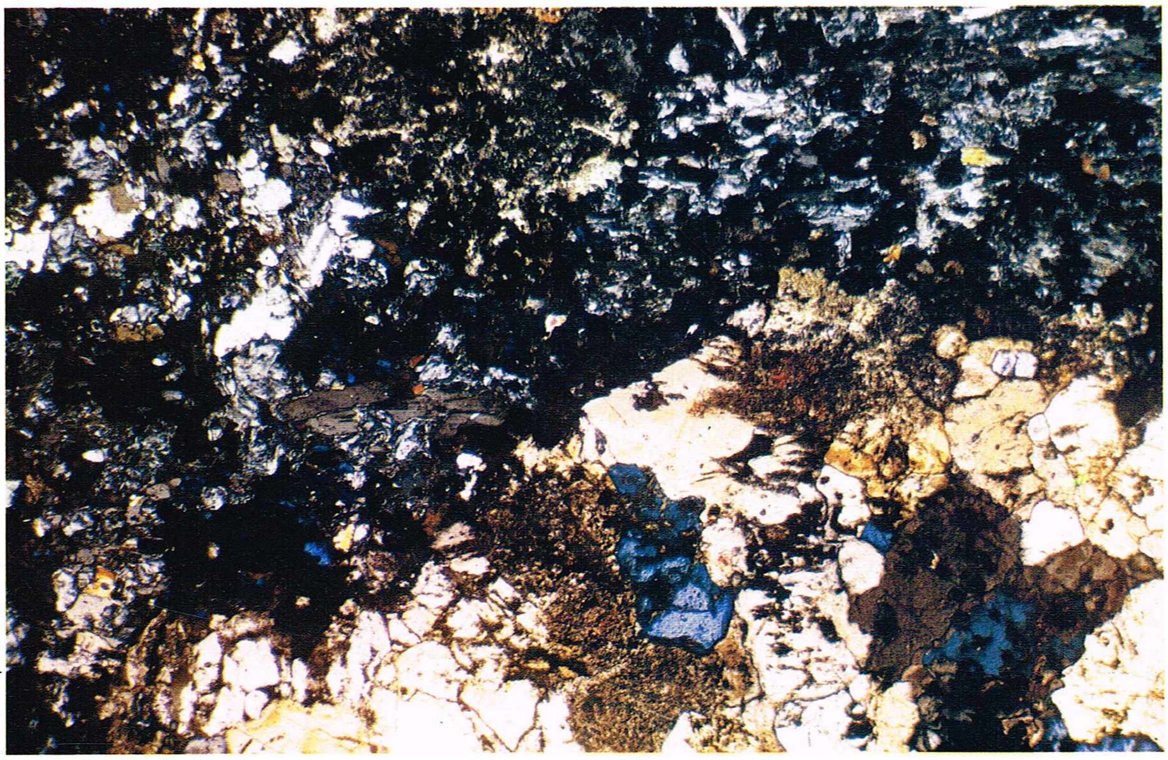

Archives photo B

◀ ***Lame mince de*** **cornéenne** ***en nicols croisés. En bas, à droite, une plage d'épidote à structure granoblastique ; le reste de la lame est composé d'albite et de chlorite.***

Les roches calcaires se transforment en marbres, composés principalement de calcite. Si les calcaires contenaient originellement du matériel argileux ou siliceux, outre la calcite, il peut apparaître dans les marbres certains minéraux silicatés comme la trémolite ou l'épidote.

Les roches volcaniques basiques subissent moins de transformations que les roches sédimentaires; leurs structures primaires sont conservées. Les plagioclases se transforment en *albite* et en *saussurite*. Les minéraux basiques, stables à haute température, se transforment par métamorphisme rétrograde en *chlorite* et en *actinote*. Le verre recristallise. Seuls les minéraux formés à basse température par altération météorique ou hydrothermale, comme les zéolites qui remplissent les cavités amygdaloïdes de nombreux basaltes et qui se sont formés par cristallisation directe des résidus riches en eau du magma, recristallisent et se transforment en minéraux moins hydratés, tels que les *plagioclases* ou l'*épidote*.

▶ Roche du métamorphisme de contact des calcaires : dans un fond de calcite à gros cristaux sont disséminées des plages de chlorite et de serpentine qui se sont substituées aux minéraux basiques de la roche initiale (en particulier à l'olivine) [lame mince en nicols croisés].

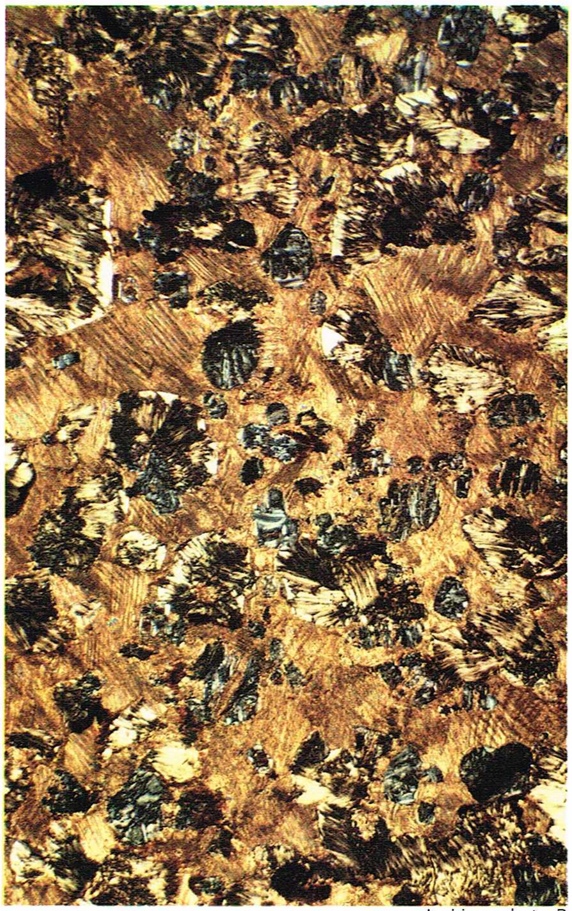

Archives photo B

▼ Un calcaire métamorphique : le principal constituant de la roche est la calcite, aux couleurs d'interférence vives et rosées, accompagnée de cristaux plus petits et bleutés d'épidote (lame mince en nicols croisés).

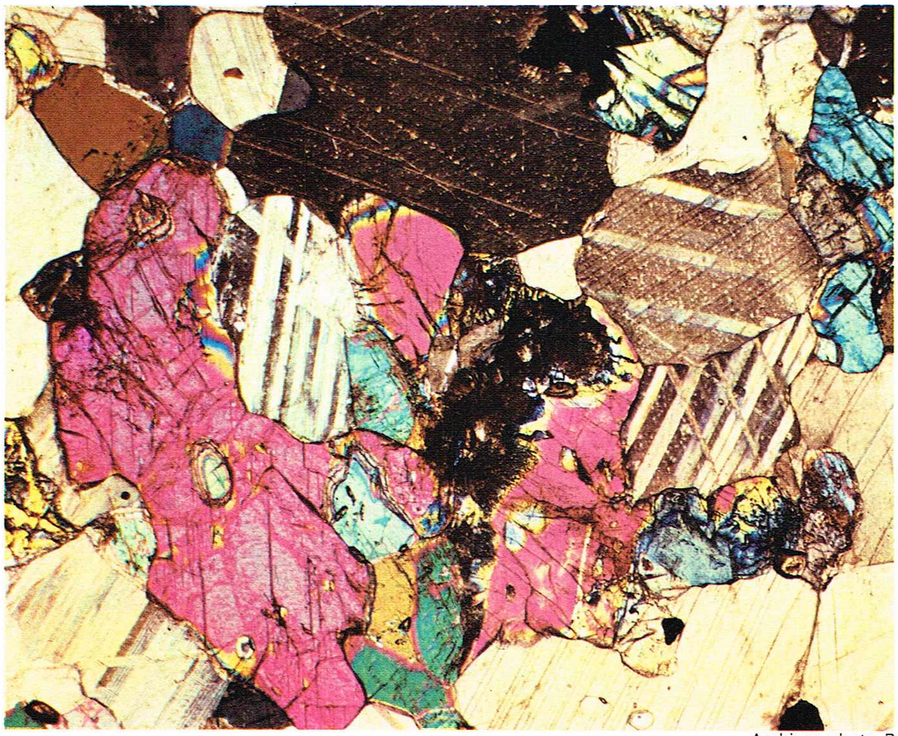

Archives photo B

Faciès des cornéennes à hornblende

La plupart des roches décrites dans les auréoles de métamorphisme de contact recristallisent dans ce faciès. Elles se forment à des températures plus élevées que celles des roches du faciès précédent et se rencontrent plus près du contact avec la roche intrusive.

Le faciès des cornéennes à hornblende est caractérisé par le développement, dans les roches de composition basique, de l'*amphibole hornblende* et de *plagioclases calciques* à la place de l'albite, de l'épidote et de l'actinote qui se rencontrent dans les roches de même composition chimique du faciès précédent. La chlorite est instable dans ce faciès.

Dans les roches calcaires impures, il apparaît, en plus de la *calcite*, du *diopside* et du *grossulaire*. Dans les roches dolomitiques il se forme du *talc* en lamelles aplaties, et pour des pressions fluides différentes, à température égale, il se forme de la *trémolite*.

Les roches argileuses se transforment en cornéennes à *andalousite* ou à *cordiérite*. La chlorite et la muscovite tendent à disparaître et prennent part à des réactions métamorphiques produisant, suivant la composition chimique de la roche, de la *biotite*, de l'*andalousite* ou de la *cordiérite*. Les cristaux d'andalousite, de forme idioblastique, peuvent contenir des inclusions disposées au centre et le long des directions de croissance moins rapide des cristaux prismatiques (variété chiastolite). La cordiérite a plus rarement une forme idioblastique. Si la roche originelle contenait en abondance des minéraux comportant du fer et du magnésium (chlorite, oxydes de fer), la cordiérite tend à prévaloir sur l'andalousite; il peut se former également d'autres silicates ferrifères, parmi lesquels la hornblende. Si la roche originelle contenait de grandes quantités de fer et d'aluminium et de petites quantités de magnésium et de calcium, il peut se former de la staurotide (dans les mêmes conditions de température).

Faciès des cornéennes à pyroxène

Les roches appartenant à ce faciès se rencontrent dans les zones les plus internes des auréoles de contact et se forment à des températures très élevées. Elles sont complètement recristallisées. La hornblende et la muscovite sont instables à ces températures. Dans les roches argileuses, la muscovite se transforme en feldspath potassique associé à de la *cordiérite* ou à l'*andalousite*. Cette dernière se transforme souvent en *sillimanite*, de composition identique (Al_2SiO_5) mais à réseau cristallin différent. La biotite, elle aussi, devient instable et entre en réaction avec d'autres minéraux pour produire d'une part du *feldspath potassique*, d'autre part des silicates ferrifères comme l'*hypersthène*, pyroxène orthorhombique remplaçant la hornblende qui se formait dans le faciès précédent.

Dans les roches calcaires impures, la calcite réagit avec la silice pour former un silicate de calcium ($CaSiO_3$), de forme prismatique semblable à celle d'un pyroxène, la *wollastonite*. Si la quantité de silice est suffisante pour réagir avec toute la calcite, il se forme une roche composée essentiellement de wollastonite. Si la quantité de silice est limitée et que la roche contienne du magnésium (calcaire dolomitique), il se forme une olivine magnésienne, la *forstérite*. Par la suite, l'olivine peut se transformer par hydratation en *serpentine*. Il se forme ainsi une roche constituée de serpentine et de calcite, souvent avec une texture pseudobréchique.

Les roches ignées basiques, dont les minéraux sont stables à ces températures élevées, subissent des recristallisations. Les principaux minéraux des roches basiques dans ce faciès sont un *pyroxène augitique* accompagné de *pyroxène orthorhombique* et de *plagioclase calcique*. Leur structure est granoblastique mais il peut persister des reliques des structures antérieures (structures blastoporphyrique et blastophitique).

Faciès des sanidinites

Les roches appartenant à ce faciès se rencontrent, très rarement, au contact avec des roches intrusives basiques de très haute température ou dans les xénolites contenus dans les laves. La température inférieure de formation de ces roches est d'environ 750 °C et la limite supérieure, fonction de la pression, est déterminée par la fusion des roches.

Les roches argileuses métamorphisées dans ce faciès subissent souvent des phénomènes métasomatiques au cours desquels les roches s'enrichissent en aluminium, par suite de l'expulsion d'autres substances (silice, etc.), et peuvent fondre partiellement puis se reconsolider en donnant une masse en grande partie vitreuse en raison d'un refroidissement rapide (épontes des filons). A côté de la *sillimanite* et de la *cordiérite*, stables à très hautes températures, il se forme d'autres minéraux riches en alumine, comme la *mullite*, le *corindon* et les *spinelles alumineux*. L'introduction métasomatique de sodium favorise la formation de la *sanidine*, feldspath sodicopotassique, donnant naissance à des sanidinites, roches qui ont donné leur nom à ce faciès métamorphique. Dans les roches calcaires, il se forme des silicates de calcium et magnésium, comme la *monticellite*, la *mélilite*, etc.

Les roches du métamorphisme régional

Les roches du métamorphisme régional constituent en grande partie les boucliers continentaux anciens et les parties internes des chaînes de montagnes post-précambriennes. Durant ce métamorphisme un rôle important est joué non seulement par la température, mais aussi par les différents types de pressions, lithostatique, fluide et orientée.

Les roches du métamorphisme régional sont caractérisées par leur texture schisteuse, anisotrope, due à l'influence des pressions orientées. En raison de leur origine, de leur composition chimique et de leurs conditions de formation très variées, il existe une très grande variété de ces roches, ce qui rend peu aisée leur classification. La classification actuelle est basée sur les faciès métamorphiques d'Eskola ; elle groupe les roches, quelles que soient leur origine et leur composition chimique, en différents faciès caractérisés par certaines associations minérales reconnaissables au microscope et formées dans des conditions particulières de température et de pressions.

A partir des observations de terrain et des expériences de laboratoire sur les champs de stabilité des minéraux caractéristiques des différents faciès, on a pu déterminer avec plus ou moins de précision les conditions thermodynamiques correspondant à la formation de chaque faciès. Les principaux faciès du métamorphisme régional sont au nombre de 7. Le faciès à zéolites et le faciès à prehnite et pumpellyite sont des faciès de basses températures et basses pressions, constituant un domaine de passage entre la diagenèse et le métamorphisme proprement dit. Le faciès des schistes verts est caractérisé par des températures de formation légèrement plus fortes. Le faciès des schistes à glaucophane correspond à des conditions de formation particulières où les températures sont basses mais les pressions très fortes. Le faciès des amphibolites se forme dans des conditions de températures et de pressions assez fortes. Enfin le faciès des granulites et celui des éclogites se forment dans des conditions de fortes températures et pressions.

Faciès à zéolites

Les roches du faciès à zéolites sont le produit de réactions métamorphiques ayant lieu à des températures d'environ 300 °C et à des pressions voisines de 3 000 bars. Ce faciès représente une transition entre le domaine de la diagenèse des sédiments et le métamorphisme. Les sédiments sursaturés en eau qui se déposent au fond des géosynclinaux commencent à subir des changements minéralogiques, par suite de la compactation due à l'enfouissement (reconstruction des argiles, recristallisation du quartz, etc.) ; cependant, les différents minéraux qui les composent, même s'ils ne sont pas en équilibre, ne réagissent généralement pas entre eux car les vitesses de réaction sont très réduites à des températures inférieures à 300 °C. Seules certaines roches commencent à recristalliser durant la diagenèse, en particulier les roches pyroclastiques ainsi que les grès tufacés riches en minéraux basiques et en fragments de verre qui

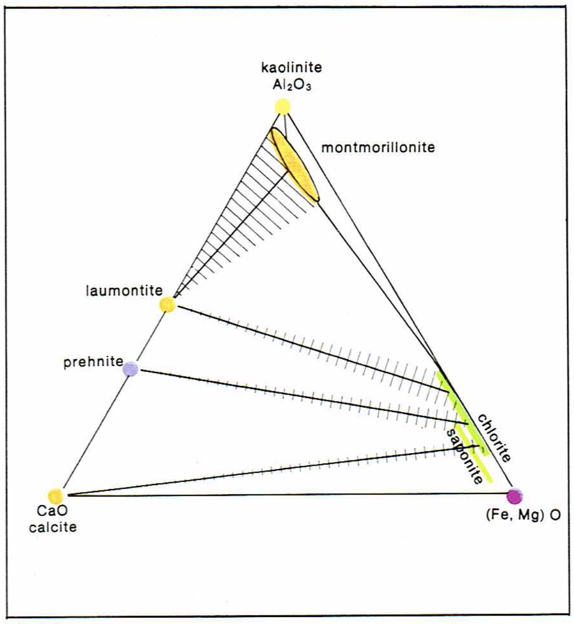

I.G.D.A.

◀ *Diagramme ACF pour les roches métamorphiques du faciès à zéolites (d'après Winkler).*

réagissent avec l'eau de mer interstitielle pour donner différents minéraux parmi lesquels prédominent les *zéolites* (analcime, heulandite, etc.), minéraux très riches en eau. Même les sédiments océaniques actuels en contiennent, en petite quantité.

Le tout début du domaine métamorphique est caractérisé par l'apparition de la *laumontite*, zéolite calcique pauvre en eau, associée au quartz. L'analcime disparaît en se combinant avec le quartz pour donner de l'*albite*.

Dans les roches argileuses, la limite entre la diagenèse et le métamorphisme est déterminée par le degré de cristallisation d'un minéral argileux, l'*illite*, qui peut s'apprécier quantitativement sur les diagrammes de rayons X.

Faciès à prehnite et pumpellyite

A des températures légèrement supérieures à celles correspondant au faciès à zéolites, les minéraux zéolitiques ne sont plus stables et tendent à se recombiner pour former un minéral hydraté de composition voisine de celle de l'épidote, la *pumpellyite*, qui coexiste généralement avec la *prehnite*, le *quartz*, l'*albite* et parfois l'*épidote*.

▼ *Une cornéenne à pyroxène : le pyroxène est le principal constituant de la roche à structure granoblastique ; on observe entre les cristaux de pyroxène un peu de biotite et de quartz, et des cristaux de plagioclase à macle polysynthétique.*

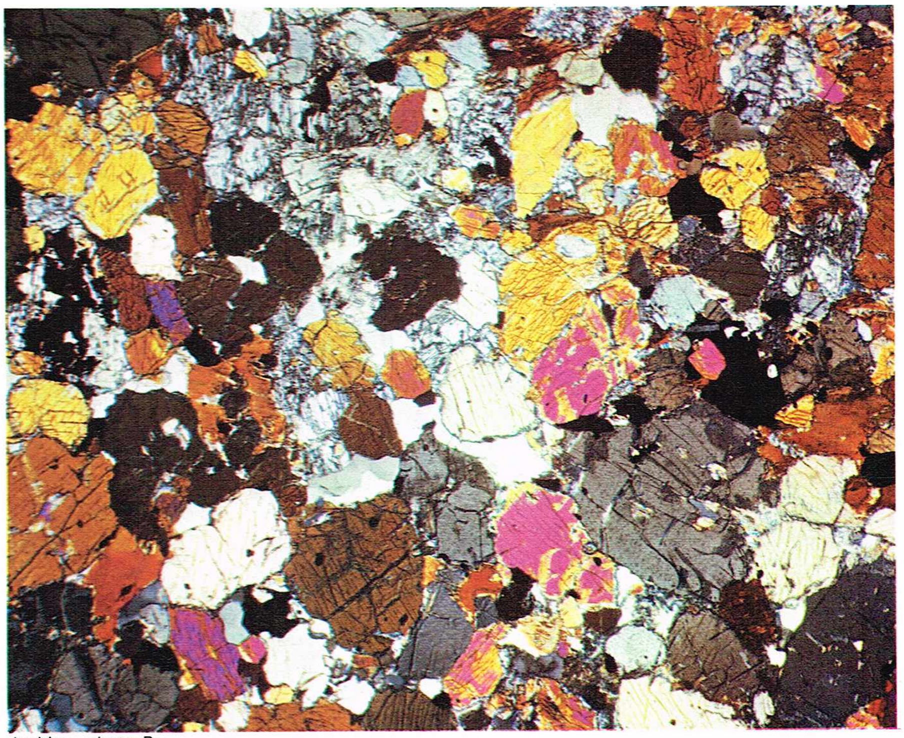

Archives photo B

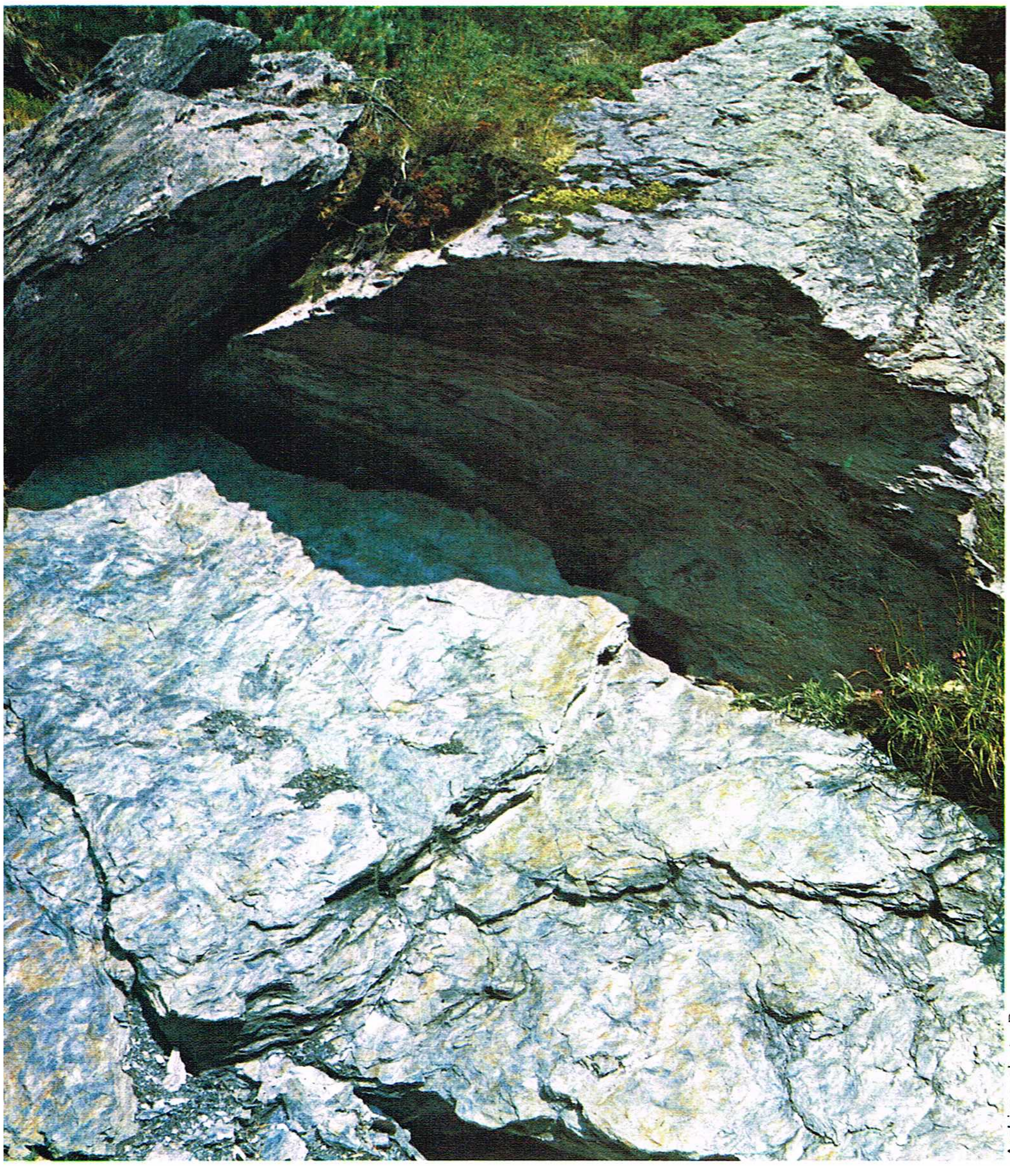

Archives photo B

Les roches de ce faciès et celles du faciès précédent sont difficiles à distinguer macroscopiquement des roches non métamorphiques. Les minéraux néoformés, de très petite taille, se voient rarement à l'œil nu. La nature métamorphique de ces roches ne se révèle qu'à l'examen au microscope.

Faciès des schistes verts

A des températures supérieures à 400 °C, les minéraux des roches des faciès à zéolites et à prehnite et pumpellyite ne sont plus stables et se décomposent en prenant part à des réactions métamorphiques, dont les principaux produits sont une *épidote ferrifère* et parfois la *trémolite-actinote* (amphibole calcique non alumineuse), minéraux caractéristiques du faciès des schistes verts.

Ce faciès correspond donc à un degré supérieur aux deux précédents. Les pressions qui règnent lors de la formation des roches varient de 3 000 à 7 000 bars et les températures de 400 à 550 °C environ. Ces températures, relativement basses, déterminent une faible vitesse des réactions chimiques entre les minéraux, et l'on observe fréquemment dans les roches appartenant à ce faciès des associations minérales en déséquilibre, où les minéraux reliques instables ne sont pas complètement détruits; c'est le cas, en particulier, des roches dérivant de la transformation des roches ignées basiques dont les minéraux ferromagnésiens se sont formés à hautes températures. Les roches de ce faciès présentent généralement un grain fin et une schistosité marquée, due à la forte importance des pressions orientées.

Ce faciès est dénommé d'après un groupe de roches, les schistes verts, caractérisés par la présence de minéraux de couleur verte tels que l'épidote, l'actinote, la chlorite, et qui dérivent de roches basiques ou ultrabasiques, ignées et pyroclastiques. Mais, comme tous les faciès, il comprend également des roches de composition chimique quelconque : pélitiques, calcaires, quartzo-feldspathiques, etc. Ce sont les **ardoises**, les **phyllades**, les **séricitoschistes**, les **chloritoschistes**, certains **micaschistes**, certains **marbres** et **grès**.

Les minéraux caractéristiques sont la *chlorite*, l'*épidote*, l'*actinote*, un *plagioclase acide* (albite ou oligoclase renfermant moins de 20 % d'anorthite). La biotite peut apparaître pour les températures les plus élevées. On peut rencontrer aussi, dans les roches de composition basique, du stilpnomélane, phyllosilicate ressemblant à la biotite mais de composition chimique un peu différente. Dans les roches de composition pélitique, à forte teneur en aluminium, il se forme à sa place du *chloritoïde* et un mica blanc de composition variable (muscovite, paragonite, pyrophyllite). Dans les roches à forte teneur en manganèse, on peut rencontrer du grenat spessartine.

▲ *Une paroi rocheuse formée de* **phyllades** *(Lombardie). Ces roches appartiennent au faciès des schistes verts. La séricite donne un aspect brillant aux surfaces de schistosité.*

▼ *A gauche, lame mince de* **chloritoschiste** *en nicols croisés : la chlorite, aux couleurs d'interférence anormales brun sépia, est accompagnée de cristaux d'épidote. A droite, un échantillon de* **calcschiste** *: les niveaux de calcite sont séparés par des niveaux micacés correspondant aux plans de schistosité.*

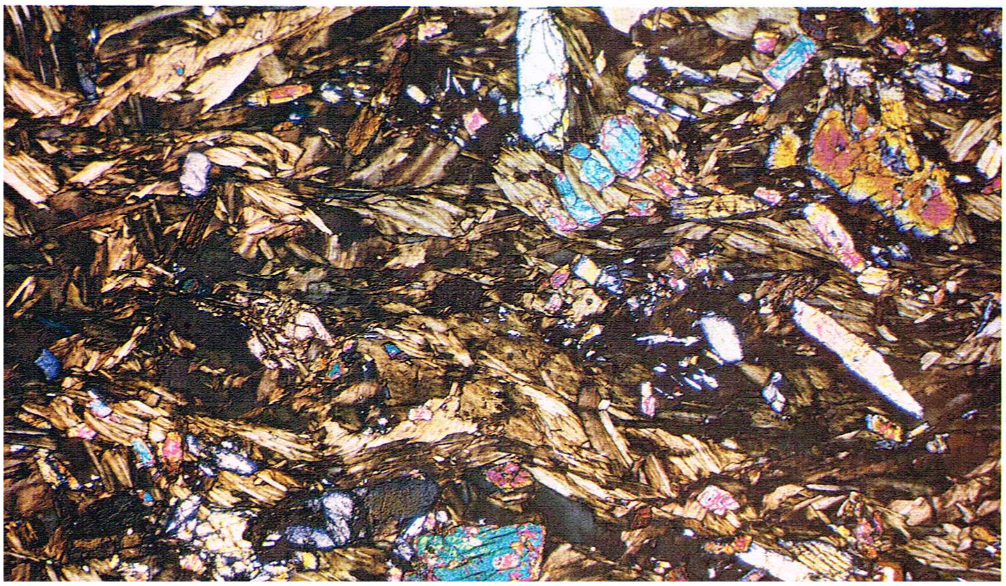

Archives photo B

C. Bevilacqua

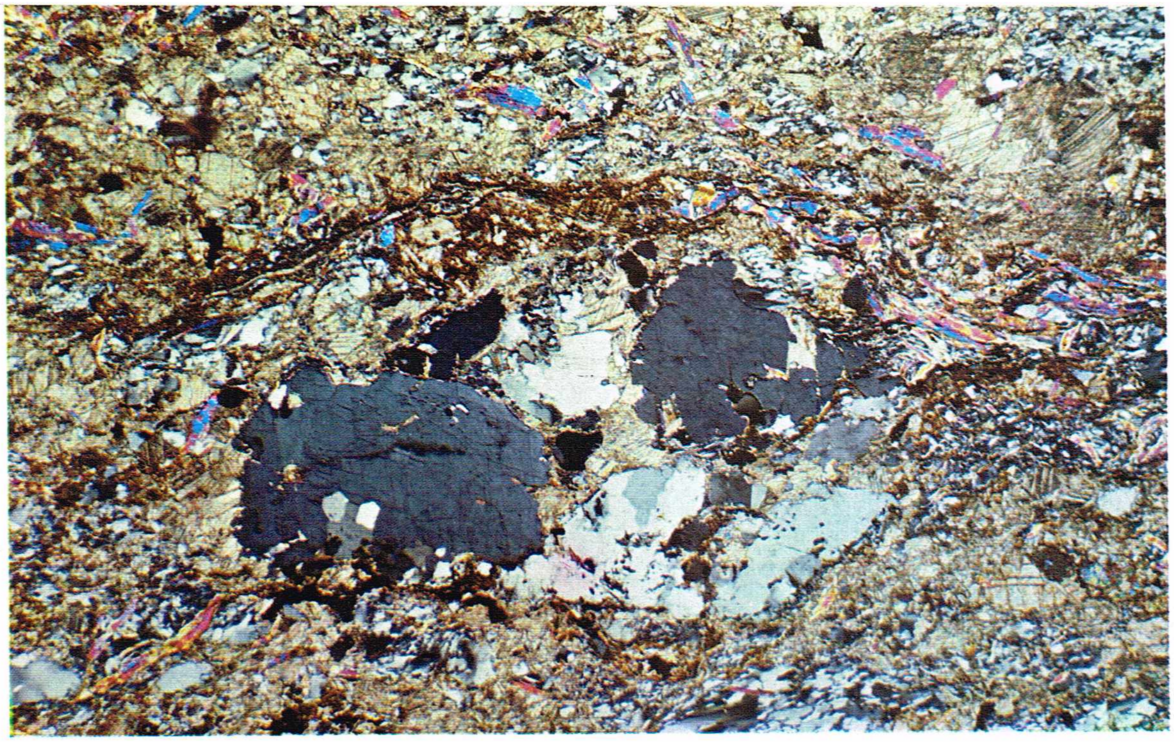

Archives photo B

Faciès des schistes à glaucophane

Les roches de ce faciès dérivent de roches sédimentaires, volcaniques ou pyroclastiques de compositions variées et sont caractérisées par des paragenèses minérales particulières, avec présence d'une amphibole sodique, le *glaucophane*. Celui-ci peut être associé à quelques minéraux présents également dans le faciès schistes verts, comme l'épidote, le stilpnomélane, l'actinote, ou la pumpellyite dans la partie la moins métamorphique de ce faciès. D'autres minéraux, comme la *lawsonite,* dont la composition est celle d'une épidote non ferrifère, et la *jadéite,* pyroxène sodique, ne se rencontrent que dans ce faciès (minéraux critiques) ; ils permettent de définir des subfaciès.

Les températures régnant durant la formation des schistes à glaucophane sont inférieures ou semblables à celles régnant lors de la formation des schistes verts (300 °C-500 °C), comme le prouvent la présence d'albite, l'absence de biotite, stable à des températures supérieures, et la présence de mica blanc, stable à des températures modérées *(phengite, séricite)*. Mais les minéraux critiques de ce faciès, comme la jadéite qui se forme en association avec du quartz par transformation de l'albite, stable à des pressions moins élevées, et l'aragonite, carbonate de calcium orthorhombique de densité supérieure à celle de la calcite, témoignent des pressions élevées de recristallisation des roches de ce faciès. L'aragonite, qui est aussi la forme sous laquelle le carbonate de calcium précipite dans les phénomènes sédimentaires chimiques et biochimiques, se forme à partir de la calcite à des pressions supérieures à 6 000 bars. La transformation de l'albite en jadéite et quartz advient à des pressions encore plus élevées, comme le montrent les expériences de laboratoire (à plus de 10 000 bars pour des températures de 300 °C). De telles pressions lithostatiques correspondraient à une profondeur de près de 35 km, pour laquelle on devrait admettre une énorme accumulation de sédiments. Or, les observations géologiques, dans les Alpes par exemple, montrent que l'accumulation relative des sédiments au cours des phénomènes de métamorphisme ayant abouti à la formation des schistes à glaucophane n'a pas pu dépasser des valeurs de 10-15 km. Les conditions de formation des roches de ce faciès, à basses températures et à fortes pressions, sont très éloignées du gradient géothermique normal, et la genèse de ces roches est difficilement explicable dans l'état actuel de nos connaissances.

On admet généralement que de fortes pressions de la phase fluide interstitielle (vapeur d'eau à l'état supercritique) existaient lors de la formation des roches. Elles sont démontrées, notamment, par la présence fréquente dans ces roches de la lawsonite, minéral hydraté.

Les roches appartenant au faciès des schistes à glaucophane ont une extension réduite à la surface du globe ; elles apparaissent dans des ceintures orogéniques étroites, le plus souvent d'âge tertiaire (Alpes, Japon, Californie, etc.), mais parfois plus ancien (schistes à glaucophane d'âge paléozoïque de l'île de Groix).

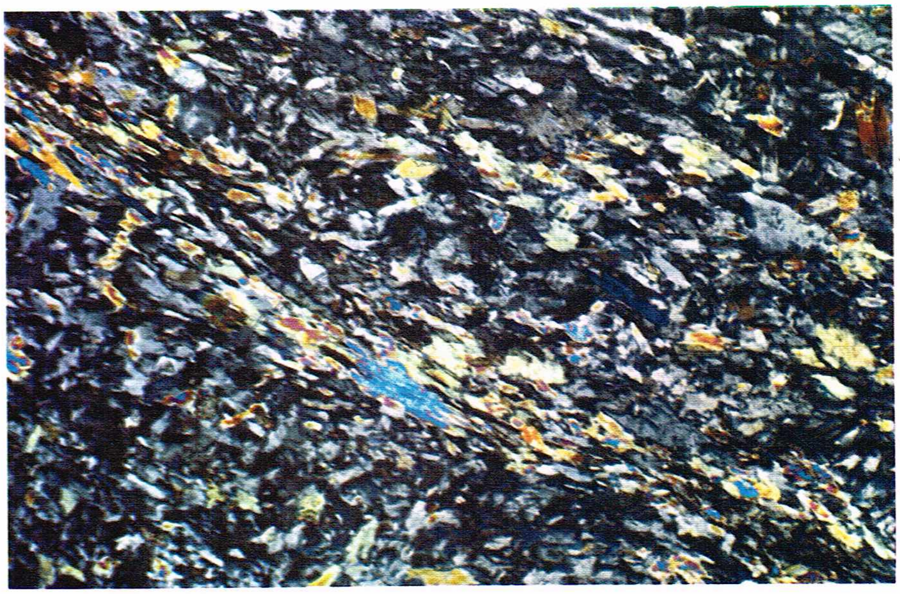

Archives photo B

▲ En haut, lame mince de calcschiste en nicols croisés : dans la masse de calcite à grains hétérogènes (couleurs d'interférence rosées) on observe du quartz et des feldspaths (couleurs d'interférence grises et ces derniers clivés) ainsi que des lamelles de mica muscovite.
Ci-dessus, lame mince de schiste à glaucophane en nicols croisés : le glaucophane, amphibole sodique dont les couleurs d'interférence sont masquées par la couleur bleue caractéristique du minéral, est associé à de la muscovite et à un peu d'épidote.

▼ Lame mince de prasinite à glaucophane en nicols croisés : le glaucophane, en prismes bleus allongés, est accompagné de plagioclase albitique, aux couleurs d'interférence blanches et grises, de mica muscovite, en lamelles aux couleurs vives, et d'épidote.

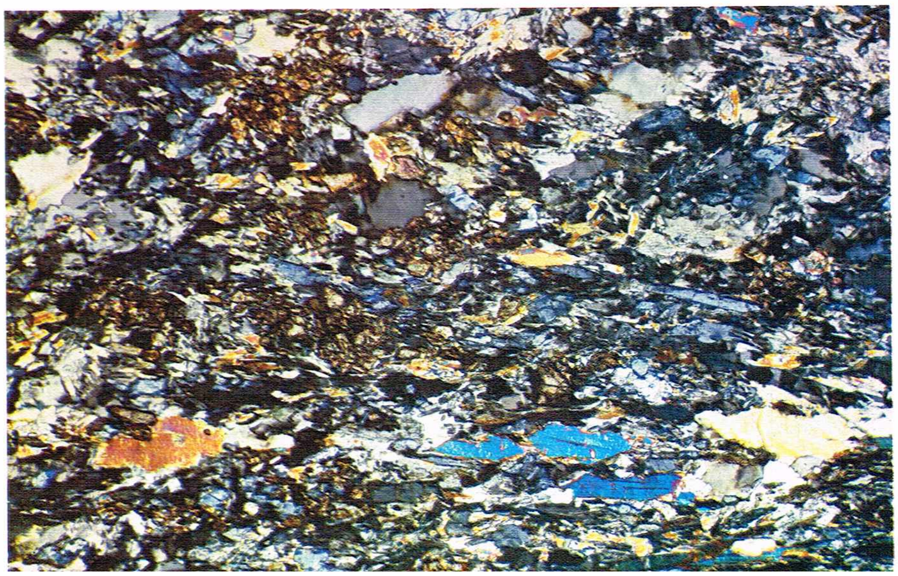

Archives photo B

▶ **Gneiss à sillimanite :** *la roche est formée de biotite, de sillimanite (cristaux aciculaires) et de feldspath; on observe également du grenat (zone éteinte), de la magnétite et de l'ilménite (lame mince en nicols croisés).*

Archives photo B

▶ **Gneiss à cordiérite :** *outre du quartz, du feldspath potassique et du mica biotite, on observe de la cordiérite et de la sillimanite, en petits cristaux aciculaires (lame mince en nicols croisés).*

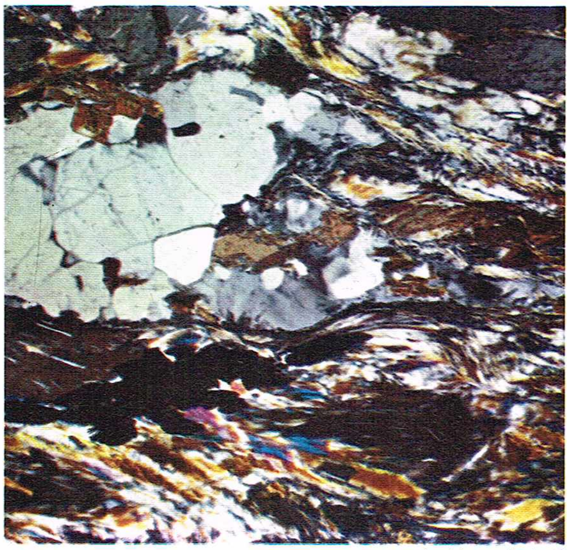

Archives photo B

▼ *A gauche,* **micaschiste à grenat :** *des porphyroblastes de grenat almandin sont inclus dans une masse où prédominent des lamelles de muscovite et où l'on observe, en outre, du quartz et divers autres minéraux (lame mince en nicols presque parallèles). A droite, lame mince d'amphibolite en nicols croisés : le plagioclase, aux couleurs d'interférence blanches et grises, est accompagné de prismes d'amphibole.*

Faciès des amphibolites à almandin

Ce faciès est caractérisé par l'absence de chlorite ainsi que par l'association critique de la *hornblende* (amphibole calcique alumineuse) et d'un *plagioclase calcique* (plus de 20 % d'anorthite) dans les roches basiques; dans les roches pélitiques, il est caractérisé par la transformation du chloritoïde en *staurotide* et par la présence de *cordiérite*. Suivant la composition chimique des roches, d'autres minéraux peuvent être associés aux minéraux critiques du faciès, comme l'épidote, le grenat almandin, la biotite, la muscovite, le disthène, la sillimanite et le diopside. Certains de ces minéraux définissent des subfaciès.

Les roches caractéristiques sont les **amphibolites,** les **gneiss,** les **micaschistes,** certains marbres et roches quartzo-feldspathiques.

Les conditions de formation correspondent à des températures et des pressions plus élevées que celles du faciès schistes verts (500-750 °C et 4 000-7 000 bars).

Les roches ont une grande extension dans les régions de plissements d'âges précambrien et paléozoïque (Massif central, Pyrénées, Bretagne, etc). Elles apparaissent plus rarement dans les zones orogéniques plus récentes.

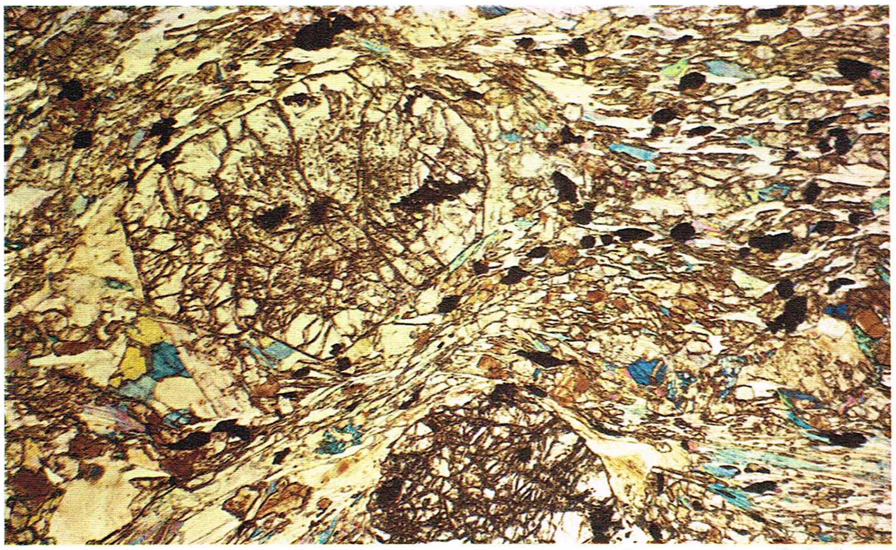

C. Bevilacqua

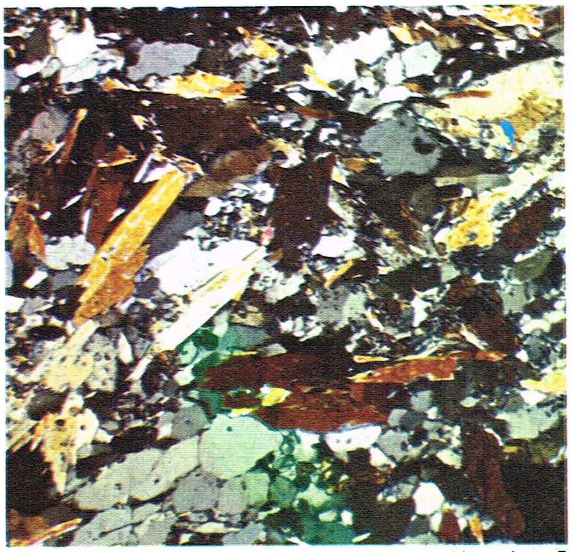

Archives photo B

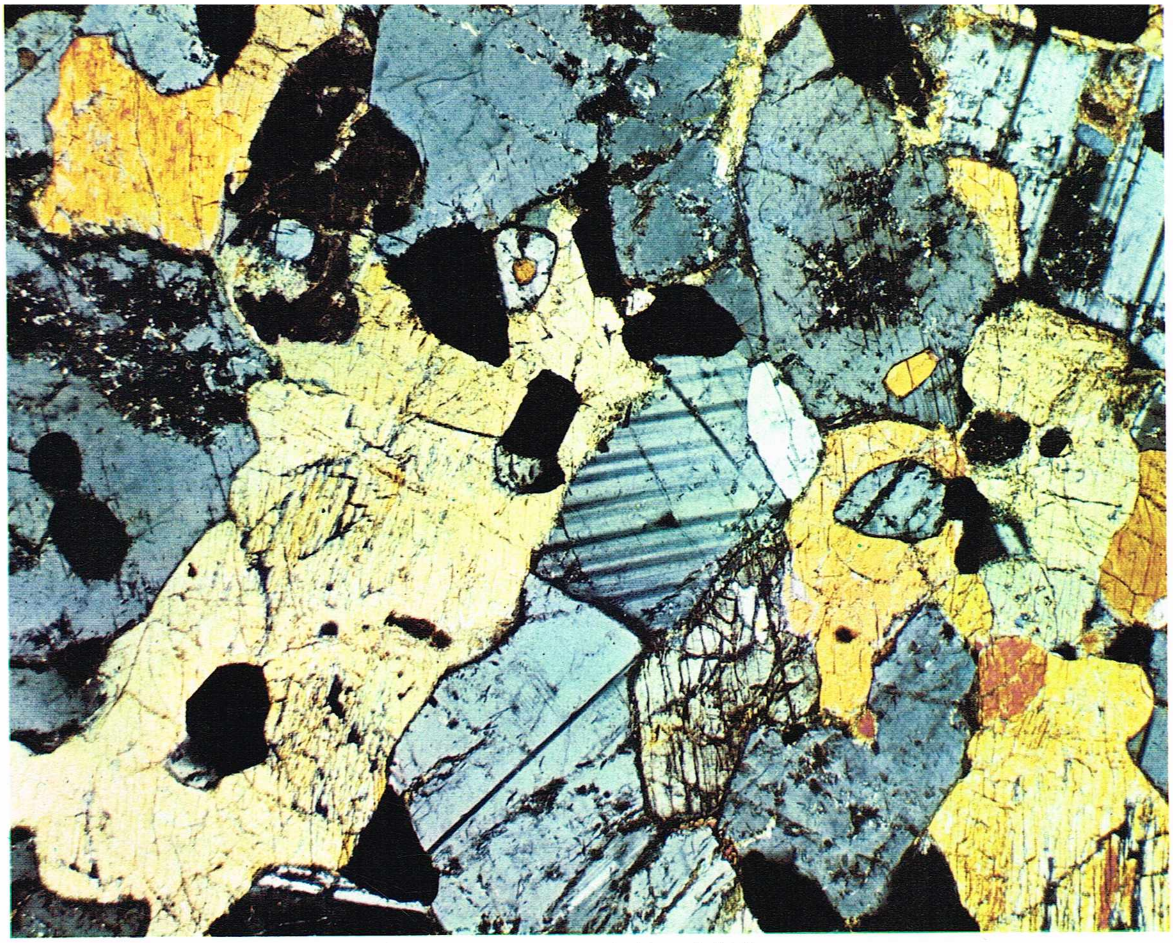

◀ ***Granulite à pyroxène :** orthose et plagioclase, aux couleurs d'interférence grisâtres, sont accompagnés de pyroxène abondant (lame mince en nicols croisés).*

Archives photo B

Faciès des granulites

Les roches de ce faciès se définissent par la disparition des micas, biotite et muscovite, en présence de quartz, par l'association critique d'un orthopyroxène *(hypersthène)* avec un *plagioclase calcique,* et par la présence de grenat de la série *almandin-pyrope.* A ces minéraux peuvent être associés du *feldspath potassique,* du *disthène,* de la *sillimanite,* de la *cordiérite;* ces derniers proviennent en grande partie de la dissociation de la muscovite et de la biotite en présence de quartz, lesquelles deviennent instables dans les conditions de température et de pressions très élevées auxquelles se forment les granulites (750-1 000 °C et 4 000-12 000 bars). Les minéraux des granulites sont des minéraux anhydres.

Si la pression d'eau est forte (supérieure à 4 000 bars), il ne se forme pas de granulites, mais la destruction de la muscovite en présence de quartz donne lieu à une fusion partielle des roches de composition gneissique et à la formation de migmatites. Ces degrés très élevés de métamorphisme régional sont à la limite des phénomènes magmatiques. Les **granulites** sont d'ailleurs souvent associées à un groupe de roches intrusives ignées, les charnockites, de compositions chimique et minéralogique voisines.

Faciès des éclogites

Le faciès des éclogites est défini par l'association d'un grenat magnésien, le *pyrope,* avec un clinopyroxène sodique, l'*omphacite,* accompagnés parfois de petites quantités de *disthène,* de *pyroxène orthorhombique* et de *quartz.* Les éclogites se forment à des températures élevées (700-900 °C) et des pressions très fortes (13 000-15 000 bars), par conséquent dans des régions très profondes de l'écorce terrestre et peut-être même dans les parties supérieures du manteau (profondeurs de 40 à 60 km).

La température élevée de formation de ces roches est prouvée par l'absence de minéraux contenant des oxhydryles ainsi que par la composition particulière du pyroxène et du grenat, qui résulte de solutions solides complexes entre les termes extrêmes de séries isomorphes, possibles seulement à des températures très élevées. Les minéraux des éclogites ont une forte densité, par suite des très fortes pressions régnant lors de la formation de ces roches.

Les éclogites exposées à la surface de la Terre ont souvent subi un métamorphisme rétrograde à plus faible température et se sont transformées en amphibolites ou en schistes à glaucophane contenant des reliques de pyroxène omphacite et de grenat pyrope.

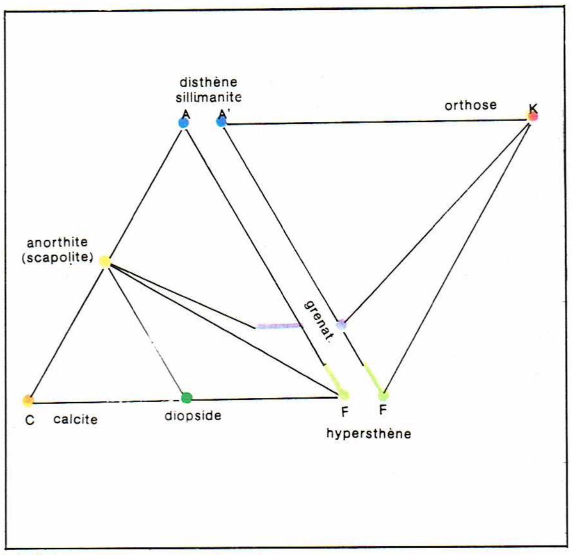

I.G.D.A.

◀ ***Diagrammes relatifs aux faciès métamorphiques des granulites** (subfaciès des granulites à pyroxène) [d'après Winkler].*

▼ ***Lame mince d'éclogite** en nicols croisés : au grenat, en gros cristaux éteints, sont associés des cristaux de pyroxène et d'amphibole sodique (glaucophane), ainsi que des feldspaths et du quartz.*

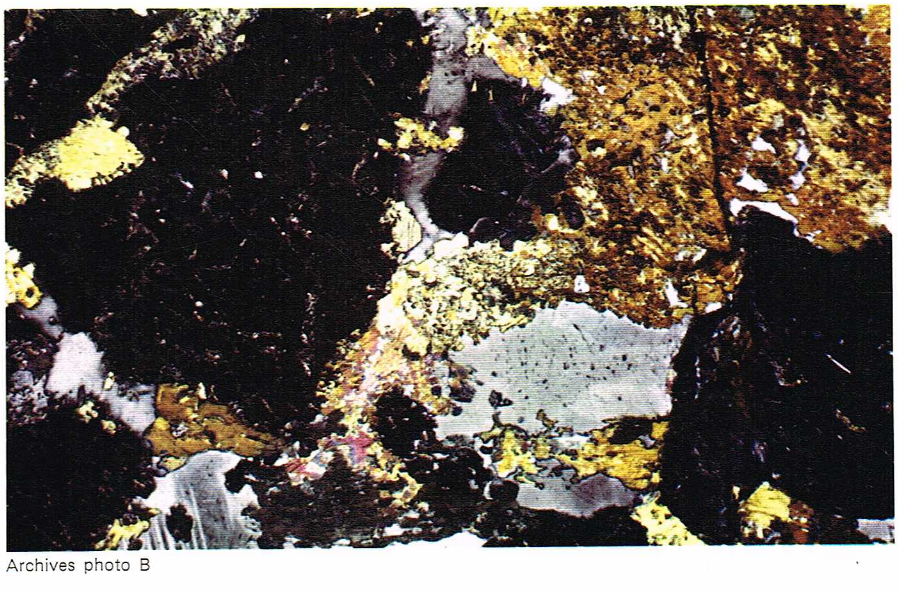

Archives photo B

▶ ***Représentation schématique des faciès métamorphiques en fonction de la pression lithostatique ($P_l = P_{H_2O}$) et de la température; les limites sont graduelles.***

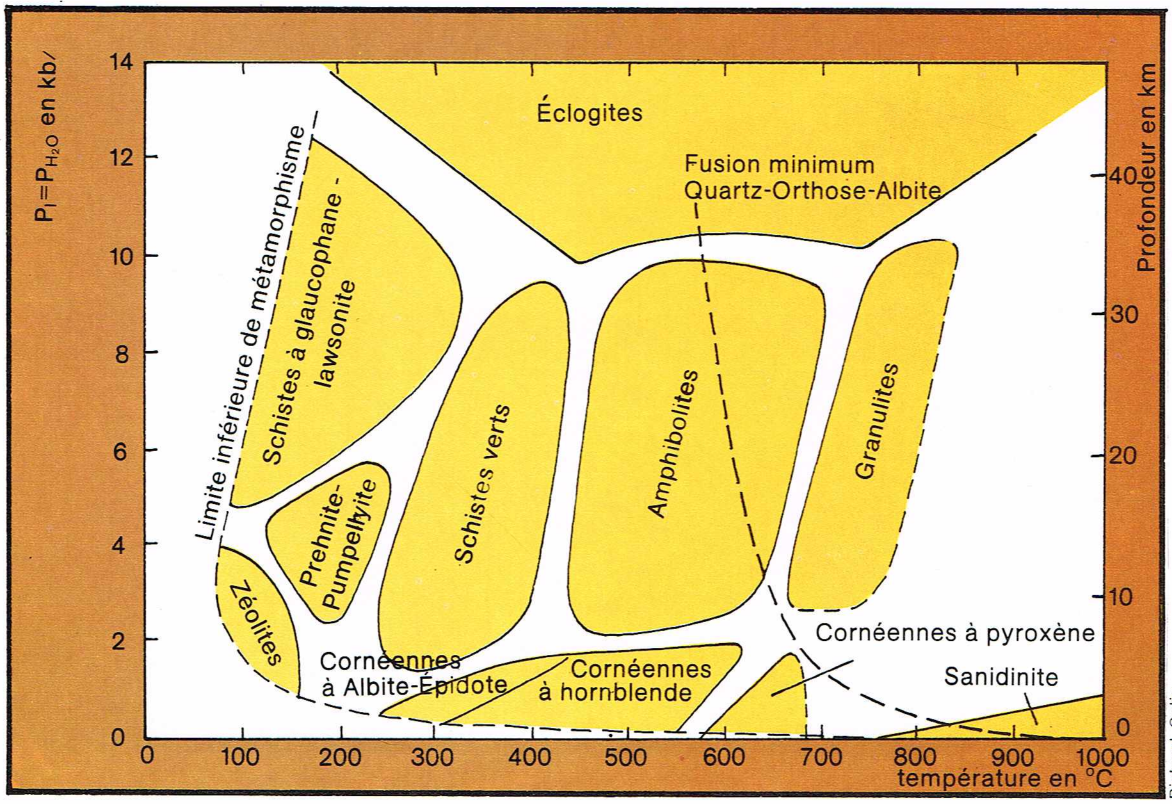

Richard Colin

▶ ***Représentation graphique des courbes d'équilibre univariant pour les*** **minéraux** ***critiques du métamorphisme.***

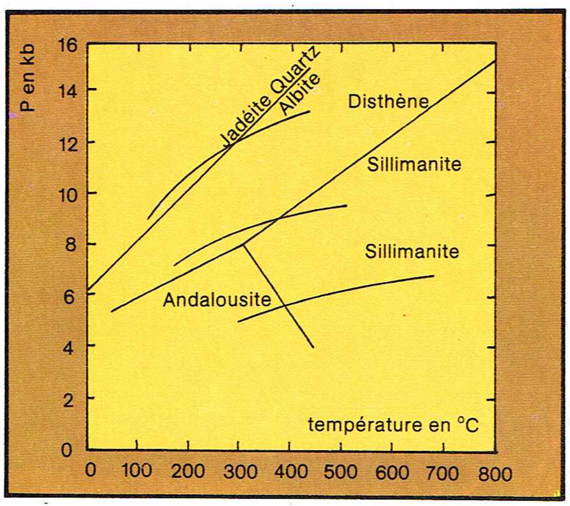

Richard Colin

▼ ***Séries de faciès du métamorphisme régional en fonction de la pression et de la température (d'après Miyashiro).***

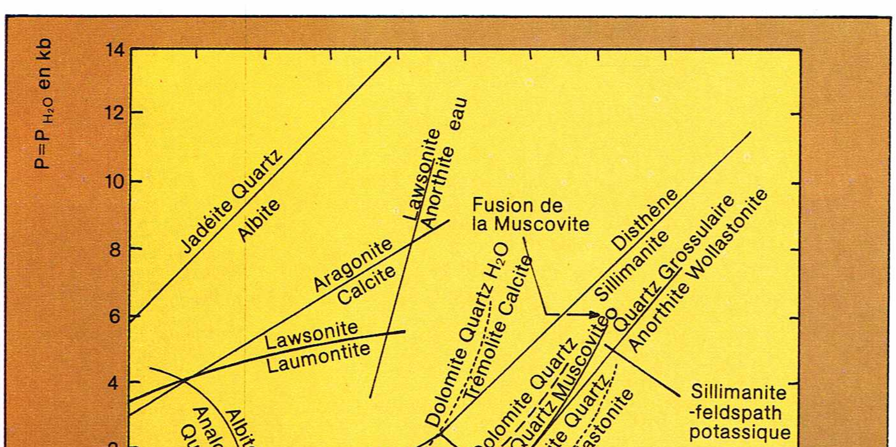

Richard Colin

La notion de séries de faciès

Il est donc possible, à partir de la détermination au microscope des paragenèses minérales critiques des roches d'une région, de déterminer à quels faciès métamorphiques elles appartiennent et d'en déduire les différents intervalles de températures et de pressions dans lesquels elles se sont formées. La classification en faciès permet d'étudier les variations du métamorphisme à l'intérieur d'une région et de comparer différentes régions entre elles.

Les expériences de laboratoire sur les champs de stabilité des minéraux caractéristiques des différents faciès permettent de représenter sur un diagramme, en fonction de la température et de la pression, les *courbes isogrades* correspondant aux réactions chimiques entre ces minéraux et qui déterminent le passage d'un faciès à un autre. En général, dans ces diagrammes, on considère que la pression fluide est égale à la pression lithostatique; cependant, d'autres diagrammes sont construits en fonction des pressions partielles de l'eau et du gaz carbonique pour certaines réactions sensibles à ces deux constituants. On peut également, sur un diagramme température-pression, représenter chaque faciès par une aire comprise entre certaines valeurs de pression et de température. Ces valeurs sont déterminées par les courbes isogrades des réactions aboutissant à la formation des minéraux critiques du faciès considéré. Par exemple, le domaine du faciès des schistes à glaucophane est limité par les courbes isogrades de la transformation de la laumontite en lawsonite, et de la lawsonite en anorthite plus eau ou en zoïsite. Certains isogrades déterminent les domaines de pressions et de températures des subfaciès.

Lors de l'étude d'une région assez étendue, il est généralement possible de déterminer une succession de faciès correspondant à un métamorphisme d'intensité croissante. Cette succession s'appelle *série de faciès,* ou *type barique de métamorphisme,* d'après l'expression utilisée par A. Miyashiro en 1961 et 1972.

Une succession de faciès peut se représenter graphiquement sur un diagramme (en fonction de la température et de la pression) par une courbe qui détermine le *gradient géothermique,* fonction de la profondeur existant dans la région considérée au cours du métamorphisme.

La série de faciès comprenant les faciès à prehnite et pumpellyite des schistes verts, des amphibolites et des granulites correspond au gradient géothermique normal

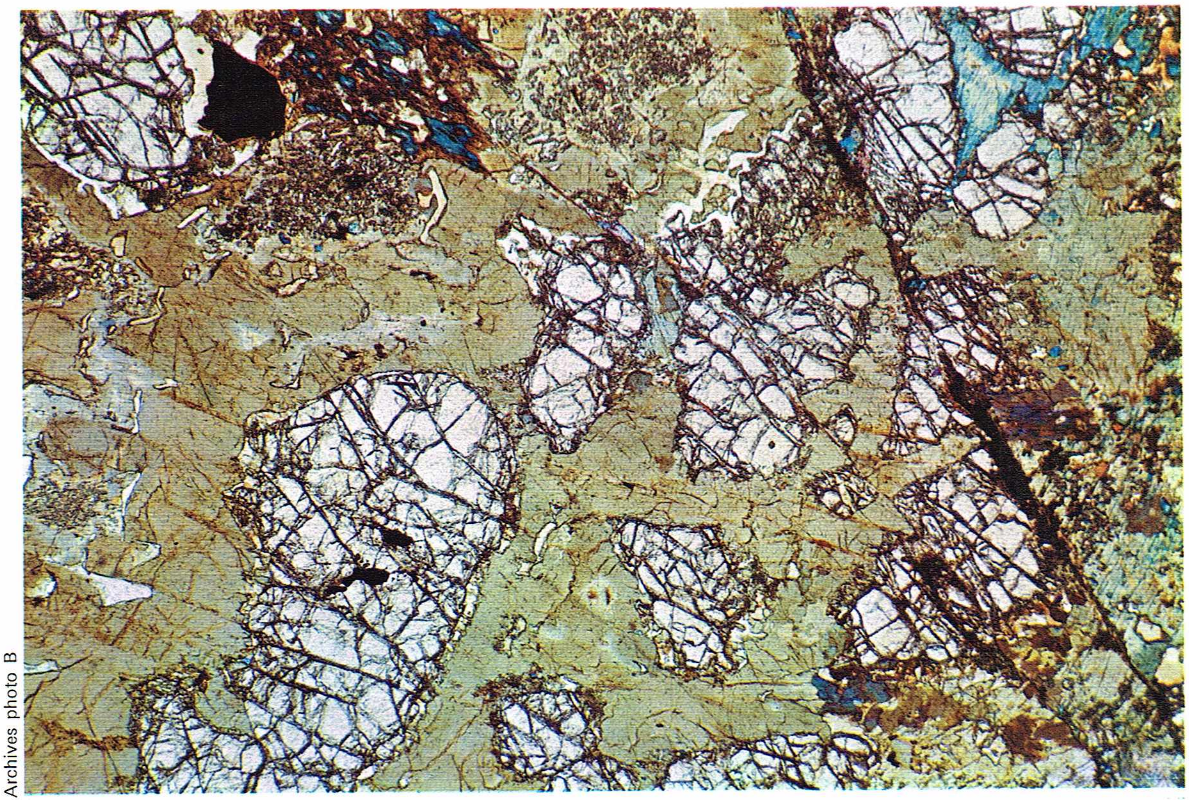

◀ ***Les signes d'un fort* métamorphisme rétrograde *marquent nettement cette roche, qui est une éclogite à l'origine. La chlorite, en grandes plages verdâtres, a remplacé en grande partie les minéraux d'origine : on reconnaît un résidu de pyroxène d'origine et l'on note que le grenat a mieux résisté au métamorphisme rétrograde (lame mince en nicols presque parallèles).***

de la croûte terrestre, c'est-à-dire 3 °C pour une profondeur de 100 m.

La succession des faciès du métamorphisme de contact forme une série de faciès où les pressions sont très basses par rapport aux températures, par suite de l'existence d'intrusions magmatiques à faible profondeur.

Les faciès des schistes à glaucophane et des éclogites requièrent pour se former des pressions très fortes par rapport à la température, conditions qui n'existent pas normalement dans la croûte terrestre. Ces deux faciès, succédant aux faciès de basses températures et basses pressions (à zéolites, à prehnite et pumpellyite), déterminent une série de faciès ou un type de métamorphisme de hautes pressions. Les conditions très particulières de formation des faciès de hautes pressions sont peu claires, et l'explication de leur genèse varie suivant les auteurs. Une grande partie des géologues des pays occidentaux l'explique dans le cadre de la *théorie de la tectonique des plaques*.

Outre ces trois principales séries de faciès, il en existe d'autres, intermédiaires, par exemple dans le cas d'un métamorphisme régional de faibles pressions à andalousite. En fait, il peut exister une grande variété de séries de faciès, correspondant aux différents gradients géothermiques au sein de l'écorce terrestre au cours du métamorphisme.

Dans la pratique, cette notion de série de faciès est très utile, puisqu'elle permet de déterminer le gradient de températures et de pressions existant dans une région au cours du métamorphisme et de comparer différentes régions entre elles.

Les roches du polymétamorphisme

Les roches métamorphiques ne se forment généralement pas lors d'une phase unique de métamorphisme, mais lors de phases distinctes dans le temps et différant par leurs intensités ainsi que leurs caractéristiques. Les phénomènes du métamorphisme régional ont lieu dans des régions profondes de la croûte terrestre (quelques kilomètres à quelques dizaines de kilomètres), au cours de l'orogenèse et de la formation de chaînes de montagnes. Par l'expression de cycle métamorphique, on peut désigner l'ensemble des phénomènes métamorphiques ayant lieu au cours d'un même cycle orogénique, comme le cycle hercynien, le cycle alpin, etc.

De même qu'un cycle orogénique est composé de la succession de plusieurs phases orogéniques, un cycle métamorphique est généralement composé de la succession de plusieurs phases métamorphiques, affectant un domaine plus ou moins étendu de la zone orogénique.

On désigne par l'expression *métamorphisme polyphasé* ces phénomènes métamorphiques se succédant au cours d'un même cycle orogénique ; le terme de *polymétamorphisme* est réservé aux phénomènes métamorphiques affectant des roches déjà métamorphisées dans un cycle antérieur. Par exemple, les roches mésozoïques des Alpes ont été affectées par différentes phases de métamorphisme lors de l'orogenèse alpine d'âge tertiaire : elles présentent un métamorphisme polyphasé. Par contre, les roches anciennes, qui constituent en grande partie les massifs granitogneissiques formant le socle des Alpes (Mont-Blanc, Pelvoux, Mercantour, etc.) et qui avaient déjà été métamorphisées avant le cycle alpin, ont été également affectées par le métamorphisme alpin : elles sont polymétamorphiques. Cependant, les effets du polymétamorphisme et du métamorphisme polyphasé sont identiques, et l'on ne peut les distinguer que par une étude géologique à grande échelle.

Le métamorphisme polyphasé peut être soit *progressif* quand les conditions de pressions et de températures sont plus élevées lors d'une seconde phase de métamorphisme, soit *régressif,* ou *rétrograde,* si l'intensité du métamorphisme est moins forte dans une seconde phase de métamorphisme que dans la phase précédente.

Durant le métamorphisme, les roches subissent des changements internes qui tendent à un état d'équilibre aussi bien structural que chimique et minéralogique. Normalement, quand le métamorphisme est complètement réalisé, une nouvelle paragenèse et une nouvelle structure se substituent aux minéraux et à la structure de la roche initiale. Mais il arrive souvent que certains minéraux et structures de la roche initiale ne soient pas complètement détruits lors du métamorphisme et persistent sous forme de *reliques*. Ces minéraux ou structures-reliques peuvent être les minéraux initiaux d'une roche sédimentaire ou ignée, ou encore des minéraux produits au cours d'une phase antérieure de métamorphisme. Leur étude permet souvent de distinguer, avec plus ou moins de certitude, les minéraux ou les structures produits successivement dans une roche au cours de différentes phases de métamorphisme. Cela a une très grande importance pour la reconstitution des phénomènes orogéniques et métamorphiques, au cours desquels la pression orientée varie avec le temps en

direction et en intensité, et où les roches se retrouvent au cours de l'orogenèse à des profondeurs variables de la croûte terrestre, et donc à des températures et des pressions lithostatiques différentes.

La succession dans le temps de différentes phases de métamorphisme régional, ou de phases de métamorphisme régional alternant avec des phases de métamorphisme thermique ou de dislocation, est étudiée quantitativement par l'analyse structurale; mais l'étude des paragenèses minérales permet aussi de clarifier la succession et la nature des phases métamorphiques.

Il est possible, par exemple, d'étudier les effets du métamorphisme thermique superposé au métamorphisme régional, phénomène observé lorsqu'une intrusion magmatique se produit dans des roches soumises auparavant à un métamorphisme régional. La principale conséquence consiste en la disparition progressive de la texture schisteuse, qui est remplacée par la structure granoblastique. La composition minéralogique de la roche ne change pas radicalement si la température maximale produite par l'intrusion magmatique correspond à la température maximale atteinte au cours du métamorphisme régional; mais certains minéraux peuvent recristalliser sous des formes différentes de celles produites par le métamorphisme régional. Ainsi, la sillimanite de certains gneiss, de forme aciculaire ou fibreuse, recristallise partiellement pour former des prismes idioblastiques.

Au contraire, si un métamorphisme régional affecte des roches déjà métamorphisées thermiquement, une texture schisteuse apparaît dans celles-ci et il se forme des minéraux caractéristiques du métamorphisme régional, stables sous forte pression. Si les températures atteintes au cours du métamorphisme régional sont moins élevées que celles atteintes au cours d'un épisode antérieur de métamorphisme thermique, les minéraux du premier épisode de métamorphisme peuvent être partiellement détruits.

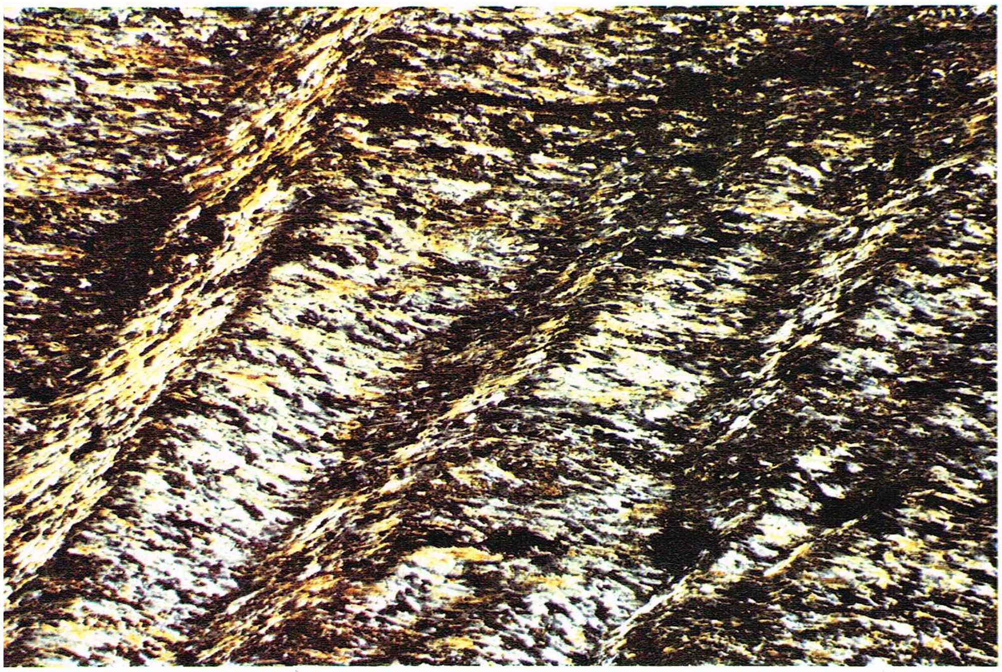

Archives photo B

▲ ***Lame mince de* schiste à chlorite *en nicols croisés : la roche est formée de lamelles de* chlorite *et de* séricite *et de petits cristaux d'*épidote*; au système principal des plans de schistosité (horizontaux) se superpose un deuxième système formé par une réorientation des lamelles de phyllosilicates suivant de nouveaux plans, lors d'une phase de déformation ultérieure.***

Dans le cas d'un métamorphisme polyphasé progressif, c'est-à-dire de la succession de plusieurs phases de métamorphisme régional d'intensité croissante, il est généralement difficile de reconnaître les minéraux ayant cristallisé dans une première phase de moindre intensité, car les paragenèses minérales reflètent la plus forte intensité de métamorphisme atteinte au cours d'un cycle métamorphique. Parfois, cependant, certains minéraux de la première paragenèse (reliques) sont conservés sous forme d'inclusions dans les minéraux porphyroblastiques de la paragenèse postérieure.

Le métamorphisme rétrograde consiste en la transformation des minéraux cristallisés lors d'une phase intense de métamorphisme en d'autres minéraux, stables à des températures inférieures. Il se traduit principalement par la *pseudomorphose* des minéraux préexistants par des minéraux néoformés, c'est-à-dire leur remplacement par des minéraux nouveaux respectant leur forme extérieure. Les feldspaths potassiques, par exemple, sont remplacés par un agrégat très fin de lamelles de séricite; une altération analogue s'observe pour l'andalousite, le disthène et la sillimanite. La cordiérite se transforme en pinite, agrégat de chlorite et de séricite, la staurotide également. La biotite et les grenats se chloritisent; les pyroxènes s'ouralitisent, c'est-à-dire se transforment en amphiboles fibreuses; les amphiboles à leur tour se transforment en chlorite. De l'épidote et de la calcite se forment aux dépens des silicates calciques stables à plus haute température.

Généralement, la diminution des températures consécutive à toute phase métamorphique n'entraîne pas de réactions rétrogrades dans les roches et les associations minérales stables à hautes températures sont conservées, ce qui explique que l'on observe des roches, ayant cristallisé à de très hautes températures, non transformées, à la surface terrestre. Cela est dû à l'absence de fluides interstitiels, nécessaires à la formation des minéraux hydratés de basse température, lesquels ont été libérés et entraînés lors des phases antérieures de métamorphisme à haute température, et à la faible vitesse des réactions métamorphiques à basse température.

Le métamorphisme rétrograde peut être dû à une intrusion magmatique tardive, ayant lieu après la phase de métamorphisme principale, et accompagnée de fluides qui pénètrent les roches encaissantes et les réhydratent.

Il peut également se produire le long des fissures ou de plans de fragilité des roches dans lesquels circulent préférentiellement les fluides.

Certaines réactions rétrogrades peuvent cependant avoir lieu peu après que les phénomènes métamorphiques ont atteint leur intensité maximale, quand la température commence à diminuer et que les éléments chimiques ont encore une certaine mobilité. Aussi les effets du métamorphisme rétrograde sont-ils particulièrement évidents pour les roches métamorphiques de degré élevé, c'est-à-dire formées à hautes températures et pressions, comme les éclogites, les granulites, quelques gneiss et amphibolites.

Au cours d'un cycle orogénique se succèdent différentes phases tectoniques et métamorphiques, qui peuvent ne pas être simultanées. Il peut exister trois types de relations entre la cristallisation métamorphique des minéraux et la déformation due aux efforts tectoniques : un minéral peut être antérieur, contemporain ou postérieur à une phase tectonique. Une phase tectonique se traduit à l'échelle d'observation microscopique par différents phénomènes, tels que la rotation des cristaux, la déformation plastique des grains cristallins, la dissolution des parties des cristaux soumises aux pressions les plus fortes et leur recristallisation dans une direction privilégiée (principe de Riecke), l'apparition de macles mécaniques, etc.

Les *minéraux antétectoniques,* ayant cristallisé avant une phase tectonique, sont généralement déformés mécaniquement. Le *quartz,* par exemple, peut acquérir une extinction roulante; les macles des *plagioclases* ou de la *calcite* deviennent courbes. Les cristaux de micas, *biotite* et *muscovite,* peuvent présenter des plis, souvent de type kink-bands, de même que les *pyroxènes.* Les porphyroblastes de *staurotide,* de *disthène,* de *grenat,* etc., présentent des fractures et peuvent acquérir une forme lenticulaire. Il s'agit là, en général, de déformations ayant lieu à basses températures où les minéraux n'ont plus la faculté de recristalliser.

Les *minéraux syntectoniques,* qui cristallisent simultanément à une phase de déformation, sont plus difficiles à mettre en évidence. Un des critères les plus nets de cristallisation syntectonique est la présence de porphyroblastes d'*albite* ou de *grenat* contenant des inclusions en forme de spirale. Ces inclusions en forme de spirale sont dues à une rotation progressive du cristal durant son accroissement et à la torsion consécutive des surfaces d'inclusions originellement planes, par suite des mouvements différentiels de la roche dus aux pressions orientées. L'orientation des cristaux suivant une

direction privilégiée qui détermine une linéation minérale dans les roches est aussi un critère de cristallisation contemporaine d'une phase de déformation.

Les *minéraux post-tectoniques* se présentent généralement sous forme de porphyroblastes non altérés, contenant fréquemment des inclusions de minéraux plus anciens. Ils ne sont pas déformés et ne présentent pas d'orientation préférentielle. Les micas peuvent se disposer suivant des surfaces plissées antérieurement; cependant, contrairement aux micas antétectoniques, ils ne sont pas eux-mêmes déformés. Une telle disposition caractéristique d'une cristallisation post-tectonique, est dite en forme d'« arc polygonal ».

Quand une phase tectonique affecte une roche postérieurement à la phase principale de métamorphisme, les différents minéraux qui la composent ne réagissent pas de la même manière : celle-ci varie suivant leur faculté de recristalliser à basses températures. Certains minéraux comme le *quartz,* l'*albite,* les *micas* et la *chlorite* conservent la faculté de recristalliser même à basse température et présentent donc plus fréquemment des cristaux non déformés. Par sa faculté de recristalliser à de très basses températures en réponse à des déformations tectoniques, le quartz peut présenter une orientation cristallographique préférentielle différente de celle des autres minéraux de la roche, comme il est possible de le révéler par l'analyse structurale.

Les roches de l'ultramétamorphisme

L'ultramétamorphisme est un ensemble de phénomènes métamorphiques ayant lieu à des températures et des pressions très élevées et donne lieu à la formation de **migmatites.** Les migmatites, suivant la définition du géologue finlandais J.-J. Sederholm (1907), sont des roches hybrides, hétérogènes, composées de deux termes pétrographiques différents, intimement mêlés : une roche métamorphique à texture schisteuse plus ou moins prononcée et une roche ignée à structure granulaire, parfois pegmatitique, et à composition le plus souvent granitique. Ce groupe de roches est donc caractérisé par des textures particulières, déterminées par le mode d'association des deux termes lithologiques mais non par leurs compositions chimique et minéralogique, qui peuvent être très variables. Le terme de migmatites a été diversement interprété. Aujourd'hui encore, les opinions sur l'origine des migmatites restent divisées; cette question est étroitement liée au problème de la genèse des magmas granitiques.

Selon les relations entre les deux termes lithologiques de la roche, on distingue différents types de migmatites.

— Un de ces types de migmatites est constitué par une roche métamorphique, à schistosité souvent mal développée comme une amphibolite, recoupée irrégulièrement dans toutes les directions par des veines de granitoïde d'épaisseur variable; les migmatites présentent ainsi un aspect bréchique et sont appelées **agmatites.** Certaines agmatites peuvent comporter des blocs de roche non métamorphique (ou de roche de métamorphisme de contact) de composition différente de celle du granitoïde (par exemple, d'autres roches ignées ou des roches d'origine sédimentaire), mais dans ce cas leur extension est limitée aux bordures des intrusions granitiques de type discordant, advenues dans des niveaux peu profonds de l'écorce terrestre. Les blocs de roches enveloppés dans le réseau constitué par les veines de granitoïde, qui se recoupent, montrent généralement des phénomènes clairs d'assimilation magmatique. Les agmatites peuvent également exister dans des complexes de migmatites à extension régionale, formées dans des zones profondes de l'écorce terrestre, où les roches ont été métamorphisées avant la migmatitisation. Dans ce cas, les agmatites sont relativement subordonnées par rapport aux autres types de migmatites et sont souvent formées de fragments d'amphibolites.

N. Santarelli

◀ ***Massif rocheux formé d'agmatites; ce sont des migmatites présentant un aspect bréchique.***

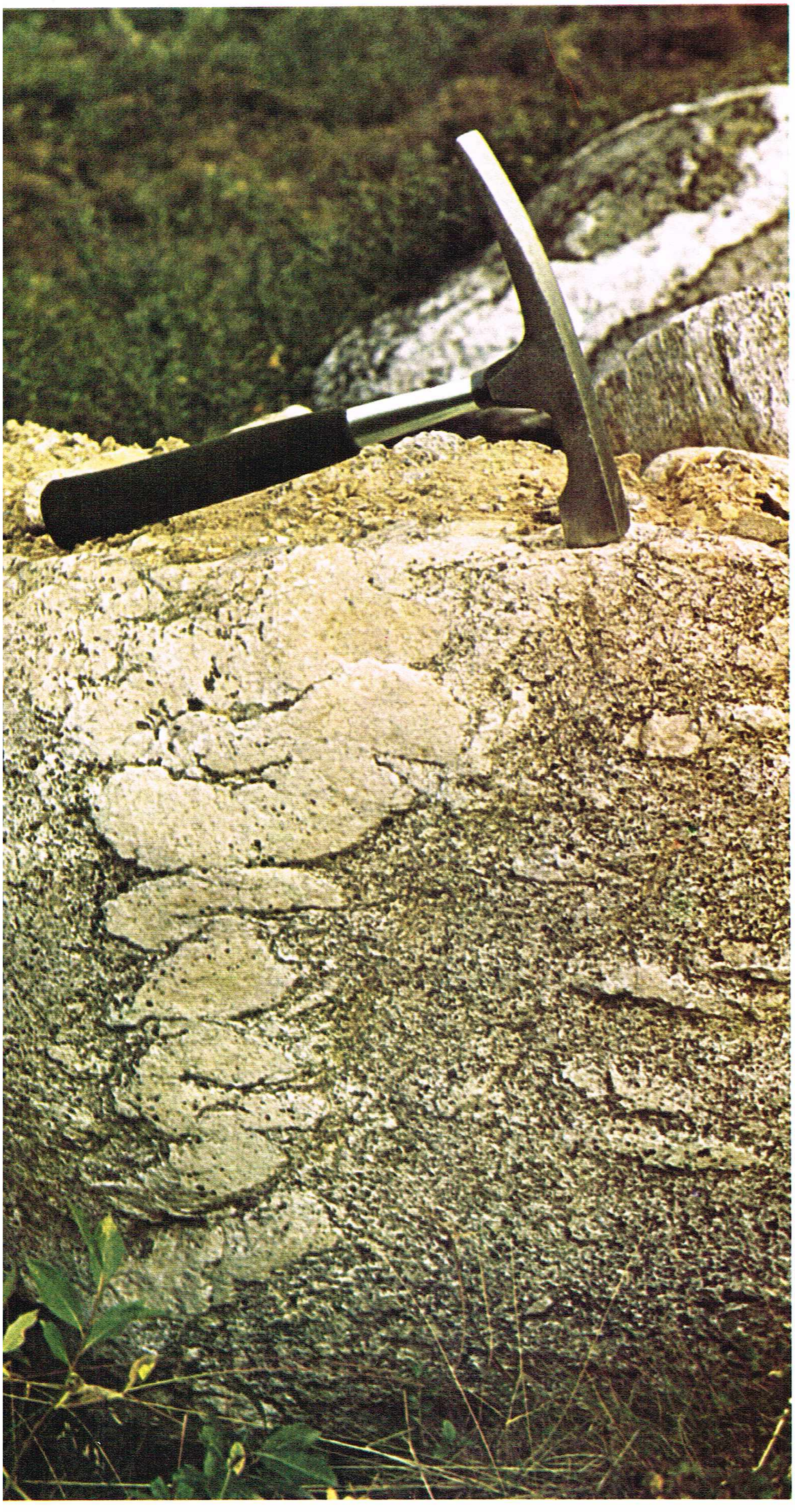

N. Santarelli

— Le groupe le plus important de migmatites, appelées parfois **gneiss rubanés**, ou **« lit-par-lit »**, comprend des roches où le terme métamorphique, de composition le plus souvent analogue à celle des gneiss communs à biotite ou à amphibole, disposé en lits millimétriques à centimétriques composés essentiellement de minéraux basiques (biotite, amphibole), alterne avec des lits quartzo-feldspathiques non schisteux. Les lits basiques comportent généralement du plagioclase calco-sodique, alors que les lits granitoïdes comportent du feldspath potassique. Il est parfois difficile de distinguer les gneiss rubanés migmatitiques des gneiss véritables. Les lits de la roche peuvent être plissotés, ou bien leur régularité peut être interrompue par la présence de porphyroblastes quartzo-feldspathiques qui donnent un aspect œillé à ces migmatites. Ces migmatites à extension régionale sont toujours associées à des roches du métamorphisme régional.

— Un troisième groupe de migmatites est constitué par les **nébulites** : ce sont des roches dans lesquelles les résidus de la roche préexistant à la migmatitisation, c'est-à-dire les niveaux basiques des gneiss rubanés ou les blocs des agmatites, se distinguent mal de la masse granitoïde prédominante et se présentent comme des concentrations de minéraux basiques, à contours vagues, très plissés, parfois encore alignés de telle manière qu'on peut reconnaître la schistosité des roches métamorphiques originelles, ou disposés en taches de forme arrondie s'ils proviennent de l'assimilation de blocs d'agmatites. Par intensification des phénomènes de migmatitisation, il peut se former un granite d'anatexie, à texture non homogène, présentant des traînées de couleur sombre et de grain cristallin souvent plus fin que le reste de la roche, constitué par un matériel granitoïde.

Le terme lithologique d'une migmatite qui préexistait à la formation de cette roche mixte, c'est-à-dire les niveaux schisteux à minéraux basiques des gneiss rubanés et les blocs caractéristiques des agmatites, en voie d'assimilation progressive par le composant granitoïde, prend le nom de *paléosoma*; la partie d'une migmatite à composition granitoïde et à structure granulaire est appelée *néosoma*.

Certaines migmatites sont constituées d'une roche métamorphique intéressée par deux, ou plus de deux, systèmes de filonnets de composition granitoïde, qui se sont formés successivement. L'examen de vastes affleurements de migmatites de ce type révèle qu'elles peuvent contenir des filons granitiques plus importants, lesquels auraient constitué les canaux d'apport du magma, à partir d'intrusions granitiques, affleurant ou non. Cependant il arrive souvent que ces filonnets ou les lits granitoïdes des migmatites ne soient en rapport avec aucun filon, ou bien soient reliés à des veines de granitoïde, à structure souvent pegmatitique, complètement isolées au sein de la roche migmatitique.

L'origine du matériel granitoïde des migmatites pose donc un problème très important.

Les filons et les veines de granitoïde observés fréquemment dans les migmatites n'ont généralement pas un parcours rectiligne, comme les filons intrusifs dans les autres roches, mais tortueux. Les filonnets les plus minces sont souvent finement replissés selon des plis caractéristiques, dits *plis ptygmatiques;* le filon conserve la même épaisseur sur ses flancs et dans les charnières des plis. Les plis ptygmatiques se forment probablement par suite de la plasticité de toute la masse rocheuse lors de la migmatitisation; des textures analogues peuvent être présentes dans d'autres roches métamorphiques, comme certaines granulites et quelques marbres. Dans de nombreuses migmatites, même les alternances régulières de lits granitoïdes et de lits à minéraux basiques sont finement replissées, toujours en raison de la plasticité atteinte par ces roches à plusieurs reprises dans des régions profondes de l'écorce terrestre, où l'augmentation de température dépasse le point de fusion de l'eutectique quartzo-feldspathique.

Du fait des caractéristiques des magmatites, à la fois métamorphiques et magmatiques, il existe trois types d'hypothèses concernant leur origine.

Selon J.-J. Sederholm, qui étudia les vastes affleurements de migmatites de la Finlande méridionale, le matériel granitoïde du néosoma provient en grande partie de l'extérieur de la roche métamorphique, plus précisé-

C. Dani

◀ ***Section polie de roche migmatitique à texture rhéomorphique, incluant une grosse veine granitique.***

ment de zones plus profondes de l'écorce terrestre où existeraient des massifs granitiques de très grande dimension. Le granitoïde se serait mis en place dans les roches métamorphiques soit sous forme d'injection forcée dans ces roches de granite normal, soit sous forme d'un fluide métasomatisant que Sederholm appela *ichor* (du nom qui désignait dans la mythologie grecque le sang des dieux) ; ce fluide aurait imprégné les roches le long des fissures transversales ainsi que, à partir de celles-ci, le long des surfaces de schistosité. La nature de l'ichor serait celle d'une solution diluée de silice, d'alumine et d'alcalins dans de la vapeur d'eau à température très élevée, solution analogue aux fluides magmatiques à partir desquels, à des températures inférieures, cristallisent les pegmatites; en effet, de nombreuses veines granitoïdes des migmatites ont un grain pegmatitique.

Suivant une autre théorie, développée par le géologue suisse C. Wegmann et par des géologues français, les migmatites se formeraient par métasomatisme, c'est-à-dire par apport de silice et d'alcalins et formation de feldspaths ; cet apport aurait lieu par suite de réactions métamorphiques se produisant à l'état solide, de préférence le long des surfaces de schistosité de la roche, où le mouvement des fluides métasomatisants ou la migration ionique sont plus faciles. Cette théorie n'est pas très différente du concept de l'ichor mais ne fait pas appel à la présence obligatoire de magma granitique profond. Selon ces auteurs, la texture œillée de nombreux gneiss rubanés confirmerait leur origine métasomatique. Cette texture, déterminée par la présence dans les niveaux de composition granitoïde de cristaux ou d'agrégats cristallins de feldspath de forme lenticulaire et de dimension supérieure à celle du grain moyen de la roche, serait due à la croissance des porphyroblastes en milieu solide.

En fait, il est parfois difficile d'établir si le composant granitoïde (néosoma) d'une migmatite s'est formé par métasomatisme ou par cristallisation d'un magma. L'hypothèse du métasomatisme se fonde sur les cas où des formations de roches métamorphiques de composition variée, différente de celle du granite (quartzites micacés, amphibolites, etc.), affleurant régionalement, prennent graduellement un aspect migmatitique avec développement toujours plus important du néosoma, jusqu'à perdre parfois leur identité propre et leur nature originelle, se confondant en une masse granitique. Cependant, dans de nombreux cas, les structures des veines et des lits granitoïdes des migmatites ainsi que les rapports complexes entre le paléosoma et le néosoma rendent plus probable l'hypothèse d'une cristallisation à partir d'un magma liquide.

Quelle que soit la nature des substances qui constituent le néosoma (magma liquide, fluides granitiques à forte teneur en vapeur d'eau, ou ions migrant à travers les roches à l'état solide), il reste le problème de leur origine et de leur provenance.

Selon certains auteurs, le néosoma est le produit d'une fusion partielle, ou *anatexie,* des roches métamorphiques elles-mêmes. Pour souligner l'origine endogène de ce matériel granitoïde, P.-J. Holmquist (1921) proposa d'appeler « vénites » ce que Sederholm appelait « artérites ». Les partisans de l'hypothèse de la formation de la plupart des migmatites par des phénomènes d'anatexie admettent que les températures très élevées atteintes par les roches lors de la migmatitisation dans des zones profondes de l'écorce terrestre ont provoqué la fusion des niveaux quartzo-feldspathiques des roches gneissiques, formés par différenciation métamorphique, et ont donné lieu à la formation d'une substance fondue de composition granitoïde (quartz, orthose, albite), même si ces minéraux n'étaient pas présents dans la roche métamorphique initiale. Les substances proviennent de la fusion de certains minéraux (par exemple, la biotite) ou du passage à l'état liquide d'un des constituants de solutions solides comme les plagioclases. Le liquide granitoïde cristallise ultérieurement par refroidissement, sur place ou après migration dans des niveaux différents de la roche métamorphique. La fusion peut intéresser une fraction plus ou moins importante de la roche suivant sa composition minéralogique et la température atteinte (en fonction de la profondeur et du degré géothermique).

Des expériences de laboratoire, réalisées en France par Wyart et en Autriche par H. Winkler, montrent qu'effectivement, lors de la fusion partielle des roches à hautes températures, quelle que soit la roche initiale, on obtient une solution de composition granitoïde. La composition chimique du liquide fondu varie quelque peu suivant la nature de la roche initiale et la température de fusion. Par exemple, pour des argiles on obtient finalement une solution de composition aplitique ou granitique, alors que pour des grauwackes on obtient, à des températures d'ailleurs plus élevées, une solution de composition tonalitique. La température de fusion la plus basse est celle de l'eutectique du système quartz-orthose-albite : un mélange de ces trois minéraux dans des proportions presque égales fond déjà à des températures inférieures à 700 °C, s'il existe une quantité suffisante de vapeur d'eau maintenue à forte pression par la charge des roches sus-jacentes. Dans tous les cas, la solution est enrichie en quartz et en feldspath par rapport à la roche

◀ ***Page ci-contre, un exemple de* plis ptygmatiques *dans un massif rocheux de Norvège; ces plis se forment probablement par suite de la plasticité de toute la masse rocheuse lors de la migmatisation.***

▶ *La texture cataclastique de ce granite se manifeste par l'extinction roulante des cristaux de quartz et le clivage marqué des feldspaths. Les cristaux aux couleurs vives sont du mica et particulièrement de la biotite (lame mince en nicols croisés).*

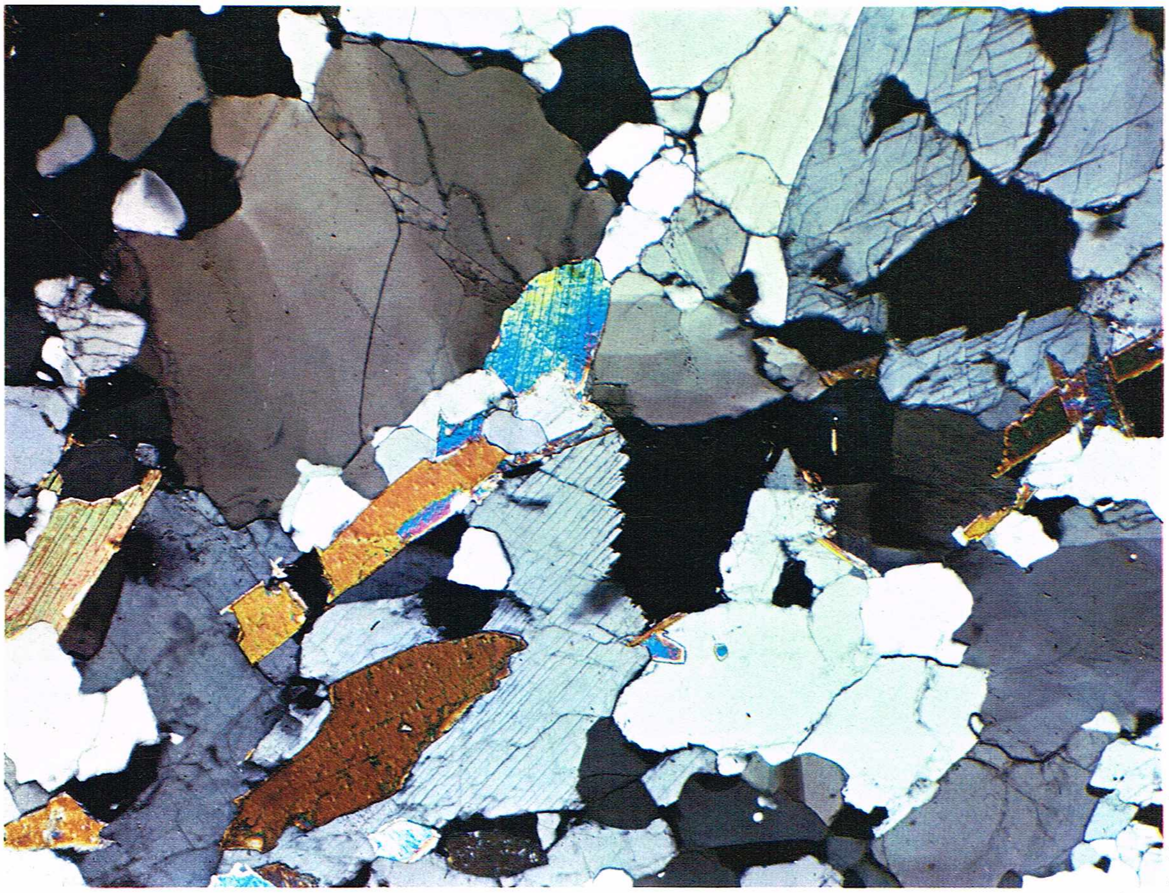

Archives photo B

originelle. Cela explique que le constituant magmatique des migmatites ait toujours une composition granitoïde, et souvent un grain pegmatitique par suite de la présence d'eau. Dans la roche originelle qui a échappé à la fusion, se concentrent les minéraux basiques et l'aluminium sous forme de sillimanite et de cordiérite. La présence de porphyroblastes quartzo-feldspathiques dans les migmatites à texture œillée peut s'interpréter comme le résultat d'une fusion partielle et d'une différenciation locale des roches.

Durant le processus de migmatitisation, les roches métamorphiques ont probablement, du fait de la présence de substances fondues ou de phénomènes de substitution métasomatique, une plasticité nettement supérieure à celle qui existe normalement dans la catazone. La présence d'un liquide d'anatexie en quantité limitée (soit qu'il s'en soit peu formé, soit qu'il ait été expulsé de la roche par des mouvements de compression tectonique) détermine la formation des textures rhéomorphiques (plis ptygmatiques, etc.). Pour des quantités plus importantes de liquide granitoïde, la plasticité de la masse donne lieu à un granite d'anatexie à composition non homogène et à texture nébulitique. Quand les roches sujettes à la migmatitisation sont des paragneiss (résultant du métamorphisme de roches sédimentaires détritiques), la quantité de liquide magmatique produite à une température donnée peut être très différente dans des bancs contigus de paragneiss, en raison de la différence de composition des roches sédimentaires originelles. Les roches métamorphiques qui restent solides lors de l'anatexie (quartzites, amphibolites, etc.), formant des bancs intercalés dans des paragneiss, répondent aux déformations tectoniques de manière rigide; elles se fracturent et sont englobées dans le magma provenant de l'anatexie des niveaux à composition plus sialique, ce qui expliquerait le mode de formation de certaines agmatites.

En France, il existe des migmatites dans le Massif central, en Montagne Noire, etc.

Les roches du métamorphisme dynamique

Le métamorphisme dynamique, ou métamorphisme cataclastique, regroupe les roches dont les structures et les textures ont subi un changement par suite de déformations de type essentiellement cataclastique, c'est-à-dire produites par un écrasement mécanique de certains ou de tous les minéraux qui les composent. Aux déformations mécaniques peuvent se superposer des réactions métamorphiques, le plus souvent de type rétrograde, conduisant à la formation de nouveaux minéraux, lesquels s'orientent en relation avec les efforts de cisaillement auxquels les roches sont soumises; cependant, les minéraux déformés de manière cataclastique et appartenant à l'association minérale originelle de la roche persistent.

Le métamorphisme dynamique est un phénomène généralement localisé le long des contacts tectoniques, failles, chevauchements, etc., dans les niveaux superficiels de la croûte terrestre.

La texture cataclastique est bien visible au microscope, surtout dans les roches grenues comme les granites, les gabbros et les marbres. Elle se manifeste de différentes manières : les minéraux maclés, comme les plagioclases, montrent des macles plissées ou fracturées, alors que la calcite peut acquérir des macles mécaniques supplémentaires; les réseaux des autres minéraux se déforment par glissement le long de certaines surfaces d'orientation déterminée ou irrégulière. Les minéraux qui ne possèdent pas dans leur réseau de surfaces de moindre cohésion, le long desquelles peuvent s'effectuer de petits déplacements, et qui sont donc privés de clivage net, comme le quartz, montrent le résultat de déformations diffuses du réseau cristallin, visibles au microscope polarisant sous forme d'extinction roulante. Les petits déplacements de l'assemblage cristallin de la roche provoquent la torsion des minéraux micacés lamellaires entre lesquels les cristaux des autres minéraux tendent à s'insérer.

Les roches qui présentent ces caractéristiques peuvent être le produit de phénomènes purement magmatiques, c'est-à-dire de déformations ayant lieu lors d'une phase tardive de consolidation d'une roche magmatique intrusive, par suite de changements de volume et d'un lent mouvement de la masse magmatique déjà presque complètement cristallisée. Ces textures cataclastiques primaires, ou protocataclastiques, sont fréquentes, spécialement sur les bordures des massifs intrusifs.

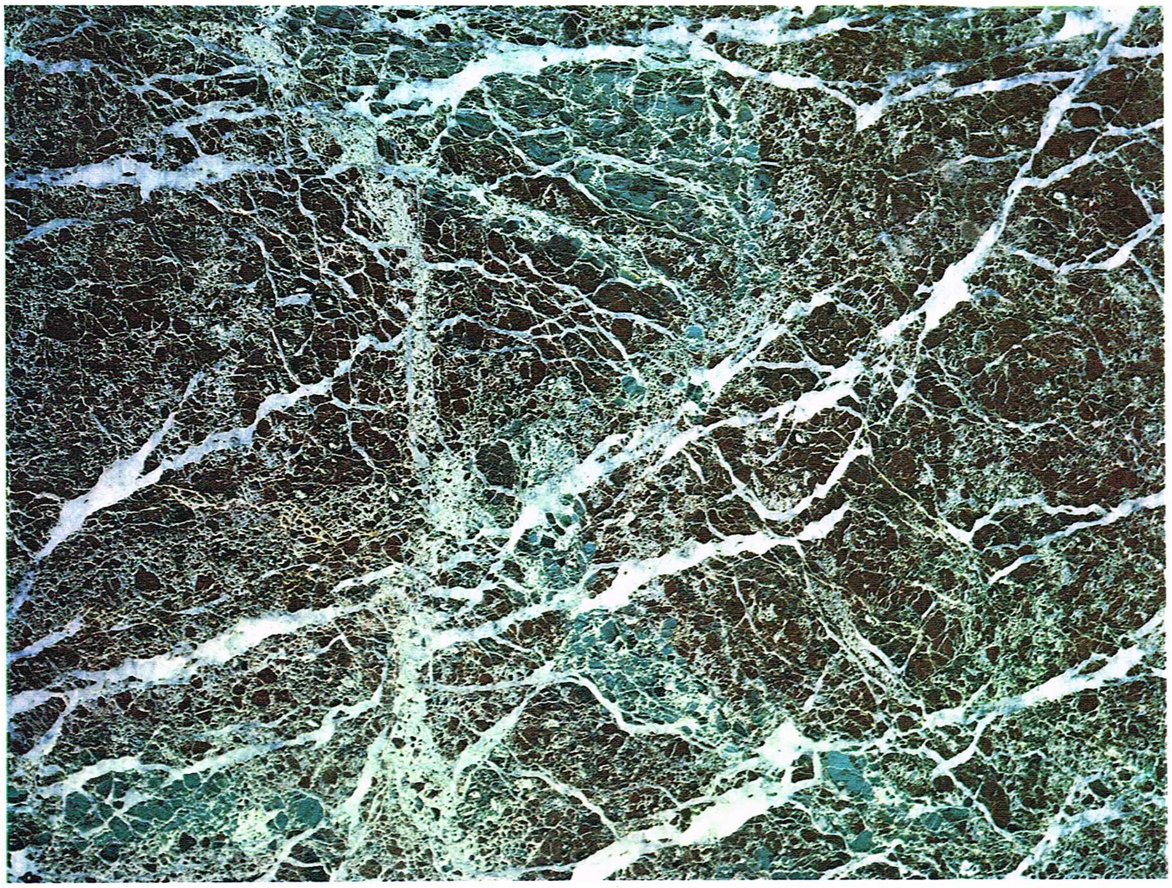

C. Bevilacqua

Une déformation encore plus intense produit l'émiettement des bords des cristaux, dû à de petits glissements réciproques. Les cristaux sont alors entourés d'une enveloppe de petits cristaux du même minéral, et prennent une forme arrondie ou lenticulaire tandis que leurs dimensions diminuent.

On distingue différents types de roches à texture cataclastique suivant le degré d'écrasement des roches.

Les **brèches tectoniques,** d'aspect souvent analogue à celui des brèches sédimentaires, sont parfois difficiles à distinguer de celles-ci ; leur origine est très différente. Les efforts tangentiels exercés sur des roches telles que les serpentinites, les calcaires, etc., peuvent provoquer, là où le mouvement différentiel de deux parties contiguës de la roche est plus intense, une rupture en fragments anguleux de dimensions très variables. Ce phénomène a lieu surtout si la déformation des roches advient à des profondeurs très faibles ; en effet, à des profondeurs plus grandes, et donc à des températures et des pressions lithostatiques plus fortes, certaines roches (et surtout les calcaires) tendent à se déformer de manière plastique, à travers des phases continues de dissolution et de cristallisation des minéraux qui les composent, ou à travers des réactions métamorphiques.

Les brèches tectoniques sont donc formées de fragments anguleux, constitués le plus souvent d'un seul type de roche et dont la structure originelle n'est pas modifiée, inclus dans une matrice fine résultant du broyage de la roche ; parfois, les fragments peuvent être joints par un ciment à grain grossier, de la calcite par exemple. Dans d'autres types de brèches tectoniques, les fragments sont plus ou moins arrondis, soit par suite d'un frottement réciproque, soit parce que la fracturation de la roche s'est réalisée suivant des surfaces ondulées et subparallèles qui ont isolé des fragments en forme de lentilles. Les brèches tectoniques ont une extension latérale limitée aux bordures des failles : elles sont particulièrement difficiles à distinguer des conglomérats sédimentaires quand elles sont concordantes avec la stratification, c'est-à-dire dans le cas de failles parallèles à la stratification ou de surfaces de chevauchement tectonique dans des régions où les strates sont horizontales.

▲▼ *Ci-dessus et ci-dessous, deux sections polies de serpentinite montrant une texture* **bréchique** *d'origine tectonique :*
en haut, les fragments sont anguleux et de tailles variables ;
en bas, ils sont plus ou moins arrondis en forme de lentilles.
Ce phénomène est dû aux efforts tangentiels exercés sur les roches.

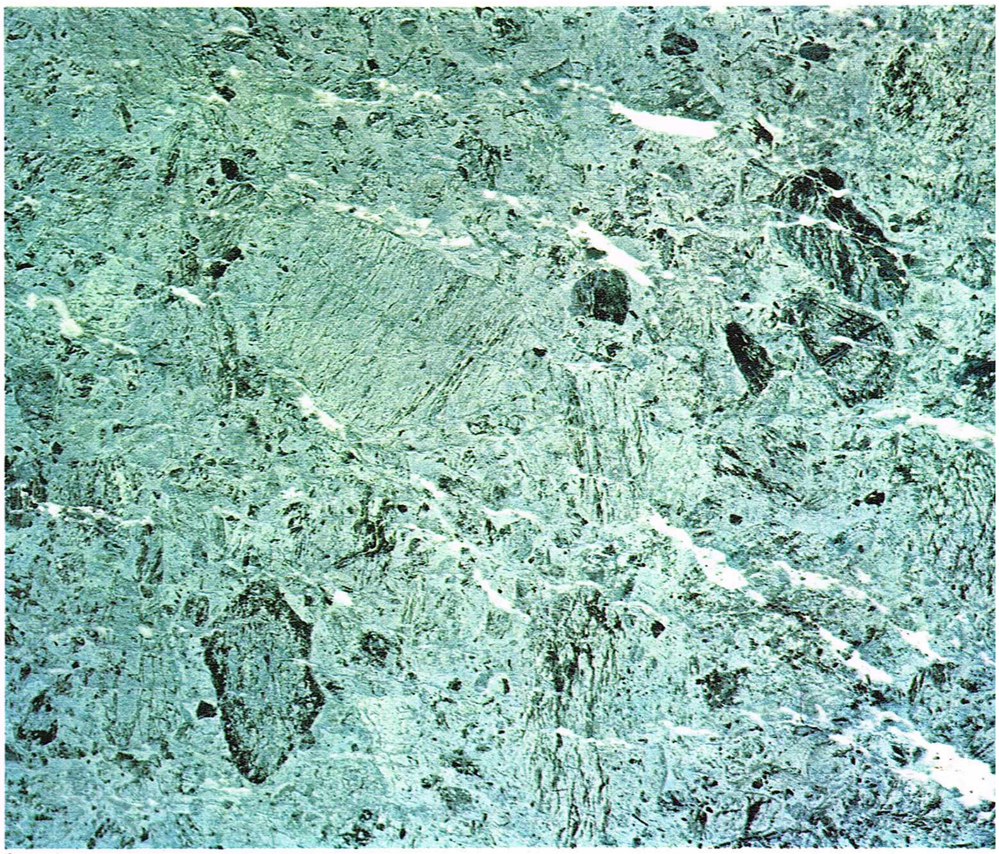

C. Bevilacqua

Pour une déformation mécanique plus intense mais où la roche cataclastique conserve encore sa structure originelle, on parle de **cataclasites** (d'un mot grec qui signifie rompre). Les cataclasites formées à partir de roches monominérales à texture granoblastique, comme les quartzites et les marbres, sont constituées de cristaux de forme arrondie ou aplatie, inclus dans une matrice à grain très fin et composée du même minéral. La matrice est parfois recristallisée, formant un ciment microgrenu; elle peut également présenter une texture fluidale marquée par des surfaces de différentes couleurs, produites par l'émiettement d'un minéral accessoire quelconque et se moulant plastiquement autour des cristaux plus grossiers. Au contraire, dans les roches grenues polyminérales, comme la plupart des roches ignées et les grès, une déformation de ce type provoque des réactions métamorphiques entre les différents minéraux. Ces réactions sont favorisées par les déformations du réseau cristallin des minéraux et par l'augmentation de température due à la friction entre les grains cristallins. Cependant, ce dernier facteur a généralement peu d'importance, sauf quand le mouvement différentiel de la roche a été concentré le long d'une seule surface de glissement; dans ce cas, on peut avoir une fusion locale de la roche, produite par la chaleur due à la friction. Si, au contraire, la déformation cataclastique intéresse de grands volumes de roches, les déplacements sur les bords des cristaux sont peu importants et la chaleur due à la friction est peu élevée. D'autre part, les cataclasites se forment à la suite de déformations tectoniques à faible profondeur (quelques kilomètres), et la température due au degré géothermique est également peu élevée. Les zones de roches triturées lors du métamorphisme dynamique peuvent constituer des voies de passage pour les fluides pneumatolytiques ou hydrothermaux, qui produisent une augmentation de température dans les roches avoisinantes et provoquent des réactions métamorphiques ou métasomatiques, souvent de type rétrograde.

Ces minéraux produits par les réactions métamorphiques qui accompagnent le métamorphisme dynamique sont stables à faible température. A partir des feldspaths des roches magmatiques et des silicates d'alumine (sillimanite, cordiérite) de certaines roches métamorphiques, il se forme de la muscovite, sous forme d'un feutrage microcristallin de lamelles de séricite orientées dans la direction du mouvement différentiel de la roche et qui tendent à faciliter ce mouvement. Au microscope, il est souvent possible d'observer autour des cristaux de feldspath soumis à une granulation cataclastique une enveloppe séricitique. A partir des minéraux basiques (amphiboles, pyroxènes), dans des conditions semblables, il se forme de la chlorite, également de forme lamellaire et disposée de manière à aider le mouvement différentiel des éléments de la roche. Ces réactions métamorphiques

▶ *La Montagne Noire est une des régions de France où l'on trouve des* **migmatites**, *roches caractéristiques de* **l'ultramétamorphisme**.

rétrogrades sont facilitées par le mouvement différentiel des minéraux de la roche. Celui-ci provoque, en premier lieu, leur granulation, accompagnée d'une augmentation consécutive des surfaces exposées aux réactions, lesquelles ont lieu grâce aux fluides (eau) présents en faible quantité dans les interstices intercristallins. En second lieu, la pression différentielle appliquée à la surface de chaque cristal, par suite de la pression tangentielle à laquelle est soumise la roche, augmente la solubilité des minéraux et facilite elle aussi les réactions métamorphiques.

La déformation cataclastique des roches ignées effusives et pyroclastiques, composées en grande partie de verre volcanique ou d'un agrégat microcristallin de minéraux, provoque des réactions métamorphiques dans la matrice, alors que les phénocristaux éventuellement présents demeurent plus longtemps inaltérés. Les porphyres quartzifères et les roches analogues se transforment en schistes séricitiques, roches grisâtres à texture schisteuse, composées essentiellement de séricite (muscovite microcristalline) et de quartz ; des phénocristaux de quartz et de feldspath épargnés par la séricitisation se détachent sur ce fond microcristallin. Cependant, quand ces roches s'étendent sur de grandes régions et non seulement près de surfaces de mouvements tectoniques, elles sont le produit d'un métamorphisme régional ayant eu lieu à faible profondeur, analogue à celui qui produit les phyllades, dont les schistes séricitiques sont proches par leur aspect.

Les roches basiques soumises à un métamorphisme dynamique se transforment en schistes chloriteux, qui se différencient de ceux produits par le métamorphisme régional par leur localisation et certaines caractéristiques de leur structure telles que la présence de plages reliques de la roche originelle.

La serpentinisation de l'olivine, l'ouralitisation des pyroxènes, la chloritisation des amphiboles peuvent être produites par un métamorphisme dynamique de degré modéré.

Le terme de **mylonites** s'applique à des roches qui ont subi les effets les plus intenses du métamorphisme dynamique et ont acquis une texture très différente de la texture initiale. Dans les mylonites proprement dites prédomine une masse cristalline à grain très fin, d'aspect semblable à certains verres volcaniques mais constituée par les minéraux originels de la roche, très finement broyés. Le fond présente une texture fluidale soulignée par des bandes parallèles à la schistosité, produites par la trituration des cristaux. Dans ce fond prédominant sont inclus des reliques lentiformes des cristaux qui n'ont pas été complètement écrasés lors de la déformation de la roche, ou des agrégats polycristallins lentiformes qui conservent encore la composition minéralogique et la structure de la roche initiale et autour desquels se

▼ ***Ci-dessous, calcarénite quartzeuse à texture* cataclastique : *les grains de calcite sont presque tous recristallisés en cristaux aplatis horizontalement et disposés suivant une direction préférentielle à côté de gros grains de quartz. Ces derniers conservent leur forme d'origine mais sont coupés de fractures verticales remplies de calcite (lame mince en nicols croisés). En bas, une* mylonite : *le métamorphisme dynamique, agissant sur cette roche ignimbritique, a entraîné la formation de bandes séricitiques suivant les surfaces de mouvement et la recristallisation de la masse de fond originellement vitreuse ou microcristalline. Les cristaux plus gros de quartz ont résisté au métamorphisme (lame mince en nicols croisés).***

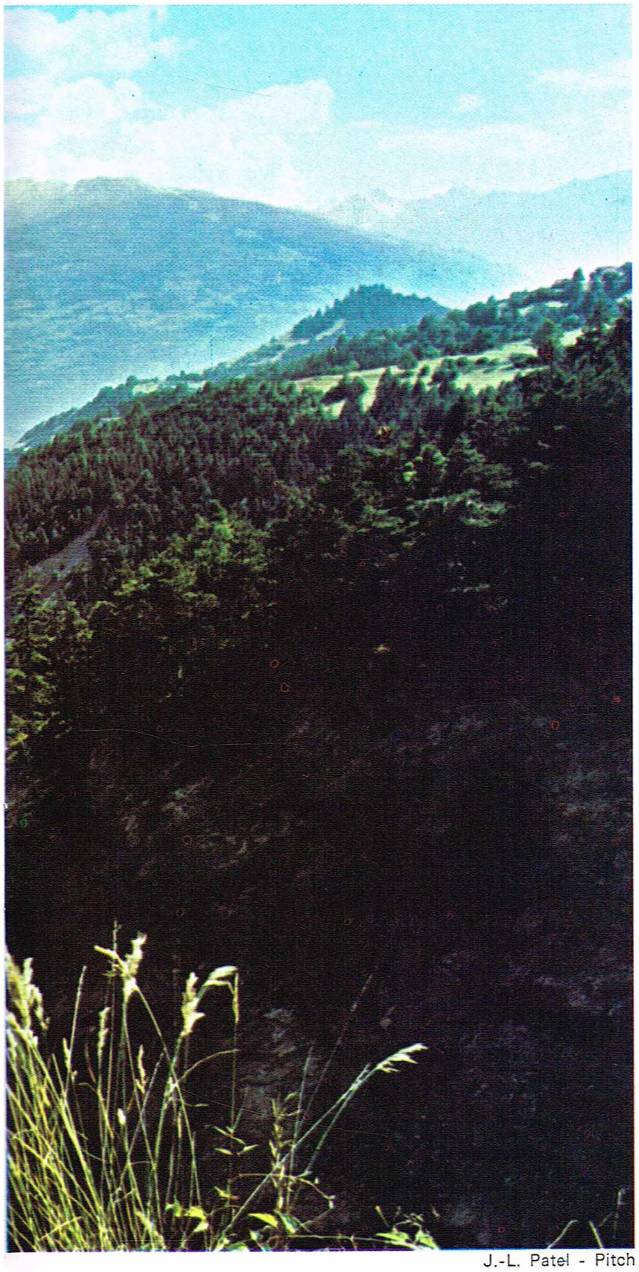

J.-L. Patel - Pitch

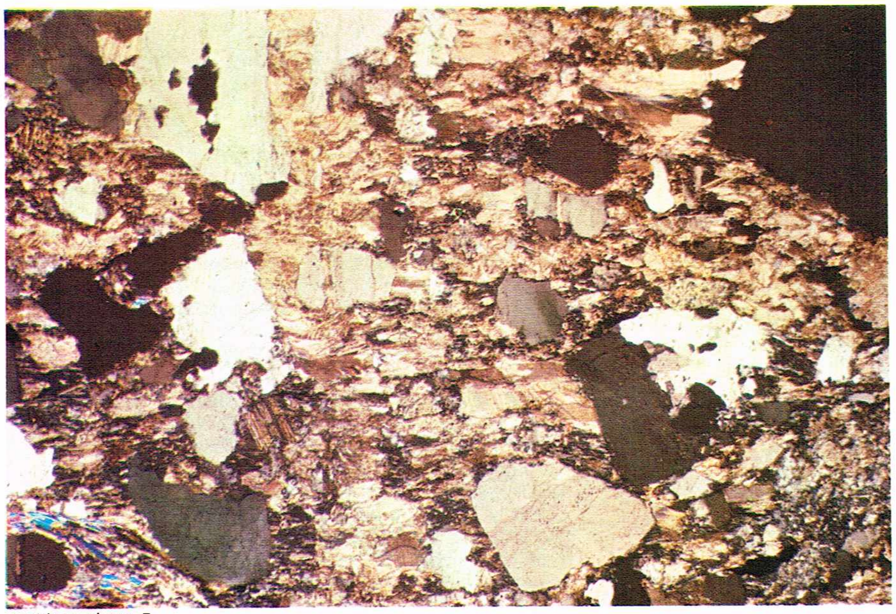

Archives photo B

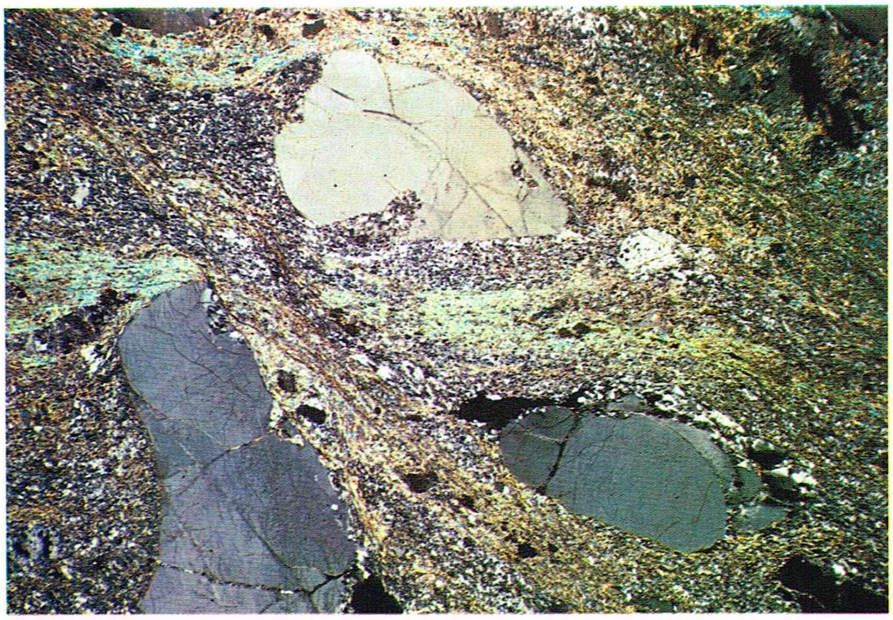

Archives photo B

moulent les bandes de différentes couleurs de la roche mylonitique. A la limite, la roche est constituée uniquement par une masse cryptocristalline à texture analogue à une foliation, due à l'alternance de bandes de couleurs variées.

Les mylonites sont des roches relativement compactes et irrégulièrement fissiles. Leur compacité est produite par la pression élevée existant durant le phénomène de mylonitisation et par une réduction consécutive des pores ainsi que des interstices intercristallins de la roche. Les cataclasites, au contraire, sont des roches souvent friables et incohérentes. La faible porosité des mylonites peut expliquer le faible développement des réactions métamorphiques entre les minéraux qui les composent, malgré la finesse du grain cristallin, par suite du manque de phases fluides et de leur mouvement limité au cours du métamorphisme.

Les **ultramylonites** sont des roches très compactes et très dures, d'aspect semblable aux silex mais non stratifiées et généralement homogènes ou avec une texture foliée moins évidente que celle des mylonites. Elles sont le produit d'un broyage mécanique extrême de roches de nature quelconque, mais surtout de celles qui montrent un comportement fragile durant les déformations (quartzites, silex, granites, etc.) ; elles se rencontrent, comme les mylonites, au voisinage de surfaces de mouvement tectonique importantes. Certaines ultramylonites ont été injectées plastiquement, comme un magma, dans les roches encaissantes (mylonites intrusives) ; durant les mouvements tectoniques auxquels est due leur genèse, elles se sont comportées comme un lubrifiant entre les masses rocheuses en mouvement.

Les roches métasomatiques

Le métasomatisme est un phénomène d'altération ou de transformation des roches qui implique leur enrichissement en certaines substances apportées de l'extérieur ; cet enrichissement peut être accompagné d'une perte de plusieurs autres substances présentes initialement dans les roches. Ces échanges d'éléments se produisent grâce à la présence d'une phase fluide, gazeuse ou liquide, qui imprègne les roches. Durant ces phénomènes, qui aboutissent à un changement des compositions minéralogique et chimique des roches ainsi qu'à la substitution partielle ou complète d'une roche par une autre, la dissolution et la recristallisation des éléments ont lieu presque simultanément, de telle manière que les roches conservent toujours l'état solide.

Par le passé, certains auteurs ont soutenu que le métasomatisme jouait un rôle fondamental dans la genèse de roches métamorphiques comme les gneiss, les migmatites, les schistes à glaucophane, etc. Actuellement, à la suite de la mise en évidence des lois de la métasomatose par D. S. Korjinskyi, on considère généralement que les métamorphismes régional et thermique sont essentiellement des phénomènes isochimiques au cours desquels la composition chimique globale des roches ne change pas, et que le métasomatisme n'est important que localement. Il est vrai que même lors du métamorphisme isochimique des roches certains échanges d'éléments se produisent, mais à une échelle très limitée, millimétrique, au contact entre deux cristaux, par diffusion à travers les cristaux à l'état solide. De plus, lors du métamorphisme isochimique, des quantités limitées d'eau et de gaz carbonique peuvent être introduites dans les roches et entrer dans la composition de certains minéraux de basse température, ou bien ces substances peuvent être expulsées des roches au cours d'un métamorphisme de haute température ; cependant, ces échanges d'éléments volatils ne sont généralement pas considérés comme des phénomènes métasomatiques.

Par contre, durant le métasomatisme, les échanges se produisent entre une roche et une solution, ou entre deux roches de compositions différentes, et affectent des couches ou des masses rocheuses d'extension beaucoup plus grande. Les changements métasomatiques impliquent un mouvement de matière sur des distances assez considérables, rendu possible grâce à des fluides circulant à travers les roches. Ces fluides proviennent généralement d'intrusions magmatiques voisines ; les substances métasomatisantes sont contenues en solution dans l'eau *(métasomatisme hydrothermal)*, ou forment une phase gazeuse complexe avec la vapeur d'eau à température supérieure à la température critique de l'eau *(métasomatisme pneumatolytique)*.

Le terme d'*autométasomatisme* désigne les changements de compositions minéralogique et chimique des roches magmatiques, produits par des fluides provenant du réservoir magmatique lui-même dans lequel est contenue ou duquel est issue la masse rocheuse à peine consolidée et se trouvant encore à une température élevée ; il s'agit donc des derniers résidus fluides du magma, constitués essentiellement d'eau. Des phénomènes autométasomatiques peuvent également se produire dans les roches volcaniques sous l'influence de fumerolles (propylitisation : transformation des minéraux basiques originels des basaltes en chlorite, épidote, calcite, etc.). Les phénomènes autométasomatiques affectent des masses rocheuses très importantes, atteignant un ou plusieurs kilomètres, alors que les phénomènes métasomatiques proprement dits sont limités à quelques dizaines de mètres. Les phénomènes autométasomatiques les plus importants sont la *serpentinisation* des péridotites, la *kaolinisation* et la *tourmalinisation* de certaines roches granitiques.

Les roches métasomatiques sont fréquemment associées aux roches du métamorphisme thermique isochimique. On les distingue parfois difficilement de celles-ci et la détermination de leur origine demande des analyses minéralogiques et chimiques approfondies. Cependant, elles s'en différencient par certains caractères, en particulier par leur composition minéralogique qui ne comporte fréquemment qu'une ou deux espèces minérales seulement, et par la distribution zonée des associations minérales que l'on y observe.

La forme, la dimension et la disposition des corps de roches métasomatiques dépendent en grande partie de la structure géologique et tectonique de la région (fractures, failles, etc.). A la différence des roches du métamorphisme thermique, même si elles se sont formées au contact avec une roche intrusive, elles ne forment pas une auréole continue autour des massifs intrusifs, mais affleurent en corps irréguliers et discontinus et peuvent exister loin du contact lui-même.

Le remplacement métasomatique se produit généralement sans changement de volume de la roche affectée, et l'espace nécessaire à la précipitation d'un nouveau minéral est proportionné par la dissolution simultanée d'un minéral substitué (loi des volumes constants de W. Lindgren, 1933). Ce phénomène est montré, en particulier, par la conservation des contours des cristaux de pyroxène et d'olivine dans les serpentinites, de la structure ophitique des diabases après leur remplacement par des minéraux kaoliniques, etc.

Dans le cas du métamorphisme isochimique (de contact ou régional), c'est-à-dire d'un système fermé, la proportion finale de chacun des constituants est égale à sa proportion initiale dans la roche, excepté pour les constituants volatils tels que l'eau et le gaz carbonique. Dans ce cas, la règle des phases permet de déterminer combien de minéraux différents se formeront lors des réactions chimiques si l'on connaît le nombre de constituants indépendants et le nombre de conditions physiques susceptibles de varier sans que les produits des réactions changent : le nombre de minéraux produits lors des réactions métamorphiques est égal au nombre de constituants indépendants prenant part aux réactions.

Au contraire, dans le cas des roches métasomatiques, un ou plusieurs constituants peuvent être échangés avec l'extérieur de la roche : il s'agit là d'un système ouvert ou partiellement ouvert. D. S. Korjinskyi (1959) a montré qu'il est possible d'appliquer la règle des phases à ces roches et de connaître le nombre de minéraux résultant des réactions métamorphiques, à condition de ne considérer comme *constituants indépendants* que les constituants dont la proportion finale est égale à la proportion initiale (constituants dits inertes). Par opposition, on appelle *constituants mobiles* ceux qui sont échangés avec l'extérieur de la roche par suite des différences de potentiel chimique existant entre deux roches contiguës ou entre une roche et une solution chimiquement incompatibles, à température et pression déterminées. L'échange tend à égaliser les potentiels chimiques des différents constituants des deux milieux.

◀ **Skarn *à hédenbergite fibro-radiée provenant de Cap Calamita (île d'Elbe).***

La proportion finale d'un constituant mobile dans une roche métasomatisée n'est pas fonction de sa proportion initiale dans la roche, mais de l'activité chimique du constituant dans le milieu adjacent. Pour chaque constituant mobile, le système a un degré de liberté supplémentaire, qui est la concentration variable de ce constituant. Pour un seul constituant mobile, la variance est donc égale à 3 (pression, température et concentration du constituant mobile), et le nombre de minéraux produits au cours des réactions est égal au nombre de constituants total moins un. Pour deux constituants mobiles, la variance est égale à 4, et le nombre des phases est égal au nombre de constituants total moins deux. D'où l'on déduit que, dans le cas d'un système ouvert, le nombre des phases produites au cours des réactions est égal au nombre total de constituants moins le nombre de constituants mobiles, c'est-à-dire que le nombre de phases est égal au nombre de constituants inertes.

Ce qui précède explique pourquoi les roches métasomatiques sont généralement constituées par des associations mono- ou biminérales, même si dans la composition des minéraux qui les constituent il entre un plus grand nombre de constituants. Par exemple, Korjinskyi a observé dans des roches métasomatiques de Sibérie la présence de seulement trois minéraux ou phases : diopside-phlogopite-scapolite, ou scapolite-phlogopite-spinelle, ou encore diopside-scapolite-orthose, alors que la composition de ces minéraux fait intervenir un nombre plus grand de constituants : les oxydes de magnésium, de calcium, de potassium, de sodium, de fer bivalent, l'anhydride sulfurique, l'eau et le gaz carbonique. Seuls trois de ces constituants sont demeurés inertes lors des réactions métamorphiques.

De plus, les différents constituants ont des mobilités, ou vitesses de dissolution, diverses. Par exemple, le fer est dissous beaucoup plus facilement que la silice : cela conduit à la formation de différentes zones, caractérisées par des compositions minéralogiques différentes, chaque zone possédant un nombre déterminé de constituants mobiles et inertes durant le métasomatisme. Le passage d'un constituant de l'état inerte à l'état mobile, dû à la différence de concentration de ce constituant dans les deux milieux adjacents, détermine un changement de variance du système et par conséquent un changement du nombre de phases, c'est-à-dire la dissolution d'un minéral. Il se forme des zones de compositions minéralogiques différentes, dont les limites brusques correspondent au passage d'un constituant de l'état inerte à l'état mobile ou *vice versa*.

On peut distinguer, suivant leurs modes de formation, deux types de roches métasomatiques : celles qui se forment au contact entre deux roches de compositions minéralogique et chimique incompatibles dans certaines conditions de températures et de pressions, et celles qui se forment entre une roche et une solution s'infiltrant à travers les pores de cette roche.

Dans le premier cas, les éléments échangés entre les roches proviennent des roches elles-mêmes et migrent par *diffusion ionique* à travers la phase fluide interstitielle immobile, de manière à réaliser l'égalisation de leur potentiel chimique dans les deux roches. C'est ainsi que se forment, par exemple, les *skarns* dits *de réaction* entre un marbre et un granite.

Dans le second cas, une solution, provenant fréquemment de masses magmatiques voisines, *s'infiltre* à travers les fissures et les pores de la roche ; il se produit des réactions entre la solution et la roche pénétrée, qui sont en déséquilibre chimique. Les roches métasomatiques ainsi formées ont une composition très différente des roches encaissantes dont elles proviennent ; des éléments très variés sont apportés aux roches par les solutions. C'est le cas, par exemple, des *greisens*.

Les **skarns de réaction** sont les plus typiques parmi les roches métasomatiques formées par diffusion. Ce sont des roches massives, à grain grossier, de couleur vert sombre ou vert-jaune, présentant parfois une succession de bandes à tendance mono- ou biminérale, à grenat, à diopside, à wollastonite, etc. Ils se forment au contact entre une roche calcaire (marbre, marbre dolomitique, etc.) et une roche magmatique, généralement acide (granite, granodiorite), ou plus rarement gabbroïque ou ultrabasique. La roche calcaire est riche en calcium et en magnésium, alors que la roche granitique est riche en fer, en aluminium et en silice. Dans certaines conditions de température et de pression, les associations minérales de ces deux roches sont incompatibles et certains constituants sont échangés entre les deux roches. La roche calcaire est enrichie en

▶ *Un exemple du mode de formation des* roches métasomatiques *par infiltration : à partir de la fracture visible en bas, les fluides pneumatolytiques ont provoqué la substitution à une roche porphyritique de calcite et de tourmaline (fortement colorée) [lame mince en nicols croisés].*

C. Bevilacqua

silice, en alumine et en fer, alors que la roche granitique est enrichie en calcium et en magnésium. Les différents constituants migrent indépendamment à travers la phase fluide immobile et entrent en réaction avec les minéraux de la roche substituée. En raison de la mobilité différentielle des différents constituants, il se forme une succession de zones, à tendance mono- ou biminérale, dont les limites correspondent à des réactions chimiques, correspondant elles-mêmes au passage de l'état mobile à l'état inerte d'un des constituants et par conséquent, suivant la règle des phases, à la cristallisation d'un minéral. A l'intérieur d'une même zone, les minéraux à composition variable (séries isomorphes) changent graduellement de composition par suite de la variation progressive des concentrations des différents constituants dans la phase fluide.

On donne parfois le nom d'*endoskarn* au skarn qui résulte de la transformation de la roche granitique, et celui d'*exoskarn* au skarn résultant de la transformation de la roche calcaire. Certains skarns se forment également par infiltration. L'épaisseur des roches de ce type, formées par diffusion, atteint rarement plusieurs mètres.

Un exemple du second mode de formation des roches métasomatiques, par infiltration, est fourni par les **greisens.** Ceux-ci proviennent de la transformation métasomatique à haute température, pneumatolytique ou hydrothermale, de roches intrusives acides (granites) et plus rarement de roches quartzo-feldspathiques comme les gneiss. Ce sont des roches à grain moyen, leucocrates, composées de quartz (qui peut constituer plus de 50 % de la roche, parfois même 90 %) et de muscovite. Les greisens peuvent en outre contenir de la fluorine, de la topaze, de la tourmaline, du béryl, de la wolframite, de la mobybdénite, de la cassitérite, etc. Ils apparaissent en association avec les intrusions magmatiques de profondeur moyenne et se forment dans les parties apicales des corps intrusifs ou dans des fractures. Leur épaisseur varie de quelques centimètres à une trentaine de mètres.

A partir de fractures le long desquelles circulent des solutions postmagmatiques, celles-ci pénètrent dans la roche granitique adjacente, qui subit une transformation. Ces solutions sont saturées en silice, en eau et en gaz carbonique et contiennent des éléments minéralisateurs tels que le lithium, le bore, le fluor, etc. La roche grani-

tique contient de la silice en excès, de l'alumine et de la potasse. Il existe donc un déséquilibre chimique entre la solution métasomatisante et la roche, et il se produit des réactions entre les minéraux de la roche et la solution.

Près de la fracture, source des solutions métasomatisantes qui percolent à travers la roche, la silice, qui est en excès dans les deux milieux, ne peut être dissoute et précipite comme constituant inerte sous forme de quartz. Par contre, l'alumine et la potasse sont dissoutes par la solution et passent à l'état mobile, de manière à réaliser un équilibre des potentiels chimiques de ces constituants dans la roche et dans la solution. La solution change donc de composition en même temps que la roche granitique, dont les minéraux contenant de la potasse et de l'alumine sont détruits (biotite, orthose) et à la place de laquelle se forme un filon de quartz, monominéral.

Dans une zone plus éloignée de la fracture, le long de la direction d'infiltration de la solution métasomatisante dans la roche, l'alumine devient inerte à son tour, mais la potasse reste mobile. Dans ces conditions, l'orthose n'est pas stable et se transforme en muscovite et quartz : il se forme un greisen typique.

Dans une zone encore plus éloignée de la source de la solution, la potasse devient à son tour inerte; seuls restent mobiles l'eau et le gaz carbonique; mais, dans ces conditions, l'orthose est stable et la roche granitique initiale n'est plus transformée. Ainsi se forment différentes zones de compositions minéralogiques différentes, souvent mono- ou biminérales, dont les limites correspondent chacune à la dissolution ou au dépôt d'un minéral, par suite de la mobilité différentielle des constituants. Les réactions chimiques ne se produisent qu'à la limite des zones et, de part et d'autre de cette limite, la solution est en équilibre avec la composition des zones respectives.

La greisenisation est accompagnée de la perte de certains constituants, comme le sodium, le calcium et en partie le fer et le magnésium. D'autres éléments sont apportés aux roches : par exemple, le fluor, le chlore, le bore, etc., qui donnent naissance à la fluorine, à la topaze, etc. Certains minéraux peuvent précipiter directement à partir de la solution, sans être le produit de réactions entre la solution et les minéraux de la roche granitique. C'est le cas, en particulier, de nombreux minéraux métallifères, souvent associés aux roches métasomatiques formées par infiltration. L'enrichissement des greisens en quartz n'est pas dû à un apport de silice, mais à la libération de la silice lors de la destruction du feldspath potassique et à son dépôt sur place.

De nombreuses autres roches métasomatiques se forment, comme les greisens, par infiltration de solutions qui apportent des éléments très variés aux roches. Ces éléments sont souvent des métaux, et un grand nombre de gisements miniers sont liés génétiquement à des phénomènes de substitution métasomatique. Suivant les éléments apportés aux roches, on distingue différents types de roches métasomatiques.

Le *métasomatisme alcalin* se produit souvent dans les roches encaissant des intrusions magmatiques de compositions variées, non nécessairement riches en alcalins. En fait, on a observé que le métasomatisme conduit souvent à l'introduction, dans les roches encaissantes, d'éléments contenus en quantités mineures dans le magma. Les silicates et les carbonates alcalins ont une solubilité élevée dans l'eau et forment avec celle-ci des fluides complexes, généralement à l'état de vapeur supercritique, qui provoquent de nombreux phénomènes d'autométasomatisme dans les roches ignées (albitisation des feldspaths potassiques, surtout dans les pegmatites; formation de certains types de spilites et de kératophyres, etc.).

L'introduction d'alcalins dans des roches de compositions variées est à la base de la théorie de l'origine métasomatique du granite. On observe, en effet, à petite échelle, la formation de porphyroblastes de feldspath dans les roches proches d'un contact magmatique intrusif. L'apport métasomatique d'alcalins dans les roches granitiques et gneissiques provoque leur transformation en *fénites,* par disparition du quartz, qui se combine avec les substances introduites pour former des feldspaths alcalins. Ce sont des roches composées essentiellement de feldspath alcalin et d'un peu d'ægyrine. Parmi les phénomènes de granitisation, encore aujourd'hui diversement interprétés, le métasomatisme sodique produit ses effets les plus évidents dans la formation des *adinoles;* ces roches, originellement argileuses, riches en alumine, sont transformées en roches constituées essentiellement d'albite et de quartz. L'albite se forme par réaction entre les solutions métasomatisantes sodiques et les minéraux aluminifères comme les micas, les chlorites, et d'autres minéraux des argiles : la roche résultante présente une structure granoblastique et conserve souvent encore des reliques de la stratification de la roche argileuse originelle. Si l'albite ne s'est formée qu'en quelques endroits de la roche, celle-ci montre une texture semblable à celle des schistes tachetés.

Le *métasomatisme sodique,* comme les autres types de métasomatisme, affecte généralement des roches déjà soumises auparavant à un métamorphisme thermique; en effet, l'infiltration des fluides métasomatisants a lieu au cours du stade pneumatolytique de consolidation des magmas, quand la température du magma aussi bien que celle des roches encaissantes est notablement diminuée. La présence d'une phase fluide à forte pression favorise le métamorphisme rétrograde de la roche, c'est-à-dire la transformation des minéraux formés aux températures les plus élevées atteintes par la roche en minéraux stables à des températures inférieures; ceux-ci contiennent alors dans leur réseau les alcalins qui se sont introduits au cours du stade pneumatolytique. Ainsi, la sillimanite, silicate d'alumine formé à des températures très élevées dans des roches originellement argileuses, se transforme en muscovite ou en paragonite, aluminosilicates alcalins stables à des températures inférieures. L'orthose, stable elle aussi à fortes températures et associée à la sillimanite et à l'andalousite, se transforme en séricite, mais sans apport d'alcalins provenant d'une intrusion magmatique. Cependant, si la roche initiale était pauvre en alumine et ne contenait pas d'andalousite ou de sillimanite, l'enrichissement métasomatique en alcalins produit la transformation de la muscovite en feldspath potassique (microcline) ou sodique (albite).

On a parfois voulu expliquer la formation des schistes à glaucophane par un enrichissement métasomatique en sodium de roches sédimentaires préalablement soumises à un métamorphisme régional. Cependant, l'origine de ces schistes n'est pas toujours explicable par un apport métasomatique de sodium; en effet, dans un grand nombre de cas, il n'existe aucune relation entre ces schistes et des masses de péridotites ou de serpentinites d'où auraient pu provenir les solutions métasomatisantes.

L'apport de *fer* et de *silice,* ainsi que d'autres éléments, provoque la formation de certains *skarns à hédenbergite* dans les roches calcaires proches d'intrusions granitiques ou granodioritiques. Dans ces skarns, la calcite peut manquer complètement car le calcium s'est recombiné en totalité avec les substances apportées par les solutions métasomatisantes. Les minéraux silicatés néoformés sont très variés; cependant, le grenat calcique (grossulaire-andradite) prédomine, accompagné d'un pyroxène monoclinique (hédenbergite) et d'idocrase, parfois de hornblende. Par apport d'*alumine,* ou dans des strates calcaires originellement argileuses, il se forme également de l'anorthite, de l'épidote, etc. Dans le cas de dolomies ou de calcaires dolomitiques, il se forme des silicates à forte teneur en magnésium, comme le diopside, la trémolite et la phlogopite. L'introduction du fer et de la silice peut être facilitée par la formation de composés gazeux de fluor et de chlore lors du stade pneumatolytique de refroidissement du magma; elle peut aussi intervenir au moyen de solutions aqueuses au cours d'un stade hydrothermal ultérieur, à température plus faible. Dans le premier cas, la roche métasomatique comprend également des minéraux contenant du fluor et du chlore, comme la fluorine, les scapolites, la phlogopite, etc. Souvent aussi, les skarns contiennent des sulfures et des oxydes métalliques, provenant eux-mêmes des magmas.

L'enrichissement en fer, silice et alumine est probablement accompagné d'un apport métasomatique de *magnésium,* élément très semblable au fer dans son comportement géochimique, et contenu lui aussi en quantités minimes dans les magmas granitiques. L'introduction métasomatique de magnésium est nécessaire pour expliquer la formation de minéraux magnésiens dans des roches composées, à l'origine, uniquement par des

silicates alcalins et du quartz ; par contre, la formation de silicates contenant du magnésium dans des roches calcaires est habituellement attribuée à la présence initiale de magnésium dans ces roches. Ainsi il n'est pas rare de trouver, au contact d'intrusions granitiques, des roches essentiellement constituées de cordiérite et d'anthophyllite (amphibole orthorhombique) ; ces deux minéraux contenant du fer et du magnésium se sont formés à partir de quartz et de silicates riches en sodium et en calcium, lesquels ont été éloignés par les mêmes solutions métasomatisantes qui ont apporté le fer et le magnésium.

L'auréole de roches à minéraux contenant du fer et du magnésium, observée autour de nombreuses intrusions granitiques, est interprétée par certains auteurs comme la preuve de l'avancée d'un front métasomatique basique, précédant un front métasomatique alcalin qui provoquerait la granitisation des roches préexistantes.

Les intrusions granitiques provoquent, en outre, des effets métasomatiques par suite de l'introduction dans les roches encaissantes d'éléments volatils concentrés dans les derniers fluides résiduels du magma : en particulier, le *bore*, le *fluor*, le *chlore* et le *soufre*.

Les roches encaissantes soumises à un *métasomatisme borique* sont réduites à un agrégat de tourmaline et de quartz, tout en conservant généralement les textures existant avant le métasomatisme, si bien qu'il s'agit souvent de schistes tourmalinifères. La tourmaline est un borosilicate très riche en alumine qui se forme à partir des silicates aluminifères tels que la biotite, la cordiérite et l'andalousite des cornéennes provenant du métamorphisme thermique de roches argileuses, lors du stade principal de solidification de l'intrusion granitique. Le métasomatisme borique de roches calcaires provoque, au contraire, la formation de *skarns à axinite*, c'est-à-dire de roches qui contiennent, outre des quantités variables de calcite, de l'axinite, borosilicate de calcium de forme prismatique et de couleur blanchâtre, et des silicates de calcium et de fer comme le grenat andradite et le pyroxène hédenbergite.

L'apport métasomatique de bore est souvent accompagné d'un apport de *fluor*. Dans les granites et les roches gneissiques encaissantes, cet élément contenu dans les fluides métasomatisants prend part à la greisenisation de ces roches et se fixe dans la muscovite qui résulte de la destruction de l'orthose. Si la roche soumise à un métasomatisme pneumatolytique avec apport de fluor contient du magnésium (par exemple, un calcaire dolomitique), le fluor entre dans le réseau cristallin d'un mica magnésien, la phlogopite ; les amphiboles et même l'idocrase peuvent contenir du fluor dans leur réseau cristallin. Le groupe des humites (silicates fluorifères de magnésium) est caractéristique de ces roches, ainsi que l'apatite fluorifère.

▼ ***Un échantillon de talcoschiste.***

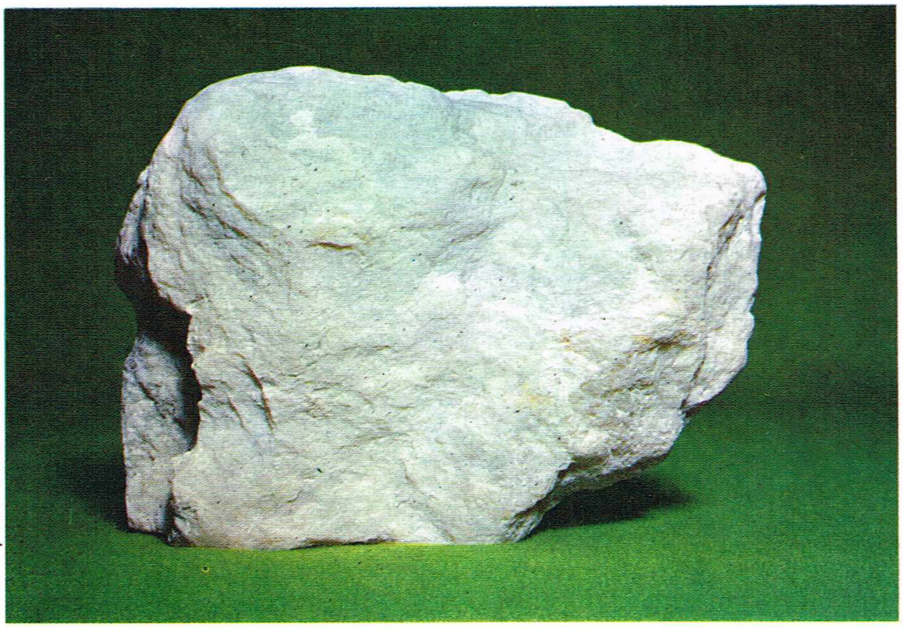

Archives photo B

L'apport métasomatique de *chlore* dans les roches calcaires et silicatées donne lieu à la formation de minéraux appartenant au groupe des scapolites et constitués d'un mélange isomorphe entre deux termes extrêmes (sodique et calcique) dont la composition est peu différente de celle des plagioclases mais qui contiennent des substances volatiles (chlore, ion carbonate et ion sulfate). La scapolite se forme par altération pneumatolytique des plagioclases calciques contenus dans les roches basiques et ultrabasiques, comme les gabbros et les amphibolites ; dans certains cas, il peut s'agir d'un phénomène d'autométasomatisme. Dans les roches calcaires, au contraire, la scapolite se forme parfois secondairement à partir des silicates de calcium métamorphiques, comme le grossulaire et l'idocrase. Un feldspathoïde contenant du chlore : la sodalite, se forme, rarement, dans les calcaires métasomatisés.

Certains *composés du soufre* (l'acide sulfhydrique, l'anhydride sulfureux, etc.) font partie des substances volatiles introduites à partir du magma dans les roches encaissantes, où elles peuvent produire des effets métasomatiques en formant des minerais utiles (sulfures, sulfates). L'apport de composés de soufre dans les calcaires dolomitiques peut provoquer la formation de la lazurite, minéral de couleur bleue, considéré comme une variété de l'haüyne (feldspathoïde) et qui accompagne d'autres minéraux dans les roches calcaires métasomatisées utilisées comme pierres ornementales *(lapis lazuli)*.

Des réactions métasomatiques importantes sont produites par l'*anhydride carbonique* contenu dans les solutions hydrothermales. Celui-ci provoque l'altération de nombreux minéraux silicatés, spécialement de ceux qui sont formés aux températures les plus élevées comme l'olivine, les plagioclases calciques, etc., et la genèse de carbonates. L'action de l'anhydride carbonique sur des roches contenant des silicates de magnésium, comme les serpentinites et les schistes chloriteux, entraîne la formation de carbonates (magnésite, dolomite et ankérite) et de talc. Ainsi se forment des *roches talqueuses* et *talco-dolomitiques*, lesquelles ont parfois une texture schisteuse *(schistes talqueux)*, produite par un métamorphisme régional antérieur ou contemporain. Les réactions métasomatiques diffèrent suivant la température ainsi que les pressions partielles des constituants de la phase fluide interstitielle et comprennent souvent l'éloignement de la silice dissoute. Le produit de ces phénomènes métasomatiques peut alors être une roche essentiellement dolomitique ou une roche composée de magnésite et de quartz.

En France, on rencontre fréquemment des roches métasomatiques, associées à des roches du métamorphisme thermique, autour des intrusions magmatiques de composition granitique, d'âge hercynien, qui ont transformé à leur contact les roches calcaires ou argileuses précambriennes et paléozoïques, en Bretagne, dans les Pyrénées, le Massif central et les Vosges. Par exemple, on connaît des skarns à grenat, idocrase, wollastonite, épidote, etc., en un très grand nombre d'endroits dans les Pyrénées. On rencontre des greisens à lépidolite, topaze, etc., dans la Haute-Vienne, etc. De nombreux gisements miniers sont liés à ces roches métasomatiques.

BIBLIOGRAPHIE

BARTH T.F.W., CORRENS C.W., ESKOLA P., *Die Entstehung der Gesteine,* Springer, Berlin, 1939. - GRUBENMANN U., NIGGLI P., *Die Geisteinmetamorphose,* Borntraeger, Berlin, 1924. - KORJINSKYI D.S., *Physicochemical Basis of the Analysis of the Paragenesis of Minerals,* New York, 1959. - MIYASHIRO A., *Evolution of Metamorphic Belts,* in *Journ. of Petrol.*, vol. II, 1961. - MIYASHIRO A., *Metamorphism and Related Magmatism in Plate Tectonics,* in *Amer. Journ. of Sci.*, vol. 272, 1972. - NIGGLI P., *Rocks and Mineral Deposits,* Freeman, San Francisco, 1954. - PITCHER W.S., FLINN G.W., *Controls of Metamorphism,* Oliver and Boyd, Édimbourg, 1965. - RAMBERG H., *The Origin of Metamorphic and Metasomatic Rocks,* The University of Chicago Press, Chicago, 1952. - TURNER F.J., *Metamorphic Petrology,* Mc Graw-Hill, New York, 1968. - WINKLER H.G.F., *Petrogenesis of Metamorphic Rocks,* Springer, Berlin, 1965.

TECTONIQUE

La tectonique (du grec τεκτονική, « art de construire ») est la branche de la géologie qui étudie les dislocations et les déformations subies par les roches constituant l'écorce terrestre, postérieurement à leur formation. On parle aussi de géologie structurale.

Au cours des temps géologiques, les roches n'ont pas toutes conservé leur mode de gisement originel, c'est-à-dire la position qu'elles avaient au moment où elles se sont formées ; de manière plus ou moins intense, elles ont été déformées après leur dépôt et leur consolidation, et ont ainsi acquis un nouveau mode de gisement.

Les actions des dislocations et des déformations sont particulièrement bien visibles dans les roches sédimentaires, grâce à leur disposition en strates de différentes couleurs, duretés, etc., séparées les unes des autres par des plans de stratification qui permettent le jeu des bancs les uns sur les autres. Dans la plupart des cas, ces roches se sont sédimentées au fond des mers et avaient à l'origine une position horizontale ou très peu inclinée. Il existe des régions où les roches sédimentaires ont conservé leur disposition originelle horizontale sur des centaines de kilomètres carrés, alors que dans d'autres régions les strates sont actuellement verticales ou courbées et leur déformation est évidente. Les roches éruptives, par contre, présentent généralement une structure massive, non stratifiée, et les effets des déformations y sont souvent plus difficiles à mettre en évidence. Cependant, toutes les roches, qu'elles soient sédimentaires, éruptives ou métamorphiques, peuvent être affectées par des déformations.

A l'échelle humaine, les masses rocheuses nous paraissent stables et permanentes. Seuls quelques phénomènes tectoniques actuels nous sont perceptibles, dont l'étude constitue la *néotectonique*. L'étude des phénomènes géologiques actuellement visibles permet dans de nombreux cas de mieux comprendre le déroulement de ceux qui ont pu avoir lieu dans le passé (sédimentation, érosion, volcanisme, etc.). C'est le « principe de l'uniformitarisme » énoncé par Ch. Lyell en 1830. Mais en tectonique, l'étude des phénomènes actuels ne nous renseigne que très peu car les mouvements tectoniques, généralement très lents, s'effectuent en plusieurs millions d'années et ne sont pas directement observables. On ne peut qu'observer le résultat de ces mouvements et essayer de les reconstituer.

On distingue différents types de **mouvements tectoniques.** Les *mouvements eustatiques* résultent d'un changement du niveau de la mer ; les *mouvements épirogéniques* sont des déformations lentes impliquant un mouvement vertical d'ensemble, par exemple, la remontée de la Scandinavie depuis la disparition des

U. Geddo

◀ ***Les actions des dislocations et des déformations sont particulièrement bien visibles sur cette côte où les strates ont acquis une disposition subverticale.***

glaciers quaternaires (200 m en 10 000 ans) ou l'affaissement du littoral de la mer du Nord en Hollande. Ces deux types de mouvements sont réversibles et continus. Ils se traduisent dans la morphologie par des affleurements de dépôts marins loin du rivage, des terrasses alluviales, d'anciennes surfaces d'érosion soulevées, des récifs coralliens soulevés au-dessus du niveau de la mer, etc.

Ces mouvements s'opposent aux *mouvements orogéniques*, qui se traduisent par des *déformations* intimes des masses rocheuses. Ces déformations très variées peuvent être classées en deux grands groupes : les *déformations cassantes* (failles) et les *déformations souples* (plis). L'observation de la formation de cassures qui affectent le sol lors des tremblements de terre nous apporte des renseignements directs sur le mode de formation des failles. Par contre, la genèse des déformations que l'on observe dans certaines régions comme les Alpes, où les roches ont été tordues, plissées et ont subi des déplacements importants sur des dizaines de kilomètres ou plus, est beaucoup plus difficile à expliquer car beaucoup trop lente pour être accessible à l'observation. Les nouvelles méthodes de nivellation, très précises, permettront peut-être dans quelques années de mettre en évidence les mouvements, même très petits, de l'écorce terrestre dans certaines régions.

La tectonique comprend essentiellement *la description* et *l'analyse géométrique* des structures que l'on peut observer en surface et l'extrapolation des résultats obtenus à des niveaux plus profonds non directement observables. Ces connaissances sont évidemment très importantes économiquement car elles permettent de prévoir la disposition en profondeur des gisements miniers. De plus, la tectonique comprend l'étude du déroulement de la déformation. Les *études cinématiques* permettent de déterminer comment les structures ont été acquises, et les *études dynamiques* de reconstituer les contraintes ayant donné lieu aux déformations. Mais ces reconstitutions sont généralement difficiles et incomplètes. L'effet des déformations se fait sentir à toutes les échelles d'observation. L'extrapolation des résultats d'un niveau scalaire à un autre est souvent problématique.

La *tectonique classique* étudie les structures d'échelle hectométrique à kilométrique. La *microtectonique,* ou *structurologie,* étudie les structures de petite échelle, millimétrique à métrique. Elle permet l'analyse de la déformation intime des roches, et en particulier des relations entre les recristallisations et les déformations dans les roches métamorphiques. Enfin, à partir des résultats des analyses tectoniques obtenues dans différentes régions, on élabore des théories orogéniques synthétiques, à l'échelle du globe terrestre, où l'on tient compte des relations existant entre le volcanisme, la séismicité, le magmatisme, le métamorphisme d'une part et la tectonique d'autre part.

Tectonique classique

Méthodes d'étude

Les observations tectoniques s'effectuent principalement sur le terrain, lors de la *cartographie,* c'est-à-dire lors du relevé sur une carte topographique des contours des différentes formations rocheuses présentes dans la région étudiée. La carte géologique est le principal instrument de l'étude géométrique des terrains. En France il existe des cartes géologiques à différentes échelles, du 1/1 000 000 au 1/50 000. La cartographie peut être complétée par le dessin de panoramas, des observations de détail, etc. De plus, on relève sur le terrain le **pendage** des différents éléments structuraux qui permet de définir leur position dans l'espace. Le pendage d'une couche est donné par l'inclinaison et l'azimut de la ligne de plus grande pente du plan de la couche. On mesure à l'aide d'une *boussole* la **direction** du plan (angle entre l'horizontale du plan et le méridien géographique local). L'**inclinaison** de la ligne de plus grande pente (angle que fait la ligne de plus grande pente du plan avec un plan horizontal) est mesurée à l'aide d'un *clinomètre* que l'on applique sur le plan. La direction et la ligne de plus grande pente d'un plan sont perpendiculaires. Sur les cartes, on indique le pendage par une flèche correspondant à la projection sur la carte de la ligne de plus grande pente, complétée par une barre perpendiculaire correspondant à la projection de la direction du plan. Une couche horizontale sera indiquée par une croix. La mesure s'effectue de même pour un plan de faille, de schistosité, etc. La position d'une ligne, celle d'un axe de pli, par exemple, est repérée par sa direction et son **plongement** (angle que fait la ligne avec l'horizontale dans le plan vertical passant par l'axe).

On sait que dans les *terrains sédimentaires* les couches étaient à l'origine horizontales, les plus récentes se déposant sur les plus anciennes. Après déformation, l'ordre des couches peut être renversé, les plus anciennes reposant sur les plus récentes. On peut reconnaître si l'ordre de succession des couches est normal ou inverse d'après les fossiles qu'elles contiennent et les critères de sédimentation (granoclassement, stratification entrecroisée, figures de base des bancs, etc.). Si deux couches d'âges différents viennent au contact l'une de l'autre, elles peuvent être séparées par une discordance ou par un contact tectonique anormal (faille, chevauchement). Tous ces renseignements sont reportés sur la carte géologique, dont la lecture permet de reconnaître les caractéristiques tectoniques d'une région (région plissée, non plissée, formes et directions des plissements, etc.). En tenant compte de l'âge des roches affectées par les déformations, on peut déterminer, de manière plus ou moins précise, l'âge de ces dernières. A partir des structures visibles en surface reportées sur la carte géologique, on peut construire des *coupes géologiques* qui reconstituent les structures existant en profondeur. En effet, si l'on connaît l'épaisseur et le pendage d'une couche, on peut déterminer quelle position elle occupe en profondeur.

Dans les *terrains métamorphiques,* où l'on ne dispose pas de repère stratigraphique permettant de dater les terrains et où les déformations sont généralement très intenses, il est nécessaire de faire appel aux méthodes plus détaillées de la microtectonique.

Les mesures des pendages des différents éléments structuraux observés en affleurement peuvent être reportées sur des *diagrammes* permettant soit d'étudier statistiquement ces mesures, soit d'analyser plus aisément l'agencement géométrique dans l'espace des différents éléments entre eux. Ces diagrammes sont construits grâce à un système de projection stéréographique ou équivalente (canevas de Wulff ou de Schmidt). Ils permettent également de franchir en partie l'obstacle que constitue le passage d'une échelle à l'autre, de la microtectonique à la tectonique classique.

Les affleurements sont en général discontinus, masqués par la végétation ou par des sédiments récents (alluvions, éboulis, etc.). On a donc souvent recours, lors du levé de carte, à des extrapolations, et les cartes comportent toutes une part interprétative. Dans les régions où les affleurements sont peu nombreux, on utilise les données obtenues grâce aux travaux miniers, aux tranchées, aux tunnels et aux sondages.

L'étude des déformations tectoniques est facilitée par l'emploi de *photographies aériennes* stéréoscopiques. Sur de telles photographies on peut déceler la présence de failles grâce à des alignements, des changements de végétation, etc. ; on peut encore différencier des terrains sédimentaires reposant horizontalement en *discordance* sur des structures plissées plus anciennes, etc. Un examen préliminaire des photographies aériennes facilite souvent l'étude directe sur le terrain mais ne peut la remplacer.

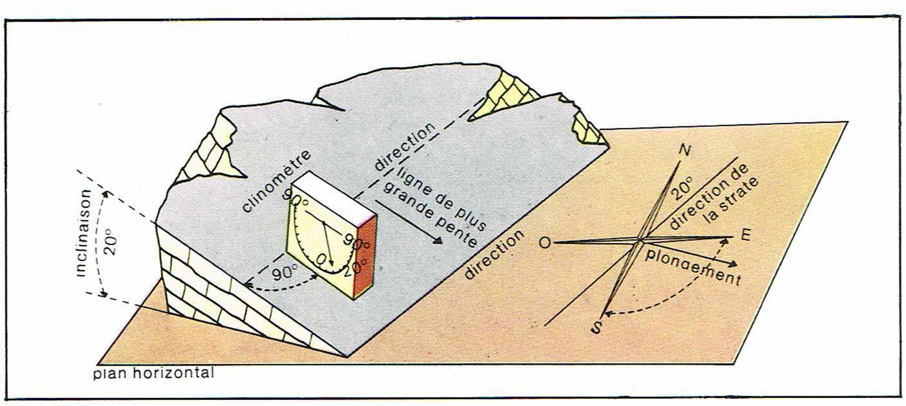

▼ ***Mesure du pendage d'une strate à l'aide d'une boussole : la* direction *de la strate est donnée par l'angle entre le nord et l'intersection de la surface de la couche avec un plan horizontal quelconque. Ici 20° vers l'est. Le* plongement *de la couche est indiqué par la ligne de plus grande pente. L'*inclinaison *est l'angle que fait la ligne de plus grande pente avec l'horizontale, ici 20° vers l'E.-S.-E. Elle est mesurée à l'aide d'un clinomètre placé perpendiculairement à la direction de la strate.***

J.-M. Quenardel

▲ ***Discordance angulaire entre le Miocène horizontal et le Crétacé incliné, dans les calanques des environs de Marseille.***

Les méthodes de prospection géophysique sont de plus en plus employées en tectonique (gravimétrie, anomalies magnétiques, sismique-réflexion, sismique-réfraction). On peut ainsi déceler des anomalies permettant de localiser en profondeur certains accidents et donnant des renseignements sur leur nature (anticlinal caché, dôme de sel, faille, etc.). Elles contribuent à l'interprétation de la structure géologique en profondeur de la région étudiée. Ces méthodes sont surtout employées à des fins minières. Dans l'étude des fonds océaniques, difficilement accessibles à l'observation directe, elles jouent un rôle fondamental.

Toutes ces méthodes aident à déchiffrer la géométrie des structures. Pour expliquer leur genèse, on fait appel à la mécanique des roches et à des expériences sur modèles réduits. En respectant certaines conditions mécaniques (plasticité du matériel, etc.), on peut reproduire des phénomènes tectoniques observés dans la nature et étudier le mécanisme de leur formation. Toutefois, les conditions sont beaucoup plus complexes dans la nature que dans les modèles réalisés, et surtout les vitesses de déformation y sont considérablement plus longues. Aussi l'application des données obtenues à l'interprétation des déformations naturelles n'est-elle pas toujours aisée.

Mécanismes de déformation

Avant d'aborder l'inventaire des déformations des matériaux de l'écorce terrestre, il est nécessaire d'étudier les propriétés mécaniques des roches et d'avoir une idée du mécanisme des déformations. On fait appel pour cela à des expériences permettant d'étudier quantitativement ces propriétés. Les roches qui constituent l'écorce terrestre sont des solides plus ou moins durs et élastiques soumis à des contraintes variables suivant la région considérée, la profondeur, etc. En un point donné de l'écorce, une roche est soumise à une pression lithostatique due au poids des terrains sus-jacents et à une pression hydrostatique due à la pression exercée par les fluides qui imprègnent les roches. Ces deux pressions sont isotropes, la pression hydrostatique étant généralement plus faible que la pression lithostatique. A ces pressions isotropes viennent s'ajouter des pressions orientées, anisotropes, de compression ou d'extension, responsables des déformations tectoniques.

Si l'on suppose un corps solide auquel sont appliquées des forces, la *contrainte,* ou *stress,* en un point quelconque du corps est égale à la limite du rapport

$$\sigma = \frac{dF}{dS}$$

quand dS tend vers 0 ; F est la force en kilogrammes-force appliquée au corps, et S la surface en centimètres carrés sur laquelle elle s'applique. On peut définir l'état de contrainte en un point si l'on connaît les trois pressions principales maximale, moyenne et minimale, σ_1, σ_2 et σ_3, s'exerçant dans trois directions perpendiculaires de l'espace. Si les trois pressions principales sont égales, la contrainte reste constante quelle que soit l'orientation de S dans l'espace. Elle est donc isotrope et peut être représentée par une sphère. C'est le cas des roches soumises uniquement aux pressions lithostatique et hydrostatique. Il arrive que deux des pressions principales soient égales ; la répartition de la contrainte présente alors une symétrie de révolution. Lorsque les trois pressions principales sont différentes, la contrainte varie suivant l'orientation de S dans l'espace. On a dans ce cas une contrainte triaxiale, qui peut être représentée par un ellipsoïde. C'est le cas des roches soumises à des pressions tectoniques orientées.

La *déformation* d'un corps est une réponse à la contrainte. De nombreux facteurs interviennent, et la relation entre l'état de contrainte et la déformation est complexe. Des expériences de laboratoire ont montré qu'un corps homogène et isotrope soumis à une pression anisotrope dans des conditions physico-chimiques données peut présenter *trois modes de déformation.* Suivant l'intensité de la contrainte, il est d'abord l'objet de **déformations élastiques,** réversibles, qui disparaissent complètement quand la pression cesse d'exercer son action ; le corps reprend alors son volume et sa forme initiaux. A partir d'un certain seuil, dit *seuil de plasticité,* ou *limite d'élasticité,* il subit une **déformation plastique,** permanente et proportionnelle à la pression. Enfin, quand le seuil de rupture est atteint, on observe une **déformation cassante,** et il apparaît dans le corps des surfaces de rupture ; la déformation est alors discontinue.

Ces trois modes de déformation peuvent être représentés graphiquement sur des *diagrammes contrainte-déformation.* Le début de la courbe contrainte-déformation forme une droite de forte pente : la déformation est peu importante, et la relation entre la contrainte et la déformation est linéaire. Ce premier stade correspond au domaine des déformations élastiques. Certaines roches peuvent, dès ce stade, atteindre le seuil de rupture : ce sont des roches cassantes. D'autres roches ne se rompent pas : la courbe s'incurve et sa pente diminue. C'est le domaine des déformations plastiques. Le seuil de plasticité correspond au point d'inflexion de la courbe. Enfin, au-delà d'un certain taux de déformation, la rupture se produit.

Les déformations élastiques sont difficiles à déceler dans les roches parce qu'elles ne sont pas permanentes. Les tremblements de terre peuvent être dus à la détente brutale des déformations élastiques accumulées sous l'action de pressions tectoniques. Les déformations plastiques sont bien connues dans les métaux. Dans les roches, elles se traduisent au niveau des cristaux par une déformation des grains cristallins (macles), par une dissolution et recristallisation de ces grains, par de multiples cassures de cisaillement aussitôt cimentées qui, globalement, se traduisent par une déformation plastique de la roche.

Le mode de déformation est déterminé par différents facteurs. Tout d'abord, il dépend de la roche elle-même, les seuils de plasticité et de rupture variant suivant les roches considérées. Par exemple, le gypse et le sel présentent un seuil de plasticité extrêmement bas par comparaison avec celui des granites. D'autre part, la stratification et la schistosité introduisent des plans d'anisotropie dans les roches, et les conditions de rupture

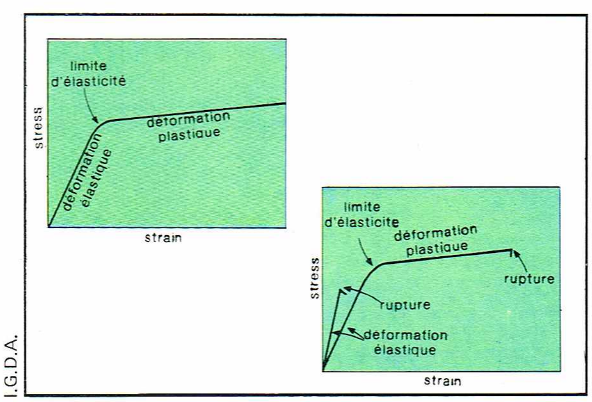

I.G.D.A.

◄ ***A gauche, rapports entre « stress » (contrainte) et « strain » (déformation). Le diagramme montre qu'au début de l'augmentation de la contrainte, la déformation croît proportionnellement : on a à ce stade une déformation élastique réversible ; passé la limite d'élasticité, la déformation devient plastique. A droite, diagramme montrant le comportement de deux matériaux différents soumis au même stress (contrainte). Le premier subit une déformation élastique, puis se casse ; le second subit une déformation élastique, puis une déformation plastique avant de casser.***

▶ *Une faille est une rupture de nature tectonique affectant une masse rocheuse et s'accompagnant d'un déplacement relatif des deux masses rocheuses résultantes. Ici, une faille dans les gorges de l'Esteron (calcaire séquanien).*

N. Santarelli

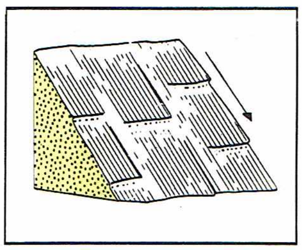

I.G.D.A.

▲ *La partie visible du plan de faille montre des stries qui sont parallèles à la direction du mouvement. La présence de petits gradins indique le sens relatif du mouvement.*

varieront si la pression maximale est orientée perpendiculairement ou à 45° par rapport à ces plans.

Le mode de déformation dépend également des conditions physiques dans lesquelles a lieu la déformation : par exemple, à la température de la surface terrestre les gneiss se comportent comme des corps très rigides, mais à températures élevées, dans les conditions de métamorphisme, ils se comportent comme des corps plastiques. Ainsi, la déformation variera en fonction de la profondeur pour un gradient géothermique donné. Un autre facteur intervient dans le mode de déformation : la proportion de fluides que contiennent fréquemment les roches, fluides interstitiels ou contenus dans les pores de la roche. Une forte proportion d'eau dans la roche peut faciliter la rupture par rapport à la déformation plastique. Enfin, la durée de la contrainte joue également un rôle. Les roches peuvent présenter des **déformations visqueuses,** permanentes et fonctions du temps. Étant donné l'échelle des temps géologiques, il se peut que des déformations visqueuses aient lieu même si les roches sont soumises à une contrainte relativement faible.

A partir des données expérimentales sur les différents modes de déformation des corps, on peut définir *trois mécanismes élémentaires principaux de déformation* des roches qui sont : l'aplatissement, la flexion et le cisaillement.

Au cours de l'**aplatissement,** un cube est transformé en un parallélépipède rectangle de même volume dont les faces sont parallèles à celles du cube initial. L'aplatissement a lieu pour une pression principale maximale σ_1 forte et les deux autres pressions principales faibles. Il est matérialisé dans les roches par l'aplatissement des objets antétectoniques, tels que les fossiles ou les galets, dans un plan perpendiculaire à σ_1, et leur étirement parallèlement à σ_3. L'apparition de la schistosité dans les roches est liée à une déformation par aplatissement.

La **flexion** est une déformation continue des roches au cours de laquelle une strate est plissée de telle manière que son épaisseur mesurée perpendiculairement aux joints de stratification reste constante. Il se forme des plis isopaques, encore appelés parallèles ou concentriques.

Le **cisaillement** correspond à une déformation par aplatissement et rotation d'ensemble. A partir d'un cube on obtient par cisaillement un parallélépipède dont les faces ne sont plus parallèles à celles du cube initial. Ce type de déformation se produit pour une contrainte « cisaillante », qui peut être matérialisée par un couple.

Ces trois mécanismes peuvent avoir lieu plus ou moins simultanément en donnant lieu à des mécanismes complexes. De plus, on observe des translations (changements de position) et des rotations (changements d'orientation) sans déformation (changements de forme).

Types élémentaires de déformation

En réponse aux contraintes, les déformations des roches peuvent être très variées. On distingue les déformations continues et les déformations discontinues. Dans une *déformation continue,* deux points initialement voisins l'un de l'autre restent voisins; c'est le cas des déformations souples par plissement. Dans une *déformation discontinue,* deux points initialement voisins se retrouvent à des distances quelconques, séparés par une surface le long de laquelle il y a glissement. Entre deux surfaces de glissement, la déformation est continue ou nulle; c'est le cas des failles, des diaclases, etc. Ces deux types de déformation sont souvent associés et contemporains.

Les failles

Une faille est une rupture de nature tectonique affectant une masse rocheuse et s'accompagnant d'un déplacement relatif des deux masses rocheuses résultantes le long d'une surface, appelée *plan de faille,* qui n'est généralement pas plane mais courbe. Elles se distinguent des diaclases, cassures sans déplacement visible.

Les deux masses rocheuses séparées par une faille sont appelées *compartiments de faille.* Il arrive qu'une faille s'exprime en surface par une dénivellation, ou *escarpement de faille.* La partie visible du plan de faille, quand elle est bien définie, peut présenter un aspect poli dû au frottement provoqué par le mouvement des blocs rocheux l'un contre l'autre; elle est alors nommée *miroir de faille.* Ce miroir peut être strié ou creusé de sillons, qui donnent des renseignements sur le déplacement relatif des deux compartiments : les *stries* sont parallèles à la direction du mouvement, dont le sens est indiqué par l'orientation des petits gradins formés par arrachement.

Les bords des deux compartiments au voisinage de la faille sont appelés des *lèvres.* Ces lèvres peuvent être au contact direct l'une de l'autre ou écartées *(faille béante),* ou encore colmatées par des produits de remplissage. Le frottement dû au déplacement des deux lèvres peut produire une *brèche de faille :* le long de la faille, la roche a été broyée en de nombreux fragments, plus ou moins cimentés entre eux ultérieurement. Lorsque la roche a été broyée en une poudre fine, on parle de *mylonite.* Il arrive très fréquemment aussi qu'au voisinage d'une faille les strates se rebroussent en formant un *crochon de faille.*

Des produits d'origine profonde peuvent monter le long des failles, et celles-ci sont jalonnées par des minéralisations métallifères, des remontées d'eaux thermales (La Bourboule), des filons de roches éruptives, ou des volcans (volcan du Kaiserstuhl associé aux failles

▲ ***Un bel exemple de flexure** dans des sédiments du Trias.*

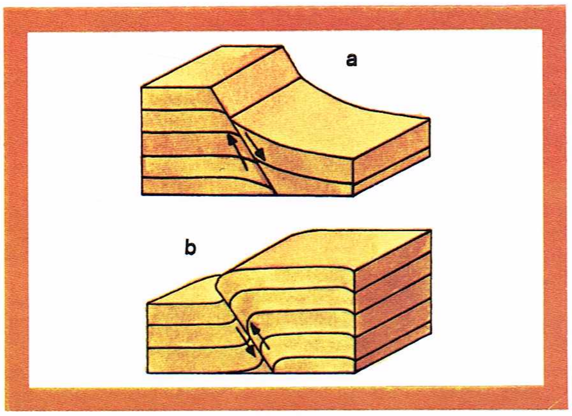

◀ ***Représentation schématique de crochons de failles** : a, faille normale; b, faille inverse.*

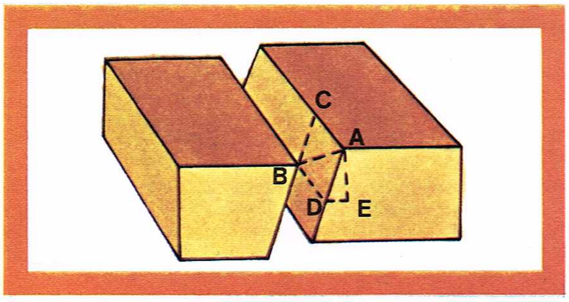

◀ ***Principaux types de rejet d'une faille** : **AB**, rejet vrai; **AE**, rejet vertical; **BD = AC**, rejet horizontal.*

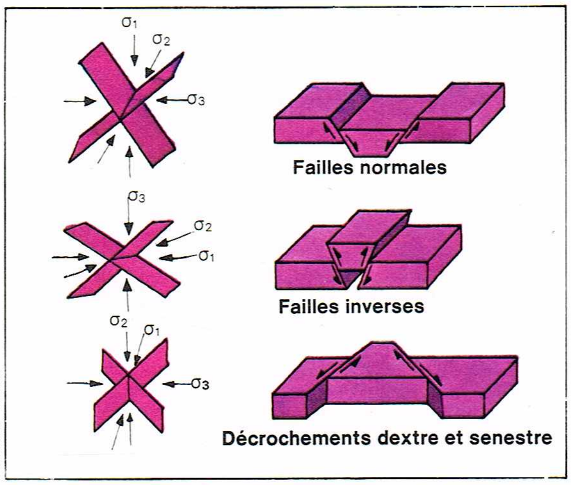

◀ ***Représentation** schématique des failles conjuguées symétriques par rapport à la pression principale maximale, et structures correspondantes.*

du fossé Rhénan). Les tremblements de terre, enfin, sont associés à leur présence.

On peut déterminer pour un plan de faille, de même que pour une strate, une direction, un sens et un plongement du pendage. Par le terme *ligne de faille,* on désigne l'intersection du plan de faille avec la surface du terrain; elle n'est confondue avec la direction du plan de faille que si celui-ci est vertical.

Le déplacement relatif des deux compartiments de faille est défini par le segment de droite joignant deux points originellement au contact l'un de l'autre (un fossile coupé en deux par exemple) : c'est le **rejet vrai.** Mais celui-ci est difficile à déterminer car il n'existe pas toujours de point de repère. Il est plus facile de mesurer le **rejet vertical,** composante du rejet vrai mesurée dans un plan de projection vertical perpendiculaire au plan de faille et qui correspond à la dénivellation produite par la faille. Le **rejet stratigraphique** est mesuré perpendiculairement aux strates quand celles-ci sont inclinées. Le **rejet horizontal** correspond à la composante horizontale du rejet vrai, projeté suivant un plan vertical parallèle à la direction de la faille.

Une faille se manifeste sur le terrain par toute une série de phénomènes secondaires : schistosité localisée, bréchification des roches, crochon de faille, etc.

Les failles peuvent affecter les terrains sur des épaisseurs considérables et s'étendre sur plusieurs centaines de kilomètres, mais ce sont le plus souvent des accidents limités en direction et en profondeur. En direction, le rejet vertical peut diminuer ou s'annuler. Les failles peuvent aussi bifurquer. En profondeur, on peut avoir un amortissement progressif d'une faille si, au-dessus ou en dessous des terrains rigides affectés par la faille, il existe des terrains plastiques qui se déformeront par étirement. Il se forme alors une *flexure,* qui diminue progressivement d'importance.

L'*âge d'une faille* peut être déterminé si des sédiments sont venus reposer en transgression sur les terrains affectés par la faille, sans en être eux-mêmes affectés. Les failles jouent souvent à plusieurs reprises au cours des temps, et leur rejet peut même s'inverser.

D'après le comportement relatif des deux compartiments lors du déplacement, on distingue différents types de failles. Un plan de faille peut être vertical ou incliné. Une faille inclinée dont le compartiment abaissé se trouve au-dessus du plan de faille est dite **faille normale;** ce type, qui correspond à un allongement de l'écorce terrestre, est encore appelé **faille d'extension.** Au contraire, si le compartiment abaissé se trouve en dessous du plan de faille, il s'agit d'une **faille inverse;** celle-ci, qui correspond à un raccourcissement de l'écorce terrestre, est encore appelée **faille de compression.** Les crochons de faille, quand ils existent, indiquent directement si une faille est normale ou inverse. De plus,

▶ *Différents types de failles : A et C, failles normales; B et D, failles inverses.*

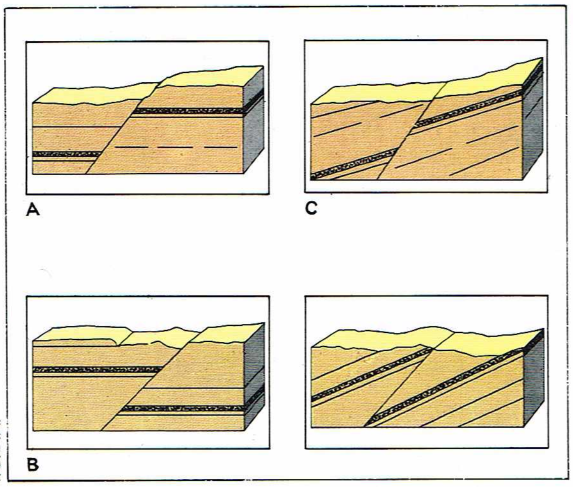

▼ *Différents systèmes de failles : en haut, failles en échelons (Oklahoma); au centre, failles radiales (r) et failles concentriques (c); en bas, failles réticulées.*

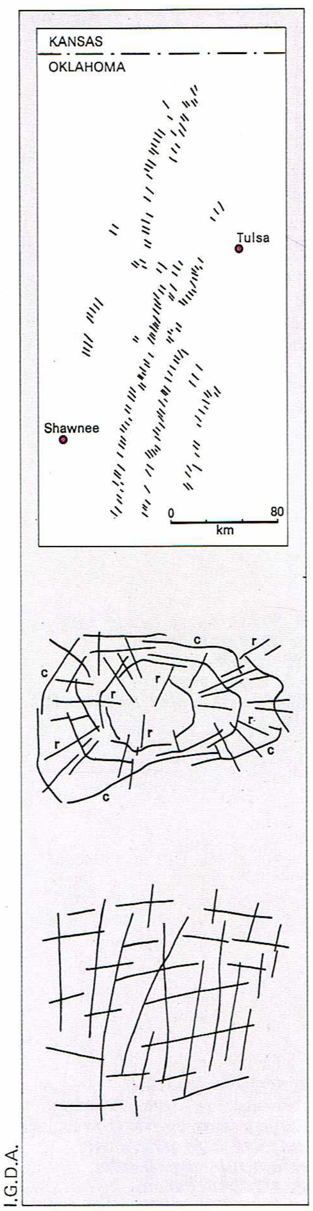

I.G.D.A.

si les couches sont inclinées, on distingue, d'après la direction de la faille par rapport à la direction des couches, les **failles directionnelles,** ou **longitudinales,** de direction parallèle à celle des couches, et les **failles transversales,** de direction oblique ou perpendiculaire à celle des couches. Parmi les failles directionnelles on distingue encore les **failles conformes,** dont le plan de faille pend dans le même sens que les couches, et les **failles contraires** quand les couches et le plan de faille pendent en sens contraire.

Une faille dont le mouvement relatif des compartiments s'effectue principalement suivant le rejet horizontal est appelée **décrochement.** Les rejets horizontaux sont souvent assez difficiles à mettre en évidence, et l'importance des décrochements a longtemps été sous-estimée. Le plan des décrochements est souvent vertical, et les stries portées par le miroir sont horizontales. Aux grands décrochements est associée toute une série de structures secondaires : plis en échelon, failles en échelon, décrochements de deuxième ordre, etc. Un décrochement est dit *dextre* si le mouvement de part et d'autre du décrochement a eu lieu dans le sens des aiguilles d'une montre, *senestre* s'il a eu lieu en sens inverse. Un exemple classique de grand décrochement est la faille de San Andreas en Californie. Cette faille dextre, longue de 900 km, a rejoué plusieurs fois au cours des temps; son rejet horizontal a été évalué à 400 km depuis le Crétacé. Elle rejoue encore actuellement et a provoqué des séismes, notamment celui de San Francisco en 1906 qui a été accompagné de déplacements horizontaux de quelques mètres. On peut également citer le grand décrochement senestre de la Great Glen Fault en Écosse (100 km de rejet horizontal estimé grâce aux deux parties décalées d'un massif granitique), le décrochement dextre Nord-Anatolien en Turquie qui se suit sur 1 300 km, etc.

Le plus souvent, les failles n'apparaissent pas isolément mais groupées en **systèmes de failles,** ou **champs de fractures.** On peut ainsi observer des systèmes de failles parallèles, radiales, concentriques, rayonnantes, réticulées, etc. Des failles parallèles entre elles et qui se relaient sont appelées des **failles en échelon.** Elles sont souvent localisées dans les zones de grand décrochement. Des failles normales parallèles, pendant toutes dans le même sens, sont disposées **en gradins** ou **en escaliers.**

Dans certains cas simples, où deux systèmes de failles sont conjugués, c'est-à-dire symétriques par rapport à un plan, on peut définir l'état de contrainte dans lequel elles se sont formées et les directions de raccourcissement et d'allongement de l'écorce. On peut reproduire ces cas simples en modèles réduits de manière très satisfaisante. Des cassures parallèles normales conjuguées à 45° du plan vertical apparaissent si la pression principale maximale σ_1 est verticale et si les deux autres pressions principales σ_2 et σ_3, horizontales, ont des valeurs faibles ou nulles. Ces cassures déterminent la formation d'un **fossé d'effondrement,** ou **graben.** Ce sont des structures de distension de l'écorce terrestre. La vallée du Rhin entre Bâle et Mayence, la Limagne, la Bresse, les fossés de la mer Morte, de la mer Rouge et des grands lacs d'Afrique orientale (Rift Valley) sont des exemples de grabens. Le panneau tectonique resté en relief est appelé **horst.** Les Vosges, le Forez, la péninsule du Sinaï en sont des exemples. Ces jeux de failles en extension permettent l'ouverture de fissures dans l'écorce terrestre par lesquelles monte du magma profond, et les grabens sont souvent le siège d'un volcanisme intense : volcans de la chaîne des Puys, volcans de l'Afrique orientale, dont le Kilimandjaro (6 010 m).

Des cassures parallèles conjuguées à 45°, ou moins, d'un plan horizontal apparaissent si la pression principale minimale σ_3 est verticale, les deux autres pressions principales σ_2 et σ_1 étant horizontales. Ces cassures jouent en failles inverses ou en chevauchements et traduisent un raccourcissement de l'écorce suivant σ_1. Elles ont un rôle très important dans la formation des chaînes de montagnes (Pyrénées, Alpes, etc.). Enfin, des failles subverticales de décrochement dextres et senestres conjuguées apparaissent si c'est la pression principale intermédiaire σ_2 qui est verticale. Elles font théoriquement un angle de 45° ou un peu moins, la pression principale maximale ayant une direction horizontale. Les roches sont soumises à la fois à un raccourcissement selon σ_1 et à un allongement selon σ_3. On pourra donc avoir, associées à ces décrochements conjugués et se formant simultanément, à la fois des structures de compression perpendiculaires à σ_1 (plis, chevauchements) et des structures en extension perpendiculaires à σ_3 (grabens d'effondrement).

Au cours des temps les failles peuvent avoir des rejeux successifs et le sens du mouvement peut s'inverser. Ainsi, une faille normale peut rejouer en faille inverse. A la suite d'une compression postérieure à la formation d'une faille, celle-ci peut être courbée. On parle alors de **faille-pli,** structure fréquente dans le Jura.

Les plis

Les plis sont des déformations continues qui affectent surtout les roches sédimentaires et les roches métamorphiques. Dans une région plissée, les structures peuvent être d'une très grande complexité, d'autant qu'aux plis peuvent se superposer tous les types de failles décrits ci-dessus.

Un pli est défini quand une strate originellement horizontale est devenue plus ou moins inclinée et courbe. Dans une série normale, un pli convexe vers le haut est un **anticlinal,** et un pli convexe vers le bas est un **synclinal.** Quand on ne connaît pas l'ordre de succession des couches, on parle respectivement d'**antiforme** et de **synforme.** Une succession de plis anticlinaux et synclinaux de taille moyenne déterminant un pli anticlinal majeur s'appelle un **anticlinorium;** une telle succession déterminant un pli majeur synclinal s'appelle un **synclinorium.**

Les éléments d'un pli sont : la *charnière,* zone de courbure maximale du pli, les *flancs,* côtés du pli de part et d'autre de la charnière, le *plan axial,* surface plus ou moins plane qui passe par les points de courbure maximale des différentes couches affectées par le pli, enfin, l'*axe* du pli, lieu des points de courbure maximale d'une couche, intersection de la charnière et du plan axial. L'axe indique la direction du pli et peut être rectiligne ou sinueux, horizontal ou plongeant, droit ou courbe. Quand la convexité de l'axe est dirigée vers le haut, on a une *culmination axiale;* si la convexité est dirigée vers le bas, on a une *dépression axiale.* Un pli peut s'amortir par une augmentation de son rayon de courbure. On a alors une *terminaison périclinale, périanticlinale* ou *périsynclinale.*

Sur une carte, un pli anticlinal est caractérisé par la présence des couches les plus anciennes en son cœur, alors que dans un pli synclinal ce sont les couches les plus récentes qui affleurent au centre. Un anticlinal qui s'ennoie très rapidement est un **brachyanticlinal,** ou **dôme** si ses dimensions longitudinales et transversales diffèrent peu. S'il s'agit d'un synclinal, on parle de **brachysynclinal** ou de **bassin.**

Des plis à axes parallèles et qui se relaient sont appelés **plis en échelons.** Ils se forment souvent, comme les failles en échelons, au-dessus d'un décrochement potentiel, sous l'action d'un couple de forces.

Géométriquement, on distingue différentes formes de plis. Un **pli** est **symétrique** quand les deux flancs présentent la même inclinaison de part et d'autre du

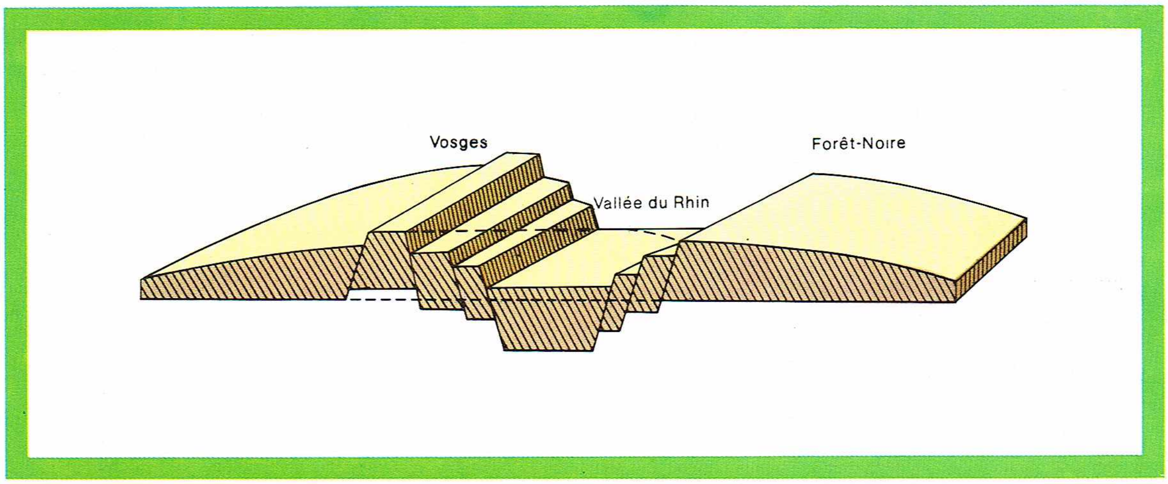

◀ *Représentation d'un* **fossé d'effondrement :** *ici, la vallée du Rhin entre Bâle et Mayence; les Vosges et la Forêt-Noire constituent des* **horsts.**

I.G.D.A.

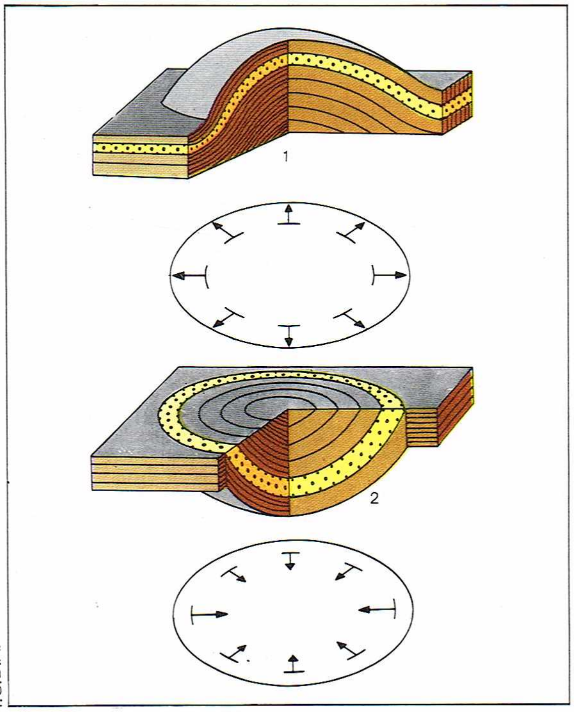

I.G.D.A.

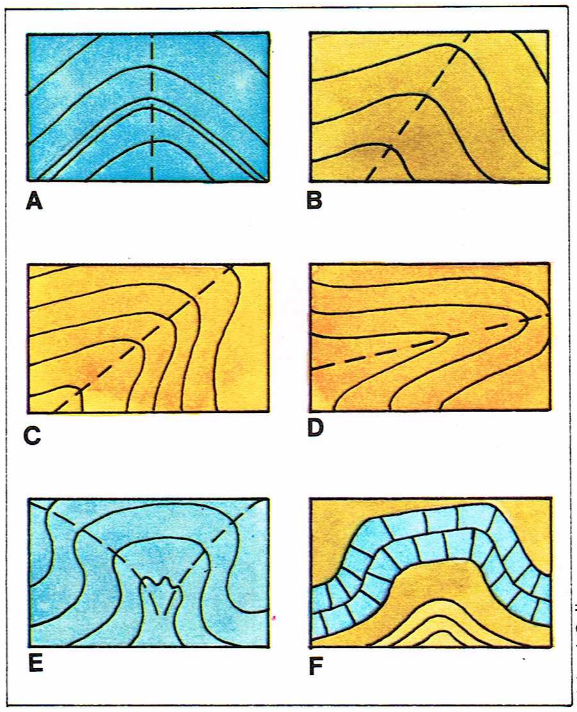

Richard Colin

▼ *Représentation schématique des* **éléments d'un pli :** **ABCD,** *plan axial de l'anticlinal;* **EFGH,** *plan axial du synclinal;* **AB,** *axe de l'anticlinal;* **EF,** *axe du synclinal;* **AC** *et* **EG,** *traces des plans axiaux sur la section transversale du pli.*

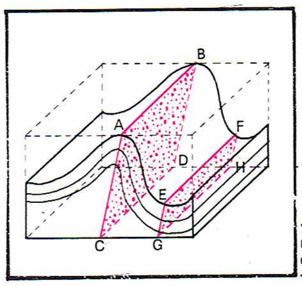

I.G.D.A.

▲ *A gauche, représentation schématique en coupe et en plan d'un* **brachyanticlinal,** *ou* **dôme** *(1), et d'un* **brachysynclinal,** *ou* **bassin** *(2).*

A droite, différents types de plis :
A, *pli symétrique droit;* **B,** *pli déversé;*
C, *pli renversé;* **D,** *pli couché;* **E,** *pli en éventail;* **F,** *pli coffré.*

plan axial, **asymétrique** dans le cas contraire. Suivant l'inclinaison du plan axial, on distingue : le **pli droit** à plan axial vertical, **déjeté** ou **déversé** si le plan axial est incliné, **renversé** si l'un des flancs a dépassé la verticale et **couché** lorsque le plan axial et les deux flancs sont sensiblement horizontaux. Un **pli coffré** est un anticlinal à crête large et flancs subverticaux. Un **pli en éventail** est un pli dont les flancs sont déversés dans deux directions opposées. Un **pli** est **isoclinal** quand ses deux flancs sont parallèles. Dans le cas des plis renversés et couchés, on appelle *flanc normal* celui dans lequel les strates se suivent par ordre chronologique (plus récentes sur plus anciennes) et *flanc inverse* celui où la succession des strates est inversée. Il arrive que dans un pli renversé ou couché le flanc inverse s'étire et s'amincisse à tel point qu'il se rompt et disparaît. Ainsi prend naissance une surface de cisaillement sur laquelle le flanc normal glisse et le long de laquelle on peut retrouver des lambeaux du flanc inverse disparu. Des terrains plus anciens viennent alors reposer en contact anormal sur des terrains plus récents. Une telle structure est appelée **pli-faille.** Quand plusieurs plis-failles se succèdent, on parle de *structures en écailles.*

Suivant le mode de plissement, on distingue deux types de plis : les plis isopaques et les plis semblables.

Dans un **pli isopaque,** dit aussi **parallèle** ou **concentrique,** les strates gardent une épaisseur constante et sont plissées en courbes parallèles. Le pli se forme par flexion et glissement des couches les unes sur les autres;

▼ *Représentation schématique de la formation d'un* **pli-faille :** *de gauche à droite, on peut observer l'étirement progressif et l'amincissement du flanc inverse jusqu'à sa disparition, le flanc normal se superpose alors directement sur le synclinal sous-jacent. Les flèches indiquent la direction des poussées qui sont à l'origine du mouvement.*

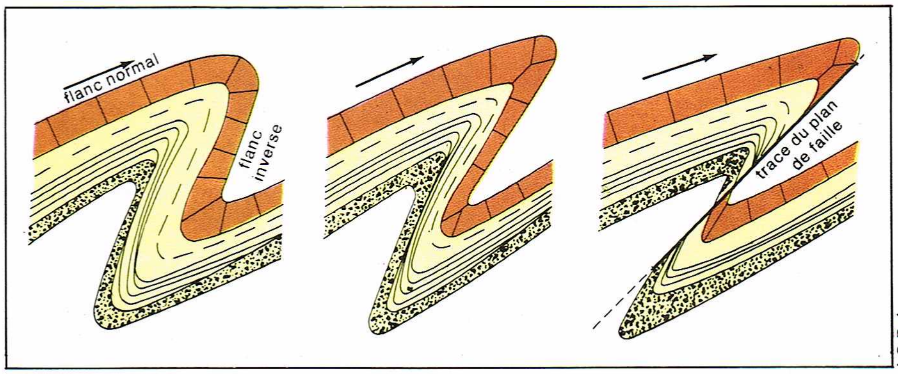

I.G.D.A.

A. Michard

N. Santarelli

▲ *A gauche, un exemple de pli isopaque ou concentrique; les strates gardent une épaisseur constante et sont plissées en courbes parallèles (flysch, Maroc). A droite, dans le cas de* **plis semblables,** *les strates ne conservent pas la même épaisseur et subissent un étirement dans les flancs des plis et un épaississement dans les charnières.*

on peut parfois observer sur les couches des stries, perpendiculaires à l'axe du pli, témoins de ce glissement. Des *fentes* d'ouverture *d'extrados* peuvent apparaître au dos des plis, parallèles à l'axe du pli. Mais les couches ne peuvent rester parallèles les unes aux autres et garder leur épaisseur constante que sur une épaisseur limitée. Il arrive un moment où le rayon de courbure devient trop faible, et au cœur du pli les couches doivent se déformer de façon différente. Elles ne conservent plus la même épaisseur, ou bien se faillent ou se plissent de manière désordonnée (phénomène de bourrage, *plis dysharmoniques*) : on dit qu'il y a *dysharmonie*. Ce phénomène est possible du fait de la présence de couches *incompétentes* relativement plastiques et capables de se plissoter ou de s'étirer facilement. Les roches incompétentes sont, par exemple, les marnes et les argiles, tandis que les calcaires, rigides, sont des roches compétentes. En profondeur, la dysharmonie permet une déformation des roches différente de celle observée en surface. Quand deux strates compétentes sont séparées par une couche incompétente, il se forme dans cette couche des plis d'entraînement ou *drag-folds* causés par le glissement des couches compétentes l'une sur l'autre. Ces plis sont toujours déversés vers la charnière du pli majeur.

Dans les **plis semblables,** les strates ne conservent pas la même épaisseur et subissent un étirement se traduisant par un amincissement des flancs du pli et un épaississement dans la zone de la charnière. Ces plis ne se forment pas par flexion mais par aplatissement et glissement parallèlement au plan axial. Aux plis semblables est souvent associée une schistosité de plan axial. Si un banc compétent est intercalé dans une série incompétente présentant des plis semblables, il est soumis, dans les flancs du pli, à un étirement se traduisant par des cassures qui le fragmentent en tronçons. On donne à ce phénomène le nom de *boudinage*. Enfin, il existe des plis qui ne se forment ni par flexion, ni par aplatissement, mais par écoulement. Ils ne se forment que si les roches sont suffisamment plastiques, à haute température (migmatites).

L'apparition de l'un ou l'autre mode de plissement dépend de la nature lithologique des roches (compétentes, incompétentes) ainsi que des conditions de températures et de pressions existant lors du plissement.

J.-M. Quenardel

▶ *Phénomène de* **dysharmonie** *dans un pli : les couches ne conservent pas la même épaisseur et se plissent de manière désordonnée (plis dysharmoniques) dans le cœur d'un pli concentrique.*

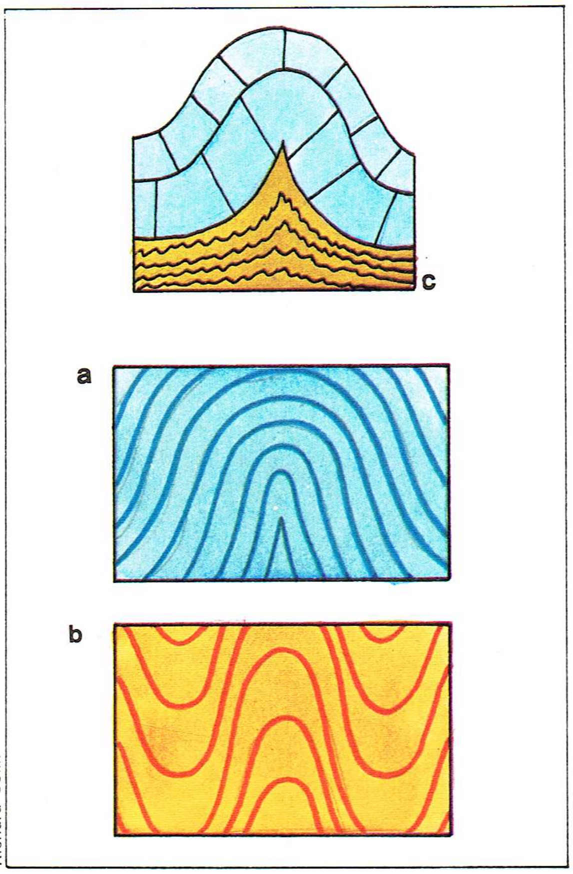

Richard Colin

Institute of Geological Sciences, Geological Museum, Londres

▲ *A gauche, en haut, représentation schématique de* **plis isopaques** *(a) et de* **plis semblables** *(b); en bas,* **dysharmonie** *entre roches compétentes et roches incompétentes (c). A droite, phénomène de* **boudinage** *affectant des grès et des argiloschistes (Cornouailles).*

Les chevauchements et nappes de charriage

Nous avons vu que l'évolution d'un pli renversé ou couché conduit à l'étirement du flanc inverse et à la formation d'une surface de cisaillement le long de laquelle glissent les strates qui constituaient le flanc normal du pli, des couches anciennes venant ainsi reposer en contact anormal sur des couches plus récentes. On appelle ce contact anormal un **chevauchement.** Les chevauchements peuvent atteindre plusieurs kilomètres d'amplitude. On appelle **nappe de charriage** un chevauchement de grande amplitude pouvant atteindre plusieurs dizaines de kilomètres, qu'il s'agisse de l'exagération d'un pli couché avec flanc inverse conservé (nappe du premier genre selon la terminologie de P. Termier) ou d'un glissement selon une surface de cisaillement non associée à des plis (nappe du deuxième genre). Les terrains ainsi charriés, appelés *allochtones,* peuvent être complètement différents des terrains situés sous la surface de charriage qui forment le substratum *autochtone.* On distingue parfois plusieurs nappes de charriage superposées dans lesquelles le matériel, bien que pouvant être de même âge, se présente sous des faciès différents.

Le *front* d'une nappe est sa partie la plus avancée. Le plus souvent, il a disparu soit par suite de l'érosion, soit parce qu'il a été recouvert par des sédiments plus récents, postérieurs à la mise en place de la nappe. La région qui se trouve en avant du front de nappe est appelée *avant-pays.* Les *lambeaux de poussée* sont des écailles provenant du substratum et entraînées à la base de la nappe lors de l'avancée de celle-ci ; de taille variable, ils peuvent atteindre des dimensions plurikilométriques.

Lorsque l'érosion attaque la nappe, il arrive qu'elle mette au jour le substratum autochtone de la nappe en une **fenêtre tectonique,** formée de terrains autochtones entourés de tous côtés par des terrains allochtones différents. Si la nappe n'est conservée que sur une partie du contour, on parle de **demi-fenêtre.** Si une partie de la nappe a été complètement isolée par l'érosion, elle est appelée **lambeau de recouvrement,** ou **klippe.**

On désigne par le terme de *racines* la région à partir de laquelle a commencé le déplacement de la nappe et où se trouvent des roches semblables à celles constituant la nappe, en place, non charriées. On observe quelquefois directement l'enracinement des nappes qui passent en continuité à une couverture sédimentaire plus ou moins verticalisée; cependant, le plus souvent, les racines des nappes ne sont pas connues avec certitude. Elles peuvent avoir été détruites par l'érosion ou recouvertes de sédiments récents. Certaines nappes ont été complètement séparées de leurs racines. Pour rechercher la région d'origine d'une nappe de charriage, on se base sur des comparaisons stratigraphiques et paléogéographiques.

Postérieurement à la mise en place d'une nappe, les terrains qui la constituent peuvent être affectés de replis. On appelle **rétro-charriages** des mouvements cisaillants tardifs et de sens opposé au sens de mise en place de la nappe.

Les régions où existent des nappes de charriage, tectoniquement d'une très grande complexité, sont difficiles à analyser géométriquement et encore plus cinématiquement et dynamiquement. En général, différents épisodes de déformation se sont superposés. Souvent, le matériel qui constitue les nappes a été affecté par le métamorphisme régional qui a effacé tous les repères stratigraphiques.

Une des hypothèses invoquées pour expliquer le mécanisme de mise en place des nappes est celle d'un glissement des masses rocheuses, dû à la gravité. Il est fréquent de voir des phénomènes de glissements superficiels affecter les talus des bords de route formés de terrains argileux plastiques. De tels phénomènes sont également connus, à plus grande échelle, sur les talus continentaux sous-marins en bordure des continents. La pente nécessaire à ces glissements peut être faible, de 1 à 5°.

Dans certaines régions, on connaît, intercalés au sein de séries sédimentaires, par ailleurs tranquilles, des paquets de roches isolés qui peuvent être de matériel et d'âge différents de ceux de la série encaissante. On leur donne le nom d'**olistolithes.** Ils sont de taille variée, métrique à kilométrique, et sont considérés comme des pans de falaise détachés de reliefs voisins et ayant glissé sur une pente sous-marine à la faveur de niveaux plastiques. On peut imaginer le même processus de formation pour les nappes de charriage, à plus grande

▶ *Représentation schématique d'une région à nappes de charriage du premier genre.*

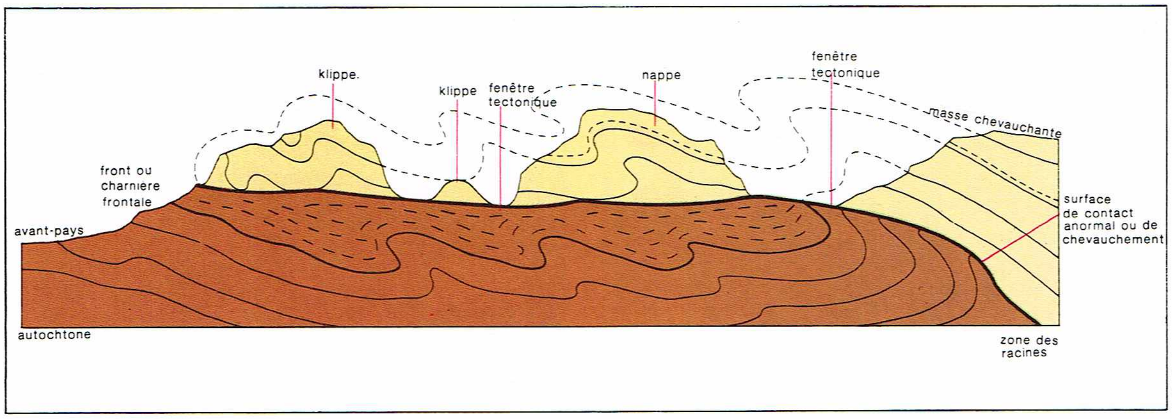

▼ *A, schéma structural de la nappe du flysch à Helminthoïdes de l'Embrunais-Ubaye; noter la fenêtre tectonique de Barcelonnette et les demi-fenêtres d'Embrun et d'Allos. B, coupe correspondante à travers la nappe.*

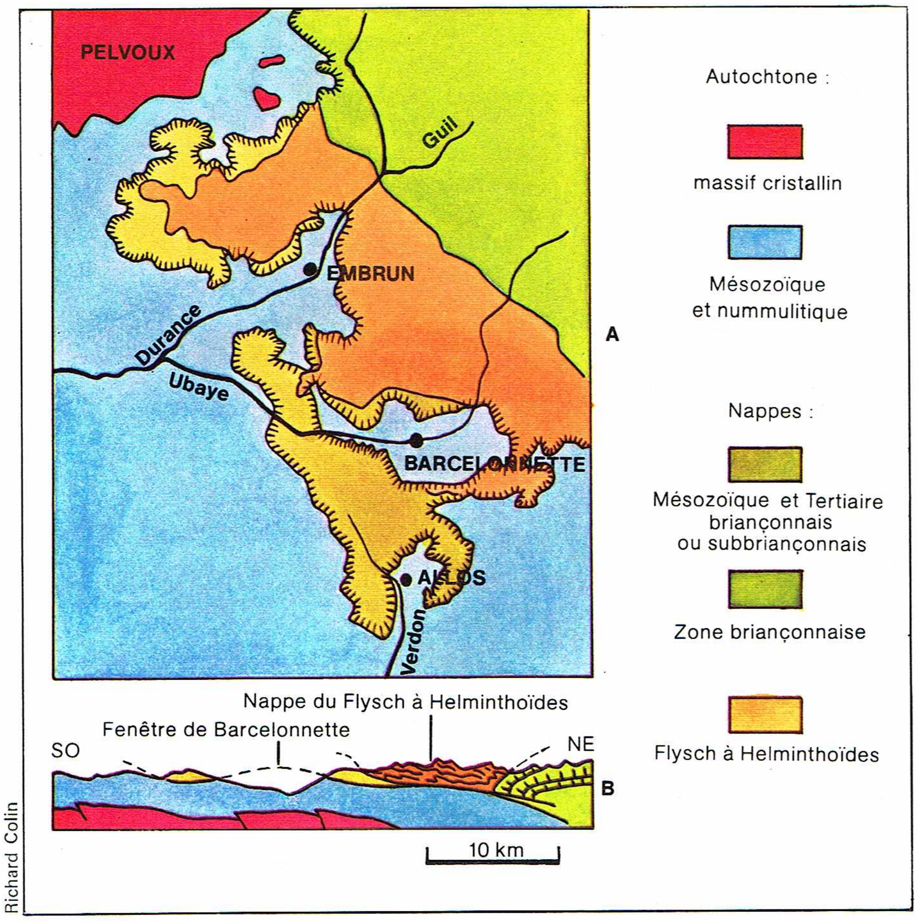

▶ *Page ci-contre, à gauche, en haut, systèmes perpendiculaires de diaclases, cassures d'origine tectonique affectant des tufs (Rio Baconao). A gauche, en bas, diverses formes de plis diapirs; leur taille très variée peut n'atteindre que quelques dizaines de mètres carrés.*

échelle. Cependant, pour que l'on observe des nappes de grandes dimensions, il faut que les masses rocheuses soient décollées de leur substratum, que les reliefs où ont pris naissance les nappes soient très importants et que la pente se maintienne sur de longues distances. Si de telles nappes formées par glissement superficiel ont pu se produire (comme il semble que ce soit le cas pour les nappes d'Afrique du Nord), ce mécanisme n'est pas applicable à toutes les nappes. Dans les Alpes, par exemple, les nappes se sont formées en même temps qu'elles étaient affectées par le métamorphisme régional. Elles se sont donc formées dans des conditions de forte pression et température, à grande profondeur, et résultent d'une compression importante et de cisaillements profonds du socle. A ce type de tectonique on donne le nom de *tectonique tangentielle*.

Historiquement, c'est dans les Alpes que les nappes de charriage ont été mises en évidence, par M. Bertrand en 1884. Par la suite, on a décrit des structures en nappes dans de nombreuses régions. Actuellement, la réalité des nappes de charriage ne fait de doute pour personne; toutefois, localement, il peut y avoir des discussions quant à l'amplitude des chevauchements.

Un exemple de nappe de charriage complètement coupée de ses racines est la *nappe du flysch à Helminthoïdes* dans la région de l'Embrunais-Ubaye (Alpes occidentales). Des terrains d'âge crétacé reposent en contact anormal sur des terrains d'âge nummulitique à oxfordien, par l'intermédiaire de lambeaux de poussée d'âge triasique, arrachés au passage aux domaines briançonnais et sub-briançonnais. L'érosion a découpé cette nappe et formé la demi-fenêtre d'Embrun et la fenêtre de Barcelonnette.

De nombreuses chaînes de montagnes se sont formées à des époques différentes par empilement de nappes de charriage. Outre les Alpes, on peut citer l'Himalaya, les montagnes Rocheuses au Canada et dans le nord des États-Unis, la chaîne calédonienne en Norvège et en Écosse, etc.

Les structures en pays salifères

Les propriétés mécaniques très particulières du sel, plus spécialement son seuil de plasticité très bas et sa faible densité, provoquent des déformations typiques des pays salifères. Parmi les structures typiques de ces pays, on distingue les *dômes de sel* et les *plis diapirs*.

Dans des régions où les terrains sont horizontaux, on trouve des massifs de sel qui pénètrent à l'emporte-pièce à travers les terrains sédimentaires. Ces **dômes de sel**, de contours circulaires, peuvent avoir un diamètre de plusieurs kilomètres, parfois de plusieurs dizaines de kilomètres. Ils affleurent rarement en surface mais les prospections géophysiques ont permis d'en localiser de très nombreux, par exemple, dans le nord de l'Allemagne et dans le golfe du Mexique. Leurs formes sont variées, et leur structure interne est très complexe. Des gisements de pétrole sont souvent localisés sur leur pourtour. Au contact du sel on observe des brèches de friction, et les couches environnantes sont rebroussées vers le haut, déterminant ainsi des structures favorables à l'accumulation du pétrole. Les dômes de sel n'ont pas une origine tectonique mais sont dus à la densité du sel, faible par rapport à celles des autres roches sédimentaires. Le sel, plus léger, monte sous l'effet de la pression exercée par les couches sus-jacentes, à la faveur de zones de moindre résistance dans la couverture (diaclases, etc.). Seules les couches de sel situées sous d'épaisses séries sédimentaires peuvent donner lieu à des dômes. Les couches situées plus superficiellement ne subissent pas une pression suffisante de la part des couches sus-jacentes pour produire de telles structures. Dans les régions arides (Iran, Maroc), les dômes de sel peuvent arriver jusqu'à la surface.

Les **plis diapirs** résultent de l'intervention de forces tectoniques. Quand une série comportant un niveau salifère est affectée par des plissements, il arrive que le sel, soumis localement à une forte pression, s'échappe le long d'une fissure, d'une faille de chevauchement ou perce un anticlinal. Les diapirs se présentent en lames discontinues ou en colonnes elliptiques ou circulaires, recoupant à l'emporte-pièce les terrains sus-jacents. Le sel est entouré de toutes parts d'un contact anormal qui le sépare des terrains plus récents, redressés et étirés. Leur taille, très variée, peut n'atteindre que quelques dizaines de mètres carrés. En France, de telles injections de sel d'âge triasique sont fréquentes le long des surfaces de contact anormal dans les Alpes et dans le Jura.

Microtectonique

La microtectonique, ou structurologie, étudie les structures tectoniques de petite taille, depuis l'échelle de l'affleurement jusqu'à l'échelle du microscope. On donne parfois le nom de *minitectonique* à l'étude des structures métriques, réservant le nom de microtectonique à celle des structures millimétriques. La microtectonique est le complément des études tectoniques faites à plus grande échelle. L'observation et la mesure des petites structures peuvent se faire simultanément avec le levé de carte géologique. Les méthodes d'analyse de la microtectonique permettent de réaliser des observations plus précises sur la géométrie des déformations, le mécanisme intime de la déformation, la chronologie des déformations et le rapport entre les recristallisations métamorphiques et les déformations.

A. Boiteau

Méthodes

Pour étudier les petites structures, il est généralement nécessaire d'effectuer un grand nombre de mesures. Celles-ci peuvent être analysées d'une manière statistique ou d'une manière géométrique. Dans l'un et l'autre cas, on utilise des représentations graphiques.

Les modes de représentation graphique pour une étude statistique sont : les *histogrammes* où l'on porte en abscisse les directions des éléments mesurés et en ordonnée le nombre de mesures correspondant à chaque direction; les *rosaces,* où la représentation des mesures se fait sur un cercle, la fréquence étant proportionnelle à la longueur de la branche indiquant la direction des éléments mesurés; enfin, les *diagrammes de densité,* qui sont une représentation dans l'espace à trois dimensions, grâce à l'utilisation du *canevas de Schmidt,* projection équivalente d'une demi-sphère de référence conservant les surfaces. Ces méthodes permettent de représenter une famille d'éléments (linéations, schistosités, etc.), de déterminer leur orientation privilégiée et de comparer ces orientations d'une région à l'autre.

Pour analyser les rapports géométriques entre différents éléments structuraux, par exemple entre des linéations, des axes de plis et des plans de schistosité, on utilise de préférence le *canevas de Wulff,* projection stéréographique d'une demi-sphère de référence qui conserve les angles mais non les surfaces. Sur de tels diagrammes on peut facilement calculer l'angle entre deux plans, entre un plan et une droite, ou faire tourner les éléments pour les remettre à l'horizontale, etc. Ces diverses méthodes permettent de franchir en partie l'obstacle que constitue le passage d'une échelle à l'autre, de la microtectonique à la tectonique classique.

Principaux types de microstructures

Les principaux types de petites structures sont les microfractures, les schistosités, les microplis et les linéations.

Les microfractures

On distingue différentes sortes de microfractures : les diaclases, les joints stylolitiques et les fentes de tension.

Les **diaclases** sont des cassures d'origine tectonique le long desquelles il n'y a pas eu de déplacement relatif des deux parties rocheuses qu'elles séparent, mais il existe tous les intermédiaires entre les diaclases sans rejet et les failles. Les diaclases affectent aussi bien les roches éruptives que les roches sédimentaires. Leur rôle est très important dans l'altération des roches et dans l'accumulation de produits minéraux exploitables car elles procurent des zones de pénétration aux eaux météoritiques et aux fluides minéralisateurs d'origine profonde.

On interprète les diaclases comme le résultat de compressions et d'extensions subies par les roches. Elles sont en relation avec les accidents tectoniques. Il est fréquent, par exemple, qu'au voisinage d'une faille un système de

▼ Ci-dessous,* deux diagrammes de densité équiaréaux *(canevas de Schmidt), représentant, à gauche, l'orientation préférentielle des axes optiques des cristaux de quartz dans un micaschiste, et, à droite, la disposition des axes optiques des cristaux de tourmaline dans une roche métamorphique. L'orientation des axes cristallins se mesure à l'aide d'un dispositif spécial, appelé platine de Fedorov, que l'on adapte au microscope. La couleur verte de plus en plus intense indique une concentration croissante des directions de ces axes. Sur le diagramme de gauche, le plan du dessin est parallèle à la schistosité, et la direction privilégiée des axes optiques du quartz est perpendiculaire à ce plan. Dans le diagramme de droite, au contraire, le plan de schistosité est perpendiculaire au plan du dessin et est projeté suivant le diamètre* a-a *; les axes des cristaux de tourmaline sont disposés dans ce plan et allongés parallèlement à une direction privilégiée.

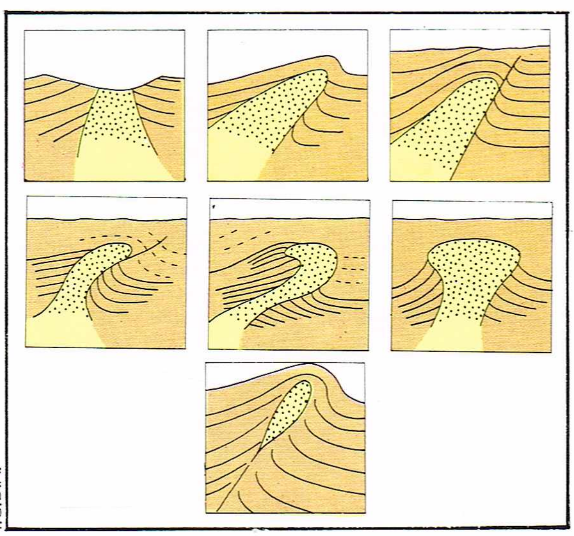
I.G.D.A.

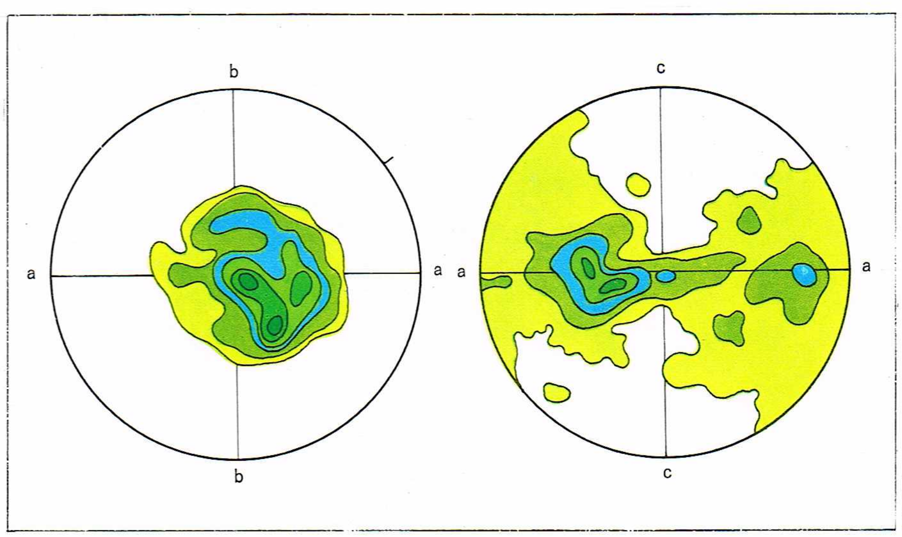

I.G.D.A.

▶ *La schistosité est l'aptitude des roches métamorphiques à se casser suivant des plans parallèles, en feuillets de composition homogène plus ou moins minces.*

N. Santarelli

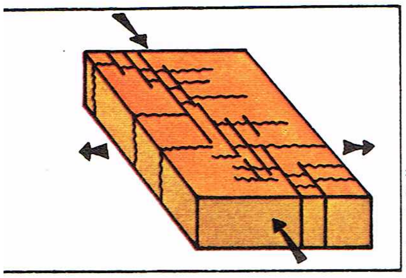

Richard Colin

▲ *Représentation schématique de* **joints stylolitiques** *et de* **fentes de tension en échelon.**

▼ *Un exemple de* **veines de tension en échelon** *dans des calcaires (Drôme).*

diaclases parallèles à la faille se développe considérablement. Dans les terrains sédimentaires, quand les diaclases sont bien développées, elles apparaissent groupées en systèmes associés qui découpent les roches en parallélépipèdes. Dans les terrains plissés, les systèmes associés principaux sont formés par les diaclases longitudinales et transversales par rapport à l'axe des plis ou par les diaclases diagonales qui se forment à environ 45° de part et d'autre de cet axe. Ces systèmes de diaclases se forment lors du plissement des roches, mais il peut exister en plus des diaclases antérieures ou postérieures à la formation des plis. Dans les roches éruptives, les diaclases peuvent se former lors du refroidissement des roches. L'étude des diaclases peut donner des renseignements sur la direction des efforts tectoniques, sur le nombre de phases tectoniques ayant mis sous contrainte les roches considérées, etc. Leur étude nécessite généralement de très nombreuses mesures.

Les **joints stylolitiques** sont des fractures obliques sur la stratification dont les deux lèvres s'interpénètrent par suite d'une dissolution sous l'action d'une pression orientée. Ce sont des surfaces irrégulières, accidentées par de petits pics. Les pics stylolitiques présentent une direction statistiquement constante, qui est la direction de raccourcissement, parallèle à la direction de la pression principale maximale σ_1. Il existe également des joints stylolitiques sédimentaires formés lors de la diagenèse des roches et parallèles à la stratification.

Les **fentes de tension** sont des fractures ouvertes, généralement remplies de produits de recristallisation (calcite ou quartz). Elles correspondent à des efforts d'extension et peuvent être obliques ou perpendiculaires à la direction d'allongement. Quand elles sont disposées en échelon, elles matérialisent un cisaillement potentiel.

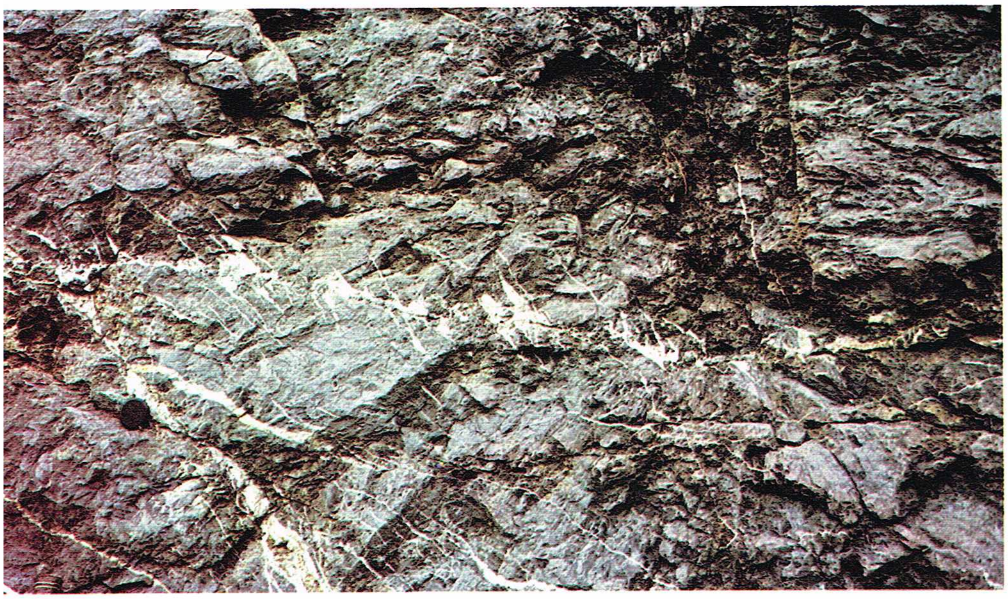

A. Boiteau

Les schistosités

La schistosité est l'aptitude des roches à se casser suivant des plans parallèles, en feuillets de composition homogène plus ou moins minces. Elle est bien exprimée surtout dans les roches métamorphiques.

On distingue différents types de schistosité. La **schistosité de fracture** est un débit en feuillets grossiers, millimétrique à centimétrique. La **schistosité par microplis-failles** (strain-slip cleavage), qui se manifeste par une alternance régulière de zones microplissées et de zones fracturées affectant les flancs des microplis. Les **kink-bands** sont des plis dont le rayon de courbure est nul ou très faible et les flancs plans. Leur plan axial est bien exprimé. S'ils sont très rapprochés, ils déterminent une schistosité grossière. La schistosité par microplis-failles et par kink-bands n'apparaît que dans des roches finement litées, le plus souvent déjà schistosées. La **schistosité de flux** est très fine. La **foliation** est une schistosité de flux accompagnée d'une dissolution et d'une recristallisation orientée des minéraux de la roche (gneiss, amphibolites, etc.), chaque feuillet ayant une composition différente.

D'origine mécanique, la schistosité de flux et la foliation ne se forment que si les pressions sont suffisamment élevées et sont en relation étroite avec un aplatissement de la matière, perpendiculairement à la direction de la pression principale maximale σ_1. Elles sont généralement parallèles au plan axial des plis synschisteux. Dans le cas d'un pli déversé, renversé ou couché, on peut déterminer, d'après les rapports entre la schistosité et la stratification, si l'on a affaire à un flanc normal ou à un flanc inverse même si l'on ne connaît pas la polarité des couches. Dans un flanc normal, le pendage de la schistosité est supérieur au pendage des couches, alors que dans un flanc inverse, le pendage de la schistosité est inférieur à celui des couches. Cela n'est pas valable dans le cas de plis retournés (tête plongeante). D'autre part, la schistosité indique directement le sens de déversement des structures.

Les différents types de schistosité dépendent de la lithologie des roches et de la contrainte. Ainsi, dans le cas d'alternances de couches gréseuses et schisteuses, on peut observer dans un même échantillon une schistosité de fracture dans les grès et une schistosité de flux dans les schistes. D'autre part, si la schistosité est oblique sur la stratification dans les lits schisteux, elle se redresse dans les couches dures et devient proche de la perpendiculaire à ces couches. C'est le phénomène de *réfraction de la schistosité.*

En fonction de la contrainte, P. Fourmarier a montré que les différents types de schistosité apparaissent successivement en fonction de la profondeur dans une région donnée. En dessous d'un *front supérieur de schistosité,* situé à des profondeurs variables suivant les régions, apparaît une schistosité de fracture qui passe vers le bas à une schistosité de flux puis à la foliation. Chaque type de schistosité caractérise une zone. Les épaisseurs respectives des différentes zones dépendent de la lithologie et du gradient géothermique de la région considérée. Signalons, toutefois, qu'en dehors des zones de schistosité il peut se développer des schistosités locales le long d'accidents tectoniques.

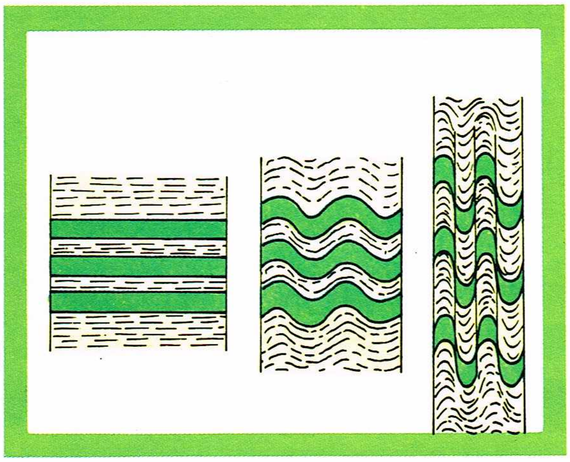

Richard Colin

◀ *Représentation schématique du développement d'une schistosité de* **microplis-failles** *(strain-slip-cleavage).*

Les microplis

Ces plis, de taille inférieure à l'échelle du mètre, sont les homologues des plis de plus grande taille. On peut leur appliquer les mêmes méthodes d'étude.

Les linéations

Les linéations sont des petites structures linéaires qui se répètent au sein des roches. On exclut ainsi les stries de faille.

On distingue ainsi quatre types de linéations : les **linéations d'intersection,** correspondant à l'intersection de deux familles de plans, par exemple de la schistosité et de la stratification, ou de deux schistosités; la linéation d'intersection de la schistosité et de la stratification est parallèle à l'axe des grands plis synschisteux; les **linéations d'allongement,** qui résultent de l'étirement d'objets antétectoniques tels que les galets ou les fossiles, et qui indiquent statistiquement la direction de la pression principale minimale σ_3; les **linéations minérales,** dues à la croissance orientée de certains minéraux métamorphiques lors de la déformation, et qui matérialisent la direction de la pression principale minimale σ_3; enfin, les **linéations par axes de microplis,** parallèles à l'axe des grands plis si ceux-ci sont de même génération.

L'examen des relations existant entre les schistosités, les microplis et les linéations permet d'établir une chronologie relative des déformations quand plusieurs phases de déformations se sont superposées. Par exemple, l'observation d'une schistosité plissée ou de linéations déformées courbées dans la charnière d'un pli conduit à admettre l'existence d'au moins deux phases de déformations successives, l'une ayant donné naissance à la schistosité ou à la linéation, l'autre aux plis qui les déforment.

L'étude de ces roches au microscope permet de déterminer quels sont les minéraux de métamorphisme qui ont recristallisé lors des différentes phases tectoniques (minéraux antétectoniques, syntectoniques ou post-tectoniques). L'étude des mesures des différents éléments sur canevas de Wulff permet de définir la géométrie des grandes structures et la direction d'allongement de la matière pour chaque phase tectonique. Il n'est pas toujours facile de déterminer les rapports entre les différentes phases ainsi définies et les phases tectoniques définies à plus grande échelle. Cependant, on constate que, quelle que soit l'échelle, le mécanisme de la déformation et les directions de raccourcissement et d'allongement de la matière sont les mêmes pour une même phase de déformation.

Tectonique générale

Les types de déformations élémentaires étudiés ci-dessus se groupent dans l'espace et dans le temps pour former des chaînes de montagnes qui diffèrent les unes des autres par leur style tectonique, leur âge et leur localisation.

Le style tectonique

Le style tectonique d'une chaîne de montagnes ou d'une portion de chaîne est défini par le type de structures que l'on y rencontre. Il dépend de la nature du matériel tectonisé et du niveau structural.

La notion de socle et de couverture

Par *socle* on entend des roches le plus souvent granitisées, métamorphisées ou très fortement plissées lors d'orogenèses anciennes. La *couverture* est formée de terrains sédimentaires plus récents qui reposent en discordance sur le socle préalablement érodé. En France, le socle est généralement constitué des terrains affectés par l'orogenèse hercynienne et les orogenèses antérieures. Il affleure en Bretagne, dans le Massif central, les Ardennes, les Vosges, les massifs cristallins des Alpes et des Pyrénées. La couverture comprend les terrains secondaires et tertiaires. Le socle et la couverture possèdent des propriétés mécaniques différentes. Lors des déformations tectoniques, le socle réagit le plus souvent aux compressions en se cassant, alors que la couverture se plisse.

Nous avons vu qu'il existe souvent au sein des séries sédimentaires des niveaux dysharmoniques et que ces niveaux permettent aux roches en profondeur de se déformer d'une manière différente de celle des roches sus-jacentes. A l'échelle d'une chaîne de montagnes, de tels niveaux jouent un rôle important car ils déterminent un style tectonique très différent selon qu'ils sont présents ou absents. En effet, si de tels niveaux

▼ *Représentation schématique de différents types de linéations : linéation* **d'allongement,** *résultant de l'étirement d'agrégats polycristallins (A);* **linéations** *minérales, dues à la croissance orientée de certains minéraux aciculaires ou tabulaires (B et C); linéation par* **axes de microplis** *(D); linéation formée par l'intersection de deux systèmes de plans (E).*

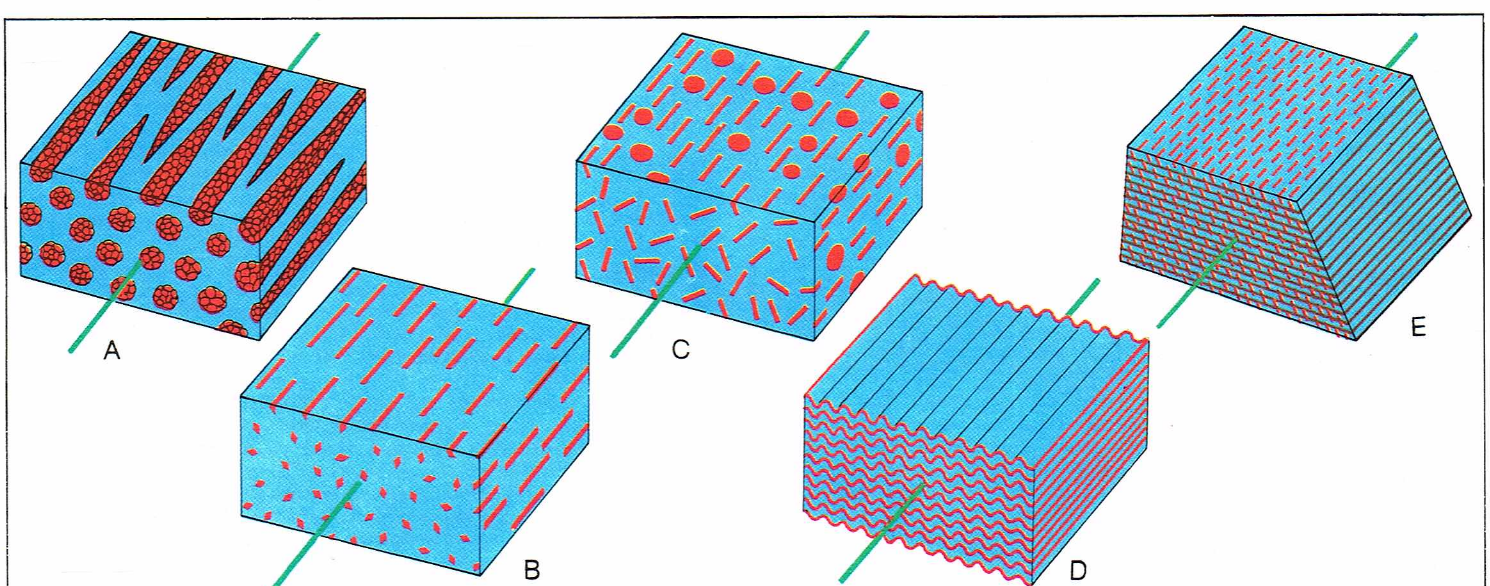

I.G.D.A.

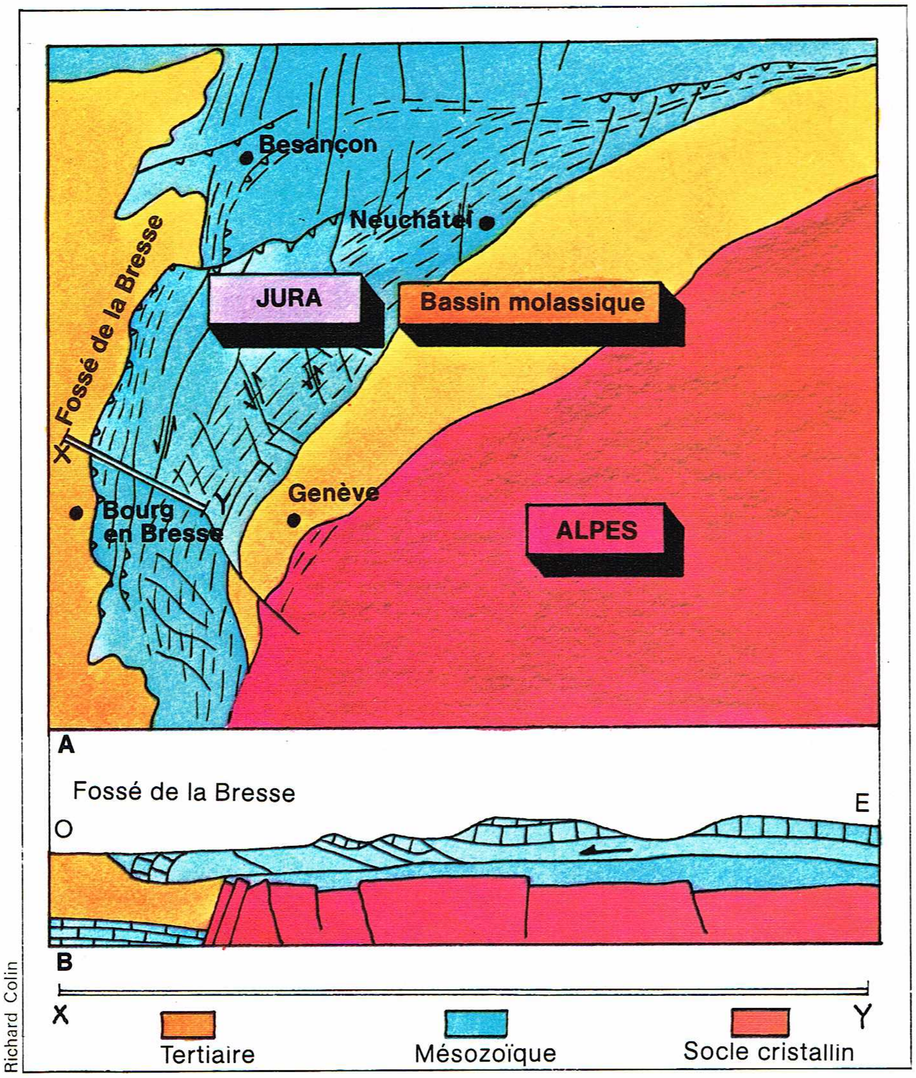

▲ *Schéma structural du Jura (A); coupe de la bordure ouest du Jura (B) montrant le décollement et le chevauchement de la couverture mésozoïque sur le Tertiaire du fossé de la Bresse. Ces déformations datent de la fin du Miocène.*

▼ *Coupe des Alpes suisses montrant les relations entre la couverture secondaire plissée et charriée et le socle des massifs cristallins externes.*

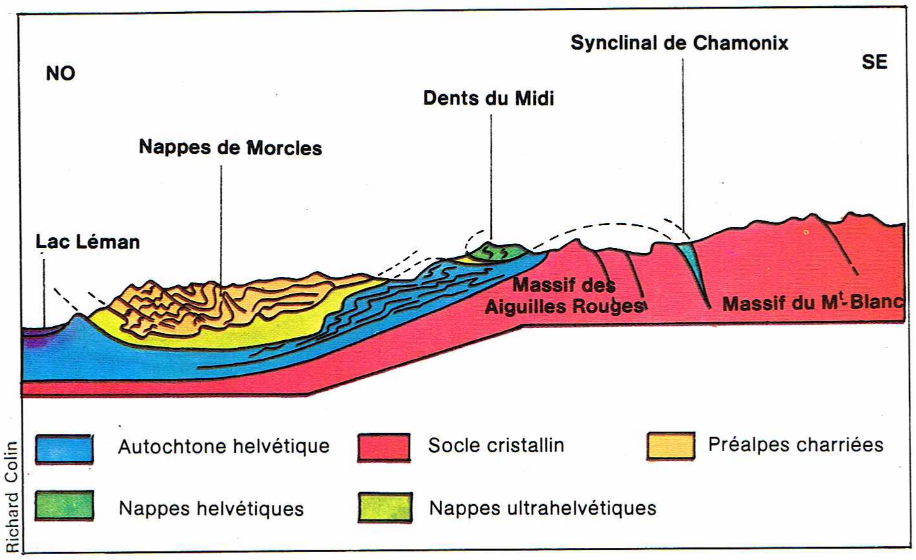

existent à la base de la couverture stratigraphique, ils déterminent un *décollement* des terrains sus-jacents, et le socle ainsi que la couverture se déformeront de manière plus ou moins indépendante. On est amené dans ce cas à envisager séparément la tectonique propre au socle et celle de la couverture. Dans le cas où un tel décollement de la couverture n'intervient pas, celle-ci se moule sur les déformations cassantes du socle.

Dans le Jura et les Alpes externes, il existe un niveau général de décollement représenté par le Trias salifère et gypseux du Werfénien supérieur et du Keuper. Dans ce cas, la notion de socle peut être différente pour un tectonicien et un stratigraphe. En effet, les quartzites du Werfénien inférieur, situés sous le niveau de décollement, sont restés mécaniquement solidaires du socle paléozoïque; ils font partie du socle pour un tectonicien, de la couverture pour un stratigraphe. De plus, il peut exister différents niveaux de dysharmonie au sein de la couverture qui déterminent soit des dysharmonies de plissement, soit des clivages entre différentes unités tectoniques indépendantes. Dans les Alpes internes, par exemple, les serpentinites du Jurassique ont souvent joué le rôle de niveaux de décollement secondaires.

Notons que le socle ne se déforme pas toujours de manière cassante. Dans les boucliers anciens, il peut former de vastes bombements de grandes dimensions (1 000 km^2) à très grand rayon de courbure. On donne le nom d'*antéclises* à de tels bombements anticlinaux, et celui de *synéclises* à de grandes dépressions synclinales. Dans certaines conditions, le socle peut se déformer lui aussi de manière souple et se plisser. En particulier, dans les parties profondes des zones internes des Alpes, le socle a été ramolli lors du métamorphisme alpin et a pu former des plis non déroulables, ressemblant aux plis diapirs des terrains salifères, et des nappes souples (nappes simplo-tessinoises). Il ne s'agit plus alors à proprement parler de « tectonique de socle », terme mécanique impliquant la rigidité du matériel. A ce domaine où les roches cristallines se déforment de manière plastique on donne le nom d'*infrastructure*, par opposition à la *superstructure* où le socle reste rigide. Dans l'infrastructure, la discordance entre la couverture migmatisée et le socle ramolli s'efface, et l'on observe un phénomène de *mise en accordance* du socle et de la couverture, qui réagissent de la même manière aux déformations.

Dans la superstructure, si le socle et la couverture ne se déforment pas de la même manière en raison de leurs propriétés mécaniques différentes, il existe des relations entre la tectonique du socle et celle de la couverture. Par exemple, dans des terrains sédimentaires plus ou moins horizontaux, comme ceux qui forment le Bassin parisien, il est possible de localiser en profondeur, dans le socle, des accidents cassants, prolongation des grandes cassures qui affectent le socle du Massif central. Ces accidents se traduisent en surface par des ondulations à grand rayon de courbure, dont l'anticlinal du Bray est la plus importante.

Dans le Jura, le socle n'affleure pas et n'est connu que par sondages. Il est analogue au socle affleurant dans le Massif central; tout comme lui, il est affecté par de grandes cassures de direction nord-sud et nord-est, sud-ouest, d'âge oligo-miocène. Ces cassures se prolongent au nord dans les Vosges et le fossé Rhénan. La couverture est formée par des terrains d'âge secondaire, entièrement décollés au niveau du Trias gypseux. Elle présente des plis, de style coffré, de direction nord-est-sud-ouest, et des chevauchements de même direction. En particulier, les sondages ont montré que la couverture du Jura chevauche sur plusieurs kilomètres le Tertiaire du fossé de la Bresse. Ces déformations datent de la fin du Miocène. Lors du plissement de la couverture à cette époque, les failles préexistantes de direction nord-est-sud-ouest ont été plissées et ont donné ce que l'on appelle des failles-plis. Les failles de direction nord-sud ont rejoué en décrochements senestres, ce qui s'est traduit par la formation de plis en nombre différent de part et d'autre de ces décrochements. La disposition en échelons fréquente des plis de la couverture confirme le jeu décrochant senestre de ces failles. On interprète les plis et les chevauchements observés dans la couverture, qui témoignent d'une compression et d'un raccourcissement de celle-ci, comme la conséquence d'un raccour-

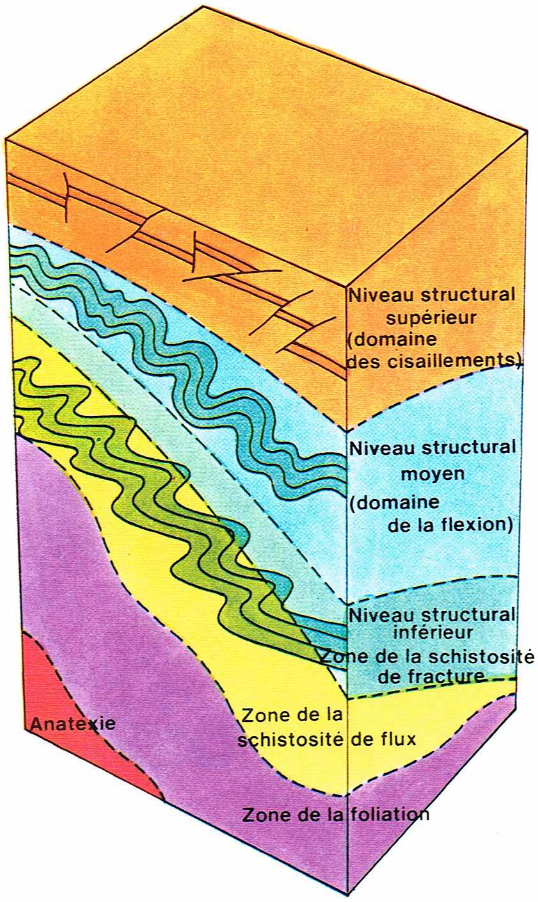

Richard Colin

◀ ***Bloc diagramme montrant de façon très schématique la répartition des niveaux structuraux dans une portion d'écorce plissée (d'après F. Arthaud, 1970).***

cissement du socle par le jeu décrochant des failles lors de la phase de compression de la fin du Miocène.

Dans les Alpes, où les déformations ont été plus intenses que dans le Jura, on a pu mettre en évidence l'action du socle sur les déformations de la couverture. Par exemple, le socle affleurant dans les massifs cristallins externes du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges apparaît divisé en écailles poussées les unes sur les autres par suite d'une compression latérale. La couverture secondaire a été pincée et écrasée entre ces blocs déplacés. Chassée de l'intervalle séparant les blocs du socle, elle a glissé en formant des nappes superposées. La nappe de Morcles, par exemple, est formée par les roches sédimentaires initialement comprises entre le massif du Mont-Blanc et celui des Aiguilles Rouges et chassées par le rapprochement de ces deux massifs, qui ne sont plus séparés actuellement que par l'étroit synclinal de Chamonix, occupé par du Lias et du Trias très écrasés.

La notion de niveau structural

L'analyse de la répartition des différents mécanismes de déformation montre qu'ils se retrouvent toujours dans le même ordre, l'allure des structures variant en fonction de la profondeur dans une région donnée. Au sein de l'écorce terrestre, la température et la pression augmentent avec la profondeur jusqu'à atteindre environ 1 000 °C et 10 kilobars. Dans ces conditions le comportement des roches se modifie, comme le montre la mécanique des roches.

On appelle *niveau structural* une portion de l'écorce terrestre où les roches montrent un type donné de déformation. On distingue généralement un *niveau structural supérieur,* superficiel, caractérisé par une faible contrainte et une basse température. La plupart des roches ont alors un comportement fragile et ce domaine est essentiellement celui de la fracture. C'est aussi le domaine des glissements superficiels, dus à la gravité, sur des niveaux plastiques. Dans le *niveau structural moyen,* la contrainte est suffisante pour que les roches se déforment de manière plastique. C'est le domaine de la flexion, donnant lieu à des plis isopaques. Le *niveau structural inférieur* est le domaine des plis semblables formés par aplatissement, de la schistosité et du métamorphisme régional. Il existe dans le niveau structural inférieur différentes zones suivant le type de schistosité qui y apparaît, de haut en bas : la zone à schistosité de fracture, la zone à schistosité de flux et la zone à foliation. La schistosité apparaît de plus en plus couchée, horizontale, en profondeur par suite de la difficulté pour les roches à vaincre la pression lithostatique exercée par les roches sus-jacentes et à s'échapper vers le haut. Enfin, à une profondeur variable, la forte température régnante permet l'écoulement des roches, qui deviennent plus ou moins fluides. C'est le domaine de l'*infrastructure* et des migmatites, comprenant aussi bien un vieux socle remobilisé qu'une proportion variable de couverture. Le passage d'un niveau structural à un autre est progressif, et l'on peut rencontrer des zones où ont lieu en même temps deux mécanismes de déformation différents, suivant la lithologie des roches.

A partir de la notion de niveau structural, on peut tenter de comparer différentes régions plissées. Cela est rendu difficile par le fait que les édifices orogéniques résultent de plusieurs phases de déformation superposées. On considère les déformations résultant de la phase de compression principale. Excepté cette difficulté et les différences de lithologie, l'apparition des différents niveaux structuraux dépendra des conditions de températures et de pressions lors des déformations et variera d'une région à l'autre. Par exemple, la profondeur à laquelle apparaîtra la zone à schistosité de flux et son épaisseur dépendront des conditions de températures et de pressions régnant durant le plissement dans la région considérée.

Certaines chaînes, comme le Jura, ne comportent pas de zone à schistosité mais présentent seulement les structures des niveaux structuraux supérieur et moyen. Dans ce cas, la compression et le raccourcissement ont été faibles. D'autres chaînes ne comportent que la partie supérieure du niveau structural inférieur, sans zone à foliation et avec un métamorphisme faible. D'autres chaînes, comme les Alpes, où apparaissent les niveaux les plus profonds de l'infrastructure, ont subi un raccourcissement très important et une tectogenèse complexe associée à des recristallisations métamorphiques importantes.

La difficulté de mesurer quantitativement le taux de déformation, la durée et la valeur de la contrainte tectonique a limité jusqu'à présent les possibilités de comparaison des différentes chaînes de montagnes entre elles.

Les tectoniques superposées

Nous avons vu en abordant la notion de socle et de couverture que différentes orogenèses se sont succédé dans le temps, des terrains plus récents venant reposer en discordance sur des terrains déjà granitisés, métamorphisés et plissés, et pouvant être à leur tour plissés et métamorphisés. On distingue depuis la formation de la Terre différents *cycles orogéniques,* au cours desquels se produisirent d'importants phénomènes de compression de l'écorce terrestre ayant donné lieu à des chaînes de montagnes.

Un cycle orogénique a donné lieu à la *chaîne huronienne* à la fin du Précambrien. Plusieurs autres cycles ont existé au cours des temps très longs de cette ère (plus de trois milliards d'années), mais il est difficile de reconstituer leur chronologie et leur extension. On les connaît dans les vieux boucliers continentaux au Canada, en Sibérie, en Scandinavie, en Afrique, au Brésil, etc. En France, on trouve des traces de ces orogenèses dans les massifs anciens comme la Bretagne *(orogenèse briovérienne)* et le Massif central, mais elles sont en grande partie masquées par les orogenèses ultérieures.

Le cycle orogénique suivant aboutit à la formation de la *chaîne calédonienne* à la fin du Dévonien ; il est bien connu en Écosse, en Scandinavie, en Sibérie et dans les Appalaches aux États-Unis. En France, des déformations calédoniennes existent dans les Ardennes par exemple.

▶ ***Page ci-contre, le massif cristallin externe du Pelvoux avec le pic de la Grave et, dans le fond, le glacier de la Selle; la surrection de ce massif date de la fin du Miocène et du Pliocène inférieur.***

Au Carbonifère eut lieu le paroxysme de l'*orogenèse hercynienne* qui a affecté les roches formant actuellement les massifs anciens français (Bretagne, Massif central, Vosges, Ardennes, massifs cristallins des Alpes et des Pyrénées).

Le dernier cycle est celui de l'*orogenèse alpine*. Commencé au Mésozoïque, il a donné les plus grands reliefs actuels (Alpes, Pyrénées, Himalaya, chaînes péripacifiques, Andes, montagnes Rocheuses).

Si l'on considère une région limitée de l'écorce terrestre, on peut admettre qu'entre un cycle orogénique et le suivant, il y a eu une période de calme orogénique au cours de laquelle la chaîne de montagnes précédente à peine surélevée était arasée et des sédiments se déposaient en discordance sur la surface d'érosion ainsi formée. Mais si l'on considère l'ensemble de la surface terrestre, on constate que cette division en cycles orogéniques est quelque peu arbitraire car les phénomènes de plissement n'ont pas été simultanés sur tout le globe. Des mouvements plus ou moins intenses ont affecté à toute époque des régions diverses de la planète.

Il est parfois difficile d'attribuer à l'un ou à l'autre des quatre grands cycles distingués les déformations que l'on observe dans une région. Des mouvements de la fin du Trias ou du Jurassique, par exemple, peuvent être considérés comme des mouvements tardifs du cycle hercynien ou comme des mouvements précoces du cycle alpin. Cependant, les quatre cycles distingués depuis la fin du Précambrien correspondent à des paroxysmes de déformation ayant affecté des régions très diverses de l'écorce.

La durée de chaque grand cycle a été d'environ 200 millions d'années, y compris la période de calme et de sédimentation précédant l'orogenèse responsable de la formation des chaînes de montagnes.

Au cours de chaque cycle orogénique se sont succédé plusieurs *phases tectoniques* ayant donné lieu à des structures de nature et de direction différentes et qui ont pu n'affecter qu'une partie restreinte de la chaîne en formation. C'est ainsi que l'édifice tectonique alpin résulte de toute une série de déformations qui se sont succédé depuis le Crétacé moyen jusqu'à l'époque actuelle. Cette superposition de plusieurs épisodes de déformation conduit à des structures très compliquées dans le détail. On connaît une phase tectonique du début du Crétacé supérieur dans le Dévoluy qui s'est traduite par des plis de direction est-ouest. A cette même époque, dans les Alpes occidentales, n'avaient lieu que des changements de sédimentation indiquant des mouvements tectoniques peu importants, essentiellement verticaux. De la fin du Crétacé au début de l'Oligocène, se sont succédé de manière presque continue différentes déformations qui ont donné lieu à des plissements de direction nord-sud, à la mise en place de différentes nappes de charriage d'est en ouest, au métamorphisme et au rétrocharriage d'ouest en est des parties internes des Alpes. A la fin de l'Oligocène, ont eu lieu des mouvements verticaux de surrection ou d'affaissement de certains secteurs de la chaîne. Enfin, à la fin du Miocène et au Pliocène inférieur, une autre série de mouvements a provoqué le plissement des nappes déjà mises en place et celui des parties externes de la chaîne jusqu'alors non déformées (Préalpes), ainsi que la surrection des massifs cristallins externes (Mont-Blanc, Pelvoux, Argentera, etc.). Les reliefs actuels de la chaîne alpine sont dus à ces mouvements tardifs de surrection, accompagnés de mouvements d'effondrements (plaine du Pô) causés par des failles en extension qui ont provoqué le morcellement de la chaîne qui, en même temps, se trouvait soumise à une érosion intense.

La trace des déformations superposées est souvent conservée dans la structure intime des roches. L'analyse microtectonique des déformations permet de distinguer et d'ordonner chronologiquement les phases successives ayant affecté les roches, et d'établir leur relation avec les phases de recristallisation métamorphique.

▼ ***Répartition à la surface terrestre des chaînes de montagnes ayant pris naissance au cours des grands cycles orogéniques.***

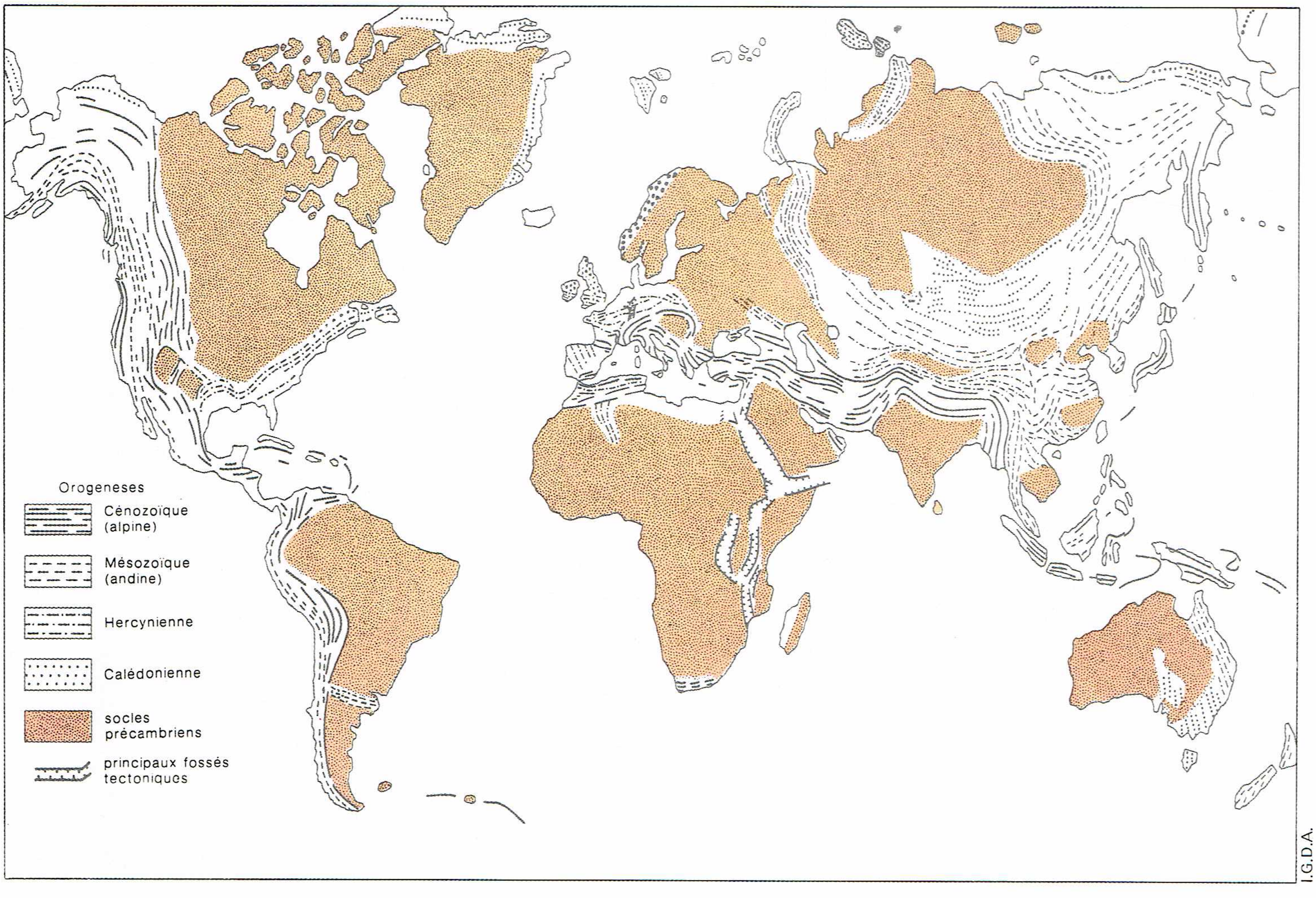

Binois - Pitch

La répartition spatiale des différentes chaînes

Si l'on observe la répartition à la surface du globe des chaînes formées à des époques différentes, on peut considérer en première approximation que les domaines affectés par des plissements sont juxtaposés les uns aux autres, les chaînes les plus récentes étant situées à la périphérie des chaînes les plus anciennes. Ainsi, au Canada, les chaînes les plus anciennes constituent le Bouclier canadien, domaine resté stable depuis la fin du Précambrien *(craton)*, et sont bordées successivement par les chaînes calédonienne, hercynienne et alpine. De telles observations ont conduit à la notion de l'*accroissement progressif des continents*. Cependant, quand on étudie plus en détail les relations existant entre les différentes chaînes, on s'aperçoit que des plissements d'âge différent ont pu affecter à plusieurs reprises une même région de l'écorce. Par exemple, les massifs cristallins des Alpes et des Pyrénées sont formés de roches anciennes affectées par l'orogenèse hercynienne et qui ont à nouveau été déformées et métamorphisées lors de l'orogenèse alpine. Les chaînes successives se disposent, en fait, obliquement les unes par rapport aux autres, et la surface des continents ne s'accroît pas régulièrement.

D'après leur style tectonique et leur position à la surface du globe, on distingue parmi les chaînes récentes : les *chaînes de montagnes intracontinentales,* ou *intracratoniques,* développées sur les cratons, et les *chaînes péricontinentales,* formées sur les bordures d'un continent. Parmi les chaînes péricontinentales, on distingue encore les *chaînes bicontinentales* ou *géosynclinales* et les *chaînes liminaires*.

Comme exemples de chaînes intracontinentales, on peut citer la chaîne pyrénéenne et le Jura, caractérisés par un raccourcissement faible, et par l'absence ou le faible développement des zones métamorphiques.

Les chaînes géosynclinales, dont l'exemple typique est la chaîne alpine, sont caractérisées par une évolution paléogéographique particulière, la présence de flysch et de roches ultrabasiques, nommées ophiolites, et un grand raccourcissement marqué par des nappes de charriage ainsi qu'un métamorphisme régional important. Elles sont comprises entre deux masses continentales.

Les chaînes liminaires, dont l'exemple typique est la chaîne andine qui s'étend sur plus de 10 000 km, diffèrent des chaînes géosynclinales par l'absence de flysch et d'ophiolites, de nappes de charriage, de métamorphisme régional, et l'abondance des roches volcaniques de type andésitique. Malgré ces différences, on peut relever certains traits communs aux chaînes de types géosynclinal et liminaire, en particulier leur différenciation en zones externes et zones internes ayant une évolution paléogéographique et tectonique différente, leur évolution semblable dans le temps et la présence constante de phases tectoniques superposées.

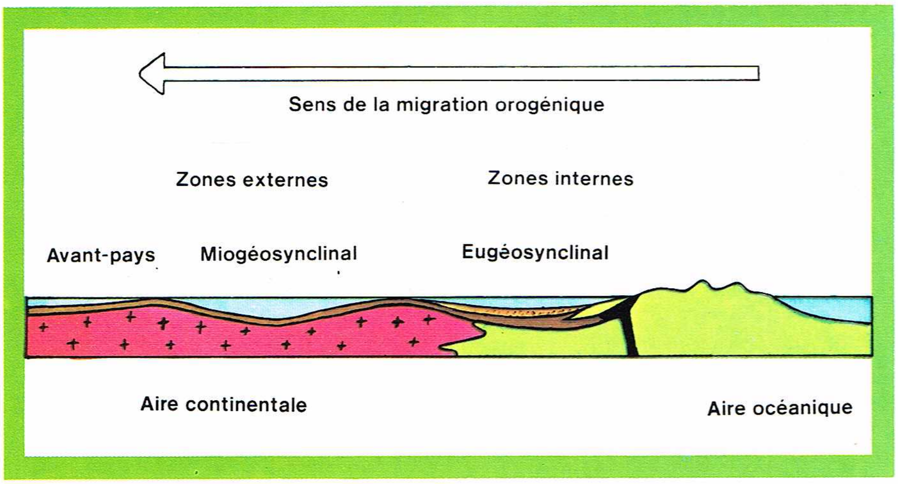

Richard Colin

▲ *Représentation schématique de la formation d'une chaîne de montagnes : stade de sédimentation géosynclinale (en pointillé : flysch; en noir : ophiolites).*

▼ *Le Jura, ici la reculée de Baume-les-Messieurs, est un exemple de chaîne intracontinentale, caractérisée par un raccourcissement faible, et l'absence ou le faible développement des zones métamorphiques.*

M. Cambazard - Pitch

La formation d'une chaîne de montagnes

L'étude comparée de la formation et de l'évolution des chaînes de montagnes montre que l'on peut, très schématiquement, distinguer trois stades d'évolution d'une chaîne en cours de formation : un stade de sédimentation, un stade de tectogenèse et un stade de réajustements verticaux.

Le stade de sédimentation

Ce premier stade correspond à la période d'accumulation des sédiments dans la zone où sera localisée ultérieurement la chaîne de montagnes. Dans les chaînes géosynclinales, cette zone constitue un sillon allongé, plus ou moins étroit, où se déposent des séries sédimentaires marines généralement très épaisses (jusqu'à 10 000 m), et qui peuvent avoir des faciès différents de ceux des régions voisines. Ce sillon est encore appelé géosynclinal. Il n'est, le plus souvent, pas simple mais divisé en une série de rides et de sillons secondaires caractérisés chacun par une sédimentation différente. On distingue généralement un sillon *miogéosynclinal,* externe, bordant l'avant-pays, et un sillon *eugéosynclinal,* interne, situé du côté océanique. Ce dernier est caractérisé par la présence de flyschs précoces, sédiments marins terrigènes à alternances rythmiques grésopélitiques déposés dans des fonds plus ou moins profonds, et la présence d'ophiolites, ensemble de roches comprenant des roches ultrabasiques (péridotites, serpentinites) et des roches basiques (gabbros) souvent accompagnées de pillow lavas, roches volcaniques d'épanchement sous-marin.

Différentes hypothèses ont été émises quant à l'origine de ces ophiolites. Elles sont considérées soit comme des intrusions ou des extrusions sur le fond du géosynclinal, accompagnées de cristallisations différentielles, soit comme des matériaux du manteau supérieur mis en place sous forme de diapirs dans le géosynclinal, soit encore comme des fragments de croûte océanique et de manteau supérieur mis en place tectoniquement dans les séries géosynclinales lors des phases tectoniques. (Cette dernière hypothèse semble actuellement démontrée.) Le miogéosynclinal comprend des séries généralement moins épaisses avec des flyschs plus tardifs que dans le sillon eugéosynclinal et sans ophiolites.

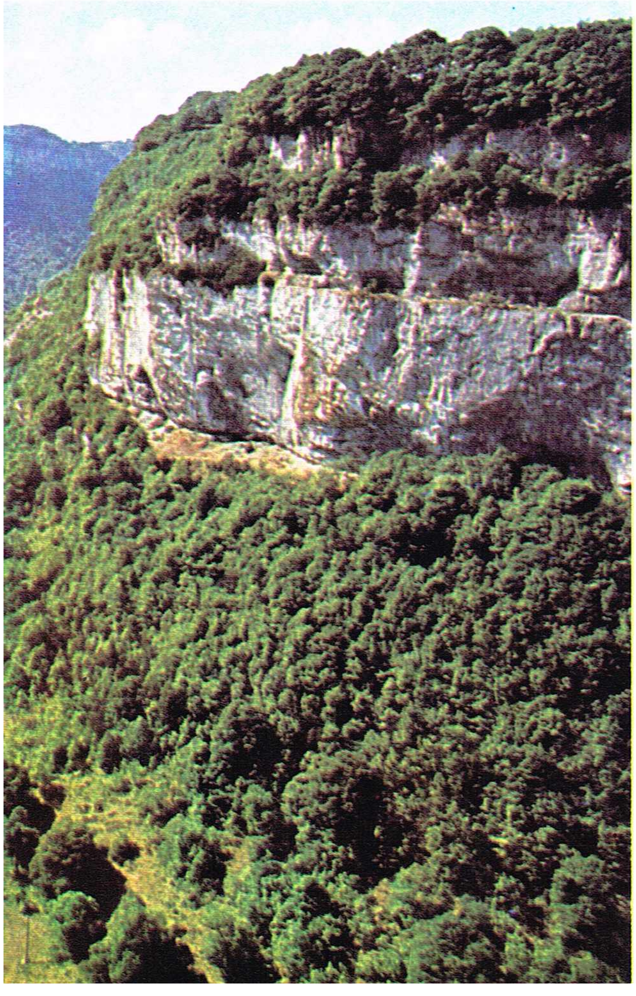

Les chaînes liminaires sont caractérisées par des formations terrigènes continentales. Il ne s'y dépose pas de sédiments de type flysch. On peut distinguer, là encore, des zones externes et des zones internes, ces dernières étant caractérisées par un puissant volcanisme andésitique.

L'accumulation très épaisse des sédiments dans les sillons géosynclinaux, alors que les sédiments présentent souvent des faciès d'eau peu profonde, est expliquée par une *subsidence* du fond des sillons, c'est-à-dire par un mouvement d'enfoncement progressif dû en partie au poids des sédiments eux-mêmes mais aussi à des mouvements actifs d'affaissement de l'écorce terrestre, moins épaisse en cet endroit.

La durée du stade de sédimentation est très longue : plus de 100 millions d'années.

Le stade de tectogenèse

Généralement, la période de sédimentation est brutalement interrompue par une période de compression entraînant la formation de plis, de failles et de chevauchements. Ces phénomènes constituent la *tectogenèse,* ou genèse des structures. Plusieurs phases tectoniques se succèdent, au cours desquelles peuvent avoir lieu le métamorphisme régional des parties les plus profondes de la chaîne et des phénomènes de magmatisme se traduisant par des intrusions granitiques ou granodioritiques successivement syntectoniques et post-tectoniques. Au cours de ce stade on observe une migration des déformations, plus anciennes dans les zones internes, vers les zones externes où elles sont plus récentes. Lors de la principale phase de plissements, les zones internes se déversent vers les zones externes.

La durée de cette période est plus courte que celle du stade de sédimentation : 30 à 50 millions d'années environ. Simultanément a lieu l'*orogenèse,* c'est-à-dire la genèse des reliefs. Dès la surrection de la chaîne, celle-ci commence à être érodée et des sédiments molassiques se déposent en bordure des reliefs.

Le stade de réajustements verticaux

A la période de compression succède une période de distension de l'écorce avec réajustements verticaux, au cours de laquelle certaines parties de la chaîne s'effondrent alors que d'autres continuent à se soulever, ce qui provoque la formation de horsts et de grabens disloquant la chaîne à l'emporte-pièce. Le jeu de failles en extension s'accompagne de phénomènes volcaniques basaltiques. En même temps, l'érosion de la chaîne se poursuit et fait apparaître en surface des roches qui s'étaient déformées et métamorphisées à grande profondeur, jusqu'à aboutir à la pénéplanation totale de la chaîne.

Cette évolution caractérise aussi bien les chaînes de montagnes récentes que les chaînes plus anciennes, dans la mesure où il est possible de les reconstituer. Ainsi, pour la chaîne hercynienne d'Europe, on peut reconnaître durant le stade de sédimentation au Dévonien et au Carbonifère inférieur une organisation paléogéographique semblable à celle des chaînes plus récentes. En particulier, on y distingue des zones externes, miogéosynclinales, dépourvues de flysch, et des zones internes, eugéosynclinales, à ophiolites et flysch bien développés (faciès culm). Durant le stade de tectogenèse se sont développés des phénomènes magmatiques (granites syntectoniques du sud de la Bretagne en bandes allongées et granites post-tectoniques à auréoles de métamorphisme de contact) et des phénomènes métamorphiques. Enfin, au Carbonifère supérieur, des failles d'extension ont découpé la chaîne hercynienne déjà formée, provoquant la formation de bassins d'effondrement remplis de séries continentales (bassins houillers limniques).

Cependant, dans les chaînes anciennes, les roches métamorphiques et magmatiques ont une extension beaucoup plus importante que dans les chaînes récentes. Le type de métamorphisme semble également différent : il correspond à des températures de formation plus élevées et à des pressions moins fortes que dans les chaînes récentes. Certains auteurs attribuent ces différences à des niveaux plus profonds d'érosion des chaînes anciennes, d'autres à des conditions différentes de formation des chaînes dans le passé.

THÉORIES OROGÉNIQUES

Les théories orogéniques ont pour but d'expliquer la genèse des chaînes de montagnes à l'échelle du globe terrestre, les lois de leur répartition spatiale et temporelle et les causes ayant provoqué l'orogenèse.

De nombreuses théories orogéniques ont été proposées au cours de l'histoire. Certaines théories proposées dans le passé sont actuellement complètement abandonnées. Les théories modernes font largement appel aux données de la géophysique ayant trait à la structure interne du globe terrestre, aux anomalies gravimétriques et magnétiques de l'écorce terrestre et à la morphologie et la nature des fonds océaniques. Soulignons que ces données se rapportent à l'état *actuel* du globe, alors que la tectonique est l'étude de l'évolution du globe dans le passé. Nous envisagerons successivement les principales hypothèses qui ont été proposées historiquement.

La théorie des cratères de soulèvement

La théorie des cratères de soulèvement, qui date de la fin du XVIII^e siècle, est la plus ancienne des théories orogéniques. Elle était fondée sur l'observation et l'interprétation des phénomènes volcaniques; la formation des chaînes de montagnes était expliquée par un soulèvement et des dislocations résultant de la poussée d'énormes masses fondues remontant de la profondeur du globe. En fait, si les phénomènes volcaniques sont associés aux phénomènes tectoniques, ils n'en sont pas la cause.

Plus tard, une théorie a voulu expliquer la formation des chaînes de montagnes par le métamorphisme régional « géosynclinal » qui aurait provoqué un gonflement et des déformations. Mais toutes les chaînes ne comportent pas de roches métamorphiques, et, là où il existe, le métamorphisme n'est pas antétectonique mais contemporain des déformations tectoniques. La liaison entre ces différents phénomènes ne peut s'expliquer en considérant l'un comme la cause de l'autre; cependant, une théorie orogénique doit pouvoir expliquer leurs relations de manière générale.

La théorie de la contraction du globe par refroidissement

Cette théorie, proposée par Élie de Beaumont en 1829, est fondée sur l'hypothèse que le globe, formé à haute température, se serait refroidi au cours des temps géologiques. Le refroidissement se serait traduit par une diminution de son volume interne; la partie superficielle, ou écorce terrestre, déjà refroidie et devenue rigide, se serait adaptée à ce changement de volume interne en se ridant et se plissant « à la manière dont une pomme se ride avec le temps ». Élie de Beaumont pensait que le globe terrestre en se contractant prenait la forme d'un dodécaèdre pentagonal dont les arêtes auraient correspondu aux différentes chaînes de montagnes. D'autres auteurs soutenaient que la Terre prenait en se contractant la forme d'une pyramide.

Malgré la faveur dont a joui cette théorie pendant longtemps, elle est aujourd'hui complètement abandonnée. De nombreuses critiques lui ont été adressées. D'une part, la contraction par refroidissement devrait se manifester avec une certaine continuité, alors que les orogenèses se sont succédé de manière discontinue dans le temps et que des phases de compression ont alterné avec des phases d'extension. De plus, il n'est pas prouvé que la Terre se soit contractée, car le refroidissement de la surface est compensé par une augmentation de chaleur au sein de la Terre due à la désintégration de corps radio-actifs. Différents auteurs, au contraire, ont proposé l'hypothèse d'une expansion généralisée du globe terrestre.

La théorie isostasique

Cette théorie est basée sur la notion d'*isostasie* introduite par Dutton en 1889 et qui est fondée sur des observations gravimétriques. L'isostasie est l'état d'équilibre gravitationnel approximatif des masses rocheuses à l'intérieur de l'écorce terrestre, lié au fait que les masses tendent à se répartir dans l'écorce de telle manière que leur poids dans toutes les colonnes verticales au-dessus d'un niveau de compensation isostasique est constant, que ce soit sous un continent, un océan ou un relief élevé.

▼ ***Le géophysicien et météorologiste allemand Alfred Wegener (1880-1930), à qui l'on doit notamment la théorie de la dérive des continents.***

Selon la théorie isostasique, la formation des chaînes de montagnes serait due à des mouvements destinés à rétablir les conditions d'équilibre isostasique, rompues du fait de l'allégement des continents en raison de l'érosion et de l'alourdissement des océans par suite de la sédimentation. Pour rétablir l'équilibre, des mouvements compensateurs auraient lieu dans le magma profond qui auraient pour effet de déterminer la formation d'un bourrelet, isostasiquement déséquilibré, au large de la zone de sédimentation. Ce bourrelet, à son tour, provoquerait le rejet des sédiments responsables du déséquilibre initial vers les bords des continents, en formant des plis et des nappes de charriage. De cette façon, les continents s'alourdiraient, ce qui compenserait l'allégement provoqué par l'érosion et rétablirait l'équilibre isostasique. Mais cette théorie n'explique ni les raisons pour lesquelles les masses magmatiques se seraient déplacées vers l'océan et non vers le continent, où la pression était moindre, ni la répartition des chaînes de montagnes à la surface du globe.

La théorie de la dérive des continents

La notion d'une dérive possible des continents a été émise dès le XVII^e siècle; mais c'est A. Wegener qui, en 1915, en coordonna les idées essentielles et apporta des arguments importants. Il montra, notamment, que l'Afrique et l'Amérique du Sud ont une configuration telle qu'en les juxtaposant ces deux continents viennent s'encastrer exactement l'un dans l'autre. Cette analogie de formes est renforcée par des analogies de constitution géologique, certaines structures géologiques, orographiques et certains alignements volcaniques se prolongeant d'un continent à l'autre. Wegener montra également certaines affinités entre les flores permo-carbonifères de continents actuellement éloignés les uns des autres. Pour expliquer la distribution, dans les séries stratigraphiques des divers continents, de certains sédiments se formant dans des conditions climatiques bien particulières tels que les dépôts d'évaporite, les récifs coralliens, les dépôts glaciaires et houillers, il admit que par le passé les continents avaient une distribution différente de la distribution actuelle. Ainsi, pour expliquer la répartition des dépôts fluvio-glaciaires (tillites) d'âge permo-carbonifère sur des continents aussi éloignés que l'Amérique du Sud, l'Afrique, Madagascar, l'Inde, l'Australie et l'Antarctique, il regroupa autour du pôle Sud ces différents continents, constituant un immense ensemble qu'il appela le continent du *Gondwana*. D'autre part, les terres actuellement réparties dans l'hémisphère boréal, l'Amérique du Nord, le Groenland, l'Europe et l'Asie furent regroupées en une vaste *Laurasia*, à climat équatorial, séparée du continent de Gondwana par un océan, la *Téthys*. Au cours des temps géologiques, ces deux immenses continents se seraient fracturés et fragmentés, donnant naissance aux continents qui auraient dérivé vers leurs emplacements actuels.

Dans cette théorie, les mouvements continentaux sont expliqués par le fait que la croûte terrestre rigide formant les continents devait flotter à la façon d'un radeau sur le manteau plus ou moins visqueux. Wegener invoqua deux causes principales de la dérive : une force d'inertie qui, en raison de la rotation de la Terre d'ouest en est, entraînerait la dérive des continents vers l'ouest d'une part, et une force centrifuge, due à la rotation du globe, qui regrouperait les continents vers l'équateur d'autre part. Ces mouvements des continents vers l'ouest et vers l'équateur auraient donné naissance à deux types principaux de montagnes : les *chaînes bordières*, c'est-à-dire celles qui, comme les Andes, surgissent à la limite entre un continent et un océan, se seraient formées au front des blocs continentaux en mouvement vers l'ouest, à cause de la résistance opposée par le magma visqueux formant le fond des océans; les bords de ces blocs se seraient alors soulevés pour former une chaîne de montagnes. Les chaînes géosynclinales se seraient

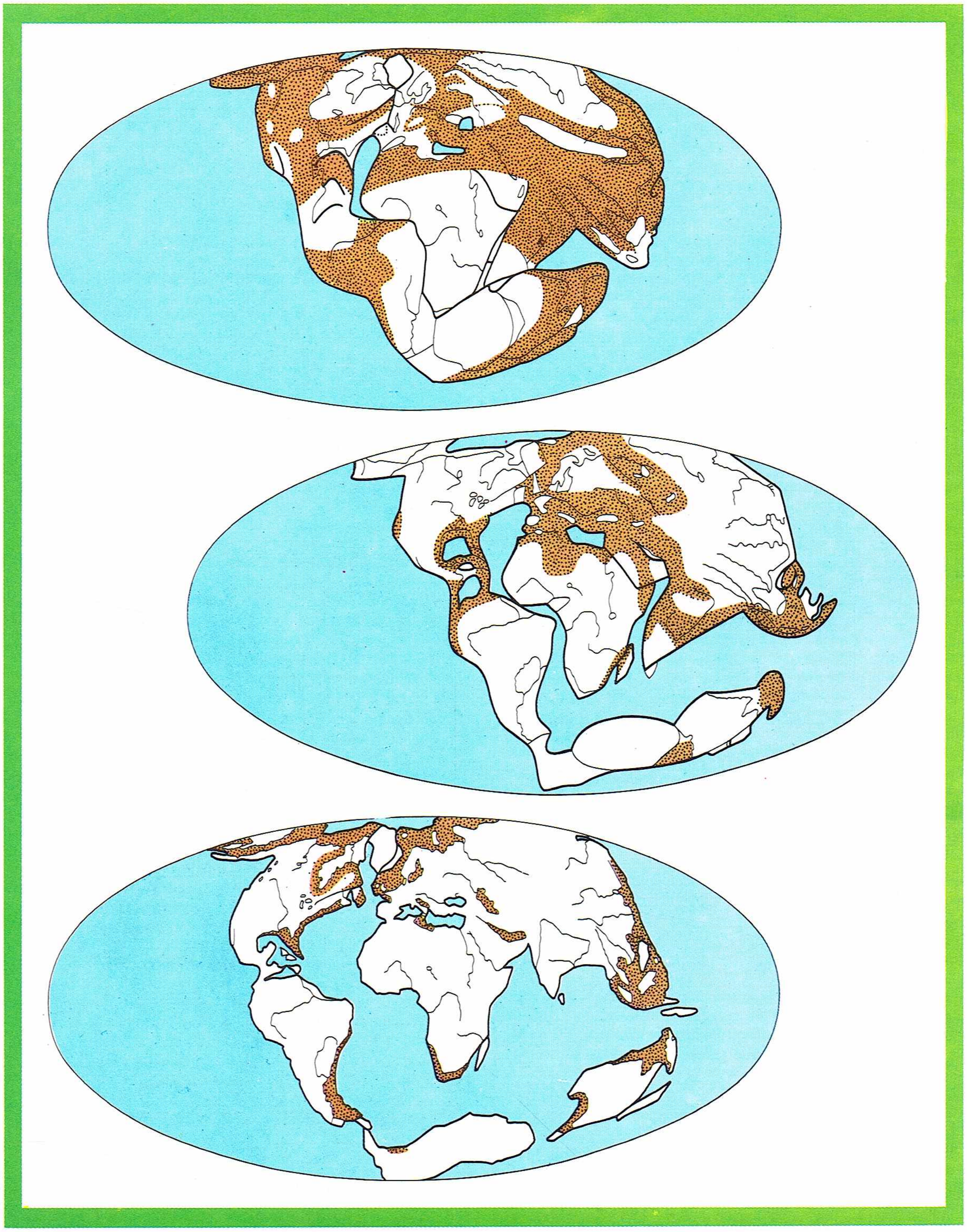

◀ *La formation des continents actuels d'après la théorie de Wegener. Les zones pointillées correspondent aux mers peu profondes (mers épicontinentales) couvrant les zones continentales effondrées.*

I.G.D.A.

formées par compression tangentielle des sédiments entre deux blocs continentaux rigides migrant en sens opposés ou dans le même sens mais avec des vitesses différentes; ce serait le cas des Alpes, formées par écrasement de la Téthys entre l'Eurasie et l'Afrique. Les arcs insulaires, tels que les Antilles et ceux du Pacifique occidental, seraient formés par des fragments de petites dimensions de l'écorce terrestre laissés en arrière lors de la dérive des continents vers l'ouest car plus fortement freinés dans leur mouvement par le magma visqueux.

La théorie de Wegener, après avoir connu une période d'engouement et avoir été soutenue par de nombreux savants, fut ensuite combattue et abandonnée. Les critiques faites à cette théorie sont basées sur l'origine peu claire des forces provoquant la dérive des continents, sur la difficulté d'interpréter les chaînes de montagnes anciennes paléozoïques et précambriennes et sur l'absence de chaînes de montagnes sur les côtes occidentales de l'Afrique et de l'Australie.

Toutefois, à partir des années 1950, les recherches sur le paléomagnétisme et les études géophysiques ont conduit les géophysiciens et les géologues à faire de nouveau appel à la notion de dérive des continents pour interpréter les observations faites à la surface des continents et des océans, mais en modifiant et en précisant la théorie de Wegener (voir la théorie de la tectonique des plaques).

La théorie du glissement gravitationnel

L'hypothèse de glissements gravitationnels, formulée à la fin du siècle dernier par H. Schardt au sujet du Jura et par M. Lugeon, explique la formation des chaînes

de montagnes par le glissement, le long de surfaces inclinées et sur de longues distances, de masses rocheuses décollées de leur substratum sous l'action de la pesanteur. Pendant ce glissement superficiel les masses rocheuses subissent des plissements et des chevauchements. Comme nous l'avons vu à propos du mécanisme de mise en place des nappes de charriage, ces glissements ne peuvent exister que si les masses rocheuses sont décollées de leur substratum à la faveur de niveaux plastiques et si la pente sur laquelle glissent les sédiments est très étendue. Dans le cas du Jura, les sondages ont montré que le substratum pend vers le sud-est, en sens contraire du glissement de la couverture qui s'est effectué vers le nord-ouest; divers arguments montrent qu'il en était de même au Miocène lors du glissement. Il semble donc qu'un tel phénomène de glissement superficiel par gravité n'ait pu jouer dans ce cas et que les plissements soient dus à une compression latérale provoquée par les mouvements des blocs du socle faillé. On ne peut donc pas appliquer l'hypothèse du glissement par gravité à toutes les chaînes de montagnes.

Reprenant ces idées, E. Haarmann (1930) proposa la *théorie de l'oscillation*. Dans cette hypothèse, de grands bombements de fond, appelés « géotumeurs », se formeraient, séparés par des dépressions dans lesquelles s'accumuleraient des sédiments. L'équilibre isostasique étant alors rompu, le fond des dépressions aurait tendance à s'enfoncer davantage, alors que les géotumeurs se soulèveraient; ces phénomènes constituent la « tectonique primaire ». Sur les flancs de ces géotumeurs, les sédiments glisseraient sous l'effet de la pesanteur, en se plissant et en formant des nappes de charriage; ces phénomènes constituent la « tectonique secondaire ». On le voit, dans cette théorie, les mouvements verticaux de l'écorce terrestre sont considérés comme essentiels, les mouvements horizontaux, plis et charriages, n'étant que des conséquences secondaires des mouvements verticaux. Elle s'oppose donc entièrement à la théorie de la dérive des continents, qui considère les mouvements horizontaux de l'écorce comme fondamentaux. Toutefois, la cause de la formation des géotumeurs reste imprécisée dans cette théorie.

▼ *A gauche, théorie des* **glissements gravitationnels,** *d'après* **Haarmann.** *A droite, schéma des* **cellules de convection** *formées par la circulation des* **courants de convection** *sous-crustaux.*

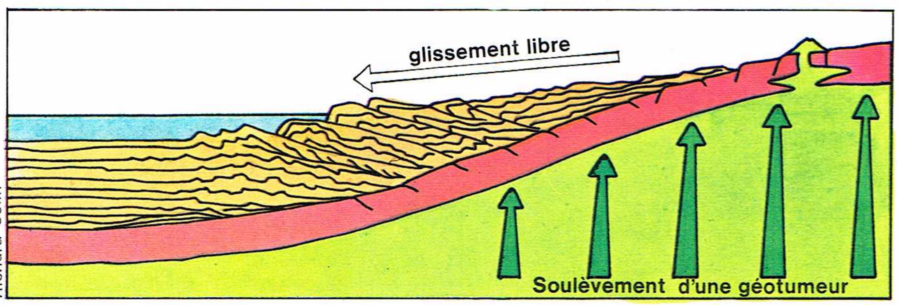

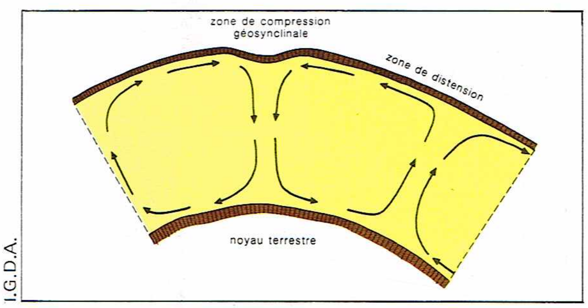

Dans la théorie de R. V. Van Bemmelen (1933), le bombement initial de l'écorce serait dû à la granitisation des roches primitivement basiques du magma sous-crustal par diffusion atomique et ionique, ce qui entraînerait une forte diminution de densité provoquant des mouvements verticaux. A partir de ces bombements se produiraient des phénomènes de glissements par gravité. Ces glissements n'affecteraient pas seulement les couches sédimentaires superficielles, mais également la croûte terrestre à différents niveaux et la partie supérieure du manteau.

Van Bemmelen envisage trois types de bombements primitifs, ou *undations,* d'échelles différentes. Les undations les plus grandes affectent des continents entiers. Ainsi, l'océan Atlantique correspondrait à une undation de grande échelle, l'Amérique du Sud tout entière glissant sur le bord de ce bombement vers l'ouest.

V. V. Beloussov considère également que les mouvements les plus importants de l'écorce terrestre sont les mouvements verticaux de blocs faillés, avec des zones de soulèvement et d'affaissement, les plissements n'étant que des phénomènes secondaires. Beloussov explique la formation de la croûte océanique, différente de la croûte continentale, par une « océanisation », c'est-à-dire un enfoncement vertical et une assimilation progressive de la croûte continentale dans le manteau.

La théorie des courants magmatiques de convection

Dès 1839, Hopkins avait suggéré l'existence possible de courants dans le magma sous-jacent à l'écorce terrestre. Ces courants étaient rendus possibles dans la partie supérieure du manteau grâce à sa viscosité, due à l'élévation des températures en profondeur qui entraînerait la fusion des roches.

En 1906, O. Ampferer fit intervenir ces courants magmatiques pour expliquer la formation des chaînes de montagnes. Il invoqua des changements de volume des magmas sous-crustaux pour expliquer la formation de soulèvements de l'écorce et de dépressions encadrant ces soulèvements. L'accumulation des sédiments provoque un déséquilibre se traduisant par un rétrécissement de la fosse de sédimentation et le plissement des sédiments qui s'y sont déposés. Le déséquilibre isostasique provoque ensuite la surrection de ces zones plissées, donnant lieu à une chaîne de montagnes.

Pour E. Kraus (1936), l'orogenèse est due à l'activité de courants magmatiques descendants. Ceux-ci, par entraînement, aboutiraient à la « succion » vers le bas de la partie superficielle de la croûte terrestre. Il en résulte, sur les bordures de la zone de succion, des compressions latérales centrifuges qui aboutissent à la formation de nappes de charriage. En fait, il s'agit là plutôt d'un « sous-charriage » des parties inférieures sous les parties supérieures de l'écorce. Cette interprétation peut rendre compte des structures observées dans les chaînes à double déversement. Mais elle n'explique pas les causes des courants magmatiques, ni leur localisation.

Par la suite, des théories ont été proposées expliquant la formation des courants magmatiques par *convection thermique*. Les expériences montrent que dans une masse fluide présentant des différences de température d'un point à l'autre, les différences de

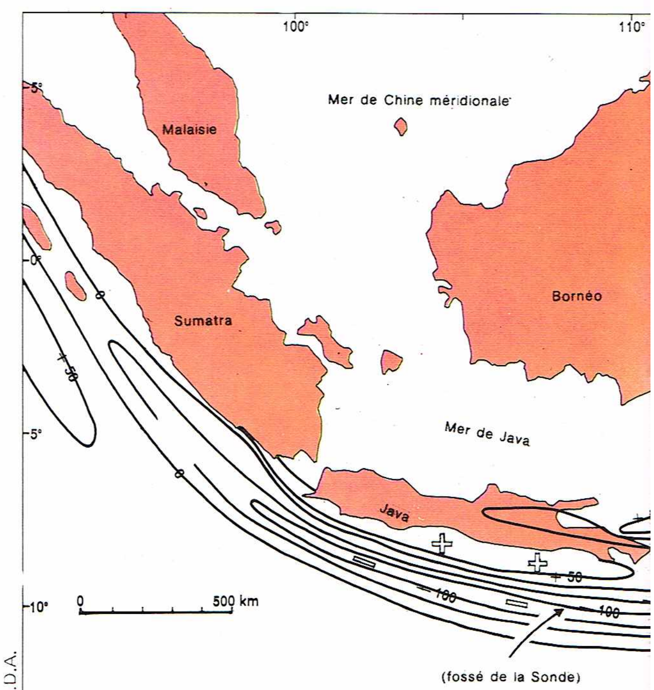

▶ *Au centre, carte des anomalies de la gravité (valeurs en milligals) de l'archipel indonésien.*

densité résultantes entraînent la formation de courants fermés sur eux-mêmes, constituant des « cellules de convection ». Ainsi, quand on fait chauffer de l'eau, la partie du liquide la plus proche de la flamme, devenue plus chaude et moins dense, monte vers le haut tandis que la partie supérieure du liquide, plus froide et plus dense, descend ; il se forme des courants ascendants et descendants.

Dès 1929, A. Holmes admit l'existence de tels courants résultant d'une convection thermique dans le magma sous-crustal. On sait que la Terre émet de l'énergie, sous forme de chaleur, par suite de la chaleur originelle de formation du globe terrestre et des phénomènes de désintégration des corps radio-actifs. Or, la répartition des éléments radio-actifs ne semble pas homogène dans l'écorce terrestre. Le matériel qui forme les continents en contiendrait plus que le matériel plus basique formant les fonds des océans. Il s'ensuivrait un déséquilibre thermique se traduisant par des courants magmatiques ascendants sous les continents et des courants descendants sous les océans. Ces courants ascendants et descendants seraient reliés par des courants horizontaux divergents à la base des continents qui exerceraient des efforts de distension sur ceux-ci. Il en résulterait une fragmentation des continents, qui partiraient à la dérive, ce qui provoquerait la formation des chaînes de montagnes péricontinentales.

Selon J. Goguel, pour que de tels courants de convection puissent se former dans le manteau supérieur, il faut que la résistance qu'oppose la viscosité du fluide soit surmontée. La viscosité du manteau semble être très grande, mais la théorie montre que de tels courants sont possibles même pour de grandes viscosités à condition que les courants soient de grande dimension (milliers de kilomètres) et très lents (moins d'un mètre par an).

L'hypothèse des courants magmatiques de convection fut appliquée, par la suite, à l'interprétation des variations des valeurs de la gravité observées par F. A. Vening Meinesz, J. H. F. Umbgrove et Ph. H. Kuenen dans l'archipel indonésien. Ceux-ci ont constaté l'existence d'une étroite bande de fortes anomalies négatives de la gravité, comprises entre deux larges zones à anomalies positives, et qui s'étend parallèlement à l'extérieur des îles de Sumatra et Java, passe par Timor et se termine dans les Célèbes. Cette bande d'anomalies négatives ne coïncide pas avec les fosses océaniques profondes connues dans cette région, mais avec une cordillère marquée par un chapelet d'îles. Pour expliquer cette bande d'anomalies négatives, Vening Meinesz a supposé qu'elle correspond à un épaississement de la croûte continentale moins dense au niveau de l'arc externe non volcanique, les anomalies positives de l'arc interne volcanique correspondant à un amincissement de cette même croûte. Cet épaississement serait dû à un fléchissement vers le bas, une sorte de boucle, de la croûte sialique plongeant profondément dans le sima plus dense sous l'action des contraintes mécaniques exercées sous l'écorce par les courants de convection ; ces courants sont descendants sous l'arc externe (ce qui expliquerait les plissements qu'on y observe) et ascendants sous l'arc interne volcanique (ce qui explique le volcanisme). Les zones d'anomalies négatives seraient des chaînes de montagnes en cours de formation. Cependant, cette interprétation s'accorde mal avec la répartition des séismes dans cette région, dont les foyers se disposent le long d'un plan oblique à la surface.

D. Griggs en 1939 a réalisé des expériences sur modèles réduits pour démontrer la manière dont pourraient se former des chaînes de montagnes sous l'action de courants magmatiques de convection. Respectant les conditions de similitude (plasticité, viscosité du matériel), il utilisa des substances qui permettent de reproduire en peu de temps des phénomènes géologiques qui ont lieu à une échelle de temps très grande. Pour simuler l'action des courants de convection, il utilisa deux cylindres horizontaux pouvant tourner soit simultanément en sens inverse l'un de l'autre, soit isolément dans le liquide simulant le manteau. Si les deux cylindres tournant simultanément en sens inverse convergent, il se produit un enfoncement du liquide simulant la croûte terrestre et la formation du modèle d'une chaîne de montagnes symétrique que l'on peut en première approximation comparer aux chaînes de type géosynclinal. Quand un seul cylindre tourne, le même enfoncement se produit, mais il est dissymétrique, reproduisant une chaîne de type liminaire. Quand la rotation des cylindres cesse, l'équilibre hydrostatique se rétablit, provoquant ainsi le soulèvement de la zone plissée.

Ces expériences ne constituent pas une preuve de la réalité de la formation des chaînes de montagnes sous l'effet des courants de convection, mais seulement un modèle possible. Pour expliquer la périodicité des cycles orogéniques, Griggs a fait intervenir une périodicité des courants de convection ; celle-ci serait due au fait que les courants ne peuvent se déclencher que si les différences de température entre les secteurs de l'écorce sont assez grandes pour vaincre la résistance du matériel et que les cellules de convection cessent de fonctionner quand les températures sont égalisées.

L'existence de courants de convection à l'intérieur du manteau est également admise par P. Gidon (1963) dans sa théorie orogénique de « l'érosion sous-crustale ».

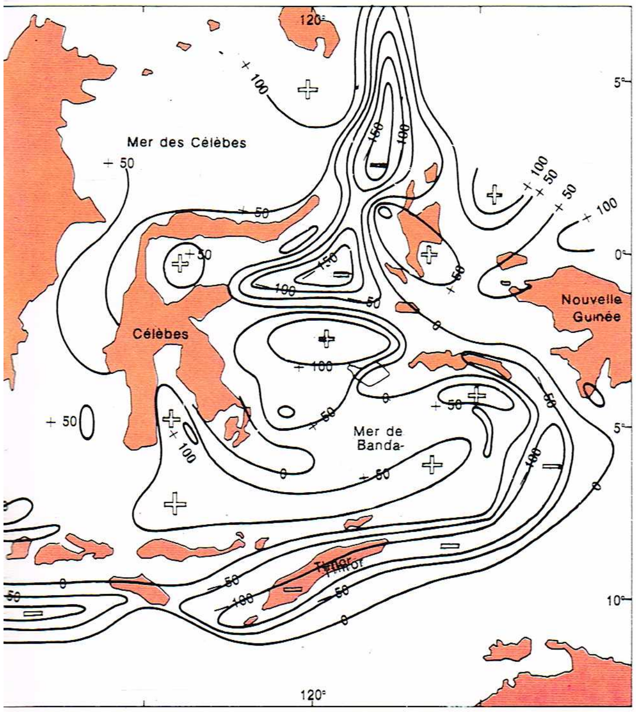

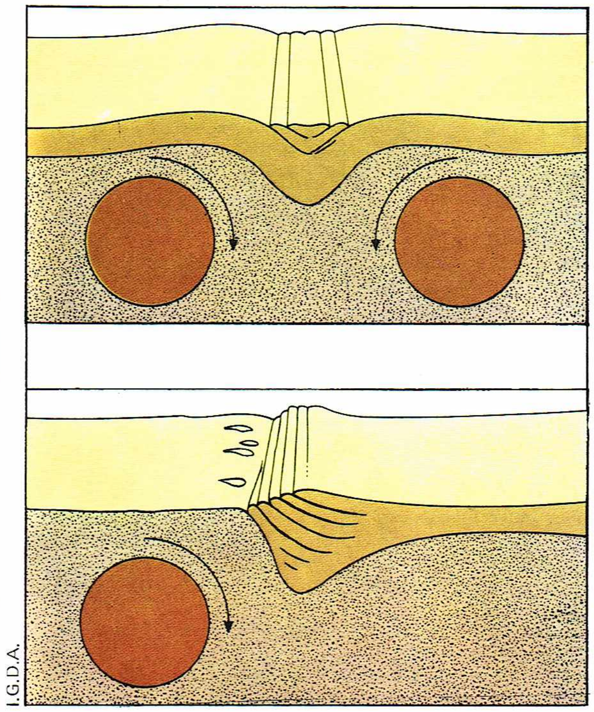

◀ ***Expérience de Griggs montrant la manière dont pourraient se former des chaînes de montagnes sous l'action de courants magmatiques de convection.***

En 1967, Rittmann a repris l'hypothèse des courants de convection en supposant que la température du manteau est, à égale profondeur, plus forte sous les océans que sous les continents. Cela entraînerait des courants dirigés des océans vers les continents et la formation de zones tectoniquement actives, orogéniques, à la limite entre les océans et les continents. Mais on explique mal alors pourquoi certaines limites entre océan et continent, comme l'Afrique ou la côte atlantique de l'Amérique du Sud, ne sont pas le siège de phénomènes orogéniques.

La théorie de la tectonique des plaques

A partir des années 1950, on a assisté à un renouveau de la théorie de la dérive des continents (abandonnée pendant un certain temps) pour interpréter les résultats des études paléomagnétiques et des autres études géophysiques concernant la structure interne et la séismicité du globe terrestre, ainsi que la morphologie et la nature des fonds océaniques. On appelle cette théorie, fondée essentiellement sur les données géophysiques, la théorie de la tectonique des plaques. Avant d'exposer cette théorie, il est nécessaire de résumer sommairement ces données géophysiques.

La structure interne du globe terrestre

Les études de sismique-réflexion et de sismique-réfraction ont permis de montrer que le globe terrestre est constitué par un emboîtement de couches concentriques ayant des propriétés physico-chimiques différentes, séparées par des surfaces de discontinuité sismique. La vitesse de propagation des ondes sismiques, proportionnelle à la densité des roches qu'elles traversent, donne une idée de la nature de celles-ci. On appelle *écorce* ou *croûte terrestre* la partie superficielle du globe, d'épaisseur et de nature variées. A la base de l'écorce, on trouve le plus souvent une surface de discontinuité sismique, dite *discontinuité de Mohorovicic,* du nom du séismicien yougoslave qui l'a mise en évidence dès 1909. La densité moyenne des terrains constituant l'écorce est inférieure à 3,3 et la vitesse de propagation des ondes sismiques P est, en moyenne, inférieure à 8 km/s.

La croûte terrestre ne représente à l'échelle du globe qu'une très mince pellicule entourant le *manteau,* qui lui-même entoure le *noyau*. Étant donné l'épaisseur très faible de la croûte comparée à celles du manteau et du noyau, il est certain que les déformations que l'on y observe ont une origine profonde et qu'une meilleure connaissance de la nature ainsi que des propriétés du manteau permet de mieux comprendre le mécanisme de ces déformations. Il est donc nécessaire de faire appel à la géophysique, d'autant plus que seule une petite partie de l'écorce (environ 10 km) est accessible à l'observation géologique directe.

D'autres subdivisions sont utilisées par les géophysiciens qui distinguent : la *lithosphère,* correspondant à une tranche de terrains relativement rigides comprenant l'écorce et une partie du manteau supérieur, d'une épaisseur de 70 à 150 km ; l'*asthénosphère,* partie moyenne du manteau atteignant 800 km, formée de matériel visqueux susceptible de se déformer ; enfin, la *mésosphère,* partie inférieure du manteau, à nouveau très rigide.

La variation d'épaisseur de la croûte terrestre au-dessus de la discontinuité de Mohorovicic permet de distinguer différents types de croûte : la *croûte continentale* sous les régions continentales anciennes, de 30 à 40 km d'épaisseur, la croûte continentale sous les chaînes de montagnes récentes formant une « racine » et atteignant 70 km, et la *croûte océanique* sous les océans, de 10 à 15 km d'épaisseur.

La croûte continentale est composée de différentes couches ; ce sont, de haut en bas : une couche formée de roches sédimentaires, une couche de terrains cristallophylliens et cristallins appelée « couche granitique », et une couche sous-jacente de terrains jamais visibles en surface mais dont la densité correspond à celle du basalte ou de gabbros, et que l'on nomme « couche basaltique ».

La croûte océanique est caractérisée par l'absence de la « couche granitique ». Seules existent la couche sédimentaire très mince et la « couche basaltique ». Dans certains bassins océaniques, il existe une *croûte intermédiaire* présentant une « couche granitique » beaucoup plus mince que celle de la croûte continentale (mer Caraïbe, mers intérieures du Pacifique occidental le long des guirlandes d'îles).

La composition du manteau supérieur prête à de nombreuses discussions. On considère qu'il est formé de péridotites plus ou moins serpentinisées ou d'éclogites.

Données paléomagnétiques

Certaines roches peuvent acquérir une aimantation au moment de leur refroidissement ou de leur sédimentation. La mesure de cette aimantation rémanente des roches permet de connaître la position du pôle magnétique à l'époque de leur formation. L'étude du magnétisme fossile des roches a montré que les pôles mesurés dans les roches anciennes ne correspondent pas au pôle Nord actuel. On peut interpréter cette différence soit par une migration du pôle magnétique au cours des temps, soit par une migration des continents. Mais en admettant que le pôle a pu se déplacer au cours des temps, cela n'explique pas pourquoi les migrations des pôles, calculées pour différents continents, ne coïncident pas entre elles. On a donc été conduit à admettre que les continents se sont déplacés les uns par rapport aux autres. Cette conclusion a été le point de départ du renouveau de la théorie de la dérive des continents.

D'autre part, les études sur le paléomagnétisme des laves récentes ont montré que le pôle magnétique terrestre peut s'inverser, la direction du champ magnétique restant la même mais son sens variant. On a pu déterminer à quelles époques se sont produits les renversements de pôles, en réalisant des datations d'âge isotopique par les méthodes radio-actives sur les roches correspondantes.

Étude des fonds océaniques

Les océans occupent les 3/4 de la surface du globe terrestre. La morphologie des fonds sous-marins n'est connue que depuis peu et de manière encore imparfaite. On sait qu'ils sont très accidentés. De profondeur moyenne d'environ — 4 000 m, ils atteignent dans certaines fosses des profondeurs de — 12 000 m. En bordure des continents s'étend généralement une *plate-forme continentale,* de largeur variable et de profondeur moyenne (— 200 m). Formée des mêmes roches que les continents adjacents, elle en est la prolongation. La plate-forme est limitée par un *talus continental,* de pente assez forte, qui relie le continent aux grands fonds océaniques. Ceux-ci forment de vastes *plaines abyssales* profondes de 3 000 à 6 000 m, accidentées dans leur partie médiane par une *ride médio-océanique*. Les rides sont des zones de relief accidenté, de 4 000 m de haut environ, siège d'un volcanisme intense et de séismes, s'étendant sur des dizaines de milliers de kilomètres, et pouvant être jalonnées par des îles affleurant au-dessus de l'eau. Ainsi, la ride médio-atlantique, parallèle et à égale distance des côtes d'Afrique et d'Amérique, est jalonnée par des îles volcaniques telles que l'Islande, les Açores, Sainte-Hélène, Tristan da Cunha, etc. Le profil topographique des rides médio-océaniques est caractérisé par une dépression centrale, zone d'effondrement encadrée par des reliefs importants diminuant progressivement quand on s'éloigne de la zone axiale. Cette morphologie montre que les rides sont des structures en distension de l'écorce terrestre comparables aux fossés d'effondrement d'Afrique orientale, qui sont eux aussi jalonnés par des volcans. Les rides médio-océaniques sont affectées par de grandes cassures transversales, qui sont des décrochements de type particulier appelés *failles transformantes,* contemporains de la formation des rides. De plus, une petite partie des fonds océaniques est accidentée par des fosses profondes bordant des *arcs insulaires* ou des chaînes de montagnes récentes (fosses du Japon, d'Indonésie, du Pérou, de Porto Rico, etc.).

La nature des roches constituant les fonds sous-marins est connue par des dragages et des sondages. Il s'agit de roches volcaniques, généralement basaltiques, recouvertes dans les plaines abyssales par des sédiments horizontaux peu épais. La constitution basaltique des fonds sous-marins tend à prouver qu'il n'y a jamais eu de continents à leur place.

L'âge des sédiments et celui des basaltes sous-jacents, déterminé par des mesures d'âge isotopique, varient,

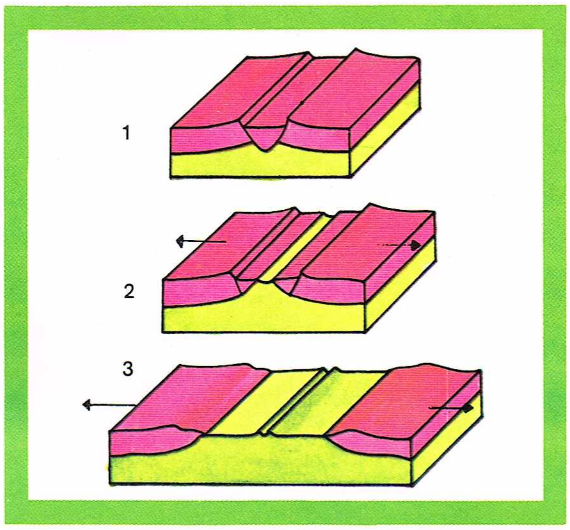

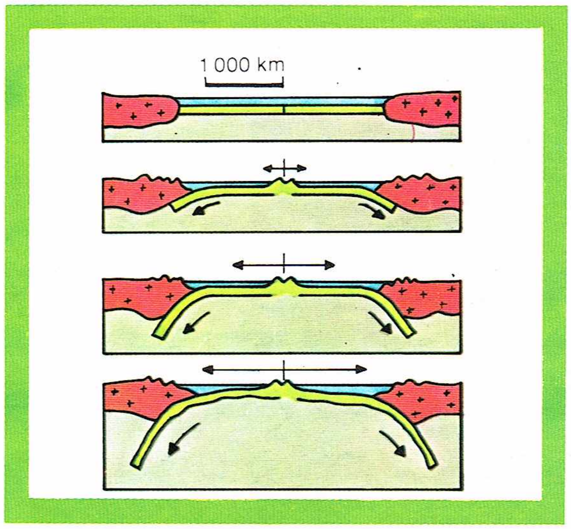

◀ *A gauche, schémas montrant la fragmentation d'un continent et la formation d'une ride océanique : 1, stade des fossés de l'Afrique orientale ; 2, stade de la mer Rouge ; 3, stade de l'océan Atlantique (d'après Mattauer). A droite, schéma montrant le mécanisme de renouvellement de la croûte océanique de l'océan Pacifique, par expansion à partir de la ride médiopacifique, et sa disparition simultanée au niveau des fossés péripacifiques.*

semble-t-il, quand on s'éloigne des rides médio-océaniques. Dans la partie axiale des rides, les roches sont actuelles ou très récentes ; au fur et à mesure qu'on s'en éloigne, sous les roches récentes apparaissent des roches de plus en plus anciennes, miocènes, puis tertiaires, puis crétacées. Actuellement, on ne connaît pas de roches océaniques plus anciennes que le Jurassique. Mais de nombreux sondages à travers une forte épaisseur de basaltes sont encore nécessaires pour déterminer avec certitude l'âge des fonds océaniques.

En 1961, reprenant les idées de Holmes, H. Hess proposa sa *théorie de l'expansion des fonds océaniques,* basée sur les courants magmatiques de convection thermique. Les rides médio-océaniques seraient le siège de courants magmatiques ascendants, et les fosses océaniques le siège de courants descendants des cellules de convection. Les continents seraient charriés passivement sur l'asthénosphère. On suppose que du magma basaltique d'origine profonde apparaît dans la zone axiale des rides médio-océaniques, en relation avec une distension de l'écorce terrestre en cet endroit. Les intrusions successives de magmas ayant lieu dans la partie axiale des rides, les deux côtés de la ride s'écarteraient peu à peu, et il se formerait de nouvelles portions d'écorce océanique, d'où une expansion des fonds océaniques. Si l'on admet que le rayon de la Terre ne s'accroît pas considérablement, on doit admettre un phénomène complémentaire de disparition de l'écorce océanique au niveau des courants de convection descendants, c'est-à-dire au niveau des fosses océaniques, par enfoncement de la lithosphère océanique sous les arcs insulaires ou les continents voisins des fosses.

Dans cette théorie on considère, comme dans celle de la dérive des continents, que l'Atlantique s'est formé par fragmentation d'un grand continent et séparation de l'Afrique et de l'Amérique du Sud, par suite de l'installation sous ce grand continent initial de courants convectifs ascendants et divergents, ce qui aurait provoqué une distension de l'écorce continentale à cet endroit et la formation d'une ride océanique. Le premier stade de cette distension serait représenté par les fossés d'effondrement de l'Afrique orientale. Par suite de l'écartement progressif des côtés des fossés d'effondrement, la croûte continentale est progressivement amincie, puis rompue, et il se forme une écorce océanique typique avec un fort volcanisme associé. Le stade suivant est représenté par le fossé d'effondrement de la mer Rouge, formé par la distension entre l'Afrique et l'Arabie, et qui possède un fond océanique. L'écartement progressant, il se formerait un océan avec ride médio-océanique tel que l'océan Atlantique. Les plaines abyssales se formeraient par réajustements isostasiques des reliefs qui disparaissent recouverts de sédiments. L'âge de l'ouverture de l'Atlantique serait triasique.

Par contre, on considère que l'océan Pacifique est un océan permanent qui ne serait pas dû à l'écartement de deux continents. Cependant, on constate l'absence apparente de sédiments plus anciens que le Jurassique au fond de l'océan Pacifique. On admet que la croûte océanique du Pacifique se renouvelle progressivement par expansion à partir de la ride médio-pacifique et disparition simultanée au niveau des fosses péripacifiques, à la manière d'un tapis roulant. Tous les 200 ou 300 millions d'années, il y aurait apparition et disparition de milliers de kilomètres de croûte océanique et renouvellement complet du fond du Pacifique.

Les études géophysiques ont montré qu'il existe au voisinage des rides médio-océaniques des anomalies magnétiques alignées parallèlement à l'axe des rides, en gros symétriques par rapport à celui-ci et alternativement positives et négatives. On interpréta d'abord ces bandes d'anomalies comme des dykes de matériel volcanique injecté dans des cassures des fonds océaniques, ou comme des coulées de laves ayant rempli des dépressions dues à des failles d'effondrement. Mais le parallélisme de ces bandes d'anomalies et de l'axe des rides laisse supposer que ces bandes sont liées à la genèse des rides océaniques : en 1963, F. J. Vine et D. H. Matthews interprétèrent ces anomalies dans le cadre de la théorie de l'expansion des fonds océaniques. Dans cette interprétation, les bandes d'anomalies correspondraient aux intrusions successives de basalte dans l'axe des rides. Par suite de l'écartement progressif des côtés de la ride, dû à l'expansion des océans, les basaltes se seraient formés à des époques différentes, fossilisant le champ magnétique régnant au moment de leur refroidissement. Les bandes d'anomalies les plus récentes se trouveraient le plus près des rides et seraient de plus en plus anciennes au fur et à mesure que l'on s'éloigne de celles-ci. Vine et Matthews proposèrent de corréler ces anomalies avec les renversements du pôle magnétique observés dans les roches continentales pour différentes époques. Chaque bande d'anomalies correspondrait ainsi à une époque déterminée, qu'on peut dater par comparaison avec les roches continentales. Il est possible, en superposant deux bandes d'anomalies symétriques par rapport à la ride et donc de même âge, de retracer les différents stades d'expansion des fonds océaniques et de déterminer la vitesse de cette expansion. Cette vitesse serait de 2 cm/an pour l'Atlantique et de 8 cm/an pour le Pacifique. Cependant, la vitesse d'expansion n'est pas constante.

C'est en 1965 que J. T. Wilson a donné une explication satisfaisante (basée sur l'expansion des fonds océaniques) des grandes cassures transversales qui affectent les rides océaniques et qu'il a appelées *failles transformantes.* Ce ne sont pas des décrochements normaux.

Dans un décrochement normal, les deux blocs de part et d'autre d'un plan de rupture subvertical se déplacent parallèlement à ce plan et en sens inverse l'un de l'autre. Le sens du déplacement des deux blocs peut être déduit du déplacement apparent des deux parties d'une structure repère, existant avant la formation de la faille et coupée ultérieurement par celle-ci (un batholite de granite, par exemple). Chaque bloc subit dans sa totalité le même déplacement.

Dans le cas d'une faille transformante, au contraire, le sens des déplacements le long de la faille varie dans

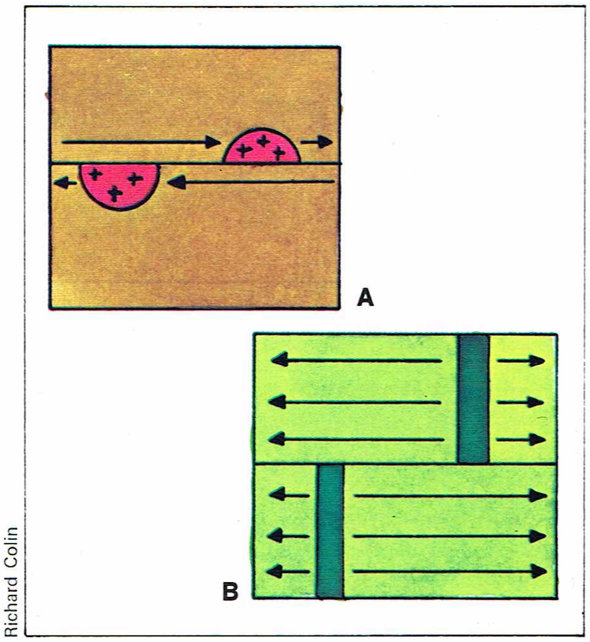

▶ *Représentations schématiques comparatives d'un* **décrochement normal** *(A) et d'une* **faille transformante** *(B).*

de l'écorce, puisque les sédiments qui s'y sont déposés sont restés horizontaux depuis le Mésozoïque. Les zones stables sont très peu affectées par les phénomènes de volcanisme et de séismicité.

Les *zones non stables* de l'écorce correspondent aux chaînes de montagnes récentes (orogenèse alpine) et aux régions où se localisent les phénomènes de volcanisme et de séismicité. Ce sont des zones étroites et allongées où ont lieu des déformations par compression ou par extension. Elles comprennent les chaînes mésogéennes (des Alpes à l'Himalaya), les guirlandes d'îles du Pacifique occidental, les montagnes Rocheuses et les Andes, les rides médio-océaniques et les failles transformantes qui hachent ces rides.

Le terme de *plaque* est utilisé pour définir une portion actuellement stable de la lithosphère, entourée de zones non stables. Une plaque peut comprendre une partie continentale et une partie océanique s'il n'existe pas de zone de déformations actuelles importante entre les deux parties. On peut ainsi délimiter huit grandes plaques à l'échelle du globe terrestre :

— la *plaque africaine,* comprenant le continent africain et la moitié sud-est de l'Atlantique ; elle est limitée par la chaîne alpine au nord et les rides médio-océaniques des océans Atlantique et Indien ;

— la *plaque eurasiatique,* essentiellement continentale mais englobant la partie nord-est de l'Atlantique ; elle est limitée au sud par la chaîne alpine, à l'ouest par la ride médio-atlantique et à l'est par les chaînes péri-pacifiques ;

— la *plaque nord-américaine,* englobant l'Amérique du Nord et l'Atlantique Nord-Ouest ;

— la *plaque sud-américaine,* comprenant l'Amérique du Sud et la partie sud-est de l'Atlantique ;

— la *plaque de l'Antarctique,* en partie continentale et en partie océanique (sud de l'océan Indien) ;

— la *plaque indo-australienne ;*

— la *plaque sud-pacifique,* entièrement océanique ;

— la *plaque nord-pacifique,* entièrement océanique.

Ces grandes plaques ont plusieurs milliers de kilomètres carrés. On est souvent amené, quand on considère une région plus limitée de l'écorce terrestre, à les subdiviser en de nombreuses plaques secondaires, de dimensions plus restreintes ; le schéma global, très simple, devient alors très complexe.

un même bloc par suite de l'expansion des fonds océaniques à partir de la ride. Le déplacement réel est l'inverse du déplacement apparent qui semblerait pouvoir être déduit des positions respectives des deux parties de la ride de part et d'autre de la faille. La ride ne s'est pas formée avant la faille, celle-ci ayant par la suite séparé les deux parties de la ride ; mais au contraire la faille est contemporaine de la formation de la ride et celle-ci a toujours possédé sa forme actuelle, acquise au moment de la séparation de deux continents, et du début de l'expansion des fonds océaniques entre ces deux continents.

La notion de plaques

Lorsque l'on considère la surface de la Terre, on remarque qu'il est possible de distinguer des zones stables et des zones non stables de l'écorce terrestre et qu'il existe des relations entre les zones de déformations actuelles de l'écorce et les phénomènes de volcanisme et de séismicité.

Les *zones stables* de l'écorce correspondent aux boucliers continentaux formés de roches anciennes et à leur couverture sédimentaire restée horizontale depuis le Mésozoïque ou même depuis le Cambrien. Les plaines abyssales océaniques sont également des zones stables

▼ *La* **tectonique des plaques.** *Répartition de la séismicité de la Terre et des plaques lithosphériques principales, limitées par des rides océaniques actives, des failles transformantes, des systèmes de fosses et des zones de compression.*

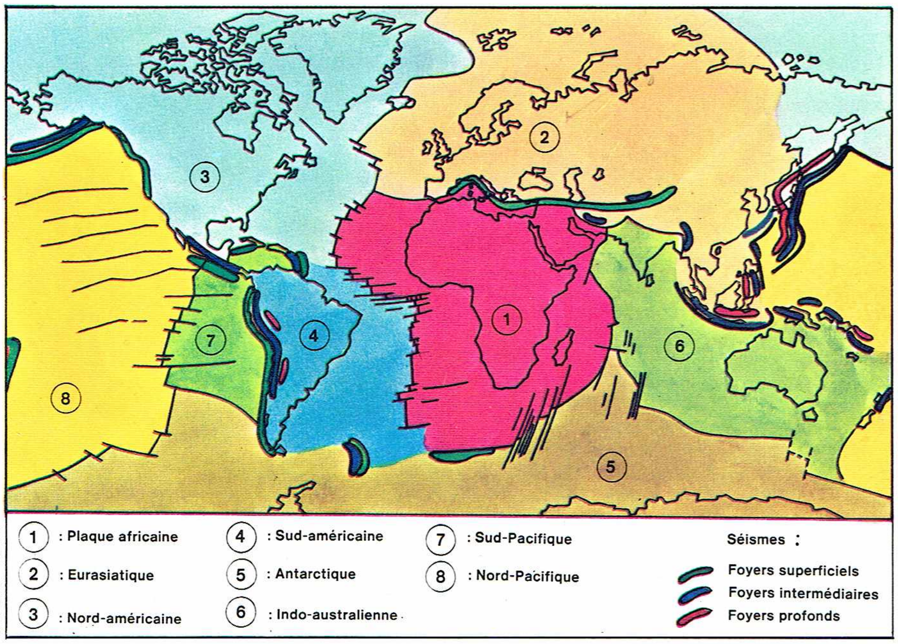

La tectonique des plaques

La théorie de la tectonique des plaques, élaborée par X. Le Pichon et par B. Isaaks, J. Oliver et L. R. Sykes en 1968, est une synthèse des théories de la dérive des continents et de l'expansion des fonds océaniques.

Les plaques lithosphériques, définies précédemment, sont considérées comme se déplaçant les unes par rapport aux autres. Leur déplacement est rendu possible mécaniquement par les propriétés de la lithosphère rigide qui glisse sur l'asthénosphère visqueuse. Par suite de l'apport de magma profond dans l'axe des rides médio-océaniques, sous l'effet des courants de convection ascendants, de nouvelles portions de lithosphère sont créées, et les plaques lithosphériques s'écartent les unes des autres à partir des rides médio-océaniques.

Quand deux plaques s'écartent l'une de l'autre, elles se déplacent par rapport aux autres plaques. Il se produit alors soit un coulissage d'une plaque contre une autre sans que la surface des plaques change, soit une collision de deux plaques. La collision provoque le fléchissement d'une des plaques, qui s'enfonce sous l'autre et disparaît, absorbée dans l'asthénosphère. Cet enfoncement est lié à la plus grande densité de la lithosphère océanique froide par rapport à l'asthénosphère. On donne à ce phénomène d'enfoncement de la lithosphère océanique dans l'asthénosphère le nom de *subduction.* La subduction provoque un flux d'énergie mécanique et thermique donnant lieu à des phénomènes de plissement, de volcanisme, de séismicité, de magmatisme et de métamorphisme et à la formation d'une chaîne de montagnes au-dessus de la zone de subduction.

Les zones de subduction actuelles sont liées aux fosses océaniques profondes situées en bordure des chaînes de montagnes récentes et des arcs insulaires, considérés comme des chaînes de montagnes en formation. Un certain nombre de caractères de ces arcs : fosses océaniques très profondes en bordure des arcs, anomalies

magnétiques négatives au-dessus de la fosse et positives au-dessus de l'arc correspondant, volcanisme, séismicité, trouvent leur explication dans le cadre de la tectonique des plaques. C'est également le cas des phénomènes de métamorphisme et de magmatisme que l'on observe en association avec les chaînes de montagnes plus anciennes.

Les cartes de répartition selon la profondeur des foyers de séismes dans les régions d'arcs insulaires, au Japon et en Indonésie, montrent que les foyers superficiels (1-70 km) se trouvent sur le bord des fosses océaniques au large des îles, les foyers moyens (70-300 km) sensiblement à l'aplomb des îles, et les foyers profonds (300-700 km) à l'intérieur de la concavité des arcs insulaires. Les foyers se disposent le long d'une surface inclinée de 25° à 45° sur l'horizontale et qui plonge sous la bordure du continent adjacent. On interprète ces surfaces, appelées *plans de Bénioff*, comme des zones de friction le long desquelles a lieu la subduction. La friction provoque des déséquilibres se traduisant par des séismes de profondeur variée, suivant l'enfoncement de la lithosphère dans l'asthénosphère. On retrouve une disposition semblable sous tous les arcs insulaires du Pacifique et des Antilles. Sous les Andes, la répartition des séismes n'est pas aussi simple. Aux séismes dus à la subduction peuvent s'ajouter d'autres séismes liés à des mouvements simultanés de coulissage des plaques le long de décrochements.

Les phénomènes volcaniques liés aux arcs insulaires suivent également une évolution, la composition des roches volcaniques variant selon leur position à travers l'arc. Celles-ci tendent à devenir de plus en plus alcalines quand on se rapproche du continent, c'est-à-dire que leur teneur en potassium et en sodium augmente vers le continent si on la compare avec celle des roches ayant la même teneur en silice. On considère que cette variation est liée à l'enfoncement de la plaque lithosphérique le long du plan de Bénioff, à sa fusion partielle et à la production de magmas différents en fonction de la profondeur et donc de la pression.

Par contre, l'étude des fosses océaniques a montré que celles-ci ont une morphologie de fossé d'effondrement et que les sédiments n'y sont pratiquement pas déformés. Cette disposition, qui traduit des efforts en extension, se comprend très mal jusqu'à présent dans le cadre de la théorie de la tectonique des plaques, la subduction au niveau des fosses impliquant des efforts de compression.

La théorie de la tectonique des plaques a été appliquée à l'interprétation géologique des chaînes métamorphiques. A. Miyashiro avait remarqué dès 1961 la juxtaposition fréquente, au Japon et dans d'autres régions circum-pacifiques, de deux ceintures différentes de métamorphisme, l'une formée dans des conditions de basses températures et de hautes pressions (faciès des schistes à glaucophane), l'autre formée dans des conditions de basses pressions et de hautes températures (à andalousite). La ceinture de métamorphisme à hautes pressions est généralement située sur le côté océanique de la ceinture de métamorphisme à basses pressions. Par la suite, on expliqua ces différents types de métamorphisme par leur relation avec les zones de subduction le long des plans de Bénioff, sous les arcs insulaires et les bordures de continents.

On attribue la formation du métamorphisme à hautes pressions, à gradient géothermique anormalement bas, à un enfoncement rapide de la lithosphère océanique froide le long du plan de Bénioff. La rapidité du phénomène empêcherait le gradient géothermique normal de s'installer dans les sédiments ainsi enfouis à grande profondeur. Par contre, les sédiments de la plaque lithosphérique située au-dessus du plan de Bénioff seraient soumis à un gradient géothermique anormalement haut, dû à un échauffement lié aux intrusions volcaniques et magmatiques, ce qui donnerait lieu à un métamorphisme de hautes températures et de basses pressions.

Le métamorphisme à moyennes pressions serait dû à un enfoncement moins rapide de la lithosphère, ce qui permettrait au gradient géothermique normal de s'installer. Le métamorphisme à hautes pressions, bien développé surtout dans les chaînes récentes (orogenèse alpine), est moins fréquent dans les chaînes

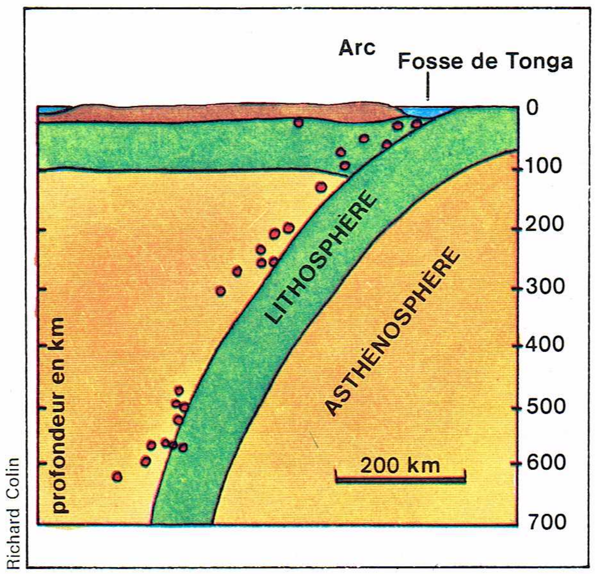

◀ *Répartition des foyers des séismes dans la région de la fosse de Tonga (Pacifique Sud) suivant un* **plan de Bénioff.**

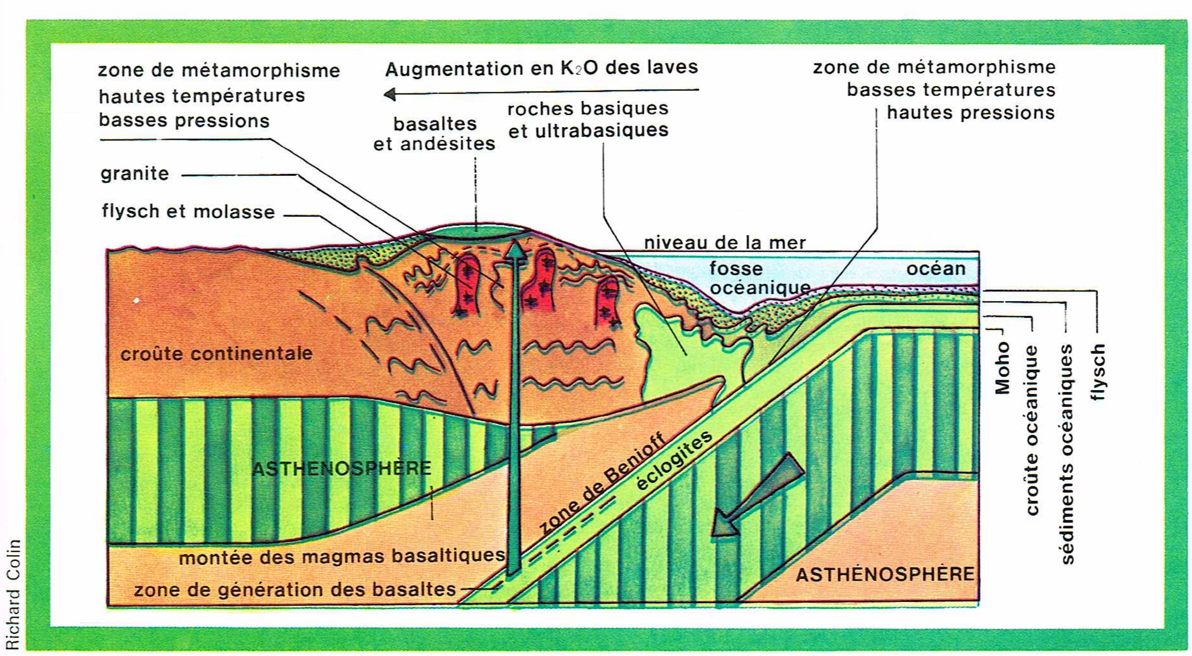

◀ ***Modèle schématique d'une chaîne orogénique créée quand une plaque océanique s'enfonce sous une plaque continentale se déplaçant en sens inverse.***

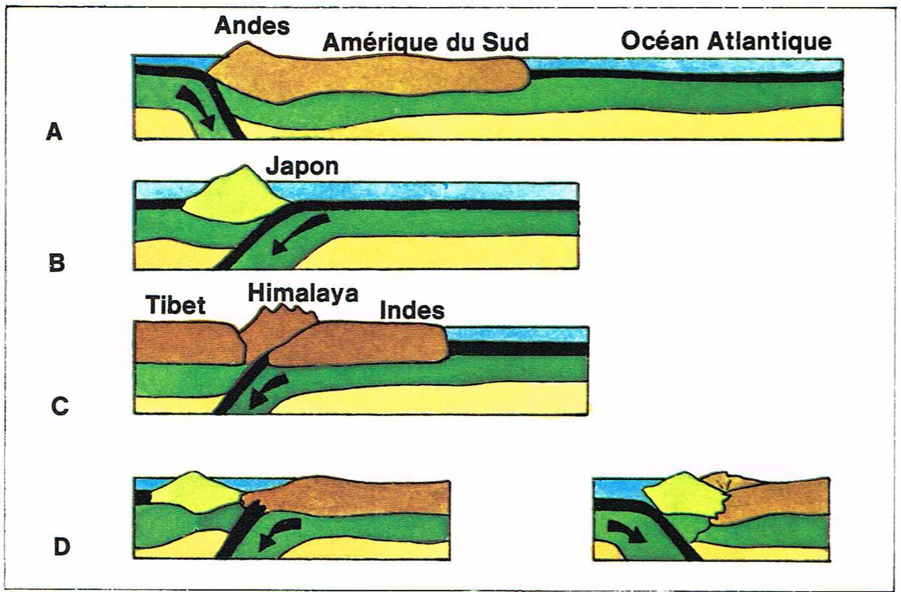

▲ *Schémas montrant différents modes de formation possibles de zones orogéniques, selon la tectonique des plaques : A, chaîne formée sur la bordure d'un continent; B, arc insulaire; C, collision de deux continents; D, collision d'un continent avec un arc insulaire, suivie d'un changement de direction du plongement de la zone de subduction.*

anciennes où l'on trouve généralement un métamorphisme à moyennes pressions. On explique cette différence par le fait que, dans les temps anciens, la vitesse d'expansion des fonds océaniques aurait été moins grande.

On constate l'association fréquente des ceintures de métamorphisme de basses pressions avec des intrusions magmatiques de composition acide ou intermédiaire (granites et granodiorites), et des ceintures de métamorphisme de hautes pressions avec des phénomènes magmatiques de composition basique et ultrabasique (ophiolites). Les intrusions magmatiques acides seraient dues au flux thermique élevé associé aux arcs volcaniques situés au-dessus des plans de Bénioff; les ophiolites sont considérées comme des fragments de croûte océanique et de manteau supérieur mis en place tectoniquement dans les séries sédimentaires océaniques le long des plans de Bénioff.

La théorie de la tectonique des plaques distingue différents modes de formation possibles pour les chaînes de montagnes; les chaînes de montagnes formées sous des arcs insulaires avec les caractères exposés ci-dessus (Nouvelle-Zélande, Japon, etc.), les chaînes formées sur la bordure des continents au-dessus d'une zone de subduction (Andes), et les chaînes de montagnes dues à la collision entre deux continents ou entre un arc insulaire et un continent. En effet, cette théorie, à la différence de celle de la dérive des continents, considère que les continents ne se déplacent pas de manière indépendante mais migrent passivement avec la lithosphère et que leur dérive n'est due qu'aux mouvements des plaques provoqués par l'accroissement des fonds océaniques. Par suite de la disparition complète par subduction d'un océan, il peut arriver qu'un continent soit amené au niveau d'une zone de subduction et qu'il entre en collision avec l'arc insulaire ou le continent situé en bordure de la zone de subduction. La faible densité de la croûte continentale ne permet pas aux continents d'être enfouis le long du plan de Bénioff, comme l'est la croûte océanique; une fois formés, ils sont très difficiles à détruire. Cela expliquerait pourquoi l'âge de la croûte continentale est beaucoup plus ancien que celui de la croûte océanique qui, elle, se renouvelle constamment (on trouve des roches datées de trois milliards d'années dans les vieux boucliers continentaux, alors que jusqu'à présent les plus anciennes roches océaniques connues sont jurassiques). Lors de la collision d'un continent avec un autre continent, il se forme une chaîne de montagnes de type bi-continental (Himalaya), et la subduction s'arrête en cet endroit. Lors de la collision d'un continent et d'un arc insulaire, il se forme là encore une chaîne de montagnes et l'arc insulaire se soude au continent (Nouvelle-Guinée). Dans ce cas, une nouvelle zone de subduction peut se former sur la côte océanique de l'arc insulaire avec changement de direction de la plaque sous-charriante.

La théorie de la tectonique des plaques est basée en grande partie sur des observations géophysiques qui ne donnent des renseignements que sur l'*état actuel* du globe terrestre.

En particulier les huit grandes plaques définies précédemment sont déterminées à partir des phénomènes tectoniques actuellement observables. Elles se seraient individualisées au début des temps mésozoïques. Quand on essaie de reconstituer les mouvements des plaques depuis le Mésozoïque, on se heurte à de grandes difficultés. Par exemple, pour expliquer les structures d'âge tertiaire des Antilles et de la mer Caraïbe ou des Alpes et de la mer Méditerranée, des dizaines de schémas différents faisant intervenir de nombreuses plaques de dimensions réduites ont été proposées. A plus forte raison l'interprétation des chaînes hercyniennes ou précambriennes est-elle très difficile. On a tenté d'appliquer la tectonique des plaques à des chaînes anciennes, aux Appalaches, à l'Oural, etc. On s'est fondé, pour déterminer les limites des anciennes plaques, sur la présence de ceintures couplées de métamorphisme, sur la présence d'ophiolites considérées comme des témoins d'un ancien océan, et sur la géochimie des laves et des intrusions. C'est ainsi que certains auteurs envisagent que l'océan Atlantique s'est ouvert et refermé à plusieurs reprises au cours des temps géologiques, provoquant la formation de chaînes de montagnes successives.

Dans ses grandes lignes, la théorie de la tectonique des plaques est une théorie simple permettant d'intégrer les données actuelles de la géophysique et celles de la géochimie ainsi que de la géologie. Toutefois, si elle connaît actuellement un très grand succès, de nombreux problèmes restent à résoudre : la question des structures en extension dans les fosses océaniques où l'on attendrait plutôt des structures en compression, le mode de formation de la « croûte intermédiaire », la nature du manteau, les modalités des courants de convection, etc. Malheureusement, certains auteurs tendent à négliger les faits et les arguments qui ne sont pas expliqués par la théorie.

Différents auteurs se sont élevés contre cette théorie en présentant des arguments importants. Par exemple, A. A. Meyerhoff a montré que des glaciers ne peuvent pas se former profondément à l'intérieur d'un continent par suite du manque d'humidité, et que dans l'hypothèse d'un immense continent du Gondwana antérieur à la dérive mésozoïque des continents on ne peut pas expliquer les dépôts glaciaires d'âge permo-carbonifère qui se retrouveraient très loin à l'intérieur de ce continent. En outre, ces auteurs soulignent d'une part que la théorie de la tectonique des plaques est essentiellement basée sur l'étude des fonds océaniques, encore très imparfaitement connus, et, d'autre part, que l'on néglige trop les observations géologiques faites à la surface de la Terre depuis plus de cent ans.

Quoi qu'il en soit, toutes les observations modernes concourent à montrer que notre planète n'est pas une masse inerte, mais au contraire un globe en évolution constante.

BIBLIOGRAPHIE

AUBOUIN J., *Tectonique, Morphologie, Globe terrestre*, in *Précis de géologie*, t. 3, Paris, Dunod, 549 p., 197. - DEWEY J. F. and BIRD J. M., *Moutain Belts and the New Global Tectonics*, in *Journ. Geophysical Research*, vol. 75, n° 14, pp. 2625, 2647, 1970. - GOGUEL J., *Traité de tectonique*, Masson, Paris, 1965. - LE PICHON X., *Sea-floor Spreading and Continental Drift*, in *Jour. Geoph. Res.*, vol. 73, n° 13, pp. 3361-3736, 1968. - LE PICHON X., FRANCHETEAU J. et BONNIN J., *Plates Tectonics Developments in Geotectonics* 6; Elsevier Scientific Publishing Company, 1973. - MATTAUER M., *les Déformations des matériaux de l'écorce terrestre*, Hermann, Paris, 493 p., 1973. - MEYERHOFF A. A., *Continental Drift : Implication of Paleomagnetic Studies, Meteorology, Physical Oceanography and Climatology*, in *Journ. Geol.*, vol. 78, pp. 1-51, 1970. - MIYASHIRO A., *Metamorphism and Related Magmatism in Plate Tectonics*, in *Amer. Journ. Sci.*, pp. 629-656, 1972. - WYLLIE P. J., *The Dynamic Earth*, John Wiley and sons Inc., New York, 1971.

LEXIQUE DE GÉOLOGIE

SUPPLÉMENT AUX VOLUMES IX ET X DE LA GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

ABRÉVIATIONS

adj.	adjectif	*n.*	nom	*p. ex.*	*par exemple*
ex.	exemple	*par ext.*	par extension	syn.	synonyme

A

aber. *n.* Voir *ria.*

abiogénique. *adj.* Qui n'est pas d'origine biologique.

abiotique. *adj.* **(milieu).** Où la vie est impossible.

abyssale. *adj.* **(zone).** Zone bathymétrique située au-delà de la zone bathyale, à des profondeurs d'environ 2 000 à 6 000 m.

abysses. *n.* Grandes fosses océaniques d'une profondeur minimale de 2 000 m.

accident. *n.* Contact anormal entre des masses rocheuses. *Ex.* Faille, chevauchement...

accordance. *n.* Concordance due à une même déformation du socle et de la couverture dans le domaine d'infrastructure.

accrétion. *n.* Accroissement de masse que subit une étoile, dû à la force de gravitation exercée par cette étoile sur la matière interstellaire environnante.

achondrite. *n.* Météorite pierreuse plus ou moins riche en calcium; probablement formée par cristallisation d'un magma, de façon analogue aux roches ignées terrestres.

aciculaire. *adj.* Terme servant à définir les faciès des minéraux en forme de très fines aiguilles.

acide fulvique. Fraction de l'humus soluble dans l'eau, les alcalis et les acides; résulte de la décomposition des matières organiques par les Champignons, en milieu froid.

acides. *adj.* **(roches).** La notion d'acidité d'une roche n'est pas liée au pH du milieu mais exprime que la roche est riche en silice.

actinolitites. *n.* Amphibolites où l'amphibole est représentée par la variété actinote.

adamantin. *adj.* Qui a l'éclat du diamant, éclat généralement dû à des indices de réfraction élevés.

adamellites. *n.* Granites *sensu lato* intermédiaires entre les granites typiques et les granodiorites, et dans lesquels le feldspath alcalin et le plagioclase sont en proportions égales.

adinoles. *n.* Roches métamorphiques produites par le métasomatisme sodique de roches originellement argileuses. Une adinole est composée essentiellement d'albite et de quartz.

adsorbant. *n.* Substance susceptible d'en fixer d'autres par adsorption. *Ex.* Le charbon pour les colorants.

adsorption. *n.* Fixation, par un processus physique ou chimique, d'une substance à la surface d'une autre ou d'une structure plus complexe. Ne pas confondre avec *absorption*.

aérobie. *adj.* Qui ne peut vivre qu'en présence d'oxygène.

aérolithe. *n.* Météorite pierreuse, composée exclusivement ou en grande partie de silicates.

aéromagnétisme. *n.* Méthode consistant à mesurer par avion, à moyenne altitude, à l'aide d'un magnétomètre, les variations du champ magnétique terrestre.

affaissement. *n.* Désigne un mouvement vertical négatif.

affleurement. *n.* Niveau stratigraphique qui se dévoile à la surface de la Terre.

âge radiométrique. Age absolu d'une formation en nombre d'années (milliers ou millions), déterminé par la méthode des isotopes radio-actifs. *Ex.* Datation au C_{14} (Carbone 14).

agmatites. *n.* Migmatites où la partie métamorphique, à schistosité souvent mal développée, est recoupée dans toutes les directions par les veines de granitoïde.

agradation. *n.* Augmentation de la qualité; s'oppose à *dégradation*.

agrégats. *n.* Se dit de cristaux agglomérés entre eux de façon cohérente.

agressivité. *n.* En hydrogéologie, caractère d'une eau naturellement acide (riche en CO_2) pouvant exercer une action corrosive sur les roches.

agrologie. *n.* Science qui traite de la connaissance des terres cultivables.

albâtre. *n.* Dépôt calcaire compact, zoné, résultant de la dissolution puis de la reprécipitation de la calcite en région karstique.

albitisation. *n.* Remplacement, dans une roche, d'un feldspath potassique par l'albite (feldspath sodique).

albitites. *n.* Syénites riches en sodium, constituées presque entièrement par un feldspath sodique : l'albite.

alcalin. *adj.* **(minéral).** Riche en éléments alcalins (K, Na).

alcalines. *adj.* **(roches).** Roches riches en métaux alcalins (sodium, potassium et plus rarement lithium) avec présence de feldspaths alcalins, feldspathoïdes, minéraux mafiques comprenant du sodium.

alcanes. *n.* Série d'hydrocarbures, de formule générale C_nH_{2n+2}.

alcènes. *n.* Hydrocarbures non saturés, comportant des doubles liaisons, de formule générale C_nH_{2n}.

alginite. *n.* Voir tableau relatif aux macéraux des lignites et des houilles, en fin de lexique.

aliphatique. *adj.* Qualifie un composé organique qui contient des chaînes ouvertes d'atomes de carbone.

allochtone. *adj.* Se dit d'un matériel qui a subi un déplacement et qui s'est déposé ailleurs qu'en son milieu de formation.

allophane. *n.* Silicate d'alumine hydraté; un des minéraux des argiles.

allotropie ou **polymorphisme.** *n.* Se dit d'un corps qui peut présenter plusieurs phases cristallines différentes. *Ex.* La silice, SiO_2, peut se présenter sous la forme de quartz α, quartz β, tridymite...

alluvions. *n.* Ensemble du matériel arraché aux roches en place, transporté puis déposé par les eaux courantes.

alpin. *adj.* **(étage).** Situé au-dessus de la zone des forêts. On y rencontre des végétaux herbacés et des arbrisseaux.

altération. *n.* Modification superficielle des roches sous l'effet des agents climatiques.

altération météorique. Altération provoquée par l'eau atmosphérique.

amalgame. *n.* Alliage du mercure avec un autre métal. *Ex.* Le tain des glaces est un amalgame d'étain et de mercure.

ambre. *n.* Résine végétale fossile de couleur brune à jaune, souvent transparente.

amphibolites. *n.* Roches métamorphiques de couleur vert sombre, composées essentiellement d'amphibole (hornblende) et de plagioclase.

anaérobie. *adj.* Qui peut vivre sans oxygène. Une forme anaérobie peut l'être de façon facultative ou « stricte »; dans ce dernier cas, l'oxygène est toxique pour elle.

analyse granulométrique. Séparation des grains d'une roche en différentes classes de taille, puis étude de la fréquence des tailles.

analyse thermique. Méthode d'analyse qui consiste à observer de façon continue les réactions d'un corps à une augmentation ou à une baisse de température.

analyse thermodifférentielle (A.T.D.). Analyse des différences de température entre deux corps, l'un étant inerte, l'autre présentant des réactions endo- ou exothermiques.

analyse thermopondérale (A.T.P.). Analyse thermique où l'on observe les variations de poids d'un échantillon (départs de H_2O, de CO_2, oxydation...).

anatexie. *n.* Processus par lequel les roches fondent totalement ou partiellement au contact d'un magmas granitique. A une température suffisante, la fusion des roches dépend surtout de leur composition chimique; elle est sélective et l'on parle alors d'*anatexie différentielle*.

anatexites. *n.* Roches produites par fusion presque complète de roches métamorphiques.

anchimétamorphisme. *n.* Intermédiaire entre la diagenèse et le métamorphisme.

anchizone. *n.* Zone de métamorphisme très léger.

andésites. *n.* Roches ignées à grain fin, à structure porphyrique, composées essentiellement de plagioclases et de minéraux mafiques. Constituent l'équivalent effusif des diorites.

andosol. *n.* Sol riche en silicate amorphe, en matière organique et contenant des *allophanes*.

angara. *n.* Continent émergé au Dévonien dans la région de l'Oural.

angrite. *n.* Achondrite (météorite pierreuse) riche en calcium, et composée en grande partie d'augite.

angström. *n.* Unité de longueur (abrégée Å) représentant la dix-millième partie du micromètre (micron). Actuellement, pour mesurer des dimensions de cet ordre, on a recours au nanomètre (nm), ou millième de micromètre (millimicron).

anion. *n.* Ion chargé négativement; dans l'électrolyse, il se dirige donc vers l'anode (pôle positif).

anisotropie. *n.* Propriété de certains corps solides chez lesquels les phénomènes physiques se modifient suivant la direction du champ d'observation.

ankaramites. *n.* Basaltes mélanocrates à olivine, très riches en augite.

anneau annuel. Manchon de bois formé chaque année. Le bois formé au printemps montre de grands vaisseaux (pores en section), alors que celui qui est formé plus tard est plus massif. L'ensemble forme un anneau, ou cerne, concentrique à un autre, similaire, les plus jeunes étant situés le plus à l'extérieur.

année hydrologique. Temps compris entre deux minimums de la surface piézométrique.

anorthosites. *n.* Roches intrusives basiques, dépourvues d'orthose, formées essentiellement par des plagioclases de composition analogue à ceux des gabbros.

antécédence. *n.* Phénomène tel qu'une rivière maintient le tracé général de son cours malgré les déformations tectoniques.

antéclise. *n.* Bombement anticlinal à grand rayon de courbure.

anthracite. *n.* Charbon très riche en carbone (90 à 95 %).

anticlinal. *n. Antiforme* dont le cœur est formé par la couche la plus ancienne.

anticlinorium. *n.* Pli anticlinal majeur, déterminé par une succession de plis anticlinaux et synclinaux.

antiforme. *n.* Pli convexe vers le haut.

antiperthites. *n.* Faccules de feldspath potassique dans des cristaux de feldspath sodique.

aplatissement. *n.* Type de déformation due à une pression principale forte et à deux autres pressions principales faibles. Ainsi, un cube se transforme en un parallélépipède rectangle de même volume, dont les faces restent parallèles à celles du cube initial.

aquifère. 1° *adj.* Qui contient de l'eau. 2° *n.* Formation rocheuse souterraine renfermant un gisement d'eau.

aquifère multicouche. Gisement d'eau souterrain constitué de deux ou plusieurs nappes séparées par des assises semi-perméables.

ardoises. *n.* Argiloschistes de couleur grise ou noire, à forte schistosité.

arène. *n.* Altération affectant, en climat tempéré, les granites et les roches granitoïdes, au cours de laquelle les grains de la roche sont disloqués sous l'action de la température, des eaux, des êtres vivants...

aréolaire. *adj.* **(érosion).** Type d'érosion qui s'exerce en surface, sur les *interfluves*, et qui tend à réduire les points hauts du relief (modelé d'aplanissement).

argilane. *n.* Revêtement pédologique, plus ou moins épais, à molécules orientées.

argiles. *n.* Roches tendres, à grain fin, constituées essentiellement de microcristaux de silicates d'alumine hydratés.

argiles des limons. Voir *silts*.

argilites. *n.* Roches sédimentaires formées en majeure partie d'un ou de plusieurs minéraux argileux, sans litage notable.

argiloschistes. *n.* Roches sédimentaires argileuses faiblement métamorphisées, dont la composition minéralogique est peu différente de celle de la roche originelle mais dont la schistosité est bien développée.

arkoses. *n.* Grès feldspathiques à ciment carbonaté et argileux.

aromatique. *adj.* Qualifie les composés organiques du benzène.

arrière-pays. *n.* Région laissée en arrière de la nappe de charriage.

artésianisme. *n.* Jaillissement d'eau à partir d'une nappe souterraine, lorsque le niveau piézométrique de celle-ci est situé au-dessus de la surface du sol.

asphalte. *n.* 1° naturel : roche imprégnée naturellement de bitume. 2° artificiel : produit dans lequel des matières minérales inertes sont enrobées de bitume.

asphaltènes. *n.* Constituants des particules colloïdales du bitume et de l'asphalte, considérés comme des groupes d'hydrocarbures aromatiques complexes.

assimilation magmatique. Processus de fusion de la roche encaissante par un magma, aboutissant à la contamination de celui-ci et à la cristallisation d'une roche de composition intermédiaire entre celle du magma et celle de la roche encaissante initiale.

association végétale. Groupement de plantes vivant le plus souvent ensemble et, suivant les cas, plus ou moins strictement limitées à une association donnée. Les associations végétales s'expliquent par les exigences écologiques des plantes qui les constituent et leurs rapports avec les conditions du milieu où se trouve l'association.

ataxite. *n.* Météorite métallique, riche en nickel, sans structure visible à l'œil nu.

atmophile. *adj.* Qualifie un élément qui se trouve dans l'atmosphère (N, A, He).

atmosphère. *n.* « Enveloppe » gazeuse, continue, qui entoure la Terre.

atoll. *n.* Récif corallien en forme de couronne entourant un lagon.

attrinite. *n.* Voir tableau relatif aux macéraux des lignites et des houilles, en fin de lexique.

attritus. *n.* Mélange gélifié très fin composant un macéral.

aubrite. *n.* Achondrite (météorite pierreuse) dépourvue de calcium, composée en grande partie d'enstatite (pyroxène magnésien).

autochtone. *adj.* 1° Se dit d'un matériel qui n'a pas subi de transport, et qui s'est déposé en son lieu de formation. 2° Substratum situé au-dessous de la surface de charriage.

autométamorphisme. *n.* Modification chimique se produisant dans une roche ignée déjà solidifiée en contact avec le fluide résiduel.

autométasomatisme. *n.* Métasomatisme de roches magmatiques produit par des fluides provenant du réservoir magmatique d'où sont issues les roches transformées.

automorphe ou **idiomorphe.** *adj.* Se dit d'un minéral qui, dans une roche, a des cristaux possédant leur forme propre, leurs faces s'étant développées sans entrave.

avant-pays. *n.* Région située en avant du front de la la nappe de charriage.

aven. *n.* Gouffre naturel en forme d'entonnoir, créé par l'érosion en pays calcaire.

averse de météorites. Fragments tombant à l'intérieur d'une zone plus ou moins vaste et provenant de l'éclatement d'une météorite pendant la traversée de l'atmosphère.

axe (d'un pli). Intersection de la charnière avec le plan axial du pli.

axe optique. Direction privilégiée d'un corps anisotrope, selon laquelle il présente les propriétés optiques d'un corps isotrope.

B

bache. *n.* Sur une plage, dépression où il reste de l'eau à marée basse.

back-reef. *n.* Partie d'un récif opposée au large.

back-shore. *n.* Haute plage, émergée (par opposition à la plage sous-marine, *off-shore*).

bad-lands. *n.* Terres argileuses profondément ravinées par le ruissellement torrentiel.

balance de Westphal. Balance hydrostatique utilisée pour la détermination de la densité d'un liquide.

balkhashite. *n.* Nom local d'un *boghead*, nommé d'après le lac Balkhash (U.R.S.S.).

barkhane. *n.* Dune en forme de croissant, orientée perpendiculairement au vent.

basaltes. *n.* Roches effusives sombres, très répandues; elles sont composées de phénocristaux de pyroxènes et de plagioclases basiques noyés dans une pâte microlitique et vitreuse. Équivalents effusifs des gabbros.

basaltes picritiques. Basaltes riches en olivine, qui constitue environ 50 % de la roche; très répandus dans les fonds et les îles océaniques.

basaltes tholéiitiques ou **«basaltes de plateau».** Basaltes résultant de la cristallisation d'un magma saturé en silice, et contenant peu ou pas d'olivine.

basanites. *n.* Roches basiques à olivine, contenant un feldspathoïde.

basiques. *adj.* **(roches).** Roches pauvres en silice. *Ex.* Basaltes.

bassin. *n.* Voir *brachysynclinal*.

bassin euxinique. Mer fermée, pauvre en oxygène et riche en résidus sulfureux, dans laquelle la vie est rendue difficile, voire impossible. *Ex.* La mer Noire.

bassin limnique. Bassin lacustre situé à l'intérieur des terres, et ne subissant pas d'influences marines.

bassin paralique. Lagune (bassin côtier) tantôt émergée, avec développement des végétaux, tantôt inondée, d'où le dépérissement de ceux-ci. Ceci entraîne des accumulations successives de matière organique. Un tel processus a contribué à former les couches de houille.

batholite. *n.* Masse intrusive de grande dimension (de l'ordre d'une centaine de km).

bathyale. *adj.* **(zone).** Zone océanique correspondant à peu près au talus continental ; la *zone bathyale* est comprise entre la *zone néritique* et la *zone abyssale*.

battance. *n.* Forme d'érosion engendrant des *sols battants*.

beach-cusp. *n.* Voir *croissant de plage*.

bentonites. *n.* Argiles (montmorillonites surtout) constituées par la transformation de tufs volcaniques déposés en milieu marin ; cette transformation s'effectue au cours de la diagenèse.

berm. *n.* ou **gradin de plage.** Micro-falaise parallèle à la ligne de rivage et dont l'origine est liée aux courants et au vent.

biocalcarénites. *n.* Calcarénites formées de fragments de tests d'organismes.

biocalcirudites. *n.* Calcaires clastiques formés de restes d'organismes transportés puis déposés sous l'action des courants.

biocénose. *n.* Communauté des êtres vivants, végétaux et animaux, peuplant le même biotope et unis entre eux par des relations nutritives et compétitives.

biocénotique. *n.* Étude des communautés d'êtres vivants du point de vue de leur description, leur genèse, leur évolution et des rapports écologiques de leurs membres entre eux et avec leur biotope.

biodégradation. *n.* Dégradation effectuée par des organismes vivants.

biofaciès. *n.* Ensemble des caractères biologiques visibles dans un sédiment.

biogénique. *adj.* D'origine biologique, dont la genèse est due aux êtres vivants.

biogéographie. *n.* Étude de la distribution géographique des divers taxons d'êtres vivants. La biogéographie des plantes est la phytogéographie.

bioherme. *n.* Édifice récifal, non stratifié, dû à des coraux et autres organismes constructeurs.

biome. *n.* Vaste écosystème couvrant de grandes étendues de la Terre, ayant une physionomie et une écologie communes (savane, forêt de feuillus) sous des compositions floristiques et faunistiques diverses.

biosphère ou **écosphère.** *n.* Ensemble des êtres vivants qui peuplent la surface de la Terre.

biostratigraphie. *n.* Stratigraphie basée sur la comparaison et l'étude des fossiles renfermés dans les strates.

biostrome. *n.* Récif en bancs continus, lités suivant les lois de la stratification.

biotitites. *n.* Roches ignées ultra-basiques composées exclusivement de mica noir (biotite).

biotope. *n.* Milieu occupé par une ou des communautés d'êtres vivants, et caractérisé par certains traits écologiques en rapport avec la vie de ceux-ci.

biozone. *n.* Unité biostratigraphique caractérisée par une certaine association de fossiles.

biréfringence. *n.* Propriété des corps anisotropes dans lesquels la vitesse de la lumière est fonction de sa direction de propagation.

bitume. *n.* En géologie, mélange d'hydrocarbures naturels, ou pyrogènes, entièrement soluble dans le sulfure de carbone. Dans le langage courant, désigne à la fois des produits contenus dans les roches asphaltiques naturelles et le résidu du raffinage du pétrole.

bituminite. *n.* Voir tableau relatif aux macéraux des lignites et des houilles, en fin de lexique.

boghead. *n.* Charbon d'Algues, de nature souvent bitumineuse et pouvant être une source d'hydrocarbures liquides ou gazeux.

bombe volcanique. Projection volcanique émise à l'état pâteux, mais possédant parfois un noyau solide.

borolanites. *n.* Syénites à pseudoleucite, associée à de l'orthose et à de nombreux minéraux ferromagnésiens (augite, biotite, grenat, mélanite).

botryoïdal. *adj.* En forme de grappe.

bouchon volcanique. Bouchon de lave solidifiée obstruant la cheminée volcanique.

bouclier. *n.* Vaste région constituée de terrains très anciens, nivelés par l'érosion, et restée tectoniquement stable depuis l'époque précambrienne. *Ex.* Le bouclier canadien.

boudinage. *n.* Fragmentation par étirement d'un banc *compétent* intercalé dans une série *incompétente*.

Bowen (série ou **suite de).** Ordre de séparation des minéraux dans les magmas, formulé par Bowen.

brachyanticlinal ou **dôme.** *n.* Anticlinal à dimensions longitudinale et transversale peu différentes.

brachysynclinal ou **bassin.** *n.* Synclinal à dimensions longitudinale et transversale peu différentes.

branche armoricaine. Direction N.-W. - S.-E. de la chaîne hercynienne.

branche varisque. Direction S.-W. - N.-E. de la chaîne hercynienne.

brèches. *n.* Conglomérats dont les éléments sont anguleux.

brèches tectoniques ou **brèches de faille.** Roches du métamorphisme cataclastique, difficiles à distinguer des brèches sédimentaires. Elles sont formées de fragments anguleux, constitués le plus souvent d'un seul type de roche, inclus dans une matrice fine résultant du broyage de la roche dans une faille.

brunizem. *n.* Sol isohumique de climat humide (prairie du Canada et des États-Unis).

brut. *n.* En abrégé, le pétrole brut tel qu'on l'extrait d'un gisement.

butte-témoin. *n.* Hauteur dégagée par l'érosion, formée d'une couche dure surmontant des roches tendres, et qui témoigne de l'ancienne extension d'un revers de côte (voir *cuesta*) ou d'un plateau.

C

calanque. n. Échancrure étroite d'un littoral calcaire, envahie par la mer. *Ex.* Les calanques de Cassis.

calcaires. *n.* Roches sédimentaires constituées essentiellement de carbonate de calcium ($CaCO_3$).

calcarénites. *n.* Roches calcaires d'origine détritique ; les grains ont la taille de grains de sable (comprise entre 1/16 de mm et 2 mm), et sont noyés dans un ciment de calcite grossièrement cristalline.

calcicole. *adj.* Qui affectionne les terrains calcaires.

calcifuge. *adj.* Qualifie une plante qui pousse sur un sol acide ne renfermant pas de calcium.

calcilutites. *n.* Calcaires détritiques à grain fin.

calcirudites. *n.* Calcaires détritiques à grain grossier.

calcite. *n.* La plus commune des deux formes cristallines du carbonate de calcium, à symétrie rhomboédrique ; l'autre forme étant l'aragonite orthorhombique.

calcschistes. *n.* Roches métamorphiques schisteuses, grises, noires ou verdâtres, formées de minéraux calcitiques alternant avec des minéraux quartzo-micacés.

caldeira. *n.* Grande cavité circulaire, entourée par une muraille de matériel volcanique, formée lors de l'explosion de la cheminée d'un volcan ou par effondrement.

camptonites. *n.* Lamprophyres essentiellement composées de plagioclase (labradorite généralement) et d'amphibole sodique.

cannel-coals. *n.* Charbons composés de micro-spores enrobées dans une matrice à la fois organique et minérale (en français, *gayets*).

capacité spécifique de rétention. Rapport, exprimé en pourcentage, du volume maximal d'eau de rétention que peut contenir un milieu poreux au volume total de ce dernier.

cap-rock. *n.* Formation géologique imperméable située immédiatement au-dessus d'un gisement qu'elle limite et protège.

capture. *n.* Détournement naturel de la partie amont d'un cours d'eau vers un cours d'eau voisin, le premier devenant l'affluent du second.

carat. *n.* Unité de masse utilisée en joaillerie (le carat moderne vaut 0,2 g).

carbènes. *n.* Hydrocarbures solides, insolubles dans les solvants habituels, provenant de l'oxydation à température moyenne des asphaltènes, de poids moléculaire élevé.

carbénoïdes. *n.* Hydrocarbures tout à fait insolubles, fortement polymérisés, à structure cyclique essentiellement aromatique.

carbonatites. *n.* Roches intrusives carbonatées, étroitement associées à des roches alcalines ignées.

carbone ratio. Théorie expliquant l'extinction des gisements carbonés.

cargneules. *n.* Roches sédimentaires pseudo-conglomératiques, formées d'une matrice calcitique jaunâtre dans laquelle sont individualisés des fragments de dolomie noirâtre à grain fin.

carottage. *n.* Extraction en profondeur d'une colonne cylindrique de sédiment.

carotte. *n.* Échantillon de terrain, de forme grossièrement cylindrique, prélevé dans un trou de forage au moyen d'un carottier.

carrière. *n.* Lieu d'où l'on extrait des matériaux de construction (pierres) ; peut être à ciel ouvert ou souterraine.

carte géologique. Relevé, sur une carte topographique, des contours géologiques des différentes formations rocheuses présentes dans une région.

carte isocarbe. Carte d'isoconcentration en carbone organique.

carte piézométrique. Carte où la surface piézométrique d'un aquifère est représentée par des courbes d'égal niveau piézométrique, dites *courbes équipotentielles*.

carte potentiométrique. Carte exprimant les pressions en hauteur d'eau douce après correction des salinités.

cataclasites. *n.* Roches du métamorphisme dynamique ou cataclastique se formant à la suite de déformations tectoniques à faible profondeur. Si la roche originelle est *monominérale,* la cataclasite correspondante sera formée de cristaux arrondis ou aplatis, inclus dans une matrice très fine. Si la roche originelle est *polyminérale,* la cataclasite correspondante montrera des réactions métamorphiques entre les différents minéraux, parfois une fusion locale.

cataclastique. *adj.* **(métamorphisme).** Métamorphisme se manifestant par l'écrasement des grains cristallins des roches soumises à des déformations intenses.

catena. *n.* ou **chaîne de sols.** Succession de sols régulièrement étagés du haut en bas des pentes, résultant d'un double processus d'érosion et de lessivage oblique.

cation. *n.* Ion chargé positivement; dans l'électrolyse, il se dirige donc vers la cathode (pôle négatif).

cellulose. *n.* Polymère insoluble d'une forme de glucose à longues molécules en forme de chaînes, elles-mêmes groupées en faisceaux. Constituant essentiel des parois squelettiques des végétaux.

chaîne géosynclinale ou **bicontinentale.** Chaîne comprise entre deux masses continentales. *Ex.* Les Alpes.

chaîne intracratonique ou **intracontinentale.** Chaîne développée sur un *craton. Ex.* Jura, Pyrénées.

chaîne liminaire ou **bordière.** Chaîne développée sur la bordure d'un continent. *Ex.* Les Andes en Amérique du Sud, qui s'étendent sur plus de 10 000 km.

chalcophile. *adj.* Élément qui présente des affinités avec le cuivre.

champ. *n.* Zone pétrolifère d'étendue variable donnant lieu à la production d'hydrocarbures, constituant une seule entité géologique, structurale et stratigraphique.

charbon à coke. Chauffé à l'abri de l'air, ce charbon fond puis se resolidifie (entre 360 et 500 °C) en une matière vacuolaire, le semi-coke qui, chauffé à 1 000 °C, donnera le coke industriel.

charbon humique. Charbon où alternent des lits brillants, composés de débris de tiges et de racines houillifiées, et des lits mats à accumulation de spores, de micro-filaments ligneux et de substances minérales.

charbon sapropélique. Charbon d'Algues à grains fins, compact, à teneur élevée en matières volatiles et en hydrogène, d'où une combustion aisée. Par distillation, ce type de charbon fournit des hydrocarbures.

charbons. *n.* Roches sédimentaires combustibles, formées en surface et sous une faible couverture d'eau par la décomposition de débris végétaux d'origines diverses que recouvrent ensuite des sédiments détritiques.

charnière. *n.* Zone de courbure maximale du pli.

charnockites. *n.* Série de roches plutoniques bien représentées dans les vieux boucliers. Les minéraux principaux en sont le quartz, l'orthose, le plagioclase, le grenat et l'hypersthène.

charriage. *n.* Déplacement de terrains de grande amplitude pouvant atteindre plusieurs dizaines de kilomètres. Les terrains déplacés constituent une *nappe de charriage,* marquée à la base par un contact anormal.

chassignite. *n.* Achondrite (météorite pierreuse) pauvre en calcium, composée en grande partie d'olivine.

chélate. *n.* Complexe pseudosoluble susceptible de migrer dans le sol.

chélateur. *n.* Substance chimique susceptible de fixer des ions métalliques.

cheminée volcanique. Fissure ou fracture par où s'échappent les matières volcaniques.

chéremchite. *n.* Nom local d'un boghead, nommé d'après le district de Cheremchovo (U.R.S.S.).

chernozem. *n.* Sol noir, uniforme, épais, riche en matières organiques, en pays tempéré assez sec. Syn. de *tchernozem, tchernoziom.*

chevauchement. *n.* Contact anormal entre deux terrains, l'un ayant avancé au-dessus de l'autre.

cheveux de Pélée. Filaments vitreux détachés des billes volcaniques et transportés par le vent.

chiastolite. *n.* Inclusion charbonneuse en forme de croix que l'on trouve dans certaines variétés d'andalousite, minéral fréquent du métamorphisme de contact.

chloritoschistes. *n.* Schistes de couleur verte constitués principalement de chlorite.

chlorophyllinite. *n.* Voir tableau relatif aux macéraux des lignites et des houilles, en fin de lexique.

chondres. *n.* Dans les météorites, sphérules de 0,5 à 3 mm de diamètre, composés de silicates et de minéraux métalliques généralement mêlés. Aucun processus géologique terrestre ne peut produire de telles structures.

chondrite. *n.* Météorite pierreuse contenant des sphérules de 0,5 à 3 mm de diamètre *(chondres)* composés de silicates (olivine, pyroxène...) et de minéraux métalliques.

chronologie. *n.* **(absolue** et **relative).** La *chronologie relative* a pour but d'établir si une roche ou un phénomène géologique s'est produit avant ou après un autre. Se fonde surtout sur l'étude des fossiles et de la superposition des terrains. La *chronologie absolue* fixe la date, en années, millénaires ou millions d'années, d'un événement à partir, notamment, de l'étude de la durée de vie des isotopes radio-actifs.

ciment. *n.* Matière minérale déposée entre des particules rocheuses, contribuant ainsi à former une roche dure.

cipolin. *n.* Marbre dont la couleur verdâtre est due à la présence de micas, formés par recristallisation des impuretés argileuses de la roche calcaire originelle.

cire végétale. Résine, analogue à la cire des abeilles, d'origine végétale.

cirque. *n.* Relief glaciaire qui se présente sous la forme d'une dépression semi-circulaire dominée par des parois abruptes.

cisaillement. *n.* Type de déformation par aplatissement et rotation d'ensemble accompagnés de ruptures.

clarain. *n.* Matière composant les lits de certains charbons; semi-brillante, moins vitreuse et moins fissurée que le vitrain.

clarite. *n.* Microlithotype des charbons formé de vitrinite et d'exinite.

classe. *n.* En minéralogie, subdivision groupant les substances cristallisées. Il existe 32 classes de symétrie réunies en 7 systèmes et ces systèmes en 3 familles.

classe hémiédrique. Classe de symétrie ne possédant que la moitié des éléments de symétrie de son système cristallin.

classe holoédrique. Classe de symétrie possédant tous les éléments de symétrie du système cristallin auquel elle appartient.

classe tétartoédrique. Classe de symétrie ne possédant plus que le quart des éléments de symétrie de son système cristallin.

clastique. *adj.* Qualifie un matériau (fragment de roche ou particule rocheuse) résultant de la désintégration d'une roche préexistante.

clinomètre. *n.* En géologie, instrument de mesure de l'inclinaison d'un plan. Permet de mesurer notamment le *pendage* des couches d'un terrain.

clivage (plan de). Plan suivant lequel un minéral se débite. Dans beaucoup de minéraux (mica, gypse), il est facile de fractionner le solide selon le plan de clivage.

coccolithophoridés. *n.* Phytoflagellés minuscules sécrétant une coque calcaire constituée de plaquettes indépendantes (les coccolithes) ; la craie en renferme en grande abondance.

collinéen. *adj.* **(étage).** Souvent, étage de végétation englobant les plaines et les collines, donc situé en dessous de l'étage montagnard, jusque vers 800 ou 1 000 m. Désigne aussi un étage situé au-dessus des plaines, qui constituent alors l'étage planitaire, et en dessous de l'étage montagnard.

collinite. *n.* Voir tableau relatif aux macéraux des lignites et des houilles, en fin de lexique.

colloïde. *n.* Mélange formé de fines particules dispersées dans une substance homogène ; les colloïdes sont caractérisés par des propriétés physiques particulières.

colluvionnement. *n.* Formation de dépôt fin, plus ou moins sableux, résultant d'un remaniement à faible distance. Ce phénomène est très important dans les formations végétales ouvertes, comme la steppe et la savane.

colluvions. *n.* Matériaux transportés le long d'un versant et s'accumulant au pied de ce dernier.

combe. *n.* Vallée entaillée par l'érosion dans la voûte anticlinale d'un plissement jurassien, et limitée par deux escarpements calcaires, les crêts.

comendites. *n.* Rhyolites alcalines très riches en sodium; elles contiennent des pyroxènes et des amphiboles sodiques.

communauté. *n.* Ensemble des espèces animales et végétales qui vivent ensemble.

compaction. *n.* Réduction de volume sous l'action de la pression (en particulier, compaction des sédiments sous l'action du poids des sédiments susjacents).

compétence. *n.* Possibilité pour un cours d'eau de transporter des matériaux en fonction de sa vitesse.

compétentes. *adj.* **(roches).** Roches rigides tels le calcaire, la dolomie, etc.

comportement géochimique des éléments. Aptitude naturelle d'un élément à se concentrer dans des minéraux ou des roches déterminés. Ce comportement est fortement influencé par la structure électronique des atomes.

composition norminative. Voir *norme.*

conchoïdale. *adj.* **(cassure).** Caractérise la surface d'une cassure qui présente une forme arrondie rappelant une coquille (*ex.* cassure du silex ou d'un verre).

concrétion. *n.* Masse irrégulière de roche compacte, noyée dans un matériel plus friable ou incohérent. *Ex.* Les concrétions de silex dans la craie.

condensat. *n.* Système d'hydrocarbures se déposant à la température de surface, inférieure à celle du gisement, en une phase gazeuse et une phase liquide.

cône éruptif. Formation édifiée par les projections volcaniques et les laves. Elle est large à la base avec des flancs plus ou moins inclinés.

cone-in-cone. *n.* Structure sédimentaire formée de cônes intriqués les uns dans les autres, d'échelle décimétrique.

conglomérats. *n.* Roches formées d'un mélange d'éléments détritiques plus ou moins arrondis, liés par un ciment qui peut être calcaire, siliceux ou argileux.

contrainte ou **« stress ».** *n.* Limite du rapport $\sigma = \frac{dF}{dS}$ quand dS tend vers zéro, F étant la force en kgf appliquée à un corps et S la surface sur laquelle s'applique la force.

coorongite. *n.* Charbon sapropélique que l'on trouve en Australie (baie de Coorong). L'aspect rappelle celui du caoutchouc ; de couleur brun-noir, la coorongite se forme à partir de dépôts de masses d'Algues desséchées de type *Botryococcus*.

copal. *n.* Résine que l'on extrait de divers arbres des régions tropicales.

coprolit(h)e. *n.* Nodule phosphaté dû à la fossilisation de déjections d'organismes (généralement de Reptiles).

coralligène. *adj.* Lié à l'activité des coraux.

core-drills. *n.* Petites carottes de forage.

cornéennes. *n.* Roches métamorphiques de contact à texture massive, non schisteuses, à grain fin, très dures.

corpocollinite. *n.* Voir tableau relatif aux macéraux des lignites et des houilles, en fin de lexique.

corpohuminite. *n.* Voir tableau relatif aux macéraux des lignites et des houilles, en fin de lexique.

corps natif. Minéral composé d'un seul élément chimique.

corrasion. *n.* En pays désertique, usure des roches sous l'action des débris transportés par le vent.

corrélation stratigraphique. Corrélation temporelle établie entre plusieurs formations, notamment grâce à leur contenu fossilifère.

corrosion. *n.* Usure des roches par des agents naturels ; se rapporte généralement à une action chimique plutôt que physique.

coupe. *n.* Voir *fraction*.

courant de convexion ou **courant sous-crustal.** Courant résultant de différences de densité, elles-mêmes liées à des différences de températures à l'intérieur du manteau du globe terrestre.

courant de turbidité. Courant de fond en milieu marin ; transporte des matériaux en suspension.

courbe granulométrique. Courbe obtenue en portant en abscisse la taille des grains d'une roche et en ordonnée la fréquence en poids (cumulé ou non).

courbes équipotentielles. Courbes d'égal niveau piézométrique.

couverture. *n.* Ensemble de terrains sédimentaires qui reposent en *discordance* sur un socle préalablement érodé et plus ancien.

cracking. (angl.) ou **craquage.** *n.* Traitement industriel qui a pour effet de rompre les molécules des hydrocarbures et d'en constituer de nouvelles, plus petites (plus légères et plus volatiles) sous l'effet de la chaleur.

craie. *n.* Variété de calcaire blanc et friable.

cratère. *n.* 1° Excavation résultant de la chute sur le sol d'une météorite. On distingue : les *cratères d'impact*, formés par des météorites relativement petites, et dont le diamètre est de l'ordre de quelques dizaines de mètres ; les *cratères d'explosion*, qui se forment dans les cas où les météorites explosent en touchant le sol ; ils ont un diamètre minimal de 100 m. 2° Dépression située au sommet, sur les flancs ou à la base d'un volcan.

craton. *n.* Domaine de la croûte terrestre resté tectoniquement stable depuis la fin du Précambien.

creep. *n.* Mouvements de migration lents.

creeping. *n.* Voir *reptation*.

cristal. *n.* Structure chimique, homogène, ayant, au moins potentiellement, une forme géométrique définie ; ce caractère est en liaison avec la structure atomique. *Ex.* La halite (ou sel gemme) cristallise sous forme cubique.

cristallin. *adj.* Qui possède les caractères d'un cristal.

cristallines. *adj.* **(roches).** Roches composées de minéraux cristallins. *Ex.* Granite.

cristallographie. *n.* Science qui étudie la forme (symétrie des cristaux et disposition des faces cristallines), la constitution, les propriétés physiques et la classification des cristaux.

crochon (de faille). Structure résultant du rebroussement des strates au voisinage d'une faille.

croissant de plage ou **beach-cusp.** Festons de plusieurs mètres d'amplitude, que l'on rencontre sur les plages et qui marque la limite de déferlement des vagues.

cross-bedding. *n.* Voir *stratification entrecroisée*.

croûte terrestre ou **lithosphère.** Partie superficielle de la Terre, composée de silicates communs, et séparée du manteau par la discontinuité de Mohorovicic.

cryosol. *n.* Sol gelé en permanence.

cryoturbation. *n.* Ensemble des déplacements touchant les particules constitutives des sols sous l'action du gel et du dégel, en climat très froid.

cryptocristallines. *adj.* **(roches).** Roches très finement cristallisées dont on ne peut distinguer les minéraux à l'œil nu.

cuesta. *n.* Relief dissymétrique, créé par l'érosion affectant une série sédimentaire formée par l'alternance de couches de résistance différente, basculées par une déformation de grande ampleur. Cette forme de relief est caractérisée par un talus à profil concave *(front)* et par un plateau doucement incliné en sens inverse *(revers)*.

cuirasse ferrugineuse. Horizon induré formé par l'accumulation d'oxydes de fer, en pays tropical.

cutinite. *n.* Voir tableau relatif aux macéraux des lignites et des houilles, en fin de lexique.

cuttings. *n.* ou **déblais de forage.** Débris arrachés aux terrains par le trépan au cours de forage et remontés à la surface par la boue de forage.

cyclanes. *n.* Voir *naphtènes*.

cycle alpin. Ensemble des phases de sédimentation (formation de dépôts marins ou continentaux), de plissement et d'érosion qui ont contribué à la formation de la chaîne des Alpes.

cycle biogéochimique. Ensemble des transformations biologiques, géologiques ou chimiques que subissent les éléments constitutifs de la matière vivante tels le carbone, l'azote, le phosphore, le soufre, le calcium, etc.

cycle sédimentaire. Ensemble de phénomènes ayant contribué à l'élaboration d'une unité sédimentaire dans laquelle on peut reconnaître trois phases : la première et la troisième sont de type continental, la deuxième est franchement marine. Le cycle suivant commencera par une phase continentale.

cyclo-alcanes. *n.* Voir *naphtènes*.

cyclothème. *n.* Alternance rythmique de lits de charbon avec des bancs qui en sont dépourvus.

D

dacites. *n.* Roches ignées (équivalents effusifs des adamellites et granodiorites), à plagioclase dominant.

dalle. *n.* Élément mince de pierre, de verre, de lave, etc., prêt à être posé en revêtement.

darcy. *n.* Unité de mesure de la perméabilité. 1 darcy correspond à la perméabilité d'un échantillon de 1 cm de longueur laissant passer 1 cm^3 de fluide de viscosité 1, en 1 s, par unité de section, sous 1 atmosphère de pression.

datation radio-active. Age absolu d'une formation en nombre d'années (milliers ou millions), déterminé par la méthode des isotopes radio-actifs de certains minéraux constitutifs des roches.

dead-line. *n.* Limite au-delà de laquelle seules subsistent des accumulations de gaz dans un gisement de pétrole, en fonction des températures subies.

débit. *n.* Volume d'eau écoulé en un point donné pendant une unité de temps (m^3/s).

débit spécifique. Débit obtenu dans un puits par mètre de rabattement.

débit unitaire. Volume traversant, par unité de temps, l'unité de section perpendiculaire à la direction de l'écoulement dans un milieu aquifère saturé.

déblais de forage. Voir *cuttings*.

décrochement. *n.* Faille dont le mouvement relatif des compartiments se fait principalement suivant un rejet horizontal.

décrochement dextre. Décrochement dont le mouvement de coulissement s'opère dans le sens des aiguilles d'une montre, de part et d'autre du plan de faille.

décrochement sénestre. Décrochement dont le mouvement de coulissement s'opère dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, de part et d'autre du plan de faille.

déflation. *n.* Déblayage par le vent de débris meubles et secs provenant de la désagrégation physique ou chimique des roches.

déformation cassante. Déformation discontinue causant des ruptures dans le corps qui a subi cette action.

déformation continue. Déformation des roches après laquelle deux points initialement voisins l'un de l'autre restent voisins. C'est le cas des déformations souples par plissement.

déformation discontinue. Déformation des roches après laquelle deux points initialement voisins se retrouvent séparés par une surface le long de laquelle il y a eu glissement.

déformation élastique. Déformation réversible (susceptible de retour à l'état initial) qui disparaît complètement quand la pression cesse d'exercer son action.

déformation plastique. Déformation permanente et proportionnelle à la pression.

déformation visqueuse. Déformation permanente et fonction du temps, qui peut avoir lieu même si la contrainte est relativement faible.

dégradofusinite. *n.* Voir tableau relatif aux macéraux des lignites et des houilles, en fin de lexique.

degré hydrotimétrique. Voir *titre hydrotimétrique*.

delta. *n.* Plaine triangulaire formée à l'embouchure d'un fleuve par les matériaux d'érosion déposés dans une mer peu profonde, aux marées faibles, de sorte que les alluvions ne sont pas déblayées. *Ex.* Le delta du Rhône.

dendrite. *n.* Agrégat dont le dessin évoque une arborisation.

dendrochronologie. *n.* Méthode de datation basée sur l'étude des anneaux de croissance des arbres.

densinite. *n.* Voir tableau relatif aux macéraux des lignites et des houilles, en fin de lexique.

densité. *n.* A volume égal, rapport entre la masse d'un corps et celle de l'eau à une température de 4 °C.

dépôts fumerolliens. Produits de condensation des émanations gazeuses qui s'échappent d'un volcan ou de crevasses avoisinantes.

dérive des continents. Théorie, postulée par Wegener (1915), selon laquelle les continents ne sont pas fixes mais se sont déplacés au cours des temps, et continuent de le faire.

désert. *n.* Zone aride à végétation xéromorphe, éparse, bien adaptée à la sécheresse et présentant des caractères morphologiques et physiologiques très particuliers.

desmocollinite. *n.* Voir tableau relatif aux macéraux des lignites et des houilles, en fin de lexique.

détritique. *adj.* Se dit d'un matériel provenant d'une roche préexistante, soumise à l'érosion. Le matériel a été arraché sous forme de particules qui peuvent être de tailles très variées.

diachrone. *adj.* Qualifie une formation stratigraphique qui, tout en conservant le même aspect et une parfaite continuité, n'a pas le même âge en toutes ses parties.

diaclases. *n.* Cassures sans déplacement des compartiments situés de part et d'autre de ces cassures (sans rejet). Interprétées comme le résultat de compressions et d'extensions subies par les roches.

diadochie. *n.* Substitution d'un ion par un autre, de dimension et de charge assez proches, à l'intérieur d'un réseau cristallin.

diagenèse. *n.* Ensemble des processus (changements de composition et de structure) transformant un sédiment en une roche consolidée.

diagramme de poudre. Enregistrement des cônes de diffraction obtenus en focalisant un faisceau monochromatique de rayons X sur une poudre cristalline. Chaque minéral a son diagramme caractéristique.

diagraphie. *n.* Opération d'enregistrement des variations d'un ou de plusieurs paramètres physiques des roches traversées par un sondage en fonction de la profondeur. Utilisée pour l'exploration pétrolière.

diamagnétique. *adj.* Se dit d'une substance minérale qui, dans un champ magnétique, prend une aimantation proportionnelle au champ, et dirigée en sens inverse.

diamètre caractéristique. Terme qui désigne, sur une courbe granulométrique, le diamètre des grains (en mm) correspondant à une valeur de fréquence en poids arbitrairement choisie.

diamètre efficace. Terme qui désigne, sur une courbe granulométrique, la valeur du diamètre correspondant à une fréquence en poids égale à 10 %.

diapir. *n.* Intrusion d'un dôme de sel à travers les formations sus-jacentes.

diastème. *n.* Discontinuité dans une série sédimentaire représentant une période de temps pendant laquelle aucun dépôt ne s'est effectué.

diatomites. *n.* Roches siliceuses organogènes constituées de restes de Diatomées (Algues unicellulaires) ; elles sont légères et tendres, de couleur blanchâtre.

différenciation magmatique. Processus de cristallisation fractionnée d'un magma aboutissant à la formation de portions chimiquement différentes.

diffusivité. *n.* En hydrologie, paramètre qui régit la propagation d'influence dans l'aquifère.

diogénite. *n.* Achondrite (météorite pierreuse) pauvre en calcium, composée en grande partie de bronzite (pyroxène orthorhombique).

diorites. *n.* Roches ignées, de composition intermédiaire entre celle des granites et celle des gabbros, constituées essentiellement de plagioclase (andésine généralement) et de hornblende.

discontinuité. *n.* 1° Surface de part et d'autre de laquelle les roches ne sont pas continues. *Ex.* Plan de faille, discordance. 2° Dans la constitution du globe terrestre, des discontinuités ont été repérées par l'étude de la propagation des ondes séismiques. Ces discontinuités impliquent généralement un changement dans la composition chimique des roches, mais peuvent résulter également de modifications de phases à des niveaux de pression critique, avec en conséquence des changements dans les caractères d'élasticité et de densité de la roche.

discontinuité de Conrad. Surface irrégulière située entre la surface de la Terre et la discontinuité de Mohorovicic.

discontinuité de Gutenberg. Discontinuité située vers 2 900 km de profondeur.

discontinuité de Mohorovicic. Discontinuité située à une profondeur de 35 à 40 km au-dessous de la surface de la Terre. Sépare la croûte hétérogène, du manteau, plus homogène.

discordance. *n.* Type de disposition d'une couche sur une autre, une phase d'érosion ou de plissement séparant le dépôt des deux strates.

dismigration. *n.* Remontée des hydrocarbures jusqu'à la surface du sol, où ils se manifestent par des indices superficiels.

dispersion hydrodynamique. Phénomène résultant de la structure des vides d'une roche, et se traduisant par une différence dans les temps d'arrivée de particules d'eau issues d'une même origine.

distillat. *n.* Liquide obtenu par condensation de vapeur dans un appareil de distillation.

distillation fractionnée. Séparation d'un mélange de plusieurs liquides ayant des points d'ébullition différents, recueillis successivement.

dodécaèdre. *n.* Polyèdre appartenant au système cubique et composé de douze faces de cinq côtés chacune.

dodécagone. *n.* Figure à douze côtés et à douze angles.

dolérites. *n.* Roches ignées basiques, de composition chimique analogue à celle des gabbros, caractérisées par leur structure ophitique.

doline. *n.* Dépression fermée, subcirculaire, creusée par l'érosion en pays calcaire.

dolomies. *n.* Roches sédimentaires formées de dolomite, souvent en association avec du carbonate de calcium.

dolomite. *n.* Carbonate double de calcium et de magnésium.

dôme. *n.* 1° Voir *brachyanticlinal.* 2° Petit relief volcanique en forme de coupole.

domites. *n.* Trachy-andésites à oligoclase, de couleur claire.

dopplérite. *n.* Substance qui a l'aspect d'un gel et que l'on trouve dans certains dépôts tourbeux à environ 2 m sous la surface du marais. C'est une substance azotée analogue aux ulmines.

doréites. *n.* Trachy-andésites auxquelles la présence de minéraux ferromagnésiens donne une couleur sombre.

drainage. *n.* Évacuation naturelle ou artificielle de l'eau en excès, qu'elle soit en surface ou dans un sol.

drainance. *n.* En hydrologie, intercommunication existant entre deux nappes d'eau souterraine et qui se fait au travers de roches semi-perméables ou imperméables.

dreikanters. *n.* Cailloux à facettes, façonnés en pays aride par les grains que projette le vent.

drumlin. *n.* Colline oblongue constituée en grande partie par des éléments de moraine de fond, et caractéristique des dépôts glaciaires.

druse. *n.* Masse plus ou moins plate sur laquelle des cristaux font saillie.

dunites. *n.* Péridotites contenant presque uniquement de l'olivine, et des quantités accessoires de minéraux métalliques.

durain. *n.* Matière mate, terne et compacte formant les lits de certains charbons.

durée de renouvellement. En hydrogéologie, temps nécessaire à la reconstitution de la réserve d'eau originelle d'une nappe souterraine.

dureté. *n.* 1° En minéralogie, désigne la résistance qu'un minéral oppose à la rayure. 2° Propriété qu'a une eau de provoquer un résidu insoluble au contact du savon et un dépôt de carbonate de calcium sous l'effet de l'ébullition.

durite. *n.* Microlithotype des charbons, formé d'exinite et d'inertinite.

dyke. *n.* Roche éruptive qui fait saillie à la surface du sol et qui affecte la forme d'une épaisse muraille ou d'une colonne.

dynamique. *n.* 1° Étude de tous les processus qui conduisent à la formation, à l'altération et à la perturbation des roches. 2° Étude, en tectonique, dont l'objet est la reconstitution des contraintes qui ont donné lieu aux déformations orogéniques.

dynamométamorphisme. *n.* Métamorphisme dû uniquement à la pression et relativement indépendant de la température.

dysodile. *n.* Charbon sapropélique très inflammable, malodorant, se débitant en lamelles fines, flexibles et élastiques.

E

eau. *n.* En géologie, élément présent en tous lieux dans le sol et le sous-sol, et sous deux états principaux, gazeux et liquide-solide.

eau de capillarité. Eau présente dans les plus fins capillaires du sol même lorsque celui-ci continue à perdre son eau par évaporation.

eau de gisement. Eau associée aux gisements de pétrole.

eau de gravité. Eau libérée d'un aquifère sous l'action de la gravité.

eau interstitielle. Eau contenue dans les pores d'une roche.

eau juvénile. Eau produite en profondeur; ne provient pas de précipitations.

eau libre. Eau souterraine, située à quelques dizaines de mètres de profondeur et caractérisée par des relations directes avec les eaux de surface.

eau de rétention. Eau retenue par la trame solide de l'aquifère.

eau de subsurface. Eau souterraine captive, située dans une zone profonde (200 à 300 m).

eau vadose. Eau de subsurface, ni absorbée ni pelliculaire, donc libre, et qui circule à l'intérieur du sol.

écailles. *n.* Structures obtenues par succession de plusieurs plis-failles.

échelle de Mohs. Ensemble de 10 minéraux utilisés comme références du degré de dureté d'un minéral.

éclat. *n.* En minéralogie descriptive, désigne la manière dont un minéral reflète la lumière (cette observation doit se faire obligatoirement sur une cassure fraîche).

éclogites. *n.* Roches métamorphiques de couleur vert sombre, à structure granoblastique très dense et constituées essentiellement de pyroxène sodique (omphacite) et de grenat pyrope (avec parfois du disthène et du quartz). Se forment dans des conditions de métamorphisme très exceptionnelles.

écobuage. *n.* Enlèvement de l'humus d'un sol.

écologie. *n.* Étude des rapports entre les êtres vivants et le milieu dans lequel ils vivent.

écologie médicale. Étude de la transmission des maladies parasitaires et de l'effet de certains facteurs du milieu sur la santé de l'homme.

écologie mésologique ou **factorielle.** Science traitant, d'une part, de l'étude du milieu et des facteurs le constituant et, d'autre part, de l'action de ces facteurs sur les êtres vivants.

écosphère. *n.* Syn. de *biosphère.*

écoulement. *n.* En tectonique, mode de plissement affectant, à haute température, des roches suffisamment plastiques.

écoulement laminaire. Écoulement d'un fluide par filets liquides parallèles, les vitesses de ceux-ci étant toutes égales sur une même section orthogonale.

édaphique. *adj.* Qui concerne le sol.

édaphologie. *n.* Science du sol, pédologie.

effets chromatiques. Teintes particulières que peut présenter un minéral observé au microscope polarisant, indépendamment de la couleur propre du minéral.

efflorescence. *n.* Transformation de sels hydratés, qui perdent une partie de leur eau de cristallisation au contact de l'air. S'observe à la surface du sol dans les zones arides et les bas-fonds mal drainés.

effusives. *adj.* **(roches).** Roches ignées qui parviennent à la surface de la Terre, par opposition aux roches *intrusives,* injectées en profondeur.

électronégativité. *n.* Force qu'a un atome dans une molécule pour attirer un électron à lui.

élément de symétrie. Figure par rapport à laquelle on opère les symétries : centre (inversion), axe (rotation), plan ou miroir (réflexion).

éluvion. *n.* Dépôt sédimentaire constitué par les éléments non évacués de la décomposition des roches.

éluvium ou **manteau d'altération.** Dépôt résiduel, laissé en place après la disparition des matériaux solubles.

embayment. *n.* Rentrant, au contact glacis-montagne.

émergence. *n.* Sortie d'eau, sous forme de source, due au contact des surfaces piézométrique et topographique.

emmagasinement. *n.* **(coefficient d').** En hydrogéologie, rapport du volume de l'eau libérée ou emmagasinée par unité de volume de l'aquifère à la variation de charge hydraulique (niveau piézométrique) correspondante.

emmagasinement spécifique. Volume d'eau libérée ou emmagasinée par unité de volume de l'aquifère et par unité de charge hydraulique.

énantiomorphe. *n.* Classe de symétrie qui ne possède que des axes, mais ni centre ni plan.

enclave. *n.* Fragment de roche (ou minéral) entièrement entouré par une roche d'un autre groupe.

endogène. *adj.* D'origine interne. *Ex.* Les roches ignées sont endogènes.

endoskarns. *n.* Roches résultant de la transformation de roches granitiques au contact d'un calcaire.

entroque. *n.* Portion de tiges de Crinoïdes (Échinodermes) ; leur accumulation en milieu marin contribue à la formation des calcaires à encrines, ou calcaires à entroques.

épicentre. *n.* Point du globe situé à la verticale d'un foyer séismique.

épicontinentale. *adj.* **(mer).** Mer dont le domaine est celui de la plate-forme continentale ; siège des dépôts néritiques.

épicontinentale. *adj.* **(zone).** Marge marine à très faible profondeur d'eau, en bordure du continent.

épigénie. *n.* En minéralogie, modification de la structure chimique d'un minéral sans modification de sa forme.

épilimnion. *n.* Zone superficielle d'un lac ou d'un étang dont la température, en été, est supérieure à 4 °C.

épimagma. *n.* Magma appauvri en gaz, qui sont concentrés au-dessus de la lave. Magma qui peut s'épancher.

épirogenèse ou **épéirogenèse.** *n.* Phase qui suit un plissement et aboutit à la formation d'une chaîne de montagnes.

épirogénique. *adj.* **(mouvement).** Déformation lente impliquant un mouvement vertical, de soulèvement ou d'affaissement, d'un ensemble géologique.

épitaxie. *n.* Croissance isostructurale.

épitomé. *n.* Horizon diagnostique de la classification américaine des sols.

éponte. *n.* Parois, supérieure ou inférieure, d'un filon (de minerai ou volcanique).

époque. *n.* Subdivision du temps géologique correspondant à une série stratigraphique.

équivalent chimique. En hydrogéologie, se dit de la masse de chaque élément contenu dans une eau (on l'obtient en divisant la masse atomique par la valence).

ère. *n.* La plus grande division des temps géologiques. *Ex.* Ère primaire, ou Paléozoïque.

erg. *n.* Champ de dunes, en pays aride.

érosion. *n.* Dégradation lente des roches et nivellement de la surface terrestre sous l'effet de processus mécaniques et chimiques.

éruptives. *adj.* **(roches).** Roches issues du refroidissement d'un magma, en profondeur pour les roches plutoniques, à la surface pour les roches volcaniques.

escarpement de faille. Dénivellation correspondant à l'expression en surface d'une faille.

esker. *n.* Accumulation glaciaire de sables et graviers, sous forme de monticules à sommet généralement plat (les *kames*) ou de bandes sinueuses à profil transversal aigu (les *osar;* singulier *os*).

essence. *n.* Terme général employé pour divers distillats légers et carburants.

essexites. *n.* Roches intrusives calco-alcalines, largement grenues, à plagioclase et néphéline.

estran. *n.* Zone de balancement des marées, comprise entre les plus hautes et les plus basses mers.

étage. *n.* Unité chronostratigraphique ; subdivision d'une série, caractérisée par un ensemble de données paléontologiques, lithologiques ou structurales de valeur en principe universelle.

étiage. *n.* Débit le plus faible d'un cours d'eau.

étoile filante. Météoroïde formé en majeure partie de substances gazeuses à la température de la surface terrestre, mais solides dans le froid interplanétaire ; il se vaporise avant l'entrée dans l'atmosphère, transformation qui s'accompagne d'un effet lumineux.

étude goniométrique. Mesure des angles entre les faces d'un cristal afin de déterminer sa forme et sa classe de symétrie.

étude radiocristallographique. Méthode qui consiste à envoyer un faisceau de rayons X sur une substance cristallisée (monocristal ou poudre cristalline). La façon dont la matière diffracte ces rayons renseigne sur sa structure.

eucrite. *n.* 1° Achondrite (météorite pierreuse), riche en calcium. 2° Ce terme désigne une variété de gabbro terrestre à olivine, plagioclase, augite et hypersthène.

eugéosynclinal. *n.* Dans un géosynclinal, sillon interne situé du côté océanique.

euphotides. *n.* Gabbros constitués de grands cristaux de plagioclase vert et de cristaux de diallage.

euphotique. *adj.* **(zone).** Zone aquatique, d'environ 50 m de profondeur, dans laquelle la lumière peut encore pénétrer.

eutectique. *adj.* **(mélange).** Mélange de deux ou plusieurs minéraux qui ont cristallisé en même temps à partir de la solution de leurs constituants, ces minéraux étant en proportions définies.

eutectique. *adj.* **(point).** Désigne la température à laquelle des minéraux ont cristallisé simultanément ; c'est la plus basse température (à pression donnée) à laquelle les constituants des minéraux peuvent coexister à l'état liquide.

eutrophique. *adj.* **(milieu).** Riche en éléments nutritifs, mais insuffisamment oxygéné.

eutrophisation. *n.* Enrichissement naturel d'un milieu en matières organiques et minérales. *Ex.* Eutrophisation d'un lac.

eu-ulminite. *n.* Voir tableau relatif aux macéraux des lignites et des houilles, en fin de lexique.

euxinique. *adj.* Qualifie un milieu marin où les eaux de surface, oxygénées, ne descendent pas en profondeur, et ou l'hydrogène sulfuré reste donc abondant. Terme dérivé de Pont-Euxin, nom de la mer Noire dans l'Antiquité.

évaporites. *n.* Roches sédimentaires formées par la précipitation chimique de sels provenant de l'évaporation de masses d'eaux marines ou continentales.

évapotranspiration. *n.* Somme de l'évaporation du sol et de la transpiration des plantes d'un écosystème.

exinite-liptinite (groupe de l'). Un des trois grands groupes des macéraux des lignites et des houilles. Rassemble des éléments assez disparates : spores, cuticules, résines, Algues, etc.

exogène. *adj.* D'origine externe. *Ex.* Les roches sédimentaires sont exogènes.

exoskarns. *n.* Roches résultant de la transformation de roches calcaires au contact d'un granite.

extinction. *n.* Propriété que possèdent les cristaux de s'éteindre selon certaines directions privilégiées quand ils sont observés au microscope polarisant.

extrusion. *n.* Roche ignée, vitreuse ou à grain fin, qui s'est solidifiée à la surface de la Terre.

exudatinite. *n.* Voir tableau relatif aux macéraux des lignites et des houilles, en fin de lexique.

F

faces cristallines. Surfaces planes qui déterminent le volume du cristal. Leur développement est fonction de la croissance cristalline, alors que leur orientation est liée à la symétrie du réseau.

faciès. *n.* 1° En minéralogie, somme des caractères externes (aspect, forme, couleur, ...) que présente un minéral. Il permet de l'identifier et parfois même de déterminer son gisement. 2° L'ensemble des caractères lithologiques et paléontologiques d'une formation géologique. *Ex.* Faciès récifal.

faille. *n.* Rupture d'origine tectonique affectant une masse rocheuse, et qui s'accompagne d'un déplacement relatif des deux masses rocheuses (ou *compartiments*) résultantes le long d'une surface dite *plan de faille.*

faille béante. Faille à deux lèvres écartées.

faille conforme. Faille directionnelle dont le plan est incliné dans le même sens que les couches.

faille contraire. Faille directionnelle dont le plan est incliné dans un sens contraire à celui des couches.

faille directionnelle ou **faille longitudinale.** Faille de direction parallèle à celle des couches.

faille inverse ou **faille de compression.** Faille inclinée dont le compartiment abaissé se trouve au-dessous du plan de la faille.

faille normale ou **faille d'extension.** Faille inclinée dont le compartiment abaissé se trouve au-dessus du plan de la faille.

faille-pli. *n.* Faille courbée, postérieurement à sa formation, à la suite d'une compression.

faille transversale. Faille de direction oblique ou perpendiculaire à celle des couches.

failles conjuguées. Failles symétriques par rapport à un plan.

failles en échelons. Failles parallèles entre elles et qui se relaient les unes les autres.

failles en gradins ou **failles en escaliers.** Failles normales parallèles, inclinées toutes dans le même sens.

falun. *n.* Roche sédimentaire formée par accumulation de coquilles noyées dans une matrice argilo-sableuse.

famille. *n.* Unité à l'intérieur de la hiérarchie de la classification. En *paléontologie* et en *biologie*, subdivision de l'ordre, se subdivisant elle-même en plusieurs genres. En *pétrographie*, équivalent du « clan ».

felsique. *adj.* Terme mnémotechnique désignant les minéraux clairs (quartz, feldspaths, feldspathoïdes) d'une roche ignée ; s'oppose à *mafique*.

felsites. *n.* Roches formées par la dévitrification de rhyolites très anciennes, sous l'action d'un léger métamorphisme.

fémique. *adj.* Terme mnémotechnique qui désigne l'une des deux principales classes de minéraux composant la norme d'une roche ignée ; cette classe comprend principalement les minéraux ferro-magnésiens ; s'oppose à *sialique*.

fenêtre tectonique. Terrains *autochtones* entourés de tous les côtés par des terrains *allochtones* différents.

fénites. *n.* Roches produites par métasomatisation de roches granitiques et gneissiques, avec disparition du quartz qui est transformé en feldspath alcalin.

fentes de tension ou **fentes de traction.** Fractures ouvertes, généralement remplies de calcite ou de quartz, répondant à des efforts d'extension.

fermentation. *n.* Processus, très généralement anaérobie, au cours duquel un substrat (« aliment ») est partiellement décomposé avec production d'énergie, qui est mise en réserve sous forme de composé phosphoré (ATP ou acide adénosine-triphosphorique) ; l'hydrogène arraché au substrat est fixé sur un accepteur différent de l'oxygène (qui est celui de la respiration). La fermentation remplace la respiration, mais son rendement est moins bon, car l'énergie du substrat n'est que très partiellement récupérée lors de sa dégradation imparfaite.

fermeture pratique. Fermeture qui représente la hauteur de la zone imprégnée d'huile ou de gaz dans un piège pétrolifère.

fermeture structurale. Différence de niveau entre le sommet d'un piège (gisement potentiel d'hydrocarbure) et sa base.

ferrane. *n.* Revêtement pédologique de fer.

figure de charge. Structure sédimentaire présentant des inflexions vers le bas de la surface inférieure des couches sableuses.

figure de corrosion. Petite dépression obtenue sur la face d'un cristal par un réactif approprié. Les contours réguliers sont liés à la symétrie de la face cristalline.

figure de flux. Dans une roche sédimentaire, figure résultant de l'action d'un courant d'eau.

filon. *n.* Formation de matière minérale recoupant à l'emporte-pièce d'autres roches.

fissilité. *n.* Propriété d'une roche qui se rompt suivant des plans parallèles. *Ex.* L'ardoise.

fissure. *n.* Fente formée dans une roche, de forme allongée, d'origine essentiellement mécanique.

fjord. *n.* Ancienne vallée glaciaire envahie par la mer.

flachmoor ou **lowmoor.** *n.* Tourbière de vallée ou de côte basse.

flanc (d'un pli). Côté du pli, de part et d'autre de la charnière.

flanc inverse (d'un pli). Flanc d'un pli couché ou renversé, où la succession des strates est renversée.

flanc normal (d'un pli). Flanc d'un pli couché ou renversé dans lequel les strates se suivent par ordre chronologique (les plus récentes sur les plus anciennes).

flexion. *n.* Type de déformation continue des roches au cours de laquelle une strate est plissée de telle manière que son épaisseur (mesurée perpendiculairement aux joints de stratification) reste constante.

floculation. *n.* Phénomène qui se produit lorsque les micelles d'une solution colloïdale s'agrègent en « flocons ». La floculation est un des processus sédimentaires.

fluorescence. *n.* Propriété qu'ont certains corps d'émettre de la lumière lorsqu'ils sont soumis à un rayonnement électromagnétique (rayons ultraviolets, rayons X).

fluorinite. *n.* Voir tableau relatif aux macéraux des lignites et des houilles, en fin de lexique.

fluvio-glaciaire. *adj.* Caractérise le dépôt qui provient à la fois de l'action des glaciers et de celle des cours d'eau.

flysch. *n.* Formation détritique d'argiles et de grès déposée dans des fosses géosynclinales.

foliation. *n.* Schistosité de flux accompagnée d'une dissolution et d'une recristallisation orientée des minéraux de la roche ; les feuillets sont de composition différente, sans avoir de rapport défini avec la stratification.

forage. *n.* Ensemble des opérations qui consistent à pénétrer dans le sous-sol, soit pour des études géologiques, soit pour l'extraction de fluides contenus dans les terrains traversés.

fore-reef. *n.* Côté externe d'un récif, tourné vers le large.

forêt mixte. Forêt constituée de Feuillus et de Conifères.

formation. *n.* Ensemble sédimentaire caractérisé par une uniformité lithologique dans toute son étendue.

forme minérale. Volume conditionné par la maille qui impose l'orientation des faces, et par les éléments de symétrie qui fixent le choix de ces faces.

fossé d'effondrement. Voir *graben*.

fosse océanique. Sillon relativement étroit et allongé dont la profondeur avoisine 10 000 m.

fossile. *n.* 1° Reste d'organisme, complet ou fragmentaire, trouvé dans les roches. 2° Plus généralement, toute trace d'activité due à des êtres vivants, et conservée dans les formations géologiques.

fossile de corrélation. Fossile utilisé pour faire des comparaisons entre des localités éloignées ; permet ainsi de tirer des conclusions d'ordre biogéographique.

fossile de faciès. Fossile caractéristique d'un milieu, d'un biotope donné ; les fossiles de faciès sont donc des indicateurs écologiques. *Ex.* Les coraux sont des indicateurs de mer chaude.

fossile stratigraphique ou **caractéristique.** Fossile-repère, à partir duquel on peut donner un âge relatif à une formation géologique.

fossilifère. *adj.* S'applique à une roche ou à un lieu qui contient des fossiles.

fossilisation. *n.* Conservation dans un sédiment des restes d'organismes ou des traces de leur activité. Elle nécessite un enfouissement très rapide après la mort.

foyaites. *n.* Syénites néphéliniques alcalines.

fraction ou **coupe.** *n.* Terme désignant un produit de la distillation fractionnée, obtenu dans un intervalle de température bien déterminé.

frange de Beck. Méthode optique qui permet de comparer les indices de deux sections cristallines contiguës.

frustule. *n.* Chez les Diatomées, sorte de boite siliceuse sécrétée par l'appareil de Golgi de la cellule et dans laquelle cette dernière se trouve contenue.

fuel. *n.* Combustible liquide extrait du pétrole brut.

fumerolle. *n.* Émission volcanique, constituée uniquement de gaz (essentiellement de vapeur d'eau) qui se dégagent à des températures supérieures à celle de l'atmosphère.

fusinisation. *n.* Dans les charbons (groupe de l'inertinite), processus de transformation des produits ligno-cellulosiques par voie partiellement aérobie.

fusinite. *n.* Voir tableau relatif aux macéraux des lignites et des houilles, en fin de lexique.

G

gabbros. *n.* Roches plutoniques basiques sombres, composées essentiellement de plagioclase calcique, de pyroxène et/ou d'olivine. Constituent l'équivalent intrusif des basaltes.

gangue. *n.* Support d'un minéral. Généralement, il s'agit de la roche dans laquelle on a trouvé le minéral.

garrigue. *n.* Formation végétale des régions méditerranéennes constituée de buissons établis sur sol calcaire ou marneux, plus ou moins disséminés et comprenant des romarins, des cistes, des chênes-kermès, etc.

gas-cap. *n.* Gaz libre, ou partiellement dissous, dans le pétrole qui se trouve à la partie supérieure d'un gisement, juste sous la couverture. Son expansion contribue à la remontée du pétrole dans le puits en cours de production.

gassi. *n.* En pays aride, couloir entre les dunes dans lequel s'engouffre le vent.

gaz naturel. Mélange d'hydrocarbures gazeux provenant d'un gisement naturel.

gazoduc. *n.* Conduite destinée au transport d'un gaz.

gélifraction ou **gélivation.** *n.* Processus de désagrégation mécanique des roches ; lié au gel.

gélinite. *n.* Voir tableau relatif aux macéraux des lignites et des houilles, en fin de lexique.

gélocollinite. *n.* Voir tableau relatif aux macéraux des lignites et des houilles, en fin de lexique.

gemme. *n.* Minéral particulièrement pur, considéré comme pierre précieuse ou semi-précieuse et utilisé en joaillerie.

géochimie. *n.* Science qui étudie la composition chimique du globe et les réactions chimiques intervenant lors des processus géologiques.

géochimique. *adj.* **(cycle).** Ensemble de phénomènes traduisant la redistribution continuelle des éléments d'une roche à l'autre et d'un minéral à l'autre.

géochronologie. *n.* Technique permettant de déterminer l'âge absolu, en milliers ou en millions d'années, des roches ou des minéraux en mesurant la quantité d'un isotope radio-actif et celle de l'atome stable dont il dérive.

géode. *n.* Masse pierreuse à l'intérieur de laquelle se trouve une cavité sphérique, ou ovoïde, tapissée de cristaux.

géodynamique externe. Science qui étudie l'altération, la désagrégation, l'érosion, le transport et la sédimentation des roches.

géodynamique interne. Science qui étudie les volcans, les tremblements de terre, la formation et la déformation des roches sous l'effet des forces internes.

géologie historique. Partie de la géologie qui étudie la succession des événements géologiques au cours des temps.

géologie stratigraphique. Branche de la géologie étudiant les matériaux déposés en couches (strates).

géomorphologie. *n.* Science qui a pour objet la description et l'explication des paysages; elle essaie aussi de prévoir de quelle manière ces paysages évolueront.

géophysique. *n.* Science relative à la constitution physique du globe et aux mécanismes des processus géologiques.

géosynclinal. *n.* Vaste dépression allongée de la croûte terrestre, caractérisée par une grande épaisseur des sédiments. Un *eugéosynclinal* est un géosynclinal de mer profonde; un *miogéosynclinal* est un géosynclinal moins important, sans trace de volcanisme.

géothermique. *adj.* 1° **(degré, gradient).** Différence de température par unité de profondeur ou de pression, à l'intérieur de la croûte terrestre. Sa valeur moyenne est de 3 °C tous les 100 m. 2° **(énergie).** Énergie provenant de la chaleur interne de la Terre.

ghourd. *n.* Pyramide formée par la coalescence d'une dune secondaire avec la dune principale.

gisement. *n.* Lieu de l'écorce terrestre où l'on trouve un minéral ou une association minérale particuliers.

gîte. *n.* Minéral ou association minérale considérés dans leur gisement.

glaciation. *n.* Phénomène qui s'est reproduit plusieurs fois dans la suite des temps géologiques, particulièrement au cours du Quaternaire : à la suite d'un refroidissement climatique, des glaciers importants ont recouvert certaines régions du globe.

glacier de piémont. Glacier formé par la réunion de plusieurs glaciers débouchant dans une plaine où ils présentent une surface presque horizontale.

glacis. *n.* Grandes surfaces inclinées; ce relief se rencontre en pays tropical.

glaucophanites. *n.* Amphibolites où l'amphibole est représentée par la variété glaucophane.

gley. *n.* Horizon d'un sol dans lequel la présence permanente de l'eau amène une concentration d'argile et de fer à l'état réduit.

gneiss. *n.* Roches métamorphiques caractérisées essentiellement par l'empilement de lits sombres, composés de minéraux ferromagnésiens, et de lits blancs, riches en quartz et en feldspaths.

gneiss œillés. Gneiss où les agrégats ou des cristaux isolés de feldspath, et parfois de quartz, prennent des formes lenticulaires, se détachant de la masse plus fine, d'où le nom de la roche.

gneiss rubannés. Migmatites où le terme métamorphique, de composition semblable à celle des gneiss communs, alterne avec des lits granitoïdes.

gondwana. *n.* Vaste complexe primaire de terres émergées dans l'hémisphère sud, comprenant l'Amérique du Sud, l'Afrique, l'Inde, l'Australie et l'Antarctique.

gore. *n.* Voir *tonstein.*

goze. *n.* En pays aride, accumulation de sable, dans une région occupée par la végétation.

graben ou **fossé d'effondrement.** Compartiment affaissé, encadré par des failles. S'oppose à *horst.*

graded bedding. *n.* Voir *grano-classement.*

gradient hydraulique. Différence de charge hydraulique entre deux points d'un aquifère, selon la direction générale d'écoulement.

gradin de plage. Voir *berm.*

granites. *n.* Roches ignées acides, essentiellement constituées de quartz, feldspath et mica.

grano-classement ou **graded bedding.** *n.* A l'intérieur d'un sédiment détritique, classement des grains selon une taille décroissant du bas vers la haut.

granodiorites. *n.* Roches grenues intrusives, ressemblant beaucoup aux granites dont elles sont difficiles à différencier microscopiquement. Contiennent environ 20 % de quartz et leur feldspath dominant est de type oligoclase-andésine.

granulites. *n.* Variétés de gneiss à grain moyen, pauvres en micas; on y trouve du grenat et parfois du pyroxène.

granulométrie. *n.* Classement des sédiments pulvérulents selon la proportion des grains de différentes dimensions.

graphite. *n.* Variété de carbone cristallisé.

grauwackes. *n.* Roches de couleur foncée, du type des flyschs, présentant des débris de roches ignées et des minéraux englobés dans une matrice détritique.

gravimétrie. *n.* Méthode d'exploration géophysique qui revient à mesurer l'intensité de la pesanteur en divers points du terrain. Les résultats sont exploités pour mettre en évidence des anomalies permettant d'interpréter les structures du sous-sol.

gravitation. *n.* Force en vertu de laquelle tous les corps matériels s'attirent mutuellement en raison directe de leur masse et en raison inverse du carré de leur distance.

greisens. *n.* Roches métamorphiques provenant de la transformation métasomatique de roches du type granite, ou plus rarement du type gneiss. Ce sont des roches à grain moyen où le quartz, associé à la muscovite, peut constituer de 50 à 90 % de l'ensemble.

grès. *n.* Roches sédimentaires formées de grains de sable assemblés par un ciment.

grès bigarrés. Grès du Trias diversement colorés.

groupe stratigraphique. Subdivision chronostratigraphique correspondant à une ère. Peut parfois désigner également une plus petite division stratigraphique.

groupes spatiaux ou **groupes de recouvrement.** En minéralogie, il existe 230 groupes de symétrie si l'on considère les éléments de symétrie avec translation (plan avec glissement et axes hélicoïdaux).

gypse. *n.* Sulfate de calcium hydraté; on en tire le plâtre.

H

hadal. *adj.* **(étage).** Zone océanique la plus profonde (plus de 9 000 m).

halde. *n.* Lieu situé près de la mine où l'on accumule la partie stérile (gangue) du minerai après extraction.

halite. *n.* Voir *sel gemme.*

halogénures. *n.* En minéralogie, classe qui regroupe des minéraux de composition chimique simple contenant un corps halogène (chlore, fluor). Ces minéraux sont souvent désignés sous le nom de sels.

halokinèse. *n.* Tectonique salifère.

halophile. *adj.* Qui vit en milieu salé. *Ex.* Plantes des déserts salés et des plages.

hamada. *n.* Plateau en paysage désertique. *Ex.* Sahara.

hard-ground. *n.* Surface durcie engendrée par un arrêt de la sédimentation sur le fond marin.

hawaiien. *adj.* Désigne un type de volcan en forme de bouclier de grande dimension et dont les éruptions latérales sont dues à des fractures rayonnantes.

hétéropique. *adj.* Qualifie des dépôts qui, bien que contemporains, montrent des faciès différents.

hochmoor ou **highmoor.** *n.* Tourbière de plateau ou de montagne.

holoplancton. *n.* Plancton constitué d'organismes qui sont planctoniques durant toute leur vie.

horizon. *n.* En pédologie, chacune des couches horizontales successives et différenciées dont l'ensemble forme le sol. Selon le degré d'évolution du sol, celui-ci se subdivise de haut en bas en horizons A, B, C... que l'on précise éventuellement en utilisant des symboles descriptifs. *Ex.* Horizon A_{00} : horizon de surface formé de débris végétaux facilement identifiables.

horizon éluvial ou **horizon lessivé.** Horizon supérieur, appauvri en éléments fins entrainés par les eaux d'infiltration (éluviation).

horizon hydromorphe. Horizon qui contient de l'eau.

horizon illuvial ou **horizon d'accumulation.** Horizon inférieur, enrichi en éléments venant de la surface.

horizon perturbé. Horizon remanié dans sa masse par des mouvements divers.

hornblendites. *n.* Roches presque uniquement formées de gros cristaux de hornblende, dans des conditions de type pegmatitique.

horst. *n.* Compartiment surélevé, encadré par des failles. S'oppose à *graben.*

houiller. *n.* Ensemble des dépôts d'origines palustre, lacustre et lagunaire du Carbonifère moyen et supérieur.

houilles. *n.* Une des catégories de charbons. Correspondent, si l'on exclut la tourbe, au deuxième stade de l'évolution des charbons, au cours d'une phase géochimique, en fonction de la température et du temps.

howardite. *n.* Achondrite (météorite pierreuse) riche en calcium, composée en grande partie de plagioclase calcique, et formée d'une brèche polymicte (fragments hétérogènes).

huile juvénile. Premiers termes libérés lors de la formation du pétrole, de densité élevée (0,88 à 1,00).

huile mature. Pétrole ayant atteint son plein développement.

huile paraffinique. Huile hautement raffinée, incolore et inodore (utilisée en pharmacie et dans la fabrication de produits cosmétiques).

huminite-vitrinite (groupe de l'). Un des trois grands groupes des macéraux des lignites et des houilles. Rassemble des produits ligno-cellulosiques gélifiés (tissus et gels).

humocollinite. *n.* Voir tableau relatif aux macéraux des lignites et des houilles, en fin de lexique.

humodétrinite. *n.* Voir tableau relatif aux macéraux des lignites et des houilles, en fin de lexique.

humotélinite. *n.* Voir tableau relatif aux macéraux des lignites et des houilles, en fin de lexique.

humus. *n.* Couche superficielle du sol résultant de l'interaction entre les éléments de la roche sous-jacente, les éléments morts d'origine biologique qui la recouvrent, et les êtres vivants qui y prospèrent.

hyaloclastites. *n.* Produits volcaniques vitreux et cassants provenant du brusque refroidissement d'une lave s'épanchant dans un milieu aqueux.

hydrocarbures. *n.* Composés chimiques dont les éléments constitutifs sont exclusivement l'hydrogène et le carbone. Ils sont gazeux, liquides ou solides à température ordinaire suivant la grosseur de leurs molécules.

hydrodynamique souterraine. Partie de l'hydrogéologie et de l'hydraulique relative à l'écoulement des eaux souterraines, aux lois qui le régissent et à leurs applications.

hydrogéologie. *n.* Partie de la géologie dynamique qui traite de la recherche et du captage de l'eau.

hydrologie. *n.* Science des eaux, de leurs caractéristiques et de leurs propriétés.

hydrologiste ou **hydrologue.** *n.* Géophysicien spécialiste de l'hydrologie.

hydromorphie. *n.* Ensemble des modifications du sol dues à l'eau.

hydrosphère. *n.* Désigne l'ensemble des eaux à la surface du globe.

hydrothermal. *adj.* Qui résulte d'émanations magmatiques riches en eau chaude (ou en vapeur).

hydroxylés. *adj.* **(minéraux).** Minéraux à radical — OH.

hypolimnion. *n.* Zone profonde d'un lac ou d'un étang dont la température reste très faible et constante.

hypomagma. *n.* Magma sous-saturé en gaz et soumis à de très fortes pressions.

I

ichnologie. *n.* Étude des traces résultant du déplacement des organismes.

ichor. *n.* Terme créé par Sederholm pour désigner une solution métasomatisante de silice, d'alumine et de minéraux alcalins dans de la vapeur d'eau à température très élevée. Ce fluide provoquerait la formation des migmatites.

idioblaste. *adj.* Se dit d'un minéral qui, dans une roche métamorphique, possède ses propres facettes.

idiomorphe. *adj.* Syn. d'*automorphe.*

ignées. *adj.* **(roches).** Roches formées par la solidification d'un magma.

ignimbrites. *n.* Roches volcaniques formées directement à partir d'une nuée ardente.

ijolites. *n.* Roches ultrabasiques à feldspathoïdes; la néphéline forme près de la moitié de la roche, le reste étant constitué de pyroxène et de zéolite.

inclusion. *n.* Substance englobée dans un minéral lors de sa cristallisation, et qui peut être solide, liquide ou gazeuse.

incompétentes. *adj.* **(roches).** Roches plastiques capables de se plissoter et de s'étirer facilement. *Ex.* marnes, etc.

indice d'arrondi. Indice caractérisant la surface ou le contour des fragments détritiques d'une roche. Il est défini comme le rapport entre le rayon moyen de cercles inscrits dans les irrégularités du contour du grain et le rayon du plus grand cercle inscrit dans le même contour.

indice de coloration (I.C.). Dans une roche ignée, quantité de minéraux fémiques (sombres) exprimée en pourcentage par volume.

indice d'octane. Indice permettant de chiffrer le pouvoir antidétonant d'un carburant, par comparaison avec celui d'un carburant étalon.

indice de réfraction. Exprime l'inverse de la vitesse de propagation de la lumière dans le milieu considéré. Cette vitesse est exprimée en fonction de la vitesse de la lumière dans l'air prise comme unité.

indice de sphéricité. Indice indiquant la forme générale des fragments détritiques d'une roche. Il est défini par la racine cubique du rapport entre le volume du fragment et le volume de la sphère circonscrite.

indice des vides. Rapport, exprimé en pourcentage, du volume des vides d'une roche au volume de la phase solide de cette dernière.

inertinite (groupe de l'). Un des trois grands groupes des macéraux des lignites et des houilles, dérivant de produits ligno-cellulosiques par voie au moins partiellement aérobie (fusinisation).

inerto-détrinite. *n.* Voir tableau relatif aux macéraux des lignites et des houilles, en fin de lexique.

influence. *n.* En hydrogéologie, effet d'un puits sur l'aquifère.

infralittoral. *adj.* **(étage).** Zone marine peu profonde mais toujours immergée, juste en dessous du niveau des basses mers.

infrarouge. *n.* Radiation électromagnétique dont les longueurs d'onde sont situées entre 25 microns et la limite inférieure du spectre visible (rouge).

infrastructure. *n.* Domaine profond où les roches se déforment de manière plastique.

insaturation. *n.* Processus affectant les hydrocarbures lorsque les chaînes carbonées possèdent des doubles ou triples liaisons.

inselberg. *n.* Relief isolé dominant de vastes plaines d'érosion; se rencontre en pays tropical.

intercotidale ou **intertidale.** *adj.* **(zone).** Partie supérieure de la zone littorale, soumise au balancement des marées.

interfluve. *n.* Partie haute de l'espace compris entre deux vallées.

interglaciaire. *adj.* Qualifie la période comprise entre deux glaciations.

interstratifiés. *adj.* **(minéraux).** Minéraux argileux constitués par l'alternance plus ou moins ordonnée de feuillets élémentaires de composition différente. *Ex.* Chlorite-illite, illite-montmorillonite.

intertidale. *adj.* Voir *intercotidale.*

intratellurique. *adj.* A l'intérieur de la Terre.

intrusion. *n.* Déplacement et injection d'un matériel dans des roches préexistantes. *Ex.* Formation de diapirs; mouvement ascendant du magma.

intrusives. *adj.* **(roches).** Roches ignées résultant d'une intrusion.

ion. *n.* Atome ou groupe d'atomes chargé électriquement.

ionisation. *n.* Production d'ions dans un gaz ou dans un électrolyte.

islandais. *adj.* Qualifie un type de volcan en bouclier de petite taille.

iso-alcanes. *n.* Hydrocarbures de la série des alcanes à chaînes plus ou moins ramifiées.

isoélectrique *adj.* **(point** ou **pH).** pH auquel un acide aminé, une protéine, ou en général une substance amphotère ne sont pas chargés, et ne migrent donc pas dans un champ électrique. La dissociation des fonctions acides et basiques se compense à ce point. Il s'abrège pH_i.

isohypse. *adj.* D'égale altitude.

isolement. *n.* Qu'il soit géographique, éthologique, mécanique ou génétique, facteur indispensable à la genèse d'une espèce, selon les théories évolutionnistes.

isomérie ou **isomorphisme.** *n.* Se dit de cristaux dont les formules chimiques sont similaires et les structures cristallines voisines.

isopaques. *adj.* **(courbes).** Courbes d'égale épaisseur des formations géologiques.

isopiques. *adj.* Qualifie des dépôts contemporains qui possèdent exactement les mêmes caractéristiques sédimentologiques et faunistiques.

isoprénoïdes. *n.* Groupe d'hydrocarbures faisant partie des iso-alcanes à chaînes plus ou moins ramifiées et portant un groupement méthyle (— CH_3) sur chaque 4ᵉ atome de carbone.

isostasie. *n.* État d'équilibre gravitationnel approximatif des masses rocheuses à l'intérieur de l'écorce terrestre.

isotope. *n.* Élément dont le noyau atomique possède un nombre de protons (Z) différent du nombre de neutrons (N). *Ex.* Le C_{14} est un isotope du C_{12}. Ainsi deux éléments sont dits isotopes s'ils ont les mêmes propriétés chimiques et ne diffèrent que par leur masse atomique. On distingue les isotopes stables des isotopes radio-actifs.

isotrope. *n.* Dont les propriétés sont indépendantes de la direction selon laquelle on les considère.

J - K

joints stylolithiques. Fractures, obliques sur la stratification, dont les deux lèvres s'interpénètrent par suite d'une dissolution sous l'action d'une pression orientée. Ce sont des surfaces irrégulières, accidentées de petits pics.

kamacite. *n.* Forme minéralogique de l'alliage fer-nickel, avec une composition de 6 % de nickel, de structure cubique à faces centrées.

kaolinisation. *n.* Décomposition des feldspaths d'une roche en kaolin.

karstification. *n.* Formation de chenaux et cavités souterraines, nommés *karsts,* par dissolution des carbonates et action mécanique de l'eau.

karstique. *adj.* Qualifie un relief particulier créé par l'érosion en pays calcaire.

kaustobiolithe. *n.* Désigne l'ensemble des roches combustibles fossiles (pétrole, charbon, schistes bitumineux).

kentallénites. *n.* Roches ignées à grain grossier, proches de la monzonite, mais où abondent les minéraux ferromagnésiens (olivine, augite, biotite).

kératophyres. *n.* Roches effusives acides, essentiellement constituées de feldspath sodique et de quartz en teneur variable.

kérogène. *n.* Nom que l'on donne parfois à la matière asphaltique, qui, dans la nature, se transformerait en pétrole.

kérosène. *n.* Distillat raffiné ayant une volatilité intermédiaire entre celles de l'essence et du gas-oil (150-300 °C). Syn. de *pétrole lampant* (utilisé pour l'éclairage).

kersantites. *n.* Lamprophyres caractérisées par la présence de biotite en phénocristaux et de plagioclases dans la mésostase.

kimberlites. *n.* Péridotites (roches ultrabasiques) micacées qui se présentent sous forme d'intrusions cylindriques ou *pipes.*

kink-bands. Plis dont le rayon de courbure est très faible, et dont les flancs sont plans.

kinzigites. *n.* Paragneiss à grenat, biotite et sillimanite.

klippe ou **lambeau de recouvrement.** Partie de la nappe de charriage complètement isolée de celle-ci par l'érosion.

kuckersite. *n.* Charbon d'Algues, pur et peu évolué, que l'on trouve notamment en Estonie (U.R.S.S.).

L

labradorites. *n.* Basaltes dans lesquels il y a du labrador, qui leur donne une couleur claire.

lacune stratigraphique. Absence en un lieu des dépôts d'une certaine époque. Les sédiments, à cet endroit, ont pu soit ne pas se déposer du tout, soit être enlevés par l'érosion.

lacustre. *adj.* Relatif aux lacs.

lagon. *n.* Étendue d'eau entourée par un atoll.

lagunaire. *adj.* Qui provient ou qui concerne une lagune. *Ex.* Milieu lagunaire, dépôts lagunaires.

lagune. *n.* Étendue d'eau de mer séparée de celle-ci par un cordon littoral généralement percé de passes.

lahar. *n.* Coulée de boue constituée de matériel volcanique, de cendres et d'éléments plus gros mélangés à de l'eau.

lambeau de recouvrement. Voir *klippe*.

lambeaux de poussée. Écailles provenant du substratum, et entraînées à la base d'une nappe de charriage lors de son avancée.

lame mince. Très fine section de roche (de l'ordre du dixième de millimètre) montée entre lame et lamelle de verre, en vue d'une étude au microscope. Syn. de *plaque mince*.

laminaire. *adj.* En lames parallèles. *Ex.* Érosion laminaire, structure laminaire.

lamprophyres. *n.* Roches ignées basiques, riches en cristaux porphyritiques de biotite ou d'autres minéraux ferromagnésiens.

lapidification. *n.* Désigne la transformation du sédiment après son dépôt et son passage à l'état de roche cohérente (*lapidus :* pierre).

lapiez. *n.* Fissures de forme et de dimension variées, créées par l'action dissolvante des eaux atmosphériques en pays calcaire.

lapilli. *n.* Cailloux formés par l'éclatement des roches qui remplissaient la cheminée volcanique; présentent des diamètres allant de quelques millimètres à quelques centimètres.

lapis-lazuli. *n.* Roche métamorphique constituée par métasomatisation de roches calcaires et où la lazurite, de couleur bleue, accompagne d'autres minéraux.

larvikites ou **lauvigites.** *n.* Syénites mélanocrates caractérisées par leur grain grossier et leurs feldspaths distincts qui renferment des inclusions métalliques à reflets bleutés.

latérite. *n.* Sol rougeâtre de la zone tropicale humide, résultant de la décomposition en profondeur des roches, et caractérisé par la présence d'alumine libre et d'oxydes de fer; dans les régions plus sèches, il forme une carapace épaisse et stérile.

latites. *n.* Trachytes à plagioclase acide.

laurasia ou **laurasie.** *n.* Ensemble des continents de l'hémisphère Nord, qui se trouvaient en continuité jusqu'au Mésozoïque. La Laurasia était séparée du Gondwana (continent de l'hémisphère Sud) par une mer, la Téthys.

lave. *n.* Matière fluide, visqueuse, de température supérieure à 1 000 °C, qui s'épand hors du volcan après l'explosion volcanique et coule sur les pentes où elle se solidifie en refroidissant.

laves en oreiller. Voir *pillow lavas*.

lémurie. *n.* Ancien continent indo-malgache, postulé autrefois par certains biogéographes pour expliquer la présence des Lémurs — sortes de singes primitifs — à la fois en Inde et à Madagascar.

leptynites. *n.* Gneiss à grain fin de couleur claire, très peu micacés.

lessivage. *n.* Dissolution et transport d'éléments solubles par les eaux de ruissellement.

leucocrate. *adj.* De couleur claire. Ce terme s'applique à une roche ignée riche en minéraux felsiques, clairs.

lévigélinite. *n.* Voir tableau relatif aux macéraux des lignites et des houilles, en fin de lexique.

lèvres de faille. Bords des deux compartiments au voisinage du plan de la faille.

liaison hydrogène. Liaison chimique, lâche, se faisant par l'intermédiaire d'un atome d'hydrogène qui, son électron étant engagé dans une liaison ordinaire de covalence, voit son proton libre manifester sa charge positive et attirer une charge négative voisine.

lignine. *n.* Substance imprégnant les parois des cellules du bois, responsable de la lignification. Polymère de composés aromatiques à fonction aldéhyde. Difficilement attaquable, elle est pourtant décomposée par certains Champignons.

lignite. *n.* Matière charbonneuse fossile, compacte, présentant des lits végétaux bien conservés.

limburgites. *n.* Roches filoniennes ultrabasiques à feldspathoïdes.

limon. *n.* Terme qui peut désigner un dépôt éolien (il est alors synonyme de *lœss*) ou une classe granulométrique dont les éléments ont de 2 μ, à 50 μ quelles qu'en soient la nature et l'origine.

linéation. *n.* Petite structure linéaire (autre que les stries de faille) qui se répète au sein des roches.

linéation d'allongement. Linéation résultant de l'étirement d'objets antétectoniques (galets, fossiles...).

linéation d'intersection. Linéation correspondant à l'intersection de deux familles de plans; *p. ex.*, de la schistosité et de la stratification.

linéation minérale. Linéation due à la croissance orientée de certains minéraux métamorphiques.

liparites. *n.* Rhyolites calco-alcalines potassiques à oligoclase, sanidine et biotite.

liptodétrinite. *n.* Voir tableau relatif aux macéraux des lignites et des houilles, en fin de lexique.

liquide dense. Liquide utilisé pour la détermination des densités des minéraux et dont la masse volumique élevée (de 2 à 4,10 g/cm³) peut être ajustée.

lit ou **microcouche.** *n.* Épaisseur de sédiment qui s'est déposée pendant une oscillation des conditions du milieu.

lithification. *n.* Ensemble des processus de cimentation et de tassement qui transforment un sédiment en une roche compacte.

lithocalcarénites. *n.* Calcarénites à grain très fin, provenant de l'érosion de calcaires d'origine chimique en milieu aquatique.

lithocalcirudites. *n.* Calcirudites formées de fragments calcaires fins, noyés dans une matrice de même nature.

lithofaciès. *n.* Faciès lithologique.

lithologie. *n.* Caractère général d'une roche : composition minérale, texture, structure.

lithophile. *adj.* Se dit d'un élément qui a des affinités avec les silicates.

lithosol. *n.* Sol minéral brut massif.

lithosphère. *n.* Tranche superficielle, formée de terrains relativement rigides (silicates) comprenant l'écorce et une tranche du manteau supérieur, d'une épaisseur de 70 à 150 km.

lodranite. *n.* Sidérolithe (météorite composée de métal et de silicates) à bronzite et olivine; ce type n'est représenté que par une seule météorite, celle de Lodran, qui est tombée au Pakistan en 1868.

lœss. *n.* Dépôt pulvérulent d'origine éolienne; formé de fines particules (de 10 à 50 μ) de quartz, d'argile et de calcaire.

log. *n.* Diagramme représentant les formations géologiques traversées par un sondage en fonction de la profondeur, de différentes caractéristiques, telles que la porosité, la perméabilité, etc.

lowmoor. *n.* Voir *flachmoor*.

lumachelles. *n.* Calcaires bioclastiques, constitués par l'accumulation de coquilles de Mollusques, Brachiopodes et autres organismes de même dimension.

lumière monochromatique. Radiation électromagnétique ayant une longueur d'onde constante.

lumière naturelle. Terme couramment employé en minéralogie pour décrire une lumière non polarisée, par opposition à la lumière polarisée (très souvent utilisée).

lumière polarisée. Lumière ayant traversé certains corps ou ayant été réfléchie par un miroir (*polariseur*), et ne vibrant plus que suivant un plan dit de polarisation. Le même dispositif placé à angle droit par rapport à ce plan empêchera le passage d'une telle lumière : c'est alors un *analyseur*. Si entre les deux se trouve une substance qui dévie plus ou moins ce plan, plus ou moins de lumière franchira l'analyseur.

lopolite. *n.* Masse intrusive étendue, lenticulaire, généralement concordante avec la stratification et dont l'épaisseur est de l'ordre du dixième ou du vingtième de son diamètre.

loupe binoculaire stéréoscopique. Appareil d'observation dont l'optique, doublée, donne une image en relief de l'objet examiné.

M

maar. *n.* Petit lac remplissant le cratère d'un volcan par suite d'apports d'eaux phréatiques.

macéral. *n.* Constituant élémentaire des houilles et des lignites. Voir tableau des macéraux en fin de lexique.

macle. *n.* Groupement de deux ou plusieurs individus de même espèce dont l'orientation obéit à des lois géométriques bien déterminées.

macle en « bec d'étain ». Macle de la cassitérite (minerai d'étain). Le plan de macle est (101); l'axe de macle est normal à ce plan.

macle en « croix de fer ». Macle fréquemment rencontrée chez la pyrite. Plan de macle sur (110), axe de macle normal à ce plan.

macle en « fer de lance ». Macle fréquemment rencontrée chez le gypse. Le plan d'accolement est (101).

macle de Karlsbad. Macle caractéristique de l'orthose. Les deux individus sont maclés selon le plan (010) et s'interpénètrent partiellement.

macle selon la loi du Brésil. Macle unissant deux individus énantiomorphes, l'un de forme droite, l'autre de forme gauche.

macle selon la loi du Dauphiné. Macle unissant deux individus énantiomorphes qui ont la même forme, soit droite soit gauche.

macle selon la loi du spinelle. Macle que l'on retrouve chez les spinelles et d'autres minéraux. Plan de macle sur (111) et axe de rotation confondu avec l'axe A_3.

macle polysynthétique. Type de macle combinant plusieurs individus (feldspaths, plagioclases). Le plan de macle est (010), les cristaux subissant une rotation de 180° les uns par rapport aux autres.

macrinite. *n.* Voir tableau relatif aux macéraux des lignites et des houilles, en fin de lexique.

macrofissure. *n.* Fissure d'une roche, d'une largeur supérieure à 2 mm.

macroplancton. *n.* Partie du plancton constituée d'organismes visibles à l'œil nu.

mafique. *adj.* Terme mnémotechnique désignant les minéraux ferromagnésiens, sombres, d'une roche ignée; s'oppose à *felsique*.

magma. *n.* Mélange de gaz, de liquide et de cristaux, plus ou moins visqueux et susceptible d'être déplacé. Ce mélange est généralement soumis à une température élevée : 750 et 900 °C pour un magma granitique et 1 100 et 1 250 °C pour un magma basaltique.

magmatiques. *adj.* **(roches).** Roches formées par la cristallisation d'un magma.

magmatisme. *n.* Ensemble des caractères et des propriétés physiques et chimiques des magmas.

magnétomètre. *n.* Instrument destiné à comparer les intensités des champs et des moments magnétiques.

maille élémentaire. C'est le plus petit volume que l'on peut obtenir en fractionnant un cristal sans que celui-ci perde ses propriétés (géométrique, physique, chimique...).

malléabilité. *n.* Propriété que certains minéraux ont d'être allongés, étendus, étirés, sans se rompre. *Ex.* L'or est le plus malléable des métaux.

mallee. *n.* Formation végétale australienne ressemblant à la garrigue et comprenant des eucalyptus et des acacias.

mangane. *n.* Revêtement pédologique de manganèse.

mangrove. *n.* Groupement de végétaux comprenant des arbres à racines aériennes et s'étendant, en zone tropicale, au bord de la mer ou à l'embouchure des fleuves.

manteau. *n.* Zone terrestre, située entre l'écorce et la croûte. Composée de silicates ferromagnésiens (ultrabasiques); séparée de la croûte par la *discontinuité de Moho*.

manteau d'altération. Voir *éluvium*.

marahuite. *n.* Nom local d'un boghead dont le nom dérive de Marahu (province de Bahia au Brésil).

marbres. *n.* Roches métamorphiques composées de grains de calcite non orientés. Elles se forment à partir d'un calcaire pur, ou impur dans le cas de marbres à minéraux (idocrase, grossulaire...).

mariupolites. *n.* Syénites à feldspathoïde, riches en sodium; l'albite y est prédominante.

marnage. *n.* Amplitude des marées ou hauteur séparant une haute mer de la basse mer suivante.

marnes. *n.* Roches mixtes, mélange de calcaire et d'argile, cette dernière formant de 35 à 65 % du total. Suivant la proportion de calcaire et d'argile, on peut distinguer des marnes calcaires et des calcaires marneux.

maskelynite. *n.* Feldspath contenu dans une météorite qui s'est vitrifiée lors d'un choc violent.

mattoral. *n.* Formation végétale américaine ressemblant à la garrigue et contenant des essences comme le boldo et le quillay.

méandre. *n.* Sinuosité régulière décrite par un cours d'eau.

mélanocrate. *adj.* De couleur sombre. Ce terme s'applique à une roche ignée riche en minéraux mafiques, sombres.

mercaptans. *n.* Composés sulfurés organiques ayant un caractère acide et contenant le groupement fonctionnel sulfhydryle (—SH). Ce sont des liquides incolores mais à forte odeur repoussante.

méroplancton. *n.* Partie du plancton constituée d'organismes qui ne sont pas planctoniques durant toute leur vie.

mésosidérite. *n.* Sidérolithe (météorite composée de métal et de silicates) à pyroxène et plagioclase.

mésosphère. *n.* Partie inférieure et très rigide du manteau.

mésostase. *n.* Matériel interstitiel, vitreux ou microcristallin, formé en dernier lieu dans une roche ignée.

métallogénie. *n.* Science qui étudie l'origine des dépôts de minerais.

métamorphiques. *adj.* **(roches).** Roches obtenues par transformation à l'état solide de roches préexistantes dans des conditions physiques définies en dessous de la surface du sol (processus endogènes).

métamorphisme. *n.* Ensemble des phénomènes (températures et pressions) qui donnent lieu à la transformation d'une roche en une autre roche.

métamorphisme cataclastique ou **dynamique.** Métamorphisme où les structures et les textures des roches sont affectées par l'écrasement de tout ou d'une partie des minéraux qui les composent.

métamorphisme de contact. Métamorphisme produit par l'intrusion d'une roche ignée. L'apport de chaleur provoque la transformation des minéraux de la roche encaissante. C'est un métamorphisme essentiellement local.

métamorphisme polyphasé. Se dit de phénomènes métamorphiques qui se sont succédé au cours d'un même cycle orogénique.

métamorphisme régional. Métamorphisme affectant les roches de toute une région lors de leur enfouissement. Les minéraux se transforment alors sous l'effet de la *pression lithostatique* et du *gradient géothermique*.

métasomatique. *adj.* Terme utilisé dans la classification des roches éruptives du point de vue génétique. Il recouvre les roches formées par un processus où les échanges se sont faits au sein d'une matière demeurée à l'état solide.

métasomatisme. *n.* Apparition de nouveaux minéraux, par échange d'éléments chimiques, entre le magma et les roches encaissantes, ou entre les eaux météoriques et les roches qu'elles traversent.

métasomatose. *n.* Substitution d'un minéral à un autre sans changement de volume. *Ex.* Dolomitisation des calcaires.

météorite. *n.* Masse de matière d'origine spatiale tombée sur la Terre, où elle peut déterminer des cratères.

météoroïde. *n.* Corps solide extraterrestre qui pénètre dans l'atmosphère.

méthanier. *n.* Navire spécialement équipé pour le transport du méthane liquéfié, sous pression, dans des réservoirs calorifugés.

mexaédrite. *n.* 1° Sidérite renfermant 4 à 6 % de nickel. 2° Assemblage de gros cristaux de kamacite (forme minérale de l'alliage fer-nickel).

micaschistes. *n.* Roches métamorphiques composées de micas ainsi que de quartz et résultant de la transformation de roches sédimentaires argileuses.

micrinite. *n.* Voir tableau relatif aux macéraux des lignites et des houilles, en fin de lexique.

microclimat. *n.* Caractéristiques climatiques d'un milieu extrêmement limité : zone située sous une pierre, dans une anfractuosité de tronc d'arbre, etc. Souvent confondu avec *climat local*, qui s'applique à une zone plus vaste : espace abrité par une falaise, par un bouquet d'arbres, etc.

microcouche. *n.* Voir *lit*.

microfissure. *n.* Dans une roche, fissure d'une largeur de quelques dixièmes de mm à 2 mm. (*Ex.* Diaclases, plans de schistosité).

microgranites. *n.* Granites de mi-profondeur à grain fin.

microlite. *n.* Petit cristal noyé dans une pâte vitreuse.

micron. *n.* Ancien nom du micromètre, ou millième de millimètre. S'abrégeait μ. Le micromètre s'abrège μm.

micropaléontologie. *n.* Science qui étudie les microfossiles, notamment les Foraminifères mais également les spicules d'Éponges, les Radiolaires, les Ostracodes, les Diatomées ,etc.

microplancton. *n.* Partie du plancton constituée par des organismes microscopiques dont la taille varie de 50 μm à quelques millimètres.

micropli. *n.* Pli de taille inférieure à l'échelle du mètre.

microsonde électronique de Castaing. Appareil qui permet une analyse très ponctuelle. Un faisceau d'électrons est focalisé sur une petite surface polie (μ^2), d'où l'émission de rayons X, et la possibilité d'informations quantitatives et qualitatives sur la composition chimique de la surface.

microstylolite. *n.* Surface de dissolution irrégulière provoquée par tassement et cimentation de roches sédimentaires, notamment dans le grès quartzeux.

microtectonique. *n.* Étude des structures tectoniques d'échelle métrique.

migmatisation. *n.* Modification de la composition chimique d'une roche métamorphique avec apparition de nouveaux minéraux. Ce phénomène peut aller jusqu'à la granitisation.

migmatisé. *adj.* Transformé en migmatite, dans le domaine d'infrastructure.

migmatites. *n.* 1° Gneiss dans lesquels les lits de minéraux dessinent des sinuosités et des volutes, comme si la matière était passée par un état liquide. 2° Roches résultant du métamorphisme de roches préexistantes avec apport de matière.

migration d'hydrocarbures. Déplacement d'hydrocarbures dans les formations géologiques sous l'effet de forces naturelles telles que les différences de densité entre les roches et les fluides, la masse du terrain, la pression hydraulique.

migration du milieu. Déplacement des conditions écologiques d'une région donnée. *Ex.* Le refroidissement de la mer au Miocène a provoqué le déplacement des Strombes (Gastéropodes) vers des régions plus chaudes, au sud.

migration primaire. Migration des hydrocarbures de la roche mère à la roche réservoir.

milliéquivalent. *n.* En hydrogéologie, nombre obtenu en divisant le poids d'un élément en solution dans l'eau par son équivalent chimique.

mine. *n.* Excavation souterraine ou à ciel ouvert, d'où l'on extrait des minerais ou du charbon.

minerai. *n.* Minéral ou association minérale susceptibles d'être exploités pour l'obtention d'un ou plusieurs métaux.

minerai primaire. Premier minéral (ou association minérale) constituant un gisement avant toute altération.

minéral. *n.* Substance solide, inorganique, de composition chimique homogène et définie, qui apparaît dans la croûte terrestre.

minéral secondaire. Minéral formé à partir d'éléments chimiques provenant d'autres minéraux.

minéralisation. *n.* Transformation en substance minérale, ou imprégnation par des matières minérales. Ce terme s'applique principalement à la fossilisation, mais s'étend à la production d'agrégats et de veines de minéraux par un processus secondaire quelconque, distinct de leur production par sédimentation directe ou solidification d'un magma.

minéralogie. *n.* Science qui étudie les minéraux.

minéraux accessoires. Minéraux que l'on rencontre en faibles quantités dans une roche ou une association minérale; ils apportent de précieux renseignements sur l'origine du gisement.

minettes. *n.* Microsyénites lamprophyriques à biotite.

miogéosynclinal. *n.* Dans un géosynclinal, sillon externe bordant l'avant-pays.

miroir de faille. Partie visible du plan de faille pouvant avoir un aspect poli dû au frottement provoqué par le mouvement des deux blocs l'un contre l'autre.

missourites. *n.* Roches intrusives ultrabasiques à feldspathoïdes, aux teneurs en pseudoleucite inférieures aux teneurs en pyroxène.

moder. *n.* Humus des sols lessivés acides, formé en aérobiose.

molasse. *n.* Dépôts terrigènes, marins ou continentaux, constitués par une alternance de grès et de pélites avec de puissantes intercalations de conglomérats.

monadnock. *n.* Relief résiduel en climat tempéré.

monchiquites. *n.* Lamprophyres caractérisées par la présence d'analcime dans la mésostase.

monomicte. *n.* Structure bréchique formée de fragments de composition analogue.

monzonites. *n.* Roches intrusives formées par du plagioclase, de l'orthose et des minéraux ferromagnésiens (augite).

mor. *n.* Humus brut des forêts à sol très acide, formé en aérobiose.

moraine. *n.* Formation résultant d'une accumulation de matériaux de taille diverse, transportés et déposés par un glacier.

morphogenèse. *n.* Création et évolution des formes du relief.

moule. *n.* 1° *Moule interne.* Remplissage minéral laissé dans un sédiment par la dissolution d'une coquille et reproduisant plus ou moins fidèlement l'aspect de la face interne du squelette. 2° *Moule externe.* Empreinte laissée dans le sédiment par un fossile.

mouvement eustatique. Changement uniforme du niveau de la mer, à l'échelle du globe, provoquant selon les cas une émersion ou une submersion des marges continentales.

mugéarites. *n.* Basaltes à plagioclase acide ou neutre, oligoclase ou andésine.

mull. *n.* Humus doux des sols bien structurés et aérés, formé en aérobiose.

mylonites. *n.* Roches du métamorphisme dynamique où prédomine une masse cristalline à grain très fin, constituée par les minéraux originels de la roche très finement broyés.

N

nagelflüh. *n. (all.)* Nom donné aux galets apparaissant parfois en saillie, comme des têtes de clous, dans les molasses conglomératiques.

nakhlite. *n.* Achondrite (météorite pierreuse) riche en calcium, formée de diopside (75 %), d'olivine (15 %) et d'une petite quantité de plagioclase.

nanomètre. *n.* Unité de mesure de longueur correspondant au milliardième de mètre (= 10^{-9} m), donc au millième de micron.

nanoplancton. *n.* Plancton constitué par des organismes dont la taille est inférieure à 50 μ.

naphta. *n.* Distillat pétrolier composé en majeure partie d'hydrocarbures aliphatiques et distillant entre 93 °C et 116 °C.

naphte. *n.* Nom parfois encore donné, mais improprement, au pétrole brut.

naphtènes ou **cyclanes** ou **cyclo-alcanes.** *n.* Hydrocarbures de la série des alcanes, formés de cycles comportant théoriquement de 3 à 8 atomes de carbone (*ex.* cyclopentane-cyclohexane).

natif. *adj.* **(élément).** Non combiné. *Ex.* Parmi les métaux natifs : l'or, le cuivre, le fer.

nebkhas. *n.* Petites dunes littorales, liées à une alimentation abondante en sable et à un vent de force moyenne.

nébuleuse primitive. Amas de matières cosmiques à partir duquel se seraient formées les planètes.

nébulites. *n.* Roches métamorphiques du groupe des migmatites, où les niveaux de gneiss rubannés ou les blocs d'agmatites se distinguent mal de la masse granitoïde prédominante.

necton. *n.* Ensemble des organismes de taille moyenne ou grande vivant au sein de l'eau, comme les Poissons.

néoformation. *n.* Formation nouvelle, secondaire. *Ex.* Minéral de néoformation, formé ultérieurement par métasomatose ou métamorphisme.

néolithique. *adj.* Caractérise la période préhistorique la plus récente de l'« Age de la pierre ».

néosoma. *n.* Partie granitoïde d'une migmatite.

néotectonique. *n.* Étude des déformations actuelles des corps géologiques.

néritique. *adj.* 1° **(zone).** Zone marine qui s'étend depuis le niveau de basse mer jusqu'à une profondeur d'environ 200 m; la zone néritique correspond approximativement au plateau continental. 2° **(dépôt).** Qualifie les sédiments déposés sur la plate-forme continentale, souvent composés de coquilles de Mollusques, entières ou fragmentées.

Neumann (lignes en bandes de). Structure lamellaire qui apparaît dans les météorites métalliques et qui a pour origine une déformation mécanique intense.

neutrons. *n.* Particules pesantes mais non chargées, présentes dans le noyau des atomes en nombre défini. Deux atomes ne différant que par le nombre de leurs neutrons sont dits *isotopes* d'un même élément.

n'hangellite. *n.* Charbon sapropélique (variété de la coorongite) qui se dépose au bord du lac N'Hangella (Afrique de l'Est).

niveau piézométrique. Altitude du niveau d'eau rencontré lors du forage d'un aquifère.

niveau structural. Portion de l'écorce terrestre où les roches montrent un type déterminé de déformation (fonction de la contrainte, température et lithologie) :
— niveau structural supérieur : domaine des cisaillements.
— niveau structural moyen : domaine de la flexion.
— niveau structural inférieur : domaine de l'aplatissement.

nodosité. *n.* 1° Renflement déterminé dans la racine de diverses plantes, en particulier les Légumineuses, par la présence de Bactéries symbiotiques. C'est au niveau des nodosités qu'est fixé l'azote atmosphérique. 2° En général, tout renflement d'une structure quelconque.

nodulaire. *adj.* Qualifie une concrétion de forme nettement arrondie.

nodule. *n.* Petite masse formée par concrétion dans un lit sédimentaire ou dans une autre formation pétrographique.

norites. *n.* Variété de gabbros dans laquelle le pyroxène est orthorhombique.

norme. *n.* ou **composition normative.** Expression de la composition chimique d'une roche ignée en terme de « minéraux normatifs », qui peuvent ou non exister réellement dans la croûte terrestre.

notation de Miller. C'est une représentation par 3 nombres (ou indices) *h, k* et *l,* caractérisant l'orientation, et non la position, des familles de plans parallèles. *Ex.* Une famille de plan indexée (205) se lit deux, zéro, cinq, et non deux cent cinq.

nouveaux grès rouges. Formation détritique du Permien.

nuée ardente. Suspension dans l'air de particules incandescentes et partiellement fondues se déplaçant à grande vitesse, sous forme d'une masse gazeuse, près du sol. Une nuée se produit lors de l'éruption d'un volcan à lave acide. *Ex.* La montagne Pelée à la Martinique, à propos de laquelle on a utilisé pour la première fois ce terme en 1902.

O

obsidiennes. *n.* Roches effusives partiellement ou totalement vitreuses, de couleur noire ou brune. Elles ont généralement une composition chimique analogue à celle des granites et des porphyres quartzifères.

octaèdre. *n.* Forme simple appartenant au système cubique et composée de 8 triangles équilatéraux.

octaédrite. *n.* Sidérite (météorite métallique) renfermant de 6 à 14 % de nickel; les octaédrites présentent une structure lamellaire caractéristique (figures de Widmanstätten).

off-shore. *n.* Plage sous-marine toujours immergée.

oléfines. *n.* Série d'hydrocarbures non saturés.

olénikite. *n.* Nom local d'un boghead, nommé d'après la rivière Léna (U.R.S.S.).

oléoduc. *n.* Conduit destiné au transport du pétrole brut ou d'un produit pétrolier liquide.

olistolithes. *n.* Paquets de roches isolés pouvant être de matériel et d'âge différents des séries sédimentaires tranquilles dans lesquelles ils sont intercalés.

oolithe. *n.* Petit grain sphérique formé de couches concentriques successives, entrant, en totalité ou en partie, dans la composition d'une roche calcaire, parfois ferrugineuse.

opaque. *adj.* En minéralogie descriptive, on considère comme opaque un minéral qui ne laisse pas passer les rayonnements électromagnétiques situés dans le domaine de la lumière visible.

ophiolites. *n.* Roches ignées basiques ou ultrabasiques, de couleur verte, comprenant des roches de texture grenue et microlithique.

ophitique. *adj.* Voir *structure ophitique.*

organogène. *adj.* D'origine organique. S'applique en particulier à une roche sédimentaire essentiellement constituée de débris solides d'organismes,

accumulés dans le milieu même où vivaient ces organismes.

orogenèse. *n.* Ensemble des différentes phases qui contribuent à la formation d'une chaîne de montagnes.

orthogneiss. *n.* Gneiss provenant du métamorphisme de roches ignées tels les granites, rhyolites...

orthoschistes. *n.* Schistes provenant du métamorphisme d'une roche ignée.

orthotype. *n.* Unité dans la hiérarchie de la classification des sols.

oued. *n.* En région aride, cours d'eau temporaire, le plus souvent desséché, mais pouvant rouler de grandes quantités d'eau et de boue lors d'une crue violente.

oxydo-réduction. *n.* Processus chimique au cours duquel un corps est *réduit* par fixation d'électrons, arrachage d'oxygène ou fixation d'hydrogène, tandis qu'un autre est *oxydé* par arrachage d'électrons ou d'hydrogène ou fixation d'oxygène.

P - Q

pain de sucre. Piton de granite, à versants convexes très raides; ce relief particulier est dû à des processus d'érosion en pays tropical.

paléobotanique. *n.* Étude des plantes fossiles.

paléoécologie. *n.* Étude des relations ayant existé dans le passé entre les êtres vivants et leur milieu.

paléogéographie. *n.* Science qui étudie la répartition géographique des faunes et des flores fossiles et, en conséquence, l'extension des anciennes mers.

paléolithique. *n.* Caractérise la première période de l'ère quaternaire, durant laquelle s'élaborèrent les premières civilisations humaines utilisant des outils de pierre taillée.

paléomagnétisme. *n.* Magnétisme d'une roche, acquis sous l'action du champ magnétique terrestre dans un âge géologique plus ancien.

paléontologie. *n.* Science des êtres vivants, ayant existé dans le passé, fondée sur l'étude des fossiles.

paléosol. *n.* ou **sol fossile.** Sol fossilisé par les sédiments lacustres, marins ou continentaux qui le recouvrent.

paléosoma. *n.* Terme métamorphique d'une migmatite en voie d'assimilation par le terme granitoïde.

paléoxylologie. *n.* Science faisant partie de la paléobotanique et qui étudie l'appareil conducteur des plantes vasculaires disparues, notamment les bois fossiles.

paléozoologie. *n.* Étude des animaux ayant vécu dans le passé.

paléthnologie. *n.* Terme parfois utilisé comme synonyme de Préhistoire mais controversé par certains auteurs.

palingénétiques. *adj.* **(caractères).** Caractères ancestraux que l'on rencontre tout au long d'une lignée évolutive.

pallasite. *n.* Sidérolithe (météorite composée de métal et de silicates) dont le silicate est de l'olivine.

palustre. *adj.* Qui se rapporte aux marais. *Ex.* Terrains, milieux palustres.

palynologie. *n.* Science qui étudie les pollens et les spores conservés dans les couches géologiques.

pangaea ou **pangée.** *n.* Continent primitif unique, dont la fragmentation en deux parties a donné la Laurasia, continent de l'hémisphère Nord, et le Gondwana, continent de l'hémisphère Sud.

panspermie. *n.* Théorie ancienne selon laquelle la vie est partout présente dans l'univers, sous forme de germes capables de se multiplier lorsque les conditions deviennent favorables.

pantallérites. *n.* Rhyolites hyperalcalines contenant des cristaux d'anorthose, de pyroxène et d'amphibole sodique, avec peu de quartz.

paraffines. *n.* Série d'hydrocarbures, de formule générale C_2H_{2n+2}.

paragenèse. *n.* Association de minéraux caractérisant le milieu chimique et les conditions physiques d'un gisement à un moment donné.

paragneiss. *n.* Gneiss provenant du métamorphisme d'une roche sédimentaire (grès feldspathique, pélite, grauwacke).

paralique. *adj.* Voir *bassin parallique.*

paramètre cristallin. Distance constante séparant deux points homologues du réseau cristallin; on a ainsi un des vecteurs définissant la *maille élémentaire.*

paramos. *n.* Prairies d'altitude, humides et froides, d'Afrique orientale, d'Australie...

paraschistes. *n.* Schistes provenant du métamorphisme d'une roche sédimentaire.

paroxysmale. *adj.* Caractérise la phase de plus haut degré d'intensité.

pédiment. *n.* Glacis rocheux recouvert d'une mince couche d'alluvions.

pédion. *n.* En minéralogie, forme composée d'une seule face, aucun élément de symétrie ne permettant de la répéter.

pédiplaine. *n.* Plaine de grande étendue et dont la pente est presque nulle quelle que soit la direction.

pédogenèse. *n.* Formation et évolution des sols en place.

pédologie. *n.* Science qui étudie les sols.

pegmatites. *n.* Roches ignées, quartzo-feldspathiques, à grain grossier.

pélagique. *adj.* Relatif à la haute mer.

pélagos. *n.* Ensemble des organismes marins vivant en pleine eau et constitué par le *plancton,* qui se laisse entraîner par les courants, et le *necton* qui possède sa motilité propre.

pélites. *n.* Roches argileuses très fines.

pendage. *n.* Angle que fait la ligne de plus grande pente d'une couche avec l'horizontale.

pénéplaine. *n.* Région aplanie par l'érosion; le relief a été réduit à une surface sans grandes dénivellations.

pénéplanation. *n.* Obtention d'une surface plane par érosion du relief.

pépite. *n.* Minéral sans forme particulière et que l'on trouve sans gangue.

percolation. *n.* Traversée du sol, de haut en bas, par les eaux de pluie et les substances qu'elles entraînent.

péridotites. *n.* Roches intrusives constituées essentiellement par de l'olivine.

période. *n.* 1° Division d'une ère correspondant à un système stratigraphique. 2° Temps au bout duquel la masse d'un corps radio-actif a diminué de moitié.

permafrost. *n.* Dans les régions froides du globe, sol gelé en permanence.

perméabilité. *n.* Aptitude d'une roche à laisser circuler les fluides.

perméabilité (coefficient de). Coefficient caractéristique d'un milieu poreux, défini comme le volume d'eau gravitaire traversant, par unité de temps, l'unité de section orthogonale à la direction de l'écoulement.

perméabilité intrinsèque. Pour une roche réservoir, c'est une constante indépendante des caractéristiques du fluide et liée à la forme des grains, au diamètre efficace, à la surface spécifique et à la porosité efficace.

perthites. *n.* Intercroissances de feldspath potassique et sodique : feldspath potassique avec des ségrégations d'albite.

pétrochimie. *n.* Chimie des dérivés du pétrole.

pétrogenèse. *n.* Origine et mode de formation des roches; ce terme est utilisé presque exclusivement dans le cas des roches ignées.

pétrographie. *n.* Étude uniquement descriptive des roches. Voir *pétrologie.*

pétrole. *n.* Liquide huileux inflammable (dont la couleur varie du jaune clair au noir), qui se compose d'hydrocarbures très divers et que l'on trouve dans les couches sédimentaires de l'écorce terrestre.

pétroligène. *adj.* Susceptible de favoriser la formation de pétrole.

pétrologie. *n.* Science qui étudie les roches d'un point de vue descriptif (composition et texture minérales) et dynamique (origine, mode de formation). Ce terme est utilisé surtout pour les roches ignées.

pH. Indice exprimant la concentration de l'ion hydrogène dans une solution à l'aide d'une échelle logarithmique. La solution est neutre à pH 7, acide en dessous, et basique de pH 7 à pH 14.

phase tectonique. Ensemble des mouvements ayant donné lieu à des structures de nature et de directions différentes des structures antérieures.

phénocristal. *n.* Grand cristal formé avant l'éruption d'une lave à la surface. Dans la roche, les phénocristaux se distinguent bien du matériel interstitiel vitreux et microcristallin.

phlobaphinite. *n.* Voir tableau relatif aux macéraux des lignites et des houilles, en fin de lexique.

phonolites. *n.* Trachytes très riches en éléments alcalins; équivalents effusifs des syénites néphéliniques. Elles ont la propriété d'être sonores quand on les frappe, d'où leur nom.

phosphorescence. *n.* Phénomène de fluorescence qui persiste plus ou moins longtemps après que l'action physique qui en est la cause ait cessé.

phosphorite. *n.* Phosphate de calcium.

photosynthèse. *n.* Processus par lequel les végétaux chlorophylliens fixent le carbone du CO^2 de l'air à l'aide de l'énergie lumineuse.

phréatique. *adj.* **(eau).** Eau souterraine qui alimente les sources.

phtanites. *n.* Radiolarites ayant subi un métamorphisme léger, et dont la schistosité est fruste.

phyllades. *n.* Roches métamorphiques, ressemblant aux argiloschistes mais à grain moins fin, et auxquelles les paillettes de séricite et de chlorite donnent un aspect huileux.

phyllites. *n.* Roches compactes, schisteuses et lustrées (aux minéraux moins bien définis que dans un micaschiste), le minéral caractéristique qui contrôle la foliation étant la séricite (mica).

phylliteux. *adj.* Caractérise la structure en couche de certains silicates. *Ex.* Argiles, mica...

physiographie. *n.* Étude du relief du sol, incluse dans la géographie physique.

phytophage. *adj.* Qualifie un organisme se nourrissant de végétaux.

phytoplancton. *n.* Plancton comportant des végétaux microscopiques.

picrites. *n.* Roches assez semblables aux péridotites

mais renfermant, en plus de l'olivine, un pyroxène calcique en faible teneur.

piège. *n.* Volume rocheux fermé dans le haut par une quelconque barrière de perméabilité pouvant donner naissance à un gisement d'hydrocarbures. *Ex.* Pièges stratigraphiques, structuraux, etc.

piézoélectrique. *adj.* Caractérise le phénomène électrique déclenché dans certains cristaux lorsqu'ils sont soumis à des contraintes.

piézomètre. *n.* 1° Instrument pour mesurer la compressibilité des liquides. 2° En hydrologie, niveau d'eau dans un ouvrage d'observation.

pila. *n.* Colonie d'Algues, de la famille des Botryococcacées, qui entrent dans la composition de certains charbons permiens (Autun).

pillow lavas, *angl.* ou **laves en oreiller.** Amas de laves épanchées sous la mer, de forme arrondie. Chaque « oreiller » se caractérise par une structure interne rayonnante et une enveloppe externe vitreuse.

pinacoïde. *n.* Forme composée par 2 plans parallèles. Une face répétée par un centre de symétrie ou un axe d'ordre 2 donne une nouvelle face parallèle à la première.

pingo. *n.* Butte circulaire, d'échelle métrique, contenant une grosse lentille de glace due à une circulation d'eau entre un permafrost et le sol superficiel gelé.

pipe. *n.* Cheminée cylindrique, verticale, faite de péridotite micacée ou kimberlite; les diamants peuvent se trouver en inclusion dans de telles cheminées. Ces cheminées sont généralement localisées au niveau des zones cratoniques telle l'Afrique.

pipe-line. *n.* Désigne l'ensemble des lignes de conduits dans lesquels sont acheminés le pétrole brut ou un produit pétrolier liquide.

pipkrake. *n.* Amas fibreux formé par la glace sous les petites pierres du sol, en climat froid.

pisolit(h)e. *n.* Granule de la taille d'un pois, constitué par des couches concentriques de calcaire inorganique.

pit crater. Voir *puy.*

placer. *n.* Gîte sédimentaire détritique, le plus souvent alluvial.

plan axial. (d'un pli). Plan passant par les points de courbure maximale des différentes couches affectées par le pli.

plan de Bénioff. Zone de friction le long de laquelle a lieu la subduction.

plan de macle. Plan suivant lequel deux individus s'accolent.

planète. *n.* Corps céleste, sans luminescence propre, tournant autour du Soleil.

plaque. *n.* En tectonique, portion actuellement stable de la lithosphère, entourée de zones non stables.

plaque mince. Voir *lame mince.*

plateau continental. Plateau, d'une profondeur inférieure à 200 m, situé entre le littoral et le talus continental abrupt qui mène aux fosses abyssales.

plate-forme. *n.* Surface rocheuse, quelle que soit sa taille; en particulier, surface susceptible de recevoir ou ayant reçu une couverture de sédiments.

platine de Fedoroff. Appareil qui se fixe sur la platine d'un microscope et qui permet d'observer une lame mince dans toutes les directions.

playa. *n.* En pays tropical, plaine d'épandage vers laquelle débouche un glacis.

pli. *n.* Structure obtenue par déformation continue, souple (plastique), et affectant les couches.

pli asymétrique. Pli dont les deux flancs ne présentent pas la même inclinaison de part et d'autre du plan axial.

pli coffré. Pli à flancs verticaux.

pli couché. Pli à plan axial et flancs sensiblement horizontaux.

pli déjeté ou **déversé.** Pli à plan axial incliné.

pli-diapir. Structure résultant d'une pression locale et forte sur une série comportant un niveau salifère, et d'où le sel s'échappe le long d'une faille de chevauchement ou perce un anticlinal.

pli disharmonique. Pli dont les strates sont déformées d'une manière désordonnée, avec changement de rayon de courbure; ce phénomène est dû à la différence de compétence des roches.

pli droit. Pli à plan axial vertical.

pli en éventail. Pli à flancs divergeant dans deux directions opposées.

pli-faille. Pli renversé ou couché, dont le flanc inverse s'étire et s'amincit au point de se rompre. Une surface de cisaillement prend naissance, sur laquelle des terrains anciens glissent et chevauchent des terrains plus récents.

pli isoclinal. Pli aux flancs parallèles.

pli isopaque ou **parallèle** ou **concentrique.** Pli à épaisseur constante dans chaque strate. Toutes les strates sont parallèles.

pli renversé. Pli dont l'un des flancs a dépassé la verticale.

pli retourné. Pli à tête plongeante.

pli semblable. Pli dont les strates ne conservent pas la même épaisseur et subissent un étirement se traduisant par un aminciseement des flancs du pli et un épaississement dans la zone de la charnière.

pli symétrique. Pli dont les deux flancs présentent la même inclinaison de part et d'autre du plan axial.

plis en échelons. Plis à axes parallèles et qui se relaient les uns les autres.

plis d'entraînement ou **drag-folds.** Plis formés dans une couche incompétente qui sépare deux autres couches compétentes; causés par le glissement de ces dernières l'une sur l'autre, ils sont toujours déversés vers la charnière du pli majeur.

plinienne. *adj.* **(éruption).** Type de volcanisme où l'éruption, avec nuées de cendres, succède à une longue période de calme pendant laquelle s'effectue une différenciation magmatique.

plissement. *n.* Déformation de roches stratifiées par courbure.

plumasites. *n.* Roches filoniennes composées d'oligoclase et de corindon.

pluton. *n.* Corps rocheux plutonique; ce terme comprend tous les corps intrusifs de roches ignées.

plutoniques. *adj.* **(roches).** Roches ignées, à grain grossier, formées en profondeur. Ce terme comprend les granites, les syénites, les diorites et les gabbros.

pneumatolyse. *n.* Stade de la cristallisation d'un magma où la vapeur d'eau se condense pour former les solutions hydrothermales.

podzol. *n.* Sol très acide, pauvre en éléments nutritifs parce que l'acidité empêche la libération des éléments minéraux (minéralisation) de l'humus par les micro-organismes et que l'eau entraine l'humus en profondeur. Il en résulte une couche (« horizon ») cendrée superficielle (sol cendré), tandis que des couches plus riches se forment inférieurement. Surtout occupé par des landes; cependant, des bouleaux et certains chênes peuvent y pousser.

polycondensation. *n.* Réactions entre des molécules identiques ou différentes avec élimination des résidus de la réaction.

polymérie. *n.* Se dit d'un corps dont la masse moléculaire est multiple de celle d'un autre corps.

polymétamorphisme. *n.* Se dit de processus métamorphiques affectant des roches déjà métamorphisées au cours d'un cycle orogénique antérieur.

polymorphisme. *n.* Voir *allotropie.*

ponces. *n.* Roches volcaniques poreuses à structure vacuolaire rendues très légères par les bulles de gaz emprisonnées lors du refroidissement.

ponor. *n.* Gouffre, en relief karstique.

pont continental. Liaison terrestre postulée par les biogéographes afin d'expliquer les analogies, anciennes ou actuelles, entre les faunes de deux continents distincts. *Ex.* Le détroit de Behring a joué plusieurs fois un rôle de pont; à cet emplacement, en effet, une bande de terre a pu relier l'Asie à l'Amérique du Nord.

porcelanites. *n.* Roches argileuses détritiques, enrichies en silice néogène; ces roches sont blanches, fines et compactes.

porigélinite. *n.* Voir tableau relatif aux macéraux des lignites et des houilles, en fin de lexique.

porosité. *n.* Rapport du volume des vides au volume total de la roche ou du sédiment exprimé en pour cent.

porosité close. Se dit de la porosité d'une roche où les pores ne communiquent pas entre eux.

porosité efficace. Pour un milieu poreux, se dit du rapport du volume d'eau gravitaire au volume total, rapport exprimé en pourcentage.

porosité de fissure. Dans une roche compacte, se dit de la porosité due à la fracturation.

porosité d'interstice. Caractéristique d'une roche dont les pores sont interconnectés.

porosité ouverte. Porosité d'une roche où la circulation de l'eau est possible.

porosité utile. Type de porosité où les pores contenus dans une roche communiquent entre eux.

porphyres. *n.* Roches éruptives volcaniques présentant des phénocristaux inclus dans une matrice finement grenue.

porphyrines. *n.* Pigments constitués par quatre molécules de pyrrol réunies en circuit fermé.

porphyry-copper. *n.* Nom récent, d'origine anglo-saxonne, servant à définir d'importants gisements de cuivre, formés par des minerais de faible teneur facilement exploitables.

poussières météoriques. Corps provenant de l'espace extra-terrestre et tombant à la surface de la Terre; leur dimension est inférieure à 1/10e de mm.

prasinites. *n.* Schistes verts contenant de la chlorite, de l'actinote et de l'albite, accessoirement de la magnétite et de l'apatite, mais pas de quartz.

précipitations. *n.* Chutes d'eau provenant de l'atmosphère et se présentant sous forme liquide (pluie, rosée, brouillard) ou solide (neige, grêle).

pression hydrostatique. Pression exercée par les fluides qui imprègnent les roches.

pression lithostatique. En un point donné, pression due à la masse des roches et sédiments sus-jacents.

projection stéréographique. Procédé purement géométrique qui permet de situer sur un plan (canevas de Wulff) l'orientation de toutes les faces d'un cristal.

propylitisation. *n.* Transformation des minéraux basiques originels des basaltes en chlorite, épidote, calcite, etc., sous l'influence de fumerolles.

prospection pétrolière. Utilisation des techniques d'exploration du sol et du sous-sol (cartographie,

géologie, géophysique) en vue de découvrir du pétrole.

proton. *n.* Particule pesante et chargée positivement, présente dans le noyau des atomes. Il y a autant de protons dans le noyau que d'électrons à la périphérie.

protopétrole. *n.* Liquide ayant l'apparence d'un pétrole lourd mais formé surtout de produits riches en oxygène et azote, dans les sédiments actuels.

province pétrographique. Région à l'intérieur de laquelle les roches ignées d'une période d'activité donnée ont des particularités communes, impliquant un certain degré de parenté.

pseudocubique. *adj.* Se dit de tout minéral dont les formes rappellent celles du système cubique mais qui appartient en réalité à un autre système (généralement quadratique).

pseudomorphose. *n.* Remplacement d'un minéral préexistant par un minéral nouveau qui respecte la forme extérieure du premier.

pseudophlobaphinite. *n.* Voir tableau relatif aux macéraux des lignites et des houilles, en fin de lexique.

ptygmatique. *adj.* **(pli).** Petit pli formé par la fusion dans des roches telles que gneiss et migmatites.

puy. *n.* ou **pit crater.** *(angl.)* Cratère à parois presque verticales, au sommet d'un cône très aplati, caractérisant les volcans en bouclier.

pycnomètre. *n.* Petit flacon en verre utilisé lors de la détermination par pesées de la densité d'un minéral.

pyroclastique. *adj.* Se dit du matériel éjecté sous forme de liquide ou de particules solides, lors d'une éruption volcanique.

pyrofusinite. *n.* Voir tableau relatif aux macéraux des lignites et des houilles, en fin de lexique.

pyrolite. *n.* Matériel primitif hypothétique non appauvri, qui se distingue des péridotites courantes par ses éléments mineurs et en traces. Ce matériel constitue le *manteau*.

pyrolyse. *n.* Décomposition chimique sous l'action de la seule chaleur.

pyromagma. *n.* Magma sursaturé en gaz et chargé de bulles qui tendent à se séparer du liquide.

pyroschiste. *n.* Ancien nom des schistes bitumineux.

pyrrole. *n.* Composé hétérocyclique azoté (produit de la distillation sèche des matières animales).

Q-R

quanta de lumière. Quantité déterminée d'énergie, dont la notion dérive de la théorie selon laquelle la lumière est un phénomène discontinu.

quartzites. *n.* Roches massives, constituées de quartz en agrégats, issues du métamorphisme des grès.

rabattement. *n.* En hydrogéologie, paramètre égal à la différence entre la surface piézométrique au repos et le niveau dynamique dans le puits ou dans un ouvrage d'observation.

radio-actif. *adj.* Qui émet des rayonnements particulaires ou électromagnétiques susceptibles, notamment, d'impressionner la plaque photographique. Le phénomène correspond à la rupture des noyaux des atomes du corps simple ou d'un ou plusieurs corps simples d'un composé chimique.

radiolarites. *n.* Roches siliceuses organogènes, constituées en grande partie de tests de Radiolaires (Protozoaires).

raffinage. *n.* Stade englobant toutes les opérations dont le but est de fabriquer les différents produits obtenus à partir du pétrole brut.

rang. *n.* Se dit du degré d'évolution d'un charbon.

ranker. *n.* Sol peu évolué, à teneur élevée en matière organique.

rayons cosmiques. Ensemble des radiations de grande énergie, très pénétrantes, qui touchent la Terre en provenance de toutes les directions de l'espace avec une égale intensité.

rayons X. Radiations électromagnétiques placées entre les UV et les rayons γ. En radiocristallographie on utilise des rayons mous ($0{,}5 < \lambda < 2{,}5$ Å) alors qu'en radiologie on utilise des rayons durs ($\lambda < 0{,}1$ Å).

rebroussement (d'une couche). Inversion du pendage d'une couche au contact d'une faille, d'un dôme de sel, etc...

récif-barrière. Récif corallien éloigné de la côte. *Ex.* La Grande Barrière du nord de l'Australie.

récif corallien. Formation calcaire édifiée par des coraux dans des mers tropicales chaudes, bien oxygénées et éclairées.

récif frangeant. Récif corallien accolé à la côte.

récifal. *adj.* Qui concerne les récifs coralliens. *Ex.* Sédimentation récifale.

réfractaire. *adj.* Qualifie une substance minérale ou métallique résistant aussi bien chimiquement que physiquement à de hautes températures.

réfraction de la schistosité. Changement de la schistosité d'une couche tendre (oblique à la stratification) à une couche rigide (proche de la perpendiculaire).

réfractomètre. *n.* Appareil qui permet de mesurer directement l'indice de réfraction d'un liquide.

reg. Sol de déflation : pavement désertique, parfois cimenté par une croûte solide.

régime permanent. Régime d'écoulement d'une eau souterraine vers un puits ; se caractérise par un équilibre entre le débit sortant du puits et le débit entrant dans l'aquifère.

régime transitoire. Régime d'écoulement d'une eau souterraine vers un puits lorsqu'il y a déséquilibre entre le débit à la sortie du puits et le débit à l'entrée.

régolite ou **régolithe.** *n.* Manteau de débris constitués par du matériel rocheux non consolidé et plus ou moins altéré.

régosol. *n.* Sol minéral brut, meuble.

régression. *n.* Recul de la mer qui abandonne les aires continentales.

reinschia. *n.* Colonie d'Algues, de la famille des Volvocacées, qui entrent dans la constitution de certains charbons permiens (Australie).

rejet de faille. Distance séparant, après le jeu de la faille, deux points d'une même couche, initialement voisins.

relique. *n.* Se dit d'un minéral ou d'une structure appartenant à une roche (sédimentaire ou ignée) conservée dans une roche métamorphique.

rendzine. *n.* Sol calcimagnésique typique, de couleur foncée, contenant de nombreux cailloux dans tout le profil.

reptation ou **creeping.** *n.* Descente lente et progressive de débris sur un versant.

réseau cristallin. Disposition régulière et périodique des ions ou des atomes à l'intérieur d'un cristal. En cristallographie, on considère 14 réseaux différents (réseaux de Bravais).

réseau karstique. Réseau constitué de cavités, conduits et chenaux souterrains, formé par dissolution de roches calcaires.

réserve permanente. En hydrogéologie, réserve en eau d'un aquifère à nappe libre ; elle est limitée par la surface piézométrique la plus basse.

réserve régulatrice. En hydrogéologie, se dit de la quantité maximale d'eau gravitaire contenue dans la zone de fluctuation comprise entre les surfaces piézométriques les plus basses et les plus hautes.

réserve totale. En hydrogéologie, réserve en eau d'un aquifère à nappe libre, réserve délimitée par la surface piézométrique moyenne.

résidu sec. Se dit, lors de l'analyse chimique d'une eau, du total des sels dissous, exprimé en mg/l.

résiduelles. *adj.* **(roches).** Roches exogènes se formant par évolution sur place d'une roche plus ancienne.

résine. *n.* Substance complexe, insoluble dans l'eau, soluble dans l'alcool, presque solide à la température ordinaire, translucide, non entraînable par la vapeur d'eau (au contraire des huiles essentielles), et contenant des alcools aromatiques ou triterpéniques et des acides aromatiques, terpéniques et aliphatiques.

résinite. *n.* Voir tableau relatif aux macéraux des lignites et des houilles, en fin de lexique.

résistivité. *n.* Résistance électrique, à une température donnée, d'un cube de roche dont les arêtes sont égales à l'unité.

résurgence. *n.* Réapparition à l'air libre d'une rivière souterraine.

rétro-charriage. Mouvement tardif et de sens opposé au sens de mise en place de la nappe.

rhexistasie. *n.* Phase d'érosion accélérée.

rhomboèdre. *n.* Forme assimilable à un cube déformé dont les six faces sont des losanges (rhombes).

rhyo-dacites. *n.* Roches effusives contenant autant de sanidine que d'oligoclase.

rhyolites. *n.* Roches volcaniques acides, souvent de structure porphyrique ; équivalents effusifs des granites.

ria ou **aber.** *n.* Vallée fluviale envahie par la mer. *Ex.* Les abers bretons.

ride. *n.* Zone plus ou moins étroite où se développent des séries sédimentaires généralement peu épaisses, avec parfois même absence complète de sédimentation.

rill. *n.* Chenal sinueux qui coule à la surface d'un glacis sans s'y encaisser.

rimaye. *n.* Vide qui sépare un glacier des parois du cirque.

ripple-marks. *n.* Ondulations parallèles, à profil asymétrique, produites sur un fond sableux ou vaseux par des courants ou par le vent.

riss. *n.* Période de glaciation européenne, située vers — 200 000 ans, qui correspond à la civilisation moustérienne des premiers Néandertaliens.

roche magasin ou **roche réservoir.** *n.* Couche de roches imprégnées d'hydrocarbures et constituant la réserve d'un gisement.

roche mère. 1° Roche non altérée, placée à proximité immédiate du sol. 2° Formation géologique dans laquelle se sont formés les hydrocarbures.

ruissellement. *n.* Écoulement des eaux sur les pentes des terrains.

S

sables. *n.* Roches détritiques formées de grains et de fragments résultant de la fragmentation d'autres roches.

saltation. *n.* Transport des matériaux par bonds successifs, sous l'action du vent ou d'un cours d'eau.

sancyites. *n.* Trachy-andésites à structure nettement porphyrique; les phénocristaux sont constitués de sanidine et d'andésine; la mésostase contient du verre et des microlites de feldspath, de biotite, d'amphibole et un peu d'augite.

sanidinites. *n.* Roches formées lors d'un métamorphisme de contact intense, et contenant de la sanidine, feldspath sodi-potassique.

saprolites ou **saprolithes**. *n.* Roches altérées par les actions climatiques et dont la structure s'est dégradée.

sapropèle. *n.* Produit non consolidé de la décomposition d'Algues sur le fond des lacs et de la mer, en milieu neutre ou faiblement alcalin. Ces vases organiques sont à l'origine de la formation de pétrole.

saturation (coefficient de). Rapport du volume d'eau contenu dans un milieu poreux à la porosité de ce dernier.

saturé. *adj.* **(minéral).** Minéral capable de cristalliser à partir d'un magma, en présence d'un excès de silice (*ex.* feldspaths, pyroxènes, micas...); les roches ignées composées essentiellement de ces minéraux sont dites *saturées*.

saumâtre. *adj.* Qualifie une eau de salinité intermédiaire entre l'eau douce et l'eau de mer. *Ex.* Les eaux des zones deltaïques sont saumâtres.

saussurite. *n.* Mélange microcristallin d'albite, de zoïsite, d'épidote et de calcite.

saussuritisation. *n.* Transformation d'un plagioclase en saussurite, par suite d'un faible métamorphisme.

savane. *n.* Formation végétale tropicale comportant de hautes herbes (80 cm au moins) et, parmi elles, des végétaux plus bas et des arbres disséminés, isolés ou en bosquets.

scalénoèdre. *n.* Forme simple composée de douze triangles scalènes (trois côtés inégaux) : six inférieurs, six supérieurs.

schistes. *n.* Roches métamorphiques à texture feuilletée.

schistes bitumineux. Schistes renfermant de petites proportions d'hydrocarbures de densité variée mais généralement lourds.

schistes noirs. Roches cristallines, micacées, de couleur sombre, qui se débitent en feuillets. Les schistes noirs à Graptolites (Ordovicien à Dévonien) sont caractéristiques d'un dépôt en milieu réducteur.

schistes tachetés. Schistes résultant d'un métamorphisme peu intense et dans lesquels des concentrations de minéraux (graphite, andalousite, cordiérite) forment de petites taches sombres.

schistosité. *n.* Aptitude des roches à se casser suivant des plans parallèles, en feuillets plus ou moins minces et de composition homogène. C'est un phénomène mécanique issu d'une déformation par aplatissement.

schistosité de flux. Débit de la roche en feuillets très minces.

schistosité de fracture. Débit de la roche en feuillets grossiers, millimétriques à centimétriques.

schistosité locale. Schistosité se développant le long d'accidents tectoniques.

schistosité par microplis-failles. Alternances régulières de zones microplissées et de zones fracturées affectant les flancs des microplis.

schistosité régionale. Schistosité qui se développe dans des régions très étendues et qui accompagne parfois le plissement.

schorre. *n.* Partie haute d'un marais maritime, exceptionnellement submergée; le schorre est formé de vase desséchée et porte une végétation de plantes halophiles (adaptées à une certaine salinité).

sclérotinite. *n.* Voir tableau relatif aux macéraux des lignites et des houilles, en fin de lexique.

scories. *n.* Fragments bulleux d'une lave refroidie à l'air pendant l'éruption.

sea-mount. *n.* Volcan sous-marin à flancs peu inclinés, n'atteignant généralement pas la surface. Le *guyot* en est une variété particulière, de forme tabulaire.

sebkha. *n.* En pays aride, lagune temporaire.

sédiment. *n.* Dépôt naturel formé au fond de l'eau, sous l'action de la gravité. Selon leur origine, on distingue des sédiments continentaux, marins, lacustres, fluviatiles...

sédimentaires. *adj.* **(roches).** Roches formées à partir de dépôts de sédiments suivant des modalités différentes.

sédimentation. *n.* Processus géologique aboutissant à la formation d'une roche sédimentaire. Il s'effectue en milieu continental et surtout en milieu marin.

sédimentologie. *n.* Science qui étudie les sédiments, leurs caractères et leur mode de formation.

séisme. *n.* Tremblement de Terre; c'est un mouvement naturel du sol, dû au relâchement soudain d'énergie élastique en un point de la Terre; il est de courte durée.

séismique ou **sismique.** *adj.* Qui se rapporte aux tremblements de Terre, qu'ils soient naturels ou artificiels.

sel gemme ou **halite.** Sel naturel (NaCl) tel qu'on le trouve dans des mines. C'est un minéral des roches sédimentaires de type évaporite.

semi-fusinite. *n.* Voir tableau relatif aux macéraux des lignites et des houilles, en fin de lexique.

semi-perméable. *adj.* Se dit d'une roche qui possède une faible perméabilité ne permettant pas le captage de grandes quantités d'eau mais favorisant les intercommunications entre les nappes d'eau souterraine.

septarium. *n.* Concrétion présentant des craquelures radiées remplies de calcite ou d'un autre minéral.

séricitoschistes. *n.* Phyllades ou schistes à séricite, laquelle confère un aspect argenté aux surfaces de schistosité.

série continue. Ensemble des minéraux dont la composition chimique et les propriétés physiques sont intermédiaires entre celles de deux minéraux types qui constituent les termes extrêmes de la série.

série stratigraphique. Division élémentaire d'un système, reconnaissable sur une grande étendue et définie essentiellement par des critères paléontologiques.

serpentinisation. *n.* Altération métasomatique de minéraux ferromagnésiens (olivine en particulier) en serpentine, silicate de magnésium hydraté.

serpentinites. *n.* Roches constituées presque uniquement par des minéraux du groupe des serpentines. Ce sont des roches vert sombre à noires, à texture schisteuse mal marquée.

sesqui. Préfixe signifiant « une fois et demie ». *Ex.* Fe_2O_3 est un sesquioxyde.

shales. *n.* Roches argileuses litées; le litage est dû principalement à la sédimentation (s'il provient d'un métamorphisme, on parle de *schistes*).

shonkinites. *n.* Syénites mélanocrates riches en néphéline et en orthose.

sial. *n.* Masse constituée par des roches claires, granitiques et sédimentaires, riches en silice et en aluminium, dans tous les degrés de métamorphisme et de déformation. Accompagné du sima, plus profond, il forme la croûte terrestre.

sialique. *adj.* Terme mnémotechnique qui désigne l'une des deux principales classes de minéraux composant la norme d'une roche ignée; cette classe comprend principalement le quartz, les feldspaths et les feldspathoïdes. S'oppose à *fémique*.

sidérite. *n.* Météorite constituée par un alliage de fer et de nickel.

sidérolithe ou **lithosidérite.** *n.* Météorite constituée, en parts égales, d'un amas de fer-nickel et de silicates basiques lourds, tels l'olivine ou le pyroxène.

sidérophile. *adj.* Caractérise un élément qui a des affinités avec le fer.

sidérophyre. *n.* Sidérolithe (météorite composée de métal et de silicate) à bronzite et tridymite; ce type est représenté par la seule météorite de Steinbach trouvée en 1724.

sidérosphère. *n.* Noyau terrestre composé de fer et de nickel, par analogie avec les météorites métalliques (sidérites).

sif. *n.* Dune en forme de S.

silex. *n.* Roches siliceuses apparaissant dans la craie sous forme de nodules.

silexite. *n.* Association de calcaires et de silice, diagénisée en milieu marin.

sill. *n.* Intrusion ignée, concordante avec la stratification, résultant de l'injection d'un magma le long de surfaces de discontinuité des roches encaissantes.

sillon. *n.* Zone allongée, plus ou moins étroite, où se développent des séries sédimentaires marines généralement très épaisses.

silteux. *adj.* Se dit d'un matériel d'origine détritique, meuble, dont la dimension des grains varie entre celle du sable et celle de l'argile.

silts ou **argiles des limons.** Argiles granuleuses; la taille moyenne des grains est cependant assez importante.

sima. *n.* Ensemble de roches assez basiques, riches en silice et magnésium, situées en dessous du sial; constitue avec le sial la croûte terrestre.

sismique-réflexion. Méthode de prospection utilisant la réflexion d'ondes se propageant dans des terrains à la suite d'une explosion.

skarns. *n.* Roches métamorphiques formées au contact d'un calcaire et d'une roche magmatique intrusive.

slikke. *n.* Partie basse d'un marais maritime, située dans la zone de balancement des marées, et dépourvue de végétation.

slumping. *n.* Figure de glissement que l'on observe dans certaines roches sédimentaires.

smectites. *n.* Argiles gonflantes.

socle. *n.* Chaîne plissée transformée en plateforme par l'érosion; peut être alors affectée par des déformations à grande échelle et des cassures, mais non par des plissements, car elle est trop rigide.

sol. *n.* Formation correspondant à un état d'équilibre dynamique dans l'évolution de la partie superficielle de la croûte terrestre, sous l'influence des conditions climatiques et biologiques qui s'exercent sur la roche mère.

sol anthropique. Sol dont l'évolution est influencée par l'action de l'homme (mise en culture notamment).

sols battants. L'eau de pluie qui arrive au sol provoque, par simple énergie cinétique, une destruction mécanique de la structure du sol. Les argiles ainsi que les limons sont séparés des matériaux grossiers et bouchent les pores; l'horizon de surface se glace; on dit que les sols sont *battants*.

sol brun. Sol brunifié caractérisé par un lessivage faible, sinon nul, des colloïdes minéraux.

sol brunifié. Sol évolué à *mull;* se développe principalement en régions tempérées humides.

sol eutrophe. Sol brun dans lequel le lessivage des colloïdes minéraux est faible ou nul à cause de la présence de calcaire.

sol ferrallitique. Caractéristique des régions chaudes et humides de la zone intertropicale.

sol fossile. Voir *paléosol.*

sol humifère lithocalcique. Sol riche en matière organique et dans lequel l'horizon organique a un pH légèrement acide en surface.

sol hydromorphe. Résulte d'une pédogenèse dominée par l'effet d'un excès d'eau en raison de l'engorgement temporaire ou permanent d'une partie ou de la totalité du profil.

sol isohumique. Caractérisé par une incorporation profonde et régulière de matière organique très évoluée le long du profil du sol.

sol lessivé. Sol brunifié caractérisé par une décomposition rapide de l'humus, en principe de type *mull,* mais qui passe au type *moder* dans les sols plus évolués.

sol lithomorphe. Vertisol à drainage externe nul et où la roche mère est particulièrement riche en Ca^{++} et Mg^{++}.

sol minéral brut. Sol caractérisé par une absence presque totale d'évolution.

sol à permagel. Sol qui présente en profondeur des niveaux gelés toute l'année mais qui en été dégèle en surface, de quelques centimètres à plus de 2 m. *Ex.* Sol des toundras.

sol podzolisé. Sol résultant d'une pédogenèse de sol très acide à faible activité biologique. Caractéristique des climats froids et humides.

sol à sesquioxydes de fer. Sol résultant d'une pédogenèse de climat chaud, moyennement humide, méditerranéen ou tropical semi-humide. Les sols *fersiallitiques* et *ferrugineux tropicaux* appartiennent à cette catégorie.

sol sodique ou **halomorphe.** Caractérisé par une évolution dominée soit par la présence de sels solubles soit par la présence de sodium et/ou de magnésium.

sol topomorphe. Vertisol à drainage externe nul, caractéristique des régions chaudes relativement humides, à saison sèche marquée, et où la roche mère est suffisamment saturée en Ca^{++} et Mg^{++}.

sol xérique. Sol peu évolué, pauvre en matière organique (de 1 à 2 %).

solfatare. *n.* Terrain volcanique qui dégage des émanations de vapeur et de gaz sulfureux chaud.

solifluxion. *n.* Déplacement en masse du sol superficiel gorgé d'eau, sous l'action du gel et du dégel.

solod. *n.* Sol sodique à structure dégradée, à horizon A_2 blanchi, fortement acidifié en surface, mais à horizon B très compact, neutre à alcalin.

solonetz. *n.* Sol sodique à structure dégradée, sans sels solubles et à horizon B très compact.

solontchak. *n.* Sol sodique à structure non dégradée, montrant à sa surface, en saisons sèches, des efflorescences ou des encroûtements salins, d'épaisseur variable.

soulèvement tectonique. Mouvement de bas en haut de l'écorce terrestre, avec élévation d'ensemble de toute une région, s'accompagnant de failles et de plissements.

spath d'Islande. Calcite particulièrement limpide qui se débite en rhomboèdres et présente le phénomène de double réfraction.

spectrophotométrie. *n.* Mesure de l'absorption plus ou moins intense des radiations de diverses longueurs d'ondes par une substance (le spectre obtenu aide à l'identification de la substance.)

spessartites. *n.* Lamprophyres caractérisées par la présence de hornblende dans la mésostase et de biotite sous forme de phénocristaux.

sphénoèdre. *n.* Tétraèdre dont les quatre faces sont des triangles isocèles.

sphérolitique. *adj.* Terme utilisé en pétrologie pour qualifier des concrétions minérales sphériques, dues à des dépôts concentriques successifs à partir d'un noyau.

spilites. *n.* Roches effusives voisines des basaltes, riches en minéraux ferromagnésiens, avec de l'albite comme plagioclase.

spongolit(h)es. *n.* Roches siliceuses organogènes, constituées en grande partie de spicules d'Éponges cimentés par de l'opale ou de la calcédoine.

sporinite. *n.* Voir tableau relatif aux macéraux des lignites et des houilles, en fin de lexique.

stabilité. *n.* En minéralogie, état correspondant à un domaine de températures et de pressions pour lequel le minéral existe sous une forme donnée.

stalactite. *n.* Concrétion calcaire qui se forme à la voûte d'une grotte. *Par ext.* Ce mot désigne aussi la forme de minéraux rappelant ces concrétions.

steppe. *n.* Zone à végétation peu dense (« ouverte ») où dominent les herbes (Graminées) vivaces se desséchant l'été, mêlées à des plantes annuelles ou des buissons. A la différence de la savane, il n'y pousse pas d'arbres. C'est la *prairie* d'Amérique du Nord, la *pampa* d'Argentine, la *puszta* de Hongrie. Dans les zones chaudes, à longue saison sèche, la steppe forme une région intermédiaire entre la savane et le désert, comme au sud du Sahara; on y trouve alors des arbres, au fur et à mesure qu'on approche de la savane.

stéroïdes. *n.* Hydrocarbures aromatiques comportant un cycle aromatique et trois cycles saturés.

Stokes (loi de). Loi exprimant la vitesse de sédimentation des particules dans un milieu fluide, en fonction de leur rayon.

strate ou **lit.** *n.* Épaisseur de sédiment déposé dans des conditions de sédimentation constantes.

stratification. *n.* Disposition en strates. Terme utilisé généralement pour les roches sédimentaires.

stratification entrecroisée ou **stratification oblique,** ou **cross-bedding.** Structure formée par les courants et que l'on observe dans certains dépôts sédimentaires; caractérisée par la présence de lits disposés obliquement par rapport aux surfaces inférieures et supérieures de la strate.

stratigraphie. *n.* Étude descriptive des strates, de leur lithologie, de leur contenu fossilifère, de leur succession, de leurs relations mutuelles et de leur classification chronologique.

strato-volcan. *n.* Volcan constitué par la superposition de strates pyroclastiques et de coulées de laves.

« stress ». *n.* Voir *contrainte.*

stromatolit(h)e. *n.* Structure laminaire, ondulée ou concentrique, formée par le dépôt en couches régulières de carbonate de calcium sur des colonies d'Algues.

structure. *n.* 1° En cristallographie, arrangement périodique que présentent les atomes les uns par rapport aux autres. 2° Pour une roche, elle est définie par les relations des différents minéraux entre eux, observés au microscope.

structure cristalloblastique. Structure d'une roche métamorphique dont les minéraux sont formés à partir de noyaux de cristallisation.

structure diablastique. Se dit d'une roche métamorphique où les minéraux s'interpénètrent irrégulièrement.

structure fibro-radiée. Agrégat de minéraux orientés suivant des fibres qui rayonnent à partir d'un même point.

structure fluidale. Disposition des particules minérales dans une roche ignée, causée par un mouvement, ou flux, dans la masse à la fin de la cristallisation.

structure granoblastique. Structure d'une roche métamorphique dont les cristaux se sont formés par croissance simultanée et sans orientation préférentielle.

structure graphique. Dans les roches plutoniques, résulte de la croissance simultanée de prismes allongés de quartz et d'orthose conférant à la roche l'aspect d'une plaque sculptée de caractères cunéiformes.

structure grenue. Caractérise des roches plutoniques formées de cristaux de différents minéraux de taille presque égale. Caractéristique des roches granitiques et assimilées, elle prend également le nom de *structure granitique.*

structure hélicitique. Structure d'une roche métamorphique, caractérisée par la présence dans certains cristaux d'inclusions microcristallines; ces dernières sont disposées en spirale par suite de la rotation du cristal hôte au cours de sa formation.

structure holocristalline. Caractérise des roches ignées composées uniquement de cristaux et qui proviennent du refroidissement très lent d'une lave.

structure kéliphytique. Structure d'une roche métamorphique où un minéral se développe à la périphérie des cristaux d'une autre espèce minéralogique.

structure lépidoblastique. Caractérise une roche métamorphique constituée de cristaux lamellaires, disposés parallèlement les uns aux autres.

structure myrmékitique. Structure de roches éruptives qui s'observe parfois au contact entre des cristaux d'orthose et de plagioclase dans le cas des roches granitiques riches en éléments minéralisants.

structure nématoblastique. Caractérise des roches métamorphiques qui contiennent des minéraux de forme prismatique, allongés parallèlement les uns aux autres.

structure ophitique. Caractérise des roches ignées (dolérites surtout) où les espaces polygonaux délimités par des lattes de feldspaths sont occupés uniquement par un pyroxène (augite).

structure perthitique. Dans certaines roches ignées plutoniques, présence de petites faccules de feldspath sodique dans le feldspath potassique et inversement.

structure pétrosiliceuse. Structure que l'on observe dans les porphyres quartzifères les plus anciens : le verre de la mésostase a recristallisé très lentement, après la consolidation de la roche, sous forme de très petites aiguilles de quartz et de feldspath.

structure poecilitique. Dans certaines roches ignées intrusives, résulte de l'inclusion de cristaux, en général lamellaires, dans une plage monocristalline d'un autre minéral.

structure pœciloblastique. Caractérise des roches métamorphiques où certains cristaux (porphyroblastes) contiennent de petites plages d'un ou plusieurs autres minéraux.

structure porphyrique. Caractérise certaines

roches ignées effusives formées de phénocristaux baignant dans une mésostase vitreuse ou microcristalline.

structure porphyroblastique. Structure métamorphique caractérisée par la présence de quelques cristaux (de même espèce minéralogique) dont les dimensions sont supérieures à celles des autres cristaux de la roche.

structure rapakivique. Dans les roches plutoniques, caractérisée par la présence de phénocristaux arrondis constitués d'un noyau d'orthose entouré de plagioclase.

structure vitreuse. Dans les roches ignées effusives, caractérise la présence de verre volcanique en plus grande quantité que la structure holocristalline.

structurologie ou **microtectonique.** *n.* Étude des structures de petite taille.

stylolit(h)e. *n.* Structure sédimentaire résultant de la dissolution partielle de roches déjà lithifiées, le long de surfaces généralement planes.

subduction. *n.* Enfoncement de la lithosphère océanique dans l'asténosphère.

sublimation. *n.* Passage direct d'un corps de l'état solide à l'état gazeux, sans passer par l'état liquide.

subsidence. *n.* Mouvement d'enfoncement progressif du fond, dû en partie au poids des sédiments ainsi qu'à des mouvements actifs d'affaissement de l'écorce terrestre, moins épaisse à cet endroit.

substratum. *n.* Matériel solide sur lequel repose une couche géologique et dont il constitue la base.

succin. *n.* Résine végétale fossile, riche en acide succinique ($COOH—CH_2—CH_2—COOH$). *Ex.* L'ambre.

sulfosels. *n.* Sous-classe des sulfures qui regroupe les sulfures doubles.

sulfures. *n.* En minéralogie, classe qui regroupe les minéraux dont la composition correspond à la combinaison non oxydée des métaux et métalloïdes, avec des éléments tels que S, As, Sb, Bi, Sc et Te.

supralittoral. *adj.* Situé à la limite supérieure du niveau de la haute mer, et rarement atteint par les flots.

surface piézométrique. 1° Surface déterminée par l'ensemble des différents niveaux piézométriques d'un aquifère. 2° Ensemble des points d'un aquifère où la pression est égale à 1 atmosphère.

surface spécifique. Surface totale des grains d'une roche rapportée à l'unité de volume et s'exprimant en m^2/m^3.

surimposition. *n.* Processus caractéristique de l'évolution de certains cours d'eau importants, qui s'enfoncent sur place dans des terrains dont la structure varie. Appelée également épigénie.

surrection. *n.* Mouvement vertical positif.

swash. *n.* Ondes de translation formées par la transformation des vagues lorsqu'elles parviennent à la côte.

syénites. *n.* Roches intrusives formées essentiellement de feldspath et d'amphibole sodique.

synchrone. *adj.* Qui se produit dans le même temps. *Ex.* Dépôts synchrones.

synclinal. *n.* Synforme dont le cœur est formé par la couche la plus récente.

synclinorium. *n.* Pli synclinal majeur, déterminé par une succession de plis anticlinaux et synclinaux.

synéclise. *n.* Dépression synclinale à grand rayon de courbure.

synforme. *n.* Pli convexe vers le bas.

système aphytal. Système océanique dépourvu de végétaux chlorophylliens par suite du manque de lumière.

système cristallin. Ensemble dans lequel sont regroupées toutes les classes de symétrie qui ont le même réseau. Il existe 7 systèmes cristallins différents.

système cubique. Système cristallin des minéraux dont la maille est formée par 6 faces carrées (cube).

système hexagonal. Système cristallin des minéraux dont la maille est un polyèdre formé par un prisme à 4 faces rectangulaires terminé par 2 faces losangiques ayant un angle de 120°.

système monoclinique. Système cristallin des minéraux dont la maille est un polyèdre formé par un prisme oblique terminé par 2 faces rectangles.

système orthorhombique. Système cristallin des minéraux dont la maille est un polyèdre formé par un prisme à 4 faces rectangulaires terminé par 2 faces rectangles.

système phytal. Système océanique recevant assez de lumière pour permettre le développement des Algues.

système quadratique. Système cristallin des minéraux dont la maille est un polyèdre formé par un prisme à 4 faces rectangulaires terminé par 2 faces carrées.

système rhomboédrique. Cas particulier du système hexagonal des minéraux dont la maille peut être un polyèdre formé par 6 faces losangiques égales (rhomboèdre).

système stratigraphique. Ensemble des terrains appartenant à une période. *Ex.* Système cambrien.

système triclinique. Système cristallin des minéraux dont la maille est un polyèdre dont les 6 faces sont des parallélipipèdes.

T

tabulaire. *adj.* Se dit d'un relief en forme de table dû à la disposition horizontale des couches constitutives.

taénite. *n.* Forme minéralogique de l'alliage fer-nickel, à composition variable (de 20 à 65 % de Ni) ; sa structure est cubique à faces centrées.

taïga. *n.* Forêt de Conifères des pays froids. Se trouve en Amérique et en Eurasie, au sud de la toundra et au nord des forêts de Feuillus.

talcschistes. *n.* Schistes de couleur vert clair ou blanc, composés principalement de talc ainsi que de minéraux accessoires : magnétite, carbonate de magnésium, parfois antigorite et trémolite.

talus continental. Pente inclinée de 5° vers la pleine mer, située à la limite du plateau continental.

talweg. *n.* Ligne de points bas, située à l'intersection des deux versants d'une vallée.

tanin ou **tannin.** *n.* Substance contenue dans certains organes végétaux (écorces, noix...).

tanker. *n.* Navire affecté au transport du pétrole brut ou des produits pétroliers liquides.

tasmanite. *n.* Charbon sapropélique de couleur brun-rouge, contenant des spores et des Algues microscopiques appelées *Tasmanites.*

taux de renouvellement. Rapport du volume d'eau introduit dans un aquifère, et qui y transite durant une période déterminée, à la réserve totale.

tchernozem. *n.* Voir *chernozen.*

tchernozium. *n.* Voir *chernozen.*

tectites. *n.* Fragments vitrifiés en forme de gouttes et qui ont traversé l'atmosphère à l'état fondu ; il pourrait s'agir de roches terrestres fondues, projetées dans la stratosphère lors de l'impact d'une météorite, puis retombées.

tectonique. *n.* Branche de la géologie étudiant les dislocations et déformations subies par les roches de l'écorce terrestre lors d'une phase postérieure à leur formation.

tectogenèse. *n.* Genèse des structures.

télinite. *n.* Voir tableau relatif aux macéraux des lignites et des houilles, en fin de lexique.

télocollinite. *n.* Voir tableau relatif aux macéraux des lignites et des houilles, en fin de lexique.

teneur. *n.* Quantité généralement mesurée en pourcentage du volume ou, parfois, du poids.

tephras. *n.* Produits volcaniques pyroclastiques.

téphrites. *n.* Basaltes alcalins contenant un feldspathoïde.

terminaison périclinale (d'un pli). Amortissement du pli par augmentation de son rayon de courbure (terminaison périanticlinale ou périsynclinale).

terpènes. *n.* Produits de formule générale $(C_5H_8)_n$, qui se rencontrent dans les essences naturelles et que l'on extrait de diverses parties des végétaux.

terra rossa. Sol rouge, riche en hydroxydes de fer insolubles accumulés en dépôt résiduel sur des calcaires qui contiennent des traces de ces composés et qui sont soumis à l'altération ; fréquent dans les pays méditerranéens.

terrasse fluviatile. Fond de vallée entaillé par une rivière.

terres rares. Désigne des minéraux qui contiennent des éléments géochimiquement rares (numéros atomiques 57 à 71).

terrigène. *adj.* Qui provient de la terre, du continent. Se dit des dépôts côtiers apportés à la mer par les fleuves et les eaux de ruissellement.

terril. *n.* Amas de déblais stériles extraits d'une mine.

teschénites. *n.* Variété de gabbros alcalins contenant de l'analcime (zéolite sodique).

test de dureté. Pour comparer la dureté des minéraux, méthode qui consiste à rayer le plus tendre avec le plus dur ; actuellement on utilise 10 minéraux-repères *(échelle de Mohs).*

téthys. *n.* Ancien océan séparant deux anciens continents : le *Gondwana* et la *Laurasia.*

textinite. *n.* Voir tableau relatif aux macéraux des lignites et des houilles, en fin de lexique.

texto-ulminite. *n.* Voir tableau relatif aux macéraux des lignites et des houilles, en fin de lexique.

texture. *n.* Ensemble des propriétés physiques qui résultent directement de la taille et de la disposition des divers constituants d'un matériau (roche, sol...).

texture amygdalaire. Issue de la structure vacuolaire par remplissage secondaire des vacuoles par des minéraux déposés par des eaux vadoses ou magmatiques.

texture bulleuse ou **vacuolaire.** Caractérise les roches ignées présentant des vacuoles engendrées par le départ des éléments volatils du magma.

texture cataclastique. Texture d'une roche dont les minéraux sont écrasés.

texture foliée. Dans certaines roches métamorphiques, présence de bandes parallèles alternativement claires et obscures.

texture linéaire. Dans certaines roches métamorphiques, allongement dans la même direction de la majorité des cristaux.

texture migmatitique. Dans certaines roches métamorphiques (migmatites), interpénétration d'un matériel granitoïde et d'un matériel métamorphique sous des formes diverses.

texture myarolitique. Caractérise certaines roches intrusives présentant des cavités partiellement remplies par des minéraux ayant cristallisé lors des dernières phases de consolidation du magma.

texture œillée. Dans certaines roches métamorphiques (gneiss), présence d'agrégats polycristallins ou de porphyroblastes lenticulaires (« œil »).

texture orbiculaire. Dans des roches ignées intrusives, se caractérise par la présence d'orbicules constitués de couches concentriques de minéraux variés.

texture rhéomorphique. Dans certaines roches métamorphiques formées à haute température, déformation en plis serrés et irréguliers de filonnets de cristaux.

texture tabulaire ou **planaire.** Caractérise des roches ignées présentant une stratification assez grossière.

texture tachetée. Dans certaines roches métamorphiques, se caractérise par la présence de plages de couleurs différentes correspondant aux premières réactions métamorphiques induites dans la roche.

texture schisteuse. Dans certaines roches métamorphiques, se caractérise par la présence de plans de schistosité.

théralites. *n.* Roches intrusives basiques à néphéline, plagioclase (labradorite) et divers minéraux ferromagnésiens.

thermocline. *n.* Zone de transition thermique d'un milieu aquatique.

thermoluminescence. *n.* Luminescence provoquée par un chauffage à une température inférieure à celle de l'incandescence.

thiophènes. *n.* Groupe d'hydrocarbures comportant du soufre dans le cycle.

tillites. *n.* Conglomérats glaciaires formés au cours de la consolidation d'anciennes moraines par une matrice argileuse ou arkosique de colorations variées.

titre (ou degré) hydrotimétrique total (TH). Exprime la dureté d'une eau. L'unité correspond à 10 mg de $CaCO_3$ par litre.

tombolo. *n.* Cordon littoral unissant une île à la côte. *Ex.* Quiberon.

tonalites. *n.* Diorites quartziques contenant, outre du plagioclase, de la hornblende, de la biotite et de faibles quantités de quartz et de feldspath potassique.

tonstein ou **gore.** Dépôt volcanique éolien, bien visible dans certains lits charbonneux, formé de tufs ignimbritiques. Leur extension latérale permet leur utilisation dans les corrélations stratigraphiques.

torbanite. *n.* Charbon sapropélique de couleur brun-noir renfermant à la fois des Botryococcacées et des spores; exploité à Torban Hill, en Écosse, d'où son nom.

toundra. *n.* Végétation croissant au nord de la limite des forêts (taïga), et correspondant, dans la zonation de la végétation en latitude, à celle de l'étage alpin de la zonation en altitude.

tourbe. *n.* Humus, formé en anaérobiose, à structure fibreuse due à une transformation biochimique faible. Utilisé comme combustible.

trace. *n.* Poudre de couleur caractéristique laissée par un minéral lorsqu'on l'utilise pour rayer une porcelaine dépolie.

trace (élément en). Élément présent dans une roche en quantité si faible qu'elle peut être détectée mais difficilement mesurée.

traceur. *n.* Substance chimique marquant une molécule et l'accompagnant dans son déplacement, d'où une possibilité de repérage spécifique.

trachytes. *n.* Roches ignées généralement de structure porphyrique, composées essentiellement de feldspaths alcalins et de pyroxènes et d'amphiboles sodiques; équivalents effusifs des syénites.

transgression. *n.* Mouvement de la mer qui recouvre les aires continentales avoisinantes ou les bords des géosynclinaux.

transgression téthysienne. Avancée de la Téthys sur les terres avoisinantes; la Téthys était une mer très étendue, qui occupait l'emplacement de l'actuelle Méditerranée depuis l'ère primaire jusqu'à la fin du Miocène.

transmissivité. *n.* Paramètre égal au produit du coefficient de perméabilité par la puissance aquifère. Il permet de représenter sur des cartes les zones de productivité des gisements d'eau souterraine.

transmutation. *n.* Changement d'une substance en une autre substance plus intéressante économiquement.

trapézoèdre. *n.* Volume constitué par 24 faces trapézoïdales.

trapp. *n.* Relief volcanique caractéristique, qui se présente en marches d'escalier, sous la forme d'un empilement horizontal de couches de laves séparées par des niveaux intermédiaires argileux.

travertins. *n.* Calcaires vacuolaires formés aux émergences de sources calcaires; ils renferment souvent des débris végétaux bien conservés.

triboluminescence. *n.* Luminescence d'un minéral obtenue par frictions énergiques.

triterpénoïdes. *n.* Hydrocarbures comportant un cycle aromatique et quatre cycles saturés.

troctolites. *n.* Variété de gabbros riches en olivine, présentant un aspect tacheté.

troncature. *n.* Remplacement d'une arête ou d'un angle par une facette, soit par clivage soit par polissage.

tubes capillaires. En géologie, tubes formés par l'ensemble des pores d'une roche, reliés entre eux, et d'un diamètre compris entre 0,5 et 1 mm.

tubes subcapillaires. En géologie, tubes formés par l'ensemble des pores d'une roche, reliés entre eux, et d'un diamètre compris entre 0,001 et 0,5 mm.

tuf. *n.* Roche tendre et poreuse, qui peut être soit *calcaire* (déposée à l'émergence d'eaux souterraines riches en carbonates), soit d'origine *volcanique* (formée de cendres ultérieurement consolidées).

tuffite. *n.* Matériel pyroclastique déposé en milieu aqueux et souvent mélangé à des sédiments.

U-V

ulminite. *n.* Voir tableau relatif aux macéraux des lignites et des houilles, en fin de lexique.

ultrabasiques. *adj.* **(roches)** Ensemble dans lequel sont regroupées les roches sans minéraux blancs. Ce sont les péridotites (contenant de l'olivine), les pyroxénolites (contenant des pyroxènes) et les hornblendites (contenant des hornblendes).

ultraviolette. *adj.* **(lumière).** Rayonnement électromagnétique situé à la limite du spectre visible. Elle sert souvent à caractériser certains minéraux luminescents pour ses longueurs d'onde.

undations. *n.* Bombements primitifs.

uniformitarisme. *n.* Principe énoncé par Ch. Lyell en 1830 et selon lequel on assimile le mode de déroulement des phénomènes géologiques actuels à celui du passé.

uniformité (coefficient d'). Coefficient égal, pour une courbe granulométrique donnée, au rapport des diamètres caractéristiques correspondant aux fréquences en poids 10 % et 60 %.

upwelling. *n.* Remontée des eaux marines sous-jacentes plus froides et plus riches en matières nutritives par suite du déplacement vers le large des eaux superficielles.

uréilite. *n.* Achondrite (météorite pierreuse) assez pauvre en calcium et dont les silicates ferromagnésiens sont de l'olivine et de la pigeonite (clinopyroxène).

urtites. *n.* Roches intrusives ultrabasiques, presque uniquement constituées par de la néphéline.

varves. *n.* Couches d'un dépôt glacio-lacustre, dont chacune comprend un lit de sédiments grossiers déposés en été et un lit de sédiments fins, argileux, déposés en hiver. Chaque varve équivaut à une année; il est ainsi possible d'établir une chronologie des périodes glaciaires.

versant. *n.* Flanc d'une colline, d'une montagne.

vertisol. *n.* Sol d'argiles noires à grises, pauvre en matière organique : 2 à 8 %. *Ex.* Vertisols tropicaux.

vieux grès rouges. Formations de grès continentaux déposés au cours du Dévonien. On les connaît particulièrement en Grande-Bretagne et dans certaines régions d'Europe.

viscosité. *n.* État d'un fluide dont les molécules sont freinées dans leur mouvement par leurs interactions ou leurs associations plus ou moins intenses. Détermine notamment la fluidité des laves, et leur vitesse d'épanchement.

vitesse de filtration. Vitesse à laquelle un volume d'eau déterminé traverse une colonne de roches perméables.

vitesse de terrain. Vitesse de l'eau s'écoulant, déterminée sur le terrain par l'emploi de traceurs.

vitrain. *n.* Matière vitreuse brillante, à fissuration orthogonale, qui compose les lits de certains charbons.

vitreux. *adj.* Qualifie l'état homogène de la matière solide, caractérisé par une structure non cristallisée.

vitrinite. *n.* Substance constituée de particules gélifiées. Voir *huminite-vitrinite.*

vitrodétrinite. *n.* Voir tableau relatif aux macéraux des lignites et des houilles, en fin de lexique.

vogésites. *n.* Lamprophyres à amphibole.

volcaniques. *adj.* **(roches).** Roches formées par le refroidissement des laves fondues épanchées en surface.

volcanisme. *n.* Ensemble de manifestations géologiques et géographiques par lesquelles les couches profondes (magma) entrent en contact avec la surface terrestre.

volcanologie. *n.* Science qui étudie les volcans.

W-X

Widmanstätten (figures de). Structure lamellaire caractéristique des octaédrites (météorites métalliques renfermant de 6 à 14 % de nickel), en forme de bandes croisées dans plusieurs directions.

xénoblaste. *adj.* Caractérise un minéral qui, dans une couche métamorphique, ne possède pas de faces cristallines régulières et qui a cristallisé dans un espace existant entre des cristaux.

xénolite. *n.* Inclusion d'une roche de nature étrangère dans une roche ignée, l'inclusion se présentant sous forme d'une masse, d'un bloc ou de fragments.

xénomorphe. *adj.* **(minéral).** Qualifie un minéral qui, se formant en dernier lors du refroidissement d'une roche ignée, ne peut acquérir sa propre forme cristalline.

Y

yardang. *n.* En pays aride, cannelures ciselées dans des argiles tendres par le vent chargé de débris.

Z

zonal. *adj.* Désigne, en géomorphologie, tout phénomène ou processus qui se répartit à la surface du globe approximativement selon la latitude.

zone aphotique. Zone des eaux marines où règne l'obscurité totale.

zone d'appel. En hydrogéologie, partie de l'aire d'influence d'un aquifère où l'eau aboutit au puits.

zone euphotique. Zone superficielle des eaux marines bien éclairée et au niveau de laquelle la photosynthèse est possible.

zone de fluctuation. En hydrogéologie, se dit de l'amplitude comprise entre les niveaux les plus bas et les plus élevés de la surface piézométrique.

zone oligophotique. Zone moyenne des eaux marines où l'éclairement, bien qu'insuffisant pour les végétaux, existe encore.

zone oxydée. Dans un gisement, niveau où l'on retrouve des minéraux secondaires provenant de l'oxydation des minéraux primaires.

zone trophogénique. Zone superficielle d'un lac au niveau de laquelle les plantes vertes produisent de l'oxygène en excès.

zone tropholytique. Zone profonde d'un lac où la production d'oxygène par les plantes vertes est inférieure à leur consommation.

zoné. *adj.* **(cristal).** Qui présente des zones ou bandes ayant une structure ou un aspect différents.

zooplancton. *n.* Partie du plancton constituée par les animaux.

Voir tableau des macéraux des lignites et des houilles en page 22.

ERRATA ET ADDITIFS

Volume I de géologie

Page 63, le terme *poids spécifique* désigne en fait la *densité*.

Page 91, colonne de droite, 3e titre, lire :
Percylite, $PbCuCl_2(OH)_2$ - cubique.

Page 93, colonne de gauche, 1re ligne, lire :
densité 5,82 (et non 6,61).

Page 94, 2e titre, lire :
Magnésiochromite, $MgCr_2O_4$
Chromite, $FeCr_2O_4$ - cubique.

Page 118, dans le texte relatif à la pricéite, ajouter, dans les propriétés, la densité 2,42.

Page 133, dans le texte relatif à la dufrénite, ajouter les renseignements suivants : dureté 4 ; densité 3,1 à 3,3.

Page 245, dans la légende du haut, lire :
Pithecanthropus pekinensis (et non Phithecantropus pekinensis).

MACÉRAUX[1] DES LIGNITES				MACÉRAUX[1] DES HOUILLES		
SUBMACÉRAL	*MACÉRAL*	*SOUS-GROUPE*	*GROUPE*	*GROUPE*	*MACÉRAL*	*SUBMACÉRAL*
	TEXTINITE	HUMOTÉLINITE			TÉLINITE	Télinite 1 Télinite 2
Texto-ulminite Eu-ulminite	ULMINITE					
Porigélinite Lévigélinite	GÉLINITE	HUMOCOLLINITE	HUMINITE	VITRINITE	COLLINITE	Télocollinite Desmocollinite Gélocollinite Corpocollinite
Phlobaphinite Pseudophloba-phinite	CORPOHUMINITE					
	ATTRINITE DENSINITE	HUMODÉTRINITE			VITRODÉTRINITE	
	SPORINITE CUTINITE SUBÉRINITE RÉSINITE ALGINITE LIPTODÉTRINITE CHLOROPHYLLI-NITE (BITUMINITE)[2] (FLUORINITE)[2] (EXUDATINITE)[2]		LIPTINITE	EXINITE	SPORINITE CUTINITE RÉSINITE ALGINITE LIPTODÉTRINITE (BITUMINITE)[2] (FLUORINITE)[2] (EXUDATINITE)[2]	
	FUSINITE SEMI-FUSINITE MACRINITE SCLÉROTINITE INERTODÉTRI-NITE		INERTINITE	INERTINITE	FUSINITE SEMI-FUSINITE MACRINITE MICRINITE SCLÉROTINITE INERTODÉTRI-NITE	Pyrofusinite Dégradofusinite

D'après B. Alpern 1971.

[1] Voir définition de macéral. [2] Terme en cours de discussion.

INDEX DES NOMS CITÉS

L'index donne tous les noms de minéraux et de roches qui figurent dans les volumes I et II de Géologie.

La référence est donnée par l'indication du volume I ou II en chiffres romains et du numéro de la page où se trouve la citation, suivi, le cas échéant, des lettres *a* et *b* se rapportant respectivement à la colonne de gauche et à la colonne de droite de chaque page.

Les références sont données, pour les illustrations, par le numéro de la page en caractères gras et, pour le texte, par le numéro de la page en caractères maigres pour une simple citation, et en italique pour un développement plus complet.

Pour les différentes variantes se rattachant à un même terme, un astérisque indiquera le renvoi à ce dernier. *Ex. :*

acmite
* ægyrine
ægyrine (acmite) I - 162 b

On trouvera en outre dans l'index les différents termes de chimie, de morphologie, de pédologie, de physique, de zoologie, de botanique, etc. figurant dans les deux volumes de Géologie.

ABRÉVIATIONS esp. espèce gen. genre gr. groupe ord. ordre.

A

B

C

D

E

F

G

H

I

J

K

L

M

N

O

P

Q

R

S

T

U

V

W

X

Y

Z

ENCYCLOPÉDIE
DES
SCIENCES

ZOOLOGIE
I

GRANGE BATELIÈRE

GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

ZOOLOGIE

I

GRANGE BATELIÈRE, PARIS - ÉDITIONS KISTER, GENÈVE - ÉRASME, BRUXELLES-ANVERS

Publiée sous le haut patronage de :
Messieurs les professeurs :
Jean DORST, membre de l'Institut,
Charles FEHRENBACH, membre de l'Institut,
Roger HEIM, membre de l'Institut,
Monsieur l'amiral André JUBELIN,
Messieurs les professeurs :
Pierre LÉPINE, membre de l'Institut,
Louis LEPRINCE-RINGUET, de l'Académie française,
Jean-François LEROY, professeur au Muséum national d'histoire naturelle,
Henri NORMANT, membre de l'Institut,
Monsieur Jacques PICCARD, docteur ès sciences h.c.

Réalisation	IDÉES ET ÉDITIONS 16, avenue de Friedland, 75008 Paris
Comité de direction	Cristobal de ACEVEDO, Simone DEVAUX, Uberto TOSCO.
Rédaction	Patrick PHLIPONEAU, Françoise MENU, Marie-Noëlle RENARD.
Recherche de l'illustration	Mathilde RIEUSSEC.
Mise en pages	Tito TOPIN et Serge BROCHE.
Illustrations techniques	Richard COLIN.
Coordinateur des dessins	Mario LOGLI.
Fabrication	Émile REGNAULT, Sylvie MARCHAND, Martine TOTIN.
Directeur de la publication	J.P. BRÉVOST.

J. Six

Ont collaboré à ce volume :

A. TÉTRY, pour l'introduction.
J. B. CRUMEYROLLES, pour les Protozoaires.
C. LÉVY, pour les Spongiaires.
J. GOY, pour l'introduction des Cnidaires, les Hydrozoaires et les Cténaires.
A. TIXIER-DURIVAULT, pour les Anthozoaires, à l'exception des Actiniaires et des Scléractiniaires.
A. FRANC, pour les Scyphozoaires.
D. DOUMENC, pour les Actiniaires.
J. P. CHEVALIER, pour les Scléractiniaires.
M. C. DURETTE-DESSET, pour les « Vers » et les Pararthropodes.
Ch. C. EMIG, pour les Phoronidiens.
J. L. D'HONDT, pour les Bryozoaires et les Brachiopodes.
A. FRANC, pour les Mollusques.
J. FOREST, pour les Arthropodes, à l'exclusion des Insectes.
J. CARAYON, pour l'appareil reproducteur des Insectes.
Y. LEROY, pour la morphologie, les fonctions de relation et le comportement des Insectes.
J. MENIER, pour le développement et la croissance des Insectes.
R. DAJOZ, pour la nutrition et l'écologie des Insectes.

Vertut - Atlas Photo

LA ZOOLOGIE

▲ ***Déjà au Paléolithique supérieur, les Hommes manifestaient un grand intérêt pour les animaux ; les peintures rupestres de Lascaux, exécutées il y a plus de 10 000 ans, révèlent un remarquable don d'observation.***

Le terme Zoologie est formé de deux mots grecs, zoon *= animal et* logos *= science ; d'après l'étymologie, la Zoologie est la science qui étudie les animaux. Depuis quelle époque l'Homme se préoccupe-t-il des animaux qui l'entourent ? Au Paléolithique supérieur, dès l'Aurignacien et le Magdalénien, l'*Homo sapiens *qui vivait dans des cavernes comptait déjà des peintres et des sculpteurs animaliers ainsi qu'en témoignent les fresques colorées des grottes de Lascaux, de Niaux (où sont représentés des Chevaux, des Cerfs à ramure développée, des Taureaux, de jeunes Vaches, des Vaches gravides, des Bisons mâles, des Bouquetins), les Bisons d'Altamira, les gravures sur os avec les Rennes de Laugerie, les propulseurs sculptés comme le Faon aux Oiseaux de la grotte du Mas-d'Azil, etc. Ces peintures et sculptures témoignent d'un esprit d'observation aigu et d'une bonne connaissance des animaux ; même un pli cutané à la racine de la queue, bien visible sur les cadavres glacés de Mammouths en Sibérie, figure sur les Mammouths de la grotte de Rouffignac. Dès l'époque préhistorique, l'Homme accordait à la faune une valeur peut-être symbolique (magie de la chasse, importance sexuelle) ; la Zoologie existait déjà, mais son développement a été d'une extrême lenteur.*

Cette discipline a beaucoup souffert de la crédulité et de l'imagination humaines qui forgeaient des bêtes et monstres fabuleux ; les superstitions étaient profondément ancrées ; bien des animaux étaient tabous. Pendant l'Antiquité et le Moyen Age, la Nature ne retient pas tellement les esprits, plus attirés par la philosophie et la théologie, avec cependant une exception pour Aristote, qui, comme nous le mentionnerons plus loin, a créé la Zoologie.

La Zoologie scientifique débute avec le XVII^e siècle. Trois facteurs importants en sont responsables : les voyages d'exploration, qui ont beaucoup accru la richesse de la faune connue — le Chimpanzé et l'Orang-Outan sont signalés respectivement en 1641 et 1658 —, les dissections largement pratiquées qui ont révélé les caractères anatomiques des animaux — les authentiques dissections des cadavres humains ont précédé celles des animaux — et l'apparition du microscope qui a révolutionné les recherches zoologiques. Les œuvres des grands microscopistes du XVII^e siècle, R. Hooke, A. Van Leeuwenhoek et J. Swammerdam, ont présenté une importance exceptionnelle tant pour les Invertébrés que pour les Vertébrés. Leeuwenhoek est sans conteste le père de la protistologie et de la microbiologie. De très remarquables études anatomiques sont effectuées dans divers

Bulloz - Petit Palais, Paris

▲ **Pendant longtemps, les Hommes ont cru à l'existence d'animaux monstrueux ou dotés de pouvoirs magiques ; les sirènes attiraient, disait-on, les navigateurs grâce à leurs voix mélodieuses.**

pays : Hollande (G. Blaes ou Blasius), Angleterre (E. Tyson, W. Harvey), Italie (F. Redi, M. Malpighi, fondateur de l'anatomie microscopique), France (Cl. Perrault entouré d'une équipe de Parisiens), Danemark (N. Sténon, H. Jacobsen, T. et C. Bartholin), Allemagne (J. C. Peyer) ; de formation médicale, ces anatomistes s'intéressaient aux animaux sous l'angle de l'anatomie comparée.

Au cours du XVII^e^ siècle, la Zoologie s'est considérablement enrichie de faits, mais peu de travaux accordent une part aux idées générales. Avec le XVIII^e^ siècle, les premières tentatives d'explication de la Nature vont apparaître. Le souci d'apporter de l'ordre dans toutes les formes vivantes avait déjà été manifesté par l'Anglais J. Ray, qui formula dans son Historia plantarum *(1686) un des critères de l'espèce moderne : « Les formes spécifiquement différentes conservent invariablement leur nature spécifique et jamais une espèce ne naît de la semence d'une autre, ni réciproquement. » Linné, en précisant la notion d'espèce et en instaurant une nomenclature méthodique, donnera un cadre précis à la Zoologie, qui prendra un rapide essor.*

Aux côtés de Linné, le XVIII^e^ siècle compte quelques grands noms : G. L. Leclerc de Buffon consacre à la Zoologie de nombreuses publications ; il est un excellent descripteur des animaux et mentionne pour chacun toutes les données biologiques connues. L. Daubenton, collaborateur de Buffon, créa l'anatomie descriptive des Mammifères. Les études zoologiques se spécialisent : P. Artedi examine les Poissons, Adamson les Mollusques, P. S. Pallas les Vers, Réaumur les Insectes, O. F. Muller les Protozoaires, et P. Lyonet consacre une remarquable monographie à la Chenille du Saule, etc.

Au début du XIX^e^ siècle, l'expansion et l'orientation de la Zoologie seront marquées par les œuvres de Lamarck, de Cuvier, d'É. Geoffroy Saint-Hilaire ; elles fondent l'anatomie comparée et accordent à la classification qui retrace l'histoire de la Vie une valeur synthétique ; la notion de parenté réelle dans les groupes et entre les groupes, c'est-à-dire l'évolution animale, se confirme et marquera intensément la Zoologie du XIX^e^ siècle.

Nous arrêterons à l'aurore du XX^e^ siècle ce rapide historique qui n'a aucune prétention exhaustive. Nous reviendrons d'ailleurs sur les œuvres les plus importantes qui constituent le substratum sur lequel se développa la Zoologie.

Caractères distinctifs de l'animal

Les animaux constituant l'objet de la Zoologie, cette vieille science contemporaine de l'Homme paléolithique, il convient de préciser ce qu'est un animal, comment il se caractérise, et de voir si sa différenciation est toujours facile.

L'animal, comme le végétal, est un être vivant; il possède une forme et une taille définies, il naît, grandit, se multiplie et meurt. L'unité fondamentale de tout être vivant est la cellule. *Les structures des cellules animale et végétale, bien que très voisines, ne sont pas identiques; la membrane cytoplasmique, le cytoplasme, le noyau, des inclusions cytoplasmiques (appareil de Golgi, mitochondries, ergastoplasme) sont communs aux deux catégories de cellules, mais la cellule animale ne possède ni chloroplastes, sites de la chlorophylle, ni membrane cellulosique, ces deux éléments étant particuliers à la cellule végétale. La présence de chlorophylle chez les végétaux retentit sur leur métabolisme cellulaire et les dote d'un pouvoir de synthèse bien supérieur à celui des animaux. En conséquence, le végétal chlorophyllien est toujours* autotrophe, *c'est-à-dire capable de se nourrir grâce à ses propres synthèses. L'animal, au contraire, incapable de réaliser ce type de synthèse, est* hétérotrophe; *pour subsister, il doit se déplacer — son organisation le lui permet — et capturer des proies végétales ou animales qu'il digérera et assimilera. La digestion serait ainsi un phénomène propre aux animaux.*

Certains animaux se composent d'une unique cellule (Protozoaires); d'autres en comptent de nombreuses (Métazoaires). Les Métazoaires, à structure plus ou moins complexe, se reconnaissent aisément : une Girafe, un Ver de terre, un Escargot, une Seiche, un Papillon, une Crevette, une Araignée, un Oursin se différencient nettement des végétaux. Si l'on passe à des animaux plus simples, des ressemblances, des convergences de formes excusent quelques hésitations. Certains Bryozoaires présentent un aspect d'Algue; les Zoophytes (étymologiquement animaux-plantes) figuraient dans les anciennes classifications et encore dans celle de Cuvier. Il faudra attendre 1744 pour que le Français J. A. Peyssonel reconnaisse et fasse admettre la nature animale du Corail, qui était considéré comme un végétal ou comme un minéral produit par un végétal; son manuscrit ne sera publié qu'en 1756 à Londres. Le rattachement des Éponges au règne animal ne date que de 1825.

Mais la distinction entre animal et végétal devient beaucoup plus délicate pour les organismes unicellulaires groupés sous le nom de Protistes (terme de Haeckel). En réalité, les Protistes comprennent deux grands ensembles, les Protistes à affinités animales (Protozoaires), incapables d'effectuer leur synthèse à partir d'éléments simples, et les Protistes à affinités végétales (Protophytes), aptes à réaliser cette synthèse. Hétérotrophie et autotrophie représentent un critère permettant de distinguer Protozoaires et Protophytes. Mais les difficultés surgissent lorsque les caractères ne sont pas bien tranchés ou lorsque des traits différents sont associés. Ainsi, les Flagellés comprennent des Phytoflagellés avec chlorophylle et des Zooflagellés sans chlorophylle; mais un Péridinien phytoflagellé possédant une membrane cellulosique et des chloroplastes se comporte comme

C. Bevilacqua

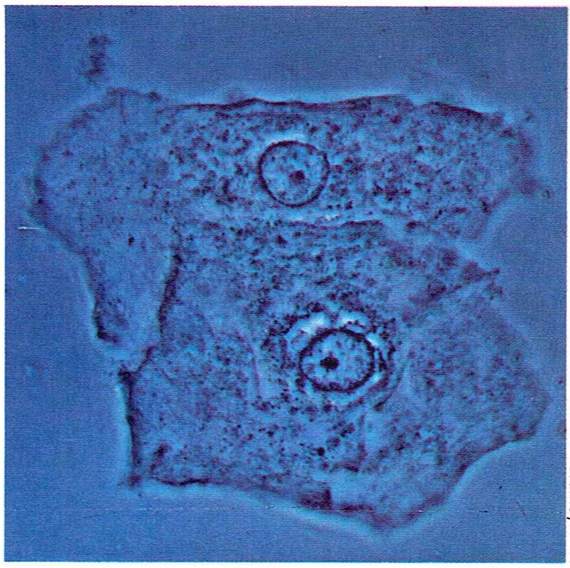

Crumeyrolles

◄▲ Deux types de cellules : cellules végétales, en haut, et animales, à gauche : on peut y voir le noyau et les inclusions cytoplasmiques; la cellule végétale possède en outre une membrane cellulosique.

▼ Il est parfois difficile de distinguer animaux et végétaux. Ce Bryozoaire, présentant un aspect d'Algue, est un exemple de convergence. Il s'agit en fait d'une colonie d'animaux.

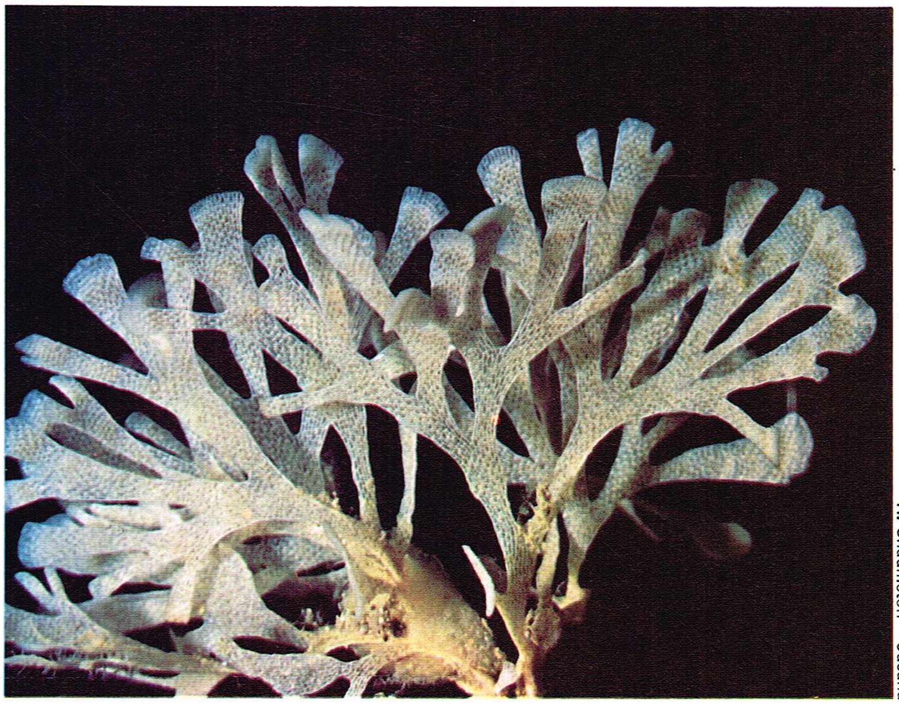

H. Chaumeton - Jacana

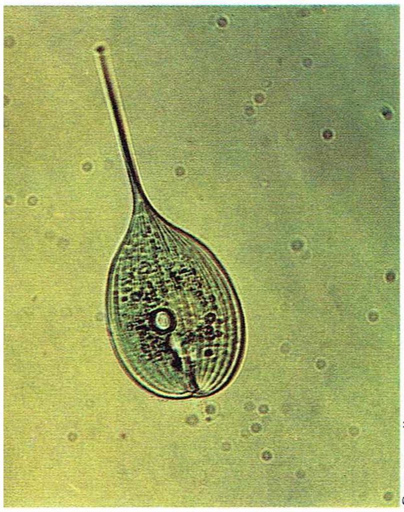

Crumeyrolles

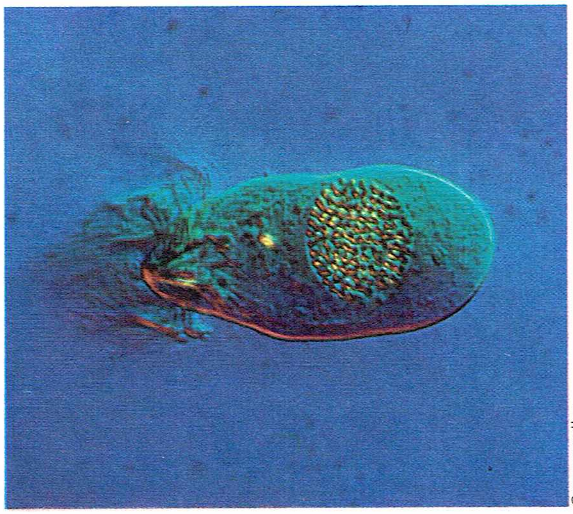

Crumeyrolles

▲ **Les Flagellés comprennent des Phytoflagellés à chlorophylle (à gauche, un Euglénien) et des Zooflagellés (à droite, Staurogenina) qui en sont dépourvus.**

un animal en capturant, par émission d'une goutte de cytoplasme, des proies qui sont absorbées dans une vacuole. D'autres Phytoflagellés réagissent comme des autotrophes ou comme des hétérotrophes; certaines Euglènes sont autotrophes alors que d'autres, dépourvues de chlorophylle, sont hétérotrophes et se comportent comme des animaux. Même les chloroplastes ne constituent pas un critère rigoureux; des Euglènes cultivées à l'obscurité perdent leurs chloroplastes; comme un plaste ne se multiplie qu'à partir d'un plaste préexistant par division, aucun de ces organismes ne récupérera ses plastes. Replacées dans des conditions normales, ces mêmes Euglènes ne survivront que par hétérotrophie. Physiologiquement, elles se comportent comme des Protozoaires, mais leur morphologie et leur chimisme sont ceux des Protophytes.

Ainsi, aux confins des règnes animal et végétal, se maintient une certaine incertitude sur la qualification de quelques organismes en raison de l'absence de critères absolus. La disparition du pigment chlorophyllien chez les animaux oriente l'évolution animale vers l'hétérotrophie. Ce nouveau type de nutrition requiert l'acquisition de systèmes organiques (système nerveux et muscles) et de mécanismes chimiques assurant l'élaboration d'enzymes, de vitamines, d'hormones indispensables pour l'exercice du pouvoir synthétique.

▼ **Un exemple de convergence : adaptation à la nage rapide chez des animaux appartenant à trois groupes différents; le Requin en haut est un Poisson, l'Ichthyosaure au milieu est un Reptile fossile et le Dauphin en bas est un Mammifère.**

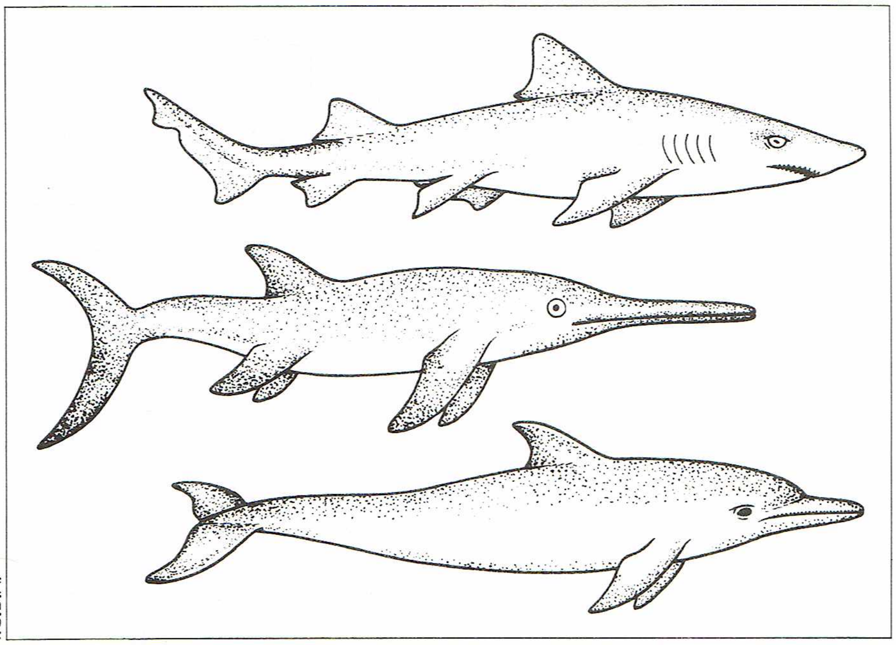

I.G.D.A.

Richesse faunique

La Zoologie est donc l'étude des animaux et ceux-ci offrent une extraordinaire abondance et une diversification extrême.

Les évaluations estiment que la Terre héberge de un million deux cent mille à un million cinq cent mille espèces animales inégalement réparties dans les embranchements, les plus riches étant ceux des Arthropodes avec plus de neuf cent mille espèces et des Mollusques avec plus de cent mille. Mais beaucoup d'espèces demeurent inconnues soit parce qu'elles appartiennent à des collections non encore examinées, soit parce qu'elles n'ont pas encore été trouvées. Dans aucune région la faune n'est totalement connue, même dans celles qui sont particulièrement fouillées. Un exemple en est donné par la faune marine de Roscoff, étudiée depuis 1871 : d'après un inventaire établi par C. Bocquet (1971), trois cents espèces nouvelles ont été récoltées entre 1945 et 1970; le nombre de Cnidaires connus est passé, entre 1950 et 1965, de cent cinquante-quatre à deux cent treize; le nombre des Annélides s'est élevé de trois cent dix à quatre cent cinquante-sept entre 1951 et 1968. La faune des milieux difficiles à pénétrer et d'exploration incommode (forêts primitives, abysses marins, milieu interstitiel des sables ou des argiles, etc.) réserve encore bien des surprises. Même des animaux de dimensions appréciables ont été signalés assez récemment. L'Okapi, un Giraffidé, a été découvert en 1900 dans les forêts du Congo. Le premier Cœlacanthe (Latimeria) *a été pêché en 1938, le deuxième en 1952 près des Comores, dans le canal de Mozambique, à 300 m de profondeur; ces spécimens représentent le seul Poisson Crossoptérygien vivant, véritable relique de l'ère secondaire. Une dizaine d'exemplaires d'un nouveau Mollusque monoplacophore* (Neopilina galathea, *37 mm de long sur 35 mm de large) ont été recueillis dans l'océan Pacifique à l'ouest de Costa-Rica par un chalut traîné sur le fond à 3 750 m. Les Pogonophores longs de 5,5 cm à 30 cm, élément caractéristique de la faune benthique des mers d'Extrême-Orient, des fosses des Kouriles et du Japon, ont été connus d'abord grâce à un individu mal conservé (1914), puis grâce à un deuxième (1932); par la suite, de nombreux échantillons permirent une étude détaillée et la création de l'embranchement des Pogonophores (1944). Ces quelques exemples montrent l'approximation des estimations qui doivent être remises à jour.*

Disciplines intervenant dans les études zoologiques

Pour prospecter un aussi vaste domaine, la Zoologie, science analytique, recourt à plusieurs disciplines.

La morphologie (morphê = *forme*, logos = *science) étudie l'aspect extérieur de l'animal, sa forme, ses dimensions, les diverses régions de son corps, sa couleur, ses appendices, ses ornements, ses phanères, etc.*

Des ressemblances morphologiques superficielles entre animaux phylétiquement différents mais ayant des modes de vie assez proches retiennent l'attention. Le Requin (Poisson), l'Ichthyosaure (Reptile fossile), le Dauphin (Mammifère) en fournissent un bon exemple : même silhouette hydrodynamique, même aspect de la nageoire dorsale, membres antérieurs en forme de palettes natatoires, nageoire caudale propulsive hétérocerque (deux lobes inégaux). Ces ressemblances qui reflètent une adaptation à un mode de vie identique, la vie en haute mer, constituent des phénomènes de convergence; leur étude relève de la morphologie comparée. Les ailes de Reptiles (Ptérodactyle fossile), des Oiseaux et des Chauves-Souris, les queues préhensiles de divers Mammifères, les formes du bec de l'Ornithorhynque (Mammifère) et des Canards sont des convergences liées respectivement au vol, à la vie arboricole, à une certaine nourriture.

La morphologie de l'animal étant connue, il faut alors analyser son organisation interne, étudier son anatomie grâce à des dissections qui montrent la conformation et les rapports des organes constitutifs des divers systèmes, nerveux, musculaire, squelettique, digestif, respiratoire, circulatoire, excréteur, reproducteur, endocrinien. Cette étude anatomique macroscopique se complète par un examen microscopique des tissus composant les organes, analyse histologique qui nécessite la préparation de coupes fines selon des techniques précises de fixation et de coloration, techniques si variées que des volumes entiers leur sont consacrés. Ainsi s'édifie une conception du plan structural. L'anatomie comparée met en évidence des types d'organisation caractéristiques des grandes divisions du règne animal. C'est alors qu'apparaît la notion d'organes homologues. Ce sont, chez des animaux différents, des organes offrant la même structure fondamentale, le même plan, et ayant conservé les mêmes connexions essentielles avec les organes voisins. L'homologie marque des affinités phylétiques et donc un lien de descendance. La vessie natatoire et le poumon, correspondant tous deux à une évagination du tube digestif antérieur, sont homologues : les parois de la vessie natatoire du Dipneuste forment en se plissant des alvéoles, la structure pulmonaire est réalisée. Chez le Protoptère, la vessie natatoire est devenue un poumon fonctionnel. Le membre antérieur du Cheval et l'aile de l'Oiseau sont homologues. Le plus sûr critère de l'homologie se trouve dans les phases précoces du développement embryonnaire.

A côté des homologies existent aussi des analogies; elles correspondent à des organes semblables ou différents qui exercent à peu près la même fonction chez des types dissemblables, mais qui diffèrent grandement par l'origine ancestrale, par l'ontogenèse, par les connexions avec d'autres organes. L'aile de l'Oiseau et celle de l'Insecte, le poumon du Mammifère et la branchie du Poisson sont des organes analogues.

Morphologie et anatomie étant analysées, les recherches s'orientent vers la physiologie; celle-ci étudie le rôle, la fonction des organes, les corrélations fonctionnelles et les mécanismes qui les règlent.

La description de l'animal se poursuit par l'examen de son mode de reproduction. Cette dernière peut s'effectuer par reproduction sexuée qui exige une sexualisation et la fabrication de

Photo J. Six

▲ **Beaucoup d'espèces animales furent longtemps inconnues : l'Okapi (Okapia johnstoni), bien qu'il soit de grande taille, a été découvert seulement en 1900 dans les forêts du Congo.**

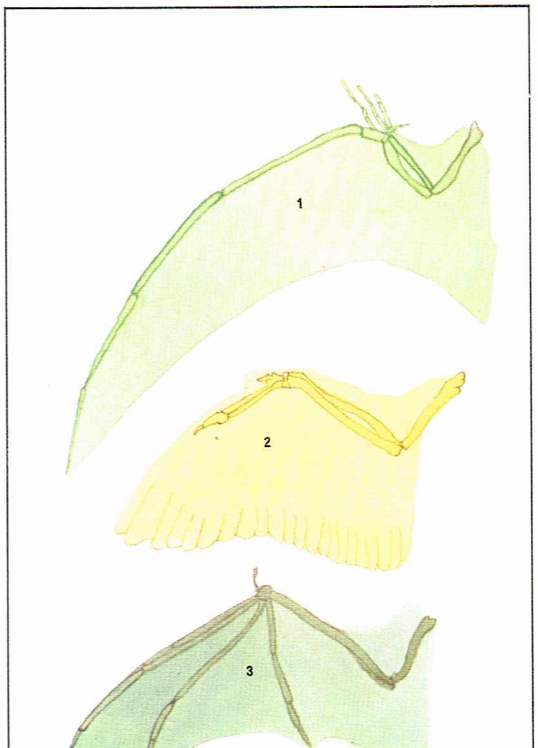

Richard Colin

◀ **Convergence des membres antérieurs adaptés au vol chez trois animaux : un Reptile fossile (1), un Oiseau (2), et un Mammifère, la Chauve-souris (3).**

J. Markham

▲ **Les animaux ne sont pas répartis uniformément sur tout le globe : certains sont cantonnés dans une zone d'une région zoologique : on les appelle alors endémiques ; ainsi le Toucan** (Rhamphastos sulfuratus) **est un Oiseau de la région néotropicale.**

▶ **Le Loir** (Glis glis) **est un endémique de la région paléarctique.**

▼ **Un exemple d'adaptation à la vie en milieu cavernicole : un Insecte Aptérygote Diploure ; les animaux qui vivent dans les grottes sont généralement peu pigmentés, leurs yeux ont régressé et leurs organes tactiles sont très développés.**

J. Markham

cellules particulières, les gamètes mâles et femelles porteurs du nombre haploïde de chromosomes (N) ; au cours de la fécondation, deux gamètes s'unissent pour former un œuf fécondé ou zygote à 2 N chromosomes (nombre diploïde), point de départ d'un nouvel organisme. La parthénogenèse, cas particulier se rattachant à la reproduction sexuée, consiste dans le développement d'un gamète femelle non fécondé. L'animal peut aussi se multiplier par reproduction asexuée ou agame qui se réalise sans le concours de gamètes ; c'est un mode de multiplication et de propagation par des éléments plus ou moins complexes, les bourgeons, produits par l'organisme-souche.

L'embryologie suit le développement du zygote ou cellule-œuf, qui, par des divisions successives et divers mouvements de territoires sous l'action d'inducteurs et de mécanismes variés, édifie soit un jeune organisme semblable à ses parents, soit une larve qui subit des métamorphoses pour devenir adulte. Les cycles évolutifs sont particulièrement compliqués chez certains parasites dont le développement exige la présence de plusieurs hôtes. L'embryologie comparée révèle parfois la parenté de types apparemment éloignés ; elle permet de déterminer, grâce aux formes embryonnaires, des organismes aberrants et difficiles à identifier.

L'association de ces diverses disciplines fournit une connaissance de l'animal en tant qu'individu, et des rapprochements entre organismes offrant des affinités sont possibles. Il convient de donner à l'animal sa place naturelle dans l'ensemble des animaux, donc de le classer ; ce classement, fondé sur la phylogenèse, c'est-à-dire sur les affinités parentales, relève de la systématique (terme dérivé de l'ouvrage de Linné, Systema naturae, *1758). Pour classer un animal, il existe des règles : celles de la taxinomie* (taxis = *rangement,* nomos = *loi ; terme de Candolle, 1813) et de la nomenclature. La taxinomie établit des catégories hiérarchisées, fondées sur des critères. Les règles de nomenclature indiquent comment un nom correct doit être attribué à chaque animal.*

Tout organisme fréquente un grand domaine, ou marin ou dulçaquicole ou terrestre ; il occupe des micromilieux variés (interstices du sol, grottes et cavernes, abysses, vallée montagnarde encaissée, îles, etc.). Chaque habitat comporte des interactions organismes-milieux. La Zoologie interfère donc avec l'écologie (oïkos = *habitat,* logos = *science) ; C. Bernard l'avait déjà pressenti : « Le conflit — ou la collaboration — entre l'organisme et son milieu est l'existence même de la vie. » Les facteurs du milieu conditionnent l'existence des organismes, leur multiplication, leur déplacement, et, réciproquement, la présence d'organismes modifie les conditions du milieu. Dans un milieu stable, un certain équilibre s'établit, ainsi que le prouve le bon fonctionnement des chaînes trophiques qui s'effectuent entre les producteurs (végétaux chlorophylliens) et les consommateurs (animaux herbivores et carnivores). La vie dans des conditions particulières entraîne des adaptations : adaptations à la vie en altitude, à la vie aquatique, à la plongée, au froid des régions polaires, à la vie désertique, etc. Les organismes adaptés à un milieu présentent un certain nombre de caractères qui leur confèrent un faciès particulier ; on reconnaît aisément des animaux planctoniques, cavernicoles, interstitiels, abyssaux, torrenticoles, etc.*

Il faut encore analyser les mœurs de l'animal, son comportement individuel et son comportement dans des populations plus ou moins denses, la structure et la dynamique des populations, la vie sociale, les notions de territoire et d'espace vital et les rapports des animaux entre eux. Cette analyse éthologique offre un vif intérêt.

La faune n'est pas uniformément répartie sur le globe ; la zoogéographie est l'étude de sa distribution sur tous les continents et dans les océans. Les animaux largement disséminés sur le globe sont des ubiquistes ; plus significatifs sont les endémiques *qui se cantonnent exclusivement dans une des six grandes régions zoologiques. D'autres formes présentent des distributions discontinues parfois énigmatiques.*

Morphologie, anatomie, physiologie, reproduction, ontogenèse, classification, écologie, éthologie et distribution géographique repré-

G. Giussani

sentent les diverses coordonnées indispensables à une connaissance approfondie des animaux vivants. Mais les recherches limitées aux animaux actuels ne donnent qu'une image partielle du monde animal ; il y manque toutes les formes antérieures qui ont vécu aux diverses époques géologiques. Les plus anciennes, les faunes antécambriennes, ont été détruites par le métamorphisme sans laisser de traces. Comme l'a dit Pierre Termier, « la Terre est un livre dont les premiers feuillets ont été brûlés ». Mais depuis le Cambrien, beaucoup d'animaux ont laissé des fossiles ; il est inconcevable de séparer les examens des formes fossiles et actuelles ainsi que semble le justifier le rattachement habituel de la paléontologie à la Géologie. Paléontologie et Zoologie, sciences jumelles, sont seules capables de donner une vue d'ensemble du monde animal et de son évolution.

Bien que science analytique, la Zoologie est à l'origine de synthèses importantes montrant comment se dessinent les étapes successives de l'évolution, les diverses entités se rattachant les unes aux autres dans un ordre hiérarchisé.

Dans cette fresque générale, la classification de la faune tient une large place. Récolte-t-il un animal inconnu ou peu caractéristique, le zoologiste cherche à préciser à quel groupe appartient l'organisme ; quel nom doit-il lui attribuer ? Une description originale d'un animal nouveau repose parfois sur un unique spécimen ; elle sera complétée lors de récoltes ultérieures. Un caractère inaperçu, une erreur d'interprétation d'un trait anatomique modifient une classification et entraînent sa révision. La classification des animaux, œuvre délicate, jamais définitive, toujours en voie d'amélioration, constitue une des préoccupations majeures du zoologiste.

La classification et la nomenclature des animaux

Pour des raisons pratiques et spéculatives, l'Homme a toujours éprouvé le besoin de nommer et de classer les animaux en catégories plus ou moins vastes. Le pêcheur, le chasseur, qui

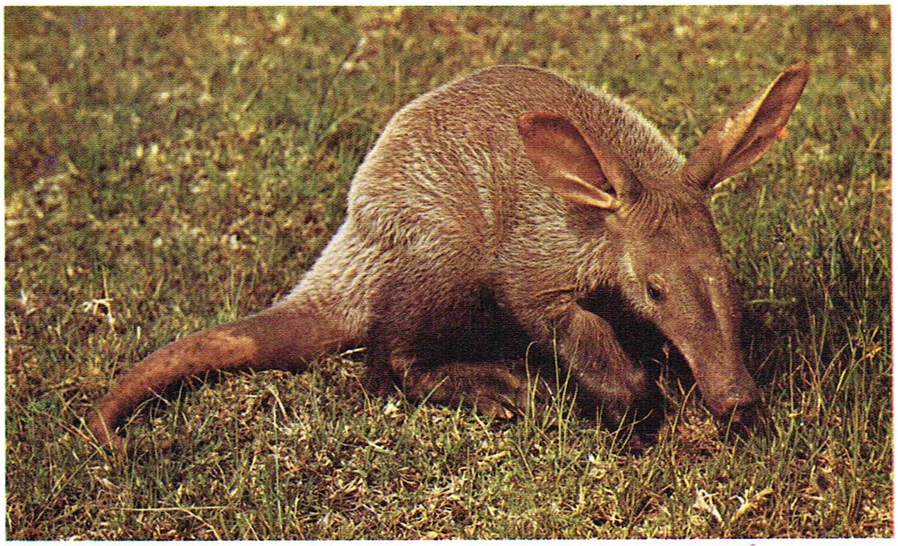

Ostman - G. Rönn

Archives Longo

▲ **Deux autres exemples de Mammifères endémiques : en haut, l'Oryctérope (Orycteropus afer), de la région éthiopienne, et en bas le koala (Phascolarctos cinereus), d'Australie.**

T. Okapia

◀ **Un Primate endémique de la région orientale : l'Orang-Outan (Pongo pygmaeus).**

Frédéric-Jacana

▲ *Le croisement d'espèces différentes est quelquefois possible mais les hybrides sont stériles; tel est le cas du Tigron, hybride résultant de l'union d'un Tigre et d'une Lionne.*

connaissent bien l'animal capturé, ont une notion intuitive de l'espèce. Certains animaux, tout en se ressemblant, présentent des différences morphologiques, physiologiques, écologiques et éthologiques. Prenons l'exemple des Grenouilles, ces Amphibiens de nos régions; un esprit observateur saura découvrir que toutes les Grenouilles ne sont pas identiques. Une Grenouille foncée, brunâtre, ornée d'une tache sombre sur la tempe est terrestre. Elle vit dans des lieux humides et chasse des proies vivantes pendant le jour; elle se rend à l'eau pour hiverner et pour se reproduire. Après une pariade de plusieurs semaines, elle pond; flottant à la surface, la ponte est bien visible. Elle pond aussi en captivité. Une autre Grenouille verdâtre vit sur le bord des eaux. A la moindre alerte, elle se jette à l'eau; son comportement est aquatique. Elle se reproduit plus tardivement; la pariade est plus courte. La ponte plus abondante ne flotte pas; elle se trouve parmi les plantes aquatiques ou sur le fond de la collection d'eau. Elle ne pond pas en captivité. Les deux Grenouilles se différencient aisément; la première est la Grenouille rousse, la seconde la Grenouille verte. Les noms français des espèces domestiques ou des espèces courantes correspondent en général à la catégorie espèce (Chien, Chat, Ane, Cheval...).

Une espèce est reconnaissable par un ensemble de caractères morphologiques, les plus faciles à déceler, physiologiques et chromosomiques. Mais ces critères sont insuffisants; les diverses races de Chiens (lévrier, boxer, basset, danois, épagneul, dalmatien, etc.) diffèrent plus entre elles que le Chien berger allemand ne diffère du Loup ou du Chacal. Un autre critère intervient : les animaux appartenant à la même espèce se reproduisent entre eux ou sont potentiellement capables de le faire dans des conditions normales (sont exclues les conditions d'élevage) et les produits du croisement doivent être féconds entre eux. Cette dernière condition est importante, car des espèces distinctes peuvent se reproduire, mais les hybrides sont stériles. Le croisement de l'Ane et de la Jument engendre un Mulet mâle stérile ou une Mule femelle, rarement féconde avec l'Ane; la Mule produit avec le Cheval des Chevaux mâles et femelles nantis de quelques caractères asiniens. Le croisement inverse Cheval × Anesse engendre un Bardot. Le Bardot mâle est stérile; le Bardot femelle est très rarement fertile. Le Tigre croisé avec une Lionne produit un hybride, le Tigron.

L'espèce, considérée longtemps comme la catégorie la plus inférieure, comprend parfois des sous-espèces qui correspondent à des populations locales d'une espèce cantonnées dans une partie géographique de l'aire de distribution. La notion pratique de l'espèce, catégorie naturelle, s'acquiert assez rapidement; les espèces voisines offrant des caractères communs et supposées avoir une même origine sont réunies dans un genre. Les Grenouilles rousse, verte, agile appartiennent au même genre, ce sont des Grenouilles. La plupart des genres renferment plusieurs espèces; quelques-uns, monospécifiques, ne comptent qu'une seule espèce. Les deux catégories genre et espèce étant précisées, il est loisible d'aborder la nomenclature ou, mieux, de donner un état civil aux animaux.

Toute espèce possède deux noms, un nom français courant ou vernaculaire et un nom latin

H. Chaumeton - Jacana

J.-P. Hervy-Jacana

▶ *Deux espèces de Grenouilles, la Grenouille rousse (Rana temporaria), à droite, et la Grenouille verte (Rana esculenta), à gauche, diffèrent notamment par leur couleur, leur habitat et l'époque de la ponte.*

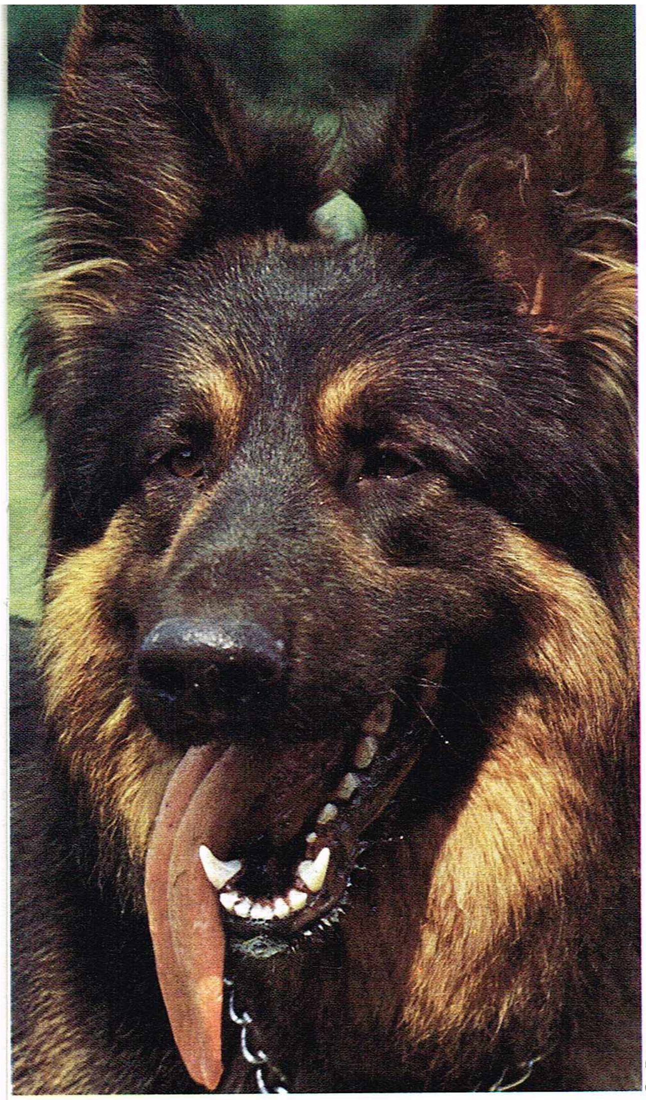

S. Prato

S. Prato

ou scientifique et international. La Grenouille rousse, la Grenouille verte, la Nèpe cendrée, la Sangsue médicinale, l'Abeille, la Roussette, le Lézard des murailles sont des noms courants connus de tous. Parfois les noms vernaculaires changent avec les régions. Ce cas est particulièrement flagrant pour les noms des Mollusques comestibles des côtes bretonne et normande : la Praire, dont le nom scientifique est Venus verrucosa, est nommée parfois Palourde, alors que la vraie Palourde est Venerupis decussata. La faune des pays étrangers porte également des noms vernaculaires anglais, allemands, italiens, etc. ; ces noms vernaculaires traduits en français sont plus que contestables. Le « horned toad » se traduit « crapaud cornu »; il désigne un Reptile, le Lézard cornu ou Phrynosome, et non un Amphibien.

Pratiques, les noms vernaculaires constituent donc souvent des sources d'erreur et d'incompréhension. Aussi, pour remédier à ces inconvénients, le nom courant est doublé d'un nom latin universellement adopté dans les mémoires scientifiques. Cette désignation binominale, établie par Linné dans son Systema naturae (dixième édition, 1758), comprend deux mots latins : le premier, un substantif, s'écrit avec une majuscule et désigne le nom du genre ; le deuxième, un adjectif ou un substantif souvent au génitif, a toujours une minuscule même s'il s'agit d'un nom propre correspondant au nom de l'espèce. Les Grenouilles appartiennent au genre Rana, la Grenouille rousse se nomme Rana temporaria, la Grenouille verte Rana esculenta. Les Lézards font partie du genre Lacerta, le Lézard des murailles est Lacerta muralis. La Nèpe cendrée est Nepa cinerea, la Sangsue médicinale Hirudo medicinalis. Le genre Canis comprend le Chien, Canis familiaris, le Loup, Canis lupus, et le Renard, Canis vulpes. A ces deux mots latins, il faut ajouter le nom de l'auteur qui a décrit l'espèce ou seulement son initiale s'il est très connu : Rana esculenta Linné ou mieux Rana esculenta L., Rana fusca Roesel, Hirudo medicinalis L. En général, le nom d'espèce rappelle un caractère de l'animal ou le lieu de récolte ou le nom de l'inventeur de l'espèce.

Selon la règle de priorité, le nom le plus ancien en date à partir de 1758 (année choisie comme origine de la nomenclature, année zéro) doit être retenu s'il est correct. Les autres noms sont mis en synonymie ; l'Anguille Anguilla anguilla L. aurait reçu au moins trente-six noms différents d'espèce. Un nom d'espèce ne peut être utilisé qu'une fois dans un même genre. Le nom du genre ne figure qu'une fois dans tout le règne animal.

Les genres établis par Linné comprenaient trop d'espèces ; ils ont été subdivisés et remplacés par plusieurs nouveaux noms de genres ou de sous-genres. Mais le nom du grand genre est souvent mieux connu, il est donc souhaitable qu'il subsiste : on indique alors le nom du grand genre, puis le nom du sous-genre entre parenthèses. Le grand genre Helix, qui groupe tous les Escargots, comprend les espèces suivantes : Helix pomatia L., Helix (Cepaea) nemoralis L., Helix (Cryptomphalus) aspersa Müller. Une autre solution consiste à ajouter au nom du grand genre un préfixe ; le grand genre Carabus se divise en Autocarabus, Chrysocarabus, Oricarabus, etc.

Une dénomination trinominale est souvent utilisée par les ornithologistes et les entomologistes, les espèces d'Oiseaux ou d'Insectes comprenant souvent plusieurs sous-espèces ou

Il existe plus de ressemblance entre le Loup (Canis lupus), à droite, et le Chien Berger allemand (Canis familiaris), à gauche, qu'entre celui-ci et certaines autres races de Chien, tel le Boxer ci-dessous.

A.-P. Rossi

▶ ***Depuis longtemps déjà, les zoologistes ont essayé d'élaborer des arbres généalogiques du règne animal traduisant les liens de filiation entre les divers groupes; celui de Haeckel (1868) en est un exemple.***

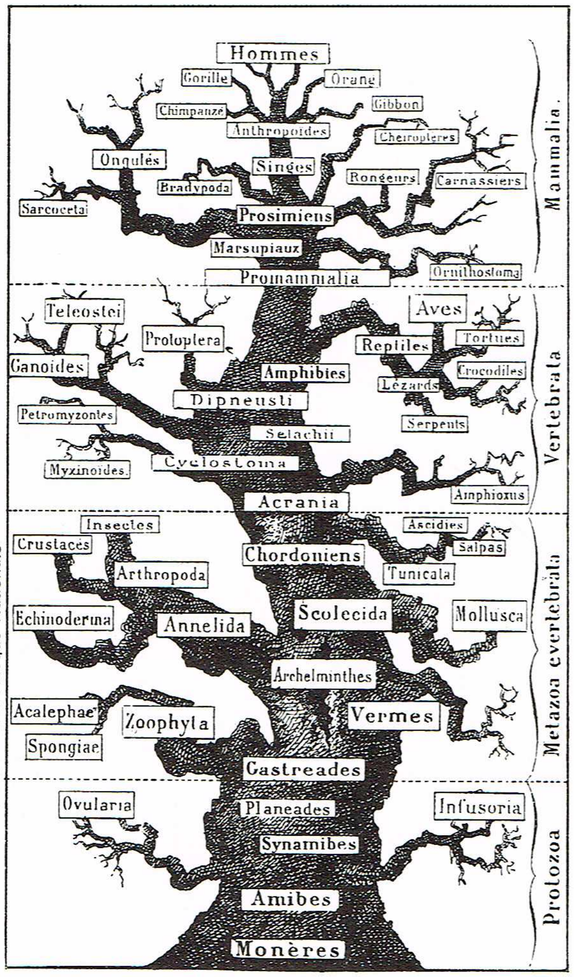

Haeckel - Photo Larousse - Bibliothèque Nationale

variétés; le Grand Cormoran de nos côtes se nomme Phalacrocorax carbo *L.; les variétés de Chine et du Japon se nomment respectivement* Phalacrocorax carbo sinensis *et* P. carbo hanedae. *Les désignations tautonymes, peu élégantes, résultent de la loi de priorité. La Tanche se nomme* Tinca tinca *L. Linné avait donné à la Tanche le nom de* Cyprinus tinca. *Cuvier divise le grand genre* Cyprinus *en plusieurs sous-genres et notamment celui de* Tinca. *Il désigne la Tanche par* Tinca vulgaris *Cuvier. Le nom d'espèce le plus ancien doit être conservé;* tinca *remplace* vulgaris *et la Tanche doit se nommer* Tinca tinca *L. ou* Cyprinus (Tinca) tinca *L.*

Après l'espèce et le genre, les catégories de la classification deviennent de plus en plus vastes. Plusieurs genres ayant des affinités forment une famille; *plusieurs familles ayant des affinités constituent un* ordre; *plusieurs ordres sont groupés dans une* classe; *plusieurs classes composent un* embranchement. *La totalité des embranchements correspond au règne animal. Les classifications plus précises, tenant compte de caractères plus nombreux, font intervenir des catégories intermédiaires. Au maximum vingt et une catégories peuvent être reconnues : sous-espèce, espèce, sous-genre, genre, sous-tribu, tribu, sous-famille, famille, super-famille, infra-ordre, sous-ordre, ordre, super-ordre, cohorte, infra-classe, sous-classe, classe, super-classe, sous-embranchement, embranchement, règne. Cette multiplication des catégories intéresse les ordres importants quantitativement. Voici quelques exemples de classifications simples comptant les six catégories classiques et de classifications plus détaillées mettant en évidence des catégories intermédiaires :*

	Chien	***Rat***	***Grenouille rousse***
Espèce	**familiaris**	**norvegicus**	**temporaria**
Genre	**Canis**	**Rattus**	**Rana**
Famille	Canidés	Muridés	Ranidés
Ordre	Carnivores	Rongeurs	Anoures
Classe	Mammifères	Mammifères	Amphibiens
Embranchement	Vertébrés	Vertébrés	Vertébrés

	Chien	***Rat***
Espèce	**familiaris**	**norvegicus**
Genre	**Canis**	**Rattus**
Sous-famille		Murinés
Famille	Canidés	Muridés
Super-famille		Muroïdés
Sous-ordre	Fissipèdes	Myomorphes
Ordre	Carnivores	Rongeurs ou Rodentia
Infra-classe	Eutheria ou Mammifères placentaires	Eutheria ou Mammifères placentaires
Sous-classe	Theria	Theria
Classe	Mammifères	Mammifères
Sous-embranchement	Vertébrés	Vertébrés
Embranchement	Cordés	Cordés

G. Mazza

▲ ***Malgré son aspect de fleur, cette Anémone de mer*** **(Actinia equina)** ***est un animal appartenant à l'embranchement des Cnidaires.***

▼ ***Un Métazoaire primitif : l'Éponge,*** **Callyspongia vaginalis.**

D. Faulkner

Dans ces dernières classifications plus complètes, les Vertébrés sont « déclassés » de la catégorie embranchement. Ils passent à celle de sous-embranchement; cette acception n'est généralement pas admise et elle est vraiment superflue.

Selon les critères adoptés, les uns étant plus significatifs que d'autres, et selon les progrès de la phylogenèse, les classifications se modifient, se précisent et se compliquent. Un rapide coup d'œil sur les anciennes classifications préconisées par quelques éminents zoologistes montrera cette évolution.

Quelques classifications anciennes

Le père de la Zoologie, Aristote (384-322 av. J.-C.), connaissait environ quatre cents espèces animales qu'il répartissait en deux grandes classes : les animaux qui possèdent du sang rouge (enaima) *et ceux qui en sont dépourvus* (anaima)*; les premiers correspondent aux Vertébrés et les seconds aux Invertébrés. De l'Antiquité, passons au siècle des lumières qui est celui de Linné (1707-1773). En précisant la notion d'espèce, en inventant une nomenclature méthodique, Linné apporte à la classification une base nouvelle et solide. Dans son* Systema naturae *(édition de 1735), Linné cherche à établir des catégories qui traduisent les affinités des êtres; il ajoute aux caractères extérieurs des caractères anatomiques (conformation du cœur, organes respiratoires et reproducteurs). Il reconnaît six classes, les Quadrupèdes, les Oiseaux, les Amphibiens, les Poissons, les Insectes et les Vers.*

En 1806, J.-B. de Monet, chevalier de Lamarck (1744-1829), dans son Tableau du règne animal, *distingue les animaux ayant des vertèbres (Mammiaux, appelés plus tard Mammifères, Oiseaux, Reptiles, Poissons) et les animaux qui n'ont pas de vertèbres (Mollusques, Annélides, Crustacés, Arachnides, Insectes, Vers intestinaux, Radiaires et Polypes). En 1807, il ajoute les Infusoires placés à tort dans les Polypes; puis il intercale les Cirripèdes entre les Mollusques et les Annélides. Au total, il reconnaît donc quatorze classes; en 1816, à la suite des travaux de Savigny, il crée la classe des Tuniciers. Encore bien insuffisante, cette classification repose sur un caractère important, la présence ou l'absence de vertèbres.*

La classification établie par G. Cuvier (1769-1832), profondément différente, relève de l'anatomie comparée. Dans le Règne animal *(1817), il reconnaît quatre formes principales, quatre plans généraux qui correspondent aux Vertébrés, aux Mollusques, aux Articulés et aux Zoophytes; à partir de ces quatre groupes ont été construits tous les autres animaux. Pour la première fois, les fossiles sont associés aux formes vivantes.*

Les classifications anciennes n'offrent plus qu'un intérêt pour l'histoire de la Zoologie. Une meilleure connaissance des animaux fait ressortir des types structuraux; des plans d'organisation homogène révèlent la parenté des organismes. Ainsi, les classifications se transforment; elles deviennent évolutives et mettent en évidence la dérivation des formes animales les unes des

Tronc :

Protozoaires : **Act.**, Actinopodes ; **Inf.**, Infusoires ; **Rhiz.**, Rhizoflagellés ; **Spor.**, Sporozoaires.
Myxosporidies : **Myx.**, Myxosporidies.
Spongiaires : **Spong.**, Spongiaires.
Cnidaires : **Anthoz.**, Anthozoaires ; **Cnid.**, Cnidaires ; **Hydr.**, Hydrozoaires.
Cténaires : **Ctén.**, Cténaires.

Branche de droite :

Plathelminthes : **Cest.**, Cestodes ; **Mono.**, Monogènes ; **Plathel.**, Plathelminthes ; **Trém.**, Trématodes ; **Turb.**, Turbellariés.
Acanthocéphales : **Acant.**, Acanthocéphales.
Priapuliens : **Pri.**, Priapuliens.
Mésozoaires : **Més.**, Mésozoaires.
Némertiens : **Ném.**, Némertiens.
Némathelminthes : **Ech.**, Echinodères ; **Gast.**, Gastérotriches ; **Némath.**, Némathelminthes ; **Némato.**, Nématodes ; **Rotif.**, Rotifères.
Annélides : **Ach.**, Achètes ; **Oligoch.**, Oligochètes ; **Polych.**, Polychètes.
Sipunculiens : **Sipunc.**, Sipunculiens.
Échiuriens : **Échiur.**, Échiuriens.
Lophophoriens : **Brach.**, Brachiopodes ; **Ectop.**, Ectoproctes ; **End.**, Endoproctes ; **Lophop.**, Lophophoriens ; **Ph.**, Phoronidiens.
Chétognathes : **Chétog.**, Chétognathes.
Mollusques : **Aplac.**, Aplacophores ; **Biv.**, Bivalves ; **Céphalop.**, Céphalopodes ; **Gastér.**, Gastéropodes ; **Monoplac.**, Monoplacophores ; **Polyplac.**, Polyplacophores ; **Scaph.**, Scaphopodes.
Pararthropodes : **Onyc.**, Onychophores ; **Tard.**, Tardigrades ; **Li.**, Linguatulides.
Arthropodes : **Tril.**, Trilobites.
— Arachnides :
Aca., Acariens ; **Aran.**, Aranéides ; **Palp.**, Palpigrades ; **Péd.**, Pédipalpes (Uropyges + Amblypyges) ; **Pha.**, Phalangides (= Opilions) ; **Ps. sc.**, Pseudoscorpions ; **Scorp.**, Scorpions.
— Pycnogonides :
Pyc., Pycnogonides.
— Crustacés :
Amp., Amphipodes ; **Bran.**, Branchiopodes ; **Cirrip.**, Cirripèdes ; **Cop.**, Copépodes ; **Décap.**, Décapodes ; **Isop.**, Isopodes ; **Lept.**, Leptostracés (= Phyllocarides) ; **Mysid.**, Mysidacés ; **Ostr.**, Ostracodes ; **Stom.**, Stomatopodes (= Hoplocarides).
— Myriapodes :
Chilop., Chilopodes ; **Dipl.**, Diplopodes ; **Pa.**, Pauropodes ; **Sy.**, Symphiles.
— Insectes :
Anopl., Anoploures ; **Blat.**, Blattides ; **Coléopt.**, Coléoptères ; **Collemb.**, Collemboles ; **Dermapt.**, Dermaptères ; **Dip.**, Diploures ; **Dipt.**, Diptères ; **Éph.**, Éphémères ; **Hétéropt.**, Hétéroptères ; **Homopt.**, Homoptères ; **Hyménopt.**, Hyménoptères ; **Isopt.**, Isoptères ; **Lépidopt.**, Lépidoptères ; **Mant.**, Mantides ; **Odon.**, Odonates ; **Orthopt.**, Orthoptères ; **Panorp.**, Panorpes ; **Plannip.**, Plannipennes ; **Pléc.**, Plécoptères ; **Prot.**, Protoures ; **Psoc.**, Psocoptères ; **Sial.**, Sialidés ; **Streps.**, Strepsiptères ; **Thys.**, Thysanoures ; **Trichopt.**, Trichoptères.

Branche de gauche :

Échinodermes : **Ast.**, Astérides ; **Bl.**, Blastoïdes ; **Crin.**, Crinoïdes ; **Cyst.**, Cystidés ; **Échin.**, Échinides ; **Holot.**, Holothurides ; **Oph.**, Ophiurides.
Pogonophores : **Pogono.**, Pogonophores ;
Stomocordés : **Stomo.**, Stomocordés.
Tuniciers : **Tunic.**, Tuniciers.
Céphalocordés : **Céph.**, Céphalocordés.
Vertébrés.
— Agnathes
— Poissons :
Chond., Chondrichthyens ; **Crossopt.**, Crossoptérygiens ; **Dipn.**, Dipneustes ; **Ostéi.**, Ostéichthyens.
— Amphibiens :
An., Anoures ; **Stégoc.**, Stégocéphales ; **Urod.**, Urodèles.
— Reptiles :
Chél., Chéloniens ; **Croc.**, Crocodiliens ; **Dino.**, Dinosauriens ; **Ich.**, Ichthyosauriens ; **Lép.**, Lépidosauriens ; **O.**, Ophidiens ; **Ptér.**, Ptérosauriens ; **Rh.**, Rhynchocéphales ; **Thério.**, Thériodontes.
— Oiseaux
— Mammifères :
Artiodact., Artiodactyles ; **Carniv.**, Carnivores ; **Cét.**, Cétacés ; **Chirop.**, Chiroptères ; **Condyl.**, Condylarthres ; **Derm.**, Dermoptères ; **H.**, Homme ; **Hyrac.**, Hyracoïdes ; **Insect.**, Insectivores ; **Mars.**, Marsupiaux ; **Monot.**, Monotrèmes ; **Multib.**, Multituberculés ; **Périssod.**, Périssodactyles ; **Pinn.**, Pinnipèdes ; **Probosc.**, Proboscidiens ; **Rong.**, Rongeurs.

Arbre généalogique du règne animal (d'après Cuénot, modifié).
Seuls les classes et les ordres les plus importants figurent dans ce dessin. La classe des Oiseaux n'est pas détaillée en raison de l'abondance des ordres.

Richard Colin

G. Mazza

autres, leur succession par filiation ; elles reposent sur la phylogenèse, c'est-à-dire sur l'étude des lignées animales et de leur enchaînement. Un phylum correspond à une lignée de formes vivantes provenant d'une même souche et se succédant par filiation.

Arbre généalogique du règne animal

Avec le développement des conceptions évolutionnistes, la construction des arbres généalogiques commence. Ceux-ci concrétisent graphiquement les liens de filiation des animaux et leur apparition dans le temps. L'aspect de l'arbre donne l'image de la zoologie d'une époque. Des arbres différents se succèdent ; les plus anciens étaient souvent fantaisistes. Peu à peu, les divergences s'amenuisent et les zoologistes s'accordent sur les grandes lignes de l'arbre ; ne subsistent plus que des différences sur des questions de détail.

Trois arbres conçus indépendamment, à peu près à la même époque, présentent une grande ressemblance ; ce sont ceux de Heitz (1939), de L. Cuénot (1940) et d'A. Vandel (1949).

Ces trois arbres ont en commun un axe en forme d'Y sur lequel s'attachent les divers phylums ou embranchements ou clades (clados = branche) comme des branches sur un tronc. Un phylum important se divise en classes, ordres, familles et présente un aspect buissonnant. Quelques phylums fort petits ne comptent que deux genres (Phoronidés) ou trois genres (Priapuliens) ou six genres (Chétognathes). Inégal par l'importance numérique, le phylum est autonome et correspond à un palier évolutif caractérisé par un type original d'organisation.

L'arbre généalogique conçu par L. Cuénot (1866-1951) se présente ainsi : la base de l'arbre se fixe dans une zone où vivant et non-vivant se distinguent difficilement (ultravirus, virus-protéine cristallisable) ; à son départ, la base porte les microbes et les Protistes d'où partent les clades végétaux et le premier grand clade animal, les Protozoaires, animaux composés d'une cellule unique, mais souvent d'une organisation fort complexe. Les Myxosporidies qui faisaient partie de cet embranchement sont actuellement considérées comme formant un embranchement indépendant, mais issu de celui des Protozoaires. Tous les autres animaux comprennent plusieurs cellules ; ce sont des Métazoaires ou Pluricellulaires. L'association cellulaire se faisait déjà sentir chez certains Flagellés et Infusoires qui possédaient une structure syncytiale (cytoplasme avec de nombreux noyaux sans aucune cloison isolant les noyaux). Chez les Métazoaires, des cellules spécialisées s'associent pour former des tissus qui composeront les organes. Les premiers Métazoaires sont des diploblastiques, c'est-à-dire qu'ils possèdent deux feuillets embryonnaires, l'ectoderme ou feuillet externe et l'endoderme ou feuillet interne ; les diploblastiques sont dépourvus de tête (acéphales) ; aucun ne présente de céphalisation.

Au-dessus du clade des Protozoaires se trouve le clade des Spongiaires ; ce sont les Métazoaires diploblastiques les plus simples, privés d'organes définis, mais ayant des cellules différenciées (cellules plates ectodermiques, cellules contractiles, cellules mobiles, cellules sexuelles, cellules à collerettes ou choanocytes, cellules sécrétrices des spicules et de spongine, cellules nerveuses).

A. Margiocco

Au-dessus des Spongiaires, l'organisation se complique par la présence d'une cavité cœlentérique ayant le double rôle d'une cavité intestinale et d'une cavité générale. Elle caractérise le clade des Cnidaires et celui des Cténaires qui autrefois étaient réunis sous le nom de Cœlentérés. Les Cnidaires à symétrie radiaire et les Cténaires à symétrie bilatérale se présentent comme une gastrula comprenant à l'extérieur un épiderme à cellules prismatiques et à l'intérieur l'endoderme qui tapisse la cavité digestive ; entre les deux se trouve la mésoglée, sorte de gelée riche en eau (95 %). La différenciation cellulaire est encore assez sommaire. Le système nerveux forme des réseaux sous-épithéliaux ; les organes sensoriels définis comprennent des organes tactiles, visuels, des chimiorécepteurs, des statorécepteurs. Une cellule spécialisée, le cnidoblaste ou cellule urticante, caractérise les Cnidaires. Les Cténaires possèdent des colloblastes servant à la capture des proies.

Une nouvelle phase ontogénétique caractérise tous les autres Métazoaires. Ils sont triploblastiques, c'est-à-dire qu'ils possèdent trois feuillets embryonnaires ; entre les deux premiers feuillets, ectoderme et endoderme, se développe un troisième feuillet, le mésoderme, qui est à l'origine des éléments du conjonctif, du squelette, des muscles, du sang, des organes excréteurs. Il participe également à la formation des cavités du corps. Cette formation revêt trois aspects. 1° Le

Un Poisson, **Salmo gairdneri**, *un Amphibien, la Salamandre* **(Salamandra salamandra)**, *un Oiseau, le Macareux* **(Fratercula arctica)**, *et un Reptile,* **Micrurus diastema.**

J. Markham

J.-H. Tashjian

mésoderme massif forme un parenchyme de remplissage entre la paroi du corps et le tube digestif qui est la seule cavité de l'organisme; l'anus n'existe pas. Cette organisation définit les triploblastiques accœlomates *(Plathelminthes). 2° Le mésoderme ne donne pas de parenchyme; entre la paroi du corps et le tube digestif persiste un reste plus ou moins grand de la cavité de la blastula (blastocœle primitif). Cette cavité nommée pseudocœle ou faux cœlome se trouve chez les Némathelminthes qui sont des* pseudocœlomates. *Souvent considérés comme des accœlomates, ils sont réunis avec eux. 3° Le mésoderme se creuse d'une cavité générale close, le cœlome, dans laquelle se trouvent les viscères. Le cœlome est soutenu par un mésentère formé de deux parois : une paroi externe, la somatopleure, disposée sous l'ectoderme et composée de muscles circulaires et longitudinaux; la paroi interne, la splanchnopleure, accolée au tube digestif, constitue la musculature de l'intestin. Un endothélium péritonéal recouvre somatopleure et splanchnopleure. Le cœlome renferme le liquide cœlomique. Dans certains groupes, le cœlome typique s'oblitère et des lacunes subsistent seulement. Les triploblastiques dotés d'un cœlome sont des* cœlomates. *Les triploblastiques accœlomates, pseudocœlomates et cœlomates possèdent une symétrie fondamentalement bilatérale; ce sont des* bilatéraux *ou* artiozoaires.

A partir de la bifurcation de l'Y en deux branches, l'état triploblastique est réalisé; en même temps apparaît un intestin autonome avec une bouche, souvent avec un anus, et indépendant des autres cavités du corps. Sur la branche droite de l'Y s'insèrent d'abord des embranchements dont les représentants sont dépourvus de vrai cœlome (embranchements ou clades des Plathelminthes, Mésozoaires, Acanthocéphales, Priapuliens, Némertes, Némathelminthes), *puis ceux qui correspondent aux vrais cœlomates* (Lophophoriens, Annélides, Mollusques, Chétognathes, Arthropodes aberrants *et* Arthropodes). *Sur la branche gauche de l'Y se trouvent uniquement des cœlomates appartenant aux embranchements ou clades des* Échinodermes, Pogonophores, Stomocordés, Tuniciers, Céphalocordés *et* Vertébrés.

En dessous de la ligne horizontale se place le milieu aquatique et au-dessus le milieu terrestre. Celle-ci marque donc le passage de la vie aquatique à la vie terrestre; les groupes aquatiques (portions proximales et médianes des deux branches de l'Y) possèdent quelques représentants terrestres (des Sangsues, Oligochètes, Crustacés, Gastéropodes, les Péripates). Les groupes terrestres correspondent aux extrémités distales des deux branches de l'Y, les Vertébrés à partir des Amphibiens et les Arthropodes à respiration aérienne s'effectuant par des poumons ou des trachées (Arachnides, Diplopodes, Chilopodes et surtout Insectes). Parmi les groupes de Vertébrés terrestres, quelques-uns sont redevenus aquatiques (Serpents marins, Ichthyosaures, Plésiosaures, Tortues, Crocodiles, Cétacés, Siréniens).

Le temps ne figure pas dans cet arbre généalogique; cette dimension peut être négligée par rapport à l'évolution cladique. Tous les clades connus à l'état fossile existaient déjà au Paléozoïque. Mais le temps devrait figurer dans l'arbre généalogique d'un clade afin de fixer les époques d'apparition des diverses classes, des ordres et des familles.

Caractères distinctifs des deux branches de l'Y

Plusieurs caractères permettent de distinguer les deux branches de l'Y. Les deux plus importants intéressent la destinée du blastopore et la position du système nerveux. Dans une des lignées, le blastopore de la gastrula participe à la formation de la bouche et jamais à celle de l'anus; cette lignée, celle des Protostomiens, *correspond à la branche droite à partir des Annélides. L'autre branche est celle des* Deutérostomiens (deuteros = *en second* lieu), *chez lesquels le blastopore donne l'anus; la bouche est une néo-formation.*

Chez les Protostomiens, le système nerveux comprend, outre un cerveau antérieur, une chaîne formée de ganglions; elle est ventrale et disposée sous le tube digestif. Ces animaux sont des hyponeuriens. *Leur corps se compose de parties qui se répètent régulièrement selon une disposition métamérique ou segmentaire. Des constrictions extérieures délimitent chaque segment, qui renferme une paire de ganglions nerveux, une paire d'organes excréteurs, une paire de sacs cœlomiques. Les Annélides Polychètes présentent cette structure archaïque. Chez les autres Protostomiens, la métamérisation peut être plus ou moins masquée.*

Les Deutérostomiens, quant au système nerveux, se divisent en deux groupes : Échinodermes, Pogonophores et Stomocordés sont des épithélioneuriens, *c'est-à-dire que le système nerveux épithélial ou sous-épithélial se compose de plexus ou de cordons. Tuniciers, Céphalocordés et Vertébrés possèdent un système nerveux disposé au-dessus du tube digestif, ce sont des* épineuriens. *De plus apparaît, entre le tube digestif et le système nerveux, un axe squelettique médiodorsal, élastique, la* corde; *la présence de cette corde justifie que les trois embranchements soient parfois réunis sous le terme de Cordés.*

Dans la branche des Protostomiens, hyponeuriens, le squelette correspond à un exosquelette chitineux ou à une coquille externe. Cette branche comprend aussi de nombreux cas de parasitisme total et déformant, alors que l'autre branche présente quelques cas de commensalisme et de pseudo-parasitisme. Quelques Mollusques et Arthropodes possèdent un pigment respiratoire, l'hémocyanine, qui renferme du cuivre; ce pigment n'existe pas dans l'autre branche.

De bas en haut de l'arbre généalogique, une complexité croissante se manifeste. L'anatomie révèle la complexité progressive du système nerveux dans les deux branches. Elle détermine un psychisme de plus en plus élevé; de la base de la branche au sommet s'observent des comportements innés (réflexes, tropismes, instincts), puis des comportements acquis (habitudes, actes de mémoire, actes intelligents). Les premiers Arthropodes montrent un psychisme simple alors que les Insectes, placés au sommet du clade, jouissent d'un psychisme élevé, tout spécialement les Insectes sociaux (Termites, Fourmis, Guêpes, Abeilles). Le même phénomène se répète chez les Mollusques; les Lamellibranches et les Gastéropodes possèdent un psychisme simple, les Céphalopodes, qui occupent le sommet du clade, distinguent les formes et les couleurs et sont capables d'un apprentissage assez difficile. Le système nerveux complexe et condensé est entouré d'une capsule cartilagi-

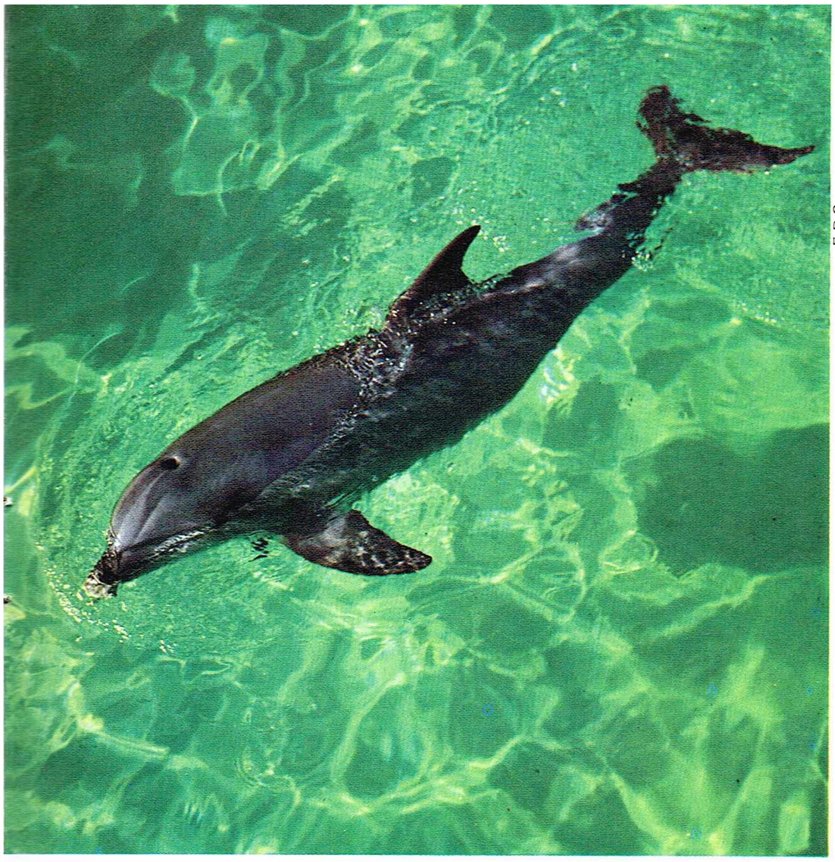

E.P.S.

A. Margiocco

neuse ; leurs yeux camérulaires rappellent ceux des Vertébrés.

Dans l'autre branche, chez les Vertébrés, le cerveau devient de plus en plus compliqué avec un maximum de complexification chez les Mammifères en raison du développement du néocortex, encore peu important chez les Monotrèmes, les Marsupiaux, les Insectivores et les Rongeurs ; il s'accroît bien davantage chez les Carnivores, les Cétacés et les Primates.

L'importance des organes des sens se modifie dans les deux branches. Les organes olfactifs, récepteurs spécialisés de la sensibilité chimique, prédominent dans les clades de la base des branches ; puis leur importance s'estompe au profit des récepteurs optiques. Les Turbellariés, les Annélides, de nombreux Mollusques sont des olfactifs alors que les Céphalopodes, les Crustacés supérieurs, les Insectes sont des visuels. La même tendance s'observe chez les Mammifères : Marsupiaux, Édentés, Rongeurs sont macrosmiques et le rhinencéphale ou cerveau olfactif présente un grand développement quantitatif. Les Primates et l'Homme sont microsmiques. La région occipitale du néocortex ou zone optique prend une importance particulière, alors que le volume du rhinencéphale est réduit, mais son rôle n'en est pas pour autant négligeable ; l'expérimentation et la clinique ont prouvé que le rhinencéphale ou système limbique est le grand centre régulateur des pulsions affectives et instinctives (agressivité, libido, etc.) qui exercent une influence notable sur le fonctionnement organique.

Les Mammifères ont conquis les milieux aquatique, aérien et terrestre. A gauche en haut, le Dauphin, excellent nageur ; à droite en haut, une Chauve-souris, Mammifère adapté au vol ; en bas, le Rhinocéros.

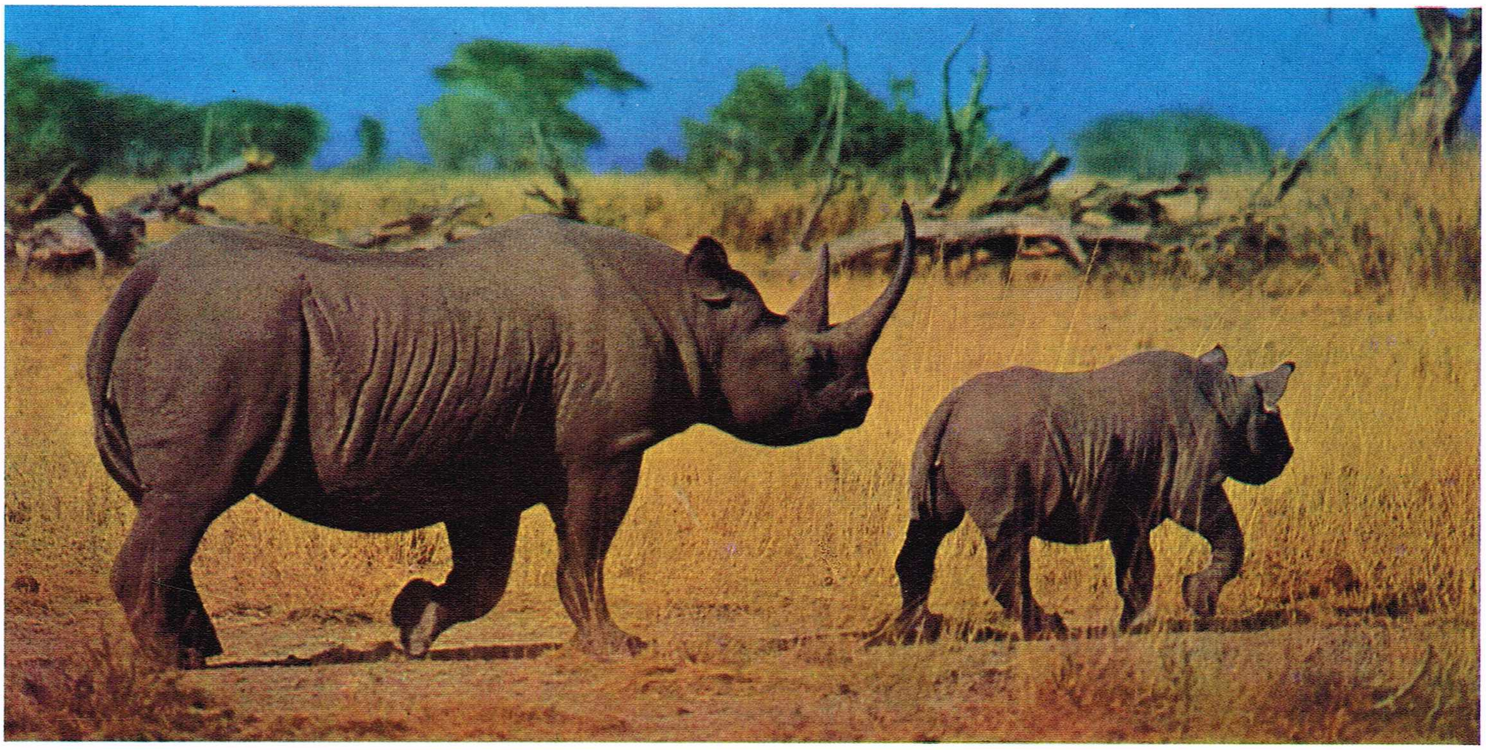

N. Myers

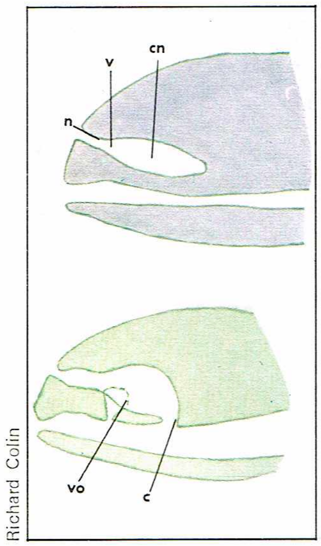

▲ Les choanes mettent en communication fosse nasale et cavité buccale ; elles sont apparues chez les Rhipidistiens, ancêtres des Vertébrés terrestres chez lesquels on les retrouve. n : narine ; v : vestibule ; cn : cavité nasale ; vo : organe voméro-nasal ; c : choane. (Région antérieure d'un Poisson, en haut, et d'un Tétrapode, en bas.)

Classification évolutive. Ses difficultés

La classification méthodique des animaux est l'objet fondamental de la Zoologie. Les classifications ne sont pas définitives ; elles traduisent l'état des connaissances et sont en harmonie avec la science d'une époque. Les classifications se fondant sur des arguments uniquement morphologiques ont vécu ; ces critères, les plus anciens, les mieux connus et les plus faciles à observer, ont été remplacés par des critères anatomiques, physiologiques, écologiques, éthologiques, génétiques et paléontologiques. L'association de critères plus diversifiés fournit des justifications beaucoup plus rigoureuses des catégories.

Actuellement toute classification doit être naturelle, c'est-à-dire évolutive, et reposer sur la phylogenèse. Dans cette perspective, strictement appliquée, comment se présentera la classification des Vertébrés dans ses grandes lignes ? En 1927, E. A. Stensiö démontrait que les Cyclostomes provenant de l'ère primaire présentaient un caractère particulier, l'absence de mâchoire ; cette structure, l'agnathisme, marquait le point de départ de l'évolution des Vertébrés. Les Agnathes ou Cyclostomes constituaient la classe la plus primitive des Vertébrés. Au caractère absence de mâchoires s'opposait le caractère présence de mâchoires, définissant les Gnathostomes, qui englobent les Poissons, les Amphibiens, les Reptiles, les Oiseaux et les Mammifères.

Les Poissons constituent une catégorie totalement hétérogène malgré leur organisation générale et leur mode de vie. Des travaux récents préconisent l'élévation au rang de classe des Chondrichthyens ou Poissons cartilagineux, autonomie justifiée par l'originalité de ces animaux. Les Poissons comprennent encore l'immense classe des Ostéichthyens ou Poissons osseux, qui réunit des ensembles aussi dissemblables que les Actinoptérygiens (Poissons actuels comprenant les Téléostéens, les Holostéens et les Chondrostéens), les Dipneustes ou Poissons pulmonés et les Crossoptérygiens (Cœlacanthes actuels et Rhipidistiens fossiles du Dévonien et du Permo-Carbonifère).

Ces Rhipidistiens, souche des Vertébrés terrestres, inaugurent une nouvelle structure, la choane, communication entre la cavité nasale et la cavité buccale ; le fond du sac olfactif descend vers la cavité buccale, débouche dans son plafond par la choane. Les choanes apparaissent chez les Rhipidistiens (les Cœlacanthes en sont dépourvus) et se maintiennent chez tous les Vertébrés terrestres avec une tendance à leur déplacement vers l'arrière ; la formation de crêtes palatines et leur soudure en un palais secondaire agrandissent les fosses nasales, et les choanes s'ouvrent dans le pharynx chez les Mammifères. Les Choanata comprennent à partir des Crossoptérygiens Rhipidistiens tous les Vertébrés terrestres.

Ces Vertébrés terrestres ou Tétrapodes marquent une nouvelle étape ; ils portent des pattes toutes construites sur le même modèle et présentant des adaptations à divers modes de vie. Alors que les Poissons étaient inféodés au milieu aquatique, les Amphibiens, comme leur nom l'indique, mènent une double vie, aquatique à l'état larvaire, terrestre à l'état adulte ; à partir des Reptiles, les Tétrapodes se libèrent du milieu aquatique. Ce profond changement de vie nécessite des novations structurales et fonctionnelles (poumons remplaçant les branchies, pattes se substituant aux nageoires, développement d'annexes embryonnaires).

La classe des Amphibiens est-elle homogène ? Non, elle semble diphylétique ; les Rhipidistiens, Crossoptérygiens à choanes, comprennent les Ostéolépiformes et les Porolépiformes, dont les anatomies diffèrent totalement. Les premiers sont à l'origine des Anoures en passant par les Stégocéphales labyrinthodontes. Les seconds sont à l'origine des Urodèles ; actuellement aucun terme de passage n'est connu entre Rhipidistiens et Urodèles. La classe des Reptiles n'est pas davantage homogène et réunit deux lignées indépendantes, d'une part les Sauropsidés (Reptiles actuels et Reptiles fossiles alliés, Oiseaux), et d'autre part les Théropsidés (Reptiles mammaliens fossiles, Pélycosaures et Thérapsidés, Mammifères). Les plus anciens Théropsidés vivaient au Primaire. Les Sauropsidés apparaissent au Trias ; leur apogée date du Jurassique et du Crétacé. Ce diphylétisme des Reptiles repose sur plusieurs caractères. Les crânes des Reptiles mammaliens et des Mammifères sont synapsides : ils possèdent une seule fosse temporale. Cette disposition se manifeste déjà chez les Pélycosauriens du Carbonifère supérieur (trois cents millions d'années). Pendant plus de cent millions d'années, ils évoluent et se diversifient en de nombreux groupes chez lesquels les caractères mammaliens apparaissent : réduction du nombre des os crâniens, formation d'un palais

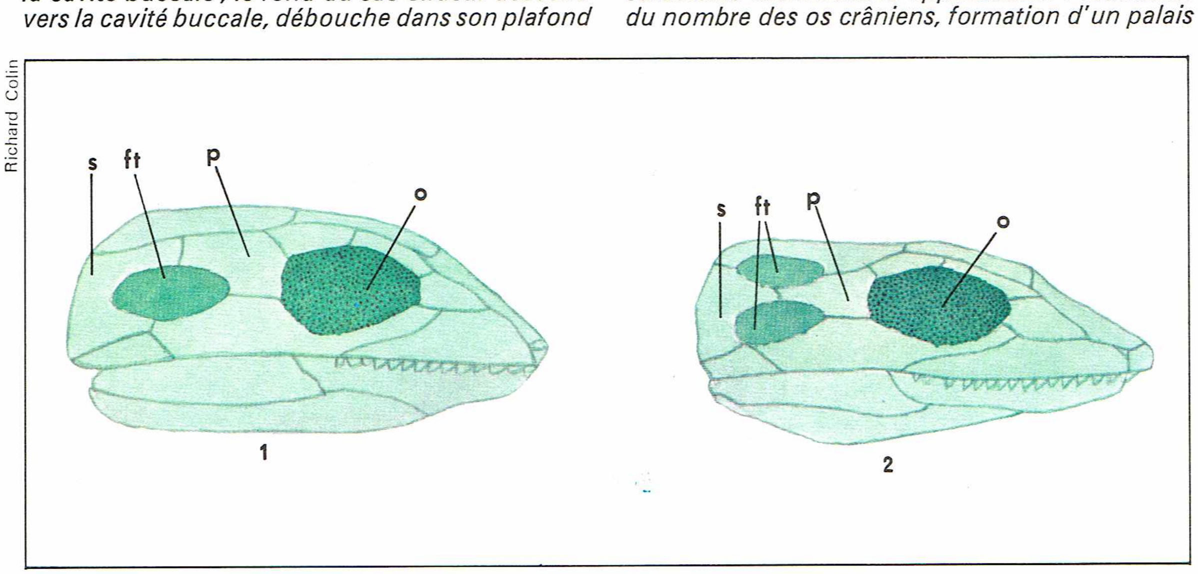

▶ Représentation schématique de la disposition des fosses temporales chez deux types de Reptiles : 1 : type synapside ; 2 : type diapside ; p : os post-orbitaire ; s : os squamosal ; ft : fosse temporale ; o : orbite.

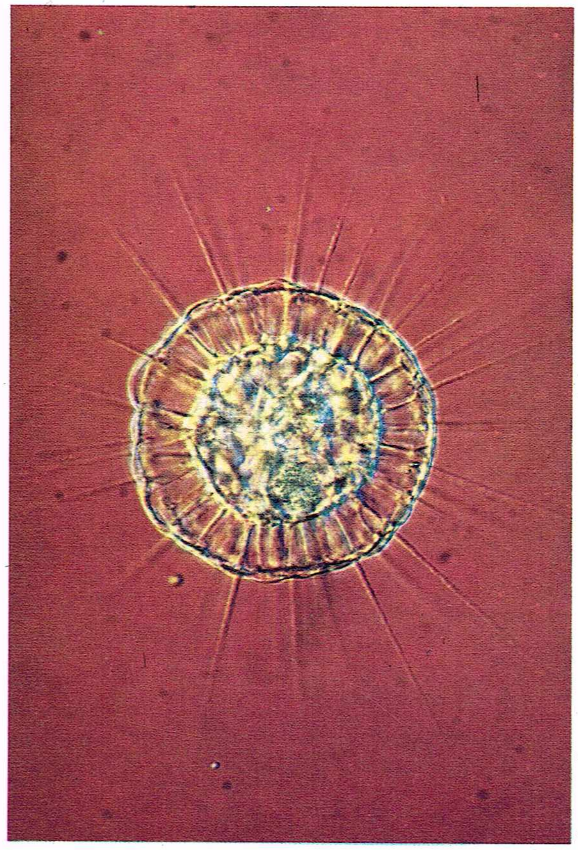

Crumeyrolles

◀ *La microscopie a fait d'énormes progrès et il existe actuellement de nombreux types de microscopes permettant une étude de plus en plus approfondie. Actinosphaerium, un Protozoaire Actinopode vu au microscope à contraste interférentiel.*

secondaire, réduction des os de la mandibule (seul le dentaire persiste), nouvelle articulation mandibulaire entre le squamosal et le dentaire (l'articulation mandibulaire reptilienne s'effectue entre le carré et l'articulaire), participation de quelques os mandibulaires reptiliens à la chaîne d'osselets de l'oreille moyenne du Mammifère (le carré deviendra le marteau et l'articulaire l'enclume), évolution de la denture, qui s'oriente vers la denture spécialisée des Mammifères. Les Reptiles sauropsidés sont diapsides*; ils possèdent deux fosses temporales.*

Les appareils circulatoires des Reptiles actuels et des Oiseaux d'une part et ceux des Mammifères d'autre part présentent une anatomie différente en raison de l'évolution de l'arc branchial IV; cet arc ou arc systémique donne les crosses aortiques qui s'unissent pour former l'aorte dorsale. Les deux crosses aortiques droite et gauche, présentes chez tous les embryons de Vertébrés, n'existent que chez les adultes d'Amphibiens et de Reptiles. La crosse gauche disparaît chez les Oiseaux; chez les Mammifères, seule la crosse gauche se maintient.

Une conclusion s'impose : la classification classique des Vertébrés reconnaissant des classes tout à fait hétérogènes ne donne pas une image exacte de la phylogenèse. Il est évident qu'il faut établir une classification évolutive réunissant les formes fossiles et actuelles. Cette classification représente une tâche ardue qui exige une connaissance approfondie de l'anatomie des fossiles. Ses progrès sont solidaires de l'abondance des formes fossiles, dont certaines seront peut-être des formes intermédiaires confirmant les liens de filiation soupçonnés ou méconnus.

Une classification doit être pratique et d'un emploi facile; qualités qui n'affectent pas la classification évolutive, encore en élaboration. Elle exige l'abandon ou la modernisation de certains termes habituels; cette attaque contre la routine est difficile à mener. Les ouvrages didactiques adoptent avec beaucoup de réticence les changements; l'embranchement des Cœlentérés doit disparaître et être remplacé par les embranchements des Cnidaires et des Cténaires. Un autre exemple est donné par les « Vers » : dans les anciennes classifications, l'embranchement des Vers a subi de nombreuses vicissitudes. Des classifications modernes ont retenu une classe des Vers; totalement hétérogène, elle ne correspond à rien, mais elle a la vie dure. Elle doit céder la place à une série d'embranchements indépendants : Plathelminthes, Acanthocéphales, Némertes, Némathelminthes, Annélides, Priapuliens, Sipunculiens, Échiuriens. Les dénominations Poissons, Amphibiens, Reptiles devraient s'effacer, mais de nouveaux termes constitueraient une source de confusion. Momentanément, il faut encore les garder en sachant qu'elles désignent des classes hétérogènes et artificielles composées de lignées indépendantes et ayant des origines différentes.

La classification classique fondée sur des degrés d'organisation est à peu près satisfaisante lorsqu'on n'envisage que les formes actuelles; les catégories taxinomiques définies présentent un ensemble de caractères communs. Mais les recherches doivent tendre à l'édification d'une nouvelle classification en harmonie complète avec la phylogenèse.

Techniques et organisation de la recherche zoologique

La Zoologie progresse aussi bien dans l'enrichissement de l'inventaire faunique que dans une connaissance plus approfondie du monde animal. Quels sont les moyens et les techniques qui conditionnent ses progrès? L'amélioration des diverses techniques commencée au XVIII^e et au XIX^e siècle s'est poursuivie au XX^e siècle et témoigne d'une intense accélération pendant les dernières décennies.

Les progrès de la microscopie se traduisent par la fabrication de microscopes de plus en plus pratiques, perfectionnés, aptes à des grossissements de plus en plus importants, microscope binoculaire, ultramicroscope, microscope en

▼ *Leeuwenhoek (1632-1723) fabriqua un microscope, qui lui permit d'observer Protozoaires, Levures et globules sanguins.*

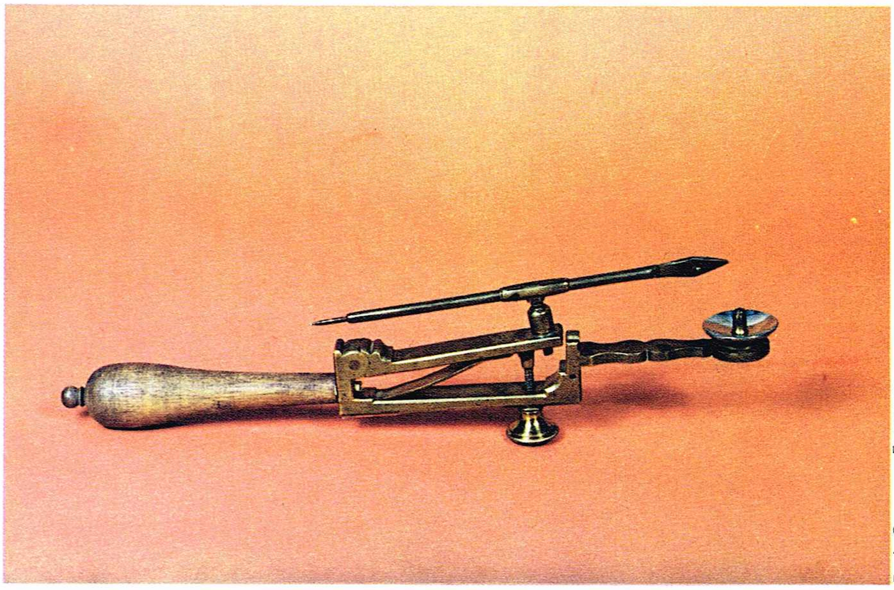

P.-J. Corson - Fotogram

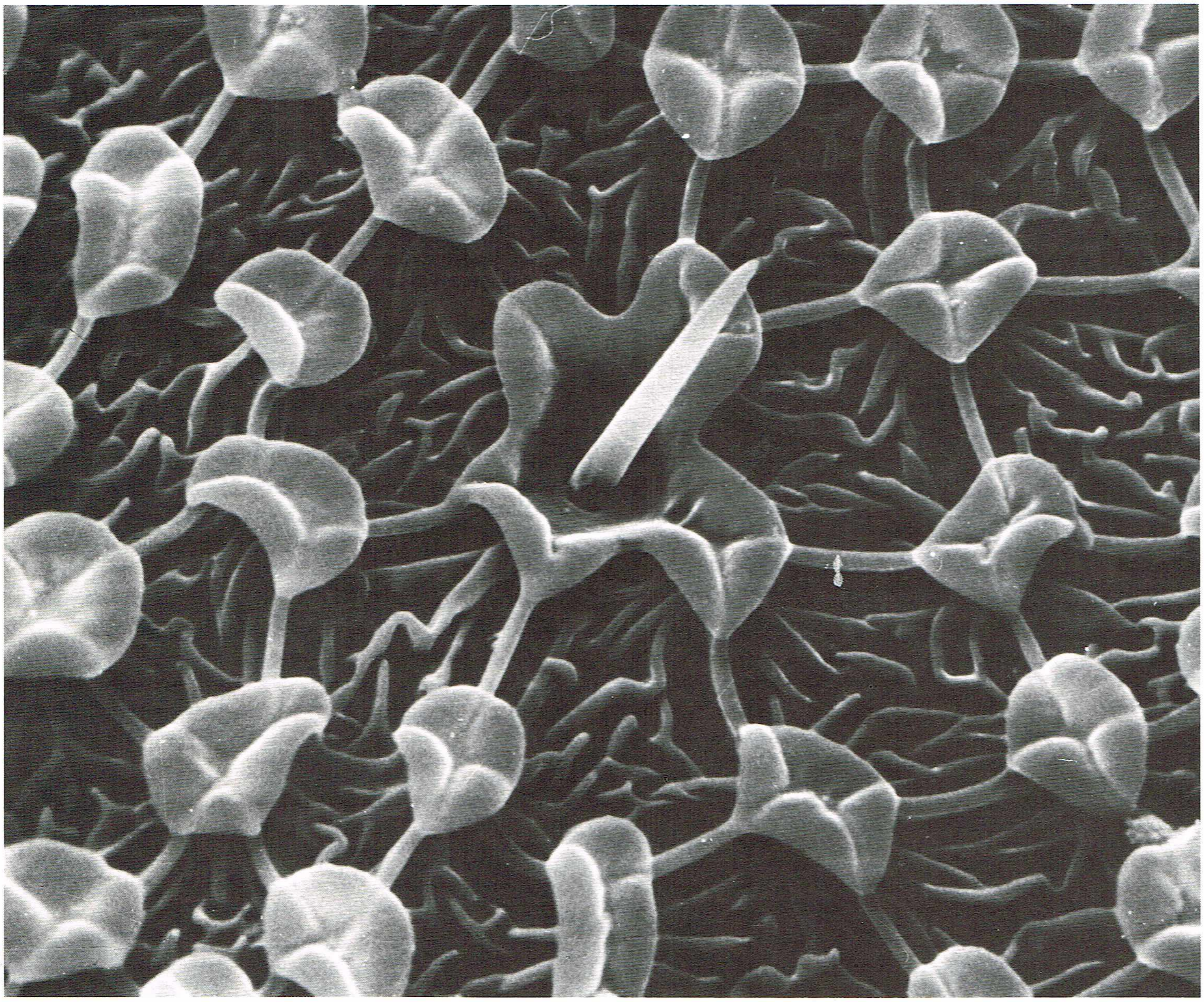

Carayon

▲ ***Le microscope électronique à balayage met en évidence le relief des structures. Autour de l'orifice des glandes odorifiques, la cuticule de la Punaise (Insecte) présente une véritable microsculpture.***

lumière polarisée, microscope à contraste de phase (1938), microscope interférentiel ; mais la grande révolution réside dans l'invention du microscope électronique qui permet l'examen des ultrastructures cellulaires sur des coupes ultrafines (100 à 300 Å ; 1 Å vaut un dix-millième de micron). Plus récent, le microscope électronique à balayage renseigne sur les reliefs des diverses structures, ornementation de téguments, de tests, de coquilles, surfaces avec papilles, villosités, alvéoles des organes. La cinématographie zoologique a fait d'immenses progrès depuis le premier film sur le développement d'un Tunicier (1904). La caméra constitue un puissant moyen d'analyse et d'investigation. Les techniques de micromanipulation, microdissection, micropuncture accroissent les possibilités expérimentales. Les méthodes histophysiques (spectrophotométrie, histophotométrie, fluorescopie, historadiographie, autoradiographie...) et histochimiques facilitent l'examen des tissus. Les isotopes radioactifs, l'ultracentrifugation, la chromatographie, l'électrophorèse, etc., permettent l'analyse des constituants chimiques. La réalisation d'appareils destinés à mesurer les conditions des milieux, l'invention de pièges pour la capture des petits animaux, les techniques de marquage des Insectes, des Poissons, des Baleines, celles de baguage des Oiseaux constituent des moyens appréciés dans la recherche zoologique.

Dès le XIX^e siècle, le développement de la Zoologie suscite la création de nouvelles sociétés spécialisées : sociétés linnéennes, sociétés zoologiques (celles de Grande-Bretagne et de France datent respectivement de 1826 et 1876), sociétés entomologiques ; d'autres associations correspondant aux disciplines plus récentes s'organisent (sociétés de biométrie, de spéléologie, de biogéographie, de génétique, etc.). Comme toute la littérature scientifique, la littérature zoologique souffre d'hypertrophie.

Les laboratoires spécialisés

La création de stations spécialisées, laboratoires maritimes, d'hydrobiologie, souterrains, favorise les études fauniques de biotopes particuliers. Sur les côtes des divers pays ont été édifiés des laboratoires maritimes. Le premier fut créé à

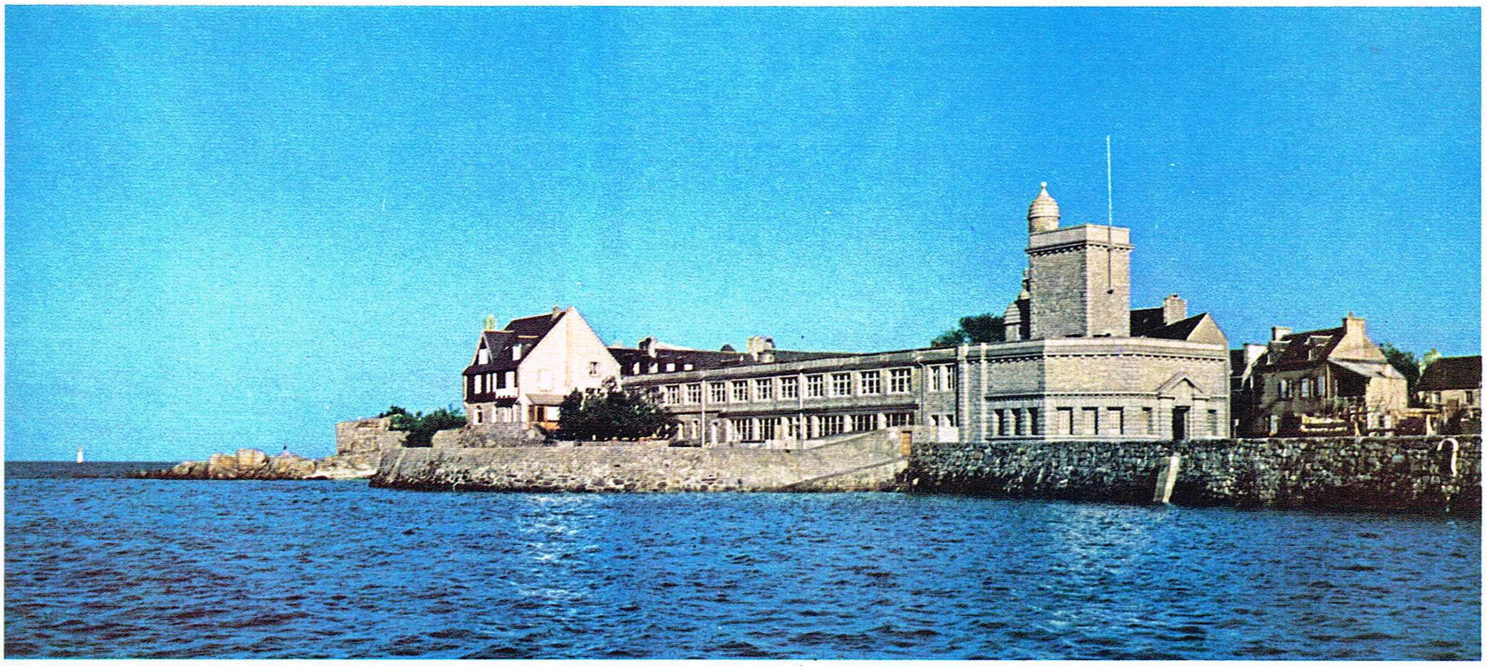

Laboratoire d'océanographie et de biologie marine de Roscoff. Centre national de la recherche scientifique.

Ostende (1843) ; en France, la première station fut fondée à Concarneau (1859), suivie de nombreuses autres, Roscoff (1871), Wimereux (1874), Banyuls (1881), Marseille, Saint-Vaast-la-Hougue, Arcachon, Luc-sur-Mer, Tamaris, Sète, Monaco, Villefranche, etc. En Italie, la station de Naples (1874) joue un rôle international de première importance. Outre le centre de Plymouth (1881), d'autres stations ont été établies sur les côtes anglaises. En Russie furent organisées les stations de Sébastopol sur la mer Noire et de Mourmansk sur la mer de Barents. La grande station américaine de Woods Hole occupe un site idéal. Des stations existent également en Espagne, au Japon, et dans bien d'autres pays. Parallèlement aux laboratoires maritimes, on a créé des laboratoires d'hydrobiologie destinés à étudier la faune d'eau douce ; le premier fut installé en Bohême ; en France, il en existe à Grenoble, sur le lac du Bourget, à Thonon, au Paraclet, à Gif-sur-Yvette ; d'autres stations sont plus particulièrement réservées à la pisciculture.

En raison de l'intérêt offert par les animaux cavernicoles, l'installation de laboratoires souterrains s'imposait afin d'entreprendre l'élevage de représentants de cette faune particulière et d'effectuer des recherches expérimentales. Le premier laboratoire souterrain, créé en 1897 sous le Jardin des Plantes, fut détruit par les inondations de 1910. En 1930, une véritable station biospéléologique fut organisée dans une galerie de la grotte d'Adelsberg (Postunia). En France, un laboratoire fut édifié en 1954 dans la grotte de Moulis (Ariège). Des travaux fort intéressants y ont été effectués. On a découvert que le développement des Insectes Coléoptères cavernicoles se fait dans l'œuf et que la phase larvaire est à peu près escamotée. Le métabolisme des cavernicoles rappelle celui des vieillards. Le Protée, Amphibien décoloré et aveugle des grottes, s'est reproduit à Moulis. Les larves sont noires et possèdent des yeux. Au cours du développement, le pigment disparaît et les yeux régressent ; cette double régression provient d'un mécanisme endocrinien qui ne s'effectue pas en raison de l'absence de lumière et de la basse température.

Ménageries et jardins zoologiques

Les ménageries et les jardins zoologiques, dont l'origine remonte à l'Antiquité, ont connu un grand développement depuis le XIX^e siècle. La ménagerie du Muséum national d'histoire naturelle fut créée en 1793 par É. Geoffroy Saint-Hilaire ; en dix ans, elle devint l'une des plus riches ménageries du monde. Les cadeaux des souverains égyptiens enrichirent les collections ; en 1826, le pacha d'Égypte offrit au roi une Girafe, animal très rare et très cher ; elle débarqua à Marseille et remonta de Marseille à Paris par la route. É. Geoffroy Saint-Hilaire l'accompagnait : ce voyage fut un grand événement. Les foules se pressaient pour voir la Girafe ; elle resta cinq jours à Lyon. Arrivé à Paris, le cortège se rendit au château de Saint-Cloud et l'animal fut présenté au roi. Cette Girafe mourut en 1845 et ce n'est qu'en 1860 que la ménagerie put acquérir une Girafe vivante. Le négus d'Abyssinie

▲ Un certain nombre de laboratoires spécialisés ont été créés partout dans le monde afin d'étudier des biotopes particuliers. Ici, le laboratoire maritime de Roscoff, créé en 1871.

▼ De nombreux jardins zoologiques ont été fondés au XIX^e siècle ; actuellement, on a tendance à laisser les animaux en semi-liberté dans des zones plus vastes où certaines espèces peuvent se reproduire plus facilement. Le parc de Thoiry en est un bel exemple.

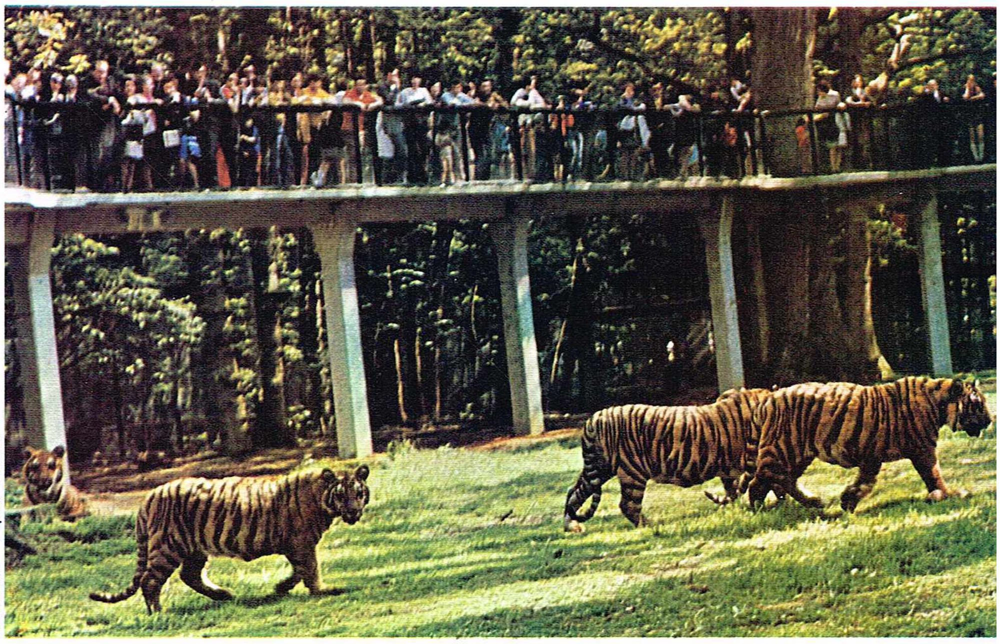

Gonnaud - Alpha Presse

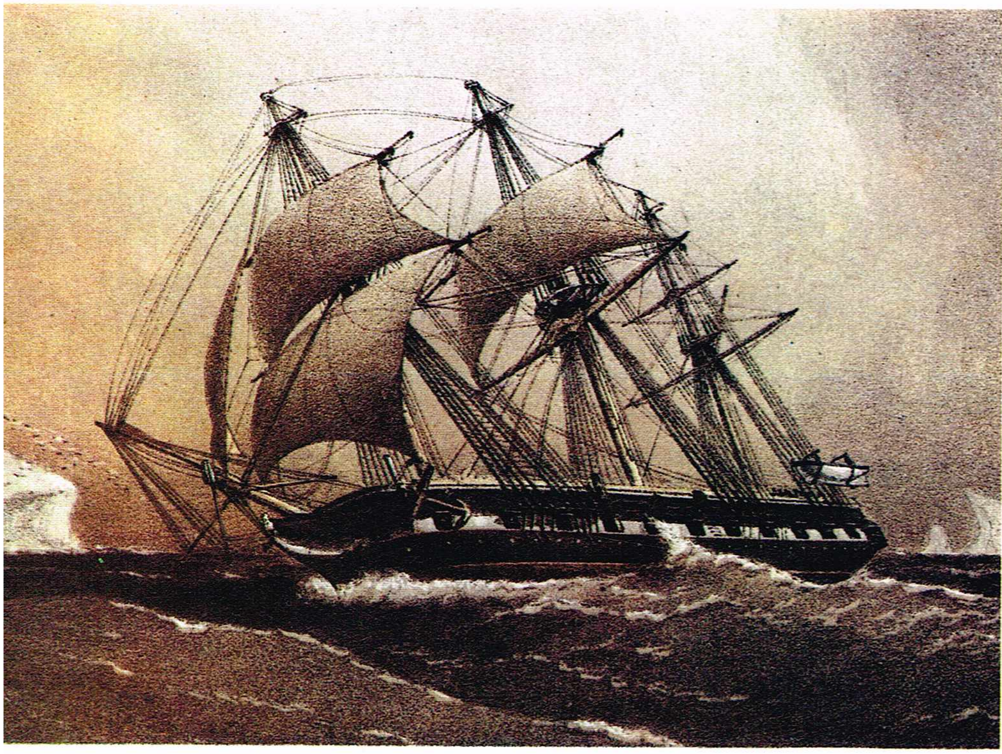

Greenwich National Maritime Museum

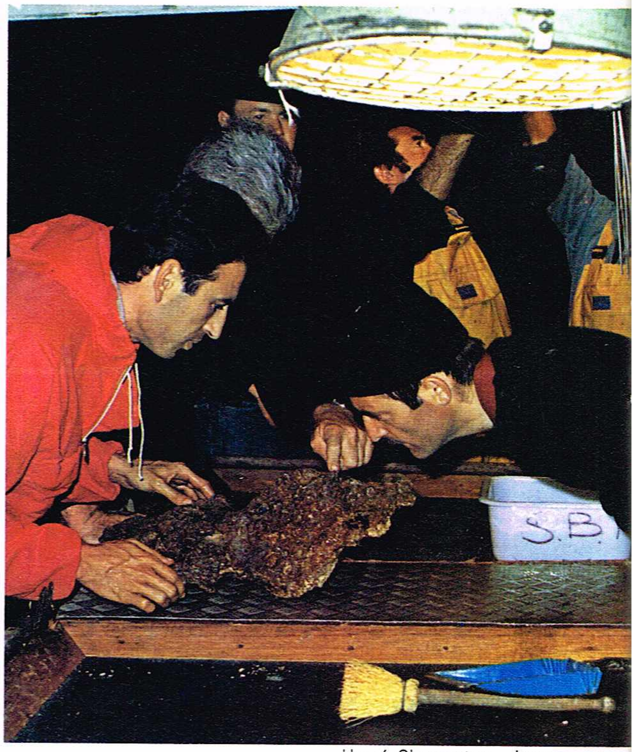

Hervé Chaumeton - Jacana

▲ *Les expéditions océanographiques ont favorisé le développement de la Zoologie sous-marine ; à gauche, le navire Challenger qui sillonna l'Atlantique et le Pacifique de 1873 à 1876 ; à droite, étude du matériel récolté lors de l'expédition Thalassa en 1972.*

offrit à J. Grévy, président de la République (1882), deux zèbres appartenant à une nouvelle espèce qui fut dédiée au président, Equus (Dolichohippus) grevyi. *Le présent zoologique le plus récent (1973) est celui du président de la Chine populaire au président Pompidou, deux Pandas (Mammifères de la famille des Procyonidés) qui ne vivent que dans une certaine région de Chine ; ils sont installés au Jardin zoologique de Vincennes.*

La liste des jardins zoologiques est longue ; le premier s'ouvrit à Londres en 1827 ; d'autres suivirent dans le monde entier. Une conception nouvelle préside à leur établissement. L'animal est placé dans un milieu qui reproduit aussi exactement que possible les conditions de son milieu naturel ; il mène une vie libre. Dans ces conditions, la plupart des animaux se reproduisent. Les vivariums et les aquariums se multiplient, et même des « océanoriums », en Floride et en Californie, permettent de garder en captivité dans des conditions satisfaisantes des Dauphins, des Marsouins, voire de petites Baleines. Des observations doublées de photographies et de films fournissent des documents appréciables sur le comportement des animaux.

Les grandes expéditions marines

*Les expéditions marines ont grandement participé à la connaissance de la faune marine littorale et de celle du plateau continental. En France, les plus célèbres furent celles de l'*Uranie, *de la* Physicienne *(1817-1820), de la* Coquille *(1812-1815), de l'*Astrolabe *(1826-1829), de la* Bonite *(1836-1837), de la* Vénus, *de l'*Astrolabe *et de la* Zélie *(1837-1840). Le voyage de circumnavigation du* Beagle *(1831-1836) décida de la carrière de Darwin.*

La découverte, en 1859, d'animaux fixés sur un câble télégraphique provenant des profondeurs de la Méditerranée (2 160 m) fut une surprise ; on estimait que la vie ne pouvait exister au-delà de 600 à 800 m. Cette révélation déclencha l'exploration des abysses. Tous les pays y participèrent ; l'Angleterre avec les croisières du Lightning *(1868) et du* Porcupine *(1869), du* Challenger *qui sillonna l'Atlantique et le Pacifique de 1873 à 1876. La France organisa les croisières du* Travailleur, *du* Talisman *(1881-1883) et du* Caudan *(1894), les États-Unis celles du* Blake *et de l'*Albatros *(1899-1900) ; l'Allemagne réalisa celle du* Valdivia *(1899-1900), la Belgique celle de la* Belgica *(1897-1899), la Hollande celle du* Siboga. *Des collections considérables furent récoltées et étudiées. Le prince Albert Ier de Monaco explora les grands fonds marins à bord de ses navires l'*Hirondelle *et la* Princesse Alice *à partir de 1885 ; les collections rapportées furent exposées au Musée océanographique de Monaco et firent l'objet d'importantes monographies.*

Au XXe siècle, les recherches océanographiques se poursuivent et acquièrent un aspect nouveau. Depuis 1945, les diverses puissances navales possèdent une flotte océanographique ; les États-Unis, l'U.R.S.S., la Grande-Bretagne et le Japon sont les plus richement pourvus. La France détient plusieurs bâtiments équipés pour la recherche, dont le célèbre Calypso. *Les explorations atteignaient 6 000 m jusque vers 1940. Les profondeurs ont progressé et les fosses du Pacifique (fosse des Mariannes) sont prospectées par le* Vitias *(U.R.S.S.) ; les profondeurs atteintes dépassent 11 000 m. L'équipement très modernisé des navires océanographiques est bien adapté au travail à accomplir ; la technique de la photographie est renouvelée.*

L'exploration sous-marine est actuellement réalisée par trois dispositifs : le scaphandre autonome, qui permet d'atteindre 60 m de profondeur ; la « soucoupe plongeante », avec laquelle l'observation se fait jusqu'à 400 m ; le bathyscaphe, véritable ballon sous-marin, qui ne peut être utilisé qu'à partir de 1 000 m jusqu'à 10 000 m. Des réalisations encore plus audacieuses marqueront l'avenir.

La disparition des espèces

La vie de toute espèce animale comprend plusieurs phases, la dernière étant la phase de sénescence qui se termine par la mort. Cette extinction naturelle des espèces s'accroît notablement dans certaines circonstances et surtout par l'intervention humaine : les chasses et les pêches inconsidérées, les défrichements abusifs, les feux de brousse, la surexploitation des pâturages, l'abus des insecticides, la destruction des biotopes aquatiques, les diverses pollutions dans tous les milieux exercent une action nocive et détruisent les faunes et les flores.

L'Homme, par des introductions accidentelles ou volontaires d'animaux, perturbe les équilibres fauniques qui « sont à la merci d'une chiquenaude ». Voici quelques exemples de ces initiatives le plus souvent catastrophiques. Le Gastéropode pulmoné Achatina fulica *propre à l'Afrique orientale est actuellement répandu dans la zone tropicale de l'Ancien Monde, où il dévaste les plantations et propage les maladies végétales; une lutte biologique a été instaurée avec plus ou moins de succès. L'introduction du Poisson-Chat* (Ameiurus nebulosus), *de la Perche-soleil* (Eupomotis gibbosus), *qui ont prospéré dans nos rivières, a éliminé des espèces plus appréciées. Le Crabe chinois* (Eriocheir sinensis), *transporté d'Extrême-Orient dans l'eau des ballasts d'un navire, a progressé dans les cours d'eau depuis la Baltique jusqu'à la Gironde et la Méditerranée ; il détruit les plantes, concurrence certains Poissons et mine les bords des rivières. La Lamproie* (Petromyzon marinus), *présente normalement dans quelques lacs américains, profita de l'aménagement d'un canal naviguable pour gagner les différents Grands Lacs ; très abondantes, elles éliminent Truites et Corégones fort appréciés. Les échanges commerciaux, la rapidité des voyages favorisent les introductions d'Insectes vivants, nocifs pour les cultures et l'état sanitaire. Le fameux Doryphore* (Leptinotarsa decemlineata), *Coléoptère de l'ouest des États-Unis, parasite de Solanées sauvages, fut introduit dans la région bordelaise en 1920 d'où il gagna toute l'Europe et s'attaqua à la Pomme de terre. Parmi les Oiseaux, l'Étourneau* (Sturnus vulgaris), *abondant dans la région paléarctique, s'est acclimaté dans toutes les parties du monde ; en soixante-dix ans, il a peuplé l'Amérique du Nord à partir de quelques individus lâchés à Central Park à New York. Il perturbe les Oiseaux autochtones en accaparant la nourriture, en occupant les aires de nidifications; il ravage les vergers, les vignobles et les champs. Le Lapin* (Oryctolagus cuniculus), *originaire de la région méditerranéenne (Espagne, îles de la Méditerranée occidentale), après avoir envahi l'Europe, a été introduit en Australie en 1787 et en 1859 et en Nouvelle-Zélande en 1864. Il représente un véritable fléau et il est actuellement dispersé dans le monde entier. Son action est doublement grave : destruction non seulement de la végétation, mais d'une grande partie de la faune (Marsupiaux herbivores). La lutte biologique par introduction en Australie d'une maladie épizootique, la myxomatose, qui sévissait sur les Lapins du Brésil, détruisit les quatre cinquièmes des Lapins.*

Il faudrait encore citer les tentatives d'acclimatation dans divers pays du Rat musqué (Ondatra zibethica), *du Ragondin* (Myocastor coypu), *de l'Écureuil gris* (Sciurus carolinensis)*. Sans aucune exagération, on peut dire que la faune indigène des régions insulaires (Nouvelle-Zélande, Hawaii, Galápagos, Antilles, îles subantarctiques...) a été dévastée par les essais d'acclimatation ne respectant pas l'endémisme si particulier de ces îles. Les Oiseaux sont rapidement frappés. L'Ara de Cuba* (Ara tricolor) *découvert vers 1885 est éteint. Trois gigantesques Pigeons, incapables de voler, le Dronte de l'île Maurice* (Raphus cucullatus), *le Dodo de la Réunion* (Raphus solitarius) *et le Solitaire de Rodriguez* (Pezophaps solitarius) *se maintenaient en absence de tout ennemi naturel; mais les marins les consommèrent; le premier disparaissait vers 1680 et les deux autres pendant le XVIII^e^ siècle. Le Perroquet* (Mascarinus mascarinus) *de la Réunion et la Huppe de Bourbon* (Fregilupus varius) *s'éteignirent dans la première moitié du XIX^e^ siècle. L'Émeu noir* (Dromaeus novae-hollandiae diemenianus) *vivant dans l'île Kangourou au sud de l'Australie était disparu en 1836. Les gigantesques Moas ou* Dinornis *de Nouvelle-Zélande ont été*

Muséum national d'histoire naturelle - Parc zoologique

▲ *Le Panda (Ailuropoda melanoleuca), est le symbole du World Wildlife Fund, ou Fonds mondial pour la nature.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◄ *Certaines espèces ont été introduites par l'Homme volontairement ou de façon fortuite par les moyens de transport. Ces introductions n'ont pas toujours été bénéfiques; ainsi le Doryphore (Leptinotarsa decemlineata), Coléoptère parasite des Solanacées sauvages de l'ouest des U.S.A., fut introduit en 1920 à Bordeaux et gagna toute l'Europe où il s'attaqua aux cultures de pomme de terre.*

▲ *De nombreux animaux ont été exterminés par l'Homme; ainsi, le Bison d'Amérique* (Bison bison) *n'existe plus que dans quelques lieux privilégiés (réserves et parcs nationaux).*

exterminés il y a plus de six cents ans. Le « Mamo » des Hawaiiens (Drepanis pacifica) *n'existe plus depuis 1898; les chasseurs de plumes et les défricheurs en sont responsables. Une chasse intensive de l'Oie néné* Branta sandvicensis *des Hawaii a réduit considérablement cette espèce qui ne comptait plus qu'une trentaine d'individus en 1951. Plus de 60 % de la faune aviaire des Hawaii est éteinte ou proche de l'être.*

Le grand Pingouin (Alca impennis) *localisé sur les îlots de l'Atlantique nord est disparu depuis 1844. Le Pigeon migrateur* (Ectopistes migratorius) *formait des bandes en Amérique du Nord; les dernières furent observées en 1898-1900.*

Les Mammifères subissent des exterminations semblables. Le dernier Aurochs (Bos primigenius) *s'est éteint dans les forêts polonaises en 1627. Des mesures énergiques sauvèrent les derniers survivants du Bison d'Europe* (Bison bonasus)*. L'Antilope Saïga, fréquente dans les steppes de l'U.R.S.S. orientale, est en voie d'extinction. Les dévastations africaines ont commencé au XVIII^e^ siècle; l'Hippotrague bleu* (Hippotragus leucophaeus) *est le premier Ongulé africain exterminé par l'Homme (1799). Il en est de même pour plusieurs Zèbres : le Quagga* (Equus quagga quagga) *disparaissait totalement entre 1870 et 1880; le Zèbre de Burchell* (Equus quagga burchelli) *s'éteignait au début du siècle. Des Antilopes, le Gnou à queue blanche, le Zèbre des montagnes, l'Éléphant* (Loxodonta africana) *n'existeraient plus en Afrique du Sud, s'ils n'étaient strictement protégés.*

Des Mammifères aquatiques, les Otaries à fourrure (Nouvelle-Zélande, Australie, Kerguelen, Cap, îles au large du Chili), des Baleines, le Baleinoptère ou Rorqual, sont grandement menacés par des chasses intensives; des mesures sévères enrayèrent l'extermination de la Loutre de mer (Enhydra lutris)*. Et cette liste déjà trop longue pourrait encore se prolonger.*

La protection de la Nature

En présence de cette situation tragique, quelques hommes clairvoyants ont compris le danger et la nécessité d'intervenir afin d'arrêter ce pillage de la Nature. Il était indispensable de protéger la Nature. Cette idée n'est pas nouvelle; depuis le Moyen Age, les princes et souverains réclamaient la protection de la grande faune et des forêts afin que les loisirs de la chasse ne soient pas gênés. C'est seulement au XIX^e^ siècle que l'on comprit l'urgence de mettre en réserve des zones du territoire. En France, les premières réserves naturelles datent de 1853; à cette époque furent créées dans la forêt de Fontainebleau des « réserves artistiques » destinées à conserver des aires forestières particulièrement belles et capables d'inspirer les peintres de l'école de Barbizon.

Mais une véritable réserve à grande échelle s'organisa aux États-Unis lors de la création du premier parc national, le Yellowstone National Park (1872). Celui-ci répondait à la conception du parc national dont le double objet cherche à préserver une zone de nature afin qu'elle demeure intacte et à satisfaire les besoins esthétiques, récréatifs et culturels. Plus de trente parcs nationaux se trouvent aux États-Unis. Il existe aussi des réserves nationales ou privées s'étendant sur de vastes territoires et préservant la faune sauvage; d'autres réserves cherchent à protéger certains éléments de la faune, tels de nombreux Rapaces qui, en automne, gagnent le sud en empruntant des voies de migration qui passent au-dessus des collines de Pennsylvanie; les Oiseaux étaient périodiquement massacrés; une réserve dans cette zone exerce donc un rôle efficace de protection. Le Canada et l'Amérique du Sud se sont engagés dans cette action. Dans la région caraïbe, deux stations biologiques entretenues par des institutions américaines préservent des habitats primitifs et constituent des laboratoires naturels de recherche.

M. Brosselin - Jacana

En France, la loi aménageant les parcs nationaux date de 1960. Dans les Alpes, le parc national de la Vanoise (1963) a donné des résultats excellents. Le troupeau de Bouquetins a été reconstitué et plus de trois cent soixante-quinze Bouquetins et mille cinq cents Chamois circulaient en liberté en 1969; l'intégrité de ce parc a été mise en danger, ce qui a soulevé de vives protestations. Le parc national des Pyrénées occidentales, fondé en 1967, se trouve dans une région exceptionnellement belle avec cirques, lacs et cascades. La faune méritant une protection comporte notamment l'Ours brun, l'Izard, le Desman, le Lynx, dont l'existence est incertaine, et, parmi les Oiseaux, l'Aigle royal, le Gypaète, le Lagopède. Le troisième est le parc national de Port-Cros, qui comprend l'île de Port-Cros et les trois îlots rocheux qui l'entourent; ici la protection consiste à conserver la sylve méditerranéenne primitive avec sa faune et sa flore ainsi qu'elle se

▲ La réserve ornithologique des Sept-Iles (Bretagne) héberge une grande population de Fous de Bassan.

▼ Les parcs nationaux ont permis de préserver un certain nombre d'espèces qui se raréfient : Bouquetins (Capra ibex) dans le parc du Grand Paradis, homologue italien du parc de la Vanoise.

S. Stefenelli

présentait sur la côte provençale avant son envahissement par le tourisme. Le parc national des Cévennes a été créé par un décret de 1970; le maintien dans son enceinte d'une importante population rurale lui donnera un caractère particulier. Le parc national du Pelvoux ou des Écrins a été inauguré récemment. Celui du Mercantour, dans les Alpes-Maritimes, est encore à l'étude.

La France possède également des réserves; la réserve de la Camargue, fondée en 1928, avec ses variétés de milieux dulçaquicoles et saumâtres, abrite une riche faune et la seule colonie régulière européenne du Flamant (Phoenicopterus ruber). *D'autres réserves existent en montagne ou sur le littoral, telles les réserves des Sept-Iles au large des Côtes-du-Nord et du Cap Fréhel pour protéger les Oiseaux, Fous de Bassan* (Sula bassana) *et Fulmars* (Fulmarus glacialis).

La Suisse entretient de nombreuses réserves qui assurent la protection efficace des sites, de la flore et de la faune; un parc national en Basse-Engadine situé entre 1 500 et 3 800 m date de 1914; les effectifs de Mammifères et d'Oiseaux (Rapaces) ont prospéré.

En Italie, le parc national du Grand Paradis, dans les Alpes piémontaises, est une belle réussite; il a permis de sauver le Bouquetin. Une liaison entre ce parc et celui de la Vanoise permettrait la protection d'une vaste région alpine.

En Afrique, le Transvaal créait en 1898 la première réserve, nommée Sabi Game Reserve; elle deviendra en 1926 le célèbre parc national Krüger, où vivent beaucoup de grands Mammifères. Le parc national Albert au Zaïre (ex-Congo belge) fut inauguré en 1925; il abrite des Gorilles de montagne, des Ongulés, des Éléphants, des Buffles, des Antilopes, des Hippopotames sur le bord des rivières. Dans cette immense région du Congo, les divers parcs assurent la conservation d'une riche nature.

Après des tentatives variées, une Union internationale pour la protection de la Nature fut fondée en 1954; des autorités compétentes définissent les règles de défense et de protection de la faune, de la flore et des sites particulièrement intéressants. L'Unesco se préoccupe de ces problèmes et a promulgué une véritable charte mondiale de la Conservation de la Nature (1962). De nombreux « sanctuaires de la Nature » existent déjà; d'autres seront encore édifiés; ainsi le sauvetage des espèces menacées sera de plus en plus efficace; le repeuplement des biotopes désertés s'effectuera. Le patrimoine national que constitue la Nature dans tous ses aspects ne s'amenuisera pas indéfiniment, il faut au moins l'espérer.

Andrée Tétry.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE ET RÉCENTE

CUÉNOT, L., et TÉTRY, A., *l'Évolution biologique*, Paris, 1951. - DEVILLERS, C., *Introduction à l'étude systématique des Vertébrés*, Paris, 1973. - DORST, J., *Avant que Nature meure*, Neuchâtel, 1965. - GRASSÉ, P.P., et DEVILLERS, C., *Zoologie*, t. II du *Précis de sciences biologiques*, Paris, 1965. - GRASSÉ, P.P., et TÉTRY, A., *dir. Zoologie*, t. I et II *(Encyclopédie de la Pléiade)*, Paris, 1963. - ROSTAND, J., et TÉTRY, A., *la Vie*, Paris, 1968. - ROSTAND, J., et TÉTRY, A., *l'Homme. Initiation à la Biologie*, Paris, 1972. - TÉTRY, A., *la Science contemporaine, XIXe siècle, Zoologie. In Histoire générale des sciences*, t. III, vol. I, Paris, 1961; *la Science contemporaine, XXe siècle, Zoologie. In Histoire générale des sciences*, t. III, vol. II, Paris, 1964; *Zoologie*, t. III et IV *(Encyclopédie de la Pléiade)*, Paris, 1972 et 1974 (sous presse). - VAYSSIÈRE, P., *les Parcs nationaux*, Paris, 1971.

▼ *Flamants roses* (Phoenicopterus ruber) *sur le lac Nakuru (Kenya). Ce parc national africain est aujourd'hui gravement menacé par la pollution.*

Bruce Coleman - A.-J. Deane

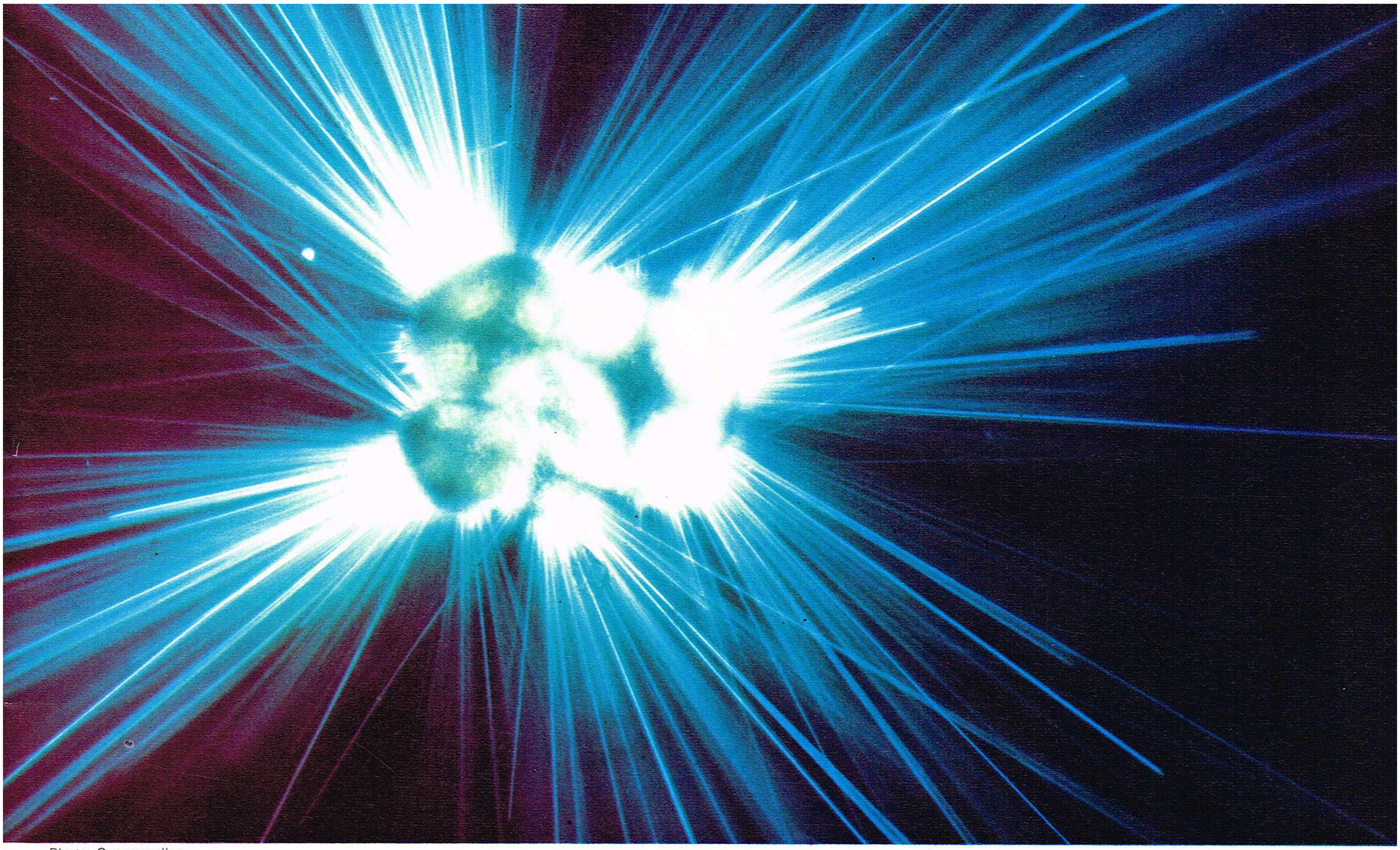

Photo Crumeyrolles

LES PROTOZOAIRES

Découverts en 1675 par Anthony Van Leeuwenhoek, les Protozoaires sont classiquement définis comme étant des *Animaux unicellulaires*. Cela sous-entend d'une part que, comme tous les Animaux, ils sont incapables de se suffire à eux-mêmes et dépendent du règne végétal pour leur alimentation ; ils sont dits *hétérotrophes* par opposition aux êtres végétaux doués du pouvoir de photosynthèse chlorophyllienne (capacité d'élaborer des substances organiques complexes à partir du gaz carbonique et d'énergie lumineuse) et qualifiés en conséquence d'*autotrophes*. D'autre part, cette diagnose lapidaire traduit le fait primordial suivant : un Protozoaire est organisé dans le cadre d'une cellule unique assumant les tâches multiples dévolues à des organes distincts chez les autres Animaux. Certes, il est très fréquent qu'une telle cellule devienne plurinucléée et donne naissance à un syncytium (plasmode), ou qu'elle reste associée à ses cellules sœurs pour former une colonie; mais en règle générale il y a dissociation de cet édifice parfois très complexe en autant d'éléments identiques ou ayant les mêmes potentialités. Les Protozoaires ne montrent pas de distinction entre un *soma* (formé par toutes les cellules du corps à l'exception des cellules sexuelles qui constituent le germen) temporaire et sans descendance et un *germen* potentiellement immortel. De ce point de vue, le tissu germinal des Métazoaires, qui se résout lui aussi en éléments équipotentiels, peut être comparé à un agrégat de Protozoaires.

On peut définir sommairement un Protozoaire comme étant une cellule animale avec une membrane périphérique, un cytoplasme et un noyau. Mais comment les identifier à coup sûr ? et de quelles autres formes vivantes les distinguer? Reconnaître dans la vie courante un Végétal d'un Animal est une expérience quotidienne, mais distinguer aussi clairement que possible les Protozoaires de formes voisines qui leur ressemblent et dont ils dérivent peut-être n'est pas chose aisée. Si des Animaux sont unicellulaires, certains Végétaux le sont également; ce sont globalement les Protophytes, qui sont chlorophylliens, donc autotrophes. Il arrive souvent, spontanément ou par accident au cours de la division cellulaire, ou par passage prolongé à l'obscurité ou encore sous l'action de drogues, qu'un Protophyte donné ou tous les individus d'un même genre perdent cette propriété. De Protophyte autotrophe et végétal bien caractérisé, il devient un hétérotrophe (osmotrophe ou phagotrophe), et donc physiologiquement un Protozoaire. Il se présente même des cas encore plus compliqués : un Euglénien se développant en autotrophe à la lumière peut poursuivre ses synthèses à l'obscurité si le milieu est convenable. Il existe même des Cryptomonadines qui, tout en se livrant à la photosynthèse, capturent des proies et se comportent donc simultanément en auto- et hétérotrophes; ils procèdent donc des deux règnes.

Ces difficultés et bien d'autres considérations ont amené en 1886 Haeckel à regrouper dans un même sous-règne des *Protistes (Protista)* tous les êtres organisés sur le mode monocellulaire, sans préjuger de leurs affinités réelles. Il employait même plus précisément le terme de « cytodes » au lieu de celui de cellules pour ne pas impliquer une architecture précise. Pour compréhensible que soit cette manière de procéder, elle ne résout en rien le dilemme. Elle est cependant passée dans le langage courant et l'on parle plus volontiers de protistologie que de protozoologie; le périodique français consacré à ces recherches et publié par le C.N.R.S. s'appelle *Protistologica*.

Cependant, une difficulté supplémentaire surgit; c'est la nécessité de distinguer les Protistes qui ne sont pas dotés d'un noyau véritable (enveloppé d'une membrane nucléaire l'isolant du cytoplasme), mais dont le matériel nucléaire, porteur de l'information génétique, est simplement disposé au centre de la cellule et mêlé au cytoplasme. Une telle organisation caractérise les Protistes inférieurs ou *Procaryotes* (Bactéries au sens large et Algues bleues). Ceux qui sont pourvus d'un noyau complet sont alors dits Protistes supérieurs ou *Eucaryotes* (Protophytes et Protozoaires).

Après qu'eut été ainsi précisée l'individualité de l'embranchement des Protozoaires vis-à-vis de ses

▲ ***Squelette* de Globigerinella, *Foraminifère planctonique dont les nombreuses loges (Polythalame) sont disposées dans un seul plan et toutes visibles. La sustentation est grandement facilitée par de longues épines rayonnantes. L'ensemble du squelette étant en calcite s'illumine, en lumière polarisée, selon quatre directions orthogonales et s'éteint selon les quatre secteurs complémentaires en produisant, sur chaque loge, le phénomène de la croix noire (0,8 mm).***

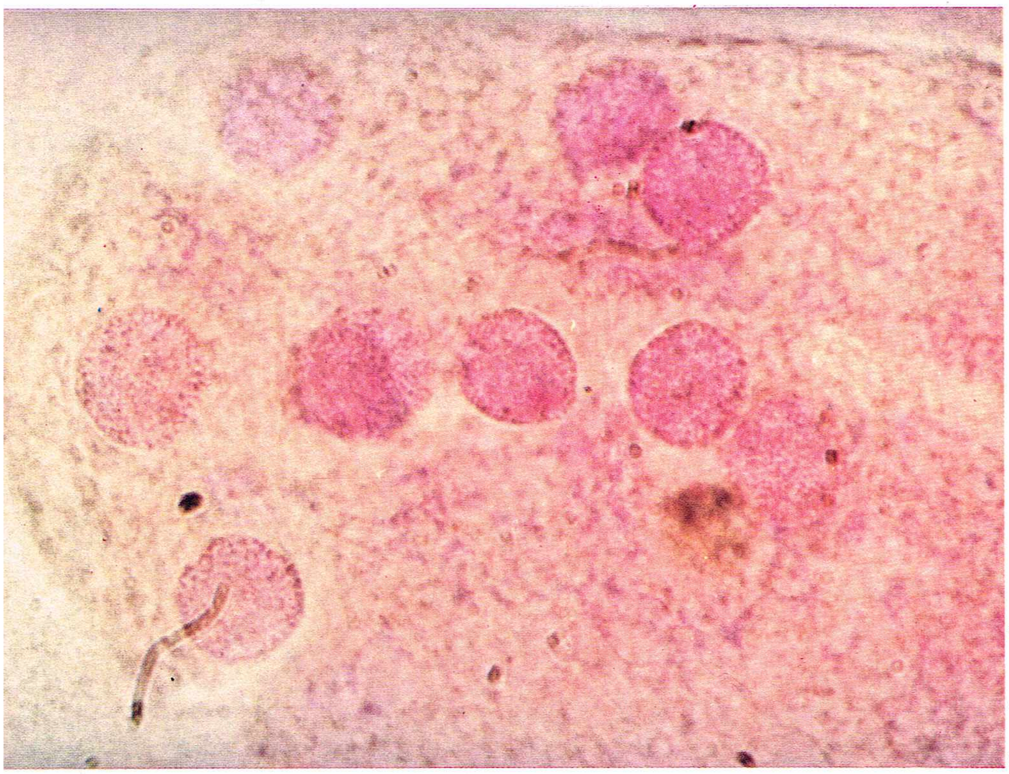

Photo Crumeyrolles

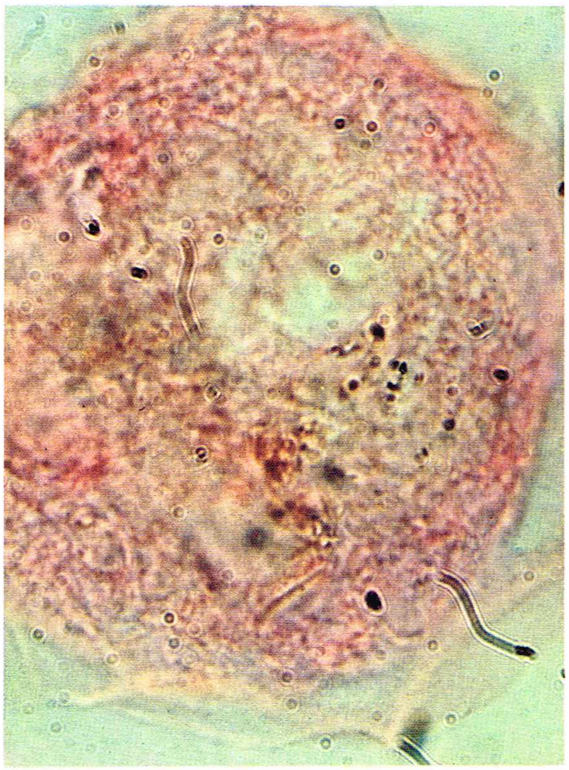

Photo Crumeyrolles

▲ Amoeba (Pelomyxa) villosa *(à gauche), syncytiale, montre ici dix grands noyaux (30 μ). Elle laisse fréquemment sur le substrat des lambeaux de cytoplasme anucléé (à droite)* [*coloration* in toto].

▼ *Les* Achromatium *sont des Bactéries (Procaryotes) libres, de grande taille (20 à 30 μ), fréquentes dans les eaux stagnantes putrides; elles accumulent des grains de soufre et souvent des cristaux de CO_3Ca. Elles sont souvent considérées comme des Algues bleues dépourvues de plastes* (in vivo, *sur fond noir*).

voisins, une nouvelle définition, plus nuancée, a été proposée : les Protozoaires sont des « Protistes eucaryotes à affinités animales ». Sous l'apparence de la simplicité, cette diagnose masque une réalité des plus complexes; l'image classique, rencontrée dans les manuels, d'une Amibe lobée pourvue d'un noyau et de quelques granulations cytoplasmiques est bien simpliste. Déjà l'organisation détaillée d'une cellule de Métazoaires, très complexe et encore imparfaitement connue, n'a été élucidée qu'à la suite des efforts acharnés de générations de cytologistes et grâce à l'apport récent de la microscopie électronique. Mais les cellules de Métazoaires sont hautement spécialisées et ne remplissent que certaines fonctions, parfois même une seule; on dit qu'elles sont différenciées. Cette différenciation commence pour la plupart d'entre elles très tôt au cours de la segmentation de l'œuf et ne fait que s'accuser au cours de l'ontogenèse. Une cellule musculaire n'a pas le même chimisme, n'est pas le siège des mêmes synthèses qu'une cellule hépatique, nerveuse ou conjonctive. Rien de tel ne concerne les Protozoaires, qui doivent donc affronter et mener à bien, sous peine de disparaître, toutes les tâches qui incombent ordinairement à un organisme entier : sensibilité, orientation, préhension, déplacement, capture de proies, digestion, élimination solide et liquide, défense, survie, reproduction, etc. Tirant argument de cet état de fait, et considérant qu'un Protozoaire est avant tout un organisme non divisé en cellules, Jahn, en 1949, suggère de considérer les Protozoaires comme des « organismes acellulaires du règne des Protistes ». Cette façon de voir semble bien un peu abusive, et, quoique louable, l'effort de systématisation ne doit peut-être pas être poussé trop loin. Bien peu de chose en fait distingue un globule blanc d'une petite Amibe (mis à part le cycle), et l'allure amiboïde de cellules en culture est si frappante qu'exclure une Amibe du cadre cellulaire nous paraît un jeu de mots excessif et stérile.

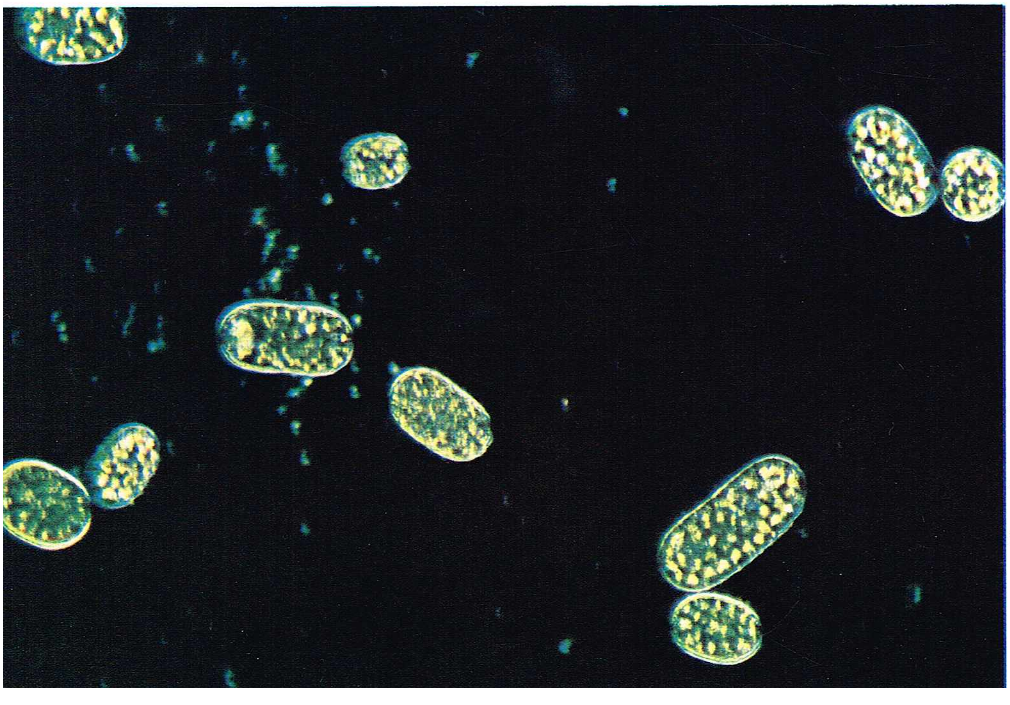

Photo Crumeyrolles

Les Protozoaires et l'origine des Métazoaires

Il subsiste d'autres caractères importants propres aux Protozoaires et qu'il nous faut maintenant examiner. Quelle que soit la ressemblance entre une Amibe et une cellule de Métazoaires en culture, un hiatus profond demeure dans le mode de multiplication; la division cellulaire trahit immédiatement l'origine et les parentés de celui qui s'y adonne.

Dans sa boîte de culture, la cellule de Métazoaire présente une orthomitose classique et immédiatement reconnaissable, et le Protozoaire suit le mode de division du groupe auquel il appartient. Cette spécificité du mode de division semble si étroite que tout naturellement l'orthomitose des Métazoaires a été activement recherchée parmi une grande diversité de Protozoaires; or, malgré des études minutieuses, elle n'a pas encore été rencontrée; certes, d'innombrables Protozoaires n'ont pas encore été étudiés à ce jour sous cet angle et la recherche de ces phénomènes demande un matériel biologique abondant et exige une culture continue souvent délicate. N'oublions pas qu'un grand nombre de Protozoaires n'ont été observés qu'une seule fois et que leur cytologie n'est que rarement connue avec la précision requise pour permettre une ré-identification certaine. Cette lacune est regrettable, car, s'il est permis de penser qu'historiquement les Métazoaires dérivent des Protozoaires, la découverte d'une identité physiologique aussi intime serait de toute première importance; mais les connaissances zoologiques actuelles ne sont pas arrivées à ce stade et nous ne connaissons

pas d'êtres intermédiaires entre ces deux ensembles. Nous ne pouvons même pas suspecter un groupe plutôt qu'un autre d'avoir pu, dans le passé, réaliser cette liaison. Quand bien même une parenté mitotique serait dépistée, cela ne suffirait pas : nous sommes en droit d'attendre de cet organisme intermédiaire d'une part un cycle chromosomique identique montrant une alternance entre phase diploïde végétative longue et phase haploïde gamétique courte, d'autre part un plan d'organisation du gamète mâle aussi voisin que possible de celui d'une spermatide ou d'un spermatozoïde. Aucun Protozoaire n'a encore rempli l'une ou l'autre de ces conditions, mais il n'est pas exclu que cela se produise un jour ou que, faute de preuves d'ordre paléontologique, le problème reste toujours insoluble. Signalons que l'on essaye de tourner cette difficulté en recherchant les « plus simples Métazoaires possibles ». Les Orthonectides et les Dicyémides furent rassemblés dans le groupe intermédiaire des Mésozoaires, et sont maintenant plutôt considérés comme des « Vers plats » régressés par le parasitisme. De petits organismes libres, ciliés et oligocellulaires ont été signalés à la fin du siècle dernier : *Salinella salvae* n'a pas été revu depuis lors, pas plus que *Pemmatodiscus* ou *Treptoplax*. Seul *Trichoplax* a été récemment retrouvé (par Grell en 1971-1972) ; longtemps suspecté d'être une larve de Cnidaire, il est régulièrement élevé en laboratoire et serait peut-être issu d'un « Flagellé colonial hétérotrophe » (Grell, 1973), mais cela reste encore une hypothèse de recherche.

L'origine des Protozoaires

Si l'on ne sait donc pas de quel groupe de Protozoaires nous sommes issus, on ne sait pas plus de quel autre groupe de Protistes ils procèdent eux-mêmes. Comme les Amibes paraissent être les plus simples des Protozoaires nucléés, il était logique de rechercher des « êtres » dotés d'autonomie amiboïde, mais dépourvus de noyaux. Haeckel et d'autres Auteurs de la fin du XIXe siècle en observèrent en effet un certain nombre qu'ils appelèrent des Monères *(Monera)*, en prévoyant même trois subdivisions systématiques selon l'aspect du « cytoplasme », des inclusions et des vacuoles qu'ils pouvaient y observer. Il semble bien que les uns n'étaient que des corps inertes complexes et colloïdaux sans grand intérêt *(Bathybius)* ; en revanche, d'autres étaient bien vivants au moment de l'observation, mais voués à une mort certaine dans les conditions naturelles : il s'agissait de fragments cytoplasmiques détachés d'Amibiens divers et qui, bien qu'anucléés, continuaient de ramper pendant quelques heures avant de se lyser. Il est fréquent d'en rencontrer dans les mares d'eau douce, riches en Amibes géantes qui abandonnent régulièrement des lambeaux de cytoplasme restant collés au substrat ; de taille réduite et en général très transparents, ils sont d'observation délicate. Enfin, le troisième groupe des Monères *(Tachymonera)* renfermait des êtres véritables (Bactéries et Spirilles) ; il constitue actuellement le groupe des Schizophytes.

Où doit-on voir alors la souche des Protozoaires ? Leur dépendance trophique actuelle vis-à-vis des autotrophes semble suggérer *a priori* une filiation naturelle entre les êtres autonomes et les êtres dépendants. Dans ce cas, il est plausible qu'ils aient pour origine divers Protophytes, eux-mêmes issus de Bactéries photosynthétiques. En l'absence de toute lignée évolutive clairement interprétable, tout cela n'est peut-être que haute spéculation, voire même pure fantaisie. D'autant que des expériences récentes prouvent la possibilité de synthèses organiques antérieures à toute vie (évolution moléculaire prébiologique). En présence de composés organiques en solution ou en suspension dans le milieu originel, un hétérotrophe se serait suffi à lui-même et l'autotrophie n'aurait alors été qu'une nécessité seconde, liée progressivement à l'appauvrissement du milieu.

Une telle façon d'envisager les choses rejoint d'ailleurs une vieille hypothèse voyant dans les chloroplastes d'anciens êtres autonomes devenus symbiontes et ayant rendu, de ce fait, leurs hôtes autotrophes. L'autotrophie telle que nous la connaissons actuellement ne serait pas primitive, mais le résultat d'une longue évolution.

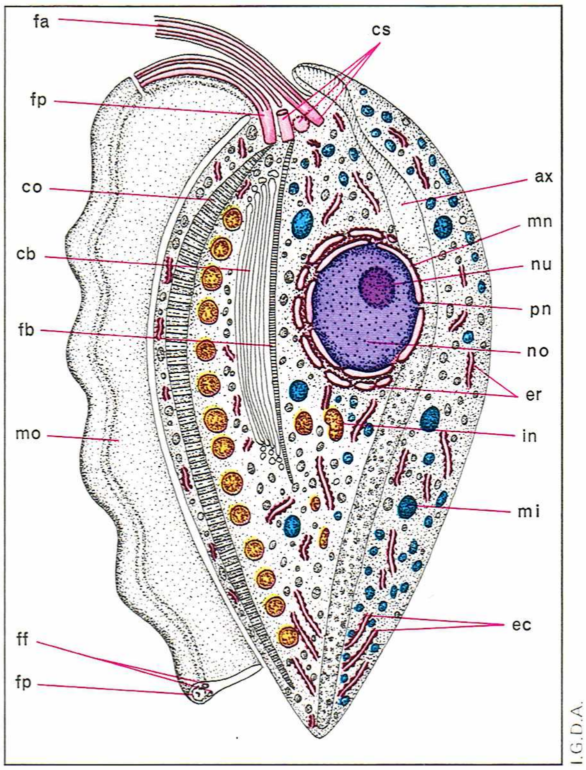

◀ ***Représentation schématique de l'organisation d'un Protozoaire,*** **Trichomonas muris ;** ***ax, axostyle ; mn, membrane nucléaire ; nu, nucléole ; pn, pore nucléaire ; no, noyau ; er, ergastoplasme ; in, inclusion ; mi, mitochondrie ; ec, éléments de l'anneau chromatique ; fa, flagelle antérieur ; fp, flagelle postérieur ; co, côte ; cb, corps parabasal ou appareil de Golgi ; fb, fibrille parabasale ; mo, membrane ondulante ; ff, fibrille paraflagellaire.***

Organisation générale

Tout Protozoaire est constitué d'une masse cytoplasmique dotée d'enclaves variées, inertes ou vivantes, et de un ou plusieurs noyaux, le tout enveloppé par une membrane plasmique.

Les Protozoaires forment un vaste ensemble d'environ trente mille espèces répertoriées ; il en est journellement découvert de nouvelles. Ils sont regroupés en un certain nombre de classes, d'ordres et de genres suivant le plan d'organisation selon lequel sont disposés les constituants cytoplasmiques fondamentaux.

Fréquemment de très petites dimensions, de l'ordre de 1 à 5 μ (la limite de résolution de la microscopie optique étant de 0,1 μ), ils sont cependant souvent visibles à l'œil nu, sinon reconnaissables (la limite de résolution de l'œil humain est de 75 μ). La Paramécie mesure environ 250 μ, *Chaos diffluens*, l'Amibe protée, 500 μ et une Opaline 1 mm. Plus rares sont les Protozoaires macroscopiques : *Spirostomum* atteint 4 mm et *Pelomyxa* 5 mm. Quelques Foraminifères et des Radiolaires coloniaux dépassent même 1 cm. La grande taille est souvent liée à un état particulier, la polyploïdie ou encore la formation de plasmodes ou de colonies.

La forme est très variable et indéfinissable pour la plupart des Rhizopodes nus, qui se transforment sans cesse (Amibe protée), mais elle est souvent très précise, parfois spécifique, et permet alors de déterminer l'Animal. C'est en particulier le cas de nombreux Protozoaires parasites développant des systèmes d'adhésion ou d'ancrage quelquefois spectaculaires ; tel est le cas de *Hellobiophrya donasis* (Infusoire) qui est suspendu aux filaments branchiaux de son hôte. Une contractibilité importante, liée à la présence de myonèmes intracytoplasmiques (sortes de fibrilles contractiles), modifie la taille et la forme du Protozoaire qui, s'il est inquiété, peut se raccourcir, voire se mettre en boule *(Spirostomum, Stentor)*.

Il y a souvent un axe de symétrie, la plupart des Protozoaires nageurs ou parasites étant piriformes, ovoïdes ou cylindriques. Un centre de symétrie présent chez presque tous les Actinopodes leur confère une spectaculaire forme de soleil et vaut à certains le nom d'« Animaux soleil » (Héliozoaires).

La membrane cytoplasmique, ou *plasmalemme,* tripartite, est constituée de lipoprotéines. Mince (en général de l'ordre de 80 Å), résistante et élastique, elle peut être isolée et étirée par micromanipulation ; souvent nue, elle se plisse intensément dans le cas de formes

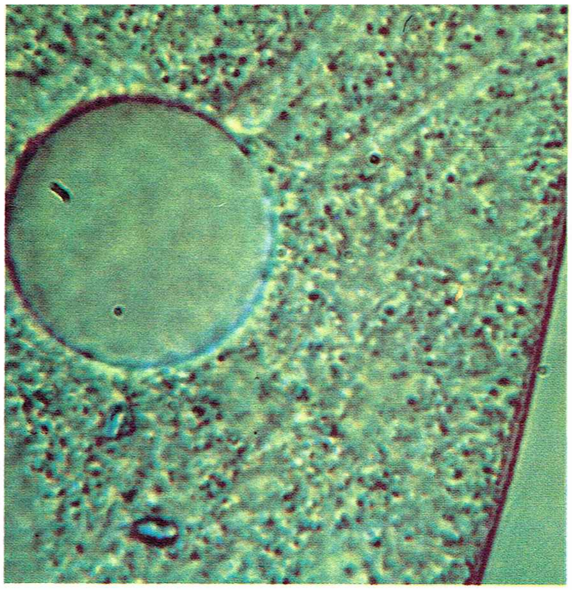

▶ ***Vacuole pulsatile de* Paramecium caudatum, *en diastole ; l'eau, drainée par les canalicules rayonnants, distend le réservoir central sur le point de se vider (*in vivo, *contraste interférentiel).***

osmotrophes (saprozoïques), et en particulier s'il y a parasitisme (Opalines, Grégarines). Doublée intérieurement de fibres sous-pelliculaires ou de paquets de tubules, elle devient alors plus rigide (Ciliés) et maintient efficacement la forme de l'animalcule. Recouverte extérieurement d'un revêtement de mucopolysaccharides, elle est alors plus étanche, isole le Protozoaire de son environnement et lui assure une relative indépendance en milieu faiblement humide (Amibes dites à pellicule : *Thecamoeba terricola* par exemple). Parfois elle élabore aussi une coque, de nature très variée, abritant tout ou partie du Protozoaire et le protégeant des agressions mécaniques (Acinétiens, Thécamœbiens), voire de la dessiccation (certains Thécamœbiens du sol ou des Mousses). Déprimée localement et spécialisée, elle se différencie en structures buccales très variées, assurant la prise et l'ingestion d'une alimentation sous forme figurée (holozoïque) par phagocytose, ou micellaire par pinocytose.

Le cytoplasme fondamental, ou *hyaloplasme*, translucide, est rarement imprégné de pigments (*Stentor amethystinus* est violacé, *Stentor coeruleus* est bleu-vert). La zone périphérique ou ectoplasme, hyaline, plus réfringente et plus dense, est comme gélifiée (plasmagel). La zone profonde, plus fluide (plasmasol), contient la plus grande partie des inclusions inertes (paraplasme) et vivantes (organites). Ceux-ci sont de deux types : d'une part les organites fondamentaux communs à la plupart des cellules vivantes, qui assument les synthèses ou les dégradations cellulaires essentielles (réticulum, ribosomes, ergastoplasme, appareil de Golgi, chondriome, lysosomes), d'autre part un certain nombre d'organites particuliers aux Protozoaires ; ce sont des différenciations localisées du cytoplasme, parfois fort complexes, adaptées à des fonctions spéciales que le Protozoaire, organisme complet à lui seul, se doit d'assurer. Ce sont les vacuoles contractiles, gastrioles, trichites, trichocystes, axostyles, plaques squelettiques variées, cils et flagelles locomoteurs et leurs racines intracytoplasmiques. Dans la plupart des cas, les organites cellulaires fondamentaux sont de structure classique.

Les membranes ou *cytomembranes*, composantes essentielles de nombreuses structures cytoplasmiques, sont le plus souvent lisses et donnent une grande quantité de vésicules ; certaines Amibes ont un cytoplasme alvéolisé formé de vésicules adjacentes. Ces structures peuvent s'organiser en un réseau complexe de canaux et de lacunes, parfois aplaties (citernes) ; c'est le réticulum endoplasmique, lieu de synthèse et probablement de transport intracellulaire de substances dissoutes. Parfois doublées de petits grains denses (ribosomes d'acide ribonucléique = A.R.N.), elles deviennent granuleuses, mais ne se groupent que rarement en ergastoplasme typique (ancien chromidium des Thécamœbiens). Ces ribosomes (130-150 Å) sont le siège de la synthèse des protéines.

L'appareil de Golgi (dictyosomes) consiste en une série de saccules lisses superposés, de taille et d'épaisseur variables selon un gradient de polarité et s'émiettant latéralement en petites vésicules denses. Il semble manquer totalement dans le cas particulier de certains Rhizopodes anaérobies *(Pelomyxa, Mastigella)*. Il est souvent accolé à une grande vésicule ergastoplasmique. Il est apte à se diviser et sa formation semble sous contrôle nucléaire ; une Amibe énucléée perd ses dictyosomes, mais la greffe nucléaire les restaure. Ses fonctions sont incomplètement connues, mais il participe à la sécrétion des polysaccharides et à l'élaboration des vésicules enzymatiques (lysosomes). L'appareil parabasal, si caractéristique des grands Flagellés, est un appareil de Golgi complexe, en quelque sorte hypertrophié, et occupant une place déterminée dans la cellule.

Le chondriome est représenté par des mitochondries de taille et de forme variables (0,5 à 5 µ), le plus souvent sphériques et limitées classiquement par deux membranes ; l'interne donne rarement naissance à des crêtes typiques, mais le plus souvent à des formations tubulaires ou sacculaires parfois entrecroisées *(Chaos)*. De l'A.D.N. (acide désoxyribonucléique) intrinsèque (peut-être semi-autonome) a été mis en évidence récemment par des techniques concordantes et sûres (microscopie électronique, autoradiographie, etc.) ; il n'est pas normalement décelable en microscopie photonique, sauf dans un cas particulier. Les Kinétoplastidés (Bodonidés et Trypanosomidés) sont dotés d'un organite étrange, à coloration Feulgen positive, et riche en A.D.N. : situé à la base du flagelle, appelé noyau de mouvement, il fut à l'origine de la théorie dite des « Binucléates » ; sa bipartition précède de peu la caryocinèse, mais il se colore également par les colorants mitochondriaux. La microscopie électronique devait révéler qu'à côté d'une zone fibrillaire (A.D.N.) existait une structure à crêtes internes rappelant une mitochondrie. Impliquées dans le processus respiratoire, elles sont régressées (tubules rares ou courts) ou manquent dans la plupart des Protozoaires anaérobies, qu'ils soient libres ou parasites, et sont abondantes, en revanche, dans les territoires cytoplasmiques doués d'une intense activité énergétique (vacuoles pulsatiles).

Les lysosomes renferment les enzymes digestives synthétisées au niveau des citernes ergastoplasmiques. Ils s'accolent aux vacuoles digestives, ou gastrioles, qui englobent les proies ingérées selon des modes variés, et s'y déversent. Cette fusion conditionne les phases de la digestion, qui est d'abord acide puis alcaline (évolution aisée à suivre à l'aide d'un indicateur de pH, tel le rouge neutre). Les résidus indigestes sont évacués soit par simple éclatement de la gastriole à l'extérieur, soit en un point fixe, parfois bien structuré, appelé cytoprocte ou cytopyge. L'excrétion de l'excès d'eau et des sels dissous est assurée, pour les organismes dulçaquicoles, par un système de vacuoles particulières, qui drainent le cytoplasme ; temporaires, naissant au sein du cytoplasme par confluence de vésicules plus petites et crevant à l'extérieur, ce sont des vacuoles dites osmotiques (chez les Amibes et chez de nombreux Flagellés) ; permanentes, plus complexes et dotées d'une paroi, de canalicules rayonnants, d'un réservoir central et parfois d'un pore excréteur fixe, ce sont des vacuoles dites pulsatiles (la plupart des Infusoires ciliés en possèdent). Le rythme de pulsation est fonction de la température, de la concentration du milieu en sels (ralentissement en milieu plus concentré et inversement), de la physiologie (il y a accélération avant un enkystement). Ces vacuoles n'existent pas dans le cas de Protozoaires parasites ou marins, en équilibre osmotique avec leur milieu, et sont susceptibles de disparaître ou d'apparaître en fonction de la concentration du milieu dans le cas de Protozoaires très tolérants vis-à-vis de ce facteur écologique (euryhalins).

▼ ***Coupe de la région périphérique d'*Euplotes vannus *(Cilié) vue au microscope électronique (× 50 000). me, membrane externe ; 1mi, 2mi, 3mi, les trois membranes internes ; mc, membrane cytoplasmique.***

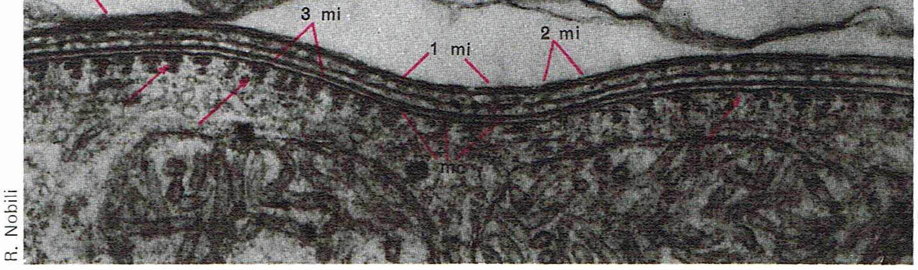

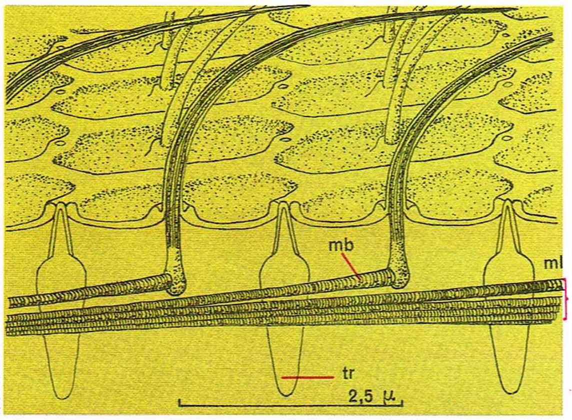

I.G.D.A.

◀ *Schéma de la structure de la pellicule d'une paramécie, montrant les microfibrilles basales (mb) et longitudinales (ml) qui assurent la liaison entre les organes locomoteurs; les trichocystes (tr), organites en forme de navette, peuvent exploser dans le milieu ambiant.*

A ces structures infracellulaires, de nature membranaire, s'ajoutent d'autres formations fibrillaires ou tubulaires.

Les microfobrilles sont de fins filaments protéiques ne présentant pas de structure apparente, de 10 à 50 Å de diamètre et de longueur très variable; abondantes dans le cytoplasme des Infusoires, elles sont souvent arrangées en paquets, en faisceaux plus ou moins lâches pouvant s'entrecroiser librement ou s'anastomoser, formant alors un réseau de mailles régulières. Elles sont certainement très hétérogènes de nature et de fonction. Sous un même aspect morphologique, elles entrent dans la constitution de parties contractiles (myonèmes des *Stentor* ou des *Spirostomum*), assurent la liaison entre organes locomoteurs ou jouent un rôle de soutien (fibre réticulée des Péritriches, par exemple).

Les fibres à structure périodique, également protéiques, d'épaisseur et de longueur très variables, présentent une striation transversale régulière de période principale de 200 à 500 Å à laquelle s'ajoutent parfois une ou plusieurs striations intercalaires plus rapprochées. Ce sont essentiellement des fibres squelettiques.

Les microtubules, souvent encore appelés fibres tubulaires, sont de fins canaux (de 150 à 300 Å de diamètre, en moyenne 250 Å), souvent fort longs (plusieurs microns). La paroi, opaque aux électrons, est formée de treize sous-unités globulaires (40 Å de diamètre moyen) disposées de façon apparemment hélicoïdale. Seuls ou associés en paquets ou en rideaux par de fines anastomoses latérales, ils remplissent des fonctions diverses dans la cellule. Ils sont sous-pelliculaires et aident au maintien de la forme (trypanosomes, Grégarines, etc.); en rideaux ou en paquets parallèles, ils glissent les uns par rapport aux autres lors de la contraction cellulaire brutale d'un *Stentor*, sans la provoquer ni changer de diamètre, puis assurent le retour à la forme normale de l'Animal. Ils sont souvent associés à des structures subissant des déformations répétées, comme les vacuoles pulsatiles ou les structures buccales des prédateurs ingérant des proies volumineuses. Ils constituent également l'axe ou axonème des pseudopodes acuminés (axopodes) des Actinopodes. Cet axonème est formé de deux couches de microtubules parallèles, enroulées l'une autour de l'autre; le nombre des microtubules décroît de la base à l'apex. Plus statiques sont les associations de microtubules fixes, donnant des formations rigides comme les axostyles, baguettes squelettiques fréquentes chez les Flagellés. Ce sont aussi les constituants des fuseaux mitotiques, intra- ou extra-nucléaires, et surtout les éléments constitutifs des cils, des flagelles et des grains basaux (cinétosomes, blépharoplastes) dont ils sont issus.

Les cinétosomes sont en effet analogues aux centrioles des cellules de Métazoaires. Ils ont été découverts en 1877 (Eimer) et appelés corpuscules basaux; l'homologie fut admise dès 1898 (Henneguy) et confirmée par la microscopie électronique. Un cinétosome a donc la forme d'un petit cylindre de 0,4 μ de long sur 0,17 de diamètre. Il est disposé perpendiculairement à la surface cellulaire, dans l'ectoplasme (zone périphérique du cytoplasme plus rigide que l'endoplasme), et il est formé de neuf triplets de trois tubules (structure dite énéanème). Ces triplets sont arrangés en cercle à la partie supérieure (distale) et à la façon des pales d'une aube à la partie inférieure (proximale); le tubule le plus central de chaque triplet (A) et le médian (B) se prolongent dans le cil ou le flagelle correspondant (doublet). Le tubule le plus externe (C) est limité au cinétosome et s'interrompt en biseau un peu en dessous de la membrane cellulaire. Le tubule A est lui-même constitué de treize sous-éléments alors que B et C n'en comptent que onze. Aux neuf doublets (A + B) pénétrant dans le flagelle ou le cil et ayant une disposition circulaire et périphérique s'adjoignent deux tubules centraux, ancrés sur une masse dense située au pôle supérieur du cinétosome. Ainsi décrit, un cil ou un flagelle est identique quel que soit le groupe zoologique considéré, et cela n'est pas sans une réelle portée phylogénique, une convergence paraissant exclue. Mais il y a en fait, dans le détail, d'innombrables petites variations portant sur la présence de septum, de plaques, de condensations ou de microfibrilles de liaisons intertubulaires qui « personnalisent » les ultrastructures de nombreuses espèces et qui, au moins chez les Flagellés, laissent à penser qu'il s'agit bien là de caractères phylogéniques précis, quoique difficiles à mettre en évidence.

De même que les centrioles des Métazoaires, les cinétosomes sont des centres organisateurs doués d'un extraordinaire pouvoir morphogène encore bien mal connu. Sauf rares exceptions, il en émane un cil ou un flagelle du côté externe (distal) et un nombre variable de dérivés intracytoplasmiques du côté profond (proximal). L'ensemble de ces structures a reçu le nom de cinétide (Chatton, 1924). Ces dérivés cinétosomiens intracytoplasmiques sont soit des formations denses, sans structure apparente, soit des microfibrilles, simples ou en réseaux, soit des fibres périodiques, soit enfin des microtubules, isolés ou groupés. Toutes ces structures sont disposées selon des arrangements spatiaux bien précis pour un Animal donné et une zone cytoplasmique définie. Le maximum de complexité est présenté par les Infusoires.

D'autres organites de structure très complexe sont élaborés dans le cytoplasme, migrent sous la pellicule et, en cas de besoin, sont éliminés brutalement. Les plus connus sont les *trichocystes* des Holotriches *(Paramecium)*; en forme de navette, de 1 à 4 μ de longueur, surmontés d'une pointe et d'une cape granuleuse, ils peuvent exploser dans le milieu ambiant si l'animalcule subit une agression sévère, mécanique, chimique ou

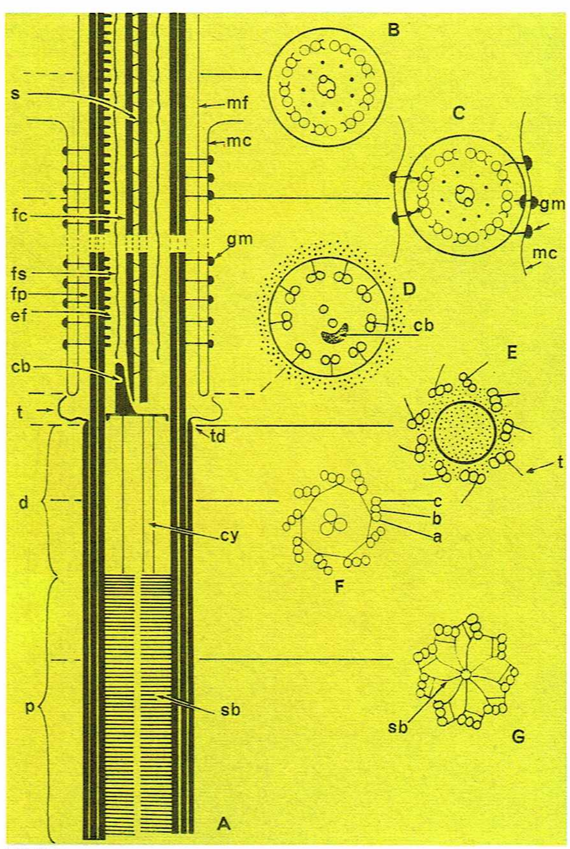

I.G.D.A.

◀ *Représentation schématique d'un flagelle et d'un cinétosome, situés dans la partie antérieure de* Pseudotrichonympha; *A, section longitudinale; B-G, sections transversales aux niveaux indiqués; s, structure annulaire de liaison des fibrilles centrales; fc, fibrille centrale; fs, microfibrille secondaire; fp, fibrille périphérique; ef, élaborations latérales de la fibrille; cb, corps basal excentré; t, filament mince s'étendant latéralement au sommet du cinétosome; d, portion distale du cinétosome; p, portion proximale; mf, membrane du flagelle; mc, membrane cellulaire; gm, granules; td, terminaison distale de la troisième fibrille d'un triplet du cinétosome; cy, cylindre dans la lumière de la partie distale du cinétosome; sb, structure de la portion basale du cinétosome; a, tubule central; b, tubule médian; c, tubule externe.*

▶ *Champ oral d'*Euplotes vannus *en voie d'organisation au moment de la conjugaison; cs, cinétosomes en section transversale; ci, cils en coupe transversale; pe, pellicule en voie de différenciation; cpb, cinétosomes sectionnés par la coupe au niveau de la plaque basale.*

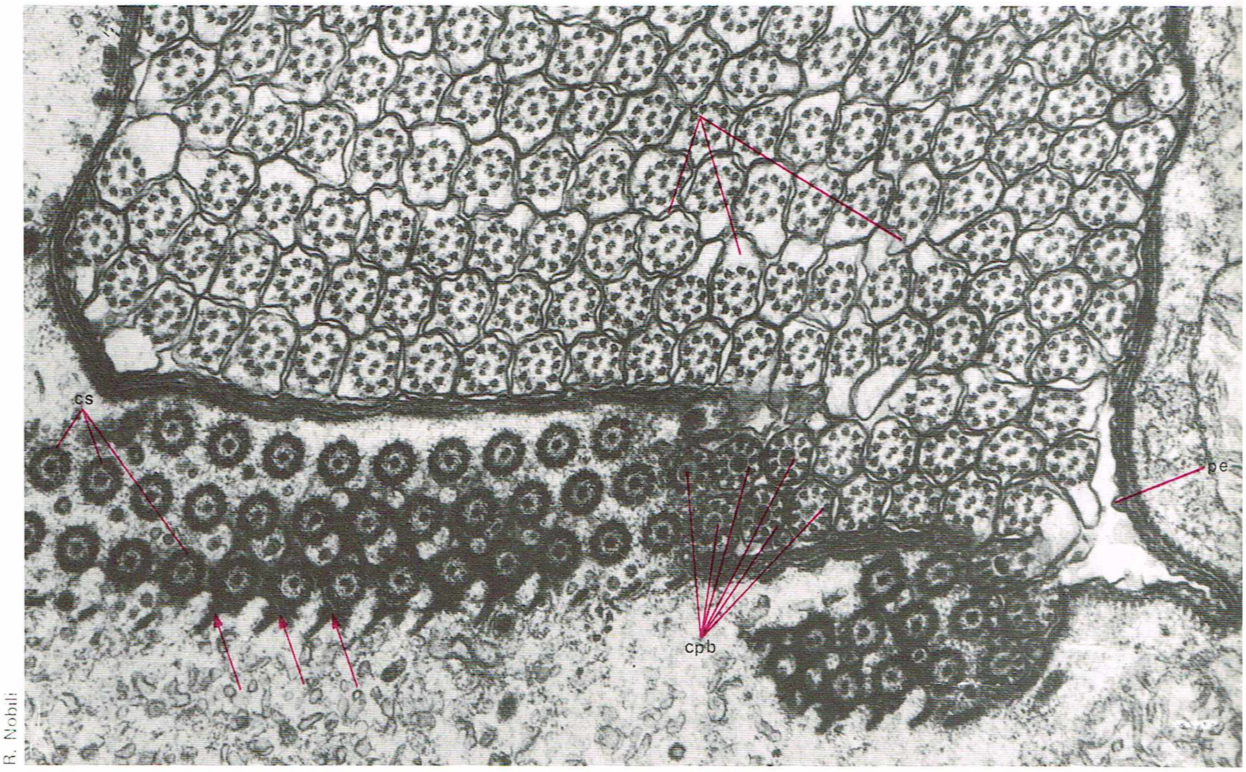

électrique. Ils mesurent alors 20 à 30 µ, ont une structure périodique, régulièrement striée, et une pointe acérée homogène; la cape disparaît. On leur attribue un rôle défensif et, souvent, la possibilité d'un ancrage temporaire au substrat; ils font l'objet de nombreuses recherches en génétique, car ils sont concernés par un grand nombre de mutations portant sur leur élaboration, leur migration ou leur fonctionnement. Il en existe bien d'autres types : *toxicytes* des Gymnostomes carnivores, paralysant leurs proies, *haptocystes* fixateurs des tentacules d'Acinétiens, *mucocystes* de divers autres Ciliés. Ils ne sont point l'apanage des Infusoires; il en existe également chez les Phytoflagellés et chez quelques Héliozoaires.

En plus des organites fondamentaux fonctionnels de la cellule, on trouve dans le cytoplasme une grande variété de substances accumulées, résultat visible du métabolisme : ce sont des enclaves inertes, ou *paraplasme*.

Les lipides, graisses neutres ou acides gras, sont abondants sous forme de gouttelettes réfringentes. Il y a même des gouttes d'huile dans le cytoplasme de Radiolaires planctoniques. D'une façon générale l'élaboration de lipides est abondante dans le cas d'organismes planctoniques, cela facilitant la sustentation en diminuant la densité relative du Protozoaire. Rappelons aussi que la plupart des techniques de laboratoire éliminent les lipides (utilisation de solvants) et qu'en conséquence ils ne figurent que rarement dans les dessins des manuels.

Les glucides accumulés sont représentés par des polysaccharides identiques ou très voisins du glycogène; le degré de polymérisation varie en effet d'un groupe à l'autre et est rarement connu avec précision. Ce sont des caractéristiques tinctoriales ou enzymatiques qui permettent de les reconnaître. Nous citerons le glycogène vrai des *Trichomonas* et de certaines Amibes, l'amylopectine de nombreux Infusoires, le paraglycogène des Sporozoaires, l'ophryoscolécine de la plupart des Infusoires Ophryoscolécidés. Les polysaccharides peuvent être localisés strictement dans la cellule, à l'un des pôles, ou imprégner un autre organite (axostyle), ou former des plaques squelettiques (chez les Ophryoscolécidés), ou bien être dispersés dans toute la cellule sous la forme de petits granules ou de corps volumineux et réfringents (corps brillants ou glycosomes des *Pelomyxa*), etc.

Les protides, représentés par des inclusions de formes et de tailles diverses, plus ou moins denses et inconstants, ont reçu des noms variés : microsomes, corps chromatoïdes, etc.

Enfin des *corps minéraux* peuvent apparaître au sein du cytoplasme; ce sont des spicules de soutien, siliceux ou constitués par des sels divers (sulfate de strontium des Acanthaires), ou encore des écailles protectrices, siliceuses (Héliozoaires, Thécamœbiens) ou calcaires. Il peut aussi s'agir de déchets du métabolisme : cristaux de phosphate de calcium *(Paramecium)* ou rhomboèdres de dérivés de l'urée caractéristiques des Amibes du genre *Chaos*.

Le noyau. Tous ces organites, extrêmement complexes pour qui n'en est pas familier, apparaissent, s'organisent ou s'agencent surtout en fonction de l'information génétique contenue pour l'essentiel dans l'A.D.N. nucléaire (acide désoxyribonucléique). Cependant un peu d'A.D.N. a été mis en évidence au sein du chondriome, des plastes et, semble-t-il, des cinétosomes. Cette information génétique extranucléaire ne semble pas autonome et serait de toute façon contrôlée par le noyau. Tous les Protozoaires sont des Eucaryotes et

▼ *Réserves polysaccharidiques (glycogène) localisées au niveau de l'axostyle de* Joenia annectens *(Hypermastigines) [150 µ] (coloration* in toto*; contraste interférentiel).*

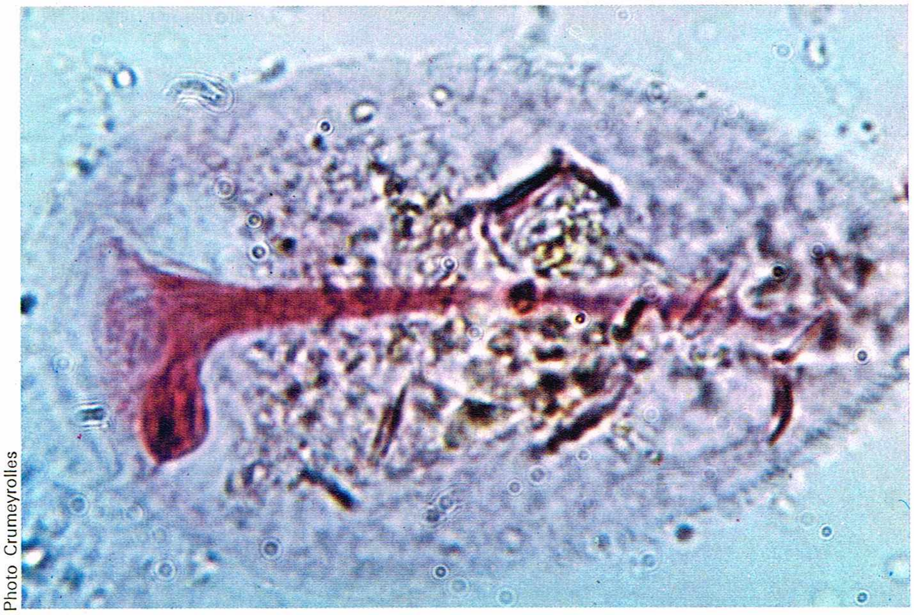

◀ ***Appareil nucléaire de* Paramecium caudatum *; un petit noyau, le micronucleus, est logé dans une encoche d'un second, plus volumineux, le macronucleus (coloration de Feulgen* in toto*).***

possèdent donc, au moins, un noyau. Il n'est pas fondamentalement différent de celui des Métazoaires; c'est une vésicule à paroi bi-membranaire régulièrement percée de pores, et renfermant un complexe macromoléculaire d'acide désoxyribonucléique (A.D.N.), d'acide ribonucléique (A.R.N.) et de diverses protéines. Selon l'état et les proportions de ces différents éléments les noyaux pourront se montrer sous des aspects très variés. Il est rare de distinguer les *chromosomes* dans un noyau au repos (Polymastigines, Péridiniens) : ils sont en effet plus généralement déspiralisés et non discernables dans le suc nucléaire ou *caryolymphe* au point que les colorations spécifiques de l'A.D.N. (test de Feulgen, vert de méthyle, etc.) appliquées aux noyaux en repos (quiescents) sont souvent très faibles, voire négatives. Les noyaux à *chromocentres*, condensations au niveau desquelles les chromosomes ne sont pas totalement déspiralisés, sont très rares chez les Protozoaires.

Le nombre de chromosomes, en principe spécifique, est très variable, de deux (Polymastigines) à plus de cinq cents *(Chaos diffluens);* quand il varie (polyploïdie) au sein d'une même espèce (variétés), la taille du noyau est fonction du nombre de chromosomes *(Paramecium bursaria)*.

Il y a fréquemment, soit au centre d'un endosome, soit au bord, un très petit granule chromatique constitué d'A.D.N. : c'est *l'organisateur nucléolaire;* il apparaît en microscopie électronique comme un corps dense, finement ponctué et très contrasté et représenterait une partie du chromosome au niveau duquel se fait l'élaboration de l'A.R.N.; sa structure est tout aussi mal connue que celle des chromosomes. S'il est déspiralisé, on ne peut guère observer que des points ou des granules; lorsqu'il est condensé, il apparaît parfois des structures fibrillaires nattées, dont l'interprétation est incertaine (chromosomes des Péridiniens).

L'A.R.N., sous forme de corps nucléolaires, d'aspects, de tailles et de dispositions très divers, demeure bien visible.

Central et sphérique (caryosome), baignant dans une caryolymphe abondante, tel est l'aspect d'un type nucléaire très répandu, le protocaryon, chez les petites Amibes, divers Flagellés et Sporozoaires. Répartis à la périphérie (endosomes), sphériques, lenticulaires, parfois rubanés, les noyaux de type vésiculaire se trouvent chez les Rhizopodes, Actinopodes, etc. Ces noyaux, qui peuvent être très volumineux (plusieurs dizaines de μ), présentent souvent une disposition reconnaissable et particulière de rubans nucléolaires leur conférant une certaine spécificité. Cela est frappant notamment dans le cas des Amibes bi- ou plurinucléées (plasmodes) dont tous les noyaux sont strictement identiques.

En dehors de quelques Foraminifères il n'est qu'une exception classique à cette règle, celle des Infusoires qui, à l'exclusion d'un seul genre *(Stephanopogon)*, présentent un dimorphisme nucléaire particulier. L'un des noyaux, petit (micronucleus ou micronoyau), diploïde et permanent, ne se manifeste qu'au cours de la division ou des phénomènes de la sexualité (noyau sexuel). L'autre, plus volumineux (macronucleus ou macronoyau), généralement polyploïde (jusqu'à 1 000 n), riche en A.R.N., dirige les synthèses cellulaires (noyau trophique ou végétatif).

Les formations nucléolaires s'estompent ou s'amenuisent lors de la division nucléaire pendant que les chromosomes, en se spiralisant, deviennent progressivement apparents.

L'enveloppe nucléaire est parfois doublée de structures fibrillaires (soutien ?) disposées en réseaux lâches ou en mailles hexagonales régulières à l'extérieur ou, plus souvent, à l'intérieur même du noyau (divers Rhizopodes des genres *Chaos* ou *Difflugia*).

La même espèce peut, à des phases différentes de son développement, montrer des organisations nucléaires très dissemblables. Il y a alors des *différenciations nucléaires* soit simultanées (certains Foraminifères), soit le plus souvent successives. C'est en particulier le cas lorsqu'un parasite change d'hôte, ou au cours de processus sexuels, ou lorsque, les conditions devenant défavorables, il y a réalisation d'une forme de survie (kystes).

Reproduction

Les noyaux, porteurs de l'information génétique propre à l'espèce, vont léguer celle-ci à leurs descendants : c'est le phénomène de la *reproduction*. Elle se présente selon deux modalités fondamentales : la reproduction *asexuée* (agamogonique) produisant deux ou plusieurs individus au patrimoine génétique identique, et la reproduction *sexuée* (gamogonique), qui assure un brassage et une recombinaison génétique cyclique par fusion de noyaux (caryogamie) suivie ou précédée d'une réduction chromosomique compensatrice.

La reproduction asexuée. La division cellulaire se déroule selon des modes mitotiques variés. La condensation et l'égale répartition des chromosomes sont passées longtemps inaperçues et, la petite taille des noyaux aidant, certaines images ont fait croire à l'existence d'une division directe (amitose) chez bon nombre de Protozoaires; cela n'est pas le cas. Seuls les macronuclei polyploïdes des Infusoires s'adonnent à ce processus, mais il s'agit alors d'une ségrégation de génomes, chaque noyau fils emportant un nombre important de

▼ ***Division amitotique d'un macronucleus de* Paramecium caudatum *; les deux micronuclei sont déjà reconstitués dans chaque cellule fille (coloration* in toto*).***

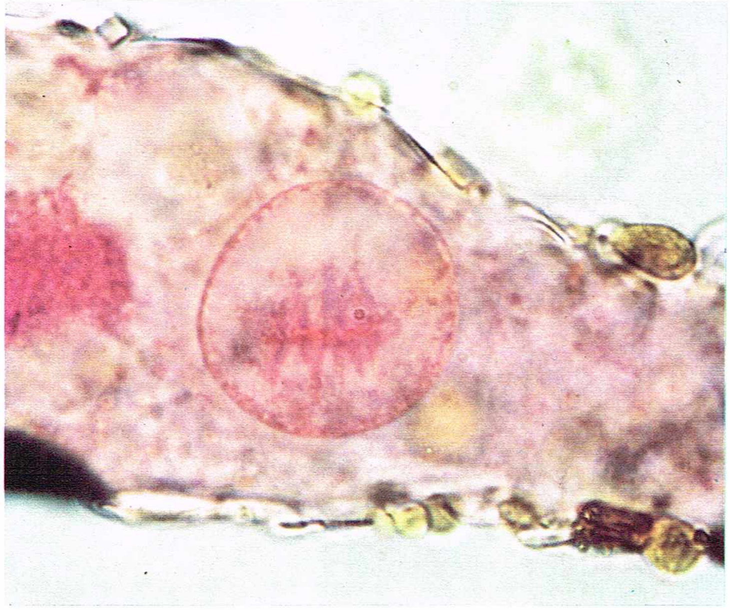

Photo Crumeyrolles

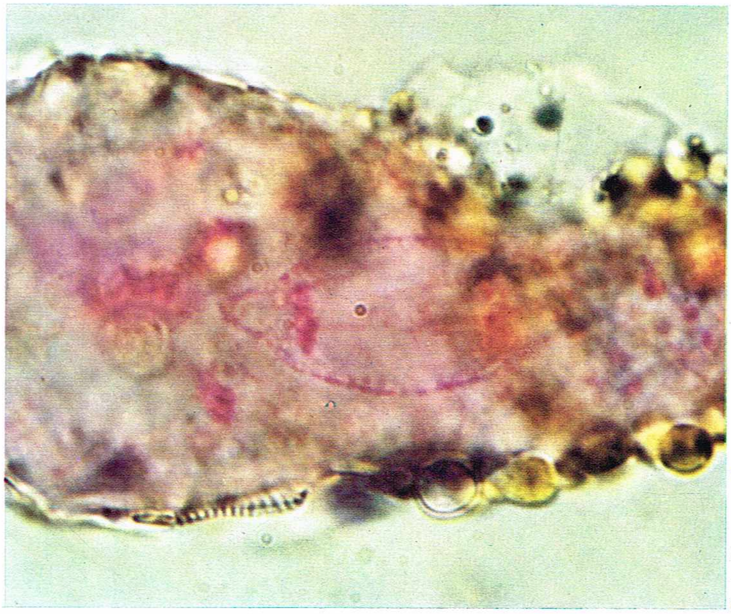

Photo Crumeyrolles

▲ *Exemple de division nucléaire chez un Protozoaire* (**Difflugia, Thécamibiens**). *Les chromosomes en métaphase sont fixés à un fuseau intranucléaire (à gauche). A l'anaphase (à droite), les deux lots chromosomiques gagnent les pôles opposés sans qu'il y ait effacement de la membrane nucléaire (cryptomitose)* [*coloration* **in toto**].

▼ **Amoeba (Pelomyxa) quarta** *en coupe; les nombreux noyaux (10 μ) de ce syncytium sont entourés de Bactéries symbiotes (Gram +). Les réserves de glycogène apparaissent sous la forme de gros corps denses colorés en rouge.*

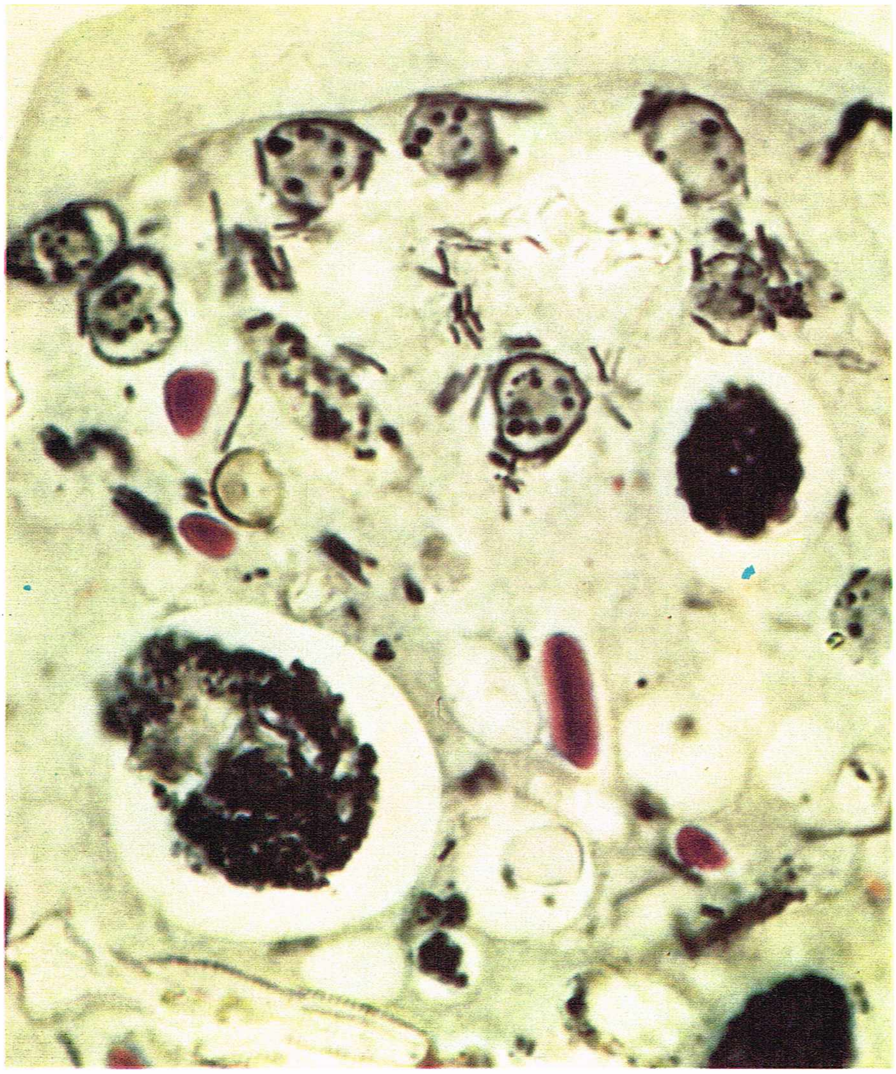

Photo Crumeyrolles

garnitures chromosomiques complètes. De toute façon ce sont des éléments destinés à dégénérer et régulièrement reconstitués.

Tous les Protozoaires recourent donc à une mitose (caryocinèse) de principe classique avec équirépartition du matériel génétique des chromosomes (A.D.N.) préalablement dupliqués en chromosomes fils (chromatides), mais de déroulement complexe et varié. On a longtemps opposé deux grandes familles de cinèses selon que les chromosomes en mitose sont associés aux fibres d'un fuseau achromatique ou à la membrane nucléaire. Dans le premier cas ou *orthomitose,* il existe une phase classique d'équilibre, la métaphase; dans le second ou *pleuromitose,* cette phase semble escamotée et les chromosomes, associés à la membrane nucléaire par leur centromère, paraissent glisser le long de celle-ci pour gagner des pôles opposés.

L'étude attentive, tant de documents anciens de la microscopie photonique que des données plus récentes de la microscopie électronique, a révélé que les phénomènes ne sont pas si simples. En premier lieu la membrane nucléaire ne disparaît pas en fin de prophase comme cela est le cas pour les mitoses des Métazoaires et des Métaphytes, mais persiste, indemne en général, pendant tout le cours du processus, ce qui a valu à l'ensemble des mitoses de Protozoaires le nom de *cryptomitose* (Hollande 1972). En second lieu c'est une structure unique, le centriole énéanème, qui préside à la mitose de l'immense majorité des cellules animales, alors que la cryptomitose des Protozoaires est ordonnée par des « centres cinétiques » (inducteurs de structures fusoriales) d'allures très variées, tantôt intra-, tantôt extra-nucléaires. Intra-nucléaires, il pourra s'agir de vésicules (micronucleus des Ciliés) ou de masses amorphes juxta-membranaires (certains Flagellés Radiolaires, Foraminifères). Extra-nucléaires, ce sera un disque *(Acanthamoeba),* un cône dense strié (Sporozoaires) ou encore une sphère de hyaloplasme réfringent, dépourvue de toute structure (chez de nombreux Flagellés), appendue à de petites tiges denses (ou atractophores) elles-mêmes induites, quand elles ne sont pas permanentes, par un cytoplasme apical particulier (morphoplasme) enrobant quelques cinétosomes dits privilégiés.

Il peut exister des centrioles aux pôles fusoriaux, mais en l'état actuel des données publiées, il semble que leur apparition soit liée à l'élaboration imminente de flagelles (gamètes) car, dans les mêmes espèces, ils n'apparaissent pas au cours des autres divisions.

On conçoit aisément que de nombreuses subdivisions puissent être réalisées d'un point de vue morphologique ou dynamique, selon que le fuseau sera extra- ou intranucléaire, qu'il apparaîtra d'emblée complet, ou par moitiés distinctes secondairement mises en relations, que les centromères des chromosomes seront fixés directement aux fibres fusoriales ou encastrés dans le feuillet

interne de la membrane nucléaire et alors en liaison avec des fibres chromosomiales, distinctes des fibres fusoriales (et à rôle probablement antagoniste). Ces essais de systématisation des modes mitotiques, s'ils ne sont pas récents, ne peuvent se faire avec quelque précision que depuis l'utilisation du microscope électronique et demandent souvent un matériel très abondant, et un travail technique particulièrement minutieux. Ils devraient pourtant être très fructueux, surtout sur le plan de la phylogénie.

La caryocinèse, quel que soit son mode, assure donc une prolifération nucléaire, mais elle n'est pas suivie instantanément de l'élaboration de cellules indépendantes. Si la réalisation de syncytiums est rare chez les Métazoaires, elle est très fréquente et pratiquée par presque toutes les classes de Protozoaires. Il suffit évidemment que la caryocinèse se produise une fois sans être suivie de la scission des cytoplasmes (cytocinèse, plasmotomie) et l'on obtient des êtres binucléés comme *Amoeba binucleata* (au moins quatre espèces réunies sous ce nom), *Arcella vulgaris,* ou les *Giardia* (Flagellés, Diplozoaires).

Si le phénomène se poursuit plusieurs fois, de façon synchrone, on obtient des syncytiums dont le nombre de noyaux, en principe identiques, peut être très élevé (jusqu'à 1 000). C'est le cas de quelques Flagellés (*Diplonympha, Stephanonympha, Calonympha,* etc.), d'Amibes libres très répandues *(Chaos, Pelomyxa, Amoeba),* de Thécamœbiens *(Arcella polypora,* plusieurs *Difflugia),* de Foraminifères, de nombreux Actinopodes et des Opalines. Notons que ces phénomènes sont parfois d'interprétation délicate : ainsi les Arcelles binucléées sont toujours connues sous cet état et les deux noyaux se divisent de concert lors de l'élaboration d'une nouvelle coque; il est cependant probable que des stades uninucléés existent à un certain moment (amœbules nues et libres). Des modalités analogues conduisent divers Ciliés à posséder un nombre parfois élevé de micronuclei *(Paramecium multimicronucleatum)* ainsi que de macronuclei *(Loxodes).*

Si les divisions multiples se succèdent rapidement, donnant naissance à un plasmode transitoire aussitôt découpé en éléments uninucléés de très petite taille, nous avons une *schizogonie* élaborant des *schizozoïtes* (chez les Sporozoaires par exemple). Mais si la division du cytoplasme s'amorce au fur et à mesure que se déroulent les mitoses, nous obtiendrons la formation de chaînes d'individus, généralement de tailles différentes et ne se séparant que progressivement à l'un des pôles. Cette modalité est toutefois peu courante.

Le plus souvent il y a synchronisme entre la caryocinèse et la séparation des cytoplasmes. Si les volumes cytoplasmiques sont presque égaux, il s'agit d'une division binaire égale, qui peut alors être soit longitudinale (Flagellés), soit transversale (Ciliés), soit quelconque (Amibes). Chaque cellule fille reconstitue les structures qui lui manquent le cas échéant (bouche, flagelle, axostyle). Si les volumes cytoplasmiques sont sensiblement différents, il y a bourgeonnement; à la surface, ou au sein même de l'organisme mère, s'isolent un ou plusieurs bourgeons qui emportent un appareil nucléaire, un peu de cytoplasme, se détachent et refondent un organisme complet en réorganisant toutes les structures manquantes. C'est le processus de gemmiparité habituel des Acinétiens par exemple. La transformation peut éventuellement être complète, l'Animal n'abandonnant que les éléments squelettiques et tout l'organisme prenant l'allure d'un tel bourgeon cilié appelé migrateur. Ce processus, en dehors de facteurs internes, peut être produit par des modifications du milieu comme l'anoxie (abaissement de la teneur en oxygène ou suppression de celui-ci) ; le bourgeon va alors se fixer dans une zone écologiquement plus favorable.

La reproduction asexuée, quelles que soient ses modalités, assure donc d'une part la réalisation, plus ou moins rapide, d'individus strictement identiques à leurs ancêtres, et d'autre part la prolifération de l'espèce sans contacts entre les individus. Dans bien des cas c'est le seul processus que l'on connaisse (nombreux Flagellés, la plupart des Rhizopodes, etc.)

La reproduction sexuée. De nombreux Protozoaires montrent un rapprochement entre individus distincts, morphologiquement différenciés ou non, suivi de phénomènes complexes essentiellement caractérisés par la fusion de noyaux (haploïdes) ou caryogamie, réalisant une « cellule-œuf » (diploïde) ou *zygote* (copula). Les Protozoaires concernés parcourent donc un cycle de reproduction; selon que le passage de l'état diploïde à l'état haploïde se fait avant ou après la copulation et selon les longueurs respectives des deux phases, il est possible de reconnaître plusieurs types de développement.

Le Protozoaire, sous sa forme courante et durable, est haploïde, seul le zygote est diploïde et de vie brève; il subit immédiatement la méiose; c'est le cas des Sporozoaires, et leur cycle est dit *haplobiontique.* Inversement, les individus rencontrés sont diploïdes, et la méiose, rapide, s'effectue après la rencontre des partenaires, donnant alors naissance à des noyaux haploïdes (pronuclei) à vie brève, et fusionnant immédiatement; le cycle est *diplobiontique* (c'est le cas des Ciliés). Enfin les phases haploïdes et diploïdes peuvent être équivalentes, correspondant à des générations différentes, susceptibles de se diviser entre-temps d'une façon asexuée. La méiose, dans ce cas, prend place à la fin de la vie de l'organisme diploïde; c'est le cas des Foraminifères, et leur cycle est dit *haplo-diplobiontique.*

D'une façon générale la reproduction sexuée ne joue qu'un rôle très secondaire dans la prolifération des espèces (à l'encontre de ce qui se passe chez les Métazoaires). Elle a surtout pour effet de rénover le patrimoine génétique de l'espèce par le brassage génique classique qu'apportent méiose et fécondation.

Quelques Protozoaires, Flagellés, Héliozoaires, montrent une méiose classique à quelques détails près. L'interprétation est en outre souvent rendue fort délicate du fait de la petitesse des noyaux et du grand nombre de chromosomes (chez les Ciliés). Les Hypermastigines

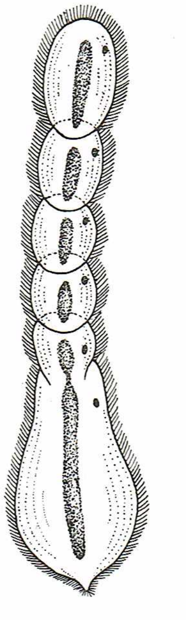

I.G.D.A.

▲ ***Chez certains Protozoaires (ici* Anoplophrya*), la reproduction asexuée peut s'accomplir par une succession de divisions du noyau et du cytoplasme, aboutissant ainsi à la formation de chaînes d'individus se séparant progressivement.***

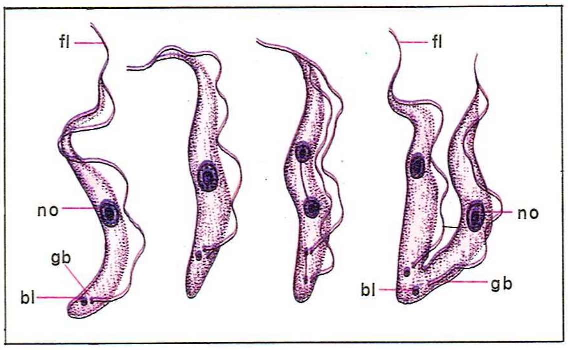

I.G.D.A.

◀ ***Schéma de la reproduction cellulaire de* Trypanosoma brucei *; fl, flagelle; no, noyau avec le nucléole; gb, granule basal; bl, blépharoplaste; (× 650).***

Photo Crumeyrolles

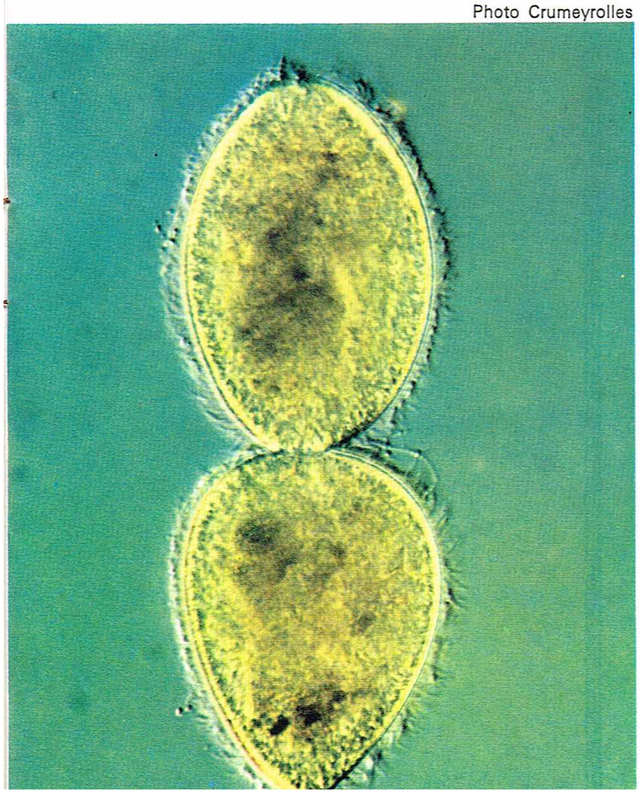

◀ ***Division de* Paramecium caudatum *observée* in vivo *; les deux individus fils, l'antérieur (ou proter) et le postérieur (ou opisthe), reformeront les éléments qui leur manquent (250 µ) [contraste interférentiel].***

▼ ***Reproduction asexuée par bourgeonnement chez* Ephelota gemmipara.**

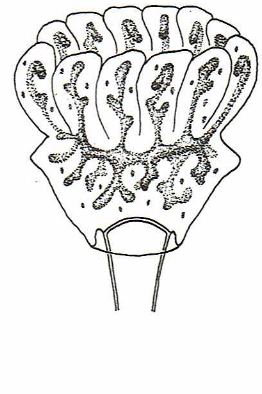

I.G.D.A.

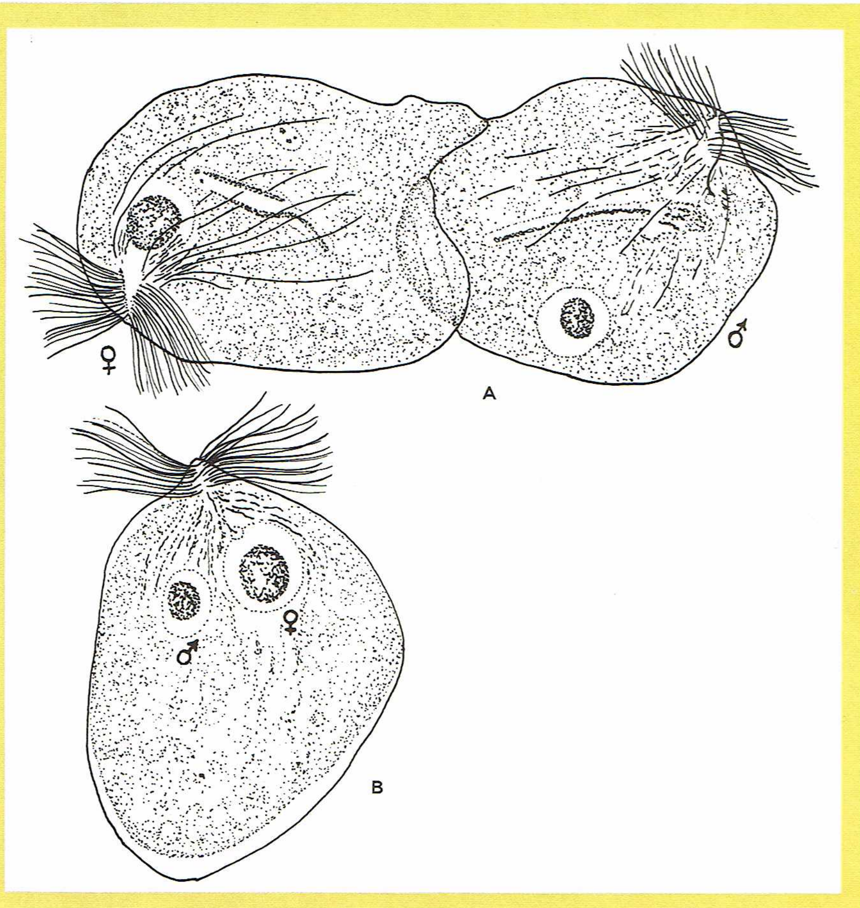

I.G.D.A.

▲ ***Exemple de reproduction sexuée avec gamétogamie chez* Barbulanympha*; les cellules libres (A) ou gamètes mâles (♂) et femelles (♀) provenant des stades végétatifs ou gamontes fusionnent et donnent un œuf ou zygote (B) [× 300].***

► ***Reproduction sexuée avec gamontogamie chez* Discorbis mediterranensis*; après l'appariement des deux gamontes, il y a formation de gamètes qui fusionnent dans l'espace compris entre les deux coques.***

► ***Page ci-contre, à gauche :* Gregarina polymorpha *en syzygie : le satellite mâle est fixé à la zone postérieure du primite femelle. Les deux zones claires sont les noyaux (300 µ) [in vivo; contraste interférentiel].***

(Zooflagellés), en revanche, dont les chromosomes de grande taille sont aisément observables, montrent des méioses particulières, dites en un seul temps; il y a un bref appariement puis, sans duplication, donc sans tétrades (ni probablement de chiasmas), les chromosomes homologues se séparent. Il n'y a qu'une seule division et les recombinaisons chromosomiques semblent limitées à leur séparation au hasard lors de l'unique anaphase. Ce type de méiose originale est postzygotique *(Oxymonas, Leptospironympha)*, aussi bien que prézygotique *(Urinympha)*. Cela semble bien être aussi le cas des Sporozoaires.

Les entités haploïdes ainsi formées peuvent connaître des sorts très différents; ou bien il y a libération indépendante de cellules libres, nageuses, différentes le plus souvent des stades végétatifs qui leur ont donné naissance (gamontes) : ce sont des gamètes qui vont fusionner et ce processus est appelé *gamétogamie*. Il y aura *isogamie* ou *anisogamie* selon que les gamètes seront identiques ou non. Par contre si la reproduction est *induite* par la rencontre et l'association de deux partenaires au stade végétatif, généralement préalable à la méiose, il y aura *gamontogamie* qui peut se conclure par la réalisation de gamètes autonomes ou de « noyaux gamétiques » non indépendants. Enfin un gamonte isolé peut se livrer seul au processus sexuel, et élaborer des gamètes ou des « noyaux gamétiques » qui copulent : c'est le processus de l'*autogamie*.

La gamétogamie. Elle est la règle pour les Phytoflagellés et son déterminisme a donné lieu à des travaux fort nombreux. Elle a été aussi observée par Cleveland depuis 1949 chez de nombreux Zooflagellés Hypermastigines vivant en symbiose dans le tube digestif d'une blatte Américaine *(Cryptocercus)*. En 1966 ce processus a été retrouvé chez d'autres Hypermastigines symbiotes de Termites. La reproduction sexuée de ces espèces est curieusement induite par l'hormone de mue (ecdysone) sécrétée par la glande pro-thoracique de l'Insecte, qui entraîne la détermination des gamontes sans qu'il y ait, le plus souvent, de modifications morphologiques observables. Puis le gamonte, haploïde, engendre par une seule division (gamogonique), dite différentielle, deux gamètes; l'un est femelle, l'autre, souvent un peu plus petit, est mâle (c'est le cas de *Barbulanympha*). Deux gamètes de sexe différent vont alors fusionner selon des modes variés et spécifiques et donner un zygote ou copula. D'autres modalités existent; *Trichonympha*, par exemple, commence par s'enkyster et résorber ses organites, puis la division gamogonique survient et engendre les deux gamètes mâle et femelle. Quand le kyste s'ouvre, les gamètes, libérés, copulent et la caryogamie aboutit au zygote fugace. Une méiose en deux temps restitue deux *trophozoïtes* haploïdes.

Plus de trente espèces sont hébergées dans le tube digestif de la blatte américaine, et presque toutes montrent une sexualité analogue.

Quelques Foraminifères comme *Elphidium, Discorbis, Orbulina,* dont la coquille comprend plusieurs loges *(polythalames)*, ou comme *Myxotheca* et *Iridia* qui ont une seule loge *(monothalames)*, libèrent de petits gamètes nageurs qui sont issus de la phase sexuée du cycle (gamonte) par divisions multiples et fragmentation de la masse cytoplasmique. Ils sont de petite dimension (2 à 5 µ), identiques (isogamie), biflagellés, et quittent la coque vide en nageant. La copulation donne un zygote diploïde, qui est à l'origine de la phase asexuée du cycle (agamonte).

Presque toutes les Coccidies (Sporozoaires) pratiquent également la gamétogamie avec une particularité : les gamontes femelles et mâles ne subissent pas la même évolution; alors que les premiers donnent directement un gamète volumineux et immobile ou *macrogamète*, les seconds se divisent plusieurs fois et engendrent de nombreux gamètes bi- ou triflagellés, les *microgamètes* qui pénètrent dans les macrogamètes et procèdent à la caryogamie. Une méiose en un temps survient et les éléments qui en sont issus se reproduisent de façon asexuée, par sporogonie et parfois schizogonie.

La gamontogamie est l'induction des phénomènes de la reproduction sexuée par l'appariement de deux gamontes. Cet acte est suivi soit de l'élaboration de gamètes, soit de l'échange de noyaux particuliers, soit enfin de la fusion des cytoplasmes suivie de méiose et de caryogamie.

Les Foraminifères nous fournissent quelques exemples d'élaboration de gamètes triflagellés *(Discorbis mediterranensis)* ou amœboïdes *(Patellina)*, qui fusionnent dans l'espace compris entre les deux coques. En ce qui concerne les Sporozoaires, toutes les Grégarines et la

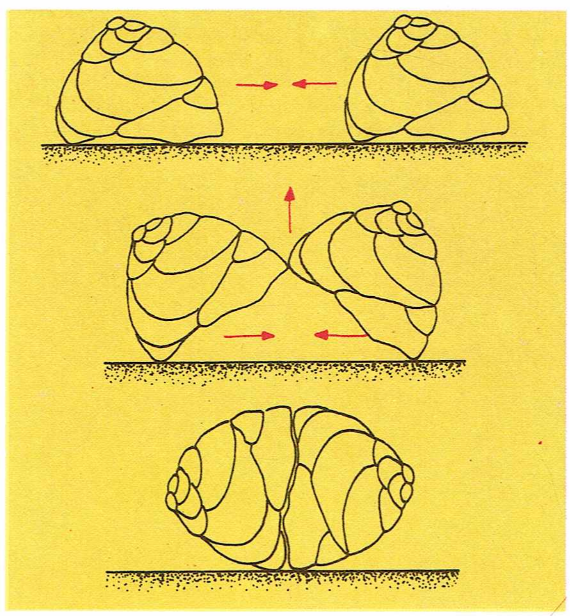

I.G.D.A.

famille des Adéléidés (Coccidies) pratiquent ce mode de sexualité. Elle est particulièrement classique dans le cas des Eugrégarines et décrite dans tous les manuels. Rappelons brièvement que les gamontes s'apparient (syzygie), souvent en file. A un premier individu femelle ou *primite* se fixe un individu mâle ou *satellite*. Puis ils se déforment, deviennent hémisphériques, s'entourent d'une enveloppe commune et forment un *gamétokyste*.

Des divisions nucléaires multiples et synchrones surviennent et les noyaux qui en sont issus migrent à la périphérie de chaque gamonte. Ces noyaux entourés d'un peu de cytoplasme s'individualisent en autant de gamètes mâles et femelles souvent identiques (perlage des gamètes) puis se mêlent (mêlée sexuelle). Ils copulent deux à deux en donnant un zygote ou copula qui s'isole à son tour sous une coque épaisse (ookyste). La première division du zygote est réductionnelle et deux mitoses engendrent huit spores vermiformes ou *sporozoïtes* (stade infestant).

Au lieu de former des gamètes, les gamontes peuvent se borner à élaborer (par méiose) chacun une paire de noyaux haploïdes ou *pronuclei* dont l'un, se comportant comme un gamète mâle (mais sans en avoir l'autonomie), sera échangé avec le partenaire : c'est le processus original de la *conjugaison*. Chaque noyau migrateur fusionne avec le pronucleus femelle stationnaire et il se forme par gamonte un *syncaryon* qui sera à l'origine des nouveaux appareils nucléaires, tant micronuclei que macronuclei. Dans la plupart des cas les gamontes sont identiques *(isogamontie)*, et ils reprennent leur indépendance à la fin du phénomène d'échange nucléaire. Par contre dans le cas de Ciliés fixés (Péritriches, quelques Acinétiens) il y a une grande différence de taille entre les partenaires : l'un reste fixe, le *macrogamonte*, tandis que l'autre, plus petit, ou *microgamonte*, est mobile. Comme dans la conjugaison il y a formation de pronuclei, mais le petit partenaire est absorbé et il ne se forme qu'un seul syncaryon pour deux gamontes. Enfin la gamontogamie peut avoir lieu par la *fusion* de partenaires identiques (*Notila*, Hypermastigines) qui fusionnent, réduisent leur noyau en quatre pronuclei qui copulent deux à deux.

L'autogamie est la manifestation de la sexualité par un seul individu. Les Ciliés en fournissent de bons exemples (*Paramecium aurelia, Euplotes minuta*, etc.). Pendant que d'autres individus conjuguent, l'autogamonte présente les mêmes phénomènes nucléaires, engendre deux pronuclei, mais ceux-ci fusionnent aussitôt. Il est vraisemblable qu'un certain rajeunissement génique s'ensuit car dans certains cas c'est le seul phénomène connu ; *Paramecium polycaryum* par exemple ne montre jamais de conjugaison bi-parentale. Les Foraminifères *(Rotatiella)* fournissent aussi un exemple remarquable d'autogamie ; il y a formation de gamètes qui fusionnent deux à deux dans la coque parentale.

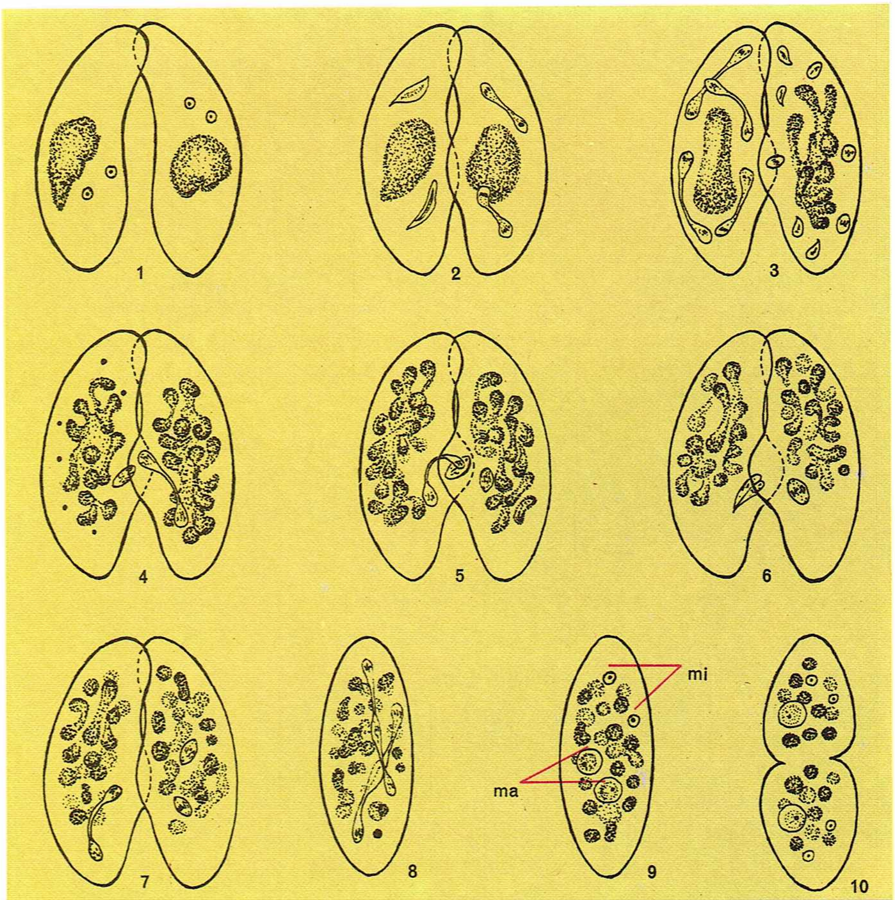

I.G.D.A.

▲ ***Stades successifs de la conjugaison avec isogamontie chez* Paramecium aurelia *; Ma, macronuclei ; mi, micronuclei.***

▼ ***Phénomène de reproduction sexuée avec anisogamontie chez un Péritriche.***

Photo Crumeyrolles

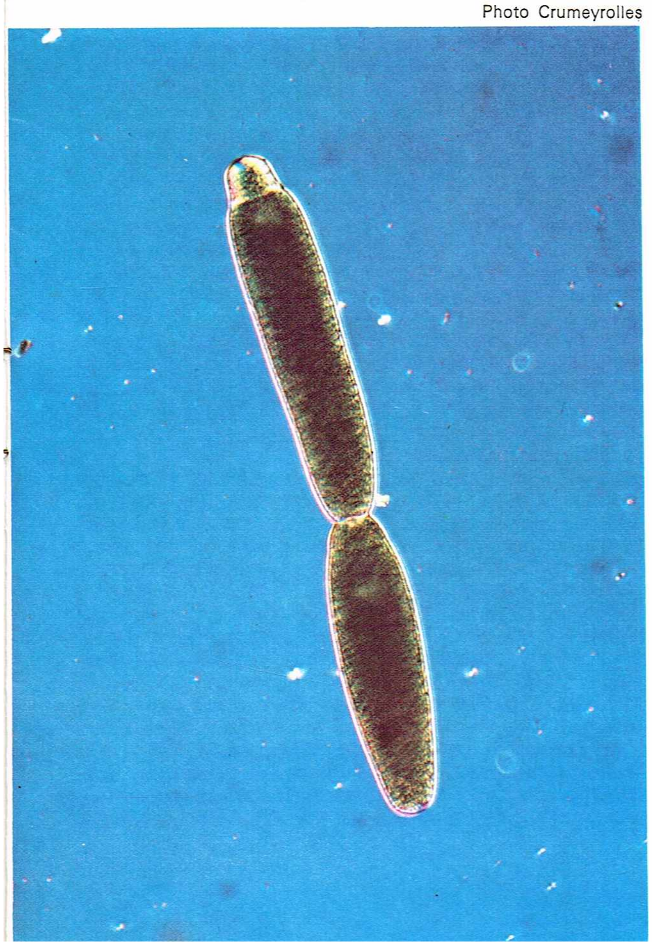

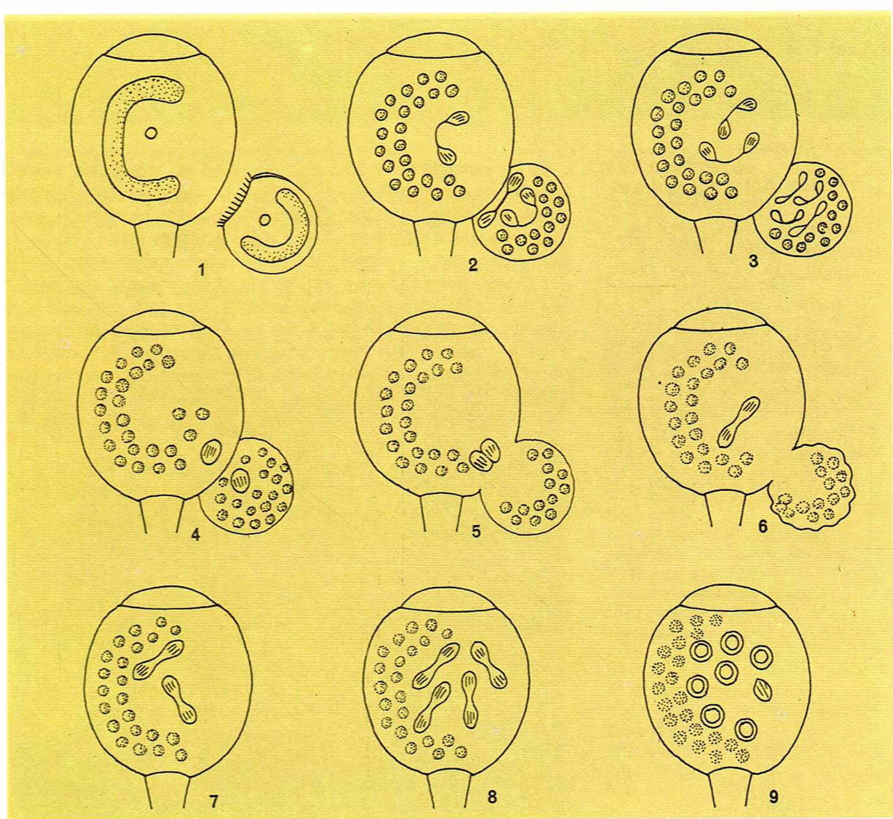

I.G.D.A.

I.G.D.A.

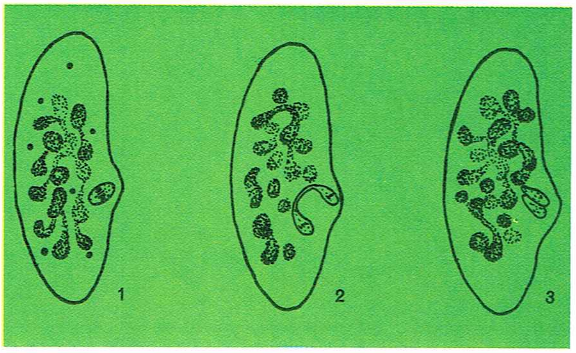

▶ ***Reproduction sexuée par autogamie chez* Paramecium aurelia. *Chez un même individu il y a formation de deux pronuclei qui vont fusionner.***

I.G.D.A.

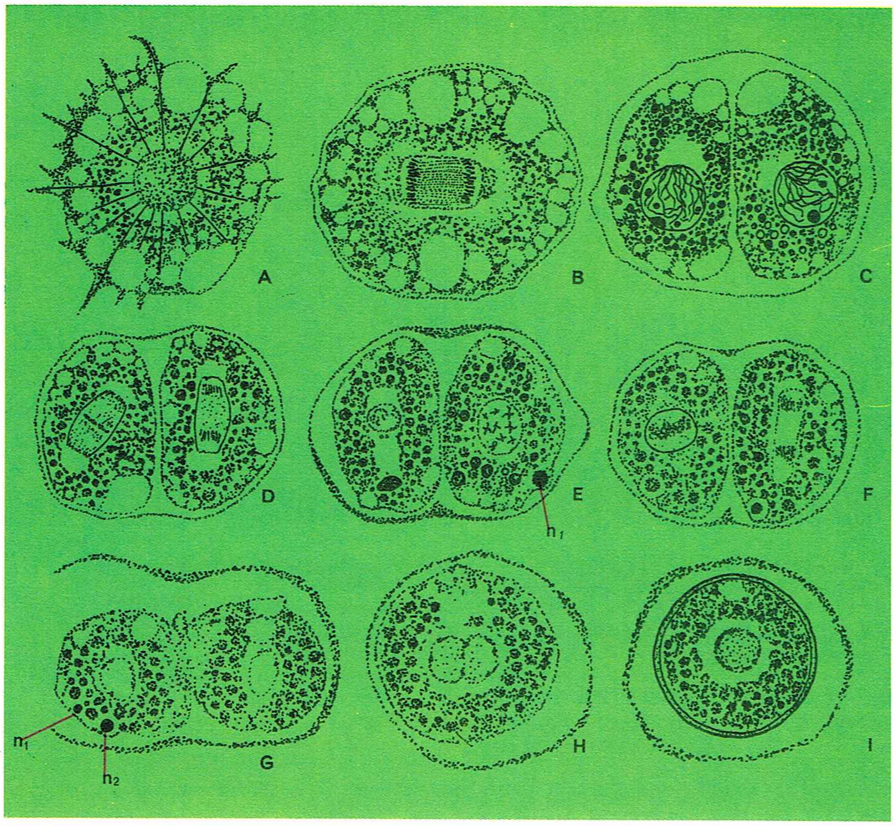

▲ ***Autogamie chez* Actinophrys sol, *un Héliozoaire. A, individu résorbant ses axopodes; B, division donnant naissance à deux gamontes (C); D-F divisions méiotiques asynchrones donnant des gamontes ♂ et ♀ à* n *chromosomes; G-H, fusion plasmique et nucléaire; I, zygote enkysté; n 1 et n 2, noyaux pycnotiques.***

Enfin l'exemple le plus souvent cité est celui des Héliozoaires et en particulier d'*Actinophrys sol*. Le trophozoïte résorbe ses axopodes (filaments rigides), s'isole sous une fine pellicule et se divise une première fois. Les deux gamontes ainsi formés subissent une méiose en deux divisions asynchrones et le premier réduit, considéré comme mâle, émet un pseudopode vers son partenaire, y pénètre et procède à la fusion plasmique puis nucléaire; il y a à nouveau 2 *n* chromosomes. Le zygote élabore une paroi protectrice et sous cette forme kystique attend des conditions plus favorables. *Actinosphaerium* poursuit une autogamie aux modalités analogues mais quelque peu compliquée par le grand nombre de noyaux.

Il est particulièrement intéressant de remarquer que dans ces cas d'autogamie les processus sexuels ne multiplient pas le nombre d'individus : un *Actinophrys* ne redonne qu'un individu, mais il est vraisemblablement très différent sur le plan génétique. Il faut souligner enfin que de très nombreuses espèces ne subissent pas les phénomènes de reproduction sexuée; chez de nombreux Flagellés ou Rhizopodes élevés depuis longtemps en laboratoire, aucun indice ne permet d'en suspecter l'existence.

Locomotion

La motilité est une propriété universelle du protoplasme, trahie par les incessants courants cytoplasmiques intracellulaires que la cinématographie accélérée montre de façon spectaculaire. Mais elle devient directement perceptible lorsqu'elle entraîne le déplacement de l'Animal, que ce soit par glissement, reptation ou nage. Le glissement en bloc des Grégarines est remarquable et serait dû aux ondulations coordonnées des innombrables et minuscules replis de la membrane cellulaire.

Des expansions cytoplasmiques temporaires, les *pseudopodes,* assurent classiquement le déplacement des Rhizopodes *sensu lato* et de quelques Flagellés. En fait il y a de nombreuses façons de se déplacer avec des pseudopodes; la plus connue est celle de l'amibe protée *(Chaos diffluens)* qui émet de nombreux pseudopodes tubulaires dont un seul assurera la direction définitive du Protozoaire (dès que le noyau s'y engage), alors que les autres se résorbent, et ainsi de suite. Mais ce n'est pas le seul moyen; de petites Amibes dites « limax » et de grands plasmodes du genre *Pelomyxa* progressent en bloc; un seul courant cytoplasmique, précédé ou non d'une cape hyaloplasmique antérieure, jaillit « en fontaine » selon l'axe de symétrie : ces espèces sont dites *monopodiales. Chaos* peut prendre temporairement cette allure en cas de déplacement rapide et polarisé. De petites Amibes nues *(Thecamoeba)* progressent par un roulement « en chenillette » de leur cytoplasme périphérique. D'autres se hâlent grâce à de courts pseudopodes ressemblant à des béquilles adhérant au substrat *(Pontifex)*. Sous cette foison de types les plus divers on peut remarquer qu'il y a presque toujours une dualité morphologique sous-jacente entre un cytoplasme fluide *(plasmasol)* axial, et un plasma plus dense, plus ferme, comme gélifié à la périphérie *(plasmagel)*. Cela est peut-être dû au choix du matériel, la plupart des sujets d'étude montrent des pseudopodes du type lobé *(lobopodes),* mais il en existe bien d'autres catégories. Les Rhizopodes *Filosia* possèdent des pseudopodes acuminés *(filopodes),* les Foraminifères des pseudopodes granuleux et réticulés; tous les intermédiaires peuvent être observés. Bien des théories ont été échafaudées pour en expliciter les modalités et en rechercher le « moteur ». On a ainsi incriminé des processus purement physiques de tension superficielle ou de thixotropie, puis le changement cyclique et réversible des états physiques du cytoplasme (gel-sol), le renouvellement continu de la membrane cytoplasmique, des modifications localisées de la disposition des molécules à son niveau, etc. Plus récemment on a suspecté l'intervention de processus de contractilité; celle-ci serait soit *passive,* la partie postérieure, en se contractant globalement, augmenterait la pression interne induisant l'extrusion de pseudopodes dans la région antérieure, soit *active* (microfibrilles ?), assurant la formation et surtout le retrait, souvent brutal, d'un pseudopode après une agression. Comme toujours en pareil cas il est vraisemblable que chaque hypothèse comporte une partie de vérité, cependant l'action nette de l'A.T.P. est en faveur de la théorie contractile qui suggère une analogie avec les processus de la contraction musculaire. L'observation du déplacement de Protozoaires particulièrement agiles renforce cette idée : tel est le cas des Difflugies qui se hâlent sur des pseudopodes hyalins (dépourvus d'endoplasme différencié) et capables de contractions brutales sous l'effet d'un choc ou de la lumière vive; citons également *Hyalosphenia papilio,* des tourbières à sphaignes, dont l'agilité extraordinaire lui a valu d'être comparé à un papillon. C'est certainement la théorie la plus féconde, mais il reste à l'étayer pour sortir de l'impasse actuelle où il s'agit plus de conviction des auteurs que de certitude scientifique (Wohlfarth-Bottermann, août 1973).

Flagelles et cils sont les organites essentiels de la nage, parfois aidée par la forme du corps, tant par son profil hydrodynamique que par une déformation hélicoïdale permettant au Protozoaire de se déplacer dans le milieu. Ils assurent la mobilité de nombreux Protistes ou de leurs gamètes. Privés de microtubules centraux, ils deviennent inefficaces; il semble cependant que ce soit le glissement réciproque des tubules périphériques, et non leur contraction, qui assure les ondulations coordonnées et locomotrices (l'activité d'une enzyme transformant l'A.T.P. en A.D.P. en libérant de l'énergie a été montrée à ce niveau). Une membrane ondulante n'est qu'un flagelle extracellulaire, associé lâchement mais spécifiquement à la membrane cellulaire et pourvu d'un paquet de fibrilles latérales, à disposition longitudinale. Très rarement en position postérieure *(Ceratium),* ils tirent plus générale-

ment la cellule (tractelle) par la force résultante d'un mouvement sinusoïdal ou hélicoïdal dont l'analyse est complexe.

Les cils, plus courts que les flagelles, procèdent de façon analogue. Ils sont souvent remarquablement coordonnés (ce qui compense leur petitesse) et battent en vagues synchrones.

Alimentation

L'alimentation des Protozoaires se fait de différentes façons. Ils sont souvent rendus en partie autotrophes *(holophytiques)* en hébergeant dans leur cytoplasme des organismes chlorophylliens supposés symbiontiques. Ce sont des Algues bleues *(Paulinella, Testaceofilosa)*, des Chlorelles (*Paramecium bursaria* et de très nombreux autres genres) ou des Xanthelles (Radiolaires, Acanthaires). Mais la nature précise et l'importance des échanges sont très mal connus. Les Protozoaires sont donc avant tout des hétérotrophes mais leurs besoins exacts en matières organiques sont rarement connus; seules quelques espèces sont cultivées en milieu *axénique*, c'est-à-dire dans un milieu de composition chimique synthétique parfaitement connue et dépourvu de tout organisme-proie.

La prise de petites molécules se fait par diffusion passive ou le plus souvent active (grâce à des perméases). La prise de grosses molécules ou de micelles colloïdales recourt au processus de pinocytose, invagination d'une microvésicule (0,2 μ à 0,001 μ) qui entraîne une microgouttelette du milieu au sein du Protozoaire. C'est le mode alimentaire exclusif des espèces dites osmotrophes (saprozoïques).

Enfin la prise de grosses particules ou d'organisme-proie (Bactéries ou autres Protistes) recourt au processus de la *phagocytose*, à l'aide de dispositifs divers. Temporaires, ce seront par exemple les pseudopodes des Rhizopodes, des grands Flagellés mangeurs de bois, etc. Une nappe cytoplasmique déprimée en son centre enveloppe la proie convoitée (chimiotactisme) qui se trouve rapidement enfermée dans une vacuole digestive ou *gastriole* et emportée dans le cytoplasme. Les proies d'un Actinopode adhèrent à un axopode et sont portées, activement, à la surface de la cellule puis recouvertes d'une nappe cytoplasmique; les modalités en sont très variables. On peut rattacher à la phagocytose la prise alimentaire des Acinétiens qui, à l'aide de tentacules creux, sucent le contenu de leurs proies. Permanents, il s'agit surtout des structures buccales des Ciliés; elles sont complexes, et leur disposition, leur topographie et leur infrastructure servent de critères taxonomiques.

SYSTÉMATIQUE

Les Protozoaires constituent un très vaste groupe de plus de trente mille espèces, dont notre connaissance est encore à bien des égards fragmentaire; l'embranchement unique des Protozoaires est de systématique très délicate. Nous nous en tiendrons, dans toute la mesure du possible, à la classification proposée par Honigberg et ses dix Collaborateurs (1964). Le niveau et le nombre des coupures systématiques ne sont pas les mêmes d'un Auteur à l'autre.

Pour ce qui est des grandes césures, l'accord semble cependant exister pour distinguer quatre sous-embranchements : les Rhizoflagellés *(Sarcomastigophora)*, les Sporozoaires *(Sporozoa)*, les Ciliés *(Ciliophora)* et les Cnidosporidies *(Cnidospora)*.

SARCOMASTIGOPHORA

Ce sont les Protozoaires susceptibles de se déplacer soit à l'aide de flagelles, soit grâce à des pseudopodes. Sur ce simple critère il semblerait aisé de les distinguer, mais en fait la démarcation entre ces deux manières d'être est des plus délicates. S'il est vrai qu'un Phytoflagellé devenant amiboïde *(Rhyzochrisis)* conserve le chimisme de son groupe originel (Chrysomonadines), ce que l'on oublie bien souvent, il subsiste un groupe charnière, très hétérogène et certainement polyphylétique, d'êtres se présentant tantôt sous l'aspect de Flagellés, à un, deux ou quatre flagelles, tantôt sous l'aspect d'Amibes nues rampant sur le substrat. Réunis dans l'ordre des Rhizomastigines et rattachés tantôt aux

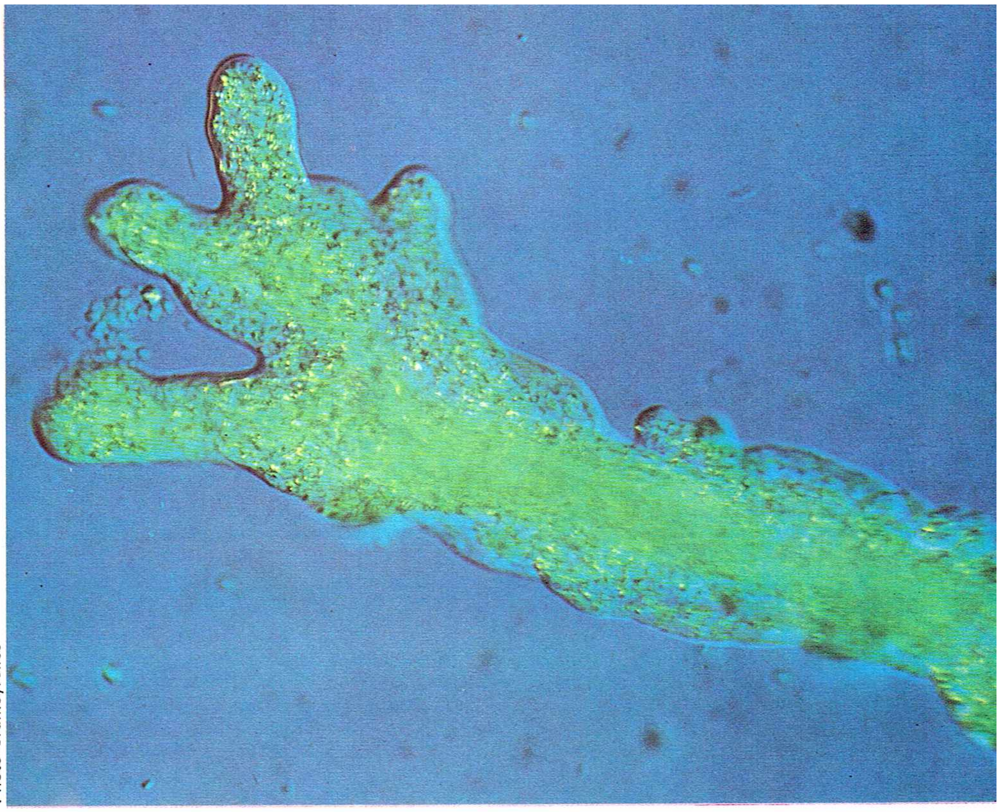

Photo Crumeyrolles

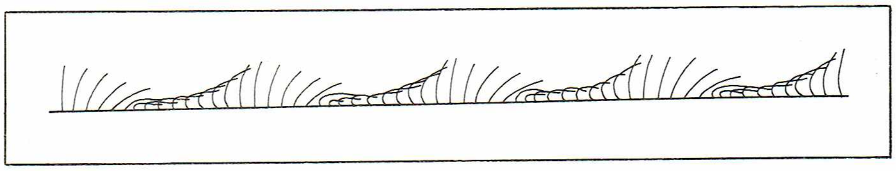

I.G.D.A.

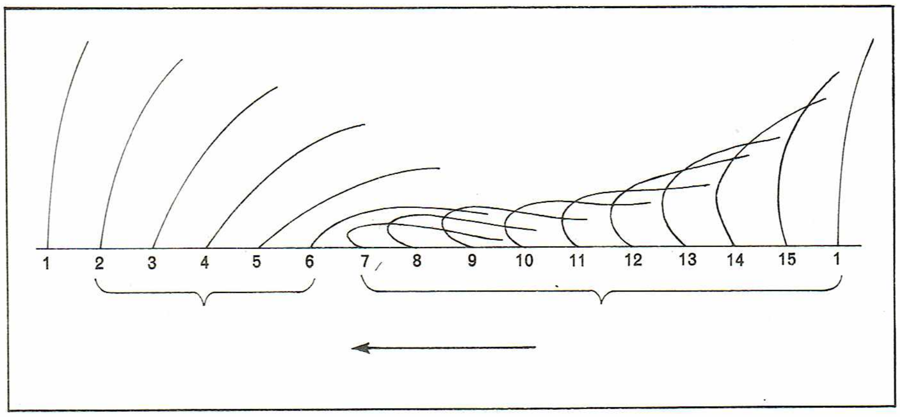

I.G.D.A.

▲ *En haut :* **Chaos diffluens,** ***l'amibe protée au cours de la locomotion (400 μ). Plusieurs pseudopodes sont élaborés simultanément, l'un d'entre eux marquera la nouvelle direction du corps pendant que les autres se résorberont. Noter la visualisation du courant endoplasmique grâce à la pose prolongée (5 secondes)*** **[in vivo;** ***contraste interférentiel*****]. *Les cils (au milieu et en bas), organes de locomotion, battent en vagues synchrones; la flèche indique le sens du déplacement.***

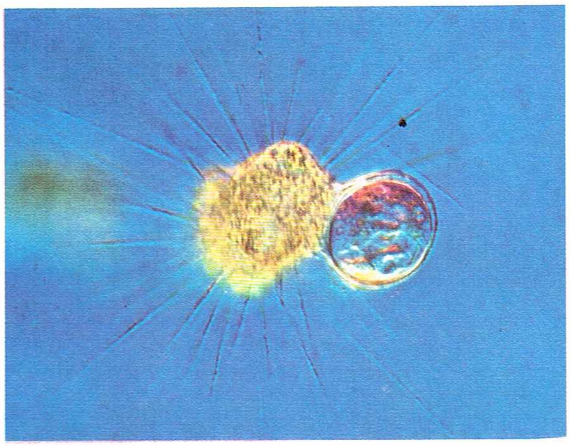

Photo Crumeyrolles

◀ ***Envacuolement d'une proie volumineuse*** **(Vorticella)** ***par un Héliozoaire*** **(Actinophrys). [*70 μ*] (in vivo;** ***contraste interférentiel*****).**

EMBRANCHEMENT DES PROTOZOAIRES

Tableau systématique simplifié (suppression des sous-ordres) d'après Honigberg et Coll. 1964

Sous-E.	*Sup.-Cl.*	*Cl.*	*Sous-Cl.*	*Ordres*	*Exemples*
Sarcomastigophora	Mastigophora	Phytomastigophorea		Chrysomonadida	*Mallomonas*
				Silicoflagellida	
				Coccolithophorida	
				Heterochlorida	
				Cryptomonadida	*Cryptomonas*
				Dinoflagellida	*Ceratium*
				Ebriida	
				Euglenida	*Phacus*
				Chloromonadida	
		Zoomastigophorea		Volvocida	*Volvox*
				Choanoflagellida	
				Bicosoecida	
				Rhizomastigida	*Mastigamoeba*
				Kinetoplastida	*Bodo, Trypanosoma*
				Retortomonadida	
				Diplomonadida	*Giardia*
				Oxymonadida	
				Trichomonadida	*Trichomonas*
				Hypermastigida	*Trichonympha*
	Opalinata			Opalinida	*Opalina, Cepedea*
	Sarcodina	Rhizopodea	Lobosia	Amoebida	*Amoeba, Pelomyxa*
				Arcellinida	*Arcella, Difflugia*
			Filosia	Aconchulinida	
				Gromiida	
			Granuloreticulosia	Athalamida	
				Foraminiferida	*Iridia*
				Xenophyophorida	
			Mycetozoia	Acrasida	
				Eumycetozoida	
				Plasmodiophorida	
			Labyrinthulia	Labyrinthulida	
		Piroplasmea		Piroplasmida	
		Actinopodea	Radiolaria	Porulosida	
				Oculosida	
			Acantharia	Acanthometrida	*Acanthometra*
				Acanthophractida	
			Heliozoia	Actinophryida	*Actinophrys*
				Centrohelida	*Acanthocystis*
				Desmothoracida	*Clathrulina*
			Proteomyxidia	Proteomyxida	
Sporozoa		Telosporea	Gregarinia	Archigregarinida	
				Eugregarinida	*Gregarina*
				Neogregarinida	
			Coccidia	Protococcidia	
				Eucoccidia	
		Toxoplasmea		Toxoplasmida	
		Haplosporea		Haplosporida	
Ciliophora		Ciliatea	Holotrichia	Gymnostomatida	*Coleps, Chilodon*
				Trichostomatida	*Isotricha*
				Chonotrichida	*Lobochona*
				Apostomatida	
				Astomatida	*Anoplophrya*
				Hymenostomatida	*Paramecium*
				Thigmotrichida	
			Peritrichia	Peritrichida	*Epistylis*
				Suctorida	*Prodiscophrya*
			Spirotrichia	Heterotrichida	*Stentor*
				Oligotrichida	
				Tintinnida	
				Entodiniomorphida	
				Odontostomatida	
				Hypotrichida	*Stylonychia*
Cnidospora		Microsporidea		Helicosporida	
				Microsporida	
		Myxosporidea		Myxosporida	
				Actinomyxida	

Rhizopodes (Grassé 1953, Jepps 1956), tantôt aux Flagellés par convenance didactique, ces Protozoaires justifieraient à eux seuls le rapprochement des Flagellés *(Mastigophora)* et des Protozoaires à pseudopodes *(Sarcodina)*. Par ailleurs, les grands Flagellés mangeurs de bois montrent une zone à potentialités rhizopodiales élevées (phagocytose) ; enfin, nous verrons que d'autres critères, d'ordre plus cytologique, peuvent inciter à des transferts suivant les progrès de nos connaissances.

• MASTIGOPHORA

Ces Protozoaires ont au cours de leur vie végétative un ou plusieurs flagelles, issus de blépharoplastes (cinétosomes) souvent reliés à un appareil dit parabasal (dictyosomes) très développé. Les caryocinèses sont de types divers, mais la plasmotomie est longitudinale. Selon la présence ou l'absence de pigments photosynthétiques, ils sont séparés en deux grandes classes : les Phytoflagellés *(Phytomastigophorea)* et les Zooflagellés *(Zoomastigophorea)*, que nous étudierons ici.

ZOOMASTIGOPHOREA

Ce sont les Zooflagellés fondamentalement dépourvus de tout pigment assimilateur, et limités par une membrane plasmatique mince. Libres ou parasites, ils présentent parfois une sexualité et s'alimentent soit par osmotrophie, soit par phagocytose. L'appareil de Golgi est souvent hypertrophié et le cytoplasme comprend les organites habituels des cellules vivantes, bien que les mitochondries disparaissent souvent (anaérobiose). Le déplacement se fait à l'aide de flagelles, soit par mouvement sinusoïdal ou hélicoïdal régulier, soit par le battement rythmique des flagelles associés en pinceaux. L'un des flagelles est parfois associé à la membrane cellulaire de façon lâche en une membrane ondulante.

Chaque cellule uninucléée est typiquement dotée d'un flagelle issu d'un cinétosome lui-même flanqué d'un parabasal, et armée d'un axostyle; l'ensemble de ces structures associées à un flagelle constitue une cinétide. Elle peut être incomplète, axostyle et parabasal manquant souvent, et même le flagelle peut faire défaut; elle est alors réduite à sa plus simple expression : un cinétosome. Inversement, chaque élément peut se présenter en plusieurs exemplaires.

Des considérations cytologiques diverses inclinent à faire tronçonner ce groupe en trois : les Protomonadines *(Protomonadina)*, les Métamonadines *(Metamonadina)*, les Opalines *(Opalinata)*.

Protomonadina

Il s'agit de Zooflagellés de petite taille, dotés d'un ou de deux flagelles, sans axostyle, et au parabasal inconstant. Dans ce groupe, les mitoses sont variées et mal connues. La microscopie électronique a révélé une couche de fibrilles longitudinales sous-pelliculaires. Nous n'étudierons que l'ordre des *Kinetoplastida*.

Ordre des Kinetoplastida

Ces Protozoaires sont caractérisés par la possession d'un organite très particulier, le *kinetonucleus* (cinétoplaste), renfermant de l'A.D.N. et élaborant du glycogène, mais dont l'ultrastructure rappelle celle d'une mitochondrie. Il est situé à la base des flagelles, contre les cinétosomes, et avait été confondu soit avec un parabasal, soit avec un second noyau; il se divise en effet par étirement lors de la caryocinèse.

Cryptobia, osmotrophe, est parasite du réceptacle séminal de divers Gastéropodes Pulmonés *(Helix)*.

Les Trypanosomides sont parasites d'Animaux ou de Végétaux. Particulièrement polymorphes, ils peuvent présenter, au cours de leur cycle, plusieurs types morphologiques parmi les quatre suivants que l'on distingue par la forme générale et selon que le cinétosome est postérieur, *Trypanosoma*, médian, *Crithidia*, antérieur, *Leptomonas*, ou endocellulaire et sans flagelle libre, *Leishmania*. Le genre *Trypanosoma* peut se présenter sous les quatre formes tandis que *Crithidia* ne prend jamais l'allure d'un *Trypanosoma*. Enfin, *Leptomonas* et *Leishmania* alternent.

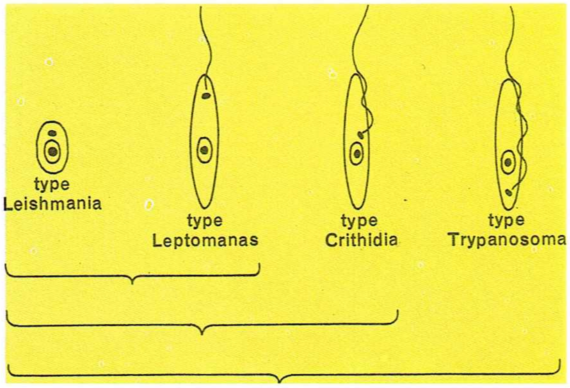

I.G.D.A.

◀ *Le polymorphisme est très développé chez les Trypanosomides qui peuvent présenter un ou plusieurs types caractérisés par la forme de l'individu et surtout par la position du cinétosome.*

Trypanosoma, agent de la maladie du sommeil en Afrique, est un parasite redouté. Élancé (15 à 30 μ sur 3 μ), il est doté d'un seul flagelle inséré dans la zone postérieure du corps et qui, infléchi vers l'avant, adhère à la membrane plasmique (membrane ondulante) puis se termine librement en avant. Il colonise le sang, la lymphe, où il se reproduit par division longitudinale. La sexualité n'est pas connue avec certitude.

Si une mouche tsé-tsé *(Glossina palpalis)* pique un sommeilleux, elle pompe le sang et ingère les Protozoaires, lesquels ne sont pas digérés et se multiplient dans l'intestin moyen en devenant très grêles et de morphologie différente, analogue au genre *Crithidia*. Ils gagnent alors les glandes salivaires, s'y retransforment en trypanosomes (métatrypanosomes) et, lors d'une piqûre à un homme sain, sont entraînés par la salive et injectés dans la circulation. L'évolution dans la glossine est très lente et demande de un à deux ans alors que l'incubation dans l'organisme humain est de l'ordre de quinze jours dans les ganglions lymphatiques, à la suite de quoi ils gagnent la lymphe, le sang et le liquide céphalo-rachidien. C'est alors qu'apparaissent les troubles nerveux caractéristiques. Non traitée, cette maladie est mortelle en quelques années.

En Amérique du Sud, *Schizotrypanosoma cruzi* est l'agent de la maladie de Chagaz, transmise à l'homme par les excréments de punaises Réduvides *(Rhodnius)*.

De nombreuses autres espèces parasitent divers Mammifères selon le même cycle; cependant, *Trypanosoma equiperdum* est monoxène (un seul hôte au cours du cycle complet) et se transmet au cours du coït.

Crithidia est parasite d'Insectes piqueurs et se reconnaît à la position de son blépharoplaste juxtanucléaire. La membrane ondulante est rudimentaire.

Les *Leptomonas* sont parasites d'Invertébrés (Nématodes, Rotifères, Insectes, Mollusques), de Reptiles et de Végétaux (Euphorbes, Asclépiadacées, ficus, caféiers) où ces Protozoaires sont aussi inoculés par des Insectes piqueurs.

Les *Leishmania* sont des parasites endocellulaires des Mammifères et de quelques Reptiles; évoluant dans l'intestin de l'Insecte vecteur sous forme *Leptomonas*, ils s'y multiplient, gagnent la région buccale et sont réinoculés à la piqûre. *Leishmania donovani*, transmis par un petit Diptère (phlébotome), colonise, sous la forme *Leishmania* sans flagelle, les cellules du système réticulo-endothélial (foie, rate, ganglions, etc., et les leucocytes) et provoque une grave maladie, presque toujours mortelle si elle n'est pas traitée, le kala azar. *Leishmania tropica* est l'agent du bouton d'Orient, ulcération cutanée limitée, mais laissant des cicatrices sévères.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ **Trypanosoma gambiense**, *Protozoaire responsable de la maladie du sommeil, se développe dans le sang ou la lymphe de l'homme; il est transmis par la piqûre de l'Insecte* **Glossina palpalis**, *connu sous le nom de mouche tsé-tsé (× 1 000 × 1,5; frottis sanguin coloré).*

Metamonadina

Ce sont des Zooflagellés de taille généralement grande (jusqu'à 200 μ) munis de plus de trois flagelles (3 à *n*) et presque toujours pourvus d'un axostyle. La mitose est en général à fuseau extranucléaire. L'appareil parabasal est bien développé. Ces Protozoaires sont souvent parasites ou symbiotes.

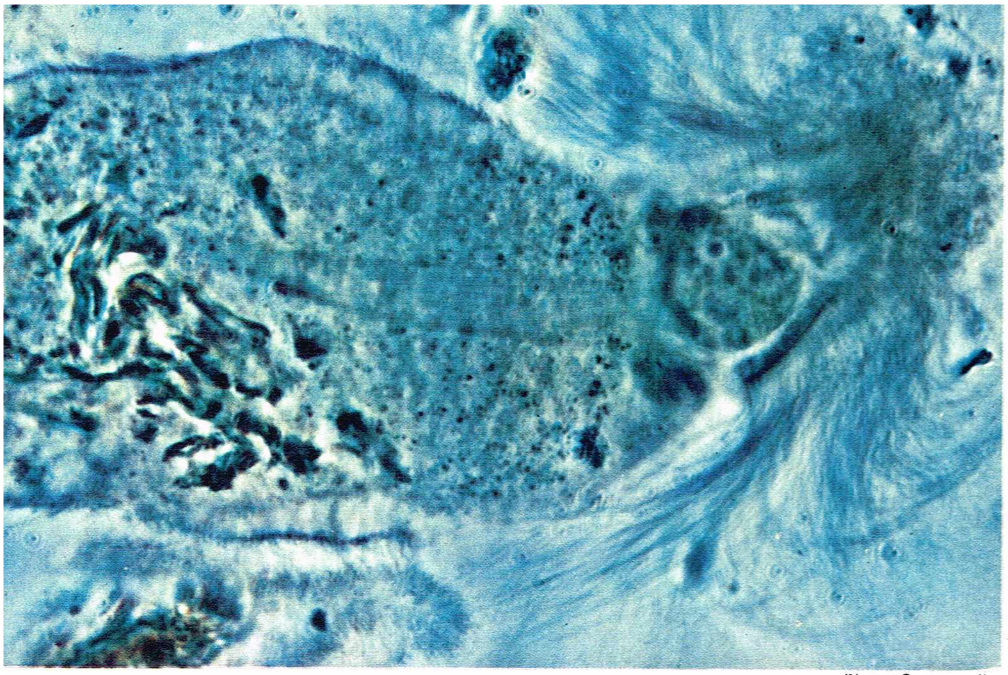

Photo Crumeyrolles

▲ *Joenia annectens*, *une Hypermastigine de 150 μ, montre de nombreux flagelles implantés dans la région antérieure : au centre de ce capuchon flagellaire se trouve le noyau, doté d'un nucléole et logé dans un élargissement cupuliforme de l'axostyle lui-même entouré des parabasaux (Golgi) puis d'un nuage de Bactéries symbiotes. La zone postérieure, envahie de bois en cours de digestion, est garnie d'une vêture schizophytique de Bactéries et de Spirochètes implantés sur la membrane. (Contraste de phase.)*

Ordre des Trichomonadida

Ces Zooflagellés sont dotés de trois à six flagelles, dont l'un, dirigé vers l'arrière, est souvent adhérent au corps (membrane ondulante). Leur parabasal est volumineux et ils présentent un axostyle. Le fuseau est extranucléaire.

Trichomonas vaginalis est parasite des voies génitales de la femme, de l'urètre et de la prostate de l'homme (transmission vénérienne). C'est un petit Flagellé (13 μ) pourvu de quatre flagelles antérieurs et d'un postérieur (membrane ondulante) sous-tendu par une côte fibrillaire intracytoplasmique. Le noyau interphasique présente des chromosomes spiralés et la mitose qui s'ensuit est à fuseau extranucléaire. L'axostyle, élastique, dépasse le corps dans la zone postérieure. Il disparaît au cours de la cinèse mais se reforme dans chaque cellule fille par induction de la zone juxta-blépharoplastique.

Ordre des Pyrsonymphida

Pyrsonympha (200 μ) est une grande Métamonadine symbiote du termite de Saintonge et du midi de la France *(Reticulitermes lucifugus)*, de forme cylindrique, devenant piriforme pour les individus de grande taille. La partie antérieure est occupée par un organe de fixation permettant l'ancrage à l'épithélium de la panse rectale de l'Insecte. Le noyau, antérieur dans les formes jeunes, devient central puis postérieur chez les grands individus et montre à la mitose un fuseau intranucléaire. Quatre à huit flagelles (formes de prédivision) insérés antérieurement s'enroulent autour du corps en une spirale sénestre et y adhèrent tout comme une membrane ondulante. Ils sont libres uniquement à la partie postérieure du corps. Le cytoplasme, envahi de particules de bois, ne permet que difficilement l'observation d'un axostyle flexible.

▼ *Chez* Octomitus intestinalis *comme chez tous les Diplozoaires, les organites sont en double et situés d'une façon symétrique (× 1 400 environ).*

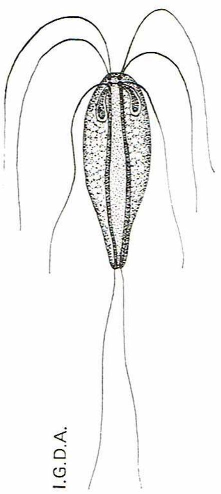

Ordre des Hypermastigida

Joenia est un Flagellé de grande taille (plus de 100 μ), le seul de cette dimension dans la panse rectale du termite de la vigne *(Calotermes flavicollis)*. Le pôle antérieur porte plusieurs centaines de flagelles battant synchroniquement « en coups de hache ». Le pôle postérieur, théoriquement nu, est revêtu d'une garniture de Schyzophytes (Bactéries et Spirochètes, voir Botanique, vol. I) adhérents à la membrane cellulaire. L'axe du corps est occupé par un axostyle unique, riche en glycogène. Il est dilaté en avant en une cupule dans laquelle est logé le noyau et sous laquelle sont disposés deux appareils parabasaux complexes « en régime de bananes » suspendus par deux lames parabasales à la zone apicale du Flagellé. Il existe un nuage de Bactéries symbiotes (hypersymbiotes) au centre de la cellule, disposées comme un manchon péri-axostylaire, et de nombreux fragments de bois. Les chromosomes sont toujours bien visibles, et la mitose, rare, très spectaculaire.

Trichonympha, également symbiote des termites *(Reticulitermes lucifugus)* ou de blattes *(Cryptocercus)*, est aussi un Flagellé de grande taille, ovoïde. La partie antérieure, plus pointue, constitue un rostre rendu mobile grâce à une « articulation cellulaire » ou cytarthrose. L'aire flagellaire, limitée au tiers antérieur, est divisée en deux zones : l'une, rostrale, est garnie de flagelles courts et perpendiculaires au corps (en moustaches) ; l'autre, postérieure, est pourvue de flagelles plus longs que le corps. Ils sont tous implantés au fond de sillons rayonnants. La zone postérieure, trophique, est dépourvue de flagelles. Le noyau, sensiblement central, est entouré d'une corbeille de cordons longitudinaux (parabasaux) suspendus à de fines fibrilles issues de la zone interne de l'aire flagellaire. Il n'y a pas d'axostyle. Les *Trichonympha* de la blatte américaine montrent une sexualité à bien des égards extraordinaire.

Ordre des Diplomonadida (Diplozoaires)

Généralement de petite taille (10 μ), ils possèdent la particularité suivante : tous les organites sont en double, symétriques par rapport à un axe longitudinal ou à un plan médian; il y a huit flagelles, deux noyaux, etc. *Giardia* est parasite de l'intestin de Mammifères, dont l'homme, et *Octomitus intestinalis* de divers Rongeurs.

Opalinata

Parasites intestinaux (le plus souvent rectaux) de Vertébrés pœcilothermes, les Opalines sont recouvertes d'une ciliature uniforme et furent longtemps de ce fait classées parmi les Ciliés. L'existence d'un seul type de noyaux (de 2 à *n* semblables = homocaryotes) et leur mode de reproduction en font bien de véritables Flagellés. Elles ne possèdent pas de structures buccales, sont largement anaérobies et de grande taille (de 100 μ à plus d'1 mm). La reproduction est complexe et semble induite par celle de l'hôte. Dans le cas des Batraciens Anoures de nos régions, la multiplication est asexuée pendant toute l'année et il se forme ainsi des plasmodes, à plasmotomie longitudinale. Au printemps, quand les Batraciens vont à l'eau pour la ponte, les plasmotomies s'accélèrent, engendrant des éléments à peu de noyaux qui s'enkystent, sont rejetés dans l'eau et sont ingérés par les têtards d'une espèce adéquate; le dékystement libère de petites Opalines qui reprennent une plasmotomie et deviennent uninucléées : ce sont les gamètes, microgamètes femelles et macrogamètes mâles (haploïdes ?), qui fusionnent et redonnent une Opaline (diploïde ?), qui se multiplie à nouveau de façon asexuée.

Considérons ensuite le « groupe charnière » entre Flagellés et Rhizopodes, bien évidemment polyphylétique. Les Protozoaires qui y sont relégués ont donc une phase amiboïde alternant avec une phase flagellée.

Rhizomastigida (Rhizomastigines)

Tetramitus (Vahlkampfiidae) est coprophile; son cycle est connu et l'on a pu préciser les facteurs entraînant ses modifications cytologiques. Il passe du stade amibe au stade flagellé (quatre flagelles) quand la concentration saline diminue et que l'oxygénation est faible; le processus inverse, qui demande deux heures environ, à lieu dans les circonstances opposées.

Naegleria (Vahlkampfiidae) montre un comportement identique, les deux flagelles apparaissent en une heure et demie pour 90 % des Amibes portées dans l'eau distillée. Longtemps considérée comme une petite (10 à 15 μ) Amibe inoffensive, des études récentes ont montré qu'elle était l'agent responsable d'une méningoencéphalite parfois rapidement mortelle (soixante-quinze cas recensés de façon certaine) décrite dans l'espèce humaine depuis 1965. La contamination se ferait par le bain en piscines chauffées et trop fréquentées, mais surtout par la consommation d'eau de réseau polluée et mal filtrée, prélevée dans des rivières contaminées. Il ne fait pas de doute que ces Protozoaires sont appelés à être l'objet d'études très approfondies.

Mastigamoeba (Mastigamoebidae) possède un très long flagelle implanté profondément, au contact du noyau qu'il déforme au cours de la progression.

Mastigella (Mastigamoebidae) vit en anaérobiose sur le fond de vases croupissantes, en symbiose bactérienne

(convergence possible avec le mode de vie des *Pelomyxa*) et possède un volumineux noyau central. Le corps est hérissé de dactylopodes hyalins ; le flagelle, profondément ancré dans le cytoplasme, ne semble guère pouvoir propulser le trophozoïte, mais paraît tâter curieusement le milieu environnant pendant la reptation. Au total, il s'agit d'un groupe de Protozoaires encore très mal connus, relativement rares, difficiles à séparer de la vase, encore plus difficiles à conserver au laboratoire.

• SARCODINA

Ce terme, peu usité en France, permet de désigner tous les Protozoaires pourvus de pseudopodes, quel qu'en soit le type. Ils peuvent être à même d'élaborer des flagelles, mais seulement pour de courtes phases de développement comme des gamètes, et jamais pour des stades végétatifs. La sexualité n'est pas constante. La reproduction asexuée se fait par divisions. Le corps est très souvent nu, parfois armé d'un squelette interne ou protégé par des enveloppes externes de natures très diverses. Ils sont presque tous libres.

RHIZOPODEA

Uni- ou plurinucléés, les stades « adultes » ou trophozoïtes se déplacent tous à l'aide de pseudopodes caractéristiques de chaque sous-division, lobés, acuminés ou réticulés. Ils s'alimentent par phagocytose. Le fait de « vivre avec des pseudopodes » ne constitue qu'un *habitus* qui ne doit pas nous abuser ; il n'implique bien évidemment aucune affinité zoologique réelle entre les genres qui y sont relégués du fait de l'évidente insuffisance de nos connaissances à leur égard. « Rien n'est plus difficile que de déterminer une Amibe » (Dangeard 1910), et « Pour les Amibes presque tout est encore à faire » (Pénard 1902) sont des affirmations toujours valables. Les définir et les reconnaître par leur seule forme est une gageure, aussi les descriptions uniques, les synonymies valables ou non, ou les diagnoses contradictoires foisonnent à leur égard dans la littérature spécialisée, ce qui rend leur étude encore plus rebutante. Aussi est-on de plus en plus contraint d'utiliser des critères cytologiques très fins (microscopie électronique), les modalités détaillées de la mitose, voire les propriétés antigéniques, afin de ne pas décrire ou utiliser des espèces sans espoir de les retrouver.

On distingue classiquement trois grands ensembles selon que les pseudopodes sont arrondis, lobés, *Lobosia ;* acuminés, simples ou branchus, *Filosia ;* ou granuleux et réticulés, *Granuloreticulosia*.

Sous-classe des Lobosia (Lobés)

Comme leur nom l'indique, ces Protozoaires ont des pseudopodes lobés, arrondis à leur extrémité, parfois digités, exceptionnellement anastomosés, qui sont constitués seulement d'ectoplasme (exolobopodes) ou pénétrés d'endoplasme (endolobopodes). Ils sont nus ou abrités dans une loge. Nous ne citerons que quelques espèces communes.

Ordre des Amoebida (Amibiens nus)

Les Amoebida ou Gymnamibiens sont des Rhizopodes nus, polymorphes ; ce sont les plus démunis de caractères morphologiques objectivement repérables. Une membrane fine, souvent doublée d'une couche de mucopolysaccharides, limite le corps. La taille est très variable (de 10 μ à plus de 3 mm). L'ectoplasme est hyalin, et tous les organites sont endoplasmiques. Ils peuvent être uni- ou plurinucléés et la mitose est souvent très difficile à observer (très rapide). Trois types de mitoses ont été décrits (en microscopie photonique) : la promitose marquée par une division du nucléole entre les deux cellules filles, la mésomitose dont les nucléoles disparaissent et sont reconstitués par la suite. La membrane nucléaire est toujours bien visible quel que soit le type de mitose (cryptomitose). Le troisième, ou métamitose, verrait sa membrane nucléaire s'effacer à la métaphase, mais cela est à confirmer en microscopie électronique. *Chaos diffluens (Amoeba proteus)* a montré en effet que la membrane, que l'on croyait disparue, s'amincissait, devenait indistincte en microscopie optique, mais subsistait cependant.

Chaos diffluens, fréquent dans les eaux douces, est une grande Amibe (500 μ) souvent branchue, parfois monopodiale lorsque son déplacement est rapide. Un seul noyau, lenticulaire, très colorable, montre cinq cents chromosomes environ à la mitose. Aucune sexualité n'a été établie. Le genre est caractérisé par la possession d'innombrables petits cristaux rhomboédriques (dérivés de l'urée). *Chaos* phagocyte activement d'autres Protozoaires (Ciliés) et des Algues. Une vacuole osmotique, souvent postérieure, apparaît dans le cytoplasme et est expulsée périodiquement.

Pelomyxa est un genre formé de grands plasmodes (2 à 3 mm) contenant jusqu'à mille noyaux et au cytoplasme intensément alvéolisé. Anaérobies, ils vivent au fond des eaux douces en symbiose avec deux espèces différentes de Bactéries, parfois agglutinées autour des noyaux ou des réserves de glycogène. Ils ne montrent ni appareil de Golgi ni mitochondries et se nourrissent d'Algues, de feuilles mortes, de kystes divers, voire de grains de sable dont ils doivent rechercher et digérer le revêtement bactérien. Ils élaborent de volumineux amas de glycogène et une grande quantité de gouttes lipidiques.

Acanthamoeba est une petite Amibe du sol, bactériophage, susceptible de former des kystes (intérêt taxonomique).

Entamoeba histolytica est responsable de l'amibiase humaine. Cette Amibe est ingérée sous formes de kystes qui contaminent l'eau, les légumes, et qui libèrent dans le tube digestif huit amœbules. Celles-ci peuvent soit grossir et devenir pathogènes en érodant la muqueuse intestinale, phagocytant les hématies, soit demeurer de petite taille (forme minuta) et être bactériophages et non pathogènes. La pathogénicité est induite par une série de facteurs : microflore, alimentation, maladie préexistante. L'amibiase se manifeste par des douleurs abdominales et surtout des diarrhées (crise aiguë). L'amibiase

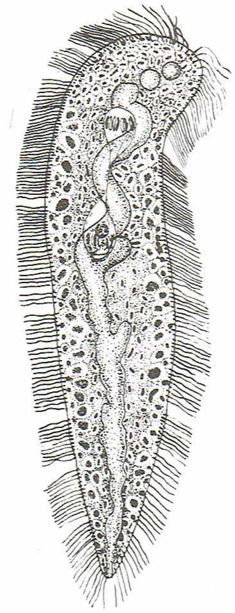

I.G.D.A.

I.G.D.A.

▲ ***Deux représentants du groupe des Opalines :*** ***en haut,*** Protoopalina intestinalis ***(× 250 environ)*** ***En bas,*** Cepedea dimidiata ***(× 300 environ).***

Photo Crumeyrolles

◀ Acanthamoeba ***est une petite Amibe (50 μ) vivant dans le sol. Le trophozoïte montre un protocaryon typique et une vacuole osmotique. Les trois kystes, entourés d'une paroi étanche, se préparent à la déhiscence.*** (In vivo ; ***contraste interférentiel.***)

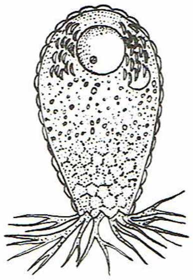

I.G.D.A.

▲ **Euglypha tuberculata,** *entouré d'une coque composée d'écailles siliceuses endogènes, émet ses pseudopodes acuminés par un pore ou pseudostome.*

▶ **Difflugia** *(à gauche) est le genre de Thécamibiens le plus fréquent dans toutes les mares permanentes (150 µ). Chez* **Ditrema flavum** *(à droite) un bouquet de pseudopodes acuminés émerge de chaque pseudostome (50 µ)* [**in vivo**; *contraste interférentiel*].

▼ *Copulation de deux euglyphes : les cytoplasmes confluents élaborent une nouvelle coque de grande taille dans laquelle se fera l'enkystement (80 µ).* [**In vivo**; *contraste interférentiel.*]

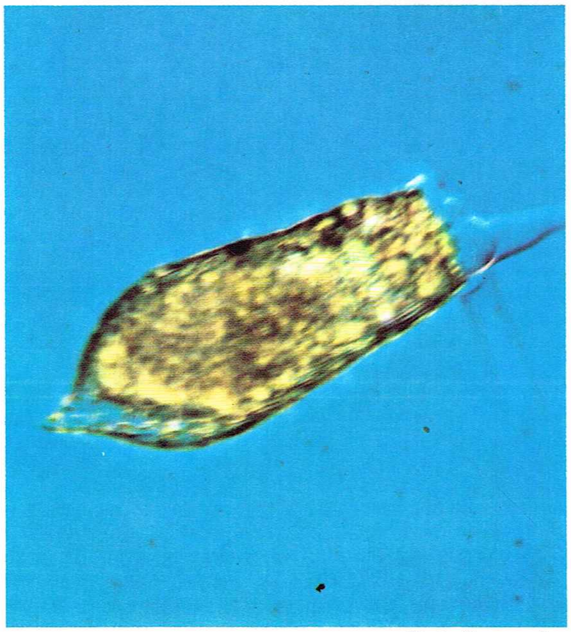

Photo Crumeyrolles

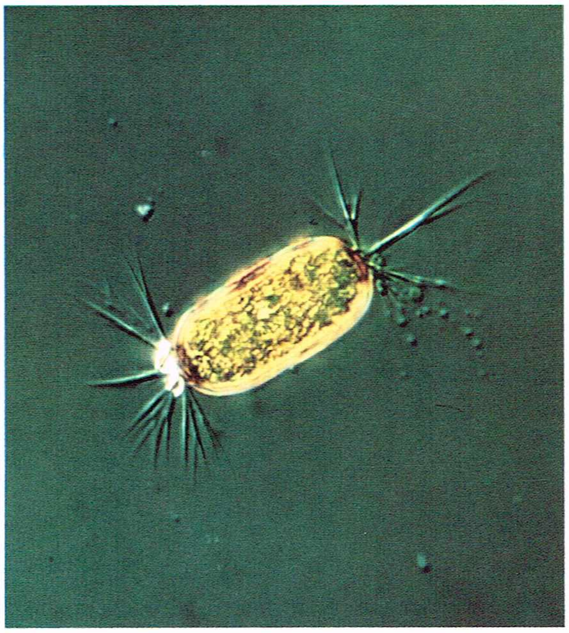

Photo Crumeyrolles

chronique montre des périodes de rémission plus ou moins longues. Le parasite peut envahir d'autres organes (abcès hépatiques). Différentes thérapeutiques sont utilisées mais les guérisons sont toujours longues et le parasite difficile à éliminer totalement. Dans certaines conditions les Amibes s'enkystent dans l'intestin et la contamination se poursuit. La meilleure prévention est une hygiène scrupuleuse et une désinfection de l'alimentation (ébullition ou chimio-épuration).

Ordre des Arcellinida (Thécamibiens)

Ce sont des Amibes lobées, logées dans une petite coque (thèque) à laquelle elles adhèrent en général par de petits pseudopodes acuminés, les épipodes. Elles vivent presque toutes en eaux douces et sont particulièrement abondantes dans les eaux acides (tourbières). Les pseudopodes émergent par l'ouverture de la coque ou pseudostome. Les espèces plurinucléées sont rares; un ergastoplasme particulièrement abondant a été appelé *chromidium*. Quelques espèces hébergent des Chlorelles. La sexualité est controversée et la systématique spécifique fondée sur les paramètres physiques des coques est ardue.

Difflugia, généralement mononucléée, est logée dans une coque construite à l'aide de petits grains de sable ou de frustules de Diatomées agglomérés. Le genre est très fréquent dans toutes les eaux douces stagnantes.

Les *Arcella,* bi- ou plurinucléées, avec une coque chitinoïde *(endogène)* en forme de béret plus ou moins surbaissé et ornementé sont abondantes sur les plantes immergées ou à la surface parmi les *Lemna*.

Cochliopodium, petit et aplati sur le substrat, d'observation difficile, n'a pas de thèque véritable, mais est orné de petites granulations en forme de bobines (microscopie électronique), qui rappellent les écailles de certaines Chrysomonadines (Phytoflagellés); il est suggéré de transférer les *Cochliopodium* dans ce groupe bien que l'on ne connaisse pas de stade flagellé.

Photo Crumeyrolles

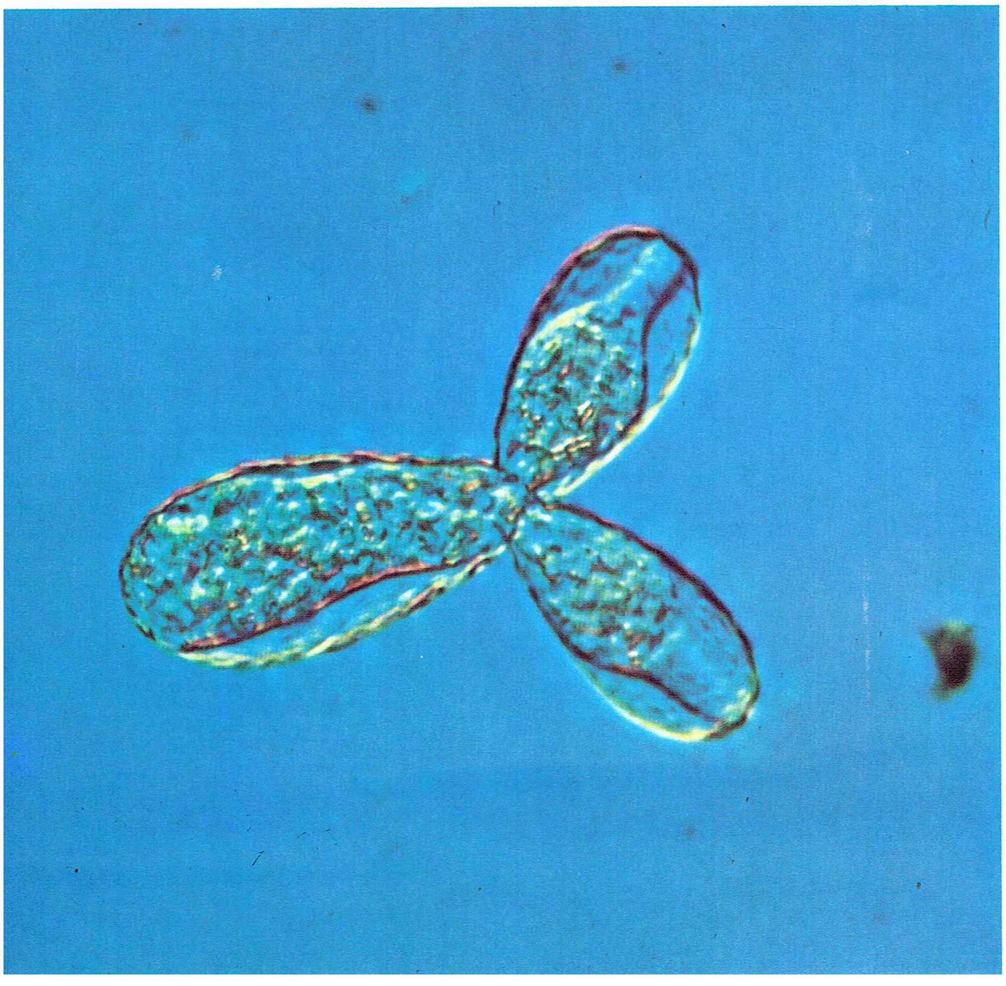

Sous-classe des Filosia

Ce sont des Rhizopodes de taille très variable et émettant des pseudopodes acuminés.

L'ordre des *Aconchulinida* compte une forme nue, dulçaquicole et fort mal connue, *Penardia*.

Dans l'ordre des *Gromiida,* l'Amibe est logée dans une coque à un ou deux pores.

Euglypha élabore des écailles siliceuses disposées en tuiles de toit et constituant une petite loge ventrue, transparente, parfois diversement ornée d'épines. C'est un genre très abondant dans les Mousses très humides, ou les tourbières. La copulation s'observe assez fréquemment : deux individus s'accolent par le pseudostome, se disposent en V et rejettent leur cytoplasme à l'extérieur : les deux masses cytoplasmiques fusionnent et élaborent une nouvelle thèque plus volumineuse. Les deux thèques vides sont abandonnées. Puis la nouvelle coque élabore un bouchon étanche au niveau du pseudostome, s'entoure d'une nouvelle enveloppe d'écailles siliceuses et se rétracte au centre en une masse dense, opaque. Plus tard les deux noyaux fusionneront. La rupture du kyste n'a pas été suivie, pas plus que l'évolution chromosomique; il s'agit peut-être d'un phénomène sexuel, mais nous n'en avons pas la preuve.

Paulinella chromatophora est le seul Protozoaire à héberger des Cyanophycées symbiotes.

Ditrema flavum héberge des Zoochlorelles et vit dans les tourbières acides, à Sphaignes ou à *Hypnum*. Sa coque, chitinoïde, est percée de deux pores opposés.

Sous-classe des Granuloreticulosia

Ce sont des Rhizopodes à pseudopodes du type granulo-réticulé, très délicats, anastomosés souvent en une nappe adhérant au substrat.

Les représentants de l'ordre des *Athalamida* sont des formes toujours nues, et très mal connues. *Biomyxa* est coprophile. *Pontomyxa,* de grande taille (jusqu'à 10 mm), vit sur la tunique d'une ascidie.

Chez les *Thalamida,* la présence d'une coque, parfois très délicate, difficile à observer, rappelle certaines Chrysomonadines (Phytoflagellés).

Allogromia, Microgromia sont les plus fréquents en eaux douces et encore bien peu connus. Il n'y a pas de sexualité biparentale, ni d'alternance de générations sûre. Cependant on a montré (en 1955) qu'*Allogromia* pratiquait l'autogamie. Il est bien possible que ces organismes soient englobés dans les Foraminifères, groupe que nous allons étudier plus longuement.

Ordre des Foraminiferida

Les Foraminifères sont des Rhizopodes à pseudopodes granulo-réticulés, planctoniques ou benthiques, vivant surtout en eaux marines, plus rarement en eaux saumâtres, exceptionnellement en eaux continentales (eaux sodées ou magnésiennes). Ils sont fondamentalement pourvus d'une coque, ou *test,* percée d'un orifice, ou *foramen,* par lequel le cytoplasme émerge et s'étale sur le test qui devient de ce fait secondairement interne. Les plus primitifs ne sont constitués que de chitine et sont transparents. A cette enveloppe simple fondamentale peuvent être agglutinés des corps étrangers divers (sable, spicules, etc.) ; enfin dans la majorité des espèces il s'y fait un dépôt de substances minérales (calcaires le plus souvent, parfois siliceuses). Si le dépôt est continu, la coque sera régulièrement opaque et seul le foramen apparaîtra (tests imperforés). Si le dépôt est incomplet, ménageant de petits interstices, le test semblera perforé, à tort, car la coque chitinoïde est continue; on a longtemps pensé que le cytoplasme pouvait se frayer un chemin par ces « pores » (tests perforés) ; cela paraît faux, seul le foramen livre passage au cytoplasme périphérique, extraloculaire.

Les tests les plus simples sont faits d'une seule loge *(monothalames)* et peuvent prendre des aspects divers, souvent difficiles à repérer en tant que Protozoaires; les plus simples sont ovoïdes, avec un foramen bien visible d'où émergent les gros troncs pseudopodiaux *(Iridia).*

Cette loge initiale, ou *proloculum,* peut s'adjoindre, au cours de la croissance, d'autres loges de plus en plus volumineuses. Cette addition se fait après immobilisation totale de l'Animal et demande quelques heures. Selon

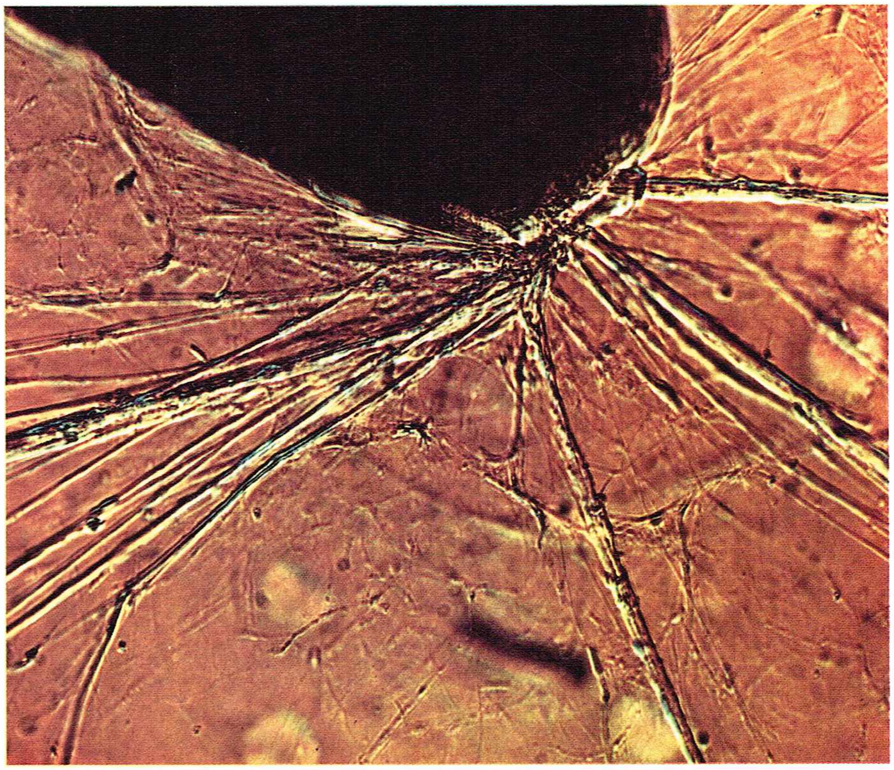

Photo Crumeyrolles

▲ ***Nappe cytoplasmique réticulée issue de l'ouverture (stomostyle) de la coque, à une seule loge (monothalame), du Foraminifère,*** **Iridia lucida.**

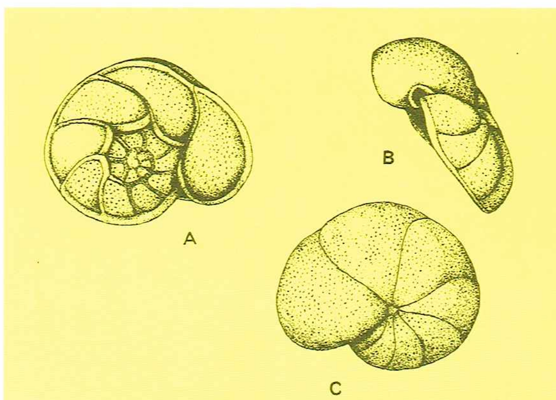

I.G.D.A.

◀ **Cibicides lobulatus,** ***un Foraminifère à test pluriloculaire (ou polythalame) en vue ventrale (A), latérale (B) et dorsale (C).***

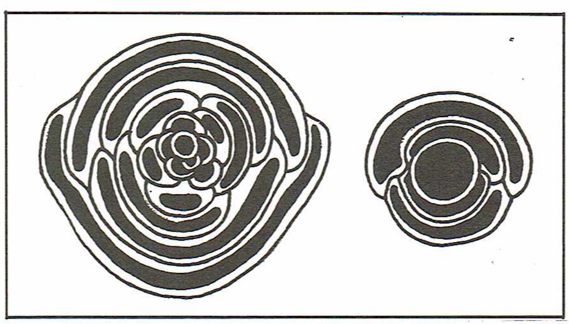

I.G.D.A.

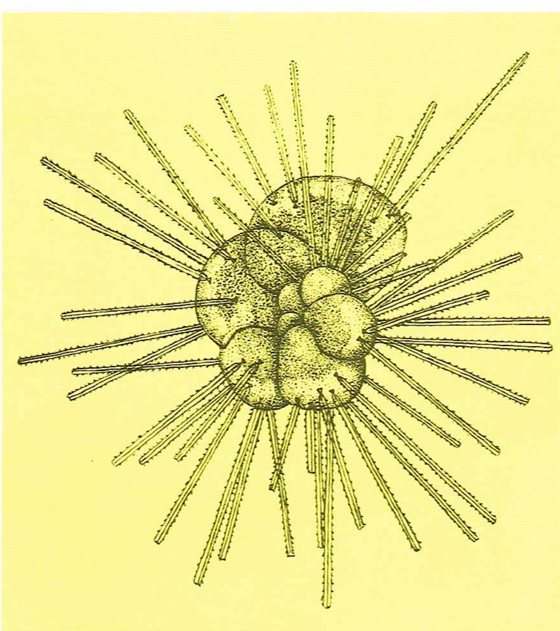

I.G.D.A.

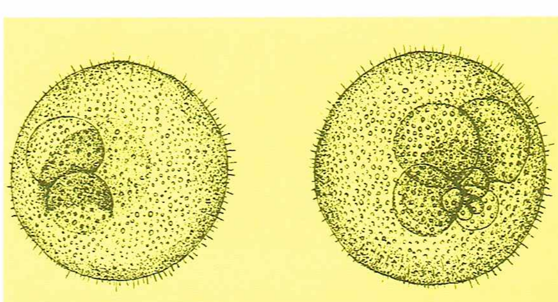

I.G.D.A.

◀ **Hastigerina pelagica,** ***Foraminifère polythalame, est bien adapté à la vie planctonique grâce à ses spicules calcaires facilitant la flottaison (à gauche). Au cours de leur cycle de développement, les Foraminifères (ici*** **Idalina antiqua*****) présentent deux types de coques : microsphériques à loge initiale de taille réduite (en haut à gauche) et macrosphériques, à loge de grande taille (en haut à droite).*** **Orbulina universa** ***(en bas) élabore au début de la gamétogenèse une grande loge qui englobe toute la coque du gamonte; en A, vue ventrale et, en B, vue dorsale.***

▶ *Deux Actinopodes Radiolaires : à gauche,* Collozoum inerme *qui forme des colonies pouvant atteindre une taille importante. A droite,* Thalassicola nucleata *qui n'a pas de squelette.*

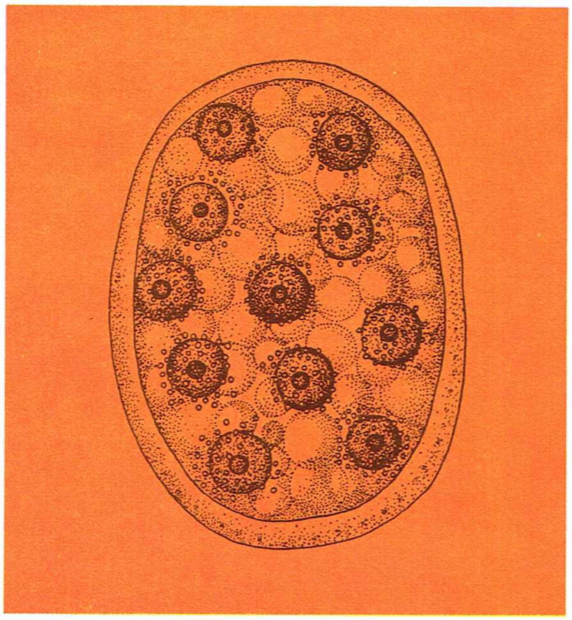

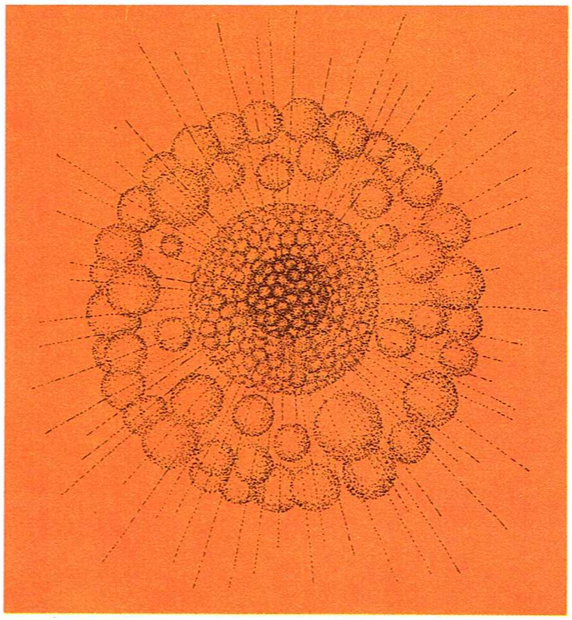

I.G.D.A.

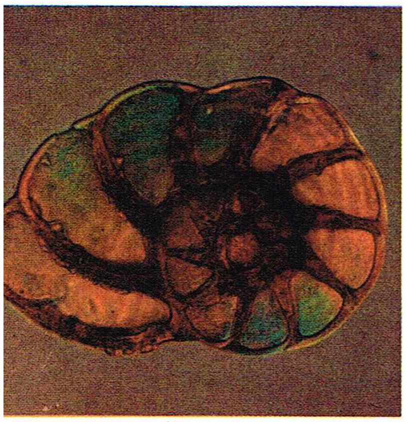

A. Margiocco

▲ *Test du Foraminifère polythalame* Peneroplis pertusus, *observé en lumière polarisée.*

la disposition des loges, la forme globale des tests, munis d'ornementations diverses, varie à l'infini. Une configuration fréquente confère au test une forme hélicoïdale surbaissée, « nautiloïde », ce qui a valu à ces Protozoaires d'être quelque temps considérés comme des Céphalopodes.

Les coques minéralisées sédimentent aisément et, jusqu'à 5 000 m, constituent les boues à globigérines des fonds océaniques (plus profondément la calcite se redissout). Aisément fossilisables, connus depuis le Cambrien, les Foraminifères fournissent aux micropaléontologistes de bons repères stratigraphiques et sont très utilisés dans les recherches de gisements pétrolifères. Ils ont en conséquence été l'objet de recherches systématiques approfondies, et cela d'autant plus que leur taille est généralement élevée (500 μ, 1 à 2 mm, pouvant aller jusqu'à 20 cm).

Pour une espèce donnée, il existe deux types de coques, décrites souvent jadis sous des noms différents.

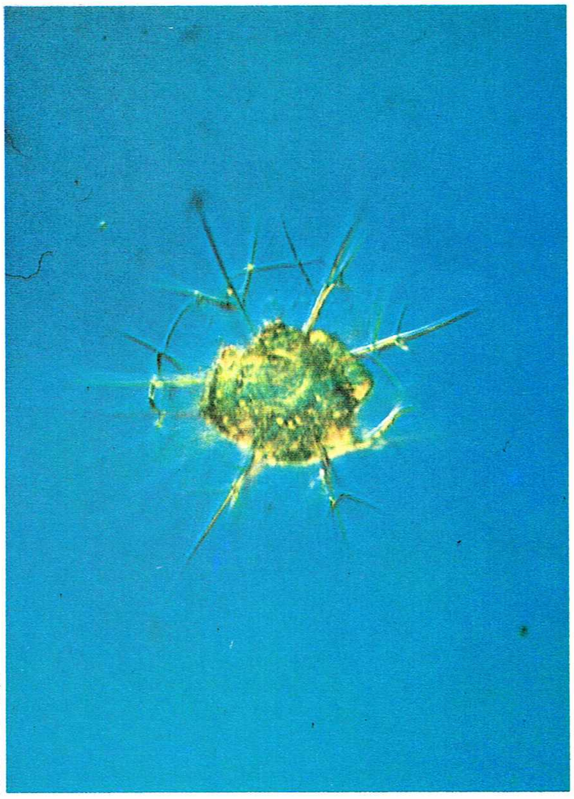

Photo Crumeyrolles

▶ Pseudocubus obeliscus *est un Radiolaire Nassellaire à squelette interne branchu et caractéristique.* (In vivo ; *contraste interférentiel.*)

Les Foraminifères parcourent en effet un cycle caractéristique diphasique qui est le suivant : le zygote (2 *n*), de petite taille, engendre un schizonte (2 *n*) dont la coque présente un proloculum de dimension réduite (test microsphérique). Arrivé à plein développement, il subit une schizogonie, terminée par une méiose, libérant des éléments plus volumineux que le zygote, ou schizoïtes *(n)*, à l'origine de gamontes dont la coque a un proloculum relativement grand (tests macro- ou mégalosphériques). Les gamontes *(n)* libèrent des gamètes identiques qui, en copulant, bouclent le cycle.

Iridia lucida, monothalame, est fréquent en Méditerranée sur les frondes des posidonies. *Elphidium, Cibicides, Discorbis*, etc., Millioles ou Fusulines, tous polythalames, sont très abondants sur les Algues côtières ou les colonies d'Hydraires.

Hastigerina, Globigerina, Globigerinella, polythalames, sont adaptés à la vie planctonique : les loges ont une paroi allégée et hérissée d'épines calcaires facilitant la sustentation.

Orbulina élabore, au début de la gamétogenèse, une grande loge sphérique qui englobe largement toute la coque du gamonte.

L'alternance des générations est mal connue pour toutes ces espèces planctoniques.

ACTINOPODEA

Ce sont des Sarcodinés, presque tous planctoniques, à disposition radiaire ; les pseudopodes, acuminés, dirigés dans toutes les directions et éventuellement pourvus d'un axe microtubulaire ou axonème, sont alors appelés axopodes.

Sur la base du plan d'organisation il est aisé de les distribuer en trois sous-classes : une capsule centrale percée de pores isolant l'ectoplasme de l'endoplasme, un squelette de vingt rayons spiculaires ou l'absence de ces caractères précis caractériseront respectivement les Radiolaires *(Radiolaria)*, les Acanthaires *(Acantharia)* et les Héliozoaires *(Heliozoa)*, à de rares exceptions près.

Sous-classe des Radiolaria

Ce sont des Actinopodes marins et planctoniques dont l'ectoplasme, ou *calymma*, est séparé de l'endoplasme par une paroi épaisse, dite capsule centrale, vraisemblablement protéique et percée de petits pores.

Ils possèdent presque tous un squelette de forme et de structure diverses, souvent très délicat et décoratif, contenant toujours de la silice, parfois pure et amorphe. Les pseudopodes sont acuminés, rarement anastomosés, les axopodes inconstants selon les groupes. Le noyau,

typiquement unique, est intracapsulaire et souvent de grandes dimensions. La division binaire est suivie d'une plasmotomie quelquefois différée. Selon que le squelette est discontinu (spicules, valves) ou continu, il est partagé entre les deux cellules filles ou reconstitué par l'une d'elles. Il y a parfois division multiple (sporogenèse) engendrant des spores identiques biflagellées dont l'évolution n'est pas connue (gamètes ?).

La flottabilité est assurée par la grande extension des pseudopodes, par la couche spumeuse périphérique et par des gouttes d'huile intracapsulaires. L'ascension et la plongée sont obtenues par la modification du volume des pseudopodes et de la couche gélatineuse.

La nutrition s'effectue aux dépens du plancton ; la digestion est nécessairement ectoplasmique.

Des pores disposés sur toute la surface de la capsule centrale caractériseront les Spumellaires, alors que les Nassellaires le seront par une ouverture axiale (plaque poreuse) et les Phaeodariés par trois pores.

Chez les Spumellaires *(Porulosida)*, les pores de la capsule centrale sont disposés sur des plaques polygonales, jointives.

Thalassicola et *Thalassophysa* sont des formes isolées (monocytaires) et de forte taille (4-8 mm), *Collozoum* en est une coloniale (polycytaire) ; ce groupe des mers chaudes peut donner des colonies de plus de 20 cm.

Les Nassellaires *(Oculosida)* ne présentent qu'une zone de perforation de la capsule centrale, c'est le champ de pores, ventral. Cette disposition entraîne souvent une polarisation du corps, la capsule centrale étant déjetée, et de la coque quand elle est continue. Dans ce groupe, l'élaboration du squelette est très complexe.

Eucyrtidium et *Cyrtocalpis* ont une coque conique, ajourée. *Triplagiacantha, Eucoronis* ont des squelettes branchus ou en anneaux épineux, plus simples.

Chez les Phaeodariés *(Oculosida)*, la capsule n'a que trois pores, l'un ventral, l'astropyle, les deux autres, ou parapyles, étant secondaires et le plus souvent au pôle opposé. La membrane capsulaire est double ; en face de l'astropyle s'accumule une masse brune, caractéristique du groupe, probablement constituée de déchets, le phaeodium.

Coelacantha ornata possède un squelette délicat et continu. *Aulacantha*, très fréquent, a des spicules libres, soit tangentiels, soit radiaires. Son noyau mesure environ 1 mm et montre à la division mille à mille cinq cents chromosomes.

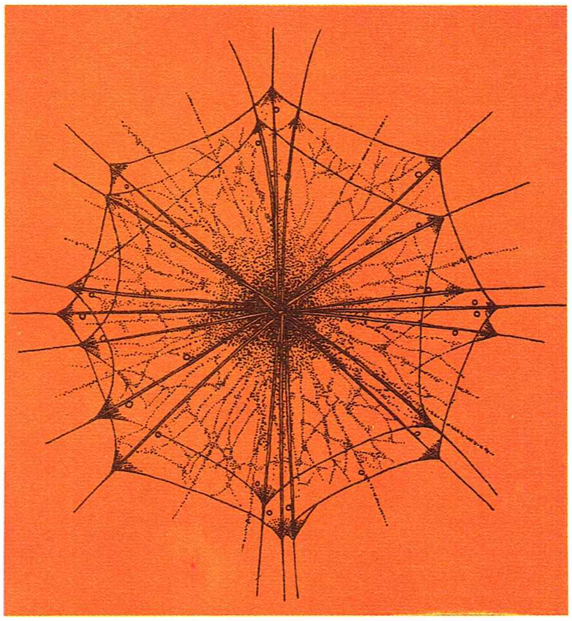

I.G.D.A.

◀ ***Les Acanthaires sont généralement pourvus de vingt spicules de sulfate de strontium, à disposition radiaire, mais* Acanthophlegma krohni *n'en possède que dix diamétraux (× 60).***

Sous-classe des Acantharia

Ce sont des Actinopodes, tous marins et planctoniques, caractérisés par leur squelette constitué de vingt spicules à disposition radiaire (très rarement dix à disposition diamétrale) émergeant en des points bien précis de la cellule selon la loi dite de Müller.

Les spicules sont constitués essentiellement de sulfate de strontium (célestine des minéralogistes) et à ce titre permettent de doser rapidement le taux de strontium radioactif dans l'eau de mer, après une explosion thermonucléaire par exemple. Des excroissances distales peuvent rendre les spicules coalescents et même constituer une ou deux coques grillagées. Enfin, ces éléments n'ont pas toujours la même longueur, et la forme globale des Acanthaires n'est pas obligatoirement sphérique.

Le cytoplasme est nettement divisé en deux zones : au centre, l'endoplasme dense, qui contient les noyaux, et en périphérie l'ectoplasme spumeux, de volume

▼ ***A gauche :* Cyrtocalpis urceolus *possède une coquille conique ajourée.***
A droite : chez les Acanthaires les spicules émergent de la cellule selon une loi dite de Müller. Ils sortent au niveau de cinq parallèles ; un équatorial de latitude 0°, deux tropicaux à 30° et deux polaires à 60°. Les quatre spicules équatoriaux (en vert) et les huit spicules polaires (en rouge) recoupent deux mêmes grands méridiens orthogonaux. Les huit spicules tropicaux (en bleu) recoupent les deux grands méridiens bissecteurs des précédents.

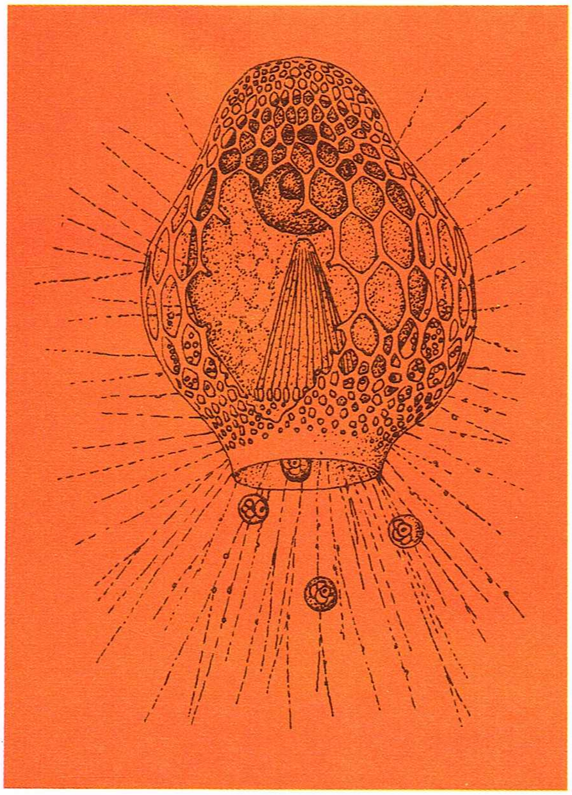

I.G.D.A.

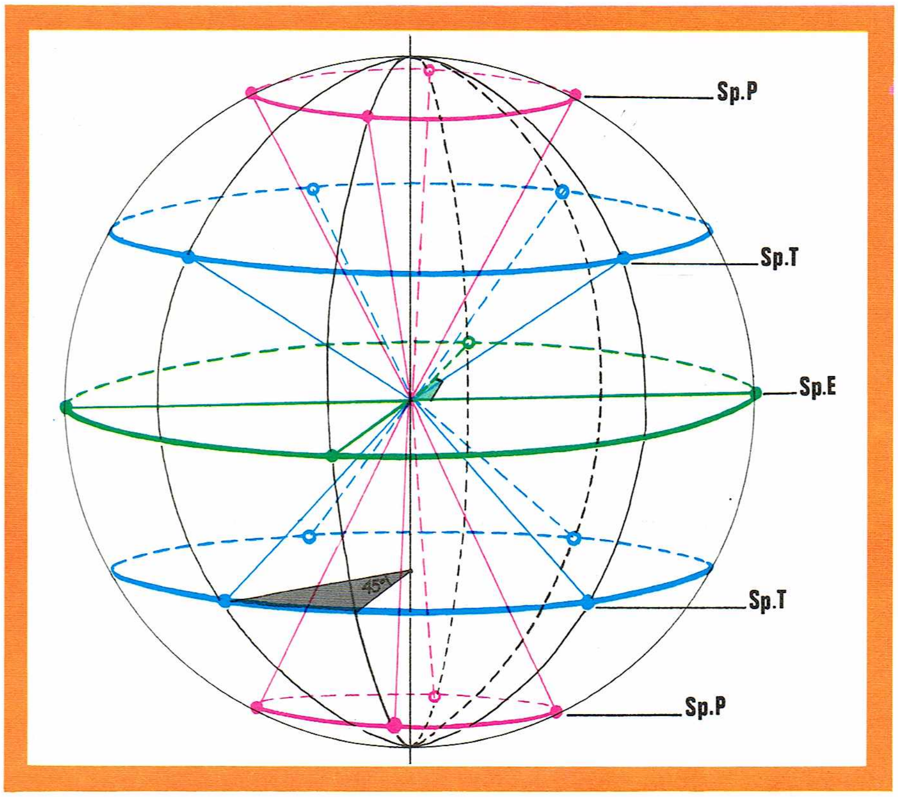

Richard Colin

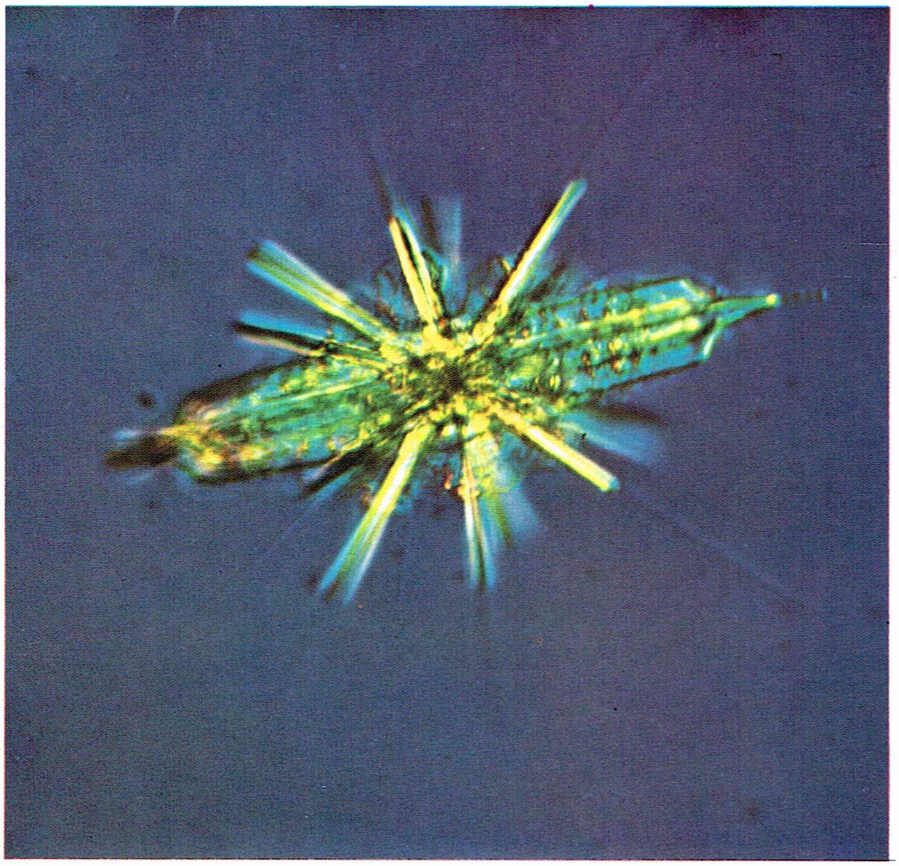

Photo Crumeyrolles

▲ *Deux spicules équatoriaux étant hypertrophiés,* **Amphilonche elongata** *est un exemple d'Acanthaire non sphérique.* (In vivo ; *contraste interférentiel.*)

variable. Planctoniques, presque tous les Acanthaires possèdent un extraordinaire dispositif semblant jouer un rôle hydrostatique. De petits myonèmes contractiles, en nombre variable selon les espèces et l'âge des Animaux, sont fixés au voisinage de l'extrémité des spicules. Selon qu'ils se contractent ou qu'ils se relâchent, l'ectoplasme alvéolisé est étiré et augmente de volume ou se rétracte et diminue de volume. Cette augmentation active du volume créerait un appel d'eau qui, plus diluée que les liquides des vacuoles et chargée de gaz dissous, ferait diminuer la densité relative de l'Acanthaire qui tendrait à s'élever; inversement, il plongerait par la manœuvre opposée.

Des Zooxanthelles sont fréquentes dans l'endoplasme ou dans l'ectoplasme. Les relations entre Algues et Protozoaires sont mal connues ; il y a alimentation holozoïque et digestion dans l'ectoplasme.

Quelques genres présentent une capsule centrale entre les deux zones cytoplasmiques, mais elle n'est pas percée de pores et semble bien différente de celle des Radiolaires.

Les Acanthaires sont susceptibles de s'enkyster; quelques-uns pratiquent la division binaire (les espèces à spicules diamétraux) et la reproduction sexuée semble être la règle. Après caryocinèse multiple, il y a libération de petits gamètes biflagellés que l'on a vu copuler, mais la transformation en adulte n'a jamais été suivie. Il semble que le début du développement se fasse au fond; les plus jeunes stades pêchés (400 m) montrent déjà une organisation complexe et vingt (ou dix) jeunes spicules. Les phases de la croissance ont été suivies.

Le squelette des *Acanthometrida* est simple, mais les spicules sont diversement rendus solidaires au centre de la cellule.

Acanthophlegma possède dix spicules diamétraux et deux myonèmes seulement par spicules. Le corps, souple, est plus ou moins amiboïde. *Amphilonche elongata* a deux spicules équatoriaux opposés plus longs et plus forts. *Lithoptera* montre quatre spicules équatoriaux développés et pourvus d'apophyses grillagées, plates, non coalescentes.

Chez les *Acanthophractida,* les spicules, coalescents, forment une coque grillagée continue. A ce groupe appartiennent les genres *Stauraspis* et *Lycnaspis*.

▼ *Ookystes d'*Eimeria magna *(en haut) et d'*E. media *(en bas), Coccidies parasites de l'intestin du lapin.*

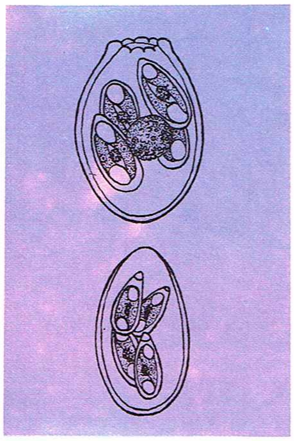

I.G.D.A.

Sous-classe des Heliozoa

Il s'agit d'Actinopodes essentiellement dulçaquicoles, aux axopodes rayonnants (Animaux-soleil), parfois munis de filopodes et différenciant de courts lobopodes temporaires lors de la phagocytose. De taille très variable (30 à 400 μ), ils sont nus ou recouverts d'écailles de formes diverses, parfois de corps étrangers agglutinés. L'ectoplasme périphérique est spumeux, l'endoplasme, plus dense, renferme le noyau, généralement unique, qui occupe le centre de la cellule. Il y est parfois supplanté par une formation dense, réfringente, au voisinage de laquelle s'ancrent les axopodes, le centroplaste. La plupart sont libres, seules quelques rares espèces sont fixées par un pédoncule. La reproduction se fait par division binaire ; une autogamie est décrite chez quelques espèces susceptibles de bourgeonner.

Les trois ordres sont reconnus selon que le corps est nu, garni de spicules ou logé dans une coque organique grillagée.

L'absence de zone mucilagineuse périphérique, de squelette et de centroplaste est caractéristique des *Actinophryida*. Ce sont les plus grands et les plus abondants des Héliozoaires d'eaux douces. C'est dans ce groupe que l'autogamie a été décrite.

Actinophrys sol (40-50 μ) a un unique noyau central près duquel sont insérés les axonèmes des axopodes. Il est le plus abondant en eaux douces (en macérations) ; une espèce est marine.

Actinosphaerium est de grande taille (jusqu'à 400 μ) et peut renfermer jusqu'à cinq cents noyaux répartis à la limite entre l'endoplasme et l'ectoplasme spumeux. Les axopodes se terminent librement au niveau de cette zone de transition ou sont parfois enchâssés chacun dans une dépression de membrane nucléaire.

Les *Centrohelida* sont caractérisés par la présence d'un centroplaste toujours central, et la possession, presque générale, de spicules ou d'écailles siliceuses périphériques adhérant souvent au corps par une couche mucilagineuse.

Acanthocystis aculeata montre deux types de spicules : les uns sont des bâtonnets disposés tangentiellement au corps, les autres, à base élargie en clous de tapissier, sont disposés radiairement (chez les espèces d'eaux douces).

Raphidiophrys elegans forme des colonies de dix à vingt individus, reliés entre eux par des ponts cytoplasmiques et recouverts de petites écailles maintenues par un mucilage abondant.

Il n'y a pas de centroplaste ni d'axopodes chez les *Desmothoracida,* seulement des filopodes. Le corps est logé dans une coque organique grillagée ; ces organismes sont souvent fixés. *Clathrulina* qui vit en eau douce est rare ; sa taille atteint 80 μ.

SPOROZOA

Les Sporozoaires sont des Protozoaires tous parasites, dépourvus d'organes locomoteurs différenciés. Le cycle, haplobiontique, débute par un germe de petite taille, le sporozoïte, qui, directement ou pas (schizogonie asexuée intercalée), engendre les individus végétatifs ou gamontes élaborant les gamètes. Ceux-ci, copulant, donnent le zygote, seul stade diploïde, qui après réduction chromatique redonne les sporozoïtes de départ. Un gamonte femelle extra-cellulaire libérant de nombreux gamètes caractérise les Grégarines *(Gregarinia)* tandis qu'un gamonte femelle intra-cellulaire se transformant en un seul gamète caractérise les Coccidies *(Coccidia)*.

Sous-classe des Gregarinia

Sporozoaires de grande taille (100 μ, 500 μ, 1 mm et jusqu'à 10 mm), d'observation aisée, les Grégarines se déplacent lentement par glissement. Le corps est souvent différencié en trois zones : un *épimérite* d'ancrage dans la cellule, un *protomérite* court et un *deutomérite* plus long contenant le noyau. Le cytoplasme est chargé d'un polysaccharide de réserve, le paraglycogène. La

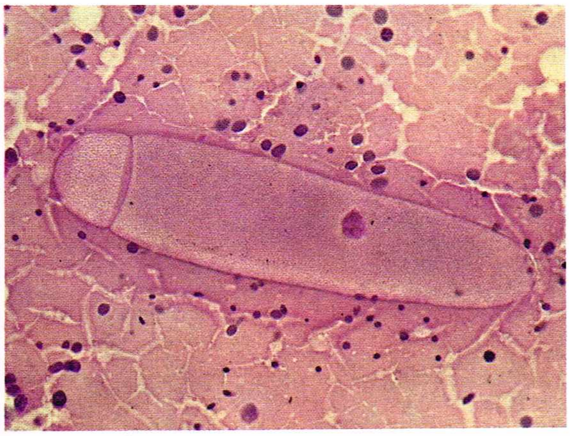

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ *Une Grégarine parasite de l'intestin de l'Insecte Blattoptère,* **Periplaneta americana,** *la blatte (× 1 000 × 1,2).*

sexualité a lieu par gamontogamie suivie de l'élaboration de gamètes généralement flagellés (mâles) et toujours immobiles (femelles). Ce sont des parasites d'Invertébrés et de Prochordés.

Probablement primitifs, les *Archigregarinida* ont conservé une schizogonie, asexuée, intercalée entre le sporozoïte et la gamontogenèse. *Selenidium,* qui possède de puissants myonèmes permettant des mouvements pendulaires, vit dans le tube digestif d'Annélides.

Chez les *Eugregarinida* il n'y a plus de schizogonie, seule la sporulation et les gamètes assurent la prolifération. *Gregarina blattarum* est de grande taille (1 mm) ; *Stylocephalus,* encore plus grand (3 mm), vit dans l'intestin d'un Coléoptère, le *Blaps. Monocystis* parasite les vésicules séminales de lombrics.

Les *Neogregarinida* ont réacquis, secondairement semble-t-il, une schizogonie leur permettant de pulluler dans leur hôte. *Ophryocystis* parasite les tubes de Malpighi de nombreux Coléoptères Ténébrionides. *Lipocystis polyspora* vit dans le corps gras de *Panorpa communis.*

Sous-classe des Coccidia

Les Coccidies sont des Sporozoaires de petite taille, immobiles en dehors des phases de la reproduction et parasites tant d'Invertébrés que de Vertébrés ; seul le gamonte mâle se divise en petits gamètes flagellés, le gamète femelle est directement issu du gamonte et, fécondé, donne un zygote relativement volumineux appelé ookyste. La sporogonie se fait en deux temps ; des spores sont d'abord élaborées qui s'entourent d'une membrane sous laquelle une dernière division donne deux sporozoïtes par spore. Le nombre de spores est variable (jusqu'à quatre). Ces sporozoïtes subiront une ou plusieurs schizogonies, chez les *Eucoccidia ;* elle a pu disparaître dans le cas des *Protococcidia.*

Chez les *Protococcidia* la schizogonie est absente ; il y a succession de gamogonie et de sporogonie dans le même hôte (Annélides marins).

Chez les *Eucoccidia* le cycle est triple et complet ; le développement peut se faire dans un seul hôte ou dans deux hôtes successifs et nécessaires pour boucler le cycle.

Eimeria est une Coccidie à un seul hôte (monoxène). Parasite de l'intestin du lapin, le sporozoïte infestant pénètre dans une cellule et en quarante-huit heures procède à la schizogonie (qui peut être itérative). Puis il y a élaboration de gamètes (gamogonie) qui copulent (anisogamie). La copula procède à la sporogonie en deux temps caractéristiques et les ookystes complets sont expulsés ; réingérés, ils libèrent les sporozoïtes qui, dans le même Animal ou dans un autre, amorcent un nouveau cycle.

Plasmodium falciparum est un parasite hétéroxène ; les hôtes sont l'anophèle et l'homme ; c'est l'agent de la fièvre tierce maligne, une des formes de paludisme. Les sporozoïtes sont inoculés lors de la piqûre d'un anophèle, et pénètrent d'abord dans des cellules hépatiques où ils évoluent en volumineux schizontes libérant de nombreux schizozoïtes ; ces phases de multiplication peuvent se répéter plusieurs fois (un cycle dure une semaine). Ces schizozoïtes peuvent aussi pénétrer dans les hématies où se déroule une schizogonie secondaire, synchronisée ;

▼ *A gauche, cycle d'une Grégarine* **(Haemogregarina stepanovi)** *; les numéros indiquent la succession des différentes phases. A droite, cycle de* **Plasmodium,** *parasite hétéroxène responsable chez l'homme d'une maladie appelée malaria ; son deuxième hôte est un moustique, l'anophèle.*

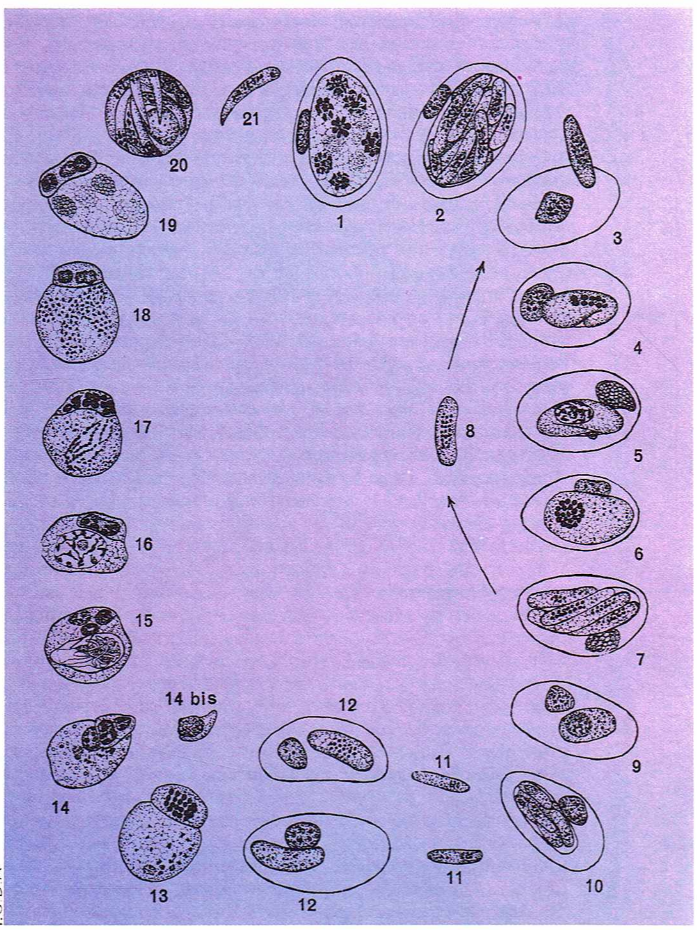

I.G.D.A.

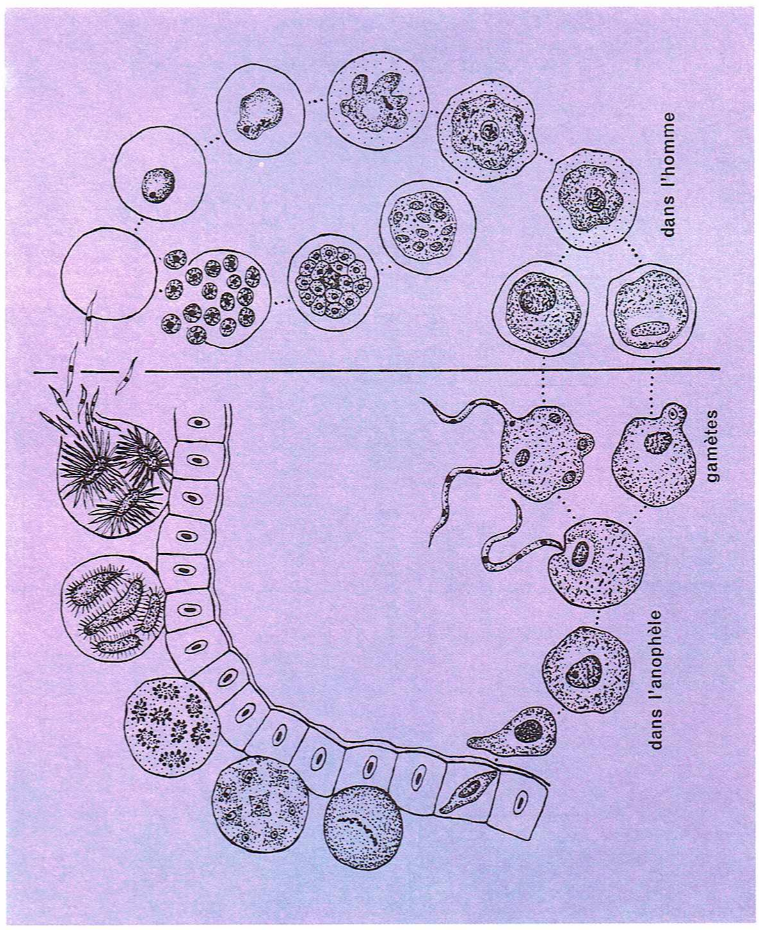

I.G.D.A.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Au bas de cette photo représentant une section de l'intestin du moustique anophèle, quelques ookystes de* Plasmodium vivax *en sporogonie situés sous l'épithélium intestinal sont bien visibles.*
▼ *Un gamonte développé dans une hématie de pigeon et déjetant le noyau ne continuera son développement qu'après ingestion par un Diptère piqueur; une seule hématie parasitée est visible au centre de la photo (6-8 µ).*

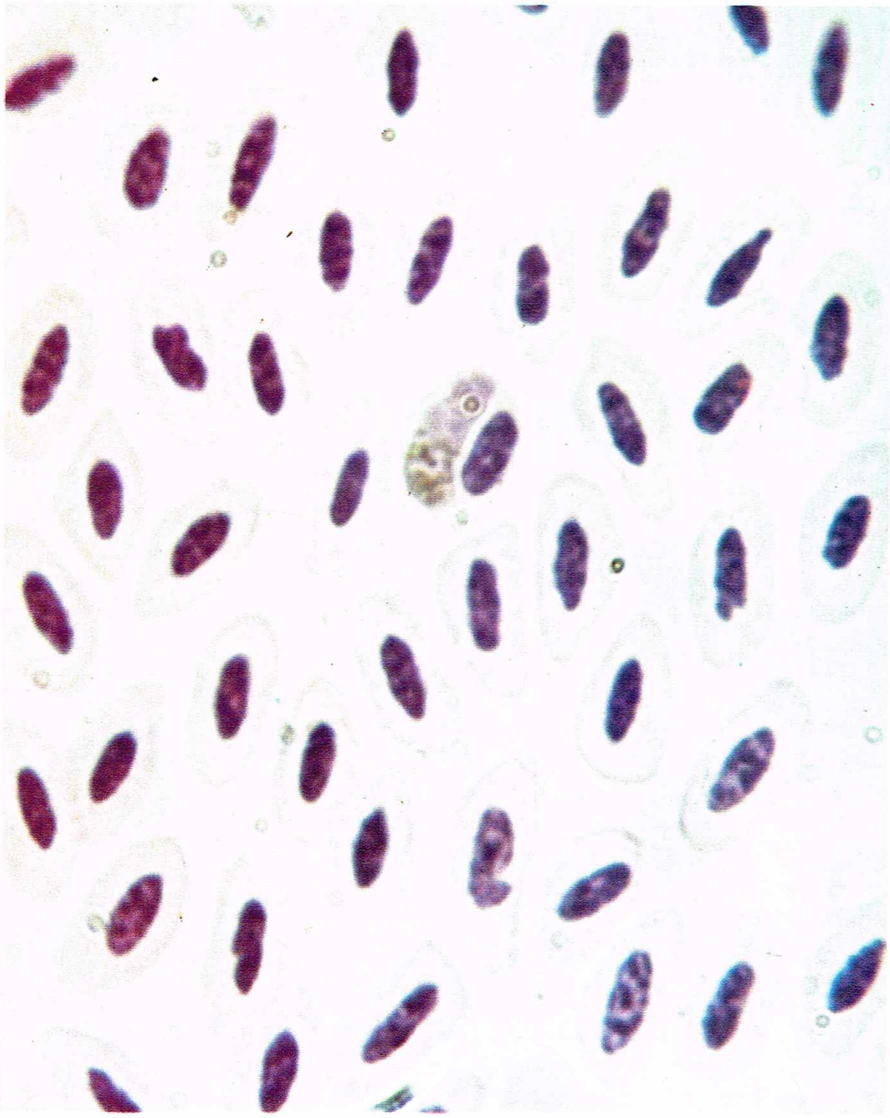

Photo Crumeyrolles

la multiplication des noyaux donne de petits plasmodes intra-érythrocytaires qui se résolvent en autant de schizozoïtes qu'il y a de noyaux et sont libérés par éclatement des hématies (le synchronisme provoque les accès de fièvre). Dans des conditions mal définies ils peuvent aussi évoluer en gamontes intra-érythrocytaires sexuellement différenciés. Le développement s'arrête là dans le corps humain. Le sang prélevé par l'anophèle à la piqûre est digéré, de même que les schizozoïtes qui s'y trouvent, mais les gamontes demeurent indemnes. Le gamonte femelle devient gamète, le mâle donne un petit nombre de gamètes fusiformes. Après la fécondation le zygote se loge sous l'épithélium intestinal de l'Insecte et subit une sporogonie intense qui libère des milliers de sporozoïtes filiformes gagnant les glandes salivaires dans l'attente d'une inoculation à un homme sain.

Haemoproteus poursuit un cycle analogue, la schizogonie se fait dans le poumon du pigeon, la gamogonie dans les hématies et la sporogonie dans un Diptère piqueur.

Sarcosporidies

Ce sont des Sporozoaires dont on ne connaît qu'une partie du cycle, un plasmode libérant des schizozoïtes nombreux. *Sarcocystis tenella* parasite tous les moutons.

CILIOPHORA

Le sous-embranchement des Ciliophora ne comprend qu'une seule classe, celle des *Ciliatea* ou Ciliés encore appelés Infusoires.

Outre la ciliature, l'appareil nucléaire des Infusoires est certainement la caractéristique essentielle de la classe. A l'exception d'un seul genre *(Stephanopogon)* tous les Ciliés sont dotés de deux sortes de noyaux, de type différent et complémentaires : le micronoyau et le macronoyau (ils peuvent être très nombreux chez le même sujet).

Classer les Infusoires n'est pas chose aisée. La systématique du groupe est essentiellement fondée sur la distribution et la spécialisation éventuelle de la ciliature, tant somatique que buccale. Des études aussi minutieuses demandent donc nécessairement un matériel abondant et l'entretien des souches étudiées. L'observation sur le vivant, qui n'apporte que fort peu de renseignements dans ce domaine, doit être impérativement complétée par l'observation de préparations permanentes, diversement fixées et colorées. L'introduction dans la technique microscopique des méthodes d'imprégnations électives des cils et de l'infraciliature par des sels d'argent a beaucoup fait progresser nos connaissances. Puis l'apparition récente de la microscopie électronique a métamorphosé l'étude des Infusoires (et des Protozoaires en général). en permettant une analyse plus fine des structures en présence et de leurs rapports. Mais cela n'a encore été réalisé que sur un nombre d'espèces relativement faible. Bien que plus de six mille espèces d'Infusoires aient été recensées à l'heure actuelle et que de nouvelles formes soient régulièrement découvertes et décrites, il est encore souvent conjectural de vouloir attribuer une place systématique sûre à un Infusoire donné, même très courant. Cela est si vrai qu'un même genre peut être classé de façon différente selon les Auteurs et même, par un Auteur donné, d'une publication à l'autre. Cela peut se comprendre si l'on sait que les Infusoires forment, de fort loin, le groupe de Protozoaires le plus complexe, le plus diversifié, le plus évolué. Et cette évolution, bien qu'ayant conservé au groupe une remarquable homogénéité, est difficile à retracer. Il n'existe aucun fossile utilisable sauf quelques coques sans grand intérêt phylogénétique. Nous sommes donc contraints de spéculer sur la valeur évolutive de tel ou tel constituant, chaque Auteur pouvant subjectivement leur attribuer des valeurs évolutives différentes. Il s'ensuit de nombreux schémas d'évolution possible toujours temporaires et, partant, des coupures systématiques à des niveaux très divers. Nous nous en tiendrons à l'un d'eux (quelque peu simplifié), le plus souvent retenu.

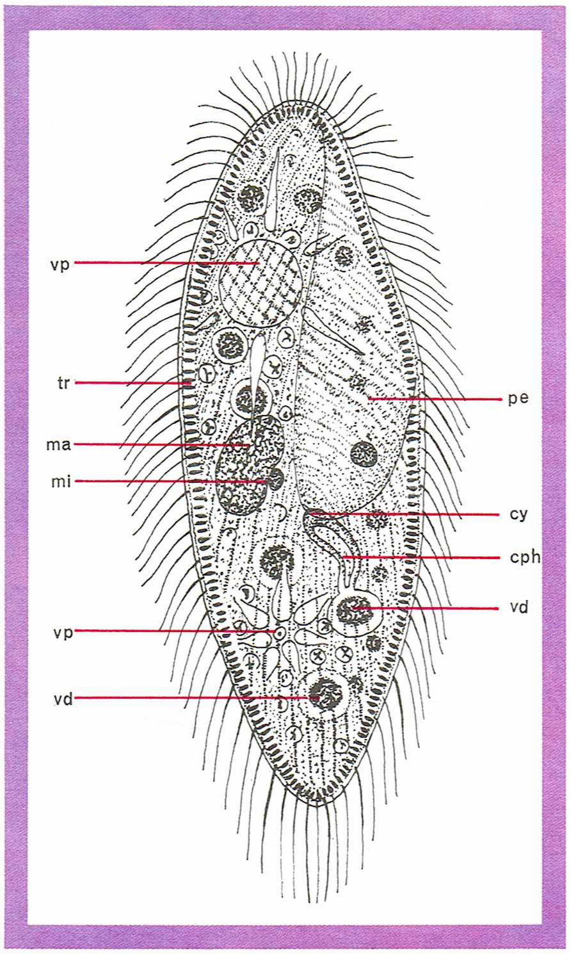

◀ *Représentation très schématique de* **Paramecium caudatum**, *un des Ciliés les plus connus. pe, péristome; cy, cytostome; cph, cytopharynx; vd, vacuole digestive ou gastriole; vp, vacuole pulsatile; mi, micronucleus; ma, macronucleus; tr, trichocystes.*

Le critère fondamental étant la disposition des cils, somatiques et buccaux, on scinde dès lors la classe des Infusoires *(Infusoria, Ciliata, Ciliophora)* en trois sous-classes. Une ciliature somatique simple, alliée à une ciliature buccale absente ou très discrète, caractérise les clolotriches. Les deux autres groupes ont une ciliature somatique faible ou nulle, alors que la ciliature buccale s'hypertrophie et aboutit à la bouche en s'enroulant dans le sens des aiguilles d'une montre dans le cas des Spirotriches et dans le sens contraire chez les Péritriches.

Sous-classe des Holotrichia

Les représentants de cette sous-classe sont de taille relativement modeste. La ciliature est simple, souvent uniforme, constituée de cinéties longitudinales ou obliques. Elle peut disparaître secondairement. La bouche, quand elle existe, est soit dépourvue de cils, soit discrètement ciliée. La sous-classe se divise en huit ordres théoriquement bien définis, et comprend plus de la moitié des espèces décrites.

Ordre des Gymnostomatida

Les Gymnostomes sont considérés comme les Infusoires actuels les plus primitifs. Ils sont pourvus d'une bouche « à fleur de peau », dénuée de ciliature spécialisée. Le cytopharynx est formé de baguettes rigides, parfois soudées en nasse. La plupart des Gymnostomes, exception faite des *Cyrtophorines,* phytophages dont la bouche et la ciliature somatique sont ventrales, sont de grande taille, dotés d'une bouche en position dorsale, entourée de *toxicystes* et d'une ciliature régulière. Ils appartiennent au groupe des *Rhabdophorines* et renferment des genres intéressants d'un point de vue biologique, tels *Stephanopogon,* l'unique Cilié doté d'un seul type de noyaux, *Coleps,* à plaques calcaires corticales, *Loxodes,* grand Infusoire plat et effilé aux deux extrémités, à macronuclei diploïdes (noyaux vésiculaires), commun sur la vase des mares et des étangs (on l'attribuerait depuis peu à l'ordre des Trichostomes).

Ordre des Trichostomatida

Les Trichostomes sont dotés en avant de la bouche d'un vestibule garni le plus souvent d'une ciliature uniforme. Parmi les genres les plus connus, citons *Balantidium,* l'unique Cilié parasite de l'homme, et *Isotricha* qui réalise une symbiose avec les herbivores.

Ordre des Chonotrichida

Les représentants de cet ordre sont tous marins à l'exception de *Spirochona,* seul genre connu en eau douce et vivant sur les lames branchiales des Gammarides. Ils sont presque tous ectoparasites de Crustacés. Les adultes sont des formes fixées, entourées d'une pellicule rigide, à allure de bouteille, dépourvues de ciliature somatique. Les larves en revanche présentent un champ ciliaire ventral qui deviendra la ciliature vestibulaire de l'adulte. Ces larves, nageuses, proviennent d'un processus de bourgeonnement externe.

Ordre des Acinétiens

Les Acinétiens sont en général des organismes fixés à l'état adulte; ils peuvent être sessiles ou munis d'un pédoncule non contractile. De forme très variable (certains possèdent une coque protectrice) ils sont dotés de tentacules creux dont l'extrémité constitue une ventouse garnie d'*haptocystes* (organites vulnérants) qui ont pour fonction la préhension et la succion des autres Infusoires dont ils se nourrissent. La disposition de ces tentacules diffère selon les genres; chez *Corynophrya* ils forment une couronne apicale simple, cette dernière est double chez *Tokophrya* et *Acineta;* ils sont parfois portés par des prolongements ramifiés *(Dendrocometes).*

La multiplication asexuée s'effectue par bourgeonnement, externe ou interne, la libération du bourgeon pouvant donner lieu alors à une véritable « parturition ». Généralement dépourvu de tentacule et cilié, c'est le stade migrateur, libre, dont l'étude attentive permet seule le rapprochement des Acinétiens aux autres Holotriches et même plus précisément aux Gymnostomes. Après une brève phase de vie errante le migrateur se fixe, et par une véritable métamorphose, rapide et spectaculaire (15 minutes), reconstitue la forme adulte spécifique. Si les conditions de vie deviennent défavorables les Acinétiens peuvent s'enkyster de diverses manières ou se transformer totalement en migrateur, abandonnant alors au substrat les structures squelettiques éventuelles. La reproduction sexuée se fait aussi par conjugaison entre adultes selon différents modes imposés par leur morphologie, mais les phénomènes nucléaires fondamentaux sont les mêmes (méiose, pronuclei, syncaryon). Les Acinétiens libres ont colonisé les différents milieux

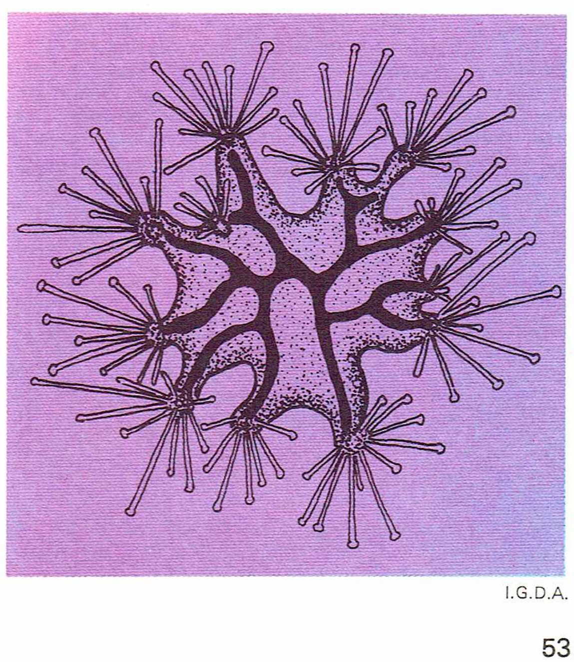

I.G.D.A.

◀ **Lernaeophrya capitata** *dont le macronucleus est ramifié est, comme tous les Acinétiens, pourvu de tentacules creux dont les extrémités constituent des ventouses.*

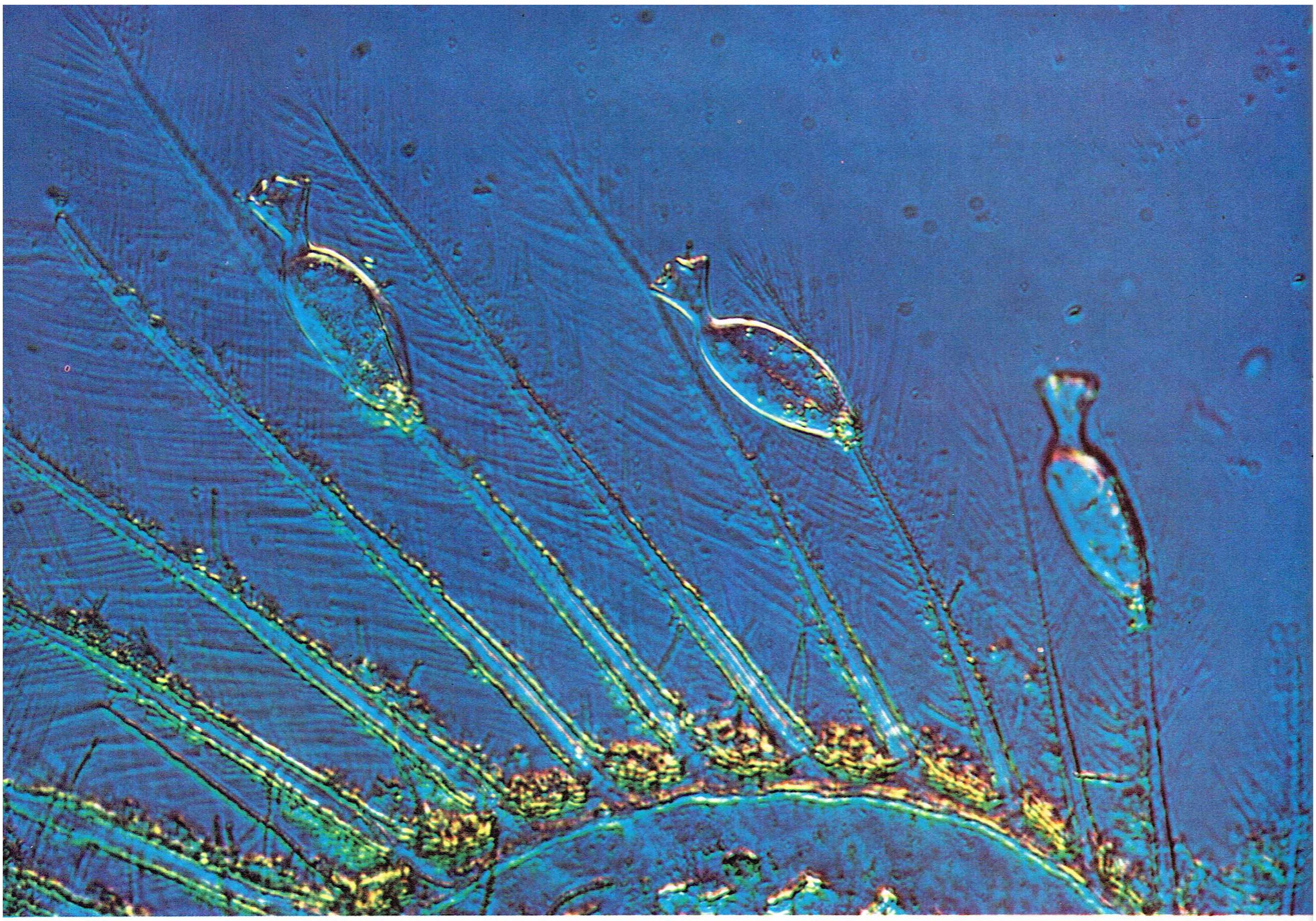

Photo Crumeyrolles

▲ **Lobochona limnoriae,** ***Chonotriche ectoparasite, fixé sur les soies des pléopodes d'un petit Isopode marin. Le corps glabre est néanmoins protégé par une cuticule rigide. Seuls demeurent quelques cils buccaux tapissant l'entonnoir. (In vivo ; contraste interférentiel.)***

aquatiques ; les autres présentent divers degrés de phorésie, de commensalisme ou de parasitisme.

Ordres des Apostomatida et des Astomatida

Les Apostomes sont des organismes marins, parasites de Crustacés. Leur cycle biologique très complexe passe par deux hôtes intermédiaires. Les affinités phylogénétiques de ce groupe sont très incertaines. Les Astomes, uniformément ciliés, sont des endoparasites des Oligochètes ; ils sont dépourvus de bouche et possèdent parfois un dispositif squelettique qui assure leur fixation à l'épithélium intestinal de leur hôte. Ils sont eux-mêmes symbiontes de Bactéries qu'ils hébergent dans leur cytoplasme et qui sont propres à chaque espèce. La répartition des Infusoires le long du tube digestif permet d'observer un exemple simple d'écologie parasitaire, chaque espèce choisissant son micro-habitat en fonction des caractéristiques locales. La multiplication asexuée est assez remarquable et aboutit souvent à la formation de chaînes d'individus.

Ordre des Hymenostomatida

Les représentants de cet ordre sont particulièrement appréciés des chercheurs qui trouvent en eux un excellent matériel d'étude, tant sur les plans cytologique que physiologique et génétique *(Paramecium)*. Ils sont apparentés à plusieurs ordres d'Holotriches et pourraient être la souche de nombreux ordres supérieurs. Les Hyménostomes ont une ciliature somatique uniforme ; la bouche s'ouvre au fond du *péristome* pourvu sur le côté gauche de trois bandes ciliées formées chacune par l'association de plusieurs cinéties et parcouru sur le côté droit par une cinétie cilifère (membrane ondulante). Il est précédé ou non d'un vestibule. Cette disposition typique de la ciliature buccale est dite tétrahyménienne (l'exemple type étant le genre *Tetrahymena*). Elle se rencontre, plus ou moins modifiée et simplifiée, chez nombre d'Infusoires des ordres déjà décrits et des ordres suivants sans que l'on sache avec certitude si elle doit être considérée comme ancestrale (signe d'une évolution plus avancée) ou au contraire annonciatrice.

Ordre des Thigmotrichida

Ces Infusoires se caractérisent par une ciliature très réduite, voire nulle, et la présence de cils spécialisés qui leur permettent d'adhérer et de se fixer provisoirement sur un hôte. La bouche peut présenter une disposition tétrahyménienne, être remplacée par un suçoir, ou faire totalement défaut. Les Thigmotriches sont considérés comme les Holotriches les plus évolués ; ils sont parasites de Mollusques. Plusieurs espèces ont pour hôte la moule *(Mytilus edulis)* sur les branchies de laquelle elles se fixent.

Sous-classe des Peritrichia

Les Péritriches sont des Infusoires assez volumineux dont le corps massif affecte la forme d'une cloche, d'une toupie ou d'une bobine. La ciliature buccale est localisée au pôle apical, et dérivée de la disposition tétrahyménienne des Hyménostomes et des Thigmotriches. Une bande de membranelles adorales conduit en sens inverse des aiguilles d'une montre à la cavité buccale *(infundibulum)* correspondant en totalité ou en partie à un péristome. Les Péritriches peuvent être sessiles, et dans ce cas sont fixés par le pôle opposé à la cavité buccale, ou portés par un pédoncule contractile *(Vorticella)* ou non *(Epistylis)* ou par une loge pseudo-chitineuse *(Vaginola)*, ou enfin par une ventouse *(Trichodina)* ; dans ce cas l'adhésion n'est que temporaire et l'individu est mobile. On distingue ainsi deux groupes, les Sessiles et les Mobiles.

Les Péritriches Sessiles peuvent être solitaires *(Vorticella)* ou former des colonies arbusculaires *(Epistylis)*,

parfois planctoniques *(Zoothammium)*, qui sont alors fixées les unes aux autres. La division inégale (apparemment longitudinale) donne naissance à un individu qui se détache et, devenu libre, se meut grâce à un anneau ciliaire postérieur, seul vestige de la ciliature somatique, temporaire chez les Sessiles et permanent dans le cas des Mobiles. Ce stade nageur, dit *télotroche*, assure la propagation de l'espèce. Un individu entier peut également se transformer en télotroche (plus volumineuse). Après une brève phase de vie libre la télotroche se pose sur un substrat convenable et, dans le cas des Sessiles, la zone ciliaire reconstitue un pédoncule et perd ses cils. Le genre *Telotrochidium* n'est connu que sous cette forme, et sa reproduction, à cet état larvaire, peut être considérée comme un cas de néoténie. La conjugaison des Sessiles est un peu particulière : l'un des conjugants (macro-conjugant femelle) est un adulte complet, fixé, alors que son partenaire (micro-conjugant mâle) est libre, nageur et télotroche. La fusion est complète et il en résulte un seul syncaryon. Ce caractère particulier se retrouve dans le cas des Mobiles, ce qui semble bien indiquer que leur mobilité est secondaire et qu'ils dérivent de Péritriches Sessiles (par néoténie ?). Les Sessiles sont libres ou ectoparasites d'Arthropodes, les Mobiles sont ectoparasites (Poissons) ou endoparasites d'Amphibiens.

Sous-classe des Spirotrichia

A l'inverse des Péritriches la ciliature buccale des Spirotriches se dirige vers la bouche dans le sens des aiguilles d'une montre. La ciliature somatique varie d'importance suivant les ordres ; elle peut être homogène ou inexistante. La sous-classe des Spirotriches comprend cinq ordres.

Ordre des Heterotrichida

Cet ordre renferme les formes les plus simples, et possédant une ciliature homogène. On pourrait de ce fait penser qu'ils dérivent d'Holotriches mais également qu'ils constituent la souche d'ordres plus évolués. Certains genres de grande taille *(Stentor, Spirostomum)* ont été souvent employés dans les recherches de morphologie et de différenciation (régénération). Ils renferment souvent des Zoochlorelles ou des pigments, ce qui leur confère de très belles couleurs (vert, rose, bleu, jaune, etc.). *Bursaria, Metopus, Fabrea, Climacostum,* Infusoires parmi les plus connus, appartiennent à cet ordre.

Ordre des Oligotrichida

Les représentants de cet ordre sont de très petite taille (50-60 μ) et ont une forme sphérique. Leur ciliature somatique se réduit, lorsqu'elle n'est pas totalement nulle, à quelques cils rigides grâce auxquels l'organisme se déplace en effectuant des sortes de bonds, les membranelles adorales assurant la nage.

Ordre des Tintinnida

Les Tintinnides sont pour la plupart marins et pélagiques bien qu'ils soient logés dans une coque ; l'ornementation

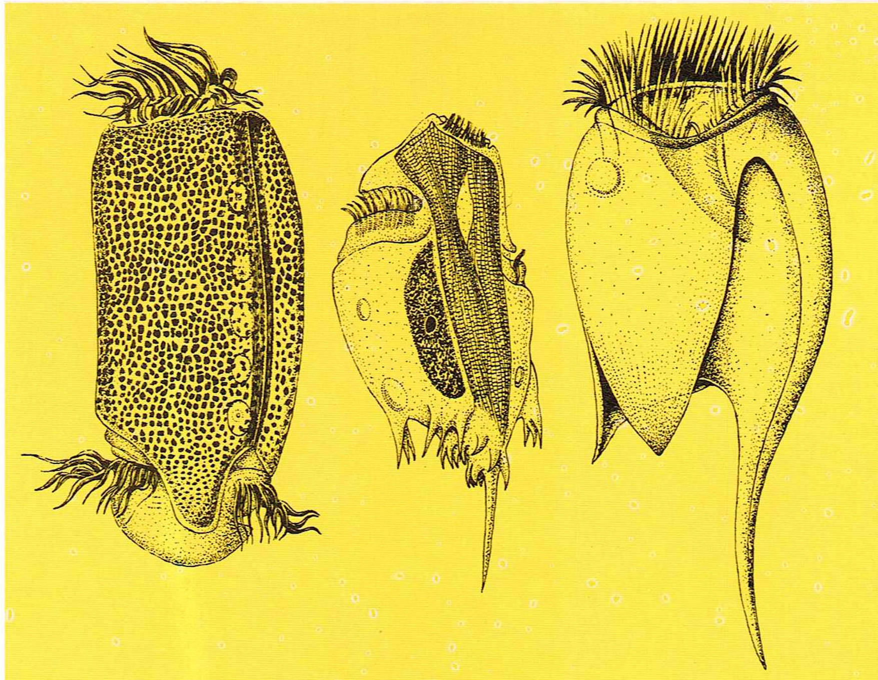

I.G.D.A.

▲ ***Trois Ciliés Entodiniomorphes :*** ***à gauche,*** **Cycloposthium bipalmatum ;** ***au milieu,*** **Ophryoscolex caudatus ;** ***à droite,*** **Entodinium caudatum.**

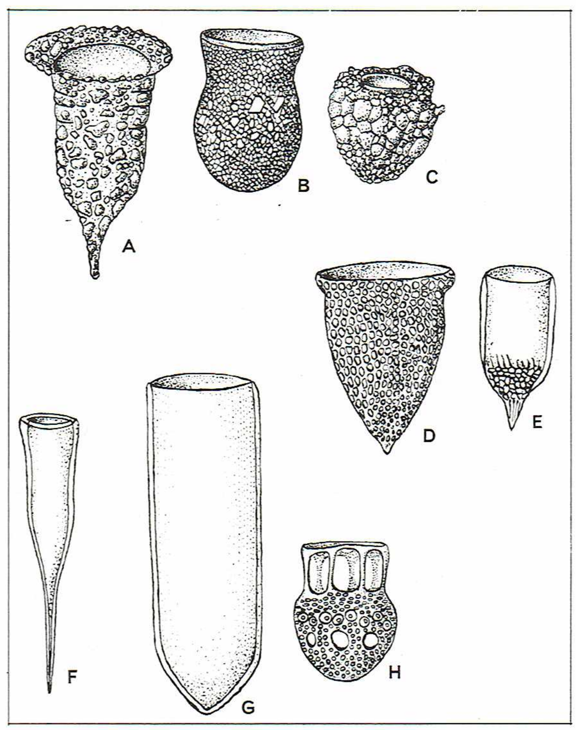

I.G.D.A.

◀ ***Les Ciliés Tintinnides sont logés dans une coque dont l'ornementation intervient pour la détermination des individus.***

▼ ***Trois Ciliés Hypotriches photographiés*** **in vivo :** ***à gauche*** **Euplotes sp. *(× 100 × 2) ;*** ***au milieu*** **Uronychia sp. *(× 170 × 2) ;*** ***à droite*** **Stylonychia sp. *(× 170 × 2).***

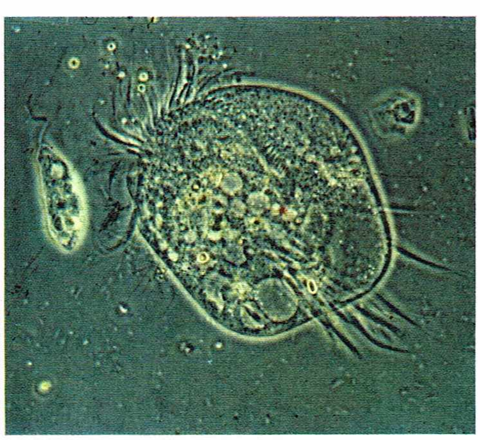

G.S. Giacomelli

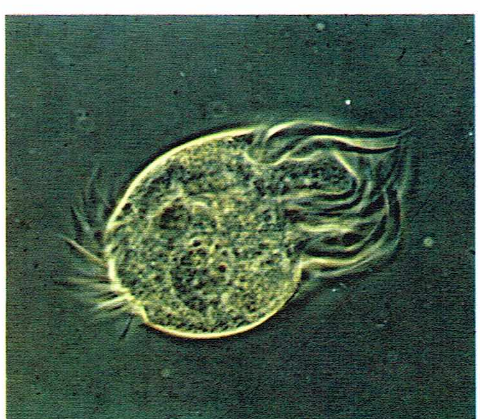

G.S. Giacomelli

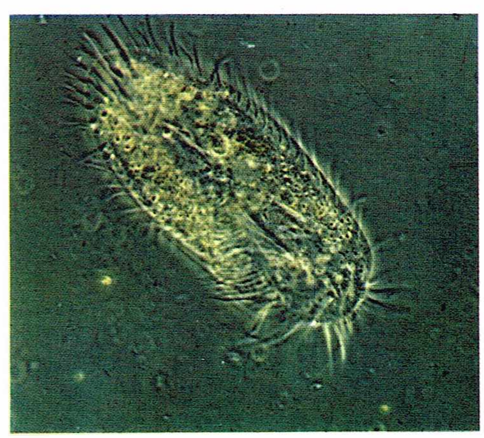

G.S. Giacomelli

▶ *Cycle biologique de* Myxobolus pfeifferi, *Cnidosporidie parasite des Poissons d'eau douce; les numéros correspondent aux différentes phases du cycle.*

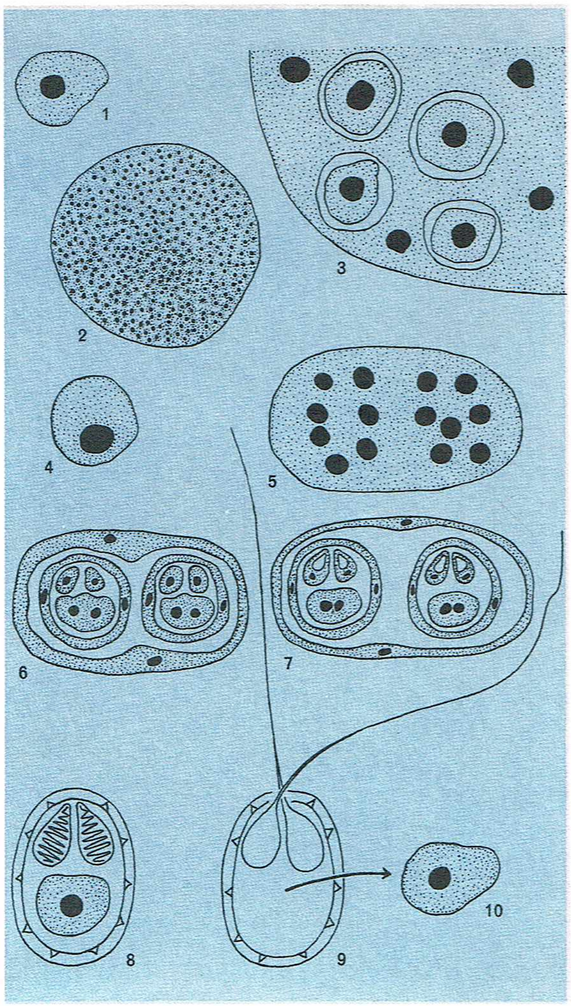

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

de celle-ci intervient dans la détermination des espèces. Comme chez les précédents la nage est assurée par les membranelles adorales. Ils comptent parmi les rares Infusoires qui aient laissé des fossiles.

Ordre des Entodiniomorphida

Chez les représentants de cet ordre la ciliature est réduite à une frange péribuccale de *syncils* (pinceau de cils) qui intervient dans la locomotion et l'alimentation *(Entodinium)*; peuvent lui être associées des membranelles destinées à assurer la propulsion et situées dorsalement *(Diplonidium)*, à la partie postérieure *(Cycloposthium)* ou disposées en hélice *(Ophryoscolex)*. La cuticule périphérique est ferme, résistante et indéformable (le cytoprocte est donc fixe). Les Entodiniomorphes sont tous des commensaux du tube digestif de Mammifères (herbivores, singes).

▼ *Barbues parasitées par* Myxobolus pfeifferi; *les sporoplasmes fixés dans les muscles de l'hôte entraînent la formation de kystes bien visibles.*

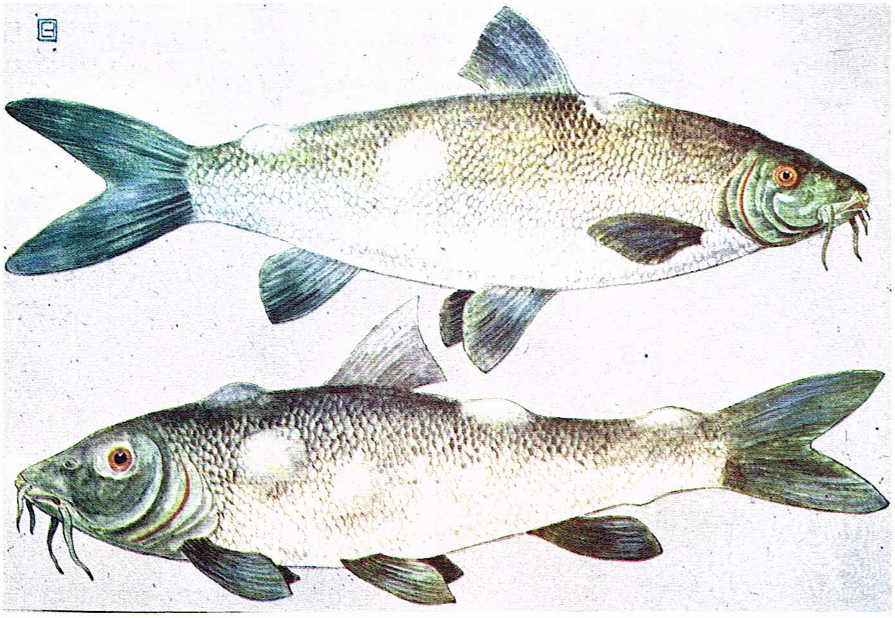

I.G.D.A.

Ordre des Hypotrichida

Les Hypotriches sont aplatis dorso-ventralement, ce qui favorise le déplacement sur un substrat. La cuticule rigide conserve au corps cet aspect foliacé. La ciliature somatique conserve sur le dos quelques cils dont la fonction n'est probablement que sensorielle, en revanche la face ventrale est recouverte de cirres puissants qui assurent la locomotion de l'Animal, soit par bonds, soit en « marchant ». La ciliature buccale consiste en une large frange de membranelles adorales. Les Hypotriches sont considérés comme les Ciliés et peut-être les Protozoaires les plus évolués. *Euplotes* et *Stylonychia* sont les représentants les plus connus de l'ordre.

CNIDOSPORA

Les Cnidosporidies sont encore classés provisoirement parmi les Protozoaires mais ils s'en écartent sensiblement : ils ne présentent pas l'état unicellulaire à l'état végétatif. Le cycle en effet commence sous la forme d'un petit germe amiboïde, le sporoplasme, issu d'une spore infestante complexe et plurinucléée. Cette amœbule produit un plasmode étrange possédant plusieurs noyaux qui seront somatiques, périssables, et des noyaux particuliers, qui sont à l'origine de cellules germinales, rampant au sein du plasmode, et qui se différencieront en spores complexes dotées de plusieurs cellules : cellules valvaires pour l'enveloppe, polaires à filament urticant, et germinales, souvent binucléées.

Cet état très particulier fait de plus en plus considérer les Cnidosporidies comme un embranchement autonome.

Ordre des Microsporida

Les spores sont d'origine monocellulaire ; le sporoplasme est uninucléé, le plasmode entièrement découpé en spores. Ce sont les plus « Protozoaires » du groupe : ex. *Nosema bombycis*, agent de la pébrine du ver à soie.

Ordre des Actinomyxida

Chez les Actinomyxidies les spores ont une symétrie d'ordre trois. Ces Animaux sont parasites de Sipunculiens et d'Oligochètes d'eau douce *(Tubifex)*.

Ordre des Myxosporida

Chez les Myxosporidies les spores se forment par paires au sein du plasmode ou pansporoblaste. Il y a une ou plusieurs capsules polaires. Certains, tel *Myxobolus*, sont parasites des Poissons d'eau douce (*Barbus, Leuciscus*, etc.), d'autres de Poissons marins. La spore s'ouvre dans l'intestin de l'hôte, les filaments spiralés s'évaginent, le sporoplasme libéré va se fixer dans des muscles. L'évolution nucléaire est complexe, et le développement du parasite et la réaction tissulaire de l'hôte forment de volumineux kystes en hernies, très visibles.

BIBLIOGRAPHIE

GRASSÉ P. P., *Traité de zoologie*, t. 1, fasc. 1 et 2, Paris, 1952-1953. - GRELL K. J., *Protozoology*. Springer Verlag, 1973. - MAC-KINNON D. L., HAWES R. S., *An Introduction to the Study of Protozoa*. Oxford, 1961. Périodiques : *Journal of Protozoology*. - *Protistologica*. C.N.R.S., Paris. - *L'année biologique*. Masson & Cie, Paris (depuis 1969). - *Archig. für Protisten Kunde*. Gustav Fischer. Verlag Iena.

H. Chaumeton - Jacana

LES SPONGIAIRES

On ignore généralement que les Spongiaires sont nombreux dans les eaux douces comme dans les océans, dans les eaux froides comme dans les mers chaudes et que les éponges de toilette naturelles sont des squelettes d'Animaux. On a longtemps considéré les Spongiaires comme des Végétaux et quand on a reconnu leur appartenance au règne animal il a fallu de nombreux débats pour clarifier leurs relations avec les autres embranchements.

On classe les Spongiaires au sein des Métazoaires, comme tous les autres Animaux multicellulaires, en dépit d'une organisation anatomique assez originale et des particularités de leur développement qui avaient incité certains zoologistes à isoler les Spongiaires dans un sous-règne des Parazoaires. La classification générale des Spongiaires repose sur la nature et la structure des éléments du squelette. On distingue ainsi trois classes : les Calcisponges ou Calcaires, à spicules de carbonate de calcium, les Hexactinellides, à spicules siliceux de structure triaxiale, et les Démosponges, à spicules siliceux de structure monaxiale et souvent riches en fibres scléroprotéiques : collagène et spongine.

Organisation générale

Le système anatomique le plus simple, connu sous les noms d'*olynthus* ou d'*ascon*, est un sac ou un tube creux s'ouvrant à l'une de ses extrémités par un orifice, l'*oscule*. La paroi est percée par de nombreux canalicules dont l'ouverture externe est appelée *ostiole* ou pore. La cavité centrale, que limitent des cellules à flagelles appelées *choanocytes*, est parcourue par un courant d'eau qui pénètre dans l'Éponge par les ostioles et en sort par l'oscule. L'ouverture principale de l'olynthus fonctionne donc comme un anus et non comme une bouche. Le flux d'eau apporte les aliments qui seront capturés puis absorbés par les choanocytes, lesquels jouent le rôle de cellules digestives et assurent par le battement de leurs flagelles la circulation de l'eau dans l'Éponge. La paroi de l'olynthus est mince et constituée par une couche de cellules externes aplaties, les *pinacocytes*, et par la couche interne de choanocytes. Les deux couches se rejoignent à la face interne de l'oscule. Elles sont séparées dans la paroi par une substance intercellulaire où peuvent circuler des cellules mobiles, parmi lesquelles des phagocytes, des fibrocytes et des sclérocytes qui produisent les spicules. Cette organisation simple caractérise quelques Éponges à squelette calcaire existant actuellement. Mais chez la plupart des Spongiaires elle est plus complexe, dite de *type leuconoïde*, et elle est la conséquence d'une augmentation considérable du volume de l'espace intérieur compris entre les deux feuillets. Il en résulte la fragmentation de la cavité centrale primitive de l'olynthus en de très nombreuses cavités sphériques bordées de choanocytes et le développement d'un système complexe de canaux aquifères bordés de pinacocytes ; les uns, inhalants, conduisent l'eau des ostioles aux chambres choanocytaires, les autres, exhalants, convergent vers l'oscule en collectant l'eau provenant des chambres. Il y a aussi prolifération des cellules mobiles et production accrue de fibres intercellulaires et de spicules.

Morphologie

Aquatiques et très généralement marines, fixées dès la métamorphose, les Éponges sont souvent considérées à tort comme des individus amorphes et sujets à d'importantes variations morphologiques. Il est vrai que certaines espèces offrent une série de formes individuelles dont il est possible de définir les limites et que beaucoup d'autres se modèlent sur le substrat qu'elles occupent, présentant ainsi un polymorphisme apparent. Mais la très grande majorité des Spongiaires a une forme relativement constante qui répond souvent aux conditions écologiques auxquelles ils sont soumis et à laquelle correspond une organisation anatomique et squelettique adaptée.

Sans la contrainte d'un squelette externe, soutenue en fonction de la taille par une charpente interne susceptible de fermeté, mais aussi de souplesse d'articulation et de transformation, dépourvue d'organes mais s'organisant globalement par migrations cellulaires, l'Éponge

▲ *Les Spongiaires (ici,* **Polymastia mamillaris)** *ont été pendant longtemps considérés comme des Végétaux ; en fait, il s'agit d'Animaux pluricellulaires sans organes différenciés, munis d'orifices inhalants et exhalants permettant la circulation de l'eau qui véhicule les très fines particules nutritives.*

EMBRANCHEMENTS DES SPONGIAIRES

Classe des Calcisponges ou Éponges Calcaires

ordres : *Homocœles*
Hétérocœles
Pharétronides

Classe des Hexactinellides

ordres : *Amphidiscophores*
Hexastérophores

Classe des Démosponges

Sous-classe des Homosclérophorides
Sous-classe des Tétractinomorphes
ordres : Astrophorida
Spirophorida
Desmophorida
Hadromerida
Axinellida
Sous-classe des Céractinomorphes
ordres : Poecilosclerida
Halicondrida
Haplosclerida
Dictyoceratida
Dendroceratida

peut prendre la forme la plus complexe en conservant un système anatomique relativement simple.

Les dimensions des Spongiaires sont très variées; les individus les plus grands appartiennent en général à la classe des Démosponges et les plus massifs aux classes des Démosponges et des Hexactinellides. Contrairement à ce qu'on pouvait imaginer, on n'observe pas corrélativement de spécialisation anatomique ou squelettique. La présence d'une région périphérique plus solide (en écorce ou en croûte) n'est pas particulière à ces Éponges massives et la charpente squelettique n'est pas obligatoirement adaptée au développement pondéral. Chez certains Démosponges de très grand poids, les spicules restent entremêlés, sans lien organique; la fermeté de l'Éponge est alors due au développement du collagène intercellulaire. Parmi les plus grandes Éponges connues figurent *Poterion neptuni* (Hardwicke), ou coupe de Neptune, *Spheciospongia vesparia* (Lam.), *Petrosia testudinaria* (Lam.), *Asconema setubalense* (S. Kent), *Geodia rex* (Dendy), *Spongia officinalis* (L.), *Mycale bellabellensis* (Lambe), etc., qui atteignent fréquemment 30 à 90 cm de diamètre ou d'envergure et parfois même 1 à 2 m. Ni les mers froides ni les eaux tropicales n'hébergent exclusivement les espèces de grande taille. Il semble cependant que les eaux assez calmes et sans turbulence des plaines abyssales, par exemple, favorisent le développement de la taille. Les Éponges Calcaires sont en général de petite taille (elles dépassent rarement 50 mm de long); les Hexactinellides, en revanche, le sont rarement. Les autres mesurent fréquemment de 100 à 200 mm d'envergure et forment parfois des masses importantes, que la drague arrache par fragments. Beaucoup d'Éponges encroûtantes n'ont que 1 mm d'épaisseur et ne couvrent que 1 ou 2 cm². D'autres, revêtantes et aussi minces, s'étalent sur de très larges surfaces. Des variations saisonnières et annuelles de la taille peuvent être observées chez les espèces côtières soumises au régime des marées. La croissance comme l'involution peuvent être très rapides et les dimensions maximales observées sont liées soit aux limites du substrat, soit aux conditions écologiques locales.

La maturité sexuelle est atteinte simultanément par tous les individus et n'est pas liée à une taille minimale.

Les Éponges Calcaires *(Leucosolenia, Clathrina)* construites sur le type olynthus sont des tubes simples, aplatis ou dressés, ramifiés ou anastomosés, ce qui leur permet d'atteindre quelques centimètres de haut. La forme en vase à col étroit, à vaste cavité centrale, dérivée du type primitif est fréquente chez les Calcaires (*Sycon* par exemple), mais aussi chez les Hexactinellides malgré l'épaisseur de leurs parois et leur grande taille. Cette forme est liée à l'*anatomie syconoïde* (cavité centrale plissée). Les structures asconoïdes et syconoïdes conditionnent la morphologie de l'Éponge et en limitent les variations possibles et donc les possibilités adaptatives. Au contraire, la mise en place postlarvaire immédiate de chambres choanocytaires séparées donne à l'Éponge une liberté morphologique considérable. Le système aquifère leuconoïde et le squelette s'adaptent alors à la meilleure forme de croissance pour répondre aux exigences du milieu; il en résulte l'apparition d'une série de types

▶ Sycon, *Éponge Calcaire en forme de vase à col étroit, présente une vaste cavité centrale plissée (type syconoïde).*

▼ *Types fondamentaux d'organisation des Spongiaires : A, type asconoïde (le plus simple); B, type syconoïde; C, type leuconoïde; les flèches indiquent le sens du courant d'eau.*

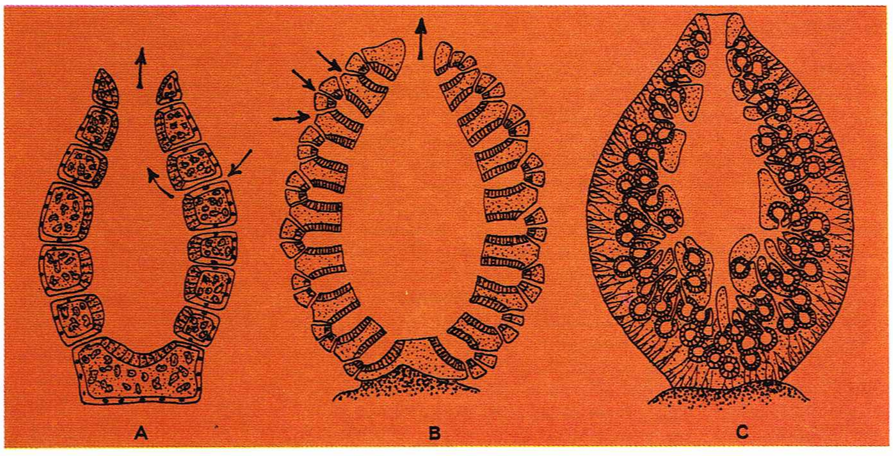

I.G.D.A.

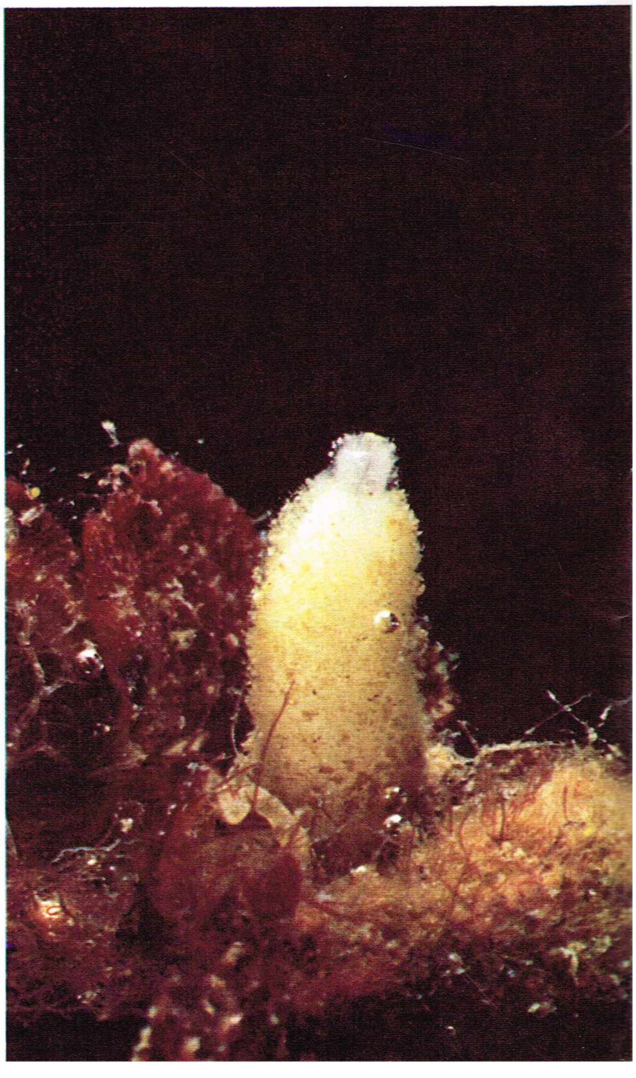

H. Chaumeton - Jacana

morphologiques entre lesquels les intermédiaires sont nombreux et qui comprennent beaucoup de variantes.

Les Éponges encroûtantes sont liées au substrat par la totalité de leur surface inférieure, de dimension comparable à celle de la face supérieure libre. La fixation est assurée ou renforcée par la spongine basale et les spicules, nombreux et plantés perpendiculairement dans le support. La croissance périphérique est dirigée et limitée par la nature du substrat. Les Démosponges encroûtants sont très nombreux et répandus sur tous les supports solides : rochers, cailloux, coquilles, madrépores, scories, Algues calcaires, etc.

Les Éponges revêtantes couvrent le support sans y adhérer aussi étroitement que les précédentes. Les points de fixation sont espacés et les espèces à croissance rapide forment des voiles ou des plaques épaisses susceptibles de recouvrir d'autres organismes, même de grande taille, comme certains Mollusques, Ascidies, Bryozoaires ou Algues déjà fixés sur les rochers.

Chez les Éponges massives, dont il existe une grande variété de formes, la croissance est souvent très irrégulière. Après passage par un stade encroûtant, beaucoup de Démosponges et de Calcaires constituent des masses à face supérieure convexe, se subdivisant partiellement en gros lobes ou en digitations inégales ou se prolongeant en papilles. Les charpentes de ces Éponges sont de tous les types connus; elles peuvent être radiaires chez certaines Éponges massives subsphériques dont la base de fixation est réduite.

Les Éponges dressées sont également très abondantes et solidement liées au support par une sole de fixation. Les plus caractéristiques sont en tiges simples ou ramifiées avec un squelette axial radiaire ou réticulaire souvent renforcé par de la spongine. Chez les formes pédonculées, la longue tige de fixation, dépourvue de choanocytes, est fortement charpentée et se prolonge brusquement ou progressivement en une masse distale, en massue ou en chapeau (*Caulophacus, Stylocordyla,* etc.). Les rameaux restent isolés ou s'anastomosent irrégulièrement, ce qui constitue des formes en touffes ou arbusculaires. Il arrive que la ramification se fasse dans un plan et il en résulte des Éponges en éventail ou en grillage. Les Éponges dressées sont souvent foliacées ou flabellées; les feuilles ou les lames se constituent directement ou proviennent de la fusion de rameaux voisins et situés dans le même plan; elles peuvent aussi dériver de la croissance foliacée d'une tige cylindrique primitive qui subsiste comme tige de fixation. Les Éponges foliacées sont parfois courbées et les deux extrémités sont susceptibles de se souder pour former un cornet ou un vase à large ouverture. D'autres espèces dressées sont creusées d'une cavité axiale qui occupe quelquefois un volume considérable et s'ouvre au sommet par une large ouverture; ces Éponges tubulaires sont simples ou formées de plusieurs tubes concrescents qui se développent à partir d'une région proximale massive commune. Quelques espèces massives, surtout intertidales, placées dans une situation locale favorable, forment des digitations, des cordons ou des tubes, mais sont toujours identifiables, malgré ces variantes, grâce à d'autres caractères externes tels que la position et les dimensions des ouvertures, l'état de la surface, la consistance et la couleur.

L'organisation anatomique typique des Spongiaires exige la présence d'ouvertures inhalantes *(ostioles)* et exhalantes *(oscules)* qui sont reliées entre elles par le système des canaux aquifères et les chambres choanocytaires. L'examen de la disposition de ces orifices à la surface de l'Éponge donne des indications utiles sur le mécanisme de la circulation de l'eau et sur la localisation écologique. Dans l'Éponge Calcaire primitive en tube ou en vase, l'oscule correspond à une des extrémités du tube ou se situe au sommet du vase. Les ostioles toujours nombreux sont distribués sur toute la surface de l'Éponge, à l'exception cependant de la zone de fixation. Chez les autres Éponges, la répartition des ostioles est très fréquemment uniforme, mais le nombre des oscules est variable et n'est pas forcément lié à la taille de l'Éponge. On peut en compter un seul ou plusieurs dizaines; chez certaines espèces encroûtantes, il peut y en avoir plus d'une douzaine. L'espacement des oscules est assez caractéristique pour chaque espèce et correspond à une organisation précise du système aquifère exhalant. La plupart des

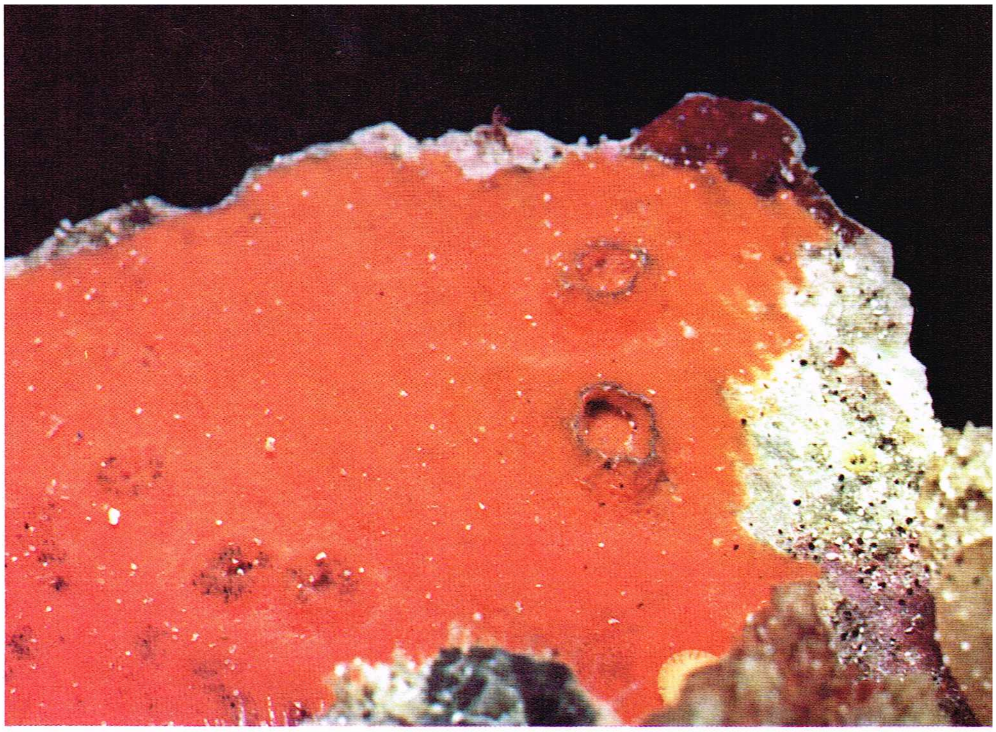
H. Chaumeton - Jacana

oscules mesurent de 1 à 5 mm de diamètre, mais il en existe de plus larges, de 5 à 15 mm, surtout dans les Éponges tubulaires. Dans certains cas, les ostioles comme les oscules n'existent que sur une portion restreinte de la surface, que l'on désigne alors sous le nom d'aire ostiolaire et d'aire osculaire. Dans les zones qui leur sont propres, plusieurs ostioles peuvent former un crible ostiolaire qui conduit l'eau dans une cavité inhalante commune. Les Éponges foliacées ont parfois une face ostiolaire et une face osculaire et l'eau traverse ainsi la feuille d'une face à l'autre; cette disposition est liée aux conditions hydrodynamiques locales. Les ostioles et les oscules peuvent encore être situés sur des prolongements, mamelons, papilles ou digitations de la face apicale. C'est notamment ce qui existe chez les Éponges qui vivent enfoncées dans le sédiment qui les recouvre presque en totalité ou qui habitent des galeries dans des

▲ ***De nombreuses Éponges, comme* Microciona atrasanguinea, *peuvent s'étaler sur le substrat et recouvrir des surfaces plus ou moins importantes.***

▼ **Xestospongia muta,** ***une Éponge des côtes des Antilles; l'oscule est bien visible.***

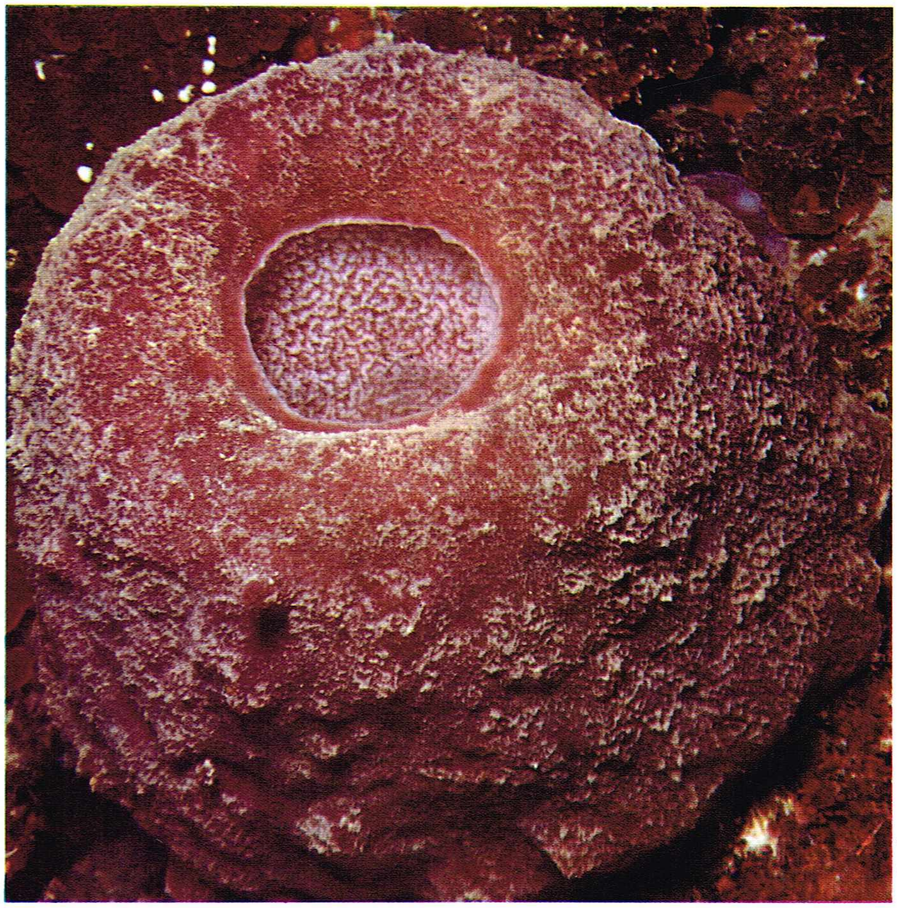
D. Faulkner

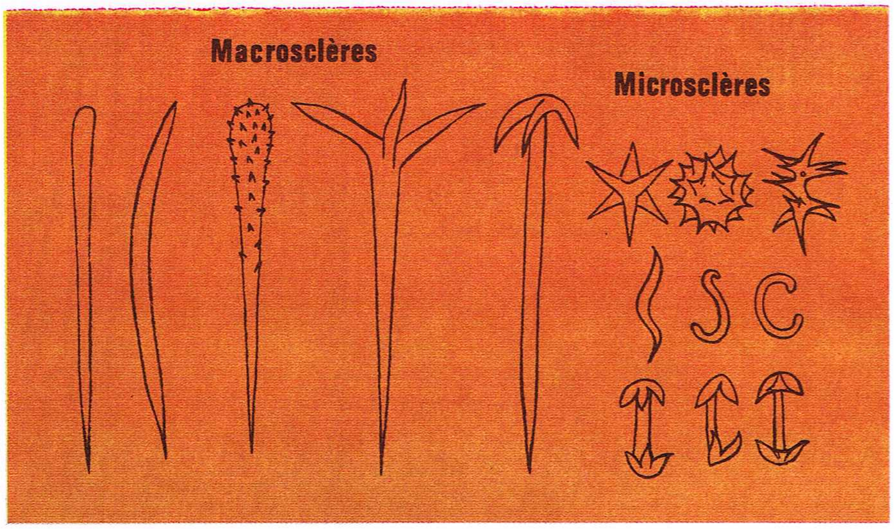

Richard Colin

▲ *Les Spongiaires, à l'exception des Démosponges à fibre de spongine, sont soutenus par un squelette formé par l'association de spicules calcaires ou siliceux présentant des formes caractéristiques.*

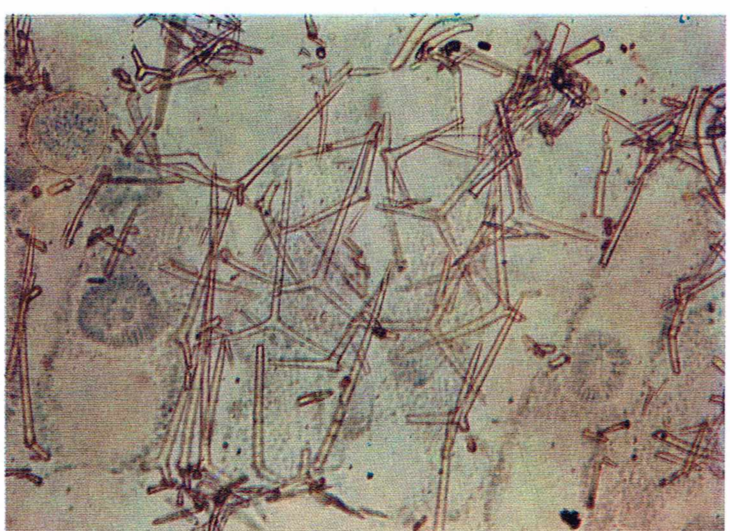

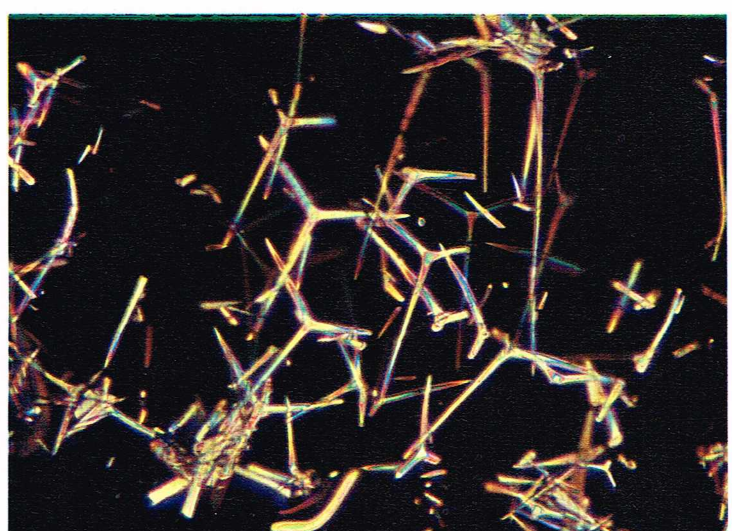

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▼ *Spicules appartenant à l'Éponge Calcaire* **Grantia compressa,** *photographiés en lumière normale, à gauche, et en lumière polarisée, à droite.*

substrats calcaires qu'elles peuvent avoir creusés elles-mêmes. Certaines papilles sont osculaires et d'autres sont ostiolaires.

L'état de la surface de l'Éponge dépend en grande partie de l'organisation du squelette et du système aquifère. Un très grand nombre de Spongiaires n'ont pas de chambres choanocytaires dans leur région périphérique, ou *ectosome,* qui peut être une fine membrane transparente non soutenue par une charpente spiculaire ou encore une couche plus ou moins épaisse où les spicules sont abondants. Par ailleurs les différents types de charpente squelettique se terminent à la surface de l'Éponge soit en spicules isolés ou en faisceaux, soit encore en fibres spiculaires ou cornées avec ou sans inclusions solides. La combinaison de tous ces éléments superficiels donne une série de types de surfaces. La surface lisse est fréquente lorsqu'il existe une membrane ectosomique dépourvue de spicules ou si ces derniers sont tangentiels et recouvrent les canaux aquifères sous-ectosomiques, et quand l'extrémité des spicules du squelette principal n'atteint pas la surface. La membrane ectosomique est alors facilement détachable du reste de l'Éponge. La surface est hispide lorsque les spicules font saillie hors de l'Éponge, soit qu'ils se dressent au hasard, soit qu'ils constituent une palissade périphérique ou qu'ils représentent l'extrémité des faisceaux ou des fibres ascendantes (*Axinellides, Clathria, Tetilla, Pheronema,* etc.). L'espacement des spicules dressés et leur longueur déterminent plusieurs types d'hispidations et confèrent à la surface une texture caractéristique. La protection des ostioles et des oscules contre une sédimentation excessive est parfois assurée par une hispidation élevée et par la présence de spicules spéciaux. Enfin, la surface est conulaire lorsque la charpente principale est fibreuse. L'ectosome est alors tendu comme une toile entre les extrémités des fibres et les recouvre en formant des conules simples ou même ramifiés, obtus ou épineux; dans ce cas, les ostioles sont alors dispersés dans des dépressions alvéolaires entre ceux-ci. Très fréquemment, de grands canaux exhalants s'étendent tangentiellement sous la surface avant de confluer près des oscules, de telle sorte qu'on peut les apercevoir par transparence à travers l'ectosome. On observe alors une mosaïque de territoires hispides en relief et de territoires lisses sous forme de sillons ou de dépressions.

La consistance des Éponges est très variable. Elle dépend de la nature du squelette, du nombre des spicules, de leur position et de la proportion relative de leurs différents types, de la masse de collagène et de spongine, enfin de la présence de sécrétions cellulaires particulières. Les espèces dépourvues de spongine et dont l'ectosome est mince sont les plus fragiles, exception faite de rares Éponges sans squelette *(Oscarella)* auxquelles une cuticule confère néanmoins une certaine résistance. L'absence de spongine exclut l'élasticité, mais non la dureté, qui est due chez ces espèces à une disposition spéciale des spicules *(Petrosia)* ou au développement d'un ectosome riche en collagène ou en petits spicules *(Tethya, Geodia).* Certaines Éponges, quelle que soit leur consistance, sont gluantes ou visqueuses, glissent dans les mains ou collent aux doigts, et ces propriétés particulières sont causées par des sécrétions de cellules spécialisées *(Desmacidon fruticosum, Haliclona viscosa, Halisarca).*

La couleur des Éponges est souvent vive, notamment celle des Démosponges. Mais, en majorité, les Calcaires sont de teinte blanche ou brunâtre et la plupart des Hexactinellides sont blanc grisâtre. Des pigments colorent les Démosponges en gris, brun violacé, mais surtout en jaune ou orangé. Les Éponges cornées sont noires ou grises, d'autres sont colorées en pourpre ou jaune. Des sels métalliques (fer) peuvent altérer la couleur typique; de même la présence d'Algues ou de Bactéries symbiontes donne à certaines Éponges des teintes anormales, vert, violet, rouge ou bleu, alors qu'elles sont naturellement jaunes ou grises.

Nutrition et circulation de l'eau

L'eau qui recouvre la totalité de l'Éponge y pénètre par les ostioles et en ressort par les oscules. Le courant d'entrée est difficile à mesurer en raison du petit diamètre des ostioles. Mais la vitesse du courant de sortie a été calculée au niveau de l'oscule. Elle est de l'ordre de 5 à 15 mm/s, plus faible à l'intérieur des chambres choanocytaires où s'effectue la filtration. Les particules d'une taille supérieure à 0,05 mm pénètrent rarement au travers des ostioles; c'est pourquoi l'eau absorbée contient surtout des substances organiques dissoutes et de très fines particules. Les matières organiques sont absorbées par les choano-

cytes qui en transmettent une partie aux autres cellules de l'Éponge par l'intermédiaire de celles qui sont mobiles. On ne connaît encore presque rien des mécanismes de la nutrition. Beaucoup d'Éponges abritent des populations de Bactéries symbiontes qui doivent participer à leur équilibre nutritionnel. Les Spongiaires sont les rares organismes capables de se nourrir de particules organiques aussi fines; la plupart des autres filtreurs absorbent de petites proies vivantes ou des particules de plus grandes dimensions. Contrairement à ce que l'on pensait, la circulation de l'eau n'est pas toujours régulière et continue. Elle peut s'interrompre et même cesser pendant plusieurs heures. La signification physiologique de ce phénomène n'est pas élucidée, et certains mécanismes de la régulation de la circulation d'eau sont encore mal connus. Des sphincters présents autour des orifices et dans certaines zones inhalantes sont composés de cellules contractiles dont l'activité est coordonnée. De temps en temps, l'Éponge entière peut se contracter.

Reproduction

Reproduction sexuée. Les Spongiaires ont une reproduction sexuée et beaucoup d'Éponges sont hermaphrodites. La période de reproduction dure quelques semaines chez la plupart des espèces; elle est liée de façon encore incomprise à la température de l'eau (température permissive), mais d'autres facteurs interviennent sans doute dans le déterminisme de la stimulation goniale. Très souvent les températures permissives sont élevées et les Éponges se reproduisent au cours de l'été boréal ou austral.

Chez les Calcaires Hétérocœles, la segmentation de l'œuf donne une blastula (stade de développement de l'œuf présentant autour d'une cavité, dite cavité de segmentation, une seule assise de cellules) bipolaire dont la paroi cellulaire effectue un retournement en doigt de gant avec inversion des surfaces. Après ce phénomène, la moitié formée de petites cellules flagellées sera l'hémisphère antérieur de la larve mobile, l'hémisphère postérieur étant composé de grosses cellules peu nombreuses. La cavité centrale est réduite. Libérée à travers un oscule, la larve nage en spirale; sa vie mobile est courte (de quelques heures à quelques jours). Ensuite elle se pose puis se fixe sur un substrat par l'hémisphère antérieur et s'aplatit très rapidement; les cellules antérieures flagellées sont alors recouvertes par de grosses cellules postérieures. Cette vésicule aplatie à double paroi préfigure l'Éponge. Les cellules internes flagellées sont à l'origine des choanocytes. Celles de la périphérie donneront les pinacocytes et les cellules mobiles. Le mode de développement est semblable chez les Démosponges Homosclérophorides, où la larve est également du type amphiblastula, à large cavité centrale.

Chez les autres Spongiaires dont le développement est connu, l'œuf, après segmentation égale ou très inégale, évolue en un embryon plein dont les cellules devenues périphériques acquièrent une ciliature et enferment un massif interne de cellules riches en vitellus dont la différenciation s'effectue progressivement. Chez les espèces incubantes, la larve, appelée *parenchymella* au moment de l'éclosion, est donc l'homologue d'une amphiblastula, à ceci près que l'épithélium locomoteur larvaire cilié enferme totalement ou presque (pôle postérieur découvert) le massif des futures cellules mobiles et pinacocytes au lieu de constituer l'hémisphère antérieur. Chez les espèces ovipares, la parenchymella est très peu différenciée et les embryons sont agglomérés par du mucus. La métamorphose, qui débute lors de la fixation de la larve au substrat, est donc caractérisée par la mise en place des deux groupes cellulaires dont l'évolution vient d'être signalée. Mais la morphogenèse de l'Éponge est surtout marquée par l'organisation du système aquifère jusqu'à sa mise en fonction et à l'ouverture de l'oscule primaire. Au cours d'une première phase se forme une enveloppe de pinacocytes très plats qui isole les autres cellules du milieu extérieur. Puis se différencient celles de l'intérieur et les choanocytes qui constituent les chambres flagellées en même temps que se creusent les lacunes puis les canaux aquifères et que s'ouvrent ostioles et oscules.

Chez les Spongillides d'eau douce, l'épithélium cilié de la larve est entièrement phagocyté pendant la métamorphose, et les choanocytes sont issus de cellules internes de l'embryon. Chez la plupart des Démosponges, une partie, parfois notable, des cellules ciliées est phagocytée; les autres sont les ancêtres des choanocytes.

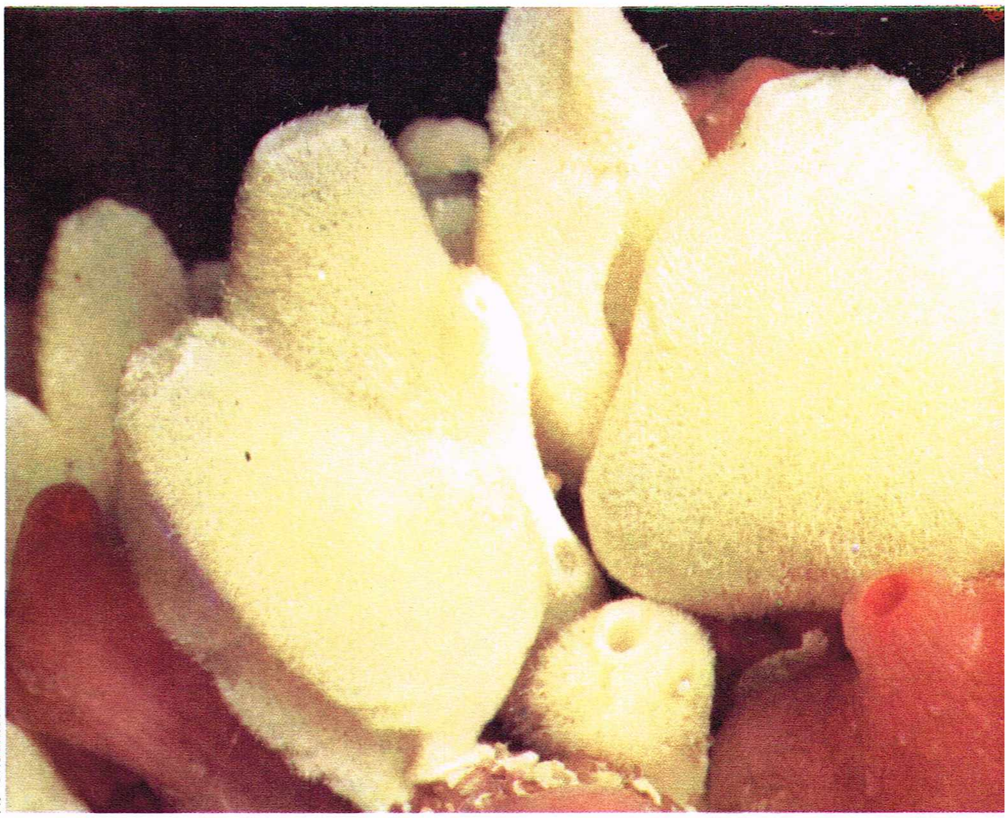

H. Chaumeton - Jacana

▲ *Une Éponge Calcaire,* **Grantia compressa;** *les oscules assurant la sortie de l'eau sont bien visibles.*

La croissance des Éponges est mal connue. Certaines espèces de la zone intertidale sont annuelles et ont une croissance rapide qui précède généralement une phase sexuée; après métamorphose, elles se développent alors très lentement. Il semble que, chez la plupart des Éponges, la durée de vie soit extrêmement longue et que les périodes de croissance se succèdent suivant des rythmes climatiques inconnus. Les marques de croissance sont rares, mais dans certains cas le squelette des parties anciennes est plus dense et plus altéré que dans les parties jeunes. Les Éponges d'une même espèce peuvent fusionner; malheureusement l'approche génétique du phénomène reste impossible.

Reproduction asexuée. Chez diverses Éponges marines, on observe la formation de *sorites* ou de *gemmules* (sortes de globules de 1 à 2 mm de diamètre). Les sorites de *Tethya* et de *Mycale* sont de petits fragments d'Éponge portés par une expansion en saillie d'un faisceau spiculaire de l'Éponge mère. Elles renferment toutes les catégories cellulaires ou presque et parfois une forte concentration d'archæocytes et peu de choanocytes. Les gemmules des *Suberites*, des *Ficulina*, etc., sont disposées en tapis entre l'Éponge et le substrat. Elles sont entourées

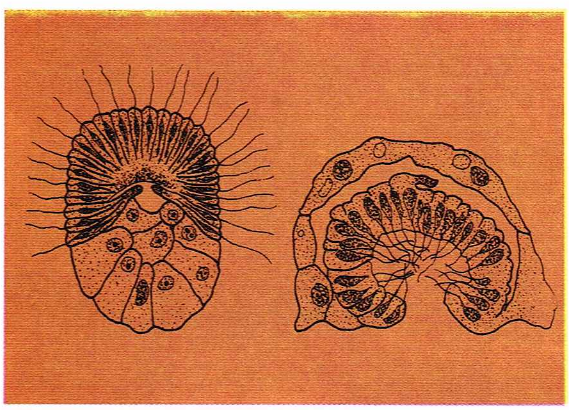

I.G.D.A.

◀ *Chez les Calcaires Hétérocœles (ici* **Sycon**), *la segmentation de l'œuf donne une larve amphiblastula à petite cavité centrale et à pôle antérieur formé de cellules flagellées (à gauche); cette larve se fixe par le pôle antérieur, s'aplatit et les cellules postérieures recouvrent les cellules flagellées qui donneront les choanocytes (à droite).*

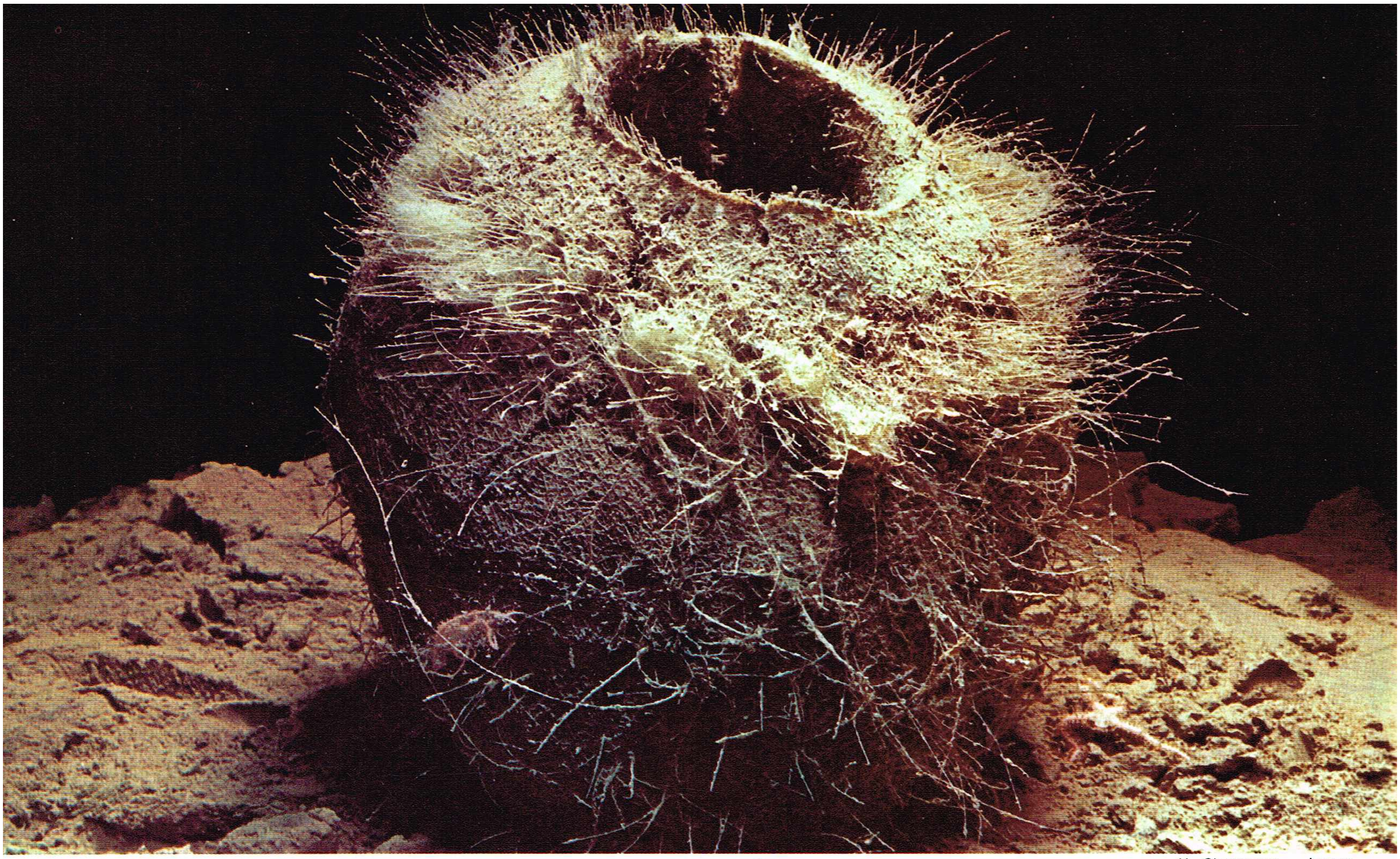

H. Chaumeton - Jacana

▲ *Un Hexactinellide,* **Pheronema grayi.**

▼ *Une espèce de Démosponge,* **Stelligera stuposa.**

d'une coque résistante et contiennent surtout des cellules chargées de réserves (archæocytes gemmulaires). Chez les Éponges d'eau douce, la gemmulation est devenue un phénomène de grande importance écologique et certaines Spongillides produisent des milliers de gemmules généralement composées d'archæocytes binucléés, à plaquettes vitellines (ARN-glycogène-protéines) et entourées d'une coque pneumatique; leur germination se déroulera plusieurs mois plus tard. La gemmulation est un phénomène complexe qui concerne toute l'Éponge. Les archæocytes gemmulaires se développent par phagocytose de nombreux trophocytes et constituent des agrégats après migration dans l'Éponge. L'école de Bruxelles a étudié en détail le mécanisme de la gemmulation, qui survient en été et en automne, et celui de la germination, qui se déroule au printemps. Celle-ci se caractérise par l'ouverture de la gemmule et la différenciation progressive des archæocytes qui forment une Éponge suivant un processus très semblable à celui du développement postlarvaire.

L'amputation ou la section d'une Éponge en plusieurs fragments est suivie rapidement de la cicatrisation. Cette propriété a été utilisée par certains promoteurs de la spongiculture. Des fragments d'éponge de toilette taillés en forme sphérique sont suspendus en collier sur des fils ou des cordages : chaque fragment cicatrise puis reprend sa croissance. Il est possible de préparer ainsi d'assez nombreux « noyaux » de culture à partir d'un spécimen récolté sur le terrain.

Les cellules des Éponges peuvent être séparées aisément par diverses techniques mécaniques et chimiques; après sédimentation, elles se réassocient en formant de petits agrégats sphérulaires dont la plupart, en s'étalant sur le support, reconstituent chacun une petite Éponge fonctionnelle. Cette remarquable capacité de dissociation et de réassociation montre que l'intégration des cellules de l'Éponge en un organisme est relativement faible. L'Éponge sert de matériel d'étude pour les recherches sur l'agrégation et l'adhésivité cellulaire. On a pu mettre en évidence le rôle indispensable du calcium, la plus ou moins grande spécificité des polysaccharides de surface ainsi que la présence d'un facteur protéique d'agrégation. Des essais de reconstitutions hérétospécifiques et de chimères bispécifiques ont montré qu'en dépit d'une tolérance apparente plus ou moins longue pendant les premières phases, les cellules de chacune des espèces en présence se séparent et constituent des Éponges distinctes. Le déroulement de la morphogenèse après la réagrégation cellulaire et la formation de sphérules est identique à la morphogenèse postlarvaire dès lors que la sphérule commence à s'étaler sur le support.

H. Chaumeton - Jacana

Distribution géographique et écologie

Les Éponges marines ont été trouvées dans tous les océans et dans toutes les mers, depuis la zone intertidale jusqu'au fond des fosses abyssales et hadales. Elles constituent d'importantes populations et représentent un des éléments essentiels de la faune benthique sessile. Bien qu'il soit difficile d'apprécier toutes les descriptions spécifiques, on peut considérer qu'il existe plus de cinq mille espèces d'Éponges. On en dénombre environ deux

cent cinquante dans la Manche et trois cents dans la Méditerranée, et chaque province géographique en compte un nombre équivalent. Les Éponges Calcaires habitent surtout les eaux fraîches et tempérées, à de faibles profondeurs. Les Éponges cornées sont particulièrement abondantes dans les eaux chaudes et peu profondes. Dans les régions bathyales et abyssales dominent les Hexactinellides et certains Démosponges adaptés à la vie sur les fonds meubles, où ils s'ancrent par un pédoncule de spicules. La spongine est particulièrement abondante chez les individus qui vivent dans les eaux de température élevée (de 20 à 30°) et se réduit à des plaques basales ou à des nœuds périspiculaires chez les espèces d'eau fraîche (de 0 à 15°). Les Éponges cornées, utilisées pour la toilette, proviennent de trois régions principales : Méditerranée orientale (Tunisie, Grèce), Caraïbes, Bahamas et Philippines. Des espèces voisines inutilisables sur le plan commercial sont répandues à de faibles profondeurs dans toutes les eaux chaudes océaniques, spécialement dans les diverses provinces indo-pacifiques. Les Éponges d'eau douce occupent tous les bassins fluviaux, les eaux courantes et stagnantes. Les espèces sont relativement peu nombreuses dans les régions paléarctiques et boréales ; elles sont abondantes en Afrique tropicale, où d'énormes populations occupent les talus des cours d'eau.

SYSTÉMATIQUE

Les Spongiaires sont divisés en trois classes : Calcisponges, Hexactinellides et Démosponges.

CALCISPONGES

Les Calcisponges, ou Calcaires, sont caractérisés par leurs spicules constitués de carbonate de calcium. Leur forme fondamentale est triactine, c'est-à-dire composée de trois rayons généralement situés dans un plan et formant trois angles égaux de 120°. Il existe souvent des tétractines dont le quatrième actine fait saillie dans les cavités exhalantes ou se projette vers l'extérieur, et des diactines obliques ou tangentiels formant un revêtement externe. En général, deux cellules participent à l'élaboration de chaque rayon spiculaire et six cellules s'associent donc pour former le spicule triactine typique. On divise les Calcisponges en trois ordres : les *Homocœles (Clathrina)*, les *Hétérocœles (Leucosolenia, Sycon, Leuconia)* et les *Pharétronides* à squelette rigide, qui ont été surtout abondantes du Permien au Crétacé. Toutes les Éponges Calcaires sont marines et la plupart sont communes sur les plateaux continentaux.

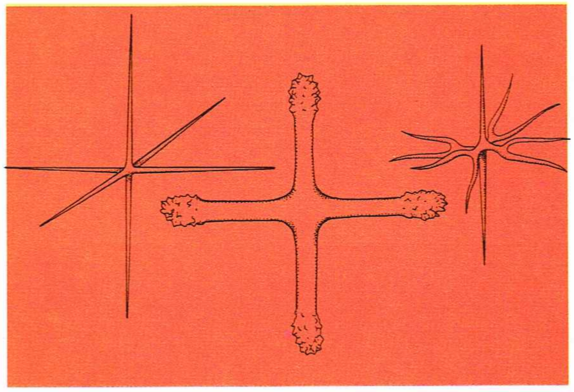

I.G.D.A.

◀ ***Les spicules des Hexactinellides sont siliceux et fondamentalement de type triaxial; lorsque les six rayons persistent, le spicule est dit hexactine (à gauche), mais il peut y avoir réduction du nombre des branches (au milieu), ou division dichotomique (à droite).***

HEXACTINELLIDES

Ces Éponges sont caractérisées par leur squelette à spicules siliceux dont la structure fondamentale est triaxiale. Les trois axes sont perpendiculaires entre eux et le spicule à six rayons est appelé hexactine. Par la réduction de certains de ces rayons, par le développement d'une ornementation ou à la suite d'une multiplication par di- ou trichotomie, l'hexactine primaire se transforme en diverses catégories de spicules dont chacune occupe une position constante dans l'Éponge. Certains spicules en touffes basales assurent l'ancrage, d'autres la protection de la surface contre le sédiment ou le soutien de cribles ou de cavités aquifères, etc. L'anatomie des Hexactinellides est très mal connue, car il est difficile de les récolter vivants en bon état et d'éliminer sans dommage la masse de silice qu'ils contiennent. On les divise en *Amphidiscophores,* à spicules indépendants (*Hyalonema,* etc.), et en *Hexastérophores,* à spicules souvent soudés, formant un squelette en treillis *(Farrea, Aphrocallistes)*. Les fossiles sont nombreux et connus depuis le Cambrien ; ils sont abondants et variés depuis le Dévonien.

DÉMOSPONGES

Les Éponges appartenant à cette classe ont une organisation anatomique de type leuconoïde avec des chambres choanocytaires sphériques ou ovoïdes. Le squelette minéral est siliceux ; les spicules sont formés de silice hydratée amorphe (opale) entourant un filament axial contenant 4 % de protéines et sont élaborés dans une cellule mobile (ou sclérocyte) qui s'étire lors de la croissance en longueur du spicule. Les premiers formés

▼ ***Les spicules des Calcisponges (à gauche), composés de carbonate de calcium, ont une forme fondamentale de type triactine, c'est-à-dire à trois rayons, mais ils peuvent être aussi diactines ou tétractines. Exemple d'association entre*** **Suberites domuncula,** ***Démosponge fixé sur une coquille, et un pagure vivant dans cette coquille (à droite).***

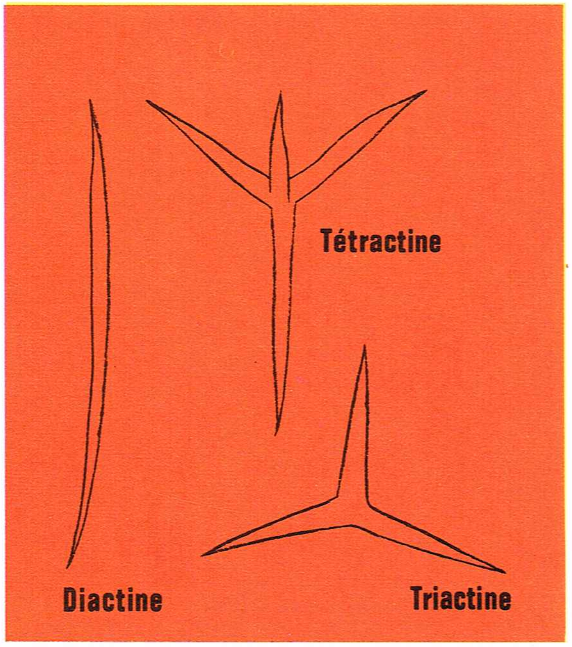

Richard Colin

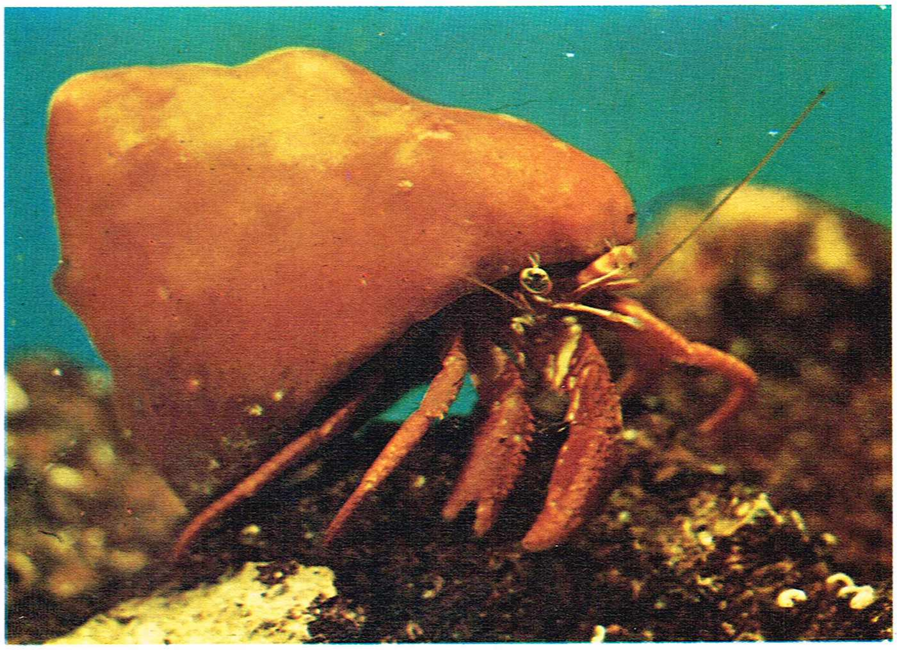

G.S. Giacomelli

s'implantent perpendiculairement au support de l'Éponge, et les sclérocytes se déplaçant avec leur spicule se disposent en charpente caractéristique de l'espèce. Les fines fibrilles de spongine peuvent former un épais feutrage en lame à la base de l'Éponge et entourent les extrémités des spicules en les liant, ou les enferment complètement dans des fibres dites cornées. Chez les éponges de toilette, les spicules manquent et le squelette est composé de fibres de spongine qui se renforcent de grains de sable et de débris divers. La qualité marchande dépend, notamment, de la densité de ces particules étrangères captées par l'Éponge.

On divise les Démosponges en trois sous-classes :

Les *Homoscléropherides* sont des Éponges de faibles dimensions à très petits spicules semblables aux spicules calcaires (triactines et dérivés). Les *Oscarella* n'ont aucun squelette.

Les *Tétractinomorphes* sont généralement ovipares; la spongine est assez rare et la charpente est radiaire ou axiale chez les *Astrophorida (Stelletta, Geodia)* et les *Spirophorida (Tetilla)*; les spicules principaux sont tétraxones et les microsclères sont des asters ou des spires. Les espèces littorales sont nombreuses, mais les formes abyssales ne sont pas rares. Les *Desmophorida,* dont les fossiles sont connus du Cambrien au Quaternaire, ont un squelette de silice composé de spicules soudés. Les *Hadromerida* groupent des Éponges à spicules monaxones et monactines. Beaucoup sont littorales comme les *Tethya* (oranges de mer), les *Polymastia* (portant des papilles) et les *Suberites.* Certaines espèces de *Cliona* perforent le calcaire et forment des galeries dans les coquilles, les madrépores et le coralligène, qu'elles contribuent à disloquer. Les *Axinellida* sont des Éponges dressées ou encroûtantes, souvent flabellées, foliacées, buissonnantes ou en entonnoir *(Axinella, Raspailia)*. La spongine y est plus abondante que dans les ordres précédents.

Les *Céractinomorphes* sont des Éponges qui incubent leurs embryons et produisent de la spongine, parfois en abondance. Les spicules principaux sont toujours monaxones. Les *Poecilosclerida* sont nombreux et très variés; les petits spicules ont des formes très diverses facilitant la classification. Les *Halichondrida,* comme les *Halichondria* et les *Hymeniacidon* des côtes atlantiques françaises, ont un squelette siliceux confus avec peu de spongine. Les *Haplosclerida* sont généralement chargés en spongine et les spicules y sont parfois vestigiaux, notamment dans les eaux chaudes *(Callyspongia, Spinosella)*. La charpente est réticulée chez *Haliclona, Reniera, Petrosia* et *Calyx.* Les Éponges d'eau douce fluviales et lacustres s'apparentent à cet ordre. Les *Dictyoceratida* et *Dendroceratida* sont dépourvus de spicules siliceux; leur squelette réticulé ou dendritique est formé de fibres de spongine *(Spongia, Hippospongia)*. Les éponges commerciales sont des *Dictyoceratida* vivant dans les eaux chaudes.

On a découvert quelques Spongiaires remarquables qui ont l'apparence de polypiers et produisent un squelette massif calcaire et des spicules siliceux dispersés; ces Sclérosponges sont proches de divers fossiles des terrains primaires et secondaires.

Les Spongiaires, dont l'organisation n'a sans doute guère changé depuis les temps géologiques anciens, sont actuellement très répandus dans toutes les eaux du globe, où leurs populations sont souvent considérables. Ils jouent un rôle important dans l'équilibre des écosystèmes benthiques.

BIBLIOGRAPHIE

BRIEN P., TUZET O., SARA M. et VACELET J., LÉVI C., *Spongiaires, in* GRASSÉ P.P., *Traité de zoologie* III, 1, 1974. - FRY W. C., *Biology of Sponges,* Symposium Zool. Soc. of London, vol. 25, éd. 1970. - HYMAN L.H., *The Invertebrates. Protozoa Through Ctenophora,* New York, 1940. - TOPSENT E., *Spongiaires,* C. R. Campagnes Prince Albert Ier de Monaco. 1928.

▶ ***Démosponges Tétractinomorphes : une forme dressée, à gauche*** **(Axinella damicornis),** ***et une buissonnante, à droite*** **(Axinella verrucosa).**

G.S. Giacomelli

G.S. Giacomelli

▶ ***Démosponges Céractinomorphes : à gauche,*** **Petrosia;** ***à droite,*** **Ectyon.**

A. Margiocco

A. Margiocco

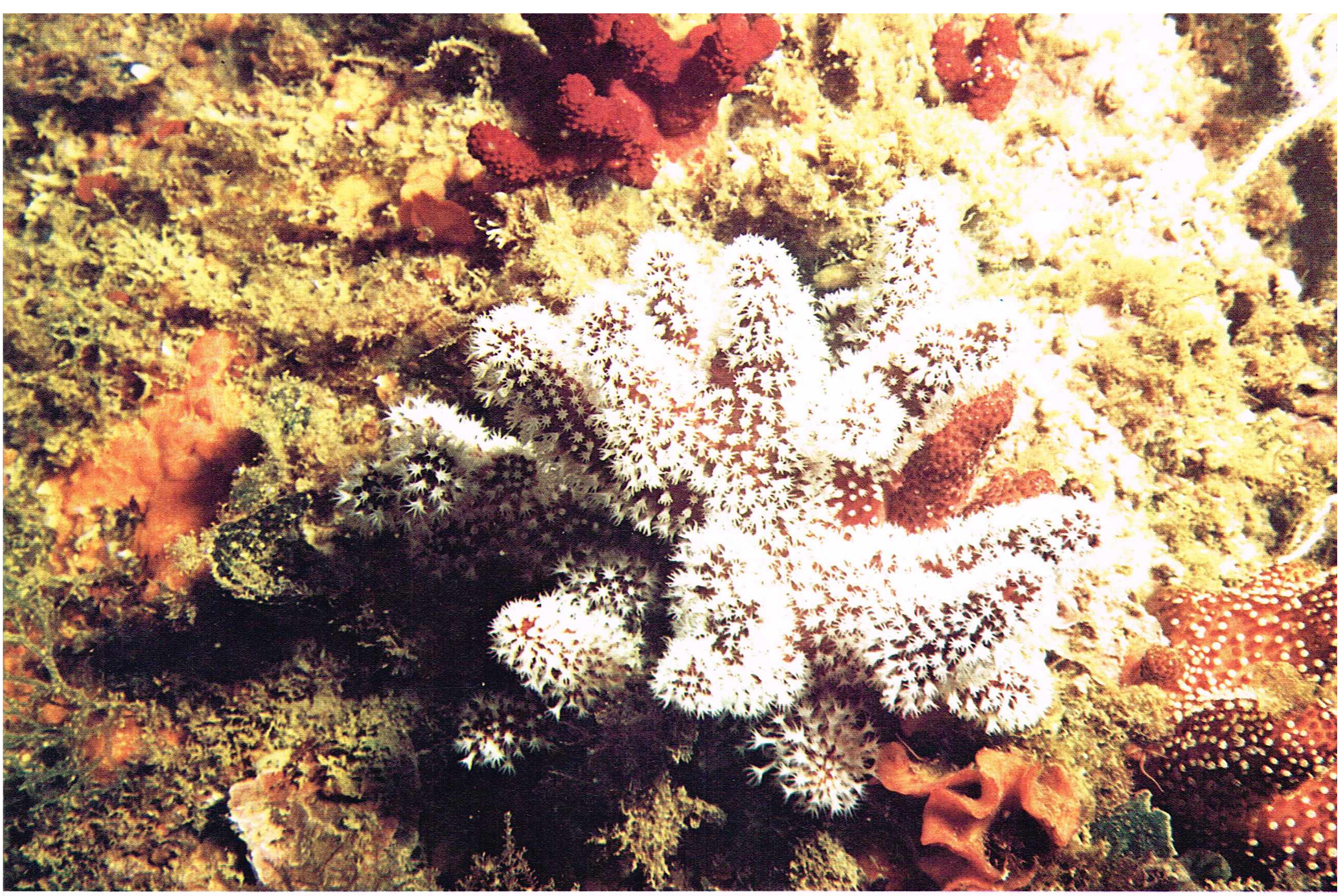

D. Perche

▲ ***Cet Alcyonaire appartient à l'embranchement des Cnidaires qui comprend aussi des groupes bien connus comme les coraux et les anémones de mer.***

LES CNIDAIRES

Les Cnidaires constituent le deuxième embranchement du sous-règne des Métazoaires.

Leurs représentants se caractérisent par une symétrie radiaire accompagnée parfois d'une symétrie bilatérale; la paroi du corps n'est formée que de deux couches cellulaires de nature épithéliale; ce sont donc des Métazoaires diploblastiques. La couche externe ou ectoderme est séparée du feuillet interne ou endoderme par une lame plus ou moins épaisse de gelée anhiste et riche en eau : la mésoglée.

Le corps possède une cavité unique, le cœlentéron, à la fois cavité générale et gastrique; l'absence de cœlome (issu du mésoderme) fait ranger les Cnidaires parmi les Acœlomates.

Des cellules très spécialisées, urticantes, d'où leur nom de cnidoblastes (de κνίδη = ortie) ou nématoblastes, sont localisées à des points stratégiques de l'ectoderme; elles ont un rôle dans la capture de la nourriture.

Les Cnidaires renferment un peu moins de dix mille espèces, toutes aquatiques, la plupart marines, et carnivores. Les sexes sont presque toujours séparés, et les individus peuvent vivre soit isolés, soit le plus souvent groupés en colonies temporaires ou permanentes. Par leur mode de vie, ils appartiennent à la faune sessile benthique ou à la faune planctonique.

Décrits dès la plus haute antiquité, ils ont été longtemps classés parmi les Zoophytes à cause de la ressemblance qu'offrent leurs colonies avec un minuscule arbuste : c'étaient des « Animaux-plantes ». Mais on doit à Peysonnel, puis à Milne-Edwards et enfin à Lacaze-Duthiers leur place dans la classification zoologique, dans l'embranchement des Cœlentérés (de κοῖλος = creux, et de ἔντερον = intestin); ces trois savants ont démontré d'une part le caractère animal et d'autre part la complexité du développement et du cycle de vie des Cœlentérés, lesquels sont actuellement divisés en deux embranchements distincts : les Cnidaires et les Cténaires.

Organisation générale

La plupart des Cnidaires ont deux stades dans leur cycle de vie, sans parler de la phase larvaire : un stade fixé donc benthique — le polype — et un stade libre planctonique — la méduse.

Le corps du polype a la forme d'un sac fixé à une extrémité sur le substrat par une sole pédieuse. A l'autre extrémité, au sommet d'un petit renflement dessinant une zone hypostomiale, s'ouvre le seul orifice du corps, la bouche, entourée par de fines digitations ou tentacules; elle est dirigée vers le haut et met en communication avec l'extérieur la cavité gastrique dont les ramifications se terminent dans les tentacules. Le corps se divise ainsi en trois régions chez les formes solitaires; ces régions vont persister dans les formes coloniales, mais avec des anastomoses qui leur font perdre leur individualité. Le polype est rarement nu; en général, il est enfermé dans un périsarc mince de nature chitineuse ou calcaire, sécrété par l'ectoderme.

La méduse, qui représente la forme libre et solitaire, a, au contraire, l'orifice buccal dirigé vers le bas, et la meilleure image que l'on puisse donner pour faire comprendre son organisation est celle d'une cloche transparente dont le battant correspond à la région œsophagienne *(manubrium)*. La cloche, ou ombrelle, est ornée de fines digitations : les tentacules, implantés sur le pourtour du cercle inférieur retréci (chez les Hydroméduses seulement) par un voile, ou velum, délimitant une cavité sous-ombrellaire dans laquelle pend le manubrium. La bouche s'ouvre à l'extrémité de ce manubrium, donc le plus souvent dans la cavité sous-ombrellaire; elle donne accès à un court œsophage qui débouche dans l'estomac situé au sommet de la cloche. Il en part des canaux radiaires, au nombre de quatre ou d'un multiple de quatre, qui rejoignent un canal circulaire ou marginal bordant l'ouverture de l'ombrelle. Ce canal envoie des canalicules dans chaque tentacule

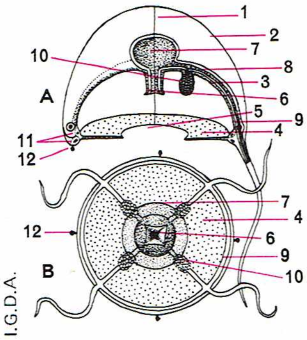

▲ ***Schéma d'une méduse craspédote vue en coupe longitudinale (A) et par la face orale (B); 1, ombrelle; 2, exombrelle; 3, épithélium de la sous-ombrelle avec des myofibrilles; 4, velum; 5, ouverture de la cavité sous-ombrellaire; 6, bouche; 7, estomac; 8, canal radiaire; 9, canal marginal; 10, gonade; 11, cordon nerveux; 12, organe des sens.***

▼ ***Schéma d'une méduse montrant les deux plans de symétrie radiaire (tétramérie) et l'axe d'intersection de ces deux plans.***

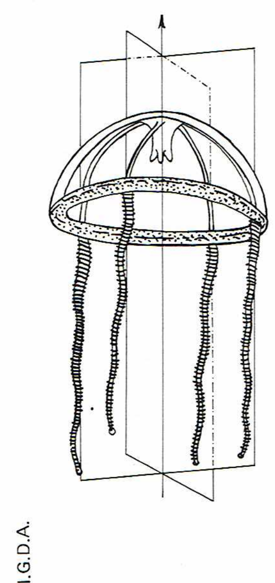

EMBRANCHEMENT DES CNIDAIRES

Classe des Hydrozoaires

Super-ordre des Hydrophores
ordres : Hydrides
Athécates
Thécates
Hydrocoralliaires
Limnoméduses
Actinulides
Trachyméduses
Narcoméduses
Super-ordre des Siphonophores
ordres : Disconanthes
Siphonanthes

Classe des Scyphozoaires

ordres : Stauroméduses
Cuboméduses
Coronates
Semaeostomes
Rhizostomes

Classe des Anthozoaires

Sous-classe des Octocoralliaires
ordres : Stolonifères
Télestacés
Alcyonaires
Cœnothécaliés
Gorgonaires
Pennatulaires
Sous-classe des Hexacoralliaires
ordres : Actiniaires
Scléractiniaires
= Madréporaires
Zoanthaires
Cérianthaires
Antipathaires

et est flanqué de deux cordons nerveux qui se prolongent également dans les tentacules. La méduse présente plusieurs plans de symétrie : deux perradiaires, deux interradiaires et quatre adradiaires; les gonades se développent dans les plans perradiaires, sur les canaux ou sur le manubrium. Elle possède des organes des sens : ocelles ou yeux rudimentaires disposés à la base des tentacules, et statocystes ou organes d'équilibration situés entre les tentacules.

Chez les Siphonophores, on assiste à une organisation de type colonial avec division du travail entre les différents individus. Les stades du polype et de la méduse ne se reconnaissent pas dans ces colonies pélagiques, mais la structure cellulaire reste la même. Chez les Scyphozoaires et les Anthozoaires, la cavité gastrique possède deux particularités : d'une part elle communique avec la bouche par l'intermédiaire d'un pharynx tapissé par l'ectoderme, d'autre part elle est subdivisée incomplètement par des cloisons radiaires.

Organisation cellulaire. Bien que constituée par deux couches seulement, l'organisation cellulaire est complexe, mais de type essentiellement épithélial monostratifié.

L'ectoderme limite le corps extérieurement. Il est fait de cellules de revêtement prismatiques entre lesquelles sont dispersées des cellules à fonctions bien définies : des cellules glandulaires, très vacuolisées, à cytoplasme granuleux, sécrétant du mucus sur leur face libre; des cellules épithélio-musculaires, à corps prismatique, mais dont la base s'étale en une sole renfermant des myofibrilles; des cellules sensorielles, qui possèdent à leur extrémité libre une soie tactile et à l'autre extrémité un prolongement venant se raccorder soit sur une cellule épithélio-musculaire, soit sur une des cellules nerveuses multipolaires disséminées à la base de l'ectoderme, et qui constituent un réseau nerveux rudimentaire dépourvu de centre et de nerfs. Sur ces cellules s'anastomosent également les cellules urticantes : les cnidoblastes, ou nématoblastes, qui ont donné son nom à l'embranchement.

Le nématoblaste est ovoïde, son extrémité libre est ornée d'un prolongement tactile, le cnidocil; le cytoplasme est repoussé à la périphérie par une importante vacuole, ou nématocyste, qui vient s'appliquer contre la face libre de la cellule. Ce nématocyste contient un filament urticant enroulé en hélice, hérissé d'épines disposées le long de trois spirales et supporté par une hampe également ornée; il baigne dans un liquide venimeux, l'actino-congestine. Un effet de choc perçu par le cnidocil est transmis à la cellule nerveuse puis aux myofibrilles dont les contractions compriment la paroi du nématocyste, laquelle cède, libérant le filament. Celui-ci se déroule, se dévagine et va inoculer le liquide venimeux à la cause du choc, en général une proie (petit Crustacé, larve de Poisson ou Chétognathe). Ces nématoblastes ne sont pas répartis régulièrement à la surface du corps, mais agglomérés en des points bien particuliers où leur rôle dans la capture des proies peut s'effectuer de manière optimale : on les rencontre sur les tentacules, disposés en amas, en anneaux ou en boutons terminaux, sur les lèvres, et, dans les formes coloniales, sur des individus chargés de défendre la colonie : les dactylozoïdes. Chez les jeunes méduses, ils tapissent souvent la surface exombrellaire ou dessinent des ornementations. Chez les Siphonophores, ils sont rassemblés sur les tentilles des très longs tentacules ou filaments pêcheurs. La forme des nématocystes est très variable d'une espèce à l'autre, de même que la disposition des épines sur la hampe et le filament, mais ces caractères sont fixes pour une espèce donnée, si bien qu'actuellement, grâce à l'observation au microscope électronique, les nématocystes prennent une place prépondérante comme critère de détermination. Toutefois, leur étude nécessite des techniques spéciales qui laissent encore toutes leurs valeurs spécifiques aux critères macroscopiques. Le nématoblaste ne fonctionne qu'une fois. Son renouvellement est assuré par des cellules interstitielles indifférenciées situées à la base de l'épithélium prismatique; ayant conservé leur caractère embryonnaire, elles peuvent évoluer dans l'une ou l'autre catégorie de cellules, même germinales.

L'endoderme tapisse l'unique cavité du corps. Il est constitué essentiellement de cellules digestives flagellées dont le rôle dans la digestion est phagocytaire, de cellules glandulaires sécrétant une enzyme qui s'écoule dans la cavité gastrique, et de cellules épithélio-musculaires à myofibrilles, orientées perpendiculairement par rapport à celles de l'ectoderme.

Entre les deux feuillets s'étale une lame mince et gélatineuse, la mésoglée, peu épaisse chez les polypes, mais très abondante dans la zone apicale des ombrelles de méduses. Elle ne possède pas de cellules caractéristiques, mais peut être traversée par les anastomoses nerveuses ou par des cellules interstitielles en migration. Constituée par des mucoprotéines riches en eau, elle assure une densité idéale aux méduses et aux Siphonophores, favorisant ainsi la flottaison, la transparence et la position verticale au sein des eaux. Toutefois, étudiée avec les méthodes nouvelles de chimie biologique, cette couche semble constituée de collagène ou de mésenchyme; sa composition ne paraît plus aussi homogène à l'intérieur de l'embranchement.

L'organisation interne est des plus simplifiées, puisque réduite au seul appareil digestif, qui assume également les fonctions de circulation et d'excrétion : les produits de la digestion s'écoulent dans les canaux radiaires et marginaux, et, par un retour en sens inverse, les déchets sont rejetés par la bouche. Il n'y a donc pas d'appareils circulatoire et excréteur différenciés, sauf chez les velelles et les porpites, Siphonophores un peu particuliers, qui présentent une couche cellulaire, dite rénale, formée de

cellules excrétrices contenant des cristaux de guanine. Le système nerveux est réduit à quelques neurones dispersés dans l'ectoderme et aux deux cordons nerveux marginaux des méduses. Les sexes sont en général séparés. L'appareil génital est constitué de gonades, amas de cellules germinales localisées sur les canaux radiaires ou sur le manubrium des méduses, dans les gonophores des polypes, les gamozoïdes des formes coloniales, et dans des cloches différenciées, les gonozoïdes, des Siphonophores.

Reproduction

Reproduction sexuée. La gamétogenèse se produit dans les gonades, elle aboutit à des spermatozoïdes d'environ 5 μ de long, libérés par déchirure de la paroi des glandes, et à des ovules de taille variant, suivant la nature de la fécondation, de quelque 10 μ à plus de 100 μ. La fécondation est externe ou interne et se fait alors à l'intérieur de la gonade femelle. Les œufs sont alécithes ; la segmentation, égale et totale, donne dans la plupart des cas, après une gastrulation par délamination ou par migration cellulaire, une larve libre, nageuse, de 1 mm de longueur, soit ciliée, la planule, soit ornée de petits tentacules, l'actinule. L'une et l'autre présentent deux zones : une zone corticale, l'ectoplasme, formée de cellules palissadiques, l'autre interne, l'endoplasme, à cellules irrégulières. Ces deux zones vont évoluer pour donner les deux feuillets de l'adulte, au cours d'une métamorphose qui est une phase critique dans la vie de l'individu : planule et actinule tombent sur le fond, se fixent et se transforment en polype.

Reproduction asexuée. Pour assurer la dissémination ou pour parvenir à créer une colonie, polypes, méduses et Siphonophores peuvent mettre en œuvre un autre mode de reproduction, asexué, par bourgeonnement ou gemmiparité. Ainsi, chez l'hydre, dans des conditions optimales de température et de nourriture, apparaissent sur le corps des renflements, constitués par les deux feuillets, qui s'ornent de tentacules avant de se détacher, réalisant ainsi une colonie temporaire à existence brève. Mais dans le cas de formes coloniales, chaque bourgeon reste réuni à l'organisme mère par un pédoncule ou stolon, sauf, bien entendu, les méduses, qui, issues également de bourgeons, se détachent pour mener une vie libre pélagique. Le stolon a la structure d'un fin canal dont la lumière, ou cœnosarc, est tapissée par l'endoderme et relie les cavités gastriques des différents polypes. Certaines méduses présentent aussi le mode de reproduction suivant : les bourgeons naissent sur l'emplacement des futures gonades, dont ils précèdent souvent l'apparition, donc sur les canaux radiaires ou sur le manubrium, exceptionnellement à la base des tentacules. Mais elles peuvent également se multiplier par scissiparité, ce qui est le cas de nombreuses Leptoméduses ; une polygastrie précède alors le phénomène de division.

Le polype issu de l'œuf est l'oozoïde, par opposition aux autres polypes formés par bourgeonnement, les blastozoïdes. Chez les Scyphozoaires, l'oozoïde prend le nom de scyphistome ; par strobilisation, il donne des éphyrules qui évoluent en méduses ou Scyphoméduses.

L'activité des cellules interstitielles joue un grand rôle dans ce mode de reproduction asexuée, de même que dans les phénomènes de régénération.

Régénération. Chaque tronçon sectionné du corps d'une hydre redonne un Animal entier avec une orientation : la face dirigée vers la bouche reforme une bouche et une couronne de tentacules ; il y a polarité. De même, les méduses régénèrent leurs tentacules mutilés par la pêche. Cette aptitude est d'autant plus développée que cet embranchement des Cnidaires se situe au bas de l'échelle zoologique et qu'il possède des cellules interstitielles à caractère embryonnaire, pouvant donc évoluer dans l'une ou l'autre catégorie de cellules manquantes.

Le schéma général du cycle de vie des Cnidaires peut se résumer ainsi : de l'œuf s'échappe une larve planule ou actinule qui se fixe sur le substrat et se transforme en polype. Par bourgeonnement, le polype forme d'autres individus et, parmi eux, les individus reproducteurs, méduses ou gonozoïdes, sur lesquels mûrissent les cellules germinales. Ce cycle peut présenter des raccourcissements : certaines larves planules ou actinules évoluent directement en méduses.

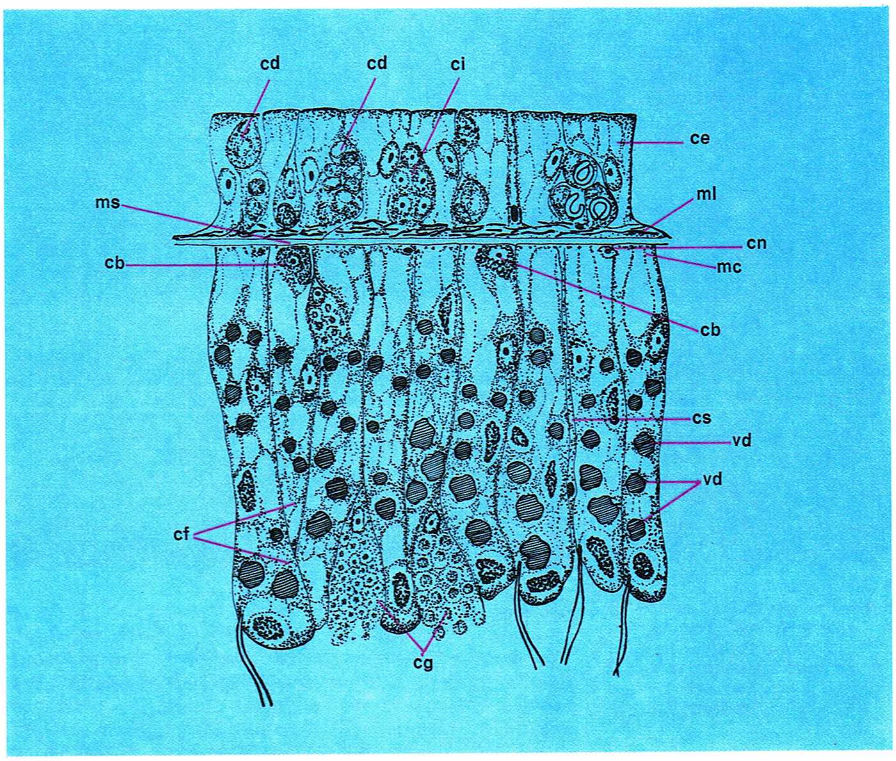

▲ *La paroi d'un Cnidaire est constituée de deux assises de cellules, séparées par une lame gélatineuse ou mésoglée. cd, cnidoblaste ou nématoblaste ; ce, cellule épithélio-musculaire ; ci, cellule interstitielle ; ml, myofibrille longitudinale ; ms, mésoglée ; cb, cellule basale interstitielle en migration ; cg, cellule glandulaire ; cn, cellule nerveuse ; cf, cellule endodermique flagellée ; cs, cellule sensorielle ; mc, myofibrille circulaire ; vd, vacuole digestive.*

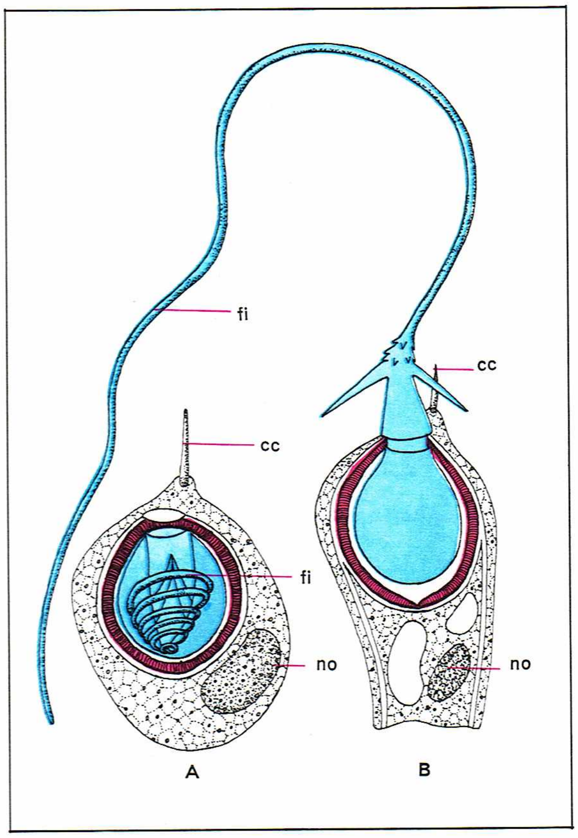

◀ *Chez les Cnidaires, l'ectoderme renferme des cellules urticantes, les cnidoblastes ou nématoblastes ; cellule au repos (A) et avec son filament dévaginé (B) ; cc, cnidocil ; fi, filament ; no, noyau.*

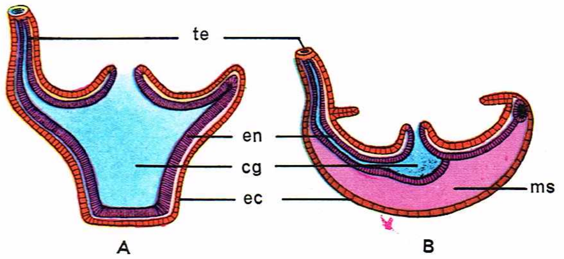

◀ *Coupes longitudinales schématiques d'un polype (A) et d'une méduse (B) ; cette dernière est représentée à l'envers, c'est-à-dire la face orale tournée vers le haut ; ec, ectoderme ; en, endoderme ; cg, cavité gastrovasculaire ; ms, mésoglée ; te, tentacule.*

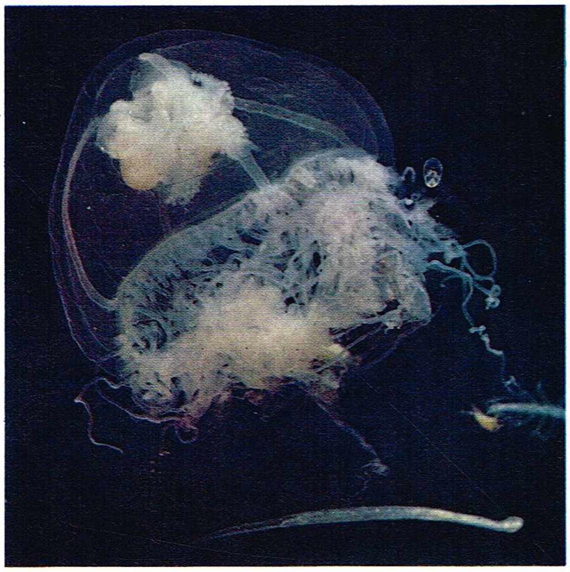

G.S. Giacomelli

▶ *Une méduse vivante capturant deux proies : un Chétognathe et une larve d'Annélide.*

Physiologie

La nutrition est de type carnivore. Les proies sont ingérées et, dès leur arrivée dans l'estomac, sont attaquées par des enzymes particulièrement actives : il n'est pas rare de trouver dans le plancton une méduse avalant un Ver dont l'extrémité dans l'estomac est déjà désagrégée tandis que la bouche continue d'aspirer l'autre extrémité. La voracité est tout aussi spectaculaire : une méduse de 1 cm de diamètre peut ingérer douze à quinze larves de Crustacés en une seule fois et dilater ainsi considérablement son estomac.

La locomotion des méduses et des Siphonophores est assurée par la contraction rythmique du bord de l'ombrelle qui propulse l'Animal vers l'avant. Chez l'hydre, la contraction des cellules musculaires provoque quatre types de déplacements : reptation de la sole pédieuse sur le substrat, arpentage, culbute et enfin nage.

La perception est assurée par des organes spéciaux ; en particulier chez les méduses, les ocelles sont des yeux très rudimentaires, situés à la base des tentacules et constitués par un groupe de cellules pigmentées en brun ou rouge et de cellules sensorielles entourant une sorte de lentille formée par l'ectoderme. On leur suppose un rôle dans la perception de l'intensité lumineuse avec pour effet le déclenchement du mécanisme de migrations verticales nycthémérales. Toutefois, certaines méduses dépourvues d'ocelles présentent également un rythme journalier dans leurs déplacements verticaux.

L'équilibration est perçue au niveau de statocystes disposés sur le bord ombrellaire chez les méduses. Ces micro-organes sont de plusieurs types : le plus fréquent est formé d'une vésicule creuse, ciliée, tapissée de cellules sensorielles et contenant un ou plusieurs grains calcaires : les statolithes. La position des grains sur les cils renseigne la méduse sur son orientation dans l'eau. Chez les Siphonophores, cette équilibration peut être du ressort d'un organe spécial, le pneumatophore, situé au sommet de la colonie, dont le rôle est le maintien de la verticalité.

Les associations

Montrant déjà une grande diversité dans l'organisation des colonies, certains Cnidaires réalisent également des associations privilégiées entre eux, ou avec des individus d'autres embranchements zoologiques ou botaniques soit par parasitisme, soit par commensalisme, soit plus simplement par symbiose.

Le *parasitisme* est déjà réalisé par le bourgeon qui se développe sur l'organisme mère jusqu'à la libération. Certaines larves de Narcoméduses sont des parasites temporaires d'autres méduses ; elles s'accrochent à la sous-ombrelle au niveau de la cavité gastrique. C'est dans cette même position que se rencontre un Hypérien parasitant des Leptoméduses ou des Siphonophores.

Le *commensalisme* affecte des actinies très répandues sur les côtes : *Sagartia parasitica* se fixe sur une coquille habitée par une espèce de bernard-l'hermite, *Pagurus striatus,* mais peut encore vivre isolément. Ce n'est plus le cas d'*Adamsia palliata,* associé à *Eupagurus prideauxi* et qui dirige sa bouche vers la face ventrale du pagure.

La *symbiose* se rencontre chez l'hydre d'eau douce, *Hydra viridis,* qui héberge dans son endoderme des Algues microscopiques, les zoochlorelles, ce qui lui fournit un apport alimentaire. C'est également en association avec une autre Algue verte marine, *Zooxanthella,* que vivent la plupart des coraux de la zone supérieure, bénéficiant de l'utilisation des produits azotés et phosphorés par les Algues qui fonctionnent un peu comme des cellules excrétrices ; mais ce ne sont jamais des symbioses parfaites, car l'hôte se développe très bien en l'absence de l'Algue ; l'association de l'anémone et du poisson-clown permet à ce dernier de trouver un refuge dans les tentacules de l'anémone dont il assure le nettoiement.

Intérêt des Cnidaires

Bien que situé au bas de l'échelle de la classification zoologique, cet embranchement a une grande importance. D'abord, il permet d'envisager des problèmes de biologie, entre autres le *bourgeonnement* en individus tous identiques à l'individu mère ou très différenciés, avec chacun une fonction bien particulière (il y a là un déterminisme du bourgeonnement), la *régénération* des parties mutilées grâce aux cellules interstitielles et la *liaison* entre le *soma* et le *germen* (ces mêmes cellules interstitielles assurent aussi bien la formation des nématoblastes que celle des cellules germinales ; les deux lignées somatique et germinale ne sont donc pas parfaitement séparées) ; enfin les problèmes que pose la vie en association : parasitisme, commensalisme, symbiose et surtout vie coloniale.

La division du travail entre les différents membres d'une colonie démontre une adaptation très poussée à ce mode de vie, adaptation d'autant plus parfaite qu'elle n'est pas liée à un biotope : elle se réalise chez les formes fixées et chez les formes pélagiques néritiques ou océaniques.

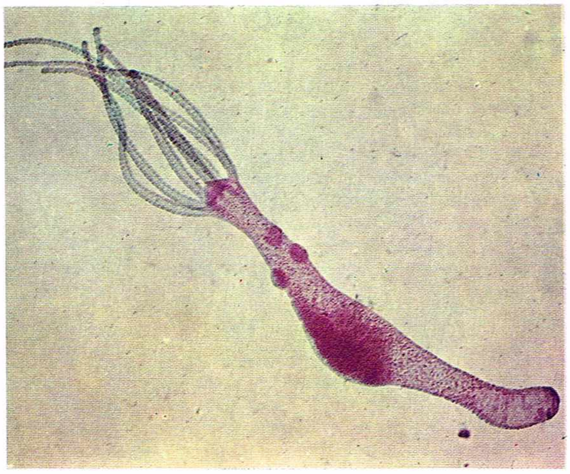

Bavestrelli, Bevilacqua, Prato

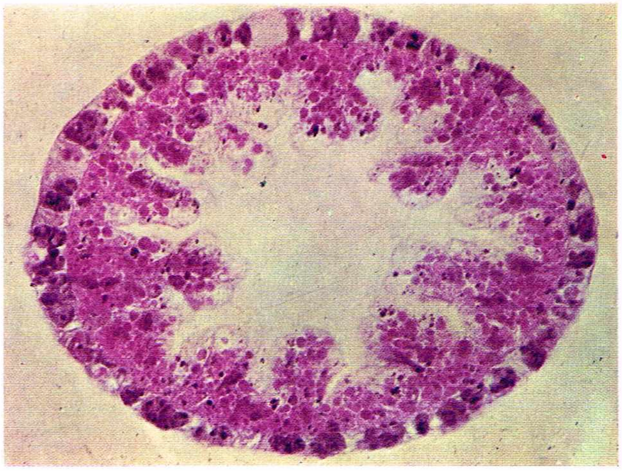

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ *A gauche,* Hydra viridis, *un Hydrozoaire commun dans les eaux douces (× 25). A droite, une section transversale du corps de cette même espèce (× 250) ; ces préparations sont colorées pour l'examen au microscope.*

Les Cnidaires contribuent au peuplement des eaux tant littorales qu'océaniques. Ils ont de ce fait une place dans la chaîne alimentaire marine, et leur type de nutrition, carnivore, les range parmi les prédateurs : ils occupent le troisième niveau trophique. Ils opèrent une prédation sur les zooplanctontes : Crustacés herbivores et carnivores, Chétognathes, œufs et alevins de Poissons, voire méduses, car ces dernières sont parfois cannibales. En revanche, les velelles sont mangées par des squales et certains coraux sont broutés par des Mollusques. Toutefois, l'apport alimentaire que constituent ces Animaux reste encore à démontrer car ils contiennent 90 % d'eau ; mais ils sont appréciés dans la cuisine chinoise, séchés puis accommodés en salade. C'est d'ailleurs une des plus grandes formes du zooplancton, *Cyanea capiliata,* atteignant 2 m de diamètre, qui subit ce sort.

Le rôle des Cnidaires du point de vue géologique n'est plus à démontrer : les polypes à thèque calcaire ont contribué à construire des récifs dès l'ère primaire, devenant très luxuriants au Jurassique, notamment dans le Jura français. Ces récifs coralliens frangeants, barrières ou atolls servent de refuge à une population bien adaptée à ce biotope particulier, utilisé comme exemple pour les études d'associations faunistiques.

L'organisation fort simplifiée des Cnidaires rend leur physiologie très accessible sans dissection, ce qui facilite l'étude des enzymes digestives protéolytiques. De plus, la morphologie de leurs statocystes est si proche de celle de l'organe de l'équilibration situé dans l'oreille interne de l'homme que la N.A.S.A. a un programme d'études utilisant les méduses à statocystes comme sujets de laboratoire soumis aux conditions d'apesanteur.

Ces possibilités de recherches à partir des Cnidaires peuvent paraître bien insignifiantes en regard des nuisances occasionnées par les piqûres de ces Animaux, dues à l'actino-congestine et pouvant entraîner la mort. Mais c'est justement à cause de ce désagrément que les Cnidaires ont fait l'objet de recherches intensives qui ont conduit deux médecins du début du siècle, Richer et Portier, à bord de *la Princesse Alice,* à mettre au jour les phénomènes d'anaphylaxie et tous les problèmes qui sont liés à l'immunité et aux maladies allergiques.

SYSTÉMATIQUE

Les critères de détermination sont essentiellement fondés sur la morphologie des méduses (présence ou non de cloisons gastriques, présence ou non de velum) et sur la symétrie des polypes. Les Cnidaires se divisent en trois classes : les Hydrozoaires, dont les méduses ont une cavité gastrique non cloisonnée et un bord ombrellaire rétréci par un velum (méduses craspédotes, de κράσπεδον = frange) ; les Scyphozoaires, dont les méduses ont un estomac cloisonné et un bord ombrellaire sans velum (méduses acraspédotes), et les Anthozoaires, qui existent uniquement sous la forme de polypes, avec une symétrie hexa- ou octomère. Chaque classe est à nouveau divisée : ainsi les Hydrozoaires renferment deux super-ordres, les Hydrophores, comprenant des individus isolés ou réunis en colonies bourgeonnant ou non des méduses, et les Siphonophores, dont les individus sont toujours réunis en colonies pélagiques présentant un polymorphisme très poussé. Les Scyphozoaires sont partagés en cinq ordres et les Anthozoaires en onze.

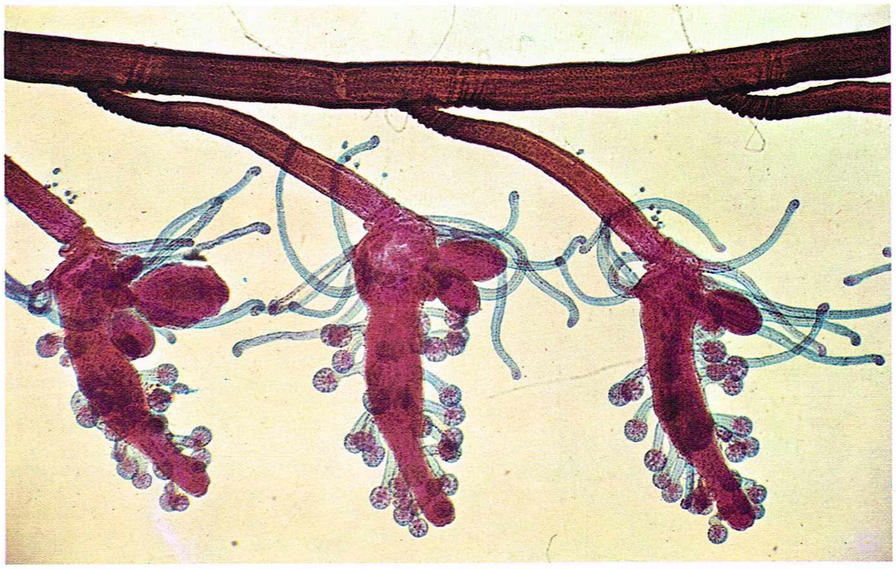

▲ *Fragment d'une colonie d'Hydrozoaires du genre* **Pennaria** *(préparation microscopique, coloration par contraste, grossissement × 16 × 1,5).*

HYDROZOAIRES

Cette classe groupe des individus dont le cycle de vie est métagénétique avec alternance de générations de polypes et de méduses. Cependant, il existe des exceptions allant jusqu'à la disparition totale d'un des stades.

Super-ordre des Hydrophores

Ce groupe est divisé en huit ordres que nous allons étudier successivement.

Ordre des Hydrides

Dans cet ordre, seul le stade polype est présent. Ce sont de petits organismes appartenant à la faune d'eau douce, rangés dans le seul genre *Hydra* avec plusieurs espèces se différenciant par leur couleur due à l'association avec différentes Algues, et aussi par leur reproduction : *H. viridis* est hermaphrodite protandre ; les gonades mâles apparaissent dans le tiers supérieur du corps, puis les gonades femelles se forment au-dessous, chacune contenant un seul ovule géant. Dans les autres espèces, les sexes sont séparés.

L'alternance des générations est typique dans les deux ordres suivants mais avec parfois une régression ou une

▼ *Une hydre dont la cavité gastrique est dilatée et colorée en brun par la nourriture ingérée ; on peut observer un jeune bourgeon à la base du corps.*

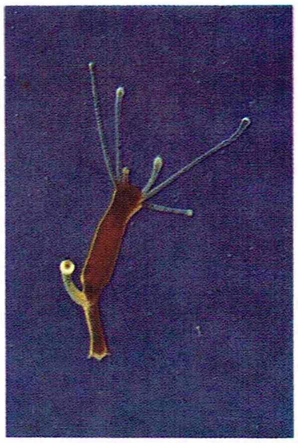

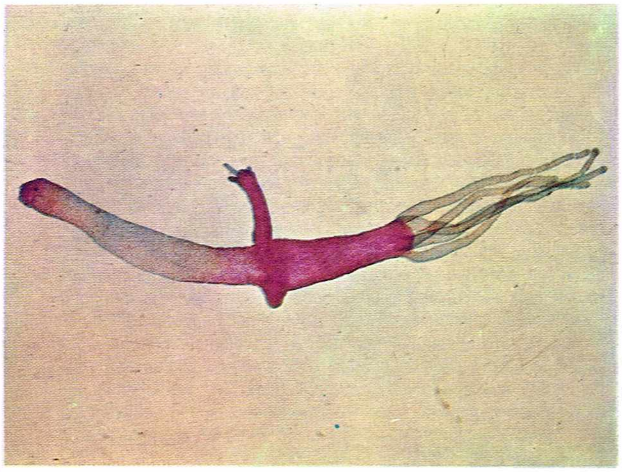

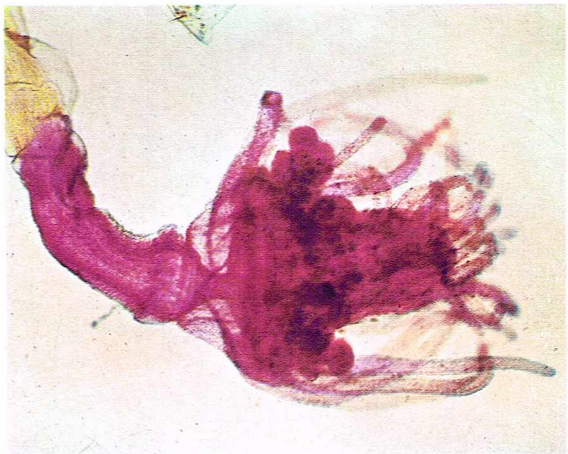

◀ *En plus de la reproduction sexuée, les hydres peuvent mettre en œuvre un processus de bourgeonnement qui leur permet de se multiplier (à gauche, × 11). Un polype d'Hydrozoaire Athécate du genre* **Tubularia** *(à droite, × 25).*

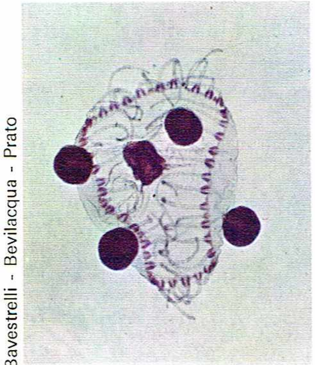

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Une petite Leptoméduse d'*****Obelia*****, Hydrozoaire Thécate très commun.***

disparition du stade méduse. Ils comprennent un grand nombre de formes coloniales dues au bourgeonnement à partir de l'oozoïde. La reproduction sexuée est assurée par des gonozoïdes libérant soit des gamètes, soit des méduzoïdes, soit des méduses parfaites libres et nageuses, d'une taille comprise entre 1 et 10 mm. Récoltées par des méthodes de pêche spéciale, ces méduses ont longtemps bénéficié d'une classification particulière. On les réunit dans le groupe des *Hydroméduses,* ainsi réparti :

a) Les *Anthoméduses,* de forme plus haute que large, dotées de quatre canaux radiaires, de gonades sur le manubrium, d'ocelles à la base des tentacules ;

b) Les *Leptoméduses* aplaties en verre de montre, de consistance molle, ayant quatre ou huit canaux radiaires ou plus et des gonades sur ces canaux, avec des statocystes et parfois des ocelles ;

c) Les *Ptéroméduses,* organismes aberrants classés désormais dans les *Scyphoméduses ;*

d) Les *Limnoméduses,* ressemblant à des Leptoméduses mais à stade polype solitaire et nu ;

e) Les *Trachyméduses* et *Narcoméduses,* n'ayant pas de stade polype dans leur développement.

Toutefois le premier critère de détermination est l'importance et la nature du périsarc ou enveloppe protectrice des polypes coloniaux : les *Athécates* ont un périsarc mince ne s'étendant pas autour du polype et des méduses du type Anthoméduses. Les *Thécates* ont un périsarc plus développé, entourant le polype d'une coupe dans laquelle il peut se rétracter ; les méduses sont des Leptoméduses. Enfin les *Hydrocoralliaires* ont un périsarc de nature calcaire englobant les individus. Il n'y a pas de vraies méduses, mais des individus rappelant une Anthoméduse simplifiée ou méduzoïde.

Ordre des Athécates

Ces organismes que l'on désignait autrefois sous le nom de Gymnoblastidés se présentent le plus souvent sous forme de colonies rameuses dont le stolon radiculaire est l'hydrorhize et le stolon dressé l'hydrocaule, qui porte à l'extrémité de ses ramifications des polypes ou hydranthes. Ils sont très communs sur nos côtes et libèrent leurs méduses au début du printemps, lorsque l'eau commence à se réchauffer.

Tubularia mesembryanthemum se reconnaît aisément à sa couleur rosâtre et à son allure en touffe. Deux couronnes de tentacules entourent la bouche ; entre elles se forment les bourgeons reproducteurs qui laissent échapper une larve actinule. Il n'y a pas de stade méduse dans le cycle évolutif, mais chez une espèce de la même famille, *Ectopleura dumortieri,* la méduse est libérée. *Corymorpha nutans* atteint 10 cm de longueur et forme de magnifiques petites méduses monotentaculées ; c'est également le cas d'*Euphysa aurata,* dont les méduses se rencontrent jusqu'à des profondeurs d'environ 1 000 m. Les différentes espèces du genre *Sarsia* émettent des méduses dont certaines bourgeonnent à tel point qu'elles peuvent parfois pulluler lorsque les eaux présentent des conditions optimales. *Perigonemus repens* est une forme fréquente sur les fonds vaseux ; elle émet de petites méduses bitentaculées à croissance rapide, pouvant atteindre 4 cm de longueur, taille exceptionnelle chez les Anthoméduses. Mais la méduse adulte ne ressemble en rien à ce jeune stade ; elle a été décrite sous le nom de *Leuckartiara octona* et c'est grâce aux élevages que les différents stades du polype et de la méduse jeune et adulte ont été réunis en une même espèce. Les *Podocoryne,* dont plusieurs espèces peuplent les eaux littorales, se fixent sur des coquilles de Mollusques habitées par un pagure et montrent un faible polymorphisme : des individus, les dactylozoïdes, privés de bouche et de tentacules, ne sont en fait que de simples masses bourrées de nématocystes et chargées de défendre la colonie.

Ordre des Thécates

Les représentants de cet ordre (anciens Calyptoblastidés) différencient leurs œufs ou leurs bourgeons médusaires dans une sorte d'urne formée par la thèque, la gonothèque, fermée par un opercule, tandis que les polypes sont protégés par une hydrothèque. L'une et l'autre sont ornées d'anneaux à leur base et d'indentations autour de l'orifice, caractères importants pour la détermination des espèces.

Obelia gelatinosa et *Campanularia johnstoni* sont des formes très fréquentes le long des côtes ; au printemps et en automne, elles émettent de petites Leptoméduses qui sont parmi les plus nombreuses dans le plancton de la zone néritique. *Sertularia, Plumularia, Aglaophenia* et *Lytocarpa* n'émettent pas de méduses et mûrissent leurs œufs dans des gonothèques très modifiées. Par leur port, ces genres ressemblent à certaines Rhodophycées.

▼ ***Les Siphonophores sont des organismes coloniaux ; à gauche,*** **Porpita mediterranea** ***; à droite, représentation schématique d'une colonie de*** **Stephanomia bijuga** ***;***
br, bractée ou phyllozoïde ;
dz, dactylozoïde ;
fp, filament pêcheur ;
go, gonozoïde ;
gz, gastrozoïde ;
nz, nectozoïde ;
pn, pneumatophore ;
st, stolon.

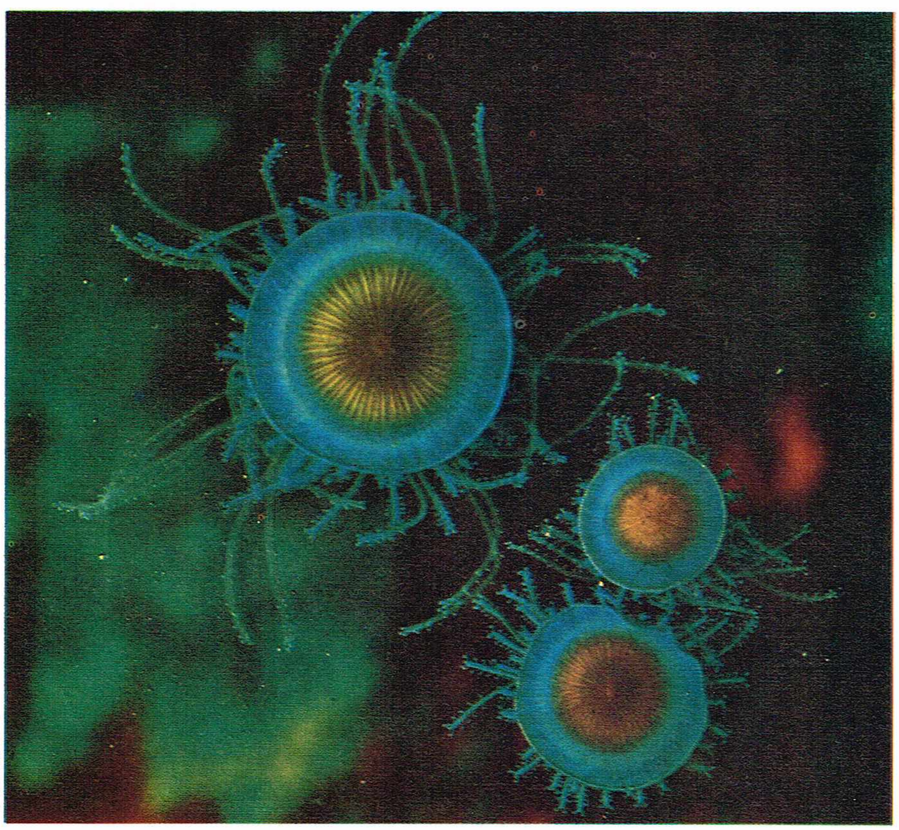

A. Margiocco

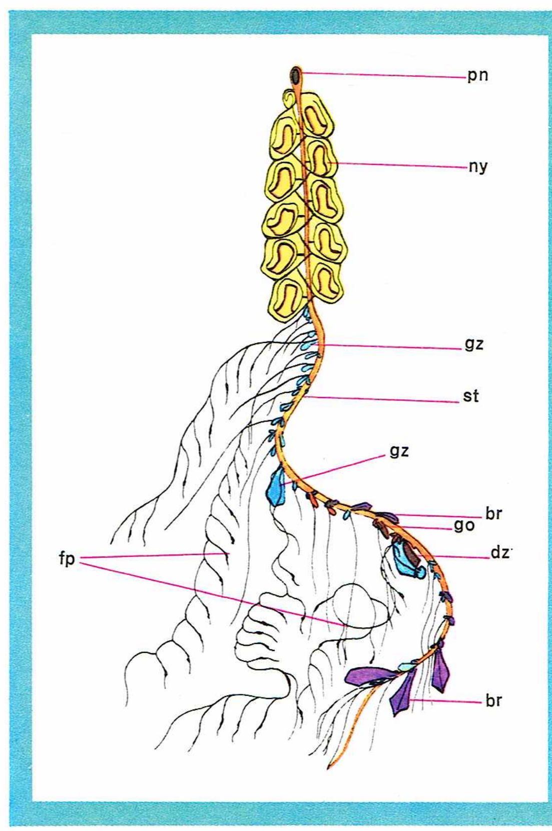

I.G.D.A.

Ordre des Hydrocoralliaires

Ces organismes, dont le type est *Millepora nodosa*, présentent des polypes très polymorphes qui seuls émergent de la masse compacte et calcaire du périsarc. Ils contribuent à la formation des récifs de coraux ; à cause de la virulence de leurs nématocystes, on les appelle « coraux de feu ».

Ordre des Limnoméduses

A partir de cet ordre, le stade de la méduse devient prépondérant et le polype, très régressé, de quelques millimètres de longueur, est souvent solitaire ou forme des colonies réduites à quatre ou cinq individus seulement. Les représentants vivent en eau douce ou saumâtre ; une espèce, *Craspedacusta sowerbii*, est commune en été dans les eaux calmes de l'Europe du Nord.

Ordre des Actinulides

Les représentants de cet ordre sont de curieuses petites formes, très voisines des larves actinules, d'où leur nom, mûrissant des œufs à développement direct dans des sortes de poches incubatrices. *Halammohydra* et *Otohydra* appartiennent à la faune littorale mésopsammique.

Ordres des Trachyméduses et Narcoméduses

Dans ces deux ordres, seul le stade méduse existe. Les larves restent pélagiques et évoluent en méduses, Trachy- et Narcoméduses, qui diffèrent par la forme et l'ornementation du bord ombrellaire. Parmi les Trachyméduses, *Geryonia* est la plus grande des Hydroméduses avec 8 cm de diamètre. *Liriope tetraphylla* est l'espèce la plus abondante dans la zone néritique épipélagique, où elle provoque de véritables invasions. Certaines Narcoméduses ont un cycle évolutif encore inconnu ; le stade larvaire est parfois parasite de Trachyméduses ou peut présenter un bourgeonnement.

Super-ordre des Siphonophores

Ce super-ordre renferme des formes coloniales transparentes avec quelques parties colorées. Le polymorphisme est encore plus accusé : aux gastrozoïdes, dactylozoïdes et gonozoïdes s'ajoutent des individus différenciés pour permettre à la colonie de flotter et de se déplacer. La réalisation de la colonie peut se faire de deux manières, par la constitution d'une longue guirlande mesurant plusieurs mètres, le long de laquelle sont disposés des groupes d'individus, ou bien par la condensation des individus rassemblés à la face inférieure d'une sole ou d'un disque. Ce dernier cas pourrait bien dériver d'une colonie de polypes Athécates devenue pélagique. Les représentants sont quelquefois classés dans cet ordre, mais cette position systématique est encore controversée.

Le type des Siphonophores est la colonie linéaire se présentant sous la forme d'un long tube creux dont la paroi possède les deux feuillets caractéristiques. A l'extrémité supérieure, une vésicule pleine d'air rappelle une méduse modifiée sans manubrium ; c'est le flotteur, ou pneumatophore. Au-dessous s'opposent deux séries de cloches natatoires, ou nectozoïdes, semblables à une méduse sans manubrium, ni tentacules, ni organes sensitifs, dont l'ouverture est dirigée vers l'extérieur et vers le bas. Les cloches possèdent une musculature très développée dont les contractions chassent l'eau emprisonnée et provoquent un déplacement dans le sens opposé. Ensuite sont disposés des membres de la colonie réunis en petits groupes formant une cormidie. De haut en bas, on rencontre : un phyllozoïde aplati en bouclier ou en écaille, qui joue un rôle de protection ; un gastrozoïde nourricier, de la base duquel part un long filament présentant des boutons pédonculés sur son trajet (boutons urticants ou tentilles chargés de nématocyses), c'est le filament pêcheur homologué à un dactylozoïde ; un cystozoïde qui rappelle par sa forme un gastrozoïde (sa bouche est cependant plus étroite et sa cavité est tapissée de cellules excrétrices, il est chargé de la fonction d'excrétion) ; s'y ajoutent un individu sensitif et des gonozoïdes mâles ou femelles qui produisent soit des médusoïdes, soit de vraies méduses Anthoméduses qui ne semblent pas avoir de bouche fonctionnelle et sont envahies par des chlorelles.

Le nombre de cormidies sur un stolon peut être très élevé. La formation de la colonie s'établit dès le stade planule. La larve évolue en présentant à une extrémité un épaississement ectodermique qui se creuse d'une cavité ; c'est l'ébauche du pneumatophore. A l'extrémité opposée se différencie un gastrozoïde qui porte déjà à sa base un filament pêcheur. La larve est alors une larve siphonula. Le stolon entre le pneumatophore et le gastrozoïde s'allonge et donne naissance, par bourgeonnement, aux différents individus des cormidies successives.

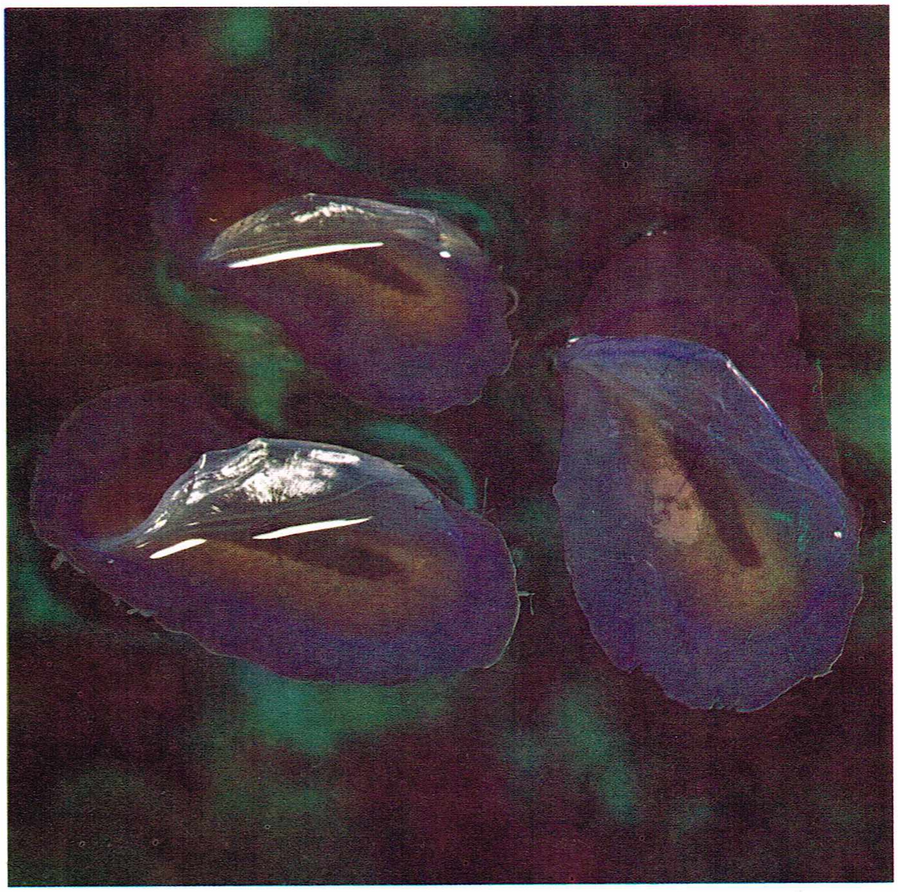

A. Margiocco

▲ ***Chez les vélelles (Siphonophores Disconanthes), le disque porte une crête qui sort de l'eau.***

Ordre des Disconanthes

Ces organismes ont une position systématique encore imprécise. La colonie est grande, elliptique, répartie sous un disque qui flotte à la surface. A la partie supérieure, le pneumatophore est divisé par des cloisons en une série de compartiments annulaires disposés autour d'une chambre centrale. Ces compartiments communiquent entre eux et s'ouvrent par des stigmas, directement à l'extérieur. De ce pneumatophore partent, en profondeur, des tubes qui traversent les couches sous-jacentes : une couche hépatique, dont les cellules sécrètent des ferments digestifs, une couche de soutien riche en nématoblastes, et une couche rénale renfermant des cellules excrétrices bourrées de cristaux de guanine. Au-dessous s'étale la colonie d'individus avec, au centre, un gastrozoïde entouré de plusieurs verticilles de gonozoïdes qui donnent des méduses. Sur le pourtour de la sole, un verticille de dactylozoïdes assure la défense de la colonie. Le genre *Velella* est fréquent à la surface de la mer dans les régions tempérées et chaudes des deux hémisphères ; son disque est hérissé d'une crête sortant de l'eau dont l'orientation varie suivant la direction des vents dominants. Ses méduses sont appelées *Chrysomitra*. Le genre *Porpita* a la même organisation, mais il est dépourvu de crête ; sa méduse est une *Discomitra*. Ces deux méduses sont rangées dans les Anthoméduses dans la famille des Chondrophoridés, ce qui prouve l'incertitude de la position systématique de cet ordre.

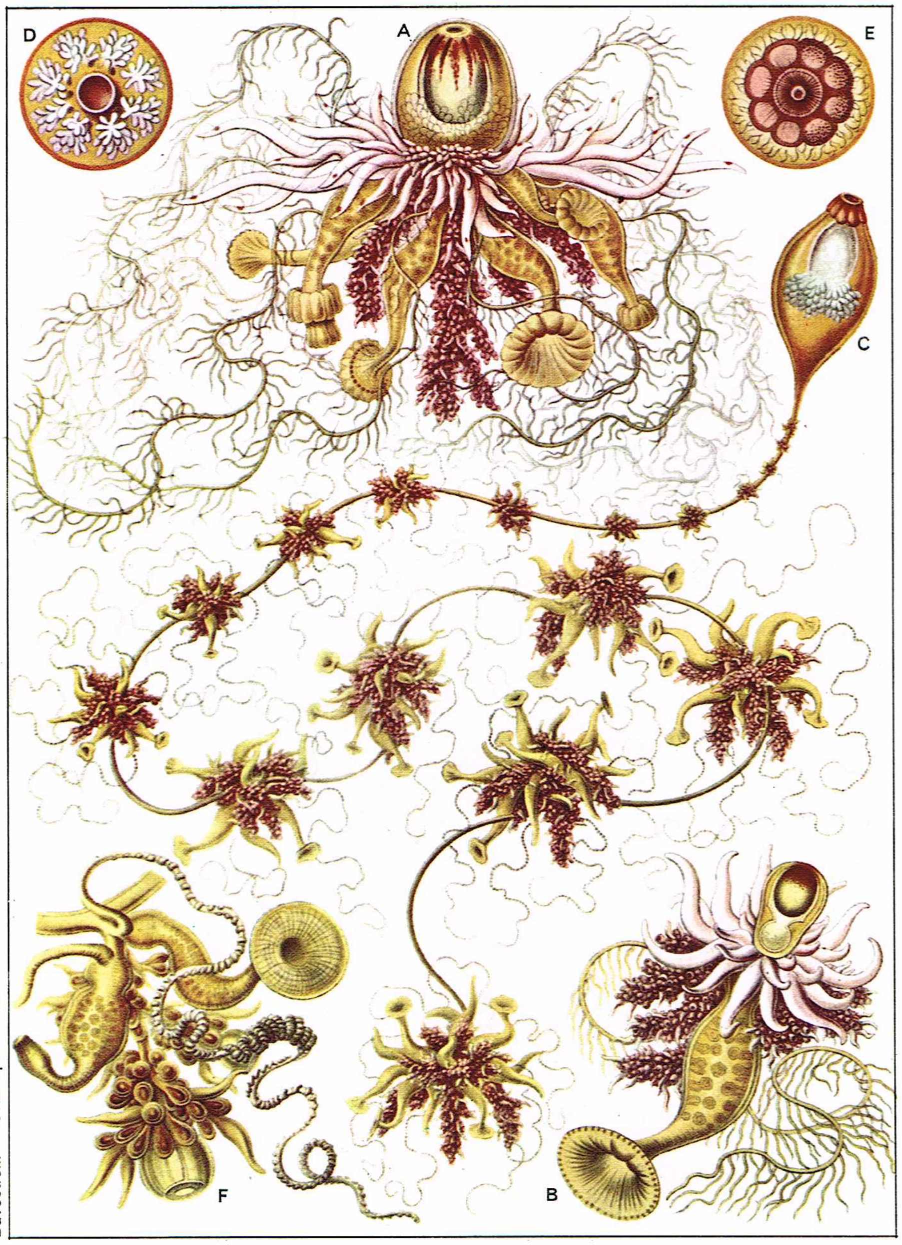

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Représentation stylisée de quelques types de Siphonophores (d'après Haeckel); A,* Epibulia ritteriana *de l'océan Indien; B,* Cystalia monogastrica *de Ceylan; C-F,* Salacia polygastrica *(D, vue apicale; E, pneumatophore vu par-dessus; F, cormidie).***

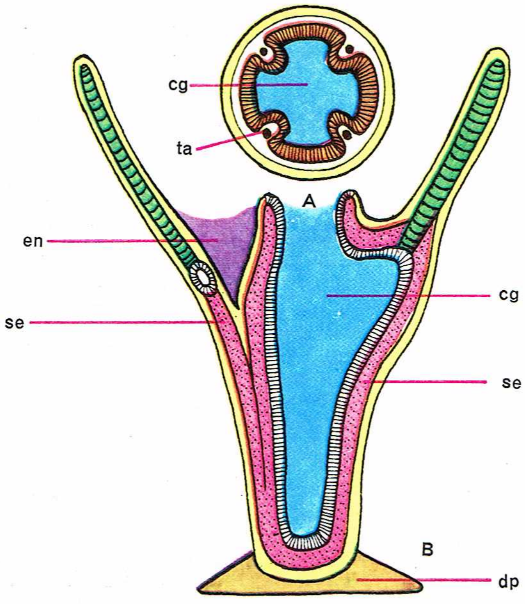

▶ ***Section transversale (A) et longitudinale (B) d'un polype de Scyphozoaire; cg, cavité gastrovasculaire; dp, disque pédieux; en, entonnoir; se, septum; ta, tæniole.***

I.G.D.A.

Ordre des Siphonanthes

Les représentants de cet ordre sont encore appelés « Siphonophores vrais ». Ils renferment trois sous-ordres, différenciés par la disposition plus ou moins complexe des individus sur le stolon.

Sous-ordre des Physonectes

Ces organismes possèdent tous les éléments caractéristiques d'une colonie de Siphonophores. Les différents genres se distinguent par la longueur du stolon, la position des éléments sur ce stolon et le mode de reproduction. *Forskalia* peut atteindre 10 à 20 m en état d'extension. *Physophora* est une colonie de petite taille, réduite encore par la concentration de toutes les cormidies sur un plateau vésiculeux au-dessous des nectozoïdes.

Sous-ordre des Cystonectes

Les représentants de cet ordre n'ont pas de cloches natatoires et les cormidies sont dépourvues de phyllozoïdes protecteurs. Un genre est bien connu des marins, la physalie ou « navire de guerre portugais », dont le pneumatophore émerge à la surface.

Sous-ordre des Calicophores

Ces organismes n'ont pas de pneumatophore, et leurs cormidies, réduites, ne possèdent plus de dactylozoïdes. Les gamètes mûrissent dans des cloches séparées, les eudoxies, qui sont libérées et disséminent dans la mer les produits génitaux. La stabilité est assurée par des oléocystes, capsules remplies d'huile situées au sommet de la colonie. *Hippopodius* et *Abylopsis* n'ont que deux cloches; chez *Monophyes,* une seule cloche persiste. Ces espèces sont fréquentes dans le plancton et ont une large répartition spatiale.

SCYPHOZOAIRES

Le terme de Scyphozoaires *(Scyphozoa)* désigne une classe de Cnidaires marins connus surtout par des méduses de taille parfois très grande et distinctes des Hydroméduses par plusieurs caractères, notamment par l'absence de velum, d'où le nom d'acraspèdes qui leur a été donné par opposition aux méduses craspédotes. On les nomme aussi acalèphes. Ces formes nageuses résultent fréquemment de la métamorphose d'*éphyrules,* petites formations discoïdes libérées par la segmentation transversale d'un polype, ou scyphopolype, qui représente l'individu véritable.

L'ombrelle des « Scyphoméduses », discoïde, globuleuse, cubique ou en dôme, porte sur son bord simple ou lobé des organes sensoriels souvent très complexes, ou *rhopalies,* parfois aussi des tentacules. A sa face inférieure pend le manubrium ouvert par une bouche quadrangulaire (indice d'une symétrie tétramère) qui donne accès au système gastrovasculaire constitué par un estomac central pourvu de filaments gastriques et un sinus coronaire périphérique. La compartimentation de l'estomac, qui peut atteindre une grande complexité, résulte de fusions localisées des lames endodermiques exombrellaires et sous-ombrellaires. C'est ainsi que naissent parfois des septums gastriques séparant l'estomac central, ou *centrogaster,* des poches gastriques, sauf au niveau des ostiums gastriques. D'autres septums, radiaires, peuvent compartimenter la périphérie de la cavité gastrovasculaire.

Les Scyphoméduses ne possèdent pas toujours un véritable canal circulaire, mais des ostiums ménagés au niveau des septums radiaires pourraient en représenter l'équivalent. Les fusions peuvent être si nombreuses que la cavité digestive se réduit à un réseau bien défini de canaux, réseau dont la connaissance est souvent nécessaire à l'identification des méduses. Le système nerveux comprend deux réseaux de fibres, l'un diffus, l'autre dit « à fibres géantes ». Chez les Cuboméduses exclusivement apparaît un véritable anneau nerveux submarginal en rapport avec huit centres ganglionnaires. Dans certains groupes, la paroi sous-ombrellaire se déprime en quatre poches subgénitales plus ou moins profondes, laissant

voir les gonades par transparence. Celles-ci, en fer à cheval, en arc ou en W, naissent à partir de l'endoderme du sinus coronaire. Les gamètes sont émis à l'extérieur par la cavité gastrovasculaire. Les sexes ne sont réunis que dans le genre *Chrysaora*.

Le développement n'est connu que dans quelques cas. Les œufs produits par les méduses engendrent des planules ciliées qui, après fixation, deviennent les scyphopolypes, ou scyphistomes, dont la taille est en général de quelques millimètres, rarement de 1 ou 2 cm. Ces polypes ont la forme d'un calice ; leur pédoncule, effilé jusqu'au disque de fixation qui le supporte, se prolonge par une colonne gastrique terminée à sa partie supérieure par un disque péristomial au centre duquel s'ouvre la bouche de section quadrangulaire. Le bord du calice porte des tentacules. La cavité gastrovasculaire occupe l'intérieur du calice et s'étend loin dans le pédoncule ; elle est compartimentée en quatre poches gastriques par autant de bourrelets septaux interradiaires allongés du pharynx au pédoncule. Puis quatre dépressions profondes du disque péristomial, entre les angles buccaux, s'enfoncent dans ces bourrelets pour constituer les *tænioles*. Sur le scyphistome se creusent ensuite de plus en plus une ou plusieurs constrictions annulaires à partir du disque péristomial ; le scyphistome est alors devenu le strobile. Les éphyrules s'en détachent, puis, en grandissant, se métamorphosent en méduses.

Ce cycle métagénétique est loin d'être général ; ainsi, chez les Cuboméduses, le polype évolue directement en méduse, tandis que, dans une ou deux autres espèces, la forme méduse libre fait défaut, ce qui entraînerait même sans doute, selon Werner (1971), l'absence chez *Tesseroscyphus* de tout développement sexué.

Le cycle est hypogénétique chez les Stauroméduses, où le polype fixé possède les caractères essentiels de la méduse, et chez *Pelagia*, où la planule se transforme directement en une méduse. En fait, le cycle vital n'est connu que pour un nombre d'espèces très restreint, car, si les méduses se distinguent aisément les unes des autres, il est plutôt rare que des polypes puissent être identifiés. De belles découvertes réalisées ces dernières années ont remis en question la réalité de l'alternance des générations, surtout à la suite de la description de polypes producteurs de strobiles de polypes et non pas d'éphyrules. (H. Thiel, 1963). On ne saurait considérer que ce problème soit résolu.

Ordre des Stauroméduses

Fixés sur des Végétaux marins, ces Animaux combinent l'organisation du scyphistome et celle d'une méduse qui serait fixée par le sommet étiré de l'exombrelle. Le bord du calice s'échancre, laissant en saillie huit bras hérissés de touffes de tentacules creux terminés par un renflement abondamment pourvu de nématocystes. Au fond des échancrures, dans les plans perradiaux et interradiaux, existent soit de petits organes glandulaires, les ancres marginales, soit des tentacules capités.

Comme le scyphistome, la Stauroméduse possède de profonds entonnoirs ou saccules septaux fixés à la paroi de l'Animal par des septums. Par transparence, on voit les gonades disposées par paires ainsi que des phacelles, ou filaments gastriques. *Lucernaria*, des régions nordiques, et *Haliclystus*, à vaste répartition, sont les formes les mieux connues.

Ordre des Cuboméduses

Cet ordre occupe une place très particulière parmi les Scyphozoaires. Il groupe des méduses de forme cubique, pyramidale ou subhémisphérique, dont la cavité ombrellaire, profonde, se trouve rétrécie par une membrane ou vélarium. Sur le bord de l'ombrelle, on distingue quatre rhopalies, qui, chez certaines formes, portent des yeux simples ou composés avec cristallin, corps vitré et rétine. Les quatre tentacules naissent de renflements d'origine sous-ombrellaire, les pédalies. Le caractère le plus important de ces méduses a été découvert à la suite d'élevages de polypes de *Tripedalia cystophora* par Werner, Cutress et Studebaker (1971) et réside dans leur origine. Elles résultent d'une transformation directe du polype, qui, de la sorte, s'apparente plus à l'hydropolype qu'au scyphopolype.

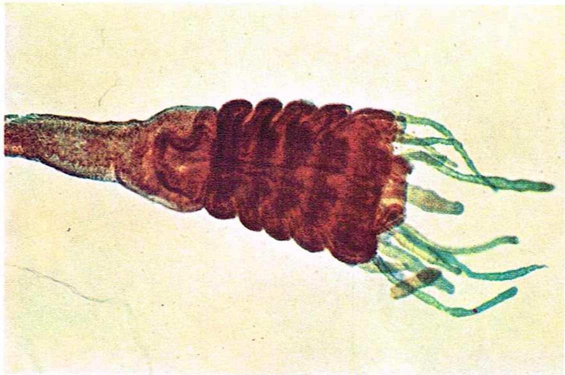

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

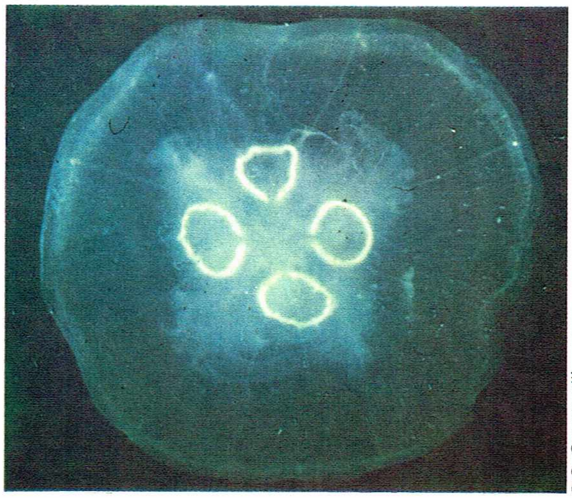

G.S. Giacomelli

G. Mazza

Certains Scyphozoaires présentent deux types d'individus : le polype (en haut, polype d'*Aurelia*) et la méduse (au milieu, méduse d'*Aurelia*) ; chez d'autres espèces (*Pelagia noctulica*, en bas) la larve planule se transforme directement en méduse.

Quelques méduses d'une grande beauté (d'après Haeckel) : **Desmonema annasethe** ***(A); vue inférieure de l'ombrelle de cette même espèce après élimination des filaments (B);*** **Floscula promethea** ***(C);*** **Chrysaora mediterranea** ***(D).***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Les Cuboméduses sont voraces et capturent à l'aide de leurs tentacules richement pourvus de nématocystes de petits Poissons, des Crustacés ou des Annélides Polychètes. *Carybdea, Tamoya* et *Tripedalia* sont inoffensifs ; en revanche, deux formes exotiques sont très redoutées : *Chiropsalmus quadrigatus,* la « méduse de feu » de Malaisie, et surtout *Chironex fleckeri,* qui a causé la mort d'assez nombreux baigneurs sur les plages du nord de l'Australie. La piqûre de cette méduse transparente entraîne la mort dans un laps de temps variant d'une demi-minute à quatre heures, et cela dans de grandes souffrances. Le venin a une activité hémolytique ; son caractère antigénique a été reconnu et de très nombreuses recherches ont été entreprises en Australie afin de prévenir ou de guérir les accidents.

Ordre des Coronates

Les méduses de cet ordre sont pour la plupart connues depuis longtemps et bien caractérisées par un sillon coronaire circulaire et profond qui partage l'ombrelle en un disque ombrellaire et une portion périphérique dont la marge se découpe en lobes. L'ombrelle est assez plate, globuleuse ou conique et surélevée. La région périphérique est marquée par des dépressions radiaires situées entre des zones convexes ou *pédalies,* dont chacune porte soit un tentacule, soit une rhopalie. La face sous-ombrellaire est creusée d'entonnoirs septaux qui compliquent plus ou moins la conformation de la cavité gastrovasculaire, selon la hauteur de l'ombrelle. Ces dernières années, la découverte de scyphistomes a permis, après élevage, de définir le cycle métagénétique de deux de ces méduses (Werner, 1967) : *Nausithoe punctata* et *Atorella vanhoffeni*. En fait, de nombreux polypes de même type, caractérisés par l'existence d'une thèque protectrice à denticules internes, ont été décrits sous le nom de *Stephanoscyphus*. Cette thèque doit dériver assez directement de celle des *Conulata* fossiles (Werner). Il est probable que certains de ces scyphistomes engendrent des méduses Coronates. Ce groupe englobe donc une série de formes méduses bien caractérisées et des polypes dénommés *Stephanoscyphus,* dont deux au moins sont identifiés.

Periphylla, Atolla et *Linuche* sont les représentants les plus connus. Le polype d'un *Nausithoe* est exceptionnel, car il élabore des éléments germinaux mâles et femelles.

Ordre des Semaeostomes

De nombreuses méduses très communes telles qu'*Aurelia, Chrysaora, Cyanea* et *Pelagia* appartiennent à ce groupe. Certaines sont délicatement colorées, d'autres sont remarquables par l'intensité de leurs tons ou par la présence de bandes radiaires sur l'ombrelle. Celle-ci n'est pas toujours découpée en lobes nets. Au-dessous, le manubrium s'étire en quatre longs bras oraux à bords frangés et plissés. Les *Cyanea*, de teinte bleue, remontent de la Floride ou de la Manche jusqu'au Groenland et au Spitzberg. Leur manubrium prend l'aspect d'un rideau extrêmement plissé, masqué par plus d'un millier de tentacules. Leur taille atteint 2,30 m de diamètre ; leurs tentacules, de 20 m de long environ, explorent un énorme volume d'eau. De l'estomac central divergent des canaux radiaires qui débouchent parfois dans un canal circulaire et se prolongent au-delà jusqu'aux rhopalies et dans les tentacules.

La plupart des Semaeostomes ont un cycle de reproduction métagénétique, sauf *Pelagia,* qui est hypogénétique, et peut-être aussi les *Stygiomedusa*, dont la découverte en profondeur est récente et qui sont vivipares. Les polypes d'*Aurelia* et de *Chrysaora* montrent divers types de reproduction asexuée par bourgeons et kystes pédieux ou podocystes. La strobilation engendre parfois des éphyrules spiralées ou des polypes (H. Thiel, 1963) ; elle se prolonge pendant au moins trois ou quatre ans.

Ordre des Rhizostomes

Cet ordre, bien caractérisé par le remplacement de la bouche centrale par une multitude d'ostioles buccaux répartis sur les bras oraux, a été démembré par M. E. Thiel (1970) en deux ordres distincts, ceux des *Cepheida* et des *Rhizostomida*.

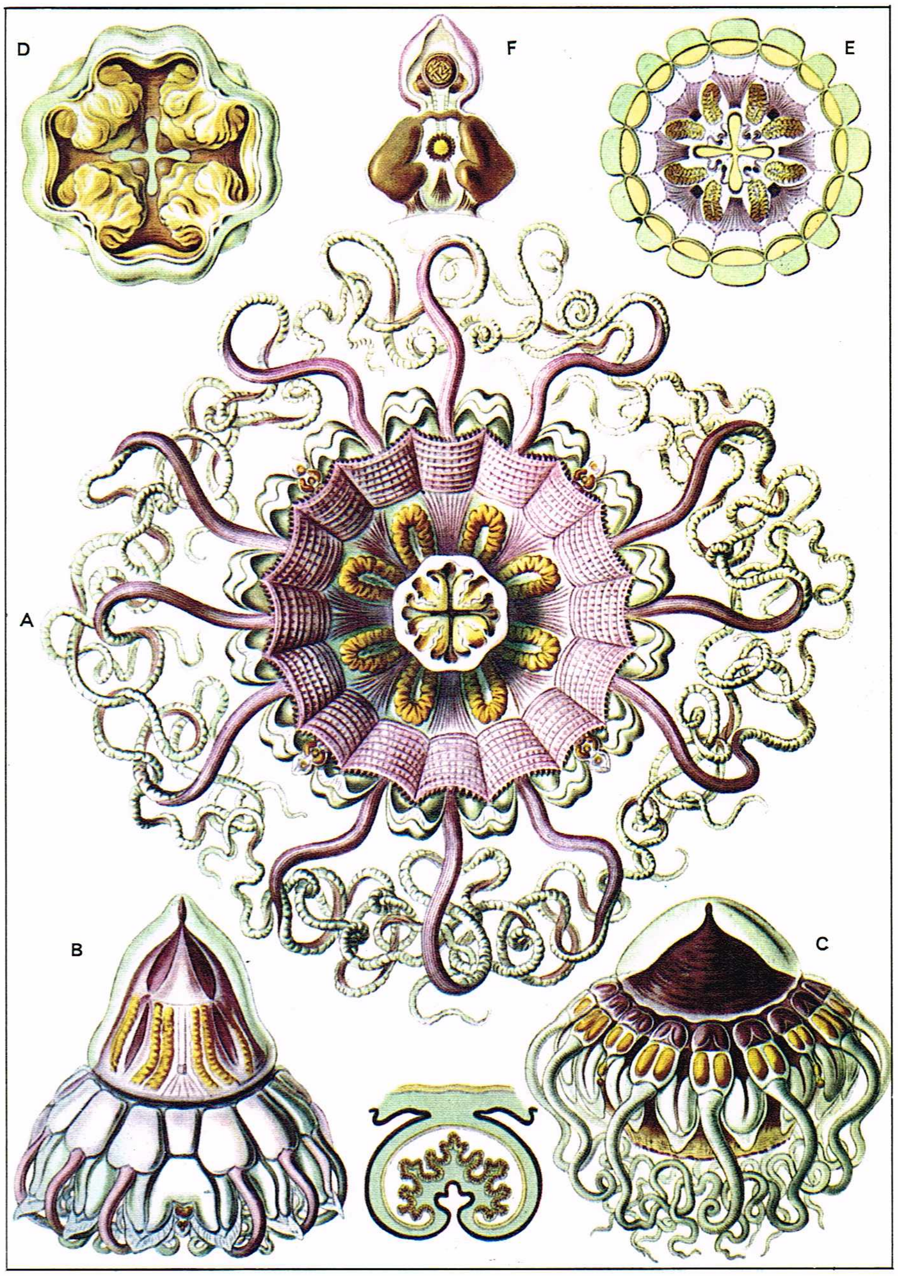

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Quelques méduses de Scyphozoaires Coronates (d'après Haeckel).*** **Periphylla mirabilis** ***en vue orale (A) et latérale (B) ;*** **P. peronii** ***en vue latérale (C) ;*** **P. hyacintina** ***vu du disque oral (D) ;*** **P. mirabilis,** ***coupe transversale (E) ; détail d'une rhopalie (F) ; coupe transversale d'un muscle tentaculaire (G).***

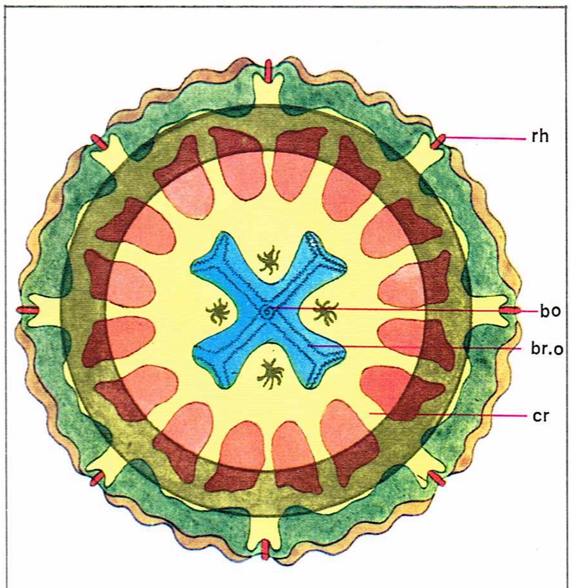

I.G.D.A.

◀ ***Détail d'un spécimen jeune de*** **Rhizostoma** ***(Scyphoméduse) ; bo, bouche ; br.o, bras oral ; cr, canal radiaire ; rh, rhopalie.***

▶ *A gauche,* Rhizostoma pulmo, *appelé poumon de mer; à droite, en haut et en bas, deux aspects d'une méduse commune dans la Méditerranée :* Cotylorhiza tuberculata.

A. Margiocco

G.S. Giacomelli

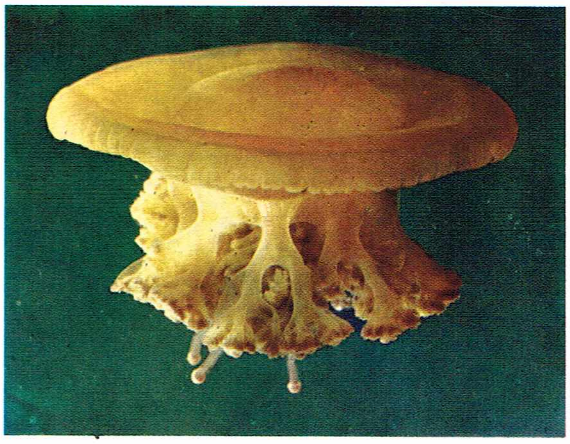

G.S. Giacomelli

Page ci-contre :
▶ *Deux représentants de la classe des Anthozoaires; sur la gauche,* Agaricia, *un Hexacoralliaire; à droite et dressé,* Gorgonia, *un Octocoralliaire.*

▼ *Mésentères et musculature chez les Octocoralliaires (A), les Actiniaires (B), les Zoanthaires (C) et les Cérianthaires (D); les chiffres indiquent l'ordre d'apparition au cours de l'embryogenèse; S : siphonoglyphe.*

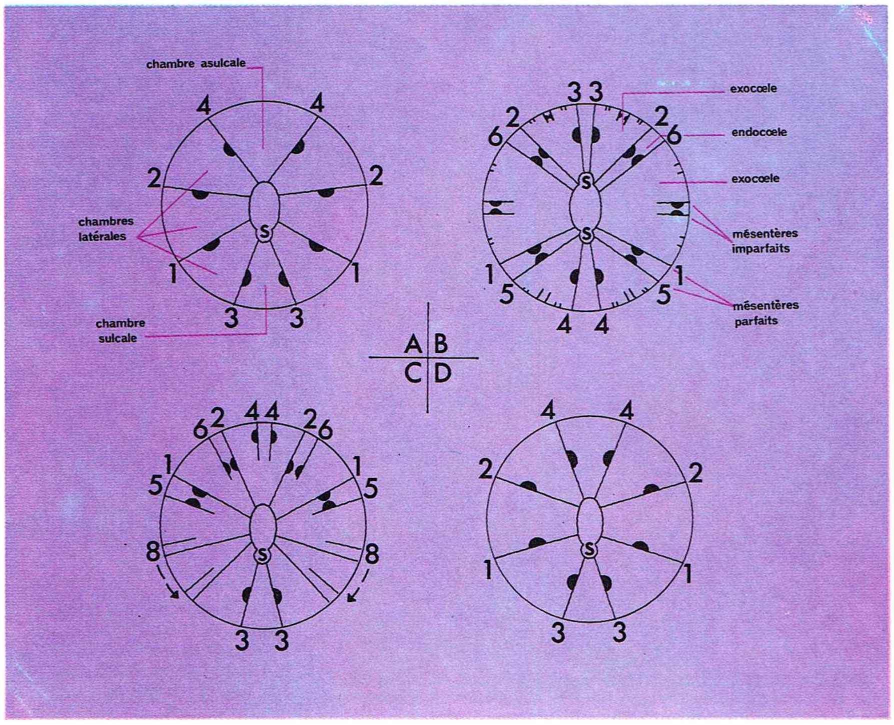

Dans l'ensemble, l'ombrelle à bords découpés en lobes ne porte pas de tentacules. Le sinus gastrique, par suite de nombreuses fusions, s'est modifié en un réseau complexe de canaux. Les cavités subgénitales confluent en un « portique » tel que les petits ostiums se voient entre les piliers que forme la base des bras oraux. La bouche est cependant ouverte dans le jeune âge. Les bras oraux sont libres, simples ou ramifiés *(Cassiopea),* coalescents sur une partie de leur longueur ou sur presque toute leur hauteur *(Stomolophus).* Ils peuvent porter des « épaulettes », sortes de bras pairs aplatis et découpés. A l'extrémité des bras oraux existent divers appendices : de courts tentacules, des fouets allongés ou des ventouses. Les appendices claviformes terminaux des *Rhizostoma,* perforés à leur extrémité, assurent le rejet du flux qui a circulé dans les espaces gastrovasculaires. La strobilation, bien étudiée chez les *Cassiopea* de la mangrove ou chez les *Cotylorhiza,* est de type monodisque, car chaque strobile ne produit qu'une éphyrule.

Les Rhizostomes vivent pour la plupart dans l'Indo-Pacifique; sur nos côtes, ils sont représentés surtout par les *Rhizostoma,* connus depuis l'Antiquité sous le nom de « poumons de mer ».

ANTHOZOAIRES

Les Anthozoaires ou « Animaux-fleurs » sont ainsi dénommés pour leur beauté, la grâce de leurs colonies épanouies, la délicatesse et la variété de leurs coloris. Comprenant les formes les plus connues et le plus grand nombre d'espèces de Cnidaires marins (six mille environ), ils sont essentiellement caractérisés par la présence d'une seule sorte d'individus, les polypes, le stade méduse n'existant pas. Renfermant des Animaux très divers, ils sont tantôt répandus dans les eaux peu profondes des rivages des mers tempérées, tantôt particulièrement abondants dans les zones benthiques intertropicales.

Ils sont solitaires (Actiniaires, Cérianthaires, certains représentants des Scléractiniaires) ou coloniaux (Octocoralliaires, Scléractiniaires, Zoanthaires, Antipathaires) et fréquemment fixés sur les fonds rocheux ou partiellement enfouis dans les sédiments meubles, vaseux ou sableux; certaines espèces sont capables d'effectuer quelques déplacements.

La structure des polypes est un peu plus complexe que celle des Hydraires et la paroi est plus épaisse. Ces polypes cylindriques présentent une portion basale fixée au substratum chez les solitaires, ou plongée dans un cœnosarc plus ou moins charnu ou ramifié chez les

coloniaux, et une portion distale épanouie, à disque buccal entouré d'un ou plusieurs cercles de tentacules creux.

Les polypes sont limités extérieurement par une couche ectodermique qui s'infléchit intérieurement dans la cavité gastrique au niveau de l'orifice oral pour former un pharynx (stomodeum ou actinopharynx) pendant librement dans la cavité générale et pourvu d'une ou deux gouttières ciliées longitudinales (siphonoglyphe ou sulcus) qui, lors de la contraction du polype, contribuent à la circulation de l'eau à l'intérieur de la cavité générale.

La cavité polypaire est compartimentée en chambres plus ou moins nombreuses par des cloisons membraneuses verticales à disposition radiaire (mésentères ou sarcoseptes). Elles sont en nombre variable : huit chez les Octocoralliaires et six ou un multiple de six pour la majorité des autres Anthozoaires. Elles sont attachées à la paroi de la cavité générale et libres en son centre (sauf chez quelques ordres), mais au niveau du pharynx toutes ou quelques-unes d'entre elles sont fixées, déterminant ainsi de véritables loges. Les mésentères sont essentiellement composés de deux couches ectodermiques enserrant une fine lamelle mésogléenne et présentent fréquemment sur une certaine longueur de leurs bords libres des sortes de bourrelets : les filaments mésentériques, rappelant les filaments gastriques des Scyphozoaires. Ces filaments sont spécialisés dans la digestion enzymatique des aliments et dans l'entretien d'un courant d'eau exhalant, contribuant ainsi à la fonction respiratoire. Dans bien des cas, le nombre des loges correspond à celui des tentacules, la cavité tentaculaire étant la continuation directe de la chambre radiaire sous-jacente. Chaque mésentère porte généralement sur sa face sulcale une musculature longitudinale et parfois sur sa face asulcale une musculature transverse. La disposition des tentacules et des mésentères confère à ces polypes une symétrie radiaire apparente, alors que l'allongement de l'orifice oral, la position du siphonoglyphe et des muscles longitudinaux font apparaître l'existence d'une symétrie bilatérale réelle : la symétrie des Anthozoaires est donc typiquement radiobilatérale.

Les Anthozoaires présentent parfois un exosquelette (corné et ténu ou massif et calcaire) ou un endosquelette (sous forme de spicules calcaires noyés dans la mésoglée, ou constitué d'un axe corné ou cornéocalcaire). La reproduction est asexuée (bourgeonnement, scissiparité) ou sexuée, les colonies étant alors monoïques ou dioïques. Les cellules sexuelles, d'origine endodermique, sont distribuées le long des mésentères. Les colonies sont ovipares, vivipares ou larvipares, les larves appartenant au type planula.

Les Anthozoaires se subdivisent en deux sous-classes, déterminées par le nombre de leurs mésentères : les Octocoralliaires et les Hexacoralliaires.

Sous-classe des Octocoralliaires

Ce sont des Anthozoaires marins, coloniaux, généralement sédentaires, dont les polypes présentent une construction octamère apparente et une symétrie bilatérale réelle. Les polypes, émergeant différemment suivant les ordres, présentent toujours un disque buccal entouré de huit tentacules creux à ramifications plus ou moins ténues, les pinnules. L'orifice oral, allongé, ovale, possède une légère dilatation correspondant à un siphonoglyphe qui s'étend longitudinalement à l'intérieur du pharynx et dont l'activité ciliaire entretient un courant inhalant. Le pharynx est aplati et relié à la paroi interne du zoïde (polype) par huit mésentères. Ainsi se déterminent à ce niveau huit chambres radiaires, dont une asulcale, une sulcale et six latérales. Au-dessous du pharynx, les mésentères sont libres dans la cavité gastrovasculaire et leurs bords sont épaissis en filaments mésentériques : six d'entre eux (sulcaux et latéraux), courts et endodermiques, assurent la fonction digestive, alors que les deux asulcaux, longs et ectodermiques, exercent, par le battement continu de leurs cils, un courant exhalant. Les muscles mésentériques transversaux (asulcaux) sont faibles alors que les muscles longitudinaux (sulcaux) sont puissants. Au niveau inférieur de la cavité gastrovasculaire, le bord des six mésentères sulcaux et latéraux présente une accumulation de cellules germinales. Les colonies sont dioïques ou monoïques, et il y a protandrie ou protogynie chez les colonies hermaphrodites.

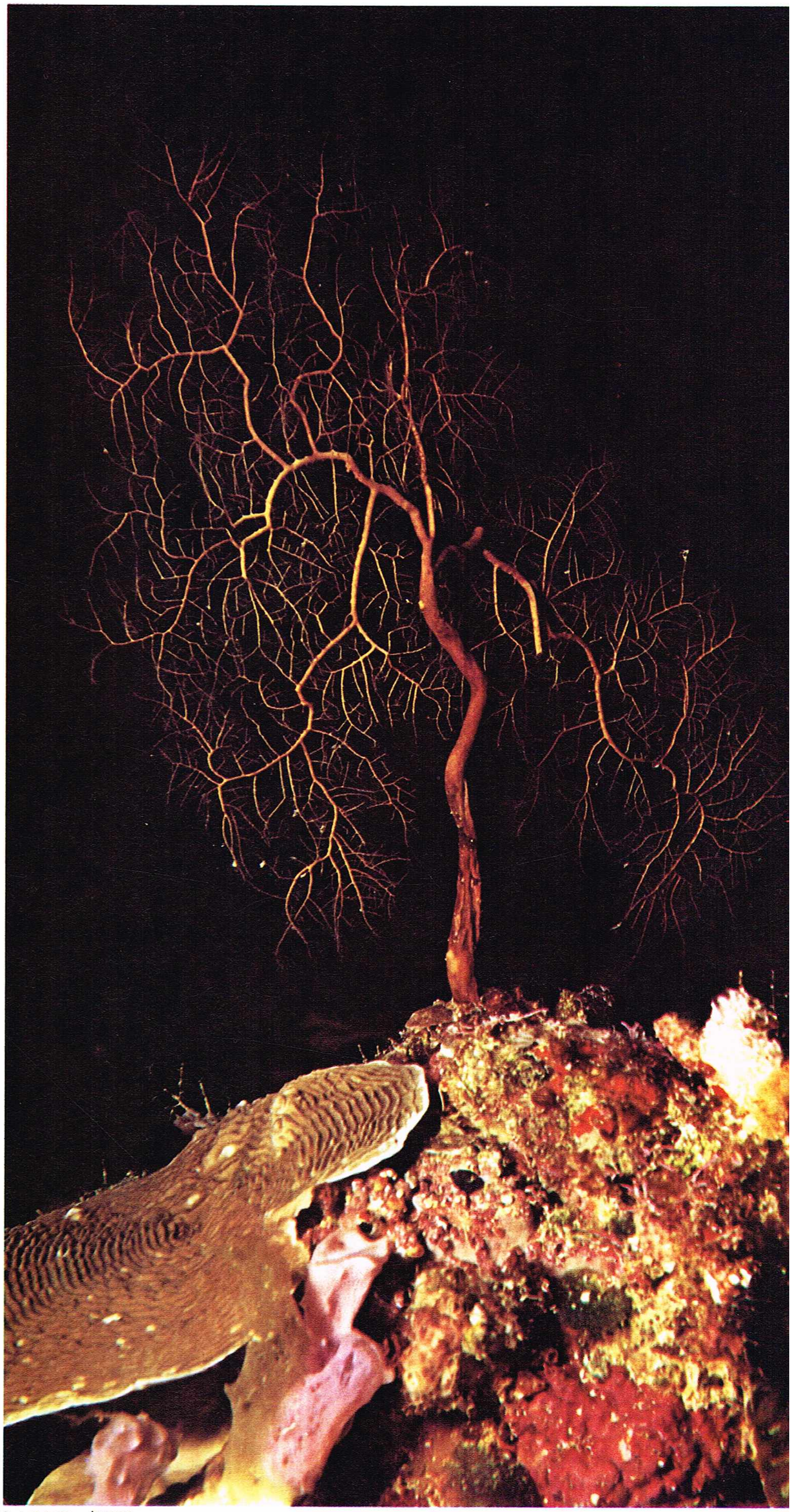

P. Laboute - Jacana

▶ ***Coupe longitudinale d'un polype d'Octocoralliaire; c, canal endodermique; cg, cavité gastrovasculaire; fma, filament mésentérique asulcal; fml, filament mésentérique latéral; fms, filament mésentérique sulcal; g, gonade; ma, mésentère asulcal; ml, mésentère latéral; ms, mésentère sulcal; oo, orifice oral; ph, pharynx; pi, pinnule; si, siphonoglyphe; t, tentacule.***

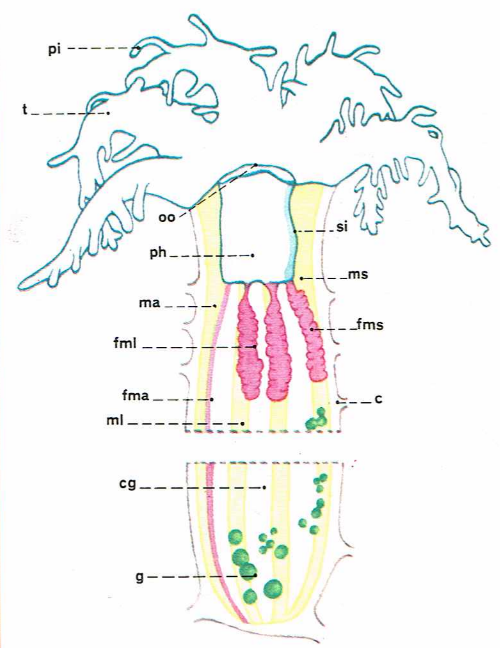

Coupe longitudinale d'un polype d'Octocoralliaire

Le dimorphisme des polypes est constant *(Pennatulacea)* ou rare *(Alcyonacea, Gorgonacea)*, alors que le trimorphisme est exceptionnel *(Alcyonacea, Pennatulacea)*. Les zoïdes normaux ou autozoïdes sont généralement fertiles et de grande taille alors que les siphonozoïdes (servant à la circulation de l'eau) et les mésozoïdes, plus petits, sont stériles. Les nouveaux polypes naissent par bourgeonnement sur les *solenia* (canaux endodermiques faisant communiquer les cavités gastrales), tantôt indépendamment les uns des autres à la base de la colonie, tantôt sur les parois des zoïdes existants. A l'exception de l'exosquelette des Stolonifères les plus primitifs, les Octocoralliaires sont munis d'un endosquelette calcaire ou corné. Les colonies sont richement colorées, luminescentes, la pigmentation étant surtout localisée dans les spicules (sclérites) et exceptionnellement dans les tissus épithéliaux.

Les Octocoralliaires vivent dans tous les océans, à des profondeurs variables, littorales ou abyssales; ils sont rares dans les mers peu salées et particulièrement abondants dans les eaux chaudes intertropicales.

Ordre des Stolonifères

Les représentants de cet ordre sont des Octocoralliaires dont les colonies sont composées de polypes de taille variable, cylindriques ou légèrement coniques, étalés sur un support par un stolon basal, plus ou moins divergent, un fin ruban ou une mince plaque membraneuse. La portion distale (anthocodie) comprenant les tentacules est habituellement rétractile dans la portion basale (anthostèle). La colonie prend naissance à partir d'un polype initial qui envoie des stolons ou des plaques sur lesquels naissent par gemmation, dans des directions variées, de nouveaux individus. Les cavités gastrales ne communiquent pas directement entre elles, mais au moyen de canaux endodermiques, ou solenia, inclus dans les stolons et les plaques.

La famille des **Cornulariidés** renferme des colonies de petite taille caractérisées par la présence sur les stolons et les anthostèles d'une fine cuticule cornée externe et par l'absence totale de spicules. Les espèces, assez rares, se rencontrent en Méditerranée et dans les océans Indien et Pacifique.

La famille des **Clavulariidés** comprend de petites colonies dont le squelette interne se compose de spicules particulièrement abondants sur les stolons, les plaques basilaires et les anthostèles. Elle est répandue en Méditerranée et dans les eaux tempérées des océans Atlantique, Indien et Pacifique.

La famille des **Tubiporidés** présente de longs polypes formant des tubes rigides composés de spicules fusionnés. L'espèce la plus connue, *Tubipora musica*, porte le nom d'« orgue de mer » par suite de l'aspect de son polypier. Les sclérites, d'une belle teinte rouge, sont très abondants et si parfaitement engrenés les uns dans les autres qu'ils forment un squelette rigide reproduisant parfaitement la forme du tissu vivant. Les tubes, légèrement divergents, sont reliés à différents niveaux par de nouvelles lamelles calcaires rigides et spiculées, les plates-formes, horizontales, contenant les solenia. La portion vivante, comprenant des polypes vert émeraude, se situe dans la partie supérieure de la masse coloniale; il y a abandon progressif des zones squelettiques inférieures âgées; les jeunes individus naissent toujours sur les plates-formes nouvelles, ce qui donne à l'ensemble du polypier une taille élevée et de plus en plus large. *Tubipora musica* est une espèce tropicale abondante dans l'océan Indien et l'océan Pacifique, où elle contribue à la formation des récifs coralliens par ses constructions importantes.

Ordre des Télestacés

Cet ordre comprend des Octocoralliaires dont les colonies, dressées, ramifiées et minces, sont réparties sur des stolons rubanés, réticulés ou membraneux. Le polype primaire donne naissance latéralement et à différents niveaux à des polypes secondaires, ceux-ci à des zoïdes tertiaires et, de proche en proche, à des individus de quatrième et de cinquième ordre. Les spicules sont nombreux, libres, partiellement ou totalement fusionnés, constituant alors des tubes rigides renfermant les anthostèles.

La famille des **Télestidés** comprend des colonies monopodiales qui ont un polype initial plus grand que les suivants; on les rencontre dans les océans Atlantique, Indien et Pacifique.

Les **Pseudochladochonidés** ont une ramification sympodiale, des zoïdes de même grandeur et sont répandus dans les océans Indien et Pacifique.

Ordre des Alcyonaires

Cet ordre regroupe des Octocoralliaires plus ou moins charnus à la suite du grand développement de la mésoglée, encroûtants, à colonies fixées, basses, lobées, en champignons, dressées ou arborescentes. Les unes sont molles, les autres plus consistantes suivant la quantité de spicules épars contenus dans la colonie. Leurs lobes, souvent très longs, sont enveloppés par une couche mésogléenne plus ou moins importante, formant un véritable cœnosarc contenant des spicules calcaires (calcite) et diverses cellules. Les zoïdes communiquent entre eux à divers niveaux au moyen de solenia. La masse coloniale s'agrandit par l'accroissement de la mésoglée et l'adjonction de nouveaux polypes à partir de canaux endodermiques internes. Leur coloration parfois très vive varie : jaune, orange, rose, rouge, brun ou violet.

Dans l'océan Atlantique vit en plus ou moins grande abondance et à faible profondeur une espèce à lobes mous, blancs ou roses et gélatineux : *Alcyonium digitatum*, alors qu'une espèce méditerranéenne commune, *Alcyonium palmatum*, atteint 20 cm de long. La masse coloniale, charnue, rose ou rouge, montre une portion basale fixée et une partie supérieure formée de lobes charnus irréguliers sur lesquels on distingue un grand nombre de polypes essentiellement visibles par leur extrémité supérieure. A la moindre alerte, cette partie visible se contracte, les tentacules se replient vers l'intérieur de l'orifice oral tandis que le disque buccal s'invagine dans le pharynx au moyen de muscles rétracteurs spéciaux. Les polypes sont aussi introversés et protégés par la masse coloniale, leur portion fragile étant ainsi en sécurité et la colonie prenant un aspect verruqueux.

Les Alcyonaires, groupés en six familles d'aspect divers, se distinguent par leur construction coloniale et la configuration de leurs spicules. Ils vivent dans les eaux peu profondes, en petite quantité dans l'océan Atlantique et en

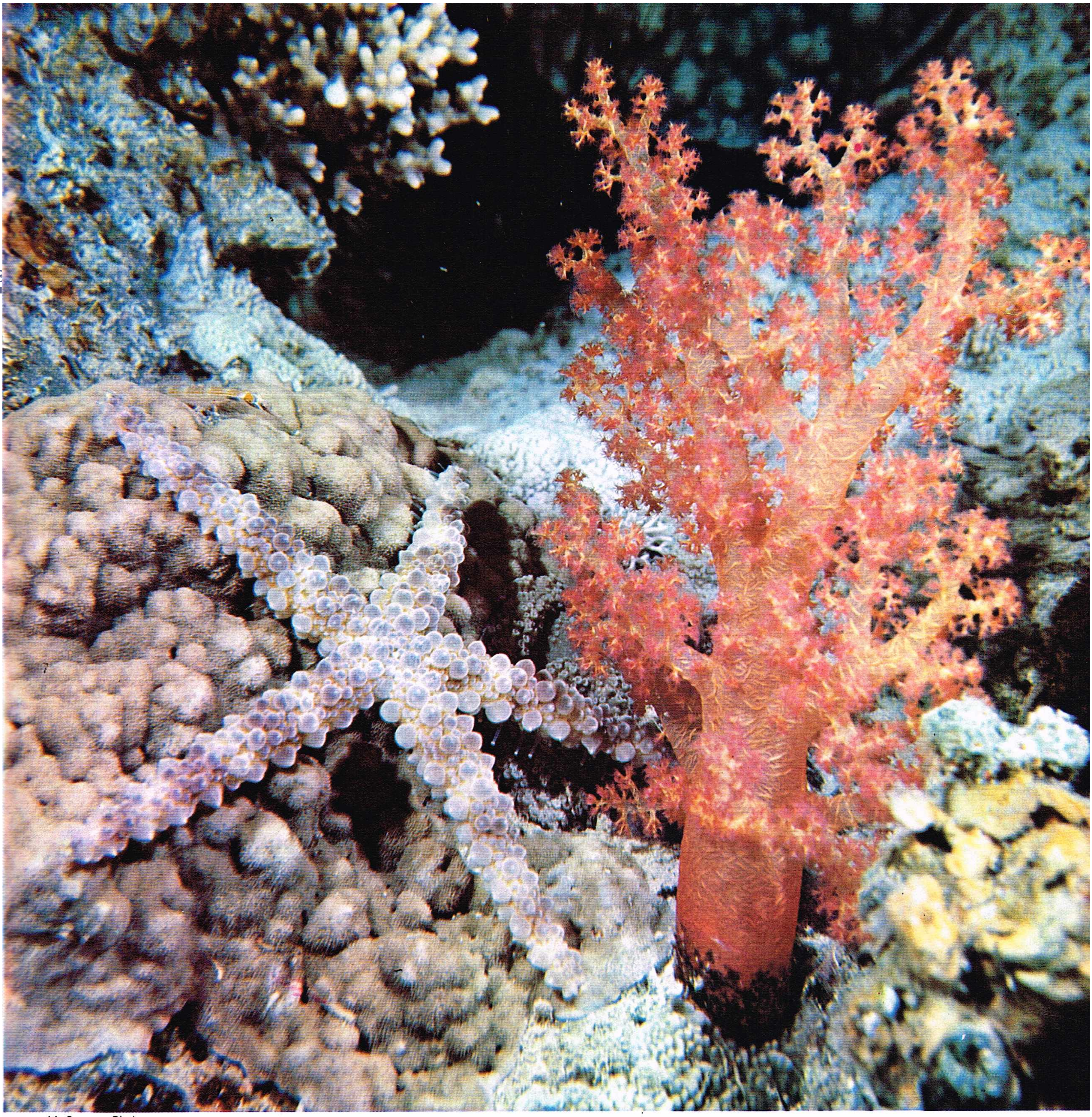

M. Sester - Pitch

plus grande abondance dans les eaux chaudes de la mer Rouge, des océans Indien et Pacifique, où ils forment de larges masses molles pouvant atteindre 2 m de diamètre *(Sarcophyton)*. Dans les eaux plus profondes, ils produisent des colonies plus réduites, rigides et ramifiées (Nephtéidés).

Ordre des Cœnothécaliés

Les Cœnothécaliés comprennent des Octocoralliaires dépourvus de spicules, à masse squelettique calcaire, importante, massive, fortement lobée, formée de couches de fibres cristallines d'aragonite (carbonate de calcium). Les polypes se logent dans des tubes superficiels alors que les solenia occupent de petites canalisations étroites qui relient entre eux les divers individus. Les cloisons polypaires ne sont pas toujours au nombre de huit. *Heliopora coerulea* ou « corail bleu » est une espèce très répandue dans les massifs madréporiques des océans Indien et Pacifique ; ils se distinguent par leur forme massive, la coloration bleu intense de leur squelette en partie cachée par la teinte brune des polypes en extension.

Ordre des Gorgonaires

Ce sont des Octocoralliaires à colonies abondantes et variées, fixées, arborescentes, plus ou moins ramifiées, ressemblant à des plantes, généralement élégantes, à colorations diverses (rose, pourpre, jaune, orange, brun, violet) et de taille variable (de 10 cm à 2,70 m). Les colonies sont soutenues par un axe central corné (gorgonine), calcaire ou cornéo-calcaire, entouré d'une mince

▲ *Les Alcyonaires forment des colonies fixées qui peuvent être arborescentes et vivement colorées ; ici, sur la droite, un Alcyonaire rose ; on peut noter, à gauche, sur le fond marin, la présence d'une étoile de mer (Échinoderme).*

▶ *Détail de* **Paramuricea chamaeleon,** *une Gorgone de la mer Méditerranée.*

G. Mazza

▼ *Les Gorgonaires (ici* **Paramuricea clavata)** *forment de belles colonies dressées et ramifiées aux couleurs éclatantes.*

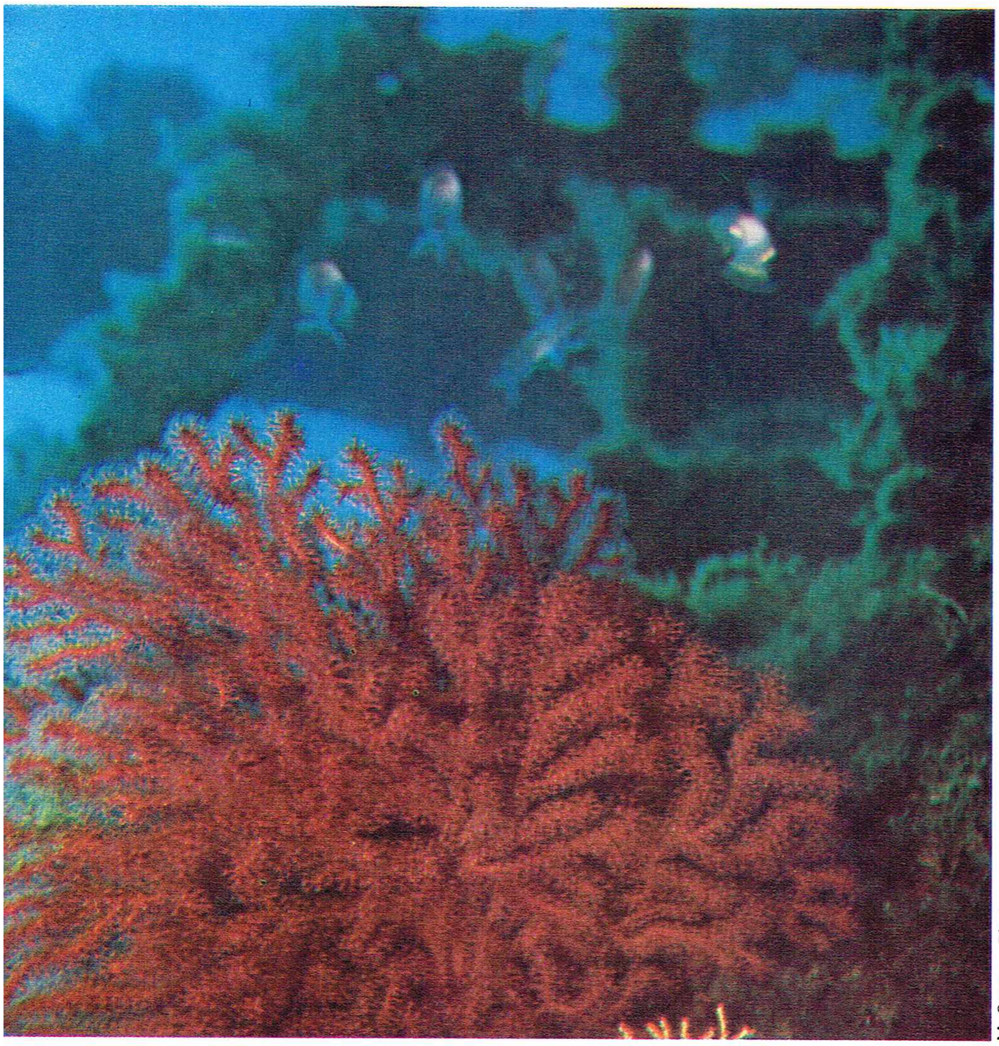

M. Sester - Pitch

couche de cœnosarc ou cortex, où se logent de courts polypes, des spicules calcaires et des canaux endodermiques assurant des relations interpolypaires. Les Gorgonaires comprennent deux sous-ordres : celui des Scléraxoniés et celui des Holaxoniés.

Sous-ordre des Scléraxoniés

L'axe médullaire est parcouru par des canaux et des solenia chez les Scléraxoniés, qui comptent sept familles parmi lesquelles figurent les espèces méditerranéennes communes : *Paramuricea chamaeleon* et *Corallium rubrum*. La première forme de grandes colonies abondantes, ramifiées en éventail, de teinte orange ou pourpre, vivant entre 30 et 35 m de profondeur sur les fonds rocheux très inclinés. La seconde espèce, dont l'axe calcaire privé de substance organique fournit le corail rouge des bijoutiers, de couleur rose ou rouge, présente une colonie irrégulièrement ramifiée, dont l'axe rigide, dépourvu de gorgonine, est essentiellement formé de spicules calcaires fortement engrenés par une substance interstitielle calcaire. Les polypes, d'un blanc pur, sont développés dans le cortex et sont dimorphes : les autozoïdes jouent un rôle dans la nutrition et la reproduction, alors que les siphonozoïdes, réduits à l'état de minuscules pores contractiles, permettent la circulation de l'eau dans les canaux endodermiques corticaux.

Ces colonies, hermaphrodites, vivent dans les eaux limpides et fraîches, fréquemment renouvelées, sous une faible luminosité, dans les grottes ou sous les surplombs de 30 à 40 m de profondeur. La pêche a été pratiquée pendant des siècles le long des côtes de Corse, de Sardaigne, de Sicile, du sud de la France, d'Afrique du Nord et même dans l'océan Atlantique, aux îles du cap Vert. Autrefois, la valeur du corail, due aux difficultés de sa récolte, permettait son échange, chez les Indiens et les Chinois, contre des émeraudes, des rubis et des perles. Sa rareté et sa couleur rouge vif faisaient qu'on lui attribuait alors des vertus thérapeutiques ; il était utilisé sous forme de poudre ou en collier par les malades affaiblis. Actuellement, les gisements étant épuisés, ce corail ne peut être ramassé que par des plongeurs. Cette précieuse Gorgone existe encore en très petite quantité en Méditerranée et une limitation de la récolte serait nécessaire pour assurer la survie de cette espèce et en éviter la destruction totale.

Sous-ordre des Holaxoniés

Les Holaxoniés (ou vraies Gorgones), sont beaucoup plus nombreux que les Scléraxoniés. Leur axe, très dur, est continu et corné ou alternativement composé de portions calcaires et cornées. Ils comprennent onze familles et un très grand nombre de genres et d'espèces répandus dans le monde entier. Leurs formes sont très variées : tantôt simples, en forme de fouet, tantôt arborescentes ou buissonnantes, à branches minces, dichotomiques, ramifiées ou non dans un plan, en éventail, parfois réticulées *(Gorgonia flabellum),* foliacées ou spiralées. Les Gorgones abondent dans tous les océans à des profondeurs variables, dans des eaux agitées, et sont plus particulièrement nombreuses dans les eaux tropicales indo-pacifiques et luxuriantes dans les Caraïbes. Elles constituent généralement un bon support pour diverses larves (Éponges, Hydroïdes, Bryozoaires, Brachiopodes) ou des adultes (Crustacés, Vers, Ophiures).

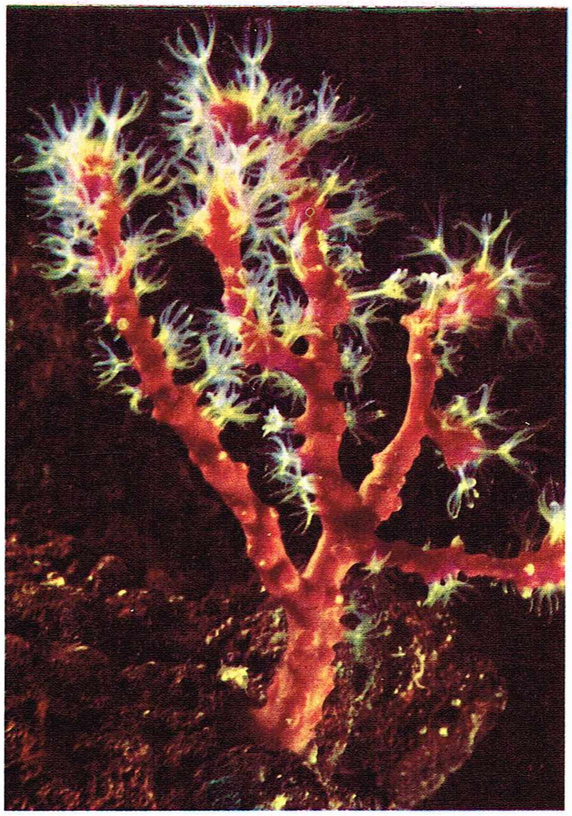

G.S. Giacomelli

◄ *Le corail rouge provient d'un Gorgonaire,* **Corallium rubrum** *; il est constitué par l'axe calcaire de la colonie, débarrassé de la substance organique.*

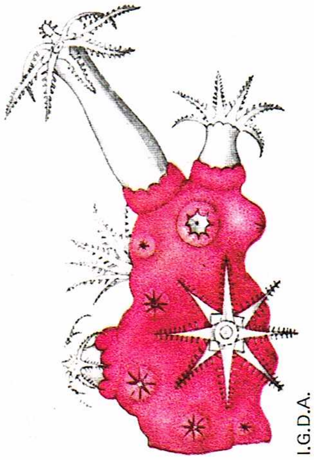

I.G.D.A.

▲ *Représentation schématique d'un fragment de colonie de corail rouge.*

Ordre des Pennatulaires

Les Pennatulaires sont des Octocoralliaires très particuliers dont les colonies non ramifiées et non fixées, mais seulement enfoncées dans les fonds meubles, sableux ou vaseux, sont capables d'opérer certains déplacements. Les Pennatules ou « plumes de mer » se fixent par l'extrémité bulbeuse et contractile de leur pédoncule; leur taille varie de quelques centimètres à 1 m et même plus; leurs couleurs, jaune, orange, rouge, pourpre, brun ou violet, sont dues à la pigmentation des spicules.

Primitivement la colonie naît d'un polype initial qui s'allonge rapidement : la portion inférieure forme le pédoncule, stérile, et la partie supérieure le rachis, où se rassemblent les zoïdes secondaires nés par gemmation. En général se développe un axe mince cornéo-calcaire, plus ou moins complet, accompagné de muscles permettant à la colonie de garder une position dressée. La cavité gastrique du polype initial se divise en quatre canaux longitudinaux, deux primaires et deux secondaires, au moyen de parois membraneuses entourant l'axe central. Après la dégénérescence de la bouche et des tentacules du polype initial, le rachis possède un grand nombre de polypes dimorphes : des autozoïdes de grande taille, fertiles, et de petits siphonozoïdes.

La classification des Pennatules dépend de l'arrangement des polypes secondaires, de la distribution et de la forme des spicules calcaires. On distingue ainsi quatorze familles d'aspect très différent.

Les **Vérétillidés,** les plus primitifs, ressemblent à une massue dépourvue de symétrie bilatérale et dont la partie charnue recèle des polypes entièrement rétractiles et sans calice. *Veretillum* est commun dans les zones côtières de la Méditerranée et de l'océan Atlantique. Les rénilles ou « reins de mer » peuvent cohabiter par centaines ou par milliers sur les fonds vaseux des côtes des régions chaudes d'Amérique; elles ont un fin pédoncule court dépourvu d'axe et un rachis ovale ou réniforme, aplati, rose ou violet. Elles se nourrissent de larves capturées dans un voile muqueux que sécrète leur rachis. Les rénilles sont fréquemment la proie des Nudibranches. Les umbellules, à rachis mince et très long, portant un bouquet distal de polypes de grandes dimensions, sont caractéristiques des eaux profondes abyssales (5 860 m). Enfin, les Pennatules les plus évoluées ont une symétrie bilatérale et une forme pennée due à la distribution régulière des polypes sur des expansions foliacées. *Pennatula phosphorea* et *Pteroeides griseum* sont communs en Méditerranée; le premier est rouge et le second gris. Ces deux espèces, comme la plupart des autres Pennatules, émettent des ondes lumineuses qui apparaissent encore plus vivement après des excitations répétées; cette particularité est due à l'existence de granules luminescents concentrés dans les sécrétions muqueuses; on trouve différentes teintes : jaune, vert, bleu ou violet.

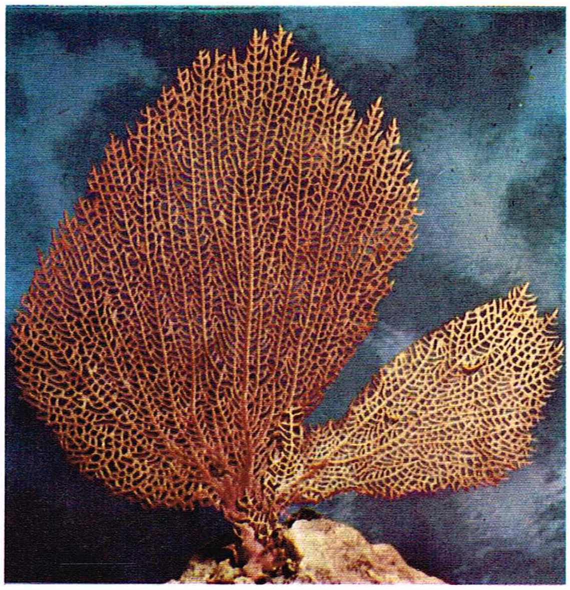

A. Margiocco

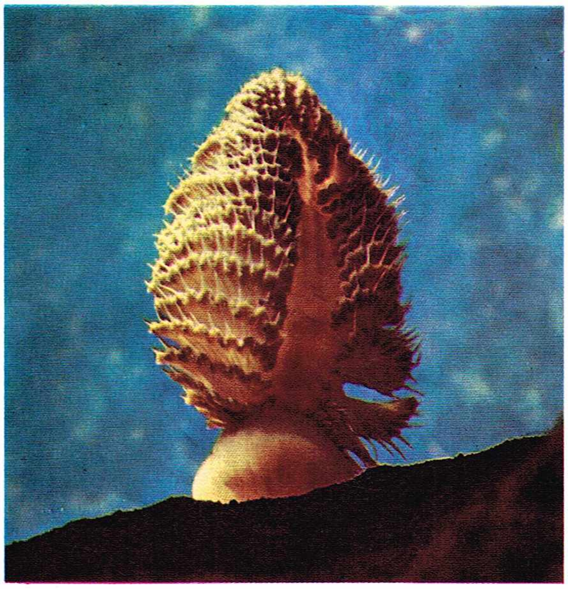

A. Margiocco

◄ *A gauche,* **Gorgonia flabellum** *qui présente un aspect foliacé; à droite, une colonie de Pennatulaires :* **Pteroeides spinosum.**

Stevenino - Rapho

▶ *Les Pennatules ou plumes de mer* (Pennatula sp.) *forment des colonies capables de se déplacer grâce aux mouvements de leur pédoncule contractile.*

Sous-classe des Hexacoralliaires

Ce groupe, quelque peu hétérogène, réunit des Anthozoaires marins, solitaires ou coloniaux, dont les polypes présentent une symétrie radiobilatérale. Leurs tentacules sont simples, au nombre de six ou d'un multiple de six, à quelques exceptions près, et toujours dépourvus de pinnules. Le nombre des loges mésentériques est aussi de six ou d'un multiple de six. Les structures polypaires, variées, sont nettement différentes de celles des Octocoralliaires. De nombreuses espèces solitaires sont totalement dépourvues de squelette (Actiniaires, Zoanthaires, Cérianthaires) alors que des formes coloniales en ont un corné (Antipathaires) ou formant une masse calcaire très volumineuse (Scléractiniaires) constituant de véritables récifs.

Cette sous-classe comprend cinq ordres : les Actiniaires, les Scléractiniaires, les Zoanthaires, les Cérianthaires et les Antipathaires.

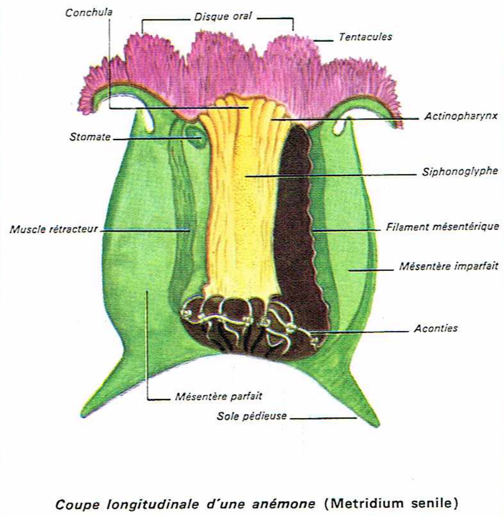

Coupe longitudinale d'une anémone (Metridium senile)

Droits réservés

▶ *Coupe longitudinale d'une anémone de mer.*

Ordre des Actiniaires

Les Actiniaires *(Actiniaria)* sont souvent appelés « anémones de mer ». Ces Animaux ressemblent en effet à des fleurs vivement colorées.

Le polype, généralement de grande taille, solitaire, est dépourvu de squelette ou de spicules, mais il est renforcé intérieurement par des cloisons molles, ou mésentères. Il se compose d'une colonne cylindrique limitée à son extrémité supérieure par un disque oral, ouvert en son centre par une bouche, ou actinostome, et à son extrémité inférieure par une base discoïde plus ou moins élargie et qui peut être arrondie lorsque le polype est enfoncé dans le sédiment (elle porte alors le nom de physe). La plus grande partie du cylindre est nue ou recouverte de nodosités plus ou moins alignées ayant parfois la forme de petites ventouses qui permettent l'adhésion de débris divers, favorisant ainsi le mimétisme de l'Animal par rapport à son substrat. La jonction colonne-disque oral est la plupart du temps soulignée par un bourrelet, ou marge, souvent accompagné d'un anneau de protubérances ovoïdes ou réniformes appelées acrorrhages. Les tentacules, insérés en deux ou plusieurs séries circulaires, sont généralement simples, mais ils peuvent avoir, surtout chez les espèces tropicales, des formes variées : pennées, en demi-haltère, en forme de main, etc.

Le disque oral s'invagine à l'intérieur de la colonne et forme l'actinopharynx s'ouvrant dans la cavité gastrale. L'actinopharynx possède un, deux ou plusieurs siphonoglyphes ciliés qui débouchent à la surface du disque par une sorte de gouttière, ou *conchula,* quelquefois ornée de protubérances et d'excroissances variées.

A l'intérieur de la colonne se développent des mésentères groupés par paires et situés symétriquement par rapport à un axe passant par le siphonoglyphe. L'espace compris entre deux mésentères du même couple est appelé endocœle; celui qui est compris entre deux couples successifs est l'exocœle. Les mésentères joignant l'actinopharynx à la colonne sont appelés mésentères parfaits (ou de premier ordre); les autres, plus petits, à bordure entièrement libre, sont nommés imparfaits. Ces mésentères portent une musculature longitudinale importante, constituée par un muscle rétracteur placé dans la partie médiane et un muscle pariétobasilaire près de l'insertion sur la colonne. Les couples de mésentères rattachés aux siphonoglyphes (mésentères directeurs) ont leur musculature située sur la face externe des endocœles qu'ils délimitent. Les autres paires, en revanche, ont leur musculature sur leur face interne, en vis-à-vis. Les six premiers couples de mésentères qui se forment sont parfaits et délimitent six endocœles et six exocœles principaux ; les couples de deuxième ordre appa-

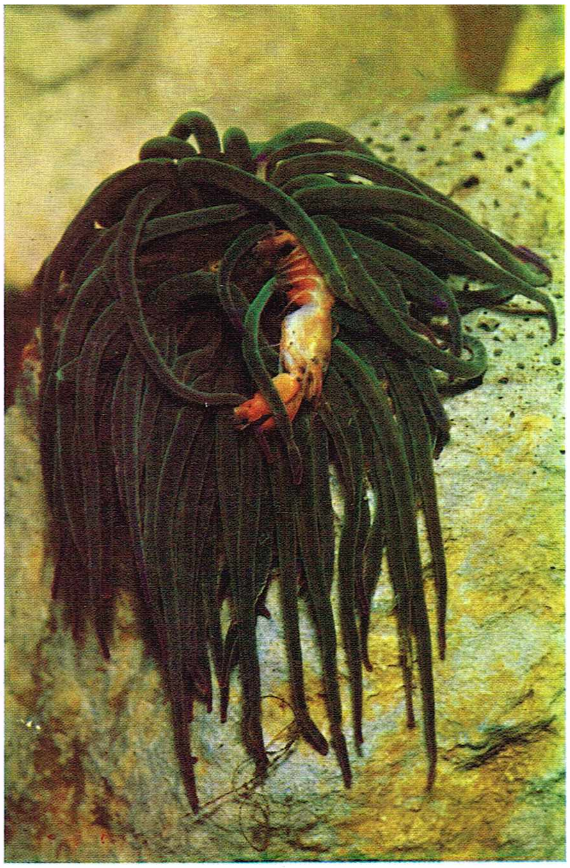

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

A. Margiocco

▲ ***Une anémone de mer* (Anemonia sulcata) *capturant un Crustacé (à gauche). Les Actinies peuvent se reproduire par multiplication asexuée; c'est le cas d'*Actinia equina *(à droite).***

raissent au milieu des exocœles et ainsi de suite. A chaque endocœle ou exocœle correspond au moins un tentacule; il existe donc une correspondance étroite entre les cycles tentaculaires et les cycles mésentériques des Actinies. Dans certains cas *(Edwardsia, Halcampa, Phellia)*, les mésentères parfaits et imparfaits ont une structure et une taille très différentes. Les premiers (macrocnèmes) ont un muscle rétracteur circonscrit et volumineux alors que les autres (microcnèmes) sont dépourvus de toute musculature. Les muscles mésentériques sont les plus volumineux du polype, mais ils ne sont pas les seuls. Au niveau du disque oral, un sphincter permet la rétraction de la couronne et la fermeture de la colonne. Les tentacules se meuvent et s'introversent grâce au double jeu d'une musculature ectodermique longitudinale et d'une musculature endodermique circulaire. La sole pédieuse est renforcée chez certaines espèces *(Actinia, Anemonia, Metridium)* par des muscles basilaires permettant une meilleure adhésion au substrat et surtout une certaine reptation. Il existe bien sûr des variations considérables dans le schéma musculaire indiqué ici, tant pour la position des muscles que pour leur importance respective.

Toutes ces données anatomiques servent de critère pour la systématique des Actinies. Il faut cependant en ajouter une très importante, celle qui concerne la répartition et la morphologie des capsules dévaginables, ou cnidocystes, dans les différents tissus (cnidome). Comme chez les Cérianthaires, les Zoanthaires et les Scléractiniaires, ces capsules sont de deux types différents tant par leur structure que par leur fonction : les spirocystes, abondants au niveau des tentacules, participent à la capture des proies grâce à leurs propriétés adhésives; les nématocystes, répartis dans tout le corps, sont spécialisés dans l'injection d'un venin puissant. Cela est fondamental pour la nutrition d'un Animal fixé, peu ou pas mobile.

La zone digestive, au sein de la cavité gastrale, est située sur le bord libre des mésentères (filaments mésentériques). Celui-ci est un bourrelet trilobé qui a en coupe la forme d'un trèfle. Le lobe central est composé de cellules glandulaires, à sécrétions digestives, et de nématocystes spéciaux. Les deux lobes latéraux sont ciliés et jouent un rôle dans la circulation de l'eau et du contenu de la cavité gastrique. Chez beaucoup d'Actinies, des filaments longs et fins, ou aconties, sont insérés à la partie inférieure des mésentères, à la suite du filament mésentérique. Les aconties, très riches en nématocystes, sont normalement enroulées au fond de la cavité gastrale, mais en cas d'alarme elles se déroulent et sont éjectées par l'actinostome ou par les pores de la colonne appelés cinclides.

Les Actinies se reproduisent par voie sexuée; certaines sont hermaphrodites, d'autres ont les sexes séparés. Les gonades sont placées à la partie inférieure des mésentères, entre le bourrelet du muscle rétracteur et le filament mésentérique. Elles ne sont pas présentes sur tous les mésentères, mais la plupart du temps sont situées sur ceux de taille moyenne (mésentères de deuxième ou troisième ordre). Chez les espèces hermaphrodites, les gonades femelles et les gonades mâles sont portées alternativement par des mésentères différents. Les cellules germinales, d'origine endodermique, migrent dans la mésoglée du mésentère et se divisent pour former une masse génitale ovoïde. Au moment de la maturité sexuelle, les gamètes mâles, développés en follicules comprimés les uns sur les autres, sont mis en relation avec la cavité gastrique de l'Actinie, par déchirement de l'endoderme. Les ovules se disposent en chapelets dans la mésoglée puis sont généralement émis par l'actinostome et fécondés hors du corps maternel. Le développement embryonnaire a lieu en pleine eau. Les actinulas ciliées sont ovoïdes et portent souvent une touffe de flagelles caractéristique à leur pôle aboral. Elles sont déjà pourvues d'un actinostome, d'une ébauche de pharynx et de quelques mésentères, mais les bourgeons tentaculaires et la sole pédieuse n'apparaîtront qu'au moment de la fixation sur le substrat.

Toutefois, chez quelques espèces, la fécondation a lieu dans la cavité gastrique et certaines Actinies *(Actinia equina, Cereus pedunculatus)* incubent les jeunes jusqu'à un stade très avancé du développement (bien après l'apparition des premiers tentacules). Dans d'autres cas, comme

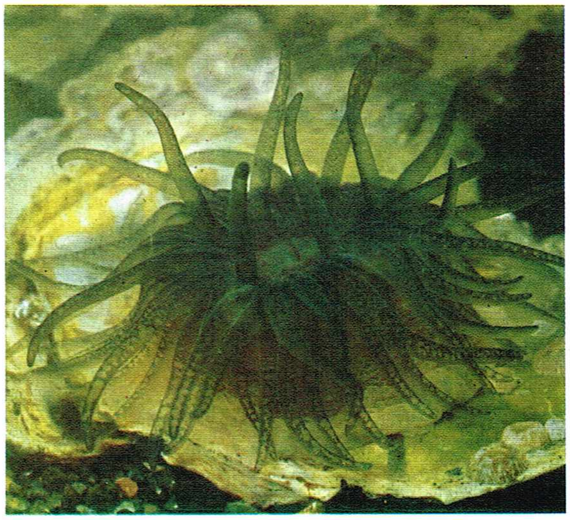

I.G.D.A. Archives B

◀ **Bunodactis rubripunctata.**

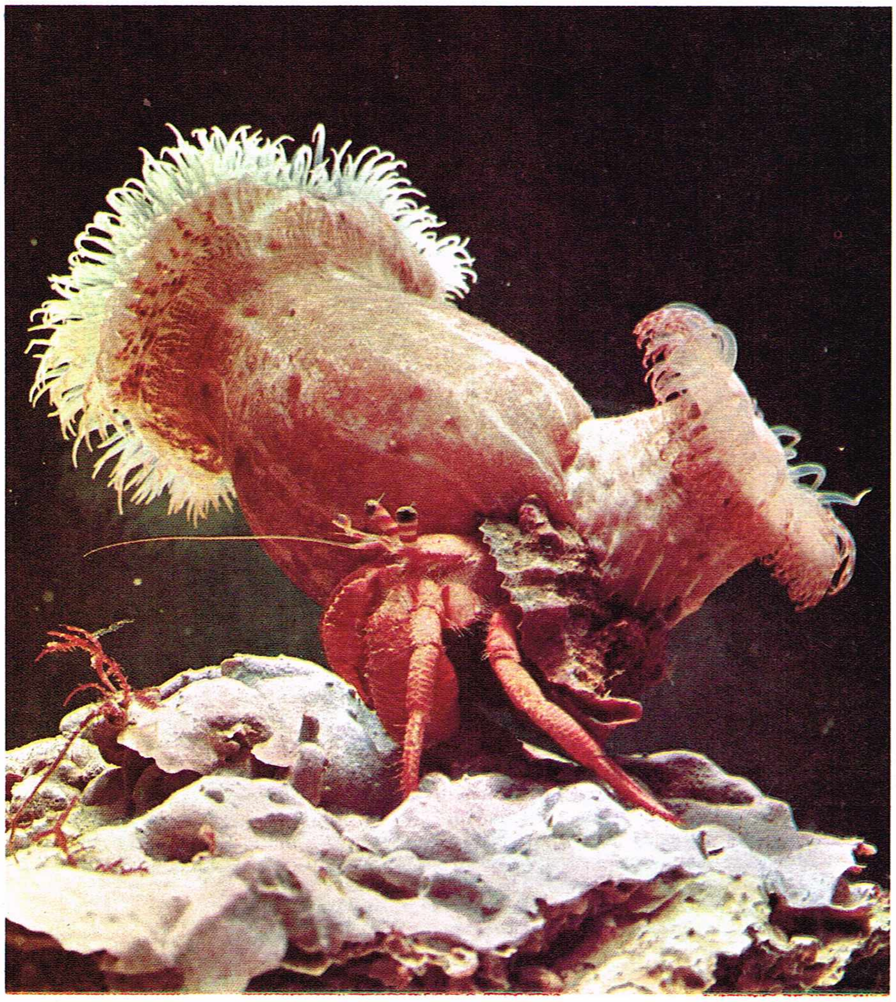

G. Mazza

▲ ***Exemple de symbiose entre deux anémones* (Calliactis parasitica) *et un bernard-l'hermite* (Pagurus arrosor).**

chez les Actinies arctiques ou antarctiques *(Epiactis prolifera)*, les embryons se développent dans de véritables poches incubatrices, situées sur la surface externe de la colonne. Ces phénomènes incubatoires, dont les modalités et la nature exacte sont encore mal connues, permettent à ces espèces la colonisation de biotopes difficiles, tels que la zone de balancement des marées (*Actinia equina* par exemple), et provoquent une concentration importante d'individus en certains points géographiques, puisque les larves incubées *(Cereus pedunculatus)* se fixent, la plupart du temps, à proximité de leur protecteur. Enfin, et nous ne citerons cet exemple qu'à titre anecdotique, certaines larves utilisent de curieux moyens pour se développer. C'est le cas de *Peachia hastata*, qui, durant une grande partie de sa vie embryonnaire, se place dans les canaux radiaires d'une méduse; là, il trouve protection et nourriture et peut effectuer ainsi des déplacements importants.

De nombreuses Actinies utilisent également le mode de reproduction asexué pour se multiplier. Ce type de reproduction, relativement fréquent chez les Cnidaires, est lié à une grande capacité régénératrice de leurs tissus. Le mode le plus fréquent est la fission longitudinale *(Sagartia, Anemonia)*; dans ce cas, la sole pédieuse s'allonge, s'amincit en un point et se fissure. La séparation des deux nouveaux individus s'opère par la prolongation de ce phénomène jusqu'au disque oral. La lacération pédieuse n'est pas rare non plus *(Metridium, Sagartia, Phellia)*. Elle a lieu à la périphérie de la sole pédieuse, où apparaissent à l'extrémité des pédoncules des lobes plus ou moins sphériques qui se détachent et forment une petite Actinie, véritable copie conforme de l'adulte. Chez les espèces les plus primitives peut exister une forme de strobilisation; *Gonactinia prolifera* a la faculté de créer une couronne de tentacules au milieu de sa colonne. La scission s'opère transversalement, au-dessus de cette zone, et engendre deux individus qui régénèrent leur partie manquante. La régénération peut s'effectuer à partir de fragments du disque oral chez *Boloceroides*. Les tentacules se détachent aisément par groupes de deux ou trois; leur zone cicatricielle se ferme grâce à la présence d'un sphincter en anneau, situé à la base de chaque tentacule, et en quelques jours s'opère la régénération complète de jeunes individus.

Les Actinies se nourrissent un peu au hasard de proies qui passent près d'elles. *Tealia crassicornis* peut ingérer des Animaux très volumineux (crabes, Poissons, etc). La capture se fait toujours de la même manière : lorsqu'une proie passe au voisinage de l'actinostome, les tentacules s'inclinent, l'enserrent, la paralysent grâce à leurs spirocystes et leurs nématocystes, et la poussent vers l'actinostome qui s'ouvre en laissant passage à une partie de l'actinopharynx venant s'accoler à elle. La digestion commence dans la cavité gastrale par sécrétion d'enzymes puissantes, et l'absorption s'opère par phagocytose. Les déchets, noyés dans un voile de mucus, sont rejetés peu de temps après.

L'étude du comportement des Actinies est très difficile en raison de la complexité de leurs réactions à des stimuli (lumière, courant électrique, chaleur, etc.). On a pu cependant mettre en évidence certains mécanismes réguliers dans les réponses chez certaines Actinies grégaires communes sur nos côtes *(Actinia equina)* ou sur les côtes américaines *(Anthopleura elegantissima)*. Lorsque ces espèces sont en contact avec des individus qu'elles ne reconnaissent pas comme des leurs, leurs acrorrhages se gonflent d'eau et prennent une taille démesurée. Par un mouvement de la colonne, ils sont appliqués sur l'agresseur, se déchirent et laissent sur ses tissus des plaques de nématocystes nécrosants. Ce type de défense est non seulement original, mais il est efficace puisque l'action du venin se fait encore sentir bien après le moment de la réponse à l'agression.

La reconnaissance interspécifique est aussi remarquable dans le cas de la symbiose entre le pagure (Crustacé décapode) et l'Actinie. Associés l'un à l'autre, ces Animaux vivent à bénéfice réciproque, l'un assurant à l'autre le déplacement rapide et la nourriture, l'autre recevant la protection. Les exemples les plus connus de cette association sont ceux de *Calliactis parasitica* avec *Eupagurus bernhardus* et d'*Adamsia palliata* avec *Pagurus prideauxi*. Dans ce dernier cas, l'Actinie place son orifice buccal près de la bouche du pagure, en position ventrale, et augmente l'habitat de ce dernier par un développement considérable de sa sole pédieuse. Citons enfin un dernier cas de symbiose, cette fois-ci entre une Actinie gigantesque et un petit Poisson des mers tropicales : l'amphiprion cherche protection dans les tentacules de l'anémone *Stoicactis kenti*, où il se cache à la moindre alerte, sans subir les effets des nématocystes pourtant très venimeux.

Les Actinies, dont le nombre d'espèces connues est évalué entre six cents et sept cents, forment un petit groupe, comparativement à d'autres, comme celui des Mollusques. Elles sont cependant intéressantes d'un point de vue écologique, car elles sont abondantes dans la plupart des faciès marins. Il leur arrive de dominer les autres groupes zoologiques quant à la biomasse : cela est fréquent dans les eaux froides (régions polaires ou subpolaires). Sur nos côtes, les faciès rocheux sont souvent colonisés par *Actinia equina*, de taille moyenne, rouge ou brune, dont la couronne bleue d'acrorrhages est caractéristique; très commune dans la zone de balancement des marées, elle conserve son hygrométrie par une rétention d'eau lorsqu'elle est émergée. Une autre espèce caractéristique de cette zone est l'*Anemonia sulcata*, dont la couleur verte est due à la présence dans ses tissus d'Algues symbiotes, participant à son bilan nutritif. Communes également, mais dans les fentes des rochers et dans les cuvettes profondes, la belle Actinie rose et bleu *Bunodactis verrucosa* et la grande *Tealia felina* sont remarquables par leur magnificence. Moins fréquente sous nos latitudes, l'élégante Actinie *Metridium senile* se reproduit régulièrement par voie asexuée, en lacérant sa sole pédieuse; sa grande taille et la beauté de son panache de tentacules en font un matériel de choix pour les aquariophiles.

Dans les faciès meubles, là où se développent les herbiers à zostères, on rencontre en abondance *Cereus pedunculatus*. Cette Actinie, généralement ancrée sur de petits cailloux enfouis à faible profondeur dans le sédiment, ne laisse émerger du sable que sa couronne tentaculaire.

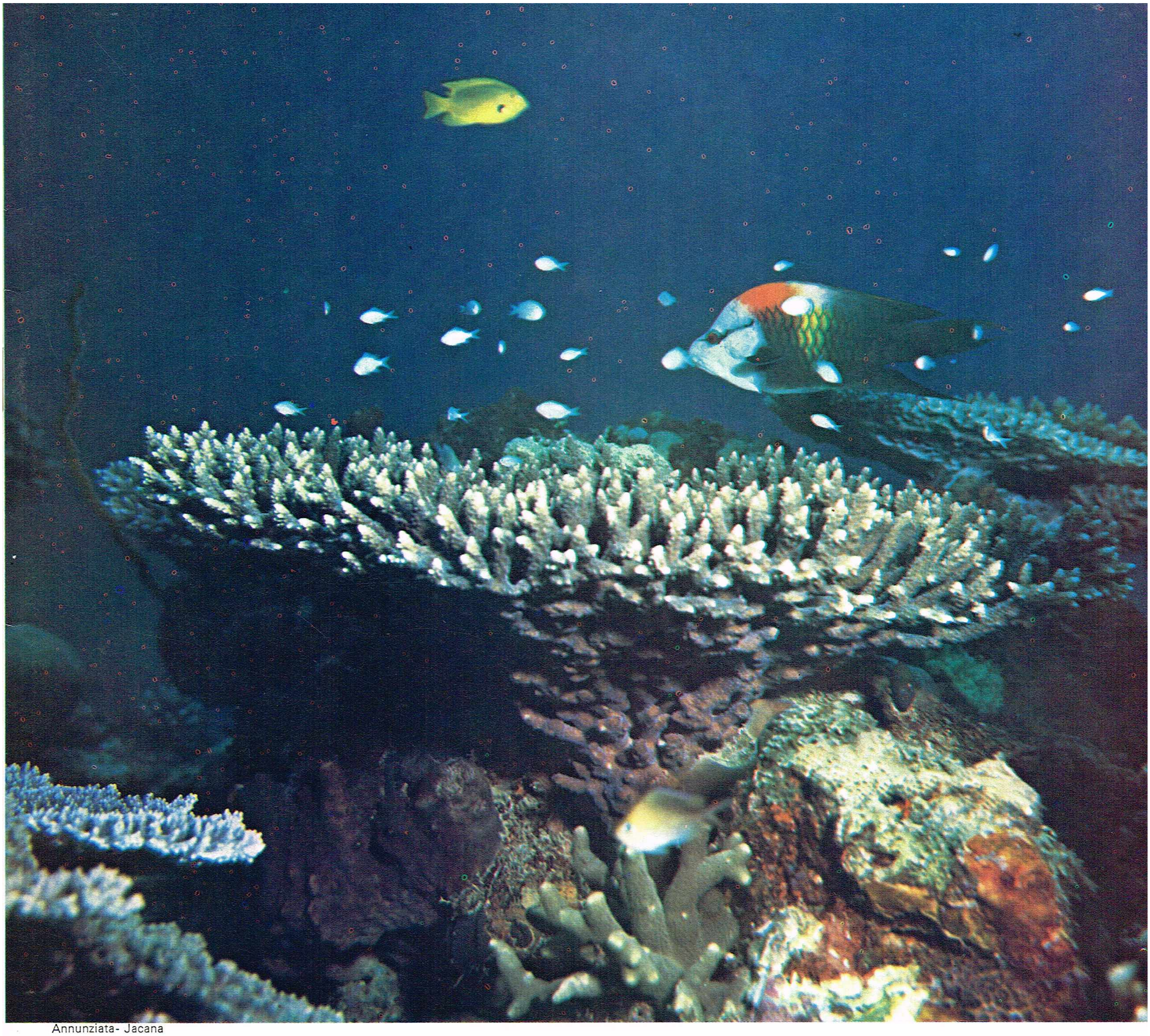

Annunziata- Jacana

Ordre des Scléractiniaires ou Madréporaires

Les Scléractiniaires, dénommés communément coraux, se différencient des Actiniaires par la présence d'un squelette calcaire appelé polypier. La nature animale de ces organismes, longtemps assimilés à des plantes, ne fut reconnue qu'en 1726 par Peyssonel. Un Madréporaire comprend deux parties : le polype et le squelette.

L'anatomie du polype rappelle celle des Actinies. Comme chez ces dernières, la cavité gastrovasculaire se prolonge vers le haut par un stomodeum et communique avec l'extérieur par un seul orifice, la bouche (ou orifice oral), munie de deux siphonoglyphes et entourée de tentacules généralement courts et disposés en couronnes régulières. La cavité gastrovasculaire est divisée par des mésentéries disposées par paires et dont le bord interne se renfle pour constituer les filaments mésentériaux. L'ectoderme renferme de nombreux cnidoblastes ou nématoblastes. Les polypes des Madréporaires sont en général beaucoup plus petits que ceux des Actinies : leur diamètre moyen est de quelques millimètres ; il peut s'abaisser au-dessous de 1 mm ou atteindre exceptionnellement 20 cm ou plus chez *Fungia*. Les Madréporaires sont simples ou coloniaux. Chez ces derniers, de loin les plus nombreux, les polypes sont reliés entre eux par le cœnosarque parsemé de canaux permettant aux cavités gastrovasculaires de tous les individus d'une colonie de communiquer entre elles. Les tissus vivants des Madrépores offrent des couleurs souvent très vives grâce à la présence d'Algues symbiotiques unicellulaires, les zooxanthelles, et de pigments diffus disposés en grains de 1 à 2 μ de diamètre, responsables de la fluorescence des coraux. Si on soumet ces organismes aux rayons ultraviolets, ils restituent à l'obscurité l'énergie accumulée, en émettant une lumière de couleur variable ; cette disposition a été mise à profit à l'Aquarium de Nouméa.

Le squelette est sécrété par l'ectoderme du polype (il s'appelle alors *polypiérite*) ou par le cœnosarque (il se nomme dans ce cas cœnenchyme ou cœnosteum). Entièrement extérieur à l'Animal, qu'il recouvre à la manière d'un gant sur la main, il peut atteindre une très grande complexité. La loge calcaire dans laquelle vit le polype, et qui porte le nom de calice, est constituée par une muraille compacte ou poreuse d'où partent des lames calcaires verticales rayonnantes, les septes *(éléments radiaires* ou *scléroseptes)* alternant avec les mésentéries. Au centre du calice se dresse une petite colonne calcaire, la columelle, souvent irrégulière et en relation avec les septes. Les cloisons calcaires sont réunies par les planchers, lamelles

▲ Nombre de Scléractiniaires, ou Madréporaires, construisent des récifs coralliens. Certains Madréporaires, comme cet* Acropora*, contiennent des Algues symbiotiques et sont donc limités aux eaux peu profondes et généralement chaudes ; d'autres sont dépourvus d'Algues et vivent dans des conditions écologiques moins strictes.

Annunziata - Jacana

World Photo Service

▲ *La zone claire bordant cette petite île de la mer des Philippines est constituée par un récif corallien.*

horizontales ou arquées sur lesquelles le polype s'appuie successivement au cours de l'édification progressive du squelette. Ce dernier contient de 98 à 99,7 % de carbonate de calcium auquel s'ajoute une très faible proportion de carbonate de magnésium et de phosphate de calcium. Il est constitué de très petits cristaux d'aragonite appelés fibres, ayant de 0,3 à 1 μ de diamètre et visibles seulement en microscopie électronique. Les fibres rayonnent autour d'un centre pour former de petites sphérules dont la disposition est souvent caractéristique d'un genre ou d'une famille.

La symétrie bilatérale primitive ainsi que la symétrie hexaradiaire, presque toujours visibles chez les jeunes individus, persistent très souvent chez l'adulte, où les tentacules, les couples de mésentéries et les septes sont au nombre de six ou d'un multiple de six. Dans certains groupes, en revanche, cette régularité s'altère profondément.

Autrefois on classait les Madréporaires en *Aporosa* et *Porosa* d'après la texture compacte ou poreuse du squelette. D'autres critères actuellement utilisés en systématique font appel aux éléments calcaires réunissant les septes et à l'ornementation de ces derniers. Il n'est pas possible d'indiquer les différents groupes reconnus chez les Madréporaires, et nous nous bornerons à signaler les principaux types morphologiques, classification pratique sans aucune valeur systématique. On distinguera donc les formes simples *(Caryophyllia, Fungia)* et les formes coloniales. Parmi ces dernières, certaines sont massives, d'autres ramifiées, quelques-unes lamellaires ou encroûtantes. Les calices sont soudés les uns aux autres *(Favites)* ou séparés par une assise de cœnosteum *(Montastraea)*. Lorsque les polypes et les calices perdent leur individualité, ils se fusionnent pour constituer des colonies méandriformes *(Meandrina, Platygyra)*; une évolution plus poussée conduit à la réunion de tous les polypes d'une colonie *(Hydnophora)*.

Les coraux sont carnivores, mais ne se nourrissent que des minuscules organismes du plancton, qu'ils capturent et immobilisent grâce aux nombreux cnidoblastes de leurs tentacules. En outre, ceux qui vivent dans les eaux tropicales renferment dans leurs tissus des zooxanthelles, qui sont aussi présentes dans l'œuf et dans la larve. Plusieurs études ont permis d'élucider la nature de l'association établie entre le Madrépore et les Algues : elle constitue une véritable symbiose. En effet, le corail offre aux zooxanthelles une protection, un apport de gaz carbonique rejeté par les tissus de l'Animal et une source de phosphates et d'acides aminés. En échange, les Algues, grâce à l'assimilation chlorophyllienne, élaborent des substances comme les glucides utilisées ensuite par le Madrépore.

Von Heider a montré le premier, en 1881, que le squelette était une production de certaines cellules spécialisées de l'ectoderme, les calicoblastes. Récemment, grâce au microscope électronique et en utilisant comme traceur le $Cl_2\ Ca^{45}$ radioactif introduit dans l'eau de mer de bacs d'élevage, les physiologistes ont pu préciser les différentes phases de la construction du squelette. Les calicoblastes interviennent seulement en sécrétant une substance organique, un amino-polysaccharide, qui forme sur la paroi externe des cellules ectodermiques une mince couche de 1 à 1,5 μ d'épaisseur; cette substance absorbe les ions Ca^{++} et CO_3^{--} de l'eau de mer et sert de moule aux fibres d'aragonite qui s'allongent perpendiculairement à la surface de l'ectoderme. L'élaboration des cristaux calcaires s'effectue grâce à une enzyme, l'anhydrase carbonique, fabriquée par le polype. Les zooxanthelles jouent un rôle important dans la construction du squelette en fournissant un apport énergétique non négligeable pour la sécrétion de l'amino-polysaccharide. Si on élève des coraux à l'obscurité, dans un aquarium, les zooxanthelles, incapables d'exercer leur fonction chlorophyllienne, meurent; dès lors, le squelette des coraux s'édifie beaucoup plus lentement et reste fragile. Il en résulte que la fabrication du carbonate de calcium par le Madrépore est plus faible la nuit que le jour, et dans certaines régions du squelette apparaît une succession de très fins bourrelets parallèles correspondant à la croissance diurne. L'application, par ailleurs difficile, de ces observations à des formes anciennes des temps paléozoïques a permis d'en conclure qu'à l'ère primaire, l'année comptait quatre cents jours. La croissance des coraux varie avec

l'âge, les conditions du milieu (température, profondeur) et la forme de la colonie (*Acropora*, ramifié, croît en moyenne de 30 mm par an en hauteur, tandis que *Porites*, massif, ne pousse que de 17 mm environ). Certaines colonies de *Porites* peuvent atteindre plusieurs mètres de hauteur.

Chez les Madréporaires, la reproduction est sexuée ou asexuée. La plupart sont hermaphrodites, et les cellules sexuelles, contenues dans des capsules primitives situées dans les mésentéries, sont libérées à maturité dans la cavité gastrovasculaire où se produit la fécondation. Chez plusieurs espèces, la reproduction a lieu sans périodicité, chez d'autres, l'influence de la lune semble prépondérante : ainsi, chez *Pocillopora damicornis*, la fécondation s'effectue lors de la nouvelle lune, tandis que celle de *Stylophora pistillata* ne se produit qu'entre la pleine lune et le dernier quartier. L'œuf donne naissance à une petite larve ciliée, la planula, dont la longueur varie entre 0,5 et 2,5 mm. Expulsées par l'orifice oral, les larves mènent une vie libre au sein du plancton en nageant grâce à leurs cils vibratiles. La vie larvaire ne dure que quelques jours seulement; elle atteint rarement un mois. Malgré sa brièveté, cette phase libre permet la dissémination de l'espèce, grâce à l'entraînement des larves par les courants marins. Au bout d'un certain temps, variable suivant les espèces, mais également sous l'influence des conditions extérieures comme la lumière et la température, la larve se fixe sur un support solide, perd ses cils et se transforme peu à peu en un polype solitaire qui sécrète les premiers éléments de son squelette.

Lorsque le polype est parvenu à maturité apparaît chez les formes coloniales le phénomène de bourgeonnement (ou gemmation). Sur les parois du sujet solitaire se différencie un bourgeon qui se développe en un second polype, lequel sécrète à son tour un squelette étroitement soudé à celui de l'individu original. Par bourgeonnements successifs, la colonie croît et acquiert la forme caractéristique de l'espèce. Chez *Fungia* existe une véritable scissiparité transversale : la larve, après fixation, se transforme en un petit individu pédonculé qui, parvenu à un certain stade de croissance, se détache et devient libre, processus qui peut se reproduire plusieurs fois et rappelle la strobilisation des acalèphes. Chez *Diaseris*, voisin de *Fungia*, l'Animal se fragmente en plusieurs morceaux dont chacun se régénère peu à peu ; sur la Grande Barrière australienne, on a pu compter en certains points jusqu'à mille individus au m², provenant tous de la division de quelques *Diaseris* adultes.

Presque tous les coraux vivent fixés sur un support solide. Cependant, certains reposent sur les sédiments meubles du fond; quelques-uns, comme *Fungia*, parviennent à se mouvoir lentement grâce à leurs tentacules. Le Madréporaire solitaire *Heteropsammia* réussit à se déplacer grâce à un petit Ver parasite, *Aspidosiphon*, qu'il abrite partiellement dans son squelette.

Écologie des Madréporaires

La répartition des Madrépores est très influencée par le milieu extérieur. Du point de vue écologique, on peut reconnaître parmi les coraux deux types essentiels : les Madréporaires récifaux ou hermatypiques, qui contiennent dans leurs tissus des zooxanthelles, et les Madréporaires non récifaux ou ahermatypiques, qui sont dépourvus d'Algues symbiotiques et qui peuvent vivre dans des conditions écologiques moins strictes que les précédents.

Les coraux de récifs vivent dans les eaux peu profondes et chaudes où la température ne descend jamais au-dessous de 18°, l'optimum se situant entre 25° et 29° ; en revanche, une température supérieure à 35° entraîne la mort des organismes, et les petites cuvettes d'eau stagnante très chaude n'abritent jamais de Madrépores. Ne pouvant vivre sans lumière, les coraux hermatypiques descendent rarement au-dessous de 60 m de profondeur. Ils exigent aussi une eau salée et ceux de la mer Rouge subissent même une salinité supérieure à la normale (40 ‰) ; une trop grande dilution leur est néfaste, et c'est l'une des raisons pour lesquelles ils ne peuvent s'installer à l'embouchure des grands fleuves. La plupart des coraux ne supportent pas l'émersion ; toutefois, certains d'entre eux (*Platygyra, Porites*) découvrent à marée basse, et luttent contre la dessiccation en sécrétant un abondant mucus. Les Madrépores de récifs recherchent les

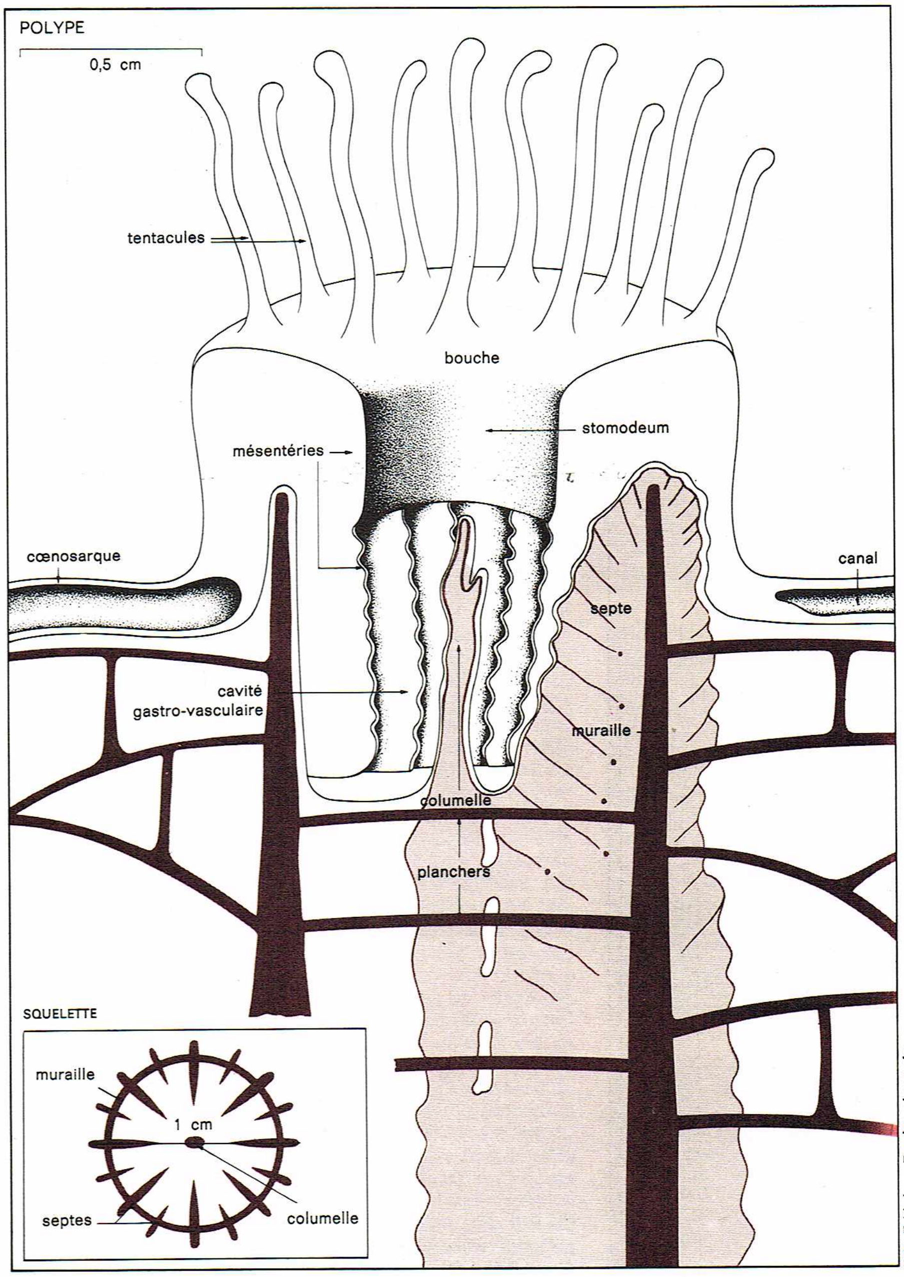

▲ ***Représentation schématique d'un polype de Scléractiniaire.***

▼ ***Les récifs coralliens montrent parfois des formes étranges.***

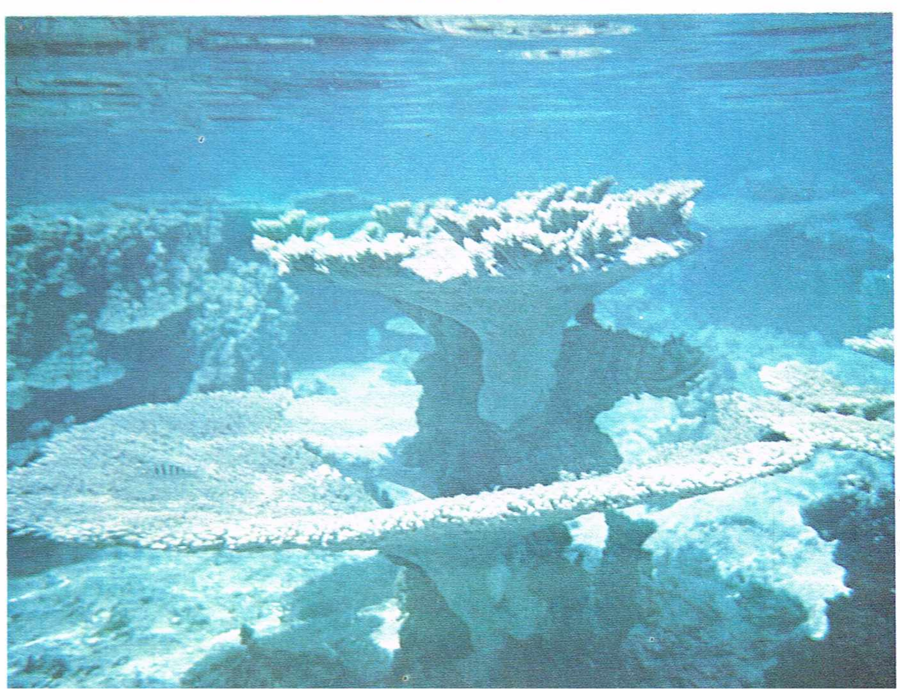

Chevalier

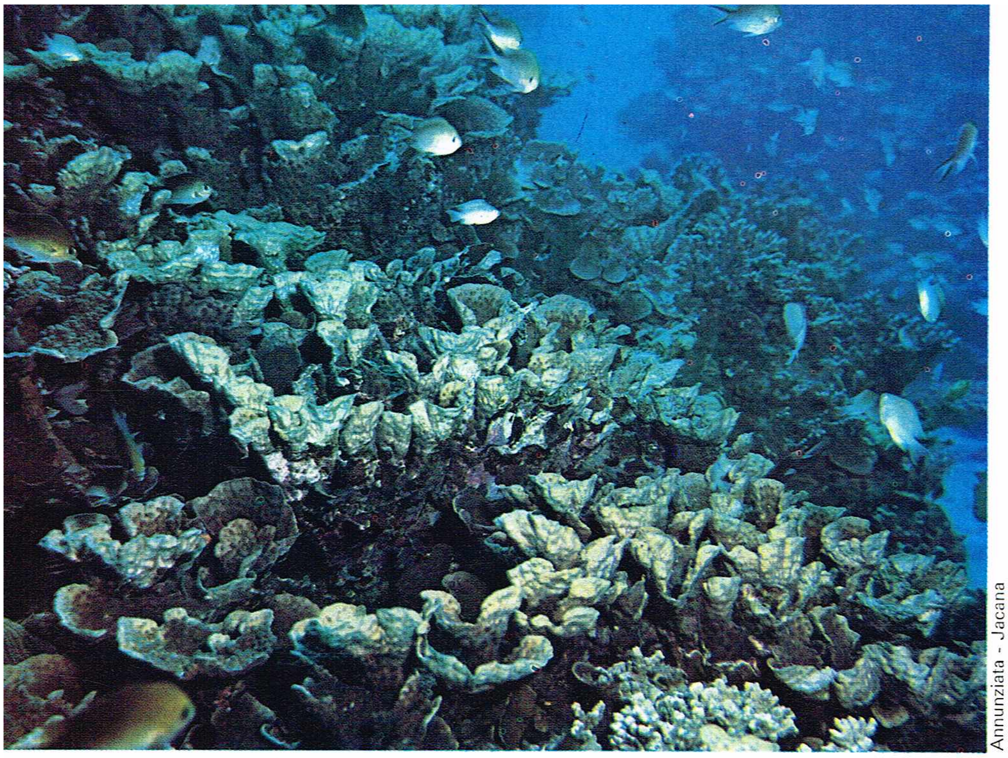

Annunziata - Jacana

▲ *Fond corallien à* Aestropora.

eaux claires, oxygénées, et s'accommodent difficilement des sédiments en suspension dans la mer. Un apport considérable d'alluvions lors des tempêtes peut détruire ces organismes sur une grande surface. Néanmoins, quelques espèces s'adaptent aux eaux boueuses et parviennent à lutter contre l'envasement grâce aux nombreux cils vibratiles qui tapissent la paroi extérieure des polypes; *Fungia* et *Maeandra areolata* enfouis sous le sable fin se libèrent totalement des sédiments au bout d'une heure au plus. Cette faculté d'adaptation explique que des eaux troublées par des apports terrigènes comme celles de la grande baie de Djakarta en Indonésie puissent renfermer des constructions coralliennes souvent très riches.

Les Madréporaires hermatypiques, à cause de leurs exigences écologiques généralement assez importantes, sont localisés dans les régions tropicales, principalement entre 32° de latitude nord et 30° de latitude sud. Toutefois, à la suite de circonstances favorables, ils parviennent à s'installer au-delà de ces limites. La baie d'Enoura Wan au Japon (35° 5′ latitude nord) et l'île de Lord Howe dans le Pacifique (31° 38′ latitude sud) abritent les formations à coraux récifaux les plus éloignées de l'équateur. En revanche, dans les régions tropicales, les Madrépores sont absents si les conditions propices à leur développement font défaut : à l'embouchure des grands fleuves d'Afrique, de l'Inde et de l'Amérique du Sud par exemple. De même les courants froids qui baignent périodiquement les côtes occidentales de l'Afrique australe ou de l'Amérique du Sud ont empêché leur installation. Celle-ci exige en outre un support convenable, une large plate-forme peu profonde; là où ces conditions sont remplies dans les eaux tropicales, que ce soit au voisinage d'îles ou de continents ou sur des hauts fonds formés par d'anciens volcans, les Madrépores construisent avec d'autres organismes, surtout des Algues calcaires, des récifs dont les principaux types sont les récifs frangeants le long des côtes, les récifs-barrières à une certaine distance du rivage, les atolls, récifs annulaires entourant un lagon, enfin les récifs tabulaires qui sont des masses calcaires très étendues, plates à leur sommet et aux contours irréguliers. Deux grandes régions récifales peuvent être reconnues.

Dans l'Atlantique occidental tropical, les récifs coralliens (frangeants, en barrières et deux petits atolls) s'étendent depuis la Floride jusqu'à la côte nord du Brésil et principalement aux Antilles. De petites formations coralliennes se sont installées également aux Bermudes; elles sont baignées par les eaux chaudes du Gulf Stream. La faune madréporique, riche de vingt genres et quarante espèces, renferme des formes spéciales à cette région *(Mussa, Meandrina, Agaricia)* et d'autres communes au Pacifique. Les coraux des Antilles sont parvenus, au début du Quaternaire, à coloniser les côtes occidentales d'Afrique qui abritent actuellement des récifs de faible extension, peuplés par une quinzaine d'espèces, toutes connues dans les Caraïbes.

Dans la région indo-pacifique, les récifs coralliens couvrent une surface considérable dans la mer Rouge, dans l'océan Indien, en Indonésie et dans le Pacifique tropical. La Grande Barrière australienne, qui s'étend sur 2 500 km de longueur, constitue le plus bel ensemble corallien actuel et la région indo-pacifique renferme de nombreux atolls. Dans ce vaste domaine récifal, on a compté quatre-vingts genres et plus de six cents espèces de Madréporaires. Le nombre diminue d'ailleurs au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'équateur (à cause des modifications de température) et également d'ouest en est par suite de l'isolement des îles du Pacifique central. La côte occidentale de l'Amérique constitue même une province faunistique particulière qui ne renferme qu'une quarantaine d'espèces coralliennes, différentes de celles des Antilles et installées sur de petites constructions récifales dans le golfe de Californie, la baie de Panama et la côte du Pérou.

Sur un récif, les coraux ne sont pas répartis au hasard. La profondeur de la mer, le vent, la houle et d'autres facteurs moins importants président à leur distribution et parviennent à créer une zonation plus ou moins aisément discernable. Sur un atoll du Pacifique on peut reconnaître plusieurs zones. Le platier récifal, souvent à fleur d'eau à marée basse, n'abrite que des colonies rampantes ou petites qui deviennent plus abondantes vers la bordure externe, sauf si la houle trop forte favorise la croissance des Algues calcaires (lithothammies) au détriment des coraux. La pente externe de l'atoll est en général riche en Madréporaires constructeurs *(Acropora, Pocillopora, Porites, Montipora)* jusqu'à une profondeur de 20 ou 30 m. Au-delà, les coraux deviennent moins abondants en même temps qu'apparaissent des genres beaucoup plus rares dans les eaux superficielles, comme *Echinopora. Leptoseris* et quelques autres persistent jusqu'à 100 m et au-delà. Le lagon abrite des formes branchues ou en parasol (*Acropora* surtout) d'autant plus fragiles qu'elles vivent à de plus grandes profondeurs. Protégées d'une forte houle, les colonies atteignent souvent de grandes dimensions. Toutefois, au-dessous de 50 m, elles disparaissent pratiquement à cause de la forte sédimentation calcaire et en raison du renouvellement insuffisant de l'eau.

Aux coraux récifaux des mers chaudes s'opposent les Madréporaires ahermatypiques dépourvus de zooxanthelles et qui, pour cette raison, vivent depuis la surface jusqu'à plusieurs milliers de mètres de profondeur, avec toutefois un optimum vers 200 à 400 m. *Fungicyathus*, le plus profond, a été récolté par dragage sous 6 000 m d'eau. Peu exigeants sur les conditions de température, ces Madréporaires se trouvent sous toutes les latitudes et certaines espèces vivent sans inconvénient dans des eaux dont la température est voisine de 0°. Ils appartiennent le plus souvent à des familles différentes de celles des formes tropicales. On y rencontre beaucoup de formes simples (*Caryophyllia, Flabellum, Balanophyllia,* dont l'espèce *B. regia* est assez commune sur les côtes de

▼ *Sur un récif, les coraux ne sont pas répartis au hasard; de nombreux facteurs président à leur distribution; ici, une colonie de* Favia.

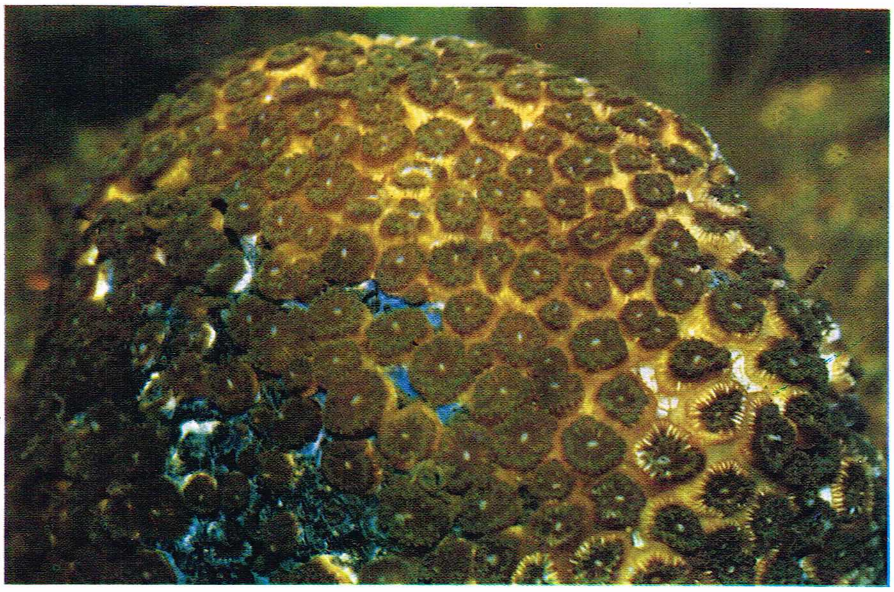

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

A. Margiocco

◀ *Certains coraux sont dépourvus d'Algues zooxanthelles ; pour cette raison, ils peuvent vivre jusqu'à des profondeurs importantes ; c'est le cas de* **Dendrophyllia cornigera.**

Bretagne), mais également des organismes coloniaux ramifiés *(Lophohelia, Amphihelia, Dendrophyllia)*, susceptibles de construire de petits édifices calcaires. Ainsi, de véritables récifs à Madrépores peuplent l'Atlantique au large de la Norvège, de l'Irlande, de la France, de l'Espagne et du Maroc à une profondeur oscillant entre 100 et 1 200 m. Récemment, près de la Nouvelle-Zélande, les océanographes ont reconnu sous 300 m d'eau un banc récifal construit par un corail colonial *(Goniocorella)* et s'étendant sur près de 1 km de longueur et 40 m de hauteur.

Origine des récifs

De nombreuses théories ont été émises pour expliquer la genèse des récifs et leur évolution. L'une des plus classiques a été imaginée vers 1840 par Darwin. Selon cet auteur, les premiers récifs qui apparaissent au voisinage d'une terre émergée sont frangeants. Plus tard, si un lent affaissement du rivage se produit (mouvement de subsidence), le récif devient une barrière, à la suite d'une croissance verticale des organismes. Enfin, si le mouvement de descente se poursuit, l'île disparait totalement et le récif devient un atoll. Ainsi, ces formations annulaires représenteraient le dernier stade d'une très longue évolution résultant à la fois de la croissance des Madréporaires et d'un lent affaissement d'une terre émergée. Darwin et son disciple Dana expliquent ainsi la formation de tous les atolls de la région indo-pacifique qui se seraient installés sur d'anciens volcans éteints affaissés sous la mer. Cette théorie recueillit l'unanimité du monde scientifique durant plusieurs décennies, et c'est pour vérifier sa validité que fut entrepris en 1896 le premier forage réalisé sur un récif corallien, dans l'atoll Funafuti (archipel d'Ellice). La sonde traversa 367 m de formations récifales. Puisque les coraux récifaux peuvent vivre à une telle profondeur, il fallait admettre qu'un lent enfoncement du socle s'était produit ; cette conclusion confirmait les idées de Darwin.

Cependant, d'autres auteurs eurent des doutes sur la validité de cette théorie. Selon eux, les matériaux traversés par le forage de Funafuti n'étaient en réalité que des débris éboulés le long des pentes de l'atoll et cette expérience n'apportait aucune preuve décisive à l'idée de subsidence. Pour Murray et d'autres auteurs, les lagons des récifs-barrières ainsi que ceux des atolls seraient le résultat d'une action dissolvante de la mer ou proviendraient d'une érosion à la fois mécanique et chimique par les organismes vivants destructeurs (Vers, Algues perforantes, Mollusques, etc.). En 1910, Daly émit une hypothèse, connue sous le nom de théorie du contrôle glaciaire, qui suppose une stabilité des terres émergées, mais par contre une modification du niveau des océans au cours du Quaternaire. Durant les quatre grandes glaciations, l'eau de la mer stockée dans les régions polaires sous forme de glace a entraîné un abaissement du niveau de la mer, que Daly a évalué à 80 m environ pour la dernière glaciation (trente mille ans avant notre ère). Les récifs émergèrent et furent en grande partie détruits par l'érosion ; ainsi se constituèrent de vastes plates-formes qui, durant les périodes de réchauffement des phases interglaciaires et la lente remontée du niveau marin, servirent de support aux organismes constructeurs. La forme des récifs installés au bord de ces plateaux sous-marins est donc sous la dépendance de la topographie du socle. Daly expliquait ainsi la morphologie des récifs-barrières et des atolls.

Depuis quarante ans, une dizaine de forages profonds ont été réalisés dans les formations récifales en Indonésie, au sud du Japon, dans les îles Marshall, aux Tuamotu, en Nouvelle-Calédonie, aux îles Hawaii. A Eniwetok et à Bikini, la sonde a traversé respectivement 820 et 1 480 m de récifs en place. Le socle volcanique a pu être atteint sous plusieurs atolls. La preuve de la subsidence suggérée par Darwin semble donc établie définitivement, mais une étude précise des matériaux récoltés durant ces travaux a montré aussi l'exactitude des vues de Daly. On a pu constater en effet des interruptions dans la croissance du récif, correspondant aux périodes d'émersion durant les différentes phases glaciaires. La mise en place des grandes formations récifales actuelles s'est échelonnée durant toute l'époque cénozoïque ; la plus ancienne d'entre elles est peut-être celle de l'atoll d'Eniwetok, établie sur un ancien volcan qui s'est éteint il y a trente millions d'années environ et qui s'est enfoncé peu à peu sous la mer.

Évolution des Madréporaires

Durant l'ère primaire, les Cœlentérés constructeurs sont représentés par les Stromatopores (attribués aux Hydrocoralliaires), les Tétracoralliaires et les Tabulés. Les Madréporaires n'apparaissent qu'au Secondaire. Les organismes de cette époque, très différents de ceux qui vivent actuellement, ont édifié à plusieurs reprises d'immenses récifs, en particulier au Jurassique où les coraux hermatypiques s'étendaient jusqu'au nord de l'Europe ; en France, ils ont construit d'importantes barrières dans le Bassin parisien (Hauts de Meuse), dans le Jura, en Provence et en Aquitaine. Depuis cette époque, les Madréporaires récifaux ont progressivement reculé vers les tropiques. C'est au début du Quaternaire que se mettent en place les deux grandes zones récifales actuelles, les régions antillaise et indo-pacifique. L'aire couverte par les Madréporaires constructeurs n'a donc cessé de diminuer depuis l'apparition du groupe jusqu'à nos jours.

Ordre des Zoanthaires

Cet ordre regroupe des Hexacoralliaires peu nombreux, coloniaux (à une exception près), dépourvus de squelette, ressemblant superficiellement à des Actinies. Ces formes simples, ne possédant qu'une couronne marginale de tentacules indivis et peu nombreux, ne sont relativement abondantes que dans les eaux chaudes peu profondes. Leur aspect général rappelle fréquemment celui d'un Octocoralliaire encroûtant, car leur lame basilaire commune se fixe sur des supports variés (pierres, coquilles, Éponges, Hydroïdes, Gorgones, coraux, Bryozoaires, Vers tubicoles...). Leurs polypes, réunis à la base, présentent un seul siphonoglyphe et une symétrie bilatérale très accentuée. Le nombre des mésentères est variable ; si initialement il est de douze, son accroissement a lieu au niveau des deux interloges directrices situées au voisinage de la loge sulcale. Il existe deux sortes de mésentères : des macroseptes, fertiles, complètes, atteignant le pharynx, et des microseptes, stériles et incomplètes.

▼ *Les Madréporaires sont apparus au Secondaire et ont édifié de grands récifs surtout au Jurassique ; on peut trouver ainsi des formes fossilisées, tel* **Isastrea**, *en haut.* **Cyatophyllum helianthoides**, *un Tétracoralliaire, en bas.*

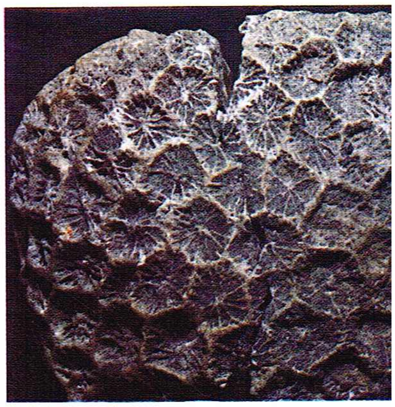

A. Margiocco

D. Faulkner

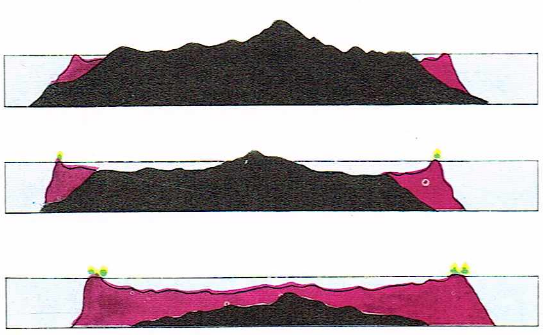

I.G.D.A.

◀ *Représentation schématique des différents stades présumés de la formation d'un atoll ; à la suite d'un affaissement du sol, les coraux croissent en hauteur, puis l'île finit par disparaître et, à sa place, se trouve un atoll.*

G.S. Giacomelli

▲ *Les Zoanthaires, presque exclusivement coloniaux, sont dépourvus de squelette et munis d'une seule couronne marginale de tentacules; ici,* **Parazoanthus axinellae.**

Les larves pélagiques sont parfois incubées. En Méditerranée se rencontre fréquemment *Parazoanthus axinellae,* de couleur jaune-orangé, fixé de préférence sur une Éponge siliceuse *(Axinella)* et vivant en zone sombre et peu profonde. Chaque espèce d'*Epizoanthus* a son support favori.

Ordre des Cérianthaires

Les Cérianthaires sont des Hexacoralliaires solitaires, en partie fichés dans le sable ou la vase et ressemblant à des Actinies. Les polypes, à long corps cylindrique musclé, plus ou moins plissé transversalement, sont dépourvus de disque pédieux et de squelette; ils sont enfermés dans une sorte de tube de consistance solide, contenant beaucoup de nématocystes, formé par la sécrétion de nombreuses cellules muqueuses ectodermiques, fréquemment englué de vase et incrusté de grains de sables et de particules étrangères. Les tentacules, grêles, terminés en pointe, de taille variable et dépourvus de pinnules, sont disposés en deux séries concentriques autour de l'orifice buccal. Les plus longs constituent la série externe ou marginale alors que les plus courts forment le groupe interne ou labial. Le disque buccal ne peut se rétracter dans la colonne basale, comme c'est habituellement le cas chez les Actinies, mais, quand l'Animal est inquiété, il rentre en totalité dans son tube.

La symétrie bilatérale est aussi accentuée que celle des Actinies. Il existe un seul siphonoglyphe déterminant la face sulcale. Les mésentères sont nombreux et symétriques; leur croissance est continue à partir d'une loge directrice asulcale, si bien que leur nombre augmente régulièrement avec l'âge. Ils sont fréquemment dépourvus de muscles transversaux, mais munis de muscles longitudinaux. La larve est une cerinula à vie libre et pélagique mesurant quelques centimètres de diamètre.

Cerianthus membranaceus est une espèce commune en Méditerranée, atteignant parfois 30 cm, avec des tentacules remarquables par leur finesse et leur teinte verte ou violette. Cette espèce, fréquemment enfouie dans un terrier creusé dans la vase, n'apparaît que par son disque buccal et ses tentacules. D'autres cérianthes sont connus dans la Manche et le long de la côte américaine de l'Atlantique, où une espèce d'eau peu profonde atteint 15 cm, alors qu'une autre, plus nordique, vivant en plus grande profondeur, héberge fréquemment dans son tube long de 60 cm une Actinie de 45 cm. *Cerianthus estuari,* dont les tentacules marginaux transparents s'étalent en une couronne de 10 à 12 cm de diamètre, vit en abondance sur les fonds plats et sableux de la côte pacifique américaine, au voisinage d'une Actinie creusant des terriers *(Harenactis).* Enfin, une espèce géante de la Caroline du Sud, qui ne prospère que dans la zone de balancement des marées, montre fréquemment un tube de 1,80 m de long. La plupart des cérianthes sont principalement répandus dans les zones tropicales ou subtropicales.

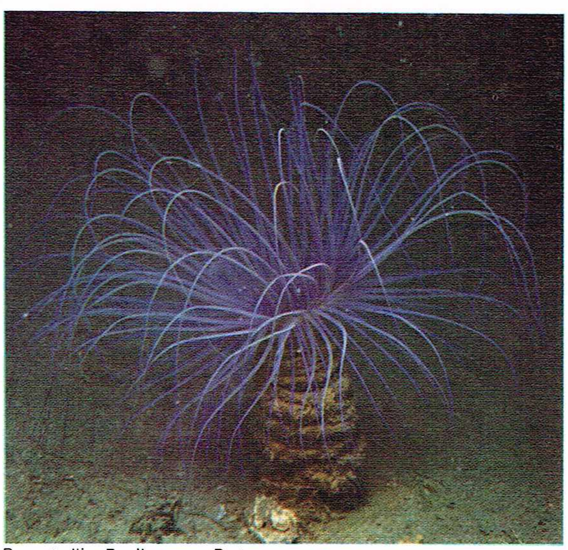
Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ *Chez les Cérianthaires (ici,* **Cerianthus filiformis**)*, le polype solitaire et sans squelette est entouré d'une sorte de tube solide souvent incrusté de grains de sable.*

Ordre des Antipathaires

Les représentants de cet ordre sont des Hexacoralliaires coloniaux, plus ou moins développés, dont la hauteur varie entre 1 cm et 1m, soutenus par un squelette axial noir, corné, tantôt lisse, tantôt épineux, très dur, donnant à l'ensemble une apparence de plante ou de Gorgone.

Les colonies sont allongées, ramifiées ou spiralées, fichées dans le sable, et vivent en commensalisme avec de nombreux groupes animaux (Spongiaires, Crustacés, Actinies, Annélides). Le cœnosarc recouvrant l'axe est très réduit; les polypes, ténus, ne présentent généralement que six tentacules non rétractiles, dont les deux plus longs correspondent aux deux extrémités pharyngiennes. Les mésentères sont inégaux. Aux six mésentères principaux, complets, s'ajoutent parfois quatre à six mésentères secondaires d'importance morphologique bien moindre. Il y a deux siphonoglyphes et la musculature est faible.

Les colonies vivent généralement dans les eaux profondes (jusqu'à 3 600 m) de la mer Rouge, du golfe Persique, de la Chine, du Japon, de l'archipel malais, de l'océan Indien, de l'océan Atlantique et de la Méditerranée. Leur squelette est encore utilisé en Asie dans la fabrication de bracelets dits « de corail noir » qui passent pour protéger des méfaits de l'eau, des rhumatismes, etc.

BIBLIOGRAPHIE

BAYER Fr., *Treatise on Invertebrate Paleontology,* Part F, *Coelenterata, Octocorallia,* 1956. - BROCH Hj., *Handbuch der Zoologie,* 1 Bd, *Hydroida, Trachylina und Siphonophora,* 1923-25. - DELAGE Y., et HEROUARD E., *Traité de zoologie concrète,* v. II (2), *les Cœlentérés,* Paris, 1904. - HICKSON S.J., *An Introduction to the Study of Recents corals,* Univ. Press, Manchester, 1924 - HYMAN L.H., *The Invertebrates : Protozoa Through Ctenophora,* Mc Graw-Hill Book C°, New York, 1940. - KRAMP P.L., *Synopsis of the Medusae of the World,* Cambridge, 1961. - KRUMBACH Th., *Handbuch der Zoologie,* 1 Bd, *Scyphozoa,* 1923-25. - KUKENTHAL W., *Handbuch der Zoologie,* 1 Bd, *Octocorallia,* 1923-25. - MAYER A.G., *Medusae of the World,* 3, *Scyphomedusae,* Washington, 1910. - NAUMOV D.V., 1960, *Hydroids and Hydromedusae of the U.S.S.R.,* Israel Program for Scientific Translations, Jérusalem, 1969 : 660 p. - PAX E., *Handbuch der Zoologie,* 1 Bd, *Hexacorallia,* 1923-25. - REES W.J. (Ed.), 1966, *The Cnidaria and their Evolution,* Academic Press, London, 449 p. - RIELD R., *Fauna und Flora der Adria,* Berlin, 1963. - RUSSEL F.S., *The Medusae of the British Isles,* Univ. Press, Cambridge, 1953. - THIEL M.E., *Scyphomedusae,* Leipzig, 1936, 1938, 1959, 1962. - TRÉGOUBOFF G., et ROSE M., *Manuel de planctonologie méditerranéenne,* C.N.R.S., Paris, 1957. - UCHIDA T., 1963, *The Systematic Position of the Hydrozoa,* Japanese Journal of Zoology, 14 (1) : 1 — 14 p. - WELLS J.W. et HILL D., *Treatise on Invertebrate Paleontology,* Part F, *Zoanthiniaria, Actiniaria, Rugosa,* 1956.

LES CTÉNAIRES

Rangés autrefois avec les Cnidaires dans l'embranchement des Cœlentérés, les Cténaires sont considérés aujourd'hui comme un groupe distinct. A part quelques formes aberrantes, ils sont tous marins et pélagiques et se déplacent grâce aux mouvements des palettes ciliées disposées en rangées à la surface du corps. Ils sont transparents, possèdent une symétrie bilatérale et sont hermaphrodites. Les nématocystes font défaut, mais leur rôle dans la capture des proies est assuré par d'autres cellules, les colloblastes, qui sont des cellules adhésives

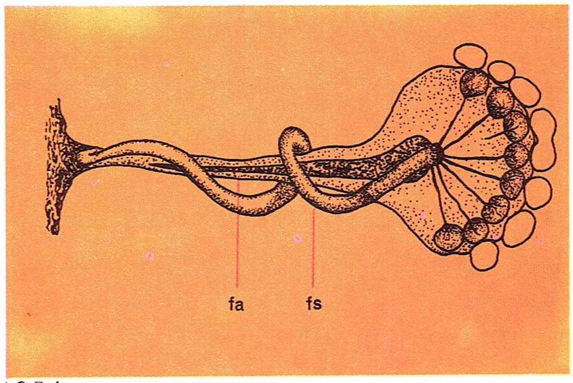

I.G.D.A.

◀ *Structure d'un colloblaste, cellule différenciée servant à la capture des proies; fa, filament axial; fs, filament spiral.*

Organisation générale

Une description générale peut être établie en prenant pour type le genre *Cydippe*. Le corps est globuleux, translucide, de la grosseur d'une cerise; il possède deux plans de symétrie : un plan sagittal passant par la bouche et un plan transversal perpendiculaire au premier. A un pôle, le pôle oral, s'ouvre la bouche, qui est dirigée vers l'avant quand l'Animal se déplace. Au pôle opposé, le pôle aboral, se trouve l'unique organe des sens et de l'équilibration, le statocyste. A la surface du corps, huit bandes ciliées vibratiles dessinent huit méridiens équidistants et incomplets. Elles sont constituées par une série de palettes natatoires rectangulaires, formées de cils fusionnés à leur base; l'ensemble ressemble à une paupière bordée de cils ou à un peigne, d'où le nom de l'embranchement (κτείς = peigne). Les cellules ectodermiques portant les palettes ciliées sont reliées entre elles par des prolongements, si bien que toutes les palettes d'une même bande méridienne sont synchrones. Sur les côtés de l'Animal, deux longs tentacules s'insèrent au fond d'un cul-de-sac ou gaine tentaculaire, à l'intérieur de laquelle ils peuvent se rétracter. Certaines cellules épithéliales différenciées ou colloblastes sont concentrées sur de minuscules tentacules secondaires : les tentilles. La surface libre des colloblastes est recouverte de corpuscules glutineux sécrétés par la partie glandulaire de la cellule; une bande élastique en spirale entoure la cellule et lui assure le retour à la forme initiale après décollement. Ces colloblastes adhèrent aux proies, en général de petits Crustacés planctoniques, et peuvent servir plusieurs fois; notons toutefois qu'ils sont fréquemment renouvelés.

Organisation interne

La bouche donne accès à un vaste pharynx tapissé par l'ectoderme; il occupe la moitié de la hauteur du corps et joue un rôle important dans la digestion. Une cavité gastrique lui fait suite; tapissée d'endoderme, elle a une disposition particulièrement complexe et débute par une chambre, ou infundibulum, prolongeant le pharynx d'où partent des canaux horizontaux en nombre pair. Ces canaux se ramifient en canaux méridiens ascendants et descendants situés sous les bandes méridiennes. L'endoderme qui recouvre tout ce système de canaux méridiens est perforé par places. Les perforations sont bordées de cils dont les battements assurent le passage du liquide cavitaire vers la mésoglée (lame gélatineuse assez semblable à celle des Cnidaires). Cet appareil digestif est en réalité un appareil gastrovasculaire. Il existe un appareil excréteur très rudimentaire, partant de la cavité gastrique à la hauteur de l'infundibulum et venant s'épanouir en quatre petits canaux au niveau du statocyste. Deux de ces canaux se terminent par une ampoule, les deux autres s'ouvrent à l'extérieur.

Les gonades mâles et femelles se développent sur un même individu sans qu'il y ait autofécondation, car les produits génitaux sont émis dans la mer par la bouche. Les gonades tapissent les parois latérales des canaux méridiens, mâles d'un côté et femelles juste en face, dans le même canal.

Le statocyste est situé au pôle aboral dans une légère dépression. Il a la forme d'une cloche percée à la base de plusieurs orifices pour la pénétration de l'eau. Le centre est occupé par quatre « ressorts » constitués de cils agglomérés sur lesquels repose un statolithe résultant de la fusion de granulations calcaires. Cet organe unique est en relation par un réseau de cils avec les bandelettes ciliées méridiennes, dessinant un champ polaire cilié.

Le système nerveux est mal connu et son existence encore discutée. Il semble qu'un réseau nerveux très diffus relie statocyste et bandes ciliaires. Des fibres musculaires sont dispersées dans la mésoglée, sous l'ectoderme, et condensées en un manchon dans le tentacule.

Le développement est entièrement planctonique; les Cténaires font partie de l'holoplancton. Les œufs sont télolécithes, la segmentation est égale au moins dans les premières divisions. La larve qui s'échappe de l'œuf

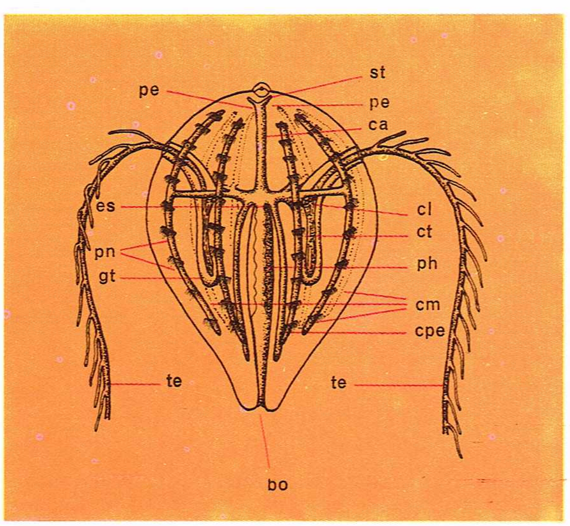

I.G.D.A.

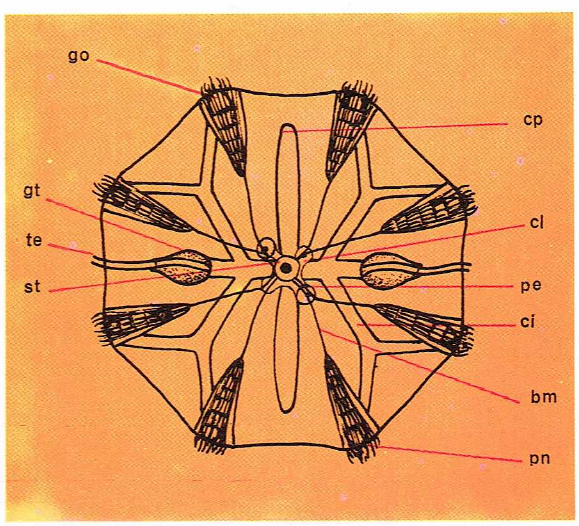

I.G.D.A.

◀ *Organisation générale d'un Cténaire Cydippidé, à gauche, et vue aborale, à droite; bo, bouche; bm, bande méridienne; ca, canal infundibulaire aboral ou excréteur; ci, canal interradiaire; cl, canal latéral; cm, canal méridien; cp, champ polaire cilié; cpe, canal péripharyngien; ct, canal tentaculaire; es, estomac; go, gonade; gt, gaine tentaculaire; pe, pore excréteur; ph, pharynx; pn, palette natatoire; st, statocyste; te, tentacule.*

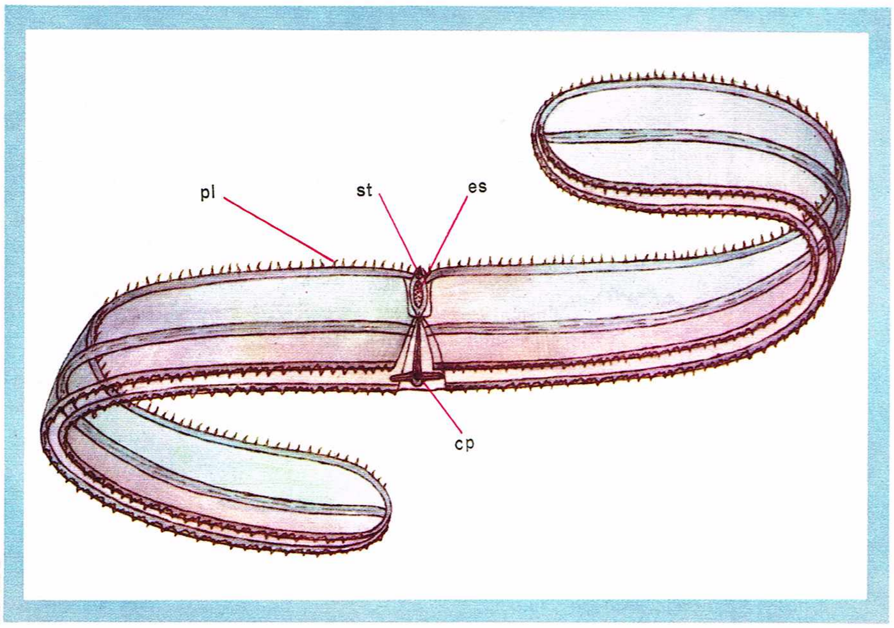

I.G.D.A.

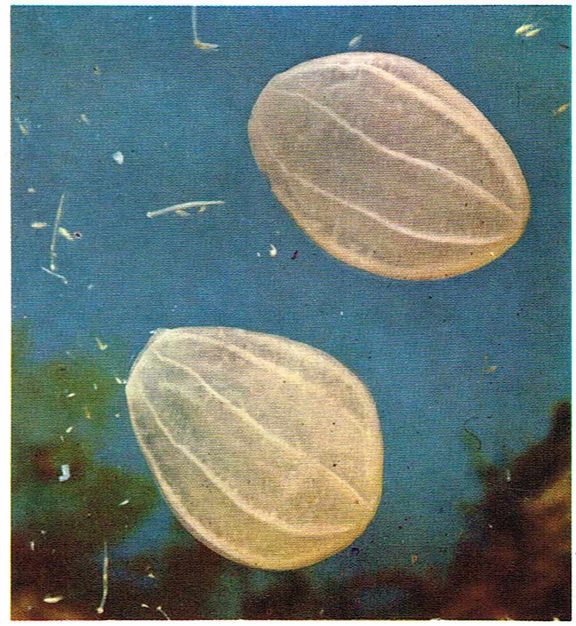

A. Margiocco

▲ *A gauche, la ceinture de Vénus* (Cestus veneris), *Cténaire commun en Méditerranée : cp, canaux pharyngiens ; es, estomac ; pl, palettes natatoires ; st, statocyste. A droite,* Beroe, *comme tous les Cténaires, est bien adapté à la vie pélagique.*

▼ *A gauche,* Coeloplana mesnili, *vu par le pôle aboral ; à droite,* Beroe cucumis, *en coupe longitudinale.*

est semblable à l'adulte. Certaines larves peuvent présenter une acquisition précoce des caractères sexuels avec émission de produits génitaux, puis les gonades régressent et la larve poursuit son développement.

SYSTÉMATIQUE

Le critère essentiel est la présence ou non de tentacules. Il détermine la séparation des représentants en deux ordres : les Tentaculés et les Nus.

Ordre des Tentaculés

Une nouvelle séparation apparaît à l'intérieur de cet ordre, fondée sur la forme du corps : les Cydippidés sont sphériques et globuleux, les Lobés ont des protubérances sur le corps, les Rubanés sont aplatis en ruban, les Platycténidés sont déformés par leur mode de vie rampant.

Les Cydippidés renferment des Animaux appelés souvent groseilles de mer. Les genres *Pleurobrachia* et *Cydippe* sont fréquents dans le plancton.

Les Lobés possèdent des lobes aplatis au niveau du pôle oral et les bandes ciliaires méridiennes sont garnies de palettes nombreuses mais de taille réduite. *Bolinopsis* est répandu dans les eaux froides du nord de l'Europe.

Les Rubanés renferment un des genres les plus curieux du plancton. En effet, le genre *Cestus* est aplati latéralement et peut atteindre 80 cm de large ; il ressemble à un ruban transparent ondulant harmonieusement dans l'eau et on lui a donné le nom de « ceinture de Vénus ».

Les Platycténidés ont une organisation dégradée qui rappelle par l'aspect morphologique les Vers plats Turbellariés. Les genres *Coeloplana* et *Ctenoplana*, hôtes de l'océan Indien, ont leur pôle oral contre le substrat.

Ordre des Nus

Les représentants de cet ordre sont dépourvus de tentacules. Ils comptent un genre très commun, *Beroe,* dont le corps est presque cylindrique. La bouche occupe toute la surface du pôle oral et les bandes ciliées méridiennes s'étalent d'un pôle à l'autre.

Les Cténaires ont une adaptation à la vie pélagique remarquable : la transparence de leur corps, la présence de bandes ciliées à mouvements synchrones, l'allégement du corps par les nombreux canaux de la cavité digestive contribuent à assurer une flottabilité maximale. Leur mode de nutrition est carnivore, et de ce fait ils participent à la chaîne alimentaire ; ce sont des prédateurs redoutables, et leur action sur les autres maillons de cette chaîne est devenue un exemple classique. Dans les eaux de la mer de Barents vit un Cténaire, *Bolinopsis,* particulièrement friand d'un Copépode très commun, dont il décime bientôt la population. Mais les *Beroe* mangent les *Bolinopsis*, redonnant alors espoir aux Copépodes. Alors interviennent les morues qui se nourrissent de *Beroe ; Bolinopsis* peut de nouveau pulluler au détriment de la population de Copépodes.

Bien qu'il ne renferme qu'une vingtaine d'espèces, cet embranchement est important car il assure le passage des Cnidaires aux Vers par les Platycténidés, très aberrants, qui ont une morphologie proche de celle des Turbellariés.

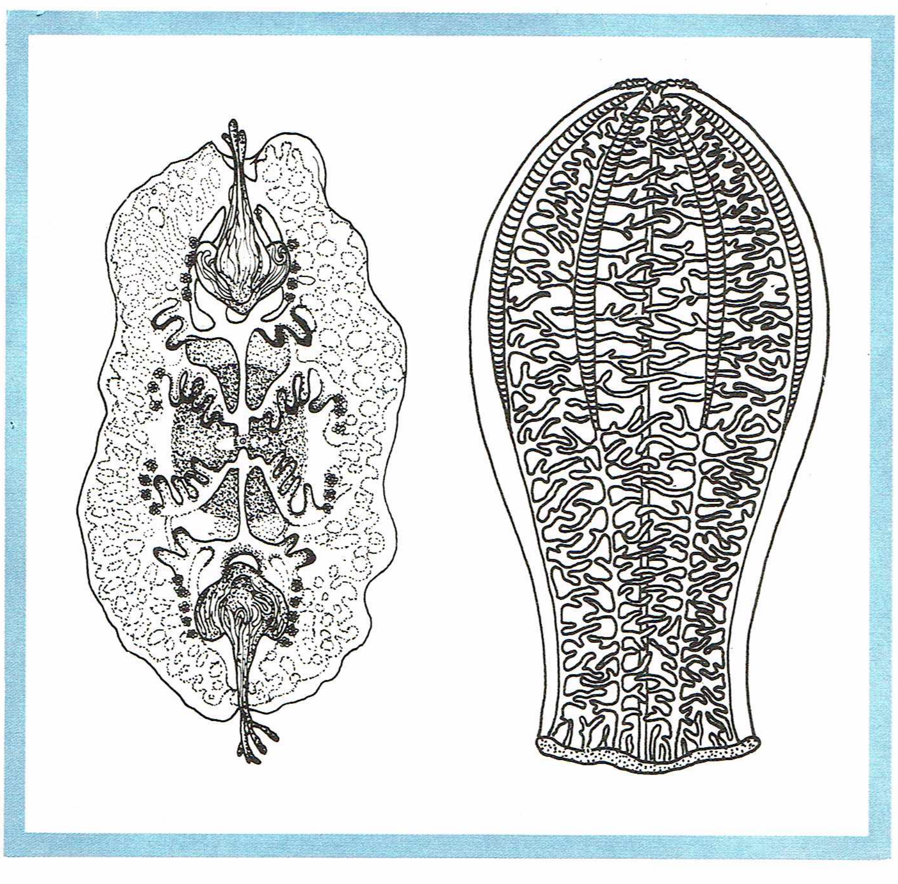

I.G.D.A.

BIBLIOGRAPHIE

TRÉGOUBOFF, G., et ROSE M., 1957, *Manuel de planctonologie méditerranéenne*, tomes I et II ; C.N.R.S., Paris, 587 p., 212 pl.

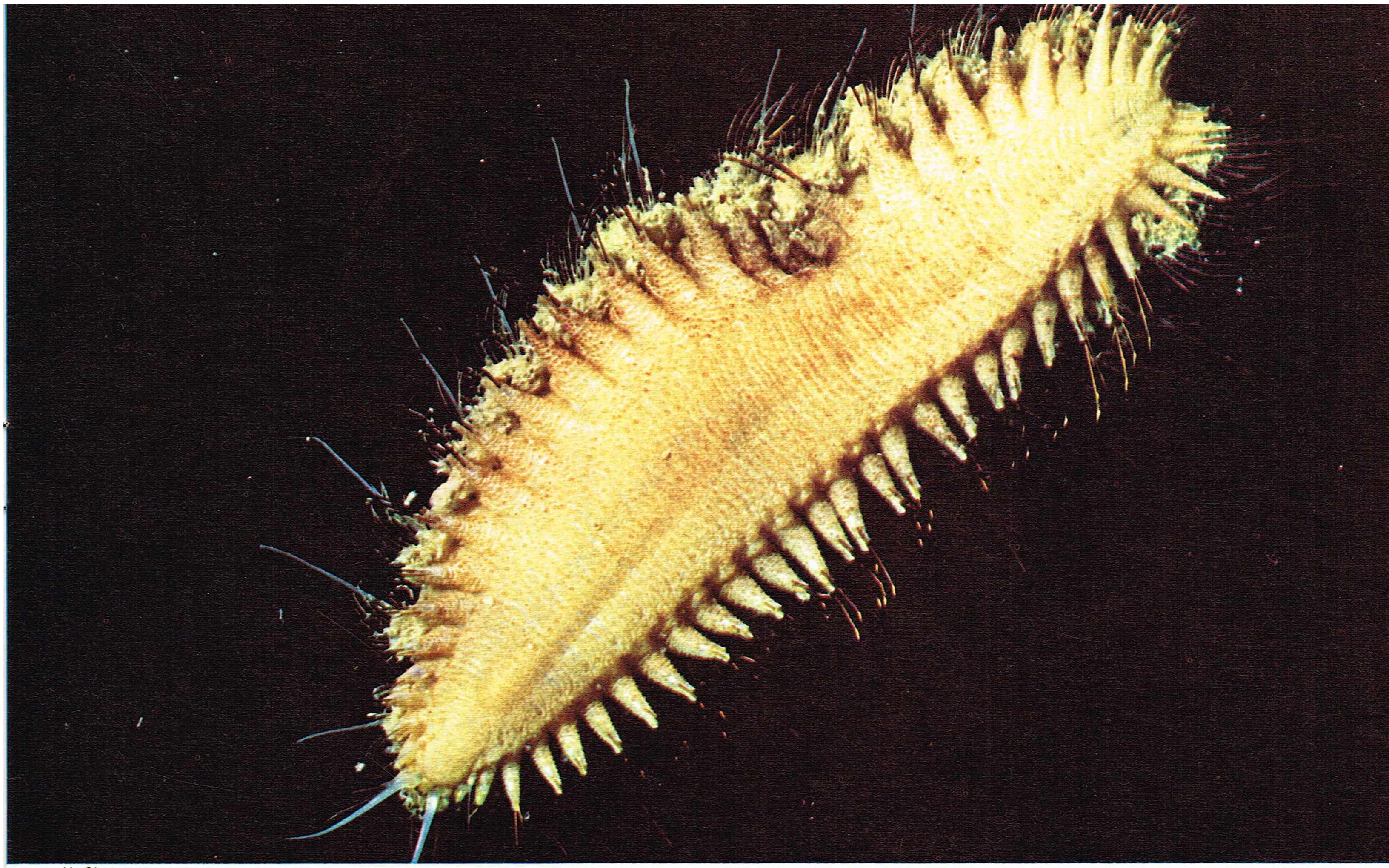

H. Chaumeton - Jacana

LES « VERS »

Dans la systématique de la zoologie, on donnait autrefois le nom de Vers (Vermidés, Helminthidés, Helminthes = *Helmynthes*), qui n'a plus maintenant de valeur que dans le langage commun, à un grand nombre de formes animales auxquelles on attribuait comme caractères distinctifs : la symétrie bilatérale, l'absence constante d'appendices articulés, et le corps souvent mou, plus ou moins allongé, aplati chez certains groupes (Plathelminthes), ou filiforme et à peu près cylindrique chez d'autres (Némathelminthes notamment), ou encore divisé en segments chez un dernier groupe (Annélides). D'après l'ancienne classification, les Plathelminthes, les Némathelminthes et les Annélides, ainsi que d'autres groupes d'Animaux connus seulement des scientifiques du fait de leur taille minuscule ou de leur habitat particulier, étaient réunis en un phylum unique, placé au même rang que ceux des Mollusques, des Échinodermes ou des Arthropodes.

Tout cet ensemble de formes animales comprenait des organismes marins et dulçaquicoles, planctoniques ou benthiques, libres ou fixés, certains ayant pour habitat des liquides (vinaigre) ou la terre arable (humus) ; beaucoup d'autres encore étaient parasites de Vertébrés, d'Invertébrés ou de Végétaux.

L'étude de plus en plus approfondie de la structure et de l'embryogenèse de représentants des divers groupes aboutit à démontrer qu'il était impossible de trouver pour les Vers un plan commun d'organisation, même fondamentale, alors que cela était possible pour les autres phylums déjà cités. Les caractères pris en considération, comme l'acquisition d'un tube digestif complet, la présence et le type des organes excréteurs (protonéphridies ou métanéphridies), la division du corps en segments, le nombre de ces segments, la présence ou l'absence et la nature d'une cavité générale (cœlome), la comparaison des formes larvaires et le type de segmentation des œufs, et d'autres caractères particuliers se sont révélés insuffisants pour trouver une réelle unité chez les Vers. Ainsi, il n'y avait pas d'indices concrets de liaison phylogénétique entre tous les groupes de Vers, mais seulement entre certains d'entre eux. On fut donc amené à ne plus considérer les Vers comme un phylum, qui paraissait désormais tout à fait artificiel, et on substitua à celui-ci un certain nombre d'embranchements. Bien que les avis soient encore partagés sur les affinités existant entre les différents embranchements et qu'à l'intérieur de ceux-ci les divisions soient parfois arbitraires ou provisoires, on peut admettre que l'ancien terme de « Vers » recouvre actuellement les embranchements suivants : Plathelminthes, Mésozoaires, Acanthocéphales, Némertiens, Némathelminthes, Rotifères, Nématorhynques, Annélides, et quatre classes aux ressemblances plus incertaines et détachées de ces embranchements : Priapuliens, Myzostomides, Sipunculiens, Échiuriens.

▲ **Hermione hystrix** ***appartient à l'embranchement des Annélides, l'un des huit groupes de l'ancien phylum des « Vers ».***

▼ ***Les Plathelminthes comprennent des formes libres, comme cette planaire*** **(Prostheceraeus vittatus)** ***qui appartient à la classe des Turbellariés, mais aussi des parasites.***

H. Chaumeton - Jacana

LES PLATHELMINTHES

Embranchement des PLATHELMINTHES

Classe des TURBELLARIÉS
- ○ *ordre des Archoophores*
- ○ *ordre des Périlécitophores*
- ○ *ordre des Eulécitophores*
- ○ *ordre des Protriclades*
- ○ *ordre des Triclades*
- ○ *ordre des Polyclades*

Classe des TEMNOCÉPHALES

Classe des MONOGÈNES
- □ *Sous-classe des Monopisthocotylea*
- □ *Sous-classe des Polyopisthocotylea*

Classe des CESTODAIRES
- ○ *ordre des Amphilinidea*
- ○ *ordre des Gyrocotylidea*

Classe des CESTODES
- ○ *ordre des Haplobothrioidea*
- ○ *ordre des Pseudophyllidea*
- ○ *ordre des Tetrarhynchidea*
- ○ *ordre des Diphyllidea*
- ○ *ordre des Tetraphyllidea*
- ○ *ordre des Nippotaeniidea*
- ○ *ordre des Ichthyotaeniidea*
- ○ *ordre des Tetrabothridea*
- ○ *ordre des Cyclophyllidea*

Classe des TRÉMATODES
- □ *Sous-classe des Aspidogastres*
- □ *Sous-classe des Digenes*
  - — Super-ordre des Anepitheliocystidia
    - ○ *ordre des Strigeatoida*
    - ○ *ordre des Echinostomida*
  - — Super-ordre des Epitheliocystidia
    - ○ *ordre des Plagiorchiida*
    - ○ *ordre des Opisthorchiida*
- □ *Sous-classe des Didymozoides*

Les Plathelminthes ou Vers plats ont une symétrie bilatérale. Ils ne possèdent ni système circulatoire ni système respiratoire. La surface de leur corps est recouverte par un épiderme à cils vibratiles qui, chez les formes adultes parasitaires, est remplacé par une cuticule lisse ou épineuse. Le cœlome est absent (ce sont des acœlomates) et les espaces entre les divers organes sont remplis par un tissu conjonctif appelé parenchyme. La musculature est formée de couches de fibres transversales ou longitudinales sous l'épiderme; le système nerveux est normalement situé dans le parenchyme. Les organes des sens existent chez les formes adultes non parasitaires, et parfois chez les stades larvaires de certaines formes parasites. L'appareil digestif, totalement absent chez les Cestodes, existe partiellement chez les Turbellariés Acœliens. Chez les Turbellariés, les échanges gazeux ont lieu par diffusion à travers la surface du corps; chez les formes endoparasitaires, il y a une respiration anaérobie. Sauf de rares exceptions, les Plathelminthes sont hermaphrodites. La caractéristique de la majeure partie des Plathelminthes (exception faite des Acœles, des Polyclades et de quelques autres Turbellariés) est la séparation des gonades femelles en deux structures : les ovaires proprement dits et les glandes vitellogènes. Diverses espèces se reproduisent aussi de façon asexuée.

Les Plathelminthes sont divisés en six classes : Turbellariés, Temnocéphales, Monogènes, Cestodaires, Cestodes, Trématodes.

TURBELLARIÉS

Cette classe est considérée comme la plus primitive des Plathelminthes et comprend peu de parasites. Ses représentants vivent dans tous les milieux et se nourrissent de petites proies vivantes.

Organisation générale

Les Turbellariés sont en général de petite taille, leur longueur variant d'une fraction de millimètre à plusieurs centimètres. Leur corps présente une surface dorsale convexe fréquemment pigmentée et une surface ventrale aplatie. L'extrémité antérieure, qui est souvent séparée du reste du corps par un étranglement, porte toujours les organes des sens et parfois des tentacules.

Paroi du corps. Le corps est recouvert, au moins partiellement et à l'état jeune, par un épiderme cilié, le plus souvent nucléé et garni de rhabdites (bâtonnets) constitués par des substances protéiques sulfurées combinées à du calcium, et sécrétées par des cellules glandulaires localisées dans l'épiderme ou dans le parenchyme. A

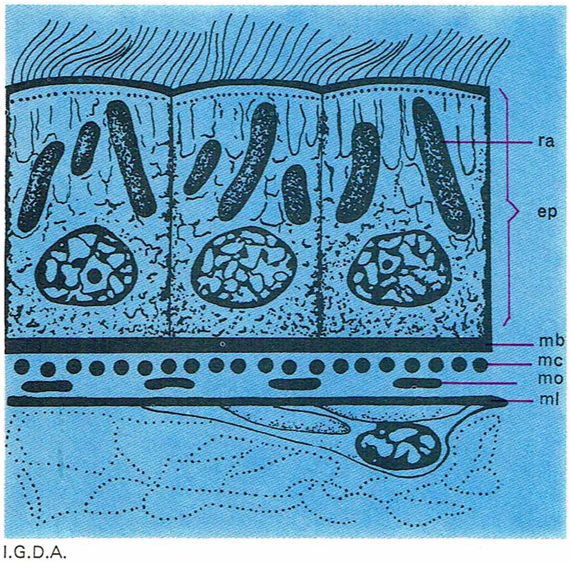

I.G.D.A.

▶ A gauche, représentation schématique de la paroi du corps d'un Turbellarié : ra, rhabdites; ep, épiderme; mb, membrane basale; mc, muscles circulaires; mo, muscles obliques; ml, muscles longitudinaux. A droite, **Prostheceraeus roseus,** ***un Triclade Maricole se déplaçant sur de petits Tuniciers*** **(Clavelina).**

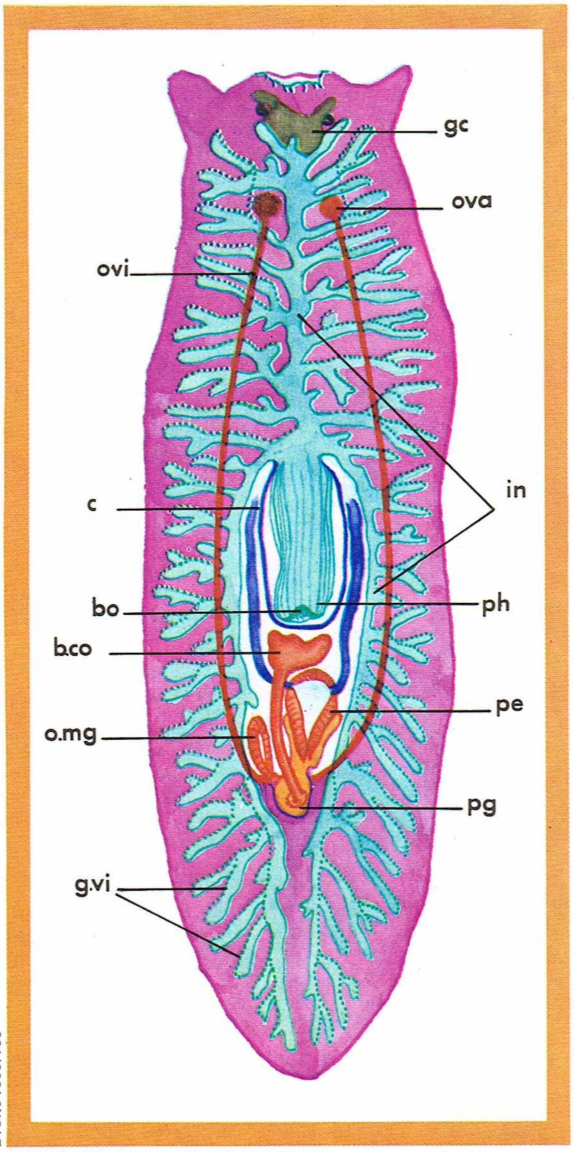

◀ *Schéma montrant l'organisation générale d'un Turbellarié; gc, ganglion cérébral; ova, ovaire; in, intestin; ph, pharynx; pe, pénis; pg, pore génital; ovi, oviducte; c, canal déférent; bo, bouche; b. co, bourse copulatrice; o. mg, organe musculo-glandulaire; g. vi, glande vitellogène.*

proximité des ganglions cérébraux se trouve une structure caractéristique, la glande frontale, dont la sécrétion aurait une fonction protectrice et serait également utilisée pour engluer les proies ou cimenter les œufs au substratum. Elle n'existe pas chez les Polyclades et chez les Triclades. Les couches musculaires immédiatement sous-jacentes à la membrane basale sont composées par des fibres circulaires, alors que la couche la plus interne est formée de fibres longitudinales. Des faisceaux de fibres en diagonale séparent les deux couches. Les Turbellariés possèdent de nombreux organes adhésifs de différents types, constitués par l'épiderme lui-même.

Parenchyme. Les organes sont entourés par un tissu conjonctif d'origine mésodermique. Les espaces intercellulaires sont remplis par un liquide interstitiel qui contient des grains de pigment. Il y a donc un système lymphatique ou vasculaire qui est rudimentaire, mais essentiel pour le transport des substances nutritives. Il existe aussi des cellules libres, arrondies, qui ont un rôle important dans les processus de régénération.

Système nerveux. Chez la majeure partie des espèces, le système nerveux est constitué par deux ganglions cérébraux, entourés par le parenchyme et réunis par une commissure transversale d'où partent des cordons nerveux longitudinaux, souvent réunis par une série de filaments annulaires. Les Turbellariés possèdent divers types d'organes sensoriels. Les plus élémentaires sont de simples cellules bipolaires munies de deux prolongements : le premier atteint la surface de l'épiderme, où il fait saillie avec une touffe de poils sensitifs, et le deuxième est en rapport avec le système nerveux. Les chimiorécepteurs qui donnent la possibilité à l'Animal de détecter la nourriture à distance sont habituellement limités à la région de la tête et constitués par des fossettes en forme de bouteille, creusées dans l'épiderme, et dont les bords sont couverts de cils. Le fond est tapissé de soies sensorielles. La perception de la lumière se fait par des photorécepteurs situés dans la partie céphalique et formés de fossettes tapissées à la base de cellules pigmentées photosensibles. Il n'y a pas de cristallin et l'Animal ne peut apprécier que l'orientation des rayons lumineux.

Appareil digestif. La bouche, de forme circulaire, habituellement ventrale, est pourvue de fibres musculaires circulaires et radiales. Le pharynx, musculeux, est normalement rétractable dans une poche pharyngienne. L'intestin peut être soit un simple sac allongé ou arrondi, soit un système tubulaire plus ou moins ramifié; il est absent chez les Acœliens. La digestion est en partie extracellulaire et en partie intracellulaire. Il n'y a pas d'ouverture anale.

Système excréteur. Il est composé par deux troncs latéraux qui s'ouvrent soit isolément, soit par un orifice commun situé en position postérieure, ou encore par plusieurs pores dorsaux (chez les Planaires). Dans les troncs débouchent des canaux de calibre plus petit, qui se ramifient dans le parenchyme. Les dernières ramifications se terminent par une cellule flamme munie de flagelles. Le système excréteur n'existe pas chez les Acœliens et est en général moins développé chez les formes marines que chez celles d'eau douce.

Appareil reproducteur. Les Turbellariés sont hermaphrodites, et chaque individu possède des organes mâles et femelles pleinement fonctionnels. Toutefois, certaines espèces de Triclades ont des sexes séparés. La morphologie de l'appareil mâle est complexe et présente de grandes différences dans les divers groupes. L'appareil génital mâle comprend un ou plusieurs testicules reliés aux canaux déférents. Ceux-ci sont réunis en un canal

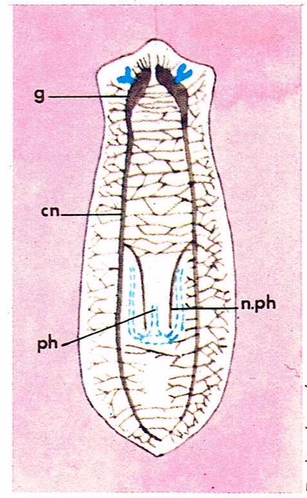

▲ *Représentation schématique du système nerveux d'un Turbellarié; n. ph, nerf pharyngien; ph, pharynx; cn, cordon nerveux; g, ganglion cérébral.*

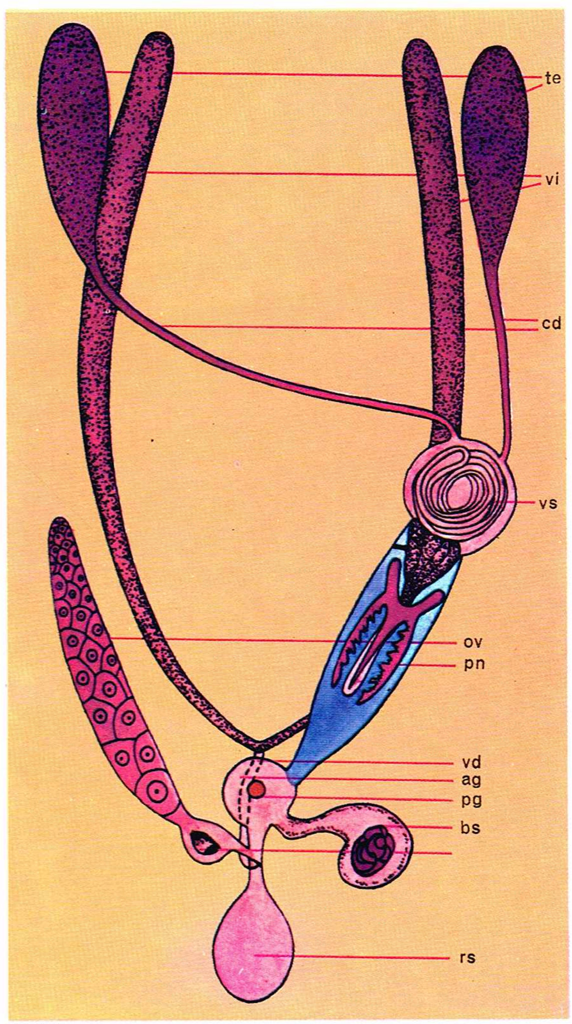

I.G.D.A.

◀ *Appareil reproducteur d'un Turbellarié du genre* **Dalyella** : *te, testicules; vi, glandes vitellogènes; cd, canal déférent; vs, vésicule séminale; vp, vésicule prostatique; ov, ovaire; pn, papilles péniennes; vd, vitelloducte; ag, atrium génital; pg, pore génital; bs, bourse séminale; rs, réceptacle séminal, ut, utérus.*

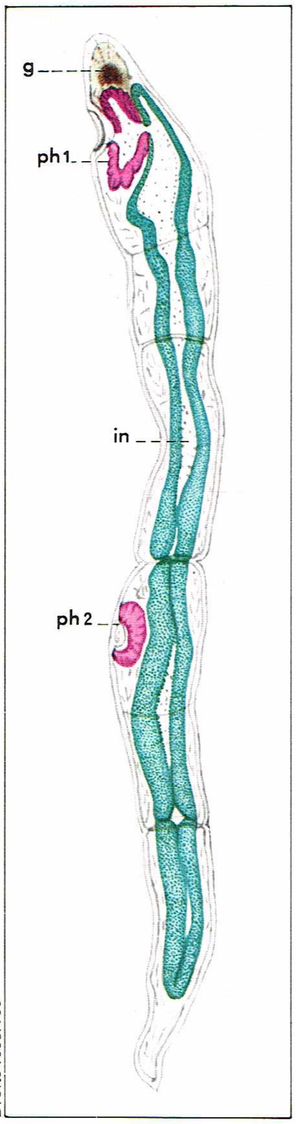

▲ **Microstomum,** *Turbellarié Archoophore dessiné ici de profil, se reproduit par scissiparité en donnant une chaîne d'individus (six sur ce schéma); g, ganglion cérébral; ph_1, pharynx primaire; ph_2, pharynx secondaire; in, intestin.*

unique ou séparés jusqu'à leur débouché dans une vésicule séminale où sont emmagasinés les spermatozoïdes. La vésicule se prolonge par le canal éjaculateur, qui traverse un organe à parois musculaires épaisses, le pénis, à la base duquel se trouvent des cellules glandulaires prostatiques qui débouchent dans le canal éjaculateur. Le pénis est contenu dans une cavité, la gaine mâle, qui communique avec un atrium où débouchent également les conduits ovovitellins. Il peut sortir à travers le gonopore. L'appareil génital femelle consiste en une paire d'ovaires prolongés par deux oviductes qui viennent déboucher dans l'atrium génital ou dans un oviducte commun. L'oviducte s'élargit en un réceptale séminal avant de déboucher dans l'atrium commun. Il existe également des glandes vitellogènes.

Reproduction

Reproduction sexuée. La fécondation interne est la règle chez les Turbellariés. Le pénis d'un individu est introduit dans le gonopore de l'autre, tandis qu'une sécrétion adhésive aide le processus copulateur. Les œufs sont généralement pondus dans un cocon sécrété par les glandes annexées à l'orifice des oviductes et qui peut être fixé au substratum directement ou par l'intermédiaire d'un pédoncule. La segmentation est de type spiral et le développement est direct. Chez certains Polyclades, en revanche, l'embryon se transforme d'abord en une larve ciliée pélagique dite de Müller, possédant huit lobes qui, après un certain temps de vie libre, sont réabsorbés; la larve tombe alors au fond et se transforme en un individu adulte.

Reproduction asexuée. Elle s'observe chez les Triclades et les Archoophores. Chez ces derniers, elle se fait par division transversale et le processus aboutit à la formation de chaînes d'individus. Chez les Triclades, la séparation est immédiate.

Régénération. Il s'agit là d'un phénomène très important chez les Turbellariés, qui aurait lieu aux dépens d'éléments du parenchyme restés indifférenciés.

Écologie

Les Turbellariés, connus dans tous les milieux, sont toutefois rares dans le plancton, surtout celui d'eau douce, et dans les grandes profondeurs marines. Les formes terrestres se rencontrent particulièrement dans les régions tropicales humides. Certaines espèces comme *Monocelis fusca* (Protriclades) ou *Procerodes ulvae* (Triclades), qui vivent dans la zone des marées, supportent de grands écarts de température et de salinité. Les Turbellariés dulçaquicoles peuvent se rencontrer aussi bien dans les étangs stagnants que dans les torrents et les rivières. Certaines espèces de Planaires, comme *Polycelis felina,* habitent essentiellement les eaux froides et courantes. Il existe des espèces sténothermes (exigeant une température constante du milieu) et d'autres eurythermes (peu sensibles aux variations thermiques; ainsi *Microstomum lineare* vit aussi bien dans les lacs alpins que dans les sources chaudes). Certaines espèces de Planaires croissent seulement dans les eaux souterraines : elles sont dépigmentées et le plus souvent aveugles. Certaines espèces de Turbellariés marins sont plutôt commensales que parasites. Les zoochlorelles et les zooxanthelles vivent en symbiose dans le parenchyme de nombreux Turbellariés et ont une certaine importance pour la nutrition de l'hôte.

SYSTÉMATIQUE

Les Turbellariés sont divisés en six ordres : Archoophores, Périlécitophores, Eulécitophores, Protriclades, Triclades et Polyclades.

Ordre des Archoophores

Cet ordre renferme une série peu homogène de groupes dont les caractères communs sont l'absence de vitellogènes différenciés et le fait que l'œuf est endolécithique. Ils sont généralement marins, mais certains groupes se rencontrent en eau douce.

Chez le groupe des *Acœliens,* la caractéristique fondamentale est l'absence d'intestin défini : la bouche s'ouvre, soit directement, soit par un pharynx dans une masse syncytiale qui se confond avec le parenchyme. L'appareil excréteur et les voies génitales femelles sont absents. Les Acœliens sont exclusivement marins; ils vivent sous les pierres, au milieu des Algues, et le plus souvent sur le fond vaseux de la zone littorale, jusqu'à une certaine profondeur. Diverses espèces du genre *Haplodiscus* sont pélagiques; *Convoluta,* commune dans la Méditerranée, héberge des zoochlorelles; *Amphiscolops sargassi* vit dans la mer des Sargasses.

Dans le groupe des *Macrostomiens,* les conduits génitaux femelles et les canaux excréteurs sont présents. Dans la famille des *Macrostomidés,* la reproduction est sexuée. Parmi eux, *Acanthomacrostomum spiculiferum,* qui vit sur les fonds sableux des côtes de Bretagne, est l'unique Turbellarié présentant un endosquelette constitué de spicules probablement calcaires. Dans la famille des *Microstomidés,* le genre *Microstomum* se reproduit par scissiparité. On le trouve en eau douce et en mer.

Ordre des Périlécitophores

Chez les individus de ce petit ordre, le vitellus est élaboré dans des cellules entourant chaque ovule, puis s'accole à lui. Le genre *Prorhynchus* est répandu dans les eaux douces et saumâtres.

Ordre des Eulécithophores

Cet ordre riche en espèces renferme maintenant les anciens Rhabdocœles. Les Eulécithophores vivent dans la mer et dans les eaux douces et saumâtres. Certaines espèces sont également terrestres. D'autres sont commensales sur divers Animaux. Enfin, certains genres deviennent des parasites internes de Mollusques et d'Échinodermes (*Fecampia* vit dans l'hémocœle des Crustacés). La caractéristique fondamentale de ce groupe est l'intestin en forme de sac, allongé, droit, sans ramifications. Les vitellogènes sont parfois fusionnés aux germigènes, mais produisent des cellules distinctes, non absorbées par l'ovule avant son développement. Les œufs sont réunis dans des cocons à enveloppe chitinoïde brunâtre, souvent pédonculés et operculés.

Ordre des Protriclades

Cet ordre, qui comprend une partie des anciens Allœocœles, a souvent été réuni aux Triclades. Il en diffère par un intestin plus simple, jamais complètement bifurqué en dessous du pharynx, et par des germigènes situés plus postérieurement. Ces Turbellariés ne dépassent guère 5 mm de longueur. Ils vivent dans les eaux douces *(Bothrioplana)* ou dans les eaux saumâtres *(Monocelis).*

Ordre des Triclades

Les Triclades ou Planaires comprennent des espèces dont la longueur varie du millimètre à plusieurs centimètres. Ils ont généralement deux ocelles. Dépourvus de glande frontale, ils possèdent des organes tangorécepteurs (jouant probablement un rôle dans l'équilibration) et d'autres chimiorécepteurs. Ils sont caractérisés par leur intestin divisé en trois branches principales : une antérieure et deux postérieures. La bouche, située ventralement vers le milieu du corps, s'ouvre dans un pharynx plissé, habituellement cylindrique, prolongé par un intestin. L'appareil sexuel est constitué de deux ovaires, chacun étant réuni aux vitellogènes par un canal ovovitellin. De nombreux follicules testiculaires communiquent par des tubes avec deux conduits spermatiques qui, isolés ou réunis, se terminent dans un pénis musculeux.

Les Planaires sont divisées en trois sous-ordres. Les *Maricoles,* vivant sur le littoral, semblent être absentes des mers tropicales et subtropicales. *Procerodes lobata* se trouve très communément dans la Méditerranée. Les *Paludicoles* se rencontrent dans les eaux douces courantes ou stagnantes des zones tempérées, où les deux familles des *Planaridae* et *Dendrocoelidae* sont représentées. Les *Terricoles* peuplent surtout les sols humides des zones tropicales. *Bipalium javanicum* atteint 60 cm de long. En Europe vit *Rhynchodesmus terrestris.*

Ordre des Polyclades

Les Polyclades ont une forme aplatie, foliacée. Ils possèdent de nombreux ocelles et parfois des tentacules à l'extrémité antérieure. Leur taille varie de quelques millimètres à plusieurs centimètres. L'intestin est très ramifié. De nombreux ovaires et testicules sont épars dans les régions latérales du corps et les vitellogènes manquent. Les espèces, de grande taille, sont en général marines et la plupart d'entre elles sont benthiques. On observe en Méditerranée *Planocera* et *Thyzanozoon*.

TEMNOCÉPHALES

Ces Plathelminthes vivent en commensaux à la surface du corps ou dans la cavité branchiale de Crustacés et de Mollusques. Leur extrémité antérieure est pourvue de tentacules mobiles et l'extrémité postérieure porte un appareil adhésif en forme de ventouse (hapteur). Ils sont surtout répandus dans les régions tropicales et subtropicales. En Europe, *Scutariella* se rencontre sur des Crustacés cavernicoles.

MONOGÈNES

Les Monogènes sont des parasites. Leur cycle biologique ne comporte qu'un seul hôte (d'où leur nom).

Organisation générale

Les Monogènes sont souvent de petite taille, d'une fraction de millimètre à 30 mm de longueur. Leur extrémité postérieure est transformée en appareil de fixation, le hapteur, qui comporte soit une ventouse et des crochets, soit une série de pinces ou d'épines qui s'insèrent dans les tissus de l'hôte. La morphologie du hapteur a une grande importance pour la systématique. Le corps est recouvert par un épiderme syncytial. La musculature sous-tégumentaire est constituée par trois couches de fibres : une circulaire, une longitudinale et une oblique.

Le *système nerveux* consiste en une paire de ganglions cérébraux réunis dorsalement par une commissure transversale, d'où partent deux nerfs principaux, l'un dorso-latéral, l'autre ventral. Les ocelles (deux ou quatre lorsqu'ils existent) sont situés dorsalement dans la région antérieure. Des terminaisons nerveuses (soies sensorielles) se rencontrent sur toute la surface du corps.

Appareil digestif. La bouche, subterminale, s'ouvre ventralement. Elle peut être entourée par un entonnoir musculaire ou flanquée de deux ventouses. Le pharynx est musculeux et aspirateur, l'intestin est divisé en deux cæcums simples ou ramifiés.

L'*appareil excréteur* est constitué par deux pores antéro-dorsaux s'ouvrant chacun dans un canal cilié, lequel reçoit deux collecteurs principaux dont les ramifications aboutissent à des protonéphridies.

Appareil reproducteur. Les Monogènes sont hermaphrodites. L'appareil mâle comprend un nombre variable de testicules et un canal déférent qui débouche dans un organe copulateur parfois pourvu de pièces sclérifiées. L'appareil femelle est composé d'un ovaire et d'un ootype. Les glandes vitellogènes sont toujours très développées.

Cycle biologique

Des œufs à opercule éclosent, en général, des larves ciliées, qui nagent à la recherche de leur hôte. Les larves possèdent un hapteur circulaire armé de crochets et des glandes céphaliques qui permettent l'adhésion au substratum ; leur tube digestif est déjà bien développé. Sur la tête se trouvent des taches oculaires de forme et de dimension variables. Les larves deviennent adultes après la fixation sur l'hôte.

Écologie

La majorité des Monogènes s'attache à la surface du corps ou sur les branchies de Poissons marins ou dulçaquicoles. Certains vivent dans la vessie d'Amphibiens

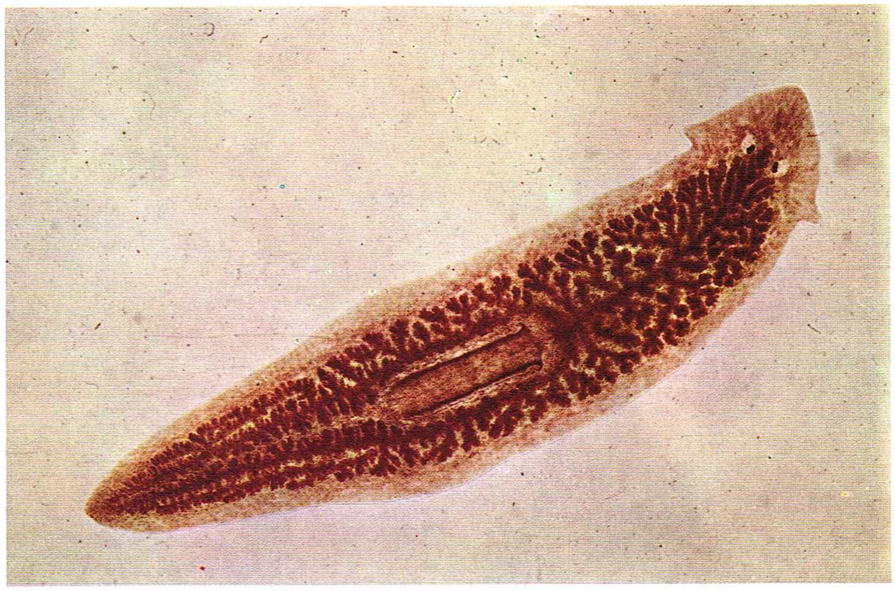

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Chez ce Turbellarié, on peut observer par transparence les structures internes, notamment les diverticules de l'intestin et le pharynx au centre.*

G.S. Giacomelli

◀ Thyzanozoon, *un Turbellarié Polyclade commun en Méditerranée (vue dorsale).*

▼ *A gauche,* Thyzanozoon *en vue ventrale ; à droite, œufs de* Thyzanozoon.

G.S. Giacomelli

G.S. Giacomelli

ou dans la cavité buccale des Tortues palustres. Ils se nourrissent de sang ou de cellules épithéliales. En grand nombre, ils peuvent provoquer de graves lésions des branchies des Poissons et même tuer les jeunes individus.

SYSTÉMATIQUE

Les Monogènes sont divisés en deux sous-classes, selon la morphologie du hapteur. Chez les *Monopisthocotylea,* le hapteur est simple, circulaire et pourvu de crochets en nombre variable. Le genre *Gyrodactylus* est représenté par des espèces vivipares accrochées aux branchies des Cyprinidés. L'œuf se développe dans l'utérus, et les jeunes individus ont toutes les caractéristiques des adultes. Pendant le développement utérin apparaît précocement un deuxième embryon à l'intérieur du premier, un troisième à l'intérieur du deuxième, puis un quatrième à l'intérieur du troisième. Quand le premier embryon a fini son développement, il naît en portant à l'intérieur l'autre embryon, et il se fixe directement aux branchies du Poisson servant d'hôte.

Chez les *Polyopisthocotylea,* le hapteur porte de nombreux organes de fixation en forme de ventouses ou de pinces munies de pièces sclérifiées. *Polystoma integerrimum (Polyopisthocotylea)* vit en Europe dans la vessie de la grenouille rousse *(Rana temporaria)*. Il pond au printemps en même temps que son hôte. Les œufs sont expulsés avec l'urine et leur développement se poursuit dans l'eau. La larve ciliée qui en sort s'attache aux branchies d'un têtard ; là, elle perd son revêtement cilié et le hapteur se transforme en six ventouses typiques. Lorsque le têtard se métamorphose, le parasite quitte la branchie et passe dans la vessie, où il termine son développement ; en général, il atteint la maturité sexuelle en trois ans en même temps que la grenouille. Lorsque la larve ciliée s'attache aux branchies d'un très jeune têtard, elle se transforme, atteint très rapidement (trois semaines) la maturité sexuelle et pond (formes néoténiques). Les larves issues de ces œufs sont identiques aux précédentes et s'attachent aux branchies des têtards ; en général, elles migrent dans la vessie, où elles donnent des adultes. Par contre, lors de la métamorphose du têtard, les néoténiques ne gagnent pas la vessie et disparaissent avec les branchies. Un cas curieux est celui des *Diplozoon*. Ce sont des parasites branchiaux de divers Cyprinidés. Il faut deux individus soudés en X et en copulation croisée permanente pour former une espèce capable de se reproduire, qui donnera une larve fixée sur la branchie du Poisson ; celle-ci se transformera en post-larve appelée diporpa, qui ne pourra poursuivre son développement que par accolement avec une autre diporpa.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ **Capsala pelamydis,** *un Monogène ; on peut remarquer l'extrémité postérieure tranformée en organe de fixation, le hapteur ; les organes sont bien visibles, en particulier les glandes vitellogènes colorées en brun foncé.*

CESTODAIRES

Ce sont des Plathelminthes hermaphrodites qui vivent dans l'intestin ou dans la cavité générale des Poissons. Leur corps est foliacé, non segmenté, sans appareil digestif. On distingue deux ordres : les Amphilinidea et les Gyrocotylidea.

Ordre des Amphilinidea

Ces Animaux ont un corps aplati, foliacé, dépourvu de scolex et dont l'extrémité antérieure possède une trompe rétractile. La larve, connue sous le nom de lycophore, possède cinq paires de petits crochets situés au pôle postérieur du corps. Dans la partie antérieure débouchent les grosses glandes unicellulaires qui occupent presque tout le corps de la larve. Les *Amphilinidea* vivent à l'état adulte dans la cavité cœlomique de Poissons et de tortues palustres. *Amphilina foliacea* est à l'état adulte parasite de l'esturgeon ; sa larve ne sort pas de sa coquille tant qu'elle n'a pas été ingérée par l'hôte intermédiaire, qui est un Crustacé amphipode du genre *Gammarus* ou *Corophium*. Quand le Crustacé est absorbé par le Poisson, la larve passe dans le cœlome de ce dernier et atteint sa maturité sexuelle.

Ordre des Gyrocotylidea

Ces Animaux sont aplatis et allongés ; leur extrémité postérieure se termine par un entonnoir musculaire à bords plus ou moins plissés utilisé pour l'adhésion. La partie antérieure porte une trompe qui semble servir de ventouse. La larve est très semblable à celle des Amphilinidea. Adultes, ce sont des parasites de l'intestin des Poissons Holocéphales. Les espèces du genre *Gyrocotyle* ne semblent pas avoir besoin d'un hôte intermédiaire.

CESTODA

La classe des Cestodes est formée d'individus exclusivement endoparasites et dépourvus de système digestif à tous les stades de leur développement.

Organisation générale

Le nom de Cestode dérive du mot grec κεστός, qui signifie ruban ; en effet, le corps de ces Animaux apparaît comme un ruban long et aplati, de couleur blanche ou jaunâtre. L'extrémité antérieure est appelée scolex. La morphologie du scolex est très variable et a une grande importance systématique. On en distingue trois types fondamentaux : chez le type pseudophyllien, le scolex porte deux dépressions (une dorsale et une ventrale) appelées pseudobothridies ; chez le type tétrarhynchide-diphyllidien, le scolex est muni de quatre pseudobothridies, en forme de cuiller, très mobiles et revêtues de petites épines. Chez le type tétra-cyclophyllidien, le scolex montre quatre bothridies ou ventouses, très mobiles et plus ou moins foliacées. Chez de nombreuses espèces, il peut y avoir au sommet du scolex une couronne de crochets chitineux : le rostellum ou rostre, grâce auquel l'Animal s'attache fermement à la paroi intestinale. Le col, région immédiatement sous-jacente au scolex, est segmenté et peut avoir une longueur variable. Viennent ensuite une chaîne de segments, les proglottis, qui se forment par strobilation de la région du col, appelée aussi zone de croissance ; ceux qui sont les plus proches du col sont donc les plus jeunes. L'appareil reproducteur contenu dans chaque proglottis se développe graduellement, et, par conséquent, les derniers proglottis sont ceux qui sont sexuellement mûrs.

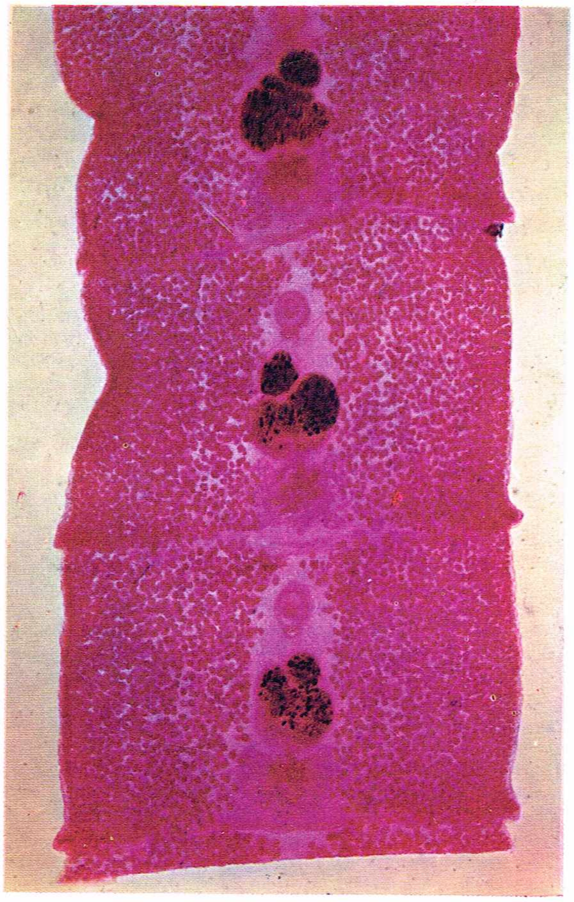

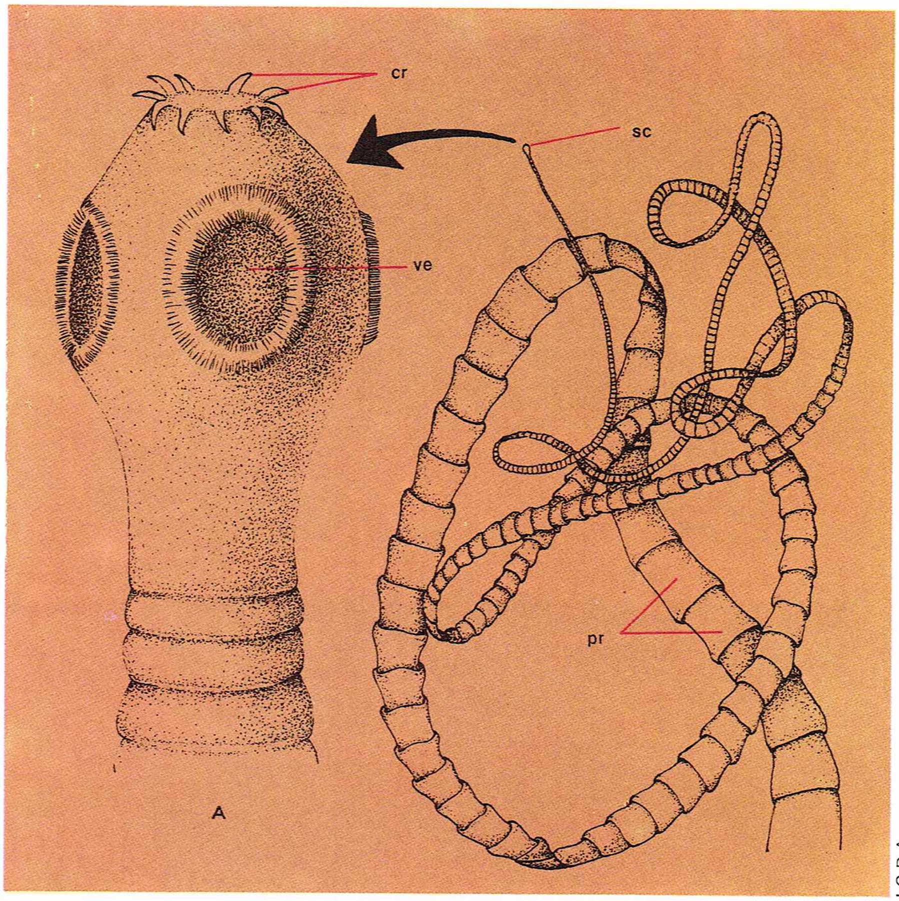

▲ ***A gauche, préparation microscopique de* Taenia *montrant trois segments ou proglottis ; les nombreux testicules colorés en violet sont bien visibles. A droite, représentation d'un* Taenia *; en A, détail du scolex ; cr, crochets ; ve, ventouse ; sc, scolex ; pr, proglottis.***

Paroi du corps. L'individu adulte est recouvert par une cuticule transparente, dont l'épaisseur peut varier selon les espèces ; elle est constituée de deux couches, l'extérieure étant souvent pourvue de papilles, de soies et de piquants. Il n'y a pas de pores ou de canalicules, et le passage de l'eau ou des substances en solution se fait par osmose. La cuticule repose sur une membrane basale, elle aussi constituée par deux couches, l'une extérieure, qui contient des granules et des vacuoles, l'autre sous-jacente, dans laquelle se trouvent les corps cellulaires. Au-dessous de la membrane basale se trouve une couche de fibres musculaires circulaires externes et longitudinales internes qui sont traversées par les prolongements des cellules sous-cuticulaires. Les fibres longitudinales sont liées aux ventouses et leur fonction est surtout de maintenir l'Animal en état de contraction, afin de résister aux mouvements péristaltiques de l'intestin de l'hôte qui tente de les expulser.

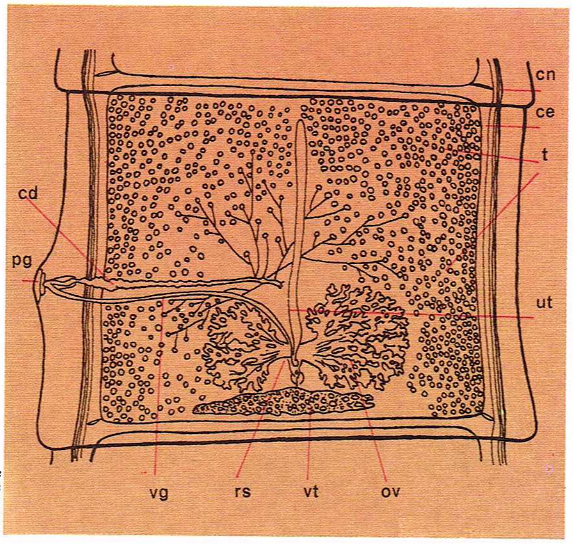

◀ ***Schéma d'un proglottis de* Taenia saginata *: cn, cordon nerveux ; ce, canal excréteur ; t, testicules ; ut, utérus ; ov, ovaire ; vt, vitellogène ; rs, réceptacle séminal ; vg, vagin ; pg, pore génital ; cd, canal déférent.***

Parenchyme. Les organes de ces « Vers » sont mêlés à un tissu spongieux, dont la véritable nature n'est pas bien connue. Il s'agit probablement d'un syncytium formé par les anastomoses de cellules mésenchymateuses ramifiées. On trouve à l'intérieur du parenchyme les cellules sous-cuticulaires. Chez la plupart des Cestodes, on observe en outre, éparses dans le parenchyme, des cellules sphéroïdales possédant chacune un gros noyau. Des particules ovoïdes composées de couches concentriques de phosphate et de carbonate de calcium et de magnésium et appelées corpuscules calcaires s'y trouvent également ; leur fonction serait de neutraliser les acides des sucs digestifs de l'hôte.

Alimentation. L'absorption de la nourriture se fait par toute la surface du corps. Les aliments sont des produits de la digestion de l'hôte, comme le glucose et les acides aminés, lesquels sont absorbés par diffusion, à travers la cuticule, qui est donc une membrane sélective. Les réserves de nourriture des Cestodes consistent surtout en glycogène et en diverses substances lipidiques, telles que des lécithines, du cholestérol, des cérébrosides, et des acides gras, qui s'accumulent dans les cellules du parenchyme. Le glycogène, principale source d'énergie de ces Animaux, est utilisé dans la respiration anoxybiotique (qui s'effectue sans oxygène) ; il y a une fermentation aux dépens du glycogène, lequel donne finalement de l'anhydride carbonique et des acides gras qui, se combinant à de la glycérine, forment des matières grasses (glycérides). Pendant les périodes où l'hôte ne se nourrit pas, la réserve en glycogène du Cestode diminue rapidement.

Le *système nerveux.* A l'intérieur du scolex se trouvent toujours deux masses ganglionnaires, réunies par des commissures d'où partent des cordons nerveux antérieurs qui innervent les organes de fixation et deux gros cordons nerveux longitudinaux qui courent latéralement tout le long de l'animal. Il n'y a pas d'organes des sens, et les terminaisons nerveuses libres se rendent dans la cuticule, où se différencient souvent des fossettes ou des papilles sensorielles.

L'*appareil excréteur* est, comme chez les autres Plathelminthes, formé de protonéphridies typiques, avec des cellules « flamme ». Les capillaires qui en proviennent

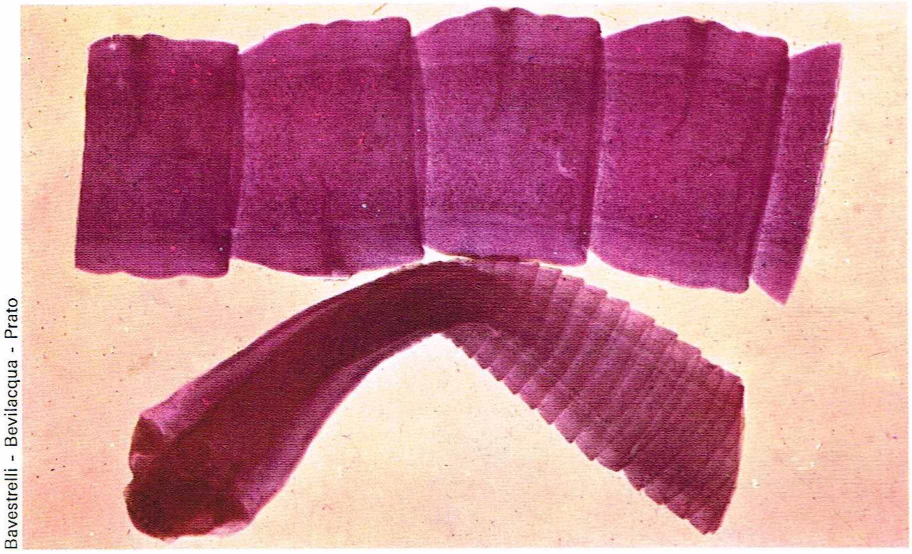

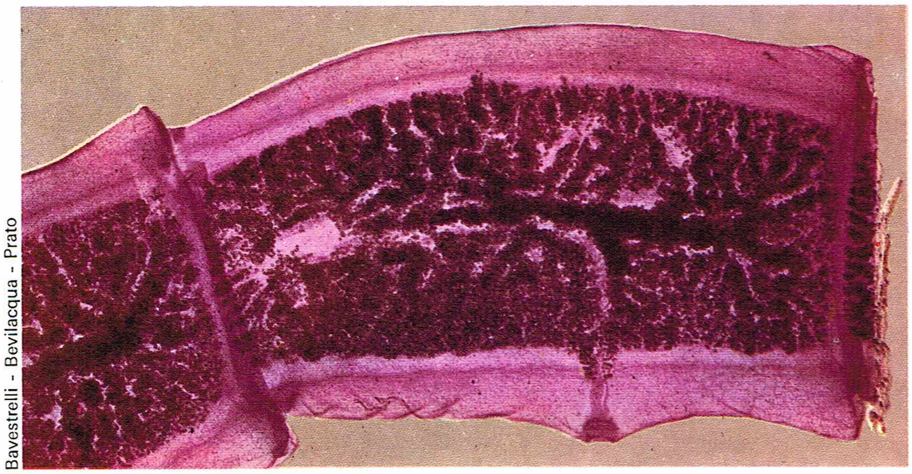

▲ Taenia pisiformis; ***en haut, proglottis immatures et scolex suivi de jeunes proglottis; en bas, proglottis à maturité.***

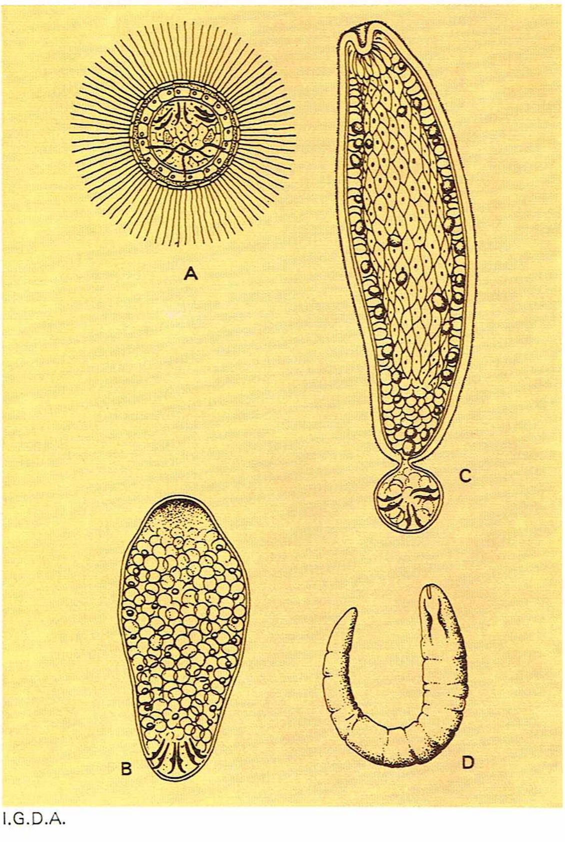

▶ *Cycle de développement d'un bothriocéphale, appartenant à l'ordre des Pseudophyllidea A, coracidium; B et C, procercoïde; D, plérocercoïde.*

I.G.D.A.

débouchent dans les canaux excréteurs longitudinaux, au nombre de quatre : une paire dorsale et une autre ventrale. Seuls les canaux ventraux s'ouvrent à l'extérieur dans le dernier anneau, alors que les canaux dorsaux s'arrêtent dès le début des proglottis mûrs.

Appareil reproducteur : les Cestodes sont tous hermaphrodites. Chaque proglottis contient les appareils mâle et femelle. L'appareil mâle est constitué par des testicules souvent nombreux et de forme sphérique. Il y en a généralement une ou deux rangées horizontales, dans le parenchyme, entre les fibres musculaires longitudinales. A chaque testicule fait suite un canal déférent, qui débouche dans le spermiducte. Dans sa partie terminale, celui-ci prend le nom de canal éjaculateur et se termine par un pénis érectile qui porte des crochets pour la copulation. Le canal éjaculateur est contenu dans un organe musculeux, ou poche du cirre, dont la partie terminale, qui débouche dans l'atrium génital, contient le cirre, qui peut se dévaginer. L'appareil femelle est constitué par un ovaire, des vitellogènes, un ootype, un utérus et un vagin qui débouche dans l'atrium génital commun. A proximité de l'ovaire, le vagin s'élargit et forme le réceptacle séminal, dans lequel s'accumulent les spermatozoïdes. L'ovaire se trouve dans le parenchyme et consiste en deux corps lobulés réunis par un mince pont d'où part l'oviducte, qui, après avoir reçu le canal vitellin et le vagin, s'élargit en formant l'ootype. Celui-ci est un petit organe ovoïdal, à parois musculeuses, entouré par des cellules glandulaires, dites de Mehlis, qui y déversent leur sécrétion. On a considéré d'abord que la sécrétion de ces glandes formait la coquille de l'œuf, mais on a observé que celle-ci est constituée par la coalescence de grains contenus dans les cellules vitellines qui entourent la cellule-œuf. Il semble plutôt que la fonction de la glande de Mehlis soit de réunir par sa sécrétion les cellules vitellines à la cellule-œuf jusqu'à ce que la coquille se soit formée.

Cycle biologique

Les œufs fécondés s'accumulent dans l'utérus, qui, chez la plupart des Cestodes, est en cul-de-sac. Les œufs sortent donc extérieurement lorsqu'un proglottis se détache. Par contre, chez les Pseudophyllidea, il existe un pore utérin. Les œufs descendent des ovaires dans l'oviducte, sont fécondés par les spermatozoïdes provenant du réceptacle séminal et sont entourés par les cellules vitellines. Dans l'ootype, chaque cellule-œuf ainsi que de nombreuses cellules vitellines sont incluses dans une capsule formée par cet organe; puis les œufs encapsulés passent dans l'utérus. Chez les Cestodes, il y a généralement autofécondation. Le mode le plus fréquent consiste en l'introduction du pénis dans le vagin du même proglottis ou bien dans l'union de différents proglottis d'un même strobile. Dans le second cas, lorsque le strobile se replie, les proglottis les plus jeunes, en phase mâle, viennent en contact avec les plus anciens, situés plus postérieurement et qui sont alors en phase femelle.

Développement embryonnaire. L'œuf fécondé se scinde en blastomères et aboutit à la formation d'un embryon sphérique, appelé embryon hexacanthe ou oncosphère et armé de trois paires de crochets. Du point de vue biologique, on peut distinguer deux catégories d'œufs. Dans la première, l'œuf quitte l'intestin de l'hôte avant que l'embryon ne soit complètement formé et il doit subir une période d'incubation dans le milieu extérieur. Dans la seconde, l'embryon est complètement développé dans l'utérus avant son expulsion.

Le *cycle de développement* est surtout connu chez les Pseudophyllidea et les Cyclophyllidea dont nous parlerons ici. Habituellement, les Pseudophyllidea ont besoin de deux hôtes intermédiaires : le premier est un Crustacé, alors que le second est un Poisson ou un autre Vertébré. Chez les Cyclophyllidea, il y a presque toujours un seul hôte intermédiaire, qui peut être un Invertébré ou un Vertébré. Les larves des Cestodes ne pénètrent pas activement chez l'hôte, mais sont ingérées par lui.

Chez les Pseudophyllidea, le coracidium (oncosphère et embryophore cilié) éclôt dans le milieu extérieur puis est ingéré par l'hôte intermédiaire, presque toujours un Copépode, et se porte dans la cavité cœlomique ou dans un organe quelconque; là, il se développe pour donner

le second stade larvaire qui est appelé procercoïde. Le procercoïde ne peut pas continuer à croître si le premier hôte n'est pas ingéré par un Vertébré, qui représente ainsi le second hôte intermédiaire. Arrivé dans l'intestin, le procercoïde, grâce à la sécrétion des glandes frontales qui détruisent les tissus, traverse la paroi intestinale, atteint le cœlome, et peut pénétrer selon les espèces dans le foie, dans la rate, dans le tissu sous-cutané, dans les muscles. Il se transforme alors en plérocercoïde, qui s'allonge et donne naissance au scolex et aux organes typiques de l'espèce. La cuticule s'épaissit, l'appareil excréteur et le système nerveux se développent, et la larve se transforme en un jeune Cestode qui, s'étant enkysté dans les tissus du second hôte intermédiaire, ne se développe pas tant que l'hôte n'est pas mangé par le troisième hôte, qui est définitif. Une fois parvenu dans l'intestin de ce dernier, le parasite se fixe à la muqueuse et la strobilation commence. Le cycle recommence par l'émission des œufs.

Chez les Cyclophyllidea, l'oncosphère se transforme en une vésicule qui, selon les espèces, peut être un cysticercoïde ou un cysticerque. Lors de la formation du cysticercoïde, la vésicule s'élargit, s'allonge et une cavité centrale se creuse alors qu'en un point de la paroi s'effectue une invagination qui donnera naissance au scolex. La partie postérieure prend l'aspect d'une queue qui conserve les crochets de l'oncosphère plus ou moins longtemps. La larve de type cysticercoïde se développe presque toujours chez un Invertébré. Le cysticerque dérive d'une oncosphère qui s'élargit jusqu'à se transformer en une vésicule emplie de liquide, avec une paroi composée d'une cuticule externe et d'une couche interne mésenchymateuse. La paroi interne s'épaissit en un point et s'invagine dans la vésicule ; à sa base et à l'intérieur se différencie le scolex. Le cysticerque se développe chez un Vertébré supérieur. Quand les viscères infestés sont ingérés par l'hôte définitif, le scolex sort en prenant la forme caractéristique de l'adulte, s'attache à la paroi intestinale et commence à subir la strobilation. Chez certaines espèces, durant le stade vésiculaire du cysticercoïde ou du cysticerque, il peut y avoir formation de nouveaux cysticercoïdes ou de nouveaux cysticerques par bourgeonnement.

SYSTÉMATIQUE

On reconnaît actuellement neuf ordres chez les Cestodes : les Haplobothrioidea, Pseudophyllidea, Tetrarhynchidea, Diphyllidea, Tetraphyllidea, Nippotaeniidea, Ichthyotaeniidea, Tetrabothridea et Cyclophyllidea.

Ordre des *Haplobothrioidea*

Les Haplobothrioïdes sont facilement reconnaissables, car ils possèdent quatre trompes épineuses et rétractiles. Ces Animaux de petite taille vivent, à l'état adulte, dans la valvule spirale des Sélaciens.

Ordre des *Pseudophyllidea*

Le scolex est de type pseudophyllidien. La limite entre le scolex et les proglottis n'est pas bien nette et souvent on ne distingue pas la région du col. *Diphyllobothrium latum,* dont le nom vulgaire est bothriocéphale, est le plus long des Cestodes parasites de l'homme. Son hôte définitif est l'homme ou un carnivore comme le chien, le chat ou la loutre. Son scolex en forme de massue, avec deux bothridies, est suivi par un long cou fin. L'individu adulte peut atteindre jusqu'à 10 m de longueur et avoir trois mille à quatre mille proglottis. Le bothriocéphale adulte vit dans l'intestin ; l'œuf fécondé est expulsé avec les fèces et donne naissance à l'oncosphère ciliée, qui est ingérée par un Copépode d'eau douce *(Cyclops* ou *Diaptomus),* dans la cavité cœlomique duquel il se transforme en larve procercoïde. Si un Poisson d'eau douce ingère ce Copépode infesté, la larve procercoïde se développe en un plérocercoïde qui, passant à travers la paroi intestinale de l'hôte, va dans ses muscles où il s'enkyste. L'homme s'infeste en mangeant des Poissons parasités mal cuits. La larve arrive dans l'intestin, se fixe à la muqueuse et commence sa strobilation. Dans certains cas, la présence de ce parasite dans l'intestin

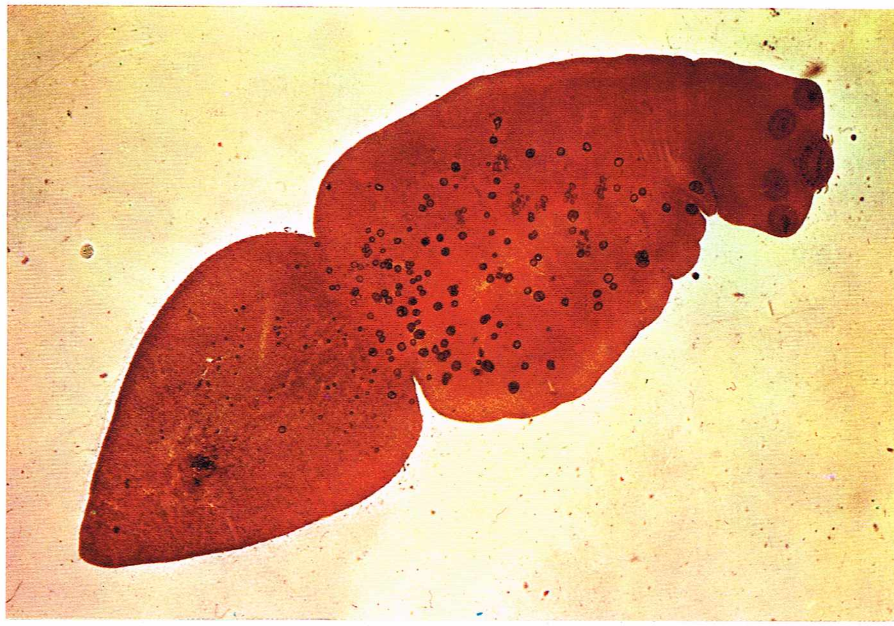

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Cysticerque de* **Taenia serrata.**

ne provoque pas de maladie grave ; dans d'autres cas, cependant, il provoque l'anémie bothriocéphalique, très dangereuse, qui peut même aboutir à la mort.

Ordre des *Tetrarhynchidea*

Les Tetrarhynchidea ont un scolex caractérisé par quatre trompes rétractiles ornées de crochets. Ce sont des parasites exclusifs de Sélaciens et leur cycle évolutif se fait probablement avec deux hôtes intermédiaires.

Ordre des *Diphyllidea*

Le scolex présente un rostre très mobile et deux pseudobothridies portées chacune par un pédoncule armé d'épines. Les proglottis, au nombre d'une vingtaine environ ont des pores sexuels médians. Les Diphyllidiens parasitent l'intestin des Sélaciens et leur hôte intermédiaire est représenté par un Crustacé ou un Mollusque marin.

Ordre des *Tetraphyllidea*

Le scolex est pourvu de quatre bothridies de forme très variable. Le cycle des Tétraphyllidiens n'est pas encore bien connu ; il y a probablement deux hôtes intermédiaires et les adultes sont parasites de Poissons Sélaciens.

Ordre des *Nippotaeniidea*

Le scolex est muni d'une seule ventouse terminale. Ce sont des parasites de Téléostéens d'eau douce et le cycle évolutif comporte un hôte intermédiaire.

Ordre des *Ichthyotaeniidea*

Le scolex est armé ou inerme et muni de quatre ventouses musculaires. Ce sont des parasites de Poissons d'eau douce, d'Amphibiens et de Reptiles. Le cycle évolutif ne possède qu'un seul hôte intermédiaire.

Ordre des *Tetrabothridea*

Le scolex porte quatre ventouses présentant des appendices auriculaires. Ces Cestodes sont parasites de Cétacés, de Pinnipèdes et d'Oiseaux marins. Leur cycle évolutif est inconnu.

Ordre des *Cyclophyllidea*

Le scolex présente un rostre volumineux armé de deux et parfois trois couronnes de crochets, et quatre ventouses profondes situées symétriquement par rapport à sa circonférence. La longueur des Cyclophyllidiens est

▼ *Chez* **Tetrarhynchus longicollis,** *le scolex est pourvu de quatre trompes munies de crochets.*

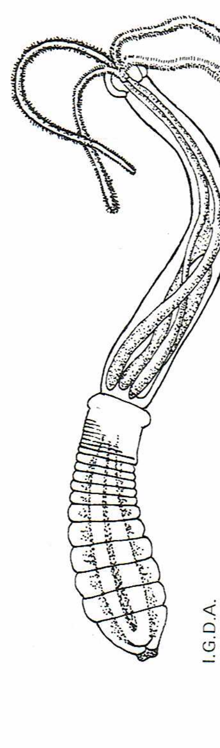

I.G.D.A.

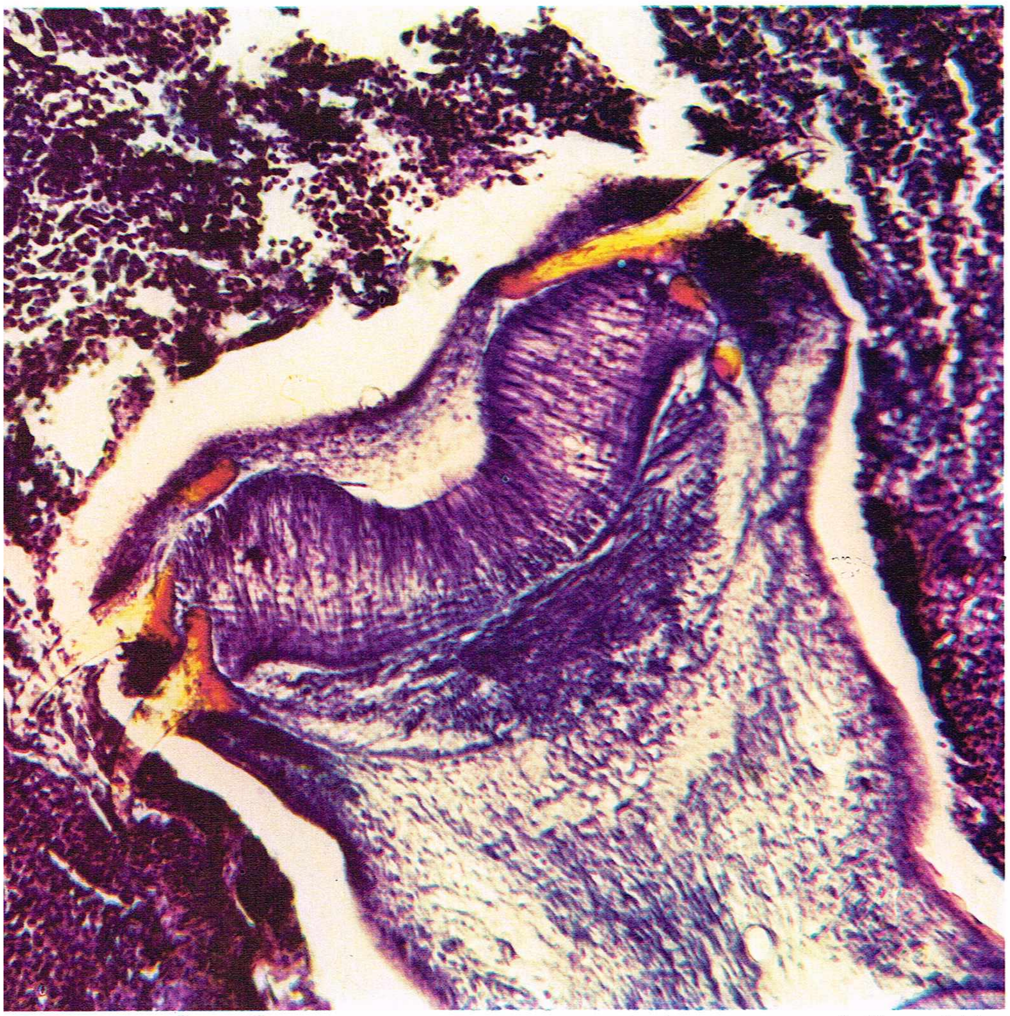

Nuridsany - Reichert

▲ *Les Cestodes sont des endoparasites; certains* Taenia *se fixent à la paroi intestinale de leur hôte, grâce à leurs crochets.*

▼ *Scolex et proglottis de deux espèces de* Taenia *; en A et C,* Taenia solium, *muni de ventouses et de crochets chitineux; en B et D,* Taenia saginata, *qui porte quatre ventouses proéminentes.*

très variable; ils ont généralement de quelques millimètres à 20 ou 30 cm, mais il est des espèces mesurant jusqu'à 10 m, avec des strobiles composés de centaines de proglottis. Les œufs, faute de pore utérin, atteignent l'extérieur seulement après le détachement des proglottis. Ce sont des parasites de Reptiles, d'Oiseaux et de Mammifères dont le cycle évolutif se fait avec un seul hôte intermédiaire (Arthropode, Mollusque ou Vertébré).

Dipylidium caninum vit à l'âge adulte dans l'intestin du chien ou du chat, et, exceptionnellement, de l'homme. Il possède un scolex à rostre rétractile. L'hôte intermédiaire est une puce qui ingère l'œuf lorsqu'elle est encore une larve. Les embryons de *Dipylidium,* après avoir traversé la paroi intestinale de l'Insecte, pénètrent dans sa cavité cœlomique et continuent à se développer, atteignant le stade de cysticercoïde quand la puce est devenue adulte. L'hôte définitif s'infeste en ingérant ces Insectes; chez l'homme, cela se produit rarement et a lieu surtout chez les enfants, qui, vivant trop en contact avec les chiens dans des endroits manquant d'hygiène, peuvent ingérer accidentellement les puces qui tombent dans leurs aliments.

I.G.D.A.

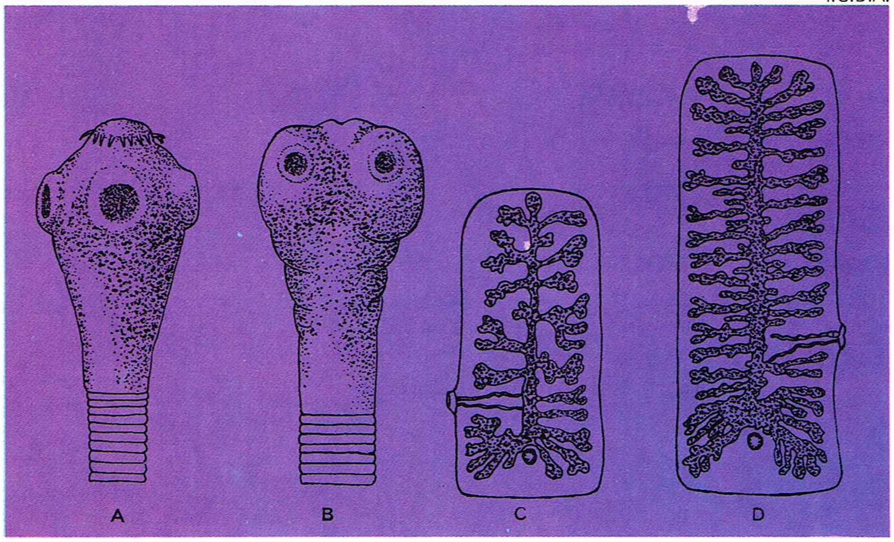

Hymenolepis nana est le plus petit ténia parasite de l'homme. Il mesure de 10 à 25 mm et compte une vingtaine de proglottis. Le scolex porte un rostre rétractile. Le cycle de ce Cestode diffère des autres, car il n'y a pas normalement d'hôte intermédiaire; il parasite habituellement le rat.

Les parasites typiques de l'homme sont *Taenia saginata* et *Taenia solium,* appelés aussi « Vers solitaires ». *T. saginata,* qui peut présenter jusqu'à plus de deux mille proglottis, a un scolex dépourvu de rostellum, mais avec quatre ventouses gonflées et proéminentes; il n'y a pas de crochets, et ce Cestode est appelé pour cela ténia inerme. Il vit dans l'intestin grêle de l'homme, qui en est l'hôte définitif. Les proglottis chargés d'œufs en cours de développement sont émis avec les fèces et, arrivés à l'extérieur, s'ouvrent en libérant les œufs; ceux-ci donnent des oncosphères. L'hôte intermédiaire est un Ruminant, généralement le bœuf, qui s'infeste en mangeant des herbes souillées. Les oncosphères, après avoir traversé la paroi de l'intestin, vont s'enkyster dans les muscles, et l'homme s'infeste en mangeant la viande crue ou peu cuite. *T. solium,* appelé aussi ténia armé, car il possède quatre ventouses ainsi qu'un rostellum avec une double couronne de crochets chitineux, peut avoir jusqu'à mille proglottis. Cette espèce a aussi l'homme comme hôte définitif; l'hôte intermédiaire est le porc, dans les muscles duquel s'enkystent les cysticerques (porc ladre). La présence de ces deux ténias dans l'intestin provoque chez l'homme des troubles digestifs et nerveux, de la faiblesse et de l'amaigrissement, par suite de l'action soustractive et irritante du parasite. *T. multiceps* est adulte chez le chien. L'hôte intermédiaire est un herbivore, généralement le mouton. La larve, appelée cénure, atteint la taille d'un œuf de poule et se localise dans les centres nerveux de l'Animal parasité et elle provoque une maladie appelée tournis. Le chien se parasite en ingérant des cervelles d'Animaux infestés.

Echinococcus granulosus, appelé vulgairement échinocoque, est l'un des Cestodes les plus dangereux pour l'homme. Il est long seulement de 4 à 5 mm, avec trois ou quatre proglottis, dont seul le dernier présente les éléments sexuels mûrs; le scolex est pourvu d'un rostellum. L'hôte définitif est le chien. Les œufs éliminés avec les fèces sont très petits et contiennent déjà un embryon en état avancé de développement. Une fois les œufs ingérés par l'hôte intermédiaire, qui peut être l'homme ou un Ruminant, ou encore le porc, l'oncosphère est libérée. Celle-ci traverse la paroi de l'intestin et, entraînée par le torrent sanguin, va dans un organe quelconque de l'hôte. Son volume augmente alors et il se forme un kyste hydatique dont la double paroi est composée par deux membranes; la membrane interne, dite proligère, engendre des vésicules qui, à leur tour, en donneront d'autres; ces dernières formeront des scolex. Si les viscères infestés d'un Animal sont mangés par le chien, les scolex se transforment dans son intestin en individus adultes et se reproduisent sexuellement. Le danger de l'échinocoque résulte surtout de la pression exercée par le kyste sur l'organe où il est situé. Chez l'homme, la localisation de l'oncosphère se fait de préférence dans le foie, les poumons, les reins, le crâne, l'abdomen et enfin les muscles. L'unique remède est l'intervention chirurgicale. L'infestation se fait chez l'homme qui a mangé des légumes crus mal lavés où se trouvent les œufs de ce ténia, ou bien en portant à la bouche ses mains où sont restés des œufs de ce parasite. *Echinococcus multilocularis* est très semblable à l'espèce précédente, mais beaucoup plus dangereux, car la forme larvaire, mal limitée, devient une véritable tumeur. L'hôte définitif principal est le renard. Le cycle normal s'effectue entre le renard et des petits Rongeurs sauvages. L'homme peut être contaminé en mangeant des fruits souillés par les déjections du renard.

TREMATODA

Les Trématodes sont tous des parasites internes d'autres Animaux. Ils ont un appareil digestif, sont pourvus de ventouses et présentent divers stades larvaires. Ils ne possèdent pas d'épithélium cilié et sont pour la plupart hermaphrodites. Ils ont communément une forme ovoïde plus ou moins allongée, et sont généralement de petite taille. Le corps est recouvert par un tégument où sont implantés des crochets, des spicules et des soies. Le nombre et la disposition de ces soies sont très variables et leur étude chez la forme cercaire tend à prendre une grande importance en systématique. Au-dessous du tégument, il n'y a pas de cellules épidermiques, mais directement des couches de fibres musculaires circulaires et longitudinales avec des fibres diagonales interposées entre elles. D'origine mésodermique, le parenchyme est constitué par un syncytium réticulaire, avec des lacunes emplies d'un liquide contenant des cellules libres donnant naissance à des lymphocytes. Dans la partie centrale du parenchyme se trouvent des amas de cellules où sont accumulés du glycogène et des matières grasses. Chez les espèces anaérobies, le glycogène est utilisé au cours d'une fermentation qui remplace la respiration : il est décomposé en anhydride carbonique et en un acide organique. Chez certains Trématodes digéniens, il existe un ensemble de canalicules parenchymateux qui semble représenter un système circulatoire primitif. Il interviendrait dans la distribution des substances nutritives, les phénomènes respiratoires et l'excrétion.

Les Trématodes sont divisés en trois sous-classes : Aspidogastres, Digènes et Didymozoïdes. Comme elles sont très distinctes, nous traiterons les autres caractères séparément pour chacune d'entre elles.

Sous-classe des Aspidogastrea

Les Aspidogastres sont caractérisés par la présence, sur leur face ventrale, d'un disque adhésif dont la surface est cloisonnée en un nombre variable d'alvéoles grâce à un système de tractus musculaires.

Le *système nerveux* est composé d'un ganglion situé dans la région du pharynx et duquel partent des nerfs longitudinaux et spécialement ceux qui innervent le disque adhésif. Dans certains genres, on peut observer deux yeux situés près du ganglion cérébral et en position dorsale. On peut voir également des organes dits marginaux qui sont de petites ampoules éversées auxquelles on attribue généralement une fonction sensorielle.

Appareil digestif. La bouche, située à l'extrémité antérieure, se trouve au fond d'un entonnoir qui peut se dévaginer. Vient ensuite un pharynx musculeux communiquant avec l'intestin par un court œsophage ; celui-ci est formé d'un seul diverticule et s'étend jusqu'à l'extrémité postérieure du corps.

L'*appareil excréteur* est formé, chez l'adulte, par deux vésicules excrétrices qui débouchent sub-dorsalement et postérieurement dans un canal impair.

Appareil reproducteur. Les Aspidogastres sont hermaphrodites. L'appareil génital mâle est généralement constitué par un seul testicule. Le canal déférent débouche dans une vésicule séminale externe. L'appareil génital femelle comporte un ovaire, situé en avant du testicule. Les glandes vitellogènes occupent deux zones latérales dans lesquelles sont groupés les follicules. L'utérus débouche à côté du pore sexuel mâle, dans un atrium commun.

Cycle biologique. Les œufs sont operculés et souvent de grande taille. Les larves, qui possèdent déjà une ébauche de disque ventral et un appareil digestif complètement formé, se fixent par leur bouche évaginée qui sert donc aussi d'organe adhésif. Ces Animaux sont parasites du manteau de certains Gastéropodes et Lamellibranches, ainsi que du tube digestif de Poissons marins et dulçaquicoles, mais on ignore comment ils parviennent dans leurs hôtes.

Aspidogaster conchicola est un parasite de la cavité péricardique des Lamellibranches d'eau douce et de l'intestin des Tortues palustres. Les *Cotylapsis* vivent dans la cavité branchiale des Lamellibranches ainsi que dans l'intestin des Tortues palustres.

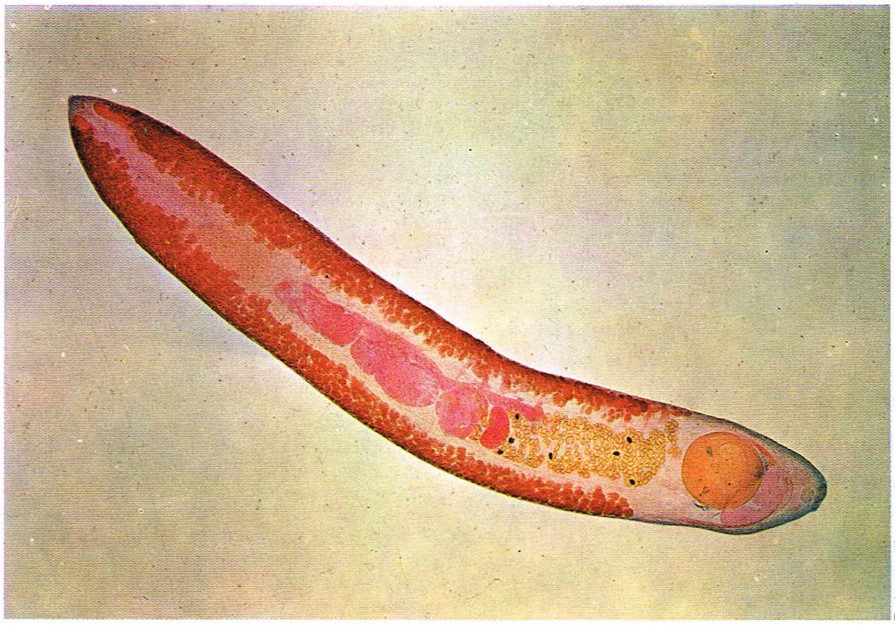

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Un représentant de la classe des Trématodes.***

Sous-classe des Digenea

Ils présentent le plus souvent deux ventouses, l'une autour de la bouche, rarement absente, l'autre sur la face ventrale en position soit médiane (Distomes), soit postérieure (Amphistomes) ; la ventrale peut manquer (Monostomes).

Le *système nerveux* consiste en une paire de ganglions cérébraux et un plexus sous-musculaire. Les deux ganglions cérébraux, réunis par une commissure, sont situés

▼ ***Représentation schématique de* Fasciola hepatica, *la douve du foie.***

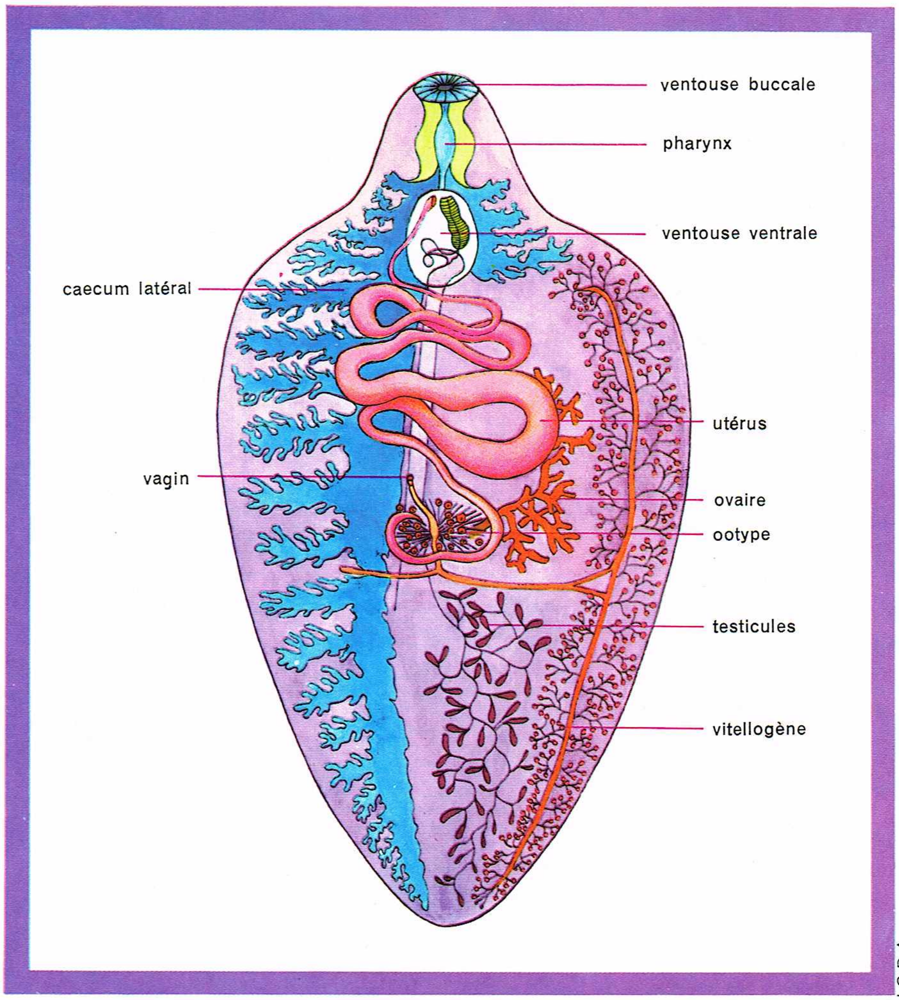

I.G.D.A.

en avant et dorsalement; il en part des cordons nerveux longitudinaux, ventraux, dorsaux et latéraux, qui se dirigent vers l'extrémité postérieure et sont réunis par des commissures transversales. Les organes adhésifs et le pharynx reçoivent de nombreuses terminaisons nerveuses. Les organes des sens sont rares. Les taches oculaires des formes larvaires disparaissent chez l'adulte.

Appareil digestif. La bouche, située à l'extrémité antérieure, en position ventrale ou terminale, est entourée généralement par une ventouse. Le pharynx, qui peut posséder des glandes pharyngiennes externes ou internes, est quelquefois suivi d'un court œsophage. L'intestin se bifurque immédiatement en deux branches, qui s'étendent en arrière et se terminent en formant des cæcums. Cette disposition typique peut présenter de multiples variations.

L'*appareil excréteur* consiste en deux tubes principaux longitudinaux, qui reçoivent de chaque côté d'autres canaux plus fins, se terminant par une cellule flamme. Les tubes longitudinaux se réunissent en une vessie unique qui s'ouvre à l'extrémité postérieure.

Appareil reproducteur. Les Digènes, à la seule exception des Schistosomidés, sont hermaphrodites. L'appareil génital mâle est constitué par les testicules, d'où partent les canaux déférents qui vont à l'organe copulateur, ou cirre, en formant sur leur trajet, à la base de celui-ci, une vésicule séminale. L'appareil génital femelle comprend un ovaire et un ou plusieurs vitellogènes. Le canal ovarien et le canal vitellin débouchent dans un canal unique, le canal ovovitellin, qui constitue une dilatation : l'ootype, entouré par des cellules glandulaires, dites de Mehlis. De l'ootype part l'utérus, où s'accumulent les œufs fécondés; il débouche dans l'atrium génital qui s'ouvre à l'extérieur par un pore génital. Du conduit ovarien part un canal dit de Laurer, qui débouche à l'extérieur par un pore situé dorsalement et qui servirait à l'évacuation des cellules vitellines en excès.

Le *cycle évolutif* est un des plus complexes du règne animal. Les différentes phases larvaires ont toujours lieu chez un Mollusque. L'œuf fécondé, entouré d'une capsule, commence à se développer pendant sa descente dans l'utérus. La segmentation aboutit à la formation d'un embryon, appelé miracidium, qui a besoin d'un milieu aquatique pour son développement. A l'extrémité antérieure de cet organisme cilié s'ouvrent les orifices d'une ou plusieurs paires de grosses glandes unicellulaires appelées glandes de pénétration. Le miracidium adhère aux Mollusques par sa papille apicale et, grâce au liquide sécrété par les glandes de pénétration, qui détruit les tissus, il s'introduit dans le corps du Mollusque pour se fixer dans l'hépatopancréas ou dans les gonades; il perd alors son épiderme cilié et se transforme en un sporocyste. Le sporocyste se nourrit aux dépens des tissus de l'hôte, tandis que les cellules génitales situées dans la cavité interne se divisent en donnant naissance à des sporocystes fils ou à des rédies. Contrairement au sporocyste, la rédie porte une bouche, située à l'extrémité antérieure, qui est suivie par un pharynx, puis par un intestin sacciforme. Il y a des glandes de pénétration, des ganglions nerveux et des protonéphridies. L'intérieur est empli d'initiales génitales en voie de développement. Les rédies abandonnent le sporocyste et errent en se nourrissant des tissus de l'hôte. Elles peuvent donner naissance soit à de nouvelles générations de rédies, soit au stade larvaire suivant, la cercaire. Quand la cercaire est complètement développée, elle abandonne la rédie en passant à travers les tissus de l'hôte et tombe dans l'eau, où elle nage pendant deux ou trois jours, pour s'arrêter ensuite sur une plante ou sur un substratum quelconque. Elle meurt si elle ne trouve pas d'hôte. Dans de nombreux cas, il y a un second hôte intermédiaire, qui peut être un Invertébré, un Poisson ou un Amphibien. Grâce à l'action dissolvante du liquide élaboré par les glandes céphaliques, la cercaire pénètre dans le second hôte, perd sa queue et s'enkyste en formant une sphère à paroi épaisse, appelée métacercaire. Toutes les caractéristiques larvaires, c'est-à-dire les ocelles, les glandes cystogènes et les glandes de pénétration, disparaissent. Lors de l'ingestion des kystes par un autre Animal qui sert d'hôte définitif, la paroi est dissoute sous l'action des sucs gastriques de l'hôte, et le jeune Trématode gagne sa localisation définitive. Dans certains cas, comme chez les Schistosomidés, la cercaire se transforme directement en adulte sans passer par le stade de métacercaire.

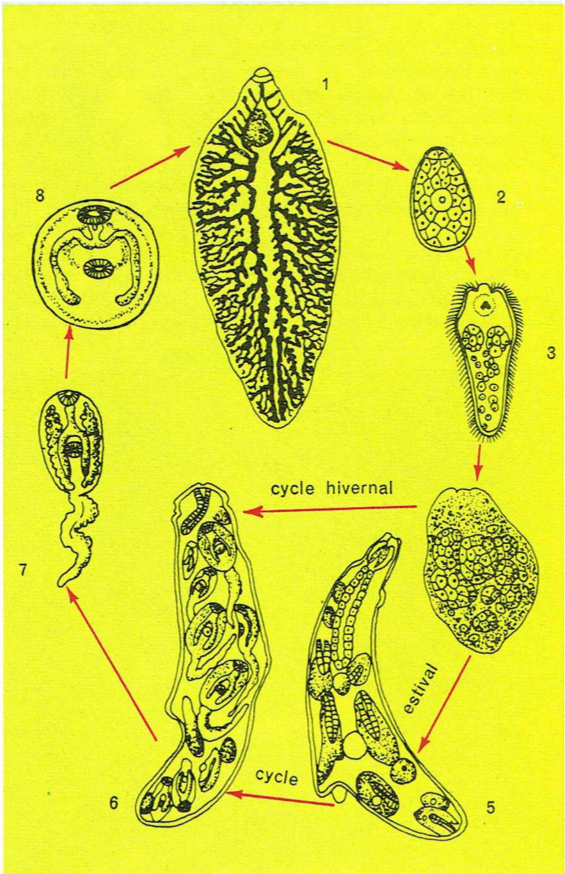

▶ *Le cycle des Trématodes Digènes est très complexe.* **Fasciola hepatica** *adulte (1), qui vit dans les voies biliaires du mouton, du bœuf ou du cheval, libère des œufs (2) qui donnent naissance à des larves miracidiums (3); celles-ci pénètrent dans un Mollusque* **(Lymnea)** *et se transforment en sporocystes (4) à partir desquels se développent des rédies (5) donnant une autre génération de rédies (6) qui libéreront des cercaires (7); ces dernières sortent du Mollusque et s'enkystent sous forme de métacercaires (8), qui, ingérées par un Mammifère, se développeront pour former un adulte. En hiver, le cycle est plus court, les rédies donnant directement des cercaires.*

I.G.D.A.

SYSTÉMATIQUE

La systématique des Digènes est très complexe et comprend deux super-ordres. Les *Anepitheliocystidia*, chez lesquels la vessie excrétrice primitive est conservée sans être remplacée par des cellules mésodermiques, sont subdivisés en deux ordres : les Strigeatoida et les Echinostomida. Les *Epitheliocystidia*, chez lesquels la vessie définitive possède une paroi épithéliale épaisse, sont séparés en deux ordres : les Plagiorchiida et les Opisthorchiida. Nous ne traiterons ici que quelques familles et plus particulièrement les genres importants en parasitologie humaine.

Ordre des Strigeatoida

Chez ces Digènes, les cercaires ont une queue fourchue et le miracidium possède une ou deux paires de protonéphridies.

La famille des **Strigéidés** est représentée par des espèces dont les individus adultes vivent dans l'intestin d'Oiseaux, de Mammifères et plus rarement de Reptiles. Le corps est divisé par un étranglement en une partie antérieure aplatie et légèrement concave, où se trouve la ventouse, et une partie postérieure allongée et cylindrique, contenant les organes reproducteurs. Le miracidium, qui se développe après la ponte de la capsule, pénètre dans un Gastéropode, chez qui se succèdent deux générations de sporocystes. Les cercaires, qui ont la queue bifide (furcocercaires), pénètrent dans divers Animaux aquatiques, où elles se transforment en métacercaires; les Oiseaux et les Mammifères s'infestent en ingérant ces Animaux parasités. Dans certains cas, un troisième hôte intermédiaire est nécessaire. Les genres *Diplostomum, Cotylinus* et *Cyathocotyla* sont surtout des parasites d'Oiseaux aquatiques; *Alaria* et *Pharyngostomum* infestent pour leur part les chiens, les chats et d'autres carnivores.

Dans la famille des **Schistosomidés**, les sexes sont séparés et le dimorphisme sexuel est accentué. Le corps du mâle, allongé, en forme de feuille enroulée, est recourbé en gouttière vers la face ventrale, pour former le canal gynécophore, où se loge la femelle; celle-ci est cylindrique, plus fine que le mâle, mais généralement plus longue.

Trois espèces de *Schistosoma* vivent, à l'état adulte, en parasites chez l'homme. Chez *S. haematobium*, d'Afrique et du sud-ouest de l'Asie, la ponte des œufs se fait dans les vaisseaux de la vessie de l'hôte. La capsule ovigère est pourvue à son extrémité d'une pointe qui, par suite des mouvements de la larve, lacère les vaisseaux et pénètre dans la vessie, d'où elle est expulsée par l'urine. Ce parasite produit une maladie appelée bilharziose vésicale, caractérisée par de l'hématurie et des troubles vésicaux dont la gravité est variable. Les hôtes intermédiaires sont les Gastéropodes des espèces *Bulinus contortus* et *Phisopsis africana*. *S. mansoni*, d'Égypte et d'Afrique centrale, a été importé en Amérique probablement à la suite de la traite des Noirs. Il vit à l'état adulte dans le système porte de l'homme. La capsule présente une pointe latérale avec laquelle la larve déchire les parois de l'intestin; elle tombe ainsi dans la lumière intestinale et est éliminée avec les fèces. Pour sortir de leur coquille, les larves doivent se trouver dans l'eau. Ce parasite provoque une maladie nommée bilharziose intestinale, caractérisée par des diarrhées sanguinolentes. L'hôte intermédiaire est un Gastéropode du genre *Planorbis*. *S. japonicum*, de Chine, du Japon et des Philippines, infeste non seulement l'homme, mais de nombreux autres Mammifères; il vit à l'état adulte dans les petits vaisseaux intestinaux. Les œufs, pourvus d'un petit éperon latéral, sont expulsés simultanément en grand nombre de l'intestin. Les personnes contaminées présentent des lésions intestinales et hépatiques et des oblitérations des vaisseaux sanguins sous l'action des œufs. De nombreuses autres espèces atteignent essentiellement les Animaux; ainsi *S. bovis*, parasite des Ruminants, existant en Sardaigne et en Corse.

Les **Azygiidés** vivent dans la première partie du tube digestif des Poissons. Les capsules contenant le miracidium sont ingérées par les Mollusques, et le miracidium, après s'être dégagé de son enveloppe, pénètre dans la paroi intestinale de l'hôte.

La famille des **Bucéphalidés** présente, à la différence de tous les autres Digènes, une bouche située au centre de la face ventrale, ainsi qu'un petit intestin sacciforme. L'appareil digestif est considéré comme primitif. Les espèces de ce groupe vivent à l'état adulte dans l'intestin des Poissons carnivores marins ou dulçaquicoles. Le miracidium, qui porte des cils sur des appendices en saillie, pénètre dans un Lamellibranche d'eau douce *(Anodonta, Unio)* ou marin *(Ostrica)* en se transformant en un sporocyste très ramifié qui produit directement les cercaires (furcocercaires). Celles-ci s'enkystent sous les écailles d'un petit Poisson (deuxième hôte intermédiaire). Le cycle se boucle quand un gros Poisson mange celui qui porte les cercaires.

Ordre des Echinostomida

Chez les Echinostomida, les cercaires ont une queue simple et se développent dans des rédies. Le miracidium possède une seule paire de protonéphridies.

Chez la famille des **Échinostomidés**, la forme est allongée. La cuticule est épineuse et, comme l'indique le nom, il y a des piquants entourant l'extrémité antérieure, comme une collerette, ce qui distingue cette famille de tous les autres Digènes. Leurs cercaires et leurs métacercaires possèdent elles aussi cette collerette Les miracidiums attaquent les Gastéropodes aquatiques; les cercaires s'enkystent dans les muscles d'autres Gastéropodes, têtards d'Amphibiens et Poissons. Les hôtes définitifs peuvent être divers Oiseaux et Mammifères, y compris l'homme.

La famille des **Fasciolidés** comprend *Fasciola hepatica*, à peu près cosmopolite, long de 20 à 30 mm et large de 8 à 12 mm, qui vit à l'état adulte dans les voies biliaires du mouton, du bœuf et du cheval. Les miracidiums pénètrent dans le poumon d'un Mollusque Gastéropode d'eau douce *(Lymnea)* et se transforment en sporocystes à partir desquels se développent les rédies.

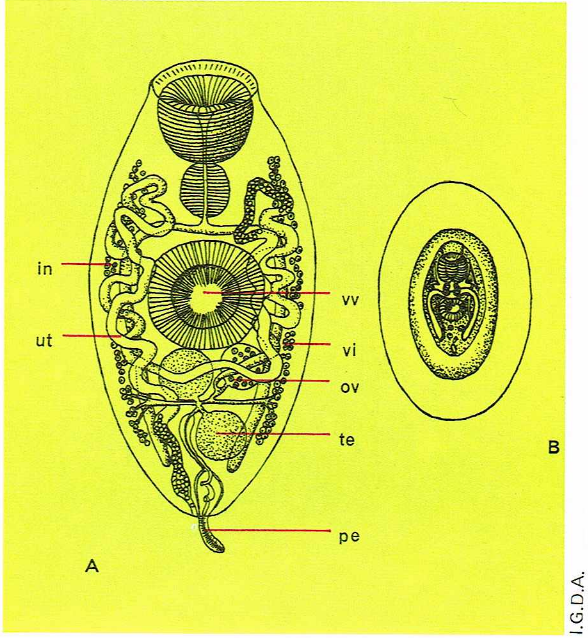

◀ *Schéma de l'adulte (A) et de la cercaire (B) d'***Urogonimus macrostomus**, *un Digène appartenant à l'ordre des Strigeatoida; vv, ventouse ventrale; vi, vitellogène; ov, ovaire; te, testicule; pe, pénis; ut, utérus; in, intestin.*

Celles-ci se rendent dans le foie du Mollusque dont elles se nourrissent. Les rédies de la première génération engendrent d'autres rédies, à partir desquelles se forment les cercaires, dont l'intestin est bifurqué et qui possèdent une queue; en hiver, les cercaires proviennent directement des rédies de la première génération. Les cercaires sortent du Mollusque, nagent grâce aux mouvements de leur queue et s'accrochent sur des plantes aquatiques, où elles s'enkystent sous forme de métacercaires. Le développement en individus adultes se fait quand des Mammifères herbivores mangent des herbes où se sont fixées les métacercaires. Les douves provoquent des lésions et des hémorragies, qui aboutissent à une grave maladie, la distomatose des Ruminants. L'homme peut ingérer la cercaire accidentellement en mangeant des plantes herbacées crues en salade, en particulier le cresson.

Ordre des Plagiorchiida

Chez les Plagiorchiida, les cercaires sont dépourvues de vaisseaux excréteurs caudaux.

La famille des **Dicrocœliidés** comprend *Dicrocoelium dendriticum*, parasite du foie et de la vésicule biliaire des moutons et d'autres Mammifères herbivores. Ses œufs n'éclosent pas dans l'eau, mais se développent seulement après avoir été ingérés par des Gastéropodes terrestres *(Helicella, Zebrina)*, chez qui apparaissent deux générations de sporocystes. Les cercaires abandonnent l'hôte, tombent sur l'herbe et sont absorbées par des fourmis dans le cerveau desquelles elles se transforment en métacercaires. Le cycle se ferme lors de l'ingestion par un herbivore d'herbe contenant des fourmis parasitées.

La famille des **Plagiorchiidés** est constituée par des espèces de petite taille, à cuticule épineuse, à vessie en Y et à gonopore antérieur. L'adulte parasite l'intestin de nombreux Vertébrés, habituellement aquatiques. Le miracidium ne sort pas de la capsule avant d'avoir été ingéré par un Gastéropode. Le sporocyste contient de nombreuses cercaires, qui sont caractérisées par un stylet antérieur; une fois sorties du Mollusque, les cercaires pénètrent chez un second hôte intermédiaire, généralement la larve d'un Insecte aquatique, mais aussi de petits Crustacés et têtards, dans les muscles desquels elles s'enkystent en se transformant en métacercaires. Celles-ci vivent même après la métamorphose de l'Insecte, ce qui favorise ainsi l'infestation d'Animaux non aquatiques qui mangent l'Insecte adulte.

La famille des **Troglotrématidés** est représentée par des espèces ovoïdes, à pore génital situé en arrière de la ventouse ventrale. Nous citerons notamment *Paragonimus ringeri*, long d'environ 20 mm; son miracidium pénètre dans un Mollusque Gastéropode d'eau douce du genre *Melania*. Là, il se transforme en sporocyste et il y a

▶ *Le dimorphisme sexuel est très accentué chez* **Schistosoma haematobium** *(A); le corps du mâle (♂) est enroulé pour former une gouttière longitudinale où se loge la femelle (♀); les œufs (B) sont pondus dans les vaisseaux de la vessie de l'hôte; les cercaires (C) ont une queue bifide.*

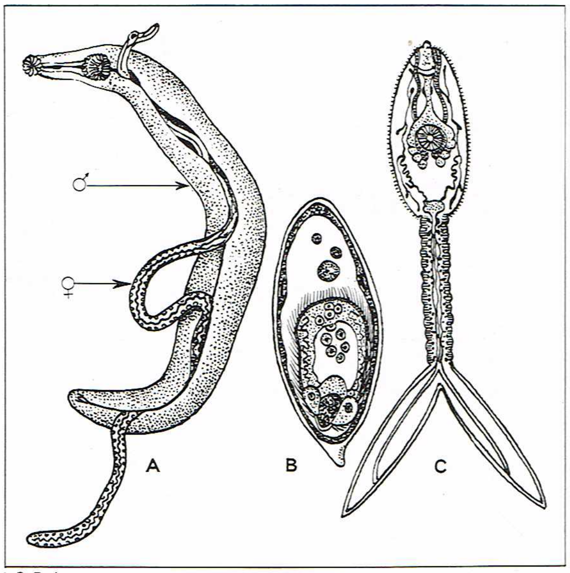

I.G.D.A.

▶ **Schistosoma haematobium** *provoque chez l'homme (son hôte définitif) une maladie appelée bilharziose vésicale; son hôte intermédiaire est un Gastéropode.*

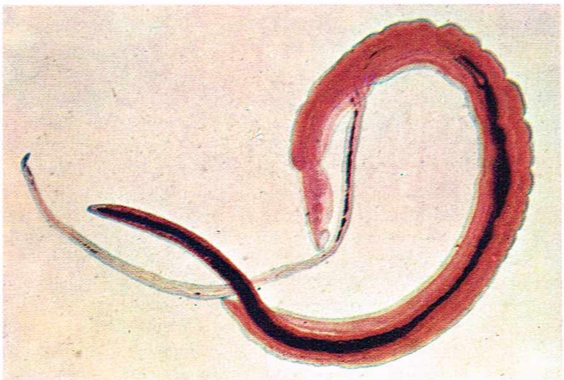

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ **Fasciola hepatica,** *qui vit à l'état d'adulte dans les voies biliaires des Mammifères herbivores, occasionne une grave maladie, la distomatose.*

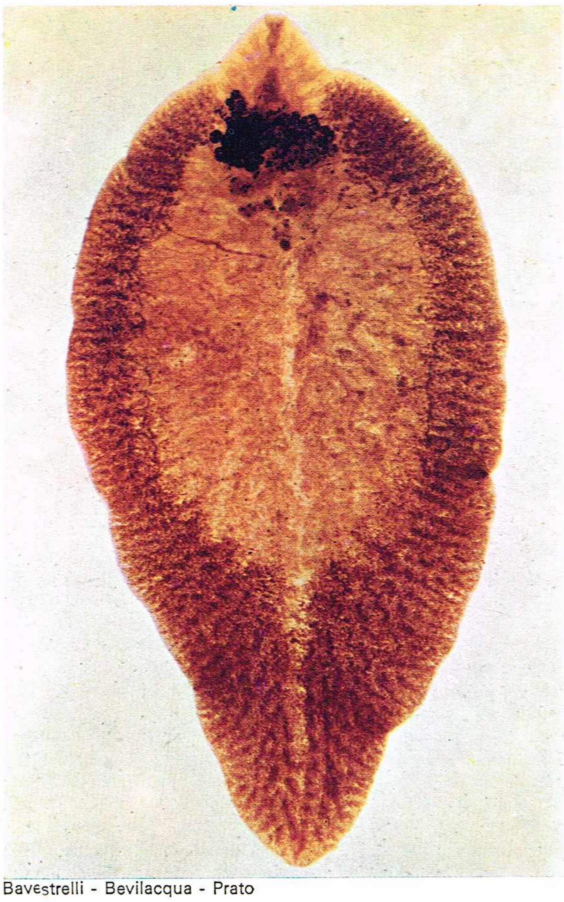

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

deux générations de rédies. Les cercaires passent dans le corps de crabes d'eau douce *(Potamon),* où elles s'enkystent dans les muscles. L'homme ou un carnivore s'infeste en mangeant des Crustacés non cuits. Le parasite gagne les poumons, où il forme une capsule fibreuse attachée aux bronches. Cette localisation la plus fréquente provoque une maladie simulant la tuberculose et appelée distomatose pulmonaire.

Ordre des Opisthorchiida

Chez les Opisthorchiida, les cercaires possèdent des vaisseaux excréteurs caudaux.

La famille des **Opisthorchiidés** est caractérisée par un corps lancéolé, des ventouses rapprochées entre lesquelles s'ouvre l'atrium génital, et des testicules situés postérieurement. *Opisthorchis felineus,* adulte, vit dans les canaux biliaires du chat, du chien, de l'homme et d'autres Mammifères. Le miracidium se développe seulement après ingestion par un Mollusque du genre *Bythinia*. Chez l'hôte, le sporocyste donne naissance à une génération de rédies formant des cercaires. Celles-ci pénètrent chez un Cyprinidé et s'y enkystent sous la peau ou dans les muscles. L'hôte définitif est contaminé en mangeant l'Animal cru ou mal cuit. Les kystes se dissolvent dans l'estomac, et la métacercaire passe du duodénum dans le canal cholédoque.

Sous-classe des Didymozoidea

Ces Trématodes, qui ne renferment qu'une seule famille, se distinguent de tous les autres par leur morphologie adaptée à la vie enkystée ainsi que par le fait qu'ils présentent des espèces hermaphrodites à côté d'autres qui sont dioïques. Ils vivent en couples à l'intérieur de kystes qui se forment sur les branchies, sur la peau, et dans la cavité orale des Poissons de mer; chaque paire est constituée par deux individus de sexe opposé. Dans la plupart des cas, cependant, il ne s'agit pas d'un véritable gonochorisme, étant donné que le mâle possède des organes femelles, bien que dégénérés, et que chez les individus de sexe opposé on trouve des organes mâles atrophiés, seuls les organes femelles étant pleinement fonctionnels. Le corps des Didymozoidea, allongé et rubané, est divisé en deux parties inégales : l'une antérieure, allongée et plus ou moins aplatie, portant la bouche et le pore génital, et l'autre postérieure, volumineuse et gonflée, contenant les organes de reproduction. Chez *Wedlia,* les sexes sont nettement séparés, et il y a aussi un net dimorphisme sexuel : le mâle est beaucoup plus petit que la femelle et se trouve logé dans une dépression formée par la volumineuse partie postérieure du corps de la femelle. Le miracidium n'a pas de cils et présente, à l'avant, une couronne de crochets. On ne sait pas exactement quel est l'hôte intermédiaire.

BIBLIOGRAPHIE

BAER J. G., *Étude monographique du groupe des Temnocéphales,* 1931. *Bull. Biol. France et Belgique,* 55, 1950; *Phylogénie et cycles évolutifs de Cestodes, Rev. Suisse Zool.,* 57. - BEAUCHAUMP P. de, *Biospeologica, Turbellariés,* t. 59, 3e série. *Arch. Zool. Exper.,* 86 n. et rev., 1949. - CHAUHAN B. S., *Studies on the Trematode Fauna of India,* I. *Subclass Monogenea, Rec. Ind. Mus.,* 51, 1954. - COLOSI G., *Zoologia e Biologia generale,* Turin, 1967. - EUZET L., *Suggestions pour une nouvelle classification des Cestodes Tétraphyllides, Proc. XIV, Congr. Int. Zool.* Copenhague, 1956. - GOURBAULT N., *Recherches sur les Triclades paludicoles hypogés,* 1972. *Mém. Mus. Nat. Hist. Nat. N. sér. série A, Zoologie,* 73. - GRASSÉ P., *Traité de zoologie,* t. 4, Paris, 1961. - HYMAN L., *The Invertebrates : Platyhelminthes and Rhynchocoela. The Acoelomate Bilateria.* New York, 1951. - KARLING T. G., *Zur Morphologie und Systematik der Alloecoela Cumulata und Rhabdocoela Lecitophora,* in *Acta. zool. fennica,* 26, 1940. - RICHARD J., *la Chétotaxie des cercaires. Valeur systématique et phylétique, Mém. Mus. Hist. Nat. série A, Zoologie,* 67, 1971. - WARDLE R. A. et MC LEOD J. A., *The Zoology of Tapeworms.* Minneapolis, 1952.

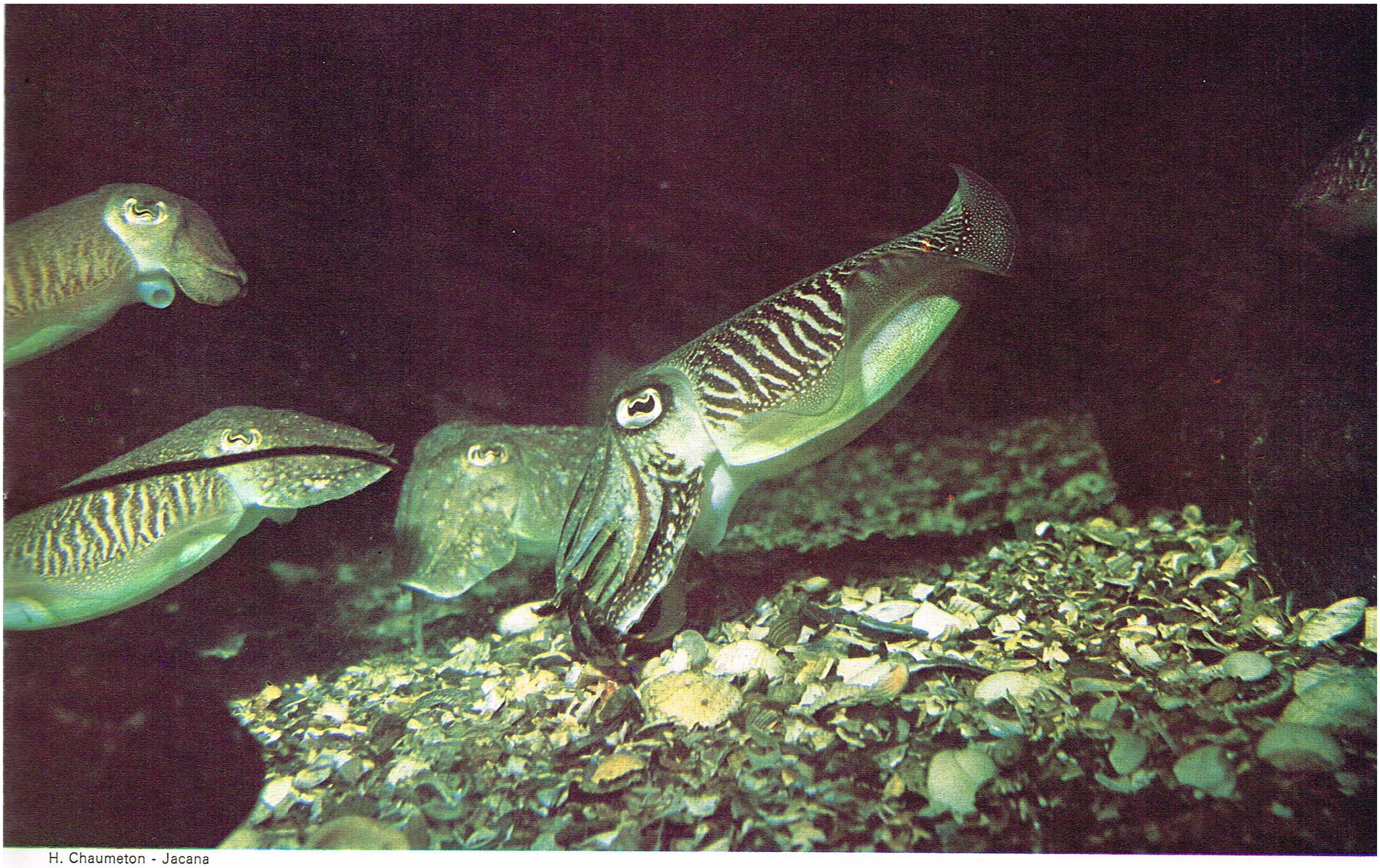

H. Chaumeton - Jacana

▲ *Les Céphalopodes peuvent renfermer dans leurs sacs urinaires des Mésozoaires Dicyémides qui se nourrissent de substances dissoutes dans l'urine.*

LES MÉSOZOAIRES

L'embranchement des Mésozoaires comprend des organismes animaux de taille réduite, endoparasites d'Invertébrés marins. On les considère maintenant comme des Métazoaires chez lesquels l'organisation du corps est extrêmement simplifiée.

Les Mésozoaires ont un corps annelé et constitué par une couche externe de cellules qui renferment un groupe d'éléments cellulaires d'où naissent les gamètes. Dans le cycle biologique de ces organismes, on assiste à une alternance caractéristique de générations sexuées et asexuées. Les Mésozoaires sont divisés en deux classes que nous étudierons ici.

ORTHONECTIDES

Les Orthonectides sont des endoparasites de Mollusques, de Polychètes, de Némertiens et d'Échinodermes. L'anatomie de ces organismes, qui n'atteignent pas 1 mm de longueur, est fort simple. Chez la femelle, de forme fuselée, le corps est constitué par un feuillet externe, l'ectoderme, composé d'une unique couche de cellules. Celles-ci forment des anneaux transversaux qui se succèdent, en nombre variable chez les différentes espèces, le long de l'axe longitudinal du corps, lequel présente ainsi une sorte de segmentation.

L'ectoderme est cilié. Les cils sont orientés vers l'avant à la partie antérieure et vers l'arrière sur la partie postérieure. A peu près à la moitié du corps s'ouvre un pore génital. L'ectoderme entoure une cavité occupée par les éléments germinaux.

Chez le mâle, de forme cylindrique et plus petit que la femelle, la cavité délimitée par l'ectoderme n'est pas entièrement occupée par les éléments germinaux mâles, mais il y a un véritable testicule en communication avec l'extérieur par un pore génital parfaitement fonctionnel. Le dimorphisme sexuel est donc très net. Les Orthonectides sont des endoparasites : mais en réalité, une partie de leur cycle biologique s'effectue à l'extérieur de l'hôte. En effet, les mâles et les femelles sexuellement mûrs abandonnent l'hôte et vivent librement dans la mer, où a lieu la fécondation. Un ou plusieurs mâles se collent à une femelle, et leurs spermatozoïdes, pourvus d'un flagelle, pénètrent dans la cavité interne de cette dernière par le pore génital, pour se rendre à la masse des œufs mûrs qui sont ainsi fécondés. Le développement de l'œuf fécondé est très rapide, puisque, vingt-quatre heures après la fécondation, des larves sphériques ciliées abandonnent leur mère en passant par le pore génital. Ces larves, qui vivent librement dans l'eau de mer, peuvent ainsi aller infester de nouveaux hôtes.

Le comportement des larves ciliées et leur développement à l'intérieur de l'hôte n'est pas encore totalement connu dans ses détails. Chez les hôtes, les organes parasités présentent, en coupe, des Orthonectides en amas plasmodiaux dans lesquels on peut observer, entre autres, des cellules germes pourvues d'un gros noyau et d'un cytoplasme propres, et des amas de cellules qui représentent des embryons à divers stades de développement. Les embryons proviennent d'une cellule germe appelée agamète, car elle se développe dans le plasmode par voie asexuée. L'agamète grossit et se divise plusieurs fois en constituant un amas de cellules à l'intérieur duquel émigrent par la suite d'autres éléments cellulaires, les véritables cellules sexuées, d'où naissent les gamètes. Cet amas de cellules constitue un embryon. Dans certains cas, chaque amas plasmodial produit des embryons qui donneront des Orthonectides d'un seul sexe, soit mâle, soit femelle. Dans d'autres cas un plasmode donne aussi bien des mâles que des femelles.

Le cycle biologique des Orthonectides comprend une alternance de générations : l'une asexuée, au cours de laquelle se forment des mâles et des femelles provenant des embryons produits à l'intérieur des plasmodes, et une autre sexuée, au cours de laquelle, par suite de l'accouplement des individus, naissent des larves infestantes qui donneront les plasmodes.

On a divisé la classe en deux familles que nous examinerons brièvement.

I.G.D.A.

▲ *Le cycle des Dicyémides parasites des sacs urinaires des Céphalopodes n'est pas encore bien connu; la pénétration dans l'hôte a lieu au niveau de la larve fondatrice (A); nématogène fondateur (B); nématogène primaire (C); rhombogènes (D); infusorigène (E) qui donne des gamètes suivis d'une autofécondation; infusoriforme (F) libéré dans l'eau de mer; sa destinée est inconnue.*

La famille des **Rhopaluridés** comprend une douzaine d'espèces parasites d'Ophiurides, de Mollusques, de Polychètes et de Némertiens. L'une des espèces les plus connues de cette famille est *Rhopalura ophiocomae*, qui parasite un Ophiuride, *Amphiura squamata*. Cette espèce se localise dans les poches incubatrices de l'hôte, en provoquant chez celui-ci une castration parasitaire.

La famille des **Pelmatosphéridés** est constituée par l'unique espèce *Pelmatosphaera polycirri*, parasite d'un Polychète.

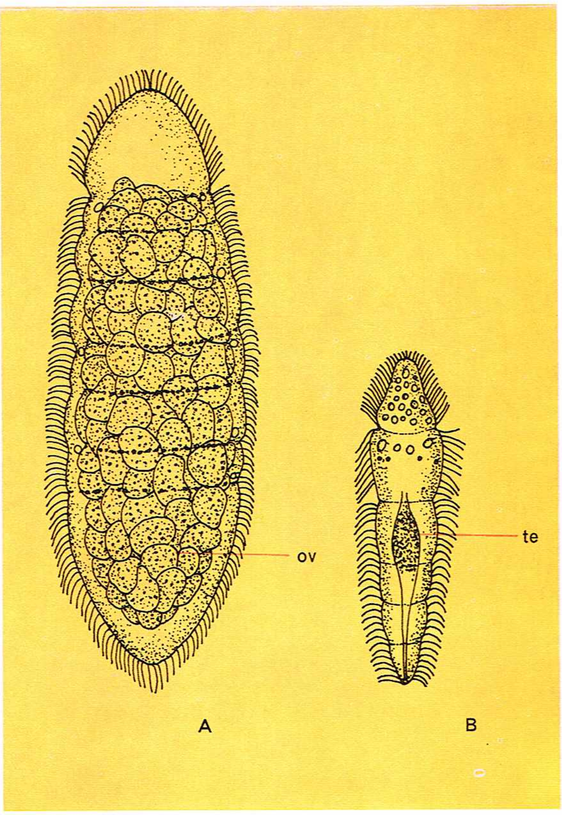

I.G.D.A.

▶ **Rhopalura granosa**, *un Mésozoaire Orthonectide : A, femelle à maturité; B, mâle; ov, ovaire; te, testicule.*

Embranchement des MÉSOZOAIRES

Classe des ORTHONECTIDES

Classe des DICYÉMIDES

- ○ *ordre des Dicyemida*
- ○ *ordre des Heterocyemida*

DICYÉMIDES

Les Dicyémides vivent dans le liquide des sacs urinaires des Céphalopodes. Ils peuvent atteindre 7 mm de longueur et se nourrissent par osmose des substances dissoutes dans l'urine. Le cycle biologique, qui n'est pas encore bien connu, est très complexe. L'infestation a lieu par la pénétration des larves chez les jeunes Céphalopodes.

Ces larves sont constituées par une couche d'éléments cellulaires ciliés qui englobe deux ou trois cellules dites axiales. A l'intérieur de chacune de ces cellules axiales se trouvent des cellules germes.

Les larves, à ce stade, par suite d'une simple augmentation de volume des cellules qui les composent, grandissent beaucoup. L'organisme qui se forme diffère du premier seulement par sa taille plus importante et est appelé *nématogène* fondateur. Chez ce dernier, les cellules germes commencent à se diviser, et chacune d'elles donne naissance à de nouveaux individus qui diffèrent de leurs parents (une seule cellule axiale et des cellules ciliées moins nombreuses) et que l'on nomme nématogènes primaires. Ceux-ci engendrent à leur tour des nématogènes de même structure. Il en résulte une pullulation de Dicyémides dans le sac urinaire de l'hôte.

Quand l'hôte va atteindre sa maturité sexuelle, les nématogènes primaires se modifient légèrement, devenant plus larges et plus plats, pour se transformer en *rhombogènes*. Les cellules germes du rhombogène ont la propriété d'engendrer des individus producteurs de gamètes, les *infusorigènes*. Ceux-ci donnent des ovules par leur surface et des spermatozoïdes par leur région centrale. Ils n'abandonnent pas la cellule axiale dans laquelle ils se sont développés.

L'autofécondation a lieu, et l'œuf fécondé donne un individu, l'*infusoriforme*, qui reste d'abord à l'intérieur de la cellule axiale, puis l'abandonne à la fin de son développement, pour passer dans le liquide urinaire, puis dans l'eau de mer où sa destinée est inconnue. La production des infusoriformes assure la dissémination de l'espèce.

Sur le plan de la systématique, les Dicyémides sont divisés en deux ordres : les *Dicyemida* et les *Heterocyemida*. Les premiers sont ciliés à l'état adulte, sur toute leur surface. Les seconds perdent leurs cils quand ils sont adultes.

BIBLIOGRAPHIE

CAULLERY M., *Classe des Orthonectides*, in GRASSÉ P. P., *Traité de zoologie.*, fasc. 1, Paris, 1961. - CAULLERY M. et MESNIL F., *Comparaison des cycles évolutifs des Orthonectides et des Dicyémides, C. R. Acad. des Sc. Paris*, 141, 1905. - HARTMANN M., *Mesozoa* in W. KUKENTHAL und Th. KRUMBACH, *Handbuch der Zoologie*, 1, 1925.

LES ACANTHOCÉPHALES OU ÉCHINORHYNCHIDES

Ce sont des Acœlomates vermiformes, parasites à tous les stades de leur existence. Les adultes vivent dans le tube digestif des Vertébrés et les larves sont enkystées dans la cavité générale d'Invertébrés, de Crustacés ou d'Insectes. Leur taille va de 10 à 20 cm et atteint exceptionnellement 60 cm chez *Macracanthorhynchus hirudinaceus*, parasite de l'appareil digestif du porc.

Le corps est souvent vivement coloré, mais ce n'est pas une coloration propre à l'Animal, étant donné qu'elle est uniquement liée à la présence de substances nutritives particulières absorbées par l'hôte. Il n'y a pas d'appareil digestif, pas d'appareil respiratoire ni circulatoire. Le corps comprend deux parties : le présoma protractile, ou trompe, à l'avant, et le tronc, à l'arrière, qui renferme les glandes sexuelles ainsi que les organes copulateurs. La trompe porte à son sommet une série de crochets. Le nombre, les dimensions et la disposition des crochets sont des éléments constants chez les individus de la même espèce, et ont donc une grande importance en taxonomie. La trompe peut s'invaginer à l'intérieur d'un réceptacle musculeux. Le tronc peut avoir un aspect varié et présenter à sa surface des piquants.

▼ *Détail de la trompe munie de crochets d'un Acanthocéphale du genre* Neoechinorhynchus.

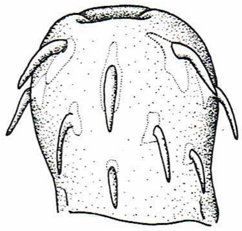

I.G.D.A.

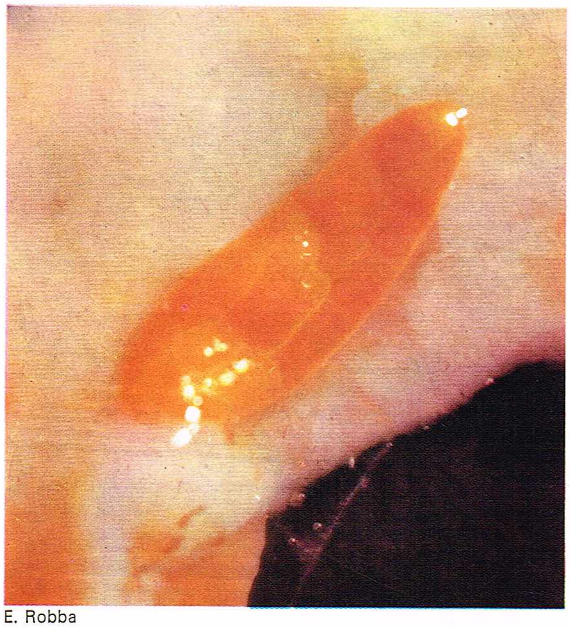

E. Robba

◀ *Adulte d'*Echinorhynchus truttae*, fixé à la paroi intestinale d'un Poisson ; la couleur jaune-orangé du parasite est due aux substances nutritives ingérées par l'hôte.*

Organisation générale

La *paroi du corps* est constituée par une cuticule, un épiderme et une couche musculaire. La cuticule est extrêmement mince et est formée de deux couches, suivies de l'épiderme, tristratifié, fibreux et syncytial. Au niveau des deux dernières couches est creusé un ensemble de lacunes (ou de canaux) rempli d'un liquide qui intervient dans la dévagination de la trompe et joue peut-être aussi un rôle dans l'absorption. Il comprend deux systèmes : un système lacunaire du corps, avec deux grandes lacunes longitudinales, et de nombreuses anastomoses ; un système de la trompe, relié à deux organes lacunaires, les *lemnisques*, situés à la base de la trompe. Le liquide contenu dans les lacunes de la trompe passe dans celles des lemnisques quand la trompe s'invagine. Il existe en général deux lemnisques, parfois quatre ou six. Leur rôle est encore mal connu.

Au-dessous de l'épiderme se trouve la musculature, qui en est séparée par un tissu fibreux de type conjonctif. La musculature présente également une structure syncytiale et est constituée par deux couches distinctes : la plus externe est formée par des fibres circulaires, alors que la plus interne est faite de fibres longitudinales.

La *cavité du corps* est un pseudocœlome situé entre la couche musculaire et les organes génitaux, qui sont dans la plupart des cas contenus à l'intérieur des sacs ligamentaires. Quand ces sacs sont au nombre de deux, le pseudocœlome est peu développé, alors qu'il prend de l'importance lorsque les sacs ligamentaires sont absents ou quand il en existe seulement un seul.

Les *sacs ligamentaires* sont des tubes faits de tissu conjonctif qui isolent les organes génitaux. Les sacs sont rattachés antérieurement à la partie distale du pseudocœlome. Chez les femelles des Archiacanthocéphales et des Éoacanthocéphales, les sacs ligamentaires sont au nombre de deux, l'un dorsal et l'autre ventral, et communiquent entre eux à l'extrémité antérieure par une ouverture sur les parois. Chez les mâles d'un certain nombre d'espèces, en revanche, il existe un seul sac, dorsal, qui contient les testicules et les glandes du cément. Chez les Palaeacanthocéphales et dans les deux sexes, il existe un seul sac ligamentaire. Alors que chez les Archiacanthocéphales, les sacs persistent durant toute la vie de l'individu, chez les deux autres ordres, les sacs s'atrophient, puis disparaissent lors de la maturité sexuelle. Dans ce cas, les organes, libres dans la cavité cœlomique, restent fixés à la partie antérieure de cette cavité par un fin cordon, le cordon ligamentaire.

Le *système nerveux* est constitué essentiellement par un ganglion cérébral situé dans la partie postérieure du réceptacle de la trompe, d'où partent deux groupes principaux de nerfs se dirigeant vers le présoma et vers le tronc. Les premiers innervent la musculature, les muscles de la trompe et les papilles sensorielles de celle-ci quand elles existent. Les seconds, au nombre de deux, vont innerver le tronc et les organes génitaux. Chez le mâle, ils confluent pour former deux ganglions situés à la base du pénis.

Les organes des sens sont mal représentés. Ils sont localisés au niveau de la trompe et de l'appareil copulateur du mâle. Ceux de la trompe sont constitués par des papilles et ont probablement une fonction tactile.

L'*appareil excréteur* manque chez la plupart des Acanthocéphales, et l'on pense que l'élimination des produits cataboliques a lieu grâce à un mécanisme particulier, par ailleurs inconnu. Seuls les Archiacanthocéphales possèdent des protonéphridies, en relation avec l'appareil reproducteur. Le tronçon terminal de l'appareil reproducteur des deux sexes est alors transformé en un canal uro-génital.

▼ *Schéma du système lacunaire de* Centrorhynchus, *un Acanthocéphale ; cl, canal lacunaire latéral principal.*

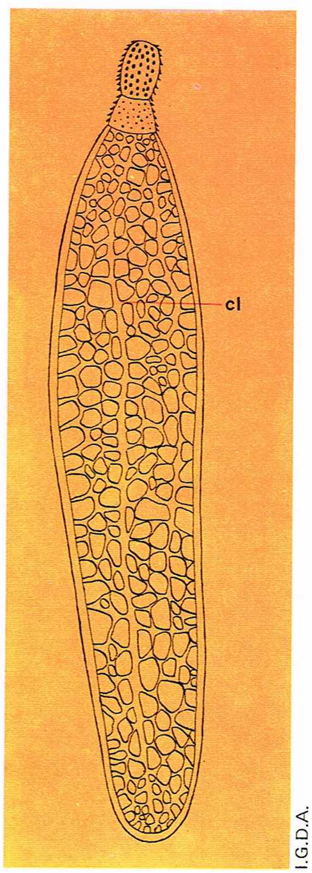

I.G.D.A.

Reproduction

La reproduction est sexuée et les sexes sont séparés. Les mâles sont généralement plus petits que les femelles. L'appareil génital mâle comporte deux testicules ovoïdes, situés dans le sac ligamentaire dorsal et d'où partent deux canaux déférents. Ceux-ci se réunissent en un canal éjaculateur, dans lequel débouchent des glandes annexes et qui se termine par un pénis musculeux, contenu dans une bourse copulatrice. L'appareil génital femelle est plus complexe. L'ovaire est formé de cellules germinales non différenciées qui se fragmentent en

Embranchement des ACANTHOCÉPHALES

- ○ *ordre des Archiacanthocéphales*
- ○ *ordre des Palaeacanthocéphales*
- ○ *ordre des Éoacanthocéphales*

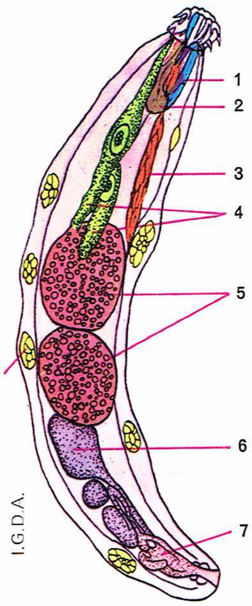

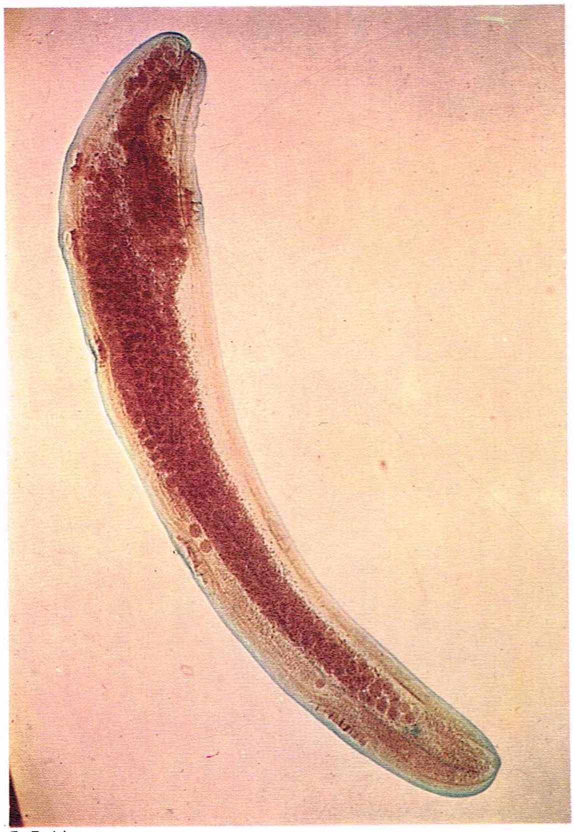

E. Robba

E. Robba

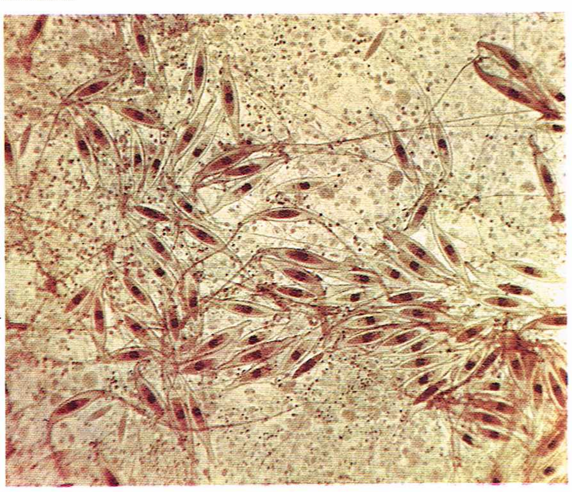

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *A gauche, représentation schématique du mâle de* **Neoechinorhynchus rutili** *; 1, réceptacle de la trompe; 2, ganglion cérébral; 3, muscle rétracteur; 4, lemnisques; 5, testicules; 6, glande cémentaire; 7, bourse copulatrice; 8, noyau hypodermique.*
▶ *En haut, un* **Echinorhynchus** *avec sa trompe rétractée.*

▶ *Embryons d'***Echinorhynchus truttae** *(au milieu et en bas) vus à des grossissements différents.*

donnant naissance aux sphères ovariennes. La différenciation des *ovogonies* a lieu à partir des éléments les plus périphériques des sphères ovariennes, puis s'étend à tout l'ensemble des cellules germinales non différenciées. Les ovogonies évoluent à l'intérieur des sacs ligamentaires, où les ovocytes sont fécondés. Chez les espèces où les sacs se déchirent, le développement se poursuit dans la cavité viscérale. Dans ce cas, il subsiste un résidu du sac ligamentaire, nommé cordon ligamentaire, qui s'insère à la base d'un organe tubulaire, la cloche utérine qui reçoit les embryons en vue du développement. Chez les autres espèces, cet organe communique directement avec le sac ligamentaire. Les embryons passent ensuite dans l'utérus musculeux qui débouche dans un court vagin. Celui-ci s'ouvre à l'extérieur par un orifice sexuel terminal ou sub-terminal.

L'œuf commence sa segmentation dans le corps même de la femelle et il se forme une larve dite *acanthor* pourvue de crochets cuticulaires antérieurs et dont le corps est recouvert de piquants. L'œuf embryonné poursuit son évolution chez un hôte intermédiaire (Invertébré terrestre ou aquatique). L'embryon éclôt dans l'intestin et en perfore les parois grâce à ses crochets cuticulaires. Il tombe alors dans la cavité cœlomique, où il se développera. La larve grandit, invaginée sur elle-même, devient une larve *acanthella,* puis une larve infestante qui, si elle est ingérée par un Vertébré aquatique ou terrestre, dévagine sa trompe et acquiert progressivement l'organisation définitive de l'adulte.

On divise les Acanthocéphales en Archiacanthocéphales, Palaeacanthocéphales et Éoacanthocéphales.

Ordre des Archiacanthocéphales

Les Archiacanthocéphales parasitent des hôtes terrestres. Les crochets de la trompe sont souvent disposés en spires. Les canaux lacunaires sont situés dans les faces dorsale et ventrale du tronc. Les œufs sont à enveloppe épaisse.

Les Archiacanthocéphales comprennent certaines des espèces les plus grandes de tout le phylum. *Macracanthorhynchus hirudinaceus* ou échinorhynque géant est un parasite du porc, et plus rarement du chien; ces hôtes s'infestent en mangeant des Coléoptères comme le hanneton et la cétoine, chez lesquels se trouvent les larves infestantes.

Ordre des Palaeacanthocéphales

Les Palaeacanthocéphales sont parasites surtout d'hôtes aquatiques. Leur trompe est armée de crochets disposés selon une symétrie radiaire. Les canaux lacunaires sont en général latéraux. Les œufs sont à enveloppe mince. La principale famille est celle des *Échinorhynchidés.*

Ordre des Éoacanthocéphales

Les Éoacanthocéphales sont des parasites de Poissons, et exceptionnellement de Tortues. Ce sont des organismes de taille réduite, chez lesquels les crochets qui arment la trompe présentent une symétrie radiaire. Les canaux lacunaires sont situés dans les faces dorsale et ventrale du tronc. Chez les femelles, on observe deux sacs ligamentaires persistants. La glande du cément est de structure syncytiale. Les protonéphridies sont absentes. Les œufs sont à enveloppe mince. *Neoechinorhynchus rutili* est observé fréquemment chez de nombreuses espèces de Poissons dulçaquicoles. Son hôte intermédiaire est un Ostracode.

BIBLIOGRAPHIE

BAER J. C., *Embranchement des Acanthocéphales,* in GRASSÉ P. P., *Traité de zoologie,* t. 4, fasc. 1, Paris, 1961. - GOLVAN Y. J., *le Phylum Acanthocephala (première note). Sa place dans l'échelle zoologique. Ann. Parasit* 33, p. 538, 602, 1958; *le Phylum des Acanthocephala (deuxième note)* 1959; *la Classe des Eoacanthocephala* (Van Cleave, 1936). *Ibid.* 34, p. 5 à 52.

LES NÉMERTIENS

Les Némertiens sont des Acœlomates à symétrie bilatérale que certaines structures anatomiques, telles que l'ouverture du tube digestif aux deux extrémités et un système circulatoire clos, obligent à séparer en un phylum indépendant. Ils se distinguent également par l'existence d'une trompe dévaginable *(proboscis)*, située dorsalement par rapport au tube digestif et contenue dans une cavité particulière, le *rhynchocœle*. Il n'existe pas d'organes spécialisés pour la respiration, celle-ci ayant lieu à travers la paroi du corps, ainsi que par l'introduction et l'expulsion d'eau de l'œsophage.

Les Némertiens sont presque tous marins. Ces organismes sont en général très colorés, par suite de la présence dans leur corps de pigments ou même de chromatophores. Leur taille varie de quelques millimètres à plusieurs mètres de longueur, sur une largeur de 5 à 10 mm.

Ces Animaux présentent des affinités avec les Turbellariés et peut-être les Annélides.

H. Chaumeton - Jacana

▲ *Les Némertiens (ici* **Tubulanus annulata***) sont presque tous marins et généralement très colorés ; ce sont des Acœlomates pourvus d'un système circulatoire clos.*

Embranchement des NÉMERTIENS

Classe des ANOPLES

- ○ *ordre des Paléonémertiens*
- ○ *ordre des Hétéronémertiens*

Classe des ÉNOPLES

- ○ *ordre des Hoplonémertiens*
- ○ *ordre des Bdellonémertiens*

Organisation générale

La *paroi du corps* est constituée par le tégument et par les couches musculaires qui forment dans leur ensemble un véritable sac musculo-cutané. Le tégument est constitué par un épithélium monostratifié, suivi par une couche d'épaisseur variable de tissu conjonctif : le *cutis*. En dessous du cutis se trouve l'ensemble musculaire, composé de deux ou trois couches fondamentales. Les formations musculaires principales sont complétées par d'autres formations secondaires représentées par des muscles radiaux et dorso-ventraux. L'espace compris entre le sac musculo-cutané et les organes internes est rempli par du tissu conjonctif d'épaisseur variable.

L'*appareil de la trompe,* caractéristique des Némertiens, comprend le *rhynchodeum* ou vestibule de la trompe, la trompe elle-même et sa gaine nommée *rhynchocœle*. Le rhynchodeum est une cavité plus ou moins développée chez les différentes espèces et revêtue par un épithélium cilié. Cette cavité s'ouvre à l'extrémité antérieure du corps, ce qui permet la dévagination de la trompe. Puis font suite le rhynchocœle et la trompe, qui sont deux tubes creux insérés l'un à l'intérieur de l'autre et séparés par un liquide. Les deux tubes sont réunis l'un à l'autre seulement en avant. La trompe est reliée à celui-ci en position distale par un muscle rétracteur.

La trompe peut être inerme ou armée, mais elle est dans tous les cas un organe d'attaque et de défense. Dans le premier cas, il existe dans les parois de cet appendice des cellules à rhabdites. Dans le second, le fond de l'organe présente un stylet accompagné de stylets accessoires et associé à des glandes venimeuses.

L'*appareil digestif* comprend une bouche sub-ventrale à laquelle font suite un œsophage d'où se détache un cæcum postérieur, un estomac allongé présentant un court cæcum antérieur, un intestin moyen muni de petits cæcums latéraux, un court rectum et un anus. La nourriture diffère pour les formes larvaires et pour les adultes. Les larves pélagiques vivent aux dépens du phytoplancton. Les adultes sont strictement carnivores (Annélides, Mollusques et Crustacés) et sont capables d'ingérer des proies d'une taille supérieure à la leur.

Le *système nerveux* comprend le cerveau et deux nerfs latéraux. Le cerveau est constitué par deux ganglions, liés entre eux par des commissures ventrale et dorsale. Il y a ainsi un anneau qui entoure non pas l'œsophage comme chez la plupart des Vers, mais la trompe. Les nerfs latéraux se rejoignent à l'extrémité postérieure du corps par une commissure anale. En outre, il existe souvent un nerf médio-dorsal, plus rarement un nerf médio-ventral.

Le long du corps des Némertiens sont localisés de nombreux organes des sens. Parmi les plus simples, nous citerons les fentes et les sillons céphaliques, les organes frontaux et latéraux et les bulbes sensoriels. Les *statocystes* sont des organes des sens plus complexes, ainsi que les yeux et les organes cérébraux. Les statocystes, généralement au nombre d'une seule paire, sont des vésicules situées sous le cerveau, et qui contiennent

▼ **Lineus geniculatus,** *un Némertien Anople.*

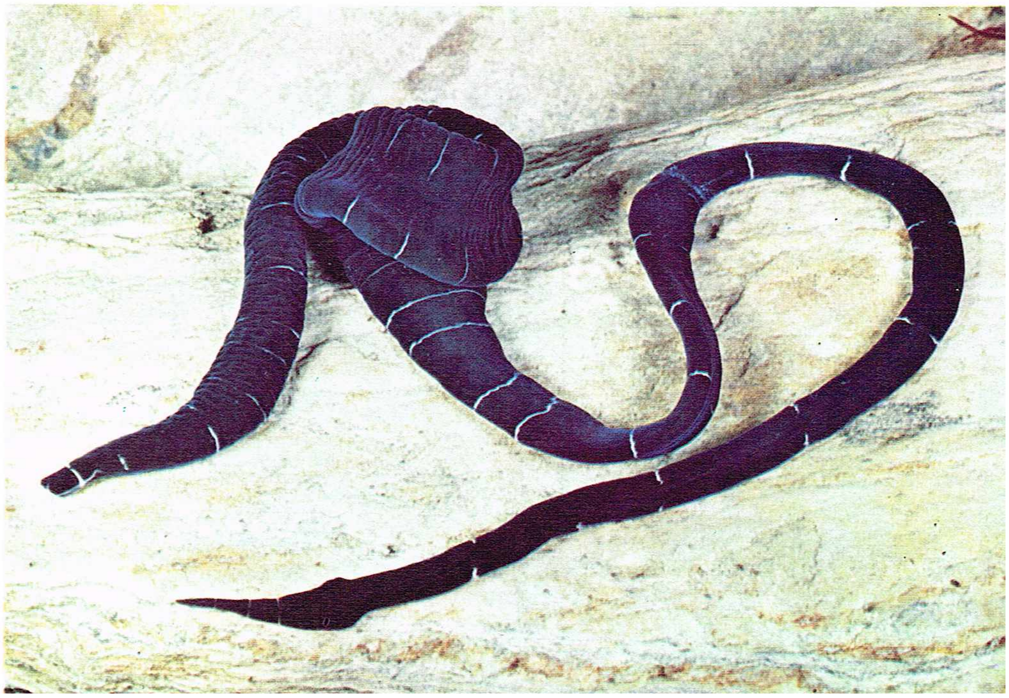

J. Six

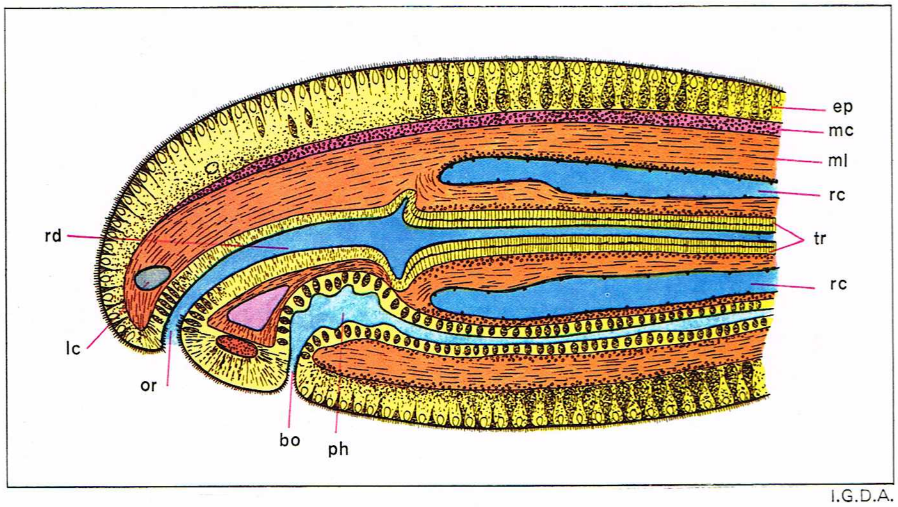

I.G.D.A.

▲ *Coupe schématique sagittale de l'extrémité antérieure d'un Paléonémertien; ep, épiderme; mc, muscles circulaires; ml, muscles longitudinaux; rc, rhynchocœle ou gaine de la trompe; tr, trompe; ph, pharynx; bo, bouche; or, orifice du rhynchodeum; lc, lacune céphalique; rd, rhynchodeum ou vestibule de la trompe.*

chacune une ou plusieurs statolithes. Elles existent uniquement chez les Hoplonémertiens et chez les Paléonémertiens.

Les yeux sont présents chez la plupart des Némertiens et se trouvent aussi bien à l'extrémité céphalique que le long des nerfs latéraux, dans la région du tronc. Leur nombre peut être très élevé et ils tendent à se localiser sur le corps en deux groupes symétriques. Rarement superficiels, ils sont en général placés dans le cutis ou dans le parenchyme.

Il existe enfin deux organes cérébraux, hautement spécialisés, très caractéristiques des Némertiens. Ce sont des invaginations épithéliales tapissées de cellules sensorielles et glandulaires; leur fonction est peut-être endocrinienne.

C'est dans l'embranchement des Némertiens qu'apparaît, pour la première fois dans le règne animal, un *système circulatoire clos.* Sa structure est très variable selon les ordres. Le type le plus simple est constitué par deux vaisseaux latéraux reliés par deux anastomoses, l'une postérieure, l'autre antérieure. Cette dernière est à son tour en communication avec une lacune céphalique. L'anastomose postérieure, dite anale, va ventralement à l'extrémité distale de l'appareil digestif. Le système circulatoire est plus compliqué quand il y a d'autres anastomoses et quand d'autres lacunes s'ajoutent à celle de la tête. Le type le plus complexe est formé par trois vaisseaux longitudinaux, deux latéraux et un dorsal. Dans les vaisseaux circule un liquide parfois coloré, qui contient des éléments figurés. La couleur du sang est due à la présence de pigments qui ont les caractères de l'hémoglobine. Le système circulatoire est en rapport étroit avec l'appareil excréteur.

I.G.D.A.

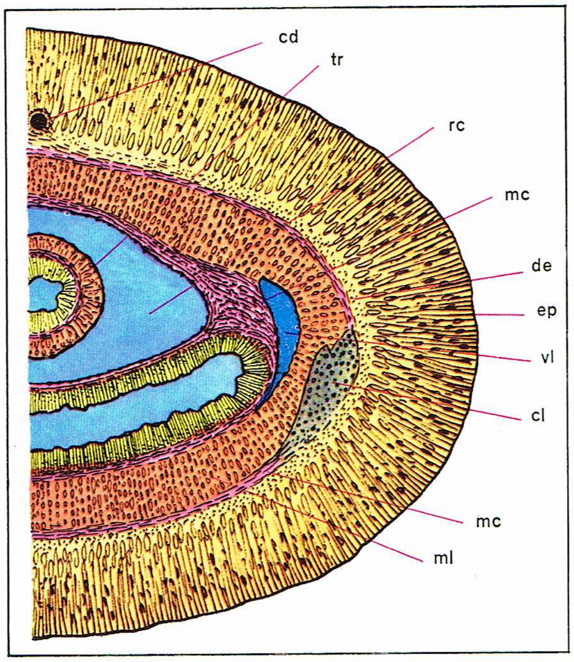

▶ *Moitié de coupe transversale d'un Paléonémertien : cd, cordon nerveux dorsal; tr, trompe; rc, rhynchocœle; mc, muscles circulaires; de, derme; ep, épiderme; vl, vaisseau latéral; cl, cordon nerveux latéral; ml, muscles longitudinaux.*

Le type d'appareil excréteur le plus simple est constitué par deux protonéphridies tubulaires situées dans la région œsophagienne et qui s'ouvrent à l'extérieur par deux pores néphridiaux. La cellule flamme de chaque protonéphridie est en contact direct avec la paroi du vaisseau latéral de l'appareil circulatoire. Dans d'autres cas, on trouve, au lieu de deux protonéphridies seulement, de nombreux organes de ce genre qui aboutissent à un ou deux canaux collecteurs par lesquels les produits excrétés parviennent aux pores excréteurs.

Reproduction

La reproduction est sexuée et les sexes sont séparés. Les gonades sont localisées dans les espaces compris entre les diverticules intestinaux, ou le long du tube digestif, si les diverticules manquent. Les gonades sont de simples sacs limités par un épithélium monostratifié; elles envoient leurs produits à l'extérieur par des oviductes ou des spermiductes, qui apparaissent lors de la maturité sexuelle et qui aboutissent à un pore génital.

La fécondation est généralement externe, et les éléments mûrs sont libérés dans l'eau. Les œufs peuvent être pondus isolés ou en petits groupes, ou encore être regroupés à l'intérieur d'un cocon. La segmentation de l'œuf fécondé est totale et de type spiral. Une fois atteint le stade de la *gastrula,* le développement peut se faire par voie directe ou indirecte. Dans le premier cas, il sort de l'œuf une jeune larve ovoïdale, ciliée, qui possède au pôle apical une touffe de cils. Dans le développement indirect, la gastrula prend la forme larvaire appelée *pilidium,* qui a l'aspect d'un petit casque conique recouvert de cils et pourvu à la base de deux oreillettes symétriques. Cette larve différenciera, en son intérieur, une petite Némerte.

Régénération : s'il subit une excitation brutale, mécanique ou chimique, le Ver se fragmente spontanément en tronçons. Par la suite, ceux-ci régénèrent chacun un individu complet, s'ils contiennent toutefois une petite partie du rhynchocœlome.

Les Némertiens sont divisés en deux classes, selon la position des cordons nerveux par rapport aux assises musculaires et aussi selon la structure de la trompe.

ANOPLA

La trompe est inerme et la bouche s'ouvre en arrière du cerveau. Le système nerveux central est inclus dans l'épaisseur de la paroi musculaire du corps ou se trouve sous le tégument. L'intestin est droit et parfois dépourvu de diverticules latéraux. Les Anoples sont divisés en deux ordres : *Paléonémertiens* et *Hétéronémertiens.*

ENOPLA

La trompe est armée et possède, sauf chez le petit groupe des Bdellonémertiens, un ou plusieurs stylets. La bouche s'ouvre en avant du cerveau. Le système nerveux central est inclus dans le parenchyme en dessous des couches musculaires de la paroi du corps. L'intestin est généralement pourvu de diverticules latéraux et parfois de cæcums. Les Énoples constituent deux ordres.

Les *Hoplonémertiens* sont divisés à leur tour en Polystylifères et Monostylifères, selon le nombre de stylets que porte leur trompe.

Les *Bdellonémertiens* ne possèdent pas de stylets sur leur trompe et sont représentés par l'unique genre des *Malacobdella.*

BIBLIOGRAPHIE

GONTCHAROFF M., *Embranchement des Némertiens,* in GRASSÉ P. P., *Traité de zoologie,* t. 4, fasc. 1, p. 783-886, Paris, 1961.

G. Mazza

LES NÉMATHELMINTHES

Les Némathelminthes sont des organismes qui, du fait de la forme cylindrique de leur corps, sont appelés Vers cylindriques par opposition aux Plathelminthes, considérés comme des Vers plats. On y distingue deux classes : les Nématodes et les Gordiacés qui diffèrent essentiellement par leur cycle évolutif.

NEMATODA

Ce sont des Métazoaires, à symétrie bilatérale, généralement de petite taille, de forme cylindrique, filiforme ou fusiforme et revêtus d'une cuticule. Ils sont dépourvus de cellules ciliées. Ils vivent librement dans les mers, les eaux douces et le sol, ou comme commensaux ou parasites de plantes et d'Animaux.

Organisation générale

La *paroi du corps* est constituée par la cuticule, l'épiderme et une couche musculaire. La cuticule est formée par trois couches dont la plus externe contient une substance proche de la kératine.

La cuticule externe peut être lisse ou pourvue de différenciations superficielles : stries transversales, anneaux, crêtes longitudinales, épines, écailles, etc. Ces derniers caractères peuvent avoir une certaine importance en systématique. L'épiderme, ou hypoderme, fait suite à la cuticule et est constitué par une couche cellulaire qui, dans certains cas, et en particulier chez les grands Nématodes parasites, devient syncytiale. L'hypoderme s'épaissit en constituant quatre zones qui font saillie dans la cavité du pseudocœle pour former les champs (cordes) longitudinaux, un ventral, un dorsal et deux latéraux. En dessous de l'hypoderme se trouve la couche musculaire, qui est uniquement longitudinale. La cellule musculaire est constituée de deux parties, l'une fibrillaire, adossée à l'hypoderme, et l'autre cytoplasmatique, qui contient le noyau et fait saillie dans la cavité du corps. Bien que la musculature circulaire soit absente, il existe des muscles transversaux qui s'insèrent en général ventralement à côté de la corde médiane et sub-dorsalement près des cordes latérales. Il s'agit des muscles copulateurs, bursaux, vulvaires et anaux.

La *cavité du corps* se trouve entre la paroi et l'appareil digestif. Elle a reçu le nom de *pseudocœle*. Dans cette cavité, emplie d'un liquide, on trouve, surtout chez les espèces parasites, des cellules géantes ramifiées ou étoilées, qui ont une position bien définie par rapport aux cordes longitudinales. Ces cellules, dites pseudocœlocytes, ne sont jamais très nombreuses et semblent avoir une fonction d'oxydation.

L'*appareil digestif* commence par l'ouverture buccale, située à l'extrémité antérieure du corps, et se termine par l'ouverture anale qui, lorsqu'elle existe, est une fente transversale localisée à la face ventrale du corps. Dans la majorité des cas, la bouche est entourée par six lèvres,

▲ *Les Nématodes se rencontrent dans des milieux divers : Mousses, Lichens, fonds des étangs, sables marins, et même dans le vinaigre, telles ces anguillules* **(Turbatrix aceti)** *; d'autres Nématodes sont des parasites.*

EMBRANCHEMENT DES NÉMATHELMINTHES

Classe des Nématodes

☐ *Sous-classe des Adenophorea*

infra-classe des Chromadoria
infra-classe des Enoplia

☐ *Sous-classe des Secernentea*

○ *ordre des Rhabditida*
○ *ordre des Tylenchida*
○ *ordre des Strongylida*
○ *ordre des Oxyurida*
○ *ordre des Ascaridida*
○ *ordre des Spirurida*

Classe des Nématomorphes ou Gordiacés

○ *ordre des Gordioidea*
○ *ordre des Nectonematoidea*

parfois surmontées de protubérances qui, chez certaines espèces, ont un développement exceptionnel. Chaque lèvre porte une papille qui sert d'organe sensoriel et qui peut être parfois remplacée par une soie. A l'extérieur de ce premier anneau, il en existe un autre, constitué aussi par six papilles ou soies ayant toujours la même fonction. Puis fait suite une troisième série de quatre papilles ou soies, extérieures aux lèvres et dites céphaliques. Mais il peut y avoir de nombreuses variantes, qui consistent surtout en une réduction du nombre des lèvres et en une migration des papilles sensorielles des anneaux les plus extérieurs vers ceux qui sont les plus proches de l'ouverture buccale.

L'ouverture buccale communique avec le vestibule, cavité assez peu développée, délimitée par les faces internes des lèvres, suivie par une cavité allongée, le *protostoma,* qui communique avec la cavité suivante, généralement plus large que longue, le *telostoma.* Cet ensemble de chambres qui se succèdent selon un axe antéro-postérieur forme la capsule buccale; celle-ci, chez de nombreuses espèces, est constituée, plus simplement, par un tube allongé de diamètre constant.

La capsule buccale est suivie par l'œsophage ou pharynx qui présente de grandes différences de forme et de structure selon les groupes. Certains éléments sont cependant constants : ainsi, la structure triradiée de l'œsophage qui, en coupe transversale, est composé de trois secteurs, l'un dorsal et les deux autres sub-ventraux.

Chez certaines espèces parasites, la cavité de l'œsophage est incluse dans une ou deux rangées de cellules, les *stichocytes,* cellules glandulaires constituant le *stichosome.* L'œsophage communique par une valvule pharyngo-intestinale avec l'intestin, qui est un long tube séparé du rectum par une valve entourée d'un sphincter. Le rectum s'ouvre à l'anus qui correspond, chez le mâle, au cloaque.

L'*appareil excréteur* peut être de deux types : type simple et type en H ou tubulaire. Le premier type se rencontre chez la plupart des Nématodes marins libres. Il est constitué par une cellule glandulaire très allongée, dont le canal s'ouvre en avant, sur la ligne ventrale du corps, par un pore excréteur.

Le second type de système, tubulaire, est caractérisé par la présence de deux canaux longitudinaux qui courent à l'intérieur des deux lignes latérales. Ces canaux sont reliés par un autre canal médian, qui débouche ventralement par un pore excréteur. Généralement, les branches antérieures de l'H ainsi formé sont moins développées que les postérieures. Le type Ascaride, en U renversé, dériverait du type H par la réduction des conduits collecteurs antérieurs.

Le *système nerveux* est constitué par un anneau nerveux péri-œsophagien auquel sont associés des ganglions dont les plus importants sont une paire latérale et une paire ventrale. De l'anneau partent, vers l'avant, les nerfs innervant l'appareil sensoriel céphalique et, vers l'arrière, huit troncs nerveux dont les uns sont moteurs et les autres sensitifs.

Les organes des sens sont essentiellement des soies et des papilles que l'on observe en nombre important chez les Nématodes libres.

Sur la tête, on trouve les papilles labiales et céphaliques et, dans la partie antérieure du corps, au nombre de deux, des papilles cervicales ou *deirides,* situées au niveau de chaque champ latéral; enfin, chez le mâle, il y a des papilles génitales sur la face ventrale de la queue. On suppose que toutes ces papilles sont tactiles.

La tête porte également deux *amphides* latérales surtout développées chez les formes libres et qui auraient un rôle de chimiorécepteurs. Dans la partie postérieure du corps se trouve une paire de glandes unicellulaires, les *phasmides,* dont le canal s'ouvre de part et d'autre de la queue. Elles sont surtout bien développées chez les formes parasites.

▼ A gauche, schéma du système nerveux d'un Nématode (Parascaris equorum). *1, ganglion nerveux péri-œsophagien; 2, pore excréteur; 3, cordons sublatéraux; 4, cordon dorsal; 5, commissures; 6, cordon ventral; 7, ganglion anal; 8, anus. Au milieu, vue microscopique de la coupe transversale d'un ovaire d'*Ascaris. *A droite, vue microscopique d'une coupe transversale d'*Ascaris. *cd, champ dorsal; cm, cellules musculaires; cu, cuticule; ep, épiderme; cv, champ ventral; in, intestin; cl, champ latéral.*

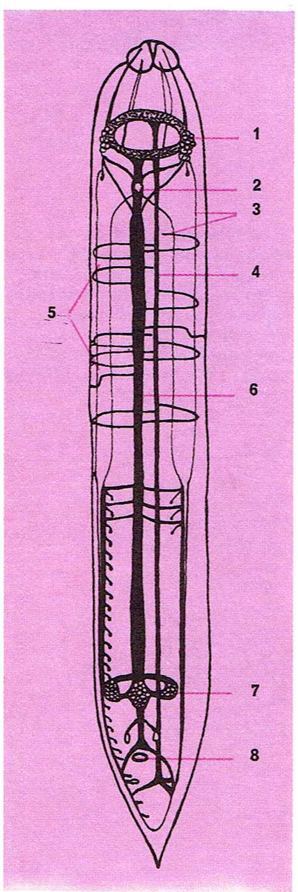

I.G.D.A.

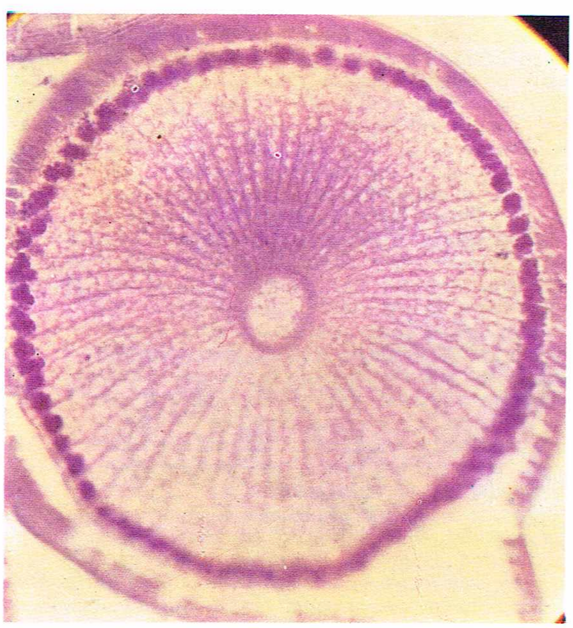

E. Robba

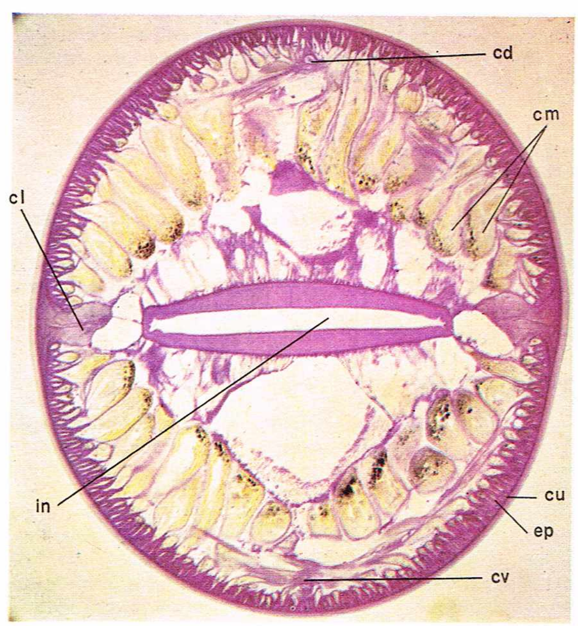

E. Robba

E. Robba

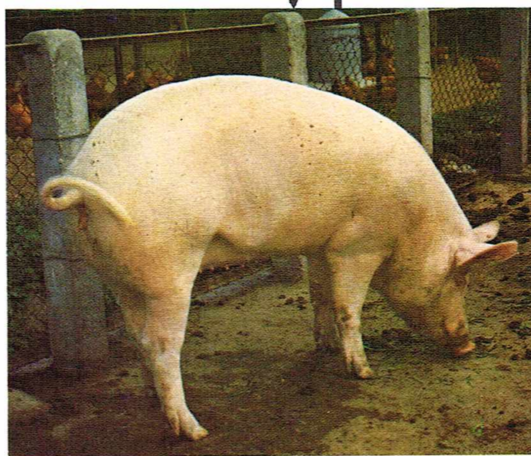

E. Robba

◀ *Cycle et principaux hôtes de la trichine,* **Trichinella spiralis :** *le rat s'infeste lui-même par son cannibalisme ; le porc absorbe le parasite, soit en mangeant des rats infestés, soit en ingérant des déchets d'abattoir, provenant d'autres porcs contaminés ; l'homme peut s'infester en mangeant de la viande de porc mal cuite.*

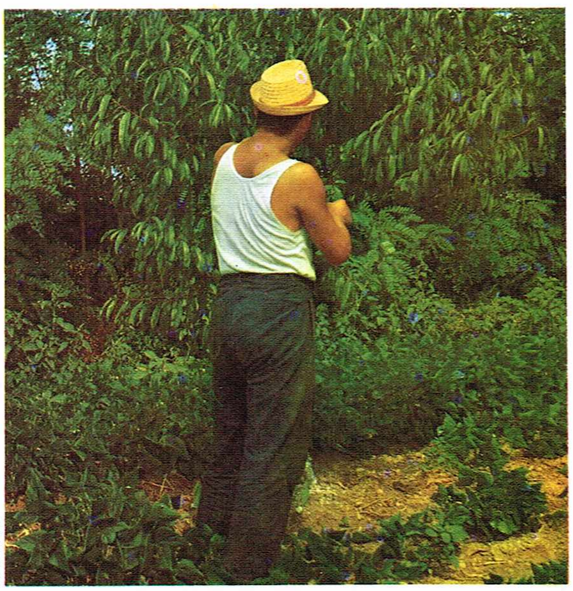

E. Robba

Appareil reproducteur. Mis à part quelques exceptions, les sexes sont séparés. L'appareil génital femelle est généralement constitué par deux gonades ou ovaires, qui se continuent par deux oviductes, se terminant souvent par une vésicule séminale où sont conservés les spermatozoïdes. Viennent ensuite deux utérus convergeant en un vagin impair qui s'ouvre par une petite fente vulvaire transversale, située sur la ligne médio-ventrale. L'appareil génital mâle compte aussi deux gonades mais, dans de nombreux cas, la gonade postérieure dégénère. Au testicule fait suite le gonoducte qui peut être différencié en plusieurs sections : un canal efférent, une vésicule séminale et un canal déférent dont la partie distale, à paroi très musculeuse, se différencie en un canal éjaculateur qui débouche dans le rectum. La plupart des Nématodes mâles possèdent un appareil copulateur, formé d'une paire de spicules contenus dans une poche dorsale. Chez les Strongylides, la cuticule s'élargit de part et d'autre du cloaque, pour former une bourse caudale.

Cycles biologiques

Chez les espèces de Nématodes vivant librement, le nombre d'œufs pondus par une femelle est généralement réduit, alors que chez les espèces parasites il est très élevé, de l'ordre de millions d'unités dans certains cas.

L'œuf, généralement ellipsoïdal ou sphéroïdal, est fécondé quand, après avoir traversé l'oviducte, il passe par la vésicule séminale, dans laquelle se trouvent les spermatozoïdes. Il se forme autour de l'œuf une membrane de fécondation qui a pour but d'empêcher l'entrée d'autres spermatozoïdes. Cette membrane, en particulier chez les espèces parasites, tend à avoir une épaisseur qui augmente, car il se dépose à sa face interne une ou plusieurs couches de substances protéiques. Il se forme ainsi une véritable coquille, parfois très consistante, et pourvue dans certains cas d'ornementations bien visibles. La segmentation de l'œuf peut avoir lieu directement à l'intérieur de la femelle ou après la ponte.

Le Nématode qui sort de l'œuf est le premier d'une série de quatre stades larvaires, lesquels se succèdent avec autant de mues. Les mues sont des processus nécessaires pour permettre à l'Animal de s'accroître, et consistent en l'élimination de toutes les structures cuticulaires rigides (c'est-à-dire la cuticule qui recouvre le corps et les revêtements de la capsule buccale, du pharynx, du rectum et du vagin), reconstituées ensuite. Chez les Nématodes, à la fin du développement embryonnaire, certains organes comme le pharynx et le système excréteur sont constitués par un nombre de cellules qui restera constant pendant toute la vie de l'individu. Ce phénomène, ou *eutélie,* rend pratiquement impossible chez ces Animaux les processus de régénération.

Les Nématodes phytophages présentent divers degrés de parasitisme depuis les ectoparasites jusqu'aux endoparasites qui se trouvent soit dans les parties aériennes du Végétal, soit dans les parties souterraines (racines ou organes souterrains à structure de tige). Chez les endoparasites, le cycle évolutif est généralement long et on observe souvent une seule génération annuelle. La conservation des espèces, en l'absence des plantes hôtes, est favorisée par des adaptations particulières, tel l'enkystement larvaire, qui peut être situé à un stade variable (L2, L3 ou L4), ou l'enkystement de la femelle adulte, que l'on trouve uniquement dans le genre *Heterodera,* enfin la protection de la ponte, les œufs étant émis dans un véritable sac protecteur, résistant à la dessiccation.

Les cycles des Nématodes parasites d'Invertébrés et de Vertébrés sont très variés et complexes, mais on peut mettre en évidence un certain nombre de lois générales. Alors que les Adenophorea peuvent être infestants à des stades variés, chez les Secernentea, c'est uniquement le troisième stade larvaire (même si le phénomène peut être masqué par des adaptations secondaires) qui est infestant pour l'hôte définitif. On peut distinguer également l'hôte intermédiaire, qui s'infeste avec le premier ou le deuxième stade et chez lequel la larve subit un développement indispensable à son cycle. Par contre, l'hôte d'encapsulement (ou hôte d'attente) s'infeste avec le troisième

▼ *Extrémité caudale du mâle* **d'Ancylostoma duodenale,** *parasite vivant dans l'intestin grêle de l'homme : 1, vésicule séminale ; 2, canal éjaculateur ; 3, spicules rétractés ; 4, anus ; 5, bourse caudale.*

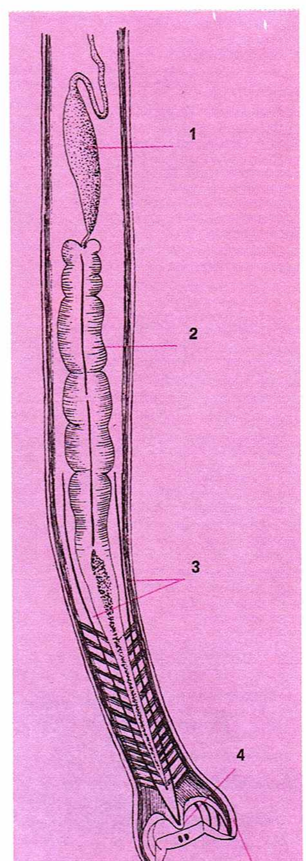

I.G.D.A.

▶ *Un Nématode microscopique vivant dans les eaux saumâtres.*

G. S. Giacomelli

stade. La larve n'y subit pas de développement. L'hôte forme autour de la larve une réaction conjonctive et celle-ci, encapsulée, ne se développera que lorsqu'elle rencontrera un hôte favorable pour devenir adulte. L'hôte d'attente ne joue donc qu'un rôle facultatif dans le cycle évolutif. Les cycles ne comportant qu'un seul hôte sont dits monoxènes par opposition aux cycles hétéroxènes qui demandent plusieurs hôtes pour pouvoir s'accomplir. Les larves infestantes qui arrivent chez l'hôte définitif ne se dirigent pas toujours directement vers l'organe où elles deviendront adultes, mais subissent très fréquemment des migrations complexes.

Chez la majorité des espèces, le dimorphisme sexuel est très accentué. Le mâle est plus petit que la femelle et en diffère par la présence de caractères morphologiques particuliers (courbure caudale, organes copulateurs). Cependant, certaines espèces sont formées presque exclusivement d'individus à morphologie femelle. Elles se reproduisent alors par voie parthénogénétique ou grâce au fonctionnement hermaphrodite de leur gonade, les éléments mâles apparaissant avant les éléments femelles. Enfin, on a signalé de nombreux cas d'intersexués. Il s'agit le plus souvent d'individus dont la glande génitale est de type femelle, mais qui possèdent certains caractères mâles plus ou moins développés (papilles, spicules, musculature). Dans certains cas, il y a alternance de générations, ce qui présente la possibilité pour une espèce donnée d'effectuer son développement dans des conditions très différentes et de parvenir à l'état adulte sous des formes diverses, en rapport avec ces conditions. Ainsi, une même espèce fournira des adultes libres et des adultes parasites. Ces deux formes peuvent alterner de façon plus ou moins régulière d'une génération à la suivante.

Écologie

Les Nématodes colonisent les milieux les plus divers : on en observe en effet dans les Mousses, les Lichens, dans le sable marin, sur les fonds vaseux des étangs, et même dans les eaux saumâtres.

D'innombrables espèces sont parasites d'Animaux et de plantes, et certaines comptent parmi les parasites les plus communs et parfois les plus dangereux de l'homme. Les Nématodes ont généralement une grande résistance aux variations du milieu et réussissent parfois à survivre longtemps dans des conditions très défavorables.

SYSTÉMATIQUE

La systématique des Nématodes est fondée essentiellement sur les différences de l'œsophage, sur les caractères des structures céphaliques et des appareils reproducteurs mâle et femelle, et sur la connaissance des cycles biologiques. Enfin, la présence ou l'absence de phasmides a permis de séparer les Nématodes en deux sous-classes : les *Adenophorea* (ou Aphasmidiens) et les *Secernentea* (ou Phasmidiens).

Nous traiterons ici seulement les principales familles et en particulier celles qui comprennent des parasites de l'homme, des Animaux domestiques et des plantes cultivées.

Sous-classe des Adenophorea

Ils sont divisés en deux infra-classes : les *Chromadoria,* qui ne renferment que des Nématodes libres, et les *Enoplia,* qui sont soit libres, soit parasites. Nous ne traiterons que des représentants de la seconde.

La famille des **Mermithidés** comprend un grand nombre de genres qui peuvent évoluer chez divers Invertébrés, le plus souvent des Insectes. Ainsi, *Paramermis contorta,* parasite des larves de chironomes. Les individus muent avant de quitter l'hôte par l'anus ou en perforant les téguments, s'enfoncent dans la vase, s'accouplent, puis les femelles pondent. Les œufs éclosent au bout de quelques semaines, les larves nagent à la recherche de jeunes larves de chironomes dans lesquelles elles pénètrent par voie tégumentaire.

Les **Trichuridés** et les **Trichinellidés** sont des Animaux parasites de Vertébrés. Ils sont pourvus, au moins à l'état larvaire, d'un stylet buccal et possèdent un ou deux stichosomes. *Trichuris trichiura* (Trichuridés) est une espèce cosmopolite. La femelle atteint au maximum 5 cm de longueur, alors que le mâle est légèrement plus petit et diffère par l'extrémité postérieure de son corps, qui est recourbée et pourvue d'un spicule. Chez les deux sexes, la partie antérieure du corps est filiforme et contraste nettement avec la partie postérieure, gonflée, qui contient

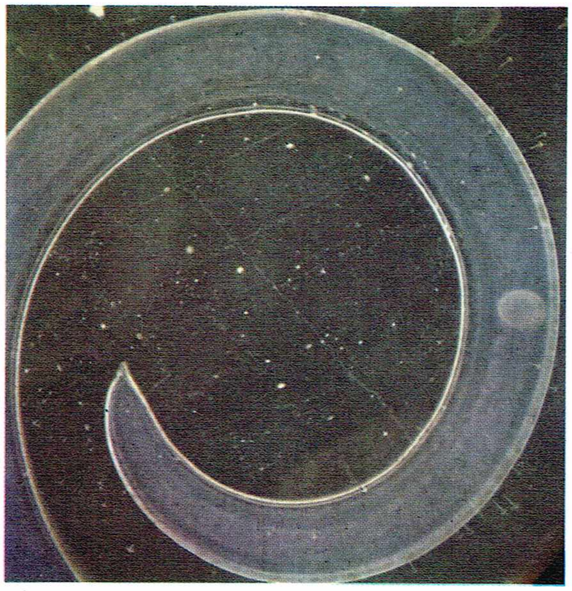

E. Robba

E. Robba

▶ *Chez* **Paramermis contorta** *comme chez de nombreux autres Nématodes, le dimorphisme sexuel est accentué ; extrémité postérieure de la femelle, à gauche, et du mâle, à droite ; le spicule du mâle est bien visible.*

l'appareil génital. Ces parasites vivent dans le gros intestin et dans le rectum de l'homme, fixés par leur partie antérieure. Le cycle évolutif est direct. Les œufs sont émis avec les fèces. L'embryon commence son développement à l'intérieur de l'œuf dans le milieu extérieur. L'homme s'infeste en ingérant des aliments souillés. Les œufs éclosent au début de l'intestin grêle et les larves accomplissent en quelques semaines toute leur évolution dans l'intestin, avant de se fixer à leur emplacement définitif. Les troubles produits par le parasite sont particulièrement graves quand l'infestation est massive. Dans ces cas, on observe de l'anémie par suite des lésions provoquées à la muqueuse intestinale par la fixation du Nématode, ainsi que de la diarrhée chronique, des nausées et de l'insomnie. La prophylaxie consiste surtout à éviter autant que possible la contamination du sol et des eaux par les fèces contenant les œufs du parasite.

La famille des **Trichinellidés** est caractérisée par le fait que le développement larvaire débute obligatoirement chez l'hôte qui héberge les adultes. *Trichinella spiralis* parasite l'homme et un grand nombre de Mammifères carnivores et omnivores, parmi lesquels le chat, le chien et le porc sont les plus fréquemment atteints. Les adultes des deux sexes vivent dans la lumière de l'intestin grêle et leur longévité ne dépasse pas quelques semaines. Après la fécondation, les femelles ovovivipares pénètrent dans la paroi intestinale, où elles pondent des larves L1. Par la voie lymphatique ou sanguine, les larves sont répandues dans tous les organes, mais elles se développent de préférence dans les muscles striés. Les hôtes s'infestent soit par cannibalisme (lorsque le porc mange de la viande de porc), soit en consommant de la viande de Mammifères d'espèces différentes (ainsi l'homme, en mangeant de la viande de porc mal cuite). Les troubles provoqués chez l'homme par la trichine sont de différentes natures. Les adultes du parasite, qui s'installent dans la muqueuse intestinale, provoquent d'intenses douleurs abdominales, des diarrhées, des nausées et des vomissements. La migration des larves dans le torrent sanguin et leur enkystement dans les tissus aboutit à l'apparition de douleurs musculaires de type rhumatismal, de fièvre, de délire, d'œdèmes et d'hypertension.

Sous-classe des Secernentea

Elle comprend six ordres : Rhabditida, Tylenchida, Strongylida, Oxyurida, Ascaridida et Spirurida.

Ordre des Rhabditida

Ce sont des Sécernentes dépourvus de stylet buccal, ayant un œsophage divisé d'avant en arrière en trois parties : corpus, isthme et région bulbaire. Les amphides sont petites et en forme de poche. La plupart de ces Nématodes sont saprophages, mais dans de nombreuses familles on trouve des formes parasites d'Insectes. Les Rhabdiasidés sont des parasites de Batraciens et de Reptiles présentant une alternance de générations.

Dans la famille des **Néoplectanidés**, citons l'espèce *Neoplectana glaseri*, qui a fait l'objet de tentatives d'utilisation dans la lutte contre les Insectes nuisibles.

La famille des **Strongyloïdidés** présente aussi une alternance de générations. Dans ce cas, les mâles et les femelles libres sont dits « stercoraux ». *Strongyloides stercoralis*, qui est agent de la diarrhée tropicale humaine, peut accomplir son cycle biologique aussi bien à l'intérieur du corps qu'à l'extérieur. Dans la paroi intestinale de l'homme vivent uniquement des femelles parthénogénétiques. Les œufs sont émis avec les fèces. Dans certains cas, les larves évoluent jusqu'au troisième stade, puis pénètrent dans l'organisme à travers l'épiderme et redonnent des femelles parthénogénétiques.

Dans d'autres cas, les larves livrent des adultes mâles et femelles qui s'accouplent; les femelles pondent, les œufs éclosent et produisent des larves qui, à l'état libre, se développent jusqu'au troisième stade, qui devient infestant. Enfin, dans certains cas, il existe une auto-infestation de l'hôte, les larves accomplissant toute leur évolution dans son organisme.

La famille des **Céphalobidés** se rencontre dans des milieux très divers, mais ses représentants sont en général saprophages. Les propriétés de leur cuticule leur permettent des habitats aussi spécialisés que celui de la classique anguillule du vinaigre, *Turbatrix aceti*, qui ne vit que dans ce milieu et aux dépens des Bactéries qui s'y trouvent.

Ordre des Tylenchida

Ce sont des Sécernentes de petite taille, armés d'un stylet buccal protractile et dont l'œsophage comprend un bulbe médian valvulaire et une région postérieure glandulaire. La plupart sont phytoparasites.

Chez les **Tylenchidés**, *Ditylenchus dipsaci* ou anguillule des tiges et des bulbes est une espèce très polyphage que l'on rencontre sur un nombre considérable de cultures (seigle, avoine, trèfle, luzerne...). Le parasite se développe dans le sol et, à l'état de larve, il pénètre dans les jeunes plantes par les racines ou la base de la tige, dans laquelle il émigre ensuite pour aller dans les feuilles ou les graines. Les femelles fécondées pondent leurs œufs au sommet des tiges ou des feuilles : les œufs, qui contiennent les embryons du Nématode, tombent sur le sol et le cycle recommence. L'attaque du parasite aboutit à d'importantes lésions des feuilles, et par conséquent de toute la plante, qui voit son développement contrarié et dont la production de graines est très diminuée.

Chez les **Hétérodéridés**, citons le genre *Heterodera*, parasite des racines (tomate, betterave, pomme de

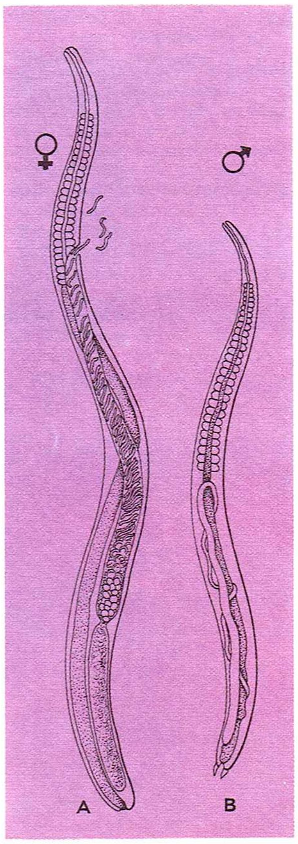

I.G.D.A.

▲ **Trichinella spiralis;** ***la femelle (A) est plus grande que le mâle (B); ce caractère est courant chez la plupart des Nématodes.***

E. Robba

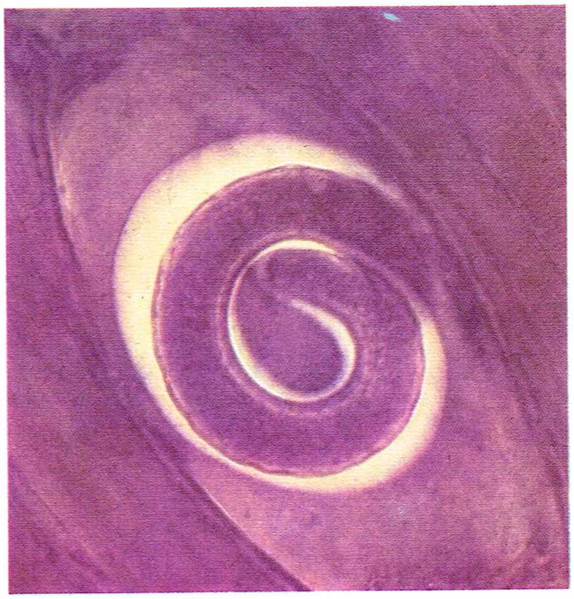
E. Robba

◀ ***Les larves de trichine (Trichinella spiralis) s'enkystent de préférence dans les muscles striés de l'hôte et provoquent des douleurs musculaires; les adultes vivent dans l'intestin grêle; à gauche, muscle parasité par de nombreuses trichines; à droite, détail de la larve enkystée.***

▶ *Certains Nématodes appartenant à l'ordre des Tylenchida sont des phytoparasites, tel* **Heterodera radicicola** *qui se fixe à l'état larvaire sur des radicelles dont il lèse les tissus (à gauche).* *Adulte mâle d'***Ancylostoma duodenale** *; la bourse caudale et les spicules sont visibles (à droite).*

▼ **Enterobius vermicularis** : *individu femelle en haut et mâle en bas ; 1, œsophage ; 2, intestin ; 3, utérus ; 4, vagin ; 5, anus.*

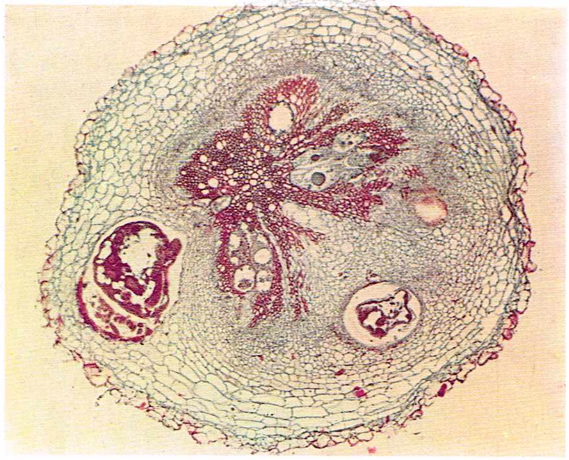
Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

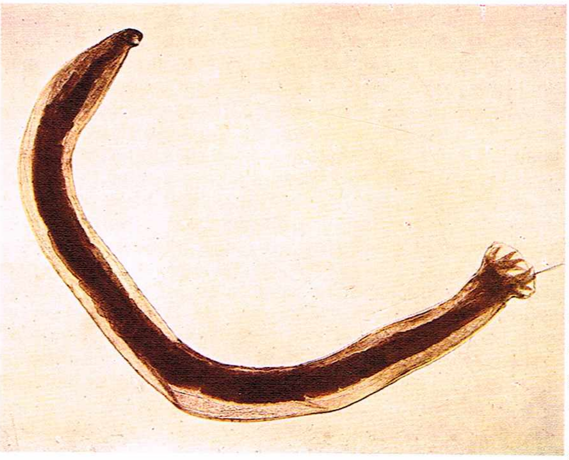
Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

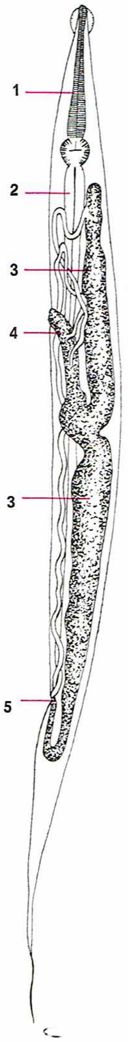

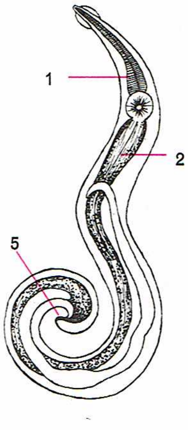

I.G.D.A.

terre...). La femelle se fixe à l'état larvaire sur une radicelle, puis est fécondée par un mâle errant. Elle grossit considérablement et des milliers de larves se forment à son intérieur qui, libérées, se répandent dans le sol et infestent de nouvelles racines.

Ordre des Strongylida

Ce sont des Sécernentes dépourvus de stylet buccal. Ils se reconnaissent aisément grâce à la bourse caudale du mâle. Ce sont des parasites de tous les Vertébrés, mais très rarement des Sélaciens et des Poissons. Le cycle est monoxène.

La famille des **Ancylostomatidés** comprend deux importants parasites de l'homme : *Necator americanus* et *Ancylostoma duodenale,* dont le cycle biologique est pratiquement identique. On les rencontre dans tous les pays tropicaux, où les conditions du sol, de la température et de l'humidité sont favorables au développement des larves, mais seul *A. duodenale* existe dans les districts miniers d'Europe. *A. duodenale* a une taille légèrement supérieure à celle de *Necator*. La capsule buccale porte sur sa face ventrale antérieure deux paires de dents en forme de crochet, remplacées chez *Necator* par deux lames tranchantes. Les adultes vivent dans l'intestin grêle. Les œufs sont expulsés avec les selles et éclosent un ou deux jours plus tard dans le milieu extérieur. Les deux premières mues ont lieu, mais le troisième stade, infestant, conserve la mue précédente et, pour poursuivre son développement, doit passer chez l'hôte définitif. La pénétration se fait généralement à travers la peau. Puis les larves sont transportées par le torrent sanguin jusqu'aux poumons, pénètrent dans les alvéoles, et de là passent dans la trachée et dans l'œsophage ; enfin, elles se fixent dans le duodénum et l'intestin.

L'ankylostomiase ou anémie tropicale peut être déterminée aussi bien par le nécator que par l'ankylostome. Cette maladie peut être mortelle non du fait du parasite lui-même, mais parce que le sujet très parasité est fragile et succombe facilement à des maladies de carence ou à des infections.

Ordre des Oxyurida

Ce sont des Sécernentes sans stylet buccal. Les papilles cloacales du mâle sont en nombre réduit. Il n'y a généralement qu'un seul spicule. Ce sont des parasites d'Invertébrés ou de Vertébrés (essentiellement Amphibiens, Reptiles et Mammifères). Le cycle est monoxène et les deux premières mues s'effectuent à l'intérieur de l'œuf.

Dand la famille des **Oxyuridés,** *Enterobius vermicularis* est un oxyure très banal de l'homme et plus particulièrement des enfants. Le sujet neuf s'infeste en ingérant quelques œufs, probablement en portant ses mains sales à la bouche. Les œufs libèrent les L3 dans le duodénum. Celles-ci deviennent adultes dans le rectum. Les femelles mûres migrent alors dans le rectum, franchissent le sphincter anal et éclatent sur la marge de l'anus en libérant plusieurs centaines d'œufs qui sont tous au même stade de développement et deviennent rapidement infestants. Les femelles mûres sortent à l'extérieur, en particulier la nuit, et provoquent un intense prurit anal qui fait que l'individu infesté se gratte plus ou moins consciemment pendant le premier sommeil. Les œufs infestants s'accumulent alors sur les doigts et sous les ongles, et l'auto-infestation a lieu lorsque le sujet porte ses mains à la bouche. On peut donc admettre qu'après une première infestation d'origine étrangère, généralement faible, peuvent se produire des auto-infestations massives.

Ordre des Ascaridida

Ce sont des Sécernentes sans stylet buccal, de taille assez grande, caractérisés par la présence de trois lèvres. Ils sont parasites de l'intestin des Vertébrés. A l'exception des Subuluroïdes, la vie préinfestante ne s'effectue pas entièrement chez l'hôte intermédiaire.

Dans la famille des **Ascarididés,** l'espèce *Toxocara canis* est parasite du chien domestique. L'infestation prénatale, par migration des larves à travers le placenta, semble le mode de contamination le plus fréquent et ce sont les chiots qui sont généralement les plus infestés. Le cycle peut être monoxène (l'hôte définitif jouant alors le rôle d'hôte intermédiaire) ou hétéroxène. Dans ce dernier cas, l'homme peut s'infester en ingérant des œufs d'ascarides du chien.

Ascaris lumbricoides est un parasite de grande taille (15 cm chez le mâle, 25 cm chez la femelle) que l'on rencontre chez l'homme, mais aussi chez les grands Primates. Il vit dans l'intestin grêle et émigre facilement dans différents organes. Les œufs, rejetés dans les selles, achèvent leur développement à l'extérieur. Lorsqu'ils sont ingérés par l'homme avec les aliments, l'eau ou même la poussière, ils éclosent dans l'estomac. Les larves traversent les parois du tube digestif et émigrent dans les poumons. La deuxième mue s'effectue dans les alvéoles pulmonaires, puis les larves montent dans la trachée, gagnent le pharynx, sont dégluties et parviennent enfin dans le tube digestif, où s'achève le développement. Parmi les helminthiases de nos pays, l'ascaridiose est celle qui est le plus mal supportée et qui cause le plus d'accidents.

Ordre des Spirurida

Ce sont des Sécernentes dépourvus de stylet buccal. La tête est à symétrie bilatérale. Ils sont, à l'état adulte, parasites de la partie antérieure du tube digestif (œsophage, estomac, rarement duodénum) ou des tissus des Vertébrés. Le cycle est toujours hétéroxène et l'hôte intermédiaire presque constamment un Arthropode. La vie préinfestante s'effectue entièrement chez l'hôte intermédiaire.

Dans la famille des **Dracunculidés,** la « filaire de Médine » *(Dracunculus medinensis)* est un parasite de l'homme, largement réparti en Afrique tropicale. Les femelles mesurent parfois plus de 1 m de long pour 2 mm de diamètre. Les mâles n'atteignent que 2 cm environ. Les œufs évoluent jusqu'au premier stade larvaire dans le corps de la femelle. Celle-ci vient se placer sous la peau de l'hôte, généralement aux membres inférieurs, et forme une petite ulcération cutanée.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ ***Frottis sanguin montrant une larve microfilaire de* Dirofilaria immitis *qui vit dans le sang du chien.***

Lorsque le sujet trempe cette ulcération dans l'eau, les tissus se ramollissent. La femelle perfore les téguments ; son utérus s'évagine à l'extérieur et se rompt en libérant des larves qui poursuivront leur développement chez un *Cyclops :* l'homme s'infeste en buvant de l'eau contenant des *Cyclops* parasités. Les adultes jeunes habitent surtout le mésentère, où la copulation s'accomplit. Le mâle meurt et la femelle arrive sous la peau après un an environ d'évolution. Les troubles provoqués par le parasite sont essentiellement de violentes réactions allergiques qui se manifestent par des migraines, des nausées et des vomissements.

La famille des **Onchocercidés** forme un vaste groupe chez lequel on rencontre les genres les plus importants en pathologie humaine et en particulier *Wuchereria* et *Onchocerca*. *Wuchereria bancrofti* ou filaire de Bancroft, adulte, vit dans le système lymphatique, en amont des ganglions. Le mâle mesure environ 4 cm et la femelle 15 cm. Les microfilaires (ou larves) vivent dans le sang et sont de cent à quatre cents fois plus nombreuses la nuit que le jour dans le sang périphérique. Les hôtes intermédiaires sont des moustiques Culicidés qui s'infestent en piquant l'homme. Les microfilaires poursuivent leur évolution dans l'hémocœle de l'Insecte, puis dans les muscles du thorax et parviennent dans les glandes salivaires et la trompe. La libération des larves a lieu au moment de la piqûre. Elles sont déposées à la surface de la peau et pénètrent activement dans les tissus. Elles vont alors dans le système lymphatique, où elles achèvent leur développement. La filaire de Bancroft détermine la filariose lymphatique. C'est une maladie très répandue dans les régions chaudes, qui peut provoquer parfois une hypertrophie des membres inférieurs et de l'appareil génital masculin, par engorgement des voies lymphatiques. On parle alors d'éléphantiasis. *Onchocerca volvulus* est un peu plus petit que l'espèce précédente. Les microfilaires se trouvent dans le tissu conjonctif sous-cutané ou dans les ganglions lymphatiques. De plus, elles se concentrent dans les zones cutanées éclairées intensément. Les hôtes intermédiaires sont des Diptères du genre *Simulium*. Au moment de la piqûre de ces Insectes, les tissus du derme de l'hôte sont dilacérés et les microfilaires aspirées. L'évolution chez le Diptère est la même que pour *Wuchereria*.

L'onchocercose sévit de façon endémique sur deux grands foyers, en Afrique (surtout équatoriale et orientale) et en Amérique (Guatemala, Mexique). Elle provoque des tumeurs sous-cutanées. La maladie est grave, car les microfilaires déterminent des troubles oculaires pouvant aller jusqu'à la cécité.

NEMATOMORPHA OU GORDIACÉS

Les Nématomorphes sont des Vers filiformes qui mènent à l'état adulte une vie libre dans l'eau, alors qu'ils sont endoparasites d'Arthropodes lors de leurs stades juvéniles. Leur corps est très allongé et très fin. L'épiderme est dépourvu de champs latéraux. Il n'existe pas d'appareil respiratoire, ni d'appareil circulatoire ou excréteur. On les rencontre, pendant la belle saison, dans les sources ou les torrents de montagne, les ruisseaux et les mares.

La *paroi du corps* est constituée par une cuticule, un épiderme et une couche musculaire. La cuticule est épaisse, résistante. Sa couche externe est souvent pourvue de saillies, ou aréoles, dont la forme, la disposition et les dimensions fournissent de bons caractères taxonomiques. L'épiderme est monostratifié. La musculature est constituée uniquement par des fibres longitudinales, excepté dans la région cloacale, où existent des fibres circulaires et radiées.

Le *parenchyme*. Entre la paroi du corps et l'appareil digestif se trouve une cavité pseudocœlomique, creusée de cavités longitudinales, deux latérales correspondant aux cavités gonadiales, et une médiane à l'intérieur de laquelle se trouve le tube digestif.

L'*appareil digestif* est toujours plus ou moins atrophié, et, en tout cas, sa structure est très simple. L'ouverture buccale, qui est localisée quand elle existe à l'extrémité antérieure du corps ou ventralement par rapport à celui-ci, est suivie par un pharynx et par un intestin, simple tube qui débouche dans le cloaque. Cependant, les adultes paraissent ne pas ingérer d'aliments. Les substances nutritives seraient absorbées par la surface de leur corps.

Le *système nerveux* consiste principalement en une masse cérébrale, située à l'extrémité antérieure du corps, et en un cordon nerveux ventral. Les nerfs secondaires

▼ ***A gauche, coupe transversale d'un adulte femelle de* Parachordodes tolosanus *(Nématomorphe) ; sd, sinus dorsal ; cm, couche musculaire ; so, sinus ovarien ; ov, ovaire ; im, intestin moyen ; cn, cordon nerveux ; si, sinus intestinal ; pa, parenchyme. Au milieu, individu adulte de* Gordius aquaticus, *Nématomorphe commun dans les milieux aquatiques. A droite, extrémité postérieure bilobée d'un mâle de* Gordius aquaticus.**

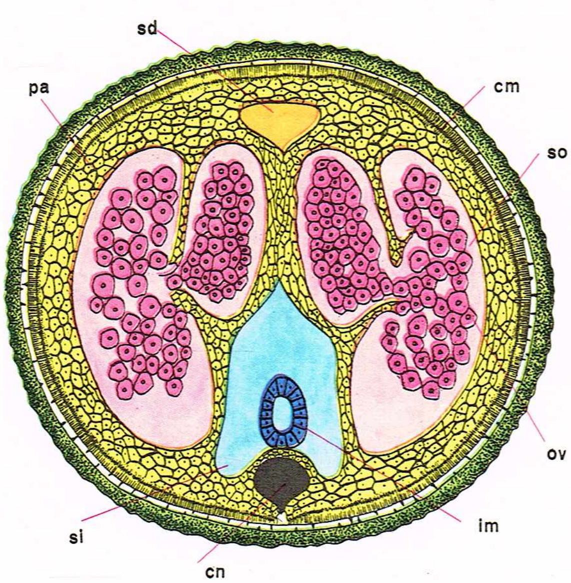

I.G.D.A.

A. Margiocco

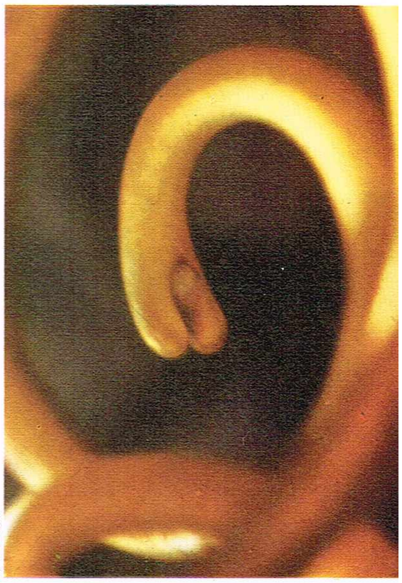

E. Robba

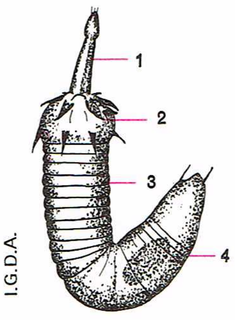

▲ *Larve de* **Gordius aquaticus**, *1, trompe; 2, région du cou; 3, partie antérieure du corps; 4, partie postérieure du corps.*

▼ *Un certain nombre de maladies dues à des Nématodes parasites sévissent en Afrique où elles peuvent être contractées en buvant de l'eau souillée ou par des piqûres d'Insectes.*

innervent la musculature, l'épiderme ainsi que l'appareil reproducteur.

L'appareil reproducteur. Les sexes sont séparés; les mâles possèdent deux testicules, dont chacun aboutit par un spermiducte au cloaque. Les Nématomorphes ne possèdent pas de spicules, mais il peut exister dans le cloaque des piquants ou des soies. L'appareil génital femelle comporte deux ovaires, deux courts oviductes, puis un atrium génital dans lequel s'ouvre un réceptacle séminal médian. Ce dernier communique avec le cloaque.

Cycle biologique. Les mâles et les femelles mûrs vivent librement dans l'eau, où a lieu la copulation et la ponte. Ils peuvent former des pelotons enchevêtrés (d'où le nom de la classe en référence au nœud gordien). A l'éclosion, la larve tombe sur le fond et quelquefois s'enkyste; parfois il existe un hôte intermédiaire mangeant le kyste ou bien la larve pénètre dans l'hôte. Cette pénétration lui est facilitée par la présence d'un appareil perforant céphalique, composé de trois stylets. Lorsque la larve a terminé son développement, elle quitte l'hôte en perçant le tégument de celui-ci, généralement au voisinage de l'anus. Cette sortie s'effectue lorsque l'hôte vient au contact de l'eau.

SYSTÉMATIQUE

Les Nématomorphes ont été divisés en deux ordres : les Gordioïdes et des Nectonématoïdes.

Les *Gordioïdes* comprennent des espèces terricoles et dulçaquicoles. L'une des espèces les mieux connues est *Gordius aquaticus,* commun à certaines périodes de l'année dans de nombreux milieux aquatiques. Les *Nectonématoïdes* sont des Nématomorphes marins pélagiques. Le stade larvaire parasite le cœlome de Crustacés Décapodes.

BIBLIOGRAPHIE

CHABAUD A., *Ordre des Strongylida. Ordre des Ascaridida. Ordre des Spirurida,* in GRASSÉ P. P., *Traité de zoologie,* t. 4, fasc. 3, Paris, 1965. - CHABAUD A. G., *Phénomènes d'évolution régressive des structures céphaliques et classification des Nématodes Spiruroidea, Parasitologia 1,* 11-20, 1959. - CHITWOOD B. G. et CHITWOOD M. B., *An Introduction to Nematodology.* Baltimore. - DOUGHERTY E. C., *Evolution of Zooparasitic Groups in the Phylum Nematoda, J. Parasit 37,* 353-378, 1951. - FILIPJEV I. N., *The Classification of the Free-Living Nematodes and Their Relation to the Parasitic Nematodes, Smithsonian Misc. Collections 89* (6) 1-63, 1934. - HARTWICH G., *Zur Systematic der Nematoden-Superfamilie Ascaridoidea, Zool. jahrbucher 85,* 211-252, 1957. - PARAMONOV A. A., *les Principales Directions de l'évolution des Phytonématodes appartenant aux ordres Rhabditida et Tylenchida. Zool. Zhurnal* 37 (5), 736-749, 1958. - RITTER M., *Ordre des Rhabditides,* in GRASSÉ P. P., *Traité de zoologie,* t. 4, fasc. 3, Paris, 1965. - RUHM W., *Nematodes und biologische Bekämpfung der Insekten, Nematologica, 2* suppl., 349-354, 1957.

Rapho - Christian Zuber

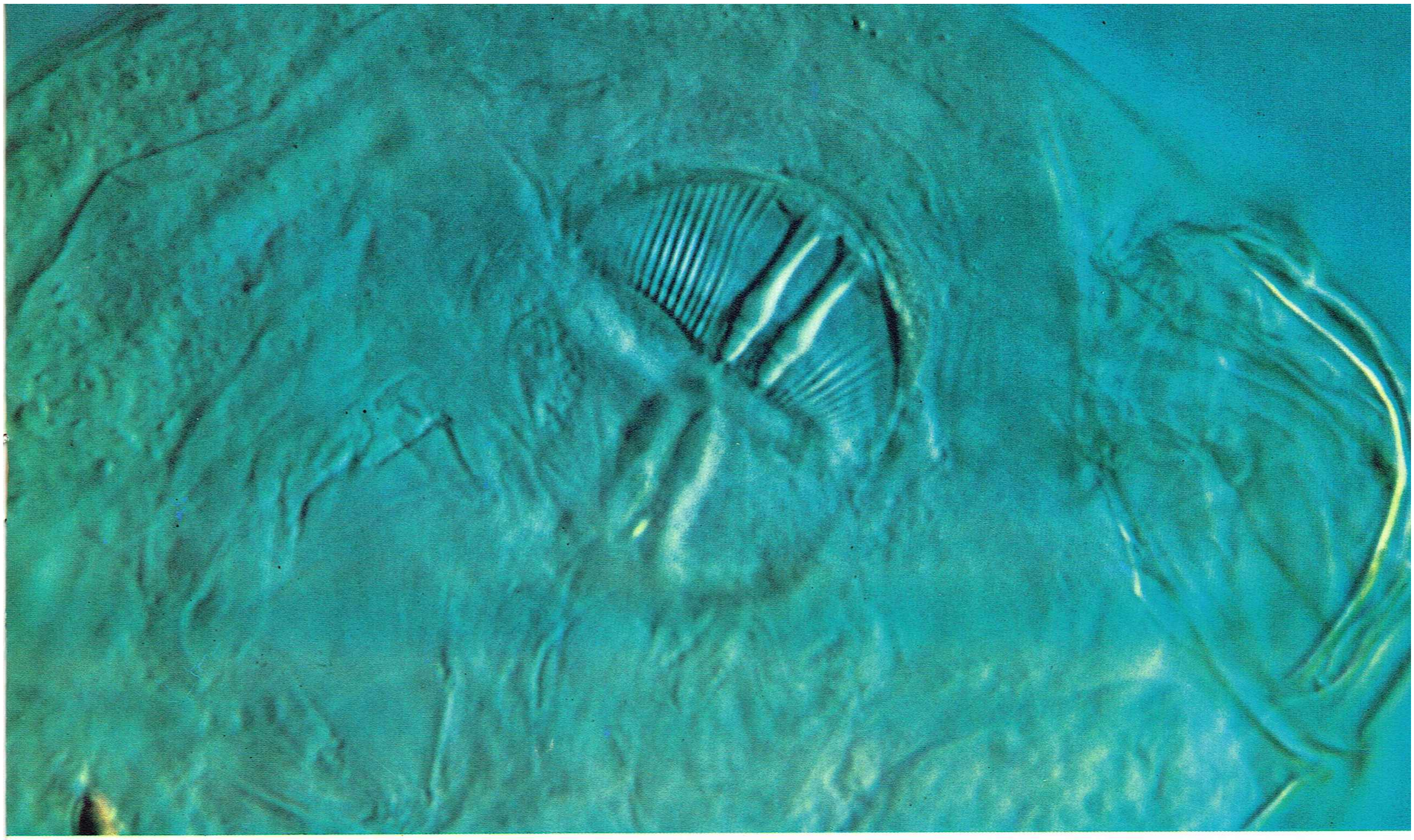

Studio Natiris

LES ROTIFÈRES

▲ ***Si les Rotifères sont des Animaux minuscules, ils ont néanmoins une structure complexe avec un pharynx contenant un véritable appareil masticateur : le mastax, formé de sept pièces.***

Les Rotifères sont des Métazoaires microscopiques, fréquents dans les eaux douces et moins répandus dans les mers. On en trouve aussi dans les Mousses et les Lichens ; certaines espèces sont parasites d'organismes animaux et végétaux. Les formes aquatiques sont surtout benthiques et se déplacent activement au fond, à la recherche de nourriture. Nombreuses sont par ailleurs les espèces sessiles, qui vivent fixées au substratum, généralement constitué par des Algues. Il existe aussi des formes planctoniques, chez lesquelles la morphologie externe est souvent très modifiée par suite des conditions de vie particulières.

Le corps des Rotifères, généralement peu coloré, dépasse rarement une longueur de 2 mm, et présente d'innombrables formes. Il est divisé en une partie antérieure pourvue d'un appareil rotateur cilié (ou couronne, caractéristique du groupe), en un tronc et en une région terminale ou pied. L'appareil rotateur est constitué essentiellement par un anneau de cils longs et fins entourant une zone centrale déprimée dans laquelle se trouve la plaque buccale. Il peut présenter l'aspect d'un simple disque ou avoir des bords lobés ou prolongés en de véritables cirres. Chez certaines espèces enfin, l'appareil rotateur est totalement absent. Les organes du corps sont presque tous syncytiaux et le nombre des noyaux présents dans les syncytiums est constant pendant toute la vie de l'individu chez de nombreuses espèces.

Le pied, généralement bien développé, se bifurque à son extrémité postérieure en deux doigts plus ou moins longs entre lesquels débouchent des glandes pédieuses, qui sécrètent un liquide visqueux. Le pied se termine quelquefois par un disque adhésif qui sert à l'Animal pour se fixer au substratum et aussi pour le déplacement ; il est souvent réduit ou tout à fait absent, surtout chez les formes qui mènent une vie pélagique.

Organisation générale

La *paroi du corps* est constituée par la cuticule, un épiderme syncytial et par quelques faisceaux musculaires attenant à l'épiderme. Chez certaines espèces, la couche cuticulaire est très épaisse et divisée en plaques formant autour du tronc une cuirasse, la *lorica*. Deux groupes de glandes adhèrent à l'épiderme : les glandes pédieuses et l'organe rétro-cérébral, qui est représenté par une ou plusieurs masses syncytiales localisées à l'avant et à l'arrière du cerveau.

La *cavité du corps* et la *musculature*. L'épiderme se trouve en contact direct avec l'ample cavité du corps, le pseudocœle, qui est rempli par un liquide contenant quelques cellules amiboïdes et où sont situés tous les organes internes. La musculature est constituée essentiellement par des faisceaux circulaires et longitudinaux, généralement discontinus.

L'*appareil digestif*. La bouche s'ouvre à l'extrémité antérieure du corps et communique avec le pharynx soit directement, soit par un tube buccal dont les parois internes sont recouvertes de cils. Le pharynx est un organe de conformation diverse selon les espèces ; il possède un robuste appareil masticateur, le *mastax*, ou estomac masticateur, fait de pièces mobiles, les mâchoires ou *trophi*. Ces dernières sont formées de sept pièces principales : le *fulcrum*, impair, et les *rami, unci, manubria*, qui sont pairs. Fulcrum et rami sont souvent appelés *incus ;* les unci et les manubria sont désignés sous le nom

EMBRANCHEMENT DES ROTIFÈRES

- *ordre des Seisonidea*
- *ordre des Bdelloidea*
- *ordre des Monogononta*

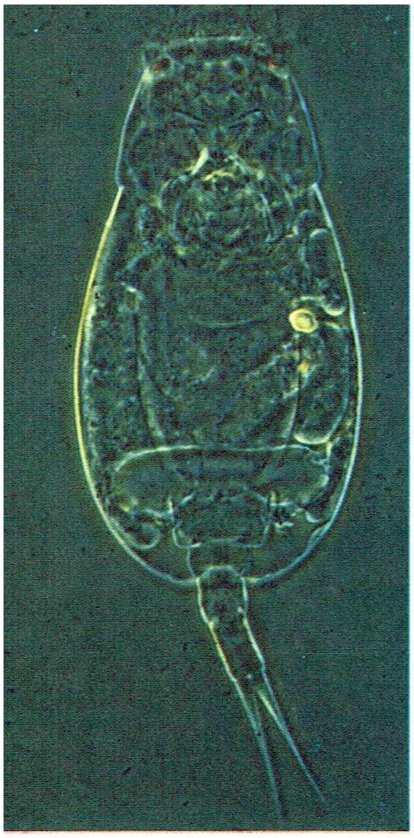

G. S. Giacomelli

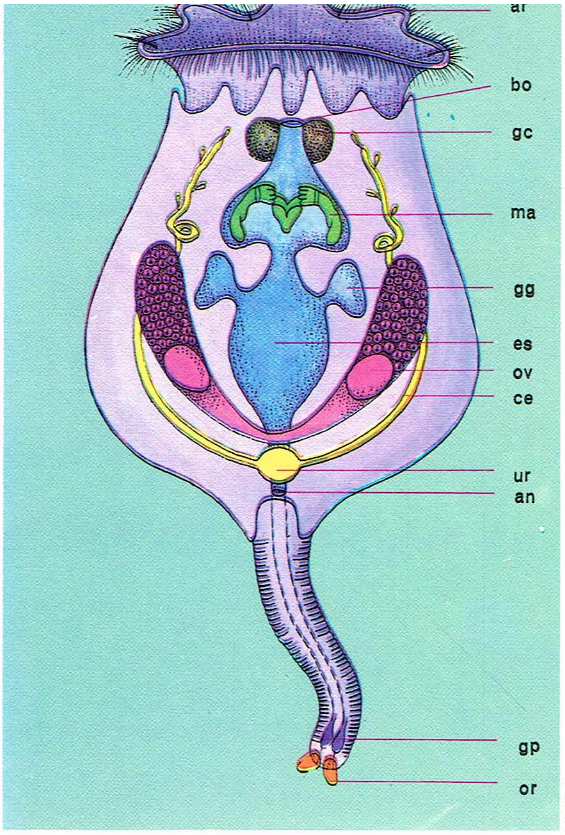

I.G.D.A.

▲ ***Le corps des Rotifères (à gauche) présente généralement une région antérieure munie d'un appareil rotateur, un tronc contenant les organes et un pied terminé par deux orteils. A droite, représentation schématique d'un Rotifère : ar, appareil rotateur cilié; bo, bouche; gc, ganglion cérébral; ma, mastax; gg, glande gastrique; es, estomac; ov, ovaire; ce, canal excréteur; ur, urocyste; an, anus; gp, glande pédieuse; or, orteil.***

de *malleus*. La morphologie de ces pièces varie selon les genres. Dans la paroi de l'estomac masticateur sont localisées deux à sept glandes, dites salivaires. L'œsophage, court et cilié, s'élargit en estomac glandulaire, auquel sont annexées deux glandes gastriques, rarement plus. L'intestin, qui suit, se rétrécit et aboutit à un rectum piriforme débouchant dans un cloaque s'ouvrant dorsalement au-dessus du pied. L'anus et le cloaque manquent chez certaines formes pélagiques. Les Rotifères se nourrissent d'Animaux et de Végétaux. L'appareil rotateur et le mastax sont importants pour la capture de la nourriture.

L'*appareil excréteur* est constitué par deux protonéphridies avec des cellules flamme, dont les canaux débouchent séparément dans une vésicule contractile unique, l'urocyste, qui s'ouvre ventralement dans le rectum. Parfois les conduits urinaires fusionnent à leur extrémité et confluent dans le cloaque, l'urocyste manquant alors.

Le *système nerveux* comprend un volumineux ganglion cérébral, suprapharyngien, bilobé. Il en part deux nerfs ventraux principaux et deux autres secondaires qui innervent l'appareil rotateur, les yeux, les muscles et la paroi du corps. Les organes des sens sont représentés par des soies tactiles, des papilles, des palpes et des fossettes ciliées à fonction chimio-réceptrice. Il y a souvent aussi une paire d'yeux, parfois réunis en un unique élément médian rouge vif.

Appareil reproducteur. Chez les Rotifères, les sexes sont séparés et, généralement, le dimorphisme sexuel est accentué. Les mâles sont plus petits que les femelles, leur tube digestif est atrophié, la vésicule contractile manque en général. Il n'y a pas d'anus ni de lorica. L'appareil génital mâle est constitué par un testicule impair et un canal déférent s'ouvrant sur une papille qui peut être plus grosse que le pied ; elle est considérée comme représentant un pénis. Cependant, il semble qu'il n'y ait pas de copulation. L'appareil reproducteur femelle est composé d'un ovaire ventral et bilobé et d'un oviducte débouchant dans le cloaque. L'ovaire comprend une portion ovarienne antérieure et une région vitellogène postérieure, formée d'ovogonies dégénérées.

Reproduction

Les œufs des Rotifères ont une segmentation totale et égale. La reproduction est caractérisée par l'alternance de générations parthénogénétiques et d'une génération sexuée. Les femelles parthénogénétiques ou amictiques sont diploïdes et ne peuvent s'accoupler. Elles donnent des œufs à développement immédiat, émettant un seul globule polaire et ne subissant pas de réduction chromatique. Ces œufs donnent naissance à de nouvelles femelles diploïdes. Sous l'influence de certaines conditions, il apparaît des femelles fécondables ou mictiques qui produisent des ovules émettant deux globules polaires. Si ces œufs ne sont pas fécondés, ils donnent naissance à des mâles haploïdes. Ceux-ci s'accouplent avec les femelles, qui pondent alors de gros œufs à coquille épaisse, qui sont appelés durables, car ils pourront supporter la mauvaise saison. Au début du printemps, ces œufs se développent en donnant des femelles parthénogénétiques. Un Rotifère est dit monocyclique lorsqu'il présente plusieurs générations parthénogénétiques au cours de la belle saison et une seule génération sexuée à l'automne. Il est dit polycyclique quand il a au moins deux périodes de reproduction sexuée (une au printemps et une autre à l'automne).

SYSTÉMATIQUE

Les Rotifères sont divisés en trois ordres :

Ordre des Seisonidea

Les Séisonidés comprennent quelques espèces marines, dont certaines sont épizoïques, c'est-à-dire vivent fixées à d'autres organismes ; d'autres sont des ectoparasites. La reproduction est bisexuée. Il n'y a pas de parthénogenèse. Le genre *Seison* est caractérisé par l'absence d'appareil rotateur.

Ordre des Bdelloidea

Les Bdelloïdés comprennent les Rotifères les plus communs qui colonisent les Mousses et les Lichens, et de nombreuses espèces d'eau douce. Ils sont nageurs ou rampants. *Philodina* a un appareil rotateur bien développé.

Ordre des Monogononta

Les Monogonontes comprennent un grand nombre d'espèces, nageuses ou fixées, vivant dans les eaux douces et saumâtres, dans les Mousses et dans les Lichens.

L'ordre est divisé en trois sous-ordres, dont celui des *Ploima* qui comprend la majorité des Rotifères.

BIBLIOGRAPHIE

BEAUCHAMP P. de, *Embranchement des Rotifères*, in GRASSÉ P. P., *Traité de zoologie*, t. 4, fasc. 1, p. 1225-1379, Paris, 1965. - HYMAN L., *The Invertebrates : Acanthocephala, Aschelminthes and Entoprocta*, vol. III, New York, 1951. - POURRIOT R., *Recherches sur l'écologie des Rotifères*, thèse de doctorat, *Vie et Milieu*, suppl. 21, 224 p., 1965. - REMANE A., *Rotatoria. Tierwelt der Nord und Ostsee*, Lief. 16, 7°, p. 1-156, 1929. - VOIGT M., *Rotatoria. Die Rädertiere Mitteleuropas*, Berlin, 1957.

▼ ***Deux Rotifères observés in vivo.***

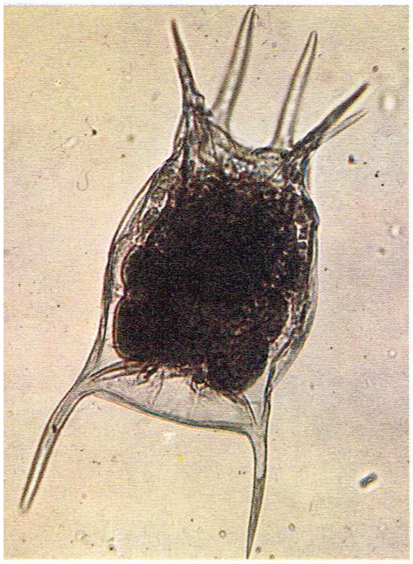

A. Margiocco

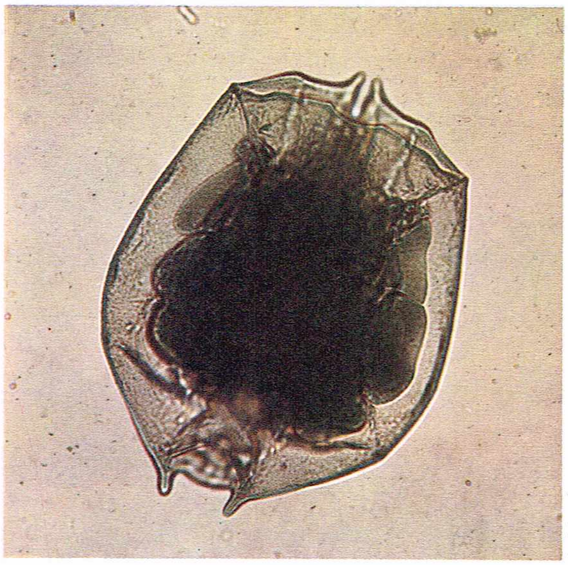

A. Margiocco

LES NÉMATORHYNQUES

Cet embranchement comprend deux classes très distinctes : les Gastrotriches et les Échinodères ou Kinorhynques. Ils sont parfois réunis aux Rotifères dans le groupe des Trochelminthes.

GASTROTRICHA

Les Gastrotriches sont des Métazoaires microscopiques, marins et benthiques ou d'eaux douces. Leur corps, allongé et aplati, est différencié en une tête et un tronc qui se termine par une extrémité bifide. Leur symétrie est bilatérale. Il existe des tubes adhésifs, disposés en deux files obliques sur la tête, puis en rangées latérales et dorsolatérales assez denses à la base de la queue. Sur sa face ventrale, le tronc possède un revêtement ciliaire qui peut être soit continu, soit groupé selon des bandes longitudinales ou transversales. Le corps est recouvert par une mince cuticule qui est très souvent pourvue de formations particulières comme des écailles, des soies et des piquants parfois très développés. La musculature est constituée essentiellement par des bandes longitudinales. Le système circulatoire est totalement absent, de même que l'appareil respiratoire : la respiration se fait à travers la paroi du corps.

L'appareil digestif. L'ouverture buccale, située à l'extrémité antérieure du corps, se continue par un pharynx musculeux, de type nématodien, puis par un tube digestif médian et rectiligne. L'anus s'ouvre en position dorsale ou ventrale. Les Gastrotriches se nourrissent surtout de Bactéries, des Protozoaires, des Diatomées et des détritus de nature diverse.

Le *système nerveux* et les *organes des sens*. Le système nerveux comprend deux gros ganglions cérébraux situés de part et d'autre de l'extrémité antérieure du pharynx et réunis par une commissure dorsale. Des ganglions partent deux nerfs latéraux qui parcourent tout le corps. Les organes des sens sont représentés pa des touffes de longs cils présents surtout à l'extrémité céphalique des Chétonotoïdes, par des soies et des cils à fonction tactile distribués en différents endroits, et par des fossettes ciliées sur la tête.

L'appareil excréteur est constitué par une ou plusieurs paires de protonéphridies localisées à peu près au milieu du corps, latéralement, et s'ouvrant à l'extérieur par des pores néphridiaux. De plus, il existe une ou plusieurs paires de glandes ventrales plurinucléées, dépourvues de canal et débouchant à la surface du corps.

Appareil reproducteur. Développement. Les Macrodasyoïdes et les Xénotrichulides (ceux-ci faisant partie des Chétonotoïdes) sont hermaphrodites. Chez les autres Chétonotoïdes, l'appareil génital mâle est dégénéré et les œufs se développent uniquement par parthénogenèse. Chez certaines espèces de Macrodasyoïdes, il apparaît des mâles, des femelles ainsi que des individus hermaphrodites. Les gonades sont localisées dans la moitié postérieure du corps. L'appareil génital mâle est constitué par un ou deux testicules. De chaque testicule part un spermiducte s'ouvrant à l'extérieur par un pore génital, ou pouvant être relié au pore génital femelle. L'appareil génital femelle est formé par un ou deux ovaires qui sont simplement des amas de cellules germinales non délimités par une paroi. A la suite de l'ovaire viennent un utérus, un réceptacle séminal et un oviducte qui débouche par un gonopore en avant de l'anus, ou dans la cavité anale. Le développement de l'œuf fécondé est direct.

On divise les Gastrotriches en deux ordres, que nous allons examiner brièvement.

Ordre des Macrodasyoidea

Chez les Macrodasyoïdes, l'appareil sexuel mâle est bien développé et il y a de nombreux tubes adhésifs. Des pores mettent en communication le pharynx avec l'extérieur. Il s'agit d'Animaux uniquement marins qui ont une répartition mondiale.

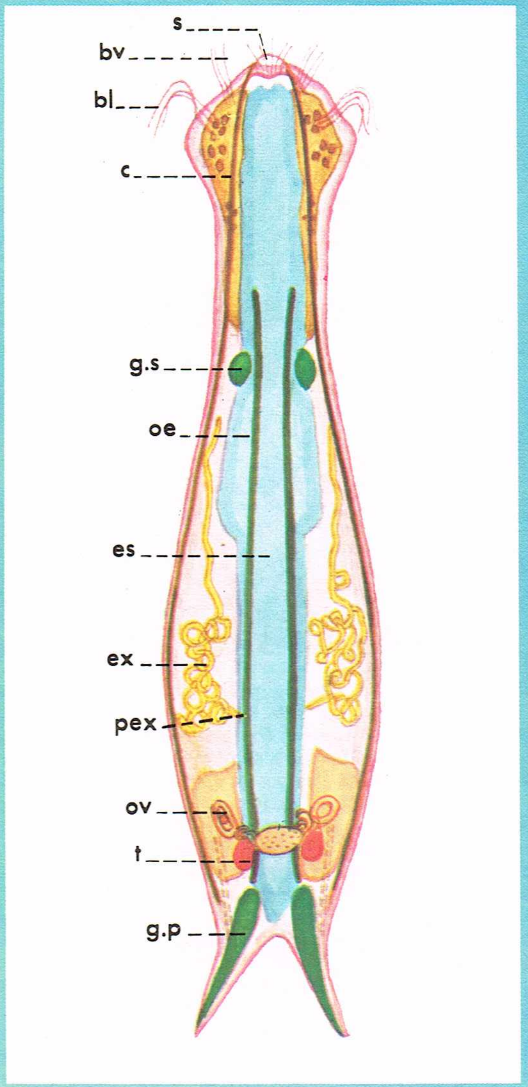

◀ *Représentation schématique d'un Gastrotriche; s, soies; bv, bouquet ventral de cirres; bl, bouquet latéral de cirres; c, cerveau; g.s, glandes salivaires; oe, œsophage; es, estomac; ex, appareil excréteur; pex, pore excréteur; ov, ovaire; t, testicules; g.p, glande pédieuse.*

Ordre des Chetonotoidea

Les Chétonotoïdes comprennent des organismes dulçaquicoles et quelques rares formes marines. Leur tête est pourvue de touffes de soies ou de longs cils sensoriels. L'appareil reproducteur mâle est absent la plupart du temps et la reproduction se fait par voie parthénogénétique. Les tubes adhésifs, très peu nombreux, sont souvent

EMBRANCHEMENT DES NÉMATORHYNQUES

Classe des Gastrotricha
- ○ *ordre des Macrodasyoidea*
- ○ *ordre des Chetonotoidea*

Classe des Kinorhyncha ou Échinodères

sous-ordre des Cyclorhages
sous-ordre des Chonchorhages
sous-ordre des Homalorhages

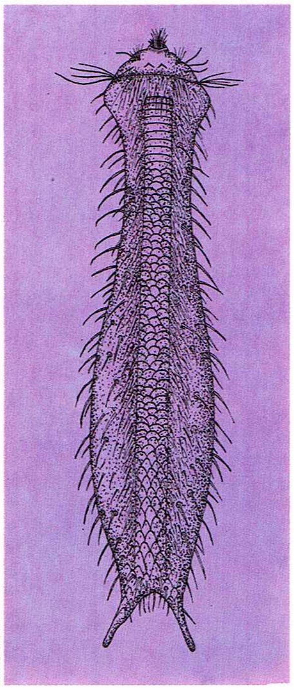

I.G.D.A.

▲ *Le corps des Gastrotriches est souvent recouvert de cils, de piquants ou d'écailles.*

▼ *Schéma de la structure interne d'un Kinorhynque : 1, bouche; 2, épines; 3, ganglion cérébral; 4, soies céphaliques; 5, pharynx; 6, glandes salivaires; 7, soies; 8, gonades; 9, intestin; 10, protonéphridie; 11, intestin terminal; 12, anus, 13, soie terminale.*

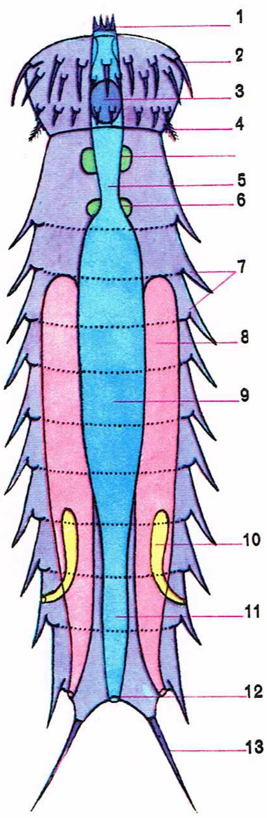

I.G.D.A.

localisés à l'extrémité postérieure du corps. L'appareil excréteur est généralement bien développé.

KINORHYNCHA (OU ÉCHINODÈRES)

Les Kinorhynques sont des Animaux microscopiques (de moins de 1 mm de longueur) uniquement marins. On les trouve dans la vase, dans le sable et parmi les Algues des zones littorales. Leur corps est allongé et recouvert d'une cuticule divisée, extérieurement, en treize ou quatorze anneaux, chacun étant emboîté dans celui qui le précède. Le premier anneau constitue la tête, le deuxième le cou, et les autres le tronc, terminé par une queue épineuse. La tête, sphéroïdale, porte au centre la bouche, qui s'ouvre à l'extrémité d'une protubérance rétractile, ou cône buccal, et est entourée par un anneau d'épines insérées sur ce cône. La tête porte latéralement de cinq à sept couronnes formées chacune de dix à vingt épines dirigées vers l'extrémité postérieure du corps. Sous la cuticule, un épiderme syncytial s'épaissit dorsalement et latéralement, en formant trois cordes.

Le *système musculaire* présente des affinités avec ceux des Gastrotriches et des Rotifères (absence de couche pariétale sous l'épiderme). Il y a toutefois des modifications particulières en fonction de la division du corps en anneaux; en effet, un système compliqué de faisceaux musculaires favorise les mouvements de la région antérieure du corps. Les anneaux du tronc possèdent des faisceaux musculaires dorso-ventraux qui relient la plaque dorsale aux plaques ventrales. En outre quatre faisceaux longitudinaux de muscles, insérés sur les plaques cuticulaires des segments, réunissent chacun de ceux-ci avec le suivant, ce qui confère au corps une grande mobilité.

La *cavité du pseudocœle* se trouve entre la paroi du corps et l'appareil digestif; elle est remplie par un liquide qui contient des amibocytes, semblant provenir de la paroi de l'appareil digestif. Il n'y a aucun système circulatoire et l'activité respiratoire a lieu à travers les parois du corps.

L'*appareil digestif*. La cavité buccale est suivie du pharynx, qui est un tube musculeux débouchant dans l'œsophage autour duquel adhèrent quatre masses syncytiales, qui font probablement fonction de glandes salivaires. L'estomac et l'intestin sont rectilignes et séparés de l'extrémité postérieure de l'appareil digestif par un sphincter. L'anus est terminal. Les Animaux se nourrissent de Diatomées ou de particules détritiques.

L'*appareil excréteur* est constitué d'une paire de protonéphridies situées dans le dixième anneau et débouchant par des pores néphridiaux, au niveau du onzième anneau.

Le *système nerveux* est constitué par un cerveau qui forme un anneau à neuf lobes autour de la bouche et d'où part une chaîne nerveuse ventrale, sous-épidermique et ganglionnaire (un ganglion par anneau). Les organes des sens sont représentés par des yeux et des soies sensorielles.

Appareil reproducteur et développement. Les Kinorhynques ont des sexes séparés et ne présentent pas de dimorphisme sexuel; les gonades consistent en une paire de petits sacs qui débouchent par des orifices pairs latéraux au niveau du dernier anneau. A la partie antérieure de chaque gonade se trouve une cellule apicale d'où naissent tous les éléments qui composent la gonade elle-même, c'est-à-dire les cellules germinales, les cellules nutritives, qui existent seulement dans les ovaires, et les cellules épithéliales de la paroi de la gonade. Les oviductes sont pourvus d'un réceptacle séminal. Les œufs sont émis par un gonopore. Les testicules continuent par un spermiducte qui débouche par un pore pourvu de deux ou trois spicules. Les œufs fécondés se développent par des mues successives. Au cours de chaque mue, le nombre des anneaux du corps s'accroît, la cuticule s'épaissit peu à peu, et la quantité d'épines et de soies augmente progressivement.

Les Kinorhynques sont divisés en trois sous-ordres. Chez les *Cyclorhages*, seul le premier anneau peut être rentré, et les plaques qui recouvrent le second forment une coupole qui cache la tête. Chez les *Conchorhages*, le troisième anneau porte deux plaques en forme de coquille. Chez les *Homalorhages*, enfin, le troisième anneau est pourvu d'une couronne de plaques : une dorsale et trois ventrales.

BIBLIOGRAPHIE

REMANE A., *Gastrotricha und Kinorhyncha, Das Tierreich*, 4 (1), 242 p., 1936; *Die Geschichte der Tiere. Die Evolution des Organismen*, Stuttgart, 1954. - REMANE A. und STEINBÖCK O., *Verb. Deutscher Zool. Ges in Graz*, 1957. - STEINBÖCK O., *Zur Phylogenie des Gastrotricher, Schlusswort zur Diskussion*, 1958. - SWEDMARK B., *The Interstitial Fauna of Marine Sand, Biol. Rev.*, 39, p. 1-42, 1964.

La classe des Priapuliens occupe une place incertaine dans la systématique et ne peut être rattachée à aucun des embranchements qui précèdent ou qui suivent.

PRIAPULIENS

Les Priapuliens sont des Animaux uniquement marins, habitant de préférence les mers froides à forte salinité, enfouis dans les fonds sableux ou vaseux, vivant le plus souvent dans les zones côtières; on peut cependant les trouver à de plus grandes profondeurs. Le corps, trapu et cylindrique, de couleur foncée, présentant une symétrie bilatérale, peut être divisé en deux parties : la région céphalique, transformée en trompe rétractile (ou introvert) qui porte de puissants crochets et des papilles disposées en lignes méridiennes régulières, et le tronc, divisé extérieurement en sillons circulaires et recouvert par des diverticules digitiformes et parfois par des crochets. Les sillons sont ornés de petites papilles alignées régulièrement et qui portent soit des crochets, soit des formations sensorielles. Le tronc se termine ordinairement par un long appendice post-anal : le panache caudal. Il n'y a pas de système circulatoire. Certains auteurs admettent que le panache caudal aurait un rôle respiratoire. La paroi du corps est constituée par une épaisse cuticule, un épiderme unistratifié et une puissante musculature. La cavité du corps, probablement cœlomique, est vaste et tapissée par un mince endothélium continu qui enveloppe tous les viscères; elle est remplie par le liquide cœlomique.

L'*appareil digestif* est un tube rectiligne qui débute à la bouche, située à l'extrémité distale de la trompe, et se termine à l'anus, qui s'ouvre à la base du panache caudal. Il comprend un pharynx, musculeux, renflé en bulbe, un intestin rectiligne et un rectum très court, séparé de l'intestin par un étranglement circulaire. Les Priapuliens se nourrissent de particules détritiques et de micro-organismes vivant dans la vase.

Le *système nerveux* se compose d'un collier péri-œsophagien et d'un cordon nerveux ventral, restant en connexion avec l'épiderme. Les organes des sens sont représentés seulement par des papilles tactiles situées sur la trompe et le tronc.

L'*appareil urogénital* est constitué par l'union des organes excréteur et génitaux. Chez les jeunes, l'appareil excréteur est formé de deux canaux dont les diverticules se terminent par une cellule flamme; puis les glandes génitales se développent en association avec ces organes excréteurs et les canaux génitaux se substituent aux canaux excréteurs. Il existe en outre, dans l'endothélium péritonéal, de nombreuses cellules excrétrices. Les sexes sont séparés; le développement embryonnaire est encore mal connu. La segmentation est bilatérale et la larve ressemble à l'adulte, mais porte une cuirasse.

Les Priapuliens ne renferment qu'une famille avec quatre espèces. La plus connue est *Priapulus caudatus*, des eaux côtières européennes.

BIBLIOGRAPHIE

DAWYDOFF C., in GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie*, 5 (1), p. 908-926, 1959. - VAN DER LAND Y., *Systematics, Zoogeography and Ecology of the Priapulida, Zool. Verh. Leiden*, 112, 1970.

Photo J. Six

LES ANNÉLIDES

Les Annélides ont un corps à symétrie bilatérale, divisé par des cloisons en segments ou métamères. La cavité générale, qui est un cœlome, est toujours présente, mais souvent réduite. Le système nerveux est constitué d'un collier péri-œsophagien dont les centres dorsaux forment le cerveau et d'une chaîne ventrale comprenant une paire de ganglions par segment. L'appareil circulatoire est clos. L'intestin est complet, divisé en plusieurs parties et se termine par un anus. Les organes excréteurs, segmentaires, sont des métanéphridies. Les cellules sexuelles sont situées dans la cavité cœlomique et le développement de l'œuf se fait par segmentation spirale. La larve est fondamentalement du type trochophore. On divise les Annélides en trois classes : les Polychètes, qui sont pour la plupart marines, les Oligochètes, qui sont presque tous terrestres ou dulçaquicoles, et les Hirudinés, qui peuplent la plupart des milieux aquatiques. Les Archiannélides, considérées autrefois comme une classe, forment en fait un groupe hétérogène et seront traitées en annexe des Polychètes. Enfin, les Myzostomides, bien que présentant des affinités avec les Annélides, ne sont pas actuellement rattachés à cet embranchement.

POLYCHAETA

Ce sont des Annélides dont les métamères ont des expansions latérales, ou parapodes, sur lesquelles s'insèrent des soies chitineuses. Le corps des Polychètes est divisé typiquement en trois régions : le *prostomium* ou lobe céphalique, qui porte les appendices sensoriels, le *metastomium* comprenant les segments suivants, tous semblables entre eux ou bien différenciés en thorax et abdomen, et enfin le *pygidium* ou dernier segment. Chaque segment ou métamère du *metastomium* se compose d'un épiderme cuticulaire, d'une couche de muscles circulaires, de faisceaux de muscles longitudinaux, de muscles obliques, de deux sacs cœlomiques, d'une paire de ganglions nerveux ventraux et d'une paire d'organes excréteurs. Les métamères portent chacun une paire de saillies latérales ou parapodes formés d'une rame dorsale, ou *notopodium,* et d'une rame ventrale, ou *neuropodium.* Chaque rame porte un cirre tentaculaire et contient un bulbe sétigère, d'où sortent les soies; les plus fines sont saillantes, les plus fortes, appelées *acicules,* émergent peu et servent d'insertion aux muscles faisant mouvoir les bulbes. La morphologie des parapodes et des soies est très variable. La taille des Polychètes varie de 1 à 2 mm jusqu'à 3 m chez les eunices géantes.

Organisation générale

La *paroi du corps* est formée d'une cuticule plus ou moins épaisse selon les espèces, et composée le plus souvent de deux couches striées se coupant à angle droit, d'un épiderme monostratifié et d'une membrane basale d'importance variable. L'épiderme renferme des cellules à mucus qui, chez les espèces tubicoles, forment d'épais bourrelets glandulaires, ou boucliers. Ce sont ces boucliers qui sécrètent un tube soit membraneux ou corné, soit calcaire. La musculature se compose de trois groupes principaux de muscles : une couche de muscles circulaires, des muscles obliques, enfin des muscles propres à des organes comme les parapodes et les tentacules céphaliques.

La *cavité du corps* est un cœlome, généralement vaste, qui, outre sa division en trois chambres longitudinales inégales par des planchers musculaires, peut être divisé transversalement par des diaphragmes. Le cœlome, ainsi que tous les organes qu'il renferme, est tapissé par un endothélium péritonéal formant un mésentère dorsal et un mésentère ventral soutenant le tube digestif. Dans le liquide cœlomique, on observe non seulement des éléments reproducteurs, mais aussi des cellules libres (cœlomocytes) de différents types.

Appareil digestif. La bouche est inerme ou pourvue de crochets chitineux souvent complexes : les mâchoires. Chez les espèces prédatrices, il existe un bulbe buccal avec des glandes salivaires; chez d'autres individus, la partie antérieure forme une trompe exsertile qui porte les mâchoires. Viennent ensuite l'œsophage et l'intestin, ce dernier étant le plus souvent rectiligne; dans certains

▲ ***L'embranchement des Annélides est divisé en trois classes : les Polychètes (ici,* Serpula vermicularis*), les Oligochètes, appelés généralement « Vers de terre », et les Hirudinés qui regroupent les Sangsues.***

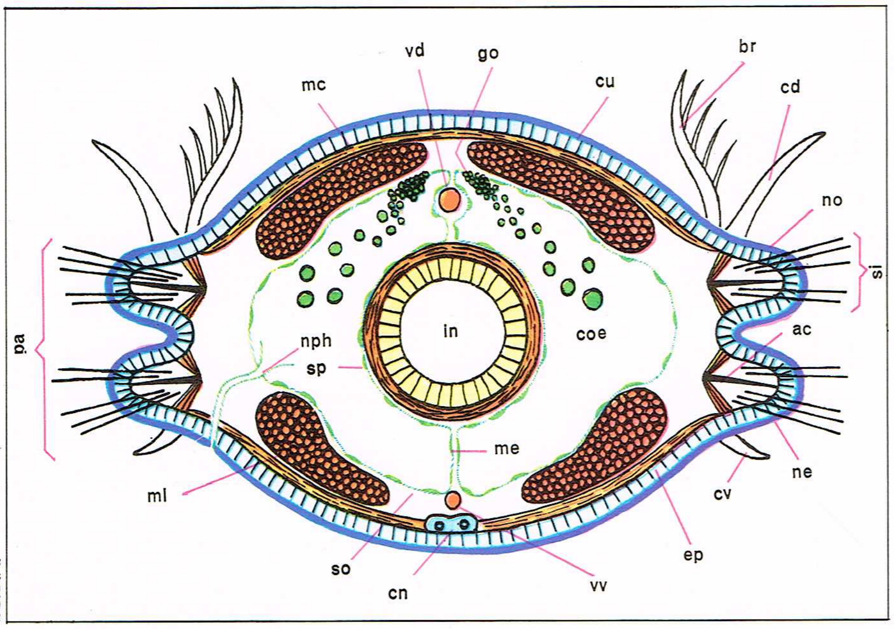

▲ *Schéma de la coupe transversale d'une Polychète : vd, vaisseau dorsal; go, gonades; cu, cuticule; br, branchie; cd, cirre dorsal; no, notopode; si, soie; ac, acicule; ne, neuropode; cv, cirre ventral; ep, épiderme; vv, vaisseau ventral; cn, chaîne nerveuse; so, somatopleure; ml, muscles longitudinaux; pa, parapodes; mc, muscles circulaires; nph, néphridies; sp, splanchnopleure; in, intestin; me, mésentère; coe, cœlome.*

genres, il possède des cæcums glandulaires, élargis à leur extrémité distale. L'anus s'ouvre dans le pygidium. Le régime alimentaire est très varié selon les groupes. Certaines espèces sont prédatrices; d'autres, qui creusent des galeries, ingèrent le sable et la vase avec les particules alimentaires qu'ils contiennent; d'autres enfin se nourrissent de plancton, capturé grâce à leurs filaments branchiaux.

Système nerveux et organes des sens. Le système nerveux comprend une masse supra-œsophagienne complexe appelée cerveau ou encéphale, des connectifs péri-œsophagiens, une chaîne nerveuse ventrale, et un système périphérique. Trois centres différents, un antérieur, un moyen et un postérieur, composent l'encéphale. La chaîne ventrale est le plus souvent constituée par deux cordons longitudinaux renflés en ganglions réunis par une commissure, dans chaque métamère. Les Polychètes, surtout les Errantes, possèdent de nombreux organes sensoriels dont la fonction n'est pas toujours connue. Outre les organes tactiles, abondants sur les tentacules et les palpes céphaliques, existent des organes nucaux situés à la base du prostomium, des organes dorsaux et latéraux. Les yeux sont presque toujours présents et situés normalement dans la région céphalique, mais ils peuvent être localisés dans d'autres régions du corps.

L'*appareil circulatoire* est clos et se compose, dans les cas les plus simples, de deux vaisseaux médians, l'un dorsal, l'autre ventral, réunis dans chaque segment par une paire d'anses vasculaires. Le sang est incolore chez un certain nombre de familles. Chez beaucoup d'autres Polychètes, il est coloré en rouge par de l'hémoglobine dissoute dans le plasma sanguin.

La *respiration* est surtout cutanée, mais les échanges gazeux peuvent s'effectuer au niveau de branchies.

Appareil excréteur. Les principaux organes excréteurs sont constitués par les néphridies (typiquement une paire par segment), les organes cilio-phagocytaires, la région postérieure de l'intestin et le tissu chloragogène (tissu ayant aussi un rôle dans le métabolisme des glucides et des lipides). La communication de la cavité cœlomique avec l'extérieur se fait soit par des néphridies, soit par les cœlomoductes (métanéphridies) destinés en principe à l'émission des produits génitaux, mais, lorsque les cœlomoductes manquent, ceux-ci peuvent emprunter le canal des néphridies.

Appareil reproducteur. Les sexes sont séparés, mais il n'y a pas d'organes génitaux bien différenciés. Les produits sexuels se développent aux dépens du revêtement péritonéal du cœlome, des vaisseaux dorsaux, ventraux et surtout néphridiens. Les produits génitaux tombent dans le liquide cœlomique à l'état de spermatogonies pour les mâles et d'ovogonies pour les femelles. Chez les mâles, les spermatogonies prolifèrent en amas groupés autour d'une masse glandulaire ou cytophore.

Reproduction

Reproduction sexuée. La segmentation de l'œuf est de type spiral et aboutit à la formation d'une larve fortement ciliée dite trochophore. Elle comprend trois parties, qui donneront les trois régions de l'adulte. Cette larve nage activement et se nourrit de micro-organismes. La reproduction sexuée présente quelques particularités. La parthénogenèse est très rare, mais on a observé un certain nombre d'espèces hermaphrodites. La plupart des Polychètes sont ovipares, mais la viviparité a été observée chez quelques Syllidiens. Au moment de la maturité sexuelle, les individus peuvent présenter des modifications

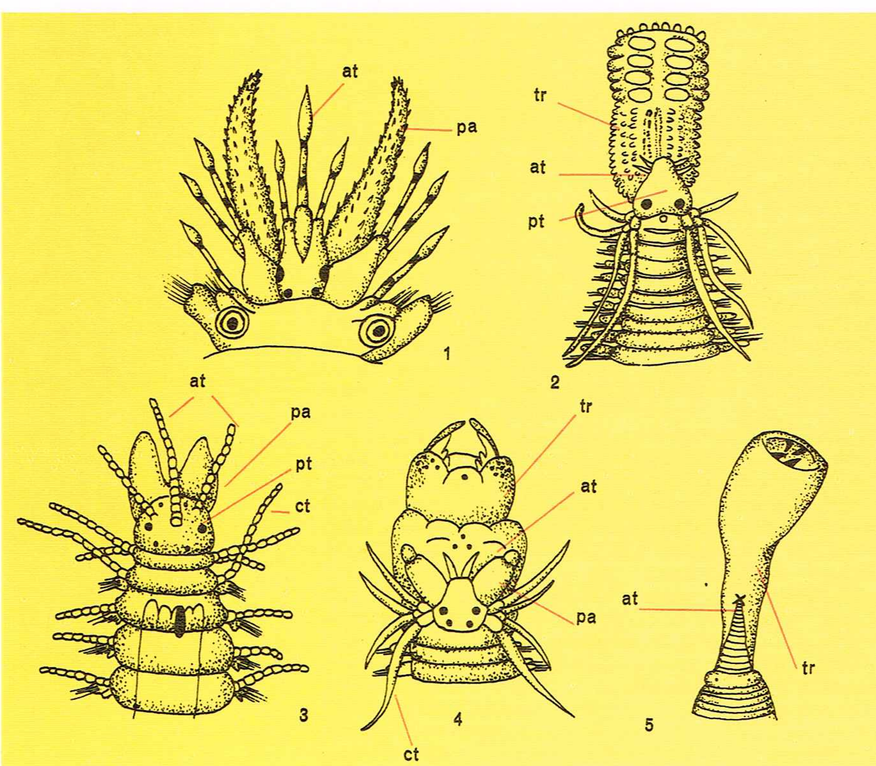

EMBRANCHEMENT DES ANNÉLIDES

Classe des Polychaeta

groupe des Errantes
groupe des Sédentaires ou Tubicoles
groupe des Archiannélides

Classe des Oligochaeta

○ *ordre des Plésiopores plésiothèques*
○ *ordre des Plésiopores prosothèques*
○ *ordre des Prosopores*
○ *ordre des Opisthopores*

Classe des Hirudinea

○ *ordre des Acanthobdelliformes*
○ *ordre des Rhynchobdelliformes*
○ *ordre des Gnathobdelliformes*
○ *ordre des Pharyngobdelliformes*

I.G.D.A.

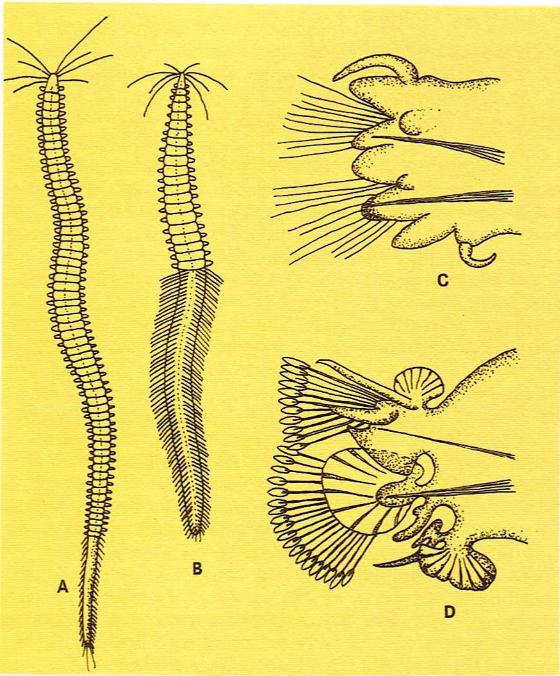

I.G.D.A.

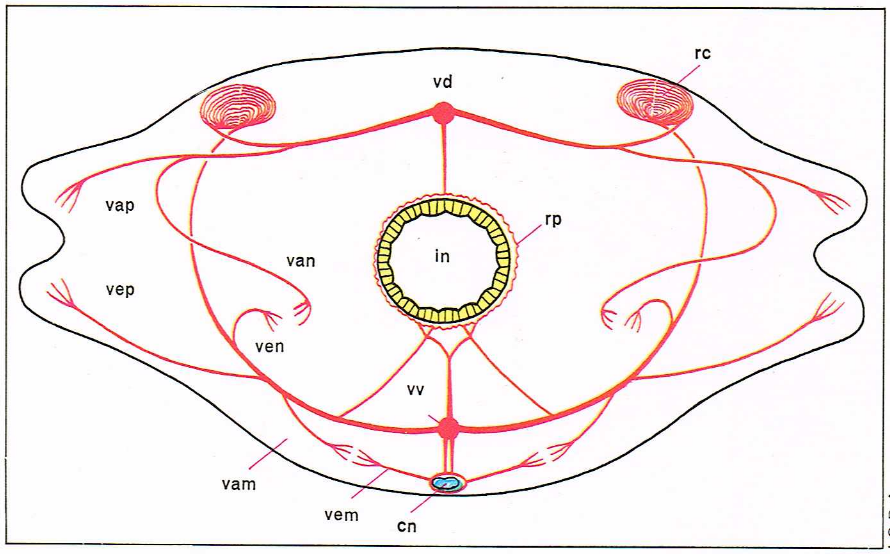

I.G.D.A.

▲ *A gauche, épitoquie chez les Néréidés : A et B, formes en cours d'acquisition de l'épitoquie* ***(Heteronereis)****; C, parapode atoque; D, parapode épitoque. A droite, schéma de l'appareil circulatoire au niveau d'un segment de Polychète : vam et vem, vaisseaux afférents et efférents des muscles longitudinaux ventraux; van et ven, vaisseaux afférents et efférents des néphridies; vap et vep, vaisseaux afférents et efférents des muscles des parapodes; cn, chaîne nerveuse; rc, réseau capillaire de l'aire respiratoire; in, intestin; rp, réseau capillaire périntestinal; vd, vaisseau dorsal; vv, vaisseau ventral.*

internes et externes très importantes et devenir pélagiques et nageurs, ils sont alors dits « épitoques ». Alors que dans le cas général les œufs sont abandonnés dans la mer, chez les individus épitoques la fécondation a lieu à la surface de l'eau; on dit que les Annélides essaiment. Il existe une relation, non expliquée, entre l'essaimage et les cycles lunaires.

La *reproduction asexuée* peut se produire de différentes façons, soit par gemmiparité (production de bourgeons), soit par scissiparité, soit par schizogamie. Dans ce dernier cas, les gonocytes ne s'observent que dans un certain nombre de segments postérieurs formant le stolon. A partir d'une même souche, il peut se former une chaîne d'individus stoloniaux, unisexués. C'est la stolonisation.

Actions endocrines. Il existe, chez les Polychètes, des substances hormonales, essentiellement à fonction inhibitrice, qui agissent sur la maturation des glandes génitales et les transformations morphologiques liées à la reproduction (épitoquie, stolonisation).

Écologie

L'immense majorité des Polychètes vit dans la mer, dans les habitats les plus variés. Elles abondent surtout dans les zones intertidales et côtières. Beaucoup vivent enfoncées dans le sable plus ou moins vaseux découvert à marée basse *(Arenicola marina)*; certaines habitent les fentes de rochers, enfin d'autres construisent des tubes grisâtres et souples d'où sortent des panaches multicolores *(Spirographis, Sabella)*. Les espèces pélagiques nagent à la surface ou entre deux eaux et sont transparentes. On peut aussi trouver certaines espèces en eau saumâtre. Rares sont les espèces dulçaquicoles comme *Tylorhynchus heterochaetus*, qui vit dans les rizières du Japon, ou *Marifugia cavita*, que l'on rencontre dans les grottes de Moravie. Il existe des espèces commensales, soit d'autres Annélides, soit d'autres Animaux comme les Éponges. Enfin certaines Polychètes sont ectoparasites comme *Histriobdella homari*, parasite des branchies des homards, ou endoparasites d'autres Polychètes.

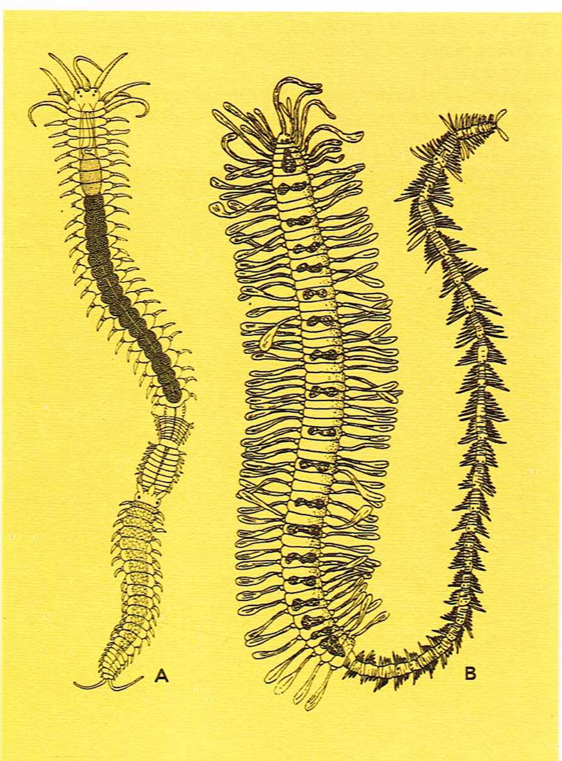

I.G.D.A.

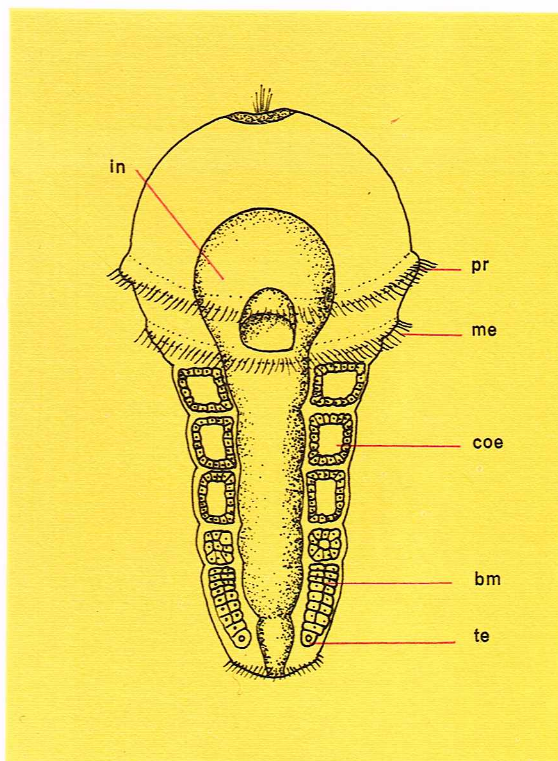

I.G.D.A.

◀ *A gauche, exemples de reproduction par scissiparité multiple chez* **Autolytus prolifer** *(A) et* **Myrianida fasciata** *(B). A droite, métamérisation et formation du cœlome au cours du développement de la larve trochophore : bm, bandes mésodermiques; coe, cœlome; in, intestin; me, métatroque; pr, prototroque; te, téloblastes.*

◀ *Page ci-contre, en bas à gauche, aspects de la région antérieure chez différentes familles de Polychètes : 1, Aphroditidés; 2, Phyllodocidés; 3, Syllidés; 4, Néréidés; 5, Glycéridés; at, antenne; ct, cirre tentaculaire; pa, parapode; pt, prostomium; tr, trompe.*

A. Kerneis - Jacana

▲ *Les Polychètes errantes, comme leur nom l'indique, mènent une vie libre;* **Eulalia viridis** *est une espèce marine.*

G. S. Giacomelli

▶ **Aphrodite aculeata**, *une Polychète errante.*

SYSTÉMATIQUE

On divise les Polychètes en Errantes et en Sédentaires ou Tubicoles, et on y annexe les Archiannélides.

Groupe des Polychètes errantes

Le corps de ces Polychètes est généralement vermiforme, à segments nombreux, à peu près tous semblables entre eux, sauf les premiers qui avoisinent la bouche. Les parapodes sont uniramés ou biramés, à rames peu dissemblables munies d'acicules. Les Polychètes errantes sont réparties en dix-sept familles dont nous ne traiterons que quelques-unes.

La famille des **Aphroditidés** est caractérisée par certains cirres pédiaux dorsaux, transformés en lames aplaties (élytres), et recouvrant le dos. Elle contient, entre autres, les genres *Aphrodite, Hermione, Lepidonotus, Harmothoe, Polynoe* et *Lagisca*.

La famille des **Syllidés** comprend des Polychètes de petite taille, au corps allongé. Les parapodes sont uniramés et dépourvus de branchies. Il existe des cirres dorsaux et ventraux. La reproduction peut s'effectuer selon diverses modalités. On y trouve les genres *Syllis, Odontosyllis, Pionosyllis, Exogone* et *Autolytus*.

Les **Néréidés** ont un grand prostomium, avec quatre yeux, deux antennes et deux palpes; ils possèdent une trompe dévaginable, avec deux mandibules et de petites dents cornées. Les formes épitoques sont appelées *Heteronereis* (genres *Nereis, Perinereis* et *Platynereis*).

La famille des **Eunicidés** est constituée par des Annélides souvent de grande taille, qui possèdent un appareil masticatoire complexe. Il y a souvent des branchies cirriformes ou pectinées, situées au milieu du cirre dorsal. Nous citerons les genres *Eunice, Marphysa, Diopatra, Onuphis*.

Groupe des Polychètes sédentaires

Les Polychètes sédentaires ont le corps souvent divisé en deux régions. La tête est petite, peu distincte ou profondément modifiée. Les parapodes sont généralement dépourvus d'acicule. Les rames ventrales sont armées de soies à crochets, ou *uncini*. Les branchies sont ordinairement réparties dans une région déterminée. La trompe est dépourvue de mâchoires. Habituellement tubicoles, les Sédentaires comprennent vingt et une familles; nous ne parlerons que de quelques-unes.

Les **Chætoptéridés** ont un corps divisé en deux ou trois régions, très dissemblables. Leur prostomium est petit; les cirres tentaculaires sont présents. Ils vivent dans un tube corné. Les *Chaetopterus* émettent un mucus luminescent.

Les **Arénicolidés** possèdent des segments formant des anneaux secondaires; leurs parapodes sont biramés. Les

G. S. Giacomelli

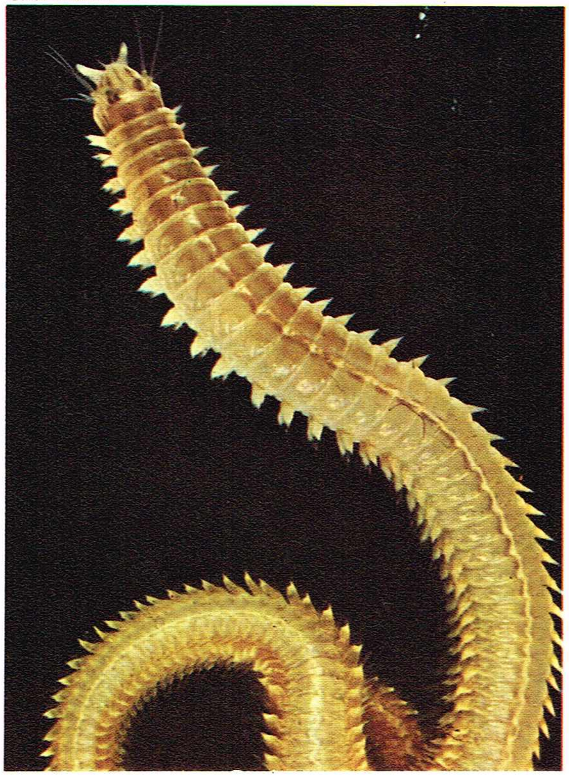

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

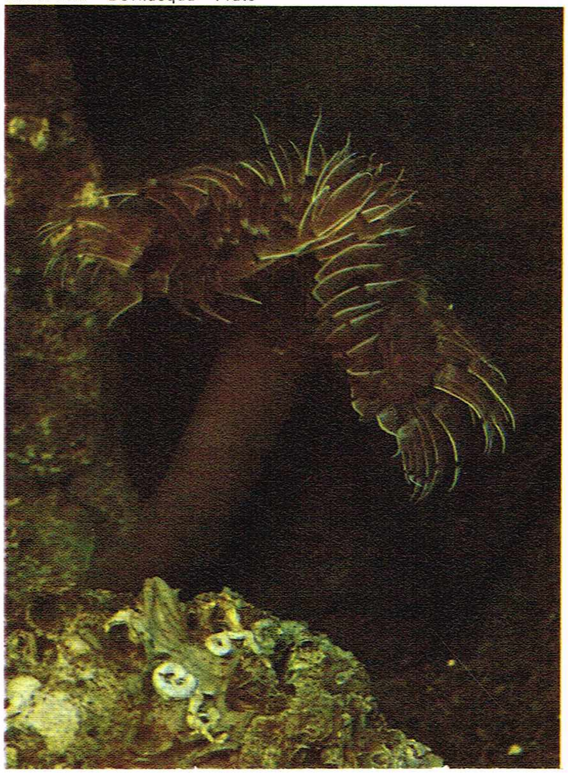

▶ *A gauche, une Polychète errante appartenant à la famille des Néréidés; on peut observer le premier segment ou prostomium portant les yeux, les palpes, les antennes et des cirres, et tous les segments pourvus de parapodes et constituant le métastomium. A droite,* **Bispira volutacornis**, *une Polychète sédentaire vivant dans un tube membraneux; seule dépasse la couronne tentaculaire.*

branchies forment des touffes sur les parapodes des segments abdominaux *(Arenicola)*.

Les **Sabellariidés** ont un corps vermiforme composé de trois régions et possèdent des branchies cirriformes sur nombre de leurs segments. Ils vivent dans des tubes de sable, souvent réunis en groupes nombreux (le genre le mieux connu est représenté par les *Sabellaria*).

Les **Sabellidés** possèdent une couronne tentaculaire, circulaire ou en spirale, multicolore, et habitent un tube membraneux, le plus souvent corné ou muqueux. Nous citerons chez eux les genres *Sabella, Spirographis, Branchiomma, Jasmineira, Myxicola*.

Les **Serpulidés** se distinguent des Sabellidés par la présence d'un tube calcaire souvent enroulé en spirale et très rarement libre, muni d'un opercule calcaire, corné ou membraneux. Il y a aussi une membrane thoracique. Citons, entre autres, *Serpula*.

Groupe des Archiannélides

Comme nous l'avons vu plus haut, les Archiannélides constituent un groupe hétérogène d'Annélides de petite taille dont les affinités sont à rechercher parmi les Polychètes. Malgré leur nom, un grand nombre de leurs caractères ne sont pas primitifs.

Ce groupe comprend une dizaine de genres, répartis en trois familles très différentes.

La famille des **Protodrilidés** comprend, entre autres, le genre marin *Polygordius*, dont les différentes espèces vivent dans le sable grossier ou sur les fonds caillouteux et englobent les plus grandes Archiannélides (jusqu'à 10 cm de longueur et même plus). On rencontre de nombreuses espèces du genre *Protodrilus* le long de nos côtes; *Saccocirrus* se trouve communément en Méditerranée.

La famille des **Dinophilidés** comprend le genre type *Dinophilus*, de taille minuscule et n'ayant que quelques segments ciliés.

La famille des **Nérillidés** compte divers genres marins (*Nerilla, Mesonerilla, Nerillidium*, etc.) et le genre *Troglochaetus*, des eaux douces souterraines.

OLIGOCHAETA

Les Oligochètes sont des Annélides modifiées par l'adaptation à la vie terrestre ou dans les eaux douces et appelées, d'une façon générale, « Vers de terre ». Les espèces marines ou littorales sont plus rares; quelques-unes sont parasites.

Le corps des Oligochètes est divisé en segments où sont insérées des soies peu nombreuses; il n'y a ni cirres ni parapodes. Le prostomium est petit et porte ventralement la bouche. L'ouverture anale est située sur le pygidium qui est généralement peu développé. La taille des Oligochètes varie de quelques millimètres à plus de 2 m, chez des Vers de terre géants des régions tropicales. La coloration du corps des Oligochètes est généralement due à la transparence de la paroi de leur corps qui permet de voir les liquides organiques circulant et le contenu du tube digestif. Il est toutefois des espèces chez qui la coloration est due à des pigments du tégument uniformément distribués sur presque tout le corps.

Organisation générale

Paroi du corps. L'épiderme, formé par un épithélium monostratifié, est composé par différents types de cellules : de revêtement, glandulaires, basales, sensorielles et pigmentaires. Les cellules glandulaires sont essentiellement mucipares. En dessous de l'épiderme, les cellules basales ont un rôle important dans le processus de régénération et de reproduction asexuée. Au moment de la reproduction, quelques segments situés au tiers de la longueur du corps de l'Animal se modifient profondément : le tégument présente un renflement épidermique, interrompu ventralement, dû à la multiplication des cellules muqueuses : c'est le *clitellum* (d'où le nom d'Annélides

G.S. Giacomelli

G. Relini

▲ ***Les Serpulidés habitent des tubes calcaires généralement fixés au substratum et fermés par un opercule; par l'orifice sort la couronne tentaculaire (à gauche); ces Polychètes sédentaires peuvent parfois être très abondantes sur les rochers submergés (à droite).***

J. H. Tashjian

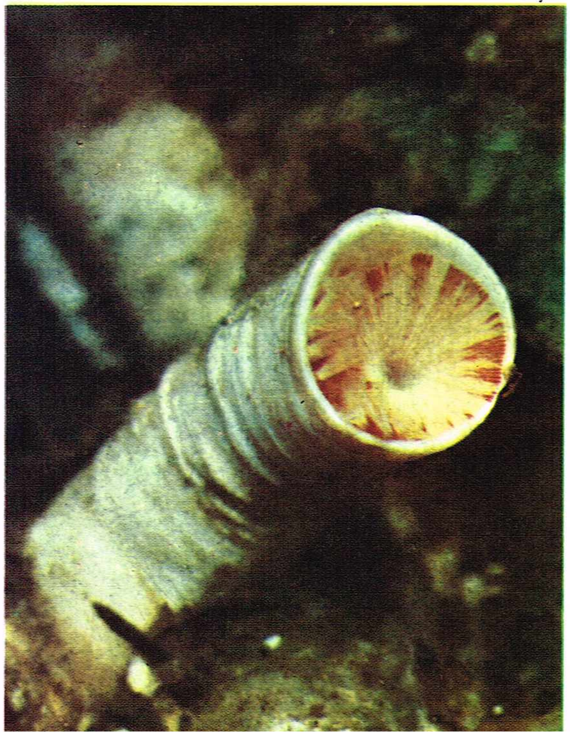

J. H. Tashjian

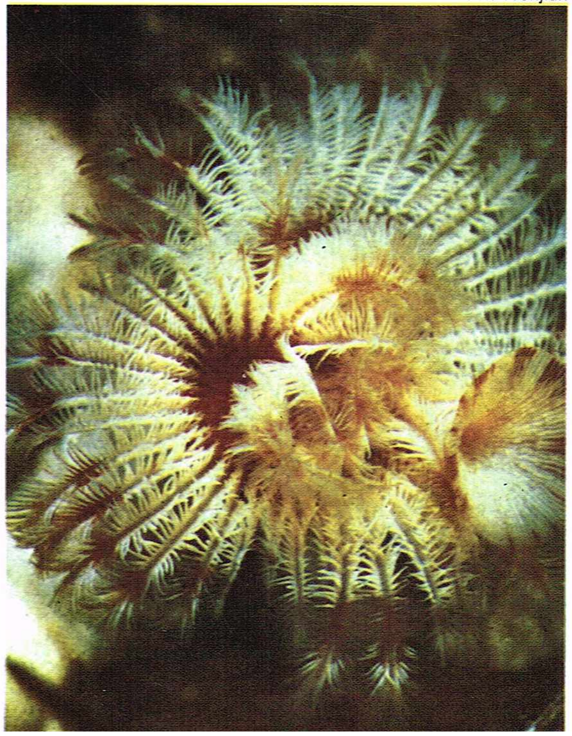

◀ ***Extrémité antérieure d'un Serpulidé; à gauche, l'individu est rétracté dans son tube fermé par un opercule; à droite, la couronne de tentacules est déployée et précédée par l'opercule.***

▶ **Les lombrics** (**Lumbricus terrestris**) *ingurgitent une grande quantité de terre et circulent dans le sol à l'intérieur de galeries; ils contribuent à ameublir le sol et à l'enrichir en certaines substances nécessaires au développement des plantes.*

P. Castel - Jacana

▲ *La transparence de ces deux Oligochètes permet d'observer les organes internes.*

A. Margiocco

clitellates donné aux Oligochètes et aux Hirudinés). L'épiderme est recouvert par une cuticule iridescente, sécrétée par les cellules de l'épiderme lui-même. En dessous de l'épiderme existe une tunique musculaire formée par deux couches : l'une externe, circulaire, et l'autre interne, longitudinale.

Cœlome et liquide cœlomique. Le cœlome est normalement très vaste et divisé par des cloisons ou *dissépiments* en segments répétant la métamérie externe. Le liquide cœlomique, généralement blanchâtre, contient des *cœlomocytes* dont une partie exerce des fonctions phagocytaires de défense (contre les Bactéries) et l'autre participe aux fonctions de nutrition. Le cœlome communique fréquemment avec la surface du corps grâce à des pores dorsaux. La cavité cœlomique est délimitée par un épithélium péritonéal formé de cellules aplaties. L'épithélium péritonéal, situé autour du tube digestif et des gros vaisseaux sanguins, est constitué par de grosses cellules formant le tissu chloragogène qui a un rôle très important dans le métabolisme des glucides et des protides.

L'*appareil digestif* est rectiligne. A la bouche, généralement inerme, succède un pharynx presque toujours pourvu d'un renflement dorsal complexe (bulbe pharyngien). Il est suivi d'un œsophage pourvu de différenciations, variables suivant le mode d'alimentation et dont l'épithélium peut être cilié (Limicoles) ou non (Terricoles). Chez les Terricoles, il s'y ajoute des diverticulesacciformes, à parois plissées, appelés *glandes de Morren.* La plus grande partie du tube digestif est constituée par l'intestin, dont la structure est uniforme jusqu'à l'anus. Chez les Terricoles, l'intestin présente le plus souvent une invagination médio-dorsale, ou *typhlosolis,* servant à augmenter la surface intestinale.

Système nerveux et organe des sens. Nettement métamérisé, le système nerveux central est composé de deux ganglions supra-œsophagiens dorsaux reliés par un collier péri-œsophagien à une chaîne nerveuse ventrale possédant en principe un ganglion par segment. De chaque ganglion de la chaîne ventrale partent trois paires de nerfs segmentaires : l'un antérieur, isolé, et deux autres postérieurs, très rapprochés ou soudés à l'origine. Après un bref parcours libre dans le cœlome, les nerfs segmentaires atteignent la musculature (plexus intra-musculaire) et l'épiderme (plexus sous-épithélial). Tous les Oligochètes, à l'exception des Branchiobdellidés et des Æolosomatidés, ont un système de fibres nerveuses multicellulaires de grande taille, incluses dans le canal nerveux central, et appelées fibres géantes. Chez les Oligochètes, il n'existe pas d'organes des sens bien différenciés. On a toutefois démontré que ces Animaux possèdent une grande sensibilité aux stimuli lumineux et aux excitations mécaniques et chimiques de diverses sortes.

L'*appareil circulatoire* est clos et composé, dans le cas le plus simple, d'un vaste sinus péri-intestinal. De ce sinus part un vaisseau dorsal où le sang circule vers l'avant. Le sang passe ensuite par deux commissures dans un vaisseau ventral, où il circule d'avant en arrière, puis regagne le sinus péri-intestinal par une série de gros vaisseaux. Chez les Oligochètes les moins évolués, le sang est incolore; chez tous les Terricoles, il est rouge par suite de la présence d'*érythrocruorine,* qui est proche de l'hémoglobine et se trouve en solution dans le plasma, qui contient aussi du glucose, des lipides et des acides aminés libres. Le sang est le véhicule des produits solubles de la digestion; en outre, il a un rôle très important dans les échanges respiratoires, par suite de la présence de l'érythrocruorine.

Appareil respiratoire. La plupart des Oligochètes ne possèdent pas d'organes respiratoires différenciés; leurs échanges gazeux se font par toute la surface du corps.

G. Mazza

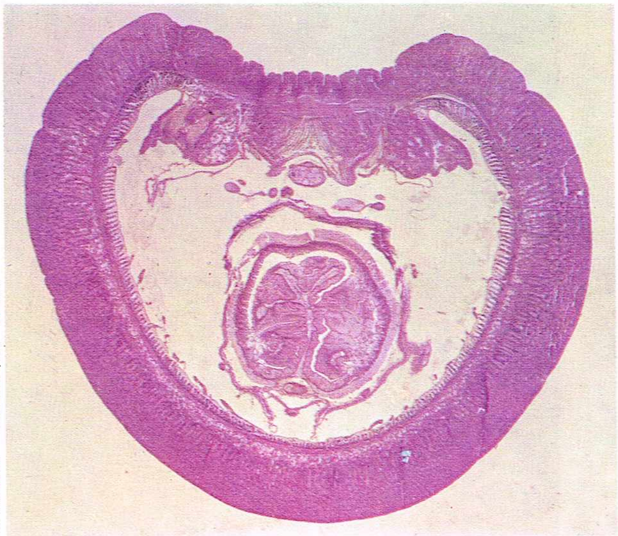

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ *Un lombric,* **Lumbricus terrestris** *(à gauche). Coupe transversale d'un lombric mettant en évidence la tunique musculaire (à droite).*

Chez les espèces de petite taille, cela a lieu par simple diffusion ; chez les gros Terricoles, l'épiderme est traversé par un système de capillaires, et c'est tout le tégument qui tient lieu d'appareil respiratoire.

L'*appareil excréteur* est constitué de *métanéphridies,* qui, dans le cas le plus simple, sont au nombre de deux par segment (sauf le premier et le dernier). Ce sont les *holonéphridies,* par opposition aux *méronéphridies,* qui peuvent se compter par centaines dans le même métamère. Les holonéphridies débouchent dans le cœlome par un *néphrostome* cilié qui se continue dans le segment suivant par un canal néphridial plus ou moins long s'ouvrant dans un pore excréteur externe (le *néphridiopore*) situé latéro-ventralement. Les méronéphridies peuvent déboucher à la surface du corps ou dans le tube digestif.

Appareil reproducteur. Tous les Oligochètes sont hermaphrodites. Les gonades, toujours nettement différenciées, consistent normalement en une ou deux paires de testicules situées en avant de la paire (ou plus rarement des deux paires) d'ovaires. Les gonades sont généralement localisées dans la région antérieure du corps, entre le dixième et le treizième segment. Les gamètes sont évacués par deux gonoductes munis chacun d'un pavillon cilié situé près du dissépiment opposé à celui où prolifère la gonade et se continuant par un canal efférent ou un oviducte (suivant qu'il correspond à un testicule ou à un ovaire). Il aboutit à l'extérieur par un pore génital. Chez les Ælosomatidés, les gonoductes sont absents et leur fonction est remplie par les néphridies.

Reproduction

Reproduction sexuée. L'accouplement a lieu entre deux individus *protérandriques,* c'est-à-dire chez lesquels les spermatozoïdes sont déjà formés, mais dont les œufs n'ont pas encore atteint leur maturité. Les deux individus s'unissent par la face ventrale du clitellum, tête-bêche, de telle sorte que le pore génital mâle d'un des partenaires corresponde au pore femelle de l'autre et réciproquement. Les spermatozoïdes de chaque individu, accumulés dans les spermathèques, passent dans les réceptacles séminaux de l'autre, qui sont de simples invaginations du tégument. Chacun des clitellums sécrète une ceinture de mucus ainsi que le cocon qui contient les œufs. Le développement est direct et aboutit à un jeune ressemblant à l'adulte.

Reproduction asexuée. De nombreux Limicoles se reproduisent par scissiparité (division transversale du corps), selon deux types principaux : l'*architomie,* où l'ensemble des phénomènes de régénération se déroule après la division du corps en segments égaux ou *schizozoïtes,* et la *paratomie,* où la séparation des schizozoïtes est précédée d'une régénération.

Écologie

Les Oligochètes se nourrissent de détritus organiques variés et vivent dans les eaux marines ou douces et dans le sol humide. Les types prédateurs sont exceptionnels ainsi que les parasites. Du point de vue agricole, les Oligochètes terricoles sont très importants : ils vivent dans le sol et ingurgitent une grande quantité de terre. L'action exercée par les lombrics sur le sol est aussi bien mécanique que chimique. En effet, leurs mouvements ameublissent le sol. Du point de vue chimique, on a démontré que la terre passant par leur tube digestif s'enrichit en substances nécessaires au développement des Végétaux. Ce sont les lombrics qui produisent la plus grande quantité d'humus recouvrant la surface terrestre.

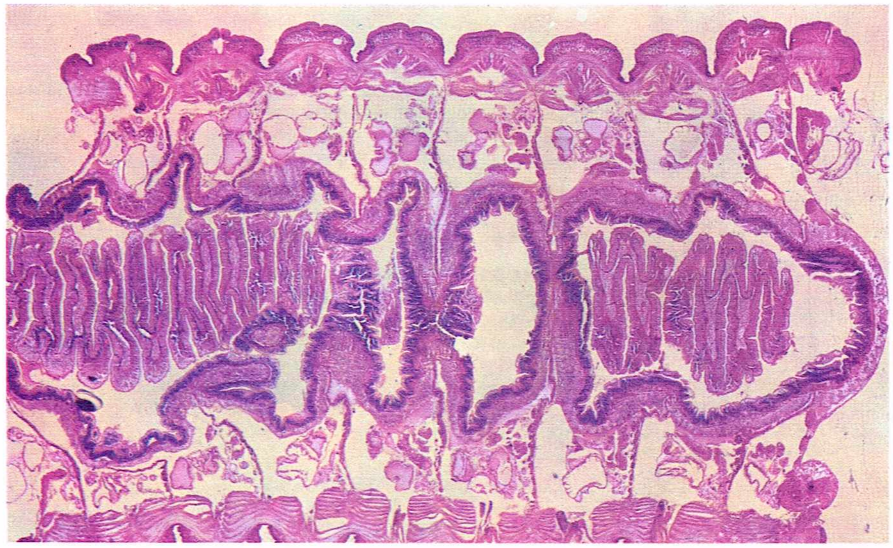

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Coupe longitudinale d'une partie de lombric, mettant en évidence les métamères.***

SYSTÉMATIQUE

La classification la plus souvent adoptée divise les Oligochètes en quatre ordres, d'après la position des pores mâles par rapport aux segments testiculaires et la situation des spermathèques par rapport à la région des gonades.

Ordre des Plésiopores plésiothèques

Les pores mâles sont situés sur le segment qui suit le segment testiculaire et les spermathèques sont absentes ou se trouvent dans la région des segments génitaux.

Les **Æolosomatidés** *(Aeolosoma, Potamodrilus)* ne dépassent pas 5 mm de longueur. Ils sont limicoles et répandus dans tous les continents. Ils se reproduisent surtout par multiplication asexuée.

▼ ***A gauche, coupe transversale d'un lombric, au niveau des gonades. A droite, représentation schématique d'une coupe transversale d'Oligochète : vd, vaisseau dorsal; cg, tissu chloragogène; cu, cuticule; mc, muscles circulaires; nph, néphridies; ms, muscles des soies; si, soies; vv, vaisseau ventral; cn, chaîne nerveuse; so, somatopleure; ml, muscles longitudinaux; ep, épiderme; coe, cœlome, ty, typhlosolis; in, intestin.***

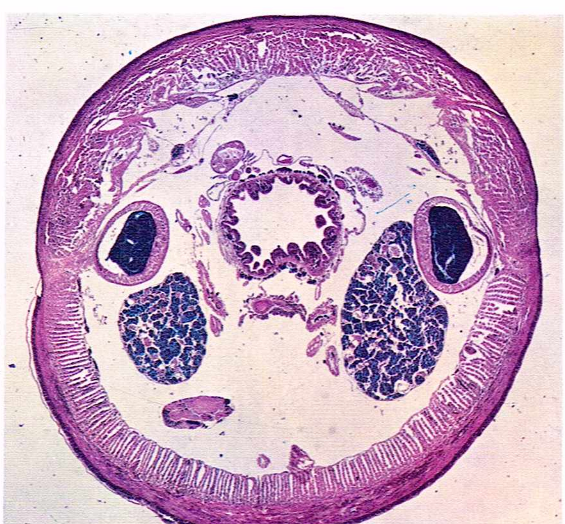

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

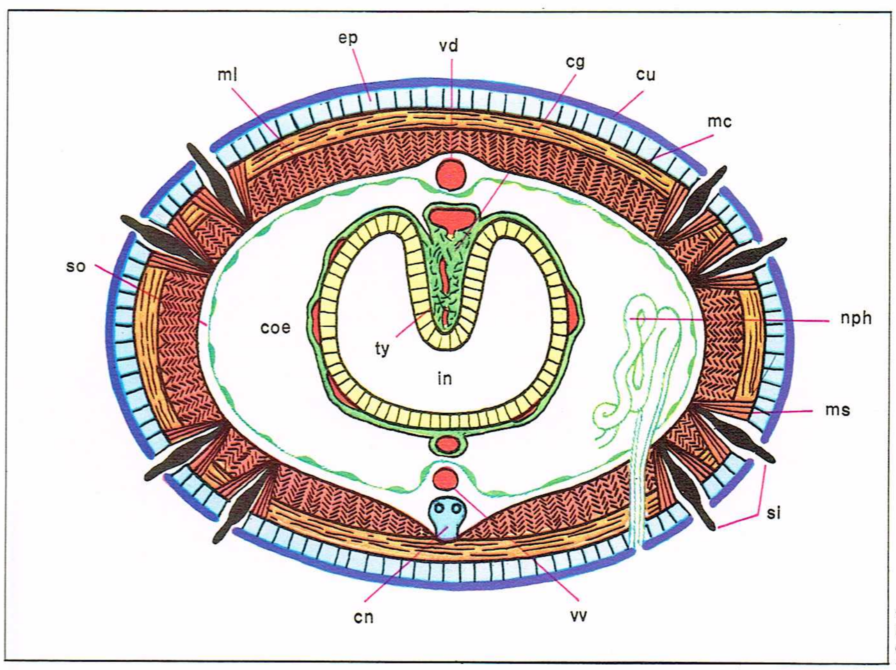

I.G.D.A.

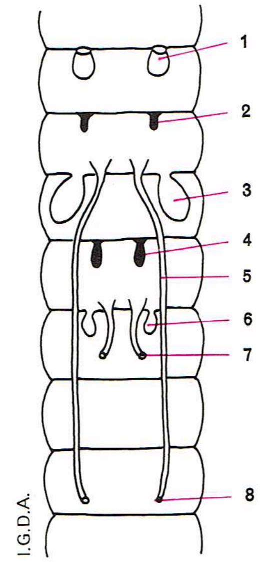

▲ *Schéma de l'appareil génital d'un Oligochète : 1, spermathèque; 2, testicules; 3, vésicule séminale; 4, ovaire; 5, canal déférent; 6, réceptacle des œufs; 7, orifice génital femelle; 8, orifice génital mâle.*
▶ *Représentation schématique de* Hirudo medicinalis *en vue dorsale (à gauche) et ventrale (à droite); ye, yeux; an, anus; vp, ventouse postérieure; va, ventouse antérieure; pgm, pore génital mâle; pgf, pore génital femelle.*
▼ *Coupe transversale schématique du corps d'une Hirudiné : sd, sinus cœlomique dorsal; ep, épiderme; cu, cuticule; mc, muscles circulaires; ml, muscles longitudinaux; sc, sinus cœlomique; nph, néphridie; sv, sinus cœlomique ventral; cn, chaîne nerveuse; tb, tissu botryoïdal; md, muscle dorso-ventral; in, intestin.*

Les **Naïdidés,** avec les genres *Chaetogaster, Pristina,* et *Nais,* sont également de petite taille et vivent en eau douce. La multiplication asexuée, fréquente, a lieu presque toujours par paratomie avec formation de chaînes. Les *Chaetogaster* sont prédateurs.

Les **Tubificidés,** avec *Tubifex* et *Branchiura,* sont des petits Oligochètes limicoles, de couleur généralement rougeâtre, toujours aquatiques.

Ordre des Plésiopores prosothèques

Les pores mâles sont localisés sur le segment qui suit le segment des testicules, et les spermathèques sont situées très en avant des organes génitaux.

Cet ordre ne comporte que la famille des **Enchytræidés,** dont la répartition géographique est mondiale. Ces Oligochètes, généralement terrestres ou littoraux, comprennent les genres *Enchytraeus, Pachydrilus* et *Parergodrilus.*

Ordre des Prosopores

Les pores mâles sont situés dans le même segment que les testicules correspondants, ou dans celui de la dernière paire de testicules.

Les **Lumbriculidés** comptent de nombreuses espèces dulçaquicoles, surtout communes dans les régions froides et tempérées de l'hémisphère Nord. Les genres les plus importants sont *Lumbriculus* et *Agriodrilus.*

Les **Branchiobdellidés** ne possèdent pas de soies et leurs derniers segments sont transformés en ventouse. Ils vivent en ectoparasites ou en ectocommensaux de Crustacés d'eau douce.

Ordre des Opisthopores

Les pores mâles sont situés en général plus d'un segment en arrière de la dernière paire de testicules. Il n'y a jamais de multiplication asexuée. On les divise en trois séries suivant leur *chétotaxie* (distribution des soies) et leurs organes génitaux. Nous les évoquerons brièvement.

Les *Haplotaxina* englobent des formes primitives qui vivent dans les eaux douces et les fissures de sols très humides.

Les *Lumbricina* renferment la plupart des Vers de terre avec les genres *Eisenia, Allolobophora, Lumbricus* (famille des Lumbricidés) et la famille des Glossoscolécidés avec *Thamnodrilus.* Ils sont très répandus, surtout dans les régions tropicales.

Les *Megascolecina* forment l'ensemble le plus riche en espèces d'Oligochètes. Les soies sont souvent nombreuses, disposées en ceinture autour du corps *(Pheretima). Megaloscolides australis,* de l'hémisphère Sud, atteint parfois plus de 3 m de long.

HIRUDINEA

Les Hirudinés sont des Annélides libres ou ectoparasites, encore appelées Sangsues, généralement dulçaquicoles, mais aussi terrestres ou marines. Elles ne portent ni parapodes ni soies. L'extrémité antérieure est modifiée en ventouse buccale et l'extrémité postérieure porte une ventouse discoïdale. Le nombre des segments du corps est constant, mais ne correspond pas aux annelures externes. Les Hirudinés sont hermaphrodites et les individus matures possèdent un clitellum.

Ces Animaux mesurent généralement quelques centimètres de longueur et leur coloration est variable; la couleur peut changer à la suite de divers stimuli.

Organisation générale

La *paroi du corps.* L'épiderme, monostratifié, recouvert par une cuticule plus ou moins épaisse selon les régions du corps et les espèces, est interrompu par de petits orifices correspondant aux glandes cutanées. Sous l'épiderme se trouve une couche de tissu conjonctif qui forme le derme, riche en glandes mucipares. La musculature est très développée : il existe des muscles circulaires, longitudinaux et dorso-ventraux.

La *cavité du corps* est un cœlome réduit, formé par un système compliqué de lacunes, et plus ou moins étouffé par le développement du cœlenchyme qui est un tissu de remplissage appelé tissu *botryoïdal* auquel on attribue le même rôle que le tissu chloragogène des Oligochètes.

L'*appareil digestif* est composé de trois parties. La partie antérieure, d'origine ectodermique, comporte la cavité buccale, le pharynx et l'œsophage. Certaines Hirudinés possèdent une trompe dévaginable (Rhynchobdelles); les autres sont munies soit de trois mâchoires dentées (Gnathobdelles), soit d'un puissant pharynx (Pharyngobdelles). La région moyenne, ou estomac, d'origine endodermique, est accompagnée de cæcums

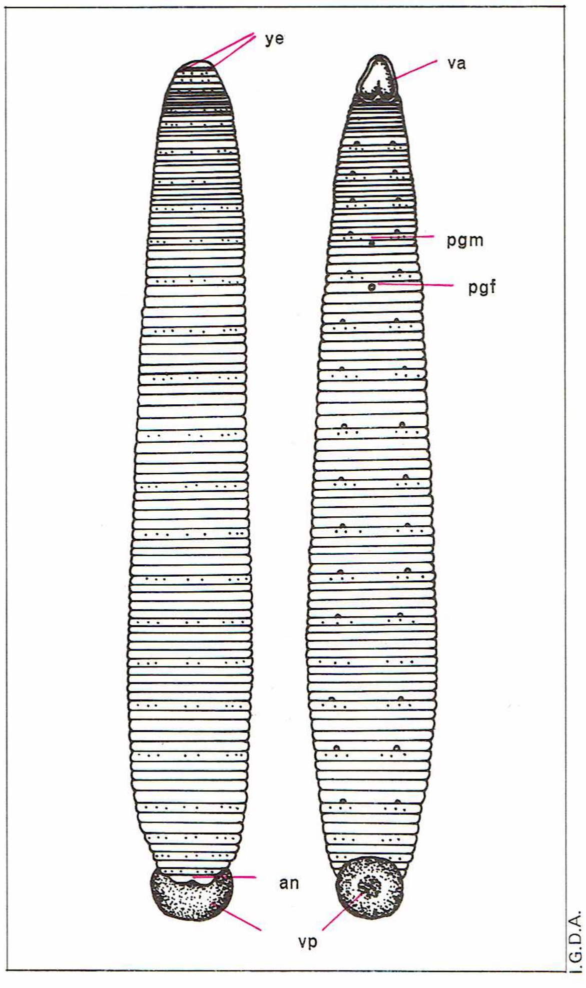

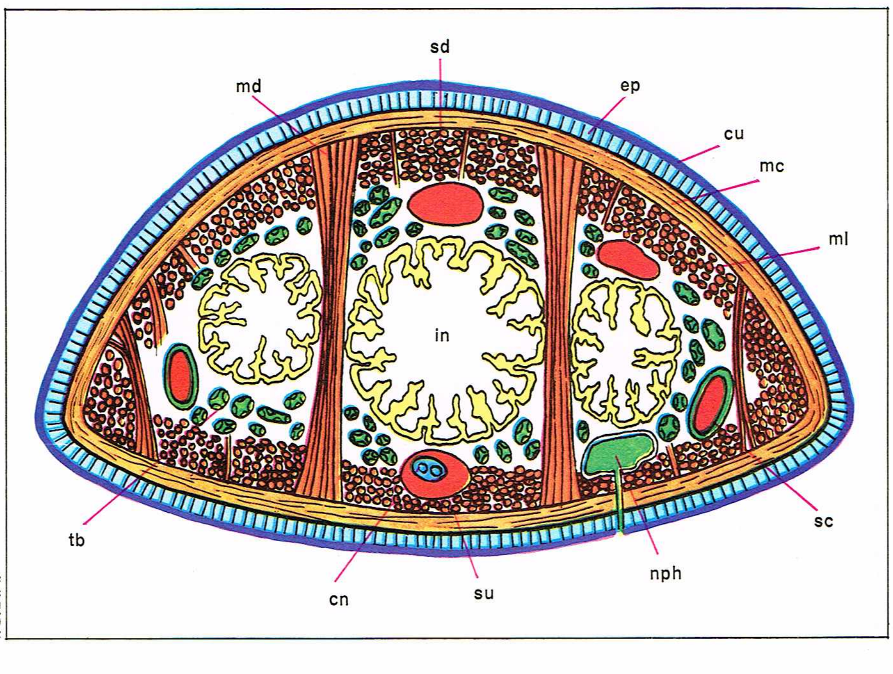

portant des valvules où séjourne le sang ingéré. La région terminale, également d'origine endodermique, est celle où a lieu la digestion; elle se termine par un canal rectal qui débouche à l'anus dorsal.

Système nerveux et organes des sens. Le système nerveux est plus complexe que celui des autres Annélides. On y distingue un système nerveux central comprenant une masse péripharyngienne, une chaîne ventrale à *neuromères* distincts, une masse postérieure de neuromères accolés au niveau de la ventouse postérieure, un système nerveux périphérique constitué par les nerfs qui partent du système nerveux ventral et qui innervent les viscères et les téguments et un système sympathique. Les organes des sens sont représentés par des yeux céphaliques, des papilles sensitives tégumentaires et segmentaires et des cellules tactiles.

Système circulatoire. Chez les Rhynchobdelles, il existe un système vasculaire clos à paroi contractile consistant essentiellement en un vaisseau dorsal et un vaisseau ventral réunis aux deux extrémités du corps par un certain nombre d'anses vasculaires. Le sang, souvent incolore, constitué de plasma et de quelques amibocytes à rôle phagocytaire, y circule toujours dans la même direction. Chez les Arhynchobdelles, il n'y a pas d'appareil circulatoire : le système cœlomique se transforme partiellement en vaisseaux et la lymphe acquiert physiologiquement le rôle du sang. Le système lacunaire peut contenir de l'hémoglobine en solution.

Respiration. Il n'existe généralement pas d'appareil respiratoire, les échanges gazeux s'effectuant à travers l'épiderme. Certaines espèces, parasites de Poissons marins, portent des replis cutanés qui, physiologiquement, paraissent avoir la valeur de branchies.

L'*appareil excréteur* est constitué par quatorze à dix-sept paires de néphridies métamériques munies d'un néphrostome cilié s'ouvrant dans le sinus cœlomique médio-ventral et suivi d'une capsule mésodermique contenant des éléments phagocytaires. La capsule est associée à un néphridium ectodermique parcouru par le canal néphridial qui s'ouvre au néphridiopore. Chez les Hirudinés supérieures, le tissu botryoïdal joue le rôle de rein d'accumulation.

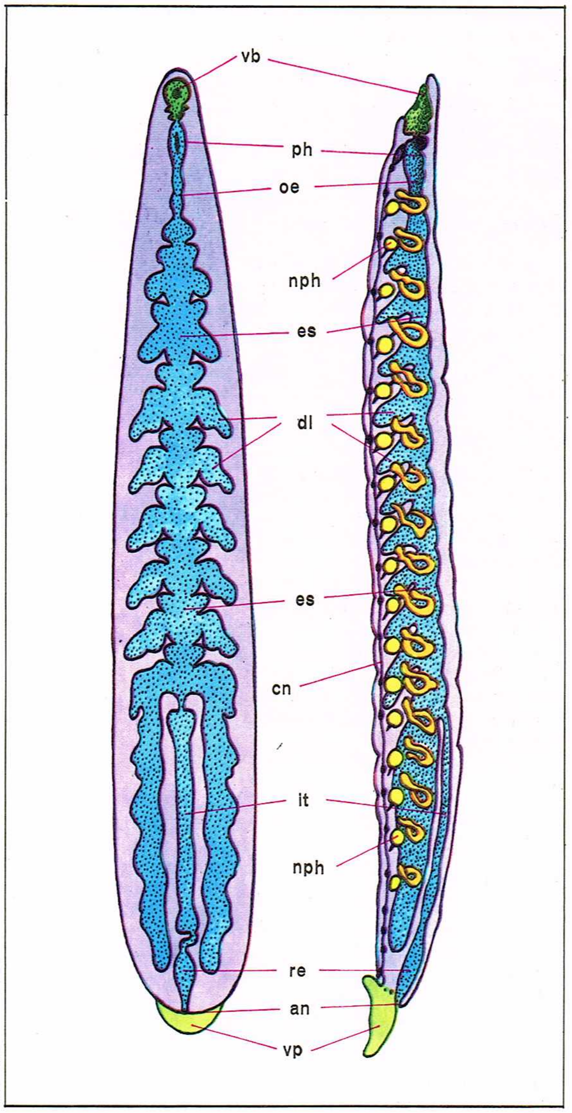

◀ *Schéma de l'appareil digestif de la Sangsue commune; à gauche, en vue dorsale, à droite, en vue latérale; vb, ventouse buccale; ph, pharynx, oe, œsophage; nph, néphridie; es, estomac; di, diverticules de l'estomac; cn, chaîne nerveuse; it, intestin terminal; re, rectum; an, anus; vp, ventouse postérieure.*

Appareil génital. Toutes les Sangsues sont hermaphrodites. Les organes génitaux s'ouvrent médio-ventralement, dans la région clitellienne, sur les segments dix et onze. L'appareil génital mâle se compose d'un nombre variable de testicules disposés métamériquement et reliés par un canal efférent au canal déférent situé de chaque côté du corps. Celui-ci s'élargit en avant en vésicule séminale et se termine en canal éjaculateur. Les deux canaux éjaculateurs aboutissent à l'atrium, qui, dans les genres à organes copulateurs, se continue par un pénis exsertile. Il y a un seul orifice mâle, toujours situé en avant de l'orifice femelle. L'appareil génital femelle consiste en une seule paire d'ovaires contenus dans les ovisacs (sacs cœlomiques allongés). Il en part deux courts oviductes qui confluent dans un vagin s'ouvrant par le pore génital femelle.

Reproduction

La reproduction est uniquement sexuée et l'accouplement peut avoir lieu de deux façons différentes, soit par implantation de spermatophores dans la paroi du conjoint (fécondation hypodermique), la fécondation étant alors réciproque, soit par introduction du pénis d'un des partenaires dans le vagin de l'autre; la fécondation est alors unilatérale. Les œufs fécondés sont pondus dans des cocons de consistance variable qui contiennent souvent un liquide albumineux servant de nourriture à l'embryon. La segmentation est de type spiral et le développement est direct.

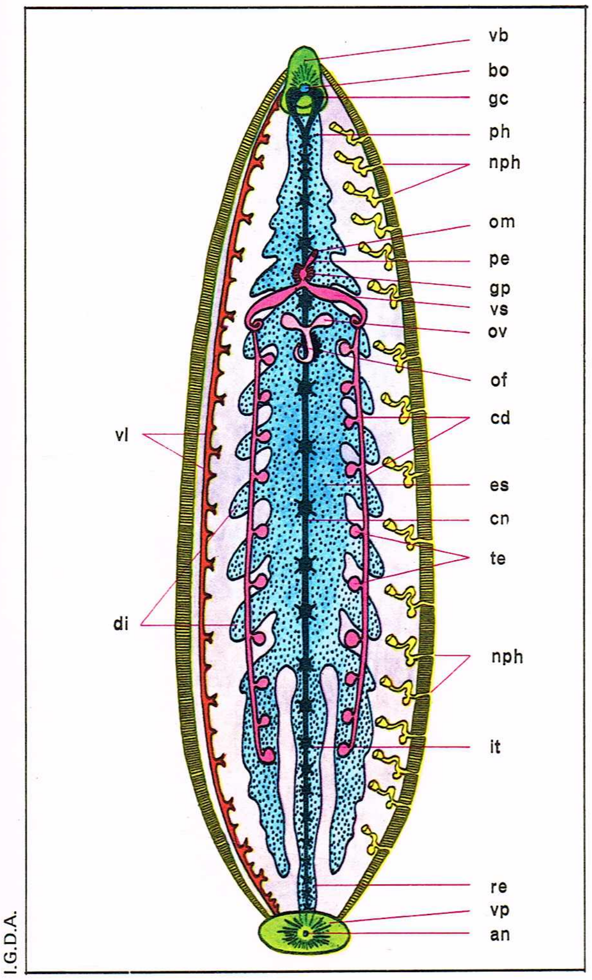

◀ *Organisation interne d'une Hirudiné : vb, ventouse buccale; bo, bouche; gc, ganglion cérébroïde; ph, pharynx; nph, néphridies; om, orifice génital mâle; pe, pénis; gp, glande prostatique; vs, vésicule séminale; ov, ovaire; of, orifice génital femelle; cd, canal déférent; es, estomac; cn, chaîne nerveuse; te, testicules; it, intestin terminal; re, rectum; vp, ventouse postérieure; an, anus; vl, vaisseau latéral; di, diverticules de l'estomac.*

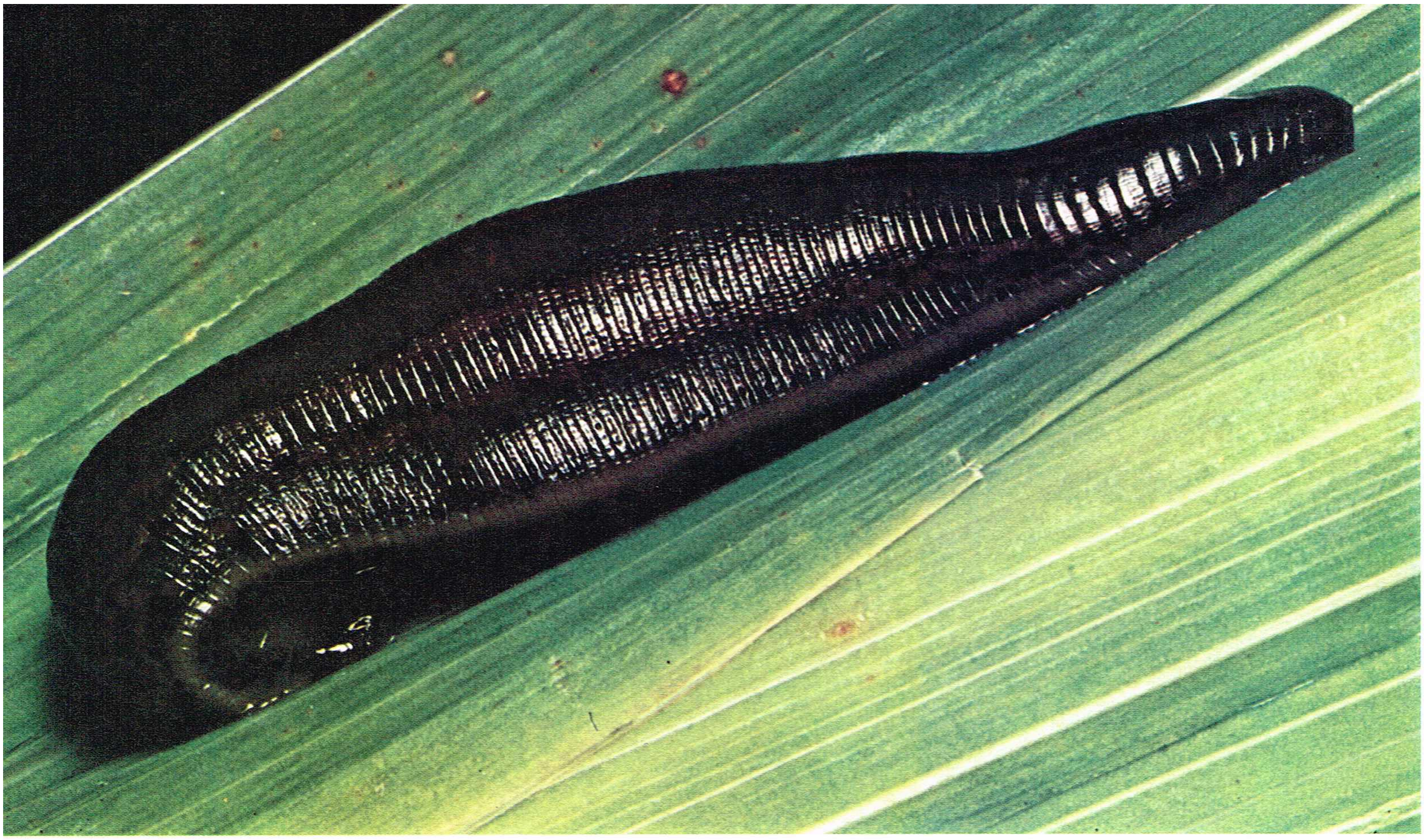

Photo J. Six

▲ *Les Sangsues (ici* **Hirudo medicinalis)** *se déplacent en fixant alternativement leurs ventouses, mais elles peuvent aussi nager.*

Écologie. Parasitologie

Les Hirudinés peuplent la plupart des milieux aquatiques, où les facteurs limitatifs paraissent être la température et la forte acidité des eaux. La majorité d'entre elles sont strictement sanguinivores, mais un certain nombre sont prédatrices ; elles possèdent toutes une extraordinaire résistance au jeûne. Les Rynchobdelles perforent les téguments de leurs victimes à l'aide de leur trompe et les Gnathobdelliformes le font grâce à leurs mâchoires. Le sang est rendu incoagulable par l'*hirudine,* substance sécrétée par les glandes buccales ; l'hémorragie est donc durable chez la victime. Les Sangsues sont habituellement des parasites temporaires qui abandonnent leur hôte après le repas, mais certaines espèces se fixent à demeure sur leur victime. Les Sangsues ont également une grande importance en parasitologie du fait des parasites qu'elles renferment. Ces derniers peuvent leur être propres ou continuer leur évolution dans un autre hôte. La Sangsue sert alors d'hôte intermédiaire.

SYSTÉMATIQUE

Les Hirudinés sont divisées en quatre ordres :

Ordre des Acanthobdelliformes

Cet ordre ne comprend qu'un seul genre, *Acanthobdella,* et une seule espèce, *A. peledina,* parasite des Poissons Salmonidés du lac Baïkal. Elle est particulièrement intéressante, car elle présente un certain nombre de caractères communs avec les Oligochètes, notamment la présence de soies sur le corps et l'absence de ventouse antérieure.

Ordre des Rhynchobdelliformes

Ce sont des Sangsues à trompe évaginable avec un système vasculaire développé. Il n'y a pas d'espèces terrestres. On distingue deux familles. Les *Glossiphoniidés* sont dulçaquicoles et parasitent des Mollusques et des Amphibiens. On y trouve les genres *Marsupiobdella, Glossiphonia* et *Haementeria*. Les *Piscicolidés* vivent aussi bien dans les eaux douces qu'en mer et sont essentiellement parasites de Poissons. Les genres sont *Piscicola, Pontobdella* et *Cystobranchus*.

Ordre des Gnathobdelliformes

Ce sont des Sangsues aquatiques ou terrestres dont le pharynx est armé en général de trois mâchoires dentées. Il n'y a pas de système vasculaire distinct du cœlome ni de spermatophores. On y distingue deux familles : les *Hirudinés* et les *Hæmadipsidés*. Chez les Hirudinés, *Hirudo medicinalis* est carnivore à l'état juvénile alors que l'adulte se nourrit du sang des Mammifères.

Ordre des Pharyngobdelliformes

Ce sont des Sangsues qui habitent les eaux douces ou la terre humide et sont essentiellement prédatrices. Le pharynx est peu musclé, sans mâchoires, mais très long. L'ordre comprend cinq familles ; citons le genre *Erpobdella,* qui se nourrit de Mollusques et de Planaires.

BIBLIOGRAPHIE

AVEL M., *Classe des Annélides Oligochètes,* in GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie,* t. V, fasc. 1, p. 224 à 470, Paris, 1959. - BEAUCHAMP P. de, *Archiannélides,* in GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie,* t. V, fasc. 1, p. 197 à 223, Paris, 1959. - DAWYDOFF C., *Ontogenèse des Annélides,* in GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie,* t. V, 1, p. 594 à 686, Paris, 1955. - FAUVEL P., *Polychètes errantes,* in *Faune de France,* 5, p. 1 à 488, Paris, 1923 ; *Polychètes sédentaires,* in *Faune de France,* 16, p. 1 à 494, Paris, 1927 ; *Classe des Annélides Polychètes,* in GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie,* t. V, 1, p. 13 à 196, Paris, 1955. - HARANT H. et GRASSÉ P.-P., *Classe des Annélides achètes ou Hirudinés ou Sangsues,* in GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie,* t. V, fasc. 1, Paris, 1959. - HARTMAN O., *Catalogue des Annélides Polychètes du monde* (Catalogue of Polychaetous Annelids of the World), I et II, Allan Hancock Found. Publ. Occas. Paper, n° 23, p. 1 à 628, 1959. - LASSERRE P., *Oligochaeta. Taxonomy and Ecology, Smith Contr. Zool.,* 76, p. 71 à 90, 1971. - MICHAELSEN W., *Oligochètes. Das Tierreich,* 10. Lieferung. *Fredländer,* 575 p., Berlin. - REMANE A., *Archiannelida. Tierwelt der Nord und Ostsee.* 6 (1), p. 1 à 36, 1932 - STEPHENSON J., *The Oligochaeta.* Oxford Univ. Press, 978 p., 1930. - STOLTE H.A., *Oligochaeta. Bronns Klass u. Ordn. d. Tierreichs,* 4 Band, 3 Ableilung, 3 Buch, 1933-1955.

Les groupes des Myzostomides, Sipunculiens et Échiuriens, aux affinités incertaines avec les autres phylums, ne peuvent s'y rattacher et forment trois classes indépendantes.

MYZOSTOMIDES

Ce sont des Métazoaires mesurant moins de 1 mm, à symétrie bilatérale, aplatis dorso-ventralement, sans accroissement pygidial, mais présentant une certaine métamérie. Ils ont cinq paires de parapodes munis de soies. La bouche possède le plus souvent une trompe protractile.

Les Myzostomides sont des hermaphrodites protérandriques ; l'insémination est réalisée par l'implantation de spermiophores dans la peau. Les œufs mûrissent et sont fécondés dans la cavité cœlomique dorsale. L'œuf donne naissance à une larve trochophore qui subit une métamorphose peu marquée.

Ces organismes marins sont parasites ou commensaux d'Échinodermes et comptent sept genres.

BIBLIOGRAPHIE

JAGERSTEN G., *Zur Kenntis der Morphologie, Entiwicklung und Taxonomie der Myzostomida,* in *Nova acta Regiae Societ. Scient. Uppsaliensis* (4) vol. 11, nº 8, 84 p., 1940. - PRENANT M., *Classe des Myzostomides,* in GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie,* t. V, fasc. 1, p. 714-784, Paris, 1959.

SIPUNCULIDEA

Ce sont des Animaux exclusivement marins dont l'habitat est varié : sable fin, vaseux ou grossier, fentes de rochers, etc. Leur distribution verticale est très vaste, car elle s'étend de la zone intertidale jusqu'aux profondeurs océaniques. Certaines espèces sont cosmopolites, d'autres prédominent dans les zones arctiques et indo-pacifiques.

Leur corps se compose de deux parties : la trompe, ou *introvert,* de longueur variable, située à l'extrémité antérieure, et le tronc. Sous l'action de muscles rétracteurs, l'introvert peut s'invaginer ou se dévaginer ; il porte souvent des crochets. La bouche, située à l'extrémité de l'introvert, est entourée par des tentacules. L'anus s'ouvre à la base de l'introvert en position antéro-dorsale.

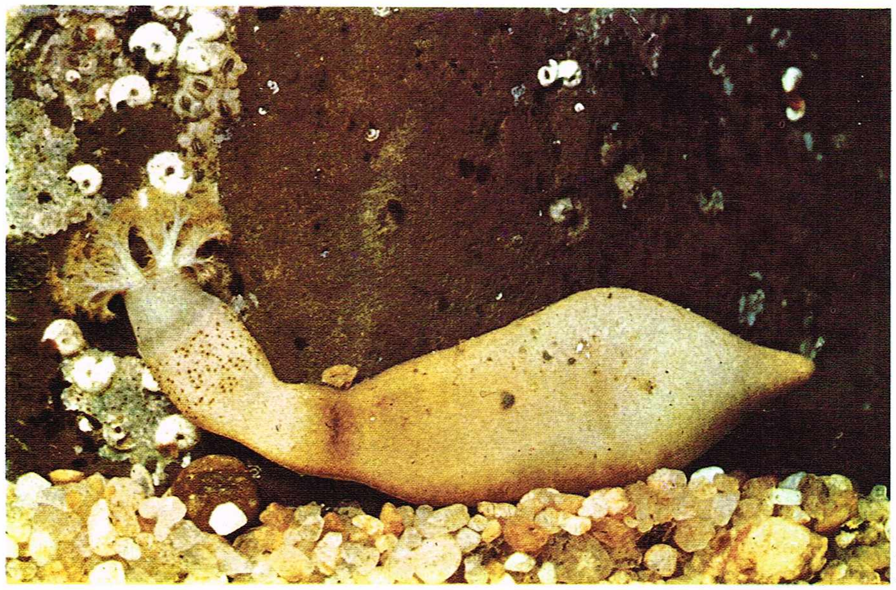

J. H. Tashjian

▲ **Dendrostomum sp,** ***un Sipunculien sur lequel on peut observer la trompe dévaginée munie de tentacules.***

La *paroi du corps* est constituée par une cuticule souvent épaisse, un épiderme monostratifié, un derme d'épaisseur variable renfermant de très nombreux corpuscules glandulaires et sensitifs, et enfin une tunique musculaire avec une couche externe de muscles circulaires et une couche interne de muscles longitudinaux.

La *cavité du corps* est un cœlome tapissé d'un épithélium cilié et renferme tous les organes essentiels. Le liquide cœlomique contient des hématies, des leucocytes, des urnes (cellules glandulaires ciliées), des vésicules dites « énigmatiques » et des cellules sexuelles.

Système nerveux et organes des sens. Le système nerveux comprend un cerveau dorsal bien développé, un collier péri-œsophagien et une chaîne nerveuse ventrale courant tout le long du corps et émettant des nerfs latéraux. Les organes des sens comportent des terminaisons tactiles nombreuses sur la trompe, un organe frontal et un organe nucal pair exerçant une fonction olfactive.

L'*appareil excréteur* se compose d'une ou deux néphridies qui s'ouvrent dans le cœlome par un pavillon cilié et communiquant avec l'extérieur par un néphrostome. Il existe également des cellules péritonéales excrétrices, les chloragogènes. L'appareil circulatoire n'est pas différencié.

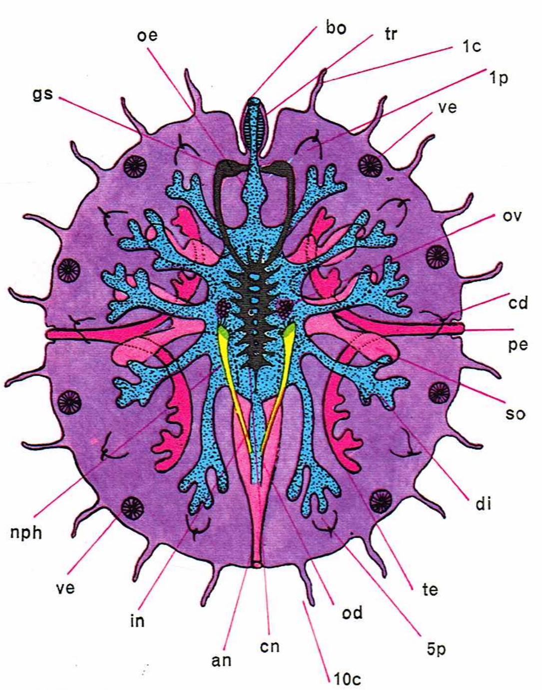

I.G.D.A.

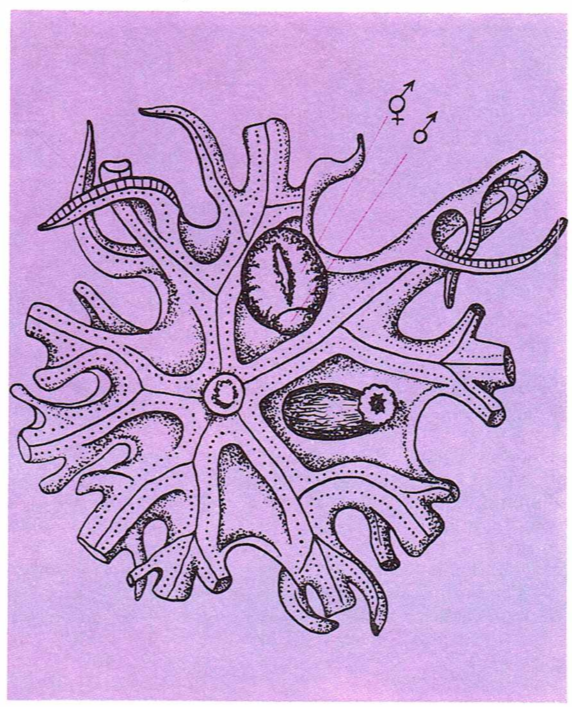

I.G.D.A.

◀ ***A gauche, représentation schématique d'un Myzostomide, vu par la face ventrale : bo, bouche ; tr, trompe ; 1c, premier cirre ; 1p, premier parapode ; ve, ventouse ; ov, ovaire ; cd, canal déférent ; pe, pénis ; so, sac ovarien ; di, diverticule intestinal ; te, testicule ; 5p, cinquième parapode ; od, oviducte ; 10c, dixième cirre ; cn, chaîne nerveuse ventrale ; an, anus ; in, intestin ; nph, néphridie ; gs, ganglion supra-œsophagien ; oe, œsophage. A droite, un Myzostomide,*** **Myzostomum glabrum,** ***sur un Crinoïde du genre*** **Antedon** ***; un adulte hermaphrodite est accouplé à un jeune en phase mâle.***

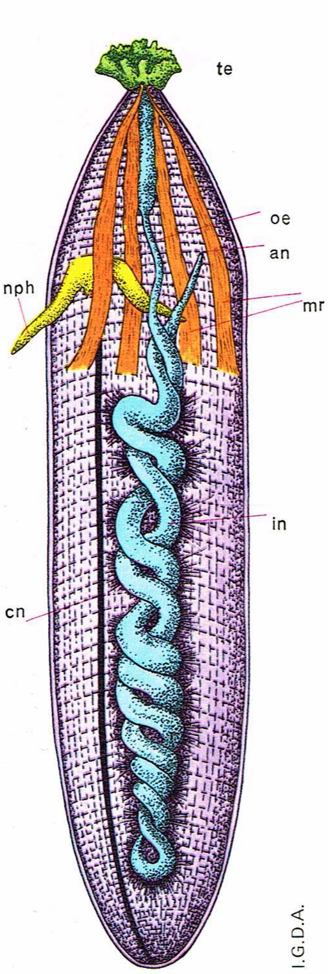

▲ *Schéma de l'organisation d'un Sipunculien,* Sipunculus nudus : *te, tentacules; oe, œsophage; an, anus; mr, muscles rétracteurs des tentacules; in, intestin; nph, néphridie; cn, cordon nerveux.*

L'*appareil digestif* est libre dans le cœlome, fixé seulement à la paroi du corps par quelques brides mésentériques. Entre la bouche et l'anus il comprend un œsophage cilié, un intestin qui décrit d'abord une spire descendante puis se recourbe et remonte en une spire ascendante, et enfin un rectum.

Appareil reproducteur et développement. Les sexes sont séparés; la paire de gonades est insérée à la base des muscles rétracteurs ventraux. Les produits génitaux sont évacués par le pore néphridial. La segmentation, de type spiral, produit une gastrula qui donne naissance à une larve trochophore qui passe au stade adulte après une métamorphose très complexe.

Les Sipunculiens comprennent environ deux cent cinquante espèces réparties en treize genres. Citons, entre autres, *Sipunculus nudus,* long de plus de 30 cm, qui vit dans le sable du littoral, et *Golfingia,* qui est cosmopolite.

BIBLIOGRAPHIE

CUÉNOT L., *Sipunculiens, Échiuriens, Priapuliens,* in *Faune de France,* 4, 29 p., 1922. - FISHER W. K., *The Sipunculid Worms of California and Baja California,* in *Proc. U.S. Nat. Mus.,* 102, p. 350-371, 1952. - HYMAN L., *The Invertebrates. Acanthocephales Aschelminthes and Entoprocta,* vol. III, New York, 1951. - TÉTRY A., *Classe des Sipunculiens,* in GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie,* t. 5, fasc. 1, p. 785-854, Paris, 1959.

ECHIURIDA

Les Échiuriens sont des organismes marins et benthiques qui vivent dans la vase ou le sable ou dans les fentes de rochers. Leur corps est divisé en deux régions : la trompe et le tronc. La trompe est parfois très extensible, mais jamais rétractile à l'intérieur du tronc; ses bords latéraux forment une gouttière à concavité ventrale qui se ferme près du point d'insertion de la trompe sur le tronc et donne ainsi un canal qui aboutit à la bouche. Le tronc est pourvu d'un appareil sétifère formé de un ou de deux groupes de soies.

La *paroi du corps* est constituée par trois couches : la cuticule, très mince, l'épiderme, monostratifié, et le *cutis,* qui contient de nombreuses cellules pigmentaires et ganglionnaires. La tunique musculaire comporte des muscles circulaires appliqués contre le cutis, puis d'autres longitudinaux et enfin des obliques.

La *cavité du corps* est un cœlome limité à la région thoracique et tapissé par un épithélium péritonéal; il contient tous les viscères. Le liquide cœlomique est riche en cœlomocytes chargés d'hémoglobine, d'amibocytes et de cellules reproductrices.

Système nerveux et organes des sens. Le système nerveux ne comporte pas, chez l'adulte, de ganglions cérébroïdes, mais seulement un collier péri-œsophagien et un cordon médio-ventral. Les organes des sens, très primitifs, sont représentés par de simples terminaisons nerveuses cutanées.

L'*appareil excréteur* est représenté, chez l'adulte, par des organes segmentaires (homologues de ceux des Annélides) servant aussi de gonoductes et par deux néphridies modifiées : les sacs anaux; elles sont entrées en relation, secondairement, avec l'intestin terminal.

L'*appareil circulatoire* est clos et muni d'un organe propulseur central. Il est construit sur le plan de celui des Annélides et ne communique pas avec le cœlome. Il n'y a pas d'appareil respiratoire. Les échanges gazeux se font à travers le tégument.

L'*appareil digestif* a la forme d'un tube cylindrique. On y distingue trois régions. La région stomodéale est divisée en vestibule buccal, pharynx, œsophage et estomac. L'intestin, tube extrêmement long, porte une gouttière ciliée sur sa ligne médio-ventrale et sa partie médiane est doublée d'un intestin accessoire, ou siphon. Enfin, le rectum débouche à l'anus terminal.

L'*appareil reproducteur et le développement.* Les sexes sont séparés; la gonade est impaire et située dans la région postérieure du tronc en position médio-ventrale. Les cellules germinales tombent dans la cavité cœlomique, où elles poursuivent leur développement. La fécondation est externe et la segmentation de type spiral donne une larve trochophore. Le dimorphisme sexuel est très accentué chez *Bonellia viridis* et porte non seulement sur la taille (le mâle a de 1 à 3 mm de long, d'où le nom de mâles pygmées, et la femelle plus de 1 m), mais aussi sur la morphologie (absence de trompe) et l'anatomie (régression totale ou partielle de certains organes). Les mâles pygmées vivent en parasites soit sur le corps de la femelle, soit à l'intérieur de celui-ci.

Le petit groupe des Échiuriens comprend environ trente genres et quatre-vingts espèces. Outre *Bonellia,* genre fréquent dans nos mers, nous citerons, parmi les espèces les mieux connues, *Echiurus echiurus,* long d'environ 12 cm, commun sur les côtes de la mer du Nord, où il vit dans la vase.

BIBLIOGRAPHIE

DAWYDOFF C., *Classe des Échiuriens,* in GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie,* t. 5, fasc. 1, p. 855-907, Paris, 1959.

▶ *Une femelle de* Bonellia viridis : *le corps globuleux est à l'abri dans une anfractuosité de rocher, et seule dépasse la trompe; les femelles ont plus de 1 m de longueur, alors que les mâles appelés pygmées mesurent entre 1 et 3 mm.*

M. Sester - Pitch

LES « LOPHOPHORIENS »

Sous ce terme avaient été réunies un certain nombre de classes d'Animaux, caractérisées par la possession d'une couronne tentaculaire péribuccale, chaque tentacule étant recouvert de cils vibratiles dont les battements dirigent les particules alimentaires vers la bouche (le régime est microphage). Mais dans ce vaste embranchement qui réunissait une partie des groupes zoologiques dits mineurs, autrefois rassemblés sous le nom général de « Vermidiens » (terme lui aussi maintenant abandonné, car sans valeur systématique réelle), étaient classés des ensembles d'Animaux sans grandes affinités entre eux : Brachiopodes, Bryozoaires, Phoronidiens, Pogonophores, Ptérobranches.

Si les auteurs actuels continuent à reconnaître une certaine parenté entre les deux premiers et les classent encore parmi les Protostomiens, les deux derniers sont maintenant placés dans la lignée des Stomocordés et il semble qu'il doive en être de même des Phoronidiens. De ce fait, le terme de « Lophophoriens », auquel la plupart des zoologistes n'accordent plus guère de valeur systématique, n'est-il plus utilisé actuellement que par souci de commodité, comme un collectif servant à désigner l'ensemble de trois embranchements indépendants et apparentés d'une manière très imprécise : les Bryozoaires, les Brachiopodes et les Phoronidiens.

Ce sont des Animaux sédentaires, souvent fixés, protostomiens (ou, dans le cas des Phoronidiens, présentant un mélange de caractères de Protostomiens et de Deutérostomiens), cœlomates, à symétrie bilatérale. Le tube digestif, lorsqu'il est complet, est courbé en U. Lors de la reproduction sexuée, la larve, libre, nageante et ciliée, a toujours une morphologie et une organisation très différentes de celles de l'adulte et, après être tombée sur le fond, subit une métamorphose rapide, caractérisée par le rapprochement du pore anal de l'orifice buccal. Des analogies structurales ont permis de rapprocher les larves des « Lophophoriens » des trochophores d'Annélides, mais les affinités réelles, discutées, n'ont pas encore été établies. La plupart des « Lophophoriens » sont marins.

BIBLIOGRAPHIE

CUÉNOT L., *Phylogenèse du règne animal,* in GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie, anatomie, systématique, biologie,* I, 1, Paris, 1952. - EMIG C. C., *les Processus de l'ontogenèse comparés à ceux de la régénération des Phoronida, Z. Morph. Tiere,* Berlin, 1973. - NIELSEN C., *Entoproct Life-Cycles and the Entoproct-Ectoproct Relationship, Ophelia,* Elsingör, 1971.

▲ Par commodité, on regroupe encore les Bryozoaires dont un représentant figure ici, les Brachiopodes et les Phoronidiens sous le nom de « Lophophoriens », mais en fait il s'agit de trois embranchements apparentés d'une manière imprécise.

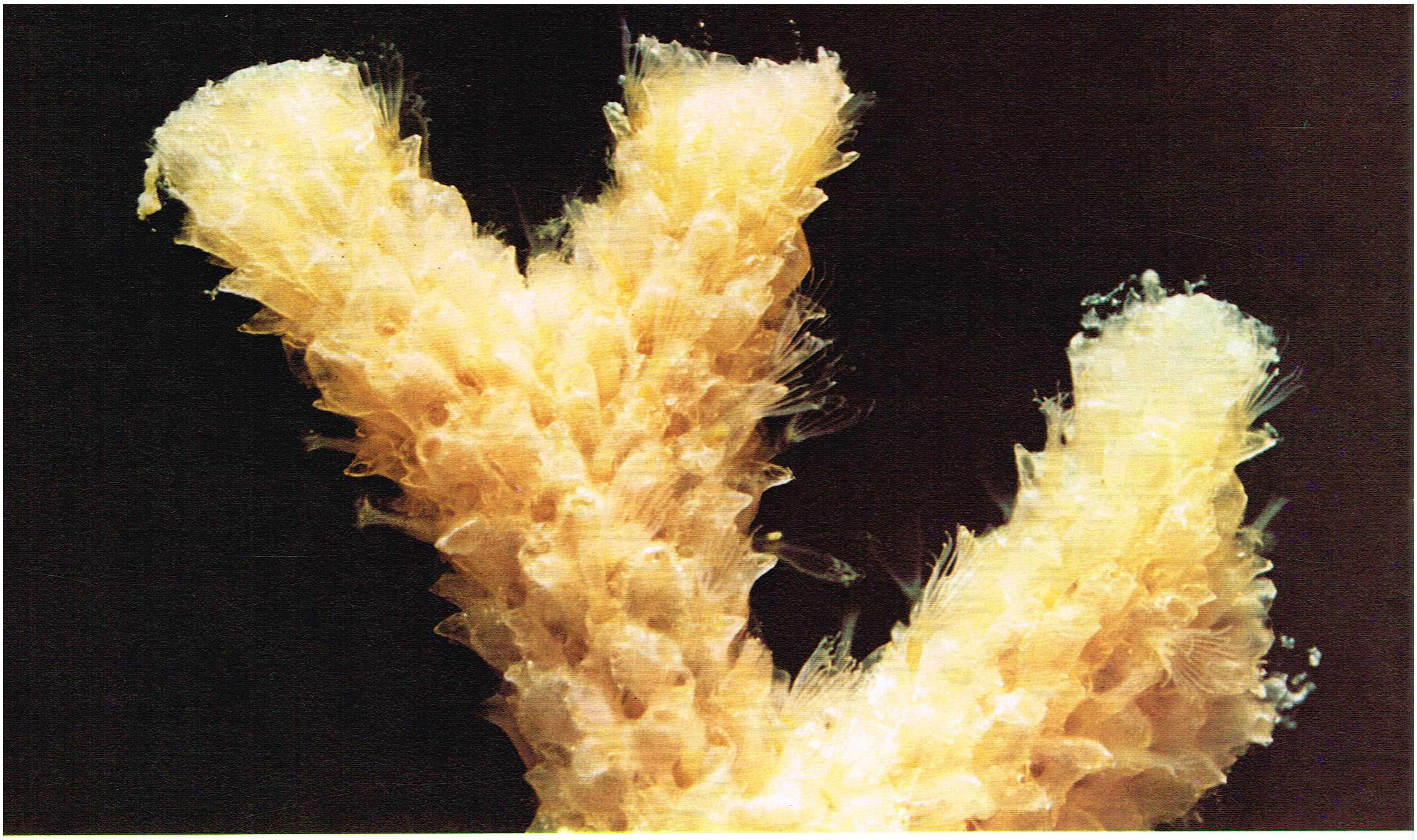

H. Chaumeton - Jacana

LES BRYOZOAIRES

▲ ***Organismes coloniaux, les Bryozoaires Ectoproctes forment des arbuscules dressés et ramifiés ou encore des plaques encroûtantes à la surface de supports divers.***

Le phylum des Bryozoaires groupe deux classes de Cœlomates Protostomiens séparées par les anciens zoologistes, et qui se sont récemment révélées devoir effectivement constituer un même embranchement : les Ectoproctes (classe *Bryozoa stricto sensu,* ou *Ectoprocta* ou *Polyzoa*) et les Entoproctes (classe *Entoprocta* ou *Kamptozoa*). Cet embranchement rassemble des espèces aquatiques de moins de 1 mm de longueur en général, pourvues d'une couronne de tentacules ciliés rétractiles portés par un lophophore commun. Le tube digestif est courbé en U.

ECTOPROCTES

Les Ectoproctes sont des organismes coloniaux et sessiles, formant des arbuscules dressés et ramifiés (fixés par des *rhizoïdes*) ou des plaques encroûtantes à la surface de supports divers. Chaque colonie ou *zoarium* est composée d'un nombre plus ou moins élevé de logettes ou *zoécies,* nées par bourgeonnement les unes des autres ; chaque zoécie abrite un individu ou *zoïde.* Les zoïdes sont formés de deux parties fondamentales, le cystide et le polypide. La description ci-après sera celle d'une zoécie normale ou autozoécie.

Le *cystide* est constitué par un épiderme doublé intérieurement d'une couche mésodermique comportant une musculature pariétale lisse, et extérieurement d'une paroi squelettique. Celle-ci est une sécrétion épidermique de nature chitinoïde ; il s'y adjoint parfois un dépôt de calcaire (carbonate de calcium), la calcification s'effectuant sous la cuticule. Très fréquemment, la surface zoéciale est ornée d'épines, de plaques calcifiées ou de perforations. L'ouverture de la zoécie est antérieure. La communication entre deux zoécies d'un même zoarium est assurée par de minuscules perforations, les « pores à rosettes » ; leur orifice est occupé par un groupe de cellules disposées d'une manière radiaire et affectant en perspective la forme d'un diabolo.

Le terme de *polypide* désigne l'ensemble des tissus de l'appareil digestif, la musculature rétractrice de l'individu et l'essentiel du système nerveux qui sont périodiquement susceptibles de dégénérer pour donner une formation particulière appelée le « corps brun ». Le polypide débute par la couronne de tentacules recouverts sur toute leur hauteur par une ciliature mobile dont le battement amène vers la bouche les particules alimentaires (débris organiques divers, petits Animaux ou Végétaux) ; ces tentacules ont une paroi ectodermique ; leur intérieur contient un diverticule du cœlome, rempli de cellules mésodermiques. Les tentacules se rattachent à une zone d'implantation, le lophophore, perforé en son centre par la bouche ; autour de la cavité buccale existe un anneau nerveux auquel est accolé un volumineux ganglion. Par ailleurs, le lophophore est relié à l'ouverture zoéciale par un cylindre membraneux emprisonnant les

EMBRANCHEMENT DES BRYOZOAIRES

Classe des Ectoproctes

- ☐ *Sous-classe des Gymnolaemates*
  - ○ *ordre des Eurystomes*
  - ○ *ordre des Cyclostomes*
- ☐ *Sous-classe des Phylactolaemates*

Classe des Entoproctes

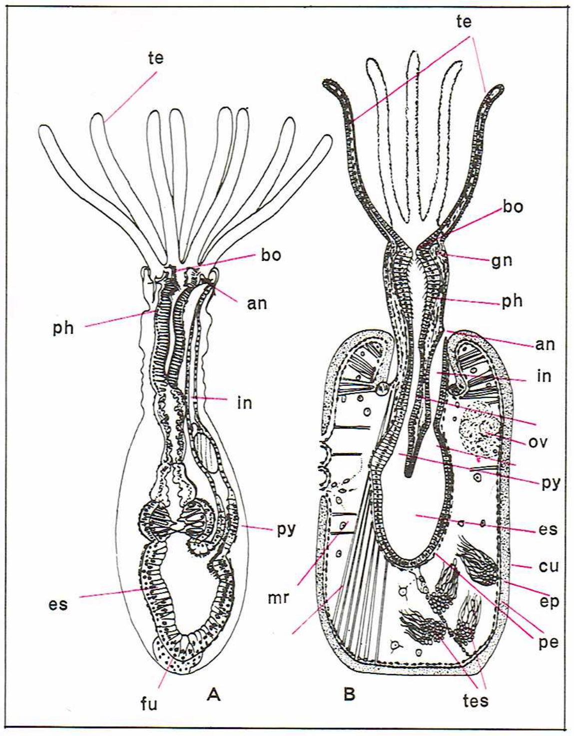

▲ *A gauche, représentation schématique de la structure d'un Bryozoaire (B) et détail de l'appareil digestif (A); par souci de clarté, le volumineux cæcum stomacal n'a pas été figuré. te, tentacules; bo, bouche; gn, ganglion nerveux; ph, pharynx; an, anus; in, intestin terminal (rectum); ov, ovaire; py, pylore; es, estomac; cu, cuticule; ep, épiderme pariétal; pe, péritoine; tes, testicules; mr, muscle rétracteur du polypide; fu, funicule. A droite, région marginale d'une colonie d'*Alcyonidium polyoum *montrant les diverses étapes de la différenciation de jeunes polypides; ceux-ci se présentent initialement sous l'aspect de saccules globuleux puis allongés, puis les tentacules et les diverses parties du tube digestif se différencient. L'accroissement de la colonie est marginal et les individus les plus âgés se rencontrent dans une région de plus en plus centrale.*

tentacules, appelé gaine tentaculaire. A la bouche fait suite un pharynx aux parois épaisses et musclées, parfois suivi d'un gésier, et débouchant dans un estomac prolongé par un volumineux cæcum stomacal. Le transit des aliments non digérés est assuré par un pylore cilié et un rectum débouchant dans la gaine tentaculaire, à l'extérieur de la couronne de tentacules : d'où le nom d'Ectoproctes. Le polypide est en rapport avec le cystide par l'intermédiaire de muscles rétracteurs striés, implantés sur le lophophore, et en arrière de la zoécie, qui permettent, notamment en cas de danger, l'invagination brusque du polypide, normalement épanoui à l'extérieur de la loge. Un ou plusieurs *funicules* relient aussi le tube digestif à la paroi zoéciale. C'est généralement à partir des cellules du ou des funicules, et parfois du mésoderme pariétal, que se différencient les éléments génitaux mâles et femelles.

Tout l'intérieur de la cavité générale est tapissé de cellules mésodermiques mésenchymateuses; celle-ci renferme également des cellules libres et amiboïdes, qui sont soit des phagocytes absorbant les débris cellulaires dégénérescents, soit des cellules de réserves protéiques, lipidiques ou glucidiques.

Il n'existe ni appareil circulatoire ni appareil respiratoire. Le système nerveux, outre le ganglion et l'anneau lophophoriens d'où partent divers nerfs, dont ceux qui innervent les tentacules, comporte entre le mésoderme et l'épiderme pariétaux un plexus de petites cellules étoilées. Des cellules sensorielles existent au moins dans les tentacules. Les organes excréteurs spécialisés font défaut. La majeure partie des excrétats s'accumule dans la paroi du tube digestif, et la surcharge excessive de ces cellules en déchets provoque la formation du corps brun, forme de dégénérescence de tout le polypide (muscles rétracteurs compris) caractérisée par la concentration de l'ensemble des tissus polypidiens en une ou plusieurs masses opaques, ultérieurement confluentes ou non; les tissus du corps brun se dégradent peu à peu, et lorsqu'un nouveau polypide aura bourgeonné, ou bien il assimilera le corps brun et en rejettera les ultimes déchets, ou bien le corps brun sera expulsé à l'extérieur. Le bourgeonnement de la partie digestive du nouveau polypide naît d'une prolifération cellulaire interne et localisée de l'épiderme cystidien, qui forme une verrue d'abord pleine, puis creuse, s'allongeant peu à peu et finissant par se recourber en U. Cette régénération épidermique d'un tissu fonctionnant comme un « dérivé endodermique » est un phénomène périodique et caractéristique des Bryozoaires. Les spermatozoïdes et les œufs ont toujours une origine mésodermique. Les loges sont hermaphrodites; il n'y a pas de gonades différenciées.

SYSTÉMATIQUE

Les Ectoproctes comprennent deux sous-classes.

Sous-classe des Gymnolaemates

Chez les Gymnolaemates, les polypes d'un même zoarium sont nettement séparés. Les tentacules, disposés suivant un cercle, ne sont pas reliés à leur base par une membrane commune. L'occlusion de l'ouverture zoéciale n'est pas assurée par un *épistome*. La reproduction asexuée ne comporte jamais la formation de *statoblastes*. Il existe souvent, outre les autozoécies, des zoécies spécialisées d'aspect différent, appelées hétérozoécies. Les Gymnolaemates sont des organismes marins ou parfois d'eau saumâtre.

Des cinq ordres supposés, deux sont complètement fossiles; parmi les trois actuels, Cténostomes, Cheilostomes et Cyclostomes, les deux premiers ont été fusionnés en un ordre unique, les Eurystomes.

Ordre des Eurystomes

Les Eurystomes *(Eurystomata* ou *Cheiloctenostomata)* possèdent un dispositif d'occlusion de l'ouverture zoéciale; celle-ci n'est jamais parfaitement circulaire. Les larves sont incubées soit dans une hétérozoécie globuleuse, ou *ovicelle,* soit (jusqu'à un stade souvent moins avancé) à l'intérieur de la zoécie même. Les larves mûres (longues de 150 μ à 1 mm), libres et nageantes, présentent un organe antérieur à la fois nerveux, glandulaire et sensoriel, l'organe piriforme; chez quelques espèces très évoluées, les larves dites *Cyphonautes* sont enfermées entre des valves mobiles reliées par des muscles adducteurs et possèdent un tube digestif; mais dans la très grande majorité des cas, les larves (dites « en tonnelet ») en sont dépourvues. Leur locomotion s'effectue grâce au battement de cils portés par un anneau de grosses cellules (cellules coronales) disposées sur toute la périphérie de la larve. La métamorphose des larves donne naissance à l'*ancestrula,* loge fondatrice de la colonie qui engendrera par bourgeonnement les zoécies suivantes. Outre les ovicelles, il peut exister d'autres types d'hétérozoécies : les aviculaires (en forme de becs d'Oiseaux, qui enlèvent les corps étrangers tombés sur la colonie), les stolons et les vibraculaires (munis de fouets qui balaient la surface de la colonie). Il existe chez quelques espèces des bourgeons dormants, restant inertes pendant l'hiver, les hibernacules.

Les Eurystomes groupent actuellement un peu moins de quatre mille espèces, généralement marines, se rencontrant de la zone de balancement des marées jusque dans les abysses, à 6 000 m de profondeur; chaque espèce ne s'observe en général qu'entre deux limites de profondeur et dans un biotope bien particulier et déterminé.

Les Cténostomes (principaux genres : *Alcyonidium, Flustrella, Bowerbankia*) ont un cystide non calcifié et de nature chitinoïde; la loge est fermée, lors de la rétraction du polypide, par la contraction d'un anneau musculaire, et par le resserrement d'une collerette membraneuse souvent sétigère; il n'y a jamais d'ovicelles, ni d'aviculaires, ni de vibraculaires; dans le détail des familles systématiques, la classification est encore discutée.

Les Cheilostomes (près de trois mille cinq cents espèces) ont généralement des ovicelles, et dans certaines familles des aviculaires et des vibraculaires; les orifices autozoéciaux sont fermés par des opercules mobiles actionnés par des muscles. La paroi frontale peut ne pas être calcifiée et rester souple (section des Anasca; principaux genres : *Membranipora, Bugula, Scrupocellaria*); lorsqu'elle est complètement calcifiée (section des Ascophora; principaux genres : *Schizoporella, Retepora, Cellepora*), la dévagination du polypide est facilitée par les mouvements de remplissage et de désemplissage d'un sac membraneux débouchant en arrière de l'ouverture. L'ancienne classification en Ctenostomata et Cheilostomata, l'un et l'autre hétérogènes, est apparue comme insuffisante aux zoologistes, qui envisagent de lui substituer une nouvelle classification, en une dizaine de sous-ordres.

Ordre des Cyclostomes

Les Cyclostomes ne possèdent aucun dispositif d'occlusion de l'ouverture zoéciale; celle-ci est circulaire, et les autozoécies sont tubuleuses. Les hétérozoécies ne sont jamais du type aviculaire ou vibraculaire; elles consistent essentiellement en cénozoécies (évoluant en rhizoïdes ou en processus épineux) et en gonozoécies (zoécies se transformant en chambres d'incubation après dégénérescence du polypide). L'embryon primaire donne en général par bourgeonnement des embryons secondaires (polyembryonnie). Les larves, « en tonnelet », sont dépourvues d'organe piriforme. Le zoarium est entièrement calcifié. Les principaux genres sont *Crisia, Stomatopora* et *Lichenopora*; les Cyclostomes, très diversifiés à l'état fossile, ne groupent plus actuellement que quatre cents espèces environ.

Sous-classe des Phylactolaemates

Les Phylactolaemates ne réunissent que quelques espèces d'eau douce, non calcifiées, généralement mobiles. Le polypide est essentiellement caractérisé par la disposition de ses tentacules en double fer à cheval, emprisonnant la bouche, axiale; l'anus est entre les deux branches et à l'extérieur. Les tentacules sont réunis à leur base par une membrane commune. Une musculature spéciale permet au lophophore de pivoter sur lui-même. La bouche est surmontée par une languette mobile et ciliée, l'épistome, qui la ferme incomplètement au repos. Le pylore n'est pas cilié. Les zoécies sont dressées, allongées, et partiellement séparées les unes des autres; parfois leurs cavités générales communiquent complètement, formant une cavité coloniale commune. L'ensemble de la colonie est le plus souvent mobile par glissement sur le support. Il n'existe pas d'hétérozoécie.

La *reproduction sexuée* apparaît presque simultanément chez tous les individus des extrémités d'une même colonie; l'incubation a lieu à l'intérieur d'une poche formée dans la paroi cystidienne. La larve mûre est libre et contient deux jeunes polypides en préformation, dont la dévagination sera à l'origine d'une nouvelle colonie.

La *reproduction asexuée* est caractérisée par la formation de bourgeons dormants, les statoblastes, à l'intérieur des funicules; eux seuls permettent la survie des espèces d'une année sur l'autre. Chaque statoblaste présente un flotteur facilitant son transport par les eaux courantes, et des crochets permettant sa fixation au substrat; à l'intérieur du statoblaste se préforme l'ébauche d'un polype qui sortira lors de l'ouverture du statoblaste.

ENTOPROCTES

Ces organismes marins ou d'eau saumâtre, exceptionnellement dulçaquicoles, peuvent atteindre une taille supérieure à celle des Ectoproctes (3 ou 4 mm). Les zoïdes sont indépendants les uns des autres, ou forment des colonies d'Animaux dressés, seulement réunis par un stolon commun. Chacun d'entre eux est formé par un pédoncule musculeux plus ou moins long, parfois noueux, portant à son extrémité un calice contenant l'ensemble des viscères, et dont le lophophore délimitant un atrium occupe le sommet; ce lophophore, qui porte des tentacules réunis à leur base par une membrane intertentaculaire, est rétractile dans le calice, mais il n'y a pas de gaine tentaculaire. La distinction entre polypide et cystide manque de netteté, un tissu conjonctif les réunissant et occupant toute la hauteur du pédoncule. La cuticule n'est pas calcifiée; il n'y a ni cavité cœlomique, ni doublure péritonéale, ni polypide individualisé. La bouche et l'anus sont tous deux compris à l'intérieur de la couronne tentaculaire arrondie (mais présentant une symétrie bilatérale de part et d'autre d'une interruption du lophophore). La totalité du tube digestif est ciliée (bouche, œsophage, volumineux estomac sans cæcum, intestin et rectum). Il n'existe ni appareil respiratoire, ni appareil circulatoire. Un ganglion cérébroïde existe au-dessus de l'estomac; il en part des nerfs certainement en relation avec les cellules sensorielles éparses dans l'ectoderme du calice, des tentacules et du pédoncule. Les organes excréteurs sont représentés par une paire de néphridies.

Suivant les espèces, les sexes sont séparés ou non. Les glandes sexuelles sont différenciées, et débouchent dans l'atrium où se fait l'incubation. La larve est libre, pourvue d'un tube digestif et d'un organe sensoriel antérieur différent de l'organe piriforme des Ectoproctes. Au cours de la métamorphose, le tube digestif larvaire pivote sur lui-même, pour donner le tube digestif de l'adulte. Les Entoproctes se reproduisent aussi par bourgeonnement à partir du stolon d'une colonie déjà existante. Des hibernacules apparaissent aussi chez certaines espèces.

Les Entoproctes ne groupent que quelques dizaines d'espèces; les principaux genres sont *Urnatella, Pedicellina, Barentsia, Loxosoma*.

BIBLIOGRAPHIE

BOBIN G. et PRENANT M., *Bryozoaires,* in *Faune de France,* I (1956) et II (1966), Paris. - BRIEN P., *Bryozoaires,* in GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie,* t. V, 1, Paris, 1960. - HYMAN L. H., *The Invertebrates,* V, New York, 1959. - NIELSEN C., *Entoproct Life-Cycles and the Entoproct-Ectoproct Relationship. Ophelia,* Elsingör, 1971. - RYLAND J. S., *Polyzoa,* in *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rew.,* London, t. 5, 1967.

▼ Détail de quelques ramifications de* Bugula neritina. *▶ Détail de l'organisation d'un Entoprocte : bo, bouche; ca, calice; cu, cuticule; es, estomac; gn, ganglion nerveux; go, gonoducte; in, intestin; la, larves; oe, œsophage; pe, pédoncule; re, rectum, te, tentacules.

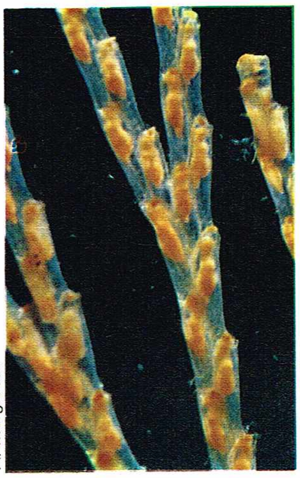

A. Margiocco

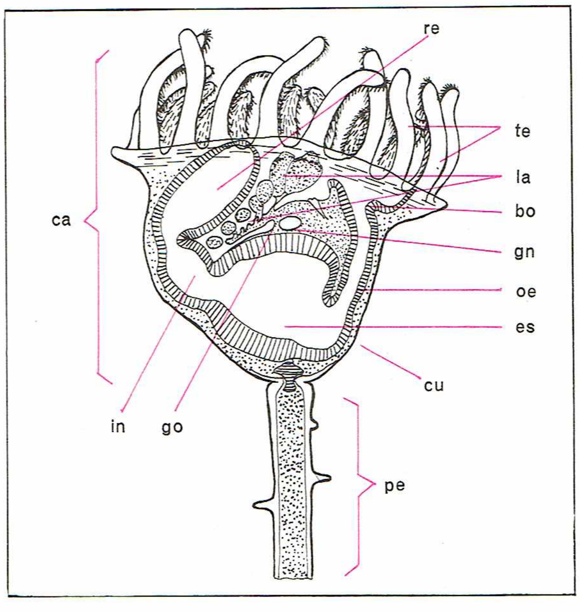

I.G.D.A.

LES BRACHIOPODES

Connu depuis le Cambrien, ce groupe revêt une extrême importance du point de vue paléontologique pour la stratigraphie des terrains primaires et secondaires. Actuellement, il n'est plus représenté que par un nombre restreint d'espèces (moins de trois cents), existant de la zone des marées jusque dans les abysses.

Les Brachiopodes sont des Animaux cœlomates exclusivement marins, solitaires, très généralement adhérents au support par l'intermédiaire d'un pédoncule musculeux relativement mobile. Chez la plupart des espèces, ce pédoncule fait saillie à l'extérieur, et traverse la plus ventrale des deux valves calcaires qui emprisonnent le corps de l'Animal; chez la lingule, le pédoncule s'insinue simplement entre les deux valves sans les échancrer. La présence d'une coquille bivalve n'est pas sans évoquer l'aspect des Mollusques Lamellibranches, mais l'anatomie et la morphologie de la coquille sont tout à fait différentes. Si ces valves sont pratiquement identiques chez la lingule, les différences sont plus marquées chez les autres Brachiopodes, essentiellement chez les Articulés, mais, dans tous les cas, les valves sont peu mobiles l'une par rapport à l'autre. La bouche est bordée de chaque côté par un bras fixe recouvert de cirres mobiles, et soutenu par un squelette calcaire plus ou moins complexe qui constitue une différenciation de la valve dorsale. L'appareil digestif est parfois incomplet. Le régime est microphage. Les sexes sont séparés, la larve libre et ciliée, et la multiplication asexuée inexistante. Les Brachiopodes sont subdivisés en deux classes.

H. Chaumeton - Jacana

▲ **Dallina septigera** ***appartient à l'embranchement des Brachiopodes, qui ne compte plus actuellement que trois cents espèces, alors qu'il était très bien représenté durant les ères primaire et secondaire. Cette photo a été réalisée après ablation de la valve ventrale de la coquille.***

TESTICARDINES

Chez les Testicardines *(Articulata)*, le squelette brachial ou brachidium est plus ou moins complexe, comportant des branches latérales rétroflexées (les *crura*), une branche transversale les réunissant, et une baguette axiale. Les deux valves sont articulées par l'intermédiaire d'une charnière caractérisée par des dents cardinales; elles sont généralement striées, pourvues de crêtes et de fines perforations. La valve inférieure (ventrale) est plus développée que la valve supérieure, et déborde sur elle par un crochet saillant; entre celui-ci et la charnière existent deux plaques squelettiques plus ou moins écartées, le *deltidium*.

La coquille est intérieurement doublée par un manteau, qui tapisse les deux valves, parcouru par des canaux en relation avec l'appareil génital, et où mûrissent les produits génitaux; sa marge est bordée de longues soies. Le tube digestif, intérieurement cilié, n'est pas perforé par un anus, et comporte seulement un œsophage et un intestin aveugle; un foie volumineux avoisine l'estomac. Un cœur contractile existe à la limite stomaco-intestinale; il en part un certain nombre de vaisseaux vers les principaux organes du corps; le liquide qui y circule ne contient pratiquement pas d'éléments figurés; des cellules libres existent en plus grand nombre dans le cœlome. Une importante musculature assure l'écartement des valves. Les néphridies excrétrices s'ouvrent dans le cœlome par un pavillon plissé. Le système nerveux, peu différencié, forme un collier péribuccal, localement renflé en deux ganglions cérébroïdes d'où se détachent un certain nombre de nerfs. Les sexes sont séparés, la fécondation est généralement externe, mais il peut arriver qu'elle soit interne et que les œufs se développent alors dans les sinus (canaux) du manteau. Les bras, immobiles, sont recouverts de cirres ciliés, les battements ciliaires amenant vers la bouche les particules alimentaires. Les muscles sont le plus souvent lisses. La larve est pourvue d'un pied grâce auquel elle se fixera au moment de la métamorphose. Le tégument renferme souvent des spicules.

La classification moderne des Testicardines, très complexe, est établie sur la considération des formes fossiles. Les deux principaux groupes actuels sont ceux des Rhynchonelles et des Térébratules, ce dernier étant le plus riche en espèces (principaux genres : *Terebratulina, Terebratella, Dallina, Argyrotheca*).

ÉCARDINES

Chez les Écardines *(Inarticulata)*, le squelette brachial est inexistant, et les valves indépendantes ne présentent aucune charnière. L'orifice anal est perforé. L'exemple classique est la *Lingula*, pourvue de valves rectangulaires, dont le corps se prolonge par un long pied creux, musculeux et contractile; fouisseuse, elle vit dans un tube qu'elle enfouit dans le sable, et au fond duquel elle peut se rétracter grâce à son pédoncule. La *Lingula*, espèce d'eaux très peu profondes (quelques dizaines de centimètres), se rencontre surtout dans l'océan Pacifique, et a la réputation d'être un authentique « fossile vivant »; s'il est vrai que le groupe des lingules est connu depuis l'Ordovicien, les organes internes des formes fossiles n'ont pas été conservés, et la prétendue immuabilité du genre est donc sujette à caution.

Les autres genres actuels sont *Crania* (plus largement répandu dans le Pacifique, l'Atlantique et la Méditerranée, avec des espèces plus ou moins arrondies, mais plus épaisses que les *Discina*, dépourvues de pied, et adhérentes au support par toute la face ventrale qui se moule au relief des rochers) et *Discina*. Ce dernier vit à faible profondeur, fixé sur le substrat par l'intermédiaire de son pédoncule, qui sort par un orifice allongé entouré d'un diaphragme; la coquille est discoïde, recouverte de crêtes concentriques, plate, et le pédoncule court échancre la face ventrale. Le groupe des *Discina* est surtout connu dans l'océan Indien et près des côtes atlantique et pacifique américaines.

▼ ***Face interne de la valve dorsale d'un Brachiopode Testicardine, montrant le squelette brachial, ou brachidium.***

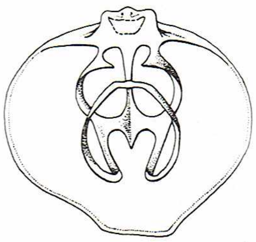

I.G.D.A.

BIBLIOGRAPHIE

BEAUCHAMP P. de, *Classe des Brachiopodes, formes actuelles,* in GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie,* t. 5, 1, Paris, 1960. - HYMAN L. H., *The Invertebrates,* 5, New York, 1959.

LES PHORONIDIENS

H. Chaumeton - Jacana

▲ **Phoronis hippocrepia** *vit dans un tube chitineux sécrété par des cellules glandulaires de l'épiderme; une double couronne de tentacules, le lophophore, dépasse du tube.*

Ce phylum *(Phoronida)* est composé de deux genres *(Phoronis* et *Phoronopsis)* et de onze espèces, toutes exclusivement marines, entièrement libres, vivant dans un tube cylindrique chitineux (sécrété par des cellules glandulaires de l'épiderme) dans lequel elles se déplacent librement. La plupart des espèces sont enfoncées verticalement dans des sédiments meubles, trois sont perforantes dans les roches ou les coquilles et une vit en association avec des cérianthes, dans les tubes de ceux-ci. Les Phoronidiens sont présents dans toutes les mers et océans du monde, depuis la zone intertidale jusqu'à 140 m de profondeur environ.

Le corps vermiforme des Phoronidiens comprend trois régions distinctes. Le protosome, représenté par l'épistome, est réduit à une languette surplombant la bouche, à la base des tentacules internes : il intervient dans le soutien statique du lophophore et dans la capture et le choix des particules alimentaires. Le *lophophore,* ou couronne tentaculaire, forme essentiellement le mésosome : les tentacules sont disposés en forme de fer à cheval, dont les pointes sont plus ou moins incurvées vers la concavité lophophorale ou enroulées en spirales; le nombre de tentacules varie de quinze à plus de quinze cents, selon les espèces. Le métasome correspond au tronc cylindrique dont la partie postérieure élargie s'appelle l'ampoule. Celle-ci sert notamment d'organe d'ancrage dans le tube. L'Animal occupe normalement toute la longueur du tube, ne laissant dépasser que son lophophore à la surface du substrat; il peut rapidement se contracter au moindre danger pour ne plus occuper que le tiers postérieur du tube. Selon les espèces, la longueur totale de l'Animal normal varie de 15 à plus de 450 mm. Chez le genre *Phoronopsis,* il existe une invagination épidermique caractéristique marquant la séparation entre le mésosome et le métasome.

La *paroi du corps* comprend de l'extérieur vers l'intérieur plusieurs couches successives : l'épiderme, formé de plusieurs types cellulaires avec une *bordure en brosse* (à microvillosités), le plexus nerveux, situé à la base de l'épiderme contre la membrane basale, épaisse, véritable substance de soutien, puis deux couches musculaires, une circulaire et une longitudinale recouverte par le péritoine.

Le *système nerveux,* essentiellement basi-épithélial, se compose d'un ganglion cérébroïde, placé entre l'épistome et la papille anale, du nerf circulaire longeant (depuis ce ganglion) la base du lophophore, d'une ou de deux fibres nerveuses géantes issues du ganglion et se prolongeant jusqu'à l'extrémité postérieure de l'ampoule, enfin, d'un plexus diffus dans tout le corps avec des prolongements nerveux vers les divers organes.

Les Phoronidiens présentent une trimétamérisation, correspondant aux trois régions du corps, qui possèdent chacune une cavité cœlomique. Le protocœlome est situé entre la bouche, la rangée interne de tentacules et le diaphragme, et représente la cavité de l'épistome. Le mésocœlome, ou cavité lophophorale, est séparé du protocœlome par une cloison mésentérique et le vaisseau sanguin lophophoral, et du métacœlome par le diaphragme. Ce dernier, séparant protosome et mésosome du métasome, est inséré à la base du lophophore au niveau du nerf circulaire. Le métacœlome, ou cavité du métasome, est divisé en compartiments gauche et droit par le mésentère principal, puis chacun de ces compartiments est à nouveau séparé, incomplètement, par un mésentère latéral, gauche ou droit.

Le *tube digestif* est en forme de U. La branche descendante débute par la bouche, située au fond de la cavité lophophorale et surmontée par l'épistome; elle est suivie de l'œsophage à paroi épaisse, du pré-estomac avec un épithélium mince et caractérisé par une gouttière ciliée, et de l'estomac. Ce dernier, à paroi épaisse, entouré d'un sinus sanguin, est situé principalement dans l'ampoule. L'intestin constitue à lui seul la branche ascendante du tube digestif; séparé de l'estomac par un pylore, il s'ouvre à l'extérieur par l'anus, sur la papille anale, en arrière du lophophore et au même niveau que la bouche. Les Phoronidiens sont des « suspensivores » (plus précisément des « impingment feeders ») qui ont besoin d'une eau plus ou moins agitée leur fournissant les particules alimentaires. Pour faciliter la capture de ces substances, les tentacules se disposent en forme d'entonnoir dirigé vers le courant; les battements des cils des tentacules conduisent les aliments jusqu'à la bouche, occupant le fond de l'entonnoir.

Le *système excréteur* est constitué de deux néphridies, situées du côté anal et généralement en forme de tube en J. Chaque néphridie possède un ou deux entonnoirs dans le métacœlome et s'ouvre à l'extérieur par le néphridiopore à côté de l'anus. Les néphridies font aussi office de gonoductes.

Le *système circulatoire* est clos, formé par deux (parfois trois) vaisseaux longitudinaux, un latéral efférent et un médian afférent, qui parcourent tout le métacœlome. Ils communiquent postérieurement par le sinus péristomacal et antérieurement par le vaisseau lophophoral. Celui-ci, en forme de fer à cheval, est composé de deux arcs accolés, afférent et efférent, et envoie un capillaire

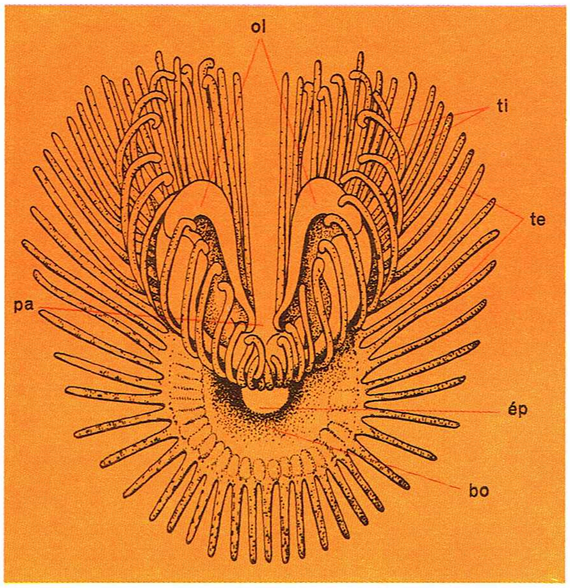

▶ *Détail du lophophore d'un individu mâle de* **Phoronis psammophila** *: ol, organes lophophoraux; ti, rangée de tentacules internes; te, rangée de tentacules externes; ép, épistome; bo, bouche située au fond de la cavité lophophorale; pa, papille anale située au fond de la cavité lophophorale.*

dans chaque tentacule. Le sang rouge des Phoronidiens provient de la présence d'hémoglobine dans les globules sanguins. L'oxygénation du sang a lieu principalement dans les tentacules, qui jouent ainsi le rôle de système respiratoire (comme des branchies).

Appareil reproducteur. Les Phoronidiens sont soit dioïques, soit hermaphrodites. Les gonades se développent dans l'ampoule autour du vaisseau latéral. Les organes lophophoraux et les glandes nidamentaires sont des glandes sexuelles annexes qui apparaissent au cours de la maturation des gonades dans la concavité lophophorale. Les organes lophophoraux sont présents chez tous les mâles et les individus hermaphrodites, mais les glandes nidamentaires n'existent que chez les femelles et les hermaphrodites incubant les embryons dans le lophophore. La fécondation interne a lieu dans le métacœlome ; les œufs sont alors rejetés par les néphridies directement dans l'eau de mer ou incubés dans le lophophore, selon les espèces. La segmentation de l'œuf est totale, égale et se déroule selon le type radiaire. Le développement embryonnaire conduit à la formation d'une larve ciliée pélagique, nommée *actinotrocha* (actinotroque), caractérisée par un lobe préoral, une plaque apicale, des tentacules larvaires, une couronne ciliée périanale et des protonéphridies. Par métamorphose, l'actinotroque se transforme en un jeune Phoronidien.

Outre la reproduction sexuée, les Phoronidiens présentent une reproduction asexuée, par scissiparité, au niveau de la zone médiane du métasome. Ils peuvent aussi rejeter leur lophophore à intervalles réguliers, par autotomie. Dans ces deux cas, la régénération des parties manquantes intervient rapidement, selon des procédés souvent semblables à ceux du développement ontogénétique, mais certains processus sont distincts des schémas de l'ontogenèse et généralement plus rapides, plus simples et plus évolués.

Les Phoronidiens occupent une place primordiale dans l'arbre phylétique des Métazoaires : ils appartiennent aux Archicœlomates Deutérostomes, c'est-à-dire à la lignée évolutive aboutissant aux Chordés. Bien que leur position dans cette lignée reste encore à établir, il faut rapprocher les Phoronidiens des Ptérobranches (Hémichordés).

BIBLIOGRAPHIE

EMIG C. C., *Taxonomie et systématique des Phoronidiens,* in *Bull. Mus. Hist. nat.,* Paris (Zool.), 8, 469-568, 1971. - GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie,* t. 5, Paris, 1959. - HYMAN L. H., *The Invertebrates : Smaller Cœlomates Groups,* vol. 5, New York, 1959. - SELYS-LONGCHAMPS M. de, *Phoronis, Fauna Flora Golf Neapel,* 30, 1907.

Dans l'état actuel des connaissances, les Chétognathes doivent être mis à part dans la classification et ne peuvent être inclus dans aucun embranchement.

CHÉTOGNATHES

Cœlomates Deutérostomiens, les représentants de la classe des Chétognathes sont des organismes marins de petite taille, généralement adaptés à la vie pélagique. Leur corps, allongé, à symétrie bilatérale, est pourvu de replis cuticulaires appelés « nageoires » (une ou deux paires de nageoires latérales et une nageoire caudale). Il comprend trois parties : la tête, arrondie ou triangulaire, le tronc, plus ou moins fusiforme, et la queue.

Le *revêtement tégumentaire* de ces Animaux est composé d'un épiderme simple, stratifié en certains endroits (tête), doublé extérieurement par une cuticule mince, avec des aires glandulaires.

La *musculature* comporte quatre faisceaux longitudinaux et quelquefois des éléments obliques. Elle est particulièrement développée au niveau de la tête.

La *cavité cœlomique* compte trois parties distinctes correspondant à chacune des régions du corps précédemment citées. Dans le tronc, le cœlome est en outre divisé longitudinalement selon le plan de symétrie par un mésentère qui entoure le tube digestif.

Le *tube digestif* commence au niveau de l'ouverture buccale située à l'extrémité de la tête. La bouche est recouverte par un capuchon susceptible de se rabattre et de s'écarter en laissant apparaître deux ou quatre rangées de dents de petites dimensions et deux groupes latéraux de crochets. Ceux-ci, dotés d'une musculature puissante, jouent un rôle important de collecteurs de nourriture en dirigeant les proies vers la bouche. Cette dernière, qui peut être partiellement exsertile, s'élargit en un vestibule auquel fait suite un œsophage, puis un long intestin quelquefois pourvu de deux diverticules. Le rectum, cilié, débouche ventralement à l'extérieur par un orifice anal sans sphincter. Le niveau de l'anus constitue la limite entre le tronc et la queue. Les Chétognathes ne présentent pas d'organes excréteurs différenciés. Font également défaut les appareils circulatoire et respiratoire.

Le *système nerveux,* complexe, présente un double collier. Il comprend fondamentalement un ganglion cérébral bilobé, placé dans la tête en position dorsale. Il en part des connectifs dont deux se dirigent vers deux ganglions vestibulaires, dorsaux, situés sur les côtés de la bouche et réunis entre eux par une commissure ventrale. Deux autres connectifs relient le ganglion cérébral à un ganglion ventral, localisé dans le tronc et qui émet deux nerfs qui s'anastomosent. De deux ganglions œsophagiens naissent des nerfs vers le tube digestif.

Les *organes des sens.* Outre des cils répartis sur tout le corps, les Chétognathes présentent une structure à fonction tactile, la couronne cilio-glandulaire. Cette couronne, de forme variable, est placée dorsalement à la partie postérieure de la tête. Cette dernière porte aussi deux yeux constitués en général par cinq ocelles à cellules rétiniennes.

Citons également deux formations assez mal connues, à fonction probablement tactile, les organes rétrocérébraux, localisés près du ganglion cérébral.

Appareil reproducteur. Les Chétognathes sont hermaphrodites. Leurs ovaires, allongés, sont situés dans la région postérieure du tronc, parallèlement à l'intestin. La lumière des oviductes abrite une autre formation tubulaire, le réceptacle séminal, où sont retenus les spermatozoïdes mûrs qui proviennent le plus souvent d'un autre individu, car la fécondation est généralement croisée. Les conduits génitaux femelles débouchent à l'extérieur par des pores proches de l'anus.

Les testicules se trouvent dans la région caudale. Les spermatozoïdes mûrs gagnent un long tube, le canal déférent, qui présente un renflement dont la place et la forme sont variables : la vésicule séminale. Les pores génitaux mâles sont en position ventrale.

Comme nous l'avons dit, la fécondation, à laquelle participent des cellules accessoires, est généralement croisée ; toutefois, il existe des cas d'autofécondation exclusive. Les œufs fécondés sont émis à l'extérieur et flottent à la surface de l'eau. Le développement est direct.

Les Chétognathes, essentiellement planctoniques, présentent un rythme journalier, remontant la nuit vers la surface. Ils peuvent nager grâce aux mouvements de leurs nageoires et aux ondulations de leur corps, qui résultent des contractions des quatre faisceaux musculaires longitudinaux. Ce sont des prédateurs qui ingèrent quantité de Copépodes et autres petits Crustacés, ainsi que des méduses, etc. Les Chétognathes sont très largement répandus dans le monde.

Parmi les genres les plus remarquables et les plus riches en espèces de la classe des Chétognathes, citons le genre *Sagitta* dont les représentants présentent deux paires de nageoires latérales.

Notons que certains *Spadella* (avec une seule paire de nageoires latérales), contrairement à la majeure partie des Chétognathes, mènent une vie benthique, se mouvant sur les fonds et adhérant au substrat au moyen d'une papille adhésive.

BIBLIOGRAPHIE

BEAUCHAMP P. de., *Classe des Chétognathes in* P.-P. GRASSÉ., *Traité de zoologie,* t. 5, fasc. 2, p. 1500-1520, Paris, 1960. Masson éd. - FURNESTIN M.L., 1957. *Chaetognathes et zooplancton du secteur atlantique marocain.* Thèse d'État, Paris, Institut scientifique et technique des pêches maritimes, 356.

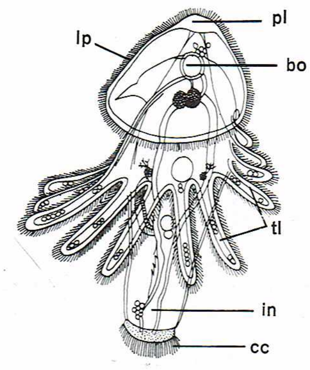

I.G.D.A.

▲ ***Larve* actinotrocha *de Phoronidien : lp, lobe préoral ; pl, plaque apicale (ganglion nerveux) ; bo, bouche ; tl, tentacules larvaires ; in, intestin ; cc, couronne ciliée périanale.***

▼ ***Représentation schématique de la structure anatomique d'un Chétognathe du genre* Spadella *: bo, bouche ; gc, ganglion cérébral ; gv, ganglion ventral ; td, tube digestif ; ov, ovaire ; od, oviducte ; an, anus ; pf, pore génital femelle ; na, nageoire ; te, testicule ; cd, canal déférent ; pm, pore génital mâle.***

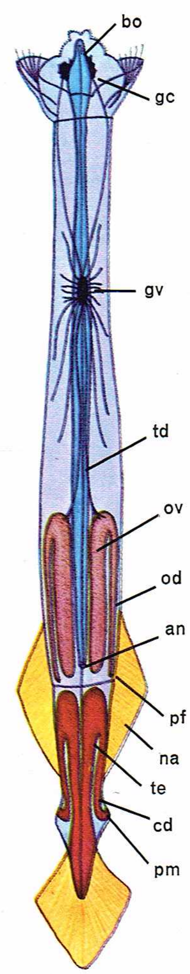

I.G.D.A.

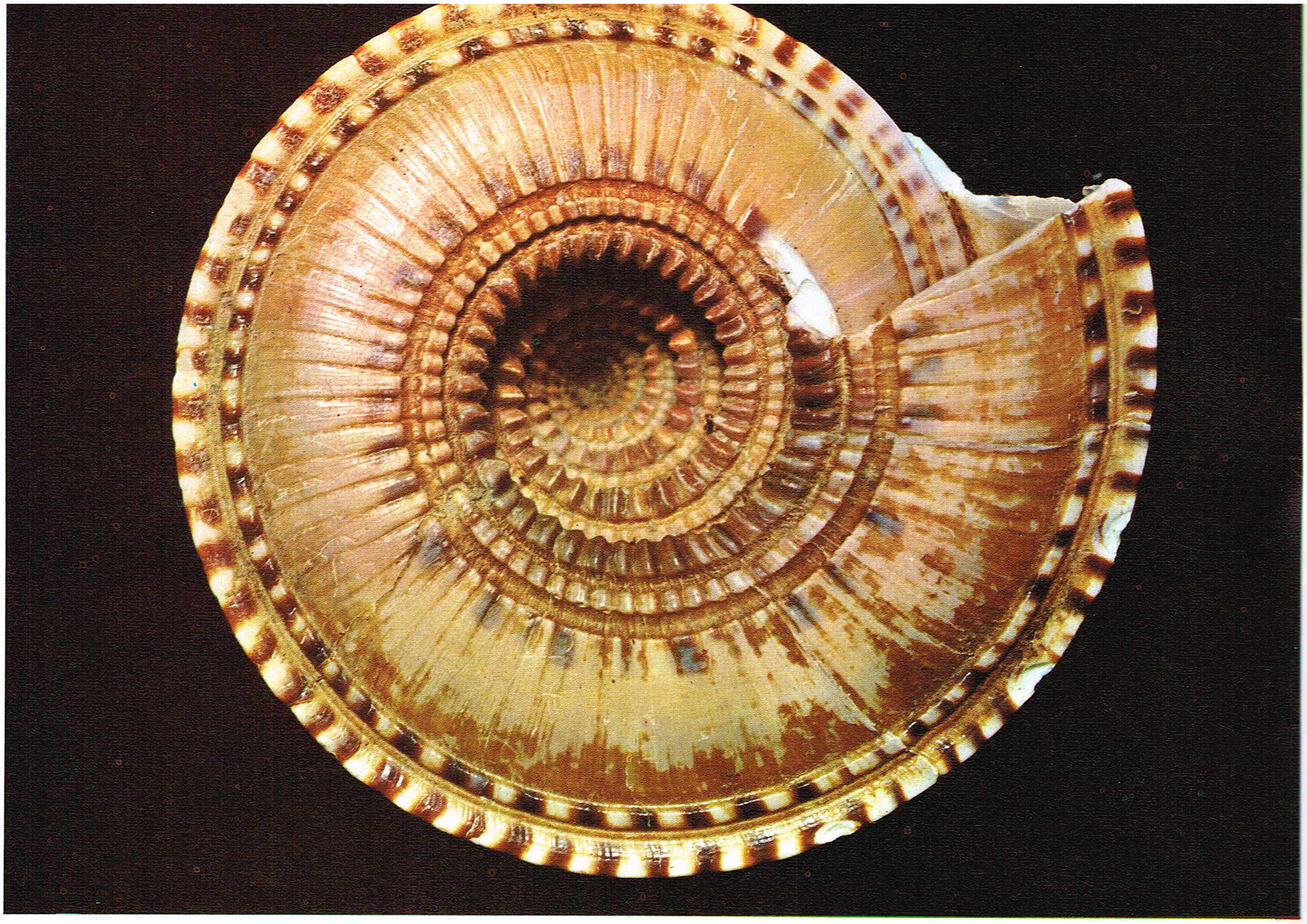

LES MOLLUSQUES

▲ *Les Mollusques ont un corps de consistance molle, mais élaborent fréquemment des parties dures calcifiées ou seulement cornées, internes ou externes comme cette coquille de* Architectonica, *un Gastéropode de la mer Rouge.*

Par définition les Mollusques ont un corps de consistance molle, mais il est fréquent qu'ils élaborent des parties dures, calcifiées ou seulement cornées, externes ou internes, toujours bien caractérisées par leur forme, souvent aussi par leur couleur. Ces mêmes parties dures, parfois admirablement conservées dans les couches sédimentaires des divers horizons géologiques, témoignent de l'ancienneté de ces Animaux, dont de nombreuses lignées, après avoir proliféré, ont à jamais disparu.

Originaires du milieu marin, les Mollusques s'y sont beaucoup diversifiés ; cependant, certains de leurs représentants se sont adaptés à la vie en eau saumâtre, à la vie en eau douce et même à la vie sur terre. Ils constituent un ensemble très hétérogène d'Animaux chez lesquels se retrouvent pourtant un certain nombre de caractères communs au point que l'embranchement qu'ils forment a une réelle individualité.

Cet embranchement contient en fait des classes d'Animaux à tégument spiculeux (Solénogastres, Caudofoveata), lequel peut élaborer aussi une série de plaques dorsales (Placophores), et des classes bien caractérisées soit par une coquille unique (Tryblidiacés, Gastéropodes, Scaphopodes), soit par deux valves (Bivalves), ou encore par un test de même signification (Céphalopodes).

Les trois premières classes constituent la division des Aculifères, les cinq dernières celle des Conchifères.

Par rapport aux embranchements avec lesquels il a le plus d'affinités (Annélides, Arthropodes), celui des Mollusques offre d'intéressantes particularités, entre autres l'absence de métamérisation nette. En outre, le corps, très déformable en raison d'une forte musculature, est revêtu dorsalement par le manteau, zone tégumentaire qui présente deux propriétés remarquables, celle d'élaborer la coquille et celle de former par un repli une cavité palléale qui abrite les branchies.

Les Mollusques dérivent vraisemblablement d'un ancêtre commun dont l'organisation était peut-être comparable à celle des Plathelminthes du groupe des Turbellariés. On ne sait sous quels traits se présentait cet archétype ; aussi se borne-t-on en général à définir un « type morphologique » inspiré de l'organisation des Gastéropodes. Cependant, au cours de leur évolution, ceux-ci ont subi une curieuse torsion d'une partie de leur corps, torsion qui a eu d'importantes conséquences sur leur organisation. Pour une conception d'ensemble de l'embranchement, un tel type morphologique est représenté sous la forme du Gastéropode prétorsionnel, c'est-à-dire imaginé tel qu'il devait être avant l'apparition de la torsion. Un tel modèle, qui correspond à un type moyen de Mollusque, permet d'imaginer le sens général de l'évolution des classes. La phylogénie des Mollusques a fait l'objet de bien des théories ; c'est de la plus récente (Salvini-Plawen, 1969, 1972) qu'il sera tenu compte ici.

Organisation générale

Dans le corps de tout Mollusque se distinguent deux ensembles souvent bien individualisés : le céphalopodium, complexe formé par l'union de la tête et du pied, puis le complexe palléo-viscéral, ou viscéro-pallium, qui, prolongeant la tête vers l'arrière, surmonte la portion pédieuse. Fragile, la portion viscérale est protégée dans de nombreux cas par la coquille.

Le *céphalopodium* ne mérite pleinement son nom que dans la classe des Céphalopodes, où la tête forme avec le pied une masse unique. Ailleurs, la tête, où s'ouvre l'orifice buccal, contient la partie antérieure du tube digestif et les centres nerveux principaux ; elle porte aussi des organes sensoriels tels que les tentacules et les rhino-

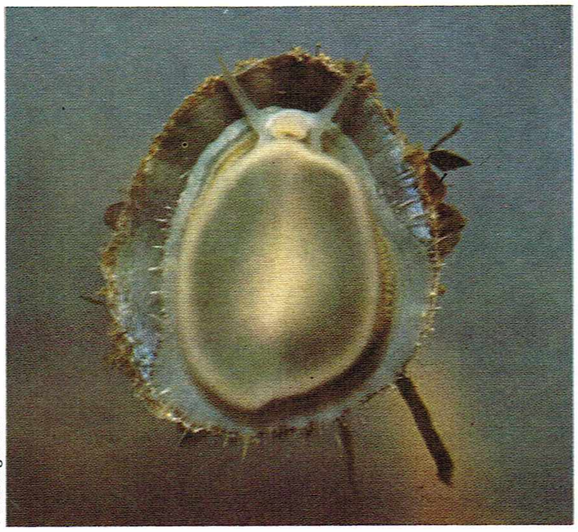

A. Margiocco

phores. Distincte, prolongée par un mufle chez les Gastéropodes, elle se réduit dans la plupart des autres groupes pour disparaître à peu près complètement chez les Bivalves, où la bouche en représente le seul témoin.

Le pied, à musculature en général puissante, formé d'une sole aplatie chez les Gastéropodes et les Placophores, s'aplatit latéralement chez les Bivalves, où il prend la forme d'une hache (d'où le nom de Pélécypodes donné à ces Animaux) ; mais il a un aspect vestigial chez les Solénogastres. En revanche, celui des Céphalopodes est représenté par la couronne des bras et des tentacules qui entourent la tête et par un organe tubuleux ventral, l'entonnoir, ouvert dans la cavité palléale. La musculature se relie pour une bonne part à la coquille.

La *masse viscérale,* traversée par le tube digestif, est occupée par la glande digestive et le complexe formé par les gonades, le cœur entouré de son péricarde, puis les reins. Ce dernier groupe d'organes représente en toute logique ce qui reste des formations cœlomiques, mais c'est à grand-peine qu'on a tenté d'y trouver des traces de la métamérisation qui, normalement, résulte de la partition du cœlome. En fait, la métamérisation se produit

A. Margiocco

chez les Animaux tels que les Annélides ou les Arthropodes, chez lesquels la croissance a lieu selon l'axe principal du corps. Or, Portmann (1961) a fait observer que chez beaucoup de Mollusques un axe de croissance secondaire, oblique par rapport à l'axe principal, contribue à donner une conformation particulière aux Animaux, car il assure un développement très grand du complexe palléal.

EMBRANCHEMENT DES MOLLUSQUES

Classe des Caudofoveata

Classe des Solénogastres

Classe des Placophores ou Polyplacophores

- ○ *ordre des Lepidopleurina*
- ○ *ordre des Ischnochitonina*
- ○ *ordre des Acanthochitonina*

Classe des Tryblidiida

Classe des Gastéropodes

□ *Sous-classe des Prosobranches*
- ○ *ordre des Archaeogastropoda*
- ○ *ordre des Neritoidea*
- ○ *ordre des Mesogastropoda*
- ○ *ordre des Neogastropoda*

□ *Sous-classe des Pulmonés*
- ○ *ordre des Basommatophores*
- ○ *ordre des Stylommatophores*

□ *Sous-classe des Opisthobranches*
- ○ *ordre des Cephalaspidea*
- ○ *ordre des Runcinacea*
- ○ *ordre des Acochlidiacea*
- ○ *ordre des Sacoglossa*
- ○ *ordre des Aplysiacea*
- ○ *ordre des Pleurobranchacea*
- ○ *ordre des Thecosomata*
- ○ *ordre des Gymnosomata*
- ○ *ordre des Nudibranchiata*

Classe des Bivalves ou Lamellibranches

- ○ *ordre des Protobranchiata*
- ○ *ordre des Filibranchiata*
- ○ *ordre des Eulamellibranchiata*
- ○ *ordre des Septibranchiata*

Classe des Scaphopodes

Classe des Céphalopodes

□ *Sous-classe des Nautiloidea*

□ *Sous-classe des Coleoidea*
- ○ *ordre des Decapoda*
- ○ *ordre des Octopoda*
- ○ *ordre des Vampyromorpha*

◀ ***Le pied des Mollusques présente des aspects variés ; chez les Gastéropodes comme*** **Patella** ***(en haut), il forme une sole aplatie ; chez les Céphalopodes (en bas à gauche), il est représenté par une couronne de bras et de tentacules qui entourent la tête et par l'entonnoir.***

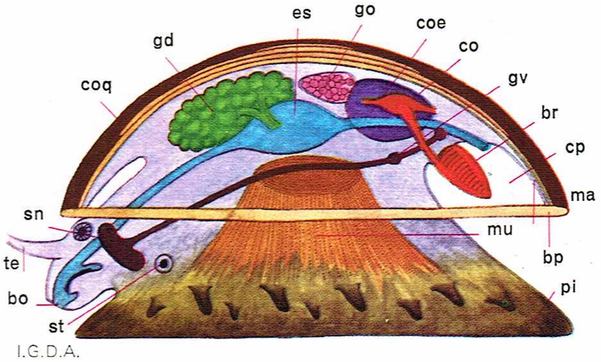

I.G.D.A.

◀ ***Schéma de l'organisation d'un Mollusque primitif : st, statocyste ; bo, bouche ; te, tentacule ; sn, système nerveux central ; coq, coquille ; gd, glande digestive ; es, estomac ; go, gonade ; coe, cœlome péricardique ; co, cœur ; gv, ganglion viscéral ; br, branchie ; cp, cavité palléale postérieure ; ma, manteau ; mu, muscle coquillier ; bp, bord palléal ; pi, pied.***

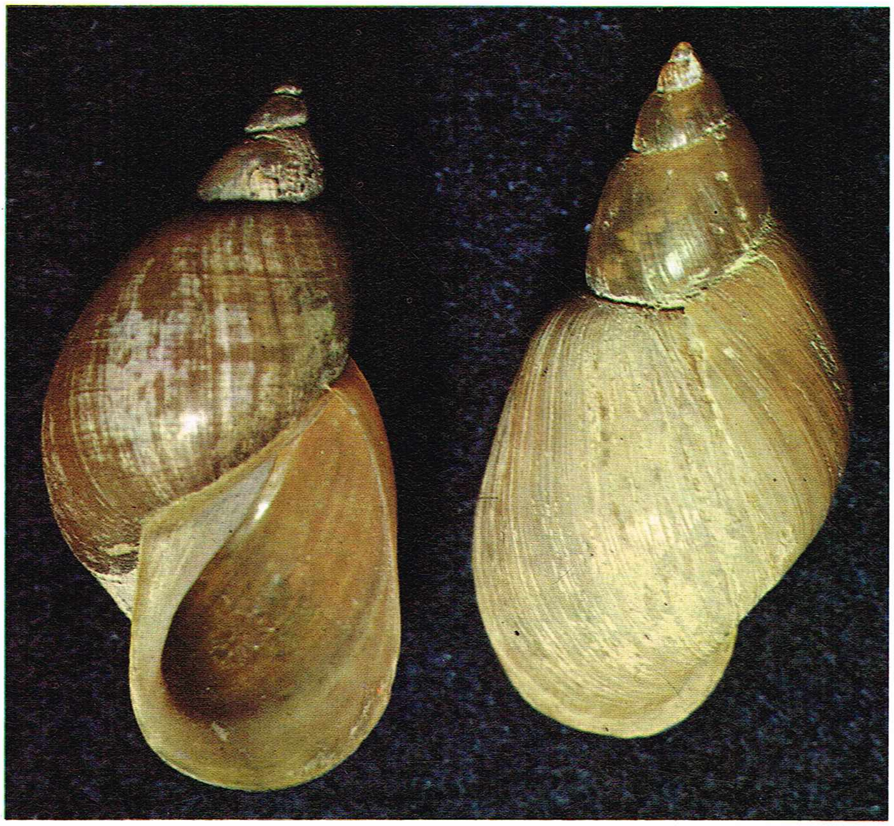

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

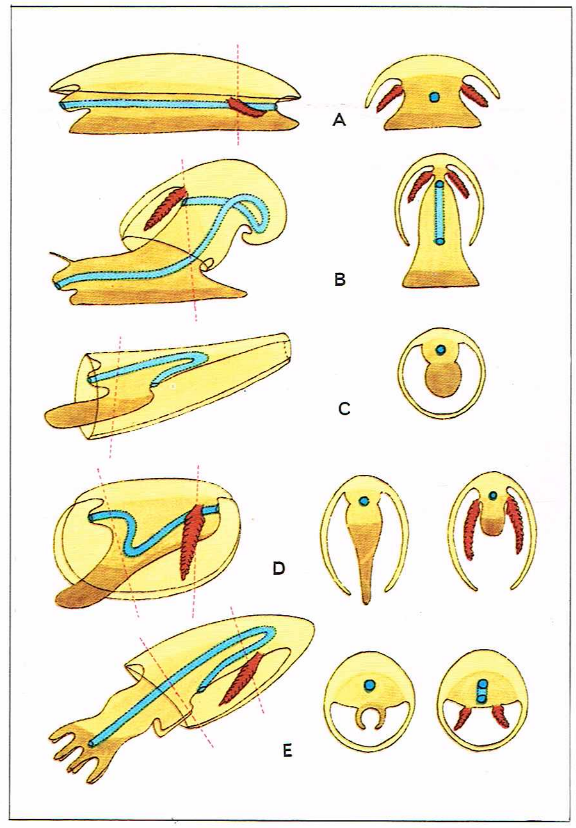

I.G.D.A.

▲ *La coquille des Mollusques Gastéropodes est le plus souvent enroulée en spirale. L'enroulement est généralement dextre; c'est le cas de cette coquille de* Lymnaea peregra *(à gauche). Représentation de la correspondance anatomique entre les diverses classes de Mollusques (à droite); coupes longitudinales et transversales au niveau des lignes en pointillé; A, Polyplacophores; B, Gastéropodes; C, Scaphopodes; D, Bivalves; E, Céphalopodes.*
▼ *Cette coquille de* Physa fontinalis *présente un enroulement senestre.*

C'est aussi dans la masse viscérale que passe l'anse nerveuse issue des centres nerveux céphaliques, anse qui se renfle de distance en distance en ganglions d'où partent des nerfs importants.

Le *manteau* est une formation tégumentaire qui revêt la masse viscérale et la déborde de façon inégale sur son pourtour. La cavité déterminée par le développement du repli du manteau, ou repli palléal, est la cavité palléale. Dans cette cavité palléale se trouvent les branchies, organes respiratoires fort délicats qui sont en principe à peu de distance des émonctoires, anus et orifices urinaires, ainsi que deux chimio-récepteurs, les osphradies, et une glande hypobranchiale qui contribue à agglutiner les particules indésirables. La cavité palléale a chez les Mollusques une importance primordiale. C'est un véritable organe de « sanitation » au sens des auteurs anglais et, comme les branchies ne sauraient fonctionner utilement en milieu pollué, des dispositifs, surtout ciliaires, tendent à éloigner de celles-ci les produits du métabolisme que rejettent les émonctoires.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Dans le Mollusque primitif prétorsionnel, la cavité palléale devait se situer à l'arrière de la masse viscérale et le tube digestif, après un trajet subrectiligne, devait y déboucher. Deux phénomènes ont complètement bouleversé cette disposition : une flexure ventrale accentuée a reporté l'anus en avant, sous la bouche, si bien que la cavité palléale s'est trouvée orientée vers l'avant; puis la masse viscérale du Mollusque Gastéropode, peut-être par suite d'une mutation larvaire, a subi une rotation de 180° dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, de telle sorte que la cavité palléale et l'anus se sont placés en arrière de la bouche, à la face dorsale de l'Animal. La conséquence d'une telle rotation fut la torsion de l'anse nerveuse qui, partant des centres nerveux supra-œsophagiens, passait sous la portion postérieure du tube digestif. Cette anse a donc pris une configuration en 8 et la torsion en U du tube digestif, après son accomplissement, a provoqué le report de l'anus au-dessus de la tête, ou presque. Ce phénomène, unique dans tout le règne animal, s'observe au cours de la vie embryonnaire des Mollusques Gastéropodes ou au moins dans le groupe des Prosobranches, car ailleurs il est si peu apparent qu'il suggère qu'une détorsion a pu intervenir. On voit ainsi que le schéma de l'archétype rend compte d'une organisation présumée et que, s'il se réalise parfois, c'est à la suite de phénomènes intervenus secondairement. Quoi qu'il en soit, la torsion a déterminé la dissymétrie du corps; elle a entraîné la perte de l'un des deux reins, ainsi que de nombreuses autres modifications. Il s'y est en outre ajouté un second phénomène, l'enroulement de la masse viscérale et, par voie de conséquence, celui de la coquille qui la recouvre.

Ces bouleversements n'ont affecté que la classe des Gastéropodes et la considération des fossiles montre qu'au cours d'une période, bien lointaine en vérité, ont vécu des Gastéropodes isopleures, à coquille enroulée rigoureusement dans un plan, comme celle du nautile, Animal du groupe des Céphalopodes.

La diversification des Mollusques, la séparation des classes s'est produite avant même le Cambrien, de sorte qu'il est impossible de retracer la généalogie des classes.

Les *productions du manteau*, spicules, plaques, coquille univalve, valves des Lamellibranches, tube des Scaphopodes et test des Céphalopodes sont d'une très grande diversité. Les spicules des Aculifères résultent de l'activité de cellules éparses dans le manteau. Les plaques des

Placophores, très calcifiées, s'agencent en série de la tête à la partie postérieure du corps. Leur articulation permet à l'Animal de s'enrouler dans un plan à la façon des cloportes. La coquille des Tryblidiacés, en cône, révèle par son apex un enroulement en spirale dans un plan. Celle des Gastéropodes, parfois absente ou remplacée par des granulations calcaires, peut être conique comme chez les patelles, ou en nacelle, mais elle est bien plus souvent enroulée en spirale. L'enroulement est dextre en général, c'est-à-dire que, si la coquille est observée par son extrémité supérieure (apex), il se fait jusqu'à l'ouverture dans le sens des aiguilles d'une montre. L'Animal peut s'y retirer en totalité, ou en partie, par contraction de son muscle columellaire ; mais dans le premier cas, réalisé chez les Prosobranches, l'ouverture peut être obstruée, après rétraction de l'Animal, par un opercule corné ou calcifié élaboré par la face postéro-dorsale du pied. Les Pulmonés, tels que l'escargot, ne possèdent pas d'opercule, mais ils sécrètent, lorsqu'ils se retirent dans leur coquille, un épiphragme qui les isole du monde extérieur.

Les Bivalves, ou Lamellibranches, à corps généralement symétrique enclos dans un vaste manteau, sont protégés par un ensemble de deux valves plus ou moins épaisses, articulées dorsalement au niveau d'une charnière pourvue ou non de dents constituant un remarquable dispositif d'engrenage. Ces deux valves, unies par un ligament élastique dorsal qui tend normalement à les maintenir béantes, sont reliées à leur face interne par un ou deux muscles adducteurs disposés de telle sorte que l'Animal, en les contractant, peut s'enclore complètement dans ces valves.

Le tube des Scaphopodes rappelle souvent par sa forme une défense d'éléphant ; il est ouvert à ses deux extrémités, au moins à l'état adulte. Dans le groupe des Céphalopodes, seul le nautile possède, de nos jours, une coquille calcifiée externe, qui est du reste plus complexe que celle des Gastéropodes. Celle que produit la femelle de l'argonaute, élégante, légère, est une production d'un tout autre type qui, en fait, ne peut être identifiée à une véritable coquille.

Beaucoup d'autres Céphalopodes sont dotés d'une sorte de squelette interne calcifié (sépion), ou d'une « plume » cornée (calmars) que revêt le tégument dorsal et dont l'origine se rapproche beaucoup de celle de la coquille des autres Mollusques.

Sur le plan structural, la coquille ne représente pas une formation homogène. Elle est élaborée par deux régions du manteau : le rebord palléal, qui la limite à sa périphérie et en assure l'agrandissement, puis tout le reste de la surface du manteau qui, progressivement, en accroît l'épaisseur. Chez les Bivalves où elle est la mieux connue, la coquille est constituée de trois couches superposées : le périostracum, à l'extérieur, formé d'une substance organique protectrice mal définie, la « conchyoline », l'ostracum ou couche des prismes, où sont juxtaposés essentiellement des cristaux de calcite, puis l'hypostracum, couche porcelanée ou nacrée. La couche de prismes est particulièrement résistante du fait de la disposition plus ou moins entrecroisée des cristaux. En fait, bien que due à l'activité du manteau, la sécrétion de la coquille relève pour une grande part des conditions biochimiques et biophysiques qui se trouvent réalisées au sein du liquide extra-palléal, mince couche fluide interposée entre le manteau et la coquille. Les cristaux de carbonate de calcium sont engendrés sur une matrice de conchyoline qui, en quelque sorte, dirige leur évolution.

Le tégument des Mollusques, d'une façon générale, est riche en glandes qui élaborent un mucus utile en de nombreuses circonstances. Ce tégument contenant de nombreuses fibres musculaires a souvent la valeur d'un étui musculo-cutané résistant et très déformable.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ Les Bivalves, comme leur nom l'indique, sont protégés par une coquille présentant deux valves, une droite et une gauche.
▼ A gauche, schéma d'une section à travers la coquille et le manteau d'un Bivalve : co, coquille ; ma, manteau ; pe, périostracum ; os, ostracum ; hy, hypostracum ; ep, épithélium externe ; cc, couche de tissu conjonctif ; ei, épithélium interne.
A droite, une coquille de **Nautilus pompilius** ***; le nautile est le seul Céphalopode actuel qui produise une coquille calcifiée externe.***

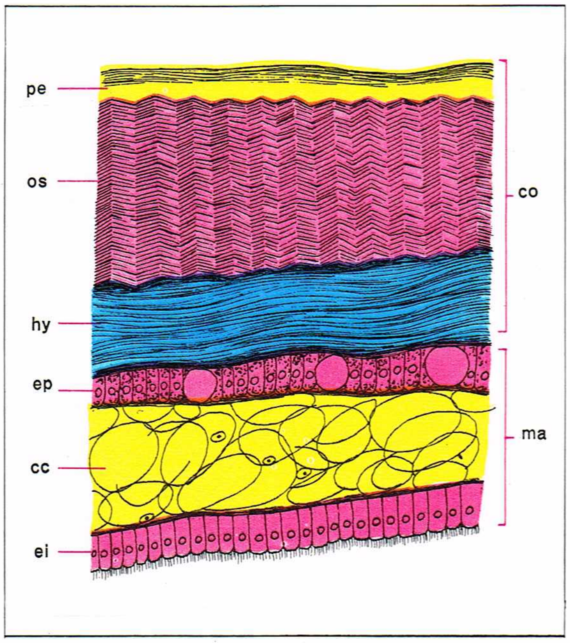

I.G.D.A.

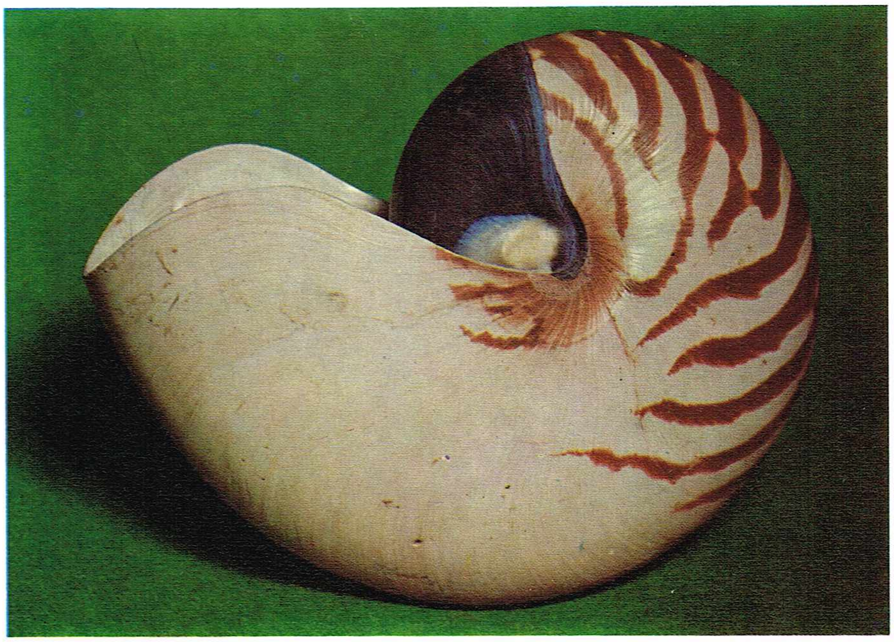

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ *Schéma du bulbe buccal d'un Mollusque : cl, cartilage lingual; ma, mâchoire; ra, radula; ph, pharynx; gr, gaine radulaire; oe, œsophage.*

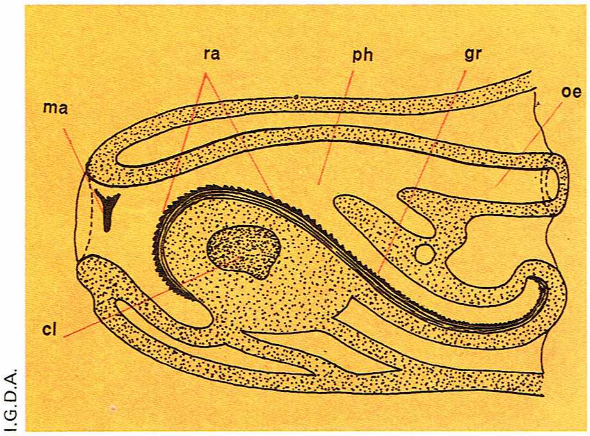

▼ *Système nerveux et statocystes d'un Mollusque du genre* Nucula *: 1, ganglion cérébroïde; 2, ganglion pleural; 3, pied; 4, statocyste; 5, ganglion pédieux; 6, ganglion osphradial; 7, ganglion viscéral.*

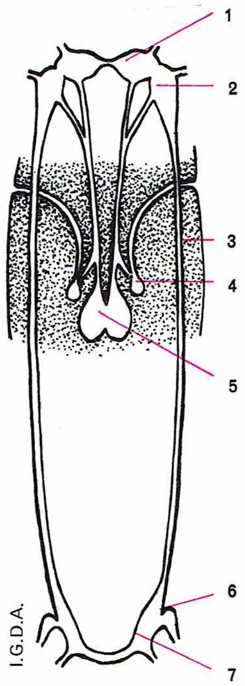

▼ *Coupe à travers une osphradie de Gastéropode : 1, épithélium sensoriel; 2, nerf de l'osphradie; 3, soutien cartilagineux; 4, sinus sanguin; 5, rameau nerveux branchial; 6, tissu de soutien.*

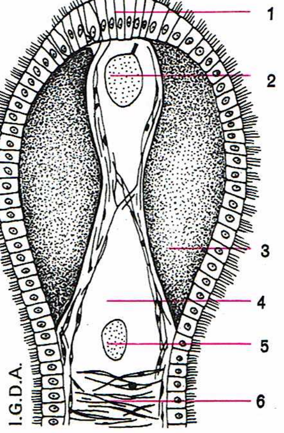

L'*appareil digestif* des Mollusques offre d'intéressantes caractéristiques dans sa région antérieure du fait qu'en arrière de la bouche existe dans toutes les classes, à l'exception de celle des Bivalves, outre des mâchoires chitinisées, un appareil radulaire complexe essentiellement constitué d'une radula, ruban plus ou moins long garni de rangées de dents parfois fort nombreuses, différemment conformées selon le régime alimentaire.

La radula, engendrée dans une gaine radulaire, est mue par de nombreux muscles. L'œsophage donne accès à l'estomac, poche complexe en rapport par des conduits avec une glande digestive où se produirait une partie de la digestion. La paroi même de l'estomac différencie une région chitineuse, le bouclier gastrique, où sont triturés les aliments qui y sont conduits par des gouttières ciliées avant d'être séparés des matières inutilisables au niveau d'une aire de triage, également ciliée. L'estomac contient en outre, chez de nombreuses formes, un stylet cristallin capable de libérer des enzymes et qui, animé d'un mouvement de rotation, bute contre le bouclier gastrique.

L'*appareil circulatoire* des Mollusques n'est pas clos; il tend à l'être seulement chez les Céphalopodes. Du cœur, qui présente selon les groupes une conformation assez différente, partent des vaisseaux aortiques ouverts dans des sinus dont l'un des plus importants se trouve dans le pied. Le sang revient au cœur après avoir circulé dans les branchies où il subit l'hématose. L'appareil respiratoire, représenté par deux séries longitudinales de branchies chez les Chitons (Placophores), par deux paires de lames branchiales chez les Bivalves, par une ou deux cténidies chez les Prosobranches et par une ou deux paires de branchies chez les Céphalopodes, se réduit beaucoup ou même disparaît sous sa forme typique (Solénogastres) pour faire place à la respiration tégumentaire. Mais la transformation la plus profonde semble bien être celle qui s'est produite lors de l'adaptation à la vie aérienne. A cet effet est apparue une cavité pulmonaire comparable à la cavité palléale des formes aquatiques dont le plafond s'est considérablement vascularisé. Les Mollusques terrestres, tous Gastéropodes, appartiennent au groupe des Pulmonés, mais certains de leurs représentants (lymnées, planorbes, etc.) ont fait retour à l'habitat aquatique sans toutefois acquérir des branchies. Le sang, ou hémolymphe, contient rarement de l'hémoglobine (planorbes, arches); le pigment, ou hémocyanine, dissous dans le sérum sanguin, contient du cuivre.

La cavité péricardique communique avec l'extérieur par des reins et leur conduit évacuateur; cependant, par suite de la torsion, le rein droit a fréquemment disparu.

Le *système nerveux* est l'un des éléments les plus caractéristiques des Mollusques, car, des plus primitifs aux plus évolués, il subit des transformations considérables qui résultent d'une tendance à la constitution de centres cérébraux de plus en plus concentrés. Ici encore le type Gastéropode primitif peut servir de type de référence. On y trouve des ganglions cérébroïdes supra-œsophagiens plus ou moins confluents ou unis par une commissure cérébroïde, reliés par deux connectifs à deux ganglions pédieux sous-œsophagiens accolés ou unis l'un à l'autre par une courte commissure pédieuse. Ces deux paires de ganglions, portées par un collier périœsophagien, se relient en arrière à deux ganglions pleuraux d'où émane l'anse viscérale sur laquelle se voient une paire latérale de ganglions et un ganglion viscéral, ou plusieurs. La *chiastoneurie*, ou disposition en 8 de l'anse viscérale, a pour effet de modifier considérablement les rapports de situation de ces ganglions, car la branche de l'anse viscérale issue du ganglion pleural droit passe de droite à gauche au-dessus du tube digestif en se dirigeant vers le ganglion supra-intestinal alors que l'autre branche, issue du ganglion pleural gauche, passe sous l'œsophage de gauche à droite et porte le ganglion sous-intestinal.

En avant des ganglions cérébroïdes part aussi un collier sur lequel se trouvent deux ganglions buccaux.

Dans les formes inférieures des Solénogastres et des Caudofoveata, la disposition du système nerveux est bien plus simple. Des centres nerveux, assez paradoxalement déjà condensés, partent deux paires de longs cordons nerveux, l'une latérale, l'autre ventrale, unies entre elles par de nombreuses commissures issues de renflements ganglionnaires. Il existe également deux arcs nerveux chez les Placophores et chez *Neopilina*; mais, comme les Gastéropodes, les Bivalves possèdent une commissure viscérale.

Un cerveau véritable, complexe, existe chez les Céphalopodes. C'est en effet dans ce groupe que la cérébralisation est la plus nette.

Les *organes sensoriels*, en relation avec les centres nerveux des Mollusques, sont de plusieurs types. Au premier rang de ceux-ci, les yeux montrent tous les degrés de complexité entre la vésicule ouverte et l'œil extrêmement différencié des Céphalopodes. Il est aussi intéressant de constater que quelques Bivalves tels que les pectens, ou coquilles Saint-Jacques, portent des yeux déjà fort complexes, non sur la tête qui est absente, mais sur le bord du manteau.

Les Mollusques sont dotés d'une paire d'organes statorécepteurs logés dans la partie antérieure du pied. Dans la cavité palléale des Gastéropodes aquatiques existe une osphradie, petit organe d'aspect pectiné rappelant une branchie (cténidie), dont la fonction se rapporte certainement à l'appréciation des qualités de l'eau. En outre, sur la plus grande partie du corps des Mollusques, notamment sur les tentacules des Gastéropodes, existent des terminaisons sensorielles.

Les *organes reproducteurs* comprennent les gonades et les voies évacuatrices auxquelles s'adjoignent fréquemment des organes copulateurs. Les sexes sont séparés ou réunis, et la fécondation est externe ou interne. Les gonades, logées dans la masse viscérale, peuvent s'étendre jusque dans le manteau (moule).

Les appareils copulateurs consistent souvent en un vagin et un pénis simples ou complexes; toutefois, chez les Céphalopodes, les gamètes mâles sont transmis à l'orifice femelle par l'intermédiaire d'un bras spécialisé.

Physiologie

Locomotion. Les multiples adaptations des Mollusques ont évidemment nécessité d'importants ajustements physiologiques, compte tenu des modifications profondes survenues dans l'anatomie de ces Animaux. Les modes de locomotion, en rapport étroit avec la conformation du pied, vont de la reptation à la nage et même au saut. Les Placophores, *Neopilina* et de nombreux Gastéropodes rampent à l'aide d'une large sole pédieuse garnie de cils. Le pied fort réduit des Solénogastres ne peut assurer qu'une reptation réduite, mais celui des Bivalves, souvent apte à changer considérablement de volume, s'amincit pour pénétrer dans la vase puis se dilate et, ainsi fixé, attire l'Animal en profondeur. L'opération se renouvelle jusqu'à enfouissement complet.

Les Gastéropodes de plusieurs groupes possèdent un pied très élargi en nageoires qui, battant synchroniquement, permettent une nage assez rapide. C'est aussi par des parapodies, larges dilatations de la région ventrale du corps, que nagent les aplysies et d'autres Gastéropodes du groupe des Opisthobranches. Mais les meilleurs nageurs sont incontestablement les Céphalopodes Décapodes qui mènent une vie pélagique et peuvent effectuer des déplacements extrêmement rapides en expulsant avec

G. Mazza

◀ ***Chez les Mollusques, les modes de locomotion, très variés, sont en rapport avec la conformation du pied; ce Gastéropode terrestre rampe grâce à sa sole pédieuse.***

force, par l'entonnoir, l'eau contenue dans leur cavité palléale. C'est là le mode de propuision « par jet ».

Les pectens et les limes utilisent pour fuir un mode de propulsion assez analogue. Ces Animaux, en refermant brusquement et rythmiquement leurs valves, se déplacent par sauts successifs sur plusieurs mètres.

Le mode d'alimentation se trouve être en rapport étroit avec la constitution du tube digestif, et plus précisément de la radula. Lorsque celle-ci fait défaut, comme chez les Bivalves, le mode d'alimentation devient très particulier, car il utilise les courants produits par l'activité des cils des branchies. Dans l'ensemble donc, le régime est macrophagique, herbivore, carnivore ou microphagique; mais les procédés utilisés pour la capture des micro-organismes ou des proies sont des plus variés. Ils mettent en œuvre, outre les courants ciliaires, les propriétés du mucus et celles de la radula, des dispositifs de préhension, de filtration, parfois de perforation, d'étouffement, de succion et de paralysie par des venins.

La *digestion* est fréquemment extra cellulaire, car elle résulte de l'action de plusieurs enzymes sécrétées par des glandes ou des cellules glandulaires situées au niveau de l'œsophage, de l'estomac, ou libérées par le stylet cristallin. Mais, en particulier chez les Bivalves et chez plusieurs Gastéropodes, la glande digestive représente un organe phagocytaire apte à englober de petites proies et à les digérer avant de transmettre les produits de la digestion à des amœbocytes qui les emportent à distance. La différenciation des glandes qui interviennent dans la digestion est particulièrement importante chez les Céphalopodes qui, dans leur grande majorité, se nourrissent d'Animaux souvent de belle taille.

Circulation. Le système circulatoire n'est clos que chez les Céphalopodes qui ont, entre les artères et les veines, de véritables capillaires. Dans ce groupe, une circulation branchiale définie s'interpose entre les veines et le cœur. Chez les Scaphopodes par contre le cœur est rudimentaire, peu apparent et tel que le mouvement du sang dans les sinus ne dépend que des contractions musculaires. Deux Opisthobranches au moins *(Alderia modesta, A. uva)* n'ont ni cœur, ni artères. La circulation du sang est assurée chez eux par la contraction des papilles dorsales. *Rhodope,* dont la position parmi les Mollusques a été contestée, n'a pas de cœur non plus. Le sang de *Neopilina,* après avoir traversé deux oreillettes, parvient à deux ventricules d'où il ressort par une artère. La multiplicité des branchies des Placophores a souvent été interprétée comme un indice de segmentation mais, en fait, celles-ci s'abouchent à une veine branchiale unique. Ces Animaux ont un cœur à deux oreillettes, comme les Bivalves et les Gastéropodes inférieurs, car les Gastéropodes plus évolués n'ont qu'une oreillette. Le cœur des Céphalopodes s'intègre dans un système clos où la pression sanguine demeure élevée et qui est tel que tout le sang est oxygéné au départ de l'oreillette. En outre, le sang est propulsé vers les branchies par des cœurs branchiaux.

Expérimentalement, on a prouvé l'existence d'un pacemaker localisé à l'origine de l'aorte, qui assure la contraction, et d'une région auriculaire à fonction inhibitrice antagoniste. Chez les huîtres au contraire, le pacemaker occuperait principalement une région auriculaire.

La *fonction respiratoire* s'exerce principalement par les branchies chez les formes aquatiques et par un « poumon » chez les Gastéropodes Pulmonés; cependant, dans maintes espèces marines, il n'existe pas de branchies et force est d'admettre que la respiration s'effectue par le tégument. La respiration tégumentaire est cependant évidente même quand des organes spécialisés sont présents. Les branchies typiques disparaissent parfois et des branchies secondaires tout autrement conformées s'y substituent, en particulier chez de nombreux Gastéropodes Opisthobranches. D'autres représentants de ce même groupe ont le corps hérissé de papilles à grande surface qui doivent suppléer à l'absence de branchies.

Dans les formes aquatiques, il est essentiel que les branchies baignent dans une eau pure et constamment

▼ ***Les Bivalves peuvent pratiquer l'enfouissement grâce à des variations de volume de leur pied, ou encore peuvent se déplacer en refermant brusquement leurs valves; Mytilus, la moule, se fixe par son byssus, une sécrétion de la glande byssogène. Les Céphalopodes Décapodes peuvent effectuer des déplacements rapides en expulsant par leur entonnoir l'eau de la cavité palléale.***

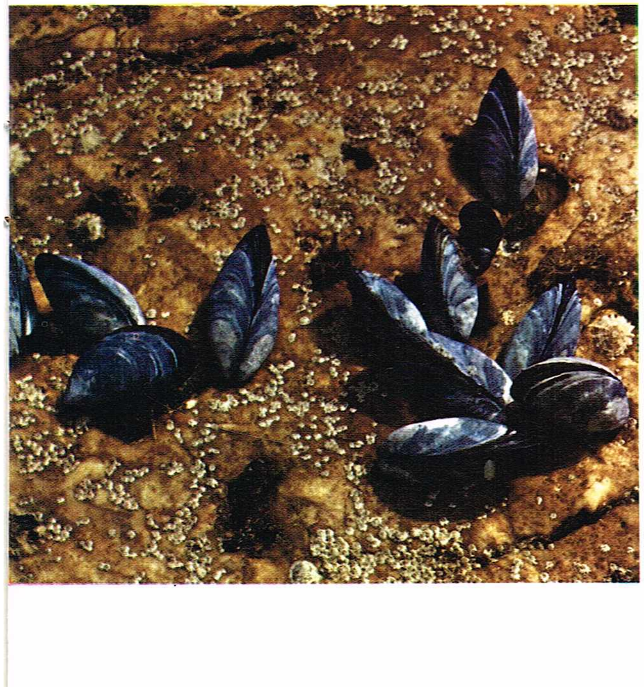

D. Wilson

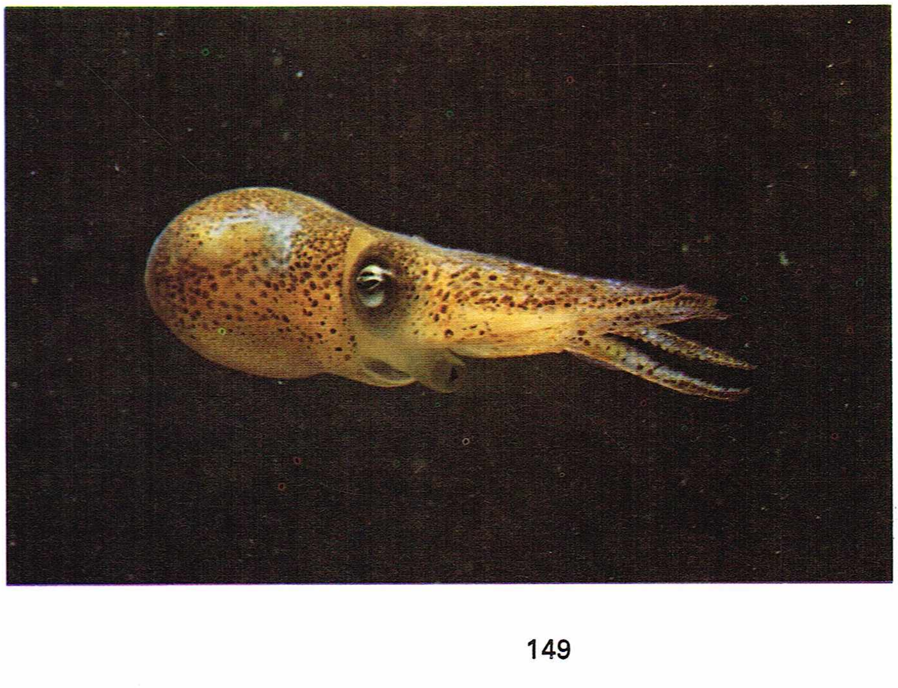

G. Mazza

▶ ***Chez les Gastéropodes Pulmonés, la respiration s'effectue grâce à une cavité pulmonaire s'ouvrant à l'extérieur par le pneumostome, orifice bien visible sur cette photo de limace.***

S. Lombardi

renouvelée. La ciliature du manteau, celle des branchies, mais aussi la musculature créent en permanence des courants respiratoires qui, en particulier chez les Bivalves où l'eau ambiante est acheminée dans la cavité palléale par une ouverture de celle-ci ou par un siphon inhalant parfois fort long, sont aussi des courants alimentaires, car ils entraînent sur les branchies, et de là sur les palpes et vers la bouche, des Diatomées et des Protistes qui sont ingérés.

La mise en œuvre des courants respiratoires est d'une surprenante perfection et en ce sens la cavité palléale, où s'effectue une séparation de l'eau respiratoire, de l'eau polluée par les déchets du métabolisme, et de celle qui a déjà baigné les branchies, se révèle d'une importance vitale pour les Mollusques. Cette cavité augmente et diminue de volume rythmiquement surtout chez les Céphalopodes, ce qui assure une oxygénation importante du sang au niveau des branchies.

Dans le cas des Gastéropodes Pulmonés terrestres, la ventilation pulmonaire est contrôlée par le pneumostome, ou orifice pulmonaire, qui peut rester clos durant d'assez longues périodes. Plusieurs lymnées et planorbes, Pulmonés adaptés à l'eau douce, ont un « poumon aquatique » apte à fonctionner comme une branchie.

Les *processus de filtration* de l'urine se produisent vraisemblablement au niveau du péricarde; puis au niveau des reins ont lieu la sécrétion et la réabsorption. La réabsorption limite la perte d'eau, mais aussi celle des sels, des glucides, des amino-acides et d'ions spécifiques. Le rein des Gastéropodes Pulmonés, toujours unique, localisé près du péricarde, montre nettement sa fonction excrétrice, en particulier au cours de l'hibernation. L'urine des Mollusques aquatiques se charge de composés ammoniacaux (ammonotélie), celle des Gastéropodes terrestres est riche en acide urique (uricotélie). Chez les larves, où les reins ne sont pas encore différenciés, la fonction excrétrice s'exerce parfois par des protonéphridies à solénocytes ou par des protonéphridies dépourvues de cils et de flagelles.

Physiologie nerveuse. La comparaison de l'organisation du système nerveux dans les différentes classes de Mollusques est particulièrement étonnante car ce système apparemment presque dépourvu de centres nerveux individualisés chez une partie des Aculifères devient assez graduellement d'une grande perfection; chez les Céphalopodes, il n'est pas exagéré de parler d'un véritable cerveau. On observe effectivement en premier lieu l'apparition de centres nerveux dispersés, puis une tendance de ces centres à se grouper au-dessus de l'œsophage (céphalisation). Ces centres peu distants les uns des autres ou accolés fusionnent chez certains Gastéropodes (cérébralisation); enfin la télencéphalisation se réalise par constitution d'un centre d'une haute complexité (Céphalopodes).

L'absence de métamérisation chez les Mollusques a pour conséquence la participation des centres nerveux aux réflexes complexes, alors que chez les Arthropodes, du fait de la répartition segmentaire des ganglions nerveux, les mouvements réflexes ne font pas intervenir le cerveau.

Il existe aussi chez les Mollusques des ganglions isolés répartis de place en place le long de l'anse nerveuse, qui fonctionnent comme des centres réflexes locaux exerçant un contrôle sur des territoires restreints. On sait aussi que les ganglions cérébraux, pédieux, pleuraux et viscéraux sont le siège d'une activité neurosécrétoire dont les variations concordent avec les phases du cycle sexuel.

Les nerfs des Mollusques constituent un matériel d'étude de choix. Les neurones géants de calmars, en particulier, se prêtent admirablement à l'expérimentation. L'influx nerveux chez les Mollusques se propage à des vitesses qui varient selon les espèces, selon le diamètre des nerfs, en fonction aussi de la température. Sa vitesse de propagation, de 5 cm/s pour le nerf intestinal de l'escargot, s'élève à 7 m/s dans certains nerfs de la seiche de 200 μ de diamètre et à 35 m/s dans les fibres nerveuses de calmars de 400 μ de diamètre. Les ganglions cérébraux sont surtout des centres coordinateurs des mouvements du cœur et de l'activité respiratoire mais, en liaison avec les ganglions pédieux, ils gouvernent l'activité locomotrice. Les ganglions viscéraux, par contre, innervent les organes contenus dans la masse viscérale. Le rythme de clôture des valves et des siphons des Lamellibranches répond à des nécessités alimentaires et respiratoires qui relèvent de centres secondaires, mais aussi des ganglions cérébroïdes.

Le degré de perfection du « cerveau » atteint son maximum chez les Céphalopodes qui sont capables d'apprentissage, si l'on en juge par les très nombreuses expériences effectuées sur les pieuvres *(Octopus)*. Ces Animaux, après avoir été entraînés, sont capables de discerner des couleurs et des formes, et ils réagissent rapidement, avec une grande précision, à des stimulations tactiles. Par des interventions effectuées au niveau des différentes parties du cerveau, il a été possible de reconnaître un certain nombre de centres en rapport avec diverses facultés.

Physiologie sensorielle. Dans ce domaine aussi les Céphalopodes occupent une place privilégiée en raison de la perfection de leurs appareils sensoriels et en tout premier lieu de leurs organes photorécepteurs. Ces derniers n'ont pas été reconnus chez les Monoplacophores, les Solénogastres et les Caudofoveata. Par contre, les Placophores en possèdent un type très particulier sous la forme de petits organes, les esthètes, inclus dans la paroi dorsale des plaques calcaires. Ces esthètes consistent en papilles ectodermiques contenant des cellules sensorielles en relation avec des filets nerveux palléaux qui traversent les plaques dorsales. On y reconnaît parfois un cristallin, un corps vitré, une rétine et une gaine pigmentée. Le nombre de ces organes peut atteindre quelques milliers, mais leur rôle dans la vie des Chitons a été discuté et l'on a reconnu la propriété photoréceptrice du tégument de la ceinture, ou portion supérieure des Animaux non recouverte par les plaques.

Les Gastéropodes possèdent des photorécepteurs bien définis dans l'ensemble, et qui manquent rarement (ianthine, parasites). Ces yeux toujours localisés à la région céphalique consistent en vésicules à fond tapissé d'une couche de cellules rétiniennes; mais les vésicules elles-mêmes sont ouvertes vers l'extérieur (*Haliotis,* fissurelle, patelle) et remplies d'une masse de sécrétion qui joue probablement le rôle de cristallin, ou closes et plus ou moins perfectionnées.

Souvent portés par des tentacules, les yeux des Gastéropodes supérieurs, subsphériques, sont bien caractérisés par une assise de cellules rétiniennes disposées en une cupule qui contient un cristallin et un corps vitré. En face de ces yeux, le tégument forme une cornée transparente doublée vers l'extérieur d'une couche conjonctive de cellules transparentes, très réfringentes. Un étonnant phénomène de compensation s'observe chez les Bivalves où les formations céphaliques font défaut. Car, en dehors de quelques exceptions où des Bivalves possèdent des yeux « céphaliques » (quelques Mytilidés, *Avicula, Malleus*), des yeux se localisent au bord du manteau ou sur les siphons, au moins chez quelques espèces. La structure de ces organes varie quelque peu, mais elle devient fort complexe chez les Pectinacés et chez les Limidés. *Pecten irradians* en possède une centaine d'environ 1 mm de diamètre.

La fonction visuelle aide vraisemblablement à l'orientation des Gastéropodes. Chez les Bivalves, sensibles à un obscurcissement brusque, elle interviendrait aussi pour conditionner les positions les plus favorables à l'enfouis-

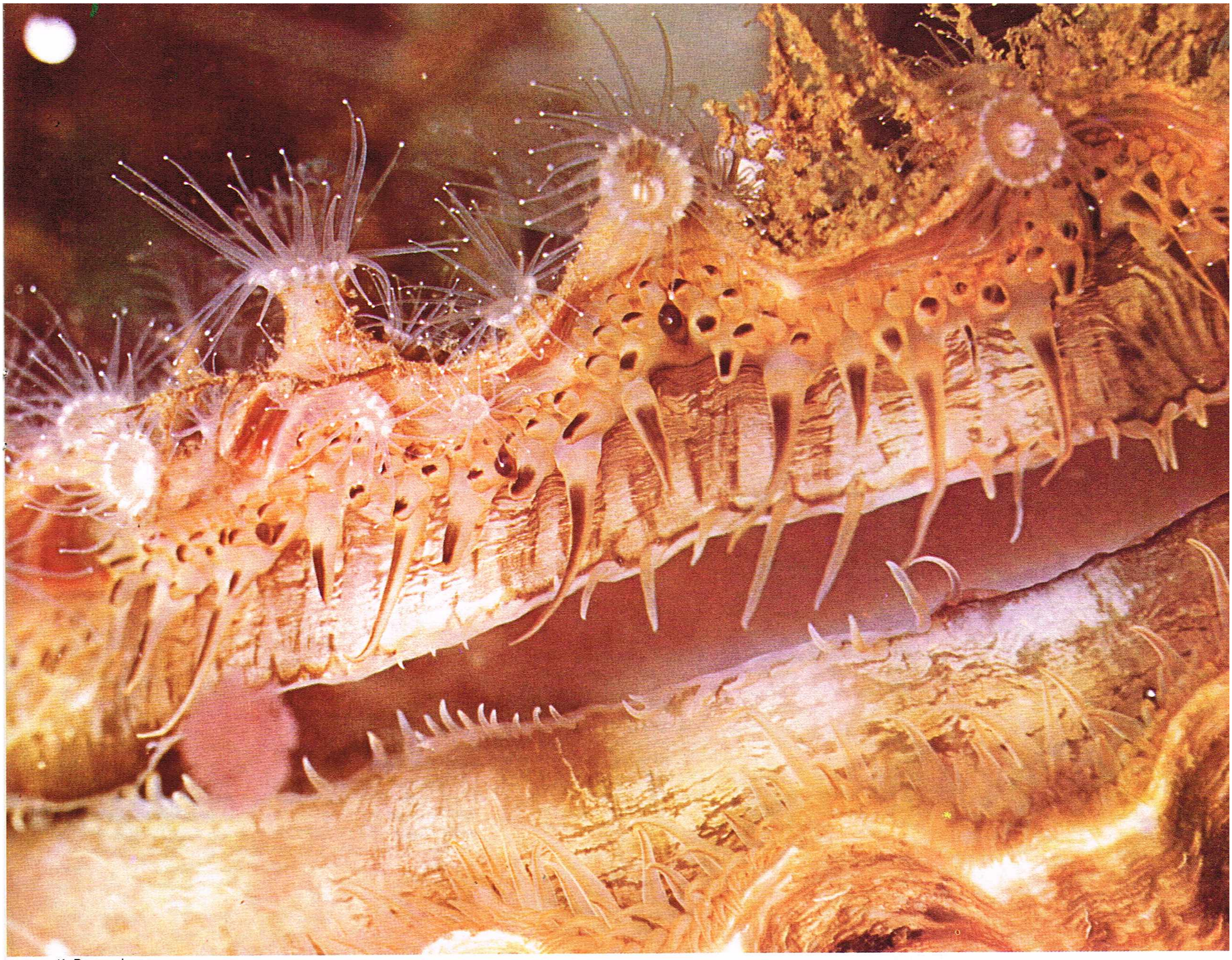

K. Ross - Jacana

sement, pour contrôler l'ouverture et la fermeture des siphons. Il est du reste vraisemblable que la majeure partie du tégument de bien des Mollusques est apte à percevoir des stimulations lumineuses.

Parmi les Céphalopodes, le nautile est bien celui qui possède les yeux les plus simples. Ces organes de bonne taille ne sont que des vésicules ouvertes par une pupille et à fond occupé par la rétine. L'œil des autres Céphalopodes a une constitution voisine de celui des Mammifères avec cornée, iris, cristallin et forte densité des éléments rétiniens. La question de savoir s'il accommode effectivement dans les conditions naturelles ne semble pas avoir reçu de réponse satisfaisante, bien qu'on ait montré sur des yeux excisés que le cristallin, sphère dure, peut être déplacé vers l'intérieur par action des muscles ciliaires, ou vers l'extérieur, par contraction des muscles de la vésicule oculaire. Quant à la pupille, elle répond normalement aux stimulations lumineuses par ouverture ou par fermeture.

Un important chapitre de la physiologie sensorielle se rapporte aux variations de la teinte des Céphalopodes et à la production de lumière par certaines espèces. L'état clair ou sombre du tégument de ces Animaux est directement placé sous l'influence de stimulations des organes optiques. Le contrôle des photophores, par contre, moins connu, relève sans doute à un moindre degré des stimulations visuelles.

Les stimulations mécaniques affectent les statocystes, petites vésicules closes souvent bordées intérieurement de cils, dans lesquelles se trouvent une ou plusieurs concrétions, des récepteurs tactiles répartis en plusieurs points du tégument et des propriocepteurs, sensibles aux contractions musculaires et aux changements de position de la coquille.

▲ ***Coquille Saint-Jacques*** **(Pecten maximus)** ***entrouverte montrant le bord du manteau portant des tentacules et des yeux.***

▼ ***Chez les Céphalopodes autres que le nautile, l'œil a une constitution voisine de celle des Mammifères ; ici, un œil d'*****Argonauta argo.**

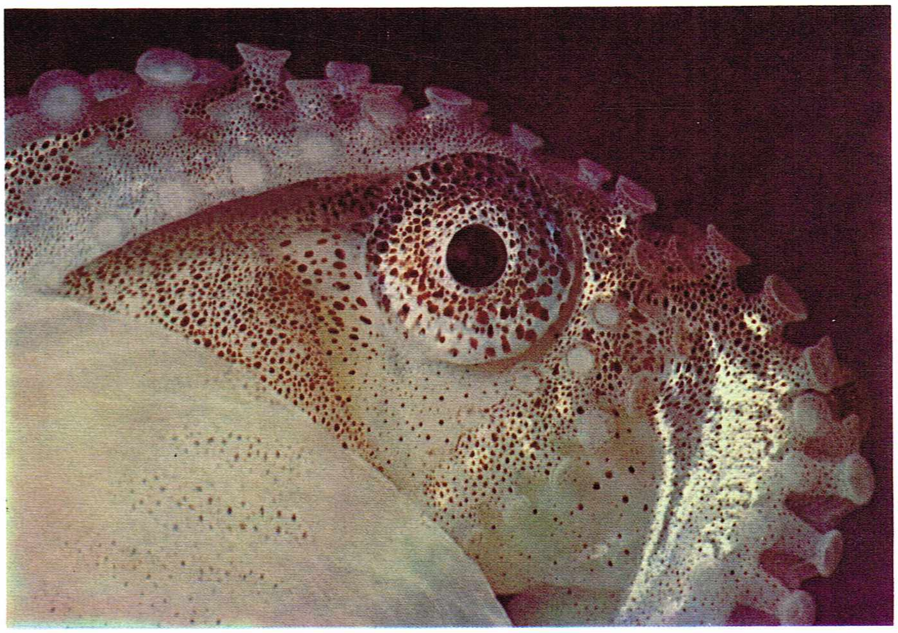

G.S. Giacomelli

▶ *Accouplement de limaces; chez les Gastéropodes Pulmonés, l'hermaphrodisme est de rigueur, alors qu'il est sporadique chez les Bivalves et rare chez les Caudofoveata et les Placophores; les sexes sont toujours séparés chez les Céphalopodes.*

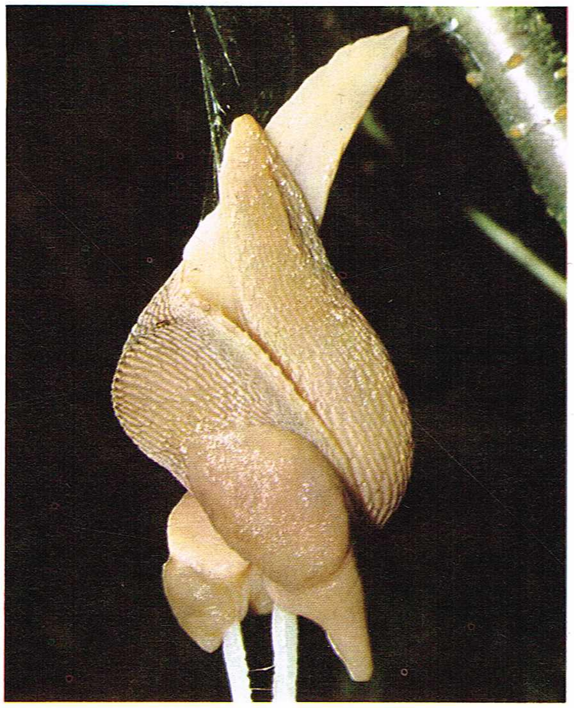

A. Girod

Les tentacules et les rhinophores sont des organes tactiles très sensibles.

On ne saurait douter de l'existence d'organes chimiorécepteurs de différents types chez les Mollusques. Plusieurs d'entre eux sont connus en détail. Toutefois, il est encore très difficile d'opérer une distinction physiologique entre les organes gustatifs et olfactifs; aussi préfère-t-on nommer la gustation « chimioréception de contact » et l'olfaction « chimioréception à distance ».

Les tentacules céphaliques, les rhinophores, les siphons et l'organe subradulaire se rapportent au premier type, l'osphradie au second. Tous ces organes sont richement innervés, mais l'osphradie manque, notamment chez les Pulmonés terrestres, où cependant l'olfaction a été reconnue. En réalité, le bord du manteau et les parois du pied sont sensibles à diverses substances chimiques et aux variations de la salinité. Il semble que les siphons soient très sensibles aux « substances d'accouplement » de même qu'aux sécrétions des prédateurs; en ce cas joue le réflexe de fuite.

Reproduction. De tous les groupes animaux, celui des Mollusques est l'un des plus diversifiés — sinon le plus diversifié — quant à l'expression de la sexualité. Les formes gonochoriques, c'est-à-dire à sexes séparés, sont très fréquentes, mais l'hermaphrodisme a un caractère de généralité dans certaines classes (Solénogastres, Pulmonés et Opisthobranches) alors qu'il demeure sporadique dans le groupe des Bivalves et rare chez les Caudofoveata et même les Placophores.

Le dimorphisme sexuel n'est bien évident que chez l'argonaute et chez quelques Gastéropodes parasites. Dans ces deux groupes, le mâle est d'une taille bien inférieure à celle de la femelle, au point que chez les Gastéropodes parasites, où il est fort réduit, on le qualifie de mâle pygmée. Le dimorphisme sexuel porte parfois sur la coquille, la radula et les tentacules (Viviparidés); *Viviparus* et les formes apparentées possèdent en effet deux tentacules différents dans le sexe mâle, le tentacule droit étant modifié en pénis.

L'hermaphrodisme, évident chez les Pulmonés et les Opisthobranches où la gonade contient simultanément des éléments germinaux des deux sexes, est parfois fort difficile à déceler, en particulier lorsqu'il est « successif ». En ce cas, la gonade ne contient en général à son apparition que des éléments mâles, puis les individus ne forment plus que des gamètes femelles. On connaît aussi des exemples où cette alternance des sexes se répète plusieurs fois au cours de l'existence, au moins chez certains individus. Il en résulte (huîtres, tarets) qu'une population peut contenir des individus chez lesquels le sexe est fixé définitivement lors de l'apparition de la gonade, des individus où l'alternance des sexes est simple (stade mâle, puis stade femelle définitif ou inversement) et des spécimens capables de changer de sexe plusieurs fois au cours de leur existence, cela selon un rythme variable, une ou deux fois par an.

La fécondation résulte soit du rejet en mer des produits génitaux parvenus à maturité, soit d'un accouplement qui peut concerner en quelques cas plusieurs individus. Dans la première éventualité au moins, celle de la fécondation externe, il n'est pas douteux que des gamones, substances capables d'induire la ponte des ovules ou l'éjaculation du sperme, favorisent l'union des gamètes. Chez les Céphalopodes les plus accessibles à l'observation, le bras hectocotyle assure le transfert des spermatozoïdes du mâle enclos dans des capsules très complexes, ou spermatophores, à la cavité palléale de la femelle. La fécondation est nécessairement interne chez tous les Mollusques terrestres; elle l'est aussi cependant dans un grand nombre de Gastéropodes marins ou d'eau douce.

Les gamètes femelles, plus ou moins chargés de vitellus, n'acquièrent d'assez grandes dimensions que chez les Céphalopodes et chez quelques Pulmonés. Quant aux spermatozoïdes, s'ils appartiennent à un type primitif dans les formes inférieures, leurs très grandes variations morphologiques se montrent en rapport avec l'évolution subie par les différents groupes. Un dimorphisme spermien particulièrement net se voit dans de nombreuses familles de Gastéropodes Prosobranches. Le sperme de ces derniers contient en effet des spermatozoïdes typiques ou normaux et d'autres, atypiques, à chromatine rare ou absente. Ces derniers, ou spermatozeugmata, dont la signification reste mystérieuse, ont une évolution parfois étonnante, car, démesurément agrandis, ils se chargent de très nombreux éléments typiques qui s'y fixent et se font véhiculer par eux. On incline à leur attribuer une fonction nourricière.

L'autofécondation demeure rare; on ne la connaît que chez certains Pulmonés d'eau douce. La parthénogenèse ne serait guère plus fréquente.

Les œufs fécondés se développent librement en mer, mais ils sont plus fréquemment déposés dans des oothèques ou inclus dans des cordons de consistance gélatineuse. Ils sont déposés isolément en terre lorsqu'il s'agit de Mollusques terrestres ou sur des Algues (seiches).

Plusieurs Bivalves (Unionidés) et quelques Gastéropodes incubent leurs œufs. A cette fin, les premiers utilisent leurs branchies, les seconds conservent leurs œufs dans l'utérus jusqu'à l'éclosion des jeunes.

Développement. La connaissance du développement des Mollusques est d'un très grand intérêt, car, d'une part, la comparaison des processus ontogénétiques devrait permettre d'établir au sein du groupe les rapports de parenté des classes, ce qui pourrait fournir d'utiles renseignements sur leur origine, et, d'autre part, elle contribuerait à fixer les liens de parenté des Mollusques, des Annélides et même des Arthropodes.

A. Margiocco

▶ *A l'intérieur de ces œufs de limaces, on peut apercevoir les embryons.*

C. Bevilacqua

◀ *Les coquilles fossilisées des Mollusques ont permis de constater que leur diversification s'est accomplie au Silurien; ce fossile de* **Turritella cathedralis** *date du Miocène.*

On sait que la segmentation de type spiral est propre aux Annélides et aux Mollusques; en outre il est d'usage de considérer que la larve des Mollusques n'est qu'une trochophore comparable à celle des Annélides. De belles études incitent à croire qu'il en est bien ainsi, au moins dans quelques cas typiques, mais, comme le souligne Salvini-Plawen (1969), n'a-t-on pas eu tendance à exagérer les homologies? La « larve souche » des Mollusques primitifs présente des caractères particuliers dont la modification, par convergence, aurait pu conduire au type trochophore des Annélides. Le problème est posé; mais, quoi qu'il en soit, les processus de la segmentation, à eux seuls, permettent de conclure à une parenté des deux groupes. On ne saurait en déduire que les processus ontogénétiques se déroulent selon le même schéma dans toutes les classes de Mollusques, et il convient de remarquer que la teneur très variable des œufs en vitellus introduit un sérieux élément de complication.

Par malchance, le développement des Aculifères demeure mal connu; or, c'est dans cet ensemble, ainsi que dans le groupe des Scaphopodes et dans les formes inférieures des Gastéropodes Prosobranches, que les comparaisons sont les plus fructueuses.

L'embryon des Gastéropodes marins et aussi celui des Bivalves évoluent en une larve dite « véligère », car elle développe un velum parfois très ample qui provient du segment antérieur ou prototrochal de la trochophore prise comme référence. Le velum favorise beaucoup la nage par sa surface et par la puissante ciliature qui est implantée sur son bord. Mais c'est aussi un organe de capture des aliments, car une gouttière périphérique ciliée conduit vers la bouche des Diatomées et des micro-organismes qui sont aisément ingérés.

Ce n'est du reste pas toujours une larve véligère qui est libérée à l'éclosion, car en bien des cas le velum, toujours transitoire, disparaît auparavant et l'éclosion se fait au « stade rampant », avec escamotage du stade larvaire pélagique. Cette éventualité se produit en particulier lorsque dans l'oothèque existent des œufs nourriciers qui servent d'aliments aux larves. En fait, de nombreux intermédiaires existent entre la larve de type trochophore qui tournoie un certain temps en eau libre, la véligère univalve ou bivalve qui nage plus ou moins longtemps et le jeune Mollusque qui, à l'éclosion, ne montre plus de caractères larvaires. Peu apparente et très graduée dans ce dernier cas, la métamorphose implique quelquefois des transformations tout à fait spectaculaires et assez rapides. Il n'en est pas ainsi dans le groupe des Céphalopodes où le développement est très progressif. Enfin, chez les formes terrestres, le développement se déroule avec d'autres particularités.

Mollusques fossiles

Si l'on excepte les deux classes des Caudofoveata et des Solénogastres dont les restes anciens ne sont pas conservés, on constate que la diversification des Mollusques était accomplie au plus tard au Silurien. Dès le Cambrien inférieur existaient les deux classes des Tryblidiidés et des Gastéropodes. Au Cambrien supérieur vivaient des Bivalves et des Céphalopodes et ce n'est que dans les couches siluriennes qu'ont été trouvés les Polyplacophores et les Scaphopodes.

L'histoire des Gastéropodes est encore énigmatique car les documents paléontologiques ne permettent ni d'en éclaircir l'origine, ni d'établir les relations qu'ils peuvent avoir entre eux et avec les Tryblidiidés. La coexistence de trois types d'Univalves au Cambrien, Tryblidiidés, Bellérophontidés et Gastéropodes, indique déjà des tendances évolutives assez précises. Les Tryblidiidés, représentés encore par *Neopilina* dont on connaît six espèces vivantes, possèdent une coquille sur l'intérieur de laquelle se voient des paires d'insertions musculaires, et cela, joint à d'autres caractères, fait de ce groupe un ensemble de formes où semblent exister des indices de métamérisation. Cependant, si l'on se réfère à *Neopilina,* il se peut qu'il s'agisse là d'une pseudo-métamérisation qui, pourtant, à première vue, semble confirmée par l'étude de l'organisation générale du corps. En outre, sur ces formes déjà distinctes de Gastéropodes, la torsion n'a pas eu prise.

Les Bellérophontidés font figure d'ancêtres prétorsionnels des Gastéropodes car leur coquille s'enroule en une spirale plate qui témoigne d'une symétrie totale par rapport à un plan vertical passant par la tête et l'extrémité postérieure. C'est en fait à de tels Animaux que l'on peut rapporter le modèle théorique établi pour l'ancêtre des Gastéropodes. L'organisme n'a encore subi aucune « torsion », mais par contre il a été affecté par une flexure endogastrique. *Helcionella,* du Cambrien inférieur, *Cyrtonella,* du Dévonien supérieur, *Sinuites,* connu de l'Ordovicien au Carbonifère, sont les types les plus connus. Ils sont aussi très proches des Tryblidiidés. *Cyrtonella,* par exemple, isopleure, c'est-à-dire enroulé dans un plan comme un *Bellerophon,* possède trois paires d'insertions musculaires.

Le plus ancien Gastéropode connu pourrait être *Pelagiella,* du Cambrien inférieur. C'est une forme déjà modifiée par la torsion; mais il pourrait aussi s'agir d'une forme larvaire de Tryblidiidé. Les affinités entre les Bellérophontidés et les Tryblidiidés sont telles que ces Mollusques forment un groupe individualisé, celui des Amphigastropodes.

Les Gastéropodes cambriens ne possèdent qu'une coquille patelliforme plus ou moins enroulée. La fin du Primaire semble avoir constitué une période de crise, mais dès le Trias la spéciation s'est accélérée. Les plus anciens Bivalves reconnus en toute certitude sont d'âge silurien et l'on y a distingué quatre genres dans lesquels

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ *Œufs de Gastéropodes inclus dans une ponte gélatineuse.*

▶ **Arctica islandica,** ***Bivalve fossile de l'ère quaternaire.***

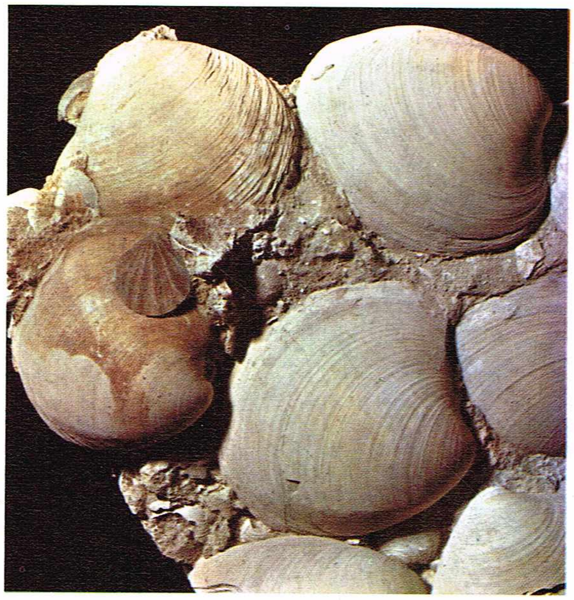

C. Bevilacqua

les dents de la charnière, nombreuses, sont de type *taxodonte* et se disposent de deux façons différentes, selon le mode cténodonte et le mode actinodonte. Le mode *cténodonte* a peu varié jusqu'à nos jours ; c'est celui que montrent encore les nucules. La charnière *actinodonte* par contre s'est beaucoup diversifiée et c'est d'elle que dérive la grande majorité des formes actuelles. Cette diversification de la charnière était pratiquement terminée à la fin du Primaire, comme l'atteste déjà l'existence de lignées bien caractérisées qui devaient soit se développer, soit s'éteindre plus ou moins brièvement. L'une de ces lignées fut à l'origine de formes demeurées longtemps énigmatiques, les Rudistes, à valves subégales ou très dissemblables, qui vivaient libres ou fixés par l'une des valves. Les Rudistes aux formes parfois extravagantes se sont épanouis au Crétacé, mais plusieurs de leurs représentants étaient localisés dans des régions bien délimitées.

Si la branche cténodonte s'est cantonnée aux océans, il n'en a pas été de même de la branche actinodonte dont certains descendants se sont adaptés aux eaux saumâtres et douces.

▼ ***Un fossile d'Ammonite ; ce groupe de Céphalopodes s'est éteint au Crétacé supérieur.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

L'évolution des Céphalopodes au cours des temps géologiques est particulièrement intéressante à suivre en raison de l'épanouissement spectaculaire de quelques lignées. Vers le Cambrien moyen ont vécu les premiers Nautiloïdés. Ces Animaux ont laissé de nombreux fossiles sous la forme de coquilles droites ou enroulées en spirale qui présentaient des cloisons concaves vers l'ouverture, traversées par un siphon. Mais après le Crétacé, le déclin de ce groupe fut rapide au point qu'un seul genre, vraisemblablement l'ancêtre du nautile actuel, subsista.

Les Ammonites semblent avoir dérivé des Nautiloïdés ; leurs formes les plus archaïques, les clyménies, s'en rapprochent par plusieurs caractères. A ces Céphalopodes Tétrabranchiés s'ajoute dès le début du Secondaire un groupe d'Animaux d'aspect bien différent, comparable à celui des calmars actuels, le groupe des Bélemnites, à coquille interne partagée en rostre, portion en forme de cigare, phragmocône cloisonné et prolongement dorsal fragile, ou pro-ostracum.

Le test des Céphalopodes fossiles se prête bien à l'étude de la phylogénie du groupe ; en outre, ces Animaux à répartition parfois très étendue sont d'un grand intérêt paléontologique.

SYSTÉMATIQUE

Dans ses travaux sur les groupes inférieurs de Mollusques, Salvini-Plawen (1969, 1972), après avoir extrait les Caudofoveata de la classe des Solénogastres et rapporté la classe des Monoplacophora à celle des Tryblidiida, fournit un intéressant tableau de la phylogénie des Mollusques telle qu'il la conçoit. Selon cet auteur, les Aculifera se sont individualisés avant que soit atteint le stade Conchifera, et dans l'ordre suivant : Caudofoveata, Solénogastres, Placophora. Quant aux Conchifera, ils doivent résulter de l'apparition de rameaux ayant fourni les Tryblidiida et Gastropoda, les Bivalvia, les Scaphopoda et les Cephalopoda. C'est ce même ordre qui sera suivi ici.

CAUDOFOVEATA

Le corps de ces Animaux, vermiforme, long de 3 mm à 14 cm, est revêtu d'un manteau continu à fine cuticule, armée de spicules calcaires. La bouche, antérieure, s'ouvre dans une encoche du bouclier buccal, plaque cuticulaire dépourvue de spicules. L'extrémité postérieure du corps se déprime en cloche et laisse émerger deux cténidies bipectinées que six paires de muscles peuvent rétracter.

Appareil digestif. Le pharynx porte un appareil radulaire à dents fortes ou polymorphes placé en avant de glandes œsophagiennes. Dans l'intestin moyen s'ouvre un long cæcum ventral que sa structure permet d'interpréter comme une glande digestive. L'intestin ne forme parfois d'évaginations que dans la partie antérieure du corps.

Le système nerveux comporte un complexe cérébral, plusieurs ganglions précérébraux, une paire de longs cordons nerveux ventraux à laquelle viennent s'unir deux cordons latéraux. Les commissures et connectifs qui relient ces cordons se localisent à la portion antérieure du corps. Les yeux et les statocystes manquent, mais le bouclier buccal représente un organe sensoriel.

Appareil reproducteur. Les sexes sont séparés et les gonades fusionnées en une seule masse. Les œufs sont évacués par le péricarde et les cœlomoductes, mais leur développement n'est pas connu.

Les Caudofoveata comprennent six genres dont *Chaetoderma, Limifossor, Falcidens* et cinquante-cinq espèces. Ils habitent la vase et sont cosmopolites.

SOLÉNOGASTRES

A la différence des Caudofoveata, les Solénogastres au corps allongé, arrondi, couvert de spicules polymorphes, présentent un sillon abdominal longitudinal où font saillie des plis longitudinaux de nature pédieuse

et ils n'ont ni bouclier buccal, ni cténidies. La cavité palléale est en partie représentée par la cavité anale subterminale, pourvue ou non de plissements ou de lamelles et en partie aussi par une fraction du sillon abdominal.

Appareil digestif. La bouche, antérieure et ventrale, s'ouvre au fond d'un atrium garni de cils sensoriels. La radula porte des dents de divers types qui peuvent manquer. L'œsophage, où débouchent des glandes œsophagiennes, précède l'intestin moyen bien caractérisé par une succession régulière de paires de diverticules latéraux entre lesquels passent autant de faisceaux musculaires dorso-ventraux.

Le système nerveux comprend un cerveau formé de deux ganglions cérébroïdes fusionnés, reliés à des ganglions ventraux, et buccaux, et deux paires de troncs longitudinaux, l'une ventrale, l'autre latérale. Sur ces chaînes nerveuses des ganglions plus ou moins régulièrement espacés sont unis entre eux par des connectifs et par des commissures, l'ensemble évoquant une échelle de corde. Les cordons ventraux et les cordons longitudinaux restent séparés sur toute leur longueur. Les principaux organes sensoriels sont représentés par l'atrium et par une fossette sensorielle dorsale, subterminale.

Appareil reproducteur. Les Solénogastres sont hermaphrodites; leurs produits génitaux sont évacués par le péricarde et les cœlomoductes. La fécondation, très probablement croisée, est favorisée par la présence de réceptacles séminaux. L'appareil copulateur peut former une grosse papille à sacs garnis de stylets copulateurs. Les rares larves connues sont d'un type particulier, leur corps étant recouvert comme par une cloche d'une enveloppe épithéliale. La larve d'*Epimenia verrucosa* par contre est de type trochophorien.

Les Solénogastres, dont on connaît cent dix espèces réparties en cinquante genres, vivent surtout sur des Cnidaires dont ils semblent brouter les tissus et sur des zostères. *Lepidomenia, Nematomenia, Dondersia, Neomenia, Pruvotina, Hypomenia, Strophomenia* sont quelques-uns des genres connus de Méditerranée.

PLACOPHORES OU POLYPLACOPHORES

Les Placophores, ou « Chitons », à corps en général assez aplati dorso-ventralement, à sole pédieuse très développée, sont les seuls Mollusques protégés par une armure de huit plaques successives, articulées entre elles de telle façon que le corps peut s'enrouler sur lui-même. Ces plaques s'insèrent latéralement sur la ceinture, repli palléal muni d'écailles, spicules ou soies chitineuses.

La tête, peu distincte, est séparée du pied par un sillon transversal. Au plafond de la cavité palléale, qui est représentée par la dépression qui sépare la tête et le pied de la ceinture, s'insère un nombre plus ou moins grand de branchies. L'anus s'ouvre en arrière du pied.

Les *lorica*, ou plaques dorsales, fortement calcifiées, ont une constitution complexe. La plaque antérieure a, comme la postérieure, un contour semi-circulaire; les six plaques intermédiaires et la dernière portent des lames suturales saillantes. De l'extérieur, on ne voit des plaques que la zone du *tegmentum,* couche qui est recouverte de périostracum; les lames sont en fait insérées dans le manteau. Sur la ceinture, des cellules isolées ou en groupes élaborent des spicules, articulés ou non, ou des écailles calcaires dont la hampe chitineuse peut, seule, subsister et fournir des soies longues et souples. De la musculature complexe on retiendra surtout l'existence de seize paires de muscles dorso-ventraux, chiffre qui indique une tendance à la concentration des faisceaux qui, nombreux chez les Solénogastres, finissent par se réduire à un seul faisceau chez les Gastéropodes.

Appareil respiratoire. Les branchies, par paires et nombreuses, ne sont, en dépit de bien des discussions, que des néoformations; elles n'indiquent nullement l'existence d'une métamérisation. Sous leur influence s'établit de l'avant vers l'arrière un courant respiratoire souvent contrôlé par des osphradies situées vers l'anus.

L'appareil digestif débute à la bouche portée par le disque buccal et s'ouvre dans une cavité buccale où débouchent des glandes salivaires. L'appareil radulaire comporte un *odontophore* massif supportant une radula avec plusieurs rangées de dix-sept dents. Sous l'odontophore un diverticule porte à son plafond un organe subradulaire. Au-dessus du sac radulaire débute l'œsophage où parviennent les conduits de deux volumineuses

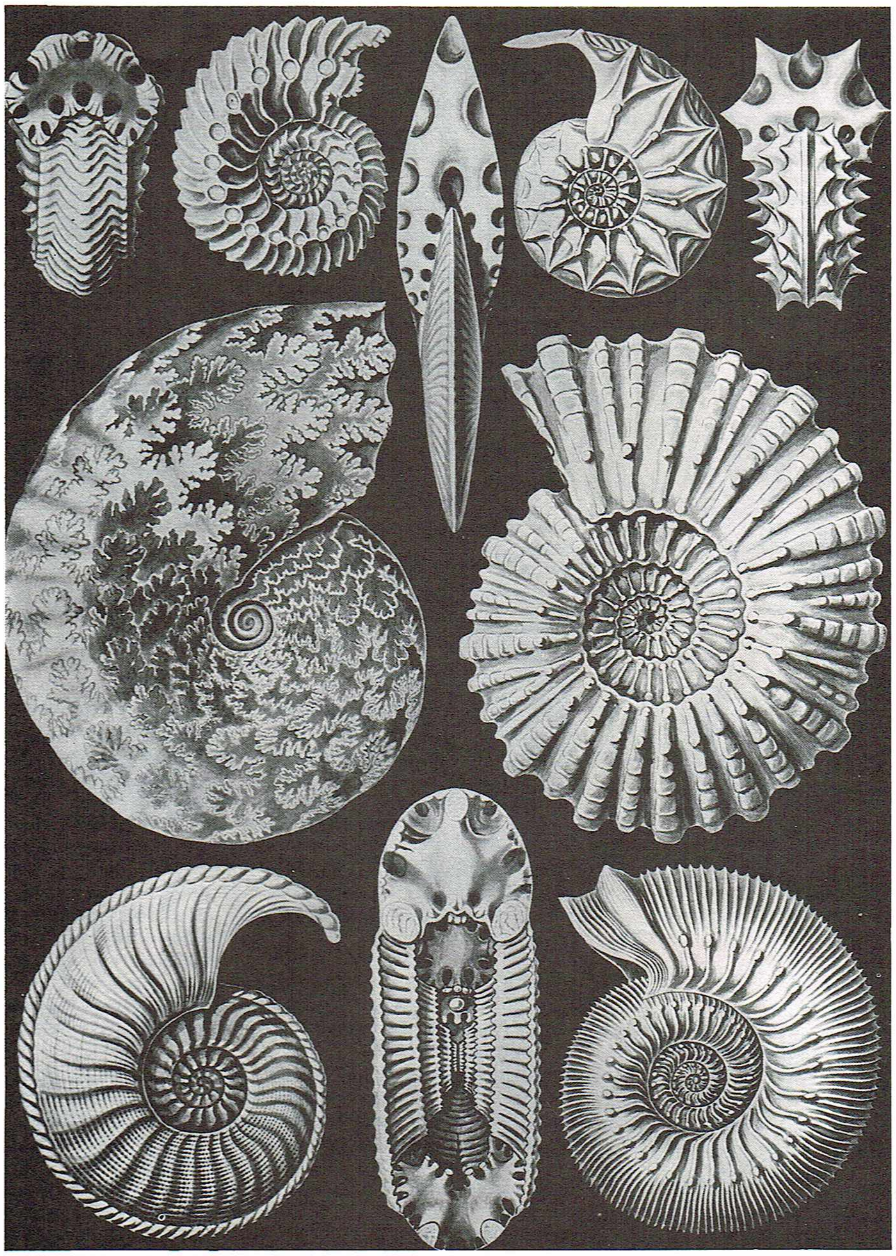

C. Bevilacqua

▲ ***Planche de Haeckel représentant des coquilles d'Ammonites aux ornementations très diverses.***

G S. Giacomelli

◀ **Neomenia sp.**, ***un Mollusque Solénogastre de la mer Méditerranée.***

▶ *A gauche,* Chiton olivaceus, *un Polyplacophore; les plaques articulées recouvrant le corps sont bien visibles. A droite, un Mollusque Tryblidiida : A, coquille vue par sa face dorsale; B, vue par sa face ventrale; bo, bouche; ve, velum; te, tentacules; br, branchies; pi, pied; bm, bord du manteau; co, coquille; an, anus.*

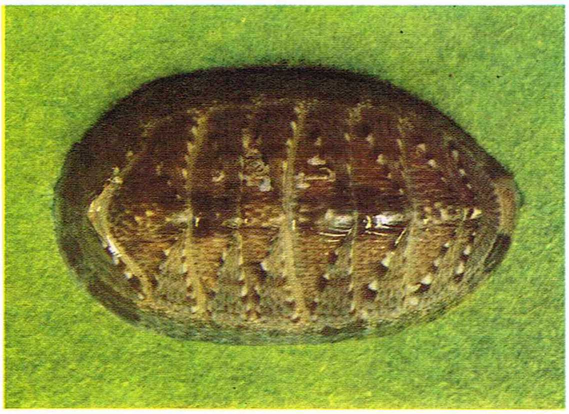

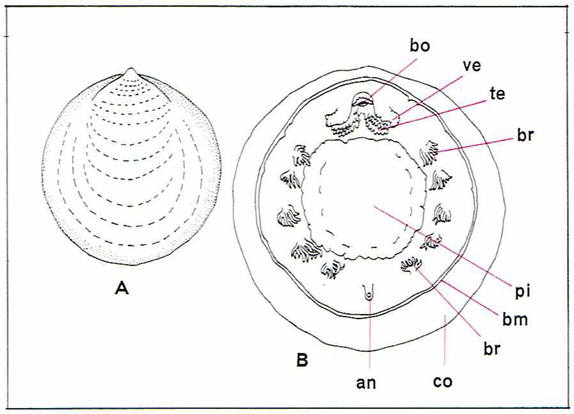

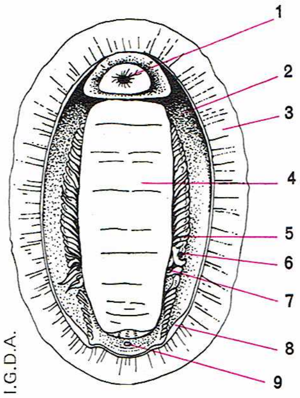

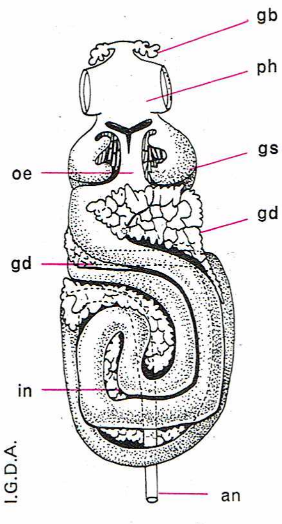

▲ *En haut,* Chiton tuberculatus, *un Mollusque Polyplacophore vu par sa face ventrale : 1, bouche; 2, cavité palléale; 3, ceinture; 4, pied; 5, cténidie; 6, orifice génital; 7, orifice excréteur; 8, lobe postérieur formé d'un repli palléal; 9, anus. En bas, appareil digestif d'un Polyplacophore : gb, glande buccale; ph, pharynx; gs, glande à sucre; oe, œsophage; gd, glande digestive; in, intestin; an, anus.*

glandes à sucre. L'estomac, tubuleux, piriforme ou bien fusiforme, est volumineux chez *Lepidopleurus* et marqué de fortes dépressions chez *Chiton*. Il est en relation avec une glande digestive paire et asymétrique. L'intestin se distingue par sa longueur et par la disposition des anses, parfois nombreuses, qu'il décrit.

L'appareil circulatoire reste de type primitif. Le sang quitte le cœur, qui est logé dans le péricarde, par une aorte antérieure qui débouche dans des pseudo-vaisseaux ou des lacunes. Après s'être hématosé dans les branchies il revient au cœur par des veines branchiales.

L'appareil excréteur est constitué par deux reins symétriques, formés de longs tubes ouverts dans le péricarde. Ces tubes où se distinguent plusieurs portions successives s'ouvrent à l'extérieur au niveau de la septième plaque.

Le système nerveux, qui est ici tétraneure, est peut-être le caractère archaïque le plus net des « Chitons ». Les centres nerveux ne laissent point reconnaître de ganglions distincts; ils ne forment qu'un fort cordon arqué, supra œsophagien et doté d'une commissure sous-œsophagienne, et ils se prolongent en arrière par deux arcs; l'arc palléal, latéral, comprend deux longs cordons unis en arrière par une commissure suprarectale, et l'arc pédieux consiste en deux longs cordons plus médians. Ces quatre cordons sont reliés entre eux à intervalles assez réguliers par des commissures pédieuses et par des connectifs latéro-pédieux.

Organes des sens. Outre l'osphradie, les esthètes et les yeux coquilliers, quelques organes sensoriels de fonction peu connue sont à mentionner. Ce sont surtout des organes portés par le disque buccal et la sole pédieuse, les soies, les spicules, des tentacules et des cirres.

Appareil reproducteur. Tous les Placophores sauf *Lepidochitona raimondi* sont unisexués et leur gonade est paire. La fécondation a lieu dans l'eau en général, la ponte et l'éjaculation étant souvent nettement commandées par des gamones. Il existe une espèce vivipare *(Callistochiton viviparus)* et des formes incubatrices.

Les Chitons, organismes littoraux, vivent sur des substrats durs sur lesquels ils se déplacent assez peu. La puissance de leur musculature leur permet d'adhérer très fortement aux roches et de résister au choc des vagues. Ils se nourrissent en général d'Algues, mais certains pourraient être microphages.

La classification actuelle des Placophores est fondée sur la structure des plaques.

Les **Lepidopleuridae** (ordre des *Lepidopleurina*), d'assez petite taille, comprennent essentiellement le genre *Lepidopleurus* à vaste répartition.

Dans l'ordre des *Ischnochitonina,* les **Ischnochitonidae,** à ceinture assez large *(Ischnochiton, Lepidochitona)*, ont des spicules simples et des écailles lisses ou costulées nombreuses. Les **Chitonidae** montrent peu de caractères primitifs; ils habitent surtout la zone des marées *(Chiton, Tonicia, Acanthopleura)*.

Les **Acanthochitonidae** (ordre des *Acanthochitonina*) ont des plaques plus ou moins recouvertes par la ceinture qui, outre des spicules, porte parfois des touffes d'épines. *Acanthochitona (= Acanthochites)* est connu de l'Europe occidentale à l'Adriatique. *Cryptochiton* de Nouvelle-Zélande atteint une grande taille. Les *Cryptoplax,* allongés, vermiformes, à ceinture épaisse et spiculeuse, ont des plaques réduites.

TRYBLIDIIDA

L'histoire de cette classe de Mollusques dont jusqu'en 1952 on ne connaissait que des restes fossiles du Paléozoïque ne manque pas d'intérêt. En effet, la récolte à grande profondeur d'exemplaires vivants d'une forme de Tryblidiida, *Neopilina galatheae*, fut considérée comme une découverte exceptionnelle, car cette espèce à coquille unique, à symétrie bilatérale, à apex antérieur, laissait reconnaître une série d'insertions musculaires, cinq paires de cténidies, six paires de néphridies, trois paires de compartiments cœlomiques, caractères qui indiquaient une métamérisation si régulière qu'elle pouvait être comparée à celle des Annélides et des Arthropodes. *Neopilina* fut alors placé dans le groupe des Monoplacophores créé par Odhner en 1940 pour des Mollusques du Cambrien inférieur. La structure de ce « fossile vivant » semblait indiquer que les Monoplacophores étaient en relation étroite avec les Mollusques ancestraux à partir desquels le phylum des Mollusques s'est développé. Lemche et Wingstrand publièrent en 1957 et 1959 une étude remarquable de cet Animal. Cependant l'interprétation qu'ils avaient fournie de la structure fut peu à peu critiquée et Lemche lui-même devait annoncer en 1966 que *Neopilina* ne devait pas avoir la signification qu'il lui avait précédemment attribuée.

On reconnaît à l'heure actuelle que l'organisation de *Neopilina,* donc celle des Tryblidiida, ne montre qu'une pseudo-métamérie du même ordre que celle dont témoignent les Placophores par leurs nombreuses paires de branchies. L'importante publication de Salvini-Plawen en 1972 a permis de conclure dans le même sens et de considérer les Tryblidiida comme le groupe le moins évolué des Conchifères. L'auteur estime en outre que le terme « Monoplacophora » n'a pas d'utilité, d'autant plus qu'il pourrait servir à désigner les autres classes de Conchifères. Il n'en reste pas moins que l'étude de *Neopilina,* compte tenu de rectifications nécessaires, permet de caractériser la classe des Tryblidiida et de mieux comprendre le sens de l'évolution des Mollusques.

La coquille d'aspect patelloïde a un contour presque circulaire; son apex orienté vers le bord antérieur porte une coquille larvaire enroulée en une spire dextre d'un tour et demi. Par sa face ventrale l'Animal rappelle un peu un Placophore car il est entouré d'un sillon palléal à l'arrière duquel s'ouvre l'anus, dans le plan médian. Aucune trace de torsion n'est visible; la symétrie est parfaitement bilatérale.

Le pied, à contour subcirculaire, occupe la face ventrale. Sur ses côtés, au fond du sillon palléal, s'insèrent cinq paires de branchies constituées d'un tronc portant une série de lamelles aplaties.

La musculature consiste essentiellement en huit paires de muscles insérés sur la coquille et dans le pied. Salvini-Plawen remarque à ce sujet que cette musculature est intermédiaire entre celle des Placophores et celle des Gastéropodes.

La bouche, antérieure, est précédée d'une lèvre supérieure associée à un velum élargi latéralement en lobes ciliés, comparables aux palpes buccaux des Bivalves. Deux pédoncules situés en arrière de la bouche portent chacun un éventail de tentacules post-oraux dont la disposition évoque les captacules des Scaphopodes.

Appareil digestif. A la bouche fait suite une cavité buccale et un pharynx où débouche une glande salivaire impaire. La radula comporte de quarante à quarante-cinq rangées de onze dents disposées en V. Ces dents sont de plusieurs sortes et ne peuvent être comparées à celles des Placophores. Au-delà de l'estomac, simple comme l'œsophage qui le précède, mais contenant un stylet cristallin, l'intestin décrit six tours en sens inverse des aiguilles d'une montre.

Le système nerveux montre une portion circum-orale où se discernent deux ganglions cérébraux. De chacun de ceux-ci partent deux longs cordons rappelant ceux des Placophores : cordon ventral et cordon latéral, formant deux arcs concentriques complets, les cordons latéraux étant unis par une commissure supra-rectale. Des paires de connectifs joignent les deux arcs d'où partent de place en place des nerfs.

Appareil circulatoire. Du cœur, enclos dans un péricarde, partent deux aortes qui fusionnent en une aorte dorsale impaire semblant s'ouvrir dans le sinus sanguin céphalique. Les six paires de néphridies sont situées dans le pli palléal.

Appareil reproducteur. Les sexes sont séparés; le mâle est doté de deux paires de testicules, la femelle probablement du même nombre d'ovaires. Les œufs très petits semblent devoir être fécondés en mer.

Six espèces de *Neopilina* sont actuellement connues. *N. galatheae* a été capturé à l'ouest de Costa Rica par le navire de recherches danois « *Galathea* » par 3 570 m de profondeur.

Une comparaison de la coquille de *Neopilina* avec celle d'espèces éteintes fait ressortir une différence d'épaisseur, la forme actuelle possédant une coquille très mince. Mais cette étude comparée montre aussi qu'au sein des Tryblidiida s'est poursuivie la concentration des faisceaux musculaires amorcée chez les Solénogastres et les Placophores, concentration qui aboutit à une plus grande mobilité du corps dans la coquille. *Drahomira* montre sept paires d'insertions, *Tryblidium* et *Pilina* six, *Sinuitopsis* trois et *Cyrtonella* trois ou quelquefois deux. Les Bellerophontidea n'en possédaient qu'une.

▲ ***Gravure ancienne représentant quelques coquilles de Gastéropodes : 1 a, 1 b,* Cypraea vittata *; 2,* Conus scriptus *; 3,* Conus cedonulli *; 4 a, 4 b,* Cypraea ocellata *; 5 a, 5 b,* Cypraea mappa.**

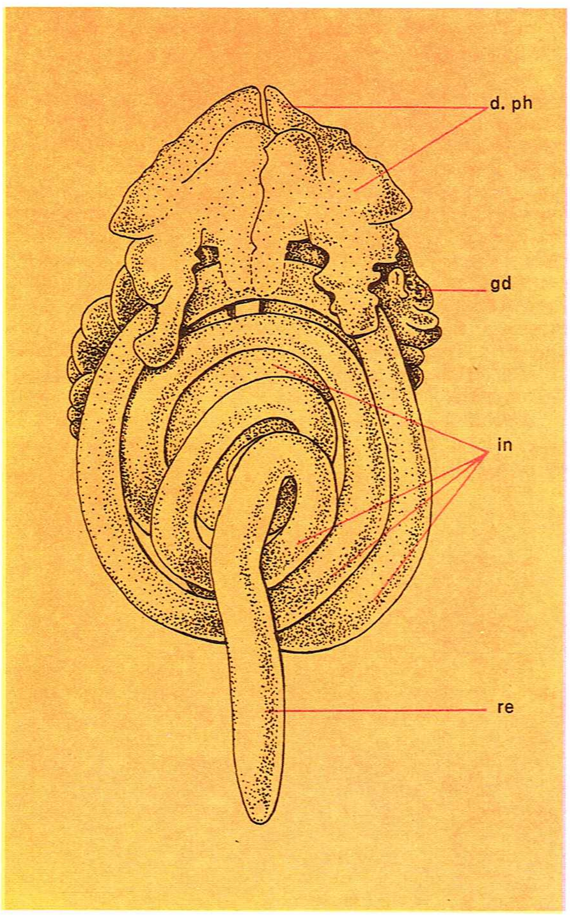

◀ ***Vue dorsale de l'appareil digestif d'un Mollusque Tryblidiida du genre* Neopilina *: d. ph, diverticules du pharynx; gd, glande digestive; in, spires de l'intestin; re, rectum.***

GASTÉROPODES

Les Gastéropodes sont des Mollusques devenus asymétriques du fait de la torsion subie par le viscéro-pallium, mais qui, en de nombreuses circonstances, se trouvent être secondairement symétriques. Extérieurement, c'est l'enroulement en spirale de la masse viscérale enclose dans une coquille typiquement hélicoïdale qui, très souvent, rend cette asymétrie apparente au premier coup d'œil. Toutefois, dans de nombreux cas, la coquille fait défaut à l'état adulte et les Animaux devenus limaciformes ne laissent plus discerner leur asymétrie que par la situation des émonctoires et de l'appareil copulateur au côté droit du corps. L'asymétrie des patelles et autres formes apparentées, dont la coquille est sensiblement conique, est encore moins évidente, mais elle n'en est pas moins réelle.

Organisation générale

Morphologie externe. Tête, pied, viscéro-pallium, toujours présents ou presque, montrent de très grandes variations morphologiques.

La tête, souvent bien distincte du reste du corps, allongée ou non en mufle, porte la bouche et dorsalement une paire d'yeux, une ou deux paires de tentacules, ou des rhinophores. A ces organes sensoriels s'en ajoutent d'autres dont la fonction est mal connue.

Le pied demeure en général aplati en une sole pédieuse à fonction essentiellement locomotrice. C'est un organe riche en muscles, relié à la columelle par le puissant muscle columellaire qui s'y insère solidement et dont la contraction provoque la rentrée de l'Animal dans la coquille. Chez plusieurs espèces pélagiques, le pied se modifie en une large carène ou en nageoires puissantes; ses portions latérales deviennent des parapodies natatoires lorsqu'elles s'étalent en lobes latéraux.

Le manteau existe très généralement sous la forme d'un vaste repli qui recouvre soit une cavité palléale, soit une

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *La coquille des Gastéropodes présente des aspects variés; enroulée dans un plan comme cette coquille de* Planorbarius corneus, *on dit qu'elle est de type planorboïde.*

▼ *A gauche, coquille de* Viviparus pyramidalis; *un certain nombre de Gastéropodes présentent une coquille obturable par un opercule. A droite,* Trochus niloticus, *un exemple de coquille montrant une face externe plane (type trochiforme).*

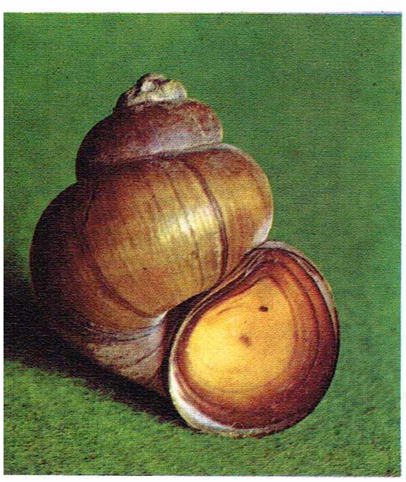

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

cavité pulmonaire, mais dans plusieurs familles il disparaît pour faire place à un notum lisse ou hérissé de papilles respiratoires.

La masse viscérale est l'un des principaux éléments de la morphologie du corps; elle s'enroule en « tortillon » ou se recourbe seulement; elle ne fait même plus saillie dans les espèces limaciformes.

La coquille. La coquille est unique. Toutefois, Kawaguti et Baba ont eu la surprise de découvrir (1959) un authentique Gastéropode à coquille bivalve, *Tamanovalva limax,* devenu depuis *Berthelinia limax.* A la suite de cette découverte, il est apparu que des valves de Mollusques actuels connues de longue date devaient être rapportées à des formes voisines de Gastéropodes.

Très tôt au cours de l'embryogénie la coquille apparaît comme une mince pellicule élaborée par le bord d'une dépression circulaire de la portion dorsale des embryons. C'est la glande coquillière. Par la suite, la coquille grandit en épousant les contours de la masse viscérale enroulée en tortillon.

L'existence de la coquille est générale chez les embryons; toutefois, chez beaucoup d'espèces, elle disparaît lors de la métamorphose sans être compensée par une formation définitive et le corps reste nu. Dans la majorité des cas la croissance de la coquille se produit encore après la métamorphose, avec ou sans discontinuité nette.

La coquille des Gastéropodes se développe en quelque sorte sous la forme d'un hélicocône, c'est-à-dire d'une surface conique enroulée en spirale autour d'un axe hypothétique. Le pas de l'hélice est très variable et l'hélicocône peut même s'enrouler dans un plan, comme le montrent les coquilles *planorboïdes.* La columelle correspond à l'axe d'enroulement. Cependant, selon le degré de confluence des tours vers l'axe, elle est pleine ou creuse, et dans ce cas, ouverte à la partie inférieure par un ombilic étroit, large ou très large.

Les tours de spire, en général délimités par un sillon plus ou moins profond, la suture, n'ont pas toujours en réalité une section circulaire; ainsi, leur face externe devient plane dans les coquilles *trochiformes.* Lorsque le dernier tour, très dilaté, recouvre les autres, la suture n'est plus apparente. Dans les coquilles *pupiformes* la section de l'hélicocône, après avoir atteint une certaine valeur, tend au contraire à se réduire.

Le dernier tour s'ouvre par le péristome où l'on distingue le bord externe, ou labre, le bord inférieur simple, échancré, allongé en gouttière ou en tube lorsque le manteau développe un siphon respiratoire, et le bord columellaire, parfois épaissi par une callosité columellaire. Cette ouverture porte en bien des cas des plis internes, des denticules ou des lamelles qui la rétrécissent curieusement.

L'enroulement n'est pas toujours régulier ou continu. L'hélicocône semble alors se dérouler et s'allonger comme un tube très irrégulier; chez quelques formes terrestres, c'est peu avant le niveau de l'ouverture qu'il change brusquement de direction. La coquille des espèces *patelliformes,* conique, ne montre pas de tendance à l'enroulement. Plusieurs Gastéropodes du plancton élaborent un test très particulier : cône très mince, très allongé, test globuleux ou aplati des cavolinies, des *Euclio.*

L'ornementation des coquilles (stries, varices, cordons, tubercules, épines, lamelles) atteint un étonnant degré de complexité. Elle résulte de différences d'activité du bord du manteau qui n'a pas en toutes ses régions les mêmes propriétés.

Quelques Gastéropodes possèdent une coquille entièrement recouverte par le tissu palléal, et qui est entière ou réduite à des granulations calcaires.

Des coupes faites dans des coquilles montrent qu'elles consistent en couches superposées d'éléments cristallins agencés selon différents « types structuraux » : structures prismatiques simples ou complexes, feuilletées (nacre), entrecroisées, dans lesquelles les éléments cristallins s'ordonnent pour réaliser des ensembles d'une grande résistance.

Influence de la torsion sur l'organisation générale. Comme on l'a vu, l'organisation des Gastéropodes est profondément affectée par la torsion du complexe palléo-viscéral et l'enroulement de la masse viscérale. A partir du Mollusque ancestral symétrique et enroulé dans un plan, on peut considérer que trois phénomènes ont eu lieu. Le premier, conséquence de l'apparition de l'axe secondaire de croissance, engendre une *courbure endogastrique* du complexe palléo-viscéral. En effet, l'accroissement en hauteur de cette portion du corps provoque sa déformation en U ainsi que celle du tube digestif, de telle sorte que l'anus semble se rapprocher de la bouche au-dessous de laquelle il s'ouvre. C'est la *flexion ventrale.*

En second lieu la portion dorsale de la masse viscérale sur laquelle s'accroît la coquille embryonnaire subit un enroulement spiralé, dit exogastrique car il s'opère dans le sens inverse de la courbure endogastrique et dans le plan sagittal, sans que la position de l'anus soit affectée. En réalité cet enroulement se poursuit soit dans le sens dextre, soit dans le sens sénestre.

Enfin intervient la torsion proprement dite, c'est-à-dire la rotation de 180° de toute la masse palléo-viscérale autour de l'axe du corps, le céphalopodium ne subissant aucune déformation. La conséquence la plus évidente de ce mouvement est le report de l'anus au côté droit puis à la partie dorsale de l'Animal. La portion du corps impliquée dans ce mouvement de rotation est celle qui se situe entre le céphalopodium, qui reste inchangé, et le complexe palléo-viscéral, l'effet de la torsion étant particulièrement net sur l'œsophage, sur le trajet du tube digestif et sur l'anse nerveuse viscérale, au moins lorsque celle-ci est suffisamment longue.

Les causes profondes de la torsion sont encore bien mal connues. Pour Garstang (1929), l'origine en serait une mutation larvaire avec pour conséquence l'asymétrie

de deux muscles, l'un à gauche en rapport avec le pied, l'autre, à droite, avec la tête. La torsion débute souvent une trentaine d'heures après la fécondation; or, à ce stade, l'organisation larvaire est encore réduite et, en fait, dans plusieurs Gastéropodes spécialisés, c'est après la torsion qu'apparaît la musculature.

Quoi qu'il en soit, une conséquence importante de ces processus est le report vers l'avant de la cavité palléale. Orientée dans le sens du déplacement, elle peut assurer ses différentes fonctions dans les conditions optimales.

Les effets de la torsion sont nets dans le groupe des Prosobranches que caractérise la streptoneurie — ou chiastoneurie —, c'est-à-dire la torsion en 8 de l'anse nerveuse viscérale. En revanche, dans les deux autres groupes de Gastéropodes, Pulmonés et Opisthobranches, l'anse nerveuse viscérale n'est pas croisée et ces formes sont dites euthyneures. Il n'en reste pas moins que la position de la cavité palléale et des orifices rénal et anal témoigne de la réalité de la torsion, parfois incomplète, ou même d'une détorsion. Il se peut en effet qu'une détorsion ait pu rétablir secondairement la situation initiale de l'anse nerveuse viscérale, mais il paraît plus probable que celle-ci n'a pas été impliquée dans la torsion par suite d'un processus de céphalisation, c'est-à-dire de regroupement des centres nerveux ganglionnaires dans la région céphalique, ce qui aurait entraîné son raccourcissement.

Appareil digestif. De la bouche, toujours antérieure, à l'anus situé en général en arrière de la tête et sur le côté droit du corps, mais parfois ouvert à son extrémité postérieure, le tube digestif comprend la cavité buccale, la cavité pharyngienne où débouchent les conduits des glandes salivaires et dont le plancher est occupé par l'appareil radulaire, l'œsophage, l'estomac et l'intestin, très long chez les formes primitives herbivores, mais beaucoup plus court chez les autres. La partie antérieure du tube digestif différencie dans plusieurs groupes une trompe évaginable, très mobile, qui se modifie chez les Pyramidellidae en un appareil de succion perfectionné. L'appareil radulaire est utilisé pour la préhension des aliments. Il est essentiellement constitué d'une radula, mince ruban porteur de rangées transversales de dents de forme extrêmement variée et dont la connaissance permet de reconnaître des genres ou même des espèces. A sa partie postérieure, ce ruban émerge de la gaine radulaire où des odontoblastes élaborent les dents, puis il passe en avant sur un odontophore, masse musculeuse souvent consolidée par des cartilages. L'odontophore, mû par de nombreux muscles, protracte la radula jusqu'au-delà de la bouche, puis la ramène à sa position initiale. La radula attaque les Végétaux ou les proies animales par un mouvement de va-et-vient. En réalité ce dernier s'accompagne de la déformation du ruban qui, d'abord creusé en gouttière, s'étale en passant sur la partie antérieure du bulbe radulaire, ce qui a pour effet de redresser les dents et de rendre leur action particulièrement efficace.

La radula n'est cependant pas toujours une « langue râpeuse ». Lorsque les dents sont très longues, très fines et très nombreuses, elles agissent parfois comme une brosse ou comme un balai sur une paroi couverte de micro-organismes. Les rangées peuvent comporter de nombreuses pièces disposées avec une grande régularité, soit une dent centrale, dite rachidienne, sur l'axe du ruban, une ou plusieurs dents latérales et des dents plus externes, les marginales. Une rangée peut se réduire à la seule dent rachidienne; c'est là le type de la « radula-scie » qu'utilisent les Sacoglosses pour ouvrir les parois cellulaires des Algues et aspirer le suc cellulaire. D'autres Gastéropodes possèdent de très fortes dents conformées

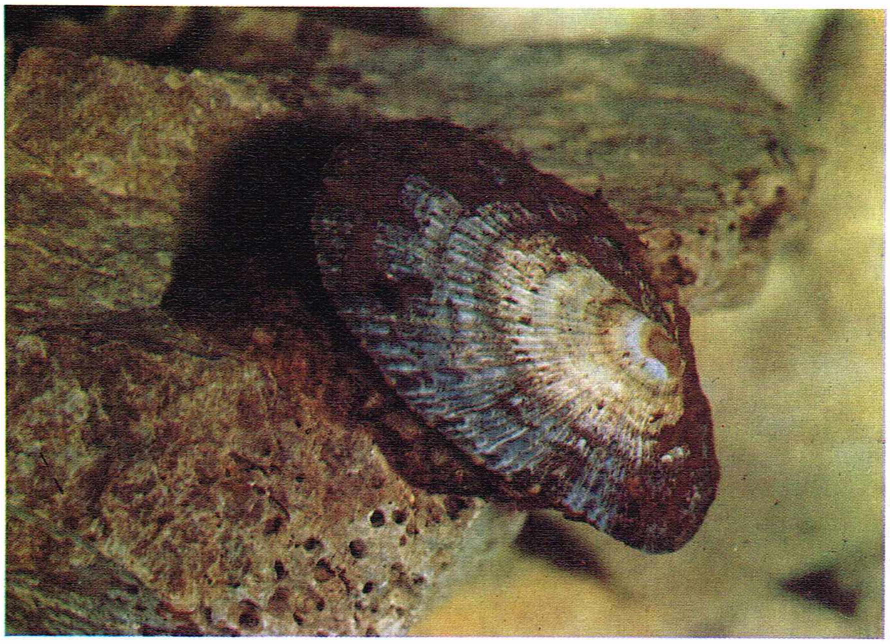

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ **Diodora italica** ***présente une coquille non enroulée et conique dite patelliforme.***

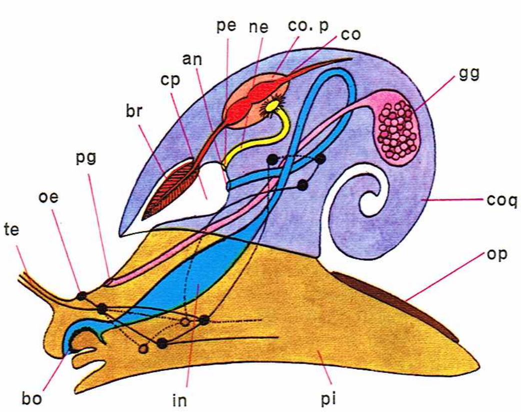

I.G.D.A.

◀ ***Schéma de l'organisation générale d'un Gastéropode Prosobranche : bo, bouche; te, tentacules; oe, œil; pg, pore génital; br, branchie; cp, cavité palléale; an, anus; pe, pore excréteur; ne, néphridie; co. p, cœlome péricardique; co, cœur; gg, glande génitale; coq, coquille; op, opercule; pi, pied; in, intestin.***

G. Mazza

G. Mazza

◀ **Cadlina marginata,** ***comme tous les Nudibranches, ne possède pas de coquille; à gauche, vue dorsale; à droite, vue latérale.***

comme des harpons et qui coexistent avec une glande à venin.

L'appareil radulaire, on le voit, se modifie considérablement avec le régime alimentaire.

L'œsophage, simple en général, différencie des glandes œsophagiennes et, chez quelques Opisthobranches, un jabot et un gésier garni de plaques ou de denticules. Par suite de la torsion il s'ouvre à la partie inférieure et postérieure de l'estomac. L'organisation de ce dernier, souvent très complexe, est en rapport étroit avec le régime alimentaire. A sa partie postérieure, le stylet cristallin est conservé par quelques groupes.

Dans l'estomac s'ouvrent les canaux de la glande digestive, masse de diverticules digestifs où semble s'effectuer la majeure partie, sinon la totalité de la digestion. Quant à l'intestin, il est long et décrit de larges anses dans les formes primitives, alors que chez les supérieures il se raccourcit beaucoup.

Appareil circulatoire. Au ventricule unique s'adjoignent chez les Gastéropodes les plus archaïques deux oreillettes; l'une d'elles disparaît chez ceux qui sont plus évolués. Le cœur est aidé dans sa fonction de propulsion du sang par les contractions de tout le corps, et par celles des papilles dorsales de bien des espèces dépourvues de coquille.

Appareil excréteur. En liaison étroite avec l'appareil reproducteur, l'appareil rénal n'est représenté par deux reins que dans les formes primitives. De ces deux reins, le gauche, lorsqu'il n'est pas seul, est le plus important. Cette situation est évidemment l'une des conséquences de la torsion car le développement de la spire à droite du corps a provoqué, pense-t-on, la compression de l'avant-dernier tour sur la partie droite de l'Animal, donc aussi une réduction de tous les organes palléaux droits.

Du point de vue de l'excrétion elle-même, on constate l'excrétion d'ammoniaque chez les espèces aquatiques et celle d'acide urique, parfois sous la forme de concrétions, chez les espèces terrestres.

Système nerveux. Le système nerveux des Gastéropodes montre des centres cérébraux et d'autres, secondaires, qui s'y relient par des colliers ou des anses. Mal individualisés dans les groupes inférieurs (*Haliotis*, patelle), ces centres deviennent des ganglions distincts qui, on l'a vu, tendent à se rapprocher des ganglions cérébroïdes avec lesquels certains fusionnent.

Fondamentalement, les deux ganglions cérébroïdes, dorsaux par rapport à l'œsophage, s'unissent de part et d'autre de cet organe aux deux ganglions pédieux, sous-œsophagiens, reliés l'un à l'autre par la commissure pédieuse, par deux connectifs dits cérébro-pédieux. C'est là le collier périœsophagien.

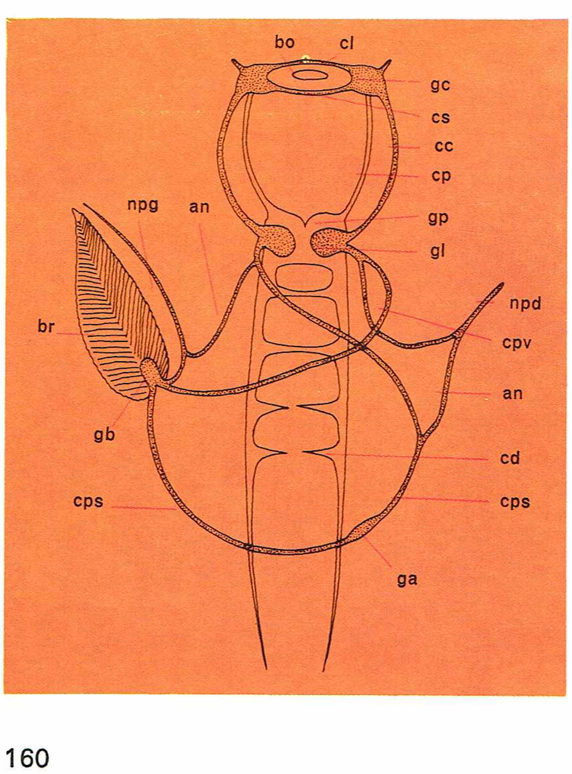

▶ *Schéma du système nerveux d'un Mollusque Gastéropode Prosobranche; bo, bouche; cl, commissure labiale; gc, ganglion cérébroïde; cs, commissure sous-œsophagienne; cc, connectif cérébro-pleural; cp, connectif cérébro-pédieux; gp, ganglion pédieux; gl, ganglion pleural; npd et npg, nerfs palléaux droit et gauche; cpv, connectif pleuro-viscéral supra intestinal; an, anastomose entre glanglions pleural et viscéral; cd, cordon pédieux; cps, connectif pleuro-viscéral sous-intestinal; ga, ganglion abdominal; gb, ganglion branchial; br, branchie.*

L'anse viscérale, que l'on peut suivre dans la masse viscérale, se raccorde par ses deux extrémités aux ganglions cérébroïdes. Elle porte à partir du ganglion cérébroïde droit les ganglions suivants : pleural droit, pariétal droit, viscéral, pariétal gauche et viscéral gauche. Les ganglions pleuraux sont reliés aux pédieux du même côté par un connectif pleuro-pédieux.

Vers l'avant, un collier buccal porte sur son trajet deux ganglions buccaux placés sur le bulbe radulaire. Les plus archaïques des Gastéropodes montrent en outre une anse labiale passant par deux ganglions labiaux. Des nerfs issus de ces centres se distribuent à tous les organes du corps.

Les effets de la torsion se manifestent seulement sur l'anse viscérale, à condition toutefois que sa longueur soit suffisante. Les autres colliers ne sont pas affectés. Il est logique d'admettre que le ganglion pariétal droit, rejeté vers la gauche au-dessus du tube digestif, est devenu le ganglion supra-intestinal et que le pariétal gauche, entraîné vers la droite, figure le ganglion sous-intestinal.

Ainsi schématisée, la disposition du système nerveux peut sembler simple; en fait l'évolution de ce système pose de nombreux problèmes.

Organes sensoriels. A peu d'exceptions près, tous les Gastéropodes possèdent des yeux qui peuvent être simples ou complexes, et tous sont dotés de statocystes. Par contre, des chimiorécepteurs particuliers, les osphradies, dont la fonction semble être d'apprécier les qualités de l'eau qui pénètre dans la cavité palléale, ne subsistent plus qu'exceptionnellement chez les Gastéropodes terrestres.

Appareil reproducteur. L'évolution de cet appareil dans toute la classe des Gastéropodes est particulièrement complexe. A la suite de la torsion il ne subsiste dans les groupes inférieurs qu'une gonade qui s'ouvre soit dans le rein droit, soit dans le conduit réno-péricardique; en conséquence, les gamètes sont évacués directement en mer. Chez les autres formes, où le rein droit se réduit à son canal évacuateur, c'est dans ce dernier que débouche la gonade. C'est alors qu'apparaissent aux dépens de la partie droite du manteau des prolongements des voies génitales, sous la forme de gouttières ciliées. Un pénis se développe à droite de la tête, à l'extrémité du sillon séminal; chez la femelle le conduit homologue devient très glandulaire. Ainsi, les voies génitales très simples des Gastéropodes primitifs subissent une spécialisation poussée par suite du développement de voies génitales palléales, puis d'organes copulateurs. D'externe, la fécondation devient interne, ce qui rend possible la reproduction des lignées devenues terrestres. Chez celles-ci du reste, comme chez les Opisthobranches qui sont tous marins, le tractus génital s'enrichit encore de glandes annexes, tandis que ses parties distales se diversifient.

Ponte et développement

Les modalités de la ponte et du développement ne sont naturellement pas les mêmes pour les formes aquatiques et pour les formes terrestres : si les premières recherchent une protection au sein des eaux, les autres utilisent les seules ressources que leur offre le sol pour mettre leur progéniture à l'abri. De même le développement des premières comporte une métamorphose plus ou moins importante alors que celui des secondes est direct.

L'œuf des Prosobranches à fécondation externe ne jouit d'aucune protection. En mer, il évolue en une larve de type trochophorien; mais la majeure partie des Gastéropodes marins déposent leurs œufs dans des coques, des rubans ou des cordons gélatineux qu'ils fixent sur des Végétaux ou sur des roches, ce que font aussi les lymnées, Pulmonés d'eau douce. Les coques ovigères isolées ou groupées en une ponte volumineuse, telle celle de *Murex brandaris*, contiennent un nombre d'œufs très variable. Les œufs pondus par les Opisthobranches dans des cordons parfois très longs ou dans des rubans enroulés en spirale sont petits et abondants. On estime à plus de dix millions leur nombre dans la ponte de

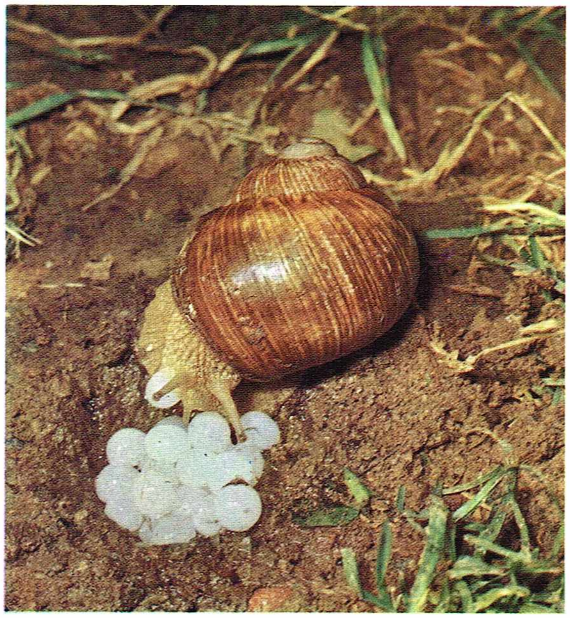

D. Giussani

World Photo Service

◀ *Les Pulmonés terrestres creusent généralement une cavité dans le sol afin d'y déposer leurs œufs (à gauche).* **Littorina littorea**, *appelé « bigorneau », vit sur les rochers et dans les Algues de la zone intertidale (à droite).*

l'ombrelle de Méditerranée *(Umbraculum),* à trois millions cinq cent mille ceux que dépose l'aplysie dans un cordon pelotonné de 15 ou même 20 m de long.

Les Pulmonés terrestres creusent en général une cavité dans le sol pour y déposer leurs œufs qui, chez l'escargot par exemple, atteignent d'assez belles dimensions, soit quelques millimètres ou même quelques centimètres de diamètre chez de grosses formes exotiques.

En mer, les larves issues d'œufs pauvres en réserves éclosent sous la forme de véligères à velum bilobé, tétralobé ou hexalobé. Elles mènent une existence méroplanctonique plus ou moins longue avant de se métamorphoser. Les Gymnosomes (Opisthobranches) ont des larves dites « polytroches » qui ressemblent à de petits tonnelets ornés de trois couronnes ciliées et se déplacent en tous sens avec une grande rapidité. Dans la curieuse larve « échinospire » de quelques Prosobranches coexistent une coquille larvaire et une coquille définitive.

Lors de la métamorphose se produit une régression ou une perte rapide du velum, mais en général les changements ne sont pas très grands. Une transformation considérable se produit par contre dans les genres *Pterotrachea, Carinaria, Firoloida,* Hétéropodes du plancton au corps effilé. En quelques heures, tandis que le velum se réduit de plus en plus, le corps, en s'allongeant énormément, change totalement d'aspect.

Le développement direct s'observe chez les Prosobranches dont les œufs contiennent beaucoup de vitellus, chez ceux qui sont incubés *(Viviparus),* ainsi que chez les Pulmonés. L'évolution de l'œuf de ces derniers comprend les mêmes étapes que chez les Mollusques marins, mais les organes larvaires y sont moins caractérisés. En outre, des organes transitoires différents y apparaissent : le pied engendre à sa partie postérieure une forte vésicule pédieuse, le podocyste, ainsi qu'une volumineuse vésicule céphalique.

SYSTÉMATIQUE

On admet classiquement la division des Gastéropodes en trois sous-classes, celles de Prosobranches, des Pulmonés et des Opisthobranches. Cependant, d'assez nombreux auteurs tendent à ne distinguer que deux sous-classes, celle des Streptoneures (Prosobranches) et celle des Euthyneures.

Sous-classe des Prosobranches

Ces Gastéropodes sont bien caractérisés par leur streptoneurie, par la présence très générale d'un opercule, élaboré par le pied, qui obture l'ouverture de la coquille lorsque l'Animal s'y retire, enfin par la séparation des sexes — à quelques exceptions près. La cavité palléale toujours orientée vers l'avant abrite deux cténidies, deux osphradies, deux glandes hypobranchiales, deux orifices rénaux chez les formes archaïques, ou un seul de ces organes.

Écologie des Prosobranches

La répartition des Prosobranches marins est commandée par de nombreux facteurs de milieu, par le régime alimentaire et par la constitution de ces Mollusques. Ils doivent en effet pouvoir se nourrir soit d'Algues, soit de micro-organismes, soit de leurs congénères ou d'autres Animaux ; il leur faut aussi trouver une protection contre les vicissitudes du flux ou des vagues et, en fait, leurs adaptations sont très diverses. La Manche, par exemple, où les marées sont d'une grande amplitude, se prête bien à l'étude de la zonation, qui s'y révèle particulièrement nette, compte tenu des divers faciès : roches, sable, vase, herbiers. Tout en haut de la frange intertidale, dans la zone des embruns, les *Littorina neritoides* se groupent

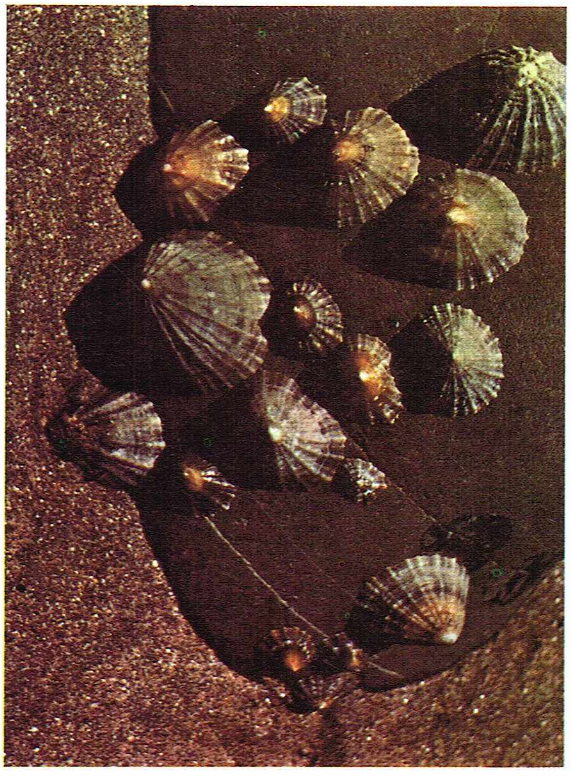

World Photo Service

◀ *Les patelles (ici,* **Patella vulgata**) *adhèrent fortement aux rochers.*

G. Mazza

▲ **Natica millepunctata** *présente un pied très développé dans sa partie antérieure.*

en petites populations dans des crevasses; elles sont capables de supporter une dessiccation de longue durée. Dans la zone de balancement des marées, d'autres Prosobranches doivent faire face quotidiennement à une exondation qui dure plusieurs heures vers les niveaux supérieurs. Ils se réfugient sous les pierres, sous les surplombs humides, ou dans les cuvettes, en faciès rocheux. Les cuvettes sont soumises à des variations de température très importantes; la vie n'y est possible que pour un nombre assez petit d'espèces. Les plages de sable vaseux permettent un autre moyen de protection : l'enfouissement. Beaucoup de Prosobranches y restent tapis, tout en conservant le contact avec l'extérieur par le tube du siphon et par une voie exhalante.

En période d'exondation, ils s'isolent dans leur coquille et n'ont plus d'activité. Dans les herbiers toujours humides que la mer laisse à découvert, les Prosobranches n'ont qu'une activité assez réduite, mais dès le retour de l'eau celle-ci reprend.

Peu d'espèces peuvent subsister sur les roches battues, mais, au nombre de ces formes, il convient de citer les patelles, au pied très puissant, qui donnent peu de prise aux vagues. L'activité des Prosobranches demeure continue sur les rivages peu affectés par les marées, ou sur le plateau continental, au-dessous de la zone des basses mers.

En eau douce, des Animaux tels que la paludine ne voient leur activité se réduire qu'en hiver. Ils s'enfoncent dans la vase et y demeurent à l'état de vie ralentie. La plupart des femelles retiennent leurs embryons dans leur oviducte jusqu'au printemps, et quand la température de l'eau dépasse une certaine limite les éclosions se produisent en masse.

Sur terre, les *Pomatias elegans* qui vivent normalemen sous les feuilles ou à la base de différentes plantes s'enfouissent à la mauvaise saison à quelques centimètres de profondeur et ne refont surface qu'aux premiers beaux jours.

Les Prosobranches sont particulièrement intéressants par les types d'associations qu'ils peuvent constituer et par les étonnantes transformations que le parasitisme peut entraîner chez certains d'entre eux. Les représentants de familles entières s'associent, surtout à des Mollusques et à des Échinodermes. Le parasitisme atteint les degrés les plus divers depuis les formes ectoparasites non modifiées ou peu modifiées jusqu'aux endoparasites simplifiés à l'extrême. Plusieurs *Capulidae* prélèvent seulement un peu de la nourriture captée par des Annélides ou des Échinodermes; d'autres, ectoparasites sur des Astéries, s'adaptent à la succion. Des *Eulimidae,* devenus ectoparasites sur des Astéries, ont une trompe suceuse perfectionnée.

Paedophoropus dicoelobius et *Molpadicola orientalis* sont endoparasites des Holothuries. La première de ces espèces a été caractérisée par ses larves véligères. Le mâle, nain, reste appliqué sur la femelle. L'appareil digestif se réduit presque à la trompe qui est longue et puissante. Parmi les *Stiliferidae* existent des commensaux, des ectoparasites et des endoparasites à organes très régressés *(Gasterosiphon, Diacolax)*. La simplification atteint un degré extrême chez les *Entoconchidae*. Des *Entocolax* n'ont plus ni branchie, ni système nerveux, ni cœur, ni rein et il ne subsiste qu'un statocyste, mais l'ovaire demeure bien développé. *Entoconcha mirabilis* devient une sorte de Ver de 8 cm de long; l'appareil digestif des *Enteroxenos* disparaît en totalité. Autres parasites d'Échinodermes, les *Thyonicola* n'ont plus de systèmes digestif, vasculaire, excréteur ou nerveux. Le parasite se revêt de téguments appartenant à son hôte.

Le degré de simplification maximal se trouve chez *Parenteroxenos dogieli,* parasite de la cavité générale d'Holothuries. Cet Animal, le plus grand de tous les Gastéropodes connus, se présente comme un Ver de 130 cm de long et 4 à 5 mm de diamètre. Son corps ne contient pratiquement qu'une vaste cavité incubatrice où se voient de très nombreux cocons, un ovaire et un testicule. Les cocons donnent naissance à des larves véligères qui subissent leur métamorphose dans le tube digestif des Holothuries qui les ont avalées. La famille des *Pyramidellidae,* celle des *Ctenosculidae* renferment aussi des parasites, mais ceux-ci ne subissent pas de transformations aussi profondes.

Les Prosobranches hébergent d'assez nombreux parasites, en particulier des cercaires. Assez curieusement, l'infection massive semble provoquer une augmentation de la taille. A son degré extrême elle engendre une désagrégation de la gonade telle qu'elle aboutit à une castration parasitaire totale.

Trois grands ensembles constituent la sous-classe des Prosobranches. Ce sont les ordres des Archaeogastropoda, des Mesogastropoda et des Neogastropoda. Un quatrième ordre, celui des Neritoidea, semble devoir être séparé des Archaeogastropoda.

Ordre des Archaeogastropoda

C'est le groupe le plus archaïque, où le cœur conserve souvent deux oreillettes et où il est fréquent de trouver dans la cavité palléale deux cténidies bipectinées, deux osphradies, et une paire de glandes hypobranchiales. Les deux reins persistent en général, mais le rein droit

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ **Haliotis,** *l' « ormeau », vit au bas de la zone de balancement des marées; sa chair est très appréciée et sa coquille est nacrée à l'intérieur.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ *La coquille de* Turritella communis *présente de nombreux tours de spire et un apex très pointu.*

disparaît chez les formes évoluées. La radula porte de nombreuses dents marginales. L'état archaïque se retrouve aussi dans le pied où sont développés, non pas des ganglions pédieux, mais des cordons réunis par des commissures. Les représentants de cet ordre ont un régime principalement herbivore.

Nous étudierons successivement les trois super-familles du groupe.

Pleurotomarioidea. La disposition de la cavité palléale, profondément incisée, ou ouverte à sa partie supérieure, retentit sur la forme de la coquille qui est échancrée (pleurotomaires, scissurelles), pourvue d'un orifice (fissurelle), ou de plusieurs *(Haliotis)* assurant la sortie de l'eau. Les pleurotomaires à coquille nacrée sont des formes exotiques de profondeur. *Haliotis* appelé ormeau ou oreille de mer vit au bas de la zone des marées.

Patelloidea. Les patelles à coquille conique ont un pied sans opercule ; leurs cténidies sont modifiées en un cercle de branchies et leur radula est plus longue que le corps.

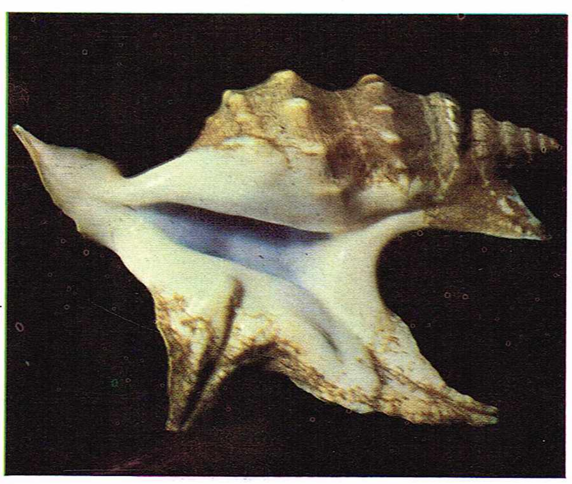

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ *La coquille d'*Aporrhais pes pelecani *est remarquable par les expansions de son ouverture.*

Trochoidea. La coquile conique, turbinée, spiralée, globuleuse ou auriforme, épaisse ou mince, nacrée, est lisse ou garnie de tubercules. *Trochus niloticus* des mers chaudes a été très utilisé pour la fabrication des boutons de nacre. Sur nos côtes abondent les gibbules *(Gibbula)*. Les *Angaria,* ou *Delphinula,* exotiques, ont une coquille ornée d'appendices forts, recourbés ou ramifiés, mais leur opercule est corné. Les *Turbo* à coquille épaisse portent un opercule épais et calcifié.

Ordre des Neritoidea

Les Nérites sont des formes marines à une seule cténidie bipectinée et au cœur traversé par le rectum ; plusieurs espèces se trouvent en eau saumâtre, en eau douce *(Theodoxia fluviatilis)* et même sur terre *(Helicina)*.

Ordre des Mesogastropoda

C'est le groupe le plus important, nous étudierons successivement ses diverses super-familles.

Cyclophoroidea. Ces Animaux terrestres ou d'eau douce à coquille souvent irrégulière ou à ornementation parfois curieuse sont presque tous exotiques.

Viviparoidea. Les paludines de nos eaux douces *(Viviparus viviparus)* ne libèrent leurs embryons que lorsqu'ils sont aptes à vivre par eux-mêmes. Le tentacule droit du mâle est modifié en pénis. Les Pilidae des eaux douces tropicales *(Ampullarius, Pomacea, Lanistes)* sont amphibies. La partie gauche de leur manteau prend la valeur d'un vaste sac pulmonaire, mais une cténidie subsiste à droite de la cavité palléale.

Littorinoidea. *Littorina littorea,* le « bigorneau », ou « vignot », abonde sur les rochers et dans les Algues. *L. saxatilis* incube ses œufs en toutes saisons. Les cyclostomes *(Pomatias elegans)* sont bien adaptés à la vie terrestre.

Architectonicoidea. Les *Architectonica (Solarium)* de Java et de Ceylan ont un ombilic fort large laissant voir la portion axiale des tours de spire.

Cerithioidea. Les turritelles ont une coquille très haute à nombreux tours de spire, à sculpture spirale et ouverture assez petite. Les cérithes montrent le même type d'enroulement, mais les tours portent en général des varices, des tubercules, des costulations ou des épines. Les vermets sont fixés aux roches par leur coquille à tours disjoints. Ils capturent leur nourriture par de longs filets muqueux.

Epitonioidea. Outre les *Epitonium (Scala)* à coquille turriculée ce groupe contient les ianthines qui dérivent en mer grâce à un flotteur de bulles d'air confectionné par leur pied.

Aglossa. C'est dans ce groupe que sont placées provisoirement les familles des Paedophoropodidae, des Stiliferidae, Entoconchidae, Pyramidellidae, qui contiennent les parasites déjà signalés.

Stromboidea. Cette super-famille contient des formes ornementales telles que les *Pterocera* à labre étiré en longues gouttières, les *Aporrhais pes pelecani*, les rostellaires à labre festonné prolongé en très long rostre et même les *Strombus* à dernier tour plus ou moins étalé. L'œil d'*Aporrhais* est l'un des plus différenciés qui existent chez les Invertébrés.

Calyptraeoidea. Outre les calyptrées *(Calyptraea chinensis)* en forme de chapeau chinois, ce groupe contient les crépidules *(Crepidula fornicata)* qui prolifèrent sur les bancs d'huîtres. D'abord mâles, ces Animaux s'accumulent les uns sur les autres en courtes chaînes et changent de sexe probablement sous l'influence de sécrétions élaborées par l'individu inférieur qui est femelle.

Cypraeoidea. Par leur galbe et leurs coloris, les cyprées sont de très beaux Animaux. Ce sont les « porcelaines » à dernier tour recouvrant tous les autres et même la protoconque. Leur ouverture, très allongée, montre des lèvres régulièrement plissées ; leur manteau tacheté de vives couleurs recouvre la coquille ; il est hérissé de papilles. Sur nos côtes les *Simnia* ont le corps rose ou rouge et les *Trivia* (« pucelages », « grains de café »), de taille assez réduite, vivent sur les Ascidies.

Heteropoda. Les *Atlanta,* les *Carinaria* et *Pterotrachea* sont adaptés à la vie pélagique. Les petites atlantes, à coquille discoïde, se maintiennent au sein des eaux par

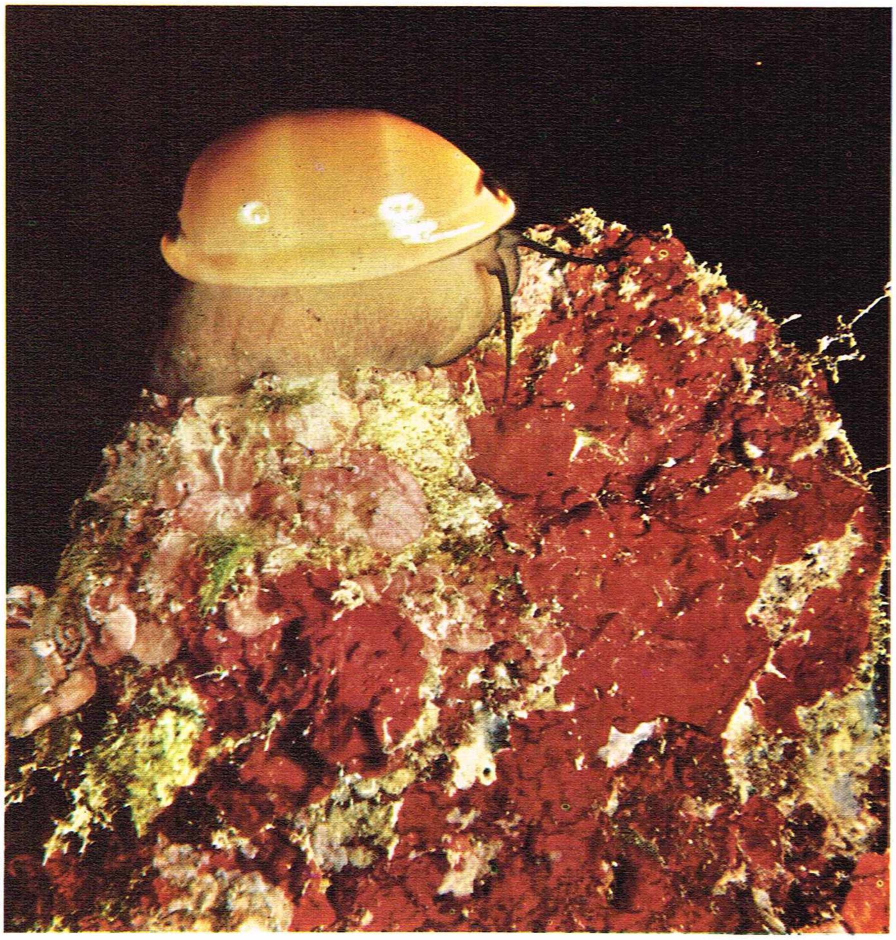

R. Maltini - P. Solaini

R. Maltini - P. Solaini

des battements de leur pied qui forme une longue lame très souple. Beaucoup plus grands, fusiformes et transparents, les *Carinaria* et les *Pterotrachea* ont une masse viscérale réduite, recouverte par une très mince coquille chez les premiers. Les branchies baignent largement en pleine eau; les yeux, complexes, sont dirigés parallèlement au mufle. De l'arrière du corps des *Pterotrachea* part un appendice fin, plus long que le corps et dont on ne connaît pas la fonction.

Naticoidea. Ces Animaux vivent dans le sable, et ont un pied très dilaté dans sa portion antérieure et jusque sur la tête et la coquille chez les natices; ils se nourrissent de Bivalves (*Donax*, tellines, nucules) dont ils percent la coquille.

Tonnoidea. Ce sont des Mollusques souvent de grande taille à dernier tour très ample. *Tonna galea (Dolium galea)* injecte par sa trompe très développée une salive toxique contenant de la tétramine qui paralyse les proies. *Cassidaria echinophora* n'est pas très rare en Méditerranée. *Cassis madagascariensis, Cassis cornuta* et les *Cypraeacassis* sont de grandes et belles formes. Les *Cymatiidae* comprennent des espèces à périostracum

▲ *Chez les cyprées, ou « porcelaines », le dernier tour de spire de la coquille recouvre tous les autres; ici,* Cypraea lurida, *commun en mer Méditerranée.* Carinaria *(à droite) possède un pied en carène arrondie et une coquille très fragile; il est adapté à la vie pélagique.*
▼ *Deux Mesogastropoda : à gauche,* Simnia sp.; *à droite,* Pterotrachea sp.

G. Relini

A. Margiocco

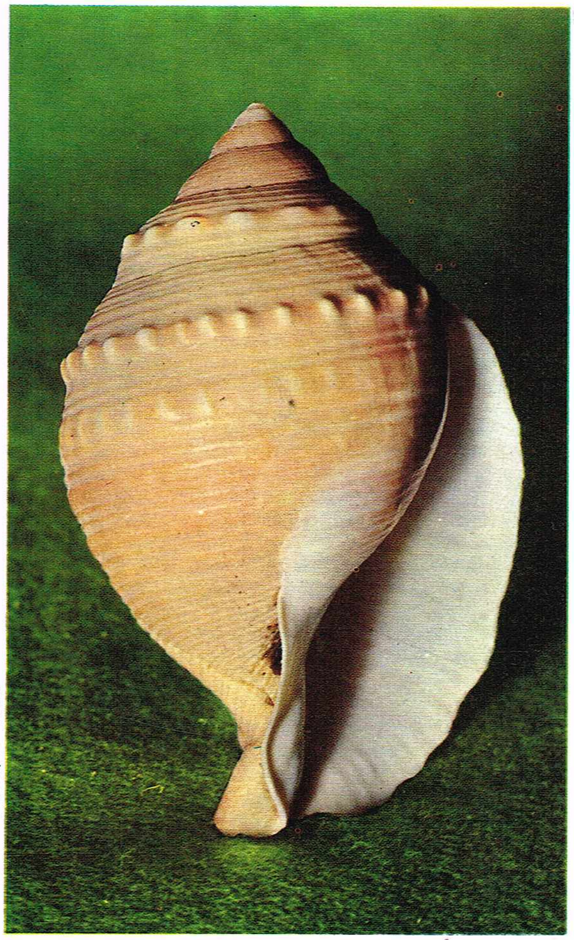

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

A. Margiocco

▲ *La coquille des Neogastropoda est prolongée par un tube permettant de loger un siphon : à gauche,* Cassidaria echinophora ; *à droite,* Murex brandaris *et sa ponte.*

▼ Murex triremis *possède une coquille ornée de longs piquants.*

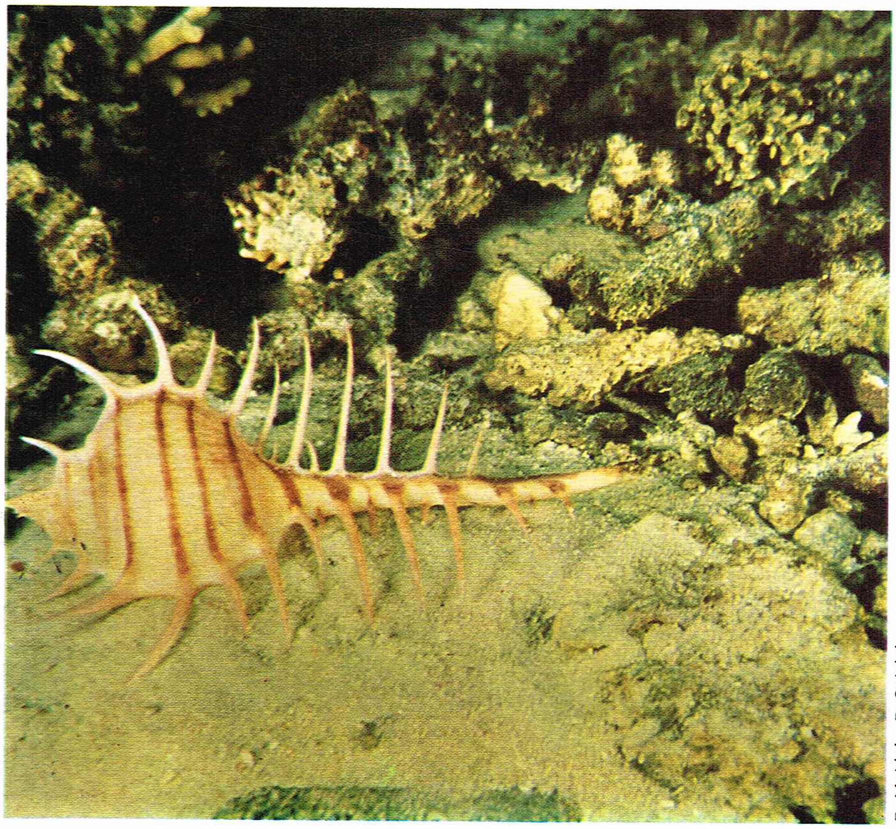

R. Maltini - P. Solaini

pileux et d'autres qui sont très grandes, comme les tritons *(Charonia = Tritonium)*.

Ordre des Neogastropoda

Dans ce groupe la coquille est prolongée par un tube siphonal court, long ou très long, logeant un siphon bien différencié. La radula, étroite, comporte rarement plus de trois dents par rangée. Certaines espèces n'en possèdent même plus. Le système nerveux atteint son degré de concentration maximal. Le pénis, toujours du côté droit de la tête, est parfois énorme. Ces Animaux sont carnivores et les procédés qu'ils utilisent pour capturer leurs proies sont variés.

Sous-ordre des Stenoglossa

Étudions les trois super-familles de ce groupe :

Muricoidea. Communs en Méditerranée, *Murex brandaris* et *M. trunculus* furent exploités par les Romains pour teindre des tissus. La « pourpre » de l'Antiquité provient d'une sécrétion de la glande hypobranchiale ; d'abord jaune verdâtre, elle devient pourpre au soleil.

L'ornementation du test de plusieurs Muricidae consiste en longues épines *(Murex tenuispina, M. triremis)*, parfois aussi en longues lamelles très plissées, recourbées en gouttière *(M. palmarosae)*. Dans la Manche et l'Atlantique, *Ocinebra erinacea* dénommé « perceur », ou « cormaillot », se nourrit de moules et d'huîtres dont il perce la coquille. *Thais lapillus,* à coquille claire ou à bandes brunes, a les mêmes mœurs. *Magilus antiquus* se laisse emprisonner dans les Madrépores, mais au fur et à mesure de leur accroissement, il élabore un très long tube calcaire qui lui permet de survivre.

Buccinoidea. Les buccins *(Buccinum undatum)* sont fréquents dans la Manche, en bas de la zone des marées. Les nasses *(Nassarius)* se dirigent vers les cadavres dont elles perçoivent l'odeur à grande distance.

Volutoidea. Ce sont de grandes et belles formes à coquille lisse avec des zébrures sombres, qui vivent dans les mers chaudes. *Voluta musica* vit aux Antilles

▶ Conus mediterraneus *est l'unique représentant de ce genre en mer Méditerranée ; on le rencontre aussi en mer Rouge et de l'autre côté du détroit de Gibraltar.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Les harpes *(Harpa major)*, lisses, luisantes, ont des ornementations d'une grande élégance.

Sous-ordre des Toxoglossa

Mitres, cônes et Turridae (pleurotomes) sont groupés dans cet ensemble. Les mitres *(Mitra papalis, M. episcopalis)* ont une coquille fusiforme à fond clair et taches de couleur orangée ou brune. Les dessins qui ornent la coquille des cônes, belles formes à ouverture très allongée, sont d'une grande finesse. *Conus (Darionicus) textilis* en est un bon exemple. Plus rare, *C. gloria maris* est aussi la gloire de quelques musées privilégiés. En contrepartie certains cônes sont très venimeux et la liste des victimes de *C. geographus*, de *C. textile* est déjà longue. Les cônes possèdent en effet une glande à venin et des dents radulaires qui peuvent être protractées à bonne distance. Ils sont surtout piscivores et vermivores. Les pleurotomes ont également une glande à venin ; les *Terebra* ont une coquille très effilée à tours nombreux et petite ouverture (*Terebra subulata* de l'Indo-Pacifique).

Sous-classe des Pulmonés

Comme les Opisthobranches, les Pulmonés sont euthyneures et hermaphrodites, ce qui explique les similitudes de leur organisation ; mais leur originalité réside avant tout dans la présence d'une cavité pulmonaire à plafond très vascularisé qui ne semble pas avoir la même origine que la cavité palléale. En effet elle apparaît chez l'embryon comme une dépression ectodermique qui s'approfondit et demeure ouverte au niveau du pneumostome.

La *coquille*, plus souvent dextre que sénestre, n'atteint pas d'aussi grandes dimensions que chez les Prosobranches ; elle peut se réduire et disparaître. Un opercule n'en obture l'ouverture que chez les Amphibolidae. On y distingue : 1° les Basommatophores, aquatiques, dont les yeux se voient à la base des tentacules qui sont rétractiles, mais non invaginables ; 2° les Stylommatophores, terrestres, dont la tête porte en arrière de deux tentacules sensoriels deux autres tentacules rétractiles, invaginables, les ommatophores.

La tête plus ou moins nettement délimitée du pied laisse voir fréquemment l'orifice génital sur sa droite s'il s'agit d'une forme dextre, ou sur sa gauche (chez les formes senestres).

La masse viscérale s'enroule en tortillon dans le cas où la coquille est spiralée, mais quand cette dernière a disparu, elle se loge dans le pied. Elle est revêtue d'un manteau apte à créer une cavité palléale *(Ancylus, Chilina)* où se développent chez les espèces aquatiques des branchies adaptatives (siphonaires, *Protancylus, Miratesta*). Le recouvrement de la coquille par le manteau n'est pas exceptionnel et peut aboutir à la fusion des bords palléaux avec persistance d'un orifice palléal et lorsqu'il y a enfoncement de la masse viscérale dans le pied, la coquille s'isole dans une poche coquillière. Cette poche, très vaste, et d'où la coquille a disparu, recouvre tout le dos des *Philomycus*. Le champ palléal des espèces limaciformes demeure bien localisé. La cavité pulmonaire devient complexe chez les *Arion ;* elle se ramifie

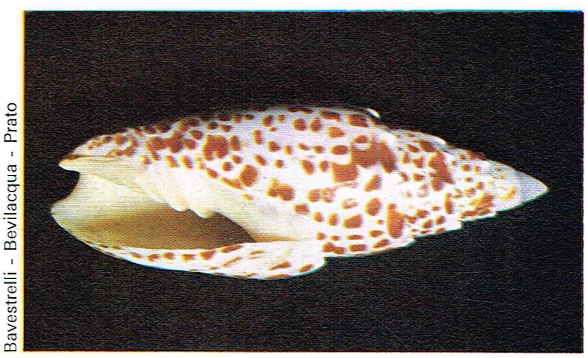

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ Mitra papalis *présente une coquille tachetée très décorative.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

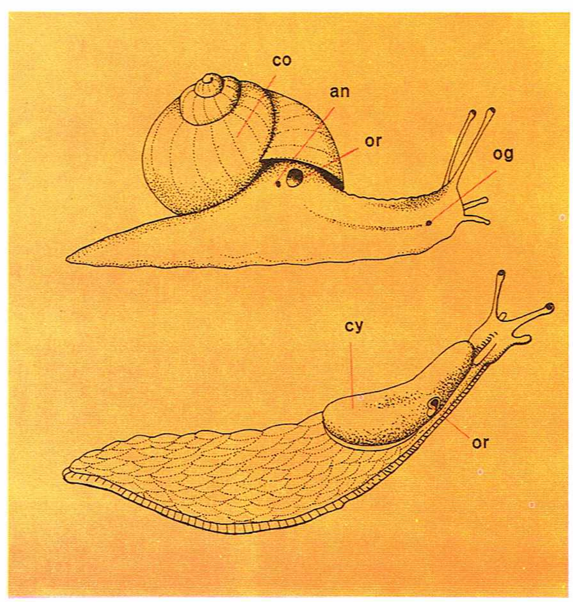

I.G.D.A.

▶ *A gauche,* Darionicus textilis, *un coquillage très coloré de la mer du Japon. A droite, deux Gastéropodes Pulmonés terrestres : en haut, un escargot* (Helix sp.) *; en bas, une limace* (Arion sp.) *; an, anus ; co, coquille ; cy, clypeus contenant la coquille rudimentaire ; og, orifice génital ; or, orifice respiratoire.*

(chez les Onchidiidae) ou produit un poumon trachéen à fins tubules buissonnants (chez les Athoracophoridae).

L'appareil digestif, plus voisin de la disposition primitive des Basommatophores, se spécialise. Un gésier musculeux précède l'estomac de constitution souvent simplifiée.

Le *cœur* n'a qu'une oreillette placée en avant du ventricule. Le *rein* s'ouvre dans la cavité pulmonaire par une papille ou, dans les formes supérieures, par un uretère.

Le *système nerveux* peut se caractériser dans toute la série des formes par une tendance au raccourcissement de l'anse viscérale ou même à la fusion des centres ganglionnaires. Parmi les organes sensoriels, les yeux sont ceux qui montrent le plus de particularités. Les yeux céphaliques atteignent un haut degré de perfection. Des yeux complexes existent, sur la face dorsale des Onchidiidae.

L'appareil reproducteur comporte une glande hermaphrodite, d'où part un conduit unique qui, parvenu au niveau de la glande de l'albumine, se divise en oviducte et spermiducte distincts, débouchant à l'extérieur par deux orifices, ou encore en voies mâle et femelle unies en un spermoviducte partiellement compartimenté sur sa longueur par deux bourrelets opposés. La partie distale des voies mâles et femelles montre des différenciations multiples : diverticules, glandes, organes copulateurs parfois très complexes.

Ordre des Basommatophores

La coquille spiralée, en nacelle ou en capuchon est toujours présente. Les orifices génitaux sont en général séparés.

Ce groupe comprend des formes exclusivement marines telles que les siphonaires à coquille patelliforme et branchies situées dans une cavité palléale, des formes d'estuaire ou de rivage *(Amphibolidae, Ellobiidae),* ainsi que les « Pulmonés d'eau douce », c'est-à-dire les familles des *Lymnaeidae, Physidae, Planorbidae, Bulinidae, Ancylidae.* Bien qu'aquatiques, ces Animaux respirent en général par leur poumon; aussi doivent-ils regagner périodiquement la surface pour renouveler leur provision d'air. Lorsqu'ils parviennent au contact de l'air, leur pneumostome s'ouvre largement, s'étale, puis se referme, emprisonnant ainsi une bulle d'air. L'abaissement de la température, en réduisant l'activité métabolique, ralentit beaucoup le rythme de remontées de ces Animaux. Toutefois, des adaptations particulières permettent à quelques-uns de ces Mollusques de rester immergés en permanence. Les planorbes *(Planorbarius corneus)* dont le sang contient de l'hémoglobine semblent tirer un parti plus grand de leur oxygène que les lymnées. La respiration des Ancylidae doit être exclusivement tégumentaire.

Lymnées, planorbes et bulins hébergent des stades larvaires de dangereux parasites de l'homme et des Animaux domestiques. La bilharziose, due à deux formes de Trématodes, *Schistosoma haematobium* pour la forme vésicale d'Afrique et *S. mansoni* pour la forme intestinale (Afrique, Antilles, Amérique), semble nécessiter le séjour des parasites par des *Bulinus* et par quelques Planorbidae, notamment *Biomphalaria.* La douve du foie, *Fasciola hepatica,* a pour hôte intermédiaire principal une lymnée.

Ordre des Stylommatophores

Les Stylommatophores tous terrestres, bien caractérisés par leurs tentacules oculaires situés en arrière des tentacules sensoriels, sont extrêmement nombreux.

Leur classification, très complexe en raison de l'absence de critères bien définis, utilise dans une large mesure, outre les caractères de la coquille, ceux que peut fournir l'appareil génital : oviducte, utérus, vagin et formations annexes d'une part, spermiducte, prostate, complexe pénial d'autre part. Un sac du dard, des glandes muqueuses dites multifides représentent « l'appareil amatorial » qui contracte des rapports avec les voies mâles et les voies femelles.

Le vagin s'ouvre dans un enfoncement de la paroi du corps, l'atrium (où débouchent le conduit mâle et la glande du dard), ou plus rarement dans le sac du stylet.

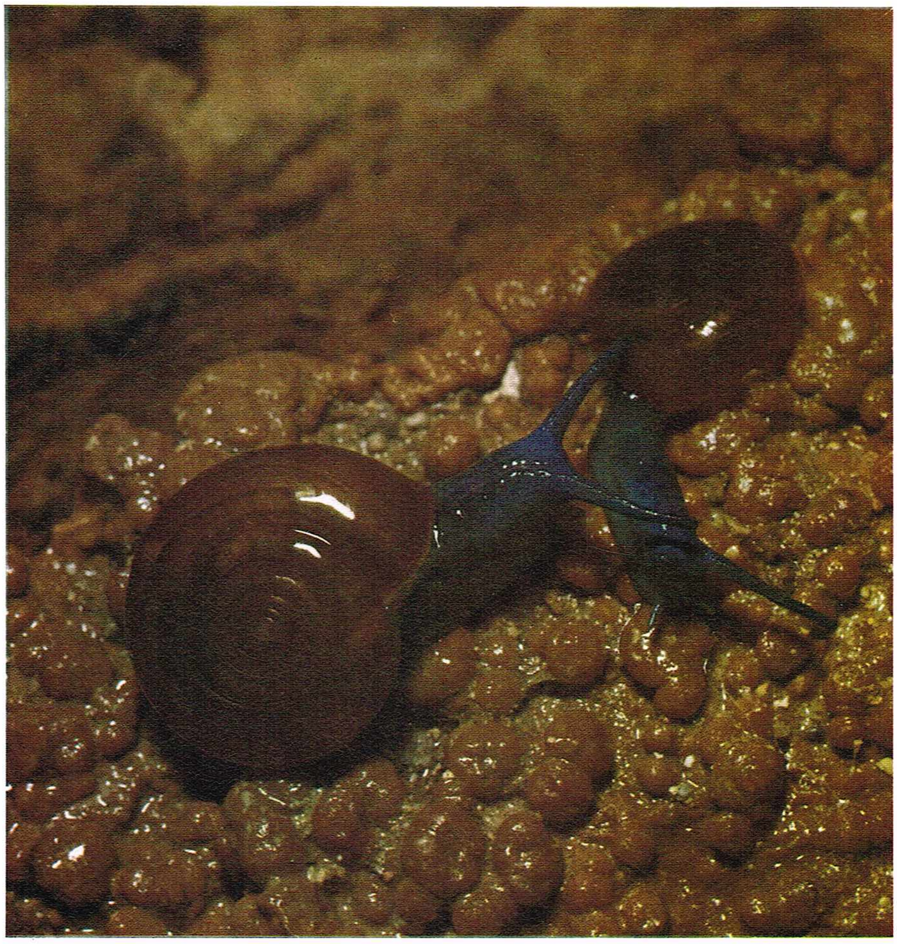

P. Castano

▲ **Oxychilus lucidus,** ***un Gastéropode Pulmoné Stylommatophore.***

Le sac du dard n'existe pas chez tous les Pulmonés; il contient un ou plusieurs stylets utilisés lors de la copulation par l'un des conjoints qui l'enfonce profondément dans le pied de son partenaire. Le pénis, dont la définition n'est pas tout à fait la même que chez les Basommatophores, est un tube à paroi musculeuse ouvert dans l'atrium. Sa paroi interne s'orne souvent d'organes excitateurs. Les spermatozoïdes sont expulsés isolément ou plus souvent groupés en *spermatophores.* L'accouplement, précédé de longs préludes, est unilatéral ou réciproque.

Deux groupes très inégaux sont à considérer :

Les *Gymnophila* comprennent les Soléolifères, sans coquille, à manteau couvrant aussi bien la face dorsale que

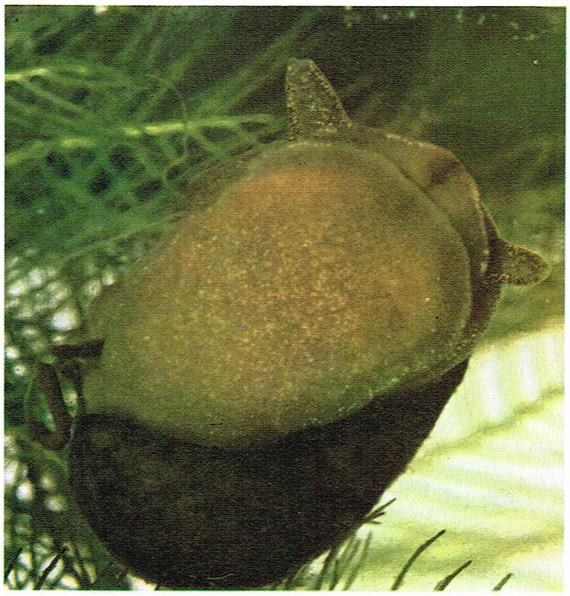

A. Margiocco

◀ ***Les Pulmonés aquatiques, comme cette lymnée*** **(Lymnaea sp.),** ***doivent rejoindre fréquemment la surface pour faire une provision d'air dans leur cavité respiratoire.***

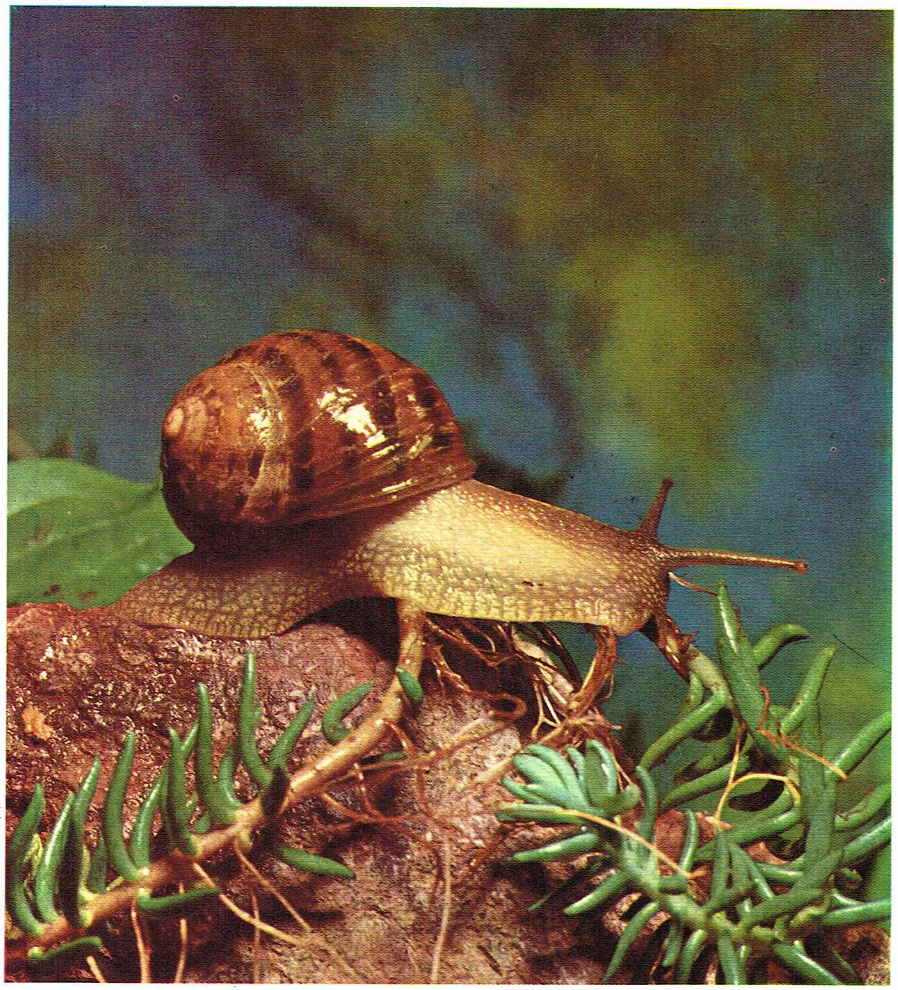

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

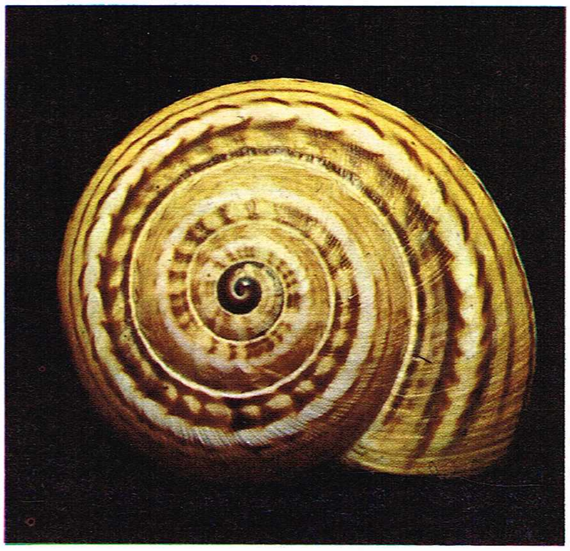

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

G.S. Giacomelli

▲ ***Trois Gastéropodes Pulmonés Stylommatophores : à gauche,* Helix aspersa ; *à droite, en haut, une coquille agrandie de* Helix pisana ; *à droite, en bas,* Agriolimax sp.**

les parties latérales. Dans ce groupe qui contient les espèces carnivores *(Rathouisia, Atopos)* se trouvent les *Onchidella,* hôtes de la zone des marées, dont les embryons passent par le stade de larve véligère.

Les *Geophila* rassemblent tous les autres Stylommatophores que l'on classe surtout d'après la disposition du rein, de l'uretère et du pore urinaire. Plusieurs familles telles que les *Pupillidae,* les *Enidae* ou *Bulimulidae* ont une coquille petite ou de taille moyenne. Les *Partulidae,* des îles du Pacifique, sont ovovivipares ; ils vivent sur les buissons ou même sur les arbres. Les *Clausiliidae* n'ont pas d'opercule, mais une lame mobile, le *clausilium,* en tient lieu.

Les *Strophocheilus,* de taille assez grande, pondent des œufs très volumineux. Les succinées vivent dans les pièces d'eau ou sur les Végétaux qui les entourent.

Les *Tracheopulmonata* n'ont plus en guise de coquille que des corpuscules calcaires inclus dans le tégument dorsal. Ils ont un poumon arborescent ou trachéal.

Les *Achatinidae,* de taille parfois importante, sont bien connus ; *Achatina fulica* cause des dommages considérables aux cultures, dans les régions chaudes où on a introduit ce Mollusque en tant qu'Animal comestible.

Les *Arionoidea* à coquille discoïde, carénée ou héliciforme, déprimée, ont des génitalia simples ; mais leur coquille se réduit parfois beaucoup ; le manteau recouvre alors la partie antérieure du corps. *Arion rufus,* la grosse limace commune au bord de nos pièces d'eau, et *Arion ater* sont très fréquents sous nos climats.

La superfamille des *Limacoidea* rassemble des formes à coquille spiralée ou réduite à une plaque calcaire (Limacidés) ou encore à coquille rudimentaire ou absente. *Limax maximus, Agriolimax agrestis,* et *Milax gagates* des régions méditerranéennes nous sont familiers.

Les testacelles appartenant à une superfamille voisine sont très allongées, et portent une petite coquille sur l'extrémité postérieure de leur corps. Ces Animaux voraces, capables de s'enterrer très profondément, pourchassent les lombrics. Les oléacines, également carnivores, s'attaquent à d'autres Pulmonés.

Enfin, la très vaste superfamille des *Helicoidea,* à coquille héliciforme, discoïde, lentiforme, conique ou ovoïde, a une très vaste dispersion. La famille la plus représentative contient nos escargots comestibles : *Helix pomatia,* l'escargot de Bourgogne à grosse coquille claire, et *Cryptomphalus aspersa,* escargot des vignes, ou « petit gris », à coquille flammulée, introduit dans toutes les parties du monde. Tous ces Animaux commettent des dégâts dans les cultures potagères.

A. Margiocco

▶ ***Un escargot du genre* Helix *en train d'émettre du mucus.***

H. Chaumeton - Jacana

▲ **Elysia viridis,** ***petite forme du haut de la zone des marées, dont le tégument héberge des Algues symbiotiques unicellulaires, est un exemple d'Opisthobranche sans coquille, devenu secondairement symétrique. Toutefois, la situation antérieure et latéro-dorsale de l'anus témoigne de la réalité de la torsion, phénomène qui n'a guère laissé d'autre indice.***

Sous-classe des Opisthobranches

Les Opisthobranches n'ont aucun représentant adapté à la vie sur terre. Bien qu'elle soit assez nettement délimitée, cette sous-classe est très diversifiée. Les tendances évolutives y sont très marquées de sorte qu'il est bien difficile de fournir un plan d'organisation de valeur générale.

L'un des caractères les plus importants concerne la position relative du cœur qui, dans son péricarde, comprend en général en avant de la branchie un ventricule antérieur par rapport à l'oreillette ou placé sur sa gauche. L'euthyneurie est évidente, bien que certaines formes inférieures conservent un système nerveux typiquement streptoneure.

L'aspect de la tête peut être très modifié par le développement d'un fort « bouclier céphalique » et par les rhinophores qu'elle porte parfois. Le pied lui-même s'adapte de plusieurs façons à la natation, mais en général il demeure un organe de reptation développé à des degrés divers. Le manteau conserve parfois ses caractères ; toutefois il est assez fréquemment remplacé par un *notum*. La cavité palléale parfois développée abrite une cténidie, une glande hypobranchiale, l'anus et le néphroprocte. Elle devient virtuelle dans des groupes entiers, ce qui entraîne la disparition de la branchie et son remplacement par des branchies de néoformation, localisées en certains points du corps, ou par des papilles dorsales. Plusieurs familles ne possèdent pas de formations pouvant être interprétées sûrement comme des organes respiratoires, mais il est certain que la respiration peut être exclusivement tégumentaire.

La *coquille,* solide ou fragile, est spiralée, dextre ou sénestre, ou ovoïde, patelliforme, conique, réduite et incluse dans le manteau, ou absente. Elle comprend deux valves chez *Berthelinia* et devient aberrante dans le groupe des Thécosomes pélagiques. L'opercule est assez rarement présent.

L'*appareil digestif,* adapté à des régimes alimentaires variés, différencie un jabot, un gésier à plaques masticatrices dites « gésiales » et un estomac qui, bien que parfois assez spécialisé, semble n'être qu'un lieu de transit des aliments vers la glande digestive. Mais en relation avec les régimes alimentaires différents, les organes de préhension des aliments, la radula et d'autres formations annexées à la bouche ou au pharynx deviennent très spécialisés. La situation de l'anus sur le côté droit du corps, ou en arrière et dans le plan médian, pourrait résulter d'un processus de détorsion.

L'*appareil reproducteur* atteint un très haut degré de complexité chez bien des Opisthobranches. Le conduit mâle relié à une prostate aboutit à un pénis situé du côté droit du corps. L'oviducte, qui se complique d'une glande de l'albumine et de glandes nidamentaires, s'ouvre à l'extérieur par un orifice placé en arrière du pénis (il y a alors diaulie), mais lorsque le conduit hermaphrodite aboutit à un orifice commun (monaulie), les spermatozoïdes sont dirigés vers l'organe copulateur mâle par un sillon séminal cilié. Lorsque l'orifice de l'oviducte et le vagin sont distincts il y a triaulie.

Le *système nerveux* montre une évolution remarquable, car tous les intermédiaires existent entre le système nerveux à anse viscérale longue et ganglions bien distincts et celui de certains Nudibranches où les ganglions du collier œsophagien fusionnent en une masse unique avec ceux de l'anse viscérale. Les yeux, contrairement à ceux des Prosobranches, sont en général enfoncés dans le tégument et réduits. Quelques espèces en seraient dépourvues. Les « organes de Hancock » propres aux Opisthobranches doivent être gustatifs ou olfactifs. Ils se localisent aux côtés du bouclier céphalique. Il se pourrait qu'ils soient à l'origine des rhinophores, organes sensoriels développés en arrière des tentacules.

A deux exceptions près, *Strubellia paradoxa* et *Acochlidium amboinense,* qui peuvent exister en eau douce,

G. S. Giacomelli

M. Bavestrelli - C. Bevilacqua - S. Prato

▲ *A gauche,* **Flabellina affinis** *: la spécialisation de la tête entraîne l'existence de rhinophores consistant en deux tentacules céphaliques porteurs de cellules sensorielles à fonction chimioréceptrice. A droite,* **Aplysia rosea.**

les Opisthobranches vivent sur les fonds marins ou dans le plancton et sont surtout nombreux dans les mers chaudes. Peu d'espèces habitent les eaux saumâtres.

Ordre des Cephalaspidea

La coquille, bien constituée chez les *Acteon, Hydatina, Bulla,* régresse plus ou moins dans plusieurs familles. Sur la tête se différencie un bouclier céphalique bien délimité, saillant, où les yeux ne sont pas toujours très visibles. La branchie est ici un repli du feuillet interne du manteau qui se plisse parfois énormément, surtout chez *Acera (Akera)*. Sa situation par rapport au cœur, au rein et à l'anus semble représenter divers stades de la détorsion et du changement du cœur. Dans le gésier, aux plaques gésiales peuvent s'ajouter des denticules.

L'organisation de l'*Acteon* est très proche de celle des Prosobranches. Les *Bulla,* à coquille ovoïde, se trouvent dans presque toutes les mers; leur pied n'a plus d'opercule. *Gastropteron* est un bon nageur grâce à son pied modifié en larges parapodies. On trouve sur nos côtes des *Scaphander* et des *Philine*.

Ordres des Runcinacea et des Acochlidiacea

Ces deux ordres comprennent de petites formes; *Philinoglossa* n'a qu'un millimètre de long.

Ordre des Sacoglossa

Outre *Berthelinia* à coquille bivalve, on classe chez les Sacoglosses *Lobiger*, aux parapodies allongées en deux paires de longues lames natatoires, *Oxynoe* et des formes telles que *Hermaea*, *Stiliger*, *Alderia*, à papilles dorsales foliacées ou fusiformes qui manquent chez *Elysia* et *Limapontia*. La radula des Sacoglosses se réduit à la série des dents rachidiennes, mais les dents usées, au lieu d'être éliminées comme ailleurs, s'accumulent dans un cæcum placé en avant de l'odontophore.

Ordre des Aplysiacea

D'assez belle taille, les aplysies, qui présentent une tête allongée suivie d'une portion viscérale plus dilatée, sont bien caractérisées par leurs larges parapodies qui, en ondulant, leur permettent de nager. Inquiétées, elles rejettent une sécrétion violacée bien connue. Leur accouplement que l'on peut observer au printemps, du fait de la réciprocité des fonctions, donne lieu à la constitution de chaînes d'une dizaine d'individus dont seuls les extrêmes n'assurent qu'une fonction. Les *Dolabella* et les *Dolabriferidae* vivent dans les mers chaudes. Les *Notarchus,* de Méditerranée, effectuent de légers sauts par expulsion brusque de l'eau de leur cavité palléale.

Ordre des Pleurobranchacea (Notaspidea)

Trois types d'Animaux constituent cet ordre : les *Umbraculidae* et les *Tylodinidae,* à coquille externe, ainsi que les *Pleurobranchidae,* dont la coquille est externe, interne ou absente. L'ombrelle de la Méditerranée *(Umbraculum mediterraneum)* se reconnaît à son énorme pied verruqueux arrondi et à sa coquille surbaissée d'où émerge une grande branchie. Bien que

▼ *Mollusques appartenant à la sous-classe des Opisthobranches : à droite,* **Umbraculum mediterraneum** *; à gauche,* **Glossodoris valenciennesi,** *dépourvu de coquille.*

G. S. Giacomelli

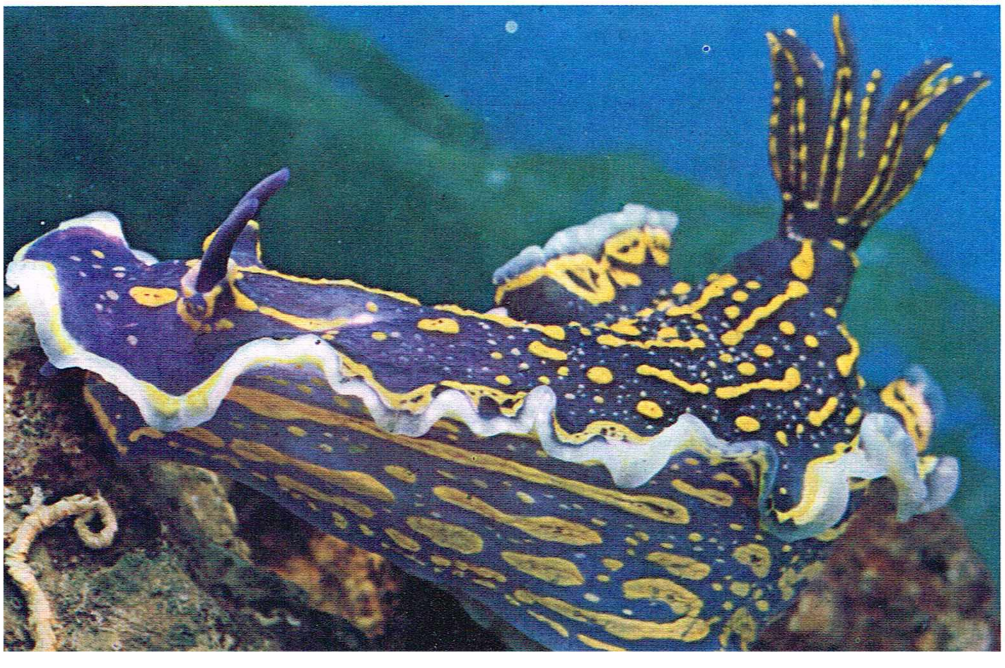

G.S. Giacomelli

cette espèce ponde à chaque saison plus de dix millions d'œufs, il semble qu'elle soit en voie de disparition. Les tylodines, de Méditerranée, ont un corps jaune soufré et une coquille patelliforme. Le « pleurobranche » *Berthella plumula* n'est pas rare dans la Manche.

On a longtemps groupé tous les Mollusques planctoniques possédant des nageoires sous la dénomination de « Ptéropodes ». Or ces Animaux se répartissent en deux ordres distincts : les Thécosomes, dérivés des Cephalaspidea, et les Gymnosomes, certainement apparentés aux Aplysiacés.

Ordre des Thecosomata

Chez les *Euthécosomes*, le pied, ventral, se situe en arrière de la nageoire qui consiste en deux lobes latéraux; la coquille est spiralée, ou très modifiée. Les Euthécosomes ont leur pied déplacé vers l'avant et différencié en une trompe plus ou moins longue; la nageoire insérée ventralement par rapport au pied s'étale en une pièce unique. Les petits *Spiratella* ont conservé une coquille spiralée, mais le test des *Diacria* et *Cavolinia* semble formé par l'accollement de deux valves lisses, striées, ou costulées. Les *Creseis* à coquille subulée abondent dans le plancton.

Parmi les *Pseudothécosomes, Cymbulia peroni* est l'une des formes dotées d'une pseudoconque, qui est d'ailleurs très élégante. *Corolla* et *Gleba* lui sont apparentés. *Desmopterus* ne possède plus aucun test. Les Pseudothécosomes, au corps presque transparent, sont de très belles créatures adaptées à la vie pélagique.

Ordre des Gymnosomata

L'adaptation encore plus poussée à la vie pélagique se retrouve chez les Gymnosomes dont le corps fusiforme et plus robuste reste de dimensions plus petites. La cavité palléale a disparu, mais des plissements tégumentaires doivent correspondre à des branchies de néoformation. Les organes de préhension des proies sont particulièrement remarquables. Le vestibule buccal s'évagine en une trompe simple ou complexe pouvant porter une mâchoire et des « sacs à crochets », sortes de dépressions d'où émergent des dizaines de crochets longs et fins. Lorsque la trompe est relativement peu développée, elle porte à sa base des « cônes buccaux ». La trompe des *Cliopsidae* atteint deux ou trois fois la longueur du corps; celle de *Pneumoderma atlanticum* porte une gigantesque paire de « bras à ventouses » rappelant ceux des Céphalopodes. Seul le bras médian est développé chez *Pneumodermopsis canephora* et porte une unique ventouse qui est énorme. A l'état de repos toutes ces productions sont ramenées à l'intérieur de la région céphalique. Les cliones *(Clione limacina)* se groupent fréquemment en essaims; leur corps mesure de 30 à 40 mm de long; communs en mer du Nord et dans l'Arctique, ils sont consommés par les baleines. Dans l'Antarctique, cette espèce est remplacée par *C. antarctica*.

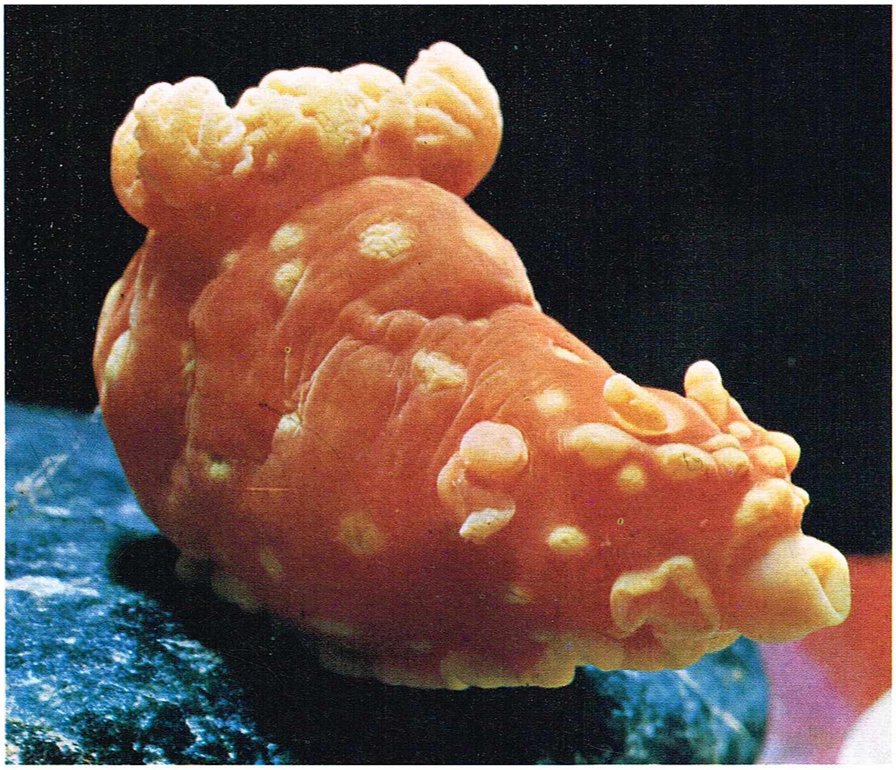

G. Mazza

▲ ***Les Nudibranches, de couleurs très variées, dépourvus de coquille à l'âge adulte, présentent sur leur dos des papilles ou productions arborescentes à fonction respiratoire.***

Ordre des Nudibranchiata

En dépit de nombreuses différences d'organisation, les Nudibranches constituent un ensemble de Gastéropodes que l'on peut répartir en quatre catégories relativement homogènes dont Odhner a fait quatre ordres : Doridacea, Dendronotacea, Arminacea, Aeolidiacea. Tous marins et dépourvus de coquille à l'état adulte, ces Animaux ont l'aspect de limaces. Leur pied est presque toujours aplati en sole et leur notum est nu ou papilleux. La tête porte des tentacules et des rhinophores. Les organes respiratoires sont représentés par de vraies branchies ou par des lamelles latérales, des papilles ou des productions arborescentes. La glande digestive est massive ou ramifiée; ses diverticules peuvent s'introduire jusque dans les rhinophores et les papilles dorsales. L'anus est médio-dorsal ou sur le côté droit.

Nous considérerons les quatre groupes de Nudibranches comme des sous-ordres :

Les *Doridacea* ont un corps plutôt aplati; il porte des branchies médio-dorsales disposées en rosette autour de l'anus. *Doris verrucosa, Chromodoris elegans* et *Archidoris tuberculata* vivent sur nos côtes.

Les *Dendronotacea* comprennent *Tethys leporina* qui porte un large velum antérieur, et les *Phylliroe* pélagiques à corps comprimé latéralement et scintillant à l'obscurité.

Les *Arminacea* montrent des lamelles branchiales sous le notum qui est souvent sculpté longitudinalement.

Les *Aeolidiacea* portent des papilles dorsales disposées en séries ou en groupes. Le corps mince est extrêmement allongé chez plusieurs espèces. *Aeolidia papillosa*, de couleur chamois, est commun au printemps sur toutes nos côtes.

▼ ***A gauche,* Peltodoris atromaculata ; *à droite,* Aeolidia papillosa, *représentant du groupe des Aeolidiacea, chez lequel les appendices respiratoires fusiformes sont disposés, selon les espèces, de chaque côté du dos ou sur toute sa surface.***

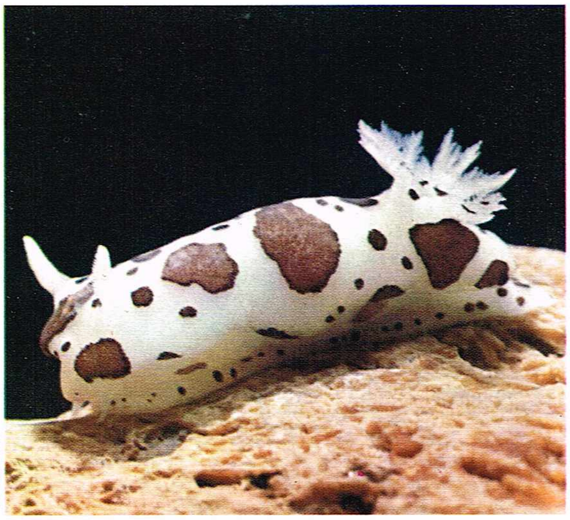

G. Mazza

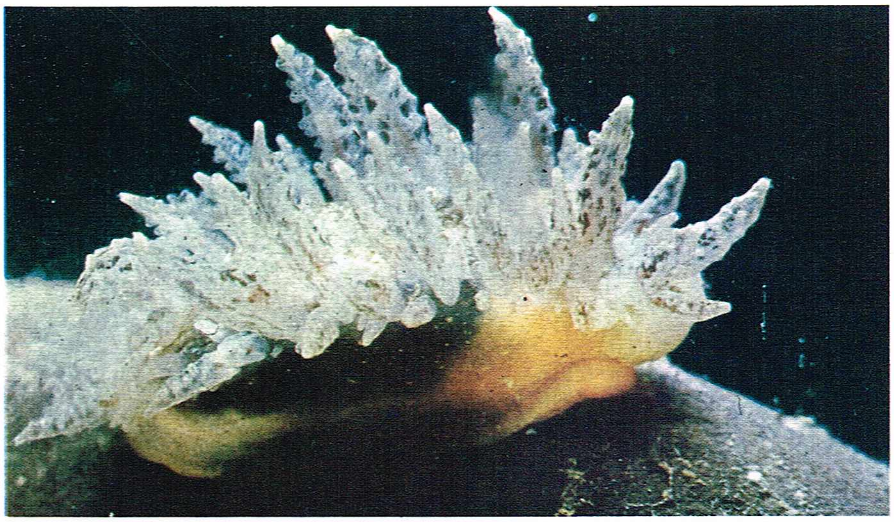

J. H. Tashjian

▶ **Pecten jacobaeus,** ***dont les valves présentent latéralement des ailes ou « auricules ».***

G. Mazza

BIVALVES OU LAMELLIBRANCHES

Très largement répandus dans les mers, les eaux saumâtres et douces, les Bivalves sont des Animaux à symétrie bilatérale dont le corps est enclos dans deux valves calcifiées, mobiles autour d'un axe dorsal, la *charnière*. Leur respiration s'opère au niveau des branchies, sauf dans l'ordre des Septibranches où ces organes très fragiles sont remplacés par un septum percé de pores inhalants. Leur régime est microphagique, leur fécondation en général externe.

Organisation générale

La *coquille*. Quelle que soit la position de l'Animal sur son substrat, la coquille a une valve droite et une valve gauche. Au niveau de la charnière, un ligament dur mais élastique, fixé sur une partie du bord dorsal des valves, tend à écarter les valves l'une de l'autre. Leur rapprochement jusqu'à fermeture complète est provoqué par la contraction de deux muscles adducteurs insérés par leurs extrémités sur leur face interne, ou par un seul muscle. Ces valves, très réduites chez les tarets et surtout chez les « arrosoirs », ne disparaissent jamais. Elles se compliquent de plaques surnuméraires dans le groupe des Adesmacés où le ligament fait défaut.

La charnière porte des dents dont la forme, le nombre et l'agencement doivent traduire l'existence de lignées définies. Six types sont ainsi caractérisés. Le type *taxodonte* comporte des dents nombreuses, toutes semblables, ce qui n'est pas le cas pour le type *hétérodonte* où trois dents cardinales au maximum se localisent sous les sommets, ou umbos. Dans le type *schizodonte,* le plateau cardinal est divisé en deux moitiés symétriques. La charnière *isodonte,* où la fossette ligamentaire sépare de chaque côté une dent et une fossette, est robuste. Les dents sont plus réduites dans les types *desmodonte* et *dysodonte*. Les valves grandissent avec le manteau; elles sont engendrées sous la forme de surfaces spirales logarithmiques.

La forme des valves diffère beaucoup suivant les genres considérés; des ailes, ou « oreillettes », se développent chez les *Malleus,* les Aviculidés, les *Pecten*. Ces valves sont lisses, luisantes, parfois colorées par des pigments (composés pyrroliques, chromoprotéines, porphyrines, dérivés de la mélanine), ou montrent des stries, des côtes simples ou entrecroisées, des tubercules, des épines, des lobes, des festons. Celles des tarets et des pholades sont hérissées de denticules propres à user ou forer le bois ou la vase compacte. Celles de *Tridacna gigas* atteignent 137 cm de long. Le poids de telles valves serait de l'ordre de 250 kg.

Morphologie. Extrait de ses valves, le corps d'un Bivalve apparaît recouvert sur ses deux faces par deux larges replis du manteau, l'un sur la face droite, l'autre sur la face gauche. Ces lobes palléaux, libres à la face ventrale ou fusionnés, enclosent la cavité palléale où se trouvent, outre le pied médian, deux branchies lamelleuses, striées, enserrées entre le pied et le manteau. En avant du pied, à l'extrémité antérieure du corps, s'ouvre la bouche entourée de quatre palpes labiaux striés. Les formes à lobes palléaux fusionnés montrent en arrière deux siphons, tubes courts ou longs donnant accès à l'eau (siphon inhalant) ou permettant sa sortie (siphon exhalant).

Le manteau engendre le ligament par sa face dorsale et la coquille par toute sa surface; son bord porte des papilles, des tentacules ou même des yeux *(Pecten)*. Il est creusé sur toute sa longueur de deux sillons qui délimitent trois bourrelets. Du fond du sillon externe naît le périostracum, couche la plus externe de la coquille sous laquelle sont élaborées les couches calcaires de l'ostracum et de l'hypostracum. Une très mince couche d'un fluide extrapalléal, siège de la calcification, s'interpose entre le manteau et l'hypostracum.

Dans certaines circonstances, telles que la présence de parasites ou de menus grains de sable au niveau du manteau, celui-ci réagit en produisant autour du corps étranger un massif de cellules qui s'organise en « sac perlier ». De très minces couches de nacre, de calcite ou d'aragonite, de conchyoline se déposent alors autour du « noyau ». Plusieurs Bivalves, Unionidés, moules, huîtres, *Pinna, Pecten* produisent des perles; les plus recherchées sont les perles de nacre des pintadines ou huîtres perlières des mers chaudes. Les perles dites « de culture » sont obtenues au Japon : un petit noyau de nacre entouré d'un fragment d'épithélium palléal est greffé dans le manteau. Il y détermine l'élaboration de couches de nacre superposées, mais ces perles sont moins appréciées que les perles naturelles.

Le pied est un organe musculeux, comprimé latéralement, très développé chez les Bivalves fouisseurs, réduit ou nul chez ceux qui ne se déplacent pas (huîtres adultes). Pour s'enfouir dans un sédiment meuble, un Bivalve y introduit son pied qui, par étalement de l'extrémité et afflux de sang, s'y ancre et attire l'Animal en profondeur. De brusques contractions du pied permettent parfois le « saut ». Le pied de la moule, qui a perdu toute fonction locomotrice, élabore par une glande byssogène les filaments résistants du byssus, qui se fixent aux roches.

Les deux lames branchiales qui, à droite et à gauche du pied, forment une branchie s'insèrent au fond du sillon palléo-pédieux sur un axe vasculaire parcouru par deux vaisseaux sanguins. Cet axe porte de très nombreux filaments branchiaux solidaires les uns des autres grâce à des jonctions ciliaires soutenues par leurs faces latérales. Dans les cas les plus simples, ces filaments sont courts et larges, mais le plus souvent ils se disposent en deux lames, l'une interne contre le pied, l'autre externe contre le manteau. Les filaments se recourbent brusquement, puis remontent vers l'axe vasculaire, du côté interne pour la lame interne, du côté externe pour la lame externe, de sorte que la section transversale d'une branchie prend l'aspect d'un W. Une branchie se trouve donc formée de deux lames qui ne sont pas toujours symétriques par rapport au plan vertical passant par l'axe vasculaire, chaque lame étant constituée d'un feuillet

▼ ***A gauche,*** **Cerastoderma edule** ***dont la coquille à côtes simples souligne la parfaite symétrie des valves. A droite,*** **Spondylus princeps** ***(Californie), un autre Bivalve dont le test s'orne de lamelles longues et larges.***

G. S. Giacomelli

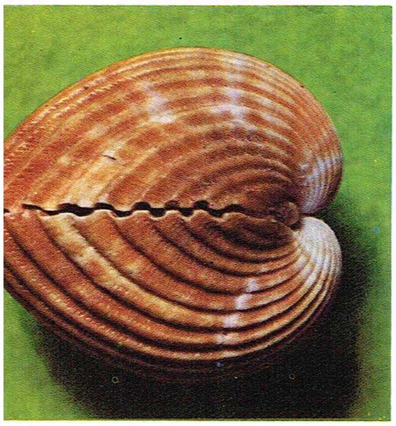

M. Bavestrelli - C. Bevilacqua - S. Prato

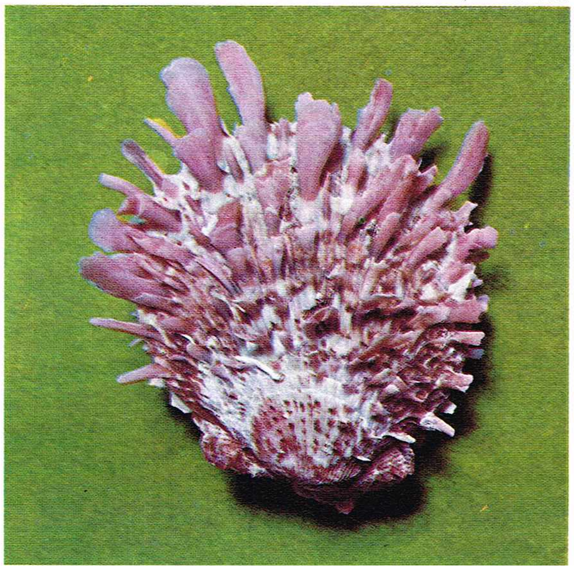

direct, et d'un feuillet réfléchi. Lorsque les extrémités des feuillets réfléchis s'accolent aux parois du pied et du manteau, la cavité palléale se trouve subdivisée en deux chambres.

La surface des branchies porte plusieurs catégories de cils spécialisés qui déterminent des courants orientés. L'eau est ainsi constamment renouvelée; en outre, les micro-organismes du plancton sont conduits aux palpes, et de là à la bouche; les corpuscules sans utilité sont rejetés. L'eau admise dans la cavité palléale par la fente palléale ventrale ou par le siphon inhalant passe entre les filaments, où circule le sang, et de la chambre infrabranchiale elle pénètre dans la chambre suprabranchiale d'où elle ressort par un orifice exhalant ou par le siphon exhalant.

Chez les Septibranches, le septum à pores ciliés a les mêmes fonctions que la branchie; il divise la cavité palléale en cavité infraseptale et cavité supraseptale.

Outre leur fonction respiratoire et alimentaire, les branchies sont, dans certains groupes, des organes incubateurs. Les embryons peuvent s'y développer jusqu'à un stade avancé (Unionidés, certaines huîtres).

Appareil digestif. Cet appareil est parfaitement adapté au régime microphagique. De la bouche part un œsophage cilié, ouvert dans un estomac relativement simple chez les formes inférieures, mais très perfectionné ailleurs. Un ou plusieurs canaux font communiquer cet organe avec les diverticules digestifs, qui occupent une grande partie de la masse viscérale.

Dans l'estomac se situent des zones ciliées, véritables aires de triage des particules, des dépressions ou des sillons ciliés. A son extrémité, une fine baguette hyaline, le stylet cristallin, tourne sans fin dans un cæcum et bute contre une cuticule gastrique. Après le tri au niveau des aires de triage, les particules nutritives enrobées dans des filets muqueux suivent certains trajets; elles sont entraînées vers le stylet cristallin, puis réduites et acheminées vers les diverticules digestifs. La digestion est en partie extracellulaire dans l'estomac où existent des enzymes et en partie intracellulaire, après phagocytose dans les diverticules digestifs. Les matériaux digérés sont ensuite repris par des amibocytes qui les distribuent à l'organisme. Les déchets sont éliminés par un sillon cilié.

Appareil circulatoire. Il est assez uniforme, mais parfois dédoublé; il se simplifie chez les Septibranches. Le cœur, placé vers le haut de la masse viscérale, entouré par le péricarde, se voit en général par transparence. Il est le plus souvent formé d'un ventricule médian et de deux oreillettes latérales. Du ventricule partent deux aortes, l'une antérieure, l'autre postérieure, d'où se détachent les différentes artères qui aboutissent à des lacunes, ou sinus, car il n'y a pas de système capillaire individualisé.

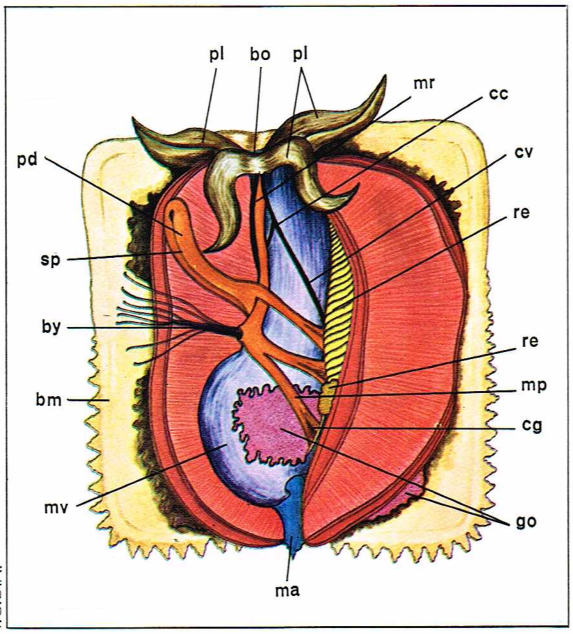

Sous la pression du sang artériel, le sang des sinus est repoussé dans les veines et revient aux oreillettes. Le sinus veineux (le plus important) se trouve au-dessous du complexe rénopéricardique; une notable partie du sang y circule, gagne le rein, puis les branchies par des vaisseaux branchiaux afférents. Le retour au cœur du sang hématosé s'effectue par des veines branchiales efférentes. Mais ce circuit n'est pas unique. Quelques espèces d'huîtres possèdent des cœurs accessoires au niveau du rein, ou des vaisseaux contractiles.

Le sang contient très rarement de l'hémoglobine (arches, *Glycymeris*); on y reconnaît plusieurs catégories d'amibocytes.

Appareil excréteur. On admet que le cœlome des Mollusques se réduit à la cavité péricardique et à la glande génitale avec laquelle elle communique, et que les reins, ou organes de Bojanus, dérivent de la portion péricardique. En fait ils consistent essentiellement en un conduit excréteur ouvert dans le péricarde par un entonnoir cilié. Cette portion excrétrice est irriguée par du sang veineux. L'urine provient du liquide péricardique déjà chargé de substances excrétées par les glandes péricardiques. Sa composition se trouve modifiée du fait des échanges qui ont lieu entre lui et le sang veineux, lors de la traversée du rein. Le rein, où l'on n'a pas reconnu la présence d'acide urique, participe avec le tégument et le tube digestif à l'osmorégulation.

Système nerveux. Ce qui caractérise ce système disposé de façon symétrique, c'est le rapprochement, voire même la fusion des ganglions cérébroïdes et pleuraux du même côté. Il s'ensuit la formation de ganglions cérébro-pleuraux

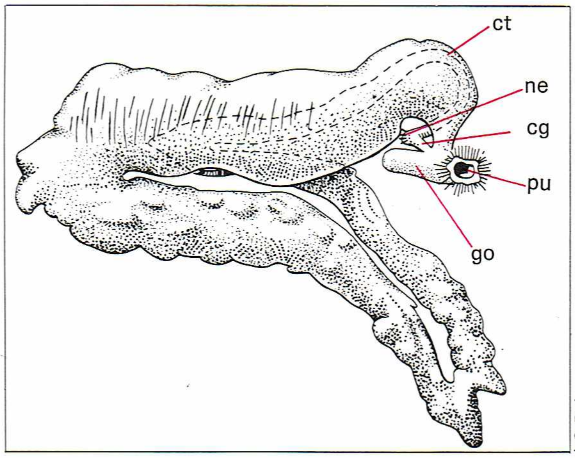

◀ ***Schéma de la néphridie de* Nuculana minuta *vue du côté gauche : ct, conduit transversal; ne, néphrostome s'ouvrant dans le péricarde; cg, conduit gonopéricardique; pu, pore urogénital; go, gonoducte.***

reliés, sauf dans certains genres *(Nucula, Nuculana)*, aux ganglions pédieux par un seul connectif de chaque côté. L'anse viscérale porte une paire de ganglions viscéraux qui semblent être assez complexes chez les pectens et les spondyles. Dans le système périphérique il existe quelques variantes; elles sont en rapport avec l'existence des siphons, la réduction de la paire de muscles adducteurs à un seul muscle, le degré de développement du pied, de l'appareil byssogène.

Organes sensoriels. L'absence d'yeux et de tentacules céphaliques semble compensée dans une certaine mesure par le développement de récepteurs sensoriels répartis en divers points du corps. On doit noter que les Bivalves sédentaires n'ont pas à rechercher leur nourriture, car la perfection des mécanismes ciliaires ne nécessite ni orientation, ni déplacement, en dehors d'une éventuelle harmonisation de leur position par rapport à la direction des courants.

Les statocystes sont toujours présents. Des photorécepteurs de divers types sont développés dans quelques groupes. Ce sont des yeux composés, à ommatidies, tels qu'en porte le bord du manteau des arches, des yeux invaginés complexes *(Lima)*, des yeux branchiaux à couche pigmentée et à cristallin (*Pteria*, Modioles) et les yeux à cavité close des pectens et des *Cardium*. Ceux des pectens, régulièrement répartis au bord du manteau, portés par un pédoncule, sont les plus complexes. Ils

◀ ***Schéma d'un Mollusque Bivalve ouvert : pl, palpe labial; bo, bouche; mr, muscle rétracteur antérieur du pied; cc, connectif cérébropédieux; cv, connectif cérébro-viscéral; re, rein ou organe de Bojanus; mp, muscle rétracteur postérieur du pied et du byssus; cg, conduit génital; go, gonades; ma, membrane anale; pd, pied; sp, sillon pédieux; by, byssus; bm, bord du manteau; mv, masse viscérale.***

▶ *A gauche,* Pecten jacobaeus *(détail) : les yeux régulièrement répartis au bord du manteau sont de structure très complexe. A droite, schéma de la larve glochidium d'*Anodonta *: ma, muscle adducteur embryonnaire ; cs, cils sensoriels ; fm, faux manteau ; va, valve de la coquille ; pc, prolongement de la coquille ; fa, filament adhésif ; cr, crochet.*

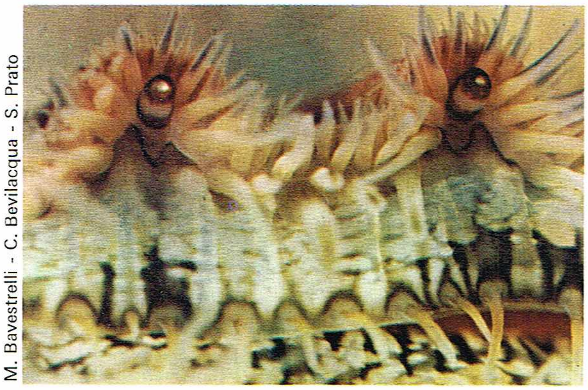

M. Bavestrelli - C. Bevilacqua - S. Prato

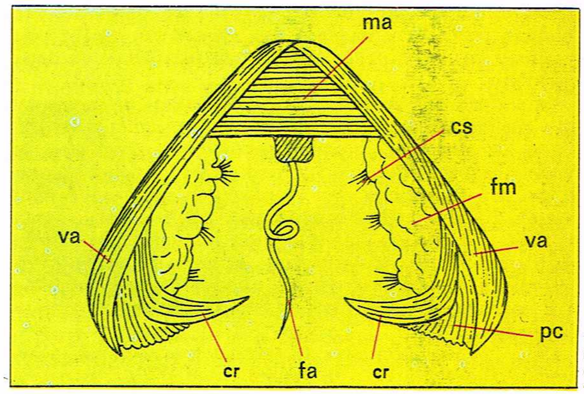

I.G.D.A.

sont recouverts d'un épithélium pigmenté, sauf au niveau de la cornée, et contiennent un globe oculaire à cristallin lentiforme placé sous cette dernière, puis au-dessous une formation vésiculeuse qui représente l'appareil photosensible. Le fond de la vésicule est tapissé de cellules très pigmentées, au-dessus desquelles est tendue une membrane réfléchissante, le *tapetum*. La partie supérieure de la vésicule est occupée par une double couche de cellules rétiniennes inversées. L'innervation de la vésicule se fait par deux branches d'un nerf oculaire. Les yeux des *Cardium* sont portés par des tentacules du bord des siphons. D'autres organes sensoriels existent parfois en différents points du tégument. L'osphradie n'est pas souvent présente (arche, *Pecten*).

L'*appareil reproducteur* des Bivalves est très simple. Les gamètes, toujours de petite taille et fort nombreux, se différencient dans des gonades paires constituées de glandes acineuses ramifiées dans la masse viscérale, et même dans le manteau (moule). Leur évacuation se fait par les gonoductes, ou au travers des reins. La fécondation est le plus souvent externe.

De nombreux Bivalves sont gonochoriques, mais ils ne présentent aucun dimorphisme sexuel. Seuls, de ce point de vue, les Unionidés semblent faire exception car les valves des femelles sont souvent plus renflées que celles des mâles. Les gonades des deux sexes peuvent être différemment colorées.

Reproduction

L'hermaphrodisme, anciennement reconnu dans un nombre restreint d'espèces, est beaucoup plus fréquent qu'on ne l'avait pensé, mais d'une façon générale il n'est pas aisé de le mettre en évidence en raison de la labilité du sexe. Il est simultané ou successif, avec maturation asynchrone ou distincte. Lorsqu'il est simultané *(Pecten irradians)*, spermatocytes et ovocytes évoluent côte à côte, dans un même follicule, et l'autofécondation n'est pas exclue. Il y a hermaphrodisme successif à maturation asynchrone chez l'huître plate de nos côtes *(Ostrea edulis)* et chez quelques autres espèces. L'Animal se montre d'abord en phase mâle, mais dans sa gonade, avant même la fin de la spermatogenèse, se déroule l'ovogenèse. La protérandrie est encore plus accentuée chez l'huître du Japon, *Crassostrea gigas*, où la phase femelle n'apparaît qu'après l'achèvement de la phase mâle. A l'échelle des populations, la sexualité de cette espèce offre des aspects inhabituels car, outre des mâles vrais et des femelles vraies, existent des individus ambisexués à l'origine, qui évoluent de façons très différentes, pouvant changer de sexe plusieurs fois au cours de leur existence.

La libération des gamètes n'a lieu qu'au-dessus d'un certain seuil de température, variable avec les espèces. On a prouvé que des gamones émises au cours de l'éjaculation ou de la ponte déclenchaient l'émission des gamètes de l'individu de l'autre sexe. L'une de ces substances, la diantline, libérée par les spermatozoïdes, favorise ces phénomènes.

Il existe en outre une relation étroite entre la libération des gamètes et l'activité des cellules neurosécrétrices des ganglions cérébroïdes et viscéraux. La disparition du produit de neurosécrétion semble être un préalable à l'émission des gamètes.

La fécondation engendre, après une segmentation de type spiral, une larve dont la glande coquillière ébauche une coquille qui deviendra bivalve lorsque les lobes palléaux seront distincts. De telles larves véligères abondent dans le plancton. D'autres ont un sort différent ; ainsi, celles des Unionidés, incubées dans les branchies maternelles, sont libérées sous la forme *glochidium*. La larve glochidium, dépourvue de bouche et d'anus, porte deux valves triangulaires munies d'une forte dent et elle émet un long filament visqueux. Si par chance ce filament vient au contact des nageoires ou des branchies d'un Poisson, le glochidium s'y fixe, s'y installe dans une petite tumeur et n'en sort qu'après deux ou trois mois sous les traits d'un jeune Unionidé.

L'incubation chez les Unionidés entraîne de profonds changements d'une partie des lames branchiales qui, perdant leur fonction respiratoire, différencient un *marsupium*, ou organe d'incubation.

Écologie

Les différents milieux habités par les Bivalves leur imposent des conditions de vie parfois réalisées dans des limites assez étroites ; de ce point de vue on doit d'une part distinguer les formes d'eau douce, les formes marines ainsi que celles d'estuaires qui pratiquement sont toutes euryhalines, et d'autre part considérer trois périodes, celle de la vie larvaire, celle de la métamorphose et celle qui marque le développement de l'organisme.

Dans les eaux douces ne vivent que le très vaste groupe des Unionidés, une partie de celui des Sphæriidés, et quelques espèces appartenant à différentes familles. Dans les estuaires, bien des formes peuvent supporter une importante diminution de la salinité et il arrive que certaines d'entre elles remontent les cours d'eau sur de nombreux kilomètres. Quant aux Bivalves marins ils sont en principe sténohalins, mais le milieu marin se révèle particulièrement varié du point de vue écologique. Quoi qu'il en soit, les trois facteurs les plus importants du milieu sont la salinité, la température et les possibilités d'alimentation ; mais en règle générale ce sont les valeurs extrêmes de ces facteurs qui offrent un réel intérêt car elles représentent des facteurs limitants. Le premier de ces facteurs ne joue pas dans le cas des espèces d'eau douce ; toutefois on doit noter que dans les eaux privées de calcaire les Unionidés sécrètent des valves réduites au périostracum et que lorsque la teneur en calcaire est forte, les valves deviennent très épaisses.

Les variations de la température sont plus importantes dans les cours d'eau ou les pièces d'eau que dans la mer. Les mécanismes vitaux requièrent une température optimale assez élevée pour leur parfait accomplissement, mais ils tendent à s'annuler vers 0 °C ou à des températures élevées. Bien que des Unionidés puissent vivre emprisonnés sans dommage pendant quelque temps dans de la glace à — 5 °C, les hivers rigoureux provoquent une mortalité élevée. Le froid, en diminuant l'activité ciliaire, ralentit l'alimentation et toutes les autres fonctions.

L'assèchement des pièces d'eau n'a pas toujours des conséquences fatales. Au Brésil, plusieurs Unionidés subsistent plus de six mois dans la vase durcie et compacte ; leurs valves sont hermétiquement closes et les Animaux sont en léthargie.

Les Bivalves d'estuaires ont acquis un grand pouvoir d'osmorégulation ; il se produit une sorte d'ajustement

M. Bavestrelli - C. Bevilacqua - S. Prato

◀ **Unio pictorum.** ***Cette espèce ne vit qu'en eaux douces. Notons qu'en eaux privées de calcaire, elle sécrète des valves réduites au périostracum.***

physiologique; certains anodontes en sont capables mais dans des limites plus restreintes.

En mer, les conditions de vie des adultes sont sous la dépendance de multiples facteurs. L'influence de la salinité n'apparaît que dans certaines régions. On l'a étudiée dans la zone particulièrement favorable qui va de la mer du Nord à l'est de la Baltique. D'ouest en est la salinité décroît; corrélativement, les Animaux d'une même espèce ont une taille plus réduite vers les basses salinités et leurs valves diminuent d'épaisseur.

La quantité de nourriture disponible est en rapport étroit avec le mode d'alimentation. La très grande majorité des Bivalves se nourrit de plancton; mais on peut les classer en utilisateurs de suspensions, de dépôts et en formes carnivores (les plus rares).

Les consommateurs de dépôts, enfouis dans un substrat meuble, laissent émerger leur siphon inhalant sur une bonne longueur. Ce siphon, de faible diamètre, balaie le fond de telle sorte que les Diatomées qui le revêtent sont aisément aspirées. Quant aux consommateurs de suspensions, ils sont dotés soit d'un large siphon inhalant, soit d'un siphon dressé au-dessus du fond; ainsi, les micro-organismes en suspension entrent avec le courant inhalant. Les carnivores (Septibranches, *Propeamusium meridionale*) semblent ingérer des larves de Crustacés et des Copépodes. Sur les fonds vaseux, une surcharge de vase à la suite de tempêtes provoque la fermeture des valves et l'arrêt de l'alimentation. Plusieurs Bivalves vivent à de grandes profondeurs. Une espèce du genre *Phaseolus* a été capturée dans la fosse des Tonga, entre 10 400 et 10 700 m de profondeur; elle s'y nourrissait d'Infusoires, de larves...

Le second aspect écologique à considérer concerne les larves. La fécondation externe est livrée au hasard. Les larves, en l'absence de courants, restent sur place; aussi, nombre d'entre elles sont absorbées par leurs parents lorsque les adultes sont concentrés sur de petites surfaces. Mais plus aléatoire encore est le sort de celles qui sont entraînées par les courants. Comme le fait remarquer Thorson, un courant d'un demi-nœud transporte des larves à environ 1 km/h, soit à près de 170 km en une semaine. A une telle distance de leur lieu d'origine, après une semaine de vie planctonique, les larves ont des chances réduites de trouver un fond favorable. Si, lors de la métamorphose, elles tombent sur un fond qui ne leur convient pas, elles périssent. Il arrive cependant qu'elles puissent retarder leur métamorphose jusqu'à ce qu'elles trouvent le point le plus favorable. Le pourcentage de larves perdues n'en est pas moins extrêmement élevé. Ainsi, selon Spärck (1927), sur un million d'œufs produits par l'huître plate *Ostrea edulis*, une seule larve atteint le stade sédentaire, et cela en année favorable. De telles pertes sont compensées par le très grand nombre d'œufs pondus, qui est, par exemple, de cent à cent cinquante millions par an chez l'huître du Pacifique. Le cas des tarets *(Teredo navalis)* est aussi suggestif; en une ponte, un individu libère environ quatre-vingts millions d'œufs. Les larves qui en éclosent ne peuvent survivre que si elles rencontrent une pièce de bois immergée; or, dans un tel substrat, les individus sont toujours très nombreux.

Relations entre les Bivalves et les autres organismes. Le flux d'eau qui circule en permanence dans la cavité

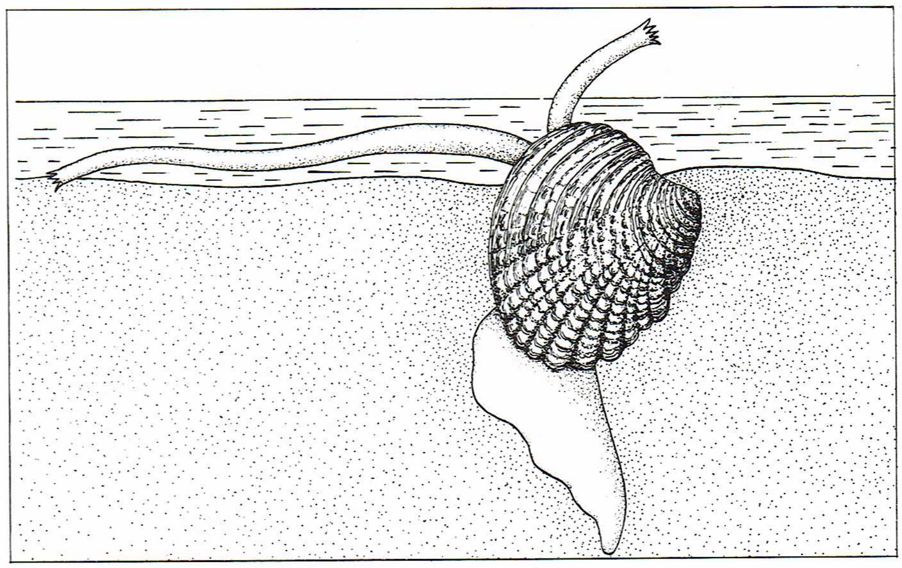

I.G.D.A.

▼ ***La plupart des Mollusques Bivalves pratiquent l'enfouissement et assurent leur nutrition au moyen de deux longs siphons : l'un inhalant au-dessus du fond, l'autre expulsant l'eau chargée de déchets à distance du premier.***

M. Bavestrelli - C. Bevilacqua - S. Prato

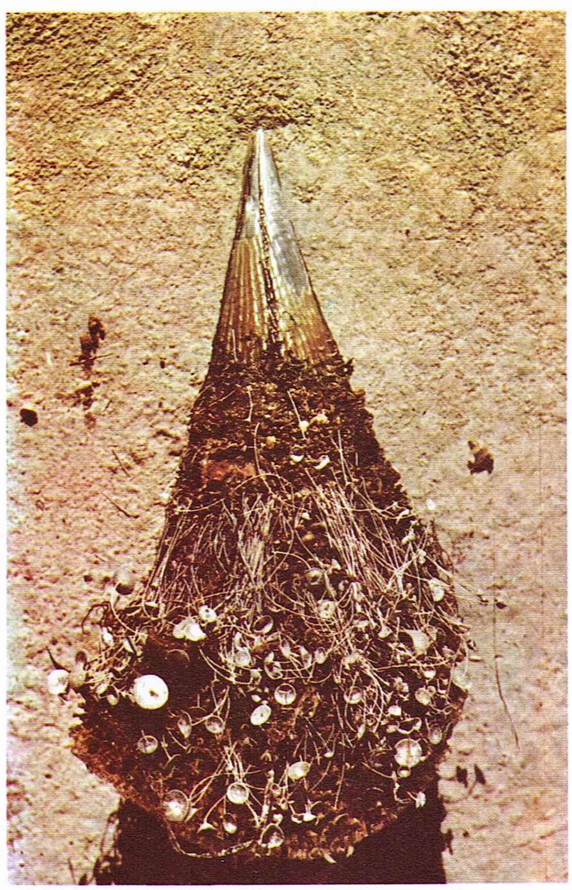

D. Wilson

◀ ***A gauche,* Anodonta cygnea, *Lamellibranche lacustre. A droite,* Pinna nobilis, *Bivalve se développant surtout aux abords des littoraux pollués.***

M. Bavestrelli - C. Bevilacqua - S. Prato

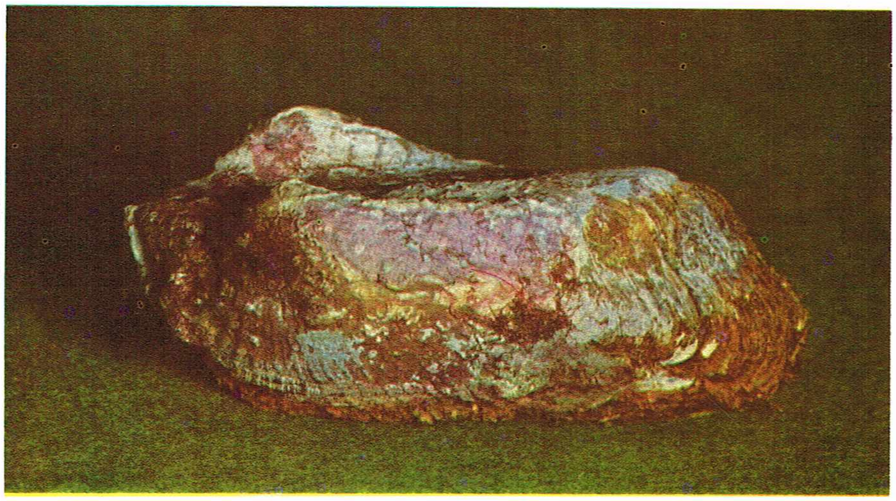

M. Bavestrelli - C. Bevilacqua - S. Prato

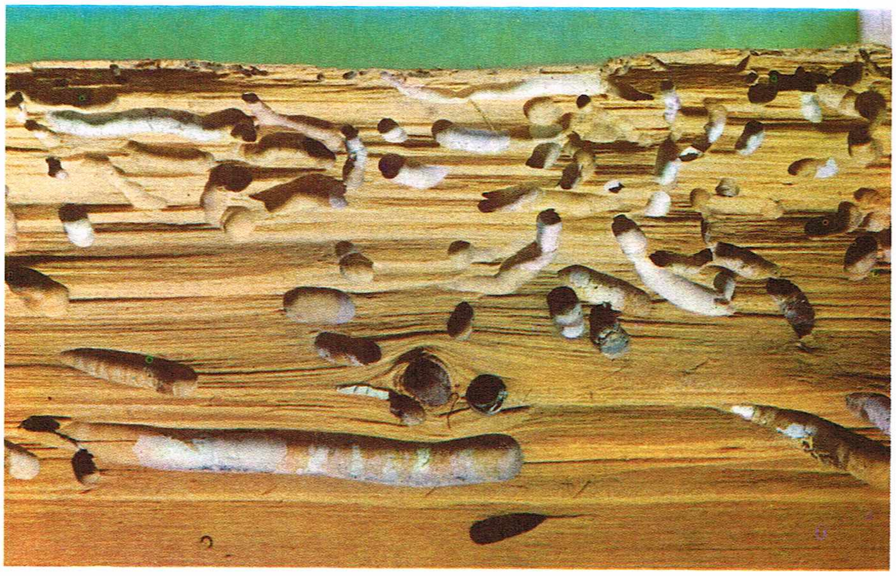

En haut,* Arca noae *(Filibranchiata). Au milieu,* Teredo navalis *(Eulamellibranchiata), en bas,* Lithophaga *(Filibranchiata) ; ces deux formes sont nuisibles aux bois et aux roches.

A. Margiocco

palléale y introduit toutes sortes d'organismes dont certains s'y établissent en commensaux, inquilins, ectoparasites, alors que d'autres, ingérés ou non, deviennent des endoparasites bénins ou redoutables. Il existe cependant une association qui semble constituer une véritable symbiose ; c'est celle des tridacnes et de quelques autres Bivalves avec les Zooxanthelles. Les magnifiques couleurs du manteau des tridacnes sont dues à une extrême abondance de ces Algues unicellulaires dans les tissus palléaux qui sont normalement exposés à la lumière. On suppose que ces Zooxanthelles pourraient faire profiter les individus qui les hébergent du bénéfice de leur photosynthèse et, en retour, elles y puiseraient des phosphates et d'autres sels minéraux.

Les associations avec d'autres organismes animaux ne paraissent pas fondées sur une réciprocité des bénéfices. Sur les valves se fixent souvent des Algues, des Spongiaires, des Cnidaires, des balanes, ainsi que d'autres Mollusques. Korringa (1951) a dénombré jusqu'à cent vingt-cinq espèces animales sur les coquilles d'huîtres. Parmi ces organismes, certaines Éponges *(Cliona)* et l'Annélide *Polydora* creusent des galeries dans les valves.

Des Protozoaires (Ciliés), des Annélides, des Nématodes se trouvent fréquemment dans la cavité palléale. De petits crabes, les pinnothères, sont parfois très abondants sur les branchies des moules ou des huîtres. Dans un spécimen de *Crassostrea virginica* on en a dénombré deux cent soixante-deux ; ces crabes se nourrissent des aliments que concentrent les Bivalves sans causer aux Mollusques d'autres dommages que de faibles érosions des branchies : ce sont des inquilins. Certains Gastéropodes *(Odostomia)* restent sur le bord des valves, puis, grâce à leur trompe qu'ils introduisent dans les tissus de l'hôte, ils en aspirent le sang.

Dans certaines régions on trouve des Copépodes dans l'intestin des moules, des huîtres, des *Cardium,* et des *Mercenaria ;* ces *Mytilicola (M. intestinalis, M. orientalis, M. porrecta),* dont les femelles atteignent 12 mm de long, peuvent faire dépérir les moules lorsqu'ils sont assez nombreux. Plus redoutables encore sont les Protozoaires endoparasites, qui ravagent parfois des populations entières de Bivalves. Souvent, des larves de Trématodes (cercaires et sporocystes) peuvent envahir la glande digestive et l'ovaire, et les cas de castration parasitaire ne sont pas exceptionnels.

Les Bivalves sont recherchés par toutes sortes de Mollusques qui en forent les valves ou réussissent même à les ouvrir. Les pieuvres en font une grande consommation. Beaucoup d'Échinodermes, de Crustacés, de Poissons, d'Oiseaux s'en nourrissent aussi.

La liste des Bivalves comestibles est assez longue. Certains sont pêchés, d'autres cultivés (conchyliculture, mytiliculture, ostréiculture). Cependant, la consommation des Mollusques doit être soigneusement contrôlée, car s'ils sont récoltés dans les zones insalubres, ils peuvent devenir de dangereux agents d'infection. De sérieuses intoxications surviennent aussi lorsque des Dinoflagellés, les *Gonyaulax,* pullulent en mer et produisent les « marées rouges ». Les moules, notamment, deviennent très toxiques.

Enfin, il existe aussi des espèces fort nuisibles, qui s'attaquent aux bois et aux roches. Dans les bois immergés, les appontements, les coques de bateaux, les tarets, en particulier *Teredo navalis,* forent des galeries larges et très longues. Les dommages ainsi causés chaque année sont considérables. Les môles, les jetées de pierre sont également attaqués par plusieurs Bivalves et surtout les lithophages *(Lithophaga)*.

SYSTÉMATIQUE

La constitution des branchies permet de séparer les Bivalves en quatre ordres : Protobranchiata, Filibranchiata, Eulamellibranchiata et Septibranchiata.

Ordre des Protobranchiata

Chez les Protobranches, les branchies, ou *cténidies,* sont constituées par des filaments simples en contact les uns avec les autres par des brosses ciliées. C'est le

R. Maltini - P. Solaini

M. Bavestrelli - C. Bevilacqua - S. Prato

▲ Arca noae, *à gauche.* Arca barbata, *à droite, présente un périostracum étiré en lamelles longues et fines.*

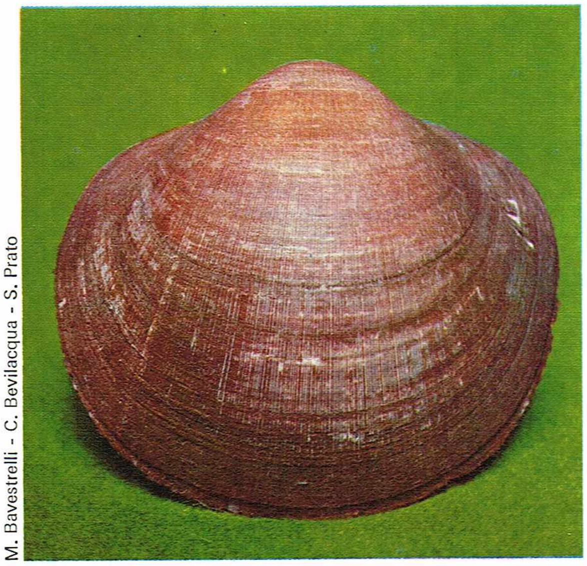

M. Bavestrelli - C. Bevilacqua - S. Prato

A. Margiocco

◀ Glycymeris violaceus, *à gauche, de la famille des Glycymeridae dont l'espèce* Glycymeris glycymeris *est comestible ; à droite,* Meleagrina margaritifera, *de la famille des Pteriidae, appartient au groupe des huîtres perlières.*

groupe le plus archaïque, à charnière de type taxodonte et à ganglions cérébroïdes et pleuraux incomplètement fusionnés. Les Protobranches sont divisés en quatre familles. Citons les *Nuculidae,* qui ont un contour triangulaire et une charnière coudée, et les *Solemyidae,* dont une forme, *Solemya mediterranea,* possède une coquille allongée, débordée ventralement par des lames de périostracum.

Ordre des Filibranchiata

Dans l'ordre des Filibranches, les branchies sont formées de lames à filaments réfléchis, en contact par des zones de cils ou unis par des ponts conjonctifs et même vasculaires. La charnière est taxodonte, dysodonte ou isodonte.

Les *Arcidae,* à charnière droite très longue, à dents petites et très nombreuses, sont abondants dans les mers chaudes et sont représentés sur nos côtes par *Arca noae* et *Barbatia barbata,* dont le périostracum est étiré en lamelles longues et fines.

Dans la famille des *Glycymeridae, Glycymeris glycymeris* est comestible ; il est vendu sous le nom d'« amande de mer ».

Les *Mytilidae* comprennent, outre la moule commune, *Mytilus edulis,* et la moule de Méditerranée, *M. galloprovincialis,* les modioles et des formes perforantes, comme *Lithophaga mytiloides,* ou « datte de mer », de forme allongée, à test peu épais.

Les *Isognomonidae* comprennent des genres exotiques, tels que *Crenatula* et *Vulsella,* qui habitent les Éponges, et *Malleus.*

Les *Pteriidae,* ayant des « ailes » plus ou moins développées de part et d'autre des umbos, groupent les *Pteria,* les huîtres perlières *(Pinctada, Meleagrina),* dont la plus connue est *Pinctada margaritifera.* Ce sont des formes des mers chaudes.

Les *Pinnidae,* à valves effilées vers les umbos, comprennent les *Pinna* et *Atrina* qui émergent du sable vaseux par leur partie postérieure arrondie et tronquée. L'un d'entre eux, *Pinna nobilis,* fournit son byssus, très long, fin et soyeux, pour la confection de tissus et de gants.

Les *Amusiidae,* des mers profondes ou froides, sont remarquables par leur grande coquille plate, translucide et fragile. En particulier, *Adamusium colbecki* est répandu dans l'Antarctique.

Parmi les *Pectinidae,* les deux genres *Chlamys* et *Pecten* sont les plus familiers. *C. varia,* le pétoncle, est très recherché. *Pecten maximus,* ou coquille Saint-Jacques, capable d'accomplir des bonds par claquement des valves et expulsion brusque de l'eau, est remarquable par ses yeux palléaux ; cette espèce est abondante dans la rade de Brest.

Les *Spondylidae* à coquille épaisse souvent hérissée de lamelles très longues *(Spondylus gaederopus)* présentent des tons roses, orangés ou jaunes.

Les *Limidae* possèdent un manteau à très longs tentacules *(Lima hians, L. inflata).* Le byssus sécrété par certaines espèces est utilisé à la confection de nids, un même nid pouvant être l'œuvre de plusieurs *Lima.*

Les *Anomiidae,* dont les valves minces, inégales et nacrées se trouvent sur bien des plages, ont un byssus calcifié qui, chez *Anomia ephippium,* passe par une échancrure subcirculaire de la valve droite. Seule la valve gauche est nettement nacrée.

La famille des *Ostreidae* constitue, de loin, la plus importante des familles de l'ordre des Filibranches, tout

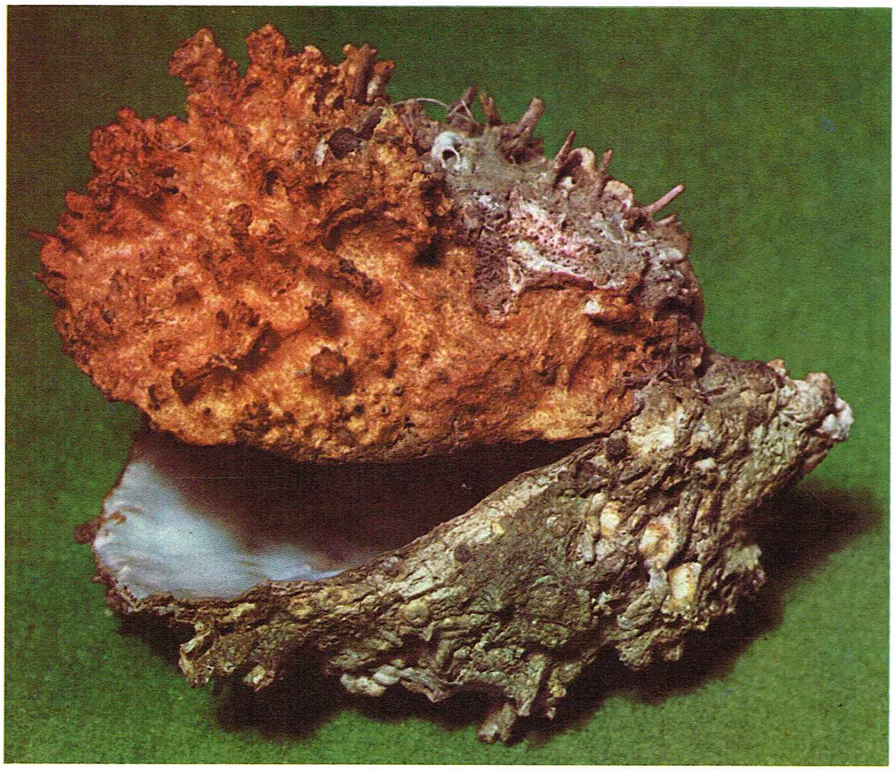

G.S. Giacomelli

▲ **Spondylus gaederopus,** ***à coquille épaisse, à lamelles, souvent très encroûtée.***

au moins d'un point de vue économique ; elle comprend les genres *Pycnodonta, Crassostrea* et *Ostrea*. L'identification des espèces est rendue possible par l'examen de la charnière de la *prodissoconque,* ou coquille larvaire, qui subsiste en général sur les sommets. *Ostrea edulis,* l'huître plate, de forme assez régulière, est répandue de la mer du Nord à la mer Noire. On l'élève surtout en Bretagne. *Crassostrea angulata,* l'huître portugaise, ne remonte guère au-dessus de l'embouchure de la Loire ; son exploitation, fort développée dans la région de Marennes-Oléron, périclite depuis 1968. *C. gigas*, l'huître du Japon, à croissance rapide, acclimatée en France depuis peu, semble prospérer de façon très satisfaisante. L'huître du Pacifique, *C. virginica,* a également une très grande importance économique.

Ordre des Eulamellibranchiata

L'ordre des Eulamellibranches est le groupe où les branchies sont les plus perfectionnées, car des jonctions de plusieurs types s'établissent entre filaments adjacents (jonctions interfilamentaires) ou entre les branches ascendante et descendante d'un même filament (jonctions interfoliaires) ; ces unions peuvent être vasculaires ou conjonctives. Les siphons sont fréquemment présents et développés, ce qui se traduit souvent par l'existence, sur la face interne des valves, d'une sinuosité due à l'empreinte des muscles palléaux (siphon palléal). Il y a généralement deux muscles adducteurs. La charnière est hétérodonte, schizodonte, desmodonte, mais rarement du type taxodonte.

Les *Trigoniidae* ne comprennent plus actuellement que le seul genre *Neotrigonia* que l'on rencontre dans la région australienne.

Les Unionidae forment un groupe très vaste, particulièrement bien représenté en Amérique du Nord. On y distingue quatre familles. Les *Margaritiferidae* sont bien connus par *Margaritifera margaritifera,* qui élabore des perles de bonne qualité. Parmi les *Unionidés sensu stricto,* certains ont une charnière pourvue de dents fortes *(Unio pictorum),* tandis que les *Anodontinae,* à valves minces, présentent une charnière en général inerme. *Anodonta cygnea* et *A. anatina* sont fréquents dans nos cours d'eau ; les valves de ces formes sont nacrées à l'intérieur.

Les *Mutelidae* sont présents en Afrique tropicale et en Amérique du Sud. Les *Etheriidae* d'Afrique tropicale atteignent de grandes dimensions.

Les *Sphaeriidae* avec les petits *Sphaerium* et *Pisidium* sont également communs dans nos cours d'eau. Les *Dreissenidae,* probablement originaires de la mer Caspienne, se sont considérablement développés dans nos fleuves depuis un siècle (notamment *Dreissena polymorpha*).

Les *Cardiidae,* à coquille globuleuse, costulée, parfois épineuse, ont une vaste répartition. Quelques espèces telles que la coque *(Cerastoderma edule),* la bucarde épineuse *(Acanthocardium aculeata)* sont pêchées sur nos rivages.

Les *Tridacnidae* sont les géants du groupe, ils vivent tous dans l'Indo-Pacifique. *Tridacna gigas* à coquille épaisse laisse apparaître au repos le bord magnifiquement coloré de son manteau.

La vaste famille des *Veneridae* englobe de nombreux genres répartis en une douzaine de sous-familles. *Venus verrucosa* n'est autre que la praire et *Tapes decussatus* la clovisse ou palourde. *Venerupis corrugata* et *Tapes aureus* sont communs au bord de la mer. *Mercenaria mercenaria,* le « clam » d'Amérique, à valves grandes, régulières et très luisantes, a été introduit sur notre côte atlantique.

Les *Petricolidae,* de petite taille, comptent des espèces perforantes telles que *Petricola lithophaga* de nos régions.

Les *Tellinidae* ont une coquille souvent allongée, aplatie et lisse, mince, ornée de zones colorées. *Tellina tenuis* et *Macoma balthica* ne sont pas rares sur les plages de sable.

Les *Scrobiculariidae,* à valves orbiculaires, se localisent de préférence dans les faciès vaseux. Tel est le cas pour *Scrobicularia plana,* le « lavignon », à saveur un peu poivrée. Les *Solenidae* ont une coquille baillante à ses

M. Bavestrelli - C. Bevilacqua - S. Prato

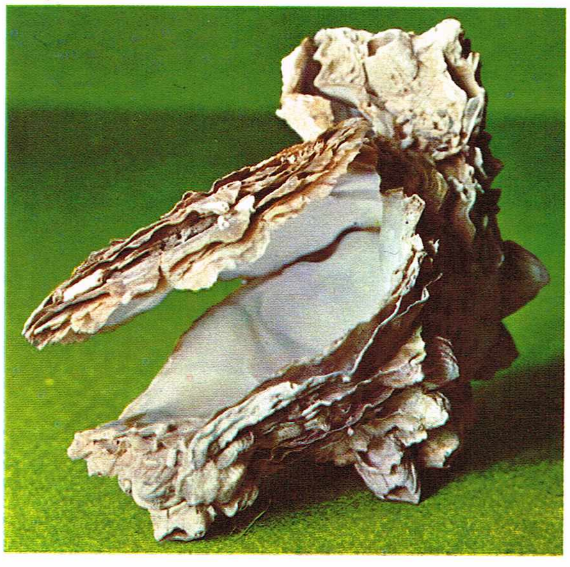

M. Bavestrelli - C. Bevilacqua - S. Prato

▶ **Lima inflata** ***(à gauche) se caractérise par un manteau à très longues papilles.*** **Ostrea edulis** ***(à droite), huître plate très répandue en mer du Nord et en mer Noire, est élevée en Bretagne.***

M. Bavestrelli - C. Bevilacqua - S. Prato

◀ **Cardium aculeatum** *(famille des Cardiidae), caractérisé par une coquille globuleuse, épineuse et costulée.*

extrémités. Les « couteaux » *(Ensis ensis, E. siliqua)* s'enfoncent profondément dans le sable.

Les *Mactridae,* à coquille subtrigone, comprennent les mactres de nos régions *(Spisula solida, Mactra stultorum).*

Les *Hiatellidae* sont plus connus sous le nom de saxicaves; *Hiatella gallicana* s'établit volontiers dans les fissures des roches.

Les *Myidae* se prolongent par de très forts siphons réunis dans une gaine périostracale. La mye, *Mya arenaria,* recherche les eaux moins salées des estuaires. Chez les *Gastrochaenidae,* on trouve des espèces perforantes.

Les *Pholalidae* sont célèbres par la forme lumineuse *Pholas dactylus;* ils comprennent aussi *Barnea candida.* Ces pholades ont des valves baillantes et une ou plusieurs plaques accessoires. On les trouve dans la vase durcie; quant aux *Xylophaga,* ils s'introduisent dans les bois immergés.

Les *Teredinidae,* répandus dans le monde entier, sont beaucoup plus redoutables car ils commettent de très importants dégâts. Les *Clavagellidae,* connus sous le nom « d'arrosoirs », logent dans les coraux ou les formations calcaires. Ils élaborent un long tube calcaire qui englobe soit une valve *(Clavagella),* soit les deux *(Brechites).*

Ordre des Septibranchiata

Chez les Septibranches, les branchies sont en général modifiées en un septum musculaire à perforations garnies de cils par lesquelles l'eau peut, par pompage, passer de la chambre infraseptale à la chambre supraseptale. Ce groupe comprend les familles des *Verticordiidae,* des *Poromyidae* et des *Cuspidariidae.* Ce sont des formes d'assez faible taille, à coquille assez mince. Celle de *Cuspidaria rostrata* s'allonge en un rostre postérieur caractéristique. Ces Animaux vivent le plus souvent en profondeur et sont des fouisseurs. Des débris de petits Crustacés ayant été trouvés dans leur tube digestif, on présume que leur régime est surtout carnivore.

SCAPHOPODES

Représentée par seulement deux familles et un nombre réduit de genres, cette classe, l'une des plus petites des Mollusques, apparaît homogène et surtout caractérisée par le grand développement intervenu selon l'axe de croissance secondaire. En effet, le viscéro-pallium a subi un très fort allongement.

Nous décrirons le dentale, genre le plus représentatif du groupe, vivant sur les plages de vase de nos régions. Son corps est protégé par un test en forme de défense d'éléphant ouvert à ses deux extrémités. De l'ouverture la plus grande émerge le pied cylindrique, mais effilé en cône à son extrémité, au-delà de deux lobes latéraux arrondis.

A l'intérieur de la coquille, le corps, à symétrie bilatérale, présente sa face dorsale vers la zone concave de la coquille, à laquelle il se relie par un important muscle coquillier. C'est aussi vers cette même face, au-dessus du pied, qu'apparaît la région céphalique, reconnaissable à un mufle court percé d'une bouche entourée de palpes. Le manteau forme tout au long du test un étui de même forme que lui, car ses bords ont fusionné ventralement. Il adhère au test par sa face dorsale et s'ouvre à l'extrémité effilée par le « pavillon ».

La cavité palléale abrite le mufle ainsi que la base du pied lorsque celui-ci est en extension. De part et d'autre du mufle font saillie deux replis latéraux porteurs de filaments longs et dilatés à leur extrémité, les *captacules,* organes de capture des micro-organismes dont le dentale se nourrit. La masse viscérale montre un notable degré de simplification car le cœur est réduit, sans oreillettes, sans communication avec les reins qui, par contre, se relient à la gonade lors de la maturité sexuelle et éliminent les gamètes par le pavillon.

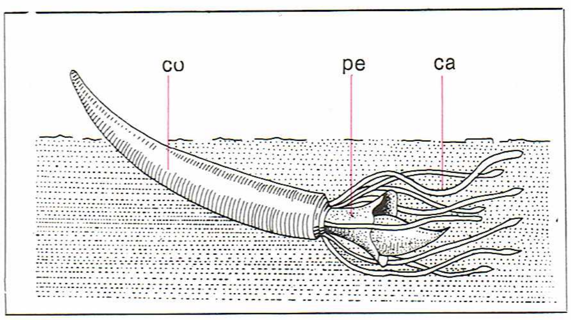

I.G.D.A.

◀ *Schéma d'un* **Dentalium**; *co, coquille; pe, pied; ca, captacules.*

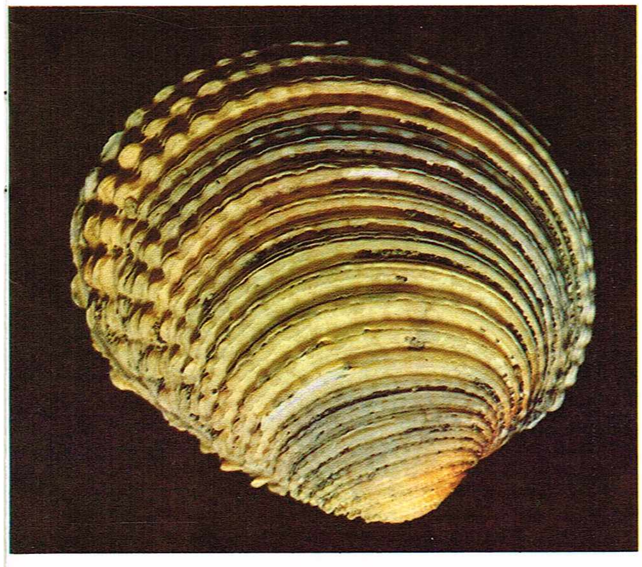

M. Bavestrelli - C. Bevilacqua - S. Prato

R. Maltini - P. Solaini

◀ **Venus verrucosa** *(à gauche) appartient à la vaste famille des Veneridae et n'est autre que la praire.* **Tridacna gigas** *(à droite), à coquille très épaisse, vit exclusivement dans l'Indo-Pacifique.*

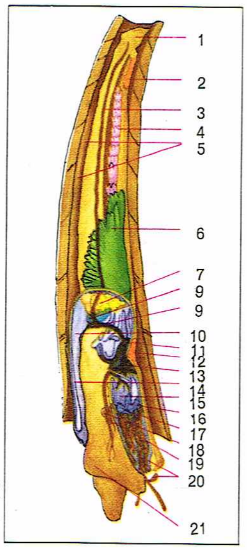

I.G.D.A.

▲ ***Représentation schématique de l'organisation d'un* Dentalium *: 1, ouverture supérieure du manteau (pavillon); 2, muscle columellaire (extrémité supérieure); 3, nerf palléal; 4, glande génitale; 5, espace compris entre la coquille et le manteau; 6, glande digestive; 7, pore néphridien; 8, anus; 9, ganglion viscéral; 10, cavité palléale; 11, ganglion buccal supérieur; 12, muscle columelaire (extrémité inférieure); 13, ganglion cérébroïde; 14, manteau; 15, mufle; 16, appendices buccaux; 17, bouche; 18, statocyste; 19, ganglion pédieux; 20, captacule; 21, pied.***

▼ **Dentalium entalis** : ***on note la coquille striée longitudinalement.***

G. S. Giacomelli

Appareil digestif. Il conserve la plupart des caractères qu'il a dans les autres classes. Le pharynx comporte une radula à dents bien définies, disposées en rangées transversales, comme chez les Gastéropodes, ainsi qu'une mâchoire. Les conduits des glandes digestives larges et partiellement lobées débouchent dans l'estomac recourbé. L'intestin présente quelques circonvolutions et s'ouvre à l'anus, près de la base du pied. Les captacules, dont l'importance est manifeste dans l'alimentation, ont une structure assez complexe; ils sont très mobiles et extensibles; il est possible qu'ils produisent une toxine agissant sur les Foraminifères et autres micro-organismes dont se nourrissent les Scaphopodes.

Appareil respiratoire. Pour leur respiration les Scaphopodes utilisent des courants d'eau engendrés par l'activité ciliaire du manteau; toutefois le rejet de l'eau s'effectue par la contraction de la musculature. Admission et rejet ont lieu par le pavillon.

Appareil circulatoire. En l'absence de cœur fonctionnel, la circulation semble être assurée par les contractions musculaires des Animaux. Le sang est partiellement endigué dans des pseudo-vaisseaux; par contre, plusieurs sinus, ou lacunes, peuvent aisément être mis en évidence par injection d'un colorant dans le système circulatoire.

Système nerveux. Il rappelle celui des Bivalves.

Appareil reproducteur. Les gamètes sont rejetés en mer, de sorte que la fécondation est livrée au hasard. L'œuf montre des localisations germinales précises; il se développe en une larve de type trochophore à trois couronnes ciliées, qui devient une véligère à pied trilobé sur laquelle le manteau s'ébauche en formant deux lobes qui, par la suite, fusionnent ventralement.

Les Scaphopodes se divisent en deux familles : celle des Dentaliidae et celle des Siphonodentaliidae.

Chez les *Dentaliidae, Dentalium vulgare,* le dentale de nos côtes, a une coquille striée longitudinalement. Son pied à larges lobes lui permet de s'ancrer dans la vase et de s'y mouvoir. A marée basse, juste avant d'être atteints par le flux, les dentales se soulèvent au-dessus de la vase et se laissent retomber. Le genre *Dentalium* est cosmopolite; il peut également vivre à des profondeurs de près de 5 000 m.

Les *Siphonodentaliidae* sont construits selon le même plan que les Dentaliidae; cependant, leur pied est très allongé, élargi à son extrémité en un disque à bords dentelés; leur coquille est lisse, mince, rétrécie à ses deux extrémités. *Cadulus* est cosmopolite. *Siphonodentalium,* à répartition plus restreinte, a été trouvé jusqu'à près de 7 000 m de profondeur.

CÉPHALOPODES

Exclusivement marins, les Céphalopodes sont, de tous les Mollusques, ceux qui, par leur organisation comme par leur comportement, montrent le plus haut degré de perfection. Du plan fondamental des Mollusques ils ont conservé notamment l'individualisation d'une cavité palléale abritant des branchies, l'élaboration ou non d'une coquille ainsi que la symétrie bilatérale. Chez les membres de cette classe, la fusion de la tête et d'une grande partie du pied en un véritable *céphalopodium* est complète, ce qui résulte vraisemblablement du développement important de la masse viscérale selon un axe secondaire de croissance, axe oblique ou perpendiculaire à l'axe antéro-postérieur du corps. En conséquence la cavité palléale occupe une position située à la face pratiquement inférieure de l'Animal et elle s'ouvre vers l'avant. Quant au tube digestif, il se recourbe très fortement par suite de cette sorte de flexure endogastrique.

L'originalité des Céphalopodes se manifeste surtout par le développement, aux dépens d'une partie des ébauches pédieuses embryonnaires, d'une couronne de bras ou de tentacules au pourtour de la bouche et aussi par la différenciation, à partir d'ébauches pédieuses postérieures, de l'entonnoir qui s'adapte à l'ouverture de la cavité palléale et participe au contrôle de son irrigation, tout en devenant un remarquable appareil de propulsion. Le pompage de l'eau par contraction et relâchement de la paroi palléale dotée d'une musculature puissante se substitue aux mécanismes ciliaires pour créer des courants d'eaux.

Les Céphalopodes actuels sont tous dépourvus de coquille externe, à l'exception du nautile; ce dernier se distingue de plus par le fait qu'il possède un cœur à deux paires d'oreillettes, deux paires de reins, deux paires de branchies, contrairement aux autres membres de cette classe, qui ne possèdent qu'une paire de ces différents organes. Aussi divise-t-on les Céphalopodes en Nautiloidea ou Tétrabranchiaux, et Coleoidea ou Dibranchiaux.

Organisation générale

Le corps de tout Céphalopode présente essentiellement deux parties. D'une part, la région céphalopédieuse, antérieure, qui porte, outre les yeux et la bouche, soit de nombreux tentacules péribuccaux répartis en rangées alternantes (nautile), soit une seule couronne péribuccale de dix bras chez les Décapodes (seiche, calmar) ou de huit bras chez les Octopodes (pieuvre). D'autre part, la portion palléo-viscérale, recouverte par la coquille chez le nautile, est assez globuleuse et nue chez les Octopodes, nue et plus ou moins allongée, fusiforme ou aplatie, mais rendue rigide par un endosquelette chez tous les autres Coleoidea, qui portent en outre des nageoires, expansions latérales triangulaires ou circulaires. Le tégument est en général consistant, mais chez plusieurs espèces il est mou, presque gélatineux.

La coloration générale, très souvent brune, peut passer rapidement du clair au sombre ou consister en zébrures noirâtres sur fond clair. Ces variations de coloration dépendent du degré d'étalement ou de contraction des *chromatophores,* cellules du derme, chargées de grains de pigment jaune, orangé, brun, rouge, bleu ou violacé noirâtre. La coloration claire est due à la contraction des chromatophores et la coloration sombre à leur étalement. D'autres cellules, les *iridocytes,* disséminées entre les chromatophores, sont opaques et réfléchissantes et engendrent, par diffraction de la lumière à travers de minces lamelles de guanine, une iridescence.

Les appendices péribuccaux consistent en plusieurs dizaines de tentacules, rétractiles dans une gaine chez le nautile, à l'exception des deux tentacules les plus dorsaux qui s'agencent en un large bouclier, ou, chez tous les autres Céphalopodes, en bras armés de nombreuses ventouses dont le pourtour est renforcé par un anneau corné à bord tranchant ou denticulé. Aux huit bras que possèdent tous les Coleoidea s'ajoutent chez les Décapodes deux tentacules, ou « bras tentaculaires », à extrémité dilatée garnie de ventouses ou de forts crochets. Ce sont ces tentacules que l'Animal projette sur ses proies avant de les enserrer dans ses bras.

A la face inférieure de l'Animal, la cavité palléale forme une poche profonde où s'ouvrent l'anus, les orifices rénaux et l'orifice génital. L'entonnoir émerge de la cavité palléale; c'est un tube largement ouvert dans cette dernière, mais rétréci vers l'avant et rattaché par la face interne de sa base à la paroi palléale interne. Lors de l'expulsion de l'eau, le repli palléal s'applique étroitement sur sa face externe libre, de sorte que la contraction de ce repli chasse l'eau par l'entonnoir. Il y a coaptation du manteau et de l'entonnoir par un dispositif en bouton-pression. Le rejet de l'eau par contraction brusque du manteau assure une propulsion rétrograde. Le relâchement de la musculature provoque l'entrée de l'eau entre l'entonnoir et le repli palléal. Chez le nautile, l'entonnoir n'est formé que par deux lobes en cornets, non soudés entre eux, mais capables de s'agencer en tube.

La *coquille* du nautile, enroulée en spirale logarithmique plane, est solide. Elle est blanche, avec de longues flammules colorées à l'extérieur, et nacrée à l'intérieur. Des cloisons transversales, concaves antérieurement, la divisent en loges nombreuses dont seule la dernière, la plus vaste, est occupée par l'Animal. Mais de cette loge jusqu'à la loge initiale, toutes les cloisons sont traversées par le siphon, tube recouvert de tégument, issu de la face postérieure de l'Animal. Chez la grande majorité des Céphalopodes, la musculature est très développée; en outre, le conjonctif de différentes

M. Bavestrelli - C. Bevilacqua - S. Prato

régions du corps se transforme en un tissu très voisin du cartilage des Vertébrés. Comme la coquille, devenue interne et recouverte chez tous les Décapodes par le manteau, ces formations dures donnent insertion à des muscles puissants. La coquille interne prend dans ce même groupe la valeur d'un tissu axial et elle se présente sous trois aspects différents, celui de « sépion », ou « os de seiche », celui de la « plume » du calmar, ou « gladius », celui de la coquille enroulée de la spirule. Le « sépion » se présente comme une lame épaisse et allongée, à bords amincis, convexe à sa partie supérieure et marquée en dessous par une dépression correspondant au *phragmocône* de formes éteintes, les Bélemnites. L'enroulement n'y apparaît plus, mais de très nombreuses lamelles presque accolées les unes aux autres constituent autant de très minces cloisons. La plume des calmars se réduit à une lame chitinisée légèrement déformée en gouttière. L'enroulement subsiste chez les spirules, petits Céphalopodes de profondeur, à coquille à tours disjoints et loges séparées par des cloisons traversées par le siphon comme chez le nautile.

Appareil digestif. Il comprend un bulbe buccal complexe, l'œsophage, le jabot, ou gésier, l'estomac et le cæcum plus ou moins spiralé, qui sont en fait deux diverticules ouverts côte à côte dans le « vestibule », zone qui marque la jonction de l'œsophage et de l'intestin. Le cæcum peut, de même que l'estomac, être isolé du reste du tube digestif par des valvules ou des sphincters. La portion intestinale reçoit, juste avant d'atteindre l'anus, le conduit du « sac de l'encre », vésicule où est produite la substance noirâtre que l'Animal rejette par l'anus lorsqu'il est inquiété. La bouche est entourée de deux lèvres circulaires, l'une externe et lisse, l'autre interne et papilleuse ; il s'y ajoute, chez les Décapodes, une membrane buccale formée d'un cercle de petites digitations reliées entre elles par une membrane et sur lesquelles apparaissent quelquefois de minuscules ventouses. Entre les lèvres font saillie les mâchoires en bec de perroquet, mues par des muscles très puissants. En arrière des mâchoires, la cavité buccale est presque comblée par l'odontophore, qui ne laisse aux aliments qu'un étroit passage entre deux lobes palatins, garnis de denticules chez les Coleoidea et glandulaires chez le nautile. L'odontophore porte une radula typique à rangées successives de cinq dents. La cavité buccale reçoit les sécrétions de cinq glandes salivaires : la glande subradulaire en position médiane, sous l'odontophore, les glandes salivaires antérieures, paires, situées à l'arrière de la masse buccale, enfin, les glandes salivaires postérieures placées à l'avant du foie et dont le conduit traverse le collier nerveux. Chez la pieuvre, ces dernières sécrètent une toxine très active sur le système nerveux des crabes. L'œsophage forme un tube droit chez les Décapodes ; par contre il se renfle en jabot chez le nautile. Comme l'estomac, le vestibule et le jabot, l'œsophage est recouvert d'une mince cuticule tandis que le cæcum et l'intestin ont un revêtement muqueux. La glande digestive

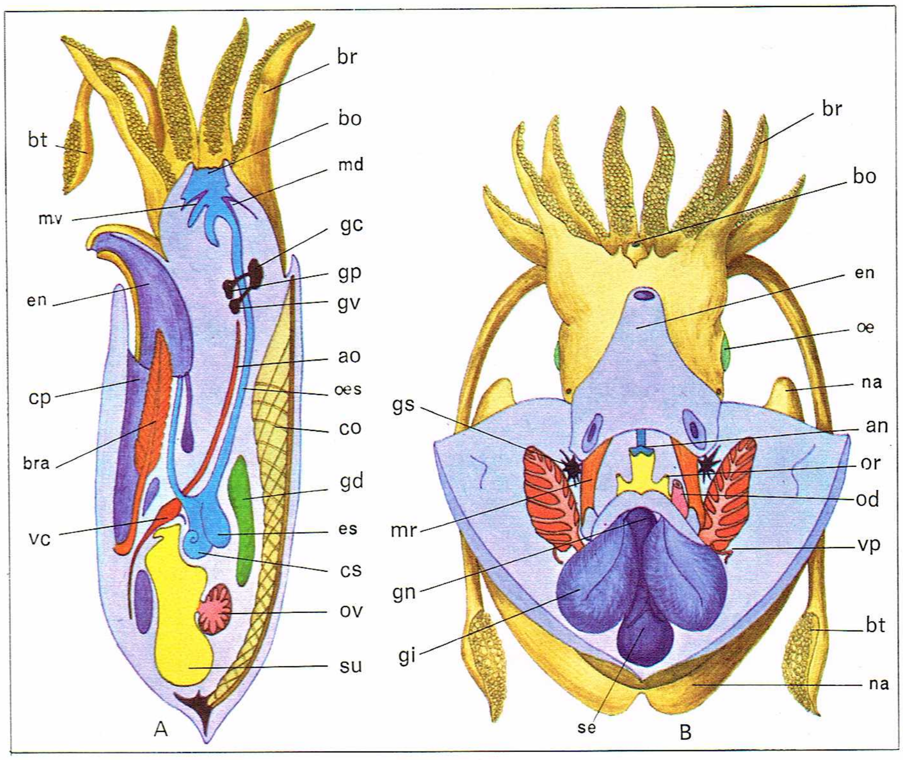

I.G.D.A.

▲ ***Représentation schématique de la structure anatomique d'une seiche, en coupe sagittale (A) et en coupe verticale médiane (B) ; an, anus ; ao, aorte ; bo, bouche ; br, bras ; bra, branchie ; bt, bras tentaculaire ; co, coquille ; cp, cavité palléale ; cs, cæcum spiralé ; en, entonnoir ; es, estomac ; gc, ganglion cérébroïde ; gd, glande digestive ; gi, glande nidamentaire inférieure ; gn, glande nidamentaire supérieure ; gp, ganglion pédieux ; gv, ganglion ventral ; gs, ganglion stellaire ; md, mâchoire dorsale ; mr, muscle rétracteur de l'entonnoir ; mv, mâchoire ventrale ; na, nageoire ; od, ovudicte ; œ, œil ; œs, œsophage ; or, orifice urinaire ; ov, ovaire ; se, sac de l'encre ; su, sac urinaire ; vc, ventricule cardiaque ; vp, veine palléale.***

▲◀ **Argonauta hians** ***ne possède qu'une pseudo-coquille qui n'est pas sécrétée par le manteau comme chez les autres Mollusques.***

▼ ***Détail des bras tentaculaires armés de ventouses chez*** **Octopus vulgaris.**

A. Margiocco

▶ *Système nerveux de seiche* **(Sepia officinalis)** : *nt, nerf des bras tentaculaires; nb, nerf brachial; gb, ganglion buccal; gc, ganglion cérébroïde; gp, ganglion pédieux; go, ganglion optique; gs, ganglion stellaire; gbr, ganglion brachial; gg, ganglion gastrique; np, nerf palléal.*

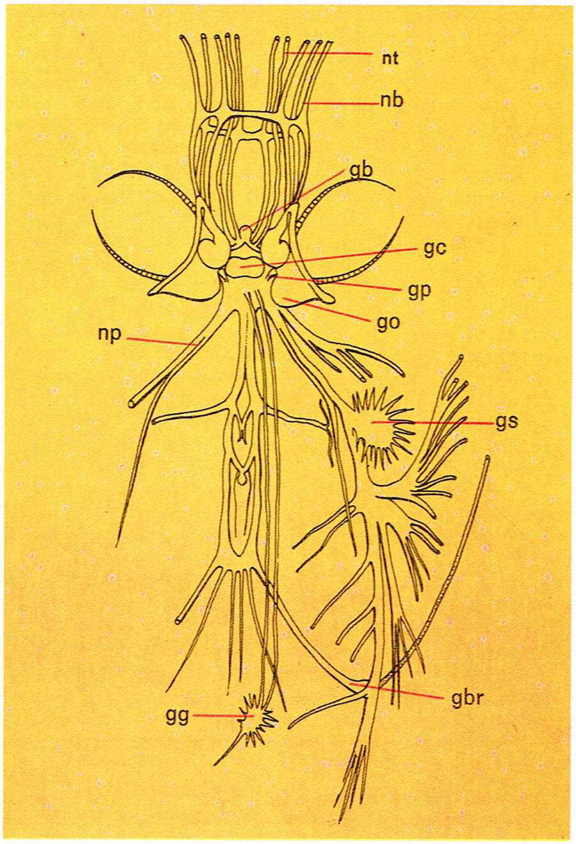

I.G.D.A.

est divisée en foie et en pancréas, sauf chez le nautile, et ses conduits débouchent dans le cæcum.

Système nerveux. Bien que présentant certaines particularités, le système nerveux des Céphalopodes est organisé sur le même plan que celui des autres Mollusques; mais on y observe une céphalisation très accentuée par la fusion des centres principaux. Le collier œsophagien est conservé, mais les ganglions cérébroïdes forment un véritable « cerveau ». Cet organe, généralement protégé par un « crâne » cartilagineux, montre des lobes avec des zones composées de grandes cellules nerveuses qui tendent à avoir une fonction motrice et d'autres régions à petites cellules qui participent à l'intégration sensorielle et interviennent dans le phénomène de la mémoire.

Latéro-ventralement, une paire de massifs nerveux sous-œsophagiens correspond à l'union des ganglions pédieux et pleuro-viscéraux. Les pédoncules optiques bien développés aboutissent à de gros ganglions optiques; ils portent, à la base de ces derniers, une glande optique dont l'ablation entraîne l'arrêt du développement des organes génitaux; par contre, la section des pédoncules optiques a l'effet inverse, ce qui semble indiquer que le cerveau a une action inhibitrice sur les gonades.

De la partie antérieure des ganglions pédieux partent huit nerfs destinés aux bras (nerfs brachiaux) et, chez les Décapodes, deux nerfs tentaculaires. Des ganglions pleuro-viscéraux naissent de forts nerfs destinés aux branchies et au manteau. Sur ces derniers, appelés nerfs palléaux, s'intercalent deux volumineux ganglions stellaires situés près de la base externe de l'entonnoir. Du cerveau part en avant un collier nerveux qui porte les ganglions buccaux; c'est le système stomatogastrique. La disposition des centres nerveux est moins claire chez le nautile, où les ganglions cérébroïdes forment une bande assez uniforme.

Appareil circulatoire. C'est un système clos dans lequel la pression sanguine conserve une valeur élevée. Entre les artérioles et les veinules s'interpose un système complexe de capillaires. Du cœur, logé dans le péricarde, le sang est poussé dans deux aortes, l'une antérieure, l'autre postérieure, et son retour s'effectue par des veines caves qui gagnent les branchies, puis deux oreillettes (Coleoidea), ou quatre (Nautiloidea). C'est exclusivement chez les Coleoidea que des cœurs branchiaux, placés à la base des branchies, favorisent l'entrée du sang dans ces organes et portent des « appendices des cœurs branchiaux ». Tout le sang qui a circulé dans l'organisme s'oxygène dans les branchies avant de pénétrer dans les oreillettes. L'aorte antérieure donne, outre deux artères ophtalmiques, huit artères brachiales. En arrière, la veine cave qui traverse les reins porte de nombreux « appendices rénaux ».

Le sang contient de l'hémocyanine; il se forme dans un organe hématopoïétique, le corps blanc de Hansen, situé dans chaque capsule optique.

Appareil respiratoire. L'eau parvient sur les cténidies, non plus par des mécanismes ciliaires comme chez les autres Mollusques, mais grâce aux muscles du manteau ou de l'entonnoir (nautile). Les cténidies sont très plissées et s'insèrent dans la face supérieure de la cavité palléale. Les lamelles branchiales partent d'une sorte de lame axiale, dont le bord antérieur est occupé par la veine branchiale efférente. En dessous de celle-ci se trouve la veine branchiale afférente.

Appareil excréteur. Sur la face postérieure de la masse viscérale deux sacs rénaux contenant l'urine laissent voir par transparence la grosse branche de la veine cave qui les traverse; celle-ci porte de petites masses à aspect de choux-fleurs, les appendices des corps rénaux ou corps lymphoïdes : c'est là qu'a lieu une bonne partie de l'excrétion. Il semble que les appendices des cœurs branchiaux et le pancréas participent à cette fonction.

Appareil reproducteur. Chez tous les Céphalopodes, les sexes sont séparés. Le transfert du sperme à la femelle s'opère par un ou plusieurs bras modifiés en *hectocotyles.* Chez les seiches et les calmars, c'est le bras ventral gauche qui est transformé; par contre, *Architeuthis* possède, entre deux bras ventraux modifiés, un « pénis » énorme qui atteint 78 cm de long et dépasse de 55 cm l'ouverture palléale (Clarke, 1966).

L'hectocotyle des Octopodes semble être le plus perfectionné; celui de l'argonaute, d'*Ocythoe,* de *Tremoctopus* (formes sans spermatophores), qui contient l'extrémité du « vas deferens », est abandonné dans la femelle où il s'autotomise avant d'être expulsé. Chez le nautile c'est le *spadix,* groupe de quatre tentacules modifiés, qui assure le transfert du sperme. Les spermatophores sont des étuis complexes qui, en explosant dans le milieu adéquat, libèrent les spermatozoïdes.

Physiologie

Changements de coloration. Comme on l'a vu, les chromatophores les déterminent par action réflexe.

Luminescence. Un certain nombre de Céphalopodes possèdent en des points variés de leur corps des organes lumineux ou *photophores* capables de produire une lumière continue ou intermittente et même d'en modifier la couleur. L'émission de lumière est intrinsèque lorsque des cellules spécialisées, les *photocytes,* sont le siège de réactions chimiques particulières, ou extrinsèque lorsqu'elle résulte de la présence de Bactéries lumineuses.

La luminescence est d'origine intracellulaire chez la plupart des Céphalopodes, mais les photophores y sont tantôt simples *(Spirula, Cranchia),* tantôt complexes *(Lycoteuthis, Chiroteuthis, Mastigoteuthis).* Les photocytes se groupent en général en une masse assez dense, entourée de conjonctif formant réflecteur vers l'arrière, et se compliquent souvent d'une lentille traversée par le faisceau lumineux *(Watasenia scintillans, Abraliopsis, Enoploteuthis).* Dans bien des cas, le revêtement extérieur des photophores contient des chromatophores, de sorte qu'il forme un écran de couleur variable.

Heteroteuthis dispar et *Sepiolina nipponensis* sont bien connus pour leur luminescence d'origine extracellulaire. Leurs organes lumineux se situent sur le sac de l'encre et, sous l'influence de stimulations, ils évacuent par l'entonnoir une sécrétion brillante.

La luminescence des Sépiolidés et de plusieurs calmars a une autre origine. Les photophores, iridescents sur l'individu vivant, sont de petits organes ovoïdes

J. Lecomte. C.N.R.S. Laboratoire de Banyuls-sur-mer.

▲ *Jeune Céphalopode, ici* **Loligo vulgaris**, *âgé de deux jours et long de 6 mm.*

ou piriformes dont l'intérieur très plissé contient des granulations et des Bactéries lumineuses. Ces organes sont revêtus d'une couche réfléchissante et ils se compliquent d'une sorte de cristallin. La lumière émise est souvent jaune (spirule, calmar), bleue *(Watasenia)*, blanche ou rouge *(Lycoteuthis diadema)*.

Locomotion. La propulsion par jet n'est pas le seul mode de déplacement des Céphalopodes.

Les pieuvres se meuvent avant tout grâce à leurs bras très mobiles, qui, en s'appliquant alternativement sur les roches, donnent l'impression que l'Animal glisse sans effort. Lorsqu'elles sont menacées, les pieuvres parviennent à se déplacer promptement en rejetant de l'eau par l'entonnoir. Les seiches effectuent de petits déplacements par ondulation de leurs nageoires latérales; cependant, celles-ci, longues et étroites, ne sont pas adaptées à la nage rapide. Les calmars portent comme les *Ommastrephes* des nageoires plus courtes, plus larges qu'ils utilisent sans doute surtout comme des stabilisateurs. Ces nageoires se rabattent contre le corps en cas de nage rapide par jet. S'aidant de leurs nageoires, ils effectuent hors de l'eau des bonds étonnants.

Les *Cranchia,* bien qu'ils puissent aussi se déplacer par jet, flottent en général assez passivement et leur corps, curieusement compartimenté, peut alors être comparé à un appareil hydrostatique muni de ballasts. Leur flottabilité résulte de la concentration d'ions ammonium dans leur corps.

Quelques petites formes littorales, comme *Rossia* et *Sepiola,* semblent être assez sédentaires; elles s'enfouissent sous une mince couche de sable pour chasser à l'affût. Quant au nautile, la coquille qu'il porte ralentit beaucoup ses déplacements.

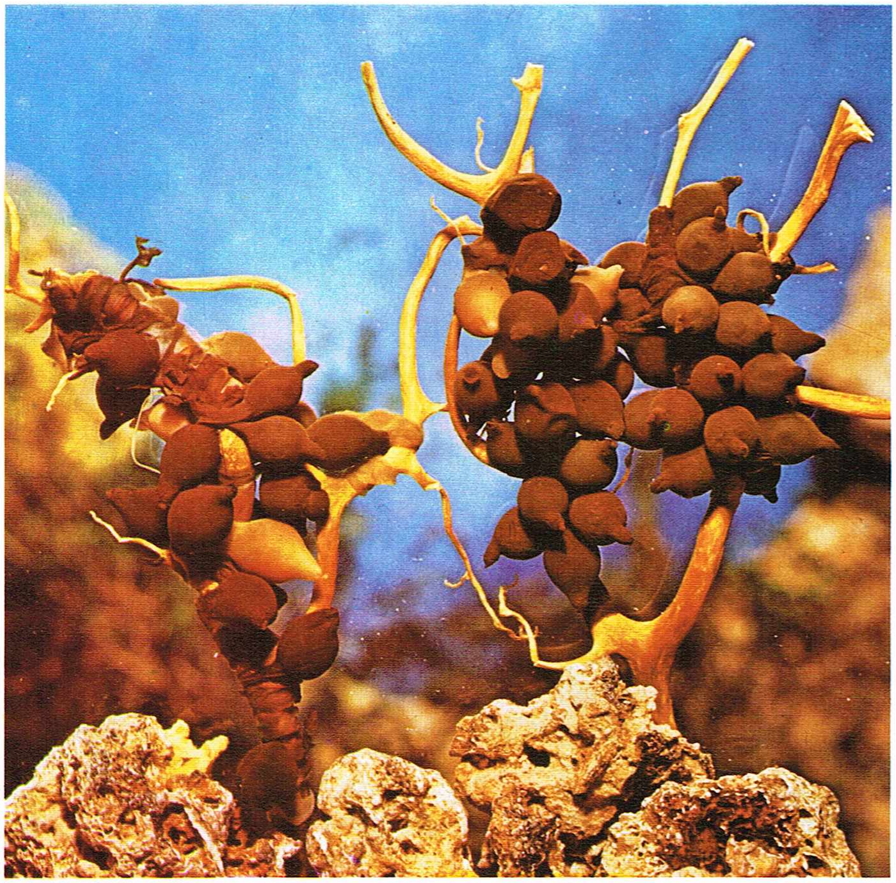

A. Margiocco

▲ *Œufs de seiche; leur taille varie de 7 à 9 mm de diamètre.*
▼ *Coquille de nautile (enroulée en spirale logarithmique) blanche et colorée de flammules. Des cloisons transversales la divisent intérieurement en loges dont la dernière est, seule, occupée par l'Animal.*

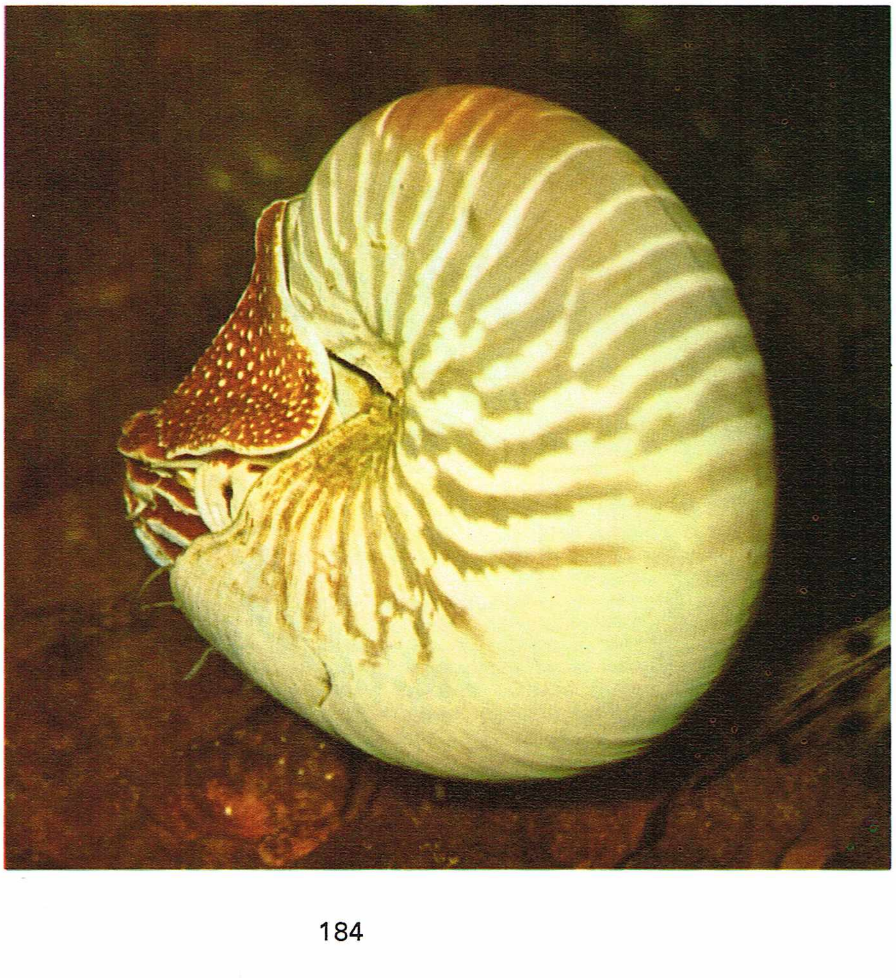

A. Margiocco

Capture des proies. A l'exception d'une seule forme de profondeur, dont l'examen du contenu stomacal n'a révélé que des débris d'Algues, il semble que tous les Céphalopodes soient des carnassiers plus ou moins féroces. Les moyens qui sont utilisés pour capturer les proies sont variés. Dans l'ensemble, le régime alimentaire des jeunes consiste en petits Animaux (Crustacés, Annélides, Chétognathes, Mollusques), alors que celui des adultes comprend des Animaux de plus grande taille.

Les Céphalopodes capturent leurs proies soit en les poursuivant, s'ils sont des nageurs rapides, soit par surprise en se mettant à l'affût, soit, encore, en explorant les fonds meubles ou les anfractuosités des roches. Nombreux sont les Œgopsides de haute mer qui, souvent en bancs considérables, suivent les migrations de Poissons tels que les harengs, les maquereaux et les morues. Plus près des côtes, les seiches se nourrissent de crevettes qu'elles capturent en se plaçant à l'affût sous une mince couche de sable ou en disséminant par leur jet d'eau le sable où logent ces Crustacés. Certains Œgopsides transparents ou colorés attendent, immobiles, l'approche de proies et projettent sur elles leurs bras tentaculaires qui peuvent être fort longs *(Chiroteuthis)*. Quant aux pieuvres, elles chassent les crabes ou d'autres Crustacés ainsi que des Mollusques qu'elles ramènent à leur terrier avant de les dévorer.

Reproduction et *développement.* Au cours de l'accouplement, c'est le bras hectocotyle qui introduit les spermatozoïdes ou les spermatophores dans la cavité palléale de la femelle (calmar) ou les dépose sur une zone glandulaire de la membrane buccale (seiche) ou parfois même sur un réceptacle voisin de l'orifice génital *(Rossia, Sepiola)*. L'accouplement, précédé de préludes, de caresses, devient parfois un acte brutal et violent. Le mâle peut empoigner la femelle par la tête (seiche) ou enlacer son manteau. Le mâle des sépioles retourne la femelle sur le dos avant d'introduire ses spermatophores dans la cavité palléale.

Le comportement des seiches s'observe aisément dans de grands aquariums lors de la période de reproduction. La présence d'une femelle à proximité d'un mâle provoque un rapide changement de coloration. Les zébrures noires et blanches s'accentuent beaucoup et les yeux se congestionnent. Le mâle prend une attitude d'intimidation, se place au-dessus de la femelle, la suit dans ses déplacements, manœuvre pour écarter l'un de ses bras ventraux, puis la saisit brusquement par la tête et dépose les spermatophores sur le côté ventral de sa membrane buccale. L'accouplement des argonautes a souvent été mal interprété car on attribuait à l'hectocotyle le pouvoir de se détacher du mâle et de se déplacer jusqu'à la femelle. En réalité, comme on l'a vu, il se détache du corps du mâle après l'acte sexuel.

A l'époque de la reproduction, beaucoup de Céphalopodes effectuent des migrations plus ou moins importantes vers le littoral. Les œufs sont pondus dans les herbiers, sur les Algues, dans les anfractuosités des roches. Leur nombre et leur taille sont très variables; ainsi la pieuvre pond jusqu'à quatre cent mille œufs de petite taille et la seiche de deux cents à cinq cents œufs de 7 à 9 mm de diamètre. La ponte forme des cordons plus ou moins longs, ou en forme de saucisses, que la mère fixe au substratum. La femelle de l'*Octopus* prend le plus grand soin de ses œufs; celle de l'argonaute les conserve dans sa pseudocoquille.

SYSTÉMATIQUE

Les Céphalopodes actuels se répartissent en deux sous-classes : celle des Nautiloidea et celle des Coleoidea.

Sous-classe des Nautiloidea ou Tétrabranchiaux

Seuls Céphalopodes pourvus d'une coquille externe cloisonnée, ces Animaux sont représentés par le genre *Nautilus* de l'Indo-Pacifique *(N. pompilius)*. Le grand groupe fossile des *Ammonoidea* a de nombreux points communs avec cette sous-classe.

Sous-classe des Coleoidea ou Dibranchiaux

Cette vaste sous-classe se divise en trois ordres inégaux : Decapoda, Octopoda, Vampyromorpha.

Ordre des Decapoda

Outre huit bras semblables, les Décapodes possèdent deux bras tentaculaires adaptés à la capture des proies.

Sous-ordre des Teuthoïdes

Les Teuthoïdes sont de deux types selon que la chambre antérieure de l'œil est close par une cornée (Myopsida) ou largement ouverte (Œgopsida).

Les *Myopsides* ne comprennent que la famille des *Loliginidae,* restreinte à la zone néritique. *Loligo vulgaris,* le calmar commun, a une vaste répartition.

Les *Œgopsides* rassemblent de nombreuses familles de Décapodes océaniques.

La famille des *Architeuthidae* est remarquable par les dimensions des représentants du seul genre qu'elle contient, *Architeuthis.* Ces Animaux, surtout abondants dans les eaux de Terre-Neuve, atteignent vraisemblablement, pour une longueur totale de 17 m, le poids d'une tonne. *Architeuthis* a donné lieu à de nombreuses légendes, mais il demeure mal connu.

Les *Ommastrephidae,* relativement communs en surface le jour, sont des nageurs très puissants. *Ommastrephes bartrami,* l'un des « calmars volants », effectue, sans doute lorsqu'il est pourchassé, des bonds tels qu'il retombe parfois sur le pont des navires. Il est capable d'attaquer des Poissons ou même des congénères de sa propre taille. Les jeunes *Illex* se nourrissent de Crustacés ; adultes, ils pourchassent les harengs et les maquereaux, qu'ils tuent d'une morsure en arrière de la tête, et sont mangés par des morues et d'autres Poissons. *Todarodes sagittatus,* qui apparaît presque chaque année en bancs immenses sur les côtes d'Islande, recherche surtout les harengs. Les bonds qu'il effectue hors de l'eau atteignent une grande hauteur. On le trouve fréquemment dans l'estomac des germons, des morues, des dauphins. La forme voisine, *T. pacificus,* donne lieu au Japon à une pêche importante. C'est ainsi que 600 780 tonnes y ont été pêchées en 1952.

Les *Onychoteuthidae* sont aussi des « calmars volants ». Les photophores de leur cavité palléale émettent une lumière bleu pâle.

Les *Bathyteuthidae,* relativement abondants dans l'Antarctique, se capturent surtout entre 700 et 2 000 m de profondeur et même jusqu'à près de 5 500 m.

Les *Enoploteuthidae,* de petite taille, sont bien représentés dans diverses mers, notamment vers le Japon par les genres *Abralia, Abraliopsis, Watasenia* et *Enoploteuthis* ainsi que dans l'Atlantique par *Pterygoteuthis, Pyroteuthis* et *Enoploion. Watasenia* a des photophores très différenciés sur ses bras et ses globes oculaires. 652 000 tonnes en ont été pêchées au Japon en 1963.

Dans la famille des *Octopoteuthidae, Veranya sicula (Octopoteuthis sicula)* se rencontre en Méditerranée.

Les *Lycoteuthidae* forment une famille remarquable par la diversité et le nombre des photophores. *Lycoteuthis diadema (Thaumatolampis)* possède cinq photophores sous chaque œil, huit sur la face inférieure du corps et quatre sur une paire de bras. C'est à son sujet que Chun écrivait : « On aurait dit que le corps était orné d'un diadème de gemmes brillantes. Les organes moyens des yeux brillaient de bleu outremer, les latéraux d'un éclat nacré. Ceux qui étaient en avant de la face inférieure du corps donnaient une lumière rouge rubis, ceux qui étaient en arrière étaient blanc de neige ou nacrés, sauf le médian qui était bleu ciel. »

Les *Histioteuthidae* ne sont pas moins remarquables, si l'on en juge d'après les étonnantes descriptions d'*Histioteuthis ruppelli* faites par Vérany à Nice.

Dans la famille des *Chiroteuthidae, Chiroteuthis lacertosa* a des bras tentaculaires démesurément longs, garnis d'un photophore à l'extrémité, ce qui a fait dire qu'« il pêche au fanal et à la ligne ».

La famille des *Lepidoteuthidae* comprend le genre *Lepidoteuthis* qui semble être recouvert d'écailles.

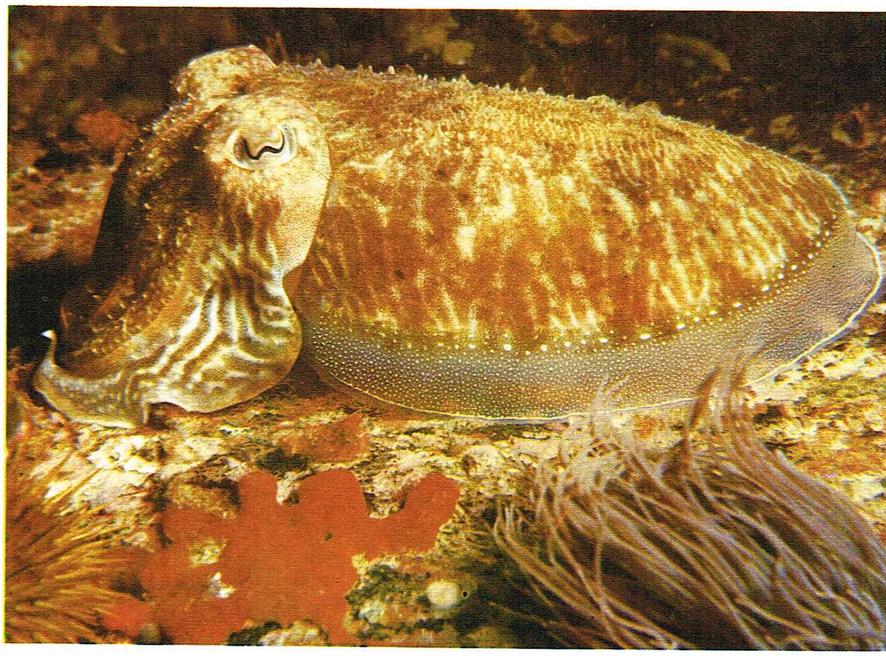

C. Rives - Cedri

▲ **Sepia officinalis** : *la locomotion des seiches s'effectue par jet ; les nageoires la facilitent par l'ondulation de leurs bords.*

Les *Cranchiidae* comprennent, outre certains genres adaptés à la flottaison, les genres *Sandalops, Toxeuma* et *Bathothauma,* dont les yeux sont portés par de longs pédoncules. *B. lyromma,* pour sa part, n'a que huit bras fort réduits et deux longs tentacules.

Sous-ordre des Sépioïdes

Ce sous-ordre comprend les trois familles des *Sepiidae, Sepiolidae* et *Spirulidae. Sepia officinalis* est la seiche commune. *Sepiola* et *Rossia* sont de plus petite taille. Les spirules, dont le test cloisonné et disjoint abonde sur certaines plages, vivent en profondeur, sans doute en essaims.

Ordre des Octopoda

On y distingue deux sous-ordres, les Polypoidea et les Cirroteuthoidea.

A. Margiocco

◀ **Heteroteuthis dispar** *se caractérise, à l'encontre de la plupart des autres Céphalopodes, par une luminescence d'origine extracellulaire. Chez cette espèce, les organes lumineux se situent sur le sac de l'encre ; sous l'influence de stimulations, ils évacuent par l'entonnoir une sécrétion brillante.*

▶ *Dans la famille des* **Octopodidae**, *l'espèce* **Octopus vulgaris** *est la plus connue. Les pieuvres se meuvent grâce à leurs bras très mobiles réunis par une membrane à la base. Carnassières, elles se nourrissent de Mollusques, de Crabes ou d'autres Crustacés qu'elles saisissent de leurs bras et portent à leur bouche.*

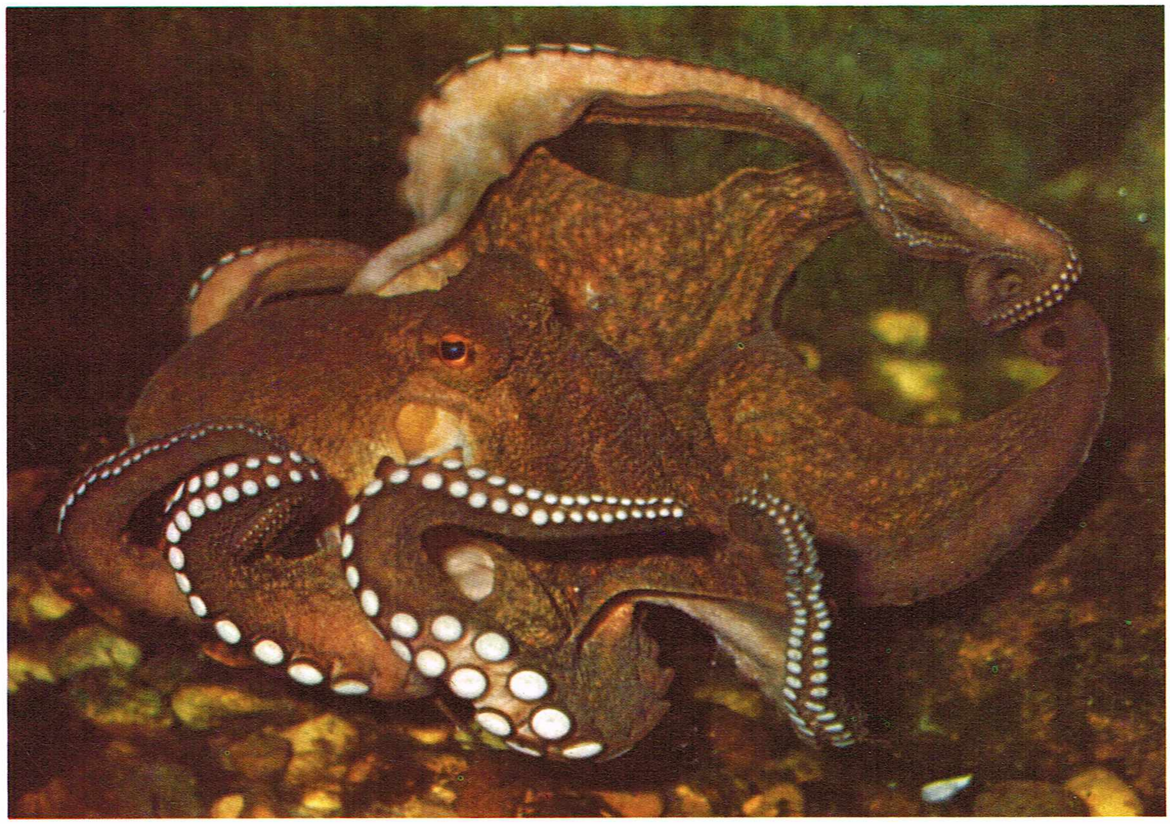

A. Margiocco

▼ **Argonauta argo** *femelle. Le dimorphisme sexuel est très accentué; le mâle est vingt fois plus petit que la femelle dans cette famille des Argonautidae.*

A. Margiocco

Le premier de ces sous-ordres comprend, entre autres, la famille des *Octopodidae,* dont le genre *Octopus* est le plus connu. Dans cette même famille, il faut mentionner les *Hapalochlaena* et particulièrement *H. lunulata,* qui est une petite pieuvre des côtes d'Australie dont la morsure est mortelle. Le venin de ses glandes salivaires contient une toxine qui provoque la paralysie des muscles respiratoires. Les Polypoidea sont aussi représentés par les *Argonautidae,* formes chez lesquelles le mâle est vingt fois plus petit que la femelle.

Dans la famille des *Cirroteuthidae,* les individus ont de longs bras réunis par une ample membrane brachiale. Comme un certain nombre d'autres Octopodes, les *Cirrothauma* ont un corps très mou, de consistance gélatineuse.

Ordre des Vampyromorpha

Cet ordre se réduit au seul genre *Vampyroteuthis,* sorte de petit Octopode à nageoires réduites et à bras réunis par une palmure. Ces Animaux ont conservé cependant une « plume » réduite. *Vampyroteuthis* ne possède ni hectocotyle, ni sac de l'encre. Son tégument est brun-rouge sombre ou noirâtre, comme c'est souvent le cas pour les Animaux de profondeur. Les photographies benthiques ont révélé que l'Animal utilise divers modes de locomotion : nage lente grâce aux nageoires ou au jet et fuite par action des bras et de la membrane.

BIBLIOGRAPHIE

FISCHER-PIETTE E. et FRANC A., *Aplacophores, Polyplacophores, in* GRASSÉ P. P., *Traité de zoologie,* vol. V, t. 2, Paris, 1960 - ID., *Ibid., Scaphopodes,* vol. V, t. 3, 1968. - FRANC A., *Bivalves, in* GRASSÉ, P. P., *Traité de zoologie,* vol. V,t. 2, 1960 - ID., *Ibid., Gastéropodes,* vol. V, 3, 1968. - FRETTER V. et GRAHAM A., *British Prosobranch Molluscs,* Londres, 1962. - GERMAIN L., *Mollusques terrestres et fluviatiles, Faune de France,* n°s 21 et 22, Paris, 1930-1931. - GRASSÉ P. P., POISSON R. et TUZET O., *Zoologie,* vol. I, *Invertébrés,* Paris, 1961. - JAECKEL S., *Cephalopoden,* Leipzig, 1958. - LANE F. W., *The Kingdom of the Octopus,* Londres, 1957. - MORTON J. E., *Molluscs,* Londres, 1958. - PRUVOT-FOL A., *Mollusques Opisthobranches, Faune de France* n° 58, Paris, 1954. - WENZ W., *Gastropoda,* vol. I, Berlin, 1938. - WILBUR K. M. et YONGE C. M., *Physiology of Mollusca,* vol. I, II, Londres, 1964, 1966. - ZILCH A., *Gastropoda, in* WENZ, Berlin, 1959-1960.

A.R. Devez - Jacana

LES PARARTHROPODES

On regroupe sous le terme de « Pararthropodes », les Onychophores, les Tardigrades et les Pentastomides.

ONYCHOPHORES OU PÉRIPATES

Les représentants de la classe des Onychophores sont des Animaux terrestres, d'origine très ancienne, constituant un groupe très homogène. Ils vivent, pour la plupart, dans des biotopes humides, sont généralement photophobes et se meuvent avec lenteur. Leur taille varie d'une quinzaine de millimètres à une quinzaine de centimètres chez certaines femelles de Péripatidés. Leur corps, allongé, a l'aspect de celui d'une Annélide; l'extrémité antérieure porte des antennes annelées, insérées dorsalement et des tentacules oraux situés latéralement sur la face ventrale. Viennent ensuite un certain nombre d'anneaux (quatorze à quarante-trois) qui portent chacun une paire de pattes, appelées lobopodes, terminées par deux griffes.

La *paroi du corps* est constituée par une cuticule souple, chitineuse, sujette à des mues, perméable à l'eau et à l'oxygène, par un épiderme formé de cellules polyédriques contenant le pigment cutané, par un conjonctif à fibres diversement orientées et enfin par plusieurs couches de muscles (circulaires, obliques et longitudinaux). Il existe des *glandes crurales* logées dans les pattes et les sinus latéraux de la cavité générale ; leur fonction est inconnue ; les glandes de la « glu » débouchent au sommet des tentacules oraux.

Le *système nerveux* comprend deux masses ganglionnaires céphaliques d'où partent deux cordons ganglionnaires latéro-ventraux reliés par de nombreuses commissures sous-intestinales.

Les *organes des sens* sont représentés par des papilles épidermiques sensorielles à fonction tactile ou olfactive et par des yeux situés à la base des antennes.

L'*appareil excréteur* est constitué par autant de paires de néphridies qu'il y a de paires de pattes. Les néphridies, semblables à celles des Annélides, débouchent à la base des pattes.

L'*appareil circulatoire* est formé d'un vaisseau dorsal, pulsatile, ou cœur, qui s'ouvre à ses deux extrémités dans le sinus péricardique. Ce dernier contient de nombreuses cellules péricardiales. Au milieu de chaque segment, le cœur présente une paire de fentes (ostioles) bordées de replis valvulaires.

La *respiration* s'effectue essentiellement à l'aide de trachées qui s'ouvrent à la surface du corps par de nombreux orifices stigmatiques.

L'*appareil digestif* est formé d'un tube rectiligne. La bouche ventrale est limitée par un cercle de lobes papillifères, et contient une crête médiane denticulée, ou langue. De part et d'autre de la langue se trouvent les deux paires de lames mandibulaires. Viennent ensuite un pharynx musculeux, un œsophage court et fortement plissé, un intestin très long et un rectum. Les Péripates se nourrissent surtout de petits Insectes et Mollusques qu'ils immobilisent avec la glu, et, également, des fibres du bois pourri.

▲ Animaux terrestres, les représentants des Onychophores, ici un Péripate femelle trouvé dans la forêt amazonienne, ont un corps allongé dont l'épiderme formé de cellules polyédriques contient le pigment cutané.

▼ Représentation schématique de l'organisation interne d'un Onychophore : te, tentacule; œ, œil; ce, cerveau; gs, glande salivaire; cœ, cœur; in, intestin; ov, ovaire; an, anus; bo, bouche; ma, mâchoire; gm, glande mucipare; nph, néphridie; pe, pore excréteur; gc, glande crurale; cn, cordon nerveux; ut, utérus; og, orifice génital.

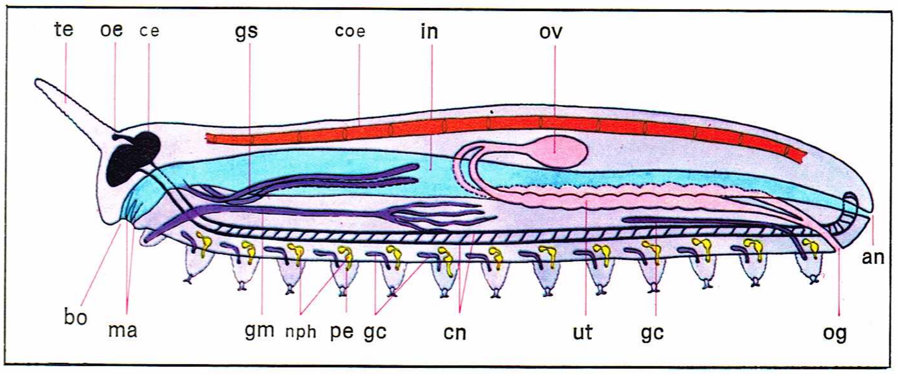

I.G.D.A.

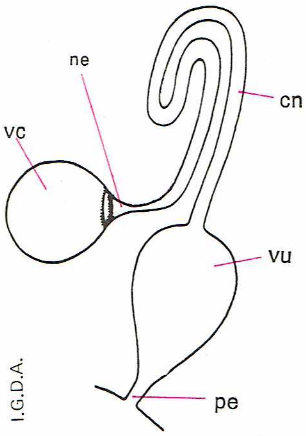

▲ *Schéma de la métanéphridie d'un Onychophore; cn, canal néphridien; vu, vésicule urinaire; pe, pore excréteur; vc, vésicule coelomique; ne, néphrostome.*

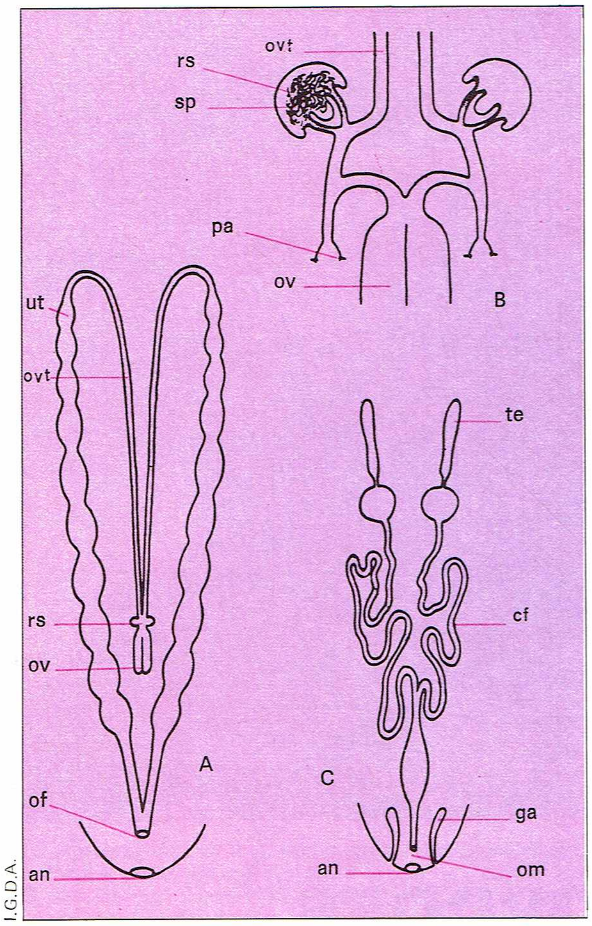

▶ *Schémas de l'appareil génital des Onychophores : A, organes femelles - B, détail - C, organes mâles; an, anus; cf, canal déférent; ga, glande anale; of, orifice génital femelle; om, orifice génital mâle; ov, ovaire; ovt, oviducte. pa, pavillon; rs, réceptacle séminal; sp, spermatozoïde; te, testicule; ut, utérus.*

Appareil reproducteur. Les sexes sont séparés. Chez le mâle il est composé de deux testicules, suivis, chacun, par une vésicule séminale d'où part un canal déférent. Les deux canaux fusionnent en un canal impair dont la première partie renferme les spermatophores et la seconde, musculeuse, constitue un canal éjaculateur. L'appareil génital femelle comprend deux ovaires tubuliformes suivis d'un court atrium médian d'où partent deux courts canaux débouchant chacun dans un canal néphridien fonctionnant comme oviducte. Chaque oviducte s'élargit en utérus. Enfin, les deux utérus s'unissent pour déboucher à l'orifice génital. Presque tous les Onychophores sont vivipares. Chez ceux-ci, l'utérus est subdivisé en une série de chambres incubatrices contenant chacune un œuf. L'œuf s'y développe soit en utilisant son vitellus, soit aux dépens de la mère, en s'unissant à la paroi maternelle par un placenta, soit, encore, en se développant dans un sac trophoblastique qui absorbe un liquide nutritif sécrété par la paroi utérine.

Les Onychophores actuels sont divisés en deux familles séparées par certains caractères morphologiques et par une distribution géographique différente. Les *Péripatidés* vivent dans les régions équatoriales de l'hémisphère Sud et les *Péripatopsidés* se répartissent uniquement dans l'aire australe (au Cap).

BIBLIOGRAPHIE

CUÉNOT L., *les Onychophores, in* GRASSÉ P. P., *Traité de zoologie,* Masson, édit., Paris, 1949, p. 3-37. - GABE M., *Données histologiques sur les organes segmentaires des Peripatopsidae (Onychophores), Arch. Anat. microsc. et morph. expérim.* 46 (3) p. 283-306.

TARDIGRADES

La classe des Tardigrades comprend des Animaux marins d'eau douce ou terrestres; dans ce dernier cas, les espèces ont besoin d'un mince film d'eau pour mener une vie normale. Leur taille varie de 80 μ à 1 mm. Leur corps, vaguement annelé, est à symétrie bilatérale. Ils portent quatre paires de pattes terminées par des griffes ou des doigts en nombre variable et de formes diverses. Le corps présente également de nombreux appendices : les uns, à fonction vraisemblablement sensorielle, sont constitués par des papilles et des cirres; les autres sont des expansions cuticulaires en forme de piquants et de filaments. Il faut signaler que généralement on ne rencontre pas ce dernier type d'appendices chez les Eutardigrades.

La *paroi du corps* est constituée par une cuticule sécrétée par un épiderme formé de grandes cellules plates et en nombre constant pour chaque espèce. La musculature est formée de muscles striés qui s'insèrent sur des saillies intérieures de la cuticule. Chez de nombreux Hétérotardigrades, la cuticule est recouverte par une carapace dorsale faite d'une série de plaques plus ou moins ornées.

Le *système nerveux* est métamérisé, comme celui des Arthropodes. Il comprend un cerveau plurilobé, réuni à un ganglion sous-œsophagien par un collier ganglionnaire. Le ganglion sous-œsophagien est relié à une chaîne ventrale comprenant quatre ganglions bilobés. Le cerveau porte souvent deux taches oculaires.

La *respiration* s'effectue par des échanges gazeux à travers la surface du corps. Il n'y a pas d'appareil circulatoire; ce sont les mouvements du corps qui produisent un brassage constant du liquide cœlomique contenu dans la cavité générale. Il n'existe pas d'appareil excréteur, et on suppose que l'excrétion se fait par l'intermédiaire des glandes salivaires, de l'épithélium de l'intestin moyen ou de glandes rectales (qui n'existent que chez les Eutardigrades).

Le *tube digestif* est rectiligne. La bouche est entourée d'anneaux cuticulaires grâce auxquels elle peut se fixer sur les corps étrangers. Viennent ensuite le tube buccal, de chaque côté duquel se trouvent un stylet perforant et de grosses glandes buccales, le bulbe, l'œsophage (intestin antérieur), l'intestin moyen, et enfin le rectum et l'anus. En général, les Tardigrades se nourrissent de la chlorophylle des cellules végétales. Chez les Hétérotardigrades, la défécation coïncide avec la mue, tandis que chez les Eutardigrades, elle peut se produire à tout moment.

Appareil reproducteur. Les sexes sont séparés. L'appareil génital mâle est composé d'une seule gonade, de deux canaux déférents et d'un gonopore ventral. L'appareil génital femelle comporte également une seule gonade et un oviducte (droit ou gauche), qui aboutit au pore génital ventral. Chez les Hétérotardigrades, le gonopore est situé un peu au-dessus de l'anus; chez les Eutardigrades, il débouche sur la paroi ventrale du rectum, qui devient alors un cloaque auquel est annexé, chez les femelles, un réceptacle séminal. Les Tardigrades sont ovipares. Il existe deux modes de ponte; les œufs à coque ornementée sont pondus isolément ou par petits amas; les œufs lisses sont libérés au moment de la mue et se retrouvent dans la mue abandonnée. Le développement est direct chez les Eutardigrades, alors que, chez les Hétérotardigrades, une métamorphose a lieu au cours des mues.

Les Tardigrades sont répartis en deux groupes : les Hétérotardigrades avec les genres *Batillipes* et *Echiniscoides*, marins, et *Echiniscus*, terrestre; les Eutardigrades avec *Macrobiotus, Hypsibius, Milnesium,* qui ne comprennent pas de genres marins. Les espèces marines vivent

▼ *Représentation schématique de l'organisation d'un* Macrobiotus hufelandi *femelle (coupe sagittale) : gc, ganglion cérébral; gs, glande salivaire ou buccale; bu, bulbe; œs, œsophage; md, muscle longitudinal dorsal; ov, ovaire; in, intestin; gd, glande dorsale; ovt, oviducte; gp, glande pédieuse; oc, orifice cloacal; rs, réceptacle séminal; tm, tube de Malpighi ou glande excrétrice latérale; gv, ganglion ventral; gso, ganglion sous-œsophagien; bo, bouche.*

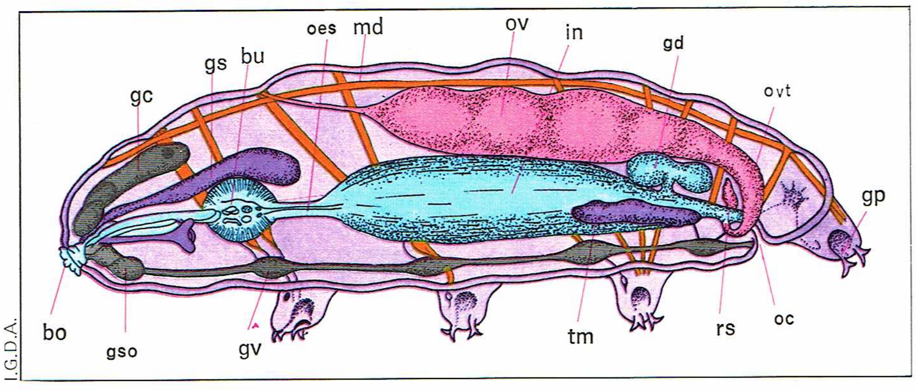

dans les sables marins ou sur les Algues, les espèces d'eau douce dans la lisière moussue des lacs et les Algues; les espèces terrestres se rencontrent dans les Lichens, les Hépatiques et les Mousses. De nombreuses espèces sont cosmopolites et vivent partout où se trouvent les Mousses et les Lichens.

La plupart des Tardigrades présentent des périodes de vie inactive, qui se manifestent selon trois modalités. *L'état asphyxique* est déterminé par un manque d'oxygène dans le milieu; l'Animal s'immobilise, se gonfle d'eau et finit par mourir si le milieu n'est pas à nouveau aéré. *L'enkystement,* assez rare, serait peut-être provoqué par un manque de nourriture. L'individu se rétracte à l'intérieur de sa vieille cuticule épaissie et s'y trouve enkysté. *L'anabiose* apparaît comme un phénomène fréquent chez les Tardigrades des Mousses et des Lichens soumis à des conditions de sécheresse prolongée. Le corps se contracte et prend la forme d'un tonneau, les pieds se rétractent et l'Animal se déshydrate. Le retour à la vie active se fait par absorption d'eau.

BIBLIOGRAPHIE

MAY R. M., 1948, *la Vie des Tardigrades*, éd. Gallimard, Paris, 133 p. - RAMAZZOTI G., 1972, *Il Phylum Tardigrada, Mem. ist. Ital. Idrobiol. 28,* p. 1-732. - RENAUD-MORNANT J., 1970 (1971), *Campagne d'essais du «Jean-Charcot» (3-8 décembre 1968) 8, Meiobenthos II. Tardigrades. Bull. Mus. Nat. Hist. Nat.* Paris, 2e s, *42 (5)* p. 957-969. - RENAUD-MORNANT J., et POLLOCK L. W., 1971, *A Review of the Systematics and Ecology of Marine Tardigrada. Proc. 1st. Intern. Conf. Meiofauna.,* Smithsonian Contr. Zool. 76 p. 109-117.

PENTASTOMIDES OU LINGUATULIDES

Les Animaux de cette classe sont parasites des organes respiratoires des Vertébrés aériens; leur taille varie de quelques millimètres à une quinzaine de centimètres. Le corps, aplati ou cylindrique, présente une métamérie uniquement tégumentaire. Il comprend une région céphalique courte, un abdomen qui se termine par une région anale peu développée. La tête porte deux petites papilles frontales, la bouche ventrale et, sur les côtés, deux paires d'appendices locomoteurs inarticulés, plus ou moins rétractiles, portant à leur extrémité une forte griffe. Chez les types les plus évolués, seules les griffes subsistent.

La *paroi du corps* est limitée par une cuticule transparente et élastique sujette à des mues. Sous la cuticule se trouve un épiderme monostratifié, puis viennent les fibres musculaires striées, circulaires, longitudinales, obliques ou dorso-ventrales. Outre les glandes frontales, il existe des glandes en rapport avec les griffes, dont la fonction est inconnue. La cuticule présente également de nombreux pores, orifices de petites glandes multicellulaires, peut-être excrétrices.

La *cavité du corps* est vaste et traversée par des mésentères et des cordons musculaires. Elle est remplie d'un liquide incolore ou rougeâtre, contenant des amibocytes. Il n'y a pas de système circulatoire; le liquide cavitaire est brassé par les mouvements du corps. Il n'existe ni appareil respiratoire ni appareil excréteur.

Le *système nerveux* comprend, dans les cas les plus simples (Céphalobénides), une masse cérébroïde formée de deux ganglions unis par une commissure supra-œsophagienne, et une chaîne ventrale de trois ou quatre ganglions peu distincts. Chez les Porocéphalides, le système nerveux central est condensé en une masse ganglionnaire unique presque entièrement sous-œsophagienne, d'où partent huit paires de nerfs latéraux et deux nerfs longitudinaux. Les *organes des sens* sont peu développés et représentés par de simples papilles : deux papilles frontales, un nombre variable de papilles postfrontales, des papilles latérales et une paire de papilles génitales.

L'*appareil digestif* est un tube rectiligne qui comprend trois parties : l'intestin antérieur (pharynx et œsophage) très court, recouvert d'une cuticule chitineuse, l'intestin moyen dont les parois sont formées de hautes cellules glandulaires et absorbantes et enfin l'intestin terminal, ou rectum à cuticule chitineuse. La bouche et l'œsophage sont organisés pour aspirer uniquement de la nourriture liquide par un jeu de pompe. Les Pentastomides adultes sucent du sang pulmonaire ou absorbent le mucus des cavités nasales qu'ils parasitent.

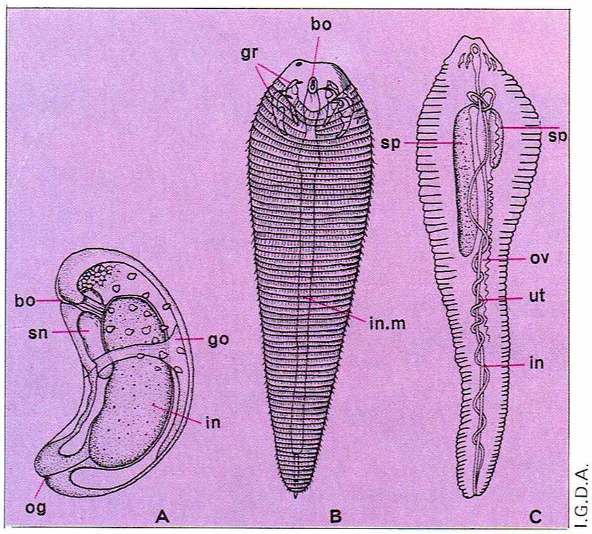

◀ *Schémas d'un Pentastomide,* **Linguatula serrata** *: larve tertiaire immobile (A); larve primaire libérée (B); femelle à l'époque de l'accouplement (C); bo, bouche; gr, griffes; go, gonades; in, intestin; in. m, intestin moyen; og, orifice génital; ov, ovaire; sp, spermathèques ou vésicules copulatrices; sn, système nerveux; ut, utérus.*

Appareil reproducteur. Les sexes sont séparés et les mâles, généralement plus petits que les femelles, ont une vie plus courte. L'appareil génital femelle est constitué par un ovaire dorsal et impair, une paire d'oviductes qui se réunissent en un court canal médian, une paire de vésicules copulatrices qui débouchent, de même que l'oviducte commun, dans un long tube utéro-vaginal qui s'ouvre à l'orifice génital. L'appareil génital mâle est plus complexe et plus variable. Chez *Linguatula serrata,* il est composé de deux testicules qui aboutissent à une vésicule séminale impaire, d'où partent deux cæcums éjaculateurs très musculeux qui projettent le sperme dans deux canaux déférents entourés de cellules glandulaires. Les canaux déférents se prolongent par le cirre, long tube grêle, enroulé en spirale dans la poche du cirre à laquelle est annexée latéralement une cavité très musculeuse qui renferme un crochet. Le cirre et le crochet se dévaginent lors de l'accouplement, qui a lieu à l'intérieur de l'hôte parasité.

Développement et cycle biologique. Les œufs sont petits et pauvres en vitellus. Leur segmentation est totale et aboutit à un embryon. Les œufs embryonnés sont rejetés à l'extérieur. En général, le développement se poursuit chez un hôte intermédiaire, souvent un petit herbivore ou omnivore (Mammifère, Poisson, grenouille), chez lequel la coque se dissout et où la larve dite primaire est libérée. De l'intestin grêle, elle gagne d'autres organes où elle s'enkyste et subit une série de mues en donnant une larve secondaire, puis une larve tertiaire. Lorsque l'hôte intermédiaire est dévoré par l'hôte définitif (serpents, crocodiles, Oiseaux, Mammifères), la larve tertiaire deviendra adulte. Les Céphalobénides n'ont pas d'hôte intermédiaire obligatoire dans leur cycle évolutif; leur développement est direct.

Les Pentastomides sont divisés en deux ordres :

Dans l'ordre des *Céphalobénides, Cephalobaena tetrapoda,* parasite des poumons de serpents néo-tropicaux, paraît avoir conservé de nombreux caractères archaïques de sa classe. Chez les *Porocéphalides,* nous citerons *Linguatula serrata,* dont les larves parasitent le lapin, et les adultes les sinus frontaux et nasaux de Canidés (surtout chien et loup).

▼ **Cephalobaena tetrapoda,** *parasite des poumons de serpents néo-tropicaux, paraît avoir gardé nombre de caractères archaïques de sa classe.*

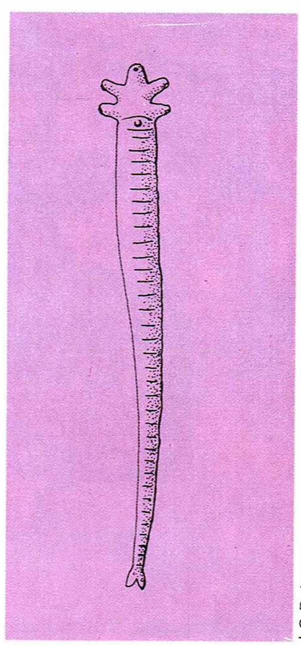

BIBLIOGRAPHIE

CUÉNOT L. *Les Pentastomides,* in GRASSÉ P. P., *Traité de zoologie,* t. 6, Paris, 1949. - DOUCET J., 1965, *Contribution à l'étude anatomique, histologique et histochimique des Pentastomes (Pentastomida).* Thèse d'État, Paris série A, n° 4554, n° d'ordre 5401.

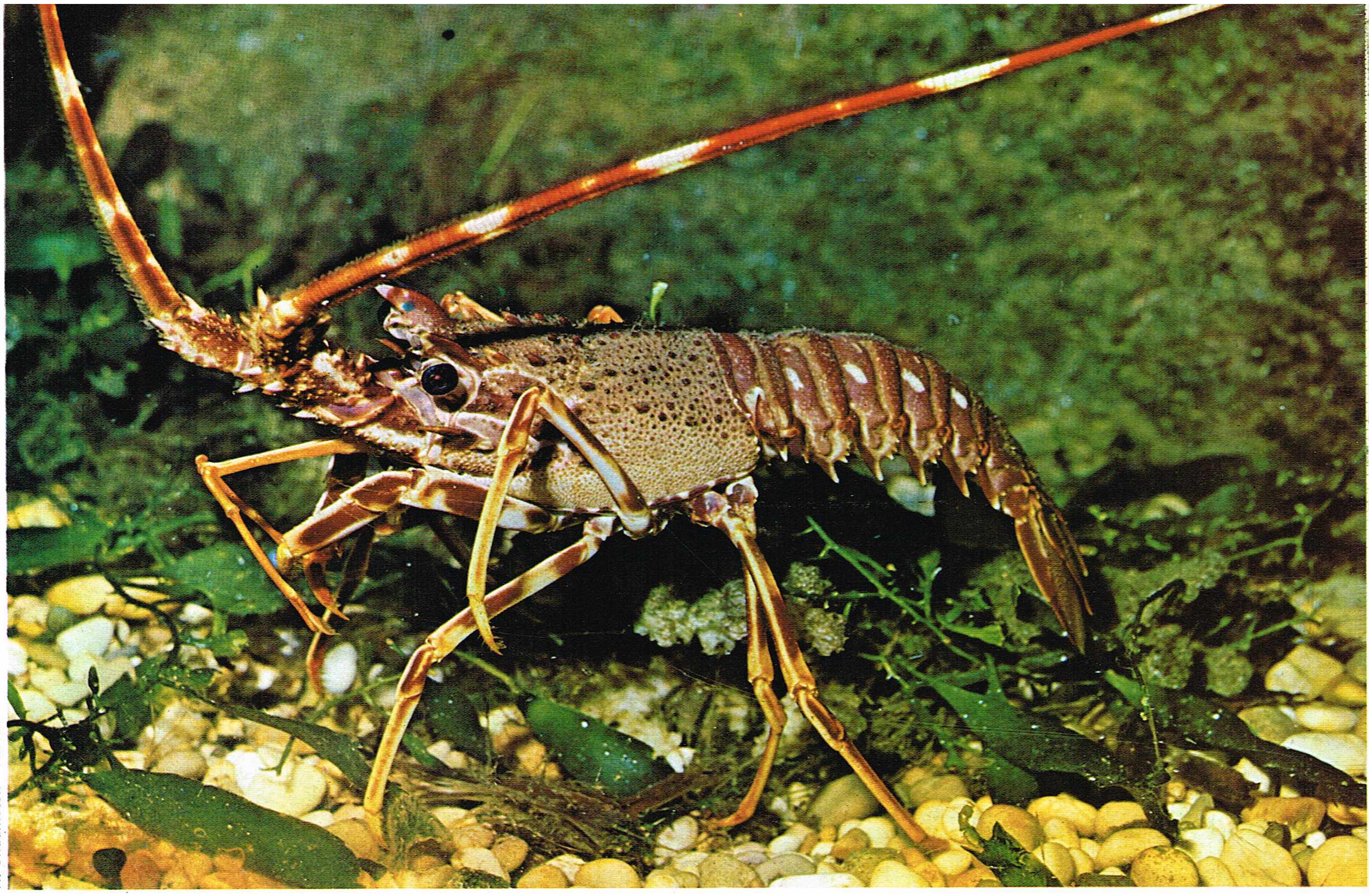

H. Chaumeton - Jacana

LES ARTHROPODES

▲ *Un représentant de l'embranchement des Arthropodes : la langouste.*

▼ *Coupe schématique du tégument des Arthropodes : ss, soie sensorielle ; ep, épicuticule ; en, endocuticule ; hd, hypoderme ; mu, muscle ; mb, membrane basale ; gt, glande tégumentaire ; ns, neurone sensoriel ; ex, exocuticule.*

Les Arthropodes constituent le plus important des embranchements du règne animal, avec plus d'un million d'espèces vivantes décrites, ce qui représente près des quatre cinquièmes de la faune mondiale connue. Si des caractères communs font de cet embranchement un ensemble homogène et bien défini, ses éléments manifestent cependant une étonnante diversité, qui porte à la fois sur la morphologie, sur la physiologie et sur l'écologie. On range en effet parmi les Arthropodes des Animaux aussi différents d'aspect que les crabes, les crevettes, les araignées, les scorpions, les tiques, les mille-pattes, les scarabées, les mouches et les libellules. Leur taille varie d'une fraction de millimètre chez des Acariens parasites à près de 4 m d'envergure chez le crabe géant du Japon. On les rencontre partout, aussi bien sur la terre ferme que dans les eaux continentales ou marines, du pôle Nord au continent antarctique, des fosses océaniques les plus profondes jusqu'au sommet du mont Éverest.

Ajoutons que les principaux groupes d'Arthropodes semblent s'être partagé les milieux dans lesquels la vie est possible. Les Arachnides, les Myriapodes et surtout les Insectes ont peuplé toutes les surfaces émergées, alors que les Crustacés conquéraient le domaine aquatique et particulièrement les immensités océaniques.

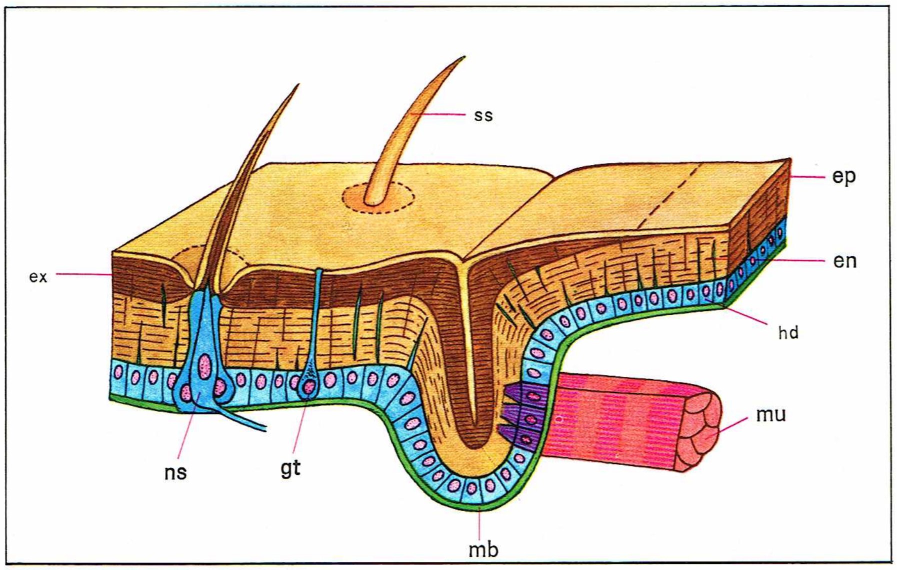

I.G.D.A.

Organisation générale

Les *téguments,* qui recouvrent le corps et les appendices, sont constitués par une couche interne, l'*hypoderme*, et une couche externe protectrice, la *cuticule*. L'hypoderme se compose d'une couche unique de cellules non ciliées qui peuvent sécréter des soies, des poils ou des épines ; il inclut également des glandes de divers types et des terminaisons nerveuses sensorielles. La cuticule est une formation rigide qui assure une protection mécanique et l'imperméabilité aux gaz et aux liquides, sauf au niveau des surfaces respiratoires. Elle comprend une *endocuticule* épaisse, souple, avec plusieurs assises formées, l'une avant, les autres après la mue, une *exocuticule* dure et une *épicuticule* extrêmement mince. Les constituants chimiques de la cuticule sont principalement une protéine hydrosoluble, l'*arthropodine*, et un polysaccharide azoté, la *chitine*. Chez les Crustacés et chez les Myriapodes Diplopodes, les téguments sont souvent imprégnés de sels calcaires qui leur confèrent une dureté particulière ; ceux des régions articulaires sont plus minces et plus riches en chitine et ont ainsi une souplesse qui permet l'exécution des mouvements.

Les téguments sont fréquemment colorés soit en raison de la présence de pigments dans l'hypoderme, en dessous, ou encore dans la cuticule, soit en raison de la structure

physique de cette dernière, qui provoque des phénomènes d'interférences. Les formations cuticulaires recouvrent la surface externe du corps, constituant ainsi l'*exosquelette*, mais elles s'étendent en outre aux organes d'origine ectodermique, comme les intestins antérieur et postérieur, ainsi qu'aux organes respiratoires. De plus, un ensemble d'invaginations rigides fournissent une base d'insertion aux muscles du corps et constituent l'*endosquelette*.

La nature même du revêtement cuticulaire, qui peut être souple et flexible, mais n'est plus extensible lorsqu'il est complètement formé, ne permet pas l'accroissement continu du corps, tel qu'on l'observe chez les autres Animaux. La croissance d'un Arthropode, à partir de sa naissance, s'effectue par palliers, grâce au mécanisme de la *mue;* au cours de son développement, il rejette à plusieurs reprises son enveloppe chitineuse, l'*exuvie,* et, à chaque fois, en règle générale, sa taille et son poids augmentent. Le processus de mue, qui s'accompagne souvent de profonds remaniements morphologiques (métamorphoses), est sous la dépendance de sécrétions hormonales; il s'accomplit selon des modalités diverses suivant les groupes : dans certains cas, chez les Chélicérates et les Insectes, par exemple, chaque espèce présente un nombre déterminé de stades, et l'Animal ne grandit plus dès qu'il a acquis la forme adulte; par contre, dans d'autres cas, chez la majorité des Crustacés notamment, les mues sont de plus en plus espacées, mais se poursuivent jusqu'à la période de sénescence.

Régions du corps. On considère généralement que les Arthropodes et les Annélides ont une même origine, et, de fait, dans les deux embranchements, le corps, à symétrie bilatérale, est fondamentalement formé d'une série de segments semblables, ou *métamères*, ou *somites*. Cependant, chez les Annélides, les processus embryologiques conduisent à la formation d'un nombre variable de segments identiques en arrière de la tête, ou *prostomium*, alors que, chez les Arthropodes, des arrêts de croissance, des fusions partielles ou totales de segments et des disparitions d'appendices entraînent la différenciation de régions morphologiquement et physiologiquement spécialisées, ou *tagmes*. Certaines de ces zones peuvent encore révéler de façon très apparente la métamérie originelle, mais, bien souvent, celle-ci ne se manifeste plus qu'indirectement, par la présence d'appendices.

Chaque segment arthropodien comprend typiquement une enveloppe tégumentaire, renforcée par des pièces rigides, les *sclérites*. On distingue un *tergum*, ou *tergite*, dorsal, et un *sternum*, ou *sternite*, ventral, qui sont unis par des pièces latérales, ou *pleurites*. L'anatomie interne comporte des éléments musculaires, des éléments vasculaires, une paire de ganglions nerveux, une paire d'organes d'excrétion, ou néphridies. A chaque segment est également annexée une paire d'appendices. Les différentes régions du corps n'ont pas la même origine segmentaire dans les diverses classes d'Arthropodes et la terminologie utilisée pour les désigner varie en conséquence.

La région céphalique résulte de la fusion d'une partie primitive, l'*acron,* homologue du *prostomium* des Annélides, avec un nombre de segments variable suivant les groupes. L'ensemble est désigné sous le nom de *tête,* de *céphalon* ou de *prosome*. La tête des Trilobites, connus seulement à l'état fossile, est la plus primitive : elle est formée de cinq segments dont les quatre derniers portent des appendices semblables à ceux du reste du corps. Chez les Mandibulates, la tête inclut trois segments postbuccaux dont les appendices sont masticateurs. Quant aux Chélicérates, ils n'ont pas de région céphalique distincte, ce qui est lié à l'absence d'appendices buccaux spécialisés.

Le tronc, c'est-à-dire la partie du corps qui succède à la tête et qui précède la pièce terminale postérieure, ou *telson,* peut être formé par une suite de segments, souvent très nombreux et tous semblables : c'est le cas des Myriapodes. Chez les Crustacés on distingue généralement dans le tronc une région antérieure, le *péréion,* et une région postérieure, le *pléon*. Le péréion est souvent désigné sous le nom de *thorax* et le pléon sous le nom d'*abdomen,* par analogie avec les régions correspondantes du corps des Insectes, bien que ces régions ne soient pas homologues dans les deux groupes. Chez les Chélicérates, qui, nous l'avons dit, n'ont pas une tête individualisée, l'ensemble du corps est divisé en un *prosome*, avec une paire de *chélicères* correspondant aux antennes des Crustacés, cinq paires d'appendices à rôle sensoriel ou locomoteur, et un *opisthosome* de treize segments sans appendices ou à appendices très modifiés.

Appendices. Les premiers Arthropodes possédaient sans doute des appendices pairs, tous semblables et à fonction locomotrice. On pense aussi que l'appendice

Embranchement
des ARTHROPODES

Sous-embranchement
des
TRILOBITOMORPHES

Sous-embranchement
des
CHÉLICÉRATES

Classe des Mérostomes
Classe des Arachnides
Classe des Pycnogonides

Sous-embranchement
des
MANDIBULATES

Classe des Crustacés
Classe des Myriapodes
Classe des Insectes

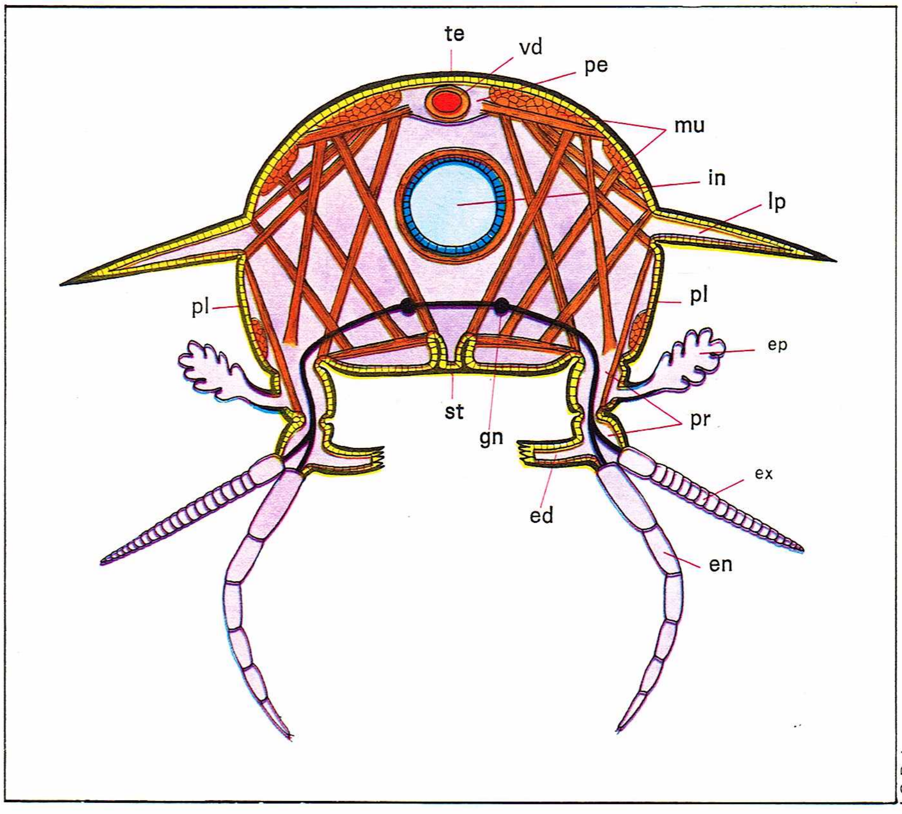

▼ ***Représentation schématique de la coupe transversale du thorax d'un Arthropode : te, tergite; vd, vaisseau dorsal; pe, cavité péricardique; mu, muscles; in, intestin; lp, lope pleural; pl, pleurite; ep, épipodite; pr, protopodite, ou sympodite; ex, exopodite; en, endopodite; ed, endite (lame masticatrice); gn, ganglion nerveux; st, sternite.***

▶ *Types divers d'appendices dans l'embranchement des Arthropodes. A) patte d'Insecte : ha, hanche ; tr, trochanter ; fe, fémur ; ti, tibia ; ta, tarse ; pt, prétarse ; B) appendice biramé de Crustacé ; C) chélipède, ou pince de Crustacé : pr, protopodite ; is, ischiopodite ; me, méropodite ; ca, carpopodite ; pp, propodite ; da, dactylopodite ; ex, exopodite.*

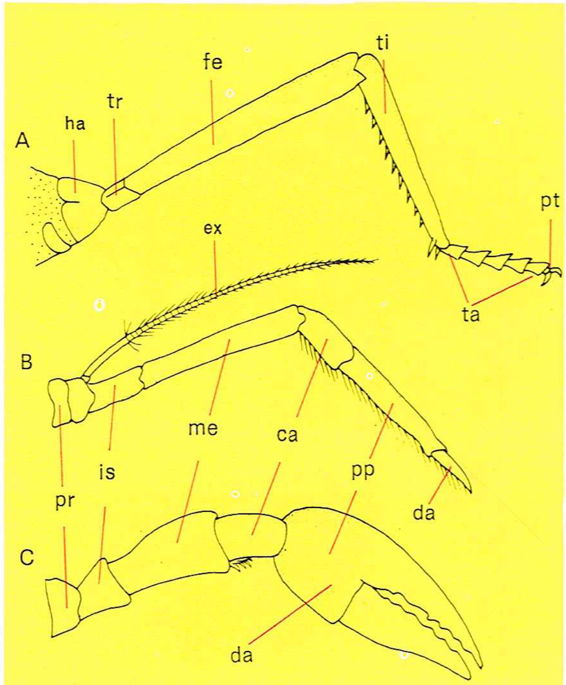

I.G.D.A.

primitif était fondamentalement de type biramé, composé d'une partie basilaire, triarticulée, le *sympodite,* et de deux rames multiarticulées, l'une interne, l'*endopodite,* l'autre externe, l'*exopodite.* Au cours de l'évolution, les appendices se sont différenciés et ont acquis une morphologie correspondant à leurs spécialisations respectives ; les uns ont conservé une fonction locomotrice, soit ambulatoire, soit natatoire, d'autres sont devenus sensoriels, masticateurs, préhensiles, respiratoires, etc. Dans la plupart des cas, la rame externe a disparu, la structure biramée n'étant plus actuellement observée que chez certains Crustacés. Les homologies que l'on peut rechercher chez tous les Arthropodes portent ainsi essentiellement sur la partie basilaire et sur la rame interne. Les soudures ou les divisions secondaires des articles, survenues au cours de l'évolution des différentes classes, rendent d'ailleurs difficile l'établissement d'homologies et les termes différents employés pour désigner les différents articles reflètent ces difficultés. Des correspondances sont généralement admises entre les articles des appendices des grandes classes d'Arthropodes. On distingue deux régions principales : un *coxite,* qui correspond au sympodite, et un *télopodite,* équivalent de l'endopodite (terme utilisé pour les Crustacés). Certains articles, comme la *précoxa,* ne sont pas individualisés chez les formes actuelles.

Par contre, il existe fréquemment des subdivisions secondaires : chez beaucoup d'Opilions (Arachnides) le tarse est formé d'un grand nombre de petits articles et, chez les Insectes, il peut en compter jusqu'à cinq. La segmentation typique est en général observée sur les pattes ambulatoires. Les appendices hautement spécialisés présentent des fusions qui réduisent considérablement le nombre des segments, mais on peut encore déceler certaines homologies : ainsi, la partie masticatrice de la mandibule des Crustacés correspond à une pièce coxale et le *palpe mandibulaire* au vestige d'un endopodite.

Parmi les différenciations des appendices, il en est une qui est visible chez de nombreux Arthropodes, c'est celle qui transforme une paire de pattes en *pinces* destinées à la capture ou à la contention des proies : chez les homards et les crevettes, le propode d'une ou de plusieurs paires de pattes thoraciques présente un prolongement latéral qui forme avec le dactyle une pince terminale. On observe des différenciations comparables chez les Pseudoscorpions et les Scorpions.

Le système nerveux, comme celui des Annélides, se compose d'un cerveau et d'une chaîne ganglionnaire ventrale. Le cerveau, situé dans la partie antérieure du corps, se divise en trois parties : le *protocérébron,* qui comprend des centres d'associations et les centres optiques ; le *deutocérébron,* qui innerve les antennules des Crustacés et les antennes des Myriapodes et des

Correspondance entre les segments des appendices dans les principales classes d'Arthropodes

Section de l'appendice	*Segment typique*	*Mérostomes*	*Arachnides*	*Crustacés*	*Myriapodes*	*Insectes*
coxite	*précoxa*	—	—	*(précoxa)*	—	*(subcoxa)*
	coxa	*coxa*	*coxa (ou hanche)*	*coxa*	*(subcoxa)*	*coxa*
	basis			*basis*	*coxa*	*(ou hanche)*
télopodite — *section fémorale*	*préischion*	—	—	*(préischion)*	—	—
	ischion	*préfémur*	*trochanter (ou préfémur)*	*ischion*	*trochanters (ou préfémur)*	*trochanter*
	mérus	*fémur*	*fémur*	*mérus*	*fémur*	*fémur*
télopodite — *section tibiale*	*carpe*	*(patelle) + tibia*	*patelle tibia*	*carpe*	*tibia*	*tibia*
	propode	*tarse*	*basitarse tarse*	*propode*	*tarse*	*tarse*
	dactyle	*post-tarse*	*apotèle (ou prétarse)*	*dactyle*	*prétarse*	*prétarse*

Insectes (il est peu développé ou absent chez les Chélicérates, qui n'ont pas d'antennes); le *tritocérébron*, formé de deux ganglions réunis par une commissure postœsophagienne, qui est, chez les Crustacés, le point de départ des nerfs des antennes, et, chez les Chélicérates, de ceux des chélicères. La chaîne nerveuse ventrale, unie par des connectifs au tritocérébron, comporte une paire de ganglions par segment; chaque ganglion émet deux paires de nerfs dorsaux, moteurs, et une paire ventrale, sensitive. Le *système stomogastrique* ou *sympathique*, connecté avec le tritocérébron, innerve la partie antérieure du tube digestif.

Organes des sens. Les Arthropodes peuvent percevoir les odeurs, les goûts, les vibrations, les propriétés du substratum, grâce à des soies et à des poils sensoriels différenciés. Les organes de la vision sont de deux types : des yeux simples, ou *ocelles*, et des yeux composés. L'ocelle se compose d'une cornée chitineuse formant le système optique et d'une assise de cellules rétiniennes entourées d'une couche de cellules pigmentaires qui peuvent sécréter un bâtonnet, le *rhabdomère*. La réunion des rhabdomères de plusieurs cellules contiguës forme un *rhabdome*. Les yeux composés comprennent un grand nombre d'éléments simples, ou *ommatidies*, jusqu'à vingt mille par œil chez les Insectes. Chaque ommatidie est formée d'une *cornéule* transparente, superficielle, d'un *cône*, ou cristallin, réfringent, de cinq à dix cellules rétiniennes qui sécrètent un *rhabdome* et se prolongent par des fibres nerveuses, ainsi que de cellules pigmentaires qui entourent l'ommatidie.

L'*appareil digestif* se compose de trois parties : l'intestin antérieur *(stomodéum)* et l'intestin postérieur *(proctodéum)* sont d'origine ectodermique, alors que l'intestin moyen *(mésentéron)* est une formation endodermique. L'intestin antérieur comprend généralement un pharynx et un œsophage et ceux-ci présentent souvent des différenciations qui leur permettent de remplir la fonction d'appareils de succion ou de trituration des aliments. A l'intestin moyen sont annexés des diverticules glandulaires *(cæcums)* dont les sécrétions ont un rôle digestif. Les tubes de Malpighi sont des organes excréteurs situés à la jonction des intestins moyen et postérieur, et présents chez presque tous les Arthropodes terrestres.

Appareil respiratoire. Les Arthropodes les plus primitifs et ceux dont la cuticule est très mince n'ont pas d'appareil respiratoire : chez eux, les échanges gazeux s'effectuent à travers les téguments. Cependant, chez la plupart des formes aquatiques, la respiration est assurée par des branchies, qui sont en général des différenciations de certains appendices. Quant aux Arthropodes terrestres, ils sont dotés d'organes respiratoires variés, suivant les groupes. Certains Arachnides ont des poumons, situés à l'intérieur de cavités du thorax et formés de lamelles empilées. Le plus souvent la respiration se fait par des trachées, invaginations tubulaires, souvent ramifiées, anastomosées, s'ouvrant par des *stigmates*.

Appareil circulatoire. Les Arthropodes ne possèdent pas un réseau vasculaire clos comparable à celui des Annélides ou des Vertébrés, ce qui est en rapport avec la réduction du cœlome chez les adultes. Il existe bien un cœur, qui est dorsal, et des artères, mais le sang qui sort de ces dernières se répand dans la cavité du corps, ou *hémocèle*, et baigne les organes. Il retourne dans un sinus péricardique par des sinus veineux, et pénètre dans le cœur par des ostioles. Le sang des Arthropodes est rouge, vert, bleu ou incolore, suivant la nature des pigments respiratoires; ceux-ci peuvent être de l'*hémoglobine*, ou fréquemment de l'*hémocyanine*.

Appareil excréteur. Les glandes excrétrices des Arthropodes représentent des vestiges du cœlome, qui est très réduit chez les adultes. Ce ne sont plus des néphridies métamériques comme chez les Annélides, mais des glandes localisées dans certains segments : *glandes antennaires* ou *glandes maxillaires* chez les Crustacés, *reins labiaux* ou *maxillaires* chez les Diplopodes, les Chilopodes et certains Insectes, *glandes coxales* chez les Chélicérates. Nous avons mentionné plus haut, à propos de l'appareil digestif, d'autres organes excréteurs, propres aux Arthropodes terrestres : les tubes de Malpighi.

Reproduction

La disposition métamérique primitive des gonades a presque disparu chez les Arthropodes actuels. Ces glandes sont paires ou réunies en un organe unique, et il n'y a plus trace de segmentation. Il y a toujours deux conduits génitaux, ou *gonoductes*, même si la gonade est impaire, mais ces conduits peuvent confluer dans une poche qui s'ouvre par un pore unique. Les orifices génitaux, qu'il y en ait deux ou un seul, sont situés à un niveau du corps qui varie suivant les groupes, et aussi, quelquefois, suivant le sexe. Chez les mâles, certains appendices de la région génitale sont souvent modifiés en organes copulateurs, ou *gonopodes*. D'autres appendices, éloignés de cette région, peuvent également jouer un rôle dans la copulation : c'est le cas, par exemple, des pédipalpes des Araignées et des antennules de certains Crustacés Copépodes. Les femelles possèdent parfois des appendices différenciés qui constituent un *ovipositeur*, ou *oviscapte*, utilisé au cours de la ponte. Les sexes sont séparés, sauf chez les Crustacés, où des groupes entiers sont hermaphrodites. On observe de nombreux cas de parthénogenèse cyclique ou géographique chez les Insectes, les Crustacés, les Myriapodes et les Arachnides.

Les Arthropodes sont ovipares, sauf quelques Insectes et Chélicérates (certains Scorpions et Acariens) qui sont vivipares. Les œufs, riches en vitellus, et d'assez grande taille en général, présentent une segmentation superficielle. Dans de rares cas, ils sont petits, pauvres en vitellus, et leur segmentation est alors totale. Chez la plupart des Chélicérates et chez certains Crustacés, le développement est direct, c'est-à-dire que l'Animal atteint une forme voisine de celle de l'adulte au cours de sa vie embryonnaire. Cependant, chez tous les autres Arthropodes, le jeune qui vient d'éclore est une larve qui a des caractères morphologiques et un mode de vie propres, souvent très différents de ceux de l'adulte. Après une métamorphose, ou après plusieurs stades larvaires séparés par des métamorphoses, l'organisme atteindra l'état adulte, caractérisé par le développement complet de l'appareil reproducteur.

Origine et évolution

Les Arthropodes ont vraisemblablement eu, au Précambrien, des ancêtres alliés aux Annélides. Cette parenté est attestée, non par des documents paléontologiques, puisque les deux embranchements se sont différenciés à une époque qui n'a pas laissé de fossiles reconnaissables, mais par de nombreuses preuves anatomiques et embryologiques, notamment la structure métamérique de la chaîne ganglionnaire ventrale, et la persistance de certains éléments d'origine cœlomique, comme les néphridies.

Au cours de l'évolution, les Arthropodes se sont séparés des Annélides en acquérant une cuticule chitineuse, des gonades non segmentées, des appendices articulés, en même temps que le cœlome se réduisait considérablement et que les cils vibratiles disparaissaient totalement. A cause de l'ancienneté de la différenciation des grands groupes d'Arthropodes, qui se traduit par l'absence de fossiles significatifs, l'établissement des rapports phylétiques à l'intérieur de l'embranchement est très incertain. On peut immédiatement en séparer les trois petits groupes sans doute indépendants, à caractères mixtes d'Annélide et d'Arthropode : Onychophores, Tardigrades et Pentastomides.

Quant aux trois sous-embranchements d'Arthropodes vrais, ils se sont différenciés avant le Cambrien. Le plus primitif, par la structure de la région céphalique et par la similarité de tous les appendices postoraux, dont aucun n'est masticateur, est celui des Trilobites. Il est éteint depuis la fin de l'ère primaire.

Les rapports des Trilobites avec les deux autres sous-embranchements sont toujours discutés. Cependant, on suppose généralement que ce sont les Chélicérates qui sont les plus proches des Trilobitomorphes et qu'ils pourraient dériver d'une souche commune.

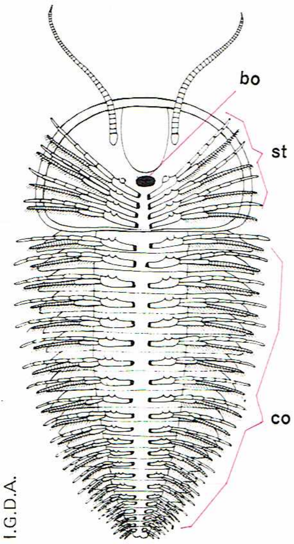

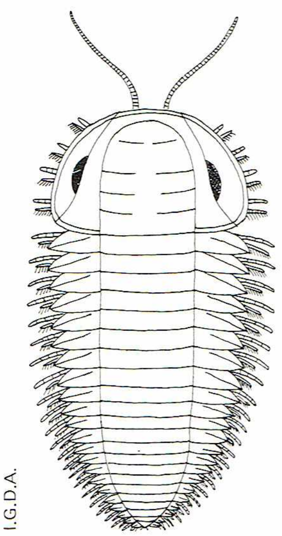

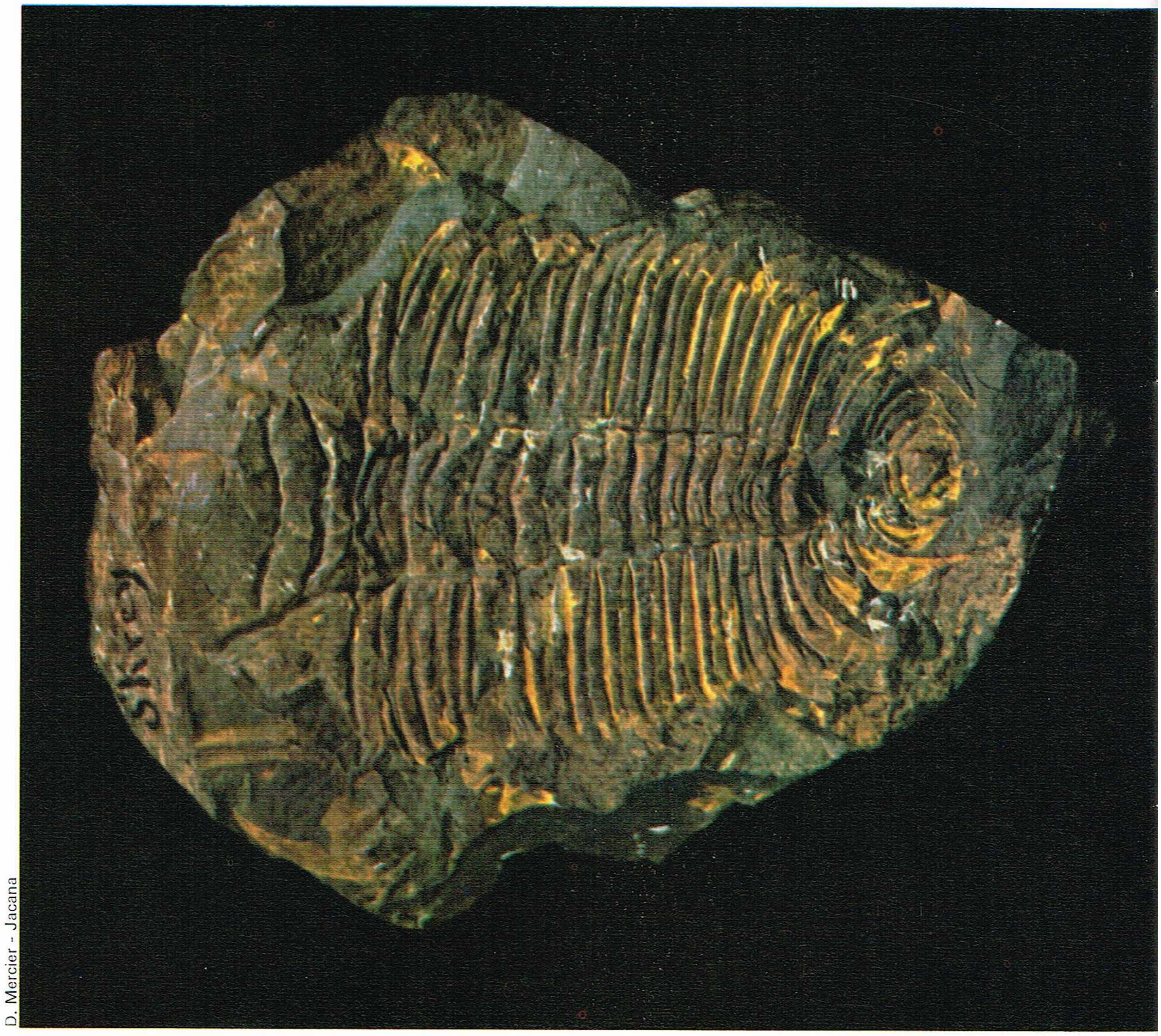

▲ En haut, schéma d'un Trilobite vu par sa face ventrale : bo, bouche; st, quatre paires de stomatopodes; co, cormopodes. En bas, représentation schématisée d'un Trilobite du Cambrien, vu par sa face dorsale.

▲▶ Un Trilobite du Cambrien : Paradoxites sp.

Les plus primitifs des Chélicérates sont les Mérostomes, marins, dont une famille s'est maintenue jusqu'à nos jours. Un autre ordre marin, celui des Gigantostracés, est apparu à l'Ordovicien. Avant que ce groupe ne s'éteigne, au Carbonifère, certains de ses représentants s'étaient adaptés à la vie terrestre et il est possible que les premiers Scorpions, puis les autres Arachnides, en soient issus, alors qu'une autre lignée poursuivait dans les océans une évolution indépendante et aboutissait aux Pycnogonides.

Les premiers Mandibulates étaient certainement des Arthropodes marins. A partir du Cambrien, ils ont évolué dans deux voies écologiques distinctes : les uns, restés dans le domaine marin, formaient la classe des Crustacés, alors que les autres, adaptés à la vie hors de l'eau, donnaient naissance aux diverses classes de Myriapodes. La souche des Insectes est sans doute l'une de ces classes, mais les opinions diffèrent à cet égard.

SYSTÉMATIQUE

L'embranchement des Arthropodes se divise en Trilobitomorphes, Chélicérates, et Mandibulates.

Les *Trilobitomorphes,* connus à l'état fossile seulement, sont caractérisés par la structure primitive de la tête; celle-ci est formée de cinq segments qui sont recouverts d'un bouclier semi-circulaire, et dont le premier est doté d'une paire d'antennes, alors que les quatre autres portent chacun une paire d'appendices biramés. Les segments suivants, en nombre variable suivant les espèces, sont pourvus d'appendices biramés, identiques à ceux de la région céphalique.

Chez les *Chélicérates,* la tête n'est pas individualisée et il n'y a ni antennes ni appendices céphaliques spécialisés pour la trituration des aliments; il existe par contre une paire de *chélicères* qui occupent une position préorale et ont une fonction préhensile. Les Chélicérates comprennent trois classes : les *Mérostomes,* marins, en grande partie éteints, les *Arachnides,* terrestres, à de rares exceptions près, et les *Pycnogonides,* petit groupe marin aberrant.

Les *Mandibulates,* ou *Antennates,* ont une tête distincte, une ou deux paires d'antennes et trois paires d'appendices buccaux différenciés. Ils se répartissent en trois classes : les *Crustacés,* en majorité aquatiques, les *Myriapodes* et les *Insectes,* qui sont, au contraire, des Animaux essentiellement terrestres.

TRILOBITOMORPHES

On réunit dans le sous-embranchement des Trilobitomorphes la classe des Trilobites ainsi que quelques groupes également éteints dont la position systématique est douteuse. Les Trilobites représentent un groupe important d'Arthropodes marins, qui a connu son extension maximale au Cambrien, pour disparaître au cours du Permien. Le corps d'un Trilobite, déprimé dorsoventralement, se compose de la tête, ou *céphalon,* d'un thorax pluriarticulé et du *pygidium.* La face dorsale est divisée en trois parties par deux sillons longitudinaux (d'où le nom de Trilobite).

Le *céphalon* est toujours composé de cinq segments et recouvert d'un bouclier semi-circulaire prolongé

Ph. Frédéric - Jacana

▲ *Les Mérostomes sont des Arthropodes Chélicérates marins, à respiration branchiale, en grande partie éteints. Ici, l'une des rares espèces représentées dans la faune actuelle, la limule* **Tachypleus gigas**

postérieurement par les *pointes génales*. La région médiane, ou *glabelle*, porte plusieurs paires de sillons latéraux et, souvent, des facettes et des épines. De part et d'autre de la glabelle se trouvent les *joues ;* chacune de celles-ci est divisée par une ligne sinueuse, ou *suture faciale*, en une *joue fixe*, soudée à la glabelle, et en une *joue mobile*, sur laquelle est situé un gros œil composé. La carapace qui recouvre la tête s'étend par-dessous, en formant une large plaque convexe, l'*hypostome*, qui couvre la bouche. De chaque côté de l'hypostome s'insère une antenne multiarticulée. Chacun des quatre segments postérieurs porte une paire d'appendices biramés dont la rame interne semble avoir un rôle locomoteur, alors que la rame externe est pourvue de lamelles pectinées qui seraient des branchies.

Le *thorax* est formé de deux à quarante-quatre segments. Chaque tergite comprend une partie médiane renflée et deux *plèvres* latérales qui peuvent se prolonger par des *pointes pleurales*. Ventralement, sur chaque segment, se trouve une paire d'appendices semblables à ceux de la région céphalique.

Le *pygidium* est constitué par un nombre variable de segments qui, contrairement à ceux du thorax, sont soudés, mais sont aussi armés de pointes latérales; le dernier segment peut se prolonger en une pièce terminale plus ou moins aiguë, le *telson*.

On ne connaît pratiquement rien de l'anatomie interne des Trilobites. En revanche, on sait que le développement larvaire comportait de nombreuses mues et que l'Animal passait par une série de phases marquées par l'accroissement progressif du nombre des segments thoraciques. Le plus grand Trilobite connu mesurait 75 cm de longueur, mais cette taille était exceptionnelle et, le plus souvent, les dimensions de l'Animal étaient comprises entre 3 et 10 cm. Tous les Trilobites étaient marins, mais on peut déduire de leurs particularités morphologiques que leurs modes de vie étaient variés : certaines espèces étaient benthiques et fouisseuses, alors que d'autres devaient nager et mener une vie planctonique. La plupart étaient littorales, mais on suppose que les espèces à gros yeux vivaient à grande profondeur. On a décrit plus de quatre mille espèces de Trilobites, qui sont rangées dans de nombreuses familles, groupées en quatre ordres. La classification est fondée sur la forme et l'ornementation du céphalon et du pygidium, ainsi que sur le nombre, la forme et l'ornementation des segments thoraciques.

CHÉLICÉRATES

Les quelques soixante mille espèces actuelles ou éteintes qui constituent cet important sous-embranchement des Arthropodes présentent un caractère commun : elles portent dans la région antérieure de la tête une paire de *chélicères*, appendices comptant un petit nombre d'articles et à fonction préhensile. La possession de ces appendices est le lien apparent entre les Chélicérates, et les oppose aux autres Arthropodes, qui en sont dépourvus, mais sont dotés d'antennes. D'autres caractères, concernant la structure générale du corps, confèrent une unité réelle à ce groupe, par ailleurs diversifié dans sa morphologie et sa biologie.

Le corps des Chélicérates est divisé en deux grandes régions physiologiquement spécialisées : le *prosome*,

▲ ***Seuls représentants vivants de l'ordre des Xiphosures, les limules (ici* Limulus polyphemus*) vivent dans deux régions géographiques distinctes : Indo-Pacifique d'une part, et côtes atlantiques d'Amérique du Nord d'autre part. L'Animal acquiert sa forme adulte (50 à 60 cm de long) après une dizaine d'années marquées de mues successives.***

Milwaukee - Jacana

en général non segmenté, porte les appendices à fonctions locomotrices, préhensiles, masticatrices et sensorielles; l'*opisthosome*, ou abdomen, souvent segmenté, dont les appendices sont absents ou très modifiés et peu nombreux, est en partie occupé par les organes de digestion et de reproduction.

La question des rapports phylétiques entre les différents ordres de Chélicérates est encore fortement controversée. Nous distinguerons ici trois classes : les Mérostomes, les Arachnides et les Pycnogonides, que certains considèrent comme un sous-embranchement distinct.

MÉROSTOMES

Les Mérostomes sont des Chélicérates aquatiques, à respiration branchiale. Ils sont représentés par de nombreuses formes fossiles et par un petit nombre d'espèces vivantes appartenant à une famille unique. On distingue plusieurs ordres, dont les principaux sont les Xiphosures et les Gigantostracés.

Ordre des Xiphosures

Le corps des limules, seuls représentants actuels d'un groupe apparu au Dévonien et dont on connaît un nombre élevé de formes fossiles, se divise en un prosome et un opisthosome sur lequel s'articule un long aiguillon, le telson. Le prosome est protégé par une large carapace dorsale semi-circulaire qui se prolonge par des pointes postérieures; fortement bombée, formée d'une couche chitineuse épaisse et de couleur verdâtre, cette carapace est ornée de trois crêtes longitudinales et porte deux yeux simples, médians, et deux yeux composés, latéraux. Ventralement sont insérées six paires d'appendices, les chélicères, à trois articles, et cinq paires ambulatoires, à sept articles. Tous les appendices, sauf ceux de la dernière paire, se terminent en pince.

L'opisthosome n'est pas segmenté dorsalement mais est armé de six paires d'épines mobiles latérales. Sur sa face ventrale, on observe une paire d'appendices non segmentés, les *chilaria,* situés en arrière de la bouche, ainsi que l'opercule génital, plaque impaire qui recouvre les deux orifices génitaux, et cinq paires de pattes foliacées pourvues de branchies.

La nourriture, constituée surtout par des Mollusques, est saisie par les chélicères, triturée par les lames maxillaires des pattes, puis passe dans un gésier d'où sont régurgités les fragments de coquilles. La digestion s'effectue dans de volumineux cæcums qui débouchent dans l'intestin. L'anus s'ouvre à la base du telson.

L'appareil circulatoire comprend un cœur dorsal doté de huit paires d'ostioles, des artères et un système de lacunes, qui permet la circulation du sang et son oxygénation au niveau des branchies.

Le système nerveux est formé d'une masse cérébrale qui se prolonge en un collier périœsophagien englobant tous les ganglions du prosome et les deux premiers ganglions de l'opisthosome; la chaîne ventrale réunit cinq ganglions. Les organes des sens sont représentés par trois paires d'yeux, dont une ventrale, non fonctionnelle chez l'adulte, et un organe frontal à rôle olfactif.

Les sexes sont séparés et les œufs sont déposés dans le sable par les femelles, puis fécondés par les mâles. Après l'éclosion, la limule passe par une série de stades larvaires, dont certains sont dits *trilobitiformes* en raison de leur ressemblance avec certains Trilobites. L'Animal acquerra ensuite la forme adulte, puis, après une série de mues qui s'étaleront sur une dizaine d'années, atteindra sa taille maximale (50 à 60 cm).

Les cinq espèces actuelles de limules vivent dans deux régions géographiques séparées, d'une part dans l'Indo-Pacifique (mer de Chine, Indonésie, Nouvelle-Guinée), et, d'autre part, le long des côtes atlantiques d'Amérique du Nord, où l'on rencontre l'espèce la mieux connue, *Limulus polyphemus*. Les limules fréquentent les eaux littorales, marchant sur le sable, dans lequel elles peuvent s'enfouir rapidement; elles sont aussi capables de nager rapidement, mais toujours dans une curieuse position, le ventre en l'air.

Ordre des Gigantostracés

Les Gigantostracés, connus seulement à l'état fossile, sont les plus grands des Arthropodes puisque certains atteignent une taille supérieure à 2 m. Le prosome, non segmenté, est recouvert d'un bouclier qui porte deux gros yeux; les appendices comprennent une paire de chélicères et cinq paires ambulatoires de forme et de dimensions variables suivant les espèces. L'opisthosome compte douze segments, dont les cinq premiers sont pourvus de feuillets branchiaux; le telson terminal est en forme de palette ou d'aiguillon rappelant celui des Scorpions, d'où le nom de « scorpions de mer » qui désigne parfois ces Animaux.

Les deux cents espèces de Gigantostracés décrites ont vécu pendant l'ère primaire, du Silurien au Permien. La plupart étaient des formes marines ou saumâtres, mais certaines, parmi les plus récentes, ont été trouvées dans des dépôts lacustres ou même terrestres.

D. Giussani

▲ *Ce Scorpion* **(Euscorpius italicus)** *appartient au plus ancien groupe connu que comptent les Arachnides.*

ARACHNIDES

La classe des Arachnides, tout en présentant une incontestable unité, comprend des organismes d'aspects fort divers, tels que les Araignées, les Scorpions ou les tiques, sans parler de bien d'autres formes moins familières. Très variables par l'apparence, les Arachnides ne le sont pas moins par la taille, qui ne dépasse pas 0,1 mm chez certains Acariens, alors qu'elle atteint 20 cm chez les Scorpions africains du genre *Pandinus*. Si la grande majorité des quelques cinquante mille espèces d'Arachnides actuellement connues mène une vie libre sur la terre ferme, dans les milieux les plus variés, il existe des exceptions : certaines lignées de l'ordre des Acariens se sont adaptées au milieu aquatique soit en eau douce, soit en mer, et d'autres sont parasites.

Les plus anciens Arachnides trouvés à l'état fossile sont des Scorpions qui datent du Silurien, c'est-à-dire de cinq cents millions d'années environ. Des Acariens et des Araignées ont été trouvés dans des couches datant du Dévonien alors que, au Carbonifère, la plupart des ordres actuels étaient représentés. Pendant longtemps, les Arachnides ont été identifiés aux Insectes et Linné lui-même considérait encore qu'il s'agissait d'une seule et même classe. C'est Lamarck qui, en 1802, a distingué les Insectes vrais des Insectes sans ailes et sans métamorphoses, et proposé pour ces derniers le nom d'Arachnides; quant aux Myriapodes et aux Pycnogonides, alors rangés dans cette classe, ils allaient en être séparés par la suite.

Organisation générale

Les Arachnides ont un corps divisé en deux régions, le *prosome,* ou céphalothorax, et l'*opisthosome,* ou abdomen; ils sont dépourvus d'antennes et caractérisés par la présence d'yeux simples et de six paires d'appendices sur le prosome, la première étant désignée sous le nom de chélicères. Terminées par une pince ou par une griffe, les chélicères sont avant tout préhensiles, mais peuvent avoir d'autres fonctions, par exemple, chez le mâle, celle de transférer la masse spermatique dans la chambre génitale de la femelle. Les appendices de la deuxième paire sont les pédipalpes, ou pattes-mâchoires, dont l'article de base (la hanche, ou *coxa*) peut être fortement développé et servir à la mastication. Leur aspect varie beaucoup suivant les groupes; dans certains cas, ils sont grêles et se terminent par un ongle, dans d'autres, chez les Scorpions notamment, ce sont des pinces puissantes à fonctions préhensile, tactile et sexuelle. Les quatre paires suivantes ont une fonction ambulatoire, mais l'une ou plusieurs d'entre elles peuvent être transformées en organes tactiles, ou jouer un rôle dans la reproduction ou dans le filage de la soie.

A. Margiocco

◀ *Les Arachnides sont dépourvus d'antennes et se caractérisent par la présence de six paires d'appendices dont la première, terminée soit par une pince, soit par une griffe, porte le nom de chélicères. Ici, chélicères d'Araignée.*

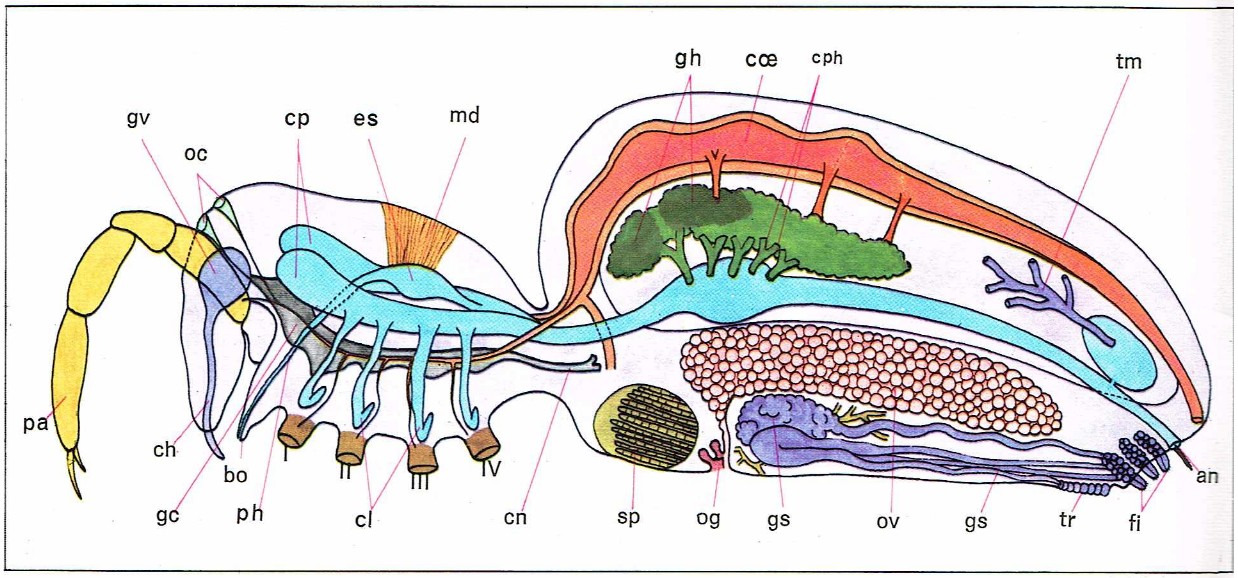

I.G.D.A.

▼ *La majorité des Araignées, comme cette lycose (à gauche), possède huit yeux placés en deux ou trois lignes parallèles, mais on observe d'assez nombreuses exceptions quant au nombre et à la disposition. Représentation schématique en coupe longitudinale d'un poumon d'Araignée (à droite) : st, stigmate; la, lamelles.*

A. Margiocco

L'abdomen est soit largement uni au céphalothorax, soit séparé de ce dernier par un pédoncule plus ou moins étroit. Il ne porte pas de véritables appendices; cependant certaines structures, comme les peignes des Scorpions et les filières des Araignées, ont une origine appendiculaire.

Le *système nerveux* comprend principalement deux centres complexes : le cerveau, situé dans la partie antérieure du céphalothorax, au-dessus de l'œsophage, et la masse sous-œsophagienne, formée par la concentration des ganglions pairs de la chaîne ventrale observés chez la plupart des autres Arthropodes.

Organes des sens. Les yeux sont simples et en nombre variable, mais l'acuité visuelle est bien inférieure à celle des Vertébrés. En revanche, le sens tactile, servi par des soies sensorielles et par d'autres organes spécialisés, est très développé, comme nous le verrons plus loin, à propos de certains ordres remarquables à cet égard.

Appareil digestif. La bouche donne accès à l'estomac par l'intermédiaire d'un œsophage étroit. Le plus souvent la nourriture est broyée, triturée et en partie digérée entre les hanches des pédipalpes, grâce à la régurgitation de salive et de sucs intestinaux, puis aspirée. La digestion se poursuit dans l'intestin, et les substances excrémentielles sont acheminées, à travers un tube rectal, vers un anus terminal.

Appareil excréteur. L'excrétion est réalisée par des glandes coxales ou par des tubes de Malpighi. Le système glandulaire peut aussi comprendre des glandes séricigènes, comme chez les Araignées et les Pseudoscorpions, et aussi des glandes à venin comme dans les deux groupes précédents et chez les Scorpions.

L'*appareil circulatoire* est constitué par un cœur tubulaire dorsal et par des artères qui s'ouvrent dans des sinus. Les organes de la respiration sont des trachées ou des poumons, dans lesquels le sang s'oxygène avant d'être ramené vers le cœur par un réseau veineux.

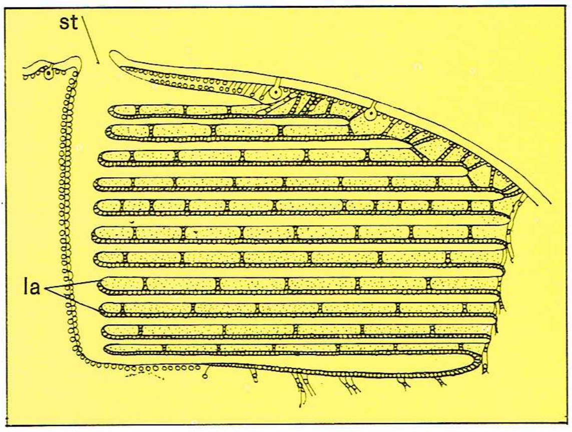

I.G.D.A.

Appareil reproducteur. Les sexes sont toujours séparés et il existe souvent un véritable dimorphisme qui permet de distinguer les mâles des femelles. La fécondation est rarement directe. Elle s'effectue plutôt suivant deux autres modes. Chez les Scorpions et les Pseudoscorpions le mâle construit un appareil temporaire, le *spermatophore,* alors que chez les Araignées il transporte directement le sperme dans la chambre génitale de la femelle à l'aide des chélicères ou d'un organe différencié situé sur les palpes.

SYSTÉMATIQUE

La classe des Arachnides comprend seize ordres, dont onze possèdent des représentants vivant actuellement, à savoir : les Scorpions, les Solifuges, ou Solpugides, les Pseudoscorpions, ou Chernètes, les Ricinules, ou Podogones, les Palpigrades, les Uropyges, ou Télyphonides, les Schizomides, ou Tartarides, les Amblypyges, ou Phrynes, les Aranéides, ou Araignées, les Opilions, ou Phalangides, et les Acariens.

Classe des ARACHNIDES

- *Ordre des Scorpions*
- *Ordre des Solifuges*
- *Ordre des Pseudoscorpions*
- *Ordre des Ricinules*
- *Ordre des Palpigrades*
- *Ordre des Uropyges*
- *Ordre des Schizomides*
- *Ordre des Amblypyges*
- *Ordre des Araignées*
- *Ordre des Opilions*
- *Ordre des Acariens*

Ordre des Scorpions

Les Scorpions sont caractérisés par la division de l'abdomen en deux régions distinctes : un *préabdomen* large, composé de sept segments, et un *postabdomen* étroit, la queue, mobile seulement dans le plan vertical et formée de six segments, dont le dernier est une vésicule à venin.

Sur le prosome s'articulent les chélicères, les pédipalpes et quatre paires de pattes ambulatoires. Les pédipalpes sont particulièrement robustes; la pince qui les termine comprend deux articles : l'un, fortement renflé, se prolonge en avant par un doigt fixe, alors que l'autre, plus étroit, constitue le doigt mobile. Les quatre pattes ambulatoires, dirigées latéralement, sont dotées d'ongles plus ou moins robustes.

L'orifice génital est situé du côté ventral, sur le premier segment de l'abdomen. Sur le second segment, juste en arrière des dernières pattes, on observe les deux *peignes,* organes dont il sera question plus loin. Sur les segments suivants s'ouvrent les quatre paires de poumons. Quant à l'anus, il est situé sur le bord postérieur du cinquième segment du postabdomen.

Les peignes sont les appendices les plus caractéristiques des Scorpions : ils consistent en une pièce transverse sur l'un des côtés de laquelle s'insèrent des lamelles en nombre variable et généralement imbriquées.

Le système nerveux diffère de celui de la plupart des autres Arachnides par la présence de sept ganglions, qui forment une chaîne abdominale distincte.

Les organes tactiles sont bien développés : les *trichobothries* (poils auditifs) disposées sur différentes régions du corps, suivant un arrangement caractéristique de la famille et parfois de l'espèce, perçoivent les vibrations de l'air. Les peignes richement innervés sont sans doute aussi des organes tactiles, mais on considère qu'ils ont en outre un rôle d'équilibration. Le nombre des yeux situés sur la carapace n'est pas uniforme : il y a toujours une seule paire médiane, mais le nombre des paires latérales varie de trois à cinq. La vision est médiocre et c'est surtout par leurs soies sensorielles que les Scorpions détectent leurs proies.

Beaucoup de Scorpions sont dotés d'*appareils stridulatoires*, qui se trouvent sur les hanches des pédipalpes, sur les chélicères ou sur les premiers segments de la queue.

L'appareil respiratoire est constitué par quatre paires de poumons. Quant aux systèmes circulatoire, digestif et excréteur, ils sont du type habituel chez les Arachnides.

◀ Page ci-contre, en haut, coupe schématique de l'organisation interne d'une Araignée : gv, glande à venin; oc, ocelle; cp, cæcum prosomien; es, estomac; md, muscle dilatateur de l'estomac; gh, glande hépatique; cœ, cœur; chp, canaux hépatiques; tm, tubes de Malpighi; pa, patte-mâchoire, ou pédipalpe; ch, chélicère; gc, ganglion cérébraux; bo, bouche; ph, pharynx; cl, cæcums latéraux; cn, chaîne nerveuse; sp, sac pulmonaire; og, orifice génital; gs, glandes séricigènes; ov, ovaires; tr, trachée; fi, filières; an, anus.

A. Allegri

A. Margioccc

◀ A gauche, sur cet exemplaire de Scorpion européen, on notera les pédipalpes très robustes et la pince qui les termine, prolongée en avant par un doigt fixe et par un autre plus étroit et mobile. A droite, détail des peignes, organes caractéristiques des Scorpions. Ils sont situés sur le second segment de l'abdomen, juste en arrière des dernières pattes.

▶ *A gauche, l'appareil venimeux des Scorpions est situé dans la partie terminale de la queue près de la pointe de l'aiguillon. A droite, « danse nuptiale » d'un couple d'*Euscorpius germanus*. Les Scorpions sont en général ovovivipares, et les jeunes auxquels la femelle donne naissance restent accrochés sur son dos et ne l'abandonnent qu'après la première mue.*

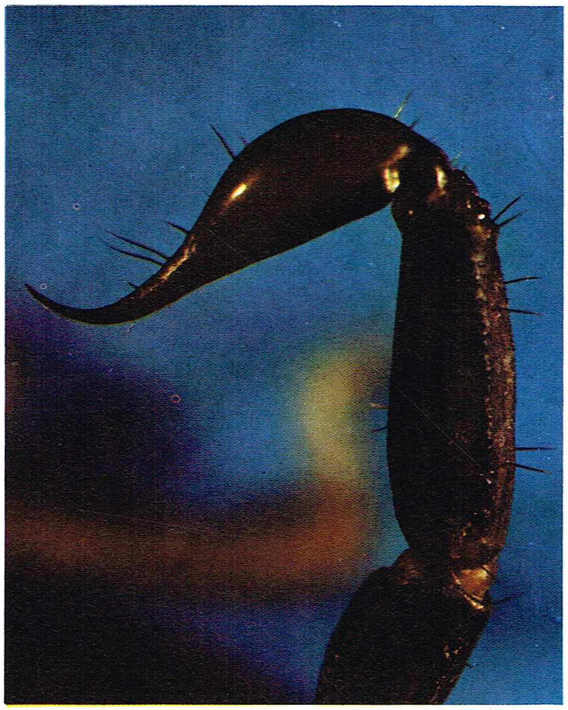

A. Margiocco

A. Margiocco

Les Scorpions vivent dans les régions arides et chaudes et sont particulièrement bien représentés dans les contrées désertiques. De mœurs nocturnes, ils se tiennent pendant le jour sous les pierres, dans des anfractuosités ou dans des cavités profondes creusées dans le sable. Ils évitent ainsi la chaleur du soleil et les risques de déshydratation.

Ils se nourrissent exclusivement d'Animaux vivants qu'ils attendent, à l'affût, ou qu'ils rencontrent sur leur chemin. Avertis de la présence de la proie par leurs soies tactiles, ils rabattent vivement leur queue vers l'avant, par-dessus le corps, et piquent la victime de leur aiguillon venimeux. Ils la dilacèrent ensuite avec les chélicères et en sucent les parties comestibles.

Les Scorpions ont une mauvaise réputation : ils possèdent en effet un appareil venimeux, situé dans la partie terminale de la queue et composé d'une glande double qui s'ouvre des deux côtés, près de la pointe de l'aiguillon. Le venin agit comme le curare, avec une efficacité très variable suivant les espèces. Celles que l'on rencontre en Europe sont peu dangereuses pour l'homme. Par contre, la piqûre de nombreuses formes tropicales peut causer des troubles graves, et même, lorsqu'il s'agit de personnes affaiblies ou d'enfants, la mort. Sur les proies habituelles et particulièrement les Insectes, l'effet est presque toujours mortel ou tout au moins paralysant. On préconise comme premier remède contre les piqûres de Scorpions l'application de compresses d'hypochlorite de calcium à 1/60 ou de permanganate de potasse à 1 %. Dans les régions où les piqûres de Scorpions représentent un danger sérieux, en Afrique et en Amérique du Sud par exemple, on utilise des sérums antivenimeux.

La légende selon laquelle le Scorpion, enfermé dans un cercle de feu, se donne la mort avec son propre aiguillon, est dénuée de tout fondement. La vérité est que l'Animal, sous l'effet de la chaleur et de la terreur, peut se contorsionner de façon désordonnée et heurter ainsi avec violence son céphalothorax avec la pointe de l'aiguillon.

Le comportement sexuel des Scorpions est remarquable. A l'époque de la reproduction, le mâle saisit les pinces de la femelle à l'aide de ses propres pinces et l'entraîne dans une promenade ou dans une danse nuptiale dont les figures sont caractéristiques de l'espèce. A un moment donné, le mâle attire sa partenaire au-dessus d'un *spermatophore,* sorte de vase à long pied qu'il a construit et collé sur le sol, et dans lequel est déposé le sperme ; il la maintient dans cette position jusqu'à ce que le sperme se trouve injecté dans la chambre génitale de la femelle. Dans certains cas, la pariade se termine mal pour l'époux, qui est dévoré par sa compagne. Les Scorpions sont ovovivipares, c'est-à-dire que les jeunes auxquels la femelle donne naissance se sont développés à l'intérieur de l'œuf. Ces jeunes restent accrochés sur le dos de leur mère pendant quelques jours et ne l'abandonnent qu'après une première mue.

Les sept cents espèces de Scorpions actuellement connues se répartissent en dix-sept familles, dont certaines ne sont représentées que par des formes fossiles. La plus ancienne, qui vivait au Silurien, était dépourvue d'ongles et de poumons et on présume qu'elle était aquatique ; elle était, par ailleurs, fort semblable aux formes actuelles. Celles-ci se rencontrent entre 40° et 50° de latitude nord et 35° et 40° de latitude sud. Elles sont rares en altitude, encore qu'on en ait signalé jusqu'à 3 800 m, dans le Cashmire. Parmi les espèces à venin mortel, on peut citer *Androctonus australis* d'Afrique du Nord et *Centruroides noxius* du Mexique. Les géants du groupe sont les *Pandinus* africains qui atteignent la taille de 20 cm. A l'inverse, les *Microbuthus* du Sénégal et de Somalie ne mesurent pas plus de 1,5 cm. En France, dans les régions chaudes du Midi, on rencontre *Euscorpius carpathicus, Euscorpius flavicaudis* et *Buthus occitanus,* dont la piqûre peut être douloureuse mais ne présente pas plus de gravité que celle d'une guêpe. Dans les grottes des Pyrénées orientales vit une espèce aveugle, *Belisarius xambeni*.

A. Margiocco

▶ Galeodes, *de l'ordre des Solifuges, dont le corps est entièrement recouvert de poils, porte des chélicères en forme de pinces puissantes armées de fortes dents, et ornées sur la face interne de stries constituant un appareil stridulant.*

A. Margiocco

◀ Les **Galeodes** mesurent de 4 à 5 cm et sont abondants en Afrique du Nord, en Asie Mineure, au Turkestan et dans le Caucase. Ils se caractérisent par des pédipalpes allongés se terminant par des sortes de ventouses qui facilitent leur déplacement sur les surfaces lisses.

Ordre des Solifuges, ou Solpugides

Les Solifuges sont caractérisés par leurs énormes chélicères, leurs pédipalpes allongés, semblables aux pattes ambulatoires, et par la segmentation du prosome et de l'opisthosome qui est ovale. Leur taille varie de 10 à 60 mm environ ; leur corps est entièrement recouvert de poils.

Au bord antérieur du céphalothorax se trouvent deux yeux, chacun étant précédé d'une longue soie. Les chélicères forment des pinces ; la branche supérieure, fixe, et l'inférieure, mobile, sont armées de fortes dents, alors que des stries de la face interne constituent un appareil stridulant. Les pédipalpes ont des hanches dilatées adaptées à la trituration des aliments et se terminent par des sortes de ventouses grâce auxquelles l'Animal peut se déplacer sur des surfaces très lisses. Les pattes ambulatoires sont longues et grêles et ont aussi une fonction tactile. Sur les hanches de la dernière, de curieux organes, les *malléoles,* ou *raquettes,* ont probablement un rôle sensoriel.

L'abdomen est composé de dix ou onze segments ; sur le second s'ouvre l'orifice génital, pourvu de lèvres mobiles qui permettent son obturation. Il existe une paire de stigmates respiratoires à la base des troisièmes pattes thoraciques et deux ou trois paires sur l'abdomen.

Mâles et femelles se ressemblent beaucoup, mais les premiers sont cependant toujours reconnaissables par la présence, sur la face interne des chélicères, d'un flagelle dont la forme est constante dans une espèce donnée. Au moment de l'accouplement, le mâle saisit la femelle, qui paraît tomber dans un état d'hypnose, par le milieu du corps ; il dépose alors sur le sol une masse spermatique qu'il ramasse avec ses chélicères et qu'il introduit dans l'orifice génital de sa compagne. La femelle fécondée creuse un terrier qui peut atteindre 25 cm de long ; elle y dépose de cinquante à cent œufs, puis reste immobile à côté d'eux. L'éclosion a lieu quelques jours après. Les jeunes restent inertes pendant deux à trois semaines, puis subissent une mue et se dispersent alors avec agilité.

Les Solifuges habitent à peu près exclusivement les régions désertiques et les steppes tropicales et subtropicales de l'ancien et du nouveau continent. En Afrique du Nord, on les nomme les « scorpions du vent », car ils seraient les annonciateurs des bourrasques et des tempêtes. De mœurs nocturnes, ils se meuvent avec vélocité dès le crépuscule, pédipalpes, pattes de la première paire et abdomen relevés. Ils sont attirés par la lumière et pénètrent volontiers dans les habitations et sous les tentes. C'est à tort cependant qu'ils sont redoutés, car ils ne possèdent pas de glandes venimeuses. Ils chassent les Insectes et les petits Reptiles qu'ils dévorent vivants, tenant leur proie dans l'une des chélicères et la dilacérant de l'autre.

On connaît environ sept cents espèces de Solifuges, réparties en dix familles. Les *Galeodes,* souvent de couleur jaune, mesurent 4 à 5 cm et sont abondants en Afrique du Nord, en Asie Mineure, au Turkestan et dans le Caucase jusqu'à 1 900 m d'altitude. Les *Solpuga* comptent de nombreuses espèces africaines. Le petit *Gluvia dorsalis* ne dépasse guère 20 mm de long ; son corps jaune brunâtre est strié de noir ; il vit dans le sud de l'Espagne, où on le nomme l' « araignée du soleil », car, à l'inverse de la plupart des autres Solifuges, ses mœurs sont diurnes. Les espèces américaines, comme celles des genres *Eremobates* et *Ammotrechus,* sont relativement moins nombreuses, et de plus petite taille que celles qui vivent sur le continent africain.

Ordre des Pseudoscorpions, ou Chernètes

C'est surtout à cause de l'aspect de leurs pédipalpes, qui se terminent, comme chez les Scorpions, par de fortes pinces, que ces petits Arachnides ont reçu le nom sous lequel on les désigne habituellement. Cependant, la ressemblance est limitée à la région antérieure du corps puisque les Pseudoscorpions n'ont pas de post-abdomen.

Le céphalothorax est recouvert d'une carapace indivise sur laquelle on trouve, près des angles antérieurs, une ou deux paires d'yeux régressés qui, parfois même, font complètement défaut chez bon nombre d'espèces.

L'abdomen, largement uni au céphalothorax, est formé de douze segments, chacun étant marqué sur la face dorsale par une pièce transversale chitinisée. Les deux articles des chélicères forment une pince dont la branche inférieure est mobile et porte une petite filière, la *galea,* à l'extrémité de laquelle s'ouvre l'orifice d'une glande séricigène. A la base du doigt fixe, un groupe de crins raides, ou *flagellum,* aurait un rôle nettoyeur. Les pattes-mâchoires sont très développées et renferment des glandes à venin qui débouchent à l'extrémité des doigts. Les quatre paires de pattes ambulatoires se terminent par deux ongles qui portent parfois une sorte de ventouse adhésive, l'*areolium*.

Les trachées respiratoires s'ouvrent sur le troisième et le quatrième segment abdominal, par deux paires de stigmates, alors que l'orifice génital est situé sur le second segment. Au voisinage de cet orifice, on observe, chez le mâle de certaines espèces, des organes érectiles dont la fonction n'est pas encore connue : ce sont les *organes en cornes de bélier*.

Les Pseudoscorpions vivent dans des milieux très variés. Beaucoup préfèrent les lieux obscurs et on les trouve sous les pierres, sous les écorces et les feuilles mortes, dans les Mousses. Certains recherchent les

A. Margiocco

◀ **Neobisium doderoi,** comme tous les Pseudoscorpions, se caractérise par un corps dépourvu de postabdomen. Le genre **Neobisium** compte plus de soixante-quinze espèces, dont certaines sont adaptées à la vie sur les rivages marins.

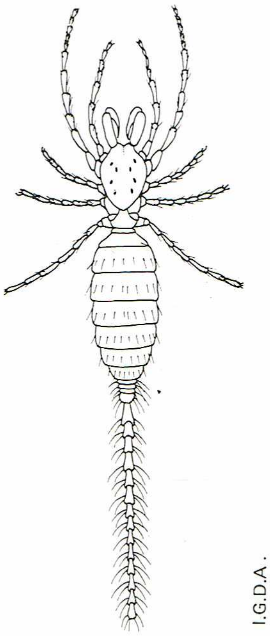

I.G.D.A.

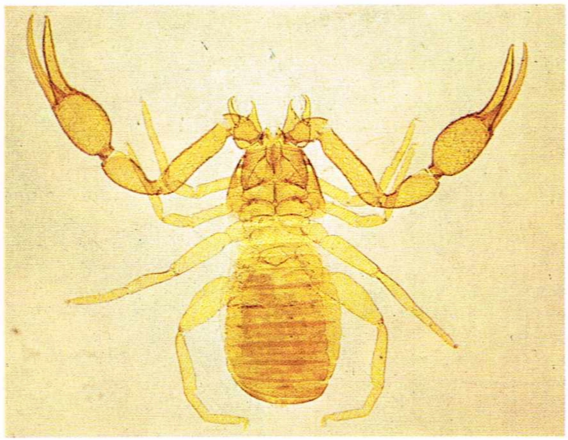

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *A gauche, un Palpigrade du Bassin méditerranéen,* **Koenenia mirabilis** *(femelle), espèce découverte en Sicile par Grassi en 1885. On notera la présence d'un flagelle terminal multiarticulé. A droite,* **Chelifer** *appartient à l'un des genres les plus importants de l'ordre des Pseudoscorpions. Ceux-ci sont très largement distribués dans le monde.*

milieux humides; d'autres, au contraire, ne fréquentent que des endroits très secs. Quelques-uns sont abondants dans les constructions humaines : granges, étables, maisons, alors que d'autres sont exclusivement cavernicoles. Carnivores, ils s'attaquent à des proies vivantes, en général de très petits Insectes, qu'ils détectent à l'aide de leurs nombreuses soies sensorielles. Pendant la mauvaise saison ou au moment de la mue, ils se réfugient dans de minuscules cavités qu'ils tapissent de soie.

La reproduction présente beaucoup d'analogies avec celle des Scorpions : le mâle entraîne aussi la femelle dans une sorte de danse nuptiale, au cours de laquelle il dépose un spermatophore sur le sol; il attire ensuite sa partenaire au-dessus du spermatophore et la maintient dans cette position jusqu'à ce que la masse spermatique ait pénétré dans la chambre génitale femelle. Le développement des œufs s'effectue dans une poche incubatrice. A l'éclosion, les jeunes sont encore dans un état peu avancé, mais ils sont dotés d'un organe de succion qui leur permet d'absorber des liquides nourriciers produits par la mère.

Les Pseudoscorpions sont très largement distribués dans le monde et beaucoup d'entre eux sont cosmopolites. Cette vaste diffusion est certainement facilitée par leur aptitude à se faire transporter par d'autres Animaux. Ce phénomène, connu sous le nom de *phorésie,* a été fréquemment observé, notamment chez les *Chelifer,* qui s'accrochent à la patte d'une mouche ou d'un autre Insecte.

On connaît actuellement environ quinze cents espèces de Pseudoscorpions, rassemblées en deux cents genres et vingt familles. L'un des genres les plus importants est celui des *Chelifer,* avec *Chelifer cancroides,* qui mesure 5 mm; il est commun dans nos maisons, dans les angles obscurs, les placards, les greniers, etc. Le *Cheiridium museorum,* minuscule puisqu'il ne dépasse pas 1 mm de long, est aveugle; il fréquente, comme son nom l'indique, les vieilles collections et les bibliothèques. Le genre *Neobisium* compte plus de soixante-quinze espèces dont certaines sont adaptées à la vie sur les rivages marins, dans la zone des marées. C'est sur les plages de Méditerranée qu'on rencontre le géant des Pseudoscorpions (6 à 7 mm), *Garypus beauvoisi.*

▼ *Deux Ricinules : A,* **Ricinoides feae***; B,* **Ricinoides sjostedti** *(mâle); cu, cucullus, dont le rôle est de protéger les chélicères; pe, pédipalpes.*

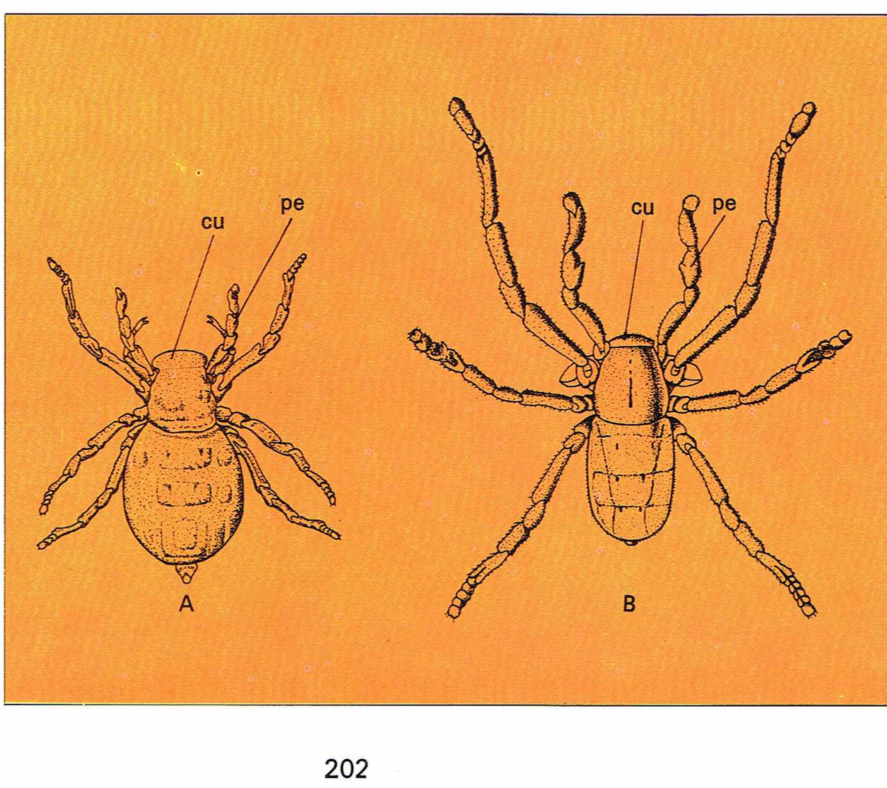

I.G.D.A.

Ordre des Ricinules, ou Podogones

Ces Arachnides de petite taille (1 cm au plus) ont un corps court, plus ou moins aplati, et des téguments épais et durs. Le céphalothorax est recouvert d'une carapace non segmentée et prolongée en avant par une plaque mobile courbée vers le bas, le *cucullus,* qui protège les chélicères. L'abdomen, qui se rattache au céphalothorax par un pédicule court et large qui n'est visible qu'à la dissection, compte dix segments, dont quatre seulement sont discernables.

Le groupe présente d'autres particularités. Ainsi, l'article terminal des pattes-mâchoires, en forme d'ongle, se rabat contre le tibia qui est doté en avant d'un processus spiniforme; l'ensemble constitue ainsi une pince rudimentaire. La dernière paire de pattes ambulatoires, aux hanches libres, est beaucoup plus mobile que les trois paires précédentes, dont les hanches sont fusionnées. Chez le mâle, le métatarse et le tarse des troisièmes pattes sont modifiés et constituent un appareil copulateur.

Le système nerveux est condensé en une masse périœsophagienne. Il n'y a pas d'yeux, mais les soies spatuliformes qui ornent le corps ont sans doute un rôle sensoriel. Les trachées s'ouvrent par deux stigmates situés près du bord postérieur du céphalothorax. L'ouverture génitale localisée sur l'abdomen est, en général, cachée par les hanches de la dernière paire de pattes.

La biologie de ces Arachnides assez rares est pratiquement inconnue; on sait qu'ils vivent dans les lieux humides, sous les feuilles mortes ou dans des cavités souterraines. Les vingt espèces existantes appartiennent à deux genres rassemblés en une famille unique. Certaines espèces sont localisées dans les régions tropicales d'Afrique, les autres sur le continent américain, du Texas au bassin de l'Amazone.

Ordre des Palpigrades

Les Palpigrades sont, en dehors des Acariens, les plus petits Arachnides, avec une taille maximale de 2 mm. Le corps, de couleur blanchâtre, translucide, est allongé, segmenté, prolongé par un flagelle terminal multiarticulé.

Le céphalothorax est recouvert de trois pièces dorsales, dont l'antérieure est beaucoup plus développée que les suivantes. Il n'y a pas d'yeux, mais trois groupes d'organes situés sur le céphalothorax ont probablement un rôle sensoriel. Les chélicères, triarticulés, sont en forme de pinces. La paire d'appendices correspondant aux pattes-mâchoires des autres Arachnides ne mérite pas ce nom, puisque ces appendices sont semblables aux pattes des trois dernières paires et ne servent, comme celles-ci, qu'à la locomotion. En revanche, les pattes homologues des premières pattes ambulatoires sont plus allongées que les autres et recouvertes de poils sensoriels; relevés et dirigés vers l'avant quand l'Animal se déplace, ces appendices seraient des organes d'exploration.

L'abdomen comprend onze segments; sur le bord postérieur du second s'ouvrent les orifices génitaux; les trois derniers segments, petits et annulaires, forment un processus, le *pygidium,* sur lequel s'insère le long flagelle caudal, dont les quatorze ou quinze articles portent des verticilles de poils. Lorsque l'Animal se déplace, ce curieux appendice est en général dressé verticalement.

Les Palpigrades vivent dans les régions tropicales et tempérées et fréquentent les lieux humides, se réfugiant sous les pierres ou dans les grottes. Les trente-cinq espèces connues appartiennent à quatre genres qui constituent une famille unique. L'espèce la mieux connue

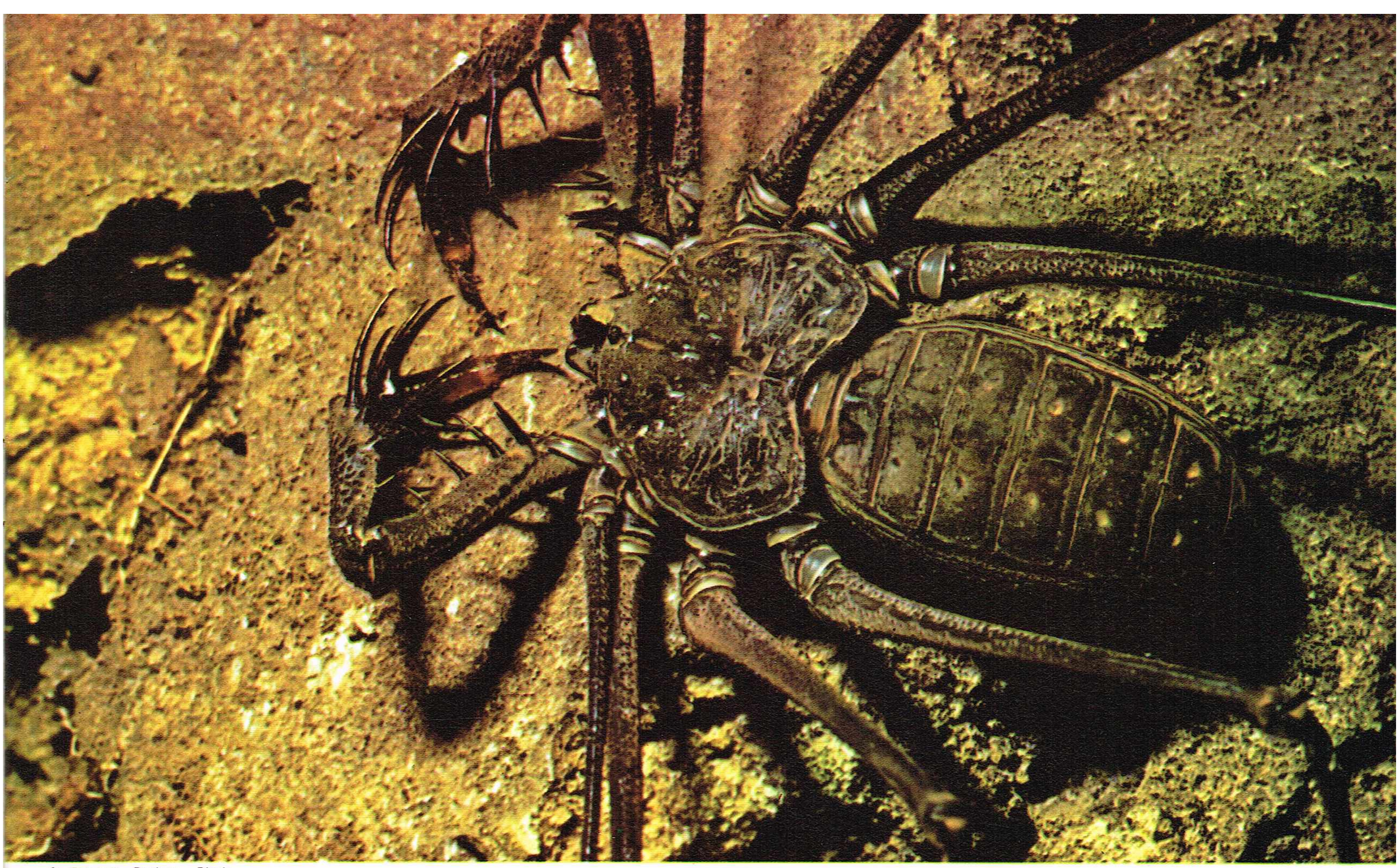

C. Descat - Parisot - Pitch

▲ *Les Amblypyges, dont un représentant figure ici, vivent dans les régions tropicales humides. Certains sont strictement cavernicoles; leurs pattes-mâchoires, longues et armées de fortes épines, se terminent par un ongle.*

a été découverte en Sicile en 1885; elle n'est pas rare dans les contrées méditerranéennes, en France notamment, dans la région de Banyuls-sur-Mer.

Ordre des Uropyges, ou Télyphonides

Les Uropyges étaient naguère réunis aux Amblypyges dans l'ordre unique des Pédipalpes. Par la suite, les deux groupes ont été considérés comme des ordres distincts. Enfin, une famille d'Uropyges a été érigée en un troisième ordre, celui des Schizomides.

Les Uropyges ont une carapace allongée et indivise et un abdomen de douze segments, dont les trois derniers, petits et annulaires, forment un pygidium sur lequel s'insère un long flagelle multiarticulé. Les chélicères ont deux articles, dont le second se rabat sur le premier sans former une véritable pince. Les appendices les plus remarquables sont les pédipalpes, qui sont plutôt des pattes ravisseuses que des pattes-mâchoires puisqu'elles ne servent pas à la mastication des proies, mais à leur capture; robustes, armées de dents et d'épines, elles se terminent par un ongle qui se rabat sur une saillie aiguë de l'article précédent pour former une sorte de pince. Les pattes de la paire suivante ne sont pas ambulatoires, comme celles des trois dernières paires, mais, très allongées, elles jouent un rôle tactile.

Les quatre paires d'yeux, situées sur la carapace, sont très simples et servent, sans doute, surtout à percevoir l'intensité lumineuse. Le système d'excrétion présente une particularité : il existe, outre des tubes de Malpighi et des glandes coxales, des glandes anales qui peuvent projeter à 30 cm de distance un liquide volatil à rôle défensif, dont l'odeur rappelle celle de l'acide formique ou de l'acide acétique, ce qui, dans certaines régions, a valu à ces Animaux le nom de « vinaigriers ».

Les Uropyges vivent dans les lieux obscurs, en forêt et dans les rochers, dans les contrées chaudes. On en connaît soixante-dix espèces, qui appartiennent à dix genres, groupés en une seule famille, celle des *Télyphonidés.* C'est dans l'Indo-Pacifique que les Uropyges sont les plus nombreux; le genre *Telyphonus,* avec quinze espèces, est largement distribué de Ceylan aux Philippines. C'est cependant aux États-Unis et au Mexique qu'on trouve le géant du groupe, *Mastigoproctus giganteus,* qui atteint 65 mm de longueur. Les Uropyges ne paraissent pas être représentés en Australie.

Ordre des Schizomides, ou Tartarides

Les Schizomides ressemblent quelque peu aux Uropyges, parmi lesquels ils étaient auparavant rangés. Les principaux caractères qui les distinguent sont les suivants : la division de la carapace dorsale en trois parties, dont la seconde, formée de deux pièces très minces, est peu visible, les pattes-mâchoires qui sont plus robustes et ne se terminent pas en pinces, le flagelle abdominal, très court, qui compte, au maximum, quatre articles.

Les Schizomides fuient la lumière et se tiennent dans les débris végétaux et dans la terre. Leur taille ne dépasse guère 8 mm. Les espèces connues, peu nombreuses, vivent dans les régions tropicales d'Asie, d'Afrique et d'Amérique. L'une d'entre elles, *Schizomus crassicaudatus,* de Ceylan, a jadis été signalée dans les serres du Muséum, à Paris.

Ordre des Amblypyges, ou Phrynes

Les Amblypyges se distinguent essentiellement des deux groupes précédents par leur carapace céphalothoracique, indivise comme chez les Uropyges, mais plus large que longue. L'abdomen, nettement séparé du céphalothorax, comprend aussi douze segments mais est dépourvu de flagelle caudal. Les pattes-mâchoires sont longues, armées d'épines souvent très fortes, et terminées par un ongle. Les pattes de la première paire ressemblent à des antennes; elles sont, en effet, extrêmement longues, et le tibia et le tarse peuvent compter soixante articles. Les autres pattes, à fonction ambulatoire, sont aussi très longues et chez certaines espèces présentent sur le tarse un *pulvillus* qui permet à l'Animal de se déplacer sur les surfaces lisses et verticales.

Les Amblypyges vivent dans les régions tropicales humides de l'Ancien et du Nouveau Monde. Ils se trouvent dans les endroits obscurs, sous les morceaux de bois, dans les crevasses des rochers; certains sont strictement cavernicoles.

Les Amblypyges sont représentés par une famille unique, celle des *Tarantulidés,* dont on connaît actuellement environ soixante espèces. Parmi les vingt genres décrits, on peut citer les *Damon,* africains et américains, les *Tarantula,* également américains, dont le nom ne doit pas être confondu avec celui donné à une Araignée, et

▼ *Représentation d'un Tarantulidé du genre* **Tarantula** *que l'on trouve presque exclusivement sur le continent américain.*

I.G.D.A.

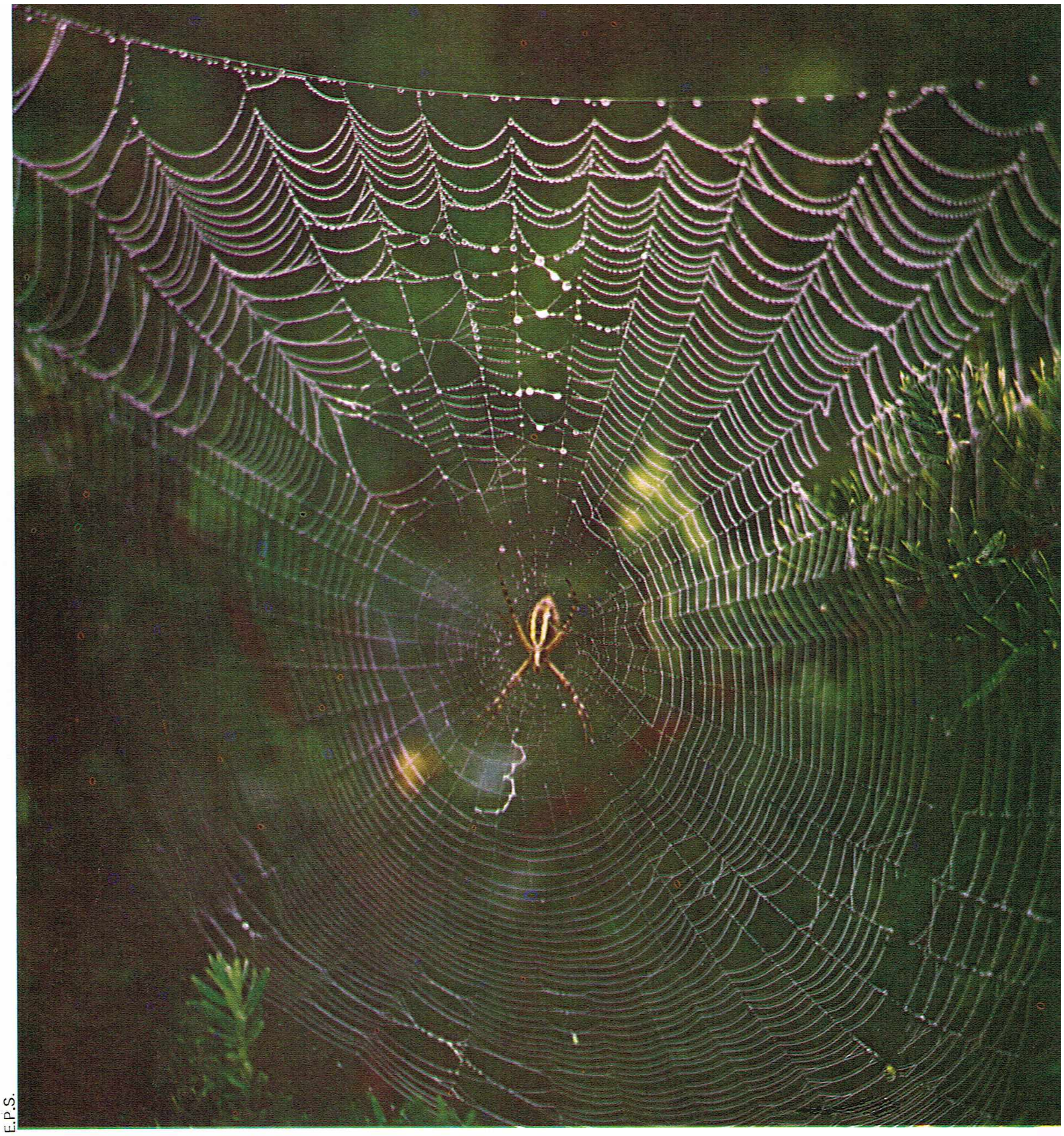
E.P.S.

▶ *Comme pour la grande majorité des Araignées, la toile d'*Argiope aurantia *est édifiée à la fois en demeure pour l'Animal et en piège pour ses proies.*

les *Charon,* dont une espèce, habitant les grottes des Philippines, peut atteindre une envergure de 120 mm, alors que son corps ne dépasse pas 30 mm de long.

Ordre des Aranéides, ou Araignées

De tout temps, les Araignées ont suscité l'intérêt et la curiosité des hommes, sans doute à cause des merveilleuses toiles qu'elles construisent. C'est dans la mythologie grecque que l'on trouve le plus ancien témoignage de la fascination qu'elles exercent sur les hommes. Selon la légende, Arachné, la jeune Lydienne, défia Minerve dans l'art de la tapisserie et la surpassa. La déesse déchira l'œuvre d'Arachné, qui, de désespoir, se pendit et fut transformée en Araignée.

L'ordre des Araignées comprend des Animaux d'une grande homogénéité morphologique, dont les dimensions du corps varient de moins d'un millimètre pour les plus petites formes à une dizaine de centimètres pour les grandes mygales.

Elles se caractérisent par un céphalothorax recouvert d'un bouclier indivis et séparé de l'abdomen par un rétrécissement très marqué, par la présence d'un sternum bien développé, par un abdomen non segmenté et par l'existence à son extrémité d'organes spéciaux, les *filières*. Le crochet des chélicères se rabat sur l'article précédent, ou *tige,* comme la lame d'un canif; près de son extrémité s'ouvre l'orifice de la glande à venin. Les pattes-mâchoires sont en forme de palpe et portent, chez les mâles, un organe copulateur sur le dernier article; leurs hanches ont un rôle masticatoire. Les quatre paires de pattes ambulatoires se terminent par deux ongles munis de dents en peigne, par un troisième plus petit, denté ou non, et par des faisceaux de crins.

Sur la face ventrale de l'abdomen, dans sa région antérieure, s'ouvre l'orifice génital, flanqué d'une paire de stigmates respiratoires; plus ou moins en arrière, débouche une autre paire de stigmates ou un stigmate unique. Sur la même face, en avant de l'orifice anal terminal, se trouvent une à quatre paires de filières, considérées comme des appendices profondément modifiés. Chaque filière, de forme cylindro-conique, porte de minuscules tubes très fins, les *fusules,* où aboutissent les conduits des glandes séricigènes; leur nombre peut s'élever à plusieurs centaines par filière. Chez certaines familles, il y a, en plus, en avant des premières filières, une plaque transversale, le *cribellum,* perforée par les multiples orifices des *microfusules,* qui émettent une soie spéciale; cette soie est dévidée et cardée par un peigne, le *calamistrum*, constitué d'une ou deux séries de poils recourbés, situées sur le tarse des pattes de la quatrième paire.

Si les Araignées présentent un type structural uniforme, leur aspect est extrêmement diversifié. L'abdomen peut être très court ou plus ou moins allongé, globuleux ou déprimé, lisse ou orné d'épines ou de tubercules; la longueur des pattes et la pilosité des téguments sont variables. Quant à la coloration, elle est souvent sombre et uniforme, mais beaucoup d'espèces présentent des teintes vives et brillantes disposées suivant un dessin caractéristique.

Beaucoup d'Araignées sont dotées d'un appareil stridulant qui comprend une plaque chitineuse, striée ou ornée de petites tiges vibrantes, contre laquelle

viennent frotter des dents, des tubercules ou des épines. Les deux parties de cet appareil occupent des emplacements divers, sur des régions entre lesquelles il peut se produire des frottements : céphalothorax et abdomen, chélicères droit et gauche, chélicères et pattes-mâchoires. Le son produit est imperceptible à l'oreille humaine, sauf chez les grandes mygales.

Le système nerveux correspond au schéma typique décrit chez les Arachnides, avec un développement plus important du ganglion supraœsophagien chez les formes les plus actives, qui se livrent à la chasse.

Chez la majorité des Araignées, il y a huit yeux, placés en deux lignes parallèles sur la région antérieure du céphalothorax, mais on observe d'assez nombreuses exceptions, tant dans leur disposition que dans leur nombre, qui peut être réduit à six, quatre ou deux, quand ils ne sont pas totalement absents, comme chez certaines formes cavernicoles. Il existe d'autres organes sensoriels et, tout d'abord, les *trichobothries,* poils fins, dressés, insérés dans une cupule chitineuse, à fonction tactile et qui sont sans doute sensibles aussi aux vibrations sonores ; cette sensibilité expliquerait l'attirance exercée par les sons musicaux sur les Araignées. L'*organe tarsal,* petite cupule richement innervée située sur le dernier article des pattes, et les *organes lyriformes,* qui se présentent comme des fentes minuscules éparses sur le corps, seraient des chimiorécepteurs, qui permettraient par exemple au mâle de reconnaître, au simple contact d'un fil tissé par une femelle, si celle-ci a atteint la maturité sexuelle. Enfin, un groupe de cellules du pharynx constitue un organe gustatif.

La respiration s'effectue par des poumons et des trachées tubulaires. La bouche s'ouvre au milieu d'un vestibule formé par les lobes masticateurs des hanches des pédipalpes, le *rostre* et le *labre.* Le pharynx, doté de plaques chitineuses striées ou denticulées, se prolonge par un étroit œsophage qui donne accès à un large estomac. A l'intestin moyen, dans lequel débouchent des diverticules glandulaires constituant un hépatopancréas, succède une poche cloacale. La digestion commence extérieurement avec la trituration, par les chélicères et les hanches des pattes-mâchoires, des aliments imprégnés des sécrétions des glandes salivaires et de l'hépatopancréas. Le bol alimentaire est ensuite aspiré par l'estomac et la digestion se poursuit dans l'intestin. L'excrétion est réalisée par des tubes de Malpighi et des néphrocytes.

Les glandes à venin s'ouvrent près de l'apex du crochet des chélicères ; elles sont localisées dans l'article basal ou s'étendent plus ou moins largement dans le céphalothorax. Le venin, liquide incolore, de composition variable suivant les espèces, a une action neurotoxique ou nécrosante. Il est très efficace à l'égard des petits Arthropodes, proies habituelles des Araignées. Des petits Vertébrés (Lézards, Rongeurs, Oiseaux) peuvent aussi être rapidement tués, ou pour le moins paralysés. Cependant, la quasi-totalité des espèces européennes, peu dangereuses pour l'homme, inflige tout au plus des piqûres comparables à celles d'une guêpe ; la seule exception est la malmignathe d'Europe, *Latrodectes tredecimguttatus,* remarquable par ses belles taches rouges, et présente, en France, dans toute la région méditerranéenne, en Vendée et en Bretagne. Quelques minutes après la morsure, de vives douleurs sont ressenties dans la région atteinte ; des symptômes variables apparaissent ensuite : douleur s'étendant à tout le corps, élévation ou abaissement de température, respiration difficile, affaiblissement du pouls, sueur profuse, parfois vomissements, hallucinations et délire, toujours accompagnés d'une anxiété intense. Les troubles se reproduisent par intermittence pendant douze à vingt-quatre heures et le plus souvent la victime se rétablit. Dans d'autres régions du monde, certaines espèces sont considérées comme très dangereuses et peuvent parfois provoquer la mort. C'est le cas de *Latrodectes mactans,* Araignée américaine surnommée la « veuve noire », ainsi que de certaines grosses mygales.

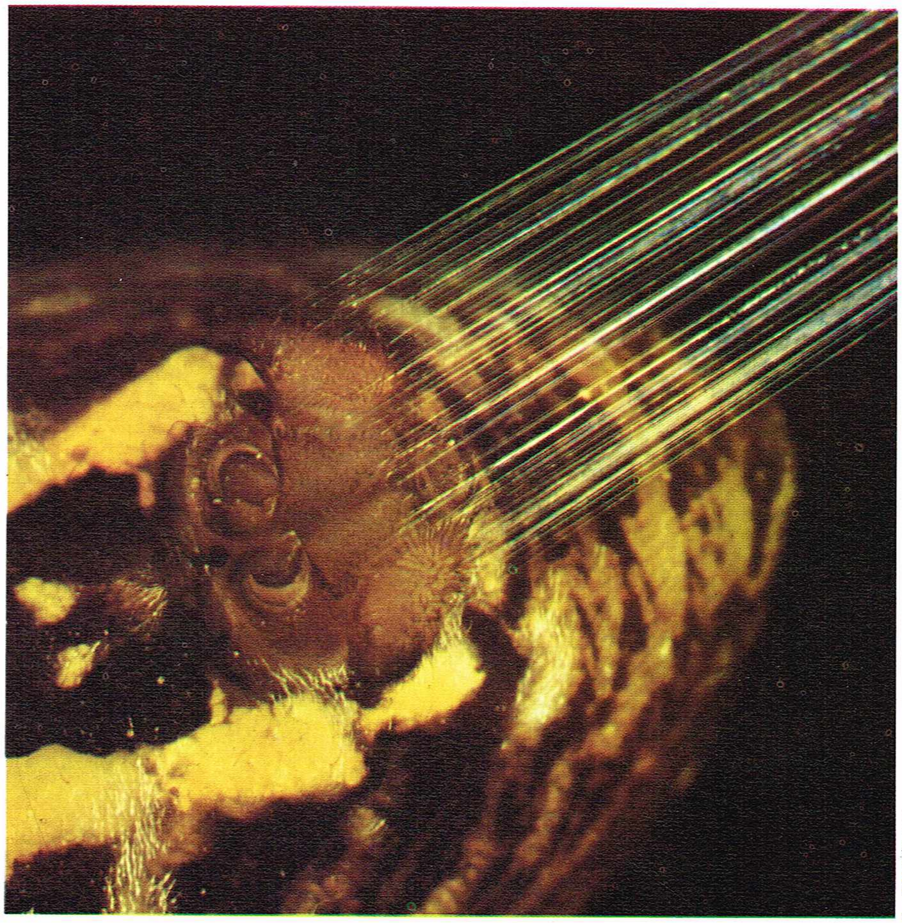

A. Margiocco

▲ ***Détail de la filière et d'un faisceau de soies chez* Argiope bruennichi *(femelle).***
On notera que seules les Araignées femelles construisent des toiles.

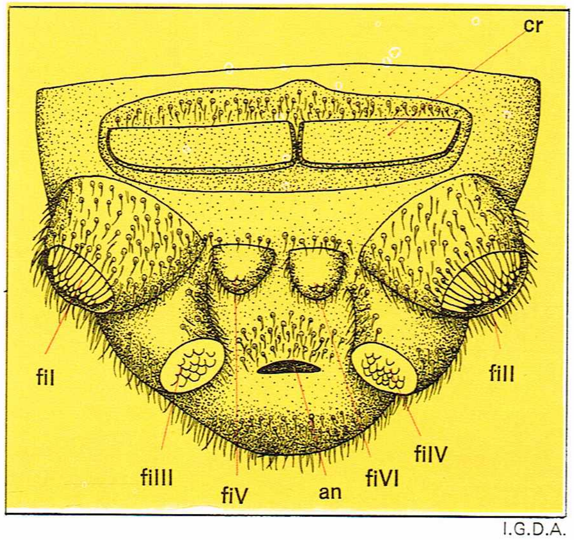

I.G.D.A.

◀ ***Représentation schématique des filières d'une Araignée : fi I, fi II, fi III, fi IV, fi V, fi VI ; ces filières, disposées par paires, peuvent être au nombre de huit ; cr, cribellum ; an, orifice anal.***

L'appareil génital des Araignées est simple. Chez la femelle, deux ovaires se continuent en deux oviductes, qui s'unissent en un utérus aboutissant à l'orifice génital par l'intermédiaire d'un vagin. Chez le mâle, il y a deux testicules et deux canaux déférents qui fusionnent en un conduit unique ; un organe copulateur, le *bulbe,* logé dans une excavation du tarse des pattes-mâchoires, sert au transport du sperme.

L'appareil séricigène est d'un intérêt tout particulier. La sécrétion de chaque glande parvient à une fusule par un très fin canal, et, au contact de l'air, se solidifie en un fil qui s'agglutine aux fils issus des autres fusules. A l'aide de ses ongles en forme de peigne et éventuellement du calamistrum, l'Araignée réunit la soie émise par les différentes filières en un fil unique de structure complexe et doté de qualités particulières, qui varient suivant l'usage auquel il est destiné.

En examinant attentivement une toile d'Araignée, on constate en effet que les fils sont de teintes diverses (blanc, jaune, rose), plus ou moins épais, et qu'ils peuvent être adhésifs ou non.

Quel que soit leur mode de vie, la très grande majorité des Araignées utilisent la soie pour construire leur demeure, pour capturer leurs proies, ou à d'autres fins.

S. Lombardi

▲ *La très classique mais très belle toile-piège d'une épeire.*

Chaque Araignée travaille durant toute sa vie suivant un schéma immuable caractéristique de l'espèce, à tel point que l'on peut identifier celle-ci par le simple examen d'une toile ; cependant, les motifs des toiles sont si nombreux et si variés qu'il est impossible de les décrire tous ou de les classer de façon rigoureuse. Nous examinerons simplement ici quelques-uns des modes d'utilisation de la soie, parmi les plus fréquents. Le plus simple, c'est le « fil-véhicule » : l'Araignée descend d'un plafond ou d'une branche, suspendue au fil qu'elle émet ; à un moment donné elle s'arrête, puis remonte en enroulant autour de ses pattes le câble de son très simple ascenseur. Elle peut aussi fabriquer un fil qui, au moindre souffle de vent, est entraîné horizontalement et se fixe à l'obstacle qu'il rencontre. L'Araignée attache alors l'autre extrémité du fil là où elle se trouve et utilise le pont ainsi établi.

S. Lombardi

▶ *Chez beaucoup d'Araignées, la soie est utilisée pour l'édification de toiles en forme de disques ou de nids dans lesquels l'Animal s'abrite et reste à l'affût.*

Plus étonnante est la façon dont la soie est utilisée pour effectuer des vols aérostatiques. Quand les jeunes Araignées veulent quitter leur lieu de naissance, elles se placent sur un endroit élevé et émettent un fil extrêmement ténu que les courants ascendants entraînent vers le ciel. Lorsque la force portante de cet aréostat rudimentaire est suffisante, les Araignées se laissent emporter et peuvent ainsi atteindre des altitudes élevées et franchir de très longues distances avant que le refroidissement de l'air ne les ramène sur la terre, où elles abandonnent aussitôt leurs fils, devenus inutiles. Ceux-ci restent accrochés aux branches des arbres : ce sont les « fils de la Vierge ».

Les toiles-pièges, ou toiles de captures, peuvent être irrégulières ou régulières. Les premières consistent en fils tendus dans toutes les directions, sans ordre apparent. Ce sont parfois des nappes de soie mince, de forme vaguement triangulaire, à texture serrée, à fils tissés sans disposition régulière ; l'un des sommets se prolonge par un tube cylindrique par lequel s'enfuit l'Araignée quand elle est menacée. C'est ce type de toile que construisent les tégénaires dans l'angle des maisons. La plus connue des toiles régulières ou géométriques est celle des épeires. Elle se compose d'un cadre, de rayons, d'une spirale, et d'un espace central. Ainsi, à la campagne, chacun peut assister à l'édification d'une telle toile, surtout à la fin de l'été ou en automne. L'Araignée femelle (les mâles ne construisent pas de toile) établit tout d'abord un « fil-pont » horizontal, suivant le procédé noté plus haut, et le traverse plusieurs fois en le renforçant à chaque passage. D'un point donné de ce fil-pont, situé près de l'une des extrémités, elle descend en sécrétant un autre fil qu'elle fixe au sol et renforce à son tour. Elle remonte ensuite sur le fil principal et en tend un troisième entre les deux premiers, formant ainsi un grand triangle dont l'une des pointes est dirigée vers le sol. Le cadre terminé, l'Araignée place les rayons, dont le nombre est assez constant dans une espèce donnée, puis, partant du centre, file une courte spirale. D'un point quelque peu excentrique, elle fabrique une spirale provisoire à tours fortement espacés. Cependant, tout ce qui a été tissé jusqu'à présent n'est que l'armature du piège et ne comporte pas de fils adhésifs. C'est alors que l'épeire entreprend, partant de la périphérie vers le centre, de construire une spirale adhésive beaucoup plus serrée. La spirale provisoire est détruite et le centre aménagé par le tissage d'un réseau irrégulier, non adhésif, sur lequel l'Animal s'installe. Certaines espèces d'épeires ne se tiennent pas au centre mais en haut de la toile, cachées dans les feuillages ou les rochers ; elles sont reliées au centre par un fil qui les avertit de la capture d'une proie. On a calculé qu'en l'espace d'un mois une seule grande épeire devait produire de 1 à 3 km de soie pour construire, réparer et rénover sa toile.

Suivant les genres et les espèces, les toiles-pièges s'écartent plus ou moins de ce type. Dans certains cas, elles ne sont pas verticales mais très obliques et parfois même presque horizontales. Chez les néphiles, le centre de construction est situé plus près du bord de la toile que de son centre géométrique. Chez les *Zilla,* deux secteurs sont vides de spirale. La toile peut aussi être ornée ; ainsi, les argiopes y tissent, suivant un diamètre vertical, un large ruban de soie en zigzag.

Beaucoup d'Araignées utilisent leur soie pour bâtir une demeure dans laquelle elles s'abritent pour guetter leurs proies.

Les Salticides, bien qu'elles soient vagabondes, se retirent temporairement dans une petite anfractuosité de rocher au-dessus de laquelle elles tissent un disque de soie serré. Les *Chiracanthium,* communs parmi les Graminées, fabriquent une toile en forme de bourse où se tiennent d'abord le mâle et la femelle, puis celle-ci avec ses petits. L'une des demeures les plus remarquables est celle de l'Araignée d'eau, *Argyroneta aquatica,* seule espèce réellement aquatique ; l'Araignée construit sous l'eau, parmi les herbes des étangs, une cloche de soie qu'elle remplit d'air petit à petit, en effectuant des allées et venues entre cette cloche et la surface, et en ramenant à chaque fois quelques bulles entre ses poils hydrofuges. Le mâle et la femelle fabriquent des cloches

distinctes, dont l'une sert de lieu d'accouplement, d'éclosion et d'élevage des jeunes.

L'habitation peut aussi être souterraine. Les grandes mygales sud-américaines creusent un court terrier cylindrique dont les parois sont cimentées de terre mêlée de salive, et le tapissent d'une fine toile blanche; elles s'y tiennent à l'affût, laissant émerger seulement leurs pattes antérieures. D'autres mygales ont un terrier plus profond muni d'un opercule de soie, sorte de clapet qu'elles ouvrent ou ferment à volonté. La plupart des lycoses, dont bon nombre d'espèces vivent en France, construisent des abris souterrains operculés. C'est le cas de *Lycosa narbonensis,* commune dans le Midi de la France, et dont la taille atteint 30 mm; son terrier cylindrique, profond de 20 cm, est obturé par une clôture faite de brindilles, de terre et de soie, qui se confond avec le terrain environnant et dissimule ainsi l'entrée.

La soie est utilisée de multiples façons par l'Araignée pour assurer le confort et la solidité de sa demeure, mais cette matière assure aussi la protection des œufs et des jeunes Animaux. Très peu nombreuses sont les espèces dont la femelle dépose sa ponte sur le sol. En règle générale, les œufs sont enfermés dans une bourse de soie très fine, ou cocon, dont la forme, constante chez une espèce, peut être une sphère, un hémisphère, un disque, un fuseau, ou un cylindre; sa couleur est le plus souvent blanche, mais parfois aussi rose, jaune d'or, ou verdâtre.

A la sortie du cocon, les jeunes restent souvent groupés pendant un certain temps et, chez les lycoses, passent plusieurs semaines accrochés sur le dos de leur mère avant de se disperser. Les adultes sont solitaires; cependant, il existe aussi des Araignées sociales, comme les *Uloborus republicanus* du Venezuela, qui construisent une immense toile collective sur laquelle vivent en commun plusieurs centaines d'individus.

La *reproduction* est l'un des chapitres les plus intéressants de la biologie des Araignées. Le dimorphisme sexuel n'est pas toujours très apparent. Il se manifeste quelquefois par la coloration, et plus fréquemment par la taille, l'exemple extrême étant fourni par *Nephila maculata,* dont la femelle est de mille à quinze cents fois plus grosse que le mâle. Dans tous les cas ce dernier est reconnaissable par l'appareil copulateur présent sur les pattes-mâchoires. Le premier soin du mâle qui devient adulte est de faire passer le liquide spermatique dans ses organes copulateurs, les bulbes. Sans doute guidé par l'odorat, il se met à la recherche d'une femelle.

Le comportement nuptial varie alors suivant les familles. Chez les épeires et chez beaucoup d'espèces qui construisent des toiles, le mâle s'approche de celle d'une femelle adulte et s'arrête prudemment, restant immobile pendant un certain temps. Il tiraille ensuite l'un des fils de la toile pour signaler sa présence, mais, en général, la femelle se précipite immédiatement vers lui dans l'intention évidente de le dévorer, ce qui entraîne sa fuite précipitée. Il demeure dans les environs avant de renouveler, souvent à plusieurs reprises, ses tentatives d'approche. Lorsque la femelle ne manifeste plus d'agressivité, le mâle accomplit l'acte sexuel, et s'enfuit aussitôt, sous peine d'être victime de la férocité de sa partenaire.

A. Margiocco

A. Margiocco

▲ Argiope bruennichi ***(femelle) sur son nid.***

◄ Une malmignathe, **Latrodectes tredecimguttatus,** ***veillant sur les trois cocons qui protègent ses œufs.***

▼ Type de nid suspendu, à forme globuleuse.

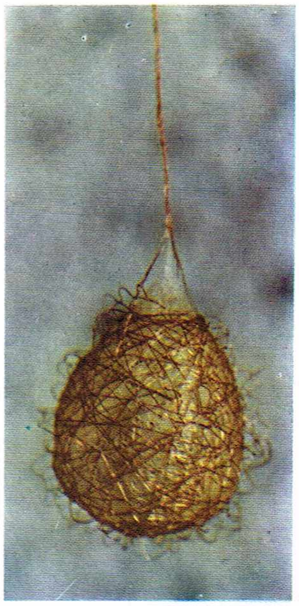

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Les spermatozoïdes introduits dans le réceptacle séminal de la femelle gardent longtemps leur vitalité. En effet, chez beaucoup d'espèces, la ponte n'a lieu que plusieurs mois après l'accouplement. Les œufs, souvent assez gros, sont, nous l'avons vu, presque toujours déposés dans un cocon. Beaucoup d'espèces abandonnent le cocon sous un abri naturel, mais dans de nombreux cas la mère manifeste une plus grande sollicitude : chez les *Xysticus*, elle reste sur son cocon, l'étreignant entre ses pattes, et meurt souvent dans cette position. Dans d'autres groupes, la mère transporte le cocon avec elle, tantôt entre les chélicères, comme chez *Pisaura mirabilis,* tantôt fixé sous l'abdomen, comme chez les *Sparassidae,* tantôt encore attaché aux filières, comme chez les lycoses.

Le *cycle vital* des Araignées peut être résumé de la façon suivante : les jeunes éclosent à l'intérieur du cocon, et y restent jusqu'à une première mue; peu de temps après, ils sortent et se dispersent, sauf chez les espèces où ils s'attardent encore sur leur mère ou dans son voisinage. Ils subissent entre six et dix mues avant d'atteindre la maturité. Beaucoup d'Araignées ne vivent qu'un an, le mâle mourant après l'accouplement et la femelle à la suite de la ponte ou après l'éclosion des jeunes. Certaines espèces ont une longévité plus grande; des mygales ont vécu sept ou huit ans en captivité, et on suppose qu'elles peuvent vivre quinze ans au moins.

Capture des proies. Les Araignées sont des Animaux voraces et féroces, qui n'hésitent pas à attaquer et à dévorer toute proie qui se présente, y compris, parfois, leur semblable, et même leur conjoint.

Les Araignées se nourrissent exclusivement de proies vivantes et surtout de petits Arthropodes, parmi lesquels les Insectes viennent au premier rang. Les grandes

S. Lombardi

▲ ***Groupe de jeunes Araignées protégées par la trame de soie qui retient leur nid à une feuille.***

mygales et les lycoses des régions tropicales s'attaquent aussi à des Vertébrés : Oiseaux, Lézards, et Mammifères de petite taille.

Les modes de capture des proies sont très variés. Chez les Araignées qui tissent des toiles géométriques, dès que la constructrice a perçu les vibrations indiquant qu'un Animal a été pris au piège, elle se précipite au centre de la toile, puis vers la victime qu'elle entoure d'une masse de soie; elle l'emporte ensuite, entre ses chélicères, jusqu'à l'endroit où elle prend ses repas. Si, entre-temps, une seconde capture a lieu, l'Araignée s'interrompt pour emmailloter de soie la seconde victime, puis revient à la première.

Les espèces qui tissent des toiles irrégulières saisissent leur proie, la piquent, puis, quand sa résistance a cessé, l'entraînent dans leur retraite. De même, celles qui vivent dans des terriers se tiennent à l'affût à l'entrée, souvent cachées par un opercule.

Les Araignées errantes, comme les Salticides, chassent à l'aventure et se jettent sur les proies qui passent à leur portée.

Répartition. Les Araignées sont présentes partout sur la terre, sauf, peut-être, au voisinage des pôles. On les rencontre aussi bien dans les plaines que dans les montagnes; si elles se raréfient au-delà de 2 000 m, certaines dépassent ce niveau puisqu'une espèce a été trouvée sur le mont Éverest, à 7 600 m d'altitude.

Les facteurs déterminants de leur répartition sont la température et l'hygrométrie; ainsi, l'aire peuplée par une espèce est souvent continue, entre des lignes isothermes déterminées. Cependant, il y a relativement peu d'espèces cosmopolites, une vingtaine au total. Si on considère qu'il s'agit surtout d'organismes qui vivent au voisinage des habitations humaines, on peut supposer que leur grande dispersion résulte de transports par des bateaux. Cependant, il ne faut pas, lorsqu'on tente d'expliquer le peuplement de vastes étendues, négliger les possibilités qu'offre le vol aérostatique des jeunes individus.

Les Araignées, dont les téguments sont faiblement chitinisés, se prêtent mal à la fossilisation. Cependant, on en trouve des fragments reconnaissables datant au Dévonien. Au Carbonifère, plusieurs familles actuelles étaient déjà représentées. Si les documents paléontologiques manquent pour le Secondaire, on connaît du Tertiaire de nombreux genres et espèces fort proches des formes actuelles, en particulier des centaines de spécimens provenant de l'ambre de la Baltique et dans un état de conservation comparable à celui d'Animaux actuels inclus dans une matière plastique.

On évalue à plus de quarante mille le nombre d'espèces d'Araignées connues. Elles se répartissent en trois mille genres, eux-mêmes groupés en soixante et onze familles dont sept fossiles. On divise, d'après la disposition des chélicères, l'ensemble des Araignées en deux groupes : les *Orthognathes,* chez lesquels ces appendices sont dirigés suivant l'axe du corps, et les *Labidognathes,* chez lesquels ils sont orientés perpendiculairement à cet axe. Au premier groupe correspondent le sous-ordre des *Liphistiomorphes* à abdomen segmenté, qui ne compte que deux familles actuelles, et celui des *Mygalomorphes.* Les *Labidognathes* englobent la grande majorité des formes vivantes et constituent le sous-ordre des *Aranéomorphes.* Nous passerons rapidement en revue quelques-uns des genres appartenant aux deux sous-ordres principaux, en signalant certaines formes, parmi les plus connues ou les plus remarquables.

▶ ***Certaines espèces, comme ce*** **Thomisus** ***(à gauche), sont mimétiques et prennent, lorsqu'elles guettent les Insectes butineurs, la teinte de la fleur sur laquelle elles se tiennent. Une épeire (à droite), appelée communément « araignée de jardin », photographiée au moment de la capture d'un gros Insecte. On la reconnaît aux taches blanches en forme de croix sur son abdomen.***

I. Bucciarelli

A. Margiocco

Sous-ordre des Mygalomorphes

Les Araignées rangées dans ce groupe sont surtout représentées dans les régions chaudes du globe, mais certaines vivent dans nos régions. Ainsi, les *Atypus* sont connus jusqu'en Angleterre; dotées d'énormes chélicères, ces Araignées percent dans les sols sableux un terrier vertical dont la doublure de soie se prolonge à l'extérieur sous la forme d'un tube d'une dizaine de centimètres de haut.

Les *Cteniza* et les *Nemesia,* communs dans la région méditerranéenne, creusent des terriers qu'obturent de façon parfaite des opercules à bords taillés en biseau. D'autres Araignées de la même famille ne fabriquent pas d'opercule, mais utilisent leur abdomen, tronqué postérieurement et ayant l'aspect d'un disque rigide, pour clore leur domicile.

Les plus remarquables représentants du sous-ordre sont les mygales, Animaux exclusivement tropicaux. Elles constituent la famille des *Aviculariidae*, dont le genre le plus nombreux, *Avicularia,* est répandu en Amérique du Sud et aux Antilles. Ce sont des Araignées de grande taille, au corps et aux pattes velus, qui se tiennent le jour dans des cavités du sol ou dans les creux des arbres, et partent en chasse au crépuscule dans la campagne ou les forêts. Une autre mygale, *Theraphosa leblondi,* de Guyane et du Venezuela, est la plus grande des Araignées : son corps seul atteint 9 cm de longueur. Certaines mygales appartenant à d'autres genres vivent dans la plupart des régions chaudes du globe : Afrique, Asie, Océanie. La crainte qu'inspirent ces Animaux est due à leur taille et à leur aspect hirsute (on les désigne parfois sous le nom d'« Araignées-crabes ») mais leur venin, s'il est capable de tuer de petits Vertébrés, n'a le plus souvent qu'un effet localisé sur l'homme, et les morsures ne sont qu'exceptionnellement graves.

Sous-ordre des Aranéomorphes

C'est le groupe de loin le plus nombreux et celui dont les représentants sont souvent appelés « Araignées vraies ».

Filistata insidiatrix, commune dans le bassin méditerranéen, mesure de 11 à 14 mm; son céphalothorax blanc jaunâtre, bordé de brun, présente une ligne médiane sombre et son abdomen est gris. Le mâle mène une vie errante, alors que la femelle, aux pattes plus courtes et plus robustes, tapisse d'une toile irrégulière et bleuâtre son domicile (trou dans un talus, un rocher, une muraille ou un arbre). Tout autour de l'entrée sont tendus des fils de capture.

Les *Dictyna* sont des Araignées de petite taille, vivant surtout parmi les arbustes, les herbes, et les fruits en grappes. Cependant, il existe une espèce, *D. civica,* dont l'habitat est différent; on ne la trouve que sur les murs des monuments ou des maisons, où ses toiles poussiéreuses présentent l'aspect de taches grisâtres.

On peut considérer que *Pholcus* est le genre type d'une très importante famille d'Araignées sédentaires, au céphalothorax court, à l'abdomen globuleux et aux pattes extrêmement fines et longues. Plusieurs espèces vivent dans les maisons, où on peut les voir accrochées aux toiles irrégulières qu'elles fixent sur la charpente des greniers.

Les diverses espèces du genre *Latrodectes,* largement répandues dans les contrées subtropicales, sont connues pour leur agressivité et l'efficacité de leur venin. La « veuve noire », *Latrodectes mactans*, qui habite le Nouveau Monde, a déjà été citée à propos des accidents graves qu'elle provoque. La malmignathe, *L. tredecimguttatus,* reconnaissable aux treize taches rouges qui ornent le noir de son abdomen, vit dans nos régions méditerranéennes et atlantiques, où elle tisse une grande toile irrégulière parmi les rochers et les arbustes; sa morsure est en général douloureuse, mais non mortelle.

Les *Argiope* sont des Araignées au corps brillamment orné, souvent couvert de poils argentés; elles sont surtout répandues dans les régions tropicales et subtropicales. En France, on rencontre l'élégant *Argiope bruennichi* à abdomen jaune, transversalement rayé de lignes sinueuses noires.

Avec plus de mille espèces répandues sur la terre entière, le genre *Araneus* se place au tout premier rang,

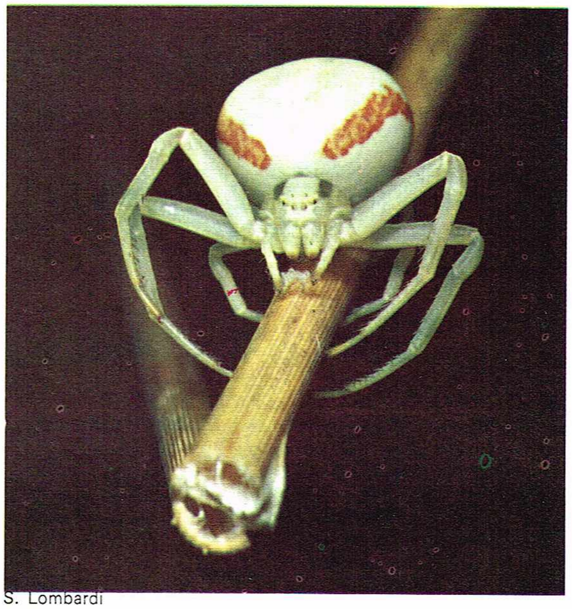

S. Lombardi

I. Bucciarelli

▲ **Micrommata roseum,** ***à gauche,*** **et Araneus diadematus,** ***à droite, comme la plupart des espèces d'Aranéides, présentent une coloration caractéristique de l'abdomen.***

A. Margiocco

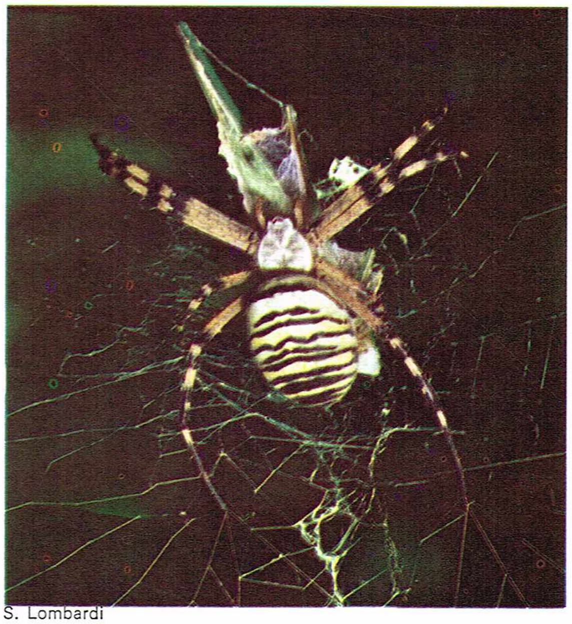

S. Lombardi

I. Bucciarelli

▼ ***La mygale, à gauche, est une Araignée de grande taille, au corps et aux pattes velus; une argiope, au centre, au corps brillamment orné de poils argentés;*** **Araneus cucurbitinus,** ***à droite, commun en France en été, dont l'abdomen, d'un vert tendre, est ponctué de points noirs alignés.***

A. Margiocco

▲ ***Araignée du genre* Lycosa *portant son cocon attaché aux filières.***
▼ ***A gauche et au milieu, deux Salticides,* Salticus sanguinolentus *; leurs couleurs brillantes leur valent le surnom d'« araignée-arlequin » ; à droite, une Araignée du genre* Thomisus. *Les Thomisides, en raison de leur démarche particulière, sont nommées « araignées-crabes ».***

non seulement parmi les « Araignées vraies », mais aussi parmi l'ensemble des Arachnides. La plus connue et la plus familière est sans doute l'épeire diadème, celle qui tisse ses grandes toiles géométriques dans les jardins ; on la reconnaît au premier coup d'œil grâce aux taches blanches qui dessinent une croix sur son abdomen. La plupart des espèces d'*Araneus* sont précisément caractérisées par la coloration de l'abdomen. Ainsi, *A. cucurbitinus,* commun en France en été sur les arbres et les arbustes, est d'un vert tendre ponctué de points noirs alignés.

Agelena labyrinthica, espèce la plus commune en France du genre *Agelena,* construit à la base des herbes ou des arbustes une toile horizontale formant un entonnoir central terminé en un tube où l'Araignée trouve son gîte.

L'une des espèces du genre *Tegenaria* porte le nom approprié de *T. domestica*. C'est la grande Araignée cosmopolite de teinte sombre qui tisse une toile tubuleuse dans les angles des habitations. Le mâle, au corps velu, aux longues pattes, court çà et là dans les maisons, inspirant une crainte bien injustifiée car il est inoffensif.

Le genre *Lycosa* est celui des « Araignées-loups », ainsi nommées en raison de l'agressivité et de la vie vagabonde de beaucoup d'entre elles. Elles se distinguent par un caractère biologique : les femelles portent leur cocon attaché aux filières pendant toute la durée de l'incubation et les jeunes, une fois éclos, restent encore accrochés sur le dos de leur mère pendant un certain temps. Parmi les espèces qui creusent des terriers, on trouve, à côté de *L. narbonensis* du Midi de la France, une forme très proche vivant dans le sud de l'Italie, *L. tarentula,* la lycose des Pouilles, ou tarentule. Cette dernière était naguère accusée de provoquer par sa morsure des troubles graves à l'issue fatale si on n'employait pas le remède spécifique suivant : des musiciens devaient exécuter des airs au rythme rituel devant les patients, qui, soumis à une impulsion irrésistible, se levaient et se mettaient à danser une « tarentelle ». Lorsque, épuisés et couverts de sueur, ils s'écroulaient sur le sol, ils étaient guéris. En fait, il est maintenant prouvé que le venin de la lycose n'a pas d'effets graves sur l'homme, et que ces croyances et pratiques, auxquelles on a donné le nom de « tarentisme », doivent être considérées comme des manifestations d'hystérie collective.

Thomisus est le genre type d'une famille aux formes nombreuses, réparties sur toute la terre. Parce que leurs pattes sont dirigées vers le côté, elles se déplacent à la façon des crabes. Elles sont en général de petite taille, mènent une vie errante et ne filent guère que pour confectionner des cocons. La plupart ont des couleurs vives avec une prédominance de jaune, mais certaines espèces sont mimétiques et prennent, lorsqu'elles guettent les Insectes butineurs, la teinte de la fleur sur laquelle elles se tiennent.

Le genre *Salticus* et les suivants appartiennent à la très importante famille des *Salticides* qui réunit quelque deux mille espèces de taille moyenne (4 à 10 mm). Ces espèces ont toutes un aspect caractéristique : le bord antérieur du céphalothorax est largement tronqué et les yeux sont plus développés que chez les autres Araignées ; on suppose que cette dernière particularité est en rapport avec un niveau psychique supérieur. Les couleurs brillantes, dans ce groupe, sont souvent dues, non à des pigments, mais à des interférences liées à la pilosité. Les Salticides, qui fréquentent les lieux les plus divers, sont des Araignées vagabondes, toujours en quête d'une proie. Comme leur nom l'indique, elles sont capables de sauter, effectuant des bonds qui atteignent trente fois la longueur de leur corps. *S. scenicus,*

A. Allegri

A. Margiocco

S. Lombardi

présent en Amérique, en Afrique du Nord et à travers toute l'Europe, chasse en terrain découvert, souvent en plein soleil. Dès qu'il détecte un petit Animal, il soulève la partie antérieure de son céphalothorax et l'oriente vers la proie. Il suit celle-ci des yeux et, si elle se rapproche, l'identifie à une distance qui varie entre 2 et 12 cm. S'il s'agit d'un Animal qui l'intéresse, le *Salticus* saute sur lui avec une précision presque infaillible; dans le cas contraire, il s'en désintéresse.

Le genre *Myrmarachne* groupe de nombreux Salticides qui ressemblent à des fourmis. *M. formicaria,* commun en Europe, a non seulement l'aspect mais aussi l'allure d'une fourmi : en effet, ce Salticide marche sur ses trois dernières paires de pattes, agitant constamment les premières, qui palpent le sol et simulent ainsi les antennes d'un Insecte.

Ordre des Opilions, ou Phalangides

Les Opilions sont des Arachnides dont les pattes sont souvent très longues. Alors que le corps a une longueur comprise entre 1 et 22 mm, l'envergure peut atteindre 20 cm. Le corps se présente comme une masse globuleuse, aucun rétrécissement ne séparant l'abdomen du céphalothorax; ce dernier est recouvert d'un bouclier dorsal, parfois soudé à plusieurs tergites abdominaux pour former une carapace qui s'étend sur une grande partie du corps; l'abdomen compte dix segments, dont certains sont décelables par les sillons dorsaux et ventraux qui les séparent; les autres sont fusionnés. Les deux yeux sont situés sur la région antérieure du céphalothorax, de part et d'autre d'un tubercule médian.

Les chélicères comprennent un premier article dans l'axe du corps, un second perpendiculaire au premier et dirigé vers le bas, et un troisième formant une pince avec le précédent. Les pattes-mâchoires peuvent être grêles et médiocrement développées, auquel cas elles ont un rôle tactile, ou fortes et épineuses, leur fonction étant alors préhensile.

Les pattes ambulatoires ont un tarse segmenté, avec un nombre d'articles variant de deux à une centaine; dans ce dernier cas, comme chez les espèces communes connues sous le nom de « faucheux », elles sont extrêmement longues mais ténues. Chez certaines formes exotiques, celles de la quatrième paire sont robustes et armées de fortes épines, qui en font des armes de défense.

Sous le céphalothorax s'ouvrent deux glandes produisant une sécrétion à odeur d'acide nitrique considérée comme répulsive. L'orifice génital a une position ventrale sur le premier segment de l'abdomen et les stigmates trachéens sont situés sur le second.

La femelle possède un ovipositeur, tube extensible qui prolonge l'utérus et a pour fonction de déposer les œufs. Le mâle, lui, est doté d'un pénis, long tube membraneux qui peut s'étendre hors de l'orifice génital. La reproduction donne lieu à des combats féroces entre mâles. Puis le vainqueur et la femelle s'accouplent face à face, pattes enchevêtrées. Contrairement à ce que l'on observe chez la plupart des autres Arachnides, il y a ici intromission du pénis dans la vulve de la femelle. Celle-ci recherche ensuite un endroit favorable et dépose, un à un, ses œufs dans le sol, grâce à son ovipositeur. Dans les pays tempérés, les Opilions ne vivent qu'un an; les œufs passent l'hiver dans le sol et se développent ensuite.

Les Opilions sont carnivores, mais n'exigent pas que leurs proies soient vivantes. Ils se repaissent souvent de cadavres d'Insectes. Il faut aussi signaler qu'ils recherchent l'eau et boivent avec avidité.

Les Opilions sont souvent cités en exemple quand on parle des phénomènes d'*autotomie :* en effet, si l'on saisit par une patte un *Phalangium* ou un *Opilio,* l'Animal abandonne son appendice par une rupture volontaire entre la hanche et le trochanter. La patte continue pendant un certain temps à se contracter par saccades, ce qui est à l'origine du nom de « faucheux » communément appliqué à ces Animaux, communs dans nos campagnes.

Le groupe des Opilions, dont on a décrit plus de trois mille espèces, a une distribution très large, puisqu'il n'est guère absent que des régions polaires, et qu'il a été signalé en montagne jusqu'à 4 500 m d'altitude. On l'a retrouvé à l'état fossile au Carbonifère, époque où vivaient déjà des formes proches des espèces actuelles.

L'ordre des Opilions se divise en trois sous-ordres qui englobent au total une douzaine de familles. Parmi les genres représentés en Europe, on peut citer les *Siro,* Animaux minuscules de moins de 2 mm, rangés autrefois parmi les Acariens, auxquels ils ressemblent; on les trouve sous les pierres, dans les forêts humides. Les *Trogulus,* à corps très plat et à pattes assez courtes, se rencontrent dans les prairies humides. Les faucheux, déjà cités, sont certainement les plus familiers; ils constituent la famille des *Phalangides.* Ceux que l'on voit en été et en automne courant dans les champs et dans les bois, sur les murs et parmi les rochers, appartiennent à plusieurs espèces : *Phalangium opilio, Opilio parietinus, Liobunum rotundum, Mitopus morio,* etc. Tous ont en commun un corps globuleux et des pattes démesurément longues et grêles. C'est à la même famille qu'appartient le plus grand des Opilions d'Europe, *Gyas titanus,* habitant des Alpes et des Pyrénées, dont l'envergure atteint 15 cm.

Ordre des Acariens

Les Acariens ne forment pas un groupement naturel homogène, mais apparaissent plutôt comme un rassemblement hétérogène d'éléments appartenant à des lignées phylétiques distinctes. Aussi est-il pratiquement impossible de proposer une définition applicable à l'ordre tout entier.

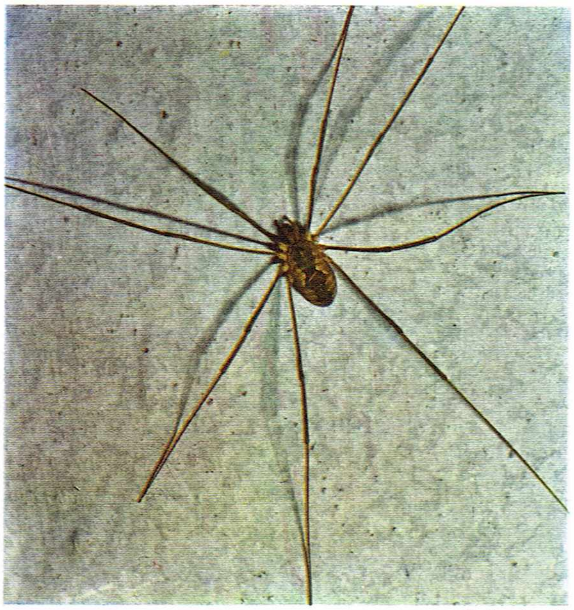

S. Lombardi

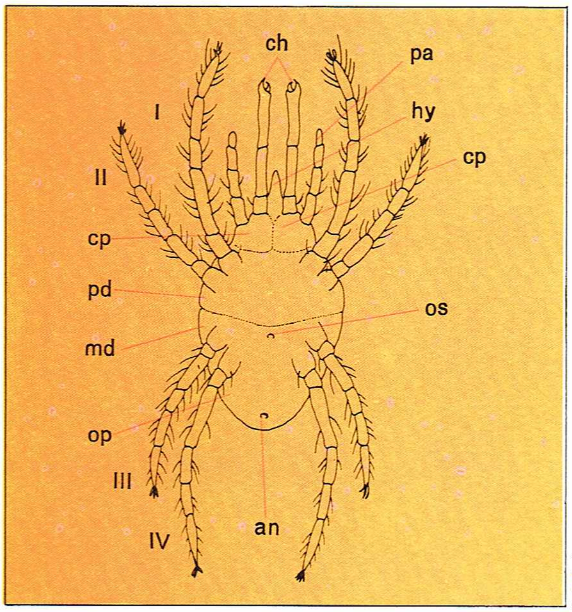

I.G.D.A.

◀ *A gauche : la plupart des Opilions se caractérisent par des pattes ambulatoires extrêmement longues mais ténues.* **A droite : représentation schématique d'un Acarien vu par sa face ventrale; ch, chélicères; pa, palpe; hy, hypostome; cp, coxa des palpes; os, orifice sexuel; an, anus; op, opisthosome; md, métapodosome; pd, propodosome; I, II, III, IV, les quatre paires de pattes ambulatoires.**

▶ *Une tique :* **Hamaphylis papuana.**

A. Margiocco

Les Acariens sont des Animaux libres ou parasites, petits ou même parfois minuscules; les plus grands atteignent 3 cm de long, alors que les plus petits ont une taille de l'ordre du dixième de millimètre. Leur corps est de forme très variable : long, étroit et vermiforme, ou circulaire et aplati, ou sphéroïdal, ou, encore, piriforme. La segmentation est presque toujours fortement estompée, mais on discerne cependant souvent un sillon en avant de la première paire de pattes et un autre entre les deuxième et troisième paires. Ce sillon divise le corps en deux parties, le *protérosome* et l'*hystérosome*. Le protérosome comprend une portion céphalique, le *gnathosome,* et une portion thoracique, le *propodosome,* alors que l'hystérosome englobe le reste du thorax, ou *métapodosome,* et l'abdomen, ou *opisthosome*.

Les pièces buccales, qui appartiennent au gnathosome, sont diversement modifiées et forment en général un appareil piqueur et suceur que l'on désigne improprement sous le nom de rostre. Les bases des pattes-mâchoires sont souvent soudées et étirées en une plaque triangulaire, l'*hypostome*. Les yeux, quand ils existent (une ou plusieurs paires), sont situés sur la face dorsale du propodosome, qui porte aussi deux paires de pattes.

G.S. Giacomelli

▶ ***Les Acariens sont des Animaux petits et même parfois minuscules, comme le montre cette illustration : on peut juger de la taille de l'Animal par comparaison avec les dimensions des nervures de la feuille sur laquelle il est posé.***

L'hystérosome peut être allongé et apparemment multi-articulé; il est plus souvent court et sans trace de segmentation. Les deux paires de pattes qui, typiquement, s'insèrent latéralement, portent à quatre paires le nombre des appendices locomoteurs, chez les adultes tout au moins, car les larves en possèdent trois paires au plus. Cependant, chez les formes parasites, la structure et le nombre de pattes varient beaucoup, et ces appendices peuvent manquer totalement.

L'anatomie interne des Acariens diffère notablement de celle de la majorité des autres Arachnides, ce qui est en rapport avec leurs particularités biologiques. Ainsi, chez les formes qui injectent un liquide digestif dans les tissus d'un hôte et absorbent ensuite le produit de la digestion, l'intestin postérieur est aveugle : l'anus manque. L'appareil circulatoire est souvent uniquement représenté par un système de lacunes, sans canaux différenciés et sans cœur. De même, s'il existe dans certains groupes des trachées respiratoires, celles-ci sont fréquemment absentes et les échanges gazeux s'effectuent alors exclusivement à travers les téguments.

Les sexes sont séparés. L'orifice génital s'ouvre en général à la partie antérieure de la face ventrale de l'abdomen, mais il peut aussi être postérieur ou même dorsal. L'accouplement et la fécondation, rarement observés, semblent présenter des modalités très diverses suivant les groupes. On sait qu'il y a parfois copulation et que, dans d'autres cas, le mâle introduit les spermatophores dans l'orifice génital de la femelle à l'aide des chélicères, des pattes-mâchoires ou de l'une des paires de pattes, différenciée à cette fin. La plupart des Acariens sont ovipares. Les œufs sont déposés, suivant le mode de vie, sur un Végétal, sur un Animal ou sur le sol.

Les Acariens sont, nous l'avons dit, libres ou parasites, mais, dans les deux cas, les habitats sont d'une grande variété. Les formes libres vivent soit dans le sol, ou dessus, dans les Mousses, les feuilles mortes, soit dans l'eau douce ou saumâtre, ou dans la mer, soit jusque dans les sources thermales, comme *Thermacarus nevadensis,* trouvé en Californie dans des eaux à 50 °C.

Les parasites infestent Végétaux et Animaux de toutes sortes, et même l'homme, provoquant malformations et maladies ou transmettant des germes pathogènes. Beaucoup d'espèces, libres quand elles sont adultes, sont parasites à l'état larvaire ou juvénile, ou *vice versa,* et on observe ainsi tous les degrés possibles entre la vie libre et le parasitisme.

En raison de leur petite taille, de leur exceptionnelle capacité à résister au jeûne, et du fait qu'ils peuvent être transportés par des Animaux, beaucoup d'Acariens sont ubiquistes, et on peut considérer qu'il y en a partout sur le globe.

Bavestrelli - Bevilacqua. - Prato

▶ **Argas reflexus,** *une tique parasite des pigeons.*

Les Acariens se divisent en six sous-ordres et en près de deux cents familles. Le nombre des espèces est supérieur à six mille. Les quelques formes citées ci-après donneront une idée de la diversité que présente l'ordre des Acariens.

Les représentants du genre *Ixodes* appartiennent au groupe des parasites que l'on désigne sous le nom de tiques et qui s'attaquent aux Vertébrés. *I. ricinus,* dont le mâle mesure 1 à 2 mm, alors que la femelle a les dimensions d'un pois quand elle est gorgée de sang, vit sur les chiens, les moutons et autres Animaux d'élevage, auxquels, dans certaines régions, il peut inoculer un piroplasme, agent de l'hémoglobinurie. Il n'est pas rare qu'une tique se fixe sur l'homme.

Une autre tique américaine, *Dermacentor andersoni,* inocule aux Mammifères le *Rickettsia rickettsi,* agent de la fièvre des montagnes Rocheuses, qui peut toucher l'homme, et le *Bacterium tularense*, responsable de la tularémie des lapins (qui peut aussi atteindre l'homme).

Assez voisines des précédentes, les tiques du genre *Argas* vivent dans les pigeonniers et les poulaillers. Elles se fixent sur les volailles pour s'alimenter, puis, repues, regagnent les fentes et interstices des parois; il n'est guère possible de les détruire que par une désinfection générale.

Pediculoides ventricosus mesure 0,25 mm de longueur; il est à la fois utile et nuisible à l'homme. D'une part, il parasite et détruit quantité de larves de *Calandra granaria,* Insecte qui cause de graves dégâts parmi les stocks de céréales. Mais, d'autre part, il attaque aussi l'homme et cause des dermatoses sérieuses (fièvre des céréales ou gale du grain).

Tetranychus telarius, de 0,4 à 0,6 mm de longueur, de couleur rouge ou brun rosâtre, tisse des réseaux de fils sous les feuilles de diverses plantes; au rythme de dix générations par an, ce parasite se multiplie rapidement et peut causer de sérieux dommages, notamment aux arbres.

Les *Trombidium* sont, à l'état adulte, d'un rouge vif et se rencontrent un peu partout dans la campagne. A l'état larvaire, ils parasitent Insectes, Oiseaux et Mammifères. Ainsi, la larve de *T. autumnalis,* qui mesure de 0,2 à 0,35 mm de longueur, s'attaque souvent à l'homme. Connue sous le nom d'aoûtat, elle est si abondante dans certaines régions qu'il n'est pas possible de se coucher dans l'herbe sans en ressentir les atteintes : le liquide digestif qu'elle injecte sous la peau provoque des démangeaisons intolérables, et parfois des réactions fébriles, mais sans conséquences graves.

L'aspect des *Demodex* diffère de celui des autres genres; le corps est très allongé, l'abdomen vermiforme, annelé, avec, dans la région antérieure, quatre paires de pattes très courtes. Ces Animaux vivent dans les follicules pileux des Mammifères. Sur le visage de l'homme les points noirs, ou comédons, sont dus à la présence de *D. folliculorum.* Ces Acariens sont tout à fait inoffensifs, mais, chez le chien, ils peuvent provoquer la gale folliculaire, affection sérieuse qui entraîne parfois la mort.

Les *Hydracna* sont des Acariens d'eau douce, nombreux dans les rivières et les étangs. Ils ont en général un corps presque sphérique et des couleurs brillantes. *H. globosa,* qui vit dans les eaux stagnantes, est d'un beau rouge écarlate et mesure de 2 à 4 mm.

Les *Halacarus* sont, comme les précédents, des Acariens aquatiques, mais qui vivent en mer, particulièrement dans les eaux peu profondes. Certains se tiennent cependant dans la zone abyssale.

Les espèces appartenant aux genres *Tyroglyphus* et *Glycyphagus* vivent sur les denrées alimentaires. Ainsi *T. siro* est bien connu sous le nom de « siro du fromage »; depuis l'Antiquité, il est le symbole de la petitesse dans le monde animal. Quant aux *Glycyphagus,* ils se fixent surtout sur les substances sucrées et peuvent provoquer des dermatoses chez les personnes qui manipulent ces dernières.

Sarcoptes scabiei est l'agent de la maladie connue sous le nom de gale. La femelle fécondée, qui mesure un quart de millimètre, creuse sous la peau de l'hôte des galeries de 20 à 30 mm, parallèles à la surface, où elle pond ses œufs. Une fois écloses, les larves remontent à la surface et c'est par elles que se fait la contagion, soit par contact direct entre personnes, soit par l'intermédiaire d'objets contaminés. Des variétés de la même espèce infestent les Animaux domestiques.

Les quatre cent cinquante espèces du genre *Eriophyes* ressemblent aux *Demodex;* leur corps est vermiforme et annelé, mais il n'y a que deux paires de pattes minuscules. Ces Animaux ne possèdent ni yeux, ni trachées, ni appareil circulatoire. Ils sont parasites des plantes et provoquent la formation de gales qui ressemblent à celles de certains Insectes. *E. vitis,* qui mesure de 0,1 à 0,2 mm, provoque l'érinose de la vigne, qui se présente sous la forme d'un feutrage rougeâtre sur la face inférieure des feuilles.

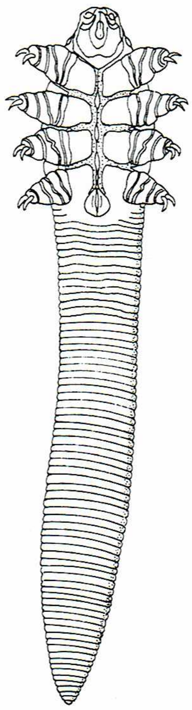

I.G.D.A.

▲ ***Fortement agrandi, un Acarien vermiforme,*** **Demodex folliculorum,** ***responsable de la présence de comédons sur le visage de l'homme.***

BIBLIOGRAPHIE

ANDRÉ M., BERLAUD L., DAWIDOFF C., FAGE L., GRASSÉ P.-P., MILLOT J., STORMER L., VACHON M., VANDEL A., WATERLOT G., 1949, *in* GRASSÉ P. P., *Traité de zoologie,* t. 6, Paris. - BEIER M., GERHARDT V., HELFER H., KAESTNER A., VITZHUM H., 1931-1941, *in* KUKENTHAL W., *Handbuch der Zoologie,* vol. 3, Berlin. - BERLAUD L., 1932, *les Arachnides,* Paris. - GRASSÉ P.-P. et TÉTRY A., 1963, *Encyclopédie de la Pléiade, Zoologie,* 2, *les Arthropodes,* Paris. - SAVORY Th., 1964, *Arachnida,* Londres et New York. - THOMAS M., 1953, *Vie et mœurs des Araignées,* Paris.

Titus

Titus

◀ ***Deux exemples de dommages causés aux plantes par des Acariens. Plusieurs centaines d'espèces de ce groupe sont nuisibles aux Végétaux.***

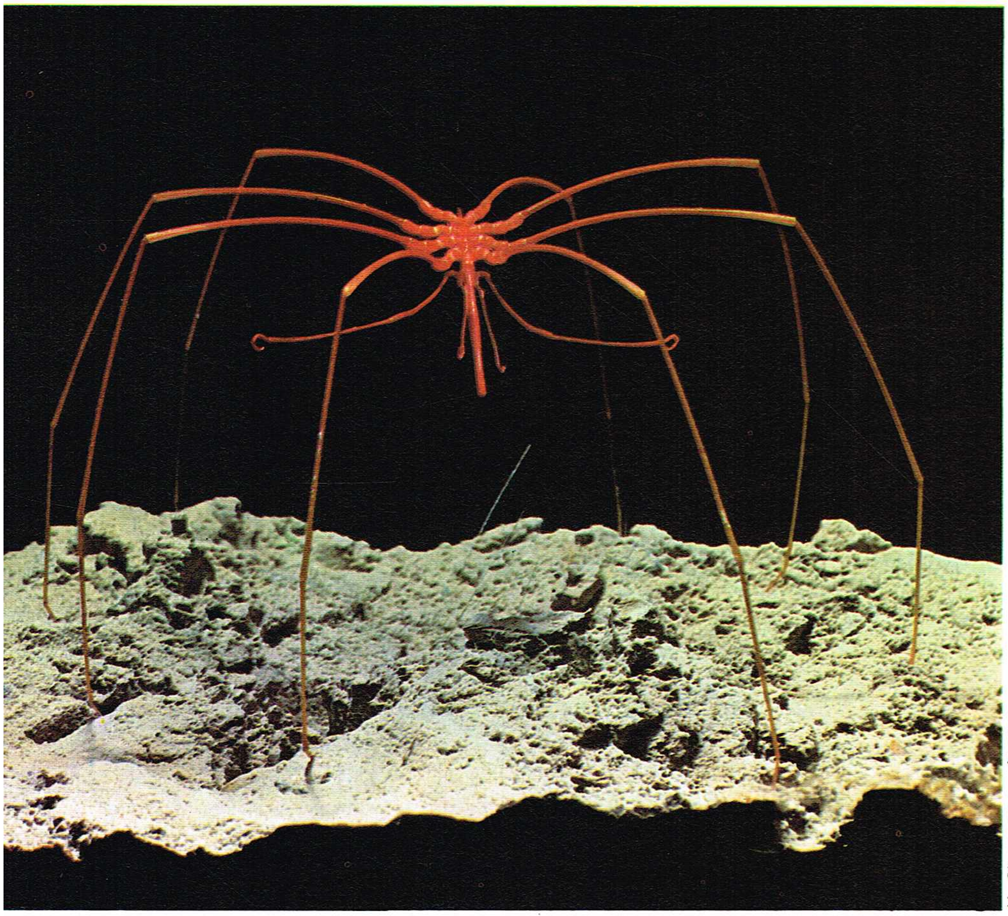

H. Chaumeton - Jacana

▲ **Colossendeis colossea** *est sans doute le géant du groupe des Pycnogonides, puisque son envergure atteint presque 60 cm.*

PYCNOGONIDES

Ce groupe d'Arthropodes exclusivement marins est aussi désigné sous le nom de Pantopodes, dont la signification étymologique est « tout en pattes ». Cela évoque bien l'aspect de la majorité d'entre eux, dont le corps proprement dit, très réduit, semble à première vue n'être que l'axe d'insertion des pattes, très longues et très grêles.

Organisation générale

Dans le corps, on distingue trois régions différenciées : une région céphalique, un tronc segmenté et un abdomen très court.

La *région céphalique* se prolonge en avant en une trompe, parfois plus longue que le corps. Elle porte dorsalement un tubercule oculaire avec deux paires d'yeux et, ventralement, trois paires d'appendices : les chélicères terminées par une pince, les *palpes* multi-articulés et les *ovigères*. Les deux premières paires peuvent manquer dans certains groupes, mais les ovigères ne font jamais défaut chez les mâles, qui transportent les œufs accrochés à ces appendices pendant la durée de l'incubation.

Le *tronc* comprend de quatre à six segments, dont le premier est soudé à la région céphalique, et qui sont peu mobiles entre eux ou soudés; chacun présente une paire de prolongements latéraux sur lesquels s'insèrent les pattes. Celles-ci, le plus souvent longues, sont composées de huit articles et se terminent par une griffe.

L'*abdomen* est un tubercule court, non segmenté, au sommet duquel est situé l'anus.

L'*appareil digestif* s'ouvre par une bouche triangulaire, bordée de lèvres denticulées, à armature chitineuse. C'est un appareil de succion doté de muscles puissants, à l'action duquel s'ajoute celle d'un pharynx, suceur lui aussi, et muni d'aiguilles chitineuses. Un court œsophage donne accès à l'intestin moyen, qui envoie des diverticules dans tous les appendices, palpes et ovigères exceptés; l'intestin postérieur est court. Le régime alimentaire se compose surtout d'Hydraires, de Spongiaires et de Bryozoaires.

L'*appareil circulatoire* est représenté par un cœur contractile dorsal, pourvu de deux à trois paires d'ostioles, qui envoie le sang dans un système de lacunes. La respiration s'effectue à travers les téguments.

Le *système nerveux* comprend une masse ganglionnaire antérieure traversée par l'œsophage et une chaîne de ganglions ventraux correspondant à chaque segment. On ne connaît pas d'organes sensoriels en dehors des yeux, qui ressemblent à ceux des Arachnides, et des soies, qui ornent le tégument.

Appareil reproducteur. Les sexes sont séparés et les gonades, qui s'étendent à l'intérieur du tronc, se prolongent dans les appendices, le long des diverticules gastriques. Les orifices génitaux s'ouvrent sur le deuxième article des pattes postérieures et parfois sur une ou plusieurs des paires précédentes. Le mâle féconde les œufs au moment de leur émission et les recueille sur ses ovigères, où ils restent accrochés jusqu'à l'éclosion. Les larves, dites *protonymphons*, n'ont que trois paires d'appendices qui correspondent aux chélicères, aux palpes et aux ovigères des adultes. Elles subissent une série de mues avant d'acquérir leur forme définitive.

On évalue à cinq cents environ le nombre d'espèces de Pycnogonides décrites. Exclusivement marines, nous l'avons dit, elles comprennent de nombreuses formes littorales, mais certaines fréquentent les eaux bathyales et abyssales, jusqu'à 7 000 m de profondeur.

SYSTÉMATIQUE

Les Pycnogonides sont actuellement divisés en huit familles, en fonction du nombre et de la segmentation des appendices.

La plus importante est celle des **Nymphonidae** avec le genre *Nymphon* dont plusieurs espèces vivent dans nos mers. Ainsi *N. gracile,* dont le corps atteint 8 mm de long, alors que son envergure, pattes étendues, est de 5 à 6 cm, est commun sous quelques mètres d'eau en Méditerranée comme dans l'Atlantique.

Les **Pycnogonidae** sont caractérisées par l'absence de chélicères, de palpes et d'ovigères chez les femelles, et par des pattes relativement courtes. *Pycnogonum littorale*, qui mesure 15 à 18 mm, pullule dans la Manche sur certains fonds.

Les **Collossendeidae**, enfin, comprennent de nombreuses espèces propres aux régions arctiques ou antarctiques, ou cantonnées dans les eaux profondes. Les représentants de cette famille sont de très grande taille, comme en témoigne le *Collossendeis colossea* capturé dans l'Atlantique par 1 500 m de profondeur et conservé au Muséum de Paris : son corps n'a que 3 cm, mais est prolongé par une trompe de 5 cm de long, et son envergure atteint presque 60 cm.

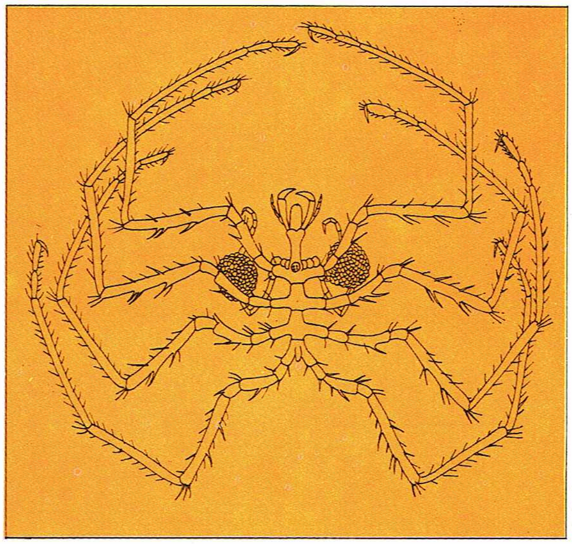

I.G.D.A.

▶ *Représentation schématique d'un Pycnogonide,* **Nymphon rubrum,** *mâle et adulte, sur lequel on observe la présence des ovigères destinés au transport des œufs pendant la durée de l'incubation.*

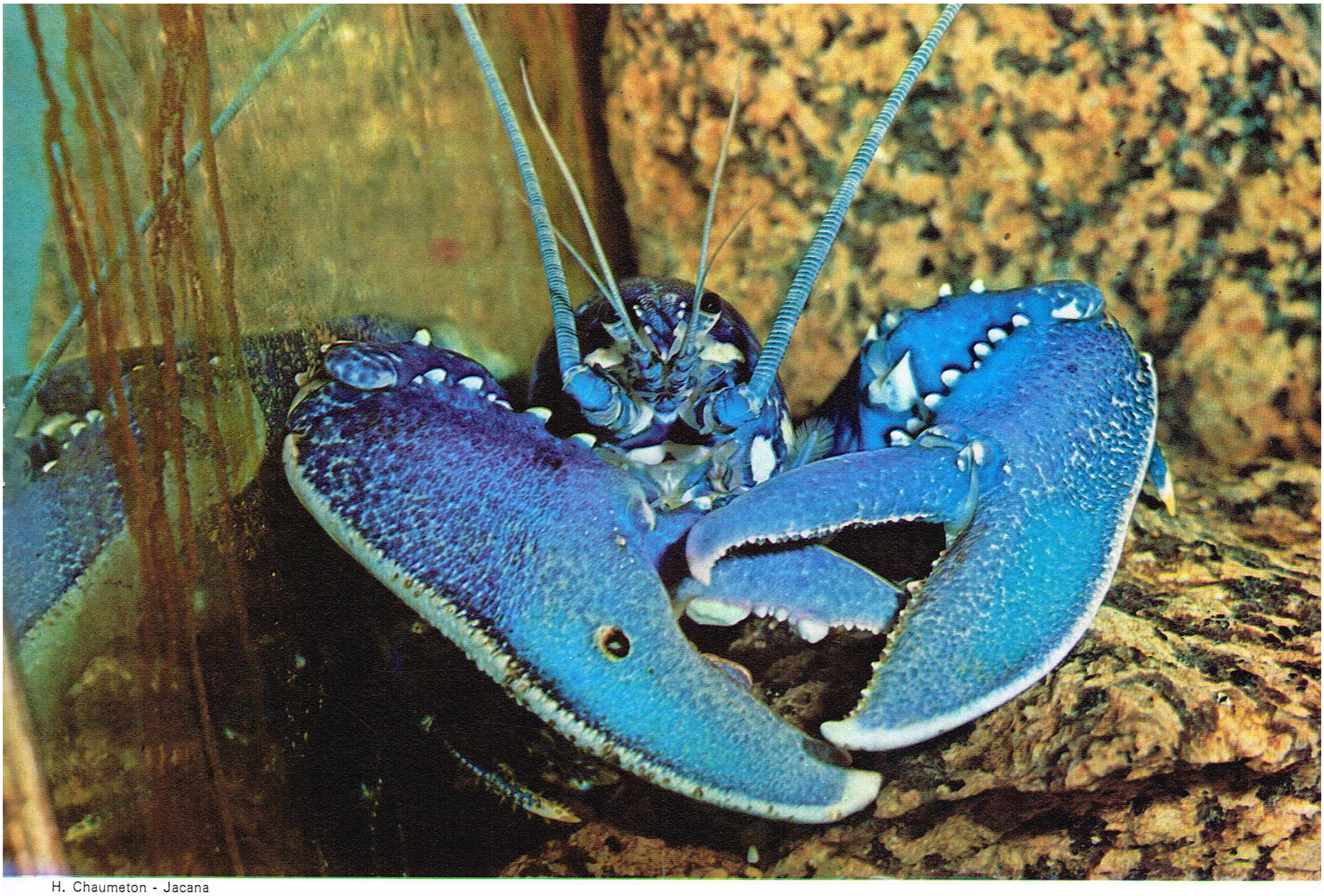

H. Chaumeton - Jacana

▲ ***Le homard de nos régions,*** **Homarus gammarus,** ***Crustacé dont la coloration est bleue, vit sur les fonds rocheux littoraux, de la Norvège à la Méditerranée.***

MANDIBULATES

Les Crustacés, les Myriapodes et les Insectes, qui constituent le vaste sous-embranchement des Mandibulates, présentent en commun plusieurs caractères qui les opposent aux autres Arthropodes. Ils sont dotés d'*antennes,* dont la morphologie et le développement sont très variés, et d'appendices masticateurs, les *mandibules* et les *mâchoires*. Les yeux, latéraux, comportent des *cônes cristallins*. La respiration est, en règle générale, *branchiale* chez les formes aquatiques et *trachéenne* chez celles qui vivent à l'air libre.

Les *Crustacés* sont des Animaux marins, dulçaquicoles, ou terrestres. Leur corps est divisé en un *céphalothorax* et un *abdomen,* et leurs appendices céphaliques comprennent deux paires d'antennes (les antennules et les antennes), ainsi que trois paires de pièces masticatrices (les mandibules, les premières et les deuxièmes mâchoires). Les appendices sont typiquement biramés. Les organes excréteurs sont représentés par des glandes *antennaires* et *maxillaires*. Le plus souvent, les sexes sont séparés et le développement est indirect, avec une forme initiale, le *nauplius*, caractéristique de la classe.

Les *Myriapodes* sont des Mandibulates terrestres, à respiration trachéenne, dont le corps comprend une *région céphalique* et un *tronc*. Les appendices céphaliques se composent d'une seule paire d'antennes, d'une paire de mandibules et d'une ou deux paires de mâchoires. Le tronc est constitué par une succession de segments, souvent en nombre élevé, dont chacun porte typiquement une paire d'appendices locomoteurs uniramés. Les organes excréteurs sont des tubes de Malpighi. Les sexes sont séparés et le développement est direct ou indirect.

Les *Insectes* représentent la classe de Mandibulates dont le degré d'organisation est le plus élevé et qui comprend le plus grand nombre d'espèces. Leur corps est divisé en trois régions : la *tête,* le *thorax* et l'*abdomen*. Les appendices céphaliques sont : une paire d'antennes, une paire de mandibules et deux paires de mâchoires. La tête porte également des yeux simples et des yeux composés. Le thorax comprend trois segments dont chacun porte une paire d'appendices locomoteurs ; le plus souvent, sur chacun des deux segments postérieurs, s'insère une paire d'ailes. Les organes excréteurs sont des tubes de Malpighi. Les sexes sont en général séparés, mais il existe de nombreuses espèces hermaphrodites et d'autres qui se reproduisent par parthénogenèse. Le développement est direct ou indirect ; ses modalités sont, cependant, extrêmement variées suivant les groupes.

CRUSTACÉS

Les Crustacés jouent, dans le domaine aquatique et particulièrement dans les mers, un rôle important que l'on ne peut comparer qu'à celui des Insectes sur la terre ferme. Cependant, les Insectes comptent un plus grand nombre d'espèces : on en a décrit plus d'un million et il en existerait trois à quatre fois plus, alors que l'on connaît environ trente mille espèces de Crustacés.

Les Crustacés ont peuplé tous les districts du domaine marin et des eaux continentales et forment une bonne part de l'énorme masse de matière vivante que l'on appelle le *plancton*. Comme certains Insectes se sont adaptés à la vie aquatique, certains Crustacés sont devenus des Animaux terrestres. Mais si, dans les deux classes, plusieurs lignées se sont orientées vers le parasitisme, un groupe entier de Crustacés, celui des Cirripèdes, a adopté un mode de vie exceptionnel chez les Arthropodes : avant d'atteindre l'âge adulte, les individus se fixent de façon définitive à un support solide, comme certains Animaux beaucoup plus primitifs (les Éponges ou les coraux). Au sein de la diversité morphologique et biologique qui caractérise la classe des Crustacés, on trouve un assez grand nombre de formes comestibles.

Organisation générale

Le corps de l'ancêtre dont sont issues les différentes lignées de Crustacés aurait été composé de deux parties : la *tête,* comprenant trois segments fusionnés et pourvue de deux paires d'antennes et d'une paire de mandibules,

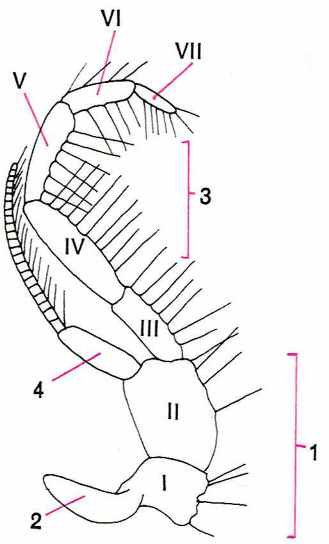

▲ *Schéma du troisième maxillipède biramé d'un Crustacé du genre* Penaeus *: 1, protopodite; 2, épipodite (branchie); 3, endopodite; 4, exopodite. Les chiffres romains indiquent les articles particuliers : I, coxa; II, basis; III, ischion; IV, mérus; V, carpe; VI, propode; VII, dactyle.*
▼ *Schéma de l'anatomie d'un crabe du genre* Carcinus *: ch, chélipèdes, ca, carapace; an, antennes; mu, muscles moteurs des mandibules; cd, canal déférent; te, testicule; he, hépatopancréas; br, branchies; cœ, cœur; ar, artères. I, II, III, IV, pattes ambulatoires.*

Classe des CRUSTACÉS

- ☐ *Sous-classe des Céphalocarides*
- ☐ *Sous-classe des Branchiopodes*
  - ○ *Ordre des Anostracés*
  - ○ *Ordre des Notostracés*
  - ○ *Ordre des Conchostracés*
  - ○ *Ordre des Cladocères*
- ☐ *Sous-classe des Ostracodes*
- ☐ *Sous-classe des Mystacocarides*
- ☐ *Sous-classe des Copépodes*
- ☐ *Sous-classe des Branchioures*
- ☐ *Sous-classe des Cirripèdes*
  - ○ *Ordre des Thoraciques*
  - ○ *Ordre des Rhizocéphales*
- ☐ *Sous-classe des Malacostracés*
  - — Super-ordre des Phyllocarides
    - ○ *Ordre des Leptostracés*
  - — Super-ordre des Syncarides
    - ○ *Ordre des Anaspidacés*
    - ○ *Ordre des Bathynellacés*
  - — Super-ordre des Péracarides
    - ○ *Ordre des Mysidacés*
    - ○ *Ordre des Cumacés*
    - ○ *Ordre des Tanaïdacés*
    - ○ *Ordre des Isopodes*
    - ○ *Ordre des Amphipodes*
  - — Super-ordre des Hoplocarides
    - ○ *Ordre des Stomatopodes*
  - — Super-ordre des Eucarides
    - ○ *Ordre des Euphausiacés*
    - ○ *Ordre des Décapodes*

et le *tronc,* formé d'une série de segments tous semblables dotés chacun d'une paire d'appendices, à l'exception du dernier, le *telson.*

En fait, l'organisation décrite ci-dessus est hypothétique et on ne connaît aucun Crustacé vivant ou fossile dont les segments céphalisés soient si peu nombreux, et dont le corps soit formé d'une succession de segments semblables, munis d'appendices identiques. Au cours de l'évolution, des adaptations fonctionnelles ont entraîné une spécialisation des appendices, et, parallèlement, la différenciation du corps en régions morphologiquement distinctes, avec fusion ou même disparition d'éléments métamériques originels. Ainsi, le corps d'un Crustacé, exception faite des formes très modifiées par la vie fixée ou par le parasitisme, est divisé en trois régions : la tête, ou *céphalon,* incluant au moins cinq segments d'origine somatique, le thorax, ou *péréion,* dont un nombre variable de segments peuvent être soudés à la tête pour former un *céphalothorax,* et l'abdomen, ou *pléon.*

Chaque segment comporte fondamentalement un squelette externe imprégné de chitine et composé de deux plaques, l'une dorsale arquée, le *tergite,* l'autre ventrale, le *sternite,* réunies latéralement par les *pleures,* ceux-ci pouvant être renforcés par des sclérifications, ou *pleurites,* dans le prolongement du tergite. Les appendices s'attachent de part et d'autre du sternite. Cette disposition originelle est souvent masquée par les fusions et adaptations que nous venons de mentionner, mais on peut l'observer aisément sur l'abdomen d'une langouste ou d'une crevette. Le nombre de segments postcéphaliques est constant et égal à dix-neuf chez les Malacostracés, qui constituent la sous-classe la plus évoluée. Dans les autres groupes il varie considérablement; très réduit chez les Ostracodes, dont certains n'ont que trois paires d'appendices postoraux, il dépasse cinquante chez les Branchiopodes.

Beaucoup de Crustacés présentent une carapace; celle-ci, par son origine morphologique, est une caractéristique typique de la classe. Repli du tégument issu de la région dorso-postérieure de la tête, elle revêt des aspects très variés et remplit des fonctions différentes suivant les groupes : chez une partie des Branchiopodes et chez les Ostracodes, elle est bivalve et enferme totalement le corps; chez les Décapodes, elle forme un bouclier protégeant dorsalement et latéralement la région céphalothoracique, alors que, chez les Cirripèdes, elle constitue un manteau renforcé par des plaques calcaires, dont certaines peuvent se souder en une loge rigide solidaire de son support.

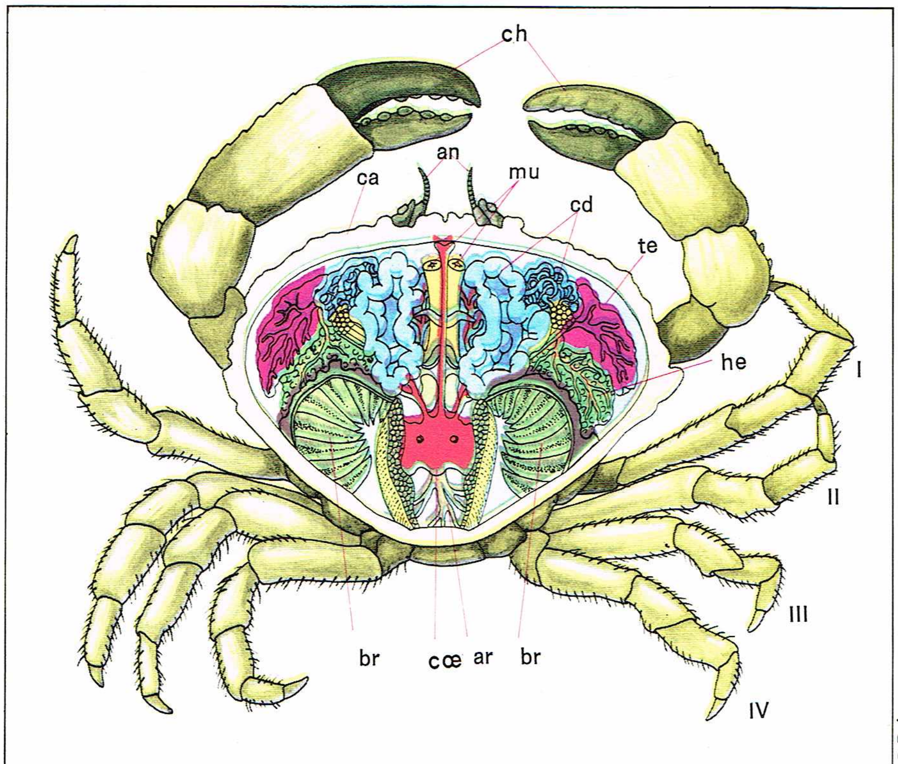

I.G.D.A

Les appendices des Crustacés présentent une grande diversité de formes, mais, dans leur structure, on peut en général reconnaître les éléments d'un type fondamental caractéristique de l'ensemble de la classe : sur un pédoncule, le *protopodite,* composé de deux articles, le *coxopodite,* ou *coxa,* et le *basipodite,* ou *basis,* s'articulent une rame interne, l'*endopodite,* et une rame externe, l'*exopodite.* Le protopodite peut présenter des processus internes, ou *endites,* et des processus externes, ou *exites.* Les endites des pièces buccales sont souvent modifiés en pièces masticatrices, ou *gnathobases,* et les exites de divers appendices peuvent se transformer en *branchies.*

La description d'un Décapode marcheur à abdomen normal (homard, langoustine ou écrevisse par exemple) fournit un exemple concret de l'organisation d'un Crustacé. La région antérieure est formée par la fusion partielle du céphalon et des huit segments du thorax, l'ensemble étant protégé dorsalement et latéralement par la carapace céphalothoracique pourvue d'un *rostre.* L'abdomen est composé de six segments articulés et du telson, terminal. Les appendices sont nettement visibles en vue ventrale, ceux de la région buccale étant cependant d'observation plus difficile, car ils s'insèrent très près les uns des autres et se superposent comme les feuillets d'un livre.

Les antennules (A1), placées en dessous des yeux, sont constituées par un pédoncule de trois articles surmonté de deux flagelles multiarticulés; on considère, en général, que cet aspect bifurqué ne correspond pas à la structure biramée fondamentale, aucun de ces flagelles ne pouvant être assimilé à un exopodite. Les antennes (A2), très écartées, sont composées d'un pédoncule de cinq articles et d'un fouet multiarticulé. Sur la coxa s'ouvre la glande antennaire, alors que, sur le basis, s'insère latéralement une large *écaille* représentant l'exopodite. A ces deux paires

d'appendices sensoriels succèdent six paires d'appendices qui forment l'appareil buccal. Les trois premières sont proprement céphaliques ; ce sont, au niveau de la bouche, les *mandibules* (Md), pièces robustes essentiellement masticatrices, puis les *maxillules* (Mx1), en grande partie formées par les endites du protopodite, et les *maxilles* (Mx2), très particulières du fait du développement de l'exopodite en *scaphognathite*.

Les trois paires suivantes, d'origine thoracique, présentent une réduction de leurs régions masticatrices et, en même temps, un développement de leur aspect pédiforme au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la bouche. Ce sont les pattes mâchoires, ou *maxillipèdes* (Pmx1, Pmx2, Pmx3). Le troisième maxillipède présente une structure biramée typique et un épipodite transformé en branchie ; il assure ainsi simultanément des fonctions masticatrices, tactiles, respiratoires, et sans doute, également, préhensiles et locomotrices par son endopodite pédiforme. Les pattes thoraciques proprement dites, ou *péréiopodes*, sont au nombre de cinq paires (P1 à P5). Dépourvues d'exopodite, elles comprennent un protopodite de deux articles *(coxa + basis)* et un endopodite de cinq articles *(ischion + mérus + carpe + propode + dactyle)*. Les appendices de la première paire, les *chélipèdes,* servent à la préhension et sont en même temps des armes défensives et offensives. Ils se terminent en deux fortes pinces, dont la dissymétrie est liée à une spécialisation différente. La pince broyeuse, indifféremment la gauche ou la droite, est plus volumineuse, ses mors sont armés de fortes dents arrondies, irrégulières, peu nombreuses, alors que la pince coupante est plus finement denticulée. Les deux péréiopodes suivants sont encore pourvus d'une pince terminale, mais beaucoup plus petite ; enfin, les deux derniers ont une extrémité en forme d'ongle. Les orifices génitaux du mâle sont localisés sur la base des dernières pattes thoraciques, tandis que ceux de la femelle se trouvent sur la troisième paire.

Chacun des six segments de l'abdomen porte une paire de *pléopodes* comprenant typiquement un article basilaire et deux rames foliacées. En fait, les paires antérieures présentent des différenciations en fonction du sexe. Chez le mâle le premier pléopode est assez grêle, rigide, pointu, avec une sorte de gouttière longitudinale près du sommet ; le second ressemble davantage à un pléopode normal, mais la rame interne est pourvue d'une petite lame latérale rigide. Comme nous le verrons plus loin, tous deux jouent un rôle dans la copulation. Chez la femelle, le premier pléopode seul est modifié ; il est petit, grêle, uniramé et est sans doute non fonctionnel. Les pléopodes non modifiés ont, jusqu'à la cinquième paire, une fonction natatoire ; chez la femelle, ils servent, en outre, à l'accrochage des œufs. Les appendices de la dernière paire, ou *uropodes*, sont modifiés d'une tout autre façon : les deux rames sont élargies en palettes natatoires et forment, avec le telson, un éventail caudal.

Dans ses grandes lignes, l'organisation des autres Décapodes correspond à celle décrite ci-dessus, avec cependant des adaptations évolutives qui ont conféré à certaines formes un aspect différent : ainsi, une réduction de l'abdomen et de ses appendices a conduit au type morphologique des Brachyoures, ou crabes. Nous verrons, avec les divers groupes de Crustacés, comment on peut comprendre leur organisation, en se reportant au schéma de base exposé ici, et qui correspond aux formes les plus évoluées.

Tégument et coloration. L'épithélium ectodermique, ou *hypoderme,* sécrète une cuticule chitineuse qui forme l'*exosquelette* et comprend deux assises principales, l'*épicuticule* externe, assez mince, et l'*endocuticule* dans laquelle on distingue, de l'extérieur vers l'intérieur, une zone pigmentée, une zone calcifiée et une zone non calcifiée. De nombreux Crustacés présentent des colorations assez vives, dues à divers pigments (caroténoïdes, mélanine, etc.) qui sont localisés dans la zone pigmentée de l'endocuticule ou dans des cellules ramifiées spéciales, les *chromatophores*. Dans ce dernier cas, les granules de pigment peuvent, en fonction de l'éclairement ou de la coloration du milieu, s'étendre à l'intérieur des branches des chromatophores ou, au contraire, se rétracter. Ce phénomène est connu sous le nom d'*adaptation chromatique* et on l'observe, par exemple, chez de nombreuses crevettes qui prennent la couleur des Algues parmi lesquelles elles vivent. Cependant, on sait, maintenant, que ces adaptations sont en partie commandées par des sécrétions hormonales.

Appareil digestif. Le tube digestif comprend deux parties (antérieure et postérieure) d'origine ectodermique, et une partie moyenne, d'origine endodermique. Chez les Décapodes, l'estomac comporte un système de pièces articulées calcifiées, actionnées par des muscles puissants. Ces pièces constituent un appareil triturant, « le *moulin gastrique* ». Dans d'autres groupes, les structures gastriques sont moins complexes, mais jouent le même rôle. Dans la partie antérieure de l'intestin moyen débouchent des diverticules de l'*hépatopancréas* qui a une double fonction : sécréter des enzymes digestives et absorber les produits de la digestion. L'intestin postérieur aboutit à l'anus qui s'ouvre ventralement sous le telson. Le tube digestif est rudimentaire ou même absent chez certains groupes parasites, les Rhizocéphales par exemple, qui absorbent leur nourriture à travers les téguments.

Appareil circulatoire. Le cœur est situé dans un sinus péricardique, au-dessus du tube digestif. Le sang, admis par des ostioles, est envoyé par les contractions des parois cardiaques dans des artères ramifiées, puis circule dans les lacunes qui entourent les différents organes ; il est ensuite drainé vers les branchies et, enfin, ramené au cœur par des sinus veineux. Chez les Crustacés les moins évolués, les artères peuvent manquer et le cœur s'ouvre directement dans les sinus. Dans plusieurs groupes, le cœur est absent et le sang circule grâce aux contractions du tube digestif.

Appareil respiratoire. Chez beaucoup de petits Crustacés, il n'y a pas d'organes respiratoires spécialisés et les échanges gazeux s'effectuent à travers les téguments. Cependant, lorsque ces derniers sont revêtus d'une cuticule épaisse, on trouve des branchies annexées à certains appendices. Chez les Décapodes, ces branchies sont localisées de part et d'autre du céphalothorax, dans les chambres branchiales situées entre le corps et la carapace. Dans certains cas, il n'y a pas de branchies différenciées et la respiration est assurée par les pléopodes. Chez les Isopodes adaptés à la vie terrestre, des invaginations sur les exopodites des pléopodes forment des chambres remplies d'air, appelées *pseudo-trachées*.

Organes excréteurs. Les principaux organes excréteurs sont les glandes antennaires et les glandes maxillaires. Sauf chez certains Mysidacés, ces deux types de glandes ne fonctionnent pas simultanément : chez les Branchiopodes, les glandes antennaires interviennent pendant la vie larvaire, puis sont relayées par les glandes maxillaires. Chez les Décapodes, par contre, l'ordre de fonctionnement est inverse ; glandes antennaires et glandes maxillaires ont une structure voisine, et se composent d'un *saccule cœlomique* d'origine mésodermique et d'un canal contourné qui aboutit au pore excréteur ; la glande antennaire comporte une vessie où l'urine s'accumule avant d'être éliminée. Des cellules glandulaires, situées dans les diverticules digestifs, ont aussi un rôle excréteur.

Système nerveux. Chez les Décapodes, comme le homard ou l'écrevisse, le système nerveux comprend une masse ganglionnaire supraœsophagienne, ou cerveau, qui innerve les appendices préoraux. Une masse ganglionnaire sous-œsophagienne, reliée à la précédente par des connectifs, innerve les pièces buccales et se prolonge par une chaîne nerveuse ventrale qui a conservé une disposition métamérique, avec une paire de ganglions plus ou moins fusionnés correspondant à chaque segment. Le système sympathique est bien développé, avec une partie antérieure, issue des connectifs périœsophagiens, et une partie postérieure, formée par des nerfs partant du dernier ganglion abdominal.

Chez les autres Crustacés supérieurs, les différences portent principalement sur le degré de concentration des ganglions de la chaîne ventrale. Chez les crabes, ils sont tous réunis en une masse unique. Dans les autres groupes, le système nerveux est moins complexe, mais on observe aussi des condensations de ganglions, par exemple, chez les Ostracodes, où cerveau et ganglion œsophagien sont unis en une seule masse. Le type le plus primitif est sans doute celui des Branchiopodes, chez lesquels le cerveau ne correspond qu'à deux paires de ganglions, alors que les

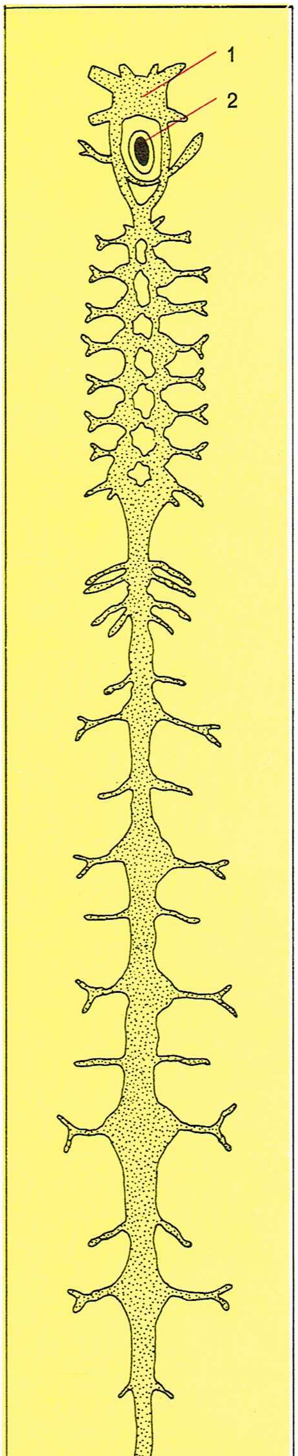

▲ ***Représentation schématique simplifiée du système nerveux d'une écrevisse (genre* Astacus*) : 1, ganglion cérébral; 2, œsophage.***

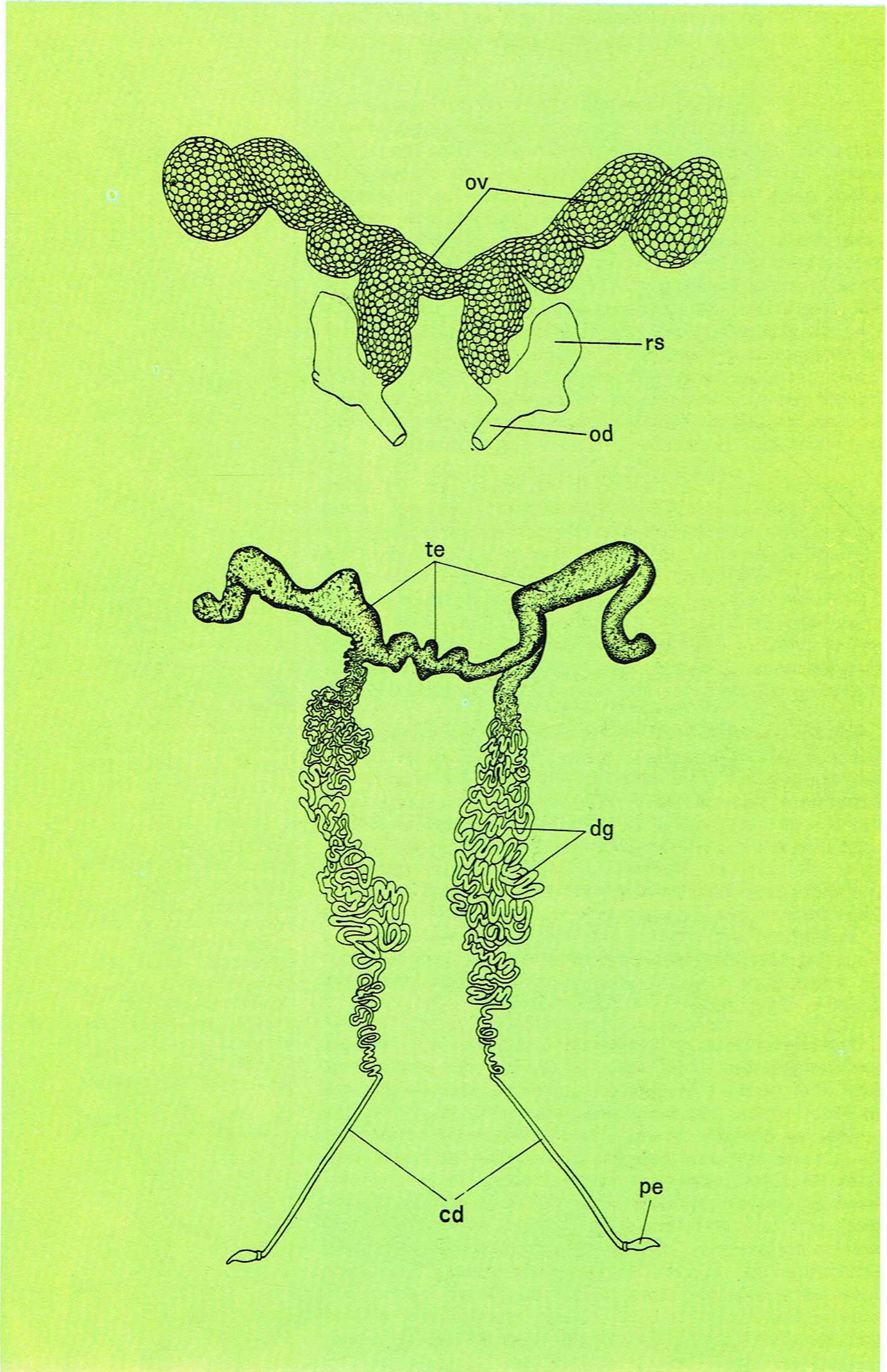

I.G.D.A.

▲ ***Représentation simplifiée des appareils sexuels femelle (en haut) et mâle (en bas) de* Potamon edule *; appareil femelle : ov, ovaire ; rs, réceptacle séminal ; od, oviducte ; appareil mâle : te, testicule ; dg, canal déférent glandulaire ; cd, canal déférent éjaculateur ; pe, pénis.***

éléments de chaque paire ventrale sont largement séparés et reliés par des commissures.

Organes des sens. Les yeux des Crustacés sont de deux sortes ; on distingue l'*œil médian,* ou *nauplien,* impair, et les *yeux composés,* pairs. L'œil médian, de structure simple, est, en général, présent au premier stade larvaire *(nauplius)*. Il persiste parfois comme l'unique organe de la vision (chez les Copépodes), ou concurremment avec des yeux pairs (chez les Branchiopodes). Il est vestigial ou absent chez les Malacostracés. Les yeux composés ont une structure comparable à celle qu'on observe chez les Insectes, c'est-à-dire qu'ils sont formés par l'assemblage d'un nombre variable d'éléments visuels, ou *ommatidies,* entourés de cellules pigmentaires. L'ensemble est recouvert par une cuticule transparente, la cornée, qui présente de multiples facettes correspondant aux ommatidies. Les yeux composés sont, le plus souvent, sessiles chez les Crustacés les moins évolués, et pédonculés chez les Malacostracés. Il ne s'agit cependant pas d'une règle absolue : les Isopodes et les Amphipodes, bien que rangés parmi les formes supérieures, ont des yeux sessiles, alors que les Anostracés, primitifs à beaucoup d'égards, ont des yeux pédonculés.

De nombreux poils et soies disposés sur le corps et les appendices des Crustacés sont des organes tactiles. Quant aux filaments à fine cuticule, les *æsthetascs,* qui sont insérés sur les antennes, on leur attribue un rôle olfactif ou gustatif. Un autre organe sensoriel important, qui se présente chez certains Malacostracés, est le *statocyste,* organe d'équilibration constitué par une vésicule tapissée de soies et contenant des grains de sable ou des concrétions calcaires *(statolithes)*. Enfin, on observe sur le corps et les appendices des Crustacés de nombreux poils et soies, dont le rôle, mal connu, est sans doute tactile ou olfactif ; leurs multiples différenciations laissent supposer qu'ils sont spécialisés et ont des fonctions sensorielles propres.

Appareil reproducteur. Chez la majorité des Crustacés, les sexes sont séparés ; cependant, certains groupes ou certaines espèces présentent un hermaphrodisme lié à un mode de vie particulier. Ainsi, les Cirripèdes, Animaux fixés, possèdent des testicules et des ovaires qui fonctionnent simultanément. Chez les Isopodes parasites et chez quelques espèces appartenant à divers ordres, l'hermaphrodisme est successif, et le plus souvent *protandrique,* c'est-à-dire qu'une phase mâle précède la phase femelle. L'appareil génital, qu'il soit mâle ou femelle, comprend essentiellement deux gonades, souvent partiellement ou complètement fusionnées, qui s'étendent de part et d'autre du tube digestif, et une paire de canaux efférents qui s'ouvrent à l'extérieur. Les orifices génitaux occupent une position, très variable selon les groupes, mais identique chez les deux sexes, sauf chez les Cirripèdes et les Malacostracés : ces derniers ont toujours leurs orifices femelles sur le sixième segment thoracique (en général, sur la coxa des P3) et les orifices mâles sur le huitième (en général, sur la coxa des P5).

Mâles et femelles présentent fréquemment un dimorphisme sexuel très marqué. Chez les Décapodes, le mâle est plus grand que la femelle et possède des chélipèdes plus volumineux. Au contraire, chez les Copépodes et les Isopodes parasites, il est, par rapport à la femelle, sur laquelle il vit, un organisme minuscule. Parmi les très nombreuses différenciations d'appendices liées au sexe, on peut citer celles qui portent sur les antennules ; chez certains Cladocères et chez de nombreux Copépodes, ces organes sont modifiés chez le mâle et servent à maintenir la femelle pendant l'accouplement. De plus, chez les mâles, les deux premières paires d'appendices abdominaux sont souvent transformées en *gonopodes* et constituent ainsi un appareil copulateur. Chez les Décapodes, dont la morphologie externe a été décrite plus haut, on observe cependant que, chez le homard par exemple, les deux paires de gonopodes fonctionnent, au cours de l'accouplement, de la façon suivante : les *spermatophores,* formés à l'intérieur des conduits déférents et contenant les spermatozoïdes, sont recueillis dans les premiers gonopodes creusés en gouttières ; poussés par la lame calcifiée des seconds, qui agissent comme un balai, ils sont déposés sur les sternites de la femelle, au niveau des orifices génitaux. Chez beaucoup de crabes, les premiers gonopodes forment un tube complet et les seconds jouent le rôle de pistons ; les spermatophores sont introduits à l'intérieur des voies génitales femelles et stockés dans un *receptaculum seminis,* ou spermathèque, diverticule des oviductes ; chez certaines crevettes connues sous le nom de Pénéides, on trouve aussi un réceptacle séminal, le *thelycum ;* cependant, si ce dernier s'ouvre à proximité des orifices génitaux, il est indépendant des oviductes.

La fécondation est parfois interne, quand il existe une spermathèque. Elle est le plus souvent externe et a lieu au fur et à mesure de la ponte. Les œufs sont rarement libérés dès leur émission ; le plus souvent, ils sont portés par la femelle jusqu'à l'éclosion, soit entre les valves de la carapace comme chez les Ostracodes, soit à l'intérieur du manteau comme chez les Cirripèdes, soit accrochés aux pattes thoraciques ou abdominales, enfermés ou non dans une poche incubatrice, comme chez les Malacostracés ; ils peuvent aussi être contenus dans un ou deux sacs appendus à l'abdomen, comme chez les Copépodes. Leur nombre et leur taille sont très variables, même à l'intérieur d'un groupe. Parmi les Décapodes, certains

pagures n'en portent que quelques-uns, très volumineux, alors qu'un tourteau *(Cancer pagurus)* peut pondre en une fois plus de trois millions d'œufs minuscules. Dans certains cas (Mystacocarides), l'œuf est unique.

La reproduction des Crustacés est sexuée en règle générale; cependant, c'est dans cette classe que l'on observe l'un des exemples les plus typiques de la parthénogenèse, celui des daphnies et d'autres Branchiopodes qui vivent dans les eaux douces et souvent dans les mares temporaires. Lorsque les conditions sont favorables, les œufs se développent sans fécondation et donnent exclusivement des femelles, dont les générations se succèdent jusqu'au moment où les facteurs écologiques s'altèrent. Alors apparaissent des mâles, et certaines femelles émettent des œufs qui nécessitent une fécondation. Ces œufs, dits durables, sont capables de résister aux conditions les plus défavorables, par exemple à la dessiccation, et reprennent leur développement lorsque les conditions s'améliorent.

Glandes endocrines. Les Crustacés supérieurs, ou Malacostracés, possèdent plusieurs glandes endocrines qui interviennent dans les processus de croissance, de mue, de gamétogenèse, de différenciation sexuelle, etc. Les *organes Y* ou *organes frontaux latéraux* sont des glandes céphaliques paires, dont l'ablation arrête les mues et la croissance. La *glande du sinus* accumulerait une hormone, inhibitrice de la mue, sécrétée par les *organes X*, ou *organes de Hanström*. Son rôle dans la gamétogenèse et dans l'adaptation chromatique a également été mis en évidence. Les *glandes androgènes* existent chez les mâles de nombreux Malacostracés; elles sont, en général, accolées au canal déférent. Leur implantation chez une femelle détermine l'apparition de caractères sexuels mâles avec la transformation de l'ovaire en testicule. Inversement, l'ablation de la glande androgène entraîne une féminisation. En ce qui concerne les autres Crustacés, on n'a qu'une connaissance limitée de leurs glandes endocrines. Il est probable que, chez la plupart d'entre eux, opèrent des mécanismes neuro-sécréteurs; des substances hormonales peuvent être élaborées par différents organes, notamment par des cellules des ganglions cérébraux et thoraciques.

Développement

Au moment de l'éclosion, le jeune Crustacé est, le plus souvent, très différent de l'adulte. Avant d'acquérir sa forme définitive, il doit passer par une série de stades larvaires dont le nombre varie suivant les groupes, et parfois d'une espèce à une autre.

Typiquement, le premier stade libre est un *nauplius*, petit organisme au corps ovale, possédant un œil médian unique et trois paires d'appendices natatoires, les premiers simples, les deux autres biramés, correspondant respectivement aux antennules, aux antennes et aux mandibules. Qu'il s'agisse d'un Copépode, d'un Ostracode, d'un Cirripède ou d'un Pénéide (crevette), la structure d'ensemble est la même; néanmoins, on peut y distinguer des caractère propres à un ordre donné, tels que, par exemple, la présence de deux cornes frontales chez les Cirripèdes ou d'une carapace bivalve chez les Ostracodes.

Chez les groupes les moins évolués, la suite du développement est souvent relativement simple. Le nauplius subit une série de mues, au cours desquelles sa région postérieure se segmente, puis se différencient de nouveaux somites, ainsi que les appendices. Chez certains, comme chez les Branchiopodes, la forme de l'adulte est acquise progressivement.

Chez d'autres, il y a passage par une étape intermédiaire, par exemple le stade *cypris*, à la fin duquel intervient la fixation chez les Cirripèdes, et le stade *copépodite*, observé aussi bien chez les Copépodes libres que chez les formes parasites très régressées.

Les modalités du développement sont beaucoup plus variées et en général plus complexes chez les Malacostracés. Dans un petit nombre de cas, il existe une phase *nauplius* suivie d'une phase *zoé*, comportant l'une et l'autre plusieurs stades séparés par des mues. Chez les zoés, le corps est divisé en deux, la partie antérieure, plus large, étant recouverte d'une carapace; la métamérisation et la différenciation des appendices se poursuivent tout au long de cette période.

Au cours d'une dernière phase, souvent considérée comme postlarvaire, encore qu'elle précède la différenciation sexuelle, se réalise la morphologie définitive de l'adulte; c'est à ce moment que se situe l'abandon de la vie pélagique chez les formes qui vont vivre sur le fond.

Ces trois phases semblent caractéristiques de l'ontogénie des Malacostracés; néanmoins, elles peuvent se dérouler partiellement ou même totalement à l'intérieur de l'œuf. Le nauplius a une grande importance phylétique, puisqu'il constitue le lien essentiel entre tous les Crustacés, quelles que soient les adaptations et les régressions de l'organisme adulte; cependant chez les Malacostracés, le plus souvent, il n'existe pas de nauplius libre, mais un stade embryonnaire correspondant, avec les mêmes caractères essentiels. L'éclosion se produit à une période plus tardive du développement, et, chez les Décapodes par exemple, généralement sous la forme d'une zoé.

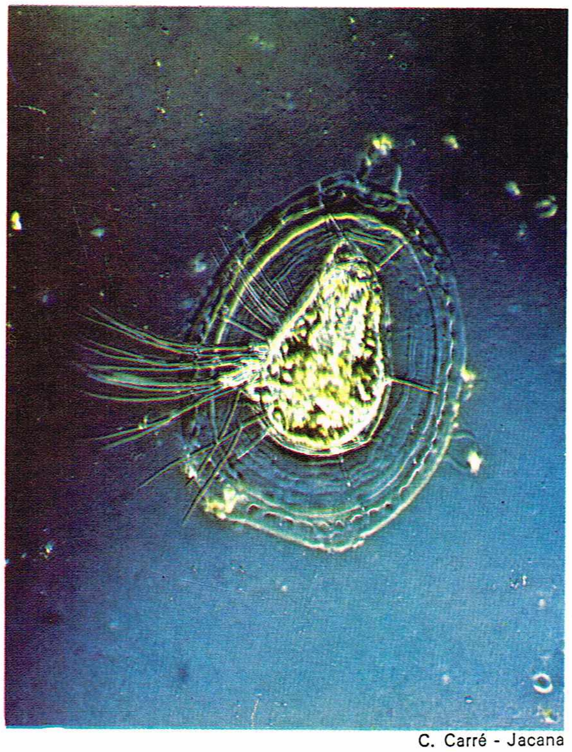

C. Carré - Jacana

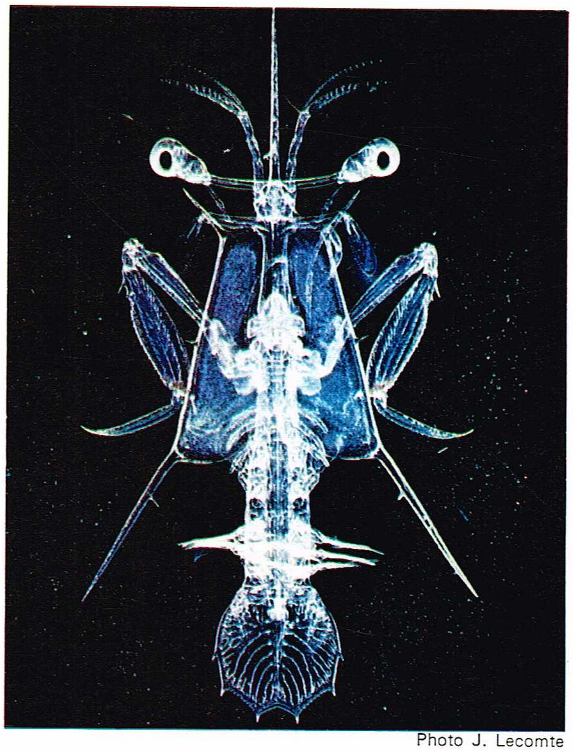

Photo J. Lecomte

◀ ***A gauche, une larve nauplius de Cirripède. A droite, larve pélagique de* Squilla mantis*, commune en Méditerranée.***

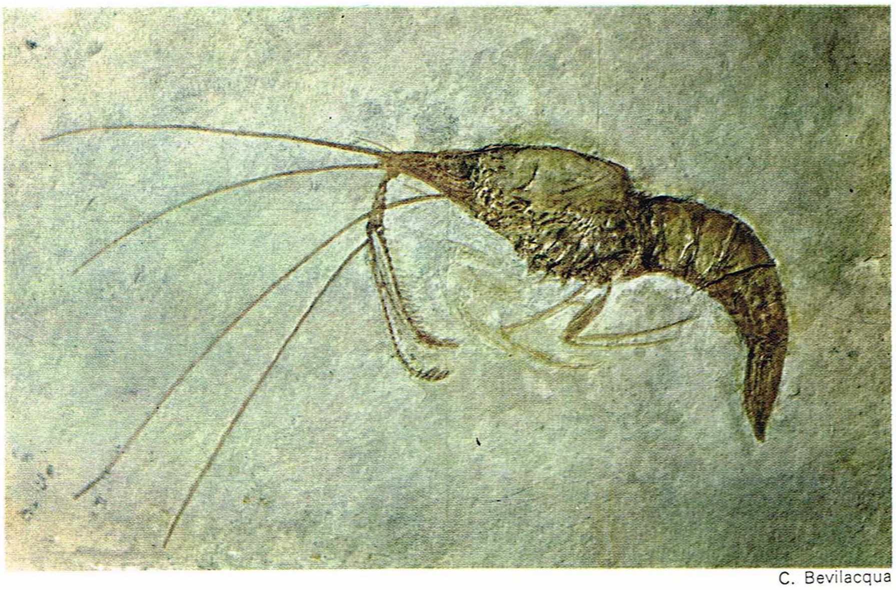

C. Bevilacqua

▲ ***Aeger insignis,*** *petit Crustacé trouvé à l'état fossile dans des terrains datant du Jurassique supérieur.*

A l'inverse des nauplius, les zoés présentent une diversité morphologique extrême, qui se manifeste par des différenciations particulières des appendices, et des structures et ornementations variées des diverses régions de corps. Cela a contraint les carcinologistes à utiliser, pour désigner les différents stades et phases, des termes particuliers suivant les groupes, et entre lesquels les correspondances n'ont pas toujours pu être exactement établies. La même diversité affecte la phase postlarvaire, souvent courte et réduite à un stade désigné par des termes différents : *mégalope* chez les crabes, *puerulus* chez les langoustes, *glaucothoé* chez les pagures.

La phase zoé et même la phase postlarvaire qui lui succède peuvent se dérouler entièrement à l'intérieur de l'œuf, c'est-à-dire pendant la période embryonnaire. C'est ce type de développement qui est la règle chez les Péracarides; ainsi, un jeune Isopode éclôt sous une forme qui ne diffère guère de celle de l'adulte, sauf chez les Gnathiides et les Épicarides, parasites fortement modifiés qui passent par des stades larvaires intermédiaires.

La tendance au raccourcissement de la période larvaire libre se manifeste également chez les Décapodes, qui fournissent de nombreux exemples de développement direct, souvent liés à un habitat ou à un mode de vie spécial ; c'est le cas des écrevisses et des crabes Potamonidés, qui vivent dans les eaux douces, et des genres de crabes et de crevettes des grandes profondeurs, ou des régions arctiques ou antarctiques.

Écologie

Les Crustacés sont avant tout des Animaux aquatiques, dont le milieu originel est vraisemblablement l'Océan. En effet, c'est là que vivent les formes les plus nombreuses et les plus variées; on en trouve aussi bien dans les eaux polaires que dans les mers équatoriales, aussi bien sur les grèves qu'aux plus grandes profondeurs explorées par l'homme (une espèce d'Isopode et quatre espèces d'Amphipodes ont été capturées à 10 500 m environ). Les Crustacés sont adaptés à tous les modes de vie que peut offrir le milieu marin. Certains constituent une bonne partie du plancton; d'autres marchent ou rampent sur les fonds de toute nature, creusent des galeries dans la vase et le sable; d'autres encore, tels tous les représentants de la sous-classe des Cirripèdes, mènent une vie fixée, soudés au rocher auquel ils se sont attachés à la fin de leur vie larvaire.

Les Crustacés ont colonisé les eaux continentales, des plus petites mares temporaires aux grands lacs, des sources chaudes aux torrents de montagne. Enfin, ils ont conquis le domaine terrestre, le peuplant en particulier de centaines d'espèces d'Isopodes (les cloportes) qui ont perdu tout contact avec l'eau. Bien d'autres Crustacés, comme le crabe des cocotiers, *Birgus latro,* et les cénobites, apparentés à des formes marines, passent la majeure partie de leur existence sur la terre ferme, ne retournant à la mer qu'au moment de la reproduction.

Origine et évolution

On trouve, dès le Cambrien, à côté de formes primitives dont les affinités avec les Crustacés actuels sont tout à fait incertaines, des fossiles assez proches des Ostracodes. Au Dévonien, toutes les sous-classes connues aujourd'hui étaient sans doute représentées, comme le seront au Carbonifère presque tous les ordres. C'est au Trias que sont apparus les Décapodes, et au Jurassique, les premiers crabes.

Les fossiles fournissent peu d'indications dans la recherche des rapports phylétiques chez les Crustacés. Beaucoup de ceux-ci, à cause de leur petite taille et de la finesse de leurs téguments, ne se fossilisent pas. C'est le cas des Copépodes, groupe important et probablement très ancien, représenté par des milliers d'espèces vivantes, mais dont on ne connaît aucun fossile. Il a existé d'innombrables formes qui n'ont pas laissé davantage de traces.

Pour essayer de comprendre l'évolution des Crustacés, il faut donc recourir, en dehors des documents paléontologiques, qui sont insuffisants, aux données de la morphologie comparée et de l'embryologie des formes actuelles. L'apparition au cours du développement embryonnaire ou larvaire d'une forme à structure générale constante, le nauplius, laisse supposer l'existence d'un lointain ancêtre à corps non segmenté, et qui devait y ressembler. On peut aussi supposer qu'en raison des analogies dans la métamérisation et le système nerveux que présentent les Crustacés les plus primitifs avec les Annélides, il y a eu, dans l'ascendance des Crustacés, un organisme à corps allongé, constitué d'une région céphalique à appendices différenciés et d'une série de segments identiques, portant chacun une paire d'appendices biramés.

Du tronc commun représenté par ce Crustacé hypothétique se seraient détachées plusieurs branches, qui, à leur tour, se seraient ramifiées et auraient abouti aux formes actuelles. Les affinités entre les grands groupes de Crustacés vivants sont toujours discutées, surtout en ce qui concerne les moins évolués, ceux que l'on rangeait naguère parmi les Entomostracés. On s'accorde cependant à reconnaître une origine commune très ancienne aux Crustacés supérieurs, ou Malacostracés, et on considère que les Phyllocarides actuels présentent des caractères proches de ceux de la souche primitive. Les Syncarides, dont la lignée s'est aussi différenciée très précocement, n'ont guère évolué depuis. Les Péracarides sont issus d'un rameau commun dont les caractères se sont en partie maintenus chez les Mysidacés actuels et d'où provient sans doute la lignée des Euphausiacés inconnue à l'état fossile, mais à laquelle se rattache celle des Décapodes.

SYSTÉMATIQUE

Pendant longtemps, la classe des Crustacés a été divisée en deux sous-classes, qui avaient été proposées par Latreille en 1806 : les Entomostracés et les Malacostracés. Cependant, si les progrès de la systématique ont confirmé le caractère homogène du second groupe, il est apparu que le premier recouvrait plusieurs ensembles évolutifs distincts, dont chacun avait, au même titre que les Malacostracés, la valeur d'une sous-classe. La base de la classification actuelle est celle proposée en 1909 par W. T. Calman, qui distinguait cinq sous-classes : *Branchiopodes, Ostracodes, Copépodes, Cirripèdes* et *Malacostracés*. L'élévation au rang de sous-classe des *Branchioures,* jusqu'alors rattachés aux Copépodes, et la découverte, en 1943, des *Mystacocarides* et, en 1955, des *Céphalocarides,* ont porté à huit le nombre des sous-classes généralement reconnues.

Sous-classe des Céphalocarides

Ces formes très primitives, récemment découvertes, ne sont connues que par quatre espèces, qui ont été recueillies entre 1 m et 300 m de profondeur, au large des côtes des États-Unis et du Japon. Le corps, très allongé, ne dépasse pas 3 mm; la tête, assez large, est suivie de vingt segments d'aspect très voisin, mais dont seuls les neuf premiers sont dotés d'une paire d'appendices, le dernier portant une *furca*.

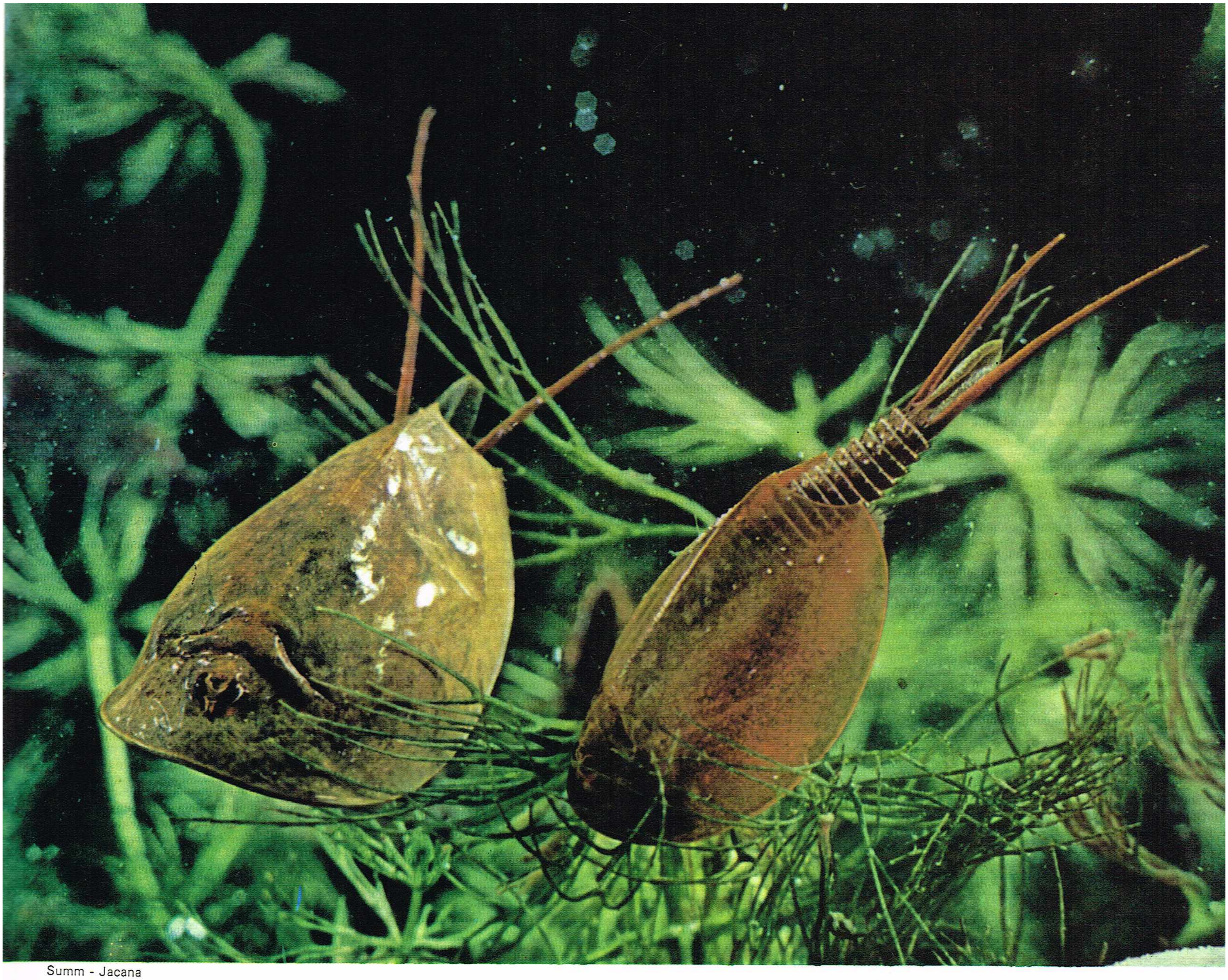

Summm - Jacana

▲ **Lepidurus apus,** ***de l'ordre des Notostracés sur lesquels on observe l'échancrure postérieure du bouclier, et les deux longs filaments terminaux, les cercopodes.***

Sous-classe des Branchiopodes

Les Branchiopodes sont des Crustacés libres dont le nombre des segments du tronc varie de quelques-uns à soixante. Les antennules sont peu développées. Les yeux sont pairs, mais il subsiste presque toujours un œil nauplien vestigial chez l'adulte. En dehors de ceux de la région céphalique qui sont sensoriels, masticateurs ou locomoteurs, les appendices sont tous semblables ; composés en général de deux rames foliacées, ils ont un rôle natatoire et respiratoire. Les Branchiopodes vivent tous dans les eaux douces, souvent dans les mares temporaires. On trouve également certains Cladocères dans la mer.

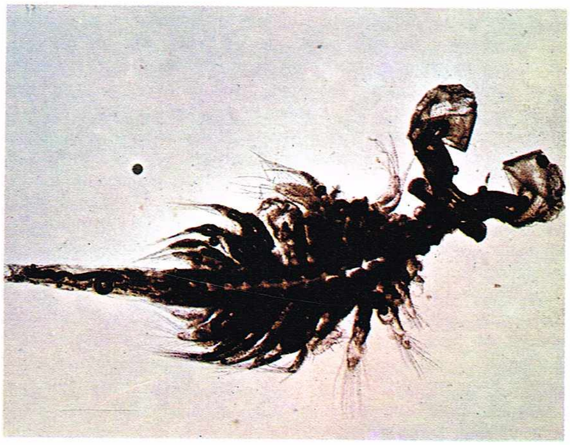

C. Bevilacqua

◀ **Artemia salina** ***(Anostracés) est remarquable par le fort développement, chez le mâle, des antennes à fonction préhensile.***

La classification retenue ici distingue quatre ordres de Branchiopodes. Il faut signaler que certains auteurs considèrent les Anostracés comme une sous-classe et rangent les Conchostracés et les Cladocères dans un même ordre.

Ordre des Anostracés

Chez les Anostracés, le corps est allongé et dépourvu de carapace. Les yeux sont pédonculés, et, chez le mâle, les antennes, très développées et d'une structure assez compliquée, ont une fonction préhensile. Les espèces de nos régions, qui vivent dans les mares et les flaques, appartiennent surtout aux genres *Chirocephalus* et *Branchipus ;* elles mesurent de 10 à 25 mm. *Artemia salina,* fréquente dans les marais salants, est remarquable par son polymorphisme, qui est fonction de la salinité, et par sa reproduction souvent parthénogénétique.

Ordre des Notostracés

Les Notostracés sont caractérisés par le large bouclier dorsal qui recouvre la partie antérieure du corps. Le dernier des dix à quinze segments visibles en arrière de l'échancrure postérieure du bouclier est doté de deux longs filaments, les *cercopodes.* On compte de quarante à soixante paires de pattes. Dans nos régions, *Lepidurus productus* et *Triops cancriformis* vivent dans les eaux stagnantes, souvent à côté des Anostracés dont ils se nourrissent.

Ordre des Conchostracés

Les Conchostracés sont dotés d'une carapace bivalve qui recouvre le corps tout entier et présente des stries

G.S. Giacomelli

G. S. Giacomelli

▲ *Les daphnies (ici* **Daphnia obtusa***), communes dans les mares et les eaux douces, se caractérisent par la présence d'yeux coalescents qui ont l'aspect d'un œil unique impair. A droite, une Alona et, au-dessous, trois œufs durables de daphnie, chacun étant à l'intérieur de son enveloppe protectrice, l'éphippium.*

▶ *Page ci-contre, les Ostracodes comme* **Candona candida** *sont des Crustacés en général microscopiques et omnivores. Benthiques, marins ou dulçaquicoles, ils se caractérisent par un corps comprimé dans une carapace bivalve fortement calcifiée.*

d'accroissement. Ils possèdent de dix à vingt-sept paires de pattes, mais nagent surtout à l'aide de leurs antennes, qui sont biramées et très développées. Plusieurs genres, entre autres *Limnadia* et *Estheria*, sont assez communs dans les eaux douces.

Ordre des Cladocères

Les Cladocères ressemblent aux Conchostracés parce qu'ils possèdent aussi une carapace bivalve, mais cette dernière laisse libre la région céphalique. De plus, leur corps n'est composé que d'un petit nombre de segments et ils ne possèdent, au plus, que quatre paires de pattes. Leurs yeux coalescents, qui ont l'aspect d'un œil unique impair, leur ont valu autrefois le nom de « monocles ». Ce sont des Animaux très communs dans les mares.

Les daphnies, ou puces d'eau, qui sont utilisées pour l'alimentation des alevins et des Poissons d'aquarium, sont particulièrement bien connues. Elles présentent un mode de reproduction très intéressant, la *parthénogenèse cyclique*. Bien qu'elles servent de nourriture à de nombreux Animaux, les daphnies pullulent grâce à une multiplication très rapide, assurée par deux modes de reproduction. Pendant l'été, quand les conditions sont favorables, les œufs se développent parthénogénétiquement, c'est-à-dire sans fécondation préalable, dans une poche incubatrice située entre les valves de la carapace. Les embryons sont nourris par une sécrétion dorsale de la mère et éclosent sous forme de minuscules femelles, qui produiront à leur tour d'autres femelles. Lorsqu'il fait plus froid, ou lorsque les conditions chimiques du milieu changent, ou encore lorsqu'une reproduction parthénogénétique intense a entraîné une surpopulation et par conséquent la disette, certains œufs donnent des mâles. Les femelles produisent alors un ou deux œufs beaucoup plus gros, à membrane plus épaisse. A la suite d'un accouplement, ces œufs fécondés passent dans la chambre incubatrice. La partie dorsale de la carapace de la mère s'épaissit, puis se détache au moment de la mue. Les œufs restent à l'intérieur de cette sorte de coque protectrice, qui a la forme d'une petite selle de cheval et a reçu, pour cette raison, le nom d'*éphippium*. Ces œufs sont dits durables, par opposition aux œufs parthénogénétiques qui se développent immédiatement ; ils résisteront, éventuellement pendant des années, aux intempéries, à la chaleur ou au gel, à la dessiccation, jusqu'à ce que le retour de conditions favorables permette leur développement.

Les espèces d'eau douce sont souvent planctoniques, comme *Daphnia pulex* et *D. magna*, qui atteignent une taille de 5 mm ; *Leptodora kindti* est remarquable par sa carapace réduite à une poche incubatrice dorsale. D'autres, comme *Chydorus sphaericus*, s'attachent aux herbes aquatiques. Les Cladocères qui vivent dans le plancton marin sont abondants et se divisent en un petit nombre de genres, par exemple, les *Podon* et les *Evadne*.

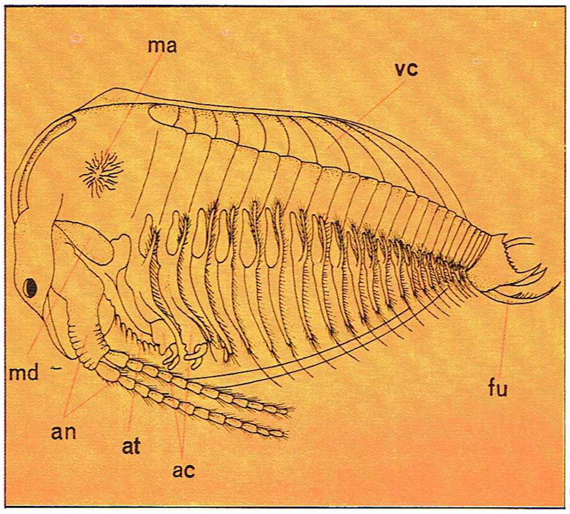

I.G.D.A.

▶ *Représentation schématique d'un Conchostracé mâle* **(Estheria obliqua)** *: ma, muscle adducteur ; vc, valve de la carapace ; md, mandibule ; an, antenne ; at, antennule ; ac, appendices copulateurs ; fu, furca.*

Sous-classe des Ostracodes

Les Ostracodes sont de très petits organismes qui ressemblent quelque peu, à première vue, à des Mollusques bivalves ; leur corps est en effet enfermé dans une carapace dont les deux parties sont fortement calcifiées et réunies dorsalement par une charnière. Le tronc est indistinctement segmenté et se termine par une furca. Les antennules sont simples et les antennes en général biramées ; les unes et les autres sont sensorielles et locomotrices. Il y a, au plus, trois paires d'appendices thoraciques. Les sexes sont séparés, mais la parthénogenèse est fréquente, et, chez certaines espèces, les mâles sont inconnus.

Les Ostracodes sont très abondants dans la mer et dans les eaux douces. La plupart nagent près du fond à l'aide de leurs longues antennes, mais ils sont également présents dans le plancton. On en a trouvé en montagne, à très haute altitude, dans des mares alimentées par la fonte des neiges. Les géants du groupe, les *Gigantocypris*, vivent en mer, à grande profondeur ; leur taille atteint 2 cm, alors que la majorité des autres espèces ne dépasse guère 0,5 mm. Comme ceux des Branchiopodes, les œufs des Ostracodes résistent à la dessiccation et gardent leur vitalité pendant des années.

Sous-classe des Mystacocarides

Ces Crustacés ne mesurent pas plus de 1 mm. Leur corps comprend une région céphalique non totalement soudée au premier segment thoracique, lequel porte les maxillipèdes. Les antennes et les mandibules ont une structure biramée primitive, telle qu'on l'observe chez les nauplius. Les quatre segments thoraciques libres portent des rudiments de pattes. L'abdomen compte cinq segments apodes, un telson et deux bras furcaux.

Les Mystacocarides vivent dans les sables littoraux fins. La première espèce, *Derocheilocaris typicus*, a été découverte en 1943 sur la côte atlantique du continent américain. L'intérêt croissant porté à la faune vivant dans les interstices des sédiments a permis de constater que ces Animaux n'étaient pas particulièrement rares. On a découvert trois autres espèces. Il est remarquable que chacun de ces groupes soit propre à un grand rivage océanique; deux espèces sont atlantiques, vivant l'une à l'ouest, l'autre à l'est; la troisième est connue dans la zone américaine du Pacifique et la quatrième sur le littoral occidental de l'océan Indien.

Sous-classe des Copépodes

Les Copépodes jouent un rôle important dans le cycle biologique des océans et des eaux douces. Ils constituent souvent l'élément dominant dans le plancton, où ils se nourrissent de Végétaux microscopiques avant d'être, à leur tour, dévorés par des Animaux plus grands. Ils sont aussi très nombreux dans le milieu benthique, soit sur le fond même, soit dans les interstices des sédiments. Ils comptent aussi des formes parasites variées, qui vivent sur presque tous les Animaux marins et en premier lieu sur les Poissons. Ces parasites sont souvent extrêmement modifiés; c'est pourquoi aucune définition ne peut s'appliquer à l'ensemble des Copépodes. Cependant, en ce qui concerne les formes libres, l'organisation est, dans ses grandes lignes, celle que l'on peut observer chez un *Calanus*, représentant type du groupe des *Calanoïdes*, très abondants dans le plancton marin.

Le corps d'un *Calanus* est divisé en deux parties. La région antérieure, longue et renflée, comprend la tête à laquelle est soudé le premier segment thoracique, les cinq autres étant libres. La région postérieure, plus courte et plus étroite, constitue l'abdomen qui, typiquement, compte cinq segments, dont les deux premiers sont généralement fusionnés chez la femelle. Les antennules, longues et multiarticulées, ont un rôle natatoire. Les antennes sont biramées et courtes. Les autres appendices de la région céphalique sont les mandibules et les maxillules, biramées, les maxilles et les maxillipèdes, uniramés. Chacun des cinq segments thoraciques libres porte une paire de pattes biramées, excepté les dernières qui sont simples, parfois réduites, ou, chez le mâle, modifiées en appendices copulateurs. Il n'y a pas de pattes abdominales, mais, sur le dernier segment, une paire d'appendices non articulés qui forme la furca caudale.

Le tube digestif est simple, sans région bien définie, et dépourvu de diverticules. La circulation est assurée par un cœur pourvu de trois ostioles, situé au niveau des premiers segments thoraciques libres. La chaîne nerveuse est courte, avec des ganglions distincts mais rapprochés. Il n'y a pas d'yeux pairs, mais un œil nauplien complexe. Les sexes sont séparés; il existe deux orifices génitaux chez la femelle, un seul chez le mâle; dans les deux cas, ils sont localisés sur le premier segment abdominal.

Beaucoup de Copépodes planctoniques appartiennent au groupe des *Cyclopoïdes*; ils se distinguent des Calanoïdes par le rétrécissement de la région postérieure du corps, qui se situe non plus en arrière, mais en avant du dernier segment thoracique, lequel paraît ainsi appartenir à l'abdomen. Chez toutes ces formes libres, l'adaptation à la vie pélagique se traduit souvent par le développement de très longues soies plumeuses sur les diverses régions du corps et surtout sur la furca caudale. Les noms de certaines espèces, comme *Calocalanus pavo* (paon) et *Oithona plumifera*, expriment bien ces remarquables caractères. Les Cyclopoïdes sont abondamment représentés dans les eaux douces, avec, en particulier, le genre *Cyclops*, ainsi nommé à cause de son œil unique situé au milieu du front et très apparent.

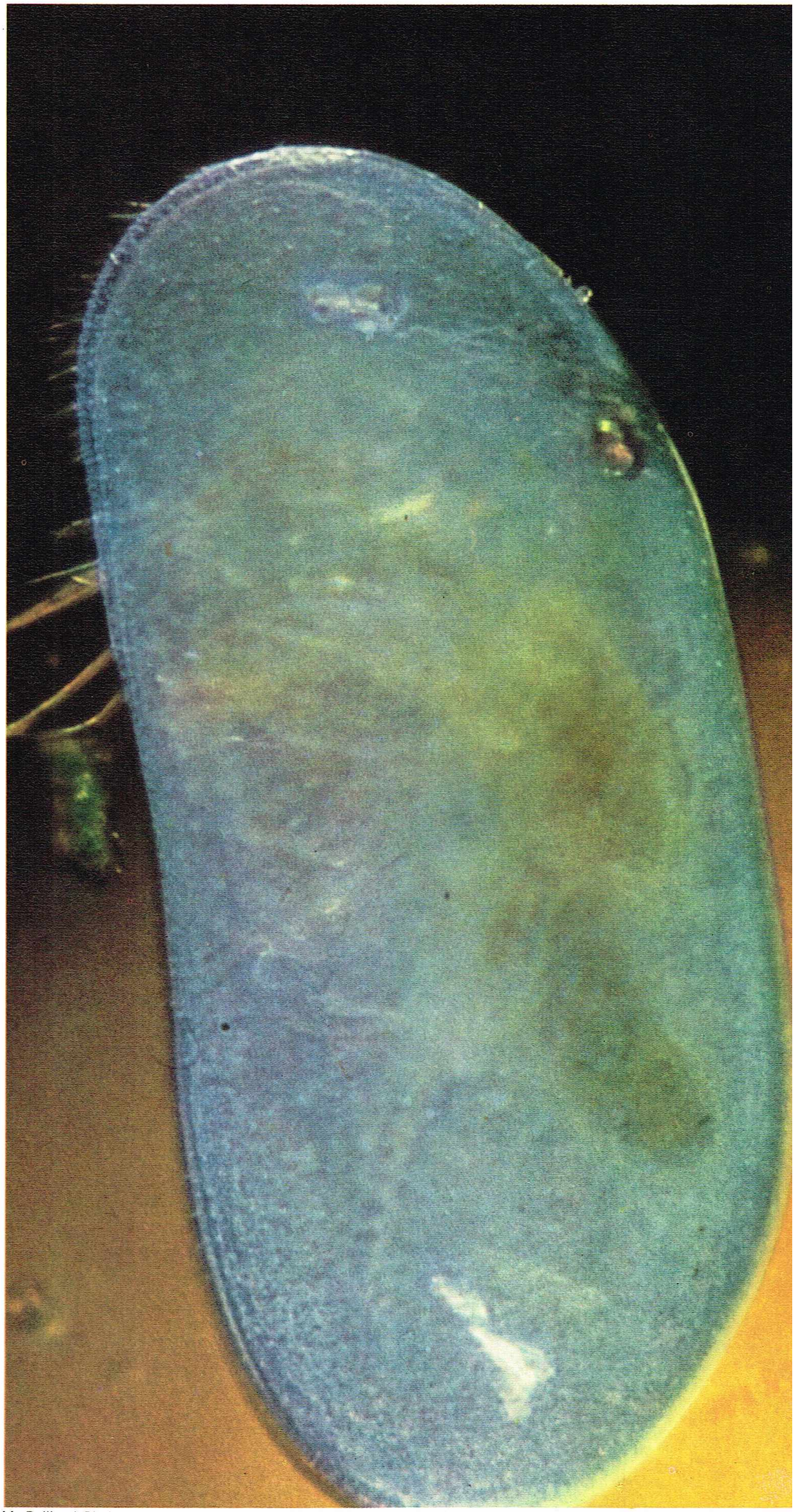

M. Bellieud-Pitch

C. Carré - Jacana

▲ ***Cyclops**, ainsi nommé à cause de son œil unique situé au milieu du front, est orné, comme beaucoup de Cyclopoïdes, de très longues soies plumeuses sur tout le corps et particulièrement sur la furca caudale.*

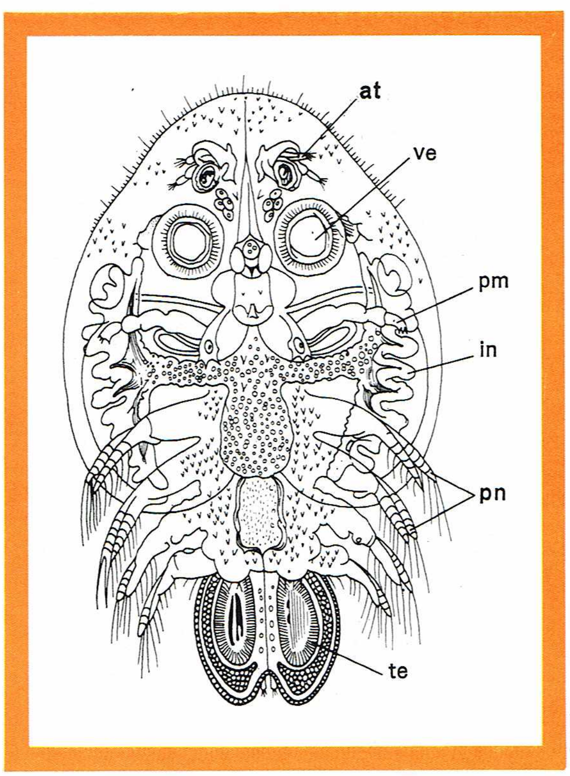

I.G.D.A.

▶ *Coupe longitudinale ventrale d'**Argulus foliaceus**, jeune mâle : at, antennule; ve, mâchoire modifiée en ventouse; pm, patte-mâchoire; in, intestin; pn, pattes natatoires; te, testicule.*

Nous mentionnerons encore un autre groupe, qui compte de nombreuses formes libres marines ou dulçaquicoles, et dont l'habitat est particulier : les *Harpactoïdes*, qui vivent sur le fond de la mer ou dans les interstices mêmes des sédiments. Leur forme est en rapport avec leur mode de vie : ils sont en général allongés, parfois vermiformes, et leurs appendices sont courts.

Les Copépodes parasites ne constituent pas un groupe indépendant mais représentent un ensemble de lignées distinctes, issues de diverses formes libres. Leur parasitisme a entraîné de fortes modifications et souvent des régressions considérables. Certains présentent encore des caractères très apparents de Copépodes. C'est le cas des *Caligidae*, qui vivent fixés comme des ventouses sur la peau des Poissons. Cependant, dans de nombreuses familles, la région céphalique de la femelle est ancrée dans les tissus de l'hôte, et son corps n'est plus qu'un sac aux formes plus ou moins compliquées, sans trace de segmentation, ni d'appendices. Les mâles, beaucoup plus petits et moins modifiés, sont souvent parasites sur la femelle elle-même. *Lerneaenicus spratae* vit généralement fixé à l'œil du sprat, alors que *Lernaea branchialis* s'attache sur les branchies de la morue.

Si déformés soient-ils, ces parasites présentent un caractère commun avec les Copépodes libres : leur développement larvaire est similaire. La première larve est un *nauplius*, auquel succède un *métanauplius*, puis un *copépodite*, qui a l'aspect général d'un Copépode libre. C'est au cours des stades suivants que s'estompent, régressent et disparaissent la métamérie et les appendices.

On observe dans la sous-classe tout entière un autre caractère constant lié à la reproduction : chez les femelles les plus régressées comme chez celles des espèces planctoniques, les œufs sont conservés après la ponte dans un ou plus souvent deux sacs ou cordons appendus à la région génitale.

Sous-classe des Branchioures

Les Branchioures diffèrent des Copépodes par la possession d'yeux pairs en plus de l'œil nauplien, par la localisation des orifices génitaux, situés sur le dernier segment thoracique, par l'absence de sacs ovigères chez la femelle, qui pond sur les plantes aquatiques, et enfin, par leur développement abrégé, la structure à l'éclosion étant voisine de celle de l'adulte.

Le corps des Branchioures est divisé en trois régions. Le céphalothorax, entier, forme dorsalement un large bouclier qui s'étend plus ou moins au-dessus de trois segments thoraciques libres et de l'abdomen indivis, plus ou moins bilobé. Les antennules et les antennes sont très courtes, les mandibules dentées à l'extrémité et les maxillules en forme de stylet. Les maxilles sont transformées en grosses ventouses adhésives et la région buccale en appareil de succion. Il y a quatre paires de pattes natatoires biramées. Le système nerveux est concentré, avec six ganglions ventraux. Les sexes sont séparés. Chez la femelle, l'ovaire est impair et l'oviducte unique; chez le mâle, il y a un testicule dans chacun des deux lobes abdominaux. L'orifice génital, impair dans les deux sexes, s'ouvre entre les bases des dernières pattes thoraciques.

Les Branchioures ne comprennent qu'une famille, celle des *Argulidae*. En Europe, le genre *Argulus* est représenté par une cinquantaine d'espèces, toutes parasites de Poissons marins ou d'eau douce. L'une des plus communes dans nos régions est *A. foliaceus*, le « pou des carpes ». C'est un petit organisme plat, mesurant au plus 8 mm de long, et dont la transparence permet de discerner l'organisation interne. Il nage activement et se fixe momentanément sur une carpe ou sur un autre Cyprinidae, dont il suce le sang, puis erre encore librement, avant de se fixer de nouveau pour s'alimenter.

Les Branchioures sont des Animaux nuisibles; très prolifiques, ils pullulent dans certaines eaux, et on peut parfois en dénombrer des centaines sur un seul Poisson. Ils ont un double effet sur leur hôte : d'une part, ils l'épuisent et peuvent même le faire succomber, surtout s'il s'agit d'un jeune individu, d'autre part, les blessures qu'ils causent forment une porte d'entrée pour des agents pathogènes et sont à l'origine de maladies parasitaires diverses (mycoses, par exemple).

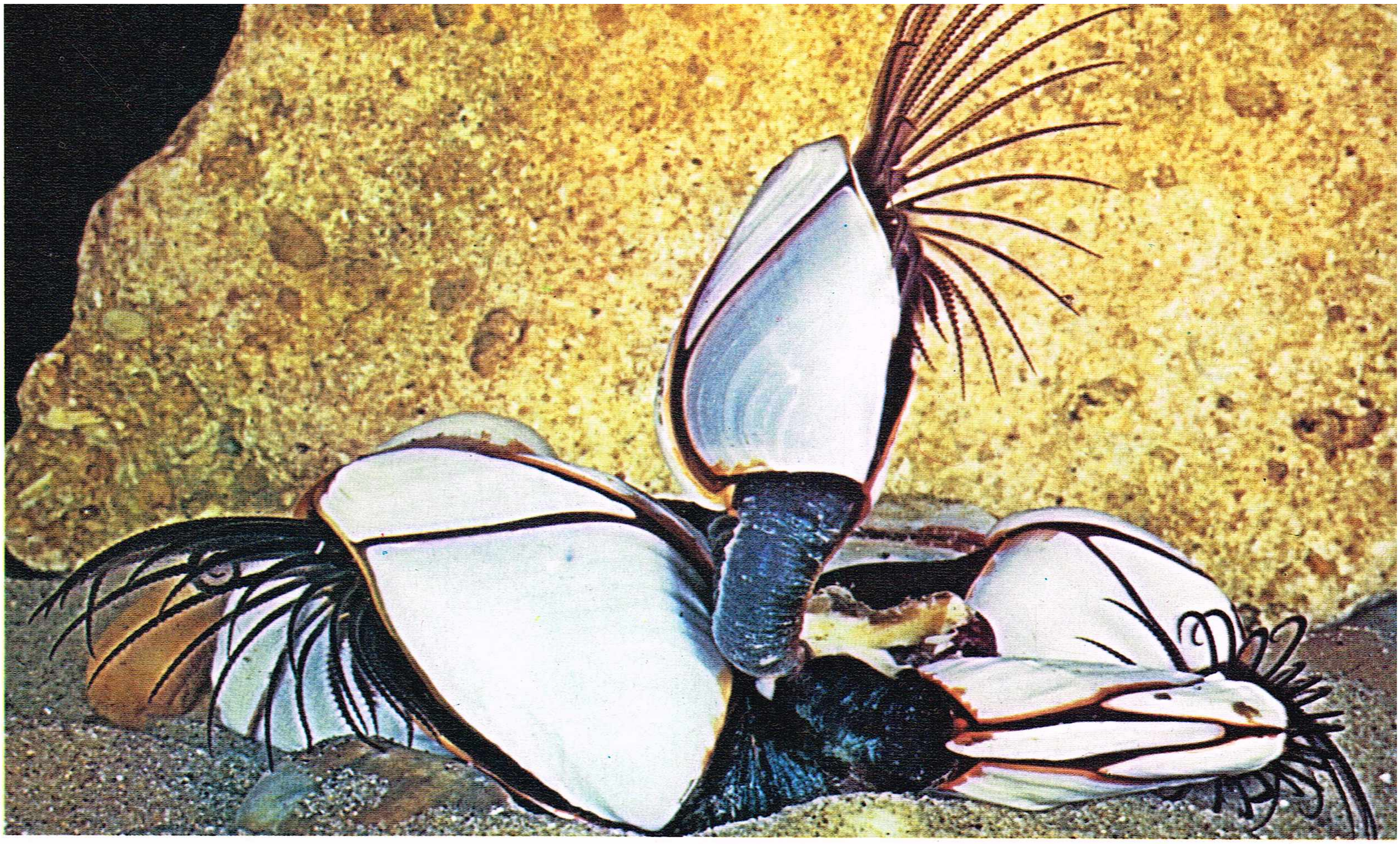

J. Six

Sous-classe des Cirripèdes

Les Cirripèdes, par leur morphologie et leur biologie, occupent une place particulière parmi les autres Crustacés. En effet, ces derniers, hormis les parasites, appartiennent à la faune vagile, qui réunit tous les Animaux capables de se déplacer, que ce soit en nageant, en marchant ou en rampant. Par contre, les Cirripèdes non parasites se soudent précocement à un support solide et restent ainsi fixés jusqu'à leur mort. Très éloignés des autres Crustacés tant par leur mode de vie que par leur aspect, les Cirripèdes ont pendant longtemps été rangés parmi les Mollusques. C'est en 1830 seulement que l'on a pu établir avec certitude leur position zoologique, en découvrant que leur premier stade larvaire était un nauplius typique.

Les Cirripèdes sont des Crustacés marins dont le corps, indistinctement segmenté, est recouvert d'un manteau qui sécrète une carapace rigide. A l'état adulte, ils sont fixés par la région céphalique qui est dépourvue d'yeux pairs et d'antennes. Ils possèdent, au plus, six paires d'appendices thoraciques biramés, en forme de *cirres* multiarticulés. La plupart des espèces sont hermaphrodites : les orifices femelles s'ouvrent sur le premier segment thoracique et les orifices mâles en arrière de la dernière paire d'appendices. L'éclosion, nous l'avons dit, se produit au stade *nauplius* et la fixation intervient à la fin d'un stade *cypris* caractérisé par une carapace bivalve et ainsi nommé pour sa ressemblance avec un Ostracode.

Ordre des Thoraciques

Cet ordre très vaste, qui rassemble toutes les formes non parasites de Cirripèdes, comprend deux sous-ordres principaux, les Lépadomorphes et les Balanomorphes.

Sous-ordre des Lépadomorphes

Lepas anatifera peut être pris comme type de Lépadomorphe. C'est un Animal qui se fixe sur des objets flottants, pièces de bois, bouteilles, etc. Il n'est pas rare de rencontrer, échouées sur les plages, des épaves portant une ou plusieurs touffes de ces curieux organismes. Leur aspect explique que l'imagination populaire ait vu, dans ces sortes de coquilles d'où émerge un panache plumeux, les œufs pédonculés de canards sauvages. Leur nom d'anatifes (du latin *anas,* canard) évoque cette croyance.

Un *Lepas* est formé de deux parties, le corps proprement dit, ou *capitulum,* en forme de gland, qui atteint 5 cm de long, et le *pédoncule*, cylindrique, flexible et musculeux, par lequel l'Animal est fixé à son support et qui peut mesurer 50 cm. Le capitulum est protégé par une carapace chitineuse dont les deux valves sont renforcées par des plaques calcaires : deux supérieures, les *terga,* deux inférieures, les *scuta,* et une impaire, la *carène.* En fait, la fixation intervenant par la région céphalique, la carène doit être considérée comme dorsale, les *terga* comme postérieures et les *scuta* comme antérieures. Les antennules subsistent à l'état de rudiments à la base du pédoncule, et les pièces buccales sont réduites. Les six paires d'appendices thoraciques se composent d'un court protopodite et de deux longs filaments multiarticulés, les *cirres ;* ce sont ces derniers qui sortent en panache entre les valves et qui, par des mouvements rythmiques, amènent les proies planctoniques vers la bouche. Le tube digestif consiste en un œsophage étroit, en un court estomac pourvu de diverticules glandulaires et en un long intestin aboutissant à l'anus, qui est dorsal.

Le cœur étant absent, le sang circule dans un système de lacunes, et la respiration s'effectue à travers les téguments. Les principaux éléments du système nerveux sont les deux ganglions cérébraux et les ganglions ventraux d'où partent les nerfs des cirres. Les deux ovaires sont logés dans le pédoncule et les oviductes s'ouvrent à la base de la première paire de cirres. Les testicules, pairs également, s'étendent le long du tube digestif et dans la base des cirres ; les spermiductes s'élargissent en vésicules séminales qui s'unissent pour former un canal éjaculateur logé dans un pénis. La fécondation est le plus souvent croisée, c'est-à-dire que le pénis long et flexible sort entre les valves et va déposer les spermatozoïdes à l'intérieur du manteau d'un individu voisin. Les œufs sont retenus jusqu'à l'éclosion dans des sacs sécrétés par les oviductes.

Les autres Lépadomorphes se distinguent des *Lepas* par divers caractères, notamment par les plaques du capitulum qui peuvent être atrophiées ou même absentes, ou, au contraire, subdivisées et nombreuses, comme chez les *Scalpellidae.* A cette importante famille appartiennent *Pollicipes cornucopiae,* le « pouce-pied », qui vit sur les rochers battus du littoral et dont on consomme le pédoncule, ainsi que les nombreuses espèces de *Scalpellum,* très largement distribuées, des côtes jusqu'à 3 000 m de profondeur.

C'est chez les représentants du genre *Scalpellum* que l'on observe des mâles nains, dits mâles complémentaires, qui vivent en parasite à l'intérieur des individus hermaphrodites normaux.

▲ ***Sur cet exemplaire de* Lepas anatifera, *appartenant à la famille des Lépadidés, on observera les cirres émergeant, en panache, des valves de la carapace.***

▼ **Balanus perforatus,** ***espèce abondante sur nos côtes, forme parfois sur les rochers un véritable revêtement.***

J. Six

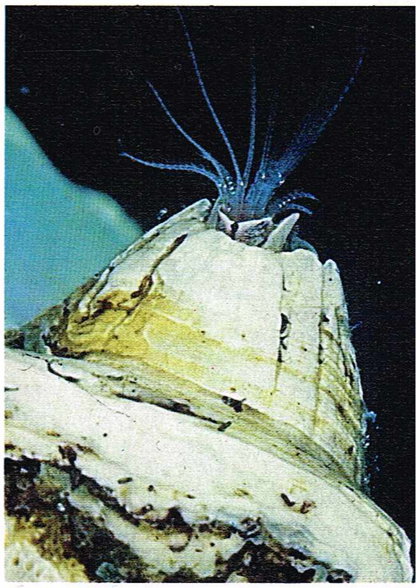

▶ *La plupart des Rhizocéphales infestent presque exclusivement les Crustacés Décapodes. Ici,* Sacculina carcini, *qui se présente comme un sac charnu, jaunâtre, appendu à la face ventrale d'un crabe.*

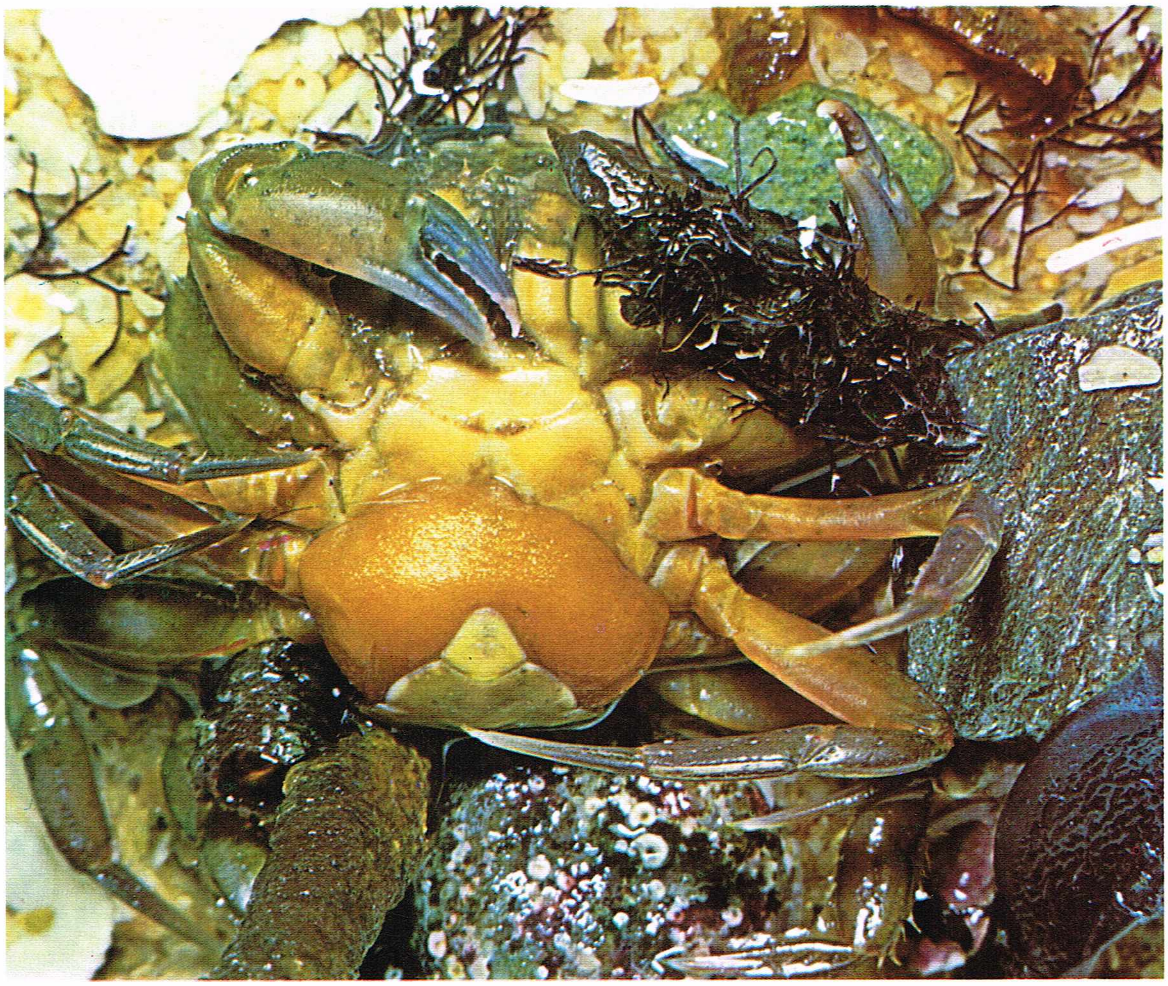

A. Kerneis - Jacana

▼ *Colonie de* Chthamalus stellatus, *fixés au rocher. Ces Cirripèdes sont très communs sur toutes nos côtes, dans la zone découverte à marée basse.*

G. Relini

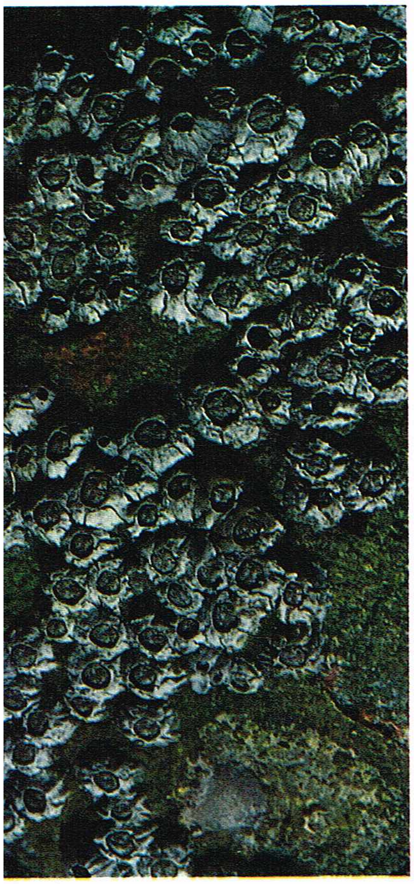

Sous-ordre des Balanomorphes

Les Balanomorphes sont observés d'une façon beaucoup plus courante que les Lépadomorphes, puisqu'ils incluent les balanes, si abondantes sur les rochers littoraux, sur lesquels elles forment souvent un revêtement plus ou moins continu. L'absence de pédoncule confère aux Balanomorphes un aspect bien différent de celui des Lépadomorphes. Le capitulum est directement soudé au substrat et son squelette se présente comme un ensemble de pièces fixes formant une sorte de loge tronconique, la *muraille,* qui peut être obturée par des pièces mobiles, homologues des terga et scuta des *Lepas.*

Les balanes sont représentées sur nos côtes par les *Chthamalus stellatus* et par plusieurs *Balanus.* Ces diverses espèces ont des domaines d'extension préférentiels, qui, cependant, se chevauchent largement entre la limite atteinte par la mer au moment des grandes marées et la zone qui reste constamment immergée. Si les balanes de nos régions ne dépassent guère 2 cm de large, on a découvert une espèce de Patagonie, qui atteint une hauteur de 15 cm pour un diamètre de 8 cm. On trouve dans le groupe des Balanomorphes des genres qui se fixent sur la carapace ou sur la peau d'Animaux vivants, comme les *Chelonobia,* qui vivent sur les tortues, et les *Coronula,* dont la taille dépasse 5 cm de diamètre, et qui sont fréquents sur les baleines.

Ordre des Rhizocéphales

L'adaptation au parasitisme est poussée à la perfection chez les Rhizocéphales. En effet, leur organisation se réduit à un ou plusieurs sacs contenant une masse viscérale et des glandes génitales, et à un système radiculaire s'étendant à l'intérieur du corps de l'hôte et en extrayant directement les sucs nourriciers. Il n'y a ni segmentation, ni appendices, ni tube digestif. Les Rhizocéphales infestent presque exclusivement les Crustacés Décapodes. De nombreux genres et espèces ont été décrits ; ils se distinguent par le nombre, la forme et l'implantation des sacs, mais surtout par des détails de structure, que seule une étude histologique permet de discerner.

L'un des Rhizocéphales les plus anciennement connus est la sacculine, qui infeste souvent *Carcinus maenas,* le plus commun des crabes de nos régions. Ce parasite se présente comme un sac charnu jaunâtre, appendu à la face ventrale du crabe ; lorsqu'il est bien développé, il maintient l'abdomen écarté du céphalothorax ; un court pédoncule le rattache à son hôte, à l'intérieur duquel s'étend, jusqu'à l'extrémité des appendices, le réseau ramifié par lequel le parasite se nourrit. Lorsque les glandes génitales sont arrivées à maturité et après autofécondation, les œufs sont incubés à l'intérieur du manteau. A l'éclosion, la larve se présente comme un nauplius, doté des cornes frontales caractéristiques des Cirripèdes, mais sans tube digestif. Après plusieurs mues, la larve parvient au stade cypris ; toujours dépourvue de tube digestif, elle mène alors, pendant plusieurs jours, une vie libre dans le plancton. C'est alors que, au lieu de se fixer sur un rocher ou sur un objet flottant comme les autres Cirripèdes, elle s'attache par une antennule à la carapace d'un crabe, à la base d'un poil. A partir de ce moment, la cypris se transforme rapidement en une masse cellulaire ovoïde qui s'entoure d'une nouvelle cuticule, la carapace et les appendices larvaires étant rejetés. Un tube interne, sorte d'aiguille creuse, se forme et s'engage dans l'antennule. C'est par ce tube jouant le rôle d'un trocart que la masse cellulaire s'injecte littéralement à l'intérieur du crabe. Pendant une longue période, évaluée à vingt mois, alors que le crabe poursuit sa croissance, elle va effectuer une lente migration qui la conduit finalement dans l'abdomen. Là, se différencient les organes définitifs de la sacculine, en même temps que se développe son système radiculaire. Au contact du parasite, les tissus du crabe se nécrosent localement et, finalement, cèdent. La sacculine devient alors externe, s'accroît rapidement et prend l'aspect décrit plus haut. Le mode de développement des autres Rhizocéphales ressemble à celui

de la sacculine. Cependant, il peut arriver que chez certains genres le parasite interne produise, non pas un, mais plusieurs sacs externes, comme chez *Peltogaster paguri,* qui vit sur les pagures, et chez les *Thompsonia,* qui infestent les crevettes.

La présence d'un Rhizocéphale modifie profondément le métabolisme de l'hôte, ralentit sa croissance et, surtout, provoque l'atrophie des glandes génitales. La castration parasitaire se manifeste de façon spectaculaire par l'apparition chez les crabes mâles parasités de caractères sexuels secondaires femelles, alors que les femelles adultes reprennent l'aspect de femelles immatures.

Sous-classe des Malacostracés

Les Malacostracés rassemblent plus des deux tiers des espèces de Crustacés actuels qui sont connus. La complexité et le degré de perfection de leur organisation expliquent qu'on les appelle souvent les Crustacés supérieurs. Ils sont très anciennement connus des hommes puisqu'ils comprennent tous les Crustacés de grande taille et presque tous ceux que l'on mange : homards, langoustes, crabes, crevettes, etc. Les Malacostracés présentent, nous le verrons, une grande diversité et se rattachent à des types morphologiques très variés. Une série de caractères fondamentaux communs en font cependant un groupe homogène.

Le corps, composé de dix-neuf segments, est divisé en trois régions ; la tête comprend cinq segments, le thorax, ou *péréion,* huit, l'abdomen, ou *pléon,* six, ainsi qu'une pièce terminale, ou *telson.* Il existe normalement des yeux pairs composés et chaque segment porte typiquement une paire d'appendices. Les orifices génitaux s'ouvrent toujours sur le sixième segment thoracique chez la femelle et sur le huitième chez le mâle. Les antennules ont le plus souvent deux flagelles et les antennes sont biramées avec un exopodite généralement en forme d'écaille. Les mandibules ont une région masticatrice divisée en une partie antérieure coupante et une partie postérieure broyeuse. Les pattes thoraciques et abdominales sont biramées.

Super-ordre des Phyllocarides

Le super-ordre des Phyllocarides, qui ne comprend que le seul ordre des *Leptostracés (Leptostraca),* comprend les formes les plus primitives de la sous-classe. Ce sont en effet les seuls Malacostracés à carapace bivalve ; leurs péréiopodes sont foliacés comme les appendices des Branchiopodes et leur abdomen compte un segment supplémentaire, qui porte une *furca.* Le nombre des segments est ainsi de vingt au lieu de dix-neuf. Ce sont cependant de vrais Malacostracés par le nombre des appendices, par la position des orifices génitaux et par l'anatomie interne.

Groupe florissant au Primaire, où certaines formes avaient plus de 60 cm de longueur, et au début du Secondaire, les Phyllocarides ne sont plus représentés actuellement que par une dizaine d'espèces, toutes marines, dont la plus grande ne dépasse pas 4 cm de long. *Nebalia bipes,* qui mesure 10 mm au plus, est commune dans nos régions, en eau très peu profonde ; elle se nourrit de substances animales et végétales en décomposition.

Super-ordre des Syncarides

Les Syncarides sont de petits Crustacés sans carapace, dont la tête est unie au premier segment thoracique ou en est séparée par un sillon. On divise ce super-ordre en deux ordres principaux. Le premier est formé par un très petit nombre d'espèces, localisées dans les eaux douces d'Australie et de Tasmanie : ce sont les *Anaspidacés,* dont la première espèce décrite, *Anaspides tasmaniae,* avait d'abord été rattachée à des groupes plus évolués.

Le second ordre est constitué par les *Bathynellacés,* qui sont caractérisés par la régression des yeux et des pléopodes. L'essor de la spéléologie a permis de découvrir qu'ils vivaient surtout dans les eaux douces souterraines : une cinquantaine d'espèces ont été décrites au cours des dernières décennies.

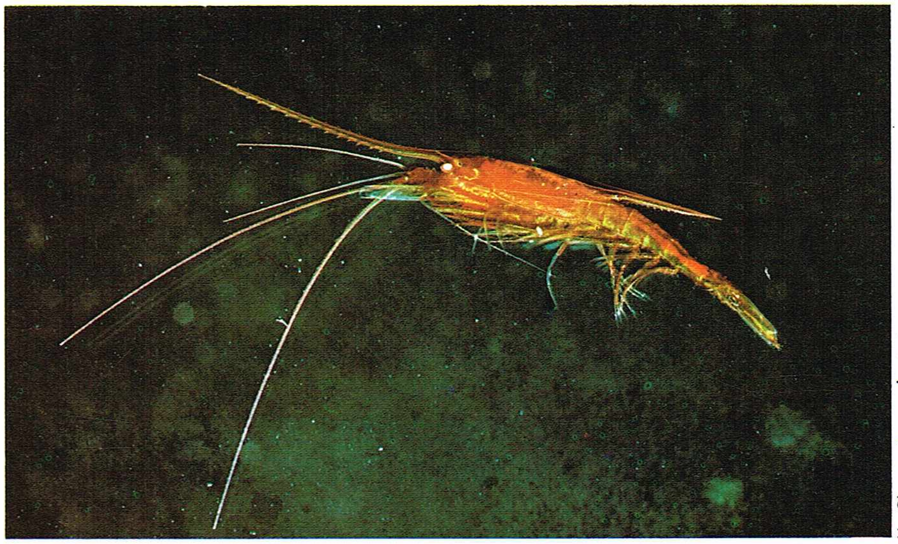

▲ ***Les Mysidacés sont en général de petite taille ; cependant certains comme* Gnathophausia zoea *ont une carapace prolongée par un rostre très développé et une longue épine postérieure, qui peuvent atteindre ensemble 20 cm de long.***

Super-ordre des Péracarides

Les Péracarides présentent une extraordinaire diversité d'aspect : présence ou absence de carapace, possession d'yeux sessiles ou pédonculés, dimensions de l'abdomen variables, et multiples adaptations à des milieux différents. Cependant, ils sont unis par plusieurs caractères communs : le premier segment thoracique au moins est soudé à la tête, mais il y a toujours quatre segments thoraciques libres, et la femelle est toujours pourvue de lamelles annexées aux péréiopodes, les *oostégites,* qui forment une *cavité incubatrice* où se développent les œufs.

Ordre des Mysidacés

Les Mysidacés sont les seuls Péracarides qui présentent un *faciès caridien,* c'est-à-dire qu'ils ont l'aspect de crevettes. La carapace protège une grande partie du thorax mais n'est soudée qu'aux trois premiers segments au plus ; les yeux sont pédonculés ; l'un des deux flagelles de l'antennule est très long ; les pattes thoraciques sont biramées et la première paire est toujours transformée en patte-mâchoire ; les pléopodes sont biramés ou manquent ; enfin, les uropodes et le telson forment un éventail caudal.

Les Mysidacés sont en général de petite taille (10 à 30 mm) ; pélagiques, on les trouve dans la plupart des mers, et, comme les Copépodes et les Euphausiacés, ils servent de nourriture aux Animaux de plus grande taille. Certaines espèces sont strictement bathypélagiques ; ainsi, au-delà de 1 000 m de profondeur, vivent les *Gnathophausia,* au corps d'un rouge intense et dont la carapace est prolongée par un rostre très développé et une longue épine postérieure, l'ensemble de ces deux dernières parties atteignant 20 cm de long. Certaines formes se rencontrent dans les lacs et d'autres, enfin, sont confinées dans les eaux souterraines.

▼ ***Représentation schématique d'un Leptostracé,* Nebalia bipes *: ro, rostre ; an1, an2, antennules ; fu, furca.***

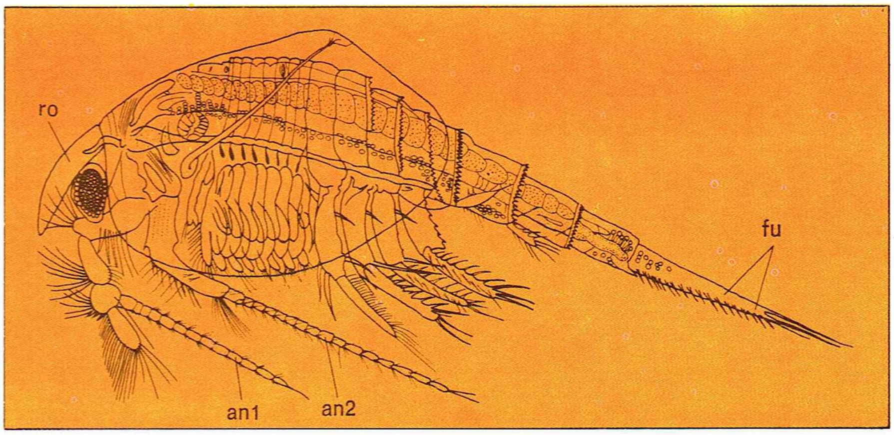

J. Forest

▲ *Côte à côte, deux Isopodes : à droite, un Cloporte du genre* **Porcellio**, *d'une taille habituelle (15 mm environ); à gauche, le monstrueux* **Bathynomus giganteus**, *forme des mers profondes, le plus grand des Crustacés en dehors des Décapodes, puisqu'il peut mesurer plus de 30 cm de long.*

Ordre des Cumacés

Les Cumacés ont un mode de vie totalement différent de celui des Mysidacés. Ce sont avant tout des Animaux fouisseurs, et leur aspect, dans l'ensemble assez uniforme, est très particulier. La carapace couvre seulement trois ou quatre segments thoraciques; l'abdomen, long et grêle, se recourbe souvent du côté dorsal, et son aspect évoque ainsi quelque peu la queue d'un scorpion, d'où le nom de *Cuma scorpioides* donné à l'espèce la plus anciennement connue. Les yeux sessiles sont soudés en un seul organe médian. Les trois premières paires d'appendices thoraciques sont modifiées en pattes-mâchoires. Les deux suivantes sont préhensiles, les trois dernières fouisseuses. Les pléopodes manquent toujours chez la femelle. Les deux sexes diffèrent également par le développement des antennes, qui sont rudimentaires chez la femelle, mais aussi longues que le corps chez le mâle.

Les Cumacés, dont on connaît sept cents espèces, se rencontrent dans toutes les mers, où ils vivent dans le sable ou la vase et effectuent, la nuit, des migrations jusqu'à la surface. Ils ont été signalés jusqu'à 8 000 m de profondeur. La plupart mesurent quelques millimètres de long, mais quelques espèces, en particulier dans la zone abyssale, ont une taille de plus de 30 mm.

Ordre des Tanaidacés

Cet ordre comprend des Animaux exclusivement marins et de petite taille (1 à 26 mm). Ils possèdent une courte carapace qui recouvre la tête et les deux premiers segments thoraciques fusionnés. Les premiers appendices thoraciques sont des pattes-mâchoires et les seconds de robustes pinces qui rappellent celles de certains Décapodes. Les suivants, tous semblables et dépourvus d'exopodite, sont locomoteurs. Les pléopodes sont biramés, et les uropodes, grêles, ne forment pas un éventail caudal avec le telson, qui est soudé au dernier segment de l'abdomen.

Les Tanaidacés vivent dans la vase, à l'intérieur de galeries cimentées par la sécrétion de glandes spéciales. On les rencontre de la zone littorale jusqu'aux fosses océaniques profondes, où habitent les géants du groupe.

Ordre des Isopodes

Les Isopodes occupent une place prépondérante parmi les Péracarides, aussi bien par le nombre des espèces qu'ils regroupent que par leur diversité morphologique et écologique : ils sont abondamment représentés à la fois dans les mers, dans les eaux douces et sur la terre ferme; on observe également chez eux tous les degrés du parasitisme.

Les Isopodes libres n'ont pas de carapace; le premier segment thoracique est soudé à la tête; les segments de l'abdomen sont souvent plus ou moins fusionnés et le telson est rarement articulé. Les yeux sont sessiles, les antennules en général petites et uniramées, alors que les antennes, longues et assez fortes, peuvent porter un rudiment d'exopodite. Les premières pattes thoraciques sont des pattes-mâchoires; les suivantes, toutes semblables et terminées par une griffe, sont ambulatoires. Les pléopodes, typiquement biramés et lamellaires, ont des fonctions natatoire et respiratoire. Chez les formes terrestres, les exopodites sont pourvus de pseudotrachées. Chez le mâle, la seconde paire est modifiée en organe copulateur (c'est parfois également le cas de la première). Les sexes sont séparés et, au moment de l'éclosion, les jeunes ressemblent déjà beaucoup aux adultes.

L'organisation des Isopodes parasites est extrêmement diversifiée. Certains, parasites temporaires, diffèrent peu des formes libres apparentées. D'autres, au contraire, sont profondément marqués par le parasitisme et diffèrent profondément des autres Isopodes par leur morphologie, comme par leur physiologie. Les Isopodes sont actuellement divisés en plusieurs sous-ordres, dont nous mentionnerons les principaux.

Sous-ordre des Asellotes

Les Asellotes *(Asellota)* possèdent un bouclier caudal formé par la fusion de l'abdomen et du telson. Ils vivent en mer ou dans les eaux douces, où l'on rencontre notamment les diverses espèces du genre *Asellus*.

Sous-ordre des Valvifères

Les Valvifères *(Valvifera)* doivent leur nom à une particularité de structure : les uropodes, très développés et repliés sous l'abdomen, forment des sortes de volets qui protègent les pléopodes. La plupart sont marins, comme les idothées, communes en eau peu profonde, parmi les Algues.

Sous-ordre des Flabellifères

Les Flabellifères *(Flabellifera)*, aux uropodes en palettes natatoires, comprennent des formes libres et des formes parasites. Parmi les premières, il faut signaler les *Sphaeroma,* nombreuses dans la zone des marées, sous les

pierres, qui se roulent en boule quand elles sont menacées, et les *Bathynomus,* dont une espèce d'eau profonde, *B. giganteus,* dépasse 30 cm de long, et mérite ainsi le titre de géant des Péracarides. De nombreux Flabellifères sont parasites; les anilocres *(Anilocra physodes)* se fixent, à l'état adulte, sur le dos de Poissons. Une famille de parasites, celle des Gnathiidés, est remarquable par ses singularités morphologiques et biologiques : mâles, femelles et larves sont très dissemblables et ont pendant longtemps été considérés comme appartenant à des espèces tout à fait distinctes; les larves parasitent des Poissons, se gorgent de leur sang, puis abandonnent leur hôte, gagnent le fond et deviennent des adultes qui vivent dans la vase et ne s'alimentent plus.

Sous-ordre des Oniscoïdes

Excepté quelques formes amphibies, les Oniscoïdes *(Oniscoidea)* sont essentiellement des Animaux terrestres. Les jeunes, comme les adultes, ont une respiration aérienne, et le cycle vital se déroule entièrement sur la terre ferme. A l'inverse des Isopodes aquatiques libres, les Oniscoïdes ont un abdomen dont les segments ne sont pas fusionnés. Leur respiration est assurée par la surface des uropodes et surtout par des pseudo-trachées situées dans les exopodites des pléopodes et appelées, à cause de leur aspect, « corps blancs ». Les Oniscoïdes, bien connus sous le nom de cloportes, sont très communs dans les lieux sombres et humides, au voisinage ou même à l'intérieur des habitations. Ils sont répandus sur toute la terre et forment un groupe nombreux. Signalons qu'en France plus de cent cinquante espèces, appartenant à plus de cinquante genres, ont été dénombrées.

Sous-ordre des Épicarides

Le sous-ordre des Épicarides *(Epicarida)* inclut de nombreuses formes parasites profondément modifiées, dont les femelles, souvent, ne présentent plus ni segmentation, ni appendices. Ces Animaux sont fixés sur le corps de leur hôte, ou dans sa chambre branchiale, ou encore, logés dans sa cavité générale; chacune des nombreuses familles qui constituent ce sous-ordre est en général inféodée à un groupe déterminé de Crustacés. On distingue, selon le mode de reproduction, deux grands ensembles d'Épicarides. Chez les *Cryptonisciens,* la larve devient sexuellement mûre sous la forme d'un mâle qui s'accouple à une femelle, puis se transforme en femelle en changeant de forme et en grossissant considérablement. Chez les *Bopyriens,* les sexes sont séparés. Les larves donnent soit des mâles, soit des femelles. Ces dernières atteignent une taille assez grande et sont fortement déformées, alors que les mâles, minuscules, conservent l'aspect d'Isopodes typiques. Parmi les Bopyriens, on trouve un exemple d'Isopode parasite très facile à observer, *Bopyrus squillarum,* dont la femelle provoque une forte déformation d'un des côtés de la carapace de la crevette rose, et dont le mâle, dix fois plus petit, est accroché à l'abdomen de la femelle.

Ordre des Amphipodes

Les Amphipodes se rapprochent des Isopodes par l'absence de carapace, par la fusion d'un seul segment thoracique avec la tête, par la transformation de la première paire de pattes thoraciques en pattes-mâchoires, et par la possession d'yeux pairs sessiles. Un caractère d'observation facile permet en général de distinguer les représentants des deux ordres : le corps des Isopodes est déprimé dorso-ventralement, alors que celui des Amphipodes est comprimé latéralement. En outre, chez les Amphipodes, les deuxième et troisième paires de pattes thoraciques sont fortement développées, et préhensiles. Ajoutons encore, toujours au sujet des pattes thoraciques, que les trois dernières paires sont dirigées vers l'arrière, alors que les précédentes sont orientées vers l'avant. On observe une différence de spécialisation dans les pléopodes : les trois premiers sont nageurs, les trois derniers sont souvent modifiés pour le saut et se ressemblent beaucoup; on les désigne sous le nom d'*uropodes,* alors que dans les autres ordres, ce terme ne s'applique qu'à la dernière paire. Les sexes sont séparés et le développement est en général abrégé, comme chez les Isopodes libres.

Les Amphipodes sont divisés en trois sous-ordres d'importance inégale.

Sous-ordre des Gammarides

Les Gammarides, de loin les plus nombreux, ont un type morphologique assez homogène, présentant les caractères généraux mentionnés plus haut. Leur taille varie en général de 2 à 20 mm, mais certaines formes géantes dépassent 10 cm. Ils comprennent plusieurs milliers d'espèces qui peuplent les mers, rampant ou nageant à proximité du fond. C'est dans toute la zone littorale qu'ils sont le plus abondants et le plus diversifiés, mais on les rencontre jusque dans les abysses : plusieurs espèces ont été capturées, en même temps que des Isopodes, par 10 500 m de profondeur. Certains vivent sur le sable des plages, sautant parmi les paquets d'Algues amenés par la mer : ce sont les *Talitrus* et les *Orchestia,* ou « puces de mer ». Le groupe est bien représenté dans les eaux douces où prédomine le genre *Gammarus,* qui est également marin. Les *Niphargus,* formes aveugles, sont communs dans les eaux souterraines.

Sous-ordre des Hypériides

Les Hypériides, adaptés à la vie pélagique, s'écartent beaucoup des Gammarides par leur aspect : leur corps, souvent translucide, est globuleux, comme chez les *Hyperia,* ou allongé en bâtonnet, comme chez les *Oxycephalus.* Leurs yeux sont presque toujours très gros, occupant souvent toute la tête. Ils vivent dans le plancton ou en commensaux, à l'intérieur d'organismes tels que les méduses ou les salpes.

Sous-ordre des Caprellidae

Les représentants du sous-ordre des Caprellidae ont perdu toute faculté de nager. Ils ont un corps grêle et filiforme, de longues antennules, un abdomen réduit à un moignon. Ils se déplacent parmi les Algues, à la manière des chenilles arpenteuses. C'est dans ce groupe qu'on trouve la seule famille d'Amphipodes adaptée au parasitisme, celle des Cyamidés, connus sous le nom évocateur de « poux des baleines ».

S.G. Giacomelli

A. Margiocco

◀ *A gauche, un Isopode terrestre très commun, l'Oniscoïde* Oniscus sp., *bien connu sous le nom de cloporte; à droite, deux Amphipodes du genre* Gammarus *qui prédomine en eaux douces, mais est également marin.*

▶ *Détail des pinces ravisseuses de* **Squilla mantis.** *La partie préhensile de ces pinces, armée d'épines, accuse une forme qui rappelle celle des pattes antérieures d'une mante religieuse.*

A. Margiocco

Super-ordre des Hoplocarides

Les Hoplocarides comprennent un seul ordre, les *Stomatopodes (Stomatopoda),* qui, en raison de la grande homogénéité de leur organisation, peuvent être désignés sous le nom collectif de squilles. Les squilles présentent des traits morphologiques très particuliers, par rapport à ceux des autres Malacostracés. La région antérieure du corps comprend en avant de la carapace deux segments libres portant, l'un les yeux, l'autre les antennules. Les quatre derniers segments thoraciques sont libres et sont suivis des segments abdominaux, qui présentent une ornementation dorsale similaire. Les cinq premières paires de pattes thoraciques n'ont pas d'exopodite et sont préhensiles. Les appendices de la seconde paire sont remarquablement développés et leur aspect évoque celui des pinces de la mante religieuse. Ce sont des pinces ravisseuses dont la partie préhensile est constituée par un dactyle acéré, armé de longues épines, qui se rabat dans une rainure de l'article précédent comme la lame d'un canif. Les trois dernières paires de pattes thoraciques sont biramées, ainsi que les pléopodes. Les uropodes forment un éventail caudal avec le telson, qui est souvent orné de carènes et d'épines.

Le processus d'incubation des œufs est original : ces derniers sont pondus par milliers, enrobés dans une sécrétion visqueuse, et rassemblés en une boule que la femelle maintient entre ses pattes ravisseuses jusqu'à l'éclosion. Les larves sont pélagiques, à la différence des adultes, qui vivent dans des galeries creusées dans la vase.

On connaît plus de deux cents espèces d'Hoplocarides, toutes marines, dont l'une, *Squilla mantis,* commune en Méditerranée, et qui atteint 20 cm de long, est considérée comme un excellent aliment.

A. Margiocco

▲ **Squilla mantis,** *Hoplocaride commun en Méditerranée, est considéré comme un excellent aliment.*

Super-ordre des Eucarides

Les Eucarides sont les plus évolués des Malacostracés. Leur carapace est soudée à tous les segments du thorax, qui se trouvent ainsi unis, dorsalement au moins, en un céphalothorax. Ils forment également un groupe homogène qui se distingue par la possession d'yeux pédonculés et par l'absence d'oostégites chez les femelles.

Les Eucarides comprennent deux groupes très inégaux, les *Euphausiacés,* à type morphologique uniforme, et qui comprennent un faible nombre d'espèces, et les *Décapodes,* extrêmement diversifiés dans leur morphologie et leur biologie, et qui rassemblent le tiers de toutes les espèces de Crustacés connus.

Ordre des Euphausiacés

A première vue, les Euphausiacés ressemblent aux Mysidacés, à côté desquels on les rangeait, autrefois, dans le groupe des Schizopodes. Les uns et les autres ont une carapace recouvrant tout le thorax et des appendices thoraciques biramés, mais les Mysidacés sont beaucoup plus primitifs. Les Euphausiacés rappellent aussi les Décapodes Natantia, c'est-à-dire les crevettes, mais en diffèrent par une particularité : les premières paires de pattes thoraciques ne sont jamais transformées en pattes-mâchoires. En outre, presque tous présentent une particularité exceptionnelle chez les crevettes : ils sont pourvus d'organes lumineux, ou *photophores,* dont la position sur le corps et les appendices est variable suivant les espèces. Les sexes sont séparés et les œufs sont immédiatement libérés après la ponte ou incubés par la femelle dans un ovisac fixé entre les appendices thoraciques de la sixième paire. Le développement larvaire comprend d'abord un nauplius, puis une longue série de stades planctoniques.

Les Euphausiacés sont essentiellement des Animaux marins pélagiques ou bathypélagiques. Ils forment des essaims innombrables, qui, la nuit, contribuent largement à la phosphorescence de la mer, grâce à leurs photophores. Ils jouent un rôle important dans le cycle biologique des océans, car ils se nourrissent de Végétaux microscopiques ou de minuscules proies animales, et sont, à leur tour, dévorés par de grands Animaux comme les Cétacés. Ainsi, l'estomac d'une baleine de taille moyenne peut contenir plusieurs tonnes de *Meganyctiphanes norvegica,* espèce qui ne dépasse pas 40 mm de long. S'ils constituent une masse énorme de matière vivante et s'ils se rencontrent dans toutes les mers, les Euphausiacés ne comptent cependant qu'un petit nombre d'espèces, une centaine au total.

Ordre des Décapodes

Il y a de multiples raisons pour accorder un intérêt particulier aux Décapodes. Ils présentent, non seulement le degré le plus élevé d'organisation observé chez les Crustacés, mais aussi une diversité morphologique extrême. Cette dernière caractéristique est le fruit d'adaptations aux milieux et aux modes de vie les plus variés; le nombre d'espèces connues est considérable (au moins dix mille). De plus, ils sont, dans l'ensemble, beaucoup plus grands que les représentants des autres ordres et comprennent la plupart des Crustacés comestibles, jouant ainsi un rôle important dans l'alimentation humaine.

Dans les premières pages que nous avons consacrées aux Crustacés, nous avons exposé les grandes lignes de l'organisation de cette classe, en prenant comme modèle un Décapode évolué, tel que le homard, la langoustine ou l'écrevisse. Résumons brièvement les traits fondamentaux de ces Crustacés, qui sont des Décapodes typiques : la carapace couvre et unit la tête et le thorax; les trois premières paires d'appendices thoraciques sont transformées en pattes-mâchoires; les cinq dernières sont préhensiles ou locomotrices (caractère qui explique le nom attribué à cet ordre); l'abdomen est constitué de six segments articulés portant chacun une paire de pléopodes, dont la dernière, lamellaire et désignée sous le nom spécial d'*uropodes,* forme avec le telson un large éventail caudal.

Chez la plupart des Décapodes, la respiration est assurée par un appareil branchial logé de part et d'autre du thorax, dans deux chambres symétriques formées par des extensions de la carapace, les *branchiostégites.* Il existe trois séries de branchies, annexées à un nombre variable d'appendices thoraciques, et insérées sur la coxa (podobranchies), sur l'articulation avec le tronc (arthrobranchies), et sur le tronc lui-même (pleurobranchies).

Les sexes sont en général séparés; cependant, il existe quelques espèces hermaphrodites. Le processus de reproduction comprend fréquemment une copulation au cours de laquelle le mâle dépose ses spermatophores au voisinage ou à l'intérieur des voies génitales de la femelle, grâce à ses deux premières paires de pléopodes, modifiés en *gonopodes.* Le fonctionnement de cet appareil copulateur a été décrit plus haut, dans la partie consacrée à la reproduction chez les Crustacés. Les œufs sont incubés par la femelle, accrochés à ses pléopodes, et, le plus souvent, l'éclosion se produit au stade *zoé,* plus rarement à un stade plus avancé ou même, quelquefois, sous une forme proche de celle de l'adulte. Il existe pourtant un groupe, celui des Pénéides, où les œufs sont libérés dès leur émission, et la première forme larvaire est un nauplius, comme chez les Crustacés les plus primitifs.

On rencontre, chez les Décapodes, les modes de vie les plus variés. Ils sont avant tout marins, soit benthiques,

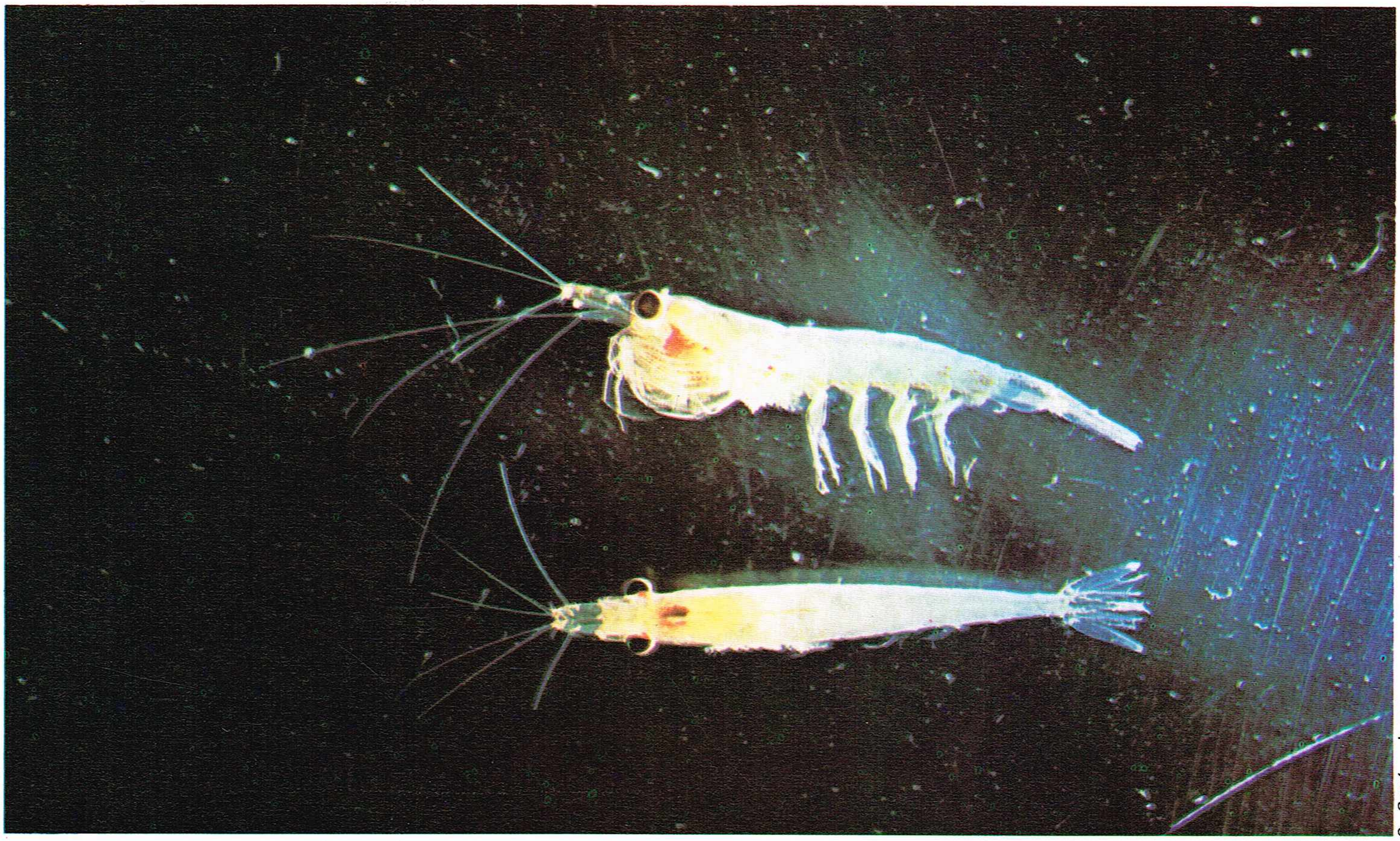

C. Carré - Jacana

▲ *Les Euphausiacés de l'espèce* Meganyctiphanes norgevicus *sont une des proies favorites des baleines. La nuit, leurs essaims innombrables contribuent, grâce à leurs photophores, à la phosphorescence de la mer.*
▼ *Les Pénéides, comme les autres Crustacés du sous-ordre des Natantia, sont désignés globalement sous le nom de crevettes. Ceux-ci appartiennent à la famille des Sergestidae, qui vit en eau profonde, dans tous les océans.*

soit pélagiques ; néanmoins, les formes d'eau douce sont nombreuses, et il existe quelques groupes qui vivent sur la terre ferme.

Les grandes divisions de l'ordre des Décapodes les répartissent en deux grands sous-ordres, les *Natantia*, ou Nageurs, et les *Reptantia*, ou Marcheurs.

Sous-ordre des Natantia

Les Natantia constituent un ensemble assez homogène, dont beaucoup de représentants peuvent être globalement désignés sous le nom de crevettes. Leur structure est comparable à celle du homard et des formes apparentées, mais se distingue par des caractères dont certains sont inhérents à leur qualité d'Animaux nageurs : leur corps est comprimé latéralement, leurs téguments sont minces et peu calcifiés, leurs antennes et leurs pattes thoraciques sont souvent longues et grêles, leurs pattes abdominales sont bien développées et natatoires.

Les Natantia comprennent deux groupes principaux, les Pénéides, dont les trois premières paires d'appendices thoraciques se terminent par des pinces, et les Carides, dont les deux premières paires, au plus, sont ainsi conformées.

Les *Pénéides* sont abondants dans les mers chaudes et tempérées chaudes. Certaines espèces sont de grande taille et dépassent 20 cm de long. En Méditerranée, on rencontre ainsi *Penaeus kerathurus* et *Parapenaeus longirostris*, bien connus en Espagne sous les noms de langostinos et de gambas.

Les *Carides* sont rangés dans de très nombreuses familles, dont certaines ont un habitat particulier : par exemple, les *Oplophorides* vivent dans les zones pélagiques profondes, à partir de 1 000 m, et les *Atyides* sont des crevettes d'eau douce. Parmi les formes des eaux littorales d'Europe, deux espèces sont particulièrement bien connues, puisqu'elles sont vendues sur tous les marchés : il s'agit de la crevette rose, *Palaemon serratus*, au long rostre dentelé, qui vit dans les zones rocheuses, et de la crevette grise, *Crangon crangon*, au rostre tronqué, qui se tient sur les fonds de sable et de vase.

A. Margiocco

G. Mazza

▲ *Ci-dessus,* **Galathea,** *représentant du groupe des Galathéides qui se caractérisent par un abdomen segmenté, court et rabattu sous le thorax; à droite, une phyllosome de* **Scyllarus arctus;** *c'est sous la forme de ce curieux organisme transparent que les scyllares, ou cigales de mer, mènent leur longue vie planctonique avant d'atteindre l'âge adulte.*

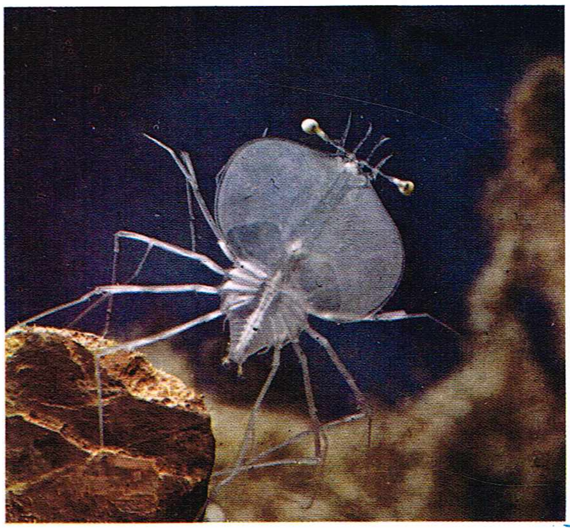

A. Margiocco

Sous-ordre des Reptantia

Les Reptantia nagent peu à l'état adulte; ils marchent ou rampent sur le fond. Dans ce vaste sous-ordre, les modifications adaptatives ont porté sur l'abdomen, et c'est d'après le développement et la conformation de cette région qu'on les classe en Macroures, Anomoures et Brachyoures.

Les *Macroures* ont un abdomen normalement développé, articulé, à téguments rigides, se terminant en une large palette natatoire. Ils se divisent, à leur tour, en trois ensembles principaux.

Le premier, celui des *Astacoures,* comprend la langoustine, ou *Nephrops norvegicus,* le homard, ou *Homarus gammarus,* et les écrevisses. Ces dernières vivent en eau douce et sont représentées en France par plusieurs espèces, dont la plus grande et la plus anciennement connue est *Astacus astacus.* Chez ces Décapodes, la première paire d'appendices thoraciques se termine par des pinces puissantes et volumineuses.

Le second groupe, celui des *Palinoures,* est caractérisé par l'absence de pinces; il inclut les langoustes aux larges antennes, ainsi que les scyllares, ou « cigales de mer », chez lesquels, au contraire, ces appendices sont transformés en palettes courtes et larges. Si homards et écrevisses sont peu différents des adultes quand ils éclosent, langoustes et scyllares connaissent une longue vie larvaire planctonique sous la forme de cet organisme plat et transparent, que l'on appelle une *phyllosome.*

Le troisième groupe de Macroures est constitué par les *Thalassinides,* qui sont dotés d'un long abdomen articulé, à téguments minces et peu calcifiés. Animaux marins, ils creusent des galeries dans la vase, ou se tiennent dans les anfractuosités du fond ou dans les coraux.

Les *Anomoures* réunissent deux groupes, les Pagurides et les Galathéides.

Les *Pagurides,* ou bernard-l'ermite, dont plus de huit cents espèces ont été décrites, s'abritent à l'intérieur de coquilles vides de Gastéropodes; ils présentent de remarquables adaptations morphologiques : ainsi, l'abdomen, constamment protégé par la coquille, est devenu une sorte de sac mou, asymétrique et non segmenté; les pléopodes ont disparu du côté droit et ceux du côté gauche, en nombre réduit, ne servent qu'à l'accrochage des œufs de la femelle. Plusieurs espèces, de petite taille, vivent sur nos côtes : *Clibanarius erythropus,* dont l'extrémité des pattes ambulatoires est longitudinalement rayée de rouge et de bleu, est extrêmement commun à marée basse, parmi les rochers, au sud de la Bretagne. *Pagurus prideauxi,* qui vit à de plus grandes profondeurs, est presque toujours associé à une anémone de mer qui l'enveloppe comme un manteau protecteur. Ces deux espèces vivent aussi en Méditerranée, de même que *Dardanus arrosor,* dont les pattes sont ornées de stries transverses et dont le céphalothorax atteint 10 cm de long. Sur les rivages tropicaux, certains pagures sont adaptés à la vie terrestre. Ils forment la famille des *Cénobites,* dont la majorité des espèces utilise des coquilles de Mollusques terrestres et se nourrit de détritus animaux et végétaux. Proche parent des vrais Cénobites, le « crabe des cocotiers », *Birgus latro,* dont les dimensions et le poids, qui peut s'élever à plusieurs kilogrammes, ne lui permettent pas de trouver de coquille à sa taille, a son abdomen protégé par des plaques calcifiées.

G. S. Giacomelli

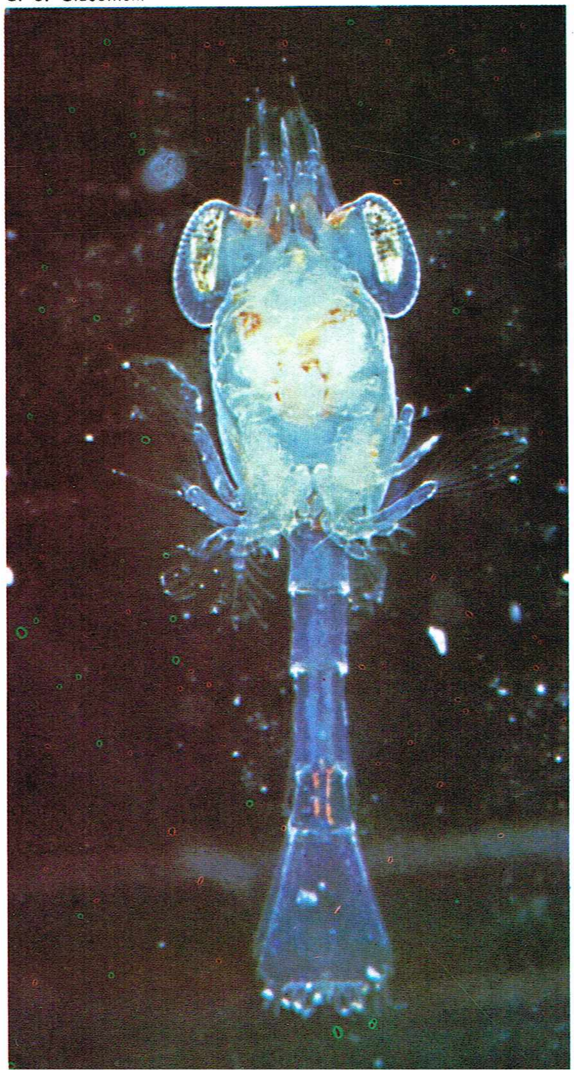

▶ *Larve de* **Pagurus alatus,** *espèce appartenant aux Pagurides, ou bernard-l'ermite, bien connus pour s'abriter à l'intérieur des coquilles vides de Gastéropodes.*

A. Margiocco

Les *Galathéides,* sensiblement aussi nombreux que les Pagurides, sont représentés, dans la faune abyssale, par certaines formes dépigmentées et aveugles; mais les plus connus sont les galathées et les porcellanes, communes dans la zone des marées. Les unes et les autres ont un abdomen segmenté, mais court et rabattu sous le thorax. Les porcellanes ont l'aspect de petits crabes, mais leurs dernières pattes, dont le rôle est de nettoyer les branchies, sont réduites, grêles et cachées sous la carapace.

Les *Brachyoures,* ou crabes, sont presque aussi nombreux que tous les autres Décapodes réunis. Leur abdomen très réduit, surtout chez les mâles, s'encastre dans une dépression ventrale du céphalothorax. Les pléopodes sont réduits, souvent absents chez le mâle, à l'exception des deux paires antérieures, qui sont, nous l'avons vu, des appendices copulateurs. Les uropodes manquent ou ne sont représentés que par des rudiments. La plupart des Brachyoures sont marins et vivent sur le fond de la zone des marées à plusieurs milliers de mètres de profondeur.

Parmi les espèces très variées que l'on rencontre sur nos côtes, on peut d'abord citer celle qui est la plus commune sur les grèves, *Carcinus maenas*, qui mesure au plus 10 cm de large, et qui a reçu de multiples noms locaux : « crabe vert », « crabe enragé », « chancre », « favouille », etc. *Cancer pagurus,* le tourteau, atteint une grande taille, et pèse parfois plusieurs kilogrammes; c'est l'un des plus appréciés des crabes comestibles.

L'étrille, *Macropipus puber,* appartient à la famille des *Portunidae,* lesquels, grâce à leurs dernières pattes aplaties en palette, sont capables de nager activement. *Grapsus marmoratus,* à la carapace quadrangulaire, ornée de stries transverses, est souvent hors de l'eau, courant sur les rochers, au-dessus du niveau atteint par la haute mer.

L'araignée de mer, *Maja squinado,* autre forme comestible de grande taille, fait partie du groupe des *Oxyrhynches,* qui sont les crabes les plus évolués et dont le psychisme est le plus complexe. Beaucoup d'entre eux font preuve d'une aptitude remarquable à se camoufler. Ils prélèvent à l'aide de leurs pinces des fragments d'Algues qu'ils fixent sur leur carapace. Ces boutures se développent et dissimulent bientôt l'Animal. Un autre Oxyrhynche, *Macrocheira kaempferi* du Japon, est le géant, non seulement des Crustacés, mais de tous les Arthropodes vivants connus; il possède des pinces et des pattes immenses, qui atteignent près de 4 m d'envergure, pour un corps mesurant 45 cm de diamètre.

Les crabes se sont adaptés aux eaux douces. Dans les régions tropicales, en plaine et en montagne, vivent les trois cent cinquante espèces de la grande famille des *Potamonidae*.

Enfin, une autre famille tropicale, celle des *Gecarcinidae,* a conquis le domaine terrestre. Les chambres branchiales de ces Crustacés sont transformées en des sortes de poumons; ces Animaux ne retournent à la mer que pour se reproduire, le reste de leur existence se passant sur la terre ferme, où ils s'abritent dans des terriers.

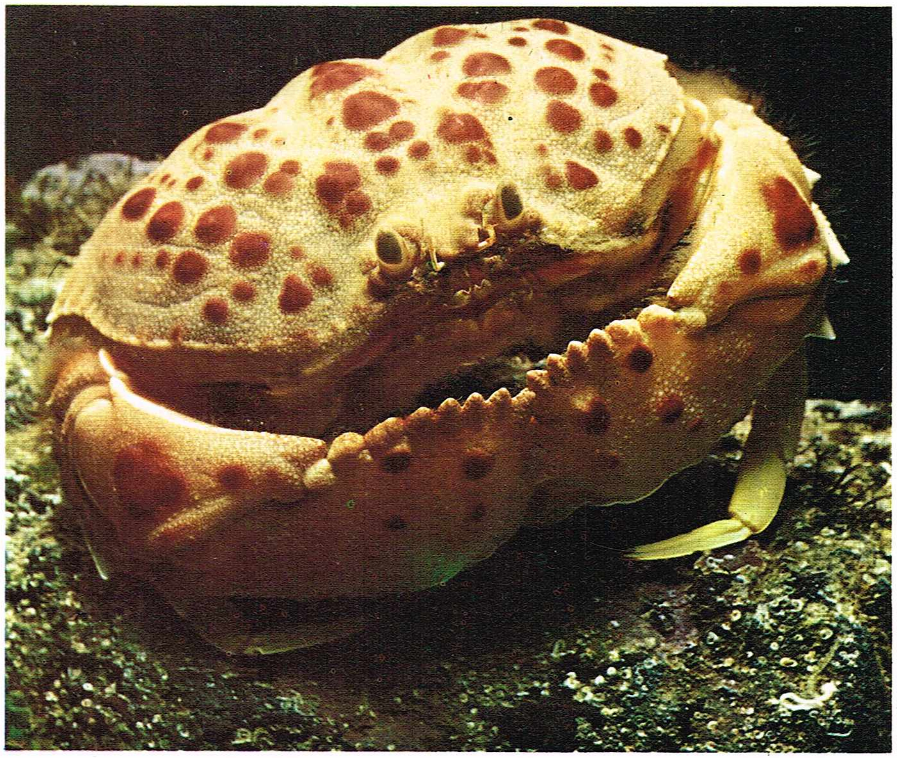

G. Mazza

▲ Carcinus maenas, ***à gauche, ou « crabe enragé » que l'on rencontre sur nos côtes;*** **Calappa granulata,** ***à droite, caractérisé par un céphalothorax fortement renflé, vit à demi enfoui dans le sable. Il est connu sous le nom de « migrane » ou de « crabe honteux ».***

BIBLIOGRAPHIE

CALMAN W. T., 1909, *Crustacea, in* LANKESTER R., *A Treatise on Zoology,* t. 7, Londres. - CROME W. et GRUNER H. E., 1969, *Klasse Crustacea, in Urania Tierreich,* t. 2 : *Wirbellose Tiere,* Leipzig-Iéna-Berlin. - DELAMARE-DEBOUTTEVILLE C., 1963, *Crustacés, in Encyclopédie de la Pléiade,* GRASSÉ P. P. et TÉTRY A., *Zoologie,* 2, Paris. - KAESTNER A., 1969, *Wirbellose, in Lehrbuch der Speziellen Zoologie,* t. 1, nº 4, Stuttgart. - PIVETEAU J., 1953, *Traité de paléontologie,* t. 3, Paris. - SCHMITT W. L., 1931, *Crustaceans,* Cambridge (Mass.). - WATERMAN T. H., 1960-1961, *The Physiology of Crustacea,* 2 vol., New York-Londres.

A. Margiocco

◀ Scyllarus arctus, ***ou « cigale de mer », se caractérise, comme tous les scyllares, par la transformation des antennes en palettes courtes et larges.***

K. Ross - Jacana

▲ ***Plusieurs espèces du genre typique*** **Glomeris** ***vivent dans nos régions; ces petits Animaux, dont certains atteignent 20 mm de long, ont la faculté de se rouler en boule et de prendre l'aspect d'une graine.***

MYRIAPODES

Pendant longtemps, les zoologistes avaient considéré que les Myriapodes représentaient une classe unique d'Arthropodes. Puis certains se sont interrogés sur l'homogénéité du groupe et ont conclu qu'il s'agissait, en fait, de quatre classes distinctes, formées d'Animaux présentant des similitudes d'aspect : le corps divisé en trois régions, tête, tronc et telson; les segments du tronc, assez nombreux en général et, à première vue, identiques, dotés chacun d'une ou deux paires de pattes. Cependant on revient aujourd'hui à nouveau à une conception unitaire, fondée sur la *diplopodie,* c'est-à-dire sur le caractère fondamentalement double de chaque segment. Chez les Diplopodes, ce caractère est apparent, chez les autres Myriapodes, il est latent, mais dénoté par des traits anatomiques ou embryologiques. A l'appui de l'hypothèse d'une classe unique, on peut ajouter que, en tout état de cause, les Myriapodes forment un ensemble nettement isolé des autres classes d'Arthropodes.

Les quatre sous-classes de Myriapodes reconnues ici peuvent être distinguées à l'aide du tableau suivant (d'après J.-M. Demange, 1963) :

A. — *Orifices génitaux dans les premiers segments du corps : section des Progonéates.*

1° Téguments mous; petite taille :

a) présence de filières et antennes simples : sous-classe des Symphyles;

b) absence de filières et antennes bifurquées : sous-classe des Pauropodes;

2° Téguments durs, deux paires de pattes par segment; taille assez grande : sous-classe des Diplopodes.

B. — *Orifices génitaux dans la partie postérieure du corps : section des Opisthogonéates.*

Pattes de la première paire transformées en crochets à venins (forcipules) : sous-classe des Chilopodes.

Section des Progonéates

Les Progonéates présentent les caractères généraux suivants.

Le corps comprend une tête et un tronc, lequel, chez les Diplopodes, peut être divisé en un thorax et un abdomen; la tête porte une paire d'antennes, une paire de mandibules et une ou deux paires de mâchoires; le tronc est formé d'au moins onze segments en plus du pygidium et porte, au minimum, neuf paires de pattes, à raison d'une ou deux paires par segment; les sexes sont séparés et la reproduction est ovipare; enfin, le développement comporte une série de mues, chacune étant marquée par l'accroissement du nombre des segments et des paires de pattes.

Sous-classe des Symphyles

Les Symphyles sont de petits Animaux blanchâtres, dotés d'antennes multiarticulées. Le nombre de segments ventraux et de paires d'appendices est de douze, mais dorsalement on distingue quinze à vingt-deux tergites. L'ouverture génitale impaire se trouve entre les hanches de la quatrième paire de pattes. La fécondation est externe; le mâle dépose des spermatophores sur le sol et la femelle les recueille avec la bouche et les conserve dans des *poches spermatiques gnathales;* puis elle pond, libère les spermatozoïdes qui fécondent les œufs, et dépose ceux-ci dans des petites cavités humides.

Les Symphyles sont très largement distribués; ils vivent sous les pierres, dans les sols humides et les amas de feuilles mortes, se nourrissant surtout d'Algues microscopiques et de Champignons. Les cent vingt espèces connues se répartissent en trois familles, groupées en un ordre unique. Parmi les espèces de nos régions, on peut citer *Scolopendrella nothacanta,* qui mesure de 2 à 3,5 mm de long, et *Scutigerella immaculata,* qui atteint 8 mm.

Sous-classe des Pauropodes

Ne dépassant guère 2 mm de long, les Pauropodes ont un corps blanchâtre ou jaunâtre, composé, en dehors de la tête et du pygidium, de onze ou douze segments recouverts de six à dix tergites. Les antennes sont biramées, mais l'une des rames se divise en deux flagelles multiarticulés; elles portent une vésicule close, le *globulus,* considéré comme un organe acoustique. Les pattes sont au nombre de neuf ou dix paires et se terminent par des griffes. La cuticule est lisse ou ornée de granules et de spinules, et le tronc ainsi que les appendices portent des soies tactiles variées.

Les sexes sont séparés. Chez la femelle, l'ovaire est impair; l'oviducte, également unique, débouche dans un vagin qui s'ouvre entre les pattes de la deuxième paire : sur chacune de ces pattes s'insère, chez le mâle, un pénis. A l'éclosion, la larve, qui ne compte que quatre segments et trois paires d'appendices, va en acquérir de nouvelles à chaque mue, jusqu'à l'état adulte.

Les Pauropodes, dont le premier, *Pauropus huxleyi*, a été décrit en 1866, ont pendant longtemps été considérés comme des Animaux extrêmement rares. Le développement des recherches sur la faune des sols a montré qu'en réalité ils étaient très répandus dans les terrains humides, dans les Végétaux en décomposition et sous les pierres.

On en connaît aujourd'hui près de quatre cents espèces, constituant de nombreux genres, répartis en cinq familles et en deux ordres.

Sous-classe des Diplopodes

Les Diplopodes représentent, parmi les Myriapodes, la sous-classe la plus variée et celle qui compte le plus d'espèces. Leur corps est le plus souvent cylindrique ou semi-cylindrique mais, par suite d'une extension latérale des segments, peut aussi être déprimé. Il est, en général, recouvert d'une carapace dure, formée de couches chitineuses renforcées par des sels calcaires. Dépourvus de crochets venimeux, les Diplopodes ont, en revanche, des glandes dont la sécrétion dégage une odeur déplaisante.

La tête porte une paire d'antennes relativement courtes, formées de sept ou huit articles, dont le dernier est pourvu de cônes sensoriels. Les yeux sont de simples ocelles et peuvent parfois manquer. En arrière des antennes se trouvent des fossettes, sièges d'organes sensoriels, dits *organes de Tömösvary*, dont la fonction est inconnue. L'appareil buccal comporte une paire de fortes mandibules et une grande pièce impaire et complexe, le *gnathochilarium*, qui résulte de la soudure et de la transformation d'une paire de mâchoires.

Le tronc est formé d'un nombre variable de segments : de onze à près de deux cents. Les quatre premiers, qui constituent le thorax, sont simples; l'un d'entre eux, en général le premier, est apode, alors que chacun des trois autres porte une seule paire d'appendices. Tous les segments abdominaux qui suivent sont doubles *(diplosomites)*; ils résultent de la fusion d'un élément antérieur, ou *prosomite*, et d'un élément postérieur, ou *métasomite*; chacun de ces segments, à l'exception du dernier, le *telson*, est pourvu de deux paires d'appendices.

Dans chaque segment se trouvent également deux paires de trachées, avec des stigmates s'ouvrant à la base de chaque patte, deux paires de ganglions nerveux et deux paires d'ostioles cardiaques.

Les organes génitaux débouchent sur le troisième segment thoracique. Comme nous le verrons plus loin, les mâles possèdent souvent des organes copulateurs, variables suivant les groupes. Les larves, à l'éclosion, ont huit segments et trois paires de pattes. Au cours des mues qui se succèdent, de nouveaux segments doubles apparaissent soit un par un, soit par groupes de deux ou trois, toujours dans une zone de croissance située juste en avant du telson.

Les Diplopodes ont des habitats très divers : ils vivent dans les bois, dans les champs, dans les Mousses, dans les nids et les terriers de toutes sortes. Ils sont végétariens et se nourrissent surtout de plantes en décomposition; mais ils peuvent aussi s'attaquer aux cultures, par exemple aux fraises et aux pommes de terre. Leurs possibilités de dispersion sont limitées et les espèces ont souvent des aires de distribution assez restreintes; elles constituent ainsi un matériel précieux pour les études de biogéographie.

Les Diplopodes, dont on a retrouvé des fossiles au Carbonifère, comprennent deux super-ordres, d'importance très inégale.

Super-ordre des Psélaphognathes

Ce groupe compte moins de cent espèces, dont la plus grande ne dépasse pas 5 mm de long. Le corps de ces Animaux à téguments non calcifiés est composé de onze à treize segments. Des soies plumeuses, disposées en séries sur le dos et en faisceaux sur les côtés de chaque segment, leur donnent un aspect très particulier, qui est à l'origine du nom de *Pénicillates* (du latin *penicillum*, pinceau) qui leur a été aussi attribué.

Super-ordre des Chilognathes

Ce super-ordre inclut la majorité des Diplopodes. Les Chilognathes ont des téguments calcifiés et portent des soies qui ne sont jamais groupées en faisceaux. Les mâles sont toujours dotés de gonopodes. Un grand nombre d'entre eux sont également pourvus de glandes répugnatoires.

Ils sont divisés en deux ordres : les Opisthandriques et les Protérandriques (sous-ordres des Polydesmides, des Nématophores, des Iuliformes et des Colobognathes).

Ordre des Opisthandriques

Dans cet ordre, les mâles ont des gonopodes d'un type particulier : ce sont des *télopodes*, différenciations des deux dernières paires d'appendices.

Les *Limacomorphes* comprennent un petit nombre d'espèces, vivant dans les régions tropicales américaines et indo-australiennes. Ils ont un tronc formé de vingt-deux segments, trente-six paires de pattes chez la femelle et trente-sept chez le mâle.

Les *Oniscomorphes*, beaucoup plus nombreux, avec plus de cinq cents espèces connues, sont ainsi nommés en raison de leur ressemblance avec certains Crustacés Isopodes, les Oniscoïdes, ou cloportes. Comme certains de ces Animaux, ils possèdent la faculté de se rouler en boule. Leur corps est court, avec un dos convexe et une face ventrale plate. Le tronc compte de quatorze à seize segments et onze à treize tergites. La femelle a dix-sept ou vingt et une paires de pattes, alors que le mâle en compte dix-neuf ou vingt-trois, dont la dernière est transformée en télopodes.

Dans nos régions vivent plusieurs espèces du genre typique *Glomeris*, dont certaines atteignent 20 mm de longueur. *Gervaisia pyrenaica*, qui vit dans les forêts de hêtres de la région pyrénéenne, ne dépasse pas 5 mm; il est remarquable par les tubercules perliformes, qui forment une ligne transverse sur chaque tergite; lorsqu'il est enroulé, ce petit Animal a l'aspect d'une graine.

▼ *De gauche à droite :* **Scutigerella immaculata** *(vu de dos et par la face ventrale) : 1 - orifice génital; 2 - saccules coxaux; I-XII, douze paires de pattes ambulatoires;* **Pauropus huxleyi** *(vu de dos) ne dépasse guère 2 mm de long, et est très répandu dans les terrains humides; un Chilognathe du genre* **Julus** *(vu par la face ventrale) : 1 - thorax; 2 - abdomen; 3 - gnathochilarium; 4 - cou (tergite I); 5 - sternite II; 6 - orifice génital; 7 - tergite II; 8 - sternite III; 9 - tergite III; 10 - sternite IV; 11 - tergite IV; 12 - gonopodes; 13 - écaille anale; 14 - pygidium; 15 - valves anales; 16 - épine pygidiale.*

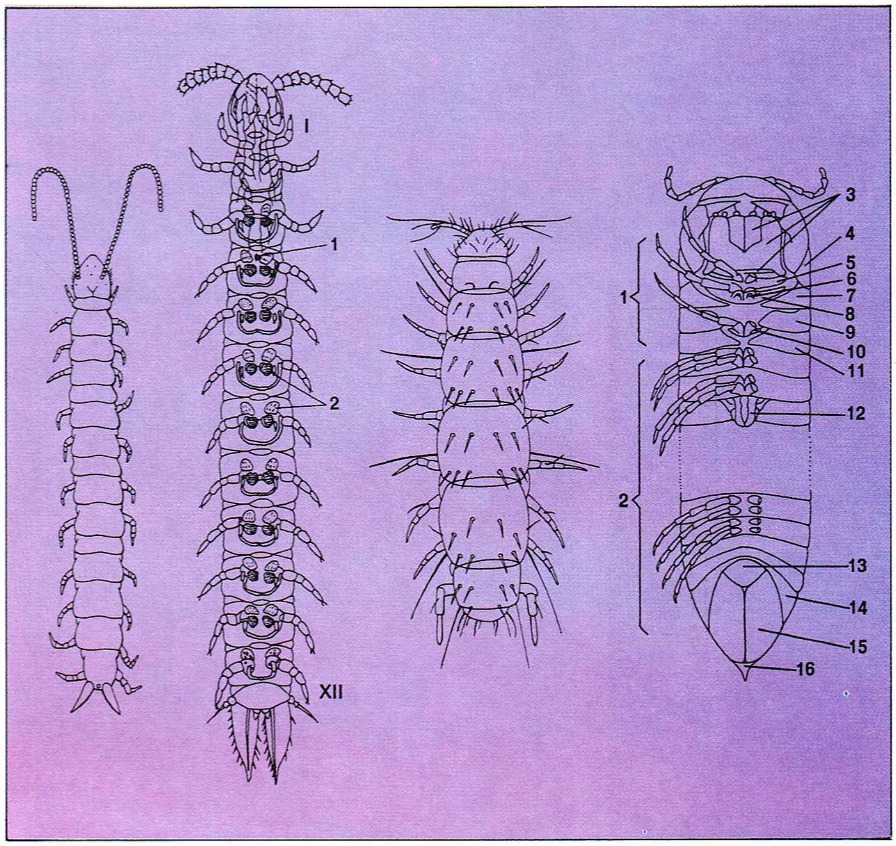

Ordre des Protérandriques

Ces Diplopodes, classés en quatre sous-ordres, sont caractérisés par la présence chez les mâles d'au moins une paire de gonopodes sur la partie antérieure du corps.

Sous-ordre des Polydesmides

Les Polydesmides sont aveugles et sont caractérisés par un nombre de segments compris entre dix-neuf et vingt-deux mais le plus souvent égal à vingt, et, chez les mâles, par la transformation en gonopodes de la paire d'appendices antérieurs portés par le septième segment. Leurs tergites portent souvent des carènes latérales et sont, de plus, ornés de tubercules rugueux. Les espèces, dont le nombre est de trois mille environ, sont répandues sur toute la terre et plus particulièrement dans les régions tropicales. Leur taille varie de quelques millimètres à 130 mm, longueur atteinte par une espèce sud-américaine *Platyrhacus pictus*. Les Polydesmides sont communs dans nos régions; on y trouve, dans la mousse et les feuilles mortes, ou sous les pierres, *Polydesmus edentulus* qui mesure de 10 à 20 mm et *P. collaris,* un peu plus grand, dont certaines carènes latérales sont d'une couleur jaune vif, tranchant sur le fond brun-rouge du corps. *Strongylosoma pallipes,* dont la taille est de 20 mm environ, est d'une teinte roussâtre et présente des taches jaunâtres sur les tergites et des pattes jaune pâle; cette dernière espèce est une de celles dont la biologie est le mieux connue; la copulation, en particulier, a été très bien observée : elle dure entre trois et cinq heures; le mâle transfère à l'aide de ses gonopodes le sperme à l'intérieur de la vulve de la femelle, située sur le troisième segment du tronc.

Sous-ordre des Nématophores

Les Nématophores possèdent de une à trois paires de papilles anales, les filières, qui sont surmontées d'une soie et sur lesquelles débouchent les glandes séricigènes; ces dernières sécrètent de la soie utilisée pour tisser une enveloppe protectrice au moment de la mue ou pour fabriquer un cocon qui entoure les œufs. Chez le mâle, la première paire d'appendices, et souvent la seconde paire du septième segment, ainsi que la seconde du sixième et la première du huitième segment, sont modifiées en gonopodes, dont la forme et la structure sont caractéristiques de chaque espèce. Les huit cents espèces de ce groupe sont regroupées en deux cents genres environ.

De nombreuses espèces sont présentes en Europe. Les *Craspedosoma* ont un corps robuste formé de trente segments. Les *Ceratosoma* et les *Chordeuma* possèdent également trente segments; les premiers se distinguent par leurs carènes latérales saillantes, les seconds par la présence sur leurs tergites de trois paires de soies courtes insérées sur des tubercules peu proéminents. *Callipus foetidissimus* vit dans le midi de la France; son corps, composé de cinquante-sept à soixante-deux segments, dont la longueur ne dépasse pas 50 mm, peut s'enrouler en une spirale à plusieurs tours.

Sous-ordre des Iuliformes

Les Iuliformes, désignés sous le nom de Iules, sont les plus connus des Diplopodes. Ils ont un corps cylindrique, allongé, sans carènes ni côtes, et sont en général pourvus d'yeux. Le nombre des segments est toujours supérieur à trente mais peut varier dans une même espèce. Les Iuliformes n'ont pas de filières, mais ils possèdent de nombreuses glandes répugnatoires qui s'ouvrent sur les côtés des segments. Chez les mâles, les pattes de la première paire sont souvent réduites à des crochets, alors que les deux paires du septième segment constituent les gonopodes; cependant, dans certains cas, il n'existe qu'une seule paire de gonopodes.

Les Iuliformes sont représentés par environ trois mille espèces, réparties en cinq cents genres.

Blaniulus présente un corps très grêle, filiforme, de teinte pâle; ses gonopodes, longs et minces, ne sont pas rétractiles. *B. guttulatus* est largement répandu en Europe et a été introduit en Amérique. Son corps, long de 10 à 15 mm pour un diamètre de 0,5 mm, compte de trente-cinq à trente-neuf segments; il a une teinte blanchâtre et présente une série de taches rougeâtres sur les flancs. Cet Animal se nourrit de racines, de fruits tombés, et peut, lorsqu'il pullule, causer de sérieux dégâts aux cultures de fraises, de pommes de terre, et d'asperges.

La famille des *Iulidae* inclut une bonne partie de la faune des Diplopodes de nos régions; ils ont un corps assez robuste, et leurs gonopodes peuvent se rétracter dans une poche membraneuse. Quelques semaines après l'accouplement, les œufs sont déposés dans un nid fait de terre et d'excréments. Avant d'arriver à l'état adulte, les larves subissent une série de mues, qui peut s'étaler sur une année. La durée de vie varie entre trois et cinq ans. La croissance des mâles de certains Iulidae est marquée par un processus rare connu sous le nom de *périodomorphose;* après avoir atteint leur maturité, les mâles subissent une mue au cours de laquelle les gonopodes régressent, alors que le nombre de segments s'accroît; à la mue suivante, ces mâles redeviennent normaux, aptes à copuler, et leur taille augmente. De telles mues régressives peuvent se produire plusieurs fois au cours de la vie d'un individu.

Nous ne citerons que quelques-unes des formes vivant en Europe. Ainsi, l'une des espèces décrites par Linné, *Schizophyllum sabulosum,* dont le corps, long de 30 à 60 mm, est formé de quarante-cinq à cinquante-cinq segments et qui possède soixante-treize à cent une paires de pattes, est commune sur les plages sableuses, sous la mousse, sur les fleurs, etc.; son dos, grisâtre, est orné de deux lignes longitudinales rougeâtres. *Pachyiulus flavipes* atteint 75 mm de long, et compte de cinquante-cinq à soixante-six somites et de quatre-vingt-dix-huit à cent vingt-trois paires de pattes; son dos est brun et son ventre jaunâtre, la limite entre les deux teintes étant très nette. Les nombreuses espèces de *Typhloiulus* sont aveugles; leur aspect est blanchâtre ou jaunâtre, et elles vivent dans les terrains humides et dans les grottes. Quant aux *Trogloiulus,* ils sont également aveugles et le plus souvent cavernicoles. *T. mirus,* long de 50 à 60 mm,

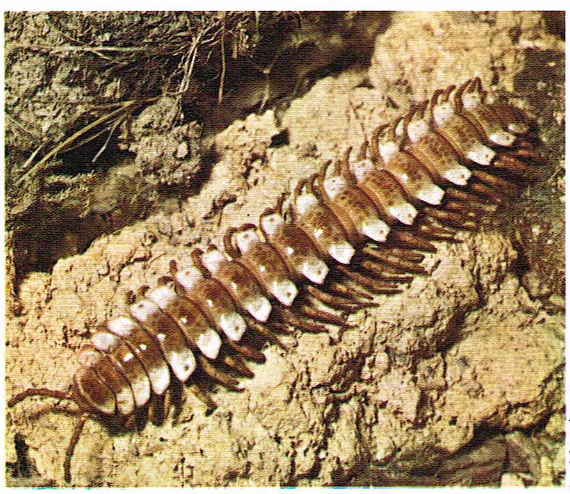

A. Margiocco

A. Margiocco

▶ **Platyrhacus modiglianii,** ***à gauche, est une espèce de Polydesmide très répandue dans l'île de Sumatra;*** **Polydesmus collaris,** ***à droite, dont certaines carènes latérales de couleur jaune vif tranchant sur le fond brun-rouge du corps, est commun dans nos régions sous la mousse, les pierres et les feuilles mortes.***

possède quatre-vingt-six segments et cent soixante-trois paires de pattes, ce qui est le nombre maximum observé chez les Iulidae d'Europe.

Dans les régions tropicales vivent de nombreux Iuliformes de grande taille, qui ressemblent à de petits serpents. C'est dans la famille des *Spirostreptidae* que l'on rencontre les plus grands, tels *Graphydostreptus gigas* d'Afrique orientale et *Scaphiostreptus seychellarum* des îles Seychelles, qui mesurent près de 30 cm de long pour un diamètre de 2 cm environ. Ces Animaux aux dimensions impressionnantes se nourrissent exclusivement de Végétaux en décomposition et sont parfaitement inoffensifs.

Sous-ordre des Colobognathes

A première vue, les Colobognathes diffèrent des Iuliformes par la forme du corps, qui n'est pas cylindrique mais longuement elliptique et déprimé, ou filiforme. La tête est petite, conique ou en forme de rostre. Les pièces buccales, fortement déformées, peuvent être transformées en une sorte de suçoir. Les téguments sont mous et soit nus, soit faiblement pileux, soit granuleux. Les appendices postérieurs du septième segment ainsi que les appendices antérieurs du huitième sont modifiés en gonopodes.

Les trois cents espèces qui composent ce sous-ordre vivent surtout dans les terrains humides des régions tropicales. Cependant, en Europe, on rencontre les représentants de deux groupes d'aspect très différent. En Italie, vit une espèce aveugle, *Dolistenus savii,* à la tête triangulaire et au corps vermiforme, de 30 mm de long au plus, formé de cent huit segments. Il faut citer également le genre *Polyzonium,* qui compte une espèce, largement distribuée dans nos contrées; *P. germanicum,* dont le corps, élargi et long de 5 à 17 mm, comprend trente à cinquante-cinq segments, les pattes, assez courtes, sont complètement invisibles en vue dorsale. Les *Polyzonium* fréquentent les prairies humides et pénètrent dans les eaux stagnantes.

Section des Opisthogonéates

Le groupe des Opisthogonéates se distingue de celui des Progonéates par la localisation de l'orifice génital sur le segment préanal et non dans la région antérieure du corps, ainsi que par l'absence de calcification des téguments.

On ne dénombre qu'une seule sous-classe, celle des Chilopodes.

Sous-classe des Chilopodes

Les Chilopodes sont des Myriapodes carnivores, dont la tête, aplatie, est nettement distincte du tronc qui est multisegmenté et plus ou moins déprimé. La tête porte une paire d'antennes simples, parfois très longues, et des ocelles latéraux. Les pièces buccales comprennent une paire de mandibules et deux paires de mâchoires. Le nombre des segments du tronc, fixe ou variable suivant les groupes, est compris entre dix-neuf et cent quatre-vingt-un; en dehors de quelques-uns qui sont apodes, ces segments portent chacun une paire de pattes. Les pattes de la première paire sont modifiées en pattes-mâchoires, les *forcipules,* dont chacune forme un crochet parcouru par le canal de la *glande à venin;* réunies, elles constituent de puissantes tenailles. Les pattes suivantes sont similaires jusqu'à la région génitale, située en avant du segment anal; cette région peut porter des gonopodes, en avant de l'orifice sexuel.

En ce qui concerne le développement, il est soit *anamorphe,* soit *épimorphe;* c'est-à-dire que, dans certains groupes (Lithobiomorphes et Scutigéromorphes), l'état adulte est précédé de stades larvaires incomplets, alors que dans d'autres (Géophilomorphes et Scolopendromorphes) le jeune possède, à l'éclosion, un nombre définitif de segments et d'appendices.

Les Chilopodes sont des Animaux lucifuges. Pendant le jour, ils se cachent dans des endroits obscurs et humides, sous les pierres, dans les cavités du sol, sous les écorces, dans les boiseries. La nuit, ils chassent de petites proies vivantes, qui meurent rapidement sous l'effet du venin injecté par les forcipules.

Les trois mille espèces de cette sous-classe se répartissent en quatre ordres, les Géophilomorphes et les Scolopendromorphes, qui ont toujours vingt et une paires de pattes au moins, et les Lithobiomorphes et les Scutigéromorphes, tous dotés de quinze paires de pattes.

Ordre des Géophilomorphes

Les Géophilomorphes ont un corps très allongé, vermiforme, blanchâtre ou jaunâtre; leurs antennes sont courtes, et ils sont dépourvus d'yeux. Le nombre de segments porteurs de pattes, qui varie, même au sein d'une espèce, est, au minimum, de trente et un et au maximum de cent soixante-treize. Il faut noter que ce nombre est toujours impair et que les segments apparaissent ainsi comme liés deux à deux : ceci correspond à la diplopodie fondamentale des Myriapodes. Enfin, les Géophilomorphes possèdent des glandes ventrales dont la sécrétion est luminescente.

On a dénombré plus de mille espèces de Géophilomorphes, réparties en deux cent cinquante genres et en dix familles. Répandus sur presque toute la terre, ils manifestent cependant une préférence pour les régions à climat tempéré.

La plus grande espèce de nos régions est *Himantharium gabrielis,* qui atteint 20 cm de long et possède de cent trente-trois à cent soixante-treize paires de pattes. Elle est commune dans le midi de la France, mais on peut aussi la rencontrer à Paris, dans les parcs et les jardins.

G.S. Giacomelli

◀ Les Iuliformes, ou Iules, vivent dans les terrains humides et se nourrissent en général de Végétaux en décomposition. Leur corps présente de nombreuses glandes répugnatoires qui s'ouvrent sur les côtés des segments.

A. Margiocco

A. Margiocco

▼ Sur ces exemplaires de Diplopodes (particulièrement sur la photographie de droite, fortement grossie), on observera que les pattes sont au nombre de deux paires par segment, alors que les Chilopodes n'en ont qu'une seule paire par segment.

A. Margiocco

A. Margiocco

▲ *A gauche, l'illustration montre l'aspect vermiforme des Géophilomorphes, qui peuvent atteindre 20 cm de long. Répandues dans presque toutes les régions tempérées de la terre, certaines espèces sont communes dans le midi de la France; à droite, un Lithobiomorphe du genre* Lithobius, *surtout répandu dans l'hémisphère Nord, et qui affectionne les endroits humides et peu éclairés.*

Le *Scolioplanes maritimus* ne dépasse pas 30 mm de longueur et possède une cinquantaine de paires de pattes; il vit dans les fissures de rochers battus par la mer, sous les pierres et les paquets d'Algues apportés par le flot.

Les *Geophilus* sont abondamment représentés en Europe. Ils vivent sous la mousse, au pied des arbres, dans les Végétaux en décomposition. Beaucoup sont phosphorescents, d'où le nom de *G. electricus* attribué à l'une des espèces de ce genre, répandue dans les forêts de la France, au nord du Massif central.

Ordre des Scolopendromorphes

La majorité des représentants de ce groupe a un corps formé de vingt-cinq segments et doté de vingt et une paires de pattes. Néanmoins, chez un petit nombre de genres, on compte vingt-sept segments dont vingt-trois pédifères.

Les Scolopendromorphes, dont on connaît six cents espèces environ, sont cosmopolites, mais plus abondants dans les régions tropicales. Dans le midi de la France, vit une espèce d'assez grande taille, *Scolopendra cingulata,* de couleur fauve mêlée de verdâtre; elle ne dépasse guère 9 cm de long dans nos régions, mais peut mesurer jusqu'à 17 cm dans l'est du bassin méditerranéen. Très vorace et très agressive, elle s'attaque aux Araignées et aux Insectes. Une espèce brésilienne, *S. gigantea,* est bien plus grande encore; sa taille dépasse 28 cm pour une largeur supérieure à 25 mm.

Ordre des Lithobiomorphes

Les Lithobiomorphes ressemblent aux Scolopendromorphes, mais leur corps est plus court et leurs pattes relativement plus longues. Les antennes sont plus ou moins développées et les ocelles plus ou moins nombreux ou, encore, absents. Ils possèdent toujours quinze paires de pattes, et les quinze tergites sont inégaux : ils sont alternativement grands et petits, sauf dans la région médiane, où les septième et huitième sont grands et égaux. Les pattes sont armées d'ongles et d'épines, et celles de la quinzième paire sont généralement plus longues que les autres.

Ce groupe, dont on a décrit environ mille deux cents espèces, a une large distribution mondiale, mais est surtout répandu dans l'hémisphère Nord.

Le genre *Lithobius* est l'un des plus riches en espèces. La plus connue, *L. forficatus,* la « lithobie à tenailles », est présente dans les endroits humides et sombres, à l'intérieur des troncs d'arbres pourris, parmi les feuilles mortes, sous les pierres, dans les grottes, etc. C'est un Animal de 20 à 30 mm, de teinte brun-fauve, dont la tête est rougeâtre; ses antennes sont assez courtes et ses ocelles nombreux et rapprochés; ses pattes sont longues, et il se déplace avec vélocité. Parmi les autres espèces de nos régions, on peut citer *L. pusillus,* qui mesure 8 mm au plus, *L. troglodytes,* très commun en haute montagne dans les Pyrénées, *L. tricuspis,* présent dans toute la France, surtout dans les forêts, et enfin *L. typhlus,* forme cavernicole aveugle.

Ordre des Scutigéromorphes

Les Scutigéromorphes aussi possèdent un tronc formé de quinze segments, mais les tergites courts, caractéristiques des Lithobiomorphes, ne sont pas individualisés et on n'observe que huit grands tergites. D'autres particularités distinguent les Scutigéromorphes; la tête est forte et renflée; les yeux sont de grosses masses bombées, formées de nombreux ocelles; les antennes, composées de plusieurs centaines d'anneaux, sont filiformes et plus longues que le corps; les pattes sont très allongées et les dernières, démesurées, sont encore plus longues que les antennes; enfin, on observe une disposition des orifices respiratoires unique chez les Myriapodes : les stigmates sont impairs et situés non sur la face ventrale, mais sur le bord postérieur des tergites, sur la face dorsale.

Parmi les Chilopodes, les Scutigéromorphes constituent l'ordre qui comprend le nombre le plus faible d'espèces : moins de cent cinquante ont été décrites, et la plus grande ne dépasse pas 50 mm de long. La distribution de ce groupe est tropicale et subtropicale. En France, on ne connaît qu'une seule espèce, *Scutigera coleoptrata,* largement répandue, surtout dans le Midi; elle présente les caractères communs à l'ordre; longue de 25 mm environ, elle a une coloration jaunâtre, avec trois bandes longitudinales violacées sur le dos. On voit souvent les scutigères, agiles et rapides, courir sur les murs des habitations et sur les boiseries; ce sont des Animaux utiles, qui méritent d'être protégés car ils capturent de petits Insectes nuisibles, tels que les mouches, les teignes ou les moustiques, grâce à leurs dernières pattes, utilisées comme des lassos.

▼ *A gauche,* Scutigera coleoptrata *est la seule espèce de Scutigères connue en France. Ce sont des Animaux agiles et rapides, que l'on voit courir sur les murs des habitations. A droite, un Chilopode du genre* Scolopendra, *dont la taille, dans nos régions, ne dépasse pas plus de 9 cm de long, mais peut atteindre 28 cm chez certaines espèces brésiliennes.*

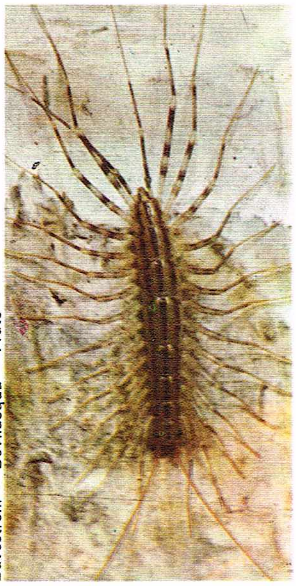

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

A. Margiocco

BIBLIOGRAPHIE

ATTEMS K., 1926, *Myriapoda, in* KUKENTHAL W., *Handbuch der Zoologie,* vol. 4, Berlin et Leipzig. - BROLEMANN H. W., 1930, *Éléments d'une faune des Myriapodes de France. Chilopodes,* Toulouse; 1935, *Myriapodes Diplopodes (Chilognathes I), in Faune de France,* Paris. - DEMANGE J.-M., 1963, *Myriapodes, in Encyclopédie de la Pléiade, Zoologie,* vol. 2, Paris. - VERHOEFF K. W., 1902-1925, *Chilopoda;* 1926-1932, *Diplopoda I-II;* 1933-1934, *Symphyla, in Bronn's Klassen und Ordnungen des Tierreich,* t. 5.

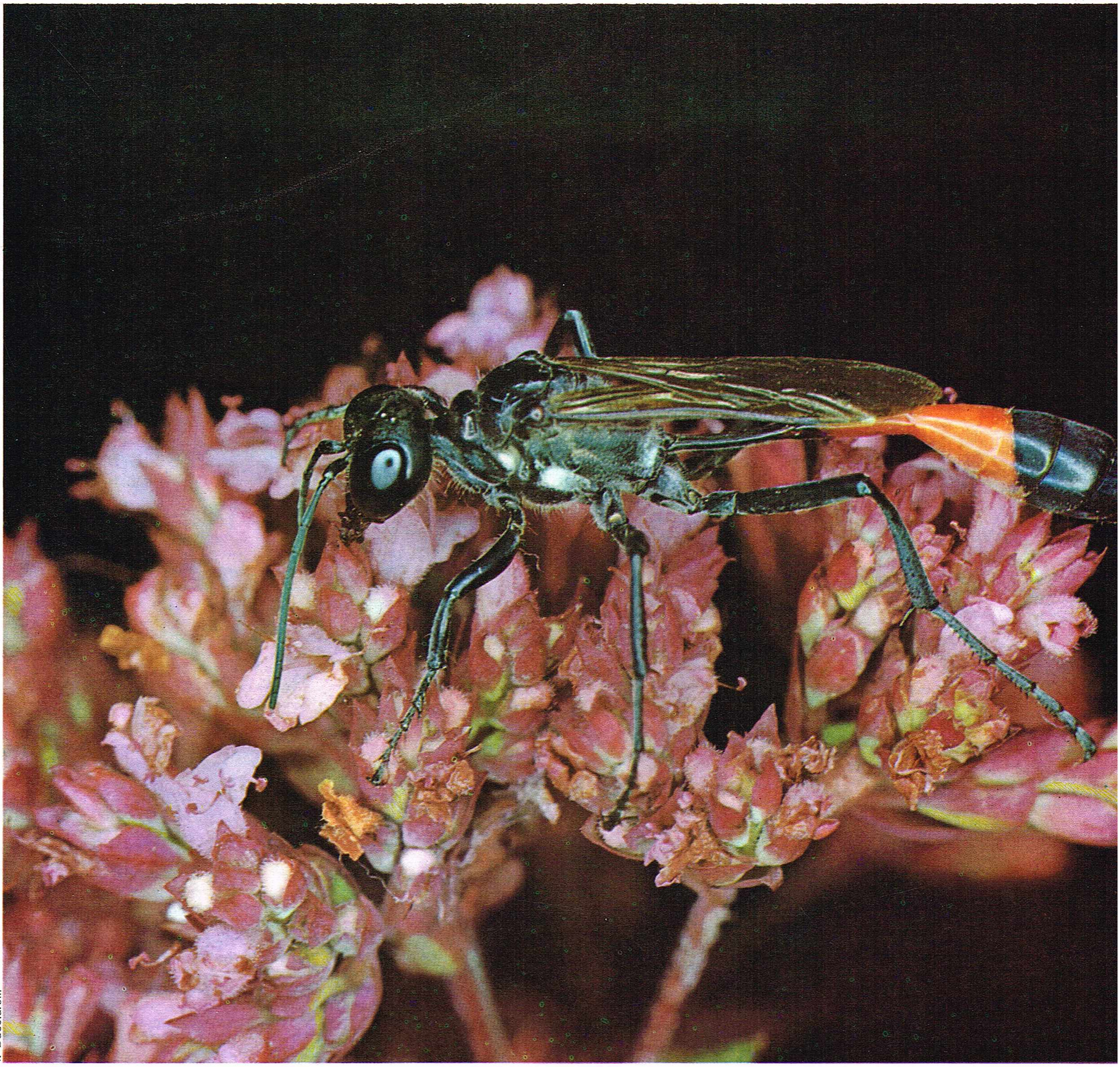

I. Bucciarelli

▲ *La classe des Insectes renferme près des 4/5 des espèces animales actuellement connues. La plupart sont terrestres. Un grand nombre sont utiles à l'homme mais il en existe de parasites. Ici, un Hyménoptère (guêpe fouisseuse),* **Ammophila sabulosa.**

INSECTES

Le mot Insecte vient du latin *insectum,* qui signifie « divisé en anneaux ». L'entomologie, ou science des Insectes, dérive du mot *entomon,* équivalent en grec d'*insectum*. Chaque embranchement animal obéit à deux règles biologiques fondamentales : l'unité du plan d'organisation et la diversité des types. Les Insectes se définissent comme des Arthropodes antennifères (ils sont dotés d'une paire d'antennes) et mandibulates (ils portent une paire d'appendices céphaliques transformés en mandibules).

Le corps comprend trois parties : la tête, le thorax et l'abdomen. Les Insectes sont des Hexapodes : leurs pattes ambulatoires sont au nombre de trois paires et dépendent des segments thoraciques. Les adultes portent souvent deux paires d'ailes insérées sur le thorax. La respiration est trachéenne. Les Insectes comprennent un grand nombre de types, peut-être un million d'espèces, d'aspects extrêmement divers; ils répondent cependant tous à ce plan d'organisation.

C'est à partir de données de la morphologie des Animaux que s'établit la systématique, science descriptive et classificatrice. Toute faune est un catalogue, présenté de manière comparative et organisée, des principales caractéristiques des formes.

Chaque espèce se définit par un ensemble de traits morphologiques qui lui est propre. Mais il y a des exceptions; certaines espèces voisines se ressemblent et sont appelées espèces « sosies », « jumelles » ou « cryptiques ». Elles n'en diffèrent pas moins, mais par des caractères autres que ceux de la morphologie. Il arrive que des Insectes de familles ou même d'ordres différents soient tellement semblables qu'on les confonde à première vue. Si cette ressemblance s'avère utile pour l'une des espèces et si les aires de répartition de ces espèces se recouvrent, on parle de mimétisme ; par contre, si elles vivent dans des régions géographiques différentes, on dit qu'il y a convergence ou évolution parallèle.

Les dimensions de la plupart des Insectes varient de quelques millimètres à quelques centimètres de longueur; elles dépassent rarement 20 cm. Le plus petit est peut-être l'Hyménoptère *Alaptus magnanimus,* qui se développe en parasite sur les œufs d'autres Insectes. Les plus volumineux se rencontrent en zone tropicale et le plus gros est sans doute le Coléoptère *Dynastes hercules,* qui dépasse 16 cm de long. Certains papillons ont une envergure supérieure ; quelques *Ornithoptera* (dont le nom signifie « aux ailes d'Oiseau ») peuvent dépasser 25 cm.

Classe des Insectes

☐ *Sous-classe des Collembola*

○ *Ordre des Collemboles*

☐ *Sous-classe des Proturata*

○ *Ordre des Protoures*

☐ *Sous-classe des Diplurata*

○ *Ordre des Diploures*

☐ *Sous-classe des Thysanurata*

○ *Ordre des Thysanoures*

☐ *Sous-classe des Pterygota*

Section des Paléoptères

○ *Ordre des Ephéméroptères*
○ *Ordre des Odonatoptères*

Section des Néoptères

× Division des Hémimétaboles

— Super-ordre des Orthoptéroïdes

○ *Ordre des Dictyoptères*
○ *Ordre des Isoptères*
○ *Ordre des Plécoptères*
○ *Ordre des Embioptères*
○ *Ordre des Notoptères*
○ *Ordre des Phasmoptères*
○ *Ordre des Orthoptères*
○ *Ordre des Dermaptères*
○ *Ordre des Zoraptères*

— Super-ordre des Hémiptéroïdes

○ *Ordre des Psocoptères*
○ *Ordre des Mallophages*
○ *Ordre des Anoploures*
○ *Ordre des Homoptères*
○ *Ordre des Hémiptères*
○ *Ordre des Thysanoptères*

× Division des Holométaboles

— Super-ordre des Névroptéroïdes

○ *Ordre des Mégaloptères*
○ *Ordre des Raphidioptères*
○ *Ordre des Névroptères*

— Super-ordre des Mécoptéroïdes

○ *Ordre des Mécoptères*
○ *Ordre des Aphaniptères*
○ *Ordre des Trichoptères*
○ *Ordre des Lépidoptères*
○ *Ordre des Diptères*

— Super-ordre des Coléoptéroïdes

○ *Ordre des Coléoptères*
○ *Ordre des Strepsiptères*

— Super-ordre des Hyménoptéroïdes

○ *Ordre des Hyménoptères*

Un grand nombre d'Insectes sont utiles à l'homme. Les abeilles produisent du miel, du propolis, de la cire; les bombyx fabriquent de la soie. D'autres sont indispensables à diverses cultures : ils favorisent la pollinisation des arbres fruitiers, des plantes fourragères, du coton et du tabac. En outre, les Insectes servent de nourriture à des Animaux recherchés par l'homme. Enfin, ils jouent un rôle important dans l'élimination des substances organiques en décomposition.

Cependant, de nombreux individus sont vecteurs de maladies qui atteignent l'homme et les Animaux domestiques. D'autres provoquent d'énormes dégâts dans les cultures, les forêts et les produits stockés.

Les Insectes sont apparus très tôt sur la terre, il y a environ trois cents millions d'années. Les plus primitifs datent du Dévonien moyen. Cette ancienneté explique, en partie, l'extrême diversité des types, l'étonnante spécialisation morphologique et comportementale de nombreuses espèces. Les Insectes ont colonisé toute la terre, sauf le milieu marin. On les rencontre jusqu'à des latitudes extrêmement septentrionales, certaines espèces pouvant résister à des températures de plusieurs dizaines de degrés au-dessous de zéro.

Une des raisons qui ont vraisemblablement favorisé la réussite des Insectes est leur énorme pouvoir reproducteur. Trois facteurs déterminent cette capacité qu'ont les Insectes d'augmenter leur population : le nombre d'œufs pondus par chaque femelle, qui est extrêmement élevé et atteint un milliard pour une reine de termite; la durée de chaque génération, qui varie de quelques jours à plusieurs années; enfin le type de reproduction; chez diverses espèces d'Insectes, la fécondation n'est ni nécessaire, ni indispensable, et les œufs se développent par parthénogenèse. Les mâles sont quelquefois en nombre réduit et peuvent même ne pas exister du tout. Un exemple de la capacité reproductrice d'un Insecte est fourni par la petite mouche du vinaigre, *Drosophila melanogaster,* très utilisée dans les laboratoires de génétique. Dans des conditions de vie optimales les performances sont les suivantes : vingt-cinq générations par an, cent œufs pondus par chaque femelle; le nombre d'individus produit par an à partir d'un seul couple est véritablement astronomique.

Morphologie

Typiquement, le corps de l'Insecte dérive d'embryons comptant vingt et un ou vingt-deux somites ou métamères (six ou sept pour la tête, trois pour le thorax, douze pour l'abdomen). Cette division embryonnaire s'altère, surtout par la coalescence des somites. Chez l'adulte, le métamère ne reste perceptible qu'au niveau du thorax et surtout de l'abdomen qui apparaît nettement constitué d'une succession de segments, ou « urites ».

La tête

La tête se présente comme une capsule rigide, le plus souvent globuleuse, largement ouverte postérieurement (foramen occipital) pour permettre le passage des tractus nerveux, digestif et circulatoire. Elle s'ouvre par un orifice oral garni de pièces buccales, soit antérieurement (type *prognathe,* comme chez les larves de Coléoptères), soit ventralement (type *hypognathe* des criquets, ou type *opisthorhynque* des pucerons). Sur le sommet de la tête s'insèrent deux antennes. La plupart des Insectes possèdent deux yeux composés, parfois très grands, situés en position dorso-latérale. De nombreuses espèces ont aussi des taches oculaires simples, ou ocelles, généralement au nombre de trois et situées entre les yeux composés.

La tête est divisée en régions délimitées par des sillons plus ou moins visibles. Antérieurement, le *front* et le *clypeus* forment la partie médiane. Dorsalement, le front se continue par le *vertex* qui, postérieurement, est séparé de l'*occiput* par un sillon occipital. L'occiput est composé de deux parties, l'occiput proprement dit et un *postocciput* qui limite le cou. Les aires latérales situées sous les yeux sont appelées les *joues,* ou *gena,* et leur partie postérieure est appelée *postgena*.

Les *pièces buccales*. L'orifice oral est entouré d'appendices buccaux assurant la saisie, et même, quelquefois, un début de dilacération des aliments. Ils participent également au repérage et au choix de ces derniers.

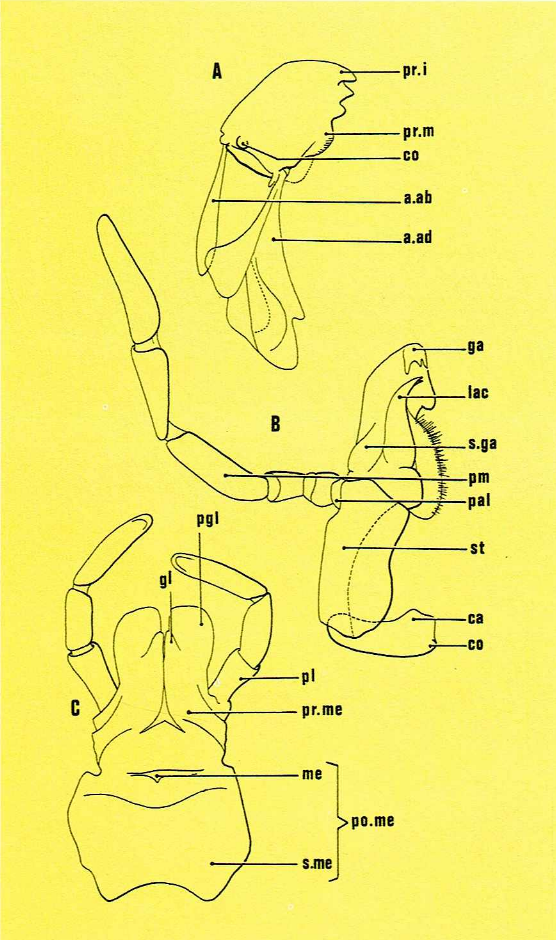

G. Hodebert

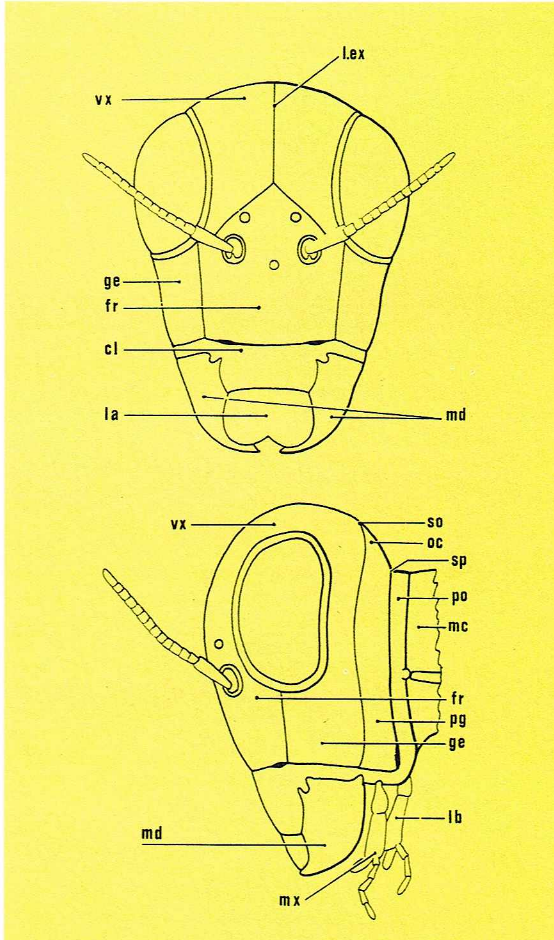

G. Hodebert

▲ *A gauche, pièces buccales de blatte : A (mandibule) : pr. i, processus incisif ; pr. m, processus molaire ; co, condyle ; a.ab, apodème du muscle abducteur ; a.ad, apodème du muscle adducteur ; B (maxille) : ga, galea ; lac, lacinia ; s.ga, sous-galea ; pm, palpe maxillaire ; pal, palpigère ; st, stipes ; ca, cardo ; co, condyle ; C (labium) : gl, glosse ; pgl, paraglosse ; pl, palpe labial ; pr. me, prementum ; me, mentum ; s. me, submentum ; po. me, postmentum ; à droite, principales parties de la tête d'un Insecte, vue de face et de profil : l. ex, ligne d'exuviation ; vx, vertex ; so, sillon occipital ; oc, occiput ; sp, suture postoccipitale ; po, postocciput ; mc, membrane du cou ; fr, front ; pg, postgena ; ge, gena ; cl, clypeus ; md, mandibule ; la, labre ; lb, labium ; mx, maxille.*

L'adaptation à des régimes alimentaires très variés va de pair avec des modifications des pièces buccales. L'appareil masticateur des Insectes qui broient les aliments est le type le plus primitif. C'est le cas de la blatte, ou cafard, qui compte l'équivalent de trois paires d'appendices, *mandibules, maxilles* et *labium,* appendus au plancher de la capsule céphalique. Les mandibules et maxilles limitent latéralement la *cavité préorale*. Le labium, ou lèvre postérieure, résultant de la soudure des appendices de la troisième paire de pièces buccales, forme la paroi postérieure. La cavité préorale est protégée à l'avant par le *labre,* ou lèvre antérieure, qui est un prolongement de la capsule céphalique. Une évagination du plancher céphalique, *l'hypopharynx,* divise cette cavité en deux compartiments : l'un postérieur, *le salivarium,* dans lequel débouche le canal salivaire, et l'autre antérieur, le *cibatium,* au fond duquel s'ouvre la bouche.

Les mandibules sont indivises, puissantes et fortement sclérotinisées. Elles présentent un *processus incisif* garni de trois dents acérées et un *processus molaire* sculpté de crêtes masticatrices. Chaque mandibule est articulée à la capsule céphalique en deux points qui forment son axe de rotation.

Les maxilles sont composées du *cardo,* proximal, articulé par un condyle à une fossette céphalique et du *stipes,* pièce qui supporte latéralement un *palpe* à cinq articles prenant appui sur une proéminence du stipes, le *palpigère*. L'axe du stipes se prolonge par un cône arqué, la *lacinia,* terminée par deux pointes aiguës, et par un lobe charnu, la *galea,* dont la partie basale, plus renflée et garnie de soies, est appelée *sous-galea*.

Le labium, ou lèvre postérieure, est impair, et s'insère sur la capsule céphalique par une plaque, le *postmentum,* divisée transversalement en une base, le *submentum,* et en un *mentum* intermédiaire qui se prolonge par le *prémentum*. Ce dernier supporte latéralement les palpes triarticulés, et médianement deux petites *glosses* entourées de *paraglosses* charnues, plus volumineuses.

Les variations de l'armature buccale. La blatte possède un appareil buccal du *type broyeur* que l'on rencontre aussi chez les Archiptères (libellules), Orthoptères (grillons), Névroptères (fourmilions), Coléoptères (hannetons) et

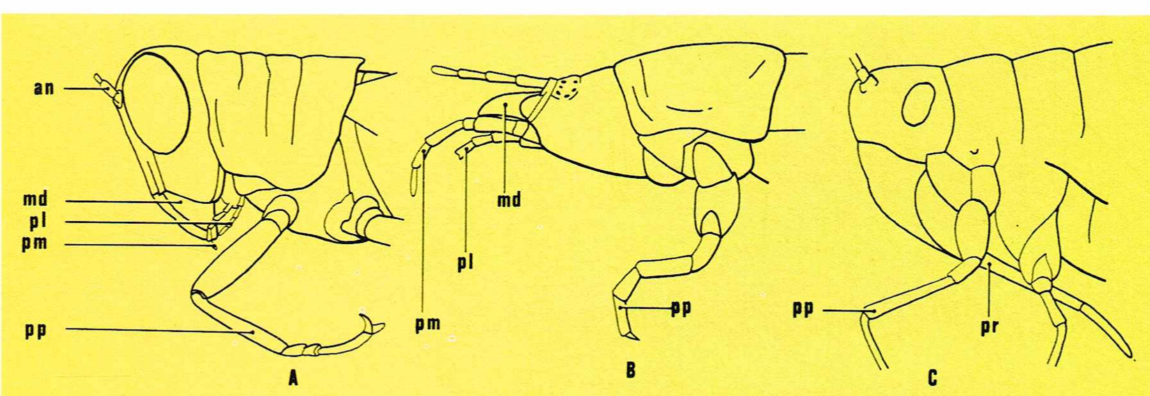

G. Hodebert

◀ *Différentes positions possibles de la tête et des pièces buccales des Insectes par rapport au reste du corps. Types, A, hypognathe ; B, prognathe ; C, opisthorhynque : an, antenne ; md, mandibule ; pl, palpe labial ; pm, palpe maxillaire ; pp, patte prothoracique ; pr, proboscis.*

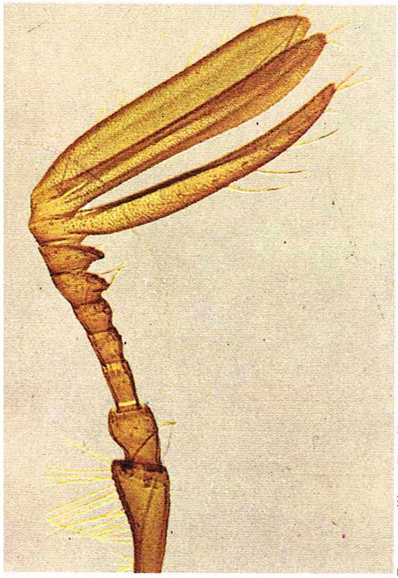

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Les antennes des Insectes sont des organes sensoriels de forme variable. Ici, un type d'antenne de Coléoptère (× 32).*

▼ *A gauche, représentation schématique d'une patte d'Insecte; co, coxa; tr, trochanter; fe, fémur; ti, tibia; ta, tarse; ts, tarsomères; pta, prétarse; à droite, vue ventrale de l'extrémité de deux types de pattes d'Insectes. A, blatte, B, Diptère : ar, arolium; gr, griffe; pu, pulville; au, auxilie; un, unguitracteur; di, distitarse; s.mu, support du muscle dépresseur du prétarse.*

la plupart des larves. Chez les autres Insectes, des remaniements profonds modifient considérablement la forme des pièces buccales; cependant, des études comparatives permettent de retrouver les équivalences.

Le type lécheur, ou broyeur-lécheur, caractéristique des Hyménoptères (abeille, guêpe, fourmi), diffère du type primitif par les mâchoires et le labium, qui constituent une trompe coudée sous la tête lorsque l'Animal ne s'alimente pas. Le labium forme une « langue » velue et creusée en gouttière pour aspirer le nectar des fleurs. Les palpes labiaux et des mâchoires en palette accompagnent cette langue.

Le *type piqueur* se rencontre, avec des variantes importantes, chez les Hémiptères (punaise, puceron) et les Diptères (moustique). Il comporte une trompe aspirante formée par le labium qui s'allonge et se replie sur lui-même en une gouttière ouverte vers le haut. Chez le moustique, le labre ferme dorsalement la gouttière, formant ainsi un fourreau dans lequel glissent mandibules et maxilles transformées en stylets perforants. Chez la mouche, la trompe comprend trois parties, le *basiproboscis,* ou rostre, le *mediproboscis* et le *distiproboscis,* ou labelles; dans le rostre, se trouve une pompe alimentaire activée par un groupe de muscles. La région moyenne de la trompe est constituée essentiellement par le labium creusé en une gouttière, recouverte par un labre de petite taille, qui dissimule le stylet salivaire. La trompe se termine par les *labelles,* grands lobes membraneux qui pourraient correspondre aux palpes labiaux. Chez les Hémiptères, le labre, très court, ne recouvre la gouttière labiale qu'à sa base.

Les Insectes piqueurs enfoncent complètement leur stylet dans les tissus animaux ou végétaux, le labium se repliant sur lui-même. Avant ou pendant la succion, ils injectent de la salive; ainsi se fait très souvent l'inoculation des germes pathogènes.

Le *type suceur,* propre aux Lépidoptères, est le plus modifié. En s'allongeant, les maxilles forment deux gouttières qui s'accolent sur la ligne médiane pour constituer une longue trompe tubulaire aspiratrice. Au repos, cette trompe s'enroule ventralement sur elle-même *(spiritrompe)*. Toutes les autres pièces buccales sont réduites, sauf les palpes labiaux.

Les antennes. Les Insectes portent une paire d'antennes, appendices linéaires multiarticulés. Chez les Collemboles et les Diploures, ainsi que chez de nombreux Arthropodes autres que les Insectes, l'antenne est de type *« segmenté »,* chaque article étant pourvu de muscles permettant aux articles voisins de se mouvoir. Les Thysanoures et tous les Ptérygotes ont des antennes de type *« annelé »,* les muscles étant localisés au premier article, le *scape,* et servant à faire mouvoir le *pédicelle* (deuxième article) ainsi que l'ensemble du *flagelle* (formé de *n* articles). La mobilité des segments du flagelle n'est due qu'au jeu de la pression sanguine.

La forme des antennes est très variable. Quelquefois, la surface est considérablement augmentée et l'antenne ressemble à une plume (par exemple, chez les mâles des papillons *Saturnia*). Chez les chenilles et larves de Coléoptères, les antennes comprennent un nombre très réduit d'articles, alors que, chez les blattes et certaines espèces de sauterelles, elles en comptent un nombre important. Chez les espèces où le dimorphisme sexuel est prononcé, les antennes des mâles sont plus complexes que celles des femelles (par exemple, chez les Coléoptères Lamellicornes).

Le thorax

Le thorax des Insectes est constitué de trois segments, porteurs chacun d'une paire de pattes. Le premier segment, ou *prothorax,* est toujours aptère, mais les deuxième et troisième segments, *méso-* et *métathorax,* portent les ailes chez les Ptérygotes adultes, les Aptérygotes en étant dépourvus. Chaque segment thoracique comprend des pièces dures, dorsalement le *tergite,* ventralement le *sternite* et latéralement les *pleurites.* Le tergite du prothorax, appelé *pronotum,* est souvent réduit; cependant, chez les Orthoptères, Dictyoptères et Coléoptères, il constitue une large voûte protectrice des zones d'insertion alaire. Les *méso-* et *métathorax* sont réduits chez les espèces aptères et se modifient en fonction du vol chez les espèces ailées.

Les pattes. Chez les Insectes Ptérygotes adultes, les déplacements sur un support ou dans l'eau sont assurés par les pattes thoraciques. Chez quelques Aptérygotes et certaines larves de Ptérygotes, ce type de locomotion est également effectué grâce à des appendices abdominaux. Les pattes thoraciques sont essentiellement les organes de la marche, mais chez divers Insectes elles accomplissent d'autres fonctions, des adaptations morphologiques apparaissant en conséquence.

Une patte typique est un ensemble de segments durs, articulés entre eux (*arthro,* « dur »; *pode,* « patte »). Ces segments sont la *coxa,* le *trochanter,* le *fémur,* le *tibia* (ces deux derniers articles représentent, le plus souvent, 80 % au moins de la longueur de la patte), le *tarse* et le *prétarse.*

Le tarse est simple chez les Collemboles et les larves d'Insectes Holométaboles; il se compose généralement de deux à cinq pièces.

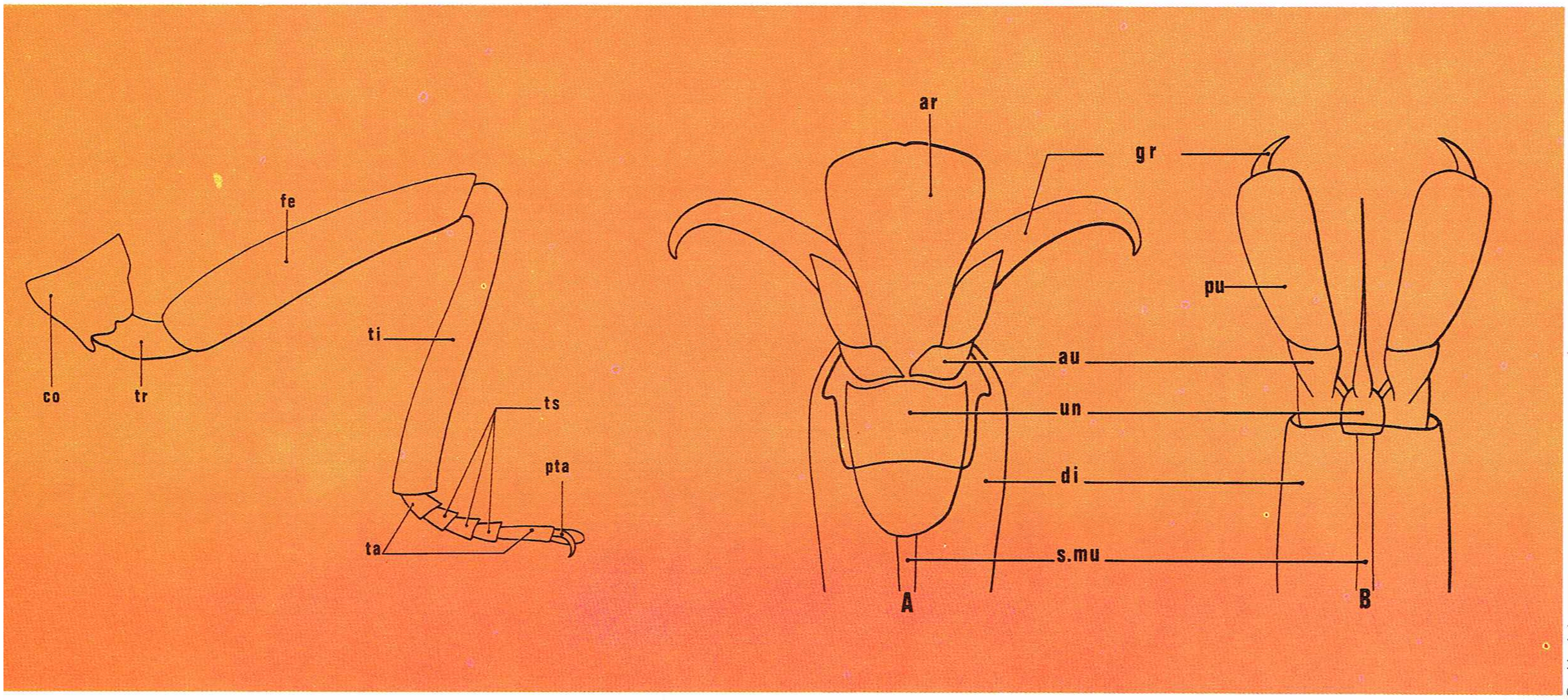

G. Hodebert

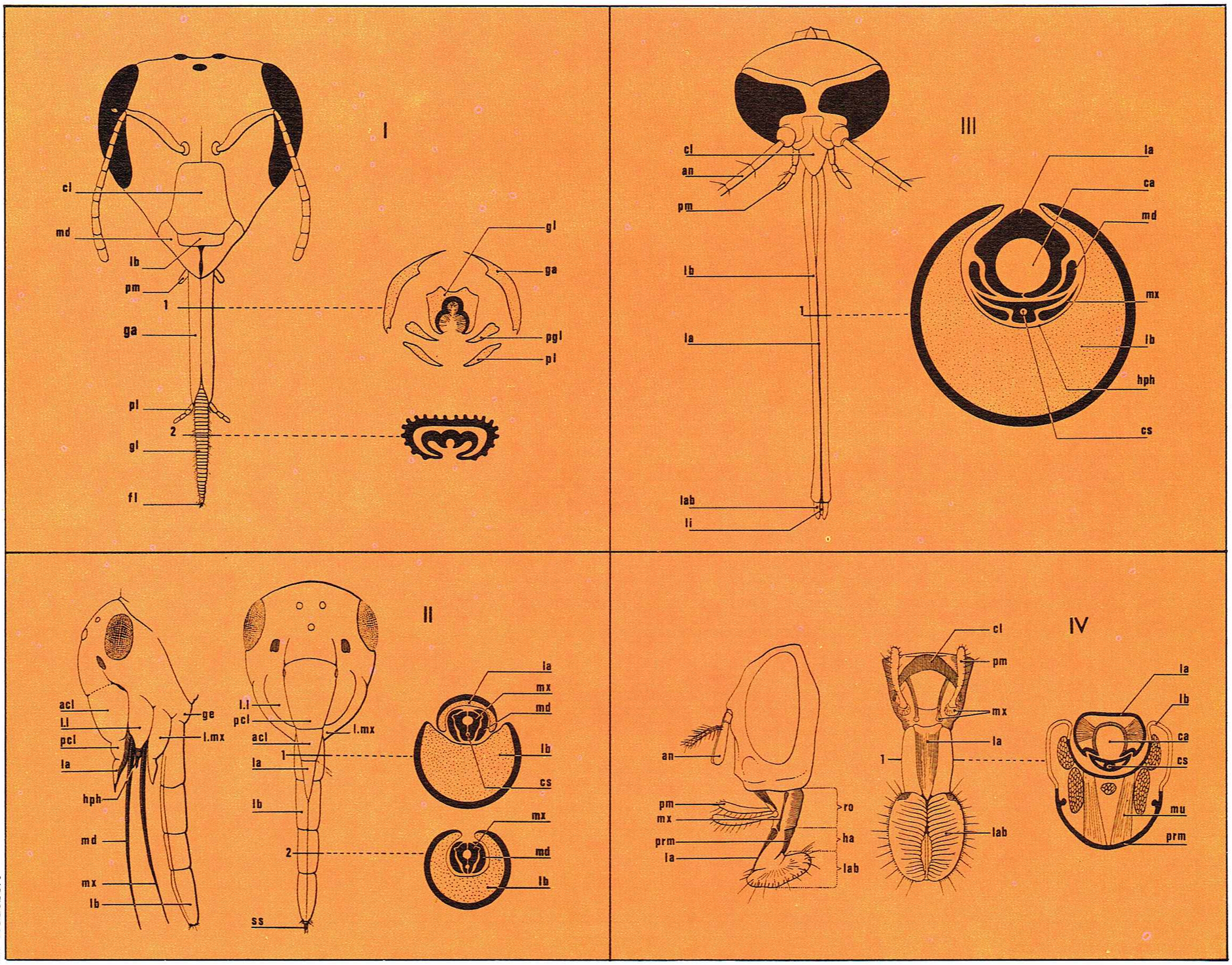

G. Hodebert

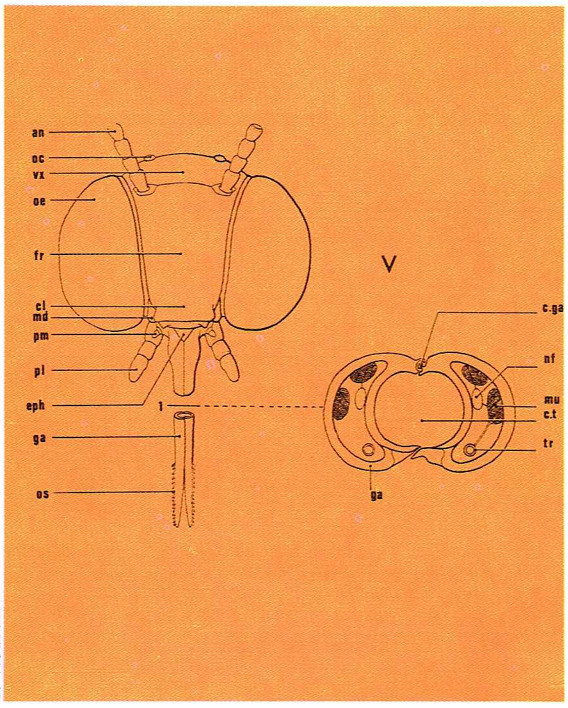

G. Hodebert

◀▲ *Pièces buccales d'Insectes. I - abeille (Hyménoptère), type broyeur-lécheur; cl, clypeus; fl, flabellum; ga, galea; gl, glosses; lb, labium; md, mandibule; pgl, paraglosses; pl, palpes labiaux; pm, palpes maxillaires; 1-2 - niveau des coupes. II - Hémiptère, type piqueur : acl, antéclypeus; cs, canal salivaire; ge, gena; hph, hypopharynx; la, labre; lb, labium; l. l, lames lorales; l. mx, lames maxillaires; md, mandibule; mx, maxille; pcl, postclypeus; ss, sensilles; 1-2 - niveau des coupes. III - moustique (Diptère), type piqueur : an, antenne, ca, canal alimentaire; cl, clypeus; cs, canal salivaire; hph, hypopharynx; la, labre; lab, labelles; lb, labium; li, ligula; md, mandibules; mx, maxilles; pm, palpe maxillaire; 1 - niveau de la coupe. IV - mouche domestique, an, antenne; ca, canal alimentaire; cl, clypeus; cs, canal salivaire; ha, haustellum; la, labre; lab, labelles; lb, labium; mu, muscle; mx, maxilles; pm, palpes maxillaires; prm, prementum; ro, rostre; 1 - niveau de la coupe. V - papillon (Lépidoptère), type suceur-lécheur : an, antenne; c. ga, coaptations assurant l'accrochage des deux galea; cl, clypeus; c. t, canal central de la trompe; eph, épipharynx; fr, front; ga, galea; md, mandibules; mu, muscle; nf, nerf; oc, ocelle; oe, œil composé; os, organes sensoriels; pl, palpes labiaux, pm, palpes maxillaires; tr, trachée; vx, vertex; 1 - niveau de la coupe.*

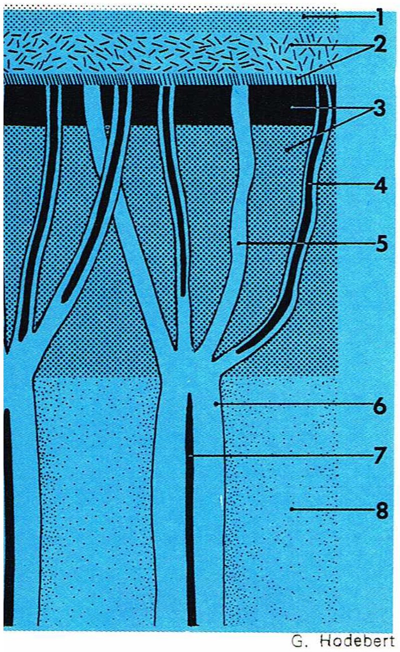

G. Hodebert

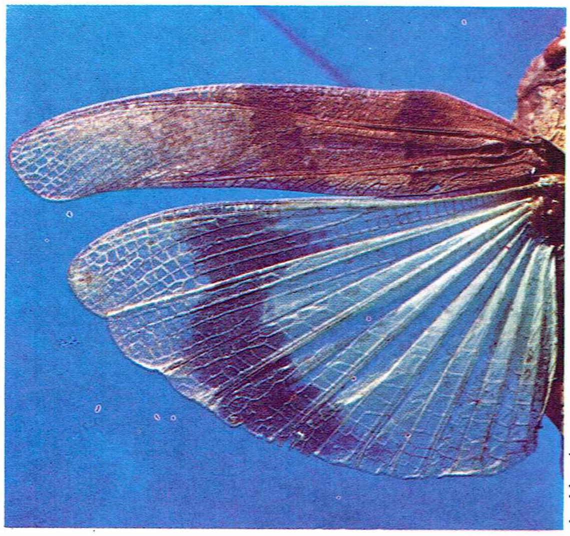

A. Margiocco

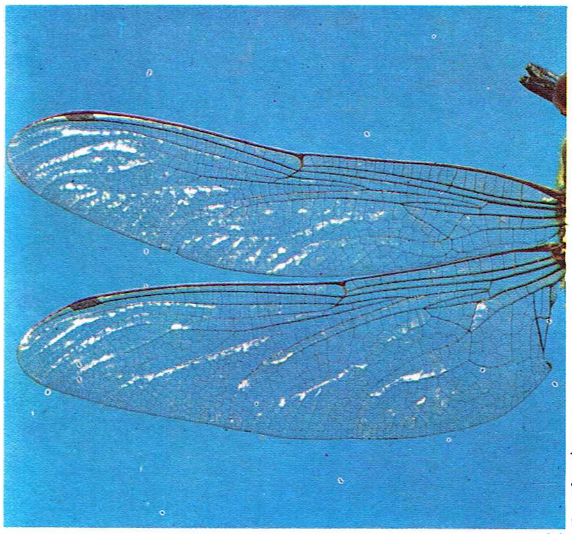

A. Margiocco

▲ A gauche coupe semi-schématique à travers l'épicuticule : 1 - tectocuticule ; 2 - cire ; 3 - cuticuline ; 4 - filament de cire ; 5 - canal à cire ; 6 - pore du canal ; 7 - filament du pore du canal ; 8 - couche basale ; au milieu, aile d'Orthoptère dont la région postérieure, bien développée, forme une surface de soutien chez les Insectes à vol lent ; à droite, ailes de libellule, qui se caractérisent par leur transparence, et leur seule mobilité dans le sens vertical.

▼ Régions alaires, A, zone apicale ; B, zone médiane ; C, zone basale : 1 - champ postérieur ; 2 - champ antérieur ; 3 - champ costal ; 4 - champ discoïdal ; 5 - champ anal ; al, alule ; ju, jugum ; rg, remigium ; ra, région axillaire ; va, vannus.

Le prétarse est réduit à une simple griffe chez les Protoures, chez quelques Collemboles et de nombreuses larves d'Insectes Holométaboles. Mais, dans la majorité des espèces, il se compose d'un *arolium,* sorte de lobe médian membraneux ou partiellement sclérotinisé, et d'une paire de griffes qui s'articulent avec le segment du tarse.

La conformation typique d'une patte se modifie souvent en relation avec diverses activités, telles que creuser, s'accrocher, nettoyer, striduler, sauter, nager. Chez la larve souterraine de la cigale, le fémur de la patte prothoracique est court et puissant, armé de crocs qui facilitent le travail d'excavation. Le tarse du dytique mâle est très aplati et garni de ventouses permettant, lors de l'accouplement, l'accrochage du mâle à la femelle. Celui de l'abeille est creusé d'une gouttière garnie de poils où, lors du nettoyage, glisse l'antenne. Le fémur de nombreuses espèces de criquets porte une rangée de tubercules qui, en frottant contre les élytres, produisent les sons caractéristiques de ces Animaux. Chez les Insectes sauteurs, Orthoptères et divers Coléoptères, le fémur très renflé abrite des muscles puissants, l'extenseur (bipartite) et le flexeur du tibia. Les pattes des Insectes nageurs sont fréquemment modifiées. Chez le gyrin par exemple, les pattes métathoraciques sont aplaties en battoir, et garnies à l'extérieur de lames raides qui augmentent la surface portante.

Les ailes. Les Insectes Ptérygotes possèdent deux paires d'ailes ; ces dernières naissent dorsalement des méso- et métathorax et sont des évaginations à double paroi séparée par une cavité qui prolonge la cavité générale du thorax. Chaque aile se compose d'une fine membrane maintenue par un système de nervures tubulaires. La membrane correspond à l'accolement des téguments évaginés (cuticule et hypoderme accolés à une autre couche d'hypoderme et cuticule). Au niveau des nervures, les téguments restent séparés, la cuticule ayant tendance à s'épaissir. Le sang circule dans toutes les cavités, faisant ainsi le tour de l'aile. Dans les plus grosses nervures, courent un nerf et une trachée.

On distingue, suivant la morphologie des ailes et leur position au repos, deux groupes de Ptérygotes : d'une part, le groupe primitif des Paléoptères, qui comprend les Éphémères et les Odonates et qui se caractérise par ses ailes nues, mobiles seulement dans le sens vertical et ne se repliant pas en arrière au repos ; d'autre part, les Néoptères, dont les ailes sont nues, ciliées ou écailleuses et sont mobiles aussi bien verticalement qu'horizontalement. Au repos, elles se replient sur l'abdomen et les postérieures peuvent être recouvertes par les antérieures.

En général, les ailes sont minces et membraneuses, mais, dans certains cas, les ailes mésothoraciques deviennent épaisses et rigides, soit dans leur ensemble (élytres des Coléoptères), soit seulement dans leur moitié proximale (hémiélytres des Hétéroptères et de quelques Homoptères). La forme de l'aile est grossièrement triangulaire. Chez les Insectes bons voiliers, elles sont allongées, pointues, étroites *(angustipennes),* alors que chez les autres, elles sont plus ou moins élargies et arrondies *(latipennes)*. Le bord antérieur est rectiligne, et le postérieur est courbe.

Les Insectes ont généralement deux paires d'ailes *(tétraptères),* mais, quelquefois, ils n'en possèdent que deux *(diptères)*. Chez les tétraptères, les quatre ailes peuvent être relativement semblables ; dans de tels cas, ces Insectes sont dits *homoneures* (Lépidoptères) ; chez les *hétéroneures,* par contre, les deux paires d'ailes sont différentes.

L'aile est asymétrique et divisée en régions qui fonctionnent différemment pendant le vol ; on distingue des champs partagés longitudinalement (champs *costal, discoïdal* et *anal*) et séparés par des nervures puissantes ou des plis alaires. La région alaire antérieure forme le *remigium* (champ costal + champ discoïdal), aire propulsive pendant le vol. La région postérieure (champ anal) constitue une aire de support ou de glissement de l'aile ; elle est particulièrement développée chez les Insectes à vol lent, où elle forme une surface de soutien (Orthoptères). Chez les Diptères, les ailes métathoraciques sont réduites à des stylets, appelés *balanciers*.

L'aile est soit nue, soit recouverte de cils, soies ou écailles. Ces dernières sont présentes chez la plupart des Lépidoptères et leurs fonctions sont diverses : coloration, sécrétion odoriférante, respiration, diffusion de substances hydrophobes et réception d'ultra-sons. Les ailes peuvent présenter des coaptations diverses ; chez les Insectes bons voiliers, les ailes antérieures et postérieures fonctionnent, en vol, de façon synchrone, grâce à un système de couplage qui se présente soit comme un simple chevauchement des surfaces, soit comme un engrenage entre gouttières et crochets. Chez les Insectes aquatiques, tels les notonectes, naucores, corises et bélostomes, les ailes antérieures s'accrochent entre elles pendant la nage et au repos. Chez les Orthoptères Ensifères (grillons, sauterelles), se différencient dans les ailes des appareils produisant des sons.

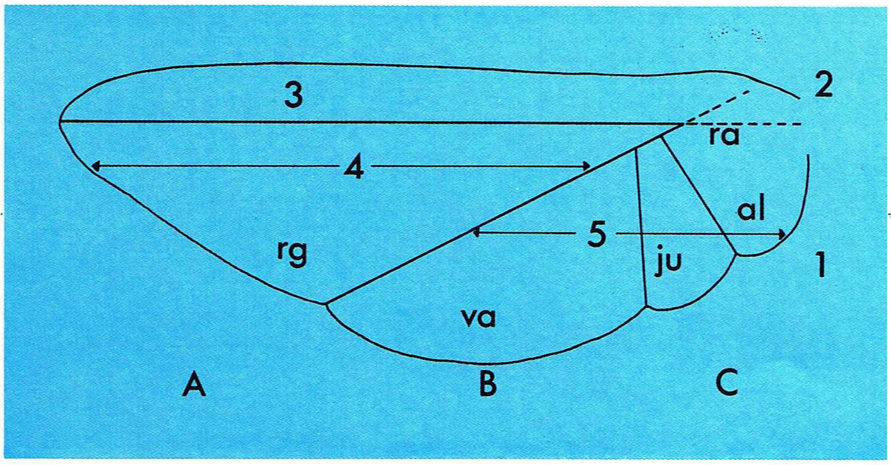

G. Hodebert

L'abdomen

Au cours de son développement, l'abdomen apparaît composé de onze segments et d'un telson ; cependant une telle structure ne se maintient que chez les Protoures. Sur les sept segments antérieurs, les ébauches d'appendices disparaissent, sauf dans certains cas exceptionnels. Les segments abdominaux antérieurs sont finalement très simplifiés ; ils ne comprennent qu'un tergite et un sternite, reliés par une membrane pleurale. Les segments postérieurs se réduisent, se transforment ou s'estompent. A leurs dépens apparaissent les *cerques,* sur le onzième segment, et les *pygopodes,* vestiges d'appendices, sur le douzième segment. L'orifice génital mâle s'ouvre au bord du neuvième segment et l'orifice génital femelle au bord du huitième. Les segments génitaux seront décrits dans la partie consacrée à la reproduction.

Les appendices abdominaux. Chez les Insectes Ptérygotes adultes, les segments abdominaux sont dépourvus d'appendices locomoteurs typiques ; il n'en persiste que des vestiges.

Les cerques. Les cerques, dépendant généralement du onzième segment abdominal ou parfois du dixième, sont présents chez les Aptérygotes et les Insectes Hémimétaboles, à l'exception des Hémiptéroïdes ; par contre, parmi les Holométaboles, seuls les Mécoptères en possèdent. Les cerques sont simples chez les Orthoptères et annelés chez les Dictyoptères ; ils peuvent être très courts et à peine visibles, ou, au contraire, plus longs que la longueur du corps chez les Thysanoures, les Éphémères et les Plécoptères. Ils ont des fonctions sensorielles et sont sensibles aux stimulations tactiles, aux mouvements d'air et parfois, chez les grillons par exemple, aux vibrations de basse fréquence. Les cerques sont parfois différents selon le sexe ; plus développés et en forme de pince chez le mâle, ils jouent un rôle lors de la copulation, ou peuvent servir à la capture des proies, ou encore, comme arme de combat chez les forficules.

Chez les Aptérygotes, il subsiste des appendices abdominaux très modifiés ou simplifiés, les styles, les vésicules dévaginables, le rétinacle et la furca.

Les branchies et fausses pattes. Chez les Ptérygotes adultes, les segments prégénitaux sont dépourvus d'appendices, mais, chez les larves, les quelques segments abdominaux portent des différenciations considérées, par certains, comme des vestiges de vrais appendices et, par d'autres, comme des développements secondaires. Ces différenciations segmentaires sont présentes sous forme de six ou sept paires de branchies chez de nombreuses larves aquatiques. Des proéminences abdominales servant à la locomotion sont fréquentes chez les larves d'Holométaboles ; à l'extension, ces fausses pattes sont turgescentes par le jeu de la pression sanguine, et sont mues par un complexe musculaire. Leur extrémité est armée d'épines ou de crochets. Chez les chenilles, les segments trois à six ou deux à sept, ainsi que le dixième, sont fréquemment pourvus d'une paire de fausses pattes membraneuses.

Le tégument

Le tégument des Insectes se compose d'une unique couche de cellules, ou *épiderme,* surmontée d'une *cuticule.* La cuticule se présente macroscopiquement sous forme de plaques solides et élastiques, les sclérites, et de parties flexibles non indurées, les « membranes ». Ces dernières constituent les régions cuticulaires entre les sclérites et peuvent aussi recouvrir des régions entières, qui deviennent alors très extensibles. La cuticule assure à l'organisme une solidité (squelette externe) et une protection contre les agents chimiques. Elle est imperméable à l'eau (tout au moins de l'intérieur vers l'extérieur) et très peu perméable aux gaz. Elle constitue une protection efficace contre la transpiration. Cependant, dans les régions membraneuses, il peut y avoir absorption d'eau et respiration cutanée.

La cuticule est faite de trois couches principales, différentes par leur formation et leur importance. L'*épicuticule,* généralement épaisse de 1 μ, et parfois de trois ou quatre, joue un rôle essentiel dans la perméabilité à l'eau. L'*épicuticule,* en dépit de sa minceur, est de structure très complexe. Elle est traversée verticalement par des canaux de 60 à 130 Å de diamètre, contenant des filaments de cire. L'épicuticule comporte au moins quatre couches, qui sont, de l'extérieur vers l'intérieur, une tectocuticule, constituée d'un cément sécrété par les glandes dermiques, une couche de cire, une couche de cuticuline lipoprotéique, enfin, une couche basale homogène de composition encore inconnue.

L'*endocuticule* est généralement plus épaisse, de structure variable, composée d'une *chitine* complexe et de diverses protéines, l'*arthropodine,* la *résiline* et la *sclérotine.* Cette dernière est une protéine qui, avec des phénols polyhydriques et des quinones, assure le tannage de la cuticule et par là son durcissement ou « sclérotinisation », et son assombrissement, ou « mélanisation ». A l'observation en microscopie électronique à de très forts grossissements, l'endocuticule s'avère composée de couches alternativement sombres et claires, se déposant respectivement le jour et la nuit. Dans les deux cas il s'agit d'une succession de feuilles, composées de microfibrilles de chitine emballées dans une matrice protéique. Dans chaque couche, les microfibrilles sont disposées parallèlement. Dans les couches claires, déposées la nuit, l'orientation de l'alignement change d'un angle à peu près constant d'une feuille à la suivante ; sur coupe transversale, cette disposition hélicoïdale présente l'aspect d'une structure en faisceaux d'arcs. Par contre, dans les couches sombres, déposées le jour, les microfibrilles des différentes feuilles sont parallèles. Cette endocuticule feuilletée d'une manière régulière ou torsadée est striée verticalement par de fins canaux qui joignent les cellules épidermiques à l'épicuticule, où ils s'ouvrent par des pores.

Dans les régions les plus dures du tégument, une partie de l'endocuticule devient plus ambrée et prend le nom d'*exocuticule.*

L'équilibre entre les épaisseurs des exo-, épi- et endocuticules varie selon les niveaux. Au niveau des membranes, l'exocuticule reste mince ; dans les coussinets adhésifs des pattes ou ventro-céphaliques des Mallophages (« poux des Oiseaux »), l'endocuticule est très lâche et les membranes sont épaisses et molles. Au moment de la mue, au niveau de la ligne d'exuviation, le liquide d'exuviation liquéfie la cuticule à partir de l'intérieur, grâce aux ferments qu'il contient. Alors, seule persiste l'épicuticule qui forme l'exuvie.

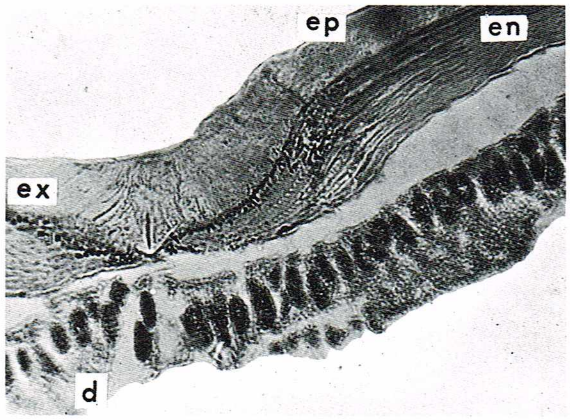

Y. Leroy

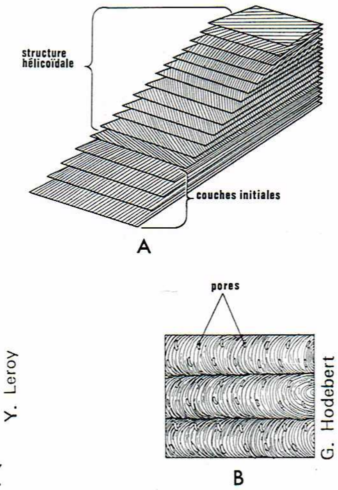

G. Hodebert

▲ A gauche, illustration de la capacité qu'ont certains Insectes de s'amputer d'une patte, par exemple lorsqu'ils sont aux prises avec un prédateur. La rupture s'exécute à un niveau différencié à cet effet, caractérisé, en particulier, par l'épaississement en biseau de l'exocuticule cassante, et l'amincissement compensatoire de l'épicuticule plus élastique ; en, endocuticule ; ep, épicuticule ; ex, exocuticule ; d, épiderme ; à droite, coupe schématique de l'endocuticule, A, feuilletée d'une manière régulière ou torsadée ; B, striée verticalement par de fins canaux qui s'ouvrent par des pores.

▼ Abdomen de criquet : t. 1, tergite 1 ; mp, métapostnotum ; ty, tympan ; sp, spiracle ; st. 1, sternite 1 ; st. 2, sternite 2 ; st. 7, sternite 7 ; st. 8, sternite 8 ; v. ov, valve de l'ovipositeur ; ce, cerque ; ep, épiprocte (segments 11) ; t. 9, tergite 9 ; t. 10, tergite 10.

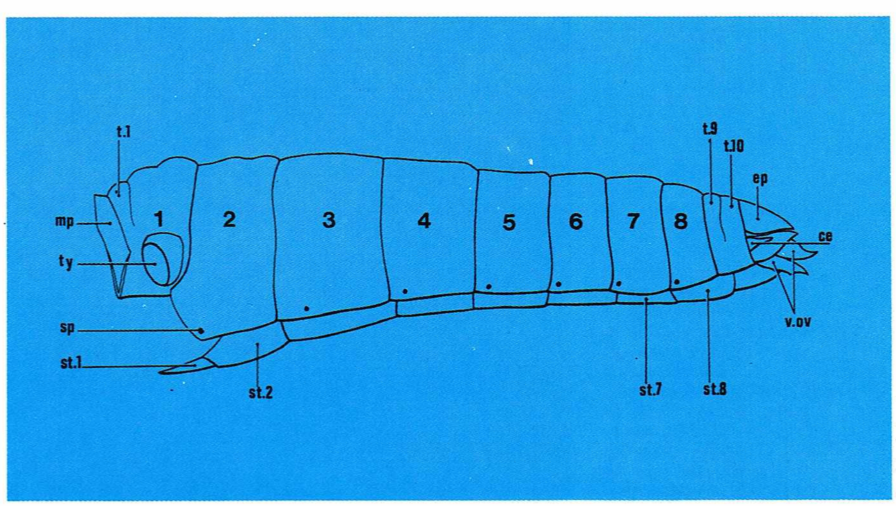

G. Hodebert

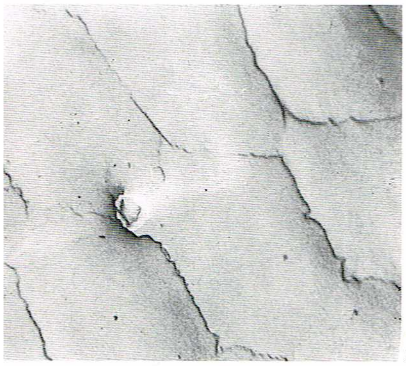

Y. Leroy

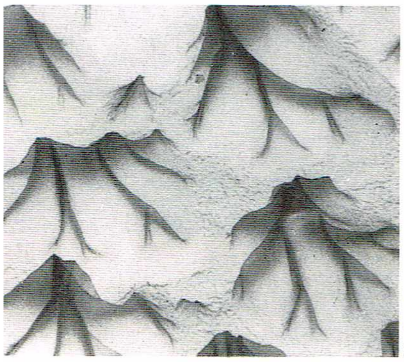

Y. Leroy

▲ *En haut, ultrastructure d'une surface tégumentaire lisse; réseau hexagonal sur un élytre de sauterelle africaine,* **Phrysocorypha politurata** *(× 2 600). En bas, ultrastructure d'une surface tégumentaire veloutée de sauterelle verte de forêt tropicale,* **Cestromoecha tenuipes,** *vue au microscope électronique (× 2 600). La lumière, frappant les replis, donne à l'Insecte son aspect mat et velouté.*

Au niveau du sillon d'autotomie, chez les Insectes capables de se séparer d'une patte par réflexe, les rapports d'épaisseur entre endo- et exocuticule sont inversés; l'exocuticule cassante s'épaissit en biseau tandis que l'endocuticule s'amincit.

La diversité des couleurs

En général, les couleurs sont dues aux couches superficielles. On distingue des couleurs pigmentaires et des couleurs structurales.

Les couleurs pigmentaires. Les pigments se fixent dans la cuticule, l'épiderme, le sang ou le corps gras.

Parmi les pigments cuticulaires, les *mélanines* sont les plus fréquentes. Elles se situent généralement dans l'exocuticule, qu'elles colorent en jaune, brun ou noir. On rencontre néanmoins des bleus et bleu-vert dans la cuticule des Lépidoptères. La mélanisation, liée à la sclérotinisation, dépend de l'intensité du métabolisme et de divers facteurs externes. Les caroténoïdes, auxquels appartiennent pour la plupart les jaunes, les oranges et les rouges, ne sont pas synthétisés par les Insectes, mais proviennent des plantes dont ils se nourrissent. L'un des composés de cette famille, le β-carotène, donne sa couleur jaune au criquet *Schistocerca*. Il est présent dans quelques organes internes et colore certaines sécrétions, comme la cire des abeilles ou la soie du bombyx.

Les pigments épidermiques et sub-épidermiques comprennent les *ommochromes,* qui donnent des teintes jaunes, brunes ou rouges selon le degré d'oxydation, et des *ptérines* de teinte blanche, jaune, rouge (chez les guêpes, les piérides).

Des *lipochromes*, provenant des plantes, sont également sous-épidermiques.

Des dépôts sur la cuticule sont formés à partir de sécrétions, souvent blanches, pulvérulentes ou filamenteuses, composées de cire chez les pucerons et les cochenilles, ou d'autres substances chez les cétoines et ténébrionides des régions désertiques.

Certains Insectes, par exemple, les larves de chironomes, qui possèdent de l'hémoglobine, paraissent rouges, la couleur de leur sang étant visible à travers les téguments. Chez d'autres espèces (larves de *Gasterophilus*), par contre, l'hémoglobine se fixe dans le corps gras.

Quels que soient la nature et l'emplacement des pigments, la couleur qui en résulte provient de ce que chaque pigment absorbe certaines radiations et en laisse passer d'autres, qu'elles soient retransmises par transparence ou par réflexion.

Les couleurs structurales. Les couleurs blanches et bleues ainsi que les reflets irisés dépendent essentiellement de la structure des surfaces du tégument. Trois procédés essentiels, la réflexion, l'interférence et la diffraction sont à l'origine des couleurs physiques.

La lumière qui tombe sur le tégument peut être réfléchie dans toutes les directions par les irrégularités de la surface ou des granules sous-jacents, qui, s'ils ont de larges dimensions par rapport aux longueurs d'onde de la lumière, la réfléchissent en totalité : la surface apparaît alors blanche. C'est le phénomène de la *réflexion*. Chez les Insectes, la plupart des blancs sont produits de cette manière; mais il existe également des pigments blancs.

Lorsque le tégument contient à la limite de la surface des granules très petits dont les dimensions sont égales ou un peu inférieures à 0,6 μ, c'est-à-dire correspondent à la longueur d'onde du bleu, seuls les bleus et les indigos sont réfléchis; les longueurs d'onde supérieures (les oranges et les rouges) ne le sont pas; c'est pourquoi le tégument paraît bleu-vert ou bleu : c'est l'*effet Tyndall*. Ainsi, les bleus des libellules résultent de cet effet. Pour que la teinte bleue soit bien visible, la présence d'une couche sombre au-dessous des granules est nécessaire, sinon les couches sous-jacentes reflètent des lumières d'autres longueurs d'onde et masquent le bleu.

Les couleurs d'*interférence* résultent de la réflexion de la lumière sur une série de surfaces superposées, séparées entre elles par des distances équivalentes aux longueurs d'onde de la lumière. Il arrive qu'en présence de telles structures quelques longueurs d'onde réfléchies par les surfaces successives soient en concordance de phase, ce qui en renforce l'effet, tandis que d'autres, en discordance de phase, s'estompent. Ainsi, seules certaines longueurs d'onde sont-elles réfléchies et donnent-elles à la surface sa coloration. L'indice de réfraction des matériaux en cause et la distance entre les surfaces de réflexion sont les facteurs déterminants de la couleur visible.

Lorsqu'on regarde la surface multisériée obliquement, les distances entre les surfaces réfléchissantes successives sont réduites et la couleur change avec l'angle de vision. Si l'observateur déplace son axe de visée, ou si l'Insecte bouge tant soit peu, les couleurs réfléchies passeront par la gamme des couleurs de l'arc-en-ciel (série de Newton). C'est ainsi que sont produites les couleurs irisées des Insectes. Les surfaces lamellaires réfléchissantes se trouvent, chez les Lépidoptères, sur les écailles, chez les Coléoptères, dans la cuticule des élytres, et, chez les Odonates, dans celle des ailes.

Une surface finement striée avec, entre les rides, des intervalles correspondant aux longueurs d'onde de la lumière, peut décomposer la lumière blanche en ses diverses composantes. C'est par ce processus que sont produites les couleurs de *diffraction*.

Aspects des téguments

Indépendamment des couleurs, les surfaces visibles des Insectes se présentent sous des aspects divers : gaufrés, pubescents, veloutés, mats, brillants, luisants, lisses, etc. Ces apparences dépendent de différenciations superficielles du tégument : multiplication et mise en relief des nervures des élytres chez les sauterelles, présence de poils souples, ou, à l'échelle de l'ultramicroscopie, différenciations d'unités structurales élémentaires de revêtement sur les téguments des parties visibles des

▶ *Les couleurs irisées des Insectes sont produites par les surfaces lamellaires réfléchissantes des écailles chez les Lépidoptères, à gauche; et chez ce Coléoptère,* **Cetonia dorata,** *à droite, par la cuticule des élytres.*

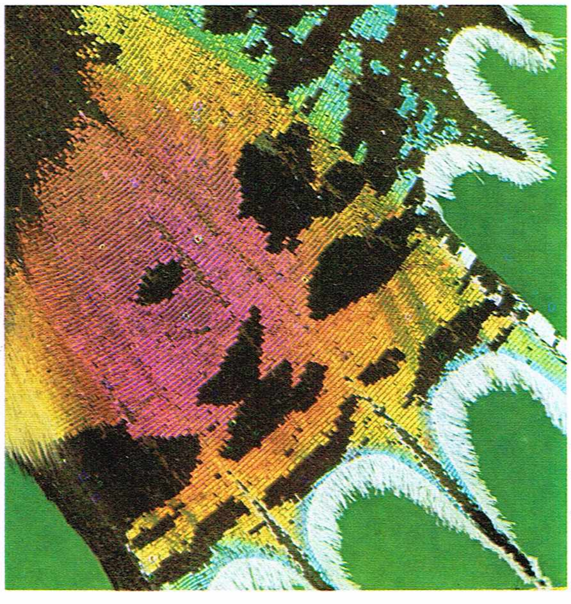

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

M. Boulard

Insectes. Les aspects plus spectaculaires sont les reliefs qui assurent la matité ou le velouté des surfaces; ils résultent d'une juxtaposition très dense de petites pinnules ou de replis diaphanes réunis en cônes.

Disposition des couleurs. Certains Insectes ont une coloration uniforme; chez d'autres, apparaissent des dessins complexes. Les ornements les plus primitifs semblent être des séries de taches plus ou moins semblables, ou des zones sombres ayant tendance à souligner certains alignements du corps, dorsalement ou latéralement. Les stries longitudinales marquent un degré de complexité supplémentaire. Viennent ensuite les bandes transversales qui proviennent vraisemblablement de la fusion de taches; d'où la fréquence des dessins en réseau.

Si les ornementations ne suivent pas nécessairement le plan d'organisation, elles n'en obéissent cependant pas moins à une composition d'ensemble. Des colorations peuvent chevaucher des parties différentes du corps. Si une coaptation est définie comme un ajustement réciproque de deux parties indépendantes d'un organisme animal, réalisant par leur union un ensemble utile et défini, on peut dire que, chez les Insectes, les coaptations pigmentaires qui coopèrent à la fonction d'apparence sont fréquentes : telle ligne claire peut courir de la tête à l'extrémité des élytres, en passant par le thorax; selon les ordres, les parties colorées du corps varient; chez les Lépidoptères ce sont essentiellement les ailes, chez les Hyménoptères et les Névroptères, l'abdomen, et chez les Coléoptères et Orthoptères, la tête, le thorax et les élytres. Les ornementations produisent deux grandes catégories de livrées : les livrées *cryptiques,* en harmonie avec le milieu, et les livrées *phanériques,* en contraste avec le milieu.

Homochromie. Homotypie. Somatolyse. De nombreux Insectes sont verts comme les Végétaux, bruns ou tachetés comme le sol et les écorces d'arbres. Ces teintes cryptiques leur permettent de se soustraire partiellement à l'attention des prédateurs et des proies. L'homochromie est souvent associée à l'homotypie, qui est la ressemblance morphologique avec les éléments du milieu (par exemple, les feuilles ou les brindilles), ainsi qu'à un comportement qui renforce le camouflage. La silhouette de l'Insecte peut être difficile à reconnaître lorsque, par un jeu de taches colorées, les limites corporelles s'estompent; on dit alors qu'il y a *somatolyse* (*soma,* corps; *lusis,* rupture) et on parle de *colorations disruptives.*

Couleurs d'avertissement. Les couleurs ou les dessins des livrées de divers Insectes peuvent effrayer ou surprendre les prédateurs, ou encore détourner leur attention vers les parties du corps les moins vulnérables. L'œdipode, cryptique, exhibe des ailes rouges en s'envolant. Lorsqu'il est dérangé, le papillon de nuit *Automeris coreus* écarte les ailes et laisse voir les ocelles qui ornent ses ailes postérieures; ce manège provoque, chez l'Oiseau prédateur, une hésitation qui, fût-elle de quelques centièmes de seconde, peut suffire à l'Insecte pour s'échapper. Les couleurs d'avertissement sont souvent associées à la présence de substances, d'odeurs ou de goûts désagréables pour les prédateurs, et même, parfois, à des poisons. Ainsi, un crapaud piqué par une guêpe qu'il est en train d'avaler évitera par la suite d'attaquer cette espèce.

Mimétisme. Le prédateur semble apprendre à éviter les Insectes de goût désagréable; il les reconnaît à leurs formes, leurs couleurs et leurs comportements. Théoriquement, un tel apprentissage se fait séparément pour chaque espèce d'Insectes; cependant, si les ornementations de plusieurs espèces, de plusieurs familles, voire d'ordres différents, se ressemblent, il suffit que le prédateur ait appris à éviter l'un des Animaux en question pour qu'il se désintéresse de tous les autres. Ainsi, pour des Insectes comestibles, la ressemblance avec une espèce venimeuse ou de mauvais goût constitue un avantage contre la pression prédatrice. Les espèces redoutées sont appelées des *modèles* et celles qui leur ressemblent des *mimes.*

Dans ce type de mimétisme, dit *batésien* en l'honneur du lépidoptériste Bates, qui le premier remarqua le phénomène, il importe que le mime soit nettement moins commun que le modèle, pour qu'il puisse tirer avantage d'un tel système de protection. Les populations d'espèces « mimantes » sont donc limitées dans leur extension numérique. Chez certaines espèces, comme chez le papillon *Papilio dardanus,* la contrainte d'expansion de l'espèce est levée grâce au polymorphisme. Chez cette espèce, il existe de nombreux types de femelles déterminés génétiquement, chaque type mimant un modèle d'espèce différente.

Reconnaissances intraspécifiques. Chez de nombreuses espèces d'Insectes, les colorations sont très importantes pour la reconnaissance entre individus de sexe différent. Le mâle du papillon *Hypolimnas misippus* ne poursuit pas la femelle de son espèce si ses ailes normalement brunes sont maculées de blanc. La livrée joue également un rôle dans les relations entre mâles rivaux. Le mâle de la libellule *Plathemis lydia* possède un territoire qu'il défend contre les intrus par une signalisation optique; menacé par un rival, il dresse l'abdomen et exhibe une belle tache bleue. En présence de la femelle, l'abdomen est horizontal.

▲ Cette Phanéroptérine montre à quel point le mimétisme peut être développé chez les Orthoptères Ensifères; l'élytre, nervuré à la façon d'une feuille, porte une tache simulant une moisissure et des découpures qui donnent l'impression qu'une chenille l'a entamé.

Nutrition et métabolisme

Aliments des Insectes

La nourriture des Insectes est très variée. Ces Animaux s'attaquent à toutes sortes de matières organiques, y compris à des matériaux aussi peu nutritifs que le bois, la laine et les Bactéries du pétrole. Certains sucent la sève des Végétaux ou piquent les Animaux pour en prendre le sang ; d'autres mangent les feuilles, les Champignons, ou bien attaquent des proies vivantes, telles que d'autres Insectes et des vers de terre, etc. La variété de leurs régimes alimentaires est reflétée d'une part dans la diversité des pièces buccales, d'autre part dans la grande variabilité de structure du tube digestif et dans la richesse en enzymes digestives.

Si certaines espèces *polyphages*, comme les blattes, mangent à peu près de tout, d'autres espèces ont un régime plus strict ; ce sont des *monophages*, qui n'attaquent qu'une seule plante ou un seul Animal (par exemple, le ver à soie ne consomme que le mûrier), ou bien des *oligophages*, dont le choix se limite à un petit nombre d'espèces généralement voisines. Parmi de tels cas, qui sont rares, on peut citer le doryphore, qui consomme surtout de la pomme de terre, et s'attaque parfois à la tomate ou à quelques autres plantes de la famille des Solanacées ; des changements de régime peuvent survenir, surtout chez les Insectes phytophages. La vigne, qui, à l'état naturel, a peu d'ennemis, est attaquée aujourd'hui par des espèces qui vivaient autrefois sur des *Galium* et des *Epilobium*. C'est le cas de l'altise *Haltica lythri* qui vit sur les Lythracées et les Onagrariées et qui a formé une race inféodée à la vigne, la race *ampelophaga*.

Facteurs réglant le choix de la nourriture

Quels sont les facteurs qui déterminent le choix de la nourriture et quels sont ceux qui déclenchent la prise de nourriture ? C'est surtout chez les Insectes phytophages que la réponse à ces questions a été recherchée, et cela est dû à des préoccupations d'ordre agronomique. Le mécanisme de la prise de nourriture peut être décrit comme une suite de comportements stéréotypés et hiérarchisés. L'Insecte se dirige vers la plante qui lui convient et commence à manger en pratiquant les premières morsures. La découverte de la nourriture peut être due au hasard, comme dans le cas des pucerons ailés entraînés par le vent, ou bien à la sélection préalable par la femelle, qui ne pond ses œufs que sur une plante qui conviendra à ses descendants. Elle peut aussi s'effectuer grâce à des stimuli visuels ou thermiques, comme chez les Insectes piqueurs. C'est souvent l'odeur qui joue le rôle attractif. Ainsi, l'odeur caractéristique des feuilles de mûrier, qui est due à divers produits (citral, hexenol, linalol), attire la chenille du *Bombyx* à une distance de quelques millimètres.

Chez les Insectes piqueurs de Mammifères, l'attraction vers l'hôte est également due à des stimuli olfactifs ; les produits en cause sont des dérivés de l'ammoniaque et de l'indol, qui sont aussi des attractifs et des stimulants de la ponte chez plusieurs mouches de la viande. La fourmi *Solenopsis saevissima* est attirée par l'acide linoléique et divers sucres.

Chez les moustiques, l'orientation vers l'hôte à piquer est provoquée par des stimuli visuels, thermiques, olfactifs et la teneur en gaz carbonique. Pour le moustique *Aedes aegypti*, ce sont les odeurs issues de la peau et, en particulier, celle due à des acides aminés comme la lysine et celle de l'acide lactique, qui sont prépondérantes. La punaise *Rhodnius prolixus* recherche, pour sa part, des constituants des globules rouges, les nucléosides, qui stimulent le réflexe de succion et de remplissage du tube digestif. Il en est de même chez *Culex pipiens*. Chez le ver à soie, la morsure est déclenchée par la présence dans la feuille du mûrier de stérols, comme le sitostérol, ou d'alcools à longue chaîne. Ces substances sont appelées des *phagostimulants*. Le même rôle est joué par l'essence de moutarde, ou sinigrine, chez les Insectes qui mangent des Crucifères, et par l'hypéricine chez la chrysomèle du millepertuis. Une fois qu'il a commencé à manger, l'Insecte doit trouver d'autres produits qui l'incitent à continuer. Chez le ver à soie, par exemple, ce rôle est joué par divers sucres (sucrose, raffinose), ainsi que l'inositol et l'acide ascorbique. Il existe également chez les plantes des *phago-inhibiteurs*, qui empêchent la prise de nourriture. Tous ces facteurs expliquent le choix exclusif, par certains Insectes, de Végétaux déterminés.

Les besoins alimentaires sont parfois différents chez la larve et chez l'adulte. Beaucoup d'Hyménoptères, para-

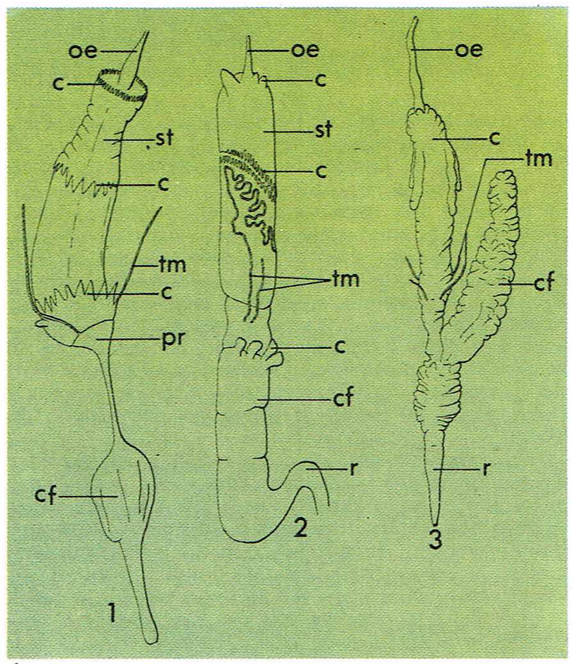

G. Hodebert

▶ *Représentation schématique, comparative, du tube digestif chez les Insectes mangeurs de bois ayant une chambre de fermentation dans l'intestin postérieur. Chez les larves de Coléoptères,* Oryctes nasicornis *(1),* Dorcus parallelipipedus *(2). Chez la larve du Diptère* Tipula flavolineata *(3) : œ, œsophage ; st, stomodeum ; c, cæcums de l'intestin moyen ; tm, tubes de Malpighi ; pr, intestin postérieur ; cf, chambre de fermentation ; r, rectum.*
▼ *A gauche, larves, et au milieu, imago du doryphore* Leptinotarsa decemlineata. *Cet Insecte se nourrit surtout de pomme de terre et de quelques rares autres Solanacées. A droite, chenille de* Bombyx mori, *ou ver à soie, qui ne mange que le mûrier.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

A. Allegri

sites à l'état larvaire, deviennent floricoles et mangent du nectar, à l'état imaginal. Chez de nombreux bousiers (comme les *Aphodius*), les imagos utilisent les parties liquides des bouses et les Bactéries qui s'y trouvent, alors que les larves en consomment les parties solides.

La différenciation des régimes alimentaires entre espèces voisines peut parfois être très subtile. *Drosophila mulleri* et *D. aldrichi* ont des larves qui vivent dans les fruits du cactus *Opuntia lindheimeri*, où se développent en abondance des Bactéries et des Levures. Mais l'examen des contenus de leurs tubes digestifs respectifs montre que ces deux espèces ne consomment ni les mêmes Levures ni les mêmes Bactéries. Ainsi, on comprend qu'il puisse exister plus d'une centaine d'espèces de drosophiles dans une région restreinte : les régimes alimentaires étant très finement diversifiés, les espèces ne se font pas concurrence pour la nourriture.

Besoins alimentaires, rôle des symbiontes

Si les Insectes absorbent des aliments très variés, ils peuvent n'utiliser qu'une faible partie de ce qu'ils consomment. Par exemple, des Coléoptères qui avalent une grande quantité de bois pourri digèrent seulement les filaments mycéliens qui s'y trouvent.

Quels sont les besoins alimentaires des Insectes ? La détermination des éléments indispensables est difficile, les chercheurs étant contraints de faire des élevages sur des milieux artificiels. Il est aussi obligatoire de travailler en milieu aseptique, car beaucoup d'espèces possèdent des symbiontes qui peuvent leur fournir les éléments manquant dans le régime.

Les Insectes, comme les Vertébrés, ont généralement besoin de protides, de glucides et de lipides. Cependant, il est possible de maintenir en vie pendant longtemps des papillons en leur donnant seulement du sucre. Beaucoup d'Insectes ont des besoins en acides aminés rappelant ceux des Mammifères ; il faut leur fournir de la cystine, de la lysine, de l'arginine et du tryptophane. La teigne de la farine *(Ephestia)* doit trouver dans ses aliments des acides gras non saturés, tels les acides linoléique et linolénique, mais ce n'est pas le cas pour la plupart des autres espèces. Les Insectes sont incapables de fabriquer les stérols ; leur régime doit donc contenir du cholestérol. Ils n'ont pas besoin des vitamines A et D et sont capables de fabriquer la vitamine C. Par contre, il leur faut des vitamines du groupe B ; certains Ténébrionides comme le ver de farine exigent, en outre, une vitamine spéciale appelée B_T qui est un triacide aminé, la carnitine.

Cependant, ces données ne sont valables que pour des Insectes élevés en milieu stérile en l'absence de micro-organismes ; en effet, beaucoup d'Insectes possèdent dans leur corps des *mycétomes*, amas de cellules spéciales qui contiennent de nombreux symbiontes pouvant constituer une source de vitamines. Ces mycétomes existent chez les poux, la punaise des lits, la glossine et chez de nombreux Diptères Pupipares, qui ne se nourrissent durant toute leur vie que de sang stérile prélevé sur l'hôte. Au contraire, les moustiques et les puces, dépourvus de mycétomes, n'absorbent pas seulement du sang mais aussi d'autres aliments qui leur apportent les vitamines nécessaires. Des expériences menées sur le pou ont permis de montrer que l'ablation du mycétome perturbe le métabolisme et la reproduction, mais qu'on peut rétablir à peu près les choses en ajoutant au régime alimentaire des extraits de Levure, qui apportent des vitamines.

Les symbiontes qui sont hébergés par les Coléoptères *Lasioderma* et *Sitodrepa* mangeurs de Végétaux jouent le même rôle ; ces Insectes n'ont pas besoin de vitamine B, mais si on fait des élevages à partir d'œufs dont la surface a été stérilisée, les besoins en vitamines deviennent les mêmes que ceux des Insectes dépourvus normalement de symbiontes. Les punaises *Rhodnius* et *Triatoma* ont, quant à elles, l'intestin bourré d'Actinomycètes, qui sont des fournisseurs de vitamines.

Les organismes symbiotiques peuvent aussi synthétiser d'autres substances que les vitamines. La drosophile et les blattes peuvent être élevées avec, comme seules sources d'azote, respectivement, des sels d'ammonium et du glycocolle. Il est bien certain que l'abondante flore intestinale (Levures et Bactéries) de ces Insectes réalise la synthèse d'éléments indispensables non fournis par l'alimentation. Les symbiontes jouent aussi un rôle dans l'utilisation d'aliments peu faciles à digérer, comme le bois.

Tube digestif

Le tube digestif comprend toujours trois parties : l'intestin antérieur, ou *stomodeum*, l'intestin moyen, ou *mésentéron*, et l'intestin postérieur, ou *proctodeum*. Le stomodeum et le proctodeum sont d'origine ectodermique et doublés intérieurement d'une cuticule mince, ou *intima* ; l'intestin moyen, d'origine mésodermique, n'a pas de cuticule et est l'unique siège de la sécrétion des enzymes digestives, de la digestion et de l'absorption.

La variabilité du tube digestif, qui est en rapport avec les régimes alimentaires, est très grande. Chez les Insectes primitifs, ainsi que chez beaucoup de carnivores et de larves, le tube digestif est simple et presque rectiligne. Chez divers Coléoptères, Orthoptères, et chez les blattes, l'intestin antérieur se dilate pour former un jabot plus ou moins volumineux, dans lequel les aliments sont emmagasinés et partiellement attaqués par les enzymes digestives remontées de l'intestin moyen. Aussitôt après, vient un proventricule, dont le revêtement cuticulaire est épaissi pour former des dents qui achèvent de triturer les aliments avant de les laisser passer dans l'intestin moyen.

Chez les Diptères supérieurs, comme la mouche domestique, le jabot a la forme d'un diverticule plus ou moins long ; les aliments y sont mélangés à la salive et partiellement digérés avant d'être transférés à l'intestin moyen, long et contourné. Chez les punaises suceuses de sang *(Cimex, Rhodnius)*, le jabot est volumineux, mais il est formé par l'intestin moyen ; la nourriture, très fluide, y est concentrée par élimination de liquide, et la digestion se

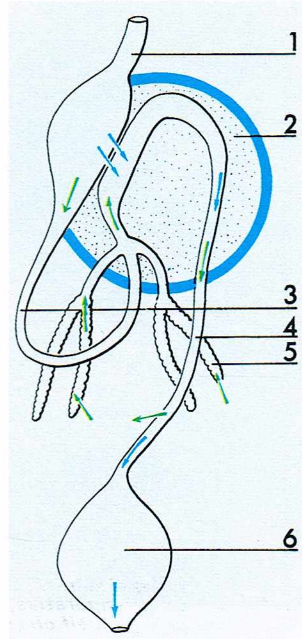

G. Hodebert

▲ Représentation schématique du tube digestif chez une cochenille suceuse de sève. Flèches bleues : chemin suivi par l'eau ; flèches vertes : chemin suivi par les substances dissoutes ; 1 - partie antérieure de l'intestin moyen ; 2 - chambre filtrante ; 3 - intestin moyen ; 4 - intestin postérieur ; 5 - tubes de Malpighi ; 6 - ampoule rectale.

G. Hodebert

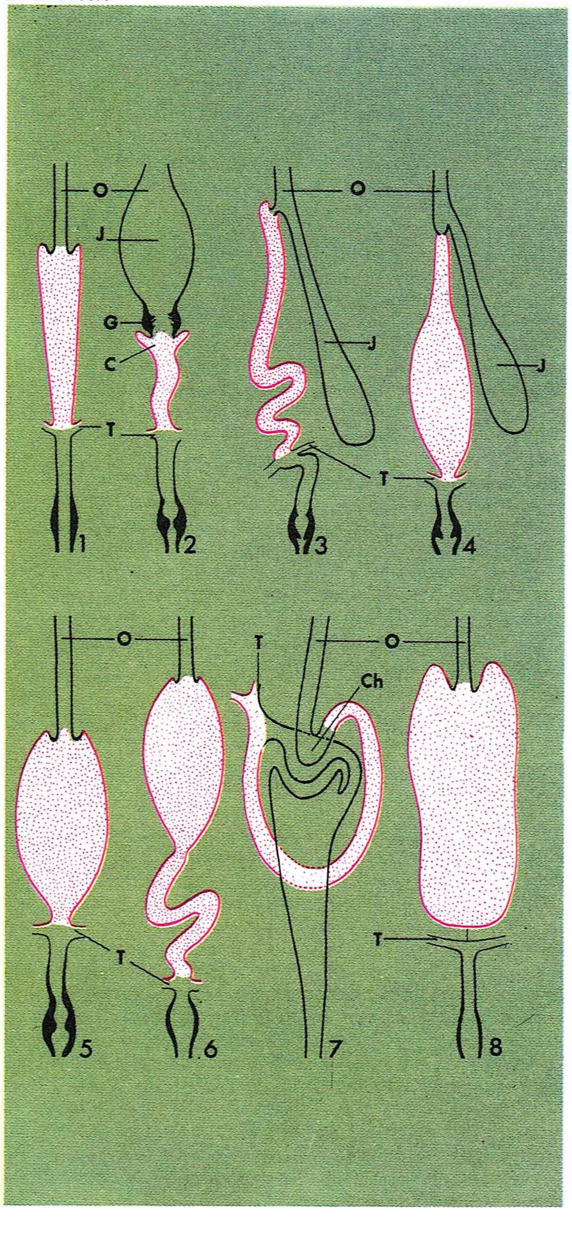

◀ Quelques types de tubes digestifs chez les Insectes. L'intestin antérieur et l'intestin postérieur sont en traits épais, l'intestin moyen est en pointillé : O, œsophage ; J, jabot ; G, gésier, C, cæcums de l'intestin moyen ; Ch, chambre filtrante ; T, tubes de Malpighi représentés seulement par leur arrivée ; 1 - Insectes primitifs et nombreuses larves ; 2 - Orthoptères, Odonates, de nombreux Coléoptères ; 3 - Diptères supérieurs ; 4 - Lépidoptères et de nombreux Diptères ; 5 - puces et poux ; 6 - Hétéroptères ; 7 - Homoptères ; 8 - larves de fourmilions et d'Hyménoptères Apocrites.

A. Margiocco

fait dans la partie suivante longue et étroite. Chez les Homoptères suceurs de sève, comme les cochenilles, le mécanisme d'élimination de l'eau est plus perfectionné ; c'est par une chambre filtrante que l'intestin postérieur vient au contact de la partie antérieure de l'intestin moyen ; dans cette chambre filtrante, les parois du tube digestif sont minces et perméables et les liquides inutiles peuvent ainsi passer directement dans l'intestin postérieur, d'où ils sont souvent expulsés sous la forme de productions sucrées, comme la manne ou le miellat. Une particularité curieuse caractérise les larves d'Hyménoptères Apocrites et de divers fourmilions : avant la nymphose, l'intestin moyen est sans communication avec l'intestin postérieur ; les résidus de la digestion s'accumulent dans l'estomac, qui se vide seulement juste avant la nymphose.

Chez les Insectes qui ont une nourriture pauvre en substances assimilables, on observe un grand allongement du tube digestif. Chez un Scarabéide coprophage comme *Scarabaeus*, l'intestin moyen fait huit à neuf boucles dans la cavité abdominale et le tube digestif peut atteindre quatre fois la longueur du corps.

Chez les larves d'Insectes xylophages, l'intestin postérieur porte un diverticule plus ou moins volumineux, qui est une chambre de fermentation dans laquelle des débris de cellulose sont attaqués par les Bactéries symbiotiques. Des cryptes à symbiontes existent dans l'intestin moyen des larves de Cérambycides et dans celui des femelles de punaises du genre *Dysdercus*. Les termites inférieurs, comme les *Eutermes*, digèrent la cellulose grâce aux Flagellés et aux Bactéries symbiotiques logés dans une dilatation de leur intestin postérieur, la panse rectale. Chez les termites supérieurs (famille des Termitidae), il n'y a que des Bactéries, logées également dans une panse rectale, qui, dans le cas de *Microcerotermes edentatus*, occupe le milieu de l'intestin postérieur et non sa partie proximale.

Dans la cavité buccale débouchent les *glandes salivaires*. Les plus développées sont les glandes labiales, qui s'ouvrent dans une poche ventrale, la poche salivaire, ou *salivarium*, située à la base de l'hypopharynx. Les glandes labiales sont absentes chez la grande majorité des Coléoptères. Il existe parfois des glandes mandibulaires chez les abeilles et les fourmis. Les glandes salivaires contiennent souvent des enzymes pouvant agir soit en dehors du corps, comme chez les pucerons, dont la salive attaque l'amidon des plantes, soit dans le tube digestif, après que les aliments sont absorbés. Dans certains cas, les glandes salivaires n'ont plus aucun rapport avec la nutrition ; elles peuvent être modifiées pour la production de soie chez les Lépidoptères, ou de phéromones chez les fourmis, etc. Beaucoup de Coléoptères prédateurs, comme les carabes et les dytiques, sont dépourvus de glandes salivaires et rejettent par la bouche les sécrétions de leur intestin moyen, ce qui leur permet de digérer leurs proies à l'extérieur ; ils absorbent ensuite les liquides produits. Ce procédé est appelé la digestion extra-orale.

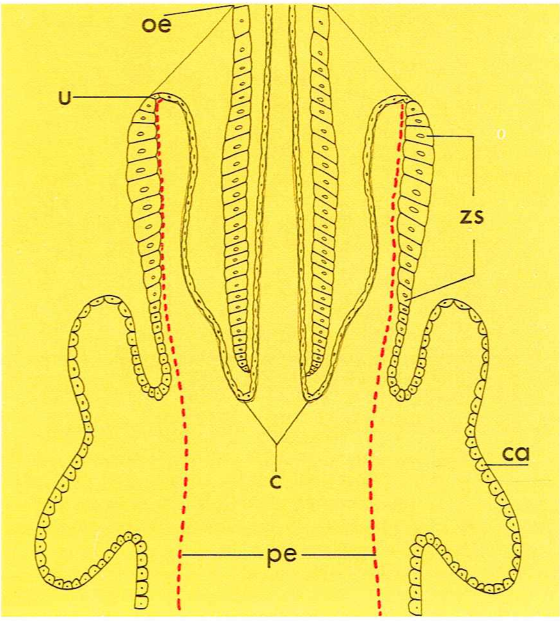

G. Hodebert

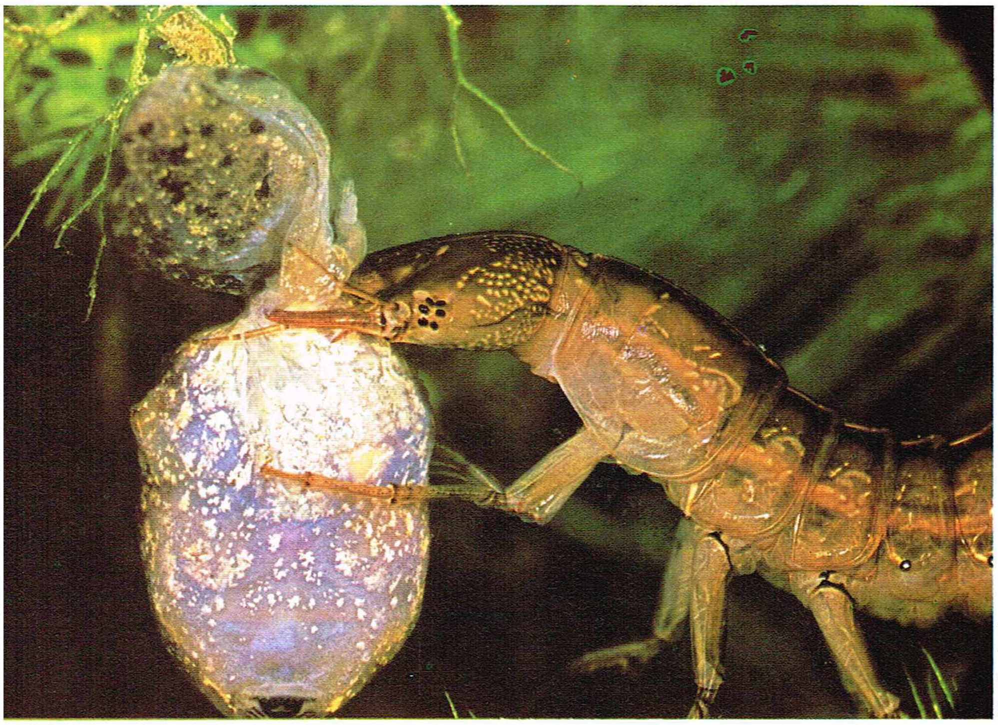

M. Boulard

▲ En haut, larves et ouvrières aptères, et sexué ailé du termite Calotermes flavicollis. Les termites sont des mangeurs de bois ; en bas, une larve de dytique attaquant un têtard. Les larves de dytiques sont des prédateurs pratiquant la digestion extra-orale.

Membrane péritrophique. La paroi de l'intestin moyen des Insectes est revêtue d'un épithélium constitué par des cellules qui sécrètent les enzymes digestives. Ces cellules s'usent et l'épithélium est le siège d'une rénovation continuelle ; celle-ci est assurée par des cellules de remplacement dont la position est variable ; elles sont situées soit à la base de l'épithélium, et ce sont alors des cellules basales ou interstitielles, soit dans des cryptes de régénération. En général, il n'y a qu'un seul type cellulaire et ce sont les mêmes cellules qui assurent la production des enzymes et l'absorption des produits de la digestion. Cependant, chez les chenilles de Lépidoptères et, en particulier, chez celles des Tinéidés, il existe des cellules cylindriques et des cellules en forme de bouteille ; les premières absorbent les produits de la digestion des protides et les secondes ont uniquement un rôle sécrétoire.

L'absorption de l'eau est souvent effectuée dans l'intestin postérieur. Dans l'ampoule rectale de certains Insectes comme le Diptère *Aedes detritus*, il existe des cellules spéciales, groupées en glandes rectales, qui ont une fonction absorbante. On a pu le confirmer récemment grâce à l'emploi simultané de méthodes physico-chimiques et de la microscopie électronique. Les cellules de ces glandes anales ont la même ultrastructure que les cellules de l'appareil excréteur des Vertébrés, mais leur polarité est inversée. Elles ont donc effectivement le caractère de cellules absorbantes, aussi bien pour l'eau que pour des ions comme le sodium, le potassium et le chlore.

L'épithélium intestinal est entouré de fibres musculaires internes et de fibres lontitudinales externes. Dans l'intestin des Insectes, il n'y a jamais de cellules muqueuses qui assurent la lubrification et le glissement sans dommages des aliments le long des parois, comme c'est le cas chez les Vertébrés. C'est Lyonet qui découvrit, en 1762, comment sont protégées les cellules intestinales. Elles sont isolées du contenu de l'intestin par une membrane péritrophique qui entoure les aliments en voie de digestion et qui remplace le mucus. Cette membrane est mince et perméable aux enzymes et aux produits de la digestion ; elle est constituée de chitine et d'une protéine, et elle est fabriquée par des cellules spéciales, situées dans la région qui est à la limite de l'intestin antérieur et l'intestin moyen. La membrane péritrophique manque chez beaucoup d'Hémiptères qui ont une nourriture liquide ; elle est aussi absente chez les Tabanides, les puces et les poux, qui sucent le sang.

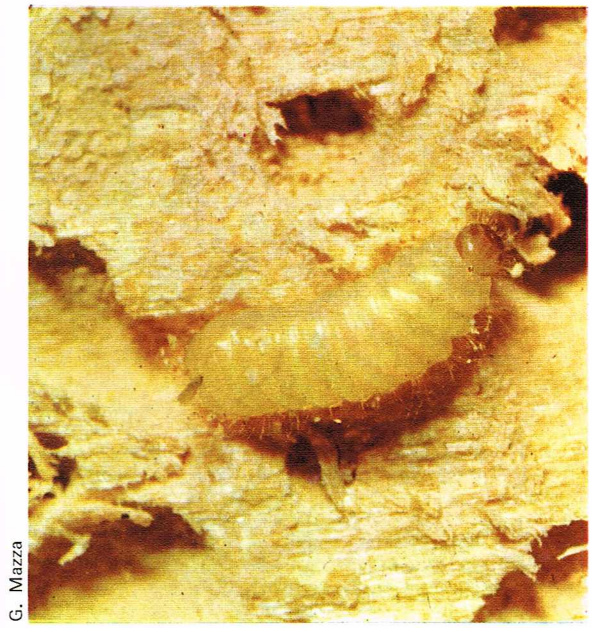

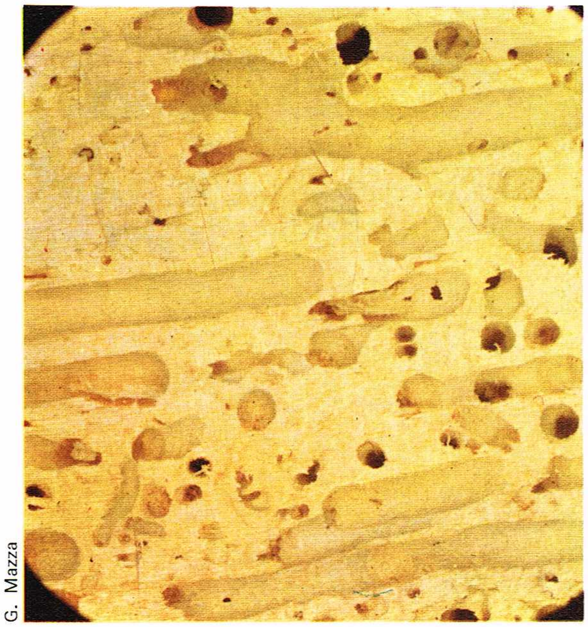

◄ *Les Anobiidae sont des mangeurs de bois. Ces deux illustrations montrent, à droite, les dégâts causés par les larves, et à gauche, une de ces larves très agrandie.*

Enzymes digestives

Comme chez tous les Animaux, les enzymes digestives varient en fonction du type de nourriture. Les omnivores comme les blattes ont des protéases, des lipases, et des enzymes attaquant les glucides : l'amylase, la saccharase et la maltase. Chez les Carabidés carnivores, les enzymes attaquant les glucides sont rares et peu actives, alors que les protéases et les lipases dominent. Il faut signaler que les Insectes peuvent absorber des substances à poids moléculaire assez élevé; dans le cas des protéines, la digestion n'a pas besoin d'être poussée jusqu'au stade des acides aminés. La punaise *Rhodnius prolixus* peut absorber une partie de l'hémoglobine de son alimentation sans digestion préalable; chez *Platymeris,* ces protides, sous la forme de peptides, peuvent traverser l'épithélium du mésentéron.

Certains Insectes peuvent digérer des substances peu attaquables; ainsi, chez les larves de *Lucilia,* le collagène des protéines animales est hydrolysé par la collagénase; *Galleria mellonella,* la teigne des ruches, digère tous les constituants de la cire, c'est-à-dire les alcools, les acides gras et les esters à poids moléculaire élevé, à l'exception des paraffines. On a longtemps cru que les chenilles de *Tineola,* la teigne des vêtements, avaient des enzymes capables de digérer la kératine, qui est le constituant principal de la laine; les travaux récents montrent qu'il n'en est rien. Cependant, il règne dans l'intestin de *Tineola* des conditions physico-chimiques telles (pH très alcalin de l'ordre de 10 et potentiel d'oxydo-réduction très bas) que les molécules de kératine sont dissociées, leurs ponts disulfures très stables étant coupés selon la réaction :

$$R\text{-}S\text{-}S\text{-}R \rightarrow R\text{-}SH + R\text{-}SH$$

Les protéinases peuvent ensuite agir sur les chaînes polypeptidiques R-SH isolées. La connaissance de ces mécanismes d'attaque de la kératine a permis de mettre au point une méthode de protection de la laine contre les mites : on rend les ponts disulfures plus stables, en utilisant un radical organique comme le dibromure de triméthylène; on obtient alors des dérivés de la kératine de formule $R\text{-}S\text{-}(CH_2)_3\text{-}S\text{-}R$. Les laines ainsi traitées sont beaucoup moins attaquées que les laines normales.

De nombreux Insectes mangent des feuilles ou du bois et le processus de la digestion de la cellulose a donc un grand intérêt. Chez les Insectes, le plus souvent, la cellulose reste intacte ainsi que la lignine. Par contre, les mangeurs de bois peuvent utiliser la cellulose et parfois aussi la lignine. Le bois est composé principalement de cellulose (de 40 à 60 %), d'hémicelluloses et de lignine (de 18 à 38 %); les sucres solubles, l'amidon, les protéines et les autres substances ne représentent donc, au maximum, qu'un faible pourcentage dans la composition du bois. Beaucoup d'Insectes xylophages utilisent uniquement les sucres solubles, l'amidon et les protéines et sont donc obligés d'avaler de grandes quantités de bois pour trouver assez de nourriture. A ce groupe appartiennent les Coléoptères Scolytides, les Bostrychides et les Lyctides.

Les Insectes qui digèrent la cellulose peuvent le faire grâce à la possession d'une enzyme, la cellulase, qui hydrolyse la cellulose en cellobiose; une cellobiase transforme ensuite le cellobiose en glucose. Seuls un Thysanoure, *Ctenolepisma lineata,* et divers Coléoptères (Cérambycides, Anobides, Buprestides) produisent eux-mêmes la cellulase. Les autres Insectes font appel à des symbiontes et utilisent le bois mieux que les premiers. Leur pouvoir de digestion est grand (il semble que ce soit là une caractéristique de tous les Animaux qui attaquent la cellulose à l'aide de symbiontes; un rendement aussi intense dans l'attaque de la cellulose se retrouve chez les Mammifères Ruminants). Dans cette catégorie on trouve les termites, qui hébergent dans leur intestin des Bactéries, seules ou accompagnées de Flagellés, des blattes comme *Cryptocercus punctulatus,* qui possède des Flagellés intestinaux, des Lépidoptères comme la chenille de *Cossus cossus,* dans le tube digestif de laquelle vivent des Bactéries et divers Champignons (*Mucor* et *Fusarium*), des Coléoptères Scarabéides appartenant aux familles des Lucanides, des Cétonides *(Osmoderma, Potosia)* et des Dynastides *(Oryctes),* qui hébergent des Bactéries (en particulier *Bacillus cellulosae fermentans*) capables d'attaquer la cellulose et en plus de fixer l'azote de l'air. En outre, les Flagellés des termites sont capables de dégrader la lignine. Chez de « faux xylophages », il peut y avoir une symbiose externe. Quant aux *Sirex,* ils infestent leurs galeries avec les spores d'un Champignon qui se développe en attaquant le bois; la larve de *Sirex* mange ensuite le Champignon.

◄ *Page ci-contre à droite, zone de formation de la membrane péritrophique chez un Diptère Nématocère. La région appelée* cardia *constitue la limite entre l'intestin antérieur et l'intestin moyen; c, intima du mésentéron; ca, cæcums; oe, œsophage; pe, membrane péritrophique; u, point d'union de l'intestin antérieur et de l'intestin moyen; zs, zone de cellules en colonne sécrétant la membrane péritrophique.*

▼ *La chenille de* Cossus cossus *attaque le bois qu'elle digère ensuite grâce à de nombreux symbiontes.*

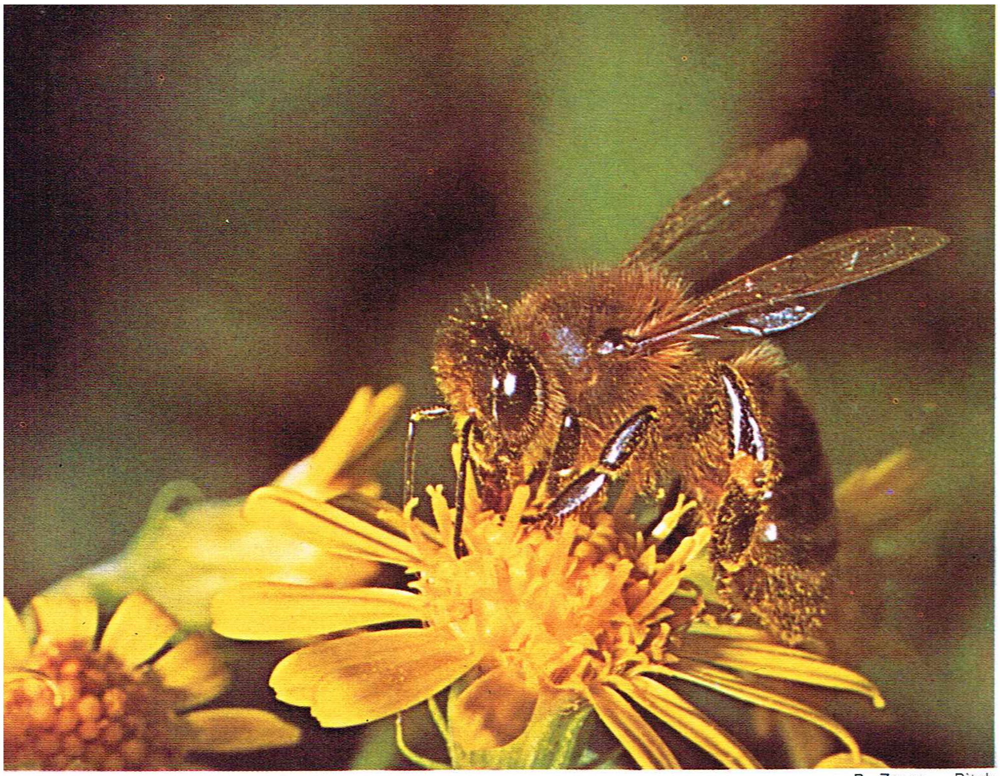

B. Zearo - Pitch

▲ *Chez les abeilles, ici* **Apis mellifica,** *le tréhalose peut être la source principale d'énergie.*

Tissu adipeux et réserves

Les Insectes possèdent un tissu adipeux, ou corps gras, qui occupe une bonne partie de la cavité générale et qui dérive du mésoderme. Son rôle le plus important est celui de réserve, aussi bien de lipides que de glycogène ou de protéines. Ces réserves peuvent être mobilisées, chez la larve lors de la mue ou de la nymphose, pour la production d'œufs chez la femelle, ou encore pour l'hibernation. Chez la drosophile, les réserves du tissu adipeux sont utilisées au cours des vols. Dans le corps gras sont distribuées des cellules spéciales, les *œnocytes,* qui semblent jouer un rôle dans le métabolisme intermédiaire; elles sont, en particulier, spécialisées dans la production de certaines parties de la cuticule, comme la cire épicuticulaire. On trouve aussi dans le corps gras des cellules à urates qui accumulent l'acide urique et qui fonctionnent donc comme un rein d'accumulation.

Métabolisme

Dans ses grandes lignes, le métabolisme des Insectes suit celui des autres Animaux; on y retrouve le cycle de Krebs, la glycolyse, etc. Peu de particularités sont à signaler, mais il faut noter que seulement quelques dizaines d'espèces ont été étudiées parmi un million d'espèces existantes dont certaines ont une biologie très particulière, ce qui retentit peut-être sur les processus du métabolisme.

Les glucides sont stockés sous la forme de glycogène et de tréhalose; ce dernier sucre est un disaccharide non réducteur qui joue un grand rôle chez les Insectes. On le trouve en effet à des concentrations supérieures à celles que l'on observe chez tous les autres Invertébrés. Le tréhalose peut être la source principale d'énergie, comme c'est le cas chez l'abeille; il est hydrolysé en glucose par une enzyme, la tréhalase.

Les données sur le métabolisme azoté sont rares. Cependant, comme chez les Crustacés, on note une concentration élevée de l'hémolymphe en acides aminés libres. Ces acides aminés jouent un rôle important dans le maintien de la pression osmotique du milieu intérieur. Les concentrations en proline et en tyrosine varient beaucoup, ce qui est lié au rôle joué par ces deux substances dans la formation de la cuticule. Le point terminal du catabolisme azoté est le plus souvent l'acide urique, parfois l'allantoïne ou l'urée.

Les lipides sont stockés dans le corps gras. Chez le papillon *Hyalophora cecropia* l'énergie nécessaire à la contraction des muscles du vol est fournie uniquement par ces réserves lipidiques. Dans ce dernier cas, le quotient respiratoire (rapport de la quantité de gaz carbonique rejeté à la quantité d'oxygène absorbé) atteint jusqu'à 7,5 alors que, lorsque ce sont des glucides qui sont brûlés, il est égal à 1. Comme chez les autres Animaux, l'essentiel des stocks de lipides est formé de triglycérides. Les Insectes sont incapables de synthétiser les stérols mais ils peuvent fabriquer des terpènes. La présence de certains acides gras spéciaux, de l'hormone juvénile et de l'hormone de mue suggère l'existence de voies du métabolisme spéciales aux Insectes; ces dernières ne sont cependant pas encore élucidées.

Le métabolisme énergétique d'un Insecte peut atteindre des taux élevés. Pour une température de 18 °C, l'abeille consomme 30 mm³ d'oxygène par gramme et par minute lorsqu'elle est au repos et jusqu'à 1 450 mm³ en vol, soit un rapport de 1 à 48 alors que, chez l'homme, le métabolisme respiratoire n'augmente que de dix à douze fois durant l'effort.

Les Insectes sont très résistants au manque d'oxygène, car ils peuvent réaliser un métabolisme anaérobie. En l'absence d'oxygène, ils accumulent des métabolites non oxydés comme l'acide lactique, et leur hémolymphe devient alors très acide. Lorsque l'oxygène est à nouveau présent, sa consommation est très élevée pendant le temps nécessaire à l'élimination des produits accumulés. Chez *Gastrophilus,* une mouche dont les asticots vivent dans l'estomac du cheval, cette vie anaérobie est devenue normale. Cet Insecte peut résister pendant dix-sept jours à l'absence d'oxygène. Il n'accumule pas d'acide lactique mais il semble capable de transformer ses réserves de glycogène en lipides et d'utiliser l'oxygène libéré par cette réaction pour la production d'énergie. La même possibilité de métabolisme anaérobie existe chez *Chironomus bathiphilus* et *C. thumni,* qui vivent dans les zones profondes des lacs, où l'oxygène est rare ou absent.

Un aspect particulier de l'étude du métabolisme est la détermination de la quantité d'aliments absorbés et de leur taux d'utilisation digestive. Une première constatation s'impose : les populations d'Insectes ne sont pas assez nombreuses, sauf dans de rares cas de pullulations, pour consommer toute la nourriture disponible; une étude effectuée à l'aide de radio-éléments a montré que chaque larve du Chrysomélide *Chrysomela knabi,* qui vit sur le saule, consomme chaque jour de 7 à 16 mg de matière végétale sèche. Cette étude, étendue aux quatre cents espèces vivant aux dépens de la végétation d'un lac asséché, a permis d'estimer la consommation journalière moyenne à 0,77 mg de Végétal par gramme d'Insecte et par jour; comme la biomasse totale des Insectes était évaluée à 300 mg par mètre carré (en poids sec), la consommation totale de Végétaux se montait à 23 grammes par mètre carré pour une période d'activité de cent jours par an. Or, la biomasse végétale était de l'ordre de 600 grammes par mètre carré. Les Insectes ne consommaient donc que 4 % de la nourriture disponible.

Le *coefficient de digestibilité* d'un aliment, calculé selon la formule :

$$\frac{\textit{poids de nourriture ingérée — poids des excrétats}}{\textit{poids de nourriture ingérée}} \times 100$$

varie beaucoup d'un Insecte à l'autre. Il est de 20 % chez la piéride du chou, de 62 % chez le phasme *Carausius morosus* élevé sur du lierre, et de 95 % chez la blatte *Blatta orientalis* nourrie de lait en poudre additionné de levure et de cholestérol.

On peut aussi calculer le *rendement écologique de croissance,* qui exprime l'aptitude d'une espèce à former des tissus nouveaux à partir d'une quantité donnée d'aliments. Ce rapport varie en fonction de la nature des aliments. Chez l'Homoptère *Philaenus spumarius,* il varie de 4,8 %, pour une population vivant dans un champ abandonné où poussent surtout des mauvaises herbes, à 16 %, dans une luzernière, qui constitue un milieu bien plus riche au point de vue alimentaire.

On a pu déterminer, chez le ver à soie, le *budget énergétique total* aux divers stades du développement. Chez le mâle, la nourriture ingérée, depuis le stade de l'éclosion de l'œuf jusqu'à la mort, correspond à l'équivalent de 13,13 kcal, dont 58,8 % sont perdus sous la forme d'excréments. L'énergie métabolisée, soit 5,42 kcal, est en partie dissipée sous la forme de chaleur nécessaire à la respiration, et en partie sous la forme de travail (déplacements de la larve et prise des aliments). En outre, les exuvies larvaires et le tissage du cocon de nymphose représentent l'équivalent de 1,25 kcal. Finalement, le papillon adulte ne représente que l'équivalent de 1,49 kcal, soit un rendement de 11 % par rapport à la totalité de la nourriture ingérée. Chez la femelle, le rendement est de 12 % (la production d'œufs représente 0,07 % de la nourriture ingérée).

Excrétion et métabolisme de l'eau

A la limite de l'intestin moyen et de l'intestin postérieur, débouchent les *tubes de Malpighi,* qui servent de reins aux Insectes et sont au nombre de deux à quatre chez les Hémiptères, de quatre chez les Diptères, de six chez beaucoup de Coléoptères, et de plusieurs centaines chez les Orthoptères. Ce sont des tubes fermés à leur extrémité proximale et qui baignent dans l'hémolymphe d'où ils extraient les déchets du métabolisme : acide urique, urée, oxalate de calcium, etc. Le produit présent dans les tubes de Malpighi forme une urine très variable d'aspect, liquide ou visqueuse, claire ou colorée.

Les tubes de Malpighi jouent aussi un rôle important dans l'économie de l'eau. Pour éviter de trop grandes pertes en eau, les Insectes rejettent le plus souvent leurs déchets azotés sous la forme d'acide urique solide. Mais beaucoup d'espèces aquatiques qui n'ont pas besoin d'économiser l'eau, comme les larves de *Sialis,* de Trichoptères et d'Odonates, éliminent l'azote sous la forme ammoniacale, qui nécessite beaucoup d'eau pour être diluée à cause de sa toxicité. Ces Insectes reviennent à une excrétion sous forme d'acide urique quand ils atteignent le stade de la vie aérienne imaginale.

Des recherches effectuées sur *Rhodnius prolixus* ont permis de montrer la façon dont l'eau est économisée chez les Insectes terrestres. Chaque tube de Malpighi comprend une partie proximale translucide, remplie de liquide, et une partie distale opaque, bourrée de grains d'acide urique. Ces deux régions ont des structures histologiques très différentes, bien révélées par la microscopie électronique. Le segment proximal possède des cellules polarisées excrétrices, et le segment distal des cellules polarisées en sens inverse et donc absorbantes. Le segment proximal excrète une solution acide d'urates de sodium et de potassium ; le segment distal absorbe une grande partie de l'eau et des bases sous la forme de carbonates, ce qui provoque la précipitation de l'acide urique. Il y a ainsi une circulation continue d'eau et de bases constamment recyclées.

La larve de *Tenebrio molitor* peut rejeter des excréments complètement déshydratés ; cette remarquable économie d'eau lui permet de vivre dans des milieux très secs. Les tubes de Malpighi, au nombre de six, sont accolés par leur partie proximale à la paroi du rectum. A ce niveau, est située une zone que l'on peut assimiler à un rein ; elle est formée par l'extrémité des tubes de Malpighi, la paroi du rectum, et une membrane imperméable à l'eau ainsi qu'aux sels minéraux, et qui enveloppe le tout. Ce système est connu sous le nom de *cryptonéphridisme*. Des cellules particulières, dites en coupole ou encore *leptophragmes,* se trouvent dans la paroi des tubes de Malpighi. Elles sont

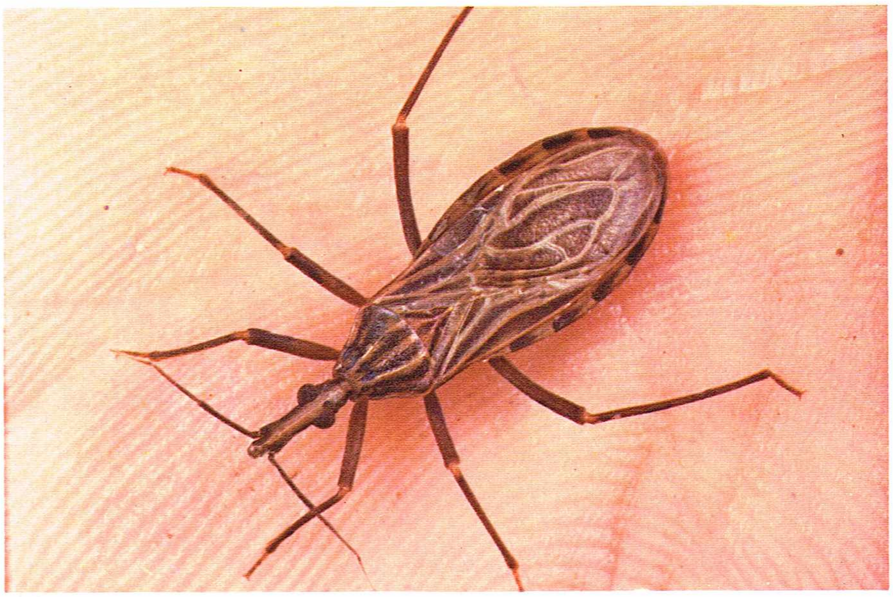

J. Carayon

▲ *Les recherches effectuées sur* **Rhodnius prolixus,** *que l'on voit ici posé au creux d'une paume de main, ont permis de montrer la façon dont les Insectes terrestres évitent de trop grandes pertes en eau.*

A. Margiocco

◀ *Larve du Coléoptère Ténébrionide* **Tenebrio molitor ;** *cette larve peut vivre dans les milieux très pauvres en eau, grâce à la disposition particulière de ses tubes de Malpighi (cryptonéphridisme).*

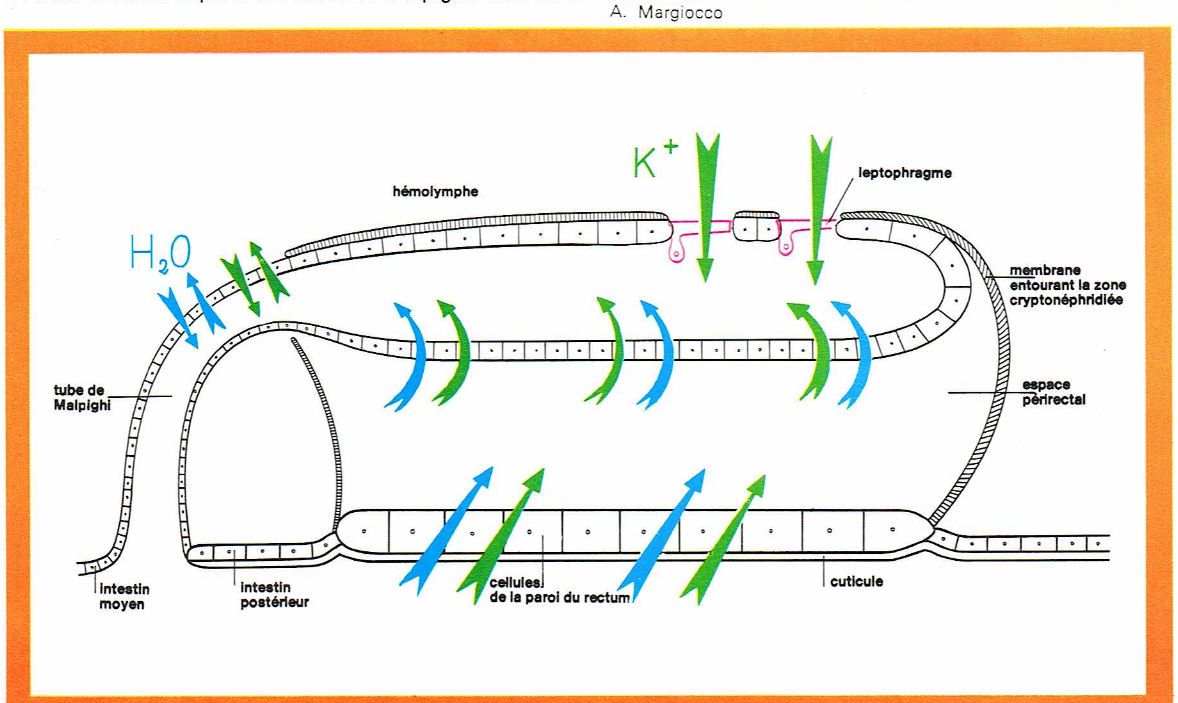

G. Hodebert

◀ *Représentation schématique de la cryptonéphridie de* **Tenebrio molitor :** *flèches vertes, passage de substances dissoutes ; flèches bleues, passage de l'eau ; K+, passage du potassium absorbé par les leptophragmes.*

▶ *Extrémité postérieure de la larve de* Culex pipiens, *montrant les variations de taille des papilles anales (p) : A, quand l'Insecte est élevé dans de l'eau distillée ; B, dans de l'eau contenant 0,006 % de chlorure de sodium ; C, dans de l'eau contenant 0,65 % de chlorure de sodium.*

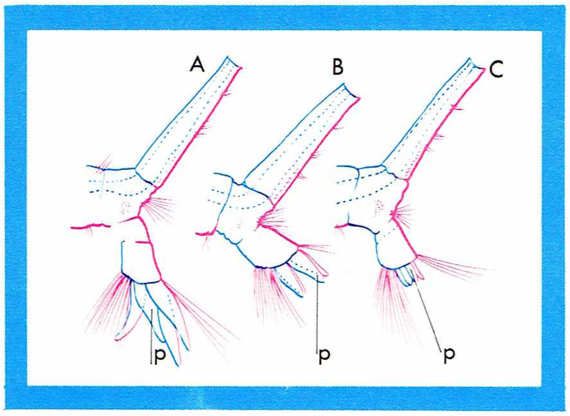

G. Hodebert

fortement chargées en chlorures. L'espace périrectal renferme, surtout dans sa partie postérieure, un liquide, dont la pression osmotique élevée est due à une substance protéique très concentrée. Ce caractère permet le passage de l'eau et des sels minéraux arrivant du rectum et assure la déshydratation des excréments ainsi que la récupération des sels minéraux. L'eau et les sels repassent ensuite dans la partie distale des tubes de Malpighi, d'où ils reviennent dans l'intestin moyen. Il existe donc un circuit fermé économisant l'eau et les sels minéraux. Le contenu des tubes de Malpighi est à la même pression osmotique que celui de l'espace périrectal ; il augmente de l'avant vers l'arrière. Les leptophragmes contribuent à maintenir cette pression osmotique élevée en prélevant des ions potassium dans l'hémolymphe, tout en restant imperméables à l'eau.

Si les Insectes qui vivent dans l'eau douce ne risquent pas de se déshydrater, ils peuvent perdre beaucoup d'ions importants, comme le chlore, le sodium et le potassium, car leur tégument est perméable à ces éléments. Chez les Culicides et d'autres Diptères Nématocères, il existe des papilles anales, dont le rôle est d'absorber dans l'eau les ions chlore. On a constaté, chez la larve de *Culex pipiens*, que ces papilles sont d'autant plus développées que l'Insecte est élevé dans une eau moins riche en chlorures.

▼ *A gauche, disposition des principaux troncs trachéens chez la blatte* Periplaneta *: A, vue ventrale ; B, vue dorsale ; à droite, schémas de quelques types d'appareils respiratoires chez les Insectes : A, trachées anastomosées ; B, trachées anastomosées et sacs aériens ; C, type métapneustique avec les stigmates terminaux, seuls fonctionnels ; D, trachées closes, respiration cutanée ; E, trachées closes et branchies trachéennes abdominales ; F, trachées closes et branchies trachéennes rectales.*

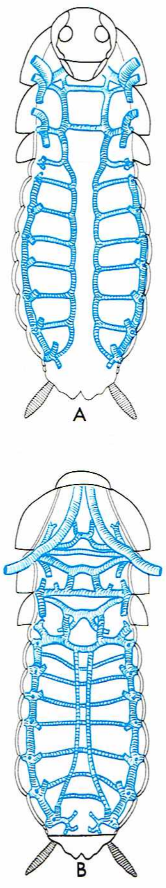

G. Hodebert

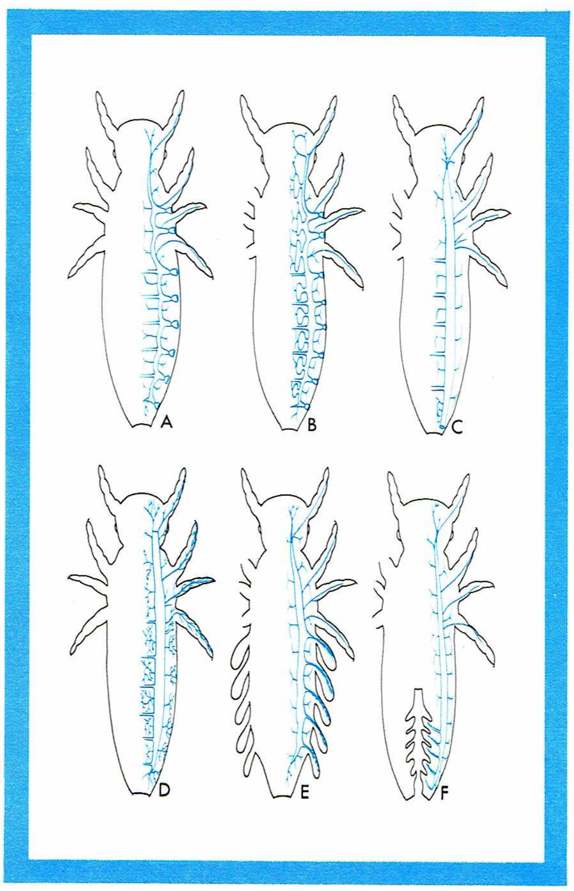

G. Hodebert

Respiration

Les Insectes, comme les Myriapodes, sont des trachéates ; ils respirent grâce à des tubes, ou trachées, qui s'ouvrent sur les côtés du corps par des stigmates. Ces trachées sont des invaginations de l'ectoderme ; elles sont formées d'une couche de cellules épithéliales revêtues intérieurement par une cuticule, doublée, le plus souvent, d'un mince ruban enroulé en spirale, la *ténidie,* dont le rôle est de maintenir les trachées ouvertes grâce à son élasticité. A chaque mue, la cuticule et la ténidie sont rejetées puisque ce sont des formations de nature cuticulaire. Les trachées se ramifient beaucoup et forment, sur les organes, des réseaux plus ou moins denses, suivant les besoins de ceux-là en oxygène. Lorsque les trachées atteignent environ 2 μ de diamètre elles se divisent en éléments plus fins ayant seulement de 0,6 à 0,8 μ de diamètre, les trachéoles, qui ont de 200 à 400 μ de longueur et se terminent en cul-de-sac. Les trachéoles sont des éléments endocellulaires qui contiennent, suivant les cas, un liquide ou de l'air et qui se développent à partir de cellules étoilées, ou trachéoblastes.

La disposition des trachées montre des traces de métamérisation. Le plus souvent, il existe deux gros troncs longitudinaux dans lesquels débouchent les troncs venus des stigmates et d'où partent d'autres trachées disposées comme les barreaux d'une échelle. Chez beaucoup d'Insectes menant une vie aérienne et volant activement (criquet, abeille, hanneton), des dilatations des trachées forment des sacs aériens volumineux logés dans diverses parties du corps. Le rôle principal de ces sacs est la ventilation du système respiratoire, leur remplissage et leur vidange dépendant des mouvements du corps. Les sacs aériens peuvent aussi contribuer à abaisser la densité du corps. Chez la larve aquatique de corèthre, il existe quatre grands sacs aériens qui fonctionnent uniquement comme des organes hydrostatiques, ce qui permet à cette larve de se maintenir à un niveau déterminé dans l'eau.

Principaux types d'appareils respiratoires

Les stigmates sont normalement placés sur les pleures des segments thoraciques et abdominaux, mais ce n'est pas toujours le cas. Ainsi, les stigmates abdominaux sont souvent situés sur la membrane unissant les tergites et les sternites ; les stigmates thoraciques sont en position intersegmentaire. Les stigmates prothoraciques sont fréquemment absents, ainsi que ceux du neuvième urite. Le nombre le plus fréquent est donc de deux paires de stigmates thoraciques et de huit paires de stigmates abdominaux fonctionnels.

Ce type, qualifié d'*holopneustique,* caractérise les imagos de nombreux ordres et certaines larves d'Hyménoptères. Beaucoup d'Insectes, dits *hypopneustiques,* ont une ou plusieurs paires de stigmates non fonctionnels ou disparus ; les Mallophages n'ont qu'une paire de stigmates thoraciques et six paires abdominales ; de nombreuses cochenilles possèdent seulement deux paires ; chez les Coléoptères Scarabéides et Curculionides en particulier, il manque fréquemment de un à trois stigmates postérieurs.

Dans le type *hémipneustique,* il n'y a plus que quelques stigmates fonctionnels. Ce type, fréquent chez de nombreuses larves, est subdivisé en trois catégories. Chez les espèces *péripneustiques,* les stigmates métathoraciques ne sont plus fonctionnels ; c'est le cas de nombreuses larves terrestres d'Holométaboles ; chez les espèces *amphipneustiques,* les seuls stigmates ouverts sont ceux du prothorax et du dernier urite ; c'est le cas chez beaucoup de larves de Diptères ; les espèces *propneustiques* n'ont que le stigmate du prothorax qui soit fonctionnel ; quelques familles de Diptères font partie de ce groupe ; enfin, les *métapneustiques* ne respirent que par la dernière paire de stigmates abdominaux ; dans ce type, on trouve les larves de Culicides et de Tipulides et les larves de Dystiscides. Cette tendance à la concentration de la fonction respiratoire à une extrémité du corps, qui existe dans les trois dernières catégories, est caractéristique des espèces vivant dans un milieu liquide ou semi-liquide.

Dans le type *apneustique,* le système trachéen est entièrement clos, ce qui est également une adaptation à la vie aquatique. L'oxygène pénètre dans l'organisme soit, chez certaines larves de Diptères comme les *Chironomus,*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

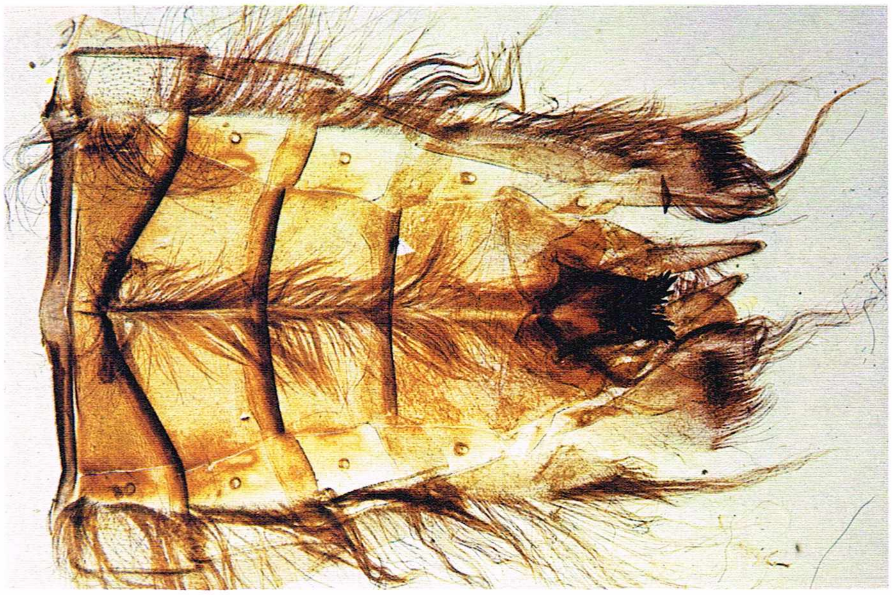

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ A gauche, larve de **Cossus cossus** *chez laquelle on observe nettement les stigmates respiratoires ; à droite, abdomen de* **Notonecta glauca** *sur lequel les stigmates abdominaux et l'appareil reproducteur sont bien visibles (× 10 × 1,4).*

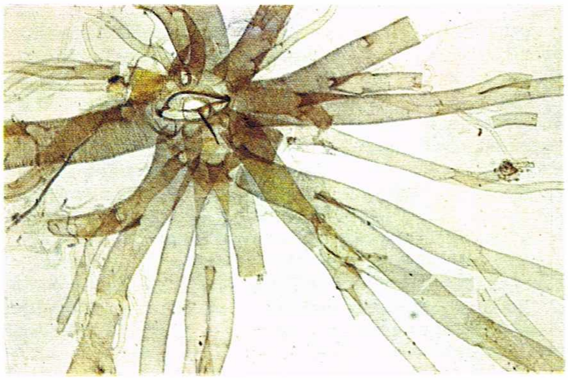

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ Trachées issues d'un stigmate de **Bombyx mori.**

par diffusion à travers l'ensemble de la cuticule, soit le plus souvent grâce à des branchies, dont la position et la structure sont très variables.

Structure des branchies

On distingue plusieurs types de branchies. Les plus répandues sont les *branchies trachéennes,* organes filiformes ou lamelliformes parcourus par des trachées et des trachéoles abondantes. Ces branchies se rencontrent en général sur l'abdomen des larves des Éphémères, des Névroptères de la famille des Sialides, des Planipennes du genre *Sisyra,* des Trichoptères, de Coléoptères Gyrinides, etc. Elles sont moins fréquentes sur le thorax et encore moins sur la tête (Éphémères du genre *Oligoneuria*).

Chez les larves d'Odonates Anisoptères, les branchies trachéennes sont en forme de lamelles logées dans le rectum ; chez les Zygoptères, on trouve des branchies caudales et non des branchies trachéennes.

Les *branchies stigmatiques* sont des modifications des stigmates, ou de la paroi du corps avoisinante, ou encore des deux à la fois. Elles existent chez les nymphes des Coléoptères Psephénides et Torrenticolides et chez celles des Diptères Tipulides, Blépharocérides, Simulides, Deutérophlébides, toutes ces espèces vivant dans les eaux courantes rapides dont le niveau varie fréquemment. Elles peuvent souvent vivre en milieu aérien et y continuer leur développement ; c'est pourquoi les branchies stigmatiques sont considérées comme des structures adaptées à la fois à la vie aquatique et à la vie aérienne. On a trouvé aussi des branchies stigmatiques chez les larves des Coléoptères Torrindicolidés, Hydroscaphidés et Sphaeridés. Chez ces larves, les branchies stigmatiques maintiennent à la surface du corps un « plastron » d'air dont la surface est relativement grande, ce qui facilite les phénomènes de diffusion gazeuse.

Les *branchies sanguines* sont des expansions tubulaires du corps, qui peuvent ne contenir que du sang, avec parfois de rares trachéoles. On les trouve chez des Trichoptères, des Chironomides et des Culicides, mais elles semblent ne jouer qu'un rôle négligeable dans la respiration. Chez les moustiques, elles constituent les papilles anales qui absorbent divers ions.

Structure des stigmates

Le stigmate type comprend, autour de l'orifice externe, un sclérite annulaire, ou *péritrème ;* l'orifice conduit dans un atrium, ou chambre stigmatique, souvent muni d'un dispositif filtrant et prolongé par un système de fermeture comprenant un ou plusieurs muscles reliés à des formations cuticulaires. La fermeture des stigmates permet à l'Insecte d'éviter des pertes d'eau par évaporation. Normalement, les stigmates sont fermés et ils s'ouvrent juste au moment où l'Insecte a besoin de se ravitailler en oxygène. Des centres régulateurs situés dans la chaîne nerveuse ventrale et dans le cerveau en commandent l'ouverture et la fermeture. Une concentration de gaz carbonique de 2 % stimule ces centres, et les stigmates restent alors ouverts en permanence. Ainsi, la punaise *Rhodnius* peut résister plusieurs semaines dans un dessiccateur, à de très basses humidités relatives, mais si on ajoute 5 % de gaz carbonique dans l'air, les stigmates s'ouvrent et elle meurt par déshydratation au bout de quarante-huit heures. A partir du type fondamental la structure des stigmates varie beaucoup.

▼ Structure de deux types de stigmates : A, stigmate simple ; B, stigmate plus complexe, avec une chambre stigmatique, ou atrium, et un appareil de fermeture.

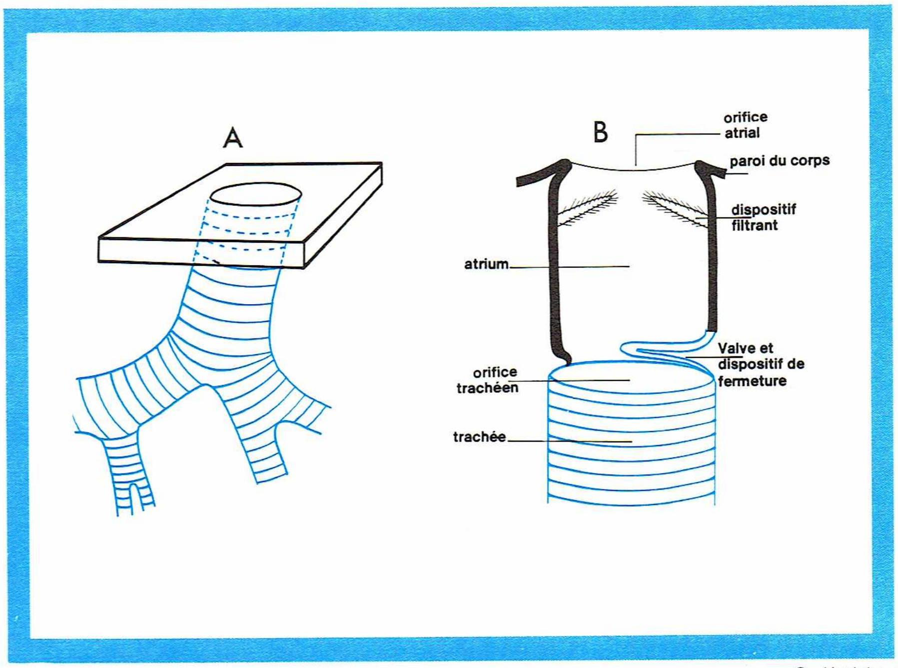

G. Hodebert

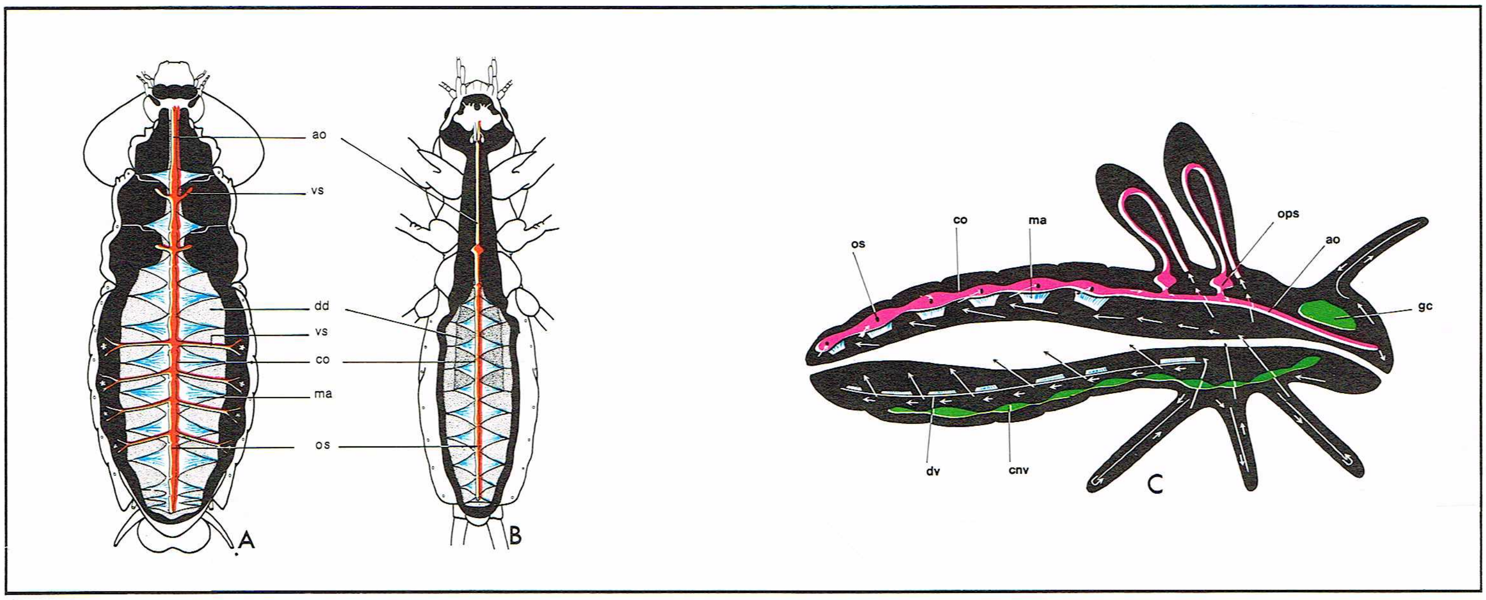

▲ *A gauche et au milieu, appareils circulatoires d'Insectes. A, type avec vaisseaux segmentaires chez* **Blaberus** *; B, type sans vaisseaux segmentaires chez* **Gryllotalpa** *: ao, aorte ; vs, vaisseaux segmentaires ; dd, diaphragme dorsal ; co, cœur ; ma, muscles aliformes ; os, ostioles. A droite, C, schéma du fonctionnement du système circulatoire ; les flèches indiquent le sens de circulation de l'hémolymphe : os, ostioles ; co, cœur ; ma, muscles aliformes ; ops, organe pulsatile secondaire ; ao, aorte ; gc, ganglion cérébroïde ; cnv, chaîne nerveuse ventrale ; dv, diaphragme ventral.*

Mouvements respiratoires

Certains Insectes ont une respiration régulière, d'autres ont des mouvements de ventilation saccadés et brefs, séparés par des pauses prolongées. Contrairement à ce qui se passe chez les Vertébrés, la phase active de la respiration des Insectes est l'expiration. Chez les Hétéroptères et les Coléoptères, l'expiration se fait par abaissement des tergites abdominaux ; chez les Acridiens et les Diptères, les tergites et les sternites ont des mouvements synchrones ; chez les Lépidoptères, les sauterelles et les Névroptères, il se produit des mouvements complexes avec rétrécissement latéral de l'abdomen au niveau des membranes souples unissant les tergites et les sternites. Enfin, quelques Insectes dits apnéiques, comme les larves de Scarabéides, n'effectuent que peu de mouvements de ventilation.

Comment l'oxygène est-il transféré des stigmates aux tissus ? Certains chercheurs ont suggéré que ce transport se ferait simplement par diffusion, mais ce mécanisme semble insuffisant, étant donné la finesse des trachées et des trachéoles ainsi que l'importance des phénomènes capillaires qui doivent avoir lieu dans ces dernières, qui sont remplies de liquide. De plus, les calculs ont été effectués en supposant que les stigmates sont toujours ouverts, ce qui n'est pas le cas, et en utilisant des données obtenues à partir d'expériences effectuées sur de grosses chenilles à mouvements très lents. L'hypothèse de la diffusion ne peut, à elle seule, expliquer l'arrivée de l'oxygène jusqu'aux trachéoles, surtout chez les Insectes petits et rapides. Il faut faire intervenir, en plus, l'activité musculaire qui, en provoquant des compressions du système trachéen, entraîne une circulation forcée de l'air. En outre, les cellules trachéolaires jouent sans doute également un rôle ; leur cytoplasme a des propriétés oxydantes très marquées et elles sont peut-être le siège d'une fixation sélective d'oxygène qui, en abaissant la pression partielle de ce gaz dans les trachéoles, accélérerait sa diffusion.

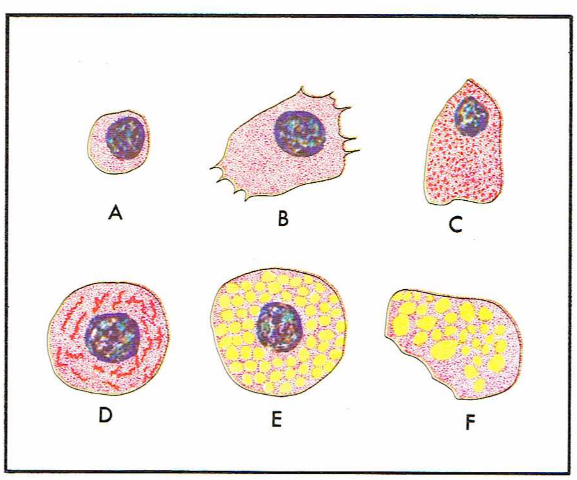

▶ *Principaux types d'hémocytes : A, prohémocyte ; B, plasmatocyte ; C, hémocyte granulaire ; D, œnocytoïde ; E, cellule à sphérules ; F, adipohémocytes.*

Hémolymphe et circulation

Les Insectes possèdent un système circulatoire ouvert, c'est-à-dire que le liquide sanguin, ou hémolymphe, occupe tous les espaces entre les organes. Cet espace est appelé cavité hémocélienne.

La circulation est assurée par un tube dorsal qui comprend primitivement une série de chambres contractiles alignées les unes à la suite des autres. La partie postérieure du tube est appelée « cœur », et la partie antérieure « aorte ». Dans sa région postérieure, le cœur présente un certain nombre d'ouvertures appelées ostioles qui permettent le passage de l'hémolymphe vers le cœur. A l'intérieur du cœur, ces ouvertures se prolongent par un fin repli qui empêche le reflux d'hémolymphe lors de la contraction. Chez quelques Insectes, il y a des ostioles exhalants ou de petits vaisseaux segmentaires en nombre limité (une à trois paires), qui libèrent l'hémolymphe avant l'aorte. A l'autre extrémité, l'aorte se termine soit par un sinus complexe, soit par des petits diverticules connectés à des organes pulsatiles secondaires qui assurent la circulation dans les appendices. Mais ces organes généralement nombreux sont le plus souvent indépendants.

Le diaphragme dorsal, ou septum péricardiaque, est situé immédiatement en dessous du cœur. Il comprend des fibres musculaires qui forment les muscles aliformes. Ceux-ci sont quelquefois situés de part et d'autre du cœur, ou bien se rejoignent en dessous en une sorte de plexus.

Le diaphragme ventral n'est pas présent chez tous les Insectes. Quand il existe, il isole le système nerveux du reste de la cavité viscérale. Il se présente sous la forme d'une fine membrane avec peu ou pas de muscles au niveau thoracique, mais fortement musclé au niveau abdominal. Sa structure varie aussi en fonction du stade de l'Insecte. Ses contractions assurent le mouvement de l'hémolymphe autour de la chaîne nerveuse.

Fonctionnement du système circulatoire. Normalement, l'hémolymphe est aspirée dans les ostioles par la dilatation du cœur, celle-ci étant favorisée par les muscles aliformes. Quand le cœur est plein, il est parcouru de l'arrière vers l'avant par une vague de contractions, qui poussent l'hémolymphe vers l'aorte. L'arrivée de ce flot dans la tête provoque un déplacement vers l'arrière du fluide qui s'y trouvait déjà. Le rôle des diaphragmes dorsaux et ventraux dans ces phénomènes est très complexe. Le rythme des pulsations, très variable, est modifié par de nombreux facteurs comme le stade considéré, les phases de repos ou de grande activité, et la température extérieure. Il peut tomber à presque zéro l'hiver, et atteindre cent cinquante dans les moments de grande activité

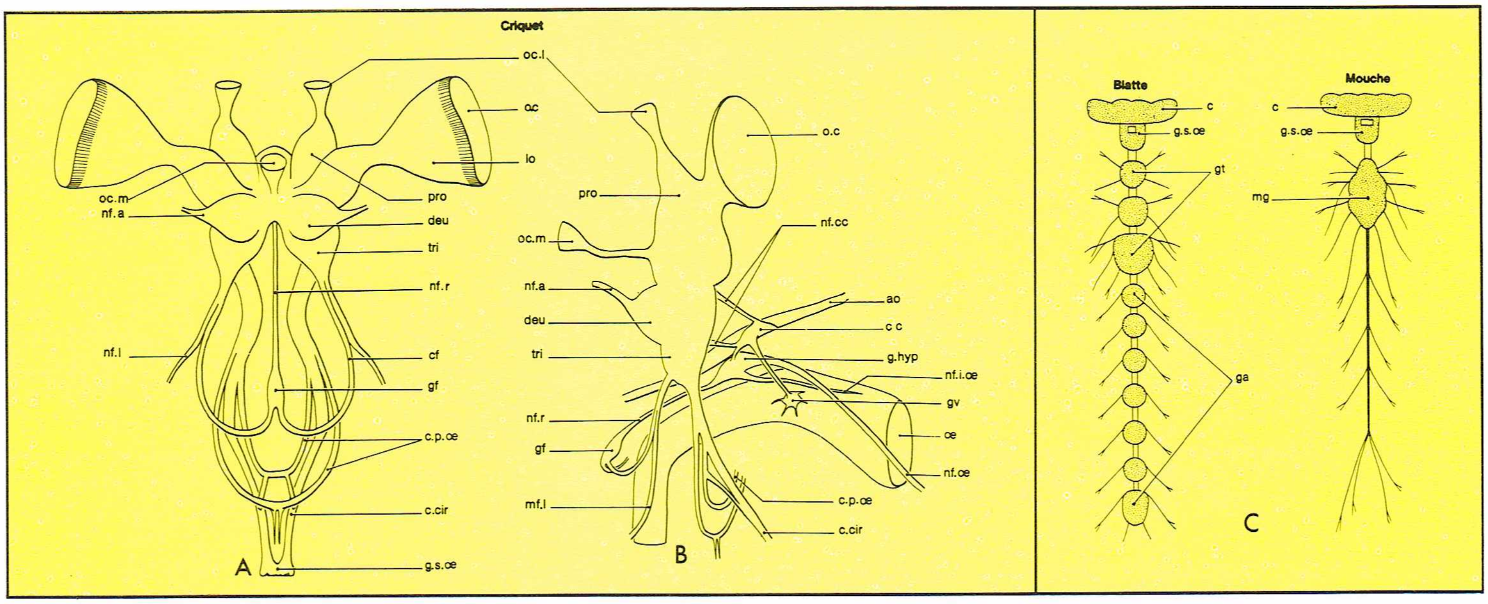

G. Hodebert

▲ ***Représentation schématique, à gauche, du cerveau et du système nerveux somatogastrique du criquet :*** ***A, vue antérieure ; B, vue latérale : ao, aorte ; cc, corpus cardiacum ; c.cir, connectif circumœsophagien ; cf, commissure frontale ; c.p.œ, commissure postœsophagienne ; deu, deutocerebron ; gf, ganglion frontal ; g.hyp, ganglion hypocérébral ; g.s.œ, ganglion sous-œsophagien ; gv, ganglion ventriculaire ; lo, lobe optique ; nf.a, nerf antennaire ; nf.cc, nerfs des corpora cardiaca ; nf.l, nerf du labre ; nf.i.œ, nerf intraœsophagien ; nf.œ, nerf œsophagien externe ; nf.r, nerf récurrent ; o.c, œil composé ; oc.l, ocelle latéral ; oc.m, ocelle médian ; œ, œsophage ; pro, protocerebron ; tri, tritocerebron ; schéma C, à droite, répartition des ganglions chez la blatte et chez la mouche ; c, cerveau ; ga, ganglions abdominaux ; g.s.œ, ganglions sous-œsophagiens ; gt, ganglions thoraciques ; mg, masse ganglionnaire composée de la fusion des ganglions thoraciques et abdominaux.***

comme le vol. Les cœurs accessoires ont eux aussi des rythmes très variables de quatorze à cent cinquante pulsations par minute.

Contrôle nerveux et humoral du système circulatoire. Le cœur ne reçoit pas toujours une innervation. Les pulsations semblent uniquement être dues aux propriétés contractiles du muscle, selon un phénomène automatique, mais le rythme et l'amplitude de ces contractions paraissent régulés par le système nerveux ou par des influences endocrines : un extrait de corpora cardiaca provoque une accélération immédiate.

L'hémolymphe : composition et rôle. L'hémolymphe est souvent incolore, quelquefois jaune ou verte. Elle est composée d'un liquide contenant des éléments figurés, les *hémocytes*, comparables aux globules sanguins des Vertébrés. L'hémolymphe peut représenter jusqu'à 30 % du poids du corps. Le liquide contient des protéines (6 %), des enzymes, des acides aminés libres, des lipides sous forme de petites particules, des sucres, des acides organiques, des sels et évidemment des déchets. Le pH est très légèrement acide.

Les hémocytes. Ils sont de types très divers, et leur nombre varie de quinze mille à deux cent soixante-quinze mille par millimètre cube d'hémolymphe. L'activité la plus évidente des hémocytes est la phagocytose, c'est-à-dire la possibilité d'absorber de petites particules solides, par exemple des déchets apparaissant lors des mues. Les phagocytes les plus actifs sont les *plasmatocytes*. La résistance aux micro-organismes comme les Bactéries est assurée par la phagocytose. De même la résistance aux œufs et aux larves d'Insectes parasites, quoique incomplète, est assurée par des hémocytes qui encapsulent le corps étranger. La coagulation du sang est due à certains types particuliers d'hémocytes. Signalons encore le rôle des hémocytes dans la formation de certains tissus, dans le métabolisme intermédiaire, et dans les phénomènes immunitaires.

Système nerveux

Le système nerveux permet l'établissement de relations aboutissant à des actions et des réactions relativement rapides. Un système endocrine lui est intimement annexé ; il assure surtout les phénomènes lents tels que ceux du métabolisme ou de la croissance et du développement. Le système nerveux est l'intermédiaire coordinateur entre les organes perceptifs et les organes effecteurs. L'influx nerveux se propage à travers les cellules nerveuses.

Organisation du système nerveux

Anatomiquement, le système nerveux comprend un *système nerveux central,* avec des ganglions, des connectifs et des commissures, et un *système nerveux périphérique.*

Les *cellules nerveuses,* conformément à leur fonction, possèdent des prolongements plus ou moins ramifiés qui captent l'excitation et conduisent l'influx. Toutes les cellules nerveuses et sensorielles montrent une polarisation physiologique et la plupart d'entre elles une polarisation anatomique. Les cellules nerveuses typiques comprennent un corps cellulaire, prolongé par un pédoncule, une arborisation dendritique d'un côté, un long axone de l'autre. Les dendrites captent les impulsions. Ils forment des synapses avec la cellule sensorielle ou d'autres neurones. L'axone peut soit former des synapses avec d'autres neurones, dits d'association, soit, dans le cas des neurones effecteurs, atteindre des cellules effectives ou des fibres musculaires.

Un axone dessert régulièrement de nombreuses fibres musculaires. Il semble que les muscles du squelette aient une double innervation, un neurone étant responsable des contractions rapides, l'autre des contractions lentes ou toniques. Certains axones des cellules d'association sont très longs, parcourant toute la longueur des connectifs de la chaîne. Ils permettent une conduction particulièrement rapide lors de réactions d'« alarme ».

Le *système nerveux central* comprend un cerveau dorsal et, ventralement, une chaîne de ganglions.

Le *cerveau,* encore appelé ganglions cérébroïdes, comprend trois parties : les *proto, deuto-* et *tritocerebron.*

Le protocerebron, bilobé, se prolonge latéralement et donne les lobes optiques. Au centre, en position antéro-dorsale, se trouve la *pars intercerebralis ;* c'est là que sont situées des cellules neurosécrétrices dont les axones s'étendent jusqu'aux *corpora cardiaca.* Les *corps pédonculés,* qui comprennent, chacun, un calice antérieur et deux lobes postérieurs, α et β, sont situés latéralement. Ils constituent le lieu d'intégration de stimulations d'origines diverses, et le centre des comportements complexes. Ils sont largement développés chez les Orthoptères, Dictyoptères, Lépidoptères et chez les Hyménoptères solitaires ; leur importance est maximale chez les Hyménoptères sociaux. Au centre du protocerebron se trouve le corps central.

Le deutocerebron correspond aux *lobes antennaires,* dont chacun comprend deux parties, une dorsale, sensitive, et une ventrale, motrice.

Le tritocerebron consiste en une paire de petits lobes ou lobes frontaux en relation avec le système stomatogastrique et le labre.

La chaîne ventrale. Le premier ganglion de la chaîne ventrale est le *ganglion sous-œsophagien,* qui résulte de la fusion des ganglions correspondant aux mandibules, aux maxilles et au labium. Il donne les nerfs moteurs et sensitifs des pièces buccales, du cou et des glandes salivaires. Des trois ganglions thoraciques partent, de chaque côté, cinq ou six nerfs. Il est fréquent que le premier nerf d'un ganglion s'associe au dernier du ganglion précédent pour former un nerf commun.

Le nombre de ganglions abdominaux est très variable ; il atteint huit au maximum, chez les Thysanoures, chez le mâle de la puce, et chez de nombreuses larves. Généralement, la dernière masse ganglionnaire est le résultat de la fusion des ganglions correspondant aux quatre

J. Carayon

▲ *Doryphores* **Leptinotarsa decemlineata;** *chez ces Insectes, le mâle doit, au moment de la reproduction, procéder* **par apprentissage** *pour distinguer la tête et la queue de sa congénère.*

▼ *La plupart des Insectes adultes, comme cette mouche, possèdent une paire d'yeux composés dont la surface consiste en une juxtaposition de multiples facettes.*

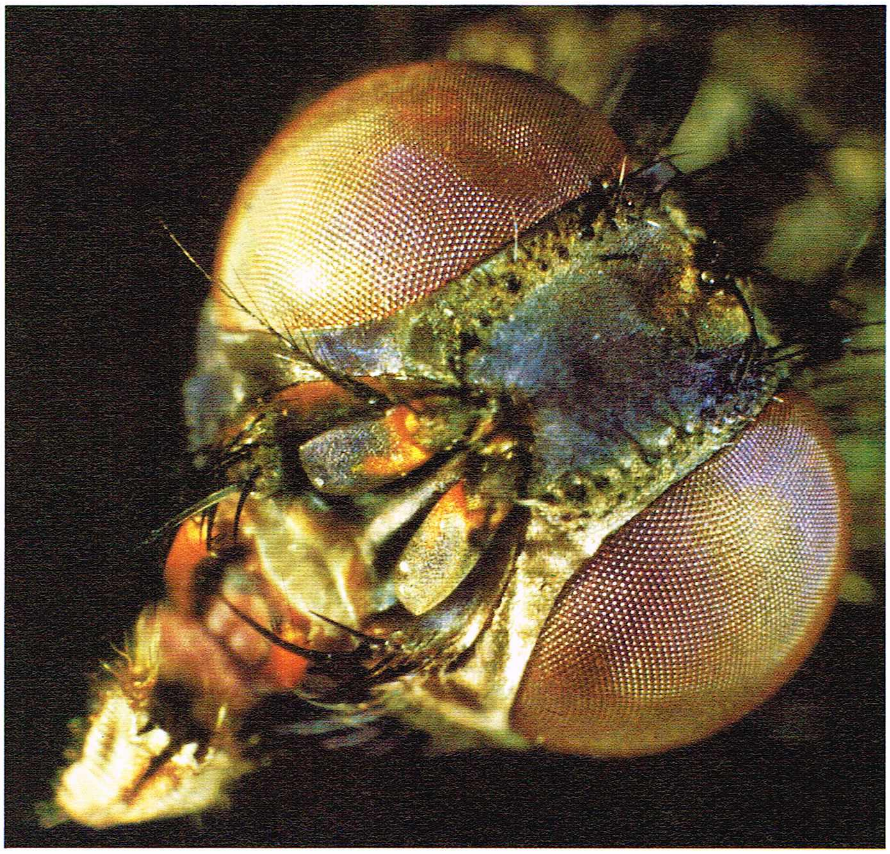

A. Margiocco

derniers segments abdominaux, ou fréquemment à un plus grand nombre chez les Insectes adultes. Le degré extrême de concentration se réalise chez la mouche, où il n'existe qu'une unique masse ganglionnaire ventrale.

Principe de fonctionnement du système nerveux

Ce sont d'abord les organes des sens qui reçoivent les stimulations provenant du milieu ou de l'organisme lui-même. Ces excitations se transforment en influx nerveux conduits par des *voies afférentes* sensorielles vers les centres nerveux. Ces derniers transmettent et coordonnent et ont, en outre, la faculté de faire naître des impulsions spontanées, généralement selon une rythmicité plus ou moins régulière; ainsi, l'organisme jouit d'une certaine indépendance vis-à-vis du milieu extérieur. Le transport de l'influx vers les effecteurs (muscles, organes lumineux, glandes) s'effectue à partir des centres par les *voies efférentes,* principalement motrices. Il ne s'agit pas d'une simple restitution quantitative à l'organe effecteur de l'excitation venue du récepteur. Si les centres nerveux jouent le rôle de coordinateur, ils sont également les centres d'origine d'impulsions nerveuses capables de mettre en marche l'effecteur et de le gouverner. C'est ainsi que le système nerveux et les récepteurs sensoriels déterminent les comportements que l'on peut définir comme des ensembles d'activités ordonnées, dans le temps et l'espace.

Les caractères des impulsions issues du système nerveux central dépendent, pour une part, des conditions d'ordre interne. Ces dernières déterminent en effet la modulation des ensembles d'impulsions, sans cesse variables, qui ont pris naissance dans le champ sensoriel de l'organisme et se sont trouvées intégrées dans le secteur afférent du système nerveux central. Les composants de cette modulation tiennent en grande partie à des facteurs extérieurs et sont donc sous la dépendance du milieu (les faits de coordination de la marche par exemple). L'amortissement des variations trop fortes des excitations d'origine externe peut déjà se faire dans l'organe sensoriel (il y a alors adaptation sensorielle), mais il reste une des principales tâches du système nerveux central. Ce dernier joue un rôle dans le maintien des comportements spécifiques, en particulier en ce qui concerne la fatigue centrale et l'habituation.

Acquisition du comportement

L'*apprentissage* peut se définir comme un processus adaptatif du comportement individuel en réponse aux sollicitations du milieu extérieur. Tout apprentissage est le résultat d'expériences.

Il y a *habituation* quand un Animal apprend à ne pas répondre à une stimulation qui s'avère sans signification biologique pour lui. Si on secoue le support sur lequel se trouve un Insecte, celui-ci a tout d'abord tendance à fuir, mais si cette perturbation se maintient, il finit par s'en accommoder.

Lorsqu'un Insecte apprend à associer des stimulations ou des situations sans signification biologique évidente ou immédiate, on dit qu'il y a *apprentissage latent;* c'est le cas pour les comportements exploratoires et les reconnaissances topographiques.

On dit qu'il y a apprentissage par *essais* et *erreurs* quand un stimulus donné, d'abord neutre, acquiert une signification dans un comportement à la suite d'une série de tentatives au cours desquelles ce stimulus se trouve à chaque fois associé à une réussite ou à un échec. Ainsi le doryphore n'a pas une connaissance innée de la morphologie de ses congénères; au moment de la reproduction le mâle tente de s'accoupler avec la femelle dans n'importe quel sens. Ce n'est qu'après plusieurs expériences qu'il semble apte à distinguer la tête et la queue de sa congénère.

Un Animal peut apprendre à répondre à un stimulus B neutre *a priori* si ce stimulus B est accompagné de manière répétitive par un autre stimulus efficace; il s'agit du principe de *conditionnement* pavlovien. Chez les Insectes, ce qui a été appris pendant la vie larvaire peut être remémoré après la métamorphose. Des adultes de *Tenebrio* savent sortir d'un labyrinthe en T si à l'état de vers de farine ils y ont été dressés. Les drosophiles adultes marquent une préférence pour les parfums qui ont été ajoutés à leur alimentation larvaire.

Vision

La plupart des Insectes adultes possèdent une paire d'yeux composés situés de chaque côté de la tête. Trois ocelles existent généralement chez les Insectes adultes et chez les larves d'Hémimétaboles. Les larves d'Holométaboles ne possèdent que des stemmates.

Yeux composés

Ils sont réduits, et même parfois absents, chez les espèces parasites, cavernicoles ou hypogées. Souvent très bombés, les yeux offrent à l'Animal un vaste champ panoramique de vision. Chez la notonecte, celui-ci couvre un angle de 246° à l'horizontale et 360° à la verticale. Les champs visuels de deux yeux se chevauchent à l'avant, au-dessus et en dessous de la tête, permettant une vision binoculaire dans ces régions.

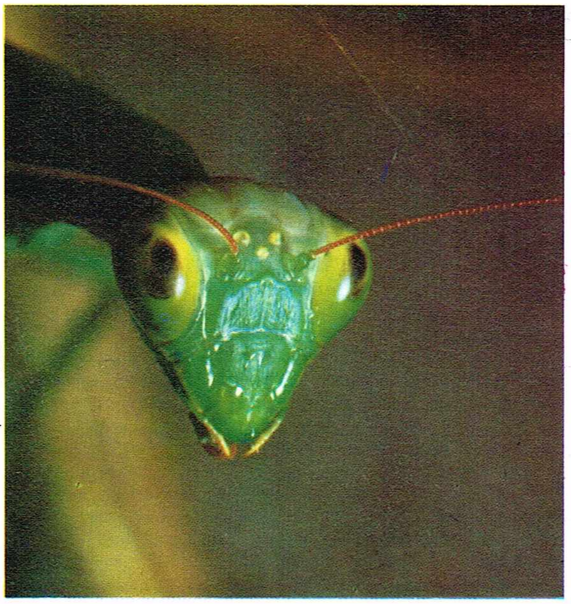

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

La surface des yeux composés consiste en une juxtaposition de petits hexagones parfois arrondis appelés *facettes*. Chaque facette se prolonge en profondeur par un cylindre complexe, ou *ommatidie*, qui est une unité élémentaire de vision. Le nombre d'ommatidies par œil composé varie avec les espèces; l'abeille en compte quatre mille et la libellule dix mille, alors que l'ouvrière de la fourmi *Ponera punctatissima* n'en possède qu'une. Chaque ommatidie comprend un système optique permettant de recueillir la lumière et un système sensoriel, assurant la transduction des radiations lumineuses en influx nerveux.

Le système optique se compose d'une lentille cornéenne biconvexe, incolore, formée aux dépens de la cuticule, et d'un cône cristallin dur, produit par quatre cellules sous-cornéennes, les *cellules de Semper*. La cornée, comme le reste de la cuticule, résulte de l'activité de deux cellules cornéagènes qui entourent le cône cristallin et qui deviennent ensuite des cellules pigmentaires.

Le système sensoriel, qui prolonge le cône cristallin, est constitué de cellules nerveuses allongées, primitivement au nombre de huit, les cellules rétiniennes, ou *rétinules*, qui, dans la zone centrale, contiennent des microtubules dont les extrémités renflées en bâtonnets se placent perpendiculairement à l'axe. Ces bâtonnets forment une sorte de bordure en brosse, ou *rhabdomère*, que les rayons lumineux frappent perpendiculairement. L'ensemble des rhabdomères constitue un *rhabdome*. Les rétinules sont entourées de douze à dix-huit cellules pigmentaires. Ainsi, chaque ommatidie se trouve séparée de ses voisines par un important manchon opaque. Ce type d'ommatidie est appelé *eucone*. Il en existe d'autres, un peu différents et plus complexes. Chez quelques Hémiptères, Coléoptères et Diptères, il n'y a pas de cristallin, mais les cellules de Semper deviennent transparentes. Ce type d'ommatidie est dit *acone*. Parfois, le cristallin est gélatineux (type *pseudocone*). Dans d'autres cas, la cornée s'insère sur un tiers de l'ommatidie, prend directement contact avec les cellules de Semper qui réfractent la lumière avant qu'elle n'atteigne les cellules rétiniennes situées au tiers inférieur (type *exocone*).

Les rétinules s'achèvent par des fibres nerveuses; celles-ci se réunissent en un nerf traversant la membrane basale qui supporte toutes les ommatidies de l'œil composé. Chez les Insectes, il n'y a pas de nerf optique. Les yeux reposent sur les lobes optiques, eux-mêmes en prolongement direct du cerveau. Les lobes optiques comprennent trois épaisseurs ganglionnaires, les *lamina ganglionaris*, les *medulla externa* et les *medula interna* qui sont réunies par des chiasmes.

Malgré leur système optique en mosaïque, les yeux composés des Insectes semblent donner des objets une image unique. Selon la longueur du rhabdome, et surtout selon la répartition des manchons pigmentaires, la réception de la lumière et la formation des images seraient différentes.

Dans les yeux dits *à juxtaposition*, chaque ommatidie, séparée de ses voisines par des pigments, donne une image partielle du champ visuel. La juxtaposition de ces images réalise l'image totale.

Dans les yeux dits à *superposition*, la séparation pigmentaire entre les ommatidies n'est assurée qu'en plein jour; lorsque la lumière est crépusculaire, les pigments migrent en profondeur. Dans ces conditions, chaque rhabdome reçoit de la lumière qui a déjà traversé les ommatidies voisines. L'image qui en résulte est appelée image de *superposition*.

Acuité visuelle. Des expériences de comportement tendent à montrer que l'Insecte est capable de distinguer deux points pour un angle de résolution de 1°. On a calculé que l'acuité visuelle d'un ver luisant est égale à 1/70 de celle de l'homme. A 4 mm, une mouche distingue un objet de 80 mμ, mais à un mètre elle ne perçoit que des objets de plus de 2 cm.

Lumière polarisée. Les ondes lumineuses vibrent dans un plan faisant un angle de 90° avec la direction de leur propagation. Ces plans, dits de vibration, peuvent être distribués d'une manière équivalente dans toutes les directions ou, au contraire, se concentrer par rapport à une direction privilégiée et donner une lumière « *polarisée* ». Les jours de ciel bleu, la lumière solaire est polarisée, et les plans de polarisation maximale des différentes parties du ciel varient avec la position du soleil. Divers Insectes, en particulier les Hyménoptères sociaux, sont capables d'utiliser cette propriété de la lumière pour s'orienter par rapport à leur nid.

Perception des distances. La perception des distances et l'appréciation d'un certain relief nécessitent une vision binoculaire, et donc une stimulation simultanée des ommatidies des deux yeux. Une bonne perception de la distance implique un *angle ommatidien* aussi faible que possible et une distance entre les deux yeux aussi grande que possible. L'angle ommatidien correspond à celui que forme la limite de l'ommatidie au niveau de la membrane basale.

Les larves de libellules qui capturent des proies vivantes possèdent deux types d'ommatidies, les unes latérales, de dimensions normales, et les autres centrales, d'angle ommatidien réduit; ces dernières servent à localiser les proies. Les Insectes carnivores, comme les mantes, ont les yeux très écartés, ce qui diminue les erreurs de visée.

Discrimination des différentes longueurs d'onde. Elle est due à la présence de divers pigments visuels. Ainsi, on rencontre chez *Calliphora*, la mouche de la viande, trois catégories de pigments photosensibles présentant, chacun, deux maximums de sensibilité : l'un dans l'ultraviolet, l'autre, respectivement, pour des longueurs d'onde de 470, 490 et 521 mμ. Chez la mouche, il semble que les trois pigments photosensibles soient répartis dans des cellules réticulaires différentes. L'abeille distingue six couleurs, le jaune, le bleu-vert, le bleu, le violet, l'ultraviolet

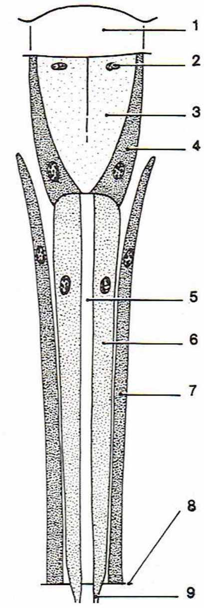

G. Hodebert

▲ ***Schéma d'une ommatidie : 1, lentille cornéenne ; 2, noyaux des cellules de Semper ; 3, cône cristallin ; 4, cellule cornéagène ; 5, rhabdome ; 6, cellule rétinulaire ; 7, pigment ; 8, membrane basale ; 9, fibre nerveuse.***

◀ ▲ ***La tête de la mante religieuse montre nettement la présence des trois ocelles et des deux yeux très bombés.***

▼ ***Sensibilités différentielles des trois types de cellules visuelles de la mouche* Calliphora *: chaque type a deux pics de sensibilités : l'un dans l'ultraviolet à 350 mμ, l'autre dans le spectre de lumière visible par l'homme. Les flèches indiquent ces pics pour chaque catégorie cellulaire.***

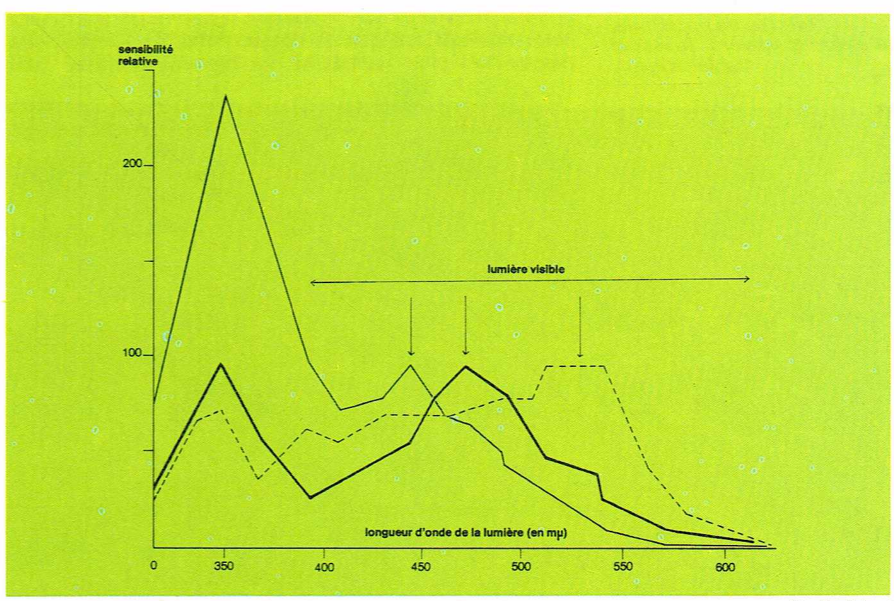

G. Hodebert

▶ ***Différentes figures utilisées pour apprécier les potentialités discriminatives des formes par les abeilles ; celles-ci distinguent mal, ou pas du tout, le rond plein du carré plein, mais discernent la croix du cercle, et le carré réduit à ses contours du carré plein.***

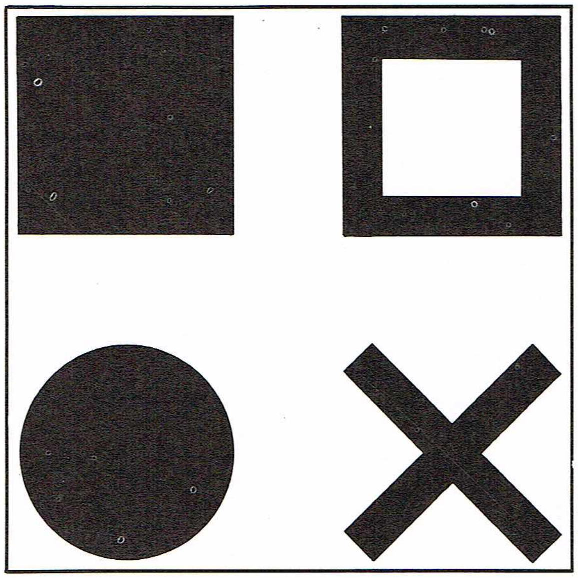

G. Hodebert

et le « pourpre des abeilles », un mélange de jaune et d'ultraviolet. De nombreuses espèces d'Insectes ne reconnaissent que le jaune et le bleu. Il semble que le rouge soit rarement perçu.

Perception. L'étude des possibilités perceptives des diverses espèces d'Insectes, comme de tous les Animaux, conduit à une conclusion importante : chaque espèce animale ne perçoit qu'une partie de son environnement, limitée à quelques couleurs, quelques sons et quelques odeurs. Ainsi chaque espèce vit dans un monde qui lui est propre, et qui est son « Umwelt », selon une expression devenue classique depuis son utilisation par J. V. Uexküll.

Généralement, une forme perçue peut orienter le comportement d'un Insecte, quand elle présente pour celui-ci une certaine valeur biologique, à condition que l'Animal soit dans un état de motivation suffisant. Une forme neutre peut devenir orientante pour des Insectes conditionnés par dressage. Cette dernière méthode ainsi que d'autres permettent de préciser les limites de la discrimination visuelle. La lumière pourrait être considérée, en elle-même, comme « orientante » *(phototaxie)*, mais elle n'est pas une forme. La vision proprement dite implique la perception de limites ou de contrastes. La plupart des Insectes sont capables de distinguer des plages de pouvoir réfléchissant variable, certains recherchant l'ombre et d'autres la lumière ; on parle parfois de réaction *skototaxique*. Les zones de contraste sont généralement bien perçues. Chez des Insectes à niveau plus élevé d'intégration visuelle, la forme est perçue comme un tout défini par ses limites.

Dans certains cas, la perception est même analytique, et différencie alors non seulement les contours mais aussi l'organisation plastique de l'objet. Enfin, l'objet peut être perçu, non plus seulement comme une surface, mais comme un volume. Des criquets, des grillons *Nemobius* sont capables de distinguer les positions horizontales et verticales de petits tableaux composés de rayures alternativement noires et blanches. L'abeille ne peut distinguer un disque ou un carré noir de mêmes dimensions, mais distingue un disque d'une croix, et un carré plein d'un carré limité à son périmètre.

La perception discriminative d'objets sombres, cylindriques, verticaux et dépassant la ligne d'horizon a été mise en évidence chez divers Insectes. Les chenilles de *Lymantria monacha* se dirigent vers un cylindre noir dressé, délaissant le même couché horizontalement. Les chenilles de *Lymantria dispar* s'orientent vers des objets dépassant l'horizon. Les hannetons se déplaçant en plaine se dirigent vers le bosquet le plus proéminent ou l'arbre le plus haut. Le criquet *Zonocerus* saute de graminées en graminées ou de bâtonnets en bâtonnets, s'ils sont plantés à distance convenable. S'ils sont de hauteur différente, on constate que le criquet progresse de support en support jusqu'au plus élevé et s'y repose en position verticale, la tête en haut. Cette situation n'est préférée que si le perchoir est le plus ensoleillé.

Les Insectes sont très sensibles au mouvement. Les abeilles sont plus attirées par des fleurs agitées par le vent que par des fleurs immobiles. Si les mouvements d'un objet dépassent une certaine vitesse, ils ne sont pas perçus ; en effet, après chaque saisie perceptive, il faut un certain temps de récupération avant la perception suivante. Le seuil du pouvoir de séparation des images successives varie selon les espèces ; il est de vingt mouvements à la seconde pour *Tachycines*, de soixante pour la larve d'æschne, qui a des yeux de type lent, de trois cents pour l'abeille et la mouche, qui ont des yeux de type rapide.

Remarques. Chaque type de comportement n'implique pas nécessairement la mise en œuvre de tous les modes de perception. Ainsi le dytique, un gros Coléoptère aquatique friand de têtards, a une très bonne vue, est sensible aux mouvements, mais reste indifférent devant un têtard frétillant dans un tube de verre, alors que, dans d'autres circonstances, il l'attaquerait avec vigueur. Par contre, il est attiré par quelques gouttes de jus de viande qu'on laisse tomber dans l'eau, mais qui sont, bien sûr, impossibles à capturer ! De même, un *Dysticus marginalis* en chasse répond à des stimuli d'ordre chimique, et non visuel, comme une observation superficielle l'aurait laissé supposer. Il a été montré que dans la recherche de la femelle, le mâle du papillon *Eumenis semele* n'est sensible qu'aux mouvements, aux dimensions et aux tons plus ou moins foncés des gris, des bruns et des noirs des ailes alors que, dans son comportement de butinage, il est sensible aux couleurs des fleurs. Ces quelques données permettent de supposer que la mobilisation des potentialités sensorielles varie selon les systèmes fonctionnels en service.

Ocelles

Il y a généralement trois ocelles chez les Insectes adultes et chez les larves d'Hémimétaboles. Chaque ocelle se compose d'une lentille, qui est une différenciation locale de la cuticule épaisse et transparente et d'un épiderme incolore au-dessous duquel sont groupées des cellules sensorielles qui forment des rhabdomères. Des dépôts pigmentaires entourent l'ocelle, ou s'insinuent entre les groupes de cellules. Les fibres des cellules sensorielles se réunissent en un nerf ocellaire. Après un relais, la voie afférente aboutit à la *pars intercerebralis*.

Il semble que les ocelles ne jouent aucun rôle dans la vision des formes. Ils ne sont sensibles qu'à de très faibles intensités lumineuses et à de faibles variations de celles-ci. Chez la drosophile, il a été montré que la suppression des ocelles augmentait le temps de réaction de la mouche à des variations d'intensité lumineuse. Les perceptions ocellaires pourraient avoir un effet stimulant sur le système nerveux en général, augmentant ainsi le taux de réactivité générale de l'Insecte. Si on recouvre les ocelles des blattes d'un vernis opaque, l'alternance de leur activité nocturne et du repos diurne est altérée.

Stemmates

Les *stemmates* sont les seuls organes visuels des larves d'Insectes holométaboles. Une chenille en porte, de chaque côté de la tête, six, qui sont séparés les uns des

▼ ***Ce criquet* Zonocerus variegatus *illustre la perception discriminative des formes, teintes et positions, qu'opèrent divers Insectes sur les objets.***

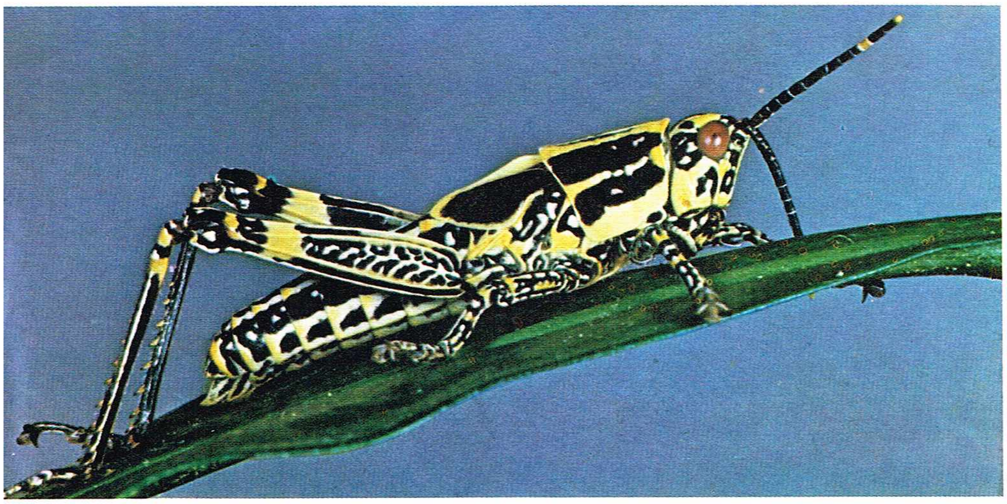

J. Carayon

autres. Un stemmate comprend une lentille résultant de l'épaississement de l'endocuticule, un cristallin, et des cellules sensorielles pigmentées qui différencient deux rhabdomes.

Des images peuvent se former au niveau du rhabdome proximal si l'objet est proche, ou du rhabdome distal s'il est plus éloigné.

Une chenille perçoit douze espaces (deux fois six), séparés autour d'elle. Cette vision en mosaïque est améliorée par des mouvements de balancement de la tête à droite et à gauche. On sait que les chenilles sont capables de distinguer des formes et de se situer par rapport à des limites de surfaces blanche et noire.

Sens dermatoptique

Diverses espèces d'Insectes sont sensibles à la lumière par toute la surface de leur corps, sans qu'il existe aucun organe différencié spécialisé à cet effet.

Production de lumière

Les Insectes producteurs de lumière ont toujours été l'objet d'une attention particulière. De célèbres savants tels que Swammerdam, Spallanzani, Darwin, Pasteur et Faraday les ont étudiés. La lumière de ces Insectes résulte de la transformation d'une substance, la *luciférine*, par une enzyme, la *luciférase*, avec production d'énergie lumineuse.

Les organes lumineux se rencontrent surtout chez les Coléoptères dans les familles des Lampyrides (luciole), Élatirides *(Pyrophorus)* et Cantarides. Chez les lucioles, les photophores sont situés sur les derniers segments abdominaux. Chez les Élatirides du genre *Pyrophorus*, qui sont les Insectes les plus luminescents que l'on connaisse, une paire d'organes, située dans la partie antérieure du thorax, produit une lumière verdâtre et un troisième organe, situé ventralement sur l'abdomen, émet une lumière orangée visible seulement pendant le vol. Les larves et les œufs de ces espèces sont également luminescents. Il arrive que l'abdomen de la femelle soit luminescent quand il est rempli d'œufs. Au Mexique et aux Antilles, les enfants les ramassent pour s'en parer lors de fêtes nocturnes et pour s'éclairer dans la forêt.

Les émissions de lumière sont intermittentes. Chez les lucioles, il y a un ou deux éclairs par seconde. La luminescence existe également chez les larves de certains Diptères fongivores, tel *Bolitophila luminosa* de Nouvelle-Zélande, chez qui l'organe lumineux se forme aux dépens des tubes de Malpighi.

Les radiations émises varient d'une espèce à une autre. Chez les Coléoptères nord-américains du genre *Photinus*, la lumière se situe entre 520 et 560 mμ, chez les *Pyrophorus*, entre 486 et 720 mμ, et pour notre lampyre, entre 516 et 656 mμ.

L'intensité de la lumière est aussi variable. Les premiers naturalistes qui ont exploré l'Amérique centrale racontent que les indigènes veillaient la nuit dans leur case éclairée par des *Pyrophorus*, une quarantaine d'individus produisant une lumière à peu près équivalente à celle d'une bougie.

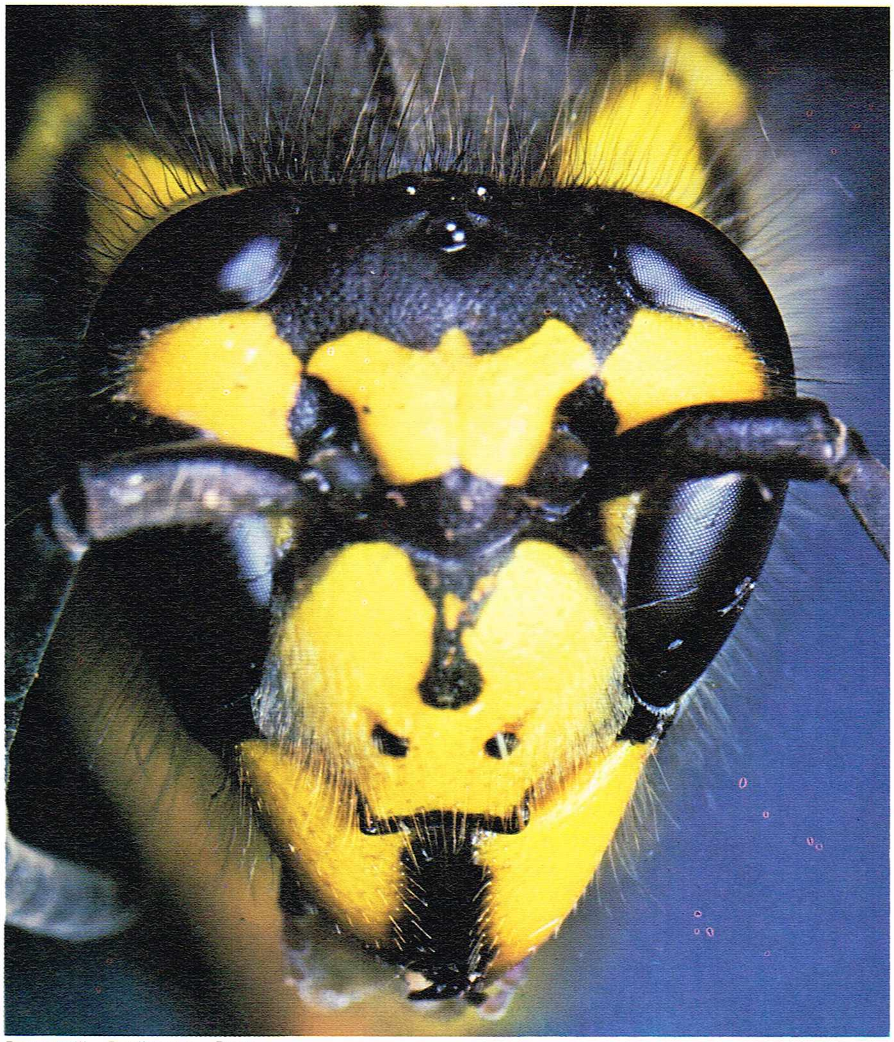

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Les ocelles, que l'on distingue sur le sommet de la tête très agrandie de cet Hyménoptère, semblent ne jouer aucun rôle dans la vision des formes mais seraient sensibles à de très faibles intensités lumineuses et aux variations de celles-ci.***

Les émissions de lumière constituent une signalisation favorisant le rapprochement des sexes en vue de la reproduction. Chez les lampyres, les mâles en vol sont attirés par les organes lumineux des femelles à terre.

La configuration des taches bioluminescentes varie selon les espèces. Chez *Lampyris noctiluca*, l'organe lumineux, qui se trouve sur la partie ventrale des derniers segments abdominaux, est composé de deux traits parallèles suivis de deux points. Un modèle de ce schéma en papier découpé, appliqué sur une lampe de poche, attire les mâles de *Lampyris noctiluca*. Chez l'espèce *Phausis splendidula*, l'organe lumineux comprend deux gros points, puis quatre petits et une courte bande transversale.

A. Margiocco

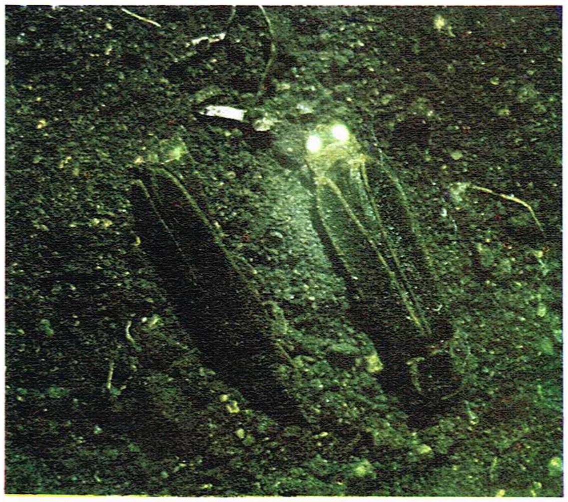

Bruce Coleman - D. Houston

◀ ***A gauche, un lampyre dont les élytres écartés laissent apercevoir les derniers segments abdominaux porteurs de l'organe lumineux ; à droite, la signalisation, bien visible la nuit, favorise le rapprochement des sexes en vue de la reproduction.***

chaque espèce. En chauffant un fil à l'infrarouge, on a pu attirer un sphinx et lui faire prendre la position d'accouplement.

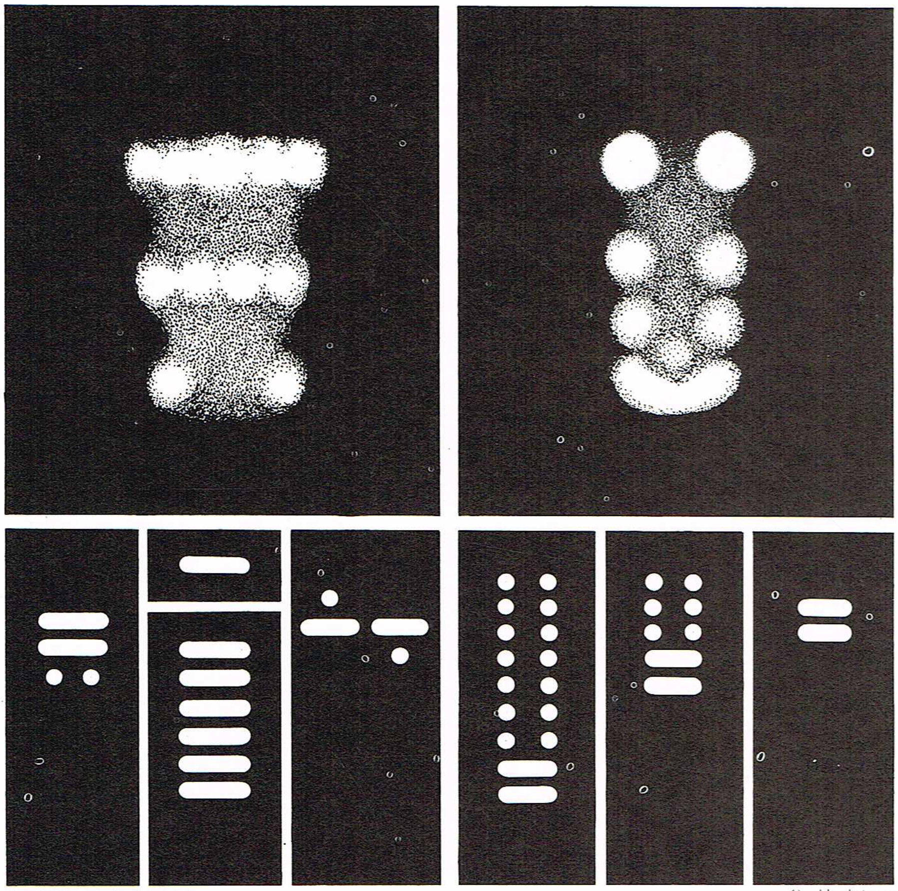

G. Hodebert

▲ *Émissions photoluminescentes de la femelle du grand lampyre* Lampyrus noctiluca, *à gauche, et de la luciole* Phausis splendidula, *à droite. Chez le lampyre, le leurre identique au signal de l'espèce est le plus efficace, alors que, chez la luciole, le leurre de gauche est plus efficace que le signal spécifique, et plus attractif que le signal de droite très réduit. Lorsque le leurre est plus attractif que le signal normal, il constitue un super-signal.*

Un modèle attire les mâles aussi bien que les femelles de l'espèce, mais un leurre différent du modèle comportant davantage de taches lumineuses, par exemple une succession de sept paires de points et deux traits horizontaux, a plus de succès que les femelles *Phausis splendidula*. A partir de cette expérience, ainsi que d'autres réalisées dans divers domaines, on a conceptualisé la notion de *super-signal* qui signifie en quelque sorte qu'une caricature est parfois plus évocatrice que le signal réel.

Reconnaissance à l'infrarouge

Certains papillons de nuit reconnaissent dans l'obscurité, grâce à des radiations caloriques (infrarouge), leurs congénères ou leurs plantes-hôtes. L'élévation de la température chez la femelle, produite par un vol de quelques instants, suffirait pour attirer le mâle. La reconnaissance spécifique se ferait au dernier moment, grâce au rythme des battements d'ailes, particulier pour

Production des sons

De nombreuses espèces d'Insectes communiquent par des signaux acoustiques. Les mécanismes de productions sonores se ramènent à quatre systèmes essentiels, la percussion, la stridulation, la vibration alaire et la vibration de membranes.

Percussion

Le cas le plus célèbre est celui de l'*Anobium*, petit Coléoptère xylophage qui creuse des galeries dans les vieux bois des meubles, des boiseries et des parquets. Il arrive, généralement la nuit, que l'*Anobium* tape rythmiquement sa tête contre les parois de ses galeries, provoquant ainsi le bruit appelé « l'horloge de la mort » dans les traditions populaires.

D'autres espèces, comme *Atropos pulsatorium* et *Liposcelis divinatorius*, communs dans les habitations, les musées et les bibliothèques, produisent par percussion des bruits analogues mais plus faibles, qui sont des appels sexuels. Ces bruits ont été à l'origine d'histoires de revenants et de diverses superstitions.

Le substrat peut être frappé par l'extrémité de l'abdomen. Les criquets du genre *Oedipoda* frappent douze coups par seconde. *Bliastes insularis*, Orthoptère Tettigoniide des Antilles, tambourine à l'intérieur de l'écorce des troncs d'arbres morts dans lequels il vit; trois ou quatre coups se suivent comme quand on frappe à une porte avec l'index.

Stridulation

Les signaux sonores les plus intenses sont produits par des organes stridulants hautement différenciés. Chez les Orthoptères Ensifères (grillons et sauterelles) les sons résultent du frottement des deux élytres l'un contre l'autre.

La stridulation du grillon est vénérée depuis la plus haute antiquité. En Orient, on plaçait l'Insecte dans des récipients de grande valeur, comme des vases de jade, d'ivoire ou de bois précieux. En Toscane et à Florence, le jour de l'Ascension est aussi le jour de la fête du grillon, et plus spécialement du grillon chantant.

Parmi les émissions sonores d'Insectes, celles produites par les grillons sont les plus agréables à l'oreille humaine. *Homoeogryllus japonicus*, une espèce japonaise, est même appelée « cloche d'or » en raison de son timbre particulièrement musical. Cette musicalité du chant des grillons est liée au fait que les espèces de cette famille émettent des sons de fréquence pure, alors que chez les criquets et les sauterelles les émissions sont complexes et s'apparentent à la limite davantage aux bruits, sans fréquence définie, qu'aux sons.

Le système de stridulation du grillon est simple, au moins dans son mécanisme. A sa face interne, chaque élytre est barré transversalement en son tiers antérieur

▶ *A gauche, l'*Anobium*, ou « grande vrillette », est bien connu comme Insecte produisant des signaux acoustiques par percussion; à droite,* Ephippiger perforatus *émet des signaux sonores produits par des organes stridulants.*

J. Carayon

A. Margiocco

par une râpe, ou *pars stridens,* constituée de petites dents. Cette râpe, frottée par le rebord intérieur de l'élytre opposé, ou chanterelle, transmet une série d'ébranlements à l'ensemble de la surface des deux élytres. Chaque dent de la râpe, frottée par la chanterelle, ébranle les élytres d'une seule vibration. Quand ceux-ci ont accompli un mouvement de va-et-vient, une seconde dent est percutée, engendrant ainsi une nouvelle vibration et ainsi de suite. Si bien qu'un seul mouvement de fermeture des élytres assurant le frottement de la quasi-totalité de la *pars stridens* se traduit par une série d'ondes identiques. Le nombre d'ondes par seconde (ou cycles, ou hertz) définit la hauteur du son, ou fréquence. Chez le grillon des champs, elle est de 3 500 Hz.

Chez les sauterelles, les sons émis sont moins harmonieux car plus complexes. Cette différence est due au fait que dans ce cas-ci, le choc d'une dent fait vibrer l'ensemble des surfaces élytrales ; il ne s'agit plus d'un seul aller et retour, mais de toute une série de vibrations qui vont en s'amortissant. La percussion de la dent voisine engendre un nouveau train d'ondes. Le spectre des fréquences des sauterelles est très vaste et s'étend dans les ultra-sons. Certaines espèces, comme *Pycnopalpa bicordata*, la sauterelle-feuille des forêts néotropicales, émettent exclusivement des ultra-sons.

Vibration alaire

La vibration des ailes pendant le vol engendre des ondes de compression et de décompression de l'air et produit ainsi un bruit dont la fréquence fondamentale correspond à la fréquence des battements d'ailes, mais à laquelle s'ajoutent des fréquences secondaires. Chez les Lépidoptères, la fréquence des battements alaires, de l'ordre de vingt par seconde, est trop faible pour être perceptible par l'oreille humaine. Mais des Insectes à battements d'ailes plus rapides produisent en vol des sons audibles. L'abeille vole à raison de deux cent cinquante battements par seconde ; les moustiques du genre *Culex* atteignent deux cent quatre-vingts à trois cent cinquante battements à la seconde. La fréquence est relativement constante pour une espèce donnée, mais varie avec la température, l'âge et le sexe. Généralement, les petites espèces exécutent des mouvements d'ailes plus rapides et produisent des sons plus aigus que les espèces volumineuses.

Vibration de membrane

Une membrane tendue sur une cavité peut être animée de vibrations par un jeu musculaire convenable. Ce procédé acoustique est l'apanage des Homoptères, de quelques Hétéroptères Pentatomides et des Lépidoptères Arctiides.

Chez la cigale *Platypleura,* les timbales, fines lames de cuticule, tendues sur une étroite bordure et soutenues par une série de piliers internes, se différencient symétriquement à droite et à gauche dans la région latéro-dorsale, au niveau du premier segment abdominal. Chaque timbale est protégée par une membrane. La structure du premier segment abdominal est entièrement différenciée en vue

M. Boulard

▲ *Mâle de la cigale rouge* **Tibicina haematodes** *dans son attitude caractéristique d'appel : ailes soulevées, abdomen tendu pour dégager l'appareil sonore dont on aperçoit la cymbale et la membrane jaune du côté gauche.*

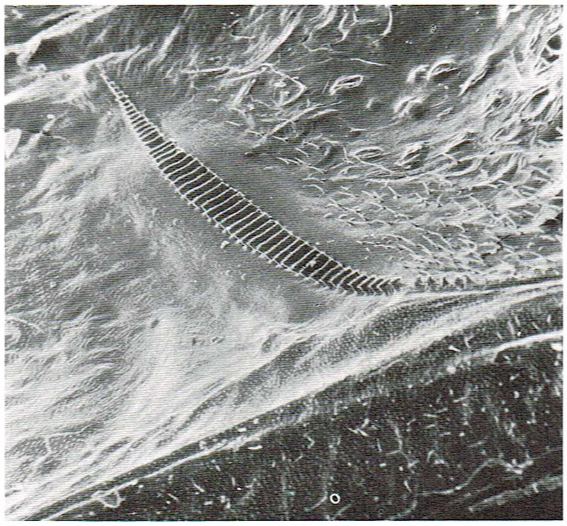

Y. Leroy

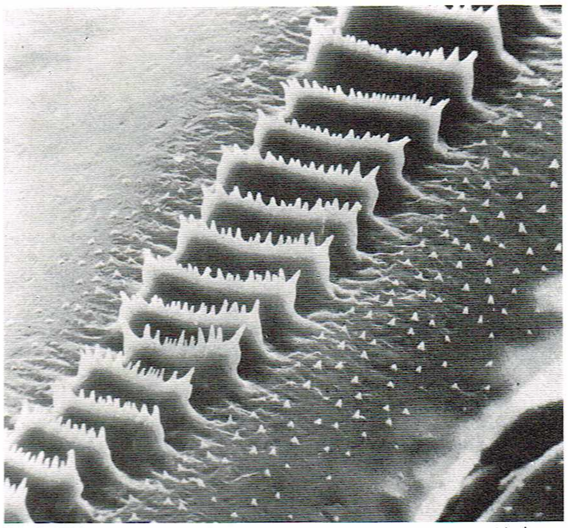

Y. Leroy

◄ *A gauche, ensemble des dents (× 45) de la râpe de stridulation d'une sauterelle de forêt tropicale,* **Enochletica ostentatrix** *; à droite, détail de l'une des extrémités (× 450).*

▶ *Représentation semi-schématique de la base d'une sensille trichoïde de la larve d'Aglais : 1, membrane articulaire d'un poil; 2, cellule tormogène; 3, noyau de la cellule tormogène; 4, cuticule; 5, épiderme; 6, membrane basale; 7, base d'un poil; 8, manchon scolopal; 9, dendrite; 10, vacuole; 11, cellule sensorielle; 12, axone; 13, cellule trichogène; 14, noyau de la cellule trichogène.*

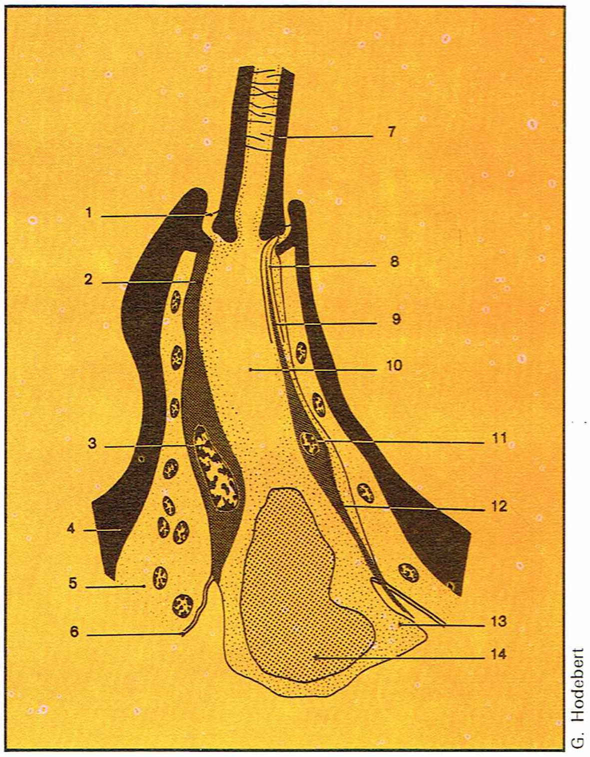

de permettre la production de sons. Les organes viscéraux sont rejetés dorsalement. La cavité générale est divisée en une lacune ventrale et deux latérales; le reste du segment comprend des arcs de soutien, un ensemble de sacs aériens et une importante musculature oblique.

Utilité des productions sonores

Les sons produits par les Insectes interviennent dans les communications inter- et intraspécifiques.

Communications interspécifiques. On suppose que certaines productions sonores ont pour fonction de protéger les Insectes des prédateurs. Diverses espèces produisent des bruits très peu structurés dont le rythme et la fréquence sont mal définis; ils peuvent être émis à la moindre alarme — ou bien, chez divers Acridiens Tettigoniides et chez les Coléoptères, quand on les touche, ou encore en accompagnement des parades d'intimidation, chez quelques Lépidoptères. Il pourrait exister un mimétisme acoustique. Certains Syrphides, qui ressemblent à des abeilles, bourdonnent comme celles-ci. Un nécrophore, qui ressemble superficiellement à un bourdon, émet, quand il est dérangé, des sons analogues à ceux de son modèle. Les ultra-sons produits par les Arctiides, proies favorites des chauves-souris, auraient pour rôle de brouiller le système de localisation de ces dernières.

Communications intraspécifiques. Les sons qui jouent un rôle dans les relations entre individus d'une même espèce ont généralement une structure spatio-temporelle bien définie. Certaines espèces possèdent un répertoire de quatre, cinq ou six signaux sonores correspondant à des fonctions différentes : l'appel, la cour, l'accouplement, l'agressivité, le combat, la victoire et l'alarme.

Le plus souvent, la production de sons est l'apanage du seul sexe mâle, par exemple, chez le grillon. Chez certaines espèces, les femelles émettent aussi des sons, mais souvent moins intenses, moins structurés, et parfois réduits à des cliquetis; c'est le cas des Tettigoniides Phanéroptères.

Chez les Insectes sociaux, les signaux sonores peuvent être liés à d'autres fonctions que la reproduction. Pendant la danse qui sert à indiquer la direction et la distance d'une nouvelle source de nourriture, les abeilles ouvrières émettent des sons.

Dans les nuées de criquets migrateurs, le bruit du vol a des rôles divers. Il pourrait augmenter ou maintenir un niveau élevé de réactivité générale chez les Insectes en migration. Il pourrait assurer la cohésion du groupe et être responsable du maintien pendant le vol de la cohésion entre les individus. Le vol d'un individu isolé est audible pour un autre individu placé à trois mètres. Un vol individuel, comme un vol massif, peut inciter à l'envol des criquets au repos qui le perçoivent acoustiquement.

Audition et mécanoréception

Il n'y a pas, chez les Insectes, d'organes des sens nettement localisés et définis, comme chez les Mammifères, à l'exception des yeux simples et composés. L'ouïe, la proprioception, le tact, l'olfaction et le goût dépendent de cellules sensorielles de divers types, isolées ou groupées, réparties sur tout le corps et plus spécialement au niveau des antennes et des pattes. On distingue essentiellement trois types d'unités sensorielles : les sensilles trichoïdes, les sensilles campaniformes et les scolopidies.

Sensilles trichoïdes

Les *sensilles trichoïdes* sont de petits organes inclus dans le tégument, comprenant chacun une ou plusieurs cellules sensorielles. Elles ont l'aspect de poils articulés sur une dépression membranaire. Le poil est produit par une *cellule trichogène,* et la membrane basale par une *cellule tormagène*. Les sensilles trichoïdes affectées à la mécanoréception ne comprennent généralement qu'une seule cellule sensorielle, alors que celles qui ont un rôle dans la chimioréception en contiennent plusieurs. Les cellules sensorielles sont bipolaires; le processus dendritique distal est entouré d'un manchon cuticulaire, ou *scolopale,* fermé ou ouvert; le dendrite s'étend dans la cavité axiale du poil. Le mouvement du poil entraîne la courbure du dendrite, qui donne alors naissance à un potentiel d'action. Parfois, seules les déformations produites dans une direction donnée sont perçues. La réponse sensorielle est souvent liée aux seuls mouvements d'abaissement et de relèvement du poil (réponse phasique), mais parfois elle se maintient pendant toute la durée de la courbure du poil (réponse tonique).

Les réponses phasiques sont le fait des poils tactiles des antennes et des tarses. Certains poils assurent la perception de vibrations acoustiques; c'est le cas des sensilles de l'abdomen et des cerques chez les Orthoptères; on sait aussi que les sensilles du tégument des chenilles répondent à des sons compris entre 32 et 1 000 Hz. Les sensilles à réponse phasique perçoivent également des souffles d'air très lents (4 cm/s).

Les récepteurs toniques se groupent souvent en plage. On les rencontre souvent au pôle antérieur de la tête; ils servent alors à apprécier l'orientation et la vitesse des courants d'air et jouent un rôle dans l'orientation pendant le vol et à l'envol (par exemple, chez le criquet migrateur). Les récepteurs toniques sont surtout importants au niveau des articulations, où ils fonctionnent comme des propriocepteurs et contrôlent la plupart des mouvements comme le vol, la marche, la capture des proies, mais aussi l'orientation par rapport à la pesanteur.

Il n'y a pas de vrais statocystes chez les Insectes, mais des organes similaires ont été signalés chez *Dorymyrmex,* un Hyménoptère, et chez *Anoplotermes,* un Isoptère. On rencontre aussi des organes de ce type, les organes de Palmen, chez les Éphémères.

Sensilles campaniformes

Les *organes campaniformes* apparaissent comme des plages de fine cuticule, ovoïdes et bombées au centre. Un seul dendrite encapuchonné dans un scolopale dessert cette sensille; les sensilles peuvent se grouper localement. Les organes campaniformes sont particulièrement nombreux à la base des ailes et des haltères des Diptères. On en rencontre aussi à divers niveaux des pattes, sur le trochanter, la base des fémurs, le tibia et sur chaque article du tarse. Ils enregistrent les forces de pression et sont mis en action par le poids du corps quand l'Insecte repose sur ses pattes.

Scolopidies

Les *scolopidies* sont des unités sensorielles tricellulaires complexes qu'on retrouve sous différentes formes et divers modes de groupements dans plusieurs organes sensoriels des Insectes. Elles ne sont généralement pas visibles extérieurement. Chaque scolopidie est constituée par la succession de trois cellules, la cellule sensorielle, la cellule intermédiaire enveloppante, ou scolopale, et la cellule-capuchon, terminale. Le dendrite distal pénètre

dans la cellule intermédiaire, entouré par son capuchon scolopal.

Les scolopidies se groupent en faisceau et constituent les *organes chordotonaux* tendus entre deux points cuticulaires. On compte quatre-vingt-dix organes chordotonaux distribués métamériquement dans les parois tégumentaires des larves de drosophiles. Des organes chordotonaux trouvent place dans le thorax de nombreux Insectes, au niveau de l'insertion des ailes. Mais ils sont surtout situés dans les pattes ; chacune d'entre elles en possède quatre qui groupent chacun un nombre variable de scolopidies (jusqu'à trois cents chez les sauterelles).

Au niveau des pattes, les scolopidies se groupent par quelques dizaines à la partie proximale du tibia, en un organe spécial, dit *subgenual*. D'un côté, les scolopidies prennent appui sur la cuticule par des prolongements de cellules accessoires, de l'autre, les cellules sensorielles s'adossent à une trachée. L'organe subgenual comprend fréquemment deux faisceaux distincts de scolopidies ; c'est le cas chez les Odonates, les Dictyoptères et les Orthoptères. L'organe subgenual est sensible aux vibrations du substrat et à celles transmises par l'air si elles sont suffisamment intenses pour faire vibrer la patte elle-même.

Les organes chordotonaux situés dans le second article des antennes sont appelés *organes de Johnston*. Ils sont bien développés chez tous les Ptérygotes adultes, et réduits chez les larves. Ils sont très importants chez les moustiques mâles dont la base de l'antenne est élargie à leur niveau. L'organe de Johnston est sensible aux mouvements du flagelle antennaire. Chez la mouche en vol, l'organe de Johnston joue le rôle d'indicateur de vitesse. Il sert également à la perception des sons chez les Diptères ; les mâles localisent les femelles acoustiquement. Le flagelle antennaire, d'aspect plumeux, est mis en vibration par les ondes vibratoires. A une fréquence du flagelle identique aux sons produits par la femelle sexuellement mûre, le mâle répond par des comportements de saisie et d'agrippement typiques de l'accouplement. L'organe de Johnston pourrait en outre permettre au moustique de s'orienter par rapport à la source sonore. Les organes de Johnston présents chez les Insectes aquatiques les aideraient à s'orienter dans l'eau (notonecte) ou à la surface (gyrin).

Les organes chordotonaux peuvent être spécialisés dans la réception des sons. Ils sont les éléments essentiels des *organes tympaniques* qui comprennent aussi une fine surface cuticulaire, ou membrane tympanique, tendue sur une cavité remplie d'air. L'organe chordotonal s'insère sur le tympan et comprend une seule scolopidie chez l'Hétéroptère *Plea*, mais quinze cents chez les cigales. Les organes tympaniques se trouvent encastrés dans le tibia des pattes prothoraciques chez les grillons et les sauterelles, dans le mésothorax chez les hydrocorises, dans le métathorax chez les noctuelles et dans l'abdomen chez les criquets, les cigales, les pyrales et les Géométrides. La structure exacte des organes tympaniques, qui varie selon les groupes, est souvent fort complexe. Les scolopidies se groupent en plusieurs faisceaux chez les grillons et les sauterelles. L'organe tympanique tibial comprend un organe chordotonal principal, ou *crête acoustique*, qui s'étend longitudinalement à l'axe de la patte, et un *organe chordotonal intermédiaire* surmonté par l'organe subgenual. Les mouvements de la membrane tympanique stimulent les cellules sensorielles de l'organe chordotonal. Selon les ordres et les familles, la bande de fréquence des sons perçus est très variable. Les sauterelles sont sensibles à des sons compris entre 1 kHz et 100 kHz, les criquets entre 100 Hz et 50 kHz, les grillons entre 200 Hz et 15 kHz, les cigales entre 100 Hz et 15 kHz et les noctuelles entre 1 et 240 kHz.

Les récepteurs acoustiques peuvent fonctionner de deux manières. Ils sont sensibles soit aux variations de pression émanant de la source sonore, soit aux déplacements d'air ou de particules que provoquent les vibrations. Ce second type de récepteurs permet à l'Insecte de localiser la source sonore. Une sauterelle tend à se placer dans un champ sonore de manière que les tympans symétriques reçoivent des stimulations identiques.

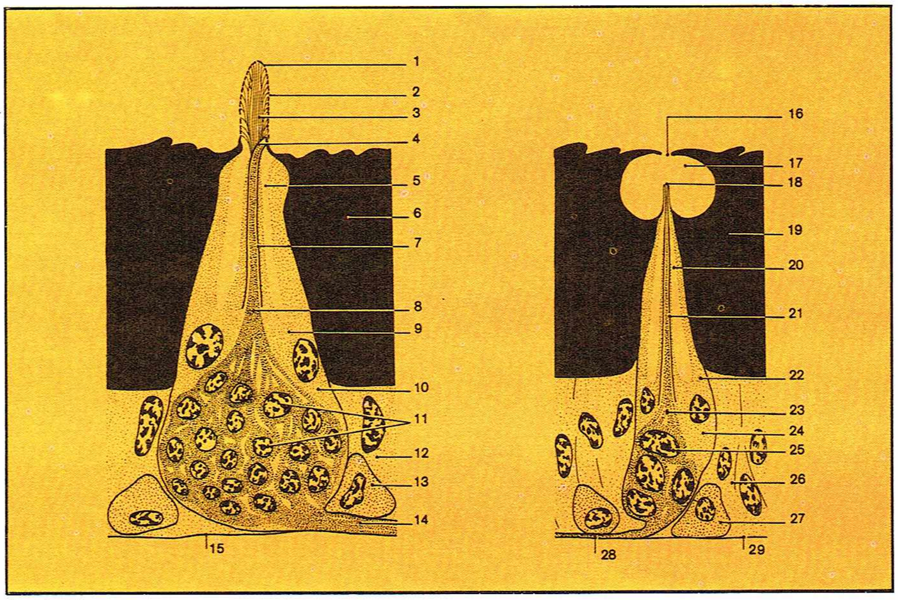

G. Hodebert

▲ ***Coupe semi-schématique à travers les organes chimiorécepteurs ; à gauche, récepteur à pinceau : 1, extrémité en pinceau ; 2, ouverture dans la cuticule ; 3, ramifications dendritiques ; 4, sortie des dendrites du manchon scolopal ; 5, vacuole ; 6, cuticule ; 7, manchon scolopal ; 8, dendrites ; 9, cellule trichogène ; 10, cellule tormogène ; 11, neurones sensoriels ; 12, épiderme ; 13, cellule glandulaire ; 14, nerf ; 15, membrane basale ; à droite, récepteur à fossette : 16, ouverture à l'extérieur ; 17, fossette ; 18, ouverture dans la cavité intracuticulaire ; 19, cuticule ; 20, vacuole ; 21, manchon scolopal ; 22, cellule tormogène ; 23, dendrites ; 24, cellule trichogène ; 25, neurones sensoriels ; 26, épiderme ; 27, cellule glandulaire ; 28, nerf ; 29, membrane basale.***

Chimioréception

Les stimulations chimiques sont appréhendées soit comme odeurs (olfaction), soit par contact direct avec les récepteurs (gustation). Les *sensilles chimioréceptrices*, réparties sur tout le corps, sont spécialement abondantes au niveau des antennes, des pièces buccales et des pattes.

Olfaction

Il y a deux types principaux de récepteurs, à pinceau et à fossette.

Les récepteurs olfactifs à pinceau sont des sensilles qui comprennent plusieurs cellules sensorielles (jusqu'à cinquante), dont les dendrites, après avoir traversé le manchon scolopal, s'étalent à l'extérieur où ils se subdivisent en ramifications très ténues. L'ensemble est recouvert d'une fine couche de cuticule percée de pores ayant 0,1 μ de diamètre. De tels organes olfactifs sont présents sur les antennes de la plupart des Insectes.

Les récepteurs à fossettes existent dans les antennes d'Orthoptères et les mandibules d'abeilles. Le pinceau de trois à quatre dendrites ne fait pas saillie en surface mais s'ouvre dans une cavité sphérique creusée dans la cuticule et en relation avec l'extérieur par un pore.

Les sensilles olfactives peuvent être isolées comme dans les cas précédents ou groupées par dizaines ou centaines, au niveau des palpes labiaux chez les Lépidoptères ou du troisième article antennaire chez les Diptères Cycloraphes. Elles comprennent plusieurs cellules sensorielles, dont chacune répond à une catégorie différente de substances chimiques ou à une seule, tout à fait spécifique. Plus le nombre de sensilles est élevé, plus le seuil de perception olfactive est bas, et plus large est l'éventail des produits décelables.

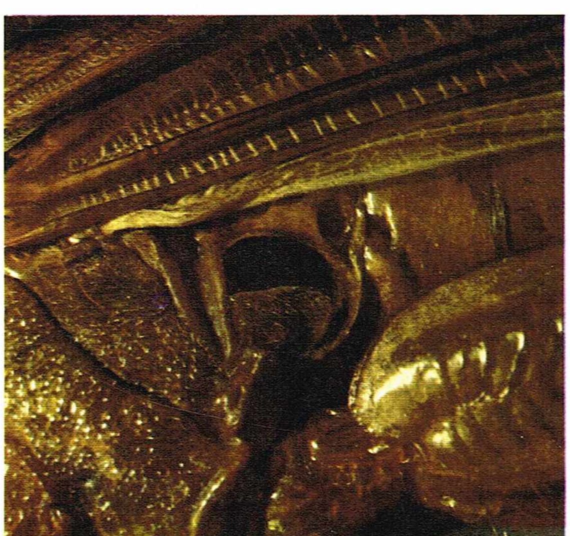

A. Margiocco

◀ ***Base de l'abdomen d'un Acridien, vu de côté, montrant la position des organes tympaniques, éléments essentiels de la réception des sons.***

J. Carayon

▲ *La mouche bleue* Cynomyia mortuorum, *comme la plupart des Insectes, porte au niveau des tarses et des pièces buccales des organes chimiorécepteurs dont la sensibilité très élevée s'exerce de façon importante, notamment dans le comportement alimentaire.*

▼ *Femelle de* Bombyx mori, *appelant le mâle en faisant saillir les glandes orangées à « phéromone ».*

Les stimulations olfactives ont des effets attractifs ou répulsifs sur les Insectes et déclenchent des comportements de quête ou d'évitement. La détection de la nourriture est souvent de nature olfactive. Le nécrophore est attiré par l'ammoniac, le doryphore par l'acétaldéhyde de la pomme de terre, et la philanthe, encore appelée le « loup des abeilles », reconnaît ses proies à leur odeur. Les lieux de ponte sont souvent recherchés olfactivement. Ainsi, les femelles de la mouche *Lucilia sericata,* qui déposent habituellement leurs œufs sur la toison des moutons, sont attirées par l'odeur de la laine. *Rhyssa,* un Hyménoptère parasite, est capable de découvrir olfactivement *Sirex,* sa larve-hôte, cachée dans une galerie située à plusieurs centimètres de la surface de l'écorce de l'arbre.

Gustation. Chimiorécepteurs de contact

Les chimiorécepteurs de contact sont des sensilles trichoïdes, qui comprennent chacune de quatre à six cellules sensorielles, dont les dendrites affleurent l'extrémité du cône trichoïde. Les tarses et les pièces buccales de la plupart des Insectes portent des sensilles de ce type. On en trouve également au niveau des ovipositeurs des Gryllides et Ichneumides, ainsi qu'à la surface de la trompe des mouches. Le contact avec une substance chimique déterminée est nécessaire pour faire apparaître un potentiel d'action dans la cellule réceptrice spécialisée.

La chimioréception de contact est surtout importante dans les comportements alimentaires. Les Insectes semblent capables de distinguer le sucré, le salé, l'acide et l'amer, et de différencier différents types chimiques de sucres. La sensibilité des chimiorécepteurs peut être très élevée; des mouches *Calliphora* ou des papillons *Pyrameis* sont capables de détecter, avec leurs tarses, une solution de sucre diluée à 1/12 800 mole et même davantage, alors que chez l'homme, le seuil de concentration auquel une solution est reconnue comme sucrée est de 1/16 ou 1/32 mole.

Phéromones

Les phéromones sont des substances chimiques libérées par un individu et capables de déclencher une réaction appropriée chez un congénère. Les glandes sécrétrices sont situées au niveau de l'abdomen chez les femelles de Lépidoptères, des mandibules chez les Hyménoptères, et des ailes chez les mâles de Lépidoptères, où elles sont appelées *androconies.* Les phéromones sont des produits volatils ou consistants; leur perception tient de l'olfaction ou du goût.

Les phéromones interviennent dans le comportement sexuel et aussi dans les effets de groupe chez les Insectes grégaires ou sociaux. Les glandes qui libèrent les phéromones sexuelles sont très variées. Chez les femelles de Lépidoptères, les plages odoriférantes se rencontrent parfois sur la dernière membrane intersegmentaire, qui est mise à découvert par l'élongation de l'abdomen *(Phalera bucephala).* Dans le genre *Cuculia,* la membrane sécrétrice se localise sur un bourrelet annulaire, qu'un afflux de sang fait saillir en relief. Chez de nombreux Lymantriidae, les femelles vierges émettent les phéromones sexuelles par des mouvements de va-et-vient de l'ovipositeur, qui entraînent des étirements et des contractions répétés de l'épiderme sécréteur, plissé dorsalement, qui constitue la glande proprement dite. Chez *Bombyx mori* l'appareil sécréteur est représenté par deux sacs intersegmentaires dévaginables. Dans les genres *Vanessa* et *Zygena,* les glandes sécrétrices sont situées en profondeur dans le huitième segment abdominal et communiquent avec l'extérieur par de fins canaux, qui s'élargissent en entonnoir par extension de l'ovipositeur, au moment où diffuse la phéromone.

Les phéromones sexuelles ont été isolées, analysées, puis synthétisées. Selon les groupes, elles possèdent de dix à dix-huit atomes de carbone et ont un poids moléculaire compris entre cent quatre-vingts et trois cents. La phéromone sexuelle de *Bombyx mori* a été identifiée en 1961-1962 par Butenandt.

L'émission de phéromones sexuelles n'est ni constante, ni passive. Chez *Bombyx mori,* l'ablation des ganglions cérébroïdes ou leur simple déconnexion supprime le comportement d'appel sexuel des femelles. Au moment de l'émission de phéromone, la femelle reste au repos en un point précis; elle exécute des battements d'ailes lorsqu'un mâle arrive à proximité. Lorsqu'ils sont sexuellement mûrs, les mâles se livrent, toujours aux mêmes heures, à une quête active de leur partenaire. Leur comportement varie selon qu'ils ont pénétré ou non dans le champ olfactif d'une femelle. Dans la première étape de la recherche, qui se fait au hasard, le mâle vole en remontant les faibles courants de vents, puis se déplace dans le sens du vent et de nouveau le remonte. Dès qu'il perçoit la phéromone, le papillon remonte le gradient olfactif et atteint ainsi facilement la femelle émettrice. Le rayon d'attraction d'une femelle est très difficile à déterminer. Il dépend, en particulier, de la nature du terrain et de la turbulence ainsi que de la vitesse des vents. Il est possible de piéger des espèces nuisibles en utilisant les phénomènes d'attraction sexuelle.

Les ouvrières d'abeilles mélipones *(Trigona postica)* badigeonnent de sécrétions mandibulaires chaque touffe d'herbe et chaque pierre, traçant ainsi un chemin odoriférant entre la ruche et les sources alimentaires intéressantes. Les fourmis tracent aussi des chemins

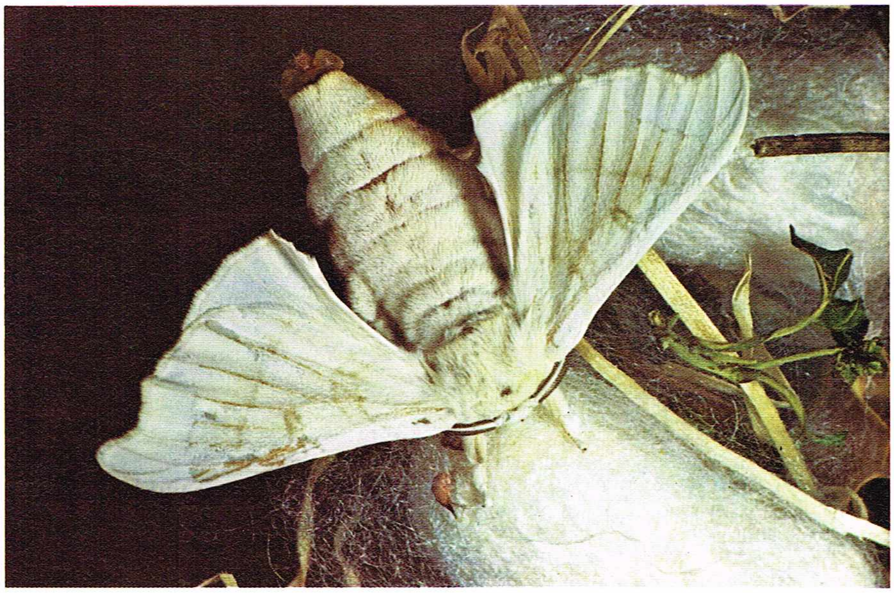

J. Carayon

odoriférants grâce à leur glande de Dufour, leur glande à poison ou leur glande de Pavan. Une ouvrière trace un itinéraire en déposant des taches d'une substance chimique spécifique. Les fourmis suivantes marquent, à leur tour, le chemin qui devient un véritable rail odoriférant. Ces chemins sont dessinés soit lors d'explorations, soit pour favoriser le recrutement des ouvrières vers une bonne source de nourriture. Chez les fourmis nomades, les tracés sont d'autant plus indispensables qu'ils sont suivis par tous les membres de la colonie, dont beaucoup sont aveugles. Dans une société de fourmis, lorsqu'un membre de la colonie est attaqué, il émet une *substance d'alarme* qui attire les congénères et les rend agressives vis-à-vis des intrus.

Chez les Insectes sociaux, il existe de nombreuses autres phéromones, qui remplissent des fonctions variées. L'un des ensembles de phéromones les plus étonnants est celui de la reine d'abeille; il assure le maintien de la structure sociale de la colonie. Quant on enlève une reine de la ruche, son absence est vite repérée par les ouvrières, qui, au bout de quelques heures, se mettent à construire quelques cellules royales en élargissant certaines cellules d'ouvrières dont les larves, spécialement bien nourries, pourront se développer en reine. Quand la reine est présente dans la ruche, elle produit en permanence une phéromone qui incite les ouvrières à ne construire que des alvéoles d'ouvrières. Cette phéromone, un acide 9-oxodécénoïque, est produite par des glandes situées dans les mandibules, et se répand sur tout le corps de la reine. Sa propagation s'effectue lorsque les ouvrières lèchent la reine puis, par trophallaxie, entre les ouvrières. La présence de la reine inhibe le développement des ovaires des ouvrières en même temps qu'elle inhibe la construction de cellules royales. Enfin, une autre phéromone, l'acide 9-hydroxydécénoïque, également d'origine mandibulaire, attire les ouvrières et assure leur cohésion dans l'essaim, au moment de la formation d'une nouvelle colonie.

Locomotion

Tous les muscles des Insectes, que ce soient les muscles viscéraux entourant le tube digestif ou le cœur, ou des muscles squelettiques assurant les mouvements locomoteurs, sont constitués de *fibres striées*. On ne leur connaît pas de muscles lisses. Des invaginations de cuticule, ou *apodèmes*, matérialisent les zones d'insertion des muscles, qui sont, contrairement à ceux des Vertébrés, dépourvus de tendons.

Tous les muscles des Insectes sont construits sur le même plan malgré d'importantes variantes. Ils comprennent des unités allongées et multinucléées, les *fibres*, qui sont dotées d'éléments contractiles, les *myofibrilles*. Une *fibre musculaire* d'Insecte est de la longueur du muscle. Chaque fibre est limitée par une double enveloppe, ou *sarcolemme*, qui comprend une membrane basale externe et une membrane plasmatique interne. Cette dernière s'invagine transversalement d'une manière régulière et est responsable de ce qu'on appelle le système tubulaire transversal, ou *système « T »*.

La fibre musculaire se caractérise par la présence de *myofibrilles*, enrobées par le *sarcoplasme*, où sont situés les noyaux. Les mitochondries sont toujours en contact étroit avec les myofibrilles, qui sont composées de deux types de filaments, la myosine et l'actine, correspondant à deux catégories de molécules protéiques.

On appelle *sarcomère* l'unité protéique de la fibrille. Les limites des sarcomères apparaissent transversalement et correspondent aux *disques « Z »*. Entre deux disques Z, chaque sarcomère présente cinq zones : alternativement claires et foncées, les bandes limitrophes des disques Z ou *bandes « I »*, la *bande « A »* qui contient en son centre la *bande « H »*; d'où la succession : Z.I.A.H.A.I.Z. Les bandes « A », plus foncées, correspondent à l'empilement des filaments d'actine et de myosine, la bande « H » aux seuls filaments de myosine, et les bandes « I » aux filaments d'actine. Lors de la contraction, le système double de filaments coulisse, la distance entre deux disques Z diminue et la bande H disparaît. On suppose que, peut-être, les filaments eux-mêmes se plissent en accordéon, accusant ainsi la contraction de la fibrille.

La disposition des fibres musculaires varie selon les parties du corps, et selon les différentes espèces d'Insectes.

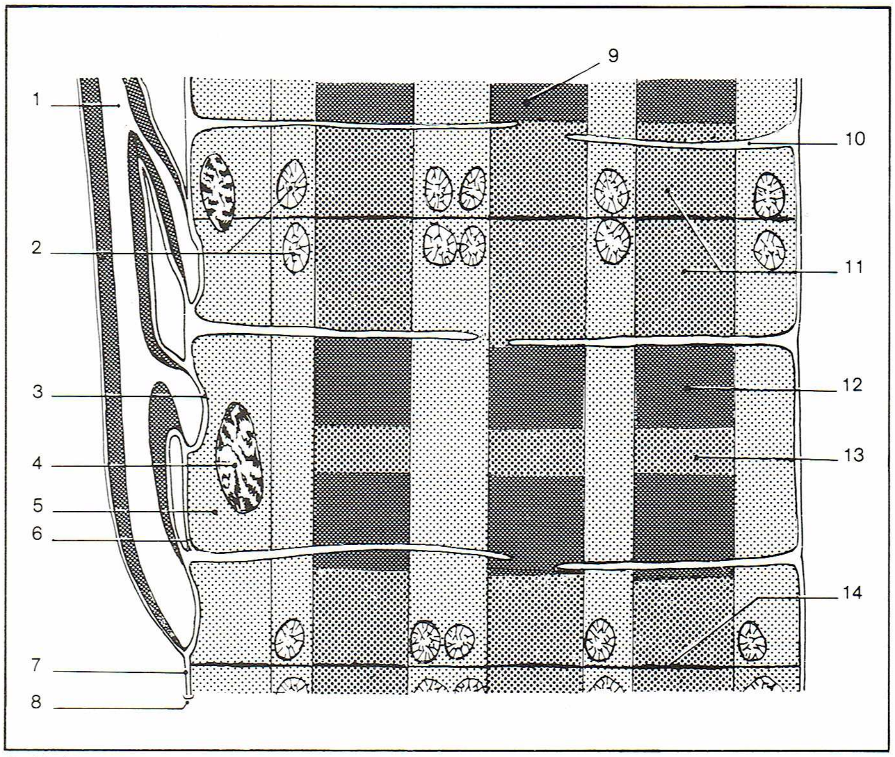

G. Hodebert

▲ ***Coupe schématique montrant les constituants essentiels d'un muscle d'Insecte : 1, axone; 2, mitochondries; 3, jonction nerf-muscle; 4, noyau; 5, sarcoplasme; 6, membrane plasmatique; 7, membrane basale; 8, sarcolemme; 9, fibrilles; 10, tubule T; 11, bande I; 12, bandes A; 13, bande H; 14, disque Z.***

Chez de nombreux Insectes, les muscles des pattes et du tronc sont du type *tubulaire* en raison de l'agencement radial des myofibrilles autour d'un axe de sarcoplasme contenant les noyaux; les mitochondries sont disposées soit à la périphérie, soit sans ordre particulier.

Les muscles alaires des Odonates et des Dictyoptères sont aussi de ce type. Ils contiennent des mitochondries énormes qui peuvent occuper jusqu'à 40 % du volume des fibres. Cette particularité est liée au taux élevé du métabolisme de ces muscles. Les muscles du vol des Hyménoptères, des Coléoptères, des Diptères, des Homoptères et des Hétéroptères sont caractérisés par des fibrilles de grand diamètre (5 μ). Les noyaux sont répartis entre les fibrilles, et les mitochondries sont volumineuses et appliquées contre les myofibrilles. La grande concentration de cytochromes dans ces muscles leur donne une couleur rose ou jaune.

Chez les larves d'Aptérygotes, dans les pattes de quelques adultes de Ptérygotes et dans les muscles alaires des Lépidoptères et des Orthoptères, les myofibrilles occupent le centre de la fibre musculaire, et les noyaux rejetés à la périphérie s'aplatissent contre le sarcolemme; les mitochondries, volumineuses, s'insinuent entre les myofibrilles; des trachéoles pénètrent dans les fibres musculaires.

Les muscles qui assurent le mouvement des organes internes, comme le cœur, le tractus digestif et l'appareil reproducteur, ont souvent une activité irrégulière et lente. L'une des particularités de ces muscles viscéraux est l'existence de relations entre les fibres musculaires voisines, soit à l'échelle cellulaire par des anostomoses, soit à l'échelle ultramicroscopique par des desmosomes.

Les muscles ont pour rôle essentiel d'assurer les fonctions du mouvement. Les différents modes de locomotion sont tributaires de jeux musculaires complexes. Certains Insectes sont capables de traîner ou de soulever des poids supérieurs à celui de leur propre corps. Les Insectes sauteurs font parfois des bonds de plus d'un mètre. Ces performances sont liées à leur faible taille; en effet, la puissance d'un muscle varie globalement avec le carré du diamètre de sa section et la masse de l'Insecte varie avec le cube de ce même diamètre. Plus la masse du corps diminue, plus les muscles gagnent en puissance. Le pouvoir absolu d'un muscle est défini par le poids maximal qu'il peut soulever par cm^2 de section. Le pouvoir absolu du muscle de la patte métathoracique de la grande sauterelle verte *(Tettigonia viridissima)* est de 4,7 kg/cm^2; à titre de comparaison, signalons que chez l'homme cette valeur varie entre 6 et 10 kg/cm^2.

A. Margiocco

A. Margiocco

▲ *Les différents modes de locomotion des Insectes sont tributaires de jeux musculaires complexes : la marche caractérise certains, comme ces fourmis et ces termites, aptères, que l'on voit en lutte, à gauche ; d'autres, comme le criquet* Locusta migratoria, *à droite, sautent pour se déplacer ou fuir rapidement.*

Marche

Chaque patte est capable d'exécuter différents types de mouvements : protraction, rétraction, extension, flexion, etc. Les forces utilisées pour la marche s'exercent dans différentes directions (forces horizontales, vers l'avant au niveau de l'articulation coxale, ou vers l'arrière au niveau du tarse, forces verticales vers le haut du muscle rétracteur de la patte, ou vers le bas au niveau du tarse, force axiale oblique, etc.). Quand un Insecte marche, ses pattes se meuvent dans un ordre défini, selon un double principe : les pattes symétriques se meuvent toujours en alternance, et aucune patte ne se lève tant que la patte qui lui succède n'est pas au sol. Les mouvements des pattes sont contrôlés par le système nerveux central et par les proprioccepteurs des pattes.

Saut

Les Orthoptères et quelques Coléoptères, Homoptères, Siphonaptères et Collemboles sautent pour se déplacer ou fuir rapidement. Chez les premiers, c'est la détente des pattes qui provoque le saut, chez les Collemboles, c'est celle d'un appendice abdominal complexe, la furca. Le saut du criquet, particulièrement spectaculaire, a été bien étudié. L'extension rapide du tibia métathoracique projette le criquet en l'air. La puissance de ce mouvement est due aux muscles extenseurs du tibia qui se logent dans le fémur dilaté ; ces muscles comprennent une série de courtes fibres insérées obliquement sur les apodèmes et qui exercent une force de 800 g au niveau des apodèmes. Chez la puce, les muscles du saut sont logés dans le thorax et déterminent le mouvement du fémur.

Reptation

Les larves de nombreux Insectes holométaboles progressent par reptation. Ce mode de locomotion implique une cuticule déformable et une musculature longitudinale appropriée, assurant la progression de vagues segmentaires de contraction. Chez les chenilles, l'action de la turgescence par afflux rythmique d'hémolymphe au niveau des pattes s'ajoute au jeu des muscles au niveau des fausses-pattes. Les méthodes de reptation varient selon les différents types de larves.

Nage

Parmi les Insectes aquatiques, la plupart nagent en pleine eau grâce aux mouvements des pattes métathoraciques et parfois des mésothoraciques. Les tarses et les tibias présentent un aplatissement antéro-postérieur et prennent l'aspect de palettes. Pour la nage, contrairement à ce qui se passe pour la marche, les deux pattes métathoraciques évoluent simultanément, exception faite cependant pour le Coléoptère *Hydrophilus.*

La force qu'exerce la patte dans l'eau est proportionnelle à sa surface et au carré de la vitesse de ses mouvements. La plupart des Insectes aquatiques ont un profil hydrodynamique, et sont aplatis dorso-ventralement, offrant ainsi un minimum de résistance à la pression de l'eau. Cet aplatissement favorise en outre la stabilité horizontale de l'Insecte. Le contrôle des plongées est assuré par les antennes, les yeux et les mécano-récepteurs des pattes. La vitesse de la nage varie selon les espèces. L'*Acilius* peut atteindre 35 cm/s et le gyrin 100 cm/s. De nombreuses larves aquatiques apodes progressent dans l'eau par des mouvements ondulatoires, souvent très complexes.

Locomotion à la surface de l'eau

Quelques espèces d'Insectes sont capables de se tenir à la surface de l'eau et même de s'y déplacer. *Podura aquatica,* un Collembole, possède une cuticule hydrofuge non mouillable. Un tube ventral, dépendant du premier segment abdominal, assure l'ancrage à la surface de l'eau, grâce à son extrémité mouillable. Les griffes des pattes, également mouillables, permettent la progression sur l'eau, tandis que l'Insecte accomplit des bonds grâce à la détente de sa furca caudale. Les autres Insectes aquatiques se déplacent à la surface de l'eau, soit en marchant normalement *(Hydrometra),* soit en utilisant leurs pattes mésothoraciques comme des rames mues synchroniquement *(Gerris).*

Vol

Chez les Arthropodes, le vol est l'apanage des seuls Insectes adultes. Les mouvements des ailes pendant le vol sont complexes ; les uns, mouvements d'abaissement et de relèvement, résultent de contractions et relaxations alternées des muscles dorso-ventral et basilaire du thorax, les autres sont dus à des torsions du thorax par

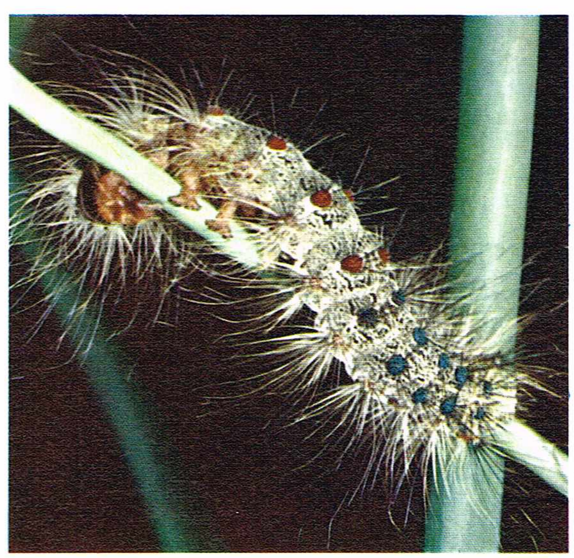

A. Allegri

▶ *Chez les chenilles et les larves de nombreux Insectes holométaboles, ici une larve de Limantridé, la progression se fait par reptation.*

des muscles verticaux et longitudinaux qui ne sont pas seulement liés au système alaire.

La fréquence des battements alaires varie considérablement selon les espèces; chez les papillons, on compte de quatre à vingt mouvements par seconde. Chez le criquet *Schistocerca*, de quinze à vingt, chez l'abeille et la mouche domestique environ cent quatre-vingt-dix. Chez *Forcipomyia*, un très petit Diptère, le nombre de battements d'ailes est de mille par seconde. Quand les battements d'ailes sont lents (de l'ordre de trente par seconde), chaque mouvement correspond à une impulsion nerveuse; quand ils sont plus rapides, chaque impulsion nerveuse est à l'origine d'une succession de contractions musculaires dites *myogéniques*, qui sont liées à la structure fibrillaire particulière des muscles du vol. Dans ce cas, la fréquence des battements d'ailes dépend des propriétés des muscles et non seulement du système nerveux.

Le vol est conditonné par de nombreux facteurs, les uns externes, les autres internes. Parmi les facteurs externes, il faut citer la lumière, la vitesse du vent, le degré hygrométrique, et la température; parmi les facteurs internes, l'état de développement de la musculature, la quantité de substances énergétiques disponibles, la température du corps, l'état de maturité sexuelle et le degré de satiété exercent une influence sur le vol.

Même lorsque toutes les conditions internes et externes sont favorables, le vol doit encore être suscité par quelques stimulations; l'intensité de la lumière ou le passage rapide de l'ombre à la lumière (rôle des nuages) peuvent suffire, mais la perception d'un stimulus plus précis est souvent nécessaire; la mouche tsé-tsé s'envole dès qu'elle perçoit le mouvement d'un objet quelconque qui rappelle l'hôte qu'elle cherche à piquer, même s'il s'agit d'un leurre grossier. La perception de l'odeur de la phéromone produite par la femelle, la plante-hôte ou l'animal-hôte déclenchent aussi l'envol. Chez les criquets migrateurs, l'agitation se propage de sujet à sujet et favorise les envols massifs. Des phénomènes internes, comme le taux de glucose sanguin, et des besoins alimentaires ou sexuels, poussent également les Insectes à s'envoler.

La vitesse de vol est différente selon les espèces; ainsi, le criquet *Schistocerca* peut atteindre 20 km/h, mais l'abeille ne dépasse pas 9 km/h et le moustique 5 km/h. L'Insecte peut voler chaque jour pour accomplir les déplacements nécessaires à sa survie : recherche de nourriture, parade sexuelle, ponte, soins à la progéniture; cependant, il arrive parfois que toute autre activité cessant, les Insectes accomplissent d'énormes déplacements migratoires. Le plus souvent ces vols s'effectuent par groupes compacts de milliers d'individus; les vols de vanesses, les migrations du papillon monarque *(Danaus plexippus)*, qui vole au printemps de la Californie vers le Canada, et inversement en automne, en sont deux exemples. En Afrique, les vols massifs de criquets (les sauterelles de la Bible) peuvent s'étendre sur 10, voire 100 et même 200 km² et peuvent progresser à raison de 40 km par jour.

I. Bucciarelli

▲ ***Un groupe de Coléoptères,*** **Aulonogyrus concinus*****; ces Insectes aquatiques nagent en tournoyant à la surface de l'eau.***

Reproduction

Chez les Insectes, les appareils génitaux mâles et femelles sont, à de rares exceptions près, portés par des individus différents; le gonochorisme est donc habituel.

Appareil reproducteur

Les éléments essentiels, les gonades, qui produisent les gamètes, et les gonoductes, ou conduits évacuateurs de ces gamètes, se développent précocement et de manière très comparable dans les deux sexes. Souvent, dès le début du développement embryonnaire, on voit apparaître au pôle postérieur de l'œuf un petit groupe de *cellules sexuelles primordiales*. Au cours de la différenciation des feuillets, ces cellules émigrent et vont constituer, le long d'une série de sacs cœlomiques abdominaux, deux groupes latéraux symétriques accolés au mésoderme, qui les enveloppera bientôt. Ainsi prennent naissance les deux ébauches des gonades qui, d'abord

J. Legrand

◀ ***Le vol caractérise, chez les Arthropodes, les seuls Insectes adultes; ici un Diptère,*** **Syrphus balteatus.**

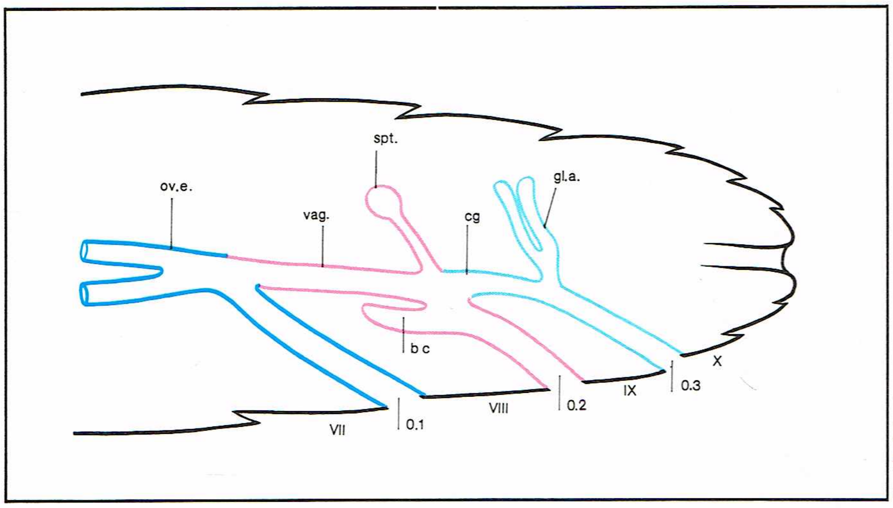

G. Hodebert

entières, sont secondairement subdivisées par des cloisons longitudinales en des lobes identiques, les futurs *ovarioles* et *lobes testiculaires*, plus ou moins nombreux.

Sous les gonades et en arrière, les diverticules cœlomiques ventraux, devenus jointifs, forment les ébauches des gonoductes qui s'étendent primitivement jusqu'à la paroi du dixième sternite, où elles restent attachées dans les embryons mâles. Dans les embryons femelles, ces ébauches, après dégénérescence de la partie distale, fixent leurs extrémités libres, renflées en ampoules, au bord postérieur du sternite VII. C'est beaucoup plus tard, pendant la vie larvaire seulement, que s'organise l'ensemble des voies et annexes génitales ectodermiques. Créé par une série d'invaginations, généralement impaires et médianes, de la paroi ventrale de l'abdomen, cet ensemble est très différent dans les deux sexes, très varié et souvent complexe.

Chez le sexe femelle, une première invagination tubulaire entre les sternites VII et VIII donne l'*oviducte médian ;* peu avant la mue imaginale, celui-ci se raccorde aux gonoductes, et les met directement en communication avec l'extérieur chez quelques Insectes primitifs (Éphéméroptères et Dermaptères), où l'orifice génital femelle est donc situé dans la membrane intersegmentaire VII-VIII. Mais bien plus souvent, après une régression précoce de sa partie postérieure, l'oviducte médian ne débouche plus au-dehors, mais dans une seconde invagination, laquelle, née entre les sternites VIII et IX, constitue le *vagin* avec ses annexes, la *spermathèque* toujours dorsale et, souvent, une *bourse copulatrice*. L'orifice génital se trouve alors dans la membrane intersegmentaire VIII-IX. Chez certains Insectes supérieurs, dont les Coléoptères, cet orifice est reporté à l'intersegment suivant (IX-X) par la répétition du même mécanisme au cours du développement : il y a dégénérescence de la partie postérieure du vagin, qui débouche dans une troisième invagination ; cette dernière est à l'origine de la *chambre génitale* et porte dorsalement des glandes annexes. Chez la plupart des Lépidoptères, où se forme ainsi un orifice de ponte en arrière du sternite IX, le vagin ne subit cependant aucune régression et conserve un orifice externe qui sert à la copulation.

Des pièces génitales externes, ou *genitalia* femelles, n'existent guère que chez les Insectes pourvus d'un véritable ovipositeur (Orthoptères, Hémiptères, Hyménoptères, etc.). Variable dans sa forme et ses dimensions relatives suivant le mode de ponte, l'ovipositeur est néanmoins toujours constitué par les appendices modi-

A. Margiocco

▼ ***Appareils reproducteurs mâle et femelle des Insectes. En trait épais, contour des voies ectodermiques ; les ovarioles des ovaires, normalement groupés, à gauche, ont été séparés, à droite, pour montrer leur structure : b, bulbe éjaculateur ; c.d et c.e, canaux déférent et efférent ; c.ej, canal éjaculateur ; ec, ectadénies ; f, follicules testiculaires ; ger, germarium ; gl.a, glandes annexes ; mes, mésadénies ; o, ovaires ; ov.e et ov.m, oviductes ectodermique et mésodermique ; pa, paramère ; ped, pédicelles ; ph, phallus ; s, filaments suspenseurs ; spt, spermathèque ; t, testicule ; vag, vagin ; vit, vitellarium ; v.s, vésicule séminale.***

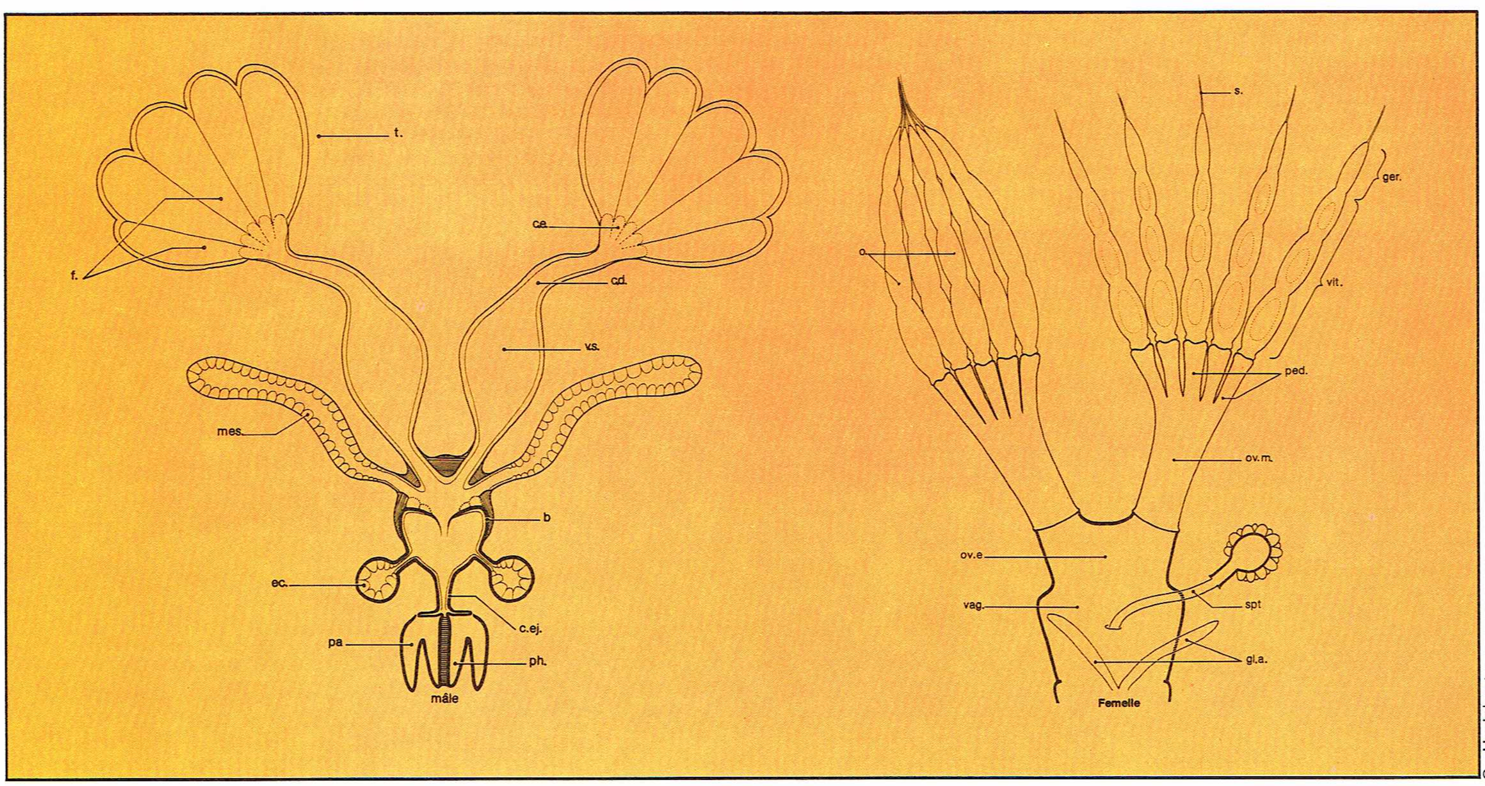

G. Hodebert

fiés des urites VIII et IX. Il comprend fondamentalement deux paires de *gonapophyses,* qui sont en général de longues lames coaptées et souvent dentées en scie, portées par des plaques basales, ou *gonocoxites,* articulées sur la paroi du corps. Une troisième paire de lames, les *styloïdes,* s'y trouvent adjointes dans bien des cas; elles ressemblent aux gonapophyses, mais sont de simples processus des gonocoxites IX.

Nombre de Coléoptères, de Lépidoptères et de Diptères ont un appareil de ponte différent, formé par les urites postérieurs, allongés, étroits et télescopés au repos dans le reste de l'abdomen.

Chez les mâles, les éléments ectodermiques de l'appareil génital se forment toujours, à de rares exceptions près, dans le territoire des sternites IX et X, où une invagination, d'ordinaire impaire et médiane, donne naissance au *canal éjaculateur.* Celui-ci se raccorde en avant aux gonoductes mésodermiques, et constitue, chez certains Insectes, un *bulbe éjaculateur* renflé, où débouchent des glandes annexes ectodermiques, les *ectadénies;* en arrière, il aboutit au *phallus* et s'y prolonge par le *canal séminal,* qui conduit à l'orifice génital. Organe copulateur très différent selon les espèces et, dans bien des cas, fort complexe, le phallus dérive en majeure partie d'une paire de lobes représentant sans doute les appendices embryonnaires de l'urite X. Chacun de ces lobes se subdivise en un lobe médian et un lobe latéral. L'accolement ultérieur des deux lobes médians, creusés d'une gouttière sur leur face interne, constitue un tube, ébauche du phallus proprement dit. Quant aux lobes latéraux, ils deviennent des pièces articulées, mobiles, en général crochues, les *paramères,* qui faciliteront, lors de l'accouplement, la fixation et l'intromission du phallus dans les voies femelles. Le phallus et les paramères représentent les *genitalia* mâles; leur examen est souvent indispensable pour parvenir à une discrimination précise des espèces.

◀ Page ci-contre, en haut, représentation schématique des voies génitales et de leurs annexes, chez les femelles d'Insectes. Suivant les groupes, on observe la formation d'une à trois invaginations tégumentaires; la première (en bleu) suivie d'une seconde (en orange) puis d'une troisième (en vert). Au cours de ce développement, par répétition du même mécanisme, les annexes se mettent en place successivement. ov.e, oviducte ectodermique; vag, vagin; spt, spermathèque; bc, bourse copulatrice; cg, chambre génitale; gl.a, glandes annexes; VII, VIII, IX, X, sternites d'origine; 01, 02, 03, orifices génitaux successifs. Page ci-contre, au milieu, abdomen de femelle de **Decticus verrucivorus** ***doté d'un ovipositeur long, en forme de sabre, adapté à la ponte des œufs dans le sol.***

	Mâle	Femelle
Gonades	— deux testicules composés de lobes, ou follicules testiculaires.	— deux ovaires composés d'ovarioles attachés à la paroi du corps par des filaments terminaux.
Voies mésodermiques	— canaux efférents (autant que de lobes); — deux canaux déférents localement renflés en vésicules séminales.	— pédicelles (autant que d'ovarioles); — deux oviductes en totalité ou en majeure partie latéraux.
Glandes génitales mésodermiques	— mésadénies (en général une paire).	— épithélium sécréteur des pédicelles et des oviductes latéraux, constituant parfois des glandes individualisées.
Voies et annexes ectodermiques	— canal éjaculateur, dans bien des cas renflé à l'avant en bulbe éjaculateur; — canal séminal prolongeant le précédent dans le phallus.	— oviducte commun; — vagin pouvant être localement dilaté en bourse copulatrice et portant la spermathèque; — chambre génitale.
Principales glandes génitales ectodermiques	— ectadénies (généralement paires).	— glandes annexes ou collétériques; — glande de la spermathèque.
Genitalia	— phallus et paramères.	— ovipositeur.

◀ Tableau comparatif du développement des appareils génitaux mâle et femelle de l'Insecte adulte. Bien que placés en regard, plusieurs éléments, notamment les voies et annexes ectodermiques, ne sont pas homologues.

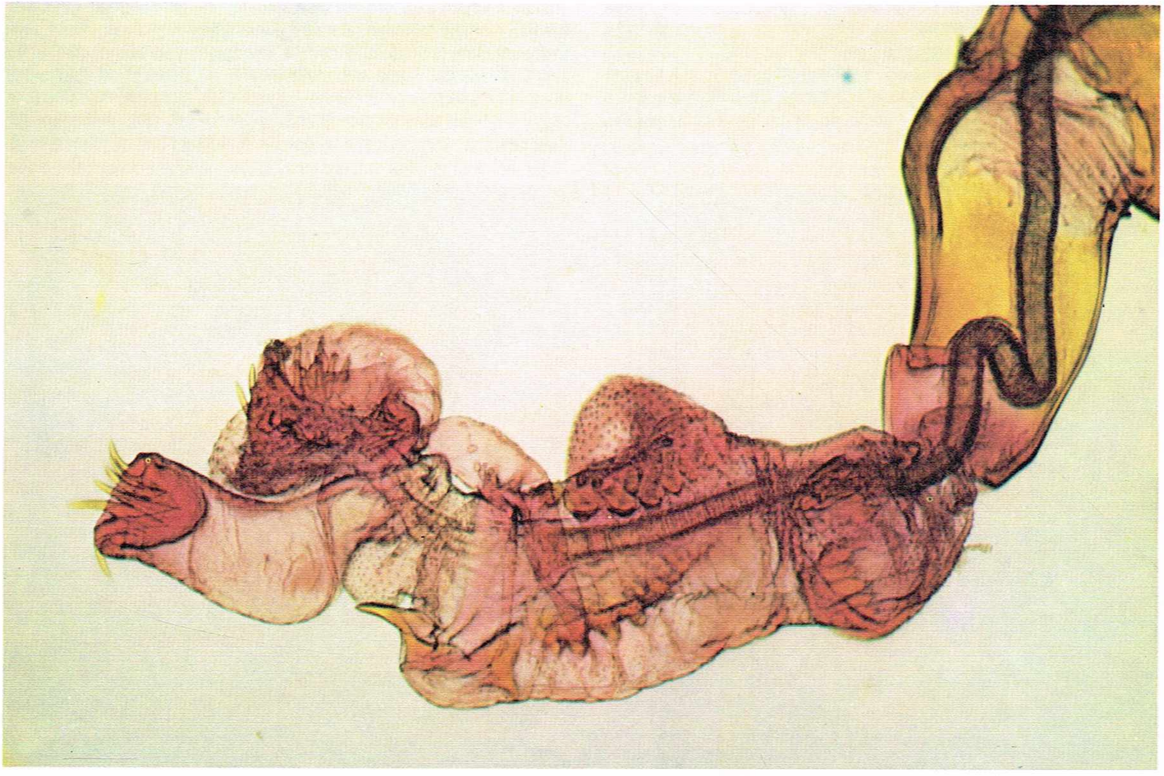

J. Carayon

◀ Le phallus des Insectes, ici celui de l'Hémiptère **Aptus mirmicoides,** ***a une conformation très variable et souvent compliquée; il porte dans bien des cas des épines crochues assurant sa fixation dans les voies génitales femelles.***

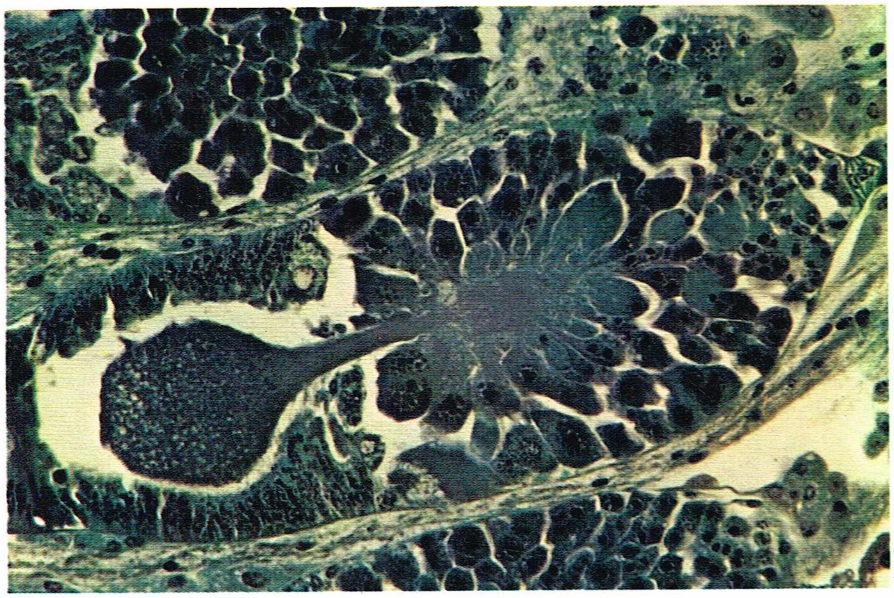

J. Carayon

▲ *Coupe longitudinale dans la région antérieure d'un ovariole* acrotrophique *de la punaise des lits* (Cimex lectularius) ; *on y voit un jeune ovocyte en relation avec les trophocytes groupés dans le germarium.*

Les testicules produisent d'ordinaire en grande abondance les spermatozoïdes nés de la multiplication et de la transformation progressive des cellules sexuelles primordiales. Chez beaucoup d'Insectes, les différentes phases de cette transformation, ou spermatogenèse, se succèdent régulièrement d'avant en arrière dans chacun des lobes testiculaires, dont le nombre varie, suivant les espèces, de un à plus de cent. On peut alors distinguer dans ces lobes quatre zones.

Dans la *zone apicale,* ou de multiplication, les cellules germinales sont accumulées contre une volumineuse « cellule apicale » ou contre un tissu apical, qui joue peut-être un rôle trophique. Elles se divisent et certaines, quittant vers l'arrière l'ensemble des autres, s'entourent d'une mince enveloppe de cellules dites « cystiques » et deviennent des spermatogonies. Chacune de celles-ci, après de nouvelles divisions, donne un nombre déterminé de spermatogonies filles, qui, enfermées dans l'enveloppe commune, forment un *cyste* et évolueront toutes en même temps.

Dans la *zone de croissance,* les spermatogonies grandissent et deviennent des spermatocytes.

Dans la *zone de maturation,* s'opère la méiose, qui réduit de moitié le nombre des chromosomes des spermatocytes et transforme ceux-ci en spermatides.

La *zone de transformation* est appelée ainsi en raison des profonds changements de forme et de structure qu'y subissent les spermatides avant de devenir des spermatozoïdes.

Chez presque tous les Insectes, les spermatozoïdes possèdent une queue fine, très longue et une tête à peine plus large, également filiforme. Leur taille, souvent bien supérieure à celle d'un spermatozoïde humain, peut atteindre près de 6 mm, chez certaines mouches du vinaigre par exemple. Il n'est pas rare que leur production, commencée durant la vie larvaire, s'achève dès le début de la vie imaginale. Ils s'accumulent dans les vésicules séminales, et, lors de l'accouplement, une partie d'entre eux, empruntant les voies génitales postérieures, s'y mélange aux sécrétions des glandes annexes et forme le sperme qui est expulsé au-dehors par la contraction des fibres musculaires entourant le canal éjaculateur.

Les diverses sécrétions des glandes annexes mâles sont toujours riches en mucoprotéines, et leurs fonctions sont variées. Bien souvent, elles assurent la protection des spermatozoïdes émis, en les englobant dans une masse, que l'on nomme *spermatophore* quand elle a une consistance solide et une forme définie. Tous les Orthoptéroïdes, tous les Lépidoptères et beaucoup d'autres Insectes produisent des spermatophores qui sont parfois très complexes. Il s'agit, dans certains cas, chez les grillons par exemple, de véritables petits appareils autonomes, dont certains éléments, gonflant au contact des sécrétions génitales femelles, expulsent à l'intérieur du vagin les spermatozoïdes contenus dans des sacs pourvus de conduits. Des substances élaborées par les glandes annexes mâles interviennent aussi dans l'activation des spermatozoïdes et peuvent contribuer à modifier la physiologie des femelles après l'accouplement.

Suivant les Insectes considérés, chaque ovaire comporte de un à plusieurs centaines d'ovarioles semblables, où l'on distingue habituellement une région antérieure de dimensions assez constantes, le *germarium,* et une région postérieure, le *vitellarium,* très variable en fonction de l'état physiologique de la femelle. La zone apicale du germarium ne contient que des cellules sexuelles, en général à l'état d'*ovogonies* qui se multiplient activement.

Dans les ovaires *panoïstiques* que possèdent beaucoup d'Insectes inférieurs, comme les Thysanoures, les Odonates, les Orthoptères et d'autres encore, les ovogonies produisent, par division, uniquement d'autres ovogonies. A la base du germarium, toutes deviennent de jeunes ovocytes et se mêlent à des cellules mésodermiques dites *folliculaires,* encore disposées sans ordre. Le vitellarium se compose essentiellement d'une file d'ovocytes en croissance, que les cellules folliculaires entourent maintenant d'une assise régulière, en les séparant les uns des autres par de petites masses de tissu *interfolliculaire.* Ce tissu, présent aussi en arrière du dernier ovocyte de la file, y constitue l'extrémité postérieure de l'ovariole proprement dit, lequel est une formation compacte et non pas un tube ouvert, comme on l'indique généralement. Les cellules folliculaires assurent le transfert des substances trophiques, permettant ainsi aux ovocytes d'accumuler

▼ *Chez de nombreux Lépidoptères, le dimorphisme sexuel se manifeste, outre la différence de taille, par des variations importantes de coloration, comme le montre cette illustration du mâle (à gauche) et de la femelle (à droite) d'*Anthocaris euphenoides.

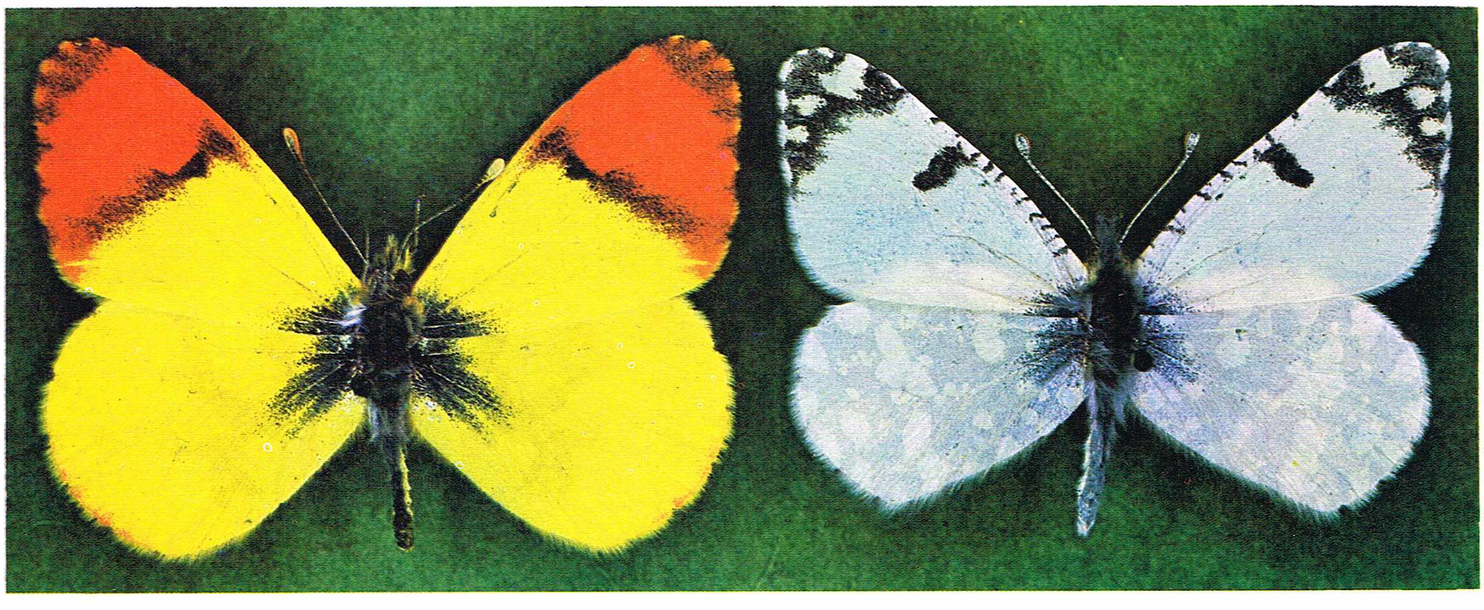

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

d'importantes réserves vitellines; une fois cette vitellogenèse achevée, elles sécrètent l'enveloppe dure de l'œuf, le *chorion*.

Dans les ovaires *méroïstiques,* les dernières divisions des ovogonies donnent naissance d'une part à des ovogonies filles, d'autre part à des *trophocytes,* cellules qui subissent des divisions supplémentaires en se modifiant plus ou moins et qui nourriront leurs sœurs devenues des ovocytes. Tantôt les trophocytes, accolés en nombre fixe à chaque ovocyte, passent avec lui dans le vitellarium; c'est le type *polytrophique,* rencontré chez beaucoup d'Insectes Holométaboles. Tantôt les trophocytes restent groupés près de l'apex du germarium et sont reliés par des *cordons trophiques* aux ovocytes en vitellogenèse dans le vitellarium; c'est le type *acrotrophique,* propre aux Hémiptéroïdes et à nombre de Coléoptères. Souvent, la nutrition des ovocytes est complétée grâce aux cellules folliculaires qui sont disposées comme dans les ovaires panoïstiques, et qui sécrètent ensuite le chorion.

Quand la choriogenèse est terminée, l'ovocyte possède la taille et la conformation d'un œuf mûr, dont on lui donne en général le nom; cependant la première division de maturation ne se produit d'ordinaire qu'à son début et s'achèvera seulement après la fécondation. Traversant par effraction le tissu fermant l'ovariole, puis le fond en cul-de-sac du pédicelle correspondant, cet « œuf mûr » quitte son enveloppe folliculaire et entre dans les voies génitales. C'est l'*ovulation,* qui a plus de points communs avec l'ovulation des Vertébrés qu'on ne le pensait naguère. Après le passage de l'œuf, les tissus lésés, où apparaît un pigment, cicatrisent vite en subissant des modifications; les restes de l'enveloppe folliculaire s'y incorporent et s'y résorbent, de telle sorte que l'ensemble constitue une masse, ou *corps jaune,* présentant une structure complexe en perpétuel remaniement.

Dans les pédicelles et les oviductes latéraux, où ils peuvent séjourner parfois longtemps, les œufs sont enduits par des sécrétions plus ou moins abondantes. C'est au moment de la ponte qu'ils traversent l'oviducte médian puis le vagin, où s'opère en général la rencontre avec les spermatozoïdes sortis de la spermathèque. Les glandes annexées aux voies ectodermiques femelles assument des fonctions variées, comme la production de substances qui fixent les œufs à des supports ou les enrobent dans une gangue protectrice, la destruction des spermatozoïdes excédentaires et, chez certains Insectes vivipares, l'alimentation des larves.

Caractères sexuels secondaires

Chez la plupart des Insectes, les deux sexes n'ont pas seulement des appareils reproducteurs différents; ils se distinguent aussi par de nombreux *caractères sexuels secondaires*. Les plus manifestes de ces caractères sont morphologiques et constituent le *dimorphisme sexuel* proprement dit. Ils portent sur la taille, l'aspect général, la pigmentation, la forme et les dimensions relatives des ailes, des appendices et des organes sensoriels, la présence d'appareils glandulaires, stridulants ou lumineux, propres à l'un des sexes, etc. Ce dimorphisme est souvent tellement accusé qu'il provoque des erreurs; ainsi, on pense parfois que le mâle et la femelle d'une même espèce sont des membres d'espèces ou même de genres distincts tant qu'on ne les a pas vus accouplés. Dans plusieurs groupes d'Insectes, les différences morphologiques entre les sexes atteignent un degré extrême; alors que les mâles conservent l'aspect habituel des représentants adultes de leur ordre, les femelles, dépourvues d'ailes, souvent vermiformes, ressemblent à des larves, comme c'est le cas chez les Strepsiptères, les Lépidoptères Psychidés, les Coléoptères Lampyridés; il arrive même, chez beaucoup de cochenilles, qu'elles ne présentent extérieurement plus aucun trait qui rappelle un Insecte.

Sans connaître encore la signification précise de tous les caractères morphologiques distinguant les mâles des femelles, on sait que la grande majorité d'entre eux est en relation plus ou moins directe avec la reproduction et particulièrement avec la vie sexuelle : appels, reconnaissance des sexes, incitation à l'accouplement, contention des femelles, etc. Il en est de même pour les nombreuses différences sexuelles autres que morphologiques, notamment celles qui concernent le comportement, la nutrition, le métabolisme et la composition chimique, comme par exemple, l'existence de protéines propres à l'un des sexes. En règle générale, les mâles ont une motilité plus grande et une vie plus brève que les femelles. Chez celles-ci, la nutrition, qui conditionne la fécondité, est plus importante; aussi l'alimentation diffère-t-elle quantitativement et parfois qualitativement de celle des mâles, comme le montre, entre autres, le cas bien connu des moustiques, chez lesquels seules les femelles se nourrissent de sang.

Les caractères sexuels secondaires des Insectes peuvent, chez certains Hyménoptères, Diptères et Homoptères, être modifiés ou inversés par le parasitisme, mais, à la différence des Vertébrés et de nombre d'autres Animaux, ils semblent en général indépendants de toute influence hormonale. Le ver luisant, *Lampyris noctiluca,* dont la femelle larviforme diffère beaucoup du mâle, constitue une remarquable exception; le tissu apical des testicules y produit en effet une hormone « androgène »; si on l'implante dans des larves femelles, il les transforme en mâles.

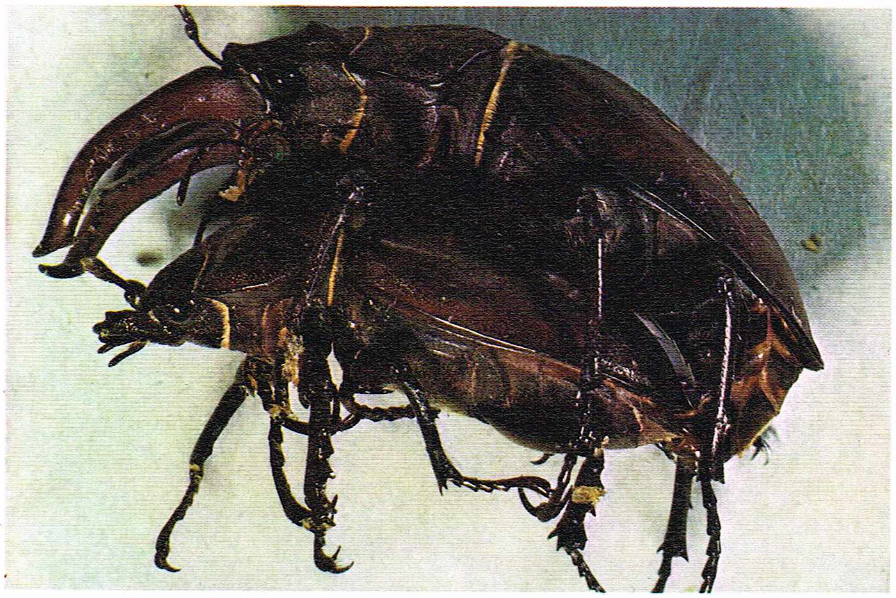

J. Carayon

▲ ***Accouplement de « cerfs volants »* (Lucanus cervus) *; le dimorphisme sexuel tient ici à l'énorme développement des mandibules chez le mâle.***

Accouplement. Insémination. Fécondation

L'accouplement aboutit au dépôt par le mâle de sperme dans l'organisme de la femelle. Constituant sans doute une adaptation à la vie terrestre, l'accouplement n'avait pas lieu chez les ancêtres aquatiques des Insectes et n'existe toujours pas chez les Aptérygotes actuels; ces derniers sont des Animaux terrestres qui, du point de vue évolutif, se trouvent encore à une étape intermédiaire de la conquête du milieu aérien. Tous les Aptérygotes réalisent l'insémination par *transfert indirect de spermatophores,* souvent sans la moindre attraction ou interaction entre individus de sexes opposés. Chez les Ptérygotes au contraire, dans le cas le plus fréquent de la reproduction sexuée, il y a toujours accouplement après un rapprochement où le mâle joue d'ordinaire le rôle le plus actif.

Alors que de nombreux facteurs externes et internes conditionnent l'activité sexuelle des Insectes, celle-ci ne dépend guère de l'état des gonades, surtout chez les femelles, auxquelles il arrive d'être inséminées longtemps avant que leurs ovaires fonctionnent. Les mâles deviennent en général aptes à l'accouplement peu après la mue imaginale, dès que leurs glandes annexes sont complètement développées. Ils peuvent alors, sous la seule influence d'une motivation interne, se mettre en quête de femelles. Mais dans la plupart des cas, leur recherche est déclenchée puis guidée par des stimuli olfactifs, visuels ou auditifs émanant des femelles. Chez un grand nombre d'Insectes, chez beaucoup de Lépidoptères, mais aussi chez des Diptères, des Hyménoptères, des Coléoptères, des Hémiptères, des Orthoptères et des Dictyoptères, les femelles produisent des substances odorantes, les *phéromones sexuelles* qui attirent les mâles de leur propre espèce. Comme Fabre fut un des premiers à le montrer par ses observations sur le grand paon de nuit, cette attraction peut s'exercer à des distances de l'ordre du kilomètre et exceptionnellement d'une dizaine de km,

J. Carayon

▲ *« Offrande nuptiale » chez l'Hémiptère* Stilbocoris natalensis *; le mâle présente à la femelle une graine de figue, très alléchante pour elle, qu'il a « préparée » en y injectant sa salive.*
▼ *Schéma de l'appareil génital, du système paragénital, et de la migration des spermatozoïdes dans l'abdomen femelle chez un Hémiptère Cimicidé à insémination traumatique : l'oviducte droit a été coupé et enlevé avec l'ovaire correspondant pour laisser voir le spermalège : c, cicatrice ; ec, ectospermalège ; cop, organe copulateur (figuré par la flèche blanche) ; ad, cellules adipeuses modifiées entourant une masse de cellules sanguines (en rouge) ; mes, mésospermalège ; cs, conceptacles séminaux dans lesquels viennent s'accumuler les spermatozoïdes après avoir suivi le chemin figuré par les flèches noires ; vag, vagin en dehors duquel le sperme est déposé chez ces Insectes ; od, oviductes ; ov, ovaires dans lesquels les spermatozoïdes parviennent et où ils fécondent les ovocytes.*

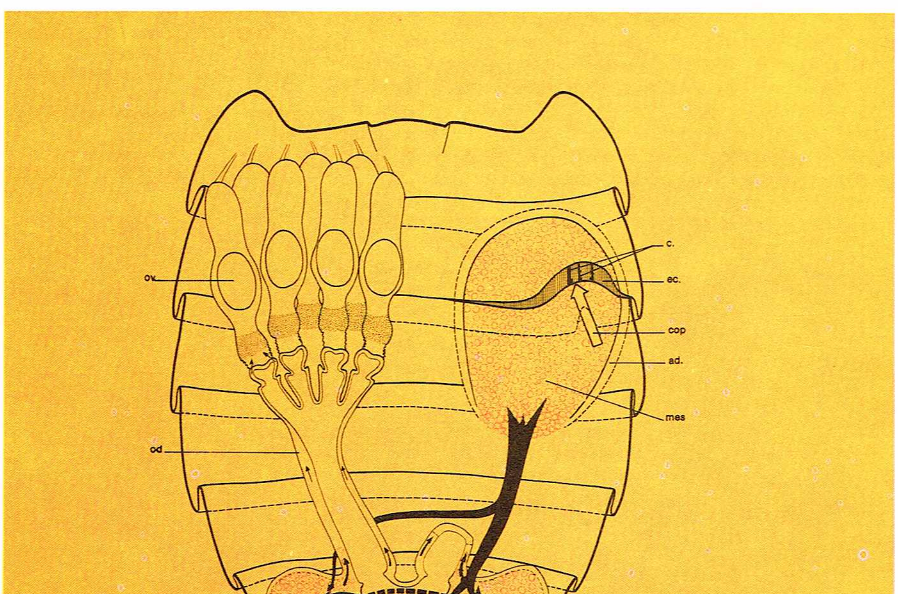

G. Hodebert

car les substances en cause agissent à des doses infinitésimales sur les récepteurs antennaires des mâles. On a aujourd'hui analysé chimiquement et même fait la synthèse de nombreux attractifs sexuels tels que le bombykol et le gyplure en raison de l'intérêt qu'ils peuvent présenter pour la lutte contre les Insectes nuisibles.

Les stimuli visuels n'agissent qu'à une distance bien moindre. Ils sont créés, par exemple chez beaucoup de papillons diurnes, par les couleurs et les mouvements des ailes des femelles. Les émissions lumineuses nocturnes à l'aide desquelles les femelles de Lampyridés et d'autres Coléoptères attirent les mâles, diffèrent d'une espèce à l'autre par leurs longueurs d'onde et par leur rythme.

Nombre d'Insectes, surtout des mâles, produisent des signaux sonores variés, qui servent, entre autres fonctions, à appeler un partenaire sexuel.

Les stimuli attractifs, quand ils existent et sont réellement spécifiques, permettent en général aux mâles de reconnaître les femelles de leur propre espèce. Mais, souvent, cette reconnaissance n'a lieu, grâce à d'autres stimuli, tactiles notamment, qu'une fois les partenaires en contact ou presque. Elle peut être très imparfaite, ce qui explique la grande fréquence des tentatives d'accouplement homosexuel, qui vont parfois chez la punaise des lits et chez les Hémiptères apparentés jusqu'à l'insémination d'un mâle par un autre.

Même chez les Insectes où les mâles ont un comportement sexuel agressif et brutal, l'accouplement ne s'effectue d'ordinaire que si la femelle est « réceptive ». Cette réceptivité dépend, entre autres facteurs, de son état physiologique et surtout d'une précédente insémination. Elle peut être en effet inhibée temporairement ou définitivement par la présence du sperme déjà déposé dans les voies génitales. Chez d'assez nombreuses espèces, surtout des Diptères, les femelles ne s'accouplent qu'une fois au cours de leur vie. Aussi, dans certaines régions, a-t-on pu faire disparaître des mouches nuisibles en lâchant des mâles stérilisés par des radiations ionisantes, mais encore capables de copuler.

Même lorsque les femelles sont réceptives, chez de nombreux Insectes, les mâles doivent encore les inciter à accepter l'accouplement. Les moyens dont ils disposent pour ce faire sont constants dans une espèce donnée, mais d'une extrême diversité.

L'étude des différents ordres d'Insectes fournit à ce propos de nombreux exemples, dont il suffit d'indiquer ici les principaux.

Des phéromones « aphrodisiaques » sont sécrétées par des glandes propres aux mâles et agissent en effluves chez certains Hémiptères et Coléoptères. Chez de nombreux papillons, des écailles spéciales et odorantes, les *androconies,* se fixent sur les antennes des femelles.

Lors des comportements de cour et des parades nuptiales, les mâles peuvent exhiber une ornementation particulière, stimulant surtout visuellement leur partenaire ; il faut y rattacher les « chœurs de danses », dont l'effet est sans doute plus complexe, exécuté par de nombreux mâles d'une même espèce, auxquels viennent se mêler quelques femelles.

Des stimulations gustatives ou alimentaires sont produites par des substances ou des objets alléchants que le mâle offre le plus souvent à la femelle, qui s'en nourrit avant et pendant l'accouplement. Ces *offrandes nuptiales,* dont les rites peuvent être complexes, portent sur la sécrétion de glandes spéciales chez certaines blattes et chez des grillons, sur des goutelettes de salive chez les panorpes, sur des graines chez des Hémiptères du genre *Stilbocoris* ou sur des proies préalablement capturées et parfois enveloppées de soie, chez les Diptères Empididés notamment.

Il faut signaler également des stimulations tactiles très variées, qui résultent, par exemple, de frôlements d'antennes ou de palpes.

En ce qui concerne l'accouplement même, les conditions dans lesquelles il s'effectue, la posture des partenaires, sa durée et son mécanisme varient beaucoup suivant les Insectes considérés. Le plus souvent, au moins au début, le mâle chevauche la femelle qu'il agrippe avec ses pattes antérieures, puis il prend la position habituelle à son espèce, soit sur le dos de sa partenaire, soit, moins fréquemment, contre son ventre ou à côté d'elle ; ou bien encore, le mâle et la femelle se trouvent opposés par les extrémités des abdomens. Comme ces postures dépendent

de la position des orifices génitaux et des appareils copulateurs, elles sont fort étranges chez certains Insectes, tels que les libellules.

Durant l'accouplement, dont la durée, assez constante chez une espèce donnée, varie d'une dizaine de secondes à plusieurs jours, le mâle introduit d'ordinaire son pénis évaginé dans les voies génitales femelles, puis y injecte le sperme ou le spermatophore. C'est la première phase de l'*insémination,* ensemble des processus relatifs au sperme et se déroulant à l'intérieur du corps de la femelle jusqu'à l'union des gamètes, ou *fécondation* proprement dite. Les spermatozoïdes, bientôt libérés du spermatophore, dont l'enveloppe vide est détruite sur place ou expulsée, se trouvent peu après accumulés dans la spermathèque. Ils peuvent y rester vivants et mobiles fort longtemps, parfois des années dans le cas de la reine d'abeille. Lors de la ponte, quelques-uns d'entre eux, quittant la spermathèque, parviennent dans le vagin au moment du passage d'un œuf, où ils pénètrent par les micropyles pour assurer la fécondation. Au cours de ces déplacements dirigés, les spermatozoïdes émigrent vers des substances qui les attirent ou sont propulsés par la contraction des fibres musculaires entourant certaines des voies et des annexes génitales.

Chez la punaise des lits et chez d'autres Hémiptères Cimicoidea qui sont ses parents plus ou moins proches, les mâles possèdent une pièce copulatrice acérée, en forme d'aiguille hypodermique. Pendant l'accouplement, ils n'introduisent pas cette pièce dans le vagin, mais s'en servent pour perforer le tégument abdominal de la femelle, puis ils injectent une grande quantité de sperme dans le corps de celle-ci, toujours en dehors des conduits et organes génitaux proprement dits. Aussi les spermatozoïdes doivent-ils suivre, par voie sanguine surtout, un trajet étrange et compliqué avant d'atteindre les ovocytes. Chez la plupart des Hémiptères présentant de telles *inséminations extragénitales traumatiques,* des formations sans équivalent chez les Insectes à insémination normale se sont différenciées au cours des temps dans l'organisme femelle. Les unes, nommées *spermalèges,* s'observent au niveau de la paroi abdominale. Très variables suivant les espèces considérées quant à leur position et leur degré de complexité, elles comprennent une partie tégumentaire, souvent en forme de poche ou de tube, et une masse sous-jacente, surtout constituée de cellules sanguines plus ou moins modifiées. Les mâles enfoncent leur phallus dans la première et injectent le sperme dans la seconde, qui, un peu plus tard, laisse en général les spermatozoïdes émigrer dans le sang. Ceux-ci arrivent enfin à d'autres formations spéciales, elles aussi en partie sanguines, les *conceptacles séminaux,* qui sont des poches saillant à l'extérieur des voies génitales ; ils s'y accumulent puis les quittent peu à peu pour aller féconder les ovocytes, en cheminant dans la paroi des oviductes et des pédicelles. Spermalèges et conceptacles séminaux sont les principaux éléments du *système paragénital,* propre aux Insectes à insémination traumatique.

Chez les Strepsiptères, on observe des phénomènes analogues, mais bien plus simples et uniformes, associés à un système paragénital rudimentaire.

Quand il y a insémination extragénitale, ainsi que dans un certain nombre d'autres cas, les spermatozoïdes pénètrent en général dans les ovocytes, alors que ces derniers sont encore à l'intérieur des ovarioles et dépourvus de chorion. Aussi le développement embryonnaire commence-t-il précocement et se poursuit-il jusqu'à un stade plus ou moins avancé avant la ponte.

Bien plus souvent, la fécondation n'a lieu que dans les voies génitales, après le dépôt du chorion, et les spermatozoïdes doivent emprunter les micropyles pour entrer, d'ordinaire à plusieurs, dans chaque ovocyte, qu'un seul d'entre eux fécondera effectivement.

Production des œufs, ponte

C'est en général après la ponte seulement que les œufs d'Insectes peuvent être bien observés. Ils présentent une extraordinaire diversité de taille, de forme, de couleur et d'ornementation.

Presque tous les œufs d'Insectes appartiennent au type *centrolécithe.* Leur vitellus, fort abondant, occupe tout le centre et ne laisse libre qu'une mince couche de cytoplasme périphérique, entouré par la très fine *membrane vitelline.* Le *chorion,* sécrété par les cellules folliculaires, constitue une seconde enveloppe, d'ordinaire beaucoup plus épaisse et beaucoup plus dure ; sa surface peut être lisse ou alvéolée, ou encore sculptée de telle manière que l'œuf a exactement l'aspect de certaines graines ; les œufs de phasmes ressemblent ainsi à des graines d'Ombellifères. Dans bien des cas, on peut observer au pôle antérieur un opercule que la larve soulèvera comme un couvercle au moment de l'éclosion. Le chorion diffère beaucoup de la cuticule par sa structure et sa composition, mais présente aussi deux couches principales. La première, l'*exochorion,* contient surtout une lipoprotéine, la *chorionine,* comparable à la « cuticuline » de l'épicuticule ; la seconde, l'*endochorion,* se subdivise en strates de compositions distinctes, riches en protéines « tannées » associées à des polyphénols.

Sur une partie ou sur la totalité de son épaisseur, le chorion présente, chez beaucoup d'Insectes, une structure alvéolée, parfois très complexe, qui peut notamment permettre à l'air de circuler, et même parfois de former une réserve en cas d'immersion provisoire de l'œuf. Mais la respiration de l'embryon est surtout rendue possible par la présence fréquente de fins canaux traversant le chorion, les *aéropyles,* localisés d'ordinaire au pôle antérieur. Dans la même région de l'œuf, un à plusieurs autres canaux, les *micropyles,* servent à la pénétration des spermatozoïdes lors de la fécondation.

Une femelle pond, au cours de sa vie, de un à plusieurs dizaines de millions d'œufs suivant les espèces considérées. Il y a une certaine indépendance entre la taille d'un Insecte et celle de ses œufs ; ceux-ci sont souvent d'autant plus petits qu'ils sont produits en grande quantité.

Le nombre total d'œufs qu'une femelle pond au cours de sa vie diffère considérablement suivant les Insectes étudiés. Au sein d'une même espèce, il dépend aussi de nombreux facteurs externes et internes dont seuls les principaux peuvent être mentionnés.

L'*alimentation,* tant par sa qualité (teneur en glucides, lipides, protides, en stéroïdes, en vitamines, en sels minéraux, etc.) que par sa quantité, influence toujours beaucoup et de diverses manières la production des œufs. Les besoins alimentaires des Insectes au cours de cette période, très variés dans l'ensemble, sont, pour chaque espèce, ceux que satisfait le régime alimentaire habituel mais ils sont parfois accrus et modifiés ; ainsi chez les moustiques, l'hématophagie est propre aux femelles.

L'*accouplement* augmente en général très notablement la production des œufs et leur ponte, déjà stimulées chez les femelles de certains Insectes par la seule présence des mâles. Dans un assez grand nombre d'espèces, les femelles vierges ne pondent pas.

Les *facteurs écologiques,* principalement la température, la photopériode et le degré hygrométrique, ont aussi une grande importance. Tant que ces facteurs demeurent en dessous d'un certain « seuil », variable selon les espèces, ils empêchent la maturation ovarienne et induisent la diapause, ou la quiescence génitale. Lorsque leurs valeurs augmentent, ils accroissent de plus en plus la production des œufs jusqu'à un maximum correspondant à un niveau optimal, puis ils la diminuent.

La *densité de population* a des effets complexes et divers ; lorsqu'elle est élevée, elle abaisse le plus souvent la fécondité, qui diminue aussi avec l'âge des femelles.

Ces facteurs présentent entre eux des corrélations multiples. Leur effet sur la vitellogenèse et la production des œufs, quelquefois direct, s'exerce dans la plupart des cas par l'intermédiaire du système nerveux central et des formations endocrines.

Les conditions et les modalités de la ponte, également appelée *oviposition,* sont, chez les Insectes, presque aussi diverses que les espèces. En règle générale, les femelles déposent leurs œufs de telle sorte que les larves qui en sortiront aient le maximum de chances de survivre et de se développer. Leur comportement, souvent modifié dès que l'appareil génital renferme des œufs mûrs, est donc ordinairement adapté à la recherche et au choix d'un milieu propice non seulement à la ponte puis à la conservation des œufs, mais aussi à l'alimentation des larves. Les femelles sont guidées dans cette recherche par des stimuli très variés, chimiques, mécaniques, optiques, qui agissent seuls ou ensemble et auxquels elles montrent une sensibilité parfois extraordinaire.

Ainsi, presque chaque espèce de moustique a ses propres exigences quant à la nature et à la teneur en

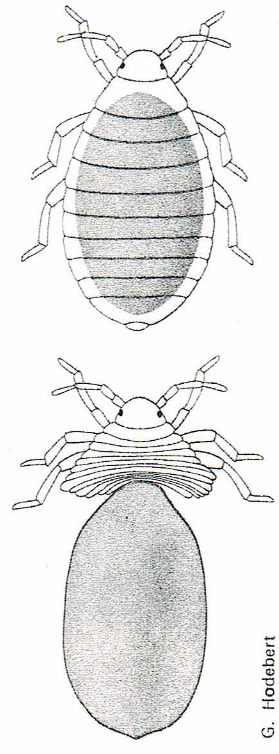
G. Hodebert

▲ ***Représentation schématique d'une femelle aptère de puceron lanigère* (Eriosoma lanigerum) *pondant un unique et relativement énorme « œuf d'hiver ».***

I. Bucciarelli

A. Margiocco

▲ *A gauche, femelle de Coléoptère* Melasoma populi *en train de pondre ; à droite, œufs de* Pieris sp.*, vus à un très fort grossissement.*

substances dissoutes des eaux où se développent ses larves. Or, les femelles ne peuvent déposer leurs œufs que là où elles ont « reconnu » les teneurs nécessaires, grâce à des terminaisons sensorielles, dont certaines, situées sur les tarses, permettent par exemple à *Culex pipiens* de percevoir des différences de concentration en sel (NaCl) de l'ordre du gramme par litre.

Chez nombre d'Insectes phytophages inféodés à un petit groupe de plantes, les femelles pondent exclusivement sur ces plantes, en manifestant de plus une préférence pour l'espèce végétale dont elles-mêmes se sont nourries pendant leur vie larvaire.

Souvent, on ignore encore quelles perceptions extrêmement subtiles permettent à certains Insectes de découvrir l'endroit précis où doivent être déposés leurs œufs. Tel est le cas pour les *Rhyssa* et autres Hyménoptères Ichneumonidés, parasites de larves qui creusent dans les troncs d'arbres de profondes galeries sans communication avec l'extérieur. A travers une épaisseur de bois de plusieurs centimètres, les femelles de ces Ichneumonidés discernent l'emplacement exact d'une larve, puis fixent sur celle-ci un œuf, après avoir enfoncé leur longue tarière dans le tronc.

C'est le système nerveux central, où s'intègrent les perceptions des stimuli externes et les informations internes provenant de l'organisme de la femelle, qui contrôle la ponte. Il la bloque, même si les voies génitales contiennent de nombreux œufs mûrs, tant que les conditions nécessaires ne sont pas réunies. Chez certains Insectes, il peut aussi, par l'intermédiaire d'hormones, adapter la production des œufs à la quantité de matériaux trophiques disponibles pour le développement des larves.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ *Exemple de galle provoquée par les Insectes qui ont déposé leurs œufs sur les feuilles d'une plante soigneusement choisie.*

Un assez grand nombre d'Insectes pondent sans assurer une protection particulière à leurs œufs. Ceux-ci, suivant les espèces, sont déposés isolément ou en groupes qui peuvent avoir une configuration caractéristique comme les « nacelles » des moustiques Culicinés qui flottent à la surface des eaux. Fréquemment, une substance adhésive colle les œufs au substrat ; elle est abondante autour des œufs de poux, qu'elle attache solidement aux poils de l'hôte ; chez les Chrysopes (Névroptères) elle forme le long pédicule dressé qui maintient en l'air chacun des œufs.

Cependant, le plus souvent, les œufs sont dissimulés ou abrités et cela de manières si diverses que seuls quelques cas peuvent être mentionnés ici. Le camouflage, fréquemment assuré à l'aide de particules terreuses, d'excréments, de poils ou de matières diverses, s'opère fort curieusement chez une mouche du genre *Villa ;* la femelle possède au niveau de l'orifice génital une poche spéciale qu'elle remplit de sable fin avant de pondre ; les œufs arrivent ensuite dans cette poche et s'y enduisent de sable, puis, en volant, la femelle les projette dans des anfractuosités du sol, où il est impossible de les discerner.

De très nombreux Insectes abritent leurs œufs dans le sol, soit en utilisant des cavités préexistantes, soit en creusant eux-mêmes un trou où les œufs sont déposés tantôt isolément, tantôt en groupes, souvent, dans ce dernier cas, sous forme d'*oothèque ;* c'est ainsi qu'on nomme une masse d'œufs enveloppés dans une couche généralement épaisse de sécrétion émise et disposée par la femelle lors de la ponte, puis qui durcit à l'air. Très variées d'aspect, mais fréquemment caractéristiques de l'espèce qui les a produites, les oothèques, enfoncées en terre chez les Acridiens, fixées à des supports variés chez les mantes et chez certaines punaises, restent engagées en partie dans les voies génitales de la mère chez beaucoup de blattes.

Bien des Insectes, principalement des phytophages, protègent leurs œufs, à la fois contre la dessiccation et contre les prédateurs ou les parasites, en les insérant jusqu'au pôle antérieur dans l'épaisseur de tissus végétaux vivants. Chez certaines des espèces dont les larves parasitent d'autres Animaux, les femelles procèdent à peu près de la même façon en pondant directement dans le corps de l'hôte ou dans ses œufs. Mais parmi les Insectes « parasites », il existe beaucoup d'autres modes de ponte qui, souvent en corrélation étroite avec les comportements larvaires, assurent de manières très diverses l'infestation des hôtes.

Si la plupart des Insectes ne font, au mieux, que déposer leurs œufs à l'abri et dans des milieux favorables aux larves, d'autres s'occupent plus longtemps et plus activement de leur descendance, à laquelle ils dispensent des soins parentaux. Ceux-ci, quelquefois assumés par les deux parents, sont en général uniquement maternels. Ces soins, assez stéréotypés dans une espèce donnée,

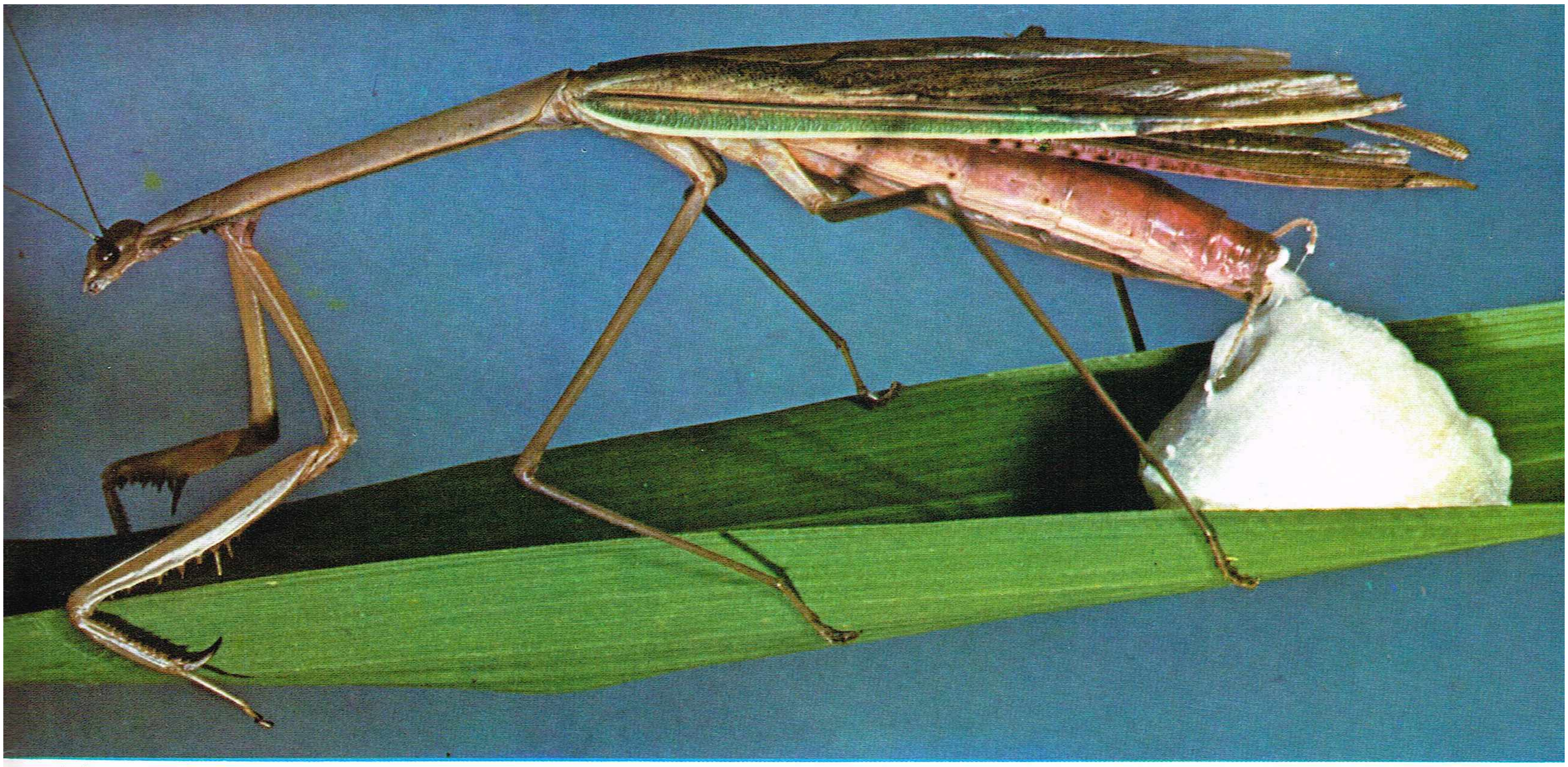

J. Carayon

▲ *Femelle d'une mante tropicale,* **Tenodera superstitiosa,** *fabriquant son oothèque.*

mais très variés dans l'ensemble, montrent, quand on les étudie comparativement, une tendance à se perfectionner et à se prolonger jusqu'à la fin du développement de la génération suivante. Seuls les principaux types de soins parentaux sont décrits ci-dessous.

Les femelles de Dermaptères et d'Embioptères assurent aux œufs une protection active et des soins. On peut y rattacher le cas particulier de certains bélostomes, Hémiptères aquatiques chez lesquels le mâle porte sur son dos jusqu'à leur éclosion les œufs qu'y a fixés la femelle; il les protège et, par ses mouvements, assure le renouvellement de l'eau autour d'eux.

Des provisions alimentaires pour le développement des larves sont faites le plus souvent avant la ponte par divers Coléoptères comme les nécrophores et les Scarabéidés coprophages ainsi que beaucoup d'Hyménoptères, tels les pompiles, les Sphégiens, les guêpes et les abeilles solitaires. Les modalités extrêmement variées de ce type d'opération permettent de retracer l'évolution des comportements, et montrent la tendance à l'édification de terriers ou de nids de plus en plus élaborés.

Chez les « Insectes sociaux », comme les termites, les fourmis et les abeilles, les larves sont alimentées au jour le jour jusqu'à leur complet développement. Les soins parentaux atteignent là leur plus haut degré d'évolution, et constituent la fonction essentielle de ces sociétés; ils ne sont d'ailleurs pas seulement alimentaires mais multiples et dispensés aussi aux œufs.

Modes particuliers de reproduction

Le type de reproduction précédemment étudié est de beaucoup le plus répandu chez les Insectes. Ce type présente trois caractères principaux : l'*amphigonie,* c'est-à-dire la fécondation obligatoire des œufs par des spermatozoïdes, le *gonochorisme,* qui exprime le fait que spermatozoïdes et œufs proviennent d'individus différents, les uns mâles, les autres femelles, et enfin, l'*oviparité,* ou ponte des œufs qui ne commencent à se développer qu'après avoir quitté l'organisme maternel. Les divers modes particuliers de reproduction diffèrent du type général quant à un ou plusieurs de ces trois points.

Hermaphrodisme. On ne connaît, parmi les Insectes, que trois cas où les gonades mâles et femelles coexistent normalement dans un même individu. Rudimentaire chez le Plécoptère *Perla marginata,* dont seules les larves mâles ont des ébauches d'ovaires le long des testicules, l'hermaphrodisme est, en revanche, fonctionnel chez les Diptères du genre *Termitoxenia* et chez les cochenilles du genre *Icerya.* Les premiers, après l'éclosion imaginale, produisent d'abord des spermatozoïdes, ont un comportement mâle, puis, leurs ovaires se développant, ils acquièrent l'aspect et la physiologie de femelles. Les gonades de la plupart des spécimens d'*Icerya* produisent simultanément des spermatozoïdes au centre et des ovocytes à la périphérie, de telle manière qu'il y a autofécondation. Il existe aussi, en faible proportion, des individus uniquement mâles qui peuvent s'accoupler avec les hermaphrodites.

L'*intersexualité* et le *gynandromorphisme* sont des anomalies qui ne vont jamais jusqu'à l'hermaphrodisme fonctionnel.

Viviparité. Dans son acception la plus large et aussi la plus simple, retenue ici, ce terme désigne un mode de reproduction où le développement embryonnaire commence au moins dans l'organisme maternel. Mais, chez les Insectes, comme chez d'autres Animaux, la viviparité et les catégories qu'on a voulu y établir restent impossibles à définir avec précision, faute de critères satisfaisants. Entre la ponte d'œufs en début de segmentation et la mise bas de larves à la fin de leur développement, on trouve pratiquement tous les intermédiaires. Suivant les espèces considérées, les embryons peuvent se développer à l'intérieur de la mère, à n'importe quel niveau de son appareil génital et même en dehors de celui-ci. Ils peuvent se nourrir uniquement des réserves vitellines des œufs (on parle alors d'*ovoviviparité*) ou utiliser, soit en complément, soit exclusivement, des substances nutritives directement fournies par l'organisme maternel de manières très diverses (il s'agit, dans ce cas, de la viviparité au sens strict).

Les cas généralement rapportés à l'ovoviviparité sont les plus nombreux. Ils s'observent chez l'éphémère *Chloeon dipterum* et chez certains représentants des Dictyoptères, des Dermaptères, des Psocoptères, des Thysanoptères, des Hémiptères, des Coléoptères, des Diptères et des Lépidoptères. Une simple rétention des œufs, souvent associée à leur fécondation précoce dans

▼ *Mâle de Belostome* **Hydrocyrius colombiae** *portant les œufs que la femelle a pondus sur son dos.*

M. Boulard

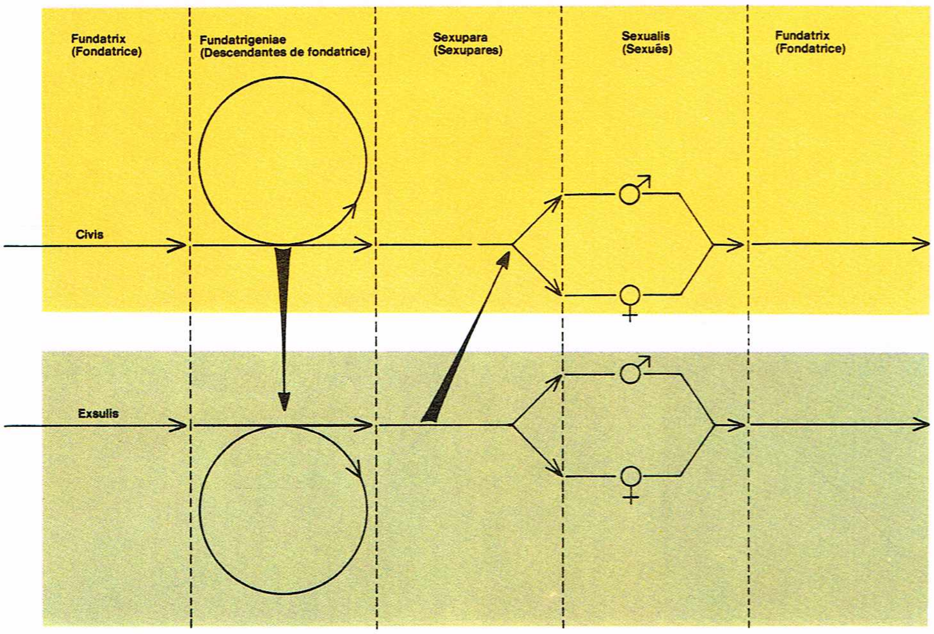

J. Boudinot

▲ *Diagramme général de la succession des générations chez un puceron hétérogonique effectuant des migrations (flèches élargies à la base) entre sa plante, hôte primaire, et une plante hôte secondaire.*
▼ *Cycle hétérogonique d'un Diptère à larves paedogénétiques,* **Heteropeza pygmaea** *: en blanc, les larves « indifférenciées »; en rouge, larves, pupes et imagos mâles; en violet, larves, pupes et imagos femelles. Les flèches en trait plein représentent les éléments du cycle dans des conditions favorables, les flèches en pointillé indiquent ce qui se passe quand les conditions sont défavorables.*

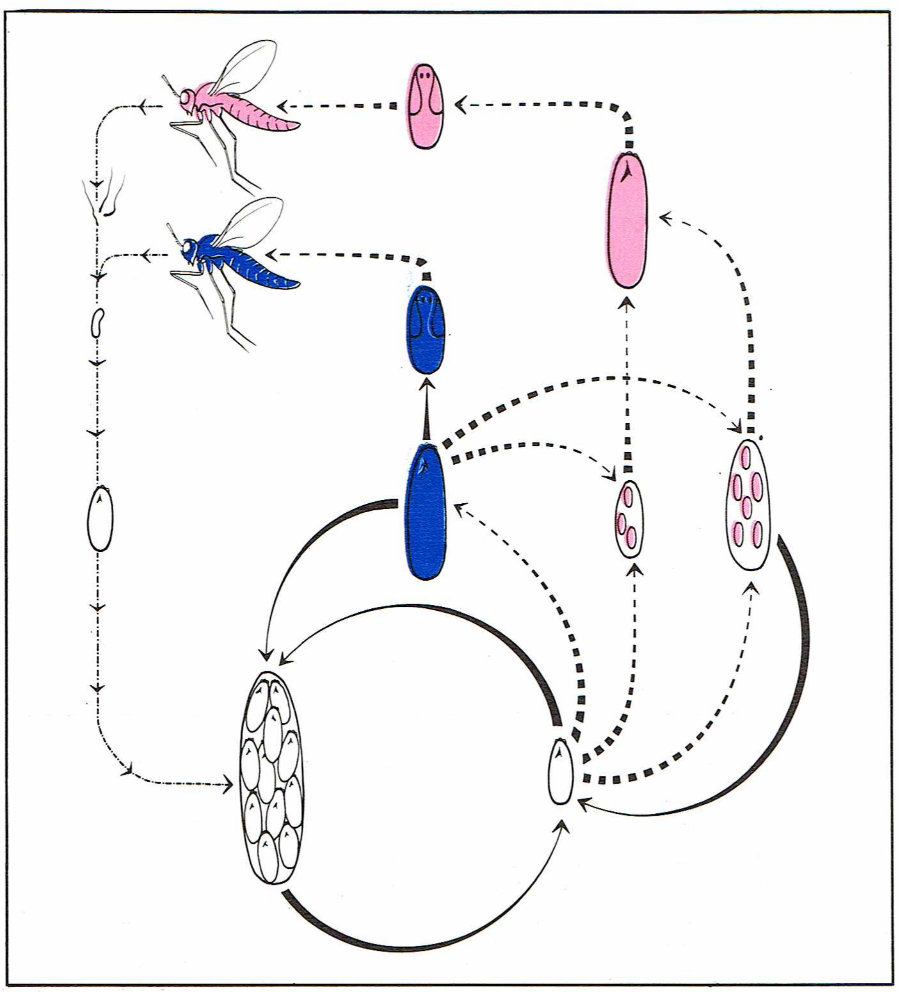

G. Hodebert

les ovarioles ou dans les pédicelles, explique ce type de viviparité. Fortuit chez des Insectes normalement ovipares, il est constant chez d'autres, et parfois prolongé au point que les œufs éclosent quelques instants après la ponte. Le vagin de bien des mouches, considérablement dilaté, forme une poche incubatrice où les œufs demeurent jusqu'à la fin de leur développement.

Chez certains Insectes, notamment des *Chrysomela* (Coléoptères Chrysomélidés) et des *Stilbocoris* (Hémiptères Lygaeidés), le développement embryonnaire ne pourrait atteindre son terme avec les seules réserves vitellines des œufs; dans la mesure où ceux-ci restent dépourvus de chorion, on suppose qu'il s'achève grâce à un appoint trophique provenant directement de l'organisme maternel. Aussi peut-on voir là une transition entre l'ovoviviparité et la viviparité au sens strict. Le terme de viviparité s'applique à trois phénomènes en réalité assez différents.

La *viviparité hémocœlienne* est propre aux Strepsiptères, dont les femelles ont une organisation étrange, fortement modifiée par la vie parasitaire. Les œufs, dispersés dans la cavité abdominale, y sont fécondés puis y accomplissent tout leur développement grâce aux éléments nutritifs du sang où ils baignent.

La *viviparité pseudoplacentaire* du Dermaptère *Hemimerus talpoides* et de quelques pucerons est caractérisée par l'épithélium folliculaire, localement épaissi, qui jouerait le rôle d'un placenta vis-à-vis des embryons se développant dans les ovaires. Dans le cas des Hémiptères Polycténidés et d'une blatte vivipare, ce rôle, attribué à d'autres formations, est très douteux.

La *viviparité adénotrophique,* très particulière, se rencontre exclusivement chez certains Diptères presque tous hématophages et parasites, les Pupipares et les glossines. Un seul œuf à la fois arrive dans le vagin dilaté en « utérus », s'y développe à l'aide de ses propres réserves et y éclôt. C'est encore dans l'utérus que la larve, nourrie par la sécrétion des glandes annexes transformées en « glandes à lait », accomplit toute sa croissance jusqu'à la pupaison ou presque.

Parthénogenèse. La parthénogenèse, ou développement des œufs sans fécondation, dérive sans aucun doute de la reproduction sexuée. On peut la provoquer expérimentalement et elle apparaît de manière accidentelle chez de nombreux Insectes bisexués, où une proportion, en général faible, des œufs issus de femelles vierges commence tout au moins à se développer. Parmi les Psocoptères, différentes espèces montrent à peu près tous les intermédiaires entre une telle parthénogenèse accidentelle et la parthénogenèse constante. Dans ce dernier cas, les mâles sont absents ou très rares et les femelles donnent uniquement naissance à d'autres femelles. Il s'agit de la parthénogenèse *thélytoque,* qui existe chez certains représentants de la plupart des ordres d'Insectes, sauf les Dermaptères, les Isoptères, les Odonates, les Névroptères, les Mécoptères et les Aphaniptères. Les femelles ainsi produites conservent en général, malgré l'absence de fécondation, le nombre diploïde de chromosomes grâce à l'un ou l'autre de deux mécanismes régulateurs, l'*améiose,* ou *apomixie,* et l'*automixie.* Dans l'apomixie, la méiose est remplacée par une ou deux mitoses normales de sorte que l'œuf reste diploïde. Dans l'automixie, il y a réduction chromatique, mais l'ovocyte, haploïde, redevient diploïde par fusion de son noyau avec celui de l'une des autres cellules, ou globules polaires, nées de la méiose.

La parthénogenèse est dite *arrhénotoque* lorsque les œufs produisent toujours des mâles s'ils n'ont pas été fécondés et des femelles dans le cas contraire. Ce type de parthénogenèse, bien différent du précédent, est quasi général parmi les Hyménoptères, mais peu fréquent chez d'autres Insectes (quelques Homoptères et Thysanoptères). Il se traduit, le plus souvent, par un état nommé *haplo-diploïdie,* car les mâles ont n chromosomes et les femelles 2 n, à l'exception toutefois de certaines espèces de Thysanoptères notamment, où l'arrhénotoquie est liée à des mécanismes chromosomiques différents.

On appelle *parthénogenèse polyploïde,* ou encore *géographique,* la coexistence au sein d'une même espèce d'une race diploïde bisexuée et de races polyploïdes (3 n, 4 n, 5 n) parthénogénétiques, lesquelles diffèrent souvent de la première quant à leur répartition géographique, car elles supportent des conditions de vie plus

rudes. D'assez nombreux cas de parthénogenèse polyploïde ont été signalés dans divers ordres d'Insectes ; les mieux étudiés concernent des Coléoptères Curculionides et des Lépidoptères Psychidés du genre *Solenobia*.

Hétérogonie. Ce type de reproduction que certains rattachent à la parthénogenèse (parthénogenèse cyclique) mérite d'être classé à part. Sa caractéristique principale est bien une alternance de générations parthénogénétiques et sexuées, mais celle-ci s'accompagne presque toujours de changements dans la forme et le comportement des individus, de migrations parfois complexes, d'alternances d'oviparité et de viviparité, et manifeste souvent une grande sensibilité à certains des facteurs du milieu. L'hétérogonie est connue chez de nombreux pucerons (Homoptères), chez les Cynipidés gallicoles (Hyménoptères) et, sous une forme particulière, dans quelques espèces de Cécidomyidés (Diptères).

Chez les Cynipidés, il y a une alternance régulière de générations, dont *Biorhiza aptera* fournit un exemple. Cette espèce commune se développe dans les galles qu'elle provoque sur le chêne. Les imagos de la génération estivale sortent de grosses galles de rameaux appelées « pommes de chêne ». Les uns, ailés, sont des mâles, les autres, pourvus d'ailes vestigiales, sont des femelles qui, après fécondation, vont pondre en terre sur les racines de chêne. Leurs larves s'y développent dans des galles bien différentes des premières et deviennent toutes des femelles aptères, qui ne ressemblent guère à celles de la génération estivale. En plein hiver, ces femelles, parthénogénétiques, montent le long du tronc pour aller pondre dans les très jeunes bourgeons, lesquels, transformés en « pommes de chêne », donnent naissance à une nouvelle génération estivale.

Chez les pucerons hétérogoniques, les phénomènes sont d'ordinaire plus compliqués. L'alternance des générations, irrégulière, dépend beaucoup des conditions extérieures ; de nombreuses générations parthénogénétiques se succèdent pendant la belle saison et il y a souvent des migrations obligatoires et cycliques, entre une plante-hôte primaire et une plante-hôte secondaire. On peut distinguer plusieurs catégories, désignées par des noms latins, parmi les représentants des générations successives, suivant leur origine, leur conformation, leur comportement, leur mode de reproduction et les caractères de leur progéniture. Quand ces catégories d'individus se succèdent sur deux plantes-hôtes différentes, on ajoute à leurs dénominations latines le préfixe *civis,* pour désigner les formes habitant la plante-hôte primaire, et le préfixe *exilis,* pour désigner celles vivant sur une plante-hôte secondaire.

En premier lieu, vient la « fondatrice », ou *fundatrix*. Femelle issue d'un œuf fécondé, elle donne naissance parthénogénétiquement à des « descendantes de fondatrice », les *fundatrigeniae* dont une série de générations se succèdent en conditions favorables, mais qui, dans le cas contraire, produisent des « sexupares », ou *sexupara*. Ces dernières donnent naissance, toujours par parthénogenèse, à des sexués, ou *sexuales,* identiques d'aspect, mais séparables dans certains cas en « mères de mâles » *(andropara)* et mères de femelles *(gynopara)*. Fécondées, les femelles de sexués pondent les œufs d'où sortiront, en général après la mauvaise saison, les nouvelles fondatrices.

La *paedogenèse,* ou reproduction à l'état larvaire, constitue la particularité majeure de l'hétérogonie des Cécidomyidés, étudiée surtout chez les genres *Miastor* et *Heteropeza*. Les larves de ces Diptères vivent dans le bois pourri, sous l'écorce des arbres tombés. Une fois qu'elles ont atteint une certaine taille, des œufs, visibles par transparence à travers le tégument, y apparaissent et éclosent, donnant alors des larves filles qui s'échappent après avoir dévoré tout l'intérieur du corps de la larve mère. Si les conditions du milieu, en particulier l'humidité, la température et les aliments disponibles, restent favorables, les larves ainsi produites donnent à leur tour naissance de la même façon à d'autres larves et de nombreuses générations paedogénétiques peuvent ainsi se succéder. Si les conditions deviennent défavorables, les larves paedogénétiques engendrent, directement ou non, des larves sexuées qui, après pupaison, deviennent des imagos mâles et femelles. Celles-ci cherchent en volant un milieu propice, et y pondent un petit nombre de gros œufs, d'où sortiront de nouvelles larves paedogénétiques.

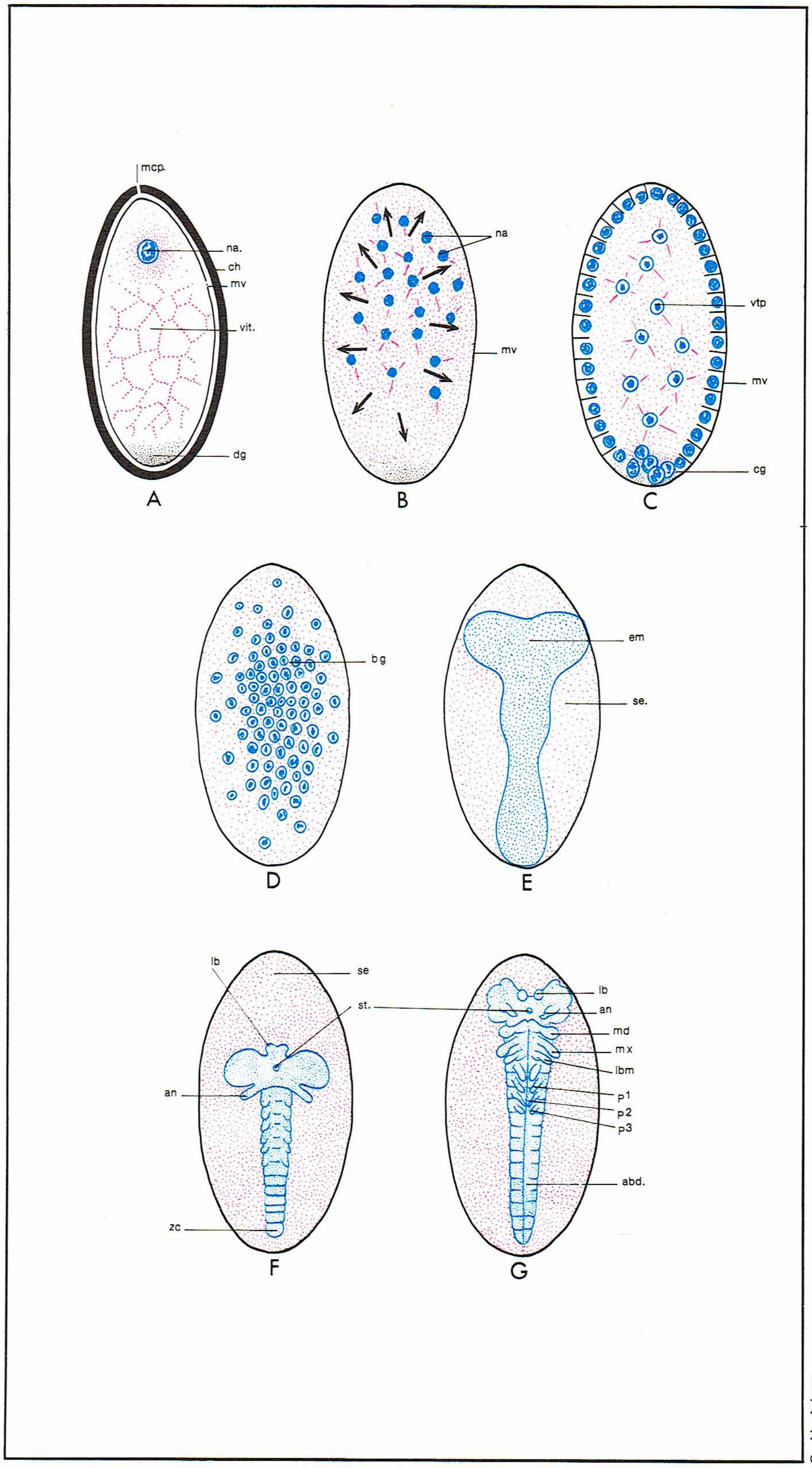

G. Hodebert

▲ ***Représentation schématique, simplifiée, des grandes étapes du développement embryonnaire ; A, structure de l'œuf ; mcp, micropyle ; na, noyau ; ch, chorion ; mv, membrane vitelline ; vit, vitellus ; dg, déterminant germinal ; B, phase de division des noyaux qui migrent ensuite vers la périphérie : na, noyaux ; mv, membrane vitelline ; C, stade blastoderme ; vtp, vitellophages ; cg, cellules germinales ; D, stade bandelette germinative : bg, bandelette germinative ; E, début de la formation de l'embryon ; em, embryon ; se, séreuse ; en B, C, D, E, le chorion n'est pas figuré ; F et G, schéma du développement des appendices à deux stades successifs : abd, abdomen ; an, antennes ; lb, labre ; lbm, labium ; md mandibule ; mx, maxilles ; p1, p2, p3, pattes thoraciques ; se, séreuse ; st, stomodeum ; zc, zone de croissance de l'embryon.***

Croissance et développement des Insectes

Tous les Insectes sont issus d'un œuf, fécondé ou non, libre (c'est-à-dire pondu) ou retenu dans le corps de la femelle.

Au cours du développement on peut distinguer deux grandes périodes : le développement embryonnaire, ou embryogenèse, c'est-à-dire la division de la cellule initiale de l'œuf en une multitude de cellules qui vont s'organiser en tissus formant un embryon, et le développement post-embryonnaire, c'est-à-dire la transformation de la larve née de l'embryon en un Insecte adulte, l'éclosion de l'œuf marquant le passage de l'embryon à la larve.

Développement embryonnaire

Selon qu'il s'agit d'Insectes primitifs ou évolués, le développement embryonnaire sera différent. Nous décrirons le cas le plus général, celui des Insectes évolués, en le simplifiant volontairement.

Dans la majorité des cas, l'œuf est fécondé. Après la fusion des gamètes, il se produit un certain nombre de divisions des noyaux qui se regroupent d'abord au centre de l'œuf, puis migrent à la périphérie, et forment la bandelette embryonnaire, ou *blastoderme,* composée d'une seule couche de cellules indifférenciées; les réserves de l'œuf (le vitellus, qui est l'équivalent du jaune d'œuf de poule) sont alors digérées par des cellules venant du blastoderme et que l'on nomme *vitellophages*. Dans une zone privilégiée, ou déterminant germinal, situé au pôle postérieur de l'œuf, on remarque quelques cellules isolées qui seront à l'origine des cellules sexuelles de l'Insecte. Il s'établit donc très rapidement une différence entre les cellules qui sont destinées à former le corps de l'Insecte et celles qui sont à l'origine des cellules reproductrices. Les cellules du blastoderme continuent de se diviser, et constituent la *bandelette germinative,* qui donnera, en se différenciant, l'embryon proprement dit et les aires extra-embryonnaires. Ces aires vont se développer, jusqu'à entourer complètement l'embryon et former deux enveloppes, la *séreuse* à l'extérieur, et l'*amnios* contre l'embryon; l'amnios peut manquer dans certains cas, par exemple chez les Hyménoptères parasites. Parfois même, les deux enveloppes font défaut; l'embryon entoure alors complètement le vitellus, et la membrane qu'il forme est appelée *amnioséreuse*.

Au cours du développement ultérieur de l'embryon, les cellules de la bandelette germinative se dédoublent soit par invagination, soit par recouvrement, et produisent des tissus ou feuillets au nombre de trois; les cellules les plus externes constituant le feuillet ectodermique, les plus internes, les feuillets mésodermiques et endodermiques. C'est à partir de ces trois feuillets que se différencieront de manière définie les organes de l'embryon. Ainsi, le feuillet ectodermique, ou ectoderme, formera l'épiderme qui sécrétera la cuticule, l'intestin antérieur et postérieur (par invagination de la bandelette germinative aux deux extrémités), l'appareil respiratoire (les trachées), le système nerveux et les organes sensitifs qui en dérivent, en particulier l'œil, et, enfin, une bonne partie du système glandulaire.

Quant au mésoderme, il donnera le vaisseau dorsal, ou « cœur », diverses glandes ou structures glandulaires (glandes céphaliques chez les Aptérygotes, une partie des *corpora allata* chez les Ptérygotes), les glandes sexuelles (sauf les cellules germinales proprement dites qui migreront plus tard), les muscles, le tissu adipeux, et, vraisemblablement, les cellules sanguines.

Enfin, l'endoderme produira l'intestin moyen et, peut-être, les tubes de Malpighi (les embryologistes ne sont pas tous d'accord sur ce point).

Ensuite, l'embryon se divise en blocs, ou *métamères,* qui sont les précurseurs des différents segments de l'Insecte. La tête s'individualise, ainsi que les ébauches d'appendices. L'embryon est alors sujet à divers mouvements qui se produisent toujours au même stade du développement pour une espèce donnée, et qui servent de points de repère aux embryologistes. On appelle ces mouvements les *blastokinèses (anatrepsis* et *catatrepsis).*

La durée du développement embryonnaire est très variable selon les groupes et les espèces. Pour *Lucilia* (Diptère) elle est de 20 à 24 heures, pour *Drosophila* (Diptère) de 22 heures, pour *Bruchus* (Coléoptère) de 4 à 9 jours, et enfin, pour *Xiphidium* (Orthoptère) de 5 mois. Des températures élevées, mais qui ne dépassent pas la limite des températures vitales, accélèrent le développement, tandis que des basses températures le ralentissent; le degré d'humidité exerce également une influence sur le rythme de développement.

L'éclosion de l'œuf

Lorsqu'il est complet, l'embryon sort des membranes de l'œuf. Pour cela, il dispose de plusieurs moyens. Beaucoup d'embryons possèdent sur différentes parties du corps des épines, des zones aiguës ou des plaques, qui les aident à déchirer les membranes ou à pousser un opercule. Chez les Ptérygotes inférieurs (blattes, mantes, Orthoptères), l'embryon possède une paire d'organes glandulaires, ou pleuropodes, sur le premier segment abdominal. On pense, sans en être absolument certain, que ces organes servent à digérer partiellement et de l'intérieur les enveloppes de l'œuf, pour les rendre plus fragiles et faciliter leur déchirure. D'une manière générale, l'embryon avale le liquide amniotique, de l'air ou de l'eau et, une fois gonflé, n'a plus qu'à faire quelques mouvements pour déchirer sa prison et sortir. Dans quelques cas, la mère qui donne des soins aux œufs dévore leurs enveloppes externes, ce qui facilite grandement la sortie des jeunes larves; c'est le cas des forficules.

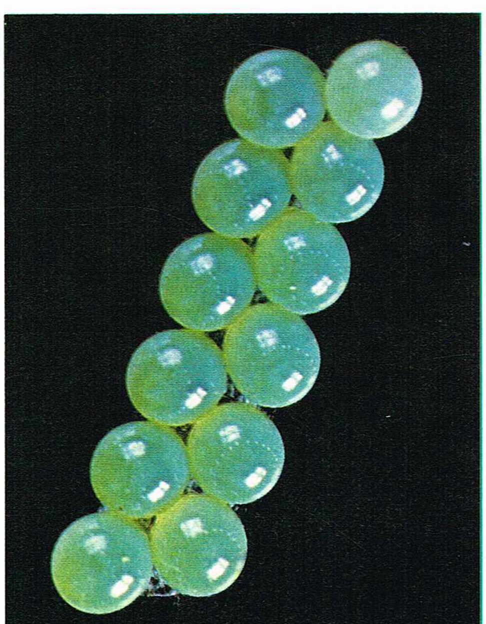

J. Carayon

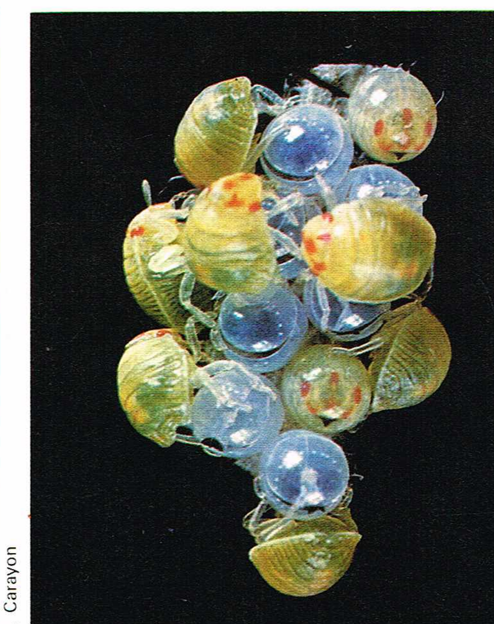

J. Carayon

▼ *Œufs et éclosion chez la punaise des blés* **(Eurygaster integriceps)** *: à gauche, les œufs venant d'être pondus; au milieu, à l'approche de l'éclosion, on voit par transparence à travers le chorion les yeux de la larve et, en noir, la dent d'éclosion qui lui servira à découper la coque de l'œuf; à droite, les jeunes larves venant d'éclore se tiennent sur la coque translucide des œufs vides.*

J. Carayon

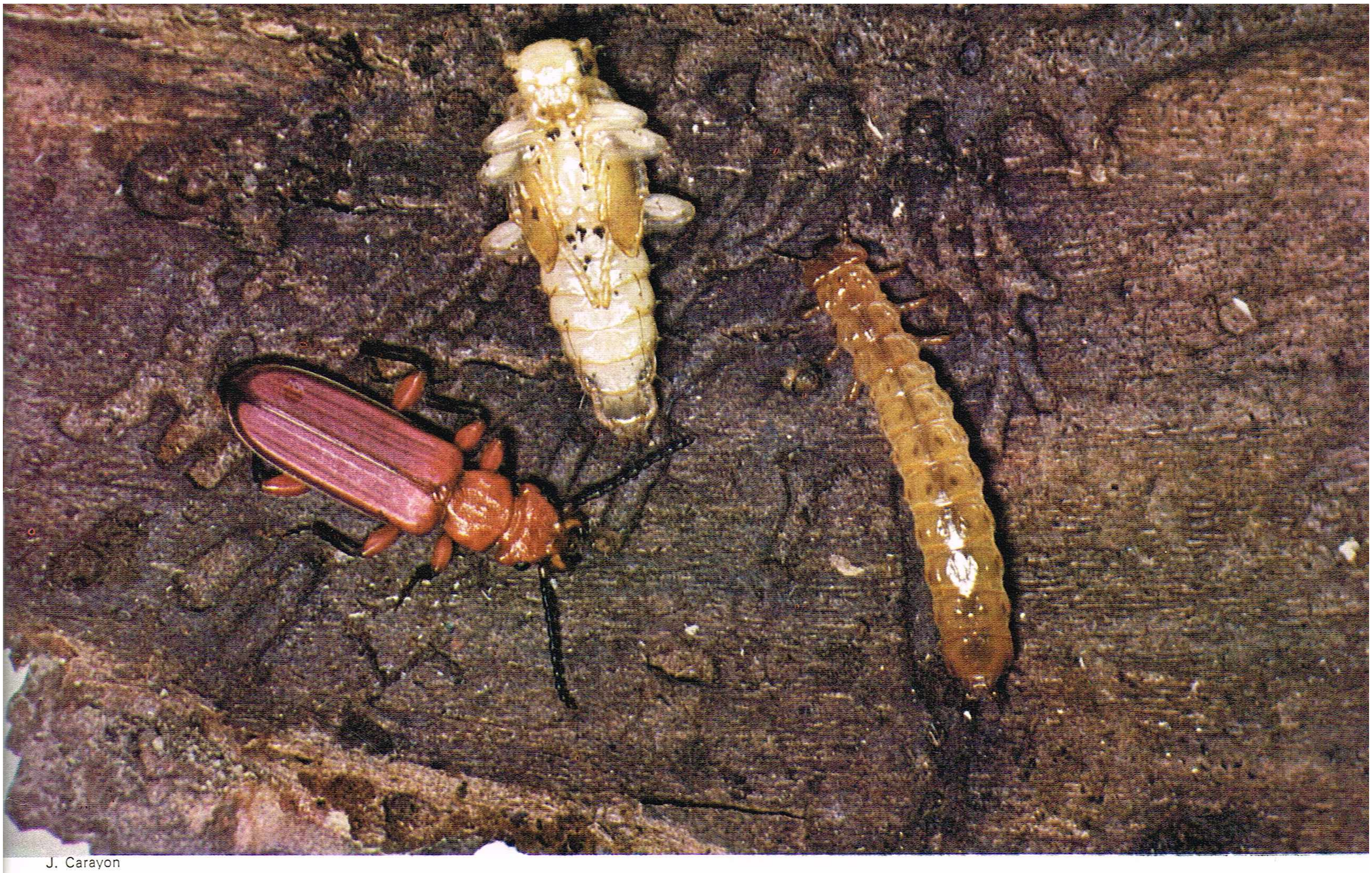

J. Carayon

▲ ***Larve, nymphe et imago du Coléoptère*** **Cucujus clavipes.**

Développement post-embryonnaire

A la sortie de l'œuf, la larve *néonate* ressemble ou non à l'adulte. La croissance de tous les Animaux s'effectue de manière cyclique, des périodes de croissance alternant avec des périodes de « repos », et les Insectes n'échappent pas à cette règle. A certains intervalles de temps, la larve change de « peau » car la cuticule n'est pas extensible, et pour grandir, l'Insecte doit en changer : ce phénomène s'appelle la *mue* ou *ecdysie ;* les périodes pendant lesquelles les larves se déplacent et se nourrissent sont les *intermues*.

Les types de développements chez les Insectes. Avant de voir les moyens mis en œuvre dans les phénomènes de croissance, nous allons examiner les types de développements, c'est-à-dire les façons dont on passe d'une larve à un Insecte parfait appelé *imago*. On distingue deux types de développements : le type anamorphose et le type métamorphose.

Type anamorphose : à l'éclosion de l'œuf, la larve ressemble à l'adulte, mais la segmentation est incomplète, le nombre définitif de segments n'étant pas encore atteint ; à chaque mue, il va en apparaître un nouveau. Ce type unique ne se rencontre que chez les Insectes les plus primitifs, les Protoures. Ainsi, *Acerentomon microrrhinus* naît avec neuf segments abdominaux, et, au fur et à mesure de sa croissance, il acquiert les trois segments supplémentaires que l'on trouve chez l'adulte.

Type métamorphose : il s'applique à tous les autres Insectes. A l'éclosion, la métamérisation est complète. Selon le type de développement, on distingue : les *hémimétaboles* et les *holométaboles*.

Les *hémimétaboles* ont un développement incomplet et simple. La larve présente le même aspect que l'adulte, mais en diffère par la taille, l'absence de pièces génitales externes, l'immaturité des gonades, certains détails de pigmentation et de structures cuticulaires, et, enfin, chez les Insectes ailés, par l'absence d'ailes. Mais la segmentation des appendices, les yeux composés, le système nerveux sont complets. Ce type de développement hémimétabole, au sens large, a lieu chez les Aptérygotes (excepté les Protoures), les Éphémères, les Odonates, les Plécoptères, les Dermaptères, les Grylloblattides, les Phasmides, les Orthoptères, les Dictyoptères, les Isoptères, les Embioptères, les Zoraptères, les Psocoptères, les Mallophages, les Anoploures et chez presque tous les Hémiptères. Les hémimétaboles comprennent trois sous-divisions.

L'*amétabolie* n'existe que chez les Aptérygotes (Collemboles, Thysanoures). La larve ne diffère de l'adulte que par la taille et l'absence de pièces génitales. Le nombre de mues est indéfini ; elles se poursuivent même après la maturité.

Dans le cas de la *paurométabolie,* les larves ressemblent à l'adulte, sauf en ce qui concerne les caractères déjà cités dans la définition de l'hémimétabolie, elles vivent dans le même milieu et se nourrissent de la même façon, mais les mues cessent dès que le stade imago est atteint.

A. Margiocco

◀ ***Larves de*** **Philosamia cynthia** ***auprès des restes des œufs dont elles sont sorties.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

A. Margiocco

▲ *A gauche, nymphe d'Anisoptère dans son milieu naturel, l'eau; à droite, exemplaire de larves apodes de Diptère, sur un Champignon* **Boletus edulis.**
▼ *Représentation de divers types de développements : A -* **Pediculus** *(le pou de corps); B-* **Blatella** *(Dictyoptère) présentant un développement hémimétabole; C-* **Otiorrhynchus** *(Coléoptère Curculionidé), type de développement holométabole.*

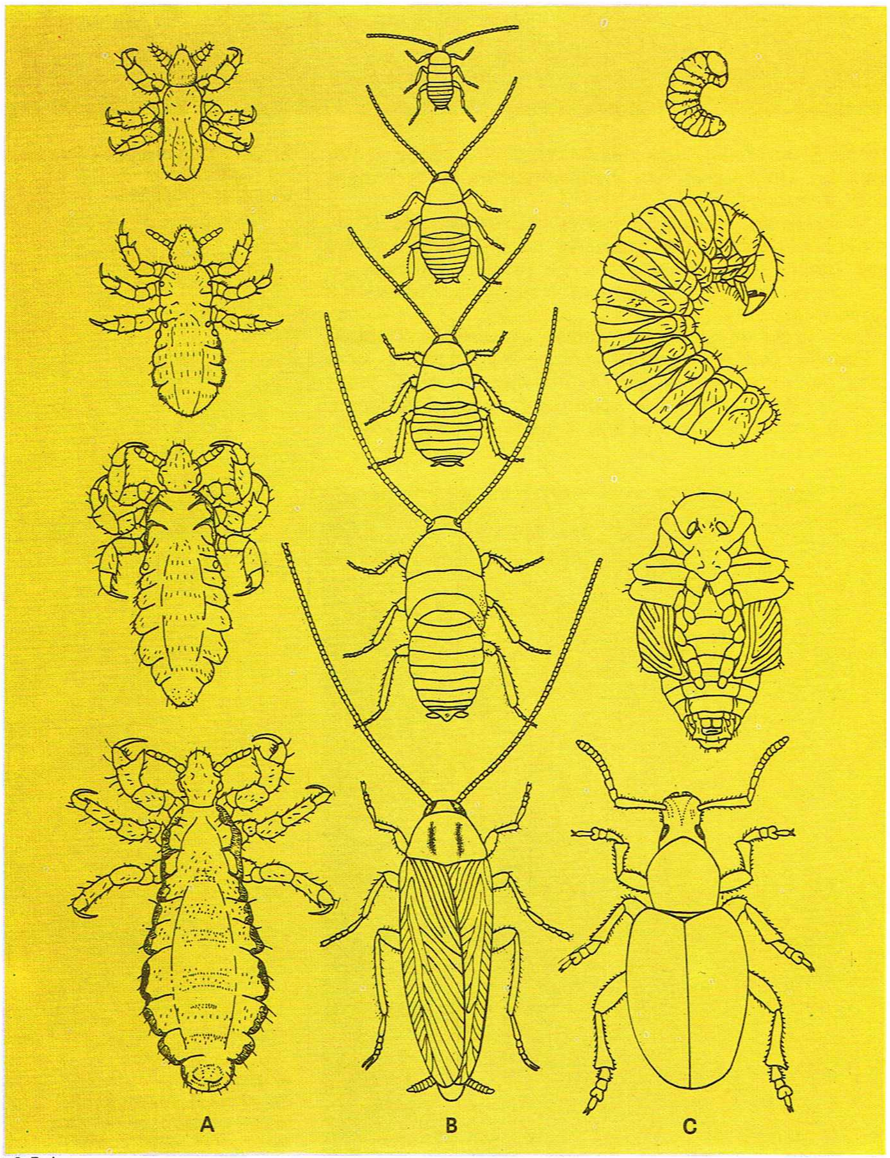

I.G.D.A.

La paurométabolie se rencontre chez les Dictyoptères, les Isoptères, les Zoraptères, les Grylloblattides, les Phasmides, les Orthoptères, les Embioptères, les Dermaptères, les Psocoptères, les Mallophages, les Anoploures, et chez les Hémiptères à l'exception de quelques familles.

Dans l'*hémimétabolie* au sens restreint, les larves sont aquatiques et respirent par des branchies. Elles sont assez dissemblables des imagos, qui sont aériens (Éphémères, Odonates, Plécoptères).

Chez les *holométaboles,* les larves ne ressemblent pas du tout à l'imago, bien que leur segmentation soit complète. Les larves sont toujours aptères : elles ne présentent aucune trace externe d'ailes, si petites soient-elles; elles n'ont pas d'yeux composés, seulement, dans certains cas, des stemmates en petit nombre; le plus souvent, elles sont aveugles. Le nombre de pattes est généralement de six, mais il est quelquefois supérieur chez les larves de Lépidoptères et d'Hyménoptères inférieurs, qui possèdent des fausses pattes abdominales; il est parfois inférieur (chez les larves apodes). Les Mécoptères, les Trichoptères, les Lépidoptères, les Hyménoptères, les Coléoptères, les Névroptères, les Diptères, les Siphonaptères (puces), les Strepsiptères, ainsi que quelques Hémiptères sont des holométaboles.

La distinction des différents types de larves des holométaboles est éclairée partiellement par certains aspects du développement embryonnaire des Insectes. Les embryons de tous les Insectes passent par trois stades morphologiques constants : les phases protopode, polypode et oligopode. Au cours de la phase *protopode*, l'embryon présente seulement des appendices de pièces céphaliques et thoraciques non segmentés, mais jamais d'appendices abdominaux (l'abdomen n'est d'ailleurs pas totalement métamérisé). La phase *polypode* est caractérisée par la segmentation partielle des appendices céphaliques et thoraciques et par la métamérisation complète de l'abdomen qui porte quelques rudiments d'appendices. Enfin, au cours de la phase *oligopode,* les appendices céphaliques et thoraciques sont totalement segmentés, tandis que les appendices abdominaux ont régressé ou se sont transformés en structures adultes. On suppose que les larves d'holométaboles éclosent au stade polypode, et les larves d'hémimétaboles au stade oligopode. En fait, ce n'est pas aussi simple qu'il y paraît, et les nombreuses théories ébauchées depuis un siècle n'ont pas totalement résolu le problème. Ces trois phases du développement embryonnaire sont utilisées pour classer les types de larves des holométaboles.

La larve *protopode* est un type inhabituel; elle n'est guère plus qu'une bandelette germinative, avec quelques rudiments d'appendices dans la zone céphalique. Les larves protopodes seraient incapables de mener une vie libre, si elles n'étaient toutes parasites. Elles existent chez les Hyménoptères et les Diptères parasites, qui pondent dans l'œuf ou dans le corps de l'hôte, et se trouvent ainsi directement dans le milieu nutritif qui leur est nécessaire.

A. Margiocco

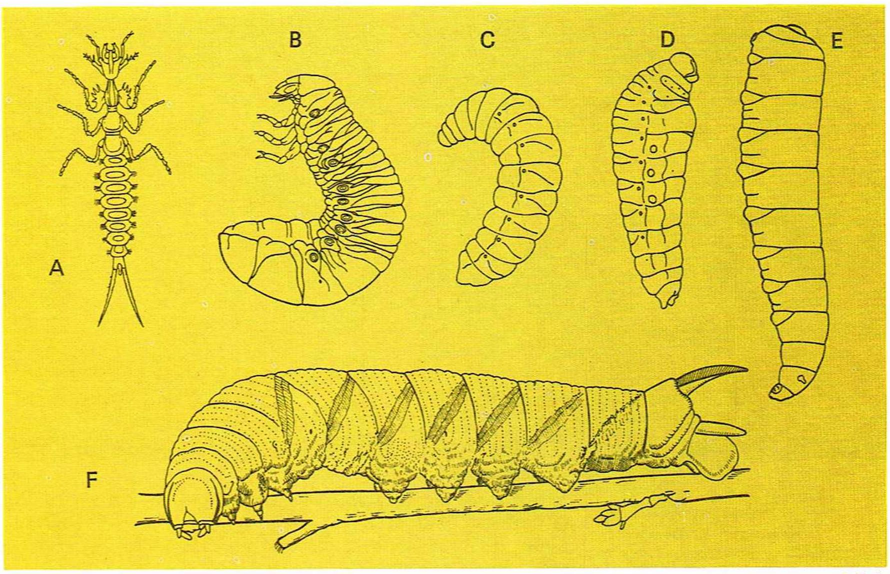

I.G.D.A.

En se développant, elles vont passer par des types larvaires de plus en plus évolués.

La larve *polypode* correspond à la phase la plus précoce au cours de laquelle la larve peut mener une vie libre. L'exemple type est fourni par la chenille de papillon (type éruciforme), à pièces buccales broyeuses. Les yeux composés, les antennes, les pattes thoraciques et les ailes sont encore à l'état embryonnaire (disques imaginaux). Les pattes abdominales, ou fausses pattes, existent déjà. On trouve ces larves chez les Mécoptères, les Trichoptères, les Lépidoptères et les Hyménoptères inférieurs (tenthrèdes).

La *larve oligopode* a des pattes thoraciques, mais pas de pattes abdominales car il y a régression des appendices abdominaux. On distingue deux types de larves oligopodes. La *larve campodéiforme,* qui a des pattes thoraciques bien développées et le corps assez fortement sclérifié, est généralement une larve prédatrice ; on la trouve chez les Névroptères, les Coléoptères, les Strepsiptères, les Thysanoptères et chez les Hémiptères holométaboles. La larve *scarabéiforme* a des pattes thoraciques courtes et faibles, et un abdomen gros et mou ; on la rencontre chez les Coléoptères.

La *larve apode* est dépourvue de pattes. L'asticot de la mouche en est l'exemple type. Extraordinairement bien adaptées à leur milieu, ces larves dérivent probablement du type oligopode par perte des pattes thoraciques. Les Hyménoptères supérieurs, les Diptères, à tous les stades ou presque, les Siphonaptères (puces) ainsi que quelques groupes de Coléoptères, de Strepsiptères et de Lépidoptères possèdent des larves de ce type.

Chez les holométaboles, le passage entre la larve et l'imago s'effectue à travers un stade le plus souvent quiescent, appelé *nymphe* (stade *nymphal*). Durant cette phase immobile, l'Animal subit de très grandes transformations telles que l'apparition des yeux composés, des ailes chez les types ailés et des organes génitaux externes.

On distingue plusieurs types de nymphes. Les *nymphes dectiques* ont des mandibules fonctionnelles, utilisées pour découper les cocons ; les autres appendices sont très nettement dégagés du corps et mobiles dès que les muscles ont acquis une certaine importance. On trouve ces nymphes chez les Névroptères, les Mécoptères, les Trichoptères et quelques familles de Lépidoptères à mandibules. Les *nymphes adectiques,* pour leur part, n'ont pas de mandibules mobiles ; elles peuvent être subdivisées en deux groupes selon que les appendices sont collés ou non le long du corps. Si les appendices sont englués par une sécrétion cuticulaire, la nymphe est dite *adectique obtectée ;* au contraire, si les appendices sont libres le long du corps, il s'agit d'une nymphe *adectique exarate* (toutes les nymphes dectiques sont donc exarates). On trouve les nymphes adectiques exarates chez les Thysanoptères, les Hémiptères holométaboles, la plupart des Hyménoptères et des Coléoptères, les Strepsiptères et chez quelques Diptères supérieurs. Les nymphes adectiques obtectées se rencontrent chez les Lépidoptères, quelques Coléoptères, les Diptères Nématocères, et quelques Diptères supérieurs.

Signalons enfin que les nymphes sont souvent enfermées dans une enveloppe qui peut prendre plusieurs

▲ ***A gauche, larves aptères de* Celerio euphorbiae *;***
à droite, types de larves d'Insectes :
A, campodéiforme ;
B, scarabéiforme (mélolonthoïde) ;
C, D, E, larves apodes ;
F, larve éruciforme de Lépidoptère.

G.S. Giacomelli

I. Bucciarelli

◀ ***A gauche, une larve campodéiforme de chrysope, généralement prédatrice de pucerons ;***
à droite, larves scarabéiformes de Coléoptère coprophage.

▶ *Types de nymphes d'Insectes holométaboles ; A, pupe exarate ; B, pupe obtectée ; C, puparium de Diptère.*

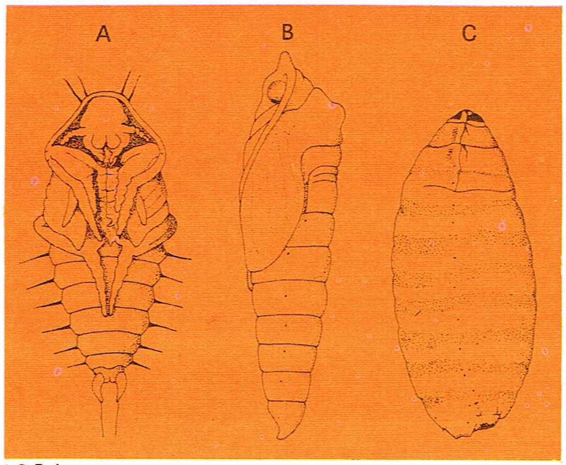

I.G.D.A.

aspects. Ainsi, le *puparium* des Diptères est en réalité la dernière peau larvaire durcie. La nymphe des Lépidoptères, ou chrysalide, peut être entourée d'un cocon de soie dont la forme, la couleur, les éléments étrangers incorporés (gravillon, morceaux de feuilles) sont variables en fonction du groupe considéré. Chez beaucoup de Lépidoptères la chrysalide pend librement par un petit morceau de soie qui représente un vestige du cocon. Contrastant avec ces nymphes absolument immobiles, les nymphes de Culicides et de Chironomides (Diptères Nématocères) sont mobiles et très actives durant tout ce stade.

Certains holométaboles présentent des cas particuliers de développement, appelés *hypermétamorphoses*. Ce terme est utilisé pour désigner des cycles de développement où différents types de larves apparaissent lors des mues. Chez certains Staphylinidés (Coléoptères), la première larve, de type campodéiforme, recherche activement une pupe de Diptère Cyclorraphe dans laquelle elle pénètre en perçant un trou avec ses mandibules. Une fois installée, elle se nourrit et mue plusieurs fois en donnant une larve de type éruciforme. On trouve ce mode de développement chez d'autres Coléoptères (Rhipiphorides, Méloïdes) et chez les Strepsiptères. Chez les Strepsiptères, qui sont tous parasites d'Insectes supérieurs (Hémiptères, Hyménoptères), la femelle, qui se présente comme une sorte de kyste retenu dans les tissus de l'hôte, garde ses œufs dans sa cavité hémocélienne. A l'éclosion, les larves minuscules, de type campodéiforme, appelées *triongulins*, car chaque tarse porte trois griffes, sortent du corps de la femelle, et cherchent un nouvel hôte. Si elles le trouvent, elles creusent leur chemin dans son corps, et s'y installent pour poursuivre leur cycle. Lors de la première mue, le triongulin se transforme en une larve dégénérée et apode. Cette dernière caractéristique subsiste jusqu'au stade nymphal.

Les mues chez les Insectes

Mécanismes des mues. La larve prend du poids, la masse des tissus internes augmente à travers le processus des divisions cellulaires, et la cuticule devient trop petite. A l'approche de la mue, la larve cesse de se nourrir et arrête toute activité, sauf pour chercher un lieu, en général bien dissimulé, favorable à l'accomplissement de la mue, car pendant un certain temps, elle sera très vulnérable. L'hypoderme sécrète un liquide contenant des enzymes qui vont digérer la partie interne de la cuticule (l'endocuticule et l'exocuticule). Les produits de cette « digestion » vont être réabsorbés pour être réutilisés lors de l'édification de la nouvelle cuticule. Puis l'hypoderme sécrète la nouvelle cuticule en commençant par les couches les plus externes (l'épicuticule et l'exocuticule). Il ne subsiste alors de l'ancienne cuticule qu'une espèce de « coquille » que l'individu quitte rapidement. Sur cette enveloppe, on remarque certaines zones privilégiées qui sont des lignes de rupture, ou *lignes ecdysiales,* généralement situées sur la capsule céphalique, et dorsalement, sur la zone thoracique. Le mécanisme de sortie est le suivant : l'Animal, selon le milieu dans lequel il vit, avale de grandes quantités d'air ou d'eau, ce qui le fait gonfler. La pression interne augmente ; elle peut atteindre l'équivalent de 90 mm de mercure et la vieille enveloppe se rompt au niveau des lignes d'exuviation ; c'est alors que l'Animal s'extirpe ; la nouvelle cuticule est molle, souple, plissée et se tend sous la pression interne qui persiste. L'Animal lui-même est encore mou ; cependant, certaines pièces comme les mandibules et la capsule céphalique sont déjà partiellement durcies et pigmentées. Ensuite les processus de tannage (durcissement) et de pigmentation de la cuticule vont se produire. La vieille cuticule s'appelle l'exuvie et le phénomène l'exuviation. L'exuvie ne comprend pas seulement l'enveloppe externe, mais aussi des morceaux du revêtement cuticulaire de l'intestin antérieur et postérieur et le système trachéen, qui sont d'origine ectodermique. La nécessité de ces mues apparaît clairement quand on sait qu'entre la larve néonate du bombyx du mûrier (Lépidoptère) et la dernière larve le poids de l'Animal est multiplié environ dix mille fois. Chez un autre Lépidoptère *(Cossus),* cet accroissement est de l'ordre de soixante-douze mille fois.

Cependant, il faut signaler que s'il est commode de marquer le passage d'un stade larvaire au stade suivant par le phénomène de la mue, la croissance de l'Animal est continue à l'intérieur de la cuticule, et qu'au moment de l'abandon de la vieille cuticule l'Animal occupe déjà la nouvelle. Dans certains cas, la cuticule larvaire n'est pas rejetée avant l'apparition de l'imago (puparium des Diptères).

Nombre de mues et durée du développement larvaire. Le nombre de mues, qui varie en général de trois à neuf, est très variable selon les Insectes que l'on considère. Il dépend, en outre, d'un certain nombre de facteurs externes comme l'alimentation, la population, la taille des œufs, et, quelquefois aussi, du sexe. Certaines races locales d'Insectes ont un nombre de mues, fixé héréditairement, différent de celui de l'espèce typique.

Ainsi, une mite *(Tineola)* accomplira son cycle en vingt-six jours avec quatre mues, dans un milieu riche, et en neuf cents jours avec quarante mues, dans un milieu pauvre, certaines de ces mues en milieu défavorable s'effectuant sans qu'il y ait croissance. (Il arrive même, parfois, que la même mite « grandisse tout en diminuant ».) La taille de l'œuf dont est issue la larve influe sur le nombre de mues. Des larves, de petite taille, nées de petits œufs auront besoin d'une mue supplémentaire pour atteindre la taille normale. Des chenilles élevées dans des conditions de surpopulation sont plus actives, se nourrissent plus, et leur durée de vie larvaire peut être raccourcie de 80 %, avec une diminution du nombre de mues. Le nombre de mues peut également varier selon le sexe ; chez les Strepsiptères, le mâle subit neuf mues, et la femelle seulement sept. La durée de vie larvaire varie également dans des proportions considérables, de quelques jours à plusieurs années. Ainsi, deux cigales américaines, *Magicicada trede-*

▼ *A gauche, larve éruciforme de Tortricide dans son cocon ouvert ; à droite, chrysalide de Lépidoptère pendant librement par un vestige du cocon.*

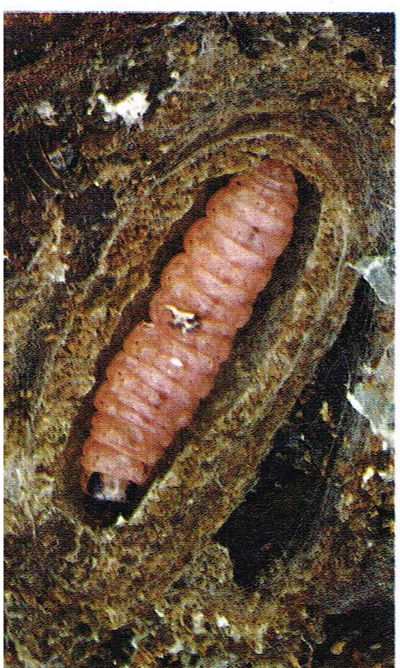

A. Margiocco

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

I. Bucciarelli

I. Bucciarelli

I. Bucciarelli

▲ ***Trois phases de développement d'un Lépidoptère Sphingide,*** **Celerio euphorbiae :** ***à gauche, la larve; au milieu, la chrysalide; à droite, l'imago.***

cim et *Magicicada septemdecim,* ont des vies larvaires qui atteignent respectivement treize et dix-sept ans.

Lois de la croissance. Le mécanisme de la croissance des larves d'Insectes peut être plus ou moins déterminé de manière empirique. Dyar a montré, il y a très longtemps, que la capsule céphalique des Lépidoptères croissait en largeur d'un facteur égal à environ 1,4 à chaque mue. Ce facteur, ou raison de l'accroissement, est constant pour une espèce donnée, et permet, parfois, de déduire d'après une série incomplète d'exuvies le nombre de mues larvaires d'un Insecte. Malheureusement, chez certains Insectes, cette loi subit de très nombreuses variations, et son utilisation se révèle impossible, d'autant plus que certains facteurs, la malnutrition par exemple, peuvent faire varier la raison de l'accroissement. Selon une autre loi empirique, la *loi de Przibram,* le poids de la larve double entre chaque mue, et à chaque exuviation, les dimensions linéaires s'accroîtraient d'un facteur égal à 1,26 ou $\sqrt[3]{2}$. Cette loi s'applique approximativement à un grand nombre d'Insectes, mais elle est fausse chez beaucoup d'autres. En fait, contrairement à ce que postule la loi de Przibram, la croissance est *dysharmonique,* ou *allométrique,* c'est-à-dire que chaque partie du corps croît à un rythme qui lui est propre. En effet, chez les Insectes, comme chez les autres êtres vivants, il n'y a jamais de croissance harmonique, au sens mathématique du terme; chaque partie du corps ne s'accroît pas du même facteur que l'accroissement général. Cette dysharmonie porte sur tous les organes ou presque, et peut être en relation avec le sexe de l'individu considéré.

Physiologie de la mue. On sait, depuis une soixantaine d'années, que les phénomènes de mue sont sous la dépendance de sécrétions endocrines, de même que chez les Vertébrés la croissance, la reproduction et le taux de glucose dans le sang sont sous la dépendance d'hormones produites par les glandes endocrines. Mais ce n'est guère que depuis une quarantaine d'années que ces phénomènes ont été bien étudiés, et leurs mécanismes partiellement compris.

Les sites de production des hormones intervenant dans les mues sont presque tous étroitement associés au cerveau ou au système nerveux. Ce système neurosécréteur est composé de cellules qui sont situées dans la partie antérieure du cerveau et sont appelées *cellules neurosécrétrices de la pars intercerebralis* (C.N.S.P.I.); une paire de glandes, les *corpora cardiaca* (C.C.), est également associée au système neurosécréteur; les *corpora allata* (C.A.) situés en arrière des corpora cardiaca n'ont pas la même origine embryologique. Quant à la glande ecdysiale (G. E.), elle peut prendre, selon sa localisation, le nom de *glande prothoracique* ou *glande céphalique.* Néanmoins, on préfère l'appeler glande ecdysiale, car ce terme exprime le rôle qu'elle joue. Les corpora allata et la glande ecdysiale ne font pas partie du système nerveux. Quelquefois, leurs structures sont modifiées, mais leur rôle reste le même. Ainsi, les corpora allata ou les corpora cardiaca peuvent être fusionnés (on dit alors *corpus cardiacum* et *corpus allatum*). Parfois, ils peuvent être réunis en un seul ensemble : l'anneau de Weismann des Diptères supérieurs. Mais quel que soit leur rôle, ces glandes sécrètent ou libèrent ce qu'on peut appeler les hormones du développement, car elles régulent certaines phases de la croissance, de la différenciation et de la morphogenèse.

Les hormones. Les cellules neurosécrétrices de la pars intercerebralis produisent une substance appelée facteur cérébral, ou *ecdysiotropine,* dont la nature chimique est encore indéterminée, bien que l'on pense de plus en plus qu'elle est de nature protéinique comme toutes les neurohormones connues. La glande ecdysiale libère l'*ecdysone,* ou hormone de mue, ou encore, hormone de croissance et de mue, qui fut la première hormone des Insectes à être isolée, purifiée et cristallisée. (Il fallut utiliser cinq cents kilos de pupes du Diptère *Calliphora,* qui, après extraction et purification, donnèrent 25 mg de substance active.) Les biochimistes en distinguent deux types : l'α-ecdysone, et la β-ecdysone, qui paraît être la plus importante après avoir été longtemps considérée comme un produit de la dégradation de l'α-ecdysone. La formule globale de l'ecdysone est $C_{27}H_{44}O_6$.

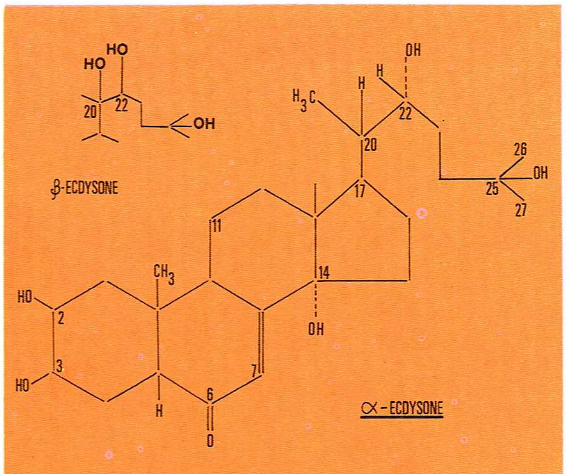

J. Menier

Les corpora allata sécrètent l'*hormone juvénile* (H.J.), ou *néoténine,* qui a aussi été isolée et purifiée.

Ces deux hormones, l'ecdysone et l'hormone juvénile, ne sont pas d'origine neurale, contrairement au facteur cérébral qui est lui une neuro-hormone.

Le mode d'action des hormones intervenant dans les phénomènes de mue a été mis en évidence par des expériences de ligature, d'ablation et d'implantation des différentes glandes.

Selon un schéma généralement admis, et excepté quelques petites variations qui interviennent dans certains cas, l'action des hormones de mue est la suivante : sous l'influence d'un stimulus (pas toujours bien connu), les cellules neurosécrétrices de la pars intercerebralis

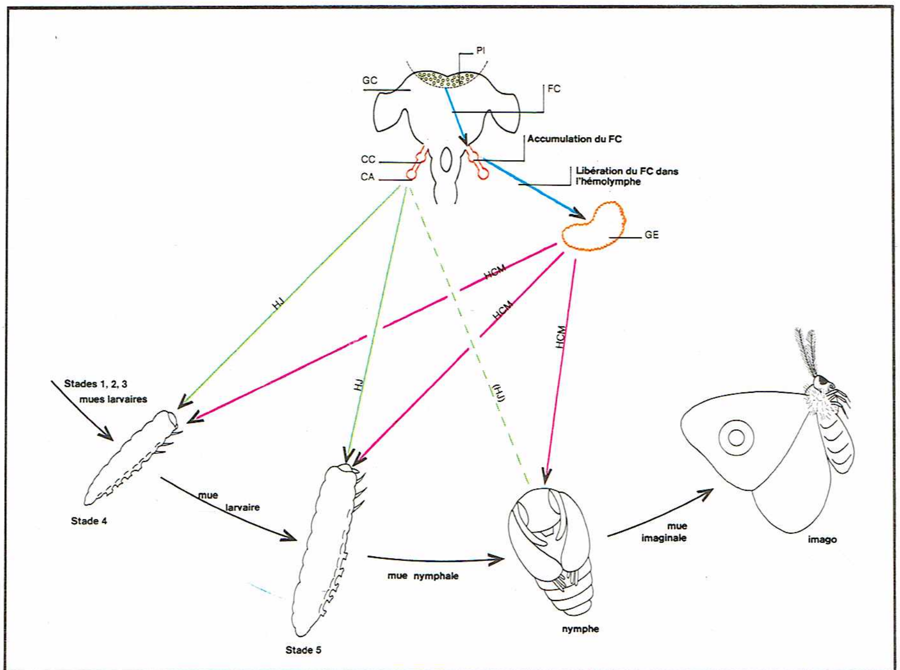

G. Hodebert

▲ ***Schéma général de la régulation hormonale du développement post-embryonnaire : CA, corpora allata ; CC, corpora cardiaca ; FC, facteur cérébral ; GC, ganglions cérébroïdes ; GE, glande ecdysiale ; HCM, hormone de croissance et de mue ; HJ, hormone juvénile ; PI, pars intercerebralis.***

libèrent le facteur cérébral qui migre, le long des axones des cellules nerveuses, vers les corpora cardiaca. (A l'heure actuelle, on pense qu'il pourrait se produire également une libération directe dans l'hémolymphe.) Des corpora cardiaca, le facteur cérébral passe dans l'hémolymphe, qui le véhicule dans tout le corps. Cependant, seule la glande ecdysiale est sensible à ce facteur, et, sous son influence, elle libère, dans l'hémolymphe, de l'ecdysone qui va stimuler les cellules de l'épiderme (organe cible) ; ce sont ces dernières qui entament alors des processus de destruction de l'ancienne cuticule (apolyse), puis déposent les couches de la nouvelle cuticule.

Les corpora allata sécrètent l'hormone juvénile ; cette dernière n'a pas d'influence sur le déclenchement et le déroulement de la mue elle-même, mais sur le type de mue qui va intervenir. Si l'hormone juvénile est présente en quantité suffisante, la mue sera de type larvaire, c'est-à-dire que l'on passera d'un certain stade larvaire au stade larvaire suivant. Si, au contraire, la quantité d'hormone est faible, on passera du stade larvaire au stade nymphal ; enfin, si elle est absente, la nymphe donnera l'imago. L'hormone juvénile tend donc à maintenir l'Animal à l'état larvaire ; sa concentration dans l'hémolymphe détermine le type de mue. Avec des expériences d'ablation des corpora allata, on a pu obtenir des imagos nains (en effet, un certain nombre de mues larvaires pendant lesquelles la larve aurait grandi ont été ainsi supprimées). Inversement, des implantations de corpora allata actifs permettent d'obtenir des mues larvaires supplémentaires et, par conséquent, des imagos géants (jusqu'au double de la taille normale).

Les très nombreux travaux spécialisés poursuivis par des équipes de chercheurs ont permis de préciser certains mécanismes, concernant les hormones de mue et leurs actions.

Ainsi, le facteur cérébral, que l'on pensait être stocké dans les corpora cardiaca, peut, en plus, chez certains Aphides et Hétéroptères, être emmagasiné dans les parois de l'aorte. On pense même que chez certains Insectes, tel *Bombyx mori*, le ver à soie, les lieux de stockage pourraient être les corpora allata et non les corpora cardiaca.

L'ecdysone n'a jamais pu être isolée dans la glande ecdysiale elle-même, et on pense que sa synthèse pourrait être opérée dans un autre organe. Si cette hypothèse était vérifiée, la glande ecdysiale ne serait qu'un lieu de stockage ou de production soit d'un précurseur de l'α-ecdysone, soit d'une substance qui favoriserait sa synthèse ou sa libération ; c'est pourquoi, les chercheurs portent maintenant la plus grande attention à certaines protéines du sang dont la teneur diminue quand la concentration en ecdysone augmente. On pense également que le corps gras jouerait un rôle dans la transformation de l'α-ecdysone en β-ecdysone. On a récemment isolé, chez des Insectes, certaines substances jusqu'alors inconnues, qui auraient une action dans le déclenchement des mues (20-26-dihydroxyecdysone, inokostérone, ponastérone...). De certaines plantes, on a extrait des substances proches de l'α-ecdysone et la β-ecdysone et qui ont une action analogue ; à l'heure actuelle, on connaît environ trois douzaines de ces *phytecdysones*. Il est possible que ces substances, ingérées par les larves mangeuses de Végétaux, soient utilisées comme précurseurs de l'hormone de mue.

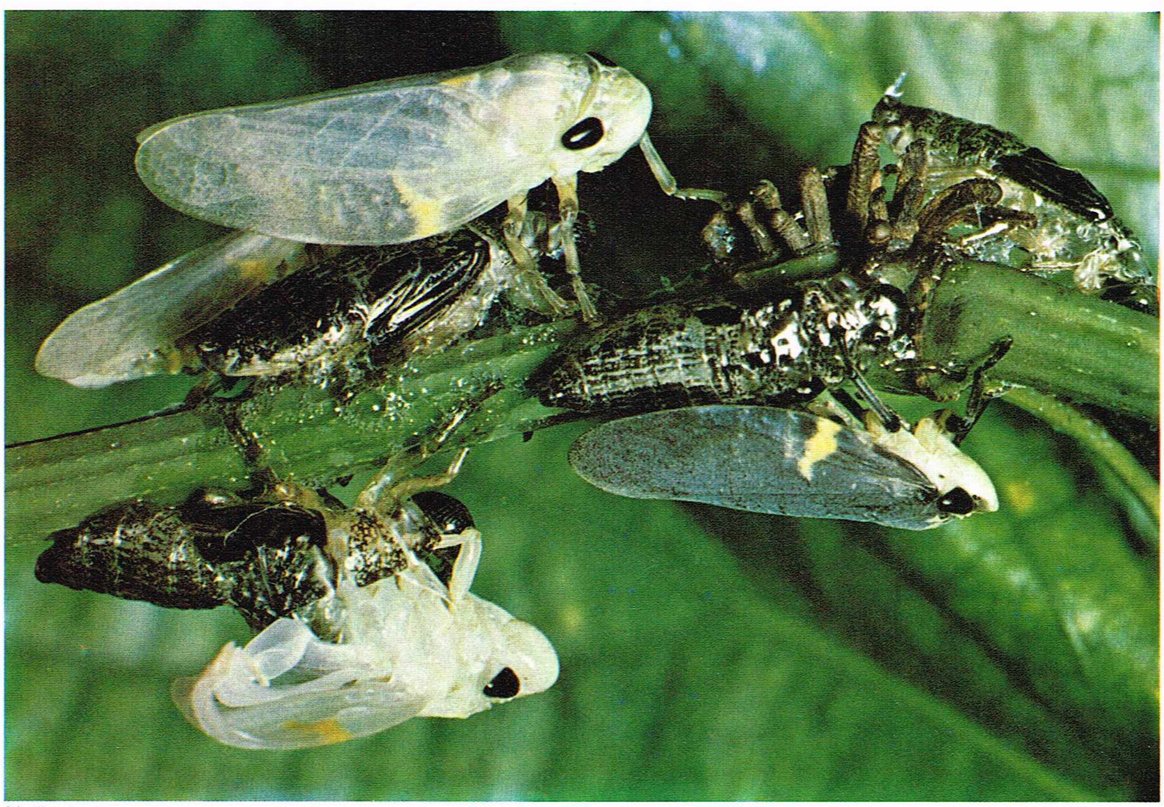

▶ ***Métamorphoses de* Ptyelus grossus.**

M. Boulard

Les chercheurs ont également isolé une deuxième hormone juvénile. On sait aussi maintenant que l'hormone juvénile est produite par les embryons, dès les premiers jours ou les premières heures du développement. Avec des dosages de plus en plus précis, on a constaté que, si la concentration en hormone juvénile devenait nulle au moment de la mue imaginale, elle redevenait importante chez l'adulte.

Autres actions des hormones de mue. L'ecdysone et l'hormone juvénile ont d'autres effets que ceux qu'elles exercent sur l'épiderme au moment de la mue. Nous n'en prendrons que quelques exemples.

Chez les holométaboles, l'ecdysone a un rôle primordial dans le développement des disques imaginaux. Lors de la pupaison des larves de Diptères, l'ecdysone provoque la contraction de la larve et le tannage de la cuticule (formation du puparium proprement dit) ou sa calcification ; de plus, il semble qu'une autre hormone, non encore isolée, intervienne également dans ce processus. L'ecdysone contrôle aussi le dépôt de certains pigments, les homochromes. Les pattes de certains Insectes se détachent très facilement quand on les saisit (réflexe d'autotomie), et leur régénération se fait au fur et à mesure des mues ; la possibilité d'un rôle joué par l'ecdysone dans cette régénération a souvent été suggérée par des expériences de transplantation de glande ecdysiale ; malheureusement, les résultats ne sont pas toujours très concluants. L'ecdysone agit aussi sur les chromosomes polytènes (chromosomes géants) des glandes salivaires, sur la régénération des muscles intersegmentaires, et sur l'activité des cellules phagocytaires durant les métamorphoses. Des travaux très récents (1972) semblent montrer que l'ecdysone, en présence d'un « facteur macromoléculaire » non encore bien connu, pourrait intervenir dans la spermatogenèse de certains Lépidoptères.

On sait maintenant que la sécrétion de l'hormone juvénile reprend après la mue imaginale, et même, dans certains cas, quelques jours avant cette mue. Elle intervient dans la détermination des phases solitaires et grégaires chez les criquets migrateurs. Ces phases se distinguent par des caractères morphologiques (pigmentation, dimorphisme sexuel), physiologiques (maturité sexuelle, fécondité, type de descendance), biochimiques et comportementaux. C'est une sécrétion accrue d'hormone juvénile qui est, au moins partiellement, responsable du maintien de certains caractères larvaires dans la phase solitaire. De même, le changement de couleur qui a lieu au cours du passage de la phase grégaire à la phase solitaire est sous la dépendance du taux d'hormone juvénile.

Mais le rôle le plus important de l'hormone juvénile est celui qu'elle joue dans les phénomènes de maturation sexuelle. Une femelle adulte de *Rhodnius prolixus* (Hémiptère hématophage) ne produit des œufs qu'après avoir pris un repas de sang. Si on enlève les corpora allata de cette femelle juste après le repas, elle ne pondra plus jamais d'œufs. On peut renverser cette situation, en implantant des corpora allata actifs (c'est-à-dire qui sécrètent de l'hormone juvénile). L'hormone juvénile contrôle la maturation des ovocytes et les mécanismes de dépôts des réserves vitellines, qui sont synthétisées dans le corps gras, libérées dans l'hémolymphe, puis incorporées dans les ovocytes.

Cependant, l'hormone juvénile n'agit pas seule dans ces phénomènes de maturation sexuelle et les neurosécrétions du cerveau y jouent un rôle très important. Enfin, signalons que l'hormone juvénile semble aussi être nécessaire à l'activation des glandes accessoires.

Les castes sont représentées dans certains groupes d'Insectes (termites, fourmis, abeilles) par un type reproducteur femelle, « la reine », par un ou plusieurs types femelles non reproducteurs, les « ouvrières », et par au moins un ou deux types de mâles, les mâles reproducteurs et les « soldats » (chez les termites). Ces castes se distinguent par des caractères morphologiques, anatomiques, physiologiques et comportementaux.

Chez les abeilles, les ouvrières ont des ovaires normalement réduits et ne pondent pas. Si on enlève la reine, on constate que les ovaires des ouvrières se développent. En effet, la reine sécrète, au niveau de ses glandes mandibulaires, des substances qui, lors du léchage de la reine par les ouvrières, sont absorbées par ces dernières et inhibent l'activité sécrétrice de leurs

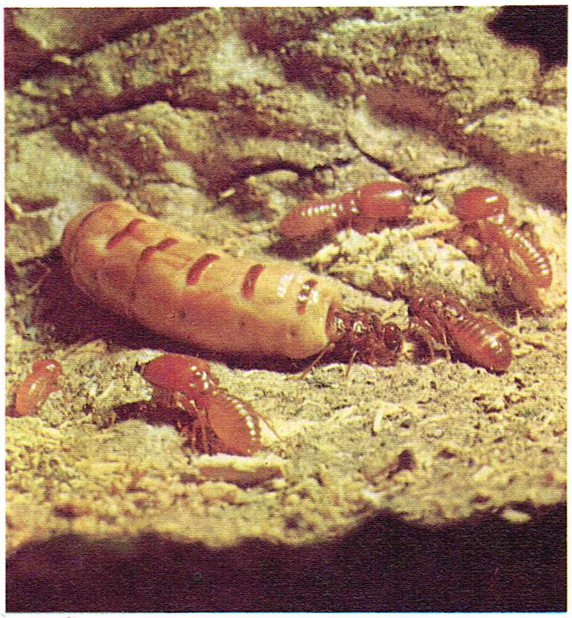

A. Margiocco

◀ *Femelle et « soldats » de termites* **Bellicositermes bellicosus.**

corpora allata ; c'est pourquoi, ceux-ci ne libèrent pas d'hormone juvénile responsable du développement ovarien. Si l'on enlève la reine, les ovaires des ouvrières se développent normalement.

Chez une fourmi, *Formica rufa*, l'hormone juvénile semble jouer un rôle indirect dans l'apparition des castes. La reine pond en hiver un petit nombre d'œufs de grande taille qui donneront naissance à des reines. En été, au contraire, elle pond en grandes quantités des petits œufs, qui n'atteignent qu'un huitième de la taille des œufs d'hiver et qui donneront des ouvrières. Les gros œufs sont riches en A.R.N. et en vitellus. On suppose qu'à cause du rôle de l'hormone juvénile dans le dépôt du vitellus, une diminution de l'activité des corpora allata de la reine provoque la ponte de petits œufs pauvres en vitellus, destinés à donner des ouvrières.

Mécanismes d'action des hormones. Nous étudierons brièvement les mécanismes possibles par lesquels agissent ces hormones. Pour l'ecdysone, deux thèses sont en

▼ *Les fourmis sont des Insectes sociaux bien connus ; cette illustration montre un nid (en section verticale) de fourmis rouges.*

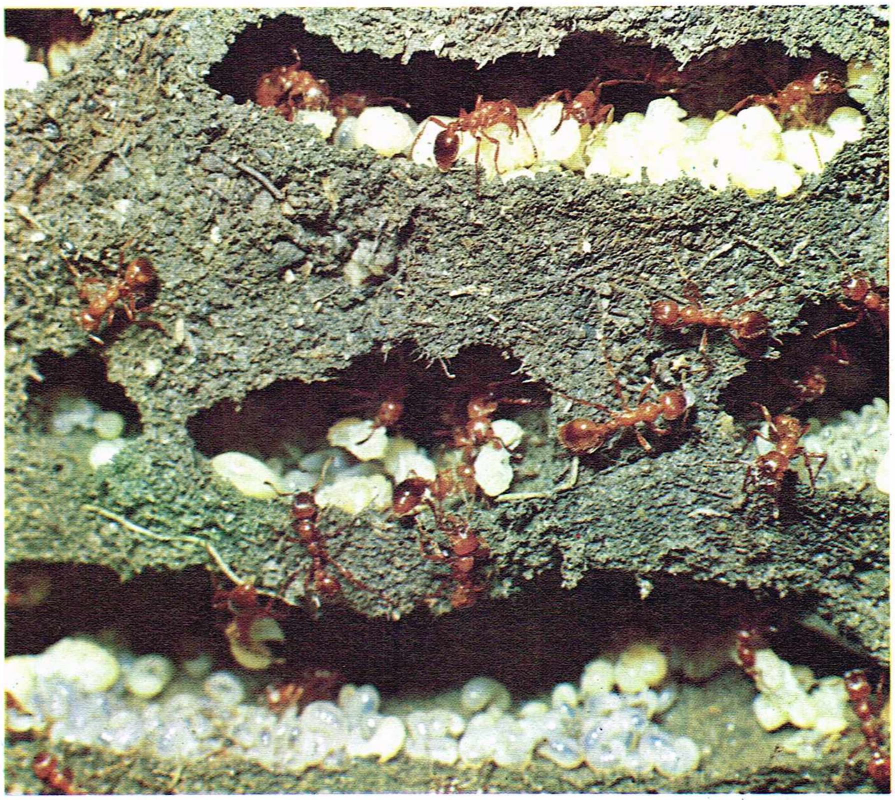

G. Mazza

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Chez certains Lépidoptères, comme l'imago de*** **Bombyx mori** ***que l'on voit ici, sorti de son cocon, la diapause est induite par des photopériodes longues.***

présence; l'une est fondée sur les découvertes de Jacob et Monod (mécanismes de régulation génique, existence d'un répresseur sur lequel se fixerait l'ecdysone pour inhiber son action); l'autre suggère que l'ecdysone modifie la perméabilité des membranes cellulaires aux petits ions, en particulier au potassium dont la concentration augmente dans les cellules, ce qui activerait des gènes spécifiques. C'est également à partir de ces deux hypothèses que l'on tente d'expliquer le mode d'action de l'hormone juvénile. En conclusion, on ne sait rien d'absolu sur les mécanismes d'action de ces hormones; il y a là un champ de la biologie absolument vierge.

Diapause et quiescence

L'existence d'un stade de repos, ou dormance (au sens large), est un caractère très répandu chez les êtres vivants qui habitent des milieux où les variations climatiques saisonnières sont très importantes. Ce stade de dormance est caractérisé par un arrêt du développement embryonnaire, de la croissance ou de l'activité reproductrice, et n'existe pas seulement chez les Insectes, mais également chez les autres Arthropodes, les Végétaux, et même chez les Vertébrés (par exemple, l'hibernation des Mammifères). La quiescence est une phase d'arrêt du développement due à des conditions temporaires défavorables; elle cesse dès que les conditions redeviennent favorables.

Dans la diapause, un ensemble particulier de facteurs externes bloquent le développement par l'intermédiaire du système neuro-endocrinien, même si les autres conditions, pourtant favorables, sont présentes. La rupture de diapause ne s'effectuera que grâce à un autre ensemble de facteurs opérant toujours par l'intermédiaire du système neuro-sécréteur, et qui lèvera le blocage. La diapause peut intervenir pendant le développement embryonnaire (diapause embryonnaire au stade de l'embryon rudimentaire, ou embryon complet, mais non encore éclos, et à tous les stades intermédiaires), pendant le développement larvaire (diapause larvaire), pendant le stade nymphal (diapause nymphale) ou imaginal (dans ce cas, la diapause se limite à un arrêt de l'activité reproductrice). La diapause peut être obligatoire ou facultative. Si elle est obligatoire, l'espèce est *univoltine,* c'est-à-dire qu'il y a une seule génération par an. Si elle est facultative, l'espèce peut être *bivoltine* (deux générations par an) ou *polyvoltine* (plusieurs générations par an). Le plus souvent, il n'y a qu'un seul stade de diapause, mais on connaît quelques cas où l'espèce subit deux diapauses. Les facteurs intervenant dans le déclenchement de la diapause sont très nombreux et extrêmement complexes. ils peuvent être extérieurs (par exemple climatiques) ou intérieurs (cessation de l'activité des systèmes neuro-sécréteurs conditionnant le développement et la croissance).

Les principaux facteurs externes intervenant dans le déclenchement de la diapause sont la photopériode, c'est-à-dire l'alternance du jour et de la nuit et les longueurs relatives de ces deux périodes, la température et la nutrition. C'est le rapport de la longueur du jour à la longueur de la nuit qui détermine le déclenchement de la diapause, mais son action elle-même est souvent en rapport avec la température; une longueur de jour particulière induit la diapause lorsque la température est comprise entre certaines limites. Chez la majorité des Insectes, une photopériode courte (entre six et seize heures de jour par vingt-quatre heures) déclenche la diapause. Le cas du ver à soie *Bombyx mori* (Lépidoptère), où ce sont des photopériodes longues qui induisent la diapause (durée de jour supérieure à seize heures), est exceptionnel.

Le mécanisme de l'action de la photopériode n'est pas encore totalement élucidé; on pense que ce sont les pigments caroténoïdes qui seraient les récepteurs des stimuli. Par ailleurs, on sait que ce ne sont pas les yeux qui interviennent; chez certains Lépidoptères, ce seraient les ocelles; chez *Pieris brassicae,* un Lépidoptère, le cerveau peut répondre directement à la photopériode. On pense de plus en plus à l'heure actuelle que les facteurs agissent sur les cellules neurosécrétrices de la pars intercerebralis et contrôlent la sécrétion du facteur cérébral. Ce seraient, en outre, les mêmes mécanismes qui régiraient l'entrée en diapause et sa rupture.

La levée de diapause se fait très souvent par l'exposition au froid, le retour à la température normale permettant la reprise du développement. L'action du froid s'effectue par l'intermédiaire du cerveau; on l'a démontré sur *Hyalophora cecropia* (Lépidoptère Saturnidé) par l'expérience suivante. Lorsqu'une nymphe de ce papillon en état de diapause est privée de son cerveau, elle ne reprend jamais son développement, quelles que soient ensuite les conditions dans lesquelles on la place. Cependant si on implante un cerveau de nymphe refroidie, c'est-à-dire ayant subi une longue exposition au froid, le développement aura lieu de nouveau. La présence de la glande ecdysiale est, elle aussi, nécessaire, chez les larves. On en conclut que la diapause est due à l'absence de neurosécrétions cérébrales qui provoquent la libération d'ecdysone. Mais, chez les œufs, la diapause est provoquée par la présence d'une hormone inhibitrice sécrétée par la mère au moment de la ponte; l'existence d'une diapause de l'œuf de *Bombyx mori* est déterminée par les conditions de photopériode et de température auxquelles la mère a été soumise dès les premiers stades de son développement, dans l'œuf et durant le premier stade larvaire. Cette diapause est provoquée par une hormone de

diapause sécrétée par le ganglion sous-œsophagien de la mère. On a réussi à extraire cette substance; si elle est injectée à une nymphe femelle de *Bombyx*, le papillon naissant de cette nymphe produit obligatoirement des œufs qui entreront en diapause, même si, primitivement, il appartenait à une race produisant des œufs sans diapause.

Chez les imagos, la diapause se manifeste essentiellement par un arrêt des phénomènes de reproduction. Elle est sous le contrôle du taux d'hormones juvéniles produites par les corpora allata. Il faut signaler enfin qu'on pense avoir trouvé un cas où la levée de diapause se ferait par une hormone, la proctodone, sécrétée par des cellules particulières de l'intestin. Cependant, des expériences sont encore en cours pour établir définitivement son rôle.

Le déterminisme du sexe

On entend par déterminisme du sexe le mécanisme par lequel vont apparaître les mâles et les femelles au sein d'une même espèce. On sait que les noyaux des cellules contiennent des chromosomes associés par paires, parmi lesquels les chromosomes sexuels forment une paire de chromosomes semblables (appelée XX) ou dissemblables (XY). Quelquefois, il n'y a qu'un seul chromosome sexuel (XO). Il existe des formules chromosomiques sexuelles complexes, du genre X_1X_2Y, XY_1Y_2, jusqu'à $X_1X_2X_3X_4X_5Y$ chez un Hétéroptère Réduvidé *(Sinea rileyi)*.

Les chromosomes non sexuels, appelés *autosomes,* sont en nombre très variable : de deux, chez certains Diptères Simulidés, à cent quatre-vingt-dix ou cent quatre-vingt-onze, chez un Lépidoptère Psychidé, *Lysandra nivescens;* c'est d'ailleurs le plus grand nombre de chromosomes connu chez un être vivant.

Lors de leur formation, les gamètes n'auront plus, après le phénomène de réduction chromatique, que la moitié du nombre des autosomes et un seul chromosome sexuel ou même pas du tout, si on a affaire à une formule du type XO. Les XX sont dits *homogamétiques*, c'est-à-dire qu'ils vont produire des gamètes d'un seul type (X). Les XY ou XO sont dits *hétérogamétiques*, c'est-à-dire qu'ils produiront deux types de gamètes (X et Y, X et O). Le sexe hétérogamétique est représenté par les femelles chez les Lépidoptères et les Trichoptères, tandis qu'il est représenté par les mâles chez tous les autres Insectes, y compris les Aptérygotes. En principe, les gamètes de chaque catégorie sont produits en nombre égal; de ce fait, au moment de la fécondation, il y a théoriquement autant d'œufs XX, XY ou XO, et le *sex-ratio* est égal à un (c'est-à-dire qu'il y a autant de mâles que de femelles). Mais dans certaines conditions de température, le sex-ratio peut être modifié; ainsi chez *Talaeporia* (Lépidoptère Psychidé), on aura cent femelles pour cent soixante-deux mâles si les œufs se développent entre 30 et 37 °C, et cent femelles pour soixante-cinq mâles s'ils se développent entre 3 et 8 °C. D'autres facteurs peuvent aussi intervenir, comme la longueur de la période séparant la maturité sexuelle de la date de la fécondation, les facteurs nutritionnels; ainsi, selon la nutrition, les ovocytes peuvent donner soit de petits œufs qui ne subiront pas la réduction chromatique, et qui produiront des femelles, soit de gros œufs qui subiront la réduction chromatique et produiront des mâles. Un autre exemple classique du déterminisme du sexe est représenté par les Hyménoptères, chez lesquels le déterminisme est chromosomique, mais par absence de chromosome; les femelles sont capables de contrôler la fécondation des œufs qu'elles pondent; les œufs fécondés donneront des femelles, les œufs non fécondés des mâles.

Cependant, dans les phénomènes classiques, il ne suffit pas qu'il y ait un chromosome Y pour que l'Insecte soit mâle; dans certains cas, chez *Drosophila melanogaster* par exemple, le sexe dépend d'un équilibre entre certains gènes portés par les autosomes (caractères mâles). Le chromosome Y n'a pas de rôle direct dans le déterminisme du sexe. Les individus ayant un chromosome X et pas de chromosome Y sont des mâles, mais stériles, avec une spermatogenèse anormale. La spermatogenèse est normale quand certains gènes portés par le chromosome Y sont présents.

Les *gynandromorphes* sont des individus chez lesquels certaines parties du corps sont mâles et d'autres femelles. Cette particularité est due aux combinaisons chromosomiques des cellules qui sont variables d'un territoire à un autre. Ces phénomènes débutent très tôt, au moment de la fécondation de l'œuf par le spermatozoïde, par l'élimination d'un chromosome, ou par la fécondation d'un œuf contenant deux noyaux, l'un ayant un X, l'autre un Y, comme chez les Lépidoptères. Cela entraîne, lors du clivage de l'œuf, l'existence de noyaux à structure « mâle », et « femelle », qui vont exprimer leurs caractères lors de la mue imaginale. On distingue deux types de gynandromorphes : le type *bipartite,* c'est-à-dire où la moitié de l'Insecte est mâle, l'autre moitié femelle, et le type mosaïque, chez qui les caractères mâles et femelles sont répartis au hasard.

▼ Les Insectes géants, tel ce Cérambycide américain* Titanus giganteus *qui mesure jusqu'à 20 cm, se rencontrent dans les régions tropicales.

M. Boulard

Écologie

A un observateur superficiel il pourrait sembler que la nature a surtout favorisé les Vertébrés; en effet, dans les milieux naturels, ce sont les Oiseaux, les Mammifères, les Poissons, parfois les Reptiles et les Batraciens, qui apparaissent au premier coup d'œil. Cependant la réalité se présente bien différemment à celui qui veut se donner la peine d'observer avec un peu d'attention. Grâce à leurs particularités biologiques, les Insectes représentent une réussite éclatante à tous les points de vue.

Particularités biologiques des Insectes

La petite taille des Insectes explique qu'ils puissent souvent passer inaperçus. Les espèces les plus communes ont une taille qui est de l'ordre de quelques millimètres. Les plus petits Insectes sont de taille inférieure aux plus grands Protozoaires : des Hyménoptères parasites qui se développent dans les œufs d'autres Insectes ne dépassent pas 0,5 mm, le plus petit étant sans doute *Alaptus magnanimus,* Hyménoptère Mymaridé qui mesure 0,2 mm. Des Coléoptères de la famille des Ptiliidae ne sont guère plus grands. Les Insectes géants se rencontrent dans les régions tropicales; ils peuvent atteindre la taille des petits Mammifères; *Titanus giganteus,* un Cérambycide américain, mesure jusqu'à 20 cm; le papillon *Erebus agrippina* du Brésil a une envergure de 30 cm; certains phasmes atteignent la même longueur. La petite taille de beaucoup d'Insectes facilite leur transport par le vent ou involontairement par l'homme : on a trouvé, dans des filets posés dans une base de l'Antarctique, des espèces australiennes qui avaient été entraînées à plus de 3 000 km de leur lieu d'origine. En 1933, cinquante ans après l'éruption du Krakatoa, qui avait anéanti toute vie sur cette île proche de Java, sept cent vingt espèces d'Insectes, venues des îles voisines, transportées sans doute par des courants aériens ou grâce à des radeaux formés de troncs d'arbres et de débris végétaux, étaient déjà recensées.

Les Insectes représentent au moins sept cent mille du million d'espèces animales connues; le nombre réel d'espèces est peut-être de deux à trois fois supérieur. Cette extraordinaire diversité a permis aux Insectes de coloniser presque tous les milieux, sauf le milieu marin où ils sont très rares. Une autre raison pour laquelle les Insectes ont de très nombreux individus est leur fécondité élevée et leur cycle de développement souvent court, qui permettent plusieurs générations par an. Leur abondance est telle qu'ils représentent sur terre le groupe animal dont la biomasse (c'est-à-dire le poids à l'hectare) est la plus élevée, alors qu'en mer ce record est détenu par de petits Crustacés, les Copépodes. Quelques chiffres donneront une idée de l'abondance des Insectes. En Allemagne, dans un champ de luzerne, on a compté sept cent quatre-vingt-dix espèces d'Insectes; dans un milieu naturel peu perturbé par l'homme comme la forêt de Fontainebleau, il y a plus de trois mille espèces de Coléoptères sur 25 000 hectares. Une colonie d'abeilles peut comprendre jusqu'à cinquante mille individus et un nid de fourmis jusqu'à cinq cent mille. Le professeur Pavan a estimé que, dans les Alpes italiennes, il y a plus de un million de nids de fourmis rousses, peuplés de trois cents milliards d'individus, capables de consommer en une année mille cinq cents tonnes de nourriture. Le record est détenu par le criquet pèlerin dont certains nuages, ou essaims, couvrant jusqu'à 100 km², ont été estimés à 70 000 tonnes. Alors que la glossine, ou mouche tsé-tsé, qui est ovovivipare, ne donne qu'une larve à la fois, et a donc une faible fécondité, la reine de l'abeille domestique pond de deux mille à trois mille œufs par jour et celle de certaines espèces de termites peut en pondre plusieurs millions au cours de sa vie. Le charançon du blé, *Sitophilus granarius,* a une fécondité de cinquante à deux cent cinquante œufs et huit à douze générations annuelles. Lorsque les conditions climatiques sont favorables, le puceron du chou *Brevicoryne brassicae* peut avoir douze générations entre le 15 mars et le 15 août. Pendant ce temps la descendance théorique d'une femelle pourrait être de cinq cents milliards d'individus, représentant une biomasse de 250 tonnes !

Il existe, heureusement, dans la nature des mécanismes régulateurs qui interviennent pour limiter l'expansion des Insectes. Lorsque ces mécanismes ne peuvent agir, des pullulations se produisent. C'est ce qui a lieu souvent à la suite d'interventions maladroites de l'homme.

Les Insectes manifestent une très grande résistance vis-à-vis des agressions du milieu. Ils peuvent ainsi coloniser des régions aux climats extrêmes. Des larves de moustiques et de divers autres Diptères habitent des sources chaudes dont la température atteint 52 °C; à l'opposé, le Coléoptère cavernicole, *Isereus xambeui,* vit et se reproduit dans une grotte glacée de l'Isère, dont la température varie de 0 °C en hiver à + 1 °C seulement en été. Au Canada, un Hyménoptère, *Bracon cephi,* résiste à des froids de — 20 °C en accumulant dans son organisme des quantités importantes de glycérine, substance ayant un pouvoir protecteur et agissant comme un véritable antigel. Au Sahara, la fourmi *Cataglyphis bombycina* se déplace en plein soleil à la surface du sable alors que la température de l'air dépasse 50 °C.

Beaucoup d'Insectes, dits *xérophiles,* peuvent supporter une grande sécheresse sans en souffrir. Les cas les mieux connus sont ceux du ver de farine *Tenebrio molitor,* et de la mite, dont la chenille mange la laine des vêtements. Ces Insectes peuvent se passer d'eau dans leur alimentation et sont capables d'utiliser l'eau de métabolisme provenant de l'oxydation de leurs aliments. La larve de *Tenebrio* peut perdre presque toute l'eau de son corps sans en souffrir; elle grandit simplement moins vite.

Les rayonnements ionisants, si dangereux pour l'homme et les Mammifères, ne sont nocifs aux Insectes qu'à des doses élevées, dix à cent fois supérieures à celles qui tuent les Mammifères.

Les Insectes peuvent aussi résister à de très basses pressions et à l'absence momentanée d'oxygène. Cette caractéristique leur permet de coloniser les hautes montagnes, où l'air se fait rare, ou bien le fond des lacs dont l'eau est dépourvue d'oxygène et où la vie anaérobie est obligatoire.

L'existence d'un tégument plus ou moins imperméable rend les Insectes relativement résistants aux produits toxiques. Le cas extrême de résistance est celui de la mouche *Psilope petrolei,* dont les larves mangent des Insectes morts qui tombent dans le pétrole et peuvent aussi se nourrir des paraffines du pétrole grâce à des Bactéries qui vivent en symbiose dans leur intestin.

Leur fécondité élevée et leur grande rapidité de développement donnent aux Insectes des possibilités d'adaptation rapide à des conditions de vie nouvelles. Les deux exemples les plus remarquables sont certainement l'acquisition de la résistance aux insecticides et l'apparition de ce que l'on a appelé le *mélanisme industriel.* On désigne sous ce nom un phénomène qui est apparu depuis la seconde moitié du XIXe siècle chez plusieurs espèces de papillons de Grande-Bretagne, et en particulier chez *Biston betularia,* la phalène du bouleau. Le milieu naturel a été très modifié par l'industrialisation et les troncs des arbres sont de plus en plus souvent recouverts de suie noire. Or, les papillons comme *Biston betularia* se

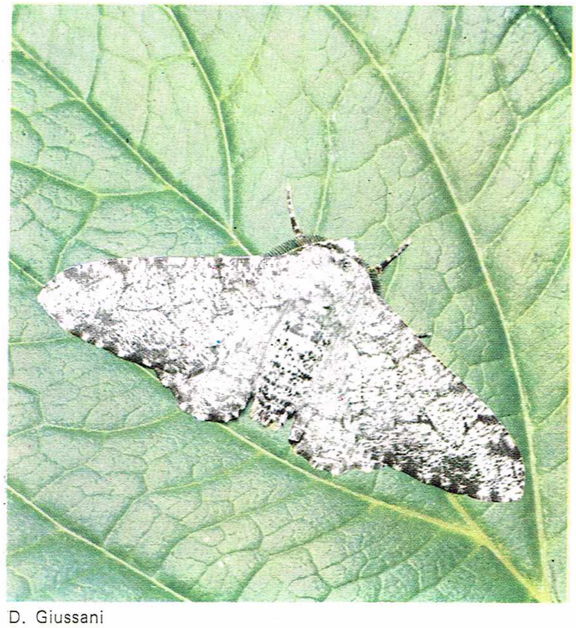

► *Le mélanisme industriel a induit chez plusieurs espèces de papillons, notamment chez* Biston betularia *dont on voit ici le phénotype normal, des formes foncées de plus en plus communes dans les régions industrielles.*

D. Giussani

posent sur les arbres avec les ailes étalées; ils sont alors presque invisibles sur les arbres clairs des régions non industrialisées, en raison de leur couleur de fond blanche, parsemée de taches noires. En 1848, une forme foncée est apparue aux environs de Manchester et elle est devenue de plus en plus commune; actuellement, elle a supplanté presque totalement la forme claire dans les régions industrielles. On a pu montrer que, sur les troncs noircis par la suie, la forme noire est mieux camouflée que la forme claire. Elle échappe ainsi plus facilement aux Oiseaux insectivores. Résultat d'une mutation, la forme foncée de la phalène du bouleau a pu s'installer rapidement (en moins de cinquante ans), grâce à la sélection naturelle.

Ce phénomène s'est produit également chez soixante-dix autres espèces de papillons. Il est connu chez une coccinelle de notre pays : la forme des campagnes est rouge avec des taches noires, alors que la forme des villes devient de plus en plus foncée, certains exemplaires ayant même perdu complètement leur pigmentation rouge.

L'univers des Insectes

En raison de leur petite taille, les Insectes vivent dans un milieu très différent du nôtre. Ils ont fréquemment la possibilité de trouver des refuges dont les conditions de température, d'humidité et d'éclairement leur sont favorables. Ces climats localisés à des espaces peu étendus sont appelés *microclimats,* par opposition au climat général d'une région donnée auquel sont soumis l'homme et les Animaux de grande taille et qui correspond aux valeurs mesurées par les stations météorologiques.

En montagne, l'hiver, la neige protège très efficacement le sol du refroidissement ; pour une température de — 33,7 °C à un mètre au-dessus du sol, il règne sous un mètre de neige une température de — 0,6 °C, très supportable pour les Insectes qui se sont réfugiés dans le sol. La seule présence de pierres sur le sol suffit à créer des microclimats très variés (c'est également le cas en plaine). Dans l'Himalaya, vers 4 000 mètres d'altitude, par une journée ensoleillée et sans nuages, la température atteint 30 à 35 °C, à la surface des rochers, celle de l'air est de 2 à 7 °C; la nuit, le rayonnement nocturne est tel que la température baisse jusqu'à — 10 °C à la surface des rochers, alors qu'elle reste à peu près constante, de l'ordre de 7 °C sous les pierres. L'humidité est constamment élevée sous les pierres, alors que le sol est sec; on peut le constater en retournant un bloc rocheux par une journée ensoleillée en montagne. On comprend l'importance écologique de ces refuges et le fait que, dans les sévères conditions climatiques de la haute montagne, presque tous les Invertébrés vivent sous les pierres.

Le microclimat des *troncs d'arbres* abattus où habitent de nombreux Insectes est également très particulier. Alors que la face supérieure, exposée au soleil, a une température élevée pouvant atteindre 50 °C en surface ou sous l'écorce, la face inférieure a une température bien moins élevée, voisine de celle qui est enregistrée dans les abris météorologiques; par contre, l'humidité y est très élevée. Ces variations sont importantes pour le développement des Insectes. Par exemple, le Coléoptère Scolytide *Ips typographus* ne pond ni dans la zone trop exposée au soleil, ni dans la zone inférieure trop humide, mais dans une zone latérale où la température et l'humidité conviennent à l'éclosion des œufs et au développement des larves.

Le sol a un microclimat très spécial. L'humidité y est généralement élevée et la température très variable suivant la profondeur. A la surface d'un sol nu, dépourvu de végétation, comme une plage sableuse ou une dune, la température au soleil peut dépasser 50 °C en plein midi dans nos régions et, le plus souvent, les Insectes évitent d'y circuler en plein jour. Mais, dès que l'on s'enfonce de quelques centimètres, les variations de température sont très amorties; on peut mesurer 22 °C à 10 cm de profondeur, alors qu'il règne 54 °C en surface. Les Insectes fuient la grande chaleur en s'enterrant le jour au pied des plantes et ils adoptent un rythme d'activité nocturne.

La forêt fournit des exemples de microclimats très variés offrant des possibilités à des Insectes aux besoins fort divers.

Dans la grande forêt équatoriale telle que celle qui existe encore en Afrique, la pénombre règne en sous-bois. Quand on descend, par une journée ensoleillée, de la cime des grands arbres, qui culminent vers 40 mètres, jusqu'au sol, on a l'impression de descendre dans un puits. L'éclairement passe de 100 000 lux à 200 lux; la température s'abaisse de 32 °C à 27 °C et l'humidité relative s'élève de 30 % à 80 %; le vent est considérablement ralenti et presque nul au niveau du sol. Cette variation verticale des principaux facteurs climatiques explique la répartition de beaucoup d'Insectes; certains, qui recherchent un éclairement intense, restent constamment au sommet des grands arbres et ne descendent presque jamais au sol (c'est le cas de beaucoup de papillons); d'autres, comme certains moustiques, se cantonnent à une hauteur où l'humidité relative leur est favorable; d'autres, enfin, ne quittent jamais la surface du sol. Beaucoup s'installent dans les clairières, où la faune est souvent plus dense et plus variée que dans le sous-bois.

Dans les forêts des régions tempérées, les variations microclimatiques sont moins nettes, mais elles existent. La lumière est indispensable au vol des scolytes; des espèces comme *Cryphalus piceae* ou *Pityogenes chalcographus* ne s'installent pour pondre que sur des branches ensoleillées situées sur des arbres en bordure d'une clairière.

Les Insectes et la vie aquatique

L'abondance des Insectes et leurs possibilités d'adaptation en font des éléments essentiels de tous les milieux; néanmoins, ils sont fort rares en mer. On ne peut guère citer que les *Halobates,* punaises qui vivent à la surface de l'eau dans certaines régions, telles que la mer des Sargasses, les côtes de Floride et de Californie, ainsi que des Diptères Chironomides du genre *Pontomyia* que l'on trouve dans le Pacifique, dans la région des îles Samoa et

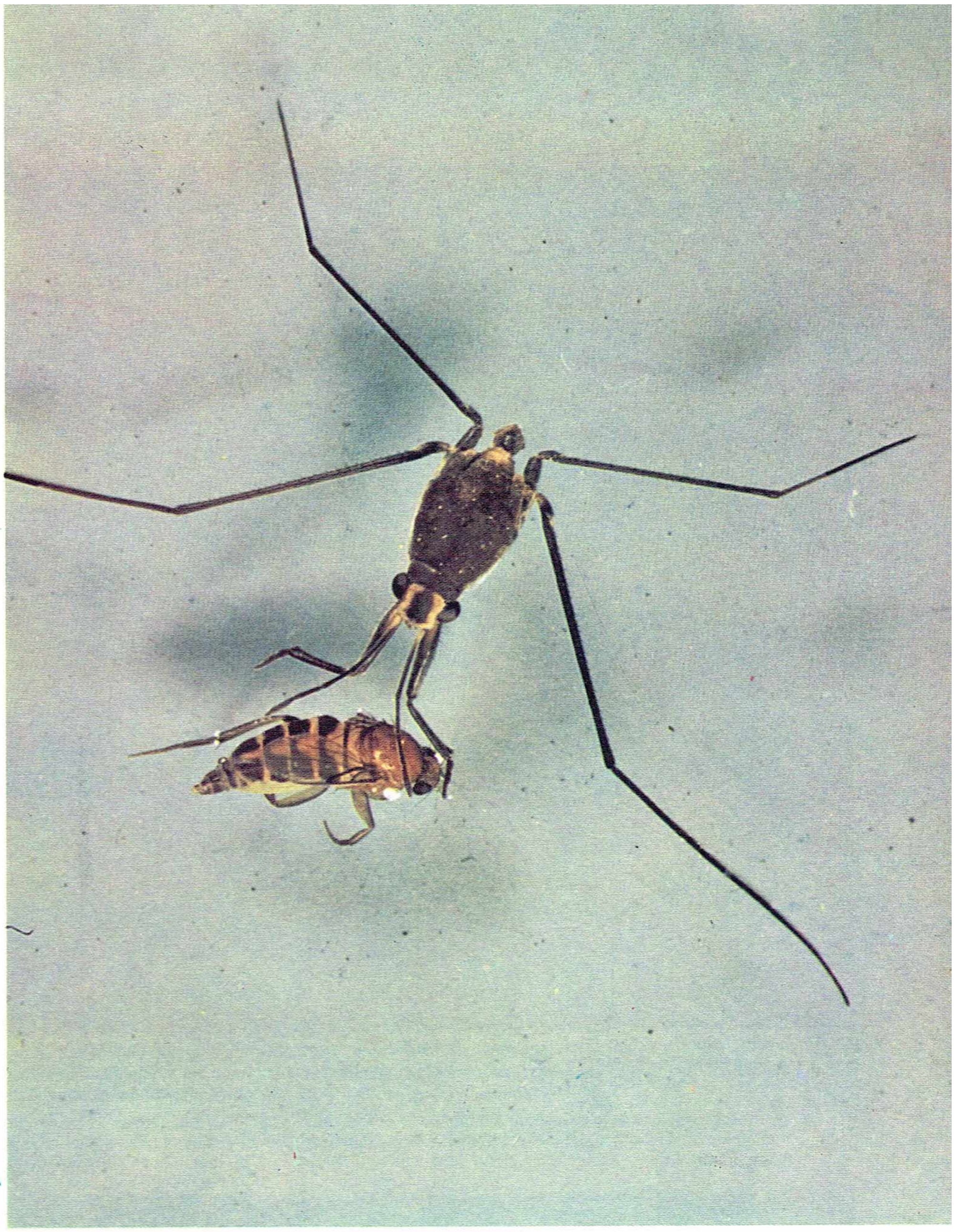
J. Carayon

▲ ***Les* Halobates, *ici un mâle vivant agrippant un moucheron, sont quelques-uns des Insectes vivant à la surface des mers.***

A. Margiocco

▲ *En haut, un spécimen de* Nepa rubra, *Insecte plus connu sous le nom de « scorpion d'eau ».*

▼ *Ci-dessous,* Ranatra linearis *autre Insecte aquatique; en bas, larve aquatique d'Odonate Zygoptère. Ces larves respirent grâce à des trachéobranchies rectales.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

du Japon. Les mâles des *Pontomyia* nagent activement, les femelles, dépourvues d'ailes et de pattes, de même que les larves, vivent dans des tubes construits entre les feuilles de plantes aquatiques submergées.

Pourquoi les Insectes sont-ils quasiment absents au cœur des océans? La salinité de l'eau ne semble pas pouvoir être mise en cause puisque de nombreuses espèces se rencontrent dans certaines pièces d'eau très salée, comme les plans d'évaporation des marais salants. Le Coléoptère Dytiscide *Potamonectes cerisyi* pullule dans les eaux sursalées de Camargue; des larves de Diptères des genres *Ephydra* et *Stratiomiya* supportent des salinités de 350 grammes de sel par litre, soit dix fois la salinité de l'eau de mer normale. Peut-être la place que les Insectes auraient pu occuper en mer était-elle déjà prise par d'autres organismes, tels que les Crustacés?

On peut distinguer deux catégories d'Insectes aquatiques : les espèces de pleine eau ou vivant sur le fond sont des aquatiques vrais, et les espèces vivant en surface sont des semi-aquatiques. Les principaux facteurs limitant la pénétration des Insectes en profondeur sont l'absence d'oxygène et la faiblesse de l'éclairement. Dans les grandes profondeurs des lacs on trouve peu d'Insectes; toutefois certaines larves de Chironomides ont été découvertes à 300 mètres. Notons que très peu d'Insectes passent la totalité de leur vie dans l'eau sans en sortir au moins à certaines périodes. Cependant, des punaises aquatiques de la famille des Hélopeltidés, qui vivent dans le lac Tanganyika, semblent bien rester constamment submergées; de même, une espèce de corise se rencontre constamment à 15 mètres de profondeur et à plusieurs kilomètres au large dans les grands lacs américains, et elle ne vient apparemment en surface qu'à de longs intervalles.

Les conditions de vie dans les eaux douces déterminent en grande partie la biologie des Insectes aquatiques. La teneur en oxygène dissous est un facteur important, car ce gaz est peu soluble dans l'eau, et il l'est d'autant moins que la température est plus élevée. Les Insectes aériens respirent par des trachées qui s'ouvrent à l'extérieur par des stigmates servant aux échanges gazeux.

Une solution pour les Insectes aquatiques consiste dans la fermeture de tous les stigmates et le développement de branchies trachéennes plumeuses, généralement localisées de chaque côté de l'abdomen. Celles-ci se rencontrent, par exemple, chez les larves d'éphémères, de Plécoptères, de Trichoptères, et de divers Coléoptères; chez les larves de libellules, les branchies sont situées dans le rectum. Parfois, l'absorption d'oxygène se fait à travers la paroi du corps, qui est suffisamment mince pour être perméable aux gaz; c'est le cas chez certaines larves d'éphémères ou de Lépidoptères aquatiques.

La majorité des Insectes aquatiques à l'état adulte (Coléoptères, Hémiptères) respirent de l'air en nature. Généralement, leurs stigmates sont partiellement fermés et seuls ceux qui sont situés dans la partie postérieure du corps tendent à rester fonctionnels. Ces Insectes gardent une provision d'air qui peut se trouver soit dans des troncs trachéens assez volumineux pour servir de réservoirs (larves de moustiques et de dytiques), soit sous les élytres (dytique adulte), soit encore sur le dessus de l'abdomen (notonecte et corise). Dans ce dernier cas, le corps est recouvert de poils non mouillables, hydrofuges, qui tiennent l'eau à distance, de sorte que l'Insecte, quand il reste dans l'eau, peut emporter avec lui sa provision d'air. Ces réserves d'air sont bien visibles chez les notonectes : lorsque l'Insecte nage, elles forment sur le corps un plastron argenté brillant. Grâce à ses réserves, l'Insecte peut rester immergé plus ou moins longtemps; un dytique, en trois à quatre minutes de plongée, voit sa réserve sous-élytrale passer de 19,5 % d'oxygène à 1 %.

Un mécanisme physique de diffusion augmente les possibilités de durée de la plongée : quand la pression partielle de l'oxygène diminue dans la réserve d'air, l'équilibre est en partie rétabli par la diffusion de l'oxygène dissous dans l'eau vers l'intérieur de la réserve, alors que l'azote de l'eau ne diffuse que bien plus lentement. Les réserves d'air interviennent en outre en allégeant le poids spécifique de l'Insecte et en lui permettant ainsi de gagner plus facilement la surface.

Chez les Coléoptères du genre *Elmis* et chez la punaise *Apheilocheirus,* des poils hydrofuges recourbés à l'extrémité limitent une couche d'air fortement retenue,

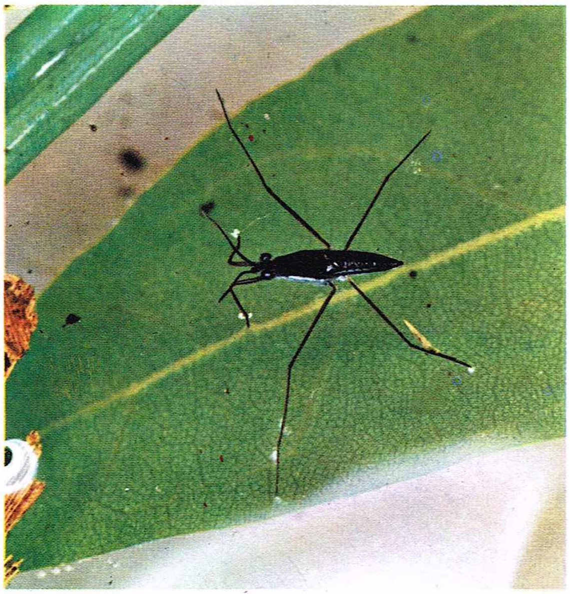

I. Bucciarelli

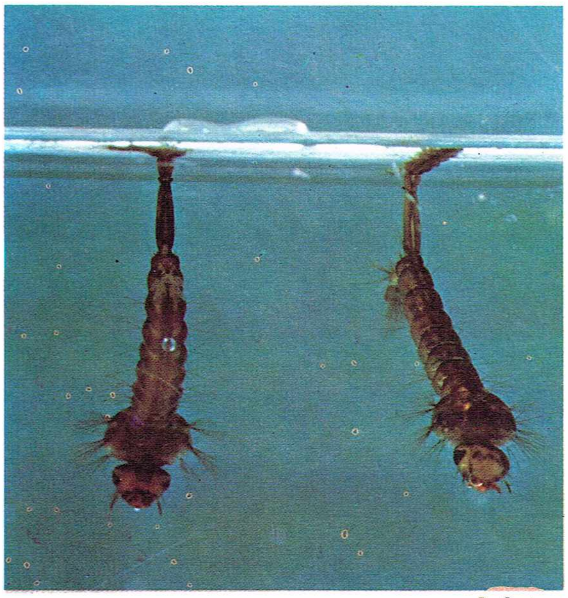

P. Castano

◀ *A gauche, un* **Gerris** *qualifié de « patineur de surface ». La locomotion chez ces Insectes met en jeu un phénomène de tension superficielle. A droite, larves de Diptères aquatiques.*

qui constitue un plastron. Celui-ci facilite la diffusion gazeuse, et les Insectes n'ont donc plus besoin de venir en surface faire le plein. Chez les Chrysomélides du genre *Haemonia,* ce sont les bulles d'oxygène libérées par les Végétaux chlorophylliens qui servent de provision d'air. Les stigmates abdominaux du huitième segment se sont transformés à cet effet en un éperon creux que l'Insecte plante dans les lacunes aérifères des plantes aquatiques.

La locomotion, chez les Insectes aquatiques de pleine eau, se fait grâce à la nage. Un cas particulier est celui des formes de surface, comme les *Gerris, Hydrometra* et *Velia,* que l'on qualifie de « patineurs de surface ». Pour flotter ces Animaux n'utilisent pas la poussée d'Archimède, qui fait flotter les corps moins denses que l'eau, mais un phénomène physique différent : la tension superficielle. Pour permettre de comprendre ce dont il s'agit, on peut dire qu'à l'échelle du millimètre ou du centimètre, qui est celle des Insectes, la surface de l'eau est assimilable à une membrane tendue, d'où le nom de tension superficielle. Lorsqu'un objet non mouillable s'appuie sur la surface de l'eau, une force verticale dirigée de bas en haut tend à soulever cet objet et donc à s'opposer à son immersion ; si cette force est supérieure au poids du corps, l'objet flotte. Étant donné que les tensions superficielles correspondent toujours à des forces très faibles, seuls les Insectes de petite taille sont capables de marcher sur les eaux. Chez les *Velia,* qui ne mesurent environ qu'un centimètre, ce sont les extrémités des tarses antérieurs et postérieurs qui reposent sur l'eau ; chez les *Gerris,* qui atteignent 4 cm, la surface non mouillable en contact avec l'eau doit être plus grande pour augmenter la tension superficielle ; dans ce cas, tout le tibia et tout le tarse des pattes postérieures reposent sur l'eau. Les patineurs de surface reposent sur l'eau par les pattes antérieures et postérieures ; les pattes intermédiaires ne servent pas à la flottaison mais fonctionnent comme des rames et assurent le déplacement. Cette adaptation se rencontre chez des espèces aussi diverses que *Velia, Gerris* et *Hydrometra* (Hémiptères), *Hydrophorus* (Diptère Dolichopodide) et *Acrophylax* (Trichoptère). Les Insectes de petite taille, comme les Collemboles du genre *Anurida,* reposent sur l'eau par l'extrémité des griffes de leurs six pattes : ils font « des pointes ».

Un cas curieux est celui des Coléoptères du genre *Stenus,* qui vivent dans les lieux humides et peuvent tomber à l'eau à la suite d'un coup de vent ; ils flottent alors à la surface et s'échappent généralement lentement en marchant sur l'eau. Mais si un danger les menace, ils peuvent, à l'aide de glandes sécrétrices qui se trouvent à l'extrémité de l'abdomen, rejeter un produit qui abaisse la tension superficielle de l'eau. Ils se trouvent alors projetés vers l'avant, comme si la surface de l'eau se contractait en les tirant. La vitesse de fuite ainsi obtenue peut être élevée : 15 mètres sont parcourus à une vitesse de 40 à 75 cm/s, soit un maximum de 2,7 km/h.

Le *courant* joue un grand rôle dans la biologie des Insectes aquatiques. Les eaux très lentes ont une vitesse inférieure à 10 cm/s ; les eaux très rapides des torrents de montagne ont une vitesse supérieure à 100 cm/s. Mais les vitesses sont très inégalement réparties dans un cours d'eau ; par exemple, il existe au voisinage du fond une zone plus calme dans laquelle beaucoup d'organismes peuvent trouver refuge. Les exigences des Insectes aquatiques en ce qui concerne les courants sont très variables. On qualifie de *rhéophiles* les espèces qui recherchent les eaux rapides et peuvent résister aux courants grâce à des dispositifs variés ; ainsi les larves des Diptères Blépharocérides ont le corps aplati et possèdent six ventouses abdominales qui leur permettent d'adhérer fortement aux cailloux du fond. Les larves des simulies ont également besoin de courants rapides ; elles ont l'abdomen terminé par une couronne de crochets servant à l'amarrage ; elles sécrètent, en outre, grâce à des glandes situées sous la bouche, des fils de soie qui sont collés aux rochers.

▼ *Mâle de* **Dytiscus marginatus ;** *ce Coléoptère aquatique respire l'air atmosphérique en remontant, de temps en temps, à la surface de l'eau.*

P. Castano

▶ *A gauche,* **Notonecta glauca** *est un Insecte aquatique appartenant au necton lacustre; à droite, le perce-oreille* **Labidura riparia** *est un habitant fréquent des sables des plages et des rives des cours d'eau.*

A. Margiocco

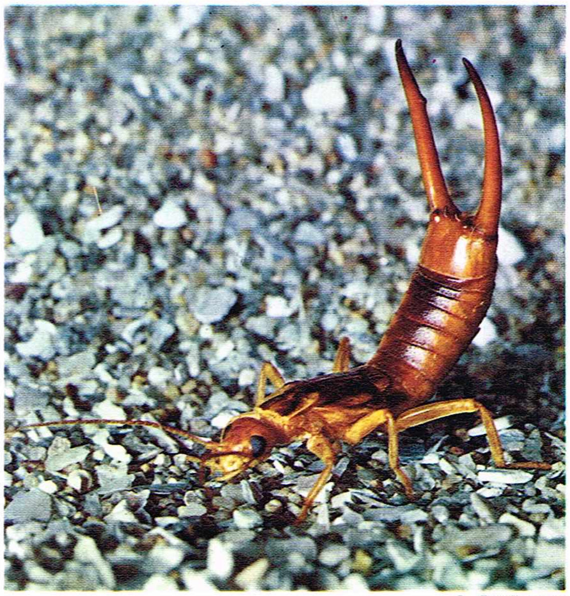

C. Bevilacqua

Dans une rivière de Corse, les larves de simulies et de Blépharocérides forment 3 % de la faune du fond lorsque la vitesse du courant est de 50 à 80 cm/s et 96 % de la faune lorsqu'elle atteint 160 cm/s.

Les larves d'éphémères, adaptées à la vie dans les torrents, nagent peu; elles marchent sur le fond ou deviennent même fouisseuses; chez certaines, les branchies se transforment en ventouses adhésives. Dans les eaux courantes, les Animaux qui vivent sur le fond peuvent parfois lâcher prise et se trouver entraînés plus ou moins en aval. Ce phénomène est connu sous le nom de *dérive*. Il s'observe chez beaucoup d'Invertébrés et, dans le cas des Insectes, chez les larves d'éphémères du genre *Baetis,* chez les larves de simulies, et chez d'autres encore.

Beaucoup d'Insectes aquatiques ont une activité nocturne et ne se mettent en mouvement que lorsque l'éclairement est devenu très faible. C'est pourquoi, la dérive est surtout importante la nuit, lorsque les Animaux quittent leurs refuges sous les pierres, comme on peut s'en rendre compte en tendant des filets fins en travers d'un torrent. On peut se demander comment la partie amont des torrents ne se trouve pas progressivement dépeuplée, car la dérive peut emporter des quantités impressionnantes d'Animaux lors des crues. Plusieurs auteurs pensent que les Insectes adultes ont tendance à remonter au vol le cours des rivières, avant de pondre dans les zones hautes, ce qui permet de reconstituer la faune.

L'inféodation de certains Insectes à des eaux courantes est si poussée que la présence de ces eaux suffit à permettre leur installation. Le cas s'est produit en Afrique, en Haute-Volta, où de nombreux barrages ont été construits afin de créer des réserves d'eau. Ces barrages ont favorisé la pullulation des larves de *Simulium damnosum,* au niveau de leurs déversoirs. Ce Diptère est le vecteur d'une filaire responsable de l'onchocercose humaine, maladie qui peut rendre aveugle la presque totalité de la population dans certaines régions. Il a donc fallu éliminer les déversoirs habituels en « marches d'escalier » et rechercher des types de barrages dans lesquels le mode d'écoulement de l'eau ne permette pas l'installation des simulies.

Si la mer n'a guère été colonisée par les Insectes, les terrains salés et les plages littorales hébergent une faune riche, très caractéristique. Les espèces qui recherchent les terrains salés sont appelées *halophiles;* on les trouve aussi bien au bord de la mer que dans l'intérieur, près des affleurements de sel ou des sources salées. Quant aux espèces qui recherchent le sable, ce sont des *psammophiles,* qui peuvent vivre aussi bien au bord de la mer dans les dunes que dans les déserts ou même dans les zones sableuses de l'intérieur de notre pays.

Les Insectes halophiles

Les Insectes halophiles se rencontrent surtout dans les étendues d'argile et de vase salée qui retiennent une certaine quantité d'eau. De nombreux Coléoptères courent sur le sol, les plus caractéristiques et les plus abondants étant des Carabiques des genres *Dyschirius* et *Pogonus,* la cicindèle *Cicindela circumdata* et le minuscule *Tachys scutellaris,* qui sont des prédateurs et tous hautement halophiles. Sur ces vases salées, vivent des Staphylinides du genre *Bledius* et des Hydraenides du genre *Ochthebius* qui mangent des Algues microscopiques.

Une catégorie très curieuse est celle des Insectes inféodés au bois mort échoué sur la plage, ayant longtemps flotté en mer et imprégné de sel. On trouve dans ces morceaux de bois des larves de Scarabéides, comme *Callicnemis latreillei* sur la côte des Landes; des charançons du groupe des Cossonides se rencontrent sur presque toutes les côtes, ainsi qu'un Œdéméride comme *Nacerda melanura*.

Beaucoup d'halophiles sont des fouisseurs, c'est le cas des *Bledius,* qui creusent des terriers dans lesquels des prédateurs, les *Dyschirius,* les poursuivent. Si dans les sols salés les Insectes sont nombreux en individus, ils sont par contre relativement pauvres en espèces. Lors d'inventaires comparatifs réalisés en Camargue, on a dénombré quatre-vingt-onze espèces d'Insectes dans une zone où la teneur en sel était élevée (plus de 20 %), tandis que dans une région à peine salée on en comptait deux cent quarante-huit.

Les Insectes psammophiles

Beaucoup d'Insectes qui habitent surtout les plages et les dunes littorales remontent assez souvent dans l'intérieur des terres, le long des rives sablonneuses des rivières, ce qui permet de penser qu'il s'agit surtout de psammophiles; tel est le cas du perce-oreille *Labidura riparia*.

On peut se faire une idée de la faune d'une plage en parcourant les dunes du littoral entre la Camargue et Sète. Sur la partie de la plage la plus proche de la mer, là où la végétation ne s'est pas encore installée, les Insectes les plus caractéristiques sont les cicindèles (avec, en particulier, *Cicindela trisignata*) et le perce-oreille *Labidura riparia*. Les cicindèles courent et chassent activement en plein soleil : ce sont des carnivores qui mangent des petites proies comme les puces de mer; au contraire, les perce-oreille se cachent sous les débris ou se creusent un terrier qu'ils ne quittent pour chasser que la nuit.

Des amas de débris végétaux, rejetés par la mer et appelés « laisses de mer » s'accumulent parfois en abondance sur la plage. Ils servent d'abri à une foule d'Insectes, tels que des Diptères dont les larves mangent des Végétaux en décomposition, des Hyménoptères parasites de ces Diptères, et des Coléoptères. On trouve aussi sous ces « laisses » deux Carabiques remarquables : le grand scarite, tout noir, dont la taille atteint 4 cm, et *Nebria complanata,* aux élytres fauve clair plus ou moins tachés de noir. Ces deux Coléoptères sont nocturnes, comme beaucoup d'autres habitants de la plage qui se réfugient dans la profondeur du sable aux heures chaudes de la journée. On peut recueillir ces Insectes nocturnes en tamisant le

sable au pied des Végétaux ; on récolte alors plusieurs Ténébrionides, comme des *Phaleria*, des *Halammobia*, des *Trachyscelis* et plusieurs espèces de charançons. Çà et là, des larves de fourmilions vivent également enfouies dans le sable ; elles appartiennent à des espèces qui ne creusent pas d'entonnoirs.

La vie n'est cependant pas absente à la surface de la dune, même dans la journée : on peut voir circuler des Ténébrionides noirs de grande taille, comme des *Pimelia*, des *Tentyria*, des *Scaurus* et des *Opatrum* ; ces Ténébrionides sont de plus en plus riches en espèces au fur et à mesure que l'on descend vers le sud ; en effet, il est possible d'en trouver quatre fois plus sur les plages de la Crète que sur celles du littoral méditerranéen français. *Scarabaeus semipunctatus*, espèce voisine du scarabée sacré, est encore commun dans certains endroits du littoral du Roussillon, là où existent encore des élevages de chevaux. On peut y voir cette espèce volumineuse rouler activement ses pilules de bouse aux heures chaudes de la journée ; sabulicole strict, cet Insecte ne s'éloigne guère des sables littoraux.

On peut se demander pourquoi certains Insectes sont localisés aux sols salés. Est-ce par un besoin de chlorure de sodium ? Il ne semble pas que cette explication soit la bonne ; en tout cas, aucune expérience n'a pu mettre en évidence un besoin plus grand en sel chez les halophiles que chez les autres Insectes. Peut-être ces Insectes sont-ils repoussés vers ces milieux ingrats par les espèces plus compétitives. Cette explication est vraisemblable, d'autant plus qu'elle a été vérifiée dans le cas de certains Végétaux localisés à des sols salés mais pouvant fort bien être cultivés en l'absence de sel. Il y a là un phénomène appelé *compétition interspécifique*, les espèces les mieux armées dans la lutte pour la vie éliminant celles qui sont plus faibles.

On sait mieux pourquoi certains Insectes recherchent les sols sableux. La taille des grains de sable, dont la mesure s'appelle la granulométrie, joue un rôle important, car le fouissement est plus ou moins facile, selon que les grains sont plus ou moins gros. Il y a souvent une préférence pour une granulométrie déterminée. Ainsi, le Carabique *Harpalus serripes* est relativement indifférent à la taille des particules du sol, tandis que l'espèce voisine *Harpalus rufitarsis* recherche les sols à grains fins et évite les zones à sables grossiers.

Tous ces Insectes psammophiles présentent des caractéristiques écologiques et morphologiques remarquables. La dépigmentation, c'est-à-dire la décoloration des téguments, est fréquente surtout chez les espèces à activité nocturne, alors que les espèces actives dans la journée conservent leur couleur noire. Les Insectes psammophiles sont capables de fouir le sol avec rapidité. Ils possèdent souvent des pattes antérieures élargies, aplaties, modifiées en des sortes de pelles permettant le creusement et leur corps est fréquemment recouvert de poils raides et nombreux.

Les Insectes des déserts

On trouve, dans les déserts, de grandes étendues de sable qui sont peuplées par une faune ayant certaines caractéristiques communes avec celle des sables des plages littorales. Un inventaire effectué au Sahara, mais qui est valable pour les autres déserts, montre que ce sont les Coléoptères Ténébrionides qui dominent dans les zones arides ; viennent ensuite des Scarabéides et des Histérides. Dans les autres ordres, il faut mentionner comme très caractéristiques les mantes du genre *Eremiaphila*, la fourmi *Cataglyphis bombycina*, un certain nombre de fourmilions et quelques punaises de la famille des Cydnides en particulier.

Les caractéristiques écologiques de la faune des grands déserts chauds sont remarquables. Les espèces qui habitent les couches superficielles du sable totalement privées d'eau sont dites *xérophiles* ; elles montrent une résistance remarquable à un jeûne prolongé (ce qui s'explique par la rareté de la nourriture) et à la dessiccation ; dans des conditions identiques, la perte de poids due à la transpiration est toujours bien inférieure à celles des Insectes des zones non désertiques.

Il règne dans les déserts chauds des températures élevées pouvant dépasser 50 °C ; on a même pu y enregistrer avec certitude une température de 78 °C. Or, les Insectes des déserts, à quelques rares exceptions près, ne peuvent pas supporter ces températures. Ils doivent donc trouver des moyens pour les éviter. Le plus efficace est l'enfouissement, qui leur permet, en s'enterrant, de trouver une température plus clémente en profondeur. Cette obligation de s'enfouir a de profondes conséquences sur la morphologie de beaucoup d'espèces. Les organes les plus modifiés sont les pattes, dont les tibias sont transformés en véritables pelles à remuer le sable ; elles sont élargies, garnies de dents, d'épines et de nombreuses soies raides. Dans d'autres cas, en particulier chez d'extraordinaires Ténébrionides du désert de Namib, comme *Pachynotelus machadoi*, on assiste à un allongement des tarses, qui sont garnis, en dessous, de longues franges de cils raides, ce qui permet à ces Insectes de se soulever de plusieurs millimètres au-dessus du sol et d'éviter ainsi le contact avec le sable surchauffé, la température étant moins élevée dès que l'on se trouve seulement à une faible distance du sol.

On sait que la couleur noire absorbe les rayonnements solaires, alors que le blanc ne les absorbe que très peu. L'acquisition de la couleur blanche, exceptionnelle chez les Coléoptères, s'est faite chez plusieurs espèces des déserts et elle atteint son maximum chez les Ténébrionides du désert de Namib comme *Onymacris bicolor* et *Stenocara eburnea*, qui ont la tête et le prothorax noirs mais les élytres d'un blanc éclatant.

Mentionnons encore, toujours parmi les Ténébrionides, le grand développement des élytres ; entre eux et l'abdomen se trouve une chambre sous-élytrale dans laquelle s'ouvrent les stigmates, et qui ne communique avec l'extérieur que par des ouvertures très réduites. Dans cette cavité, le microclimat est sans doute différent de celui du sable, ce qui évite les pertes d'eau par évaporation.

Chez les termites qui vivent dans les régions tropicales et doivent lutter contre une trop grande élévation de la température de leur nid, une méthode originale de climatisation est parfois employée : par des galeries, ces

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Le Ténébrionide* **Pimelia rugulosa** *; les* **Pimelia** *sont des Insectes bien représentés dans la faune des déserts.*

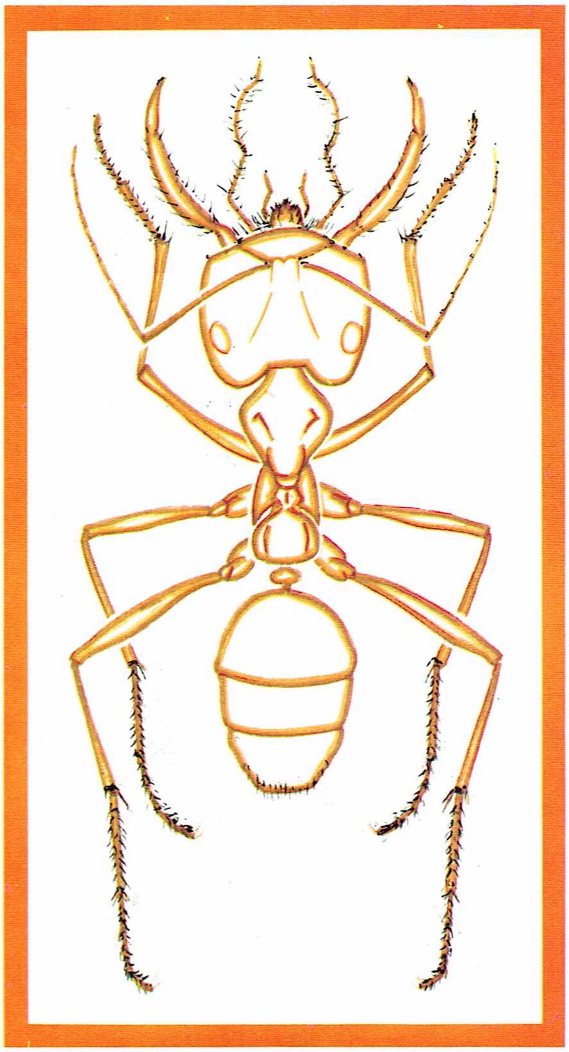

G. Hodebert

◀ *La fourmi* **Cataglyphis bombycina**, *très résistante aux températures élevées, est remarquablement adaptée à la vie dans les sables du Sahara.*

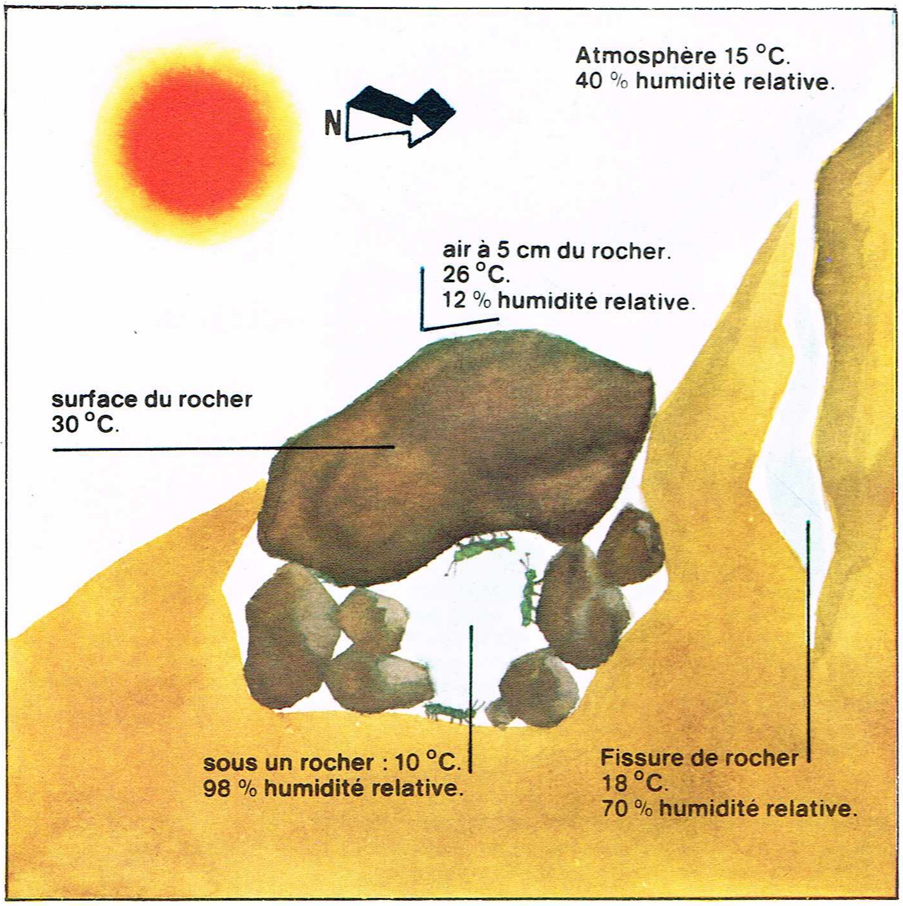

Richard Colin

C. Bevilacqua

▲ *A gauche, exemples de microclimats utilisés par les Insectes en montagne : Himalaya vers 3 000 m. Les Insectes se réfugient sous les pierres où les conditions de vie sont les plus clémentes; à droite, le Dermaptère* Anechura bipunctata, *bien reconnaissable à ses cerques incurvés en S, est un hôte caractéristique des montagnes de l'arc alpin.*

Insectes descendent jusqu'à la nappe aquifère, qui peut se trouver à plus de 10 mètres de profondeur, et ils en remontent des gouttes d'eau entre leurs pièces buccales; ils en imbibent ensuite les parois de la termitière et l'évaporation de cette eau abaisse la température. Les fourmis *Acantholepis frauenfeldi* font appel aux propriétés hygroscopiques du chlorure de sodium pour humidifier les parties les plus sèches de leur nid. Elles apportent, quand elles en trouvent à proximité dans des terrains salés, des boulettes de sel, qui vont absorber la vapeur d'eau de l'atmosphère dès que l'humidité relative dépassera 75 %.

La fourmi *Cataglyphis bombycina* est remarquablement adaptée aux sables du Sahara. Sa résistance aux températures élevées est peut-être due au fait qu'elle possède sur son tégument des écailles argentées qui réfléchissent le rayonnement solaire. Les ouvriers portent à la face ventrale de la tête, un peu en arrière de la bouche, des poils raides qui constituent une sorte de râteau, ou *psammophore*, leur permettant de transporter le sable et de maintenir ainsi en état leurs galeries souterraines. Les mandibules très grandes, aussi longues que la tête chez les soldats, interviennent également dans le fouissement et le transport du sable.

Au Sahara, l'apparition des Insectes se fait au cours de la période de l'année la plus favorable pour eux; cette période varie selon les zones. Dans la partie tempérée du Nord, c'est au cours de la saison chaude qu'ils font leur apparition, mais dans la zone tropicale du Sud, c'est à la saison froide ou pendant la petite saison chaude; la période de latence, durant laquelle peu d'espèces sont visibles à l'état adulte, se situe à la grande saison chaude.

Les Insectes de la haute montagne

Alors que les Insectes des déserts sont surtout adaptés à la sécheresse, ceux de la haute montagne doivent avant tout résister au froid.

Dans toutes les montagnes suffisamment élevées, on distingue un étage alpin, situé au-dessus de la limite des arbres, où la végétation se réduit à des espèces herbacées et à de petits arbrisseaux, et un étage nival, où la végétation est presque totalement absente, à l'exception de rares Lichens qui arrivent à subsister sur les surfaces rocheuses non recouvertes par la neige ou la glace. Les limites de ces étages varient avec la latitude. En France, dans les Pyrénées, l'étage alpin commence vers 2 400 m et l'étage nival vers 3 000 m d'altitude; dans l'Himalaya, la limite des neiges éternelles varie entre 4 000 et 5 000 m; dans le massif du Kilimandjaro en Afrique orientale, la forêt monte jusqu'à 4 000 m et la zone nivale ne commence guère qu'à 5 000 m.

Les Coléoptères sont les Insectes les mieux représentés en montagne, aussi bien dans la chaîne alpine que dans

C. Bevilacqua

▶ *Les Parnassides, ici un Lépidoptère du genre* Parnassius, *sont fort bien représentés dans la zone alpine.*

l'Himalaya ou la cordillère des Andes ; près de la moitié des espèces de la zone alpine appartient à cet ordre ; ce sont surtout des Carabiques et des Staphylinides. Les Lépidoptères sont des Papilionides, des Parnassides et des Satyrides. Les Diptères sont également bien représentés et certaines espèces dépassent 6 000 m : ce sont des Tipulides, des Blépharocérides, des Empidides et des Chironomides. Les Collemboles, moins riches en espèces mais nombreux en individus, dominent dans les hautes régions de l'Himalaya, où on les trouve jusqu'à 6 300 m. Les Insectes qui arrivent à subsister dans l'Himalaya au-dessus de 6 000 m sont des Collemboles et des Machilides qui se nourrissent des débris végétaux apportés par le vent ; ces espèces détritivores servent de proies à des carnassiers, plus particulièrement à des Coléoptères Carabiques et à des Araignées.

Dans les Alpes, on peut trouver des Insectes à plus de 3 000 m. Les Collemboles y sont représentés par la « puce des glaciers », *Isotomurus saltans*. Mais c'est dans l'étage alpin que la faune est la plus riche. Les espèces *nivicoles* se rencontrent l'été au voisinage des névés ; les Coléoptères de la famille des Carabiques et les staphylins sont abondants.

Il faut signaler que plusieurs genres d'Insectes présentent des espèces endémiques étroitement localisées à un massif montagneux déterminé. C'est le cas des *Nebria*, des *Trechus*, des *Haptoderus* et de divers carabes. Parmi les papillons, les *Erebia* et les *Parnassius* sont abondants.

Beaucoup d'Insectes de la haute montagne sont de teinte plus foncée que leurs proches parents des plaines. Ce phénomène de *mélanisme* est difficile à expliquer ; il semblerait dû à la grande humidité. Quant à l'aptérisme fréquent chez les Coléoptères, il est considéré comme une adaptation aux vents violents ; il permet aux Insectes de ne pas être entraînés hors de leur habitat. On retrouve cette particularité chez beaucoup d'Insectes vivant dans les îles où soufflent également des vents violents.

La faune de haute montagne ne supporte pas les grandes variations de température. Elle est composée d'espèces dites *sténothermes froides*, adaptées à des températures voisines de 0 °C, parfois même inférieures. Dans l'Himalaya, plusieurs espèces de Collemboles et de Diptères Chironomides du genre *Chiona* ont une vie active entre 0 °C et — 10 °C ; elles sont très sensibles à l'augmentation de température et sont tuées en quelques minutes par la chaleur dégagée par la main de l'homme. L'Orthoptère *Aeropedellus variegatus* a besoin au mois de juillet d'une température moyenne comprise entre 6 et 8 °C, ce qui explique sa localisation dans les Alpes françaises à quelques rares stations d'altitude supérieure à 2 500 m. Une espèce plus commune, *Aeropus sibiricus*, recherche des stations où la température est comprise entre 7 et 14 °C en juillet, ce qui lui permet de descendre vers 2 000 m. Des conditions thermiques analogues se rencontrent dans le nord de l'Europe, en Scandinavie. On y rencontre plusieurs dizaines d'espèces qualifiées de *boréo-alpines*, qui habitent à basse altitude (dans les régions méridionales, elles sont localisées aux sommets des montagnes, comme les Alpes, les Pyrénées, les Carpathes, et les Appennins). Ce sont toutes des sténothermes froides témoins vers le sud de l'extension des glaciations quaternaires. A cette époque, le long du front glaciaire, habitaient de nombreuses espèces sténothermes froides, qui ont eu ainsi la possibilité de migrer vers le sud. Lors du réchauffement du climat, ces espèces ont suivi vers le nord le recul des glaciers, mais certains individus restés sur place se sont réfugiés en altitude. C'est à ce groupe d'espèces boréo-alpines qu'appartiennent le papillon *Colias palaeno*, localisé en plaine dans le nord de l'Europe, là où la température moyenne de janvier ne dépasse pas — 2 °C, et que l'on retrouve en altitude dans le Massif central, les Alpes, les Carpathes, le Jura et les monts de Bohême, ainsi que les Coléoptères *Amara erratica* et *Hypnoidus hyperboreus*, et l'Orthoptère *Aeropus sibiricus*, etc.

L'attention des entomologistes a été récemment attirée par la présence d'Insectes localisés en haute altitude, dans la zone nivale, là où les rochers émergent de la couverture de glace et de neige. On a ainsi trouvé, dans les Alpes, des charançons et des staphylins, appartenant à des espèces et même à des genres endémiques, vivant dans le sol parmi les racines des rares Végétaux comme la renoncule des glaciers, qui peut pousser jusqu'à 4 200 m.

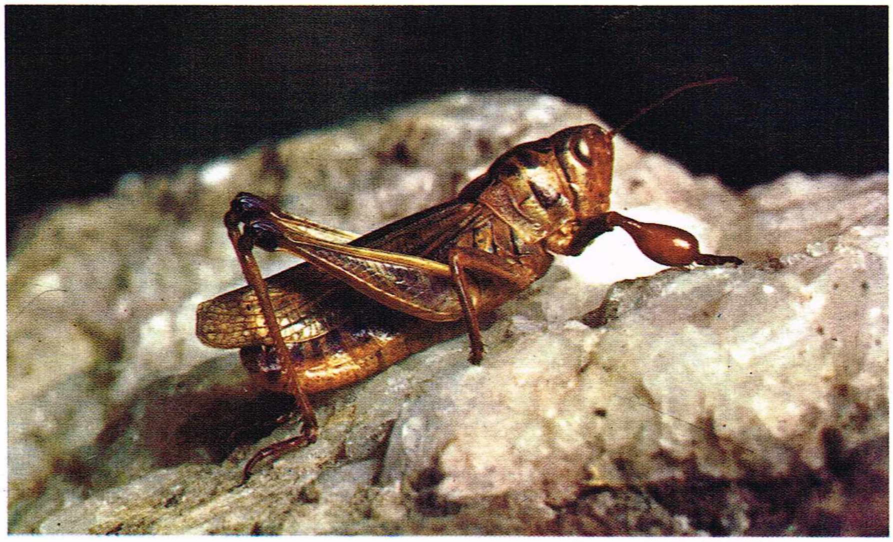

C. Bevilacqua

▲ ***Un Orthoptère boréo-alpin,* Gomphocerus sibiricus, *dont on remarquera les tibias antérieurs renflés. Cette espèce est commune en montagne au-dessus de 2 000 m.***

Ces Insectes semblent bien être les descendants d'espèces datant de l'ère quaternaire et qui vivaient dans des zones non recouvertes par la glace ; ces zones devaient être analogues à celles que l'on voit émerger de nos jours au-dessus de la calotte glaciaire du Groenland et que l'on appelle des nunataks. Ainsi, la vie aurait pu subsister çà et là en certains points des régions recouvertes par les glaciers quaternaires.

Les dures conditions climatiques de la haute montagne se retrouvent dans la région antarctique, où quelques rares Diptères comme *Belgica antarctica* et aussi des Collemboles arrivent à survivre. Ce n'est pas un Insecte mais un Arachnide, l'Acarien Oribate *Maudheimia wilsoni*, qui semble détenir le record de résistance au froid ; il a été récolté sous les pierres du continent antarctique.

Les Insectes du sol

Le sol constitue un milieu où les variations de température et d'humidité sont très faibles par rapport à celles que l'on peut mesurer dans le milieu aérien. Pour cette raison, le sol est un véritable réservoir de formes animales primitives qui, apparues sur terre il y a fort longtemps, se sont réfugiées sous terre pour échapper aux variations climatiques qu'elles n'auraient pu supporter.

▼ ***Répartition du papillon* Colias palaeno, *du groupe des espèces boréo-alpines. En pointillé, zone où l'espèce est présente dans le nord de l'Europe. Sont en outre indiquées les stations de montagnes : 1, Mont-Dore ; 2, Morvan ; 3, Baraque Michel ; 4, Hautes-Vosges ; 5, Forêt-Noire ; 6, Jura ; 7, Alpes ; 8, Bohême ; 9, Tatra ; 10, Carpathes ; Trait plein, limite d'extension de la calotte glaciaire quaternaire.***

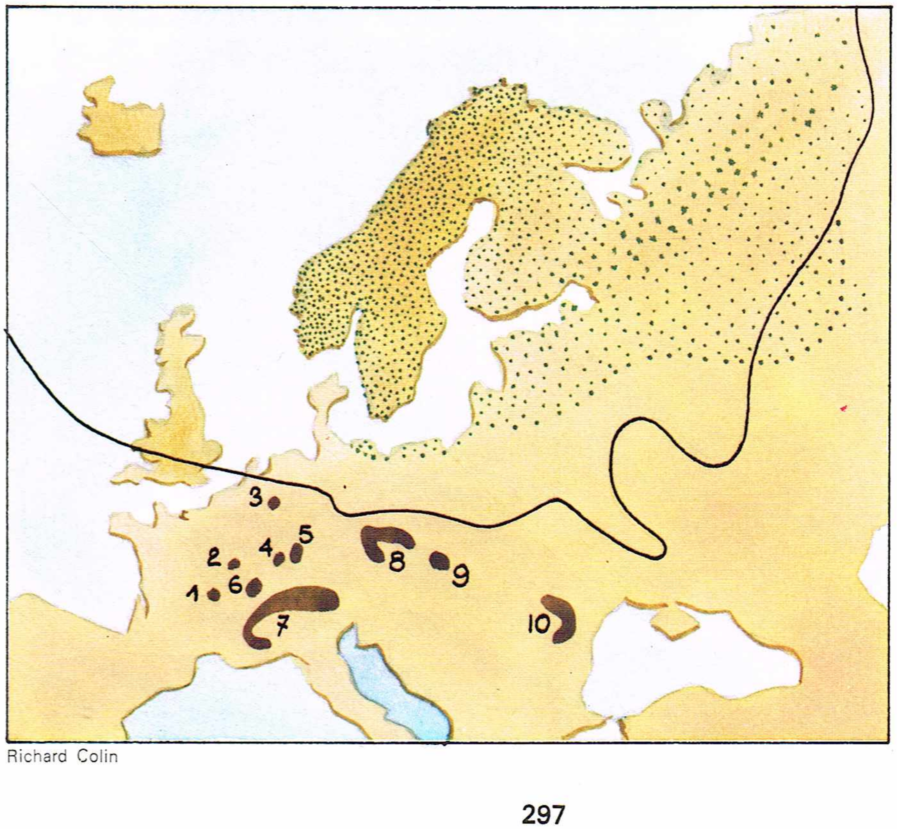

Richard Colin

I. Bucciarelli

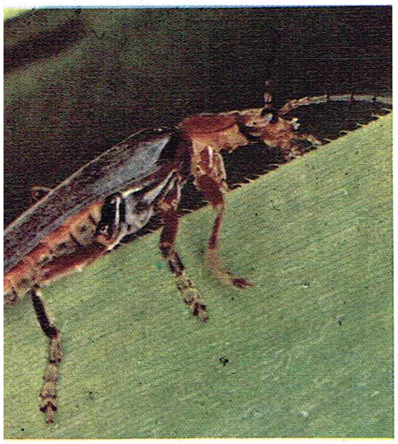

I. Bucciarelli

▲ ***En haut,***
Agriotes lineatus,
***en bas,* Cantharis livida**
appartiennent à la catégorie des Insectes actifs dans le sol, mais seulement à un stade de leur développement.

De très nombreux êtres vivants habitent le sol. En ce qui concerne les Insectes on peut y distinguer trois catégories. La première comprend ceux qui y passent une phase d'inactivité : ce sont, par exemple, les chenilles de papillons qui s'y enterrent pour y passer le stade chrysalide, sans se nourrir, ou certains Coléoptères comme les Scarabéides du genre *Rhizotrogus*, qui volent activement le jour et y séjournent seulement la nuit, ou encore divers Ténébrionides qui s'enterrent la journée pour fuir la grande chaleur. La deuxième catégorie est constituée par les Animaux actifs dans le sol, mais seulement à un stade de leur développement : beaucoup de Diptères, de Coléoptères floricoles à l'état adulte, comme les *Cantharis*, sont dans ce cas ; il en est de même des larves de hannetons et d'Élatérides du genre *Agriotes*. Enfin, la troisième catégorie comprend les véritables habitants du sol, ceux qui y vivent en permanence et y sont actifs. Cette classification, logique et justifiée pour le zoologiste qui entreprend l'étude des innombrables espèces du sol et de leurs adaptations, est plus discutable pour l'écologiste, car les espèces qui ne passent qu'une partie de leur vie dans le sol y jouent parfois un rôle important, ne serait-ce qu'en raison de leur abondance.

Qu'est-ce que le sol ? C'est la couche supérieure de l'écorce terrestre, constituée de fragments de roches brisées et remaniées chimiquement sous l'action du climat, des Végétaux et des Animaux. La limite n'est pas facile à tracer entre le sol et les milieux voisins car les relations entre ceux-ci sont nombreuses et sans discontinuités bien marquées.

La partie supérieure du sol ou horizon superficiel correspond à la litière, constituée par l'accumulation de débris végétaux qui se décomposent lentement. C'est le domaine de très nombreux Insectes qui ne s'enfoncent guère dans les couches profondes, et, en particulier, des espèces de taille relativement grande, comme les carabes, les staphylins, les charançons, les larves de Diptères, etc. Les Collemboles et autres Aptérygotes y sont également fort nombreux. Cette couche superficielle, directement soumise aux influences climatiques, connaît des variations de température et d'hygrométrie encore marquées.

Les horizons profonds, variables suivant les types de sols, sont les lieux de transformation des débris végétaux en humus. Les conditions de vie y sont beaucoup plus stables ; en particulier, l'humidité est toujours élevée, supérieure à 75 % et pratiquement égale à 100 % à partir de 10 cm de profondeur ; la teneur en gaz carbonique est plus élevée que celle de l'atmosphère, surtout au printemps et en automne en raison des phénomènes de respiration des êtres vivants et de la décomposition des matières organiques. On constate que les Animaux de couches profondes résistent mieux au gaz carbonique que ceux des couches superficielles ; certains, tels que les larves de hannetons ou d'Élatérides du genre *Agriotes*, sont attirés par celui que produisent les racines dont ils se nourrissent. Sauf rares exceptions, les couches profondes du sol sont le domaine des Insectes de petite taille, la plupart ne dépassant pas 5 mm et beaucoup n'atteignant pas le millimètre. Presque tous sont plus petits que leurs proches parents ne vivant pas dans le sol, ce qui leur permet de se faufiler dans les interstices, les fissures et les galeries des vers de terre ou des racines mortes. Au fur et à mesure que l'on s'enfonce dans le sol, la teneur en humus et en matières organiques diminue et la roche mère, qui apparaît peu à peu, marque la fin du sol proprement dit. Dans certaines régions, comme les terres noires ou tchernozioms du sud de la Russie, le sol peut atteindre plus d'un mètre d'épaisseur.

Les couches riches en humus et en matières organiques sont occupées par des espèces dites *humicoles* ; les couches profondes pénétrées par les racines des Végétaux et pauvres en matières organiques sont le domaine des *endogés*. Il est évident que la limite entre ces deux domaines n'est pas tranchée d'une façon absolue. Les humicoles peuvent s'aventurer dans le milieu endogé, alors que le contraire est rare, sauf dans certaines circonstances, par exemple, lors des grandes pluies.

Parmi les Insectes des couches profondes du sol, il faut signaler en premier les Collemboles, qui dominent très largement en nombre. A titre d'exemple, on a pu évaluer que dans un mètre carré de sol de prairie, il existe environ cinquante mille Collemboles, mais seulement deux cents Diptères et une centaine de Coléoptères ; il faut ajouter à ces Insectes plusieurs dizaines de milliers d'Acariens, un millier de vers de terre et plusieurs millions de Nématodes. Les Collemboles des couches profondes du sol diffèrent de ceux qui vivent dans la litière ou sur les plantes herbacées par un certain nombre de caractères adaptatifs, parmi lesquels on peut citer : la petite taille, inférieure au millimètre, alors que les autres espèces atteignent parfois 5 mm, la forme plus allongée, la dépigmentation plus ou moins marquée, la disposition quasi régulière de la musculature et des segments, ce qui facilite les mouvements de reptation dans les interstices du sol, la réduction et parfois l'absence des yeux, le raccourcissement des appendices, et, enfin, la simplification de la chétotaxie, les espèces de profondeur ayant le corps couvert de poils moins nombreux et plus courts que celles de la surface. Il faut noter, en outre, que le métabolisme est moins intense et que les mouvements sont ralentis.

Les autres ordres d'Aptérygotes, les Protoures, les Diploures et les Thysanoures comprennent aussi des représentants typiques de la faune du sol.

Les Ptérygotes ont une importance moins grande dans le sol que dans les milieux aériens. Les plus remarquables de ceux qui y vivent sont des Coléoptères, parmi lesquels on peut citer des Carabiques, comme *Anillus*, des Staphylinides de la sous-famille des *Leptotyphlinae*, qui compte des centaines d'espèces, toutes étroitement inféodées au sol, de très nombreux Psélaphides, Scydménides, Catopides et Ptilides et enfin quelques représentants des Charançons *(Raymondionymus)*, des Colydides (*Lyreus*, *Langelandia* et *Anommatus*), des Lathridiides *(Metophthalmus)*, etc. La faune du sol comprend aussi

I. Bucciarelli

G.S. Giacomelli

▶ ***A gauche, le grand carabe*** **Procerus gigas,** ***qui atteint 6 cm de long et vit en Europe orientale, est un habitant caractéristique des amas de feuilles mortes des grandes forêts. A droite, les Collemboles, dont une espèce du groupe des Arthropléones est représentée ici, très agrandie, sont des Insectes nombreux dans le sol.***

D. Giussani

◀ *Un autre Insecte du sol,* **Gryllotalpa,** *ou grillon-taupe, est rigoureusement adapté à la vie souterraine, grâce surtout à ses pattes antérieures fouisseuses.*

des Psocoptères aptères, des cochenilles vivant sur les racines des plantes comme les *Orthezia* et des Embioptères. Les fourmis dans les régions tempérées et les termites dans les régions tropicales jouent également un rôle considérable dans le sol. Bien que vivant dans le sol, peu de fourmis montrent des caractères d'adaptation à la vie endogée; cependant, il existe quelques formes remarquables. Les espèces du genre *Solenopsis* sont décolorées et leurs yeux sont réduits; les *Epitrurus* et les *Strumigenys* sont des endogés vrais aveugles.

Il faut préciser que tous les Insectes endogés ne sont pas de petite taille. Il existe dans le sol quelques rares endogés véritables de grande taille. Ainsi, les courtilières ont des yeux réduits et des pattes antérieures fouisseuses; on trouve d'autres Orthoptères du sol encore plus remarquables, comme *Oryctopus prodigiosus*, qui vit en Inde; la femelle est aptère, possède des antennes minuscules, des yeux réduits à quelques ommatidies, un oviscapte rudimentaire et des pattes antérieures transformées en organes de fouissement comme chez les courtilières. Les *Cylindrochaeta*, d'autres Orthoptères d'Australie, ont le corps allongé et cylindrique, les yeux réduits et les pattes antérieures fouisseuses. L'Insecte endogé de grande taille le plus curieux est peut-être un Cérambycide du Brésil, *Hypocephalus armatus*, qui ressemble à une courtilière, ce qui constitue un phénomène de convergence étonnant et en même temps une modification de la morphologie et du mode de vie extraordinaire pour un Insecte de cette famille dont la plupart des représentants à l'état adulte sont floricoles. Parmi les Insectes endogés de grande taille, mentionnons encore les scarites, Coléoptères Carabiques pouvant atteindre 5 cm et qui creusent leurs terriers à l'aide de leurs mandibules.

Les Coléoptères vivant dans le sol ont été très étudiés et montrent des particularités remarquables, notamment une petite taille, un allongement du corps, une réduction ou une disparition totale des yeux, une perte des ailes et une décoloration des téguments. Il est possible que les larves de ces Insectes vivent à une plus grande profondeur que les adultes car, à de rares exceptions près, on ne les a jamais trouvées. Chaque espèce de ces Coléoptères du sol n'occupe, le plus souvent, qu'une aire très limitée, et même une seule station. Cet endémisme strict est lié à la faible mobilité de ces Insectes dépourvus de moyens de déplacement. Les Coléoptères du sol représentent, au moins dans la région méditerranéenne, des espèces reliques issues d'ancêtres qui ont évolué sur place au cours des âges et qui ont résisté aux variations climatiques en s'enfonçant dans le sol. C'est la raison pour laquelle on les considère comme de véritables « fossiles vivants », particularité qu'ils partagent avec les espèces cavernicoles, comme nous le verrons plus loin. Beaucoup de genres sont représentés par un grand nombre d'espèces, souvent très voisines les unes des autres et difficiles à distinguer; ainsi, le genre *Anommatus* comprend soixante-huit espèces, localisées essentiellement en Europe méridionale; dans le seul département du Var, il existe dix espèces de Psélaphides du genre *Mayetia* et vingt-trois espèces de Staphylinides du genre *Entomoculia*.

La plupart des Animaux du sol (80 % d'entre eux) se nourrissent de substances organiques mortes, d'origine animale ou végétale : ce sont des *saprophages*. Les espèces *phytophages* sont rares (environ 10 %) ; elles attaquent les racines des Végétaux et sont plus abondantes dans les sols secs, tels que les sols pauvres en humus des zones arides, où elles peuvent causer de grands dégâts dans les cultures; c'est le cas de nombreux Ténébrionides. Enfin les *prédateurs* (10 % des espèces) sont surtout des Coléoptères comme les Carabiques. Le rôle des Animaux du sol est fondamental dans le maintien de sa fertilité. En effet, les débris végétaux ingérés par les espèces saprophages sont fragmentés en morceaux de plus en plus petits, ce qui facilite grandement l'attaque chimique ultérieure par les Bactéries et la formation de l'humus.

Au sol proprement dit s'ajoutent des annexes qui ont une faune plus ou moins différenciée.

Certaines de ces annexes sont superficielles; ce sont, par exemple, les coussins de Mousses qui hébergent une faune muscicole, ou encore le dessous des pierres qui offre des abris où la faune peut se concentrer pendant les périodes humides. Cette particularité est bien connue des chasseurs d'Insectes qui trouvent de nombreuses espèces sous les pierres. Les troncs d'arbres abattus et plus ou moins décomposés constituent le milieu saproxylique, peuplé par des Insectes du sol qui remontent à la faveur de l'humidité et par des espèces du bois mort. On trouve ainsi mêlés des Coléoptères Psélaphides, Scydménides et Carabiques et des Collemboles de la faune du sol, mais aussi des larves de Lucanides, de Ténébrionides, d'Alléculides et de Cétonides, qui mangent le bois pourri. Dans la forêt tropicale, la remontée de la faune du sol est encore plus spectaculaire. Il existe, en effet, à l'aisselle des grosses branches ou parmi les racines des plantes épiphytes, des amas plus ou moins importants de terreau qui forment des sols suspendus. Ceux-ci sont colonisés par la faune du sol, qui peut remonter jusqu'à 20 ou 30 m de hauteur, d'une part grâce à l'humidité élevée et à la température presque constante qui règnent sous la voûte des grands arbres, et d'autre part en profitant souvent des interstices qui existent sous les écorces et qui lui fournissent des voies de migration.

D'autres annexes du sol sont profondes; ce sont les terriers de Mammifères, les nids de fourmis et de termites et surtout les grottes.

Les Insectes des grottes

Puisque les grottes s'ouvrent dans la profondeur du sol, il est bien évident que des communications ont lieu entre ces deux milieux. D'ailleurs, on a pu montrer que certains cavernicoles dérivent d'espèces endogées. Beaucoup de ces dernières vivent dans les entrées des grottes et la distinction entre endogées et cavernicoles devient alors difficile. C'est le cas dans les Pyrénées pour certains Coléoptères Carabiques des genres *Lianoe* et *Duvalius*.

A. Margiocco

▼ *Un Trechini cavernicole d'Italie,* **Duvalius liguricus,** *espèce aptère et aveugle.*

▶ **Sphodropsis ghilianii,** ***Coléoptère Carabidae du groupe des Sphodrini dont beaucoup d'espèces sont des guanobies.***
▼ ***Évolution, chez les Trechinae, vers la forme cavernicole : a, une espèce épigée,*** **Trechus bonvouloiri ;** ***b, une espèce cavernicole,*** **Geotrechus orpheus,** ***de la grotte d'Aubert (Pyrénées) ; les yeux ont disparu mais les appendices sont encore peu allongés ; c, chez*** **Aphaenops bucephalus,** ***de la grotte de Liqué (Pyrénées), l'évolution atteint son maximum : grosse tête, mandibules, antennes et pattes allongées, prothorax petit ; d, la même évolution se retrouve chez*** **Trichaphaenops sollaudi** ***de la grotte des Faux Monnayeurs (Jura).***

A. Margiocco

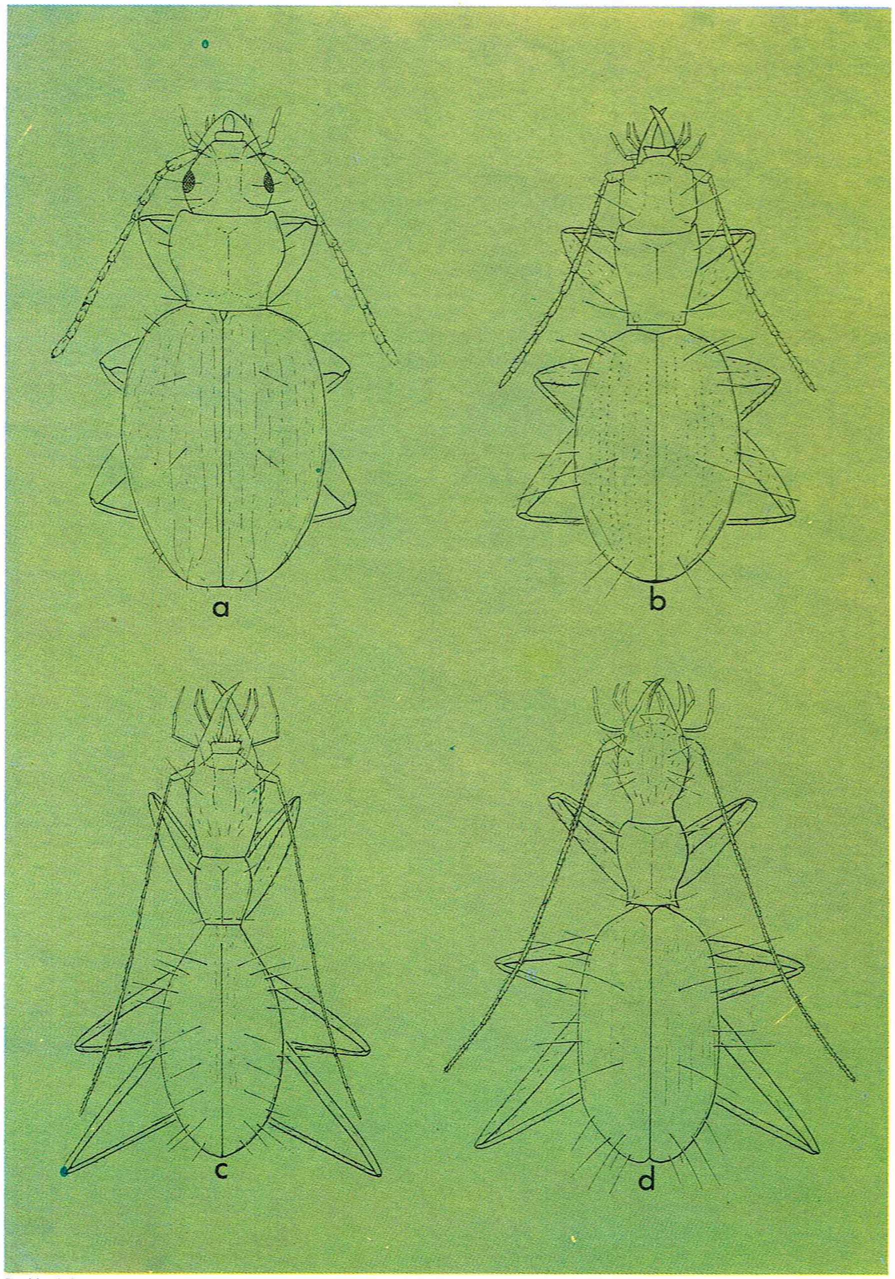

G. Hodebert

Du point de vue écologique, on peut distinguer, dans l'ensemble hétérogène d'espèces qui constitue la faune cavernicole, trois catégories : celles qui sont strictement inféodées aux grottes, qui ne peuvent en sortir et qui y passent toute leur vie, sont les *troglobies ;* d'autres fréquentent les grottes sans y être confinées d'une façon absolue : ce sont les *troglophiles ;* enfin, les hôtes occasionnels, qui trouvent dans les grottes un milieu de vie provisoire, sont les *trogloxènes.*

En nous limitant aux troglobies terrestres, l'inventaire des formes connues nous montre que, par ordre d'importance, les Coléoptères arrivent en tête. Ce sont, pour la plupart, des Carabiques ou des Bathyscinae appartenant au grand groupe des Staphylinoidea ; les autres groupes de Coléoptères ne sont que peu ou pas représentés, et il n'y a en particulier aucune espèce phytophage, les Végétaux ne pouvant pas pousser dans les grottes en l'absence de lumière. Seuls des Animaux omnivores à tendances saprophages et des carnassiers peuvent vivre dans les grottes ; or, à l'exception des Coléoptères, les autres Ptérygotes (Lépidoptères, Hyménoptères, Hémiptères, etc.) sont en grande majorité phytophages ; c'est pourquoi, sauf dans de très rares cas, ils n'ont pas colonisé les grottes.

Parmi les Carabiques, les espèces troglobies les plus nombreuses appartiennent à la sous-famille des Trechinae, de répartition mondiale, et surtout à la tribu des Trechini, dont les représentants cavernicoles sont particulièrement nombreux dans les montagnes du système alpin (Pyrénées, Alpes, Apennins, Carpathes, Caucase), mais aussi au Japon, aux États-Unis, au Mexique et en Nouvelle-Zélande. En France, les genres les plus remarquables habitent les Pyrénées : ce sont les *Aphaenops* et les *Geotrechus ;* les *Speotrechus* occupent les Causses et les Cévennes ; les régions karstiques des Balkans, en particulier en Yougoslavie et en Roumanie, sont peuplées de nombreux genres : *Pheggomisetes, Nannotrechus, Oreotrechus* et *Aphaenopsis.* Le genre *Duvalius* est présent dans une grande partie de l'Europe et en Afrique du Nord ; les *Trichaphaenops* peuplent quelques grottes des Alpes et du Jura.

Le groupe des Trechini est intéressant, car une étude des nombreuses espèces qu'il renferme permet de suivre le passage progressif d'un type primitif, humicole, à un type cavernicole. Les espèces primitives, épigées, sont ailées, pigmentées, pourvues d'yeux bien développés, et ont un prothorax peu développé ; ce type se trouve chez de nombreuses espèces de *Trechus* qui vivent dans la litière, parmi les feuilles mortes, toujours dans les endroits humides. Le stade ultérieur d'évolution est représenté par d'autres espèces de *Trechus,* encore pigmentées et pourvues d'yeux, mais devenues aptères et dont le prothorax est plus développé.

C'est à partir de ce stade que s'est produite l'évolution souterraine, selon deux voies divergentes. Dans le premier cas, on a abouti à un *type anophtalme* (c'est-à-dire privé d'yeux), comme les *Geotrechus* des Pyrénées ou les *Duvalius* (aux yeux très réduits), qui sont des endogés vivant dans les ravins humides exposés au nord et se rencontrant fréquemment sous les grosses pierres profondément enfoncées dans le sol ou bien aux entrées de grottes, ou même sous les planchers stalagmitiques de ces grottes ; dans ces genres, la séparation entre endogés et troglobies est parfois difficile. Dans le second cas, l'évolution a abouti à un *type aphénopsien,* représenté en France par les *Aphaenops* et *Arctaphaenops,* et en Amérique du Nord par les *Neaphaenops* et *Mexaphaenops.* Les espèces de type aphénopsien sont dépigmentées, aveugles et aptères ; mais elles diffèrent des espèces endogées par l'allongement du corps et des appendices : les antennes dépassent parfois la longueur du corps, les pattes et les mandibules sont très longues, le prothorax est rétréci et souvent plus long que large avec les côtés effacés, enfin, les téguments deviennent minces, transparents et souples. Les Trechini de type aphénopsien sont des prédateurs qui chassent sur les concrétions calcaires et les parois stalagmitiques ruisselantes d'eau ainsi que sur les bancs d'argile abandonnés par les rivières souterraines en périodes de basses eaux. On peut les voir déambuler lentement, s'orientant à l'aide de leurs longues antennes et des soies sensorielles démesurées qui recouvrent leur corps et particulièrement les élytres. Ils s'enfuient rapidement au moindre bruit provoqué par

les spéléologues. La lumière les met en fuite bien qu'ils soient aveugles. Peut-être sont-ils sensibles au rayonnement infrarouge.

Il est très probable que les Trechini de type aphénopsien dérivent d'ancêtres nivicoles qui vivaient à l'ère tertiaire au bord des névés et qui se sont enfoncés dans les grottes à la suite des changements climatiques ayant provoqué la disparition de la neige, au moins pendant une partie de l'année. Cette hypothèse est étayée par plusieurs observations. Ainsi, en Algérie dans les monts du Djurjura, des trous remplis de neige sont habités par *Trechopsis lapiei,* qui a déjà un certain faciès aphénopsien ; il en est de même en Yougoslavie pour *Anophtalmus nivalis* des montagnes de Slovénie. Les *Trichaphaenops* des grottes glacées des Alpes vivent actuellement dans un habitat qui doit être très semblable à celui de leurs ancêtres nivicoles. Dans le pays basque, les *Aphaenops* du gouffre de la Pierre Saint-Martin sont installés dans une caverne qui était entièrement recouverte par un glacier à l'époque quaternaire ; leurs ancêtres se sont enfouis sur place pour survivre lors du réchauffement du climat. Actuellement, c'est en hiver, lorsque la neige recouvre les hauteurs qui entourent la région de la Pierre Saint-Martin, que ces *Aphaenops* manifestent la plus grande activité et se reproduisent, ce qui peut être interprété comme un vestige de leur vie nivicole ancestrale.

Parmi les autres Carabiques troglobies, il faut signaler quelques genres de la sous-famille des Pterostichinae : des *Troglorites* des Alpes-Maritimes et de la Navarre espagnole, des *Lianoe* des grottes pyrénéennes et des *Zariquieya* de Catalogne. Dans la super-famille des Staphylinoidea, ce sont surtout les Catopidae de la sous-famille des Bathyscinae, qui comprend plus de sept cents espèces répandues surtout dans l'Europe méridionale, qui constituent les troglobies les plus remarquables. Ces Coléoptères sont des saprophages qui peuvent pulluler dans les grottes où la nourriture est abondante, par exemple à la suite d'apports de débris végétaux de l'extérieur, lors des crues. On peut reconstituer l'évolution des Bathyscinae vers la vie souterraine, comme celle des Trechinae. Le stade initial est constitué par des espèces muscicoles, comme les *Bathysciola,* qui sont déjà dépigmentés et ont des yeux très réduits. Le deuxième stade est formé par des endogés ou des cavernicoles peu spécialisés comme les *Speonomus* pyrénéens, les *Cytodromus* alpins, qui ont conservé l'aspect ovoïde et les appendices courts des muscicoles. Ultérieurement, le corps s'est allongé ainsi que les pattes, les antennes et le prothorax. Ce stade caractérise des troglobies déjà évolués, parmi lesquels on peut citer *Isereus* des grottes du Vercors et *Pholeuon* des Carpathes. C'est le *type pholeuonoïde* dont beaucoup de représentants vivent dans les grottes glacées. Le type le plus évolué, appelé *leptodiroïde*, est représenté par *Leptodirus hohenwarti* des grottes d'Istrie, espèce de grande taille (près de 1 cm), aveugle, dont les pattes et les antennes sont très allongées, mais surtout dont l'avant-corps est très étiré et l'arrière-corps presque sphérique grâce au renflement des élytres. C'est aussi le plus ancien Insecte cavernicole connu puisqu'il a été découvert en 1831.

Les autres ordres d'Insectes Ptérygotes comprennent rarement des espèces troglobies. Parmi les Diptères, la découverte récente de moustiques troglobies dans les grottes d'Afrique a été un événement. *Allopnyxia patrizii,* de la famille des Sciarides, vit dans une grotte d'Italie aux environs de Rome ; les ailes du mâle sont réduites et la femelle est aptère ; les yeux n'ont que quelques ommatidies et les ocelles sont absents. Parmi les Dictyoptères, seules deux espèces de blattes du genre *Spelaeoblatta* vivant dans les grottes de Birmanie méritent le titre de troglobies. Chez les Aptérygotes, les Collemboles qui recherchent l'humidité ont tendance à peupler les grottes et y abondent. Cependant, les troglobies vrais appartiennent surtout à la famille des Entomobryides. Ils sont caractérisés par la dépigmentation du corps, les yeux réduits ou disparus, les organes sensoriels souvent plus développés que chez les formes de surface, ainsi que l'allongement des pattes et des antennes.

Les descriptions que nous venons de donner des principaux types morphologiques d'Insectes troglobies montrent chez ceux-ci l'existence de caractères communs : la dépigmentation, la perte des yeux, l'allongement des pattes et des antennes, et la gracilité du corps.

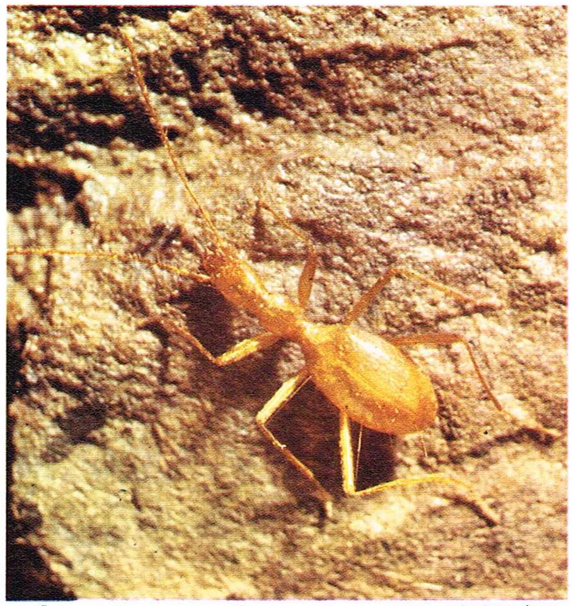

◀ *Un* **Aphaenops** *de l'Argentine.*

A. Margiocco

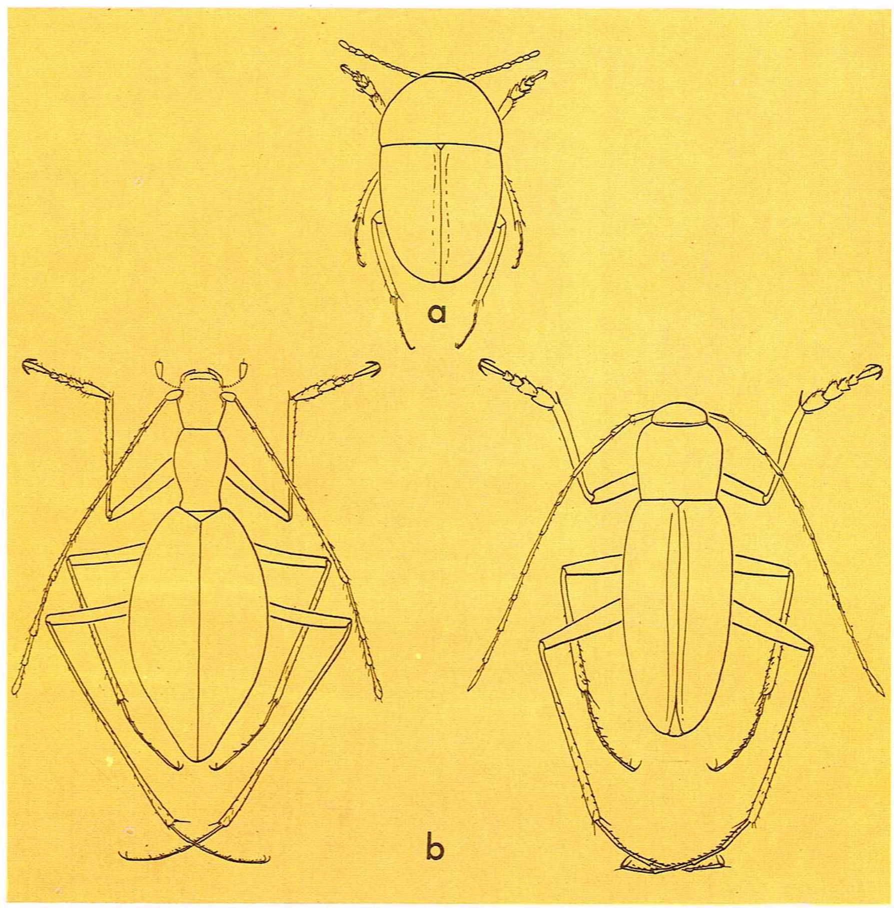

▼ ***En haut, évolution chez les Bathyscinae ; a, le stade*** **Bathysciola** ***des espèces muscicoles présente une forme en lentille ; b, forme allongée chez*** **Isereus** ***et*** **Astagobius,** ***espèces cavernicoles à pattes et antennes allongées ; en bas, le stade extrême est représenté par*** **Leptodirus hohenwarti** ***remarquable par sa physogastrie ; il habite les grottes de l'Istrie.***

G. Hodebert

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ *Parmi les Carabiques, les espèces troglobies les plus nombreuses appartiennent aux Trechinae, tel* Allegrettia boldorii.

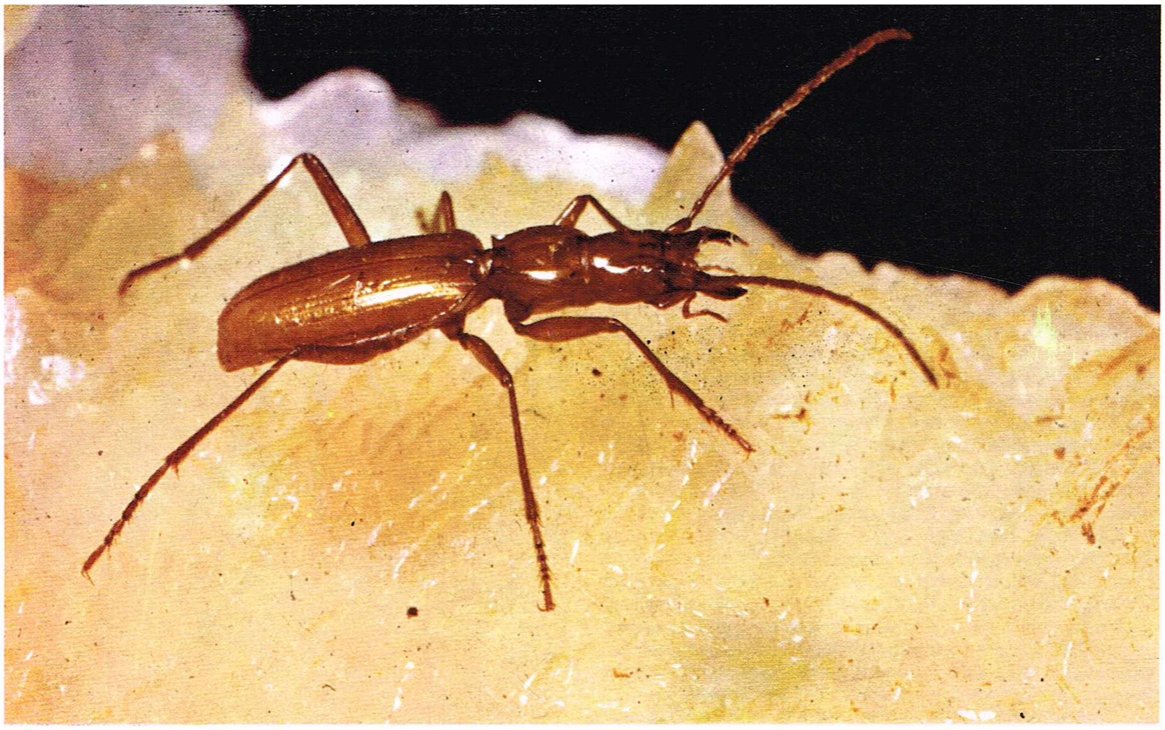

C. Bevilacqua

▼ *Les Lépidoptères sont également présents dans les grottes, ainsi les Géométridés sont représentés par les* Triphosa.

G. Cappa

Les biologistes sont divisés sur l'explication de ces particularités. Pour certains, il s'agit d'une adaptation au milieu souterrain, d'une réaction commune des Insectes à des conditions de milieu très particulières, par exemple, une température constante, une forte humidité, l'obscurité, le calme de l'air, etc. Cette explication, fondée sur les idées de Darwin relatives à la sélection naturelle, n'est pas admise par tous. D'autres biologistes font remarquer que, d'une part, ces caractères ne sont pas présents chez tous les vrais troglobies, et que, d'autre part, ils existent déjà chez les ancêtres muscicoles ou nivicoles qui sont effectivement souvent remarquables par la gracilité de leurs formes. Ainsi, le type cavernicole ne serait pas un produit de l'adaptation à la vie souterraine, mais serait la conséquence d'une évolution orientée, d'une *orthogenèse* se poursuivant indépendamment du milieu, toujours dans le même sens dans un certain nombre de lignées. Les ancêtres des troglobies seraient entrés dans les grottes parce que leur degré d'évolution leur rendait la vie épigée impossible, étant donné les conditions climatiques. Leur évolution orthogénétique aurait ainsi pu se poursuivre sans entraves pendant des millénaires dans le milieu très stable qu'est le milieu cavernicole, où, de plus, la concurrence est très faible et la sélection naturelle à peu près nulle. Les troglobies très évolués n'auraient certainement pas pu subsister dans le domaine épigé, où ils auraient été éliminés par des espèces plus vigoureuses, mieux armées pour la « lutte pour la vie ». Dans cette hypothèse, le milieu cavernicole serait donc un refuge pour des Animaux inadaptés aux conditions du monde actuel.

Les caractéristiques physiologiques des Insectes cavernicoles sont tout aussi remarquables que leurs particularités morphologiques; leur métabolisme est très ralenti, et, surtout, leur taux de reproduction est bien plus faible que chez les espèces épigées voisines. Des comparaisons quantitatives précises ont pu être effectuées grâce à des élevages de Collemboles. Les espèces troglobies ont une longévité plus grande que les espèces des couches superficielles du sol (en moyenne trois mois au lieu d'un mois et demi), une maturité sexuelle plus tardive, une durée d'ovogenèse plus longue, une ponte réduite à une quinzaine de gros œufs au lieu de quarante à cinquante petits œufs et un développement embryonnaire plus long. Chez *Typhlogastrura balazuci*, espèce troglobie, en trente-huit mois la descendance d'une femelle comprend trois générations et cinquante mille individus, alors que *Ceratophysella engadinensis*, espèce des couches superficielles du sol, engendre, en vingt-trois mois seulement, une descendance formée également de trois générations, mais comprenant cinq millions d'individus.

Pendant longtemps, le mode de développement des Coléoptères troglobies a été un mystère. Il est éclairci pour quelques espèces, grâce à des élevages réalisés dans les grottes mêmes où vivent ces Insectes. Prenons l'exemple du Bathyscinae *Speonomus longicornis* des grottes pyrénéennes. La femelle ne pond qu'un seul œuf à la fois. Cet œuf, bourré de réserves, donne naissance à une larve qui mène une vie libre réduite à quelques jours, ou même quelques heures. C'est pourquoi on n'avait jamais réussi à en trouver dans les grottes. La larve se creuse une logette dans l'argile, s'y enferme et y reste en diapause durant cinq à six mois, puis elle se nymphose. La larve ne s'accroît pas, ne mue pas et ne se nourrit pas au cours de sa vie. Il n'y a donc dans cette espèce qu'un seul stade larvaire, alors que les Coléoptères en comptent normalement au moins trois. Chez le Trechinae *Aphaenops cerberus*, le cycle est semblable : il y a réduction du nombre d'œufs pondus et la larve ne se nourrit pas, mais il est moins simplifié, car il y a au moins deux stades larvaires.

Les grottes ne sont pas habitées uniquement par des troglobies. L'entrée d'une grotte se présente souvent comme un vaste porche prolongé par un couloir qui est une zone de transition avec le monde extérieur. La lumière s'y atténue progressivement, l'humidité y devient plus élevée et les fluctuations thermiques plus faibles. Ces entrées de grottes sont peuplées par des espèces trogloxènes constituées par des Arachnides et des Insectes et qui constituent ce que l'on appelle *l'association pariétale*. On y trouve surtout des Diptères en abondance : des Mycétophilides *(Rhymosia)* et des Culicides, par milliers quand les conditions sont favorables. Les Lépidoptères, moins nombreux, sont des Géométridés comme *Triphosa dubitata*, des Noctuides et des Microlépidoptères. Les Trichoptères sont également présents de même que des Hyménoptères Ichneumonides et des Orthoptères des genres *Dolichopoda* et *Troglophilus ;* ces derniers étaient déjà connus de l'homme préhistorique qui nous en a laissé une gravure sur un os de bison. Parmi les Coléoptères, les *Choleva* sont les plus fréquents. En Afrique, il existe aussi des punaises carnassières de la famille des Réduvides.

Tous ces Insectes recherchent la faible lumière, la grande humidité, les températures constantes et peu élevées qui leur sont indispensables à un moment donné de leur vie. Beaucoup viennent dans les grottes en été, d'autres en hiver. Ainsi, les *Choleva* passent l'été en diapause dans les entrées, ce qui leur est indispensable pour pouvoir se reproduire. Quant aux grandes sauterelles du genre *Dolichopoda*, elles sortent la nuit lorsque les conditions ambiantes du milieu extérieur sont semblables à celles des entrées des grottes.

Beaucoup de grottes renferment d'importantes colonies de chauves-souris qui déposent sur le sol de grandes quantités de guano. Celui-ci est exploité par des Insectes *guanobies*, qui s'en nourrissent; il s'agit surtout des Collemboles et des Diptères, mais il s'y ajoute, dans les régions tropicales, des blattes et même des chenilles de Tinéides. Tout ce monde grouillant est la proie des prédateurs, dont les plus caractéristiques sont des Coléoptères Carabiques du groupe des Sphodrides comme les *Laemosthenus*, ainsi que des staphylins, comme *Atheta subcavicola*. Mais les guanobies recherchent le guano et non la grotte. Ils dérivent de formes coprophages ou vivant dans les terriers de Mammifères.

Un dernier milieu souterrain doit être mentionné rapidement car il renferme très peu d'Insectes : il s'agit des eaux souterraines, surtout riches en Crustacés. Les Insectes que l'on y rencontre sont des Coléoptères Dytiscides aveugles ou aux yeux réduits. Les espèces du genre *Siettitia*, connues seulement par quelques exemplaires, se rencontrent parfois en Provence, dans l'eau des puits ; le genre *Phreatodytes* vit dans les eaux souterraines du Japon.

Les Insectes commensaux

Beaucoup d'Insectes s'installent dans les gîtes d'autres espèces et y sont tolérés : ce sont des commensaux. Les liens qui unissent le commensal à son hôte peuvent être plus ou moins étroits ; en général, les commensaux sont assez éclectiques dans leur choix ; certains peuvent même se passer d'hôte et mener une vie libre.

Les commensaux qui habitent les terriers de Mammifères ou les nids des Oiseaux sont appelés *pholéobies* lorsque toute leur vie se passe obligatoirement dans la demeure de l'hôte ; ils sont dits *pholéoxènes* lorsqu'ils ne s'y trouvent qu'occasionnellement.

Beaucoup de commensaux sont attirés dans les terriers et les nids par la température élevée qui y règne et qui est indispensable à leur survie ; on a pu le démontrer dans le cas du staphylin *Microglotta nidicola*, qui, dans nos régions, ne peut s'accoupler qu'à une température nettement supérieure à celle qui règne dans le milieu extérieur.

D'autres commensaux recherchent l'humidité ; tel est le cas des Insectes qui habitent les terriers des Rongeurs des régions steppiques d'Afrique du Nord ou d'Asie. Enfin, les déjections de l'hôte ont un rôle attractif certain pour beaucoup d'Insectes comme les *Blaps* qui s'en nourrissent. Cette dernière catégorie forme la transition avec les guanobies qui vivent dans les grottes, mais que l'on peut aussi considérer comme des commensaux des chauves-souris.

La faune des nids et des terriers peut être fort riche : on a recensé, dans les terriers de la marmotte des Alpes, cent dix espèces de Coléoptères.

Les commensaux les plus intéressants sont les *myrmécophiles*, hôtes des fourmis, et les *termitophiles*, hôtes des termites. Les espèces qui s'installent dans les nids des Insectes sociaux en question y trouvent, tout d'abord, des conditions de milieu très spéciales : une température beaucoup plus stable que dans le milieu environnant et plus élevée en hiver, au moins dans nos régions, une humidité relative constante et élevée, l'obscurité, parfois, une atmosphère chargée de divers gaz absents dans l'air normal (comme dans les nids de fourmis Dorylines) et, enfin, de la matière organique décomposée, plus ou moins abondante. Un grand nombre d'espèces animales exploitent les colonies d'Insectes sociaux. Les unes le font occasionnellement comme prédateurs ou comme hôtes temporaires, mais la plupart dépendent de leur hôte pour leur survie au moins à un stade de leur développement. Les relations établies peuvent parfois être assez lâches et facultatives. C'est le cas de celles qui s'établissent entre des Diptères Tachinides et Conopides et des fourmis magnans. Dans ce cas les commensaux suivent les colonnes de chasse de leurs hôtes, dans le dessein de parasiter les blattes et les grillons fuyant leurs abris.

Outre de très nombreux Acariens, on peut découvrir dans les fourmilières des Insectes très variés. Les Collemboles sont représentés par des Entomobryidae et les Thysanoures par des Nicoletiidae ; on trouve aussi de petits grillons du genre *Myrmecophila*, diverses blattes comme *Myrmecoblatta*, *Attaphila* et *Nothoblatta*, des Homoptères, pucerons, cochenilles et Cercopidae, des Hémiptères comme les Réduvides du genre *Ptilocerus*, qui sont attirés par l'odeur de la substance déposée le long des pistes des fourmis *Hypoclinea*, et qui en dévorent les ouvrières et quelques Psocoptères. Parmi les Névroptères, on peut citer les Chrysopides du genre *Nadiva*, dont les larves vivent dans les fourmilières de *Camponotus*. Les Coléoptères comprennent les types de myrmécophiles les plus nombreux. Les Paussides, dont toutes les espèces vivent avec les fourmis et dont la morphologie est très modifiée par le mode de vie, sont parmi les plus intéressants. Tous les Paussides habitent les régions tropicales, sauf *Paussus favieri*, qui se trouve en France dans les nids de *Pheidole pallidula* de la région de Banyuls.

C. Bevilacqua

▲ **Blaps gigas**, ***comme beaucoup d'Insectes, vit en commensal des habitants des terriers de Rongeurs.***

A. Margiocco

◀ ***Les Coléoptères comprennent les types de myrmécophiles les plus nombreux, ici*** **Paussus raffigurato.**

M. Boulard

▼ ***Diptères du genre*** **Thaumatoxena** ***dans une termitière en République centrafricaine.***

Les Limulodides sont des hôtes des Dorylines ; beaucoup de Léiodides et surtout des Psélaphides et des Clavigérides vivent avec les fourmis. Chez les Scarabéides, les cétoines *Cremastocheilus* sont, à l'état larvaire, des prédateurs obligatoires des larves de leur hôte. Les Lathridiides *Coluocera* et *Merophysia* se rencontrent surtout avec des fourmis du genre *Messor* dont ils mangent les réserves de graines. Signalons enfin le curieux Brenthide *Amorphocephalus coronatus*, qui habite, dans le sud de la France, les nids de *Camponotus*. Chez les Lépidoptères beaucoup de chenilles de Lycénides sont des hôtes obligatoires des fourmilières.

Les termitophiles sont moins bien connus et sans doute moins nombreux. On trouve, dans les termitières, des Collemboles, de rares blattes, des Homoptères de la famille des Termitococcides qui vivent avec les *Capritermes* et les *Leucotermes*, des Hémiptères Termitaphidides, divers Coléoptères, en particulier des staphylins, tels les *Termitopullus* qui mordent les larves de leur hôte pour en absorber l'hémolymphe. Les plus modifiés des termitophiles sont des Diptères Psychodides *(Termitodipteron)*, Cécidomyides (*Termitomastus*, qui vit avec le termite *Anoplotermes*), Phorides, et surtout les extraordinaires Termitoxénides dont l'abdomen est physogastre, c'est-à-dire court, renflé et presque sphérique. La physogastrie est d'ailleurs un caractère assez fréquent chez les Insectes termitophiles et myrmécophiles ; on l'observe aussi chez divers staphylins.

Quelles sont les activités de ces Insectes et quels sont leurs rapports avec leurs hôtes ? Il est difficile de donner une réponse générale à cette question, mais un certain nombre d'exemples bien étudiés peuvent fournir un aperçu de la biologie des commensaux des fourmis et des termites. Les commensaux des Insectes sociaux ont dû tout d'abord subir une évolution profonde de leur régime alimentaire. Les cétoines du genre *Cremastocheilus* sont devenues des carnivores qui attaquent et dévorent les fourmis. A l'état larvaire, les autres cétoines vivent dans les matières végétales en décomposition dont elles se nourrissent (surtout le bois) ; à l'état adulte elles sont floricoles. Les grillons *Myrmecophila* et les blattes *Attaphila* recherchent les sécrétions de leurs hôtes ; les autres grillons et blattes sont phytophages ou détritivores. Le Coléoptère Nitidulide *Amphotis marginata*, qui sollicite les fourmis *Lasius* pour obtenir d'elles des gouttelettes de nourriture régurgitées, a des proches parents, les *Epuraea*, qui sont des suceurs de sève.

Le plus important pour les commensaux, surtout pour les myrmécophiles, est de se faire adopter et de survivre, car les fourmis sont agressives et ne tolèrent guère d'intrus dans leurs nids. Or, même des chasseresses aussi redoutables que les Dorylines (les fourmis magnans) donnent asile à des hôtes. Certains échappent aux fourmis grâce à la rapidité de leur fuite ou à leur petite taille et leur absence d'odeur qui leur permettent de passer inaperçus. Beaucoup d'autres ont acquis une forme qui ne donne pas prise aux attaques des mandibules de l'agresseur ; ce sont les commensaux de *type protégé*, que l'on trouve surtout chez les Coléoptères, staphylins, Histérides, Limulodides, Scarabéides, et chez les Diptères Phorides, comme les *Thaumatoxena*. Le corps de tous ces Insectes protégés est généralement de forme ovoïde lisse, sans relief ; leurs pattes et leurs antennes sont rétractiles et leurs tergites très développés constituent une sorte de bouclier dorsal. De plus, des coaptations permettent souvent l'enroulement du corps. Aussi le commensal est-il pratiquement inattaquable.

D'autres commensaux sont de *type mimétique*, surtout chez les myrmécophiles. La ressemblance avec les hôtes est souvent extraordinaire, en particulier chez les staphylins *Myrmeciton*, *Mimanomma*, *Ecitosus* et *Aenictoteras*, qui vivent avec des fourmis Dorylines nomades, particulièrement agressives mais aveugles. La forme de leur corps est suffisamment proche de celle de l'hôte pour tromper ses sens tactiles. Le corps s'allonge, ainsi que les pattes et les antennes ; une structure comme le pétiole, qui correspond à l'étranglement des premiers segments abdominaux des fourmis, a même été imitée par au moins sept groupes de staphylins myrmécophiles. La physogastrie présente chez diverses espèces de staphylins termitophiles correspond à une autre sorte de mimétisme. On pense que la dilatation de l'abdomen, dont les tergites sont réduits à de minces bandes, rappelle celle qui existe chez les énormes reines de termites, ce qui trompe les ouvriers et les soldats. Cette hypertrophie abdominale ne se manifeste que lors d'une phase de croissance post-imaginale, le jeune staphylin ayant une forme normale lorsqu'il émerge de son enveloppe nymphale. L'abdomen est toujours plus ou moins redressé vers le haut et recourbé vers l'avant.

Le record dans l'imitation est détenu par *Coatonachthodes ovambolandicus*, qui vit avec un termite africain du genre *Fulleritermes*. Cet extraordinaire staphylin porte sur l'abdomen quatre paires de diverticules, en forme de doigts de gant, appelés *exudatoria*. En vue dorsale, la ressemblance avec un ouvrier de termite est saisissante. La physogastrie existe aussi chez les Diptères et elle atteint un développement maximal chez le Termitoxénide *Cheiloxenia obesa*, hôte du termite africain *Allodontermes giffardii*. Chez ce Diptère, les deux premiers segments de l'abdomen recouvrent le thorax et même une partie de la tête ; la partie principale de l'abdomen est formée par le troisième segment, qui constitue une masse sphérique munie de deux exudatoria. Ces exudatoria, qui existent aussi chez d'autres termitophiles, ont un rôle énigmatique. Certains estiment qu'ils produiraient une substance recherchée par les termites ; en réalité, ils ne renferment pas de cellules sécrétrices, mais de nombreux sensilles qui seraient des organes sensoriels.

Des sécrétions dont les fourmis sont friandes sont produites par de nombreux commensaux, que l'on appelle des *symphyles* car les fourmis les recherchent et les soignent. Il y a des symphyles parmi les Diptères Phorides et les Hyménoptères Diaprides. Mais ce sont surtout chez les Coléoptères qu'ils sont nombreux ; on en connaît au moins huit cents espèces, appartenant surtout aux familles des Paussides, des Staphylinides et des Clavigérides. La plupart des symphyles produisent, grâce à des glandes épidermiques, des substances activement recherchées par les fourmis et que l'on a nommées « substances d'apaisement » car elles conduisent les fourmis à se montrer accueillantes et à adopter l'Animal qui les produit. Les glandes qui sécrètent ces produits débouchent souvent à la base de poils dorés, les trichomes. Le rôle de ces substances d'apaisement est encore mal connu :

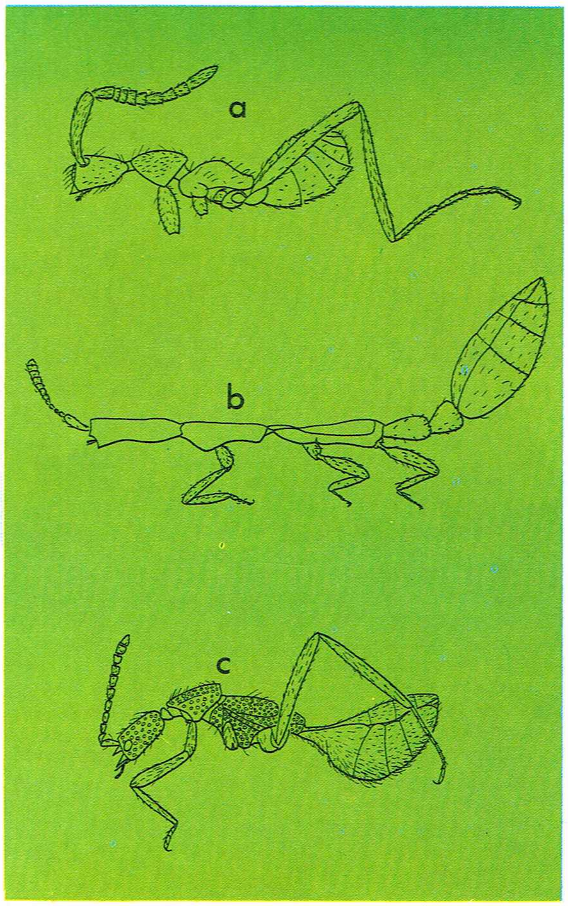

G. Hodebert

▶ ***Exemples de Staphylinides mimétiques vivant avec les fourmis Dorylines :*** *a,* **Myrmeciton antennatum ;** *b,* **Mimanomma spectrum ;** *c,* **Ecitosius gracilis.**

s'agit-il de simples aliments ou de produits mimant les phéromones de la fourmi ? Une étude biochimique serait nécessaire pour répondre.

Les symphyles présentent presque toujours des caractères morphologiques communs, la réduction et la fusion des articles antennaires comme chez les Paussides et les Clavigérides, et la réduction des pièces buccales ; les symphyles se font en effet souvent gaver par les fourmis qui leur régurgitent de la nourriture. Les sécrétions des symphyles ont parfois un effet néfaste sur les fourmis ; elles agissent comme des drogues qui perturbent profondément leur comportement. *Paussus favieri*, qui vit dans les nids de *Pheidole pallidula*, est toléré bien qu'il se nourrisse des larves de ses hôtes ; il dévore parfois même des ouvrières. De plus, les autres ouvrières lèchent le corps du *Paussus* enduit d'une substance si agréable que les fourmis en oublient de chasser leur dangereux commensal.

Le cas des staphylins *Lomechusa* qui vivent en France dans les nids de *Formica* est analogue ; les ouvrières de *Formica* recherchent avidement les sécrétions de *Lomechusa* et elles en sont intoxiquées au point de négliger leur couvain. Lorsque cela arrive, les larves, mal nourries, se transforment fréquemment en individus anormaux, ou pseudogynes, ayant la taille des ouvrières mais le thorax des femelles et incapables de travailler. Les *Lomechusa* dévorent alors tranquillement les larves des fourmis et la population de la colonie décline lentement.

Les Insectes parasites

On désigne sous le nom de parasite une espèce qui se nourrit aux dépens d'une autre, appelée hôte et généralement unique, mais qui ne la tue pas. Les Insectes parasites sont en général situés à l'extérieur de leur hôte, et ce sont alors des *ectoparasites* qui sucent le sang des Vertébrés, comme les puces, les poux ou les punaises des lits. Quant aux *endoparasites*, ils sont rares chez les Insectes : c'est le cas de quelques Strepsiptères. Les Insectes parasitant d'autres Insectes sont rares également : on ne peut guère citer que les Strepsiptères qui vivent chez des Hyménoptères. Tous les autres Insectes parasites vrais sont les hôtes de Vertébrés ou d'autres Invertébrés comme des Mollusques ou des cloportes.

Marka

▲ *Larves d'Apanteles parasites d'une larve de Sphingide, sur laquelle elles élaborent leur cocon. Ces parasites peuvent être à leur tour parasités par d'autres Insectes appelés hyperparasites.*

La plupart des Insectes que l'on désigne en général sous le nom de parasites sont en réalité des *parasitoïdes*. Vis-à-vis de l'hôte ils se comportent tout d'abord en parasites, en respectant ses organes vitaux, mais à la fin de leur développement ils deviennent des prédateurs et le mangent.

Les parasitoïdes sont nombreux chez les Hyménoptères ainsi que chez les Diptères, rares chez les Coléoptères et absents chez les Aptérygotes. Tous ces parasitoïdes sont qualifiés de *protéliens* car, à l'état d'imago, ils mènent une vie libre, souvent sur des fleurs, et les larves seules sont parasites.

On distingue des espèces *monophages* qui n'attaquent qu'un seul hôte ; ainsi l'Hyménoptère *Aphelinus mali* ne parasite que le puceron lanigère. Les espèces *oligophages*, quant à elles, font leur choix parmi quelques espèces voisines : *Opius* n'attaque que les Diptères, *Cryptochetum*, un Diptère Agromyzide, parasite seulement des cochenilles. Beaucoup de parasitoïdes sont *polyphages* : par exemple le tachinaire *Compsilura concinnata* parasite plusieurs centaines d'espèces de Lépidoptères appartenant à cent trente-trois genres différents.

Il existe également des parasites de parasites, ou *hyperparasites : Apanteles*, Hyménoptère Braconide parasite d'Insectes comme les chenilles, est parasité à son tour par divers Ichneumonides du genre *Hemiteles* et par un Chalcidien. Cet hyperparasitisme peut avoir des aspects curieux : chez certaines espèces d'Hyménoptères Aphélinides du genre *Coccophagus*, les larves mâles vivent en hyperparasites dans des cochenilles hébergeant les larves femelles, aux dépens de ces dernières qui sont des parasites primaires.

Les parasitoïdes attaquent les Insectes à tous leurs stades de développement. Ceux qui recherchent les œufs sont souvent de taille minuscule, comme par exemple les Proctotrupides et les Trichogrammides. Parmi les Hyménoptères, les familles de parasites les plus importantes sont les Ichneumonides, les Braconides, les Trichogrammides, les Ptéromalides, les Chalcidides, les Scoliides et les Tiphiides. Enfin on peut citer, parmi les Diptères, les Tachinides et les Sarcophagides.

La vie parasitaire entraîne souvent des modifications morphologiques importantes qui vont dans le sens d'une réduction des appendices et des organes sensoriels. Les femelles de Strepsiptères, comme *Xenos vesparum*, qui est un endoparasite d'Hyménoptères, ont perdu toute trace de pattes, d'antennes, de pièces buccales et d'yeux, et leur segmentation n'est plus apparente. Cependant c'est chez le Diptère africain *Ascodipteron phyllorhinae*, de la famille des Streblides, que la dégradation parasitaire atteint son maximum. Le mâle et la femelle sont normaux à l'éclosion, mais, après avoir été fécondée, la femelle se fixe sur l'oreille d'une chauve-souris, en perce la peau puis s'enfonce dans le tégument. Elle perd alors ses ailes et ses appendices ; sa tête et son thorax s'invaginent dans

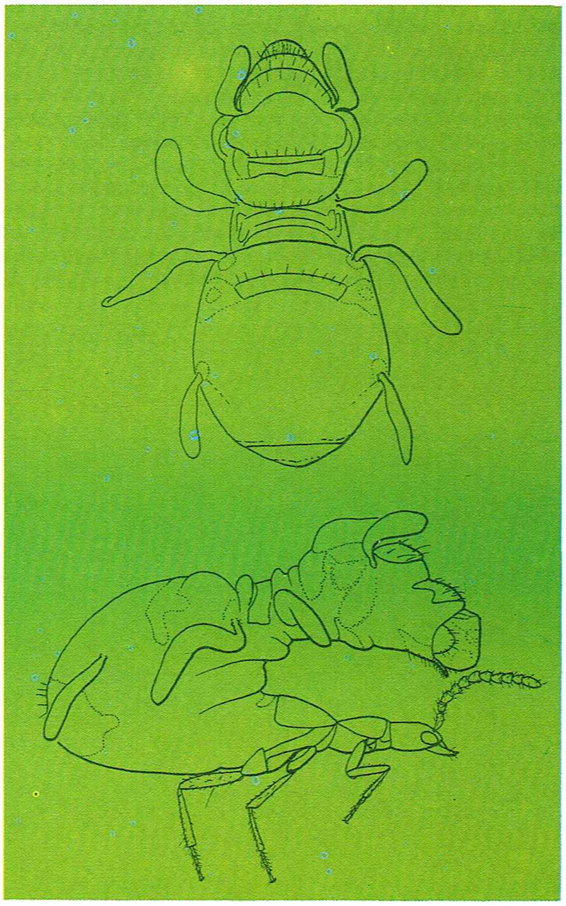

G. Hodebert

◀ *Un des plus remarquables Insectes termitophiles, le staphylin* **Coatonachthodes ovambolandicus** *vivant avec le termite* **Fulleritermes** *en Afrique : en haut, vue dorsale ; en bas, vue de profil. La partie renflée de l'abdomen simule le corps d'un ouvrier de termite et les exudatoria rappellent les pattes des termites.*

C. Bevilacqua

▲ *Un Syrphide* **Vollucella zonaria**; *c'est un Insecte utile (floricole pollinisateur).*
▼ *A gauche, une abeille ouvrière butinant des fleurs d'aubépine;*
à droite, les Coléoptères du genre **Necrophorus**, *ici,* **N. vespilloides**, *pondent dans les cadavres qu'ils enterrent, ils jouent donc un rôle utile de fossoyeurs.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

son abdomen et elle prend l'aspect d'un sac informe dans lequel les ovaires sont hypertrophiés et où seuls les stigmates permettent de reconnaître qu'il s'agit d'un Insecte.

Pour qu'un parasite puisse se développer il faut qu'il y ait coïncidence dans le temps et dans l'espace entre l'apparition du stade réceptif de l'hôte et l'apparition du stade agressif du parasite. Si l'hôte est absent ou inaccessible, ou bien encore à un stade non réceptif, le parasite ne pourra pas se développer. Cette nécessité de la *coïncidence* entre le parasite et son hôte a une grande importance pratique lorsqu'on veut entreprendre une campagne de lutte biologique contre un Insecte nuisible à l'aide d'un ennemi de l'espèce indésirable. Il faut toujours prendre soin de libérer les Insectes au bon moment pour que leur action soit efficace. Il est utile également de connaître le *complexe parasitaire* de l'espèce à contrôler, c'est-à-dire l'ensemble de toutes les espèces qui se conduisent vis-à-vis d'elle comme des parasites ou des prédateurs. Il sera ensuite possible de choisir parmi ces ennemis celui ou ceux qui seront les plus efficaces. En raison de leur fécondité élevée, parfois accrue par la polyembryonnie, les Insectes parasitoïdes jouent un rôle considérable dans le maintien des équilibres naturels, en limitant à un niveau d'abondance raisonnable beaucoup d'espèces nuisibles.

Les Insectes et l'homme

Pour beaucoup de personnes, les Insectes sont des Animaux nuisibles, dangereux, dont il convient de se débarrasser avec la plus grande énergie. Si cette opinion est justifiée dans un certain nombre de cas, il est nécessaire de rétablir la vérité : les Insectes utiles sont certainement plus nombreux que les Insectes nuisibles, même si leur rôle est souvent discret, donc ignoré. Ce rôle est suffisamment important pour être pris en considération avant d'entreprendre de fâcheuses campagnes de désinsectisation totale. Puissent les quelques exemples d'Insectes utiles traités dans ce texte modérer notre ardeur dans l'emploi du pulvérisateur à insecticide !

Les Insectes utiles

Les plus méconnus des auxiliaires de l'agriculture sont les Insectes *pollinisateurs*. On sait que la fécondation des fleurs, donc la formation des fruits et des graines, ne peut s'effectuer que si les grains de pollen sont transportés de l'étamine au stigmate du pistil. Comment se fait le transport du pollen ? Parfois c'est le vent qui l'assure, comme chez le noisetier qui fleurit très tôt, à une époque où bien peu d'Insectes sont actifs, mais, en général, ce sont les Insectes qui assurent le transport du pollen. Ils sont d'autant plus indispensables que, le plus souvent, la fécondation ne peut être assurée que par le pollen d'une autre plante de la même espèce. C'est presque toujours pour se nourrir en recherchant le nectar ou le pollen que les Insectes s'introduisent dans les fleurs; dans tous les cas, ils se recouvrent involontairement le corps de pollen, d'autant plus facilement qu'ils ont souvent le corps très velu (abeilles, bourdons).

De nombreuses expériences ont confirmé le rôle indispensable des Insectes pollinisateurs dans le rendement des cultures de fruits ou de légumes. Des plantes en fleurs, entourées d'une cage de gaze les isolant des Insectes, ont un rendement bien inférieur à celui des témoins non isolés; le coton produit 25 % de moins; des branches fleuries de poirier entourées de gaze ne donnent aucun fruit. On peut affirmer que, sans l'aide des Insectes, la plupart des fruits (pommes, poires, oranges, melons, tomates, etc.) et des graines (luzerne, trèfle, sarrasin, etc.) ne pourraient être obtenus et que beaucoup de plantes de prairies et d'ornement ne donneraient jamais de graines. L'exemple le plus célèbre est celui de la vanille : les fleurs de cette Orchidée grimpante originaire du Mexique sont fécondées uniquement par des Hyménoptères du genre *Melipona*. Partout où la vanille a été introduite et où *Melipona* est absent, elle ne donne des fruits que si l'homme assure lui-même la fécondation en mettant directement le pollen en contact avec les stigmates.

Les Insectes pollinisateurs les plus importants sont des Hyménoptères et, en particulier, les abeilles et les bourdons qui viennent chercher dans les fleurs le pollen et le nectar nécessaires à leur nourriture et à celle de leurs larves. On estime que pour produire 1 kg de miel, les abeilles doivent visiter vingt millions de fleurs de trèfle, lesquelles produisent à leur tour 30 kg de graines. En termes monétaires, lorsqu'une abeille donne pour cinq francs de miel, elle fournit en même temps cent francs de graines ou de fruits par son activité pollinisatrice. Une industrie de la pollinisation commence à se créer dans plusieurs pays : des ruches d'abeilles sont louées et installées, au moment de la floraison, à proximité des vergers : les bourdons sont aussi utilisés pour le même but. De nombreux autres Hyménoptères comme les anthophores, les dasypodes, les andrènes, les halictes jouent un rôle important. Le petit Chalcidien *Blastophaga psenes* assure la fécondation des fleurs de figuier en venant y pondre.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Il existe aussi beaucoup de pollinisateurs parmi les Lépidoptères. Les sphinx puisent, avec leur longue trompe, le nectar au fond de fleurs ayant une corolle étroite et profonde, et fécondent plusieurs Orchidées. *Macrosila*, dont la trompe atteint 225 mm de long, est adapté à une Orchidée de Madagascar dont les nectaires (glandes à nectar) sont situés à une profondeur supérieure à 200 mm. Les Diptères floricoles sont répartis dans de nombreuses familles : les Bibionidés, avec *Bibio marci*, ou mouche de la Saint-Marc, les Muscides du genre *Anthomya*, divers Tachinaires, Bombylides et surtout Syrphides (éristales et volucelles).

Les Insectes *nécrophages* (c'est-à-dire mangeurs de cadavres) et *coprophages* (mangeurs d'excréments) ont un rôle utile en tant que « nettoyeurs » de la surface du sol. Cette dernière est constamment encombrée de déchets; parmi les plus importants, citons les cadavres de divers Animaux et les excréments des Mammifères, abondants là où vivent de grands troupeaux.

Les Insectes nécrophages les plus remarquables sont des Coléoptères de la famille des Silphides, les silphes et les nécrophores. Les silphes, tout noirs et d'une taille pouvant atteindre 15 mm, dévorent les cadavres déjà plus ou moins putréfiés et envahis par les larves de Diptères. Les nécrophores, de taille souvent plus avantageuse, noirs avec des bandes orange sur les élytres sauf chez deux espèces entièrement noires, enterrent les cadavres. Plusieurs individus mettent leurs efforts en commun pour creuser le sol; la terre est rejetée tout autour du cadavre et, lorsqu'elle n'est pas trop dure, ce dernier peut se trouver enfoui jusqu'à 30 cm. Il ne semble pas y avoir, de la part des nécrophores, une activité coordonnée de tous les individus, chacun creusant plutôt pour son propre compte. Une femelle creuse ensuite sous le cadavre une cavité dans laquelle elle façonne une boule formée de fragments de chair putréfiée; de cette cavité part une galerie dans laquelle les œufs sont déposés çà et là. Les jeunes larves sont soignées par la mère, qui leur régurgite une bouillie provenant de chair digérée au préalable. Ce comportement est d'autant plus curieux qu'il apparaît chez des Insectes non sociaux.

Les Coléoptères coprophages se nourrissent surtout des excréments des Mammifères. Ils comprennent de nombreuses espèces, et, chez beaucoup d'entre elles, les femelles prennent soin de leur progéniture. Les coprophages appartiennent presque tous à la famille des Scarabéides. Leur biologie très étrange a fait l'objet de nombreux travaux, inaugurés par ceux de J.-H. Fabre. Certains bousiers s'installent et se nourrissent directement au sein de la masse d'excréments, les femelles se contentant de pondre leurs œufs sur place ou dans le sol situé en dessous, sans fabriquer de nid pour les jeunes larves. Ce comportement est celui des *Aphodius*. Les *Bubas* et *Onthophagus* creusent, sous la masse des excréments, un nid plus ou moins compliqué, ayant la forme d'un puits de 5 à 25 cm de profondeur, dans lequel débouchent plusieurs chambres. Dans chacune d'elles est déposé un œuf situé au milieu d'excréments que les parents vont chercher en surface. Souvent, le mâle et la femelle travaillent en collaboration. Le cas des *Geotrupes* est semblable, mais ces Insectes enterrent, en outre, des provisions de bouse pour leur consommation personnelle. *Copris* fait de même, mais la femelle n'abandonne pas ses œufs après la ponte; elle reste dans le nid souterrain, soigne ses larves et ne reparaît à l'air libre que lorsque ses descendants ont atteint le stade adulte. Le comportement le plus complexe se rencontre en Europe chez les *Scarabaeus*, les « scarabées sacrés »; ces Insectes fabriquent des sphères de bouse qu'ils entraînent au loin et enterrent soit pour se nourrir, soit pour y pondre; *Sisyphus* agit à peu près de la même façon.

Outre l'aspect remarquable de ces comportements, il convient d'insister sur l'importance économique des bousiers, car ce sont des fouisseurs acharnés. Une espèce européenne commune, *Geotrupes niger*, enterre 725 g de bouse par nid et *Copris lunaris* 300 g. Au Kansas, *Dichotomus carolinus* remue, en moyenne, 287 g de terre pour faire son nid et y enterre 48,5 g de bouse. Au mois de septembre, la densité des nids peut atteindre cinq cents à l'hectare, ce qui correspond à 150 kg de terre remuée et 25 kg de bouse enterrée. Ces chiffres, valables pour le mois de septembre, doivent être étendus à l'ensemble de la période d'activité de l'Insecte, qui dure

I. Bucciarelli

▲ **Geotrupes stercocarius;** ***ce bousier possède de solides pattes fouisseuses.***

en moyenne six mois par an, et il ne faut pas oublier qu'il existe dans la région de nombreuses autres espèces de bousiers qui ont une activité analogue.

En Australie, où les bovins et les ovins ont été introduits par l'homme, les coprophages indigènes sont rares et ne s'intéressent qu'aux excréments des Oiseaux et des Marsupiaux. De sorte que les trente-trois millions de tonnes de bouse que le bétail importé rejette chaque année restent sur le sol. Ces excréments durcissent, se dessèchent et perdent leurs éléments azotés. Les bouses peuvent rester sur le sol pendant cinq ans alors que, dans les autres pays, elles disparaissent souvent en quelques heures. Les prairies australiennes perdent ainsi une quantité importante d'engrais et, en outre, les bouses recouvrent une surface non négligeable. On estime que 100 000 hectares de prairies sont perdus chaque année, car des plantes que le bétail refuse de manger se développent sur ces bouses, où l'herbe habituelle ne pousse plus. Un chercheur a eu l'idée d'introduire en Australie un certain nombre d'espèces de Scarabéides coprophages en provenance d'Europe ou d'Afrique. L'acclimatation de plusieurs d'entre elles a déjà été réussie. On espère que lorsqu'ils seront assez nombreux ces Insectes enfouiront les bouses, ce qui permettra de récupérer de nombreux hectares de prairies; en outre, des éléments fertilisants seront rendus au sol. Beaucoup de mouches ne pourront plus pondre dans les bouses, ce qui réduira les populations de ces Insectes gênants aussi bien pour le bétail que pour l'homme, et, de surcroît, vecteurs de nombreux parasites. Cet exemple montre à quel point le rôle bénéfique des Insectes peut être important.

Les Insectes utiles les plus connus sont ceux qui fournissent à l'homme des produits directement utilisables. L'abeille nous donne le miel, la cire et le pollen, le bombyx du mûrier la soie, la cochenille du Népal *(Coccus cacti)* le carmin; les cochenilles à laque sécrètent une résine rouge et translucide, connue sous le nom de laque. Si l'utilisation des Insectes dans l'alimentation, dans l'ornementation, etc., est d'importance pratique négligeable, il n'en va pas de même des Insectes entomophages, prédateurs ou parasites, qui sont des auxiliaires précieux de l'agriculture.

Les Insectes nuisibles

Les moyens mis en œuvre contre les Insectes nuisibles sont de deux sortes.

La première méthode, la *lutte chimique* à l'aide d'insecticides, a pris un grand essor à partir de 1945, après la mise au point, pendant la guerre, de plusieurs insecticides de synthèse dont le plus connu est le DDT. Alors que l'on avait cru pendant plusieurs années détenir avec ces produits le moyen de nous débarrasser définitivement des Insectes indésirables, il a fallu reconnaître depuis que leurs inconvénients sont fort nombreux. Tout d'abord, ils provoquent l'apparition de races résistantes qui ne peuvent

▼ ***Un scarabée sacré,*** **Scarabaeus sp.,** ***roulant sa pilule de bouse.***

A. Margiocco

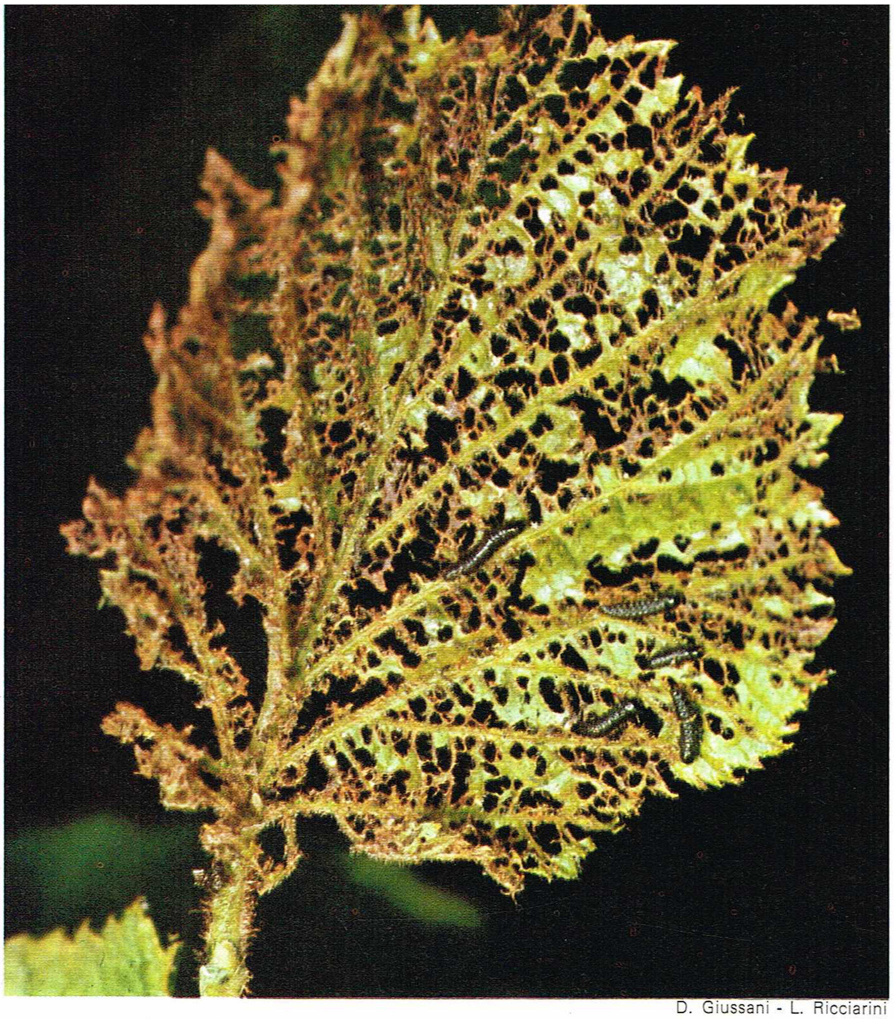

D. Giussani - L. Ricciarini

▲ *Exemple de ravages causés par les Insectes nuisibles : ici des larves de Coléoptères Chrysomélides ont dilacéré une feuille de noisetier.*
▼ *Parmi les Insectes entomophages utilisés dans la lutte contre les espèces nuisibles, les coccinelles ont un rôle efficace, notamment contre les cochenilles.*

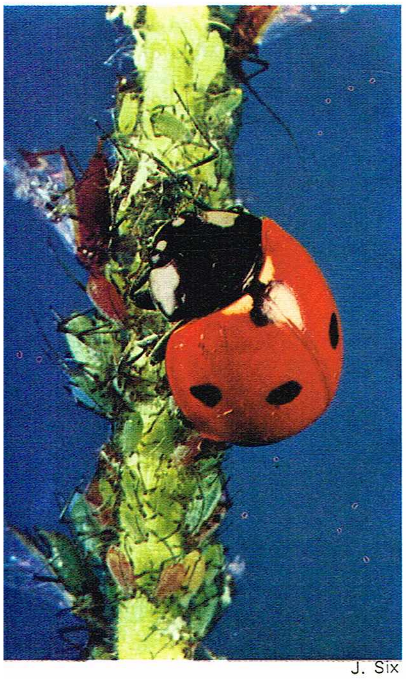

J. Six

plus être combattues avec ces insecticides. On connaît actuellement plus d'une centaine d'espèces d'Insectes, surtout des moustiques, vecteurs de nombreuses maladies dans les pays tropicaux, résistants aux insecticides. De plus ces produits détruisent indistinctement les espèces utiles ou nuisibles. Dans la région parisienne, les abeilles ont beaucoup souffert des traitements du colza contre divers ravageurs. De nombreux Insectes pollinisateurs ou entomophages sont éliminés par les traitements insecticides. Souvent, les espèces utiles, prédatrices ou parasites, sont plus sensibles que les espèces phytophages et on aboutit, au contraire de l'effet recherché, à des ruptures d'équilibre, caractérisées par la pullulation de l'espèce dont on voulait se débarrasser, celle-ci n'étant plus contrôlée par ses ennemis naturels.

Les deux exemples les plus extrêmes que l'on puisse citer sont les suivants. En Californie, pour protéger les agrumes des attaques de la cochenille *Aonidiella aurantii*, on a fait des traitements répétés au DDT. Les effets ont été inattendus : les cochenilles ont pullulé dans les parcelles traitées, tandis que la suppression de l'usage du DDT sur des arbres traités depuis des années s'est accompagnée d'une réduction des effectifs des cochenilles au-dessous du seuil de tolérance économique. Au Pérou, dans la vallée de Canete, où la culture du coton représente une ressource importante, les ravageurs de cette plante étaient devenus tellement résistants aux insecticides qu'il fallait effectuer un traitement tous les trois jours, avec pour seul résultat d'augmenter le nombre d'espèces de ravageurs. Ce n'est que l'importation d'entomophages qui a permis de sauver la situation en réduisant le nombre de traitements en même temps que les rendements augmentaient.

Le deuxième moyen de lutte contre les Insectes et autres Animaux nuisibles et même contre les mauvaises herbes est la *lutte biologique*. Ce moyen consiste à utiliser les ennemis naturels des espèces dont on veut réduire les effectifs afin qu'elles ne causent plus de dégâts économiquement appréciables. Le premier exemple de réussite de cette méthode remonte à 1888. A cette époque, la cochenille australienne *Icerya purchasi*, qui faisait de grands ravages parmi les orangers de Californie, fut tenue en échec grâce à l'introduction de la coccinelle *Novius cardinalis* qui en est un prédateur spécifique. Depuis, de très nombreuses introductions d'entomophages ont été réalisées dans diverses régions du monde et en 1964 on dénombrait déjà cent soixante cas de réussite dans la lutte contre les Insectes nuisibles. En Europe, on peut citer l'acclimatation du Chalcidien *Prospaltella perniciosi* pour éliminer le redoutable pou de San José *Quadraspidiotus perniciosus*, ennemi des arbres fruitiers, ainsi que l'emploi du Braconide *Opius concolor* contre la mouche de l'olive *Dacus oleae*.

Les Insectes entomophages sont maintenant élevés dans de nombreux pays par milliards d'individus ; ils rendent des services appréciables à l'agriculture en prenant la relève des insecticides, souvent inefficaces et toujours dangereux. Ces quelques exemples choisis parmi bien d'autres montrent que le mépris dans lequel sont tenus les Insectes est injustifié. Il existe évidemment des espèces nuisibles, mais les services que nous rendent les espèces utiles compensent bien les dégâts commis par les premières.

BIBLIOGRAPHIE

BAUDOIN R., la Physico-chimie des surfaces dans la vie des Arthropodes aériens des miroirs d'eau, des rivages marins et lacustres et de la zone intercotidale, *Bulletin biologique France et Belgique* 89, 1955, p. 16-164. - CHAUVIN R., *Physiologie de l'Insecte*, Éd. INRA, 1949. - CHAUVIN R., *le Monde des Insectes*, Éd. Hachette, 1967, 254 p. - CHAPMAN R.-F., *The Insects, Structure and Function*, English Universities Press, London, 1969. - COUNCE S.-J. et WADDINGTON C.-H., *Developmental Systems : Insects*, Academic Press, London and N. Y., 1973. - DAJOZ R., la Digestion du bois chez les Insectes xylophages, *l'Année biologique* 7 (n.s.), 1968, p. 2-38. - DAJOZ R., *Précis d'écologie*, Éd. Dunod, 1971, 434 p. - DÉCAMPS H., *la Vie dans les cours d'eau*, « Que sais-je ? », nº 1452, Éd. Presses Universitaires de France, 1971, 128 p. - DÉLYE G., *Recherches sur l'écologie, la physiologie et l'éthologie des fourmis du Sahara*, thèse, Marseille, 1968, 155 p. - DOANE W.-W. *Role of Hormones in Insect Development, in* Developmental Systems, Insects, vol. 2, Éd. S.-J. Counce et C.-H. Waddington, Academic Press, London and N. Y., 1973. - EDNEY E.-B., *The Water Relations of Terrestrial Arthropods*, Cambridge University Press, 1957, 109 p. - ENGELMANN F., *The Physiology of Insect Reproduction*, Oxford, 1970. - FLORKIN M., *Aspects moléculaires de l'adaptation et de la phylogénie*, Éd. Masson, 1966, 260 p. - FLORKIN M. & SCHEER B.-T., *Chemical Zoology*, vol. V, Arthropoda, part A, Academic Press, London 1970, 460 p. - FORD E.-B., *Génétique écologique*, Gauthier Villars, édit., 1972, 448 pp. - FOX R.-M., & FOX J.-W., *Introduction to Comparative Entomology*, Reinhold Publishing Corporation, New York, 1964. - GRANDI G., *Istituzioni di entomologia generale*, Bologne, 1966. - GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie*, VI-VIII-IX-X, Masson édit., Paris. - HINTON M.-E., Spiracular Gills, *Advances in Insect Physiology*, 5, 1968, p. 65-162. - IMMS A.-D., *A General Textbook of Entomology*, Methuen & Co, London, 1957, 886 p. - KOCH L., Tenebrionidae of Angola, *Publicacoes culturais companhia do diamantes de Angola*, nº 39, 1958, 231 p., 43 pl. - MANI M.-S., *Ecology and Biogeography of High Altitude Insects*, W. Junk édit., La Haye, 1968, 527 p. - MARTOJA R., Quelques données récentes sur la nutrition des Insectes, *in la Biologie, acquisitions récentes*, Aubier Montaigne édit., 1965, p. 175-225. - PESSON P., *la Vie dans les sols. Aspects nouveaux; études expérimentales*, Gauthier Villars édit., 1971, 471 p. - PIERRE F., *Écologie et peuplement entomologique des sables vifs du Sahara nord occidental*, C.N.R.S. édit., 1958, 332 p., 16 pl. - ROEDER K.-D., *Nerve Cells and Insects Behavior*, Harvard University Press, Cambridge, 1963. - SELLIER R., *les Insectes utiles*, Payot édit., 1959, 286 p. - SNODGRASS R.-E., *Principles of Insect Morphology*, Mac Graw Hill édit., New York, 1935, 667 p. - VANDEL A., *Biospéléologie. La Biologie des Animaux cavernicoles*, Gauthier Villars édit., 1964, 619 p. - WALDBAUER G.-P., The Consumption and Utilization of Food by Insects, *Advances in Insect Physiology*, 5, 1968, p. 229-288. - WEBER H., *Grundrisse der Insektenkunde*, G. Fischer Verlag, Stuttgart, 1954. WIGGLESWORTH V.-B., *The Principles of Insect Physiology*, Methuen édit., London, 1972. - WILSON E.-O., *Insect Societies*, Belknap Press of Harvard University Press, 1971, 548 p.

ENCYCLOPÉDIE DES SCIENCES

ZOOLOGIE

II

GRANGE BATELIÈRE

GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

ZOOLOGIE

II

GRANGE BATELIÈRE, PARIS - ÉDITIONS KISTER, GENÈVE - ÉRASME, BRUXELLES-ANVERS

Publiée sous le haut patronage de :
Messieurs les professeurs :
Jean DORST, membre de l'Institut,
Charles FEHRENBACH, membre de l'Institut,
Roger HEIM, membre de l'Institut,
Monsieur l'amiral André JUBELIN,
Messieurs les professeurs :
Pierre LÉPINE, membre de l'Institut,
Louis LEPRINCE-RINGUET, de l'Académie française,
Jean-François LEROY, professeur au Muséum national d'histoire naturelle,
Henri NORMANT, membre de l'Institut,
Monsieur Jacques PICCARD, docteur ès sciences h.c.

Réalisation	IDÉES ET ÉDITIONS 16, avenue de Friedland, 75008 Paris
Comité de direction	Cristobal de ACEVEDO, Simone DEVAUX, Uberto TOSCO.
Rédaction	Patrick PHLIPONEAU, Françoise MENU, Marie-Noëlle RENARD, Vanina DORÉ.
Recherche de l'illustration	Mathilde RIEUSSEC.
Mise en pages	Tito TOPIN et Serge BROCHE.
Illustrations techniques	Richard COLIN.
Coordinateur des dessins	Mario LOGLI.
Fabrication	Sylvie MARCHAND, Martine TOTIN.
Directeur de la publication	J.-P. BRÉVOST.

Ont collaboré à ce volume :

Pour les Insectes :
M. BOULARD, pour les Dictyoptères, les Embioptères, les Orthoptères,
les Psocoptères, les Mallophages, les Anoploures, les Homoptères, les Thysanoptères,
les Strepsiptères et les Hyménoptères.
J. CARAYON, pour les généralités sur la systématique et sur les « Rhynchotes »,
les Hémiptères, les Aphaniptères et les Diptères.
R. DAJOZ, pour les Coléoptères.
J. LEGRAND, pour les Éphéméroptères, les Odonatoptères, les Isoptères,
les Plécoptères, les Notoptères, les Phasmoptères, les Zoraptères, les Mégaloptères,
les Raphidioptères, les Névroptères, les Mécoptères et les Trichoptères.
J. MENIER, pour les Collemboles, les Protoures, les Diploures, les Thysanoures
et les Dermaptères.
P.-C. ROUGEOT, pour les Lépidoptères.

Pour les Échinodermes : G. CHERBONNIER.
Pour les Stomocordés, les Pogonophores, les Cordés, les Urocordés et les
Céphalocordés : C. MONNIOT.
Pour l'introduction des Vertébrés : J. ANTHONY.

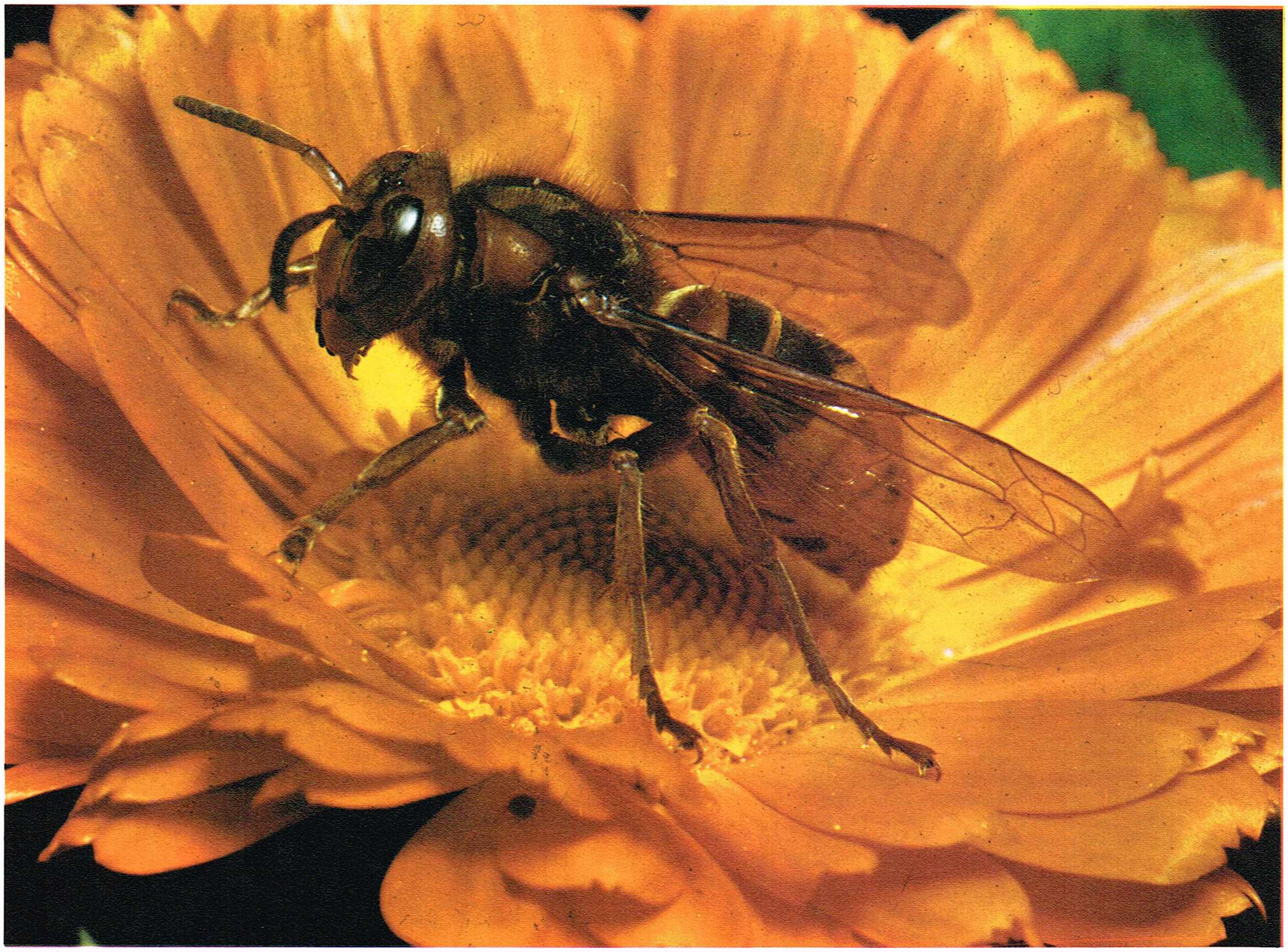

C. Bevilacqua

▲ *La classification des Insectes repose en majeure partie sur les caractères des ailes et sur les types de métamorphoses. Ici, un frelon,* **Vespa crabro**, *appartenant aux Holométaboles (métamorphoses complètes) et à l'ordre des Hyménoptères.*

SYSTÉMATIQUE DES INSECTES

La classification d'un groupe donné comporte en fait deux opérations distinctes. L'une consiste à délimiter ce groupe par rapport à ses voisins, tout en établissant sa place exacte parmi ceux-ci. L'autre, souvent considérée comme la classification proprement dite, est la subdivision du groupe en question. Dans les deux cas, on se fonde sur l'étude comparative détaillée de caractères qui doivent être aussi divers que possible et, surtout, reconnus significatifs des *degrés de parenté*. En effet, depuis que l'on s'est rendu compte de l'évolution des êtres vivants, leur classification n'est pas seulement une opération de répartition des individus en un système de catégories hiérarchisées, les *taxons*, mais elle cherche aussi à rendre compte le mieux possible de leur filiation ; cette systématique est dite *évolutive*, ou *phylétique*.

Position systématique et définition du groupe des Insectes

En ce qui concerne les Insectes, il y a donc lieu d'examiner d'abord quelle position ils occupent dans l'ensemble groupant les Animaux les plus proches, c'est-à-dire parmi les Arthropodes, et ce que l'on pense aujourd'hui de leur origine. Ce vaste phylum des Arthropodes comprend, rappelons-le, trois divisions principales : les Trilobites, uniquement fossiles, puis les Chélicérates et les Mandibulates, groupes qui rassemblent à eux deux les 7/8 de toutes les espèces vivantes. C'est dans les Mandibulates que se rangent les Insectes en compagnie des Myriapodes et des Crustacés.

Hansen, en 1893, et quelques autres zoologistes, se fiant aux ressemblances de certains caractères céphaliques, ont cru que les Insectes descendent de Crustacés primitifs. Mais cette idée est abandonnée de nos jours et l'on s'accorde à séparer nettement les Mandibulates possédant deux paires d'antennes, c'est-à-dire les Crustacés, de ceux qui n'en ont qu'une : les Myriapodes et les Insectes, réunis dans le groupe des Atélocérates. En revanche, la subdivision précise de ce groupe a constitué, jusqu'à ces dernières années, un sujet très controversé, dont un aperçu doit être donné puisqu'il intéresse la définition même des Insectes par rapport aux Myriapodes.

Alors que les Myriapodes ont un corps composé d'une tête suivie de nombreux segments identiques portant chacun une paire de pattes, les Insectes présentent toujours trois segments thoraciques pourvus de pattes et bien distincts des segments abdominaux, dont la plupart sont généralement sans appendices. La différence, très accusée dans l'immense majorité des cas, s'atténue beaucoup quand on compare quelques Insectes Aptérygotes avec quelques Myriapodes, notamment avec les formes jeunes des Symphyles. Aussi divers auteurs l'ont-ils jugée sans valeur en regard d'autres caractères montrant, d'après eux, l'hétérogénéité du groupe des Myriapodes, dont certains représentants seraient beaucoup plus proches des Insectes que des autres Myriapodes.

A la fin du siècle dernier, Pocock, le premier, divise l'ensemble Myriapodes-Insectes en deux grands groupes : d'une part les *Progonéates*, dont les orifices génitaux sont situés peu en arrière de la tête (Diplopodes, Pauropodes et Symphyles), d'autre part les *Opisthogonéates*, où ces orifices se trouvent sur l'avant-dernier segment du corps (Chilopodes et Insectes). Au contraire, selon Snodgrass (1938) les Insectes forment avec les Diplopodes, les Pauropodes et les Symphyles un groupe des *Labiata*, que la fusion des bases des secondes maxilles en labium oppose aux Chilopodes. Les travaux accomplis par Tiegs entre 1940 et 1947 démontrent que la position antérieure des orifices génitaux chez les « Progonéates » résulte d'une migration secondaire et n'a donc pas la grande valeur systématique qui lui était attribuée; ils apportent par ailleurs de nouveaux arguments à la thèse de Packard (1873), d'après laquelle Insectes et Symphyles descendraient d'un ancêtre commun. Toutefois, l'idée d'une proche parenté entre ces deux groupes, admise par nombre d'auteurs et encore soutenue par Sharov en 1966, est maintenant abandonnée devant les résultats concordants d'études détaillées, qui font apparaître les Myriapodes comme un ensemble homogène, bien distinct de celui des Insectes.

Une première preuve de cette homogénéité tient à l'état fondamentalement double de la plupart des segments du corps, non pas exclusivement chez les Diplopodes comme on le croyait auparavant, mais aussi chez tous les autres Myriapodes, y compris les Symphyles comme l'a montré Ravoux en 1962. De ses recherches comparatives sur les mandibules et leur fonctionnement chez les Arthropodes, Manton conclut également, en 1964, à une séparation nette entre Myriapodes et Insectes, notamment parce que les mandibules ont toujours deux articles chez les premiers, et un seul chez les seconds.

D'après des observations plus récentes, les Insectes diffèrent aussi des Myriapodes par leurs pattes généralement dépourvues d'un deuxième trochanter. On admet donc aujourd'hui qu'ils ne descendent ni des Symphyles, ni même de formes voisines des Symphyles; leur groupe et celui des Myriapodes sont parents, mais ont évolué dans deux directions différentes à partir de lointains ancêtres communs.

Les principaux caractères de la classe des Insectes sont les suivants. Ce sont des Arthropodes terrestres ou secondairement aquatiques. Leur corps est divisé en trois régions successives : la *tête*, pourvue d'une seule paire d'antennes, le *thorax* composé de trois segments portant chacun une paire de pattes, et l'*abdomen* qui compte de six à onze segments, dont les neuf premiers peuvent présenter des appendices rudimentaires ou transformés, toujours différents des pattes thoraciques. Leurs pièces buccales comprennent typiquement une paire de mandibules non segmentées, une paire de maxilles et un labium. Leurs pattes n'ont, en général, qu'un seul trochanter. La respiration est d'ordinaire trachéenne.

Subdivision des Insectes

Le nombre des espèces d'Insectes actuellement connues dépasse celui de tous les autres êtres vivants réunis. On l'évalue approximativement à un million et il est sans aucun doute bien inférieur au nombre des espèces existant en réalité, car beaucoup de groupes, dans les régions tropicales surtout, n'ont encore été que fort peu étudiés. Depuis un demi-siècle, les entomologistes décrivent chaque année de six à huit mille espèces nouvelles. Une telle abondance, à laquelle s'ajoute une extrême diversité, explique les difficultés particulières que rencontre la subdivision, communément appelée la « classification », de ce gigantesque ensemble. Il n'est donc pas étonnant que des « systèmes » fort nombreux et variés aient été proposés pour classer les Insectes. Le bref historique suivant en mentionne seulement quelques-uns qui ont marqué les grandes étapes qui se sont succédé avant d'aboutir à la classification généralement admise aujourd'hui.

Historique de la classification

La classification des Insectes s'est longtemps bornée à leur définition en tant que groupe zoologique, définition dont la première remonte à Aristote (384 -322 av. J.-C.). Celui-ci désignait sous le nom d'*Entoma* (de l'adjectif grec *entomos* = coupé, incisé) tous les Animaux ayant le corps divisé par des incisions visibles, au moins dorsalement. Les *Entoma* d'Aristote, qui ont servi à forger le terme entomologie, comprenaient les Insectes proprement dits, les Myriapodes et les Arachnides. Pendant près de deux mille ans, aucun changement notable ne fut apporté à cette définition originelle, hormis qu'*Entoma* traduit en latin devint *Insecta*. Le groupe subit ensuite, au gré des naturalistes, de singulières variations d'ampleur, allant jusqu'à comprendre tous les Arthropodes et même les Annélides. D'abord partisan d'une telle extension, Linné parvint à une définition des Insectes restrictive et voisine de l'actuelle. De plus, dans la douzième édition de son *Systema naturae* (1758) qui est à la base de la systématique, il subdivisa les Insectes en neuf ordres, dont sept ont été conservés sans importante modification dans les classifications modernes. Seuls deux ordres linnéens, les *Aptera*, groupant tous les Insectes dépourvus d'ailes, et les *Neuroptera*, associant les libellules aux actuels Névroptères, devaient se révéler artificiels.

Des améliorations partielles furent apportées au système de Linné en 1789 par Fabricius, et surtout en 1832 par Latreille, qui utilisa les caractères des ailes, des pièces buccales et des métamorphoses. Mais c'est à Brauer (1885) que l'on doit les progrès les plus marquants dans ce domaine, c'est-à-dire la division des Insectes en *Aptérygotes*, primitivement dépourvus d'ailes, et en *Ptérygotes*, ailés ou secondairement aptères, la séparation des Odonates et des Névroptères et la découverte de la parenté des ordres « mécoptéroïdes » (Mécoptères, Diptères, Lépidoptères, etc.).

Depuis le début du siècle, des paléontologistes comme Handlirsch, Tillyard, Martynov et Rohdendorf, en étudiant comparativement les Insectes fossiles et actuels, ont été les principaux artisans de la classification en usage aujourd'hui.

Classification utilisée actuellement

La classification actuelle demeure proche de celle de Martynov (1938); en effet celle-ci n'est qu'assez peu modifiée hormis quelques changements de noms, au moins en ce qui concerne les Ptérygotes. Des caractères alaires forment la base du système de Martynov. L'un de ces caractères, que Pruvost avait fait connaître en 1920 et dont l'importance s'est grandement confirmée depuis, conduit à diviser les Ptérygotes en deux grands groupes nommés par Martynov les *Paléoptères* et les *Néoptères*.

Chez les *Paléoptères*, qui ont comme seuls représentants actuels les libellules et les éphémères, les ailes au repos ne peuvent se rabattre en arrière le long du corps à cause de leur mode primitif d'articulation.

Les *Néoptères*, auxquels appartiennent tous les autres Ptérygotes encore existants, ont, grâce à la présence de sclérites articulés à la base des ailes, la faculté de placer celles-ci à plat ou en toit sur l'abdomen. Les ailes antérieures, plus ou moins sclérifiées, jouent souvent un rôle protecteur et les ailes postérieures présentent un champ jugal, d'ordinaire bien développé, que Martynov a baptisé *neala* en lui accordant une grande importance systématique. Selon cet auteur, en effet, c'est essentiellement d'après les caractères du champ jugal, complétés par quelques autres, que les Néoptères peuvent être répartis en trois sections.

Les *Polynéoptères* ont un champ jugal bien développé, présentant de nombreuses nervures; ce sont des hétérométaboles, à pièces buccales broyeuses; les tubes de Malpighi sont nombreux. La section a été subdivisée en quatre super-ordres, les Blattoptéroïdes, les Dermaptéroïdes, les Plécoptéroïdes et les Orthoptéroïdes.

Les *Paranéoptères* possèdent un champ jugal moins développé, pourvu d'une seule nervure parfois ramifiée; ce sont des Insectes hétérométaboles à pièces buccales plus ou moins fortement modifiées constituant souvent un appareil piqueur; les tubes de Malpighi sont peu nombreux. Ce groupe comprend trois super-ordres : Psocoptéroïdes, Thysanoptéroïdes, Hémiptéroïdes.

Les *Oligonéoptères* ont un champ jugal souvent réduit, voire absent, montrant éventuellement une nervure unique et toujours simple; ces Insectes holométaboles possèdent des tubes de Malpighi peu nombreux, sauf chez les Hyménoptères. Les Oligonéoptères comprennent quatre super-ordres, les Névroptéroïdes, les Mécoptéroïdes, les Coléoptéroïdes et les Hyménoptéroïdes.

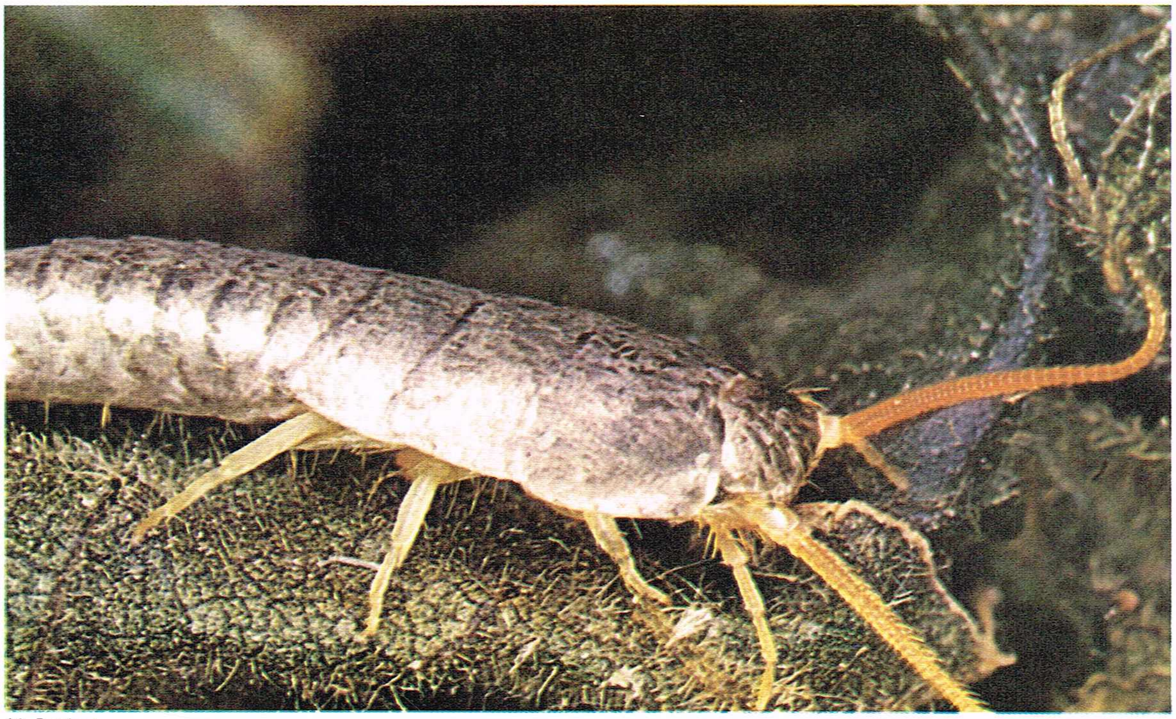

M. Boulard

◀ *Ce poisson d'argent,* **Lepisma saccharina,** *est un Aptérygote Ectognathe du groupe des Thysanoures.*

Aujourd'hui, ces trois sections restent très généralement admises. Toutefois, les noms que leur a donnés Martynov ne sont presque plus utilisés, car la nervation du champ jugal à laquelle ils font allusion apparaît dépourvue, en pratique au moins, de l'intérêt systématique majeur qui lui était attribué par ce paléontologiste. Les Néoptères se classent à nouveau d'après leurs types de métamorphoses et divers autres caractères. Voici leurs principales subdivisions et, entre parenthèses, les sections de Martynov auxquelles elles correspondent :

— Hémimétaboles { Orthoptéroïdes (= Polynéoptères) / Hémiptéroïdes (= Paranéoptères) }
— Holométaboles (= Oligonéoptères)

Les Aptérygotes, qui n'ont guère en commun que l'absence primitive d'ailes, ne sont plus considérés de nos jours comme un ensemble homogène opposé à celui des Ptérygotes. Les Collemboles, les Protoures, les Diploures et les Thysanoures, auxquels on a récemment ajouté les Monoures, uniquement fossiles, constituent des groupes si distincts qu'Handlirsch déjà en faisait autant de classes séparées, chacune équivalente à la classe des Insectes. Leur rang systématique et leurs parentés, aussi bien entre eux qu'avec les Ptérygotes, ont fait l'objet de nombreuses discussions. Suivant une opinion largement admise ces dernières années, les ancêtres des Insectes, encore inconnus, devaient avoir nombre des caractères existant chez certains Thysanoures actuels. Ils auraient évolué dans deux directions différentes en formant deux ensembles inégaux, d'une part, les *Ectognathes,* à pièces buccales externes (les Monoures, les Thysanoures et les Ptérygotes), d'autre part, les *Entognathes*, à pièces buccales enfermées dans une cavité ventrale de la tête (les Protoures, les Collemboles et les Diploures).

Toutefois en 1972, Manton conclut de l'ensemble de ses études comparatives détaillées sur les pièces buccales, la structure céphalique, l'articulation des pattes, et

▼ *A gauche,* **Anaciaeschna isosceles,** *dont les ailes, au repos, ne peuvent se rabattre en arrière le long du corps, appartient donc au groupe des Paléoptères ; à droite, une blatte (genre* **Gyna**), *représentant du groupe des Néoptères.*

I. Bucciarelli

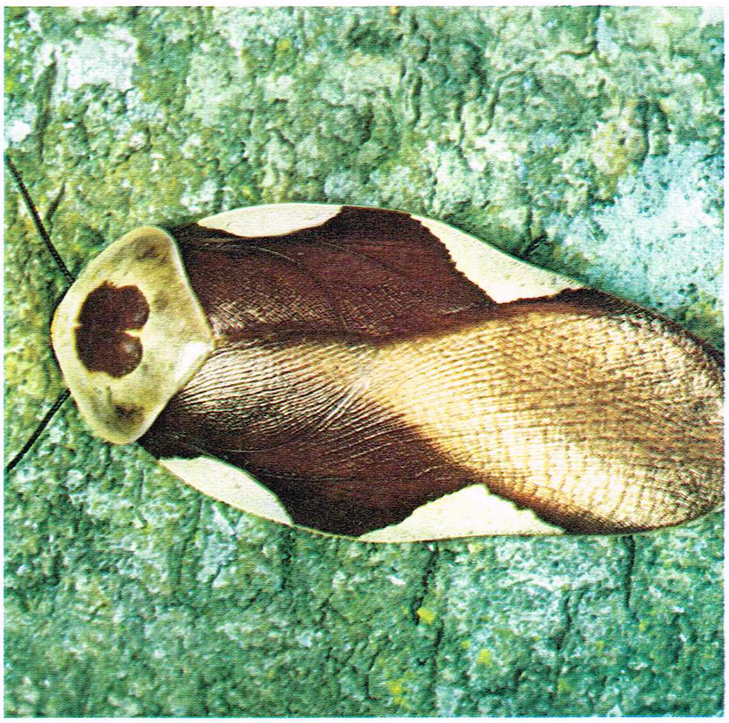

M. Boulard

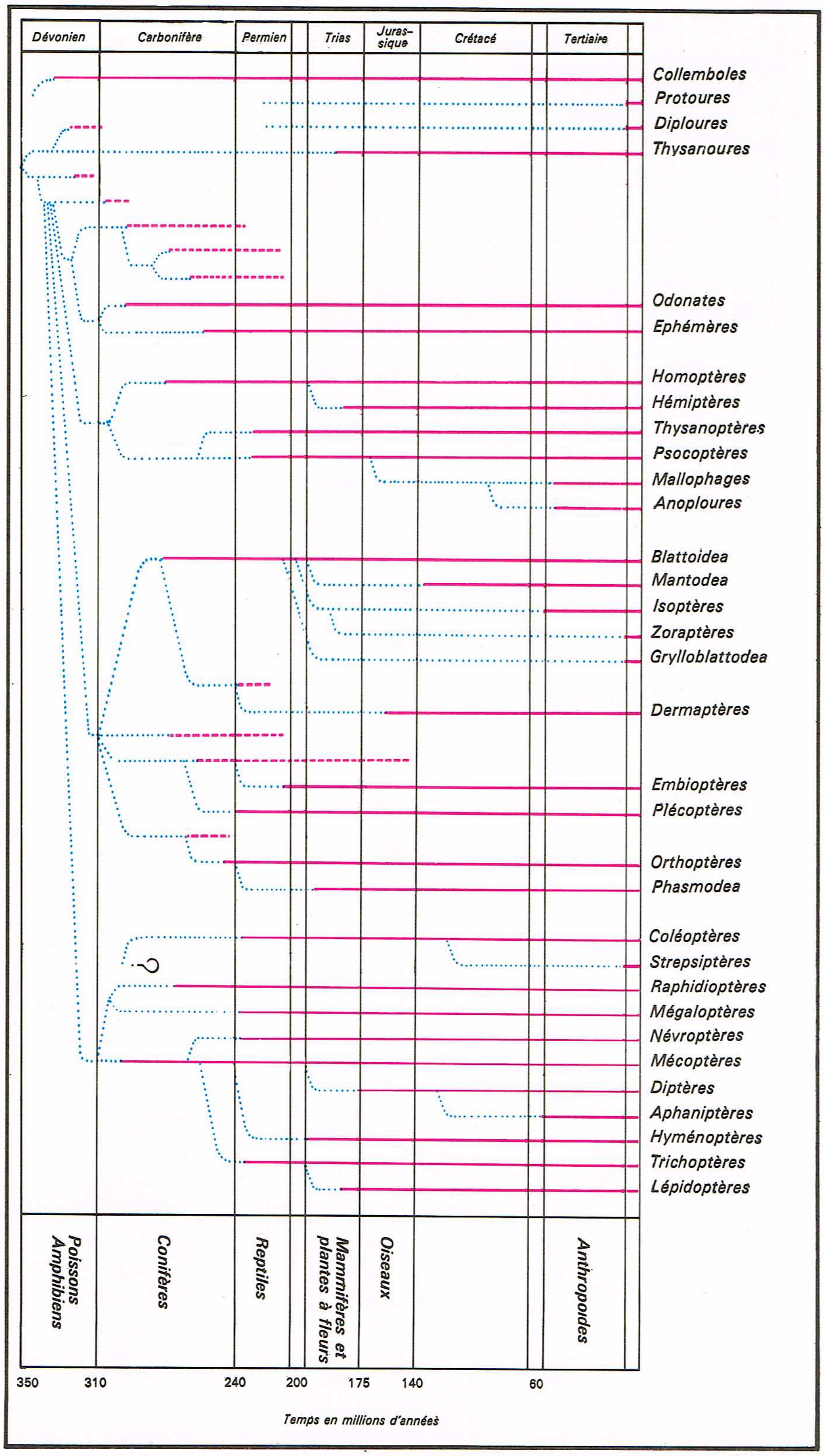

G. Hodebert

▲ ***Tableau de classification phylogénique des Insectes.***

d'autres caractères, que chacun des groupes d' « Aptérygotes » et les Ptérygotes ont évolué séparément. Aucune proche parenté ne pouvant être mise en évidence entre eux, il faut considérer ces groupes comme autant de sous-classes.

Formes fossiles et évolution des Insectes

Les plus anciens Insectes dont on ait trouvé des fossiles vivaient au Dévonien, et sont connus par deux espèces seulement. L'une, *Rhyniella praecursor*, est un Collembole Néanuridé très proche des formes actuelles, ce qui suppose qu'il s'est opéré une longue évolution antérieure, puis une stabilité remarquable. L'autre, *Eopterum devonicum*, est au contraire un Ptérygote fort primitif, considéré comme le représentant de l'ordre fossile des Archaeoptères, peut-être même d'une section particulière. Selon Sharov (1966), les ailes d'*Eopterum* ne permettaient pas encore un vol véritable; elles témoigneraient d'un stade évolutif intermédiaire entre les expansions latérales thoraciques non articulées ou *paranota*, que les ancêtres des Ptérygotes utilisaient sans doute pour planer, et les ailes « volantes » articulées.

Au Carbonifère, en liaison sans doute avec le développement de la flore terrestre, les Insectes semblent devenir beaucoup plus nombreux et variés. La plupart appartiennent à des ordres dont les derniers représentants s'éteindront au Permien. Si les « Aptérygotes » fossiles de cette époque restent rares (Monoures), en revanche les Paléoptères abondent. On trouve parmi eux les premiers éphémères, les premières libellules et surtout les membres de groupes disparus, comme les Palaeodictyoptères, les Mégasécoptères et les Archodonates, Insectes pourvus de pièces buccales piqueuses différant de celles des Hémiptéroïdes par la présence de palpes maxillaires. Durant cette époque les Néoptères, qui, en dépit de leur nom, ne descendent pas de Paléoptères, abondent aussi; hormis les premiers représentants des blattes et des Homoptères, ils appartiennent à des ordres maintenant disparus : Protélythroptères, Paraplécoptères, Protoorthoptères, etc.

C'est au Permien que plusieurs ordres d'Holométaboles commencent à se développer, notamment les Coléoptères et surtout les Mécoptères, dont quelques espèces avaient déjà fait leur apparition au Carbonifère. Peu nombreux aujourd'hui, les Mécoptères n'en présentent pas moins un grand intérêt systématique prouvé par la morphologie comparée et la paléontologie. En effet, ils sont certainement très proches des formes ancestrales ayant donné naissance à un ensemble d'ordres d'Holométaboles appelé « groupe mécoptéroïde », les Trichoptères, les Lépidoptères, les Diptères, et les Aphaniptères. Les Névroptères dérivent peut-être aussi de Mécoptères primitifs, mais la parenté que certains leur attribuent, d'une part avec les Coléoptères et d'autre part avec les Hyménoptères, dont les origines restent obscures, ne repose sur aucune base solide.

Dans la faune entomologique du Trias, relativement mal connue, apparaissent des ordres nouveaux, les Hémiptères qui descendent sans aucun doute d'Homoptères, et les Diptères; en revanche à cette époque, la plupart des ordres « fossiles » ne sont plus représentés.

Au Jurassique, tandis que les Coléoptères et les Diptères connaissent un grand développement, on trouve les premiers Hyménoptères et beaucoup de Paléontinidés, curieux Homoptères si semblables à des papillons qu'on les a longtemps classés dans les Lépidoptères. A en juger par leurs fossiles connus, les véritables Lépidoptères seraient apparus après tous les autres ordres actuels, au début du Tertiaire seulement.

Au Crétacé, excepté les Lépidoptères, tous les grands groupes et beaucoup des familles d'Insectes existant aujourd'hui sont déjà représentés; cependant les formations de cette époque n'ont fourni jusqu'à présent que peu de gisements entomologiques.

Quant aux Insectes de l'ère tertiaire, très abondants et extraordinairement bien conservés dans l' « ambre » lorsqu'ils habitaient les forêts de résineux, ils sont si proches des formes actuelles qu'ils appartiennent souvent aux mêmes genres qu'elles. C'est pourquoi leur étude n'apporte plus guère que des renseignements de détail sur leur évolution, qui fut apparemment beaucoup plus lente que celle qui se produisit chez les Mammifères à la même époque; elle reste néanmoins très fructueuse, notamment pour la biogéographie.

Sous-classe des Collembola

Cette sous-classe comprend un seul ordre, celui des Collemboles, qui sont des Insectes Aptérygotes possédant neuf segments postcéphaliques; leur taille varie de 1 à 10 mm. Leur origine est très contestée, mais nous pouvons affirmer, sans hésiter, que les Collemboles sont les Insectes les plus anciens que l'on connaisse *(Rhyniella praecursor)*, puisqu'on en trouve dans les couches

géologiques du Dévonien (ère primaire) ; cependant leur origine est sûrement encore plus lointaine. Près de deux mille espèces de Collemboles ont été décrites.

Chez les Collemboles il n'y a pas d'yeux composés mais seize cornéules, ou ommatidies, parfois moins, réparties de chaque côté de la tête. Les antennes ont de quatre à six articles, et sont, chez les mâles de certaines espèces, modifiées en « pinces ». En arrière de l'antenne, l'*organe de Tomosvary* ou organe postantennaire a un rôle encore inconnu ; il est parfois absent. La tête est prognathe ou hypognathe, avec des pièces buccales conformées pour la succion ou la trituration, situées dans une cavité de la capsule céphalique (type entognathe).

Les segments thoraciques ont une taille et une segmentation variables ; les caractères sont utilisés pour la classification supérieure des Collemboles. Quant aux tarses des pattes, ils ne sont pas segmentés.

L'abdomen est formé de six segments, qui comprennent divers organes. Le premier segment porte le tube ventral, à l'intérieur duquel se trouve une paire de sacs qui peuvent être retournés sous l'effet de la pression sanguine. Ce tube semble servir non seulement à coller l'Insecte sur des surfaces lisses, mais aussi à permettre l'absorption d'eau. Le troisième segment comprend le *rétinacle*, ou *tenaculum*, dispositif destiné à maintenir en place la furca portée par le quatrième segment abdominal. Cette furca, repliée au repos sous l'abdomen, peut se décrocher brusquement du rétinacle, et projeter violemment l'Insecte vers l'avant. Dans les deux sexes, l'orifice génital est situé sur le cinquième segment. C'est une fente horizontale chez la femelle, un trou circulaire ou une fente verticale chez les mâles. L'orifice anal est placé sur le sixième segment.

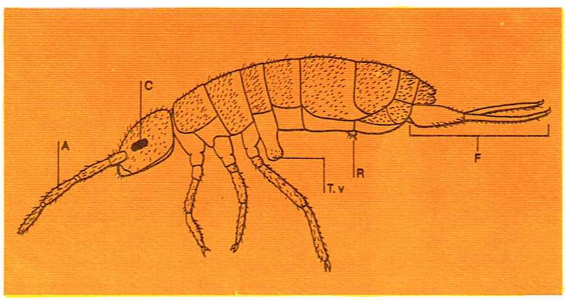

G. Hodebert

◀ *Schéma général d'un Collembole Arthropléone : A, antenne ; C, cornéules (« œil ») ; T.v, tube ventral ; R, rétinacle ; F, furca.*

Les Collemboles sont des Insectes à tégument mou présentant une ornementation cuticulaire très complexe et parfois même, chez les Tomocéridés, des écailles.

Les Collemboles ont une répartition mondiale et se trouvent dans les sols, dans les litières et sur les herbes ; ils ne manifestent pas d'adaptations particulières à ces milieux. Chez d'autres espèces, vivant dans le sol, la taille est souvent réduite, la dépigmentation est prononcée, le nombre de cornéules est réduit, les pattes et les antennes sont courtes et la furca est régressée ou absente. Chez les cavernicoles, la dépigmentation est totale. Certains Collemboles, comme *Sminthurus*, vivent à la surface des eaux ; on constate alors un élargissement des lamelles de la furca. De nombreuses espèces vivent également dans les épiphytes, dans les cadavres et les tombes, à l'intérieur des terriers et des nids, ou bien encore dans le guano. On en connaît des termitophiles ou myrmécophiles. Certains vivent même sur la neige.

Le régime alimentaire des Collemboles est varié, mais à prédominance végétale ; cependant, quelques espèces semblent être carnivores.

On connaît quelques cas de parthénogenèse facultative, notamment celui d'*Onychiurus hortensis*. Le plus souvent, la reproduction est sexuée, mais, fait important, il n'y a pas d'accouplement. Le mode de fécondation n'a été découvert qu'en 1952. Le mâle dépose sur le substrat un spermatophore contenant le sperme ; il est ensuite recueilli par la femelle. Le spermatophore est constitué d'une hampe, ou pédoncule, à l'extrémité de laquelle est fixée une goutelette de liquide spermatique. Le spermatophore mesure entre 300 et 800 μ, tandis que le diamètre de la gouttelette atteint 70 μ.

Au moindre choc la gouttelette éclate, et si à ce moment-là elle est en contact avec l'orifice génital femelle, la fécondation aura lieu. En règle générale, la femelle

C. Bevilacqua

◀ *Forme fossile de* **Libellula cymatophlebia** *datant du Jurassique supérieur.*

recueille les spermatophores. Chez *Podura aquatica*, le mâle dépose son spermatophore à la surface de l'eau, puis vient vers la femelle, et cherche à la pousser vers le spermatophore. Le dépôt de spermatophores est stimulé par la présence des femelles, et la prise se fait soit en présence, soit en dehors de la présence des mâles. Un mâle peut déposer jusqu'à soixante-dix spermatophores en une semaine. La ponte débute quelques jours après la fécondation ; les œufs sphériques de 0,10 à 0,30 mm de diamètre sont déposés en paquets ou isolément et sont soit libres, soit englués par un fluide anal mélangé à des excréments.

Dès le début du développement embryonnaire, l'œuf augmente beaucoup de taille, le chorion éclate, et une ornementation bien visible apparaît à la surface de la cuticule séreuse. La durée du développement embryonnaire varie avec la température : chez *Ceratophysella*, elle est de six jours à 27,5 °C, et de cent vingt jours à 0 °C.

Les Collemboles sont amétaboles ; le jeune ressemble à l'adulte, mais le temps nécessaire pour atteindre la maturité sexuelle dépend beaucoup des facteurs externes. Les mues continuent après la maturité sexuelle.

Les écomorphoses, découvertes par Cassagnau en 1955, consistent en un arrêt du développement, mais pas des mues. Ce phénomène est dû à des conditions externes difficiles, en particulier au froid. Les écomorphoses apparaissent en général chez les immatures à partir d'une certaine taille. L'écomorphose est un phénomène progressif ; la forme primitive donne par mue une forme secondaire, puis une forme tertiaire encore plus modifiée par rapport à la forme primitive. L'écomorphose s'accompagne de modifications morphologiques, comme la dégénérescence des pièces buccales, des appendices, des ommatidies et l'apparition de « néoformations hypertéliques » telles que des cornes, des épines ou des tubercules. L'anatomie également est modifiée ; il y a dégénérescence du tube digestif et hypertrophie du corps gras. L'Animal s'enfonce dans le sol. Lors de la rupture de l'écomorphose, le retour à la forme primitive s'effectuera, soit en repassant par les stades intermédiaires, soit directement.

▼ *A gauche, un Collembole du genre* **Orchesella**, *très fréquent dans les sols, les litières, et sur les herbes ; à droite, représentation d'un spermatophore de Collembole ; H, hampe ; GS, gouttelette spermatique.*

D. Giussani

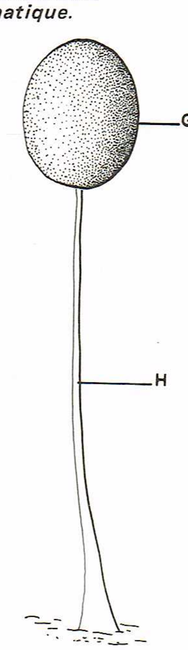

G. Hodebert

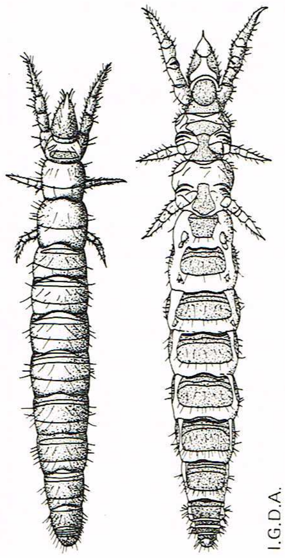

I.G.D.A.

I. Bucciarelli

G.S. Giacomelli

▲ *A gauche, un Protoure adulte, en vue dorsale et en vue ventrale* (**Acerentomon doderoi**) *; au milieu, un Diploure du genre* **Campodea** *; à droite, un Collembole Symphypléone.*

Un comportement de construction a été observé chez certains Collemboles élevés en laboratoire. L'Animal utilise ses matières fécales pour former des boulettes, qui sont ensuite assemblées en une sorte de toit ou de réseau. On constate, corrélativement à ce comportement, l'apparition de phénomènes comparables à ceux que l'on observe dans les écomorphoses, mais moins prononcés.

Les Grégarines et les Nématodes sont bien connus comme endoparasites des Collemboles. Les Myriapodes, les Araignées, les Pseudo-scorpions, les Coléoptères du sol (Staphylinidés et Carabidés), et les Diptères Empididés, sont des prédateurs des Collemboles ; les plus actifs semblent être les Acariens.

La sous-classe des Collembola comprend un seul ordre, celui des Collemboles, divisé à son tour en deux sous-ordres : les Arthropléones, qui ont le corps allongé et une segmentation nette, et les Symphypléones, qui ont le corps globuleux et une segmentation effacée.

Chez les *Arthropléones*, la section des Poduromorphes comprend quatre familles, les Podoridés, les Onychiuridés, les Hypogastruridés et les Néanuridés, dont le *pronotum* est bien visible en vue dorsale. La section des Entomobryomorphes est composée de trois espèces, dont le pronotum est caché ou peu net.

Dans le sous-ordre des *Symphypléones*, on ne compte que trois familles, les Neelidés, dont le thorax est plus développé que l'abdomen, et les Dicyrtomidés et Sminthuridés, qui présentent le caractère inverse.

Sous-classe des Proturata

La sous-classe des Proturata est composée d'un seul ordre : celui des Protoures. Ce sont des Insectes Aptérygotes de petite taille, mesurant au maximum 2 mm, et dépigmentés. Leur trait caractéristique est l'absence d'yeux, et surtout d'antennes. La capsule céphalique enferme les pièces buccales (type entognathe) et porte une paire de *pseudo-oculi* qui pourraient être des rudiments d'antennes et seraient des récepteurs sensibles à l'humidité. Les segments thoraciques sont peu développés, et portent chacun une paire de pattes composées de cinq articles. L'abdomen de l'adulte comprend douze segments, mais le jeune naît avec seulement neuf segments (le développement est anamorphe). Il n'y a pas de cerques, chaque segment porte deux stylets, composés de un ou deux articles et terminés par une vésicule exertile. On connaît assez peu de chose sur la biologie des Protoures. Ils vivent dans des milieux très humides, comme les sols, les litières de feuilles et quelquefois sous les pierres. Les sexes sont séparés. Il n'y aurait qu'une génération par an et il semblerait que les œufs soient pondus au printemps. Les adultes hivernent.

La sous-classe des Proturata comprend un seul ordre, celui des Protoures, qui est divisé en trois familles : les Éosentomidés, les Protoentomidés et les Acérentomidés. La classification repose sur la présence de trachées et de stigmates thoraciques. On connaît environ cent soixante-dix espèces de Protoures, réparties dans le monde entier.

▶ *Page ci-contre, en bas : aspect typique d'un Thysanoure,* **Lepisma saccharina.**

▼ *A gauche, principaux types morphologiques des cerques de Diploures ; au milieu, un Thysanoure du genre* **Machilis** *; à droite, un autre Thysanoure commun dans nos maisons,* **Thermobia domestica.**

G. Hodebert

I. Bucciarelli

I. Bucciarelli

Sous-classe des Diplurata

Les Diploures, qui constituent l'unique ordre de cette sous-classe, sont des Insectes Aptérygotes aveugles, dont la taille varie de 5 mm à 50 mm. Le corps, étroit et allongé, est généralement dépigmenté.

La tête est prognathe. Les segments thoraciques sont peu développés, et portent des pattes courtes à cinq segments. L'abdomen est composé de dix segments, les segments deux à sept portant des vésicules exertiles et des petits styles latéraux. Quelques familles possèdent un organe glandulaire sur le sternite du premier segment. Le gonopore des deux sexes débouche dans une poche située derrière le huitième segment. Il n'y a généralement pas d'armature génitale chez les mâles. L'anus est terminal. Les cerques très variables peuvent être groupés en trois grandes catégories : les cerques fins et longs composés de nombreux articles, qui ressemblent assez à des antennes, les cerques annelés plus courts contenant le canal d'une glande à soie et les cerques transformés en forceps (pinces).

Les Diploures sont des Insectes hygrophiles, qui vivent dans les sols et sous les pierres. Il semble que leur régime alimentaire soit composé de matière végétale ; cependant, les Japyjidés sont carnivores et capturent leurs proies avec leurs forceps.

La fécondation se fait comme chez les Collemboles, par un spermatophore à pédoncule fixé sur le substrat. Il semble que les soins maternels existent dans quelques cas.

Le développement postembryonnaire, du type amétabole, est caractérisé par l'accroissement du nombre des articles antennaires, et, dans quelques groupes, par des modifications des cerques. Le développement est très lent, et continue après la maturité sexuelle. Il peut se produire jusqu'à trente mues.

Les Diploures sont représentés à l'échelle mondiale par environ six cents espèces. On distingue quatre familles, d'importance très inégale : les Japygidés, à cerques transformés en forceps, les Campodéidés, à cerques longs dépourvus de canal de glande à soie mais avec une vésicule exertile peu développée, les Projapidés, qui se distinguent par une vésicule exertile bien développée, et les Procampodéidés, dépourvus de style et de vésicule exertile.

Sous-classe des Thysanurata

Les Thysanurata sont des Aptérygotes Ectognathes appelés couramment « poissons d'argent ». Les plus anciens fossiles connus ne remontent qu'au Trias récent ; on en a trouvé aussi dans l'ambre de la Baltique (Oligocène), mais leur origine est probablement plus lointaine.

Les Thysanurata se présentent sous la forme d'Insectes plus ou moins aplatis, de taille variable (de quelques millimètres à 2 centimètres). Le tégument est peu sclérifié, et peut être ou non recouvert d'écailles. La tête est prognathe, et porte des yeux composés, plus ou moins importants, ainsi que des ocelles, sauf chez les Lépismatidés. L'appareil buccal est de type masticateur.

Le thorax ne présente pas de caractères particuliers. Les pattes possèdent des tarses comprenant de deux à cinq articles. L'abdomen se compose de onze segments, le dernier étant allongé en un appendice qui ressemble à un cerque. Les segments abdominaux portent, en outre, des styles (segments deux à neuf) et quelquefois des vésicules exertiles (segments deux à sept).

Les Thysanoures vivent un peu partout, notamment sous les pierres, sous les écorces ; certains sont cavernicoles ou endogés, d'autres vivent en inquilins dans les nids de termites ou de fourmis. Le régime alimentaire est très varié, et certaines espèces, comme *Lepisma saccharina* et *Termobia domestica*, peuvent quelquefois devenir nuisibles dans les maisons.

La reproduction est généralement sexuée, mais on connaît quelques cas de parthénogenèses *(Nicoletia)*. Il peut y avoir un accouplement ou, comme chez les autres Aptérygotes, un transfert indirect de spermatozoïdes par un spermatophore déposé par le mâle sur le substrat.

Chez les *Machilis*, il y a une parade sexuelle active. Quand un mâle a trouvé une femelle, il effectue autour d'elle une sorte de danse. Si elle est réceptive, elle s'immobilise, et relève l'extrémité de son abdomen ; le mâle se place alors contre la femelle, abaisse l'extrémité de son abdomen sur le sol, et sécrète un fil de soie par son « pénis ». C'est le long de ce fil, tendu par le mâle du sol à l'abdomen de la femelle, que glissent quelques gouttes de sperme. Le mâle continue de bousculer la femelle jusqu'à ce qu'elle ait ses filaments terminaux de part et d'autre du fil, puis il abaisse son abdomen et les gouttelettes de sperme viennent en contact avec la femelle.

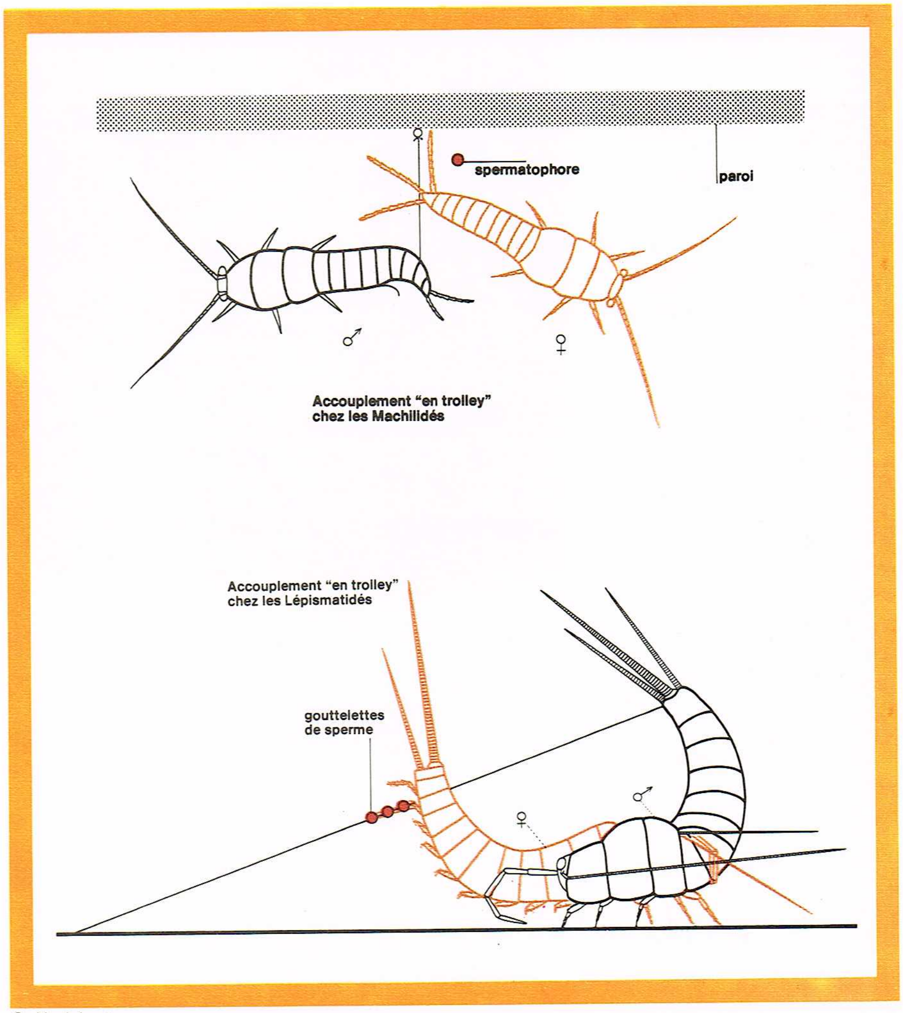

G. Hodebert

▲ ***Accouplements « en trolley » chez les Thysanoures : en haut, chez les Machilidés, la femelle recueille les gouttelettes spermatiques sur le fil de soie tendu par le mâle ; en bas, guidée par le fil de soie posé par le mâle, la femelle va rencontrer le spermatophore posé sur le sol.***

Chez les Lépismatidés, le comportement est semblable à celui que nous venons de décrire, mais le spermatophore est déposé sur le substrat. Le mâle tisse un fil de soie qui diminue l'amplitude des mouvements de la femelle. Au moment où elle touche le fil de soie, un réflexe provoque l'abaissement de son abdomen, qui vient alors en contact avec le spermatophore. De tels « accouplements » sont dits « en trolley ». Les femelles de Lépismatidés pondent une série d'œufs après chaque mue. La croissance est très lente, et les mues continuent après la maturité sexuelle. Il peut, de ce fait, y avoir jusqu'à quarante et même soixante-dix mues. La maturité sexuelle est atteinte en deux ou trois mois, et la durée de vie est très longue (jusqu'à quatre ans).

Les Grégarines sont très nombreuses dans le tube digestif des Thysanoures. Les prédateurs principaux sont les Araignées et les Coléoptères Staphylinidés et Carabidés. Les Mengéidés (Strepsiptères primitifs) sont parasites des Lépismatidés.

La systématique de cette sous-classe n'est pas encore définitivement établie ; néanmoins, on peut considérer qu'elle comprend deux ordres : les *Archéognathes*, composés de deux familles, les Meinertellidés et les Machilidés, et les Thysanoures *sensu stricto* (anciennement, les Zygyntomes), comprenant cinq familles, les Lépidotrichidés, les Nicoletiidés, les Ateluridés, les Lépismatidés, et les Maindronidés. Sept cents espèces environ sont connues, leur répartition est mondiale.

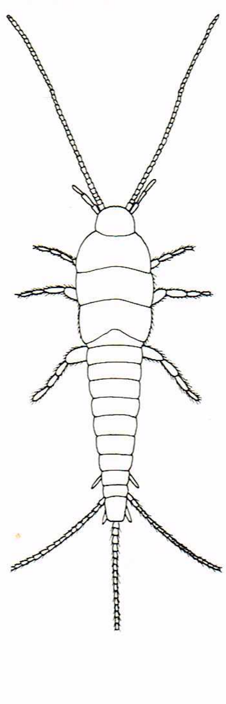
I.G.D.A.

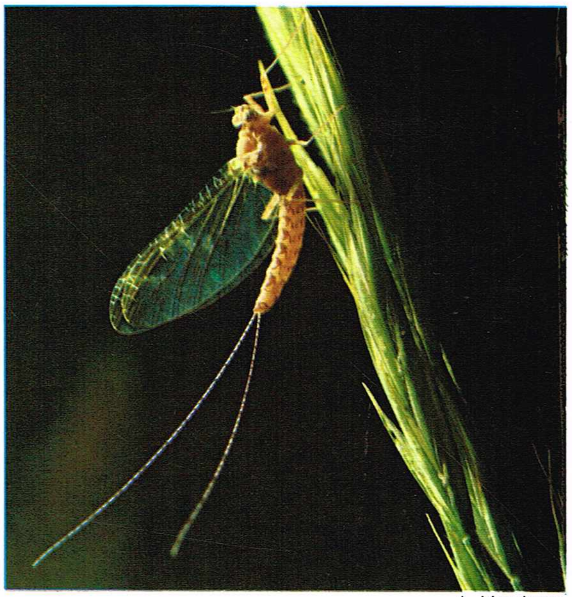

A. Margiocco

▶ *Un Éphémère dont les ailes ne se replient pas au repos au-dessus du corps.*

Sous-classe des Pterygota

Beaucoup plus riche en représentants que toutes les autres réunies, cette sous-classe se divise, principalement d'après le mode d'articulation des ailes, en deux sections : les Paléoptères, incapables d'allonger leurs ailes au repos sur l'abdomen, et les Néoptères, qui peuvent le faire.

● *Section des Paléoptères*

Les ordres composant cette section ne sont plus que deux parmi les Insectes représentés actuellement : Éphéméroptères et Odonatoptères. Il s'y ajoutait à la fin de l'ère primaire et au début de l'ère secondaire bien d'autres ordres aujourd'hui éteints.

Ordre des Éphéméroptères

Les Éphéméroptères sont des Insectes primitifs à métamorphose incomplète (Hémimétaboles). Ils sont de taille moyenne et mènent une vie aérienne fort brève. Toutes les larves sont aquatiques.

La tête a une forme triangulaire. Les yeux sont particulièrement volumineux et peuvent occuper la plus grande partie de la tête. Chez le mâle, les yeux en « turban » sont divisés en deux parties : l'une, dorsale, de coloration foncée, présente de grandes facettes, l'autre, ventrale, plus claire, est munie de facettes plus petites ; la séparation entre ces deux zones est alors très bien marquée, mais chez la femelle elle n'est pas nette. Cette différence de structure des deux parties de l'œil composé de l'Animal correspond à une différence dans la vision, qui s'effectue par superposition pour la partie supérieure et par opposition pour la partie inférieure. Entre les yeux, on trouve toujours trois ocelles. Les antennes sont filiformes et plus petites que la tête. Les pièces buccales réduites, asymétriques, peu chitinisées, à musculature peu importante, ne sont pas fonctionnelles ; l'imago ne peut s'alimenter.

Le thorax est bien développé dans sa partie méso- et métathoracique, qui porte des ailes membraneuses, très inégales, hyalines ou tachetées ; les ailes antérieures sont plus développées que les postérieures, qui peuvent même disparaître complètement chez *Cleon dipterum*. Au repos les ailes sont maintenues jointives verticalement (type Paléoptère). Les pattes sont fines et inégales ; les pattes antérieures, plus longues, surtout chez le mâle, servent pour l'accouplement. Les pattes méso- et métathoraciques sont plus réduites et peuvent même être très atrophiées et non fonctionnelles. Les tarses sont munis de quatre ou cinq articles.

L'abdomen, allongé, est constitué de onze segments, le dernier étant vestigial et complètement fusionné avec le dixième. L'épiprocte, partie dorsale du onzième segment abdominal, est prolongé par un filament plus ou moins long, le *télofilum*. Les paraproctes, vestiges latéraux du onzième segment abdominal, portent deux longs filaments pluriarticulés, les cerques. Les genitalia des mâles sont constitués par deux appendices filiformes, les styles, qui enserrent l'abdomen de la femelle pendant la copulation, et par le pénis, situé entre ceux-ci et formé de deux tubes terminés par les gonopores. Ces genitalia partent des neuvième et dixième segments abdominaux ; ils sont très utilisés pour la séparation des différentes espèces. L'appareil génital de la femelle est original, puisque les oviductes s'ouvrent séparément par une paire de gonopores entre les septième et huitième sternites.

Le tube digestif, non fonctionnel, tapissé d'un épithélium ayant perdu ses capacités digestives, est entouré de puissants muscles et forme une vésicule, ou vessie aérostatique, qui, remplie d'air, allège le corps de l'Animal. C'est l'entrée et la sortie de l'air dans l'intestin qui donnent au vol de l'Insecte cette allure dansante, si particulière. Au tube digestif est associé un nombre élevé de tubes de Malpighi (jusqu'à cent).

Les organes génitaux internes sont très primitifs et complètement séparés. Ils sont privés de glandes accessoires. Le mâle a deux testicules, prolongés par deux canaux déférents et deux canaux éjaculateurs. La femelle possède deux ovaires, composés d'un grand nombre d'ovarioles panoïstiques communiquant avec l'extérieur par deux oviductes séparés.

Les œufs, pondus en grand nombre (jusqu'à quatre mille), sont petits et de forme variée, le chorion présente une microsculpture différente suivant les espèces. Les œufs peuvent être munis de filaments qui les maintiennent jointifs ou qui servent de système d'ancrage sur les plantes aquatiques. Le développement embryonnaire est très variable suivant les espèces, les réserves vitellines et les conditions climatiques. Il dure de une semaine à plusieurs mois. De l'œuf sort une petite larve très fragile, aux téguments transparents, qui grandira par mues successives. La larve diffère de l'adulte par la présence de pièces buccales bien développées, d'un tube digestif fonctionnel et d'expansions abdominales latérales, les branchies. L'appareil buccal est du type broyeur. Le thorax porte les *ptérothèques* (Exoptérygotes). Les pattes sont terminées par un tarse à un seul article muni d'une seule griffe. L'abdomen, qui est formé de dix segments, les sept premiers portant des trachéobranchies lamelleuses, est terminé par trois soies caudales. Les larves sont toutes dulçaquicoles. On peut distinguer cinq formes larvaires, qui correspondent à des différences éco-éthologiques.

G. Hodebert

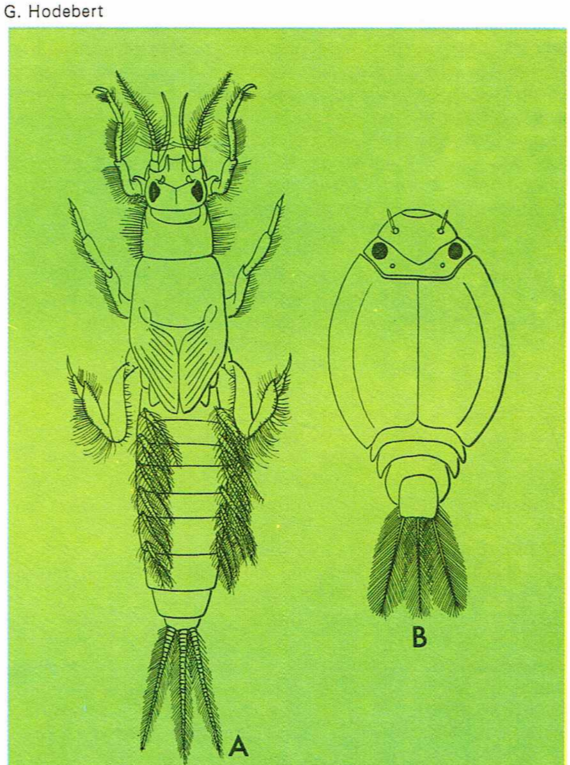

▶ *Deux types de larves d'Éphéméroptères : A, type fouisseur,* Ephemera varia ; *B, type cryptobranche,* Prosopistoma foliaceum. *Toutes les larves d'Éphémères sont dulçaquicoles.*

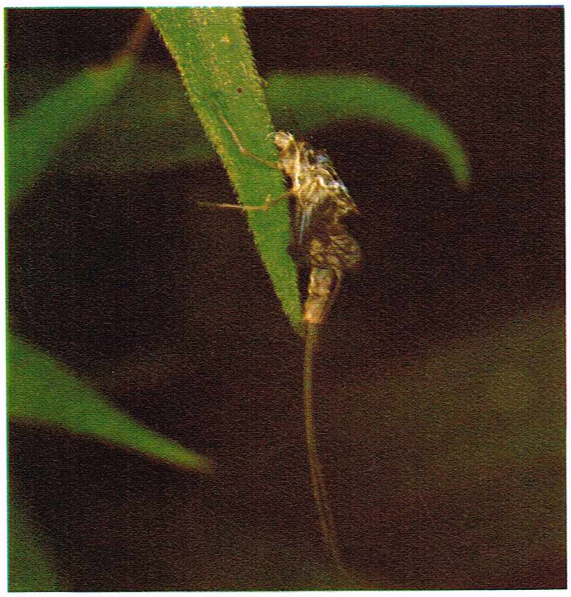

I. Bucciarelli

I. Bucciarelli

◀ *A gauche, exuvie de subimago d'Éphéméroptère ; à droite, larve d'un Éphéméroptère de l'espèce* **Ecdyonurus helveticus.**

Les larves nageuses présentent des appendices abdominaux munis de longues soies. Elles fréquentent les eaux stagnantes ou à faible courant.

Les larves rampantes sont dépourvues de soies sur les appendices abdominaux. Elles vivent dans la vase.

Les larves fouisseuses sont de forme cylindrique ; leurs mandibules et les pattes antérieures sont transformées en un organe fouisseur. Elles creusent des terriers pour y vivre dans le fond ou dans les berges.

Les larves plates, pétricoles, vivent dans les eaux rapides où elles s'accrochent aux pierres (espèces rhéophiles).

Les larves à bouclier possèdent un thorax, très développé vers l'arrière, qui cache les branchies ; elles vivent dans les eaux très rapides et s'accrochent également aux pierres.

La durée de la vie larvaire est très variable suivant les espèces ; la plupart ont un cycle annuel, mais certaines espèces peuvent engendrer deux générations par an, alors que d'autres larves peuvent vivre trois ans. Le régime alimentaire des larves est principalement phytophage et détritiphage. Elles peuvent aussi se nourrir de Diatomées. Seules quelques espèces tropicales sont carnivores. L'alimentation larvaire revêt une grande importance ; en effet, l'imago étant incapable de se nourrir, c'est chez les larves que sont accumulées les réserves vitellines. Du fait de la brièveté de la vie imaginale, les œufs sont pratiquement mûrs à la fin de la vie nymphale.

La larve, arrivée au terme de son développement, sort de l'eau pour se métamorphoser. La cuticule larvaire se fend sur le thorax le long de la suture ecdysiale pour laisser sortir un Animal en tout point identique à l'adulte, le *subimago*, qui devra effectuer une nouvelle mue pour donner naissance à l'imago. Chez certaines espèces, la larve mue très rapidement à la surface de l'eau pour donner naissance au subimago. Cela se produit en fin d'après-midi ou en début de soirée, quand les conditions atmosphériques sont favorables, après une chaude journée un peu orageuse. Il arrive que des milliers de larves muent en même temps, occasionnant ainsi de très grands rassemblements de subimagos ou d'imagos sur les berges des fleuves, et formant parfois un tapis d'Insectes de plusieurs centimètres d'épaisseur. C'est la « manne » des pêcheurs. Avant la guerre, dans certaines régions, on pouvait récolter jusqu'à 100 tonnes de cette « manne » qui servait d'engrais.

La durée de vie imaginale est brève. La période d'activité liée à la reproduction est limitée aux heures les moins chaudes de la journée, le matin, la fin de l'après-midi, le crépuscule et même quelquefois la nuit. L'accouplement a lieu en plein vol, après des danses nuptiales. Les mâles, qui peuvent être rassemblés en grand nombre, effectuent des danses verticales, s'élevant d'autant plus rapidement qu'ils sont allégés par l'air remplissant leur tube digestif. Ils redescendent aussi vite, et, arrivés près du sol ou de l'eau, recommencent une nouvelle ascension. Ils effectuent ainsi, pendant des heures, des séries de montées et de descentes. Le mâle, approchant la femelle par l'arrière et par-dessous, la saisit au niveau du thorax par ses pattes antérieures allongées, la maintient au niveau de l'abdomen par ses gonopodes, en l'enserrant au niveau des huitième et neuvième segments abdominaux. L'accouplement, très bref, ne dure que le temps de la descente vers le sol. En arrivant à terre, le couple se sépare. Chez certaines espèces, le mâle approche la femelle par-dessus.

La ponte suit presque immédiatement la copulation. Les femelles gagnent alors l'eau pour y déposer leurs œufs. Suivant les espèces, la ponte peut s'effectuer selon trois modes ; dans certains cas, les œufs sont pondus ensemble, rassemblés en deux grosses masses qui pendent à l'extrémité de l'abdomen ; dans d'autres cas, ils sont pondus un par un ou par petits paquets, la femelle effectuant au-dessus de l'eau des montées et des descentes, et déposant les œufs quand elle touche la surface de son extrémité abdominale ; ou bien encore, dans d'autres cas, la femelle pénètre sous l'eau et accroche ses œufs aux plantes aquatiques.

Bien que l'oviparité soit la règle générale chez les Éphémères, certains, tel *Cleon dipterum*, sont ovovivipares. Ainsi, chez cette espèce, la femelle, une fois fécondée, ne gagne pas l'eau pour y pondre, mais cherche un endroit abrité où elle ne sera pas dérangée durant la période de développement embryonnaire, qui durera de deux à trois semaines ; lorsque ce développement est achevé, la ponte s'effectue et les œufs éclosent au contact de l'eau.

Les Éphémères sont la proie des Poissons, lors de la mue imaginale quand celle-ci s'effectue à la surface de l'eau, lorsqu'ils viennent pondre, et également lorsqu'ils sont à l'état de larves. Ils sont aussi la proie des Oiseaux, surtout des hirondelles, ainsi que des Odonates.

L'ordre des Éphéméroptères a été divisé, suivant les travaux d'Eaton, en quatre sous-ordres, ou super-familles. Cependant, à l'heure actuelle, la tendance est à la séparation en trois familles, les Éphéméridés, les Heptagéniidés, et les Baétidés. Cette classification est fondée sur la nervation alaire et le nombre d'articles aux tarses des pattes postérieures.

Ordre des Odonatoptères

Les Odonates, ou libellules, sont des Insectes fort anciens puisque leurs ancêtres, très peu différents des formes actuelles, étaient déjà présents au Carbonifère, et pouvaient atteindre de très grandes tailles, tel *Meganeura monyi*, dont l'envergure était de 70 cm. Actuellement, les Odonates sont de taille plus modeste, bien que certains figurent parmi les plus grands de nos Insectes. Ce sont des Insectes paurométaboles, c'est-à-dire des hémimétaboles dont l'imago mène une vie fort différente de

J. Legrand

▲ **Ceriagrion tenellum** *mâle (Zygoptère Cœnagriidé). Au repos, les ailes de nombreux Zygoptères sont jointives au-dessus du corps.*

▼ **Orthetrum sp.** *(Anisoptère Libellulidé) dans la position caractéristique d'un mâle territorial, ailes étalées dirigées vers le bas.*

J. Legrand

celle de sa larve. En effet, si la larve est aquatique et présente une respiration branchiale, l'adulte mène une vie aérienne et sa respiration est trachéenne.

La tête de l'imago est très développée grâce surtout à l'hyperdéveloppement des yeux, qui peuvent, dans certains cas, en occuper la plus grande partie. Le nombre d'ommatidies peut atteindre trente mille chez certains Anisoptères. Aux yeux composés sont toujours associés trois ocelles, situés sur le vertex. Les pièces buccales, cachées ventralement par le labium, sont du type broyeur, avec des mandibules très développées et munies de « dents ». La tête est très mobile grâce à un cou très grêle qui la relie au prothorax peu important et souvent caché par la tête. Le ptérothorax, ou synthorax, résulte de la fusion des méso- et métathorax en une seule masse, dont le grand volume est dû à de puissants muscles alaires et à d'importants sacs aériens. Le ptérothorax est oblique, rejetant les ailes vers l'arrière, alors que les pattes, n'ayant plus de fonction locomotrice, sont déjetées en avant. Les ailes sont bien développées, membraneuses, colorées ou non, égales chez les Zygoptères (homonomes et homoneures) et inégales chez les Anisoptères (hétéronomes et hétéroneures). Au repos, elles sont étalées perpendiculairement au corps, ou bien jointives au-dessus du corps, mais jamais repliées en toit au-dessus de l'abdomen (Paléoptères). Les nervures longitudinales, nombreuses, sont reliées entre elles par un grand nombre de nervures transverses délimitant une grande quantité de cellules.

L'abdomen, en général long et fin ou même très long chez certains Zygoptères d'Amérique du Sud, est formé de dix segments et des vestiges d'un onzième chez le mâle, la partie terminale de l'abdomen présente une pince formée par deux cercoïdes et une lame supra-anale ; son rôle est très important dans l'accouplement, puisque c'est grâce à elle que le mâle saisit la femelle au niveau du prothorax.

L'orifice reproducteur de la femelle, situé entre les huitième et neuvième segments, peut être muni ou non d'un ovipositeur constitué de trois paires de gonapophyses, ou valves, la première ayant pour origine le huitième segment et les deux autres le neuvième. Son anatomie interne n'offre pas de grande particularité.

L'appareil reproducteur des mâles des libellules est une des particularités les plus étonnantes du règne animal. En effet, alors que le bras hectocotyle des Cépha-

lopodes, aussi extraordinaire soit-il, ne représente que la spécialisation d'un appendice existant pour une fonction déterminée, dans le cas de l'appareil copulateur des Odonates, on ne trouve aucune homologie avec un organe préexistant. Le « pénis » est totalement néoformé à partir d'ébauches apparues au niveau des deuxième et troisième sternites abdominaux chez la larve de l'antépénultième stade. Ce n'est que plus tardivement, au cours du dernier stade larvaire et de la métamorphose; et à la suite d'importants mouvements morphogénétiques affectant l'épiderme sternal, qu'il prendra sa structure définitive. L'appareil génital, logé dans une dépression du deuxième sternite, la fossette génitale, est composé, en plus du « pénis » et de la vésicule spermatique servant au stockage et au transfert du sperme, d'un certain nombre de pièces qui guident et maintiennent l'ovipositeur de la femelle pendant la copulation. Fait important, il n'y a pas de liaison anatomique interne ou externe entre les voies génitales proprement dites et l'organe copulateur, ce qui nécessite qu'avant l'accouplement le mâle transfère le sperme du pore génital au « pénis » en amenant le pore génital au niveau du deuxième segment abdominal.

Les œufs de libellules peuvent soit éclore une quinzaine de jours après la ponte, soit passer l'hiver. Au contact de l'eau la jeune larve, ou prolarve, issue de l'œuf effectue immédiatement une mue et donne naissance à une larve vraie, ou larve primaire, de même taille. Le développement postembryonnaire se poursuit après un très grand nombre de mues, pouvant aller jusqu'à treize chez *Aeschna cynea*. Sa durée varie de deux à trois mois à plusieurs années, chez certains grands Anisoptères comme *Anax imperator*, avec diapauses hivernales.

La larve mène une vie aquatique. Sa tête, moins développée que chez l'adulte, est aplatie dorso-ventralement et prognathe; les pièces buccales sont du type broyeur. Le labium, très particulier, est modifié en un organe préhensile, dont les palpes sont armés de forts crochets. Il est actionné à la fois grâce à de puissants muscles et à une augmentation de la pression sanguine dans la partie antérieure du corps; au repos, il est replié sous la tête. Le tube digestif est très particulier; sa partie distale, ou proctodeum, est très renflée chez les larves d'Anisoptères. Le proctodeum sert au transit des fèces, à la locomotion et à la respiration, qui sont assurées par le passage de l'eau dans le rectum, ou corbeille branchiale; cette dernière est tapissée de très nombreux replis, les branchies, et séparée de l'intestin moyen par un puissant sphincter. L'aspiration de l'eau et son refoulement s'effectuent grâce à de puissants muscles abdominaux. Chez les Zygoptères, la respiration est également assurée, en partie par la corbeille branchiale, beaucoup plus réduite, mais aussi par des expansions foliacées de l'extrémité abdominale, les branchies caudales, qui servent également à la locomotion; ces dernières sont absentes chez la larve des Anisoptères.

En plus de la marche, deux types de locomotion sont en usage chez les larves d'Odonates : les Zygoptères nagent donc à la godille grâce à leurs branchies abdominales, et les Anisoptères se propulsent en chassant violemment de l'eau de leur rectum.

Les larves des Odonates sont toutes carnassières. Elles se nourrissent de petits Crustacés, de larves d'Insectes (Éphéméroptères, Diptères, etc.), de Gastéropodes, ou de Vertébrés de petite taille, comme des têtards et des alevins. La localisation des proies se fait soit à vue, chez les Æschnidés, soit par tactisme, chez *Calopteryx*. La larve s'approche le plus possible de la proie et projette son masque avec une très grande rapidité; la proie, maintenue grâce aux puissants crochets des palpes, est ramenée vers la bouche quand le masque reprend sa position initiale. Si la proie se débat trop, la larve des Æschnidés peut la tuer en la lacérant avec les pointes acérées de sa pyramide anale, qui constitue également une arme de combat contre ses congénères. Le cannibalisme n'est pas rare.

Arrivées au terme de leur développement, marqué par un arrêt de la prise de nourriture, les larves, prêtes à effectuer leur mue imaginale, sortent de l'eau. Cette sortie a lieu dans la soirée, à la tombée de la nuit ou dans la matinée. La larve grimpe alors sur les plantes et s'arrête à une certaine hauteur, qui varie suivant les espèces. Sur la tête et le thorax, le long des sutures ecdysiales, les téguments se fendent sous la poussée du futur imago

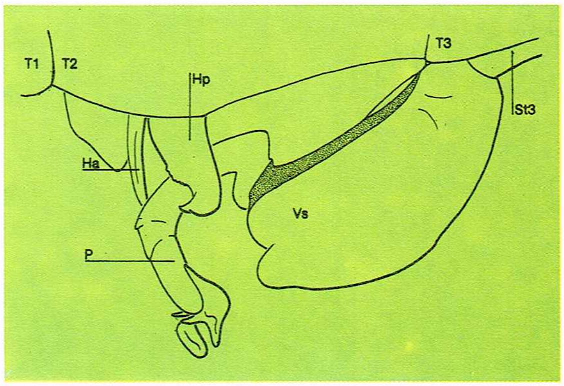

G. Hodebert

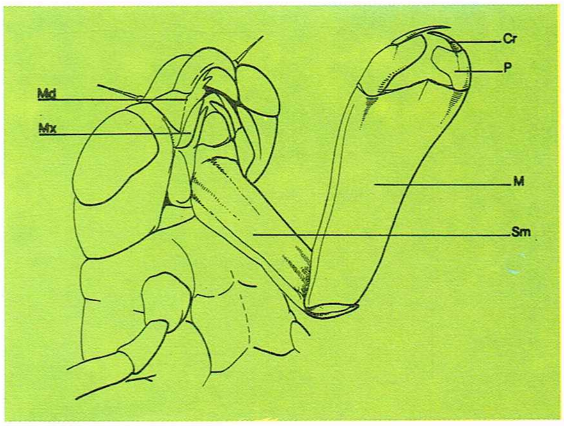

G. Hodebert

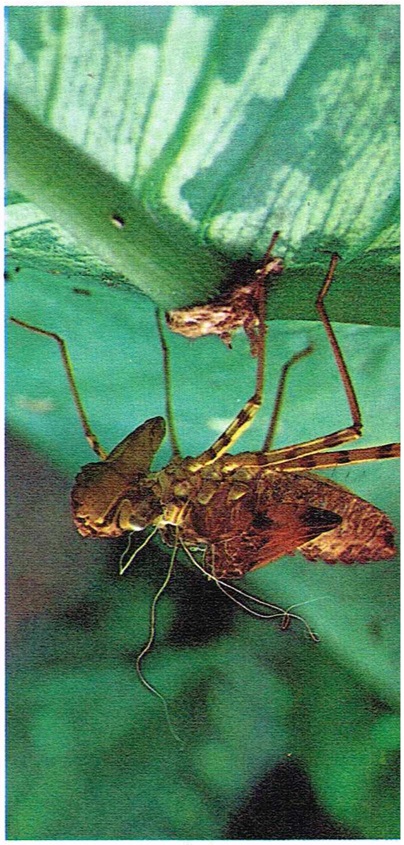

J. Legrand

▲ *A gauche, en haut, appareil copulateur d'un Anisoptère (chez tous les Odonates, il est situé au niveau des 2e et 3e segments abdominaux) : Ha, hamule antérieur; Hp, hamule postérieur; P, « pénis »; St3, sternite 3; T1, T2, T3, tergites 1, 2, 3; Vs, vésicule spermatique; à gauche, en bas, masque d'une larve d'Odonate Anisoptère Æschnidé; Cr, crochet du palpe; M, mentum; Md, mandibule; Mx, maxille; P, palpe; Sm, submentum; à droite, exuvie de* **Macromia sophia** *(Anisoptère Corduliidé). Les fils blancs sont les trachées larvaires qui muent en même temps que l'Animal.*

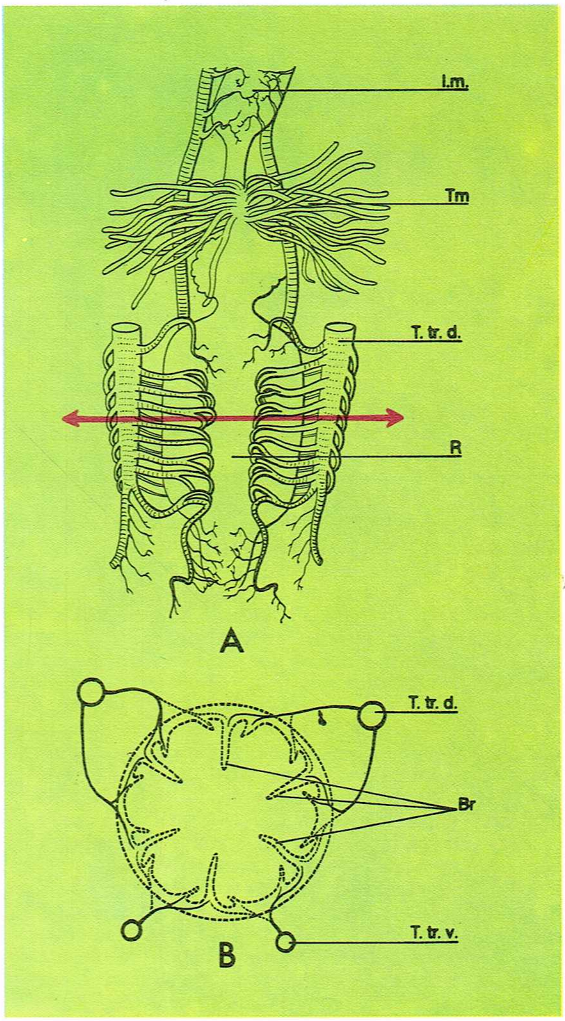

G. Hodebert

◀ *Corbeille branchiale d'une larve d'Odonate Anisoptère : A, vue dorsale; B, coupe transversale suivant la flèche; Br, branchies; I.m, intestin moyen; R, rectum; Tm, tubes de Malpighi; T. tr. d, tronc trachéen dorsal; T. tr. v, tronc trachéen ventral.*

I. Bucciarelli

▲ **Mâle (en haut) et femelle de Calopteryx virgo.**

gonflé d'air. Chez *Calopteryx*, la durée totale de la mue imaginale est de deux heures environ ; cependant la libellule ne s'envole qu'une heure après son accomplissement.

Le jeune imago n'est pas immédiatement capable de se reproduire. La maturité sexuelle va demander une dizaine de jours, pendant lesquels les gonades vont terminer leur développement et l'Insecte prendra sa coloration définitive. Pendant cette période, les imagos peuvent s'éloigner plus ou moins de l'eau et même se rassembler dans les endroits ensoleillés en groupes de plusieurs mâles et femelles de la même espèce, comme c'est le cas pour *Calopteryx*. Les imagos présentent alors une héliotaxie positive, le grand axe du corps étant toujours perpendiculaire aux rayons solaires. Dans de tels groupements, les Insectes, tous orientés de la même façon, peuvent être très proches les uns des autres mais respectent une certaine distance minimale entre eux ; cette distance n'est jamais inférieure à l'envergure de l'Animal, ailes étalées. Au cours de cette période, la nutrition est la principale activité de la libellule, qui attrape tout Insecte passant à sa portée grâce à ses pattes formant une sorte de corbeille, ou « nasse », puis revient sur son support initial pour y dévorer sa proie.

Lorsque la période de maturation est terminée, les imagos quittent les groupes pour devenir solitaires. Les mâles survolent alors le cours d'eau à la recherche d'une région où ils pourront se fixer et attendre les femelles sexuellement mûres. En général, le mâle y choisit un poste d'observation d'où il pourra surveiller l'ensemble de son territoire et le défendre contre tout intrus mâle de la même espèce. Il le quitte le soir et y revient dès le lever du jour. Lorsqu'une femelle arrive dans un territoire occupé par un mâle, celui-ci vole immédiatement à sa rencontre, l'extrémité abdominale relevée. Si la femelle est consentante, elle suit dans son vol le mâle qui lui désigne en le survolant un lieu de ponte riche en plantes aquatiques. Après cette présentation, le mâle effectue un vol de parade, zigzaguant devant la femelle posée, puis atterrit sur celle-ci à l'apex des ailes, court le long de la nervure costale, et la saisit au niveau du prothorax grâce à ses pinces abdominales. Ensuite, s'effectue le transfert du sperme du pore génital à l'organe copulateur, le « pénis », puis les deux partenaires entrent en copulation qui dure environ une minute et demie. Après l'accouplement, la femelle se dirige seule vers le lieu de ponte pour y déposer ses œufs. Le mâle surveille la femelle pendant toute la durée de la ponte. Si d'autres femelles réceptives se présentent, il entrera en copulation après avoir suivi le même processus ; ainsi, plusieurs femelles peuvent pondre dans le territoire d'un seul mâle. Chez d'autres espèces, les préliminaires de l'accouplement peuvent être réduits et même inexistants, par exemple, chez les Æschnidés. Il arrive aussi que l'accouplement s'effectue en plein vol et soit remarquablement bref, mais les positions respectives des partenaires mâle et femelle sont toujours identiques. L'oviposition est très variable suivant les espèces.

La ponte peut se faire, accompagnée (chez les Lestidés et les Cœnagriidés) ou non (chez les Caloptérygidés et beaucoup d'Anisoptères). La ponte peut être endophyte, à l'intérieur de plantes immergées pour *Calopteryx*, ou de plantes aériennes chez les Lestidés ou encore libre chez la plupart des Anisoptères.

Le seul moyen de locomotion des imagos est le vol. Dans l'ensemble, les Anisoptères sont d'excellents voiliers, alors que les Zygoptères le sont beaucoup moins. Les ailes sont actionnées directement par de puissants muscles méso- et métathoraciques qui s'insèrent à la base des ailes. Les ailes, n'étant pas couplées par un système d'accrochage, sont très indépendantes, ce qui permet à l'Insecte de voler vers l'avant et vers l'arrière, et d'effectuer de brusques changements de direction.

L'ordre des Odonates est subdivisé en deux sous-ordres, les Zygoptères, qui possèdent des ailes antérieures et postérieures égales, et les Anisoptères, qui ont des ailes antérieures et postérieures inégales.

Les *Zygoptères* sont en général des Insectes très graciles et présentent une tête transverse avec des yeux composés bien séparés. La faune de France compte diverses familles : les Caloptérygidés, les Lestidés, les Platycnémididés et les Cœnagriidés.

Les *Anisoptères* ont un abdomen en général plus épais ; leur tête est très développée, globuleuse et les yeux se touchent dorsalement au moins en un point, sauf chez les Gomphidés. La faune française comprend six familles : les Cordulégastéridés, Æschnidés, Corduliidés, Macrodiplactidés, Libellulidés et Gomphidés.

• Section des Néoptères

Cette section, qui comprend la plupart des Insectes vivant encore aujourd'hui, semble avoir toujours été plus riche que celle des Paléoptères. Selon leurs types de métamorphoses, les Néoptères peuvent être divisés en Hémimétaboles et Holométaboles.

Division des Hémimétaboles

Les larves des Insectes Hémimétaboles n'ont que de faibles modifications à subir pour devenir des adultes car elles diffèrent peu de ces derniers ; c'est ce qu'exprime le terme Hémimétaboles.

Super-ordre des Orthoptéroïdes

Les Insectes Hémimétaboles appartenant à cet ensemble ont en commun les caractères suivants : des pièces buccales de type broyeur jamais modifiées, des ailes postérieures pourvues d'un grand lobe anal, des cerques présents, des tubes de Malpighi nombreux, et des ganglions nerveux abdominaux toujours séparés.

J. Legrand

J. Legrand

◀ *A gauche,* Sympetrum sp. *(Anisoptère Libellulidé) accouplés ; à droite, la femelle d'*Æschna cyanea *(Anisoptère Æschnidé) pond dans la mousse au bord des eaux.*

Ordre des Dictyoptères

Cet ordre comprend les blattes et les mantes qui, bien que d'aspect et de mœurs différents, présentent en commun les caractères suivants : une tête triangulaire aux pièces buccales broyeuses, des tarses pentamères à toutes les pattes, des ailes antérieures tegminisées formant des élytres se croisant à plat sur le dos, des ailes postérieures à champ anal généralement très important, membraneux et repliable en éventail sous le champ antérieur, qui demeure plan, un abdomen à dix segments visibles, le dernier portant chez les deux sexes une paire de cerques pluriarticulés et l'avant-dernier étant muni chez le mâle de deux styles courts. A ces traits morphologiques communs aux deux sous-ordres s'ajoutent deux caractères biologiques, la ponte en oothèque et le développement postembryonnaire paurométabole.

Sous-ordre des Blattodea

Les Blattodea, ou blattes, dont les espèces commensales de l'homme sont connues sous les noms abhorrés de cafards et de cancrelats, représentent sans doute les Insectes les plus anciens et font partie des Animaux qui ont traversé plusieurs ères géologiques sans subir de modifications profondes. Les formes du Primaire, qui vivaient dans les grandes forêts houillères, diffèrent en effet fort peu de certaines blattes actuelles. Un type remarquable du Carbonifère, *Pycnoblattina*, présente une nervation alaire ayant une grande similitude avec celle des *Mastotermes,* termites des plus primitifs, confinés à l'Australie. Bien que ces derniers ne se retrouvent pas dans les sédiments antérieurs au Tertiaire, on considère les deux grands groupes comme issus de la même souche. La diversification très importante aussi bien des espèces fossiles, dont six cents ont été décrites, que des formes présentes, dont trois mille cinq cents sont connues, témoigne de l'évolution déjà longue au Primaire et de la vitalité du groupe des blattes, qui, en dépit de ses caractères archaïques ou grâce à eux, s'est adapté aux climats et aux milieux les plus divers et les plus nouveaux, comme les constructions humaines, en manifestant une biologie de la reproduction complexe et, à certains égards, très évoluée.

Les blattes sont, en général, des Insectes agiles, au corps assez aplati, dont les teintes sont brunâtres et souvent luisantes. Leur pronotum est développé en un bouclier protégeant la tête qu'il surplombe ainsi que les côtés du thorax. Parfois, ce sclérite est fortement bossué, comme chez les mâles de la grande espèce malgache *Gromphadorhina portentosa*. Cette dernière, mesurant jusqu'à 7 cm, fait partie des géants du groupe avec *Leucophaea maderae* (6,5 cm) d'Afrique équatoriale et *Megaloblatta blaberoides* (8 cm), espèce néotropicale. Mais la taille moyenne de la plupart des blattes est environ de 2 cm.

La tête plutôt opisthognathe, porte deux grands yeux réniformes composés d'ommatidies eucônes, et deux ocelles, plus ou moins effacés. Les antennes, qui s'insèrent dans l'encoche de l'œil correspondant, sont longues, filiformes et multiarticulées.

Typiquement, les blattes possèdent des ailes, à l'instar de *Periplaneta americana*, espèce de couleur acajou, devenue cosmopolite et Animal de laboratoire. Cependant, des espèces comme *Ceratinoptera inscripta*, d'Afrique du Sud, ont des élytres normalement développés, mais des ailes membraneuses réduites ; chez d'autres espèces, le mâle est brachyptère et la femelle microptère, par exemple, chez *Blatta orientalis*, une espèce cosmopolite ; ou bien, le thorax ne porte plus chez les mâles comme chez les femelles que des expansions squamiformes, comme c'est le cas pour *Neostylopyga rhombifolia*, d'origine malaise ; d'autres encore ont des femelles entièrement

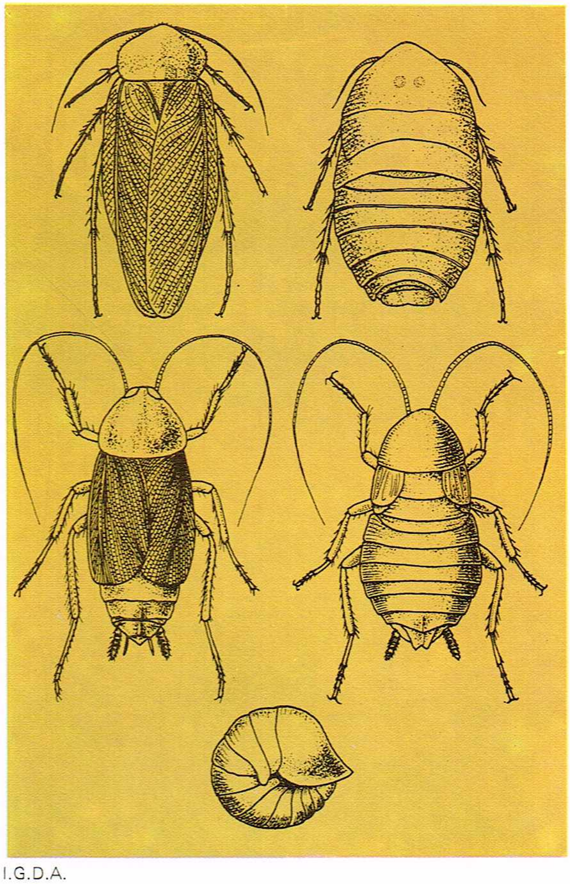

I.G.D.A.

◀ *Exemples de dimorphisme sexuel chez les blattes : en haut,* Polyphaga aegyptiaca *(mâle macroptère et femelle aptère) ; au centre,* Blatta orientalis *(mâle brachyptère et femelle microptère) ; en bas, femelle aptère d'un* Pseudoglomeris *qui possède la faculté de s'enrouler à la manière des cloportes (réflexe de peur).*

▼ *Aspect des oothèques d'une blatte ovipare,* Periplaneta americana, *élevée très fréquemment comme Animal d'expériences.*

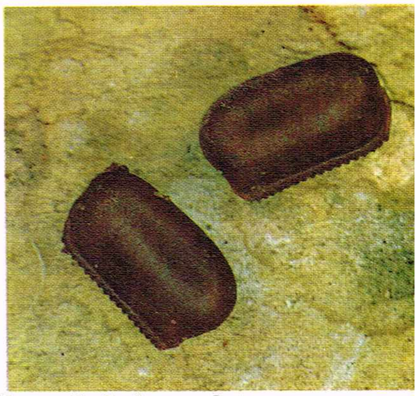

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ *A gauche, schéma de l'appareil reproducteur femelle d'une blatte vivipare* **(Diplotera dytiscoides)** *vu du profil gauche : gcl, glandes collétériales ; gsp, glande spermatécale ; ov, ovaire ; ol, oviducte latéral ; p.i, poche incubatrice ; sp, spermathèque ; ut, utérus ; v, vulve (d'après Hagan) ; à droite, section transversale de la crête d'une oothèque de blatte montrant le dispositif qui permet la respiration des œufs : cha, chambre aérifère de l'œuf (oe) communiquant avec l'extérieur par le canalicule (cl) et le tissu alvéolé (ta) (d'après Wigglesworth et Beament).*

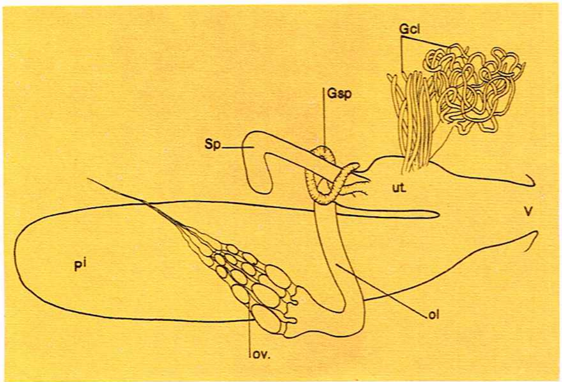

G. Hodebert

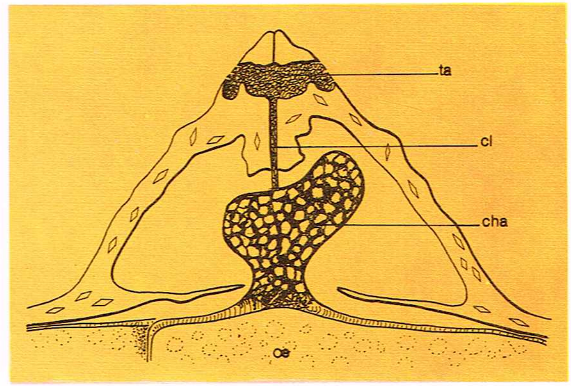

G. Hodebert

aptères *(Polyphaga aegyptica)* ; enfin chez quelques-unes, les ailes font également défaut chez les mâles *(Gromphadorhina* et *Cryptocercus)*. En général, les formes ailées volent peu, les blattes étant surtout des Insectes coureurs. Leurs trois paires de pattes, homonomes, aux hanches puissantes, sont parfaitement conformées pour la course et ne diffèrent entre elles que par la longueur, qui augmente des premières aux dernières. Souvent, les pattes présentent des tibias relativement élargis, avec des épines subapicales plus développées chez les formes fouisseuses.

L'abdomen est toujours bien segmenté ; chez les mâles, le neuvième sternite forme la plaque sous-génitale qui abrite les organes de la copulation, mais, chez la femelle, cette plaque est constituée par le septième sternite ; elle y délimite l'atrium de ponte dans lequel se trouve logé le court ovipositeur. On remarque, sur l'abdomen, deux catégories de glandes cutanées, comprenant de petites fossettes tégumentaires garnies de poils diffuseurs. Les unes, ventrales et pygidiales, ayant une fonction répugnatoire, existent dans les deux sexes et à tous les stades. Les autres, uniquement dorsales et s'ouvrant soit au début, soit vers la fin de l'abdomen, émettent une sécrétion qui joue un rôle fondamental dans le rapprochement des sexes et les préludes de l'accouplement.

Après reconnaissance et invitation par de nombreux attouchements des antennes, le mâle ouvre brusquement ses ailes et expose ses fossettes dorsales ; puis, maintenant le contact antennaire, il vient à reculons les présenter à la femelle. Celle-ci lèche les sécrétions, et le mâle se glisse alors sous elle et se lie à elle. L'un ou l'autre partenaire effectue ensuite une rotation plane, ce qui amène le couple en opposition totale ; cette attitude est gardée le temps nécessaire au dépôt d'un petit spermatophore directement dans les voies génitales femelles. Ce temps est fort variable : une vingtaine de secondes à peine chez *Blatta germanica*, une heure au moins pour *Periplaneta americana*.

La ponte survient quelques jours plus tard. Très particulière et caractéristique du groupe, elle se fait à l'intérieur de l'atrium génital et consiste dans le dépôt successif des œufs, enrobés tour à tour d'un cément sécrété par les glandes collétériales. Au moyen de l'ovipositeur, les œufs sont placés en deux rangées verticales imbriquées, le tout formant finalement une sorte de petite bourse, l'oothèque, dont la taille, la forme et le nombre d'œufs inclus diffèrent, selon les espèces. La ponte s'accomplit en un à trois jours et chaque femelle peut confectionner jusqu'à quatre oothèques au cours de sa vie (qui dure deux ans chez *P. americana*). Sur sa partie dorsale, l'oothèque est close par une crête zigzagante, de section triangulaire, où se trouvent ménagées de fines perforations, qui permettront la respiration puis la sortie des embryons.

En général, les blattes n'abandonnent pas leurs oothèques au hasard, mais les placent dans des endroits discrets, telles des anfractuosités diverses ou des trous, que certaines obturent avec de la terre *(Loboptera decipiens)* ou que d'autres creusent avec leurs mandibules dans le bois, les cartons ou les vieux livres *(Periplaneta spp.)* et qu'elles ferment à l'aide de sciure mâchouillée *(Cryptocercus)*.

Cependant, les soins accordés à la ponte peuvent aller beaucoup plus loin, jusqu'à l'ovoviviparité, voire la viviparité. En effet, bon nombre d'espèces retiennent leur oothèque et la placent, une fois terminée, dans une vaste poche sous-génitale, appelée poche incubatrice, pendant la quasi-totalité de l'embryogenèse. Elles ne la déposent qu'un ou deux jours avant l'éclosion *(B. germanica)* ou bien la gardent jusqu'à la naissance des jeunes, qui sont alors mis bas (*Blaberus spp., Panesthia angustipennis, Nauphoeta cinerea, Gyna maculipennis*, etc.). Chez ces dernières, les embryons ne reçoivent rien de la mère hormis de l'eau, et, s'il arrive que l'oothèque n'ait pas été entièrement réintroduite dans la poche incubatrice, la partie exposée à l'extérieur se dessèche et les œufs meurent. Mais, selon Hagan, chez la blatte hawaïenne *Diploptera punctata (D. dytiscoides)*, les œufs, pauvres en vitellus, établissent des relations avec l'organisme maternel et sont nourris durant tout leur développement. Celui-ci s'effectue en une cinquantaine de jours, puis la mère expulse ses nouveau-nés deux par deux, la tête en premier.

▼ *En haut, groupement très ordonné de jeunes blattes arboricoles,* **Cartoblatta pulchra** *; en bas, offrande nuptiale chez* **Blatella germanica** *; le mâle est à gauche, ailes soulevées, exposant ses fossettes glandulaires dorsales que la femelle vient lécher (d'après Wille).*

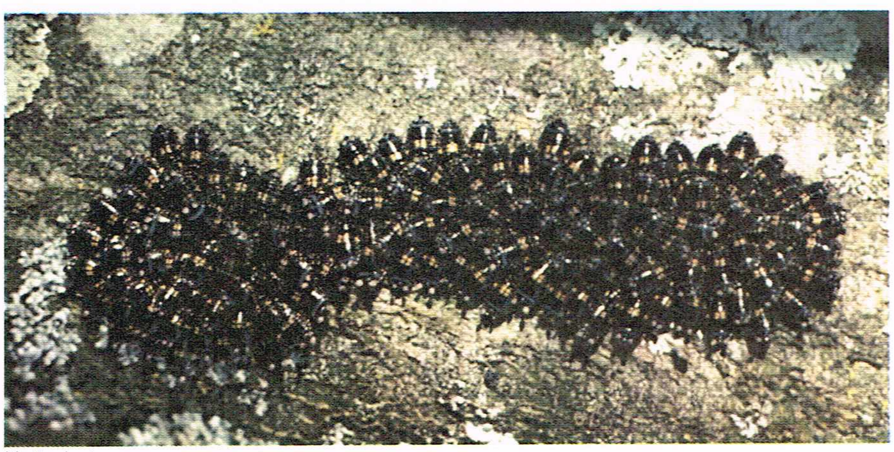

M. Boulard

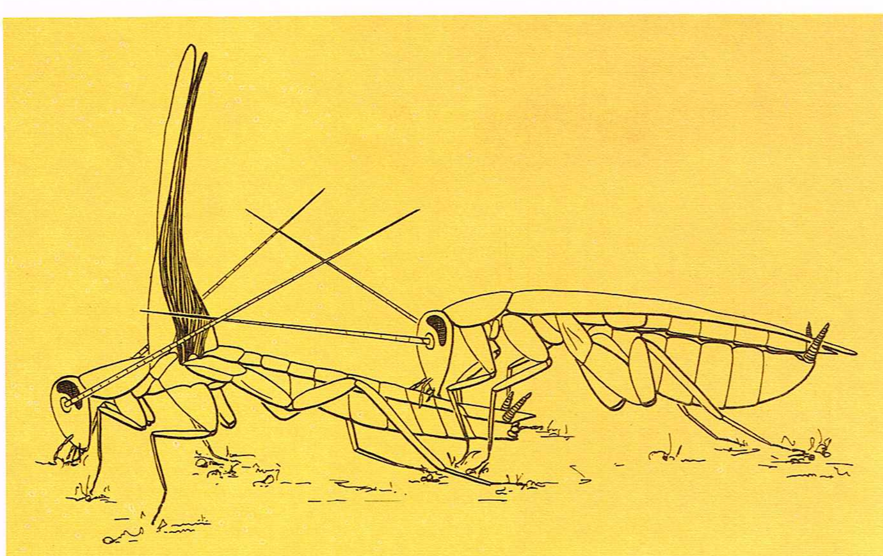

G. Hodebert

Une seule espèce est connue pour sa parthénogenèse, qui est d'ordre géographique. *Pycnoscelus surinamensis,* amphisexué en Indo-Malaisie et aux îles Hawaï, est agame ailleurs avec cette singularité, décrite par Roth et Willis, que les femelles parthénogénésiques sont macroptères comme les mâles alors que les femelles normales ont des ailes bien plus courtes que le corps.

Souvent, les blattes manifestent un grégarisme familial, jeunes et adultes voisinant dans les endroits favorables ; on observe même que des femelles ovovivipares semblent porter quelque attention à leur progéniture, à moins qu'elles ne soient, en fait, indifférentes aux manifestations apparemment filiales des jeunes ; quoi qu'il en soit, les jeunes *Gromphadorhina* viennent se tasser sous le corps de la mère, qui se hausse sur ses pattes, faisant ainsi place à sa nichée ; plus spectaculaires sont les espèces sud-orientales *Phlenobotus pallens* et *Pseudophoraspis nebulosa*, qui laissent les petits grimper et s'installer sur leur dos, entre l'abdomen et les ailes, tandis que l'espèce insulindienne *Perisphaerius glomeriformis*, aptère, porte ses jeunes accrochés sous son corps. A ces blattes, il faut adjoindre les *Cryptocercus*, que l'on trouve toujours par couples, accompagnés de jeunes d'une ou de deux générations. Un cas particulièrement curieux, signalé depuis longtemps et encore inexpliqué, est celui des groupements corticoles de *Cartoblatta pulchra*, blattes ovipares d'Afrique orientale, qui comprennent cent à deux cents individus au même stade, rigoureusement disposés en cercles concentriques et ayant tous la tête dirigée vers l'intérieur et des glandes exertiles dévaginées à l'apex dorsal de l'abdomen. Ces rassemblements restent énigmatiques. Par ailleurs, Chauvin a démontré, en étudiant *Blattella germanica*, que le développement postembryonnaire des blattes peut subir des effets de groupe particuliers, s'exerçant non pas visuellement, mais par l'intermédiaire des antennes et par une certaine souillure excrémentielle et spécifique des aliments.

D'une façon générale, les blattes sont fortement hygrophiles, termophiles, obscuricoles et omnivores. Si la forêt dense équatorio-tropicale constitue leur milieu de prédilection, elles ont pu s'adapter à des biotopes différents, parfois même opposés, et établir aussi des relations de toute nature avec de nombreux autres organismes. Elles vivent, pour la plupart, sous les feuilles mortes, les écorces, la mousse ou les pierres ; elles pénètrent dans les fissures et jusque dans les cavernes, où certaines, dites troglobies, ont définitivement élu domicile, telles les *Alluaudellina* décolorées, subaveugles, aux pattes et antennes démesurées, des grottes de l'Est africain. Dans ces grottes, on trouve aussi des espèces, qualifiées de guanobies, qui affectionnent les excréments de chauve-souris ; c'est ainsi que des *Gyna* en Afrique, des *Ergaula* en Malaisie sont parfois si nombreuses dans ces grottes que le guano paraît animé.

Panesthia et *Cryptocercus* sont xylophages et hébergent dans leur intestin des Protistes, très voisins de ceux des termites, qui leur permettent de digérer la cellulose. *Cryptocercus punctulatus*, d'Amérique, manifeste un mode de vie à peu près unique chez les blattes, puisqu'il ne se trouve que dans l'aubier mort des arbres, où il fore des galeries.

Un petit nombre d'espèces, appartenant toutes à la sous-famille des Epilamprinae et dont les mieux connues sont *Rhicnoda natatrix* et *Opisthoplatia maculata* du Sud-Est asiatique, mènent une vie presque aquatique au bord des rivières, dans les marécages, sur les bois flottants ou dans l'eau retenue par la base des feuilles des Broméliacées. Apparemment, rien ne distingue ces blattes amphibies des autres blattes, mais en fait elles utilisent un dispositif qu'elles partagent avec maintes formes purement terrestres : les derniers stigmates se trouvant à la base de petits tubes, les blattes laissent saillir ces derniers à la surface quand elles s'immergent. Toutefois, ces espèces amphibies peuvent rester entièrement sous l'eau durant plusieurs minutes.

A l'opposé, il faut signaler les blattes des déserts, devenues fouisseuses et échappant ainsi à la dessiccation (*Anisogamia tamerlana* du Sahara) et les blattes polaires, parmi lesquelles *Ectobius lapponicus,* fréquent en Laponie, et qui se rencontre également dans le nord de la France.

Beaucoup ont colonisé les nids ou les niches écologiques d'autres Insectes ou Animaux : ainsi, les *Attaphila* vivent en parasites trophiques des fourmis *Atta* d'Amérique du Sud, se nourrissant des Champignons cultivés par ces dernières ; tandis que les *Noctícola termitophila* d'Indochine habitent non seulement les termitières mais en mangent les hôtes. Certaines blattes se rencontrent dans les terriers des Rongeurs et d'autres dans les nids d'Oiseaux, des tisserins notamment, où elles coexistent avec tout un groupe de nidicoles divers, dont les Hémiptères et des Coléoptères.

C'est à cet ensemble de blattes commensales et plus ou moins parasites qu'il faut joindre les espèces anthropophiles, dont les principales, *Periplaneta americana*, *P. australasiae*, *Blatta orientalis* et *B. germanica*, sont très fréquentes dans les boulangeries et les restaurants mal tenus, les ports, les entrepôts, les taudis, etc. Ces Insectes, qui fuient la lumière, passent le plus souvent inaperçus ; ils sont pourtant nombreux, et très dangereux, car comme les mouches, les blattes peuvent passer des endroits les plus malsains aux plus propres et contaminer les aliments, transportant, sur leurs pattes ou dans leur intestin, les agents de maladies graves. En contrepartie, on peut signaler que les oothèques de certaines blattes domestiques sont recueillies, grillées et consommées en divers points du globe, en particulier au Laos, où elles constituent un mets apprécié.

La plupart des espèces que nous venons de citer ont des mœurs nocturnes ou, tout au moins, aiment vivre cachées ; leurs formes plates et allongées revêtent généralement les teintes monochromes de l'ombre. Toutes différentes sont les *Prosoplecta* de l'Insulinde, qui sont des blattes diurnes présentant des formes arrondies de chrysomèles et de coccinelles dont elles exhibent également les brillantes couleurs contrastées. Vivant dans les mêmes biotopes que ces petits Coléoptères, les *Prosoplecta*, dont on a souvent pu identifier le « modèle » de chacune des formes, fournissent l'un des exemples les plus convaincants de mimétisme batésien.

Enfin, certaines espèces sont capables de manifestations sonores : les *Cryptocercus* et les *Blaberus* tambourinent le bois avec leurs fémurs postérieurs, les secondes faisant également crisser leur pronotum sur la base des élytres. Les *Gromphadorhina*, énormes et peu agiles, utilisent leur capacité de produire des sons pour se défendre : quand on les dérange ou qu'on les saisit elles émettent une sorte de sifflement par les stigmates thoraciques.

Le sous-ordre des Blattodea est divisé en une dizaine de familles.

Excepté celle des **Corydiidae** *(Polyphaga, Attaphila, Myrmecoblatta)*, dont les ailes postérieures ont un champ anal très petit et non pliable, ces familles ne diffèrent entre elles que par des points de détail.

Les **Perisphaeriidae**, primitives, aux nervures alaires toutes développées, sont surtout asiatiques et malgaches ; certaines espèces, comme *Perisphaerius glomeriformis*, peuvent s'enrouler à la manière des cloportes ; les *Gromphadorhina* font partie de cette famille.

Les **Panesthiidae**, principalement répandues en Indo-Malaisie, portent des élytres fortement sclérifiés et comprennent les *Cryptocercus* et *Panesthia*, à symbiotes intestinaux.

C'est chez les **Blaberidae** que l'on place *Blaberus giganteus* (55 mm) et *B. atropos* ou *fuscus* (60 mm), domestiques ou semi-domestiques des habitations sud-américaines.

Le génotype des **Panchloridae**, *Panchlora*, se singularise par une couleur verte, exceptionnelle pour une blatte. Cependant, on trouve aussi dans cette famille les *Leucophaea, Pycnocelus* et *Gyna* d'Afrique et d'Asie, aux teintes brunâtres.

Les **Oxyhaloidae** réunissent les *Oxyhaloa*, ovovivipares bien qu'ayant une oothèque sclérifiée, et les *Prosoplecta* ; toutes vivent dans les régions de la ceinture tropicale.

Les **Epilampriidae** se caractérisent par des nervures élytrales parallèles ; les espèces amphibies, les *Phlebonotus* et les *Eustegasta*, appartiennent à ce groupe ; ces dernières, remarquables par leurs teintes souvent métalliques, ressemblent parfois aux Coléoptères Buprestides.

La famille des **Blattidae**, la plus importante et de répartition mondiale, comprend les principales blattes

C. Bevilacqua

▲ **Les Blattodea** ***sont très communs dans les forêts des pays tropicaux ; ici*** **Blaberus giganteus.**

▼ **Nauphoeta cinerea** ***est une espèce élevée couramment dans les laboratoires.***

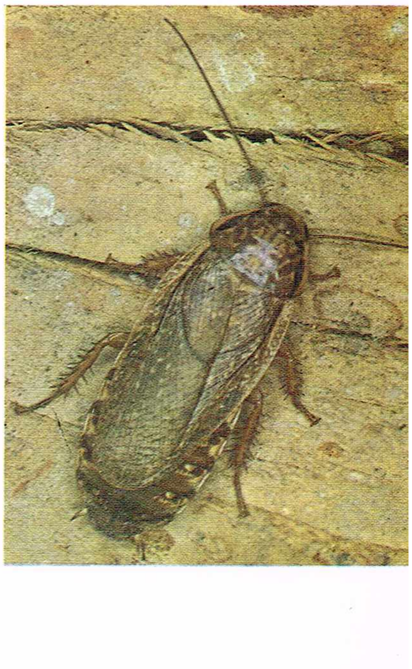

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

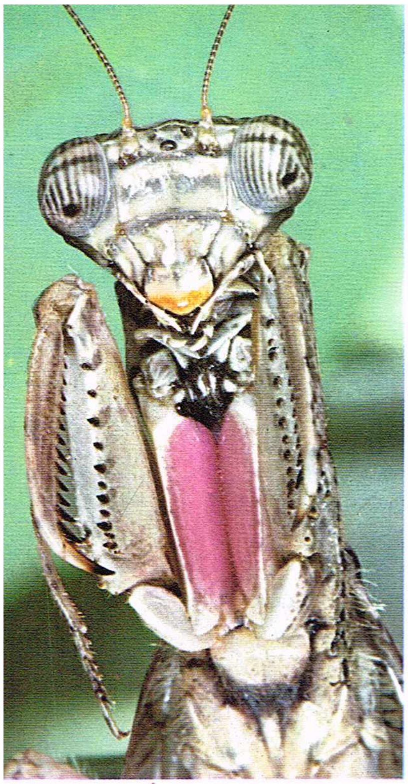

M. Boulard

▲ *Posture caractéristique des mantes à l'affût ; ici un* **Tarachodes**, *vu de face, montrant en détail sa tête et ses pattes ravisseuses.*

▶ *Page ci-contre, habitus général d'une mante religieuse.*

▼ *A gauche, tête d'***Empusa pennata**, *le diablotin de Provence ; à droite,* **Chaoeradodis laticollis**, *mante péruvienne caractérisée par sa phyllomorphie.*

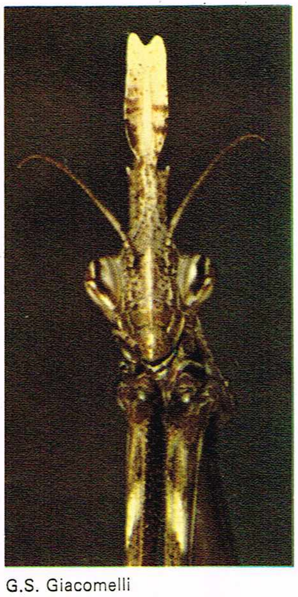

G.S. Giacomelli

A. Margiocco

communes, de nombreuses espèces non domestiques, les troglobies *Alluaudellina* et les termitophiles *Nocticola*.

Enfin c'est chez les **Ectobiidae**, famille riche d'un grand nombre de petites formes aux pattes grêles et aux antennes plus ou moins ciliées, que se rangent les *Blatella* et les *Ectobius*.

Sous-ordre des Mantodea

Les Mantodea, ou mantes, constituent un sous-ordre parfaitement distinct, homogène, comme celui des blattes, mais dont la différenciation plus récente s'est produite à l'Oligocène. La souche primitive, cependant, semble se situer en Gondwanie, l'Afrique intertropicale retenant plus de la moitié des mille neuf cents espèces actuelles, les régions néotropicales puis indo-malaise venant ensuite. La France compte une huitaine d'espèces, dont la célèbre mante religieuse et l'empuse diablotin. Toutes sont prédatrices.

Ces Insectes sont caractérisés par un corps allongé, une tête triangulaire où les yeux occupent une place importante et des pattes antérieures, dites prieuses ou ravisseuses, transformées en un remarquable appareil de capture. Leur taille est moyenne ou grande. Sans doute, *Plistospilota maxima* d'Afrique, *Macromantis hyalina* d'Amazonie, et *Archimantis monstruosa* d'Australie qui atteignent ou dépassent 12 cm, tout en conservant les proportions générales propres au groupe, sont parmi les plus grosses espèces. Cependant, il existe aussi de nombreuses petites formes et certaines, comme les perlamantines, n'atteignent pas 2 cm. Les mâles sont toujours moins grands que les femelles.

La tête, orthognathe, articulée par un cou très fin, est capable d'effectuer des mouvements dans tous les sens, ce qui est exceptionnel pour un Insecte. Les yeux ont une importance capitale chez ces Dictyoptères chasseurs ; ils sont grands, saillants, arrondis ou coniques, et présentent une aire de vision précise, dans leur partie centrale appelée zone de fixation, que la mante dirige toujours vers la proie qu'elle va immédiatement saisir. Les ocelles, au nombre de trois, bien développés et très rapprochés pour les mâles, sont réduits chez la femelle où ils peuvent d'ailleurs manquer. Les antennes sont filiformes et longues chez le mâle de *Mantis* ou relativement brèves et bipectinées chez le mâle d'*Empusa* ; chez les femelles, elles sont plus courtes. L'appareil buccal comporte des mandibules particulièrement puissantes.

L'allongement du corps intéresse surtout le prothorax et l'abdomen. Le prothorax, presque toujours plus long que large, d'une longueur parfois excessive, par exemple, chez *Heterochaeta* et *Leptocola*, présente un notum soit en forme de tuile vendéenne, soit, comme chez quelques genres asiatiques, les *Chaeradodis* notamment, phyllomorphe par de larges expansions latérales. Les deux autres segments thoraciques portent les ailes ; les ailes antérieures, étroites et tegminisées, souvent de la même couleur que le thorax, ocellées chez *Chlidonoptera*, forment au repos un étui pour les ailes postérieures qui sont larges, membraneuses et pliables, hyalines ou teintées. D'une manière générale, les ailes sont plus courtes chez la femelle *(Iris oratoria)*, mais le brachyptérisme *(Macromantis)*, le microptérisme *(Ameles decolor)*, voire l'aptérisme total peuvent affecter ces dernières espèces et parfois les deux sexes *(Eremiaphila denticollis* et *Geomantis larvoides)*. Les ailés, particulièrement les femelles, volent peu et mal. Seules les ailes postérieures sont motrices, excepté chez les petites mantoïdes sud-américaines qui battent des quatre ailes.

La patte antérieure des mantes constitue l'un des meilleurs « engins » de capture mis au point par un Insecte. La hanche, très longue, constitue, pour cet appareil, un levier qui permet de projeter brusquement en avant toute la partie préhensile formée par l'articulation fémuro-tibiale. Le fémur, généralement large, enflé par des muscles puissants, possède, sur sa marge inférieure, deux rangées parallèles d'épines fortes et aiguës, légèrement orientées de bas en haut, s'opposant à celles inclinées de haut en bas que porte le tibia ; celui-ci, subcylindrique, se termine par une longue griffe recourbée. La patte forme ainsi une pince meurtrière, aux mors acérés, dont aucune proie ne peut s'échapper. La marche est assurée par les deux autres paires de pattes, longues et fines, ornées, chez *Empusa*, *Phyllocrania*, *Hymenopus*, et quelques autres, d'expansions foliacées.

L'abdomen présente la même segmentation et les mêmes caractères sexuels que chez les blattes, mais avec une forme générale plus étroite et allongée, parfois à l'excès comme chez *Angela miranda* du Mexique. Cependant, il devient volumineux et lourd chez les femelles gravides. C'est alors que certaines femelles d'espèces asiates sont consommées.

Hormis les *Eremiaphila* et les *Metallyticus*, capables de courses rapides et de chasses actives, les mantes se déplacent normalement avec lenteur et circonspection. Toutes sont diurnes et termophiles, recherchant les endroits ensoleillés, où elles se postent à l'affût dans cette attitude bien connue, qui leur est particulière : les pattes antérieures repliées, pour ainsi dire « armées » sous le thorax, prêtes à se défendre.

Elles se placent sur les supports les plus divers, chacune ayant cependant une préférence qui correspond au développement d'un camouflage qui lui est propre. Celui-ci, inhérent aux chasseurs à l'affût, est souvent stupéfiant et parfois si extraordinaire que, même lorsque l'on a l'Insecte sous les yeux, on ne le distingue qu'avec effort. A cet égard, les mantes offrent une gamme prodigieuse. L'*homochromie* simple (verte ou brune) de nombreuses espèces, dont *Mantis religiosa,* est déjà efficiente. Mais, par l'*analoschémie* certaines mantes imitent non seulement la couleur, mais aussi la texture du substrat ; ainsi, *Eremiaphila,* qui vit sur le sable, présente un tégument granité ; les élytres de *Theopompella aurivillii* ressemblent à des fragments d'écorce ; *Chaerododis* et *Gongylus* s'assimilent à des feuillages, l'aspect foliacé tenant chez eux à la fois du pronotum, des élytres et des pattes ; *Deroplatys*, *Acanthops* et *Phyllocrania* sont semblables à de vieilles feuilles mortes déchiquetées ; grâce à ses expansions pétaliformes et à sa couleur rose, *Hymenopus coronatus* prend l'aspect d'une fleur. Le *mimétisme* est aussi très courant, *Chrysomantis speciosa,* lorsqu'elle est à l'affût, se tient toujours tête en bas, le corps relevé simulant un moignon de ramille brisée envahi par des Lichens ; les grandes espèces bacilliformes ont perdu l' « habitus mante » et, par suite de l'allongement exagéré du prothorax et de l'abdomen, ressemblent, comme les phasmes, à de fines branchettes ; ici les exemples les plus spectaculaires du mimétisme sont fournis par les formes africaines *Compsothespis et* surtout *Heterochaeta bernardii* et *Leptocola giraffa*, qui ne mesurent pas moins de 130 et 150 mm de long pour seulement 6 mm de large.

Exclusivement carnassières, les mantes saisissent tout ce qui bouge à portée de leurs pattes et dévorent aussitôt la proie vivante. Il existe des cas de cannibalisme et, placés dans des petites cages, certains mâles se révèlent si voraces et batailleurs qu'en Chine on prend des paris sur des combats à mort de *Tenodera sinensis*, une grande espèce mesurant 12 cm. Une légende tenace veut que la femelle mange obligatoirement le mâle après les noces ;

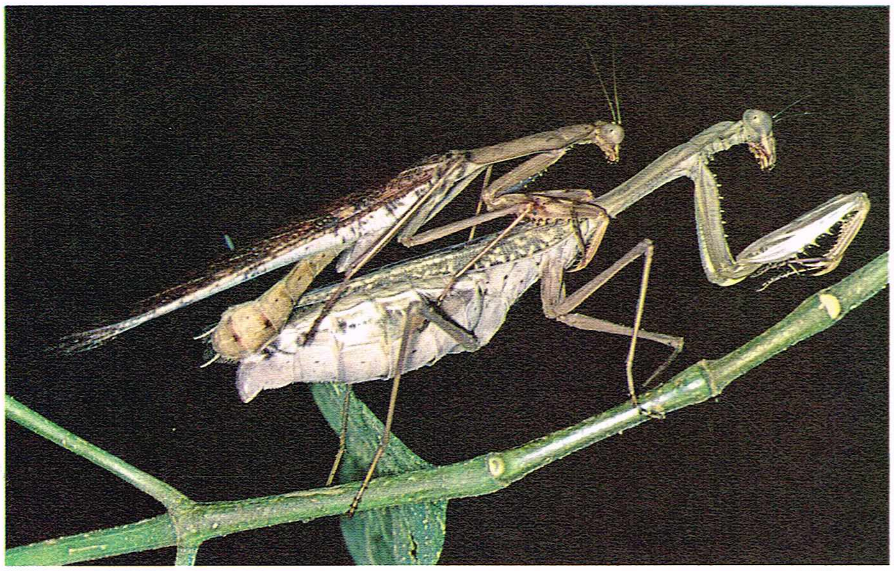

M. Boulard

▲ ***Couple de* Polyspilota acruginosa *(Centrafrique). Le dimorphisme sexuel secondaire chez les Mantodea tient principalement dans la différence de taille, le mâle étant toujours nettement plus petit que la femelle.***

ce n'est pas toujours le cas, le mâle n'est qu'un gibier parmi d'autres et s'il arrive qu'il soit capturé après la copulation, il peut l'être aussi avant et même pendant.

Le comportement nuptial du mâle est à cet égard très significatif : il procède par approche lente, jusqu'à une distance où il est à l'abri d'un coup de patte fatal, se figeant chaque fois que la femelle esquisse un mouvement ; brusquement, il saute sur le dos de celle-ci et s'y cramponne, bien parallèle et légèrement en arrière, hors du champ des pattes ravisseuses ; puis, il entreprend de « calmer » la femelle par des attouchements d'antennes et des palpes qui, au bout de quelques minutes, amèneront celle-ci à accepter l'accouplement. La fécondation se fait, là aussi, par l'intermédiaire d'un spermatophore que le mâle dépose directement dans les voies génitales de la femelle, ce qui demande généralement une à trois heures. Durant ce temps, la femelle peut attraper des proies et s'en nourrir ou, plus rarement, atteindre le mâle et le décapiter si celui-ci, au cours de ses efforts, vient à s'écarter de la zone sagittale et tombe dans son champ visuel. Mais, grâce à l'indépendance de la chaîne nerveuse ventrale par rapport aux centres céphaliques, cet accident est sans effet pour l'insémination, qui s'achève normalement. Cette particularité du système nerveux s'observe également chez une femelle dont on a enlevé le cerveau, et qui se révèle capable de coordonner pendant longtemps encore ses mouvements et même d'assurer le processus compliqué de la ponte.

Les œufs sont toujours inclus dans une substance d'abord visqueuse, composée de la sécrétion abondante des glandes collétériales et de celle, plus réduite, de la glande à calcaire ; le mélange, souvent rendu spumeux par un battage énergique de l'ovipositeur, durcit à l'air en prenant un aspect parcheminé et forme l'oothèque. A l'encontre des blattes, les mantes fabriquent leur oothèque à l'extérieur, sur le support définitif, celle-ci n'étant jamais retenue ou réintroduite dans l'abdomen.

Les œufs sont déposés dressés au milieu de l'enveloppe et, selon les cas, se trouvent entourés soit de simples feuillets, comme chez les empuses, soit, dans le cas général, et en particulier des *Mantis*, d'un épais bourrelet bulleux, ou encore, chez certaines mantes des Andes, d'une vaste chambre sphérique entièrement vide. Des voies de sorties et probablement aussi aérifères, constituées de lamelles, sont ménagées dans la partie médio-supérieure, immédiatement au-dessus des œufs. Les formes prises par les oothèques, fort variables à l'intérieur du sous-ordre, sont néanmoins constantes pour chaque espèce.

La prolificité des mantes apparaît assez importante, une femelle pouvant s'accoupler plusieurs fois et pondre jusqu'à mille œufs, dispersés en plusieurs oothèques (deux ou trois pour *M. religiosa*, vingt-deux pour *M. savignyi* d'Égypte, laquelle pourrait être parthénogénésique). Les œufs éclosent en même temps, et les nouveau-nés se faufilent entre les lamelles pour gagner l'extérieur.

Les jeunes ne perforent jamais l'oothèque, et, si celle-ci présente des trous, cela indique que la ponte a été parasitée par des Hyménoptères oophages. Le plus remarquable de ces parasites est *Mantibaria manticida*, Scélionide dont la femelle se fixe par ses mandibules sur la base de l'aile d'une mante qu'elle suit ainsi partout : c'est le phénomène de la phorésie. Au moment de la confection de l'oothèque, *Mantibaria* se détache et va mêler ses œufs à ceux du Dictyoptère. L'oothèque terminée, elle regagne sa place et attendra une nouvelle ponte.

En raison sans doute de leur comportement de prédateurs, les mantes sont, aux stades juvénile et imaginal, rigoureusement solitaires. Les jeunes se dispersent dès leur naissance ; leur régime est carnassier, mais le réflexe de capture ne s'instaure qu'un certain temps après la sortie de l'oothèque, lorsque la dispersion totale a eu lieu. Le développement postembryonnaire, déjà lent naturellement (un an ou plus), se trouve ralenti encore lorsque la température est inférieure à 18 °C.

Le sous-ordre des Mantodea comprend treize familles, dont l'importance numérique est très variable. On peut considérer les suivantes comme les plus représentatives.

Les **Amorphoscelidae** que l'on rencontre dans l'Ancien Monde, comprennent de petites espèces qui s'opposent aux autres mantes par la brièveté de leur prothorax et la conformation particulière de leurs pattes ravisseuses. Les *Perlamantis* sont des prédateurs exclusifs des fourmis, qu'ils guettent à l'affût sur les écorces.

Les **Eremiaphilidae** sont des mantes trapues et brachyptères dans les deux sexes. Propres aux déserts du Sahara et d'Arabie, elles sont extrêmement vives et chassent le plus souvent à la course. Les femelles ensablent leurs oothèques, ce qui soustrait ces dernières aux trop fortes températures comme aux écarts thermiques excessifs.

Les **Mantidae,** famille de loin la plus importante avec ses deux cent quarante et un genres, présentent une très grande variété de formes et de couleurs, citons entre autres : *Mantis, Tenodera, Theopompella, Angela, Leptocola* et *Compsothespis*. Le genre type est *Mantis*, la mante religieuse ou « prégadiou », Insecte des plus populaires dont la posture singulière est à l'origine de la légende. D'ailleurs, le nom de *Mantis* (prophétesse), donné par Linné, fait allusion à un conte médiéval dans lequel la mante, de ses pattes antérieures, indique son chemin au voyageur égaré. Les *Ameles* (2,5 cm), *Iris*

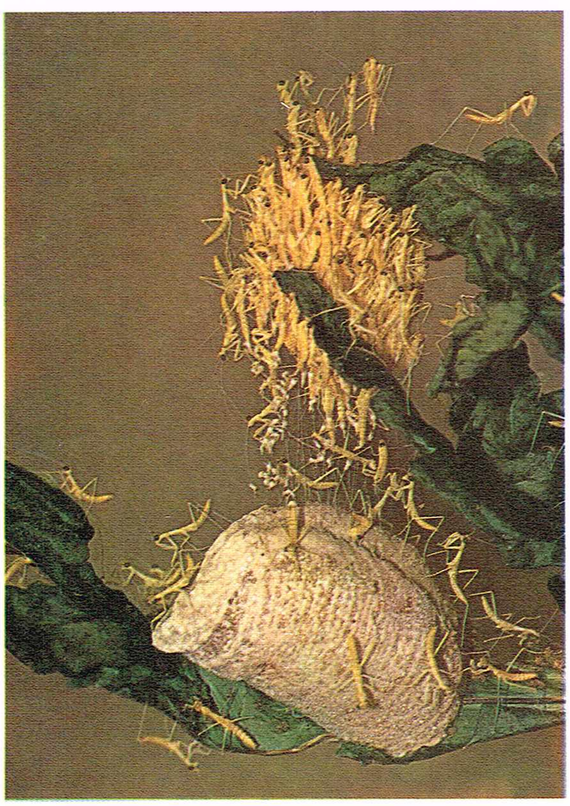

▶ ***Naissances simultanées de jeunes mantes.***

M.Boulard

A. Margiocco

J. Legrand

▲ *A gauche,* **Calotermes flavicollis** *représente l'unique espèce européenne des Calotermitidés. Ceux-ci vivent dans le bois et n'ont pas de véritables ouvriers; à droite, reine de* **Bellicositermes bellicosus** *entourée de soldats et d'ouvriers.*

oratoria et *Geomantis larvoides* représentent également cette famille en France, tandis que *M. religiosa* se retrouve jusqu'en Afrique noire et aux États-Unis.

Les **Metallyticidae** rassemblent quelques espèces indo-malaises, comme *Metallyticus splendidus*, remarquables par leur exceptionnelle couleur vert-bleu métallique, leur énorme croc à la base des fémurs antérieurs (évoquant les pattes des Névroptères *Mantispa*) et leur régime alimentaire presque exclusivement composé de blattes, qu'elles recherchent activement.

Beaucoup plus variées et riches en espèces sont les **Hymenopodidae,** qui comprennent des genres aux yeux globuleux *(Chlodonoptera)* ou coniques *(Galinthias)*, et dont la tête porte parfois des prolongements cuticulaires *(Phyllocrania)*. Cette famille est représentée en Amérique par *Acanthops*, mais surtout en Orient avec *Hymenopus* et en Afrique avec *Chrysomantis* et *Congoharpax*.

Les **Vatidae** sont caractérisées par des tibias postérieurs carénés; cette famille regroupe une centaine d'espèces aux habitus très divers, dont les bizarres *Heterochaeta* d'Afrique équatoriale.

Chez les **Empusidae**, le vertex est prolongé par une protubérance conique ou plus ou moins foliacée. Le type de cette famille est le diablotin méditerranéen, *Empusa pennata*, qui a la taille du prégadiou et dont l'oothèque, dépourvue de bourrelets, se reconnaît au long filament dressé qui la surmonte à l'extrémité postérieure; les œufs éclosent en septembre, de sorte que l'empuse hiverne à l'état juvénile. *Hemiempusa capensis* et *Idolum diabolicum* sont typiques de la faune africaine, *Gongylus gongylodes* de celle du Sud-Est asiatique. Les empuses sont inconnues dans le Nouveau Monde.

Ordre des Isoptères

Les Isoptères, encore appelés termites, sont des Insectes terrestres de taille modeste, ailés ou aptères, amétaboles, très polymorphes, et vivant en société. Du fait de leur aspect et de leur vie sociale, on les a longtemps confondus avec les fourmis, d'où leur nom de « fourmis blanches »; cependant, s'il est vrai que, de ces points de vue, la comparaison est possible, elle s'arrête là. Une colonie de termites comprend différents groupes d'individus, de taille et d'aspect variés, que l'on appelle des castes. Ainsi, dans une même termitière, on pourra rencontrer un couple de sexués, le roi et la reine, et des soldats, des ouvriers et des larves.

Les trois régions du corps, la tête, le thorax et l'abdomen sont aisément reconnaissables chez tous les termites. Cependant, chaque cas se distingue par des particularités morphologiques.

Chez les *sexués*, la tête des mâles et des femelles porte des yeux composés, une paire d'ocelles et une paire d'antennes moniliformes, dont le nombre d'articles varie de onze à trente-trois. Entre les yeux, se trouve une petite dépression, la *fontanelle*, qui n'existe que chez certaines familles et au niveau de laquelle débouche la glande frontale. Le clypéus et le labre ne présentent pas de grandes particularités. Les mandibules, du type broyeur, les maxilles et le labium formé de deux parties, un prémentum et un postmentum résultant de la fusion du mentum et du submentum sont situés ventralement.

Le thorax est formé de trois segments d'égale importance; composés d'un grand nombre de sclérites bien individualisés, reliés entre eux par une chitine souple, ils portent les pattes, et les deux derniers segments sont munis de deux paires d'ailes, de longueur sensiblement égale, superposées à plat sur le dos au repos. Elles sont homonomes et homoneures; à leur base, se trouve une ligne de rupture suivant laquelle l'Insecte détache son aile après l'essaimage; la partie restant attachée au thorax est appelée écaille alaire. La nervation de ces paires d'ailes varie selon les familles et fournit un bon moyen de les classifier.

Enfin, l'abdomen est formé de onze segments et porte une paire de cerques pluriarticulés.

Les *néoténiques* sont des termites immatures, mâles et femelles de remplacement. Ils présentent des téguments clairs et peuvent être aptères ou brachyptères; ils n'apparaissent que quand la colonie est devenue orpheline.

Chez les *ouvriers*, la tête ne présente pas de différence marquante avec celle des sexués. La plupart du temps, ils sont aveugles, les yeux composés et les ocelles étant absents, ou alors, ils possèdent des yeux faiblement développés. La fontanelle peut être présente ou non.

Les *soldats* possèdent une tête très développée et qui diffère nettement de celle des sexués. Le plus souvent, elle est hypertrophiée et atteint fréquemment la longueur du thorax et de l'abdomen réunis. A l'extrémité du rostre débouche la glande frontale. Le thorax et l'abdomen diffèrent peu de ceux des ouvriers. On peut distinguer les soldats selon deux types principaux : d'une part, ceux qui possèdent de grandes mandibules, tels les soldats de *Bellicositermes natalensis*, et, d'autre part, ceux qui ont une tête piriforme et des mandibules en général réduites, qui sont les soldats du type « nasuti ». On ne rencontre jamais les deux types de soldats dans la même colonie.

En ce qui concerne l'anatomie interne, nous insisterons sur l'appareil glandulaire exocrine et l'appareil reproducteur. Les *glandes* sont assez nombreuses chez les termites; cependant, elles n'ont pas la même importance suivant les castes et les espèces.

Les *glandes labrales*, petites, sont situées à la face inférieure du labre : leur fonction sécrétrice est encore fort discutée.

Les *glandes mandibulaires*, localisées à la base des mandibules, sont constantes chez les termites; leur fonction et la nature de leur sécrétion sont encore inconnues.

Les *glandes salivaires et labiales*, paires, sont formées d'un grand nombre d'*acini* reliés aux deux canaux salivaires. Sur leur trajet, se trouve un important réservoir salivaire, qui débouche à la base du labium. Les glandes sont très développées chez les ouvriers et chez certains

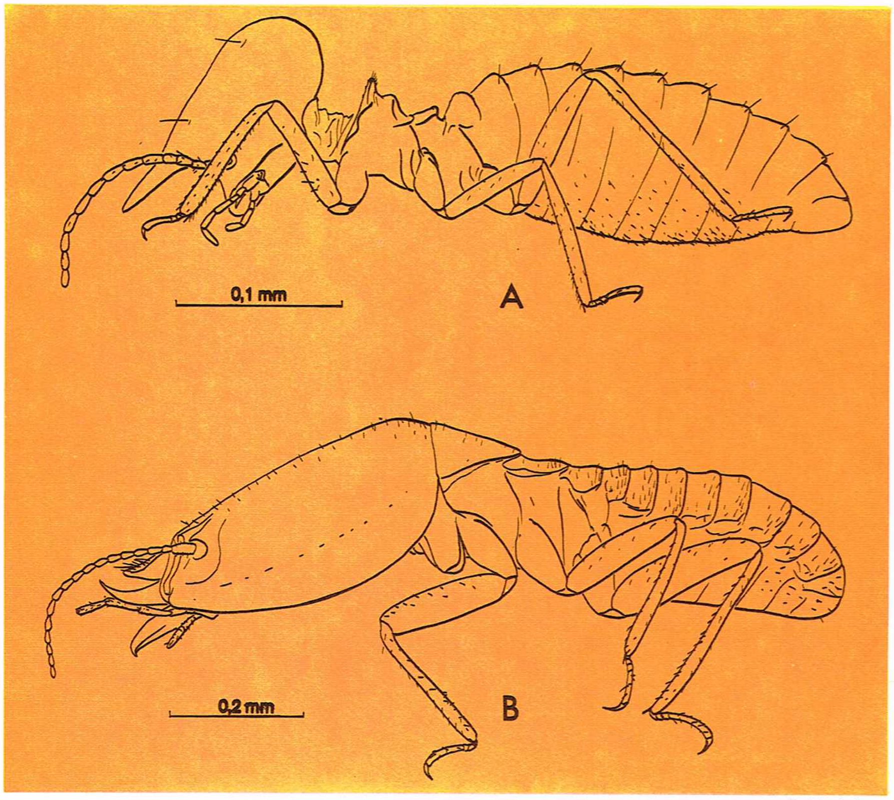

G. Hodebert

▲ ***Deux types de soldats; A, le soldat nasuti possède une tête en forme de poire à l'apex de laquelle débouche la glande frontale; B, soldat de*** **Bellicositermes bellicosus** ***armé de mandibules très coupantes.***

soldats, où elles peuvent occuper une grande partie du thorax et de l'abdomen. Suivant les castes, leur sécrétion a une nature et un rôle différents ; celle des ouvriers sert à nourrir les larves, les sexués et même les soldats; chez certains soldats, elle est corrosive et joue un rôle défensif. Dans les deux cas, peu de choses sont connues quant à leur nature chimique.

La *glande frontale* est toujours impaire et de développement très variable suivant les espèces et les castes. Chez les termites primitifs, elle reste dans un état indifférencié et sans connexion avec l'extérieur, alors que chez les termites supérieurs elle peut, avec son réservoir, occuper la quasi-totalité de la capsule céphalique et déboucher au niveau de la fontanelle ou au bout du rostre, comme chez les soldats « nasuti ». Chez ces derniers, la sécrétion est utilisée comme arme de combat et peut être projetée à quelques centimètres et engluer un éventuel ennemi. Elle est expulsée grâce à la contraction des muscles mandibulaires, qui sont restés très importants chez ces soldats, malgré l'atrophie des mandibules.

Les *glandes sternales*, situées au niveau des sternites deux à cinq, ne présentent pas de canaux différenciés les faisant communiquer avec l'extérieur, leur sécrétion devant diffuser au travers des téguments et contenir des phéromones traçantes qui servent au pistage.

Chez certaines femelles physogastres, les ovaires peuvent être hypertrophiés, occuper toute la cavité abdominale et distendre considérablement les membranes intersegmentaires. Cette distension peut, dans certains cas, isoler complètement les tergites. Ces femelles sont alors dans l'impossibilité de se mouvoir. De plus, ces ovaires ont la particularité, unique semble-t-il dans le monde des Insectes, de pouvoir augmenter le nombre des ovarioles panoïstiques pendant toute la durée de la reproduction. La poussée des nouveaux ovarioles s'effectue d'arrière en avant. Les organes génitaux femelles comprennent aussi un réceptacle séminal et des glandes collatériales, ou accessoires, indépendantes des ovaires. L'appareil génital mâle n'offre pas de particularités en dehors de l'aberration que présentent les spermatozoïdes, qui sont totalement dépourvus de flagelles, et par là incapables de se mouvoir. On ne sait encore rien de la fécondation.

Différenciation des castes. Chez les *Termitidés*, ou *termites supérieurs*, la séparation entre les castes et la différenciation sont plus poussées que chez les termites inférieurs, mais le développement postembryonnaire est beaucoup moins variable. Les ouvriers, toujours présents, sont très différents des larves et des nymphes.

Les sexués présentent un développement uniforme en sept stades (l'imago étant le septième). Ils proviennent de larves qui, au premier stade, sont toutes semblables; ce n'est qu'après la première mue larvaire, c'est-à-dire chez les larves du deuxième stade, qu'il sera possible de reconnaître deux types d'individus : d'une part, des larves ne présentant pas d'ébauches alaires, qui sont à l'origine des neutres (ouvriers et soldats) et, d'autre part, des larves pourvues d'ébauches alaires (nymphes), qui donneront les imagos mâles et femelles. C'est au cours des mues suivantes que les ébauches se développeront de façon régulière, et que les yeux composés se différencieront; mais ces derniers ne se pigmenteront qu'au pénultième stade. La durée totale du développement est de plusieurs mois.

Les ouvriers se différencient en deux ou trois stades selon les sous-familles. Les larves, peu actives, sont incapables de se nourrir. La dernière mue, au cours de laquelle elles passent au stade d'ouvrier, entraîne des modifications faibles du point de vue morphologique, mais très importantes sur le plan physiologique et éthologique. Les ouvriers présentent un certain polymorphisme en relation avec le sexe, qui se manifeste uniquement par une différence de taille, les sujets issus de larves mâles étant les plus grands.

Les soldats se développent en deux temps, soit à partir d'une larve du deuxième stade, qui mue pour donner naissance à un soldat blanc, identique à l'imago mais ayant encore un comportement larvaire, et qui lui-même donnera, en muant, un soldat, soit à partir d'ouvriers mais toujours avec passage par le stade de soldat blanc.

Les sexués de remplacement proviennent soit de néoténiques (larves ou nymphes chez lesquelles les glandes sexuelles murissent rapidement), soit d'imagos qui acquièrent leur maturité sexuelle à l'intérieur de la colonie *(Macrotermes)*, soit encore d'ouvriers.

Chez *les termites inférieurs*, les castes sont stables surtout en ce qui concerne les pseudergates (faux ouvriers).

D'après Grassé et Noirot, jusqu'à la mue imaginale, toutes les larves auraient les mêmes potentialités. Les soldats seraient différenciés les premiers, puisqu'ils peuvent provenir de larves du stade trois. Les pseudergates dériveraient soit de larves jeunes (voie ascendante), soit de larves âgées et présentant des fourreaux alaires (voie descendante). Les néoténiques sont issus soit de larves, soit d'ouvriers. Il arrive, dans certaines conditions expérimentales, que des ouvriers donnent naissance à des soldats.

L'*interprétation du déterminisme des castes* a donné lieu à deux thèses opposées. L'une, blastogénétique, considère que la caste à laquelle appartiendra le futur termite préexiste dans l'œuf sous forme de matériel génétique, ce qui implique que la voie dans laquelle s'engagera le développement est immuable. L'autre, épigénétique, et qui prévaut actuellement, considère que tous les œufs et les larves du premier stade sont identiques, à l'exception des facteurs qui déterminent leur sexe, et que l'orientation vers l'une ou l'autre caste est déterminée par des facteurs externes. Le fait que des soldats ou même des sexués puissent provenir d'ouvriers ou de pseudergates semble confirmer cette dernière hypothèse.

Chez les termites supérieurs, en ce qui concerne la séparation entre sexués et neutres (soldats et ouvriers), c'est au plus tard pendant le premier stade larvaire que s'effectue la détermination. La différenciation de soldats à partir d'ouvriers doit s'effectuer au moment où les processus de la mue sont engagés chez l'ouvrier; ce cas exceptionnel ne semble pas se produire dans la nature. Pour les soldats issus de larves, il semble que la détermination apparaisse au troisième stade (Macrotermitinae). En ce qui concerne le remplacement des sexués, qu'ils proviennent de larves ou de pseudergates, le moment de la détermination apparaît tardivement dans le développement, ce qui infirme la théorie blastogénétique.

Il est probable que les facteurs climatiques interviennent dans le cas d'une production saisonnière de sexués. Chez des termites dont la termitière est climatiquement

stable, la transmission des informations externes ne peut s'effectuer que par les ouvriers, qui, en quêtant la nourriture ou en construisant le nid, sont les seuls individus ayant un contact avec l'extérieur. On ne sait cependant rien quant au mécanisme concret de cette transmission.

Dans une société de termites équilibrée, les proportions entre les différentes castes sont particulièrement stables ; s'il se produit une perturbation affectant le nombre des individus d'une caste déterminée (par exemple par prélèvement expérimental des soldats), l'ensemble de la termitière répond par une nouvelle production de soldats, tendant ainsi à rétablir les proportions. La société des termites est donc douée d'un remarquable pouvoir régulateur. Schématiquement, cette régulation s'effectue par la production de phéromones spécifiques de chaque caste. La « phéromone soldat », produite par les soldats d'une termitière en équilibre, inhibe le développement de nouveaux soldats. Si on supprime la caste soldat, il n'y a plus de production d'hormone, et il se produit donc une levée de l'inhibition, qui entraîne ainsi l'apparition de nouveaux soldats.

De même, en ce qui concerne la production de sexués de remplacement, il est établi qu'elle n'apparaît que dans une colonie orpheline, cette différenciation devant résulter d'une levée de l'inhibition qu'exerçaient les reproducteurs présents. Les phéromones sont transmises d'individu à individu par les fréquents contacts qu'ils pratiquent, le léchage, l'échange de nourriture, etc.

Fondation d'une nouvelle société. La production des sexués s'exerce apparemment sous l'influence de facteurs climatiques, des phéromones, du degré d'évolution de la colonie et d'autres facteurs.

Dans une colonie arrivée à maturité, lorsque la saison favorable approche (au moment de la saison des pluies sous les Tropiques ou en été dans les régions présentant des hivers rigoureux), des rassemblements d'ailés se font en divers points de la termitière. Pendant cette période d'attente, les ouvriers creusent des tunnels qui permettront, le moment venu, l'essaimage des sexués. A l'intérieur de la termitière, les ailés ne présentent aucune appétence sexuelle et sont particulièrement apathiques.

D'une façon générale, l'essaimage a lieu le soir ou à la tombée de la nuit (intensité lumineuse faible), lorsque l'air n'est pas trop agité et que la température et le degré hygrométrique sont assez élevés. Les ouvriers ouvrent alors les tunnels qu'ils avaient creusés et les ailés s'envolent. La sortie peut se faire en une seule fois ou par petits groupes. En général, le vol ne dure que peu de temps. Il s'effectue, semble-t-il, sans orientation déterminée, sur une distance qui varie de quelques mètres à quelques kilomètres. Lorsqu'ils atterrissent, les sexués sont en proie à une vive agitation, courent en tous sens, et c'est à ce moment-là qu'ils perdent leurs ailes.

L'appariement des sexués peut se faire de plusieurs façons, soit au hasard des rencontres, soit que les femelles prennent des postures d'appel, abdomen relevé *(Reticulitermes)*, ou bien qu'elles battent des ailes, posées sur un chaume de Graminée, la tête en bas, comme chez *Odontotermes*, soit, enfin, que la parade ait lieu en plein vol. Lorsqu'un mâle rencontre une femelle, il lui fait une cour qui consiste en attouchements, en mordillements ou en léchages. Si celle-ci est consentante, elle part, suivie de très près par son partenaire, avec lequel elle constitue un tandem, pour effectuer la promenade nuptiale, qui peut être de courte durée ou s'étendre sur plusieurs jours. C'est la femelle seule qui choisit l'endroit où sera creusée la chambre nuptiale, ou *copularium* ; le tandem se sépare alors et tous deux participent au creusement, qui dure un ou deux jours. Lorsque la cellule a atteint la taille du couple, l'orifice est obturé avec les déblais. Ensuite, le couple devient inactif, se mutile les antennes sur les derniers articles et c'est alors que s'effectue la copulation. La jeune reine émet un nombre d'œufs assez restreint, qui constituent la première ponte, laquelle donne naissance aux premières larves soignées et nourries par les parents. Chez les Termitidés, le couple royal ne s'alimente pas et ne peut compter que sur ses réserves pour subsister et prendre soin de sa progéniture ; ils ne seront nourris que lorsque les premiers ouvriers se seront différenciés.

Il existe deux autres modes de fondation de nouvelles sociétés, le bouturage à partir de néoténiques, comme chez *Reticulitermes*, ou la sociotomie, au cours de laquelle

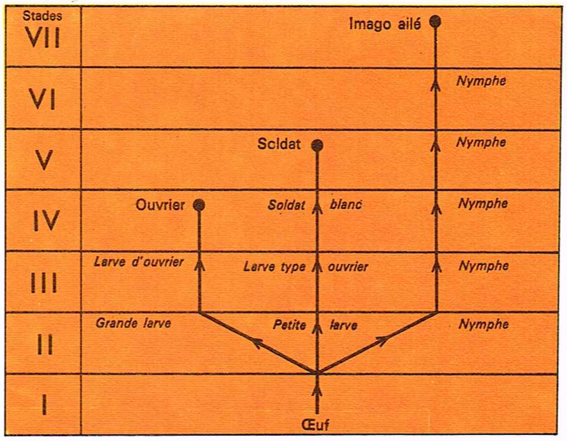

G. Hodebert

◀ **_Différenciation des castes chez un termite supérieur_**
Natusitermes matangensis.

une partie de la population où toutes les castes sont représentées quitte la colonie pour fonder plus loin une nouvelle société. La croissance de la nouvelle fondation est toujours lente et la colonie n'atteint sa maturité qu'au bout de plusieurs années. D'après Grassé, la longévité d'une colonie de *Bellicositermes* pourrait atteindre 80 ans, le couple fondateur étant toujours présent.

Répartition des tâches au sein de la termitière. Les sexués assurent l'accroissement de la colonie, les soldats la défendent, et les ouvriers accomplissent toutes les autres tâches.

Le *couple royal* n'a qu'une fonction reproductrice. La reine peut avoir une fécondité absolument énorme, particulièrement celle de *Bellicositermes natalensis*, et pondre plus de trente mille œufs par jour ; en relation avec cette énorme fécondité, l'abdomen est hypertrophié et la reine est incapable de se mouvoir. C'est pourquoi, elle est totalement prise en charge par la colonie ; elle est nourrie, nettoyée, et son énorme abdomen, agité en permanence par des mouvements péristaltiques, est constamment massé par les ouvriers. Ce sont ces derniers qui

▼ **_Différenciation des castes chez un termite inférieur_**
Calotermes flavicollis.

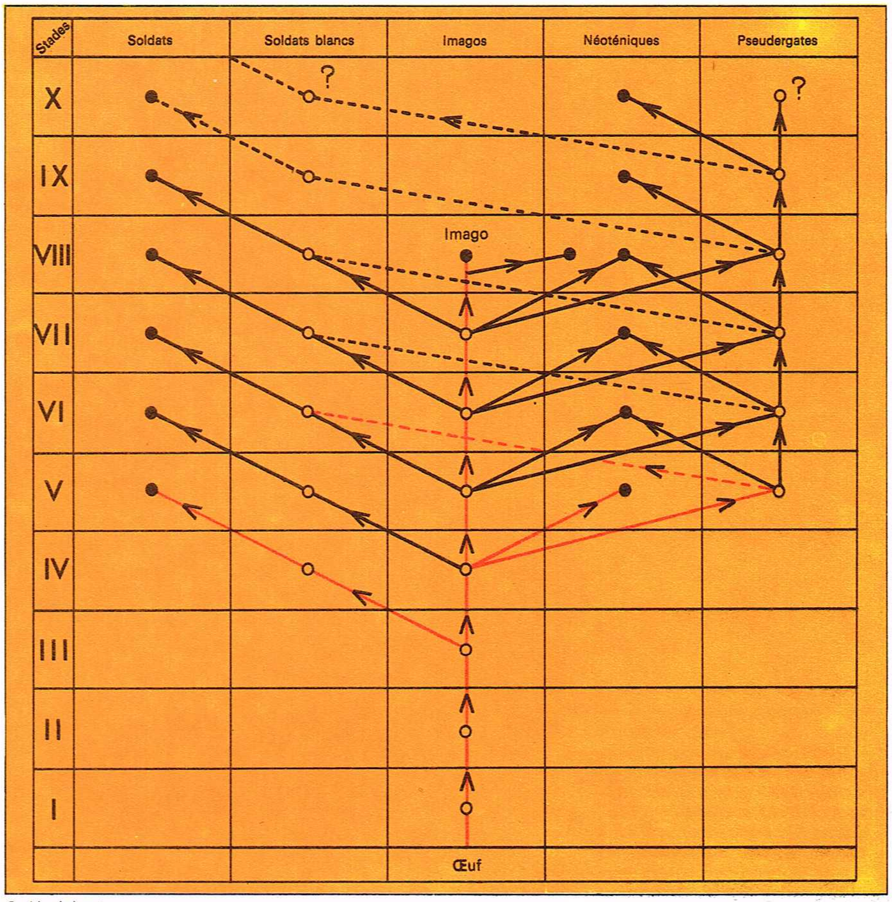

G. Hodebert

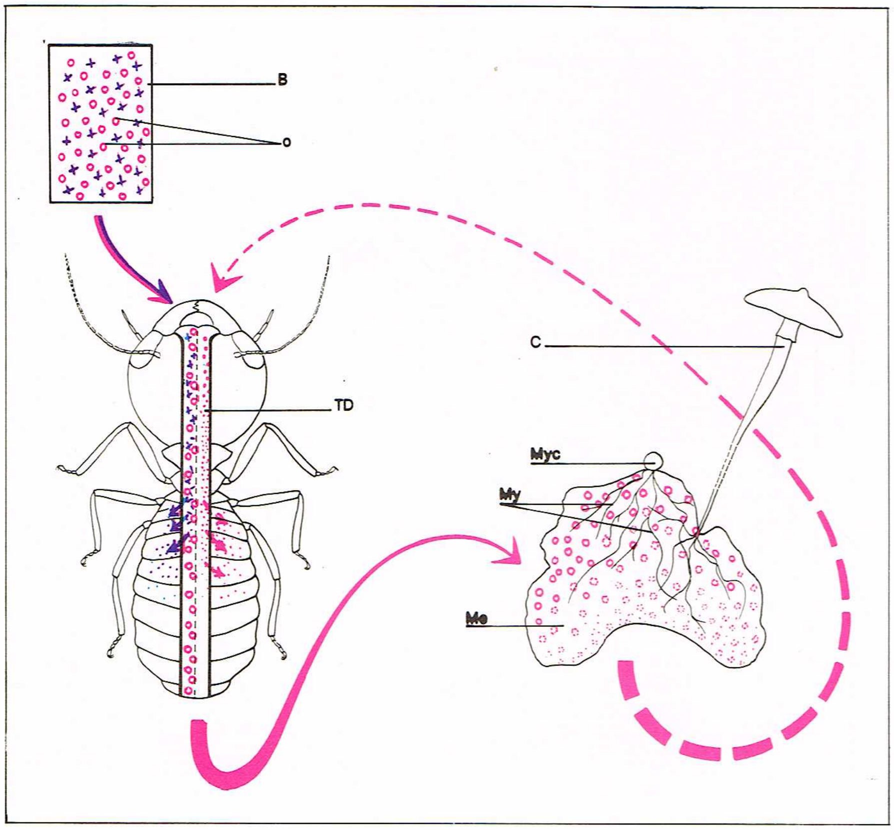

G. Hodebert

▲ *Schéma de la digestion du bois chez les termites champignonnistes : B, bois ; +, cellulose ; o, lignine ; C, carpophore ; Me, meule à Champignons ; My, mycélium ; Myc, mycotête ; TD, tube digestif.*

recueillent immédiatement les œufs pondus, soit séparément, soit par paquets. Le roi accompagne la reine, et il est probable qu'il la féconde de temps en temps.

Les *soldats* défendent le territoire contre tout ennemi éventuel grâce à leurs mandibules très développées et très coupantes, particulièrement chez *Bellicositermes natalensis* ; dès qu'une brèche est pratiquée dans la termitière, ils accourent pour former des cercles défensifs autour des ouvertures, et de leurs mandibules frappent l'air en tous sens. Les soldats du type « nasuti » appartenant au genre *Cubitermes* envoient un jet de sécrétion visqueuse qui englue l'assaillant. Pourtant, même s'ils sont bien armés, l'efficacité défensive des soldats est très relative ; dans certains cas, leur nombre peut être très faible, et, étant donné qu'ils sont aveugles, ils frappent avec maladresse. Les principaux ennemis des termites sont les fourmis ; en Afrique, les *Megaponera*, les « fourmis-cadavres », sont spécialisés dans la razzia des termitières.

Les *ouvriers* assurent tous les travaux, dont les principaux sont la recherche de la nourriture à l'extérieur, l'alimentation par trophallaxie des individus des autres castes, ainsi que celle des larves, et la construction de la termitière. La quête de la nourriture peut se faire de deux façons, soit à l'air libre, soit en passant par un réseau de galeries (aériennes ou souterraines). L'alimentation des termites est composée principalement de bois, bien que certaines espèces soient plus ou moins polyphages.

Les ouvriers ne sont pas seulement collecteurs et distributeurs de nourriture, mais, selon Noirot, ils constituent un « véritable estomac collectif » et, la plupart du temps, digèrent, transforment et assimilent les matériaux bruts pour en gaver les larves et le couple royal. Les ouvriers, ne possèdant pas l'arsenal enzymatique qui leur permettrait de digérer le bois, composé essentiellement de cellulose et de lignine, « font appel », pour les aider dans cette tâche, à des micro-organismes symbiontes, Flagellés ou Bactéries qu'ils abritent dans leur tube digestif, ainsi qu'à des Champignons. Très schématiquement, on peut diviser la digestion du bois en deux parties, la dégradation de la cellulose et la dégradation de la lignine.

Les termites inférieurs hébergent, dans leur panse rectale, des Flagellés Hypermastigines qui, par une fermentation anaérobie, dégradent la cellulose, libérant ainsi des acides acétiques, propioniques et butyriques assimilables par l'Insecte.

Les termites supérieurs, en particulier les Nasutitermitinés, digèrent la cellulose grâce à une cellulase produite par l'intestin moyen. De plus, chez ces derniers, l'intestin est peuplé de Bactéries dont le rôle n'est pas élucidé. Chez les Macrotermitinés, il existe une association remarquable avec un Champignon du genre *Termitomyces*, qui joue un rôle fondamental dans la dégradation de la lignine.

Après avoir digéré la cellulose, le termite construit avec ses « fécès », constituées essentiellement de lignine non assimilable, de petits édifices à l'aspect d'éponge, les meules à Champignons. C'est dans la masse de la meule que se développe le mycélium, qui en surface produit de petites fructifications rondes et blanches, les *mycotêtes* ; et même parfois, lorsque les conditions climatiques sont favorables, après la pluie, un chapeau, ou carpophore, est émis à l'extérieur de la termitière. La dégradation de la lignine par le mycélium se manifeste par son changement de couleur entre la périphérie de la meule (lignine brune d'apport récent) et sa base (lignine claire, dégradée et ancienne). Le termite consomme la partie basale de la meule et entretient celle-ci en état de bon fonctionnement par des apports toujours renouvelés de lignine déposée à la périphérie sous forme de boulettes.

Les ouvriers nourrissent les autres individus par échange de nourriture, ou trophallaxie, s'effectuant par voie stomodéale ou proctodéale. Les échanges alimentaires par voie stomodéale véhiculent, en plus, des informations sous forme de phéromones.

Les ouvriers construisent le nid selon un mécanisme que Grassé a appelé le *stigmergie*. Chez le termite, cette construction passe par deux phases : une phase où les actes des individus ne sont pas coordonnés, au cours de laquelle les ouvriers déposent au hasard des boulettes de terre sans s'occuper de ce que font les voisins, et une seconde phase, qui intervient lorsque les boulettes sont suffisamment proches les unes des autres ; elles deviennent alors un stimulus significatif pour les ouvriers, qui édifient sur celles-ci des parois de terre ou des piliers. Pour Grassé, « le termite n'est pas le directeur de son travail, c'est celui-ci qui le guide et qui détermine ses actes ». Au fur et à mesure que la population augmente, le volume du nid s'accroît, et, de souterrain qu'il était lors de sa fondation, comme chez *Bellicositermes natalensis* par exemple, il va sortir de terre pour un soulèvement de l'ensemble, grâce aux remaniements incessants qu'apportent les ouvriers dans la construction.

La *termitière*, même celle dont les ouvriers vont chercher leur nourriture en plein air, et dont les orifices sont rebouchés après chaque sortie, réalise un système clos, isolé du milieu extérieur. Il y règne le calme et l'obscurité, l'atmosphère est confinée, l'hygrométrie relative y est élevée, toujours supérieure à 50 %. C'est par la construction d'un tel édifice que le termite adapte le milieu à ses besoins.

Grassé reconnaît dans une termitière quatre cavités principales. L'*endoécie*, ou habitacle, comprend la chambre où vit le couple royal et où se trouvent le couvain,

A. Margiocco

▶ *Chez les termites, ici* **Bellicositermes bellicosus,** *les ouvriers nourrissent les autres individus par échange de nourriture, ou trophallaxie, s'effectuant par voie stomodéale ou proctodéale.*

les réserves alimentaires ainsi que les meules de Champignons. La *périécie* se compose d'un réseau de galeries mettant l'habitacle en relation avec les sources d'aliments et de matériaux de construction. L'*exoécie*, formée d'un système de cavités, ne communique ni avec l'endoécie ni avec la périécie, mais avec l'extérieur par de larges ouvertures. La *paraécie* est un espace libre aménagé par certains termites entre leur nid hypogé et la terre environnante.

Les *nids* des termites peuvent revêtir plusieurs formes et sont construits à partir de terre ou de carton. Les nids construits dans le bois sont certainement les plus primitifs. On les trouve chez les Calotermitidés ; dans ce cas, le bois sert à la fois d'abri et de source de nourriture ; les nids souterrains, ou hypogés, revêtent des formes très variées et diffuses, et sont parfois simplement formés de galeries plus ou moins organisées, parfois composés de plusieurs unités de taille ovoïde reliées entre elles par la périécie *(Apicotermes)*, ou, encore compacts ; ces nids peuvent aussi présenter une partie aérienne, ou épigée, dont la forme varie également : elle est en cathédrale chez *Bellicositermes natalensis*, en dôme chez *B. bellicosus*, en pain de sucre chez *Amitermes*, et en Champignon chez *Cubitermes*.

Enfin, on trouve les nids arboricoles, qui ne se rencontrent que chez les Termitidés. Ils sont toujours en relation avec la terre par des systèmes de galeries descendant le long du tronc de l'arbre. Ils peuvent être compacts ou plaqués sur les troncs, en « larmier » ou en « égouttoir ».

Les termitières hébergent beaucoup d'Insectes termitophiles, tels que des Collemboles, des Coléoptères, des Diptères, etc.

Parmi les ennemis, nous pouvons citer les fourmis, dont certaines espèces africaines du genre *Megaponera*, les « fourmis-cadavres » déjà mentionnées.

Nous donnerons ici les grandes lignes de la classification des Isoptères adoptée par Emerson en 1942 et Grassé en 1949.

Les **Mastotermitidés**, très primitifs, présentent un tarse à cinq articles. Cette famille comprend de nombreuses espèces fossiles. Actuellement, elle n'est plus représentée que par la seule espèce australienne *Mastotermes darwiniensis*, dont les femelles pondent des œufs rassemblés dans une oothèque.

Les **Calotermitidés** ont un tarse à quatre articles. Ils vivent dans le bois et n'ont pas de véritables ouvriers (pseudergates). On ne rencontre en Europe que *Calotermes flavicollis*.

Les **Termopsidés** forment une famille très hétérogène, dont les individus présentent néanmoins en commun un tarse à quatre ou cinq articles et l'absence d'ocelles.

Les **Holotermitidés** sont dépourvus d'ocelles, mais les ouvriers sont munis d'yeux composés ; ces termites forment dans le sol des colonies très populeuses.

Chez les **Rhinotermitidés**, la fontanelle et la glande frontale sont toujours présentes. Leurs colonies se rencontrent dans le sol et dans le bois. Toutes les castes sont représentées. Leur répartition est mondiale. En France, *Reticulitermes lucifugus* cause de très importants dégâts dans les bois d'œuvre et les archives.

Enfin, les **Termitidés** forment la famille numériquement la plus importante. Leurs colonies sont très populeuses.

Ordre des Plécoptères

Chez les Plécoptères, ou Perlariae, les téguments sont mous, et les larves sont aquatiques.

La tête est prognathe ; les yeux composés sont normaux, et trois ocelles leur sont toujours associés. Les antennes sont longues, filiformes et pluriarticulées. Les pièces buccales, du type broyeur, sont fréquemment réduites et non fonctionnelles chez l'imago.

Le thorax présente trois segments bien distincts. Le pronotum est plat, et subrectangulaire ; les deux autres segments portent chacun une paire d'ailes membraneuses qui, au repos, recouvrent l'abdomen. Les ailes postérieures présentent un champ anal, ou *vannus*, bien développé et plissé (type orthoptéroïde). La nervation alaire offre un grand intérêt pour la systématique. La brachyptérie est fréquente chez les mâles ; au sein d'une même espèce, on peut rencontrer des mâles à ailes normales et d'autres

J. Legrand

▲ *Coupe de l'habitacle d'une termitière de* **Bellicositermes bellicosus.** *Le « grenier » est rempli de sciure de bois.*

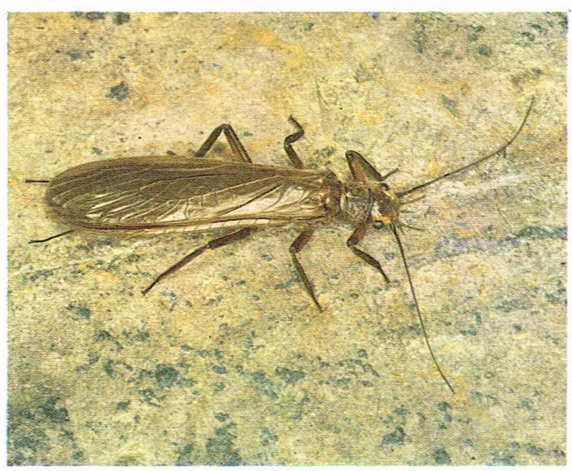

I. Bucciarelli

◀ *Plécoptère du genre* **Perla.**

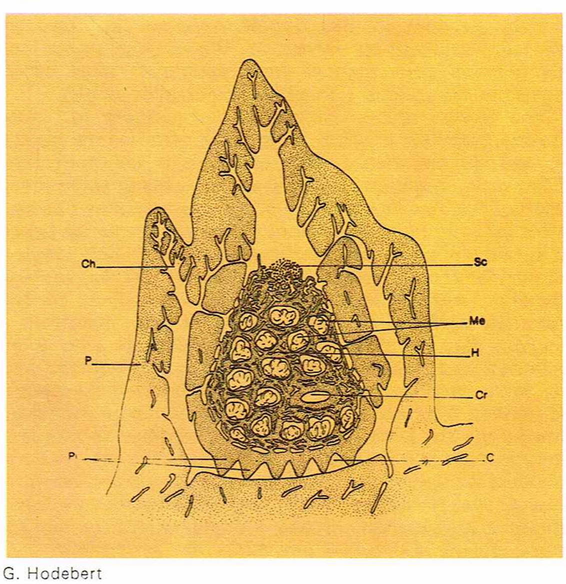

G. Hodebert

◀ *Coupe d'une termitière évoluée de* **Bellicositermes bellicosus** *: C, cave ; Ch, cheminée ; Cr, cellule royale ; H, habitacle ou endoécie ; Me, meule à Champignons ; P, paroi de la termitière ; Pi, piliers soutenant l'habitacle ; Sc, amas de sciure de bois.*

A. Margiocco

▲ *C'est une particularité bionomique des Embioptères, ici* **Embia ramburi**, *que de vivre groupés sous des fourreaux de soie qu'ils construisent et élaborent eux-mêmes.*

qui sont brachyptères. L'aptérisme total est par contre très rare. La longueur des pattes est inégale et augmente d'avant en arrière.

L'abdomen est composé de dix segments ; le gonopore est situé sur le neuvième segment chez le mâle et sur le huitième chez la femelle.

Le tube digestif est assez court. La partie antérieure de l'intestin moyen porte des cæcums digestifs, et son extrémité est marquée par un grand nombre de tubes de Malpighi (jusqu'à quatre-vingts). Le système respiratoire n'a rien de particulier (deux stigmates thoraciques et huit abdominaux), malgré la persistance, chez certains imagos, de trachéo-branchies abdominales larvaires, ici non fonctionnelles. L'appareil reproducteur peut présenter la particularité d'une union de la partie antérieure des gonades. Les œufs, de forme variée, sont munis d'un chorion fréquemment ornementé.

Les larves ont une forme peu différente de celle de l'imago et sont munies de ptérothèques. En fonction de leur écologie, les larves de Plécoptères présentent de grandes convergences morphologiques avec celles des Éphéméroptères (larves pétricoles, rhéophiles).

Les larves, toutes aquatiques, fréquentent les eaux froides, rapides et bien oxygénées. On les rencontre en grande abondance dans les torrents de montagne. Elles sont, en général, mauvaises nageuses et se tiennent accrochées aux pierres (pétricoles). Leur régime alimentaire est soit carné (elles sont alors prédatrices de larves d'Éphéméroptères, de Trichoptères, etc.), soit phytophage, soit enfin mixte. Le développement larvaire est généralement lent et peut s'étendre sur plusieurs années pour les espèces les plus grandes. La mue imaginale a souvent lieu la nuit et ne dure pas plus de cinq à six minutes. Les imagos, mauvais voiliers, s'éloignent peu de leurs lieux de naissance. Pour beaucoup d'espèces, la période d'activité est crépusculaire ou même nocturne. En dehors de cette période, les Plécoptères se tiennent immobiles, cachés dans les anfractuosités de rochers, ou sous les ponts, où ils se rassemblent en grand nombre. Les espèces Holognathes sont phytophages et les Systellognathes ne s'alimentent pas. Généralement, les imagos s'accouplent et pondent peu après leur apparition.

Les Plécoptères se répartissent en deux sous-ordres, en fonction de l'importance de leurs pièces buccales.

Les *Holognathes* présentent des mandibules bien développées ; ils comprennent trois familles : les Gripoptérigidés, les Némoridés et les Capriidés.

Les *Systellognathes*, à mandibules regressées et non fonctionnelles, comptent seulement deux familles, les Ptéronarcidés et les Perlidés.

Ordre des Embioptères

L'ordre des Embioptères, très homogène mais d'affinité incertaine, réunit environ cent quarante espèces de petits Insectes brunâtres, de forme allongée, ne dépassant pas 3 mm, à pièces buccales broyeuses du type orthoptéroïde et prognathes. Ils se caractérisent, en outre, par des antennes moniliformes comportant de quinze à trente-deux articles, par des tarses antérieurs dont le premier segment, hypertrophié, contient des glandes séricigènes, par des ailes presque homoneures et dépourvues de jugum, et aussi par la présence de cerques biarticulés et le plus souvent asymétriques. Seuls les mâles peuvent être ailés. Le développement est de type paurométabole. Les petits restent près de leur mère pendant les deux premiers stades juvéniles et, fait remarquable bien que non obligatoire, celle-ci leur distribue une nourriture triturée, composée de débris végétaux ou animaux. Au troisième stade, ils sont capables de sécréter de la soie et d'augmenter la toile coloniale. C'est en effet une autre particularité bionomique des Embioptères que de vivre groupés sous les fourreaux soyeux qu'ils construisent et disposent sur des substrats divers (pierres, troncs, branches, etc.). La soie est produite par les nombreuses unités glandulaires tarsales et tissée à l'aide de poils spécialisés. Les Embioptères circulent fort aisément à l'intérieur de ces fourreaux, aussi bien en avant qu'à reculons ; dans ce dernier cas, il semble que les cerques jouent le rôle d'antennes.

Lucifuges, les Embioptères sortent la nuit pour se nourrir, les mâles ailés quittant parfois la colonie et d'autres y arrivant, ou y faisant retour ; ce dernier point n'a toutefois pas encore été élucidé.

L'accouplement peut s'accomplir à l'extérieur des toiles ; le mâle saisit alors la tête de la femelle avec ses mandibules, puis joint les genitalia. La ponte a toujours lieu dans les galeries, sans précaution spéciale, les femelles étant dépourvues d'ovipositeur, et les œufs sont souvent recouverts de déjections.

Il existe des cas de parthénogenèse ; celle-ci peut être constante, comme chez *Gynembia tarsalis*, ou géographique comme pour *Haploembia solieri*. Les femelles vivent en général trois à quatre fois plus longtemps que les mâles. Des élevages ont montré que la vie collective n'était pas indispensable au bon développement de ces Insectes.

L'ordre des Embioptères comprend six familles, qui appartiennent principalement aux faunes tropicales, et ne sont représentées en Europe que dans la zone méditerranéenne et par le seul genre *Embia*.

Ordre des Notoptères

Les Notoptères sont des Insectes primitifs, paurométaboles avec une certaine tendance à l'amétabolie (les larves sont identiques aux adultes). Ils sont aptères, et leurs téguments sont très peu sclérifiés. Ils présentent des caractères intermédiaires entre ceux des Dictyoptères (pattes homonomes, à tarse de cinq articles, et cerques pluriarticulés) et ceux des Orthoptères (pièces buccales broyeuses, oviscapte bien développé, à six valves, et orifice génital femelle entre le huitième et le neuvième sternite).

Les Notoptères présentent quelques particularités biologiques. Leur preferendum thermique est très bas ; ils ne supportent pas les températures supérieures à 16 °C. L'accouplement et la ponte sont séparés par un très grand laps de temps, qui peut aller jusqu'à un an. Enfin, leur durée de vie, très longue pour un Insecte, peut atteindre sept ans.

L'ordre des Notoptères, très petit, est seulement représenté par une famille, celle des *Grylloblattidés*, et deux genres, qui comprennent une dizaine d'espèces, localisées aux régions montagneuses de l'hémisphère Nord.

▼ **Grylloblatta campodeiformis** *est une espèce fréquente dans les régions montagneuses et froides de l'hémisphère Nord.*

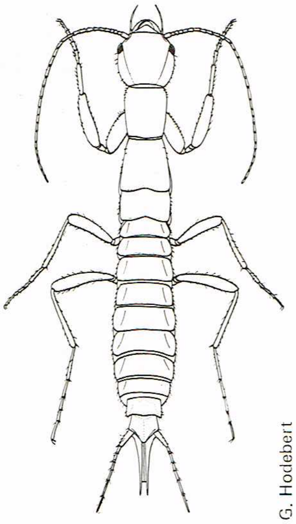

G. Hodebert

J. Carayon

▲ *Grâce à leur forme et à leur couleur, les Phasmoptères se confondent souvent avec le milieu où ils vivent. Ce phasme, ou « Insecte brindille », déploie ici ses ailes.*

Ordre des Phasmoptères

Les Phasmoptères, ou Cheleutoptera, sont des Insectes de grande taille, remarquables par l'étrangeté de leurs formes et leur homochromie, qui leur permet de se confondre avec le milieu dans lequel ils vivent. On distingue, chez ces Insectes, deux types principaux, les phasmes proprement dits, ou « Insectes brindilles », au corps allongé, et les phyllies, ou « Insectes feuilles », aplatis et foliacés. Ils sont tous phytophages et de mœurs nocturnes.

Les téguments sont en général lisses et glabres, et portent fréquemment des expansions (épines ou lobes) qui peuvent prendre un développement extraordinaire. Les Phasmoptères sont proches des Orthoptères, mais en diffèrent par des pattes postérieures non adaptées au saut, des tarses à cinq articles, et un organe copulateur réduit, qui rappelle plutôt celui des Dictyoptères.

La tête est légèrement prognathe, et les pièces buccales sont de type broyeur. Les antennes sont filiformes, de longueur variable et pluriarticulées. Les yeux sont généralement petits et les ocelles sont présents surtout chez les formes ailées.

Les trois segments thoraciques ont des proportions constantes et caractéristiques. Sur le prothorax, toujours court, à pronotum carré, débouchent, souvent aux angles antérieurs, deux orifices glandulaires; le mésothorax peut être de longueur variable, mais il est toujours plus long que les deux autres segments; le métathorax est soudé postérieurement au premier tergite abdominal en un segment appelé *segment médiaire*. Le thorax porte trois paires de pattes homonomes, longues et grêles. Les fémurs antérieurs présentent une base munie d'une encoche, de telle sorte que, lorsque les pattes sont étendues en avant, ils entourent la tête. Les tibias sont munis d'un organe auditif comparable à celui des Ensifères mais plus petit. Les tibias postérieurs portent une carène médiane, dont la forme est un caractère important pour la classification du groupe. Le tarse est composé de cinq articles, dont le dernier porte deux griffes et un arolium. Chez les formes ailées, les ailes antérieures, ou élytres, ou encore tegmina, sont plus courtes que les ailes postérieures (sauf chez les phyllies), et sont rarement fonctionnelles.

L'abdomen, long et frêle chez les phasmes et très élargi chez les phyllies, comporte dix segments bien visibles. Chez le mâle comme chez la femelle, son extrémité présente un dimorphisme sexuel marqué. Chez le mâle, le neuvième sternite, ou plaque sous-génitale, est de forme très variable, et le dixième segment a un tergite enveloppant et peut être muni ventralement d'un important crochet, ou vomer sous-anal. Les cerques peuvent être différenciés en un organe préhensile. Il n'y a pas de pénis proprement dit, mais un organe copulateur très asymétrique, formé de pièces membraneuses plus ou moins sclérifiées (type blattiptéroïde). Chez la femelle, il existe un organe préoperculaire, porté par le septième sternite, et une plaque, ou opercule, dans lequel se loge l'oviscapte, constitué de six valves.

Les glandes salivaires, composées chacune d'un grand lobe dorsal et d'un petit lobe latéral, s'étalent le long des deux premiers segments thoraciques. L'appareil digestif, simple, en forme de tube allongé, ne possède pas de gésier, et compte un grand nombre de tubes de Malpighi. Le début de l'intestin postérieur contient des bandes glandulaires.

L'appareil génital mâle est caractérisé par la forme allongée des testicules et des vésicules séminales, par un canal éjaculateur impair très court et par quelques glandes annexes tubulaires. Chez la femelle, les gaines ovigères, en nombre variable, sont espacées et libres; chacune est terminée par un ligament suspenseur très long. Le tractus génital comporte une bourse copulatrice située à la face dorsale de l'utérus, flanquée de chaque côté d'une spermathèque supplémentaire et de deux volumineuses glandes annexes.

Chez beaucoup d'espèces, la reproduction est parthénogénétique et thélytoque, les mâles étant rares (un pour mille femelles chez *Carausius morosus*) ou inconnus. Chez d'autres espèces, la reproduction sexuée et la parthénogenèse coexistent.

Lors de la reproduction sexuée, le mâle saisit la femelle au niveau de la plaque préoperculaire, à l'aide de la pince formée par le dixième tergite et le vomer. Il émet un petit

▶ *Un phasme,* **Bacillus rossius,** *venant de muer; l'exuvie est accrochée au-dessus de l'Insecte.*

A. Margiocco

spermatophore sphérique, qu'il introduit dans les voies femelles. L'accouplement est très long. Les œufs peuvent être pondus dans le sol, collés sur un support, ou encore projetés à une certaine distance. Ils sont munis d'un opercule et présentent des formes et une ornementation très variables suivant les espèces. Le développement embryonnaire est lent, avec ou sans diapause. A l'éclosion, l'opercule s'ouvre et laisse sortir une larve qui a déjà subi une mue à l'intérieur de l'œuf. Le développement postembryonnaire s'effectue en cinq à huit mues, auxquelles s'ajoute une mue supplémentaire chez les femelles. La larve ne diffère de l'imago que par la taille, le nombre d'articles antennaires, l'extrémité abdominale et le développement des ailes.

▼ *Par la forme aplatie de son corps et la nervation de ses élytres, la phyllie (Phasmoptère Phyllidé) rappelle une feuille.*

M. Bavestrelli - C. Bevilacqua - S. Prato

Mimétisme et homochromie. Les phasmes sont cités comme les exemples les plus remarquables d'Insectes protégés par une homotypie copiante. Ils présentent une ressemblance étonnante avec leur environnement, qu'il s'agisse des formes allongées (*Carausius, Baccilles,* etc.), qui miment les brindilles, ou des espèces au corps aplati, garni d'expansions foliacées *(Phyllium).* Ils se confondent d'autant mieux avec leur milieu qu'ils se déplacent très lentement et peuvent rester très longtemps immobiles. De plus, beaucoup de Phasmoptères peuvent changer de couleur, soit de façon définitive, une même espèce pouvant présenter une forme brune ou une forme verte, soit de façon réversible, et suivant un rythme nycthéméral; ainsi, *Carausius* revêt une coloration sombre la nuit et claire le jour. Lorsqu'il s'agit de changements irréversibles, ces modifications de couleur sont dues soit à une destruction, soit à une formation de pigments; lorsqu'il s'agit de changements réversibles, elles sont provoquées par des migrations de pigments à l'intérieur des cellules épidermiques; ces phénomènes sont sous le contrôle du système nerveux central.

L'*autotomie* d'un ou de plusieurs appendices est fréquente chez les phasmes; elle s'effectue dans une région bien localisée (articulation du trochanter et du fémur) où existent des dispositifs morphologiques spéciaux, tels que des amincissements de la cuticule et la présence de diaphragmes hémostatiques et d'un appareil déclencheur de l'amputation réflexe *(Carausius).* Les appendices autotomisés régénèrent chez les larves au cours des mues suivantes, mais jamais chez l'adulte, ils sont alors plus simples et présentent un nombre d'articles tarsiens réduits. Chez *Carausius,* on a pu voir repousser une patte à la place d'une antenne amputée.

Grâce à un élevage facile dû à leur grande rusticité, à une reproduction parthénogénétique et à leur grande taille, les phasmes fournissent un matériel de choix pour les expériences de greffes et d'ablations diverses.

Les Phasmoptères sont des Insectes des régions chaudes, répartis en deux groupes et sept familles.

Les *Aérolates* ont des tibias intermédiaires et postérieurs à carène médiane interne, divisée à l'apex et formant une aire triangulaire. Ils comprennent quatre familles, les Phyllidés, les Bacillidés, les Pseudophasmidés, et les Timémidés.

Les *Anaérolates* ont des tibias intermédiaires et postérieurs à carène interne, continue jusqu'à l'extrémité. Ils sont divisés en trois familles, les Lonchodidés, les Phasmidés et les Nécrosciidés.

Ordre des Orthoptères

Les Orthoptères forment un ordre très important, réunissant plus de quinze mille espèces, à répartition mondiale mais à prédominance intertropicale et dont certaines sont une menace constante et considérable pour les cultures.

La forme du corps est généralement allongée, la tête orthognathe ou parfois opisthognathe, l'appareil buccal broyeur, aux mandibules particulièrement robustes.

Les ailes, comparables à celles des Dictyoptères, sont tectiformes; les ailes antérieures sont étroites et tegminisées, les postérieures sont très larges avec un jugum repliable.

Les deux premières paires de pattes sont marcheuses, la troisième, plus longue, aux cuisses souvent très musclées et aux tibias terminés par des crampons, est conformée pour le saut. Les tarses comportent trois ou quatre articles, très rarement deux.

L'abdomen, subcylindrique, à dix segments visibles, est pourvu de cerques uniarticulés et se termine chez les femelles par un organe de ponte externe. Les Orthoptères présentent souvent des appareils stridulants et des organes auditifs particuliers. La fécondation s'effectue par l'intermédiaire d'un spermatophore et le développement postembryonnaire est de type paurométabole; l'Orthoptère nouveau-né passe d'abord par un court stade vermiforme pendant lequel, encore « emmailloté » dans sa cuticule embryonnaire, il se faufile hors du substrat où l'œuf a été déposé; arrivé à l'extérieur, il termine la première mue, libère ses pattes et devient un jeune du premier stade. Les ptérothèques, qui se développent au cours des stades successifs, effectuent un curieux

retournement lors des dernières mues juvéniles : les ailes antérieures venant s'appliquer sur les tergites et les postérieures les recouvrant; les jeunes sont dits alors anastréphoptères. La mue imaginale rétablit la position normale des ailes.

Les Orthoptères se subdivisent en deux sous-ordres bien distincts et d'égale importance : les Ensifères et les Caelifères.

Sous-ordre des Ensifères

Les Ensifères, plus connus sous les noms de grillons et de sauterelles, sont immédiatement reconnaissables à leurs longues antennes filiformes et à la tarière des femelles : l'ovipositeur étant développé en lame de sabre ou de faucille.

La tête est pourvue d'yeux hémisphériques plutôt petits, composés d'ommatidies eucônes, auxquels s'ajoutent trois ocelles chez les grillons et, souvent, deux seulement chez les sauterelles.

Le thorax est muni d'un pronotum robuste cachant les pleures. Les Ensifères sont typiquement ailés. Les élytres, dont la nervation et la conformation générale sont variables d'une famille à une autre, sont cependant toujours plus étroits et durcis que les ailes qu'ils recouvrent au repos.

A côté des espèces macroptères, coexistent de nombreuses formes brachy-, micro- et même aptères. Chez le mâle, une partie au moins de l'élytre est transformée en un appareil sonore. Les organes de l'audition se trouvent dans les tibias antérieurs, près de l'articulation avec le fémur.

La tarière, parfois très longue, se compose de six valves : deux supérieures, deux inférieures et deux internes; ces dernières sont très courtes et membraneuses, notamment chez les grillons.

Les grillons ont un tégument plutôt velu alors que les sauterelles sont à peu près glabres. La coloration paraît aussi très différente dans les deux groupes : les teintes vertes, extrêmement rares chez les premiers, sont presque une règle pour les dernières.

Les Ensifères constituent un phylum fort ancien; les formes du Primaire présentent beaucoup de traits communs avec les Ensifères actuels. Ces derniers vivent surtout en solitaires; certains sont nocturnes et hygrophiles, tandis que d'autres sont diurnes et héliophiles. Les formes souterraines, cavernicoles, déserticoles, semi-aquatiques, cespiticoles (qui vivent dans les touffes), arboricoles et myrmécophiles, etc., sont fréquentes et peuvent se rencontrer à l'intérieur d'une super-famille, comme le montrent les sauterelles gryllacridiennes qui présentent de nombreuses adaptations structurales en relation avec leurs modes de vie. Même parfaitement ailés, les Ensifères, sauf rares exceptions, volent peu et mal et ils se déplacent surtout en marchant.

Le régime alimentaire, chez les Ensifères, est également très varié avec, aux extrêmes, les phytophages stricts et les carnassiers, les uns et les autres pouvant là encore coexister dans un même groupe, comme c'est le cas chez les Tettigonioïdes; des structures adéquates comme les épines-broches aux pattes antérieures des Listroscelines distinguent souvent les prédateurs.

Cette diversité se retrouve dans la conformation des appareils stridulants, quoique l'on puisse classer ces derniers en deux catégories : le type *fémuro-abdominal*, propre aux Gryllacridides, comprenant une crête stridulatoire fémorale venant frotter contre les denticules des urotergites II ou III, et chez les autres Ensifères, le type *élytro-élytral* où la nervure spécialisée d'un élytre vient jouer sur une partie non moins élaborée de l'autre. Les grillons ont les deux élytres pareillement modifiés tandis que chez les sauterelles, le gauche porte la crête stridulatoire qui fait vibrer le miroir différencié sur le droit. D'une façon très générale et hormis chez les Gryllacridides, l'appareil sonore n'est bien développé que chez les mâles; cependant certaines femelles Tettigonioïdes peuvent émettre des sons, plus faibles, à l'aide de dispositifs différents, comme les serratules du champ anal de l'élytre droit par exemple. Exceptionnellement, chez les éphippigères, mâles et femelles possèdent des élytres de conformation identique et produisent des stridulations équivalentes. Les éphippigères utilisent leur appareil sonore le jour mais la plupart des Ensifères stridulent la nuit.

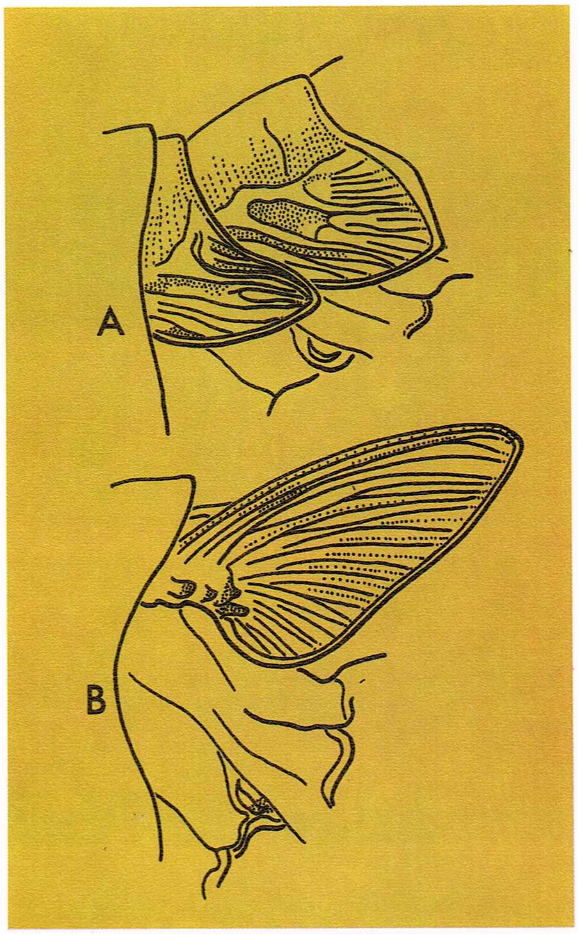

J. Boudinot

◀ ***Positions relatives des fourreaux alaires, au cours du développement dit anastréphoptère des Orthoptères : A, durant les premiers stades; B, durant les deux derniers stades juvéniles (d'après Wintrebert).***

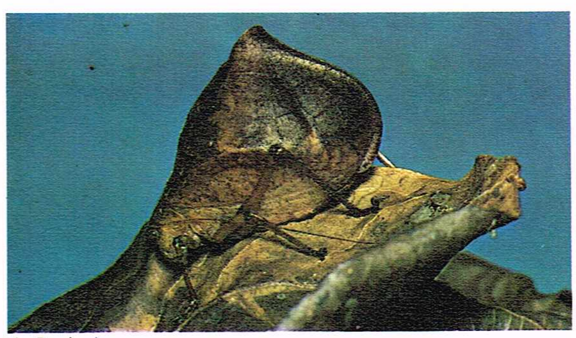

M. Boulard

◀ **Corycoides abruptus** ***est un Ensifère d'Afrique centrale qui ressemble d'une façon extraordinaire à une feuille morte.***

▼ ***Une sauterelle carnassière,*** **Pholidoptera schmidti (P. chabrieri),** ***ayant attaqué un Homoptère et le mangeant.***

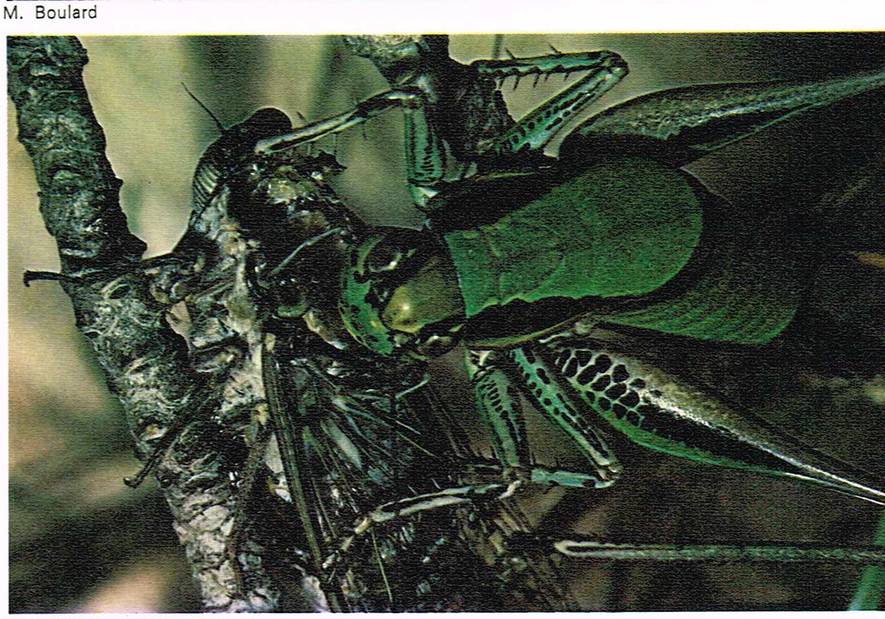

M. Boulard

Cette activité, si particulière, qui exerce un pouvoir attractif sur les femelles et exprime le besoin sexuel, ne peut s'effectuer pleinement que dans des conditions ambiantes définies, où la température et le taux d'humidité tiennent une place importante. Des mouvements de balayage effectués par les pattes antérieures permettent à ces Insectes, en orientant leurs tympans tibiaux, de localiser les sons. La stridulation est le premier acte qui précède la rencontre des sexes et on a distingué chez les mâles plusieurs sortes de chants, que l'on peut rapporter schématiquement à trois types principaux : « l'appel » des mâles sexuellement mûrs, « la cour », qui s'entend quand la femelle arrive dans le champ visuel du mâle, et la stridulation de rivalité, intervenant lorsque deux mâles sont au voisinage l'un de l'autre. A ces trois types il faut ajouter, pour certaines espèces, un chant de « triomphe » précédant immédiatement la copulation et aussi, pour bon nombre de sauterelles, ce que l'on peut appeler la stridulation de « consentement », émise pendant une période très brève, lorsque la femelle est prête à accepter le mâle. Il existe parfois chez les mâles des genres *Oecanthus* et *Troglophilus*, par exemple, des glandes dorsales analogues à celles des blattes, qui sécrètent des substances aphrodisiaques pour les femelles.

L'accouplement se pratique selon deux modes préférentiels : le chevauchement, le mâle se glissant sous la femelle (courtilières et grillons) et l'opposition, où le mâle saisit l'ovipositeur de la femelle, sa tête en regardant l'extrémité, puis joint son apex abdominal à celui de sa partenaire. En général les Ensifères copulent plusieurs fois et les grillons davantage que les sauterelles.

La ponte s'effectue dans le sol, dans ou sur les plantes, au moyen de la tarière amenée dans une position perpendiculaire au substrat, ou bien encore — chez les courtilières et chez beaucoup de grillons —, les œufs sont déposés dans des terriers. S'agissant de ponte endophyte, les œufs peuvent être introduits isolément ou en groupe dans des ramilles ou même des branches *(Pholidoptera, Ephippiger, Oecanthus)* mais de nombreuses Phanéroptérines insèrent leur ponte, œuf par œuf, dans l'épaisseur même des feuilles alors attaquées par la tranche du limbe ; les *Tylopsis* coincent leurs œufs sur les Graminées, entre la tige et la gaine foliaire. D'autres, tels les *Microcentrum* américains et certaines espèces africaines, se contentent de coller les œufs sur des brindilles. Le cheminement des œufs se fait par protraction et par rétraction des valves moyennes et grâce à des structures de surface complémentaires — bien mises en évidence par Y. Leroy —, portées, les unes par la face interne des valves (ce sont alors de multiples excroissances cuticulaires pluridentées orientées vers l'arrière), les autres par le chorion (dans ce cas, des microdépressions donnent prise aux excroissances précédentes et empêchent tout retour en arrière). Les œufs d'Ensifères sont des ovoïdes plus ou moins allongés et parfois aplatis (Phanéroptérines) ; le nombre des micropyles varie de deux à une dizaine. La quantité pondue, variable selon les espèces, paraît en moyenne plus élevée chez les grillons (environ cinq cent cinquante) que chez les sauterelles (cent quatre-vingts). La parthénogenèse existe, mais elle est rare et d'ordre géographique ; les cas les mieux connus sont, parmi les sauterelles, celui de *Saga pedo,* agame dans le sud de la France et bisexué en Grèce et, parmi les grillons, celui des *Myrmecophila* dont les mâles, rarissimes en Europe centrale, se rencontrent fréquemment dans le Sud. La durée d'incubation est fonction des conditions extérieures, en particulier de la température. La plupart des Ensifères des régions tempérées ont un cycle annuel à une génération et présentent une diapause embryonnaire hivernale.

L'éclosion de l'œuf se fait le long d'une ligne de moindre résistance du chorion et, dans bien des cas, la rupture est facilitée par une minuscule lame dentée, placée sur le front des jeunes sauterelles et des courtilières, ou sur le labre des petits grillons. Le nombre des mues de croissance varie de cinq à huit chez les premières et peut atteindre ou dépasser la dizaine pour les seconds.

Les Ensifères comprennent quatre super-familles : les Prophalangopsoidea, les Tettigonioidea, les Gryllacridoidea et les Grylloidea.

Super-famille des Prophalangopsoidea

Les Prophalangopsoidea sont les plus archaïques des Orthoptères vivants. On ne connaît que deux genres actuels pour une dizaine de fossiles datant principalement du Jurassique. Ils ont trois ou quatre articles aux tarses et représentent sans doute un rameau relicte très proche de la souche qui fut l'origine des autres Ensifères.

Super-famille des Gryllacridoidea

Les Gryllacridoidea se reconnaissent principalement à leurs tarses à quatre articles, à leurs cerques longs et flexibles, à l'absence de système stridulant sur leurs élytres et, corrélativement dans ce dernier cas, de tympans tibiaux. Cette super-famille, qui rassemble environ mille espèces essentiellement intertropicales, n'est représentée en Europe que par quelques formes cavernicoles. Elle comprend six familles dont trois principales.

Les **Gryllacrididae** présentent des particularités biologiques dignes d'intérêt : ces redoutables sauterelles carnassières (elles sont insectivores) ont des mandibules saillant en faucille, parfois hyper-développées comme chez les *Schizapterus* malgaches. Arboricoles et nocturnes, elles capturent et maintiennent leurs proies avec leurs pattes antérieures qui sont armées de fortes épines. Beaucoup se réfugient le jour dans des anfractuosités naturelles ou qu'elles aménagent à l'aide de leurs pièces buccales. Certains *Gryllacris* de Java et un *Camptonotus* nord-américain construisent des abris en assemblant des fragments de feuilles enroulés qu'ils fixent avec des fils de soie salivaire : ces comportements sont à peu près uniques chez les Orthoptères.

A. Margiocco

A. Margiocco

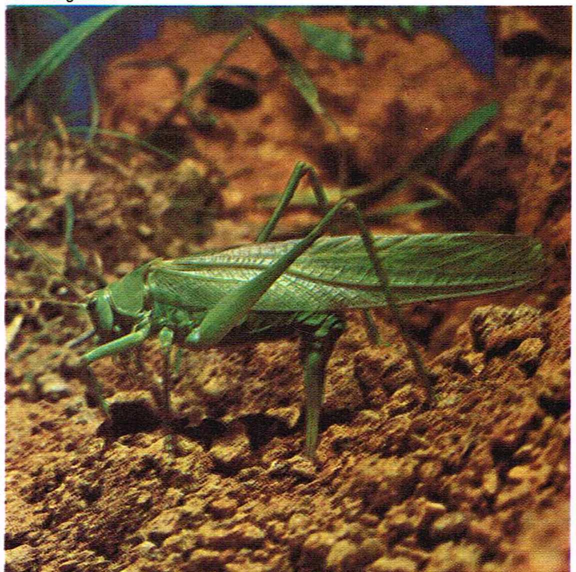

▶ *L'ovipositeur en forme de lame de serpe de* Phaneroptera nana *(à gauche) est bien adapté au dépôt des œufs dans l'épaisseur des feuilles. La sauterelle verte,* Tettigonia viridissima *(à droite), dépose ses œufs dans le sol; on peut remarquer la forme et la position de la tarière.*

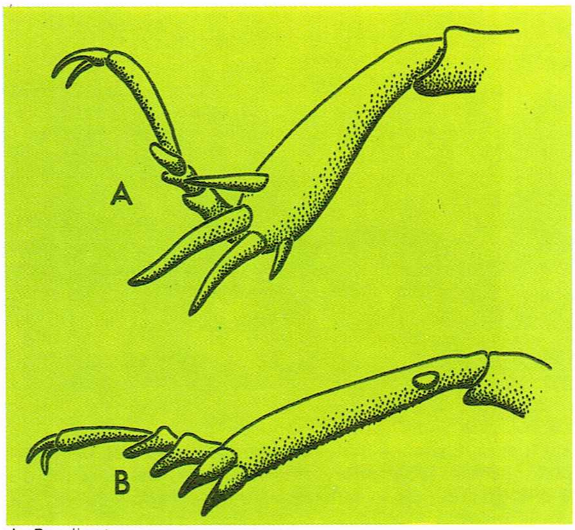

J. Boudinot

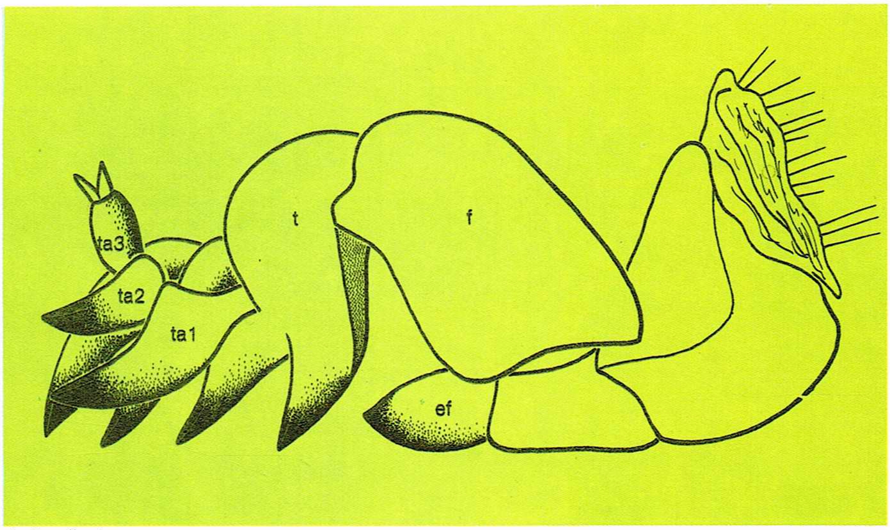

J. Boudinot

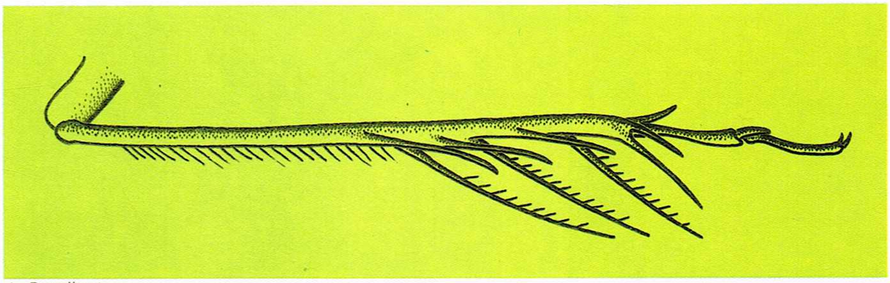

J. Boudinot

La famille des **Raphidophoridae** ne comprend que des espèces aptères, le plus souvent troglobies et dont les appendices apparaissent démesurés ; les palpes maxillaires comptent même six articles chez les *Dolichopoda*, ce qui est tout à fait exceptionnel. Les *Troglophilus* d'Europe centrale existaient autrefois dans nos régions comme l'attestent des gravures magdaléniennes découvertes dans l'Ariège.

La dernière famille présentée ici est celle des **Stenopelmatidae**, qui comprend de remarquables sauterelles subaveugles, souvent aptères, au corps épais, et dont la plupart vivent dans des galeries souterraines qu'elles creusent à l'aide de leurs tibias antérieurs grandement modifiés à cet effet : ils sont courts et larges, et terminés par des crocs puissants. Les *Stenopelmatus* d'Amérique centrale et les *Oryctopus* aux Indes sont les mieux connus.

Super-famille des Tettigonioidea

Les Tettigonioidea diffèrent des groupes précédents par la présence d'un appareil stridulant sur les élytres, de tympans sur les tibias antérieurs et par leurs cerques courts et non flexibles jouant plus ou moins le rôle de pinces lors de l'accouplement. Ce groupe très important, comprenant sept mille cinq cents espèces réparties dans le monde entier, est divisé en onze familles dont six sont présentées ici.

Celle des **Ephippigeridae** réunit des individus lourds et ventrus, de couleurs souvent vives, à pattes postérieures faibles, tous brachyptères ou même aptères. Quand ils existent, les élytres, chez les mâles et les femelles, sont vestigiaux et plus ou moins cachés sous le pronotum.

L'ovipositeur est développé en forme de sabre chez les *Ephippigerinae*, assez réduit chez les *Heterodinae*. Terricoles ou arbusticoles, les Ephippigeridae se nourrissent de feuilles, de jeunes pousses diverses, voire de fruits ; certaines espèces peuvent être nuisibles, en particulier pour la vigne (différentes espèces d'*Ephippiger*). Les *Heterodinae* se rencontrent en Afrique, les *Eugaster* dans le Nord et les *Cosmoderus* dans la zone intertropicale, les uns et les autres présentent un pronotum très caractéristique, développé en un fort bouclier bordé d'épines impressionnantes ; les *Eugaster* sont réputés pour leur autohémorrhée, saignée réflexe jaillissant d'entre les articulations de la hanche et du trochanter ; les *Cosmoderus* quant à eux portent un éperon céphalique entre la base des antennes.

Au contraire des Ephippigeridae, les **Phaneropteridae**, qui ont pour type le *Phaneroptera falcata* européen, sont de gracieux Insectes caractérisés par leurs tarses I et II lisses sur les côtés et leurs ailes postérieures qui dépassent les ailes antérieures. Chez les espèces exotiques, comme *Pycnopalpa*, ces dernières présentent souvent des taches qui ressemblent très fortement à des moisissures et sont parfois homomorphes à des feuilles que des chenilles auraient entamées. Remarquables entre toutes, certaines espèces sont douées d'un étrange mimétisme : ainsi les jeunes *Leptoderes* ressemblent très étroitement, d'abord à des cicindèles du genre *Collyris* puis,

▲ ***Quelques types particuliers de pattes d'Ensifères. En haut à gauche, A, patte antérieure fouisseuse portant de forts dactyles tibiaux, de* Stenopelmatus talpa. *B, patte antérieure à peine modifiée des* Brachytrypes *(d'après Chopard). En haut à droite, patte antérieure très adaptée au fouissement de la courtilière : f, fémur ; ef, éperon fémoral ; t, tibia muni de dactyles puissants ; ta 1, ta 2, ta 3, les trois articles du tarse également transformés pour creuser (schéma original). En bas, tibia de la patte postérieure du grillon aquatique,* Hydropedecticus vitiensis *(d'après Chopard).***

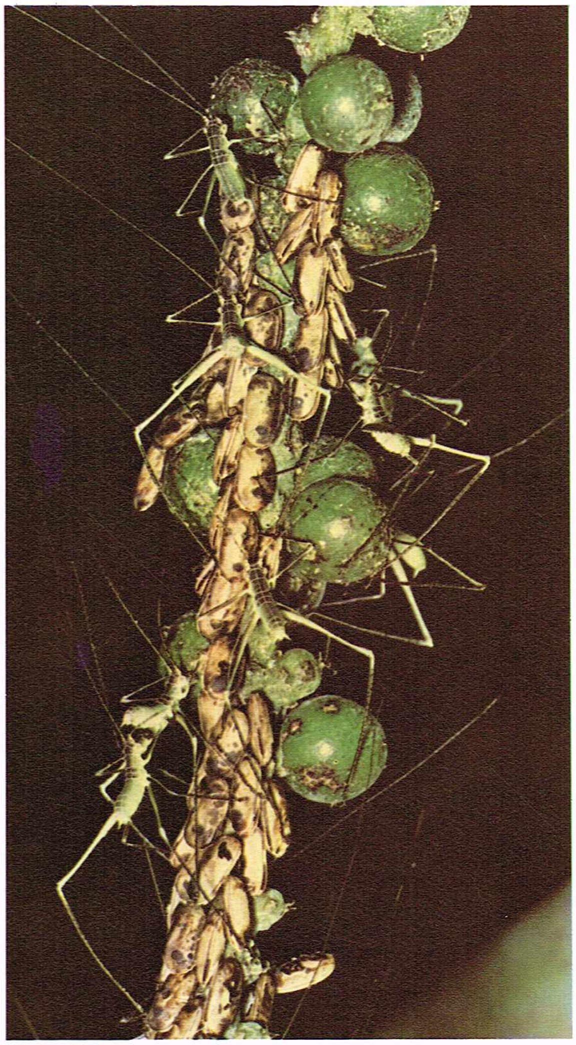

M. Boulard

◀ ***Jeunes phanéroptères d'Afrique centrale venant d'éclore ; la mère a collé ses œufs sur la hampe d'une inflorescence de poivrier, empêchant ainsi la nouaison de la plupart des baies.***

M. Boulard

▲ **Cosmoderus erinaceus,** *gros Orthoptère de la famille des Ephippigeridae très remarquable par son pronotum bordé d'épines impressionnantes et par sa corne frontale; il vit en Afrique tropicale.*

plus âgés, à d'autres du genre *Tricondyla*, tandis que les adultes sont phyllomorphes.

La famille des **Pseudophyllidae,** également riche en formes mimétiques, diffère de la précédente par la possession de tarses sillonnés et d'élytres plus longs que les ailes. Les organes auditifs s'ouvrent à l'extérieur par des fentes tibiales. Certaines de ces sauterelles, les *Sathrophyllia,* se confondent avec les écorces licheniques et d'autres, surtout les *Pterochrozes* des zones tropicales de l'Amérique du Sud, portent des élytres en forme de feuilles plus ou moins rongées par des phytophages, et souvent envahis par des Champignons.

Chez les **Mecopodidae** les tympans sont entièrement visibles. On trouve dans cette famille les plus grandes sauterelles, les *Pseudophyllanax giganteum* de Nouvelle-Calédonie dont les femelles atteignent 15 cm de longueur et une largeur de 5 cm aux élytres. Les mâles, nettement plus petits, sont dotés de l'appareil stridulant classique mais les femelles, dont la nervation médiane des ailes postérieures est serratulée (c'est-à-dire munie de petites dents non articulées), et le champ médio-cubital transformé en miroir, sont capables de cliqueter. Prennent place aussi parmi les Mecopodidae des espèces étranges, comme *Acridoxena hewaniana* et *Corycoides abruptus,* tous deux d'Afrique centrale, vivant dans la litière forestière où ils se confondent avec les feuilles mortes dont ils empruntent la couleur, mais aussi l'aspect grâce à leurs élytres déchiquetés, recroquevillés, ou enroulés.

Les familles des **Conocephalidae** et des **Tettigoniidae** présentent en commun des formes allongées, non mimétiques mais souvent homochromes, pourvues de fentes tibiales auditives et diffèrent l'une de l'autre par l'épine que seuls les Tettigoniidae possèdent aux tibias antérieurs. L'espèce française représentative des Conocephalidae est l'*Homocoryphus nitidulus,* bel Insecte de 5 cm, graminicole et remarquable dans l'application qu'il met à passer inaperçu en s'appliquant sur les tiges ou en se cachant derrière elles. Les *Listrocelinae* tropicaux, déjà cités, appartiennent à ce groupe. Les Tettigoniidae se divisent en trois sous-familles comprenant un grand nombre d'espèces répandues à travers le monde. On peut citer pour la France la sauterelle verte, *Tettigonia viridissima,* espèce arboricole qui pond dans le sol; parmi les *Decticinae, Decticus albifrons,* le dectique, et *Pholidoptera schmidti,* le pholidoptère, qui préfèrent les broussailles, et parmi les *Saginae, Saga pedo,* la magicienne dentelée, aptère, qui vit à terre ou dans les buissons et est considérée comme le plus grand Insecte européen (10 cm).

Super-famille des Grylloidea

Les Grylloidea regroupent quatre familles principales, caractérisées par leurs tarses triarticulés, le dispositif stridulatoire qui occupe chez le mâle toute la partie dorsale des élytres et leurs cerques longs et souples.

Les **Gryllidae** comptent mille cinq cents espèces à répartition mondiale. Dans son ensemble, leur morphologie est celle, bien connue, du grillon des champs, *Gryllus campestris.* La tête globuleuse prend parfois des proportions gigantesques chez *Brachytrypes megacephalus* ou se prolonge d'une mitre chez *Sciobia ambiqua;* ces deux espèces sont nord-africaines; une seule nervure divise le miroir des élytres et la teinte dominante est le brun-noir.

La plupart des grillons vivent dans des terriers qu'ils creusent avec leurs pattes antérieures, d'ailleurs peu modifiées. Pendant les nuits chaudes et orageuses, ils émettent des sons intenses. Le grillon champêtre et le grillon géant, *Brachytrypes membranaceus,* qui atteint 55 mm et vit en Afrique tropicale, stridulent sur le seuil de leur demeure faite d'un couloir donnant accès à une logette d'habitation. Mais c'est dans les maisons qu'on entend le chant plaisant de l'espèce domestique *Achaeta domestica.* Certains grillons asiatiques, aux stridulations très mélodieuses, occupent une place importante dans la poésie orientale. *Homoegryllus japonicus,* le plus apprécié en Chine comme au Japon, est appelé « clochette d'or » et on a construit pour lui de jolies petites cages en jade dont certaines sont de véritables œuvres d'art. Dans ces pays, on élève également des « grillons de combat ». A la suite d'un dressage approprié, les mâles, notamment ceux d'*Achaeta domestica,* peuvent devenir très batailleurs et se livrer à des combats acharnés, suivis avec passion, et objets d'enjeux parfois considérables. Un grillon fameux, surnommé « Gengis Khan », aurait rapporté près de 400 000 F à son propriétaire.

Les grillons se sont adaptés à de nombreux types d'habitats. On trouve, en Afrique, des espèces troglobies comme *Speluncacris lucifuga* et *S. microps* dont les pattes sont longues et les yeux réduits. Certains *Bothriophylax* d'Asie centrale sont étroitement inféodés aux terriers des Rongeurs et ne peuvent vivre plus de quelques heures à l'extérieur. Un grillon des îles Fidji, *Hydropedeticus vitiensis,* se déplace d'habitude sur l'eau des torrents, à la manière des Hémiptères du genre *Gerris;* d'autres affectionnent les rivages marins dans la zone de déferlement des vagues; c'est le cas pour *Mogoplistes squamiger* des îles atlantiques et méditerranéennes.

J. Boudinot

▶ **Pseudophyllanax giganteum,** *la plus grande sauterelle du monde, mesure 15 cm de longueur et ses élytres atteignent 5 cm de largeur; cette espèce est originaire de la Nouvelle-Calédonie.*

A. Margiocco

La famille des **Myrmecophilidae** groupe des grillons minuscules ne dépassant pas 2 à 4 mm, de couleur sombre, aptères, aux pattes postérieures puissantes et qui vivent en commensaux des fourmis dans les régions tempérées ou subtropicales.

Les **Gryllotalpidae**, communément appelés courtilières et, par les jardiniers, « taupes-grillons », sont parfaitement adaptés à la vie souterraine grâce à leur pronotum très épais développé en bouclier et surtout à leurs pattes antérieures fouisseuses, dont la forme générale évoque curieusement celle des taupes. L'appareil stridulant n'a pas de miroir et se présente chez les individus des deux sexes, quoique moins développé chez les femelles. *Gryllotalpa gryllotalpa*, la courtilière européenne, fore des galeries menant au nid où sont déposés deux à trois cents gros œufs entourés de terre mêlée à des fibres végétales, le tout pouvant avoir la grosseur du poing et situé à environ 30 cm de profondeur. Partant du nid, d'autres galeries se ramifient, pour venir parallèlement à la surface du sol : elles permettent à l'Insecte de rechercher sa nourriture (vers, larves, diverses petites racines ou tubercules). C'est dans son terrier principal et à une place précise, la base de l'embouchure évasée et divisée par un étroit pont de terre, que l'Insecte stridule, la tête dirigée vers le fond du terrier. Tout son corps tremble sous l'intense vibration des élytres qui produisent un roulement puissant, grave et continu. Mâles et femelles volent durant les soirées particulièrement chaudes et orageuses, la pariade s'accomplissant en juin et juillet. Le genre *Gryllotalpa* se retrouve partout, en espèces propres à un continent, ou cosmopolites comme *G. africana*.

Les **Oecanthidae** se composent de frêles grillons arboricoles, phytophages ou carnassiers, de taille moyenne, fusiformes, au tégument peu sclérifié, et toujours ailés. Le miroir de l'appareil sonore est cloisonné par trois ou quatre nervures obliques; pour striduler, l'Insecte relève ses élytres dans une position verticale, perpendiculaire au corps, et fait entendre un chant modulé très agréable, tel celui du grillon d'Italie, *Oecanthus pellucens*. En août et septembre, les femelles pondent dans les tiges sèches, après avoir préparé les places d'insertion de la tarière par incisions mandibulaires. Les Oecanthidae ont une répartition mondiale, à l'exception des pays froids.

Sous-ordre des Caelifères

Les Caelifères constituent le second sous-ordre des Orthoptères. Ce sont les criquets, que l'on distingue d'emblée des sauterelles à leurs courtes antennes, celles-ci ne dépassant pas ou peu la longueur de la tête et du pronotum réunis. En outre, les femelles ont un ovipositeur toujours très court, en forme de coin, jamais en tarière; la ponte a presque toujours lieu dans le sol et en oothèque. On ne connaît aucun criquet fossile avant le Tertiaire, mais l'étude de la répartition actuelle du groupe semble indiquer une origine gondwanienne. Les Caelifères, dont la classification subit actuellement des révisions profondes, comprennent sept super-familles; les Tridactyloidea, les Tetrigoidea, les Proscopioidea, les Eumastacoidea, les Trigonopterygoidea, les Pneumoroidea et les Acridoidea (d'après Descamps et Dirsh). Ces super-familles d'importance numérique très inégale ne seront ici qu'évoquées pour la plupart d'entre elles.

Super-famille des Tridactyloidea

Les Tridactyloidea se caractérisent par la présence de trois ou quatre forts dactyles alignés sur la fin des tibias antérieurs qui sont plus ou moins élargis (subfouisseurs ou fouisseurs) et par la réduction des tarses qui ne comptent que deux articles aux deux premières paires de pattes, et un ou même pas du tout à la dernière. Il n'y a ni appareil stridulant, ni organe auditif. Le groupe se compose de deux familles.

Les **Tridactylidae**, petits Caelifères ne dépassant pas 1 cm, se distinguent par leur thorax bombé, leurs pattes saltatoires extraordinairement puissantes qui permettent à *Tridactylus variegatus* (5 mm), la seule espèce française, de faire des bonds supérieurs à 1 m. On remarque aussi le remplacement des tarses postérieurs par de longues lamelles utilisées lors des déplacements sous l'eau ou dans le sable. Ces Insectes vivent en effet dans les zones sablo-marécageuses des deltas ou le long des cours d'eau des régions chaudes et tempérées, où ils creusent des galeries. Ils sont représentés par trois genres et cinquante-cinq espèces. Leurs ailes sont bien développées.

Les **Cylindrachaetidae** ont l'aspect de courtilières; allongés mais aptères, ils sont aux Caelifères ce que sont ces dernières aux Ensifères. Ils ne comptent que six espèces pour deux genres, et occupent les mêmes biotopes mais dans l'aire circumantarctique.

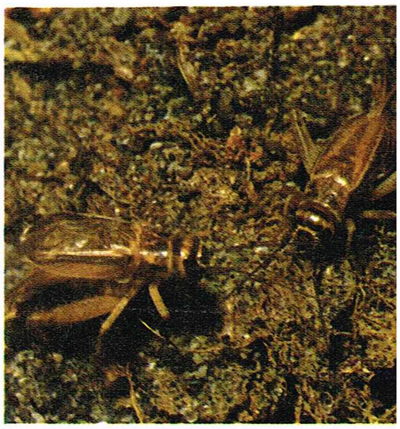

A. Margiocco

▲ *Un couple de grillons domestiques* **(Achaeta domestica)** *; le mâle, situé à gauche, est en train de striduler.*

▲◄ *Un couple de grillons champêtres* **(Gryllus campestris)** *; la nervation des élytres du mâle est différente de celle de la femelle; cette dernière se trouve à l'entrée du terrier.*

▼ *A gauche, une femelle d'*Acryptera fusca*, criquet commun dans les prairies montagnardes d'Europe. A droite,* Vossia*, qui vit de préférence sur les feuilles de cacaoyer dont il a la couleur.*

C. Bevilacqua

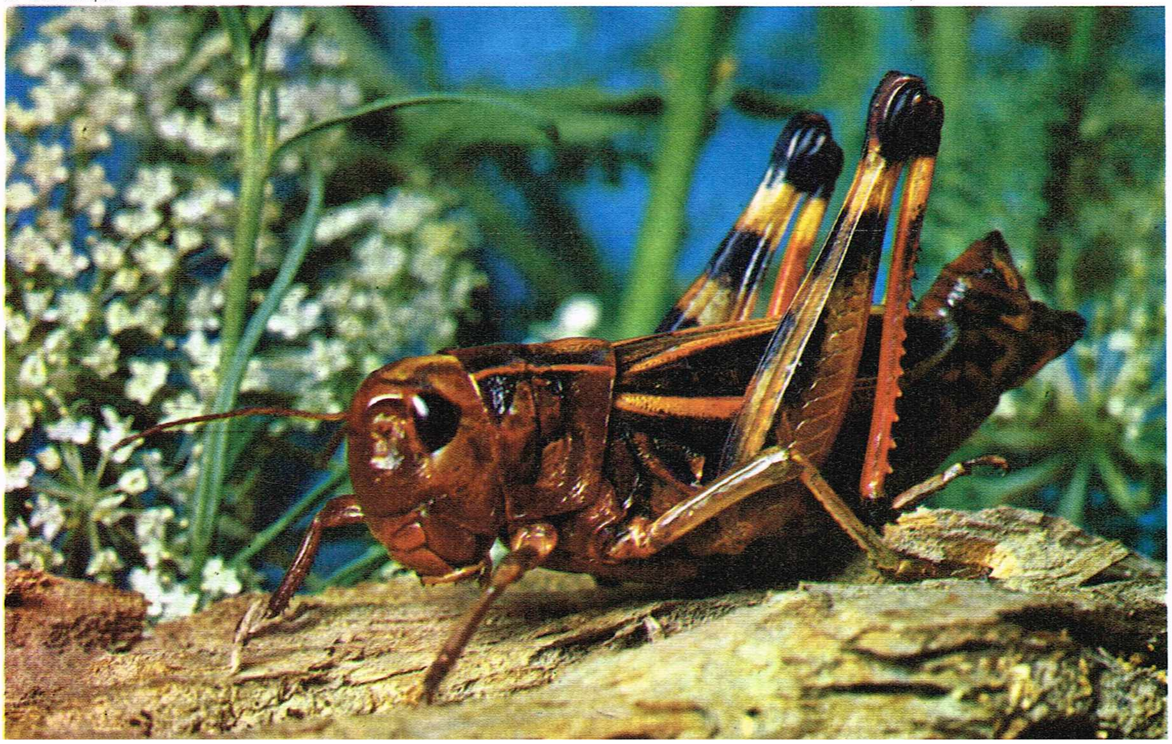

M. Boulard

M. Boulard

▲ *Le développement hypertélique du pronotum est l'un des principaux caractères distinctifs des criquets Tetrigoidea.*

▲▶ Acanthoxia gladiator *est un criquet de forme très allongée, qui vit dans les savanes africaines.*

▼ *Au repos, les Eumastacides prennent une position typique avec leurs pattes postérieures en arbalète; ici un* Chromomastax *d'Afrique orientale.*

Super-famille des Tetrigoidea

Les Tetrigoidea, ou tétrix, se reconnaissent à leur pronotum souvent hypertélique qui recouvre et dépasse la partie dorsale du corps et s'orne parfois de lames ou d'épines,et à leur prosternum dilaté en mentonnière. Les élytres sont réduits à des lobes latéraux; en contrepartie les ailes, très longues, dépassent largement le corps. Les tétrix sont terricoles et corticoles et aiment particulièrement les endroits humides; certains tétrix orientaux comme les représentants de la sous-famille des *Scelimenae* peuvent sauter sur l'eau ou se laisser tomber au fond et y rester un temps assez long. Ils se nourrissent des Algues microscopiques qui tapissent les troncs ou qui se développent dans la boue. Les cent genres connus appartiennent aux faunes tropicales et sont réunis en une seule famille, celle des Tetrigidae.

Super-famille des Proscopioidea

Les Proscopioidea, également formés d'une seule famille, sont de taille plutôt grande, bacilliformes, aptères ou microptères. Ils se distinguent à leur tête opisthognathe aux antennes très courtes ne comprenant que six ou sept articles, et à leur long pronotum tubulaire. Les fémurs postérieurs, grêles, ne permettent que de faibles sauts. Les Proscopiidae ne possèdent pas d'appareil stridulant ni d'organe auditif. Ils vivent sur les buissons des lisières et des clairières du sud de l'Amérique. Quatorze genres sont connus.

Super-famille des Eumastacoidea

Les Eumastacoidea ont une répartition pantropicale avec un centre de dispersion situé probablement dans l'ancienne région sinomalaise. Ce sont des criquets de taille moyenne, brillamment colorés, aux ailes réduites ou nulles, et fort remarquables par la position de leurs pattes saltatoires : celles-ci sont écartées, très obliques par rapport au corps et armées en arbalète. Leur détente propulse l'Insecte subhorizontalement, à des distances supérieures à 2 m. Les Eumastacoïdes sont dépourvus d'appareil stridulant et d'organe auditif. Ils possèdent une petite proéminence subconique sur l'un des articles distaux des antennes; celles-ci ont de huit à vingt-cinq articles. Autre particularité, les stigmates abdominaux s'ouvrent sur la membrane tergo-sternale. De nombreux Eumastacoïdes se nourrissent principalement de fougères, ce qui mérite d'être souligné pour deux raisons : d'une part, il semble que ces plantes n'abritent que peu d'Insectes; d'autre part, cette relation témoigne, avec d'autres observations, notamment celle des grandes différences existant entre les diverses faunes de criquets Eumastacidiens continentales, de la très grande ancienneté de ces Orthoptères. L'oothèque, déposée dans le sol ou la litière, a la forme d'une nacelle et contient généralement une seule couche d'œufs. D'après Descamps, cent quatre-vingt-huit genres répartis en sept familles ont été dénombrés.

M. Boulard

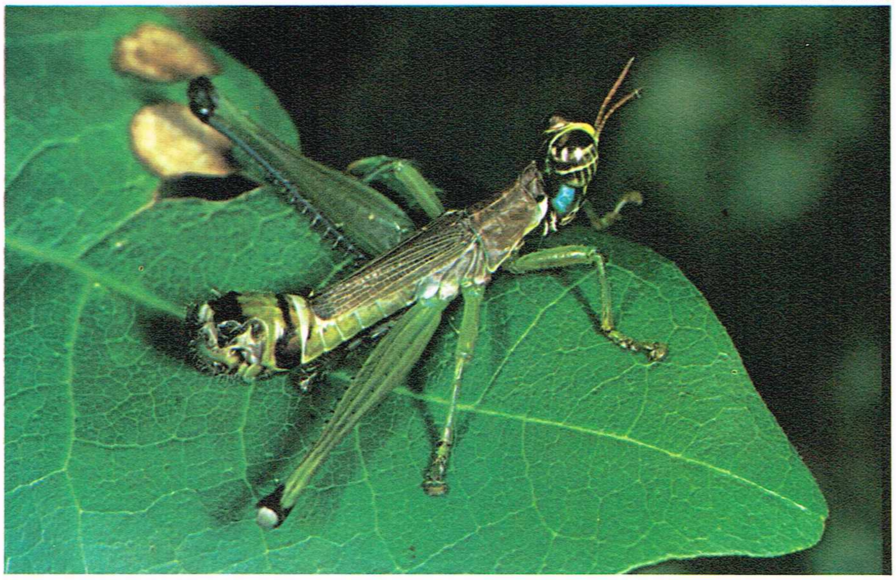

M. Boulard

Super-famille des Pneumoroidea

Les Pneumoroidea, que caractérise un système stridulant composé d'une crête serrulée à la face interne des fémurs postérieurs et d'une série de rides transverses sur les troisièmes latérotergites abdominaux, sont fort curieusement dépourvus d'organes tympanaux. Les pattes postérieures sont à peine sauteuses. Huit genres répartis en trois familles habitent le centre et le nord de l'Amérique, ainsi que l'est et le sud de l'Afrique.

Super-famille des Acridoidea

Les Acridoidea forment le groupe le plus important par le nombre des espèces (sept mille) et par l'intérêt économique que représentent certaines d'entre elles (criquets migrateurs). Ce sont des Caelifères de taille moyenne, rarement inférieure à 10 mm, ou grande, atteignant 200 mm d'envergure chez certaines espèces néotropicales. Leur habitus est variable, non seulement dans les couleurs, mais aussi dans la forme qui peut être harmonieuse *(Cyrtacanthacris)*, longiligne *(Acrida, Acanthoxa,* et *Truxalis)*, trapue *(Stenobothrus* et *Taeniophora)* ou bien encore très ramassée *(Batrachidacris* et *Bufonocarodes)*. En outre, chez un petit nombre d'espèces, les formes et les couleurs peuvent présenter des séquences intraspécifiques correspondant à différents états étho-physiologiques. La tête robuste, subovoïde ou subconique, est généralement orthognathe; les yeux sont composés, ovalaires, tachetés ou striés, de bonne dimension, et il y a presque toujours trois ocelles. Les antennes, sétiformes ou moniliformes, souvent aplaties, prennent parfois à leur extrémité l'aspect d'une massue, comme c'est le cas chez *Gomphocerus*.

Le pronotum, bien développé, est typiquement caréné médio- et latéro-longitudinalement. Chez la plupart des espèces, les deux paires d'ailes ont une conformation normale, mais on observe tous les stades de régression jusqu'à l'aptérisme total, surtout chez les espèces appartenant aux faunes insulaires, forestières ou d'altitude. Beaucoup d'espèces ont les élytres homochromes comme le corps tandis que les ailes membraneuses sont au contraire richement colorées; pour certains criquets, ces teintes vives n'apparaissent qu'avec la maturité sexuelle. Les tarses trisegmentés se terminent par deux griffes qui encadrent un arolium plus développé chez les espèces arboricoles. Sur les côtés du premier urite se trouvent les tympans, parfaitement conformés, bien que les espèces aptères ou microptères en soient dépourvues, totalement ou presque. La plaque sous-génitale est constituée par le neuvième sternite chez le mâle, et chez la

femelle, par le huitième auquel fait suite l'ovipositeur composé de six valves : deux valves supérieures et deux valves inférieures, fortes et pointues, et deux valves internes, faibles et rudimentaires. Enfin, les cerques, articulés sur un petit lobe basal, possèdent des formes particulières pouvant être utilisées pour la systématique.

L'une des caractéristiques originales des Acridoidea tient aux mécanismes de stridulation dont bon nombre d'espèces sont pourvues. Ces mécanismes, très variés, se rapportent aux principaux types suivants : le type *fémoro-élytral* dans lequel une crête échinulée (faite de dents articulées) de la face interne des fémurs postérieurs frotte contre une nervure lisse et saillante de l'élytre (Truxalines), le type *élytro-fémoral* où une crête lisse de la face interne des fémurs postérieurs joue sur une nervure élytrale serratulée, faite de dents non articulées (Acridines), le type *tibio-élytral* chez lequel les épines internes des tibias postérieurs font vibrer une série de nervules transverses de l'aire radiale de l'élytre (Hémiacridines) ; le type *élytro-alaire* où des nervures de la face interne des élytres sont frottées contre des nervules denticulées de l'aire vannale des ailes (Romaléines).

Chez les Acridoïdes, la réunion des sexes peut être précédée d'une parade nuptiale : le mâle tourne autour de la femelle, se hausse sur ses pattes, émet une stridulation particulière, vole sur place à 3 ou 4 m de hauteur, puis se laisse tomber en piqué ; chez le criquet australien, les rapprochements ont lieu en présence d'autres criquets qui entourent les couples. L'accouplement est généralement chevauché, avec le mâle au-dessus. Seul le tube du spermatophore est introduit dans les voies génitales de la femelle, la vésicule restant dans la cavité du pénis. Le transfert des spermatozoïdes se fait progressivement par la compression de la vésicule et sa durée varie, selon les espèces, de quelques minutes à une journée.

Hormis quelques rares exceptions comme les Pauliniides néotropicaux qui déposent leur ponte sur les feuilles de nénuphars ou comme *Chrysochraon dispar* de notre faune, qui pond ses œufs sur des tiges moelleuses, les œufs sont réunis dans une oothèque enfouie dans le sol. La femelle, une fois trouvé le terrain convenable (sélectif pour chaque espèce), arque son abdomen vers l'avant de façon à présenter la pointe de l'ovipositeur perpendiculairement au terrain et se met à forer un trou. Les valves, d'abord serrées, pénètrent à la façon d'un coin ; puis la femelle les écarte pour élargir le passage ; de nouveau serrées, elles sont enfoncées un peu plus et l'opération recommence. Les œufs doivent être déposés à une certaine profondeur que la petite taille de l'ovipositeur des criquets, enfoncé seul, ne permet pas d'atteindre ; aussi est-ce l'abdomen tout entier qui va jouer le rôle de tarière, et ce, grâce à une particularité structurale remarquable : la distension des membranes intersegmentaires IV à VIII en multiplie par trois la longueur, et permet d'atteindre le niveau requis. Le forage terminé, la ponte proprement dite débute par l'émission d'une matière spumeuse, dans laquelle les œufs vont être régulièrement agglutinés et qui, en séchant, constituera l'oothèque. Le nombre des œufs inclus est variable avec les espèces, dix à deux cents et parfois même quatre cents comme chez les *Pamphagus ;* il est aussi fonction, pour certaines d'entre elles, de la physiologie propre à la phase. Le plus souvent, la femelle recouvre sa ponte d'un épais bouchon de sécrétion bulleuse puis referme le trou. Pour cela plusieurs méthodes peuvent être appliquées : *Nomadacris,* par exemple, se contente du simple éboulement tandis que *Locusta* et *Heteracris* utilisent le balayage puis le damage, le premier avec les pattes postérieures, le second au moyen de l'abdomen. Une femelle peut déposer deux ou trois oothèques au cours de sa vie, mais les Acridiens migrateurs élevés au laboratoire en produisent jusqu'à douze. Assez souvent, les œufs sont parasités par des Hyménoptères Scélionides et d'autres sont mangés par des larves de Diptères Bombyliides et Calliphorides, par des Coléoptères Carabides, Méloïdes et Clérides ou bien encore par des Acariens.

Pour les pontes indemnes, la durée d'incubation est extrêmement variable ; elle est courte chez les espèces polyvoltines ou à repos sexuel comme les *Schistocerca* mais peut être longue chez les espèces à diapause embryonnaire ; elle est de l'ordre de vingt-cinq jours chez *Nomadacris*, et de neuf mois chez *Dociostaurus*. Elle varie aussi selon les conditions de milieu : à 33 °C, sous

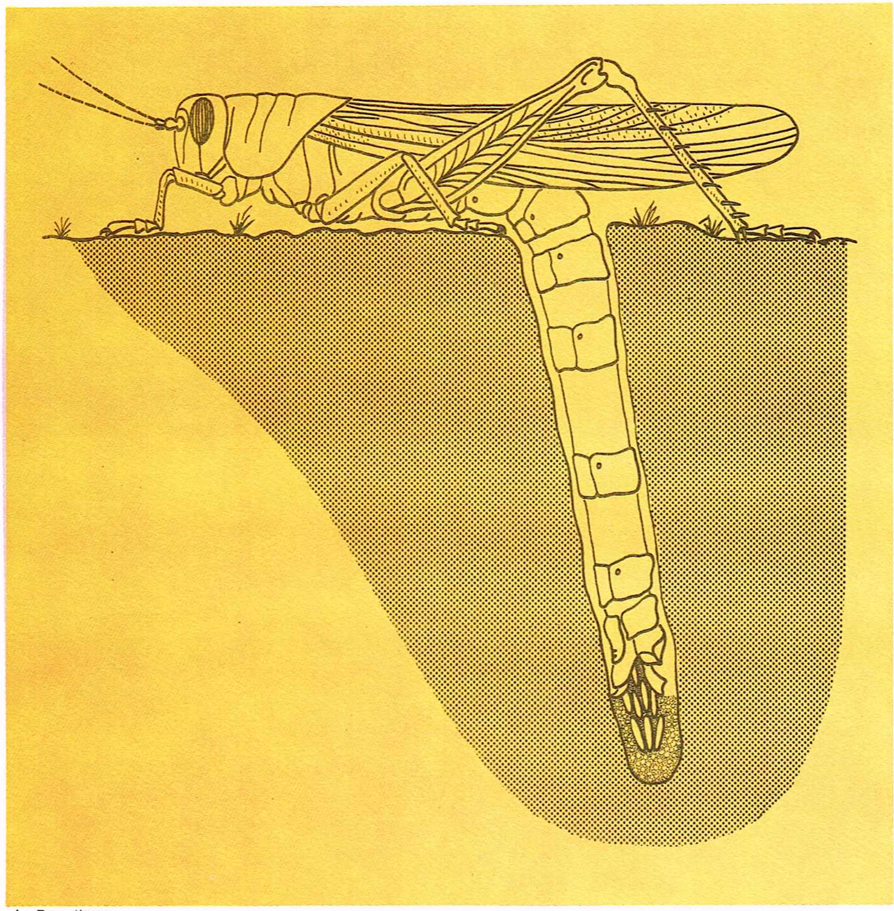

J. Boudinot

▲ ***Schéma montrant l'allongement de l'abdomen d'une femelle de criquet égyptien*** **(Anacridium aegyptium)** ***pendant la ponte (d'après*** **Fédorov*).***

humidité convenable, *Locusta migratoria* éclôt en douze jours mais il lui faut deux mois en saison sèche ou fraîche. Dans le cas d'une diapause embryonnaire, comme dans le cas d'une quiescence due au milieu défavorable, l'embryon se développe d'abord jusqu'au stade de l'anatrepsis (retournement de l'embryon) puis cesse de croître pendant une période plus ou moins longue, avant de reprendre son évolution normale. Ces interruptions peuvent être fort longues car la viabilité des œufs est très grande. Lors de la ponte, les œufs s'imbibent d'eau, par l'intermédiaire de leur hydropyle. Ceux que le criquet pèlerin *Schistocerca gregaria* dépose après la pluie dans un sol arénacé vont alors doubler de poids. Cette eau est nécessaire pour leur développement : on a pu garder pendant trois ans et demi des œufs non hydratés de *Locustana pardalina,* le criquet brun sud-africain ; au contact de l'eau, ils se sont hydratés et ont achevé l'embryogenèse en quinze jours. Sous la pression de l'ampoule cervicale, dispositif d'éclosion particulier, le chorion se rompt, selon une ligne de moindre résistance au pôle antérieur de l'œuf, et les petits criquets s'échappent vers l'extérieur.

On compte environ de cinq à huit stades juvéniles. Le nombre de stades varie avec les espèces, mais aussi avec les facteurs écologiques : la sécheresse et les basses températures induisent fréquemment la multiplication des stades du développement. Il est également lié au dimorphisme sexuel : les femelles, de taille plus grande, passant par un ou deux stades supplémentaires. Enfin, dans le cas des migrateurs, il dépend de l'appartenance phasaire, les congregans devenant adultes plus rapidement.

Au moment des mues, beaucoup d'Acridiens comme *Oedipoda* sont capables d'ajustements chromatiques à leur environnement, mais ces ajustements peuvent se faire également plus tard, comme le montre le cas des espèces tropicales adaptées aux brûlis. Les changements de coloration s'effectuent à la fois par la mélanisation de la cuticule et par la migration des pigments dans les cellules épidermiques.

Les parasites des jeunes et des adultes sont principalement des Diptères : Némestrinides et Muscides, qui provoquent la mort, Tachinides et Calliphorides, dont

M. Boulard

▲ *Couple de **Parasphena** (Pyrgomorphidae du Kenya) montrant un dimorphisme sexuel lié à la taille; le mâle est plus petit que la femelle.*

M. Boulard

▶ ***Parapetasia femorata** est un gros Pyrgomorphidae aptère, vivant en Afrique centrale.*

l'action n'entraîne qu'une baisse de fécondité. Les criquets peuvent aussi être atteints de maladies comme des bactérioses, des mycoses, des rickettsioses et être parasités par des Grégarines. Parmi les prédateurs les plus actifs, on peut citer les lézards, les Oiseaux (guêpiers, faucons, cigognes, hérons, etc., dont on remarque le calque presque parfait des aires d'habitat avec celle des criquets [Wintrebert]), les Arachnides et des Hyménoptères Sphégides.

Les Acridoidea comprennent huit familles dont trois plus importantes.

La famille des **Pamphagidae** groupe environ quatre-vingts genres de criquets d'assez grande taille, lourds et trapus, caractérisés par leur dispositif stridulatoire composé d'une petite plaque rugueuse située sur les fémurs postérieurs, qui vient gratter une aréole très finement chagrinée ou striée du deuxième latéro-tergite abdominal. Beaucoup d'espèces sont brachyptères ou aptères, la plupart sont terricoles et un certain nombre xérophiles. On les rencontre en Afrique et en Asie.

Les **Pyrgomorphidae** forment une famille particulièrement diversifiée que l'on rencontre dans les régions tropicales et subtropicales de l'Ancien Monde, et qui n'a que peu de représentants en Amérique. Leur tête est conique avec un sillon fastigial et le front oblique; ils n'ont pas d'appareil stridulant et peuvent être aptères comme *Parasphena* et *Parapetasia*. Beaucoup d'espèces montrent de brillantes couleurs comme *Zonocerus variegatus*, le criquet bariolé dit encore criquet puant en raison de l'odeur dégagée lors des hémaphrorrhées. A l'état juvénile, quelques Pyrgomorphides, dont les *Zonocerus*, tendent au grégarisme.

Les **Acrididae** forment une prodigieuse famille d'environ six mille espèces, pourvues d'organes stridulants et auditifs, mais sans sillon fastigial, et dont certaines montrent un mode de vie peu commun. Biologiquement en effet, on peut les séparer en deux groupes très inégaux : les Acridiens *non grégariaptes*, comprenant presque la totalité des espèces, lesquelles ne forment jamais de bandes organisées, et les Acridiens *grégariaptes*, qui ne comptent qu'une dizaine d'espèces seulement, et peuvent constituer des groupes dont un puissant instinct grégaire assure la cohésion.

Les Acridiens grégariaptes revêtent une grande importance, fondamentale comme économique, car ce sont eux qui donnent naissance à ce phénomène ahurissant connu sous les noms de « nuées » ou « invasions de sauterelles ». Lorsque l'instinct grégaire se manifeste, ces criquets se rassemblent en troupes sans cesse grossissantes et constituent des essaims, qui mangent toutes plantes sur leur passage et sont capables d'émigrer ainsi, jusque vers des régions très éloignées de leur aire d'origine. Ils sont alors si nombreux, qu'ils peuvent anéantir des cultures entières : les essaims couvrant jusqu'à cinq cents hectares et pesant deux mille tonnes ne sont pas rares (un criquet pèse 2 à 3 g), et des « nuages » ont été évalués à cent vingt milliards d'individus. Ces invasions qui ont un caractère périodique, et se propagent en plusieurs années, sont connues depuis fort longtemps ; les textes sumériens, la Bible en faisaient déjà mention ; les criquets ont été la huitième plaie de l'Égypte. Aujourd'hui le problème des invasions, souvent angoissant pour de nombreux pays, reste encore imparfaitement résolu, tant est grande sa complexité. Cependant, après des recherches opiniâtres menées sur le terrain et en laboratoire, les entomologistes connaissent maintenant, au moins dans ses grandes lignes, le mécanisme de la formation des essaims. Grâce à cette connaissance, qui doit être poursuivie et complétée, de premières méthodes rationnelles de lutte ont pu être mises au point, et des invasions massives ont ainsi été enrayées.

La formation des essaims tient dans les facultés phasaires, propres à ces Insectes et dépendant de la réunion ou de la succession d'un certain nombre de conditions extérieures qui déclenchent un effet de groupe aussi singulier que spectaculaire. Une même espèce de criquet migrateur est en effet susceptible de produire une série d'habitus (forme et couleur) et de manifester des éthologies (instinct et physiologie) différents selon qu'elle évolue isolément ou en groupe. Habitus et éthologie s'accordent deux à deux et, à chaque couple, Uvarov, qui a établi scientifiquement le phénomène, a donné le nom de *phase*. Aux extrêmes de la série se trouvent les phases *solitaria* et *gregaria ;* les phases *transaria* à *congregans* (dans le cas d'évolution du solitaire vers le grégaire) et *transaria* à *dissocians* (dans le cas contraire) constituent les intermédiaires. Les différences morphologiques entre les phases extrêmes sont parfois telles que les Insectes correspondants ont été longtemps considérés comme appartenant à des espèces distinctes... jusqu'en 1915 où Plotnikov observa dans ses élevages la transformation de jeunes criquets *Locusta danica*, verts et indolents, en criquets bariolés et très actifs ne différant pas de *Locusta migratoria*. Des constatations semblables ont été faites entre autres avec *Schistocerca flaviventris*, celui-ci devenant le criquet pèlerin *S. gregaria*. Le passage de l'une à l'autre phase s'effectue au cours d'une série d'étapes transitoires où les individus, nommés alors *transiens*, ne présentent que partiellement les caractères des extrêmes.

Les *solitariens*, par opposition aux *grégariens*, se caractérisent par une tête moins large, un pronotum bombé avec un angle postérieur aigu, des élytres et des fémurs plus courts. Le dimorphisme sexuel est aussi plus accentué : chez les locustes solitaires par exemple les mâles sont de 20 % moins grands que les femelles alors que la différence n'est que de 4 % pour les grégaires. On note également, chez les mâles, l'absence du changement de coloration lors de la maturité sexuelle, les grégaires devenant jaunâtres, et surtout chez les femelles un potentiel de reproduction bien supérieur ; le nombre d'ovarioles qui, pour *Nomadacris*, est d'environ deux cents chez les femelles isolées tombe à quatre-vingt-dix pour les grégaires. Toutes ces différences, comme d'autres propres au métabolisme, à la rusticité, etc., ont été codifiées et les

F. O. Albretch et J. Six

◄▼ ***Les phases extrêmes du criquet* Nomadacris septemfasciata *: à gauche, un jeune solitarien ; en bas, une bande de jeunes grégariens.***

F. O. Albretch et J. Six

▶ *Aires d'invasion et de grégarisation des trois principaux criquets migrateurs africains : en jaune,* Schistocerca gregaria, *le criquet pèlerin, ou « desert locust »; en rouge,* Nomadacris septemfasciata, *le criquet nomade ou criquet rouge, ou « red locust »; en bleu,* Locusta migratoria migratorioides, *le criquet migrateur, ou « African migratory locust ». (D'après les données d'Albrecht Descamps et Wintrebert.)*

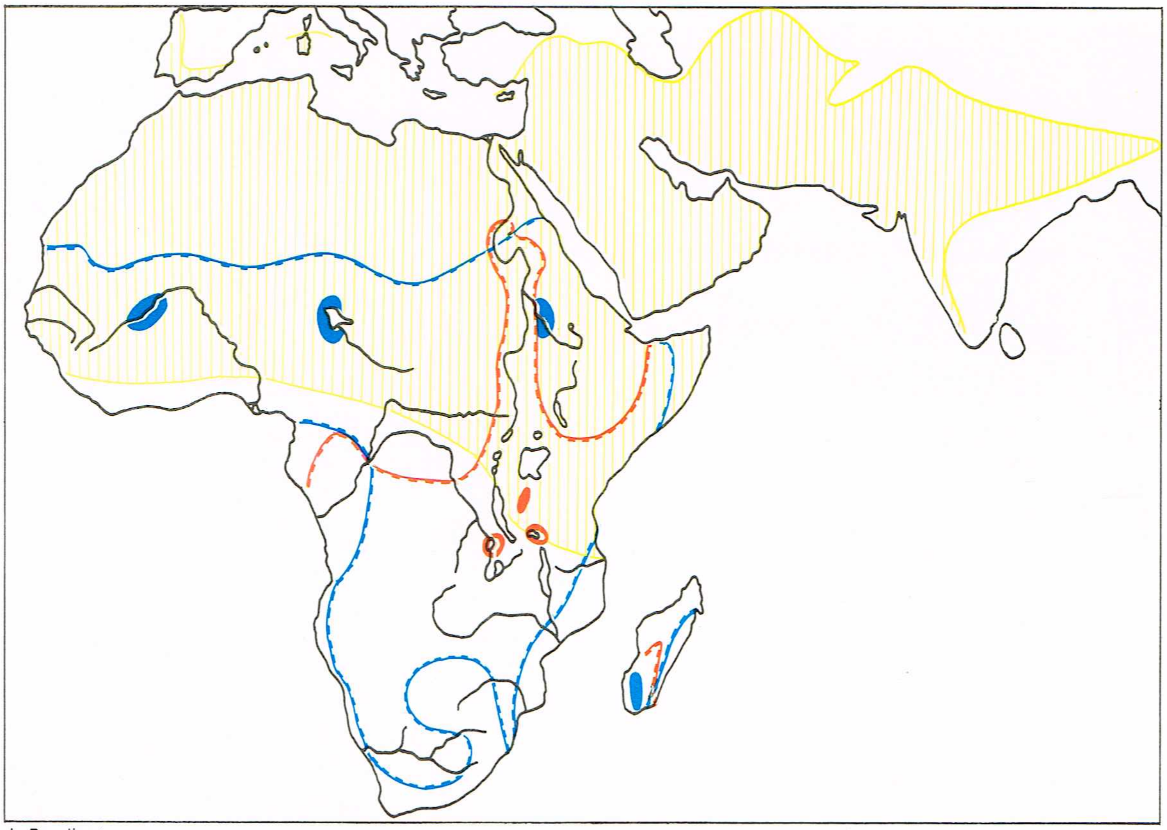

J. Boudinot

variations de leurs rapports permettent de détecter l'appartenance phasaire des transiens. Dans la séquence définie de la phase solitaria à la phase gregaria, plusieurs phénomènes interviennent que Descamps a classés comme suit. Une action très complexe des facteurs du milieu (physiques, trophiques, biotiques) permet l'augmentation numérique des Insectes de la phase solitaire par rapport à l'unité de surface. La réaction des criquets à cette augmentation du nombre se fait par l'entremise de stimuli tactiles, chimiques et visuels, qui entraînent une modification du comportement, de la physiologie, et de la morphologie. La transmission de ces caractères est héréditaire. Si les modifications phasaires peuvent être considérables au cours d'une seule génération, notamment durant les trois premiers stades juvéniles, il en faut généralement plusieurs pour que les caractères grégaires typiques soient pleinement acquis. La transmission cumulative de ces caractères constitue l'un des aspects les plus énigmatiques du phénomène phasaire. Par ailleurs, le cours du processus est susceptible de s'inverser et des transiens congregans caractérisés peuvent revenir, en au moins deux générations, à la phase *solitaria*. Un autre aspect tout aussi énigmatique, mis en évidence par Albrecht chez *Nomadacris*, réside dans l'incidence très négative du grégarisme sur la fertilité des femelles. La diminution des pontes qui en résulte est, avec l'action des prédateurs et des parasites, la cause principale du recul naturel des essaims sur l'aire d'invasion, c'est-à-dire la surface planétaire que peuvent recouvrir les grégariens. Les criquets ne se maintiennent en permanence que sur un ensemble de territoires occupés par les solitariens, appelé aire d'habitat; la transformation phasaire ne s'effectue que dans certaines parties de cet habitat, dites aires grégarigènes, où elle prend naissance dans des foyers de grégarisation. Ces foyers, plus encore que les aires grégarigènes, se caractérisent par l'instabilité inter-annuelle des conditions climato-écologiques et il arrive que s'y établisse, même momentanément, le complexe optimal (température, humidité, nature du sol, composition, abondance et qualité de la flore, etc.) qui déclenche le processus des phases, le premier effet étant le groupement des femelles pondeuses sur des surfaces relativement restreintes et le dernier, la migration vers l'aire d'invasion. De même que les foyers sont multiples à l'intérieur des aires grégarigènes, celles-ci se trouvent en plusieurs endroits de l'aire d'habitat tout en présentant des caractères communs. Pour le locuste africain par exemple, ce sont la boucle du Niger, les environs du lac Tchad, la plaine du Nil bleu et le sud-ouest de Madagascar (Wintrebert). La connaissance et la surveillance des aires grégarigènes permettent la lutte préventive — c'est la plus efficace — contre les criquets migrateurs, par destruction des premières bandes grégaires. Ces aires ne sont pas toutes connues, contrôlées ou actuellement contrôlables, et le problème acridien exige encore beaucoup de travail et d'efforts.

Les criquets grégariaptes appartiennent à quatre des dix-neuf sous-familles d'Acrididae. Ils sont rassemblés dans le tableau suivant qui indique en même temps leurs répartitions géographiques.

▼ *Les ailes des Dermaptères : en haut l'aile antérieure transformée en élytre; en bas, l'aile postérieure membraneuse; les numéros 1, 2, 3 représentent les lignes suivant lesquelles se replient généralement les ailes des forficules.*

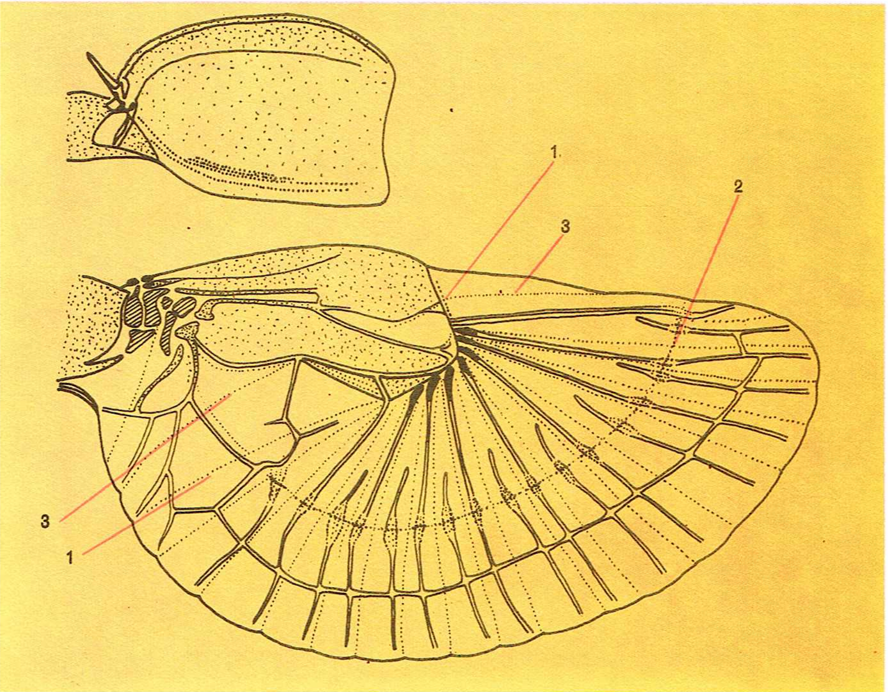

I.G.D.A.

Sous-familles	Genres et espèces (noms communs)	Répartitions
Catantopinae	*Melanoplus spretus* (criquet des Rocheuses)	Amér. du Nord
Cyrtacanthacridinae	*Schistocerca gregaria* (criquet pèlerin) *Schistocerca paranensis* (criquet d'Amér. centrale) *Nomadacris septemfasciata* (criquet nomade ou rouge) *Anacridium melanorhodon* (criquet arboricole)	Amér., Asie du S.-E. Amér. centrale et Sud Afr., Madagascar Afr., Asie
Acridinae	*Locusta migratoria* (criquet migrateur, avec plusieurs races géographiques) *Locustana pardalina* (criquet brun) *Chortoicetes terminifera* (criquet australien)	Ancien Monde au sud du 50e °N. Afr. du Sud Australie
Truxalinae	*Dociostaurus maroccanus* (criquet marocain)	Circumméditerranéen

Enfin parmi les autres sous-familles on retiendra celles des *Hemiacridinae* dont l'espèce la plus remarquable, *Hieroglyphus daganensis*, se caractérise par une diapause embryonnaire constante que seul un ensemble déterminé de conditions extérieures peut interrompre. Cette rupture de diapause entraîne la sortie soudaine d'une multitude de criquets qui peuvent alors causer des dégâts importants aux plantes cultivées. *H. daganensis* vit dans la zone sahélienne de l'Afrique.

Ordre des Dermaptères

Parmi les Orthoptéroïdes, les Dermaptères se distinguent immédiatement par leurs ailes antérieures transformées en élytres courts (comme chez les Coléoptères Staphylinidae) et par l'extrémité de l'abdomen qui porte chez les mâles et les femelles des cerques transformés en pinces ou en forceps (le nom de perce-oreille ne vient évidemment pas du fait que ces Insectes percent les oreilles, mais de la ressemblance des cerques avec l'instrument destiné à percer les lobes des oreilles pour y accrocher des boucles).

L'origine des Dermaptères est assez incertaine. *Protodiplatys fortis*, un fossile d'Archidermaptère trouvé au Turkestan dans les terrains du Jurassique, a l'allure générale d'une forficule, mais ses cerques sont divisés en de nombreux articles comme chez les larves actuelles de *Diplatys*. *Semenoviola*, un autre fossile de la même époque, a les cerques déjà transformés en forceps. Dès l'Éocène, les Dermaptères sont bien représentés par de nombreuses espèces. On connaît aussi des espèces fossiles de l'ambre de la Baltique.

Les Dermaptères sont des Insectes allongés, à téguments lisses ou légèrement pubescents. La longueur des forficules varie de 8 mm à 20 mm. *Titanolabis colossea*, le géant du groupe, mesure jusqu'à 50 mm et vit en Australie. La coloration n'est jamais somptueuse, de teinte plutôt jaunâtre, brune ou noirâtre. Les pièces buccales sont du type broyeur. Les antennes, moniliformes, comportent jusqu'à quarante articles, mais sont plus courtes que le corps. Les tarses ont trois articles. L'aile antérieure est transformée en un étui corné, l'élytre, et l'aile postérieure, membraneuse, à plicature complexe, se replie au repos sous l'élytre. Cependant, beaucoup de Dermaptères sont aptères.

Chez la femelle, il n'y a pas d'oviscapte, et chez le mâle, pas de plaque sous-génitale. La forme et la taille des forceps sont différentes d'un sexe à l'autre. Chez le mâle, ils sont gros, fortement arqués à leur extrémité et portent des dents assez fortes; chez la femelle, ils sont moins arqués à l'extrémité et portent de petits denticules. Enfin, au sein d'une même population on remarque des variations considérables de la taille des forceps; on peut ainsi distinguer une forme *macrolabia* à grands forceps, et une forme *cyclolabia* à forceps plus petits.

Du point de vue anatomique, on note une grande ressemblance avec les autres Orthoptéroïdes, mis à part la réduction des glandes salivaires et l'absence de cæcum gastrique à l'intestin moyen. La présence de deux glandes répugnatoires sur les côtés de chacun des troisième et quatrième tergites abdominaux est un caractère particulier aux Dermaptères. Les sécrétions de ces glandes s'accumulent dans une petite ampoule et peuvent être projetées à quelques centimètres par des contractions musculaires. Sur les troisième et quatrième segments abdominaux des larves, des glandes unicellulaires sécrètent des substances huileuses dont le rôle n'est pas encore bien connu. Chez les larves, signalons enfin la présence d'une glande paire à la base des forceps. Cette glande disparaît au moment de la mue imaginale. Les ovaires sont du type polytrophique et peuvent se présenter sous deux formes. Les métamorphoses sont semblables à celles des autres Orthoptéroïdes (hémimétabolie).

Les forficules sont des Insectes très hygrophiles. La majorité des Dermaptères vit sous les pierres, sous les écorces, dans les cavités des rochers, etc. Ces lieux, humides et toujours étroits, leur permettent de satisfaire leur thigmotactisme (besoin de contact du corps avec le substrat). Certaines espèces vivent dans les grottes, sans avoir toutefois produit de profondes adaptations à ce milieu cavernicole comme la dépigmentation, la disparition des yeux, etc.

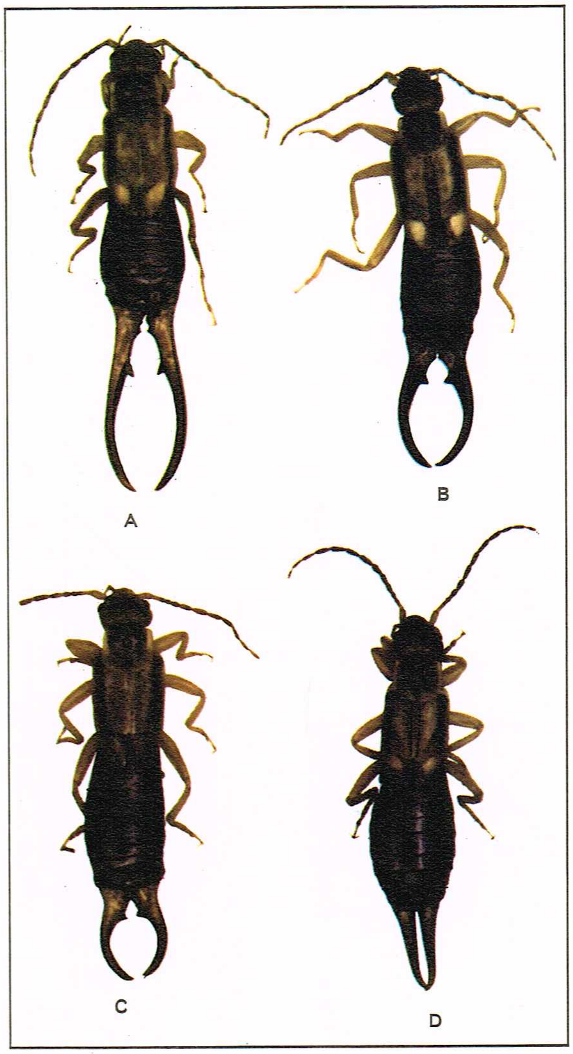

I.G.D.A.

◀ *Exemple de variation dans la taille des forceps des mâles de* Forficula auricularia *(A, B, C). En D, la femelle de la même espèce.*

▶ *A gauche, un mâle de* Forficula auricularia, *une des espèces de Dermaptères les plus connues en Europe. A droite,* Chelidura aptera, *une espèce montagnarde qui montre un cas d'aptérisme chez les Dermaptères.*

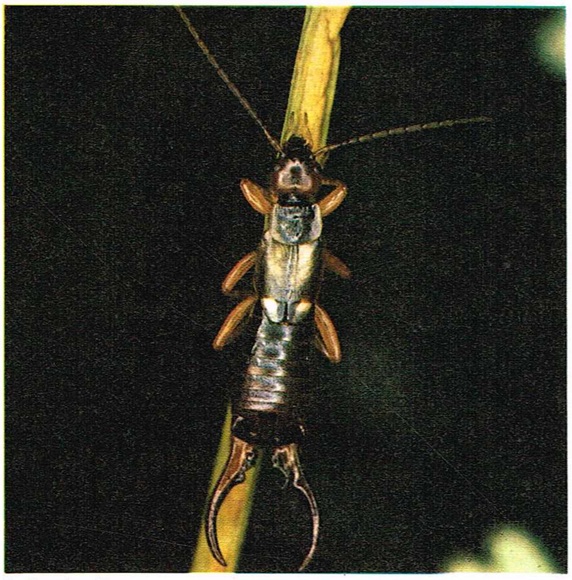

I. Bucciarelli

A. Margiocco

Certaines espèces des régions tropicales vivent et se reproduisent uniquement à l'aisselle des feuilles de Broméliacées épiphytes, qui contiennent toujours de l'eau, même au plus fort de la saison sèche; ce milieu permet aussi à l'Insecte de satisfaire son thigmotactisme. *Anisolabis caeca*, une espèce dépigmentée aux yeux atrophiés, a été trouvée dans des termitières, mais on n'est pas absolument certain qu'elle soit termitophile; elle pourrait être seulement adaptée à la vie souterraine. Enfin, on connaît un cas de commensalisme chez *Arixenia*.

Le régime alimentaire des forficules est assez varié. Chez certaines espèces comme *Forficula auricularia*, il a des incidences économiques, quand elles se trouvent en grand nombre, par exemple, dans des serres où elles dévorent les bourgeons et les plantules. Généralement, les forficules préfèrent les proies animales. On a dit que *Labidura riparia truncata* serait un prédateur efficace de la noctuelle du cotonnier. De même, *Chelisoches morio* des Nouvelles-Hébrides détruirait beaucoup de cochenilles du genre *Pseudococcus*. D'une manière générale, les Dermaptères ont un régime très varié; Végétaux et Animaux peuvent être consommés morts ou vivants. Les forficules utilisent leurs forceps pour capturer et maintenir les proies.

La reproduction des Dermaptères est toujours bisexuée. On ne connaît aucun cas de parthénogenèse chez les forficules. Chez *Labidura riparia*, l'accouplement a lieu après une parade nuptiale durant laquelle le mâle reste d'abord à quelques centimètres de la femelle, puis s'en approche, procède par attouchements avec ses antennes, puis frappe les cerques dressés de la femelle. Après quelques tentatives souvent infructueuses, le mâle retourne son abdomen de 180°, fait saillir son pénis et l'introduit dans la femelle. La copulation dure de quelques secondes à plusieurs dizaines de minutes. Après la fécondation (il n'y a pas de spermatophore), le mâle et la femelle se réfugient sous une pierre. La femelle creuse ensuite une galerie à l'extrémité de laquelle elle aménage une logette où elle va pondre. La galerie d'accès est fermée par un bouchon de terre ou de sable provenant du creusement de la logette. Pendant ces travaux, le mâle est constamment tenu éloigné.

I.G.D.A.

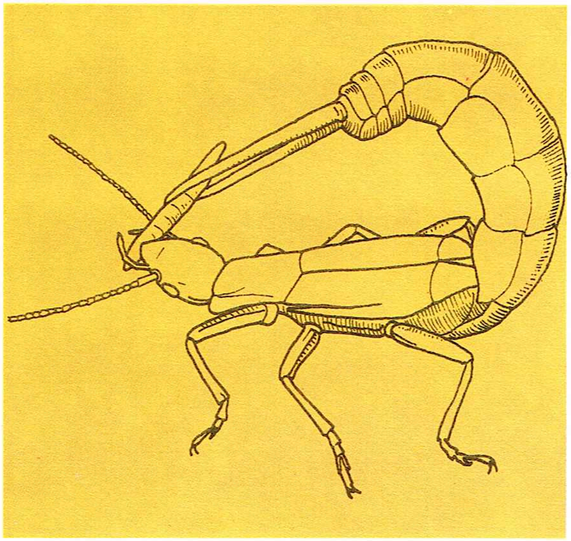

▶ Chelisoches morio *en train de dévorer une proie qu'il maintient avec ses forceps.*

Un point intéressant du comportement des forficules réside dans les soins que les femelles donnent aux œufs et aux larves. Les œufs dont le nombre varie de quarante à quatre-vingts sont léchés par la mère, déplacés, léchés à nouveau, regroupés régulièrement, ceci afin de les préserver du développement de moisissures. Si on enlève la mère, les œufs n'écloront jamais et seront détruits par les moisissures. Lors de l'éclosion, la mère « aide » les larves à sortir des enveloppes de l'œuf en dévorant celles-ci en partie. A peine nées, les larves détruisent elles-mêmes le reste des enveloppes. La mère dévore aussi les œufs avortés, non fécondés ou malades. Les soins de la mère se prolongent durant le premier stade larvaire pendant lequel elle protège ses larves. Si l'un des jeunes s'éloigne du nid, elle le coince entre ses mandibules et le ramène. Une semaine environ après la naissance des larves, les soins cessent et si les larves ne quittent pas le terrier, il arrive que la mère dévore sa progéniture. En général, le développement postembryonnaire comporte cinq stades larvaires au cours desquels les cerques vont devenir de plus en plus gros et durs, les antennes acquérir leur nombre définitif de segments, les ailes se développer; elles ont d'ailleurs peu d'utilité chez *Labidura riparia*, et dans l'ensemble les forficules volent mal ou pas du tout.

Dans nos régions la reproduction des Dermaptères a lieu en juin ou juillet. Dans les zones tropicales, elle se produit sans doute tout au long de l'année.

A quelques détails près, les soins prodigués par la mère aux œufs et aux jeunes sont les mêmes chez toutes les forficules, mais certains individus présentent une biologie tout à fait particulière. C'est le cas d'*Arixenia esau* qui est commensale de *Cheiromeles torquatus*, une chauve-souris des îles de la Sonde. *Arixenia esau* est aptère, et possède un corps plat et pubescent; ses pattes, toutes semblables, sont longues; ses yeux sont de taille réduite et ses cerques, peu sclérotinisés, ne servent probablement pas. Malgré sa taille (environ 18 mm) *Arixenia* vit fixé en « parasite » dans la poche ventrale de la chauve-souris. Son régime n'est pas connu avec précision, mais on pense qu'il se nourrit des débris des proies capturées par la chauve-souris. *Arixenia* est vivipare et ses œufs effectuent leur développement embryonnaire dans les ovarioles de la femelle. Numériquement importante, une autre espèce, *Arixenia jacobsoni*, a été découverte à la surface des guanos de certaines grottes. On pense qu'elle

se nourrirait des larves des Diptères, des Lépidoptères et des Coléoptères *(Trox)* qui vivent dans ce guano. La reproduction et la biologie des *Arixenia* sont à rapprocher de celles des *Hemimerus* (autrefois classés dans les Dermaptères), qui sont commensaux des rats de Gambie africains. Ils vivent dans le poil de ces derniers et se nourrissent sans doute comme les Mallophages. Ce n'est donc pas un parasitisme au sens strict du terme.

Un autre phénomène biologique intéressant mais pas encore entièrement élucidé existe chez *Prolabia arachidis*, une forficule des Indes. L'œuf se développe dans les ovaires, comme chez *Arixenia*. Il est pondu à la fin du développement embryonnaire. Juste après la ponte, la femelle dévore l'enveloppe externe de l'œuf. La jeune larve est alors léchée par sa mère et dès qu'elle commence à bouger, la femelle l'abandonne, pond un autre œuf, et le cycle continue.

Les Oiseaux sont bien connus pour leur rôle de prédateur des Dermaptères ainsi sans doute que certains petits Rongeurs. Parmi les Insectes, certains Diptères Tachinides *(Rhacodineura antiqua* et *Digonichaeta setipennis)*, et parmi les Vers, des Nématodes *(Mermis)* et des Cestodes *(Hymenolepis)* sont des parasites des Dermaptères.

La répartition géographique des Dermaptères est mondiale. On connaît environ mille deux cents espèces réparties en quatre super-familles, d'après Popham en 1965. Les *Labioidea* comprennent trois familles : les Carcinophoridae, les Labiidae, et les Arixenidae. Les *Forficuloidea* sont divisés en trois familles : les Labiduridae, les Chelisochidae, et les Forficulidae. Les *Pygidicranoidea* comptent deux familles, les Diplatyidae et les Pygidicranidae. Enfin les *Karschielloidea* ne comprennent que l'unique famille des Karschiellidae. Les Hemimeridae sont maintenant considérés comme un ordre séparé des Dermaptères.

Ordre des Zoraptères

Les Zoraptères sont des Insectes Ptérygotes de très petite dimension, ne dépassant pas 2 mm, connus seulement depuis une soixantaine d'années grâce aux travaux de Silvestri.

Ils présentent de courtes antennes moniliformes à neuf articles et des pièces buccales de type broyeur. Ils peuvent posséder des yeux et des ocelles ou bien en être privés.

Le thorax présente un pronotum bien développé ; les ailes, quand elles existent, sont membraneuses et leur nervation est réduite, l'aile antérieure est plus développée que la postérieure ; comme chez les termites, elles sont abandonnées au moment de la maturité sexuelle, mais la localisation de la rupture est ici moins précise. Les pattes ont un tarse formé de deux articles, le deuxième beaucoup plus long que le premier portant deux griffes.

L'abdomen est composé de onze segments.

Les Zoraptères sont des Insectes polymorphes, vivant en colonie ; les individus de chaque sexe peuvent se présenter sous deux formes : l'une ailée, bien pigmentée, munie d'yeux composés et d'ocelles, l'autre aptère et complètement aveugle. Des deux formes, la seconde est la plus commune. La colonie comprend aussi des jeunes, aveugles, et des nymphes.

De la reproduction on ne connaît que fort peu de chose ; les œufs pondus éclosent au bout d'une quinzaine de jours.

Les Zoraptères vivent dans les zones tropicales d'Afrique, d'Asie, d'Amérique et en Océanie ; ils habitent sous les écorces, dans le bois en décomposition ou même dans les termitières abandonnées où ils peuvent trouver des conditions d'humidité et d'obscurité convenables.

L'ordre des Zoraptères ne comprend qu'une seule famille et une vingtaine d'espèces du genre *Zorotypus*.

Super-ordre des Hémiptéroïdes

Bien que parfois très différents d'aspect, les Insectes composant ce super-ordre sont, à des degrés divers, proches parents, comme l'indiquent les caractères communs suivants : les pièces buccales, toujours modifiées, montrent une tendance nette à former un appareil piqueur-suceur, le lobe anal des ailes postérieures est réduit ou absent, il n'y a pas de cerques, les tubes de Malpighi sont peu nombreux (en général au nombre de quatre), et l'on note la concentration des ganglions nerveux abdominaux plus ou moins fusionnés entre eux ainsi qu'avec les ganglions thoraciques.

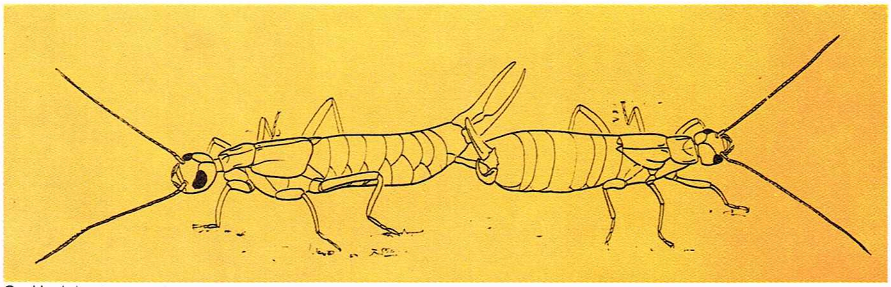

G. Hodebert

▲ ***Accouplement de* Labidura riparia ; *le mâle est à gauche, et la femelle à droite.***

Ordre des Psocoptères

Les Psocoptères, encore appelés Copéognates, ou psoques, forment un ordre très homogène d'Insectes de petite taille (1 à 10 mm), paurométaboles et typiquement stégoptères, bien reconnaissables à leur profil caractéristique. La tête, orthognathe et globuleuse, se trouve reliée par un cou membraneux à un thorax bossué.

L'appareil buccal broyeur, proche du type orthoptéroïde, n'est formé que de quatre articles aux palpes maxillaires et de lacinia en forme de gouge à leur extrémité. Les yeux composés, hémisphériques, sont très saillants, particulièrement chez les mâles ; les psoques ailés possèdent presque toujours trois ocelles, tandis que les aptères en sont dépourvus. Les antennes filiformes se composent généralement d'environ treize ou quinze articles ; les formes primaires en comptent jusqu'à cinquante ; ces articles, cylindriques, sont plus ou moins velus, excepté sur le scape et le pédicelle.

Les pattes, le plus souvent homonomes, portent des tarses bi- ou trimères avec un prétarse à deux griffes, mais sans empodium ; les pattes postérieures, légèrement plus longues que les autres, permettent de faibles sauts ; elles sont surtout remarquables par un dispositif apparemment voué à la stridulation et occupant la face interne des hanches. Lorsqu'il est complet, ce dispositif se compose d'une plage rugueuse jouxtant un miroir de cuticule mince et tendue ; on ne sait pas si cet appareil fonctionne

▼ ***A gauche, une femelle du Dermaptère* Labidura riparia *léchant ses œufs. A droite,* Zorotypus hubbardi, *un Zoraptère ; au moment de la maturité sexuelle, il abandonne ses ailes.***

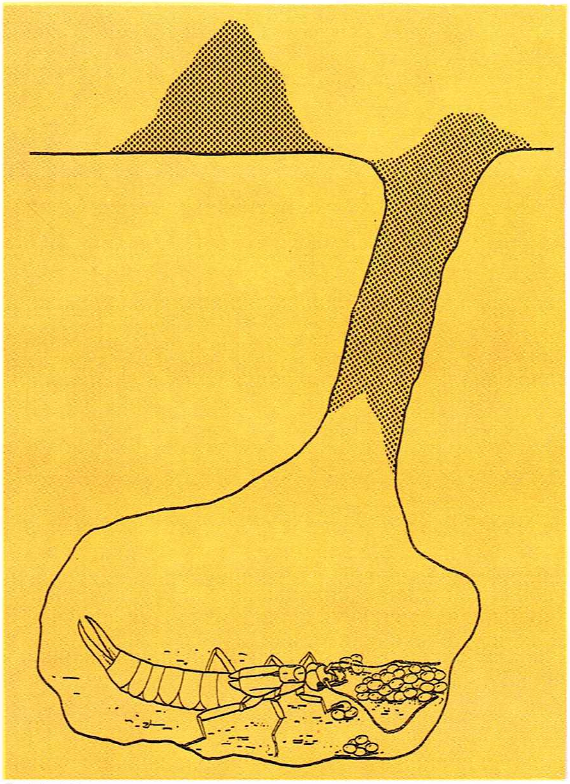

G. Hodebert

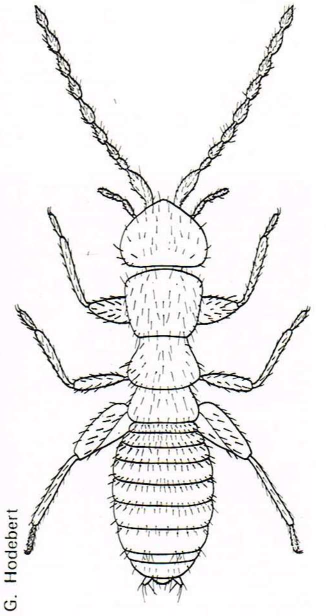

G. Hodebert

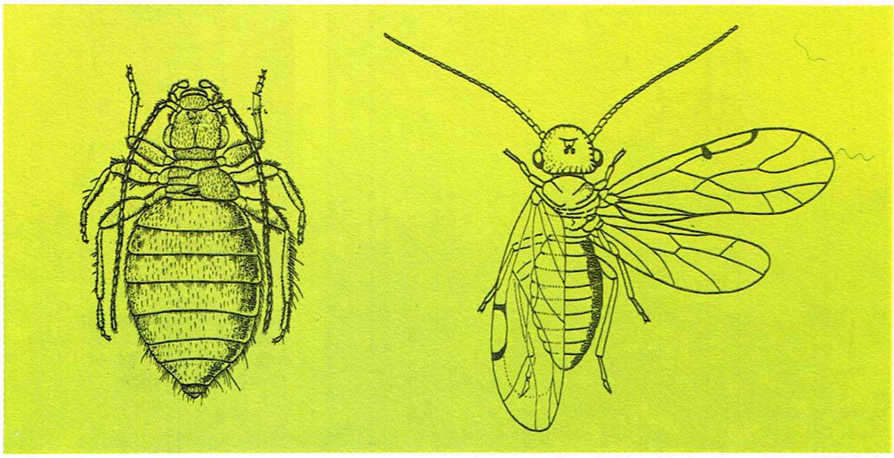

I.G.D.A.

▲ *Représentation de l'habitus des imagos de Psocoptères :* **Trogium pulsatorium,** *à gauche, est microptère;* **Ectopsocus briggsi,** *à droite, est ailé.*

réellement ni dans quelles conditions. Les ailes, quand elles existent, sont hyalines, parfois tachetées et presque homoneures; les familles des Amphientomidae et des Lepidopsocidae se distinguent par leurs ailes recouvertes d'écailles analogues à celles des papillons. Chez beaucoup d'espèces, les femelles sont brachyptères ou microptères.

L'abdomen, partagé en neuf urites visibles, se termine par un bloc anal de type orthoptéroïde marqué souvent d'une plage de trichobothries sur les paraproctes et par les organes copulateurs ou de ponte; chez les femelles, l'ovipositeur court possède six valves, les valves inférieures étant styliformes. Il n'y a pas de cerques.

Les psoques se nourrissent principalement d'Algues et de moisissures, de Lichens et de débris végétaux. Leur habitat, qui requiert une certaine humidité ambiante, peut être arboricole (tronc, branches, feuilles) ou lapidicole, voire cavernicole, et quelques espèces de Trogiidae et de Liposcelidae pénètrent dans les maisons (« poux » des vieux livres). Le plus souvent, ils vivent groupés, avec parfois des activités grégaires coordonnées (conduisant à la construction de toiles coloniales) qui peuvent modifier leur morphologie, comme chez *Psyllipsocus ramburi,* où, d'après Badonnel, le groupement apparaît comme une condition nécessaire au développement complet des ailes.

En général, une courte parade nuptiale exécutée tout autour de la femelle par le mâle dont les ailes vibrent intensément, précède l'accouplement. Finlayson et Badonnel ont montré que la fécondation s'effectue la plupart du temps par l'intermédiaire d'un spermatophore qui est édifié chez le mâle pour les Psocomorphes, chez la femelle, dans la spermathèque même, pour les Trogiomorphes et les Troctomorphes. Les œufs, au chorion très finement plissé (chagriné), sillonné ou lisse suivant les espèces, sont déposés puis recouverts de soie ou de déjections. L'éclosion se fait grâce à l'ovirupteur que l'embryon porte sur la région frontale et elle est immédiatement suivie de la mue embryonnaire, qui libère les antennes et les pattes du jeune Insecte. Quelques cas de viviparité sont connus (*Archipsocus* par exemple) et la parthénogenèse thélytoque est obligatoire chez certaines espèces, dont *Psyllipsocus ramburi,* mais facultative et géographique pour d'autres *(Reuterella)*.

Les Psocoptères comptent environ mille espèces, réparties en trois sous-ordres.

▼ *Une femelle de* **Graphopsocus cruciatus,** *l'un des Psocoptères les plus répandus en Europe et que l'on retrouve aussi en Amérique du Nord. Il atteint 4 mm de longueur.*

M. Boulard

Sous-ordre des Trogiomorpha

Les Trogiomorpha ont des antennes composées d'au moins vingt articles, mais les palpes labiaux ne possèdent que deux articles et les tarses sont trimères. Ce sous-ordre comprend les familles des Lepidopsocidae et des Trogiidae.

Sous-ordre des Troctomorpha

Les Troctomorpha, avec les familles des Amphientomidae et des Liposcelidae, diffèrent des précédents par des antennes formées d'une quinzaine de segments.

Sous-ordre des Psocomorpha

Les Psocomorpha, ou Eupsocida, sont caractérisés par des antennes à treize articles, des palpes labiaux uni- ou bisegmentés et des tarses bi- ou trimères; les représentants de ce sous-ordre sont très nombreux et comptent environ 80 % des espèces des Psocoptères.

Ordre des Mallophages

Les Mallophages, ou mangeurs de laine, appelés encore ricins, ou poux des volailles, sont des Exoptérygotes paurométaboles d'assez petite taille (0,3 à 10 mm de longueur), devenus aptères et très plats, vivant sur les Oiseaux ou les Mammifères. Leur tégument, fortement sclérifié, porte des soies régulièrement ordonnées. Suivant les espèces, la pigmentation va du blanc au noir, en passant par la gamme des bruns. La tête, très aplatie mais encore orthognathe, possède des mandibules de type broyeur et porte des antennes courtes et trapues, à trois ou cinq articles. Les yeux, réduits, ne comportent qu'une ommatidie et les ocelles sont absents.

Une caractéristique fondamentale des Mallophages est constituée par leurs tibias antérieurs, qui produisent un « pouce » opposable à la griffe du tarse.

Les Mallophages sont des ectoparasites permanents strictement inféodés à leur hôte : une espèce donnée ne se rencontre généralement que sur une seule espèce de Vertébré, cette dernière pouvant d'ailleurs nourrir plusieurs Mallophages différents. On connaît cependant des exceptions : *Heterodoxus longitarsus,* parasite ordinaire du kangourou, s'est adapté également aux chiens, et il est en outre l'une des rares formes de ce sous-ordre susceptibles de vivre aussi sur l'homme. Les Mallophages se déplacent avec agilité de plumule en plumule ou de poil en poil, grâce à la conformation de leurs pattes. Ils sont attirés par les endroits chauds et humides du corps de leur hôte et se nourrissent de productions épidermiques, de squames, de fragments de duvet ou de poil, de sécrétions cutanées, mais aussi des coquilles de leurs œufs et même de leurs exuvies; quelques-uns sont des hématophages occasionnels, comme *Ricinus fringillae* qui parasite le bruant jaune, ou quasi permanents, comme *Trimenopon jenningsi,* qui blesse les cobayes avec ses mandibules. Trop nombreux, ils souillent la peau par leurs excréments, provoquent des démangeaisons qui irritent l'hôte, troublent son repos et le font dépérir. Ils provoquent la mallophagose trichodectique du bétail ainsi que la phthiriase des volailles, causée principalement par *Menopon pallidum* pour les poules et par *Columbicola columbae* pour les pigeons. En général, les Mallophages ne résistent pas plus de trois jours à la mort de l'hôte. Ils se propagent principalement par les contacts entre les Vertébrés et, accessoirement, par phorésie, utilisant alors les Insectes vulnérants, tels que les moustiques.

Les mâles, toujours plus petits que les femelles, ont des soies plus longues et plus fines. Leurs antennes, souvent plus développées, portent des tubérosités et servent pendant l'accouplement au maintien de la femelle, celle-ci se plaçant au-dessus du mâle. La plupart des espèces sont représentées par les deux sexes, mais certains *Trichodectes* (*T. longicornis* et *T. bovis* notamment) ne sont connus que par des femelles et semblent se reproduire par parthénogenèse. La fécondité varie suivant l'espèce mais elle est toujours importante : douze à quinze œufs sont pondus chaque jour par les *Goniodes* parasites des Gallinacés, et vingt-cinq à trente par le Mallophage du pigeon. Leurs œufs, petits et remarquables par leurs ornementations compliquées, sont collés en paquet par le pôle postérieur sur les plumes ou les poils, à des endroits préalablement ruginés par la mère avec ses mandibules, ou comme chez *Menopon* et *Trimenopon*, ils sont introduits isolément dans le tronçon basal d'un phanère coupé. Dans les conditions ambiantes normales, l'embryogenèse se déroule en une quinzaine de jours et toute l'évolution juvénile en un mois.

Les Mallophages se sont répandus dans le monde entier, grâce à leurs hôtes. Les deux mille sept cents espèces et sous-espèces décrites appartiennent à trois cent trente genres, dont la classification, longtemps sujette à controverse, a été récemment revue par Eichler. Cet auteur distingue trois sous-ordres.

Sous-ordre des Amblycera

Les Amblycera, dont les antennes courtes et capitulées peuvent être rangées dans des sillons céphaliques, ont des mandibules mobiles horizontalement, des palpes maxillaires formés de quatre articles et le thorax trisegmenté ; ils comprennent les *Menoponoidea* et les *Gyropoidea*, qui rassemblent, respectivement, des parasites d'Oiseaux et de Mammifères.

Sous-ordre des Ischnocera

Les Ischnocera, aux antennes longues, dépourvus de sillons céphaliques antennifères ainsi que de palpes maxillaires, ont, pour leur part, des mandibules fonctionnant verticalement; leur thorax apparaît bisegmenté (fusion des méso- et métanotum) ; ils comprennent trois super-familles : les *Goniodoidea* et les *Philopteroidea*, dont les représentants vivent sur les Oiseaux, et les *Trichodectoidea*, qui parasitent les Mammifères.

Sous-ordre des Rhynchophtirina

Ce sous-ordre ne comprend que le genre *Haematomyzus*, caractérisé par le long rostre cylindrique prolongeant la tête antérieurement et terminé par la bouche et les mandibules. Deux sous-espèces communément appelées « poux des éléphants » sont : *H. elephantis elephantis* d'Afrique, et *H. elephantis sumatranus* d'Asie.

Ordre des Anoploures

Les Anoploures, ou Siphunculates, appelés vulgairement poux, sont des Exoptérygotes jaunâtres de petite taille (de 0,4 à 6 mm) devenus aptères et aplatis, vivant en ectoparasites hématophages des Mammifères. Ils se distinguent des Mallophages ainsi que de tous les autres ectoparasites par leur appareil buccal piqueur-suceur d'un type très particulier et d'interprétation difficile. La tête, conique, est prognathe, toujours dépourvue d'ocelles et le plus souvent d'yeux. Les antennes, courtes, ne sont constituées que de trois articles chez les *Pedicinus* et chez les stades juvéniles et de cinq chez les adultes des autres genres. Le clypéus forme la partie dorsale du cône buccal, lequel se termine par le labre étroit et semi-annulaire, prolongé par une trompe exertile munie d'un ou deux verticilles de denticules sclérifiés, alors que toute la face ventrale de la tête reste membraneuse chez la plupart des espèces. Les pièces piqueuses se trouvent contenues dans la poche gnathale qui se présente comme un diverticule ventral de l'atrium buccal. On distingue un stylet dorsal d'origine incertaine, provenant de l'hypopharynx ou des maxilles, un stylet médian conducteur de la salive et probablement d'origine hypopharyngienne, et enfin un stylet ventral, qui dériverait du labium.

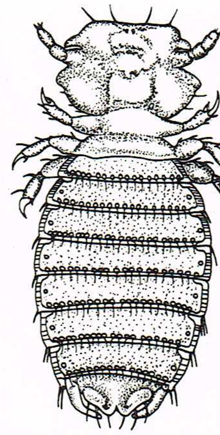

I.G.D.A.

▲ ***Le Mallophage* Trichodectes vulpis, *représenté ici par sa face dorsale, est un parasite d'Animaux carnassiers.***

M. Bavestrelli - C. Bevilacqua - S. Prato

◀ ***Un mâle de* Chelopistes meleagridis *(Mallophages).***

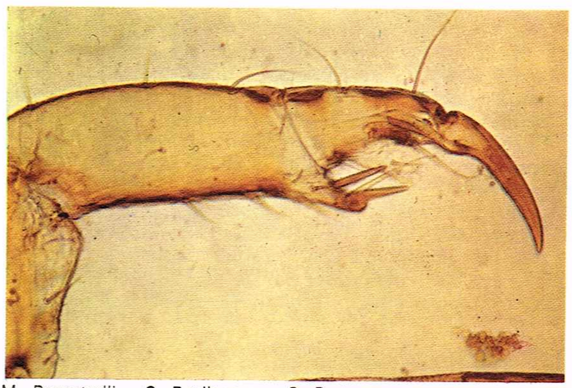

M. Bavestrelli - C. Bevilacqua - S. Prato

◀ ***Détail d'une patte de* Pediculus humanus, *le pou de l'homme (× 70).***

La segmentation thoracique est indistincte. Les pattes sont robustes, articulées sur les bords latéraux du thorax, et préhensiles grâce à des dispositifs comparables à ceux des Mallophages.

L'abdomen, ovoïde, plus ou moins allongé, présente ordinairement de six à neuf urites. Chez la femelle, des appendices terminaux assimilés à des gonopodes permettent, lors de la ponte, de saisir le poil qui sert de support.

Parmi les particularités anatomiques des différents systèmes internes, on retiendra la présence de quatre glandes salivaires volumineuses, sécrétant les principes anticoagulants et irritants de la salive, un appareil trachéen très développé communiquant avec l'extérieur au moyen de sept paires de stigmates (une thoracique et six abdominales), et un système nerveux concentré, les ganglions du thorax et de l'abdomen étant réunis en une seule masse. Chez la femelle, on trouve deux volumineuses glandes cholétériales débouchant dans les oviductes, mais pas de spermathèque ; chez le mâle, les vésicules séminales sont longues et larges. Ces deux derniers caractères peuvent être mis en relation avec le fait que les accouplements sont très fréquents chez les poux. Le mâle se place sous la femelle et redresse son abdomen pour joindre les genitalia.

La fécondité, qui varie avec les espèces, est toujours importante : pendant la période de ponte, qui dure en

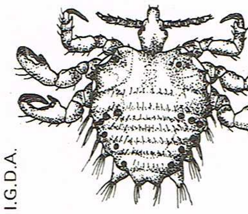

I.G.D.A.

▲ *Le morpion,* **Phthirus pubis,** *en vue dorsale.*

moyenne une quinzaine de jours, *Pediculus humanus corporis* émet quotidiennement de douze à quatorze œufs, *Haematopinus eurysternus,* le pou des vaches, de trente à cinquante, et *Polyplax spinulosa,* le pou des rats, jusqu'à soixante-dix. Les œufs, appelés lentes, possèdent un chorion plus ou moins ornementé et sont munis d'un opercule de sortie dont la micro-sculpture apparaît souvent différente de celle de la coque. Ordinairement, ils sont fixés aux poils de l'hôte par la sécrétion cholétérique, le pôle operculé restant toujours libre. Dans des conditions normales, l'embryogenèse est généralement rapide et dure de quatre à huit jours, mais de faibles variations, notamment un peu de chaleur sèche, sont nocives aux œufs. Les jeunes poux sortent en soulevant l'opercule, grâce à la pression sanguine ou à un *ruptor ovi.* Ils ressemblent à leurs parents, sucent le sang dès leur éclosion, effectuent trois mues et accomplissent leur croissance en une semaine. Les saisons n'ont aucune influence sur les générations, qui se succèdent sans interruption sur l'hôte. Par contre, si la température du porteur augmente ou s'abaisse, les poux se répandent sur le pelage et cherchent à passer sur d'autres individus ; à n'importe quel stade du développement, une température de 54 °C pendant une demi-heure suffit à les détruire.

La présence de poux sur l'hôte provoque un certain nombre d'affections directes, réunies sous le nom de phthiriase hématopinique (prurit, dermatite, lésions de grattage, amaigrissement, etc.), et indirectes, comme les piroplasmoses et anaplasmoses bovines, et des rickettsioses, particulièrement le typhus exanthématique chez l'homme.

On connaît environ deux cent vingt-cinq espèces de poux ; deux sont inféodées à l'homme, une vingtaine aux Animaux domestiques et le reste est lié aux autres Mammifères (excepté les Marsupiaux), y compris les Mammifères marins, ce qui tend à démontrer que ces derniers sont plus anciens que les Anoploures. L'ordre comprend trois familles naturelles.

Les **Haematopinidae,** totalement aveugles, au corps plutôt allongé et couvert de soies sont des parasites exclusifs des Mammifères terrestres. On rencontre *Haematopinus eurysternus* sur les bovins, *H. ventricosus* sur les lapins, et *Limognathus setosus* sur les chiens.

Les **Echinophthiriidae,** également aveugles mais au corps trapu, couvert d'échinules ou d'écailles, vivent uniquement sur les Mammifères marins. *Echinophthirius horridus* se tient dans les narines des phoques et s'y trouve enfermé lorsque ceux-ci plongent ; les *Antarctophthirus,* qui restent dans la fourrure des otaries, portent sur le dos de nombreuses petites écailles qui retiennent l'air nécessaire à leur respiration durant les plongées.

Les **Pediculidae,** pourvus d'yeux pigmentés, parasitent l'homme et les singes. *Pediculus humanus,* avec ses deux formes *capitis* et *corporis,* attaque les gens malpropres, de même que le morpion *Phthirus pubis ;* deux autres espèces de *Phthirus* vivent, l'une sur le gorille et l'autre sur les chimpanzés.

Les « Rhynchotes »

Les Insectes ainsi nommés appartiennent à deux ordres si proches qu'ils ont été pendant longtemps et restent encore considérés par nombre d'entomologistes comme les deux subdivisions d'un même ordre, baptisé originellement Hémiptères par Linné en 1758. Le terme Hémiptères est satisfaisant du point de vue de l'homogénéité de la nomenclature, puisqu'il s'achève en *-ptères* (ailes), de même que les noms de presque tous les ordres de Ptérygotes. Mais le caractère alaire auquel il fait allusion (ailes antérieures coriaces dans leur moitié basale et membraneuses dans l'autre moitié) ne s'observe en fait que chez une minorité des Insectes réunis sous cette appellation.

Le terme de « Rhynchotes », substitué à celui d'Hémiptères par Fabricius en 1803 puis par Burmeister en 1835, présente l'avantage d'être fondé sur une particularité vraiment commune à tous ces Insectes : le rostre ou « trompe » (*rhynchos* en grec) que constituent leurs pièces buccales piqueuses. Néanmoins, le terme de « Rhynchotes », discordant parmi les autres noms d'ordres, est resté assez peu utilisé. La dénomination la plus généralement admise résulte de la subdivision par Latreille en 1810 des Hémiptères en deux sous-ordres, les Homoptères et les Hétéroptères ; elle n'est pourtant guère satisfaisante, car « Hémiptères-Homoptères » constitue une antinomie et « Hémiptères-Hétéroptères » un pléonasme.

Cette difficulté de terminologie disparaît lorsqu'on se rend compte que les deux groupes en question sont reconnus à l'heure actuelle comme des ordres bien distincts : d'une part les Homoptères, d'autre part les Hémiptères *sensu stricto.* Certes, les seconds dérivent sans aucun doute des premiers, plus anciens qu'eux, mais, depuis le Trias, ils ont évolué séparément. Aujourd'hui, la différence entre les Homoptères et les Hémiptères est plus grande que celle qui existe entre les Trichoptères et les Lépidoptères, lesquels, eux aussi proches parents à l'origine, forment maintenant, selon l'avis général, deux ordres indépendants.

Caractères communs aux Homoptères et Hémiptères. Le seul caractère à la fois constant chez les « Rhynchotes » et bien différent de ce qui existe chez les autres Insectes tient à la conformation des pièces buccales. En général, le seul élément de ces pièces visible à l'extérieur est le

▼ *A gauche, microphotographie d'un mâle de* **Pediculus humanus corporis,** *le pou de corps de l'homme (× 21 × 1,3) ; au centre, une femelle de la même espèce (× 15 × 1,3) ; à droite,* **Pediculus humanus capitis,** *le pou de tête (× 36 × 1,3).*

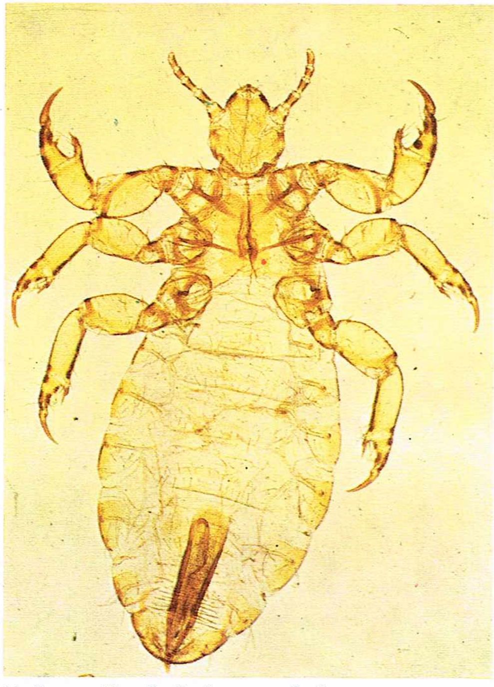

M. Bavestrelli - C. Bevilacqua - S. Prato

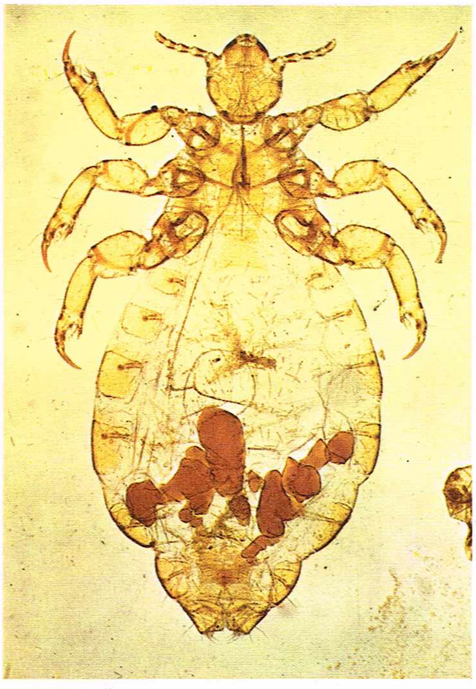

M. Bavestrelli - C. Bevilacqua - S. Prato

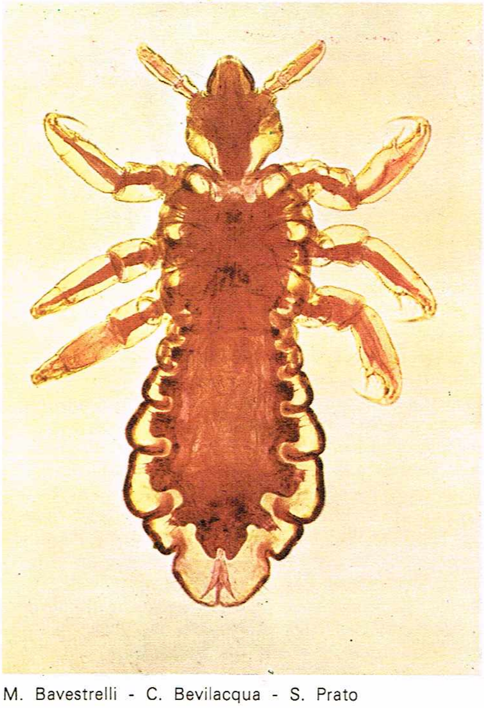

M. Bavestrelli - C. Bevilacqua - S. Prato

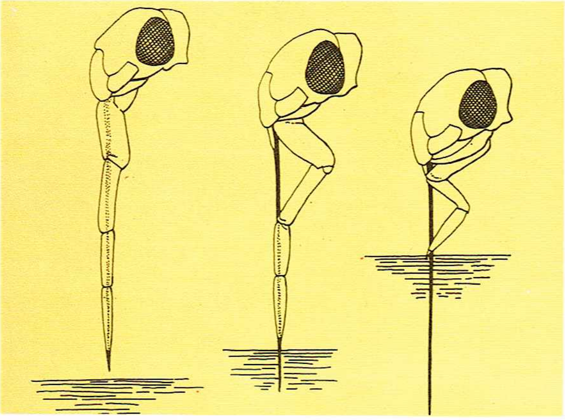

I.G.D.A.

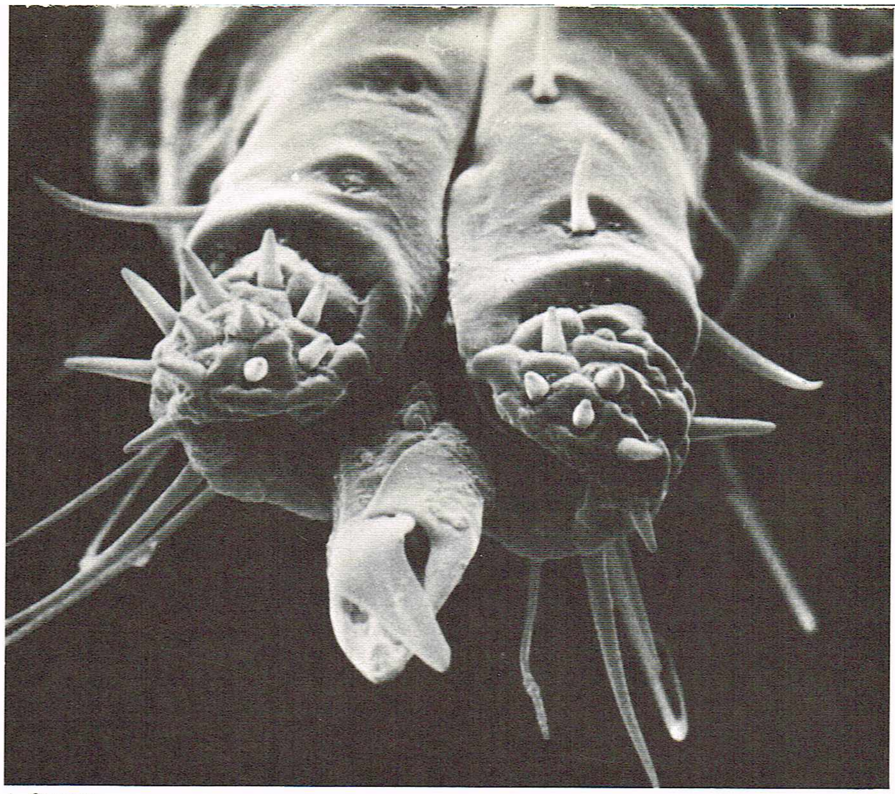

J. Carayon

▲ *A gauche, schéma de la piqûre d'un Rhynchote, montrant comment le labium (rostre) guide les stylets, puis se raccourcit pour permettre leur pénétration. A droite, micrographie électronique de l'apex du rostre d'une punaise de lit (document réalisé avec le microscope électronique à balayage du laboratoire de géologie du Muséum).*

rostre, formé principalement par le labium allongé, segmenté et creusé en gouttière sur toute sa longueur. Quatre fins stylets, bien plus longs encore, sont chacun profondément insérés à l'intérieur de la tête dans une *poche gnathale*. Très mobiles grâce à des muscles qui les font saillir ou se rétracter, ces stylets se réunissent à la base du labium et alors, étroitement coaptés, constituent un faisceau logé au repos dans la gouttière rostrale. Les deux stylets internes, ou maxillaires, ménagent entre eux un canal alimentaire et un canal salivaire. Ils sont entourés par les stylets mandibulaires, dentés en scie vers l'extrémité, qui jouent le rôle principal dans la pénétration des tissus où l'Insecte puise sa nourriture.

L'hypopharynx, non transformé en stylet vulnérant comme chez les moustiques, est une pièce assez courte, massive, dont la partie antérieure, effilée, se place entre les stylets buccaux près de leur jonction et les guide grâce à des rainures latérales, où ils s'engagent. Dans le corps de l'hypopharynx se trouve une *pompe salivaire* complexe, fonctionnant selon le principe des pompes à diaphragme ; elle aspire la salive provenant des glandes labiales, puis l'injecte dans le canal salivaire des stylets.

Deux paires de plaques contribuant à former les parois latérales de la tête caractérisent également les « Rhynchotes ». Les unes, antérieures, nommées *plaques lorales*, ou *lorum*, ou encore « *plaques mandibulaires* », semblent être de simples replis du tégument céphalique. Derrière elles, les *plaques maxillaires* représentent vraisemblablement la majeure partie des maxilles, dont la lacinia se serait transformée en stylet.

D'autres caractères, moins significatifs, s'observent chez la plupart des « Rhynchotes », sinon chez tous. Les antennes, généralement courtes, sont composées d'un petit nombre d'articles. Le thorax ne montre en vue dorsale qu'un pronotum en général grand et le scutellum mésothoracique. Les ailes antérieures sont d'ordinaire plus sclérifiées que les postérieures, qu'elles recouvrent au repos. L'aptérisme, ou le brachyptérisme, sont fréquents. L'abdomen est composé de onze segments, dont le premier, plus ou moins réduit, est fusionné avec le suivant ; les huitième et neuvième urites des femelles portent un ovipositeur plus ou moins développé. Les ovaires sont acrotrophiques. Les cerques sont toujours absents. Les glandes labiales, dites encore « salivaires », sont très développées et comportent une paire de glandes principales et une paire de glandes accessoires. Chez les « Rhynchotes », la symbiose avec des microorganismes logés dans des « mycétomes » ou dans des diverticules intestinaux est très fréquente.

Différences entre Homoptères et Hémiptères. Les différences les plus nettes s'observent dans la conformation de la tête et dans celle des ailes.

Chez les Homoptères, la tête est en général très infléchie par rapport à l'axe longitudinal du corps et située derrière le rostre, qui s'y insère dans la région basale ; sa paroi est uniquement membraneuse, sans limite visible jusqu'au bord antérieur du thorax ; c'est pourquoi on a l'impression que le rostre naît entre les pattes.

Chez les Hémiptères, la tête, peu ou pas infléchie, porte à son extrémité antérieure le rostre, et montre derrière lui une région ventrale non pas membraneuse, mais sclérifiée, appelée la *gula*, dont le bord postérieur est bien délimité. En outre, le *tentorium*, ou endosquelette du crâne, présent chez la plupart des Insectes et notamment chez les Homoptères, fait défaut chez les Hémiptères.

Alors que les ailes antérieures des Homoptères ont une consistance uniforme souvent un peu cornée, celles des Hémiptères, appelées *hémélytres*, sont en général divisées par une ligne oblique en deux parties : la *corie*, basale, assez épaisse et dure, et la *membrane* apicale, mince et souple. Sur les ailes postérieures, le sillon principal, nommé *sillon cubital*, simple chez les Homoptères, se divise ordinairement en deux branches chez les Hémiptères. Les différences alaires, très marquées dans la plupart des cas, sont parfois peu ou pas visibles. Quelques Hémiptères actuels, qui figurent en général — on doit le souligner — parmi les représentants les plus « primitifs » de l'ordre, ont des ailes antérieures dépourvues de division nette entre la corie et la membrane, et donc assez comparables à celles des Homoptères. D'autre part, les ailes antérieures de certains Homoptères montrent une ligne nodale oblique que l'on peut considérer comme l'ébauche d'une délimitation entre la corie et la membrane. C'est pourquoi, lorsque seuls les caractères des ailes et quelques autres caractères morphologiques sont visibles, comme c'est le cas chez les premiers Hémiptères fossiles, encore très proches d'ailleurs des Homoptères, il peut être difficile de reconnaître auquel des deux ordres on a affaire.

Même lorsqu'un des grands critères habituels ne peut être utilisé, les Homoptères et les Hémiptères actuels peuvent être distingués grâce à un ensemble de différences morphologiques, anatomiques et structurales, peut-être moins apparentes mais néanmoins significatives.

Ordre des Homoptères

Aux caractères fondamentaux séparant les Homoptères des Hémiptères (tête opisthognathe dépourvue de gorge, et ailes antérieures homogènes ou *homélytres*) s'ajoute un certain nombre de particularités structurales et bionomiques. Au repos, les Homoptères placent leurs ailes en toit au-dessus de leur corps (position stégoptère). Leur tégument est riche en formations glandulaires, surtout cirières. Ce sont des Insectes exclusivement terrestres qui ne se nourrissent que de sève ou de sucs cellulaires. Le tube digestif, sans doute le plus complexe qui soit chez les Insectes, possède généralement, excepté chez certains Fulguroïdes et Cochenilles Diaspides, un dispositif remarquable, la *chambre filtrante*, qui permet l'expulsion d'excréments sucrés connus sous le nom de *miellat*. Les symbiontes sont groupés dans des cellules spéciales, les *mycétocytes*, ou dans des cellules sanguines. La ponte est endophyte ou exophyte et le développement graduel présente des cas d'hémimétabolie, d'allométabolie et de paramétabolie.

L'ordre des Homoptères, qui réunit un grand nombre d'espèces dont environ cinquante mille sont connues,

▼ *Appareil buccal suceur d'un Hémiptère, vu de profil (× 14) ; de part et d'autre du labium composé de quatre articles, on voit les stylets maxillaires et mandibulaires qui y sont normalement logés.*

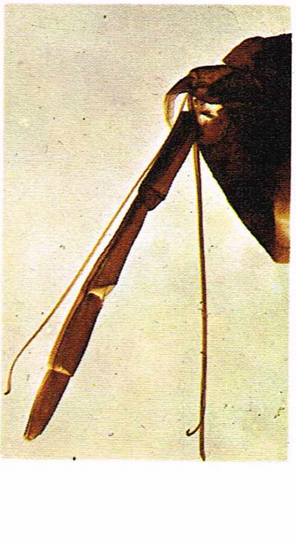

M. Bavestrelli - C. Bevilacqua - S. Prato

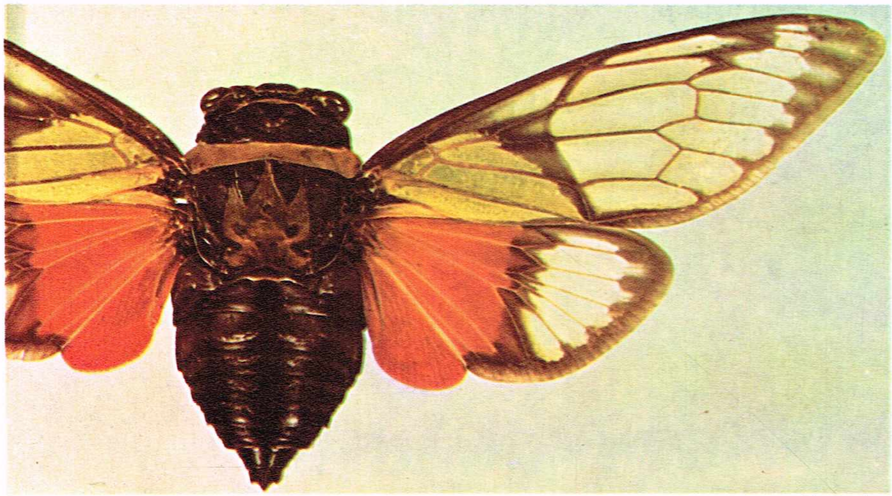

M. Boulard

▲ **Salvazana imperialis,** *la cigale impériale du Laos; son envergure atteint 12 cm.*

▼ *Appareil sonore et appareil auditif d'une cigale mâle,* **Cicada orni,** *en vue trois quarts postérieure droite. te, tendon reliant le muscle à la face interne de la cymbale; cpt, cymbacalypte; cyb, cymbale; ca, capsule auditive; op, opercule; mbj, membrane jaune; pli et plo, plateaux d'insertion et d'origine du muscle cymbalique gauche; mt, miroir ou tympan; crt, crista tympanique; eg, épigastre; mcd, muscle cymbalique droit (schéma original).*

se subdivise en trois sections : les Auchenorhyncha et les Sternorhyncha, abondants et répartis sur tout le globe, renferment de nombreuses formes nuisibles aux cultures, ainsi que des trophobiontes pour les fourmis qui s'alimentent de leur miellat; les Coleorhyncha forment un petit groupe relicte confiné à la région tasmanienne.

Chez les *Auchenorhyncha,* le rostre est inséré en avant de la base des pattes antérieures; les antennes sont munies d'un scape et d'un pédicelle bien développés, puis d'un nombre variable d'articles sétiformes aux séparations imprécises. Les ocelles sont au nombre de deux et parfois trois. Les tarses sont trisegmentés. La plupart de ces Insectes sont sauteurs, non pas à la manière des Orthoptères, mais par le jeu de muscles intrathoraciques agissant sur l'articulation de la hanche et du trochanter des pattes postérieures; celles-ci, constituées comme les autres pattes, quoique plus longues, possèdent à l'apex des tibias une demi-couronne de forts spicules, qui font office de crampons au moment du saut. Enfin, les mâles peuvent avoir un appareil stridulant plus ou moins développé, qui est caractéristique et sans équivalent dans la classe des Insectes; les femelles sont pourvues d'un ovipositeur térébrant ou tranchant. Les Auchenorhyncha sont répartis en quatre super-familles : les Cicadoidea, les Cercopoidea, les Cicadelloidea et les Fulgoroidea.

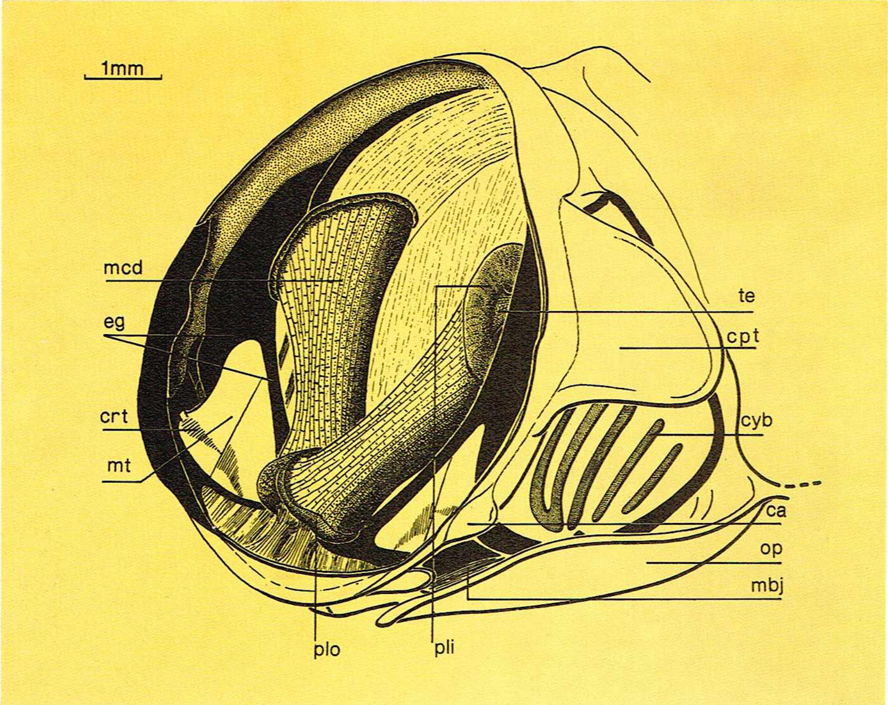

M. Boulard

Super-famille des Cicadoidea

Les Cicadoidea, ou cigales, s'opposent à tous les autres Auchenorhyncha par des caractères morpho-anatomiques et biologiques particuliers : une tête pourvue de trois ocelles, un corps massif au mésonotum très développé, trapézoïdal et bombé, un organe sonore et un système auditif très élaborés, l'absence d'appareil saltatoire, et un ovipositeur en forme de tarière lancéolée. Ce sont des hémimétaboles particulièrement remarquables : la vie imaginale, très brève, quelques semaines au plus, contraste avec la vie larvaire souterraine toujours fort longue, laquelle peut durer cinq ans pour *Lyristes plebeius,* notre plus grosse espèce, dix-sept ans pour *Magicicada septemdecim* (nord de l'Amérique), qui détient sans doute le record de longévité chez les Arthropodes.

Les cigales comptent deux mille espèces, surtout héliophiles et répandues dans les régions chaudes du globe; une douzaine d'espèces habitent la France, principalement dans le Sud. Elles offrent une grande variété de tailles et de couleurs. La plus grande, *Pomponia imperatoria* de Malaisie (10 cm de long), et la plus petite, *Prunasis pulcherrima* du Brésil (12 mm de long), sont les deux espèces extrêmes du groupe. Beaucoup de genres comme *Gaeana, Tosena, Salvazana* et *Muansa* présentent des ailes brillamment colorées, rivalisant de beauté avec les papillons. Très généralement, les mâles et les femelles possèdent le même habitus, mais on connaît quelques rares cas d'hétérochromie et de brachyptérisme liés aux sexes : ainsi chez *Musoda flavida,* les mâles sont verts et les femelles sont brunes; les femelles de *Spoerryana llewelyni* ont des ailes très réduites par rapport à celles des mâles. Cette dernière espèce, ainsi que quelques autres, vit exclusivement dans la strate herbacée, bien qu'en grande majorité, les cigales se tiennent sur les arbres. Les ailes peuvent être transparentes comme chez *Lyristes* et *Cicada* ou plus ou moins couvertes de dessins évoquant la texture des écorces, comme chez les *Platypleura* et les *Ugada,* par exemple, ou celle des thalles lichéniques comme chez *Pycna hecuba* et les *Orapa,* ou bien encore, et c'est le cas des *Hovana* et des *Lacetas,* elles ressemblent à des feuilles. Ces livrées rendent les cigales difficiles à voir et seul leur chant permet de les repérer. Le chant est une stridulation émise grâce à un appareil fort complexe, apanage des mâles. Il convient de donner quelques indications sur sa structure et ses particularités, en raison de son entité biologique et de son importance taxionomique.

Contrairement aux dispositifs acoustiques connus chez les autres Insectes, qui mettent en œuvre des attributs portés par des parties — modifiées ou non — du corps dont la fonction première n'est pas d'émettre des sons, celui des cigales est un organe original voué uniquement à la stridulation. Situé dans le premier urite, il comprend deux ensembles symétriques par rapport au plan sagittal. Pour chacun, l'élément sonore est une plaque courbe de cuticule parcheminée, renforcée de côtes mais déformable, appelée timbale ou cymbale. Chaque cymbale est reliée à un muscle extrêmement puissant par une pièce moyenne tendineuse faite d'une lame attachée à la face interne de la timbale et d'un plateau donnant insertion au muscle; celui-ci prend son origine sur l'entogastre, pièce squelettique interne médio-ventrale, propre aux cigales mâles. La contraction des muscles cymbaliques déprime les timbales, et le relâchement leur permet de reprendre leur courbure première, chaque déformation s'accompagnant de claquements. Les contractions fort rapides (environ trois cent quatre-vingts par seconde), la mise en vibration des cymbales (environ quatre mille cinq cents cycles à la seconde) et l'amplification des sons qui en résulte par le biais de véritables caisses acoustiques : telle est l'origine du chant des cigales. On peut distinguer une caisse de résonance principale, impaire, interne et constante, occupant la plus grande partie de l'abdomen, et deux ou quatre enceintes accessoires, paires, latéro-externes, pouvant être incomplètes ou même manquantes. Le plus fréquemment, elles sont ventrales, constituées par l'espace compris entre le corps et les opercules, plaques épimérales de dimensions variables selon les espèces. Très peu de cigales sont dépourvues d'opercules (cas exceptionnel des *Pulcherrima*), dont le rôle premier est sans doute de protéger les fines membranes de la caisse interne, les membranes

jaunes et les miroirs, ces derniers étant aussi les tympans de l'appareil auditif (lequel comprend en outre deux capsules renfermant les éléments intégrateurs). Des enceintes dorsales existent également, mais pas chez tous ces Rhynchotes. Elles revêtent une importance particulière, puisque l'on établit la classification supérieure des Cicadoidea en fonction de la présence et des particularités de ces organes. Les enceintes dorsales comprennent l'espace entre la timbale et un volet tergal ou *cymbacalypte* émanant du second urite; les espèces (environ mille deux cent cinquante) formant la famille des **Cicadidae** sont seules à les présenter : closes ou presque dans la sous-famille des *Platypleurinae (Platypleura* et *Lyristes)* mais largement ouvertes chez les *Cicadinae (Cicada* et *Gaeana)*.

Les **Tibicinidae,** dépourvus d'enceintes dorsales (les cymbacalyptes manquent et les timbales sont à nu), ont pour type *Tibicina haematodes,* notre belle cigale rouge. Deux espèces relictes, confinées au sud de la région australo-tasmanienne, ne possèdent que des timbales rudimentaires et non fonctionnelles; ces espèces représentent les **Tettigarctidae** dont les autres formes connues sont des fossiles du Mésozoïque.

Enfin, chez un très petit nombre, les **Platypediidae,** l'organe cymbalique fait curieusement défaut; les *Platypediinae,* nord-américaines, n'ont d'autre ressource pour bruire que de frapper leur corps avec leurs ailes, tandis que les *Ydiellinae,* de la Côte-d'Ivoire, disposent d'une crête stridulatoire alaire.

Le chant des cigales, qui chez de nombreuses espèces (*Cicada, Magicicada, Quesada,* etc.) semble jouer un rôle important dans le regroupement des populations, est avant tout un appel nuptial chez d'autres *(Lyristes, Cicadatra, Cicadetta,* etc.). Lorsqu'elles sont sexuellement mûres, les femelles rejoignent les mâles et s'accouplent à eux, certaines après un court prélude où elles claquent des ailes *(Cicadatra, Tibicina, Cicadetta* et *Spoernyana)*.

L'appareil reproducteur femelle présente des caractères dignes d'intérêt; il s'ouvre à l'extérieur par deux orifices, l'un pour la copulation, l'autre pour la ponte, et il offre un bel exemple de substitution de fonction; en effet, un organe banal comme l'oviducte commun, qui n'est à l'origine qu'un simple tube musculaire conducteur d'ovules, a acquis le rôle capital perdu par la spermathèque; cette dernière est une formation très différenciée mais dont la fonction secondaire, sécrétrice, a supplanté la fonction principale de réception et de mise en réserve des spermatozoïdes destinés à la fécondation (Boulard).

Selon les espèces, la femelle dépose environ quatre cents œufs dans des logettes, simples ou doubles, creusées dans des tiges vivantes ou mortes. Durant cette opération, elle garde la tête en haut (exceptionnellement en bas comme c'est le cas pour l'espèce française *Cicadetta pygmea,* et pour *Spoerryana llewelyni* du Kenya).

Dès leur naissance, les larves vont gagner le sol et s'y enfoncer au moyen de leurs pattes antérieures conformées pour fouir et couper, tandis que les pattes intermédiaires, inversées et utilisées comme des béquilles, leur permettent de se mouvoir aisément dans les terriers tubulaires. Les larves aspirent la sève des racines et par la suite urinent abondamment.

Une particularité bionomique remarquable des cigales tient au fait que les larves utilisent leur urine pour amollir le front de mine de leurs galeries et en maçonner les parois. Chez certaines espèces des forêts équatoriales africaines, ce maçonnage se traduit par la formation d'une gangue quasi imperméable et par suite le liquide excrémentiel s'accumule au fond du terrier. Les larves de *Muansa clypealis* et de certains *Ugada* se sont adaptées à ce milieu aqueux peu commun, grâce à des glandes spéciales qui sécrètent un épais tapis de cire laineuse, isolant les stigmates et servant de réserve d'air. Les larves séjournent, immergées, dans leur logette, et vont de temps à autre respirer et renouveler leur provision d'air en faisant légèrement saillir leur abdomen cireux au-dessus de la surface du liquide (Boulard). Au cours du dernier stade, les larves agrandissent leur mine vers le haut, en un long puits qu'un petit nombre d'espèces, dont *Muansa clypealis* et la cigale de dix-sept ans, prolongent au-dessus du sol par une tour de terre d'environ 15 cm de hauteur, mais pouvant atteindre 50 cm pour celle de *Fidicina chlorogena,* espèce brésilienne.

M. Boulard

M. Boulard

▲ *A gauche, une cigale,* **Cicadetta montana,** *en train de pondre (Europe). A droite,* **Pycna hecuba** *(Afrique orientale).*

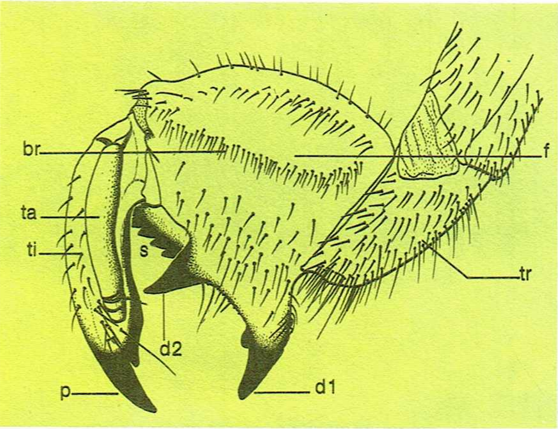

J. Boudinot

◀ *Face interne de la patte fouisseuse droite de la larve de* **Cicada orni** *au dernier stade; f, fémur; tr, trochanter; d^1, d^2, crocs fémoraux; p, pioche tibiale; s, scie fémorale; ti, tibia; ta, tarse; br, brosse (d'après Boulard).*

Les cigales comptent très peu d'espèces nuisibles; cependant quelques-unes se révèlent être des obstacles sérieux pour la canne à sucre et les caféiers. Les Oiseaux (moineaux, guêpiers, hérons notamment) sont les principaux ennemis des cigales. Enfin, sur tous les continents, des ethnies consomment les plus grosses espèces, particulièrement larves et adultes en éclosion.

Super-famille des Cercopoidea

Les Cercopoidea, ou cercopes, de taille moyenne ou petite, se reconnaissent d'emblée à leur forme trapue, à leur mésonotum triangulaire et à leurs tibias postérieurs, cylindriques et munis d'un ou deux gros spicules sur la face externe. Ils comprennent mille cinq cents espèces composant quatre familles très inégales : les *Cercopidae,* les *Aphrophoridae,* les *Clastopteridae* et les *Machaerotidae,* les deux premières étant numériquement les plus importantes. De teinte neutre le plus souvent, les cercopes présentent parfois de belles livrées : taches et rayures rouges sur fond noir des *Hemitriecphora* européens, jaune marbré de blanc ou de gris des *Ptyelus flavescens* africains, lesquels ont en outre les yeux bleus. Arboricoles et graminicoles, les cercopes se trouvent des régions chaudes aux zones tempérées froides; notre faune en compte une douzaine d'espèces. Pour la marche, ils n'utilisent que les deux premières paires de pattes, la dernière se trouvant repliée sous le corps, prête pour la vigoureuse détente qui précède toujours le vol. L'ovipositeur a la forme d'une lame tranchante et la ponte est endophyte.

C'est lors de leur développement postembryonnaire, du type hémimétabole, que ces Rhynchotes offrent le

▼ *La larve de* **Muansa clypealis,** *qui passe son dernier stade larvaire en milieu aqueux, rebouche ici son terrier.*

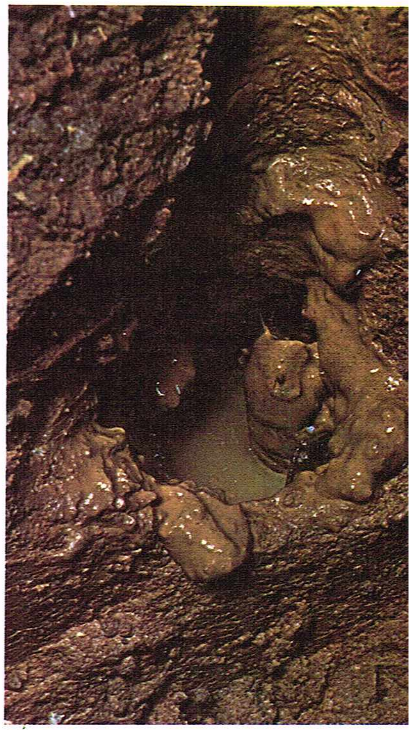

M. Boulard

M. Boulard

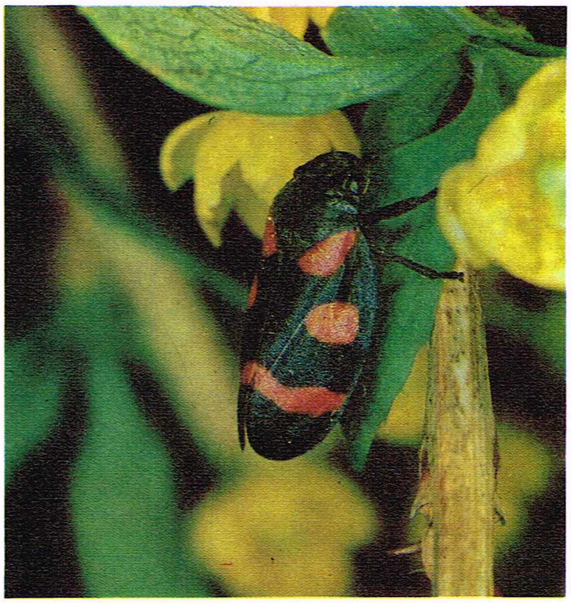

I. Bucciarelli

plus d'intérêt sur le plan biologique. La larve, qui ne saute pas, accomplit toute sa croissance, et souvent même la mue imaginale, dans un milieu spumeux, appelé « écume printanière » ou « crachat de coucou », qu'elle produit grâce à une particularité structurale remarquable. Des replis tergaux de l'abdomen forment une cavité ventrale, tubulaire, dans laquelle s'ouvrent les orifices respiratoires, et qui peut être fermée par un clapet constitué des deux derniers urites. Dès sa naissance, la petite larve se place tête en bas, aspire de la sève puis, par l'anus, émet en abondance un liquide qui l'entoure bientôt totalement. Alors, contractant la cavité sternale, elle « insuffle » l'air dans le liquide et celui-ci, légèrement filant, en partie grâce à la sécrétion de glandes pariétales situées près de l'anus, se gonfle de bulles. Excrétion et contractions continuent jusqu'à ce que l'Insecte disparaisse sous une grosse masse spumeuse, qu'il n'aura plus ensuite qu'à entretenir. Les espèces grégaires comme les *Ptyelus* africains et malgaches constituent ainsi, par la coalescence des masses spumeuses individuelles, des manchons d'écume gouttant sans cesse au point de former des flaques aux pieds des arbres (principalement des Légumineuses) qu'ils parasitent.

▲ *A gauche, une larve isolée du cercope africain* **Ptyelus flavescens** *construisant son abri de bulles; cette espèce atteint 18 mm. A droite,* **Cercopis sanguinolenta,** *un Cercopide européen.*

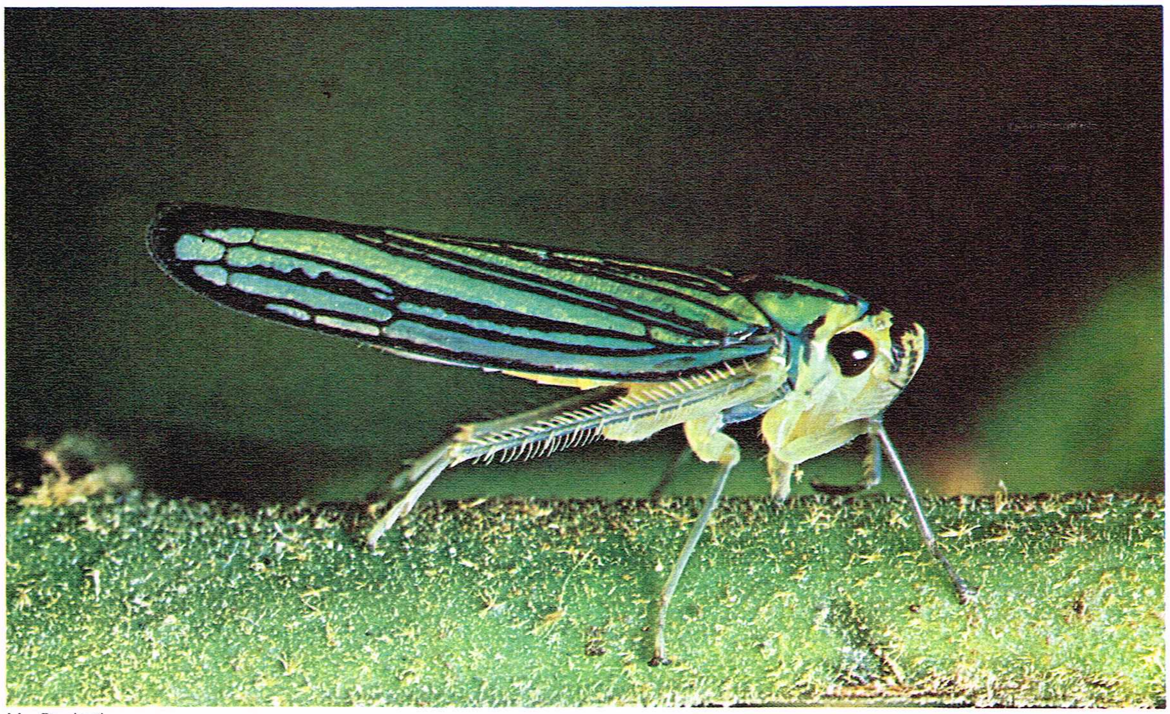

M. Boulard

▶ **Poecilocarda nigrinervis,** *une cicadelle d'Afrique centrale, en train de s'alimenter sur un rameau de cacaoyer.*

Les **Machaerotidae**, surtout représentés en Orient et en Australie, édifient, en plus de l'écume, des abris solides, en cônes allongés, ou droits comme chez les *Pectinariophyes*, ou hélicoïdaux comme font les *Soamachaerota;* ces abris sont construits grâce à des déchets digestifs calcareux. Une fente ménagée selon une génératrice de la face collée au rameau permet le passage des pièces buccales. Peu de Cercopes sont nuisibles; on retiendra seulement les *Thomaspis* d'Amérique centrale et les *Mahanarva* du Brésil qui sont capables de spolier les cannes à sucre jusqu'à entraîner leur dépérissement.

Super-famille des Cicadelloidea

Les Cicadelloidea ou Jassoidea rassemblent plus de neuf mille Homoptères paurométaboles que distinguent trois caractères principaux : des tibias prismatiques garnis d'épines, la nervation homélytrale, dépourvue de veine sous-costale mais dont la veine médiane bifurque au moins une fois, et les branches antérieures du tentorium sans connexion avec la postérieure.

Les Cicadelloidea comprennent sept familles : les Nicomiidae, les Biturritiidae, les Aetalionidae, les Membracidae, les Hylicidae, les Eurymelidae et les Cicadellidae. Les trois premières familles et la cinquième sont des groupes relictes, mais les autres peuvent être considérées comme arrivées au stade buissonnant de leur évolution. Ils vivent tous sur des arbres ou sur des herbes et certains ont une grande importance économique soit par spoliation et lyse salivaire, soit par transmission de maladies à virus lors des prises de nourriture, soit par leur miellat qui provoque sur les feuilles des brûlures osmotiques ou entraîne le développement de la fumagine.

Les cicadelles les plus pernicieuses appartiennent à la famille des **Cicadellidae** ou **Tettigellidae** dont on connaît quelque six mille espèces réparties en dix-huit sous-familles. Leur taille varie de 2 à 30 mm; la tettigelline *Poecilocarda nigrinervis* présente le type morphologique de base qui prédomine. Partant de lui, on observe une multitude de variations, souvent surprenantes, intéressant le corps entier ou l'une de ses parties, particulièrement la tête (chez *Petalocephala* et *Listrophora*) et le thorax (chez *Procomia* et *Ledra*). Les couleurs les plus courantes sont le brun et le vert, cependant, les espèces bariolées abondent. Celles-ci s'intègrent au milieu grâce à leurs livrées disruptives ou homomorphes comme c'est le cas par exemple pour les *Paradorydium*, fusiformes et monochromes, qui sont inféodés aux Graminées des savanes africaines. Les cicadelles se rencontrent partout. Beaucoup sont polyphages, d'autres monophages comme *Ulopa reticulata* qui vit sur les bruyères. Elles aspirent les sucs foliaires, le xylème ou le phloème avec des préférences plus ou moins marquées suivant les espèces et la phase du développement (Carle et Moutous).

Les jeunes cicadelles sautent comme les adultes; les mâles stridulent, mais le système auditif cicadéen manque et ces Insectes semblent percevoir les sons grâce aux récepteurs particuliers placés dans le pédicelle de leurs antennes (Howse et Claridge). Univoltines ou plurivoltines, la plupart des espèces passent la mauvaise saison à l'état imaginal; mais certaines pondent des œufs qui hivernent. C'est notamment le cas de *Scaphoideus littoralis* qui, originaire des U.S.A. où on ne le connaît que comme entité taxinomique, est devenu en France le principal agent de la flavescence dorée, une grave virose de la vigne (Baggiolini). Cas inverse, *Macropsis fuscula* est en Europe vecteur du virus qui provoque le rabougrissement des framboisiers, on le trouve aussi au Canada mais là il ne transmet aucune maladie. Le nombre d'œufs pondus varie considérablement d'une espèce à une autre : il est de seize pour *Graminella nigrifrons* porteur d'une virose à maïs, de deux cent cinquante pour *Empoasca fabae*, nuisible aux Solanées, le record étant détenu par *Homalodisca insolita* aux U.S.A., qui transporte un virus du pêcher : onze cent soixante-dix œufs sont pondus en quatre-vingt-sept jours (Pollard). La reproduction est presque toujours bisexuée, seule une cicadelle néarctique, *Agallia quadrinotata*, présente un cas de parthénogenèse thélytoque.

Une espèce est connue pour être termitophile *(Ulopella termiticola)* et quelques autres, voisines des *Agallia*, vivent en commensales avec des fourmis. Ce fait, peu fréquent chez les cicadelles, est une règle pour les familles suivantes.

Les **Eurymelidae** réunissent une centaine d'espèces australiennes et néo-guinéennes. Une taille moyenne (3-14 mm) et la présence des deux ocelles sur la partie antéro-ventrale de la tête sont leurs principaux traits morphologiques distinctifs. La plupart vivent en groupes, constitués d'imagos et de jeunes (ceux-ci ne sautant pas) accompagnés de fourmis; ces groupes se rencontrent principalement sur les branches d'eucalyptus, à l'exception des remarquables *Pogonoscopini* qui se tiennent à l'intérieur des fourmilières situées aux pieds de ces grands arbres, et se nourrissent sur les racines (Evans). Les *Pogonoscopini* sont probablement les seuls Auchénorhynches myrmécophiles au sens strict du terme.

Les **Membracidae** ou Membracides regroupent les Homoptères les plus étranges qui soient; leur originalité provient de la tête dont le vertex est vertical et la face quasi horizontale, et du prothorax dont le notum, très développé, coiffe la tête et une partie plus ou moins grande

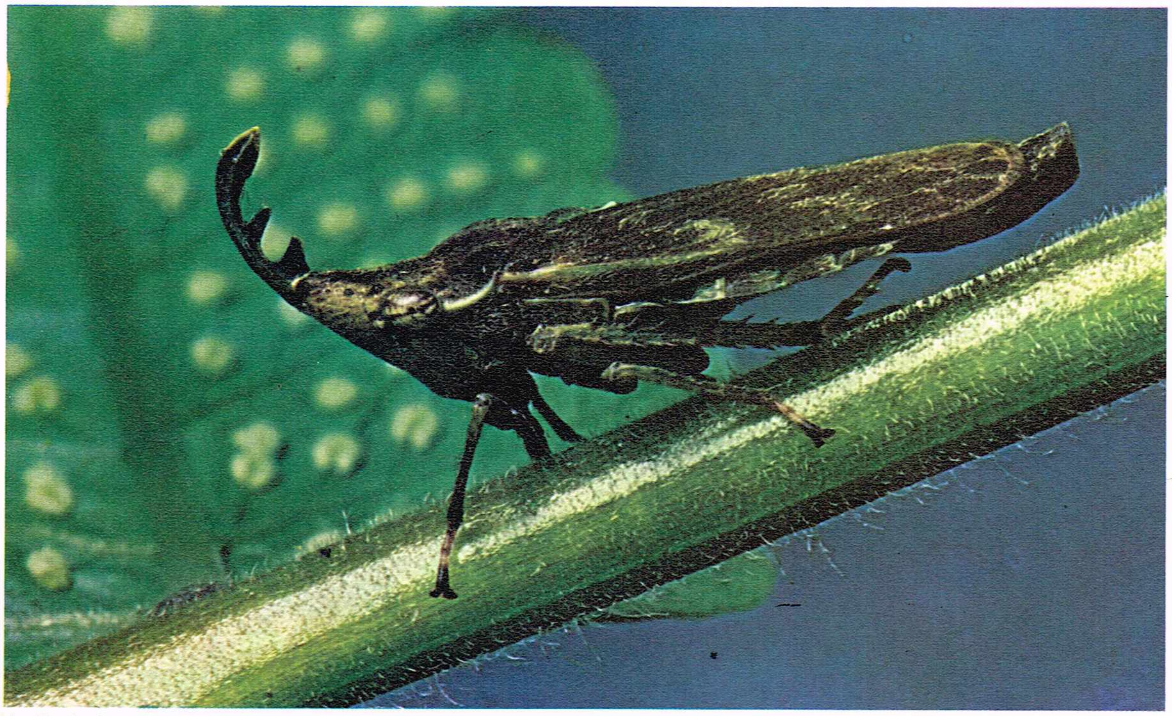

M. Boulard

◀ *La famille des Hylicidés comprend des cicadelles de genre* **Wolfella** *dont l'une des caractéristiques est de porter un processus céphalique plus ou moins recourbé vers l'arrière.* **Wolfella ensifera** *est un des rares Insectes vivant sur les fougères; on le rencontre en Afrique équatoriale.*

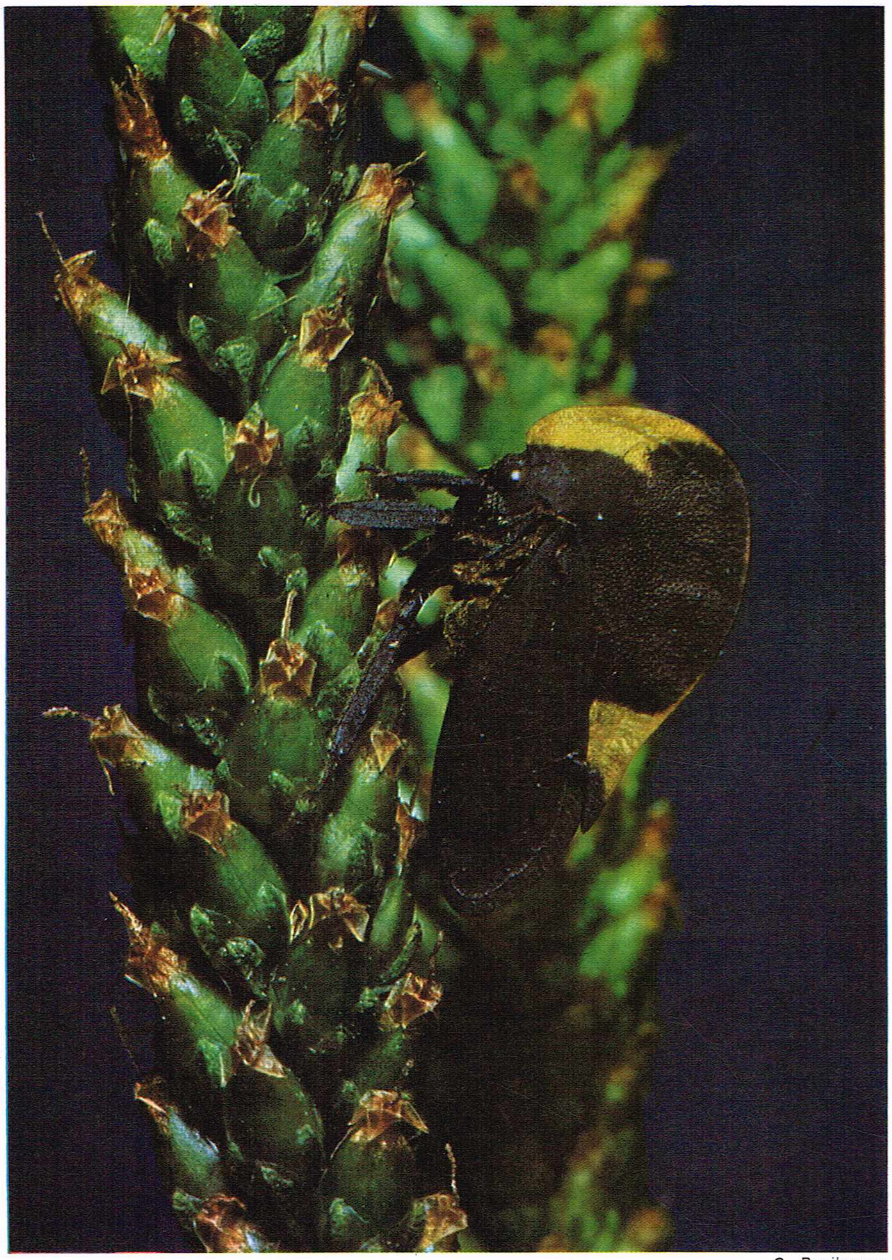

C. Bevilacqua

▲ *Chez les Membracides, le notum recouvre la tête et une partie du corps, à la manière d'un casque; ici* **Membracis tectigera** *d'Amérique du Sud.*

du corps, à la manière d'un casque qui serait disproportionné et porterait des ornements bizarres, voire grotesques. De taille plutôt petite, les Membracides vivent essentiellement dans les pays chauds; aussi la France ne compte-t-elle que trois espèces indigènes. Ils connaissent un très grand épanouissement en Amérique où l'on ne recense pas moins de la moitié des deux mille sept cents espèces connues. Par contre, on ne les trouve ni à Madagascar ni en Nouvelle-Zélande, terres isolées depuis le Tertiaire, ce qui semble montrer que les Membracides se seraient différenciés vers la fin de cette période. Ici, il faut faire remarquer que la Grande Ile a toutefois permis une évolution comparable, quoique différée, à partir d'une branche de cicadelles primitives, les *Ulopinae,* et plus précisément du seul genre *Coloborrhis.* Ce genre, d'origine gondwanienne, comprend maintes espèces malgaches arborant un habitus membracidomorphe.

La forme du pronotum varie parfois suivant le sexe de l'individu : au contraire des femelles, les mâles de *Tyranotus* par exemple, ou de certains *Platybelus,* sont acères; chez les *Umbonia* et les *Heteronotus,* la différence est telle que mâles et femelles ont pu être décrits sous des taxa distincts. Néanmoins, la plupart présentent des attributs identiques ou fort voisins. On a beaucoup écrit sur ce développement insolite du pronotum, interprété tantôt comme un camouflage sélectionné, tantôt comme un caprice de la nature. Des recherches récentes ont montré l'inutilité bionomique des expansions pronotales et leur caractère d'orthogenèse hyperthélique; l'étude des représentants des genres *Hamma,* afro-tropical, et *Membracis,* néo-tropical, a même permis la vérification sur les espèces actuellement vivantes de la loi des hyperthélies établie par la paléontologie (Boulard, Strumpel).

Cependant les Membracides s'accommodent fort bien de leur encombrant pronotum et plusieurs d'entre eux possèdent suffisamment de vitalité pour faire obstacle à certaines cultures, comme c'est le cas pour *Stictocephala,* ou pour envahir des continents, témoin *Ceresa bubalus,* le buffalo-treehopper américain trouvé pour la première fois en France vers 1918 et qui envahit progressivement toute l'Europe, causant quelques dommages dans les vergers. Fort voisins des cicadelles sur le plan biologique, les Membracides montrent une tendance arboricole plus accusée. L'oligophagie semble de mise chez les adultes tandis qu'une monophagie assez stricte est imposée aux larves, sédentaires et incapables de sauter.

Les larves revêtent un aspect très différent de celui des adultes : leur thorax ne présente pas les processus imaginaux mais garde une forme plus ou moins conique, standard à travers toute la famille. Les larves sont souvent douées d'homochromie nutricielle et possèdent des attributs phanériques (replis, bosses tégumentaires, poils...) implantés sur l'ensemble du corps. Elles se tiennent immobiles, plaquées contre le rameau, la continuité entre l'Insecte et son support étant assurée par des expansions latéro-tergales lamellaires de l'abdomen et par les pattes aux tibias foliacés ramenés près du corps. Les larves passeraient inaperçues si des fourmis, friandes du miellat qu'elles émettent, ne les entouraient de va-et-vient qui trahissent leur présence. Le plus souvent, la mue imaginale s'effectue à la face inférieure des feuilles.

Certaines espèces, d'*Oxyrhachis* entre autres, ont un comportement nuptial assez curieux : le mâle s'agrippe sur le côté d'une femelle et la secoue vigoureusement, ce qui a pour effet d'amener celle-ci à se soulever et de permettre la copulation. Souvent, deux mâles entreprennent ainsi, chacun d'un côté, une même femelle. Les œufs sont introduits isolément chez *Eumonocentrus* et *Stictocephala* ou en groupe, dans des logettes ovigères qui peuvent être profondes et allongées chez *Paraxiphopoeus,* ou hémisphériques chez *Ceresa,* ou bien superficielles et recouvertes d'une fine pellicule laquée (incisions en V imbriqués des *Oxyrhachis*) ou encore d'une écume de cire blanche comme chez les *Tropidocyta* et les *Bolbonota* de Guyane. *Umbonia crassicornis,* un Membracide néo-tropical très prolifique et grégaire, est récolté au moment de la métamorphose par les Indiens de l'Amazone qui le grillent, puis le consomment.

Super-famille des Fulguroidea

Les Fulguroidea se distinguent des Homoptères précédents par la présence de tégulas (petites écailles surplombant l'insertion des ailes), les homélytres très nervulés, les coxa intermédiaires, enchâssées très loin l'une de l'autre et aussi allongées que les antérieures et les postérieures, la tête à front caréné, le bord supérieur du clypéus n'atteignant jamais le niveau inférieur des yeux, les antennes toujours insérées sous ces derniers et munies d'un pédicelle épais particulièrement pourvu en organites sensoriels, enfin la présence de deux ou parfois trois ocelles *(Cixiidae).*

De répartition mondiale mais surtout intertropicale, les Fulgoroïdes comptent plus de sept mille espèces distribuées en seize familles. Ils présentent une infinité de formes souvent brillamment colorées, fréquemment analoschémiques et leur taille s'échelonne depuis les 2 mm des *Araeopus* d'Europe, jusqu'aux 108 mm de *Fulgora lanternaria,* du Brésil. Grâce à des glandes situées principalement vers l'apex de l'abdomen, de nombreuses espèces produisent en grande quantité une cire laineuse dont le rôle dans la protection des œufs et des larves se double, chez certains adultes, de la formation de processus caudaux propres à doubler ou tripler la longueur de l'Insecte (*Phenax* et *Pterodictya* néo-tropicaux). Les espèces vivant sur les troncs et les branches sont prodigieusement homomorphes aux écorces, comme c'est le cas pour les *Ricnophloea* et les *Druentia,* et parfois mimétiques comme les *Zanna* africains; chez ces derniers un processus frontal simule de façon déconcertante une

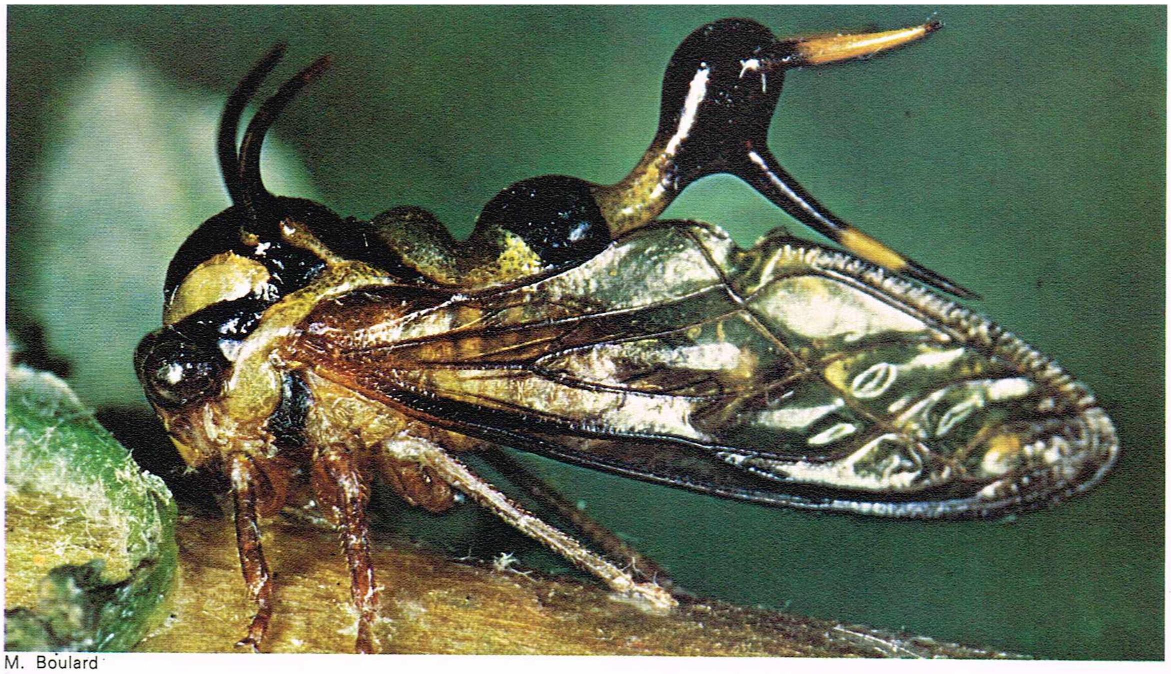

M. Boulard

M. Boulard

▲ *A gauche,* **Heteronotus armatus,** *espèce de la Guyane, au prothorax particulièrement développé. A droite, une femelle brachyptère de* **Stiroma pteridis,** *un Delphacide.*

ramille brisée. Mais chez les fulgores sud-américains et asiatiques, ce prolongement prend des proportions grotesques; les *Fulgora,* les *Phrictus,* et les *Hotinotus* sont à cet égard fort spectaculaires. Contrairement à la légende, ces attributs hypertheliques ne sont pas lumineux chez les Insectes vivants. D'autres Fulgoroïdes très aplatis dorso-ventralement revêtent un aspect lichénomorphe assez fantastique; tels sont les flatides des genres *Uysanus* d'Afrique et *Lichena* de Madagascar.

Les larves de ces derniers, également aplaties, recouvertes de cire cotonneuse, vivent, selon les espèces, isolées ou en colonies, constituant des files blanchâtres irrégulières, difficilement repérables sur les troncs recouverts de lichens. D'autres larves grégaires, appartenant aux genres *Flatina* et *Ityraea,* sucent les tiges ou les branchettes qui apparaissent alors entourées d'épais manchons de peluche blanche où l'on ne distingue plus les Insectes. Les adultes ne sont pas moins étonnants, leur corps rose ou vert comprimé latéralement est pétaliforme et ils ont l'habitude de vivre en grappe, bien ordonnés, tous la tête en haut, simulant ainsi quelque inflorescence.

Certains **Eurybrachidae** d'Asie possèdent une structure du corps et des ailes telle qu'ils ressemblent à des charançons; la copie est d'autant plus étrange que c'est l'arrière de l'Homoptère qui mime l'avant du Coléoptère.

Beaucoup d'**Issidae** comme par exemple *Issus coleoptratus* de notre faune et *Heinsenia fatua* d'Afrique présentent aussi un aspect de Coléoptère, grâce à leurs hémélytres élargis, bombés et sclérifiés.

Les **Dictyopharidae** présentent une tête en cône plus ou moins accentué *(Dictyophara),* rarement en forme de licorne *(Raphiophora),* des ailes transparentes sur leur plus grande surface au moins, et ne développent qu'une homochromie relative.

La famille des **Delphacidae** réunit de nombreuses espèces, petites ou très petites, souvent affectées (comme les Issidae d'ailleurs) de brachyptérisme en relation ou non avec le sexe; l'énigmatique « cuillère » garnie de lamelles, appendue à l'apex interne des tibias postérieurs, les caractérise.

C'est dans cette famille que se rencontrent les Fulgoroïdes nuisibles, *Perkinsiella* et *Peregrinus,* qui endommagent gravement les cultures sucrières et vivrières sous les tropiques, notamment aux îles Hawaï. Le développement de *Perkinsiella,* vecteur de la virose des Fidji, est maintenant contrôlé depuis l'introduction de punaises Mirides et d'Hyménoptères Mymarides qui sont leurs prédateurs et parasites.

Les femelles de ces Delphacidae déposent leurs œufs en groupe, à l'intérieur de logettes creusées dans la nervure principale des feuilles.

Les **Ricaniidae,** parfois appelés Insectes-delta en raison du port horizontal de leurs ailes triangulaires, font de même, mais chaque œuf est isolé et enfoncé, jusqu'au mucron. Les **Flatidae** *Uysanus* pratiquent des incisions en V imbriquées couvertes de cire floconneuse, tandis que d'autres comme *Flatina* et *Phrommia* et les **Fulgoridae** *Pyrops* collent leurs œufs en rangs serrés sur les branches, en ne les recouvrant que d'une mince couche laquée. Chez ces derniers, la copulation est précédée par une danse du mâle qui exécute des balancements latéraux du corps, ses pattes postérieures restant tendues et vibrantes (Kershaw et Kirkaly). Beaucoup de Fulgoroïdes, notamment les Eurybrachidae, expulsent leurs excréments sous forme de fèces solides, d'autres, comme certains **Tettigometridae,** émettent un miellat qui peut être exploité par les fourmis; c'est le cas de *Tettigometra fusca* et *T. atra,* petites espèces à aspect de Jassidoïdes vivant sur les racines incluses dans les fourmilières. Enfin, un fulgore est réputé comestible : le gros *Zanna* de Madagascar constitue un mets particulièrement apprécié au nord de la Grande Ile et aux Comores.

Les *Sternorhyncha* ou Phytophtires se distinguent des Auchénorhynches, par leurs antennes comprenant de trois à onze articles non sétiformes, par leur rostre le plus souvent inséré entre les pattes antérieures ou après ces dernières et par l'absence de nervures transverses sur les ailes. Ils renferment quatre super-familles : les Psylloidea, les Aleyroidea, les Aphidoidea et les Coccoidea. Tous se nourrissent surtout de sève libérienne.

Super-famille des Psylloidea

Les Psylloidea, ou psylles, ressemblent à des cigales minuscules (1 à 7 mm) et sont aptes au saut. Leur tête large porte deux gros yeux latéraux, trois ocelles, des antennes sétiformes à dix articles et, le plus souvent,

▼ *Les larves de Membracides ne ressemblent guère aux imagos, comme le montrent ces* **Oxyrhachis latipes,** *originaires du Kenya et inféodés aux Légumineuses; la larve est noirâtre et spiniforme et l'imago gris-brun porte trois cornes (à gauche). Une curieuse corne en forme de ramille brisée prolonge la tête de* **Zanna intriquata,** *grand Fulgoride d'Afrique centrale.*

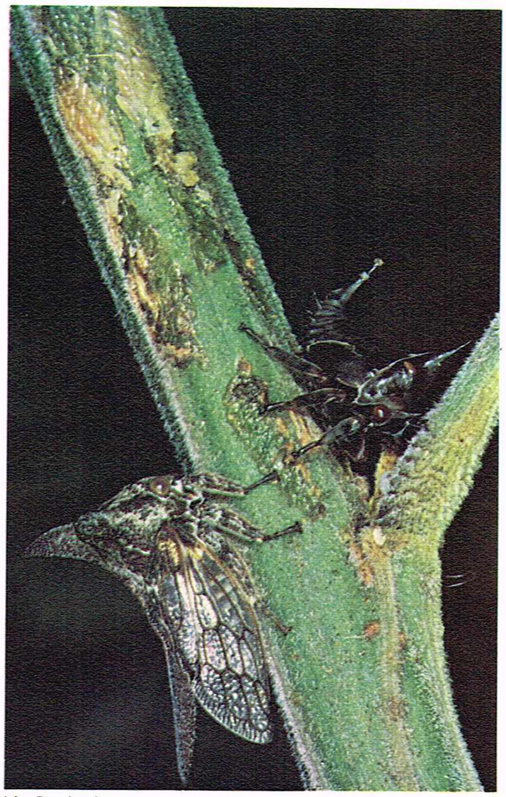

M. Boulard

M. Boulard

M. Boulard

deux protubérances coniques antérieures. Leurs tarses sont bisegmentés. On les sépare en trois familles, les *Triozidae*, les *Psyllidae* et les *Liviidae* totalisant environ mille cinq cents espèces à répartition mondiale; ils s'attaquent à tous les Végétaux hormis les Cryptogames. En général, ils mènent une vie libre mais beaucoup d'entre eux se logent dans les déformations des feuilles qu'ils provoquent par leurs piqûres (*Trioza alacris* sur le laurier-rose, et *T. viridula* sur la carotte) ou même dans des galles (*Livia juncorum* sur les joncs et *Phytolyma lata* sur l'iroko). Beaucoup d'espèces hivernent à l'état adulte comme le psylle du poirier, *Psylla pyricola*, ou encore à l'état d'œufs, comme *P. mali* nuisible aux pommiers, et quelques-unes au cours du premier stade larvaire (*Rhinocola aceris*).

L'accouplement prend toujours la figure d'angle aigu et les femelles vont ensuite soit introduire entièrement leurs œufs dans les rameaux tendres (*Mesohomotoma tessmanni* africain) ou, plus communément, les fixer à même la plante par un pédoncule; ils seront alors isolés comme ceux des femelles printanières, ou en longues files comme ceux des femelles estivales de *P. pyricola*, ou bien en paquet et c'est le cas de *P. mali*. Les adultes sautent, volent et changent d'hôtes, mais les larves sont sédentaires et souvent grégaires. Elles ont une forme très aplatie, élargie par de vastes ptérothèques, et se recouvrent de cire laineuse blanche chez *Psyllopsis* et *Mesohomotoma* ou d'une sécrétion poisseuse chez *Psylla peregrina*. Quelques espèces, dont *Psylla mali*, sécrètent un sac de cire périanal englobant le miellat excrété qui ainsi ne souille pas la feuille enroulée où se tiennent les Insectes; mais un Psylle des Bauhinia, d'Afrique tropicale, stocke son miellat sous une petite cloche cireuse, dans laquelle il se trouve également, et dont on fait consommation.

Super-famille des Aleyroidea

Les Aleyroidea, encore appelés aleurodes ou mouches blanches, comprennent une seule famille d'environ trois cents petits Phytophtires (1-3 mm) qui vivent de préférence dans les sous-bois équatoriaux. Le corps des adultes est élancé, muni de deux paires d'ailes, bien développées, arrondies à l'extrémité; leur nervation est réduite, et elles forment comme un toit très surbaissé. La tête est pourvue de deux gros yeux à aspect de mûre, souvent séparés en deux masses; les antennes ont sept articles, dont les deux premiers sont fortement enflés, et les autres, effilés, portent des organites sensoriels particuliers ou *sensoria*.

Les pattes sont fines, les postérieures étant saltatoires; à la différence des autres Homoptères, les aleurodes marchent sur l'apex des pattes formé par deux griffes et une pièce médiane, le *paronychium*, plus ou moins développé et de façon différente suivant les espèces. Des plaques ciripares antéro-ventrales sécrètent une cire qui est ensuite raclée avec les tibias postérieurs munis

▲ *Imagos et larves de* Mesohomotoma tessmanni, *le psylle du colatier; les larves sont recouvertes de cire laineuse; les gouttelettes sont du miellat.*

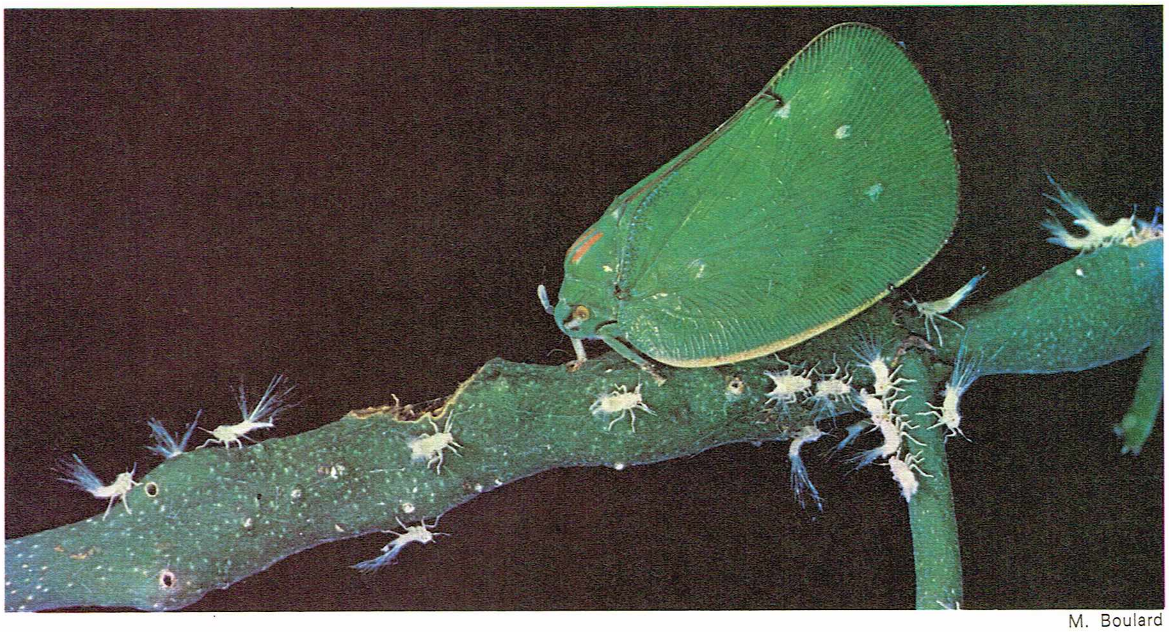

M. Boulard

▶ *Une femelle de* Flatina rubrocincta *entourée de ses larves nouveau-nées (Aucheno-rhyncha Fulgoroidea).*

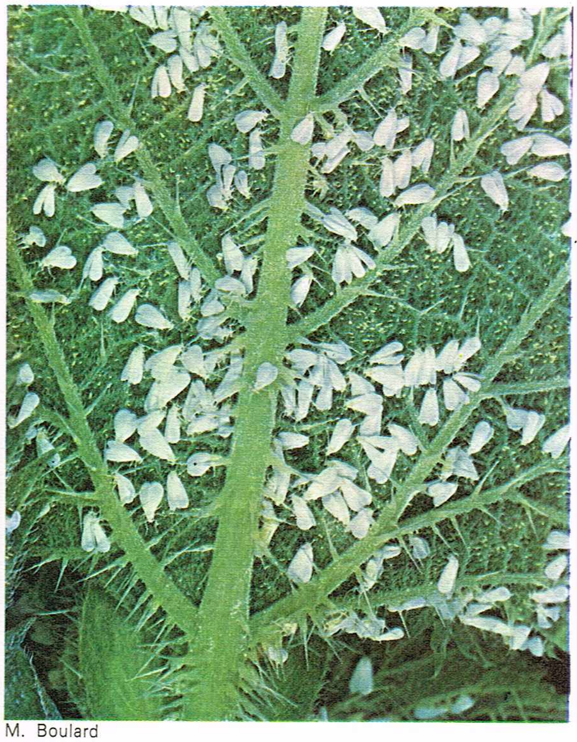

M. Boulard

M. Boulard

▲ *A gauche, une colonie d'aleurodes ou « mouches blanches » vivant à la face inférieure d'une feuille d'Urticacée du genre* Urera *; ces aleurodes se rencontrent dans les sous-bois montagnards du Kenya. A droite, des femelles d'aleurodes et leurs pontes caractéristiques en couronne.*

de soies puis répandue sur l'ensemble du corps où elle forme une pruinescence blanche.

La reproduction est généralement bisexuée, mais les parthénogenèses mâles et femelles sont possibles. La ponte s'effectue en couronne, suivant un mode très particulier aux aleurodes : la femelle, installée sur la plante nutricière, maintient ses stylets buccaux enfoncés dans la plante et dépose ses œufs un à un, tournant son abdomen au fur et à mesure tandis que le rostre fait office d'axe de rotation. Les œufs sont fixés, dressés ou allongés, à l'aide d'un court pédoncule inséré dans les tissus végétaux.

Le développement post-embryonnaire est intéressant car il fournit un exemple rare d'*allométabolie :* la larve nouveau-née est normalement constituée et mobile ; puis, après qu'elle s'est fixée par ses pièces buccales, elle s'aplatit, rétracte ses pattes sous son corps pendant qu'elle édifie, grâce à des glandes cirières périphériques, une sorte de rempart qui la scelle au support. Elle subit trois mues en conservant le même aspect d'ensemble, mais les pattes et les antennes sont réduites à des moignons et l'Insecte devient aveugle. Vers le milieu du dernier stade, l'alimentation cesse, et la larve entre en métamorphose alors que les sécrétions cireuses s'épaississent et forment des prolongements ornementaux variés et spécifiques et que, sous la peau larvaire transformée en puparium, apparaît la morphologie imaginale. L'adulte ailé sort par une fente en T, caractéristique, qui persistera sur le puparium abandonné.

Un certain nombre d'aleurodes sont nocifs : *Dialeurodes citri* est nuisible aux agrumes, *Aleurodicus coccois* aux cocotiers et quelques-uns, comme les *Bemisia,* sont vecteurs de viroses des cotonniers et du manioc.

Super-famille des Aphidoidea

Les Aphidoidea ou Aphidoïdes, encore appelés pucerons, sont de petits Homoptères de 0,5 mm à 8 mm de longueur, élancés ou plus ou moins globuleux, à monochromie dominante parfois masquée par une pruine blanchâtre. Ils sont typiquement stégoptères et leurs quatre ailes transparentes, peu nervurées, ont un bord costal ou subcostal épais. Le polymorphisme est l'un de leurs traits essentiels : une même espèce connaît plusieurs formes comprenant des individus ailés ou aptères, sexués ou parthénogénésiques, ovipares ou vivipares, suivant un cycle biologique complexe qui peut s'effectuer sur une ou deux plantes *(monoécie* et *dioécie)*. Un autre trait remarquable tient à l'extrême prolificité des femelles vivipares qui peuvent mettre bas jusqu'à douze petits par jour ; le processus de reproduction est si rapide que les embryons encore engagés dans les oviductes maternels préparent déjà une autre génération d'embryons. Selon Bonnemaison, l'apparition des ailés est liée aux conditions de surpopulation et celle des sexués à la diminution relative des photopériodes. Les Aphidoïdes groupent plus de six mille espèces connues, qu'on évalue au tiers des espèces réellement existantes, disséminées partout dans le monde. On les répartit en deux sections comprenant respectivement deux et quatre familles : la section des *Oviparia* avec les Phylloxeridae et les Chermesidae dont toutes les générations sont ovipares et celle des *Viviparia* (Eriosomatidae, Thexalidae, Lachnidae et Aphididae) dont seule la génération sexuée est ovipare. Beaucoup présentent une grande importance du point de vue économique, en raison précisément de leur fécondité prodigieuse et de leur dissémination anémophile. La plupart sont des trophobiontes, visités occasionnellement par les abeilles et fréquentés assidûment par les fourmis.

Les **Aphididae**, fort nombreux, sont bien représentés dans les zones tempérées. Leur tête, largement soudée au thorax, produit en avant deux tubercules où s'insèrent les antennes. Celles-ci, composées de six articles grêles, particulièrement le dernier, portent des *sensoria* dont le type varie d'une forme de l'espèce à une autre, et dont l'importance est décisive dans l'orientation du vol. Le rostre est quadrisegmenté ; les trois ocelles sont situés aux places habituelles mais manquent chez les formes aptères. Les yeux ont l'aspect de mûres et derrière chacun d'eux se trouve une formation ommatidienne vestigiale faite de trois unités. Les ailes antérieures sont munies d'une bande sous-costale qui est sclérifiée et dilatée en un stigma à leur extrémité. Le tarse a deux segments. L'abdomen est caractérisé par la paire de cornicules tubulaires insérées dorso-latéralement sur le sixième urite et par la cauda qui en forme l'apex.

Les pucerons pullulent du printemps à l'automne. Leur régime est varié : certains sont monophages (*Aphis forbesi* du fraisier), les autres oligophages et polyphages, soit de façon occasionnelle (*Toxoptera gramineum* des Graminées et des plantes basses diverses ; *T. aurantii* sur Sterculiacées, *Citrus,* poivrier...), soit obligatoirement (pucerons dioéciques comme *Myzus cerasi* qui va du cerisier aux herbes) avec parfois passage concomitant du branchage aux racines (*Aphis piri,* qui passe des rameaux du pommier aux racines de *Rumex*). Mais tous les Aphides se caractérisent par l'alternance d'une longue phase de multiplication agame vivipare, et d'une courte période de reproduction sexuée et ovipare, interrompue par une diapause hivernale à l'état d'œuf. On donne le

M. Boulard

M. Boulard

▲ *A gauche, une colonie de* **Macrosiphum rosae**, *un puceron très commun sur les rosiers; on peut observer de nombreuses larves, des adultes aptères et ailés. A droite, une virgine ailée de* **Macrosiphum rosae** *qui achève de mettre bas; la plupart du temps, les pucerons de la famille des Aphididae se reproduisent parthénogénésiquement et par viviparité.*

nom de *fondatrice* au puceron toujours femelle qui naît de l'œuf, de *virgines* aux femelles parthénogénésiques vivant sur l'hôte primaire, de *migrantes* aux ailées changeant d'hôte, d'*exilées* aux femelles agames se reproduisant sur l'hôte secondaire, de *sexupares* aux femelles agames engendrant des *sexués,* lesquels conçoivent les œufs d'hiver qui seront déposés sur la première plante hôte. Ces œufs n'éclosent qu'au printemps suivant. Toutefois, lorsque la température le permet, la forme parthénogyne peut aussi hiverner, comme c'est le cas pour le puceron du rosier, *Macrosiphum rosae,* ou bien l'œuf d'hiver peut éclore très précocement, fin janvier par exemple, pour *Myzus persicae* sur le littoral méditerranéen; le cas de cet Aphide, fort nuisible au pêcher, montra une fois de plus et tout récemment comme il est dangereux de procéder à des épandages d'insecticides sans une étude préalable approfondie des données bio-écologiques (Remaudière et ses collaborateurs).

Les **Lachnidae** diffèrent des précédents par le rostre constitué de cinq articles. Cette famille compte les plus grands pucerons, les *Lachnus* qui mesurent jusqu'à 8 à 9 mm de longueur. Mono- ou dioéciques, ils vivent souvent sur les Conifères.

A. Margiocco

▶ *Certains Aphidoïdes provoquent la formation de galles sur les Végétaux; cette galle est due à* **Byrsocrypta gallarum.**

Chez les **Thelaxidae**, la fondatrice est gallicole sur hôte ligneux et donne des migrantes qui s'installent au collet des Graminées comme c'est le cas pour les *Anoecia* ou sur une seconde plante ligneuse comme pour *Hamamelites spinosus* qui, néarctique et dépourvue de cornicules, effectue son cycle en deux ans avec deux phases hivernantes distinctes et alternées : l'une à l'état d'œuf sur *Hamamelis virginica* et qui donnera la fondatrice, l'autre à l'état de larve aleyrodiforme sur le bouleau.

Les **Eriosomatidae** sont des pucerons ciripares à antennes courtes, dépourvus souvent de cornicules, et toujours de cauda et même chez les sexués de rostre. Le plus connu est le puceron lanigère, très nuisible aux pommiers; américain d'origine, il se trouve depuis près de 200 ans en Europe où il est remarquable par l'altération de son cycle. Aux U.S.A., *Eriosoma lanigerum* provoque des galles (galligène) sur l'orme puis migre sur le pommier; il donne soit des larves hivernantes qui engendreront des virgines, soit des ailés sexués allant pondre sur l'orme où chaque femelle émettra un œuf puis mourra. En France, il ne se perpétue que par parthénogenèse sur les pommiers. Pour le combattre, Marchal a fait importer d'Amérique son ennemi naturel, l'Hyménoptère *Aphelinus mali*.

Les **Phylloxeridae** n'ont que de courtes antennes à trois articles et sont dépourvus de cornicules, de cauda et d'anus fonctionnel. Les aptères sont piriformes; les ailés aux ailes portées à plat en ciseaux sur le corps sont dépourvus de rostre. Tous sont minuscules et vivent sur les feuillus. Le *Phylloxera* de la vigne américaine effectue un cycle très complexe passant par des formes galligènes sur feuilles, puis par d'autres sur racines, conduisant soit à des virgines hivernantes radicicoles, soit à des sexués engendrant des œufs d'hiver. Apparu en France vers 1861, *Phylloxera vitifolii* a dévasté tout le vignoble méditerranéen et ne fut vaincu dans de bonnes conditions, 30 ans plus tard, qu'en recourant à une méthode biologique : le greffage de plants de vigne européenne sur des ceps américains dont les racines sont naturellement résistantes au parasite.

La famille des **Chermesidae** ou chermès réunit des pucerons strictement inféodés aux Conifères. Ils sont stégoptères, leurs antennes ont cinq articles et leur appareil alimentaire est normalement constitué, même chez les sexués. Dioéciques, les chermès présentent deux particularités bionomiques : d'une part, les fondatrices, quelle que soit l'espèce, sont obligatoirement galligènes sur épicéa, l'hôte secondaire restant un Conifère d'une autre essence, et d'autre part, la phase hivernante est propre à la larve nouveau-née issue de l'œuf fécondé qui éclôt toujours avant la mauvaise saison.

Super-famille des Coccoidea

Les *Coccoidea* (Coccoïdes) ou cochenilles comprennent environ neuf mille espèces connues, ce qui, d'après Balachowsky, équivaut sans doute au quart de la faune réellement existante. Les cochenilles, surtout abondantes dans la zone intertropicale, se rencontrent jusqu'aux cercles polaires et jusqu'à l'extrême limite des végétations montagnardes. La taille est généralement comprise entre 0,5 et 10 mm avec quelques formes géantes comme par exemple *Aspidoproctus maximus* qui atteint 35 mm. Ces Insectes n'ont qu'un seul article aux tarses, que prolonge une griffe. Mais les caractères les plus frappants que présentent ces Rhynchotes sont une vie strictement sédentaire, un dimorphisme sexuel accusé, une grande fécondité et la fonction protectrice de leurs formations tégumentaires.

Vivant à demeure sur leurs plantes-hôtes, les cochenilles femelles montrent d'importantes régressions morphologiques affectant surtout les organes des fonctions de relation, alors que les mâles, à vie imaginale très brève mais active, ont gardé un habitus d'Homoptère. Celui-ci, conformé selon trois types fondamentaux, est utilisé dans la classification supérieure de la super-famille (Balachowsky). Le corps des mâles est élancé, la tête, le thorax et l'abdomen sont bien distincts, les antennes et les pattes sont normalement constituées, et les ailes antérieures se disposent en toit; mais les ailes postérieures apparaissent vestigiales et l'appareil buccal, atrophié ou oblitéré, ne permet aucune alimentation.

Dans la famille des **Margarodidae (Margarodides)** qui comprend les sous-familles des *Orthezíinae, Margarodinae* et *Monophlebinae,* les mâles possèdent des yeux composés et des stigmates abdominaux, ce qui les oppose aux mâles des **Coccidae (Coccides)** comme à ceux des **Diaspididae (Diaspides)** pourvus seulement de stigmates thoraciques et d'yeux ocelliformes en nombre, tailles et situations variables. L'existence d'un cou dégageant la tête distingue les Coccides *(Apiomorphinae, Asterolecaniinae, Dactylopinae, Kermesinae, Lacciferinae, Lecaniinae, Pseudococcinae, Stictococcinae)* des Diaspides *(Diaspidinae, Conchaspinae* et *Phoenicococcinae)* chez lesquelles la tête est fusionnée au thorax.

Dans tous ces groupes, les femelles se présentent invariablement aptères et sacciformes, les trois tagmes du corps restant quasi indistincts, les antennes et les pattes réduites ou nulles.

En revanche les pièces buccales sont très développées avec des stylets souples et si longs qu'ils s'enroulent au repos dans une poche ventrale spéciale ou *crumena*.

L'abdomen possède typiquement huit segments visibles mais les quatre derniers peuvent être réunis pour former le pygidium des Diaspides; l'anus s'ouvre sur le dernier urite ou bien sur les deux premiers (chez les Stictococcinae).

M. Boulard

▲ Icerya seychellarum ***(ou I. sulfurea), exemple de cochenille à manteau de cire laineuse; femelle et larves installées sur la face inférieure de la nervure principale d'une feuille de colatier (Afrique équatoriale).***

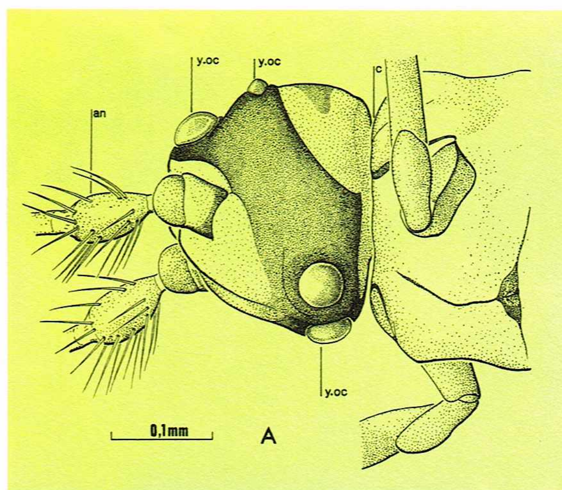

G. Hodebert

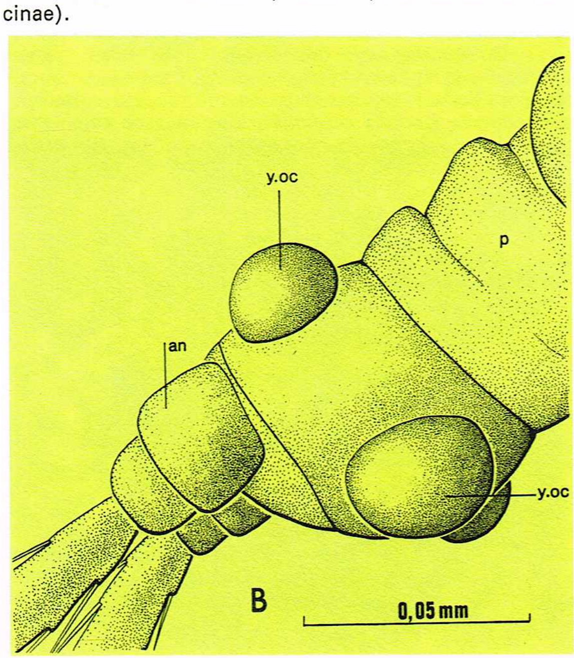

G. Hodebert

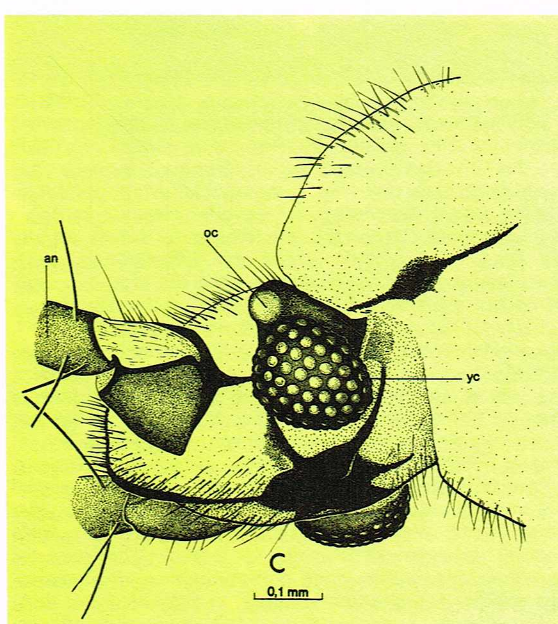

G. Hodebert

◀ Schémas de la morphologie de l'avant du corps des cochenilles mâles en vue de profil légèrement ventrale : A (en haut), **chez les Coccidae*;*** ***B (à gauche),*** **chez les Diaspididae*;*** ***C (à droite),*** **chez les Margarodidae*;*** ***an, antennes; c, cou; oc, ocelles; p, prothorax; y.c, yeux composés; y.oc, yeux ocelliformes (schémas originaux).***

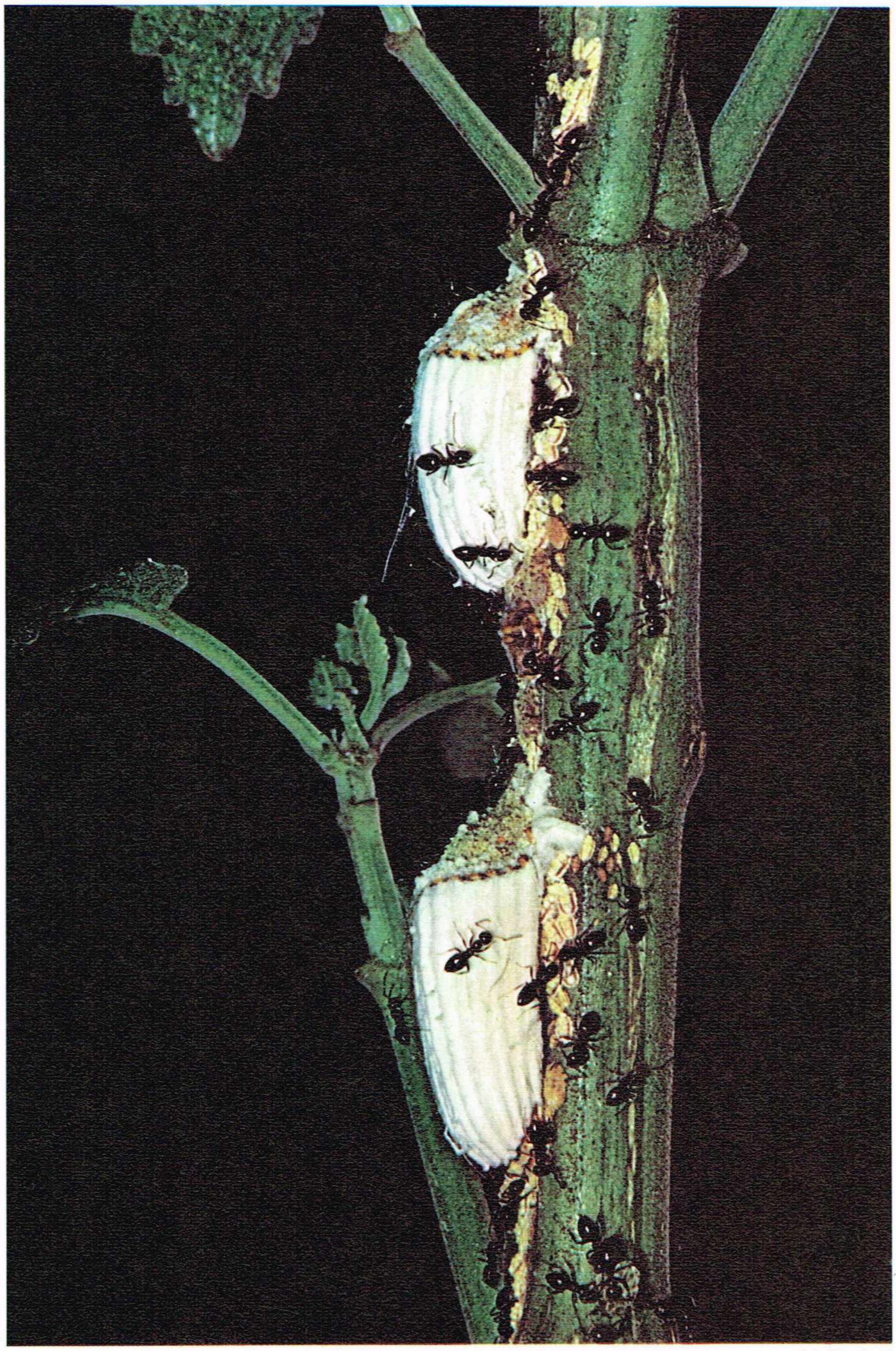

M. Boulard

▲ **Icerya purchasi *(Monophlébine), cochenille australienne devenue cosmopolite, nuisible aux agrumes. Deux femelles, avec leurs ovisacs caractéristiques faits de cire côtelée, entourées de larves nouveau-nées et de fourmis commensales.***

Généralement, le corps disparaît sous une formation protectrice faite surtout de cires ou de laques sécrétées par des glandes tégumentaires (manteau farineux des Pseudococcinae, pelucheux de certaines Monophlebinae comme *Icerya seychellarum;* bouclier cireux très épais des Lecaninae *Ceroplates,* ou lamellaire, dur et soyeux des Diaspinae; bouclier laqué des Lacciferinae, etc.). Elle peut aussi provenir directement du tégument lui-même qui s'épaissit et se durcit (écaille des Lecaninae, test des Sticotcoccinae, involucre des Asterolecaniinae). Ces revêtements protecteurs prennent des formes variées caractéristiques des genres ou des espèces; ils sont opaques et colorés, sauf de rares exceptions comme le bouclier transparent d'*Aspidiotus destructor* qui vit sur les cocotiers; ils présentent parfois un aspect de lichen, chez les *Aspidoproctus* d'Afrique centrale par exemple.

Pour un certain nombre de cochenilles, le tissu végétal se boursoufle autour des Insectes qui se trouvent alors incrustés (*Russellaspis pustulans* par exemple) mais d'autres induisent la formation de galles *(Xylococcus* et *Apiomorphinae)*. Beaucoup de cochenilles sont accaparées par des fourmis qui, souvent, construisent des abris autour d'elles. Le plus souvent, cette claustration n'interfère pas sur la physiologie ou la morphologie des Coccoïdes. Cependant, B. Delage, au cours de ses recherches, vient de découvrir, en Côte-d'Ivoire, des fourmis corticicoles qui hébergent dans leurs galeries deux sortes de Diaspides dépourvues de bouclier et dont l'une est aussi démunie des glandes sécrétrices de cette formation. Enfin il existe de nombreuses espèces normalement nues, ou pruinescentes, et molles : c'est le cas, en particulier, pour celles qui vivent sur des racines (de nombreuses Pseudococcinae et Margarodidae), sous les gaines foliaires des Graminées (*Saccharicoccus,* nuisible à la canne à sucre) ou de quelques autres, tout à fait aériennes, ainsi les kermès dont toutes les espèces vivent sur les chênes.

Comme les kermès, un grand nombre de cochenilles sont oligophages, adaptées à une famille de Végétaux; celles nuisibles aux *Citrus* en fournissent de bons exemples. Mais d'autres ne se rencontrent que sur une plante comme *Cryptococcus fagi* sur le hêtre; à l'opposé se trouvent les espèces polyphages qui constituent le groupe le plus important. Pour ces dernières, on peut retenir *Coccus hesperidum, Dysmicoccus brevipes* et *Quadraspidiotus perniciosus,* le pou de San José, redoutables parasites des arbres fruitiers, *Planococcoides njalensis* et *Ferrisia virgata* qui transmettent une grave virose aux cacaoyers.

Les Coccoïdes se reproduisent surtout par voie normale, bisexuée, ou dans quelques cas, par parthénogenèse. Dès la mue imaginale, les mâles sont sexuellement mûrs et se dirigent vers les jeunes femelles qu'ils inséminent en quelques minutes. En général, ils ne copulent qu'une seule fois et meurent peu après; par contre les femelles peuvent recevoir successivement plusieurs mâles. Chez des formes galligènes, on observe le contraire : la femelle de *Xylococcus* fait plus ou moins saillir son abdomen hors de sa logette et attend ainsi la venue d'un mâle; après l'insémination elle rétracte son ventre tandis que le mâle se dirige vers une autre femelle, en vue d'un nouvel accouplement. Pour les Diaspinae au moins, ce comportement est nécessaire : selon Benassy, le fait de supprimer les mâles entraîne la stérilité des femelles et la malformation des boucliers. D'après Balachowsky, la fécondation des ovules a lieu dans l'ovariole, et selon Pesson, elle s'effectuerait par l'intermédiaire d'une cellule spéciale. Quand elle est possible, la reproduction agame peut être thélytoque constante (chez certains *Margarodes*) ou facultative (chez des races géographiques de *Coccus* et de *Lepidosaphes* par exemple), ou bien, beaucoup plus rarement, elle peut être arrhénotoque comme chez quelques *Icerya* dont les ovules pondus donnent naissance à des mâles. Ce genre de Monophlebinae comprend des espèces fort remarquables par leur hermaphrodisme et qui, en outre, sont autofécondes.

Icerya purchasi, plus connu sous le nom de cochenille australienne, est très nuisible aux agrumes partout où il a été introduit en même temps que des plants d'orangers de son pays d'origine, et n'a pu être combattu que par l'importation par Riley de son prédateur naturel, la coccinelle *Rodolia cardinalis.* Une réussite semblable a été obtenue contre la cochenille du mûrier, *Pseudaulacaspis pentagona,* qui, originaire d'Asie, est responsable en Europe de graves dommages à la sériciculture; l introduction par Berlese de son parasite spécifique, l'Hyménoptère *Prospaltella berlesi,* a réduit à des proportions négligeables l'incidence économique de la cochenille.

Au moment de la ponte, certaines espèces, en particulier les *Icerya,* forment un manchon de cire côtelée autour de leurs œufs, constituant ainsi un ovisac; des Lecaninae du genre *Pulvinaria* agissent de même, mais leur ovisac est plat et beaucoup plus long, en forme de ruban. Parfois, cet ovisac est absorbé, au fur et à mesure qu'il est émis, par des chenilles carnassières de Lycènes (ex. *Spalgis lemolea,* Afrique) qui finissent d'ailleurs par atteindre la mère qu'elles mangent également (Boulard). D'autres Lecaninae, et certaines Margarodidae comme *Steatococcus* par exemple, gardent leurs œufs dans un repli tégumentaire ventral, sorte de marsupium qui peut occuper jusqu'à la quasi-totalité du corps; beaucoup de Pseudococcinae éparpillent les leurs, recouverts d'un peu de cire, tandis que la plupart des Diaspididae les agglomèrent sous leur bouclier; les Margarodidae hypogées les déposent en chapelet dans le sol.

En général, les cochenilles sont polyvoltines et leur fécondité est importante : trois cents à quinze cents œufs en moyenne avec, comme extrêmes, quinze œufs chez *Parlatoria* et six mille chez *Aspidoproctus*. Le plus souvent, la mère meurt après la ponte, et les œufs peuvent n'éclore que bien plus tard, plusieurs mois après chez les Diaspinae. En fait, lorsqu'ils sont pondus, ces œufs sont déjà embryonnés (ovoviviparité), mais ils subissent une diapause. L'oviparité existe cependant, principalement chez les Pseudococcinae, les Margarodinae et chez d'autres sous-familles qui peuvent renfermer aussi des espèces vivipares comme *Quadraspidiotus perniciosus* et *Laccifer lacca*, alors que la viviparité semble la règle chez les Stictococcinae.

Les larves nouveau-nées circulent activement sur l'hôte végétal d'où le vent peut les disperser ou les fourmis les transporter sur une plante voisine. Assez vite pourtant, elles enfoncent leurs stylets dans la plante et se fixent; cet arrêt est définitif, notamment chez les Diaspinae et les Lacciferinae; les Lecaninae et les Kermesinae ne s'immobilisent qu'en fin de second stade et d'autres comme les Pseudococcinae, les Orthezinae et beaucoup de Margarodidae restent mobiles toute leur vie. Cependant, chez ces dernières les espèces terricoles, comme *Margarodes* et *Porphyrophora*, fouisseuses au premier stade, grâce à leurs pattes antérieures spéciales, forment aux deux stades suivants des kystes dépourvus d'appendices, fixés aux racines par les stylets buccaux. Ces kystes, communément appelés « perles de terre » et susceptibles d'entrer en diapause prolongée, hivernale ou autre, donneront des *Margarodes* à nouveau actifs et munis de pattes fouilleuses.

L'une des caractéristiques bionomiques essentielles des Coccidea réside dans l'étonnante différence d'évolution postembryonnaire des deux sexes (on la qualifie de paramétabolique). Dans la grande majorité des cas, les mâles passent par quatre stades : deux à l'état larvaire, actifs et alimentaires, deux à l'état nymphal, immobiles et anorexiques, qui conduiront à des imagos ailés, tandis que les femelles (les *Margarodes* précédents exceptés) n'effectuent que les deux premiers stades avant d'être fécondables et adultes. Comme elles ne subissent aucune métamorphose, ces dernières restent larviformes et sont en réalité des organismes néoténiques. Cette divergence dans la lignée sexuelle se retrouve au niveau des revêtements protecteurs (bouclier femelle large et circulaire, bouclier mâle étroit et allongé de *Quadraspidiotus perniciosus*) et des cécidies qui, chez les Apiomorphinae mâles, sont minuscules et tubulaires, alors que celles des femelles sont grosses et globuleuses.

Les Apiomorphinae, propres à l'Australie, vivent principalement sur les eucalyptus et comptent parmi les rares Coccoïdes comestibles; les aborigènes les recherchent et les extraient de leur galle avant de les manger. Ils consomment également le « buum-buul », miellat très sucré produit par d'autres cochenilles, mais aussi par des psylles, et qui est à l'origine de la légende du dieu Byamée qui rappelle un peu l'histoire de la manne providentielle qui nourrit Moïse et les Hébreux lors de la traversée du

M. Boulard

▲ ***Cochenille Lécanine du genre* Pulvinaria *déposant sa ponte dans un ovisac en ruban collé sur un jeune rameau de Sterculiacée.***

Sinaï. On attribue cette manne, qui actuellement est encore collectée par les tribus nomades, à *Trabutina mannipara*, Pseudococcine grosse productrice de miellat aux dépens des *Tamarix nilotica* (Bodenheimer).

Quelques cochenilles ont été ou sont encore récoltées, élevées même, soit pour leurs sécrétions tégumentaires comme la laque extraite des *Laccifer lacca* d'Asie et *L. larreae* d'Amérique du Nord, ou la cire à chandelle qui provient d'*Ericerus pela* d'Inde et de Chine, soit encore pour des substances particulières contenues dans leurs corps, comme les graisses de *Llaveia axin*, énorme Margarodide mexicaine (2,5 cm), qui servent à fabriquer des vernis et des onguents. *Porphyrophora (Coccus) polonica* et *Kermes vermilio*, tous deux européens, fournissent l'écarlate, qui fut très utilisé pour la teinture jusqu'à la découverte, au XVIe siècle, du carmin que les Aztèques extrayaient des *Dactylopius coccus* et *indicus*. La « culture » du carmin, abandonnée dans le Nouveau Monde, a été introduite aux Canaries et en Afrique du Sud où elle se poursuit activement. Les *Dactylopius* sont inféodés aux Cactacées *Opuntia* et l'espèce *indicus* exerce une action parasitaire importante sur les figuiers de Barbarie au point qu'elle est importée en Australie pour compléter l'action de la chenille du *Cactoblastis cactorum*, originaire de l'Uruguay, dans la lutte contre ces plantes devenues indésirables.

Ordre des Hémiptères

Contrairement à d'autres noms vernaculaires d'Insectes, le mot français « punaise », dérivé du latin *putere* (= sentir mauvais), est loin de s'appliquer à tous les Hémiptères. Il ne désigne guère que les punaises de lit *(Cimex)* quand on l'emploie seul, et certaines espèces fort communes de Pentatomidés quand on parle de « punaises des bois ». Cela tient au fait que les Hémiptères, dont la taille varie de 1 mm à plus de 10 cm, présentent une extrême diversité d'aspect; aussi est-il difficile de les reconnaître à première vue comme les membres d'un même groupe, sinon peut-être par l'odeur spéciale que beaucoup dégagent lorsqu'on les saisit. Cependant, chez ces Insectes, les caractères morphologiques les plus remarquables sont importants pour la classification.

Le *tégument*, épais dans la plupart des cas et presque aussi dur que celui des Coléoptères, peut être, chez les Miridés par exemple, mince et souple. Ses couleurs varient à l'extrême; parfois très brillantes et d'origine physique (interférences lumineuses dans les couches superficielles de la cuticule), elles tiennent en général à des pigments, souvent bruns ou verts, disposés de telle sorte qu'ils rendent l'Insecte peu visible dans son milieu habituel. La structure du tégument et la forme même du corps contribuent d'ailleurs au mimétisme, fréquent et varié, des Hémiptères. Par exemple, nombre de ces derniers ressemblent à des fourmis et en évitent sans doute ainsi les attaques. D'autres, prédateurs, sont difficiles à distinguer de leurs proies.

J Boudinot

▼◄ ***Éclosion imaginale d'un mâle de* Lagosinia strachani *(Lécanine) : l'ouverture du puparium s'effectue par l'extrémité postérieure à l'encontre de ce qui s'observe chez la plupart des autres Insectes qui sortent la tête la première. (Sur laurier-rose, Sahara.)***

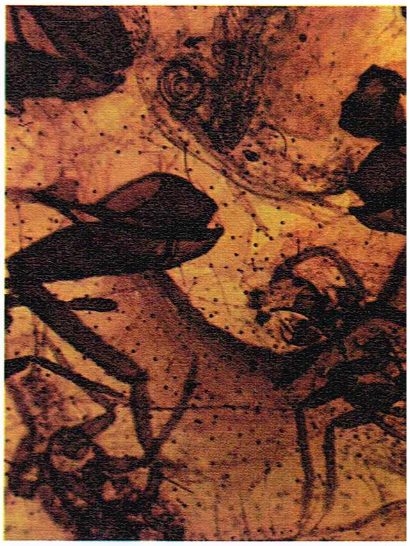

M. Boulard

▼ **Steatococcus euphorbiae*; vue ventrale montrant l'entrée du marsupium et quelques petits que celui-ci contenait encore au moment de la préparation.***

C. Bevilacqua

▲ ***Un Hémiptère Scutelleriné africain :* Callidea bohemani.**
▼ ***Tête (face ventrale) d'un Reduviidé montrant la courbure du rostre dont l'extrémité frottant sur le « plectrum » strié du prosternum produit la stridulation.***

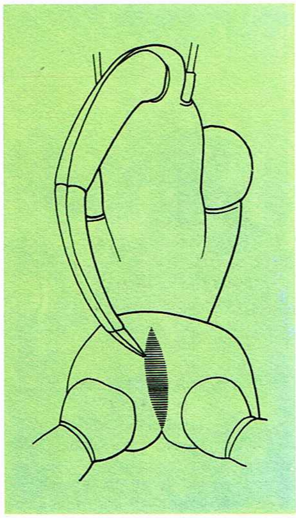

G. Hodebert

Il existe également des Hémiptères, dont certains fort communs dans nos régions, tels *Pyrrhocoris, Lygaeus, Graphosoma,* etc., que l'on remarque à leurs teintes vives et contrastées où dominent souvent le rouge et le noir. Une mélanine, déposée dans la cuticule, forme les dessins noirs. Quant aux pigments rouges, localisés dans l'épiderme, leur nature chimique diffère. Chez *Perillus bioculatus,* il s'agit de carotène pur provenant des doryphores, seules proies de ce Pentatomidé, qui tirent ce carotène des feuilles de pomme de terre. Chez *Pyrrhocoris* et beaucoup d'autres Hémiptères rouges, le pigment, une chromoprotéine, ne provient pas de l'alimentation. Bien des espèces fortement bariolées semblent immangeables par les prédateurs Vertébrés, voire même toxiques pour eux quand, se nourrissant sur des plantes vénéneuses, elles en accumulent les alcaloïdes. Leur livrée très apparente aurait donc valeur d' « avertissement ».

Lisse ou rugueux, glabre ou couvert d'une pilosité rarement très fournie, le tégument porte des sensilles variées parmi lesquelles il faut citer les *trichobothries.* Soies très fines, en général fort longues, insérées chacune dans une cupule de type particulier, les trichobothries caractérisent certains grands groupes d'Hémiptères, principalement les Amphibicorises et les Géocorises Pentatomorphes. Parmi ces derniers, leur position ainsi que leur nombre aident beaucoup à définir les tribus et à distinguer les genres.

Outre les glandes odorifiques, très importantes, dont il sera question plus loin, de nombreuses cellules sécrétrices, dispersées ou groupées, débouchent sur le tégument des Hémiptères; elles produisent des substances diverses, mais rarement des cires, à la différence de ce qui s'observe chez les Homoptères.

Les *appareils stridulants* des Hémiptères sont des formations cuticulaires situées, suivant les espèces, à des endroits très variés du tégument, et, contrairement à ceux des Homoptères, sont fort répandus dans l'ordre et toujours du type « à friction ». C'est en effet une crête cuticulaire striée ou denticulée, placée d'ordinaire sur une partie mobile (pattes, rostre, ailes), qui produit le bruit en frottant sur une « rape », petite aire de cuticule striée généralement abdominale ou thoracique. Les sons émis ont une fréquence beaucoup plus basse (50 à 200 hertz) que ceux des cigales (7 000 à 8 000 hertz).

La *tête,* caractérisée par sa paroi ventrale sclérifiée derrière le rostre, est souvent prognathe, mais, dans un même groupe, peut se présenter variablement inclinée par rapport à l'axe du corps. Les antennes, qui comportent au plus cinq articles, sont fort courtes et invisibles dorsalement chez les Hémiptères vivant dans l'eau (Hydrocorises) également appelés pour cette raison *Cryptocérates,* tandis que l'on nomme *Gymnocérates* les autres Hémiptères, pourvus, eux, d'antennes bien apparentes. Suivant les familles considérées, la tête porte ou non une paire d'ocelles situés entre les yeux composés. Le rostre, rabattu au repos contre la face ventrale, varie beaucoup quant à sa longueur relative et sa conformation; dans quelques groupes, ses quatre articles semblent réduits à trois, voire à un seul.

Le *thorax,* les *ailes* et les *pattes* fournissent d'importants caractères systématiques. Parmi les éléments thoraciques mêmes, deux surtout doivent être cités à cet égard; l'un, dorsal, est le *scutellum,* qui tend chez divers Pentatomorphes à se développer au point de recouvrir plus ou moins complètement l'abdomen en masquant les hémélytres; l'autre élément correspond aux deux *métapleures,* parties latérales du métathorax, portant chez beaucoup d'Hémiptères des gouttières et des *aires odorifiques;* il s'agit de formations cuticulaires spéciales, par où s'évacue la sécrétion de l'appareil odorant métathoracique; très variées dans l'ensemble de l'ordre, mais comparables chez des espèces voisines, elles donnent d'utiles indications sur les degrés de parenté.

Les ailes antérieures, ou *hémélytres,* généralement divisées en *corie* et *membrane,* constituent un caractère fondamental des Hémiptères. La corie épaisse, dure, pigmentée et d'ordinaire opaque, se trouve elle-même subdivisée par deux profonds sillons longitudinaux en trois secteurs qui sont de l'intérieur vers l'extérieur : le *clavus,* la *mésocorie* et l'*exocorie.* En outre, dans deux familles surtout, les Miridés et les Anthocoridés, un court sillon, perpendiculaire au bord externe de l'aile, la *scissure cunéale,* délimite dans l'angle postérieur de la corie une petite pièce triangulaire, le *cuneus.* La membrane, mince, translucide sinon transparente, peu ou pas pigmentée, montre, mieux que la corie, les nervures dont la disposition aide à caractériser certaines familles. Dans le cas, fréquent chez les Hémiptères, de brachyptérisme, elle est la première atteinte par la réduction, de sorte que l'hémélytre peut sembler composé de la corie seulement.

Les ailes postérieures, abritées au repos sous les antérieures, s'accrochent à elles, lors du vol, en enclenchant une partie épaisse et écailleuse de leur bord antérieur dans la courte gouttière que forment une brosse et un onglet au bord postérieur du clavus. Le trajet de leurs nervures est souvent à prendre en considération pour distinguer les grands groupes. Ainsi les deux subdivisions du vaste sous-ordre des Géocorises, Cimicomorphes et Pentatomorphes, se reconnaissent à ce que la nervure radiale et la nervure médiane sont, dans la région apicale de l'aile postérieure, fusionnées chez les premiers, séparées et divergentes chez les seconds.

Les pattes montrent fréquemment des modifications corrélatives du genre de vie. Beaucoup de prédateurs, les Reduviidés en particulier, ont des pattes antérieures préhensiles, ou du moins pourvues, à l'extrémité des tibias, de pelotes hérissées de poils spéciaux, adhésifs, facilitant la saisie et le maintien des proies. Chez les Cydnidés, Hémiptères fouisseurs, les tibias antérieurs et parfois postérieurs, aplatis ou carénés et munis de fortes épines sur leurs bords, facilitent le creusement des sols meubles. Les pattes postérieures, souvent renflées au niveau des fémurs dans les espèces capables de sauter, présentent de volumineuses protubérances dentées ou des expansions foliacées, à signification sans doute sexuelle, chez

les mâles surtout de divers Hémiptères, principalement des Coréidés. Nombre d'Hydrocorises ont des tibias et des tarses postérieurs transformés en palettes natatoires, tandis que d'autres adaptations des pattes permettent aux Amphibicorises de se déplacer aisément à la surface des eaux. Le nombre d'articles des tarses, trois, deux ou, rarement, un, l'absence ou la présence et la forme des « pulvilles » annexées aux griffes sont les caractères des pattes les plus souvent utilisés pour la classification.

L'*abdomen* de beaucoup d'Hémiptères dessine en coupe transversale la silhouette d'une tête de chat vue de face. Deux paires de lames minces : les *paratergites* dorsaux et ventraux, bordent latéralement les tergites; articulées, elles sont disposées de telle sorte qu'elles constituent sur les côtés de l'abdomen deux angles dièdres qui correspondent aux oreilles du chat et que l'on appelle le *connexivum*. Ce dispositif, joint à l'élasticité des membranes intersegmentaires, autorise une forte distension de l'abdomen, l'angle que forment les lames du connexivum pouvant s'ouvrir largement.

Les *glandes odorifiques,* dites larvaires, sont les plus constantes et les plus caractéristiques des diverses glandes tégumentaires abdominales. Typiquement au nombre de trois, mais pouvant être réduites à deux, voire à une seule, elles ont leurs orifices alignés les uns derrière les autres au milieu de la face dorsale entre les tergites III et IV, IV et V, V et VI. Souvent bien apparents chez les larves, ces orifices persistent, au moins à l'état de traces, chez les adultes. Comme dans bien d'autres groupes d'Insectes, les *genitalia* ont un grand intérêt systématique, puisqu'ils permettent notamment la discrimination précise des espèces. On utilise surtout les caractères des paramères ainsi que du phallus, enfermé au repos dans le *pygophore,* sternite IX transformé chez les mâles en une vaste capsule. Les femelles de presque tous les Hémiptères possèdent un ovipositeur; il est constitué soit de longues lames denticulées chez les espèces qui enfoncent leurs œufs dans des tissus végétaux, soit de plaques courtes chez les espèces dont les œufs sont simplement déposés sur le substrat.

L'*appareil odorifique,* qui produit la sécrétion malodorante donnant aux punaises leur mauvaise réputation, caractérise d'autant mieux les Hémiptères qu'il manque complètement chez les Homoptères. Deux systèmes glandulaires principaux le composent : d'une part les *glandes dorso-abdominales,* présentes dès la naissance, mais qui cessent souvent de fonctionner à la fin de la vie larvaire, d'autre part les *glandes métathoraciques,* propres aux imagos. Dans les deux systèmes, il s'agit, à l'origine du moins, de simples sacs tapissés de cellules sécrétrices et formés par une invagination impaire et médiane de la membrane reliant soit deux segments abdominaux, soit le thorax et l'abdomen. Les orifices de ces glandes, d'ordinaire maintenus fermés par l'affrontement de leurs bords, s'ouvrent grâce à la contraction de muscles tégumentaires, puis la sécrétion est expulsée, parfois violemment, sous l'influence, semble-t-il, d'une brusque augmentation de la pression sanguine.

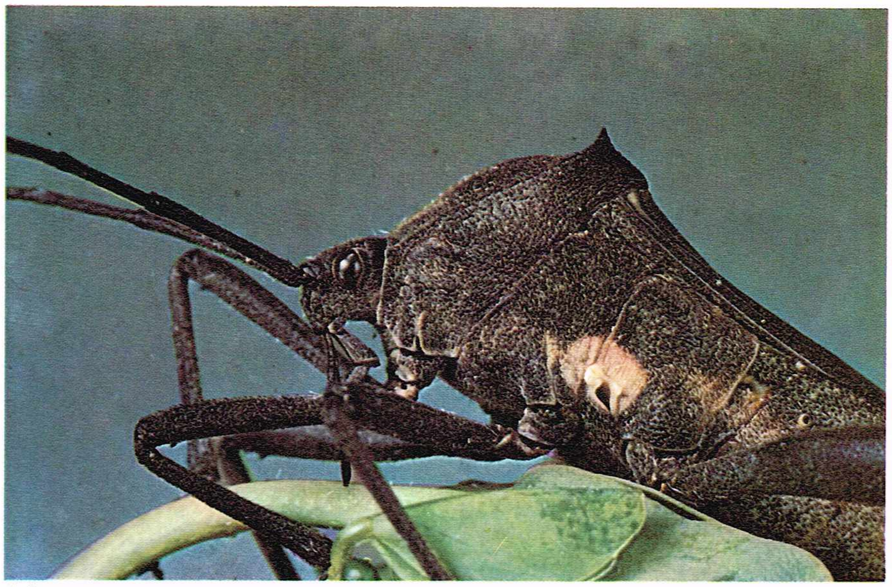

J. Carayon

▲ Anoplocnemis curvipes, Hémiptère Coréide, vu de profil, montrant, dans une tache claire, l'un des orifices des glandes odorifiques.

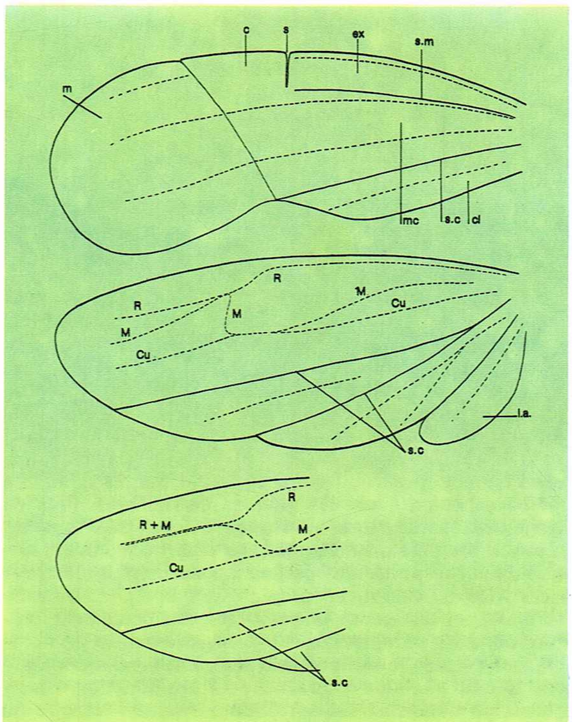

G. Hodebert

◀ Conformation des ailes d'Hémiptères. En haut, hémélytre; c, cuneus; cl, clavus; ex, exocorie; m, membrane; mc, mésocorie; s, scissure cunéale; s.c, sillon cubital; s.m, sillon médian. Au milieu, aile postérieure (chez un Pentatomorphe) : Cu, nervure cubitale; l.a, lobe anal; M, nervure médiane; R, nervure radiale; s.c, sillon cubital (fourchu). En bas, extrémité de l'aile postérieure d'un Cimicomorphe montrant la fusion caractéristique des extrémités des nervures radiale et médiale (R + M).

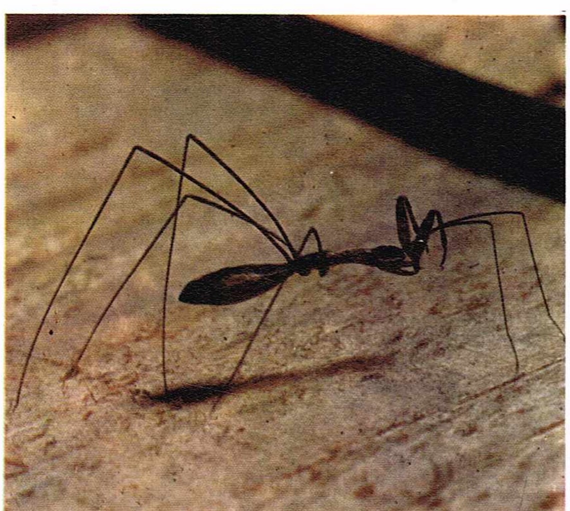

A. Margiocco

A. Margiocco

◀ A gauche, Ploiaria domestica, Reduviidé remarquable par la très grande longueur de ses pattes qui rappellent celles des moustiques, qui lui servent très souvent de proie; à droite, larve de Nezara viridula dont les taches claires sur l'abdomen marquent l'emplacement des glandes odorifiques.

J. Carayon

▲ **Lycidocoris uniformis,** ***Hémiptère Miridé en train de piquer une feuille sur laquelle on aperçoit la flaque de salive formant une tache plus sombre.***

De même que les glandes dorso-abdominales, les appareils odorants métathoraciques de type *omphalien* conservent, sans grands changements, cette conformation originelle. Caractérisés par un orifice impair et médian situé sur la face ventrale du thorax, près de sa jonction avec l'abdomen, ils s'observent chez tous les Hémiptères autres que les Géocorises. Ces derniers possèdent des appareils odorants métathoraciques de type *diastomien,* dérivé du précédent et appelé ainsi parce qu'il présente deux orifices largement séparés. Symétriquement placés sur les bords des cavités articulaires des pattes postérieures, ces orifices se prolongent sur les métapleures par des gouttières odorifiques, mentionnées dans la morphologie. Quant à l'appareil interne, devenu plus complexe, il montre en général un vaste réservoir médian, dont les cellules sécrétrices se sont séparées pour constituer de part et d'autre une paire de glandes autonomes. Le produit des appareils odorifiques est d'ordinaire un liquide volatil, incolore ou ambré. Sa composition chimique varie beaucoup suivant les espèces, et parfois dans une même espèce suivant les glandes considérées. Près de vingt-cinq substances chimiques y ont été trouvées, presque toujours en mélange. Les plus fréquentes, principalement responsables de l'action du produit, sont des aldéhydes aliphatiques comptant six à dix atomes de carbone, en particulier le *trans-hexenal,* également présent dans les sécrétions d'autres Insectes, dans de nombreuses plantes, dans le whisky, etc. L'appareil odorifique des Hémiptères a sans aucun doute une fonction essentiellement défensive. Sa sécrétion se montre toxique ou répulsive pour de nombreux Insectes, des Araignées et certains Vertébrés insectivores. Elle n'est généralement émise qu'en cas d'attaque, souvent de telle manière que l'Hémiptère cherche à atteindre son assaillant. Néanmoins cette défense paraît inefficace vis-à-vis de bien des prédateurs et parasites qui, insensibles à la sécrétion ou sachant y échapper, peuvent décimer les Hémiptères. Dans certaines espèces telles que les Bélostomes et les Lygaeidés par exemple, les glandes odorantes métathoraciques jouent un rôle dans la vie sexuelle, car elles se développent énormément chez les mâles en période d'activité génitale. Enfin, les sécrétions odorifiques facilitent parfois les rassemblements d'individus d'une même espèce et servent aussi de « phéromones d'alarme ».

L'*appareil digestif* des Hémiptères, comme celui des Homoptères, ne possède pas le *jabot* stomodéal si souvent observé ailleurs chez les Insectes dont la nourriture est à base de produits liquides. C'est l'estomac, très dilatable, qui fait office de réservoir. Il se poursuit par un intestin grêle plus ou moins long, dont le segment postérieur porte chez la plupart des Pentatomorphes phytophages des « cæcums » ou « cryptes à symbiontes ». Les Homoptères sont tous dépourvus de telles cryptes et hébergent leurs symbiontes dans des « mycétomes » isolés, ce que font aussi un petit nombre d'Hémiptères, tels que les Cimicidés, et quelques Lygaeidés. Ainsi que les quatre tubes de Malpighi à fonction principalement excrétrice, certaines parties de l'intestin moyen et de l'intestin postérieur (glandes rectales) règlent, par réabsorption ou évacuation, la teneur en eau du milieu intérieur et la pression osmotique. Mais les « chambres filtrantes » que possèdent beaucoup d'Homoptères semblent très rares chez les Hémiptères. La digestion s'opère en majeure partie sous l'action de la salive que produit une paire de volumineuses *glandes labiales,* composées chacune d'une glande principale bi- ou plurilobée et d'une glande accessoire souvent tubuleuse. Celle-ci semble fournir presque exclusivement l'eau qui dilue les principes actifs élaborés dans la glande principale. La salive des Hémiptères n'a guère été étudiée en détail que chez des Géocorises, des phytophages surtout, à cause des lésions qu'elle provoque dans les tissus attaqués, et des micro-organismes qu'elle véhicule.

Comme les Homoptères, les Pentatomorphes produisent d'ordinaire deux salives bien différentes. La première émise devient aussitôt à l'air libre un gel consistant qui maintient d'abord l'apex du rostre contre l'organe piqué, et qui constitue ensuite une gaine imperméable autour des stylets tout le long de leur trajet dans les tissus. Une autre salive, liquide, injectée peu après la première, facilite la pénétration des stylets et, en bien des cas, lyse plus ou moins complètement le contenu des cellules tout autour de la piqûre et commence la digestion avant même que le liquide alimentaire ne soit absorbé par l'Insecte. La salive liquide des Pentatomorphes et, en général, la salive des Hémiptères, contiennent des enzymes diverses, adaptées au régime alimentaire habituel de l'espèce considérée. Chez les phytophages, on y trouve notamment des amylases, d'autres carbohydrases, une pectinase, parfois une lipase et des protéinases. La salive des prédateurs, dont la composition, dans le cas de certains Reduviidés au moins, ressemble à celle du venin de serpent, est riche en protéinases et en hyaluronidase; elle renferme souvent des neurotoxines qui tuent ou paralysent très vite les proies attaquées. Les formes hématophages, tels les Cimicidés, et les Triatominés, généralement proches parentes de formes prédatrices, semblent avoir une salive bien différente, dont on sait qu'elle est anticoagulante.

Par rapport aux Homoptères, tous phytophages, les Hémiptères possèdent des régimes alimentaires considérablement diversifiés comme le montre la liste suivante :

Sources de nourriture		Principaux Hémiptères utilisateurs
Plantes supérieures	sève et contenus cellulaires	Miridés, Tingidés, Piesmatidés, quelques Lygaeidés, Coréidés, Pentatomidés et familles voisines
	graines	Beaucoup de Lygaeidés, Pyrrhocoridés, des Pentatomidés
Champignons (mycéliums)		Aradidés
Algues filamenteuses et unicellulaires		Corixidés
Insectes et autres Arthropodes		Les Hydrocorises (sauf Corixidés), tous les Amphibicorises et Archéocorises, Géocorises, Reduviidés, Nabidés, Anthocoridés, Microphysidés, Lygaeidés, Géocorinés, Pentatomidés, Asopinés.
Sang des Vertébrés		Cimicidés, Polycténidés, Reduviidés, Triatominés, certains Lygaeidés *(Cleradini)*

◀ *Accouplement de* **Pyrrhocoris apterus,** *représentant très commun en Europe de la famille des Pyrrhocoridés. Se tient ordinairement en foule, sur le tronc ou à la base des tilleuls dont il suce les graines.*

A. Margiocco

La diversification, on le remarquera, s'est opérée seulement dans le sous-ordre des Géocorises, tous les autres Hémiptères, Corixidés exceptés, ayant conservé un régime prédateur non spécialisé que l'on peut supposer originel. Beaucoup de Géocorises, de Miridés notamment, ont un régime mixte où alimentations végétale et animale entrent pour une part variable suivant les Hémiptères considérés. Même parmi les phytophages et les prédateurs stricts, peu d'espèces se montrent inféodées soit à une ou quelques plantes, soit à un petit nombre de proies proches parentes.

Les *appareils reproducteurs* internes des Hémiptères offrent un grand intérêt pour la classification. Celui des mâles surtout, qui varie beaucoup dans l'ensemble de l'ordre mais conserve un même plan d'organisation chez tous les membres d'une même famille, aussi divers soient-ils par ailleurs. Dans l'appareil génital femelle, le nombre des ovarioles, compris entre deux et huit, reste d'ordinaire constant au sein d'une famille, mais c'est la spermathèque qui donne le plus d'indications systématiques. Présente chez tous les Hémiptères, hormis les Géocorises Cimicomorphes, elle permet d'y caractériser des groupes de rang taxonomique plus ou moins élevé suivant les cas, depuis la famille jusqu'à l'espèce. Chez les Cimicomorphes, la spermathèque tantôt s'est transformée en une *glande vermiculaire* ayant un tout autre rôle, tantôt a complètement disparu. Les spermatozoïdes s'accumulent alors dans des formations vicariantes très diverses (pseudo-spermathèques des Reduviidés, sacs séminaux des Miridés, etc.) puis émigrent souvent jusque dans la région antérieure des pédicelles où s'opère la fécondation. Cinq familles de Cimicomorphes sont très remarquables par l'*insémination extragénitale traumatique* que possèdent tous ou certains de leurs représentants; exception faite du cas spécial des Strepsiptères, il s'agit là d'un phénomène unique chez les Insectes. Chez tous les Cimicidés, Polycténidés et Plokiophilidés, ainsi que chez la plupart des Anthocoridés, le mâle, lors de l'accouplement, perfore avec son organe copulateur le tégument abdominal de la femelle, soit en un point quelconque, soit au niveau d'une formation particulière : le *spermalège* en partie tégumentaire et en partie sanguin. Les spermatozoïdes, injectés directement dans le sang ou dans le spermalège, émigrent ensuite dans l'organisme femelle pour aller s'accumuler dans des *conceptacles séminaux,* autres formations particulières annexées à la paroi des oviductes. Nombre de Nabidés présentent des phénomènes comparables, mais le mâle perfore la paroi du vagin et non pas le tégument abdominal de la femelle. Une seule espèce, le Miridé *Campyloneura virgula,* est connue comme parthénogénétique. Les autres Hémiptères ne peuvent se reproduire sans qu'il y ait accouplement. Celui-ci varie beaucoup quant à ses préliminaires, sa posture et sa durée, qui atteint souvent plusieurs jours, chez les Pentatomorphes du moins. Quelques Hémiptères (Polycténidés, des Anthocoridés, certains Lygaeidés du genre *Stilbocoris*) donnent naissance à des larves qui ont achevé leur développement embryonnaire et sont enveloppées seulement d'une fine cuticule dont elles sortent aussitôt nées. Mais en général, il y a ponte d'œufs pourvus d'un chorion, qui sont tantôt enfoncés dans des tissus végétaux, tantôt déposés sur le substrat, soit isolément, soit en groupes, parfois à l'abri d'une oothèque. Par leur forme et leur structure, le nombre et la disposition des micropyles et des aéropyles, les modalités de leur développement, les œufs montrent une extrême diversité à l'échelle de l'ordre des Hémiptères, tout en gardant une conformation semblable au sein d'une même famille.

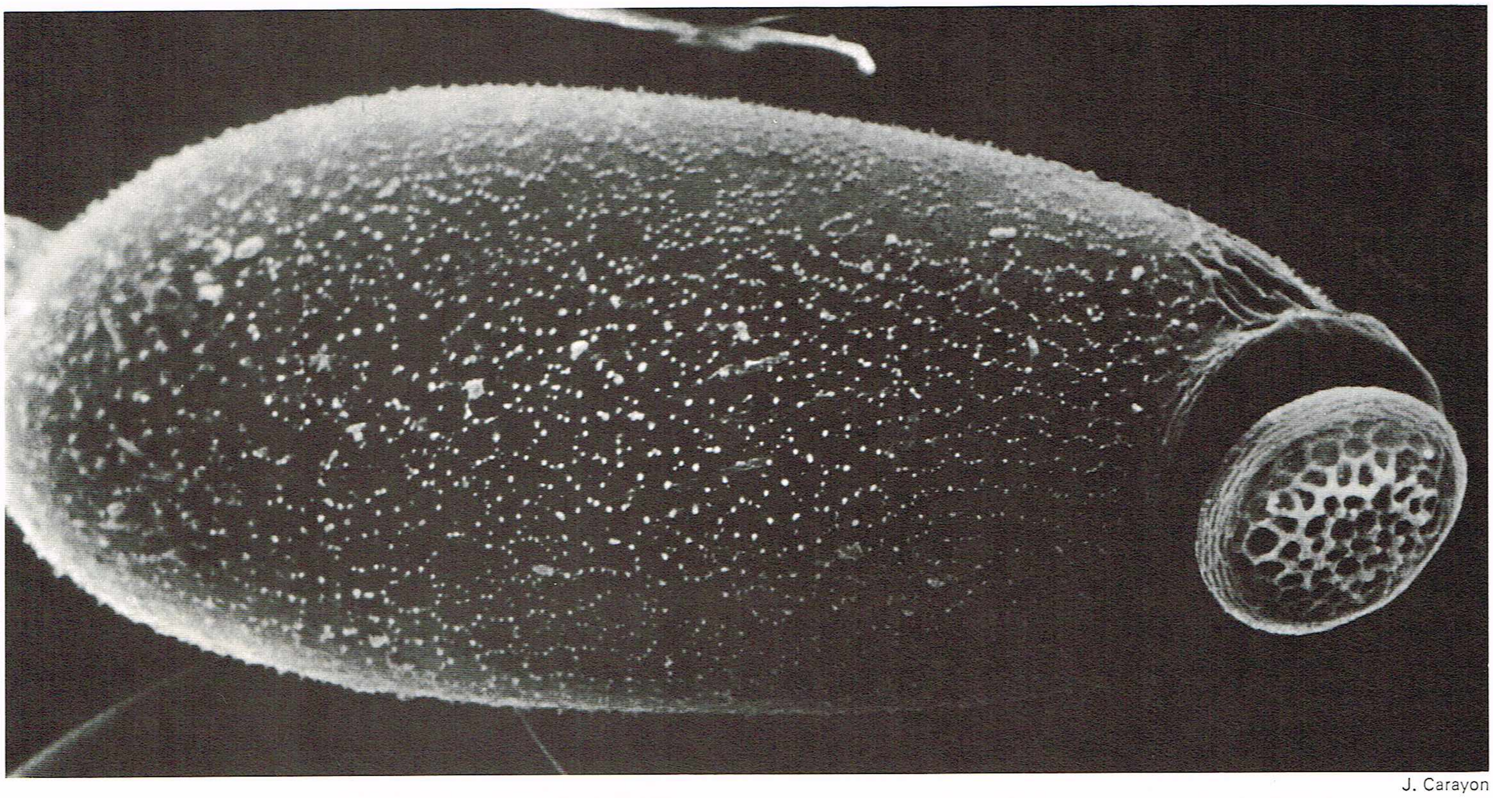

J. Carayon

▲ *Œuf de punaise des lits* **(Cimex lectularius)** *montrant l'opercule antérieur qu'a soulevé la larve pour éclore (document réalisé avec le microscope à balayage du Laboratoire de géologie du Muséum).*

Selon les groupes, les larves éclosent soit en soulevant un opercule antérieur, soit en découpant une calotte à l'aide d'un *ruptor ovi,* soit en faisant éclater le chorion. Le développement larvaire normal s'opère en cinq stades, exceptionnellement quatre.

Les Hémiptères comptent aujourd'hui environ trente mille espèces connues, réparties dans un peu plus de soixante familles. Pendant longtemps, la majorité des spécialistes a divisé l'ordre en deux groupes très inégaux quant au nombre de leurs représentants : d'une part, les *Hydrocorises,* qui vivent dans l'eau, également appelés *Cryptocérates* à cause de leurs antennes cachées, d'autre part, les *Géocorises,* vivant sur terre ou sur l'eau et nommés aussi *Gymnocérates,* en raison de leurs antennes apparentes.

Dufour en 1833, séparant à bon droit des Géocorises proprement dits les Hémiptères qui habitent la surface des eaux, en a fait une troisième subdivision : les Amphibicorises. Bien d'autres classifications furent proposées par la suite. Toutes sont moins satisfaisantes que celle de Dufour, étayée maintenant par de nouveaux arguments et généralement réadoptée depuis plus de vingt ans.

Une étude récente cependant, fondée principalement sur l'appareil odorifique (Carayon, 1971), a montré qu'il y a en réalité deux groupes bien différents dans les Géocorises au sens de Dufour. L'un de ces groupes, qui doit conserver le nom de Géocorises, mais en un sens restreint, réunit les représentants les plus évolués de l'ordre, caractérisés notamment par un appareil odorant métathoracique de type diastomien. L'autre groupe, qui mérite de constituer un sous-ordre nouveau des Archéocorises, se compose d'Hémiptères habitant les sols humides et le bord des eaux, conservant un appareil odorifique omphalien et, à bien des égards, restés les plus proches des formes primitives.

Voici, dans ses grandes lignes et jusqu'aux principales super-familles, la classification des Hémiptères que les connaissances actuelles nous conduisent à adopter.

▼ **Notonecta glauca,** *Hémiptère Hydrocorise très commun dans les mares.*

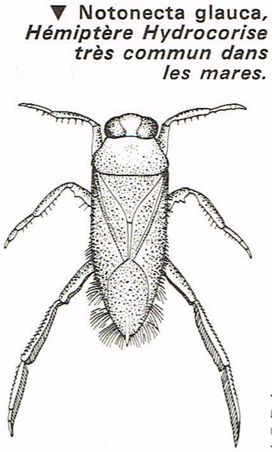

I.G.D.A.

Sous-ordre des Hydrocorises

Les Hydrocorises se caractérisent par des antennes courtes, cachées sous la tête. Ces Hémiptères vivent dans l'eau, sauf les *Gelastocoroidea* qui se tiennent sur les rives, et constituent avec les *Nepoidea,* les *Notonectoidea* et les *Corixoidea* quatre super-familles.

Super-famille des Gelastocoroidea

Les *Gelastocoroidea* sont les seuls Hydrocorises qui ne vivent pas dans l'eau, mais sur les rives, comme le faisaient sans doute les ancêtres du sous-ordre. Leur corps trapu mesure de 4 à 6 mm, et porte de gros yeux saillants.

Les **Gélastocoridés,** peu nombreux, répartis surtout dans la zone tropicale, ressemblent à de minuscules crapauds couverts de la bave où ils se tiennent en permanence; leurs pattes antérieures sont préhensiles. Les **Ochtéridés,** dont une espèce, *Ochterus marginatus,* se trouve en France, ont la face dorsale veloutée et des pattes semblables; ils sautent et volent très agilement au bord des eaux.

Super-famille des Nepoidea

Les *Nepoidea* sont caractérisés par un corps assez plat, ovale et souvent allongé, de taille moyenne ou grande. Les pattes antérieures sont préhensiles. Les **Népidés** ou « scorpions d'eau », pourvus d'un long siphon respiratoire à l'apex de l'abdomen, sont représentés par les nèpes et les ranatres, communes dans les étangs où elles marchent plus qu'elles ne nagent. Les **Bélostomatidés,** à siphon abdominal très court et pattes postérieures nageuses, sont presque tous tropicaux; certains, avec une taille de 110 mm, représentent les géants de l'ordre; très voraces, ils s'attaquent aux têtards, Mollusques aquatiques, jeunes Poissons, etc. Les **Naucoridés,** dont deux espèces, *Naucoris cimidoides* et *N. maculatus,* abondent dans les étangs sous nos climats, diffèrent des précédents par leur membrane hémélytrale dépourvue de nervures; alors que leurs fémurs antérieurs sont très élargis, ceux d'*Aphelocheirus aestivalis,* seul membre français des **Aphélocheiridés** proches des Naucoridés, sont peu renflés; *A. aestivalis* se tient sous les pierres dans les eaux courantes.

Super-famille des Notonectoidea

Les *Notonectoidea* ont un corps dorsalement convexe, le plus souvent petit, et n'atteignant pas, au maximum, 20 mm. Leur rostre possède quatre articles. Ces notonectes, fort communs dans toutes les eaux stagnantes, où ils nagent sur le dos et capturent jusqu'à des têtards, sont les principaux représentants des **Notonectidés.** Les **Pléidés** se distinguent de ceux-ci par leur taille toujours inférieure à 5 mm et leur tête en partie fusionnée avec le thorax; peu agiles, ils se tiennent au milieu des plantes aquatiques et sous les pierres immergées.

Super-famille des Corixoidea

Les *Corixoidea* se distinguent de tous les autres Hydrocorises par leur rostre très court, en apparence unisegmenté, leurs pattes antérieures courtes, aplaties à l'extrémité en palettes frangées de fortes soies, les pattes postérieures étant nageuses. Le corps est d'ordinaire transversalement zébré de brun. Hémiptères aquatiques les plus riches en représentants, les **Corixidés** abondent dans les eaux douces ou saumâtres. Ils se nourrissent surtout d'Algues et d'autres petits organismes aquatiques qu'ils récoltent par raclage avec leurs pattes antérieures puis que leur appareil pharyngien, triturant et filtrant, transforme en aliment liquide. Les Corixidés pullulent à un tel point, dans certaines régions du Mexique notamment, que les habitants recueillent leurs œufs en grandes quantités, les font sécher et s'en servent comme nourriture.

Sous-ordre des Amphibicorises

Les Amphibicorises possèdent des antennes dorsales bien visibles. La face ventrale du corps est en général couverte d'un duvet argenté. Ils se caractérisent par la présence de trois paires de trichobothries céphaliques. Ces Hémiptères glissent ou marchent à la surface des eaux. On distingue à l'intérieur du groupe deux super-familles : les *Hebroidea* et les *Gerroidea*.

Super-famille des Hebroidea

Les *Hebroidea* se caractérisent par un scutellum apparent, et des griffes insérées à l'apex des tarses. Leur taille ne dépasse pas 3,5 mm. Ces Hémiptères se tiennent principalement sur la végétation flottante ou sur les plantes au bord même de l'eau. Les Hébridés, qui ont moins de 2,5 mm et un tégument velouté, sont représentés en France par quatre espèces du genre *Hebrus*. Un peu plus grands (3,5 mm), non veloutés, souvent aptères, les **Mésovéliidés** se composent seulement du genre *Mesovelia* dont deux espèces, peu communes, vivent sous nos climats.

Super-famille des Gerroidea

Les *Gerroidea* ont un scutellum non apparent, et possèdent des griffes d'ordinaire insérées avant l'extrémité des tarses qui sont fendus. Leur taille varie entre 2 et 40 mm. Les Hémiptères se rencontrent surtout à la surface même de l'eau. Les **Gerridés** ont un corps étroit et allongé dépassant 10 mm, et seules leurs pattes moyennes et postérieures, rapprochées à la base, longues et fines, servent à la locomotion qui s'opère par saccades; leurs pattes antérieures, beaucoup plus courtes, ne sont utilisées que pour la capture de proies; leurs représentants en France, une dizaine d'espèces de *Gerris,* bien connus sous le nom d'« araignées d'eau », se rencontrent communément à la surface des mares ou des étangs, parfois des eaux courantes. De curieux Gerridés aptères, tous tropicaux, les *Halobates,* passent leur vie entière sur la mer, souvent loin des côtes. Plus trapus et plus petits (moins de 10 mm), les **Véliidés,** dont les trois paires de pattes sont assez semblables et équidistantes, glissent régulièrement à la surface des eaux; deux genres se trouvent en Europe : d'une part les *Velia,* de taille supérieure à 5 mm, qui comptent quatre espèces françaises et fréquentent surtout les ruisseaux dans leurs parties les plus calmes, d'autre part les *Microvelia* (1,5 à 2,5 mm), dont deux espèces vivent dans nos régions sur les plantes aquatiques au bord des mares. Plusieurs groupes d'Hémiptères tropicaux, analogues aux Véliidés paléarctiques, constituent des sous-familles particulières, voire des familles distinctes comme les **Macrovéliidés,** toutes pauvres en représentants. Les **Hydrométridés** diffèrent beaucoup des autres Gerroidea par leur corps filiforme dont les pattes, extrêmement fines, portent leurs ongles à l'apex; deux espèces d'*Hydrometra,* très voisines, sont communes en Europe; on les trouve dans la végétation, au bord même des eaux stagnantes à la surface desquelles elles se déplacent en marchant.

Sous-ordre des Archéocorises

Les Archéocorises portent des antennes apparentes mais sont dépourvus de trichobothries céphaliques, et de duvet argenté sur la face ventrale du corps. Les hémélytres à corie, souvent peu ou pas distincts de la membrane, sont fortement marqués par des nervures formant plusieurs cellules. Ces Hémiptères vivent au bord des eaux et dans les endroits très humides. Les représentants les plus remarquables sont distribués en trois super-familles : les *Dipsocoroidea,* les *Enicocephaloidea* et les *Leptopodidea.*

Super-famille des Dipsocoroidea

Les *Dipsocoroidea* ont les deux premiers articles des antennes beaucoup plus courts et plus épais que les derniers qui portent de longs poils très fins. La membrane est peu ou pas distincte de la corie. Leur taille atteint au plus 2,5 mm. Les **Dipsocoridés,** dont la tête est prognathe et conique, comptent en Europe une dizaine de représentants appartenant à deux genres principaux : les *Crypstostemma* qui vivent sous les galets au bord des rivières et les *Ceratocombus* que l'on trouve dans les prairies humides. Avec leur taille souvent inférieure à 1 mm, les **Schizoptéridés** sont les plus petits de tous les Hémiptères; leur tête, large, courte et plus ou moins infléchie, rappelle beaucoup celle d'Homoptères; ils habitent l'humus et les mousses humides et sont uniquement tropicaux.

Super-famille des Enicocephaloidea

Les *Enicocephaloidea* présentent un corps élancé, une tête longue, brusquement renflée derrière les yeux. Les hémélytres ne sont pas divisés en corie et membrane. Ils portent aux pattes antérieures une pince formée par l'extrémité élargie du tibia, un tarse à un seul article et des griffes. Une seule famille fort rare, les **Énicocéphalidés,** les représente en Europe. Ils habitent surtout les pays chauds; la couche superficielle des sols meubles, dans les endroits humides, constitue leur principal habitat.

Super-famille des Leptopodidea

De corps ovale, de taille généralement comprise entre 3 et 7 mm, des gros yeux proéminents, les *Leptopodidea* possèdent une membrane hémélytrale distincte de la corie, montrant quatre à cinq grandes cellules parallèles. Tous les articles des antennes sont couverts de poils courts. Les **Saldidés,** brun-noir plus ou moins taché de clair, constituent la famille la plus riche en espèces : environ deux cents dans le monde, dont une quarantaine en Europe; habitant les rives des eaux douces, parfois le littoral, ils courent et volent avec une extrême agilité en paraissant faire de brusques sauts; *Aepophilus bonnairei,* unique représentant d'une sous-famille particulière, vit sur les côtes atlantiques d'Europe et au Japon dans les rochers découverts seulement aux grandes marées; se nourrissant de petits Animaux marins, il subsiste, des semaines durant, sous plusieurs mètres d'eau en respirant l'air retenu entre les fentes rocheuses; ses hémélytres, très réduits, forment deux écailles pointues.

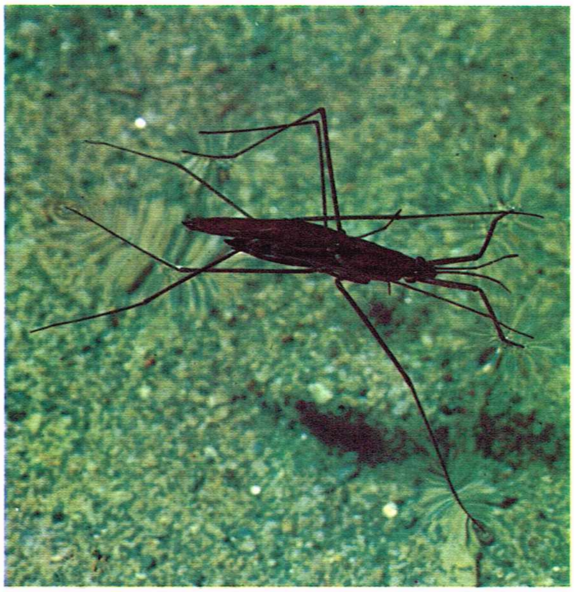

A. Margiocco

◄ *Accouplement de* **Gerris majas** *connus sous le nom d' « araignées d'eau ».*

J. Carayon

▲ **Aepophilus bonnairei**, *Hémiptère Archéocorise vivant en « cloche à plongeurs », dans les fentes de rochers normalement couverts par la mer et découverts seulement aux grandes marées sur les côtes atlantiques d'Europe et au Japon.*

▶ *Page ci-contre, en haut :* **Pycnopterna striata**, *Miridé commun en Europe sur le chêne, montrant le* **cuneus**, *ici bien visible, coloré en jaune et les deux cellules sur la membrane.*

▼ *A gauche, œufs et larves nouveau-nées de* **Cimex lectularius**; *à droite, le mâle et la femelle du même Cimicidé se nourrissent exclusivement de sang.*

Les **Leptopodidés**, voisins des Saldidés, s'en distinguent par les fortes épines qui arment en partie le rostre et les pattes antérieures; trois espèces habitent, dans le sud de l'Europe, les éboulis rocheux et les galets, parfois loin de l'eau.

Sous-ordre des Géocorises

Les Hémiptères possédant un appareil odorifique diastomien et ne vivant pas habituellement dans les milieux aquatiques ou très humides, représentent le vaste sous-ordre des Géocorises. A l'intérieur de celui-ci, on distingue deux grands groupes.

Celui des *Cimicomorphes* est constitué par des Hémiptères présentant les extrémités des nervures radiale et médiane confondues dans l'aile postérieure, sans trichobothries abdominales, et caractérisés par une spermathèque transformée ou absente. Les représentants de ce groupe sont divisés en deux super-familles : les *Cimicoidea* et les *Reduvioidea*.

L'autre groupe, celui des *Pentatomorphes*, est constitué par des Hémiptères dont les nervures radiale et médiane de l'aile postérieure sont divergentes à leur extrémité. Ils possèdent des trichobothries abdominales, et leur spermathèque est toujours présente. Les Pentatomorphes sont distribués en quatre super-familles : les *Aradoidea*, les *Piesmatoidea*, les *Coreoidea* (au sens large) et les *Pentatomoidea*.

Super-famille des Cimicoidea

Les *Cimicoidea* sont l'une des plus vastes super-familles d'Hémiptères. Ses membres, dont la parenté se reconnaît surtout à certaines particularités anatomiques, montrent une très grande diversité d'aspects et de formes; la morphologie externe ne fournit pas de caractères communs simples. Le plus souvent, la taille est inférieure à 10 mm; le tégument est mince et souple, le rostre, ni robuste ni arqué, est formé de quatre articles. Les pattes antérieures sont rarement préhensiles. Les quelque quatre-vingts représentants des **Cimicidés**, dont les hémélytres sont toujours réduits à de courtes écailles ciliées, ressemblent au membre le plus connu de la famille, la trop célèbre punaise de lit, *Cimex lectularius;* tous se nourrissent exclusivement de sang, celui de chauve-souris surtout, moins souvent celui d'Oiseaux; seules, la punaise des lits et sa proche parente *C. hemipterus* se sont adaptées à l'homme aux temps préhistoriques et sont maintenant répandues presque partout dans le monde.

Malgré leur forme étrange liée au parasitisme, les **Polycténidés**, aptères et sans yeux, sont des hématophages voisins des Cimicidés. Ils sont rares, uniquement tropicaux, et vivent en permanence dans le pelage de chauves-souris. Les **Anthocoridés**, longs de 4 mm au plus, sont caractérisés par la présence simultanée d'un *cuneus* sur les hémélytres et d'ocelles sur la tête; ils comptent environ cinq cents représentants connus dans le monde, dont quatre-vingt-dix dans la région paléarctique occidentale; prédateurs, ils s'attaquent à d'autres petits Insectes (pucerons, cochenilles, etc.) et à des Acariens. Proches des Anthocoridés, mais pourvus de pièces génitales différentes, les **Plokiophilidés** vivent uniquement sur les toiles d'Araignées ou d'Embioptères; on n'en connaît qu'une dizaine d'espèces, toutes tropicales. A peu près aussi nombreux que les Anthocoridés, les **Nabidés** ont une taille généralement supérieure à 6 mm et sont dépourvus de cuneus; certains de leurs représentants européens (trente environ), beige ou brun uniforme, abondent sur les plantes basses; prédateurs, ils ressemblent superficiellement à des Reduviidés, mais leur rostre, non incurvé, possède quatre articles.

Les **Microphysidés**, petite famille de quelque vingt-cinq membres, habitent presque tous la région paléarctique où ils se trouvent principalement sous la mousse et parmi les lichens couvrant les vieilles branches; ce sont de fort petits Hémiptères, prédateurs, longs de 1,5 à 2,5 mm, reconnaissables d'ordinaire à leur dimorphisme sexuel très accusé; tandis que les mâles ont un corps étroit et de longues ailes, les femelles montrent des

G.S. Giacomelli

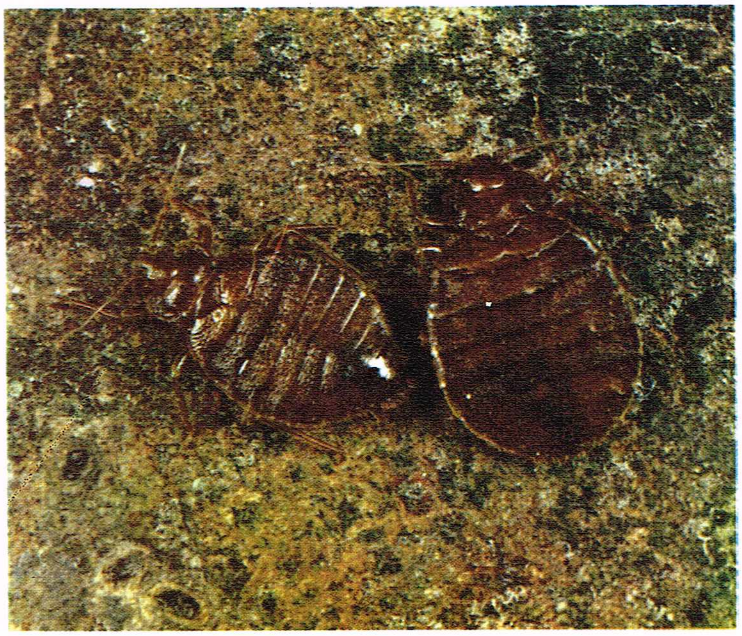

G.S. Giacomelli

hémélytres fort courts et un abdomen globuleux. Les **Miridés**, avec au moins sept mille espèces déjà décrites, constituent la plus vaste de toutes les familles d'Hémiptères; très divers quant à la taille, aux formes et aux couleurs, ils sont bien caractérisés par leurs hémélytres pourvus d'un cuneus et de nervures dessinant sur la membrane une ou, plus souvent, deux cellules; on en trouve à peu près dans le monde entier, fréquentant les plantes vivantes dont beaucoup prélèvent la sève ou les contenus cellulaires; plusieurs espèces, tropicales surtout, appartenant notamment aux genres *Lygus, Helopeltis, Salhbergella,* sont de dangereux ennemis des cultures; en revanche, d'autres Miridés, se nourrissant de petits Insectes nuisibles, pucerons par exemple, peuvent jouer un rôle utile à l'agriculture. Bien des membres de cette famille paraissent avoir un régime alimentaire mixte, pour partie végétal et pour partie animal. Les **Tingidés**, proches des Miridés, ont cependant un aspect différent : sur toute leur face dorsale, parfois étrangement bosselée, la cuticule, translucide, avec un réseau régulier d'alvéoles opaques, ressemble à de la dentelle; les « hémélytres », entièrement alvéolés aussi, ne montrent ni corie ni membrane et le scutellum est d'ordinaire caché sous une saillie que fait le pronotum vers l'arrière; mille huit cents espèces environ sont connues; toutes, phytophages, criblent en général les feuilles de petites taches de piqûre, comme le fait par exemple *Stephanitis pyri,* nuisible au poirier en Europe. Appartient encore aux Cimicoidea la famille des **Joppéicidés**, constituée seulement par *Joppeicus paradoxus,* petit Hémiptère prédateur qui vit au Moyen-Orient et dont la position systématique a longtemps été une énigme. En revanche, les affinités des **Thaumastocoridés** restent incertaines; ces étranges Hémiptères phytophages, habitant entre les feuilles de palmiers en Australie et en Amérique tropicale, appartiennent sans doute aux Cimicomorphes, mais ne se rangent nettement ni dans les Cimicoidea, ni dans les Reduvioidea.

Super-famille des Reduvioidea

Les *Reduvioidea* montrent, eux aussi, des formes très variées. Ils se distinguent des Cimicoidea et des autres Hémiptères par des particularités anatomiques telles que : une paire de pseudo-spermathèques chez les femelles, la conformation des mésadénies chez les mâles, la présence de « glandes de Brindley » à la jonction dorsale du thorax et de l'abdomen. Ce sont en général des Hémiptères oblongs, de taille supérieure à 10 mm, pourvus d'un rostre arqué et robuste. Une seule famille est importante, celle des **Reduviidés**, représentée principalement dans les régions chaudes du monde entier par plus de cinq mille espèces décrites; les Reduviidés, dont la diversité d'aspect est étonnante, possèdent à peu près tous une tête assez longue avec une brusque constriction derrière les yeux, un sillon stridulatoire prosternal, des pattes antérieures préhensiles; la plupart, prédateurs, chassent à l'affût d'autres Insectes. Cependant, tous les membres de la sous-famille des *Triatominae* sont hématophages; en Amérique tropicale, plusieurs d'entre eux piquent l'homme et lui inoculent des Flagellés pathogènes (maladie de Chagas); ils s'élèvent aisément au laboratoire et ont permis, *Rhodnius prolixus* surtout, d'importantes découvertes concernant l'endocrinologie et la physiologie des Insectes. Il existe en outre dans les Reduvioidea deux familles ne comptant chacune que quelques membres, tous tropicaux : les **Élasmodémidés** à corps très plat, munis de pattes épineuses, et les **Pachynomidés**, dont les fémurs antérieurs très renflés portent sur toute leur longueur de nombreuses dents alignées.

Super-famille des Aradoidea

Les *Aradoidea* se caractérisent par un corps plat ou très plat, et un tégument rugueux, en général brun uniforme. Les formes brachyptères ou aptères sont fréquentes; les tarses sont dépourvus de pulvilles. Ces Hémiptères vivent presque tous sous l'écorce d'arbres malades ou morts et s'y nourrissent ordinairement de mycéliums. Les **Aradidés**, dont le scutellum est triangulaire, constituent la famille la plus riche en représentants : environ six cents dans le monde, une cinquantaine en Europe; l'espèce la plus commune sous nos climats, *Aradus cinnamomeus,* contrairement aux autres, se trouve sur des pins en bonne santé, dont elle prélève la sève. Les **Aneuridés**, beaucoup moins nombreux (deux espèces en France), ont un corps mince comme une feuille et un scutellum arrondi; ils se trouvent sous les écorces de branches mortes très humides. Connus par une dizaine d'espèces tropicales, les **Termitaphididés**, petits, dépourvus d'yeux, d'ocelles et d'ailes, semblent avoir subi une régression morphologique liée à leur vie dans les termitières.

Super-famille des Piesmatoidea

Les *Piesmatoidea*, de petits Hémiptères, rappellent les Tingidés par leur tégument dorsal régulièrement alvéolé, mais le scutellum et la membrane des hémélytres sont

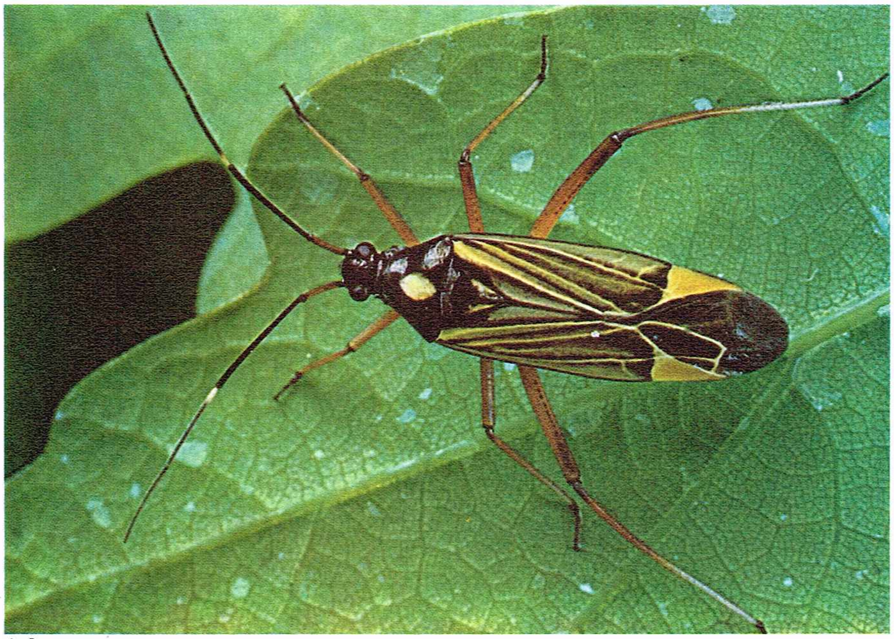

J. Carayon

▼ *A gauche,* **Anthocoris nemorum** *suçant une cochenille; représentant des Anthocoridés, petites punaises prédatrices, dont les ancêtres ont donné naissance aux punaises de lit* **(Cimex)**. *A droite,* **Rhinocoris iracundus** *appartient à la famille des Reduviidés.*

J. Carayon

I. Bucciarelli

▶ **Lygaeus equestris** *présente, comme la plupart des Lygaeinés, des couleurs vives dites « avertissantes ».*

I. Bucciarelli

bien apparents; les tarses sont pourvus de pulvilles. Une seule famille : les **Piesmatidés** comprenant environ quarante espèces, surtout paléarctiques et néarctiques, inféodées aux Chénopodiacées et aux Amaranthacées, dont l'espèce *Piesma quadratum* habite toute l'Europe, et commet d'importants dégâts en Allemagne et en Pologne où elle transmet aux betteraves une grave maladie à virus.

Super-famille des Coreoidea

Les *Coreoidea* se caractérisent par la membrane de leurs hémélytres portant bien plus de cinq nervures; leur corps, oblong, mesure de 5 à 40 mm; leur coloration est généralement brun clair à brun-noir; les antennes portent quatre articles, à base bien visible dorsalement; les pattes postérieures sont souvent renflées, épineuses ou foliacées. Représentés dans le monde entier, mais surtout nombreux en zone tropicale, les quelque deux mille Coreoidea connus sont phytophages et se nourrissent ordinairement de fruits ou de graines. Certains de ceux que l'on rencontre sur des plantes cultivées peuvent être très nuisibles, par exemple les *Leptocorisa* au riz, les *Amblypelta* et les *Pseudotheraptus* au cocotier. Les avis diffèrent quant au nombre et au rang des subdivisions de la super-famille, où l'on distingue le plus souvent quatre familles principales. Les **Coréidés,** riches en espèces aux formes très variées et souvent bizarres, dont *Phyllomorpha laciniata* donne un exemple, ont la tête beaucoup moins large que le pronotum; leurs « ostioles » odorifiques se voient aisément sur les métapleures, caractère que l'on retrouve chez les **Alydidés,** bien distincts des Coréidés par leur corps étroit, où la tête est aussi large que le pronotum. Les **Rhopalidés,** de taille généralement inférieure à 10 mm, pourvus d'hémélytres transparents entre les nervures de la corie, n'ont pas d'ostioles odorifiques apparents sur les métapleures; plusieurs de leurs représentants, tels *Rhopalus, Liorhyssus,* ou *Stictopleurus,* abondent en Europe sur les plantes basses des endroits secs et ensoleillés. Les **Sténocéphalidés,** par certains de leurs caractères, se montrent intermédiaires entre les Coréidés et les Lygaéidés, où quelques spécialistes les rangent; ils sont peu nombreux; une dizaine d'espèces, appartenant au genre *Dicranocephalus,* vivent en Europe sur les Euphorbes; longues de 10 à 15 mm, elles sont brun foncé avec des anneaux blancs sur les antennes et sur une partie des pattes.

La famille de beaucoup la plus importante est celle des **Lygaeidés** avec près de trois mille espèces décrites de toutes les parties du monde; variés quant à la taille, 1 à 15 mm, et à l'aspect, mais n'ayant pas une forme très élancée, les Lygaeidés sont en grande majorité phytophages. Les représentants de la sous-famille des Lygaeinés, fort communs, sont toxiques pour les Oiseaux, à cause des plantes vénéneuses dont ils se nourrissent. Ils présentent des colorations « avertissantes » rouge vif à taches noires et blanches. Beaucoup plus nombreuses sont les espèces qui passent facilement inaperçues et vivent sur le sol où elles se nourrissent de graines tombées; quelques Lygaeidés, les membres de la sous-famille des Géocorinés surtout, sont prédateurs; enfin les Lygaeidés tropicaux hématophages du genre *Cleradini* habitent les nids de rongeurs arboricoles. Les **Berytidés** sont faciles à distinguer des Lygaeidés par leur long corps étroit et leurs pattes filiformes dont les fémurs sont renflés à l'apex; on en connaît une trentaine d'espèces dans la région paléarctique et trois ou quatre fois plus dans le reste du monde; ils se déplacent lentement sur le sol, au pied des plantes. Le régime alimentaire, végétal chez la plupart des Berytides, est en partie animal chez certains. Néo-tropicaux et indo-australiens, les **Colobathristidés,** avec soixante-dix espèces environ, très élancés comme les Bérytidés, en diffèrent par leur tête large et la présence d'épines sur le scutellum. Les **Pyrrhocoridés,** riches d'environ quatre cents espèces, habitent surtout les régions chaudes, ils ont en Europe trois représentants dont le plus commun est *Pyrrhocoris apterus,* le « gendarme », très abondant sur les Malvacées et au pied des tilleuls, dont il suce les fruits; certaines des nombreuses espèces tropicales de *Dysdercus* sont de dangereux ennemis des cotonniers. Les **Largidés,** uniquement tropicaux, très proches des Pyrrhocoridés, en diffèrent surtout par le septième sternite de leurs femelles fendu ou échancré au milieu.

Super-famille des Pentatomoidea

Les *Pentatomoidea* ont un corps trapu qui présente un contour généralement pentagonal ou losangique; les antennes portent cinq, parfois quatre et rarement trois articles, dont le premier est en partie caché sous la tête; le scutellum dépasse vers l'arrière le milieu de l'abdomen, et, souvent, le couvre même complètement. La très vaste super-famille des Pentatomoidea, mondialement répartie, compte plus de sept mille espèces décrites, particulièrement nombreuses dans les pays tropicaux. A la seule exception des Asopinés tous prédateurs, ils se nourrissent de plantes, beaucoup manifestant une prédilection pour les fruits et les graines qui commencent à mûrir. Parmi les espèces nuisibles, les plus importantes, citons les « punaises des blés » du genre *Eurygaster integriceps* et différents *Aelia,* principaux ennemis du blé en Afrique du Nord et au Moyen-Orient, les *Eurydema,* nuisibles en Europe aux Crucifères, notamment aux choux, *Nezara viridula,* la « punaise verte », très commune en Europe méridionale et dans une grande partie du

▼ **Phyllomorpha laciniata** *est un exemple des formes étranges que l'on rencontre dans la famille des Coréidés. Cette espèce vit normalement sur des plantes épineuses avec lesquelles elle se confond (homotypie).*

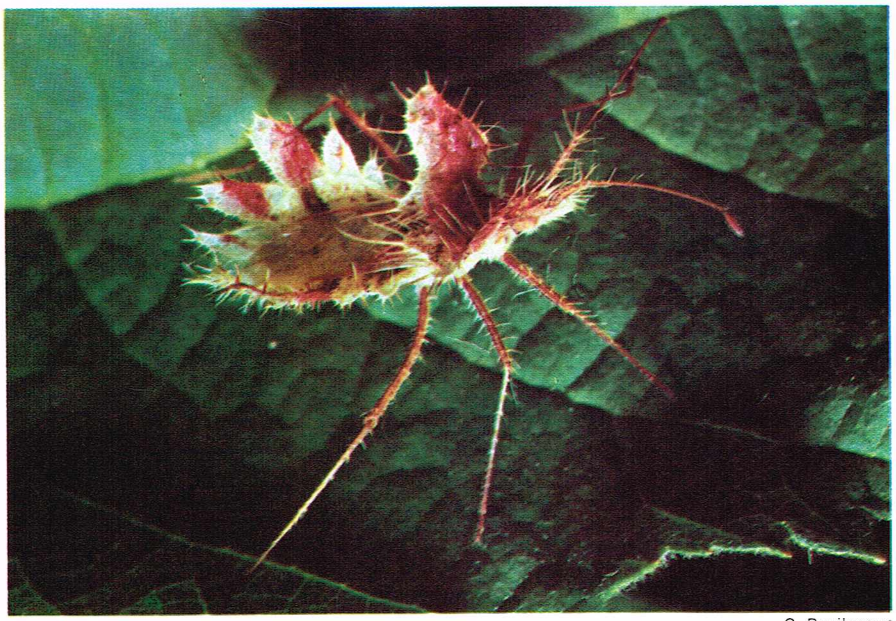

C. Bevilacqua

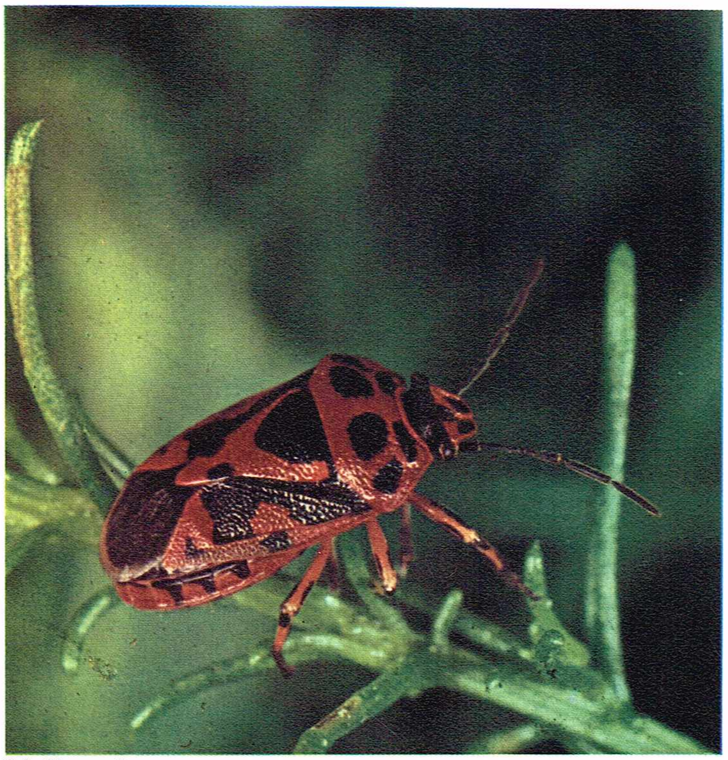

G.S. Giacomelli

I. Bucciarelli

▲ *A gauche,* **Eurydema ornatum** *est la « punaise ornée du chou » auquel elle est très nuisible ainsi qu'à d'autres Crucifères; à droite,* **Dolycoris baccarum,** *autre Pentatomide très commun, principalement sur les Ombellifères.*

monde, où elle attaque haricots, tomates, cotonniers, etc., les *Antestiopsis* inféodés au caféier arabica, dont elles réduisent beaucoup la production en Afrique et à Madagascar. Cinq familles principales composent les *Pentatomoidea ;* il est commode de les répartir en deux groupes suivant le nombre des articles des tarses de leurs représentants.

Les **Pentatomidés,** dont les tarses possèdent trois articles, et dont les pattes ne portent pas d'épines nombreuses et fortes, ont un scutellum, en général triangulaire et normalement développé, mais qui parfois chez les *Scutellerinés* et les *Podopinés* couvre plus ou moins complètement l'abdomen. Ils constituent une très grande famille, presque aussi riche en espèces connues que les Miridés ; c'est parmi eux que se rangent les formes nuisibles citées plus haut, les communes « punaises des bois » du genre *Raphigaster, Palomena, Nezara, Graphosoma,* et les Asopinés prédateurs comme *Perillus bioculatus,* ennemi du doryphore, *Podisus, Zicrona*. Les **Cydnidés,** d'ordinaire bruns ou noirs, possèdent des pattes fortement épineuses, à l'aide desquelles ils fouissent les sols meubles où ils vivent presque tous en suçant la sève des racines. Une petite famille néo-tropicale, les **Phloeidés,** mérite d'être citée ici en raison de l'extraordinaire ressemblance de ses membres avec l'écorce des arbres sur lesquels ils se tiennent ; à cause de leur couleur, de leur aspect rugueux et des expansions foliacées qui entourent tout leur corps, ces Insectes sont impossibles à repérer tant qu'ils restent immobiles.

Les **Acanthosomatidés,** dont les tarses sont constitués de deux articles, ont un scutellum triangulaire n'atteignant pas l'extrémité de l'abdomen et une carène médiane le long de la face ventrale ; peu nombreux en Europe, avec huit espèces, ils se rencontrent sur les arbres et les arbustes. Les **Plataspidés,** d'un noir fréquemment taché de jaune, doivent à leur corps hémisphérique où le scutellum recouvre complètement l'abdomen, de ressembler à des coccinelles avec lesquelles même des entomologistes les ont parfois confondus ; la plupart vivent sur des Légumineuses ; bien représentée dans les régions tropicales surtout, la famille ne compte en Europe qu'une espèce, assez commune, *Coptosoma scutellatum*.

J. Carayon

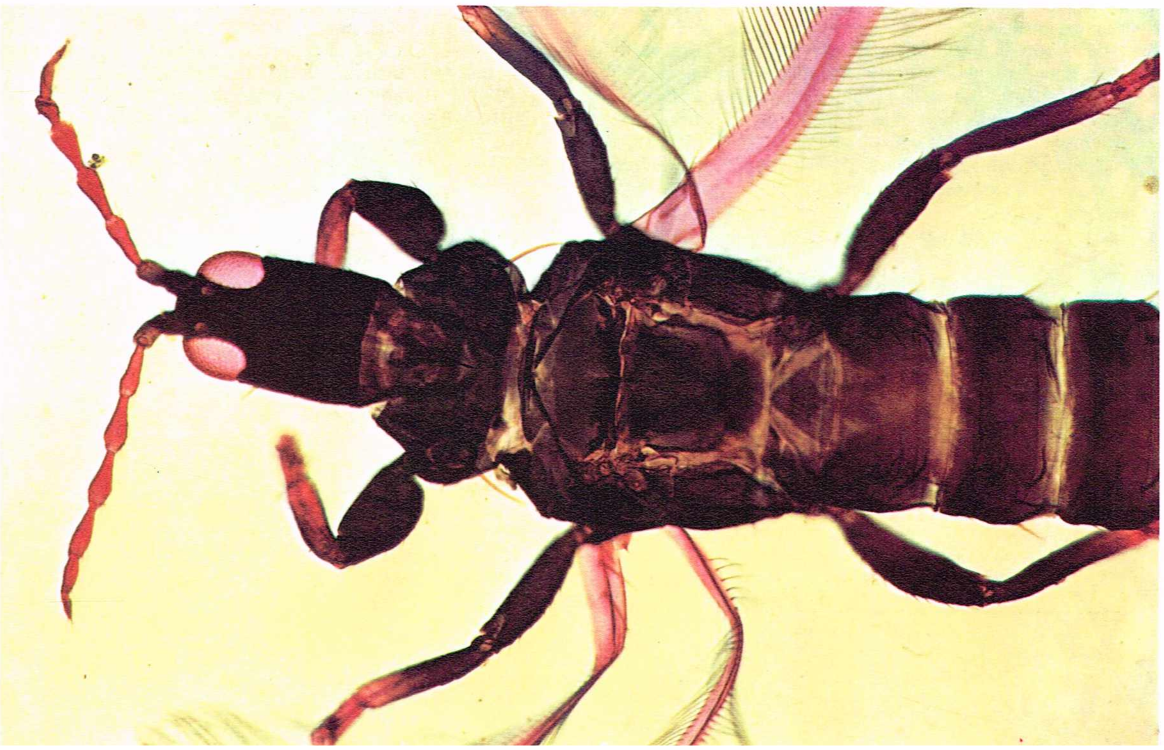

◀ *Microphotographie de* **Gynaikothrips ficorum (Tubulifera),** *espèce cosmopolite, dont les piqûres provoquent l'enroulement des feuilles du* **Ficus nitida,** *arbre ornemental sur lequel on le trouve principalement.*

Ordre des Thysanoptères

Les Thysanoptères, encore appelés thrips, ou poux des bois et des champs, sont de minuscules exoptérygotes de forme allongée (peu d'entre eux dépassent 2 mm), piqueurs-suceurs, typiquement pourvus de deux paires d'étroites ailes membraneuses et frangées de longues soies. Beaucoup sont phytophages et un certain nombre occasionnent des dommages non négligeables aux cultures; d'autres sont prédateurs.

Le *tégument,* de teintes brunes et noires le plus souvent, apparaît imprimé de microsculptures réticulées.

La *tête,* oblongue ou quadrangulaire, est franchement opisthognathe; les antennes, assez courtes, s'insèrent, contiguës ou non, au sommet de la capsule céphalique. Les yeux muriformes, portés latéralement, sont plus importants chez les formes ailées qui présentent, seules, trois ocelles disposés en triangle sur l'épicrâne.

Mais la caractéristique principale tient dans l'asymétrie du complexe gnathal inscrite dans les sutures et sclérites faciaux comme dans les pièces buccales vulnérantes; Reijne, Peterson, et Pesson ont montré que celles-ci sont toujours composées de trois stylets par suite de l'atrophie ou de la disparition de la mandibule droite. Les stylets sortent d'une bouche conique formée d'une partie clypéale et du labre, d'une paire de lobes maxillaires portant chacun un palpe, du labium enfin, aux attributs vestigiaux, qui s'insèrent directement contre l'occiput inférieur, sans gula intermédiaire. Contrairement aux Hémiptéroïdes (certaines cochenilles à labium court exceptées), le labre s'incurve en gouttière et guide finalement les stylets tout en étant, d'ailleurs, plus ou moins enveloppé par les paraglosses. Les stylets maxillaires, sans être de longueur excessive, s'articulent très profondément en levier sur le tentorium par l'entremise de pièces moyennes, cardos et piliers, permettant l'action des muscles protracteurs. Ils glissent sur les côtés de l'hypopharynx dont la paroi et ses reliefs leur servent de guides et se rejoignent en un tube.

L'*hypopharynx,* par sa face dorsale déprimée et liée à l'épipharynx, transforme le cibarium en une pompe grâce aux puissants muscles clypéaux qui lui sont associés. Par sa face ventrale, sillonnée, l'hypopharynx permet l'écoulement de la salive. Au moment de la prise de nourriture, le thrips oscille la tête d'avant en arrière, mouvements qui entraînent la saillie du stylet mandibulaire, lequel semble dépourvu de muscles protracteurs. Ainsi une fois l'épiderme végétal écorché, l'Insecte y applique étroitement l'extrémité du cône buccal, la pointe du stylet mandibulaire se trouve de la sorte engagée et les stylets maxillaires sont insinués dans les tissus.

Le premier *segment thoracique* est distinct, tandis que les deux suivants sont réunis en un ptérothorax portant les ailes et deux paires de stigmates. Les pattes, aux tarses bimères, se terminent par un arolium très développé, propre à l'ordre, et à la base duquel sont implantées les griffes du prétarse. Les ailes, en général frangées, plus denses et plus longues sur leur bord postérieur, peuvent être réduites ou nulles; ce dernier cas apparaît accompagné d'autres régressions : atrophie des yeux, des antennes et des palpes maxillaires, absence d'ocelles; souvent aussi, la teinte est différente. Tous ces caractères s'observent en relation ou non avec les sexes, mâles et femelles pouvant se présenter sous les formes ailée ou aptère, comme chez *Trichothrips pedicularis,* ou bien se manifester sous l'influence de conditions externes; ainsi, selon Hood, *Haplothrips flavipes,* qui est normalement brachyptère, produit des individus macroptères si le milieu devient défavorable.

Le port des ailes au repos permet de distinguer d'emblée les deux sous-ordres de Thysanoptères : les *Terebrantia* qui les placent parallèlement sur le dos et les *Tubulifera* qui les portent croisées. Mais les deux groupes tiennent leurs caractéristiques fondamentales dans la conformation de l'apex abdominal.

L'*abdomen* des thrips, qui comprend onze segments avec seulement deux paires de stigmates situées sur le premier et le huitième segment, peut en effet présenter deux types de *terminalia :* hémiptéroïde ou non reconnaissable comme tel. Les Térébrants femelles, en outre, se différencient aisément par la présence d'un ovipositeur en forme de tarière, composé de quatre gonapophyses très comparables à celles des cicadelles, d'implantation identique (urites VIII et IX), et entre lesquelles débouche le tractus reproducteur. Chez les mâles l'urosternite IX, renflé, abrite l'organe copulateur tandis que l'orifice génital s'ouvre entre ce segment et l'urite X. Pour les Tubulifères, la distinction est moins aisée : les femelles n'ont pas de tarière et l'apex abdominal est tubulaire dans les deux sexes avec le pore génital situé pareillement entre les sternites IX et X. Cependant, le sternite VIII de la femelle apparaît scindé en quatre parties, la dernière, repliable, faisant office de volet protecteur pour la vulve, tandis que chez le mâle, la base du tube ou urite X est échancrée à sa face inférieure.

Dans les deux groupes, la reproduction est généralement bisexuée, le mâle chevauchant la femelle lors de l'accouplement; celui-ci n'excède pas quelques minutes. Pussard-Radulesco a fait connaître le cas curieux et très peu fréquent dans la nature présenté par *Limothrips denticornis,* espèce nuisible aux céréales, dont les mâles s'apparient normalement avec les femelles encore au stade pré-imaginal, et les fécondent. Toutefois la parthénogenèse n'est pas rare; thélytoque constante comme pour l'*Heliotrips haemorrhoidalis* qui vit dans les serres et dont les mâles sont inconnus, ou pour le *Taeniothrips inconsequens* américain très nuisible au poirier; thélytoque géographique chez *Aptinothrips rufus* qui n'apparaît bisexué qu'en certaines régions d'Europe mais avec un sex-ratio extrêmement bas : un mâle pour cent cinquante femelles en Écosse, un mâle pour trois mille femelles en France; arrhénotoque et du type Hyménoptère ainsi que

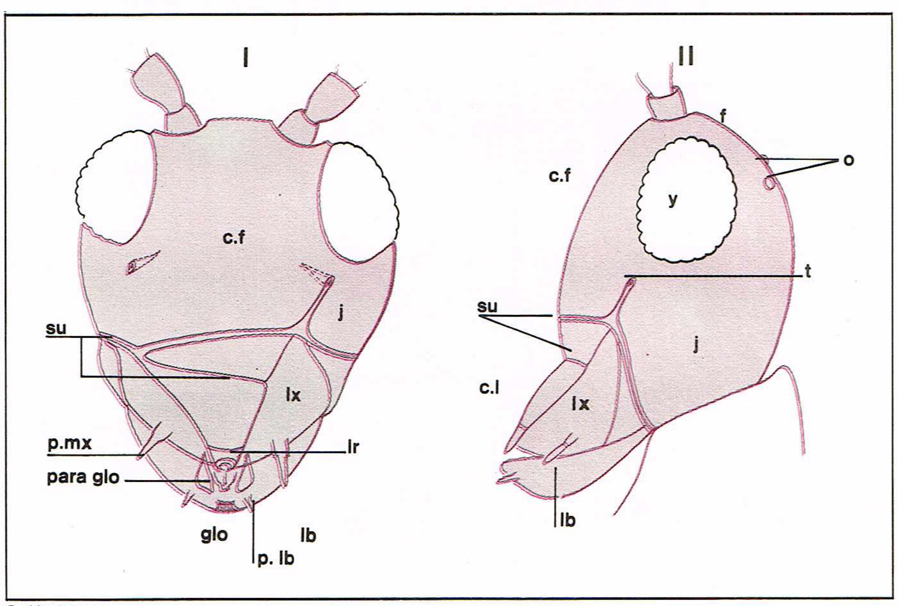

G. Hodebert

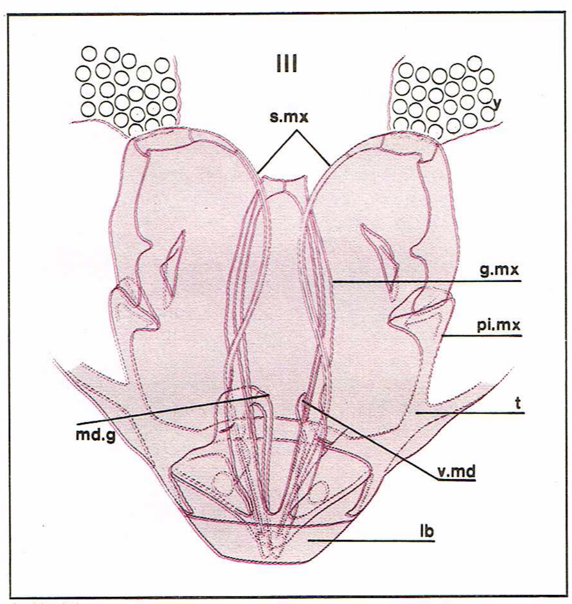

G. Hodebert

▼ *Représentation schématique, à gauche, de la tête de* Selenothrips *: I, montrant la dissymétrie faciale, II, de profil; à droite, III, cône buccal d'un* Cephalothrips *en vue ventrale et par transparence : c.f, clypéo-front; c. l, clypéo-labre; f, front; glo, glosse; g. mx, guide maxillaire (hypopharynx); j. joue; lb, labium; lr, labre; lx, lobe maxillaire; md. g, mandibule gauche; o, ocelles; para. glo, paraglosse; pi. mx, pilier maxillaire; p. lb, palpe labial; p. mx, palpe maxillaire; s. mx, stylets maxillaires; su, sutures clypéales transverses; t, tentorium; v. md, mandibule droite (vestige); y, yeux (d'après Reijne, Peterson et Passon).*

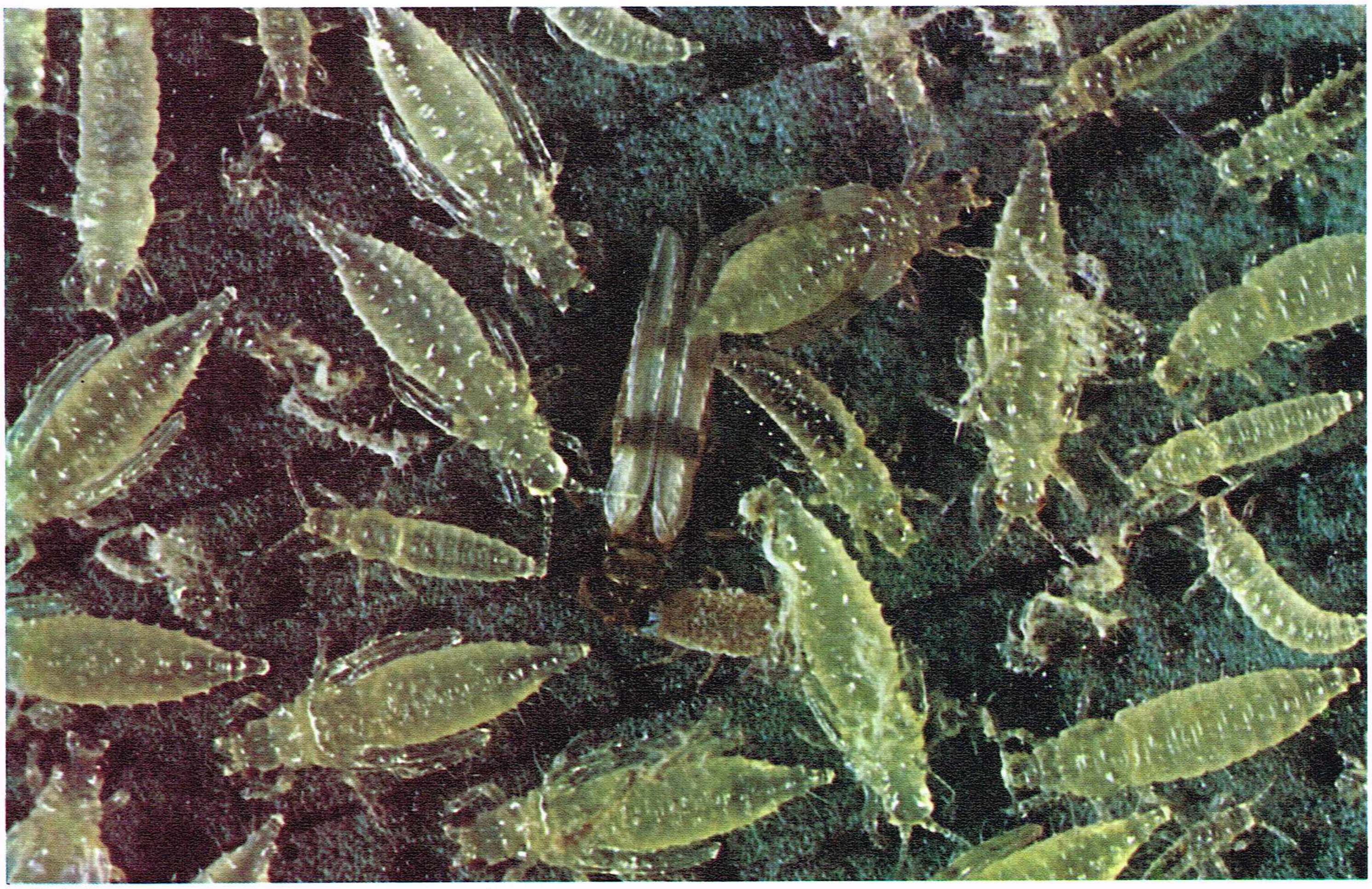

M. Boulard

▲ *Larves, nymphes et imago femelle (long de 1,5 mm) de* **Parthenothrips dracaenae** *(Térébrant), espèce cosmopolite très commune et nuisible dans les serres.*

l'a démontré Shull chez *Haplothrips verbasci* dont les femelles, une fois fécondées, pondent un certain nombre d'œufs non inséminés qui évolueront en mâles. Il en est de même pour *Liothrips oleae*, l'un et l'autre étant des Tubulifères.

Les femelles térébrantes insèrent leurs œufs dans les tissus des tiges ou des feuilles tandis que les femelles tubulifères déposent simplement les leurs sur des substrats divers, certaines choisissant des galeries béantes laissées par des Coléoptères, d'autres, comme *Liothrips* et *Aleurodothrips*, préférant les boucliers de cochenilles. Les œufs sont microscopiques, à chorion mince et lisse pour les premières, épais et gaufré pour les secondes. Bournier a signalé des cas d'ovoviviparité chez les Tubulifères du genre *Caudothrips buffai*. Le développement post-embryonnaire des thrips est également digne d'intérêt, car il offre à la fois des caractères de pauro- et d'holométaboles. Les jeunes des stades I et II sont en effet fort semblables aux adultes alors que la fin du développement est marquée par une phase d'inactivité et d'inanition, avec atrophie des antennes et des pièces buccales, et éventuellement formation d'un cocon léger ou d'un abri ; c'est le cas chez *Odontothrips loti*. Ce processus est très comparable à une phase pupale. Au contraire des Tubulifères, les Térébrants ont des jeunes à antennes annelées de microtriches ; ils ne connaissent qu'un seul stade nymphal pendant lequel les antennes sont rejetées dorsalement en arrière, tandis que les Tubulifères passent par deux stades nymphaux portant les antennes sur les côtés.

Sous-ordre des Terebrantia

Les Térébrants se répartissent, selon Priesner, en quatre familles dont trois principales. Les **Aeolothripidae**, caractérisés par une tarière à concavité dorsale et des ailes arrondies au sommet, comprennent des formes prédatrices de pucerons et d'autres Thysanoptères : les *Aelothrips* et *Melanthrips*, communs sur les fleurs du printemps à l'été, peuvent être cités en exemple.

Les **Thripidae** se distinguent par une tarière ventralement concave, des ailes étroites et aiguës à l'apex. Tous sont phytophages ; les floricoles peuvent jouer un rôle positif, pollinisateur, tels *Frankliniella tritici* sur de nombreuses plantes, *Taeniothrips ericae* sur la bruyère, ou négatif, stérilisateur, tels *Odontothrips confusus* et *Thrips flavus* qui piquent les fleurs de luzerne, interrompant la formation du pistil. Certains herbicoles et arboricoles s'avèrent nuisibles, ainsi, *Thrips tabaci*, vecteur de la virose bronzée des tomates, les *Heliothrips* et *Diartrothrips coffeae* qui, à l'état juvénile, ont la curieuse habitude d'accumuler et de transporter sur l'apex abdominal, alors relevé, une gouttelette d'excrément noirâtre maintenue à l'aide des soies circumanales. Devenue trop grosse, cette goutte est déposée par abaissement de l'abdomen jusqu'à ce qu'elle touche la feuille et s'y colle.

Les **Merothripidae**, uniquement représentés par le genre relicte *Merothrips* connu de l'ambre de la Baltique et existant actuellement dans la faune néo-tropicale, méritent d'être cités : les *Merothrips* possèdent un ovipositeur réduit et des caractères tubulimorphes concernant les antennes, le pronotum et les ailes.

Sous-ordre des Tubulifera

Les Tubulifères ne comprennent qu'une seule famille, celle des **Phloeothripidae**, qui réunit des Thysanoptères de bionomies fort diverses. Certains vivent en prédateurs d'autres thrips, les genres *Phloeothrips* et *Tricothrips*, par exemple, ou d'Homoptères Sternorhynches, tels les *Aleurodothrips ;* beaucoup sont phytophages, ainsi *Haplothrips tritici*, l'un des agents de la moucheture du blé, quelques espèces propres à l'Australie sont cécidogènes : *Neococcidothrips bursariae, Eugynothrips smilacis* et *Gynaikothrips australis*, ce dernier se fixant sur le figuier ; un bon nombre enfin tirent leur nourriture d'Algues ou de spores ; ils comptent dans leurs rangs les géants du groupe : *Megathrips, Bacillothrips, Titanothrips, Macrothrips* dont quelques-uns dépassent le centimètre (faunes tropicales).

▶ *A gauche, un exemplaire de* **Sialis** *adulte ; à droite,* **Palpares libelluloides,** *Névroptère Myrméléontidé dont les ailes diaprées présentent une nervation délicate.*

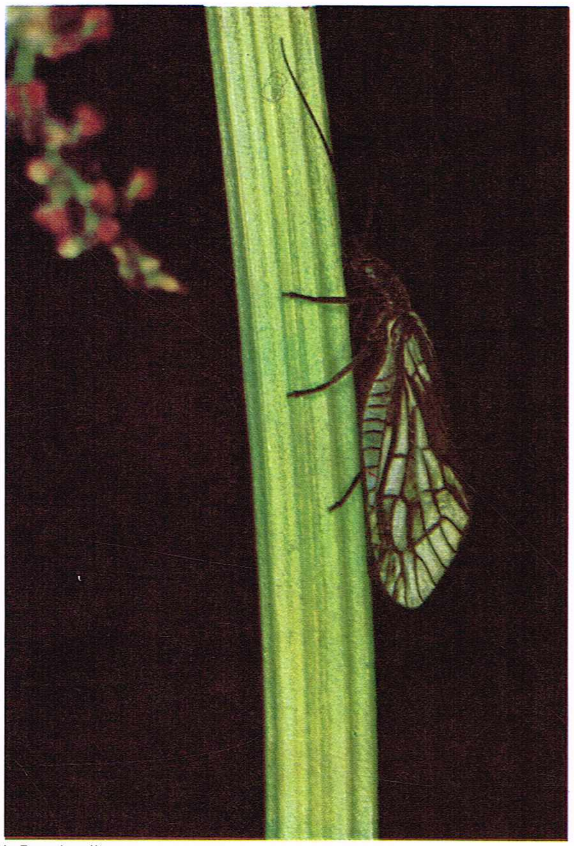

I. Bucciarelli

G.S. Giacomelli

Division des Holométaboles

Les larves des Insectes Holométaboles présentent beaucoup de différences avec les adultes (elles sont toujours aptères).

Super-ordre des Névroptéroïdes

Il s'agit là des Holométaboles qui ont conservé le plus grand nombre de caractères primitifs ; les ailes notamment présentent une nervation archaïque avec de nombreuses nervures transverses dont beaucoup sont disposées parallèlement, le long du bord costal.

▼ *Représentation schématique de la larve de* **Sialis lutaria.**

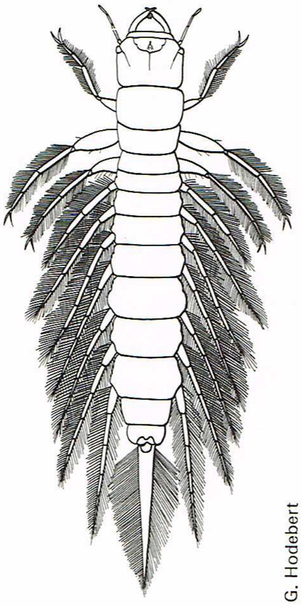

G. Hodebert

Ordre des Mégaloptères

Les Mégaloptères sont des Insectes de grande ou moyenne dimension, holométaboles, fréquentant surtout les régions de climat tempéré. Sous les Tropiques, ils peuvent atteindre de très grandes tailles. Les larves sont aquatiques alors que les imagos mènent une vie terrestre. On en connaît actuellement environ trois cents espèces.

La *tête* est prognathe, et les mandibules, bien développées, peuvent être hypertrophiées chez certaines espèces exotiques. Les antennes sont longues, sétiformes, pluriarticulées, et comptent jusqu'à quarante articles. Les yeux composés sont bien développés, trois ocelles, quand ils sont présents, leur sont adjoints.

Le *thorax* présente un pronotum important, rectangulaire ; le méso- et le métathorax sont munis de deux paires d'ailes membraneuses, repliées en toit sur le corps, (Néoptères) et qui sont beaucoup plus longues que l'abdomen. Les ailes antérieures et postérieures sont rendues solidaires les unes des autres par un système de couplage rudimentaire, du type Jugate.

L'*abdomen,* constitué de dix articles visibles, est terminé par des cerques, réduits chez la femelle. Le mâle présente une plaque sous-génitale dérivant du neuvième sternite, sur laquelle s'articulent les gonopodes. Le pénis a une position dorsale. Les orifices génitaux de la femelle s'ouvrent entre le neuvième et le dixième sternite. L'anatomie interne ne présente pas de grandes particularités. Le tube digestif possède six à huit tubes de Malpighi. Les organes génitaux mâles sont constitués de deux testicules, comptant chacun six follicules ; les canaux déférents aboutissent à une vésicule séminale complexe sécrétant le spermatophore. Chez les femelles, les ovaires sont composés d'ovarioles méroïstiques. L'orifice de copulation et l'orifice de ponte sont séparés.

La *larve,* de type campodéiforme, présente une tête prognathe armée de puissantes mandibules, les antennes sont courtes. Le segment prothoracique est plus important que les deux autres. L'abdomen est formé de dix segments, dont les sept premiers sont munis, chez la larve de *Sialis,* d'appendices branchiaux pluriarticulés, garnis de poils. Le dixième segment est terminé par une sorte d'éperon.

Reproduction. L'accouplement a lieu sur les plantes proches de l'eau, les deux partenaires placés côte à côte, le mâle recourbant très fort l'abdomen vers la femelle. Le mâle dépose dans la bourse copulatrice de la femelle un spermatophore qu'elle déchirera avec ses mandibules une fois la copulation terminée, libérant ainsi les spermatozoïdes.

Les œufs sont pondus, côte à côte, en grand nombre, jusqu'à trois mille, et forment des masses compactes sur les feuilles des plantes bordant l'eau. La jeune larve éclôt au bout de deux à quatre semaines grâce à un ovirupteur qu'elle porte sur la tête et qui lui permet de déchirer le chorion. Les larves sont très carnivores ; elles se nourrissent de *Tubifex,* de larves de Chironomidés, etc. Chez les *Sialis,* Mégaloptères communs en France, le développement larvaire s'étale sur deux ans. Pendant la première année, la larve va effectuer sept mues et trois l'année suivante. Au printemps, elle quitte l'eau, creuse une logette en terre où s'effectuera la nymphose. La vie nymphale dure peu de temps, une semaine environ. Au bout de ce laps de temps, la mue imaginale s'effectue.

Par leur abondance, leur rusticité et leur facilité d'élevage, les *Sialis* se sont révélés un matériel de choix pour les études de laboratoire. Le développement embryonnaire a été très étudié sur les œufs et l'endocrinologie sur les larves.

L'ordre des Mégaloptères est divisé en deux familles.

Les **Sialidés,** de taille moyenne, n'ont pas d'ocelle ; ils sont représentés en France surtout par l'espèce *Sialis lutaria* qui est fort commune.

Les **Corydalidés** peuvent atteindre de grandes tailles, et portent toujours trois ocelles. Chez certains du

genre *Corydalus* (néo-tropical) les mâles présentent un hyperdéveloppement des mandibules. Il n'existe aucun représentant européen.

Ordre des Raphidioptères

Ce sont des Insectes Névroptéroïdes, volant peu, de petite taille, n'atteignant que 10 à 20 mm de long, et 10 à 40 mm d'envergure.

La *tête* de l'imago est prognathe, aplatie dorsoventralement, allongée et rétrécie en arrière. Les pièces buccales sont du type broyeur. Les yeux sont très latéraux et saillants. Les ocelles peuvent être présents, ou non comme chez *Inocellia*. Les antennes sont courtes mais constituées de nombreux petits articles.

Le *thorax* se compose d'un prothorax très allongé en une sorte de cou constitué par le pronotum qui entoure presque complètement le prosternum. Le méso- et le métathorax portent chacun une paire d'ailes couplées et munies d'un ptérostigma.

L'*abdomen* comprend dix segments. Chez le mâle, le neuvième segment possède un tergite très développé ventralement et un sternite étroit muni de deux gonopodes larges et plats. La femelle possède un ovipositeur au niveau du neuvième segment abdominal, constitué par deux valves. L'orifice de ponte et l'orifice de copulation sont séparés.

La *larve* ressemble à une larve de Planipennes, à tête subrectangulaire, aux yeux réduits à quelques stemmates, entre quatre et sept, et aux antennes courtes ne possédant que trois articles. L'abdomen est composé de dix segments et présente, sortant de l'anus, un organe de fixation appelé bourrelet exsertile. Le développement larvaire ne comprendrait que trois ou quatre stades. La larve effectue sa dernière mue avant l'hiver et passe la mauvaise saison sous la forme de nymphe, mais cet aspect est variable suivant les espèces. La mue imaginale s'effectue aux premiers beaux jours. Les imagos se tiennent sur les arbres, dans les forêts. Ils chassent à vue. On rencontre fréquemment larves et adultes ensemble. D'après certains auteurs, ils seraient prédateurs, mais semblent préférer les Insectes morts.

L'accouplement a lieu suivant un mode particulier. Le mâle s'accroche par ses gonopodes et ses organes génitaux à l'extrémité abdominale de la femelle et se laisse pendre en arrière, la face ventrale en l'air, la femelle étant posée sur un support. L'accouplement terminé, le mâle se libère et la femelle va déposer ses œufs, dans les anfractuosités des écorces des arbres.

Les Raphidioptères sont des Insectes principalement holoarctiques dont une seule espèce chilienne est connue. Une seule famille les représente, les Raphidiidés divisés en deux sous-familles : Raphidiinés qui se caractérisent par la présence de trois ocelles; et les Inocelliinés qui, eux, ne possèdent pas d'ocelles.

Ordre des Névroptères ou Planipennes

Ces Insectes holométaboles sont parmi les plus primitifs des Endoptérygotes. Leur taille varie de quelques millimètres à une quinzaine de centimètres d'envergure. Ils sont en général de coloration assez terne bien que certaines espèces exotiques soient très vivement colorées. Le dimorphisme sexuel est en général peu marqué. Les adultes, et presque toutes leurs larves, mènent une vie terrestre.

La *tête* de l'Insecte adulte est généralement transverse, hypognathe, les pièces buccales, simples, sont du type broyeur. Les yeux composés sont de grande taille, fortement convexes, les ocelles sont généralement absents. Les antennes pluriarticulées sont de forme et de longueur variables et peuvent être terminées en massue, c'est le cas des Ascalaphidés.

Le *prothorax*, mobile, peut être très court et transverse (Ascalaphidés) ou au contraire très long et étroit (Mantispidés). Méso- et métathorax, bien développés, portent deux paires d'ailes homonomes d'égale longueur, sauf chez les Némoptéridés où les ailes postérieures sont longues et étroites. Elles sont caractérisées par un grand nombre de nervures formant un réticule très dense. Au repos, elles sont repliées en toit au-dessus de l'abdomen. Que les ailes antérieures et postérieures soient couplées ou non, leur système d'accrochage reste pratiquement inefficace. Le tarse des pattes est terminé par deux griffes et un arolium.

J. Carayon

▲ **Raphidia sp.** ***se nourrissant de pucerons.***

L'*abdomen* ne présente pas de particularité très notable en dehors d'un appareil de stridulation chez les Chrysopidés. Il existe aussi un appareil récepteur des sons situé à la base de l'aile antérieure. L'appareil de copulation est de conformation très variable suivant les espèces.

Les Planipennes possèdent de nombreuses *glandes tégumentaires* dont certaines produisent de la cire donnant à l'Animal un aspect pruineux; d'autres, réparties sur des vésicules exsertiles, surtout chez les mâles, doivent jouer un rôle dans le rapprochement des sexes. Le *tube digestif* n'a rien que de très banal; il est généralement muni de huit tubes de Malpighi.

L'*appareil reproducteur* mâle est formé de deux testicules comprenant chacun cinq à dix follicules, les canaux déférents débouchant dans une glande séminale, suivie du canal éjaculateur pénétrant dans le « pénis ». Chez les femelles, les ovaires sont composés d'ovarioles méroïstiques, les oviductes se réunissent en un conduit

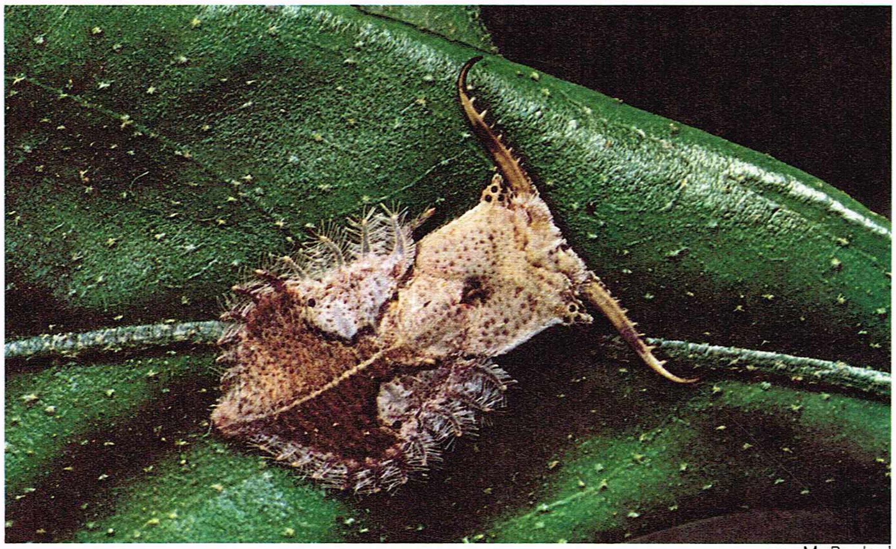

M. Boulard

▲ *Larve d'Ascalaphidé à l'affût, pièces buccales largement écartées.*

▶ *Page ci-contre, ascalaphe en position de sommeil (Ascalaphidé).*

▼ *Mantispidé dévorant un petit Orthoptère. Tous les représentants de cette famille possèdent des pattes antérieures ravisseuses comme les mantes.*

commun débouchant dans le vestibule génital. Il existe aussi chez la femelle une bourse copulatrice, une glande accessoire et un réceptacle séminal. Les Névroptères sont digamétiques, du type *Lygaeus,* avec deux chromosomes sexuels XY pour le mâle et XX pour la femelle. Les œufs sont munis d'un ou deux micropyles permettant le passage des spermatozoïdes au travers du chorion pour la fécondation.

La *larve* sort de l'œuf grâce à un ovirupteur situé au niveau céphalique, produit d'une différenciation des enveloppes embryonnaires; il agit à la manière d'une scie, sous l'influence de contractions abdominales faisant affluer le sang de façon rythmique dans la tête. Morphologiquement, les larves sont fort différentes de l'adulte et leur développement s'effectue généralement en trois stades. Les caractéristiques essentielles des larves de Planipennes résultent de leur adaptation à la capture des proies et à l'ingestion d'une nourriture presque exclusivement liquide. Les pièces buccales sont transformées en un appareil de préhension et d'absorption. Les maxilles ne présentent pas de palpe et sont sensiblement de même longueur que les mandibules. Toutes deux sont en général très développées, longues, et étroitement coaptées, ménageant entre elles un canal : le canal alimentaire. A la base de la maxille se trouve une glande à venin, prolongée dans la maxille et jusqu'à son extrémité par un canal venimeux. A la façon d'un « bouton-pression », un système dérivant de l'hypopharynx et de l'épipharynx ferme la « bouche ». Le cibarium, qui communique latéralement avec les canaux alimentaires, est muni de puissants muscles formant pompe alimentaire. Il existe d'autres glandes, les maxillo-mandibulaires dont la sécrétion contiendrait des enzymes protéolytiques assurant une prédigestion externe.

J. Carayon

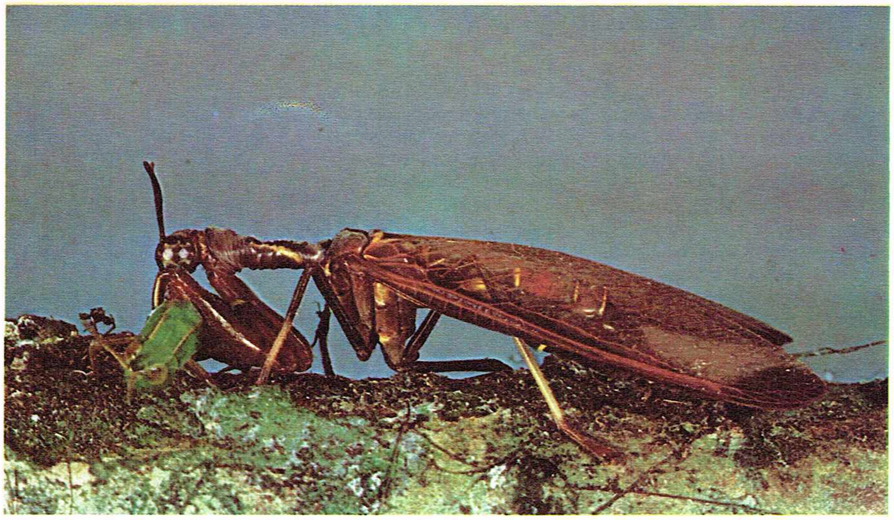

Le fonctionnement de cet appareil peut être décomposé schématiquement de la façon suivante : — premier temps : capture de la proie et injection de venin; — deuxième temps : injection des sécrétions provenant des glandes maxillo-mandibulaires; — troisième temps : digestion externe; — quatrième temps : absorption des aliments liquéfiés grâce à la pompe alimentaire.

L'intestin moyen est clos; il est relié à l'intestin postérieur par un fin cordon cellulaire aveugle (il ne permet pas le transit alimentaire), si bien que l'extrémité postérieure de l'intestin moyen est dilatée en un ventricule chylifique où s'accumulent les excréments solides. L'élimination se fait surtout par les tubes de Malpighi (huit au maximum) qui s'insèrent au début de l'intestin postérieur et dont la partie distale est englobée dans un organe piriforme *(cryptonéphridisme),* formé par un repli de la paroi rectale. C'est à ce niveau que se fait la réabsorption de l'eau. L'importance de ce cryptonéphridisme est en relation directe avec l'écologie de l'Animal; cette importance décroît avec l'augmentation de l'humidité relative du milieu et il est même inexistant chez certaines larves aquatiques. A la fin de la vie larvaire, les tubes de Malpighi acquièrent une nouvelle fonction, ils se tranforment en glandes séricigènes et élaborent la soie destinée à construire le cocon. On distingue alors deux régions dans les tubes de Malpighi : l'une, distale, mince, à fonction excrétrice, l'autre, basale, devenant volumineuse, caractérisée par une augmentation du volume cellulaire et l'apparition de noyaux géants polylobés, caractéristiques des glandes séricigènes. La soie produite se déverse dans l'intestin postérieur, s'accumule dans l'ampoule rectale et est émise en général par l'anus lors de la construction du cocon. Chez les Myrméléontidés, les deux derniers segments abdominaux sont différenciés en une filière mince, tubulaire et protractile, s'évaginant lors du filage du cocon; celui-ci est composé de deux couches, l'une, externe, grossière, à laquelle sont fréquemment incorporés des débris végétaux, et une autre plus interne, de structure beaucoup plus fine.

Certains groupes présentent des particularités :

Les *Sisyridés* ont des larves aquatiques dont la particularité est de vivre sur les Éponges d'eau douce qui leur servent à la fois d'abri et de nourriture. Les stylets maxillo-mandibulaires sont du type piqueur droit (premier type). La respiration est assurée par des trachéo-branchies abdominales. Pour se nymphoser, la larve quitte l'eau et tisse son cocon sur les plantes avoisinantes.

Les *Neurorthidés* présentent aussi une espèce ayant une larve aquatique, *Neurorthus fallax,* localisée à la Corse et à la Sardaigne; elle vit dans l'eau des torrents de montagne. La larve est caractérisée par un prothorax long et grêle. La respiration est assurée par la totalité de la surface des téguments. Il n'existe pas de trachéo-branchies.

Les *Mantispidés* de par leur aspect diffèrent beaucoup des autres Planipennes. Ils sont caractérisés par un allongement parfois très important du prothorax et par des pattes antérieures ravisseuses tout à fait comparables à celles des mantes. Les œufs sont pondus au bout d'un fin pédoncule. Les jeunes larves sont agiles, de type campodéiforme, et sont prédatrices. A la fin du premier stade, elles pénètrent dans le nid d'une araignée où elles effectueront leur mue pour donner naissance à une larve ressemblant à un asticot qui se nourrit des œufs de son hôte. On assiste ici à une véritable hyper-métamorphose, la larve se métamorphose sur place.

Les *Chrysopidés* sont des Insectes très communs. Ce sont les chrysopes que l'on rencontre dans les jardins au printemps ou à l'automne, et que la lumière attire. Les femelles pondent leurs œufs sur les plantes, à l'extrémité d'un fin pédoncule. Les larves dévorent quantité de pucerons et, pour se « camoufler », s'accrochent fréquemment sur le dos les dépouilles de leurs victimes, maintenues en place par des soies crochues.

Les *Ascalaphidés* sont de très jolis Insectes aux longues antennes que l'on rencontre volant au-dessus des prairies de montagne, ou posés sur les chaumes de Graminées. Les mâles effectuent en vol une courte parade nuptiale, et attrapent la femelle à l'aide de leur pince abdominale. L'accouplement, bref, a lieu au sol. Les larves ont des crochets courbes du type préhensile (deuxième type), elles sont terrestres et chassent à l'affût, mandibules écartées.

M. Boulard

Les *Myrméléontidés* figurent parmi les plus grands de l'ordre et certaines espèces tropicales sont très vivement colorées. Leur vol est lent, irrégulier et peu soutenu. Le développement larvaire peut être long, étalé sur trois années. Certaines larves de fourmilions construisent dans le sable des pièges en entonnoir au fond desquels elles se tiennent tapies en attendant qu'une proie tombe dedans. Elles progressent dans le sable à reculons et construisent leur piège en commençant par le cercle extérieur, et en rejetant le sable par pelletées, grâce à leur tête aplatie. Le fourmilion est renseigné sur la présence d'une proie par les vibrations transmises dans le sable jusqu'à quatre touffes de soies sensorielles situées sur le thorax. Dans l'entonnoir existe un angle mort de 70 à 80° situé face à l'Animal et dans lequel la larve ne peut détecter la présence d'une proie.

La classification des Planipennes est principalement fondée sur la nervation alaire et la structure de la tête des larves du dernier stade. On distingue classiquement quatre sous-ordres.

Les *Coniopterigoidea* sont très petits et pruinescents. Les larves portent des pièces buccales en forme de stylets. On dénombre une seule famille, les Coniopterigidés.

Les *Osmyloidea* sont caractérisés par leurs larves à stylets droits du type perforant. Ils comprennent les Dilaridés, les Bérothidés, les Sisyridés dont les larves sont aquatiques, les Osmylidés dont l'imago a un aspect de chrysope avec trois ocelles, les Myodactylidés exclusivement australiens, les Mantispidés et les Polystoechotidés.

Les *Hemeroboidea* ont des larves possédant des stylets maxillo-mandibulaires, courbes et préhensiles, mais très courts. On distingue trois familles, Psychopsidés, Chrysopidés, et Hémérobiidés, que certains auteurs élèvent au rang de sous-ordre.

Les *Myrmeleontoidea* forment le groupe le plus homogène, les larves ont des crochets du premier type. Elles sont larges et aplaties. Aucune n'est aquatique. Les Némoptéridés sont très remarquables par leur larve à très long cou, au prothorax très développé, et leurs imagos aux ailes postérieures transformées en une languette longue et étroite. Ils comprennent aussi les Ascalaphidés, les Myrméléontidés et les Nymphidés, tous australiens.

Super-ordre des Mécoptéroïdes

Rappelons que le petit ordre des Mécoptères semble avoir constitué un « centre » à partir duquel se sont diversifiés plusieurs ordres qui, incontestablement parents, forment le super-ordre des Mécoptéroïdes encore appelé « complexe panorpoïde ». Les caractères restés communs à tous ces Insectes sont cependant peu nombreux et apparemment secondaires : stipes des maxilles transversalement divisés, présence d'un « méron » aux hanches moyennes et postérieures, et tendance des pièces buccales à l'allongement avec passage du type broyeur au type piqueur et au type lécheur.

▼ **Panorpa communis *mâle (Panorpidé) ou « mouche scorpion ».***

J. Carayon

Ordre des Mécoptères

L'ordre de ces Insectes est principalement représenté par les panorpes ; il comprend environ trois cents espèces de dimension moyenne et d'aspect peu commun. Les adultes poursuivent une vie terrestre et volent pendant le jour ; ils préfèrent les lieux humides et ombragés. Parmi les formes larvaires, aucune n'est aquatique.

Chez les adultes, la *tête* est prognathe et se prolonge en un rostre, caractéristique, formation à laquelle participent principalement le *clypeus,* excessivement développé, et la portion ventrale des joues. L'appareil buccal est conformé différemment selon les familles. Dans certains cas, il est du type broyeur, dans d'autres cas, il est modifié de façon à piquer les proies, dans d'autres cas encore, il apparaît notablement réduit. Sur la tête s'insèrent les antennes pluriarticulées, de longueur variable suivant les espèces, mais toujours fines. Les yeux sont bien développés et les trois ocelles sont normalement présents.

Le *méso-* et le *métathorax* portent deux paires d'ailes membraneuses à peu près égales ; leur nervation est peu importante. Dans certains groupes, les ailes sont atrophiées et non fonctionnelles. Chez les Mécoptères comme les Névroptères, il existe un système de couplage des ailes tel que l'aile postérieure est solidaire de l'antérieure. Il est constitué de soies épaisses s'imbriquant solidement. Chaque segment thoracique porte ventralement une paire de pattes de structure normale.

L'*abdomen* est constitué de dix segments aisément reconnaissables, dont l'extrémité chez les mâles est très remarquable. Chez les panorpes, les septième et huitième segments se recourbent vers le haut, ce qui leur a valu l'appellation de « mouche scorpion ». Très développés, les gonocoxites, qui portent de grands gonostyles formés en une puissante pince, donnent au neuvième segment un aspect bulbeux. Chez la femelle, l'abdomen est très rétréci, en arrière du neuvième segment dans lequel s'ouvre la chambre génitale.

L'*appareil digestif* présente quelques particularités spéciales au groupe. A la base de l'hypopharynx débouche le canal salivaire, muni d'une pompe, provenant des glandes salivaires énormément développées chez le mâle, alors qu'elles sont très réduites chez la femelle.

L'*appareil excréteur* est formé de six tubes de Malpighi.

Le *système nerveux* central est formé de trois ganglions thoraciques et d'un nombre de ganglions abdominaux variant de six à huit, non seulement d'une espèce à l'autre, mais également au sein d'une même espèce. Les organes des sens sont représentés par des soies sensorielles dont la distribution est variable.

L'*appareil respiratoire* est composé de deux paires de stigmates thoraciques et de sept ou huit paires de stigmates abdominaux.

Les *organes reproducteurs,* mâles, sont formés de deux testicules subdivisés en trois follicules. Des testicules partent deux canaux déférents qui débouchent dans deux vésicules séminales pourvues chacune d'une glande accessoire. Des vésicules partent deux canaux éjaculateurs qui se rejoignent dans un sac éjaculateur où conflue le produit de deux glandes accessoires. Chez les panorpes, qui ne possèdent pas de pénis différencié, il communique avec un organe poussant le sperme dans les voies femelles : la pompe spermatique, constituée d'un piston sclérifié mû par deux paires de muscles antagonistes, composés de deux muscles protracteurs et de deux rétracteurs. L'appareil reproducteur femelle est formé de deux ovaires constitués d'une dizaine, ou plus, d'ovarioles méroïstiques ; il est prolongé par deux courts oviductes, tôt réunis en un oviducte commun qui s'ouvre dans la chambre génitale ; y sont associées une paire de glandes accessoires ainsi qu'une spermathèque. Chez les Mécoptères comme les Névroptères, les mâles sont digamétiques, mais au lieu de présenter un couple de chromosomes sexuels XY ils ne possèdent qu'un X.

De l'œuf de forme cubique sort une larve éruciforme, munie d'un appareil buccal broyeur, qui se nourrit

d'organismes animaux ou végétaux. Cette larve présente en plus des six pattes thoraciques huit paires de « pseudopodes » abdominaux. Le dixième article possède un organe de fixation, le pygopode. Les larves de panorpes vivent dans le sol où elles creusent des galeries; elles se nourrissent comme les adultes. Arrivées au terme de leur développement, elles creusent une petite galerie où elles construisent alors un cocon dans lequel s'effectuera la nymphose. La nymphe est du type libre, c'est-à-dire que les appendices ne sont pas plaqués contre le corps. Les Mécoptères sont des Insectes holométaboles.

La *nymphe* effectue, en général, sa mue imaginale au printemps ou en été, certaines espèces pouvant même apparaître en automne et survivre tout l'hiver. L'imago fréquente de préférence les endroits humides et ombragés. Les panorpes se nourrissent principalement de cadavres frais d'Insectes et ne semblent pas s'attaquer à des proies vivantes. D'autres espèces peuvent être de très habiles chasseurs d'Insectes ou d'Araignées, d'autres encore peuvent être phytophages. Le comportement reproducteur présente chez les Mécoptères quelques particularités; nous nous bornerons à citer ce qui se passe chez les panorpes. Lorsqu'un mâle sexuellement mûr est en présence d'une femelle, il s'en approche en faisant vibrer ses ailes, dépose devant elle une goutte de liquide « salivaire » qui se coagule ; la femelle, attirée par l'offrande, s'en approche et la déguste. Le mâle lui saisit alors l'abdomen à l'aide de son forceps et s'accouple. Pendant toute la durée de l'accouplement qui peut durer plusieurs heures, le mâle régurgite des gouttes de liquide que la femelle consomme. On observe chez les Mécoptères de grandes variétés dans les préliminaires à l'accouplement.

En raison du grand nombre de familles dont beaucoup sont fossiles, nous nous contenterons de signaler celles qui sont présentes en Europe. Les Mécoptères sont divisés en cinq sous-ordres :

Les *Protomécoptères* n'ont pas de représentants européens, et sont caractérisés par une nervation transversale compliquée.

Les *Eumécoptères* sont divisés en deux familles : les Panorpidés ont l'abdomen relevé à son extrémité chez les mâles du genre *Panorpa*; les Bittacidés du genre *Bittacus* ont un aspect de tipule. Leurs pattes sont longues et grêles.

Les *Néomécoptères,* représentés par la famille des Boréidés, du genre *Boreus hyemalis,* présentent des ailes rudimentaires et apparaissent en automne.

Les *Paramécoptères,* que l'on doit citer, mais qui n'ont aucun représentant actuel.

Les *Paratrichoptères,* connus à l'état fossile, présentent des caractères intermédiaires entre les Mécoptères, les Trichoptères et les Diptères sans être pour autant les ancêtres directs de ces deux ordres.

Ordre des Siphonaptères ou Aphaniptères

Les Siphonaptères, communément appelés « puces », dont on connaît environ mille cinq cents espèces, sont des Insectes holométaboles de petite taille (0,8 à 6 mm), toujours aptères et, à l'état adulte, ectoparasites hématophages de Mammifères et d'Oiseaux.

Le *corps* des imagos est très comprimé latéralement. Leur tégument, jaune à brun-noir, lisse, porte des soies, des épines et, à certains endroits, des rangées de fortes dents couchées : les *cténidies,* dont la présence et la disposition ont un rôle important dans la systématique.

La *tête,* sans cou apparent, s'accroche au thorax par son bord postérieur en forme de lame. Elle porte des yeux réduits, parfois absents, non composés d'ommatidies et correspondant peut-être à des ocelles. Les antennes courtes, plus développées chez les mâles, sont logées dans des fossettes souvent reliées par un sillon profond, le *caput fractum ;* le dernier de leurs trois articles présente une série de plis parallèles ou de lames foliacées. Les pièces buccales, piqueuses suceuses, sont essentiellement constituées par trois stylets creusés en gouttière sur leur face interne et réunis de telle sorte qu'ils forment un « tube alimentaire » par où le sang est aspiré. Deux de ces stylets représentent les *lacinia* des maxilles où s'observent aussi un grand *stipes* pointu et un palpe de quatre articles. L'autre stylet dérive de l'épipharynx. Il n'y a que des vestiges de mandibules, mais le labium, avec ses palpes relativement grands, enveloppe au repos les stylets et les guide lors de la piqûre. A ce moment, une pompe hypopharyngienne injecte la salive qui, s'écoulant le long de deux gouttières creusées dans les stylets maxillaires, parvient à la plaie.

Le *thorax* montre trois segments bien distincts avec une *cténidie pronotale* presque toujours présente. Les pattes, dont la première paire semble attachée sous la tête, possèdent de larges hanches et des fémurs robustes, surtout les postérieurs qui permettent des sauts atteignant 20 cm en hauteur, et le double en distance horizontale. Toutefois ces sauts ne servent qu'à la fuite ou aux changements d'hôte, le mode de progression normale étant la marche. A l'extrémité des tarses, composés de cinq articles, se trouve une paire de fortes griffes.

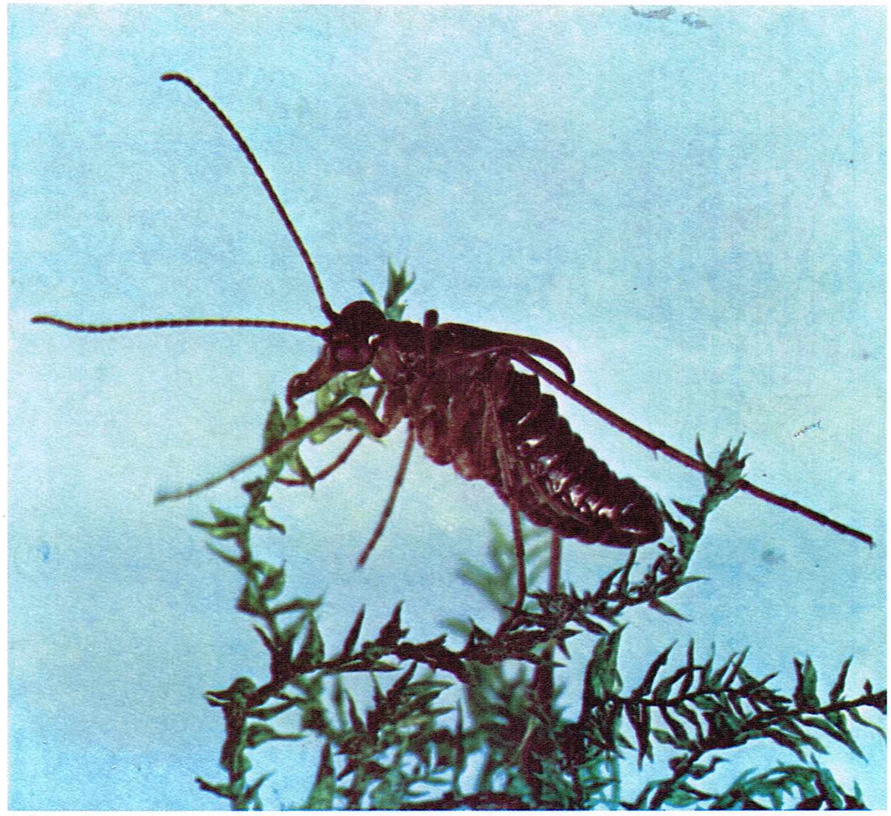

J. Carayon

▲ **Boreus hyemalis** ***(Boréidé) dont les ailes sont atrophiées et en forme de crochet.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ ***Microphotographie (× 30) de la puce du chien,*** **Ctenocephalides canis** ***(femelle).***

L'abdomen présente sur la région dorsale de son dixième et dernier segment une petite plaque pourvue de trichobothries et appelée *sensilium* ou encore, mais fort improprement, *pygidium*. Il n'y a pas d'ovipositeur chez les femelles. Quant aux pièces génitales mâles, elles sont extrêmement compliquées.

L'appareil digestif, doté d'une puissante *pompe pharyngienne* faisant suite à la *pompe cibariale,* montre une dilatation de l'œsophage : le *proventricule,* intérieurement hérissé, comme chez les Mécoptères, de longues baguettes cuticulaires dirigées vers l'arrière. Il n'y a pas de jabot, mais le sang ingéré s'accumule dans l'estomac, vaste et très extensible. Parmi les autres organes internes, le seul à mentionner est la spermathèque, unique, globuleuse, bien visible sur préparation microscopique grâce à son épaisse paroi cuticulaire et très utilisée pour la systématique.

Les *larves,* vermiformes, cylindriques, apodes et dépourvues de fausses pattes abdominales, ressemblent à celles de certains Nématocères. Elles ont un tégument mince, translucide, portant de longues soies semi-couchées. Leur teinte, blanchâtre, s'assombrit au niveau de la tête, bien distincte, où il n'y a pas d'yeux mais de courtes antennes dressées, d'un seul article; les pièces buccales sont broyeuses. Le dixième et dernier segment de l'abdomen se prolonge par deux processus charnus faiblement incurvés, qui, avec les soies des autres segments, favorisent la reptation.

Les imagos, exclusivement hématophages, sont en très grande majorité parasites de Mammifères, tandis que moins d'un dixième des espèces vivent aux dépens d'Oiseaux. La plupart des puces ne vont sur l'hôte que pour se nourrir, mais doivent rester à proximité de lui et habiter des milieux propices au développement des larves qui, elles, se nourrissent de débris organiques. Aussi les hôtes des Siphonaptères sont-ils l'homme avec ses demeures et des Animaux construisant soit des terriers ou d'autres gîtes pourvus d'une litière, soit des nids.

Les puces, souvent très abondantes si le milieu est favorable (on peut en trouver cinq cent mille dans la litière d'un seul porc), provoquent par leurs piqûres des réactions allergiques locales (papules, démangeaisons), voire un affaiblissement de l'état général. Mais leur importance médicale et vétérinaire tient beaucoup plus aux nombreux agents pathogènes ou parasites qu'elles peuvent transmettre. Ainsi, le bacille de la peste bubonique, *Pasteurella pestis,* qui fut responsable d'effroyables épidémies, est disséminé par *Xenopsylla cheopis,* puce du rat capable dans certaines circonstances de piquer l'homme. Le bacille de la tularémie, la rickettsie du typhus murin, le virus de la myxomatose, des amibes, Flagellés, Nématodes et Cestodes parasites ont également des puces comme vecteurs. A la différence des autres Siphonaptères, les membres de la famille des Tungidés, vulgairement appelés « chiques », vivent en permanence sur l'hôte. Leurs jeunes femelles se fixent à la peau, s'y enfoncent peu à peu, puis, gonflées de sang et d'œufs, prennent l'aspect de boules de gui, enfermées chacune dans un bouton blanchâtre, où un petit orifice permet l'évacuation des œufs. Ces boutons, indolores, peuvent s'infecter, produisant abcès et ulcérations. En Amérique et Afrique tropicales, *Tunga penetrans* parasite communément l'homme, quand il marche pieds nus, ainsi que beaucoup d'Animaux domestiques et sauvages. D'autres Tungidés vivent aux dépens des volailles.

La *reproduction* des puces, parfois remarquablement coordonnée à celle de l'hôte, est étroitement déterminée par les conditions extérieures et, dans les pays tempérés, n'a lieu que durant la belle saison. Après un accouplement bref, au cours duquel le mâle est placé sous la femelle, celle-ci pond jusqu'à cinq cents œufs, blancs, ovoïdes, lisses, qui tombent en général sur le sol et éclosent au bout de huit à dix jours. Les larves, nourries le plus souvent de débris organiques que, chez les espèces parasitant l'homme ou les Animaux familiers, elles trouvent dans les rainures de parquets par exemple, peuvent quelquefois rester sur l'hôte et utiliser comme aliments soit des desquamations, soit le sang plus ou moins digéré que les imagos ont rejeté. Le développement larvaire, qui comprend trois stades, dure en moyenne un mois chez *Pulex irritans,* mais varie de neuf à deux cent cinquante jours suivant la température et exige une certaine humidité, si bien qu'il n'y a pas de puces dans les régions très sèches. La pupe, exarate, habite un cocon soyeux incrusté de poussière, où l'Insecte, devenu imago, peut attendre longtemps des conditions favorables. Le passage à proximité d'un homme ou d'un Animal suffit à déclencher des éclosions imaginales massives et subites. La longévité des adultes varie de quelques mois à deux ou trois ans.

Les Siphonaptères constituent un petit ordre très homogène, dont les affinités demeurent incertaines. Aucun intermédiaire n'a été découvert entre leur forme très particulière, déjà réalisée dans le seul fossile connu (Ambre Tertiaire), et celle d'autres Insectes. On les rapproche souvent des Diptères, mais des arguments récents plaident plutôt en faveur d'une parenté avec certains Mécoptères : les Boréidés.

Mis à part le sous-ordre uniquement néo-tropical des *Malapsylloidea* qu'il suffit de citer, les Siphonaptères se divisent en *Pulicoidea,* sans dent apicale aux tibias postérieurs, et *Ceratophylloidea,* pourvus d'une telle dent. **Pulicidés** et **Tungidés** composent seuls les Pulicoidea. Les premiers, dont les trois tergites thoraciques réunis dépassent en longueur le premier tergite abdominal, comprennent cent cinquante espèces, notamment les puces communes, tels *Pulex irritans, Ctenocephalides canis, C. felis,* qui attaquent l'homme, le chien, le chat. Les *Ceratophylloidea* comptent douze familles, dont seules quelques-unes, particulièrement importantes, peuvent être citées.

Chez les **Tungidés** ou « chiques », bien moins nombreux et uniquement tropicaux, les trois tergites thoraciques réunis sont plus courts que le premier tergite abdominal.

Les **Cératophyllidés** comptent plus de cinq cents représentants répartis dans le monde entier; ce sont des parasites de petits Mammifères ou d'Oiseaux.

Les **Cténopsyllidés,** pourvus de nombreuses cténidies, sont représentés par trois cents espèces parasites de Rongeurs et d'Insectivores.

Les **Vermipsyllidés,** sans cténidies, comptent trente espèces parasites de carnassiers et de nombreux Animaux domestiques : chameau, cheval, chèvre, mouton.

Les **Ischnopsyllidés,** avec soixante-dix espèces, sont dépourvus d'yeux et parasites de chauves-souris.

Ordre des Trichoptères

Ce sont des Insectes holométaboles de petite ou moyenne dimension, hydrophiles, lucifuges, ressemblant à des papillons aux couleurs ternes. Les adultes ne s'éloignent guère de l'eau où ont vécu leurs larves presque toutes aquatiques.

La *tête* de l'imago est petite, transverse, les yeux composés sont semblables dans les deux sexes. Quand ils sont présents, les ocelles sont au nombre de trois. Les antennes, pluriarticulées, sont longues, étendues en avant de la tête au repos. L'appareil buccal, hypognathe, se caractérise par des mandibules présentes ou non et par un appareil du type lécheur-suceur, constitué par le labium que termine un renflement, le haustellum, les maxilles et une aire hypopharyngienne creusée d'une gouttière, le *sitophore*. Cet appareil subit de grandes variations suivant les groupes. Il peut être fonctionnel ou non. Les palpes maxillaires portent trois à cinq articles.

Le *thorax* présente un segment mésothoracique plus développé que les deux autres; il porte les pattes, munies d'épines mobiles aux tibias et de tarses de trois articles. Les ailes membraneuses, à nervation simple, sont iné-

▼ *La « chique »,* **Tunga penetrans** *: A, mâle adulte; B, femelle adulte avant sa fixation sur l'hôte; l'aspect est encore comparable à celui des autres puces, mais on remarque la brièveté caractéristique du throax; C, femelle fixée sur la peau de l'hôte et devenue, en majeure partie, une boule remplie d'œufs (grossissement très inférieur à celui de A et B).*

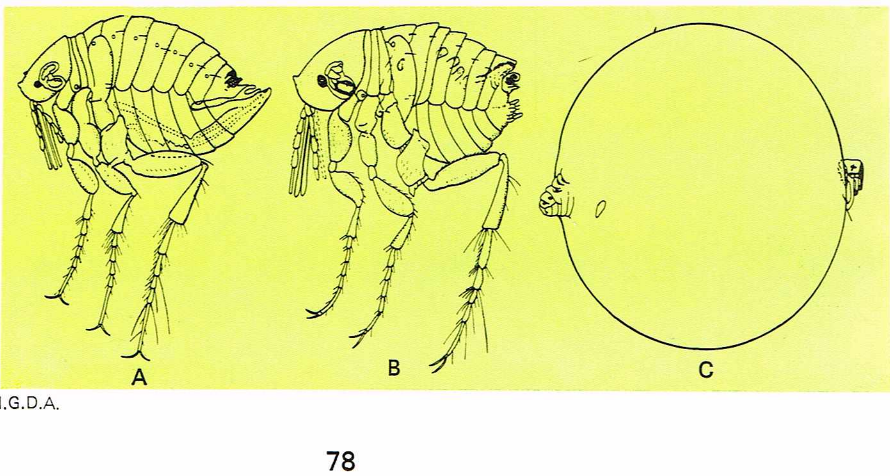

I.G.D.A.

I. Bucciarelli

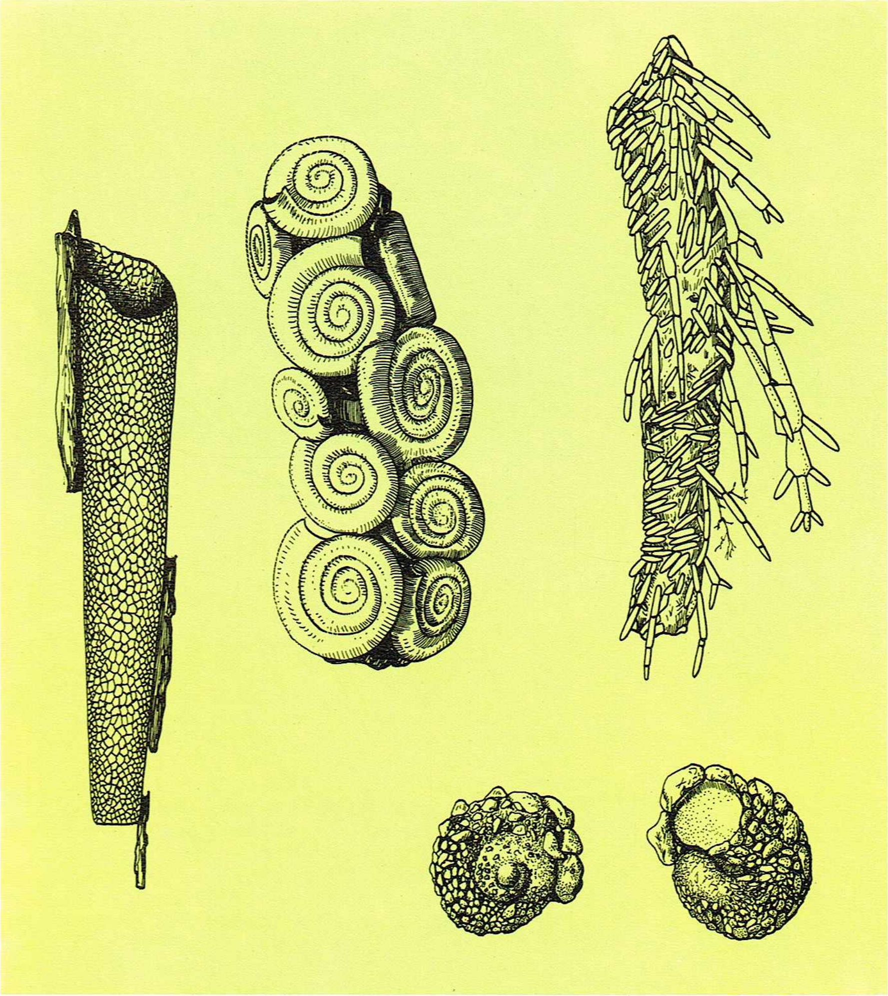

G. Hodebert

▲ *A gauche, un Trichoptère Limnophilidé du genre* Limnophilus *; à droite, quelques fourreaux construits par les larves de Trichoptères.*

gales. Bien développé, le lobe anal de l'aile postérieure se plisse longitudinalement au repos. Elles sont recouvertes de poils — et non d'écailles comme les Lépidoptères — et le système qui les couple rappelle celui des Papillons. Les cas de brachyptérie sont rares.

L'*abdomen*, composé de dix segments, ne présente pas de grandes particularités chez l'imago. Les derniers segments sont modifiés suivant le sexe : chez le mâle, postérieurement au neuvième segment, la membrane intersegmentaire s'invagine et forme une poche péniale où se loge le canal éjaculateur, différencié en un pénis exsertile plus ou moins sclérifié ; des dispositifs latéraux paramères et titillateurs peuvent y être associés. Chez la femelle, l'extrémité abdominale peut s'effiler ou non en un long ovipositeur du type Panorpe, formé par les neuvième et dixième segments. L'anatomie abdominale de la femelle révèle une paire de glandes sécrétrices d'une substance mucilagineuse où les œufs sont enrobés lors de la ponte. L'accouplement a lieu en vol ou à terre, peu de temps après l'apparition des imagos.

Suivant la copulation, la ponte s'effectue soit à terre, soit sous l'eau, la femelle pouvant ou non fixer ses œufs à un support. Le développement embryonnaire, de courte durée en général, peut s'interrompre et présenter une diapause hivernale.

Les *larves* de Trichoptères sont, en général, dulçaquicoles. Certaines peuvent s'accommoder d'eaux saumâtres ou marines, d'autres encore sont terrestres. On les trouve en abondance dans les eaux froides, courantes ou stagnantes riches en végétation. Leur appareil buccal est du type broyeur ; trois paires de glandes céphaliques y sont adjointes, dont les plus importantes sont les glandes labiales séricigènes. Les pattes sont inégales, les antérieures étant courtes et préhensiles, les autres, plus longues, sont locomotrices. Elles possèdent aussi des pattes terminales ou anales. L'appareil respiratoire est composé de trachéobranchies abdominales, isolées ou groupées en petits bouquets. On observe également des branchies rectales, qui jouent sans doute un rôle dans la régulation de la pression osmotique. Les larves appartiennent à deux types morphologiques différents. Elles sont : soit éruciformes, hypognathes, végétariennes et construisant des abris mobiles ; soit campodéiformes, prognathes, carnivores et libres. L'abri mobile des premières est en forme de fourreau qu'elles traînent dans leurs déplacements, ce qui leur a valu le nom de porte-bois ou portefaix. C'est un étui de soie produit par les glandes labiales, cylindrique ou conique, ouvert aux deux extrémités, recouvert extérieurement de matériaux divers, feuilles, brindilles, grains de sable, carapaces de petits Mollusques Gastéropodes ; sa forme aussi est très variable, droite, aplatie, recourbée, ou enroulée. La larve se maintient dans son fourreau grâce à ses pattes anales et à des bourrelets qu'elle porte sur les segments abdominaux, surtout sur le premier. A l'intérieur du fourreau, les mouvements incessants de l'abdomen créent un courant d'eau autour des trachéobranchies, permettant ainsi les échanges gazeux.

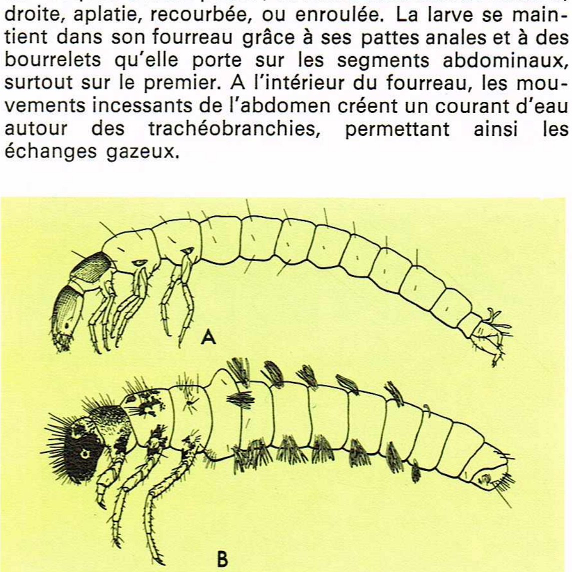

G. Hodebert

◀ *Types larvaires chez les Trichoptères : A, larve campodéiforme ; B, larve éruciforme.*

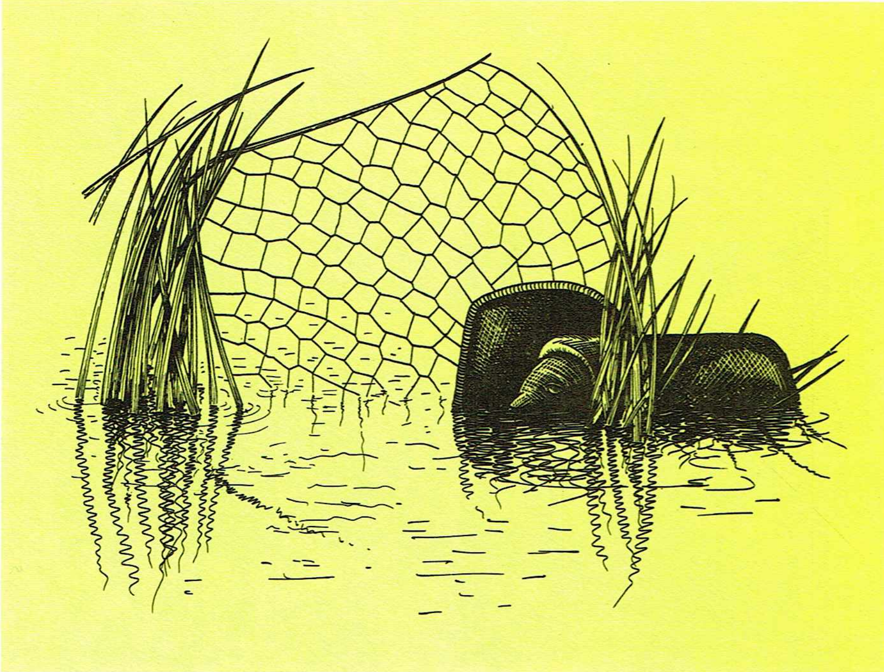

G. Hodebert

▲ *Piège en forme de nasse construit par une larve campodéiforme d'Hydropsyché.*

Les larves campodéiformes, dans leur majorité, vivent libres, sont carnivores et construisent des filets de soie en nasse ou en entonnoir si elles vivent en eaux courantes, en piège sur lequel elles guettent leur proie à la façon d'une araignée, dans les eaux stagnantes.

La vie larvaire est plus ou moins longue (elle dépasse souvent une année) et comporte cinq à sept mues. Lors de la mue, la larve éruciforme fixe son fourreau et le ferme aux extrémités, de même, lors de la mue nymphale. Les larves campodéiformes construisent un abri de pierrailles avant de tisser leur cocon.

La *nymphe* est de type libre et présente quelques caractères morphologiques particuliers à cet état. Elle possède de grandes mandibules, allongées et tranchantes, les pattes métathoraciques sont frangées de longues soies. Les segments abdominaux portent fréquemment des plaques chitineuses hérissées d'épines. Les nymphes présentent des caractères étho-écologiques eux aussi très importants : la mobilité et la vie aquatique, fait assez exceptionnel chez un holométabole. La mobilité est imposée par le renouvellement de l'eau oxygénée de façon à assurer la « respiration » ; les plaques chitineuses abdominales permettent à la nymphe de se déplacer à l'intérieur de son cocon en prenant appui sur les parois, elle peut ainsi vérifier en permanence l'état de son abri et le nettoyer le cas échéant. A la fin de la vie nymphale, elle démolit la paroi de son abri à l'aide de ses puissantes mandibules et s'en extirpe ensuite à l'aide de ses plaques abdominales. La nymphe, une fois sortie de son cocon, est très active et nage à la façon des notonectes grâce à ses pattes métathoraciques. La mue imaginale peut s'effectuer, soit que la nymphe soit accrochée à un support, soit à la surface de l'eau, comme les nymphes de certains Diptères tels que les Culicides ; elle dure alors fort peu de temps, l'imago prenant son vol quelques instants seulement après l'exuviation.

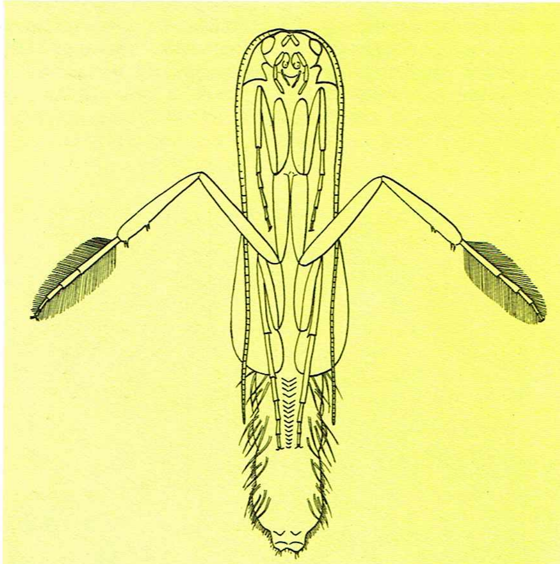

G. Hodebert

▶ *Nymphe libre de Trichoptère aux pattes mésothoraciques nageuses.*

Actuellement, les Trichoptères comprennent à peu près trois mille espèces, réparties en treize familles groupées en deux séries.

Les *Inaequipalpia,* qui se caractérisent par des palpes maxillaires de cinq articles chez la femelle et de trois ou quatre chez le mâle, comprennent les Phryganéidés, Limnophilidés, Séricosmatidés ; pour toutes, les larves, à fourreaux variés, sont éruciformes.

Les *Aequipalpia,* aux palpes maxillaires de cinq articles dans les deux sexes, comprennent les Calamocérotidés, Odontocéridés, Leptocéridés, Molamnidés à larves éruciformes, avec des fourreaux souvent arénacés coniques ; les Hydropsychidés, Psychomyidés, Polycentropidés, Philopotamidés à larves campodéiformes construisant des abris ou des filets de soie ; les Rhyacophilidés, Hydroptilidés, aux larves également campodéiformes, construisant un fourreau mobile plus ou moins aplati.

Ces Insectes présentent des affinités certaines avec les Lépidoptères d'une part, les Mécoptères d'autre part ; selon les théories modernes, ils forment avec les Lépidoptères, les Diptères et les Mécoptères le complexe Panorpoïde considéré comme un super-ordre dont les ancêtres communs remonteraient à l'ère secondaire.

Affinités avec les Mécoptères : la mandibule régressée des imagos est proche de celle réduite de *Nannochorista,* Eumécoptère de l'hémisphère Sud, la morphologie de la tête est très semblable dans les deux ordres, les genitalia présentent des ressemblances et la structure de la hanche des pattes intermédiaires et postérieures est identique.

Affinités avec les Lépidoptères : ils présentent un faciès de papillon, leur appareil digestif est proche de celui des Lépidoptères primitifs ; on constate une homologie entre les appareils génitaux femelles des deux ordres ; le dispositif de couplage des ailes rappelle le frenulum des Lépidoptères, le sexe homogamétique XX chez le mâle est hétérogamétique XY chez la femelle dans les deux ordres. Enfin, les larves éruciformes sont très proches des chenilles.

Ordre des Lépidoptères

Les Lépidoptères (du grec lepis, écaille, et pteron, aile) ou Papillons, dont environ cent vingt mille espèces sont actuellement connues, constituent l'un des grands ordres de la classe des Insectes. Ils sont holométaboles (à métamorphoses complètes), d'envergure comprise entre 2 et 300 mm ; leurs quatre ailes membraneuses et nervurées sont recouvertes, comme le corps, d'écailles imbriquées plus ou moins serrées, et les pièces buccales sont profondément modifiées, les maxilles formant une trompe suceuse s'enroulant sur elle-même. Dans leur quasi-totalité, les larves ou chenilles sont phytophages. Les Papillons peuplent tous les continents, à l'exception des régions polaires.

La *tête* de l'imago, hémisphérique, est petite par rapport au corps, les yeux composés sont très gros et beaucoup d'Hétérocères possèdent en outre deux ocelles à cornée développée.

Les *antennes* sont implantées de part et d'autre de l'épicrâne, à la suture du clypeus ; leur premier article, le scape, est plus gros que les suivants, en nombre variable de sept à cent, qui forment le flagelle. Les antennes les plus courtes sont celles des Hépialidés ou des femelles de Psychidés, alors que les plus longues sont celles des Adélidés (elles dépassent l'apex des ailes antérieures).

Les antennes, de formes très variables, sont terminées en massue ou en bouton chez les Rhopalocères, sétiformes, fusiformes, dentées, pectinées (bi- ou quadripectinées), chez les Hétérocères ; elles diffèrent souvent d'un sexe à l'autre. Celles des mâles, surtout lorsqu'elles

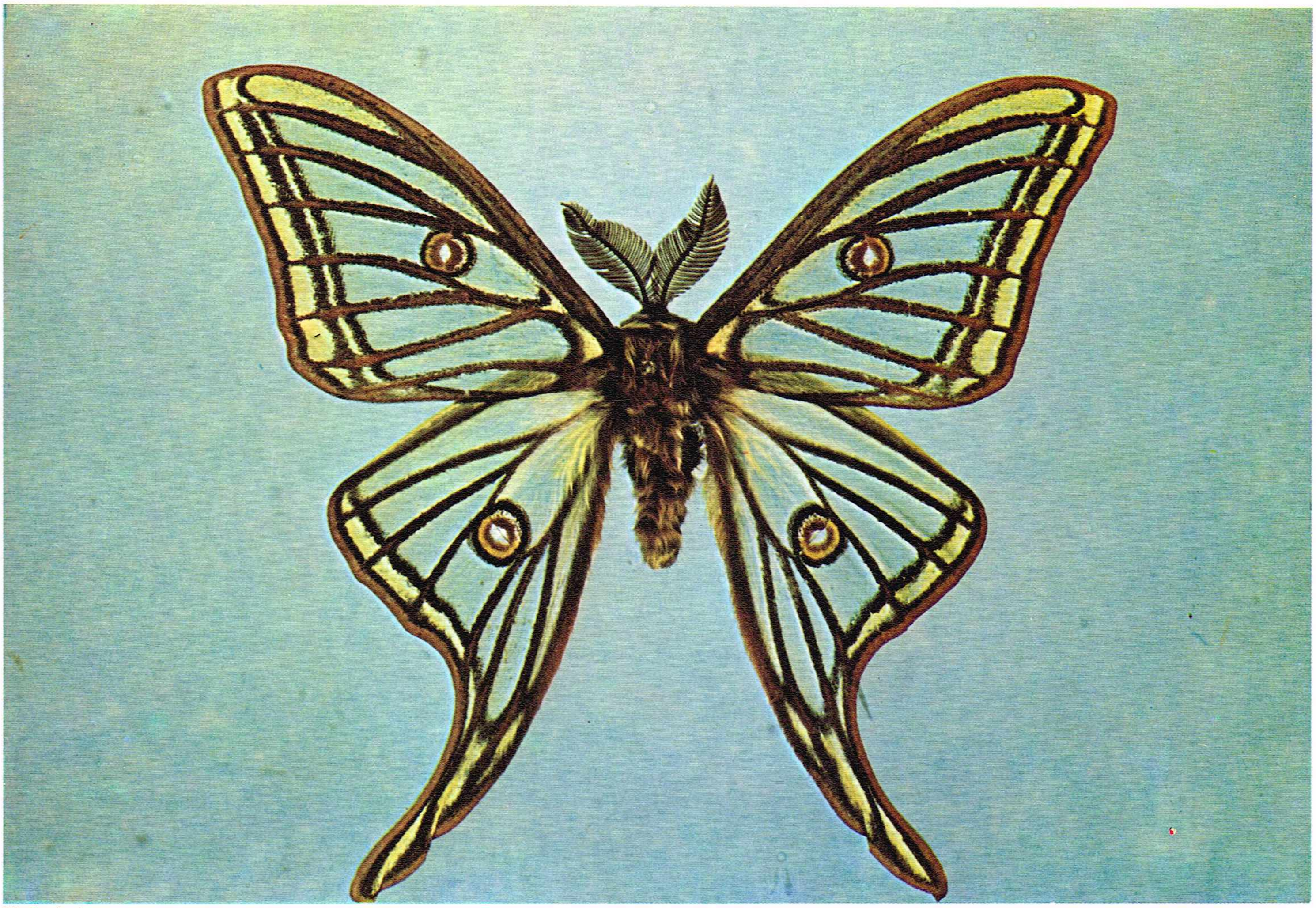

M. Boulard

▲ ***Les antennes du mâle de* Graellsia isabellae, *Attacidé inféodé aux forêts de pins des sierras espagnoles et des Hautes-Alpes françaises, sont largement quadripectinées; celles de la femelle sont beaucoup plus étroites.***

sont pectinées, sont riches en sensilles (soies, cils, cônes sensoriels) détecteurs de l'hormone femelle ou de nourriture.

L'antenne est, en général, revêtue d'écailles en dessus, garnie de cils sensoriels en dessous. Tous ces caractères sont utilisés dans la systématique.

L'*appareil buccal* des Lépidoptères se compose de pièces suceuses, à l'exception du groupe primitif des Microptérygides, à mandibules fonctionnelles du type broyeur, entre les palpes maxillaires et l'hypopharynx développés.

Au repos, la *trompe* est enroulée sur elle-même en spirale, elle se déroule par pression sanguine, les muscles des *galeae* assurant son enroulement.

Le développement de la trompe diffère selon les groupes : extrêmement longue chez certains Sphingidés, courte et robuste chez d'autres Sphingidés ainsi que chez les *Ophideres,* beaux Noctuidés tropicaux suceurs de fruits, elle peut être rudimentaire ou absente chez les Cossidés, les Psychidés, les Bombycoïdés, dont les imagos ne se nourrissent pas, à de très rares exceptions près.

Les palpes labiaux sont longs, formés de trois articles (rarement deux), chez beaucoup d'espèces (Rhopalocères et Pyrales) nettement visibles à l'œil nu. Ordinairement dressés, ils peuvent être porrigés (horizontaux ou pendants).

Le *thorax*, porteur des ailes et des pattes, est constitué de trois segments. Le prothorax est peu développé, sauf chez les Hépialidés, et presque toujours pourvu d'une paire d'appendices : les *patagiae,* formant collier, écailleux ou poilu, dont la coloration particulière est parfois utilisée en systématique (Arctiidés, etc.). Les pattes antérieures s'attachent par les hanches à la partie inférieure du prothorax. Le mésothorax est beaucoup plus volumineux et sclérifié; s'y articulent les ailes antérieures, les *tegulae* ou ptérygodes à la base de celles-ci et en dessus, enfin les pattes médianes.

Formant un ensemble rigide avec les segments précédents, le métathorax porte les ailes postérieures et les hanches des pattes postérieures. Chez les noctuelles, c'est le métathorax qui est pourvu d'une paire d'organes tympanaux, cavités dédoublées et parfois operculées, chez les Géométridés, Pyralidés, Uraniidés et Cymatophoridés; ces organes, de formes variées, sont quant à eux généralement situés sur les côtés du premier segment abdominal. Les organes tympanaux, atrophiés chez les femelles brachyptères, pourraient être sensibles aux ultra-sons; ils se situent parfois aussi sur les ailes.

L'*abdomen* est formé de huit urites normaux chez le mâle, et sept chez la femelle; les deux terminaux modifiés et réduits forment l'appareil génital *(genitalia)* du mâle dont l'étude est essentielle, en systématique, beaucoup de déterminations ne pouvant s'établir d'après le seul aspect, l'*habitus,* du Papillon.

Les pièces principales de l'armure génitale mâle, dont nous ne pouvons traiter longuement ici, sont figurées sur un schéma.

Les *valves* ou *claspers* forment une pince au moment de l'accouplement et la partie évaginable du pénis, la *vesica,* est constituée par un tube membraneux souvent garni d'épines, les *cornuti.* Chez la femelle, les deux ou trois derniers urites, modifiés, constituent l'armure génitale, variable quant au nombre et à l'emplacement des orifices génitaux. Le neuvième urite porte aussi deux lobes sétigères, les papilles anales et souvent des glandes hormonales, chez les Bombycoïdes par exemple.

Le *thorax* et l'*abdomen* sont recouverts de poils ou d'écailles, souvent groupés en brosses, en crêtes; en outre, les mâles portent souvent une longue touffe anale mêlée de poils androconiaux, tandis que les femelles, chez les Lymantriidés, peuvent être pourvues d'une toison anale adhérant aux œufs lors de la ponte. On observe parfois des organes stridulants, thoraciques chez les Arctiidés, abdominaux chez les Lymantriidés,

dont le mécanisme et le rôle restent encore mal connus; ils constituent souvent un caractère sexuel secondaire du mâle.

Les *pattes,* généralement fines et velues, se composent d'un fémur, articulé à la hanche, d'un tibia, d'un tarse de cinq articles dont le dernier est terminé par une paire de griffes situées de part et d'autre du pulvillus. Les pattes antérieures, qui diffèrent surtout des deux paires suivantes par leurs coxae indivises et non soudées au thorax, sont généralement pourvues d'un éperon mobile tibial, l'épiphyse, servant vraisemblablement au nettoyage des antennes et de la trompe. Ces pattes sont atrophiées (tarses soudés, dépourvus de griffes et infonctionnels dits en palatine) chez beaucoup de Rhopalocères. Quant à certaines femelles de Psychidés, elles sont pratiquement apodes. Le tibia des pattes médianes a en général une paire d'éperons mobiles terminaux et celui des pattes postérieures deux paires, dont une médiane. La face interne du fémur ou du tibia peut porter des organes androconiaux variés.

Les *ailes,* expansions membraneuses tendues par les nervures, sont grandes par rapport au corps, mais elles peuvent être très réduites chez les femelles de quelques Arctiides, Géométrides hivernales ou montagnardes, voire absentes chez les femelles de Psychides ou de Lymantrides du genre *Orgyia.*

Sur l'aile antérieure, ordinairement de forme triangulaire, on distingue la base, point d'articulation au thorax, le bord costal ou côte, l'angle apical ou *apex,* le bord, ou marge, externe, l'angle interne ou *tornus* et enfin le bord interne.

L'aile postérieure est plus arrondie, l'angle interne y est nommé angle anal et le bord interne, bord abdominal. Le bord externe des ailes est souvent denté, découpé, festonné et les ailes postérieures sont parfois munies d'un ou plusieurs prolongements ou *queues,* particulièrement développées chez beaucoup de Papilionidés et certains Attacidés.

L'étude des nervures joue un rôle essentiel dans la systématique des Lépidoptères; lorsque ceux-ci présentent une nervation semblable de douze nervures aux deux paires d'ailes, comme certaines espèces primitives, ils sont dits Homoneures; sinon, les ailes postérieures n'ayant pas plus de huit nervures, les anales ne comptant que pour une et la radiale n'étant pas ramifiée, ils appartiennent au grand sous-ordre des Hétéroneures. Les trois nervures principales : radiale, médiale, et cubitale sont ramifiées; enfin des nervures transversales, discocellulaires, peuvent réunir vers le milieu de l'aile la radiale à la cubitale, fermant ainsi la cellule discoïdale. Certaines nervures disparaissent, se fusionnent, s'anastomosent, formant parfois une aréole, petite cellule close... Chez les Satyridés par exemple, la base de certaines nervures est fortement renflée et correspond aux organes tympanaux.

D'autres régions de l'aile peuvent porter un renflement nervuré, une sorte de tambour, excité par les épines d'une patte ou par la partie correspondante de l'aile opposée; cet organe stridulant supposé se trouve surtout chez le mâle des Noctuidés de l'espèce *Thecophora fovea.* Les nervures délimitent à la surface de l'aile des champs ou espaces internervuraux : espace costal, champ basal, discal, etc. La nomenclature des nervures diffère selon les auteurs (abréviation du nom latin ou numéro).

Les *écailles* sont le revêtement qui caractérise l'ordre; il colore les ailes qui lui doivent aussi leur ornementation. Une écaille est une fine lame chitineuse, ou *limbe,* implantée dans le tégument alaire à l'aide d'un pédicelle. La structure de l'écaille est complexe, les deux lamelles parallèles qui la forment isolant une minuscule cavité remplie d'air et traversée par les trabécules, sortes de piliers transversaux; la lamelle inférieure est plus ou moins lisse alors que la supérieure, celle qui reçoit la lumière, est ridée longitudinalement et striée transversalement. Courtes (en général de 0,07 à 0,8 mm) en surface, les écailles peuvent être beaucoup plus longues, quand elles forment les franges par exemple; la forme en est très variable, allant du fin poil écailleux à l'écaille arrondie, dentée, ou pointue, etc. Chez les espèces évoluées, les écailles sont disposées assez régulièrement en deux couches, les écailles de fond et celles de recouvrement. Souvent, outre leur rôle sensoriel, elles jouent un rôle protecteur; les écailles glandulaires odorifiques également fréquentes sont pourvues d'une houpette distale; elles sont isolées ou groupées en taches chez les Piéridés du genre *Colias,* en séries, en longues touffes androconiales chez les Nymphalidés, caractéristiques et souvent cachées dans un repli de l'aile chez les Papilionidés et les Hespériidés. Des taches d'écailles modifiées, peut-être en appareil stridulant, existent aussi parfois chez les femelles du genre *Orthogonioptilum* (Attacidés éthiopiens).

La coloration des écailles est optique (physique) ou pigmentaire (chimique), les deux types pouvant d'ailleurs se combiner. Les couleurs physiques ont souvent un aspect métallique (*Morpho* par exemple) et sont dues à la fine striure des écailles ou à l'angle qu'elles forment par rapport à la surface de l'aile (18° chez les *Apatura*). Les couleurs chimiques (mélanines, etc.) sont produites par l'organisme de l'Insecte ou proviennent de sa nourriture. La coloration dépend souvent du sexe tandis que les dessins restent plus stables; ceux-ci peuvent être semblables aux deux ailes ou se compléter d'une aile à l'autre, en position de repos, sur la face dorsale ou sur la ventrale. Enfin, sur une aile donnée, les dessins se répartissent souvent en deux moitiés symétriques, par rapport à l'axe des discocellulaires dans l'aire médiane.

Couplage des ailes. Au cours du vol, les battements alaires sont synchronisés grâce au couplage de l'aile antérieure et de la postérieure correspondante. Le plus fréquent des types principaux de couplage est le frénate, répandu chez les Hétéroneures (Hétérocères seulement); un faisceau serré de soies, le frein, situé sur la côte et à la base de l'aile postérieure, s'accroche à un lobe chitineux ou à une touffe de poils, le *rétinacle,* de la face ventrale correspondante de l'aile antérieure. Le frein du mâle est simple, celui de la femelle ordinairement multiple, mais n'excédant pas plus de 20 soies.

Dans le type jugal (Homoneures) il existe une languette à la base de l'aile antérieure s'accrochant à la partie correspondante de la postérieure. Il y a enfin un couplage mixte qualifié de jugo-frénate chez les espèces primitives et un couplage par simple adhérence, appelé amplexiforme, où l'aile antérieure s'appuie sur un élargissement de l'aile postérieure au niveau du lobe huméral, ce que l'on observe surtout chez les Rhopalocères et chez les Bombycoïdes au frein vestigial.

L'organisation interne est semblable à celle des autres Insectes. Certaines particularités méritent cependant d'être signalées.

Organes sensoriels. Outre les organes des sens particuliers à l'ordre mentionnés ailleurs, tels que les antennes, les pattes, les ailes, etc., une paire de papilles poilues, situées derrière les antennes et près des yeux, le *chaetosema,* existe chez les Rhopalocères (famille des Lycénidés) et chez diverses familles d'Hétérocères, comme les Tortricidés, les Géométridés, et les Zygénidés. Le rôle de cet organe reste encore fort mal connu.

Appareil digestif. La succion de la nourriture est effectuée grâce au pharynx, prolongé par un fin œsophage qui présente une dilatation, le jabot, véritable pompe

▼ ***Représentation schématique des genitalia d'un* Nephele *(Sphingidé).***

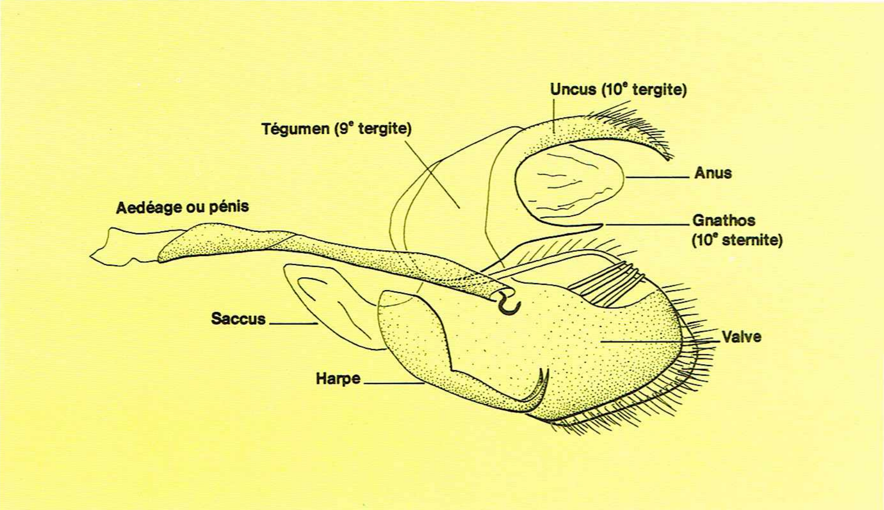

G. Hodebert

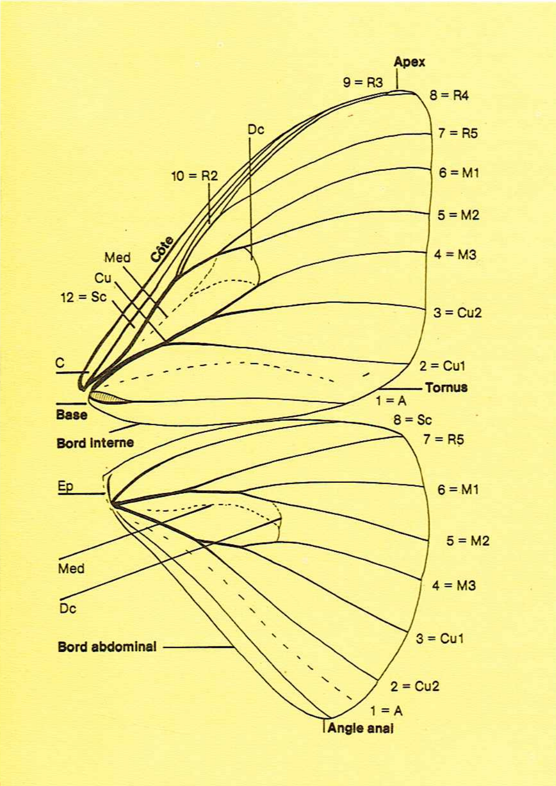

G. Hodebert

aspirante souvent gonflée d'air. L'appareil digestif lui-même est rempli d'air chez les espèces ne se nourrissant pas.

Appareil respiratoire. Chez de nombreux Hétérocères, il existe des sacs aériens, qui manquent, par contre, chez les Rhopalocères. Tous les Lépidoptères connus ont une vie aérienne, à l'exception des Pyrales du genre *Acentropus* dont certaines femelles aquatiques respirent l'oxygène dissous.

Organes glandulaires. Ce sont surtout les glandes odorifiques, qui constituent presque toujours des caractères sexuels secondaires; chez le mâle, elles peuvent être situées sur le thorax, l'abdomen, les ailes, les pattes (touffes érectiles de certains Bombycoïdes); chez la femelle, elles se trouvent généralement sur les trois derniers segments abdominaux : sac ventral des Attacidés, *sacculi laterales* du *Bombyx mori,* à émission directe ou plus rarement indirecte de phéromones.

Appareil reproducteur. On se reportera pour la physiologie des appareils génitaux mâle et femelle aux généralités de la classe.

L'étude de la garniture chromosomique des Lépidoptères — dont les variations numériques sont remarquablement étendues, avec toutefois une moyenne de 30 pour /n, même chez des espèces très voisines, comme l'ont montré, entre autres, les travaux de H. de Lesse sur les Lycénidés et les Satyridés ou les recherches de Goldschmidt et Katsuki particulièrement poussées sur l'intersexualité et le gynandromorphisme, chez les Bombycoïdés, les Lymantriidés et les Géométridés — intéresse également les généticiens et les systématiciens.

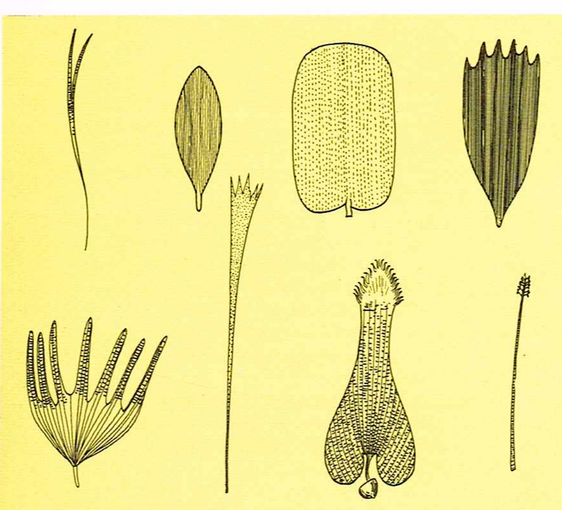

G. Hodebert

◀ *Différents types d'écailles de Lépidoptères.*

La reproduction des Lépidoptères est normalement sexuée, à l'exception de rares cas de parthénogenèse spontanée, facultative ou obligatoire, outre ceux obtenus expérimentalement chez *Bombyx mori.* La parthénogenèse facultative n'aboutit qu'exceptionnellement au développement complet de l'imago. Toutefois dans l'espèce *Solenobia triquetrella,* les œufs de ce Psychidé peuvent se développer avec ou sans fécondation et

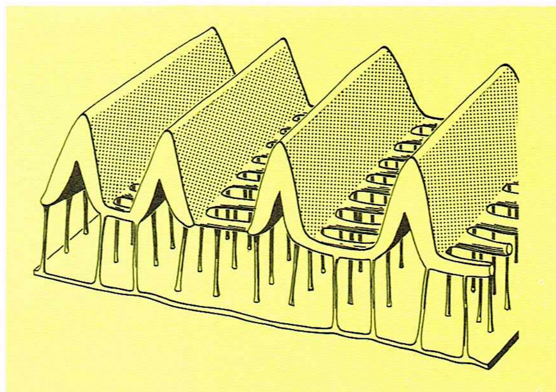

G. Hodebert

◀ *A gauche, représentation schématique de la nervation des ailes de Lépidoptères : A, anale; C, costale; Cu, cubitale; Dc, discocellulaire; Ep, éperon précostal; M, médiale; Med, media; R, radiale; Sc, subcostale; à droite, coupe transversale d'une écaille de Papillon.*

donner les deux sexes; la parthénogenèse obligatoire qui ne produit que des femelles est peu fréquente; elle a été également observée chez le Psychidé précité et chez les Bombycoïdes, notamment des *Goodia,* petits Attacidés africains; il s'agit en général de races locales parthénogénétiques d'espèces normalement bisexuées ailleurs. On connaît enfin, surtout chez les Sphingidés du genre *Hyles,* des hybrides naturels entre espèces voisines; en captivité, l'hybridation est pratiquée couramment par les éleveurs.

Œuf. Les Lépidoptères sont holométaboles sauf de rares espèces (Piéridés montagnards surtout), vivipares.

L'œuf est de forme très variable : sphérique, hémisphérique, selon les groupes, avec le micropyle situé au pôle supérieur et entouré d'un relief en rosette; la surface du chorion, plus ou moins résistant, est souvent striée. Les œufs les plus petits, de 0,2 à 0,3 mm, sont ceux des Nepticulidés, minuscules Lépidoptères; toutefois, leur diamètre n'est pas toujours en rapport avec la taille de l'espèce : en effet, *Saturnia pyri,* notre plus gros Attacidé, pond des œufs de 2,5 mm, alors que certains Lasiocampidés de taille plus modeste produisent des œufs de même diamètre.

La coloration des œufs est extrêmement variable — souvent, ils sont même maculés, tachetés — et change au cours du développement embryonnaire. Les œufs peuvent être pondus à l'air libre couchés ou plus rarement dressés chez les Rhopalocères, Notodontidés notamment, mais les espèces dont l'ovipositeur est transformé en tarière les déposent à l'intérieur des tissus végétaux : c'est le cas chez les Ériocraniidés. Tandis que certains Satyrides, des noctuelles sèment leurs œufs en vol, la plupart des Papillons les pondent isolément, en paires, en séries nombreuses, en bagues régulières autour d'une branchette comme les Bombycoïdes, ou encore en plaques imbriquées comme beaucoup de tordeuses, et d'hyponomeutes; la femelle, chez les Lymantriidés et chez beaucoup de Lasiocampidés, les fait adhérer au support à l'aide d'une sécrétion albumineuse, qui peut aussi servir à recouvrir la ponte de bourre abdominale. La ponte est plus ou moins abondante selon les espèces, de quelques dizaines à deux milliers d'œufs dont un certain pourcentage reste souvent infécond.

La *chenille*. La larve des Lépidoptères ou chenille, le plus souvent cylindrique ou fusiforme, parfois aplatie, bossuée, comprend une tête suivie de quatorze segments.

J. Boudinot

▲ *Exemple de ponte en bague autour d'une branchette* (Eudia pavonia).

La tête, ou capsule céphalique, est grosse, en général globuleuse, et porte ordinairement six paires d'yeux, les *stemmates;* les antennes sont très courtes, les pièces buccales broyeuses comprennent un labre, des mandibules robustes et une lèvre inférieure munie d'une filière entre les palpes labiaux.

Dans certains genres, la tête est rétractile. Les segments portent les pattes : trois paires de pattes thoraciques et le plus souvent les pattes abdominales ou fausses-pattes dont quatre paires ventrales sur les segments 3 et 6, une anale sur le dernier. Des exceptions à ce schéma chez les Microptérygidés, et les Géométridés, seront mentionnées dans la partie systématique de l'ordre. La sole des fausses-pattes est pourvue de crochets dont la disposition, coronate ou semi-coronate, caractérise certains groupes. Quant aux stigmates, présents sur le prothorax et sur les huit premiers urites, ils sont réduits chez les chenilles aquatiques, des trachéo-branchies ou branchies, nombreuses, y suppléant.

Le tégument est souvent rugueux et peut porter des rangées de verrues, de tubercules épineux ou sétifères, de cornes, comme celle du huitième urite de beaucoup de Sphingides, par exemple; il se hérisse de soies sensorielles primaires, déjà présentes au premier stade, et subprimaires, les suivantes, peu nombreuses, dont la distribution précise, ou chétotaxie, est utilisée en systématique, outre les nombreuses soies secondaires ou poils, implantés sans ordre. Certaines soies, transformées en organes glandulaires, sont urticantes chez les Processionnaires par exemple. La coloration et les dessins des chenilles sont extrêmement variables, parfois chez la même espèce (phase solitaire ou phase grégaire de quelques noctuelles, polymorphisme des *Holocerina,* Attacidés africains), surtout sous l'influence du milieu ou de la nourriture. Beaucoup de chenilles de la famille des Géométridés offrent une homochromie ou une homotypie remarquables; celles qui sont endophytes ou endogées sont aplaties et peu ou pas pigmentées. Enfin les chenilles de certains groupes, celles des Notodontidés entre autres, peuvent d'ailleurs présenter un aspect extraordinaire, susceptible de modification d'un stade à l'autre, comme la disparition de cornes chez les Brahméidés par exemple. Rappelons à ce sujet qu'il y a ordinairement quatre ou cinq mues larvaires. Pour la morphologie interne de la chenille, nous renvoyons le lecteur aux généralités de la classe.

Mais certains organes glandulaires particuliers à ce stade méritent mention : les deux glandes séricigènes, appelées glandes de Lyonet, se réunissant en un canal efférent, le tube fileur, pour aboutir à la filière; la glande jugulaire, organe prothoracique et défensif, sécrétant un liquide âcre et malodorant, qu'elle peut même projeter à quelque distance de la tête de la chenille; l'osmaterium, appareil évaginable bifide et odoriférant du dos du prothorax des Papilionidés, serait un organe excréteur; l'organe des Lymantriidés, que nous verrons plus loin; les organes myrmécophiles des Lycénidés; les glandes cirières, observées surtout chez les Hespériidés, au rôle hydrofuge protecteur, et divers organes latéraux éversibles des Attacidés, ou appendices postérieurs évaginables des Notodontidés; enfin, les glandes de Verson ou glandes exuviales, découvertes d'abord chez les Lépidoptères.

La *chrysalide*. Les nymphes de Lépidoptères sont nommées chrysalides (du grec khrusos, or) à cause des taches brillantes de certaines d'entre elles. De forme cylindro-conique en général, elles laissent deviner la segmentation en trois parties du futur imago, mais dépourvues d'orifices, leurs appendices sont soudés et leurs segments abdominaux, peu ou pas mobiles dans les groupes évolués, sont libres, leurs sutures incomplètes dans les autres. La trompe est parfois renfermée dans une gaine saillante chez certains Sphingidés; les pattes, les antennes, chez les mâles de Bombycoïdes, largement pectinées, et les étuis alaires ou ptérothèques sont nettement délimités par des sutures. Le dernier des dix segments articulés de l'abdomen porte souvent une pointe ou une couronne de crochets, le *crémaster*. Les stigmates sont bien visibles et l'on peut reconnaître le sexe femelle à ses deux derniers urites moins nettement dessinés. Le tégument nymphal, très dur, est généralement glabre, souvent rugueux, strié, muni de saillies et de courtes épines, qui produisent, lors des mouvements abdominaux de la chrysalide, un crissement sur les parois d'un cocon; il peut être recouvert d'une pruinosité blanchâtre ou bleuâtre hydrofuge, chez *Parnassius* et certains Attacidés ou Noctuidés.

La coloration de la chrysalide varie beaucoup selon l'âge (nouvellement formée, elle est beaucoup plus claire), le milieu, la saison parfois (chrysalide verte ou brune de *Papilio machaon*).

L'anatomie interne de la chrysalide ne diffère guère de celle des autres pupes.

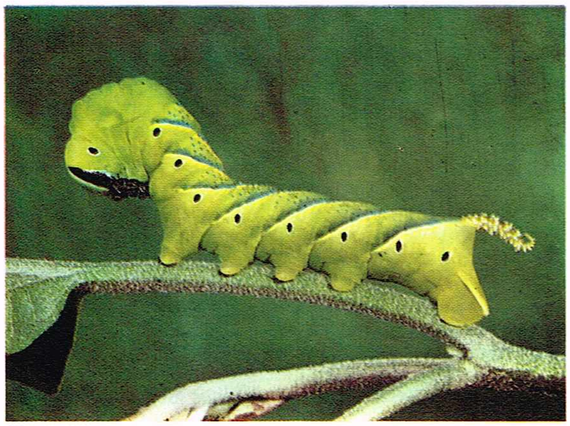

G.S. Giacomelli

▶ *La chenille de l'*Acherontia atropos *est munie, comme celles de nombreux autres Sphingidés, d'une corne impaire dorsale sur le 8e segment abdominal : elle vit sur les Solanées, notamment la pomme de terre.*

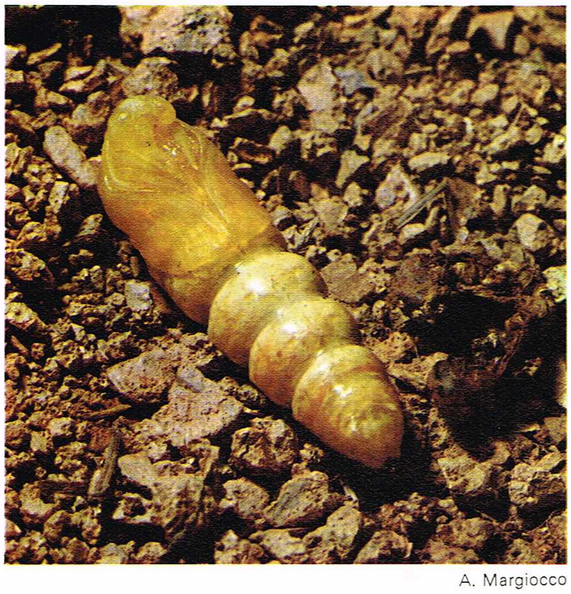

A. Margiocco

▶ *Chrysalide du même* Acherontia atropos *dont la forme laisse deviner la segmentation tripartite du futur imago.*

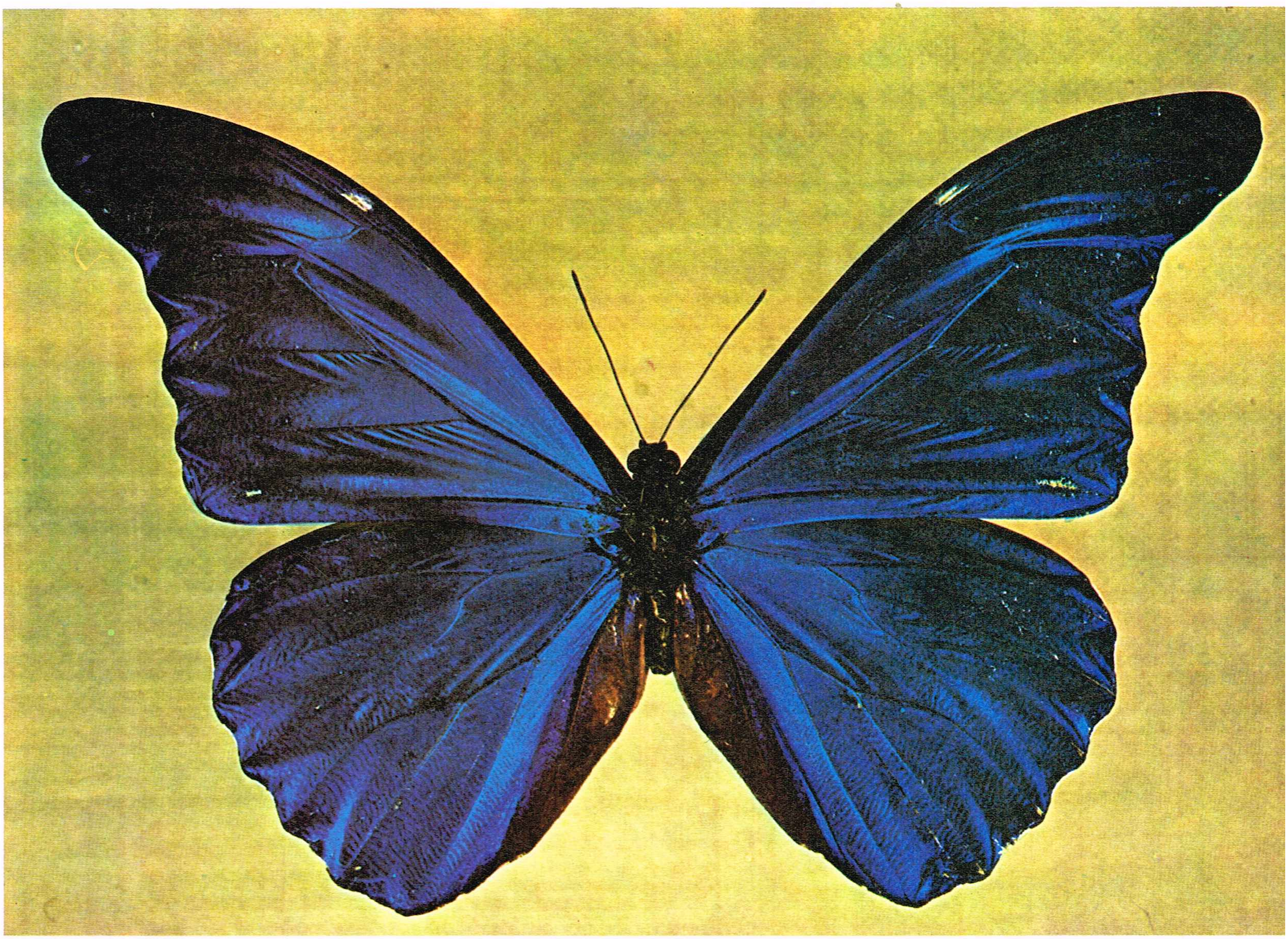

M. Boulard

▲ *Les* Morpho *comptent quelques-unes des plus belles espèces de Lépidoptères d'Amérique du Sud, au dimorphisme sexuel souvent accentué. Ici, un spécimen de* Morpho rhetenor *mâle.*

Éthologie et écologie

Au contraire du chapitre précédent où la morphologie de l'imago nous a paru prioritaire, nous traiterons celui-ci dans l'ordre naturel des stades.

La *chenille* éclôt après une incubation de quelques jours à plusieurs mois (diapause hivernale), en grignotant le chorion de l'œuf à l'aide de ses mandibules ; elle est alors minuscule, mais grossira très vite, surtout dans les premiers stades, car elle est extrêmement vorace. La plupart des chenilles sont phytophages et s'attaquent surtout aux Phanérogames, mais aussi parfois aux Cryptogames : Fougères, Mousses, Lichens, Champignons... consommés par des noctuelles du genre *Bryophila,* et des Arctides du genre *Lithosia,* et *Dysauxes*. Toutes les parties de la plante, qu'elle soit ligneuse ou herbacée, peuvent servir de nourriture : les racines aux espèces endogées comme les Hépialidés, le tronc ou la tige à certaines endophytes, tels les Cossidés ou les Sésies xylophages qui y creusent des galeries, les fleurs, les graines ou les fruits ; ce sont toutefois les feuilles qui sont le plus fréquemment dévorées, la larve rongeant le bord du limbe, perçant des trous dans ce dernier ou creusant seulement le parenchyme comme le font les « mineuses » dont les galeries sinueuses, visibles au travers de l'épiderme intact, suffisent souvent à les caractériser spécifiquement ou génériquement (Tordeuses, teignes) ; nombre de chenilles d'ailleurs ne sont mineuses qu'à certains stades de leur vie. Proliférant parfois, les chenilles peuvent s'attaquer aux vergers, aux cultures ou aux forêts. Les espèces saprophages, teignes et Pyrales surtout, sont nuisibles, de leur côté, aux produits d'origine végétale : grains, fruits secs, biscuits et farines, liège, papier, etc. ; plusieurs vivent aussi aux dépens de matières d'origine animale : laine, fourrures, peaux, plumes, cire, guano ; d'autres enfin sont prédatrices de divers Insectes, les espèces coccidivores en particulier, ou bien parasites d'Insectes sociaux, par exemple, les Lycénidés myrmécophiles, les Tinéidés termitophiles, ou solitaires (Homoptères).

Si nombre d'espèces sont polyphages, la plupart sont oligophages (s'attaquant à des Végétaux du même groupe systématique ou chimiquement voisins) ou monophages, d'où la localisation souvent étroite de beaucoup d'entre elles.

Au repos comme durant la marche, les fausses-pattes forment ventouses ; les pattes thoraciques servent surtout à la préhension de la nourriture ; la progression par bond en avant des chenilles « arpenteuses » de la famille des Géométridés, dépourvues des trois premières paires de fausses-pattes, est particulièrement curieuse. Chez les chenilles abritées, ce sont les pattes thoraciques qui aident à la progression le long du support, les abdominales agrippant la paroi intérieure du fourreau (Psychidés, etc.).

La plupart des chenilles ne se meuvent que lentement, à l'exception de « mineuses » ou d'Arctiides, très vives, capables même de se déplacer en arrière ; les chenilles diurnes des *Parnassius* ne sont actives qu'en plein soleil tandis que beaucoup d'espèces ne mangent que la nuit. Au repos, l'attitude des chenilles est souvent caractéristique des groupes, et d'ordinaire défensive ; elles peuvent se plaquer étroitement au support, se raidir comme une

A. Margiocco

▲ ***Les chenilles processionnaires, ici, Thaumetopoea pityocampa, sont bien reconnaissables à leur façon de se déplacer en longue file continue.***

brindille, relever la partie antérieure (Sphingidés) ou postérieure (Notodontidés) du corps. Inquiétées, les chenilles prennent une posture défensive caractéristique : les unes s'enroulent sur elles-mêmes (« anneau du diable » des Lasiocampidés), donnent de brusques coups de tête latéraux en vomissant un liquide toxique, font saillir un organe évaginable, ainsi l'osméterium des Papilionidés, ou l'appendice bifide des Notodontidés, ou un appareil urticant, comme chez les Processionnaires, d'autres — arboricoles — se laissent tomber à terre, parfois à l'extrémité d'un fil de soie, qui leur sert aussi à rejoindre le feuillage de l'hôte; quant aux chenilles abritées elles rentrent rapidement dans leur fourreau dont elles ferment l'ouverture. La plupart des chenilles (dites nues) vivent à découvert sur les plantes-hôtes, les autres se construisent un abri permanent ou non : feuilles roulées, tube de soie, fourreau de soie recouvert de débris végétaux, de grains de sable, etc. Il existe des cécidies, ou galles, dues principalement aux Tordeuses ou aux Sésies; tandis que certaines larves (Nymphulinés) vivent immergées sur des plantes aquatiques, grâce à leur respiration cutanée ou trachéo-branchiale.

Les chenilles sont le plus souvent solitaires, mais il en est de grégaires pendant toute leur vie larvaire, quittant seulement leur gros nid soyeux, par exemple les Processionnaires, ou y restant, comme les Hyponomeutes, pour se nourrir, alors que d'autres ne restent groupées que temporairement après la ponte; c'est le cas des Nymphalidés ou d'*Eudia pavonia*. Enfin, on a même signalé des migrations locales de chenilles sociales. La durée de l'existence larvaire varie selon la nourriture (le carpocapse du pommier entre en diapause lorsqu'on l'élève sur des pommes mûres et se développe normalement sur des fruits verts), la température, le photopériodisme et parfois même le sexe. Dans nos climats, les Lépidoptères comme la piéride du chou n'ont guère plus de quatre à cinq générations par an, mais la vie larvaire peut atteindre plusieurs années chez les Cossidés, les Sésies ou certaines espèces des hautes montagnes. Dans les régions tropicales où les générations se succèdent parfois tout au long de l'année, on observe cependant un ralentissement de la croissance durant les saisons sèches, plus fraîches; d'autre part, le développement des chenilles de quelques grandes espèces, comme les Attacidés africains caudés du genre *Argema* par exemple, est très lent, puisqu'il s'étale sur plusieurs mois. A la fin du dernier stade, la chenille change ordinairement de coloration, ne se nourrit plus et erre à la recherche d'un endroit favorable à sa nymphose, qu'immobile et ratatinée, elle attendra en général quelques jours. Pour se dégager de l'exuvie, ou peau de la chenille, la chrysalide doit parfois se livrer à de périlleux exercices, comme c'est le cas chez les Rhopalocères.

La *chrysalide* reste immobile, ne s'agitant, dans la mesure où les segments abdominaux le permettent, que défensivement ou plus fréquemment au moment de l'éclosion. Les chrysalides nues reposent parfois au sol, sous une pierre; le plus souvent elles sont suspendues, c'est-à-dire fixées au support par des fils de soie accrochés au crémaster, succeintes, — attachées par une ceinture de soie —, enroulées dans une feuille ou entourées d'un cocon exogé, filé par la chenille et caractéristique des espèces. Certains cocons complexes, dont la coque soyeuse composée de plusieurs couches ou « vestes » est très dure, s'ouvrent par une nasse ou un opercule vers l'extérieur afin de faciliter l'éclosion de l'imago. La soie de beaucoup de cocons est mêlée des poils de la chenille, ou enduite de ses produits d'excrétion chez les Lasiocampidés, elle peut être recouverte de débris végétaux, de terre, de gravier... Certains cocons sont formés d'une résille aérée, laissant entrevoir la chrysalide. Outre la structure, la forme — on trouve des cocons pédonculés — et la couleur, argentée par exemple chez les *Argema,* varient beaucoup. Chez les *Anaphe,* Notodontidés africains, les cocons individuels, très nombreux, sont tous renfermés dans un nid volumineux et parcheminé.

Les chenilles vivant dans un fourreau se chrysalident dans celui-ci comme les endophytes dans leur galerie, qu'elles obturent vers l'extérieur d'une cloison soyeuse. Enfin beaucoup d'Hétérocères effectuent leur métamorphose dans une logette creusée parfois profondément dans le sol grâce aux contorsions de la chenille, c'est le cas des espèces endogées. Protégée ou non, la chrysalide est le stade à diapause hivernale le plus fréquent; la durée du repos nymphal varie de deux semaines environ à quelques années, allongeant ainsi de beaucoup le cycle ontogénique.

L'*imago*. Quelques jours avant l'éclosion, la coloration des ptérothèques change, laissant entrevoir celle des ailes; le Papillon fait éclater la cuticule nymphale et en sort en s'aidant des pattes et parfois de petites épines céphaliques ou situées à la base des ailes; lorsque la chrysalide se trouve dans un cocon serré, il en ramollit la soie avant d'en écarter les fils, à l'aide d'un liquide alcalin. Lorsque les chrysalides sont libres ou incomplètes et généralement pourvues d'épines ou de crochets sur le thorax et l'abdomen, donc plus mobiles, elles sortent partiellement de leur loge, facilitant ainsi l'éclosion; il en est de même avec le Bombycoïde *Endromis versicolora* dont la nymphe sort à demi du cocon, enterré, peu de temps avant l'éclosion.

Au cours de son développement, d'ordinaire assez rapide, l'imago rejette une sécrétion des tubes de Malpighi : le méconium, épais et souvent coloré. L'éclosion, favorisée par certaines conditions atmosphériques, a lieu généralement à des moments déterminés : le matin, chez les espèces diurnes, à la fin de l'après-midi ou le soir chez les nocturnes. Dans certains cas, l'imago ne quitte pas son fourreau protecteur, voire l'exuvie elle-même chez

les femelles de Psychidés. Ordinairement ce sont les mâles qui éclosent les premiers (protandrie, par opposition à protogynie, observée chez les Lémoniidés...) ; la proportion des sexes est constante. La durée de la vie des imagos est très variable, de quelques heures pour certains Psychidés à plusieurs mois pour les Rhopalocères hibernants, tels « citrons » et « vanesses », qui éclosent à la fin de l'été pour reparaître aux premiers beaux jours de l'année suivante; elle dépend des liquides absorbés : nectar floral, jus de fruits fermentés, eau, purin ou, chez les espèces à trompe atrophiée, incapables, à de très rares exceptions près comme les Attacidés éthiopiens du genre *Epiphora,* de se nourrir, des réserves accumulées lors du stade larvaire; ces adultes ne vivent donc que le temps de se reproduire. Marchant peu, à l'exception de très rares espèces brachyptères (Tinéoïdés des îles Antarctiques) et des femelles à ailes atrophiées, les Lépidoptères se déplacent au vol.

L'activité de l'imago est étroitement liée à la météorologie (température, degré hygrométrique de l'air, vent...), et limitée aux heures ensoleillées pour la majeure partie des Rhopalocères, mais aussi pour quelques Sphingidés (Macroglosses...) et les mâles de certains Bombycoïdes, tandis que les espèces nocturnes ont une activité optimale par ciel couvert et par temps chaud et humide (brouillard ou pluie). Lorsqu'il fait froid, l'Insecte, avant son envol, doit se réchauffer, cela chez les Sphingidés grâce à une vibration particulière des ailes. Les *Parnassius* (Papilionidés) obtiennent le même résultat en exposant les taches colorées de leurs ailes aux rayons du soleil; le passage d'un nuage interrompt momentanément leur vol. Le seuil thermique du vol peut varier pour une même espèce selon la latitude ou l'altitude; ainsi pour l'Attacidé nocturne *Graellsia isabellae* il se situe d'ordinaire dans les Alpes du S.-E. vers 9 °C, tandis qu'il tombe en Espagne montagneuse à 6 °C (observation inédite); ce seuil est particulièrement bas pour les espèces vernales, automnales ou montagnardes d'Hétérocères.

L'Insecte se pose pour butiner; toutefois les Sphingidés pourvus d'une longue trompe peuvent visiter les fleurs, contribuant ainsi à leur fécondation, en vol vibré sur place.

Les Lépidoptères nocturnes possèdent un phototropisme positif développé, d'où leur abondance parfois, le soir, autour des lampes; on use couramment de ce procédé pour en faire la chasse.

La vitesse et la puissance du vol sont en rapport avec la structure thoracique, la musculature, la forme et la surface des ailes. Le vol est le plus souvent ramé, ou battu, entrecoupé de périodes de vol plané chez certaines espèces de Papilionidés, Nymphalidés à charge alaire faible (de 55 à 150 g par m²) ; il est vibré chez les espèces à ailes étroites et à charge alaire élevée (1 250 g par m² pour des Sphingidés); la fréquence des battements est rarement élevée (de 5 à 40 par seconde). La vitesse est variable; chez les Sphingidés et de nombreux Bombycoïdes, elle peut atteindre 15 m/s, soit 54 km/h; le vol des espèces les plus rapides est rectiligne, chez les Sphingidés, saccadé chez les Lémoniidés; il peut être zigzagant pour les plus lentes, leur permettant ainsi d'échapper parfois aux Oiseaux et aux chauves-souris.

Certaines espèces particulièrement résistantes peuvent accomplir de véritables migrations, isolément ou en groupes serrés. Les principaux Papillons migrateurs de nos régions sont des Piéridés des genres *Pieris* et *Colias,* des Nymphalidés comme *Vanessa cardui,* divers Sphingidés comme *Acherontia atropos* et *Agrius convolvuli,* des noctuelles comme *Autographa gamma.* Les déplacements s'effectuent de l'Afrique et de l'Europe méridionale vers l'ouest et le nord, jusqu'en Grande-Bretagne et en Scandinavie, régions où toutefois les femelles des générations automnales sont stériles. Outre-mer, quelques Danaïdés, comme *Danaus plexippus,* sont capables de traverser l'Atlantique; en Afrique équatoriale, certains Nymphalidés, tel *Cymothoe coenis,* se déplacent parfois par millions d'individus, de la forêt vers la côte.

Un autre comportement social curieux, celui des rassemblements de sommeil appelés aussi « dortoirs » des *Parnassius,* des Lycènes mérite d'être cité. Chez les Rhopalocères surtout, au repos, les ailes sont relevées et jointes sur le dos; chez la plupart des Hétérocères, elles sont tenues à plat contre le support, en toit, ou étroitement appliquées le long du corps, leur homochromie les rendant souvent à peu près invisibles pour l'homme. Effrayés, les Papillons s'envolent ou se laissent tomber à terre, immobiles, et peuvent faire perler du prothorax des gouttelettes de sang toxique (hémaphrorrhée).

A. Margiocco

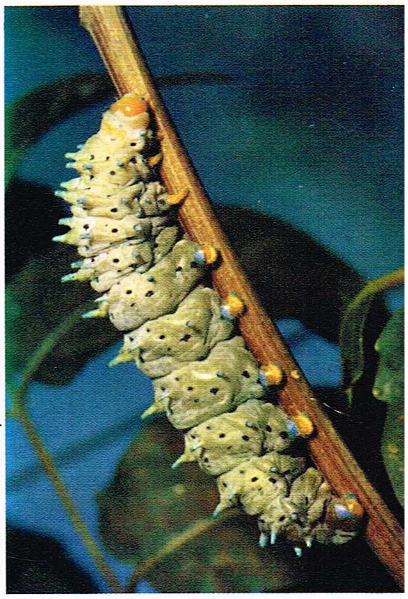
Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***A gauche, chenille « arpenteuse » de la famille des Géométridés; à droite,*** **Samia cynthia,** ***belle espèce séricigène introduite en Europe au milieu du siècle dernier; elle vit encore en plein Paris sur l'ailanthe.***

S. Lombardi

◀ ***Cocon ouvert de*** **Saturnia pyri** ***montrant la chrysalide.***

Reproduction. C'est le mâle qui recherche la femelle, parfois même dans les premiers moments de l'éclosion de celle-ci. La vue (c'est le cas des Rhopalocères, qui se rencontrent souvent en vol), mais surtout l'odorat, chez les Bombycoïdes, les Lymantriidés par exemple, conditionnent le rapprochement des sexes; c'est ainsi que le mâle de l'Attacidé *Eudia pavonia* peut déceler sa femelle cachée dans la végétation à plusieurs km de distance grâce aux cônes sensoriels complexes de ses antennes. Certaines espèces d'Arctiidés stridulent. Souvent, l'accouplement est précédé d'une sorte de parade sexuelle. *In copula,* certaines espèces sont encore capables de s'envoler, l'un des partenaires entraînant l'autre, immobile. La durée de l'accouplement varie de quelques instants pour les Rhopalocères à vingt-quatre heures au moins chez de gros Hétérocères. Certaines espèces peuvent copuler plusieurs fois. Curieux est le cas de *Lasiocampa quercus,* chez lequel deux rapprochements se succèdent, le premier fécondant et le second déclenchant la ponte. Dans certains groupes, *Parnassius,* Acréides, une poche cornée ou sphragis, — sécrétée par le mâle —, se forme durant l'accouplement à l'extrémité de l'abdomen de la femelle; elle empêcherait une deuxième copulation.

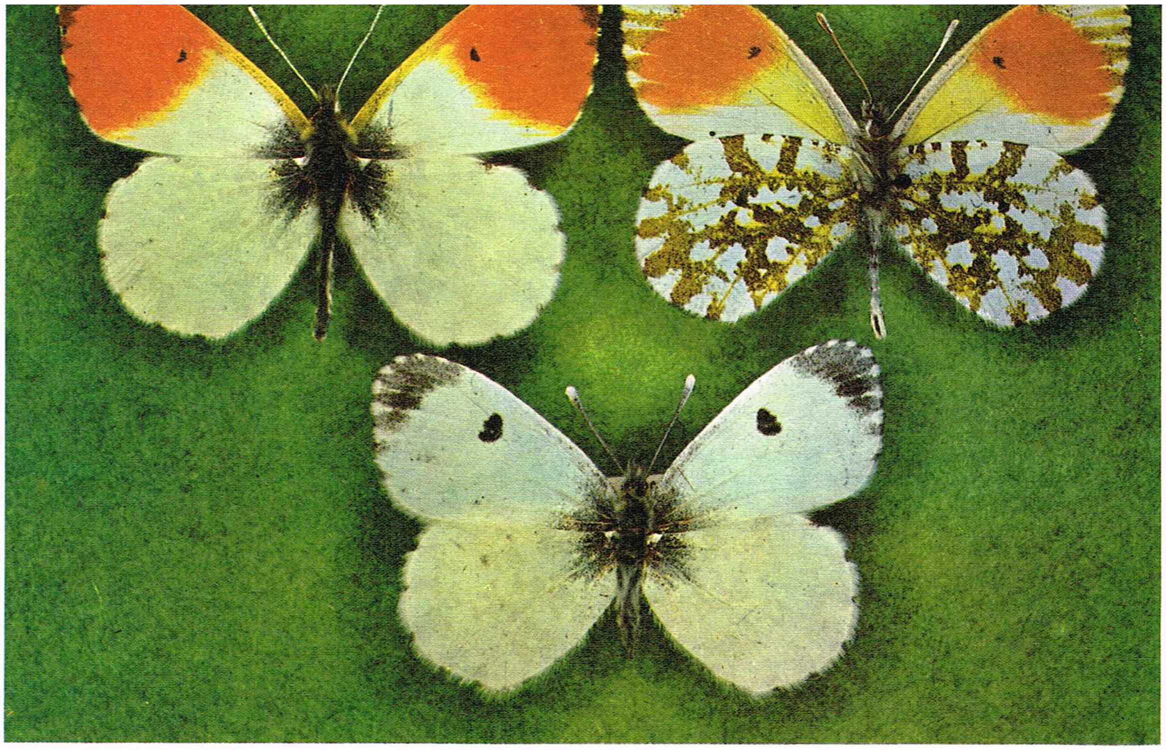

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ Anthocharis cardamines, *connu en France sous le nom d'aurore, présente un remarquable dimorphisme sexuel : la femelle est dépourvue de la tache orangée des ailes antérieures, mais présente, en dessous, aux postérieures, les mêmes marbrures vertes.*

C. Bevilacqua

▲ Cerura vinula *est un Notodontide fréquent dans nos régions; son extraordinaire chenille vit sur les saules et les peupliers. Cette espèce est homochrome des écorces sur lesquelles elle repose le jour.*

Dimorphisme sexuel. Il s'agit de dissemblances plus ou moins marquées entre le mâle et la femelle : envergure, forme, développement et coloration des ailes, frein, structure des antennes, androconies, etc. C'est évidemment chez les gynandromorphes bipartis qu'il est le plus spectaculaire puisqu'il réunit en un seul individu toutes ces différences par moitié, en apparence tout au moins, les caractères du mâle dominant généralement dans l'appareil génital.

Polymorphisme. Chez l'imago, le polymorphisme se traduit surtout par des variations d'envergure et de coloration. Il peut être géographique, différenciant des espèces largement répandues en sous-espèces ou races (clines) plus ou moins nombreuses, surtout insulaires ou altitudinales. Sur le plan génétique cependant, les Papillons ubiquistes sont d'ordinaire très stables (c'est le cas de certains Nymphalidés). On observe aussi sur un même territoire des espèces à large variabilité génétique. Les variations sont saisonnières ou individuelles, dépendant du milieu. Parmi les premières, classique est le cas du petit Nymphalidé paléarctique *Araschnia levana* dont la génération vernale, éclose de chrysalides hibernantes, est fauve (forme *levana*), et dont la forme estivale, *prorsa*, longtemps tenue pour une espèce différente, est brun-noir. De même, dans les régions tropicales, nombreuses sont les espèces produisant des formes de saison sèche. Les secondes sont ordinairement rares dans la nature, mais l'expérience montre qu'il est possible d'obtenir des phénotypes parfois encore inconnus, en soumettant la chrysalide, durant les tout premiers jours de son existence, à des variations de température ou d'humidité. Ces « aberrations » artificielles affectent surtout la coloration (variations chromatiques : albinisme, mélanisme...) ou les dessins des ailes (variations graphiques).

Le polymorphisme mutationnel est bien souvent limité au sexe femelle, par exemple chez divers *Colias* et *Papilio ;* il y a en conséquence, chez la même espèce, un type mâle et au moins deux types femelles. On attribue au polymorphisme mimétique, d'origine génétique, le « mélanisme industriel » de certaines espèces vivant dans les régions usinières, comme *Biston betularia*, à ailes blanches sablées de noir, dont les mutants entièrement noirs (forme *carbonaria*) seraient plus fréquents actuellement qu'il y a un siècle; ces spécimens mélaniques, très homochromes des écorces ou des pierres sur lesquelles ils reposent le jour, sembleraient mieux protégés des passereaux.

Des recherches approfondies ont été consacrées au mimétisme des Papillons; ainsi les Sésiidés et les Cténuchidés miment-ils souvent de façon étonnante des Hyménoptères dangereux. Les cas d'homotypie et d'homochromie sont très nombreux, chez *Kallima* par exemple. C'est la face visible des ailes au repos (dessous pour les Rhopalocères, dessus pour la plupart des Hétérocères) dont la coloration et les dessins sont cryptiques. Enfin, des espèces appartenant à des groupes différents, mais habitant les mêmes régions, peuvent se « copier » curieusement, les unes servant de modèles aux autres (mimétisme batésien) ; parfois, seule la femelle est mimétique, comme chez certains Rhopalocères exotiques à variations parallèles, dont un bon exemple nous est donné par les trois formes femelles du Nymphalide ubiquiste *Hypolimnas misippus*, mimétiques des trois formes correspondantes d'un Danaïde également très répandu, *Danaus chrysippus*.

Prédateurs, parasites et maladies des Lépidoptères. Chez les Vertébrés, les principaux prédateurs de Lépidoptères sont les Oiseaux, recherchant chenilles (le coucou ingurgite même les Processionnaires urticantes) et imagos, et les chauves-souris qui capturent les nocturnes au vol ou ceux qui tourbillonnent autour des lampadaires. L'homme est aussi un ennemi redoutable des Papillons, dévastant les biotopes favorables à leur existence qu'il saupoudre par ailleurs de pesticides.

De nombreux parasites, Hyménoptères et Diptères surtout, s'attaquent aux divers stades des Lépidoptères. En général, les Hyménoptères parasites, Ichneumones par exemple, pondent à l'intérieur de la chenille; parfois la proie, paralysée, est emportée et déposée avec la ponte de l'Hyménoptère (Sphécidés), dans le nid de ce dernier.

Certains Coléoptères comme les calosomes dévorent les chenilles tandis que les adultes peuvent être victimes de Diptères Asilides, de libellules et d'Arachnides.

De nombreuses espèces sont également sujettes, surtout à l'état larvaire, à des maladies infectieuses ou parasitaires : viroses, grasserie et gattine chez le ver à soie et les Lymantriidés; infections par des Bactéries pathogènes (flacherie), microsporidioses (pébrine du ver à soie), mycoses (muscardine du ver à soie, Ascomycètes, tels les curieux *Cordyceps* se développant surtout sur les chrysalides endogées...). Ces maladies, souvent graves pour l'industrie de la soie (elles firent tomber la production de cocons de 26 000 000 à 7 900 000 kg sous le second Empire, et Pasteur devait les étudier), contribuent par contre à rétablir l'équilibre naturel lorsqu'il est rompu par la pullulation anormale d'une espèce, d'ordinaire cyclique.

La *répartition géographique.* Les Lépidoptères ne peuplent pas l'ensemble des terres immergées du globe d'une façon uniforme : particulièrement nombreux dans les régions chaudes, ils manquent dans les régions polaires. Certaines espèces, généralement migratrices, sont cosmopolites, comme quelques Microlépidoptères, des noctuelles, des Sphingidés, des Nymphalidés; d'autres sont au contraire étroitement localisées géographiquement du fait de l'insularité ou de l'orographie.

La présence de la plante nourricière, le milieu, le climat sont autant de facteurs limitant l'aire qu'occupe une espèce; la localisation très étroite de quelques-unes d'entre elles dans nos régions, notamment les relictes pléistocènes de nos marais ou de nos tourbières, rend leur existence particulièrement précaire dans les pays

peuplés et industrialisés. Les forêts, les montagnes jusqu'à 6 000 m avec leurs étages subalpin et alpin, les déserts constituent aussi des refuges pour beaucoup de Lépidoptères, dont l'étude contribue à retracer l'histoire des grandes migrations animales du Quaternaire. Enfin, alors que l'habitat de certaines espèces du genre *Parnassius* ou de *Colias palaeno* semble se restreindre, on constate depuis un peu plus d'un siècle le phénomène inverse, certaines espèces de Piéridés et de Nymphalidés notamment colonisant au fil des décennies de nouvelles localités. Nous rappellerons brièvement le peuplement des principales régions faunistiques. Dans la région éthiopienne et malgache, Nymphalidés *(Charaxes)* et Attacidés prédominent, les grands Papilionidés s'y trouvant moins bien représentés que dans la riche région orientale où volent tant d'espèces spectaculaires de cette famille. La région néo-tropicale compte encore un plus grand nombre de brillants Rhopalocères, des genres *Morpho* et *Agrias,* ainsi que des nocturnes géants, représentants des Noctuidés, et des Sphingidés; la faune antillaise, voisine, est pauvre et celle des îles antarctiques réduite à quelques Tinéidés et à de rares Microlépidoptères microptères. La région australienne est la patrie d'Attacidés gigantesques *(Archaeoattacus),* d'Hépialidés et de Cossidés, outre de nombreux endémiques. La région holarctique, moins richement pourvue que les précédentes, renferme cependant quelques endémiques, notamment les Lémoniidés comme *Endromis versicolora.*

Intérêt de l'étude des Lépidoptères. Si la très grande majorité des Lépidoptères ne constitue pour l'homme qu'une merveilleuse parure printanière ou estivale de la nature, il en est quelques-uns qui lui sont utiles, telles les espèces séricigènes (Bombycoïdes surtout) et d'autres dont les chenilles s'attaquent aux cultures, aux grains, etc. (Microlépidoptères, Pyralidés, Noctuidés, Piéridés entre autres). Quelques espèces fournissent en outre un matériel de choix aux généticiens et aux biologistes pour leurs recherches.

En Afrique centrale, des chenilles d'Attacidés ou de Notodontidés (anaphes) sont consommées cuites par les villageois.

Enfin les espèces les plus grandes et les plus brillantes ont depuis longtemps la faveur des collectionneurs et des décorateurs et atteignent parfois un prix élevé chez les naturalistes ou dans les ventes publiques; il y a quelques années, par exemple, un spécimen d'*Ornithoptera allotei,* de la famille des Papilionidés, a trouvé acquéreur à l'Hôtel Drouot pour 10 000 F.

Plusieurs auteurs prélinnéens, tel R. de Réaumur, ont déjà traité des Lépidoptères, mais il fallut attendre la dixième édition du *Systema Naturae* (1758) de C. Linné, fixant les règles de la nomenclature scientifique moderne, pour en permettre l'étude systématique.

Insectes fragiles, les Lépidoptères n'ont guère laissé de fossiles. Aucune famille éteinte de l'ordre n'a été décrite sauf celle des **Éosétidés**, créée pour *Eoses triassica,* du Trias d'Australie, dont la position reste cependant douteuse; les espèces fossiles connues les plus anciennes sont des Microlépidoptères du Tertiaire (Éocène), mais l'ordre a vraisemblablement existé, déjà bien différencié, dès le Mésozoïque, apparaissant sans doute au Jurassique. On a ainsi découvert en Italie, dans les marnes tertiaires du Monte Gabbro, une femelle de Papilionidé à sphragis, dont la nervation et les dessins alaires sont bien conservés : *Doritides bosniaskii* ancêtre probable de nos Parnassiens. En conséquence, la classification des Lépidoptères n'est pas définitivement fixée et repose essentiellement sur leurs caractères macroscopiques, d'où leur division en deux grands ensembles, les Macrolépidoptères et les Microlépidoptères, toujours utilisée, quoique sans réelle valeur systématique. Les Macrolépidoptères ont été répartis à leur tour en Rhopalocères (antennes en massue) et en Hétérocères (antennes de formes diverses), les premiers renfermant tous les « Papillons de jour ». Un autre système divise les Lépidoptères en Homoneures ou Jugates, caractérisés par le même type de nervation aux deux paires d'ailes avec couplage alaire jugate ou jugo-frénate, et en Hétéroneures ou Frénates, à nervation différente avec couplage de type frénate; ces derniers sont à leur tour partagés en Monotrysiens et Ditrysiens.

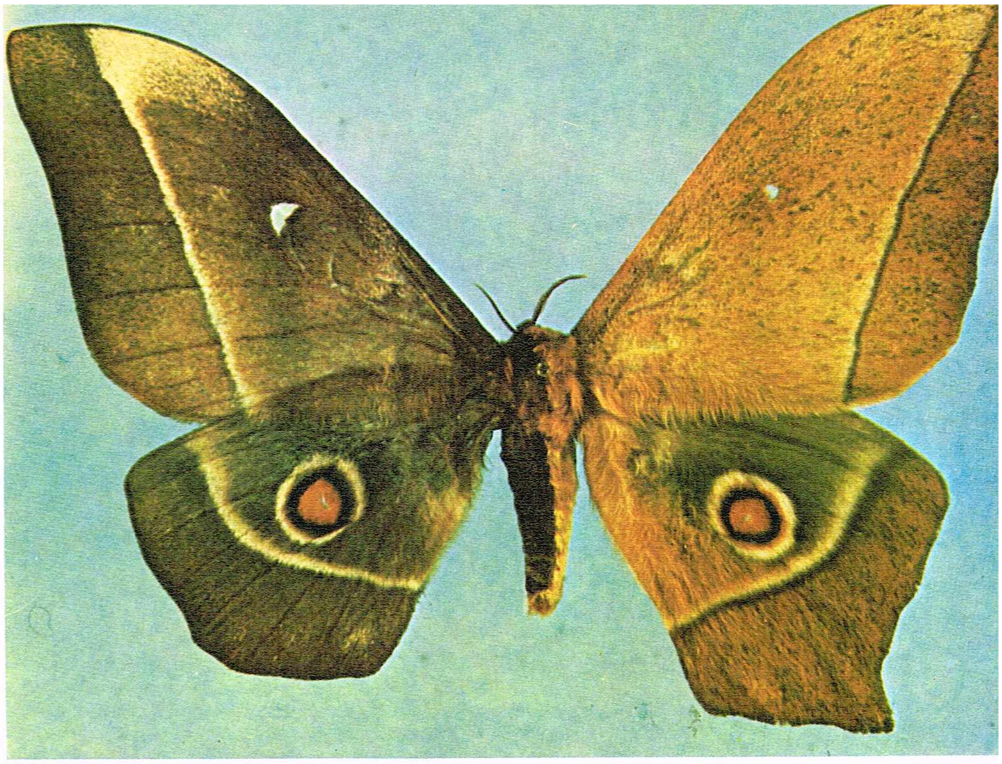

M. Boulard

▲ *Rares sont les gynandromorphes bipartis aussi frappants que celui-ci, un* **Imbrasia epimethea** *(l'aile postérieure du côté mâle est caudée), grand Attacidé nocturne largement répandu en Afrique tropicale.*

Nous retiendrons ici l'essentiel des classifications les plus récentes; en vue de recherches plus approfondies, on pourra consulter la bibliographie sommaire à la fin de la partie systématique de ce travail dont le cadre restreint ne nous permet de citer que les familles les plus intéressantes.

Sous-ordre des Homoneures

Les Lépidoptères, appartenant au sous-ordre des Homoneures, se divisent en trois super-familles : Micropterygoidea, Eriocranioidea, Hepialoidea.

Super-famille des Micropterygoidea

Une seule famille peu nombreuse caractérisée par les pièces buccales broyeuses de l'imago (mandibules dentées et fonctionnelles) est représentée par les **Microptérygidés**. Les *Micropteryx,* petits Lépidoptères longs de 7 à 15 mm, de coloration généralement métallique et de mœurs diurnes, se nourrissent de grains de pollen.

Super-famille des Eriocranioidea

Ce groupe rassemble trois familles. En Europe, on connaît quelques espèces diurnes d'**Ériocraniidés**. De type suceur primitif, elles se caractérisent par des mandibules présentes mais atrophiées, et une trompe fonctionnelle mais rudimentaire. Les chenilles sont à peu près apodes, et mineuses. La chrysalide porte des mandibules saillantes.

Super-famille des Hepialoidea

Des trois familles qui la forment, celle des **Hépialidés** est la plus importante. Ce sont des Homoneures de grande taille, aux pièces buccales rudimentaires et non fonctionnelles; leur thorax est très long. Diurne ou nocturne, leur vol est vif, mâles et femelles se recherchant activement. Les œufs, très nombreux, sont disséminés

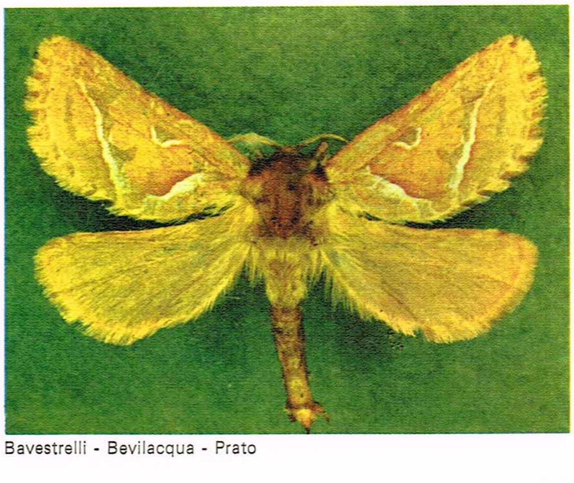

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ **Triodia sylvina** *(la sylvine) est l'une des hépiales les plus connues de nos régions; son vol est nocturne.*

▶ *Cossus cossus, le cossus gâte-bois, est un gros Papillon nocturne qui s'attaque aux arbres fruitiers ou forestiers, déjà âgés, en y creusant des galeries. La durée de la vie larvaire est de trois ans.*

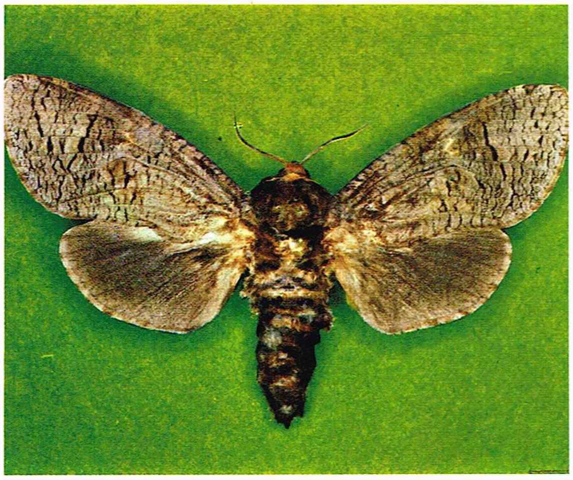

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

en vol par la femelle. Les chenilles endogées ou endophytes, au développement très lent parfois puisqu'il s'étale sur plusieurs années, sont souvent nuisibles aux racines des plantes-hôtes où elles creusent des galeries. La chrysalide est mobile. Famille cosmopolite d'environ trois cents espèces, surtout nombreuses dans l'hémisphère austral où elles atteignent une envergure considérable; ses représentants sont souvent brillamment colorés : les ailes antérieures sont lilas rose avec de grandes taches nacrées chez *Leto venus* d'Afrique du Sud, vertes dans le genre *Oenetus,* répandu de l'Australie à la Nouvelle-Calédonie.

Sous-ordre des Hétéroneures

Les Lépidoptères appartenant au sous-ordre des Hétéroneures sont, à leur tour, partagés en deux sections : les *Monotrysiens* et les *Ditrysiens*. Les premiers se caractérisent par la présence chez la femelle d'un orifice génital unique, et se divisent en deux super-familles : Nepticuloidea et Incurvarioidea; chez les seconds, l'orifice génital de la femelle peut être double. Ce groupe se compose d'un très grand nombre de super-familles.

Super-famille des Nepticuloidea

Les **Nepticulidés** comprennent les plus petits Papillons existant et forment une famille cosmopolite d'environ trois cents espèces minuscules, 3 mm d'envergure en moyenne, dont les ailes, à nervation réduite, possèdent de longues franges. Les chenilles, mineuses, creusent des galeries sinueuses, circulaires ou plus rarement linéaires; la nymphose s'effectue dans un cocon.

Super-famille des Incurvarioidea

Les antennes de certaines espèces du groupe peuvent atteindre quatre fois la longueur de l'aile antérieure.

Dans la famille des **Incurvariidés,** certains *Nemophora,* aux antennes particulièrement longues chez le mâle, sont communs et souvent diurnes.

La famille des **Adélidés** comprend des petits Papillons aux antennes filiformes excessivement longues, trois fois la longueur des ailes du mâle. Les mâles se groupent souvent au soleil pour effectuer une sorte de danse nuptiale à proximité d'une femelle posée sur une feuille. Dans nos régions, une trentaine d'espèces des genres *Adela* et *Nemotois* ont des ailes d'un vert bronzé.

Super-famille des Cossioidea

Les caractères de l'unique famille la composant sont une trompe atrophiée, une nervation complète, mais primitive, une aréole aux ailes antérieures.

La famille des **Cossidés** compte environ cinq cent cinquante espèces dans le monde. Les imagos sont nocturnes, et parfois très grands. Les chenilles, endophytes dans des galeries creusées à l'intérieur des troncs, des branches, des racines, ont une croissance très lente, de deux ou trois ans environ. La chrysalide, incomplète, sort partiellement de la galerie au moment de l'éclosion.

Communs en Europe, *Cossus cossus,* le gâte-bois, et *Zeuzera pyrina,* la coquette, sont tous deux nuisibles aux vergers.

Super-famille des Tineoidea

Celle-ci est formée surtout de la famille des **Tinéidés,** qui comprend environ mille huit cents espèces dans le monde. Leur trompe est brève ou rudimentaire, les palpes maxillaires sont coudés, souvent développés, les palpes labiaux pointus, les ailes étroites; elles vivent souvent dans nos maisons où elles sont bien connues sous le nom de « mites ». Les chenilles peuvent être saprophages, se nourrissant de matières d'origine végétale ou animale, farines, lainages, fourrures; la plupart se construisent un fourreau soyeux; la chrysalide, incomplète, repose dans un cocon ou reste dans le fourreau larvaire.

Super-famille des Plutelloidea

Elle compte de nombreuses petites espèces, tels des *Plutella,* des *Lithocolletis,* dont les chenilles sont adaptées morphologiquement à la vie mineuse et parfois nuisibles aux vergers.

Super-famille des Glyphipterygoidea

On lui rattache actuellement la famille des **Sésiidés.** On connaît environ huit cents espèces cosmopolites de Sésies, caractérisées par leurs ailes allongées et étroites, plus ou moins transparentes, et leur abdomen annelé de couleurs vives, terminé par une touffe de poils; la plupart des espèces sont diurnes, butinant d'un vol vif sur les fleurs comme des Hyménoptères qu'elles mimétisent souvent de remarquable façon, ressemblance d'où l'on a parfois tiré leurs noms. Les chenilles, dans leur grande majorité xylophages, vivent généralement deux ans dans des galeries. Les chrysalides, aux trois premiers urites soudés, sont incomplètes.

Super-famille des Psychoidea

Ces petits Lépidoptères dépourvus de trompe présentent un très grand dimorphisme sexuel; les mâles, aux antennes très pectinées et au corps très velu, sont ailés et de coloration uniformément brune ou blanchâtre, alors que les femelles sont aptères ou à ailes très atro-

▶ *Teigne des vêtements, connue sous le nom de « mite », sur un lainage.*

G. Mazza

phiées, et pourvues d'un ovipositeur extrêmement long. Les chenilles, phytophages, s'abritent dans un fourreau de soie parfois volumineux recouvert de débris, de Végétaux, de sable, etc. Ces fourreaux, de forme spécifique, protègent ensuite la chrysalide. Beaucoup de femelles restent au fourreau durant l'accouplement (l'abdomen du mâle peut s'allonger considérablement) et même pour la ponte. Les œufs sont mous. Des cas de parthénogenèse ne sont pas rares dans ce groupe.

De la famille des **Psychidés** il existe environ cinq cents espèces, dont le dixième habite nos régions. La plupart des mâles sont diurnes et ne vivent que très peu de temps comme les petits *Oreopsyche,* aux ailes parfois hyalines, volant comme des mouches à la recherche des femelles, dont les fourreaux sont cachés dans la végétation basse. Les grands *Oiketicus* africains sont par contre nocturnes.

Super-famille des Tortricoidea

Ce sont des Lépidoptères aux palpes maxillaires très réduits et aux palpes labiaux d'ordinaire obtus; ce groupe est très important car il est fréquemment « nuisible » aux cultures.

La famille des **Tortricidés** comporte environ quatre mille cinq cents espèces de Tordeuses dont plus de cinq cents habitent l'Europe. Elles se distinguent des autres Microlépidoptères par la forme plus ou moins trapézoïdale des ailes antérieures; les mâles ont souvent un organe odorifique dans le repli costal des ailes. Les chenilles souvent très agiles vivent généralement dans des feuilles tordues ou enroulées à l'aide de fils de soie, d'où leur nom de Tordeuses; d'autres sont endophytes, spécialement dans des fruits et des bourgeons, quelques espèces, enfin, sont cécidogènes. Les espèces des genres *Enarmonia, Laspeyresia, Evetria* et *Sparganothis* sont particulièrement nuisibles aux pommiers, aux pois, aux pinèdes, à la vigne, tandis que *Tortrix viridana,* la tordeuse du chêne, très reconnaissable à ses ailes antérieures vert clair, peut défolier des forêts entières lorsque sa chenille prolifère.

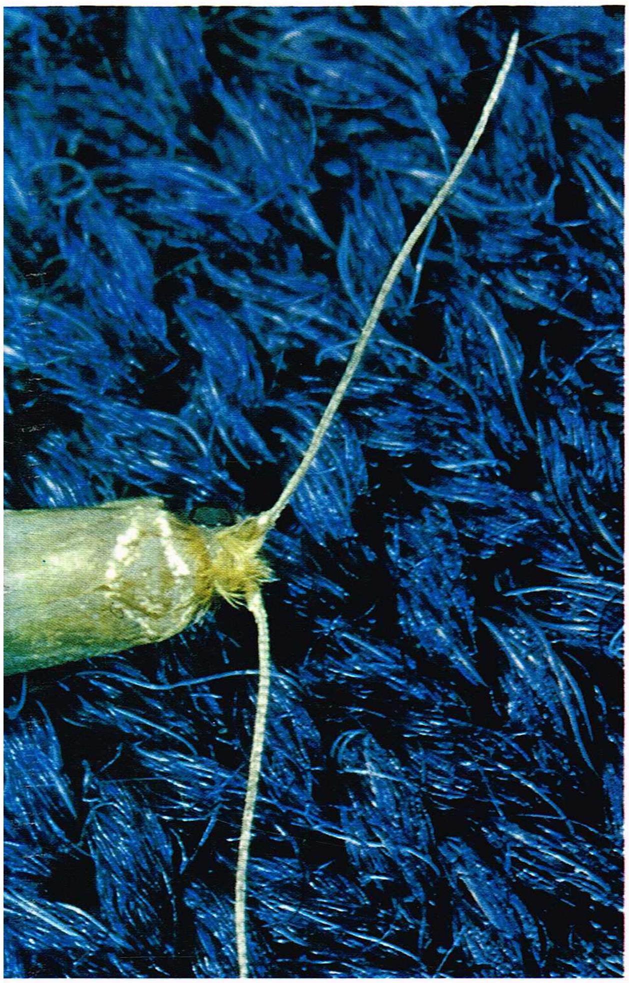

La famille des **Bucculatricidés** comprend environ six cents espèces dans le monde, et est représentée dans nos régions par de petits Papillons aux ailes étroites et pauvrement nervurées appartenant surtout aux genres *Bucculatrix* et *Leucoptera*.

Parmi les espèces exotiques, *Perileucoptera coffeella,* de la région néo-tropicale, est une mineuse du caféier.

Super-famille des Castnioidea

Une seule famille caractérisée par le renflement en massue des antennes, celle des **Castniidés.**

Les *Castnia* sont grands et souvent brillamment colorés, avec leur trompe généralement développée, ils ressemblent un peu aux Rhopalocères; toutefois, leur nervation de même que leurs stades pré-imaginaux sont encore primitifs. On en connaît environ cent soixante espèces, des régions néo-tropicale, australienne et indo-malaise. Leurs chenilles sont généralement endophytes de Monocotylédones.

Super-famille des Hyponomeutoidea

Ce sont de petits Lépidoptères aux palpes maxillaires réduits et aux labiaux dressés ou porrigés; leur nervation est complète.

La famille des **Hyponomeutidés** comprend un millier d'espèces, souvent de couleurs vives; les mâles sont pour la plupart pourvus de deux touffes de poils sous le huitième urite. Au repos, l'Insecte tient curieusement le corps relevé, s'appuyant sur les quatre pattes antérieures. Les chenilles mineuses ou ectophytes, parfois grégaires, au moins à certains stades, vivent alors dans un nid soyeux tissé sur un rameau. Certaines espèces du groupe sont des plus nuisibles aux vergers comme *Hyponomeuta malinella,* la teigne des pommiers, aux ailes antérieures d'un blanc brillant, ponctuées de noir.

Super-famille des Copromorphoidea

Elle ne compte en Europe que la famille des **Ornéodidés** caractérisés par leurs ailes profondément divisées, suivant les nervures, en six ou sept lanières frangées aux deux bords. Les chenilles sont souvent endophytes et parfois cécidogènes.

Super-famille des Gelechioidea

Ce très vaste groupe de teignes comprend plusieurs milliers d'espèces dont nous retiendrons d'abord les **Géléchiidés** *Platyedra gossypiella,* répandu partout dans les plantations de coton où il endommage parfois plus de la moitié des récoltes, et *Sitrotoga cerealella,* nuisible aux céréales, dans les champs comme dans les granges.

La famille des **Coléophoridés** est formée d'environ six cents petits Lépidoptères, à ailes étroites et pointues longuement frangées, dont les chenilles sont mineuses au premier stade, puis vivent dans un fourreau servant à la chrysalidation après fixation à un support.

Super-famille des Pterophoroidea

C'est un groupe de curieux Lépidoptères à trompe bien développée et aux ailes généralement divisées en deux ou trois lobes étroits et plumeux, aux pattes longues et grêles munies d'éperons.

La famille des **Ptérophoridés** compte environ six cents espèces, qui ressemblent aux Ornéodidés, mais aux lobes alaires moins nombreux. Leur vol est surtout crépusculaire. Parmi nos espèces indigènes communes, citons *Pterophorus monodactylus* et *Alucita pentadactyla,* hôtes du liseron.

Super-famille des Pyralidoidea

Elle comprend surtout les Pyralidés et les Thyrididés aux pattes longues et grêles.

La famille des **Pyralidés** est l'une des plus vastes de l'ordre avec une dizaine de milliers d'espèces, dont plus de cinq cents habitent l'Europe; elles sont d'ordinaire de taille petite à moyenne, hormis quelques géantes exotiques; les palpes maxillaires sont très développés chez elles.

Les *Ephestia* (Phycitinés) et la plupart des Pyralidines peuvent vivre aux dépens de denrées alimentaires, comme *Asopia farinalis* ou teigne des farines, cosmopolite. Les Hydrocampinés peuvent avoir des chenilles aquatiques, avec ou sans trachéo-branchies; le cocon est parfois

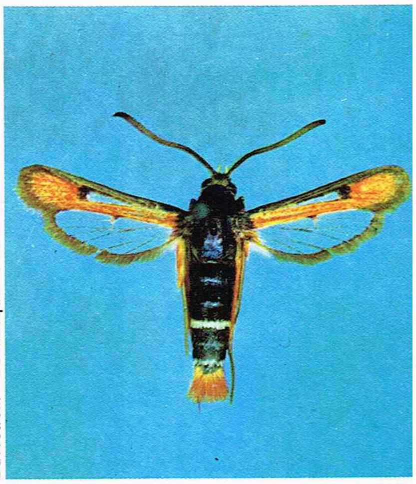

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ **Chamaesphecia chrysidiformis** ***présente comme la plupart des Sésiidés un abdomen annelé terminé par une touffe de poils.***

I. Bucciarelli

▲ **Plutella maculipennis,** ***petit Lépidoptère cosmopolite nuisible aux Crucifères.***

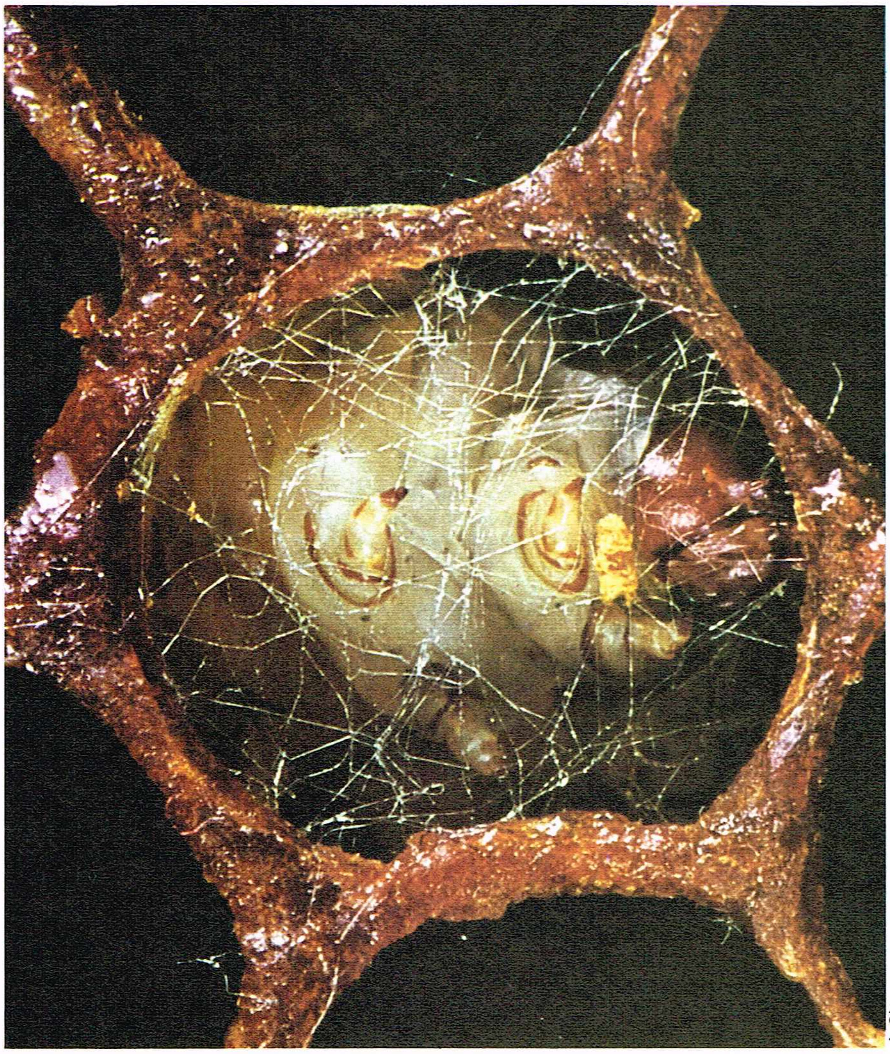

J. Six

immergé. L'espèce la plus répandue en est *Nymphula nymphaeata,* aux dessins alaires complexes.

Parmi les Pyraustinés qui comptent trois mille cinq cents espèces, citons *Pyrausta nubilalis,* la pyrale du maïs, paléarctique, mais introduite aux États-Unis, où elle s'est largement répandue dans le « Corn-Belt », et *Nomophila noctuella,* nuisible aux Légumineuses fourragères, cosmopolite et migratrice; ne la trouve-t-on pas à plus de 3 000 m sur les hauts sommets éthiopiens!...

Les Crambinés sont surtout inféodés aux Graminées et chez les Schoenobiinés, les *Acentropus* ont des mœurs presque totalement aquatiques, notamment *A. niveus,* aux femelles normalement ailées ou microptères; ces dernières, à respiration cutanée, nagent en s'aidant de leurs pattes à longs poils. L'accouplement a lieu alors à la surface de l'eau. La chrysalide femelle est également dimorphe.

La famille des **Thyrididés** est une famille tropicale d'environ six cents espèces, surtout représentée en Europe par le petit *Thyris fenestrella* aux ailes festonnées, ornées de fenêtres hyalines. Les chenilles sont souvent endophytes.

Super-famille des Geometroidea

Elle se caractérise par des antennes souvent bipectinées chez le mâle, presque toujours simples chez la femelle, gracile, une trompe généralement présente, un chaetosema et, presque toujours, une paire d'organes tympanaux sur le premier urite.

Une seule famille, les **Géométridés,** compte douze mille espèces, dont trois mille dans la région paléarctique, aux ailes larges et fragiles, souvent homochromes des écorces. Dans certains genres, les femelles sont brachyptères ou aptères. Les Papillons sont ordinairement nocturnes.

Les chenilles sont pour la plupart caractérisées morphologiquement par la disparition des trois premières paires de pattes abdominales, d'où leur démarche si particulière d' « arpenteuses » ou « géomètres »; immobiles, au repos, dressées sur les deux dernières paires de pattes, elles ressemblent beaucoup à des branchettes desséchées. Les chrysalides sont succeintes. La famille est subdivisée en une demi-douzaine de sous-familles, comprenant pour la plupart des espèces aux ailes grisâtres avec des rayures dentées transversales. Un Géométriné, *Abraxas grossulariata,* la zérène du groseillier,

▲ *Larves de* Galleria melonella *(la teigne de cire) logeant dans un alvéole de cire d'abeille.*

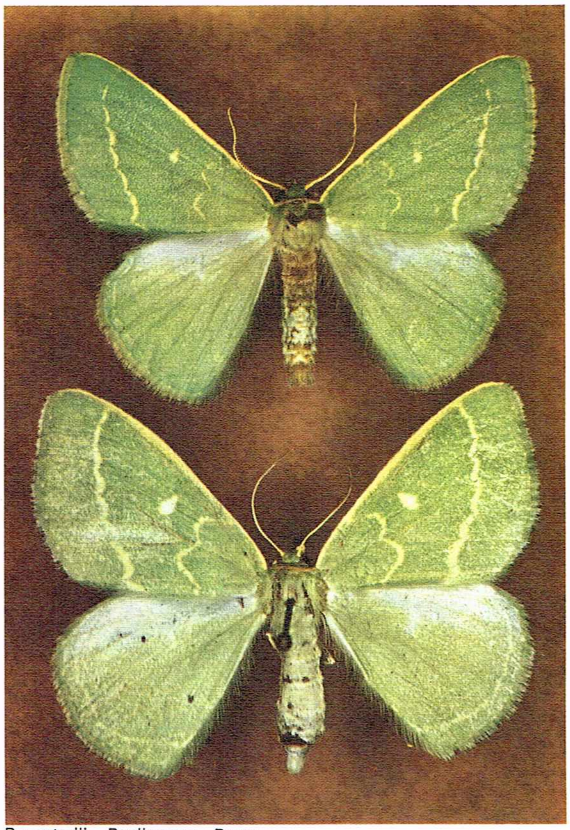

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

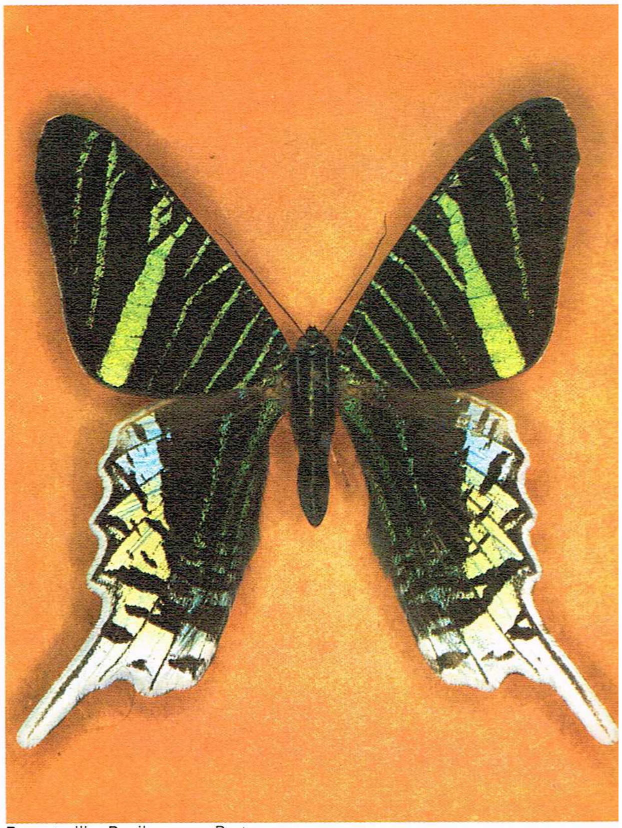

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ *A gauche, deux exemplaires d'*Euchloris smaragdaria *(en haut, le mâle; en bas, la femelle), l'une de nos plus belles espèces de géomètres; sa chenille se camoufle sous des fragments de feuilles fixés, par quelques fils de soie, aux protubérances crochues qu'elle porte; à droite,* Urania leilus *est une brillante espèce néotropicale; de mœurs diurnes, d'autres Uranides vivent à Madagascar et sur la côte orientale d'Afrique.*

eurasiatique, produit la mutation récessive, *dohrni,* précieuse aux généticiens, et dont la répartition chromosomique est dite de type *Abraxas.* Les curieuses hibernies n'apparaissent qu'en automne et en hiver, les femelles sont aptères ; leurs chenilles peuvent causer des ravages considérables aux arbres forestiers ou fruitiers. La géomètre du bouleau, *Biston betularia,* est bien connue par sa mutation mélanique *carbonaria.* Enfin les quelques espèces du genre *Archiaearis* ou *Brephos,* au vol élevé, capricieux et diurne, éclosant en mars-avril dans les bois de bouleaux, constituent à elles seules une petite sous-famille.

Super-famille des Uranioidea

Elle comprend quelques familles de distribution essentiellement tropicale, se distinguant de la précédente surtout par la nervation. On range dans la famille des **Uraniidés** quelques-uns des plus beaux Papillons existant, diurnes, grégaires et souvent migrateurs.

Super-famille des Drepanoidea

Ce sont de délicats petits Lépidoptères, aux antennes pectinées ou non, avec les organes tympanaux du premier urite particuliers.

On lui rattache la famille des **Drépanidés,** qui compte environ trois cent cinquante espèces et qui est surtout représentée en Europe par quelques *Drepana* aux ailes antérieures d'ordinaire falciformes, et celle des **Thyatiridés,** groupe eurasiatique d'espèces proches des noctuelles, dont elles diffèrent par la nervation comme le joli *Thyatira batis,* la batis, aux ailes antérieures ornées de taches roses. Les **Axiidés** sont représentés dans la région méditerranéenne par la délicate espèce *Axia margarita.*

Super-famille des Bombycoidea

Elle compte actuellement neuf familles, groupant environ trois mille cinq cents espèces dépourvues de chaetosema, de palpes maxillaires et d'organes tympanaux ; la trompe est rudimentaire ou nulle, non fonctionnelle à de rarissimes exceptions près. Les antennes sont largement pectinées et garnies de sensilles chez le mâle. Le frein est réduit, ou nul, mais la dilatation humérale est souvent considérable. Ce sont des espèces velues, parfois de grande taille, généralement nocturnes. Le dimorphisme sexuel est souvent considérable. Les chenilles de forme variable, souvent poilues ou munies de tubercules, se chrysalident dans un cocon soyeux, ou en terre.

La famille des **Endromididés** est réduite à une seule espèce paléarctique printanière, le beau versicolore, *Endromis versicolora,* dont la chenille glabre et verte vit surtout sur le bouleau.

Les **Lasiocampidés** sont plus nombreux avec mille deux cents espèces dans le monde, dont quelques dizaines habitent l'Europe. Assez grands en général, ces Lépidoptères, pour la plupart nocturnes, sont surtout caractérisés par la dilatation humérale et les deux nervures anales de l'aile postérieure. Leurs chenilles sont velues et parfois urticantes. La feuille morte du chêne, *Gastropacha quercifolia,* étrangement semblable au repos à une feuille morte de chêne, est souvent commune dans nos régions.

La famille des **Bombycidés.** Des quelque trois cents espèces exotiques formant cette famille, la plus célèbre est évidemment le ver à soie, *Bombyx mori,* domestiqué en Chine depuis quatre mille cinq cents ans environ, et introduit en France sous le règne d'Henri IV.

La famille des **Lémoniidés** n'est représentée, dans la zone paléarctique, que par l'unique genre *Lemonia,* comptant moins d'une quinzaine d'espèces, dont deux françaises, au vol rapide et saccadé.

La famille des **Attacidés** ou **Saturniidés** comprend de belles espèces, aux ailes souvent ornées d'ocelles discoïdaux à fenêtres hyalines ; en outre, les branches du peigne antennaire, surtout développées chez le mâle, sont situées dans un même plan. Les chenilles sont souvent épineuses ou sétifères, les chrysalides sont endogées ou vivent dans un cocon. La sous-famille principale des Attacinés compte un millier d'espèces dans le monde ; certaines d'entre elles sont véritablement géantes, tels les *Attacus* asiatiques et les *Archaeoattacus* d'Australie et de Nouvelle-Guinée, pouvant atteindre 300 mm d'envergure. Répandu de l'Afrique du Nord à travers l'Europe méridionale jusqu'en Iran, le grand-paon-de-nuit, *Saturnia pyri,* est le plus grand de nos Lépidoptères indigènes. Sa belle chenille se trouve surtout sur les arbres fruitiers. Quant à *Graellsia isabellae,* c'est un magnifique nocturne très localisé dans les Alpes du S.-E. en France et dans les sierras espagnoles. Seul représentant en Europe des Actiens, aux ailes postérieures couchées et de coloration verte ou jaune, un Agliiné, la hachette, *Aglia tau,* est commun au printemps en plein jour dans nos forêts. Enfin, les Hémileucinés, Arsénurinés et Adélocéphalinés représentent le groupe en Amérique, les Salassinés en Asie, et les Ludiinés en Afrique ; ces derniers, de petite taille, présentent un grand dimorphisme sexuel.

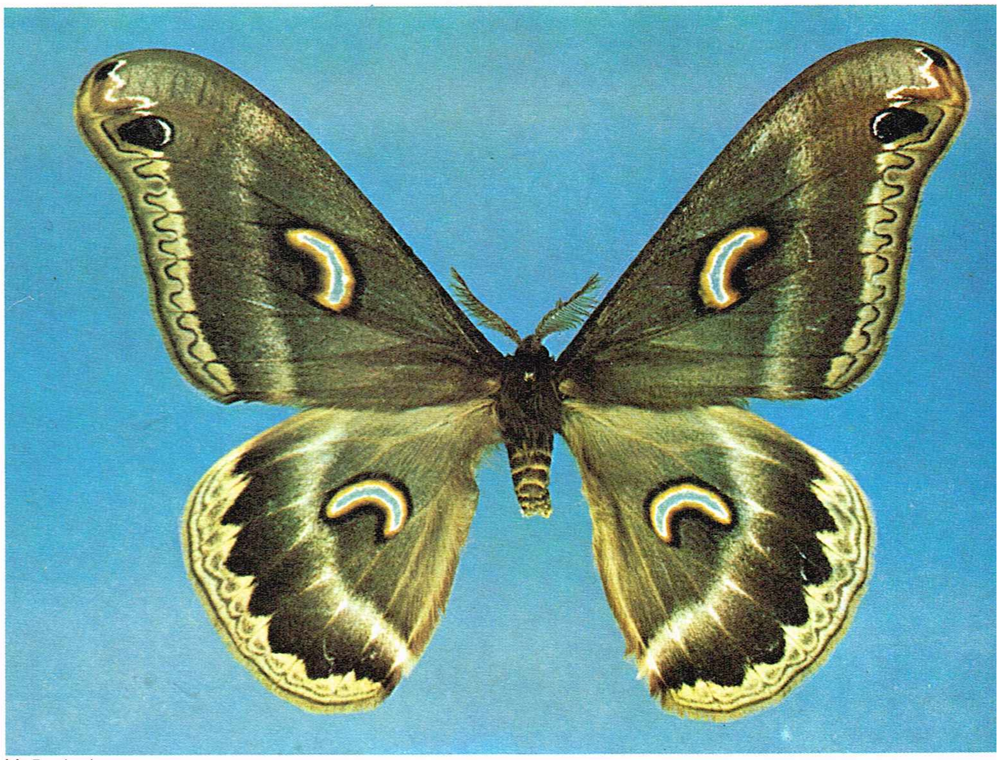

M. Boulard

▲ **Epiphora elianae** *est un Attacidé, récemment découvert dans les hautes montagnes de l'Éthiopie, capable, malgré la brièveté de sa trompe, d'absorber dans les flaques des routes ou des sentiers un peu d'eau, rejetée aussitôt par l'anus.*

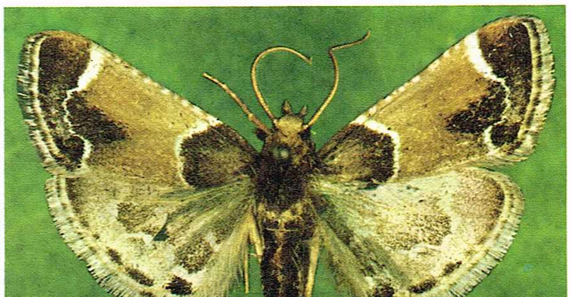

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ **Asopia farinalis** *est une Pyrale cosmopolite des plus nuisibles, en particulier aux farines, aux pâtes, etc.*

La famille des **Brahméidés** compte dans les régions paléarctique et éthiopienne une douzaine de grandes et belles espèces aux dessins complexes et souvent asymétriques ; les mâles du genre éthiopien *Dactyloceras* portent des touffes de poils odoriférants à la base du premier segment abdominal.

Ressemblant aux **Lasiocampidés,** citons encore les **Euptérotidés,** avec trois cents espèces, que l'on trouve en Asie et surtout en Afrique où volent les grands *Jana.*

Super-famille des Sphingoidea

Une seule famille homogène, celle des **Sphingidés,** réunit, au sein de deux grandes sous-familles, un millier d'espèces, de moyenne ou grande taille (200 mm chez les *Cocytius* américains), crépusculaires ou nocturnes. Le corps est volumineux et conique, les ailes antérieures sont allongées, triangulaires et d'ordinaire pointues. Les

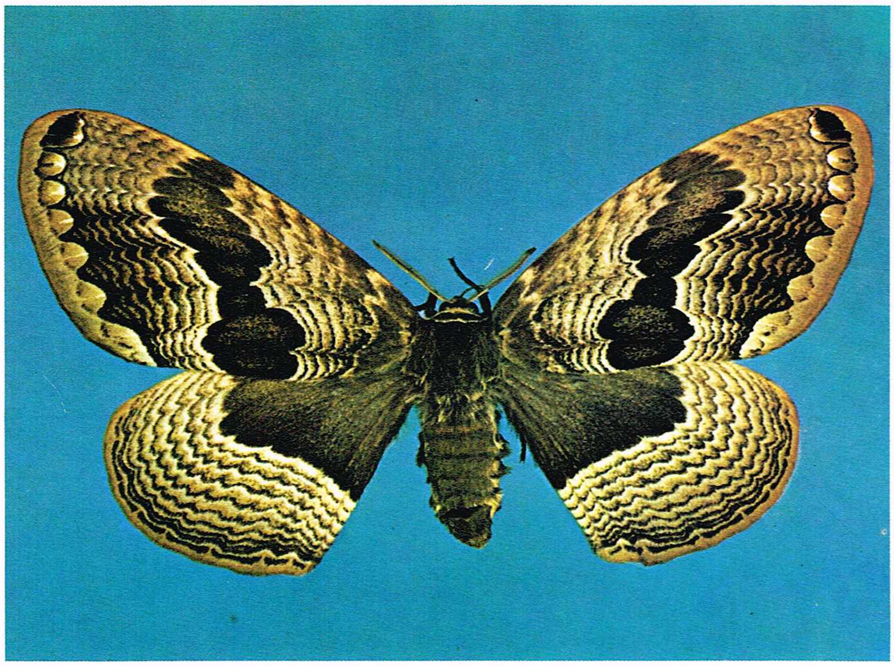

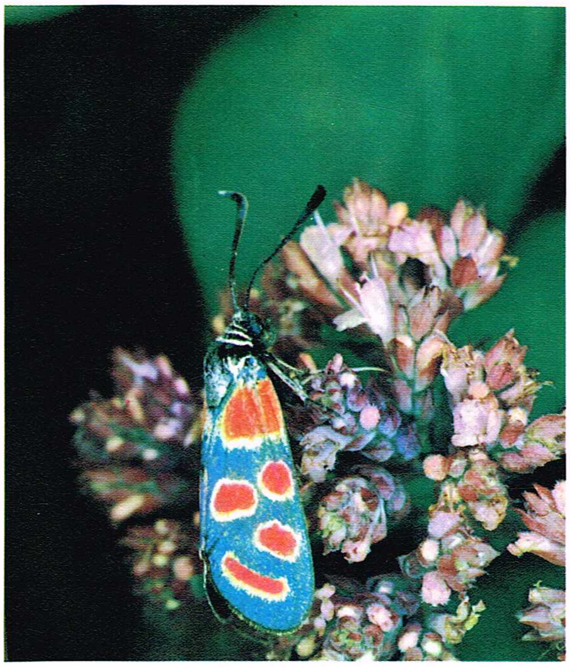

▲ *A gauche,* **Brahmaea ledereri** *appartient aux Brahméides, proches des Attacidés, mais reconnaissables aux dessins compliqués de leurs ailes; à droite,* **Zygaena carniolica,** *fréquente dans les régions calcaires; ses antennes en forme de massue sont caractéristiques du groupe des Zygènes (spécimen agrandi).*

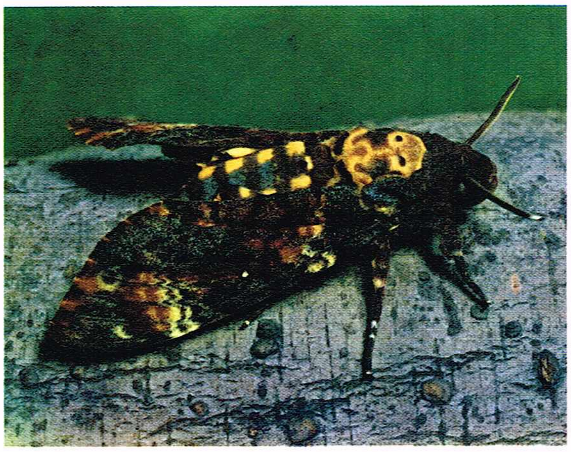

▶ **Acherontia atropos,** *le célèbre sphinx-tête-de-mort, doit son nom vernaculaire au dessin jaunâtre qui orne le dos de son thorax; cette espèce commune en Afrique et en Asie, migratrice durant la belle saison en Europe, est friande de miel (réduction de 1/4).*

antennes sont presque toujours fusiformes, parfois dentées ou pectinées. La trompe peut être très longue (280 mm), courte chez *Acherontia* ou même atrophiée et non fonctionnelle chez les *Smerinthus*. Les imagos, de coloration variable, souvent plus vive aux ailes postérieures, ont un vol puissant, rapide et bourdonnant et sont capables de s'immobiliser en vol au-dessus des corolles pour y plonger leur trompe; certaines espèces peuvent effectuer de longues migrations. La plupart des chenilles du groupe possèdent une corne sur le dos du huitième segment abdominal. Au repos, ces chenilles soulèvent la partie antérieure du corps, ressemblant ainsi un peu au sphinx égyptien, d'où leur nom. Les chrysalides, dont la trompe est parfois libre dans un étui saillant et recourbé, sont endogées ou plus rarement, à la surface du sol, enveloppées dans un cocon lâche.

De la trentaine de Sphingidés européens, citons deux Sphinginés, le sphinx-tête-de-mort, *Acherontia atropos,* largement répandu dans l'Ancien Monde, qui émigre au printemps de l'Afrique tropicale en Europe jusqu'en Scandinavie, où toutefois il ne peut se perpétuer, et le sphinx de l'euphorbe, *Hyles euphorbiae,* qui s'hybride parfois avec les espèces voisines, et un Macroglossiné, le petit moro-sphinx, *Macroglossum stellatarum,* diurne au vol très rapide.

Super-famille des Cochlidioidea

Elle compte cinq familles, dont la plus importante, seule présente en Europe, est celle des **Cochlidiidés.** Ces Lépidoptères aux ailes arrondies souvent brunes et vertes sont de taille petite ou moyenne, à trompe souvent atrophiée. Les chenilles, à tête rétractile, courtes et trapues, testudiniformes ou limaciformes, d'où leur nom, ont leurs pattes et leurs fausses-pattes remplacées par des ventouses; elle portent fréquemment de longs tubercules épineux très urticants. La chrysalide repose dans un cocon arrondi, mais operculé en vue de la sortie du Papillon. Il en existe un millier d'espèces qui sont surtout tropicales.

Super-famille des Zygenoidea

Ils se caractérisent par des antennes le plus souvent en forme de massue ou filiformes, un chaetosema, des palpes labiaux, une trompe et un frein ordinairement présents et développés. Dans nos régions, deux familles, celle des **Hétérogynidés,** groupe peu nombreux, aux femelles aptères, ne quittant pas leur cocon à l'instar des Psychidés, et celle des **Zygénidés,** aux antennes d'ordinaire renflées en massue et aux ailes droites et allongées, de coloration en partie métallique. Les quelque huit cents espèces qui la composent, dont trois douzaines environ en France, sont des *Procris,* le plus souvent d'un vert ou d'un bleu brillant, et des *Zygaena.*

▶ *La « porcelaine »,* **Pheosia tremula,** *au repos sur une tige; sa chenille vit surtout sur les saules et le tremble comme celles de beaucoup de Notodontidés (× 2).*

Super-famille des Notodontoidea

Elle rassemble deux familles en Europe.

Les représentants des **Notodontidés** sont des Papillons nocturnes singulièrement homomorphes ou homochromes de leur support quand ils sont au repos. Les antennes sont généralement pectinées chez les mâles, la trompe est très réduite, ils possèdent une paire d'organes tympanaux thoraciques. Le bord interne de l'aile antérieure peut porter une sorte de dent écailleuse, d'où le nom de la famille. Les chenilles, le plus souvent glabres, ont fréquemment une forme extraordinaire et leurs fausses-pattes anales peuvent être transformées en une paire d'appendices longs et grêles d'où sortent, en cas de danger, deux longs filaments mobiles rouge vif ; de même, la glande jugulaire peut projeter à distance un liquide corrosif, chez *Cerura* par exemple. Les chrysalides se trouvent dans un cocon de soie souvent très dur et fixé aux troncs.

La famille des **Thaumétopoéidés** est une famille cosmopolite de deux mille espèces, dont il n'existe dans nos régions que très peu d'exemplaires et dont les chenilles se déplacent en longues files derrière une seule chenille-guide, d'où leur nom de Processionnaires. Elles sont urticantes et construisent de gros nids soyeux. En France, trois espèces de *Thaumetopoea* sont nuisibles aux forêts de chênes et de Conifères.

Super-famille des Noctuoidea

C'est la plus vaste de toutes avec plus de trente mille espèces en grande majorité nocturnes.

La famille des **Arctiidés** compte environ huit mille espèces, essentiellement néotropicales et orientales, aux ailes souvent brillamment ornées et colorées. Leur vol est nocturne ou diurne ; leurs chenilles, dites oursonnes, sont généralement très velues. Les Cténuchinés comprennent environ deux mille espèces, en majorité néotropicales, parfois mimétiques d'Hyménoptères. Les Arctiinés comprennent de belles espèces, ainsi *Arctia caja,* l'écaille-martre ou « hérissonne », et *A. villica,* l'écaille fermière.

La famille des **Lymantriidés** compte la plupart des espèces du groupe présentant un important dimorphisme sexuel ; les femelles sont parfois brachyptères ou aptères. La trompe est réduite. Le vol est diurne chez certaines espèces. Les chenilles, avec des pinceaux de soies urticantes, et des tubercules glanduleux sur les urites cinq et sept, sont souvent nuisibles aux essences forestières ou aux vergers. Il existe environ mille huit cents espèces dans le monde, localisées surtout dans les régions éthiopienne et orientale. L'espèce la plus commune chez nous est *Lymantria dispar ;* elle se caractérise par un grand dimorphisme sexuel. Chez les petits *Orgyia,* les femelles sont presque aptères.

La famille des **Agaristidés** groupe des espèces tropicales, aux vives couleurs, souvent diurnes ; l'extrémité de leurs antennes est plus ou moins renflée.

La famille des **Noctuidés** est une famille cosmopolite ; on connaît plus de vingt mille espèces de noctuelles, dont environ sept cents habitent l'Europe. Ce sont des Lépidoptères de taille moyenne, sauf exceptions (280 mm chez *Thysania agrippina* du Brésil), et d'aspect assez uniforme. La trompe est généralement bien développée, les antennes filiformes et les tibias postérieurs pourvus d'une paire d'éperons. Les imagos sont pour la plupart nocturnes et volent rapidement ; au repos, ils tiennent leurs ailes à plat ou en toit, mimétisant souvent un petit morceau de bois. Les chenilles sont en général glabres, se chrysalidant au sol. Les noctuelles sont divisées en nombreuses sous-familles, réunies en deux groupes principaux : les Trifides, dont la nervure 5 (M2) des ailes postérieures est incomplète ou remplacée par un pli, et les Quadrifides chez lesquels cette même nervure est bien développée.

Super-famille des Hesperioidea

La famille des **Hespériidés** est représentée par des Papillons de petite taille, en général à grosse tête, aux antennes très écartées et d'ordinaire claviformes et pointues. Il n'y a pas de frein, les ailes antérieures sont triangulaires, toutes les nervures partant séparément de la cellule ; les ailes postérieures sont plus ou moins arrondies, parfois caudées. Les ailes sont généralement brunes ou noirâtres, avec des taches claires, mais certaines espèces tropicales sont brillamment colorées. Les antérieures du mâle portent fréquemment une androconie. Le vol rapide et saccadé est généralement diurne. Les chenilles, au prothorax rétréci, sont ordinairement glabres, avec des glandes cirières à sécrétion hydrofuge ; elles vivent en général dans des feuilles enroulées. La chrysalide cylindro-conique est suspendue ou se trouve dans un léger cocon. Les Hespériidés comptent environ trois mille espèces dont un peu plus de quarante habitent l'Europe ; ils fournissent, au contraire, près de la moitié du nombre des Papillons diurnes dans la région néotropicale.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ **Callimorpha quadripunctaria,** ***l'écaille chinée, est commune partout en été ; il en existe une forme à ailes inférieures jaunes,*** **lutescens,** ***fréquente en Normandie et en Bretagne.***

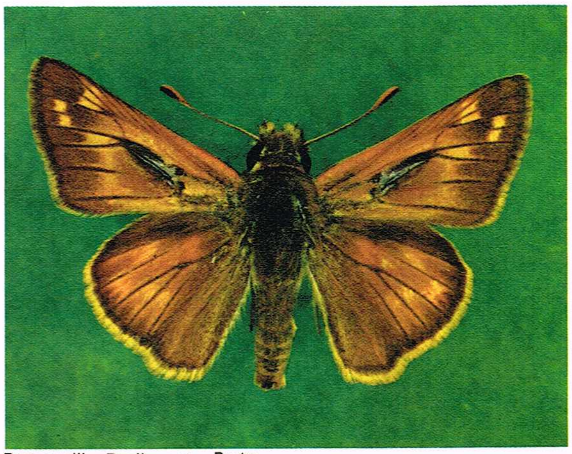

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ **Hesperia comma** ***est l'une des Hespéries les plus communes dans nos bois et nos prairies, durant la belle saison ; il convient de remarquer le trait androconial oblique et sombre des ailes antérieures.***

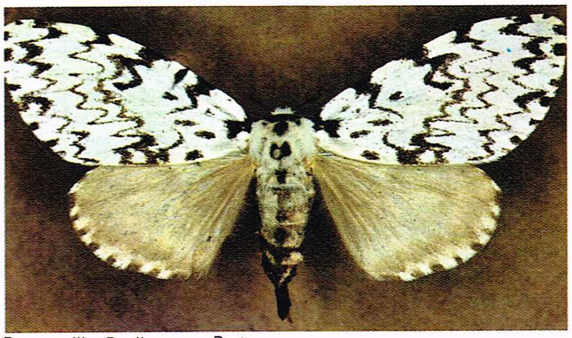

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ **Lymantria monacha,** ***la nonne, est parfois nuisible aux forêts de Conifères lorsqu'elle y prolifère (× 1,5).***

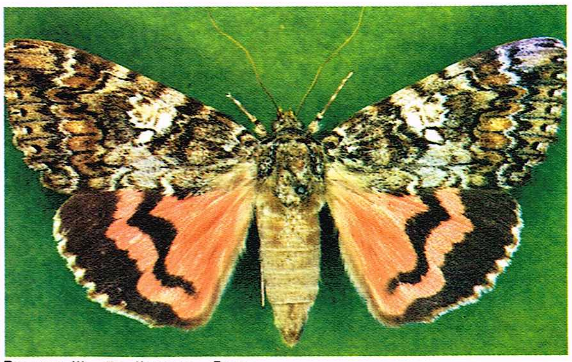

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ **Mormonia sponsa** ***est une likenée fréquente en été dans les bois de chênes ; de jour, au repos, elle est très homochrome de l'écorce des troncs ; effrayée, elle s'envole rapidement, montrant alors la couleur rouge de ses ailes postérieures.***

▶ **Agapetes galathea,** ***le demi-deuil, commun partout dans nos régions, est un représentant de la famille des Satyridés.***

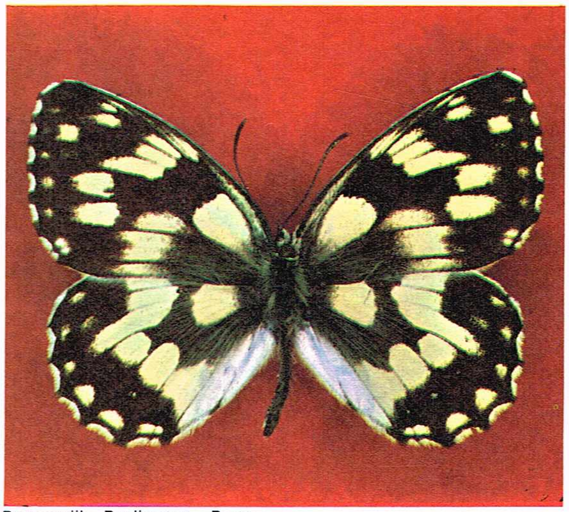

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Super-famille des Papilionoidea

Celle-ci comprend tous les Rhopalocères, caractérisés par leurs antennes en forme de massue et par l'absence de frein. Les imagos sont diurnes, sauf quelques espèces exotiques, et au repos tiennent leurs ailes relevées sur le dos. Les chenilles sont souvent épineuses; les chrysalides, nues, à l'exception par exemple des *Parnassius,* sont fréquemment succeintes ou suspendues. Groupe ubiquiste, il est surtout bien représenté sous les tropiques, mais compte, dans toute l'Eurasie, moins de cinq cents espèces.

La famille des **Papilionidés** est représentée par de beaux Lépidoptères de moyenne ou grande taille, aux ailes postérieures souvent caudées, leurs pattes antérieures sont complètement développées et fonctionnelles. Les chenilles, d'aspect variable, sont pourvues sur le prothorax d'un organe défensif exsertile, bifurqué et odoriférant, l'*osmeterium*. Les chrysalides, fréquemment succeintes, peuvent porter deux pointes céphaliques.

Les Papilionidés (environ six cents espèces) sont cosmopolites mais sont éminemment tropicaux : une douzaine d'espèces seulement habitent l'Europe. On les

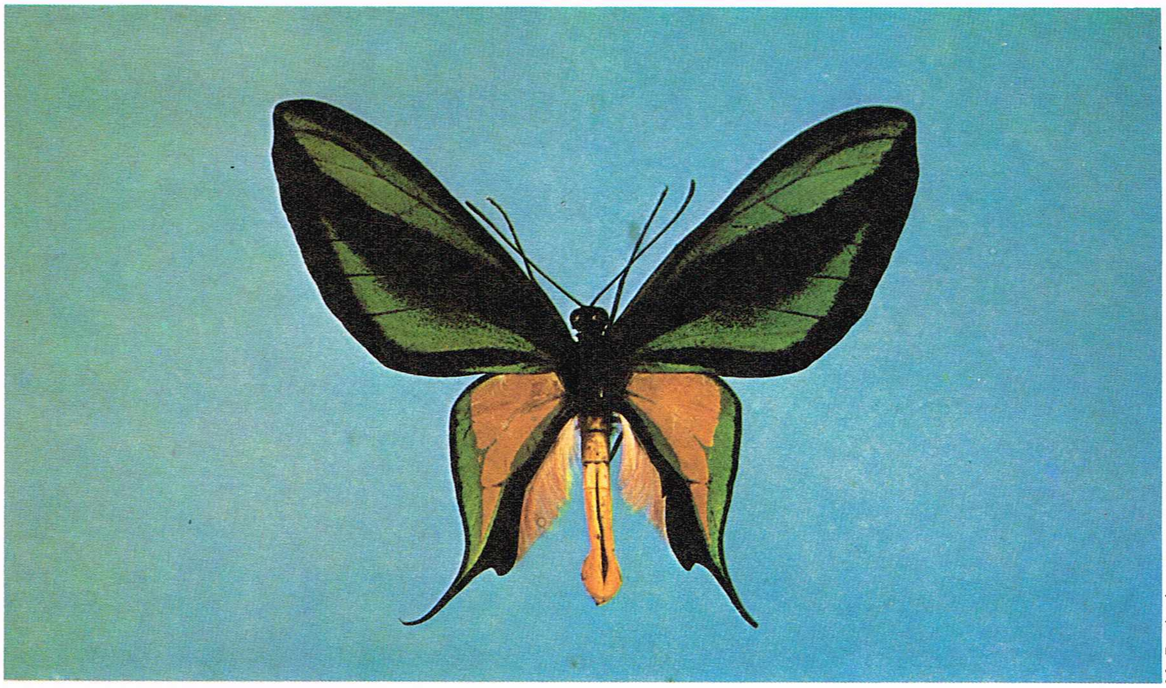

M. Boulard

▶ **Ornithoptera paradisea,** ***mâle, est l'un des plus beaux Papillons connus; l'espèce habite la Nouvelle-Guinée où sa capture a été interdite.***

divise en trois sous-familles : Papilioninés, Zérynthiinés et Parnassiinés. Celle des Papilioninés est la plus vaste; la plupart d'entre eux possèdent à l'aile postérieure une queue, comme notre *Papilio machaon,* le grand porte-queue.

On connaît, chez les *Papilio,* de nombreux cas de mimétisme, limités le plus souvent à la femelle comme chez l'espèce éthiopienne *P. dardanus,* au polymorphisme également considérable. A ce groupe appartiennent aussi les splendides *Ornithoptera,* indo-malais, de grande taille, au dimorphisme sexuel très accusé. Les Zérynthiinés aux ailes festonnées comprennent quelques jolies espèces paléarctiques et orientales, deux de ces « Thaïs » vivent en France méridionale. Enfin, les Parnassiinés sont représentés chez nous par trois espèces monovoltines du genre *Parnassius,* caractéristiques des zones montagneuses de l'hémisphère boréal, avec leurs ailes blanches plus ou moins hyalines, très souvent tachées de noir et de rouge. L'abdomen des femelles fécondées porte un *sphragis,* sorte de poche anale cornée de forme spécifique, sécrétée par le mâle pendant l'accouplement.

L'apollon, *Parnassius apollo,* est le plus répandu; il habite la plupart des régions montagneuses d'Europe continentale, de la Scandinavie à l'Andalousie et jusqu'en Asie centrale; ses variations géographiques sont importantes; il est en voie d'extinction dans certaines régions. La chrysalide est couverte d'une pruinosité blanchâtre, et repose dans un léger cocon.

La famille des **Piéridés** groupe des Lépidoptères aux ailes généralement blanches, jaunes ou orangées, avec des taches noires. Les ailes postérieures des mâles possèdent souvent des taches ou des touffes de soies androconiales. Les pattes, toutes fonctionnelles, portent des griffes bifides. La grande majorité des espèces de taille moyenne présente un important dimorphisme sexuel; certaines sont migratrices comme les *Pieris,* et les *Colias;* d'autres hibernent dans nos régions (*Gonepteryx,* les « citrons »). Les chenilles vivent surtout sur les Crucifères, les Légumineuses. Les chrysalides sont suspendues ou succeintes, avec une pointe céphalique souvent carénée. Les Piéridés comprennent environ mille cinq cents espèces, pour la plupart tropicales, dont une quarantaine, habitant l'Europe, l'Afrique du Nord et les îles Atlantides, appartiennent aux Piéridinés, les plus nombreux, et aux Dismorphiinés.

La famille des **Danaïdés** groupe ces grands Papillons, à l'odeur parfois désagréable, dont les pattes antérieures sont petites et dépourvues de griffes terminales; on observe des organes androconiaux sur les ailes ou l'abdomen. Leur toxicité répugne aux prédateurs et ils sont fréquemment « copiés » par les Nymphalidés; ainsi, on dénombre trois formes de *Danaus chrysippus* correspondant aux formes femelles de *Hypolimnas misippus.* Les Danaïdés sont presque tous tropicaux, mais deux espèces migratrices parviennent accidentellement en Europe. A noter également la famille des **Morphidés** à laquelle appartiennent de très brillantes espèces sud-américaines.

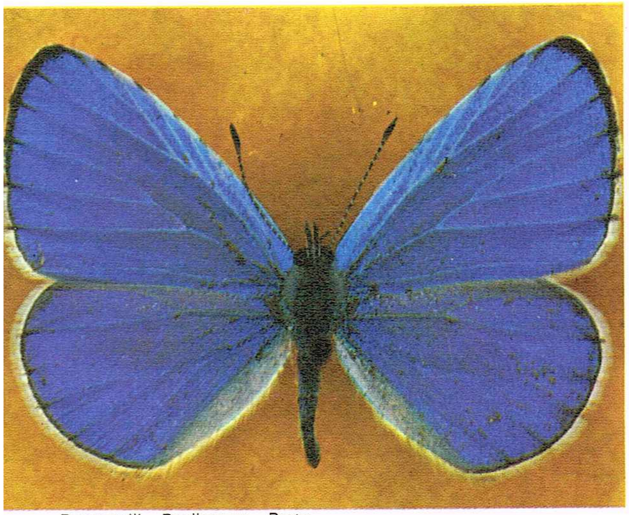

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

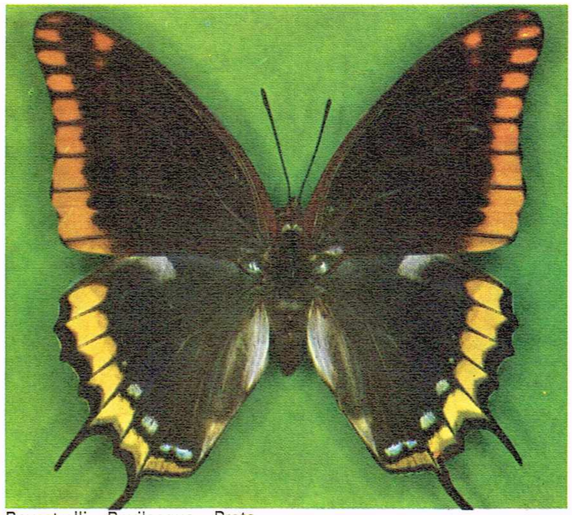

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ *A gauche,* **Lycaenopsis argiolus** *est l'un de ces jolis « petits-bleus » de nos régions répandus partout pendant la belle saison ; sa femelle est plus largement bordée de noir ; à droite,* **Charaxes jasius,** *le pacha-à-deux-queues, est le seul représentant en Europe méridionale d'un genre de l'Ancien Monde particulièrement riche en Afrique tropicale.*

▼ **Zerynthia polyxena** *est une petite espèce répandue du midi de la France à l'Asie Mineure ; sa chenille vit sur les aristoloches des friches et du bord des torrents (×2).*

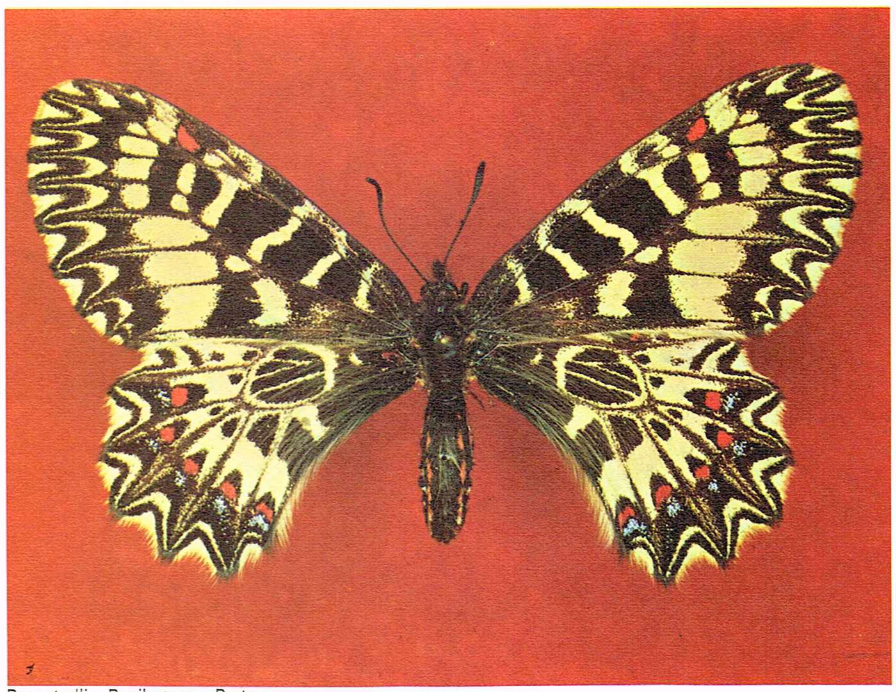

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

La vaste famille cosmopolite des **Satyridés** souvent considérée avec les trois précédentes comme sous-famille des Nymphalidés, compte cent dix espèces en Europe, celles des genres *Erebia* et *Oeneis* étant essentiellement montagnardes ou boréales. Les imagos portent des antennes grêles et courtes ; ils sont le plus souvent de taille moyenne, leurs ailes sont de coloration jaunâtre ou brunâtre, presque toujours ornées d'ocelles, et chez le mâle, de taches androconiales, les nervures sont fréquemment renflées à la base de l'aile antérieure. Le vol des Satyridés est peu rapide, mais zigzagant, afin d'échapper aux prédateurs éventuels ; ils préfèrent souvent les endroits ombragés ; certaines espèces tropicales sont même crépusculaires, ou nocturnes, la ponte a parfois lieu au vol.

Les chenilles fusiformes, avec deux pointes sur le segment anal, vivent surtout sur les Graminées ; les chrysalides sont suspendues, ou libres au sol.

La famille des **Nymphalidés** est une famille cosmopolite riche en espèces spectaculaires, présentant fréquemment un polymorphisme saisonnier ou géographique. Les ailes de ces Papillons, plus ou moins hyalines chez les *Acraea* éthiopiens, portent souvent des écailles androconiales, odorifiques ; la paire de pattes antérieures est atrophiée dans les deux sexes, à l'exception des femelles de Libythéinés. Les chenilles s'ornent de tubercules d'ordinaire spiniformes ou ramifiés ; les chrysalides succeintes ont souvent des taches métalliques ou nacrées. Parmi les plus brillants Nymphalidés, citons les *Agrias* et les *Prepona* des forêts de l'Amérique du Sud, les *Charaxes* surtout éthiopiens mais représentés en Europe méridionale par le pacha-à-deux-queues, *Charaxes jasius.* Connus de tous, les vanesses, les nacrés constituent la parure ailée des fleurs de nos jardins et de nos prairies durant la belle saison.

La famille des **Riodinidés** compte environ mille cinq cents espèces, surtout néotropicales, aux couleurs souvent brillantes.

La famille des **Lycénidés** est constituée par de très nombreuses espèces généralement petites, présentant fréquemment un fort dimorphisme sexuel. Les antennes sont ordinairement annelées de blanc, les pattes prothoraciques sont fonctionnelles, dépourvues, chez le mâle, de l'une ou des deux griffes ; les poils androconiaux sont fréquents aux deux ailes. Les Lycénidés, de mœurs diurnes sauf rares exceptions, ont un vol rapide, tourbillonnant, mais court. Les chenilles sont en forme de cloporte et à tête rétractile, elles portent souvent trois organes glandulaires exsertiles myrmécophiles sur les septième et huitième urites, car les fourmis sont friandes de leurs sécrétions. Ainsi la chenille de l'arion, *Maculinea arion,* d'abord phytophage, pénètre bientôt dans une fourmilière et s'y nymphose. Les chrysalides sont courtes et mobiles, succeintes ou libres. Des trois mille espèces que compte cette famille cosmopolite, mais surtout tropicale, on en connaît une centaine en Europe appartenant aux Théclinés, aux ailes généralement brunâtres, les postérieures étant munies de petites « queues », aux Lycéninés, les brillants cuivrés des anciens auteurs, et aux Plébéinés, vulgairement appelés « argus bleus », ou petits-bleus, en raison de leur coloration et des nombreux ocelles ornant le dessous des ailes ; la plupart d'entre eux présentent un dimorphisme sexuel prononcé, leurs femelles étant brunes.

Ordre des Diptères

D'origine grecque (di-ptère : à deux ailes), le nom de Diptères désigne les mouches et les moustiques du langage commun, que caractérise à l'état adulte la possession d'une seule paire d'ailes, sur le deuxième segment thoracique. Profondément modifiées, les ailes postérieures, que l'on observe sur le troisième segment thoracique, constituent des « balanciers » ou « haltères » ; leur fonction est purement sensorielle, bien qu'ils vibrent comme les ailes pendant le vol.

L'appareil buccal de ces Insectes sert uniquement à sucer : il forme une « trompe », avec laquelle ils aspirent soit des liquides libres, soit des liquides (sang, hémolymphe, etc.) circulant dans le corps de certains Animaux, mais jamais de sève. Quoique le plus souvent composée des mêmes pièces fondamentales, la trompe des Diptères présente une extrême diversité suivant les espèces et peut atteindre, chez les mouches domestiques par exemple, une grande complexité. La même remarque s'applique à la plupart des autres parties du corps. De tous les Insectes, les Diptères sont ceux dont l'évolution des formes et des structures est parvenue à son plus haut degré.

Du point de vue de l'homme aussi, les Diptères ont sans doute plus d'importance qu'aucun des autres groupes

d'Insectes. Certains, très communs, répandus sur la terre entière et connus de tout le monde, fréquentent en permanence ou presque les habitations. Ce sont surtout les mouches domestiques, dont on connaît d'assez nombreuses espèces; on doit les considérer non seulement comme importunes, mais aussi comme dangereuses. Elles se développent en effet dans les matières organiques en décomposition puis, devenues adultes, se nourrissent aussi bien de liquides putrides que du jus de nos denrées alimentaires, véhiculant ainsi des uns aux autres des germes pathogènes. Beaucoup plus importants encore sont les Diptères hématophages (divers moustiques, les taons, les glossines ou mouches tsé-tsé, etc.), dont bon nombre transmettent à l'homme et aux Animaux domestiques les agents de maladies graves, telles que la fièvre jaune, le paludisme ou la maladie du sommeil. Le moustique anophèle, principal vecteur du paludisme, a, depuis la plus haute antiquité, influé sur la répartition des hommes dans de vastes contrées. Son incidence sur l'histoire de l'humanité fut considérable. Ainsi, la décadence de la civilisation grecque, puis celle de l'Empire romain ont eu pour cause majeure des extensions de l'aire habitée par les anophèles, donc du paludisme.

▼ *Un Asilidé vu de face; c'est un Brachycère Hétérodactyle, mouche prédatrice d'autres Insectes.*

J. Carayon

Parmi les ennemis des plantes cultivées, on compte aussi beaucoup de Diptères. Cependant il ne faudrait pas conclure que tous les représentants de cet ordre sont nuisibles. La majorité d'entre eux n'a aucune importance médicale ou économique. Quelques-uns même rendent service à l'homme; ainsi les Drosophiles ou mouches du vinaigre, utilisées comme animaux de laboratoire, ont servi l'essor de la génétique.

On connaît aujourd'hui près de cent mille espèces de Diptères réparties dans le monde entier, mais ce nombre est certainement très inférieur à la réalité, car, surtout dans les régions tropicales, bien des groupes sans intérêt immédiat pour la médecine ou l'agriculture n'ont encore été que fort peu étudiés alors qu'ils sont très riches en représentants. Chaque année, même en France, ou dans d'autres pays d'Europe, on découvre de nouvelles espèces.

Les Diptères peuvent s'adapter aux conditions de vie les plus difficiles. Certains vivent et se reproduisent à moins de 1 000 km du pôle Nord, et d'autres en montagne à plus de 4 000 m d'altitude; d'autres encore peuplent les déserts les plus arides, vivant aux dépens d'autres Insectes et de Vertébrés (excréments et charognes).

C'est surtout à l'état de larves que les Diptères manifestent un pouvoir d'adaptation écologique qui n'a d'égal dans aucun autre groupe d'Insectes. Si la majorité de ces larves fréquente les matières organiques en décomposition, beaucoup d'entre elles se développent à l'intérieur de plantes ou d'Animaux vivants, et certaines arrivent à subsister dans des milieux aussi inattendus que des sources thermales, des mares de pétrole, voire même les pièces anatomiques conservées dans du formol presque pur.

Les Diptères, dont la taille varie de moins d'1 mm à plus de 5 cm, avec une envergure de 100 mm chez les géants de l'ordre (certains Midaïdés américains), possèdent beaucoup d'espèces extraordinairement riches en individus. On a l'occasion de le constater dans certaines circonstances, lorsqu'ils forment des essaims gigantesques ou tapissent d'une couche épaisse le sol et les murs des habitations. A tel point que des dizaines de kilogrammes d'adultes de la même espèce peuvent être récoltés alors que chaque individu pèse tout au plus quelques centigrammes.

Chez les Diptères dits inférieurs parce qu'ils conservent nombre de caractères primitifs, les pupes sont souvent abritées dans un cocon de soie, pure ou mêlée à des particules empruntées au milieu.

Chez les représentants les plus évolués de l'ordre, c'est la vieille cuticule ou exuvie de la dernière larve qui, au lieu d'être rejetée, persiste autour de la pupe et durcit de façon à former un étui protecteur rigide, le *puparium*. Au moment de l'éclosion imaginale, l'Insecte, pour sortir du puparium, en provoque l'ouverture suivant des lignes de déhiscence préformées. Dans le groupe des Orthorrhaphes (dérivé du grec, ce terme signifie « à fente droite ») les lignes de déhiscence dessinent un T, tandis que chez les Cyclorrhaphes (à fente circulaire), elles délimitent une calotte antérieure qui se soulève comme un couvercle. C'est par des augmentations brusques du volume de son corps que la jeune mouche provoque l'éclatement du puparium. Ces augmentations sont tantôt générales et résultent surtout d'importantes absorptions d'air dans le tube digestif, tantôt localisées à la tête, dont le volume peut doubler, grâce à la présence, chez les Diptères les plus évolués, d'un sac interne évaginable, le *ptilinum*. Un rapide afflux de sang dans la tête le fait saillir à l'extérieur et le rend turgide. Ce phénomène résulte d'un brutal accroissement de la pression sanguine provoqué par la contraction violente de la paroi abdominale, grâce à des muscles particuliers qui régressent après l'éclosion.

Les Diptères, où l'on distingue les *Orthorrhaphes* et les *Cyclorrhaphes* d'après la forme de la fente d'éclosion imaginale, se divisent en deux groupes différents : les *Nématocères* et les *Brachycères*, d'après le nombre des articles antennaires, supérieur à sept chez les premiers, égal ou inférieur à six chez les seconds. La combinaison de ces deux caractères amène à répartir les Diptères en trois sous-ordres ainsi que l'indique le tableau suivant :

Antennes	Fente d'éclosion imaginale	Sous-ordres
NÉMATOCÈRES	ORTHORRHAPHES	NÉMATOCÈRES
BRACHYCÈRES *sensu lato*		BRACHYCÈRES *sensu stricto*
	CYCLORRHAPHES	CYCLORRHAPHES

Dans la mesure où la morphologie des Diptères est extrêmement diverse et souvent fort compliquée, on pourra seulement indiquer les caractères de quelques types principaux, pour la systématique ou la biologie.

Chez l'*imago* la tête, souvent subsphérique, toujours très mobile et bien distincte du thorax auquel la réunit un cou mince, porte des yeux composés volumineux, où l'on dénombre, chez la mouche domestique, près de quatre mille ommatidies. Surtout chez les mâles, il n'est pas rare que ces yeux soient développés à un point tel qu'ils occupent la plus grande partie de la tête et se touchent sur la ligne médiane. On observe généralement trois ocelles, disposés en triangle sur le vertex. Comme les sutures et repères morphologiques habituels sont effacés ou très modifiés, les régions céphaliques des Diptères se comparent difficilement entre elles et à celles des autres Insectes; aussi, les noms qu'on leur donne varient-ils suivant les groupes considérés. La plus caractéristique des régions est la « face », délimitée surtout en arrière par ce que l'on appelle un peu improprement la « suture frontale », fente en ∧ ou en ∩ d'où sort le ptilinum au moment de l'éclosion imaginale et qui n'est plus utilisée par la suite. Appliquées contre la face, les antennes sont constituées chez les Cyclorrhaphes de trois articles, dont le dernier, de beaucoup le plus grand, porte bien avant son extrémité une soie particulière nommée *arista*. Celle-ci représente une file de petits articles devenus coalescents, mais d'ordinaire encore visibles chez les Brachycères, où ils constituent le *style* annelé, qui, dans ce groupe, prolonge directement trois grands articles basaux dissemblables. Quant aux antennes des Nématocères, elles sont en général longues, minces et composées de nombreux articles peu ou pas différents les uns des autres.

Les pièces buccales des Diptères appartiennent à des types extrêmement variés, mais se montrent toujours adaptées à la prise d'aliments liquides. On y reconnaît en général : le *labre*, dorsalement sclérifié et ventralement membraneux, les *mandibules*, transformées en stylets chez les formes hématophages et régressées chez les autres, les *maxilles* diversement modifiées, munies d'un lobe unique, la *galea*, et de palpes dont le nombre d'articles varie de quatre ou cinq chez les Nématocères à un ou zéro chez les Cyclorrhaphes, le *labium*, allongé, pourvu distalement d'une paire de *labelles* qui représentent probablement des palpes labiaux modifiés. Surtout chez les Diptères supérieurs, de fines gouttières presque closes s'observent en nombre à la surface des labelles; par la présence dans leur paroi d'anneaux cuticulaires (ici incomplets) régulièrement disposés, elles rappellent des trachées; aussi les nomme-t-on « pseudotrachées »; ce sont elles qui, par capillarité et par aspiration, prélèvent les liquides alimentaires lorsque les appareils buccaux, comme par exemple la trompe de la mouche domestique, appartiennent au type lécheur. Les pseudotrachées sont très réduites, sinon absentes, dans la trompe des Diptères hématophages, dans celle des moustiques notamment, où le labium constitue un étui logeant les mandibules et les maxilles transformées en stylets vulnérants auxquels s'ajoutent un stylet hypopharyngien et le labre également transformé en pièce perforante.

Le thorax est caractérisé par le grand développement de son segment médian, qui porte les ailes, et par la réduction du prothorax et du mésothorax. Le *mésonotum* occupe presque toute la face dorsale; il se divise en *préscutum*, *scutum* et *scutellum*, les deux premières régions étant séparées par une *suture transverse*, complète seulement dans le groupe des Tipuliformes, où elle présente la forme d'un V. Les pleures thoraciques, formés chez les Nématocères et les Brachycères d'éléments comparables à ceux des autres Insectes, sont tellement modifiés chez les Cyclorrhaphes que leurs diverses régions, dont les homologies demeurent très incertaines, ont dû recevoir des noms particuliers. Cette désignation était indispensable car, comme d'autres parties du thorax et comme la

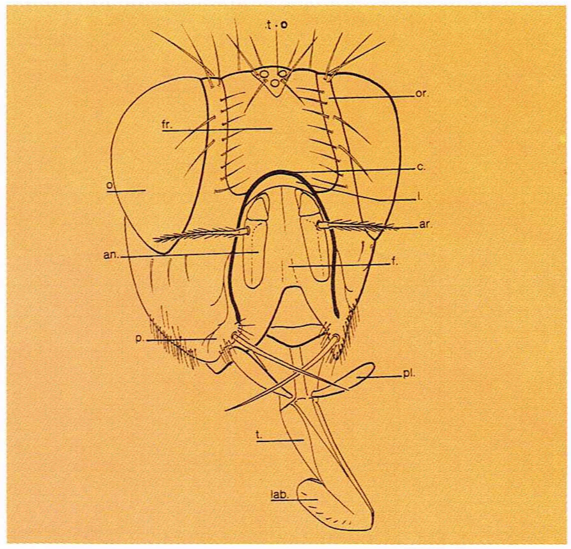

◄ ***Tête d'un Diptère Cyclorrhaphe Schizophore : an, antenne; ar, arista; c, cicatrice frontale; f, face; fr, front; l, lunule; lab, labelles; o, œil composé; or, orbite; p, péristome; pl, palpe labial; t, trompe; t. o, triangle ocellaire.***

▼ ***Microphotographies de l'appareil buccal de Diptères : à gauche, chez un moustique femelle (× 25); au centre, chez un moustique mâle (× 18); à droite, trompe de la mouche* Eristalis tenax *(Cyclorrhaphe Syrphidé) [× 14].***

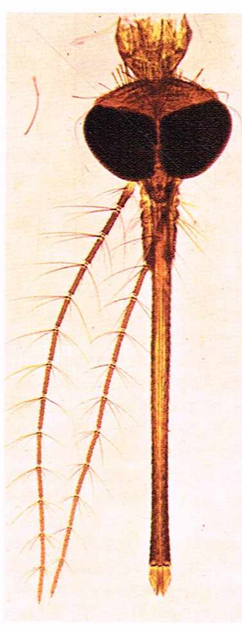

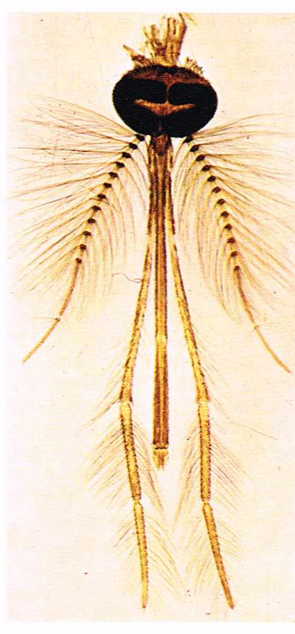

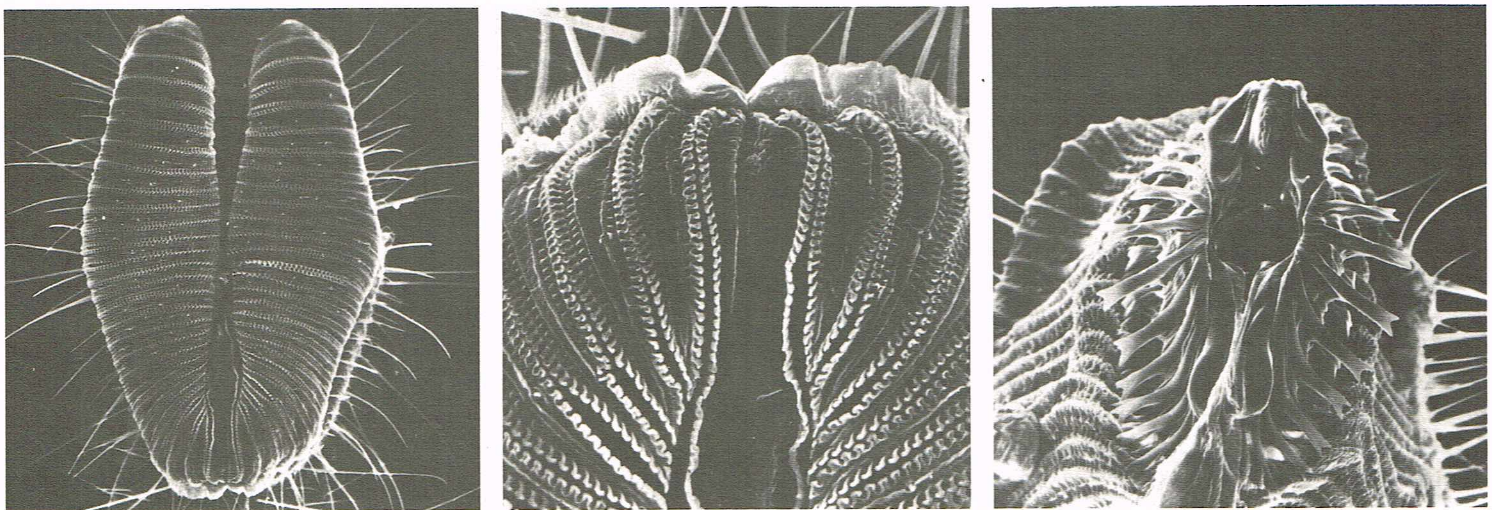

J. Carayon J. Carayon J. Carayon

▲ *Micrographies électroniques de l'extrémité de la trompe en extension de mouches bleues : chez* Calliphora erythrocephala, *on voit, à gauche, les deux « labelles » largement étalés (× 100); au centre les pseudotrachées (× 900) qui par capillarité et aspiration absorbent les liquides alimentaires; à droite, la « bouche » de* Calliphora vomitoria *est entourée de petites dents capables de râper la viande pour en extraire les sucs (× 200) [document obtenu au microscope à balayage du Laboratoire de géologie du Muséum].*

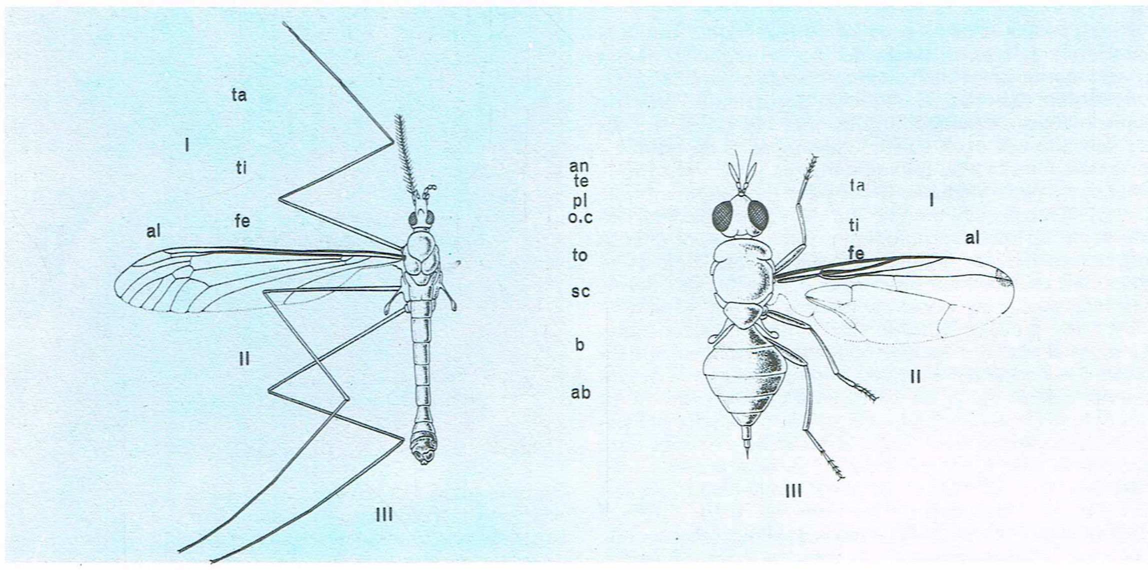

I.G.D.A.

▶ *Principales parties du corps, en vue dorsale, chez un Diptère Nématocère* (Tipula) *à gauche; chez un Diptère Cyclorrhaphe* (Dacus) *à droite : ab, abdomen; al, aile; an, antenne; b, balancier; fe, fémur; o. c, œil composé; pattes I : antérieures, II : moyennes, III : postérieures; pl, palpe labial; sc, scutellum; ta, tarse; te, tête; ti, tibia; to, thorax.*

tête, elles portent de grandes soies sensorielles, les *macrochètes*, dont le nombre et la répartition fournissent des caractères indispensables pour la systématique du sous-ordre.

Toujours membraneuses, les ailes sont rétrécies à la base, où se trouve un lobe particulier, l'*alule* chez les Cyclorrhaphes, dont certains, nommés pour cette raison « Calyptères », possèdent en outre dans la même région deux lamelles semi-circulaires superposées, les *cuillerons*. Chez les Diptères inférieurs, la nervation alaire, assez proche du type primitif (mécoptéroïde), ne montre que peu de nervures transverses. Très diversifiée dans l'ensemble de l'ordre, la nervation a une grande importance pour la systématique. D'assez nombreux Diptères commensaux, parasites, cavernicoles ou encore ceux qui habitent des endroits très exposés aux vents, notamment dans les îles, ont des ailes réduites, voire absentes. Les haltères, ou balanciers, représentent les ailes postérieures transformées comme le prouve, entre autres, l'existence chez les Drosophiles de mutants « tétraptères » possédant à la place des balanciers de petites ailes métathoraciques. Inversement, une autre mutation peut changer les ailes antérieures en balanciers. Très mobiles, animés pendant le vol de rapides mouvements giratoires ou oscillants, les haltères servent de stabilisateurs de direction; leur fonctionnement est analogue à celui des compas gyroscopiques. Dans le renflement de leur base, de nombreuses terminaisons sensorielles campaniformes se trouvent groupées sous des dômes de cuticule mince, dont les moindres déformations, à l'occasion d'un changement dans la direction du vol, les stimulent. Les influx correspondants, directement transmis au cerveau par un gros nerf, informent l'Insecte sur ces changements, qui peuvent être corrigés en cas de nécessité.

Les pattes ne montrent que rarement des modifications adaptatives. Leurs tarses, toujours composés de cinq articles, portent à l'extrémité des griffes souvent robustes et une paire de *pulvilles* membraneux, garnis de poils adhésifs, lesquels permettent aux mouches de se promener sur un plafond ou de grimper le long d'une vitre. Chez les Brachycères on observe entre les pulvilles tantôt une languette également membraneuse, l'*arolium*, qui caractérise les « Homéodactyles », tantôt une soie fine, l'*empodium*, qui caractérise les « Hétérodactyles ».

Selon les groupes, l'abdomen comporte un nombre variable de segments visibles. Élevé chez certains Nématocères, où l'on repère encore les urites II à XI (le premier étant déjà très réduit), ce nombre passe à quatre ou cinq chez les Diptères supérieurs. Toutefois, la plupart des segments apparemment manquants sont en fait rétractés d'ordinaire dans l'abdomen. Ceux de rang VI à X constituent chez les femelles un ovipositeur télescopique, saillant à l'extérieur sous la forme d'un long tube au moment de la ponte. Chez les mâles, l'*hypopygium* se compose des urites VIII et IX modifiés, qui portent les *genitalia*. Il est souvent tordu en permanence de 180°, de sorte que l'anus devient ventral par rapport à l'orifice génital. Parfois, la torsion atteignant 360°, l'orifice génital retrouve sa position ventrale.

Les caractères anatomiques offrent, eux aussi, une grande diversité et leur complexité s'accroît souvent beaucoup quand on passe des Nématocères aux Cyclorrhaphes. Ainsi, le tube digestif, presque droit chez les premiers, long et tortueux chez les Brachycères, est plus riche encore en circonvolutions chez les Cyclorrhaphes, où existe un *jabot*, diverticule œsophagien permettant la mise en réserve de la nourriture; il est très développé chez les espèces hématophages. Dans le système nerveux

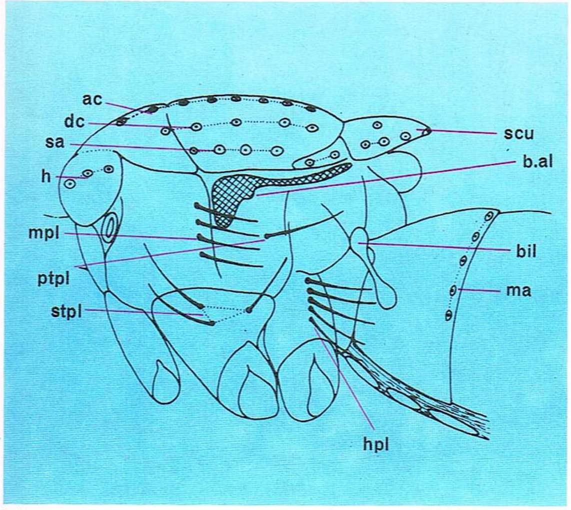

I.G.D.A.

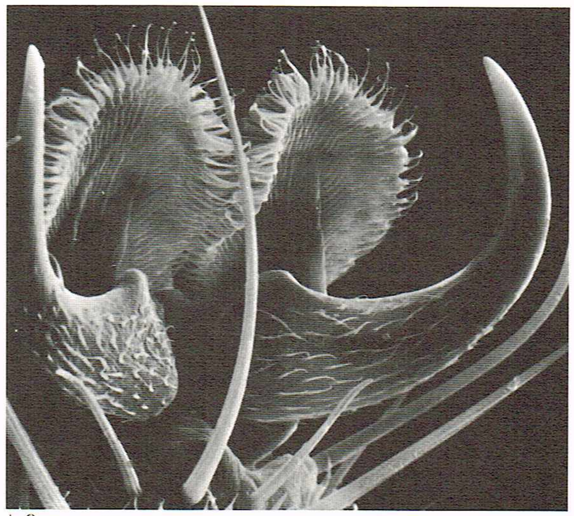

J. Carayon

◀ *A gauche, schéma du thorax d'un Diptère Cyclorrhaphe, en vue latérale, montrant les divers groupes de soies dont seules les bases sont représentées par un cercle avec un point central : ac, soies acrosticales ; b, balancier ; b. al, base de l'aile ; dc, soies dorso-centrales ; h, soies humérales ; hpl, soies hypopleurales ; ma, macrochètes abdominaux ; mpl, soies mésopleurales ; ptpl, soies ptéropleurales ; sa, soies supra-alaires ; scu, scutellum ; stpl, soies sternopleurales. A droite, micrographie électronique de l'extrémité d'une patte de mouche bleue* (Calliphora erythrocephala) *: à la base des griffes, on voit des pulvilles, sacs membraneux aplatis, pourvus de poils adhésifs, grâce auxquels les mouches peuvent se déplacer sur différents plans (document obtenu au microscope électronique à balayage du Laboratoire de géologie du Muséum).*

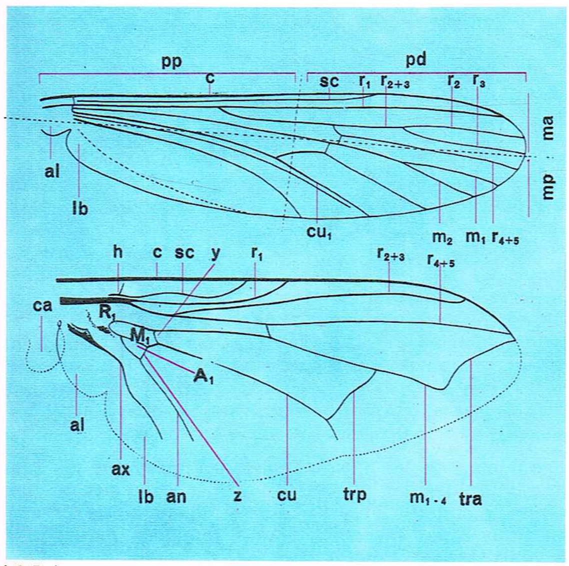

I.G.D.A.

◀ *Ailes d'un Diptère Nématocère (en haut) et d'un Diptère Cyclorrhaphe (en bas). Régions alaires : al, alule ; ca, cuilleron (ou « calyptre ») alaire ; lb, lobe anal ; ma, moitié antérieure ; mp, moitié postérieure ; pd, partie distale ; pp, partie proximale. Nervures : c, costale ; sc, sous-costale ; r1, r2, r3, r4, r5, rameaux de la radiale (r 2 + 3, r 4 + 5, nervures formées par fusion) ; m1, m2, etc., rameaux de la médiane, parfois fusionnés (m1 — 4) ; cu, cubitale ; an, anale ; ax, axillaire ; tra, transverse antérieure ; trp, transverse postérieure ; h, y, z, transverses h, y, z. Cellules : R 1, cellule radiale basale ; M 1, cellule médiale basale ; A 1, cellule anale basale.*

également, on trouve tous les intermédiaires entre l'état primitif des Nématocères, aux ganglions abdominaux et thoraciques séparés, et la concentration ganglionnaire en une seule masse thoracique des Cyclorrhaphes. Chez ces derniers, une condensation comparable a groupé corps allates et corps cardiaques sous forme de l'*anneau de Weismann*.

L'appareil reproducteur ne présente de particularités notables que chez les femelles. Les ovaires se composent d'ovarioles polytrophiques qui, nombreux chez les Diptères ovipares — on en compte jusqu'à une centaine —, le sont beaucoup moins (trois ou quatre, parfois un seul) chez les Diptères vivipares. Le vagin porte une à trois spermathèques. Dans le cas relativement fréquent de certains Cyclorrhaphes, une dilatation plus ou moins localisée le transforme partiellement, soit en *chambre incubatrice* abritant les œufs qui s'y développent jusqu'à l'éclosion, soit en utérus dans lequel une larve, nourrie par la sécrétion des glandes annexes, demeure jusqu'à la pupaison.

Chez tous les Diptères, le sexe mâle est digamétique XY, avec un nombre diploïde d'autosomes le plus souvent égal à dix dans les groupes supérieurs. L'intérêt considérable que présente l'étude des Diptères en matière de génétique tient notamment à l'existence de chromosomes polytènes « géants », surtout dans leurs glandes salivaires.

Le système trachéen mérite d'être mentionné à cause du grand développement des sacs aériens chez les Diptères supérieurs et de la variabilité dans l'ensemble de l'ordre du nombre des stigmates abdominaux.

Les *larves* de Diptères présentent une grande gamme de formes correspondant à leur extrême diversité écologique. Toujours dépourvues de pattes vraies, elles se déplacent grâce à des formations secondaires très variées : pseudopodes, papilles, saillies tégumentaires couvertes de spinules, palettes de poils, spatule sternale, etc.

Leur tête n'est bien apparente que chez un petit nombre de familles de Nématocères (chez les Culicidés par exemple), dont les larves sont dites « eucéphales ». A l'opposé, les larves « acéphales » des Cyclorrhaphes, communément appelées asticots, semblent dépourvues de tête ; en réalité des éléments plus ou moins reconnaissables de celle-ci se trouvent invaginés dans le thorax. Entre les deux extrêmes, il existe de nombreux intermédiaires groupés sous le nom de larves « hémicéphales ». Les antennes comportent de un à six articles semblables, réduits à une simple papille dans le cas des Diptères supérieurs. Chez les larves de certains Nématocères, les pièces buccales, très diverses, ne gardent qu'une conformation de type général avec un labre bien délimité, des mandibules développées, mobiles dans un plan horizontal, des maxilles pourvues d'un lobe unique et d'un palpe, et un labium sans palpe. Chez les autres Diptères, les pièces buccales, caractérisées par des mandibules mobiles dans un plan vertical, ont subi des modifications plus ou moins profondes et constituent, dans le groupe des Cyclorrhaphes surtout, un appareil très particulier dit céphalo-pharyngien ou, plus simplement, *armature buccale*. A l'avant, on y voit une paire de crochets qui correspondent aux maxilles, et s'articulent sur un *sclérite hypostomal* suivi d'une *pièce basale* formée de deux grandes lames verticales, unies ventralement en une gouttière où passe le pharynx. Divers éléments du squelette interne de la tête entrent dans la composition de ces pièces, dont les homologies ne sont pas encore connues avec certitude. La forme des crochets, très utilisée pour la systématique, peut donner aussi des indications sur le régime alimentaire. Les larves de nombreux Nématocères portent sur le labre une paire de pièces mobiles, pourvues

A. Margiocco

◀ *Nervation réelle d'une aile de mouche domestique.*

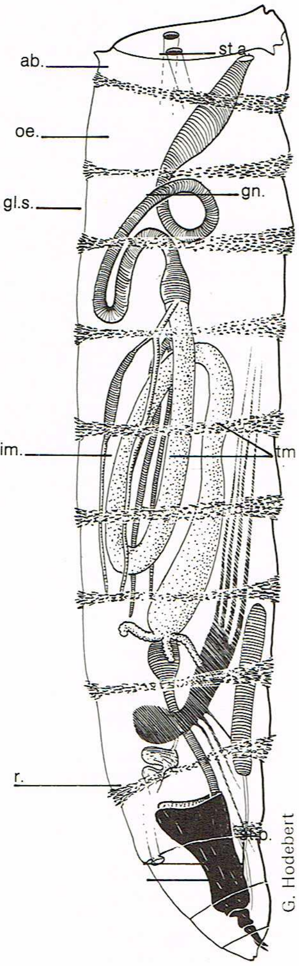

▲ *Aspect général et organes internes (vus par transparence) d'une larve « acéphale » de Diptère Cyclorrhaphe (asticot) : ab, crochets et sclérites constituant l'« armature buccale »; gl. s, glandes salivaires; gn, ganglions nerveux condensés en une seule masse; im, intestin moyen; oe, œsophage; r, rectum; st. a, stigmates antérieurs; st. p, stigmates postérieurs; tm, tubes de Malpighi.*

▲▶ *En haut, pupe d'un Cyclorrhaphe Syrphidé du genre* Microdon, *parasite des fourmis; en bas, pupe de moustique du genre* Anopheles *(un des rares cas de pupes aquatiques mobiles, nageant grâce aux palettes placées à l'extrémité de l'abdomen).*

de longues soies et appelées improprement « prémandibules »; bien qu'intervenant dans la prise de nourriture, ces pièces ne sont pas des appendices buccaux, au sens strict du terme.

En arrière de la tête, le corps comprend douze segments, trois thoraciques et neuf abdominaux; le nombre des segments apparents est souvent plus ou moins réduit.

Le système trachéen, très varié, fournit de nombreux caractères importants pour la systématique; le nombre et la disposition des stigmates fonctionnels permettent de définir différents types, dont voici les principaux. Le type *holopneustique*, qui comprend dix paires de stigmates dont une mésothoracique, une métathoracique, et huit abdominales se rencontre chez les larves de Bibionidés par exemple. Le type *péripneustique*, avec ses neuf paires de stigmates dont une mésothoracique et huit abdominales, se rencontre chez les larves de Cécidomyidés. Le type *amphipneustique* comporte deux paires de stigmates, une mésothoracique, et une sur le dernier segment abdominal; les larves de Psychodidés possèdent ces caractères. Dans le type *métapneustique*, on n'observe qu'une seule paire de stigmates situés sur le dernier segment abdominal; les larves de Culicidés et de beaucoup d'autres Diptères appartiennent à ce type. Le type *apneustique* est dépourvu de stigmates fonctionnels; c'est le cas des larves de Chironomidés. Dans ce dernier cas, la respiration est cutanée, souvent facilitée par la présence soit de trachéo-branchies, soit de branchies sanguines.

Fréquemment, les stigmates, les postérieurs surtout, sont entourés de plaques sclérifiées, de formations sensorielles, de dispositifs protecteurs variés ou encore, chez les formes aquatiques, des siphons respiratoires. Ceux-ci, de forme parfois télescopique, et, dans leur taille maximale, six fois plus longs que le corps dans le cas des Éristales, permettent généralement à la larve d'atteindre la surface de l'eau, tout en restant immergée. Certaines larves, entre autres celles des moustiques du genre *Mansonia*, possèdent des siphons perforants qu'elles enfoncent dans les racines ou les tiges de plantes aquatiques, pour y prélever l'air des lacunes aérifères.

Les caractères anatomiques des larves ressemblent à ceux des adultes, du moins en ce qui concerne l'appareil digestif et le système nerveux. Les glandes salivaires et les glandes mandibulaires sont particulièrement développées chez les larves, chez qui les secondes sécrètent assez souvent de la soie. Celle-ci sert à fabriquer les tubes des Chironomidés par exemple ou les toiles de certains Mycétophilidés.

Les *pupes*. Le nombre des stades larvaires est d'ordinaire plus élevé chez les Nématocères (six ou sept pour les simulies et quatre pour les moustiques) et chez les Brachycères (de cinq à huit) que chez les Cyclorrhaphes. Les larves de ces derniers muent deux fois seulement avant de s'enfermer dans leur puparium, où néanmoins s'opère souvent une troisième mue, celle-là restant invisible. Ce puparium des Cyclorrhaphes, présent aussi chez les Brachycères Stratiomyidés, mais de structure assez différente, n'est autre que l'exuvie du dernier stade larvaire apparent. Non fendue et rejetée comme d'ordinaire, elle est devenue dure au point de constituer une coque résistante, à l'abri de laquelle ont lieu les transformations en pupe, puis en imago. Exarates chez les Cyclorrhaphes, les pupes des Diptères sont généralement obtectées, et parfois protégées dans un cocon soyeux. Elles possèdent assez souvent des formations particulières, développées surtout chez les pupes aquatiques dont elles assurent la respiration (branchies chez les simulies, « cornets » respiratoires thoraciques chez les moustiques, etc.), voire la locomotion. On sait, en effet, que les pupes de nombreux moustiques nagent très activement. Chez les Orthorrhaphes, la sortie de l'imago s'opère par une fente en T de l'exuvie pupale, et chez les Cyclorrhaphes par une fente circulaire du puparium.

Biologie

Chez les imagos, et plus encore chez les larves, la biologie des Diptères est si diverse qu'il faut là encore se limiter aux faits généraux les plus caractéristiques.

Imagos. Les Diptères adultes sont tous terrestres, à la seule exception du Chironomidé *Pontomyia pacifica*, dont la vie entière se passe en pleine mer. Douze familles ont des représentants qui habitent les rivages marins;

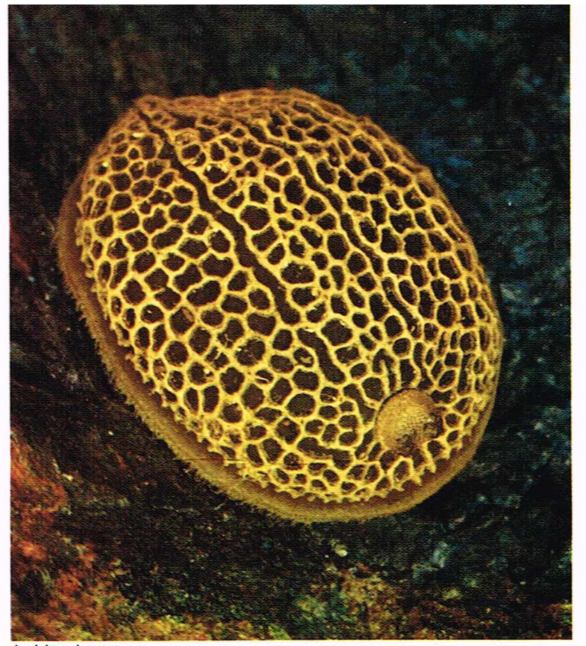

A. Margiocco

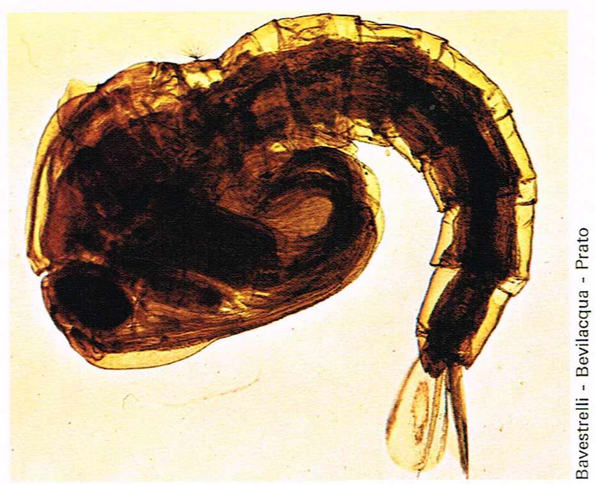

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

parmi ceux-ci les Chironomidés se montrent les plus nombreux. Depuis le bord de la mer jusqu'aux glaciers en haute altitude, il n'y a guère de milieux où ne puissent se trouver ces Insectes. Hormis quelques moustiques, les imagos de Diptères sont généralement diurnes. La majorité d'entre eux fréquente les fleurs et se nourrit de nectar ou d'autres liquides sucrés. Beaucoup d'espèces recherchent les matières organiques en décomposition, tout en étant également floricoles, ce qui témoigne ainsi d'un régime alimentaire fort étendu. Les représentants des familles des Cératopogonidés, Blépharocéridés, Rhagionidés, Empididés et Asilidés sont tous, ou presque, des prédateurs et capturent d'autres Insectes. Quant aux Diptères hématophages, ils se répartissent en deux grands groupes : les uns, qui appartiennent aux familles des Culicidés, Simuliidés, Tabanidés, Carnidés, Muscidés et au groupe des Pupipares, se nourrissent du sang de Vertébrés, les autres, membres des familles des Cératopogonidés, Psychodidés et Rhagionidés, sucent aussi bien le sang d'Invertébrés que celui de Vertébrés et peuvent être également prédateurs, voire saprophages. Parmi les hématophages du premier groupe, seuls les Pupipares et les glossines (Muscidés) n'utilisent pour s'alimenter que le sang directement prélevé dans un vaisseau; les autres sont capables de subsister en absorbant nectar, jus sucrés ou liquides variés.

D'assez nombreux Diptères, commensaux ou parasites, habitent en permanence les nids d'Insectes sociaux; leurs formes sont parfois étrangement modifiées et leur biologie, incomplètement connue, semble très particulière. Certains, appartenant aux familles des Thaumatoxéniidés et des Termitoxéniidés, se trouvent dans les termitières, d'autres dans les fourmilières, et une espèce, *Braula caeca*, communément appelée pou d'abeille, vit dans les ruches. Parmi les Diptères adultes, il n'y a guère que les Pupipares qui soient parasites de Vertébrés, toujours parasites externes d'ailleurs, hormis l'un d'eux, *Ascodipteron*, dont la femelle, transformée en une masse piriforme, se tient profondément enfoncée sous la peau de chauves-souris asiatiques.

Les Diptères adultes ne sont jamais réellement grégaires bien qu'on les voie souvent rassemblés en grande quantité. Dans beaucoup de cas, leurs apparitions massives tiennent à des éclosions imaginales simultanées, comme cela se produit au printemps, par exemple pour *Bibio marci*, la mouche de saint Marc. Au contraire, quand approche la mauvaise saison, diverses espèces, voisines de la mouche domestique, se réfugient dans les maisons, envahissant parfois certaines pièces, toujours les mêmes d'une année à l'autre, sans qu'on en connaisse exactement la raison.

Bien des espèces, surtout parmi les Nématocères, forment des essaims temporaires. Tantôt, chez des simulies et des Cératopogonides hématophages, il s'agit de poursuites ou d'attaques en groupe d'un Animal à sang chaud, tantôt les essaims ne se déplacent guère, et leurs participants exécutent sur place une sorte de danse saccadée. De telles « chorégraphies » ont presque toujours une signification sexuelle. Elles font partie des comportements très divers qui, chez les Diptères, précèdent l'accouplement, et dont quelques autres importants ou fréquents méritent d'être cités.

Les *parades sexuelles*, pratiquées par d'assez nombreuses familles, sont exécutées d'ordinaire par les mâles qui, souvent, tournent autour des femelles en faisant vibrer leurs ailes d'une manière caractéristique. Parfois, la parade est plus compliquée et s'accompagne, notamment chez les Dolichopodidés, de l'exhibition de poils ornementaux que les mâles possèdent sur les pattes.

Les *offrandes nuptiales*, connues presque exclusivement chez certains Empididés, varient de manière fort intéressante suivant les espèces. Dans bien des cas, les femelles n'acceptent l'accouplement que si les mâles leur présentent une proie fraîchement capturée. La proie est offerte tantôt telle quelle, tantôt emballée dans un paquet de soie que le mâle tisse à l'aide de glandes dont sont pourvus ses tarses antérieurs. Chose curieuse, l'offrande paraît symbolique chez certaines espèces, où il suffit que le mâle présente à la femelle un ballonnet de soie vide, voire même un petit fruit soyeux rappelant vaguement ce ballonnet.

Des *phéromones* attractives ou aphrodisiaques sont produites chez le mâle ou la femelle, par des glandes particulières souvent évaginables.

L'accouplement varie considérablement quant à sa posture et sa durée ; chez bien des espèces, il ne peut se réaliser que dans des conditions précises d'éclairement, de température, d'espace disponible, etc.

Beaucoup de Diptères connaissent une fécondité extraordinairement élevée. On a calculé que, pour une mouche domestique pondant cent œufs au 1[er] mai, la descendance théorique s'élèverait, le 30 septembre de la même année, à quatre mille milliards de milliards d'individus, pesant au total plus de quarante milliards de tonnes. La ponte dépend de nombreux facteurs externes et internes, au premier rang desquels se place l'alimentation, qui doit fournir aux femelles une quantité suffisante de glucides et de protides. Ainsi, chez bien des moustiques la maturation des ovaires ne peut se faire qu'après ingestion de sang. Des odeurs précises, en général celles des milieux propices au développement des larves, attirent très souvent les femelles gravides et déclenchent l'émission des œufs. Ainsi l'odeur du crottin de cheval stimule au maximum la ponte des mouches domestiques.

Les œufs, très divers de forme et de structure, sont généralement déposés en vol, suivant des modalités constantes chez une espèce donnée, mais fort variables dans l'ensemble de l'ordre. On trouve ces œufs tantôt isolés, tantôt groupés, et ceci d'une manière quelquefois caractéristique, surtout chez les Diptères à larves aquatiques : « nacelles » des moustiques, cordons ou masses glaireuses de certains Chironomidés, etc. Les femelles des espèces dont les larves sont parasites (tachinaires, gastérophiles, hypodermes, œstres, etc.) fixent le plus souvent leurs œufs sur l'hôte, ou les enfoncent parfois dans le corps de ce dernier à l'aide de leur ovipositeur transformé en trocart. Il arrive aussi que les œufs ne soient pas pondus sur l'hôte même mais sur les feuilles de la plante qui lui sert de nourriture comme c'est le cas des œufs « microtypes » de certaines tachinaires. En Amérique tropicale, une mouche du genre *Dermatobia*, dont les larves se développent sous la peau de l'homme et des grands Mammifères, pratique une ponte indirecte fort curieuse : elle capture un moustique ou un autre Diptère hématophage, puis le relâche après y avoir fixé ses œufs, qui seront ainsi transportés par lui jusqu'à l'hôte.

Nombre de Diptères supérieurs donnent directement naissance à des larves, car les œufs se développent, sur leurs seules réserves, dans les voies génitales maternelles qui forment une « chambre incubatrice ». Chez les glossines et les Pupipares, les larves restent, jusqu'à la pupaison ou presque, dans le corps de la mère qui les nourrit avec la sécrétion de ses glandes annexes.

Certains Diptères Cécidomyidés sont capables de se reproduire à l'état larvaire, ce remarquable phénomène de *paedogenèse* se combinant à l'hétérogonie.

Les *larves* de Diptères habitent des milieux généralement très différents de ceux des imagos, et beaucoup plus variés. Du point de vue écologique, on peut les répartir approximativement en larves aquatiques et en larves terrestres, même si des intermédiaires existent entre ces deux catégories.

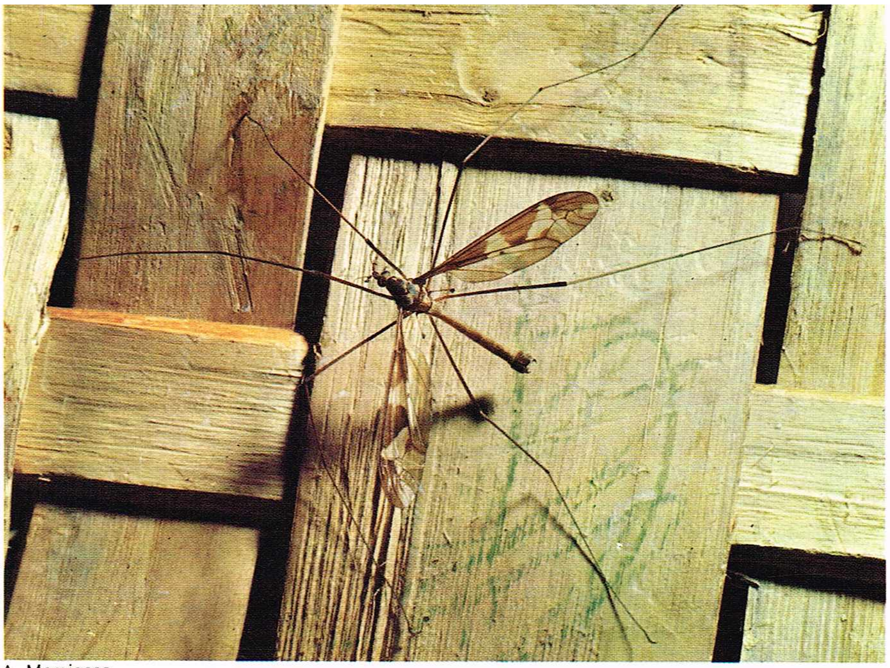

A. Margiocco

▲ *Un Nématocère Tipulidé dont on remarque les pattes longues et fragiles.*

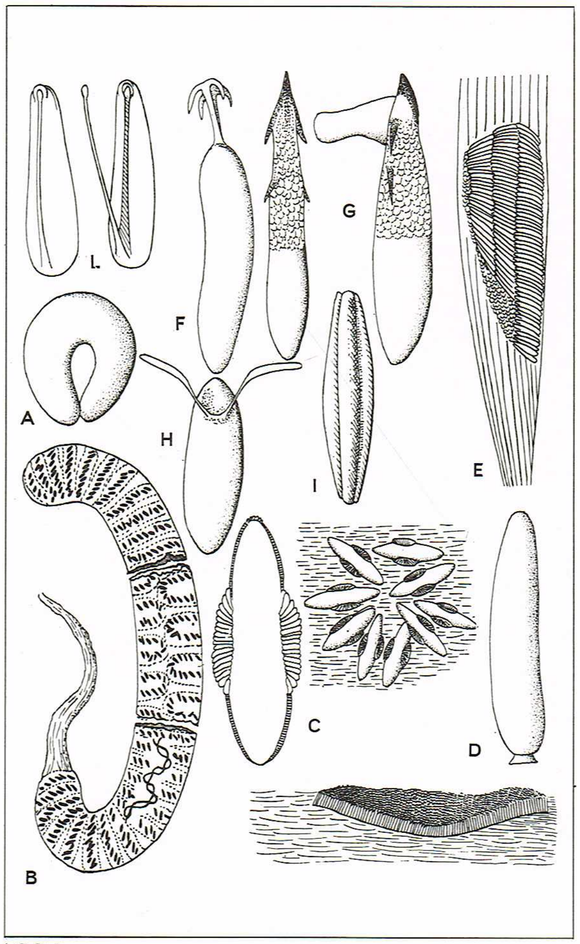

I.G.D.A.

◀ *Œufs et pontes de quelques Diptères : A, œuf en croissant d'un Nématocère Cératopogonidé* (Dasihela), *B, ponte d'un Nématocère Chironomidé* (Chironomus militaris) *dont les œufs sont groupés dans un long cordon mucilagineux déposé dans l'eau ; C, œuf fortement grossi d'un moustique du genre* Anopheles *montrant les flotteurs latéraux ; à droite, un groupe de plusieurs œufs du même moustique flottant à la surface de l'eau ; D, œuf d'un moustique du genre* Culex *et, en dessous, la « nacelle » flottante constituée par un grand nombre de ces œufs que la femelle colle les uns contre les autres lors de la ponte ; E, œufs d'un Brachycère Tabanidé* (Tabanus sp.) *déposés en trois couches superposées à la surface d'une feuille ; F, G, œufs en forme de harpon ou pourvus d'ancres chez des Diptères Conopidés (F, chez* Myopa sp., *G, chez* Spilogaster sp.) *; H, œufs de* Drosophila melanogaster *(Drosophilidés) ; I, œufs d'*Atherigona quadripunctata *(Muscidés) ; L, œufs de mouche domestique* (Musca domestica) *avant et après l'éclosion.*

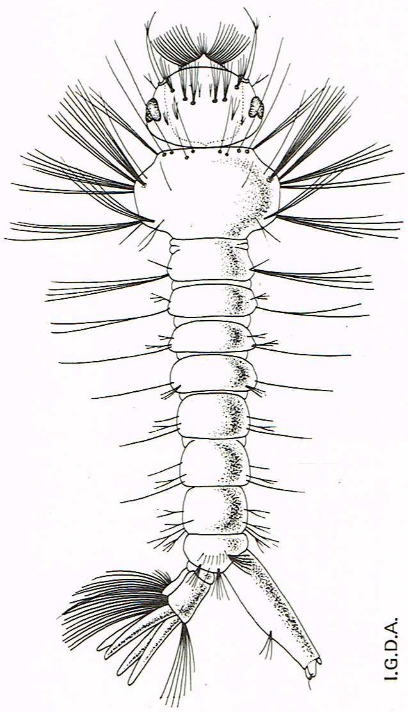

En haut, larve aquatique du moustique Aedes cinereus; en bas, larves de tipules, Diptères Nématocères primitifs, vivant dans la terre humide; la tête, fort petite, est cependant apparente et sclérifiée (type eucéphale). A, ensemble du corps de la larve de Tipula scripta; B, C, D, détails de la région postérieure de la larve de Tipula paludosa montrant en vue latérale (B) et en vue ventrale (C) le bourrelet anal et la plaque stigmatique postérieure; au centre de celle-ci, vue de face en D, s'ouvrent les deux stigmates.

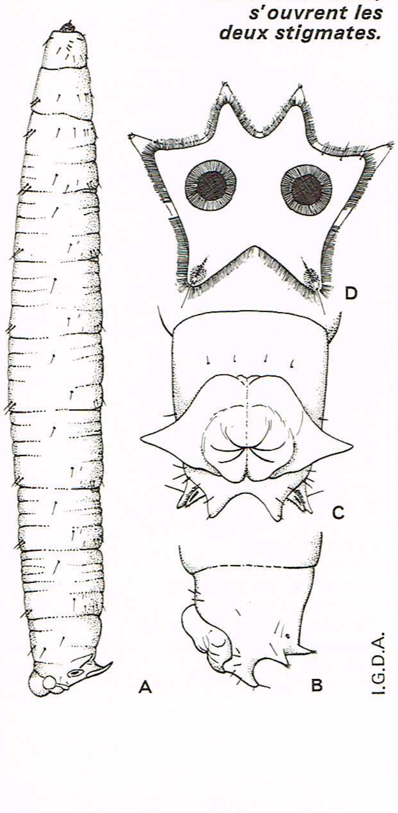

Larves aquatiques. La majoritè des larves de Nématocères et celles de nombreux Brachycéres sont aquatiques, ou parfois amphibies. Suivant les espèces, elles vivent dans des eaux courantes ou stagnantes, douces, saumâtres, marines, voire thermales. Les larves de certains moustiques n'habitent que les petites réserves d'eau, temporairement constituées au fond de récipients abandonnés ou à l'aisselle des feuilles de plantes tropicales. Bien des Diptères se développent normalement dans des liquides fermentés ou putrides. Les larves de quelques espèces supportent des conditions de vie extraordinaires; celles de l'Éphydridé *Psilopa petrolei*, par exemple, ne vivent que dans les mares de pétrole en Californie méridionale.

Larves terrestres. Les larves des Nématocères, de nombreux Brachycères et de la quasi-totalité des Cyclorrhaphes sont terrestres. Cette catégorie est donc si vaste, et si variée également qu'il faut, même dans les limites d'un simple aperçu, la subdiviser d'après les principaux régimes alimentaires.

Les larves saprophages, qui se nourrissent de matières organiques en voie de décomposition, sont les plus nombreuses; celles de quelques Bibionidés et Tipulidés peuvent subsister dans des sols secs, mais la plupart habitent la terre humide et surtout l'humus, le fumier et les milieux de même nature.

Les larves phytophages attaquent des tissus végétaux vivants et celles, nombreuses, qui s'en prennent à des plantes cultivées, peuvent être fort nuisibles. A cet égard, on trouve dans la famille des Tipulidés quelques représentants produisant des larves qui commettent de sérieux dégâts dans les prairies, parfois aussi dans les cultures de Légumineuses fourragères. Pour la plupart, les larves des Cécidomyidés vivent dans les tissus d'espèces végétales très variées, où elles causent la formation de « galles ». Beaucoup sont nuisibles, par exemple au blé *(Mayetiola)*, au poirier *(Contarinia)*, et à bien d'autres plantes cultivées. Les Chloropidés, du groupe des *Oscinis*, se développent dans les tiges de céréales, et quelques-uns comptent parmi les pires ennemis du blé et de l'avoine. Chez les Agromyzidés, voisins des précédents, les larves dites mineuses creusent de longues galeries dans les feuilles de nombreux Végétaux. Les Trypétidés, communément appelés mouches des fruits, provoquent des dommages souvent importants, en se nourrissant, à l'état larvaire, de la pulpe des fruits les plus divers, dont ils entraînent la pourriture. Certaines espèces, tel *Ceratitis capitata*, sont polyphages; d'autres, comme la mouche des olives, *Dacus oleae*, n'attaquent guère qu'une espèce végétale. Des Muscidés peu nombreux, mais de grande importance sur le plan agricole, comme *Hylemyia* et *Pegomyia*, sont capables de ravager les cultures de choux, d'oignons, et de betteraves. Leurs larves se développent surtout dans les organes souterrains, riches en réserves, et les font pourrir.

Les larves de plusieurs familles dont la principale est celle des Mycétophilidés, vivent exclusivement aux dépens de Champignons. Enfin, les larves des Pantophtalmidés, grands Diptères sud-américains, creusent des galeries dans les troncs d'arbres.

Les larves qui se nourrissent d'Animaux vivants sont les unes prédatrices, les autres parasites.

Les *larves prédatrices*, déjà relativement nombreuses parmi les formes aquatiques (des Tipulidés, beaucoup de Chironomidés et de Stratiomyidés, quelques Culicidés comme les *Megarhinus* qui dévorent les larves d'autres moustiques), sont plus fréquentes parmi les formes terrestres. Le régime carnassier apparaît général chez les Tabanidés, Asilidés, Empididés, Dolichopodidés entre autres; leurs larves attaquent à peu près tous les petits Invertébrés vivant dans le même milieu qu'elles. Il arrive que les proies soient capturées à l'aide de pièges comme par exemple les entonnoirs que les larves de *Vermileo* (Rhagionidés) creusent dans le sable ou les toiles de certains Mycétophilidés. Les larves prédatrices présentant une spécialisation alimentaire sont en minorité; on connaît surtout celles des Syrphidés Syrphinés, presque toutes inféodées aux pucerons qu'elles consomment en grandes quantités, jouant ainsi un rôle utile dans les cultures.

Les *larves parasites d'Animaux* sont fort nombreuses chez les Diptères, principalement chez les Cyclorrhaphes. Elles appartiennent à des familles entières, parfois très

J. Carayon

riches en représentants (tachinaires) ou, plus souvent, ne se rencontrent que chez certains des membres d'une famille.

On observe chez ces larves toutes les transitions possibles, de l'alimentation saprophyte ou prédatrice au parasitisme vrai, qui est tantôt facultatif et temporaire, tantôt obligatoire et permanent, avec, là encore, bien des cas intermédiaires.

La majorité des Diptères qui ont des larves parasites se développe aux dépens d'Invertébrés : Vers, Mollusques, Crustacés, Arachnides, Myriapodes et surtout Insectes. A l'exception de quelques Chironomidés dont les larves sont parasites externes de Mollusques ou d'Insectes aquatiques, il s'agit d'endoparasites vivant ordinairement dans la cavité générale de l'hôte. Le plus souvent, une seule larve habite ce dernier, mais elle en épuise toutes les réserves, et quand elle le quitte pour aller se transformer en pupe à l'extérieur, il est prêt de mourir ou, du moins, incapable de se reproduire (castration parasitaire). Les Diptères peuvent donc constituer de précieux auxiliaires lorsque leurs larves parasitent des Insectes nuisibles; c'est le cas notamment de beaucoup de tachinaires, d'autant plus efficaces que chacune de leurs espèces ne se développe en général que dans un hôte ou dans un groupe d'hôtes déterminés. D'autres familles, moins importantes, montrent également une spécificité parasitaire. Ainsi, les larves d'Oncodidés ne parasitent que des Araignées, celles des Pipunculidés, des Homoptères, et celles des Conopidés, des Hyménoptères. A l'opposé, on trouve beaucoup de Diptères capables de se développer à l'intérieur d'hôtes très divers, ou qui ne sont même des parasites que facultatifs ou occasionnels.

Les larves de Diptères qui parasitent les Vertébrés appartiennent surtout à certaines espèces de Calliphoridés et à deux petites familles d'autres Cyclorrhaphes, spécialisés dans ce genre de vie : les Gastérophilidés et les Œstridés. Ces larves provoquent chez leurs hôtes des lésions et des troubles auxquels on donne le nom de *myiases*, qui peuvent être classées d'après les organes ou les tissus attaqués en plusieurs catégories parfois peu tranchées. On range d'habitude dans l'une de ces catégories le cas fort particulier des larves hématophages qui, tel le ver des cases, *Auchmeromyia luteola*, en Afrique, sucent le sang des personnes endormies sur le sol ou celui des Oiseaux dans leur nid.

Les myiases dites cutanées sont dues à des Calliphoridés ou à des mouches proches parentes, les Cutérébridés, dont le développement s'accomplit dans le derme de l'homme et de Mammifères tant sauvages que domestiques, engendrant des tumeurs furonculeuses d'où les

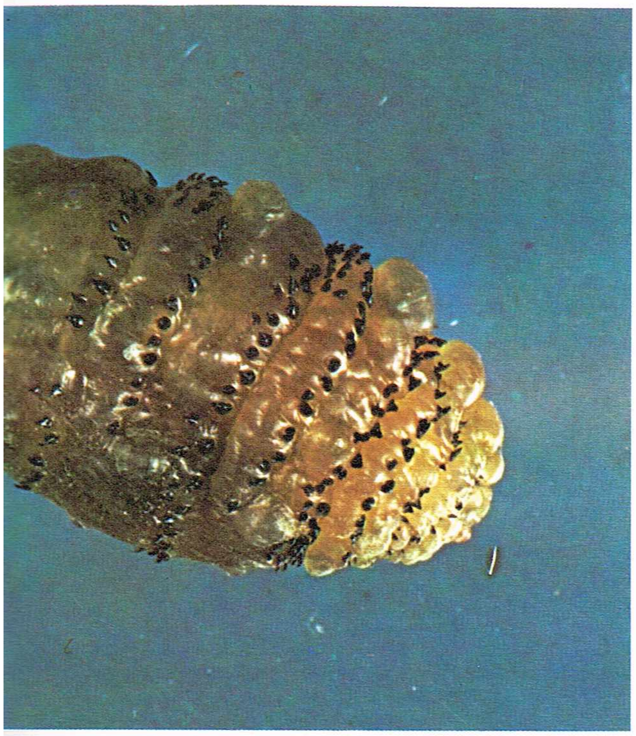

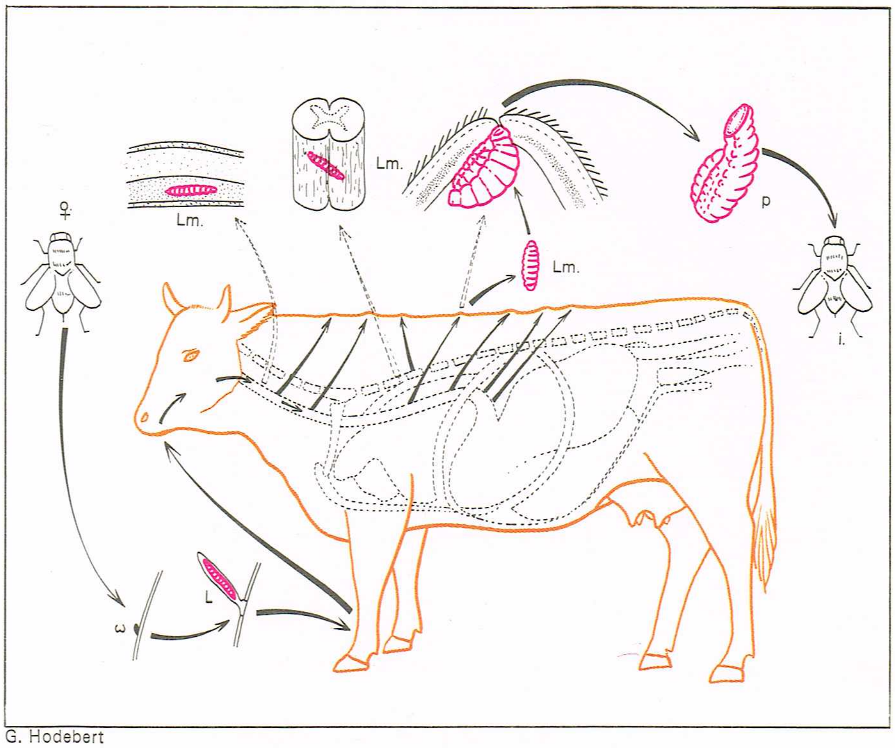

G. Hodebert

▲ *A gauche, larve de* **Dermatobia cyaniventris,** *Diptère Cutérébridé, voisin des Calliphoridés, parasite, en Amérique tropicale, de l'homme et des grands Mammifères chez lesquels elle provoque une myiase cutanée; à droite, évolution de l'hypoderme du bœuf,* **Hypoderma bovis** *(Cyclorrhaphes Calliphoridés) : la mouche femelle (♀) fixe ses œufs (ω) sur les poils des Bovidés; dans chaque œuf se développe une larve (L) absorbée par l'hôte et qui devient une larve migratrice (Lm) qui, au printemps, accomplit diverses migrations, symbolisées par les flèches, qui l'amènent finalement dans le derme du dos. Appelée communément « varron » à ce stade, la larve grossit et, en achevant son développement, provoque une tumeur furonculeuse, d'où elle s'échappe, à l'été, pour aller se transformer dans le sol en une pupe (P) qui donnera l'imago (i) vingt à trente jours après.*

larves sortent avant la pupaison. *Cordylobia anthropophaga,* le ver de Cayor, d'Afrique, et *Dermatobia cyaniventris,* le ver macaque d'Amérique du Sud, pénètrent dans la peau de l'hôte, celle de l'homme éventuellement, et évoluent sur place. Les hypodermes, parasites du bétail dans les régions tempérées, sont au contraire avalés à l'état d'œufs par l'hôte, dans le corps duquel leurs larves effectuent ensuite une migration compliquée, pour aller achever leur développement sous la peau du dos.

Les myiases des plaies, provoquées par d'autres Calliphoridés, diffèrent des précédentes par le mode d'entrée des parasites et par les lésions qu'ils produisent, d'ailleurs variables suivant les espèces mises en cause. Parvenues dans les plaies, certaines larves se nourrissent exclusivement de tissus morts, d'autres détruisent les parties encore vivantes et, comme elles sont nombreuses, le font si vite que l'hôte peut être gravement mutilé, voire tué.

Les myiases cavitaires sont dues à la présence de larves de Diptères qui vivent dans la lumière d'organes internes, le plus souvent l'estomac ou l'intestin. Il s'agit, tantôt d'un parasitisme occasionnel dû par exemple à des larves saprophytes accidentellement ingérées avec la nourriture, tantôt du développement de parasites obligatoires tels que les gastérophiles et les œstres. Les larves des premiers vivent fixées, parfois en très grand nombre, à la paroi de l'estomac des chevaux, causant des troubles digestifs et éventuellement des hémorragies, celles des seconds, qui se développent dans les sinus frontaux des moutons, déterminent des inflammations locales et des vertiges.

Les familles de Diptères sont si nombreuses, près de cent vingt, que seules les plus importantes ou les plus intéressantes peuvent être mentionnées ici, avec quelques-uns de leurs principaux caractères systématiques et biologiques.

Sous-ordre des Nématocères

Les Nématocères, caractérisés par leurs antennes d'au moins sept articles semblables ou presque, se subdivisent en quatre groupes.

★ Groupe des Tipuliformes

Ces Diptères, souvent de grande taille, possèdent sur le mésonotum une surface transverse en V. Leurs pattes sont très longues et fragiles et leurs ailes sont bordées par un épaississement costal. Ce groupe comprend trois familles, dont la plus importante est celle des **Tipulidés.**

★ Groupe des Bibioniformes

Le groupe des Bibioniformes comprend des individus de taille moyenne ou petite dépourvus de suture en V sur le mésonotum, aux pattes longues mais robustes, aux ailes à nervation réduite, et non entourées par l'épaississement costal. Ce groupe est très riche en représentants, répartis en quatre super-familles.

Super-famille des Mycetophyloidea

Les yeux des Mycetophyloidea ne sont pas contigus dorsalement, et deux ou trois ocelles sont présents. L'appareil buccal n'est pas vulnérant. Les hanches sont très développées et les tibias pourvus d'éperons. Les principales familles sont celle des **Mycétophilidés,** dont les larves fréquentent surtout les Champignons en voie de décomposition, et celle des **Sciaridés;** les larves de ces derniers sont communes dans l'humus et le terreau; chez quelques espèces, elles se déplacent par bandes de millions d'individus appelés « vers militaires ».

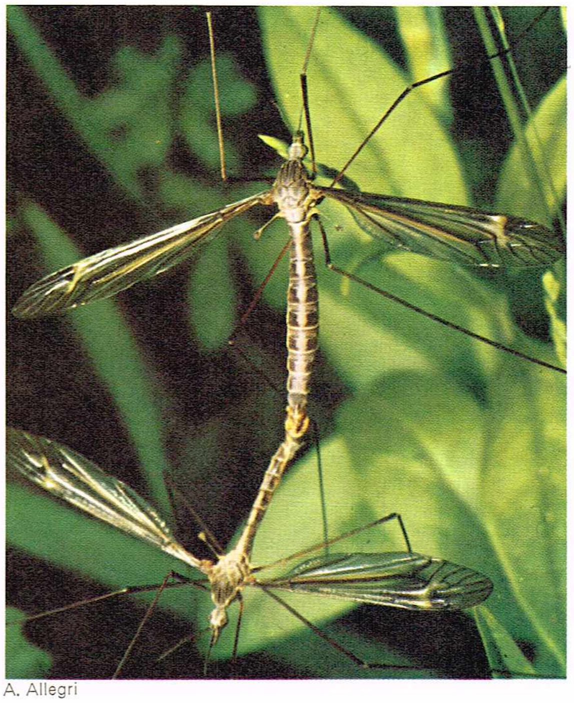

A. Allegri

◀ *Accouplement de la tipule du chou,* **Tipula oleracea** *(Nématocère Tipulidé).*

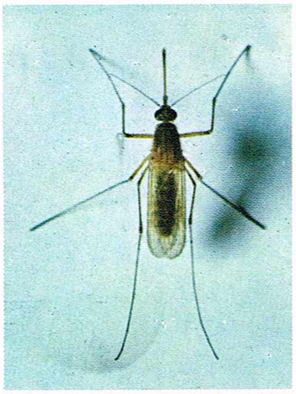

I. Bucciarelli

▲ *Femelle au repos du moustique* **Culex pipiens** *(Nématocère Culicidé).*

▼ *En haut, taon des bœufs,* **Tabanus bovis** *(Brachycère Homéodactyle). En bas, un Nématocère Psychodidé,* **Telmatoscopus meridionalis,** *ressemblant comme les autres membres de la famille à un minuscule Papillon et vivant dans les endroits humides.*

A. Margiocco

A. Margiocco

Super-famille des Cecidomyoidea

Cette super-famille diffère de la précédente par les hanches très courtes et les tibias dépourvus d'éperons. Les larves, à tête fort petite ou inapparente, sont caractérisées par la présence d'une « spatule sternale ». Les Cecidomyoidea sont divisés en deux familles.

Les **Cécidomyidés** ou **Itonididés** sont très riches en représentants, la plupart fort petits (0,4 à 5 mm), dont les yeux sont souvent réunis dorsalement par une « bride oculaire ». Les larves, fréquemment jaunes ou rouges, peuvent être zoophages ou saprophages, mais, le plus souvent, elles sont phytophages et, dans bien des cas, nuisibles aux plantes cultivées.

Les **Hétéropézidés** forment une petite famille remarquable par le développement paedogénétique de certains de ses membres *(Heteropeza, Miastor);* les larves sont généralement saprophages et les imagos dépourvus de bride oculaire.

Super-famille des Bibionoidea

Ces Nématocères ressemblent à des mouches noires et velues, à tégument mou. La tête est pourvue d'ocelles, les hanches sont très courtes et les tibias portent des éperons. La principale famille est celle des **Bibionidés,** dont les larves vivent groupées dans les sols riches en matières organiques et effectuent parfois leur éclosion imaginale toutes ensemble au printemps pour donner les « mouches de saint Marc ».

★ Groupe des Culiciformes

Les Culiciformes sont de taille petite ou moyenne. Ils sont dépourvus d'ocelles, et les antennes des mâles portent d'ordinaire des verticilles de longs poils. Les pièces buccales des femelles sont souvent vulnérantes. Les ailes sont en général couvertes d'écailles, au moins sur les nervures. Les larves, eucéphales, sont fréquemment aquatiques et possèdent des « prémandibules ». Deux super-familles composent ce groupe.

Super-famille des Culicoidea

Les Culicoidea ont les antennes plumeuses chez les mâles, et les ailes arrondies à l'apex.

Les **Simuliidés** mesurent de 1 à 6 mm. Leur couleur est sombre, leurs antennes courtes pourvues de onze articles cylindriques, et leurs ailes, larges et irisées, sont pourvues de quelques nervures très marquées près du bord antérieur. Les larves vivent dans les eaux courantes, fixées sur des pierres. Les pupes, immobiles, sont enfermées dans des cocons. Les femelles, hématophages, sont souvent vectrices d'organismes pathogènes, notamment de filaires, qui provoquent une maladie, l'onchocercose, d'où leur grande importance médicale et vétérinaire.

Les **Cératopogonidés** ne dépassent pas 2 mm de longueur. Leurs antennes, longues, comptent quinze articles, et celles des mâles sont pourvues de soies couchées. Les ailes sont marbrées de taches sombres. Les larves sont terrestres ou aquatiques. Cette famille compte plus de cinq cents espèces, en majorité floricoles ou saprophages. Les femelles de certaines espèces sucent le sang d'autres Insectes; celles des genres *Culicoides* et *Leptoconops,* hématophages de Vertébrés, très agressives et fort abondantes, surtout dans les régions tropicales, attaquent l'homme.

Les **Chironomidés** ressemblent à des moustiques, mais n'ont jamais de pièces buccales piqueuses, ni d'écailles sur les ailes. Leur pronotum saillant forme une bosse, et leurs pattes antérieures sont fort longues. On connaît trois mille espèces, dont les larves, aquatiques, habitent de préférence les eaux stagnantes où elles construisent des tubes dans la vase; ce sont les « vers de vase » bien connus des pêcheurs.

Les **Culicidés** sont les « moustiques » proprement dits. Leurs corps et leurs ailes sont couverts de poils souvent écailleux, dont certains forment une frange le long du bord postérieur des ailes. Le prothorax ne forme pas de bosse. Les femelles de beaucoup d'espèces sont pourvues de pièces buccales piqueuses. Les larves et les pupes sont toujours aquatiques, ces dernières étant munies de cornes respiratoires thoraciques et de palettes natatoires. Deux mille espèces sont réparties en cinq sous-familles. Les Chaoborinés ou « corèthres », à larves aquatiques transparentes, ne contiennent pas d'espèces hématophages. Les Mégarhininés sont exclusivement floricoles et leurs larves attaquent celles des autres moustiques. En revanche, bien des espèces d'Anophélinés, d'Aédinés et de Culicinés ont une extrême importance du point de vue médical et vétérinaire, car leurs femelles, hématophages, transmettent de nombreux agents pathogènes, comme des virus, des hématozoaires, des Vers, et des parasites divers.

Super-famille des Psychodoidea

Les représentants de cette super-famille ont des antennes semblables dans les deux sexes, des ailes souvent pointues à l'extrémité, et une taille généralement inférieure à 2 mm. Parmi les cinq familles, la plus importante est celle des **Psychodidés**, dont les sujets sont couverts de poils écailleux et dont les ailes sont disposées en toit au repos. Dans la sous-famille des Phlébotominés, le corps est peu velu et le thorax est très bombé; les femelles, hématophages, transmettent à l'homme des Flagellés parasites, agents de maladies appelées leishmanioses. Chez les Psychodinés, moucherons très velus ressemblant à de minuscules Papillons, et communs dans les endroits humides, les adultes se nourrissent de nectar ou de matières organiques.

★ Groupe des Blépharocériformes

Ces Nématocères, au corps presque glabre, possèdent des ailes très larges, parcourues par de nombreux plis simulant des nervures. Leurs larves, torrenticoles, sont munies de ventouses adhésives. Les Blépharocériformes comprennent deux petites familles, dont une est celle des **Blépharocéridés,** assez largement répandue dans les régions montagneuses du monde entier.

Sous-ordre des Brachycères

Les Brachycères sont caractérisés par des antennes composées de trois articles dissemblables, portant un *style* toujours terminal et souvent annelé. La fente d'éclosion imaginale est droite ou du moins non circulaire. Les Brachycères se subdivisent en deux groupes :

★ Groupe des Homéodactyles

Chez les Homéodactyles, les pattes sont dépourvues d'épines, et les tarses portent trois pelotes dont la médiane est *l'arolium.* Les yeux des mâles sont généralement contigus. Trois super-familles constituent ce groupe.

Super-famille des Stratiomyoidea

Au repos les ailes des Stratiomyoidea sont repliées l'une sur l'autre comme les lames d'un ciseau. Les couleurs de ces Brachycères sont souvent vives, et parfois métalliques. La famille principale, celle des **Stratiomyidés,** compte mille quatre cents espèces, vivant dans les zones marécageuses; leurs larves sont souvent aquatiques et leurs pupes s'abritent dans la dernière exuvie larvaire.

Super-famille des Tabanoidea

Au repos les ailes des Tabanoidea sont écartées du corps. Les cuillerons sont bien développés. Les pupes sont libres. Les deux familles principales sont celles des Tabanidés et Rhagionidés.

Les **Tabanidés,** communément appelés taons, ont un corps trapu de couleur généralement terne, mais leurs grands yeux sont souvent pourvus sur le vivant de bandes mordorées. L'appareil buccal est vulnérant et les femelles hématophages attaquent l'homme et le bétail en transmettant parfois des filaires, en Afrique tropicale notamment. Les larves prédatrices vivent dans les sols humides, et parfois même dans l'eau. Cette famille comprend trois mille espèces.

Les **Rhagionidés,** qui comptent cinq cents espèces, ont un corps assez élancé de teintes claires, souvent assez vives, et des pièces buccales formant une trompe allongée. Les larves, d'ordinaire prédatrices comme les imagos, construisent parfois, dans les terrains sablonneux, des pièges en entonnoirs comparables à ceux des fourmilions *(Vermileo).*

Super-famille des Nemestrinoidea

Chez les Nemestrinoidea, l'appareil buccal est atrophié, ou forme une longue trompe. Le thorax est dépourvu de grandes soies, mais il est souvent couvert d'une fourrure

dense. Les larves parasitent des Arthropodes. La plus importante des deux familles est celle des **Oncodidés** qui comprend des mouches, à corps globuleux et à tête minuscule, dont les larves parasitent des Araignées.

★ *Groupe des Hétérodactyles*

Chez les Hétérodactyles, les pattes sont armées d'épines et les tarses ne portent que deux pelotes, séparées par une soie dressée. Le corps est recouvert de nombreuses soies dressées ou d'une fourrure dense. Les yeux des mâles sont rarement contigus. Deux super-familles constituent ce groupe.

Super-famille des Asiloidea

Les mouches, particulièrement velues, ont un vol rapide. Un épaississement costal entoure les ailes. Des six familles, nous traiterons seulement des deux principales.

Les **Asilidés** ont des pièces buccales formant une trompe courte et acérée. Les imagos sont prédateurs d'autres Insectes, alors que les larves, terrestres, sont le plus souvent saprophages. On ne compte pas moins de cinq mille espèces dans cette famille.

Chez les **Bombylidés,** la trompe est souvent longue et grêle, et le corps généralement couvert d'une épaisse fourrure. Ces mouches floricoles, au vol rapide, butinent comme les abeilles solitaires, dont leurs larves sont parasites. Cette famille renferme trois mille espèces.

Super-famille des Empididoidea

Chez les Empididoidea, l'épaississement costal n'entoure pas l'aile et le tégument qui porte de grandes soies espacées n'est pas recouvert de fourrure. Ces mouches sont toujours prédatrices. On dénombre deux familles principales.

Les **Empididés,** qui comprennent trois mille espèces, ont une coloration terne souvent noirâtre, une tête globuleuse à trompe le plus souvent longue, et leurs larves, saprophages ou prédatrices, vivent dans la terre humide ou le bois pourri.

Chez les **Dolichopodidés,** la coloration est verte ou bleue à reflets métalliques. Plus de trois mille espèces fréquentent les endroits humides et le bord des eaux; leurs larves sont prédatrices.

Sous-ordre des Cyclorrhaphes

Chez les Cyclorrhaphes, les antennes à trois articles sont toujours pourvues d'une *arista* non apicale, insérée dorsalement sur le dernier article. Les larves sont acéphales, sauf chez les Syrphides. L'éclosion imaginale se fait par une fente circulaire du puparium. Deux groupes très inégaux par le nombre de leurs représentants constituent ce sous-ordre.

★ *Groupe des Aschizes*

Les Aschizes ont un front dépourvu de *ptilinum* et de lunule, et la cellule alaire cubitale est en général allongée. Ce groupe se divise en trois super-familles.

Super-famille des Lonchopteroidea

Les ailes sont pointues à l'apex et entourées par l'épaississement costal. L'unique famille, celle des **Lonchoptéridés,** comprend de petites mouches de 3 à 5 mm d'envergure, qui fréquentent les plantes basses dans les endroits humides.

Super-famille des Phoroidea

Chez les Phoroidea, les ailes, arrondies à l'apex, ne sont pas entourées par l'épaississement costal. La taille de ces Insectes est petite (0,5 à 5 mm). Trois familles principales forment cette super-famille.

Chez les **Phoridés,** les ailes sont caractérisées par les nervures du bord antérieur beaucoup plus marquées que les autres. L'aptérisme est fréquent. Ces petites mouches noirâtres courent par saccades et recherchent les matières organiques ou les cadavres en décomposition. Plusieurs espèces sont commensales ou parasites, notamment dans les fourmilières et les termitières. Plus de mille espèces composent cette famille.

Les **Thaumatoxénidés** et les **Termitoxénidés,** dont les femelles sont aptères et les formes très particulières, groupent une trentaine d'espèces vivant uniquement dans les termitières en Afrique et en Asie tropicales.

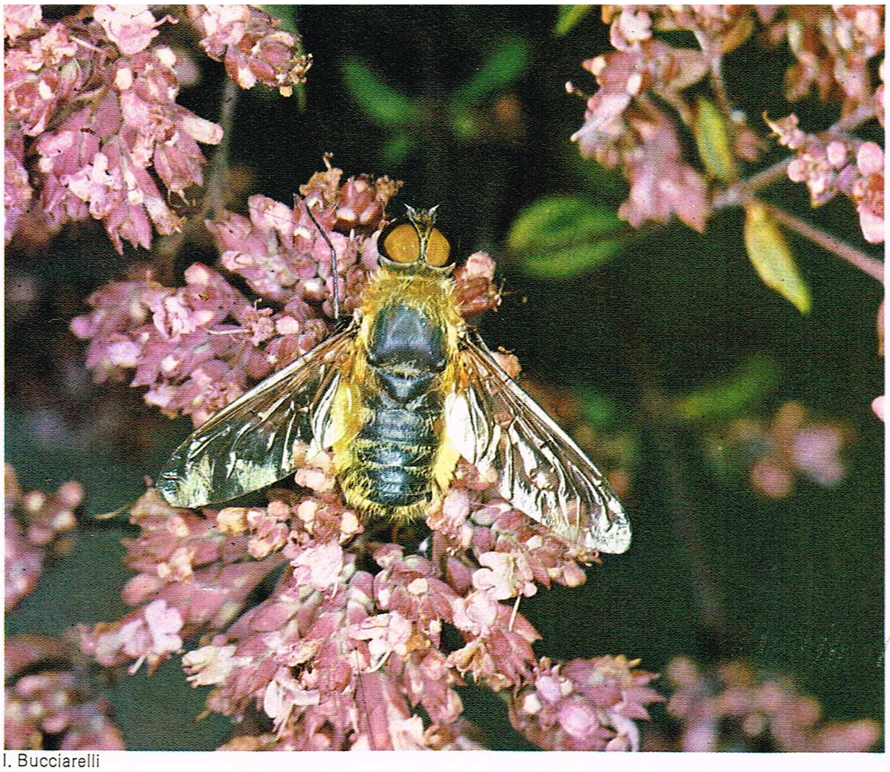

I. Bucciarelli

▲ *Un Diptère Bombylidé,* **Antrax hotteytottus.**

Super-famille des Syrphoidea

Les ailes sont caractérisées par un épaississement linéaire, la *vena spuria* qui simule une nervure, sans être reliée aux véritables nervures. Le corps est dépourvu de grandes soies dressées. Cette super-famille ne comprend que deux familles.

Les **Syrphidés** sont des mouches de taille moyenne ou grande, dont la configuration en bandes jaunes sur fond noir les fait ressembler à des abeilles ou à des guêpes. Les adultes sont floricoles, alors que les larves sont saprophages, phytophages, ou encore prédatrices (souvent de pucerons), parfois commensales dans les nids d'Insectes sociaux. On compte cinq mille espèces dans cette famille.

Les **Pipunculidés** ont une grosse tête hémisphérique, presque entièrement occupée par les yeux et les ailes très longues par rapport au corps de petite taille (3 à 6 mm). Les larves sont toujours parasites d'Homoptères Cercopides, Jassidés et Fulgoridés. On connaît quatre cents espèces de Pipunculidés.

★ *Groupe des Schizophores*

Ce groupe est caractérisé par la présence d'une suture frontale correspondant au *ptilinum*, et d'une lunule. La cellule cubitale est très courte. L'étude systématique de ce vaste groupe, au moins aussi riche en représentants que tous les autres Diptères réunis, est difficile. En position isolée, on y trouve d'abord la super-famille des *Conopoidea*, représentée seulement par les **Conopidés.** Ceux-ci ressemblent aux Syrphidés, malgré leurs antennes coudées à angle droit et la longueur de leur trompe. Adultes, ils sont floricoles, alors que leurs larves sont parasites d'Hyménoptères. Le reste des Schizophores se divise en deux groupes.

Chez les *Haplostomates* ou *Acalyptères,* le deuxième article des antennes n'est pas parcouru sur toute sa longueur par un sillon. Les cuillerons sont peu ou pas développés. On compte plus de cinquante familles, presque toutes riches en représentants, généralement de petite taille, réparties en sept « sections » par les spécialistes.

Trypetidea

Les Trypetidea ont des ailes le plus souvent tachées, un tube de ponte sclérifié chez les femelles; leurs larves sont phytophages. Ils comptent quinze familles dont les deux principales seront seules étudiées.

Chez les **Trypétidés** ou mouches des fruits, les ailes sont presque toujours tachées et elles présentent deux fractures sur la nervure costale. Les larves, couvertes de petites épines, se développent dans des tissus végétaux vivants, surtout dans les fruits. Parmi les deux mille espèces de cette famille, un bon nombre sont très nuisibles.

Chez les **Agromyzidés** qui comptent mille espèces, les ailes sont hyalines et n'ont qu'une seule fracture costale. Les larves, dépourvues d'épines, minent généralement les feuilles et sont parfois nuisibles.

▼ **Syrphus ribesii,** *comme beaucoup d'autres Syrphidés (Cyclorrhaphes Aschizes), ressemble à un Hyménoptère supérieur (dans ce cas à une guêpe).*

S. Lombardi

J. Carayon

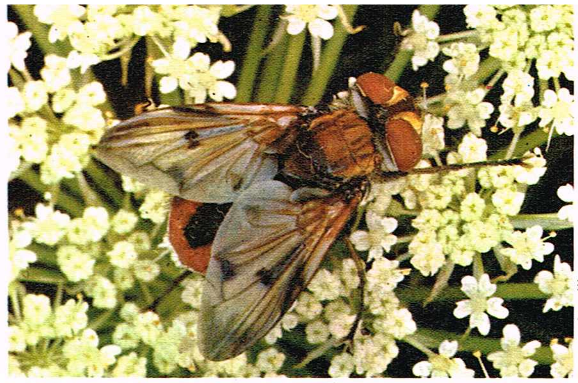

I. Bucciarelli

▲ *A gauche, un Diptère Trypétidé commun,* **Urophora cardui** *(Cyclorrhaphes Schyzophores) dont les larves se développent dans les tiges des chardons; à droite, un Diptère Tachinaire,* **Phasia crassipennis** *dont la larve se développe, comme celle des autres Phasiinés, en parasite d'Hémiptères.*

Tetanoceridea

Le tube de ponte des femelles n'est pas sclérifié, et les ailes sont rarement tachées. Parmi les dix familles, trois seront étudiées.

Les **Piophilidés** présentent une fracture costale. Ce sont de petites mouches noirâtres dont les larves, saprophages, se développent souvent dans les denrées animales (mouche des fromages) et peuvent sauter. Environ cinquante espèces sont connues.

Les **Diopsidés** comptent une cinquantaine d'espèces de mouches tropicales, remarquables par leur tête, dont les antennes et les yeux sont aux extrémités de deux très longs processus latéraux. Les larves sont saprophages, parfois phytophages et nuisibles au riz.

Chez les **Tétanocéridés,** la nervure costale, sans fracture, porte de petites épines, les ailes sont souvent marbrées. Deux cents espèces fréquentent surtout les endroits humides des régions tempérées.

Lauxanidea

Ces mouches, toujours très hygrophiles, aux ailes peu développées, ont un vol faible et lent. Parmi les dix familles, la plus remarquable est celle des **Célyphidés,** dont les représentants, uniquement tropicaux, ont un scutellum sclérifié et très développé qui couvre tout l'abdomen.

C. Bevilacqua

▲ *La mouche « tsé-tsé »,* **Glossina palpalis,** *appartient aux Cyclorrhaphes Muscidés; elle ressemble à une mouche domestique mais possède une longue trompe vulnérante.*

Drosophilidea

La nervation alaire est plus ou moins réduite et le tube des femelles est télescopique et peu sclérifié. Parmi les seize familles, seules les principales sont traitées ici.

Les **Drosophilidés,** plus connus sous le nom de mouches du vinaigre, ont deux fractures costales et une arista plumeuse et une coloration souvent rousse ou brun clair. Le tégument des larves est couvert de spinules; le puparium est pourvu de cornes respiratoires thoraciques. Ces mouches sont souvent attirées par les matières en fermentation et les larves, en majorité saprophages, se développent fréquemment dans les fruits gâtés. On compte plus de mille espèces.

Les **Éphydridés** sont des mouches noirâtres, de taille moyenne, supérieure à celle des drosophiles. Une forte épine fait saillie sur le deuxième article des antennes. Les larves, à cuticule épaisse, sont pourvues de pseudopodes épineux. Les adultes fréquentent le bord des eaux, et les larves, souvent aquatiques, sont capables de se développer dans des milieux liquides très particuliers (pétrole, formol, etc.).

Chez les **Chloropidés,** la teinte générale est souvent claire, et le thorax est rayé de bandes noires. Les yeux sont verts ou pourpres. Les larves, souvent phytophages, sont parfois très nuisibles *(Oscinis, Chlorops).*

Braulidea

Les Braulidea sont communément appelés poux des abeilles. L'unique famille, celle des **Braulidés,** comprend le seul genre *Braula* qui compte deux espèces. Ces petits Insectes aptères ont un corps globuleux et vivent dans les ruches aux dépens de la pâtée pollinique distribuée aux larves d'abeilles.

Pupipara

Ces Diptères, tous ectoparasites d'Oiseaux et de Mammifères, présentent un corps à segmentation peu distincte, des ailes souvent réduites, des pattes aux hanches largement séparées et aux tarses pourvus de fortes griffes. Les larves se développent entièrement ou presque dans l'organisme maternel. Il n'y a que trois familles.

Chez les **Hippoboscidés** la tête, enfoncée dans une excavation du bord antérieur du thorax, est pourvue d'antennes et d'yeux bien développés. Trois cents espèces, parmi lesquelles on peut citer les hippobosques, parasites des chevaux et du bétail, les mélophages, parasites du mouton, et les ornithomyies, parasites d'Oiseaux.

Les **Nyctéribiidés** ont une tête très petite, dépourvue d'yeux, repliée en arrière et logée dans une gouttière sur le dos du thorax. Les cent espèces sont toutes aptères et parasites de chauves-souris.

Les **Stréblidés** n'ont pas d'yeux et leur tête n'est pas repliée en arrière. Les ailes sont plus ou moins développées. On compte une cinquantaine d'espèces, parasites de chauves-souris tropicales.

Gasterophilidea

Ils sont représentés par la seule famille des **Gastérophilidés.** Ces mouches au vol rapide sont couvertes d'une fourrure dense. Leurs larves sont toujours parasites des Mammifères ongulés dont elles habitent le tube digestif. On en compte trente espèces.

Chez les *Thécostomates* ou *Calyptères,* le deuxième article des antennes est parcouru par un sillon sur toute sa longueur, et les cuillerons sont bien développés. Ce groupe comprend deux super-familles.

Super-famille des Muscicoidea

Les Muscicoidea sont caractérisés par l'absence d'une rangée de grandes soies dressées sous les stigmates thoraciques postérieurs (soies hypopleurales). Il n'y a que deux familles.

Les **Scatophagidés** ont les yeux largement séparés, chez les mâles comme chez les femelles. Ces mouches, saprophages, coprophages et parfois prédatrices, présentent une fourrure jaune chez les espèces les plus communes. Les larves ont des régimes alimentaires très divers. On connaît environ cinq cents espèces.

Les **Muscidés** ont des yeux très rapprochés ou contigus chez les mâles. La biologie des larves et des imagos est extrêmement variée. Quatre mille espèces au moins sont réparties en onze sous-familles, dont les plus importantes sont les Anthomyinés, les Muscinés, les Stomoxinés (hématophages chez les deux sexes) et les Glossininés (glossines ou mouches tsé-tsé).

Super-famille des Tachinoidea

Chez les Tachinoidea, la rangée de soies hypopleurales est toujours présente. Les trois familles principales sont décrites ici.

Chez les **Calliphoridés,** la région dorsale du thorax, située sous le scutellum (postscutellum), ne forme pas une saillie prononcée. Les larves, saprophages, se développent souvent dans la viande en décomposition « mouches à viande »), avec une tendance marquée au parasitisme facultatif ou obligatoire; elles provoquent alors des myiases chez leur hôte. Cette famille ne compte pas moins de deux mille espèces, dont les plus communes sont les *Calliphora* (mouches bleues), les *Lucilia* (mouches vertes) et les *Sarcophaga* (mouches à damier).

Le postscutellum des **Tachinidés** forme une saillie nette. Ces mouches, d'aspects très divers, sont ordinairement de couleur terne ou sombre. Les larves sont toujours parasites obligatoires d'Invertébrés, le plus souvent d'Insectes. Cette vaste famille comprend au moins trois mille espèces connues, dont beaucoup sont des auxiliaires de la lutte contre les Insectes nuisibles.

Les **Œstridés** sont faciles à distinguer des précédents par leur corps dépourvu de grandes soies dressées et par l'atrophie de leurs pièces buccales. Les imagos, dont la vie est très courte, déposent leurs œufs près des naseaux ou dans les yeux des Mammifères. Les larves, courtes, cylindriques ou ovales, sont couvertes de bandes d'épines, et se développent toujours en parasites, d'ordinaire dans les sinus frontaux, parfois dans le pharynx ou le larynx, chez les Mammifères sauvages, moutons, chèvres, et rarement chez l'homme.

C. Bevilacqua

▲ *Le mâle du Scarabaeidae* **Dynastes hercules** *est un des plus grands Coléoptères. Il vit aux Antilles et atteint 10 cm. Noter la corne de la tête et celle du prothorax dont la femelle est dépourvue.*

Super-ordre des Coléoptéroïdes

Il est principalement constitué par l'ordre immense des Coléoptères, que l'on rapproche parfois, mais sans preuves réelles, des Névroptéroïdes, en raison notamment de certaines ressemblances entre leurs formes larvaires. Le petit ordre des Strepsiptères, aux affinités longtemps discutées, semble bien faire partie aussi des Coléoptéroïdes.

Ordre des Coléoptères

Les Coléoptères sont des Insectes Holométaboles à pièces buccales de type broyeur (à de très rares exceptions près), dont les ailes antérieures, ou élytres, sont transformées en étuis rigides qui se juxtaposent sans se recouvrir et qui cachent généralement le mésothorax (sauf le scutellum), le métathorax, et l'abdomen. Le prothorax constitue, avec la tête, l'avant-corps, qui est séparé de l'arrière-corps, ce dernier étant formé par le mésothorax, le métathorax et l'abdomen unis en un bloc rigide. Les ailes postérieures membraneuses se replient sous les élytres. Théoriquement l'abdomen est formé de neuf segments, mais certains sont disparus ou cachés. L'appareil reproducteur mâle est rétracté dans l'abdomen au repos. Les tubes de Malpighi sont le plus souvent au nombre de six. Les larves sont de type campodéiforme, tout au moins chez les espèces primitives. Les nymphes sont libres ou à demi obtectées, très rarement enfermées dans un cocon.

On connaît environ quatre cent cinquante mille espèces de Coléoptères, mais le nombre réel d'espèces semble être au moins le double. Les Coléoptères représentent donc, à eux seuls, le tiers des espèces du monde animal. Ainsi une famille géante comme celle des Curculionidae a autant d'espèces que l'ensemble des Vertébrés. Les Coléoptères ont colonisé tous les milieux terrestres, des grottes profondes jusqu'aux hautes montagnes; ils habitent aussi les eaux douces, les eaux sursalées et même la zone de balancement des marées. Ils représentent un groupe relativement homogène au point de vue morphologique mais très diversifié au point de vue biologique.

La tête des imagos, généralement de type prognathe, n'a guère de traces des sutures primitives à l'exception de la suture clypéofrontale et parfois de la suture occipitale. La gula est souvent bien visible et limitée par les sutures gulaires; elle a disparu chez les Curculionidae chez lesquels les sutures gulaires sont confluentes. Les yeux composés manquent chez les espèces cavernicoles et endogées; les ocelles sont rares : on trouve un ocelle médian impair chez certains Dermestidae. Les antennes sont variables : le nombre habituel d'articles est de onze, mais il existe de nombreuses variations dans la forme et le nombre des articles antennaires, ce qui permet de définir les familles, les genres et les espèces. Les pièces buccales sont de type broyeur avec des modifications de détail qui correspondent à des régimes alimentaires différents : soit carnivores, soit phytophages (l'alimentation est même en partie liquide chez beaucoup de Scarabaeidae coprophages). Chez l'imago des Curculionidae, la pointe des mandibules se détache par autotomie. Dans quelques rares cas les pièces buccales ne sont pas broyeuses. Chez les Meloïdes floricoles des genres *Nemognatha* et *Leptopalpus*, qui pompent le nectar à l'aide d'une trompe, les galéas et les lacinias maxillaires sont étirées et soudées en une sorte de canal. Chez les Cerylonidae on assiste au passage progressif du type broyeur au type piqueur par étirement des mandibules et de leur lacinia ainsi que des galéas et lacinias maxillaires; ces pièces deviennent des stylets piqueurs

enfermés dans une gaine formée par le labre très allongé, le tout rappelant la trompe des Tabanides. Les *Aculagnathus* et *Cautomus*, qui ont ce type de pièces buccales, doivent piquer et sucer des microarthropodes présents dans le sol où ils vivent.

Le *thorax* comprend un prothorax indépendant des deux autres segments, constitué par un seul sclérite dorsal, ou pronotum, dont un repli ventral forme l'épipleure. Sur la face ventrale les pièces pleurales sont plus ou moins visibles. Chez les Adephaga, elles sont unies aux épipleures par des sutures appelées sutures notopleurales; dans le sous-ordre des Polyphaga toute trace de ces sutures a disparu. Le méso- et le métathorax, unis à l'abdomen en un bloc compact, forment le ptérothorax. Ils sont plus complets que le prothorax : dorsalement chaque segment a les sclérites habituels : préscutum, scutum, scutellum et postnotum. Mais les élytres cachent entièrement cette structure au repos, et seul le scutellum (ou écusson) du mésothorax est visible. Sur la face ventrale on distingue les sternites, épisternes et épimères dont la disposition est fort variable et fournit de bons critères pour la classification.

Les *élytres* correspondent aux ailes mésothoraciques très modifiées, transformées en étuis cornés dont la nervation est simplifiée. Leur dureté est due à la grande épaisseur de l'endocuticule ainsi qu'à la présence de piliers qui réunissent la face supérieure et la face inférieure. Les élytres peuvent être plus ou moins réduits et découvrir une partie de l'abdomen (chez les Staphylinidae); ils manquent totalement chez les femelles de *Pachypus* (Scarabaeidae). Les ailes métathoraciques, membraneuses, sont absentes chez beaucoup d'espèces aptères (Carabidae, Tenebrionidae, Curculionidae) qui ne peuvent plus voler. Dans ces cas, les élytres sont souvent soudés entre eux ou réunis par des systèmes de coaptation. Il existe, chez certaines espèces, des formes ailées et des formes microptères dont le déterminisme semble d'origine génétique. La caractéristique principale de l'aile membraneuse des Coléoptères est que la partie distale peut se replier sous la partie proximale, l'ensemble venant s'abriter sous les élytres au repos. Ce système de pliage a entraîné des modifications profondes de la disposition des nervures. Trois types principaux de dispositions peuvent être distingués : le *type adépha-*

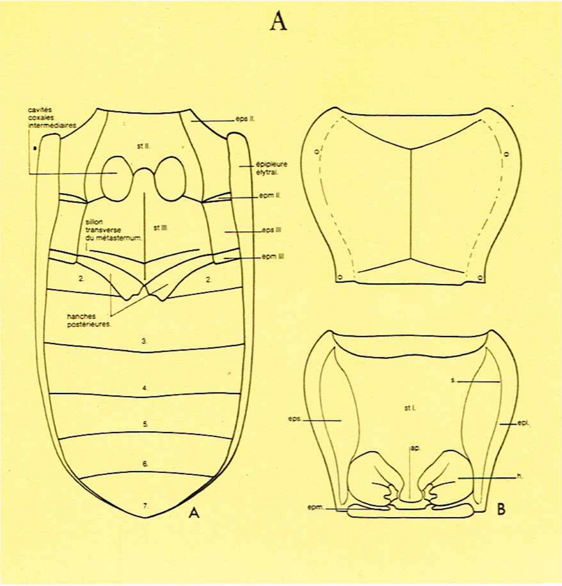

G. Hodebert

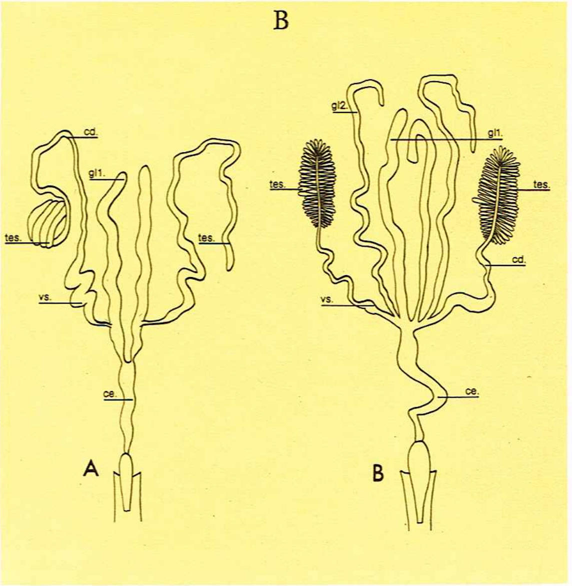

G. Hodebert

▶ *A gauche, A, structure thoracique et abdominale d'un Adephaga : Carabidae du genre* Pterostichus *: 2 à 7, segments abdominaux visibles (le premier est disparu); st II et st III, méso- et métasternum; eps II et eps III, épisternes du méso- et du métathorax; epm II et epm III, épimères du méso- et du métathorax. Noter la séparation en deux du deuxième segment abdominal et le sillon transverse du métasternum; B, prothorax d'un Carabidae,* Duvalius simoni *(en haut face dorsale, en bas face ventrale) : ap, apophyse prosternale; epl, épipleure; epm, épimère prothoracique; eps, épisterne prothoracique; h, hanches antérieures; s, suture notopleurale; st I, prosternum. A droite, appareil reproducteur mâle des Coléoptères, A, chez les Adephaga, B, chez les Polyphaga; cd, canal déférent; ce, canal éjaculateur; gl, glandes accessoires (gl1, ectadénies, gl2, mésadénies); tes, testicules; vs, vésicule séminale.*

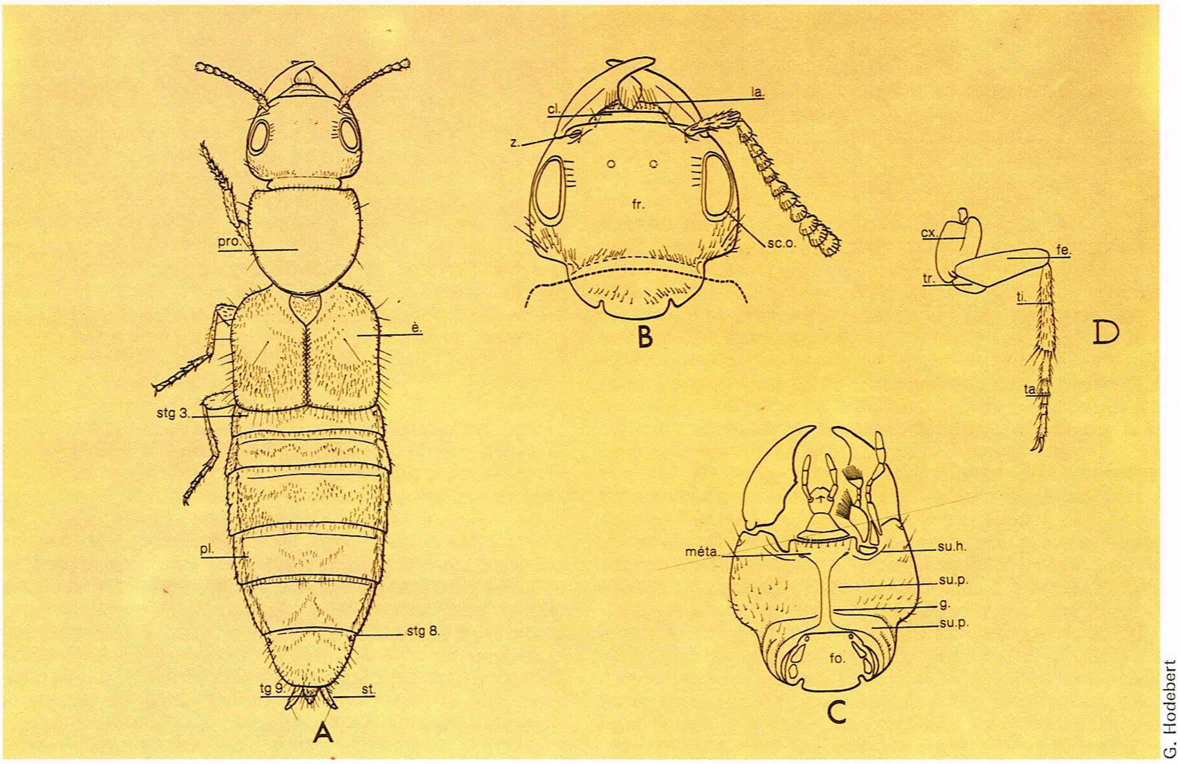

G. Hodebert

▶ *Morphologie du Staphylinidae,* Creophilus maxillosus, *A, vue dorsale; B, détail de la tête en vue dorsale; C, détail de la tête en vue ventrale; D, patte antérieure gauche : cl, clypeus; cx, coxa; é, élytre; fe, fémur; fo, foramen occipital; fr, front; g, gula; la, labre; méta, métatentorina; pl, pleurites; pro, pronotum; sc. o, sclérite oculaire; stg 3, stigmate métathoracique; stg 8, huitième stigmate abdominal; st, styles; su. h, suture hypostomiale; su. p, suture postoccipitale; tg 9, neuvième tergite; ta, tarse; ti, tibia; tr, trochanter; z, zone d'articulation de l'antenne.*

gien, dans lequel il existe une cellule fermée, ou *oblongum*, qui fonctionne comme une charnière lorsque l'aile se replie, et qui est formée par deux nervures transverses supplémentaires unissant les deux nervures médianes M_1 et M_2; le *type staphylinidien*, caractérisé par la disparition presque totale de toutes les nervures transversales; le *type cantharidien*, où les nervures transverses sont développées et où l'on observe, dans la partie distale, la réunion de la médiane M et de la cubitale Cu, ce qui forme une boucle caractéristique. Ces deux dernières catégories n'ont pas de valeur systématique; elles se retrouvent dans des groupes très divers, à l'exception des Adephaga. Chez les Ptiliidae et divers autres Coléoptères de petite taille, l'aile se réduit à un moignon filiforme garni de longues soies.

Les *pattes* sont adaptées à la marche ou à la course dans la plupart des cas; chez divers Scarabaeidae et Carabidae, elles sont fouisseuses; chez les espèces aquatiques, les pattes postérieures sont modifiées en rames natatoires.

L'*abdomen* a une structure variable qui sera exposée dans la partie systématique. Le neuvième urite et souvent le huitième sont invaginés dans l'abdomen au repos. L'urite IX constitue le segment génital et, chez les femelles, son sternite est divisé en deux hémisternites entre lesquels s'ouvre l'orifice génital, et qui portent chacun un appendice articulé, ou *style*. Les styles peuvent être plus ou moins modifiés en organes qui creusent le sol afin de permettre la ponte. C'est le cas des Adephaga, et de certains Silphidae. Chez les Cerambycidae, l'urite VIII et l'urite IX peuvent se dévaginer comme les éléments d'une longue-vue et former un organe de ponte qui va déposer les œufs dans les crevasses de l'écorce des arbres. Chez les mâles, le segment génital est de forme très variable. Il est souvent réduit au tergite et flanqué de chaque côté par les pleurites réunis en une longue tige gastrale ou *spiculum*, donnant insertion aux muscles de l'organe copulateur. Ce dernier, ou *édéage*, est extrêmement variable d'une famille à l'autre. Le type primitif comprend un lobe médian, en position distale, articulé sur le tegmen situé en position proximale. Ce tegmen est constitué par une pièce basale flanquée de deux styles latéraux aussi développés que le lobe médian; c'est pourquoi l'édéage, qui paraît formé de trois éléments, est dit trilobé. La partie terminale du canal éjaculateur forme le sac interne, orné de phanères dont la disposition est, dans chaque espèce, caractéristique, et dont le rôle est de pousser le spermatophore dans les voies génitales de la femelle.

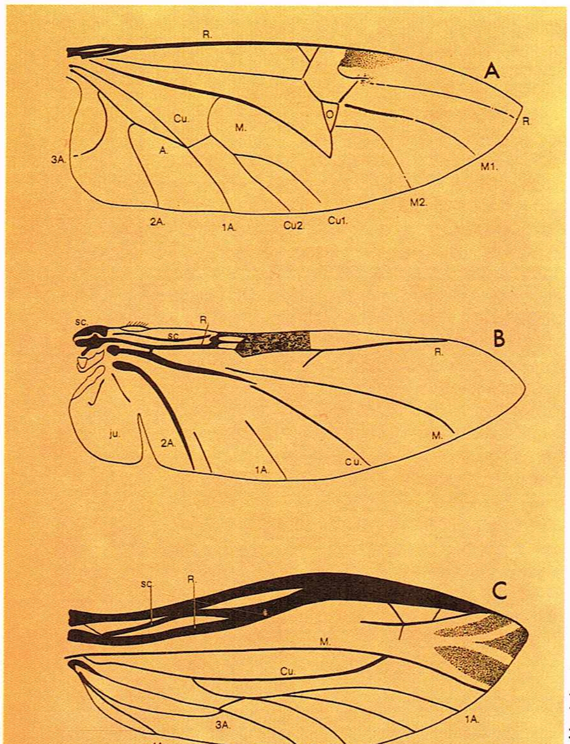

G. Hodebert

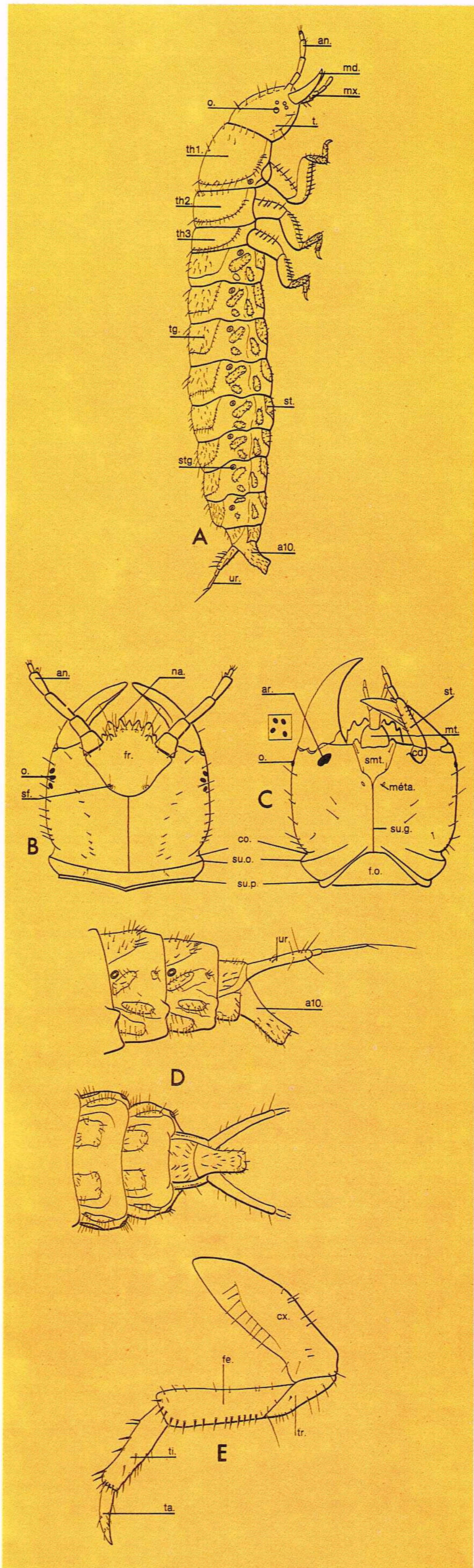

G. Hodebert

◀ *A gauche, trois types de nervation alaire chez les Coléoptères; A, chez un Adephaga; B, chez un staphylin; C, chez* **Cantharis***; o, oblongum; sc, sous-costale; R, radiale; M, M 1, M 2, médiane; Cu, Cu 1, Cu 2, cubitale; 1 A, 2 A, 3 A, 4 A, anales; ju, jugum. A droite, larve de Staphylinidae,* **Creophilus maxillosus***, A, vue de profil : an, antenne; a 10, dernier segment abdominal (pygopode); md, mandibule : mx, maxille; o, ocelles; st, stipe; stg, stigmates; t, tête; tg, tergites abdominaux; th 1, th 2, th 3, segments du thorax; ur, urogomphe; B, tête face dorsale; C, tête face ventrale; an, antenne; ar, zone d'articulation de la maxille sur la capsule céphalique; cd, cardo; co, cou; f. o, foramen occipital; fr, front; méta, métatentorina; mt, mentum; na, nasal; o, ocelles; sf, suture frontale; smt, submentum; st, stipe; su. g, suture gulaire; su. o, suture occipitale; su. p, suture postoccipitale; D, a 10, dernier segment abdominal (pygopode); ur, urogomphe; E, cx, coxa; fe, fémur; ta, tarse; ti, tibia; tr, trochanter.*

I. Bucciarelli

▲ *Larves de* Chrysomela populi *dévorant une feuille de peuplier.*

En général, l'anatomie des Coléoptères est simple et ne présente pas les complications que l'on peut trouver dans les autres ordres. Le *tube digestif* présente des variations nombreuses, dont certaines seront décrites dans la partie systématique. Le *système nerveux* est plus ou moins condensé. Un type très concentré existe chez les Scarabéides coprophages : ainsi, chez *Scarabaeus*, on trouve un gros ganglion prothoracique suivi, dans le mésothorax, d'un ganglion thoraco-abdominal unique provenant de la fusion de tous les autres ganglions de la chaîne nerveuse ventrale.

L'*appareil reproducteur femelle* montre une grande diversité. Il existe tous les intermédiaires entre les *Meloe*, dont chaque ovaire renferme des centaines d'ovarioles, et certains charançons dont chaque ovaire est réduit à deux ovarioles. La réduction maximale est atteinte chez les Scarabéides coprophages, comme les *Ontophagus* et les *Scarabaeus*, qui n'ont plus que l'ovaire droit réduit à un seul ovariole. Chez les Coléoptères, les ovarioles sont de type méroïstique, chez les Adephaga, de type polytrophe, et de type télotrophe chez les Polyphaga. Les glandes annexes sont très variées. Une spermathèque est généralement présente et elle s'ouvre par un long canal dans le vagin ou dans la bourse copulatrice.

L'*appareil reproducteur mâle* des Adephaga comprend des testicules formés par un tube unique pelotonné sur lui-même, et celui des Polyphaga des testicules constitués de follicules réunis entre eux. Les glandes annexes sécrètent une substance qui entoure les faisceaux de spermatozoïdes et qui peut même, dans certains cas, former de véritables spermatophores.

Le développement et la morphologie larvaire. Les Coléoptères sont des Holométaboles. Les sexes sont séparés et le dimorphisme sexuel est parfois très marqué dans certaines familles comme les Scarabaeidae. Les œufs sont déposés au hasard sur le sol, ou bien enfoncés dans celui-ci, sous les écorces ou les tissus végétaux. Quelques espèces comme les *Hydrophilus* fabriquent des cocons ; les *Cassida*, pour leur part, construisent des oothèques. La fécondité est variable ; elle est de un ou deux œufs chez les *Micromalthus* et elle atteint plusieurs milliers d'œufs chez les Méloïdes.

Le type larvaire primitif des Coléoptères se rencontre chez les Carabidae et les Staphylinidae ; il correspond à une larve campodéiforme ayant une tête bien distincte, des pattes bien développées, le corps plus ou moins allongé, un abdomen formé de dix segments, deux urogomphes articulés. Ces larves sont actives, souvent prédatrices. Chez les Meloidae et chez d'autres espèces parasites, seul le premier stade larvaire est campodéiforme, mais les stades suivants sont plus ou moins dégénérés et dépourvus de pattes. Les larves des Cucujoidae représentent un type campodéiforme modifié, avec des urogomphes souvent absents et des pattes réduites. Les larves de type mélolonthoïde ou scarabéiforme sont épaisses, subcylindriques, recourbées en forme de C, à pattes courtes ; elles sont typiques des Scarabéides et se rencontrent aussi parmi d'autres familles comme les Anobiidae. Les larves, apodes, caractérisent beaucoup de familles : les Curculionidae ont des larves dites éruciformes, qui représentent un type extrême. Les larves de Cerambycidae et de Buprestidae appartiennent à ce type.

Comme chez tous les Holométaboles les larves de Coléoptères diffèrent profondément des adultes. La tête porte dorsalement une suture épicraniale en Y qui représente une ligne d'exuviation. La suture occipitale et la suture postoccipitale existent souvent, en particulier chez les Staphylinidae. A la face ventrale la gula est absente et les sutures gulaires réunies. Le labre peut être distinct ; il peut aussi être soudé au front en un sclérite fronto-clypéo-labral terminé en avant par une partie saillante et denticulée, qui a reçu le nom de *nasal*. C'est le cas des Adephaga, des Staphylinidae, des Elateridae. Les organes de la vision sont des yeux simples, ou ocelles. Les antennes sont formées de trois ou quatre articles, l'avant-dernier portant sur le côté externe un organe sensoriel qui a parfois été assimilé à un exopodite. Les maxilles sont de deux types : chez les Adephaga, beaucoup de Staphylinidae, et chez certains Elateridae, le stipe est allongé, la lacinia absente et le palpe situé dans le prolongement du stipe ; ce type semble caractéristique des formes prédatrices ; chez la majorité des Coléoptères, le stipe est court et large, la lacinia et la galéa forment un lobe interne et le palpe est en position latérale ; cette structure caractérise les formes phytophages et saprophages. Les trois *segments thoraciques* des larves sont peu différents les uns des autres. Les pattes sont de deux types : le type adéphagien et le type polyphagien. L'interprétation morphologique de la patte larvaire est sujette à discussion. On peut admettre que, chez les Polyphaga, les cinq articles correspondent à la coxa, au trochanter, au fémur, au tibia et au tarse ; chez les Adephaga, l'article supplémentaire est le médius situé entre le fémur et le tibia. Les segments abdominaux, au nombre de dix, portent des stigmates seulement sur les huit premiers segments. Le neuvième porte, chez les larves campodéiformes, des prolongements, ou urogomphes, dont la nature appendiculaire est discutée. Chez les larves fouisseuses, comme celles des Elateridae, ces urogomphes sont en forme de crochets rigides. Le dixième segment, qui porte l'anus, est nommé *pygopode*. Le développement des Coléoptères s'effectue généralement en trois stades larvaires. Mais, il existe des exceptions ; ainsi, chez certains Tenebrionidae, il peut y avoir jusqu'à quinze mues, et un Bathyscinae cavernicole comme *Speonomus longicornis* ne subit plus aucune mue.

Les nymphes sont nues, parfois semi-obtectées (comme chez les Staphylinidae), c'est-à-dire que le corps est recouvert d'une sécrétion élaborée lors de la dernière mue larvaire. Sur les nymphes, on observe presque toujours des saillies, des poils et des phanères qui n'existent pas chez l'imago. Il est toujours possible de reconnaître les diverses parties du corps ainsi que les ébauches des pattes, des ailes et des élytres. Le nombre de stigmates est réduit. Ainsi, chez le Staphylinidae *Creophilus maxillosus*, il existe huit paires de stigmates abdominaux, mais les quatre dernières débouchent dans des troncs trachéens oblitérés et ne sont donc pas fonctionnelles. Il n'y a plus que trois paires de stigmates abdominaux fonctionnels chez les Scarabéides coprophages. Certains Coléoptères se fabriquent un cocon de nymphose. Les Cerambycidae se construisent une loge nymphale à l'aide de débris ligneux.

I. Bucciarelli

▲ *Les Carabes sont nombreux dans les forêts et les montagnes.* **Carabus auratus** *est commun en France.*

Sous-ordre des Adephaga

Les caractères de ce sous-ordre sont les suivants : les sutures notopleurales du prothorax sont distinctes ; les hanches postérieures, immobiles et unies au métasternum, divisent en deux le premier sternite abdominal visible ; le premier sternite réel a disparu et les huitième et neuvième sternites sont involués dans l'abdomen ; les tarses possèdent cinq articles ; les ailes sont membraneuses, avec un oblongum ; les tubes de Malpighi sont au nombre de quatre ; les testicules sont formés par un tube unique pelotonné ; les ovaires sont de type polytrophique ; enfin, les larves ont la patte formée de six articles, la mandibule sans mola, et l'abdomen terminé par des urogomphes articulés.

Ce sous-ordre présente un ensemble de caractères primitifs (en particulier dans la structure de la patte larvaire) et de caractères évolués dans le sens d'une adaptation à la vie prédatrice. Il comprend une seule superfamille : les *Caraboidea*. On peut y distinguer deux groupes : les formes terrestres, aux hanches postérieures peu développées, et les formes aquatiques, dont les hanches postérieures sont plus ou moins grandes et atteignent parfois les élytres sur les côtés.

Les *Adephaga terrestres*

Les **Rhysodidae** constituent une petite famille d'une centaine d'espèces vivant dans le bois mort. Ce sont des Insectes aux antennes courtes et épaisses, avec des sillons longitudinaux sur la tête et le pronotum, et qui ont les hanches postérieures bien séparées. Une espèce, *Rhysodes sulcatus*, vit en France dans le pays basque.

Les **Cicindelidae** renferment des Insectes vifs et chasseurs dont la lacinia maxillaire forme une sorte de palpe biarticulé terminé par un crochet ; le clypéus est étendu latéralement au-dessus de l'insertion antennaire et cache la base des mandibules. Les larves, très modifiées, chassent à l'affût dans des terriers ; en forme de S, elles possèdent deux ou trois paires de crochets sur la face dorsale du cinquième urite, ce qui leur permet de se cramponner à la paroi. La tête et le pronotum constituent une sorte de disque qui obture l'orifice du terrier.

A. Margiocco

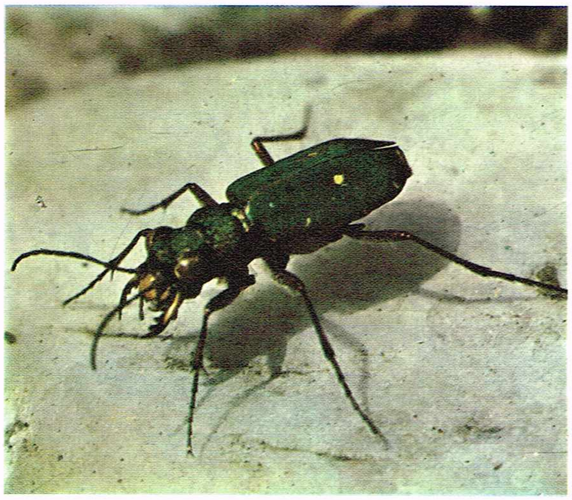

C. Bevilacqua

▲ *A gauche, un Paussidae myrmécophile de Java du genre* **Ceropterus.** *Les espèces de cette famille sont caractérisées par leurs antennes; à droite,* **Cicindela campestris,** *l'espèce la plus commune du genre.*

La sous-famille des *Collyrinae* comprend des espèces au corps grêle, répandues dans les régions tropicales, qui chassent dans les arbres les Insectes floricoles; leurs larves creusent leurs terriers dans le bois. La sous-famille des *Cicindelinae* renferme les cicindèles, dont plusieurs espèces vivent en France, à terre.

Les **Paussidae** comprennent environ cinq cents espèces, presque toutes myrmécophiles. Leurs antennes n'ont que deux articles, le deuxième correspondant à la réunion des articles II à XI normaux des autres Adephaga, avec des traces visibles de la fusion. Les larves très déformées ont les derniers segments abdominaux modifiés en un large organe glandulaire discoïde, sans doute en rapport avec leur mode de vie myrmécophile. Les Paussidae sont surtout tropicaux, mais il existe une espèce en France : *Paussus favieri*.

Les **Carabidae** représentent une importante famille d'environ vingt-cinq mille espèces réparties dans le monde entier. La plupart sont terricoles, vivant dans le sol, sous les pierres, dans les Mousses, au bord des eaux, ou dans les grottes. Les espèces arboricoles sont rares dans nos régions (genre *Lebia*) mais plus fréquentes dans les régions tropicales. La forme, la taille (de 1 mm chez certains *Anillus* à près de 10 cm chez les *Mormolyce*) et la couleur sont très variables. Les antennes de onze articles sont filiformes; les tibias antérieurs sont munis de deux éperons qui délimitent entre eux un « peigne », ou organe de toilette servant au nettoyage des antennes. Les larves sont de type campodéiforme, avec le labre fusionné au clypéus, et des urogomphes articulés.

Les Carabidae sont le plus souvent des prédateurs actifs la nuit, se nourrissant de vers de terre, de Mollusques et d'autres Arthropodes. Quelques espèces ont acquis secondairement un régime phytophage et peuvent devenir nuisibles, comme *Zabrus tenebrioides*, dont les imagos s'attaquent aux jeunes épis des céréales et dont les larves dévorent surtout les tiges et les plantules.

La famille des Carabidae comprend deux sous-familles : les *Carabinae* et les *Harpalinae*. Parmi les *Carabinae*, il faut citer la tribu des *Carabini* avec trois types principaux : les Carabes, les Calosomes et les *Cychrus*. Les Carabes sont des Insectes mesurant en général de 2 à 3 cm (le géant du groupe, *Procerus gigas* des Balkans, atteint 6 cm), aux couleurs souvent vives, aux ailes réduites ou absentes, qui ont formé des centaines d'espèces et de races géographiques dans la région paléarctique. Ils sont nombreux dans les forêts et les montagnes. *Carabus auratus* est commun en France; *Carabus auronitens* a des reflets métalliques rouge et vert; *Carabus solieri* est un endémique des Alpes de Provence en France et en Italie. Beaucoup de Carabes sont en voie de raréfaction en raison de la destruction de leurs biotopes et aussi à cause de la chasse intense qui leur est faite par des collectionneurs et des marchands cupides qui ravagent des stations entières. Un remarquable endémique italien, *Carabus olympiae*, est éteint pour cette raison depuis quelques dizaines d'années. Les Calosomes ont des mœurs arboricoles; ils sont plus trapus que les Carabes, volent, et sont d'utiles destructeurs de chenilles. Les *Cychrus* ont l'avant-corps étroit, ce qui leur permet de rechercher les escargots, dont ils font leur nourriture, jusqu'au fond de leur coquille. Les *Nebria*, aux pattes grêles et aux téguments mous, fréquentent surtout le bord des eaux et des névés; ils s'élèvent très haut en montagne. Les *Scarites* sont des fouisseurs dont les protibias sont munis de fortes dents et terminés par deux gros éperons; leur prothorax est séparé du mésothorax par un étroit pédoncule. La tribu des *Trechini* est immense. Elle rassemble des espèces ripicoles comme les *Bembidium*; des endogés comme les *Anillus*; des cavernicoles comme les *Aphaenops*. Les *Cillenus* vivent au bord de la mer, dans des fentes submergées à marée haute. Les *Harpalinae* comprennent beaucoup d'espèces à tendances phytophages, comme les *Ophonus* et les *Zabrus*. Le genre *Pterostichus* a plusieurs espèces endogées. Les *Lebia* vivent dans les arbres, où ils s'attaquent aux larves de Chrysomélides. *Lebia scapularis* est remarquable par ses hypermétamorphoses : de l'œuf sort une larve primaire active qui dévore une nymphe de la galéruque de l'orme *(Galerucella lutea)*; elle devient alors énorme et presque immobile, et se tisse un cocon à l'intérieur duquel elle mue. La deuxième larve qui apparaît est très différente de la première : immobile, elle vit de ses réserves avant de se nymphoser et de donner un imago. Ce type de développement avec existence d'une larve parasite, rare dans nos régions, est sans doute bien plus commun dans les régions tropicales où les Carabidae arboricoles sont nombreux; mais les larves et les cycles de ces espèces tropicales sont encore inconnus. Les *Mormolyce* sont remarquables par leur grande taille, leur tête allongée et surtout par les deux grandes expansions foliacées situées de chaque côté des élytres. Ils vivent en Indo-Malaisie, dans des Champignons lignicoles, et ils sont en voie de disparition. Les *Brachinus*, ou bombardiers, sont parmi les plus curieux des Carabidae. Ils se groupent sous les pierres et les débris végétaux en petites sociétés rudimentaires dont la cohésion est maintenue par l'attraction que les individus exercent les uns sur les autres. Le cycle de ces Insectes si communs n'est pas encore connu : on n'a pu obtenir, en élevage, que la larve primaire active, qui doit avoir besoin d'un hôte déterminé pour poursuivre son développement. On sait seulement que la larve d'une espèce de l'Amérique du Nord vit en ectoparasite d'une nymphe de Gyrinide. Les *Brachinus* possèdent un système défensif constitué par des glandes anales très modifiées qui élaborent, dans deux compartiments distincts, d'une part une solution d'eau oxygénée, et d'autre part une solution d'hydroquinone. Lorsque le *Brachinus* est menacé, ces produits passent dans la chambre d'explosion qui renferme des enzymes (catalases et peroxydases) produites par des cellules situées dans sa paroi. La catalase décompose l'eau oxygénée, et les hydroquinones sont oxydées par l'oxygène produit et transformées en quinones. Cette réaction dégage de la chaleur, la température pouvant atteindre 100 °C. Les quinones sont rejetées à l'extérieur sous la forme d'un petit nuage toxique de couleur rougeâtre dont l'odeur est perceptible par l'homme.

Les *Adephaga aquatiques*

Les **Dytiscidae,** avec quatre mille espèces, nombreuses surtout dans la région paléarctique, vivent dans les eaux courantes ou dormantes, et quelquefois dans les eaux thermales. Leurs pattes postérieures sont modifiées pour la nage; elles sont aplaties, bordées de longues soies; les antennes sont filiformes. Le corps est en général de forme ovalaire, peu hydrodynamique. Les *Dytiscus* atteignent 4 cm; les mâles ont des élytres lisses et les protarses dilatés et garnis de ventouses adhésives; les femelles ont les élytres sillonnés et les protarses non dilatés. Les larves pratiquent la digestion extraorale : la fente buccale est fermée, mais chaque mandibule possède un canalicule permettant d'injecter dans la proie une salive toxique et riche en sucs digestifs.

Les **Gyrinidae** comprennent les *Gyrinus*, ou tourniquets, qui se déplacent à la surface de l'eau grâce à leurs pattes postérieures transformées en rames courtes; les pattes antérieures sont longues; les yeux dédoublés permettent à la fois la vision dans l'air et sous l'eau. Les larves portent dix paires de trachéobranchies abdominales. Ce sont des Insectes carnivores vivant le plus souvent en petites troupes à la surface des eaux dormantes ou peu courantes.

C. Bevilacqua

◀ Calosoma sycophanta, *Carabidae aux mœurs arboricoles, prédateur de chenilles.*

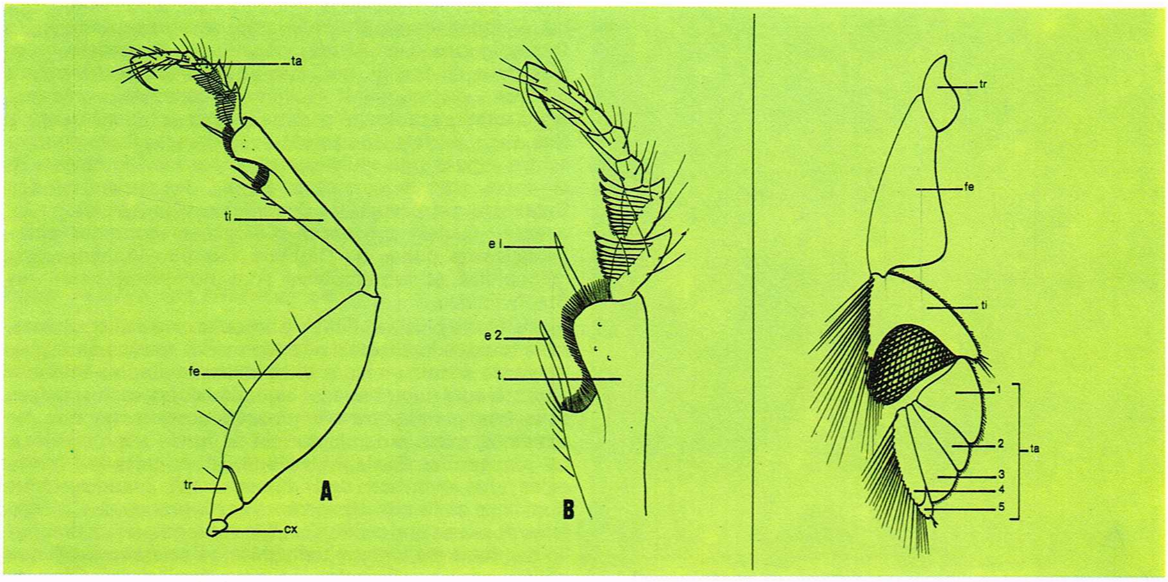

G. Hodebert

◀ *A gauche, patte antérieure d'un Carabidae du genre* Trechus : *A, patte entière ; B, extrémité montrant les deux éperons terminaux (e1 et e2) du tarse délimitant l'organe de toilette (t) ; cx, coxa ; fe, fémur ; ta, tarse ; ti, tibia ; tr, trochanter. A droite, patte postérieure de* Gyrinus *transformée en rame natatoire, large et aplatie ; tr, trochanter ; fe, fémur ; ti, tibia ; 1 à 5, les cinq articles du tarse (ta) ; le tibia et le tarse sont élargis et bordés de longs poils raides.*

Sous-ordre des Archostemmata

Dans ce groupe, les sutures notopleurales sont distinctes et les ailes membraneuses pourvues d'un oblongum. Mais la structure de l'abdomen est de type cryptogastre et non de type Adephaga. Les ailes ne se replient pas au repos, mais s'enroulent par leur partie distale. La patte des larves a encore six articles.

L'ordre renferme une famille, les **Cupedidae,** dont des représentants très voisins des formes actuelles ont été retrouvés dans des couches datant du Permien. Ce sont des xylophages localisés aux régions chaudes. La position de la famille **Micromalthidae** est controversée ; elle comprend une seule espèce, qui vit aux États-Unis, *Micromalthus debilis*, également xylophage, remarquable par son cycle de développement très complexe, unique chez les Coléoptères, et dont certains détails ne sont pas encore élucidés. Dans ses grandes lignes, ce cycle est le suivant. Une larve cérambycoïde apode peut se nymphoser et donner une femelle. Elle peut aussi donner une larve blanche très dégradée qui peut soit rester stérile et mourir, soit pondre un œuf unique (phénomène de pédogenèse) ; dans ce dernier cas, l'œuf donne une larve métrophage restant engagée dans les voies génitales de sa mère, aux dépens de laquelle elle se nourrit, et qu'elle finit par dévorer entièrement avant de se nymphoser et de se transformer en un mâle ailé ; ou bien, encore, l'œuf donne naissance par viviparité à plusieurs larvules caraboïdes agiles qui muent et se transforment en larves cérambycoïdes. Ces dernières conduisent après la nymphose à des femelles ailées ; mais elles peuvent aussi redonner des larves blanches à partir desquelles un nouveau cycle recommence.

Sous-ordre des Polyphaga

Tous les autres Coléoptères sont réunis dans cet immense sous-ordre. Les entomologistes ne se sont pas encore mis d'accord sur sa classification rationnelle en super-familles et en familles et nous n'indiquerons ici que les principales super-familles.

Les *Polyphaga* sont caractérisés par l'absence de sutures notopleurales au prothorax ; par l'absence d'oblongum aux ailes membraneuses ; par des testicules de type folliculaire ; par des ovaires de type méroïstique télotrophe. Les larves ont des pattes formées de cinq articles.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ *Spécimen de* Carabus auronitens.

I. Bucciarelli

▲ *Le staphylin odorant,* **Ocypus olens,** *relève l'abdomen dans une posture d'intimidation.*

La structure abdominale fournit des données commodes pour la subdivision du sous-ordre. Dans tous les cas, il n'existe aucune trace visible extérieurement du premier urite; il n'en reste tout au plus que des vestiges logés à l'intérieur du corps. Chez les *hologastres* comme les *Cantharis* ou les *Lampyris*, le deuxième sternite est bien développé et semblable au troisième; il existe donc sept sternites apparents puisque le neuvième est invaginé dans l'abdomen. Chez les *haplogastres,* il ne subsiste du deuxième sternite que des restes latéraux parfois difficiles à voir; le premier sternite complet et nettement visible est donc, du point de vue morphologique, le troisième. Chez les *cryptogastres,* toute trace du deuxième segment a disparu; il n'existe donc que six (parfois cinq) sternites apparents.

Ces différences dans la morphologie abdominale des Polyphaga permettent de distinguer, d'une part, les *Haplogastra,* qui réunissent les super-familles des Scarabaeoidea, Hydrophiloidea, Staphylinoidea et Histeroidea, et, d'autre part, les *Cryptogastra* (ce nom ayant un sens systématique et non plus anatomique), qui réunissent tous les autres Polyphaga, que leur abdomen soit cryptogastre ou hologastre.

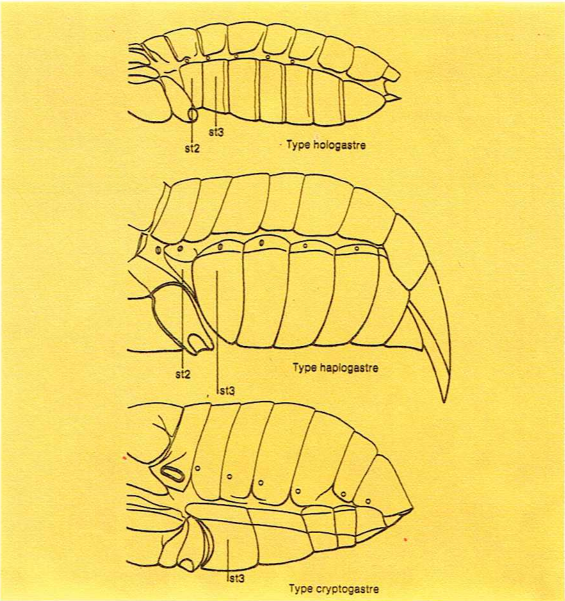

G. Hodebert

▶ *Trois types de structures abdominales chez les Coléoptères Polyphaga : type hologastre de* **Rhagonychia limbata** *(Cantharidae); type haplogastre de* **Melolontha melolontha** *(Scarabaeidae); type cryptogastre de* **Hylobius abietis** *(Curculionidae); st_2 et st_3, deuxième et troisième sternite abdominl.*

C. Bevilacqua

▼ *Un staphylin très commun sur les rives sableuses des cours d'eau,* **Paedurus sp.**

Super-famille des Staphylinoidea

La famille principale est celle des **Staphylinidae.** Les staphylins ont le corps allongé, l'abdomen laissé à découvert par les élytres, qui sont courts et qui cachent seulement le ptérothorax. Les tergites abdominaux, non protégés, sont bien sclérifiés, contrairement à ce que l'on observe chez les autres Coléoptères à élytres développés. En outre, cet abdomen est mobile et peut, lorsque l'Insecte est inquiété, se relever vers le haut en une posture dite d'intimidation. Les larves campodéiformes des staphylins rappellent beaucoup celles des Carabidae mais leurs pattes n'ont que cinq articles. Cette énorme famille dont au moins trente mille espèces ont été décrites, comprend des formes très variées par la taille (de moins de 1 mm à 3 cm) et par des détails de la morphologie, mais surtout par la biologie. Beaucoup d'espèces sont hygrophiles et fréquentent les endroits humides; les *Paederus* rouge et bleu courent avec agilité le long des rivières; les *Stenus* « marchent » sur les eaux; les *Lesteva* vivent dans les Mousses des cascades. Il existe de nombreuses espèces endogées (en particulier dans la sous-famille des *Leptotyphlinae*); les *Cafius* sont halophiles et se rencontrent au bord de la mer parmi les débris végétaux ; les *Gyrophaena* et *Bolitobius* se développent dans les Champignons. Les *Bledius* constituent de petites colonies dans la vase du bord des cours d'eau et des plages marines; on reconnaît facilement certaines espèces à leur prothorax prolongé par une longue corne médiane; la tête porte, parfois, également deux cornes; ils se nourrissent d'Algues unicellulaires telles que les Diatomées. Ils creusent, grâce à leurs tibias élargis, des terriers, où des Carabidae prédateurs, les *Dyschirius,* viennent les pourchasser. Certaines espèces d'*Aleochara* sont des ectoparasites de pupes de Diptères. Les pholéophiles, myrmécophiles et termitophiles sont nombreux parmi les Staphylinidae.

Les **Pselaphidae,** riches d'environ cinq mille espèces, sont tous de petite taille (moins de 3 mm). Les élytres laissent à découvert les tergites abdominaux; les antennes ont toujours une massue bien développée; les palpes sont très grands, parfois presque aussi longs que les antennes, avec le dernier article de forme très complexe. La plupart des Pselaphidae sont muscicoles ou humicoles; ils abondent dans l'humus des grandes forêts tropicales où ils constituent souvent le groupe de Coléoptères dominant (alors que ce rôle est tenu par les Staphylinidae dans les régions tempérées). Beaucoup de Pselaphidae sont cavernicoles. La sous-famille des *Clavigerinae* n'est constituée que de myrmécophiles, pourvus de glandes spéciales, qui se nourrissent de fourmis.

Les **Catopidae** comprennent beaucoup d'espèces pholéophiles, comme les *Choleva* et les *Catops,* vivant dans les terriers de Mammifères et les nids d'Oiseaux. La sous-famille des *Bathyscinae* renferme presque exclusivement des formes cavernicoles.

Les **Leptinidae** ont le corps dépigmenté, aplati, et sont aveugles. Le plus remarquable est *Platypsillus castoris* inféodé au castor en Europe et en Amérique du Nord. L'adaptation est si poussée que ce Coléoptère ressemble à un Mallophage. La larve a des griffes puissantes; l'adulte a des antennes courtes rappelant celles des gyrins, et qui jouent un rôle respiratoire chez cet Insecte qui passe une grande partie de sa vie dans l'eau, sur son hôte. Les mouvements des antennes lui permettent de prélever l'air et de le refouler dans les régions thoraciques couvertes de poils hydrofuges qui entourent les stigmates.

Les **Limulodidae,** myrmécophiles, appartiennent aussi à la super-famille des Staphylinoidea, ainsi que les **Ptiliidae,** qui comptent parmi eux les plus petits Coléoptères (*Nanosella fungi* mesure 0,25 mm), dont les ailes, très réduites, sont frangées de longs cils.

Les membres de la famille des **Silphidae** sont des Insectes de taille plutôt grande (un centimètre et plus), de forme trapue et de couleur terne. Ils renferment environ deux cent cinquante espèces nombreuses dans la région paléarctique. Les antennes moniliformes ont les derniers articles renflés en massue; les élytres portent souvent deux ou trois côtes longitudinales et découvrent le pygidium. Les larves, dites onisciformes, sont aplaties, ovaloïdes avec des tergites munis d'expansions latérales, de couleur noire; les antennes sont longues. Presque tous

les Silphidae sont nécrophages comme les *Necrophorus*. Quelques-uns sont prédateurs et attaquent les chenilles, comme *Xylodrepa quadripunctata*, forme jaune avec quatre taches noires, qui a des mœurs arboricoles. *Agyrtes bicolor* hiverne avec les groupements de larves de *Bibio*; les *Blitophaga* sont des phytophages qui peuvent être nuisibles aux cultures : *B. opaca* attaque la betterave en Europe. Les *Ablattaria*, qui vivent aux dépens des escargots, ont l'avant-corps étiré comme les *Cychrus*.

Super-famille des Hydrophiloidea

Une seule famille, celle des **Hydrophilidae**, constitue cette super-famille. Les imagos ont les palpes maxillaires allongés, aussi longs ou plus longs que les antennes qu'ils semblent avoir remplacées dans leurs fonctions sensorielles. Les antennes ont acquis un rôle respiratoire. Chez une espèce aquatique, comme *Hydrophilus piceus*, qui est tout noir, mesure environ 4 cm, et est commun dans les eaux calmes, les antennes sont courtes, à massue ovale. Il existe une réserve d'air sous-élytrale; de chaque côté du thorax et de l'abdomen une ligne longitudinale de pubescence conduit de la réserve d'air jusqu'aux stigmates. Lorsque l'hydrophile remonte pour renouveler sa provision d'air, il aborde la surface de l'eau par la face dorsale; l'antenne, tenue verticalement, émerge dans l'air et permet le passage de ce gaz jusqu'à la réserve sous-élytrale. Les hydrophiles mangent des plantes aquatiques; ce sont de mauvais nageurs; ils pondent leurs œufs dans un cocon qui leur sert de nacelle et qui assure leur respiration grâce à un long prolongement aérien. Les larves sont carnassières et elles pratiquent la digestion extraorale comme celles des dytiques. Les *Cercyon* et les *Sphaeridium* ont un régime alimentaire très différent : ce sont des coprophages fréquents dans les bouses.

Super-famille des Histeroidea

Nous ne citerons que la famille des **Histeridae**, formée d'espèces au corps très sclérifié, fréquemment noir, lisse et brillant, aux élytres munis de rares stries et laissant les deux derniers segments abdominaux à découvert, aux antennes coudées terminées par une massue, à la tête rentrant dans le pronotum, aux pattes à tibias aplatis pouvant se dissimuler dans des sillons de la face ventrale. A l'état larvaire, les Histeridae sont carnivores, à l'état imaginal, ils chassent, dans les cadavres et les bouses, les larves de Diptères; certains vivent sous les écorces et sont aplatis (genre *Platysoma*).

Super-famille des Scarabaeoidea

Les *Scarabaeoidea* constituent un groupe bien individualisé. On leur a donné le nom de Lamellicornes, à cause de leurs antennes de huit à onze articles comprenant un funicule terminé par une massue de plusieurs articles lamellaires et s'ouvrant souvent comme un éventail. Les tarses ont cinq articles. Presque toutes les espèces sont ailées et volent activement : la tête et le prothorax portent souvent des ornements cuticulaires nombreux et le dimorphisme sexuel est fréquent et très prononcé. Les larves sont caractéristiques : ce sont les vers blancs, ou larves mélolonthoïdes, recourbées en forme de C, aux téguments mous et blancs, et dont les deux derniers segments abdominaux sont très développés. La morphologie des larves varie avec leur régime alimentaire et leur mode de vie. Les espèces radicicoles vivant dans le sol *(Melolontha, Amphimallon)* ont un corps allongé, des pattes bien développées, une pilosité abondante sur les segments thoraciques et abdominaux, des antennes allongées, formées de quatre articles, des mandibules constituées d'une partie incisive importante et d'une partie molaire. Chez les espèces vivant dans le bois mort, comme les *Dorcus*, le corps est moins long, les pattes plus courtes, par suite de la réduction des coxas, la pilosité plus rare, les antennes moins allongées avec seulement trois articles, les mandibules plus massives avec la partie incisive moins importante. Des larves comme celles des *Osmoderma* et des *Cetonia* qui vivent dans le terreau ou le bois très décomposé, montrent des caractères intermédiaires. Le tube digestif des Scarabaeoidea présente des modifications en rapport avec leur régime alimentaire riche en cellulose. L'existence d'une chambre rectale de fermentation est fréquente. Il faut noter également, aussi bien chez les larves que les imagos, la fréquence des appareils stridulatoires et leur diversité morphologique.

Les principales familles de Scarabaeoidea sont les suivantes.

Les **Lucanidae** sont souvent de grande taille; leurs élytres couvrent entièrement l'abdomen et sont lisses, sans sillons. Les antennes, souvent coudées, ont les articles terminaux dilatés d'un seul côté de l'axe. Le dimorphisme sexuel est la règle. Les mandibules des mâles sont très développées et cette hypertrophie est soumise à des phénomènes d'allométrie majorante, qui peut aussi affecter la tête et le prothorax. Il existe, de ce fait, chez beaucoup d'espèces, plusieurs types morphologiques de mâles en fonction de la taille; les femelles, au contraire, sont plus petites et uniformes. Les larves habitent le bois décomposé dont elles se nourrissent; la durée de la vie larvaire peut atteindre quatre ans chez *Lucanus cervus*. La plupart des imagos sont crépusculaires ou nocturnes; il en existe quelques espèces en France comme le « cerf-volant », ou lucane.

Les **Passalidae** forment une famille riche de huit cents espèces, entièrement exotiques, d'Insectes au corps noir, déprimé, allongé, à antennes non coudées et dont les feuillets de la massue sont développés d'un seul côté. Leurs élytres sont striés longitudinalement. Ils vivent dans le bois mort, en petites colonies où sont mêlés larves et imagos. On a prétendu que les femelles nourrissaient les jeunes larves de bois régurgité et les rassemblaient autour d'elles grâce à des stridulations. Mais cette hypothèse n'a jamais été confirmée par l'observation.

A. Margiocco

I. Bucciarelli

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *A gauche, un couple de cerfs-volants,* **Lucanus cervus**; *le mâle a des mandibules très développées; en haut, larve onisciforme d'un Silphidae du genre* **Silpha**; *en bas, l'Hydrophilidae,* **Hydrophilus piceus**, *dont on note le grand développement des palpes.*

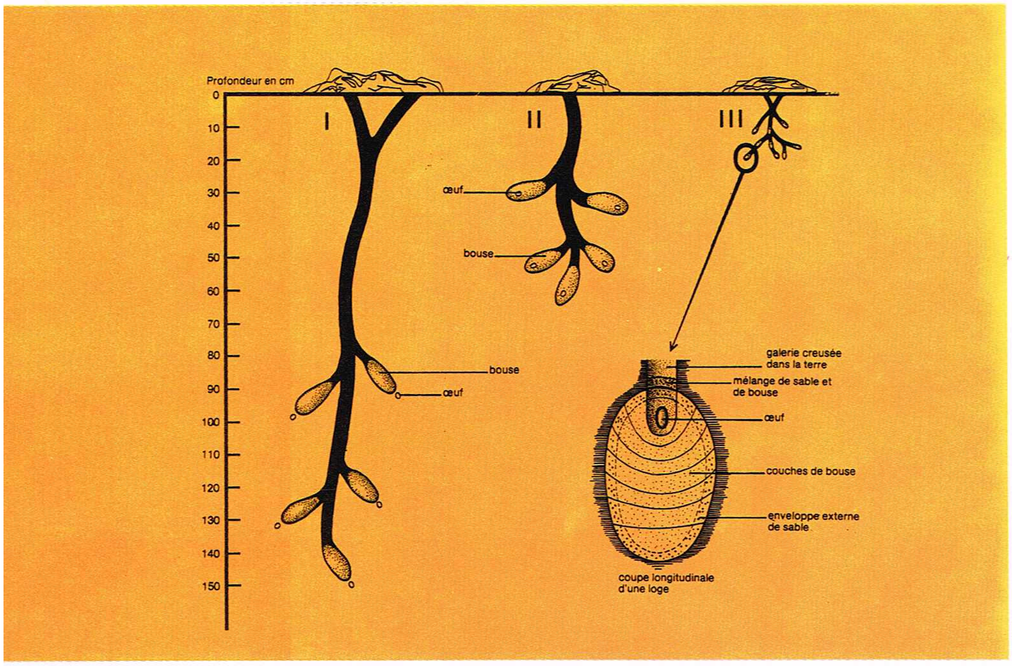

G. Hodebert

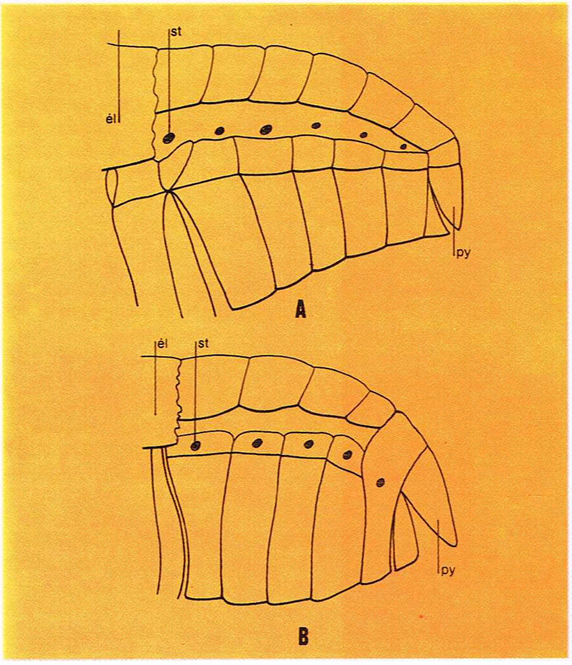

G. Hodebert

▲ *A gauche, terriers de trois Scarabaeidae coprophages : I,* **Typhoeus typhoeus**; *II,* **Geotrupes stercorarius**; *III,* **Ontophagus fracticornis**; *à droite, schémas de l'abdomen, vu de profil, et disposition des stigmates (st) : A, chez les Laparosticti; B, chez les Pleurosticti : él, élytre sectionné à la base; py, pygidium.*

▼ *Le mâle et la femelle du minotaure,* **Typhoeus typhoeus**; *noter les cornes prothoraciques très développées.*

A. Margiocco

Les **Trogidae** ne renferment qu'un nombre très réduit d'espèces. Les *Trox* sont des saprophages recherchant les déchets d'origine animale.

Les **Geotrupidae** ont des antennes de onze articles avec une massue de trois articles; leurs tibias antérieurs sont fortement dentés, ce qui correspond à des mœurs fouisseuses. Les larves ont un pygidium très développé, des segments abdominaux avec des replis membraneux saillants et des pattes réduites. Les Geotrupidae sont, pour la plupart, des coprophages, aussi bien à l'état larvaire qu'à l'état imaginal. Ils volent au crépuscule à la recherche de leur nourriture. Chez *Geotrupes stercorosus*, le nid est un terrier creusé en collaboration par le mâle et la femelle. Il comprend un puits principal situé sous l'amas de bouse; dans ce puits débouchent des galeries en cul-de-sac qui reçoivent chacune un œuf, lequel est recouvert d'excréments tassés en un boudin serré. Le terrier peut atteindre 50 cm de profondeur. L'activité fouisseuse des géotrupes est intense et la quantité de bouse enterrée importante. Quelques Geotrupidae sont mycophages, comme les *Bolboceras*, qui recherchent les Champignons Ascomycètes endogés voisins des truffes. Les *Lethrus* ont gardé un régime phytophage. Le mâle et la femelle accumulent dans un terrier, semblable à celui des géotrupes, des amas de pousses fraîches qui serviront de nourriture aux larves. *Lethrus apterus* peut être nuisible aux cultures dans les zones steppiques d'Europe orientale et de Russie. Le régime phytophage serait primitif chez les Geotrupidae, alors que la coprophagie serait acquise secondairement. D'ailleurs, beaucoup de géotrupes sont attirés par les Champignons pourris.

Les **Scarabaeidae** sont divisés par certains auteurs en plusieurs familles. Pour simplifier nous garderons ici une seule famille. En fonction de la structure abdominale des adultes, on distingue deux groupes : les *Laparosticti* et les *Pleurosticti*. Chez les Laparosticti, les stigmates abdominaux sont situés sur la membrane d'union entre les tergites et les sternites; l'avant-dernier sternite n'est pas complètement sclérifié et les élytres enveloppent toute la face dorsale de l'abdomen. Ce sont des coprophages (il faut noter que les Geotrupidae ont aussi cette structure). Chez les Pleurosticti, phytophages ou saprophages, les stigmates abdominaux sont situés sur la partie sclérifiée épaissie des segments abdominaux; l'avant-dernier sternite est bien sclérifié et les élytres laissent généralement à découvert le dernier sternite, ou pygidium. Les Scarabaeidae comptent plusieurs sous-familles.

Les *Aphodiinae*, représentés surtout par le genre *Aphodius*, riche de plus de mille espèces réparties dans le monde entier, se reconnaissent à leur forme plus ou moins oblongue, à leurs antennes de neuf articles à massue de trois, à leur clypéus développé recouvrant le labre et les mandibules, à leurs élytres cachant entièrement le pygidium et à leur scutellum bien visible. Ces Insectes très communs, dont la taille ne dépasse pas 1 cm, sont, le plus souvent, de couleur sombre. Certains sont éclectiques dans le choix de leur nourriture; d'autres sont spécialisés : ainsi *Aphodius cervorum* recherche les laissées de cerf dans la région parisienne; quelques espèces vivent aux dépens des Végétaux décomposés; la femelle des *Aphodius* pond ses œufs dans un amas de bouse et ne soigne pas ses jeunes.

Les *Scarabaeinae* ont le scutellum souvent invisible et le pygidium toujours découvert. Ils sont de forme plus massive que les Aphodiinae et de taille plus avantageuse : *Heliocopris bucephalus* atteint 55 mm. Ce sont les bousiers dont le comportement est le plus évolué, chez lesquels les soins aux jeunes sont fréquents. Plusieurs genres comme *Scarabaeus*, *Sisyphus*, roulent des pilules de bouse, loin du tas, alors que les *Copris* et les *Ontophagus* enterrent leur nourriture sur place. Les recherches sur la biologie des bousiers, commencées au XIXe siècle par J.H. Fabre, sont très nombreuses. Au point de vue anatomique, le tube digestif est très allongé, surtout le mésentéron, ce qui est en rapport avec la faible valeur nutritive des aliments ingérés. Mais la caractéristique la plus remarquable de ces Insectes est la simplification progressive de l'appareil reproducteur femelle. Chez *Aphodius fossor*, chaque ovaire comprend cinq à sept ovarioles, la fécondité est assez grande et les œufs sont déposés au hasard. Chez les géotrupes, chaque ovaire est réduit à un seul ovariole, la fécondité est plus faible et la ponte est précédée par l'enfouissement d'une grande masse d'excréments, ce qui nécessite un travail important. Chez des Scarabaeinae comme *Scarabaeus* et *Ontophagus*, l'ovaire droit est complètement atrophié; seul subsiste l'ovaire gauche, qui est réduit à un seul ovariole.

Les *Pachypodinae* comprennent avec le genre *Pachypus* deux espèces localisées à la Corse et à la Sardaigne. Elles sont remarquables par leur dimorphisme sexuel : la femelle n'a ni ailes ni élytres et vit dans un terrier; le mâle vole à sa recherche, sans doute guidé par l'odorat.

Les *Melolonthinae*, ou hannetons, sont des mangeurs de Végétaux comprenant de nombreuses espèces nuisibles. Leur taille varie de 10 à 40 mm; la massue de leurs antennes est glabre et formée de trois à sept articles mobiles en forme de feuillets. Les larves vivent dans le sol aux dépens des racines ou de débris végétaux. Le hanneton commun *Melolontha melolontha* a fait l'objet de recherches nombreuses. Sa vie larvaire dure trois ans; la larve s'enfonce dans le sol en hiver, et remonte en surface au printemps pour se nourrir; elle se trouve surtout dans les sols lourds, en lisière de forêt, et évite le sable. Les adultes apparaissent tous les trois ans au printemps; ils volent le soir et, en sortant de terre, s'orien-

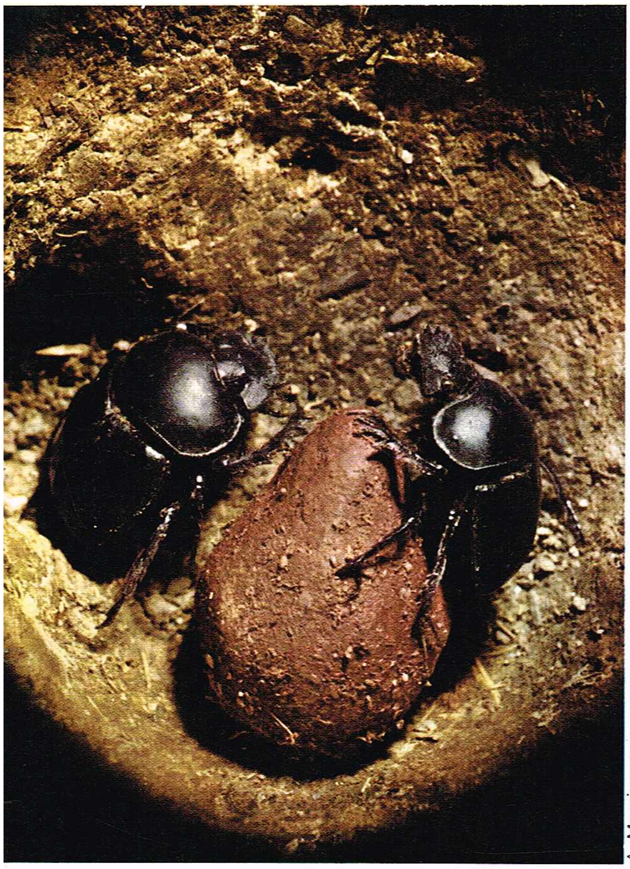

A. Margiocco

tent vers certaines parties localisées des lisières forestières où ils vont se nourrir. Chaque Insecte se dirige vers la silhouette qui lui paraît la plus haute, c'est-à-dire celle qu'il voit sous le plus grand angle, à condition que cette silhouette soit assez massive et située en deçà de la portée visuelle maximale du hanneton, qui est de 3 km. Parvenus dans les arbres, les hannetons se nourrissent puis retournent pour pondre dans la région de leur lieu d'éclosion. Ces faits expliquent l'irrégularité de la répartition des hannetons et la distribution en taches des vers blancs. Les larves âgées empêchent les larves jeunes de se développer en les attaquant à coups de mandibules. On comprend ainsi pourquoi, dans une région donnée, tous les vers blancs ont le même âge et pourquoi il y a des années à hannetons, alors que les taupins du genre *Agriotes* qui ont aussi un cycle larvaire de trois ans, apparaissent tous les ans à l'état imaginal. Parmi les autres Melolonthinae communs, citons les *Rhizotrogus* parmi lesquels on compte *R. solstitialis*, le hanneton de la Saint-Jean, les *Anoxia* qui vivent dans les sols sablonneux et le grand hanneton du pin *Polyphylla fullo*, dont le mâle a les feuillets de la massue antennaire très développés.

Les *Rutelinae* se reconnaissent aux griffes de leurs tarses inégales, surtout aux pattes postérieures. Ce sont des Insectes diurnes, actifs en plein soleil. Le hanneton japonais *Popillia japonica*, originaire d'Extrême-Orient et introduit aux États-Unis, y fait de grands dégâts. *Phyllopertha horticola*, au thorax vert métallique et aux élytres bronzés, est commun en France. Les *Hopliinae* sont représentés par *Hoplia coerulea*, dont la femelle est recouverte de squamules d'un bleu intense qui se détachent facilement.

La sous-famille des *Dynastinae* (de même que celle des *Cetoniinae*) possède des espèces qui sont parmi les plus grandes connues chez les Coléoptères et dont le dimorphisme sexuel est très prononcé. Le mâle de *Dynastes hercules* atteint 12 cm de long ; sa tête ainsi que son prothorax sont munis chacun d'une longue corne médiane, alors que la femelle est plus petite et dépourvue de ces ornements. Aux Antilles, où ils vivent, les *Dynastes* sont connus sous le nom de « scieurs de long », car ils auraient l'habitude de serrer les jeunes rameaux dans la pince formée par les deux cornes de la tête et du prothorax, et de tourner vivement en volant afin de couper des branches. Les larves des Dynastinae sont des vers blancs volumineux : celle d'*Oryctes nasicornis* atteint 10 cm de long et pèse dix grammes. Elles vivent dans les matières végétales décomposées, dans le bois mort, mais elles peuvent s'attaquer aussi à des Végétaux vivants. Beaucoup d'espèces d'*Oryctes* ravagent les cultures de cocotiers et autres palmiers tropicaux et sont de véritables fléaux. En France, on trouve *Oryctes rhinoceros*, qui n'est pas nuisible ; *Callicnemis latreillei* est inféodé aux plages sableuses au sud de la Loire ; *Pentodon punctatus* peut causer des dégâts à la vigne dans le Midi.

Les **Cetoniinae**, ou cétoines, ont des élytres échancrés latéralement en arrière de l'angle huméral, et des mandibules cachées dorsalement. Les larves se distinguent des autres vers blancs par leur tête relativement petite, leurs pattes courtes et leur aptitude à ramper sur le sol en s'aidant de leur pubescence dorsale. Elles vivent dans le terreau, le bois mort, parfois dans les fourmilières. Les imagos sont floricoles et recherchent les parties sucrées des fleurs et des fruits ou les exsudations de sève ; ils volent en plein soleil. Il existe plusieurs espèces de *Cetonia* en France ; elles ont une magnifique couleur vert métallique ou noire. Les goliaths africains atteignent jusqu'à 8 cm.

Super-famille des Dryopoidea

La super-famille des *Dryopoidea* comprend des familles aquatiques qui transportent avec elles un plastron d'air retenu par des poils hydrofuges, comme les **Elmidae** et les **Dryopidae**. Les **Psephenidae** des eaux courantes d'Amérique ont des larves de forme remarquable, aplaties et ovoïdes, qui s'accrochent avec ténacité au fond pour ne pas être emportées par le courant. Les **Heteroceridae** vivent avec leurs larves dans des galeries qu'ils creusent dans la vase.

Super-famille des Buprestoidea

Cette super-famille a été créée pour la seule famille des **Buprestidae**, jadis rapprochée des Elateridae. Les Buprestidae sont les Coléoptères les plus brillamment colorés. Ils comptent seize mille espèces, très héliophiles et surtout communes dans les régions chaudes. Leur corps est généralement allongé, à téguments durs ; l'apophyse prosternale est reçue dans une dépression du mésosternum et le prothorax est fixé d'une manière rigide au mésothorax. Les deux premiers sternites abdominaux sont plus ou moins fusionnés. Les larves dites « larves-marteau » sont le plus souvent xylophages ; elles creusent des galeries, de forme caractéristique, sous l'aubier et le cambium ou bien dans la profondeur du bois ; leur prothorax est très développé et leur tête y est partiellement

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

A. Allegri

▲ *En haut, larve de hanneton ; en bas, imago mâle du hanneton* **Melolontha melolontha** *dont on note le grand développement des lamelles de la massue antennaire.*

◀▲ *Un couple de scarabées sacrés,* **Scarabaeus sacer,** *confectionnant, dans le terrier, la pilule de bouse qui recevra l'œuf.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ *Le hanneton des pins,* **Polyphylla fullo ;** *le mâle, représenté ici, porte de très grandes antennes.*

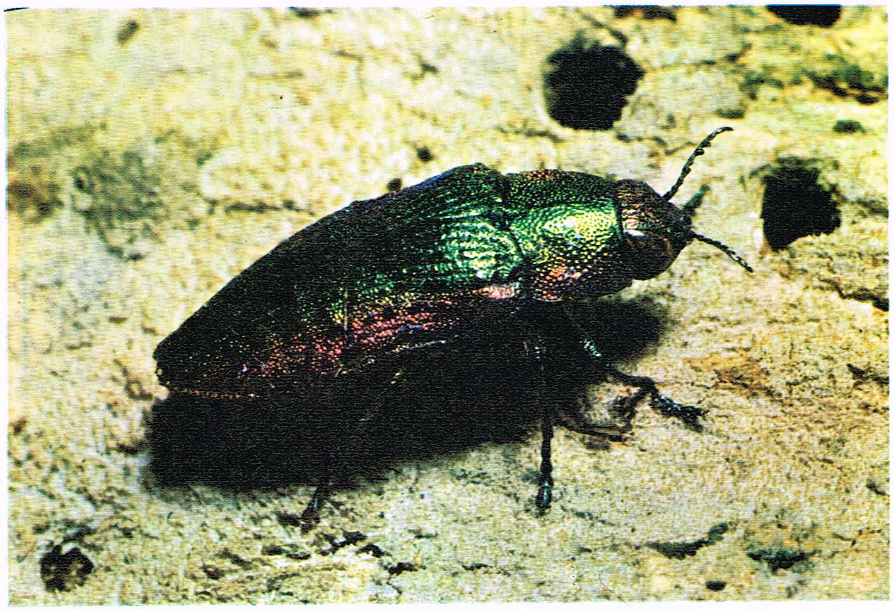

C. Bevilacqua

▲ *Le Buprestidae* **Lampra rutilans** *se rencontre sur les troncs des tilleuls dans une grande partie de la France.*

▼ *L'Elateridae* **Corymbites virens** *est commun dans les parties montagneuses des Alpes. Il vole en plein soleil. Noter le grand développement des antennes de ce mâle.*

C. Bevilacqua

enchâssée. Les pattes sont absentes, les téguments sont mous et blanchâtres. Suivant les espèces, la vie larvaire peut être de courte durée ou se prolonger plusieurs années. Il existe un peu plus d'une centaine d'espèces de Buprestidae en France, dont les plus répandus sont les *Agrilus* et les *Anthaxia*.

Super-famille des Elateroidea

Les **Elateridae**, ou taupins, de forme le plus souvent allongée, constituent la famille la plus importante de cette super-famille. Chez les taupins, l'apophyse prosternale, bien développée, est mobile par rapport au mésothorax et, lorsque l'Insecte est placé sur le dos, la détente brusque du prothorax lui permet de faire des sauts d'une dizaine de centimètres de hauteur. Les antennes de onze articles, filiformes, dentées ou flabellées, sont souvent logées dans des sillons du prosternum ; ce dernier possède un lobe saillant, ou mentonnière, qui recouvre plus ou moins la base des pièces buccales. Les Elateridae forment une famille homogène en ce qui concerne la morphologie externe, et leur subdivision en sous-familles, tribus et genres est difficile et non encore établie d'une façon satisfaisante.

L'appareil reproducteur femelle, dans sa partie ectodermique, montre par contre une diversité remarquable en ce qui concerne le nombre et la forme des glandes accessoires ainsi que la forme des pièces sclérifiées qui s'y trouvent. Cette diversité taxonomique n'a guère encore été utilisée pour une classification rationnelle de la famille.

Les larves des Elateridae sont les larves « fil de fer ». Elles ont le corps allongé, rigide, jaune ou noir, de section ronde ou aplatie suivant les cas ; les pattes sont courtes, le labre soudé au front ; le dernier segment abdominal est pourvu d'urogomphes de forme caractéristique. Au point de vue biologique, il existe deux groupes. Le premier est représenté par les espèces dont les larves vivent dans le sol aux dépens des Végétaux. Ce sont les *Agriotes*, certains *Selatosomus*, *Athous* et *Lacon*. Chez les *Agriotes*, la vie larvaire peut durer trois années. Les larves s'orientent à distance vers les plantes nourricières en se laissant guider par le gaz carbonique, les acides aminés ou divers sucres sécrétés par les racines. Chez l'espèce américaine *Ctenicera aeripennis*, en raison de la structure de sa bouche et de ses pièces buccales, la larve ne peut ingérer que des liquides ou des particules de moins de 3 μ de diamètre. Elle semble se nourrir en mâchant les Végétaux, puis en pratiquant une digestion extra-orale. Les imagos d'*Agriotes* sont nocturnes et phytophages. Le deuxième groupe renferme les espèces dont les larves vivent dans le bois mort (le genre *Ampedus*, de nombreux *Athous*, *Adelocera*, *Melanotus* et *Ludius*). Elles sont, en général, prédatrices d'autres Arthropodes, au moins à un stade de leur vie ; elles peuvent aussi ingérer des fragments de mycélium ou de bois pourri. Les imagos de ce groupe restent souvent cachés dans les anfractuosités des écorces ou dans les cavités d'arbres, d'où ils ne sortent que rarement, sauf la nuit. En Amérique tropicale, les *Pyrophorus* possèdent des organes lumineux sur le prothorax et l'abdomen ; ils émettent une lumière froide et intense résultant d'un processus d'oxydation semblable à celui qui existe chez les vers luisants.

Super-famille des Cantharoidea

Les **Cantharidae**, fréquemment floricoles, sont carnassiers aussi bien à l'état larvaire qu'à l'état imaginal. Leurs téguments sont mous (d'où leur ancien nom de Malacodermes), leurs antennes longues, leur tête bien dégagée du prothorax. Les larves ont les mandibules creusées d'un canal salivaire qui permet d'injecter des sucs digestifs dans les proies et de pratiquer la digestion extra-orale. Les *Cantharis* et les *Rhagonychia* sont communs en France. Chez les *Malthodes*, le dernier segment abdominal du mâle présente des appendices de formes très diverses.

Les **Lampyridae** sont remarquables par leur dimorphisme sexuel. Chez le ver luisant *Lampyris noctiluca*, la femelle a un aspect vermiforme qui la fait ressembler à une larve. Tous les Lampyridae sont des carnassiers chassant surtout les Gastéropodes. De nombreuses espèces sont lumineuses, l'appareil émetteur se trouvant situé sur l'abdomen. La lumière émise provient de l'oxydation de la luciférine sous l'action d'une enzyme, la luciférase.

Cette dernière comprend uniquement des radiations visibles, situées entre le vert et le rouge. Chaque espèce est caractérisée par une lumière d'une certaine longueur d'onde et par des éclats lumineux de durée déterminée. Ces signaux servent de moyen de reconnaissance et permettent le rapprochement des sexes, les mâles ne réagissant qu'aux signaux émanant des femelles de leur propre espèce.

Super-famille des Dermestoidea

Les **Dermestidae** sont une petite famille de Coléoptères de taille modeste (moins de 1 cm) qui attaquent les produits d'origine animale (comme la fourrure, la laine, la viande séchée, les collections d'Insectes, les cadavres) et qui peuvent causer de grands dégâts. Les plus communs sont les *Dermestes* et les *Anthrenus*.

Super-famille des Bostrychoidea

On classe ici les **Anobiidae**, les **Bostrychidae** et les **Lyctidae**, dont les larves sont xylophages. Les *Anobium*, ou vrillettes, ont des larves qui peuvent cribler les vieux meubles d'innombrables galeries et les réduire en poussière. Ils peuvent se développer dans des bois très secs.

Super-famille des Cleroidea

Les **Cleridae** ont des tarses de cinq articles, des antennes renflées en massue; leur corps pubescent est en général brillamment coloré en rouge, en bleu ou en vert métallique. Ce sont des carnassiers dont la plupart des trois mille espèces sont tropicales. Beaucoup d'imagos sont floricoles comme les *Trichodes*; d'autres vivent sous les écorces en compagnie de leurs larves, comme les *Opilo*, les *Tillus*, ou comme *Necrobia ruficollis*, dans les cadavres. Les larves de *Trichodes apiarius* (le clairon des abeilles) vivent aux dépens d'Hyménoptères comme les abeilles, les osmies, les mégachiles.

G.S. Giacomelli

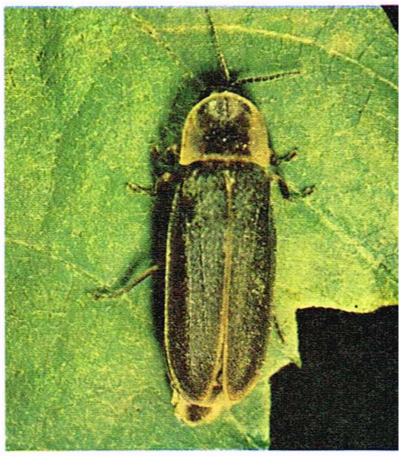

G.S. Giacomelli

▲ ***A gauche, la femelle d'aspect vermiforme; à droite, le mâle du ver luisant,*** **Lampyris noctiluca.**

Super-famille des Cucujoidea

La vaste super-famille des *Cucujoidea* représente à la fois le groupe le plus riche en familles, et celui dont la classification est la plus confuse. On peut la scinder en deux subdivisions plus ou moins naturelles : les Homéomères, dont tous les tarses ont en général le même nombre d'articles, et les Hétéromères, dont la formule tarsale est 5-5-4.

Les *Homéomères* constituent un ensemble qui recouvre à peu près les anciens Clavicornes. On y place près d'une trentaine de familles, aux limites mal définies, formées d'espèces de petite taille. Nous ne citerons que les *Nitidulidae* et les *Coccinellidae* en raison de leur importance économique.

Les **Nitidulidae** sont surtout représentés en Europe par le genre *Meligethes*, riche de plusieurs centaines d'espèces à répartition mondiale. Ce sont des Insectes ne dépassant pas 2 mm, de forme ovale et généralement noirs, verts ou bleus, avec des antennes terminées en massue et les élytres dégageant le pygidium. Plusieurs espèces, comme *Meligethes aeneus*, sont nuisibles aux Crucifères et en particulier au colza. Les imagos mangent le pollen et le nectar, et pondent leurs œufs dans les fleurs.

Les **Coccinellidae**, dont la taille atteint rarement 1 cm, ont le plus souvent une forme hémisphérique, des antennes en massue, des pattes courtes et des couleurs vives : rouge, orangé, jaune, avec des taches noires. Ces couleurs très voyantes semblent avoir pour fonction d'avertir les éventuels prédateurs qu'il s'agit d'espèces non comestibles. En effet, la plupart des Coccinellidae sécrètent des alcaloïdes qui les rendent immangeables. Beaucoup de coccinelles sont prédatrices de pucerons, de cochenilles, d'Acariens ou de petits Arthropodes, chaque espèce ayant un régime plus ou moins spécialisé. Les coccinelles jouent un rôle considérable dans la limitation des populations de certains Insectes nuisibles. *Novius cardinalis* est employé dans la lutte biologique contre la cochenille de l'oranger, *Icerya purchasi*; les *Scymnus* dévorent les Acariens Tetranychidae; *Coccinella septempunctata* (la coccinelle commune à sept points) attaque les pucerons mais peut changer de régime en cas de disette. Les *Halyzia* et les *Thea* mangent les moisissures. Les coccinelles hivernent, à l'état adulte, dans certains lieux de rassemblement privilégiés qui sont toujours, année après année, les mêmes. Quelques rares espèces, phytophages, peuvent être nuisibles. Ce sont surtout des représentants de la sous-famille des *Epilachninae*, reconnaissables à leurs téguments pubescents. Dans la région méditerranéenne *Epilachna chrysomelina* est nuisible aux melons et aux pastèques.

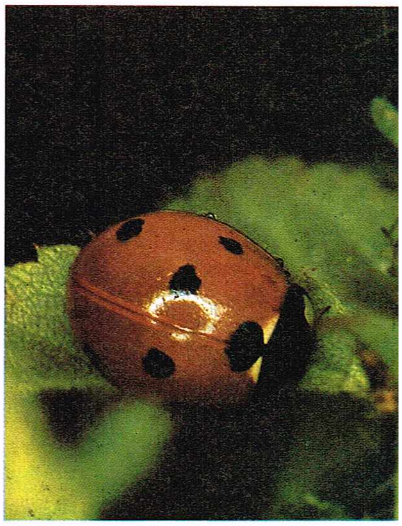

I. Bucciarelli

▲ ***Une coccinelle,*** **Coccinella septempunctata.**

Les *Hétéromères* ont généralement des tarses de cinq articles aux pattes antérieures et intermédiaires, et de quatre articles aux pattes postérieures. On groupe dans cet ensemble une trentaine de familles fort diverses en ce qui concerne la morphologie et la biologie.

C. Bevilacqua

◀ ***Le Cleridae*** **Trichodes alvearius.**

Les **Tenebrionidae** constituent une immense famille de près de vingt mille espèces décrites. Ce sont des Coléoptères très variés quant à la forme et à la taille (de 2 mm chez les petits *Oochrotus* qui vivent avec les fourmis, à 80 mm chez certains *Molurini*). On y trouve presque tous les types morphologiques et certains Tenebrionidae ressemblent étrangement à des Carabidae, à des Chrysomelidae ou à des Coléoptères d'autres familles. Les téguments sont souvent noirs (ce sont les mélasomes des anciens entomologistes), rarement de teinte métallique, parfois dépigmentés chez quelques espèces désertiques ou endogées; il existe aussi des espèces rouges, vertes ou bleues et d'autres, qui vivent dans les déserts, recouvertes d'un enduit blanc. Les antennes, de onze articles, sont presque toujours filiformes ou légèrement renflées. Beaucoup de Ténébrionides sont aptères. Tous, ou presque tous, possèdent des glandes anales qui sécrétent des quinones jouant un rôle défensif vis-à-vis des prédateurs. Les larves sont aussi variées que les imagos; elles rappellent souvent celles des Elateridae par leur raideur. Les nymphes sont caractérisées par des expansions latérales des segments abdominaux.

Au point de vue biologique, il est possible de distinguer quatre grands groupes parmi les espèces encore peu nombreuses dont on connaît bien la biologie. Les plus nombreuses sont répandues dans les régions arides et vivent dans les déserts; elles appartiennent aux sous-familles des *Tentyriinae*, des *Asidiinae* et en partie aux *Tenebrioninae*. Leur biologie a été étudiée dans la partie

C. Bevilacqua

▲ *Un Tenebrionidae,* **Akis italica.**

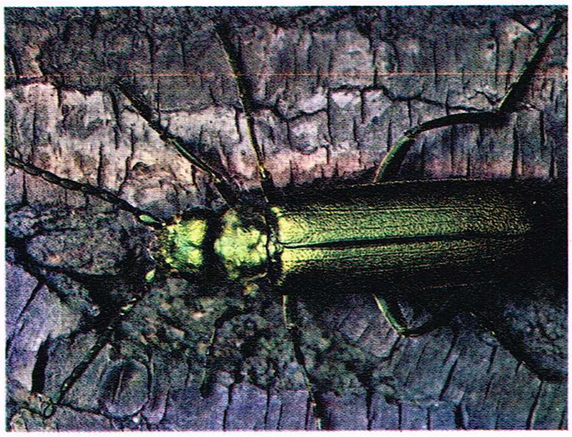

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ *La cantharide* Lytta vesicatoria *appartient à la famille des Meloidae.*

consacrée à la faune des déserts. A ce groupe appartiennent les *Tentyria*, les *Erodius*, les *Pimelia*, les *Asida*, *Opatrum*, les *Blaps*, etc. Ce sont des phytophages ou des mangeurs de débris végétaux sans spécialisation alimentaire bien marquée. Cependant *Foleya brevicornis* du Sahara mange uniquement les épis de la Graminée *Aristida pungens*. Dans les régions steppiques cultivées, certaines de ces espèces peuvent devenir nuisibles. Dans le sud de la Russie les *Opatrum* attaquent des plantes comme le tabac. Plusieurs espèces des régions arides manifestent des tendances à la pholéophilie : les *Blaps* sont fréquents dans les terriers de Mammifères, où ils mangent les débris d'origine animale. Les Tenebrionidae des régions plus humides sont surtout des Tenebrioninae. A cette catégorie appartiennent des espèces forestières qui vivent en saproxylophages dans le bois pourri, comme divers *Helops* et *Melasia culinaris;* quelques-unes sont inféodées aux Champignons lignicoles : *Boletophagus reticulatus* se développe dans l'amadouvier et *Diaperis boleti* dans divers polypores. Certaines espèces sont devenues prédatrices, comme les *Hypophloeus* qui vivent sous les écorces et chassent les larves de scolytes. Le sol a été colonisé par de rares Tenebrionidae aveugles, dépigmentés et de petite taille. Les *Caecochares* de Madagascar et divers genres d'Amérique du Sud appartiennent à cette catégorie. En Afrique orientale, *Typhlophloeus chappuisi* vit dans les terriers de rats-taupes. Des Tenebrionidae halophiles se sont installés dans les terrains salés du bord de la mer et de l'intérieur des terres. Sur les plages de la Méditerranée, les *Phaleria* et les *Halammobia* abondent dans le sable, sous les cadavres ou les débris végétaux.

Enfin, il existe plusieurs espèces nuisibles aux denrées emmagasinées, dans lesquelles elles peuvent pulluler. Leur régime alimentaire correspond à une modification secondaire du régime primitif : elles mangent de la farine, du blé, des céréales et des graines diverses. Plusieurs *Tribolium*, *Palorus* et *Tenebrio molitor* sont dans ce cas. En raison de leur facilité d'élevage, ce sont devenus des Animaux de laboratoire grâce auxquels nos connaissances ont largement progressé dans plusieurs domaines de la biologie. Ainsi, les élevages de *Tribolium* ont permis d'obtenir des données sur les mécanismes de la compétition intraspécifique et sur la dynamique des populations.

Les **Meloidae** sont remarquables par leurs hypermétamorphoses dont *Meloe* nous offre un exemple. Ce genre renferme des espèces de grande taille (jusqu'à 4 cm), de couleur souvent bleue ou noire, avec des élytres laissant à découvert une bonne partie de l'abdomen; les ailes sont absentes. Les *Meloe* pratiquent fréquemment l'autohémorrhée et rejettent, par la bouche et les articulations des pattes, du sang coloré en rouge et riche en cantharidine toxique pour les Vertébrés. Les larves primaires issues de l'œuf s'installent sur les fleurs et s'accrochent aux Hyménoptères qui viennent y butiner. Ces larves sont appelées triongulins à cause des trois griffes qui terminent leurs pattes (une médiane assez large et deux latérales plus minces); elles ne mesurent que de 0,5 à 2 mm. Lorsque la larve-triongulin arrive dans le nid d'un hôte approprié (*Anthophora, Osmia, Andrena,* etc.), elle se nourrit du miel et de la larve situés dans la cellule où elle s'est installée. Ensuite, elle subit une première mue et devient une larve caraboïde, puis deux autres mues successives qui donnent des larves mélolonthoïdes; la seconde larve mélolonthoïde se déplace vers d'autres cellules, où elle dévore les larves de l'Hyménoptère-hôte qui s'y trouvent. Au bout de quelques jours, une autre mue fournit une larve contractée, aux pattes atrophiées, qui ne bouge plus et ne mange plus. Cette larve atrophiée passe par un stade de prénymphe, stade le plus souvent inutile puisque la prénymphe ne se dégage même pas de l'exuvie de la larve contractée. Le stade nymphal qui suit est normal et l'imago apparaît en général à l'automne. Le cycle complet dure de six à huit mois. *Lytta vesicatoria*, d'une belle couleur verte, vit sur les frênes dans le sud de la France. Il sert à faire la poudre de cantharide utilisée jadis en pharmacie. D'autres *Meloidae* vivent aux dépens d'Acridiens. C'est le cas des *Zonabris* aux vives couleurs, jaune et noir, ou rouge et noir.

Super-famille des Chrysomeloidea

Dans cet ensemble qui comprend uniquement des espèces phytophages ou xylophages, le caractère essentiel réside dans la structure des tarses qui sont cryptopentamères, c'est-à-dire formés de cinq articles, mais avec le quatrième très petit et caché entre les lobes du troisième; les trois premiers articles sont souvent pourvus, en dessous, de lamelles adhésives. Les larves n'ont pas d'urogomphes. Cette super-famille est homogène et reconnue depuis longtemps. On y trouve tous les intermédiaires entre les Chrysomélides typiques, courts et presque hémisphériques, aux antennes courtes, et les Cérambycides, au corps allongé et aux antennes très grandes.

Les **Cerambycidae**, ou Longicornes, ont des antennes dont la longueur atteint au moins la moitié de celle du corps mais qui, dans certains cas, peuvent être bien plus longues. Elles possèdent normalement onze articles. Le corps est allongé, la taille souvent très grande : *Titanus giganteus* et *Macrodontia cervicornis* d'Amérique du Sud atteignent 16 cm de long à l'état adulte et leurs larves dépassent 20 cm. Les mandibules des Cerambycidae sont robustes. Les ailes sont bien développées ou absentes suivant les cas. Les imagos de beaucoup de genres de nos régions, comme les *Leptura*, sont des floricoles qui fréquentent les Composées et les Ombellifères et sont actifs en plein soleil ; beaucoup de Prioninae volent au crépuscule et sont attirés par les lumières ; quelques espèces ayant perdu leurs ailes marchent au sol et se cachent sous les troncs et les écorces.

Alors que la durée de vie imaginale est courte (souvent moins d'un mois), la vie larvaire peut durer plusieurs années. Presque toutes les larves de Cerambycidae sont xylophages et faciles à reconnaître : le corps est charnu et turgescent ; la tête est encastrée dans le prothorax ; les pattes, réduites ou absentes, sont remplacées par des ampoules ambulatoires abdominales qui fournissent des points d'appui pendant la progression dans les galeries ; le tube digestif est long et l'équipement enzymatique complet, une cellulase permettant de digérer la cellulose, parfois à l'aide de symbiontes.

La plupart des espèces sont polyphages ; cependant, la faune des feuillus est différente de celle des résineux ; beaucoup d'espèces ne se développent que dans le bois déjà décomposé. Les Cerambycidae qui s'attaquent aux arbres vivants sont rares : on les qualifie de ravageurs primaires. C'est le cas des *Saperda* des peupliers et d'une espèce d'origine australienne, *Phoracantha semipunctata*, introduite accidentellement dans le bassin méditerranéen, où elle fait de grands ravages parmi les plantations d'eucalyptus. Il existe quelques Cerambycidae aberrants. Les *Dorcadion*, qui n'ont plus d'ailes, vivent à terre ; leurs larves sont terricoles et parcourent le sol à la recherche des racines de Graminées dont elles se nourrissent. Les *Vesperus* sont crépusculaires ou nocturnes. Leurs femelles ont des élytres atrophiés et leurs larves sont très différentes de celles des autres Cerambycidae ; celles-ci ont, en effet, des pattes bien développées et une longue pubescence, et elles cheminent dans le sol. *Vesperus xatarti*, connu dans la région de Banyuls sous le nom de « mange-maillols », attaque les racines de la vigne.

Les **Bruchidae** ont une forme globuleuse, une taille inférieure à 5 mm, des élytres dégageant le pygidium, le premier article des tarses postérieurs très long, et des antennes souvent renflées en massue. Leurs larves rappellent celles des charançons. Les Bruchidae sont des mangeurs de graines (ou cléthrophages) à l'intérieur desquelles leurs larves se développent. Ils font souvent des ravages importants dans les denrées emmagasinées. Ainsi, les espèces des genres *Bruchus* et *Acanthoscelides* attaquent les Légumineuses : les pois, les haricots, les lentilles.

C. Bevilacqua

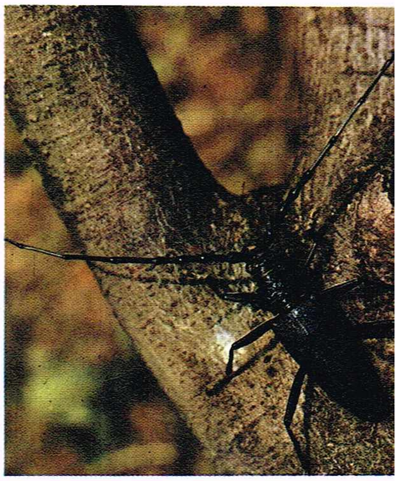

C. Bevilacqua

▲ *A gauche, le Cerambycidae* Macrodontia cervicornis *est remarquable par sa grande taille et ses mandibules hypertrophiées ; à droite,* Cerambyx cerdo *se développe dans le chêne.*

M. Boulard

◀ *La femelle du Cerambycidae africain,* Analeptes trifasciata, *en train de pondre dans une branche de* Lannea.

C. Bevilacqua

A. Margiocco

▲ *En haut,* Crioceris asparagi *vit aux dépens des Liliacées; en bas,* Lilioceris merdigera *doit son nom à sa larve qui se camoufle sous ses excréments.*

▲▶ *Le Curculionidae africain* Rhynchophorus phoenicis *dans un tronc de palmier.*

Les **Chrysomelidae,** famille très riche en espèces (elle en comprend au moins vingt-six mille), ont souvent une taille relativement réduite, des couleurs métalliques où domine le vert, une forme ramassée (ce qui les différencie des Cerambycidae) et des téguments glabres. Tous sont phytophages. Les Chrysomelidae sont subdivisés en seize sous-familles. Les *Donaciinae* comprennent les *Donacia* dont le corps est allongé, ce qui est inhabituel dans la famille; ils vivent sur les plantes aquatiques. Les *Haemonia* en sont voisins mais ils sont constamment submergés, de même que leurs larves. Les *Criocerinae,* de forme étroite et allongée, ont souvent une coloration métallique, avec des taches sur les élytres. Les *Crioceris* attaquent les Liliacées; *C. asparagi* a le prothorax rouge, les élytres rouge et bleu. *Lilioceris merdigera,* entièrement rouge, vit sur le lis et l'oignon; sa larve a la curieuse habitude de se recouvrir avec ses excréments, d'où le nom de l'espèce. Les *Clytrinae* renferment le genre *Clytra*; les larves de *C. quadrimaculata* logent leur abdomen dans une coque constamment agrandie et elles vivent avec les fourmis rousses. La sous-famille des *Chrysomelinae,* est riche en espèces, citons les *Chrysolina, Chrysomela populi* et surtout le doryphore de la pomme de terre, *Leptinotarsa decemlineata,* importé accidentellement en France en 1938 et maintenant répandu dans presque toute l'Europe. Les *Cassida* de la sous-famille *Cassidinae* ont le corps aplati et ovale et peuvent dissimuler leurs pattes et leurs antennes sous les bords du prothorax et des élytres. Les *Hispinae* ont le corps couvert d'épines. En France, *Hispa testacea* vit sur les cistes dans la région méditerranéenne et *Hispella atrata* se rencontre sur les Graminées dans tout le pays. Les espèces de la sous-famille des *Halticinae,* ou altises, ont la faculté de sauter grâce au développement de leurs pattes postérieures. Enfin, signalons que beaucoup d'espèces causent des dégâts aux cultures : *Psylliodes chrysocephala* et divers *Phyllotreta* attaquent les Crucifères; *Haltica lythri ssp, ampelophaga* s'est adapté à la vigne.

M. Boulard

Super-famille des Curculionoidea

Encore appelées Rhynchophores, les espèces de cette super-famille sont caractérisées par la réunion des sutures gulaires; leur tête est fréquemment prolongée en rostre; les palpes maxillaires ont trois articles, la galéa et la lacinia sont fusionnées en un seul lobe. Les tarses sont cryptométamères ou trimères; les antennes sont souvent terminées en massue. Les larves, dites éruciformes, sont dépourvues de pattes, presque cylindriques, souvent recourbées, avec des téguments blancs et mous.

Les *Curculionoidea* constituent la super-famille de Coléoptères la plus riche en espèces. Elle comprend les formes les plus évoluées au point de vue morphologique et renferme un nombre de familles qui varie de cinq à sept, suivant les conceptions des auteurs.

Les **Curculionidae,** ou charançons, comptent soixante mille espèces présentes partout où il existe de la végétation. Les petits *Apion* de nos régions ne dépassent pas 1 mm, alors que les *Rhychophorus* africains mesurent jusqu'à 70 mm. La tête des Curculionidae est prolongée par un rostre qui, chez les *Balaninus,* dépasse la longueur du corps. Les pièces buccales sont situées à l'extrémité de ce rostre; les palpes maxillaires de trois articles sont plus ou moins rigides et immobiles; les antennes sont coudées, avec le premier article (ou scape) allongé et un funicule souvent terminé en massue. La forme du corps est variable; le tégument est fréquemment recouvert de squamules colorées. Les larves sont fort homogènes. La plupart vivent à l'intérieur des Végétaux; celles des espèces mineuses comme les *Orchestes* ont une forme aplatie. Exceptionnellement, les larves des *Hypera* peuvent s'installer à l'extérieur du Végétal nourricier. Chez la femelle, le rostre sert souvent d'instrument de forage pour creuser une loge où sera ensuite déposé l'œuf. Les charançons attaquent toutes les parties des Végétaux sans exception : les racines, les tiges, les feuilles, les fleurs, les graines et les fruits. Les *Cossininae* vivent dans le bois; les *Bagous* sont aquatiques et nagent à l'aide de leurs pattes. Les *Sitophilus* vivent dans les stocks de céréales.

Les Curculionidae renferment de nombreuses sous-familles. Les *Otiorrhynchinae* sont caractérisés par leur rostre court, droit et épais, leurs antennes longues et logées au repos dans des sillons, ou *scrobes,* bien développés. Leur forme est courte, ovoïde. Beaucoup d'espèces sont aptères, à élytres soudés et à coloration généralement sombre ou noire. Le genre *Otiorrhynchus,* riche de huit cents espèces à activité nocturne, est répandu dans la région paléarctique, surtout dans les montagnes. La parthénogenèse y est fréquente et les mâles de beaucoup d'espèces sont fort rares. Les *Phyllobius* vivent sur les feuilles de divers arbres ou de plantes herbacées. Leur tégument est recouvert de squamules aux couleurs vives : vert, bleu, doré. Ils sont plus allongés que les *Otiorrhynchus. Phyllobius urticae,* qui vit sur l'ortie, et a une belle couleur verte, est l'un des charançons les plus communs.

Les *Brachyderinae* se séparent des *Otiorrhynchinae* par leurs scrobes plus étroits et allongés. Les *Polydrosus* rappellent les *Phyllobius* par leur forme. Les *Sitona* présentent les élytres tronqués à la base et plus larges que le pronotum, une taille réduite (de 2 à 6 mm) et des teintes ternes. Ils vivent aux dépens de Légumineuses. Les *Brachycerinae,* avec le genre *Brachycerus,* se reconnaissent facilement à leur taille avantageuse, leur forme massive, leurs élytres soudés et couverts de reliefs marqués. Leurs antennes de sept articles sont courtes et non coudées. Les larves répandues dans la région méditerranéenne et dans les régions tropicales vivent dans les bulbes des Liliacées et des Amaryllidacées. Les *Cleoninae* comprennent deux tribus. Les *Cleonini* ont le rostre épais et caréné. La larve de *Cleonus piger* vit à la base des tiges de divers chardons où elle provoque la formation de galles. Les *Lixini* ont le rostre mince et non caréné. Les *Lixus* ont une forme élancée, presque cylindrique; leur corps est fréquemment recouvert d'un enduit de couleur jaune, rouge ou grise, qui semble provenir de l'élimination de déchets du métabolisme. Les *Larinus* sont des *Lixini* au corps massif et recouvert d'un revêtement semblable à celui des *Lixus.* De taille fréquemment supérieure au centimètre, ils vivent presque exclusivement aux dépens des Composées du groupe des chardons. Leurs larves dévorent le réceptacle des jeunes capitules et y effectuent leur nymphose.

Dans la sous-famille des *Curculioninae* nous mentionnerons la tribu des *Hyperini,* dont les larves vivent à l'extérieur du Végétal nourricier; *Hypera variabilis* est nuisible à la luzerne; *Coniatus tamarisci,* qui vit sur les tamaris,

A. Margiocco

est étonnamment homochrome avec ses taches vertes et rouges. Dans la tribu des *Curculionini, Hylobius abietis* est une espèce commune qui vit sur le pin, dans le bois duquel la larve creuse ses galeries. La sous-famille des *Calandrinae* est une des plus importantes de la famille. On y rencontre des espèces qui s'attaquent aux plantes ligneuses. *Pissodes notatus* vit sur les pins malades, où sa larve creuse des galeries sous l'écorce. Les *Cossonini* recherchent le bois mort, plus ou moins décomposé, ou bien les vieilles poutres et les parquets. La tribu des *Orchestini* est représentée par des espèces aux pattes postérieures renflées qui sautent énergiquement. Dans le genre *Orchestes*, plusieurs espèces sont des mineuses des feuilles de hêtre, de chêne et d'orme. Les *Magdalini*, qui comprennent le genre *Magdalis*, ont des larves xylophages qui attaquent les rameaux morts ou dépérissants, surtout ceux des résineux mais aussi des arbres fruitiers. D'autres espèces de *Calandrinae*, comme les *Ceuthorrhynchus*, qui ont six cents espèces dont plus de cent vingt en France, vivent aux dépens des plantes herbacées, des Crucifères, des Labiées, des Boraginacées, etc. Au niveau du lieu de ponte de ces charançons, il se manifeste souvent une réaction du Végétal, dont les cellules prolifèrent, ce qui produit une sorte de galle à l'intérieur de laquelle la larve reste emprisonnée pendant sa croissance. La formation de cette galle semble due à l'action stimulante de sécrétions de l'Insecte ou bien à celle de microorganismes symbiotiques émis par la femelle lors de la ponte. Dans la tribu des *Calandrini* se rencontrent les charançons des grains, *Sitophilus granarius* et *Sitophilus oryzae*, qui attaquent surtout le blé, le maïs et le riz et qui peuvent faire de grands ravages. Comme les *Tribolium*, ces Insectes faciles à élever sont devenus des Animaux de laboratoire, et ont fait l'objet d'innombrables recherches. Les *Balanini*, avec le genre *Balaninus*, sont caractérisés par leur rostre très long et mince. *Balaninus elephas* vit dans les glands et les châtaignes ; *Balaninus nucum* est le ver des noisettes.

La sous-famille des *Apioninae*, souvent considérée comme une famille distincte, comprend seulement le genre *Apion*, riche de plus de mille six cents espèces, toutes de petite taille avec un rostre allongé, des antennes non coudées, un corps globuleux et ovoïde. Les *Apion*

▲ **Eulophus schonherri** *est un Curculionidae de Nouvelle-Guinée, revêtu de brillantes couleurs dues à la présence de squamules colorées, fixées sur le tégument.*

▼ *Le charançon du blé,* **Sitophilus granarius**, *et ses dégâts.*

A. Margiocco

vivent sur des plantes très diverses. Certaines espèces sont de couleur vive : rouge, bleu ou vert.

Les **Attelabidae,** qui ont été séparés des Curculionidae, ont un rostre court ; chez certaines espèces exotiques la tête peut être portée sur un cou démesuré ; la forme est, le plus souvent, massive, avec des couleurs vives, métalliques : rouge, vert, bleu, cuivré ; les antennes ne sont pas coudées. Les Attelabidae sont des charançons vivant sur des essences ligneuses et connus sous le nom de « cigariers » ou de « coupe-bourgeons » en raison de leurs mœurs. Ils renferment des espèces comme *Byctiscus betulae* qui enroule les feuilles de peuplier en un véritable cigare après avoir pratiqué des incisions sur le pétiole et à la base du limbe pour provoquer le flétrissement de la feuille. Les œufs sont déposés dans des entailles pratiquées dans le parenchyme foliaire. *Deporaus betulae* enroule les feuilles de bouleau suivant un entonnoir

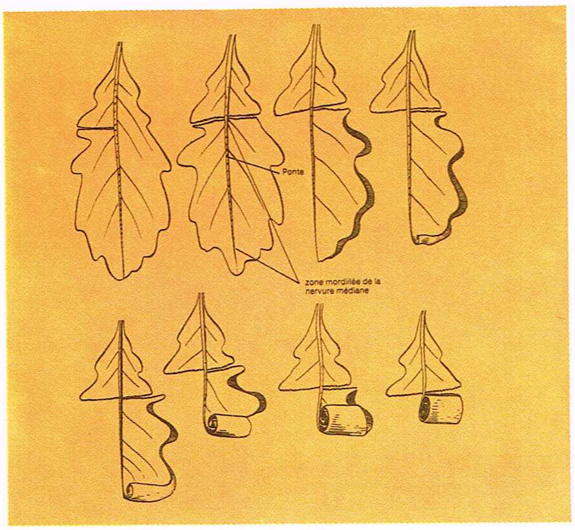

▶ ***Schémas montrant les stades successifs de l'enroulement d'une feuille de chêne par la femelle de l'Attelabidae*** **Attelabus nitens.**

G. Hodebert

▶ *Les galeries de* **Scolytus** *ont une forme caractéristique ; la galerie maternelle sert de point de départ aux galeries larvaires rayonnantes. Ces galeries sont creusées dans l'aubier ; on voit ici deux systèmes de galeries et l'amorce d'un autre système en haut.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

conique, après avoir sectionné la base de la feuille. Les *Rhynchites* pondent dans la pulpe des pommes, des cerises, des prunes ; en même temps, ils pratiquent des morsures de nutrition dans les bourgeons et les feuilles jeunes des arbres, auxquels ils peuvent être très nuisibles.

Les **Brenthidae** constituent un groupe d'environ mille sept cents espèces au corps étroit et allongé, au rostre bien développé, et aux antennes non coudées. Le dimorphisme sexuel est souvent intense au niveau du rostre. Les larves et les imagos de beaucoup d'espèces sont des xylophages vivant dans le bois mort ; d'autres sont des prédateurs de Scolytidae et de Platypodidae ; enfin, certaines sont myrmécophiles, comme *Amorphocephalus coronatus*, le seul Brenthidae présent en France.

La famille des **Scolytidae** est parfois difficile à séparer de celle des Curculionidae. Les larves se ressemblent beaucoup. Les imagos de Scolytidae ont une petite taille (moins de 1 cm) ; ils ne possèdent généralement pas de rostre, mais il existe des exceptions, par exemple les *Hylastes*, qui ont un rostre court et qui rappellent les Curculionidae de la sous-famille des *Cossoninae*. Chez les Scolytidae les antennes sont courtes et la massue antennaire est formée de un à six articles fusionnés, sauf dans de rares cas. Le caractère le plus constant qui permet de séparer les Scolytidae des Curculionidae semble être l'existence, chez les premiers, de tibias antérieurs dentés sur leur bord externe ou pourvus d'un crochet apical, cette structure n'existant pas chez les seconds.

Les Scolytidae vivent sous les écorces ou dans le bois d'arbres les plus variés, mais ils semblent bien plus nombreux dans les résineux, au moins dans nos régions où beaucoup d'espèces comme les *Ips* et les *Phloeosinus* sont inféodées aux Conifères. En France, ce sont les pins qui en hébergent le plus grand nombre. Quelques rares espèces vivent dans les plantes herbacées ; *Coccotrypes dactylifera* s'installe dans les graines de palmiers. Les scolytes ont généralement une ou deux générations par an en France, mais ils peuvent en produire jusqu'à quatre lorsque la température est assez élevée. Certains scolytes sont des parasites primaires très nuisibles attaquant les arbres vivants, comme *Ruguloscolytus rugulosus* ou *Ips typographus*. Les parasites secondaires qui attaquent des arbres malades souffrant de la sécheresse, ou d'une défoliation consécutive à cette dernière, sont les plus nombreux et les plus dangereux ; les parasites tertiaires qui s'installent dans le bois mort comme *Xyloterus lineatus* sont sans importance économique.

Chez beaucoup de scolytes, le mâle et la femelle collaborent à l'édification d'un système de galeries où seront pondus les œufs. Le trou d'entrée est creusé par le mâle ou par la femelle, ou parfois par les deux sexes, et il sert de lieu d'accouplement. A partir de là sont forées des galeries de ponte, ou galeries maternelles, qui reçoivent les œufs, déposés dans des encoches. Les galeries larvaires sont creusées par les larves à partir des endroits où les œufs ont été déposés ; elles ont un diamètre qui augmente avec la croissance de la larve et elles se terminent chacune par une logette de nymphose. L'adulte sort en perçant l'écorce. La disposition des galeries varie avec chaque espèce. Ainsi, chez les *Scolytus*, la galerie maternelle est simple et les galeries larvaires rayonnent autour en s'inscrivant dans une ellipse. Chez *Cryphalus piceae*, espèce polygame, il existe une chambre d'accouplement centrale, creusée par le mâle, d'où partent des couloirs de ponte occupés chacun par une femelle. Ces types de galeries sont superficiels, installés dans l'écorce ou immédiatement en dessous. Quelques scolytes comme *Anisandrus dispar* ont des galeries pénétrantes qui entrent profondément dans le bois et dans lesquelles les femelles ensemencent des Champignons du genre *Ambrosia*. Les larves ne creusent pas de galeries mais mangent ce Champignon. Les Scolytidae sont de redoutables ennemis des plantations forestières qu'ils peuvent parfois anéantir sur des milliers d'hectares. Ils sont connus des forestiers sous le nom erroné de « bostryches » ; mais ils n'ont rien à voir avec les Bostrychidae.

Les **Platypodidae,** avec plus de sept cents espèces presque toutes tropicales, diffèrent des Scolytidae par l'allongement du premier article des tarses. Ce sont tous des mangeurs de Champignons du genre *Ambrosia*, et leurs mœurs se rapprochent de celles des scolytes mycophages. Ce sont de grands ennemis des forêts tropicales.

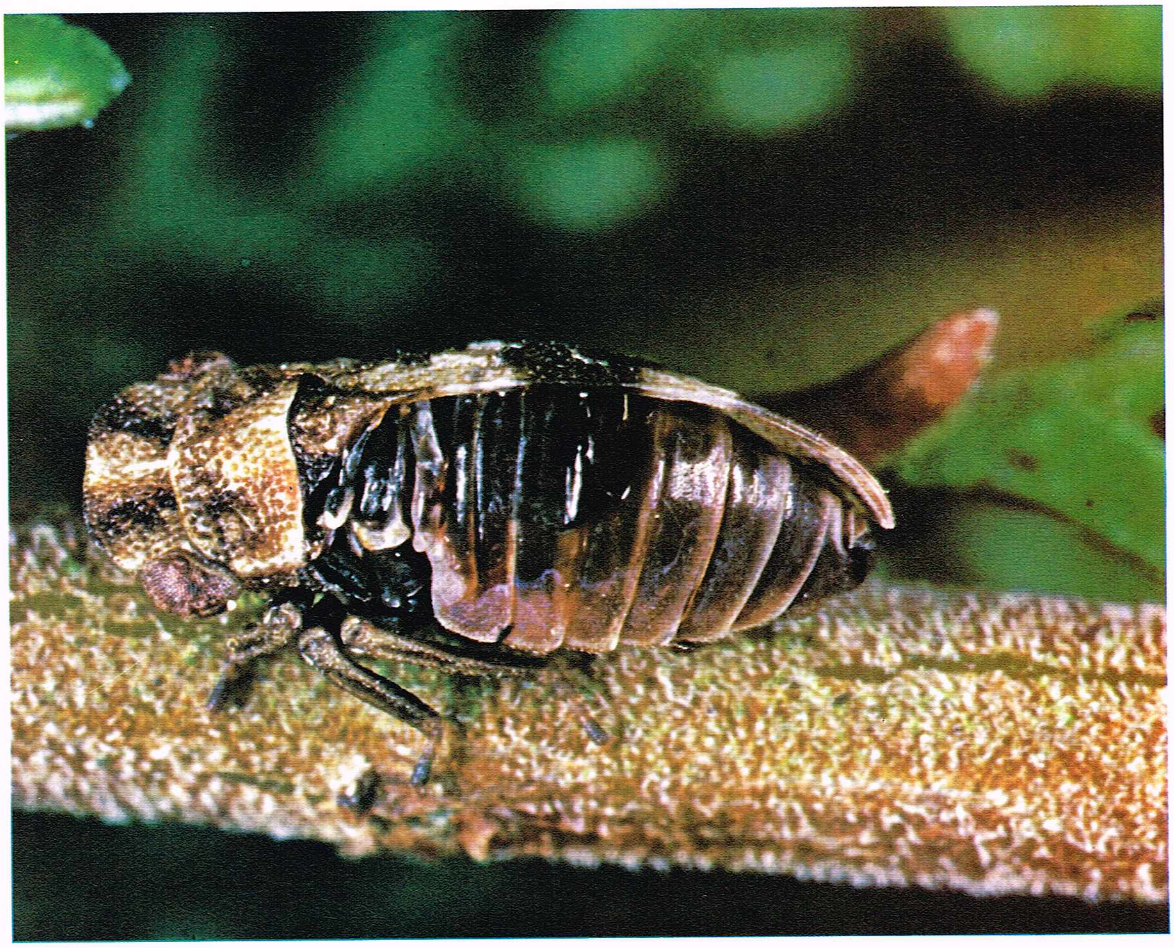

M. Boulard

◀ **Ulopa reticulata** *(Homoptère) en élevage et dont on a enlevé un élytre pour montrer les Strepsiptères du genre* **Halictophagus** *qui le parasitent; sur le dos : grosse coque d'un mâle déjà sorti; latéralement : petite écaille céphalothoracique d'une femelle. Les Strepsiptères ne tuent pas leur hôte, mais l'affaiblissent et le rendent incapable de se reproduire.*

Ordre des Strepsiptères

On observe parfois sur l'abdomen de certains Insectes, Hyménoptères et Homoptères notamment, des sortes de petites hernies brunâtres globuleuses ou en écaille, faisant saillie vers l'arrière à partir des membranes intersegmentaires. Ces hernies indiquent la présence de Strepsiptères chez ces Insectes dont on dit alors qu'ils sont stylopisés.

Les Strepsiptères comprennent un petit nombre d'Insectes Holométaboles très particuliers, avec hypermétamorphoses, tous endoparasites au moins à l'état larvaire. Considérés parfois comme des Hyménoptères très dégradés, ils sont en fait plus proches des Coléoptères et, plus précisément, des Rhipiphoridae. Leur taille est minuscule (de 1 à 4 mm), et ils sont caractérisés en outre par un dimorphisme sexuel très accusé.

Les mâles sont ailés, mais diptères : leurs ailes postérieures seules développées sont amples, membraneuses et repliables en éventail; leurs ailes antérieures, très courtes et étroites, sont transformées en balanciers à tégument peu sclérifié. La tête, orthognathe mais à bouche atrophiée, porte des antennes flabellées, composées de quatre à sept articles couverts de sensilles placoïdes, et des yeux globuleux à grosses facettes, séparées par des cloisons pubescentes. Un large cou membraneux relie la tête au thorax. Les deux premiers segments thoraciques sont très faibles, alors que le troisième présente un grand développement en rapport avec celui des ailes fonctionnelles. L'abdomen qui comprend dix segments visibles, dont le premier est étroitement soudé au thorax, se termine par un organe copulateur vulnérant qui reste externe.

Les femelles sont toujours aptères; celles des *Mengeidae* qui mènent une vie libre, ont un corps ovale muni de courtes pattes et d'une tête portant des organes sensoriels moins développés que chez les mâles; celles des *Stylopidae*, parasites durant toute leur vie, restent larviformes avec une tête vestigiale. L'appareil reproducteur des femelles ne possède pas de gonoductes et les ovaires libèrent les ovocytes dans la cavité générale.

La fécondation s'effectue selon un processus peu commun : l'insémination traumatique, le mâle perforant un point quelconque du corps de la femelle chez les *Mengeidae* ou bien la membrane céphalothoracique des femelles de *Stylopidae* en place dans leurs hôtes; ces dernières ne présentent à l'extérieur qu'une sorte d'écaille formée de la tête et du thorax réunis; ce céphalothorax contient des glandes spéciales ou glandes de Nassonov dont la sécrétion attire les mâles pourvus sur leurs antennes d'organes olfactifs très développés.

L'œuf donne une larve triongulinide mobile, pourvue de trois paires de pattes mais progressant surtout par bonds grâce à des flexions abdominales. Elle quitte l'hôte maternel et recherche un nouvel hôte dans le corps duquel elle pénètrera. Là, elle se transforme, devient une sorte de sac, perd ses pattes et ses yeux; les rudiments de pièces buccales qui subsistent ne sont pas fonctionnels et la nutrition s'effectue par osmose, à travers le tégument. Les larves mâles sont toujours plus grosses que les larves femelles.

La présence de ces parasites entraîne des troubles chez l'hôte qui peut être modifié dans ses caractères sexuels, devenir stérile et prendre un habitus d'intersexué (stylopisation).

L'ordre des Strepsiptères, dont on a retrouvé des fossiles inclus dans l'ambre de la Baltique (Tertiaire), compte près de quatre cent cinquante espèces réparties en deux familles.

Les représentants de la famille des **Mengeidae**, la plus primitive et la moins nombreuse, ne vivent en parasites qu'à l'état larvaire; *Eoxenos laboulbeni*, l'espèce la mieux étudiée, se développe aux dépens des Thysanoures Lépismatidés.

Chez les **Stylopidae**, seuls les mâles adultes sont libres. Cette famille comprend la plupart des espèces connues, qui s'attaquent à des Insectes d'ordres divers, à l'exclusion, notamment, des Coléoptères. Comme exemples, on retiendra *Stylops melittae* et *Xenos vesparum* parasites d'Hyménoptères et les *Halictophagus* parasites d'Homoptères Auchénorhynches.

▼ *Habitus adultes, mâle (A) et femelle (B), de* **Mengenilla quaesita**, *Strepsiptère Mengeidae (d'après Silvestri).*

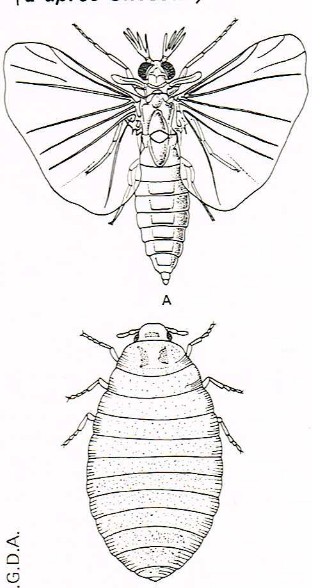

I.G.D.A.

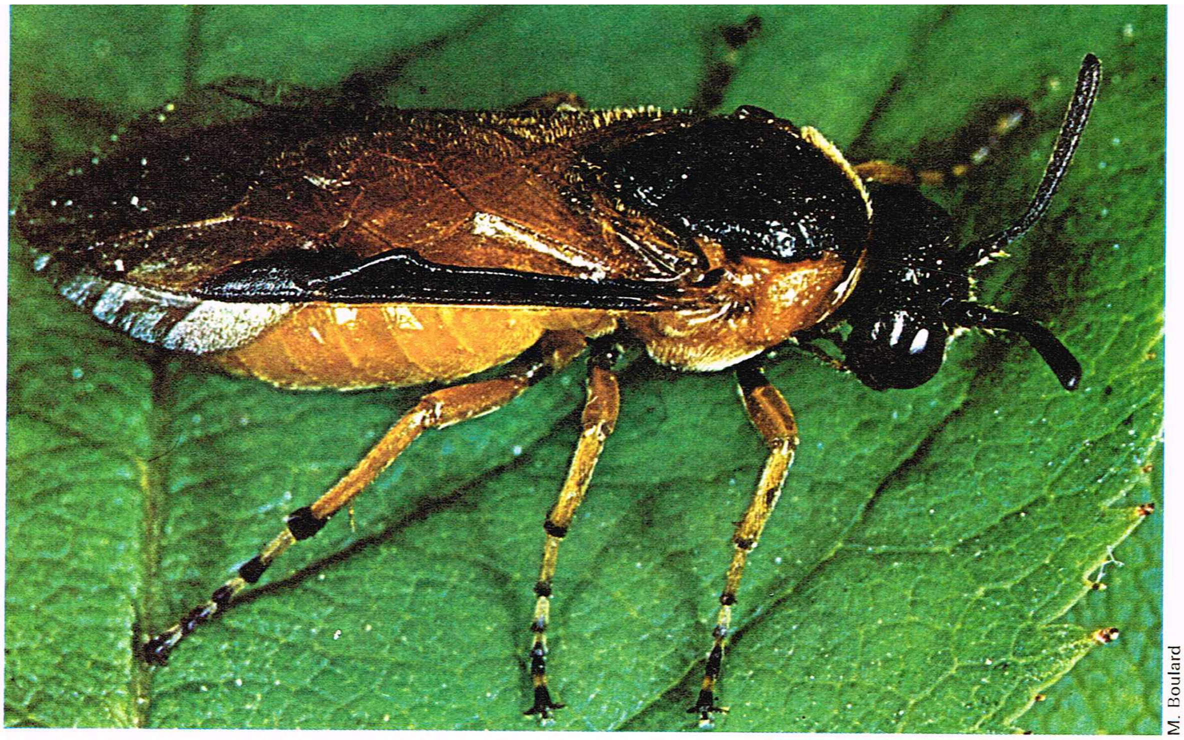

M. Boulard

▶ Arge rosae, *bel Hyménoptère Symphyte dont la larve vit aux dépens des rosiers, mangeant les feuilles.*

Super-ordre des Hyménoptéroïdes

Il ne comprend que l'ordre des Hyménoptères, dont la parenté avec d'autres ordres d'Holométaboles reste incertaine.

Ordre des Hyménoptères

Apparus, semble-t-il, au début du Jurassique, presque en concordance avec l'épanouissement des plantes à fleurs, les Hyménoptères constituent l'un des ordres les plus importants du monde animal, tant par la diversité et le nombre que par les particularités de leur biologie. Ils se définissent ainsi : Insectes Holométaboles de taille très variable, allant de 0,1 mm (trichogrammes) à 50 mm (pompiles et sphégiens exotiques), typiquement pourvus de deux paires d'ailes membraneuses et transparentes, peu nervurées, les postérieures étant plus petites et solidaires des antérieures pendant le vol; tête généralement orthognathe, munie de pièces buccales primitivement broyeuses mais venant progressivement au type lécheur-suceur; tubes de Malpighi très nombreux (en général une vingtaine) ; cerveau et corps pédonculés souvent très développés, ainsi que les éléments sensoriels des antennes; mâles haploïdes et femelles diploïdes; dimorphisme sexuel notable et l'ovipositeur des femelles pouvant être modifié en aiguillon; parthénogenèse fréquente; larves de type varié, mais surtout éruciformes ou vermiformes; métamorphoses s'effectuant le plus souvent dans un cocon.

Diurnes et floricoles à l'état adulte, établissant des rapports souvent étroits avec les Phanérogames, les Hyménoptères montrent en outre deux tendances évolutives distinctes : l'une, qui se manifeste à l'état larvaire, vers le parasitisme, l'autre, qui apparaît à tous les stades, vers la vie sociale. La construction, collective ou non, de nids architecturés, les soins suivis aux larves, l'alimentation sélective (proies, sécrétions nutritives), la division du travail pour certains et l'aptitude particulière au sommeil qui caractérise un grand nombre de ces Insectes, montrent que le psychisme est remarquablement développé dans ce groupe.

L'ordre réunit une très grande quantité d'espèces; près de trois cent mille sont connues, mais celles-ci ne représentent qu'une fraction du nombre réel.

Les Hyménoptères se répartissent en deux sous-ordres très inégaux : les Symphytes et les Apocrites.

Sous-ordre des Symphytes

Les Symphytes, ou porte-scie, regroupent les formes les plus primitives, assez peu nombreuses (six mille environ) et dont l'abdomen, soudé au thorax, ne présente pas d'étranglement. L'appareil buccal est broyeur et les ailes sont normalement nervurées. L'ovipositeur, à valves en forme de lames de scie, permet la ponte endophyte.

Les larves, dites éruciformes car elles ressemblent beaucoup à des chenilles, se distinguent aisément de ces dernières par les caractères particuliers suivants : elles possèdent un seul stemmate de chaque côté de la tête et soit au moins douze pseudopodes abdominaux intermédiaires, soit pas du tout. Ces larves sont très généralement phyllophages, quelques-unes sont mineuses et d'autres cécidogènes, mais chaque espèce se nourrit sur une plante déterminée ou sur un petit groupe de plantes, Phanérogames ou Fougères. Inquiétées, certaines manifestent l'étrange réflexe de relever l'abdomen au-dessus de leur tête; l'hémaphrorrée est également fréquente. D'autres, grégaires, peuvent tisser des toiles collectives. La croissance achevée, la larve va le plus souvent se nymphoser dans le sol, à l'intérieur d'un cocon.

Les imagos, diurnes pour la plupart, butinent les fleurs, mais on connaît quelques cas de prédation chez les tenthrèdes. Leur vie est brève, solitaire, uniquement vouée à la reproduction, les Symphytes ne se livrant à aucune construction; les mâles et les femelles diffèrent souvent par la couleur. Au point de vue économique, les Symphytes ont une importance car plusieurs d'entre eux peuvent être nuisibles à des plantes cultivées ou à des arbres.

Le sous-ordre a une répartition mondiale; il est cependant mieux représenté dans les régions humides sous climat tempéré. Il se subdivise en six super-familles.

Super-famille des Xyeloidea

Les *Xyeloidea* se caractérisent par leur livrée terne, leur troisième article antennaire fort long et la nervation alaire la plus détaillée qui existe chez les Hyménoptères. Les femelles, dont l'ovipositeur atteint parfois une longueur supérieure à celle du corps, pondent sur les Conifères, et les larves possèdent des pseudo-pattes à chaque urite, y compris le premier, ce qui est exceptionnel. En France, *Xyela julii*, l'espèce la plus commune, se développe dans les cônes de pin et butine sur les fleurs de bouleau.

Super-famille des Megalodontoidea

Les *Megalodontoidea* rassemblent des Symphytes trapus, à tête relativement grande munie d'antennes courtes, chez les Mégalodontidés, ou longues, chez les Pamphiliidés. Les larves, dépourvues de fausses pattes, vivent souvent en groupes dans des lames découpées sur des feuilles et maintenues enroulées par des points de soie (*Pamphilius* du bouleau), ou sur des toiles collectives, comme les *Neurotoma nemoralis*, qui causent parfois des dégâts dans les vergers.

Super-famille des Siricoidea

Les *Siricoidea*, les plus grands des Symphytes, ressemblent à des guêpes qui auraient un corps massif, allongé et cylindrique, mais ils présentent parfois des teintes métalliques. Les antennes sont formées de nombreux articles, jusqu'à trente. Les femelles, dont l'ovipositeur, en aiguille saillante mais non serratulée, est parfois

I. Bucciarelli

très long, introduisent leurs œufs un à un, principalement dans le bois de Conifères morts ou dépérissant, en perforant l'écorce.

La larve est en effet xylophage et creuse des galeries qui s'élargissent avec la croissance de l'Insecte ; elle est aveugle, dépourvue de fausses pattes, mais possède à l'extrémité du corps une protubérance cornue qui sert d'appui pour les déplacements. L'évolution larvaire est longue et dure de deux à trois ans ; au terme de cette période, le Siricoïde s'aménage une logette près de la surface, puis tisse un cocon de soie mêlée de sciure où il se nymphose et devient adulte.

L'imago perfore la couche souvent mince qui le sépare de l'extérieur. *Urocerus gigas*, le sirex géant dont la femelle dépasse 40 mm, *Sirex juvencus*, de couleur noir métallique, et *Tremex fuscicornis* qui, contrairement aux autres, vit dans les arbres feuillus, sont parmi les mieux connus.

G. Hodebert

Super-famille des Cephoidea

Les *Cephoidea* renferment des espèces moyennes ou petites, à tête globuleuse et à abdomen plutôt comprimé latéralement. Les larves n'ont que des pattes thoraciques réduites et elles vivent dans les tiges de diverses plantes.

Certaines, comme le cèphe du blé, *Cephus pygmaeus*, sont occasionnellement nuisibles aux céréales. Les adultes apparaissent en juin ; la femelle, dont l'ovipositeur est peu développé, choisit pour pondre des tiges portant déjà l'épi, et dépose un œuf un peu au-dessous de ce dernier. La larve descend en mangeant la moelle et en perforant les cloisons nodales. Vers la mi-juillet, elle atteint la partie souterraine de la plante et file un long cocon parcheminé, après avoir pratiqué une incision circulaire dans le chaume le rendant très fragile : les blés ainsi attaqués versent au moindre vent.

Tachelus tabidus, qui ressemble au cèphe mais est entièrement noir, et qui est, comme ce dernier, paléarctique, et *Janus integer*, d'Amérique du Nord, causent parfois des dégâts comparables.

Super-famille des Tenthredinoidea

Cette super-famille, la plus importante, se compose de cinq familles principales, qui se différencient par la forme des antennes.

Chez les **Argidae**, les antennes n'ont que trois articles, dont le dernier est fort long et souvent claviforme. Les larves, bien pourvues en pattes abdominales, se développent isolément, la plupart sur des feuilles, comme *Arge rosae*, très commun en France, sur les rosiers, et *Schizocera furcata*, sur les ronces. Avec le genre néotropical *Dielocerus*, on observe les prémices d'un instinct maternel, les femelles restant près de leurs larves.

Les **Cimbicidae**, de taille assez forte et d'aspect trapu, ont des antennes composées d'un faible nombre d'articles et dilatées en massue. Les larves, très grosses et pruineuses, munies de pattes thoraciques et abdominales bien développées, peuvent s'enrouler en spirale. Le gros *Cimbex femorata* (25 mm), qui vit sur le bouleau, et *Cimbex quadrimaculata*, que l'on trouve sur l'aubépine et les prunus, ont des larves dépassant 40 mm.

Les **Diprionidae**, ou **Lophyridae**, portent des antennes courtes, quoique formées de nombreux articles

◄ **Rhodogaster viridis** *dont la couleur verte est exceptionnellement chez les Symphytes.*
▼ *A gauche, les Hyménoptères Symphytes ont, pour la plupart, des larves ressemblant beaucoup à des chenilles ; ces fausses chenilles diffèrent des vraies par des caractères bien visibles ici* (**Arge rosae** *vu de profil*) *: un seul œil simple (de chaque côté) et des pseudopodes sous tous les segments abdominaux.*
A droite, tableau comparatif des terminalia (derniers segments de l'abdomen) femelles montrant l'appareil de ponte et ses modifications dans les trois grands groupes d'Hyménoptères : A, Symphyte (**Pteronidea**) *; B, Térébrant* (**Megarhyssa**) *[seule la partie de la longue tarière est figurée] ; C, Aculéate* (**Apis**) *[augmenté de l'appareil glandulaire] ; avec C', apex très grossi de l'aiguillon : b, bulbe de l'aiguillon ; ce, cerque, G, gorgeret (gy2) ; gl. a, glande alcaline ; gl. v, glande à venin ou glande acide ; gx 1, 2, gonoxites antérieurs et postérieurs ; gy 1, 2, gonapophyses antérieures et postérieures ; L, lancettes (gy 1) ; r, réservoir à venin ; sty, gaine ou styloïde ; les chiffres romains numérotent les terminalia (d'après Snodgrass).*

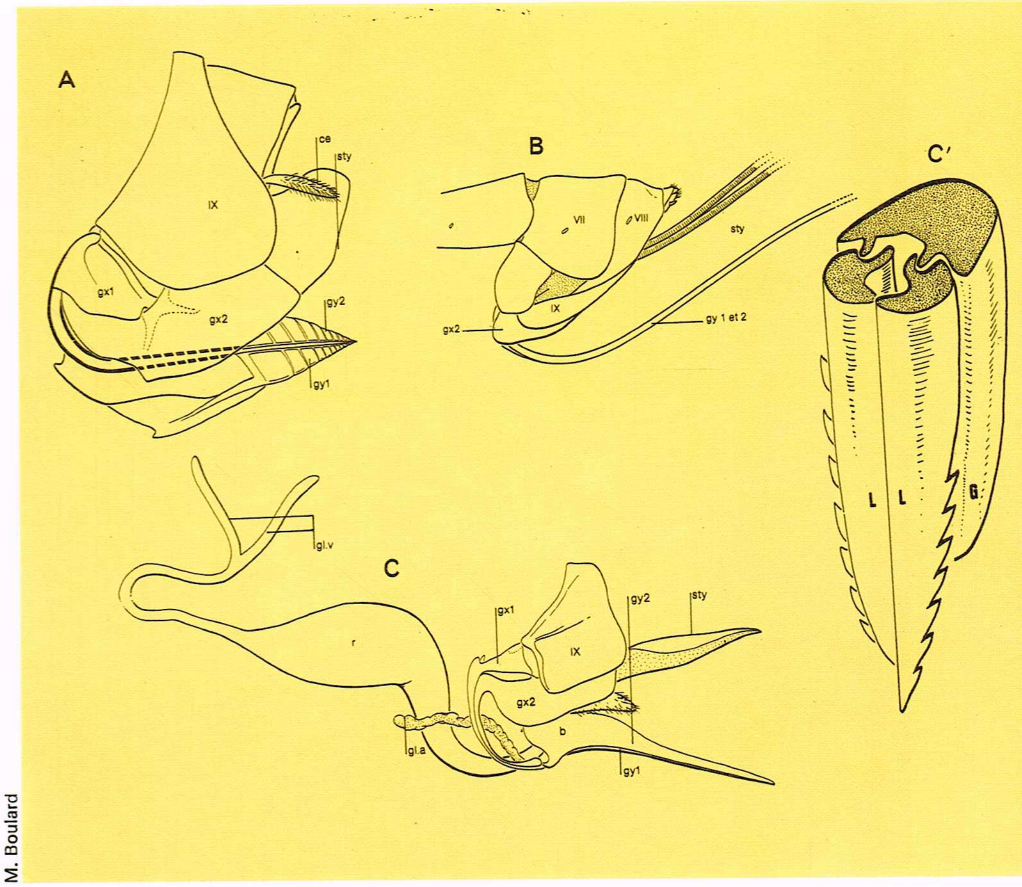

M. Boulard

et différentes selon le sexe : elles sont fortement pectinées chez les mâles et simplement serrulées chez les femelles. Ils constituent une famille inféodée aux Conifères. Les larves, polypodes et grégaires, au moins dans les premiers stades, dévorent les aiguilles et peuvent causer de graves dommages dans les pinèdes, allant parfois jusqu'à dépouiller les arbres. Le diprion du pin, *Diprion pini* est très commun en Europe; le mâle est entièrement noir et la femelle jaune pâle avec des dessins noirs sur la tête et le thorax et une large bande transversale noire sur l'abdomen. La larve tisse un cocon brun, le plus souvent fixé à l'aisselle des rameaux, ou quelquefois, à la suite d'une chute de l'Insecte, dans les herbes.

Les **Tenthredinidae** constituent la famille la plus nombreuse des Symphytes. Les antennes diffèrent avec le sexe de la même manière que chez les diprions, mais ici elles sont longues et formées de peu d'articles (sept à onze). Les larves, polypodes, sont principalement phyllophages; celles de *Croesus septentrionalis* se tiennent en groupe, placées en ordre sur la tranche d'une feuille d'aulne ou de bouleau qu'elles dévorent, et ont la curieuse habitude de redresser l'abdomen en S toutes ensembles.

Certaines espèces s'attaquent aux fruits et peuvent devenir nuisibles, ainsi, *Holocampes minuta* et *H. flava*, les holocampes, dont les femelles pondent dans les fleurs des pruniers; d'autres espèces sont cécidogènes, tels *Euura amerinae* sur le saule, *Strongylogaster lineata*, ou tels *Tenthreda maculata* et *T. scrophulariae*, qui, avec respectivement 14 et 15 mm de longueur, sont les plus grosses espèces de nos régions. Les Tenthrédinidés habitent tous les continents sauf l'Australie où ils sont remplacés par les Pergidae.

Les **Pergidae** ont également des représentants en Amérique du Sud. Les *Perga* ressemblent à des *Cimbex* et possèdent des antennes relativement courtes et en forme de massue. Les larves, qui n'ont qu'une paire de fausses pattes (anales), vivent sur les eucalyptus et manifestent un grégarisme interattractif prononcé au point de former des groupes compacts se déplaçant de concert ou en chaîne, les pattes anales de chaque larve étant fixées sur le cou de la larve suivante, d'une façon curieusement analogue à celle des chenilles processionnaires.

Super-famille des Orussoidea

Les *Orussoidea* ne sont représentés que par la seule petite famille des **Orussidae** qui comprend quelque soixante-dix espèces très particulières se distinguant des autres tenthrèdes, autant par l'habitus que par l'éthologie. Les imagos ont un corps cylindrique au tégument extrêmement dur; la tête, globuleuse, porte des tubercules sur la face; les antennes, insérées au-dessous du clypéus, disposition unique chez les Hyménoptères, sont formées d'articles très inégaux, notamment chez la femelle; les ailes ont une nervation réduite, laissant des cellules ouvertes; enfin, au repos, la tarière, très longue, est rentrée dans le corps, ce qui est exceptionnel. Les larves, totalement apodes, vermiformes, évoluent en parasites internes des larves xylophages des Coléoptères, surtout des Buprestidés.

En raison de toutes ces particularités, les Orussoidea ont été parfois considérés comme formant un sous-ordre intermédiaire entre les Symphytes et les Apocrites, quoiqu'ils présentent beaucoup de caractères les rapprochant des Siricoidea.

Sous-ordre des Apocrites

Les Hyménoptères Pétiolés, ou Apocrites, se distinguent nettement des Symphytes par l'étranglement très étroit, formant comme un pétiole, qui semble séparer le thorax de l'abdomen. En réalité, ce pétiole est constitué par le second urite, le premier, dit segment médiaire, étant intégré au thorax; le reste de l'abdomen prend le nom de gastre. L'appareil buccal est broyeur-lécheur ou broyeur-suceur. Suivant la conformation et la fonction de l'ovipositeur, on sépare les Apocrites en deux grands groupes, les Térébrants et les Aculéates, qui se trouvent avoir à peu près la même importance et présenter des éthologies fort différentes.

★ *Groupe des Térébrants*

Les Térébrants sont également appelés « porte-tarière » ou encore « *Parasitica* », car chez eux l'organe de ponte est une fine tarière le plus souvent bien visible et ils se développent tous en parasites d'hôtes divers, des Animaux surtout (alors souvent nommés amphitryons) mais

▼ **Diprion pini** *mâle, bien reconnaissable à ses antennes pectinées. Les larves de cette espèce dévorent les aiguilles de pin.*

J. Carayon

aussi des Végétaux. Ce sont des Hyménoptères de taille petite ou moyenne, caractérisés par des antennes d'au moins seize articles, une nervation alaire réduite et parfois nulle, la base du fémur brusquement rétrécie et paraissant former un second trochanter, des larves apodes d'abord mobiles puis immobiles. Fort nombreux et de répartition mondiale, ils forment quatre super-familles naturelles, traitées ici très succinctement.

Super-famille des Cynipoidea

Les *Cynipoidea,* de taille plutôt minuscule (1 à 8 mm), ont des colorations peu variées, dans la gamme des bruns, allant du jaunâtre au noir. Les antennes sont filiformes et non coudées; les ailes n'ont pas de ptérostigma et seulement quelques cellules; le gastre, souvent comprimé, présente un segment, généralement le second, beaucoup plus grand que les autres. L'œuf est allongé et muni d'un pédicelle; les larves ne tissent pas de cocon. Les Cynipoidea sont classés en une dizaine de familles, toutes parasites de larves diverses, hormis celle des *Cynipidae*, biologiquement très remarquable en ce qu'elle comprend de nombreuses espèces cécidogènes, ou simplement gallicoles et pouvant être douées d'hétérogonie.

Chez les **Cynipidae**, en effet, la femelle, qui possède une tarière bien développée mais engainée au repos, à l'intérieur du corps (cas peu fréquent chez les Térébrants), introduit ses œufs dans les tissus végétaux; ceux-ci, dès l'embryogenèse des œufs, réagissent en produisant tout autour des *cécidies*, ou galles, plus ou moins complexes, du type histioïde, dont le mécanisme de formation n'est pas tout à fait élucidé mais semble déclenché par des sécrétions, ou des excreta, de l'embryon, puis de la larve. Seules les plantes vasculaires, principalement les Fagacées (85 %) et les Rosacées, fournissent le support, les feuilles étant davantage attaquées que les autres organes. Dans tous les cas, l'aspect de la cécidie est caractéristique de l'espèce et, éventuellement, de la phase biologique de cette dernière.

Un bon exemple est donné par *Biorrhiza aptera* de notre faune, dont le cycle est hétérogonique : les femelles agames sont d'assez gros Cynipides de 3,5 à 7 mm de longueur, de couleur brun rougeâtre et dépourvus d'ailes; elles sortent l'hiver de galles ligneuses très dures installées sur les radicelles des chênes et vont pondre dans de jeunes bourgeons; en se développant, les œufs induisent la formation de grosses cécidies, connues sous le nom de « pommes de chêne ». Les Insectes mâles et femelles qui en sortent, en mai-juin, sont ailés et plus petits que les femelles agames (ils mesurent de 2 à 3 mm). Les femelles fécondées de cette deuxième génération iront pondre en terre, dans les racines des chênes.

La détermination des sexes reste cependant encore assez mal connue; on sait, grâce à Picard, que les femelles

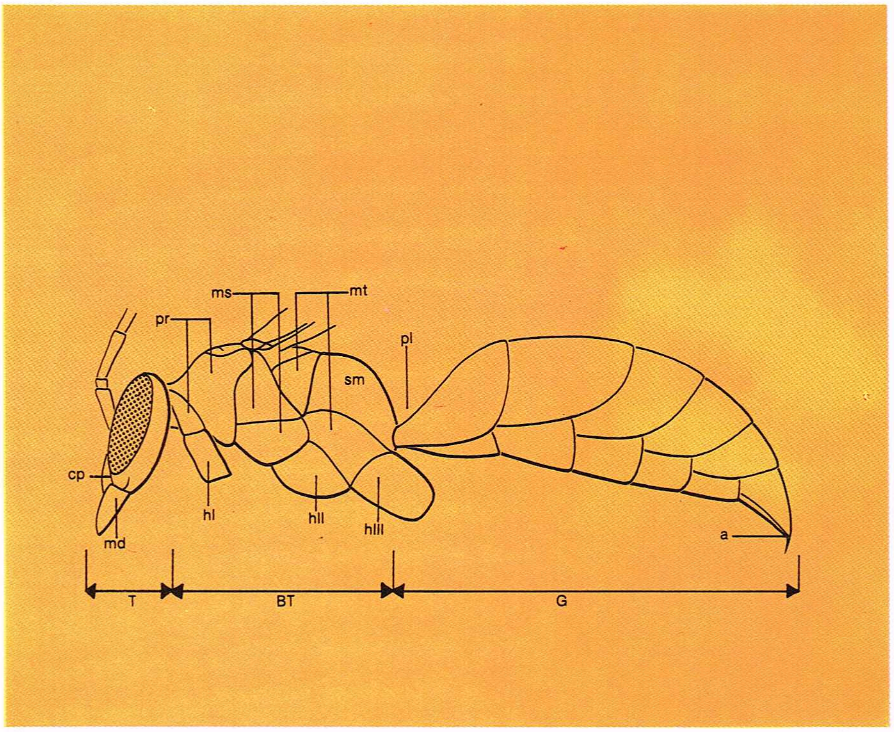

G. Hodebert

▲ *Représentation schématique d'un Hyménoptère Pétiolé (Aculéate), vu de profil : T, tête; BT, bloc thoracique; G, gastre; a, aiguillon; cp, clypeus; hI, II, III, hanches antérieure, moyenne et postérieure; md, mandibule; ms, mésothorax; mt, métathorax; pl, pétiole; pr, prothorax; sm, segment médiaire.*

M. Boulard

M. Boulard

M. Boulard

◀ *Page ci-contre, à droite, « pommes de chêne », zoocécidies induites par la forme* pallida *de* Biorrhiza aptera*; p. 131, à gauche, une « pomme de chêne », ouverte, montrant des larves et des nymphes de la même espèce, dans leurs logettes; à droite, les jeunes adultes* pallida, *venant d'éclore, parcourent la surface de la « pomme » en tous sens avant de s'envoler et s'arrêtent parfois longuement dans une « attitude prostrée », tête baissée et ailes écartées, souvent par couples se faisant face.*

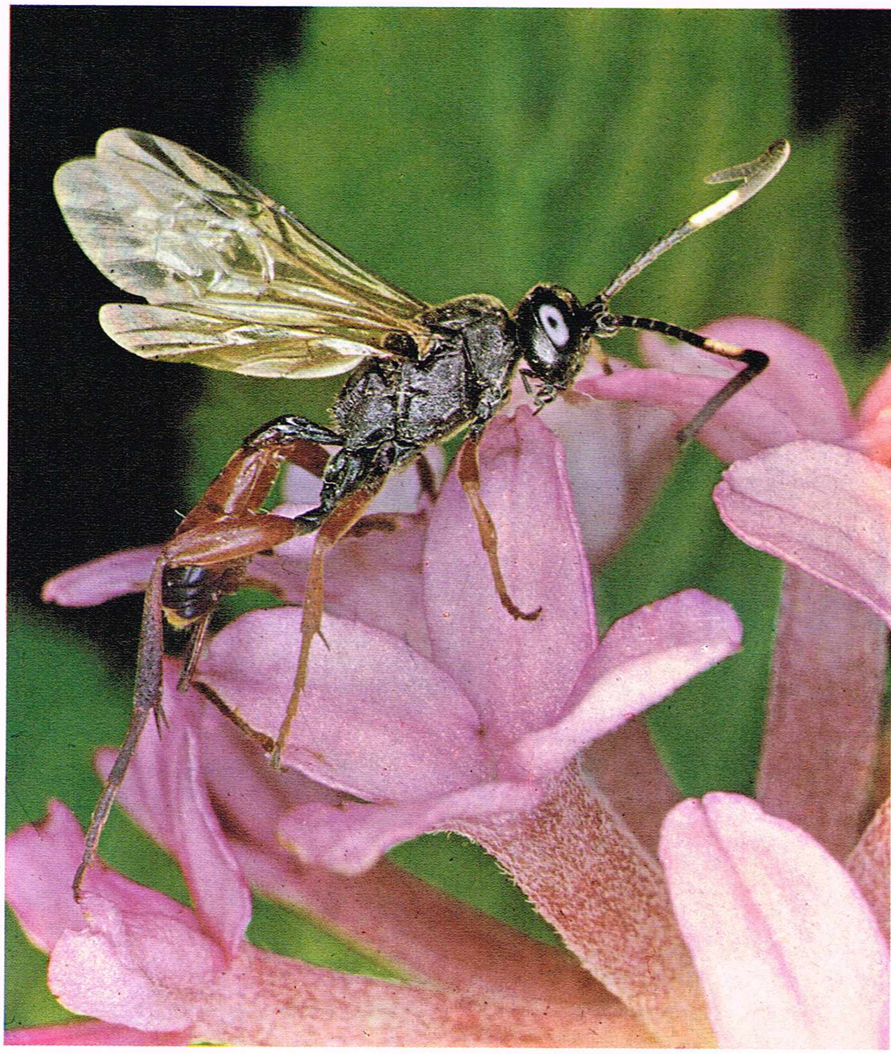

A. Margiocco

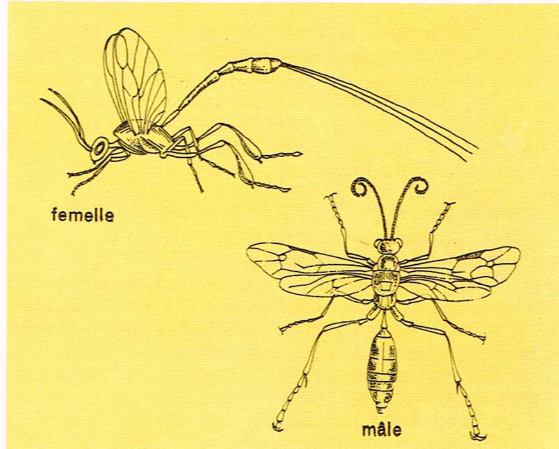

I.G.D.A.

▲ *A gauche,* **Ichneumon grossorius,** *l'un des plus grands représentants de la super-famille des Ichneumonoidea, en Europe (18 mm de long). Il parasite les chenilles de Sphingides.*
A droite, **Ichneumonidé** *mâle en vue dorsale, les ailes étalées montrant la place de l'aréole caractéristique,*
et **Gastéruptionide** *femelle, vue de profil, montrant l'insertion très dorsale du gastre et le long ovipositeur térébrant.*

agames sont soit androphores, soit gynéphores, et que parfois aussi, mais dans une faible proportion, elles portent des œufs donnant l'un ou l'autre sexe.

Le plus souvent, le cycle des Cynipides s'accomplit aux dépens des organes aériens; *Neuroterus lenticularis,* la forme agame de *Neuroterus quercus,* sort en mars après avoir passé l'hiver dans ces petites cécidies lenticulaires que l'on observe nombreuses à la face inférieure des feuilles de chêne dès la fin de l'été; elle pond sur les jeunes pousses qui développent des galles en forme de groseille autour des larves de la génération sexuée *(Neuroterus baccarum),* laquelle sera adulte en juin.

D'autres Cynipides requièrent deux plantes-hôtes successives; ainsi, *Cynips calicis* se développe, agame sur la cupule des glands de *Quercus pedunculata*, et bisexué dans des galles-amphores sur les fleurs de *Q. cerris*. Les espèces inféodées aux Rosacées ne présentent généralement pas une telle alternance; la reproduction est alors normale, bisexuée, mais peut parfois être remplacée par une agamogenèse géographique. Par exemple, dans les populations asiatiques de *Rhodites rosae*, les mâles et les femelles existent en proportions égales, alors que chez nous les mâles sont rarissimes. La cécidie, commune sur les églantiers, englobe un bourgeon et peut atteindre la taille d'une petite pomme d'où partent des filaments fort nombreux et serrés, contournés, rougeâtres à l'extrémité. Cette formation, appelée *bédéguar*, contient de l'acide tannique et a été utilisée, de même que les « noix de galle » déterminées sur les rameaux de chêne par les *Cynips tinctoria* et *C. kollari*, pour le tannage des cuirs ou la fabrication de teinture noire.

Les espèces gallicoles ou inquilines pondent dans les cécidies d'autres Cynipides, qu'elles peuvent altérer; les *Periclistus* causent ainsi l'hypertrophie du bédéguar. A l'opposé, les *Synergus* ne modifient pas la galle des *Cynips*.

Super-famille des Ichneumonoidea

Les *Ichneumonoidea* sont tous des parasites entomophages ou, plus rarement, arachnophages.

Ils présentent les caractères particuliers suivants : des antennes fines et droites, composées de très nombreux articles, des ailes antérieures pourvues d'un ptérostigma et peu nervulées, une tarière ventrale souvent très développée, sortant un peu avant l'extrémité abdominale. Leur reproduction est bisexuée et assortie fréquemment de polyembryonie.

Les Ichneumonoïdes accompagnent leur piqûre d'une émission de venin, paralysant, temporairement dans la plupart des cas, l'hôte dans ou sur lequel s'effectuera une ponte. Ce venin est produit par deux sortes de glandes, l'une alcaline et l'autre acide, très semblables à celles des guêpes. Les hôtes sont principalement les vraies et les fausses chenilles, les larves de Coléoptères et de Diptères. Beaucoup d'Ichneumonoïdes tiennent de ce fait un rôle écologique considérable et contrôlent naturellement les populations de beaucoup d'Insectes phytophages; un certain nombre sont utilisés avec succès pour la lutte biologique.

Les larves, ectoparasites ou endoparasites suivant les cas, se nourrissent de tissus vivants et se nymphosent soit à l'intérieur, soit à l'extérieur de l'amphitryon, mais toujours dans un cocon soyeux.

Les adultes butinent comme c'est la règle chez les Hyménoptères; cependant, les femelles de nombreuses espèces lèchent les humeurs qui sourdent des piqûres qu'elles infligent à leurs victimes; ce comportement peut accompagner la ponte, mais il peut aussi être sans rapport avec celle-ci et devenir alors tout à fait prédateur, comme c'est le cas pour les *Exeristes* qui élargissent la blessure avec leurs mandibules. En général, la vie imaginale ne dure que quelques semaines, mais souvent la femelle hiverne. Le groupe compte une dizaine de familles, dont nous allons à présent entrevoir les principales.

La famille des **Ichneumonidae** rassemble plus de trois mille espèces connues et caractérisées par la présence, à l'aile antérieure, de deux cellules discoïdales et d'une petite cellule particulière, appelée *aréole*, le plus souvent de forme pentagonale. De taille comprise entre 5 et 30 mm, ces Insectes sont pour la plupart monochromes, sombres ou noirs; cependant quelques espèces comme les *Xantopimpla* tropicaux et les ichneumons européens ont des couleurs de guêpes. Chez les plus connus, les ichneumons, la fécondation intervient en automne et les femelles passent l'hiver, engourdies sous les écorces, les feuilles mortes ou dans les Mousses. Les femelles, dont la tarière est courte, parasitent des chenilles, notamment de Sphingides, chaque espèce ayant une proie particulière et y déposant un seul œuf. La larve croît dans le corps de la chenille, laisse celle-ci se nymphoser, puis la mange et achève son développement; ainsi, c'est de la chrysalide du Lépidoptère que sort, par un trou net et circulaire, l'ichneumon adulte.

Le genre voisin *Amblyteles* comprend *A. palliatorius*, parasite du sphinx-à-tête-de-mort, et les seuls Insectes Hyménoptères connus pour être trogloxènes se rencontrant fréquemment dans les grottes. Les *Mesotenus* s'attaquent aux progénitures des guêpes solitaires, les *Gelis* aux cocons d'Araignées, mais c'est parmi les pim-

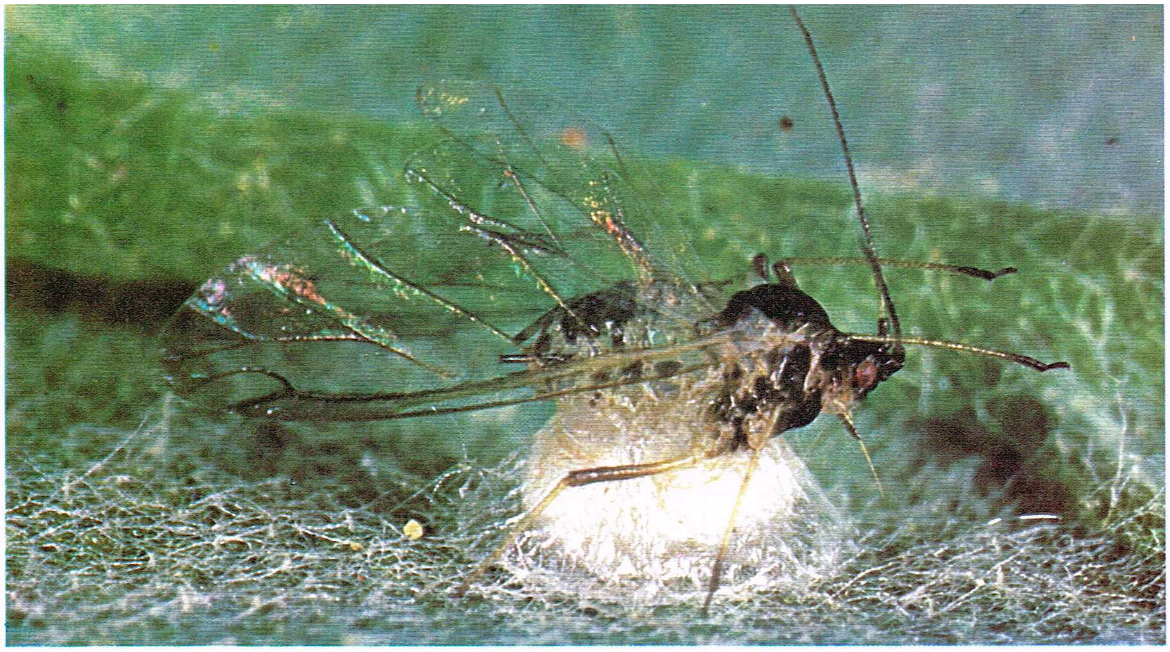

M. Boulard

◀ *Les* **Praon** *sont de minuscules Ichneumonoïdes Braconides dont les larves vivent en endoparasites des pucerons. Au moment de la nymphose, ils quittent leur hôte venant de mourir, et tissent sous sa dépouille un cocon en forme de tabouret de cirque tout à fait typique.*

plines que se trouvent les plus grands Térébrants et ceux qui sont pourvus d'une très longue tarière. Beaucoup d'entre eux recherchent les larves xylophages qu'ils atteignent en perforant souvent plusieurs centimètres de bois et aussi celles qui sont à l'abri dans les logettes des nids en mortier des Hyménoptères supérieurs. L'œuf, qui se présente effilé et pédonculé, est déposé sur ou à côté du corps de l'hôte sans que celui-ci soit piqué ; la larve évoluera en ectoparasite. Comme exemple de ces deux cas nous pouvons citer *Rhyssa persuatoria,* qui se développe aux dépens des urocères, et *Pimpla macrocerus,* qui fixe son œuf à la paroi interne des nids terrestres des odynères, après les avoir forés. A l'éclosion, la larve de *Pimpla* se laisse tomber sur l'hôte.

Un cas particulier est fourni par les *Polysphincta,* dont l'œuf est pondu sur une Araignée ; cette dernière continue de se mouvoir normalement, portant sur son dos une larve de plus en plus grosse, laquelle finira par la tuer.

La famille des **Braconidae** réunit les espèces qui ne possèdent qu'une seule cellule discoïdale ; elle est proche de la famille précédente, sur les plans morphologique et éthologique. L'ovipositeur des femelles est parfois très développé, et l'on cite toujours l'exemple de cet *Iphiaulax* sud-américain dont la tarière est quatorze fois plus longue que le corps. Le plus souvent, la croissance du Braconide retarde celle de l'hôte, qui est, le plus souvent, une chenille, ou encore une larve de Coléoptère ou de Diptère. Contrairement aux ichneumons, les Braconides se développent en grand nombre dans un même hôte, soit que la femelle y ait déposé beaucoup d'œufs, soit que l'espèce soit douée de polyembryonie, soit encore que les deux phénomènes se conjuguent, comme c'est le cas pour les *Macrocentrus,* dont la femelle pond quelque deux cents œufs qui donneront chacun cinquante individus.

Les endoparasites sont les plus fréquents, et les larves évoluent entre les organes de l'amphitryon qu'elles respectent en général, ne se nourrissant que du milieu interne ; leur croissance terminée, elles peuvent, comme les *Apanteles,* sortir toutes à la fois en traversant la peau, et elles tissent, le plus souvent chacune pour elle-même, un cocon à la surface du corps de la chenille. Celle-ci, quelque temps encore, portera la multitude de ces petits flocons, avant de mourir. Parfois, l'hôte ne meurt pas et peut même se métamorphoser, mais ses organes génitaux sont atrophiés et il est incapable de se reproduire. Dans le cas des *Praon,* la larve sort d'un puceron mort, et construit, entre ce dernier et la feuille, un cocon de forme caractéristique, en tabouret de cirque.

Les Braconides adultes se nourrissent en général de sucs végétaux ; mais la femelle d'*Habrobracon,* espèce utilisée pour lutter contre la teigne de la pomme de terre, s'alimente de façon singulière, se conduisant en véritable prédateur, ainsi que l'a montré Trouvelot. Elle détecte sa proie à l'odeur, grâce à ses antennes, puis elle atteint la chenille dans son cocon et la paralyse définitivement, son venin entraînant le relâchement musculaire irréversible, à l'exception des parties cardiaques ; la mucosité entourant la tarière a la propriété de se solidifier et de subsister comme un fin tubule lorsque l'organe est retiré ; la femelle se retourne alors et se sert du tube pour aspirer le sang de la proie (dans laquelle, d'ailleurs, elle a pu pondre).

J. Legrand

◀ *Femelle de* **Trioxys** *en train de pondre dans le corps d'un jeune puceron. Les Ichneumonoidea Aphidiidae sont de très petits Hyménoptères qui se développent aux dépens des Homoptères Aphididae.*

Les **Aphidiidae**, de très petite taille et dont la tête est plus large que le thorax, sont des parasites solitaires de pucerons, dont ils contribuent à limiter les populations.

Les **Pachylommatidae**, voisins des précédents, s'attaquent aux fourmis.

Les **Evaniidae** se remarquent à la forme du gastre, très réduit et très plat, ainsi qu'au pétiole inséré très haut sur le bloc thoracique ; tous se développent dans les oothèques des blattes.

Chez les **Gasteruptionidae**, le gastre se rattache de la même façon au segment médiaire, mais il est long et comprimé ; ces Insectes vivent en ectophages des abeilles solitaires.

Les **Agriotypidae**, caractérisés par un long pétiole et des antennes courtes, méritent d'être cités en raison de leur adaptation à la vie aquatique : ils parasitent les nymphes de phryganes.

Quant à la dernière famille que nous signalerons, celle des **Trigonalidae**, ses représentants aux allures de petites guêpes comptent des parasites primaires mais aussi des hyperparasites, certaines espèces s'attaquant à des Ichneumonides qui eux-mêmes parasitent des chenilles.

Super-famille des Chalcidoidea

Les *Chalcidoidea* constituent l'un des groupes d'Hyménoptères les plus importants, à la fois par le nombre des espèces qui dépassent fort probablement un million, et par leur rôle écologique en tant que parasites d'autres Arthropodes. Leur taille habituelle se situe entre 1 et 2 mm, mais ils renferment les plus petits Insectes connus, si minuscules qu'une vingtaine d'entre eux peuvent se développer dans un œuf de papillon ayant 1 mm^3 de capacité. Tous portent des antennes coudées après le scape, qui est long, et des ailes dont la nervation ne présente qu'une nervure subcostale, prolongée par une nervure marginale et un fragment de radiale se terminant en

boule. Cependant, quelques espèces sont aptères ou brachyptères, caractéristiques qui ne sont pas forcément en rapport avec le sexe. La couleur est généralement métallique ou noire. Les fémurs, souvent renflés, surtout au niveau des pattes postérieures, permettent le saut. Les espèces sont très prolifiques et en grande majorité plurivoltines. La croissance est rapide, éventuellement avec des hypermétamorphoses; la chrysalidation s'effectue au-dehors de l'hôte et sans cocon, à de rares exceptions près. Les Chalcidoïdes qui parasitent toutes sortes d'Araignées ou d'Insectes suivant des régimes divers, comptent une vingtaine de familles dont on donnera seulement quelques exemples.

Chez les groupes les moins évolués, dont la taille est grande ou moyenne, les antennes et la tarière sont souvent longues; la fécondité est moyenne; les larves sont prédatrices ou ectoparasites (**Eupelmidae**) et peuvent devenir végétariennes (certains **Eurypelmidae**) après avoir dévoré leur hôte phytophage.

Les **Callimomidae**, ou **Torymidae**, de teinte métallique et aux hanches démesurées, sont surtout entomophages; *Podagrion splendens* parasite les oothèques de mantes; les *Torymus* s'attaquent aux Cynipides, de même que divers *Megastigmus*, dont certains se développent aux dépens de Diptères galligènes, mais dont d'autres sont totalement phytophages et parfois nuisibles, notamment au pin de Douglas, dont ils détruisent les graines. D'après Grassé, les Torymides forment des rassemblements temporaires de sommeil comprenant soit uniquement des mâles, soit uniquement des femelles.

Beaucoup de **Perilampidae**, reconnaissables à leur fort thorax suivi d'un petit abdomen conique, sont hyperparasites et connaissent un premier stade larvaire très particulier, du type « planidium ». La femelle de *Perilampus chrysopae*, l'une des espèces les mieux connues, dépose ses œufs isolément sur les pousses infestées de pucerons; l'éclosion donne de minuscules larves mobiles, au corps large en avant, cuirassé dorsalement et muni sur la face ventrale de courtes soies utilisées pour progresser. Après quelque temps, ce « planidium » se dresse sur son extrémité postérieure et attend le passage d'une larve de chrysope à laquelle il s'accrochera mais dont il attendra la nymphose pour s'en nourrir.

▼ *Femelle d'*Ooencyrtus *pondant dans les œufs disposés en piles d'*Epicampoptera tamsi, *Lépidoptère Drépanide très nuisible aux caféiers en Afrique.*

M. Boulard

Les **Eucharidae**, au thorax encore plus énorme par rapport au reste du corps, évoluent presque de la même façon, mais aux dépens de fourmis. La larve planidiale se laisse transporter par une ouvrière jusqu'au couvain, où elle se laisse tomber; puis elle mue, devient vermiforme et mange un hôte.

Les **Chalcididae**, remarquables à leurs très gros fémurs postérieurs, évoluent en parasites internes de chrysalides ou de pupes diverses, mais la femelle peut pondre dans des amphitryons déjà sollicités, de sorte qu'il y a souvent concurrence entre les progénitures.

Les **Leucopsidae**, proches des précédents, mais grands, au corps comprimé, et dont la tarière est rangée sur la face dorsale de l'abdomen, vivent aux dépens des Hyménoptères supérieurs. La femelle de *Leucopsis gigas* (15 mm), qui possède des coloris de guêpes et plie ses ailes à leur manière, attaque les nids de chalicodomes, venant à bout de la paroi en mortier après quelque trois heures de forage (selon Fabre); le mâle de cette grande espèce est inconnu. *L. affinis* pond dans les cellules aménagées dans le bois par les osmies.

Chez les **Pteromalidae** et les **Fulophidae**, qui sont sans doute les plus polyphages des Chalcidiens, hormis *Pteromalus puparum*, parasite attitré des chenilles de piérides, les femelles se nourrissent principalement sur le receveur des œufs, à partir des blessures faites par la tarière, et soit directement (dans le cas d'une proie libre), soit avec un tube nutritif (proie dans une graine ou en cocon) conformé comme chez les *Habrobracon*.

Les familles suivantes, Aphélinidés, Eucyrtidés, Mymaridés, Trichogrammatidés et Agaonidés, que l'on réunit, d'après la classification de F. Bernard, sous la dénomination de Chalcidiens supérieurs, renferment des « microhyménoptères », dont la taille varie de 0,1 à 3 mm, et qui présentent un dimorphisme sexuel accentué au niveau des antennes (pectinées chez les mâles). Leur reproduction est intense, avec de nombreuses générations annuelles, excepté chez les Mymarides. Ce sont, pour les quatre cinquièmes, des oophages de Rhynchotes et surtout de Lépidoptères, avec une spécificité parasitaire très notable pour beaucoup, ce qui explique qu'un nombre relativement important d'entre eux a été et est utilisé dans la lutte biologique.

Les **Aphelinidae** s'attaquent aux Sternorhynches, les *Coccophagus, Prospaltella, Aphelinus* et *Aspidiophagus* fournissant des auxiliaires précieux pour l'agriculture.

Les **Encyrtidae**, qui constituent probablement la famille la plus vaste des Chalcidiens, jouent un rôle prépondérant comme parasites naturels, en particulier des Lépidoptères; certains *Ooencyrtus* peuvent anéantir 80 % des pontes et les *Copidosoma* jusqu'à 90 %. Dans cette famille, la polyembryonie est extrêmement poussée : Silvestri a rapporté que les *Litomastix,* qui évoluent dans les chenilles de noctuelles, donnent jusqu'à trois mille embryons à partir d'un seul œuf.

Les **Mymaridae,** grêles et allongés, et les **Trichogrammatidae,** plus trapus, comptent les plus petits Insectes : ils avoisinent 1/10 de mm. Leurs ailes antérieures sont frangées et les postérieures fort étroites. Ils parasitent les œufs fraîchement pondus de divers Insectes; les Mymaridae sont monophages et les Trichogrammatidés polyphages; *Trichogramma evanescens*, par exemple, est connu pour attaquer cent cinquante hôtes différents, appartenant à sept ordres d'Insectes. Dans les deux familles existent des espèces parasitant les pontes d'Insectes aquatiques.

Enfin les **Agaonidae** forment un groupe de Chalcidiens singuliers par leur forme et leurs mœurs, dont les faits essentiels ont été exposés par Grandi. La femelle naissante est ailée et munie de pattes aux tibias courts, les premières et troisièmes paires étant très épaisses; le mâle est toujours aptère et ses yeux sont réduits.

Toutes les espèces connues vivent dans les réceptacles floraux des figuiers, dont elles assument la fécondation croisée, leur action étant parfois même nécessaire à la maturation des fruits : ainsi la figue de Smyrne n'est pas consommable si elle n'a pas été visitée par *Blastophaga psenes*. L'Insecte, qui constitue normalement une véritable symbiose avec la plante sauvage, ou caprifiguier, effectue son développement dans les ovaires des fleurs, sur lesquels il provoque la formation de petites cécidies. Les mâles naissent les premiers, explorent la caprifigue qu'ils ne quitteront pas, et fécondent, à travers la paroi

végétale, les femelles encore enfermées dans leur galle. Peu après, la femelle sort de sa logette, puis de la figue, en passant par l'ombilic et en emportant sur elle du pollen qu'elle transmettra à un nouveau réceptacle où elle pénétrera définitivement (perdant d'ailleurs ses ailes) pour pondre. Contrairement aux figues sauvages, les figues cultivées ont des pistils très longs; les femelles de l'Insecte ne peuvent atteindre les ovaires avec leur tarière et y provoquer l'apparition de cécidies : les blastophages donc sont naturellement absents dans les plantations, aussi y suspend-on, ça et là, des chapelets de caprifigues, qui contiennent toujours des centaines de *B. psenes* des deux sexes indispensables à la pollinisation et à l'obtention de figues succulentes. Ce procédé, déjà connu des anciens Grecs et appelé caprification, a été introduit avec succès en Californie au tout début du siècle.

Super-famille des Serphoidea, ou Proctotrypoidea

Les *Serphoidea* ou *Proctotrypoidea* n'ont très généralement pas les antennes coudées et ils sont plus élancés que les Chalcidiens, quoique de taille très voisine (de 0,2 à 9 mm). Chez les femelles l'ovipositeur sort de l'extrémité même de l'abdomen. Tous ces Insectes sont des parasites, surtout internes; des hypermétamorphoses et la polyembryonie sont possibles, mais leur biologie est encore très mal connue. Ils comprennent huit familles dont cinq principales.

Les **Heloridae** sont, à l'état adulte, les plus proches du type hyménoptère, avec leur tête large et leurs ailes bien nervurées renfermant jusqu'à six cellules et un ptérostigma; *Helorus paradoxus*, la seule espèce à avoir été élevée, est endophage du Névroptère *Chrysopa majuscula*.

Les **Calliceratidae**, encore appelés **Ceraphronidae**, ne possèdent que trois nervures aux ailes antérieures; ce sont des hyperparasites de Sternorhynches passant par des larves âgées ou des nymphes d'Aphidiidés et d'Aphélinidés.

Les **Serphidae**, ou **Proctotrypidae**, ont des formes allongées, l'abdomen terminé en tube, la tête cylindrique ou conique avec des antennes moniliformes chez les mâles, et une seule nervure complète aux ailes. Ils vivent aux dépens des larves souterraines de Coléoptères ou de Diptères, parfois de Myriapodes, et souvent, il y a plusieurs larves par hôte, comme c'est le cas pour *Phaenoserphus viator*, qui s'attaque aux Carabides.

Les **Diapriidae**, à l'encontre des familles précédentes, pauvres en espèces, renferment des milliers de formes, surtout parasites de Diptères. Les plus communes sont *Diapria conica*, qui se développe en groupe dans le puparium du ver à queue des éristales, et *Cinetus iridipennis* qui vit dans les Champignons véreux, aux dépens des asticots.

Les **Scelionidae** constituent aussi une famille importante par le nombre et par la diversité des espèces. Leur habitus général et leur nervation alaire rappellent beaucoup les Chalcidiens, mais ils ne présentent pas les reflets métalliques qui font rarement défaut à ces derniers, et leur tégument est strié longitudinalement, au moins sur la base du gastre. Ils parasitent les œufs frais d'Insectes variés, hormis ceux des Hyménoptères et des Diptères autres que les Tabanides; quelques-uns pratiquent la phorésie : ainsi, la femelle de *Mantibaria manticida* perd ses ailes dès qu'elle s'est accrochée à une mante.

Enfin les **Platygasteridae**, plus petits et moins sculptés que les précédents, de couleur noir luisant, sont des destructeurs de Diptères Cécidomyides. L'œuf est pondu dans celui de l'hôte, et le développement présente souvent une polyembryonie faible, donnant rarement plus de vingt individus par œuf. Parfois la fragmentation s'effectue, mais une seule larve subsiste, ayant mangé toutes les autres; c'est le cas chez *Platygaster herrickii*, qui offre ainsi un exemple de cannibalisme.

★ *Groupe des Aculéates*

Les Aculéates, ou porte-aiguillon, sont ainsi nommés parce que les femelles possèdent un aiguillon, ou dard venimeux. De même que la tarière des Térébrants, l'aiguillon provient de la transformation de l'ovipositeur classique des Symphytes. La dissection permet de reconnaître les différentes parties homologues. L'aiguillon des Aculéates ne sert pas à introduire les œufs, mais est utilisé, chez les uns pour paralyser des proies destinées à la ponte ou aux larves, et chez d'autres, comme arme défensive et parfois offensive. A la base du bulbe de l'aiguillon débouchent deux glandes : la glande acide, bifide, longue et renflée d'un volumineux réservoir où s'accumule le venin qu'elle produit, essentiellement constitué d'acide formique, d'apitoxine et d'histamine; la glande alcaline, plus petite, qui émet un liquide visqueux non toxique, lubrifiant les coaptations stylet-lancettes.

Parmi les autres caractères morphologiques marquants des Aculéates, on retiendra : les antennes, composées très rarement de plus de treize articles, l'existence d'un seul trochanter vrai, et des ailes en général bien nervurées.

C'est surtout sur le plan éthologique que les Aculéates sont remarquables : pour la plupart ils paralysent des proies que, le plus souvent, ils transportent dans des nids aménagés au préalable dans le sol ou dans le bois, ou bien qu'ils construisent de toutes pièces avec des matériaux divers prélevés dans la nature; en outre, nombre d'entre eux vivent en sociétés bien structurées, durables, et soignent une progéniture incapable de pourvoir elle-même à sa subsistance. Ces sociétés où les individus échangent de la nourriture et des informations, atteignent un niveau psychique parmi les plus élevés qui existent dans le monde animal et n'ont de comparable, en fait, que les sociétés de termites, physiquement inférieurs puisque pauromé-taboles, mais ayant développé eux aussi une vie sociale très avancée. Les Hyménoptères Aculéates, fort nombreux et de répartition mondiale, comprennent huit super-familles que nous n'aborderons que très schématiquement.

Super-famille des Bethyloidea

Les *Bethyloidea* forment à la suite des Proctotrypoidea un groupe charnière entre les Térébrants et les autres Aculéates : leurs ailes sont très peu nervurées, mais ils possèdent un aiguillon, un faible nombre d'articles antennaires et ce sont des prédateurs. Ils renferment six familles, parmi lesquelles trois principales.

La famille des **Bethylidae** est caractérisée par la forme exceptionnelle de la tête, aplatie et prognathe, rappelant celle des fourmis. La réduction des ailes est fréquente et, chez la femelle, l'aptérisme est de règle pour certaines espèces; les pattes sont rarement épineuses. Leur prédation s'exerce sur les larves de Coléoptères ou de Lépidoptères qu'ils paralysent de plusieurs piqûres faites apparemment au hasard. Les Béthylides ne transportent pas leurs proies. Ils ne construisent pas de nids. Les œufs sont déposés sur l'hôte et les larves évoluent en ectoparasites; leur comportement les rapproche beaucoup des Braconides. Ils sont surtout tropicaux.

La famille des **Dryinidae**, chez qui la tête est hypognathe, se singularise par la possession de pattes antérieures préhensiles, d'un type original. La conformation de ces pattes les oppose à celles d'autres Insectes prédateurs comme les mantes, mantispes, et bélostomes, et les rapproche des pinces des Scorpions ou des Crustacés. Mais contrairement à tous ces Arthropodes, pour lesquels les pattes antérieures, qui servent d'abord à saisir et à maintenir la proie-nourriture, existent, modifiées, dans les deux sexes, la pince des Dryinides est l'apanage des femelles et sert uniquement à la rétention des proies-hôtes pendant la ponte.

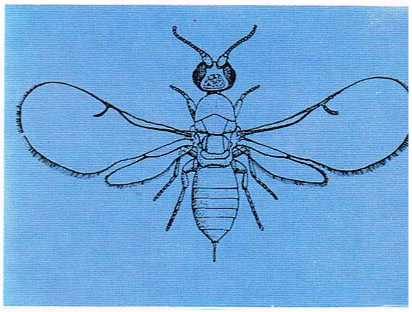

I.G.D.A.

▲ *Femelle de* **Blastophaga psenes**, *minuscule Chalcidoïde du groupe phytophage des Agaonidae, « agent » de la fécondation croisée des figuiers.*

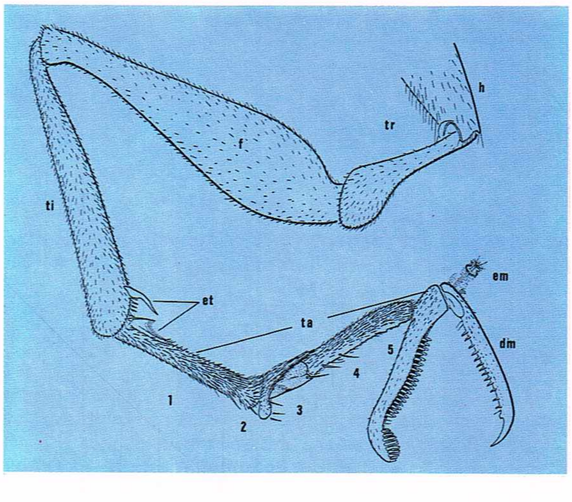

G. Hodebert

◀ *Patte préhensile de* **Dryinus tarraconensis** *femelle (dessin original) : h, hanche; tr, trochanter; f, fémur; ti, tibia; et, étrille de l'antenne; 1, 2, 3, 4, 5, articles du tarse (ta), le cinquième formant un mors; em, empodium; dm, doigt mobile (griffe modifiée du prétarse).*

M. Boulard

Super-famille des Scolioidea

Les *Scolioidea* se caractérisent par des pattes robustes, armées de fortes épines et par des hanches intermédiaires très écartées. Il existe huit familles chez lesquelles on rencontre des formes brachyptères, alors que l'aptérisme, assez fréquent, existe dans des groupes entiers. Ce sont tous des prédateurs de larves, principalement de Coléoptères, mais aussi d'autres Aculéates. Fouisseurs efficaces grâce aux fortes épines de leurs pattes, ils creusent le sol pour atteindre leur proie qu'ils piquent et paralysent avant d'y déposer un œuf.

Les **Scoliidae**, à aspect de grosses guêpes au corps trapu, noir, tacheté de jaune et velu, comprennent le plus grand Hyménoptère de France : *Scolia maculata flavifrons* dont le mâle atteint 25 mm et la femelle 40 mm. Commune dans le Midi, cette scolie se reproduit aux dépens d'*Oryctes nasicornis,* dont la larve vit dans le terreau des troncs d'arbres morts. Certaines espèces se sont révélées des auxiliaires précieux pour lutter contre les Scarabéidés aux larves ou vers blancs nuisibles à la canne à sucre et aux cocotiers : ainsi, *S. maniliae* a été introduit des Philippines aux îles Hawaii.

Les **Tiphiidae**, entièrement noirs, mais aux pattes parfois rouges, ont les mêmes mœurs ; *Tiphia morio*, très commun en France, s'attaque aux hannetons et *T. popiliovora* du Japon est utilisé aux U.S.A. pour combattre le *Popillia japonica*.

▲ *Larve de Dryinide quittant son hôte (*Hysteropterum flavescens*, Homoptère) mort et tombé sur une feuille. La larve, qui, en ectoparasite, a épuisé l'Homoptère, logeait dans la coque soulevant l'aile et que l'on voit ouverte.*

▶ *Les magnifiques Béthyloïdes Chrysidae aux téguments « métallisés » sont des Aculéates-coucous : ils pondent leurs œufs dans le nid d'autres Aculéates; ici, une femelle de* Stilbum splendidum *en train de pondre dans un nid de pélopée (Hyménoptère Sphégien) dont elle a percé la dure paroi maçonnée avec sa tarière.*

A. Margiocco

Prédateurs et ectophages de jeunes Auchénorhynches, les Dryinides ne déposent qu'un seul œuf par hôte ; la larve croît dans un sac formé par les mues successives, mais qu'elle abandonne après la mort de l'Homoptère, pour tisser un cocon sur un support végétal et se nymphoser. *Dryinus tarraconensis*, l'une des rares espèces bien connues (étudiée par Pillault), parasite le plus gros Fulgoroïde de France : *Dictyophora europaea*.

Les **Chrysidae** se reconnaissent à leurs belles couleurs iridescentes, à leur tégument profondément ponctué, et à leur aptitude à ramener l'abdomen sous le thorax lorsqu'elles sont inquiétées. Cet abdomen n'est constitué que de trois urites visibles, les autres formant un tube étroit, télescopé dans le corps et protracté au moment de la ponte. Dans nos régions, les Chrysides se comportent comme des « guêpes-coucous », pondant un œuf dans le nid des Aculéates supérieurs solitaires. Grâce aux observations de Ferton et de Maneval, on sait que la larve se nourrit des provisions animales, ou de son hôte, ne touchant jamais, le cas échéant, aux réserves d'origine végétale ; celle de *Chrysis dichora*, par exemple, attend que la larve d'osmie ait consommé miel et pollen et atteint son développement maximal pour l'attaquer. *Hedychrum rutilans* parasite les philantes y compris l'apivore. *Panorpes grandior* recherche les terriers des *Bembex*, et est capable de creuser comme ces derniers ; les *Stilbum* s'attaquent aux nids en mortier des eumènes et des pélopées, qu'ils peuvent perforer ; enfin, *Chrysis ignita*, l'une des espèces les plus communes en France, est polyphage mais vit surtout d'odynères et d'eumènes.

▶ **Scolia flavifrons**, *adulte, butinant sur un chardon fleuri. C'est le plus gros Hyménoptère d'Europe ; la femelle, ici représentée, mesure 4 cm de long.*

Les **Thynnidae**, limités à l'Australie et au continent sud-américain, présentent un dimorphisme sexuel accusé : le mâle est normal, avec des ailes, des yeux et des ocelles bien développés, alors que la femelle est plus petite, aptère, sans ocelles, et ses yeux sont réduits. Les représentants de cette famille sont terricoles et même souterrains; ils peuvent creuser jusqu'à 1 m de profondeur à la recherche des vers blancs.

Les **Mutillidae** manifestent en général le même dimorphisme sexuel et les femelles ressemblent à des fourmis qui seraient brillamment colorées. Leur dard est très long, et leur piqûre douloureuse mais aux effets passagers. Elles vivent en parasites d'autres Aculéates et de glossines. Un trait curieux de leur biologie tient dans l'accouplement qui s'effectue en vol, le mâle ayant saisi et emporté la femelle entre ses pattes. *Mutilla europaea* est l'hôte des *Bombus*, et *Dasylabris maura* celui des grands Sphécidés, *Sphex* et *Ammophiles*.

Chez les **Methocidae**, la différence entre les sexes est encore plus accentuée : les femelles aptères présentent en outre une grosse tête munie d'antennes courtes, et un étranglement thoracique. Elles s'attaquent aux larves de cicindèles; celles-ci, d'ordinaire si promptes à saisir les Insectes passant à portée de leurs mandibules, ne réagissent pas à la présence des *Methoca* qui les piquent et leur laissent un œuf sans qu'il y ait de lutte. Les mâles des myzines sont connus pour « dormir », les pattes et les mandibules solidement fixées à des plantes diverses.

Super-famille des Formicoidea

Les *Formicoidea* constituent une très importante super-famille, comprenant plus de six mille espèces connues qui représentent sans doute le tiers des espèces existantes. Elles ont très probablement une origine commune avec les Methocidae, auxquels elles ressemblent beaucoup. Les traits marquants de leur habitus général sont : des couleurs ternes, uniformes, allant du jaune au noir en passant par toute la gamme des bruns, des antennes de quatre à treize articles, coudées après le scape, qui est fort long, un pétiole de un ou deux segments souvent noueux ou en écaille, un aiguillon normal, atrophié ou nul suivant les cas.

Toutes vivent en société. La fourmilière comprend trois castes : les mâles, les femelles et les ouvrières. Les mâles, grêles, avec une petite tête occupée par des yeux et des ocelles bien développés, sont ailés durant toute leur vie ; mais celle-ci est brève et s'arrête après l'accouplement. Les femelles, plus grosses et plus grandes, également bien pourvues en organes visuels, n'ont d'ailes que pendant les premiers moments de leur vie imaginale; elles les perdent après le vol nuptial. Ce sont les pondeuses, fondatrices, ou reines; leur vie peut atteindre plusieurs dizaines d'années. Les ouvrières, plus petites, toujours aptères et dépourvues d'ocelles, sont normalement stériles ; dans une même espèce il en existe souvent des catégories différentes, petites ou grandes (minor ou major), parfois avec de grosses têtes parallélépipédiques armées de mandibules plus ou moins fortes et presque prognathes (dans le cas des soldats) ou encore avec des abdomens globuleux (nourrices, ou « pots-à-miel »). Les ouvrières assument tous les travaux et la défense de la communauté; leur longévité propre excède rarement six mois.

Les grandes lignes de la vie d'une fourmilière peuvent se résumer comme suit : à certaines époques, tous les habitants s'agitent, courent en tous sens, préparant la sortie des individus sexués qui viennent de se métamorphoser. En grand nombre, ceux-ci quittent le nid pour le vol nuptial au cours duquel les jeunes mâles et les jeunes femelles vont s'apparier. Cependant, la copulation ne s'effectuera que de retour au sol où, d'ailleurs, la femelle peut recevoir plusieurs mâles successivement. S'étant ensuite débarrassée de ses ailes, soit par autotomie, soit en les coupant, la femelle devenue fondatrice recherche un endroit propice (différent suivant le groupe auquel elle appartient) au dépôt des premiers œufs. Pendant plusieurs semaines, la mère est seule ; généralement, elle pond et soigne ses œufs sans prendre de nourriture, l'énergie nécessaire provenant principalement des substances protéiques et grasses tirées de la lyse des muscles alaires (comme l'a montré Ch. Janet). Parfois cependant, la fourmi mange quelques-uns de ses œufs et, plus souvent, elle en donne quelques autres aux premières larves. Celles-ci, arrivées à maturité, vont se nymphoser dans un cocon (ou non) et toutes évolueront en ouvrières qui, peu après leur naissance, s'occuperont de la reine, aménageront des chambres pour l'ensemble des œufs et des larves à venir qui constitueront le couvain, et pourvoiront à l'alimentation de tous.

Comme les termites, les fourmis pratiquent l'échange de nourriture trophallactique, de bouche à bouche après des attouchements mutuels des antennes. Les larves produisent, en contrepartie, un liquide buccal dont les ouvrières se montrent avides. Ces échanges sont complétés par le léchage routinier de la reine (acte capital, car l'odeur propre de la reine est insuffisante), des œufs, des larves et des ouvrières entre elles ; c'est par ce moyen que se trouvent communiquées des substances chimiques, ou phéromones, particulières à la communauté, sortes d'informations qui en maintiennent l'unité comme l'ordonnance.

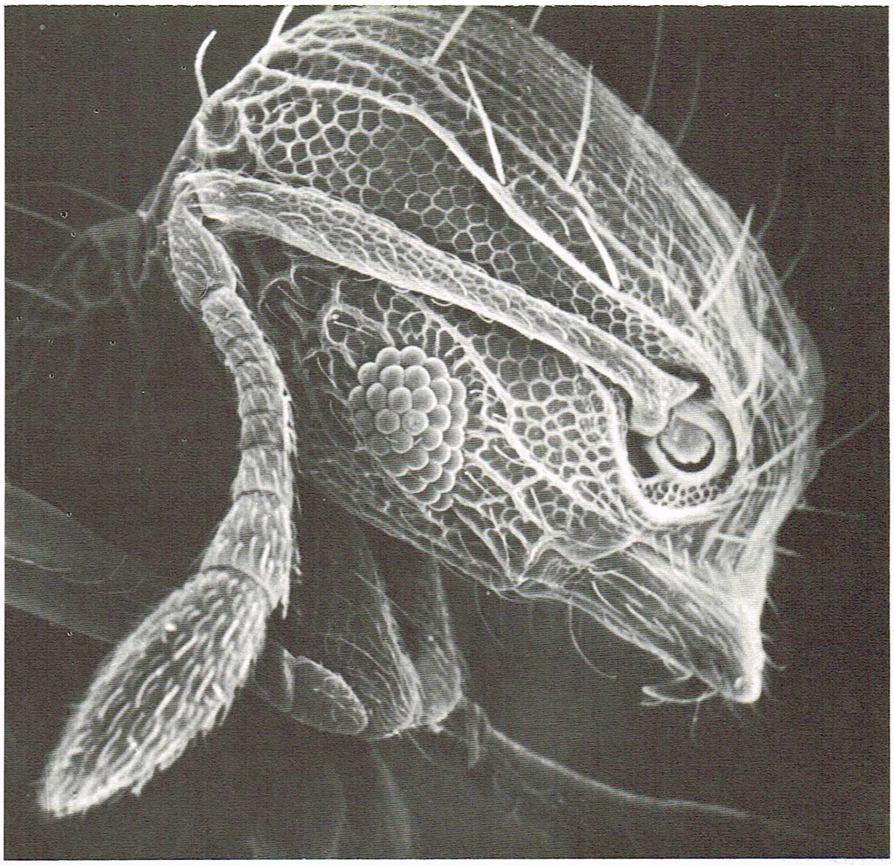

C. Richard

M. Boulard

▲ *En haut, tête de fourmi* (**Wasmania auropunctata**), *grossie 234 fois, montrant en détail l'antenne et l'œil composé du côté droit ainsi que la surface alvéolaire de la cuticule (cliché microscope à balayage, Laboratoire de géologie du Muséum) ; en bas,* **Oecophylla longinoda**, *jeune reine venant de pondre et protégeant ses œufs. Elle est incapable, seule, de construire son nid, et il lui faut attendre la naissance des premières ouvrières.*

M. Boulard

I. Bucciarelli

▲ *Dôme d'un nid de la fourmi rouge,* Formica rufa*; une autre partie du nid se trouve dans le sol.*

La nourriture apportée par les ouvrières est soit d'origine végétale (des feuilles, des fleurs, des graines, des exsudations diverses, des Champignons qu'à l'instar encore des termites, certaines fourmis cultivent), soit d'origine animale : proies variées que les espèces carnassières attaquent, excreta rejetés sous forme de miellat par divers Homoptères, ces derniers étant recherchés principalement par les fourmis évoluées qui constituent avec eux des associations appelées trophobioses. En fait, ces associations, bien que subies par les Homoptères (Cicadelloïdes, pucerons, cochenilles), souvent considérés comme du « bétail », sont à bénéfices réciproques; les fourmis en tirent les éléments essentiels à leur subsistance, et les Rhynchotes se trouvent protégés contre beaucoup de leurs ennemis, que les fourmis empêchent, autant que possible, de s'approcher. De plus, nombre de ces dernières les hébergent directement dans leurs nids aériens (les œcophylles par exemple) ou souterrains (comme font les *Lasius,* les *Pheidoles,* et les *Camponotus*) ou construisent même des abris tout autour (c'est le cas des *Cremastogaster* épigés).

Kloft, à la suite d'études récentes sur les relations fourmis-pucerons, a établi une hypothèse selon laquelle les trophobioses auraient pour origine le réflexe trophallactique, et proviendraient d'une méprise de la part des fourmis, qui confondraient l'arrière d'un puceron avec la tête d'une consœur; de fait, en vue postéro-dorsale, la silhouette abdominale de certains pucerons (ceux qui sont pourvus de cornicules), associée à celle offerte par les pattes arrière que ces Insectes ont l'habitude de lever quand ils sont menacés, notamment lorsqu'une fourmi les touche, évoque un peu une tête myrmécoïde et ses antennes. En outre, ces Homoptères qui aspirent sans cesse de la sève rejettent souvent du miellat, d'où finalement l'idée de la fausse tête dégorgeant de la nourriture à la demande. Mais cette hypothèse de la méprise ne semble pas s'appliquer de façon générale; valable peut-être dans le cas des Aphididés, voire de quelques Biturritiidés (encore que les fourmis ne quémandent pas en faisant toujours face à l'arrière des Homoptères), elle ne l'est guère pour les nombreux autres trophobiontes, en particulier pour les cochenilles et les Membracides. Chez ces derniers, ce sont principalement les larves, incapables de sauter et souvent grégaires, ainsi que les espèces ayant l'habitude, à l'état adulte, de vivre en colonie, qui reçoivent l'attention des fourmis. L'abdomen de ces larves et imagos se termine en un tube conique et tronqué, sans trait myrmécomorphe, et on ne connaît aucun Membracide qui élève les pattes postérieures dans une attitude dont on pourrait dire qu'elles simulent des antennes. Pourtant, les fourmis se comportent avec les Membracides de la même manière qu'avec les pucerons : elles quêtent le miellat que, comme les pucerons d'ailleurs, les Membracides n'émettent pas à chaque sollicitation; dans les « soins dispensés », elles poussent les nouveau-nés trop exposés au soleil vers la face opposée du rameau, les transportant sur des branches ou des plantes moins éprouvées, attaquant les prédateurs et parasites de petite taille mais restant impuissantes face aux gros prédateurs, comme par exemple, lorsqu'une chenille carnassière de

M. Boulard

▶ *Beaucoup de fourmis sont friandes du miellat que pissotent les Homoptères et établissent avec eux des relations durables. Ici des Formicidés* Camponotus *guettent l'excrétion miellée des larves de Membracides* Leptocentrus.

lycène, bien à l'abri sous son manteau tégumentaire garni de poils drus, mange un à un tous les Homoptères d'un « élevage ». Enfin le Membracide, souvent, change de place après avoir « contenté » la fourmi, et l'excrétion peut être rapprochée du jet d'urine qu'émettent les cigales lors d'un envol commandé par la peur.

Outre les trophobiontes, les fourmilières hébergent de nombreux hôtes, dits myrmécophiles; ce sont surtout des Insectes. Ceux-ci peuvent être occasionnels ou permanents et, dans ce dernier cas, ils sont tolérés ou bien recherchés par les fourmis à cause des sécrétions qu'ils produisent; ils constituent alors le groupe des symphiles, représentés le plus souvent par des Coléoptères Staphylinidés, Paussidés, Clavigéridés.

Les fourmis, en majorité terricoles, forment des nids souterrains, comme *Myrmica laevinodis*, ou établissent des constructions cartonnées à la surface du sol, comme *Lasius fuliginosus*, ou bien encore leurs fourmilières sont à la fois sous terre et épigées, comme chez *Cremastogaster auberti* et *Formica rufa*; les espèces arboricoles occupent les cavités naturelles, ou domaties, offertes par les plantes (Promyrmicides), creusent le bois mort sous les écorces *(Dolichoderus quadripuntatus)* ou bâtissent des nids tout en longueur adossés aux troncs ou en boules sur les branches (certaines *Cremastogaster*) ou bien encore utilisent des feuilles qu'elles accolent avec du carton *(Macromischoides aculeatus)* ou qu'elles rapprochent et fixent avec de la soie *(Oecophylla)*. Habituellement, il n'y a qu'une seule femelle par nid mais on connaît aussi beaucoup d'espèces pluri- et même polygynes.

A l'extérieur, les fourmis empruntent des chemins plus ou moins précis autour de la fourmilière et des voies d'exploration, qu'elles marquent de substances odorantes produites par les glandes particulières (glande de Dufour et glande de Pavan) qui débouchent ventralement vers l'apex abdominal. C'est en grande partie grâce à ces marquages que les fourmis retrouvent leurs nids; intervient également, au moins pour certaines espèces héliophiles, ce que Santschi a appelé le « compas lumineux » : l'Insecte en route se trouve sous un angle constant avec la direction du soleil, et au retour, s'efforce de garder un angle identique mais vu de l'œil opposé.

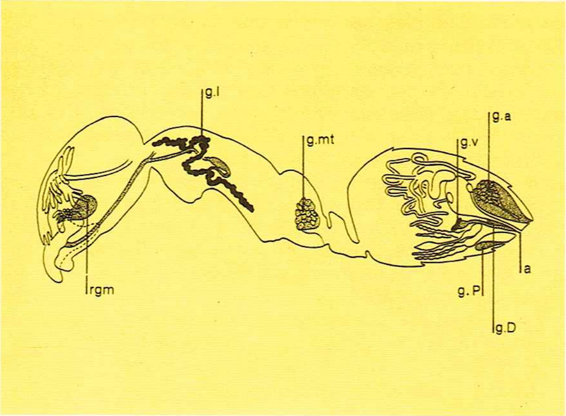

G. Hodebert

La plupart des fourmis chasseresses possèdent un appareil stridulant, qu'elles utilisent sans cesse au cours de leurs déplacements; il est constitué par des stries portées sur la partie antéro-dorsale du gastre que vient frotter une excroissance dure émanant postéro-dorsalement du pétiole.

D'autres glandes, métapleurales, émettent un produit perceptible par les antennes et grâce auquel les individus d'une même fourmilière peuvent se reconnaître; enfin, les glandes mandibulaires sécrètent une substance, dite d'alarme, très volatile qui, à faible dose, attire les ouvrières voisines, mais les fait fuir et s'affoler à plus forte concentration. Il existe aussi des substances inhibitrices des précédentes, ou alléchantes, pouvant être émises par d'autres fourmis et qui permettent l'un des traits bionomiques remarquables chez ces Insectes : l'existence d'un parasitisme social plus ou moins accusé, spécifique et montrant des particularités étonnantes. En effet, certaines espèces, qui ne construisent pas de fourmilière, se font admettre, de cette façon, dans celles d'autres fourmis. Quelques-unes, très petites, s'installent dans un nid, y creusent leurs propres galeries que les fourmis-hôtes, trop grosses, ne peuvent emprunter et se contentent de rapiner; d'autres tuent la reine en place et installent la leur, qui devient celle d'une société mixte, au moins dans les premiers temps car, par la suite, les ouvrières-hôtes disparaissent faute de reproductrice. Chez la fourmi-amazone, répandue dans toute la France quoique peu commune, c'est la jeune reine elle-même qui se charge de la besogne, aux dépens de la fourmi rousse *(Serviformica fusca)*, dont elle prend le nid et les ouvrières; puis celles-ci venant à manquer, ses propres ouvrières, remarquables à leurs mandibules en faux, vont, en longues colonnes, razzier d'autres fourmilières de *fusca* et en ramènent le couvain, qui donnera de nouvelles esclaves. Fait plus étrange, quand des *Wheelerella* s'introduisent dans une fourmilière de *Monomorium*, ce sont ces dernières qui tuent leur propre reine puis s'occupent des intruses avec empressement.

Au point de vue économique, peu de fourmis se révèlent intrinsèquement nuisibles et nous ne retiendrons que les *Messor* ou fourmis moissonneuses et les *Macromischoides* qui sont très venimeuses et par suite fort gênantes, notamment lors de la cueillette du café. Certaines, comme les *Lasius* par exemple, ont un rôle néfaste par l'élevage qu'elles font des Sternorhynches. D'autres, au contraire, s'avèrent très utiles : *Formica rufa* est véritablement « employée » en Europe à la protection des forêts, *Decophylla smaragdina* l'est de même en Chine dans les orangeraies, comme prédateurs d'Insectes défoliateurs.

On classe les *Formicoidea* en huit familles, dont six principales.

Celle des **Poneridae** comprend des fourmis de tailles diverses mais souvent grandes ou même très grandes : les ouvrières de *Linoponera grandis*, espèce sud-américaine, atteignent 30 mm de long. Les mandibules puissantes, le pétiole trapu et formé d'un seul segment (exceptionnellement deux chez les *Myrmecia*), l'aiguillon fonctionnel constituent les principales caractéristiques de ces Insectes. Ce sont des chasseresses sortant isolément ou en petits groupes de fourmilières souterraines peu importantes et peuplées, au plus, de quelques centaines d'ouvrières. Celles-ci peuvent devenir reproductrices et il y a souvent plusieurs reines par nid. C'est une famille surtout tropicale dont on citera les fourmis-bouledogues australiennes *(Myrmecia)*, très agressives lorsqu'elles sont nombreuses, donnant des Insectes à leurs larves mais se nourrissant elles-mêmes de matières sucrées; les fourmis-cadavres africaines, comme *Megaponera foetens* et *Paltothyreus tarsatus*, ainsi appelées à cause de l'odeur qu'elles répandent, s'attaquent principalement aux termites.

Les **Dorylidae**, également chasseresses mais nomades (elles ne forment que des nids provisoires), se déplacent en troupes immenses (fourmis-légionnaires) et présentent le polymorphisme le plus important qui soit chez les fourmis : les mâles, ailés, sont énormes, atteignant 4 cm, munis d'yeux et d'ocelles normaux; les femelles, plus petites, aveugles ou pourvues d'yeux réduits, sont aptères ou microptères, leur abdomen est volumineux et distendu, les ouvrières ont des tailles très diverses (entre 2 et 16 mm), les plus grandes dotées des mandibules les plus fortes. Les *Eciton* américaines, les *Dorylus* et les *Anomma* africaines, ces dernières communément appelées « magnans », constituent des colonnes plus ou moins larges (de 3 à 20 cm) mais toujours fort longues (de 500 à 1 000 m) incluant leurs symphiles et encadrées de grandes ouvrières aux mâchoires constamment écartées, imprimant les sols meubles de leur passage, formant des remblais et attaquant tout Animal rencontré. Les *Eciton* sont les mieux connues et ne sont tenues en échec que par quelques autres fourmis *(Atta* et *Azteca)* et par les fourmiliers.

Les **Promyrmicidae**, qui habitent surtout la zone tropicale comme les précédentes, sont essentiellement arboricoles, nichant dans toutes sortes de domaties, d'où elles partent chasser. Leurs larves sont hypocéphales par suite de l'importance du prothorax; ce segment et le premier urite portent ventralement chacun une paire de lobes exsudatoires que les ouvrières viennent lécher. *Viticola tessmanni* est une espèce commune en Afrique centrale, où elle niche dans les tiges creuses des *Vitex*.

◄▼ Schéma de la localisation de l'équipement glandulaire à sécrétion externe, ou phéromones, chez une ouvrière vue de profil : a, aiguillon; g. a, glandes anales; g. D, glandes de Dufour, et g. P, glandes de Pavan, servent au marquage des pistes; g. l, glande labiale, dont le rôle n'est pas encore connu; g. mt, glandes métapleurales, donnent son odeur caractéristique à la fourmilière; g. v, glande à venin; rgm, glandes mandibulaires et leur réservoir, substance pouvant être attractive ou répulsive selon la dose émise. Les phéromones permettent à ces Insectes de s'informer, d'établir ou de maintenir des relations entre eux.

▼ Nids en boules terreuses installés dans le feuillage d'un colatier par des* Cremastogaster *(fourmis Myrmicidae).

M. Boulard

G. Mazza

▲ *Ouvrières et nymphes de la fourmi rouge, Formica rufa.*

Les **Myrmicidae** forment la famille la plus riche en espèces (environ deux mille cinq cents) et dont les adaptations et les comportements sont les plus variés. Deux articles forment le pétiole, et l'aiguillon est le plus souvent fonctionnel. Les larves, primitivement mobiles, deviennent obèses avant de se transformer en nymphe, mais ne font pas de cocon.

En grande majorité, les Myrmicidés sont terricoles, cependant les *Cremastogaster*, comptant parmi les plus évolués, nidifient aussi dans les arbres, mélangeant de la terre à des fragments ou à du carton de bois. Les *Cremastogaster* sont ces fourmis remarquables par leurs facultés de relever leur gastre au-dessus de la tête et de projeter leur venin vers l'avant.

Beaucoup de Myrmicidés, surtout des pays tempérés, comme les *Pheidoles*, les *Tetramorium*, etc., sont omnivores ; cependant, la plupart ont des régimes plus stricts : ainsi, les *Messor*, ou fourmis-moissonneuses, qui coupent les plantes herbacées et prennent les grains qu'elles « engrangent » dans des silos étanches à l'eau, et dont elles empêchent la germination, ont un régime granivore ; les *Atta*, ou fourmis coupeuses de feuilles d'Amérique du Sud, qui cultivent des Champignons sur des bancs de débris de limbes mastiqués et mélangés d'excréments, sont fungivores ; les *Myrmica* et les *Cremastogaster*, qui recherchent le miellat des Homoptères, ainsi que *Paedalgus* et les *Carebara*, prédateurs de termites, sont insectivores. Chez ces dernières, la reine est environ deux mille fois plus grosse que les ouvrières et les jeunes femelles essaiment avec plusieurs de celles-ci accrochées à leurs pattes.

Le groupe renferme des espèces parasites, telles que l'*Anergates atratulus* européenne chez qui la caste ouvrière manque totalement ; la femelle va prendre la place de la reine d'un nid de *Tetramorium caespitum* qui est tuée par ses propres ouvrières dès l'arrivée de l'intruse. La nouvelle société périt avec les dernières ouvrières *caespitum* mais la reine parasite a eu le temps d'assumer une descendance ; cas rare, les mâles d'*Anergates atratulus* naissent aptères et fécondent les jeunes femelles dans le nid.

Dans la petite famille des **Dolichoderidae**, qui compte environ trois cents espèces, le pétiole est court et formé d'un seul segment, l'aiguillon vestigial ; le clypéus s'avance en triangle entre la base des antennes et des glandes anales émettent, quand l'Insecte est inquiété, une sécrétion à odeur de beurre rance. Les larves, impotentes, glabres, à segmentation indistincte et à pièces buccales rudimentaires ou nulles, sont proches de celles des Formicides. Les nids, pour la plupart polygynes, sont établis dans les branches mortes des feuilles *(Dolichoderus)* ou bien dans les terres sablonneuses exposées au soleil *(Tapinoma)*.

Le régime des Dolichodéridés est omnivore, avec une préférence marquée pour le miellat. C'est à cette famille qu'appartiennent les *Azteca* déjà citées et la pullulante fourmi d'Argentine *Iridomyrmex humilis*, brun clair, minuscule (2,5 mm), grêle, mais qui devient nuisible en France, chassant les fourmis indigènes, élevant et dispersant des pucerons, pénétrant jusque dans les maisons et s'attaquant aux denrées entreposées. Cette espèce est difficile à détruire, car elle forme des petits nids nombreux et épars.

On doit encore mentionner les *Leptomyrmex* des déserts australiens, dont certaines ouvrières, restant au nid, accumulent dans leur jabot tant de matières sucrées, rapportées par leurs consœurs, que l'abdomen devient parfaitement sphérique. Elles font partie des fourmis « pots-à-miel » ou plérergates recherchées et consommées par l'homme et dont d'autres espèces se trouvent dans la famille des *Formicidae*. Il s'agit des *Melophorus* et des *Myrmecocystus* adaptées également aux climats arides, d'Australie et d'Amérique du Nord respectivement.

Les **Formicidae**, communes sous les tropiques, sont plus abondantes encore dans les zones tempérées ou froides. Leur pétiole est unisegmenté, elles n'ont plus d'aiguillon mais elles peuvent, en se retournant, projeter des liquides de défense, souvent très riches en acide formique, à plusieurs centimètres de la pointe abdominale. Les larves hypocéphales, à fortes mandibules et au corps bien segmenté, se métamorphosent dans un cocon ; le moment venu, les ouvrières devront ouvrir celui-ci pour que l'imago en puisse sortir. Comptant plus de deux mille deux cents espèces, leurs adaptations restent cependant moins variées que celles des Myrmicides : ainsi, contrairement à ces dernières, elles ne comptent pas de champignonnistes, ni de moissonneuses, et ne présentent pas de parasitisme aussi développé.

Les Formicidés comptent deux sous-familles principales : les *Alloformicinae* et les *Euformicinae*. Les premières, généralement de petite taille, à gros yeux, terricoles et omnivores sont surtout réparties dans le Pacifique austral (quatre espèces européennes seulement) ; c'est parmi elles que se rangent les *Melophorus*. Les secondes, beaucoup plus riches en espèces, comportent trois groupes.

Le groupe des *Camponotus* réunit des fourmis d'assez grande taille, omnivores mais à tendance carnassière et friandes de miellat. Leurs habitudes sont terricoles pour les moins évoluées, arboricoles pour les autres, qui creusent des galeries dans le bois (*C. herculeanus*, qui vit en France) ou même dans les termitières installées sur les branches (*C. vividus*, espèce africaine), tissent des nids soyeux, recouverts *(Polyrhachis)* ou non (nombreux *Camponotus*) de carton grossier, ou font des habitations de feuilles réunies par des points de soie *(Oecophylla)*. Particularité extraordinaire : cette soie est sécrétée uniquement par les larves (glandes labiales) et les ouvrières se servent de ces dernières comme de navettes en les tenant entre leurs mandibules. Les œcophylles, qui utilisent des feuilles sans les détacher, font preuve d'une coordination remarquable pour rapprocher les limbes en formant des chaînes de traction où chaque ouvrière tient la précédente par son pétiole ; puis une ligne d'ouvrières maintient les feuilles bord à bord tandis que d'autres, portant les larves fileuses, en assurent la fixation définitive. Ces fourmis sont capables de morsures dont les effets sont fulgurants.

Le groupe des *Lasius* se compose de petites espèces presque toutes terricoles ou bien logeant dans le bois pourri. Beaucoup élèvent des Sternorhynches radicicoles à l'intérieur même de leurs nids. C'est ici que se placent les *Myrmecocystus* à miel.

Le groupe des *Formica*, dont le type est la fourmi rouge (*F. rufa*), est souvent polygyne et essentiellement insectivore. Sa distribution est holarctique : les petites *Proformica* et les grandes *Catalglyphis* se sont adaptées aux régions les plus sèches, vivant dans des terriers profonds, tandis que les *Formica* affectionnent les climats froids et humides, construisant des fourmilières proches de la surface, sous les pierres ou en dôme. Trois coupes éthologiques sont à distinguer : les *Serviformica*, dont la reine est capable, seule, de fonder une société (en construisant un nid sous les pierres), exemple : *Formica (Serviformica) fusca* ; les *Formica*, chez qui la reine doit être accompagnée d'ouvrières essaimantes pour construire une nouvelle fourmilière en dôme, exemple : *Formica (Formica) rufa* ; les *Raptiformica*, auxquelles on joint ici les *Polyergus*, dont les reines usurpent les fourmilières des premières, soit en respectant la reine légitime, dans le cas de la fourmi esclavagiste *Formica (Raptiformica) sanguinea*, soit en la tuant, dans le cas de la fourmi-amazone *Polyergus rufescens*.

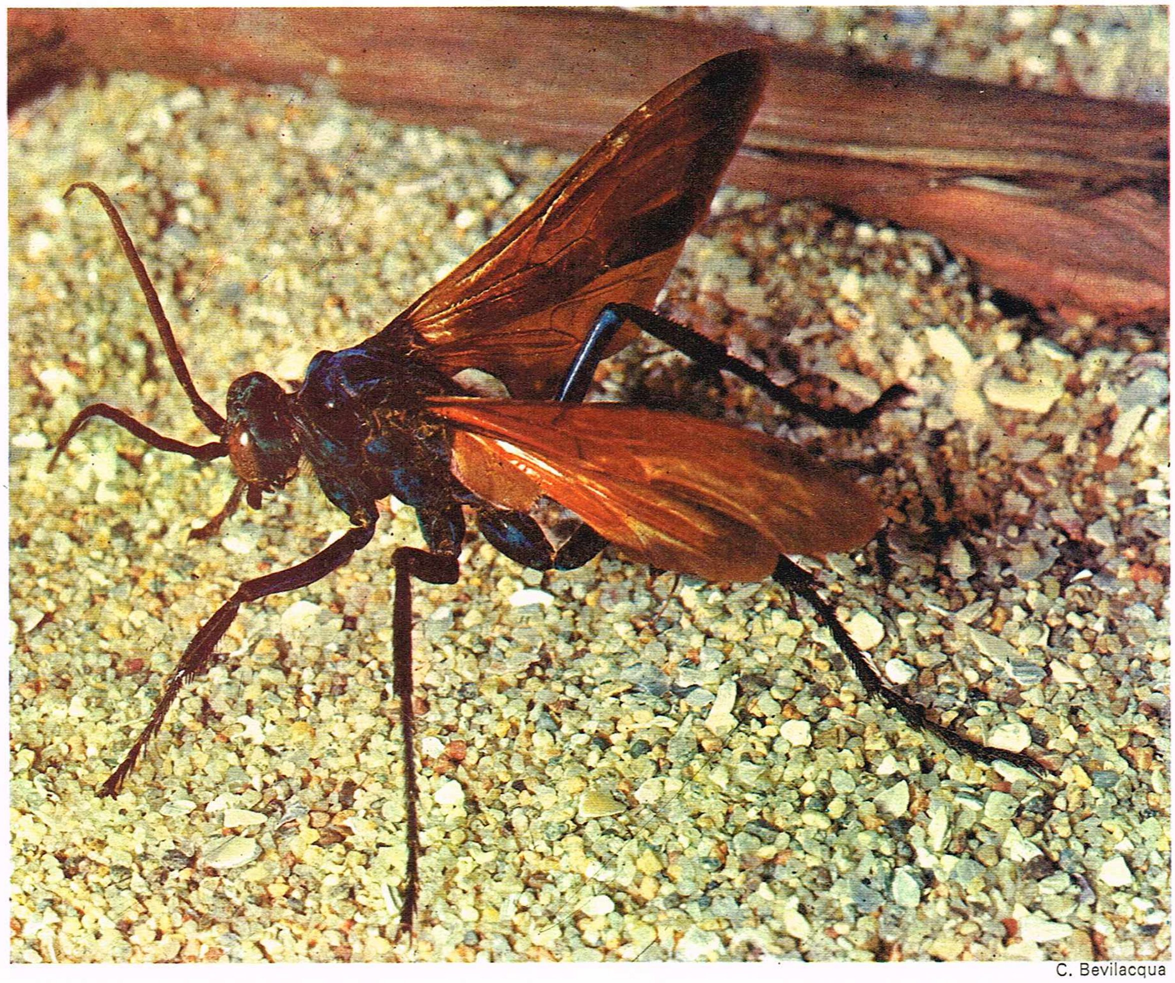

C. Bevilacqua

◀ ***Hyménoptère Pompiloïde du genre*** **Pepsis** ***à la recherche d'une Araignée.***

Super-famille des Pompiloidea

Les *Pompiloidea*, les pompiles, riches de plusieurs milliers d'espèces, constituent une super-famille très homogène, tant sur le plan morphologique qu'éthologique. Ils ressemblent à des guêpes de taille moyenne ou très grande, dont les ailes au repos resteraient écartées, mais ils s'en distinguent surtout par leurs yeux non réniformes et leurs longues antennes; celles-ci, chez la femelle, s'enroulent curieusement en crosse après la mort (mais des Sphégiens présentent aussi cette particularité). Ce sont des chasseurs d'Araignées, exclusivement. Quoique bons volateurs, les pompiles marchent plus qu'ils ne volent, explorant le terrain à pas rapides de leurs longues pattes, les antennes et les ailes sans cesse frémissantes, à la recherche d'une proie que certains vont attaquer jusque dans son repaire. Comme l'a montré Ferton, l'instinct combatif de l'Araignée est inhibé par la présence de l'Hyménoptère qui n'a pas à lutter pour la maîtriser, contrairement à ce que l'on a pu écrire parfois sur ce sujet. Un fait semblable a été noté à propos des larves de cicindelles face aux Méthocides.

En général, les pompiles paralysent ou engourdissent de façon temporaire les Arachnides de deux ou plusieurs coups d'aiguillon, dont un est appliqué dans la région buccale et un autre à travers la membrane intersegmentaire céphalothorax-abdomen. Ils ne déposent jamais qu'un seul œuf sur chaque proie. Terricole, cette dernière peut être abandonnée dans son propre logis; dans d'autres circonstances, elle est entraînée jusqu'à un endroit convenable et enfouie dans un terrier creusé extemporanément par le pompile, mais avec de fréquents arrêts pour, semble-t-il, s'assurer de l'état toujours comateux de la victime; ou bien encore, fait plus rare et caractéristique de la famille des **Macromeridae**, l'Hyménoptère peut couper les pattes de l'Araignée et l'enfermer dans une sorte de tonnelet en terre gâchée, maçonné à l'avance (*Macromeris* tropicaux et *Pseudagenia* européens). Les *Pompiloidea* comprennent trois autres familles.

Les **Pepsidae**, dont les tibias postérieurs sont crénelés en dents de scie chez la femelle, renferment de très grandes espèces : *Cryptochilus annulatus* (30 mm de long), prédateur de la lycose de Narbonne étudié par Fabre et Ferton, et surtout *Pepsis heros*, sud-américain, le plus grand de tous les Hyménoptères avec 5,5 cm de longueur et 10 cm d'envergure, chasseur de mygales.

Les **Pompilidae**, de taille très moyenne (10-25 mm), fort nombreux, ont une rangée d'épines inégales aux tibias postérieurs. Les mieux connus sont l'*Anoplius viaticus*, qu'on peut voir souvent sur les sentiers, courant à la recherche de petites lycoses et pardoses, le *Pompilus plumbeus*, qui fréquente les terrains sablonneux, et l'*Episyron albonotatus*, spécialisé dans la chasse aux épeires, qu'il va déloger de leur toile sans se prendre aux fils visqueux.

Chez les **Homonotidae** le venin n'a qu'une action fugace, permettant tout juste le dépôt de l'œuf. Ces Insectes traquent les mygales dans leurs terriers, dont ils savent très bien ouvrir l'opercule; exemples : *Planiceps fulviventris* et *Pedinaspis crassitarsis*.

Super-famille des Ceropaloidea

Les *Ceropaloidea* diffèrent des précédents par les yeux légèrement sinueux du côté interne, des antennes non enroulables, ainsi que par la forme terminale du gastre, dont l'aiguillon se trouve dirigé vers le haut. Ils s'en distinguent également par leurs mœurs : ce sont des cleptoparasites, aux dépens d'ailleurs des pompiles. Ils dérobent l'Araignée paralysée par ces derniers, au besoin après lutte, et y déposent un œuf, ce qu'a fait connaître J. Perez. Il s'agit d'un groupe surtout tropical, représenté en France par *Ceropales maculata*.

Super-famille des Sphecoidea

Les *Sphecoidea* ou Sphégiens ressemblent, en général, beaucoup aux pompiles mais s'en distinguent par un caractère constant : les angles latéro-postérieurs du pronotum n'atteignent pas, chez eux, les tegulae (petites écailles recouvrant la base des ailes). Leur taille comme la forme de leur abdomen sont très variées, 2 mm pour certains *Stigmus*, 50 mm pour quelques *Sphex*. Leur

▶ *A gauche, tête, vue de face, d'un Hyménoptère Sphecidae du genre* **Sphecius** *:*
a, antenne;
c, clypeus;
gs, glosse;
l, labre;
md, mandibule;
plb, palbe labial;
pmx, palpe maxillaire;
o. c, œil composé;
o. m, ocelle médian;
pgs, paraglosse;
v, vertex
(d'après H.-E. Evans).
A droite, **Ammophila heydeni** *; position caractéristique prise par l'Insecte lors du repos nocturne.*

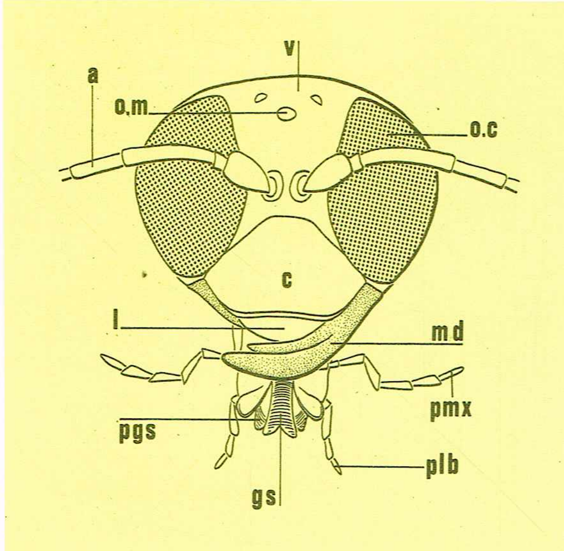

G. Hodebert

J. Carayon

M. Boulard

▲ **Odynerus (Ancistrocerus) parietum,** *petite guêpe nichant souvent dans les trous des murs; celle-ci est en train de nettoyer ses pattes postérieures par brossage réciproque.*

gastre est sessile chez les philantes et les bembix ou longuement pétiolé chez les ammophiles et les pélopées. Le tégument est glabre, les yeux sont très grands et rarement échancrés, et les mandibules puissantes. Un dimorphisme sexuel existe au niveau des antennes, diversement conformées chez les mâles, et des pattes antérieures souvent munies, chez les femelles, de fortes épines spatulées. Ils volent tous aisément.

Cette super-famille renferme sans doute les prédateurs les plus doués avec certains Vespoïdes, parmi les Hyménoptères, pour la chasse et l'anesthésie des proies. Chaque groupe a une classe déterminée de ces dernières, qu'il chasse à la vue puis à l'odeur, et les Sphecidae, famille type, fournissent les meilleurs exemples de cette spécialisation. En grande majorité, les victimes ne sont pas tuées mais paralysées par un venin neurotoxique injecté à coups d'aiguillon dans les centres nerveux, ce qu'avait bien vu Fabre et dont A. Steiner a précisé les modalités d'application chez *Liris nigra,* prédateur de grillons. L'immobilisation est définitive, mais les fonctions végétatives ne sont pas abolies et les proies restent vivantes durant un temps, plus que nécessaire d'ailleurs au développement de la larve du Sphégien. Les proies sont soit traînées de diverses manières, soit transportées en vol jusqu'à un endroit propice à la nidification ou jusqu'au nid préparé à l'avance. S'il s'agit d'un terrier, l'entrée en est souvent obturée par un petit caillou que l'Insecte dépose avant son départ pour la chasse (ce cas est fréquemment observé chez les ammophiles); les espèces maçonnes ou xylophiles ferment leur nid d'un bouchon de mortier ou de sciure. Tous localisent l'entrée d'après la topographie avoisinante, qu'ils repèrent par un court vol de fixation. L'approvisionnement terminé, le Sphégien pond sur l'une des proies un œuf long et étroit, un peu incurvé, et clôt le nid. Fabre a montré le caractère stéréotypé de ce comportement dont le déroulement, une fois entrepris, n'est pas susceptible d'ajustements.

Comptant un nombre considérable d'espèces, répandus dans le monde entier, les Sphecoidea ont été divisés en onze familles, dont nous n'évoquerons que les principales.

Les **Sphecidae**, de taille toujours très grande (20 à 50 mm) et aimant les régions chaudes, sont représentés par quatre genres nettement séparés à la fois par des traits morphologiques et d'autres éthologiques. Les *Sphex* chassent les Orthoptères et les mantes, qu'ils enfouissent dans des terriers faits avant la première capture, hormis les représentants du sous-genre *Isodontia,* qui sont rubicoles, nichant dans les tiges creuses des roseaux. Leur position de sommeil, uniquement connue pour trois espèces, est prise la tête en bas, les mandibules et les six pattes fixées au support (*Sphex umbrosus* d'Afrique du Sud, *S. albisectus* et *S. lividocinctus* de Provence).

Les *Ammophila* sont également des terrassiers, mais elles ne chassent que les chenilles glabres *(A. heydeni, A. sabulosa)* ou les fausses chenilles *(A. campestris).* Elles se reposent la nuit, dans la position caractéristique. Les *Sceliphron,* appelées communément pélopées, ne s'attaquent qu'aux Araignées, qu'elles entassent dans des nids maçonnés composés de plusieurs cellules plus ou moins parallèles; *S. spirifex* est fréquente en Provence, où elle établit souvent son nid dans les maisons. Le genre *Podium,* exclusivement américain, est spécialisé dans la chasse aux blattes. Les représentants des **Ampulicidae,** petite famille surtout tropicale, s'attaquent aussi aux Blattodea.

Les **Bembicidae**, au corps trapu, vivent souvent en colonies populeuses dans les endroits sablonneux; leurs terriers sont peu profonds et individuels, chaque femelle de *Bembix* approvisionnant ses propres larves. Ces dernières sont nourries au jour le jour, généralement avec des Diptères, ceux-ci de plus en plus gros à mesure qu'elles grandissent. Un seul œuf est déposé par cellule, d'une façon curieuse décrite par Ferton : il est maintenu vertical par trois grains de sable entourant la base.

Les **Stizidae**, également sabulicoles pour la plupart, comprennent les *Stizus,* prédateurs d'Orthoptères, les *Sphecius* et les *Bembecinus,* chasseurs de cigales et d'autres Homoptères.

Les **Philanthidae** à tête large et arrondie, et antennes très courtes, sont des chasseurs d'abeilles ou de Coléoptères. Parmi les mieux connus, citons le philanthe apivore étudié par Fabre, *Philanthus triangulum,* dont la femelle proportionne le nombre des abeilles enfouies avec son œuf au sexe de celui-ci (cinq pour la future femelle, et trois pour le mâle) ; le *Cerceris rybyensis,* qui s'attaque aux halictes; et le *C. bupresticida,* découvert par L. Dufour.

Les **Larridae**, reconnaissables à leurs ocelles postérieurs situés près du côté interne des yeux, poursuivent les Orthoptéroïdes (les *Larra* les courtilières, les *Tachysphex* les petits criquets et les jeunes mantes), les Hémiptères (c'est le cas des *Astrata*) ou d'autres Hyménoptères (c'est le cas des *Palarus*).

Les **Trypoxylonidae**, aux yeux échancrés et au corps souvent noir, paralysent des Araignées; rubicoles ou maçons; l'espèce *Trypoxylon figulus,* la mieux connue, se rencontre dans toute la France.

Les **Crabronidae** représentés par le seul genre *Crabro* mais comptant de nombreuses espèces, ont des habitudes nidifiantes très variées et des proies fort diverses. Le *C. cribarius* européen, par exemple, niche dans le bois ou le sable et vit aux dépens de Diptères.

Les **Oxybelidae** chassent aussi les Diptères que, curieusement, ils rapportent en vol empalés sur leur aiguillon.

Enfin, les **Nyssonidae** sont remarquables par les agrégats, souvent importants, que forment les mâles lors du repos nocturne, notamment chez l'espèce américaine *Steniolia obliqua* étudiée par H.E. Evans.

Super-famille des Vespoidea

Les *Vespoidea*, guêpes ou Diploptères, s'opposent aux autres Hyménoptères prédateurs par leurs yeux très échancrés du côté interne et leurs ailes antérieures

M. Boulard

S. Kelner - Pillault

◀ ▼*A gauche, femelle de* **Bembix rostrata**, *de retour au nid avec une grosse volucelle qu'elle maintient sous son corps avec les pattes moyennes, ouvrant son terrier à l'aide de ses pattes antérieures fouisseuses; un mâle suit ses gestes; à droite,* **Philanthus triangulum**, *le philanthe apivore, vit aux dépens des abeilles* **Apis**, *qu'il paralyse à coups précis d'aiguillon, puis enfouit dans son terrier avec l'un de ses œufs; en bas, une guêpe maçonne,* **Afreumenes melanosoma**, *rapportant une charge de boue pour terminer une deuxième cellule en forme de petite amphore ventrue (Afrique tropicale).*

plicatiles. Au repos, celles-ci sont pliées une fois dans le sens longitudinal et disposées à plat au-dessus des postérieures et du corps, à de rares exceptions près. Aucune des espèces n'est brachyptère ou aptère. Les pattes sont très peu épineuses et la première paire n'a pas de peigne. Le tégument, foncièrement jaune ou brunâtre, peut être maculé ou rayé transversalement de coloris variés, où prédomine le noir.

Les Vespoidea comprennent trois familles, voisines par leur morphologie mais éthologiquement très différentes; beaucoup prennent des positions particulières de repos nocturne.

Les **Eumenidae**, identifiables à l'existence d'une dent aux griffes des pattes, vivent isolément et nourrissent leurs larves d'Insectes paralysés, surtout des chenilles, emmagasinées à raison de plusieurs pour chaque larve. Certaines, comme *Rhaphiglossa* et les odynères rubicoles du groupe des *Rhynchium*, nidifient dans les tiges sèches, creuses ou riches en moelle, dans lesquelles elles alignent des logettes séparées par des cloisons en terre; d'autres, comme les *Zethus* exotiques, construisent des nids relativement volumineux avec des lambeaux de feuilles accolés, des débris végétaux mâchés au préalable; beaucoup d'eumènes et d'odynères sont des maçons dont les tendances artistiques sont plus ou moins développées selon les espèces. Les nids sont sans symétrie chez *Eumenes unguiculata* et chez *E. arbustorum* (cette dernière ferme cependant chaque logette avec un caillou scellé de mortier); *E. pomiformis* et *Afreumenes melanosoma* construisent une petite amphore ventrue; quelques odynères *Hoplopus* creusent des terriers au flanc de talus et en prolongent l'entrée d'une sorte de petite cheminée souvent courbée et dirigée vers le bas (ce comportement fut signalé pour la première fois par Réaumur). Le terrier d'*Odynerus (Hoplopus) melanocephalus* est à chambres multiples copieusement approvisionnées avec de nombreuses larves de charançons *Phytonomus*. Toutes ne laissent qu'un seul œuf par chambre ou cellule, fixé au plafond par un court fil fait d'une sécrétion génitale visqueuse qui durcit en séchant.

Les **Vespidae**, ou guêpes au sens strict du terme, sont de taille moyenne à grande (1 à 4 cm); elles n'ont pas de dents aux griffes et vivent toujours en société. Elles construisent, avec des fibres végétales transformées en carton ou en papier, des nids, aériens ou souterrains, appelés « guêpiers » par Réaumur.

Comme chez les fourmis, il existe trois castes : les femelles, les mâles et les ouvrières; par contre, ces castes sont morphologiquement fort voisines, et les sociétés ne durent qu'une année, au moins sous nos climats. Le nid est créé au printemps par une femelle qui, fécondée durant l'automne précédent, a hiverné dans un abri quelconque. Cette fondatrice commence par construire plusieurs cellules plus ou moins hexagonales par contact réciproque, au fond de chacune desquelles elle colle un œuf. L'éclosion a lieu au bout de quelques jours et

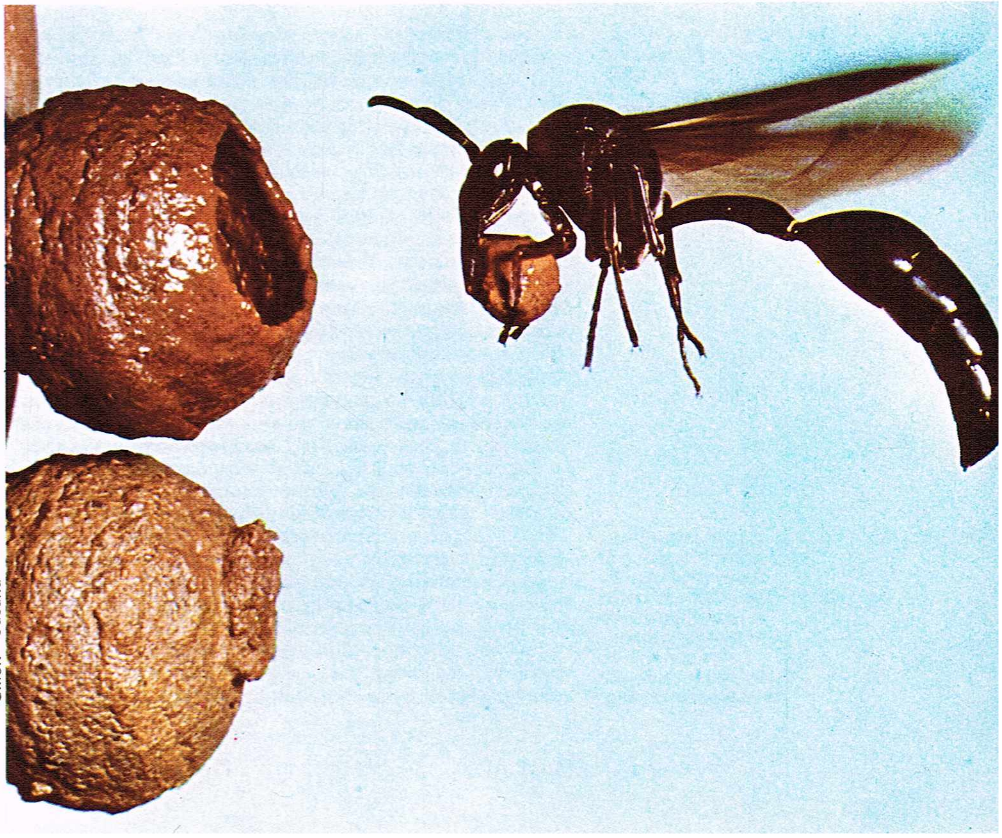

Gillon - Jacana

▶ *Guêpier vertical simple de* Rhopalidia *africaines, fixé sur un euphorbe; en haut, deux ouvrières ventilent le nid dont les alvéoles encore ouverts laissent voir des œufs et des larves.*

la mère procède alors à l'alimentation des larves, en leur apportant des Insectes broyés ou réduits en bouillie. Quinze à vingt jours plus tard, les larves sont arrivées à maturité; elles tissent un cocon et effectuent la métamorphose, qui demandera encore une quinzaine de jours. Toutes donneront des ouvrières, qui immédiatement prennent part à la construction du guêpier et à l'alimentation des autres larves, ou couvain, la femelle fondatrice pondant à un rythme alors accéléré.

La société parvient ainsi à un optimum de population, bien entendu différent selon les groupes : quelques centaines d'habitants pour les polistes, dix mille au plus pour les vespines. Au début de l'automne, les mâles et les femelles reproductrices apparaissent, celles-ci un peu plus grosses que les ouvrières, ceux-là ayant des antennes plus longues et le gastre plus cylindrique. Les sexués, qui ne participent à aucun des travaux, sont nourris par les ouvrières; ils s'accouplent dans le nid ou à son voisinage immédiat. La copulation est rapide, de cinq à six secondes chez les polistes, plusieurs minutes chez la guêpe commune.

Dès les premiers froids, les mâles, les ouvrières et la vieille reine périssent progressivement et les dernières larves, nourries par des ouvrières âgées, avortent avant ou pendant la nymphose par suite de troubles trophiques (ce phénomène a été démontré par Deleurance). Les jeunes femelles, fécondées mais dont les ovaires restent très petits, se dispersent à la recherche de cachettes variées et individuelles, tentant parfois d'entrer dans les maisons, où elles hiverneront, recroquevillées sur elles-mêmes, ailes repliées, antennes rabattues.

Après l'hivernage, les gonades se développent, forment les œufs, et les femelles peuvent alors fonder de nouvelles sociétés. Roubaud a montré que, chez les bélonogasters et les polistes, ces sociétés sont souvent pléométropiques : à la première femelle viennent s'associer une seconde, puis une troisième; à d'autres moments, notamment chez les polistes, se produit un phénomène particulier de capture, décrit par Deleurance : des ouvrières provenant d'un nid vieillissant et arrivant au voisinage d'un jeune guêpier en pleine activité, viennent s'y installer définitivement et y travailler, en dépit de quelques réactions hostiles que les hôtes manifestent au début.

Dans de nombreux genres tropicaux, comme *Polybia*, *Epipona*, *Nectarina*, etc., les sociétés sont pérennes et la multiplication peut se faire par essaimage; cependant, ces guêpes restent encore mal connues.

Les guêpiers les plus simples sont ceux des polistes et de certaines rhopalidies exotiques formés d'une seule couche, horizontale pour les premiers, verticale pour les secondes, d'alvéoles ouverts en direction du bas et suspendus par un pédicelle souvent excentré. Les guêpes, les frelons, les polybies, etc., édifient des nids complexes, incluant plusieurs rangées superposées d'alvéoles, régulièrement espacées entre elles par des piliers de carton; de plus, un involucre de forme globuleuse ou allongée, spécifique, fait de papier souvent renforcé d'une pâte soyeuse, préparée avec les vieux cocons nymphaux malaxés et imbibés de salive, entoure ces nids; une ou plusieurs ouvertures appelées *trous d'envol*, parfois plus ou moins tubulées et béantes, se trouvent ménagées à la partie inférieure ou sur le pourtour; l'ensemble du guêpier dépasse quelquefois 50 cm de haut; il est embroché sur une ou plusieurs branches ou bien encore souterrain.

On sait, grâce aux recherches de Weyrauch, que, comme chez les fourmis et les abeilles, quelques espèces ne construisent pas de nid et parasitent ceux d'autres espèces, dont elles tuent la reine : ainsi, *Dolichovespula (Pseudovespula) omissa* sur *D. (Metavespula) silvestris* par exemple; d'autres se contentent simplement d'y vivre en commensales, tels les *Pseudopolistes* qui s'introduisent chez les polistes auxquels ils ressemblent beaucoup.

Quoique le couvain puisse supporter assez bien des écarts importants de température, la température optimale du développement des larves se situe entre 29 °C et 32 °C. Les guêpiers sont thermorégulés par évaporation d'eau régurgitée et ventilation à l'aide de battements alaires rapides pour abaisser la température, ou par les mouvements généraux des Insectes pour élever cette dernière (une guêpe peut ainsi porter sa propre température à un niveau supérieur de 10 °C à celui du milieu ambiant). Dans tous les cas, l'unité des nids et la régulation de leur vie se trouvent, là aussi, assurés par les

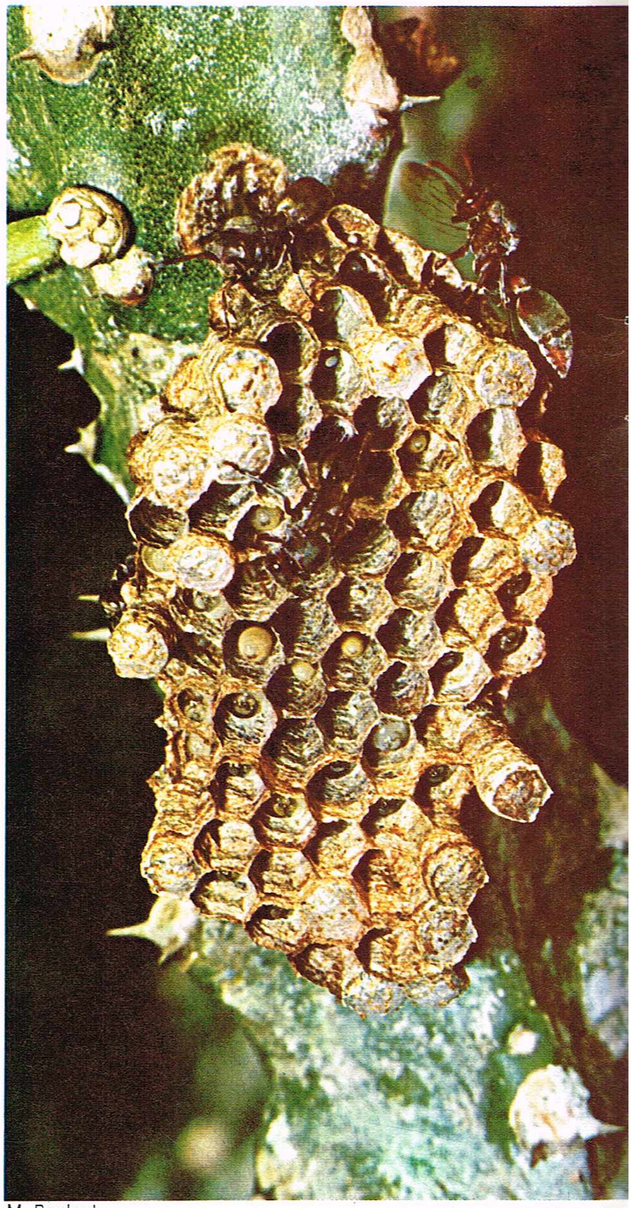

M. Boulard

A. Margiocco

▶ Polistes gallicus *revenant sur son nid dont on a ouvert les cellules les plus externes pour montrer trois nymphes et un adulte venant d'achever sa métamorphose.*

échanges trophallactiques bien montrés par Montagner.

Comme les Euménidés, les Vespidés présentent plusieurs types morphologiques, dont les traits les plus apparents se remarquent au niveau du gastre ; celui-ci est sessile et tronqué droit à la partie antérieure chez les frelons (comme le *Vespa crabro* européen et le grand *V. magnifica* asiatique) et chez les guêpes proprement dites (*Vespula germanica*, la plus commune, qui nidifie dans des cavités souterraines, *Dolichovespula media*, qui fabrique des nids aériens) ; il est sessile, mais rétréci en avant pour les polistes (*Polistes gallicus, P. biglumis,* etc.) ; il est simplement pédonculé chez les rhopalidies tropicales capables de constructions variées ; enfin, il peut être très pétiolé chez les *Belonogaster (B. griseus)*, les *Stenogaster* (*S. depressigaster* des Philippines au nid curieusement torsadé), et chez les *Myschocyttarus labiatus* néotropicaux, dont le nid, constitué seulement de quelques cellules, pend au bout d'un très long pédicelle.

Les **Masaridae**, qui n'ont que deux cellules cubitales aux ailes antérieures (alors qu'il en existe trois chez les autres Vespoïdes) et portent des antennes claviformes, diffèrent de toutes les autres guêpes par leurs habitudes mellifères : anthophiles pour elles-mêmes, elles nourrissent leurs larves principalement avec du miel (l'approvisionnement peut être définitif après dépôt de l'œuf ou au jour le jour, suivant les espèces). Beaucoup font des nids en mortier placés contre les rochers ou le long des tiges, d'autres les enfouissent profondément en terre, l'entrée étant alors surmontée d'une petite cheminée. Enfin, nombre d'entre elles ont, comme les Chrysides, le réflexe de se mettre en boule (et de se laisser tomber) lorsqu'elles sont inquiétées, posture également prise par *Celonites abbreviatus* pour le repos nocturne. Les Masarides affectionnent les climats chauds et secs.

Super-famille des Apoidea

Les *Apoidea*, Mellifères, ou abeilles, sont encore appelés apiaires. Cette dernière super-famille de l'ordre des Hyménoptères réunit un grand nombre d'espèces (plus de deux mille), voisines à bien des égards des Sphécoïdes mais s'en distinguant, au premier abord, par un corps trapu et velu. En outre, l'appareil fouisseur manque aux pattes antérieures (bien que beaucoup d'abeilles nidifient dans des terriers) ; les métatarses postérieurs sont aplatis, et les Apoïdes présentent des traits d'adaptation à la collecte du nectar et du pollen : une langue glossale suceuse, des brosses et une corbeille de récolte (ces derniers organes occupant des places différentes selon les groupes). Les produits floraux constituent la nourriture principale des larves qui ont un régime alimentaire qui diffère ainsi du régime insectivore des larves de Sphégiens. La plupart des abeilles sont solitaires, mais un petit nombre vivent en sociétés. Cette super-famille renferme par ailleurs de nombreuses « espèces-coucous » qui pondent dans les nids d'autres apiaires, recherchés le plus souvent spécifiquement et auxquels elles ne ressemblent pas. Cependant, il existe quelques formes inquilines, tellement semblables à leurs hôtes qu'on les a longtemps confondus ; mais ces abeilles n'ont pas d'appareil collecteur de pollen et se font nourrir, elles et leurs larves.

Michener a classé les Apoidea en six familles que, selon F. Bernard et C. Plateau-Quenu, on répartit en abeilles primitives et abeilles supérieures, celles-ci se distinguant de celles-là par le perfectionnement de l'appareil buccal, de plus en plus lécheur-suceur, et par l'instinct nidifiant, de plus en plus compliqué.

Les abeilles primitives possèdent une langue glossale très courte ou courte, des palpes labiaux dont les articles basaux diffèrent peu des autres ; leur dernier tergite abdominal présente souvent un petit triangle particulier, le triangle pygidial. Elles butinent lentement sur les fleurs à corolle peu profonde et forment, en terre pour la plupart, des nids à parois le plus souvent nues. Toutes ou presque ont un cycle biologique annuel avec un stade hivernant, et des mœurs solitaires. Cependant, tandis que les femelles restent au nid pour le repos nocturne, les mâles de nombreuses espèces ont l'habitude inexpliquée de se réunir à la tombée du jour, parfois en grand nombre, sur quelques « plantes-dortoirs » où ils passent la nuit, prenant des positions caractéristiques, et où ils reviennent chaque soir occuper la même place. Trois familles composent ce groupe : les *Colletidae*, les *Andrenidae* et les *Halictidae*.

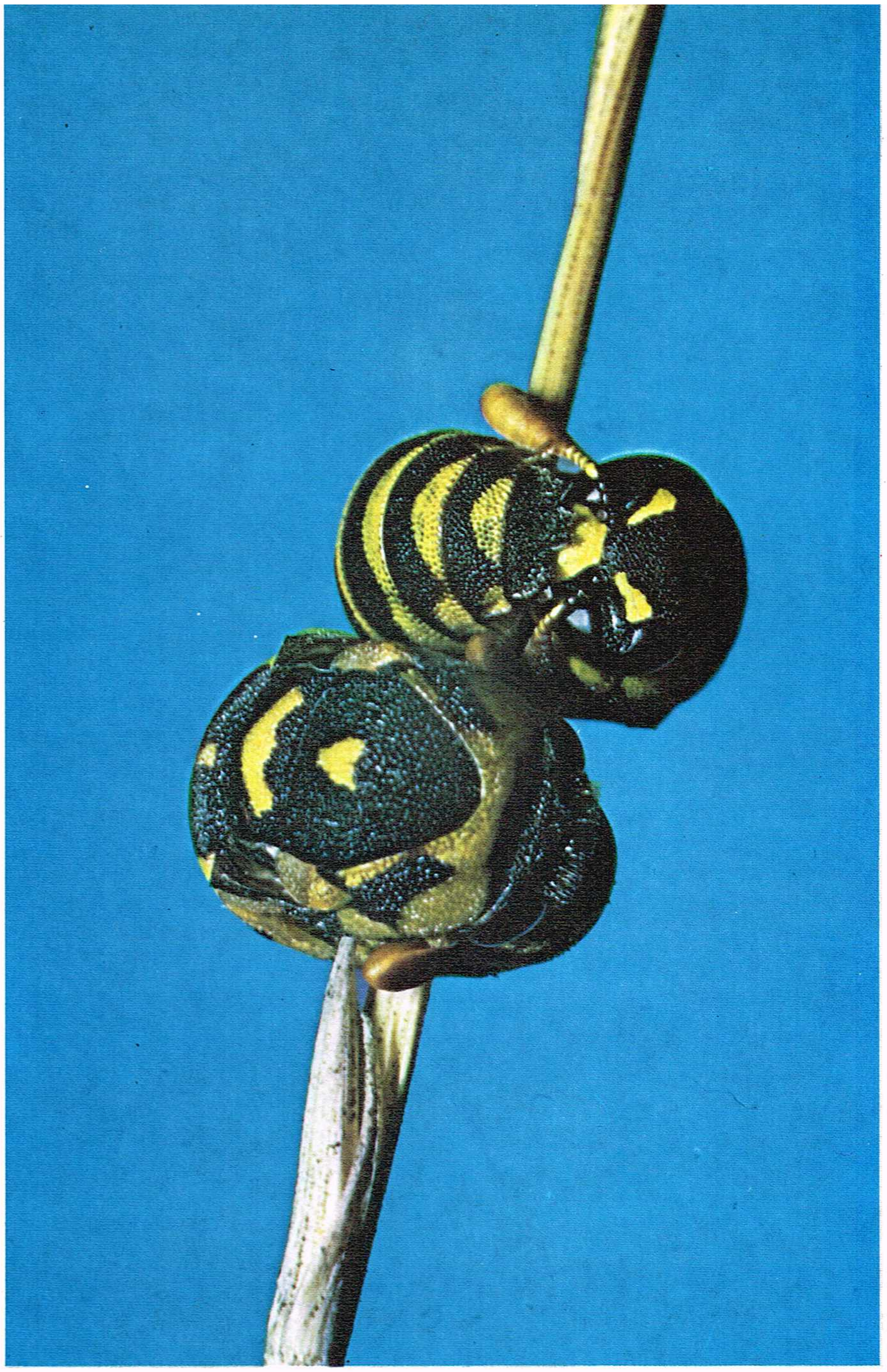

J. Carayon

▲ ***Mâle et femelle de* Celonites abbreviatus *dormant sur un chaume. Ces petites guêpes masarides se roulent de même en boule et se laissent choir au sol lorsqu'elles sont inquiétées.***

Les **Colletidae**, les plus proches de la souche ancestrale des apiaires, ont la langue tronquée ou bifide et les métatarses (ou basitarses) dépourvus de brosses collectrices ; celles-ci existent pourtant, plus ou moins rudimentaires, sur les tibias postérieurs. Les Collétidés enduisent les parois de leurs nids avec une sécrétion buccale qui forme une pellicule transparente solide, mais qui reste souple en séchant. Les mieux connues de ces abeilles sont les *Colletes* et les *Hylaeus*, de répartition mondiale et bien représentées en Europe. Les premières, taille moyenne (de 8 à 10 mm), trois aréoles cubitales aux ailes, des anneaux clairs à l'abdomen, portent des houppes de poils sur les fémurs et les trochanters. Elles creusent, dans les sols meubles, des galeries profondes menant à des cellules soit emboîtées, soit largement séparées. Chaque cellule reçoit une abondante provision de nectar et de pollen ou « pain d'abeille » puis un œuf, généralement fixé à la paroi (chez les *Scrapter* sud-africains, il est simplement déposé sur la pâtée). Les secondes, plus petites, ont un corps luisant presque glabre, des ailes à deux aréoles cubitales ; elles forment leurs nids dans des tiges creuses, du bois mort ou même dans la terre, utilisant le plus souvent les trous creusés par d'autres Insectes.

Les **Andrenidae** ont, pour la plupart, une langue courte et aiguë, des appareils collecteurs de pollen variés comprenant les brosses tibio-métatarsales postérieures, de longs poils courbes sur toutes les pattes, ainsi que, dans certains cas, une frange anale de poils serrés. Les mâles ont souvent une tête et des mandibules énormes, un corps grêle et une teinte différente de celle des femelles.

Les andrènes sont surtout printanières, certaines naissant même dans la période d'épanouissement des fleurs des plantes à chatons. Recherchant le sable ou la terre, elles creusent des nids en général formés d'un canal conduisant à un bouquet de logettes, mais laissent les parois nues. Les nids se trouvent groupés en bourgade; chaque andrène peut en construire plusieurs que, d'une manière très générale, elle est seule à approvisionner. Cependant, chez quelques espèces on assiste à des manifestations d'une vie sociale rudimentaire : d'après Michener et Rettenmeyer, deux femelles d'*Andrena erythronii* ont parfois une seule entrée pour leurs terriers respectifs; Perkins a vu plusieurs femelles d'*A. bucephala* amasser du pollen dans un même nid.

Enfin, ce groupe comprend une sous-famille de parasites, les *Nomadinae,* réunissant des abeilles vivement colorées, vespiformes, vivant aux dépens d'autres abeilles.

Les **Halictidae** ont une langue, repliable en arrière au repos, qui leur permet de butiner des fleurs profondes comme celles des Composées et des Éricacées. Elles ressemblent aux andrènes, mais sont souvent plus petites (de 3 à 13 mm); elles creusent des terriers à couloir vertical ou subvertical, partant d'un sol horizontal. L'appareil collecteur de pollen est constitué principalement d'une brosse tibiale chez les *Halictinae*, tibio-métatarsale chez les *Nomiinae* et les *Dufourinae*, dont certains représentants ont, en outre, des poils collecteurs sur tout le corps et notamment sur les sternites abdominaux (*Systropha* australiens).

La sous-famille des *Halictinae* présente un grand intérêt biologique car elle renferme, à côté d'espèces strictement solitaires et dont les individus, foncièrement agressifs les uns à l'égard des autres, ne peuvent cohabiter, des espèces sociales manifestant une parfaite tolérance réciproque, voire une interattraction réelle. Parmi ces dernières, on distingue avec C. Plateau-Quenu des sociétés primitives et des sociétés plus évoluées. Les sociétés primitives sont celles constituées, entre autres, par les *Halictus ligatus* et *scabiosae*, dont la femelle fondatrice pond continuellement pendant toute la belle saison, mais peut être remplacée par une ou plusieurs de ses filles, successivement. Les autres femelles filles sont des ouvrières qui diffèrent peu des pondeuses; les mâles apparaissent au cours de l'été. Dans les sociétés plus évoluées, le couvain est produit de façon périodique par une seule fondatrice, qui vit tout l'été. En grande majorité, ces espèces ont deux couvains, l'un printanier et le second estival. Du premier naissent des femelles généralement plus petites que la mère, qui agrandissent le nid et approvisionnent les nouvelles cellules dans lesquelles la fondatrice va pondre. Du second couvain éclosent, à l'automne, des mâles et de futures fondatrices. La copulation a lieu, le plus souvent, sur les fleurs où les femelles vont se nourrir. Les mâles meurent peu après, mais les femelles hivernent généralement dans le nid natal et fonderont de nouvelles sociétés au printemps suivant. Le caractère saisonnier des sociétés d'Halictinés ne semble pas obligatoire et Batra a montré qu'il dépend avant tout du climat.

▼ ***Abeille primitive du genre* Halictus (H. scabiosae) *quittant son terrier creusé en terre très sableuse.***

M. Boulard

Grâce aux recherches récentes de C. Plateau-Quenu, on connaît une espèce qui est pérenne : *Evylaeus marginatus*, assez commune au sud de la Loire. La fondatrice vit de cinq à six ans dans un même nid, d'où elle ne sort plus à partir de la deuxième année, accompagnée de ses ouvrières filles; les mâles et les femelles fécondables n'apparaissent qu'au cours des deux dernières années. Aucun échange trophallactique n'a pu être décelé dans cette société matrifiliale, ce qui oppose cette remarquable abeille aux autres Insectes sociaux.

Les abeilles supérieures comprennent aussi trois familles, les *Melittidae*, les *Megachilidae* et les *Apidae*. Elles se distinguent des abeilles primitives par leur longue langue glossale, leurs palpes labiaux dont les articles basaux, aplatis, diffèrent des autres; l'abdomen ne montre généralement pas de triangle pygidial. Elles butinent rapidement sur toutes fleurs et construisent des nids aménagés ou construits avec des sécrétions particulières ou bien des matériaux pris dans la nature. Leur cycle biologique est le plus souvent annuel. La plupart ont des mœurs solitaires, mais un petit nombre d'espèces constituent des sociétés hautement organisées; cependant la complexité du comportement est aussi élevée chez les unes et chez les autres, du même niveau que chez les guêpes solitaires ou sociales, et parfois supérieure.

Dans la petite famille des **Melittidae,** qui ne compte guère plus de soixante espèces, se trouvent réunis des caractères d'abeilles primitives, tels que le faciès rappelant celui des andrènes, le triangle pygidial, le nid simple et profond en terre, et des traits plus évolués, comme la longue langue, les palpes et les brosses bien limitées à la face externe des pattes, qui caractérisent les abeilles supérieures. Ils se divisent en deux genres principaux : *Melitta*, dont les femelles tapissent leurs terriers d'une sécrétion buccale, et *Dasypoda* avec, notamment, *D. hirtipes*, espèce européenne bien connue pour répartir en dunes ses déblais devant l'entrée de son terrier. Ces abeilles entassent tant de pollen sur leurs pattes que leur poids peut en être augmenté de moitié.

Les **Megachilidae**, quant à eux, récoltent le pollen de façon originale, au moyen d'une brosse qui garnit toute la face ventrale de l'abdomen. Cette famille est, en outre, caractérisée par la silhouette trapue, et la présence de seulement deux cellules cubitales aux ailes. Ils sont excellents volateurs, rapides et capables de surplace. Par leur comportement, ils se situent au point le plus avancé de l'évolution des abeilles solitaires.

L'essentiel de nos connaissances à leur égard est dû à Fabre, Perez, Ferton et Grandi, qui ont étudié les espèces méditerranéennes. Ces abeilles peuvent être fouisseuses, rubicoles, maçonnes, et certaines sont même conchylophiles, nidifiant dans les vieilles coquilles d'escargots. Leurs activités de construction et d'approvisionnement du nid fournissent, à l'égal d'ailleurs des Sphécoïdes, l'un des exemples les plus remarquables de l'instinct nidificateur comprenant la succession irréversible de comportements très minutieux où chaque opération commande la suivante.

C'est à ce groupe qu'appartiennent les abeilles coupeuses de feuilles ou de fleurs, dont on peut résumer le cycle des occupations comme il suit. L'abeille recherche d'abord un site convenable pour son nid et lui donne la forme d'une longue galerie; puis elle va découper, à l'aide de ses mandibules, des morceaux de feuilles ou de fleurs qu'elle roule ou non en boulette et rapporte au nid; là, les fragments sont déplissés et soigneusement étalés sur les parois après que le premier, parfaitement circulaire, a été disposé au fond du terrier. L'Insecte, ensuite, emmagasine un mélange de miel et de pollen (pain d'abeille) dans la première partie du nid, pond un œuf

M. Boulard

▲ *Les Melittidae du genre* Dasypoda *sont caractérisés par des tibias garnis de très longs poils leur permettant de collecter de grosses quantités de pollen ; ici* Dasypoda hirtipes, *en vue ventrale.*

et isole le tout en une logette à l'aide de quelques autres morceaux de feuilles. La succession de ces actes est reprise jusqu'à ce que le nid soit plein, entièrement compartimenté en logettes dans chacune desquelles un nouveau Megachilidae se développera.

Fabre puis Ferton ont montré que, dans cet instinct nidificateur, seule la mémoire de l'acte antérieur compte : si le travail est partiellement détruit, la mégachile continue la séquence en cours comme si rien n'était arrivé.

Joseph et Carayon ont noté que, chez plusieurs espèces, la nuit, la femelle, de même que le mâle, peut dormir la tête en bas et souvent fixée par les mandibules seules.

Le cycle est annuel avec un stade hivernant, généralement celui de l'imago qui est encore dans son cocon. Par suite de la disposition linéaire des cellules, et de l'incapacité des adultes à perforer, ceux-ci sortiront dans l'ordre inverse de la ponte, les plus rapprochés de l'ouverture devant sortir les premiers pour livrer passage aux suivants. C'est cette particularité qui a permis à Fabre d'établir expérimentalement la règle de Dzierzon, suivant laquelle l'abeille peut, à volonté, donner naissance à des mâles ou à des femelles : pour toute série de cellules constituées par une osmie amenée à nidifier successivement dans des fragments de roseaux ou dans des tubes de verre, des derniers œufs pondus naissent toujours des mâles, qui sortent en premier, tandis que les autres œufs donnent invariablement des femelles.

Ces observations, ainsi que d'autres tout aussi édifiantes conduites avec des osmies et des anthidies conchylophiles, ont montré que, chez les Megachilidae, pour reprendre l'expression de Fabre, « le sexe de l'œuf est à la disposition de la mère ». Par la suite, de nouvelles expériences et des recherches anato-histologiques devaient démontrer que ceci était valable pour tous les Hyménoptères. Rappelons ici que certaines femelles de ces Insectes savent reconnaître le sexe de leurs larves, ce

M. Boulard

◀ *Face ventrale d'une anthidie mettant en évidence la brosse collectrice de pollen, spéciale aux Megachilidae.*

M. Boulard

▲ ***Certaines chalicodomes adossent leurs nids à des pierres, d'autres comme* Megachile (Chalicodoma) sicula *l'installent sur des branchettes. Des logettes du nid de ce dernier ont été ouvertes : l'une contient une nymphe de* sicula, *et de l'autre sortent des* Monodontomerus, *Chalcidiens Torymides parasites des chalicodomes.***

que Fabre a également établi, en mettant en évidence l'approvisionnement quantitatif différent pour les mâles et les femelles chez le philanthe apivore.

Au stade actuel de nos connaissances (les formes tropicales et australes sont encore très mal connues), cinq genres importants constituent la partie principale de la famille : *Megachile*, *Osmia*, *Anthidium*, *Lithurgus* et *Serapista*, auxquels s'ajoutent quatre genres parasites : *Coelioxys*, *Dioxys*, *Perezia* et *Stelis*. Les mégachiles sont d'assez grande taille (de 11 à 18 mm), toujours de teinte uniforme, et sans dessins. La plupart nichent sous terre, comme on l'a exposé précédemment, mais selon des modalités spécifiques ; certaines, cependant, appelées chalicodomes ou abeilles maçonnes, édifient sur les murs, les branchettes ou les plantes basses des nids compacts plus ou moins globuleux, en mortier très dur. De tous les Hyménoptères maçons, ce sont elles qui obtiennent le ciment le plus solide ; seul *Leucopsis gigas* peut le perforer pour y pondre, mais les autres parasites, nombreux, agissent pendant la construction.

Légèrement plus petites que les précédentes (de 8 à 15 mm), les osmies sont des abeilles noires ou rousses. Elles établissent ou construisent leurs nids dans des endroits fort divers et selon des méthodes très variées : elles les creusent au flanc des talus, ou dans le sol, utilisent les anfractuosités des roches, les coquilles, les tiges creuses, etc.

Proches des osmies, la *Perezia* noire, et les *Coelioxys*, pourvues d'une grosse tête, d'un abdomen conique et revêtant des teintes diverses, butinent pour leur propre compte et ne nidifient pas, se contentant de pondre dans les nids d'autres abeilles, comme les anthophores et surtout les mégachiles.

Les *Anthidium* (ou anthidies) ont un *habitus* plus caractéristique : tête et thorax noirs ou ferrugineux, abdomen portant des taches jaunes ou rousses disposées

J. Carayon

▶ ***De nombreux Mégachilides « dorment » la tête en bas, seulement fixés par les mandibules ; ici, un mâle et une femelle de* Coelioxys ruficaudata.**

par paires sur chaque tergite; le corps est en outre relativement trapu et peu velu. Avec Fabre et Pérez on reconnaît deux groupes : les cotonniers et les résiniers; les premiers ont des mandibules denticulées, qui leur permettent de carder les plantes dans leur recherche des poils végétaux dont ils font leur nid; les seconds possèdent des mandibules simplement sinuées; ils tapissent et obturent leurs cellules avec de la résine prise sur les Conifères.

Suivant les espèces, les nids ont des emplacements aussi variés que chez les osmies, mais sont souvent groupés en bourgades. Les *Stelis*, abeilles-coucous proches des anthidies, parasitent ces dernières ainsi que d'autres Mégachilidés. Voisines des *Stelis*, les *Serapista* australes méritent d'être mentionnées en raison de leurs volumineuses constructions (30 cm de diamètre), faites de fibres végétales entremêlées, contenant de nombreuses logettes et fixées aux branches.

Les *Lithurgus* creusent des galeries digitiformes dans le bois et, au moins chez *L. fuscipennis*, pondent plusieurs œufs sur le même pain d'abeille, que les larves consomment de concert. Ce trait exceptionnel, parfois interprété comme un début de socialisation, ne se retrouve que chez les *Xylocopinae* et les *Bombinae*, abeilles qui appartiennent à la famille des Apidae.

Les **Apidae** ont une très longue langue cyclindrique et, généralement, trois cellules cubitales aux ailes antérieures; leur vol est rapide et souvent bruyant. Selon leur biologie, on les sépare en Apidae inférieurs et Apidae supérieurs.

Les *Apidae inférieurs* sont solitaires pour la plupart, et n'utilisent pas de cire pour construire leur nid; en outre, leurs palpes maxillaires se composent de plusieurs articles. Il s'agit des *Anthophorinae*, des *Xylocopinae* et des *Euglossinae*.

Les *Anthophorinae* sont de grosses abeilles noirâtres et très velues, dont les femelles présentent encore le triangle pygidial. Elles nichent presque toutes dans les talus ensoleillés et revêtent les parois de leurs terriers d'argile triturée. Elles comprennent trois genres travailleurs et deux genres parasites. L'espèce la mieux connue, *Anthophora parietina*, a la curieuse habitude de disposer ses déblais en une cheminée coudée vers le bas, puis, une fois le nid terminé et les logettes approvisionnées et ovigérées, de se servir des matériaux de cette cheminée pour boucher l'entrée du terrier.

Les *Xylocopinae*, remarquables par leur couleur bleu sombre plus ou moins violacé, leur abdomen glabre et leurs fortes mandibules aiguës, sont les « abeilles charpentières ». Elles creusent, dans le bois parfaitement sec, des galeries allongées au fond desquelles elles disposent successivement dix à quinze cellules, séparées par des cloisons de sciure agglutinée avec de la salive. Chaque cellule contient un bloc de pollen et une larve; la nymphose se fait sans cocon; il y a une génération annuelle et l'hivernation a lieu à l'état adulte. Les xylocopes comptent les plus grosses abeilles, *Xylocopa violacea* atteint 25 mm de long, et certaines espèces exotiques dépassent 30 mm. Chez ces dernières, on note souvent une hétérochromie sexuelle, les mâles ayant des teintes jaunes. Les *Ceratina* ressemblent à des xylocopes en miniature (de 3 à 13 mm) et sont pourvues de mandibules moins fortes; elles nidifient dans les tiges à moelle. Les *Allopape*, propres à l'Afrique du Sud, procèdent de la même manière, mais sans former de cellules individuelles, de sorte que les larves occupent ensemble l'espace du nid. Les espèces de ce genre sont fort intéressantes à étudier quant à l'origine des sociétés d'abeilles : la mère approvisionne ses larves au jour le jour, puis les premières femelles écloses aident la fondatrice (qui continue de pondre) à ravitailler un couvain composé finalement d'individus de tous âges.

Enfin, les gros *Euglossinae*, uniquement néo-tropicaux, ont, avec leurs bandes annelées de poils colorés, des allures de bourdons. Les nids d'*Euglossa nigrita* sont réunis en des masses globuleuses, les femelles travaillant indépendamment tout en utilisant une entrée commune. Cette espèce nidifie dans la terre, d'autres recherchent les arbres creux.

Les *Apidae supérieurs* sont tous sociaux et produisent de la cire grâce à des glandes abdominales particulières. Ils comprennent les *Bombinae (ou bourdons)*, les *Meliponinae* (ou mélipones) et les *Apinae* (ou abeilles au sens strict), trois sous-familles dont les traits morphologiques les plus intéressants sont les suivants : palpes

M. Boulard

▲ *Les petites cératines appartiennent à la même famille que les Xylocopinae qui comptent les grosses abeilles; ici* Ceratina cyanea.

▼ *Les vieilles tiges de roseaux sont recherchées par les osmies pour y nidifier; ici, logettes d'*Osmia parvula *contenant des cocons (ceux du bas ont été ouverts pour montrer les nymphes).*

J. Carayon

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Reine d'Apis mellifica entourée de nombreuses ouvrières.*

maxillaires nuls ou constitués d'un seul article, tibias postérieurs modifiés en corbeille, longue et large dépression sur la face externe entourée de longs poils courbés, pince à cire formée par l'articulation tibio-tarsienne, basitarses postérieurs portant une large brosse sur leur face interne.

La différenciation de ces Insectes est relativement récente comme l'ont montré les recherches de S. Kelner-Pillault sur les abeilles fossiles de l'Éocène et du Miocène, celles du Miocène étant nettement plus proches des espèces actuelles.

Les Apidae supérieurs vivent en sociétés poly- ou monogynes, le plus souvent pérennes, qui comprennent les trois castes habituelles : reines, ouvrières et mâles. Ces derniers, chez les bourdons et les abeilles, ne travaillent pas, suivant en cela une règle très générale pour les Aculéates, règle qui ne souffre d'exception que dans ce groupe des abeilles supérieures, précisément avec les mélipones. Le nid est principalement l'œuvre des ouvrières, qui construisent des rayons de cellules non seulement pour abriter le couvain, mais aussi pour mettre en réserve du miel et du pollen ; c'est là un comportement caractéristique qui oppose, sur ce plan, les Apides aux Vespoïdes sociaux comme aux abeilles primitives. Enfin, hormis les bourdons, les Apidae possèdent la faculté d'essaimer. Le groupe compte environ cinq cents espèces, dont seulement quatre abeilles *(Apis)*, le reste se partageant entre les bourdons (environ deux cents) et les mélipones.

Les *Bombinae* ou bourdons habitent surtout les régions boréales froides et tempérées montagneuses. Ce sont de grosses abeilles très velues, foncièrement noires, avec des bandes transversales de couleurs variées. Leur biologie est bien connue (travaux de Friese, Wagner et Sladen notamment). Ils vivent en sociétés annuelles, dans des nids faits de mousses et d'herbes, le plus souvent à moitié inclus dans le sol, l'habitacle protégé par une couche de cire mélangée à de la résine. Le centre est occupé par un plateau comprenant des alvéoles à miel et à pollen et des cellules globuleuses irrégulières, presque complètement closes, dans lesquelles la reine a placé du pain d'abeille et pondu une dizaine d'œufs.

Les larves se développent donc en chambre commune, et la mère continue de les nourrir de deux façons, soit par un apport supplémentaire de pain d'abeille tout en élargissant la base de la cellule au fur et à mesure de la croissance des larves, soit en perçant de temps en temps le dôme de la cellule et en dégurgitant pour chaque larve un liquide venant de son jabot. La nymphose a lieu dans un cocon, et les premiers bourdons à éclore sont des femelles, ouvrières petites ou moyennes, qui vont seconder la mère et agrandir le nid. Plus tard apparaîtront les mâles et les grosses femelles reproductrices, qui seront fécondées et qui, seules, hiverneront. Le cycle vital est donc très comparable à celui des guêpes. Comme pour ces dernières, les nids de bourdons comptent rarement plus de mille individus.

La sous-famille comprend deux genres : *Bombus*, travailleur, et *Psithyrus*, parasite du premier auquel il ressemble beaucoup.

Les *Meliponinae* sont des petites abeilles tropicales, surtout sud-américaines, aux teintes uniformes, brun-

jaune à noire, caractérisées par deux aréoles cubitales et par l'atrophie de leur aiguillon. Très communes en forêt humide, elles sont aussi présentes dans les savanes boisées. Elles nidifient dans diverses cavités du sol, des rochers ou des arbres qu'elles aménagent et prolongent vers l'extérieur par une longue entrée cylindrique, souvent munie de tubules accessoires pour l'envol. Ces nids ou « ruches sauvages » sont généralement polygynes, et les trois castes participent à leur construction, les mâles produisant eux aussi de la cire, matériau de base auquel sont parfois ajoutées terre et résine. Les cellules à couvain sont disposées sur trois à dix rayons horizontaux superposés, soutenus par des piliers de cire et operculés vers le haut; les cellules à provisions tapissent les parois involucrales du nid, ou sont groupées dans des diverticules latéraux. Le couvain évolue individuellement dans des cellules, toutes identiques chez les *Melipona,* closes après avoir été remplies de nourriture et ovigérées. A l'éclosion, chaque larve se trouve en présence des provisions nécessaires à son développement. R. et B. Darchen, Kerr ont récemment attiré l'attention sur ce fait qui pose le problème délicat du déterminisme des castes femelles et ouvrières chez les *Melipona*. Pour les deux premiers chercheurs cités, ce déterminisme ne serait pas différent de celui de l'abeille mellifique, et tiendrait à la qualité inégale de la nourriture entreposée.

La sous-famille se compose de deux genres travailleurs : *Melipona,* néotropical, et *Trigona,* pantropical, et d'un troisième, pilleur, *Lestrimelitta*, sud-américain, proche du précédent dont il vole le miel. Les *Trigona* comptent les plus petites abeilles (1,5 mm pour *T. duckei*) et présentent des cellules royales plus grosses dans leurs nids.

Beaucoup de mélipones sont recherchées pour leur miel très apprécié, leur cire ainsi que leurs amas de résine, mais sont aussi exécrées à cause de l'habitude qu'elles ont de venir lécher la sueur et le liquide lacrymal, n'hésitant pas à entrer dans les oreilles ou dans les yeux.

Chez les *Apinae*, seule l'ouvrière est munie d'un appareil de récolte et de glandes cirières; la reine, plus grosse, se limite à ses fonctions de ponte; toutes deux ont un aiguillon fonctionnel. Les mâles ou faux-bourdons sont également gros mais plus trapus, et leurs yeux composés volumineux se rejoignent dorsalement. Le genre *Apis* compte quatre espèces dont *A. mellifica,* l'abeille mellifique (dite aussi, improprement, domestique) est, de loin, la mieux connue, comme elle l'est probablement de tous les Insectes. Les données scientifiques et ethnologiques qui la concernent ont fait l'objet dernièrement d'un important *Traité de la biologie de l'Abeille* publié sous la direction de R. Chauvin, et nous nous bornerons ici à remettre en mémoire les grandes lignes de cette biologie.

La société, ou ruche, est populeuse (environ quarante mille abeilles pour une ruche en plein essor) et pérenne, mais monogyne. Les alvéoles, très réguliers, à section parfaitement hexagonale, se trouvent légèrement inclinés vers le haut, sur les deux faces de rayons verticaux, et sont faits de cire pure. Le couvain des ouvrières et des mâles occupe ceux du centre (une larve par alvéole), la périphérie servant de magasin pour le miel. Les nouvelles reines, rares, se développent isolément dans des loges grossièrement cylindriques, surajoutées aux rayons.

La différenciation des castes est soit génique : mâles haploïdes (issus d'œufs non fécondés), femelles diploïdes (issues d'œufs fécondés), soit alimentaire. La période larvaire pendant laquelle les larves sont alimentées, dure en moyenne cinq jours, et les larves de reines sont toujours exclusivement nourries de gelée royale (sécrétion salivaire labiale), tandis que les larves d'ouvrières n'en reçoivent qu'au cours des trois premiers jours, pour n'être nourries ensuite qu'avec de la pâtée miellée. Quand la croissance est terminée, les ouvrières ferment l'alvéole d'un opercule bombé, fait d'un mélange de cire et de pollen perméable à l'air. La larve sécrète alors un cocon, et entre en métamorphose pour éclore huit jours après.

La reine peut vivre plusieurs années et, après sa fécondation qui a lieu lors d'un vol nuptial, ou de plusieurs, elle ne s'occupe que de pondre, de chasser ou tuer les reines nouveau-nées, ou bien d'essaimer.

L'ouvrière n'a qu'une longévité de cinq semaines environ (pendant les belles saisons). Elle passe par une série d'étapes physiologiques qui lui confèrent une succession d'activités précises, conduisant à une division particulière du travail bien mise en évidence par les travaux de Rösch. Peu après sa naissance, l'ouvrière nettoie les alvéoles déjà utilisés et les prépare pour le dépôt d'autres œufs; elle devient ensuite nourrice, donnant d'abord de la pâtée miellée, puis de la gelée royale que ses glandes labiales antérieures sont devenues aptes à sécréter; celles-ci cessant de fonctionner au dixième jour, l'ouvrière effectue alors sa première sortie pour un vol d'orientation (en point fixe, face au nid), puis rentre à la ruche où elle passe tour à tour magasinière (réception, malaxage des récoltes, mise en réserve), cirière (au moment du développement optimal des glandes ciripares sternales) et confectionneuse d'alvéoles, ventileuse et gardienne à l'entrée du nid, pourvoyeuse enfin. Ce dernier stade occupe à peu près la dernière moitié de la vie de l'abeille, qui sort alors constamment de la ruche pour aller chercher de l'eau et de la propolis (résine et gomme des bourgeons), et butiner nectar et pollen.

Cependant, la succession des tâches est susceptible d'interruption momentanée, que motivent des besoins sociaux, ou si les circonstances l'exigent; une ouvrière peut revenir à un travail dont elle a déjà passé l'étape. C'est le cas, par exemple, des butineuses qui cessent de collecter des produits floraux, pour rapporter l'eau nécessaire à la régulation thermique du nid jusqu'à ce que la température de ce dernier redevienne normale.

K. von Frisch a montré comment les abeilles communiquent entre elles par des danses diverses qui constituent un mode d'information comparable à un langage. Ces danses s'effectuent sur les rayons de cire dont la direction, verticale, se substitue, dans l'exécution des

M. Boulard

▲ ***Belle « ruche » d'Apis sauvage photographiée en Afrique centrale; les Apis disposent leurs « gâteaux » d'alvéoles, toujours verticalement.***

figures, à celle du soleil. Si, par rapport à la ruche, les fleurs visées sont situées dans la direction du soleil, le trajet rectiligne de la danse est dirigé verticalement de bas en haut; si elles se trouvent à l'opposé du soleil, le trajet est aussi vertical, mais parcouru de haut en bas; si la direction des fleurs fait un certain angle avec celle du soleil, le trajet rectiligne fait un angle correspondant avec la verticale, la droite (ou la gauche) étant alors indiquée par le sens de la danse. La distance est communiquée par la durée des oscillations abdominales de l'informatrice, et les fleurs à visiter par le parfum qui imprègne cette dernière (intervient également, sur le terrain, l'attraction des sécrétions de la glande de Nassonoff que la butineuse a laissées sur les fleurs en question). Les danses sont si précises dans leur exécution (mouvement et rythme) que des abeilles de races différentes ne se comprennent pas ou mal, et l'on a été conduit à admettre l'existence de « dialectes ». Mais ces communications sont particulières aux pourvoyeuses, et ce sont le léchage de la reine et les échanges trophallactiques, qui comme chez les fourmis, assurent le lien essentiel de la ruche. La ruche hiverne. Toutes les abeilles entrent en léthargie, groupées autour de la reine, et ne se réveillent que pour réguler la température du nid qui doit être maintenue entre 12 et 24 °C (découverte due à Réaumur). Elles se « réchauffent » par des mouvements fébriles du corps, consomment du miel puis se « rendorment ». Ces ajustements thermiques nécessitent de 3 à 4 kg de miel par hiver.

Entre un et trois ans, la reine essaime avec quelques milliers de jeunes ouvrières. Elle va fonder un nouveau nid dans un endroit convenable qui aura été choisi par les éclaireuses, et dont ces dernières indiquent la position à l'essaim par des danses (M. Lindauer). Environ six mois plus tard, la vieille reine meurt, tuée le plus souvent par une jeune reine qui vient d'éclore et prend sa place.

Quant à la ruche mère, après quelques heures d'agitation intense, les ouvrières restantes bâtissent une grande cellule, dite alors de « sauveté », autour d'une très jeune larve qui sera exclusivement nourrie de gelée royale et qui deviendra la nouvelle reine. Parfois, il n'y a plus de jeunes larves disponibles; des ouvrières peuvent alors se mettre à pondre, mais leurs œufs, non fécondés, ne donnent que des mâles; la ruche devient « bourdonneuse » et périclite. Cette évolution fatale s'observe également lorsqu'une reine a épuisé son stock de spermatozoïdes.

La ruche est parfois pillée par des fourmis et des Coléoptères (certaines cétoines notamment), et les butineuses sont souvent les proies des Araignées et des Sphégiens, ou parasitées par les Strepsitères. Enfin, rappelons le rôle important, souvent indispensable, que jouent les abeilles, comme beaucoup d'autres Hyménoptères d'ailleurs, dans la fécondation croisée des plantes.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Échanges trophallactiques entre deux ouvrières d'Apis mellifica.*

M. Boulard

▶ *Parmi les ennemis des butineuses, les Araignées sont sans doute les plus redoutables : ici, une abeille vient d'être attaquée par une thomise tandis qu'elle butinait.*

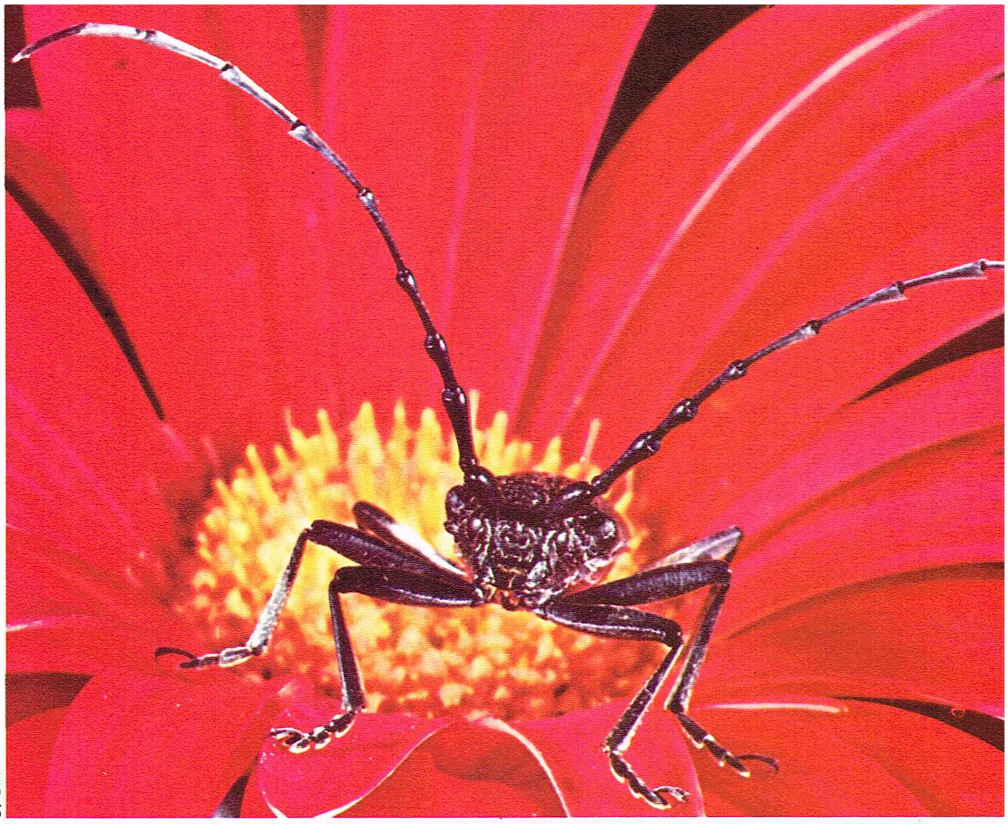

J. Six

▲ ***Un Coléoptère Cérambicide,***
Cerambyx scopolii.

BIBLIOGRAPHIE

Collemboles - Protoures - Diploures - Thysanoures
DENIS R., *Ordre des Diploures,* in GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie,* Masson, Paris, 1949. - MASSOUD Z., *Collemboles,* in PESSON P., *la Vie dans les sols,* Gauthier-Villars, Paris, 1971. - SCHALLER F., *Die unterwelt des Tierreiches,* Springer-Verlag, Berlin, 1962. - TUXEN S.L., *The Protura,* Hermann, Paris, 1964.

Éphéméroptères
DESPAX R., *Ordre des Éphéméroptères,* in GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie,* t. IX, pp. 279-309, Masson, Paris, 1949. - NEEDHAM, TRAVER, YIN-CHI HSU, *The Biology of Mayflies,* Classey, London, 1969.

Odonatoptères
AGUESSE, *les Odonates de l'Europe occidentale, du nord de l'Afrique et des îles atlantiques,* Paris, Masson, 1968. - CHOPARD, 1949, in GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie,* t. IX, pp. 311-354, Masson, Paris, 1949. - ROBERT P.-A., *les Libellules,* Delachaux et Niestlé, 1958.

Dictyoptères
CHOPARD, *Encycl. Ent.,* t. XX, Lechevalier P. éd, Paris, 1938. - GRASSÉ P.-P., *Ordre des Dictyoptères* in *Traité de zoologie,* t. IX, Masson éd., Paris, 1949. - ROTH et WILLIS, *Am. Midl. Natur.,* vol 47, 1952; *Smith. Misc. Coll.* Vol. 122, 1954; *ibid.,* vol. 141. - SHELFORD, *Proc. Zool. Soc. Lond.,* 1912. - WILLE, *Ztsch. Ange. Ent.,* supp. 1, 1920.

Isoptères
GRASSÉ P.-P., *Ordre des Isoptères, ou Termites,* in *Traité de zoologie,* t. IX, pp. 408-544, Masson, Paris, 1949. - KRISHNA K. et WEESNER F.M., *Biology of Termites,* t. I et II, 1242 p., New York and London Academic Press, 1969-1970. - NOIROT Ch., *Isoptères (Termites) in Zoologie,* t. II, pp. 636-661, Encyclopédie de la Pléiade, N.R.F., Paris, 1963.

Plécoptères
DESPAX R., *Ordre des Plécoptères,* in GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie,* t. IX, pp. 557-586, Masson, Paris, 1949.

Embioptères
DENIS R., Ordre des *Embioptères,* in GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie,* t. IX, 1949. - IMMS A., 1957.

Notoptères
CHOPARD L., *Ordre des Notoptères,* in GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie,* t. IX, pp. 587-593, Masson, Paris, 1949.

Phasmoptères
CHOPARD L., *Ordre des Chéleutoptères ou Phasmoptères,* in *Traité de zoologie,* t. IX, p. 594-616, Paris, Masson, 1949.

Orthoptères
ALBRECHT F., *Polymorphisme phasaire et Biologie des Acridiens migrateurs,* Masson, 1966. - CHOPARD L., *la Biologie des Orthoptères,* Lechevalier, 1938; *Ordre des Orthoptères,* in GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie,* Masson, 1949. - DESCAMPS M., *Problème acridien en Afrique intertropicale,* Cah. Maboké, t. I, (2), 1963; *Révision des Eumastacoidea, Acrida* 2, 1973. - DIRSH V.M., *Families and Subfamilies of Acridoidea, Bull. Brit. Mus. (Nat. Hist.), Ent.,* t. X, 1961. - LEROY Y., *Ultrastructure tégumentaire, œufs et oviscapte des sauterelles, C.R. Acad. Sc. Paris, D, t.* 269, 1969. - REMAUDIÈRE G., *Écologie de* Locusta migratoria, *Locusta,* 2, 1954. - UVAROV B., *Grasshoppers and Locusts.* Cambr. Univ. Press, 1966. - WINTREBERT D., *Aires de grégarisation,* Ann. Soc. Ent. Fr. (N.S.), t. IX (4), 1973.

Dermaptères
BEIER M., *Ordnung Dermaptera* in : *Bronns, Klassen a. Ord n. Tierreich,* t. VI (3), Lipsia 1959. - CAUSSANEL Cl., *Principales exigences écophysiologiques du forficule des sables Labidura riparia;* Ann. soc. ent. Fr. (N.S.); t. 6 (3), p. 589-612, 1970. - CHOPARD L., *la Biologie des Orthoptères,* Lechevalier, Paris, 1938; *Ordre des Dermaptères* in GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie,* t. IX, Paris, 1949.

Zoraptères
DENIS R., *Zoraptères* in GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie,* t. IX, p. 545-555, Masson, Paris, 1949.

Psocoptères
BADONNEL A., *Faune de France,* t. 43, 1943; *Psocoptères,* in GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie,* t. X (2), Masson, 1951. - ROESLER R., Stett. Ent. Zeit, t. 105, 1944.

Mallophages
EICHLER W., in BRONNS H.G., *Klassen und Ordnungen des Terreichs,* 1963. - SEGUY E., *Mallophages,* in GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie,* t. X (2), Masson, Paris, 1951.

Anoploures
HOPKINS G.H., in *Proc. Zool. Soc. Lond.* 119, 1949. - IMMS A.D., 1957. - SEGUY E., *Anoploures,* in GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie,* t. X (2), Masson, Paris.

Homoptères
PESSON P., *Ordre des Homoptères* in GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie,* t. X, (2), Masson, Paris, 1951. - BALACHOWSKY A.S., *Mém. Sc. Inst. Pasteur,* 1954 (Cochenilles). - BÉNASSY Cl., Thèse fac. Sc. Paris, 1961 (Cochenilles). - BONNEMAISON L., *Ann. Soc. ent. Fr.,* N.S., vol. 1 (1) (Pucerons), 1965. - BOULARD M., *ibid.,* vol. 1 (3), (4), 1965; *ibid.,* vol. 9 (4), 1973, (Cigales); *Cah. Lamaboké,* vol. VI (2), 1968 (Lycènes prédateurs d'Homoptères); *ibid.,* vol. IX, (2), 1972 (Cigales); *Bull. Mus. nat. Hist. Nat. Paris, Zool.,* t. 83, 1973 (Membracides). - CARLE P. et MOUTOUS G., *Ann. Epiphyties,* vol. 16 (4), 1965, (Cicadelles). - COBBEN R.H., *Zool. Beitr.,* N.F., vol. 11, 1965, (œufs des Homoptères). - DELONG D.M., *Annual Rev. Entomol.,* vol. 16, 1971, (Cicadelles). - ERMISCH A., *Zool. Morph. Okol. Tiere,* vol. 49, 1960, (endosymbiontes). - EVANS J.W., *Australian Jour. Zool.,* vol. 4 (2), 1956, (Homoptères fossiles); *Proc. R. Soc. Queensland,* vol. 79 (3), 1962, (Coléorhynches); *Austral. Mus. Memoir,* vol. XII, 1966, (Cicadelloïdes et Cercopoïdes). - FENNAH R.G., in *Pest of Sugar Cane,* Eslevier ed., 1969. (Fulgoroïdes nuisibles). - HOWSE P.E. et CLARIDJE M.F., *J. Insect Physiol.,* vol. 16, 1970 (Cicadelle). - KERSHAW J.C. et KIRKALDY G.W., *Zool. Jahrb.,* vol. 29, 1910, (Fulgore). - KORNER H.K., *Z. Parasitenk,* vol. 40, 1972, (Mycétome). - MYERS J.C., *Insect Singers,* Routledge ed., 1929, (Cigales). - POLLARD D.G., *Bull. Ent. Res.,* vol. 58 (1), 1968, (Cicadelles). - REMAUDIÈRE et coll., *Entomophaga,* (H.S.), vol. 6, 1973, (Pucerons). - STRUMPEL H., *Zool. Jb. Syst.,* vol. 99, 1972, (Membracides). - WHITTAKER J.B., *Proc. R. ent. Soc. Lond.,* vol. 40, 1965, (Cercopides).

Hémiptères
CARAYON J., *Note et document sur l'appareil odorant métathoracique des Hémiptères. Ann. Soc. Ent. Fr.* (NS), vol. VII (4), p. 737-770, 1971. - POISSON R., *Ordre des Hémiptères,* in GRASSÉ P.-P., *Traité de zool.,* t. X (3), Masson, Paris, 1951. - WEBER H., *Biologie der Hemipteren,* Springer Verlag, Berlin, 543 p., 1930.

Thysanoptères
BOURNIER A., *Arch. Zool. exp. gen.*, vol. 93, 1956. - LEWIS T., Academic Press, 1973. - MELIS A., *Redia*, vol. 44-46, 1959-61. - MOUND L.A., *Bull. Br. Mus. Nat. Hist.*, vol. 20, 25, 1968, 1971. - PESSON P., *Thysanoptères*, in GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie*, t. X (2), Masson, Paris, 1951. - PRIESNER H., *Best. z. Bodenfauna Europas*, t. 2, 1964. - PUSSARD-RADULESCO E., *Ann. Epiphyties*, 1930.

Mégaloptères
BERLAND et GRASSÉ : *Ordre des Mégaloptères*, in GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie*, t. X (1), pp. 5-17, Masson, Paris, 1951.

Raphidioptères
BERLAND et GRASSÉ P.-P., *Ordre des Raphidioptères* in GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie*, t. X (1), pp. 18-22, Masson, Paris, 1951.

Névroptères ou Planipennes
BERLAND et GRASSÉ P.-P., *Ordre des Planipennes* in GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie*, t. X (1), pp. 23-69, Masson, Paris, 1951.

Mécoptères
BERLAND et GRASSÉ P.-P., *Ordre des Mécoptères*, in GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie*, t. X (1), pp. 71-124, Masson, Paris, 1951.

Aphaniptères ou Siphonaptères
HOLLAND G.P., *Evolution, Classification and Hostrelationships of Siphonaptera, Ann. Rev. Entom.*, vol. 9, Palo Alto, California, 1964. - SEGUY E., *Ordre des Siphonaptères*, in GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie*, t. X (1), Masson, Paris, 1951.

Trichoptères
BERLAND L. et MOSELY M.E., *Catalogue des Trichoptères de France, Ann. Soc. Ent. France*, 105 et 106, 1936-1937. - CHOPARD L., *Trichoptères* in *Encyclopédie de la Pléiade, Zoologie*, t. II, p. 746-750, NRF, Paris, 1963. - DESPAX R., *Ordre des Trichoptères*, in GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie*, t. X (1), pp. 125-173, Masson, Paris, 1951.

Lépidoptères
BOURGOGNE J., *Ordre des Lépidoptères*, in GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie*, t. X, Masson, Paris, 1951. - FORSTER W. et WOHLFART T.A., *Die Schmetterlinge Mitteleuropas*, t. I à IV (en cours de publication), Stuttgart depuis 1954. - HANNEMANN H.J., *Kleinschmetterlinge oder Microlepidoptera*, in *Die Tierwelt Deutschlands*, fasc. 50, Iéna, 1961-1964. - HIGGINS L.G. et RILEY N.D., *Adaptation française* par ROUGEOT P.C., *Guide des Papillons d'Europe*, Paris, 1971. - LHOMME L., *Catalogue des Lépidoptères de France et de Belgique*, t. I, II, Douelle, 1923-1963. - PORTIER P., *la Biologie des Lépidoptères*, Paris, 1949. - ROUGEOT P.-C., *les Bombycoïdes de l'Europe et du Bassin méditerranéen*, t. I, Paris, 1971. - SEITZ A., *les Macrolépidoptères du globe*, Stuttgart, 1906-1915 et suppl. I à IV, Stuttgart, 1932-1954. - STAUDINGER O. et REBEL H., *Catalog der Lepidopteren des Palearctischen Faunen Gebietes*, 1901. - VERITY R., *les Papillons diurnes d'Italie*, t. I à V, Florence, 1940-1953. - ZERNY-BEIER, *Lepidoptera*, in KUKENTHAL, *Handbuch der Zoologie*, Berlin, 1936-1938.

Diptères
SEGUY E., *Ordre des Diptères*, in GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie*, t. X (1), Masson, Paris, 1951. - OLDROYD H., *The Natural History of Flies*, London, 1964.

Coléoptères
BALACHOWSKY A.S., *Coléoptères Scolytidae. Faune de France*, vol. 50. Lechevalier éd., 320 p., 1949. - BALACHOWSKY A.S., *Entomologie appliquée à l'agriculture*, t. I, *Coléoptères*, vol. 1, 564 p., vol. 2, 1391 p., Masson éd., Paris, 1962-63. - BALTHASAR V., *Monographie der Scarabaeidae und Aphodiidae der palearktischen und orientalischen Region*, t. I, II, III, Prague, 1963-64. - BOVING A.G. et CRAIGHEAD F.C., *An Illustrated Synopsis of the Principal Forms of the Order Coleoptera. Ent. Amer.* (N.S.), vol. 11, (1), 351 p., 1930. - CROS D.A., *Biologie des Meloe, Ann. Sc. Nat. Zool.*, 10e série, vol. 14, p. 189-227, 1931. - CROWSON R.A., *The Natural Classification of the Families of Coleoptera*. 214 p, Londres, 1967. - DAJOZ R., *Écologie et biologie des Coléoptères xylophages de la hêtraie. Vie et Milieu*, 17, série C, p. 527-763, 1966. - DAJOZ R. et CAUSSANEL C., *Morphologie et biologie d'un Coléoptère prédateur*, Creophilus maxillosus. *Cahiers des naturalistes*, 24, p. 65-102, 1968. - HEYMONS R. et LENGERKEN H.V., *Biologische Untersuchungen an Coprophagen Lamellicornien. Zeits, Morph. Okol. Tiere*, vol. 14, 1929. - HOFFMANN A., *Coléoptères Curculionidae. Faune de France*, vol. 52, 486 p., vol. 59, 720 p., vol. 62, 630 p. Lechevalier éd., France, 1950-1958. - IMMS A.D., *A General Textbook of Entomology*. Methuen éd., 886 p, 1957. - JEANNEL R., *Coléoptères Carabiques. Faune de France*, vol. 39 et vol. 40, 1173 p., Lechevalier éd., Paris, 1941-1942. - JEANNEL R. et PAULIAN R., *Coléoptères*, in GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie*, t. 9, p. 771-1077, Masson, Paris, 1949. - LENGERKEN H. von, *Die Brutfursorge and Brutpflegeinstinkte der Käfer*, Leipzig, 1939. - PAULIAN R. *les Coléoptères*, 396 p., Payot éd., Paris, 1943 ; *Coléoptères Scarabéides. Faune de France*, vol. 38, 241 p., Lechevalier éd., Paris, 1941. - PORTIER P., *Recherches physiologiques sur les Insectes aquatiques. Arch. Zool. exp.*, 5e série, vol. 8, p. 89-379, 1911. - REITTER E., *Faune Germanica. Die Käfer*. Springer Lutz, Stuttgart, 5 vol., 1908-1916.

Strepsiptères
JEANNEL R., *Traité de zoologie*, X (II), 1951. - SILVESTRI F., *Boll. Zool. Gen. Ag.*, Portici, 31-32, 1935-1943.

Hyménoptères
BERLAND L., BERNARD F., *Hyménoptères*, in GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie*, t. X, Masson, Paris, 1951. - CARAYON J., *Ann. Soc. Ent. Fr.*, vol. 3 (3), 1967. - CHAUVIN R. et coll., *Traité de biologie de l'Abeille*. - DARCHEN R. et B., *C.R. Acad. Sc. Paris*, t. 278, 1974. - EVANS H.E., *The Comparative Ethology and Evolution of the Sand Waps*, 1966. - FABRE J.-H., *Souvenirs entomologiques*. - FERTON Ch., *la Vie des abeilles et des guêpes*, 1923. - GRANDI G., *Boll. Inst. Ent. Univ.*, Bologna, t. XXV, 1961. - GUIGLIA D., *les Guêpes sociales d'Europe occidentale*, 1973. - KELNER-PILLAUT S., *Mem. Soc. Ent. Ital.*, vol. 48, 1969, - KERR W.-E., *Evolutionary Biol.*, t. 3, 1973. - MALYSHEV S.I., *Genesis of the Hymenoptera*, 1968. - NIELSEN E.T., *Mœurs des Bembix*, 1945. - PLATEAU-QUENU C., *la Biologie des Abeilles primitives*, 1972. - SOULIÉ J., *Ann. Univ. Abidjan E*, vol. V (2), 1972. - STEINER A., *Étude du comportement prédateur d'un Hyménoptère Sphégien*, 1962.

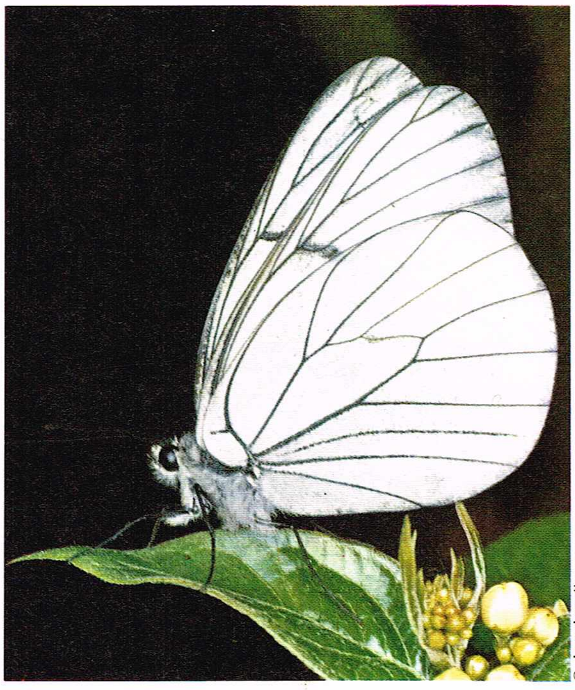
S. Lombardi

▶ **Aporia crataegi,**
la piéride de l'aubépine.

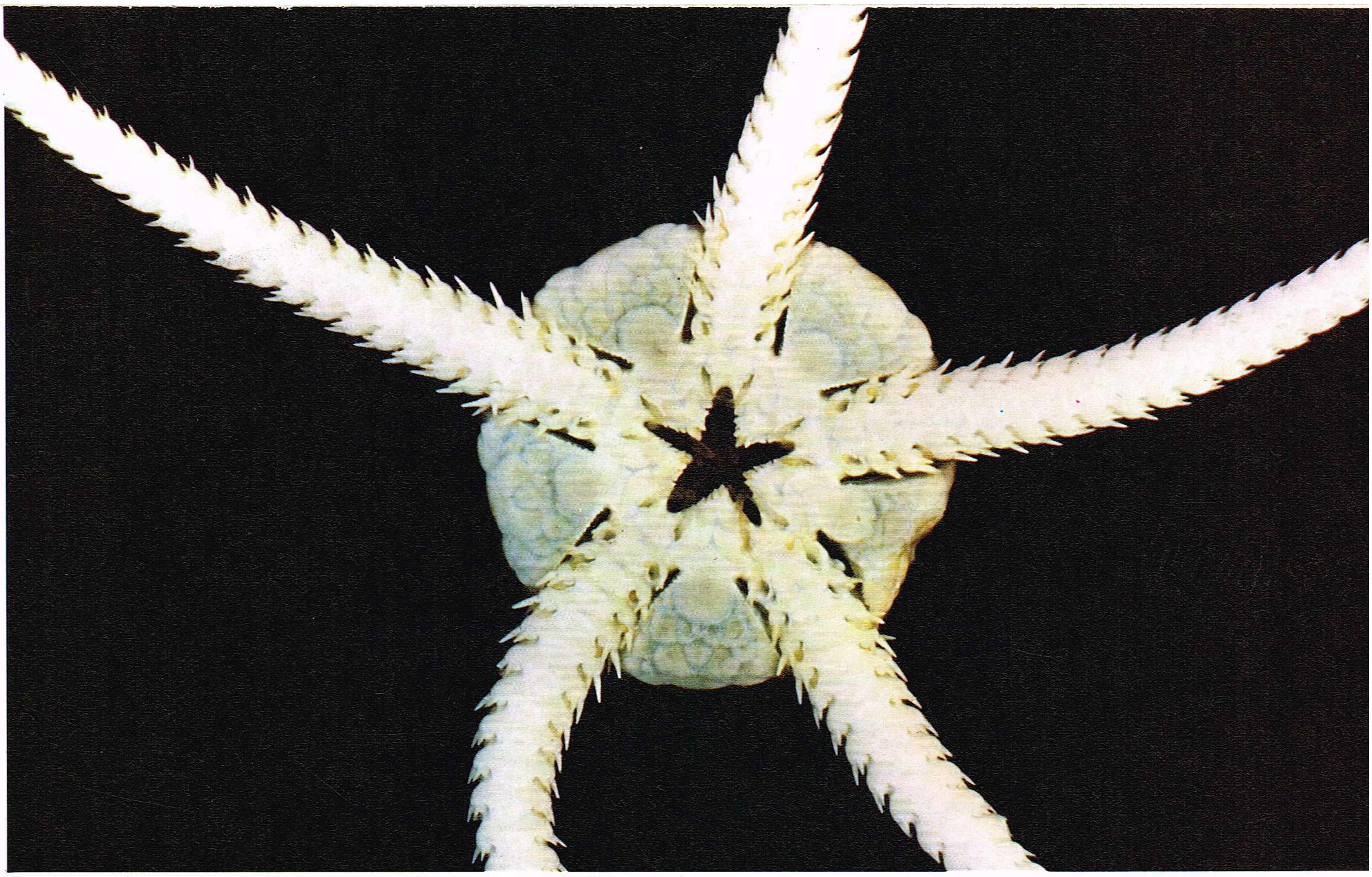

H. Chaumeton - Jacana

▲ ***Les Échinodermes sont des Invertébrés marins, benthiques, caractérisés par une symétrie radiaire, généralement pentamérique ; celle-ci est presque parfaite chez les Ophiurides ; ici,*** **Ophiura albida.**

LES ÉCHINODERMES

Les Échinodermes (phylum *Echinodermata*) constituent l'un des embranchements les mieux caractérisés du règne animal. Ce sont des Animaux exclusivement marins, Invertébrés deutérostomiens cœlomates, dont les embryons possèdent une cavité générale comprise entre deux feuillets du mésoderme, une bouche apparue tardivement et un système nerveux dorsal.

Organisation générale

Bien que très différents d'aspect, ils ont tous une organisation à peu près équivalente, et présentent à l'état adulte trois caractères essentiels : une *symétrie pentamère,* absente chez quelques formes fossiles, parfois imparfaite ou plus ou moins masquée par une symétrie latérale superposée ; un *squelette d'origine mésodermique* formé de nombreuses plaques de carbonate de calcium, ou de spicules microscopiques ; un appareil *aquifère* ou *ambulacraire,* qui n'existe dans aucun autre groupe animal.

Les Échinodermes ont tous un pôle oral et un pôle aboral. Leur symétrie pentamère est mise en évidence par des rayons pourvus ou non de *podia* (tubes ambulacraires), partant de la bouche, se continuant sur tout ou partie du corps, et divisant celui-ci en dix secteurs : cinq zones radiaires (ou radius, ambulacres), cinq zones interradiaires (ou interradius, interambulacres), alternant régulièrement avec les premières. Cette symétrie pentamère est presque parfaite chez les Stellérides, les Ophiurides et les Échinides réguliers ; elle est plus ou moins masquée chez les Échinides irréguliers, de nombreuses holothuries et des formes fossiles ; il n'y en a pas trace chez les Homalozoaires, ou Plats, qui sont sans doute les plus primitifs des Échinodermes éteints.

Leur *tégument* est toujours incrusté de calcaire. Le test de la majorité des Échinides est fait de larges plaques solides engrenées, comme soudées, qui lui donnent une très grande rigidité ; cependant, les plaques des oursins mous de la famille des Echinothuridae sont peu calcifiées et réunies par des espaces membraneux, le test est donc aplati et flexible. Chez les Stellérides, les Ophiurides et les Crinoïdes, les plaques des bras sont articulées entre elles de façons variées, ce qui permet à ces Animaux de se mouvoir dans un plan horizontal ou vertical, mais aussi de se redresser ou d'enrouler leurs bras autour d'un support. Le squelette diffus des Holothurides est fait d'une multitude de corpuscules calcaires microscopiques, les spicules, aux formes les plus diverses et d'une grande importance pour la systématique ; cependant, quelques familles, tels les Psolidae, peuvent avoir, en plus, leur face dorsale recouverte de larges plaques imbriquées.

L'appareil aquifère se compose essentiellement d'un *canal oral circulaire,* d'où partent cinq canaux radiaires qui se ramifient pour alimenter les podia, permettant ainsi leur extension et leur rétraction. Ce canal porte une ou plusieurs grosses *vésicules de Poli,* pendant à l'intérieur de la cavité générale, qui jouent un rôle régulateur du système ambulacraire. L'appareil aquifère communique soit avec le milieu ambiant par un *canal hydrophore,* issu du canal oral, aboutissant à une plaque madréporique externe perforée, soit, chez la plupart des Holothurides, avec le liquide cœlomique par un *madréporite* libre dans la cavité générale. En plus de ces systèmes, les Échinodermes possèdent des systèmes nerveux, hémal, digestif et reproducteur.

L'*appareil nerveux* comprend un *système octoneural* formé d'un ruban oral cerclant l'œsophage, ruban qui se ramifie en cinq bandes radiaires allant innerver les organes internes et les podia ; un *système* superficiel, ou *ectoneural,* innervant la peau et les divers organites recouvrant le corps de l'Animal, tels les *piquants,* les *pédicellaires,* les *sphéridies.* Chez les Stellérides, le premier système, dit profond, se divise en deux branches, l'une ventrale, l'autre dorsale. Chez les Crinoïdes, il se complique d'un second système profond, dit *entoneural,* situé au fond du calice, et qui commande aux cirres ainsi qu'au pédoncule des Crinoïdes fixés.

Le *système hémal,* ou circulatoire, consiste en lacunes, sans parois propres, renfermant un liquide riche en protides, les unes absorbantes enveloppant l'intestin, les autres nourricières ou de distribution allant au système nerveux, aux organes génitaux, aux podia. Il n'y a pas de cœur proprement dit ; sauf chez les Holothurides,

▶ ***Détail des bras robustes d'un Asteriidae,*** **Marthasterias glacialis,** ***pourvus de nombreux podia et armés de forts piquants.***

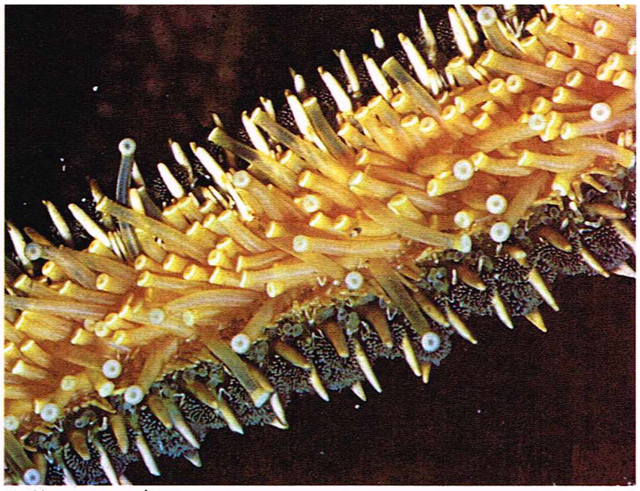

H. Chaumeton - Jacana

dont les lacunes ont des pseudo-parois musculaires, et sont animées de mouvements rythmiques qui, corrélativement à ceux du corps et aux organes respiratoires, font circuler le liquide hémal; celui-ci est formé de plasma et de constituants cellulaires, dont des hémocytes rouges contenant de l'hémoglobine.

Des *organes respiratoires* bien différenciés manquent chez la majeure partie des Échinodermes. On n'en trouve que dans les groupes éteints d'Échinozoaires et d'Astérozoaires, et chez les Holothurides. Selon les classes, ces Animaux respirent par tout le tégument, les podia, les papules, les branchies dermales, les *organes cribiformes* des Stellérides, les bourses génitales des Ophiurides, les *gills* des Échinides, les « poumons » des Holothurides; mais tous ces organes peuvent avoir d'autres fonctions.

Les Échinodermes manquent également de véritable *appareil excréteur*. L'excrétion se fait par l'intermédiaire d'*amibocytes,* surtout de *cœlomocytes,* sous forme d'ammoniaque, d'acide urique, de créatine, peut-être d'urée. Les parois du madréporite des Stellérides, les bourses génitales de certains Ophiurides, les « poumons » des Holothurides et leurs *tubes de Cuvier* prennent une part active dans le rejet de ces produits, aussi naturellement que l'anus, quand il existe.

Les *organes reproducteurs* consistent en *gonades interradiales,* sauf chez les Crinoïdes et certains types archaïques de Stellérides où elles sont allongées dans les bras. Les sexes sont généralement séparés.

Le *système alimentaire* comprend typiquement un canal digestif, droit ou circonvolutionné, allant de la bouche à l'anus. La position de la bouche diffère beaucoup dans chaque groupe et à l'intérieur de ceux-ci; on constate parfois l'absence de cæcums digestifs et d'anus.

EMBRANCHEMENT DES ÉCHINODERMES

SOUS-EMBRANCHEMENT DES PELMATOZOAIRES

Super-classe des Homalozoaires

Super-classe des Crinozoaires

Classe des Cystoïdes
- ☐ *Sous-classe des Rhombifères*
- ☐ *Sous-classe des Diploporites*

Classe des Blastoïdes

Classe des Édriastéroïdes

Classe des Crinoïdes
- ☐ *Sous-classe des Articulés*
  - ○ *Ordre des Comatulida*
- ☐ *Sous-classe des Inadunates*
- ☐ *Sous-classe des Camérates*
- ☐ *Sous-classe des Flexibles*

SOUS-EMBRANCHEMENT DES ÉLEUTHÉROZOAIRES

Classe des Holothurides
- ☐ *Sous-classe des Dendrochirotes*
  - ○ *Ordre des Dendrochirotida*
  - ○ *Ordre des Dactylochirotida*
- ☐ *Sous-classe des Aspidochirotes*
  - ○ *Ordre des Aspidochirotida*
  - ○ *Ordre des Elasipodida*
- ☐ *Sous-classe des Apodes*
  - ○ *Ordre des Molpadida*
  - ○ *Ordre des Apodida*

Classe des Stellérides
- ☐ *Sous-classe des Somasteridea*
- ☐ *Sous-classe des Asteroidea*
  - ○ *Ordre des Phanerozonida*
  - ○ *Ordre des Spinulosida*
  - ○ *Ordre des Euclasterida*
  - ○ *Ordre des Forcipulatida*

Classe des Ophiurides
  - ○ *Ordre des Stenurida*
  - ○ *Ordre des Oegophiurida*
  - ○ *Ordre des Phrynophiurida*
  - ○ *Ordre des Ophiurida*

Classe des Échinides
- ☐ *Sous-classe des Regularia*
  - ○ *Ordre des Lepidocentroida*
  - ○ *Ordre des Cidaroida*
  - ○ *Ordre des Aulodontida*
  - ○ *Ordre des Stirodontida*
  - ○ *Ordre des Camarodontida*
- ☐ *Sous-classe des Irregularia*
  - ○ *Ordre des Holectopoida*
  - ○ *Ordre des Cassiduloida*
  - ○ *Ordre des Clypeastroida*
  - ○ *Ordre des Spatangoida*

Origine des Échinodermes

Les Échinodermes sont apparus dès le Cambrien, probablement sous forme d'un Animal pélagique à symétrie bilatérale, le *Dipleurula,* pourvu de bandes ciliées, qui a ensuite évolué vers une forme d'Animal rampant, dépourvu de toute symétrie radiaire. Puis, ils se sont divisés en deux groupes bien tranchés : les Pelmatozoaires et les Éleuthérozoaires.

Les Échinodermes ont d'abord été, comme les Plats, des Animaux rampants dépourvus de toute symétrie radiaire, mais présentant une asymétrie bilatérale imparfaite. Comment ont-ils acquis leur symétrie pentaradiée? Quelques zoologistes, s'appuyant sur le cas des fossiles de la classe des Cystoïdes, supposent que leurs ancêtres ont dû passer par un stade trois, ou *trimère,* avant d'atteindre la symétrie cinq. D'autres affirment que le pentagone constitue le seul polygone régulier dont le nombre de côtés, égal à celui des diagonales, favorise la forme étoilée qui serait la plus efficace pour la protection de l'Animal; cette hypothèse est en contradiction avec l'existence de Stellérides à quatre, sept et même vingt rayons.

Par leur symétrie pentaradiée, qui reste une énigme quant à son origine, les Échinodermes se différencient de tout le règne animal. Sont-ils, comme on l'a cru longtemps, des Animaux archaïques, aberrants, « culs-de-sac de l'évolution »? Ne sont-ils pas plutôt, comme on semble l'admettre de plus en plus, les ancêtres lointains des Vertébrés? On a cru leur voir une parenté plus ou moins marquée avec les Mollusques, puis avec les Vers. Il est maintenant admis qu'ils sont assez proches parents de deux groupes qui annoncent les Vertébrés : les Stomocordés, tels les Entéropneustes et les Ptérobranches, les Procordés comme les Ascidies ou l'Amphioxus *(Branchiostoma)*. En effet, la larve des Stellérides *(bipinnaria)* et celle des Holothurides *(auricularia)* sont très voisines de la larve *tornaria* des Entéropneustes. La formation du cœlome par des *entérocœles* ainsi que la communication avec l'extérieur par l'intermédiaire du canal hydrophore rappellent ce qui se passe chez certains Procordés. Des faits paléontologiques et biochimiques renforceraient cette opinion. Mais, dans l'état actuel de nos connaissances, il est impossible de préciser davantage les relations des parentés ancestrales existant entre ces embranchements et celui des Échinodermes.

SYSTÉMATIQUE

Une classification récente des Échinodermes a été proposée, qui les sépare en quatre sous-phylums : les Échinozoaires, comprenant les classes Helicoplacoidea, Edriasteroidea, Ophicistoidea, Holothurioidea et Echinoidea, les Homalozoaires, les Crinozoaires, avec les classes Cystoidea, Blastoidea, Crinoidea; les Asterozoaires, renfermant les classes Stelleroidea et Ophiuroidea. Nous préférons garder une autre classification, peut-être plus conforme aux affinités des groupes entre eux, et qui a l'avantage de correspondre à celle encore adoptée par la plupart des traités.

Les *Pelmatozoaires* représentent les Échinodermes les plus primitifs. A l'état larvaire, ils sont toujours fixés par un pédoncule aboral, et sont parfois libres à l'état adulte comme quelques Crinoïdes. Ils se divisent en deux super-classes : les Homalozoaires, ou Plats; les Crinozoaires, qui se répartissent en quatre classes : Cystoïdes, Blastoïdes, Édriastéroïdes et Crinoïdes.

Les *Éleuthérozoaires* sont toujours libres. Ils comprennent quatre classes : Stellérides, Ophiurides, Échinides et Holothurides.

PELMATOZOAIRES

Les Pelmatozoaires (sous-phylum *Pelmatozoa*), à l'exception des Crinoïdes dont les représentants actuels sont encore nombreux, sont tous fossiles, et ne dépassent pas le Paléozoïque supérieur (Permien). Ces fossiles étaient ancrés au fond de l'eau, le plus souvent par un pédoncule dorsal flexible, de longueur variée, formé d'un grand nombre d'articles empilés et reliés par du tissu conjonctif. Ils se divisent en deux super-classes : Homalozoaires et Crinozoaires.

● HOMALOZOAIRES

Les Homalozoaires, ou Plats, forment un groupe étrange, très hétérogène, apparu au milieu du Cambrien, éteint au Dévonien. Leur corps, ou *thèque,* à face dorsale convexe, à face ventrale concave, présente généralement une symétrie bilatérale plus ou moins parfaite; il est revêtu, partiellement ou totalement, de plaques irrégulières, placées symétriquement et formant une sorte de carapace; une paire d'organes semblables à des bras est disposée autour de ce que l'on suppose être la bouche; une queue mobile, articulée, se trouve à l'extrémité opposée, organe de locomotion chez *Gyrocystis,* de fixation chez les autres groupes. Il est difficile de préciser la parenté des Homalozoaires avec les autres Échinodermes.

● CRINOZOAIRES

Les Crinozoaires se répartissent en quatre classes : Cystoïdes, Blastoïdes, Édriastéroïdes et Crinoïdes.

CYSTOIDES

Les Cystoïdes *(Cystoidea)* ont un corps ovale, ou sphérique, constitué par de nombreuses plaques polygonales irrégulières, poreuses et trouées de canaux. Ils devaient avoir une nutrition microphage, les particules alimentaires étant amenées à la bouche par des gouttières à cils vibratiles dressées autour de la bouche comme des tentacules solides ou rayonnant sur la surface de la thèque. Ils se divisent en Rhombifères et Diploporites.

Sous-classe des Rhombifères

Les Rhombifères, qui renferment un nombre considérable de formes, étaient fixés au substrat ou à divers supports par un simple bouton de l'extrémité aborale ou par une tige. Les plaques de la thèque présentent des canaux perpendiculaires à leurs sutures, et, dans les genres plus évolués, des losanges de pores. Les cinq gouttières nourricières font saillie extérieurement sous forme de brachioles, et portent de petites pinnules composées d'ossicules bisériés, le tout étant recouvert de petites plaques. Deux orifices, placés près de la bouche, dans l'*interradius* postérieur, sont considérés comme aquifère et gonoporique. L'anus, fermé par cinq valves triangulaires saillantes, est situé dans l'interradius droit postérieur. Beaucoup de Rhombifères Caryocrinides, ayant une thèque composée de plaques infrabasales, basales, radiales, interradiales, simulent des Crinoïdes éteints de la sous-classe Camerata.

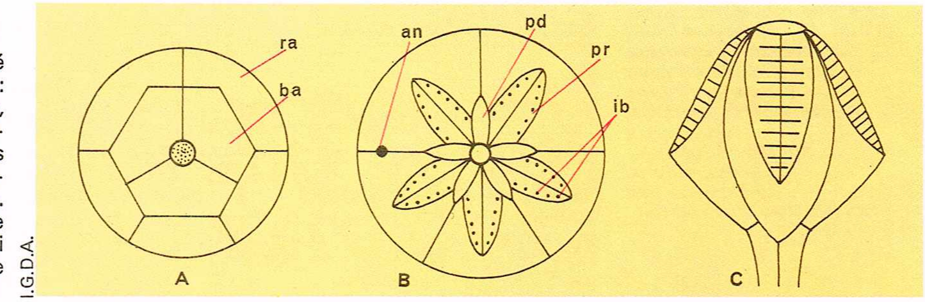

▲ *Schémas des structures de divers Blastoïdes : A, Blastoïde vu par la face aborale : ra, radiales; ba, basales; B, Blastoïde vu par la face orale : an, anus; pd, plaque deltoïde ou interradiale; pr, plaque radiale; ib, insertions des brachioles ou pinnules; C, un* **Pentremites robustus** *vu de côté.*

Sous-classe des Diploporites

La thèque des Diploporites, attachée par sa base sans tige véritable, est formée de très nombreuses plaques criblées d'innombrables pores isolés, ou réunis au nombre de deux ou trois par une courte rigole, suivie de canaux poriques divergents; il n'y a plus de losanges poriques. L'anus, le madréporite et le gonopore sont maintenant constamment dans le même interradius postérieur. Mais ce qui distingue surtout les Diploporites les plus évolués des Rhombifères est la présence, surtout au voisinage des rainures nourricières, de groupes de deux pores géminés *(Diplopores)* situés au fond d'une fossette.

BLASTOIDES

Les Blastoïdes *(Blastoidea)* dérivent probablement des Cystoïdes Diploporites. L'Animal, en forme de bouton de rose, est attaché au sol par une tige dont la base est pourvue de racines. La thèque est faite de quinze plaques réparties en trois cercles : cinq basales, cinq radiales, cinq orales; elle s'orne de cinq radius pétaloïdes; l'anus s'ouvre entre la plaque orale de l'interradius CD et les deux radiales adjacentes; on ne connaît pas de pores aquifères. Les Blastoïdes sont surtout caractérisés par des plis invaginés du stéréome, les *hydrospires,* à rôle vraisemblablement respiratoire et peut-être excréteur.

ÉDRIASTÉROIDES

Les Édriastéroïdes *(Edriasteroidea),* apparus dès le Cambrien, sont apparentés aux Cystoïdes Rhombifères. Ce sont des Animaux de petite taille, ovoïdes ou discoïdes, fichés dans la vase par des excroissances ou simplement posés sur le sol, c'est-à-dire à peu près libres. Leur thèque flexible est formée de nombreuses petites plaques polygonales; sa face supérieure est percée d'une bouche centrale d'où partent cinq bandes radiaires, droites ou sinueuses. Le plancher des rainures ambulacraires consiste en une série de plaques comportant, entre deux plaques successives, un orifice correspondant à un podia pourvu d'une vésicule pédieuse; cette rainure est pourvue de petites plaques latérales qui, en se rabattant, la recouvrent d'un pavage qui la ferme complètement. Certains auteurs supposent que les Édriastéroïdes et les Holothurides dérivent d'un ancêtre commun ayant vécu au Cambrien inférieur.

▼ *Schéma de la structure d'un* **Cystoblastus** *(Cystoïdes) : 1, sillon radial; 2, bouche; 3, hydropore; 4, orifice génital; 5, anus; 6, pédoncule.*

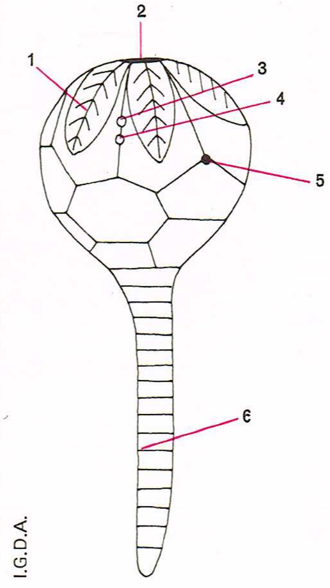

▶ **Annacrinus (wyvillethomsoni)** *appartient au groupe des Articulés fixés; ceux-ci se fixent au fond ou s'accrochent aux pierres par un pédoncule, pointu, simple ou terminé par de nombreuses racines.*

CRINOIDES

Les Crinoïdes *(Crinoidea)* se présentent sous deux formes, l'une fixée au substrat par un pédoncule aboral, l'autre libre à l'état adulte pouvant s'accrocher à divers supports à l'aide de crampons, les *cirres,* mais capable aussi de nager activement dans le milieu ambiant. Les Crinoïdes se divisent en quatre sous-classes : *Inadunata, Camerata, Flexibilia,* fossiles du Paléozoïque; *Articulata,* apparus au Triasique, dont il existe encore de nombreuses formes, fixées ou libres.

Sous-classe des Articulés

Les Articulés *(Articulata)* se répartissent en deux groupes d'inégale importance : les *Libres,* dont six cents espèces vivent encore dans toutes les mers; les *Fixés,* qui habitent les profondeurs marines au nombre d'à peu près quatre-vingts espèces.

Un Articulé libre, dont le type est la comatule, est constitué typiquement d'un corps central contenant les viscères, soutenu par un squelette de pièces assemblées, la thèque : celle-ci émet de longs bras graciles plus ou moins ramifiés; sa surface orale, ou ventrale, le *tegmen,* porte une bouche centrale, d'où partent cinq rainures ambulacraires qui bifurquent chacune en deux bras soutenus par un squelette spécial; dans un interradius s'élève un tube anal percé d'un anus terminal entouré de petites papilles. La position de la bouche, du tube anal et de la grande plaque calcaire du pôle aboral du calice détermine un plan de symétrie, dit plan crinoïdien, que nous retrouverons très marqué chez les Holothurides.

Le *calice,* en forme de coupe conique, est formé de deux ou de trois cercles de plaques, suivant que le squelette calicinal est dit monocyclique ou dicyclique. Chez la comatule, ce squelette est fait de six plaques, cinq radiales (infrabasales) et cinq interradiales (basales), groupées autour d'une plaque centro-dorsale; celle-ci porte une trentaine de cirres, sortes de griffes composées de courts articles articulés entre eux, et dont le dernier est en forme de crochet; les cirres de l'Animal lui servent à se cramponner aux divers supports qu'il rencontre.

Les *bras* des Crinoïdes, primitivement au nombre de cinq, le plus souvent de dix, s'allongent considérablement, et se ramifient parfois énormément. Leur squelette est constitué d'abord d'une plaque primibrachiale, qui repose sur la radiale du calice à laquelle elle est unie par une articulation, puis d'une pièce axillaire qui supporte les deux premières plaques secundibrachiales des deux premières ramifications; l'ensemble de ces plaques est inclus dans le calice dont il consolide la face aborale. Ce n'est guère qu'à partir de la troisième ou de la quatrième secundibrachiale que les bras deviennent vraiment libres; ils sont alors constitués de nombreux articles courts, discoïdes, unis obliquement par des muscles puissants leur donnant une grande souplesse; cependant, les bras se brisent facilement au niveau d'articulations spéciales, les *syzygies,* dépourvues de muscles, dont la jointure est perpendiculaire à l'axe longitudinal des bras. Leur face orale est parcourue par une gouttière à bords festonnés, où sont disposés des groupes de trois podia, dits *palpes,* car ils ne participent pas à la locomotion; organes tactiles, peut-être respiratoires, les palpes, enduits de mucus, participent au transport de la nourriture vers la bouche. En dehors de la gouttière, on remarque de nombreuses petites vésicules incolores, les *saccules,* profondément enfoncés dans le tégument. Ils contiennent de petites sphérules réfringentes groupées en amas piriformes, dont la base s'appuie sur le fond du saccule, tandis que le sommet se prolonge en un filament grêle; les saccules ont une affinité extraordinaire pour les colorants; on suppose qu'ils ont un rôle excréteur ou bien servent de réserve à des protides, mais leur véritable fonction n'est pas encore connue.

De chaque côté, les bras sont bordés par un rang de *pinnules;* la structure des uns et des autres est identique; les pinnules alternent régulièrement d'un côté à l'autre et leur ensemble forme une double série de nombreux appendices courts et serrés, rappelant les barbes d'une plume d'oiseau. Chaque pinnule est parcourue par une ramification de la gouttière brachiale. On distingue trois

sortes de pinnules : les proximales, ou pinnules orales, plus longues que les autres, qui se rabattent brusquement sur la bouche lorsque l'Animal est inquiété; les pinnules génitales contenant les gonades qui, au moment de la reproduction, se gonflent de produits sexuels libérés par éclatement de leurs parois; les pinnules distales qui, contrairement aux pinnules génitales, sont toujours pourvues de rainures ambulacraires et de palpes.

Le *tegmen,* qui recouvre le calice, est formé d'une délicate membrane contenant de petites plaques formant un revêtement continu ou simplement concentrées le long des rainures ambulacraires, ou remplie de formations calcaires microscopiques. Il est percé, dans les interradius, de centaines de pores minuscules : ce sont les ouvertures externes des canaux qui servent à introduire l'eau de mer dans les espaces cœlomiques du corps de la comatule.

Le *corps* de celle-ci est constitué d'un disque mou, de la grosseur d'un petit pois; au centre, ou légèrement déportée, s'ouvre la bouche, simple orifice pentagonal toujours béant; il en part cinq rainures ambulacraires donnant naissance aux dix rainures ambulacraires des bras et, intérieurement, un œsophage vertical suivi d'un intestin bosselé tournant le long de la cavité; ce dernier est terminé par un court rectum, aboutissant à l'anus situé au sommet d'un long cône interradiaire; ce tube anal, capable de contractions rythmiques, aspire et rejette l'eau de façon à éliminer les déchets; il est aussi utilisé pour un but respiratoire; deux diverticules, ramifiés à leur sommet, se développent dans le premier tiers de l'intestin, et sont parfois qualifiés de diverticules hépathiques. Dans l'espace laissé libre par l'intestin est logé un volumineux organe axial, probablement à fonction hormonale. Le reste de la cavité générale est en partie comblé par un grand nombre de lames conjonctives qui la transforment en une sorte d'éponge; elle est aussi tapissée de petites corbeilles vibratiles, dont le rôle principal est de mettre en mouvement le liquide cœlomique, mais qui se chargent également de granules de déchets, qu'une fois détachés des amibocytes phagocytent.

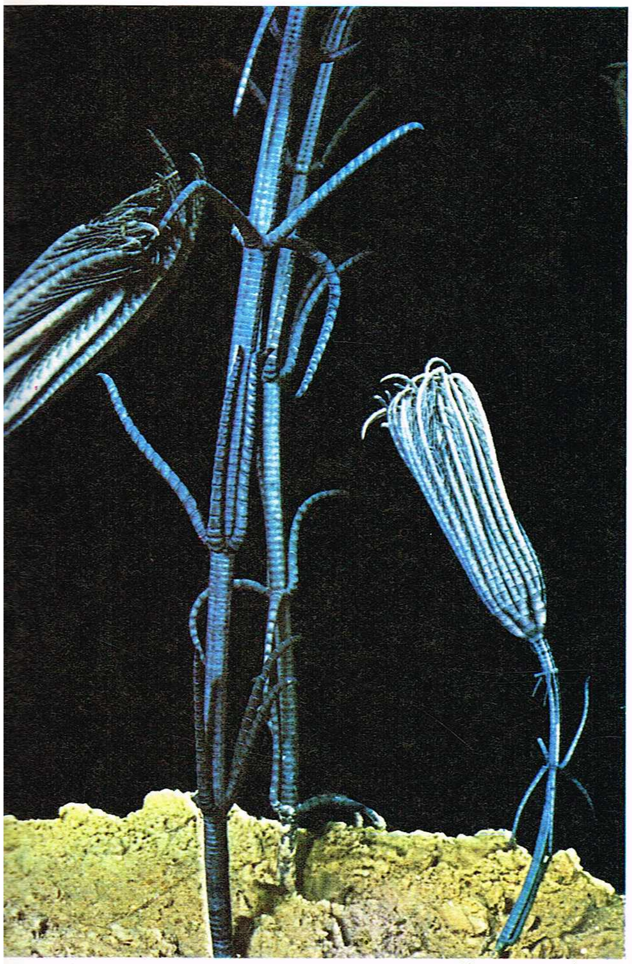

H. Chaumeton - Jacana

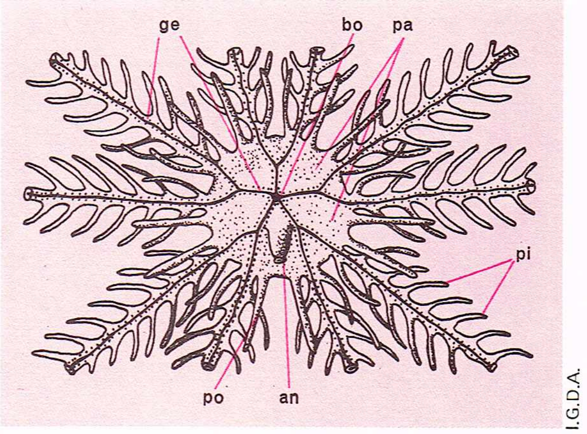

◀ ***Disque oral d'un Crinoïde du genre* Antedon*;***
ge, gouttière épineurale;
bo, bouche;
pa, pores aquifères;
pi, pinnules;
an, anus;
po, pinnule orale.

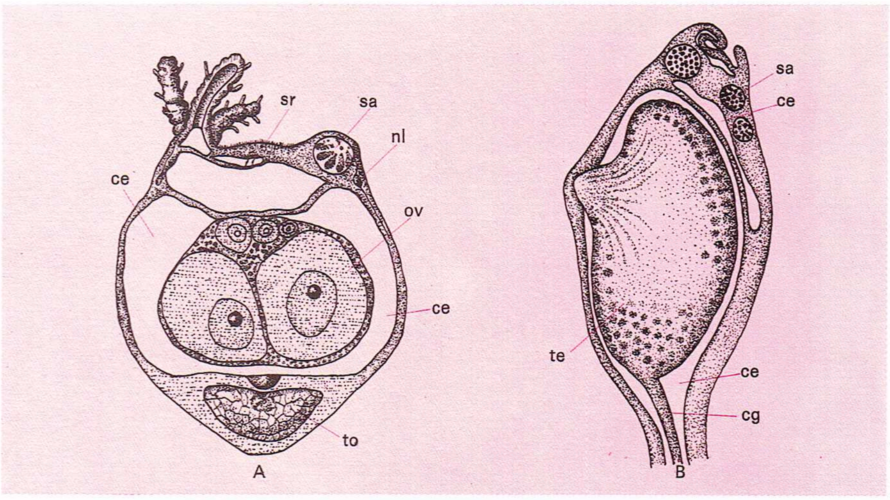

▲ ***Coupe transversale d'une pinnule d'*Antedon bifida *femelle (A) et mâle (B) : ce, cavité cœlomique; cg, cordon génital; nl, nerf latéral; ov, ovaire; sa, saccule; sr, sillon radial; te, testicule; to, partie brachiale avec son tronc nerveux.***

▼ ***Coupe sagittale d'un Crinoïde libre* (Antedon bifida) *: aao, anneau ambulacraire oral; an, anneau nerveux; sa, saccule; ip, infusoires parasites* (Conchophthirius antedonis)*; in, intestin; pa, pores aquifères; cp, cavité périviscérale; ra, plaque radiale; ana, anneau nerveux aboral; ro, rosette; ci, cirre; ga, glande axiale; tnb, tronc nerveux brachial; sy, syzygie; ceb, cœlome du bras; cab, canal ambulacraire brachial; lg, lacune génitale; ta, tube aquifère; bo, bouche; cd, cavité axiale du disque; tb, tentacule buccal.***

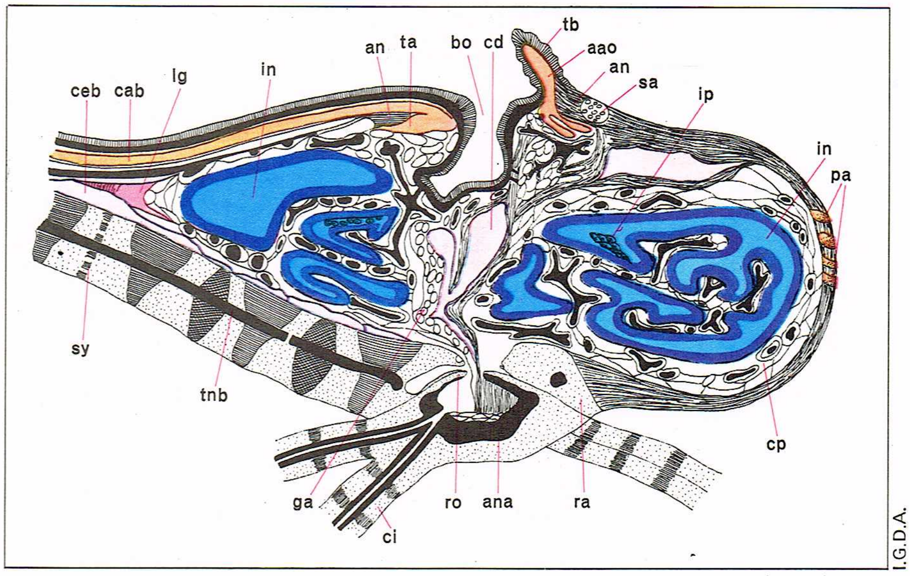

Le *système aquifère* correspond au type général précédemment décrit. Il est accompagné, dans l'axe creux des bras, par des cordons génitaux allant aux pinnules génitales.

Le *système lacunaire sanguin,* ou hémal, très développé, s'enchevêtre étroitement aux cavités cœlomiques, sans communiquer avec elles. Il contient des amibocytes normaux, des amibocytes à bâtonnets éosinophiles et des amibocytes mûriformes chargés de granules jaunes (probablement des produits d'excrétion); cependant, l'excrétion est surtout assurée par les cellules péritonéales : elles élaborent de gros granules brunâtres que des phagocytes capturent à leur expulsion et digèrent partiellement, pour les transporter dans le tissu conjonctif, ou pour passer à l'extérieur.

Système nerveux et organes des sens. Le système nerveux comprend les trois systèmes décrits dans le schéma général des Échinodermes. Le système octoneural, uniquement sensitif, émet de nombreuses fibres reliées à l'épithélium du tube digestif. Le système hyponeural consiste en un pentagone, logé dans le tissu conjonctif du tegmen, dont les nombreux rameaux innervent les palpes, le tube anal, les pinnules et certains organes internes. Le système entoneural, sorte de coupe nerveuse située dans la cavité du calice, émet cinq troncs radiaux, qui bifurquent pour donner une branche pour chacun des dix bras; chaque branche est logée au centre de l'axe calcaire des bras, et ses racines innervent les muscles articulaires des bras, les cirres, et, chez les Fixés, le pédoncule; c'est un centre de coordination des mouvements natatoires et d'accrochage de l'Animal.

Régénération. Comme tous les Échinodermes, les Crinoïdes ont une faculté de régénération très développée. Les bras, sujets à de fréquentes ruptures au niveau des syzygies, repoussent en quelques mois, ainsi que les pinnules et les cirres. Bien plus, le sac viscéral peut se détacher entièrement du squelette dorsal et de la base des bras, l'Animal le reformant en entier à condition que le centre nerveux dorsal du calice soit resté intact.

G. Mazza

▲ *Les Crinoïdes libres, nombreux dans les eaux tropicales, vivent aussi dans les eaux tempérées, tel* Antedon mediterranea, *espèce européenne.*

Reproduction

Le développement des Crinoïdes n'est complètement connu que par les études faites sur les Libres, notamment sur l'espèce européenne *Antedon bifida ;* on ignore tout de celui des Crinoïdes fixés.

Une fois fécondé, l'œuf donne naissance vers le sixième jour à une larve nageuse, cerclée de cinq bandes ciliaires transversales et parallèles, dite « larve en tonnelet ». Le squelette est déjà bien développé : il présente des plaques perforées, disposées en pile suivant l'axe longitudinal de la larve qui, dépourvue de bouche, ne peut se nourrir. Après avoir nagé activement, elle tombe sur le fond, et s'y fixe par son lobe préoral formant ventouse ; d'abord en position horizontale, elle se redresse, et son point d'adhésion devient terminal ; la ceinture ciliée disparaît, l'embryon subit de profondes modifications, et finit par prendre un aspect en massue. La partie supérieure se renfle en un calice où se groupent les viscères, tandis que la partie inférieure, où se trouve le lobe préoral, se convertit en un pédoncule, qui s'allonge pour se terminer par un disque adhésif. Les plaques squelettiques de l'Animal se forment ; vingt-cinq tentacules, disposés par groupes de cinq, apparaissent sur la face supérieure, ainsi que cinq lobes contenant une plaque orale qui joue le rôle de valvule, et permet la saillie ou la rétraction des tentacules. L'évolution se poursuit par l'apparition des cinq premiers saccules, de l'appareil digestif et de l'ébauche génitale. A ce stade, dit *cystidé,* la larve mesure trois à quatre millimètres. Elle grandit, toujours fixée par son pédoncule, et passe par une nouvelle et dernière phase connue sous le nom de *stade pentacrinoïde ;* les bras apparaissent ainsi que leurs plaques, bifurquent, le calice se complète, et les cinq valves orales disparaissent ; le tube anal se développe ; les nombreux tentacules de la larve cystidienne se résorbent en partie, alors que d'autres se transforment en se couchant le long des bras, avant leur bifurcation, et se soudent à eux pour fournir plus tard le canal ambulacraire. A l'intérieur du calice, tous les viscères se constituent, et l'appareil génital acquiert sa structure définitive. Les cirres apparaissent sur la face dorsale de la plaque centrale, puis le calice se sépare du pédoncule juste sous les cirres, et la comatule commence sa vie libre.

Chez de nombreuses comatules antarctiques, les œufs se développent dans des chambres incubatrices localisées à la base des bras, à la base des pinnules ou dans les pinnules mêmes. Parfois, les larves restent attachées à la face interne de la poche incubatrice jusqu'au stade pentacrinoïde ou, après une courte phase larvaire libre, restent attachées aux cirres de la mère.

Écologie

Les Crinoïdes libres, à quelques groupes qu'ils appartiennent, sont très nombreux dans les eaux tropicales, la plupart dans les récifs coralliens, mais aussi dans les eaux tempérées et froides. Ils vivent solidement accro-

chés par leurs cirres aux herbes ou Algues marines, aux roches, aux coraux branchus, leurs bras étalés horizontalement, ou dressés en coupe largement ouverte. S'ils sont détachés de leur support, la plupart nagent activement par ondulation de leurs bras. Ils se nourrissent de détritus et de petits organismes du plancton, qui viennent se coller sur leurs palpes, enduites du mucus sécrété par leurs petites papilles saillantes. Le bol alimentaire est poussé vers la bouche par les puissants courants ciliaires de la rainure ambulacraire des bras. Les Crinoïdes fixés, qui peuvent osciller sur leur base grâce à leur pédoncule articulé, se nourrissent de la même façon.

Les Crinoïdes sont souvent infestés de parasites. L'intestin d'*Antedon bifida* héberge le Protozoaire *Prorocentrus micans;* sur cette même comatule se fixe un Annélide Polychète très dégradé, *Myzostoma cirriferum,* sorte de disque mou et plat collé au Crinoïde par ses parapodes armés de crochets, et qui plonge son pharynx dans le bol alimentaire de l'hôte; on a dénombré jusqu'à plusieurs centaines de myzostomes sur une même comatule. D'autres espèces de myzostomes s'enfoncent dans le tégument, où ils provoquent la formation de galles, notamment sur les bras et les pinnules. Mais les parasites les plus remarquables sont de petits et délicats Mollusques de la famille Melanellidae, appartenant aux genres *Stylifer, Stylina, Sabaniella, Melanella;* ils perforent, avec leur trompe, le calice, les brachiales, les cirres, les pinnules, le tube anal, et l'enfoncent dans les tissus mous qu'ils dévorent. *Stylina comatulicola* s'accroche au tube anal des espèces européennes *Antedon mediterranea* et *Leptometra phalangium.* D'autres organismes vivent en commensaux

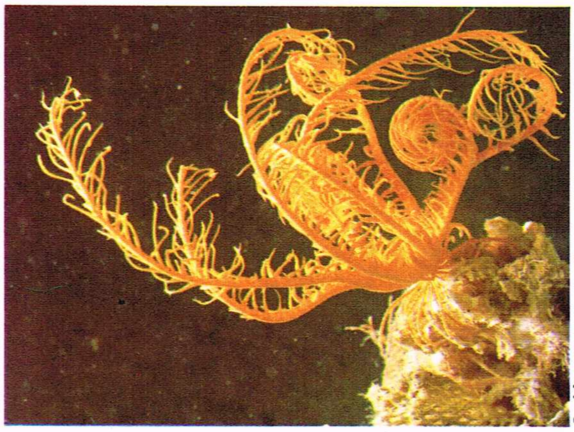
G. Mazza

◀ ***Solidement accrochés par leurs cirres aux herbes marines ou aux roches, les Crinoïdes (ici* Antedon mediterranea*) peuvent, lorsqu'ils sont détachés de leur support, nager activement par ondulation de leurs bras.***

sur divers Crinoïdes. Des Hydraires se fixent sur les cirres des *Antedon;* de petits Crustacés se réfugient sur le disque ou les bras, dont ils prennent la couleur ou l'ornementation. Mais le commensalisme le plus curieux est celui d'ophiures du genre *Ophiomaza,* qui vivent à demeure sur le disque de l'hôte, les bras moulés sur sa face dorsale; d'autres ophiures trouvent un abri parmi les bras des grands Crinoïdes.

Ordre des Comatulida

Les Articulés libres actuels sont essentiellement répartis dans l'ordre des *Comatulida.* Les Comatulida sont eux-mêmes divisés en Macrophréates et Oligophréates.

Les *Macrophréates* ont presque toujours dix bras, rarement cinq, une cavité centro-dorsale grande et profonde. A ce sous-ordre appartiennent les espèces européennes *Antedon bifida, A. mediterranea* et *Leptometra phalangium,* celle-ci d'un beau vert clair, à cirres très longs. *Heliometra glacialis* vit à partir d'une centaine de mètres dans les eaux arctiques, ainsi que *Hathrometra sarsi* qui se rencontre par bancs de milliers d'individus au large des côtes scandinaves.

Les *Oligophréates* se caractérisent par une cavité centro-dorsale petite et profonde, un tegmen plus ou moins couvert de petites plaques et, sauf exception, plus de dix bras, parfois deux cents comme *Comanthina schlegeli,* des mers tropicales. La famille **Comasteridae,** la plus importante de ce sous-ordre, fréquente dans les récifs coralliens *(Tropiometra carinata),* se trouve particulièrement concentrée en Indonésie.

Les Articulés fixés se différencient des libres principalement par la présence d'un pédoncule situé au côté aboral du cône, à contours cylindriques ou polygonaux, formé d'un grand nombre de pièces calcaires aplaties, empilées les unes sur les autres; il est parcouru par un canal axial dans lequel se prolonge la cavité générale, et où pénètrent également divers organes du calice. Ce pédoncule peut être lisse, ou porter, de place en place, sur des pièces nodales plus grandes que les autres, des groupes verticillés de cirres. L'Animal se fixe par un pédoncule pointu, simplement fiché dans le sol, ou par un pédoncule terminé par de nombreuses racines, qui s'accrochent aux pierres ou s'étalent dans la vase; l'accrochage peut se faire également par le dernier groupe de cirres verticillisés. Le pédoncule mesure jusqu'à 150 cm chez les espèces actuelles, plus de 20 m chez les formes éteintes.

Les Articulés fixés ne sont plus représentés que par environ quatre-vingts espèces. *Annacrinus wyvillethomsoni* (35 cm de haut), de couleur vert sombre, vit par bancs immenses dans des régions bien délimitées de l'Atlantique. Le petit *Rhizocrinus lofotensis,* d'au plus 7 cm de long, d'un beau jaune, se fixe dans la vase par de fines racines très ramifiées. Deux espèces de la famille **Holopidae** sont considérées comme des fossiles vivants : *Holopus rangi,* de la mer des Antilles, pourvu d'un très court pédoncule épais et sans racines; *Cyathidium foresti,* récemment découvert aux Açores, vit par 600 mètres de fond, collé directement aux anfractuosités de la roche basaltique.

Sous-classe des Inadunates

Les Inadunates *(Inadunata),* en grande partie paléozoïques, ont une thèque rigide et, au-dessus des radiales, des plaques brachiales libres. La bouche est recouverte par des plaques calcaires. Les rainures ambulacraires, ouvertes ou fermées, sont visibles sur la face orale. Les Inadunates sont représentés de nos jours par quelques genres d'eau profonde, tous pédonculés : *Gephyrocrinus, Thalassocrinus, Ptilocrinus,* et l'espèce *Calamocrinus diomedae,* jaune, à cinq bras, fixée au fond de l'océan Pacifique par un long pédoncule dépourvu de cirres, mais muni d'un disque calcaire basal adhésif.

Sous-classe des Camérates

Le groupe des Camérates *(Camerata)* dérive probablement des Inadunates. Il a vécu de l'Ordovicien au Carbonifère supérieur. La thèque est rigide, à plaques épaisses; les plaques brachiales inférieures y sont solidement incorporées. Les rainures nutritives sont complètement closes, et forment une sorte de tuyau sous la surface du disque. Les bras sont pinnulés. Le pédoncule peut être tordu sur lui-même, de sorte que la thèque peut s'incliner dans tous les sens, ou terminé par un grappin à quatre pointes *(Ancyrocrinus),* ou non fixé, et s'enrouler alors comme une queue prenante autour des objets *(Eifelocrinus).* La racine de *Scyphocrinus* est un gros sphéroïde creux, considéré plutôt comme un flotteur que comme un appareil d'ancrage.

Sous-classe des Flexibles

Les Flexibles *(Flexibilia)* représentent probablement un rameau détaché des Inadunates dicycliques qui vécurent de l'Ordovicien au Permien. La coupe dorsale est le plus souvent formée de trois infrabasales inégales et de cinq ou six basales; les premières brachiales y sont incorporées d'une façon souple, et au-delà des radiales, toutes les plaques sont unies également par des sutures lâches. La bouche est ouverte, et les rainures nourricières sont couvertes de plaques. Les bras, toujours unisériés, sont plus ou moins ramifiés et dépourvus de pinnules. Le pédoncule, sans cirres, est toujours cylindrique. Parmi les genres, citons *Protaxocrinus,* sans doute le plus primitif, *Sagenocrinus, Ichthyocrinus,* Animal piriforme, *Lecanocrinus,* au corps globuleux.

▲ *Les Holothurides sont connus sous le nom de « concombres de mer » ; ici,* **Pseudothyone furnestini** *de la famille des Sclerodactylidae (Dendrochirotes).*

ÉLEUTHÉROZOAIRES

Les Éleuthérozoaires (sous-phylum *Eleutherozoa*) sont des Animaux toujours libres, et renferment la très grande majorité des Échinodermes actuels. Ils ont des caractères communs : une symétrie pentamère définitive, des systèmes ambulacraires et nerveux presque identiques, un anus généralement opposé à la bouche. Ils comprennent quatre classes : Holothurides, Stellérides, Ophiurides et Échinides.

HOLOTHURIDES

Les Holothurides sont sans doute les plus archaïques des Échinodermes. Apparus dès le Cambrien, ils ne sont connus, à l'état fossile, mis à part quelques empreintes d'interprétation douteuse, que par leurs spicules. Mais la variété de ceux-ci est telle chez une même espèce qu'il est impossible d'adopter, pour les fossiles, la classification classique ; elle a été remplacée par une parataxinomie où cohortes, manipules et centuries remplacent les familles, genres et espèces.

L'holothurie typique se présente comme une sorte de long boudin, ou de concombre, d'où leur nom de « concombres de mer ». La bouche, entourée de podia modifiés en tentacules, s'ouvre à une extrémité, l'anus à l'extrémité opposée. La *symétrie pentamère* est soulignée par cinq ambulacres (radius), pourvus de podia alignés en deux ou plusieurs rangs allant de la bouche à l'anus ; ils sont séparés par de larges interambulacres (interradius), nus ou couverts de podia plus ou moins dispersés. Nombre d'espèces se déplacent sur un de leurs côtés, le *trivium,* aplati ou non en sole de reptation, formé de trois radius et de deux interradius ; la face dorsale, ou *bivium,* comprend les deux autres radius et trois interradius. A cette symétrie radiaire se superpose un plan de symétrie bilatérale crinoïdien, allant de la bouche à l'anus en passant par l'interradius dorsal et le radius dorsal médian.

Le *tégument,* souvent très épais, se compose d'une couche superficielle très pigmentée et d'une couche profonde, contenant de très nombreux spicules calcaires microscopiques. Cette couche profonde, formée de gros faisceaux de fibres entrecroisées, contient, au niveau des radius, les rubans nerveux ectoneural et hyponeural. Sous le derme s'étale une mince couche de muscles circulaires. La paroi interne, délimitant un vaste cœlome, est tapissée d'un tissu conjonctif.

La *bouche,* généralement terminale, parfois ventrale ou dorsale, n'est qu'une simple ouverture percée au centre du péristome, et dépourvue de tout appareil masticateur ; elle est munie d'une lèvre circulaire et entourée de huit à trente tentacules. Il en part un gros pharynx, entouré d'une couronne formée de pièces calcaires radiaires et interradiaires unies entre elles d'une façon assez souple par du tissu conjonctif, ce qui lui donne une grande élasticité ; cinq gros muscles longitudinaux s'attachent aux pièces radiaires, et se poursuivent jusqu'à l'anus, accompagnés, chez les Dendrochirotes, de muscles rétracteurs du pharynx ; ces muscles servent à la contraction du corps et à l'invagination des tentacules à l'intérieur de la bouche. Le pharynx est relié par un court œsophage à un estomac peu différencié. Ce dernier est suivi d'un intestin qui descend vers le milieu du corps, remonte en tournant jusqu'au tiers supérieur, et redescend en spirale vers une vaste poche, le cloaque, qui s'ouvre à l'extérieur par un anus muni d'un sphincter.

Sur toute sa longueur, le *tube digestif* est attaché à la paroi du corps par des mésentères. Sauf chez les holothuries apodes, deux longs tubes très ramifiés, les *organes arborescents,* ou poumons, remontent du cloaque vers la bouche. Chez des Aspidochirotes, de nombreux tubes de Cuvier s'attachent à la partie supérieure du cloaque. De minuscules urnes ciliées sont isolées, ou groupées sur la paroi interne du corps ou sur les mésentères des synaptes. Le vaste cœlome est rempli d'un liquide albumineux contenant des amibocytes à propriétés phagocytaires, des cellules excrétrices bourrées de granules jaunes ou bruns, parfois des hématies d'un jaune rougeâtre.

Le *système aquifère* est comparable, à quelques variantes près, à celui des autres Échinodermes. Un canal

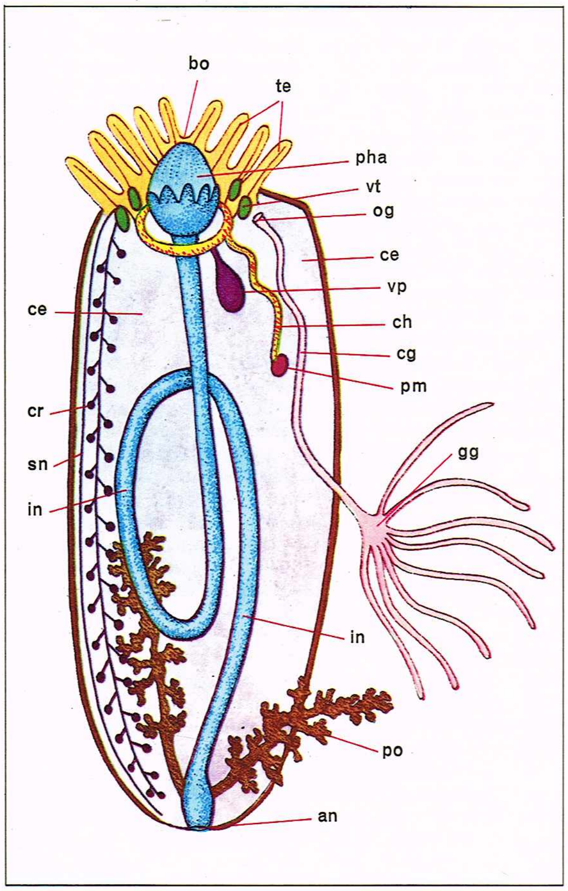

I.G.D.A.

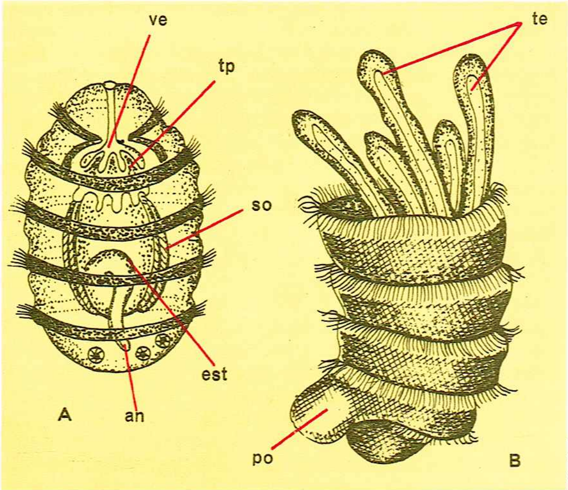

I.G.D.A.

oral circulaire émet cinq branches radiaires (sauf chez les Apodidae), qui vont alimenter les ampoules pédieuses, destinées à faire saillir ou rétracter les podia ; chez les Aspidochirotes, il alimente également les ampoules tentaculaires. Une ou plusieurs *vésicules de Poli,* réservoir contractile du liquide ambulacraire, sont appendues au canal oral, ainsi qu'un ou plusieurs canaux hydrophores terminés par un petit madréporique, peu calcifié, en liberté dans la cavité générale, sauf chez les Élasipodes. Chez les Apodes, dépourvus de podia, le système aquifère est réduit à l'anneau oral et à ses appendices.

L'*appareil hémal* est bien développé. Il se compose d'un gros canal entourant le pharynx, pourvu de cinq branches longeant les canaux aquifères, et de deux lacunes principales disposées le long de l'intestin ; l'une, dite absorbante, atteint ses plus grandes complications chez les Aspidochirotes, où elle donne naissance à un réseau admirable ; l'autre, dite nourricière, va aux organes génitaux et aux podia. Ces lacunes ont des parois musculaires, et sont animées de mouvements rythmiques qui, corrélativement à ceux du corps et des poumons, font circuler le liquide hémal.

Le *système nerveux* consiste en un ruban péribuccal d'où partent, dans chaque radius, deux cordons, l'externe, ou ectoneural, à fonction sensitivo-motrice, qui innerve les podia et les organes sensoriels, l'interne, ou hyponeural, exclusivement moteur, qui innerve les fibres musculaires de la paroi du corps. Du ruban péribuccal partent également des rameaux reliés aux tentacules, à la membrane buccale et au pharynx. Les Holothurides sont dépourvues du système aboral, si développé chez les Crinoïdes.

Organes des sens. Toutes les parties du tégument, ainsi que les podia et les tentacules, sont sensibles au toucher, comme à la lumière, sans que des organes spécialisés aient pu être décelés, sauf chez les Synaptes, qui ont des taches rouge sombre à la base des tentacules. La peau des Apodes est couverte de mamelons glandulo-sensitifs, dont certains sont reliés aux poches formatrices du complexe spiculaire ancre-plaque-anchorale. Ces mamelons déterminent les orientations de l'ancre, lorsque l'Animal doit sortir du sédiment ou y rentrer ; de plus, chez ces mêmes Animaux, chaque tentacule porte, sur sa face interne, des boutons ou des cupules sensoriels, dont le rôle est d'apprécier les modifications du milieu ambiant et, peut-être, la qualité des aliments ; de même que les Élasipodes, ils s'orientent dans l'espace grâce à des statocystes, situés par paires près de l'anneau nerveux péribuccal ou répartis, au nombre de plusieurs dizaines, autour de celui-ci.

Reproduction

Les organes génitaux se composent de un ou de deux paquets de tubes, simples ou ramifiés, en suspension libre dans le cœlome. Ils sont disposés de part et d'autre du mésentère dorsal médian, ou d'une seule touffe placée à gauche ou à droite de celui-ci ; le canal excréteur débouche à l'extérieur par un simple orifice entre deux tentacules dorsaux, ou au sommet d'une papille génitale érigée à leur base, ou franchement sur le dos, comme chez les Élapisodes.

Les œufs et le sperme sont émis dans l'eau de mer, et la fécondation se produit au hasard de leur rencontre. L'œuf donne naissance à une larve nageuse, l'*auricularia,* ainsi nommée par suite de sa vague ressemblance avec une oreille humaine ; elle est munie d'une ceinture ciliaire circumorale très circonvolutionnée, délimitant une aire préorale et un champ anal. L'auricularia se transforme peu à peu, en subissant de profondes modifications, en une larve secondaire en tonnelet, la *doliolaria,* cerclée de bandes de cils transversales et parallèles, accompagnées d'une aire ciliaire à son extrémité antérieure. La transformation de la doliolaria en holothurie s'opère progressivement, pour donner un dernier stade *pentactula,* larve encore nageuse au moyen de son appareil ciliaire, mais qui possède maintenant cinq tentacules et une paire de podia postérieurs. Bientôt, les ceintures ciliaires disparaissent, la larve tombe sur le fond, où elle rampe en se tenant verticalement sur ses deux podia. Peu à peu, tous les organes définitifs apparaissent, ainsi que le squelette calcaire, les podia se multiplient, d'autres tentacules s'adjoignent aux cinq premiers, et la petite holothurie commence sa vie active.

La reproduction asexuée se produit chez quelques espèces. Chez *Ocnus planci* et d'autres Dendrochirotes, elle s'opère par division transversale du corps. Chez les Synaptes, l'Animal se fragmente en plusieurs morceaux, mais seul le fragment antérieur régénère un individu complet.

Beaucoup d'espèces d'eaux froides, surtout antarctiques, sont incubatrices. Les unes abritent leurs œufs, ou les jeunes, sous leurs faces ventrale ou dorsale. Parfois, les œufs sont retenus par une matière visqueuse ; ainsi, la femelle de *Bathyplotes tizardi,* espèce d'eau profonde, colle ses œufs sur les tentacules du mâle, où ils poursuivent leur évolution. Des *Psolus* portent sur leur dos une *cavité marsupiale,* formée d'un toit de plaques saillantes soutenues par un ou plusieurs piliers, et où les jeunes sont parfaitement à l'abri. D'autres espèces, appartenant surtout au groupe des Dendrochirotes, possèdent de un à cinq sacs qui s'ouvrent près ou autour de la bouche, et où les œufs sont pondus.

◀ ***Schéma de la structure anatomique de l'holothurie* Ocnus planci :**
bo, bouche ;
te, tentacules ;
pha, pharynx ;
vt, vésicules tentaculaires ;
og, orifice génital ;
ce, cœlome ;
vp, vésicule de Poli ;
ch, canal hydrophore ;
cg, canal génital ;
pm, plaque madréporique ;
gg, glande génitale ;
in, intestin ;
po, poumon ;
an, anus ;
sn, système nerveux ;
cr, canal radial.

◀ ***Larves d'holothuries ;***
***A,* doliolaria ;**
***B,* pentactula :**
an, anus ;
est, estomac ;
po, podia ;
so, somatocœle ;
te, tentacules ;
tp, tentacules primaires oraux ;
ve, vestibule oral.

Parfois, l'incubation a lieu dans les gonades femelles, et les jeunes passent au dehors par l'orifice génital dilaté. Les gonades de *Leptosynapta minuta*, très petite holothurie apode, des côtes d'Europe, d'au plus 8 mm de long, contiennent deux ou trois gros œufs qui, à leur maturité, passent dans le cœlome par rupture des parois des gonades; ils sont fécondés par des spermatozoïdes pénétrant à travers le tégument de la femelle; les embryons se développent dans la cavité générale, et sortent par éclatement du corps de la mère, au voisinage de l'anus. *Neocnus incubans*, qui vit par groupes de centaines d'individus sur les rameaux de l'Algue brune *Cystoseira sedoides* des côtes tunisiennes, et dont la taille ne dépasse pas 6 mm, incube ses œufs dans un marsupium dorsal dont les fentes se ferment par des sortes de boutons-pression.

Si la reproduction asexuée est rare chez les Holothurides, nombre d'espèces d'Apodes sont hermaphrodites; la maturité des ovules et des spermatozoïdes s'effectue par poussées successives; suivant la période de l'année, l'Animal est d'abord uniquement mâle ou femelle, puis les deux éléments sexuels sont mélangés, et l'un d'eux est ensuite totalement éliminé; il ne peut y avoir autofécondation, les œufs et les spermatozoïdes d'un même Animal étant mûrs à des périodes différentes.

▼ *Caractérisés par leurs tentacules arborescents, les Dendrochirotes de la famille des Cucumariidae* (Stereoderma miniata) *vivent dans les anfractuosités des roches, fuyant la lumière.*

Écologie

A part les *Pelagothuria*, certains Élasipodes pélagiques et quelques *Stichopodidae*, les holothuries sont des Animaux benthiques qui rampent sur le fond, s'enfoncent dans le sédiment, s'accrochent fortement aux roches, ou même se hissent sur des coraux branchus. Beaucoup d'entre elles, fuyant la lumière, ont une activité nocturne et mangent la nuit. Les Dendrochirotes se nourrissent de plancton et de particules en suspension; les autres holothuries raclent le sol avec leurs tentacules, avalent le sable, la vase avec les détritus et les micro-organismes qu'ils contiennent, et qui se collent à la substance visqueuse que sécrètent les glandes muqueuses des tentacules; l'un de ceux-ci pénètre dans la bouche, et l'Animal le suce comme le ferait un enfant de son doigt enduit de confiture; il est alors rejeté brusquement, et un autre prend sa place; ces mouvements alternés de succion et de rejet se succèdent sans interruption. Lorsque l'holothurie ingurgite du sable, il n'est pas rare de voir le tentacule sucé se rabattre sur la bouche pour l'obturer, et s'opposer ainsi à la sortie des aliments.

L'holothurie respire par tout le tégument, les tentacules, les podia, mais surtout par les « poumons » chez les espèces qui en possèdent. L'eau qu'ils renferment est, rythmiquement, expulsée brusquement par l'anus; puis, les poumons se remplissent à nouveau par de petites pulsations rapides. Ces organes respiratoires jouent aussi un grand rôle dans la statique de l'holothurie; l'allongement du corps se produit par le relâchement de la musculature et par la pénétration de l'eau dans les poumons, d'où une dilatation de la cavité générale; au contraire si elle est provoquée, l'holothurie rejette toute l'eau de ses poumons, elle rentre ses tentacules, ses podia, contracte ses muscles et se ratatine en prenant la rigidité d'un corps solide. Les poumons servent également d'organes d'évacuation des déchets, sous forme de granules brunâtres, ou de cristaux losangiques qui ressemblent beaucoup à ceux de l'acide urique.

Le tégument et les organes de Cuvier des holothuries sont toxiques, aussi bien pour de petits Animaux que pour des Crustacés ou de petits Poissons. Les diverses toxines, variables selon les espèces, ont reçu le nom général d'holothurines. Une bouillie noirâtre d'*Holothuria atra*, répandue dans les cuvettes ou dans des eaux calmes, étourdit les Animaux qui, plus ou moins anesthésiés selon leur taille, n'opposent plus aucune résistance à leur capture à la main. Une trentaine d'holothuries de l'aire indo-pacifique servent à la confection du trépang, mets fort prisé des Orientaux qui lui attribuent des propriétés aphrodisiaques dues, peut-être, à la présence de ces holothurines.

Les holothuries hébergent de très nombreux parasites et commensaux : Protozoaires ciliés et Diatomées dans les poumons, Grégarines dans le liquide cœlomique, Métazoaires enfoncés dans la peau des Synaptes. Les Mollusques *Stylifer*, logés à l'intérieur ou sur la peau, présentent souvent un haut degré de dégradation. Des Polychètes et de petits Pycnogonides, revêtant souvent la livrée de leur hôte, s'abritent entre les verrucosités dorsales des Aspidochirotes. Des Copépodes et autres Crustacés s'insinuent dans le cloaque, l'œsophage. Le commensal le plus inattendu est un Poisson, mince et étroit, du genre *Carapus*, d'environ 15 cm de long, qui vit dans les poumons des grandes espèces, et ne quitte son hôte que pour se nourrir, la nuit, de petits Crustacés.

Les holothuries se répartissent en trois sous-classes : *Dendrochirotacea, Aspidochirotacea, Apodacea.*

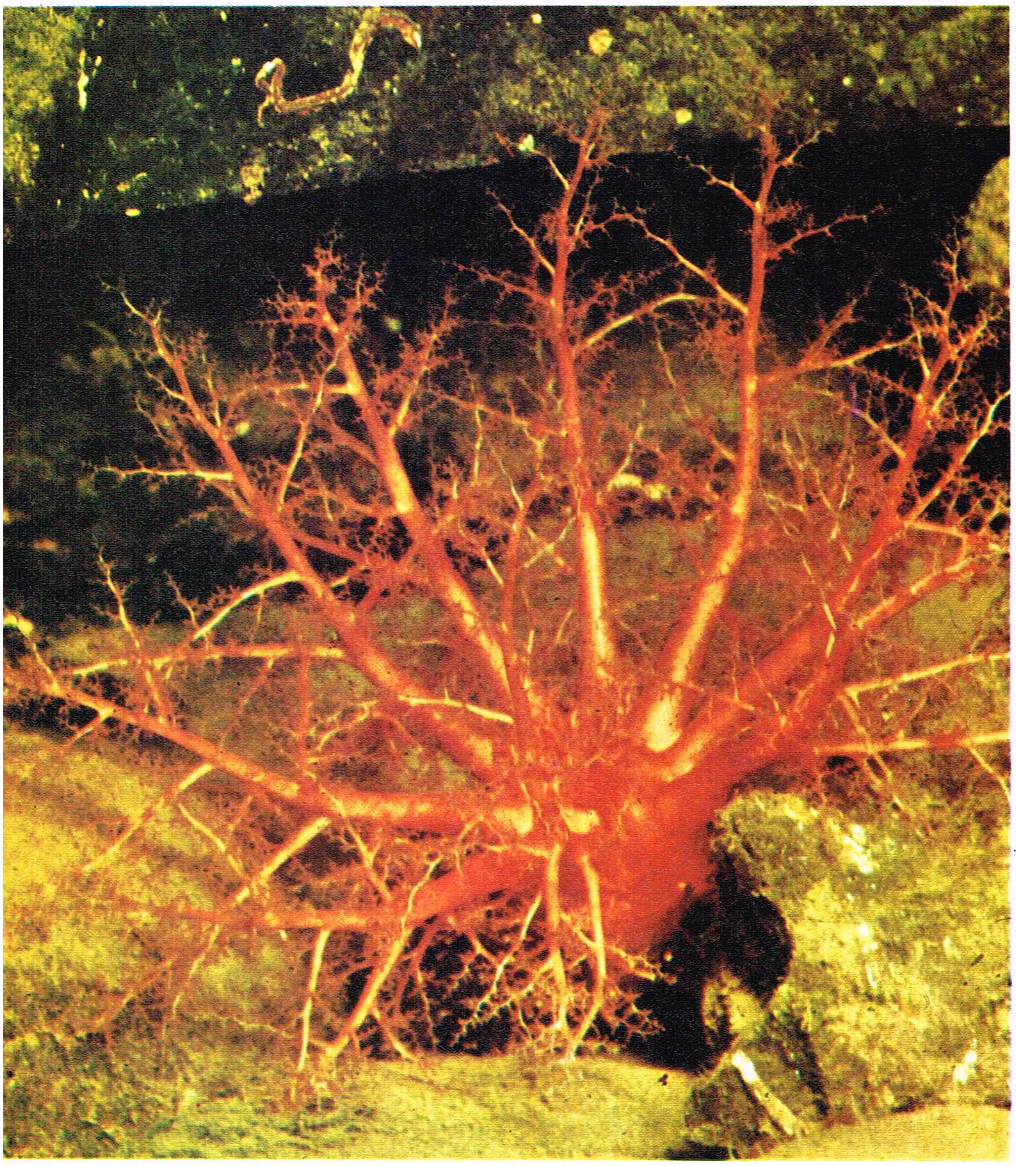

J.H. Tashjian

Sous-classe des Dendrochirotes

Les Dendrochirotes *(Dendrochirotacea)* se divisent en deux ordres : *Dendrochirotida* et *Dactylochirotida*.

Ordre des Dendrochirotida

Les Dendrochirotida se reconnaissent à leurs dix à trente tentacules arborescents, lesquels sont dépourvus d'ampoules tentaculaires. Le tégument est lisse, sauf chez les Psolidae, où il peut être recouvert de plaques calcaires imbriquées. Les podia sont répartis sur les radius, mais aussi parfois dispersés sur les interradius *(Thyone, Phyllophorus)*. La couronne calcaire est formée de radiales et d'interradiales entières, ou constituées de petites pièces assemblées en mosaïque; elle est simple ou prolongée postérieurement par des

processus de longueur variable. Les muscles radiaires sont simples, ainsi que les muscles rétracteurs du pharynx. Les gonades se disposent en deux touffes de chaque côté du mésentère dorsal. Les poumons sont bien développés, mais il n'existe jamais de tubes de Cuvier. Le mésentère de la boucle inférieure de l'intestin est situé dans l'interradius ventral droit ou gauche. Les spicules du tégument prennent les formes les plus variées : grandes plaques et boutons lisses ou noduleux, délicates corbeilles, ellipses fenestrées, tourelles à deux ou quatre piliers.

L'ordre comprend les principales familles Cucumariidae, Colochiridae, Psolidae, Thyonidae, toutes à dix tentacules, Sclerodactylidae (dix à vingt tentacules), Phyllophoridae (quinze à trente tentacules répartis en plusieurs cercles).

Ocnus planci, de la famille **Cucumariidae,** belle espèce brun-rouge à cinq radius saillants, est abondante partout sur les côtes de France; *Ocnus montagui* vit dans les anfractuosités des rochers des côtes bretonnes, tandis que la petite *Ocnus lactea* se trouve souvent à l'intérieur des grosses Éponges.

Les **Colochiridae** sont surtout communs dans les eaux tropicales, mais deux espèces, *Trachythyone tergestina* et *T. elongata,* au corps incurvé en V plus ou moins ouvert, existent en Méditerranée.

Les **Psolidae,** à face dorsale couverte de grandes plaques imbriquées, dont l'anus et la bouche, situés au sommet d'éminences coniques, sont souvent fermés par des valves, rappellent certaines ascidies; *Psolus phantapus* et *Psolus valvatus* sont des espèces boréales; *Psolidium complanatum,* du golfe de Gascogne, se reconnaît à la présence de podia logés entre les plaques de la face dorsale.

Parmi les espèces européennes de la famille **Sclerodactylidae,** signalons *Pseudothyone raphanus,* à corps effilé, incurvé, dont les podia sont répartis sur tout le corps, sauf sur la petite queue qui le termine.

Les **Thyonidae** sont couverts de podia, et les radius sont souvent peu ou pas discernables; la couronne calcaire est prolongée par de longues queues radiaires, l'ensemble étant fait d'une mosaïque de petites pièces; *Thyone fusus* est très répandu en Méditerranée, alors que *Havelockia inermis* y est assez rare.

Les **Phyllophoridae** portent de quinze à trente tentacules, disposés en deux ou trois cercles alternés autour de la bouche, au corps couvert de podia; ils ont une couronne calcaire simple, mosaïquée, ou pourvue de queues radiaires; *Neopentadactyla mixta* est très répandue sur les côtes occidentales d'Europe, *Phyllophorus urna,* en Méditerranée.

Ordre des Dactylochirotida

Les Dactylochirotida diffèrent de l'ordre précédent *(Dendrochirotida)* en ce que leurs huit à trente tentacules ne sont pas ramifiés, mais simplement digités, et en ce que leur corps est couvert de petites plaques imbriquées. La couronne calcaire est simple, sans prolongements postérieurs. On compte principalement trois familles : **Rhopalodinidae** (très incurvés ou en forme de bouteille à long goulot étroit), **Ypsilothuriidae** (*Ypsilothuria talismani,* de l'Atlantique) et **Vaneyellidae.**

Sous-classe des Aspidochirotes

Les Aspidochirotes *(Aspidochirotacea)* ont généralement la forme de gros boudins, leurs podia sont alignés sur les radius ou disposés sur tout le corps. Les tentacules, au nombre de vingt à trente, sont peltés et pourvus de longues ampoules tentaculaires, sauf chez les Synallatidae. Il n'y a pas de muscles rétracteurs du pharynx; chaque muscle longitudinal est simple ou bifide. Les gonades se composent d'une unique touffe de tubes attachée à l'interradius ventral droit, de deux touffes chez les Stichopodidae de part et d'autre de ce mésentère; dans cette dernière famille, le trivium est aplati en une sole ventrale qui accentue la nette symétrie bilatérale des Aspidochirotes. Les spicules sont des tourelles, des boutons, des trépieds aux fines ramifications. Les Aspidochirotes se divisent en deux ordres : *Aspidochirotida* et *Elasipodida*.

A. Margiocco

▲ ***Éleuthérozoaires vermiformes, les holothuries* (Ocnus planci) *rampent sur un de leurs côtés appelé* trivium.**

Ordre des Aspidochirotida

Les Aspidochirotida, comme *Holothuria tubulosa*, des côtes d'Europe, ont des organes respiratoires et le mésentère de la boucle postérieure de l'intestin attaché à l'interradius droit; *H. mammata*, de Méditerranée, possède des tubes de Cuvier; *H. forskali* est une espèce molle aux podia blancs tranchant sur le tégument vert foncé; *Stichopus regalis* a le corps aux flancs aplatis, bordés d'une frange de grosses papilles.

Ordre des Elasipodida

Les Elasipodida forment un groupe d'holothuries d'eau profonde, d'aspect bizarre et varié. Leurs corps est muni d'une sole ventrale, aplatie, et très distincte de la face dorsale bombée; celle-ci est pourvue de papilles coniques très grandes (*Oneirophanta mutabilis,* de l'Atlantique), et le corps est souvent frangé d'un voile permettant une nage active au-dessus du fond (*Benthodytes typica,* des îles Canaries et des Açores). Les **Psychropotidae** sont munis d'une énorme queue, aussi longue que le corps lui-même, sorte de panache qui s'élève au-dessus de l'Animal quand il se déplace. Quelques rares espèces, comme *Pelagothuria bouvieri,* de l'Atlantique, sont pélagiques et peuvent être facilement confondues avec des méduses. Les Élasipodides n'ont pas de poumons.

▼ ***Les Holothurides présentent un tégument épais, coriace, sur lequel les corpuscules calcaires, ou spicules, sont nombreux.***

A. Margiocco

A. Margiocco

▶ *La couleur des étoiles de mer est souvent très vive, comme on peut le voir chez cet* **Echinaster sepositus.**

Sous-classe des Apodes

Les Apodes *(Apodacea)* ont des tentacules simples, digités ou pinnés. Les podia sont absents, ou présents sous forme de papilles anales. On n'observe pas d'introvert ni de muscles rétracteurs. Les spicules se présentent sous forme d'ancres reposant sur des plaques anchorales, de baguettes fusiformes, de roues et de corps sigmoïdes. Les Apodes se divisent en Apodida et en Molpadida.

Ordre des Apodida

Les Apodida au corps cylindrique, vermiforme, sont entièrement dépourvus de podia, n'ont ni organes respiratoires ni papilles anales; leurs spicules sont essentiellement des ancres et des plaques. Sur les côtes d'Europe, *Labidoplax digitata* et *Leptosynapta inhaerens* vivent enfoncées dans la vase ou dans le sable grossier; la minuscule *Leptosynapta minuta,* originaire de la mer du Nord, se trouve également en Méditerranée, dans le sable à amphioxus. *Myriotrochus rincki,* espèce boréale, a des spicules en forme de roue.

Ordre des Molpadida

Les Molpadida, à corps fusiforme pourvu d'un étroit prolongement caudal (*Molpadia musculus*, de Méditerranée), possèdent des organes respiratoires, et l'anus est entouré de quelques papilles; les spicules du tégument, qui ne prennent jamais la forme d'une roue, sont des tourelles à haute flèche, à base toujours largement perforée, des plaques spatulées, ceux de la queue étant de longs bâtonnets perforés au centre.

STELLÉRIDES

Les Stellérides *(Stelleroidea),* ou étoiles de mer, se présentent comme des êtres à cinq bras disposés régulièrement en étoile autour d'un disque qui renferme les organes essentiels de l'Animal. Mais le nombre de bras peut atteindre la cinquantaine chez des espèces exotiques ou abyssales; ils peuvent être étroits et très longs, entourant un disque très réduit *(Brisinga)* ou, au contraire, devenir très larges et très courts jusqu'à faire prendre à l'Animal une forme pentagonale, voire globuleuse *(Culcita).* La face dorsale du disque et des bras est nue, couverte de granules, de longs piquants, de petits piquants groupés ou non en. paxilles, ou d'énormes tubercules coniques *(Oreaster).* Mais quels que soient leur aspect et leur ornementation, tous ces Animaux sont construits selon un même plan, avec des variantes plus ou moins importantes selon les groupes.

L'Animal rampe sur sa face ventrale; la bouche est située dans une dépression centrale. De cette bouche partent cinq gouttières radiaires qui se prolongent jusqu'à l'extrémité des bras, où s'alignent des podia sur deux ou quatre rangs, podia pourvus ou non de ventouses. L'intérieur de chaque gouttière est pavé de plaques ambulacraires, percées pour le passage du canal qui relie les podia à leur vésicule interne; des plaques adambulacraires la bordent des deux côtés; elles portent plusieurs petits piquants mobiles, capables de se rabattre sur elles pour protéger les podia. Près de la bouche, ce squelette se modifie; les dernières plaques ambulacraires et adambulacraires forment deux grosses pièces accolées, bordées de piquants, les *dents.*

Ainsi la bouche est pourvue de cinq dents qui ne servent pas à la mastication, mais jouent un rôle protecteur et aident à l'ingestion des proies. Sur les côtés des bras, des plaques inframarginales et supramarginales sont souvent munies de granules ou de piquants.

Théoriquement, le côté dorsal du disque est composé d'une plaque centro-dorsale entourée d'un cercle de plaques polygonales, cinq radiales et cinq interradiales primaires. De nombreuses petites plaques s'intercalent dans ce système, couvrent le reste du disque, et séparent les plaques marginales des bras par des lignes médianes constituées de plaques radiaires secondaires. Entre les plaques du disque, sur la face ventrale ou dorsale des bras, se trouvent des orifices où passent de petits tubes en doigt de gant, les *papules,* expansions de la paroi interne, à fonction respiratoire. Les papules manquent chez les Porcellanasteridae, où leur rôle est joué par des organes cribriformes faits de lames vibratiles disposées comme les feuilles d'un livre, et intercalées en petit nombre entre les plaques marginales de la base des bras. L'une des plaques du disque, dite madréporique, plus grande que les autres et toujours située dans un interradius, est constituée par de fines lamelles verticales, criblées de trous microscopiques, disposées comme les rayons d'une roue ou comme les septes d'un madrépore. Parfois, presque au milieu du disque, se trouve un minuscule anus situé, lui aussi, en position interradiaire. La présence du madréporite crée, en plus de la symétrie radiaire, une symétrie bilatérale : l'Animal peut être partagé en deux moitiés égales, selon un plan passant par le milieu du madréporite et du bras opposé à celui-ci. Souvent, les pièces squelettiques du disque et des bras sont cachées par une peau noduleuse, épineuse ou lisse. Chez les Astropectinidae, chaque plaque porte une *paxille,* petite colonne érigée, et terminée par un ou plusieurs petits piquants mobiles.

Comme les Échinides, bien des astéries possèdent des *pédicellaires* situés en divers endroits du corps. On distingue des pédicellaires valvulaires, directement articulés sur le test, des pédicellaires en salière, dont les deux valves se rabattent dans de petites logettes, des pédicellaires droits et des pédicellaires croisés; ceux-ci sont disposés en nombre considérable sur les piquants d'espèces européennes, telle *Marthasterias glacialis.*

La bouche de l'étoile de mer est percée au centre d'une membrane péristomienne; elle est munie d'un sphincter et simplement entourée des piquants des dents. Il en part un large et court œsophage, qui débouche dans un vaste estomac divisé par une constriction circulaire en deux compartiments, oral et aboral. Un très court intestin est suivi d'un rectum, s'ouvrant au dehors par un minuscule anus généralement non fonctionnel; il n'y a ni intestin, ni anus chez les Porcellanasteridae et les Luidiidae; quelques Astropectinidae ont un intestin, mais pas d'anus. La partie dorsale de l'estomac émet cinq diverticules, les cæcums brachiaux, qui bifurquent et s'étendent dans les bras jusqu'aux trois quarts de leur longueur; leurs parois, très plissées, présentent une surface considérable; seuls, les produits solubles de la digestion pénètrent dans ces cæcums, riches en acides aminés mis en réserve sous forme d'albumine pour servir, le moment venu, à la formation des produits sexuels.

Il y a cinq paires de gonades; ce sont des glandes massives, localisées à la base des bras, ou de petits cordons de petites glandes, échelonnées sur les deux côtés des bras; elles débouchent à l'extérieur par un ou plusieurs orifices situés dans les angles interradiaires.

L'*appareil aquifère,* conforme dans l'ensemble au plan général des Échinodermes, présente deux particularités intéressantes, dont l'une se rencontre chez quelques espèces d'Échinides et chez la plupart des Holothurides. L'anneau oral, d'où sortent cinq canaux radiaires qui occupent le fond des gouttières ambulacraires et alimentent les podia, porte quatre vésicules de Poli, chacune logée entre deux bras, grosses vessies piriformes appendues par un long pédoncule creux; elles jouent un rôle équilibrateur du système ambulacraire en se gonflant et en se vidant d'eau.

Dans chaque interradius, sur le côté interne du canal ambulacraire, sont disposées deux petites masses irrégulières, appelées *corps de Tiedemann,* faites de tubes groupés fortement colorés, organes à sécrétion interne, analogues sans doute à la glande axiale des Crinoïdes.

Très complexe, le *système hémal* est fait de lacunes creusées dans du mésenchyme; il se compose essentiellement d'une lacune orale, de cinq lacunes radiaires d'où partent des lacunes transverses et pédieuses; d'une lacune aborale et de cinq lacunes génitales; d'une lacune axiale qui donne le plexus lacunaire de la *glande brune;* celle-ci, creusée de cavités séparées par des cloisons de tissu conjonctif, riche en amibocytes, exerce sans doute une fonction excrétrice.

Le *système nerveux,* peu différencié, aux cellules éparses, est remarquablement diffus. Cependant, on distingue deux systèmes : l'un, ectoneural, sensitivo-moteur, fait d'un anneau péribuccal d'où partent cinq troncs nerveux, un pour chaque bras, occupant le fond des rainures ambulacraires; l'autre, hyponeural, représenté par cinq rubans qui se réunissent en étoile au

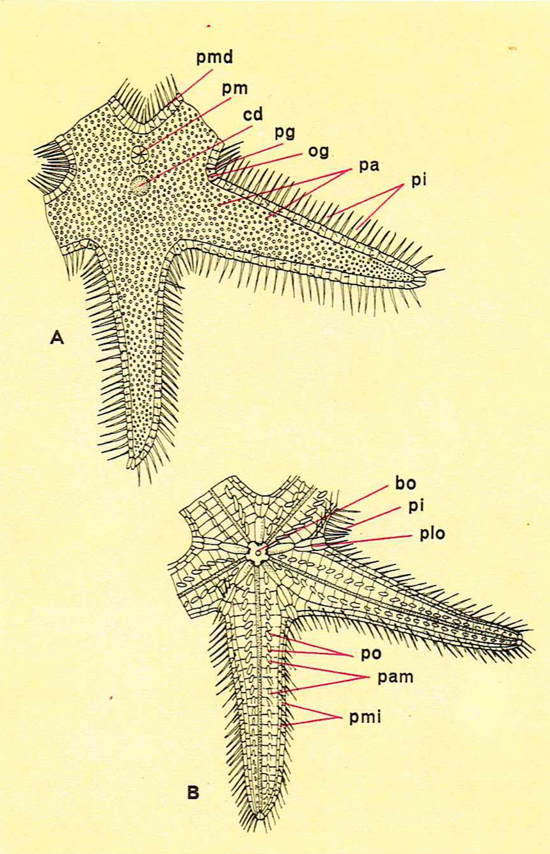

◀ ***Schémas des diverses structures internes de l'étoile de mer* Astropecten aurantiacus, *vue par la face aborale (A) et par la face orale (B) : pmd, plaques marginales dorsales; pm, plaque madréporique; cd, centre dorsal; pg, plaque génitale; og, orifice génital; pa, paxilles; pi, piquants; bo, bouche; plo, plaques orales; po, podia; pam, plaques ambulacraires; pmi, plaques marginales inférieures.***

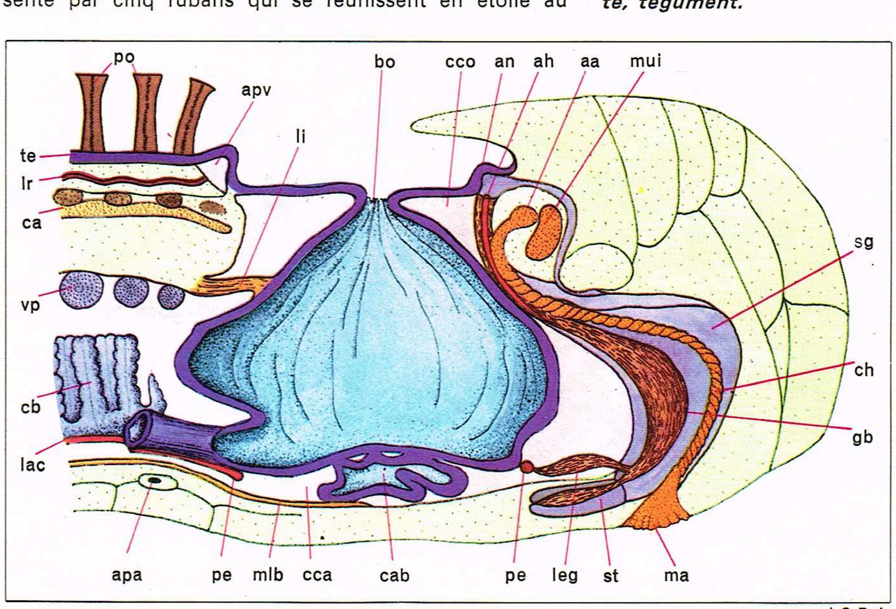

▼ ***Coupe sagittale d'une astérie : po, podia; apv, anneau périhémal ventral; li, ligament; bo, bouche; cco, cavité cœlomique orale; an, anneau nerveux oral; ah, anneau hémal oral; aa, anneau ambulacraire oral; mui, muscle interradial; sg, sinus glandulaire; ch, canal hydrophore; gb, glande brune; ma, madréporite; st, sinus terminal, leg, lacune efférente de la glande brune; pe, coupe du pentagone hémal; cab, cæcum aboral; cca, cavité cœlomique aborale; mlb, muscle longitudinal du bras; pe, pentagone hémal; apa, anneau périhémal aboral; lac, lacune absorbante des cæcums brachiaux; cb, cæcums brachiaux; vp, vésicule pédieuse; ca, canal ambulacraire radiaire; lr, lacune hémale radiale; te, tégument.***

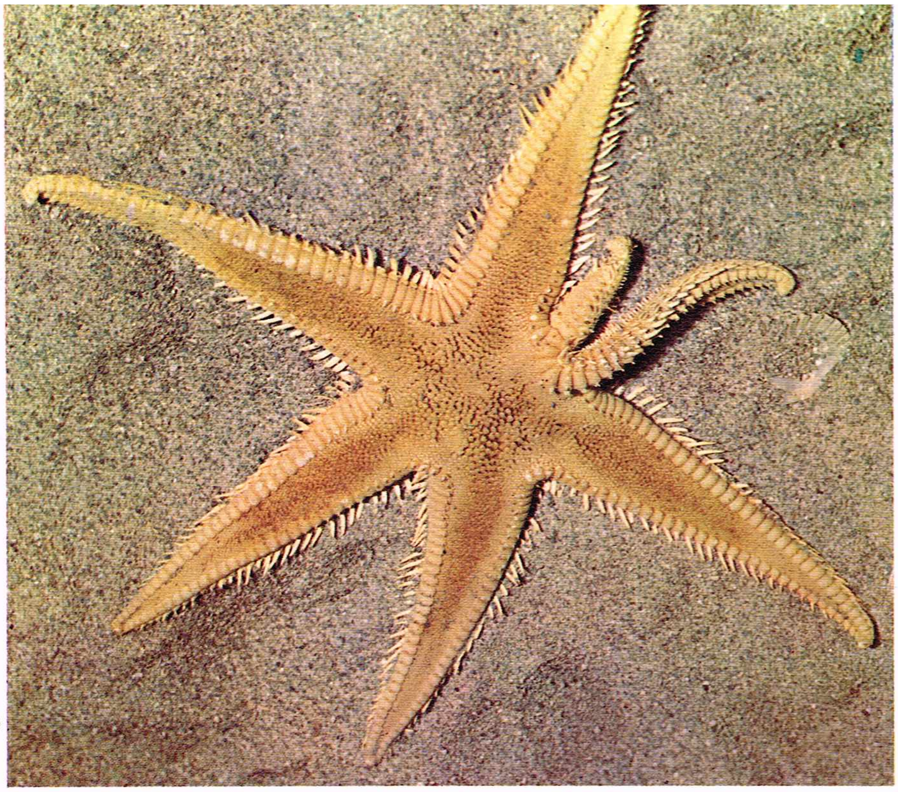

A. Margiocco

▲ *Régénération chez* **Astropecten sp.**

▼ *Coupe à travers un bras d'une astérie, passant par une paire de podia (po) : cnr, cordon nerveux radiaire recouvrant le sinus hyponeural; cnm, cordon nerveux marginal recouvrant le sinus marginal; ca, canal ambulacraire radiaire; pa, papule; ce, cœlome brachial; cb, cæcums brachiaux; la, lacune absorbante; mu, muscle longitudinal du bras; cv, cavité intertégumentaire; go, gonades; spg, sinus périgonadique; cam, canal du sinus marginal et de la cavité intertégumentaire.*

centre de la paroi dorsale, et innervent les organes génitaux.

Les *organes des sens,* sauf un, sont aussi peu développés que différenciés. Des cellules neuro-sensorielles sont dispersées sur toute la surface du corps et connectées à un plexus nerveux sous-épidermique; elles sont particulièrement abondantes sur toute la face dorsale, sur le disque des podia, à la base des piquants et des pédicellaires, dans la région ambulacraire, sur les côtés et la face orale du tentacule terminal brachial, ce dernier, à fonction probablement tactile, portant à sa base une tache rouge située sur une saillie; elle est formée de nombreuses cupules pigmentées, dont la cavité renferme une gelée incolore, sorte de corps vitré. L'ensemble, recouvert d'une membrane sous laquelle on voit souvent un pseudo-cristallin, est relié à un système de neurofibrilles en rapport avec le système nerveux central. Cet organe photo-récepteur ne semble cependant percevoir ni la forme, ni les mouvements des objets, mais seulement les différences d'éclairement, également perçues par les podia et la face dorsale de l'Animal.

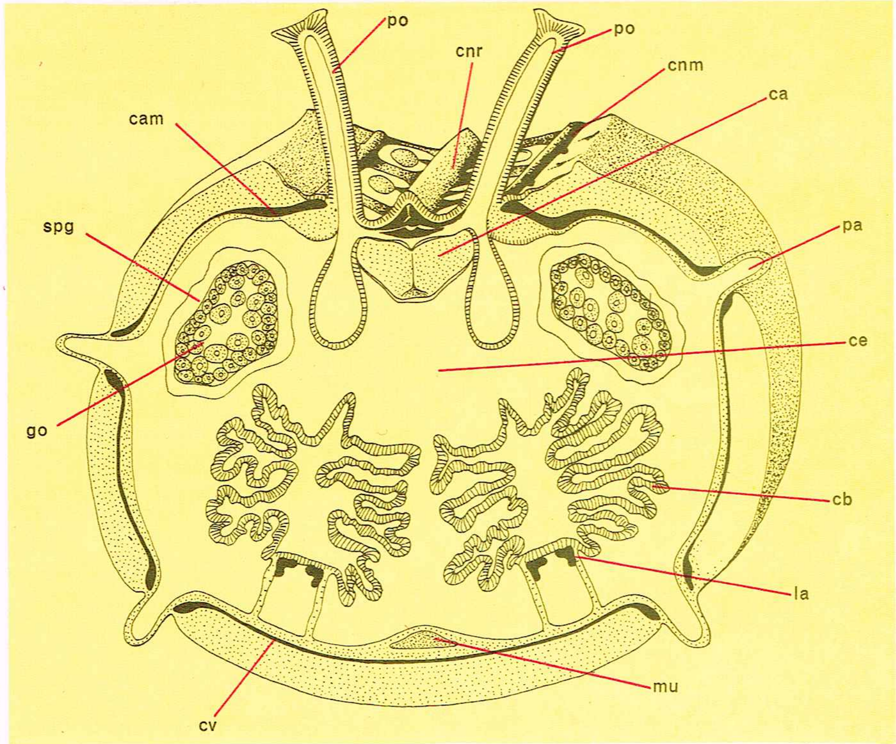

I.G.D.A.

Reproduction

Aucun signe extérieur ne permet de distinguer les sexes. Chez la plupart des Stellérides, la reproduction est externe. Les œufs, fécondés, donnent d'abord une larve ciliée nageuse, la *bipinnaria,* qui se transforme en *brachiolaria.* Elle ne diffère de la première que par l'acquisition d'un appareil fixateur, constitué de trois longs tubes et muni de papilles et d'une ventouse adhésive qui fait saillie au milieu de la base des tubes. La *brachiolaria* se métamorphose graduellement en une étoile parfaitement constituée. Chez d'autres astéries, telle *Asterina gibbosa,* les gros œufs, rouge à orangé, sont collés côte à côte sur les pierres par leur enveloppe gélatineuse; la larve qui en éclôt n'est plus nageuse, mais rampe sur le fond à l'aide d'une énorme ventouse, le lobe préoral; la petite astérie se forme en même temps que l'organe larvaire subit une atrophie progressive. Le développement d'autres espèces d'eau froide s'effectue sur le corps de la mère; les œufs séjournent dans une cavité incubatrice, formée sur le dos du disque et des bras, ou par les paxilles, les piquants rabattus pour constituer une sorte de panier, une membrane soutenue par ces piquants *(Leptasterias)*; parfois, les jeunes sont fixés à la face ventrale par un pédoncule, ou élevés dans les diverticules de la première partie de l'estomac *(Asterias groenlandica)*. *Henricia sanguinolenta* soulève son disque, et rapproche ses bras pour constituer une sorte d'abri incubateur. Quelques espèces sont hermaphrodites, avec ou sans autofécondation. La reproduction asexuée est très répandue; *Coscinasterias tenuispina,* espèce méditerranéenne ayant de six à neuf bras, se coupe en deux par une section médiane en travers du disque, les deux moitiés régénérant un Animal entier en quelques semaines. Chez les *Linckia,* l'étoile se sépare d'un ou de plusieurs bras près du disque; ceux-ci bourgeonnent de nombreux mamelons qui régénèrent un disque et des bras, l'Animal passant par une forme typique en comète.

Écologie

Les étoiles de mer habitent toutes les mers, aussi bien le long des côtes que dans les abysses. Elles vivent sur ou sous les rochers, les Algues, plus ou moins enfoncées dans le sable ou la vase. La plupart sont carnivores, s'accommodant de toutes sortes d'aliments, morts ou vivants, Crustacés, Échinodermes, Poissons, Cœlentérés, et surtout de Mollusques. *Asterias rubens* enserre une moule ou une huître avec ses bras, et, par des tractions continues des podia qui tirent en sens inverse, écarte les valves, dévagine son estomac, et l'introduit dans le bivalve. *Marthasterias glacialis* s'attaque aux gros oursins. Des espèces aux podia dépourvus de ventouse absorbent en grand nombre de petites corbules *(Astropecten africanus)* ou des coquilles pouvant dépasser six centimètres *(Luidia)*. D'autres se nourrissent de particules microscopiques qui sont agglutinées par du mucus et transportées vers la bouche par les courants des rainures ambulacraires et les mouvements des podia.

De nombreux commensaux et parasites infestent les astéries : Protozoaires Ciliés, Cténophores, Copépodes, Anatifes, Amphipodes, les Annélides Polychètes *Achloe astericola* et *Harmathoe lunulata,* circulant dans les gouttières ambulacraires des *Astropecten* et des *Luidia,* mais aussi surtout des Mollusques des genres *Thyca, Melanella, Stylifer;* ils présentent des signes de dégénérescence très prononcés, n'ont pas de radule, et vivent la trompe enfoncée dans le tégument de l'hôte.

Les Stellérides se divisent en deux sous-classes : *Somasteridea* et *Asteroidea.*

Sous-classe des Somasteridea

Les Somasteridea forment un groupe archaïque d'étoiles fossiles disparues à l'Ordovicien, sauf une espèce, *Platasterias lateradiata,* de la côte ouest de l'océan Pacifique, considérée comme un fossile vivant. Ce sont des Animaux plats à petit disque, aux bras pétaloïdes resserrés à la base, dont le squelette forme des axes transverses; les podia sont dépourvus de ventouse, il n'y a ni pédicellaires, ni anus, et le madréporite est marginal.

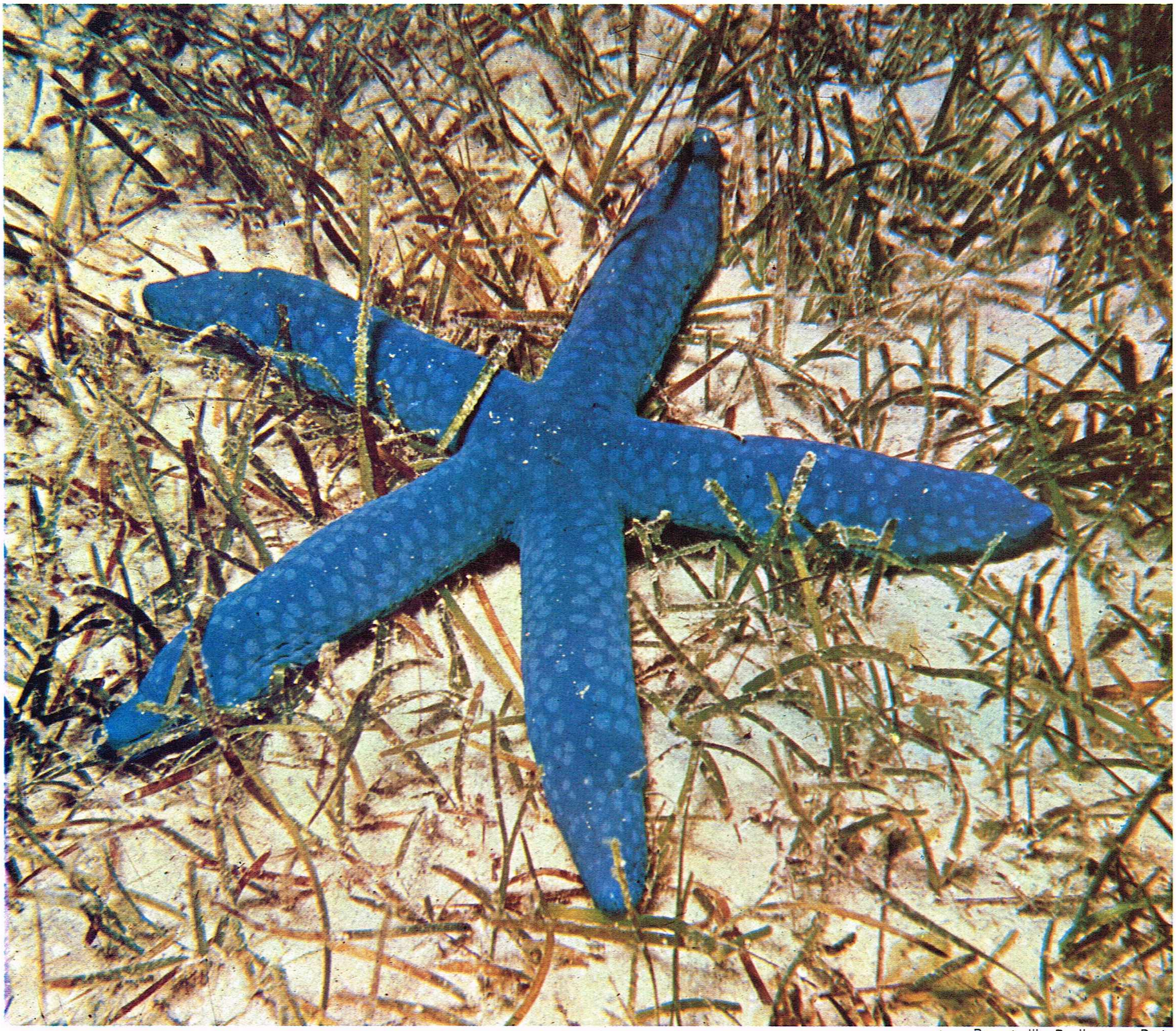

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ **Linckia laevigata,** ***belle étoile de mer aux longs bras cylindriques, habite les mers bordant le Queensland (Australie).***

Sous-classe des Asteroidea

Les Asteroidea comprennent cinq ordres : *Platyasterida* (fossiles), *Phanerozonida, Spinulosida, Euclasterida* et *Forcipulatida*.

Ordre des Phanerozonida

Les Phanerozonida sont caractérisés par deux rangs de plaques marginales très apparentes, bordant les cinq bras et le disque ; la face dorsale est souvent couverte de paxilles, entre lesquelles s'insèrent des papules ; les podia, disposés en deux rangs, sont pourvus ou non de ventouse ; les pédicellaires, quand ils existent, sont du type pectiné ou valvulaire.

Les espèces du sous-ordre *Cribellosina* renferment des espèces d'eau profonde *(Porcellanaster sladeni)* aux organes cribriformes, aux podia sans ventouse, mais dépourvues d'intestin et d'anus.

Celles du sous-ordre *Paxillosina* possèdent le plus souvent un intestin et un anus, mais sont dépourvues d'organes cribriformes, à l'exception des **Goniopectinidae** qui, semblables d'aspect aux *Cribellosina,* en ont de rudimentaires, et sont pourvues d'un intestin et d'un anus. L'une des familles les plus importantes de l'ordre, les **Astropectinidae,** renferme un nombre considérable d'espèces au corps bordé de plaques marginales très développées, couvertes de piquants ou de granules *(Astropecten aurantiacus, A. irregularis),* rarement nues. Les **Luidiidae** en diffèrent par leurs longs bras étroits bordés de piquants, l'absence de plaques marginales dorsales, remplacées par une rangée de paxilles (*Luidia ciliaris, L. sarsi,* des côtes de France).

Le sous-ordre *Notomyotina* n'est connu que par la seule famille **Benthopectinidae,** Animaux d'eau profonde à bras étroits, flexibles, bordés de plaques ovales épineuses ; les podia possèdent une petite ventouse. Elle se différencie des autres familles par deux bandes musculaires qui s'étendent du commencement à l'extrémité des bras, si bien que ceux-ci peuvent se mouvoir tant dans un plan horizontal que vertical *(Benthopecten armatus, Pontaster tenuispinus)*.

Le sous-ordre *Valvatina* comprend le reste des familles dont les podia se terminent habituellement par une ventouse ; l'une des plus importantes, les **Goniasteridae,** se compose d'Animaux au corps pentagonal, bordé de plaques épaisses et couvertes de granules ; le squelette dorsal est formé de grandes plaques polygonales granuleuses, entre lesquelles se montrent des papules isolées *(Ceramaster placenta)*. Les **Oreasteridae** sont

D. Faulkner

▲ ***Protoreaster nodosus**, des mers de Nouvelle-Calédonie, dont le disque et les bras portent d'énormes tubercules coniques.*

des espèces tropicales, à squelette réticulé, dans les mailles duquel se trouvent des aires papulaires; les bras peuvent être bien développés, et porter, ainsi que le disque, d'énormes tubercules coniques *(Oreaster nodosus, Protoreaster lincki)* ou pratiquement absents, l'Animal prenant l'aspect d'un pentagone très bombé, recouvert seulement de granules *(Culcita schmideliana)*. Les **Linckiidae**, famille également tropicale, ont un petit disque, de longs bras cylindriques flexibles, des plaques marginales réduites et peu visibles, une surface lisse ou verruqueuse *(Linckia laevigata, L. multifora)*. La famille **Poraniidae** est représentée, en Europe, par *Porania pulvillus* et *Poraniomorpha hispidus*.

Ordre des Spinulosida

L'ordre des Spinulosida, très proche des Phanerozonida, s'en distingue par des plaques marginales généralement peu visibles. Les faces ventrale et dorsale sont couvertes d'épines, groupées parfois en pseudo-paxilles; les podia, munis d'une ventouse, sont répartis en deux rangées; les papules sont visibles souvent sur les deux faces, et les pédicellaires sont rarement présents. Sur nos côtes, la famille **Asterinidae** est représentée par deux espèces très communes : *Asterina gibbosa,* aux bras peu développés, *Anseropoda membranacea,* au corps pentagonal mince et aplati.

Echinaster sepositus et *Henricia sanguinolenta,* au petit disque pourvu de cinq longs bras arrondis, portent, la première, des papules localisées sur la face dorsale, la seconde, sur les deux faces; elles appartiennent à la famille **Echinasteridae.**

La famille **Acanthasteridae** est connue, dans les eaux tropicales, par *Acanthaster planci,* espèce à quinze bras pouvant atteindre trente centimètres de diamètre couverte d'une forêt de forts piquants pointus lui ayant valu la dénomination de « coussin de belle-mère »; cette astérie, d'une voracité extraordinaire, détruit les récifs coralliens en broutant les parties molles des Madrépores.

Crossaster papposus, dit « crachat d'amiral », espèce circumboréale, appartient à la famille **Solasteridae;** c'est un splendide Animal rouge vif, parfois parsemé de taches vertes, à qui ses dix à quatorze bras, en forme de triangle allongé, donnent l'aspect d'un soleil conventionnel.

Les **Pterasteridae,** ou étoiles-coussins, ont une membrane étendue sur toute la face dorsale en une sorte de tente, formant chambre incubatrice, et soutenue par des piquants très fins, où les jeunes se développent; chez *Hymenaster pellucidus,* cette tente est mince et transparente, alors qu'elle est épaisse et opaque chez *Pteraster militaris.* Récemment, deux fossiles vivants de la famille **Sphaerasteridae,** réputée éteinte, ont été découverts : *Podosphaeraster polyplax,* en mer de Chine; *P. thalassae,* dans le golfe de Gascogne.

R. Maltini - P. Solaini

▶ ***Asterina gibbosa,** ou étoile de mer bossue, est une espèce européenne commune d'Asterinidae, aux bras peu développés.*

A. Margiocco

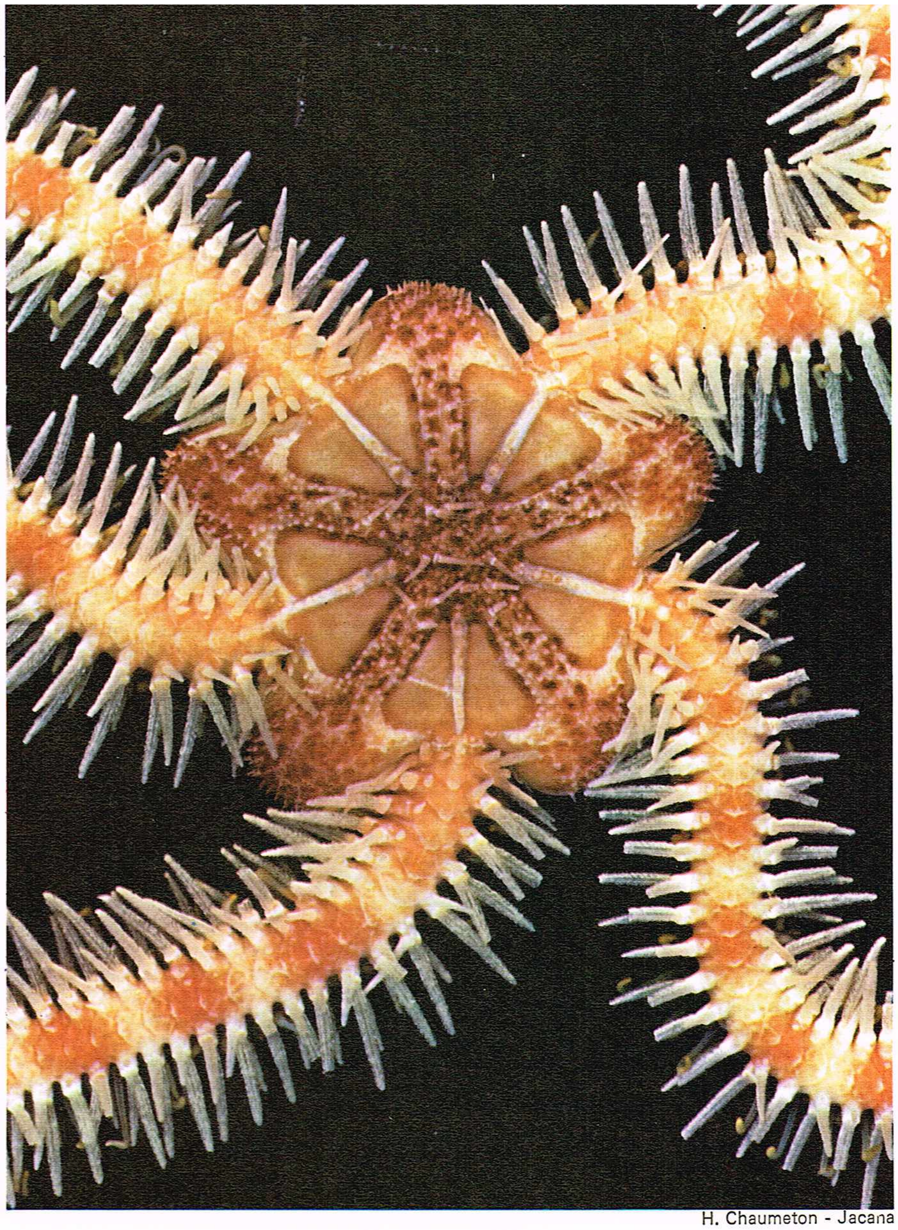

H. Chaumeton - Jacana

▲ **Ophiotrix fragilis,** ***des côtes européennes, appartient à la grande famille des Ophiothricidae dont les piquants brachiaux, caractéristiques, sont hyalins, très grands et denticulés.***

◀▲ **Coscinasterias tenuispina** ***possède de six à neuf bras étroits armés de piquants longs et fins.***

Ordre des Euclasterida

L'ordre des Euclasterida comprend des espèces aux bras nombreux, longs et délicats, attachés à un disque très petit; les plaques marginales sont à peine visibles, les plaques brachiales forment des arceaux transversaux successifs; il y a généralement un anus, des podia avec ventouse et de minuscules pédicellaires croisés. Les bras de l'européenne *Brisingella coronata* peuvent atteindre cinquante centimètres de long.

Ordre des Forcipulatida

L'ordre des Forcipulatida diffère du précédent par la présence de grands pédicellaires croisés, dits forcipiformes. La plupart des espèces possèdent un disque de taille modérée, des bras arrondis, effilés, à squelette dorsal formé d'ossicules tantôt grands et disposés en rangées longitudinales, tantôt petits et arrangés en réseau irrégulier.

Chez la grande famille des **Asteriidae,** les aires papulaires sont grandes et garnies de plusieurs papules, les podia quadrisériés, les piquants entourés à leur base d'un grand nombre de pédicellaires que l'on retrouve parfois sur les épines ambulacraires; l'anus est toujours présent, la bouche grande et dilatable. *Marthasterias glacialis,* très répandu sur nos côtes, possède cinq bras robustes, armés de forts piquants coniques disposés sur six à sept rangées longitudinales et entourés, à leur base, de collerettes de pédicellaires croisés; *Coscinasterias tenuispina,* un peu moins commun, présente un aspect similaire; il est plus petit et possède six à neuf bras étroits armés de piquants longs et fins. *Asterias rubens*, comme nous l'avons vu, ravage les bancs d'huîtres et de moules. *Pycnopodia helianthoides,* de la côte ouest des États-Unis, est muni d'une vingtaine de bras dépourvus de squelette dorsal, si bien qu'ils sont mous, très flexibles. Une dizaine de genres d'Asteriidae, à espèces incubatrices, vivent exclusivement dans les eaux antarctiques.

OPHIURIDES

Les Ophiurides *(Ophiuroidea)* ont été longtemps réunies dans la même classe que les Stellérides car, superficiellement, elles leur ressemblent beaucoup. Comme elles, elles sont faites d'un disque central d'où partent cinq bras graciles, simples ou ramifiés, mais qui ne renferment plus aucune dépendance des appareils digestif et génital; leur gouttière ambulacraire, au lieu d'être ouverte, est recouverte d'un pavage de plaques polygonales.

La *face orale* est percée au centre d'une bouche armée d'une sorte d'appareil masticateur. Celui-ci se compose de cinq mâchoires interradiales, faites chacune de deux petites plaques orales, suivies de deux plaques adorales allongées, accolées à une grosse plaque impaire, le *bouclier buccal;* un de ces boucliers, plus grand que les autres, est percé d'un ou de plusieurs pores madréporiques. Les plaques orales et adorales portent, sur leur bord libre, de petites pièces calcaires pointues ou rectangulaires, les papilles buccales qui, chez quelques espèces, peuvent fermer complètement la bouche; le sommet de chaque mâchoire est occupé soit par une pile verticale de dents, soit par plusieurs piles jointives de papilles dentaires. Le reste du disque est couvert, partiellement ou totalement, de petites plaques, ou écailles, nues, ornées d'épines ou de granules.

La *face dorsale* du disque est nue, couverte de granules, de piquants ou d'une peau épaisse et lisse. Lorsque les écailles sont nues, la face dorsale prend l'apparence d'une mosaïque de plaques, parmi lesquelles on distingue

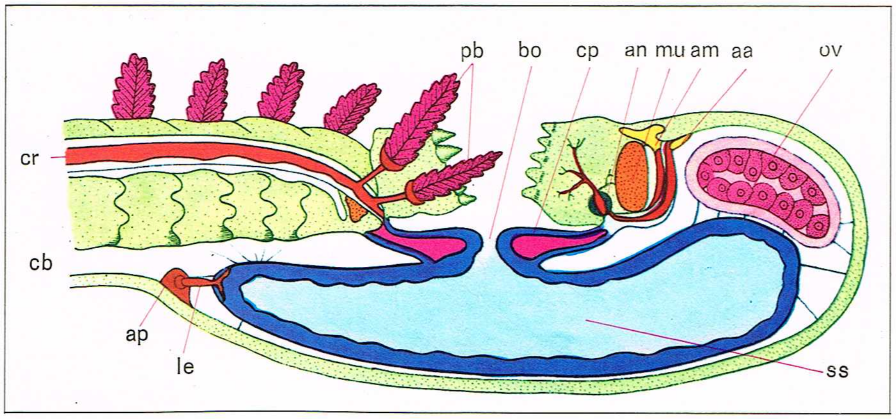

I.G.D.A.

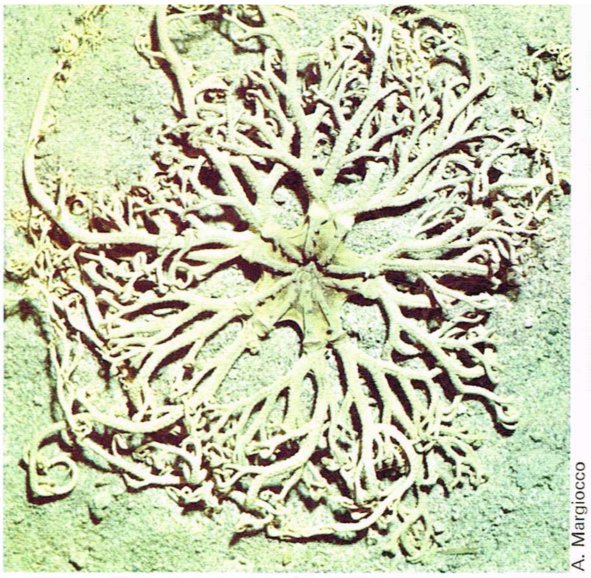

A. Margiocco

▲ *A gauche, coupe sagittale d'un* Ophiotrix, *passant par un des radius et un des interradius : pb, podia buccaux; bo, bouche; cp, cavité péristomiale; an, anneau nerveux; mu, muscle interradiaire; am, ampoule du tube aquifère; aa, anneau ambulacraire; ov, ovaire contourné par le sinus génital; ss, sac stomacal; le, lacune efférente des lacunes absorbantes intestinales; ap, anneau périhémal aboral; cb, cœlome brachial; cr, complexe radiaire; à droite,* Astrophyton muricatum, *Ophiuride aux longs bras sinueux et ramifiés, de l'embouchure de l'Amazone.*

une plaque centro-dorsale, entourée d'un cercle de cinq plaques radiaires; cet arrangement est habituellement perturbé par l'interposition de plaques secondaires, radiaires et interradiaires; de très grandes plaques, les *boucliers radiaires,* sont situées par paires à l'aplomb de chaque bras; ceux-ci, toujours longs par rapport au diamètre du disque, sont formés de très nombreux segments, ou articles, articulés et unis entre eux par une musculature puissante. Chaque article se compose de quatre plaques et d'une pièce centrale, improprement appelée vertèbre, dont chaque face porte des cavités articulaires et des saillies opposées aux saillies et aux cavités des articles adjacents; cet assemblage ne donne aux bras qu'une mobilité horizontale, sauf chez les Euryalae, où les vertèbres sont en joint universel, ce qui permet à l'Animal d'enrouler ses bras autour d'un support. Chaque vertèbre est flanquée de quatre plaques, une ventrale, une dorsale et deux latérales, celles-ci armées d'un certain nombre de piquants couchés ou dressés; leur premier piquant ventral se transforme souvent en hameçon à bords dentés (Ophiothricidae). Chez les Euryalae, des hameçons, extrêmement nombreux et petits, sont souvent disposés en bandes transversales sur les bras. Chez quelques genres des familles Ophiomyxidae et Ophiacanthidae, les hameçons sont remplacés par des grappins groupés en ombrelle. Ventralement, les bras sont parcourus par deux rangées longitudinales de podia dépourvus de ventouses, à raison d'une paire par article; ils émergent entre les plaques ventrales et latérales, et sont habituellement protégés par une ou plusieurs petites écailles tentaculaires; les podia ne participent généralement pas à la locomotion.

Les *organes internes* diffèrent sensiblement de ceux de l'étoile de mer. L'estomac, succédant à un très court œsophage, remplit presque complètement la cavité du disque; il présente, en face des bras, des dilatations correspondant aux cœcums brachiaux des Astéries. Il n'y a pas d'anus. Une partie de l'espace qui reste libre entre l'estomac et la paroi du corps est occupée, dans les interradius et de chaque côté de la base des bras, par des bourses en forme de sac, invaginations de la paroi du corps, qui s'ouvrent au-dehors par une fente bursale. Celle-ci, longue et étroite, est protégée par de grandes plaques calcaires. Sur les parois des bourses s'insèrent de nombreuses petites glandes isolées, ou dix masses volumineuses, les gonades, qui déversent leurs produits génitaux dans les bourses.

Les *divers systèmes* et *organes des sens.* Le système nerveux est semblable à celui des Stellérides, sauf l'entoneural qui semble manquer complètement. Il n'y a pas d'organes des sens définis, bien que l'ophiure montre une très nette sensibilité tactile et olfactive; le sens tactile est développé sur tout le tégument richement innervé, ainsi que sur les podia, recouverts de mamelons sensitifs; la sensibilité olfactive est mise en évidence par la rapidité avec laquelle l'ophiure se dirige vers une nourriture déposée à une certaine distance. Les espèces ont un phototropisme surtout négatif, rarement positif.

L'*appareil hémal* et le complexe axial sont similaires à ceux des Stellérides. Quant au système aquifère, sa particularité est de posséder toujours quatre ou cinq vésicules de Poli.

L'ophiure respire par tout son tégument, mais surtout par les bourses dont les mouvements rythmiques permettent l'appel ou le rejet de l'eau à travers les fentes bursales. Ces bourses jouent également un rôle excréteur, la majeure partie des déchets étant éliminée après avoir pénétré de la cavité cœlomique dans les bourses par effraction de leurs parois.

Reproduction

Comme chez les Stellérides, aucun signe extérieur ne permet de distinguer les sexes, sauf lorsque le mâle est bien plus petit que la femelle à laquelle il est accroché en permanence; une cinquantaine d'espèces sont hermaphrodites. Les œufs, expulsés par les fentes bursales, sont fécondés à l'extérieur, et donnent naissance à une larve ciliée nageuse. Celle-ci se transforme rapidement en *ophiopluteus,* cône aplati portant un anus sur la face ventrale et une aire buccale dans une vaste dépression à la base supérieure; les bords de cette aire buccale se prolongent en quatre paires de bras symétriques, d'inégale longueur, soutenus par des tigelles calcaires.

Quelques ophiures ont des larves en tonnelet semblables à celles des Crinoïdes; d'autres, vivant dans les mers froides, sont incubatrices, les jeunes étant abrités dans les bourses génitales jusqu'à leur complet développement (*Amphipholis squamata,* espèce cosmopolite). Une espèce de l'Atlantique protège ses jeunes comme une mère poule ses poussins. Chez trois espèces tropicales, le mâle nain est fixé sur la femelle, bouche contre bouche, les bras en quinconce. La reproduction asexuée est favorisée par le grand pouvoir de régénération des ophiures; les jeunes *Ophiactis virens,* espèce méditerranéenne à six bras, se reproduisent en se coupant en deux, mais les adultes, à gonades bien constituées, passent par une multiplication sexuée.

Écologie

La grande majorité des ophiures vit dans la zone littorale, quelques espèces se trouvant jusqu'à des profondeurs de plus de six mille mètres. La plupart des formes littorales ont un phototropisme négatif : elles se cachent

G.S. Giacomelli

▶ *Un Ophiuride dont on remarque les bras complètement entourés par des plaques imbriquées.*

sous les pierres, parmi les Algues, les Madrépores, dans le sable vaseux. Très agiles, elles se déplacent rapidement en allongeant trois bras dans la direction de la marche; le bras médian reste dans cette position tandis que les deux autres se rejettent brusquement en arrière comme le ferait un nageur; le corps est soulevé et projeté en avant; ensuite, ce sont quatre bras qui opèrent de cette manière, le cinquième restant allongé en arrière comme une petite queue. Des espèces du sous-ordre Euryalae grimpent sur des supports, généralement des gorgones, autour desquels elles enroulent leurs bras à la façon des vrilles de la vigne. Les *Ophiothrix* se dressent sur plusieurs de leurs bras et la population, grégaire, exécute alors de véritables ballets. Les Ophiurides sont capables de se hisser sur une surface verticale, probablement grâce à une substance collante sécrétée par leurs podia. Un phénomène très curieux de phosphorescence existe chez un certain nombre d'Ophiurides, notamment chez *Amphipholis squamata, Amphiura filiformis* et *Ophiopsila aranea* de nos côtes; quand l'Animal est excité par brassage ou piqûres, une vive luminosité verdâtre apparaît sur les plaques latérales des bras et les piquants; la substance lumineuse se trouve dans des cellules glandulaires en rapport étroit avec le système nerveux central.

On retrouve à peu près les mêmes groupes de commensaux et de parasites hébergés par les astéries. Cependant, les Mollusques sont assez rares et appartiennent surtout aux genres *Stylifer* et *Mucronalia*. Le Cilié *Rhopalura ophiocomae* pénètre dans les bourses d'*Amphipholis squamata* et la castre. Enfin, et ceci est exceptionnel chez les Échinodermes, *Ophiura texturata* est parasitée par une Algue unicellulaire qui forme, sur l'Animal entier, de petits points verts, détruit le mésenchyme du réseau squelettique, et finit par tuer l'Animal.

Les Ophiurides se divisent en quatre ordres : *Stenurida, Oegophiurida, Phrynophiurida* et *Ophiurida*.

Ordre des Stenurida

Les Stenurida, fossiles du Paléozoïque, ont leurs rainures ambulacraires ouvertes, et les ossicules brachiaux n'ont pas fusionné pour former des articles.

Ordre des Oegophiurida

Les Oegophiurida, également paléozoïques, présentent des rainures ambulacraires couvertes par un tégument, des gonades localisées par paires dans chaque bras; ceux-ci n'ont ni plaques ventrales, ni plaques dorsales, mais seulement des plaques latérales; il n'existe ni bourses, ni boucliers oraux, et le madréporite est placé latéralement.

Ordre des Phrynophiurida

Chez les Phrynophiurida, les rainures ambulacraires sont couvertes par des plaques ventrales, les gonades sont localisées dans le disque, les bourses sont présentes, ainsi que les boucliers oraux, dont l'un est madréporique. Paléozoïques avec quelques espèces actuelles (*Astrothorax misakiensis,* du Japon).

Ordre des Ophiurida

L'ordre Ophiurida renferme la quasi-totalité des espèces actuelles. Leurs bras sont complètement entourés par des plaques dorsales, ventrales et latérales assemblées en articles; les vertèbres sont articulées par des joints à rotule qui permettent des mouvements latéraux des bras, parfois leur enroulement autour d'un support. L'ordre se divise en deux sous-ordres : *Euryalae* et *Ophiurae*.

Sous-ordre des Euryalae

Les Euryalae sont des ophiures dont le disque et les bras sont couverts d'une peau épaisse qui peut contenir une mosaïque de granules, mais qui est dépourvue de plaques ou d'écailles. Les bras peuvent s'enrouler grâce à la forme en sablier des articulations vertébrales; ils sont longs, flexibles, simples (**Asteronichydae** et **Astrochematidae**), ou, souvent, ramifiés un grand nombre de fois *(Astropartus mediterraneus)*.

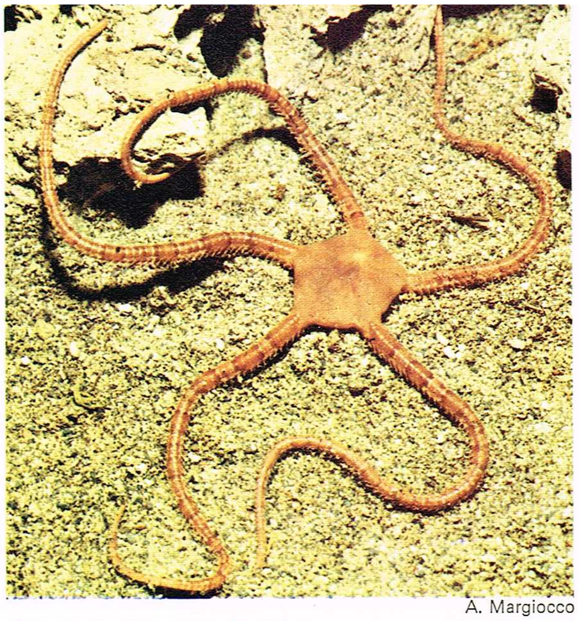

A. Margiocco

◀ **Ophioderma longicauda,** ***très répandu sur nos côtes, a des bras cylindriques et flexibles, portant de courts piquants appliqués.***

Sous-ordre des Ophiurae

Les Ophiurae sont très nombreux et sont répandus dans toutes les mers du globe.

Les douze familles qui les composent se différencient par le revêtement du disque, la forme, la disposition et le nombre des plaques et des piquants brachiaux, l'ornementation buccale.

Les bras des **Hemieuryalidae,** comme ceux des Euryalae, peuvent s'enrouler (*Hemieuryale pustulata,* de la mer des Antilles).

Les **Ophiomyxidae** ressemblent également aux Euryalae en ce que le disque et les bras sont couverts d'une peau épaisse qui cache les pièces du squelette (*Ophiomyxa pentagona,* commune en Méditerranée).

Les **Ophiacanthidae,** aux nombreuses espèces abyssales, ont un disque petit, formé de plaques recouvertes de granules, d'épines ou d'une épaisse peau nue, de grands piquants brachiaux, mais pas de papilles dentaires (*Ophiacantha setosa,* à faible profondeur en Méditerranée, peut descendre jusqu'à 1 500 m dans l'Atlantique).

Les **Amphiuridae** sont reconnaissables à leurs longs bras fins et flexibles, porteurs de courtes épines dressées, mais surtout à leur mâchoire faite, de chaque côté, d'une papille insérée sur la plaque orale, d'une papille portée par la plaque adorale et, à un niveau supérieur, dans le vide laissé entre ces deux papilles, d'une papille triangulaire et pointue *(Amphiura chiajei, A. filiformis)*.

La grande famille des **Ophiothricidae** renferme des espèces au disque généralement couvert de plaques contiguës ou imbriquées, lisses ou portant des épines, les granules ne dissimulant pas, le plus souvent, les grands boucliers radiaires; les mâchoires ont seulement un groupe ovale de papilles dentaires; les piquants brachiaux, hyalins, sont très grands et denticulés (*Ophiothrix fragilis,* des côtes européennes).

Les espèces de la famille **Ophiocomidae** ont un peu l'aspect des Ophiothricidae, mais leur appareil dentaire est fait d'un groupe de papilles dentaires accompagnées de nombreuses papilles buccales (*Ophiocomina nigra; Ophiopsila aranea,* remarquable par ses longues et étroites écailles tentaculaires internes, qui se croisent sur la face ventrale).

Ophioderma longicauda est l'espèce d'**Ophiodermatidae** la plus répandue sur nos côtes; son disque est couvert, sur les deux faces, de granules arrondis et serrés; ses bras, cylindriques et flexibles, portent de courts piquants appliqués contre les plaques brachiales latérales; les mâchoires ont des dents, de nombreuses papilles buccales, mais pas de papilles dentaires.

Le disque des **Ophiuridae** est généralement couvert de grandes plaques dorsales, inégales, épaisses et nues, parmi lesquelles on peut distinguer des plaques primaires et de grands boucliers radiaires; les mâchoires sont bordées de papilles buccales pointues, et leur sommet porte une pile verticale de papilles buccales, mais pas de papilles dentaires; les bras, sur lesquels les petits piquants sont appliqués ou dressés, sont forts et rigides; leur base est souvent entourée, de chaque côté, d'un arc de courtes tigelles calcaires, ou papilles, dont l'ensemble forme le peigne brachial (*Ophiura texturata, O. albida* se rencontrent sur toutes nos côtes; *Ophiocten sericeum* est une espèce arctique et boréale).

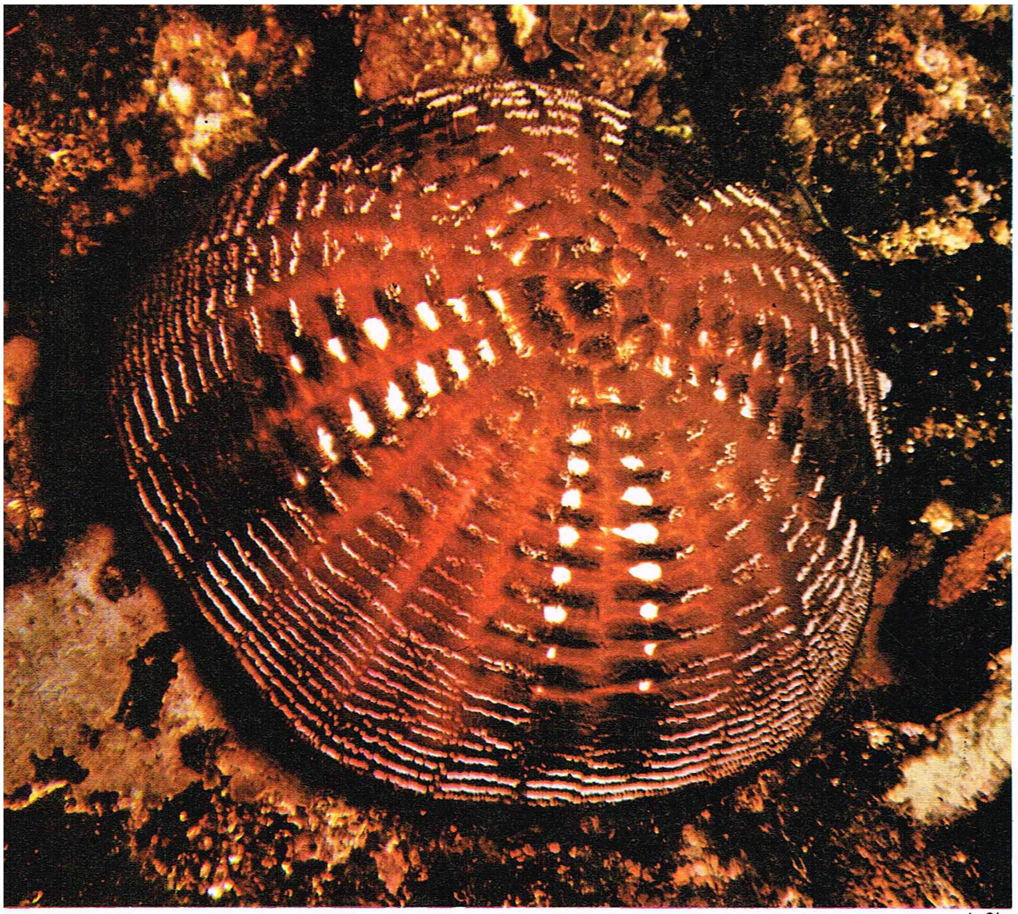

J. Six

▲ *Les Échinides, ici,* Asthenosoma varium, *ont un corps globuleux ou discoïde, formé de plaques calcaires géométriquement ajustées, dont l'ensemble forme* le test.

ÉCHINIDES

Les Échinides *(Echinoidea)*, ou oursins, ont un corps globuleux ou discoïde, à face orale tournée vers le sol, formé de plaques rigides ou souples dont l'ensemble forme le test. Les Échinides se divisent en deux grands groupes : *Regularia* et *Irregularia*. Leurs différences morphologiques et anatomiques sont considérables.

Groupe des Regularia. L'Échinide régulier est représenté sur nos côtes par quelques espèces, dont l'oursin comestible *Paracentrotus lividus*. C'est un cône bas, très renflé, couvert de piquants; ceux-ci s'articulent aux tubercules des plaques du test. Entre les piquants, de petits organes de défense, les *pédicellaires,* sont juchés sur de minuscules mamelons; on distingue des pédicellaires tridactyles, c'est-à-dire à trois mors, constitués comme une pince à sucre à poussoir, des ophicéphales à valves dentées, des trifoliés spatuliformes, des globifères pourvus d'une glande à venin et, chez les Irréguliers, des rostrés, à valves étroites, recourbées et contiguës à leur extrémité supérieure. Dans les zones radiaires, de longs podia s'allongent, ceux de la face ventrale à rôle locomoteur, les autres à fonction respiratoire, celle-ci étant également remplie par des podia modifiés en branchies, disposés par paires interradiaires à la limite du test et de la membrane péristomienne.

Des organes sensoriels, les *sphéridies,* minuscules corps transparents solides en forme de massue, se trouvent dans les aires ambulacraires.

Le *test,* dénudé, apparaît formé de dix doubles rangées de plaques calcaires géométriquement ajustées, cinq radiaires et cinq interradiaires, qui vont du pôle apical jusqu'à la bouche; les unes, dites ambulacraires, sont ornées des tubercules, portant les piquants et les pédicellaires, et percées de trous disposés par paires en arc, par où passent les canaux faisant communiquer les podia avec leurs vésicules contractiles; les formes qui présentent trois paires de pores par plaque composée sont dites oligopores, celles ayant plus de trois paires de pores sont désignées comme polypores.

Le *périprocte*, où s'ouvre l'anus, est situé au sommet du cône (formes endocycles); il est entouré de deux cercles de cinq plaques : un cercle de cinq plaques hexagonales interradiaires dont une grande plaque madréporique et quatre plaques génitales, percées d'un trou par où sont évacués les produits génitaux; un cercle de petites plaques radiaires, les ocellaires, perforées pour le passage d'un podia modifié. Les oursins sont dits ethmophractes quand le madréporite est inclus entièrement dans le système apical, ethmolytiques lorsqu'il s'étend en dehors de celui-ci. L'ensemble des plaques du test forme la couronne, dont la partie la plus élargie s'appelle l'*ambitus.*

La *bouche* s'ouvre au milieu de la face ventrale dans une molle membrane péristomienne; cinq dents proéminentes en sortent, qui appartiennent à un appareil masticateur très compliqué, la *lanterne d'Aristote.* Celle-ci est constituée par cinq pyramides triangulaires creuses, formées chacune de deux mâchoires soudées sur la moitié de leur longueur et terminées par une dent, dont la pointe fait saillie au centre de la bouche. La partie postérieure de cette dent se recourbe en crosse dans la cavité générale; chaque demi-pyramide porte une épiphyse reposant latéralement sur des rotules, petites tigelles prismatiques qui s'articulent avec la base des pyramides pour leur fournir un point d'appui dans leurs mouvements; au-dessous des rotules se trouvent les compas, pièces courbes légères faites de deux tigelles mises bout à bout. La lanterne d'Aristote est actionnée par des muscles, dont certains prennent appui sur une ceinture pérignathique calcaire, située au bord buccal interne du test, ceinture formée d'une partie interradiale étroite et de dix fortes saillies en forme d'arceau, les *auricules.* Des muscles interpyramidaux unissent les pyramides, et servent à rapprocher les dents; des muscles rétracteurs, allant de chaque auricule au sommet de la face interne de la pyramide opposée, ont pour rôle d'écarter et de rétracter les dents; des muscles protracteurs, attachés aux tigelles de la ceinture pérignathique, font saillir et se rapprocher les dents; des muscles abaisseurs des compas s'attachent aussi sur ces tigelles. De volumineuses vésicules gonflées d'eau, les *organes de Stewart,* compensateurs de pression du liquide cœlomique, sont appendues aux cinq angles radiaires de la lanterne chez les Cidarides, les Échinothurides et, sous une forme différente, chez quelques Irréguliers Clypéastroïdes. La lanterne d'Aristote, comme nous le verrons plus loin, sert à définir les différents ordres d'Échinides Réguliers; la cavité dentaire des Camerontida et des Stirodontida est carénée, contrairement à celle des Aulodontida.

Partant de la bouche, le *tube digestif,* différencié en un pharynx, un œsophage, un estomac et un intestin, s'élève d'abord verticalement en passant à l'intérieur de la lanterne, puis il décrit, avec des inflexions, deux cercles complets, l'un ventral, l'autre dorsal, qui se font suite en changeant de sens; l'intestin débouche à l'extérieur par un anus situé dans le périprocte. Les glandes génitales se présentent comme cinq grosses masses glandulaires interradiaires très lobées, qui vont déboucher chacune à l'un des pores génitaux; lorsqu'elles sont mûres, elles deviennent énormes, et envahissent presque toute la cavité cœlomique; celle-ci est remplie d'un liquide contenant des cœlomocytes jouant un rôle important dans l'excrétion des produits insolubles, ainsi qu'un matériel azoté : ammoniaque, amino-acides et urée.

L'Échinide possède des *systèmes nerveux, aquifère, hémal, lacunaire,* homologues de ceux des autres Échinodermes, ainsi qu'un système *axial* connu sous le nom de *glande brune.*

Groupe des Irregularia. Ces derniers peuvent, grossièrement, être divisés en Clypéastroïdes et en Spatangoïdes.

Les premiers sont aplatis, couverts de courts piquants, et possèdent un appareil masticateur rudimentaire; les seconds sont ovales ou cordiformes, à face dorsale plus ou moins bombée, à bouche dépourvue de tout appareil masticateur, à test couvert de longs piquants couchés, qui donnent à l'Animal un aspect soyeux; certains de ces piquants, transformés en très courtes clavules, se disposent en longs rubans étroits dessinant des fascioles brunâtres, en forme de lyre, de cœur, sur la face dorsale, autour de l'anus et sous lui.

Le *test* des Irréguliers est le plus souvent assez fragile. L'appareil apical se trouve toujours sur la face dorsale, mais le périprocte et l'anus sont reportés sur la face postérieure, plus ou moins tronquée, ou sur la face ventrale (formes exocycles). Les pores pédieux des plaques ambulacraires dessinent sur la face dorsale une sorte de fleur à cinq pétales plus ou moins larges, parfois creusés en gouttière; ces podia n'ont plus aucun rôle

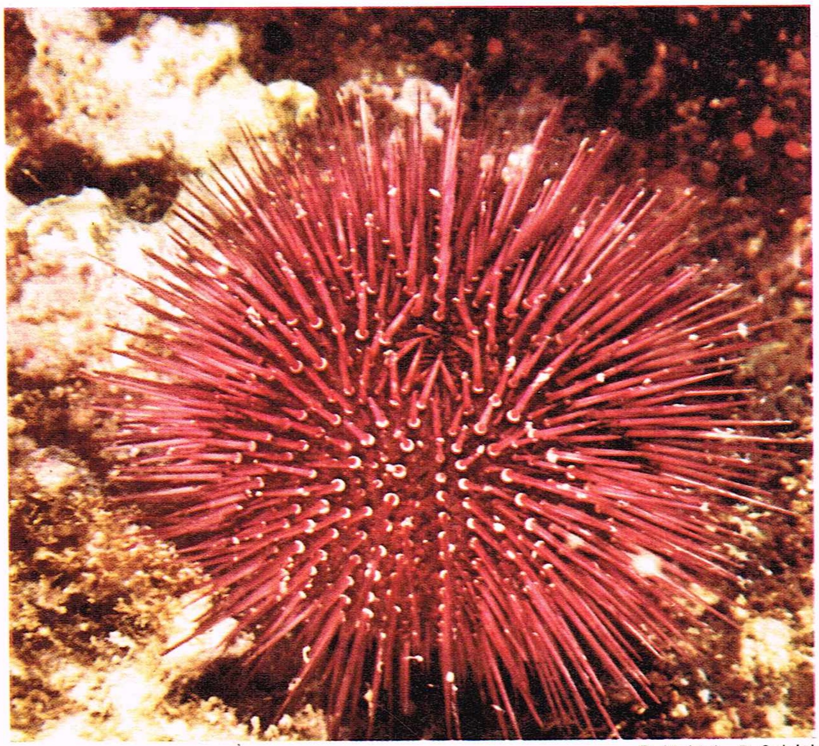

R. Maltini - P. Solaini

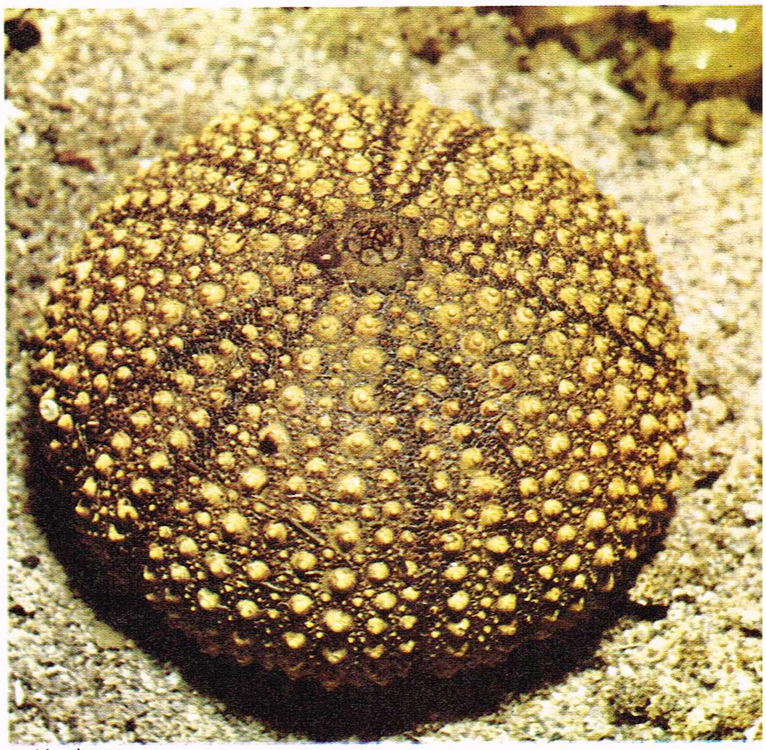

A. Margiocco

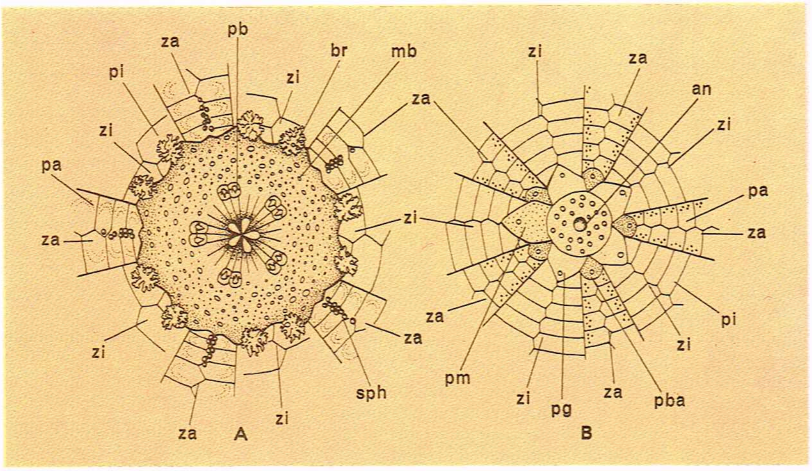

I.G.D.A.

▲ *A gauche,* Paracentrotus lividus, *oursin comestible très commun en Méditerranée ; à droite, le test dénudé du même oursin.*
◀ *Représentation schématique de* Paracentrotus lividus *vu dans sa région buccale (A) et dans sa région aborale (B) ; an, anus ; br, branchies ; mb, membrane buccale ; pa, plaques ambulacraires ; pb, podia buccaux ; pba, plaque basale ou ocellaire ; pg, plaque génitale ; pi, plaques interambulacraires ; pm, plaque madréporique ; sph, sphéridies ; za, zones ambulacraires ou radii ; zi, zones interambulacraires ou interradii.*
▼ *A gauche, représentation schématique de l'anatomie d'un oursin en coupe longitudinale : an, anus ; pi, plaques interradiaires ; pm, plaque madréporique ; pr, plaque radiaire ; car, canal ambulacraire radiaire ; in, intestin ; po, podia ou tubes locomoteurs ; vc, vésicules contractiles ; nr, nerf radiaire ; la, vue partielle de la lanterne d'Aristote ; bo, bouche ; aao, anneau ambulacraire oral ; si, siphon intestinal ; piq, piquants ; go, glande ovoïde ; ca, canal hydrophore ; ov, ovaire. A droite,* Centrostephanus longispinus, *dont on observera la grande longueur et la rigidité des piquants barbelés.*

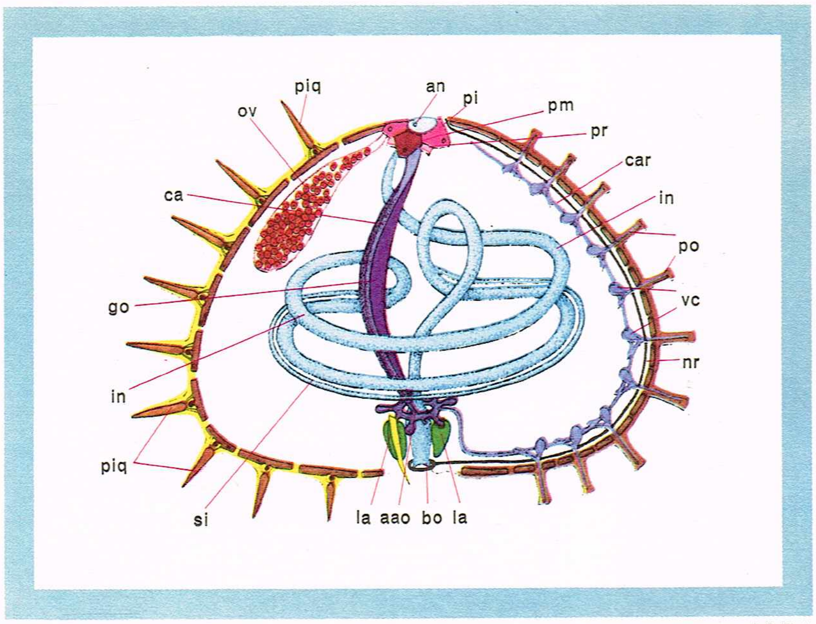

I.G.D.A.

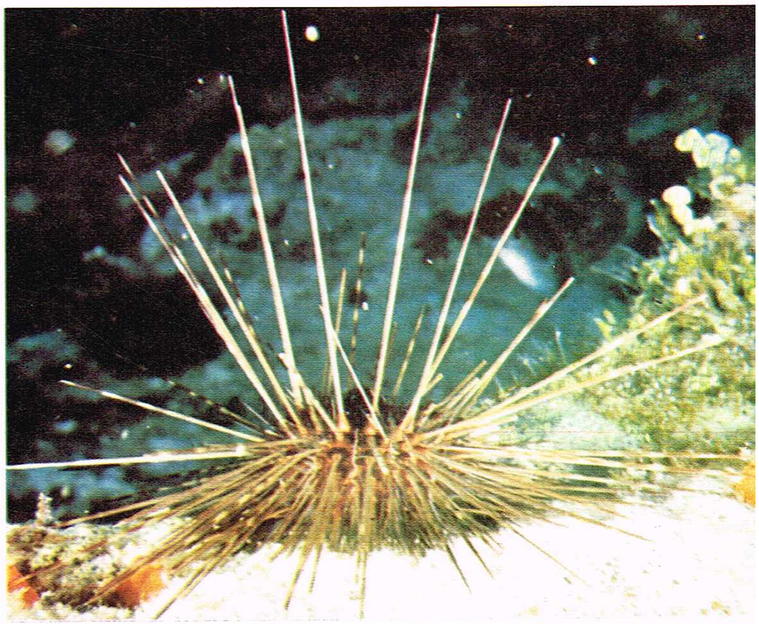

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ ***Schéma théorique d'un oursin irrégulier (Spatangidés) vu du côté gauche et montrant les différents fascioles (A), et* Echinocardium cordatum *(Spatangidés) vu par la face aborale (B) : fe, fasciole endopétale; fp, fasciole péripétale; fa, fasciole anal; fs, fasciole sous-anal; fl, fasciole latéral; fm, fasciole marginal; ra, les cinq radii.***

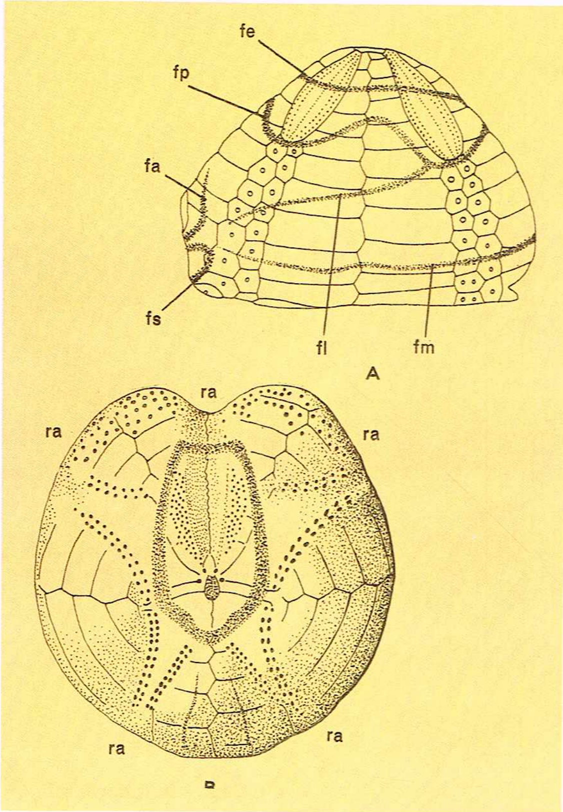

I.G.D.A.

locomoteur, mais uniquement une fonction respiratoire. Sur la face ventrale, le péristome reste central chez les Clypéastroïdes, mais il s'est déplacé vers le bord antérieur chez les Spatangoïdes où il prend une forme ovale ou en croissant; son bord épaissi porte le nom de *labrum*. L'extrémité orale des ambulacres antérieurs qui l'entourent est souvent élargie en courts pétales, les *phyllodes,* percés pour donner passage à des podia modifiés en organes sensitifs qui participent à la capture de la nourriture. Les deux ambulacres postérieurs, longs et étroits, ne comportent que quelques plaques souvent dénudées, s'étendant de la bouche à l'anus où ils s'élargissent; chacun est pourvu de podia sous-anaux disposés sur un seul rang; ces ambulacres sont séparés par un large sternum, ou plastron interambulacraire. Les Irréguliers sont dits Amphisternes lorsque les plaques de la première paire du plastron sont côte à côte, Méridosternes lorsqu'elles sont placées l'une sous l'autre.

Comme les Échinides Réguliers, les Irréguliers possèdent des pédicellaires et des sphéridies. L'organisation interne est modifiée par le déplacement du périprocte et de l'anus. Il n'y a pas de pharynx, l'œsophage est étroit; l'estomac porte un cæcum contenant un liquide brun servant à la digestion; il n'y a plus que quatre gonades inégales. De plus, nombre d'espèces de Clypéastroïdes ont, intérieurement, les deux faces du test unies par des colonnes ou des trabécules calcaires formant parfois un réseau très important.

Organes des sens. Les podia, pédicellaires, ainsi que la surface entière du corps, sont sensibles au toucher, ce qui est dû à la présence, dans l'épiderme, de cellules sensorielles disséminées. Les sphéridies, et peut-être la tension des mésentères soutenant l'appareil digestif, donnent à l'Animal des renseignements sur sa position dans l'espace. Beaucoup d'oursins littoraux sont sensibles à la lumière; ils l'évitent en se couvrant de débris végétaux, de petites pierres; *Lytechinus* laisse tomber cette couverture la nuit, et la remet le jour; l'espèce tropicale *Astropyga radiata* porte des taches bleues très brillantes sur sa face dorsale, organes sans doute photogènes car l'Animal les protège de la lumière vive par agitation de ses longs piquants. Les branchies ont peut-être un rôle gustatif.

Régénération. Tous les organes externes : podia, piquants, pédicellaires, sphéridies, sont rapidement régénérés. Les plaques du test, détruites par un choc ou par un prédateur, sont également reconstituées avec leurs ornements et leurs organites. En revanche, il n'y a pas de régénération des organes internes.

Reproduction

A part quelques cas d'hermaphrodisme, les sexes sont séparés. A l'approche de la ponte, les oursins se rassemblent souvent; l'émission des produits sexuels de l'un d'eux déclenche rapidement celle de ses congénères, et le phénomène s'étend à l'ensemble de la population. Fécondé, l'œuf passe par toute une série de divisions pour aboutir à l'état de petite sphère creuse, la *gastrula,* couverte de cils, qui se met à nager; elle se transforme en un *echinopluteus* à quatre ou cinq paires de bras, ressemblant à l'*ophiopluteus* des ophiures, à l'intérieur duquel apparaissent bientôt les premiers rudiments de l'adulte. Après plusieurs semaines de nage active, la larve tombe sur le fond, et rampe sur sa face buccale au moyen de ses premières paires de podia; apparaissent ensuite les premiers pédicellaires, puis les piquants, tandis que les bras de l'*echinopluteus* disparaissent; en même temps, les plaques du test s'accroissent et se multiplient, les organes génitaux se constituent pour former un petit oursin de quelques millimètres de diamètre. Les Échinides des mers froides sont très souvent incubateurs. *Eurocidaris nutrix,* des îles Kerguelen, abrite ses œufs sous une sorte de tente formée par des piquants spatulés inclinés vers la bouche; un autre Cidaride, *Austrocidaris canaliculata,* des îles Falkland, forme cette tente incubatrice au-dessus de l'anus. Chez diverses espèces d'oursins irréguliers, l'incubation a lieu dans les ambulacres profondément creusés du test de la femelle *(Abatus cordatus, Antipneustes rostratus)*. Une espèce de *Temnopleurus,* des mers boréales, porte ses jeunes juchés sur les plaques soulevées du système apical, protégées par des piquants.

Écologie

Les Échinides vivent dans toutes les mers, à toutes les profondeurs et dans tous les milieux. Ceux des eaux tropicales revêtent souvent des couleurs éclatantes. La plupart sont sténohalins, quelques espèces supportant cependant une certaine dessalure; *Arbacia punctulata, Lytechinus variegatus* et *Paracentrotus lividus* peuvent vivre dans des eaux à 19 ‰, mais ne semblent pas pouvoir s'y reproduire. Les oursins réguliers se déplacent par les mouvements de leurs podia, et peuvent grimper sur des surfaces verticales; d'autres se servent de leurs piquants comme d'échasses. Les oursins littoraux se nourrissent d'Algues, tel *Paracentrotus lividus* qui, avec sa lanterne d'Aristote et par mouvements rotatifs de ses piquants ventraux, creuse des logettes dans la roche. *Echinus* s'attaque aux petits Mollusques, aux Annélides polychètes, aux Bryozoaires; *Cidaris* mange surtout des Éponges et des Gorgones. Les espèces d'eau profonde s'alimentent des Végétaux arrachés aux côtes. Les oursins irréguliers absorbent, avec le sable et la vase, toutes sortes de détritus contenant souvent de petits Mollusques et des Foraminifères. *Echinocardium cordatum* habite dans un terrier qu'il s'est creusé à l'aide de ses piquants ventraux, en forme de cuiller, qui fouillent et rejettent le sable à la manière d'une petite pelle; la cavité ainsi constituée, aux parois cimentées par un mucus que sécrète l'Animal, et dont le plafond est soutenu par des piquants dorsaux spécialisés, communique avec la surface par un canal oblique, où s'engagent quelques très longs podia de la région apicale.

Les parasites et les commensaux appartiennent aux mêmes groupes, sinon aux mêmes espèces que ceux des autres Échinodermes, notamment des Stellérides. L'intestin des oursins renferme de nombreux Infusoires, appartenant à des espèces que l'on ne rencontre pas à l'état libre.

Jusqu'à récemment, et comme nous l'avons fait jusqu'ici, les Échinides étaient répartis en deux sous-classes : *Regularia* et *Irregularia*. Une nouvelle classification les range en Perischoechinoidea et Euechinoidea, ceux-ci comprenant tous les oursins réguliers et irréguliers actuels, sauf les Cidarides. Nous garderons l'ancienne classification, plus connue, et qui a le mérite de s'appuyer sur des critères facilement reconnaissables.

Sous-classe des Regularia

Les Regularia, ou Réguliers, comprennent trois ordres éteints au Paléozoïque, *Echinocystitoida, Bothriocidaroida* et *Paleochinoida,* et cinq ordres représentés actuellement : *Lepidocentroida, Cidaroida, Aulodontida, Stirodontida* et *Camarodontida*.

Les formes des trois ordres éteints ont un test habituellement flexible et sont endocycliques. Les plaques radiaires du test des Echinocystitoida sont imbriquées adoralement et les plaques interradiaires imbriquées adapicalement *(Aulechinus grayae)*. Chez les Bothriocidaroida, les plaques radiaires sont disposées sur deux colonnes, les interradiaires sur une seule *(Bothriocidaris pahleni)*. Les ambulacres des Paleochinoida sont formés de deux colonnes ou plus, dont les plaques s'imbriquent sur les plaques interambulacraires adjacentes, étagées sur au moins trois colonnes, exceptionnellement sur une seule *(Melonechinus multiporus)*.

Ordre des Lepidocentroida

L'ordre Lepidocentroida renferme les oursins les plus primitifs, souche probable de tous les oursins modernes. Seule, la famille **Echinothuridae** a des formes actuelles. Ce sont des Animaux mous, aux plaques reliées par des zones membraneuses qui donnent au test une grande souplesse. Les piquants de la face dorsale sont pourvus, près de leur extrémité, d'un sac glandulaire sécrétant un liquide venimeux. Les Echinothuridae sont surtout des êtres abyssaux, mais quelques espèces pénètrent sur le plateau continental *(Phormosoma placenta, Araeosoma fenestratum)*.

Ordre des Cidaroida

L'ordre Cidaroida renferme peut-être les plus beaux oursins connus. Leur test est solide, globuleux, à plaques ambulacraires simples, percées chacune d'une paire de pores seulement; ces plaques se continuent sur la membrane péristomienne jusqu'à la bouche, ainsi que les plaques interambulacraires, bien plus larges, et ornées chacune d'un gros tubercule, support d'un long et gros piquant. Le test dénudé est d'une grande beauté, avec ses énormes tubercules interradiaux cerclés de petits mamelons (*Cidaris cidaris, Eucidaris clavata* aux radioles en massue, *Cidaris blakei* dont les radioles sont hérissés de longues et fines épines serrées).

Ordre des Aulodontida

L'ordre Aulodontida doit son nom aux dents sans carène interne de la lanterne d'Aristote dont les épiphyses ne se réunissent pas au-dessus de la grande fenêtre des mâchoires. La famille **Diadematidae,** la plus importante de l'ordre, est remarquable par ses longs piquants creux, minces et pointus, pouvant atteindre trente centimètres de long ; ils sont munis de minuscules denticules et provoquent, de ce fait, de douloureuses blessures (*Diadema setosum, Astropyga radiata,* espèces indo-pacifiques, *Centrostephanus longispinus,* de Méditerranée et de la côte d'Afrique occidentale).

Ordre des Stirodontida

Les dents de la lanterne des Stirodontida sont carénées à l'intérieur, et les épiphyses ne sont pas jointives. *Stomopneustes variolaris* est le seul représentant actuel de la famille **Stomopneustidae**. La famille **Arbaciidae** est un peu mieux représentée ; *Arbacia lixula,* vivant le long de nos côtes, d'un beau noir velouté, se reconnaît à son périprocte formé de quatre grandes plaques triangulaires égales et à un système de granules, l'*épistroma,* sculptant les plaques du test.

Ordre des Camarodontida

Les membres de l'ordre Camarodontida sont très répandus dans toutes les mers, et se répartissent en de nombreuses familles. Ils sont caractérisés par les épiphyses de leur lanterne, qui sont soudées au-dessus du sommet de chaque pyramide ; les dents sont carénées sur leur face interne.

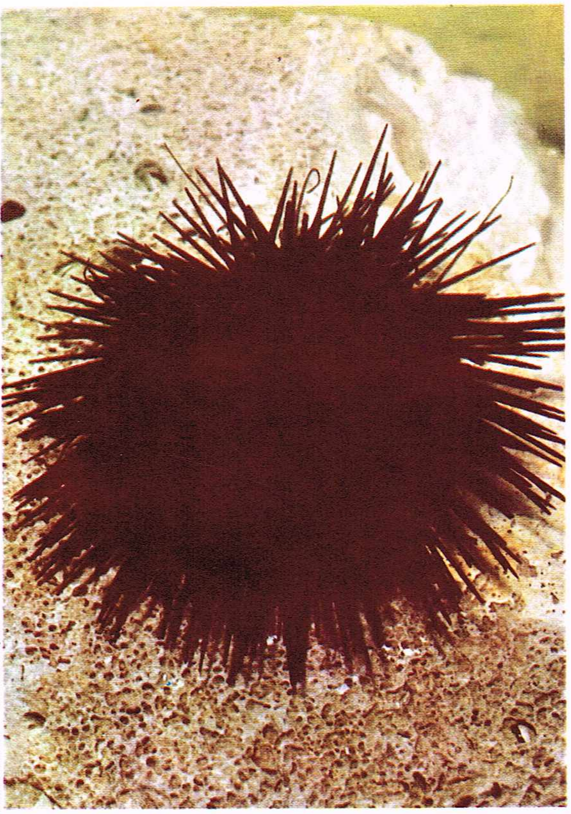

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ **Arbacia lixula,**
oursin de couleur noire.

▼ **Heterocentrotus**
(« oursin crayon »)
des mers de
Nouvelle-Calédonie.

D. Faulkner

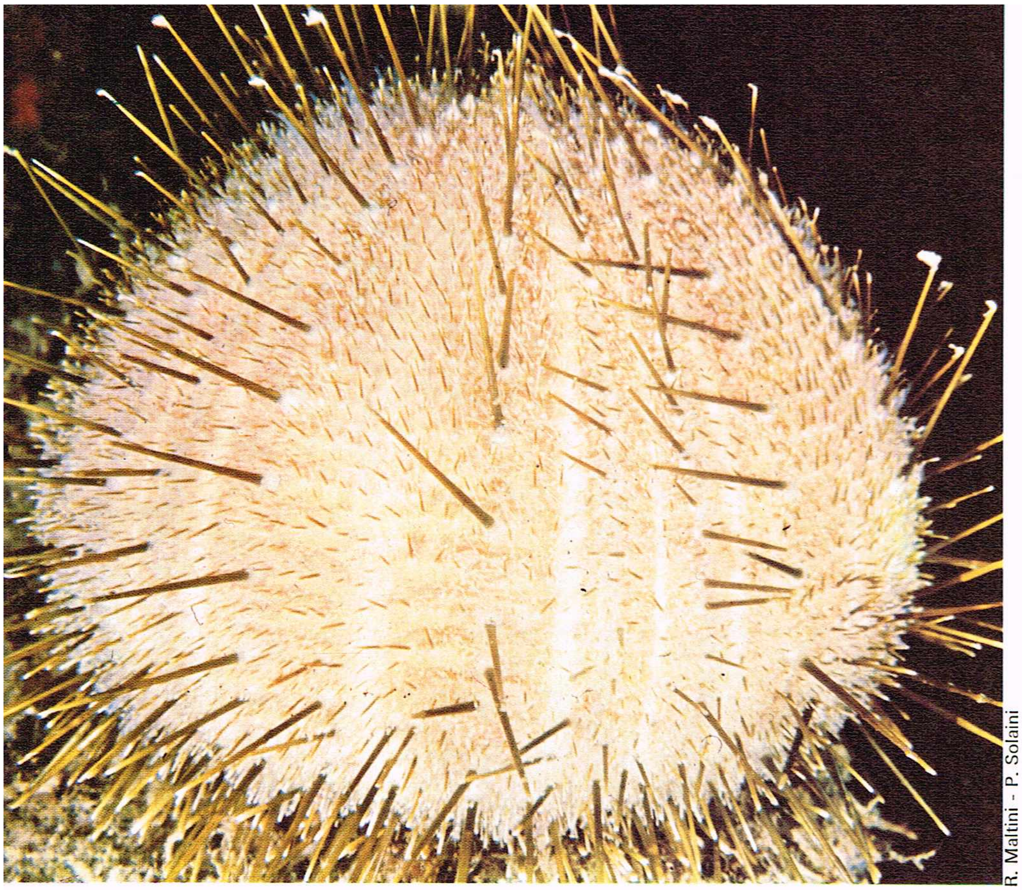

R. Maltini - P. Solaini

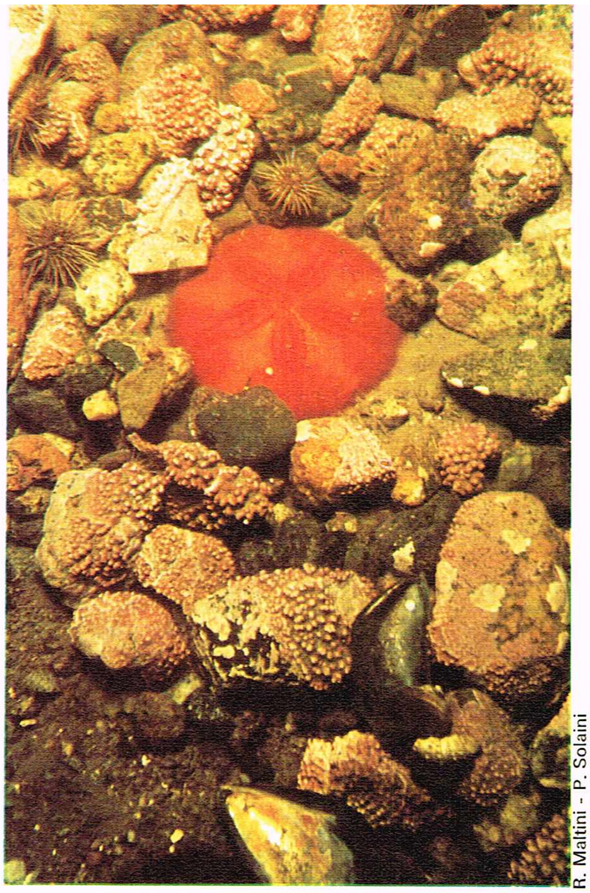

R. Maltini - P. Solaini

▲ *A gauche,* **Echinus melo,** *dont le test globuleux est armé de forts piquants; à droite,* **Echinarachnius parma,** *connu sous le nom vulgaire de « sand dollar ».*

Chez les **Temnopleuridae**, le test est sculpté par des fossettes et des rigoles réparties sur les plaques, qui sont unies par des trous et des nodules *(Genocidaris maculata,* de nos côtes, *Temnopleurus toreumaticus, Salmacis bicolor).*

La famille **Toxopneustidae** est représentée, sur les côtes européennes, par le gros *Sphaerechinus granularis,* et, dans les mers tropicales, par plusieurs espèces dont le dangereux *Toxopneustes pileolus* pourvu de grands pédicellaires globifères, dont les glandes sécrètent un venin provoquant le relâchement des muscles, une narcotisation semblable à celle de la cocaïne, et parfois mort d'homme.

Les oursins de la famille **Echinidae** sont nombreux et bien représentés en Europe; l'oursin comestible *Paracentrotus lividus* est vendu sur les marchés sous le nom de « châtaigne de mer »; *Echinus melo,* globuleux, aux beaux piquants verts, peut atteindre seize centimètres de diamètre; *Echinus acutus* et *E. esculentus,* un peu moins gros que le précédent, sont généralement ovoïdes pointus; ces trois oursins, soigneusement vidés et dépouillés de leurs piquants, ont longtemps servi de globe pour lampe de bureau.

Sous-classe des Irregularia

La sous-classe Irregularia comprend tous les oursins dont le périprocte et l'anus se sont déplacés hors du système apical. Ils se divisent en cinq ordres : *Pygasteroida,* fossiles exocycliques à plaques ambulacraires simples, *Holectopoida, Cassiduloida, Clypeastroida* et *Spatangoida,* ces deux derniers renfermant la grande majorité des espèces actuelles.

Ordre des Clypeastroida

Le test des Clypeastroida est aplati, allongé ou arrondi, couvert de très courts piquants soyeux. La bouche, située au centre de la face ventrale, est pourvue d'un appareil masticateur rudimentaire. L'anus s'est déplacé, et se trouve maintenant sur la face orale, parfois très près du bord. Sur la face dorsale, les ambulacres prennent une forme pétaloïde, et dessinent une rosace simulant les cinq pétales d'une fleur. Cet ordre est surtout abondant dans les eaux tropicales; *Clypeaster rosaceus* peut atteindre quinze centimètres de diamètre.

Les espèces des familles **Laganidae** et **Scutellidae** sont connues sous le nom vulgaire de « sand dollar » *(Echinarachnius parma).* De nombreuses espèces de Scutellidae, tel *Encope grandis,* ont les bords du test percés de longues fentes, les lunules. Les *Rotula* sont pourvues de nombreuses et fortes digitations latérales *(Rotula augusti).* L'un des rares représentants de l'ordre, des côtes d'Europe, est le minuscule *Echinocyamus pusillus,* d'une belle couleur verte.

Ordre des Spatangoida

Les Spatangoida, oursins en forme de cœur, ne possèdent aucun appareil masticateur à l'état adulte. Leur bouche a la forme d'une fente transversale arquée, munie d'une lèvre en bec de cuiller, que l'Animal utilise pour fouiller le sable ou la vase. Ils ont acquis une structure nouvelle, les fascioles, d'une grande importance systématique.

Les Spatangoida se divisent en deux sous-ordres : *Amphisternatina,* dont le plastron se termine par deux plaques accolées, *Meridosternatina,* à plastron terminé par une seule plaque.

Les *Amphisternatina* sont représentés sur nos côtes par des *Echinocardium* à fasciole interne et sous-anal, *Spatangus purpureus* qui n'a plus qu'un fasciole sous-anal, *Schizaster canaliferus,* à l'ambulacre antérieur profondément creusé, au fasciole péripétale émettant deux branches latérales dirigées en arrière, et par des **Brissidae,** notamment *Brissopsis lyrifera,* pourvu d'un fasciole péripétale rouge sombre en forme de lyre.

Les *Meridosternatina* sont des oursins très curieux, au test mince, très fragile, vivant généralement à grande profondeur; l'extrémité antérieure de *Pourtalesia jeffreysi,* espèce boréale en forme de sabot, est tronquée et élargie, et présente un profond sillon, où se trouve la bouche; l'extrémité postérieure est courte et étroite, le fasciole sous-anal très petit; *Echinosigra paradoxa,* des côtes d'Islande, ne dépassant pas quarante millimètres, est en forme d'urne; ces deux espèces possèdent des pédicellaires ophicéphales d'une grande élégance.

BIBLIOGRAPHIE

CHERBONNIER G., *le Roman des Échinodermes,* éd. Arc-en-ciel, Monaco, 1954; travaux divers 1940-1973. - CUÉNOT L., *Traité de zoologie* in GRASSÉ P.-P., XI, Échinodermes, Masson, Paris, 1946. - HYMAN L.M., *The Invertebrates : Echinodermata,* 4, New York, 1955. - KOEHLER R., *Échinodermes d'Europe,* I, 1924, II, 1927. - MORTENSEN Th., *Handbook of the Echinoderms of the British Isles,* Oxford, 1927.

LES STOMOCORDÉS

Le nom même de ce groupe est assez mal choisi. Il est dû à la « stomocorde », diverticule dorsal du pharynx situé en avant de la bouche (« stoma »). On lui a donné le nom de corde car les cellules qui la constituent sont grandes et vacuolisées, et ressemblent aux véritables cellules cordales. En fait, il s'agit seulement d'un phénomène de convergence.

La présence d'un pharynx perforé, remplissant les deux fonctions de respiration et de nutrition, ainsi que l'origine ectodermique du système nerveux et l'origine secondaire de la bouche (Deutérostomiens) sont des caractères communs aux Stomocordés et aux Cordés. Il faut noter aussi la symétrie bilatérale et la division du corps en trois régions. Par contre, le développement embryonnaire est proche de celui des Échinodermes !

Les Stomocordés sont divisés en deux classes : les Entéropneustes et les Ptérobranches ; elles sont si différentes d'aspect que seule une étude très poussée a permis d'établir leur parenté.

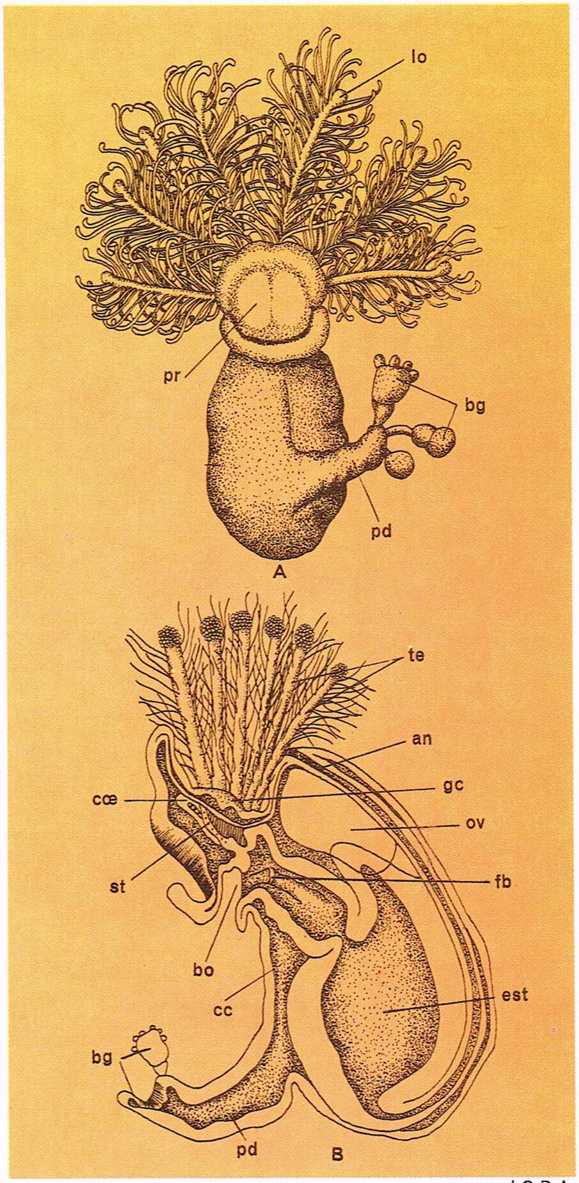

◄ *Représentation schématique du Ptérobranche* **Cephalodiscus dodecalophus** *(A) vu par la face ventrale : lo, lophophore ; bg, bourgeons ; pd, pédoncule ; pr, protosome ; (B) vu en coupe sagittale : te, tentacules ; an, anus ; gc, ganglion cérébral ; ov, ovaire ; fb, fente branchiale ; est, estomac ; pd, pédoncule ; bg, bourgeons ; cc, cavité cœlomique ; bo, bouche ; st, stomocorde ; cœ, cœur.*

ENTÉROPNEUSTES

Les Entéropneustes *(Enteropneusta),* ou balanoglosses sont tous marins, ont l'aspect de vers et vivent enfouis dans les sédiments meubles ou les récifs coralliens. Leur taille varie de quelques mm à 2,50 m. Sur les plages d'Europe, ils vivent près du niveau des basses mers, dans des tubes en U disposés verticalement dans le sable ou dans la vase. L'orifice antérieur est un petit entonnoir grâce auquel l'Animal ingère le sable et les particules alimentaires qui s'y trouvent. L'orifice postérieur, où débouche l'anus, est marqué à la surface du sédiment par un gros tortillon de sable, résidu de la digestion. Les Entéropneustes sécrètent un mucus luminescent à l'odeur forte. Leur tube sert souvent de refuge à de nombreux organismes, à tel point qu'une espèce de la côte Ouest des États-Unis a été baptisée localement « ver aubergiste ».

Le corps d'un Entéropneuste est divisé en trois parties d'aspect très différent.

Le *proboscis,* très musclé, situé en avant de la bouche, est un organe fouisseur. Il contient la stomocorde, diverticule préoral, et une cavité cœlomique. Cette dernière est très structurée : une partie se différencie en organe excréteur, le *glomérule,* une autre, la *vésicule cardio-péricardique,* s'accole à un gros sinus sanguin et ses contractions assurent la propulsion sanguine ; enfin ce cœlome s'ouvre à l'extérieur par un *cœlomoducte.*

C'est à la partie antérieure et dorsale du *collier* que s'ouvre la bouche. Le système nerveux se condense dorsalement pour former un tube médullaire, qui, dans une certaine mesure, joue le rôle de système nerveux central. Un second cœlome s'ouvre à l'extérieur par deux pores.

Le *tronc,* très long, contient le tube digestif. Le pharynx est un tube à paroi épaisse, dont la partie dorsale, percée de fentes en U, a une fonction respiratoire ; sa partie ventrale sert à acheminer la nourriture. Le pharynx débouche dans un œsophage à paroi plissée ; celui-ci est prolongé par l'*intestin hépatique,* muni de diverticules dorsaux sécréteurs. L'intestin se prolonge jusqu'à l'extrémité du corps. Deux expansions en forme de lame, qui s'étendent sur toute la longueur des portions pharyngienne et hépatique du corps, protègent les branchies et contiennent les gonades. Le système nerveux, très superficiel, est constitué par un nerf ventral et un nerf dorsal. Deux grands sinus sanguins parcourent le tronc, et se raccordent par un réseau de capillaires.

Chez les Entéropneustes, les sexes sont séparés. Il n'y a pas d'accouplement et les produits génitaux sont émis dans l'eau de mer. Après la fécondation, les œufs subissent une segmentation totale. La gastrulation et la formation des cœlomes transforment l'embryon en larve nageuse, ou *tornaria,* très semblable à la larve *bipinnaria* des étoiles de mer. Après une phase de nage active, la larve se métamorphose, et prend l'aspect d'un jeune Entéropneuste.

▼ **Balanoglossus clavigerus** *(Entéropneustes) : pb, proboscis ; cl, collier ; br, région branchiale ; al, ailes génitales ; an, anus ; ih, intestin hépatique.*

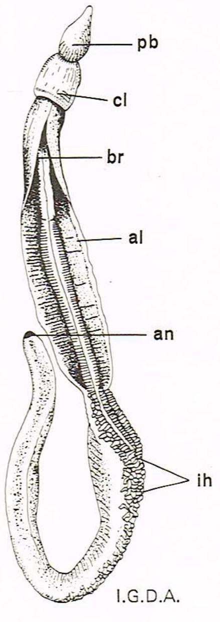

PTÉROBRANCHES

Les Ptérobranches *(Pterobranchia)* sont marins, vivent en profondeur, sont coloniaux et ressemblent à des Bryozoaires. Libres ou fixés, ils se nichent dans des logettes chitineuses. Le corps, long de 1 à 5 mm, a la structure d'un Entéropneuste aplati latéralement. Sur le collier se développe le *lophophore* constitué par deux lobes plumeux qui ont fourni son nom au groupe *(pteron = aile).*

La biologie des Ptérobranches est très mal connue. Les individus sont réunis les uns aux autres par un stolon interne chitineux, pigmenté en noir. Les bourgeons se forment en des points quelconques de ce dernier. Le stolon noir ressemble beaucoup au rhabdosome des Graptolithes, Invertébrés fossiles dont les parties molles ne sont pas connues. Beaucoup de spécialistes considèrent les Graptolithes comme un groupe de Stomocordés voisin des Rhabdopleures qui se serait très largement étendu au Primaire avant de s'éteindre totalement.

BIBLIOGRAPHIE

DAVIDOFF C., *Embranchement des Stomocordés,* in GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie,* Masson, Paris.

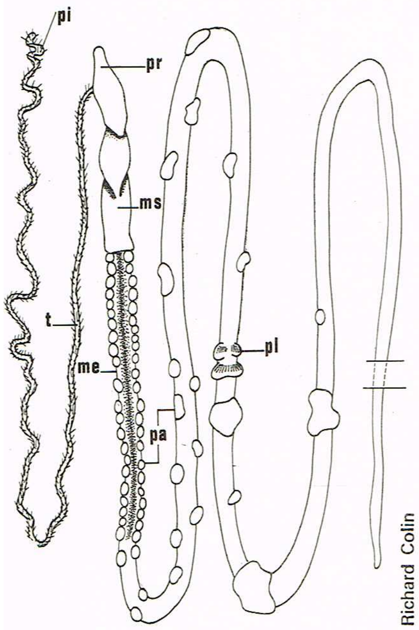

▲ *Représentation schématique d'un Pogonophore sorti de son tube : me, métasome; ms, mésosome; pa, papilles; pi, pinnule; pl, plaquettes chitineuses; pr, prosome; t, tentacule.*

LES POGONOPHORES

Les Pogonophores, appelés communément « porteurs de barbe », forment le dernier groupe découvert par les zoologistes à qui ils posent un certain nombre d'énigmes, non qu'ils soient rares, mais leur présence est très discrète. La plupart des espèces se présentent sous la forme de fils très fins, de 0,1 à 0,5 mm de diamètre pour une longueur de 5 à 10 cm. Les géants du groupe ont 2,5 mm de diamètre et 30 cm de long. Ils sont toujours enfermés dans des tubes annelés. Même pour un zoologiste habile, l'extraction d'un Pogonophore de son tube est une opération délicate. Malgré ces difficultés, leur structure est maintenant de mieux en mieux connue.

Ils ont typiquement des caractères de Cordés : système nerveux superficiel, hémoglobine et sens de la circulation sanguine. Certains chercheurs pensent que la présence de chitine les rapproche des Invertébrés. En général on les place au voisinage des Entéropneustes; leur corps, comme celui de ces derniers, est divisé en trois parties.

La partie antérieure, ou *prosome,* porte de fins tentacules garnis de pinnules. Chaque pinnule, quelle que soit sa taille, est constituée d'une seule cellule, et est traversée par deux vaisseaux capillaires. Le système circulatoire auquel ils se raccordent est entièrement clos, comme chez les êtres les plus évolués.

Les deux autres parties du corps, le *mésosome* et le *métasome,* portent des papilles et des ceintures de plaquettes chitineuses que l'Animal utilise pour se déplacer dans son tube, à la façon des Annélides Polychètes.

Le système nerveux est entièrement cutané; il n'y a pas d'organes des sens différenciés. Le système circulatoire clos est formé de deux vaisseaux. Le vaisseau dorsal porte un cœur et le sang est propulsé d'avant en arrière comme chez les Vertébrés. Situées dans le cœlome du mésosome, les gonades forment deux organes allongés. Les sexes sont séparés. La fécondation s'effectue dans le tube de la femelle. Elle est assurée par un spermatophore où sont réunis les spermatozoïdes. Les œufs se développent dans la partie supérieure du tube, qu'ils obstruent complètement.

Le caractère le plus curieux des Pogonophores est l'absence totale de tube digestif. On en est donc réduit à des hypothèses pour expliquer leur mode d'alimentation. Aucune des théories actuelles n'est pleinement satisfaisante. Certains chercheurs pensaient à une absorption directe par la peau des protéines dissoutes dans l'eau de mer; mais le corps est entièrement recouvert d'une cuticule. Il pourrait y avoir absorption au niveau des pinnules, qui sont bien irriguées, car la cuticule est très mince à ce niveau. On a pensé également à une digestion externe, mais aucune glande sécrétrice d'enzymes n'a été mise en évidence. Il est possible que des Bactéries de la vase, vivant au contact des Animaux, puissent libérer des produits nutritifs que les Pogonophores absorberaient.

Les Pogonophores vivent souvent en amas compacts dans les vases des mers froides et dans la zone abyssale. Chaque année on en récolte dans de nouvelles régions géographiques. Ils ont certainement colonisé toutes les mers. Le groupe est très ancien, puisque des tubes fossilisés ont été découverts.

Les difficultés que l'on a à les capturer, dues à la profondeur de leur habitat et à leur fragilité, ajoutées aux difficultés d'élevage, rendent aujourd'hui précaires les réponses aux nombreuses questions que pose ce groupe.

BIBLIOGRAPHIE

IVANOV A.V., *Pogonophora,* Academic Press, New York, 1963.

LES CORDÉS

La notion de « Cordé » n'a que cent ans. Elle ne tient compte ni de l'aspect des Animaux ni de leur organisation à l'état adulte, mais seulement de leur embryologie. La notion de « Vertébré », du Poisson à l'homme, paraît évidente, mais la notion de « Cordé » peut surprendre. Parler de « cousins » de l'homme à propos d'êtres fixés, à structure d'Invertébrés, sans tête différenciée, et que l'on confond souvent avec des Algues ou des Éponges, voilà qui choque à première vue.

Dans l'enthousiasme de la découverte d'une parenté entre les larves d'Ascidies et celles des Vertébrés, les anciens systématiciens avaient groupé dans le phylum des Cordés les Vertébrés, les Céphalocordés, les Ascidies, les Thaliacés, les Appendiculaires, les Entéropneustes, les Ptérobranches et les Pogonophores.

Il est certain que pour les cinq premiers groupes énumérés, le développement embryologique suit le même cours : ce sont de véritables Cordés. Pour les autres groupes, les affinités sont très discutées. La tendance actuelle serait plutôt de séparer ces formes en plusieurs phylums, tout en leur gardant une vague parenté. Mais il ne faut pas pour autant leur attribuer un ancêtre commun. Tous sont très anciens, les fossiles le prouvent. Ils proviennent probablement de souches proches les unes des autres, mais dont l'évolution s'est prolongée jusqu'à enlever à leurs descendants actuels toute ressemblance entre eux.

On groupe sous le nom de Cordés les Urocordés, les Céphalocordés et les Vertébrés. Il s'agit là de la plus grande réussite de l'évolution, puisque les Cordés forment le groupe zoologique qui s'est le plus diversifié et qui a le mieux colonisé la planète. Partout où la vie est présente, il y a des Cordés. Sous une diversité structurale considérable, les Cordés cachent une unité fondamentale. Celle-ci n'apparaît vraiment qu'au moment des toutes premières phases du développement de l'œuf. Les différenciations qui conduisent aux trois groupes de Cordés vont se faire très tôt.

Après la segmentation, l'embryon se creuse, une partie des cellules qui se trouvaient en surface pénètrent dans la cavité interne, et forment une ébauche de cavité digestive, l'*archenteron,* ouvert à l'extérieur par le *blastopore.* Chez les Céphalocordés et les Vertébrés, le fond de l'archenteron s'invagine une seconde fois pour former une nouvelle cavité, ou *cœlome,* qui s'isole de l'archenteron et qui deviendra plus tard la cavité générale. Chez les Urocordés, des cellules migrent entre la couche externe ou *ectoderme* et la couche interne ou *endoderme,* sous forme de cavité. Chez tous les Cordés, sur l'axe dorsal du corps, se creuse une gouttière. La lèvre du blastopore croît et recouvre cette gouttière pour la transformer en tube, ébauche du système nerveux. Sous cette première ébauche tubulaire se différencie une baguette rigide, la *corde,* formée de grandes cellules vacuolaires alignées. Cette structure squelettique est l'ébauche de la colonne vertébrale des Vertébrés. Chez tous les Invertébrés, sauf chez les Échinodermes, le blastopore fait office de bouche. Chez les Cordés, celle-ci se perce secondairement.

Puis, chez tous les Cordés, le corps s'allonge. Chez les Urocordés (de *oura,* la queue), seuls le tube nerveux et la corde vont croître vers l'arrière; le tube digestif ne suit pas. Par contre, chez les autres Cordés, tous les organes accompagnent l'allongement du tube nerveux et de la corde. Chez les Céphalocordés et les Vertébrés, le corps se métamérise : il s'organise en une série de segments, tous semblables, qui se succèdent d'avant en arrière. Pendant ce processus, la partie antérieure du tube digestif se perfore et va jouer un rôle respiratoire. Chez les Céphalocordés et les Vertébrés, les perforations sont

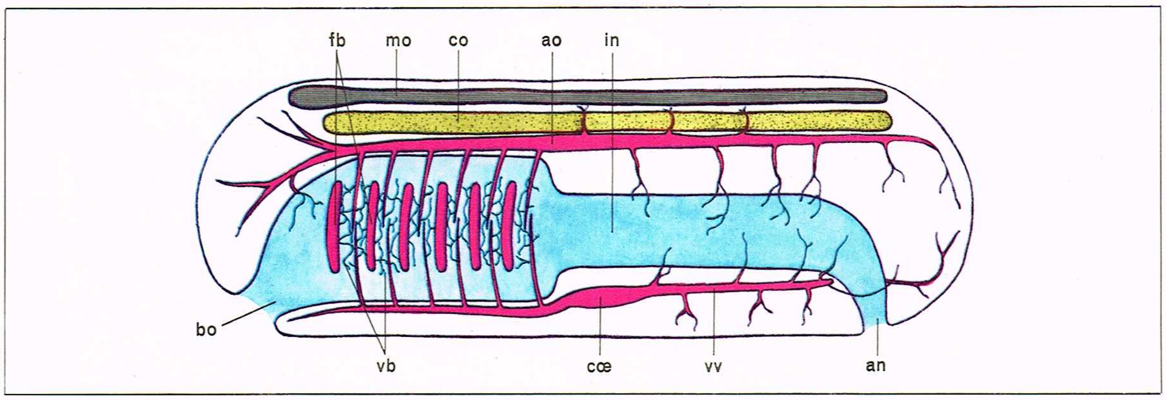

◀ ***Schéma de la structure interne d'un Cordé : bo, bouche; fb, fente branchiale; mo, moelle épinière; co, corde dorsale; ao, aorte dorsale; in, intestin; an, anus; vv, vaisseau ventral; coe, cœur; vb, vaisseaux branchiaux.***

métamériques et se succèdent dans les segments du corps. Les Céphalocordés (de *cephalè,* la tête) vont en rester à ce stade. Les Vertébrés poursuivent leur développement; des massifs cartilagineux se forment autour de la corde, se soudent segment par segment et donneront les vertèbres. Le développement des Urocordés diverge de celui des autres Cordés. Après une courte phase de vie larvaire, ils se métamorphosent en Invertébrés, perdent leur corde et leur tube nerveux. Un nouveau système nerveux, formé d'un ganglion et de nerfs, va se constituer.

Les Cordés se divisent donc facilement en trois phylums : les Urocordés, les Céphalocordés et les Vertébrés.

Les *Urocordés* ou *Tuniciers,* tous marins, comprennent les Ascidies benthiques, les Thaliacés pélagiques et les Appendiculaires, ou Perennicordés, qui gardent leur corde larvaire durant toute leur vie.

Les *Céphalocordés,* ou *Acraniens,* tous marins, gardent une structure larvaire de Vertébré. Il n'en existe que quelques espèces dans le monde.

Les *Vertébrés,* aquatiques ou terrestres, se divisent en nombreux groupes : les Agnathes ou Cycloptères, (dépourvus de mâchoires), les Sélaciens (Poissons cartilagineux), les Ostéichthyens (Poissons osseux), les Amphibiens, les Reptiles, les Oiseaux et les Mammifères.

Les nombreuses questions que pose l'origine des Cordés ne sont pas encore résolues. Grâce à leur squelette, les Vertébrés se fossilisent bien, et l'on connaît donc bien leur évolution; mais ils sont apparus tardivement, au Silurien, alors que tous les autres groupes zoologiques étaient déjà bien représentés. On connaît des fossiles plus anciens, mais leur identification est douteuse et leur interprétation change périodiquement. Les Procordés, de consistance molle, ne sont pas connus à l'état de fossiles. Les Ascidies sont représentées dans les roches par leurs spicules calcaires dès le début du Secondaire, et sous les formes de leurs représentants actuels. Il est probable que les formes sans squelette des Cordés sont apparues très tôt, en même temps que les autres groupes, mais nous n'en avons aucune preuve. A vrai dire, seuls les critères embryologiques permettent de concevoir un lien entre les Urocordés et les Vertébrés.

BIBLIOGRAPHIE

BARNES R.P., *Invertebrate Zoology,* Saunders Ed., Philadelphie, 1968. - BARRINGTON E., *The Biology of Hemicordata and Procordata,* W.H. Freeman ed., San Francisco, 1965. - GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie, Anatomie, systématique, biologie,* t. XI, Masson, Paris, 1966. - GRASSÉ P.-P., POISSON R. et TUZET O., *Zoologie,* t. I, *Invertébrés,* Masson, Paris, 1961. - HYMAN L.H., *The Invertebrates,* vol. 5, *Smaller Coelomate Groups,* Mc Graw-Hill ed., New York, 1959. - PRENANT M., *Procordés,* t. I et II, Hermann ed., Paris, 1936.

CLASSIFICATION DES CORDÉS

EMBRANCHEMENTS		CLASSES
UROCORDÉS ou TUNICIERS		*Ascidies* *Thaliacés* *Appendiculaires*
CÉPHALOCORDÉS ou ACRANIENS		
VERTÉBRÉS ou CRANIOTES	*Super-classe des Poissons*	*Cyclostomes* *Chondrichthyens* *Ostéichthyens*
		Amphibiens *Reptiles* *Oiseaux* *Mammifères*

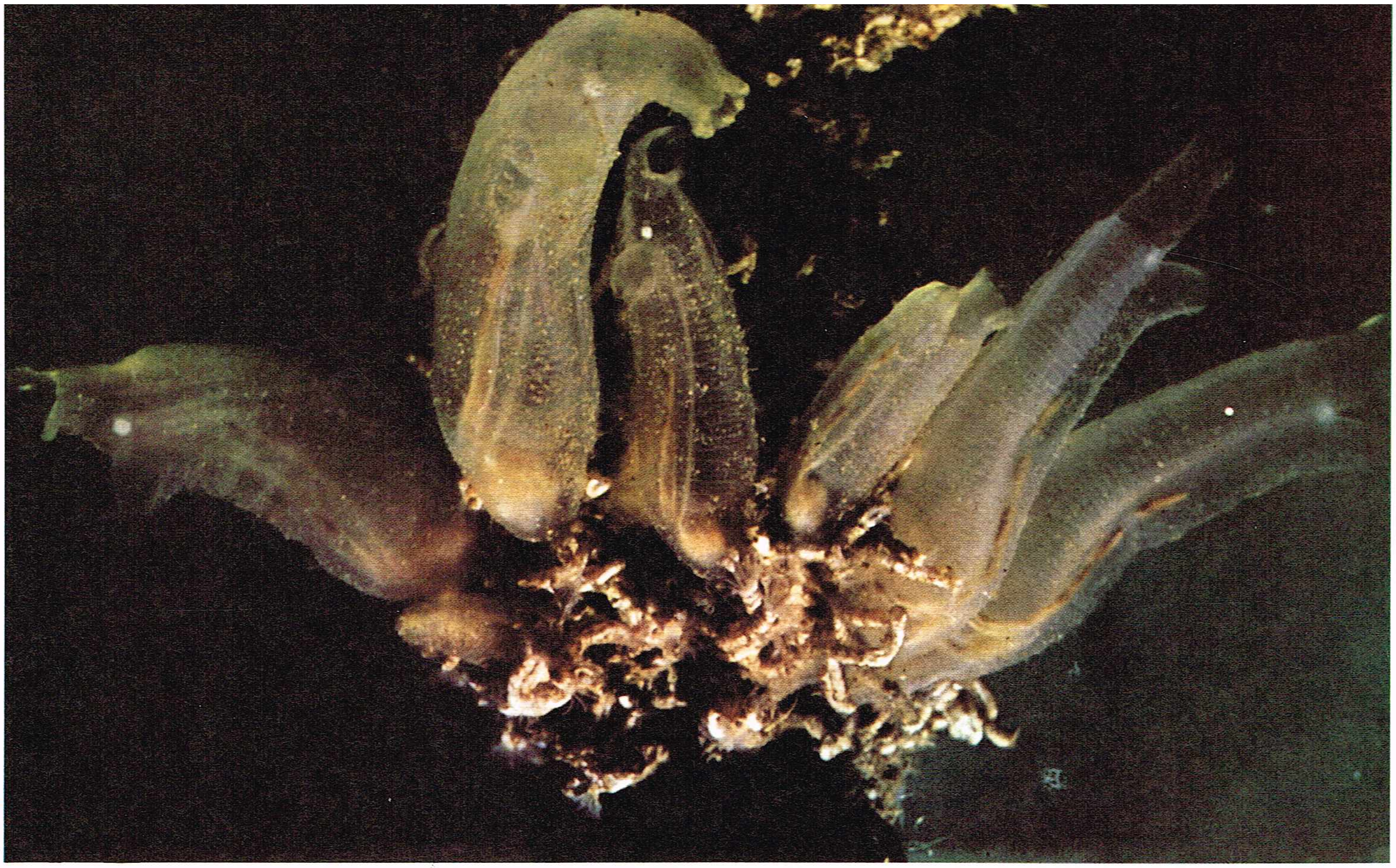

G. Relini

LES UROCORDÉS

▲ ***Fixé au rocher, un groupe de* Ciona intestinalis *dont la transparence de la tunique permet de discerner les structures internes; les Cionidae sont abondants dans les ports et sur les coques des bateaux.***

Un observateur non averti ne distinguera pas nécessairement au premier coup d'œil un Tunicier d'une Éponge, d'une Algue ou même de la roche. Solitaires ou coloniaux, fixés sur les roches, libres dans le sable ou pélagiques, leur taille va de moins d'1 mm à 60 cm pour les espèces solitaires. Certaines colonies peuvent dépasser 10 m. Certains Tuniciers étaient connus depuis l'Antiquité, mais l'unité du groupe n'était pas soupçonnée. Linné lui-même classait les espèces solitaires dans les Mollusques et les espèces coloniales au voisinage des Alcyonaires et des coraux, dans les « Animaux-plantes » ou les « Animaux-pierres ». C'est en 1816 seulement que Savigny découvrit l'unité structurale des Tuniciers et en fit une classe de Molluscoïdes proche des Céphalopodes. Ce n'est qu'en 1871 que Kowalevski, en étudiant leur larve, établit les rapports qui lient les Tuniciers aux Vertébrés.

Organisation générale

Les Tuniciers sont protégés par une enveloppe cellulosique dont la consistance est très variable puisqu'elle peut rappeler celle de la gélatine aussi bien que celle du cuir. Cas unique dans le règne animal, cette tunique est composée à 60 % d'une substance très voisine de la cellulose végétale : la tunicine. Les 40 % restants sont constitués de substances azotées (27 %) et de sels minéraux (13 %). Contrairement à tous les tubes, gaines ou carapaces des autres Animaux, la tunicine n'est pas sécrétée par un épithélium, mais elle est formée par le sang qui circule dans la tunique. C'est une structure fondamentale des Tuniciers. Chez certaines espèces, elle est consolidée par des organites calcaires, les spicules, qui se présentent sous la forme de petits disques ou d'étoiles. La différence d'acidité entre l'eau de mer, un peu alcaline, et le sang acide du Tunicier provoque la précipitation du calcaire qui est à l'origine de ces spicules.

L'organisation des Tuniciers présente des caractères très importants : l'absence de métamérisation du corps, l'absence d'un véritable cœlome, et une asymétrie fondamentale qui apparaît déjà chez la larve et même dès la première division de l'œuf; tous les organes sont décalés par rapport à l'axe du corps; cette asymétrie est souvent masquée au cours du développement, mais on en retrouve toujours la trace.

Malgré leur grande diversité d'aspect, tous les Tuniciers ont en commun certains traits anatomiques. Le tube digestif est toujours constitué de quatre parties. La première est un pharynx perforé, ou sac branchial, dans lequel l'eau pénètre par le siphon buccal. Ce pharynx joue un double rôle de respiration et de filtration des particules alimentaires. L'eau, après avoir traversé les perforations ou *stigmates,* passe dans deux cavités latérales, les *cavités cloacales,* qui se réunissent sur la face dorsale et s'ouvrent à l'extérieur par un siphon cloacal exhalant. Un mucus, sécrété par la gouttière ventrale, ou *endostyle,* enveloppe les particules alimentaires que le pharynx avait retenues. Puis, la lame ou les languettes dorsales *(raphé)* les rassemblent en un cordon, qui pénètre alors dans la seconde partie du tube digestif, l'œsophage. Les aliments parviennent ensuite dans l'estomac, partie la plus élargie du tube digestif, puis dans l'intestin. Les fécès, évacués par l'anus dans la cavité cloacale, sont ensuite rejetés à l'extérieur.

Le système circulatoire est constitué d'un cœur, simple épaississement d'un vaisseau, entouré d'une vésicule péricardique contractile; certains auteurs voient là le reste du cœlome. Le sang est pulsé dans des lacunes ou sinus sanguins creusés dans le corps; les plus importants se situent sous l'endostyle et le raphé. Le cœur effectue quelques pulsations dans un sens, s'arrête, puis envoie le sang dans l'autre sens. Le sang est constitué d'un plasma et de cellules circulantes de types variés : lymphocytes, amebocytes, phagocytes, néphrocytes, etc.

Le système nerveux comprend un ganglion plein situé entre les siphons, et des nerfs amyéliniques dont le tracé est très difficile à suivre. Sur le côté du ganglion nerveux se trouve une *glande hyponeurale,* dont le rôle est fondamental dans le cycle biologique des Tuniciers. Bien qu'elle débouche à l'extérieur par le tubercule vibratile situé en avant du raphé, cette glande semble aussi avoir un rôle endocrinien. C'est l'emplacement du ganglion nerveux, considéré comme dorsal par analogie avec les Vertébrés, qui sert à orienter les Tuniciers.

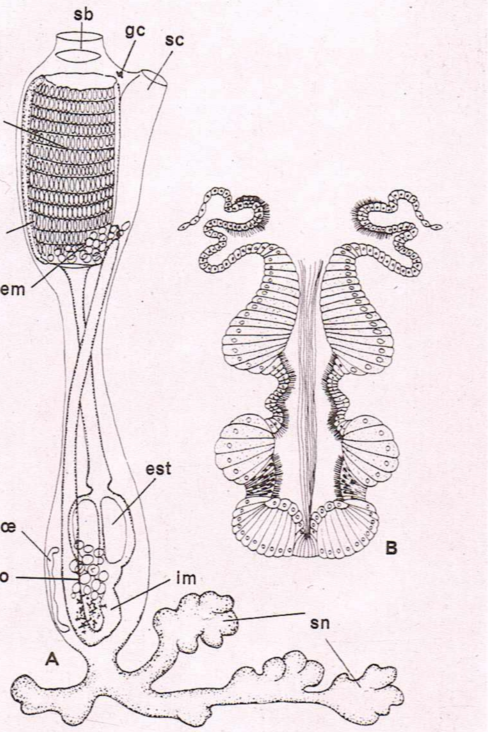

▲ A gauche, A, représentation schématique de l'organisation interne de Clavelina lepadiformis : sb, siphon buccal; gc, ganglion cérébral; sc, siphon cloacal; est, estomac; im, intestin moyen; go, gonade; sn, stolon bourgeonnant; cœ, cœur; em, embryons incubés dans la cavité cloacale; en, endostyle; cb, cavité branchiale. B, coupe de l'endostyle.

I.G.D.A.

EMBRANCHEMENT DES UROCORDÉS

Classe des Ascidies

- ○ *Ordre des Aplousobranches*
- ○ *Ordre des Phlébobranches*
- ○ *Ordre des Stolidobranches*
- ○ *Ordre des Aspiraculates*

Classe des Thaliacés

- ☐ *Sous-classe des Pyrosomes*
- ☐ *Sous-classe des Dolioles*
- ☐ *Sous-classe des Desmomyaires*

Classe des Appendiculaires

Reproduction

Les Tuniciers sont presque sans exception tous hermaphrodites. Les gonades contiennent les éléments mâles et femelles; bien souvent, les œufs et les spermatozoïdes sont mûrs en même temps; l'autofécondation est quelquefois possible. Il n'y a jamais d'accouplement. Les produits génitaux mâles sont toujours rejetés dans l'eau de mer, les œufs le sont souvent, et le développement s'effectue alors dans l'eau. Parfois, les œufs sont fécondés dans le corps de l'individu mère, soit dans l'oviducte, soit dans des poches incubatrices; l'œuf est entouré de cellules folliculaires appartenant à la mère. La segmentation de l'œuf est complète, sauf chez les Pyrosomes. Dans certains cas, les cellules folliculaires s'intègrent à l'embryon. Le développement donne en général une larve nageuse pourvue d'une corde, mais dans certains cas, le développement est direct.

En plus de la reproduction sexuée, les Tuniciers coloniaux bourgeonnent et se multiplient par voie asexuée. Les modalités de bourgeonnement sont très variables selon les groupes.

Écologie

Les Tuniciers comprennent environ trois mille espèces et vivent dans tous les milieux marins, de la zone des marées aux plus grandes profondeurs, et dans le plancton de toutes les mers. L'immense majorité des espèces ne supporte pas le dessalement. Aucune espèce ne peut vivre dans une eau dont la salinité est inférieure à 15 ‰.

SYSTÉMATIQUE

Les Tuniciers se divisent en trois classes : les Ascidies, benthiques, les Thaliacés, pélagiques, et les Appendiculaires, pélagiques, qui gardent toute leur vie une corde dorsale.

ASCIDIES

Les Ascidies *(Ascidiacea)*, sont des Tuniciers typiques, simples ou coloniaux, dont la structure est constante, bien que le développement plus ou moins grand d'une partie du corps puisse modifier profondément leur aspect. La structure coloniale ne modifie que l'aspect externe.

La taille des individus vivant sur nos côtes peut varier de 0,5 à 30 cm de longueur. Ils vivent généralement fixés sous les rochers.

Typiquement, une Ascidie simple se présente sous la forme d'une petite outre percée de deux orifices : le siphon buccal ou inhalant, généralement le plus éloigné du support, et le siphon cloacal ou exhalant. Des muscles circulaires permettent la fermeture des siphons, mais si l'on touche l'Animal, il se contracte et expulse l'eau en un ou deux jets. L'eau est aspirée par le siphon buccal, filtrée à travers le sac branchial et rejetée par le siphon cloacal.

Le sac branchial forme presque toujours la plus grande partie du corps; il est très vascularisé et joue un rôle respiratoire, mais sert aussi à la capture des aliments en suspension dans l'eau. Les perforations du sac branchial sont ciliées, et le battement des cils est le moteur principal du courant d'eau. L'endostyle sécrète en permanence un film muqueux, rassemblé en un cordon à droite du raphé dorsal; celui-ci est toujours un peu décalé sur la gauche. Le cordon alimentaire pénètre dans l'œsophage, se pelotonne dans l'estomac et transite, avant d'être évacué par l'intestin. L'estomac possède une paroi glandulaire et est quelquefois couvert d'un « foie » différencié. Dans l'estomac débouche aussi une glande située le long de l'intestin : la glande pylorique.

Chez les Ascidies, l'excrétion est encore mal connue. Une partie des produits d'excrétion est libérée à l'extérieur sous forme d'ammoniaque et de ptérines, en particulier d'isoxanthoptérine, qui n'est autre que la vitamine B_{12}; mais une autre partie est stockée, d'abord par des cellules sanguines spécialisées, qui conservent les urates sous forme de cristaux ou de pigments. Dans certains cas, ces cellules s'accumulent en certains points ou lignes de pigment, par exemple chez *Clavelina lepadiformis*. Certaines familles possèdent une série de vésicules d'accumulation. Enfin les Molgulidae possèdent à droite, le long du cœur, une vésicule creuse, le « rein d'accumulation ».

Le système nerveux est typique des Urocordés. Les organes des sens, très mal connus, semblent diffus et réduits à l'état de cellules isolées. On a pu mettre en évidence une sensibilité tactile, un sens chimique et une « audition » (sensibilité aux vibrations), mais, malgré la présence sur certaines espèces de taches dites oculaires, la sensibilité à la lumière est très faible.

Le rôle endocrinien de la glande hyponeurale est démontré, en particulier sur l'activité génitale. D'autres organes, comme l'endostyle et certaines cellules isolées

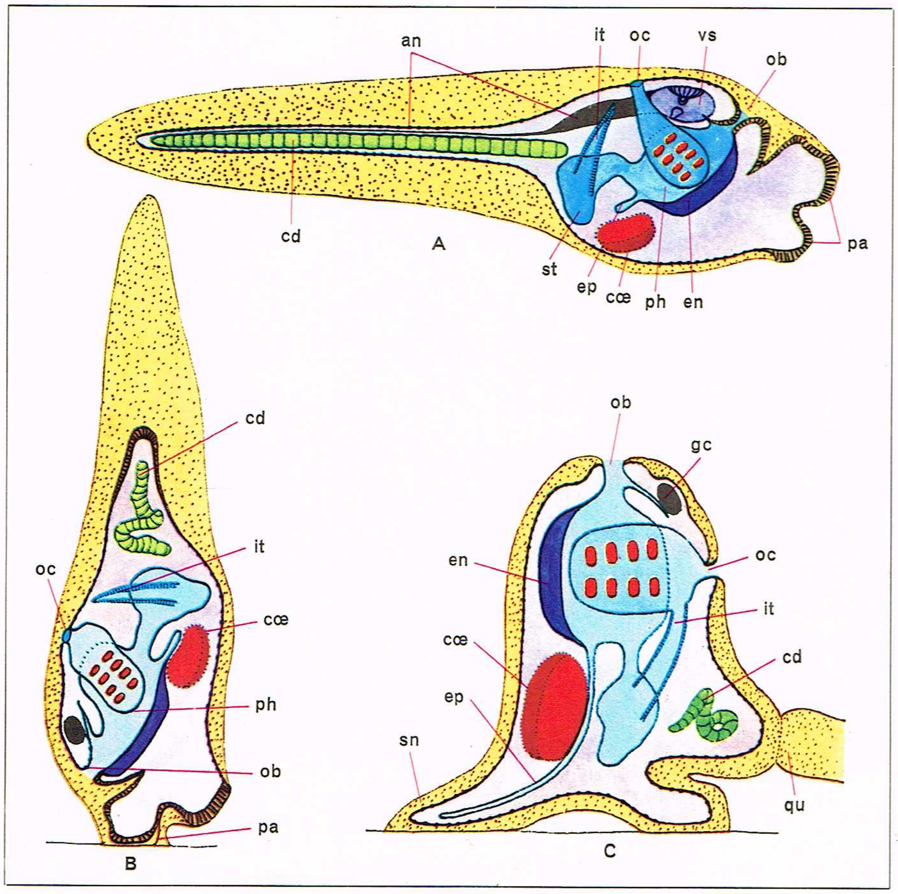

▲ A gauche, schéma de la métamorphose d'une Ascidie : A, larve libre; B, fixation de la larve même; C, rotation et régression de la queue : an, axe neural; cd, corde dorsale; cœ, cœur; en, endostyle; ep, tube épicardique; gc, ganglion cérébral; it, intestin terminal; ob, orifice branchial; oc, orifice cloacal; pa, papille adhésive; ph, pharynx; qu, queue; sn, stolon; st, stomodeum; vs, vésicule sensorielle.

▲▶ Colonie de Tuniciers Polycitoridae : **Clavelina lepadiformis.**

le long du tube digestif, ont peut-être aussi une telle fonction, sans qu'on ait pu le démontrer réellement. L'impossibilité actuelle de procéder à des ablations autres que celle du complexe nerveux ne facilite pas l'interprétation.

L'immense majorité des Ascidies est hermaphrodite. Après un développement typique de Cordé, la larve se métamorphose. Dans certains cas d'incubation, la métamorphose peut se produire dans le corps de la mère. La larve nageuse est pourvue d'une ou de deux vésicules sensorielles (ocelle et otolithe) situées au contact du ganglion nerveux, et, vers l'avant, d'un volumineux organe de fixation constitué de ventouses adhésives entourées de papilles. La durée de la vie active de la larve est courte : de trois minutes à trois jours. Sa nage est désordonnée et très lente, de l'ordre de quelques millimètres par seconde; elle est donc portée par les courants. Au moment où elle heurte le substrat, la métamorphose s'accomplit; la larve se fixe par les ventouses et très vite la queue régresse. La corde, le tube nerveux et la musculature caudale s'histolysent, la face dorsale antérieure de la larve se développe et place le siphon buccal à l'opposé du substrat. La vésicule nerveuse antérieure se désorganise, et à son emplacement s'édifie le complexe neuro-glandulaire. Les derniers vestiges à disparaître sont l'ocelle et l'otolithe qui peuvent persister quelques jours. Chez certaines Ascidies composées comme *Diplosoma,* le bourgeonnement peut commencer avant la métamorphose.

En plus de la reproduction sexuée, beaucoup d'Ascidies se reproduisent par bourgeonnement et forment des colonies. Les modes de bourgeonnement sont très nombreux et souvent caractéristiques d'une famille.

Les Ascidies sont représentées dans toutes les mers du globe, de la zone des marées aux plus grandes profondeurs où elles sont d'ailleurs abondantes et très variées. Seules quelques-unes (moins de 5 % des espèces) supportent un certain dessalement ou des variations de salinité. Tous les types de milieux sont occupés, mais l'abondance maximale se situe en zone rocheuse dans les cinquante premiers mètres de profondeur.

Les Ascidies sont divisées en quatre ordres fondés sur la structure branchiale.

Ordre des Aplousobranches

Chez les Aplousobranches *(Aplousobranchiata),* le sac branchial est simple et perforé d'un certain nombre de rangées transversales de stigmates longitudinaux. Toutes ces Ascidies sont coloniales et capables de bourgeonner.

Les **Polycitoridae** ne sont guère représentées sur nos côtes que par les *Clavelina.* Ces espèces bourgeonnent à partir du sang. Certains crampons, qui attachent l'Ascidie au substrat et qui contiennent deux vaisseaux sanguins, s'épaississent, se gorgent de cellules et un nouvel ascidiozoïde se constitue.

Si on les perturbe, les clavelines peuvent se contracter dans leur tunique, se désorganiser complètement, puis un mois plus tard se retransformer en Ascidies. D'autres Polycitoridae communes dans diverses mers possèdent un stolon, qui se découpe en tronçons pour former d'autres ascidiozoïdes.

Les **Polyclinidae** telles que les *Aplidium* se présentent sous la forme de petites mûres, suspendues sous les roches dans la zone des marées. Ici, le corps est divisé en trois parties : le thorax contenant la branchie, l'abdomen avec le tube digestif et un post-abdomen très long où se trouvent les gonades. Les zoïdes sont très minces et mesurent généralement plusieurs mm de longueur sur 1 mm de diamètre. Le bourgeonnement intéresse l'abdomen et le post-abdomen; ces deux organes perdent leurs traits distinctifs et se fragmentent en tronçons (processus de strobilisation), chacun se transformant en zoïde.

Les **Didemnidae** sont très abondantes. Généralement, elles se présentent sous la forme de croûtes blanches ou marbrées de 1 mm d'épaisseur, que l'on trouve sur les roches et sur certaines Algues. La tunique commune est truffée de spicules calcaires, et ce n'est qu'en examinant la surface avec attention que l'on peut discerner les siphons. Les zoïdes sont très petits : 1 mm environ. Ils sont formés d'un thorax et d'un abdomen contenant le tube digestif et les gonades, séparés par un étranglement. C'est au niveau de l'étranglement que s'effectue le bourgeonnement; on voit alors pousser un jeune thorax et un jeune abdomen, puis le vieux thorax va se raccorder au jeune abdomen et *vice versa.*

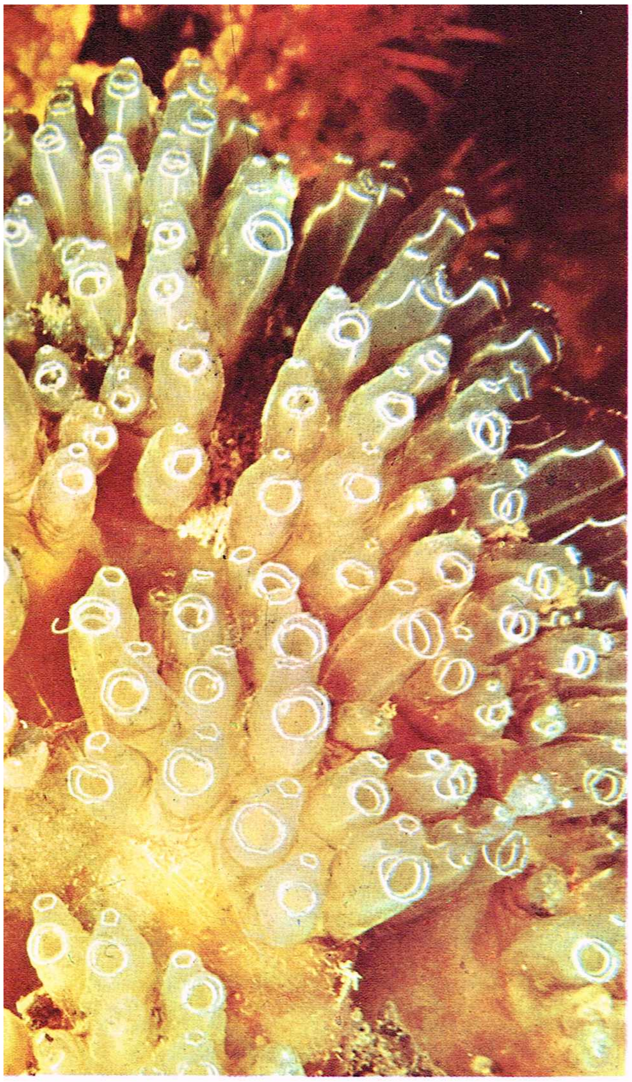

Ordre des Phlébobranches

Chez les Phlébobranches *(Phlebobranchiata)*, des papilles, qui se réunissent les unes aux autres par des vaisseaux sanguins, viennent se superposer à la lame fondamentale de la branchie perforée de stigmates. L'ensemble forme une grille à mailles carrées.

Les **Cionidae** comprennent des espèces qui ressemblent à des Polyclinidae géantes et qui bourgeonnent de la même manière, comme *Diazona violacea*, et des espèces solitaires, comme *Ciona intestinalis*, qui vivent en abondance dans les ports et sur les coques des bateaux.

Les **Octacnemidae**, proches des Cionidae, sont des Ascidies abyssales dont le siphon buccal connaît un développement considérable (les 4/5 du corps) et se transforme en nasse dans laquelle les petits Crustacés viennent se faire prendre.

La famille la plus importante est celle des **Ascidiidae**, représentée sur nos côtes par des individus de grande taille, tels que *Phallusia mamillata* ou les différents *Ascidia*. Ils vivent dans la zone des marées, dressés comme *Phallusia*, ou plus généralement couchés sur la face gauche. Leurs couleurs sont parfois très vives.

Ordre des Stolidobranches

Chez les Stolidobranches *(Stolidobranchiata)*, la branchie atteint son maximum de complexité. Le réseau de sinus que l'on trouvait chez les Phlébobranches s'organise ici en plis longitudinaux qui parcourent toute la branchie. La lame fondamentale et les stigmates pénètrent dans ces plis; l'augmentation de la surface branchiale est considérable; la branchie occupe tout le corps, le tube digestif est rejeté à gauche, et les gonades se répartissent sur les faces latérales de la cavité cloacale.

Seule la famille des **Styelidae** a des représentants coloniaux. Les *Botryllus*, qui ressemblent à des fleurs, sont vivement colorés. Les zoïdes bourgeonnent à partir des parois latérales du corps, et les deux nouveaux zoïdes vont venir se ranger à côté du zoïde mère. L'ensemble des zoïdes forme des rosettes bien visibles. D'autres individus tels que les *Distomus*, petites masses de 1 cm que l'on peut voir sous les pierres par grande

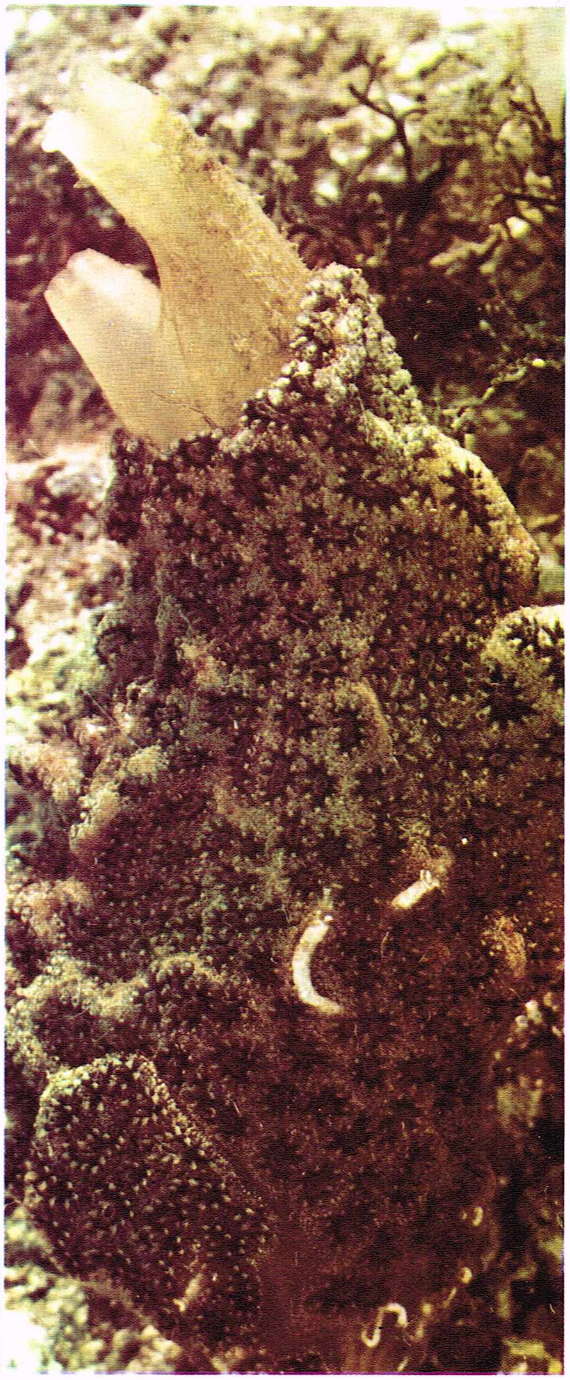

G.S. Giacomelli

◀ *Un spécimen de* **Ciona intestinalis** *recouvert d'une colonie de* **Botryllus.**

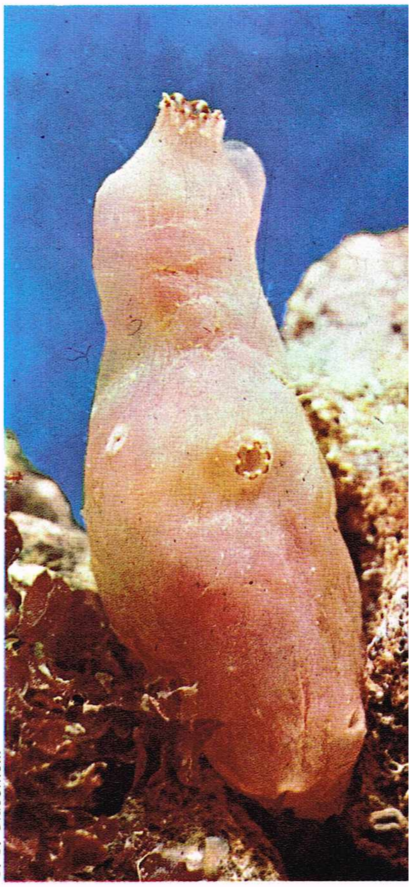

G. S. Giacomelli

▲ *Les Ascidiidae sont représentés par des individus de grande taille : ici,* **Ascidia mentula.**

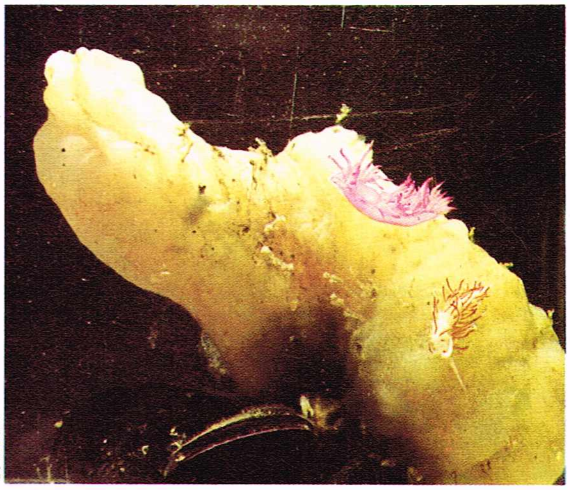

G. Relini

◀ **Phallusia mamillata,** *vivant comme beaucoup d'Ascidiidae à la limite des basses mers.*

A. Margiocco

▲ ***Une Ascidie,* Halocynthia papillosa, *enserrée solidement ici par une étoile de mer,* Echinaster sepositus.**

marée, se multiplient par des vaisseaux sanguins, à la manière des *Clavelina*. Les autres espèces sont solitaires, mais on peut les rencontrer parfois en masses compactes, comme c'est le cas pour les *Dendrodoa*. Les Styelidae n'ont jamais plus de quatre plis branchiaux par demi-branchie.

Les **Pyuridae** ont au moins six plis branchiaux et peuvent atteindre une grande taille en Méditerranée, où les *Microcosmus* se mangent sous les noms de violets, bijus ou figues de mer. D'autres espèces, telles que *Halocyntia papillosa*, d'un beau rouge, peuplent souvent les aquariums. Pratiquement toutes les Pyuridae sont comestibles, mais elles ne sont consommées qu'en quelques points du globe.

Les **Molgulidae** ont au moins six plis branchiaux; sous les plis, les stigmates se disposent en spirales et possèdent un rein. Beaucoup d'espèces vivent libres, enfouies dans le sédiment et couvertes de sable. On les trouve parfois à mer très basse, comme *Molgula occulta*, « l'œuf de sable ».

Ordre des Aspiraculates

Les Aspiraculates *(Aspiraculata)* sont de petites espèces abyssales et profondément modifiées dont la branchie a disparu et le siphon buccal s'est transformé en une trompe. Ces espèces ne sont plus des filtreurs, mais des macrophages qui happent au passage des Crustacés, des Mollusques, des Polychètes et des Foraminifères. Lors de leur récolte par draguage, elles sont toujours ramenées mortes, leur biologie est donc très mal connue.

THALIACÉS

On réunit sous le nom de Thaliacés *(Thaliacea)* trois groupes de Tuniciers dont les structures et les modes de reproduction sont très différents les uns des autres. Ces formes n'ont guère en commun que l'existence d'une alternance de générations; l'oozoïde provenant de l'œuf est asexué et bourgeonne des blastozoïdes sexués, à l'aide d'un stolon prolifère.

Sous-classe des Pyrosomes

Les colonies de Pyrosomes, appelés couramment « corps de feu », se présentent sous forme de manchons cylindriques fermés à une extrémité. Si on les excite, ils produisent des éclairs lumineux. Les blastozoïdes ont encore une structure d'Ascidie. Le siphon buccal s'ouvre à l'extérieur et le siphon cloacal à l'intérieur du manchon. L'eau filtrée s'échappant par l'orifice commun propulse la colonie.

Le pharynx des Pyrosomes ressemble beaucoup à celui d'une Ascidie Phlébobranche, mais il n'y a pas de tentacules. Les stigmates sont transverses et s'étendent du raphé à l'endostyle. Le raphé est constitué de languettes qui ne correspondent pas aux rangs de stigmates. Le tube digestif est ramassé à l'extrémité postérieure de la branchie, et l'anus s'ouvre vers l'arrière dans la cavité cloacale.

Les gonades mâles et femelles sont incluses dans le manteau et s'ouvrent indépendamment à l'extérieur. L'ovaire ne contient qu'un seul œuf qui sera incubé sur place.

Le cœur est médioventral, situé entre l'endostyle et le tube digestif. Le système nerveux est de type Ascidie, mais un ocelle est inclus dans le ganglion nerveux. Les éclairs lumineux lancés par les Pyrosomes sont produits par deux organes situés de part et d'autre du pharynx. Ils sont formés de cellules mésenchymateuses contenant des Bactéries lumineuses.

Volumineux, l'œuf est entouré de cellules folliculaires contenant les spores des Bactéries lumineuses. La segmentation de l'œuf est incomplète, et l'embryon se forme à la surface de l'œuf. Ce *cyathozoïde* possède une structure très simplifiée; il ne se compose guère que des ébauches pharyngienne, nerveuse, endostylaire, et cardiaque, et de deux tubes péribranchiaux débouchant à l'extérieur. Pharynx, endostyle et tubes péribranchiaux s'allongent vers l'arrière, se forment en spirale, puis en arc sur l'œuf. Ce stolon va se découper en quatre fragments tandis que le cyathozoïde dégénère. Les quatre fragments se différencient en quatre *blastozoïdes*. C'est à ce stade que l'œuf est libéré. Les cellules folliculaires, qui portent les spores des Bactéries, s'incorporent à la larve, et les spores, transportées par le sang, vont se fixer dans les organes lumineux. Les blastozoïdes bourgeonnent à leur tour grâce à un stolon proligère sous-endostylaire, puis la colonie va se former.

Sous-classe des Dolioles

Les Dolioles sont des petits tonnelets de 1,5 à 50 mm de long, que l'on trouve dans les mers chaudes ou tempérées. L'aspect de tonneau est encore souligné par la présence de neuf anneaux musculaires qui cerclent le corps. Un appendice prolonge la face postéro-dorsale.

Le corps est divisé en deux parties, séparées par une branchie plate presque transversale, perforée de fentes branchiales. Le tube digestif, le cœur et les gonades sont situés sur la face ventrale en arrière de la cloison branchiale. La cavité branchiale est dépourvue de tentacules et de raphé; ne demeurent qu'un endostyle ventral antérieur et un tubercule vibratile dorsal. Du ganglion nerveux dorsal partent des nerfs qui innervent les muscles, les organes sensoriels situés sur les siphons et un otolithe localisé sur la face gauche.

Le cycle des Dolioles, très compliqué, comporte l'alternance de trois générations de zoïdes.

Les gonades hermaphrodites se développent chez des zoïdes particuliers, les *gonozoïdes*. Chaque glande s'ouvre indépendamment dans la cavité cloacale et les produits

génitaux sont émis dans l'eau de mer. L'œuf fécondé subit des divisions totales et se développe selon le schéma de l'œuf d'Ascidie, mais avec des variantes; en particulier, l'ébauche nerveuse ne se prolonge pas dans la queue. La jeune larve-têtard, dans son enveloppe, nage dans du liquide périvitellin. La métamorphose a lieu dans l'enveloppe, et seule la partie tout à fait antérieure de la larve se transforme en une jeune Doliole, l'oozoïde.

L'*oozoïde* possède un stolon proligère sur la face ventrale, derrière l'endostyle. Des bourgeons s'isolent à l'extrémité du stolon. Chaque bourgeon est pris en charge par un groupe de cellules amiboïdes, ou *phorocytes*, qui vont le transporter vers l'appendice dorsal en passant par le flanc droit de l'oozoïde, le long d'une véritable piste. Les bourgeons se fixent à la base de l'appendice dorsal et se divisent en quinze ou vingt fragments. Au fur et à mesure que de nouveaux bourgeons affluent, l'appendice dorsal s'allonge, entraînant ceux qui s'étaient fixés les premiers. Sur l'appendice, les bourgeons se disposent en trois files, les deux latérales formeront des gastérozoïdes, la file centrale des phorozoïdes.

Les *gastérozoïdes* restent liés à l'oozoïde. Leur structure est modifiée dans le sens d'une hypertrophie de la branchie et du tube digestif; ils nourrissent la colonie.

Le *phorozoïde* a une structure très proche de celle de l'oozoïde; il reste lié à l'oozoïde par un pédoncule. C'est sur ce pédoncule que vont se fixer d'autres bourgeons qui donneront des gonozoïdes. Ceux-ci ressemblent à l'oozoïde, mais n'ont que huit bandes musculaires et sont dépourvus d'otolithe. Par contre, la branchie se développe et prend la forme d'une selle. Les gonozoïdes se détachent et mènent une vie indépendante.

Sous-classe des Desmomyaires

Les Desmomyaires, ou Salpes, sont des Tuniciers planctoniques à corps fusiforme marqué de bandes musculaires; ils sont caractérisés par une alternance de générations et un développement embryonnaire tout à fait originaux.

Les individus solitaires, ou *oozoïdes*, longs de 1 à 20 cm selon les espèces, sont de forme allongée et possèdent de quatre à huit bandes musculaires interrompues sur la face ventrale. Les bandes ne sont pas uniformément réparties comme chez les Dolioles. A l'avant de l'Animal, la bouche donne accès à un large pharynx qui occupe la moitié antérieure du corps, la partie postérieure étant occupée par la cavité cloacale. La branchie est constituée par une barre creuse qui s'étend dans le plan sagittal, depuis la partie antérieure et dorsale jusqu'aux trois

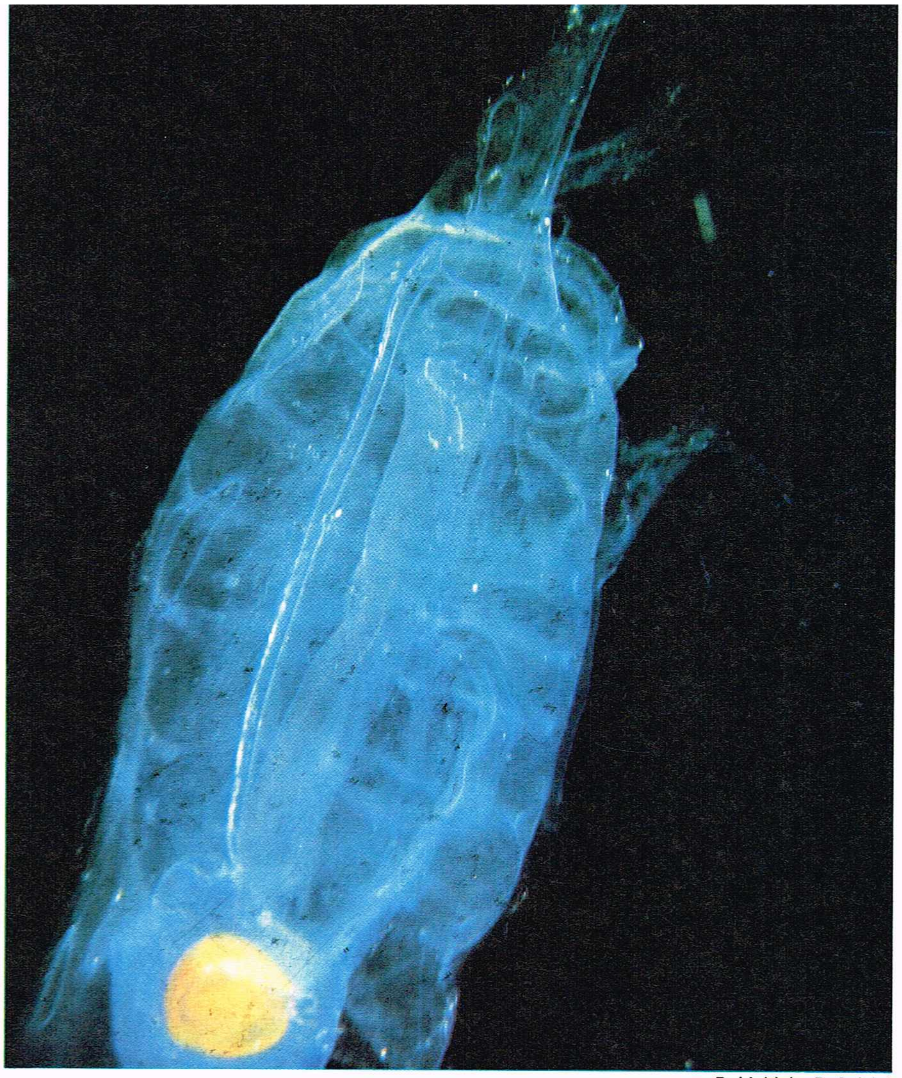

R. Maltini - P. Solaini

▲ *Un Tunicier appartenant à la sous-classe des Salpes; ce sont des Animaux planctoniques.*

▼ *A gauche,* Pyrosoma *au stade tétrazoïde; au milieu (A), structure d'une Salpe solitaire en vue dorsale : 1, bouche; 2, branchie; 3, endostyle; 4, nucleus; 5, stolon; (B)* Salpa fusiformis *au stade oozoïde : ob, orifice buccal; cb, chambre branchiale; en, endostyle; sp, stolon prolifère; cœ, cœur; est, estomac; it, intestin terminal; tu, tunique; oc, ouverture cloacale; mc, muscle cloacal; cc, cavité cloacale; b, branchie; gc, ganglion cérébral; I à VIII, bandes musculaires; à droite, gonozoïde de* Doliolum resistibile *vu par le côté gauche : lb, lobes buccaux; gc, ganglion cérébral; br, branchie; lc, lobes cloacaux; ov, ovaire; in, intestin; cœ, cœur; en, endostyle; te, testicule.*

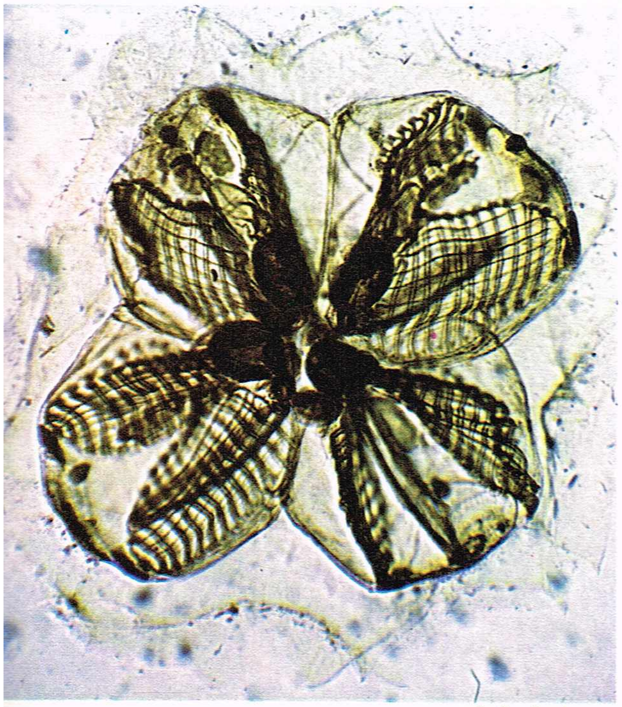

C. Carré - Jacana

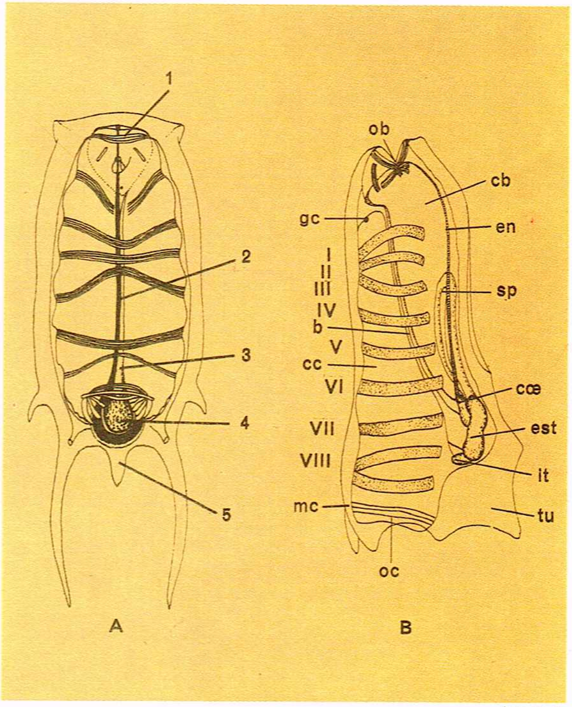

I.G.D.A.

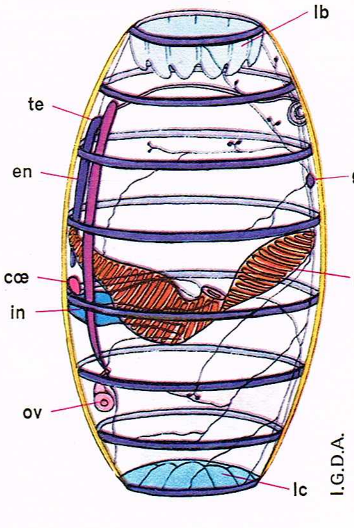

I.G.D.A.

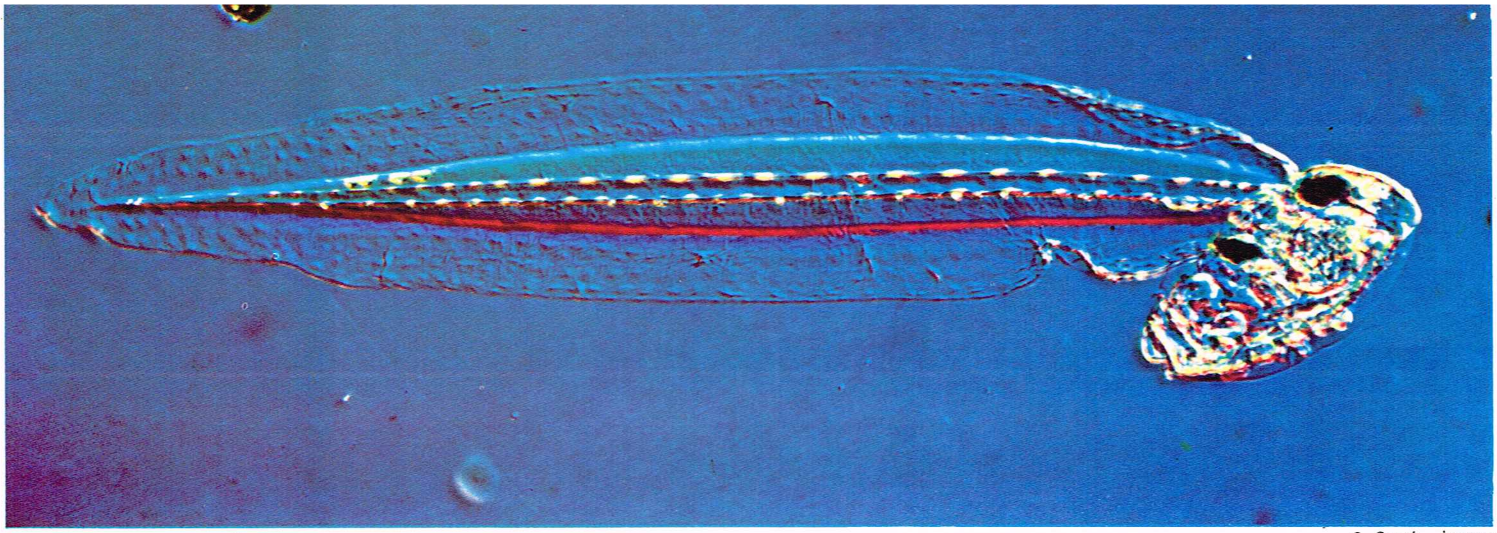

C. Carré - Jacana

▲ *Les Appendiculaires sont de petits organismes pélagiques munis d'une queue et nageant activement dans le plancton ; ici,* Oikopleura dioica.

quarts postérieurs ventraux. De chaque côté de cette barre se trouve une très vaste perforation.

Vers l'avant, la cavité buccale est limitée par un velum. On y trouve un endostyle ventral, des arcs péricoronaux et un raphé rétro-pharyngien. L'anse digestive et le cœur sont logés dans une protubérance ventrale et postérieure, le *nucleus*. Ce dernier est généralement vivement coloré en brun ou en vert.

Le système nerveux est constitué d'un ganglion cérébroïde dorsal et de nombreux nerfs périphériques, qui rayonnent à partir du ganglion et vont innerver les muscles. Un œil est inclus dans le ganglion, flanqué, à droite et à gauche, d'une glande neurale. Les glandes neurales débouchent indépendamment l'une de l'autre dans le pharynx. L'organe vibratile, impair et médian, n'a pas de rapport avec elles. Chez certaines espèces, le nucleus est entouré de cellules lumineuses contenant probablement des Bactéries.

L'oozoïde émet un stolon à partir de l'espace qui sépare l'endostyle du nucleus. Ce stolon s'élargit progressivement de l'avant vers l'arrière, puis se strobilise par à-coups, si bien que des groupes de blastozoïdes, tous du même âge, se différencient. Chaque bourgeon donne un blastozoïde sexué. Les groupes de blastozoïdes du même âge se détachent de l'oozoïde et forment des chaînes de Salpes qui peuvent être rompues accidentellement sans dommage. La forme adulte ressemble à l'oozoïde. Mais il est en général plus petit. Sa musculature est réduite. L'œil est par contre plus développé et se subdivise en plusieurs organes inclus dans le ganglion nerveux.

Les *blastozoïdes,* ou forme agrégée, sont hermaphrodites et possèdent un testicule et un ovaire ne contenant souvent qu'un ovocyte. Après les premières divisions, les cellules maternelles forment un véritable moule qui cédera peu à peu la place à l'embryon.

APPENDICULAIRES

Les Appendiculaires *(Appendiculata)* sont des organismes pélagiques munis d'une queue, qui nagent dans le plancton. Ils ressemblent à de petits marteaux dont le manche serait la queue ; cette queue s'insère à la jonction entre le thorax et l'abdomen.

Le pharynx est très modifié. Il s'ouvre en avant par la bouche. Sa forme est celle d'un tétraèdre dont l'une des faces serait ventrale. Celle-ci est bordée latéralement de deux gouttières qui aboutissent à des tubes branchiaux s'ouvrant à l'extérieur par deux spiracules. En avant, ventralement, se trouve un endostyle court. Le tube digestif décrit une boucle, et l'anus s'ouvre vers l'avant entre les deux spiracules. Il n'y a pas de cavité cloacale.

L'organe cardiopéricardique est simplifié ou même, dans certains cas, inexistant. Situé près du tube digestif, il propulse un « sang » dépourvu de cellules sanguines, tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre. Lorsqu'il n'y a pas de cœur, ce sont les battements de la queue qui propulsent le sang.

Les gonades sont situées en arrière du tube digestif. Elles se composent d'un ovaire médian et généralement de deux testicules. Il existe un spermiducte, mais pas d'oviducte. A leur maturité les œufs sont libérés par la rupture des parois du corps à la mort de l'Animal.

La queue est fondamentalement identique à celle du têtard d'Ascidie. Elle contient une corde volumineuse, rigide et élastique formée de cellules vacuolaires et située entre deux champs de cellules musculaires.

Le système nerveux est constitué d'un ganglion cérébroïde qui contient un statocyste et de nerfs qui innervent le tronc. Il se prolonge vers l'arrière par un cordon nerveux médiodorsal contenant des cellules ganglionnaires. Dans la queue, ces cellules se groupent en ganglions d'où divergent de petits nerfs moteurs et sensitifs qui innervent les muscles caudaux.

Les Appendiculaires, à l'exception d'une espèce, sont hermaphrodites protandriques. Les œufs sont très petits, et subissent une segmentation totale. Le développement est typique des Cordés, la queue se trouvant dans l'axe du corps. La différenciation du tube digestif ne s'effectue qu'après l'éclosion. La larve ne subit pas de métamorphose mais une sorte de « foulure » de la queue qui, en une fraction de seconde, passe de la position larvaire dans l'axe du corps à la position définitive.

Les Appendiculaires sont nus et ne sont pas enveloppés d'une tunique. L'épiderme contient des cellules de types variés, dont les *oïkoplastes,* qui sécrètent une logette gélatineuse non cellulosique dans laquelle vit l'Animal. La logette est une structure complexe constituée de chambres ; les premières s'ouvrent à l'extérieur par une fenêtre grillagée qui retient les grosses particules et conduisent, après les avoir séparées, l'eau et les particules alimentaires vers l'Animal : ce sont les *chambres du piège*. La queue bat continuellement, créant un courant d'eau à travers le système qui assure à la fois la filtration des aliments et la propulsion de la logette. Enfin, si l'Animal est inquiété, il peut, en rompant une paroi très fine, passer dans la *chambre de fuite,* abandonnant ainsi la logette. Les Appendiculaires ne semblent pas demeurer plus de trois heures dans une logette ; ils l'abandonnent donc naturellement, et dans l'espace de quelques secondes, une nouvelle logette se déploie autour d'eux.

▼ *Schéma de l'organisation interne d'un Appendiculaire,* Oikopleura cophocerca, *vu par le côté droit : (A) : ov, ovaire ; cg, æcum gastrique ; œs, œsophage ; cn, cordon neural ; ph, pharynx ; gc, ganglion cérébral ; gb, glande buccale ; en, endostyle ; qu, queue ; an, anus ; sp, spiracle ; in, intestin ; te, testicule ; (B) : bo, bouche ; gc, ganglion cérébral et statocyste ; go, gonade ; cn, cordon neural ; cd, corde dorsale ; mu. muscles ; an, anus.*

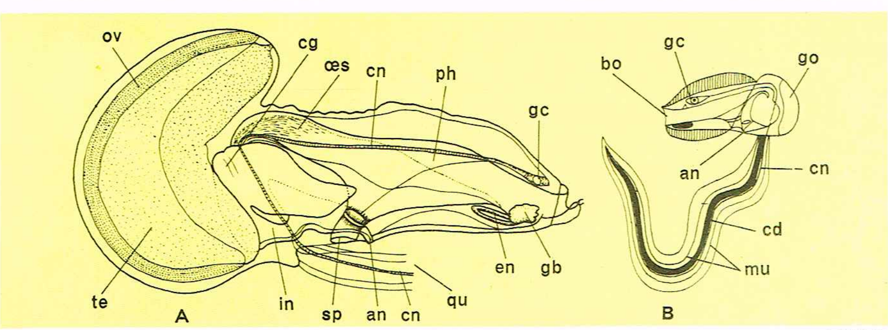

I.G.D.A.

BIBLIOGRAPHIE

BERRILL N.J., *The British Tunicata,* Ray Society, London, 1950. - BRIEN P., *Embranchement des Tuniciers,* in GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie,* Masson, Paris. - MILLAR R.H., *British Ascidians,* Academic Press, London, 1970. - TOKIOKA T., *Ascidians of Sagami Bay Collected by His Majesty the Emperor of Japon,* Tokyo, 1963. - TRÉGOUBOFF G. et ROSE M., *Manuel de planctonologie méditerranéenne,* C.N.R.S., éd., Paris, 1957. - VAN NAME W.G., *North and South American Ascidians,* Bull. U.S. Nat. Mus., 1945.

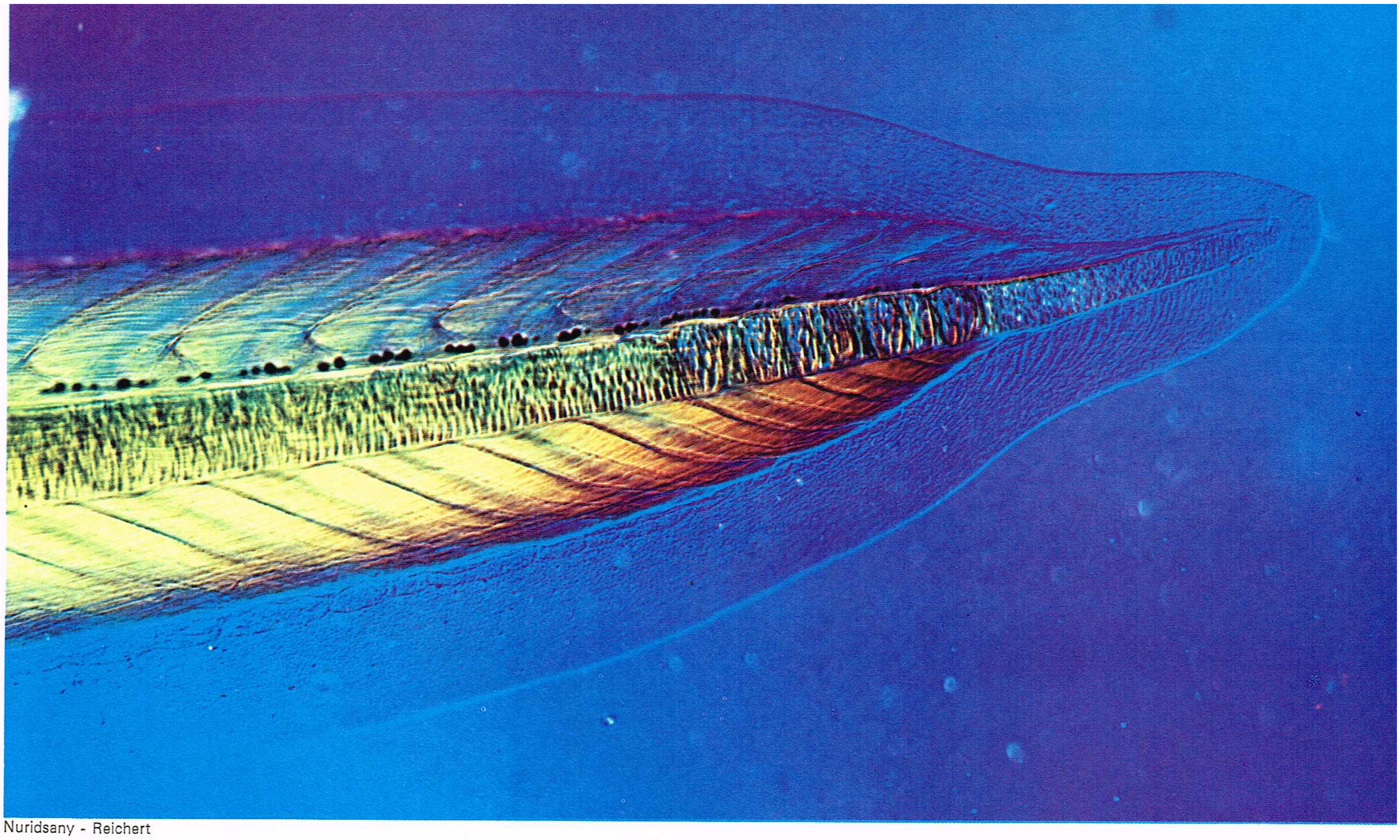

Nuridsany - Reichert

▲ ***Région postérieure d'un amphioxus* (Branchiostoma lanceolatum) *montrant la corde dorsale (axe central) avec, de part et d'autre, les masses musculaires (myotomes).***

LES CÉPHALOCORDÉS

Les Céphalocordés, ou Acraniens, sont des Animaux marins à forme de Poissons, de 6 à 7 cm de longueur, blanchâtres ou jaunâtres, qui vivent enfouis dans les sables grossiers infralittoraux. Ils ont beaucoup d'affinités avec les Vertébrés. La corde dorsale est permanente, et va de l'extrémité antérieure du corps, où elle dépasse l'ampoule cervicale, au bout de la queue. On les appelle aussi des Acraniens, car la partie antérieure du système nerveux n'est pas protégée, comme chez les Vertébrés, par une formation squelettique.

Comme les Vertébrés, les amphioxus *(Branchiostoma* et *Asymetron)* possèdent un tube nerveux, une corde dorsale, et un cœlome. Ils sont métamérisés. Ils en diffèrent par l'absence complète de formation squelettique autour de la corde, la non-différenciation du cerveau, et une asymétrie fondamentale. L'amphioxus peut être considéré comme le frère de l'ancêtre des Vertébrés, que son asymétrie aurait bloqué. Ce serait un fossile vivant.

Branchiostoma lanceolatum, l'amphioxus de nos côtes, atteint une longueur de 4 à 6 cm. Il a une forme de lancette aplatie latéralement. Vivant, il est pratiquement transparent. On ne distingue que les gonades blanches ou rosées et le contenu du tube digestif. Vers l'avant, il possède un rostre, sorte de boutoir qui lui permet de s'enfoncer dans le sédiment. Une nageoire dorsale fait toute la longueur du corps; elle s'accompagne d'une nageoire caudale plus développée et d'une nageoire ventrale postérieure. L'amphioxus est métamérisé, comme le montre sa musculature, très similaire à celle d'un Poisson. Les muscles, *myotomes,* qui correspondent à chaque métamère, sont en V et séparés par des *myomères.* Mais l'emplacement du myomère droit est situé en face du myotome gauche, si bien que toute la musculature est décalée à droite d'un demi-métamère.

La corde dorsale est une baguette élastique, formée de cellules vacuolaires fortement turgescentes, entourées d'une gaine fibreuse. Elle assure la rigidité du corps; les muscles la courbent et aussitôt la tension relâchée, elle se détend.

Sous le rostre s'ouvre le vestibule, précédé d'une couronne de tentacules, ou *cirres buccaux,* dont le rôle est d'écarter les grains de sable; il est limité vers l'arrière par un *velum* au centre duquel s'ouvre la bouche. La bouche donne accès dans une cavité élargie, la cavité branchiale, dont la longueur est d'un peu plus du tiers du corps. La branchie forme une corbeille allongée, inclinée un peu vers l'arrière et perforée de nombreuses fentes branchiales transverses (environ cent quatre-vingts paires). Comme pour les muscles, les fentes sont décalées l'une par rapport à l'autre sur les deux faces du corps. De chaque côté, il existe deux fentes par métamère. Chez le jeune, il n'en existe qu'une qui se dédoublera au cours de la croissance. Les séparations entre les fentes primitives sont les *septa;* les baguettes secondaires sont les *languettes.* Septa et languettes n'ont pas la même structure. Ils sont reliés par de petits ponts, les *sinapticules,* soutenus par des baguettes squelettiques et garnis de vaisseaux sanguins. L'axe ventral de la branchie est parcouru par un *endostyle glandulaire,* et l'axe dorsal par la *gouttière épipharyngienne.* L'eau qui traverse la branchie va dans la cavité péribranchiale et est expulsée par un orifice, l'*atriopore,* situé aux deux tiers du corps. La branchie a un rôle respiratoire et de capture des particules alimentaires.

Au pharynx succède un œsophage, puis l'intestin. A la jonction débouche un « *cæcum hépatique* » qui s'étend vers l'avant dans la cavité péripharyngienne droite. L'anus s'ouvre très postérieurement, à gauche de la nageoire caudale.

Le système circulatoire est clos; son plan général est proche de celui des Poissons. Il n'y a pas de cœur, et la propulsion est assurée par la contraction de quelques gros vaisseaux. Incolore, le sang est dépourvu de cellules sanguines. Quand il a traversé la branchie, il est collecté par deux *troncs aortiques* antérieurs et dorsaux situés de part et d'autre de la gouttière épipharyngienne. Ces deux vaisseaux se réunissent en un seul, impair et dorsal, l'*aorte médiane,* qui s'étend au-dessus de l'intestin, vers l'arrière. Ce système « artériel » se ramifie de chaque côté du corps par des *artères métamériques* qui irriguent la musculature et par un *réseau intestinal.* Le système veineux est ventral. Il est constitué de deux *veines cardinales* latérales et d'une *veine sous-intestinale* impaire. Les veines cardinales irriguent les gonades; elles se raccordent l'une à l'autre et à la veine intestinale

G. S. Giacomelli

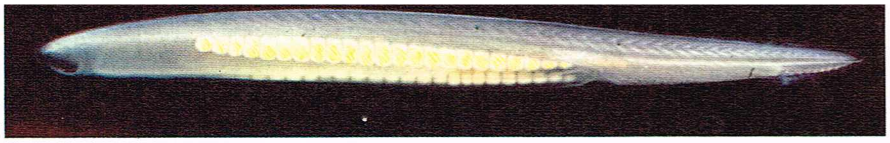

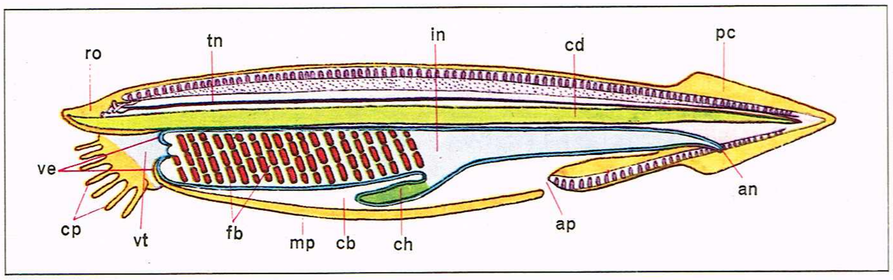

I.G.D.A.

▲ *En haut, l'amphioxus* (Branchiostoma lanceolatum) *in vivo ; en bas, représentation schématique de l'organisation interne du même amphioxus : ve, velum ; ro, rostre ; tn, tube nerveux ; in, intestin ; cd, corde dorsale ; pc, pointe caudale ; an, anus ; ap, atriopore ; ch, cæcum hépatique ; cb, cavité péribranchiale ; mp, métapleure ; fb, fentes branchiales ; vt, vestibule ; cp, cirres péribuccaux.*
▼ *A gauche, schéma de l'appareil circulatoire de* Branchiostoma *: bu, bulbilles ; aa, arcs aortiques ; ab, artère branchiale ; sp, système porte hépatique ; vh, veine hépatique ; cc, canaux de Cuvier ; sv, sinus veineux ; lp, lacune pariétale ; vi, veine sous-intestinale ; vc, veine caudale ; cp, veine cardinale postérieure ; ad, aorte descendante ; vt, veines transversales ; ca, veine cardinale antérieure. A droite, en haut, coupe schématique transversale d'un amphioxus, passant par la région pharyngienne (les fentes branchiales ne sont pas représentées) : ra, rayon de la nageoire ; tn, tube nerveux ; sc, sclérocœle ; cd, corde dorsale ; gc, gaine de la corde ; rao, racine de l'aorte ; co, cœlome ; go, gonade ; cap, cavité péribranchiale ; mv, muscle ventral ; en, endostyle ; mp, métapleure ; ph, pharynx ; ge, gouttière épipharyngienne ; mt, myotomes ; pd, pointe dorsale. En bas, quelques amphioxus* Branchiostoma lanceolatum.

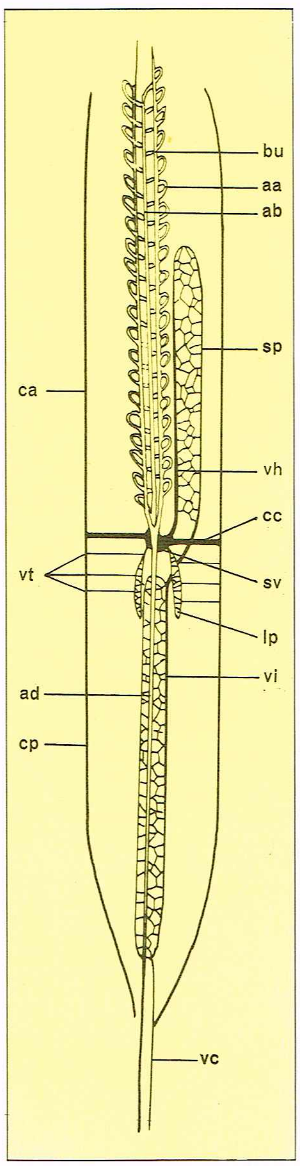

I.G.D.A.

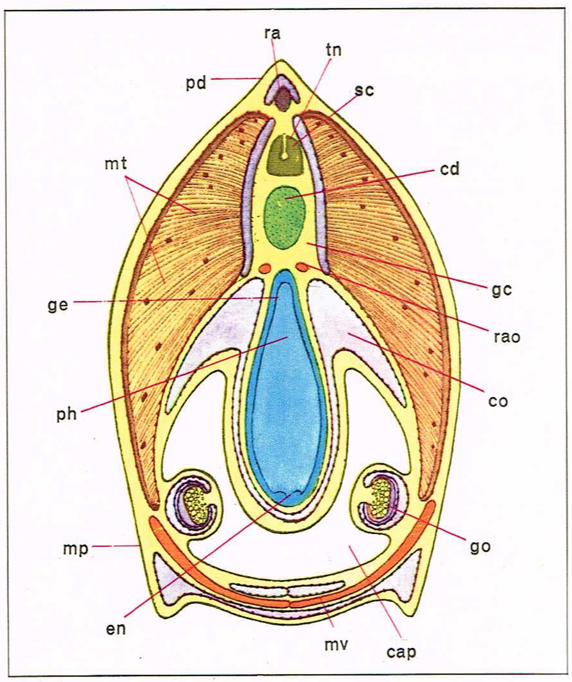

I.G.D.A.

A. Margiocco

par les *canaux de Cuvier*. Au milieu de la face ventrale se trouve un gros vaisseau, le *sinus veineux,* qui se prolonge vers l'avant par le *vaisseau endostylaire*. Le sang retourne alors dans la branchie.

Il circule de l'avant vers l'arrière dans le système artériel dorsal, et de l'arrière vers l'avant dans le système veineux ventral.

Le système excréteur est formé d'environ quatre-vingt-dix paires de *néphridies* situées au-dessus des fentes branchiales. Chacune est formée d'un sac qui s'ouvre dans la cavité branchiale. Chaque néphridie est entourée d'un élargissement, d'un vaisseau sanguin, et plonge dans le cœlome. Les cellules excrétrices ont une forme d'épingle et sont piquées par touffes dans la néphridie. La tête de l'épingle plonge dans le cœlome et la pointe dans la néphridie. Un long flagelle bat à l'intérieur de la tige. Ces cellules, ou *solénocytes,* ne peuvent être comparées aux structures connues chez les Vertébrés, mais sont proches de ce que l'on observe chez les Annélides.

Le système nerveux est constitué par un tube nerveux. Comme chez les Vertébrés, les neurones sont situés au contact de la cavité axiale, et les fibres sont périphériques. Vers l'avant, le tube se différencie en une vésicule antérieure neurosécrétrice. Le tube nerveux a une structure comparable à la moelle épinière des Vertébrés et émet des nerfs métamériques ; les dorsaux sont sensitifs et les ventraux sont moteurs. Il existe également un système nerveux sympathique, constitué d'un réseau de cellules ganglionnaires, ainsi qu'un plexus nerveux au niveau du cæcum hépatique.

Les organes des sens sont peu différenciés. Il existe une tache pigmentaire antérieure qui pourrait être un organe appréciant les variations d'intensité lumineuse. Une fossette ciliée aurait peut-être un rôle olfactif. Enfin, les parois de la moelle épinière contiennent les *cellules de Hesse et de Joseph* qui pourraient être des photorécepteurs.

Les sexes sont séparés. Il n'y a pas d'accouplement. Les produits génitaux sont émis dans l'eau de mer. La segmentation de l'œuf est totale, le développement, typique des Cordés, est très rapide : vingt-quatre heures pour arriver au stade où la métamérisation est commencée. Par contre, la vie larvaire planctonique est longue : elle dure de deux à trois mois. L'Animal tombe ensuite sur le fond, où il subit une légère métamorphose.

Les Céphalocordés ne comptent que deux genres : *Branchiostoma* et *Asymetron,* ce dernier n'ayant de gonades que d'un seul côté du corps. Les espèces ne se distinguent guère les unes des autres que par le nombre moyen de segments.

Les amphioxus vivent dans toutes les mers, à faible profondeur, enfouis dans le sable grossier. On en trouve un peu partout dans les sables, rarement en grande abondance. Par contre, en certains points très localisés, ils vivent en masses énormes dans des sables dont les grains ont environ 2 mm de diamètre, et sont très mobiles. On peut alors trouver jusqu'à cent individus par litre de sable. Comme la vie larvaire de l'amphioxus est très longue, des larves peuvent être entraînées très loin par les courants et s'installer à peu près n'importe où, là où les conditions écologiques le permettent. Les amphioxus peuvent aussi effectuer des migrations de faible amplitude. On a décrit des amphioxus pélagiques sous le nom d'*Amphioxides,* mais on n'en a jamais trouvé de sexuellement mûrs. Il est possible qu'il s'agisse là de larves entraînées au-dessus des grands fonds et qui n'auraient pas réussi à se métamorphoser.

Un des points où les amphioxus sont les plus abondants est la côte chinoise à la hauteur des îles Amoy. Là, on en pêche quelques milliers de tonnes par an. Ils se consomment frits, et entrent aussi dans la composition du nuoc-mam.

La répartition planétaire du groupe, des différences morphologiques minimes entre les espèces et une écologie très stricte, autant de facteurs qui militent en faveur de la thèse du fossile vivant, dont la survie n'a été possible que par l'adoption d'une écologie très spécialisée.

BIBLIOGRAPHIE

DRACH P., *Embranchement des Céphalocordés,* in GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie,* Masson, Paris.

N. Myers

LES VERTÉBRÉS

Les Vertébrés, ou Crâniotes, sont les Cordés dont l'organisation est la plus complexe. Chez eux, le tube neural s'est dilaté antérieurement pour former l'encéphale, constitué de diverses parties, et abrité par un squelette périencéphalique ; cette formation protectrice, ou crâne, est de substance osseuse ou cartilagineuse. La corde dorsale est présente et peut persister ou non durant toute la vie, mais elle est entourée par la colonne vertébrale, composée de vertèbres placées les unes à la suite des autres. La colonne vertébrale représente la partie axiale du squelette des Vertébrés.

Le tube digestif est divisé en une partie servant à la digestion et en une partie servant aux fonctions respiratoires. Le sang circule sous la poussée du cœur dans un réseau très développé d'artères, de veines et de capillaires ; il contient des globules rouges, dont l'hémoglobine, pigment respiratoire, est un constituant essentiel.

Les Vertébrés sont des organismes à symétrie bilatérale : leur corps, autrement dit, peut être théoriquement divisé en deux parties homologues, selon un plan sagittal contenant l'axe vertébral.

Morphologiquement, on peut ramener, dans la plupart des cas, les organismes de cet embranchement à un type caractéristique : leur corps comprend au moins trois régions : la tête, le tronc et la queue.

La tête, qui renferme l'encéphale, est pourvue de la bouche et d'organes des sens. Le tronc lui fait suite et lui est normalement relié par le cou ; il est en outre divisé à son tour en un thorax et en un abdomen. Le thorax contient le cœur et les organes respiratoires ; l'abdomen est le siège des organes qui servent à la digestion, à l'excrétion et à la reproduction. Enfin, le corps se termine typiquement par la queue, qui contient la dernière partie de la colonne vertébrale et qui est musclée. La queue est particulièrement développée chez les Animaux aquatiques.

Le corps des Vertébrés est en outre pourvu d'appendices spéciaux, qui interviennent dans la locomotion : les nageoires ou les membres marcheurs selon les cas. Dans l'organisation la plus primitive des individus aquatiques, il existe un unique repli cutané, qui s'étend sur toute la ligne dorsale et médiane du corps, contourne la queue, et se poursuit jusqu'à l'orifice anal, qui est ventral. C'est à partir de ce schéma primitif que l'évolution s'est effectuée : les nageoires dorsales, anales et caudales sont apparues en plusieurs points du repli cutané, toujours selon la ligne médiane du corps. En outre, il existe des nageoires paires, situées latéralement : les nageoires pectorales et pelviennes.

Chez les organismes terrestres, il existe normalement des membres, ou pattes, qui servent à la locomotion : le tronc porte deux membres thoraciques et deux membres pelviens, les premiers se trouvant vers l'avant, et les seconds vers l'arrière. Chez certains groupes de Vertébrés, les membres ont régressé, jusqu'à disparaître complètement.

Alors que chez l'homme, le plus évolué des Vertébrés, la position du corps est dressée pour la marche ou la station debout, les membres thoraciques ne portant pas à terre, chez la plupart des autres Vertébrés, le tronc est horizontal, et les quatre membres, verticaux, s'appuient sur le sol ou sur un autre substrat solide. On parle ainsi d'une partie antérieure qui se termine par la tête (partie céphalique) et d'une partie postérieure, avec la queue (partie caudale). Les Oiseaux se tiennent aussi dressés comme l'homme, mais leurs membres antérieurs se sont considérablement modifiés et leur permettent de voler.

Les formes aquatiques de Vertébrés respirent en principe au moyen de branchies, alors que les formes terrestres respirent à l'aide de poumons ; chez certains groupes de Vertébrés (Amphibiens), les formes aquatiques qui se développent à partir des œufs (larves) sont pourvues de branchies, mais, à la suite de la métamorphose qu'elles subissent, ces dernières s'atrophient et sont remplacées chez les individus adultes par des poumons.

Dans les groupes les plus évolués de Vertébrés, on assiste à la mise au point d'une *homéothermie.* On sait que les Invertébrés et les Vertébrés inférieurs sont théoriquement poïkilothermes, leur température interne variant en fonction de celle de l'atmosphère ou du milieu. Par contre, les Oiseaux et les Mammifères sont homéothermes ; leur température interne est à peu près constante, supérieure à celle du milieu extérieur et indépendante de lui.

▲ Les Mammifères représentent la lignée la plus évoluée de l'hypothétique arbre généalogique des Vertébrés. Ici, un groupe de girafes **Giraffa camelopardalis.**

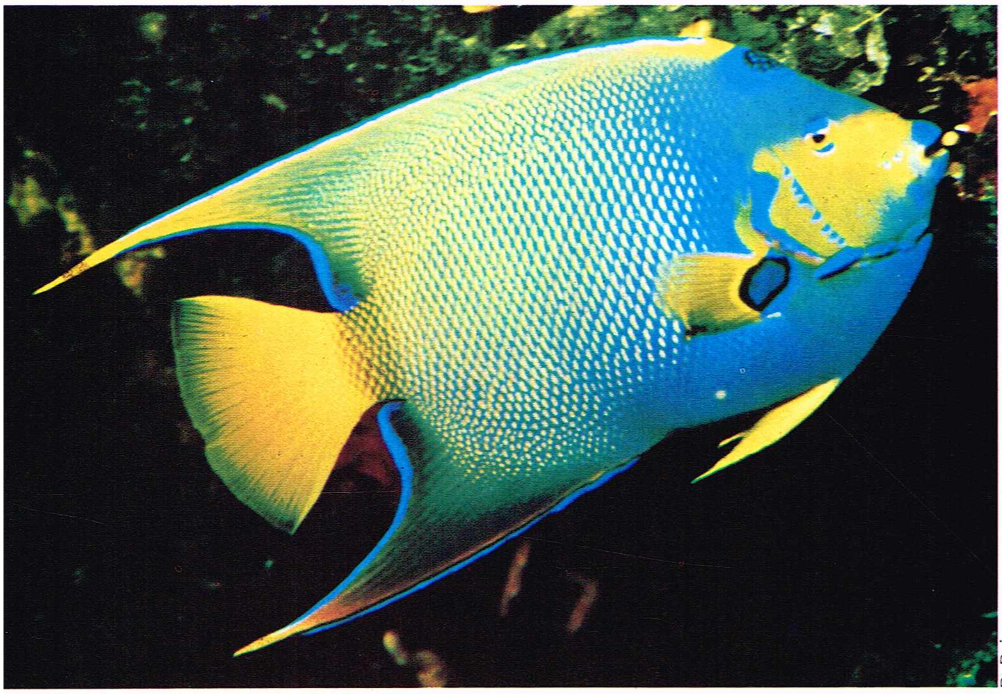

R. Dei

▲ *Un exemple de squelette externe, ou dermosquelette, nous est fourni par les écailles de Poissons; celles-ci peuvent avoir des constitutions et des formes différentes et réalisent une excellente protection mécanique du corps.*

▼ *La peau des Vertébrés peut donner diverses productions cornées; chez les Oiseaux, ce sont les plumes, très importantes pour la protection du corps et le vol.*

N. Myers

La bouche des Vertébrés est pourvue de nouvelles structures squelettiques : la mâchoire (dorsale) et la mandibule (ventrale). Les Agnathes font exception; ils ne possèdent pas ces structures buccales renforcées.

Les fentes branchiales existent encore chez de nombreux Vertébrés, mais, chez les plus évolués, elles ne sont figurées qu'à l'état de vestiges chez les embryons et disparaissent ensuite (par exemple chez les Mammifères).

A la partie postérieure et ventrale du tronc débouchent l'anus et les conduits des voies urinaires et génitales; il peut y avoir dans certains cas un cloaque, dans lequel aboutissent l'intestin ainsi que les voies urinaires et génitales.

Organisation générale

Le tégument des Vertébrés assure plusieurs rôles, dont les principaux sont : la protection de l'organisme contre les conditions défavorables de milieu (froid, chocs, etc.), la respiration (chez les Amphibiens), l'excrétion sudoripare et la sensibilité. Le tégument est formé par la peau et par le tissu conjonctif sous-cutané. La peau comprend elle-même l'épiderme, partie la plus externe constituée de plusieurs couches de cellules, et le derme, de nature conjonctive, qui contient également des fibres musculaires.

Chez les Vertébrés terrestres, les couches les plus superficielles de l'épiderme subissent un processus de kératinisation, par accumulation d'une scléroprotéine, la *kératine*; il y a production continue de nouvelles cellules à partir des couches les plus internes; les cellules meurent en s'élevant en surface et forment la couche cornée. Cette dernière est souvent renouvelée par desquamation, ou encore, périodiquement, par la mue, l'Animal rejetant alors des portions étendues de peau, ou bien tout le revêtement superficiel de cellules mortes.

La présence, chez certains Vertébrés, de cellules particulières dites chromatophores, incluses dans le derme, donne à leur peau une couleur vive; selon le type de pigment contenu, on distingue des *mélanophores* à pigment noir, des *xanthophores,* à pigments jaunes ou rouges, et des *iridocytes* contenant de la guanine, substance iridescente. Dans certains cas (Poissons), les couleurs métalliques sont simplement dues à un phénomène physique d'interférence. La pigmentation du corps peut être utile pour sa protection contre les rayons solaires. Souvent, en outre, les couleurs diffèrent notablement d'un sexe à l'autre pour une même espèce.

La peau des Vertébrés peut donner diverses productions cornées ou *phanères*. Chez les Oiseaux, ce sont les pennes ou plumes, très importantes pour la protection du corps et pour le vol; les plumes sont remplacées périodiquement en certaines saisons. Chez les Mammifères, on observe la présence de poils, très utiles pour la conservation de la chaleur interne. Par contre, les Reptiles sont protégés par des écailles cornées, dérivées de l'épaississement de la couche épidermique kératinisée. Les ongles et griffes sont aussi des formations cornées; leurs formes et leurs fonctions varient selon les Vertébrés : les ongles et griffes des Oiseaux et des Reptiles, ainsi que de certains Mammifères, sont particulièrement développés.

A la place des dents, les Oiseaux et les Tortues sont pourvus d'un bec, qui leur sert à prendre leur nourriture et éventuellement à la dépecer. Enfin, nous citerons les cornes, qui sont le plus souvent au nombre de deux, chez les Ruminants.

L'épiderme des Vertébrés aquatiques possède en outre des cellules glandulaires à mucus et des glandes à sécrétions particulières; certaines espèces comme les rascasses et les vives sont pourvues de glandes à venin. L'épiderme des Mammifères contient souvent de nombreuses glandes sudoripares et sébacées; les premières servent à éliminer les déchets de l'organisme, et interviennent dans la régulation thermique. Les individus femelles possèdent des glandes mammaires très développées, qui sécrètent le lait nécessaire à la progéniture.

Les *structures squelettiques* qui supportent le corps de ces organismes et leur permettent de se mouvoir sous l'action des muscles, sont le dermosquelette, quand

elles sont cutanées, et l'endosquelette, ou squelette interne, lorsqu'elles sont profondes. Le squelette est constitué de tissu osseux ou cartilagineux, et l'on observe fréquemment l'existence simultanée de ces deux types tissulaires.

L'exemple le mieux connu de squelette externe (dermosquelette) est celui des écailles des Poissons, qui peuvent avoir des constitutions et des formes différentes; les plus communes sont les écailles placoïdes, cténoïdes et cycloïdes.

Les *écailles placoïdes* sont caractéristiques des Chondrichthyens, elles sont très dures et, convenablement préparées, elles peuvent servir à polir des objets durs (peau de requin). Leur morphologie est particulière : chaque écaille est constituée par une plaque basale, d'où fait saillie vers l'extérieur une formation pointue, la dent cutanée, recouverte d'une substance très dure, la vitrodentine.

La majeure partie des autres Poissons (Téléostéens) possède par contre des écailles fines, lamellaires, disposées les unes à côté des autres, légèrement superposées ou imbriquées; quand leur bord postérieur est dentelé, ce qui les fait de loin ressembler à des peignes, on les appelle *écailles cténoïdes*; lorsque leur bord n'est pas dentelé, on les dit de type *cycloïde*.

Les écailles réalisent une excellente protection mécanique du corps, sans faire d'ailleurs obstacle aux déplacements du Poisson. Si l'on observe l'une de ces formations à un grossissement suffisant, on voit nettement que la surface présente des lignes concentriques, dont le nombre reflète l'âge du Poisson. La croissance de l'écaille diffère en effet selon les saisons; des zones larges dont la croissance est estivale alternent avec des zones plus étroites, de la période hivernale; cette alternance est à l'origine des stries des écailles. Chez les Chéloniens et les Crocodiliens, on observe aussi de grosses plaques osseuses, partie intégrante du dermosquelette de ces Reptiles.

Le squelette interne est ordinairement divisé en trois parties : celui de la tête, celui du tronc, et celui des membres.

Le squelette céphalique peut être constitué de tissu osseux ou cartilagineux. L'existence d'un crâne est caractéristique de l'embranchement des Vertébrés. On distingue un neurocrâne, situé dorsalement autour de l'encéphale, et un splanchnocrâne, qui enveloppe la partie antérieure du tube digestif (bouche et pharynx).

Le squelette du tronc, ou squelette axial, est constitué initialement par la corde dorsale, qui, avant de régresser, est englobée dans la colonne vertébrale. Celle-ci est formée de nombreux éléments squelettiques, articulés les uns avec les autres, les vertèbres. Chacune d'entre elles est composée d'un corps (parfois manquant) et d'arcs vertébraux.

Chez les différentes classes de Vertébrés, il existe des vertèbres de caractères particuliers. Les vertèbres des Poissons ont un corps à concavités antérieure et postérieure; elles sont dites *vertèbres amphicœles*. Les Reptiles et une partie des Amphibiens Anoures ont un corps vertébral concave antérieurement et convexe postérieurement; ce sont des *vertèbres procœles*. Une partie des Amphibiens Urodèles ont des *vertèbres opisthocœles*, c'est-à-dire à convexité antérieure et à concavité postérieure. Chez les Oiseaux, les vertèbres en forme de selle sont appelées *vertèbres hétérocœles*. Enfin, chez les Mammifères, les vertèbres dont les corps vertébraux ont des faces planes sont dites *vertèbres amphiplanes*.

Les vertèbres sont pourvues dorsalement d'arcs neuraux, qui encadrent le canal neural, et ventralement d'arcs hémaux, situés autour des vaisseaux sanguins axiaux.

Alors que, chez les Poissons, la colonne vertébrale comporte deux régions, celle du tronc et celle de la queue, on distingue chez les Vertébrés terrestres la région cervicale (cou), la région thoracique (avec les côtes), la région lombaire, la région sacrée et enfin la région coccygienne (queue).

Les nageoires des Poissons sont supportées par des éléments squelettiques, les rayons. En fonction de la forme externe et de la structure squelettique, on distingue divers types de queues. La queue est *protocerque* quand elle se termine en pointe (ce type est caractéristique chez les embryons); quand la partie dorsale est symétrique à la partie ventrale, la queue est dite *homocerque*, alors qu'elle devient *hétérocerque* lorsque la partie dorsale se développe plus que l'autre. La nageoire caudale est *géphyrocerque* quand elle est constituée par la soudure de la nageoire dorsale et de la nageoire anale au niveau de l'extrémité postérieure du Poisson.

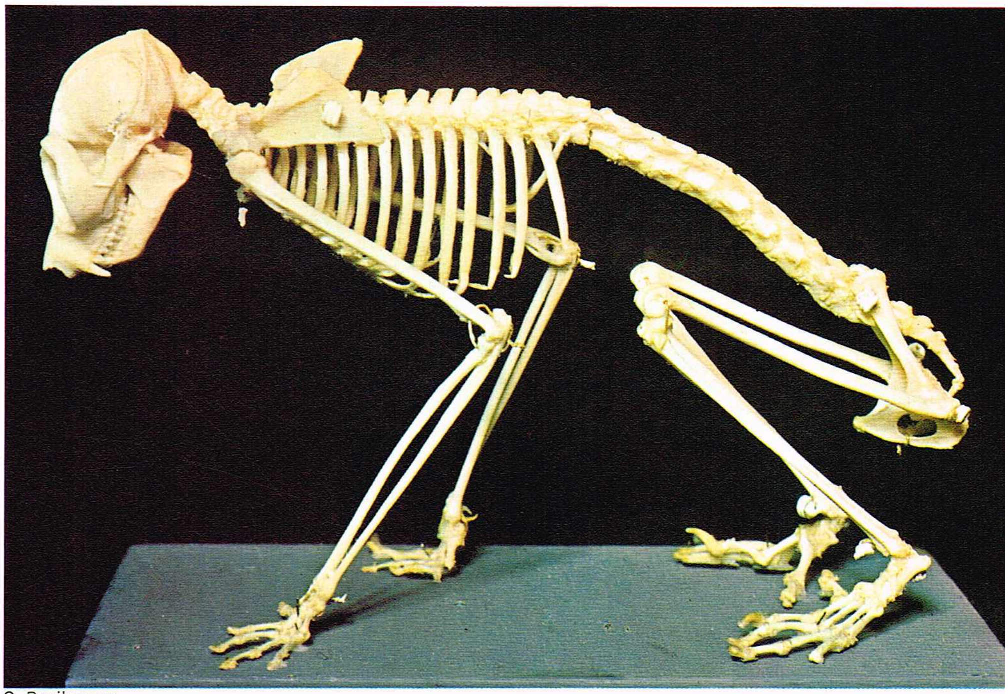

C. Bevilacqua

▲ ***Squelette d'un Mammifère Lémuridé* (Loris tardigradus).**

La ceinture thoracique ou scapulaire est reliée par des muscles à la colonne vertébrale. Elle occupe une position antérieure et comprend plusieurs éléments squelettiques, sur lesquels s'articulent les membres thoraciques. La ceinture pelvienne, en position postérieure, s'unit à la colonne vertébrale, et porte les membres abdominaux.

Les membres des Vertébrés peuvent être classés en *ichthyoptérygiums*, ou nageoires, et en *chiroptérygiums*, ou membres marcheurs. Les ichthyoptérygiums sont les membres des Poissons (Tétraptérygiens), et sont représentés par les nageoires pectorales et pelviennes.

Les Vertébrés terrestres (Tétrapodes) sont par contre caractérisés par les chiroptérygiums ou membres pentadactyles (à cinq doigts), qui peuvent subir de profondes modifications en fonction de leur utilisation lors de la locomotion (selon qu'ils marchent, qu'ils nagent, qu'ils volent, etc.). Le membre typique est constitué, à partir de la ceinture, par le stylopode, le zeugopode et l'autopode, qui correspondent respectivement au bras, à l'avant-bras et à la main pour le membre antérieur, et à la cuisse, à la jambe et au pied pour le membre postérieur.

La *musculature* est initialement métamérique; elle le reste de façon évidente, chez les Poissons adultes, dont le tronc et la queue présentent nettement des *myomères* alternant avec des lames conjonctives ou *myoseptes*. Chez les Vertébrés supérieurs, les muscles peuvent dériver de divers métamères.

Les muscles sont volontaires ou involontaires. Les muscles à motion volontaire sont constitués par des fibres musculaires striées, dépendant des nerfs encéphalo-spinaux; les muscles à motion involontaire sont constitués par des fibres musculaires lisses, sous le contrôle du système nerveux sympathique. Les muscles du cœur ont une structure particulière, car ils sont à la fois involontaires et constitués par des fibres striées spéciales et anastomosées.

La coupe transversale du tronc d'un Poisson montre deux groupes de deux masses musculaires : les dorsales (épiaxiales) et les ventrales (hypoaxiales); ces quatre masses musculaires sont séparées par deux cloisons perpendiculaires entre elles, dont l'une est horizontale et l'autre verticale. Chez les Tétrapodes, on assiste à la réduction de la musculature épiaxiale et à un important développement de la musculature hypoaxiale.

La locomotion des organismes aquatiques est due surtout à l'action des muscles du tronc et de la queue : la contraction déphasée des muscles longitudinaux des côtés gauche et droit du corps permet l'ondulation du corps, de la queue et de la nageoire caudale. Cette dernière est l'organe propulseur le plus efficace chez les Poissons; les autres nageoires servent presque uniquement de gouvernails de direction ou de profondeur. Il y a toutefois des exceptions : les hippocampes, par exemple, nagent uniquement par de très rapides mouvements continuels de la nageoire dorsale; les balistes, dont le corps est très rigide, se meuvent également grâce aux mouvements de leur nageoire dorsale.

Chez les Vertébrés terrestres, la locomotion dépend des muscles des membres; la musculature correspondante est très développée, et permet le déplacement de l'individu dont le corps glisse sur le sol ou, chez les plus évolués, se soulève au-dessus de terre. Chez les Oiseaux, les membres thoraciques (ailes) sont adaptés au vol.

La musculature cutanée, réduite chez les Poissons, est bien développée chez les Reptiles, où elle sert aux mouvements des plaques, et chez les Oiseaux en vue du mouvement des plumes. Chez les Mammifères, il peut y avoir une musculature de la face, propre à des mouvements expressifs.

Les organes électriques de certains Poissons (par exemple les torpilles) dérivent de la musculature; des fibres musculaires modifiées constituent dans ce cas diverses plaques, séparées par des couches conjonctives; des terminaisons nerveuses aboutissent aux plaques et peuvent créer de notables différences de potentiel.

Système nerveux. On distingue le système nerveux central et le système nerveux périphérique.

Le premier est représenté par l'encéphale et par la moelle épinière, coiffés par les méninges, et compris respectivement dans le crâne et dans la colonne vertébrale. L'encéphale, dont le développement varie suivant les groupes de Vertébrés, est constitué par la dilatation de l'extrémité antérieure du tube neural, qui se différencie en plusieurs parties : le cerveau (formé par l'ensemble du télencéphale, du diencéphale et du mésencéphale), le cervelet (métencéphale) et le bulbe rachidien ou moelle allongée (myélencéphale). Chez les Mammifères, la surface du cerveau présente de nombreux reliefs ou circonvolutions.

Le système nerveux périphérique regroupe de nombreux nerfs et ganglions nerveux. Il existe des nerfs crâniens, annexés à l'encéphale, au nombre de dix chez les Vertébrés inférieurs, et de douze chez les Vertébrés supérieurs. Les nerfs spinaux sont reliés pour leur part à la moelle épinière. Alors qu'on distingue chez les Cyclostomes des nerfs dorsaux sensitifs et des nerfs ventraux moteurs, les nerfs spinaux des autres Vertébrés ont ces deux fonctions, ce sont des nerfs mixtes. Enfin, le contrôle du système circulatoire, de l'appareil respiratoire et de l'appareil digestif, indépendant de la volonté, relève du système nerveux viscéral (orthosympathique et parasympathique).

▼ Représentation schématique de l'encéphale chez divers groupes de Vertébrés : A. Poisson Téléostéen **(Salmo fario)*****; B, Amphibien Anoure*** **(Rana esculenta)*****; C, Reptile*** **(Alligator)*****; D, Oiseau (pigeon); E, Mammifère Rongeur (lièvre); F, Mammifère carnivore (chien). On notera les proportions des différentes parties de l'encéphale au cours de l'évolution; ca, cerveau antérieur (télencéphale); ci, cerveau intermédiaire (diencéphale); cm, cerveau moyen (mésencéphale); cp, cerveau postérieur ou cervelet (métencéphale); ct, arrière-cerveau ou bulbe rachidien (myélencéphale).***

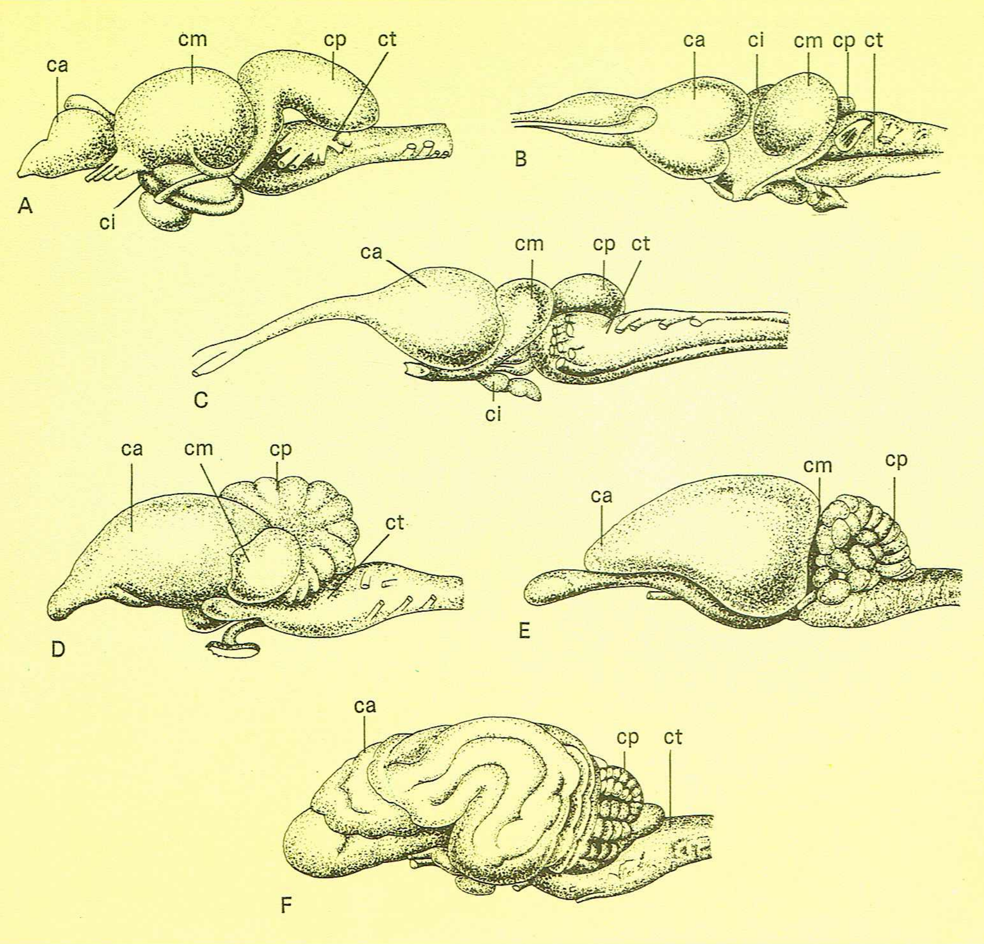

Les *organes des sens* sont très évolués; des récepteurs spécialisés recueillent les sensations tactiles, douloureuses, thermiques, etc. Chez les Poissons, ce sont des papilles, localisées dans la cavité buccale, sur la tête et sur les côtés du corps, qui font office de récepteurs gustatifs. Chez les Tétrapodes, par contre, ces récepteurs sont limités à la langue et parfois au voile du palais. Les organes olfactifs se logent dans des fossettes olfactives chez les Poissons, et dans des fosses nasales chez les Vertébrés terrestres. Les organes visuels ou yeux et les organes auditifs et statiques sont également bien développés.

Chez les Poissons, le système de la ligne latérale joue un rôle prépondérant : les vibrations et la pression de l'eau sont recueillies par des papilles sensitives distribuées principalement le long de cette ligne, qui court longitudinalement sur les flancs de l'individu.

Le *système circulatoire* est clos. Chez tous les Vertébrés existe un système sanguin où s'écoule le sang, ainsi qu'un système lymphatique, réservé à la lymphe.

Les globules rouges, ou hématies, contiennent un pigment respiratoire unique, l'*hémoglobine,* qui fixe l'oxygène atmosphérique et le transmet aux tissus. Le sang possède à la fois une fonction respiratoire et une fonction nutritive.

La circulation, due au travail cardiaque de propulsion, s'effectue dans les artères, les veines et les capillaires sanguins.

Chez les Vertébrés aquatiques, dont la respiration est branchiale, la circulation est simple : le sang veineux — pauvre en oxygène — est propulsé par le cœur, vers les branchies où il se charge d'oxygène et devient du sang artériel; de là, il va, par les artères et les capillaires, nourrir et oxygéner les tissus. Appauvri ainsi en oxygène, le sang, de nouveau veineux, passe dans les veines et retourne au cœur.

Chez les Vertébrés terrestres, dont la respiration est pulmonaire, la circulation devient double, et on distingue une petite et une grande circulation : du cœur, le sang veineux est envoyé aux poumons où il s'oxygène, pour revenir ensuite au cœur (petite circulation ou circulation pulmonaire); dans la grande circulation ou circulation générale, le sang artériel, propulsé par le cœur, va irriguer les tissus, puis retourne au cœur (sang veineux). Pour que cette circulation plus complexe se réalise, le sang veineux ne doit pas se mélanger au sang artériel; chez ces Vertébrés, il y a donc division du cœur en deux parties, cœurs droit et gauche; le sang réduit passe par le côté droit, et le sang oxygéné transite par le côté gauche. La séparation complète des deux circulations a lieu chez les Oiseaux et les Mammifères (circulation double et complète), alors que, chez les autres groupes, on observe une circulation double et incomplète, dans la mesure où s'opère un mélange partiel du sang veineux et du sang artériel.

L'*appareil digestif* s'étend de l'ouverture buccale ou orale à l'orifice anal ou anus, en effectuant beaucoup de détours. Le tube digestif commence par la bouche ou cavité buccale, suivie par le pharynx qui, chez les Vertébrés à respiration branchiale, est perforé par les fentes branchiales. La bouche reçoit la sécrétion de glan-

des séreuses et mucipares; chez les Mammifères terrestres, il existe des glandes salivaires. Normalement, la bouche est pourvue de processus spéciaux servant à la préhension et souvent à la trituration des aliments; alors que chez les Cyclostomes et chez les larves des Amphibiens, on trouve des saillies de nature cornée (dents cornées), il y a chez les autres Vertébrés des dents, souvent très robustes et de morphologie complexe, formées par une substance vivante, la dentine, recouverte d'émail non renouvelable. Seuls les Oiseaux et les Chéloniens actuels sont dépourvus de dents; elles sont remplacées par des productions cornées portées par les mâchoires (bec ou rhamphothèque).

Le pharynx est suivi par l'œsophage, puis, chez de nombreux Vertébrés, par l'estomac, renflement pourvu de glandes sécrétrices du suc gastrique; ce dernier intervient au début du processus de digestion. Le tube digestif se continue par l'intestin grêle, et enfin par le gros intestin ou côlon, que termine l'orifice anal ou anus. L'intestin produit des enzymes digestives et sert — importante fonction — à l'absorption des matières nutritives; pour cette raison, sa superficie interne est largement développée par d'innombrables replis et appendices, richement vascularisés, les villosités intestinales. Chez les Mammifères, l'intestin grêle est constitué par le duodénum, le jéjunum et l'iléon. L'intestin est normalement très long et très contourné, surtout chez les herbivores. Chez de nombreux Vertébrés, l'intestin se termine par un cloaque, où débouchent aussi les conduits des gonades (gonoductes) et des organes excréteurs (uretères et urèthres).

Diverses formations glandulaires sont annexées à l'intestin, certaines étant particulièrement développées. Le foie sécrète la bile déversée dans l'intestin grêle par les canaux biliaires; chez de nombreux Animaux, elle a son réceptacle, la vésicule biliaire. Le pancréas sécrète le suc pancréatique, très riche en enzymes digestives, envoyé lui aussi dans l'intestin grêle.

Appareil excréteur. Les produits de déchet du métabolisme des Vertébrés sont éliminés en partie par l'intestin, et en partie par l'appareil excréteur ou rénal. La peau a aussi une fonction excrétrice assurée par l'intermédiaire de la sueur. L'appareil rénal ou urinaire est constitué par l'ensemble des néphridies, qui peut aboutir dans le cloaque ou dans un orifice externe séparé. La structure de l'appareil rénal est variable, et l'on distingue le pronéphron, le mésonéphron, et le métanéphron; ce dernier existe chez les Vertébrés supérieurs.

Appareil respiratoire. Chez les Vertébrés aquatiques respirant dans le milieu liquide, l'appareil respiratoire est constitué par les branchies; les Vertébrés subaériens ont un appareil pulmonaire. Il y a aussi parfois des cas de respiration cutanée.

Les branchies caractérisent les Poissons et les larves des Amphibiens : leur pharynx présente des deux côtés plusieurs arcs branchiaux, portant les lamelles branchiales, irriguées par les artères branchiales. Les fentes branchiales, qui en dérivent, sont normalement au nombre de cinq à sept; elles peuvent déboucher directement à l'extérieur, comme chez les requins et chez les raies, ou bien, comme chez les Téléostéens, être recouvertes par les opercules. Chez de nombreuses larves d'Amphibiens, les branchies font complètement saillie à l'extérieur, et elles ont l'aspect de deux touffes arborescentes situées sur les côtés de la tête; durant la métamorphose, les branchies s'atrophient, sauf en des cas particuliers, quand l'adulte conserve l'aspect larvaire (néoténie).

De leur côté, les Amphibiens adultes, les Reptiles, les Oiseaux et les Mammifères sont pourvus de poumons, dérivant de l'intestin antérieur (œsophage) qui se dilate en un organe sacciforme; lors du développement, celui-ci se sépare en deux parties distinctes. Chez les Amphibiens, les poumons ont encore une structure simple, le plus souvent sacciforme, avec des cloisons internes, qui en augmentent la superficie pour mieux assurer les échanges gazeux. Chez les Oiseaux et les Mammifères, la structure des poumons est beaucoup plus compliquée, d'aspect spongieux; il s'y forme d'innombrables chambres, par suite de la subdivision poussée des nombreux canaux existants, qui se terminent par les alvéoles pulmonaires.

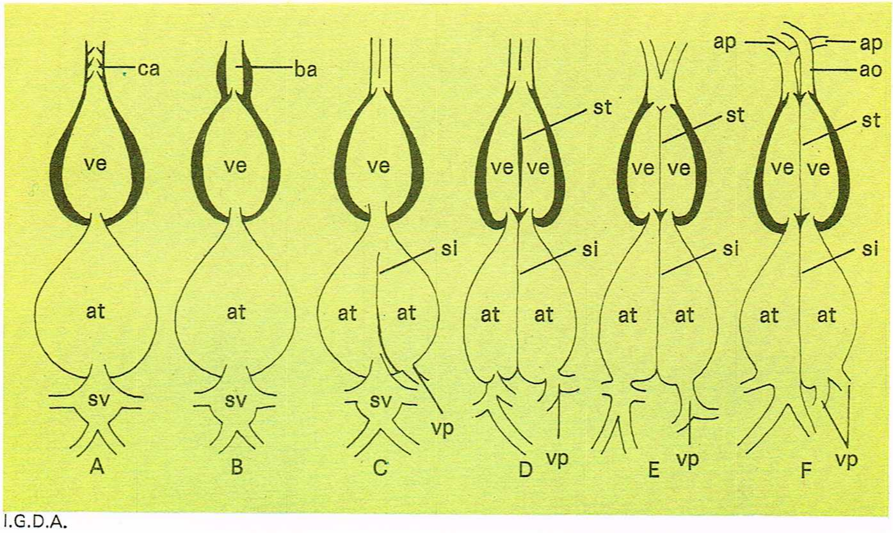

I.G.D.A.

▲ *Représentation schématique du cœur chez divers groupes de Vertébrés; A, Poissons Sélaciens; B, Poissons Téléostéens; C, Amphibiens; D, Reptiles inférieurs; E, crocodiles; F, Oiseaux et Mammifères : ao, aorte; ap, artères pulmonaires; at, atrium ou oreillette; ba, bulbe artériel; ca, cône artériel; si, septum ou cloison interauriculaire; st, septum ou cloison interventriculaire; sv, sinus veineux; ve, ventricule; vp, veine pulmonaire.*

Reproduction

Chez la majeure partie des Vertébrés, on trouve des individus mâles et femelles mais, dans certains groupes (dont les Poissons), il y a de nombreux cas d'hermaphrodisme simultané (phases sexuelles mâle et femelle simultanément présentes dans les gonades) ou successif (pendant un certain temps, les gonades sont d'un sexe, puis prennent les caractères du sexe opposé). Les gonades sont paires, mais, dans certains groupes, l'une d'elles dégénère.

La fécondation est externe chez presque tous les Poissons; elle est toutefois interne chez les Poissons cartilagineux dont les mâles possèdent un organe copulateur, le *myxoptérygium,* dérivant des nageoires ventrales; chez d'autres, comme les *Lebistes,* les mâles sont pourvus d'un gonopode, formé par la transformation de la nageoire anale. Chez les autres Vertébrés, la fécondation est en général interne : les mâles sont munis d'un organe copulateur, le pénis.

La reproduction est uniquement sexuée. Une partie des Vertébrés est ovipare : les femelles pondent des œufs qui se développent extérieurement, ainsi que cela se passe chez la plupart des Poissons, des Amphibiens, des Reptiles et chez tous les Oiseaux. Les autres Vertébrés sont généralement vivipares : l'embryon se développe complètement avant d'être mis au monde. On distingue cependant les vivipares vrais, dont l'embryon se développe à l'intérieur de l'utérus maternel dont il reçoit la nourriture (Mammifères, sauf les Monotrèmes), et les pseudovivipares, mieux nommés ovovivipares, chez qui l'embryon, bien que se développant dans le sein maternel, se nourrit seulement des réserves contenues dans l'œuf (cas de nombreux Poissons).

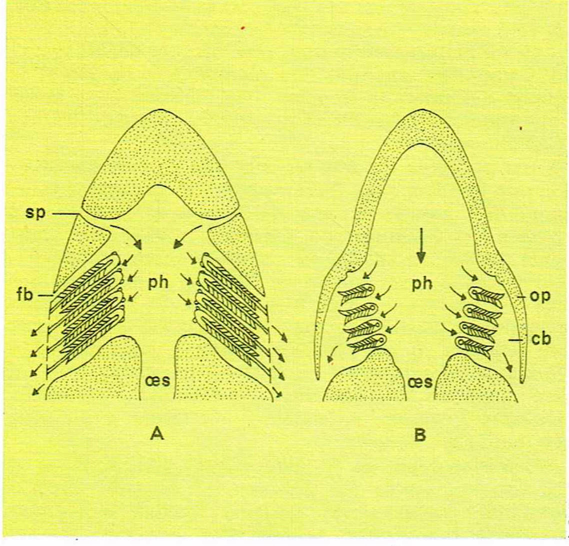

I.G.D.A.

◀ *Représentation schématique de l'appareil branchial des Poissons; A, Sélaciens; B, Téléostéens; cb, cavité branchiale; fb, fentes branchiales; œs, œsophage; op, opercule; ph, pharynx; sp, spiraculum; les flèches indiquent la direction de l'eau dont le flux irrigue les branchies.*

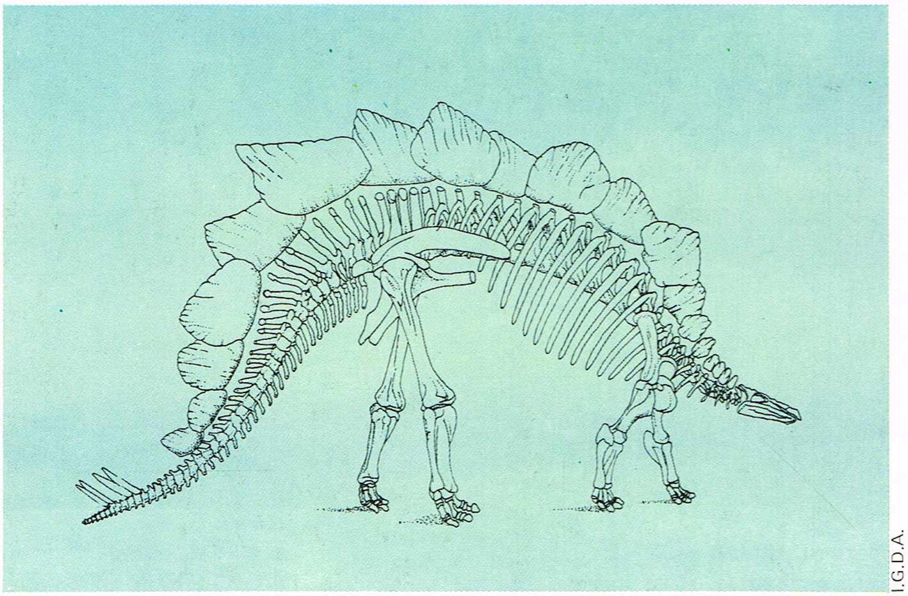

I.G.D.A.

▲ *Reconstitution du squelette d'un* **Stegosaurus**, *Reptile connu sous le nom plus commun de dinosaure.*

▼ *Empreinte fossile d'un Squaliforme Carcaride* (**Pseudogaleus voltae**) [*Muséum d'histoire naturelle de Vérone*].

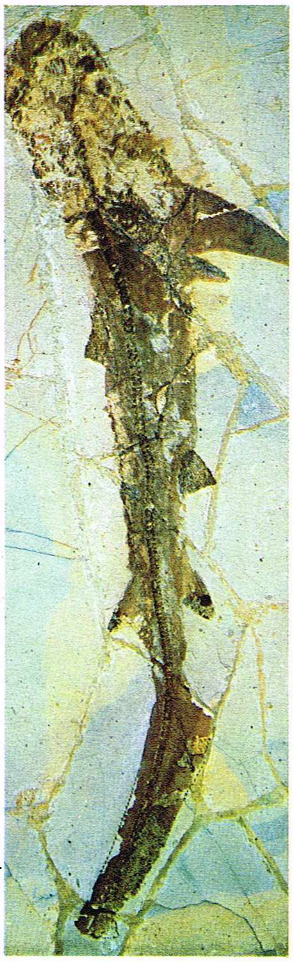

C. Bevilacqua

Origine et évolution des Vertébrés

On peut résumer en quelques grandes lignes l histoire des Vertébrés depuis trois cent quatre-vingts millions d'années, c'est-à-dire depuis qu'apparurent vraisemblablement les premières formes de vie qu'on peut attribuer à l'organisation structurale des Vertébrés; les premiers étaient les Agnathes, organismes à bouche dépourvue de mâchoires (ce qu'on observe encore aujourd'hui chez les lamproies). Puis vinrent, dans l'ordre, les Poissons, les Amphibiens et les Reptiles; les Reptiles donnèrent ensuite deux nouvelles lignées, celle des Mammifères et celle des Oiseaux. Les Vertébrés sont donc des Animaux très anciens, puisqu'ils apparurent au début du Paléozoïque.

A l'Ordovicien, il existait des organismes (Agnathes) dont les caractères étaient semblables à ceux des Cyclostomes actuels. Au Silurien et au Dévonien vivaient les deux grands groupes des Ostracodermes et des Placodermes Acanthodiens. Les Ostracodermes étaient des Agnathes, dépourvus de mâchoires, pisciformes et munis de grosses plaques de revêtement sur le corps et d'un bouclier osseux sur la tête. Les Placodermes étaient eux aussi des Vertébrés pisciformes, mais rattachés aux Gnathostomes, Animaux possesseurs de mâchoires, à l'endosquelette cartilagineux mais partiellement ossifié, et aux nageoires à gros rayons. Ces Vertébrés connurent leur apogée au Paléozoïque, puis disparurent vers la fin de la même ère (les Placodermes disparurent dès le Dévonien).

Au Dévonien, les grands groupes de Poissons à squelette cartilagineux ou osseux étaient déjà représentés; les premiers représentants des Tétrapodes, les Stégocéphales, dérivent de ces Poissons (Crossoptérygiens).

Les Amphibiens connurent une période de prospérité du Carbonifère au Trias. Au Carbonifère, ils furent la souche des premiers Reptiles : les Pélicosauriens et les Cotylosauriens. Au Permien apparurent les Tortues (Chéloniens).

C'est au début du Mésozoïque que se différencièrent d'autres Reptiles : les Plésiosauriens et les Ichthyosauriens; ces derniers étaient pisciformes et parfaitement adaptés à la vie aquatique. D'autres Reptiles (Ptérosauriens) devinrent aptes à voler, comme d'énormes chauves-souris. Ces diverses formes de Reptiles s'éteignirent dès l'ère de leur apparition au Mésozoïque. Seuls les Rhynchocéphales du Mésozoïque nous ont légué un représentant toujours en vie, l'hattérie ponctuée ou sphénodon *(Sphenodon punctatus* ou *Hatteria punctata),* qui vit dans certaines îles de Nouvelle-Zélande; ce Reptile, recouvert d'écailles, ressemble à un lézard trapu avec une nette crête dorsale.

Au Mésozoïque, les Reptiles étaient très répandus et souvent représentés par des espèces de taille impressionnante (dinosaures); certains étaient herbivores, comme le brontosaure, porteur d'un très long cou et d'une tête minuscule, et le stégosaure, dont les piquants dressés sur la queue et les plaques dorsales, osseuses et pointues, faisaient office de dispositif défensif. D'autres dinosaures étaient carnivores, le plus connu étant le tyrannosaure, qui ne prenait appui que sur ses membres postérieurs et sur sa queue. Le bouleversement des conditions écologiques provoqua la disparition de tous les dinosaures et d'une bonne partie des autres Reptiles.

Aujourd'hui, seuls sont représentés quelques groupes du Mésozoïque : les Crocodiliens, les Squamates (serpents et lézards), et les Chéloniens.

A cheval sur le Paléozoïque et le Mésozoïque, et survivant peut-être au Trias, les Thérapsidés (Reptiles) donnèrent sans doute naissance aux premiers Mammifères, alors représentés par de petits Animaux herbivores ou omnivores, faisant penser aux actuels Monotrèmes et à certains Marsupiaux. Les Mammifères réussirent à prospérer grâce à leur excellente capacité d'adaptation. Ils acquirent des caractères nouveaux, importants, parmi lesquels nous citerons avant tout la viviparité, l'aptitude à nourrir les embryons dans le corps maternel par l'intermédiaire du placenta, jusqu'à un stade de développement avancé. Cette adaptation permet une meilleure défense des petits contre les attaques des autres Animaux, ainsi qu'une excellente protection contre les mauvaises conditions de milieu ; il est évident que les œufs pondus par les Reptiles étaient bien plus exposés à la destruction par les prédateurs.

Une autre évolution positive a consisté dans l'acquisition d'une homéothermie adéquate, assurant l'indépendance de la température interne vis-à-vis de celle de l'extérieur, d'où la possibilité de vivre en des lieux dont la température est défavorable à l'organisme. Ces perfectionnements, ainsi que d'autres caractères également marquants (intelligence supérieure, cerveau plus évolué, métabolisme plus actif, etc.), ont permis aux Mammifères de s'installer de façon stable sur terre et de s'y épanouir.

C'est au Jurassique qu'apparurent les Oiseaux, également issus des Reptiles; on a en effet découvert des fossiles d'Oiseaux pourvus de plumes (caractère typique des Oiseaux), mais à longue queue, à mâchoires porteuses de dents, et dont les doigts des membres thoraciques étaient munis de griffes (caractères reptiliens). L'*Archaeopteryx lithographica* est très connu par son squelette et par les empreintes de ses plumes, qui ont été trouvés dans les schistes lithographiques de Solenhofen, en Bavière.

Au Cénozoïque (c'est-à-dire il y a soixante-quinze millions d'années), les Oiseaux et les Mammifères se sont largement répandus; au Miocène, les Primates se différencièrent, et c'est il y a environ deux millions d'années (Pléistocène) que firent leur apparition les premiers Hominidés, dont dérive l'homme actuel.

BIBLIOGRAPHIE

BAER J.G., *Comparative Anatomy of Vertebrates,* Butterworths, Londres, 1964. - COLOSI G., *Zoologia e Biologia generale,* II, UTET, Turin, 1956. - D'ANCONA U., Trattato di Zoologia, UTET, Turin, 1967. - GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie : Anatomie, Systématique, Biologie,* t. XII, Masson, Paris, 1954. - MONTALENTI G., *L'evoluzione,* Einaudi, Turin, 1965. - SAVAGE J.M., *L'evoluzione,* Zanichelli, Bologne, 1965. - TORTONESE E., *Gli animali superiori nella loro struttura e nella loro vita,* S.E.I., Turin, 1949. - YOUNG J.Z., *The Life of Vertebrates,* University Press, Oxford, 1952.

SYSTÉMATIQUE

Les Vertébrés vivants sont habituellement divisés en sept classes : les Cyclostomes ou Agnathes, les Chondrichthyens ou Poissons cartilagineux, les Ostéichthyens ou Poissons osseux, les Amphibiens, les Reptiles, les Oiseaux, et les Mammifères.

On considère normalement comme des Poissons les organismes de la deuxième ou de la troisième classe (il est impropre de considérer comme tels ceux de la première classe).

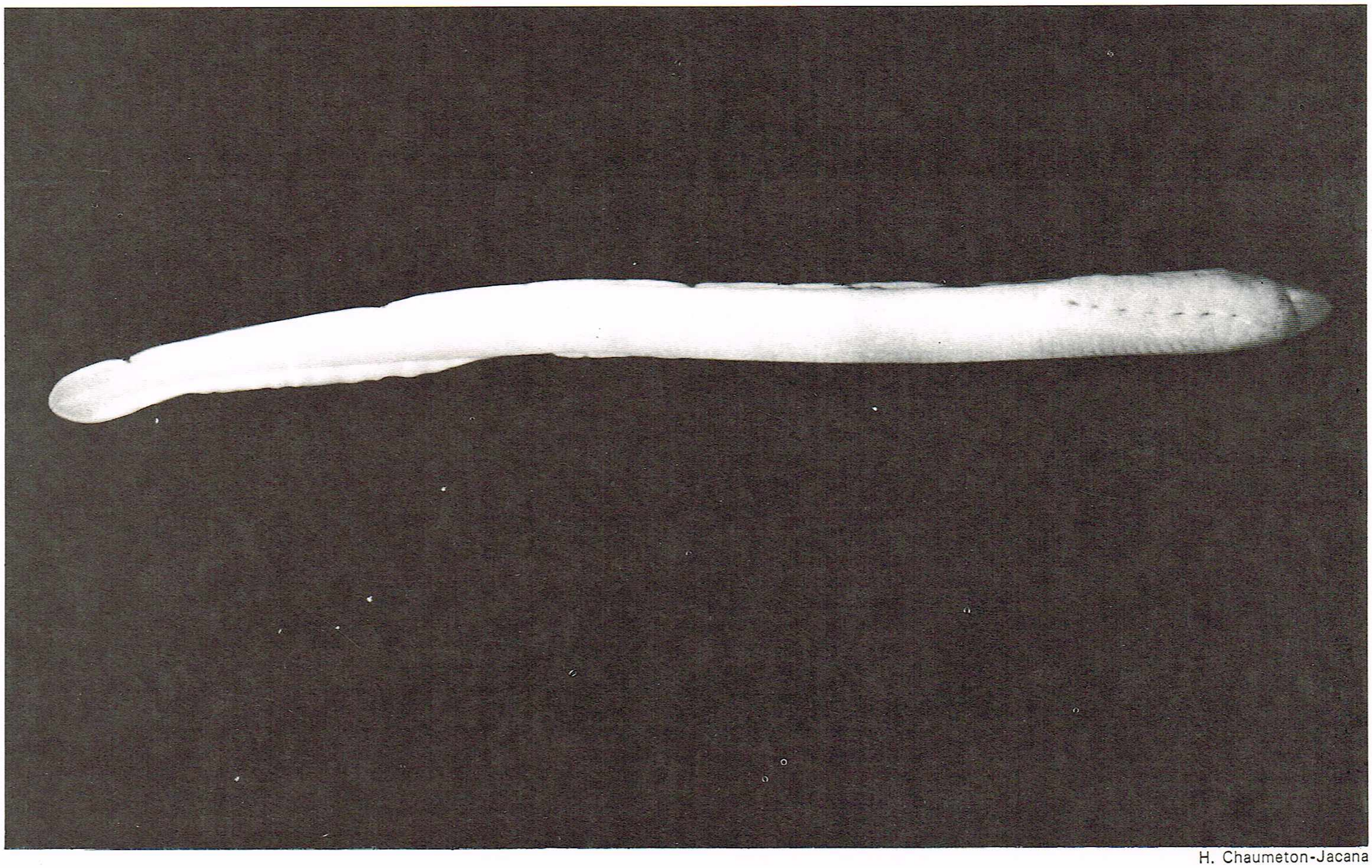

H. Chaumeton-Jacana

▲ ***Les Agnathes, ou Cyclostomes, sont des Vertébrés aquatiques, très allongés, en forme d'anguille, dépourvus de mâchoire; ils comptent notamment le super-ordre des Pétromyzonoïdes, avec les lamproies, dont on voit un spécimen ici.***

AGNATHES

La classe des Agnathes ou Cyclostomes *(Cyclostomata)* comprend les formes de Vertébrés dont l'organisation est la plus rudimentaire. On l'a pendant longtemps incluse parmi les Poissons, dont elle diffère cependant assez pour constituer une classe particulière.

Les Cyclostomes sont des Vertébrés aquatiques à branchies, dépourvus de mâchoire (Agnathes) et de narines paires; ils ont un squelette cartilagineux et souvent aussi un squelette dermique ossifié; ils sont actuellement dépourvus de nageoires paires; on trouve cependant des pectorales chez quelques formes fossiles.

Le corps des formes actuelles est anguilliforme, et celui des formes fossiles est fusiforme ou large et déprimé à sa partie antérieure. La peau est nue et visqueuse chez les Animaux actuels, ou recouverte de plaques osseuses de grandeur, de nombre et de disposition variés chez les formes fossiles. Le squelette axial comprend la corde dorsale avec ses dépendances fibreuses ou cartilagineuses. Il existe de chaque côté une série de chambres branchiales, protégées par des cartilages externes; elles communiquent avec l'extérieur grâce à des orifices séparés, ou bien par un orifice commun.

Les nerfs olfactifs sont pairs, et aboutissent à un sac olfactif, d'où part un canal naso-palatin qui est dirigé d'une part vers la cavité bucco-pharyngée, et d'autre part vers la partie dorsale ou antérieure du corps, où il se termine en une narine unique et médiane. Il existe seulement deux canaux semi-circulaires dans le labyrinthe.

Le terme de Cyclostomes a aujourd'hui une signification plus étendue que naguère, car il inclut non seulement les espèces vivantes, comme la lamproie et les myxines, mais aussi de nombreuses formes fossiles, généralement groupées sous le vocable d'Ostracodermes.

Les Cyclostomes sont répartis en trois sous-classes; celle des Chélodontes, entièrement éteinte et très hétérogène, ne sera pas étudiée.

Sous-classe des Céphalaspidomorphes

Les Céphalaspidomorphes *(Cephalaspidomorpha)* possèdent une narine, située au milieu du côté dorsal de la tête, entre les yeux, ou juste devant ceux-ci. Le canal naso-pituitaire se termine en cul-de-sac. Il existe plusieurs ouvertures branchiales de chaque côté du corps. Les nageoires pectorales sont présentes. C'est le groupe le plus nombreux et le mieux connu des Cyclostomes. Il comprend trois super-ordres, dont deux ne comprennent que des formes fossiles.

Classe des Agnathes

☐ *Sous-classe des Céphalaspidomorphes*

— Super-ordre des Ostéostracés *
— Super-ordre des Anaspidés *
— Super-ordre des Pétromyzonoïdes

☐ *Sous-classe des Ptéraspidomorphes*

— Super-ordre des Hétérostracés *
— Super-ordre des Myxinoïdes

☐ *Sous-classe des Chélodontes* *

* *Groupes fossiles*

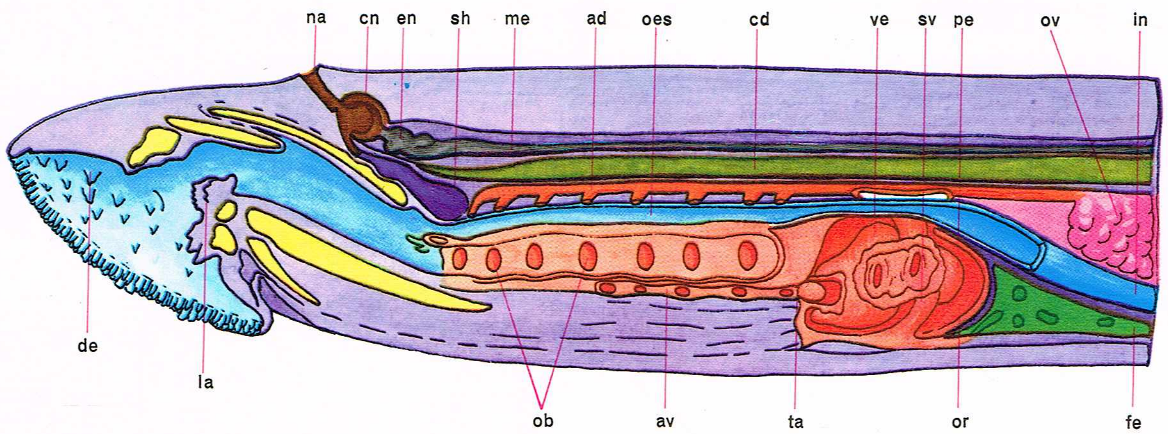

I.G.D.A.

Super-ordre des Ostéostracés

Les Ostéostracés *(Osteostraci)*, tous fossiles, avaient un corps élargi vers l'avant; ce sont les mieux connues des formes éteintes.

Super-ordre des Anaspidés

Les Anaspidés *(Anaspida)*, qui étaient planctoniques selon toutes probabilités, ont été retrouvés seulement à l'état fossile.

Leur corps, sans bouclier céphalique, était comprimé latéralement.

▼ ***Gros plan de l'intérieur de la bouche de la lamproie marine,*** **Petromyzon marinus.**

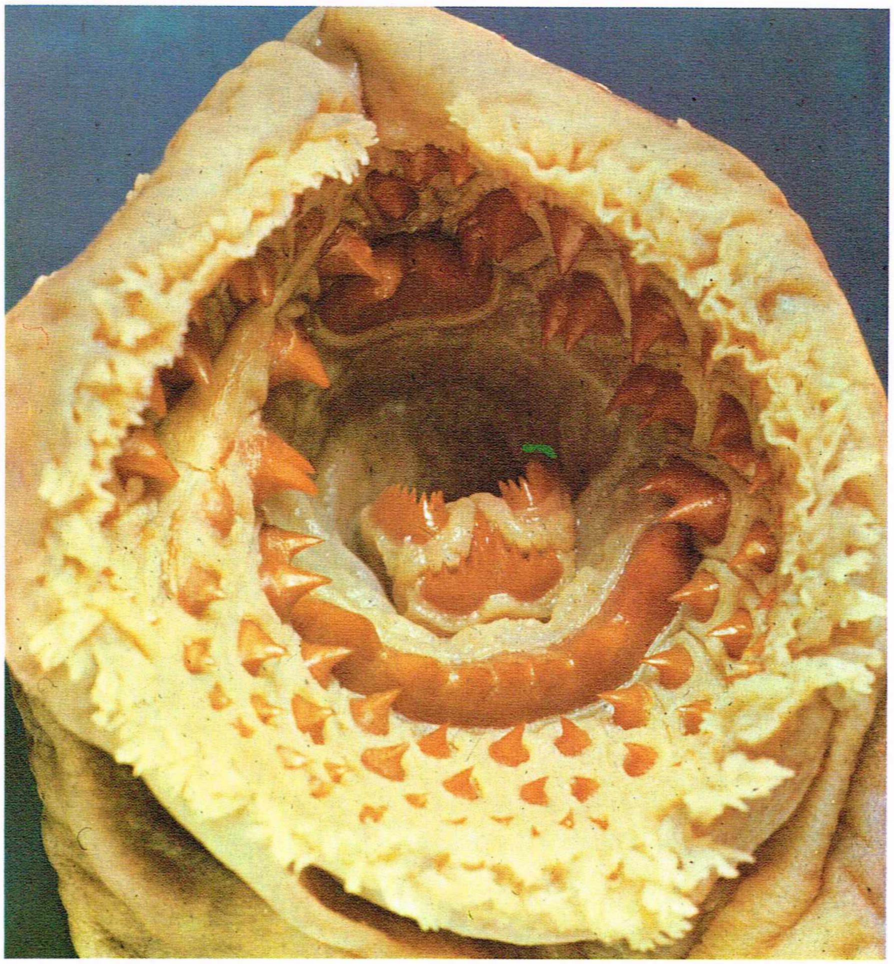

A. Margiocco

Super-ordre des Pétromyzonoïdes

Les Pétromyzonoïdes *(Petromyzonoidea)* ou Pétromyzoniformes, appelés souvent lamproies, forment le groupe le plus nombreux et le plus répandu des Cyclostomes actuels. Les Pétromyzoniformes ont un corps long et cylindrique, recouvert d'une peau nue et visqueuse, très riche en cellules mucipares.

Ils possèdent deux nageoires dorsales, souvent contiguës; la nageoire postérieure se trouve en liaison avec la caudale, elle-même reliée à une petite nageoire anale. La structure du squelette, totalement cartilagineux, est simple. Une série d'arcs neuraux, ouverts dorsalement, surmontent la corde dorsale; il n'y a pas de centres vertébraux.

La bouche est circulaire et située à l'extrémité antérieure de la tête : elle forme une cavité infundibuliforme, sur les parois de laquelle sont distribuées, en nombre variable, des dents cornées, renouvelées périodiquement. Certaines dents sont portées par des plaques dentaires de différentes tailles; et parfois par la langue, dont elles forment l'armature.

L'entonnoir buccal fait fonction de ventouse. Ainsi, l'Animal peut s'attacher aux rochers, ou, pour se nourrir, aux Poissons. Ceux-ci ont leur chair rongée par les mouvements de râpe de la langue du prédateur. Les lamproies ont une sécrétion buccale anti-coagulante, qui leur permet d'avaler facilement le sang de leurs victimes, dont le tégument garde après coup une marque circulaire. Toutes les lamproies ne se comportent pas en ectoparasites.

Les sept sacs branchiaux communiquent avec l'extérieur par autant d'orifices. Intérieurement, ces sacs débouchent dans un vestibule branchial, l'aqueduc, qui est un canal partant du pharynx, passant sous l'œsophage, parallèlement à celui-ci, et se terminant en cul-de-sac. Le tube digestif est droit, il ne forme pas d'anses et ne présente pas de parties différenciées.

La circulation sanguine est simple, et le sang contient des globules rouges ronds, biconvexes et pourvus d'un noyau. Dans le cœur, on observe trois cavités successives (sinus veineux, oreillette, ventricule) où passe le sang veineux, provenant des différentes parties du corps, avant d'être envoyé aux branchies.

La moelle épinière est aplatie en ruban et les racines (dorsales et ventrales) des nerfs rachidiens ne sont pas réunies.

La reproduction a lieu une seule fois au cours de la vie. Les individus sexuellement mûrs se distinguent plus ou moins clairement par leur couleur et par la forme de leurs nageoires dorsales. Les œufs, assez petits, se divisent complètement après fécondation.

La larve subit une métamorphose. Pendant le stade larvaire, ces Animaux ont des yeux rudimentaires et une bouche dépourvue de dents, entourée d'une lèvre en forme de fer à cheval. Les chambres branchiales débouchent directement dans l'œsophage. Ces larves

ont été à l'origine considérées comme un genre spécial; on les appelle *Ammocètes*.

Les larves sont microphages et s'enfoncent habituellement dans la vase; par suite de modifications de leurs chromatophores, elles changent de couleur plus facilement que les adultes. Leur métamorphose dite prépubérale est tardive et se produit au bout de plusieurs mois (vers la troisième année).

La chair des lamproies est comestible; la cuisson détruit un poison présent dans leur sang qui normalement agirait sur le système nerveux.

Certaines espèces de Pétromyzoniformes vivent sédentairement dans les eaux douces; d'autres sont migratrices, et partant de la mer, remontent le cours des fleuves pour se reproduire.

La plus grande est *Petromyzon marinus*, la lamproie marine, qui mesure jusqu'à 1 m de longueur. Elle est brun grisâtre, avec des taches et des marbrures plus foncées ou noires. Cette espèce est commune sur toutes les côtes européennes, on la rencontre aussi sur la côte atlantique de l'Amérique du Nord. Sa migration dans les fleuves a lieu au printemps ou au début de l'été; les œufs sont pondus dans de petits creux, sur des fonds pierreux ou caillouteux. Les larves, de couleur uniforme, possèdent une unique nageoire dorsale. Elles passent de trois à cinq ans dans les fleuves et descendent à la mer quand elles mesurent de 10 à 20 cm.

Lampetra fluviatilis, la lamproie fluviale, ne dépasse pas 50 cm. Elle est de couleur gris olivâtre, et presque blanche sur le ventre. Elle aussi est migratrice et, comme la précédente, se nourrit sur des Poissons. On la rencontre dans différentes régions d'Europe. Ces Cyclostomes ont beaucoup souffert des nuisances dues à l'homme (construction de barrages, pollution des eaux, etc.).

Nous citerons encore deux formes très voisines, dulçaquicoles, *Lampetra planeri*, la lamproie de Planer, et *Lampetra zanandreai*, la lamproie de Zanandréa, de couleur grise et ne dépassant pas 20 cm de long.

Sous-classe des Ptéraspidomorphes

Les Ptéraspidomorphes *(Pteraspidomorpha)* sont les plus anciens Ostracodermes connus; ils sont aplatis dorso-ventralement, ont un seul orifice branchial externe; la partie inférieure de leur corps est couverte d'une carapace.

Ils sont divisés en deux super-ordres; celui des Hétérostracés, fossile, ne sera pas étudié.

Super-ordre des Myxinoïdes

Les Myxinoïdes *(Myxinoidea)* ou Myxiniformes constituent le second groupe de Cyclostomes vivants; les rapports phylogéniques sont nettement différents de ceux des Pétromyzoniformes. La bouche est située ventralement et se présente comme une fente longitudinale, entourée de huit cirrhes courts. La narine se trouve à l'extrémité du museau. Le canal naso-pituitaire débouche dans le pharynx et sert à amener l'eau aux branchies. Les chambres, ou sacs branchiaux, sont au nombre de cinq à quinze paires, et s'ouvrent parfois, à l'extérieur, de chaque côté du corps, par un orifice commun. Le côté gauche de l'Animal présente un conduit œsophago-cutané, qui fait communiquer le tube digestif avec l'extérieur. La langue, bien caractéristique, constitue, grâce à une puissante musculature, un système érosif très efficace; la voûte buccale possède une dent unique. Les yeux sont rudimentaires.

Le squelette est encore plus rudimentaire que chez les Pétromyzoniformes. Le corps des Myxinoïdes est anguilliforme, bordé à l'arrière par une nageoire caudale très réduite. Le long de chaque flanc débouche une série de pores, exutoires de sacs glandulaires, producteurs de mucus : la peau est donc très visqueuse. L'ouverture cloacale se trouve sur la face ventrale, non loin de l'extrémité postérieure du corps.

Ces Cyclostomes, normalement unisexués, sont parfois hermaphrodites et protandriques. Leurs œufs sont grands, ovales, protégés par une coquille cornée. A leurs deux pôles, des filaments terminés par des crochets unissent les œufs les uns aux autres, jusqu'à l'éclosion.

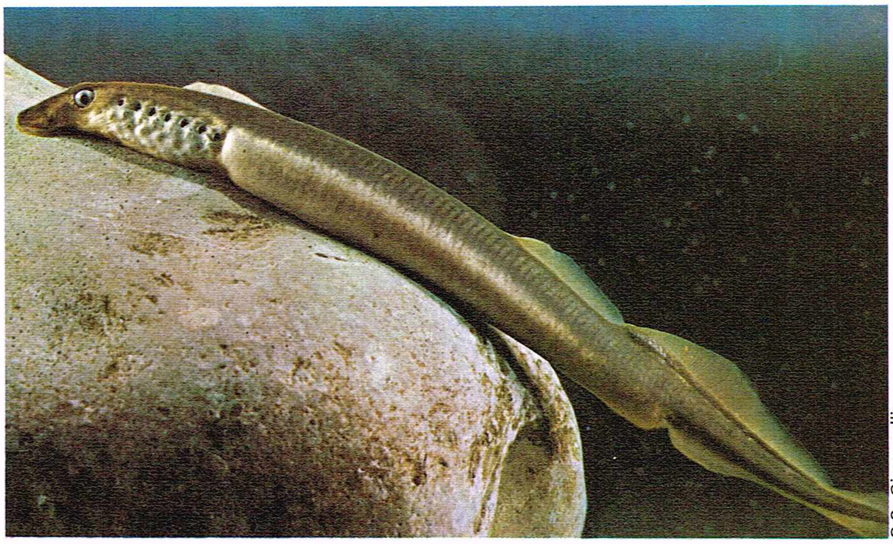

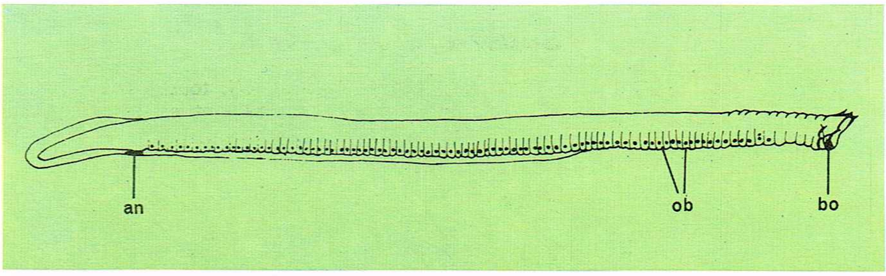

▲ *En haut,* **Lampetra planeri** *(la lamproie de Planer) vit dans les ruisseaux; en bas, représentation schématique de* **Myxine glutinosa,** *ou myxine : an, anus; ob, ouvertures branchiales; bo, bouche.*

On connaît seulement une dizaine d'espèces. Elles sont toutes marines, et vivent dans des zones tempérées ou froides, avec une prédilection pour les fonds vaseux, où elles s'enfouissent. On les rencontre jusqu'à plusieurs centaines de mètres de profondeur. Pour se nourrir, elles s'attaquent à de gros Poissons; grâce à leur langue, elles rongent la peau et pénètrent dans la chair de la proie qu'elles dévorent jusqu'à ce qu'il ne reste plus que la peau et les os. On ne doit pas considérer absolument les Myxinoïdes comme des parasites. Ils attaquent seulement les Poissons blessés, morts, ou pris dans les filets de pêche.

L'espèce la mieux connue est *Myxine glutinosa*, la myxine glutineuse, qui habite l'océan Atlantique septentrional, la Méditerranée, où on l'a capturée seulement sur les côtes d'Algérie et du Maroc.

On rencontre dans les mers du Japon *Paramyxine atami*, dont les sacs branchiaux sont au nombre de six paires comme chez la myxine glutineuse, mais débouchent à l'extérieur chacun par un orifice.

Les plus gros Myxinoïdes appartiennent au genre *Bdellostoma* et sont distribués dans les deux hémisphères, dans l'océan Pacifique et l'océan Atlantique. Leurs sacs branchiaux sont en nombre variable selon les espèces (de cinq à quinze par côté), chacun d'entre eux débouchant toujours à l'extérieur par un orifice particulier.

BIBLIOGRAPHIE

BERG L.S., *A Review of the Lampreys of the Northern Hemisphere. Ann. Mus. Zool.*, Leningrad, col. 32, (1), 1931. *Classification of the Fishes. Trav. Hist. Zool. Acad. des Sc. d'U.R.S.S.*, vol. 5, 1940. - BIGELOW H.B. et SCHROEDER W.C., *Cyclostomes, Fishes N.W. Atl*, New Haven, 1, 1948. - BRODAL A., FÄNGE R., *Biology of Myxine*, Oslo, 1963. - COTRONEI G., *Sulla sistematica biologica dei Petromizonti, Atti Accad. Lincei*, vol. 5, Rome, 1927. - GRASSÉ P.P., *Traité de zoologie*, t. XIII, Masson, Paris, 1958. - HOLLY M., *Cyclostomata, Das Tierreich*, vol. 59, 1933. - HUBBS C.L., *Cyclostomata, Encyclopedia Britanica*, 1947. - MOY THOMAS J.A., *Palaeozoic Fishes*, Londres, 1939. - TORTONESE E., *Leptocardii, Cyclostomata Selachii*, Bologne, 1956.

◀ *Page ci-contre, en haut, représentation schématique en coupe longitudinale médiane de la région céphalique et branchiale d'un Cyclostome, la lamproie marine* **(Petromyzon marinus)**; *na, narine impaire; cn, capsule nasale; en, encéphale; sh, sac hypophysaire; me, moelle épinière; ad, aorte dorsale; œs, œsophage; cd, corde dorsale; ve, ventricule; sv, sinus veineux; pe, péricarde; ov, ovaire; in, intestin; fe, foie; or, oreillette; ta, tronc artériel; av, aorte ventrale; ob, ouvertures branchiales; la, langue; de, dents cornées.*

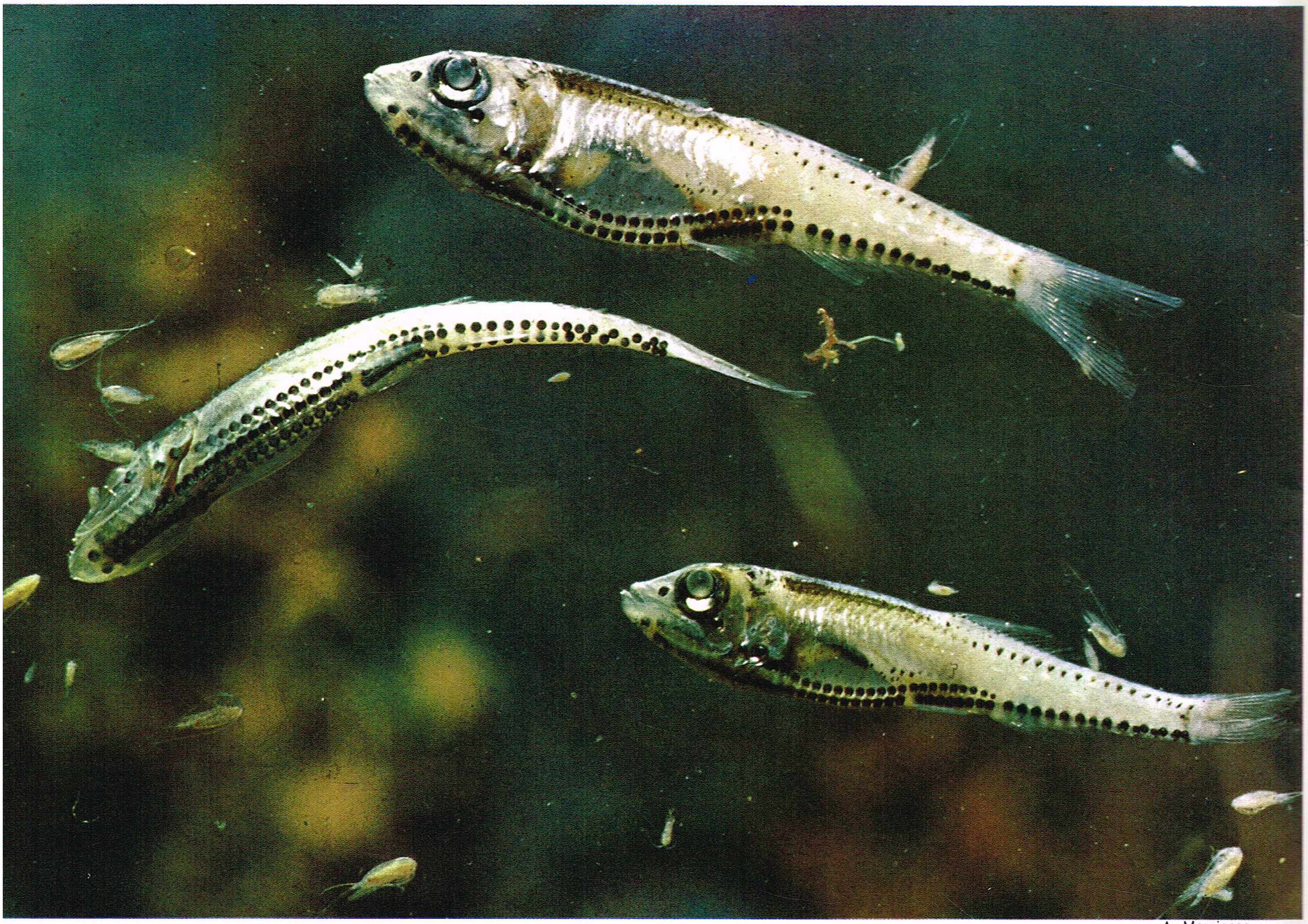

A. Margiocco

▲ *Les Poissons sont des Vertébrés pourvus de mâchoire, de deux narines et de nageoires, et respirant essentiellement à l'aide de branchies; ici, un groupe de Poissons abyssaux* **Vinciguerria attenuata.**

● POISSONS

Le nom de Poissons *(Pisces)* est appliqué par les zoologistes modernes à la super-classe qui comprend tous les Vertébrés poïkilothermes vivant dans l'eau, respirant essentiellement à l'aide de branchies, et généralement pourvus de nageoires. Ces Animaux diffèrent des Agnathes ou Cyclostomes, en ce qu'ils sont pourvus de mâchoires (Gnathostomes), de deux narines, et de membres constituant les nageoires paires.

Du point de vue systématique, les Poissons sont répartis en différentes classes, dont certaines sont actuellement éteintes. Ces classes sont caractérisées par des particularités morphologiques, anatomiques, physiologiques, etc.

Organisation générale

Dans la très grande majorité des cas, les Poissons ont une forme hautement hydrodynamique. En effet, leur corps est généralement fuselé, plus épais en avant qu'en arrière. La tête, en général à peu près conique, est directement insérée sur le tronc et n'est pas mobile. La forme en fuseau doit permettre le minimum de dépense d'énergie dans les déplacements. Toutefois, il s'agit là d'une forme typique dont les Poissons peuvent différer notablement par suite de modalités écologiques et éthologiques : ainsi, ils peuvent être serpentiformes (anguilles), rubaniformes (régalec), discoïdaux (poissons-lune), globuleux (Tétraodontidés), en forme de boîtes (Ostracionidés), comprimés (Pleuronectiformes), ou déprimés (Lophiiphormes et Rajiformes), etc.

Les différentes parties du corps des Poissons varient beaucoup d'un groupe à l'autre dans leurs proportions et leur forme, et peuvent même différer à l'intérieur de la même unité systématique, selon les sexes et les populations, ainsi qu'en fonction du temps, de l'âge, de l'état sexuel, etc. Le requin-marteau a une tête élargie en deux lobes céphaliques latéraux; chez l'espadon, la tête se prolonge par un rostre en forme d'épée, et chez les poissons-flûtes, elle forme un museau à peu près tubulaire.

La partie postérieure de la queue se rétrécit de façon typique en un pédoncule plus ou moins nettement délimité et parfois très fin; le plus souvent, il porte une nageoire caudale de formes et de dimensions variées. Les nageoires, supportées par des rayons épineux ou par des rayons mous, ou encore par les deux, sont parfois simplement adipeuses. Les rayons peuvent être séparés ou réunis par une membrane. Il arrive que certaines nageoires fusionnent avec le tronc de telle manière qu'à première vue, on ne les en distingue plus; c'est le cas des nageoires pectorales des raies.

La bouche peut s'ouvrir sur le haut, être terminale (c'est le cas le plus commun), ou encore ventrale (infère). Sur les côtés de la tête et en arrière, se trouvent les ouvertures branchiales, une seule paire chez les Téléostéens, de cinq à sept paires chez les Sélaciens.

L'anus ou le cloaque, qui peuvent être situés parfois très en avant, marquent la limite entre le tronc et la queue.

Squelette

Le squelette a une importance fondamentale pour la classification. En fonction de la nature de ce squelette, on a divisé la super-classe des Poissons en deux classes ; les Poissons osseux ou Ostéichthyens, et les Poissons cartilagineux ou Chondrichthyens.

Le squelette interne (ou endosquelette) des Ostéichthyens-Téléostéens est toujours, au moins partiellement, ossifié ; on y observe des éléments squelettiques provenant de cartilages (os de substitution) et des os cutanés ou membraneux, ou encore de revêtement, qui proviennent directement du tissu conjonctif.

Le squelette interne des Chondrichthyens est au contraire cartilagineux, bien qu'il puisse être plus ou moins profondément calcifié.

La corde dorsale (cordon cellulaire axial recouvert par une gaine fibreuse, elle-même limitée par une gaine élastique externe) constitue au cours du développement la première formation squelettique autour de laquelle se forment à partir du mésenchyme, selon une disposition métamérique, les corps vertébraux, ou quand ils manquent (Holocéphales), des arcs vertébraux. Chez les Sélaciens, la notocorde est persistante.

Typiquement, la vertèbre est constituée par un corps vertébral, une paire d'arcs vertébraux dorsaux (ou neuraux) et une paire d'arcs vertébraux ventraux (ou hémaux).

On distingue dans la colonne vertébrale deux parties fondamentales, qui correspondent aux deux régions successives abdominale ou antérieure, et caudale ou postérieure. Il n'y a pas, au sens propre, de région thoracique.

La colonne vertébrale, chez les Poissons osseux adultes, se termine le plus souvent en arrière par l'urostyle, petit os provenant de la fusion des dernières vertèbres et relevé en direction dorsale ; les processus ventraux des vertèbres qui le précèdent constituent les vertèbres hypurales, disposées en éventail vers le bas et soutenant la plupart des rayons caudaux. Ces derniers sont presque tous insérés sur la partie ventrale de la colonne vertébrale ;

▼ En haut,
exemples de nageoire caudale de Poissons :
A, hétérocerque, chez un esturgeon ;
B, homocerque, chez un saumon.
En bas,
squelette d'un Poisson osseux **(Perca sp.)** ***:***
nd, nageoires dorsales ; nc, nageoire caudale ;
na, nageoire anale ; np, nageoire pectorale ;
nv, nageoire pelvienne.

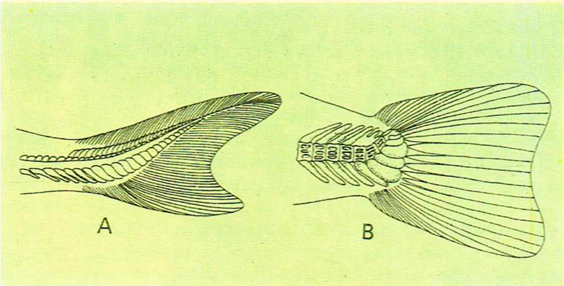

I.G.D.A.

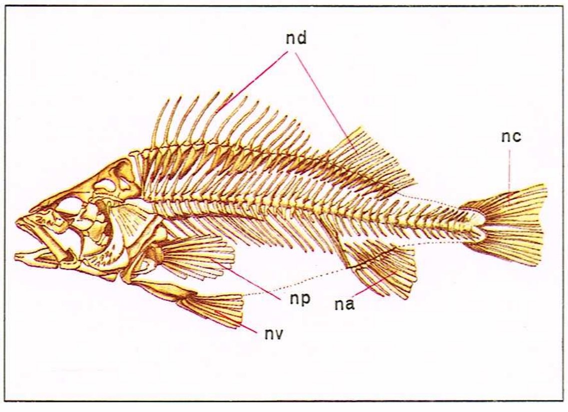

I.G.D.A.

SUPER-CLASSE des POISSONS

Classe des Acanthodiens *

Classe des Placodermes *

Classe des Chondrichthyens

☐ *Sous-classe des Selachii*
- — Super-ordre des Protoselachii *
- — Super-ordre des Euselachii
  - ○ *Ordre des Pleurotremata*
  - ○ *Ordre des Hypotremata*

☐ *Sous-classe des Bradyodonti*
- — Super-ordre des Eubradyodonti *
- — Super-ordre des Holocephali
  - ○ *Ordre des Chimériformes*

Classe des Ostéichthyens

☐ *Sous-classe des Actinoptérygiens*
- — Super-ordre des Chondrostei
  - ○ *Ordre des Acipensériformes*
- — Super-ordre des Holostei
  - ○ *Ordre des Amiiformes*
  - ○ *Ordre des Lépidostéiformes*
- — Super-ordre des Halecostomi *
- — Super-ordre des Teleostomi
  - ○ *Ordre des Clupéiformes*
  - ○ *Ordre des Scopéliformes*
  - ○ *Ordre des Saccopharyngiformes*
  - ○ *Ordre des Cypriniformes*
  - ○ *Ordre des Siluriformes*
  - ○ *Ordre des Anguilliformes*
  - ○ *Ordre des Béloniformes*
  - ○ *Ordre des Cyprinodontiformes*
  - ○ *Ordre des Syngnathiformes*
  - ○ *Ordre des Gadiformes*
  - ○ *Ordre des Macrouriformes*
  - ○ *Ordre des Lampridiformes*
  - ○ *Ordre des Béryciformes*
  - ○ *Ordre des Zéiformes*
  - ○ *Ordre des Perciformes*
  - ○ *Ordre des Gastérostéiformes*
  - ○ *Ordre des Pleuronectiformes*
  - ○ *Ordre des Tétraodontiformes*
  - ○ *Ordre des Échénéiformes*
  - ○ *Ordre des Gobiésociformes*
  - ○ *Ordre des Batrachoïdiformes*
  - ○ *Ordre des Lophiiformes*
  - ○ *Ordre des Mastacembéliformes*

☐ *Sous-classe des Brachioptérygiens*
  - ○ *Ordre des Polyptériformes*

☐ *Sous-classe des Dipneustes*
- — Super-ordre des Ceratodi
  - ○ *Ordre des Cératodiformes*
- — Super-ordre des Dipteri *

☐ *Sous-classe des Crossoptérygiens*
- — Super-ordre des Rhipidisti *
- — Super-ordre des Actinisti
  - ○ *Ordre des Cœlacanthiformes*

** Groupes fossiles*

G. Relini

▲ *Coupe d'une écaille placoïde (× 200 × 2).*

si la nageoire caudale, bien qu'anatomiquement asymétrique, semble symétrique extérieurement, elle est dite homocerque. D'autres dispositions anatomiques peuvent entraîner une caudale à lobes dissymétriques — épicerque, hypocerque — ou une symétrie due à une disposition régulière des rayons si la portion caudale de la colonne vertébrale reste droite : caudale diphycerque, etc.

Le squelette de la tête, ou crâne (chondrocrâne des Chondrichthyens, et ostéocrâne des Ostéichthyens), se divise typiquement en une boîte crânienne (neurocrâne) et un crâne viscéral (splanchnocrâne). Le neurocrâne est la partie dorsale, qui forme une sorte d'enveloppe protectrice pour l'encéphale et les principaux organes des sens; il est relié postérieurement à la colonne vertébrale. Le splanchnocrâne est situé ventralement par rapport au neurocrâne. Il est formé d'arcs successifs, les arcs viscéraux, à structure essentiellement métamérique; il reflète la métamérie primitive de la tête, qui n'est guère évidente dans le neurocrâne.

Le neurocrâne des Poissons cartilagineux est une capsule cartilagineuse sans sutures, alors que, chez les Poissons osseux, il est constitué d'os d'origines diverses dont le nombre, variable selon les groupes, est toujours important.

Le splanchnocrâne des Poissons cartilagineux présente, de l'avant vers l'arrière, les arcs viscéraux suivants : un arc mandibulaire, un arc hyoïde, de cinq à sept arcs branchiaux. La partie dorsale de l'arc mandibulaire est constituée par deux os palato-carrés (ou ptérygo-carrés), un de chaque côté, reliés entre eux à l'avant par une symphyse médiane; la partie ventrale de cet arc comporte les deux cartilages de Meckel, symétriques et réunis par une symphyse médiane antérieure. Chez les Sélaciens, les os palato-carrés peuvent être reliés au neurocrâne par l'intermédiaire de l'os hyomandibulaire (suspension hyostylique) ou bien à la fois directement et grâce à l'os hyomandibulaire (suspension amphistylique). Enfin, chacun des cinq à sept arcs branchiaux est constitué par deux éléments squelettiques cartilagineux et porte des rayons soutenant les cloisons branchiales. Chez les Holocéphales, les os palato-carrés sont soudés au neurocrâne (suspension autostylique).

Le splanchnocrâne des Poissons osseux est formé, le plus souvent, pour les deux parties dorsales (droite et gauche) de l'arc mandibulaire, par : l'os carré, le palatin, l'ectoptérygoïde, l'endoptérygoïde et le métaptérygoïde. La partie externe de la mâchoire supérieure est constituée par des os pairs d'origine membraneuse, le prémaxillaire et le maxillaire. Les prémaxillaires sont souvent mobiles, en sorte que la bouche est plus ou moins protractile; les maxillaires peuvent manquer de dents. La mandibule, de chaque côté, est presque toujours formée par un os dentaire et par un os articulaire; ce dernier est relié au carré, pièce provenant de la partie postérieure du palato-carré. Le carré est articulé au symplectique, et celui-ci sur l'hyomandibulaire, lequel est formé par la partie supérieure de l'arc viscéral hyoïde. C'est seulement chez certaines formes inférieures que les os mandibulaires sont plus nombreux.

Les cinq arcs branchiaux sont constitués par divers os branchiaux et ventralement par les basi-branchiaux; les pharyngo-branchiaux portent parfois des dents. Des appendices, nommés branchiospines, ou branchicténies, dont le nombre et la forme varient beaucoup d'une espèce à l'autre, et même d'un individu à l'autre et selon l'âge, se trouvent à la partie interne des arcs branchiaux. C'est souvent un excellent caractère systématique.

Le squelette des nageoires paires est constitué, chez les Poissons cartilagineux, d'une ceinture pectorale, ou scapulaire, et d'une ceinture pelvienne. La ceinture scapulaire se compose d'un arc par côté, séparé du crâne ainsi que, presque toujours, de la colonne vertébrale; cet arc est fait de deux parties distinctes : scapu-

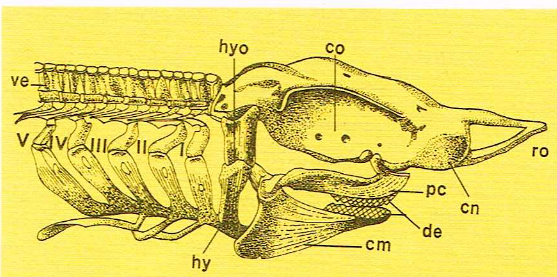

I.G.D.A.

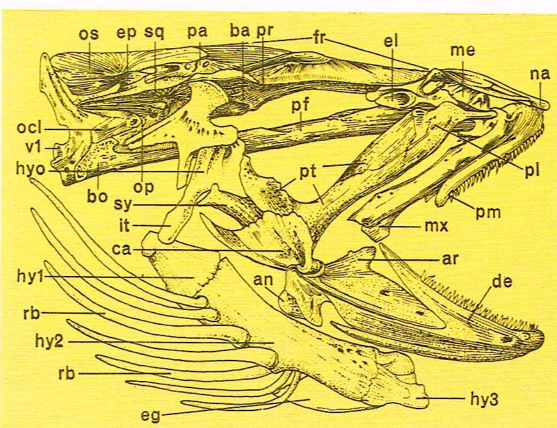

I.G.D.A.

▶ *A gauche, en haut, squelette de la partie antérieure d'un Sélacien (Mustelus sp.) : ve, vertèbres; hyo, hyomandibulaire; co, capsule optique (orbite); ro, rostre ou museau; cn, capsule nasale; pc, palato-carré; de, dents; cm, cartilage de Meckel; hy, hyoïde; I à V, arcs branchiaux. En bas, squelette de la tête d'un Poisson osseux (à l'exclusion des parties operculaires); os, os occipital supérieur; ep, épiotique; sq, squamosal; pa, pariétal; ba, basisphénoïde; pr, prootique; fr, frontal; el, ethmoïde latéral; me, mésethmoïde; na, nasal; pl, palatin; pm, prémaxillaire; mx, maxillaire; ar, articulaire; de, dentaire; hy 1, hy 2, hy 3, parties de l'hyoïde; eg, entoglosse; rb, rayons branchiostèges; ca, carré; it, interhyal; sy, symplectique; op, opisthotique; bo, basi-occipital; hyo, hyomandibulaire; v 1, première vertèbre; ocl, occipital latéral; pf, parasphénoïde; pt, ptérygoïde; an, angulaire.*

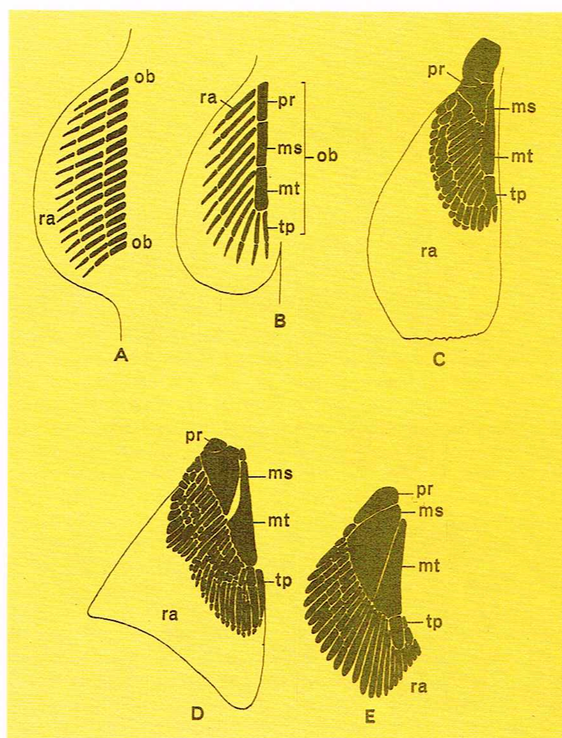

I.G.D.A.

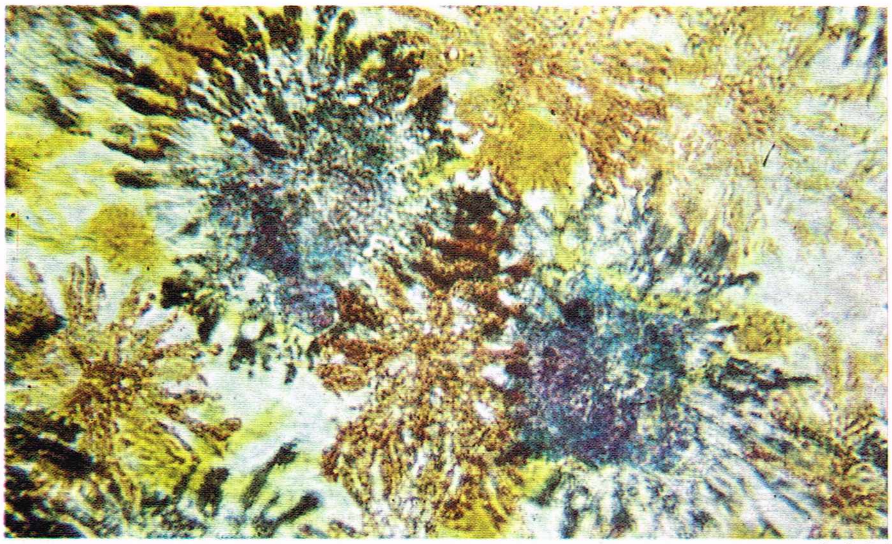

G. Relini

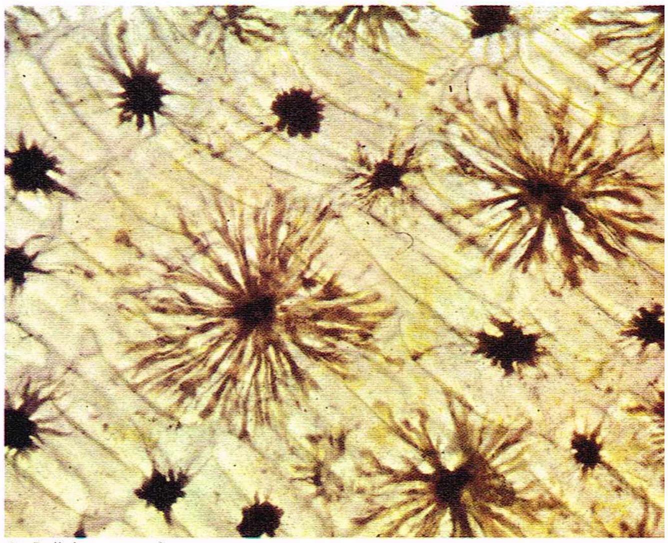

G. Relini

▲ *A gauche, chromatophores du tégument d'un Poisson* (**Crenilabrus quinquemaculatus**) *vus au microscope (× 700 × 3). A droite, mélanophores de la peau d'une morue (× 200 × 3).*

laire ou dorsale, et coracoïdienne ou ventrale. La ceinture pelvienne des Poissons cartilagineux est petite, séparée du reste du squelette, et constituée d'un arc par côté, formé par un iléon (dorsal) et par un ischio-pubien (ventral). La nageoire pectorale, chez les Poissons cartilagineux, présente toujours à la base trois éléments squelettiques cartilagineux, le pro-ptérygium, le méso-ptérygium et le méta-ptérygium, sur lequel sont implantés les ptérygophores, cartilagineux, qui soutiennent les cératotriches, cartilagineux eux aussi. La nageoire ventrale a un seul basi-ptérygium et, parfois aussi, un pro-ptérygium.

Chez les Poissons osseux, la ceinture pectorale est formée par quelques pièces, le plus souvent osseuses, mais parfois cartilagineuses, formant un arc de chaque côté ordinairement articulé avec le crâne. Les Poissons osseux ne possèdent pas de véritable ceinture pelvienne, et la nageoire s'appuie sur une pièce squelettique considérée comme l'homologue du basi-ptérygium, non réunie à la colonne vertébrale. La position des nageoires ventrales, chez les Poissons osseux, peut être abdominale (truite), thoracique (thon), jugulaire (colin), ou bien intermédiaire (par exemple, subthoracique chez l'épinoche) ; dans certains cas, la pièce squelettique de soutien de chacune des nageoires ventrales est reliée directement ou par l'intermédiaire de ligaments à la ceinture pectorale.

Téguments

L'épiderme, stratifié, contient presque toujours des cellules mucipares et, moins fréquemment, des cellules glandulaires en massue ainsi que des cellules séreuses.

Les productions cutanées sont très variées. Les éléments cornés sont assez rares; des tubercules cornés ou organes perliformes, arrondis, apparaissent chez les mâles de certaines espèces de Cyprinidés durant la période de reproduction.

Les productions cutanées osseuses sont très communes, et leur structure, qui varie généralement selon les groupes, reste constante à l'intérieur du même groupe ou de la même forme; elle peut constituer un important caractère de classification.

Les écailles placoïdes des Sélaciens, type primitif de production à base de dentine, se forment à la limite de l'épiderme et du derme, et consistent en une plaque basale, de laquelle s'élèvent une ou plusieurs petites dents perforant l'épiderme. L'extrémité de ces dents est recouverte par un émail (d'origine ectodermique) et est généralement courbée en arrière, en sorte que le tégument est particulièrement rugueux dans le sens postéro-antérieur.

Il existe un type particulier d'écailles chez certains groupes (Polyptériformes, Lépidostéiformes) : il s'agit des *écailles ganoïdes,* productions plates de forme losangique, recouvertes d'une couche luisante, et de ganoïne (substance semblable à l'émail, mais d'origine mésodermique).

Les écailles dites *cosmoïdes,* d'un type plus primitif, appartiennent à divers groupes fossiles. Elles sont formées d'un revêtement externe semblable à de l'émail couvrant trois couches superposées : une externe constituée de cosmine, une couche médiane d'os spongieux et une couche interne d'isopédine. Les écailles du cœlacanthe sont cosmoïdes.

Chez une grande partie des Poissons osseux, les écailles sont typiquement des lames de tissu *ostéoïde;* elles prennent naissance dans l'épaisseur du derme et sont disposées en lignes obliques; au cours du développement, elles arrivent à s'imbriquer entre elles et à faire saillie à la surface du tégument, chacune étant logée dans sa propre cavité. Morphologiquement, elles sont de deux types : on les dit *cycloïdes* quand le bord postérieur est lisse, et *cténoïdes* quand ce bord est dentelé. Sur les écailles apparaissent des stries de croissance, qui permettent parfois de déterminer l'âge de l'individu.

Chez divers groupes, il existe des plaques osseuses cutanées plus ou moins étendues, pouvant constituer une sorte de squelette dermique; c'est le cas chez les Acipensériformes, alors que chez les torpilles et les congres, la peau est nue, c'est-à-dire totalement dépourvue de productions cutanées. Les Poissons osseux, en particulier les Lophiiformes et les Syngnathiformes, présentent fréquemment des appendices cutanés.

◀ *Page ci-contre, à droite, représentation schématique de la théorie de la formation des nageoires paires : A, stade primitif hypothétique; B, stade ultérieur, avec les os basilaires soudés en un axe; C, nageoire d'un Sélacien bathyphile primitif* (**Chlamydoselachus**)*; D, nageoire d'un Sélacien primitif chez qui les os basilaires forment déjà un éventail; E, nageoire typique d'un Sélacien, chez qui les trois os basilaires sont en éventail : ms, mésoptérygium; mt, métaptérygium; ob, os basilaires; pr, proptérygium; ra, rayons; tp, téloptérygium.*

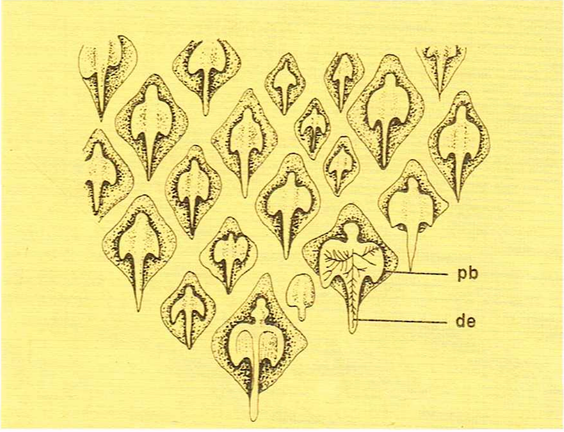

I.G.D.A.

G. Caprotti

◀ *En haut, représentation schématique des écailles placoïdes, vues de l'extérieur, chez un* **Scyliorhinus**, *ou roussette : pb, plaque basale; de, denticule. En bas, exemple d'écailles cycloïdes (chevaine).*

▶ *Structure de l'encéphale chez les Poissons osseux; A, vue dorsale : bo, bulbe olfactif; to, tractus olfactif; lo, lobe olfactif; cs, corps strié; ep, épiphyse; hc, hémisphères cérébraux; ms, mésencéphale; mt, métencéphale ou cervelet; mc, myélencéphale ou bulbe rachidien; fr, fosse rhomboïdale; me, moelle épinière; B, en vue ventrale : tb, tubercules bijumeaux; hy, hypophyse; li, lobes inférieurs; sv, sac vasculaire; br, bulbe rachidien; I à XII, nerfs crâniens.*

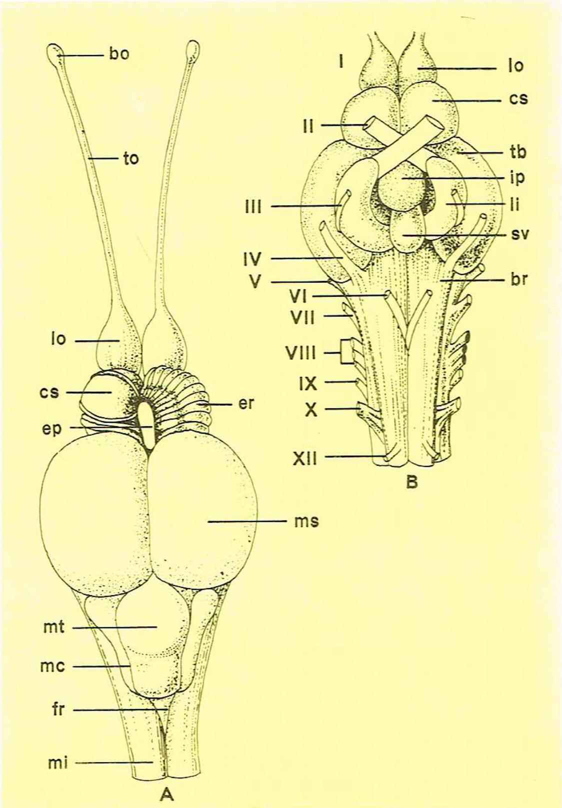

I.G.D.A.

▶ *Page ci-contre, en bas, représentation schématique des viscères d'un Poisson osseux* (Leuciscus sp.) *: pn, pronéphros; mn, mésonéphros; cp, canal pneumatique; vn, vessie natatoire; vu, vessie urinaire; an, anus; od, oviducte; ov, ovaire; in, intestin; vb, vésicule biliaire; fe, foie; cœ, cœur; br, branchies.*

Chez de nombreuses espèces, osseuses et plus rarement cartilagineuses (Squalidés de différents genres), le tégument est pourvu d'organes lumineux ou photophores, de nature glandulaire, qui produisent une luminescence soit spontanément, soit à la suite de stimulations.

Les pigments du derme jouent un rôle biologique important; ils sont contenus dans des cellules chromatophores. Ces dernières sont appelées mélanocytes quand elles ont un pigment noir ou mélanine, xanthocytes quand le pigment est jaune, etc. La coloration des Poissons provient non seulement des pigments, mais aussi, fréquemment, de phénomènes physiques de réflexion et d'interférence (iridescence); ainsi, les couleurs vertes et bleues ne sont pas dues habituellement à des pigments, mais proviennent normalement de phénomènes d'interférence sur des iridocytes.

Système musculaire

Pour l'essentiel de ses structures, la musculature des Poissons rappelle beaucoup celle des Céphalocordés et des Cyclostomes par l'existence, de chaque côté du tronc et de la queue, d'une série de segments musculaires ou myotomes. Les muscles des mâchoires dérivent de la plaque latérale du mésoderme. On trouve dans la tête, en position dorsale par rapport à la région branchiale, la musculature épibranchiale, et en position ventrale, la musculature hypobranchiale.

Une cloison longitudinale et horizontale de tissu conjonctif divise la musculature du tronc et de la queue en deux parties : l'une dorsale (muscles épiaxiaux) et l'autre ventrale (muscles hypoaxiaux); quand on enlève le tégument, on voit très bien la succession régulière des myomères.

Les nageoires possèdent des muscles érecteurs et dépresseurs, à la formation desquels coopèrent plusieurs myomères, en fonction du nombre des rayons des nageoires.

Système nerveux central

L'encéphale est typiquement constitué par cinq parties : télencéphale, diencéphale, mésencéphale, métencéphale et myélencéphale.

Chez les Poissons cartilagineux, les lobes et les bulbes olfactifs sont très développés; le cervelet, très gros également, couvre en grande partie les lobes optiques. Chez les Poissons osseux, par contre, les lobes olfactifs sont réduits, alors que les lobes optiques ainsi que les ganglions basaux (corps striés) sont développés. Chez de nombreuses formes des profondeurs, le sac vasculaire, diverticule du diencéphale, est particulièrement développé; situé ventralement près de l'hypophyse, il contient des cellules sensorielles et des cellules sécrétrices (organe infundibulaire). Les nerfs crâniens sont au nombre de dix. La moelle épinière s'étend le plus souvent jusqu'à l'extrémité de la queue. Les nerfs spinaux sont formés par des racines dorsales et ventrales, et constituent des plexus correspondant aux nageoires paires.

Organes des sens

L'épiderme contient de nombreux organes des sens, comme les terminaisons nerveuses libres, les papilles et les calices sensitifs.

L'organe dit de la *ligne latérale* ou *système latéral*, très important, est un ensemble de canaux, essentiellement longitudinaux, remplis de mucus; ce sont rarement de simples sillons cutanés (comme chez *Chlamidoselachus anguineus*, un requin), mais généralement des tubes de petit diamètre. A fleur de peau, les canaux communiquent avec l'extérieur à certains intervalles, grâce à des tubules superficiels traversant les écailles (et parfois aussi les os cutanés de la tête).

Sur la tête, la ligne latérale se divise en nombreux éléments (supra-orbital, infra-orbital, mandibulaire, et occipital), innervés par différentes branches du nerf facial (septième paire crânienne). Les éléments céphaliques se réunissent postérieurement pour former un canal longitudinal, à mi-hauteur sur les flancs, dessinant une ligne généralement bien visible, le plus souvent unique et continue jusqu'à la base de la nageoire caudale; parfois, cette ligne est multiple.

La ligne latérale du tronc est innervée par une branche du nerf vague (dixième paire crânienne); elle peut être innervée aussi par une branche du nerf glosso-pharyngien (neuvième paire crânienne) sur une brève portion.

Le système latéral est relié au labyrinthe de l'oreille interne et sert probablement de récepteur des vibrations et de la pression de l'eau; mais on ne connaît pas bien sa fonction réelle.

Il existe d'autres organes, les *vésicules de Savi* et les *ampoules de Lorenzini*, chez les Sélaciens, ou les *corps cyathiformes* des Gobiidés, importants du point de vue taxonomique.

L'organe auditif et l'organe de l'équilibre ont une origine commune avec la ligne latérale; localisés dans l'oreille interne (il n'y a pas d'oreilles moyenne et externe), ils sont constitués par le labyrinthe avec la saccule et ses replis, l'utricule, et les trois canaux semi-circulaires avec les ampoules. La fonction principale du labyrinthe est de permettre l'orientation et l'équilibre.

La vessie natatoire, ou vessie gazeuse, est un organe hydrostatique présent seulement chez les Poissons osseux (mais pas dans tous les groupes); elle peut s'étendre jusqu'au labyrinthe, et peut même lui être reliée par les osselets de Weber (ostariophyses), parties modifiées des quatre premières vertèbres.

L'organe olfactif est logé dans les fosses nasales qui ne communiquent presque jamais avec la cavité buccale.

▶ *Coupe longitudinale, au niveau de la ligne latérale, d'un Poisson* (Amia calva, *ou amie*) *: po, pores en communication avec l'extérieur; ec, écailles; cl, canal de la ligne latérale; ps, plaque sensitive; rn, rameaux du nerf latéral allant aux plaques sensitives; nl, nerf latéral.*

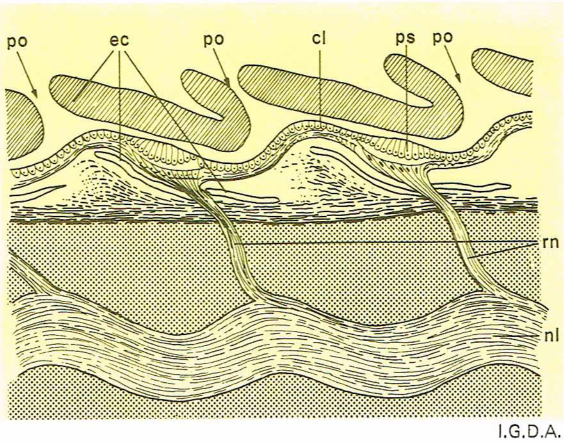

I.G.D.A.

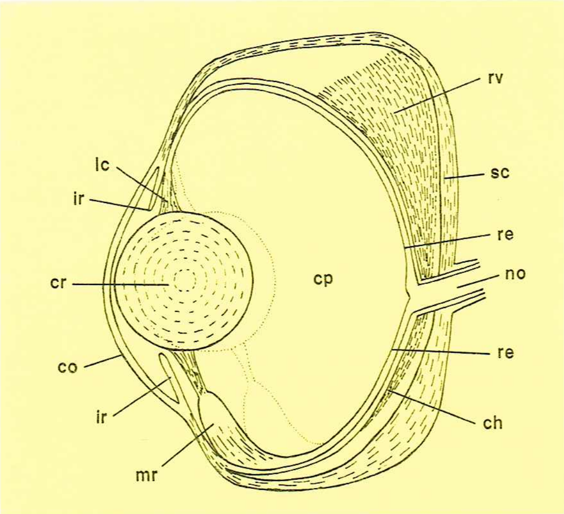

I.G.D.A.

L'organe du goût est représenté par des papilles gustatives qui parsèment la bouche, le pharynx, l'œsophage et souvent les barbillons (quand ils existent), ainsi que différentes zones du tégument du museau et des côtés de la tête.

Les yeux des Poissons, dont la vision est monoculaire, sont le plus souvent latéraux, mais peuvent être situés dorsalement et, chez les adultes de certains groupes (Pleuronectiformes ou Poissons plats), se trouver tous les deux d'un seul côté. Le plus souvent, la courbure de la cornée est faible. La sclérotique est cartilagineuse, parfois plus ou moins ossifiée, et porte fréquemment une couche interne réfléchissante, riche en cristaux de guanine. Le cristallin est sphérique, très gros et indéformable lors des stimuli normaux. La rétine renferme surtout des bâtonnets; il peut ne pas y avoir de cônes comme chez certaines formes des profondeurs. Diverses espèces de Poissons osseux cavernicoles ou marins abyssaux ont des yeux atrophiés ou même totalement absents.

Appareil digestif

L'appareil digestif est constitué typiquement par un intestin antérieur (bouche, pharynx, œsophage, estomac), un intestin moyen avec des glandes annexes (foie, pancréas) et un intestin terminal.

La bouche, le pharynx et l'œsophage sont revêtus d'un épithélium stratifié, semblable à celui de l'épiderme. La langue n'est pas musculeuse; il n'existe pas à proprement parler de glandes salivaires; certaines espèces possèdent des glandes orales venimeuses.

Les dents sont dépourvues de véritables racines. Chez les Poissons cartilagineux, elles sont implantées dans les os palato-carrés et dans les cartilages de Meckel; chez certains groupes, il en existe plusieurs rangées, dont certaines sont fonctionnelles et d'autres, de remplacement, sont progressivement renouvelées, ou bien, elles sont rapprochées de différente façon les unes des autres et forment des plaques dentaires, des plaques broyeuses, etc.

Chez les Poissons osseux, les dents peuvent manquer (chez certains Acipensériformes, Syngnathiformes, etc.), ou bien se trouver sur le vomer, les os palatins, le parasphénoïde, les ptérygoïdes, l'os hyoglosse, et les os pharyngiens. Leur nombre, leur forme et leur disposition varient selon les groupes, et, à l'intérieur d'un groupe, selon les espèces, d'où leur importance du point de vue systématique.

L'œsophage est le plus souvent court; l'estomac, tubulaire et en cul-de-sac, est pourvu de glandes fundiques et pyloriques, encore qu'un tel organe différencié, muni de glandes gastriques, manque chez certaines formes.

L'intestin moyen des Poissons cartilagineux et de certains Poissons osseux (Acipensériformes, Amiiformes, Lépidostéiformes, Polyptériformes et Dipneustes) présente un repli interne ou valvule spirale, qui en accroît la surface absorbante. En arrière du pylore, une grande partie des Poissons osseux présentent des appendices pyloriques, au nombre d'un seul jusqu'à plusieurs centaines, selon les groupes et les espèces, ou bien des invaginations en cul-de-sac qui servent essentiellement à l'absorption. Chez les Poissons cartilagineux et chez les Dipneustes, l'intestin terminal comprend une glande rectale.

Le foie, généralement volumineux, est chargé de graisse et pourvu d'une vésicule biliaire; chez certains groupes, il possède des lobules pancréatiques; chez d'autres, le pancréas constitue une glande distincte.

Appareil respiratoire

Chez les Sélaciens, les fentes branchiales sont généralement au nombre de cinq (six chez *Hexanchus* et *Chlamydoselachus,* et sept chez *Heptanchrias*); elles sont nettement séparées les unes des autres par des cloisons inter-branchiales, supportées par l'arc et recouvertes de lamelles branchiales. Les branchies sont irriguées chacune par une artère afférente et par deux artères efférentes.

Il peut exister, sur le bord interne de l'arc branchial, des appendices, ou branchiospines, cartilagineux, servant parfois à filtrer et à retenir le plancton, comme chez le gigantesque requin pèlerin *Cetorhinus maximus,* espèce planctophage. Près de l'œil, on remarque le spiracle, orifice communiquant avec le pharynx, et sur la paroi duquel peut se trouver une branchie rudimentaire irriguée seulement par du sang artériel, et qui n'a par conséquent pas de fonction respiratoire.

Chez les Holocéphales, il n'existe pas de spiracle; quant aux arcs branchiaux, ils sont au nombre de cinq et le bord des lamelles reste libre, non soudé au tégument; les arcs sont logés dans une chambre branchiale, communiquant avec l'extérieur par une unique ouverture, protégée par un opercule cutané.

Chez les Poissons osseux, chaque arc branchial supporte les hémibranchies, libres dans la chambre branchiale, la cloison étant réduite ou absente, et des branchiospines variant en nombre et en forme selon les groupes. Les spiracles sont rarement présents.

Certaines espèces peuvent utiliser l'oxygène atmosphérique à travers la surface de la chambre branchiale ou d'une autre cavité qui communique avec celle-ci, et qui contient un organe respiratoire, qualifié de suprabranchial ou labyrinthique, ou par le pharynx, le tégument, le tube digestif, etc., richement irrigués en vaisseaux capillaires.

La vessie natatoire, qui existe chez certains Poissons osseux, est un organe membraneux, diversement rempli d'oxygène, d'azote et d'anhydride carbonique, situé presque toujours en position dorsale par rapport au tube digestif. Dérivant d'une invagination dorsale (exceptionnellement ventrale) de la paroi de l'œsophage, elle peut rester en communication avec ce dernier par le canal pneumatique (dans ce cas, il peut y avoir aussi une déglutition directe de l'air atmosphérique) [Poissons physostomes] ou bien en être séparée (Poissons physoclystes). Il existe exceptionnellement aussi une communication directe avec le milieu extérieur. La paroi de cette vessie, fortement vascularisée, présente souvent des réseaux de capillaires, situés non pas entre des artères et des veines, mais entre deux artères (corps rouges), et des glandes (dites gazeuses).

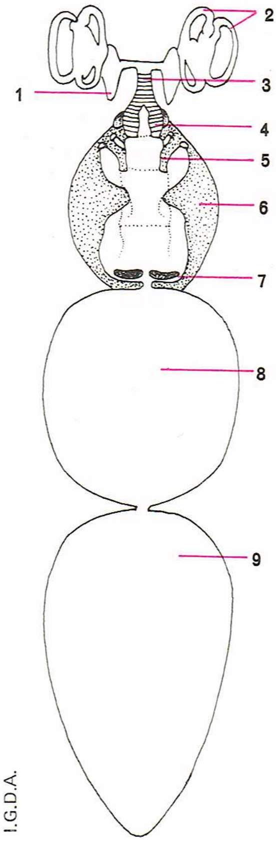

I.G.D.A.

◀▲ A gauche, coupe de l'œil d'un brochet : cp, chambre postérieure; lc, ligament du cristallin; ir, iris; cr, cristallin; co, cornée; mr, muscle rétracteur du cristallin dont l'action est indiquée selon les pointillés; rv, réseau vasculaire, ou glande choroïdienne; sc, sclérotique; no, nerf optique; re, rétine; ch, choroïde; A droite, schéma des rapports entre la vessie natatoire, les osselets de Weber et le labyrinthe, chez les Poissons Cyprinides : 1, saccule; 2, canaux semi-circulaires; 3, sac endolymphatique; 4, étrier; 5, enclume; 6, marteau; 7, os suspenseur; 8, chambre antérieure; 9, chambre postérieure de la vessie.

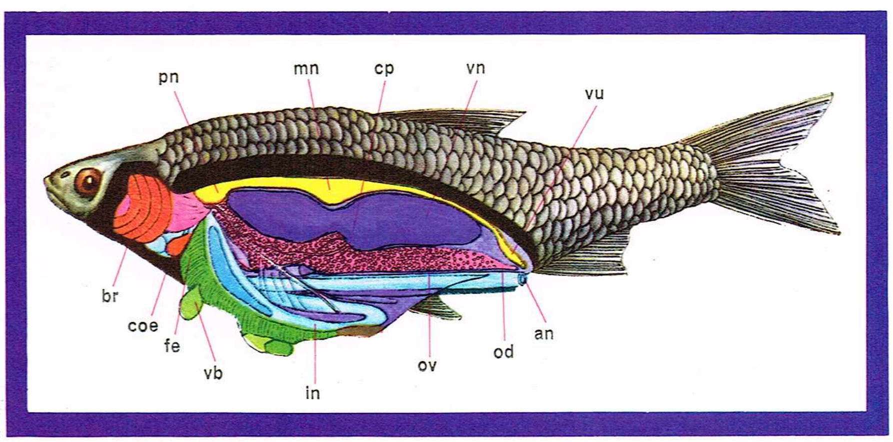

I.G.D.A.

▶ ***Schéma du système circulatoire des Poissons :*** ***or, oreillettes; ve, ventricule; ba, bulbe aortique; ta, tronc aortique; ac, artères céphaliques; cc, circulation artérielle céphalique; br, capillaires branchiaux; ra, racines aortiques; ad, aorte dorsale; pour le système veineux : sv, sinus veineux; vc, veines caudales; vr, veine porte rénale; re, reins; in, intestin; vh, veine hépatique; fe, foie; ca, veine cardinale antérieure; cu, canal de Cuvier; cp, veine cardinale postérieure; vl, veine latérale (dans la paroi de corps).***

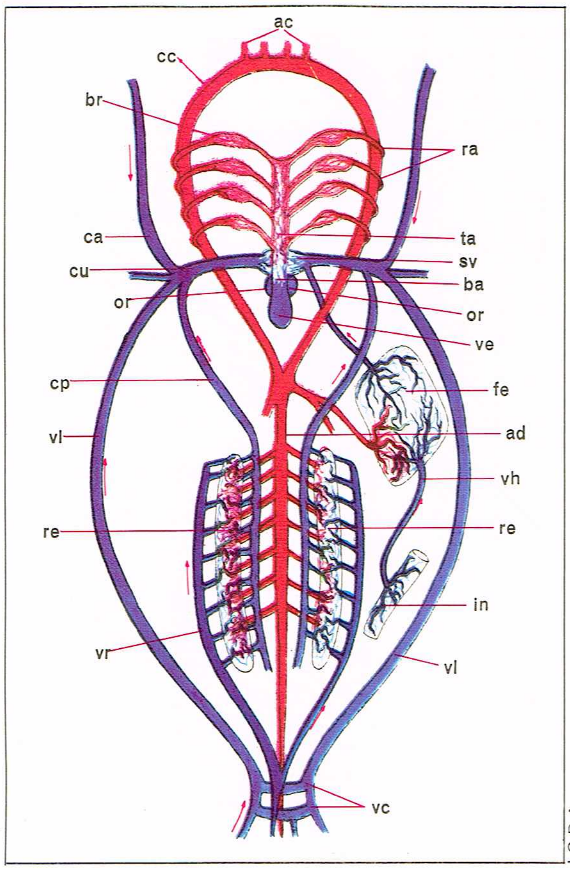

▼ ***Schéma des organes génito-urinaires (partie droite) d'un Sélacien :*** ***cd, canal déférent; te, testicule; cw, canal de Wolff; gl, glande de Leydig; cu, canaux urinaires; ur, uretère; vs, vésicule séminale; cm, canal de Müller atrophié; og, orifice génito-urinaire; rp, rein postérieur.***

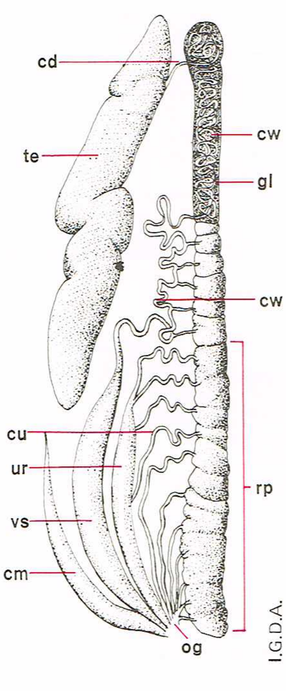

Les Cératodiformes ont également une respiration « pulmonaire »; leur poumon, qui est généralement une vessie gazeuse modifiée, débouche ventralement dans le pharynx, en arrière du dernier arc branchial; ses parois sont alvéolées et richement vascularisées; l'inspiration et l'expiration se font par la bouche. *Neoceratodus forsteri* a un poumon unique avec une seule veine pulmonaire; *Protopterus* et *Lepidosiren* en ont un divisé longitudinalement sur presque toute sa longueur en deux moitiés symétriques, possédant chacune une veine pulmonaire. Les Cératodiformes peuvent respirer hors de l'eau et, si le milieu est pauvre en oxygène dissous, ils montent à la surface pour respirer de l'air atmosphérique, complétant leur respiration branchiale par une respiration pulmonaire.

Appareil circulatoire

La circulation sanguine est généralement simple. Seuls les Cératodiformes ont une circulation double et incomplète en relation avec la respiration pulmonaire.

Chez les Sélaciens, le cœur comporte un sinus veineux, une oreillette, un ventricule, un cône artériel et un nombre variable de valvules; la cavité péricardique est en communication avec le cœlome par deux ouvertures. La concentration du sang est semblable ou même supérieure à celle de l'eau environnante, en raison de l'urée qu'il contient.

Chez les Holocéphales, le cœur est essentiellement constitué des mêmes parties, mais une ouverture unique fait communiquer la cavité péricardique avec le cœlome.

Le cœur des Actinoptérygiens est formé d'un sinus veineux, d'une oreillette, d'un ventricule, et parfois d'un cône artériel, plus rarement d'un bulbe situé au début de l'aorte ventrale, avec deux valvules; la concentration du sang est constante et indépendante de celle de l'eau environnante (homéo-osmotiques), et elle lui est supérieure chez les espèces dulçaquicoles et inférieure chez les espèces marines.

Le sang contient des hématies ovales, biconvexes, et pourvues d'un noyau. La circulation lymphatique est en rapport avec la circulation veineuse; il existe, dans la queue de certaines espèces ou de certains genres (anguille, silure, etc.), des cœurs lymphatiques qui pompent la lymphe dans la veine caudale.

Appareil excréteur

On distingue deux types de reins, qui peuvent se faire suite au cours de l'ontogenèse : le pronéphros ou rein céphalique, et le mésonéphros ou corps de Wolff.

Le *pronéphros* est constitué d'une série de tubes urinifères, ouverts dans le cœlome par une ouverture infundibuliforme et ciliée, et débouchant dans un canal longitudinal, le canal de Wolff.

Le *mésonéphros* a essentiellement la même conformation que le pronéphros, mais ses tubes tendent à ne plus être métamériques; ils manquent souvent de néphrostome, et présentent parfois des glomérules de Malpighi.

Chez les Sélaciens, les pronéphros sont plus ou moins rudimentaires, et les reins fonctionnels sont des mésonéphros. Les reins définitifs des Actinoptérygiens sont généralement des mésonéphros, les pronéphros se transformant en organes lymphoïdes.

Appareil reproducteur

Chez les Sélaciens, l'atrophie de l'un des ovaires et de l'un des oviductes est assez fréquente. On appelle ces derniers les *canaux de Müller;* ils s'ouvrent dans le cœlome par un gros orifice proche des ovaires, et débouchent dans le cloaque. Chez certaines espèces, la partie médiane des canaux de Müller sert aussi d'utérus; dans les oviductes, de toute façon, les glandes nidamenteuses forment le revêtement d'albumine et la couche cornée de l'œuf chez les espèces ovipares, ou une fine capsule membraneuse chez les espèces qui ne pondent pas d'œufs dans le milieu extérieur. Dans le cloaque des mâles des Sélaciens, s'ouvre un seul orifice urogénital, en arrière de l'anus. Chez les femelles, il y a une ouverture urinaire et une ouverture génitale séparées.

Chez les Actinoptérygiens qui n'ont pas de cloaque, les uretères et les conduits génitaux débouchent séparément ou conjointement derrière l'anus. Les conduits génitaux peuvent manquer chez les femelles (Salmonidés) ou chez les deux sexes (Anguilliformes); dans ce cas, les produits sexuels tombent dans la cavité abdominale, d'où ils sont expulsés par des pores génitaux.

Généralement, les Poissons sont gonochoriques, mais on connaît de nombreux cas d'inversion sexuelle chez les Ostéichthyens (*Coris, Labrus, Cobitis,* etc.), où les individus qui produisent pendant une bonne partie de leur vie des gonades d'un seul sexe perdent à un certain stade de leur croissance les éléments germinaux du premier sexe, remplacés totalement par ceux de l'autre; il s'agit par conséquent de faux gonochoriques.

Chez certains Sparidés, on constate la coexistence, dans la même gonade, de territoires mâles et femelles, qui arrivent à maturité à peu près au même moment.

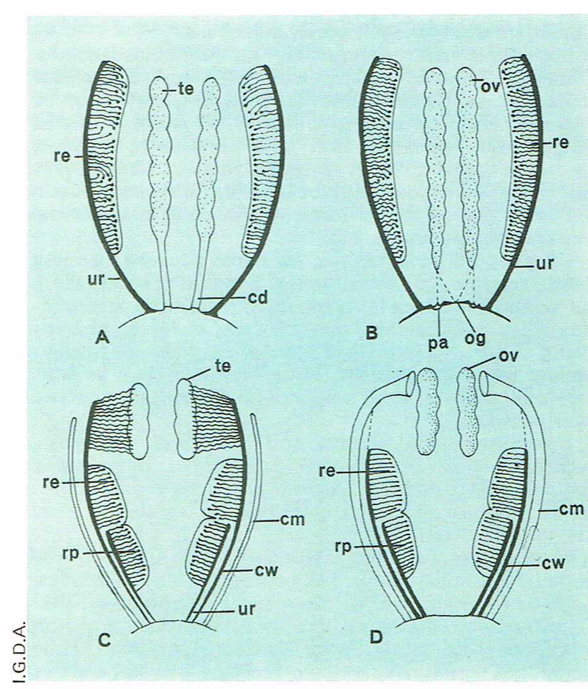

Dans d'autres cas enfin, il y a un gonochorisme de fait qui dérive de l'hermaphrodisme potentiel, par suite du manque de développement et de la régression de l'une des deux zones des gonades.

Quelques Bothidés présentent un dimorphisme sexuel, marqué par des différences dans la taille ou dans certaines proportions du corps, plus rarement dans l'existence de caractères qualitatifs déterminés. Le dimorphisme est net chez les Sélaciens et les Holocéphales, par suite de la modification partielle chez les mâles des nageoires ventrales en ptérygopodes.

Reproduction

Certains Sélaciens peuvent être qualifiés de vivipares car ils présentent une sorte de placentation; d'autres sont ovovivipares, les embryons se nourrissant seulement du jaune de l'œuf; dans tous les cas, les embryons des Sélaciens se développent dans l'utérus, c'est-à-dire dans la partie médiane et dilatée des oviductes; chez les formes correspondantes des Actinoptérygiens, le développement embryonnaire se fait dans l'ovaire. Sélaciens et Actinoptérygiens sont en majeure partie ovipares. Chez les espèces d'Actinoptérygiens ovovivipares, les mâles possèdent des organes copulateurs ou gonopodes constitués par une modification de la nageoire anale ou de la papille génitale.

Pendant la période de reproduction, certains Poissons portent une livrée nuptiale (mâles de *Gasterosteus* ou des épinoches), d'autres, comme les *Labrus*, arborent pendant les amours des colorations particulières très changeantes; il arrive que les mâles se battent entre eux *(Betta* et *Labrus)*.

Généralement, les Poissons ovipares abandonnent leurs œufs dès la ponte effectuée; toutefois, certaines espèces en prennent soin, les surveillant, comme certaines espèces des genres *Gobius* et *Pholis*, ou en les logeant dans leur bouche *(Apogon, Galeichthys* et *Tilapia)* ou dans la cavité branchiale *(Amblyopsidae)*, ou enfin dans une poche spéciale (mâles de Syngnathiformes); enfin, ces Poissons, tels les épinoches et quelques Labridés, peuvent fabriquer de véritables nids. Dans certains cas, les alevins se nourrissent de substances sécrétées par des cellules spéciales du tégument de leurs parents *(Symphysodon)*.

Les œufs des Sélaciens sont gros et riches en vitellus; ceux des espèces ovipares sont protégés par une coquille coriace de forme variable selon l'espèce et sont souvent dotés d'appendices filamenteux qui leur permettent de s'attacher au substrat; ils sont pondus en petit nombre. Ceux des espèces nettement vivipares sont seulement protégés dans l'utérus par une fine capsule membraneuse

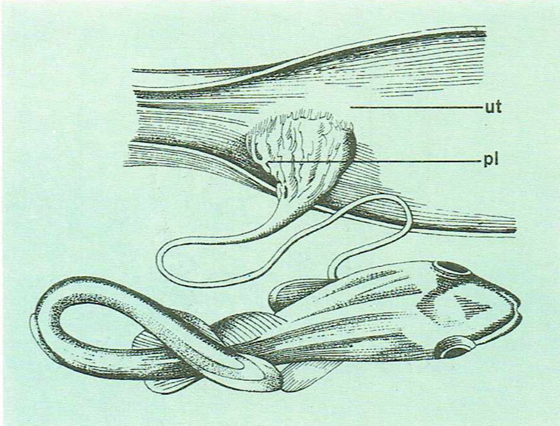

◀ ***Embryon d'émissole*** **(Mustelus sp.)** ***montrant le placenta (pl) relié à la paroi de l'utérus (ut).***

que certains chercheurs ont considérée comme un pseudo-amnios.

Chez les Actinoptérygiens ovipares et chez les Dipneustes, les œufs, généralement petits, sont produits en très grand nombre, parfois plusieurs millions par individu; il n'y a guère d'Actinoptérygiens qui ne soient pas ovipares, et bien peu entourent de soin leurs œufs après la fécondation. Les œufs des espèces ovipares sont rarement attachés au fond et, pour la plupart, flottent librement dans l'eau.

A la naissance, les Poissons cartilagineux sont morphologiquement semblables à leurs parents et prennent l'aspect complet de l'adulte à des stades plus ou moins précoces de leur vie embryonnaire.

De nombreux Poissons osseux, surtout les formes marines, éclosent à un stade plus ou moins avancé, pour passer ensuite par des stades larvaires et post-larvaires souvent très différents des adultes. Parmi les formes larvaires et post-larvaires, nombreuses sont celles qui sont planctoniques; les Poissons osseux sont dans leur majorité méroplanctoniques (planctoniques au cours d'une ou de plusieurs phases mais non dans la totalité du cycle vital).

Bien que ralentie, la croissance corporelle de la plupart des espèces continue après que la maturité sexuelle a été atteinte; c'est pour cela qu'on ne connaît pas de façon absolue la longueur totale et le poids maximal atteints par une grande partie des espèces de Poissons. Il est des formes qui ne vivent que quelques mois, par exemple pendant la saison des pluies dans les zones tropicales, alors que d'autres comme les carpes ont une grande longévité.

◀ Page ci-contre, à droite, schéma de l'appareil urogénital des Poissons; A, mâle de Téléostéen; B, saumon femelle; C, mâle de Sélacien; D, femelle de Sélacien; cd, canal déférent; cm, canal de Müller; cw, canal de Wolff (uretère et canal déférent); og, orifice génital; ov, ovaire; pa, pore abdominal; re, rein; rp, rein postérieur; te, testicule; ur, uretère.

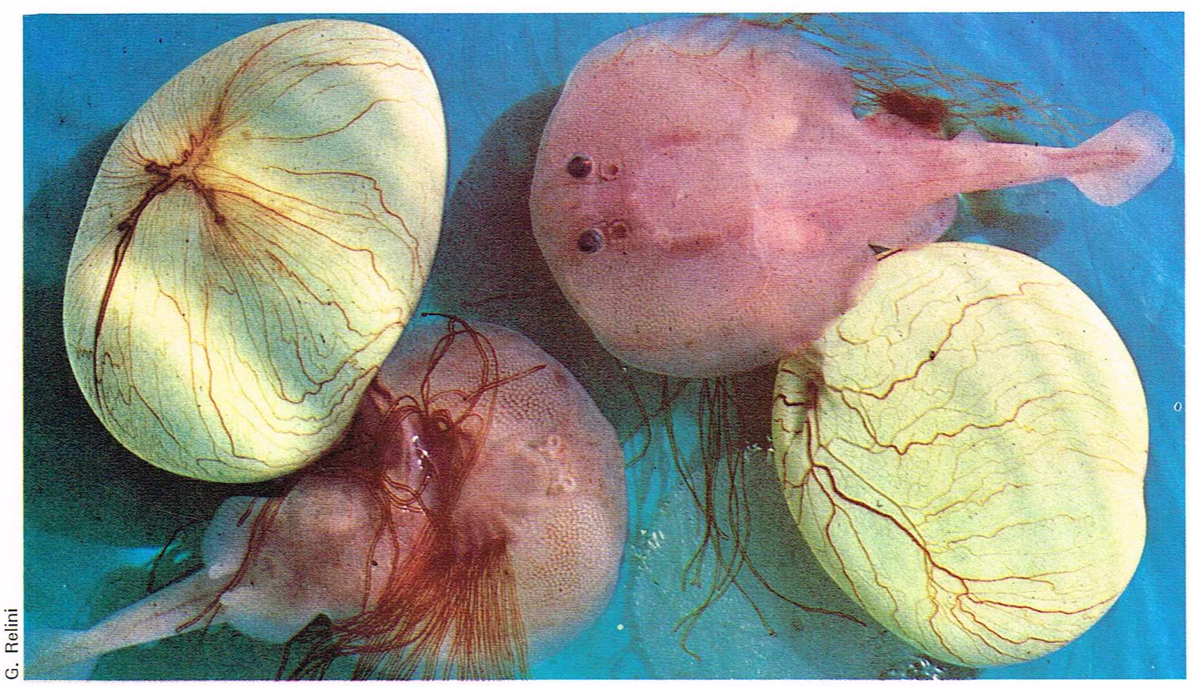

◀ ***Embryons de torpille*** **(Torpedo marmorata);** ***on voit les sacs vitellins et les filaments branchiaux.***

Grossa-Jacana

▲ **Amphiprion percula** *appartient à la sous-famille des Amphiprioninés dont les représentants, aux livrées très colorées, vivent en symbiose avec certaines anémones de mer.*

Écologie

Les adaptations des espèces au milieu sont fort nombreuses : généralement, les Poissons nectoniques ont une forme fuselée, hydrodynamique ; les Poissons benthiques sont comprimés ou nettement déprimés, et leurs yeux, ainsi que les spiracles chez les Sélaciens, sont parfois portés par des appendices, ce qui leur permet de s'enfoncer dans le sable tout en continuant d'observer les environs et de respirer sans difficulté.

La coloration d'un Poisson pélagique est fréquemment bleu verdâtre dorsalement, et argenté clair ventralement ; il est ainsi moins visible, qu'on le regarde par-dessus ou par-dessous. Les Poissons côtiers possèdent souvent de vives couleurs, variables selon le fond où ils se trouvent : certaines formes, verdâtres sur les prairies sous-marines et sur les roches couvertes de végétation verte, sont rougeâtres ou brunes sur les fonds à coraux ou sur les écueils où se développent des Algues rouges ou brunes.

Divers facteurs écologiques non biologiques ont une grande importance ; la température de l'eau conditionne le métabolisme, la vitesse de la croissance, la reproduction, les migrations et les déplacements, etc. La teneur en oxygène dissous dans l'eau, la pression, la salinité, la densité, la composition physico-chimique, la concentration en ions hydrogènes (pH) de l'eau jouent aussi un grand rôle.

L'accumulation des observations sur les déplacements des Poissons a permis de prévoir, avec une certaine approximation, le cheminement des migrations de nombreuses espèces dont l'importance dans l'économie des pêches est considérable (harengs). Les Poissons migrateurs qui vivent en mer mais pénètrent dans les eaux douces pour se reproduire (Acipensériformes, certains Salmonidés, etc.) sont dits *anadromes ;* ceux qui vivent en eau douce, mais descendent se reproduire en mer, comme l'anguille, sont dits *catadromes ;* ils présentent des exemples très nets de migrations essentiellement reproductrices.

Action de l'homme sur la faune des Poissons

Dans les zones industrielles et surpeuplées, l'action de l'homme est nettement néfaste, par la pollution des eaux, la destruction des frayères, la construction de digues et de barrages, l'introduction d'espèces exotiques animales et végétales au sein de peuplements naturels locaux (entraînant des modifications des équilibres biologiques), la surexploitation des zones de pêche, etc.

Aujourd'hui, on cherche à combattre les nuisances humaines, par des mesures pratiques et des lois destinées à protéger la reproduction des Poissons et à faire croître leurs populations; en outre, on essaie de mettre au point des méthodes pour réduire la pollution des eaux.

Relations des Poissons avec les autres organismes

Le parasitisme, très important chez les Poissons, est le fait d'espèces de divers groupes zoologiques, comme les Protozoaires, les Plathelminthes, les Némathelminthes, les Annélides, les Crustacés, les Cyclostomes, etc. Beaucoup de ces parasites engendrent de véritables maladies. Temporaires ou permanents, ils s'attaquent à la peau (ectoparasites), aux branchies ou à l'intestin (endoparasites), provoquant souvent des toxicoses, des traumatismes, des inflammations et le dépérissement. Parfois, le parasite change deux fois d'hôte ou plus au cours de son cycle biologique. Les larves de certains Mollusques Bivalves (*Unio, Anodonta,* etc.) pénètrent parfois dans les cavités branchiales des Poissons en y causant des irritations.

On connaît aussi de nombreuses formes d'inquilinisme, par exemple celle des espèces du genre *Fierasfer* avec certains Holothurides.

Certains cas de commensalisme ne sont pas nets : ainsi le poisson-pilote *(Naucrates ductor)* et les rémoras, qui accompagnent les requins et les gros Poissons osseux, pour recueillir les restes de leur nourriture.

L'activité des poissons-nettoyeurs est également intéressante. Il s'agit généralement de petites espèces de Labridés sédentaires, qui dévorent les ectoparasites d'autres Poissons. En ce domaine, on peut citer aussi les relations entre certains Amphiprionidés et divers genres d'anémones de mer des régions tropicales; ces Cnidaires sont pourvus de cellules urticantes pouvant tuer les autres Poissons de petite taille : il semble que le mucus produit par les Amphiprionidés inhibe l'anémone qui n'utilise pas ses nématocystes contre eux.

Les Poissons sont essentiellement zoophages. Beaucoup sont holophages; ils complètent leur régime par des Algues ou des plantes aquatiques, ou encore par des fruits tombés dans l'eau. Il y a peu d'espèces uniquement phytophages, qu'elles soient planctophages ou benthophages; d'autres sont détritivores.

Certaines espèces adultes, et les formes larvaires de nombreuses autres, sont holoplanctophages. Les espèces des profondeurs sont essentiellement zoophages ou détritivores, et souvent, dans le premier cas, elles peuvent engloutir d'un seul coup des proies parfois plus grosses qu'elles.

La résistance au jeûne est très grande chez diverses formes : la carpe, par exemple, peut jeûner pendant quinze mois et perdre jusqu'à 60 % de son poids avant de mourir.

Distribution des Poissons

On connaît environ six cent cinquante formes vivantes de Sélaciens, marines, pour la très grande majorité, mais dont un certain nombre pénètrent occasionnellement dans les fleuves. Il en est peu qui demeurent habituellement dans les eaux douces.

Les Sélaciens sont bien représentés dans les mers chaudes. Certains sont benthiques (essentiellement les Rajiformes), d'autres nectoniques (surtout parmi les Squaliformes); mais la plupart sont plus fréquents à faible et moyenne profondeur que dans les grands fonds, et rares sont les formes franchement abyssales. Tous les Sélaciens sont zoophages et prédateurs, certains requins peuvent attaquer l'homme.

Les quelques formes vivantes d'Holocéphales sont marines, mais jamais de grande taille; elles habitent surtout les eaux froides et profondes et sont zoophages.

Parmi les quelque vingt-cinq mille formes actuelles d'Actinoptérygiens, beaucoup sont marines, d'autres, moins nombreuses, dulçaquicoles; peu vivent uniquement dans les eaux saumâtres. De nombreuses espèces sont euryhalines.

Les Actinoptérygiens vivent en mer, de la surface jusqu'à une profondeur d'environ 8 000 m (et peut-être au-delà). Certains sont agressifs, seuls ou en groupes, et peuvent être dangereux pour l'homme (Pirañas de l'Amérique du Sud par exemple).

La seule espèce vivante de Cœlacanthiforme connue actuellement est marine; toutes les espèces vivantes de Cératodontiformes sont dulçaquicoles.

Bien que certains groupes (Acanthodes et Placodermes) soient apparus à l'Ordovicien, l'âge d'or des Vertébrés pisciformes fut le Dévonien (il y a environ trois cent vingt millions d'années), au cours duquel apparurent les ancêtres présumés des actuels Poissons cartilagineux, puis des actuels Poissons osseux. Au cours des temps, les groupes les plus anciens prospérèrent, puis déclinèrent; et de nouveaux groupes apparurent, peuplant peu à peu dans toutes les eaux du globe accusant des températures comprises entre 1 °C et 40 °C, et dont les caractéristiques chimiques, physico-chimiques et biologiques étaient très diverses.

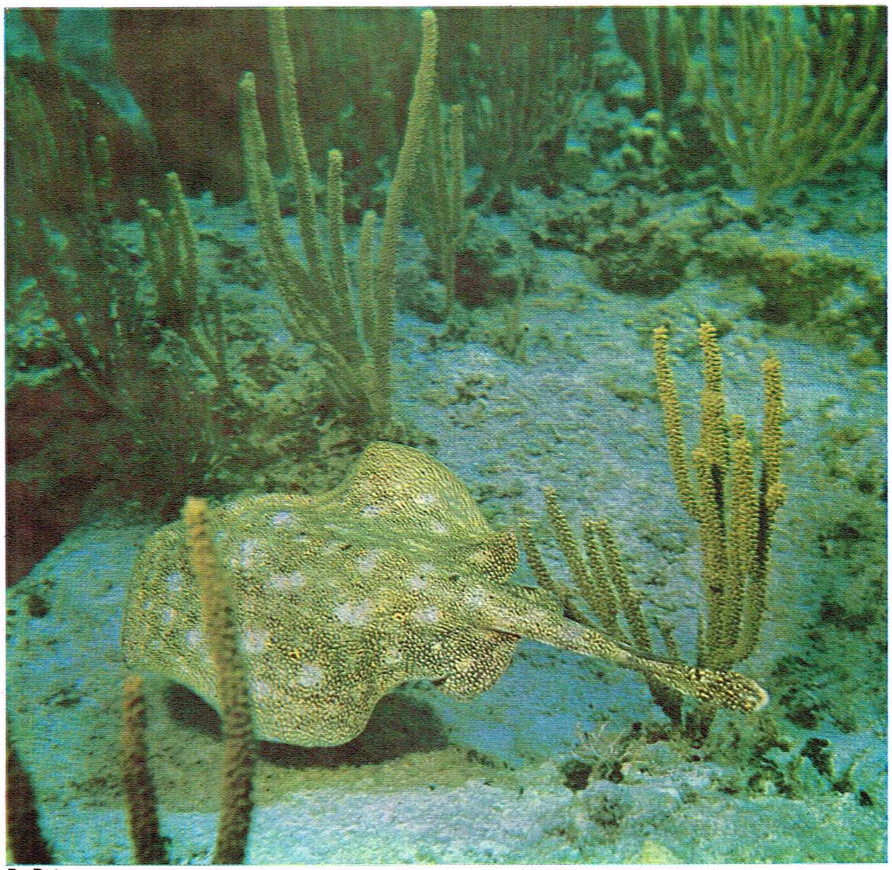

R. Dei

▲ ***Les Rajiformes sont des Poissons essentiellement benthiques, comme on peut le déduire de leur forme ainsi que de la position et de la structure de leurs organes.***

▼ ***La tanche*** **(Tinca tinca)** ***est commune dans les eaux douces de presque toute l'Europe et d'une partie de l'Asie occidentale.***

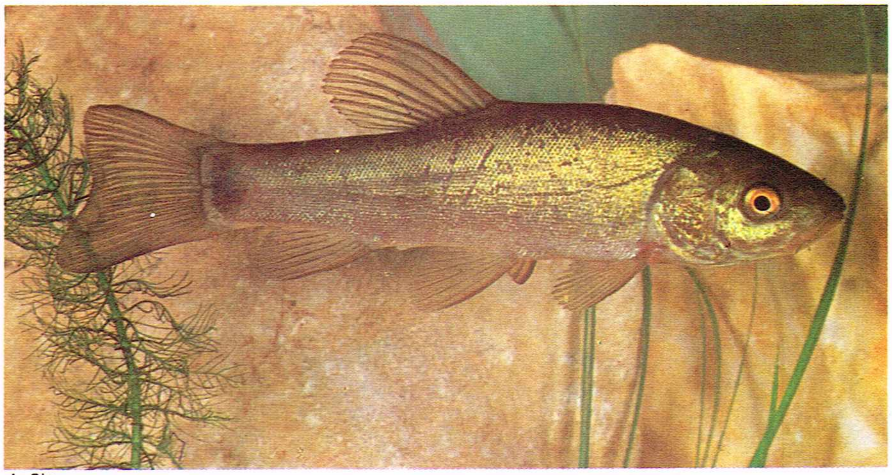

J. Six

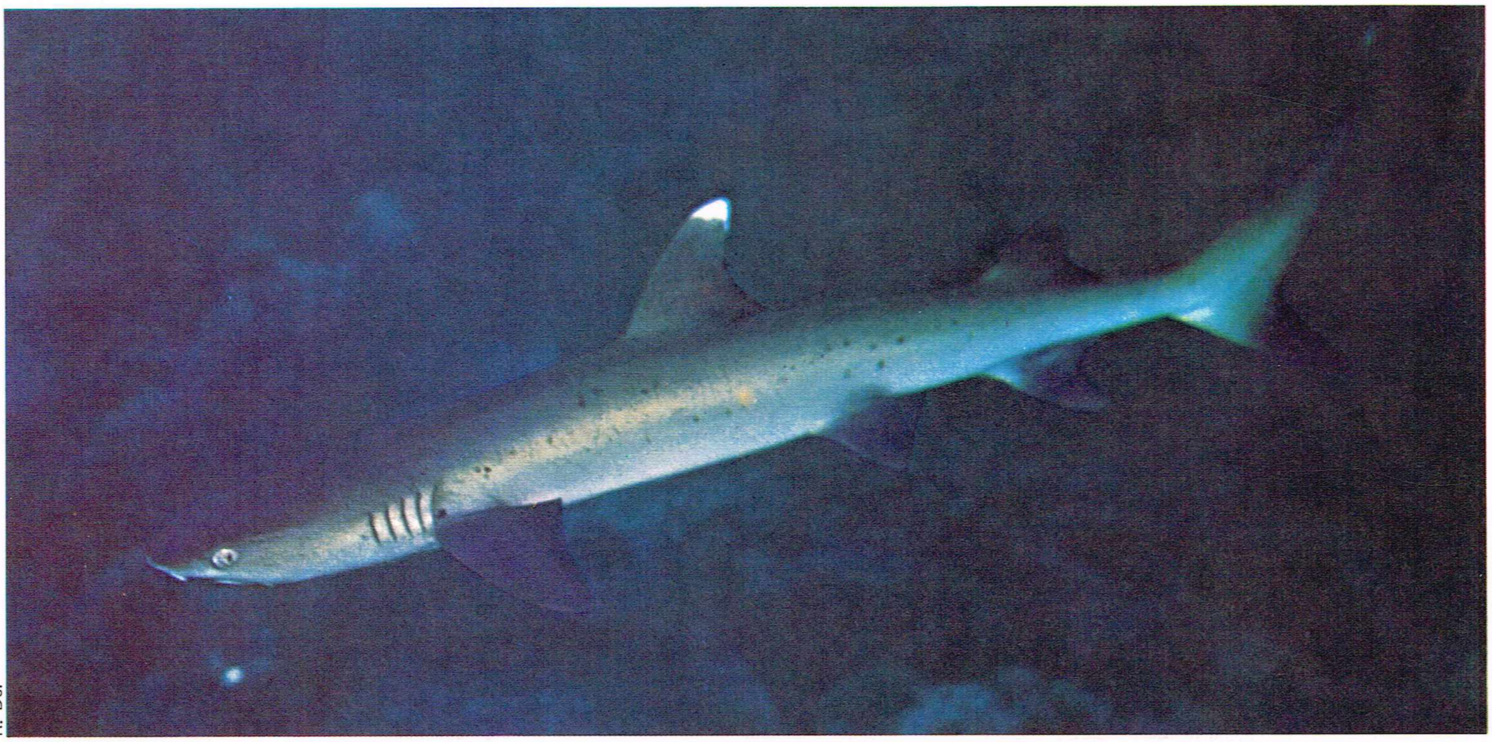

R. Dei

▲ *Un requin « à nageoire blanche » de la mer Rouge, exemple caractéristique des formes hydrodynamiques de ces Poissons puissants et rapides.*

CHONDRICHTHYENS

Les Chondrichthyens *(Chondrichthyes)*, ou Élasmobranches, ou encore Sélaciens, possèdent, comme les Cyclostomes, un squelette entièrement cartilagineux, mais sensiblement plus évolué, et présentant toujours un début de calcification. Leur mâchoire supérieure est séparée du neurocrâne chez les Sélaciens *(Euselachii)*, alors qu'elle fusionne avec celui-ci chez les Bradyodontes. Leurs membres, des nageoires soutenues par des pièces cartilagineuses et par des rayons cornés (cératotriches), sont recouverts par la peau.

Les écailles cutanées ont une structure semblable à celle des dents, aussi les a-t-on appelées denticules cutanés.

Les Chondrichthyens possèdent deux narines. Les arcs branchiaux ont leurs deux séries de lamelles séparées par des cloisons bien développées; les opercules sont toujours absents; par ailleurs, les fentes branchiales sont au nombre de cinq à sept paires (Euselachii), ou bien d'une seule paire (Bradyodonti).

▼ *Partie antérieure d'un requin; on notera sur ce spécimen la bouche arquée et largement fendue.*

R. Maltini - P. Solaini

La reproduction peut être vivipare, ovovivipare ou ovipare, mais la fécondation, toujours interne, s'effectue par l'intermédiaire des ptérygopodes (appendices allongés, dérivant de la modification partielle des nageoires ventrales du mâle).

Ces Poissons appartiennent aux plus primitives des formes actuelles; ils comprennent environ six cent cinquante formes, groupées en deux grandes séries considérées par certains comme des sous-classes (Selachii et Bradyodonti), alors que d'autres en font des classes.

Sous-classe des Selachii

Les Selachii sont des Sélaciens pourvus de fentes branchiales au nombre de cinq, six ou sept paires; leurs mâchoires supérieures (os ptérygo-carrés ou palato-carrés) sont séparées du neurocrâne (suspension hyostylique).

La bouche est large, presque toujours ventrale, parfois terminale. La denture est le plus souvent homodonte, plus rarement hétérodonte (par exemple chez *Heterodontus*). La langue est rudimentaire; l'intestin, assez court, possède une valvule spirale; l'ouverture cloacale est présente. La vessie natatoire est toujours absente. La peau est parfois nue ou lisse, mais le plus souvent la présence de denticules la rend rugueuse.

Le cœur est constitué par quatre cavités : le sinus veineux, l'oreillette, le ventricule et le cône artériel.

La distinction entre la viviparité et l'ovoviviparité n'est pas très nette, bien que les formes vivipares présentent une sorte de « placenta » qui n'est pas sans rappeler celui des Mammifères. Dans le cas d'un petit nombre d'espèces non ovipares, on ignore s'il existe réellement un « placenta », et donc si ces Poissons sont vivipares ou ovovivipares.

Dans tous les cas, il n'y a jamais de métamorphoses, et les formes juvéniles sont déjà semblables aux formes adultes. Le dimorphisme sexuel est peu marqué.

De nombreuses espèces sont grégaires et certaines, pendant une partie de l'année, forment des bancs constitués seulement de mâles ou de femelles. La taille des adultes varie de quelques dm à plus de 15 m de long.

La sous-classe est divisée en deux super-ordres : les Protoselachii, complètement éteints, et les Euselachii qui comprennent deux ordres, les Pleurotremata (requins), et les Hypotremata ou Rajiformes (raies). Pour les distinguer on utilise la position des ouvertures branchiales : en effet, chez les Pleurotremata, elles sont latérales, et chez les Hypotremata, ventrales.

Les Squalinoïdes, ou anges de mer du genre *Squatina,* aux branchies latéro-ventrales, font la liaison entre les deux ordres.

En outre, le corps des Pleurotremata est généralement fuselé alors qu'il est toujours déprimé chez les Hypotremata.

La bouche est infère ou, plus rarement, terminale. Quand ils existent, les spiracles sont de diverses tailles.

Les yeux sont pourvus ou non d'une membrane nictitante (toujours absente chez les Rajiformes). Les cartilages préorbitaux sont généralement absents (mais présents chez les Rajiformes). L'os palato-carré est pourvu d'un processus palato-basal (sauf chez les Rajiformes) et il existe une suspension hyostilique ou amphistilique. L'os hyomandibulaire est vertical et pourvu d'appendices alors qu'il est horizontal et sans appendices chez les Rajiformes. Les extrémités supérieures de la ceinture pectorale sont libres (chez les Rajiformes, les cartilages supra-scapulaires sont le plus souvent réunis à la colonne vertébrale). On observe une ou deux nageoires dorsales.

Ordre des Pleurotremata

Il y a actuellement environ deux cent cinquante espèces de Pleurotremata, réparties en une vingtaine de familles.

Les caractères distinctifs des groupes résident principalement dans le nombre des fentes branchiales et des nageoires dorsales, dans la présence ou l'absence de la membrane nictitante, de la nageoire anale, d'aiguillons aux nageoires dorsales, etc.

Sous-ordre des Hexanchiformes

Les **Hexanchidés** *(Hexanchidae),* qui ont un corps fusiforme, une bouche infère, six ou sept fentes branchiales, une seule nageoire dorsale, un squelette non calcifié et pas de membrane nictitante, sont les plus primitifs des requins actuels; la famille remonte au Jurassique.

Hexanchus, le genre type, possède six fentes branchiales; ses représentants sont surtout des fossiles du Jurassique ; il existe encore une espèce vivante, *Hexanchus griseus,* le griset, répandu dans les océans Atlantique, Pacifique, Indien et dans la Méditerranée, mais rare dans l'Adriatique. On pense qu'il peut peser jusqu'à 800 kg et atteindre assez souvent une longueur totale de 5 m.

Notorhynchus maculatus, de l'océan Pacifique, a une grande et large tête, au museau arrondi, un corps élancé, une queue très longue; il peut atteindre 3 m. Il possède sept paires de fentes branchiales.

Les **Chlamydosélachidés** *(Chlamydoselachidae)* possèdent six fentes branchiales. L'unique représentant vivant, *Chlamydoselachus anguineus* ou requin à collerette, atteint une longueur totale d'environ 2 m.

Sous-ordre des Galéiformes

Les **Odontaspididés** *(Odontaspididae),* anciennement les Carchariidés, comprennent le seul genre *Odontaspis (Carcharias).* Sa queue est incisée près de la pointe et présente aussi une fossette caudale supérieure. La seconde nageoire dorsale est aussi grande que la première. Le genre *Odontaspis* existe au moins depuis le Crétacé et compte aujourd'hui environ six espèces. *Odontaspis taurus,* le requin des sables, est répandu dans l'océan Atlantique et dans la Méditerranée. Plutôt côtier, il vit au fond mais se porte occasionnellement dans des eaux très peu profondes.

Les **Scapanorhynchidés** *(Scapanorhynchidae)* ou **Mitsukurinidés** ne comprennent pour le moment qu'une seule espèce, *Scapanorhynchus owstoni,* le requin-spatule. Sa mâchoire supérieure, protractile, est surplombée par un museau spatulé caractéristique. Sa nageoire caudale est très longue. Il peut atteindre 4,20 m de longueur.

Les **Isuridés** *(Isuridae)* que l'on retrouve à l'état fossile depuis l'ère tertiaire, comprennent actuellement trois genres, tous représentés dans la Méditerranée. Excellents nageurs, très rapides, ils sont agressifs et peuvent être dangereux pour l'homme. Leur caractère le plus remarquable est le grand développement du lobe inférieur de leur queue, qui ressemble ainsi à un croissant.

Le genre *Isurus* compte trois espèces dont les dents sont dépourvues de pointes secondaires, et dont la première nageoire dorsale naît en arrière du sommet interne des nageoires pectorales. *Isurus oxyrhynchus,* le mako de l'océan Atlantique (surtout tropical et tempéré) et de la Méditerranée, est très actif, vorace, agressif, et très courageux.

Le genre *Lamna* habite surtout les eaux boréales et australes, en sorte que sa distribution géographique est bipolaire. *Lamna nasus,* le requin-maquereau ou taupe, le mieux connu du genre, habite l'Atlantique septentrional et la Méditerranée.

Le genre *Carcharodon* diffère des genres *Isurus* et *Lamna* par ses dents larges, triangulaires, au bord dentelé, au lieu d'être étroites et à bord lisse. Ce genre est connu comme fossile depuis le Crétacé. Il en existait des espèces de grande taille, comme *Carcharodon megalodon* du Tertiaire. On ne connaît aujourd'hui que *Carcharodon carcharias,* le grand requin blanc cosmopolite, qui atteint une longueur de 10 m et dont la voracité est considérable.

Les **Cétorhinidés** *(Cetorhinidae)* comprennent actuellement un seul genre, et sans doute une seule espèce. Les fentes branchiales sont très vastes. Les dents sont nombreuses, petites et coniques. On connaît des formes fossiles du genre *Cetorhinus* depuis le Tertiaire.

Cetorhinus maximus, le requin-pèlerin, atteignant 11 m, a des ouvertures branchiales très vastes qui couvrent presque toute la partie postérieure de la tête, surtout ventralement. Les arcs branchiaux présentent de mille à mille trois cents appendices cornés, longs de 10 cm; ceux-ci servent, semble-t-il, à filtrer l'eau et à retenir les minuscules organismes planctoniques dont l'Animal se nourrit.

Les **Alopiidés** *(Alopiidae)* ne comprennent actuellement que le seul genre *Alopias,* caractérisé par une queue aussi longue que le reste du corps. Le museau est court et arrondi; les dents sont petites, égales aux deux mâchoires, et possèdent une seule cuspide. La reproduction est ovovivipare.

Ce genre comprend plusieurs espèces, sans doute quatre, très proches les unes des autres. *Alopias vulpinus,* le requin renard proprement dit, est répandu dans les eaux chaudes et tempérées du monde entier. Il atteint environ 6 m de longueur, nage très rapidement et se nourrit de Poissons et de Céphalopodes. Il n'est pas dangereux pour l'homme.

Les petits, au nombre de deux à quatre par portée, mesurent de 1,20 m à 1,50 m de longueur totale à la naissance; leurs yeux sont proportionnellement très grands.

Les **Orectolobidés** *(Orectolobidae)* possèdent deux sillons externes bien visibles, un de chaque côté, qui vont de la bouche à la narine, et portent à l'extrémité antérieure un gros cirrhe charnu. Ils ont deux nageoires dorsales et une nageoire caudale qui n'est pas dressée vers le haut, mais à peu près alignée selon l'axe du corps. Ils sont dépourvus de membrane nictitante, et possèdent des spiracles.

Il s'agit le plus souvent de petites formes, vivant le long des côtes, bien que certaines des vingt-quatre espèces atteignent de grandes dimensions. Ainsi, *Ginglymostoma cirratum,* le requin-nourrice de l'océan Atlantique, a une longueur totale maximale de 4,20 m et *Stegostoma fasciatum,* le requin-zèbre, mesure 3,30 m.

Les **Rhincodontidés** ont une distribution essentiellement circumtropicale. *Rhincodon typus,* le requin-baleine, est le seul requin dont la bouche soit pratiquement terminale; en outre, il possède des carènes longitudinales sur le corps, et mesure jusqu'à 18 m de longueur. Il est inoffensif. Il se nourrit, en filtrant l'eau, de tout petits Poissons, de Céphalopodes et de Crustacés.

Les **Scyliorhinidés** *(Scyliorhinidae)* comprennent de nombreuses espèces de petits Squaliformes, benthiques ou bathypélagiques, des eaux tempérées ou tropicales, mais jamais cosmopolites.

Les sept espèces vivantes, du genre *Scyliorhinus,* remontant au Crétacé, ont une tête déprimée avec un museau bref et arrondi. Chez *Scyliorhinus caniculus,* la roussette à petites taches, les valvules nasales sont à peu près en contact sur leur ligne médiane, alors que

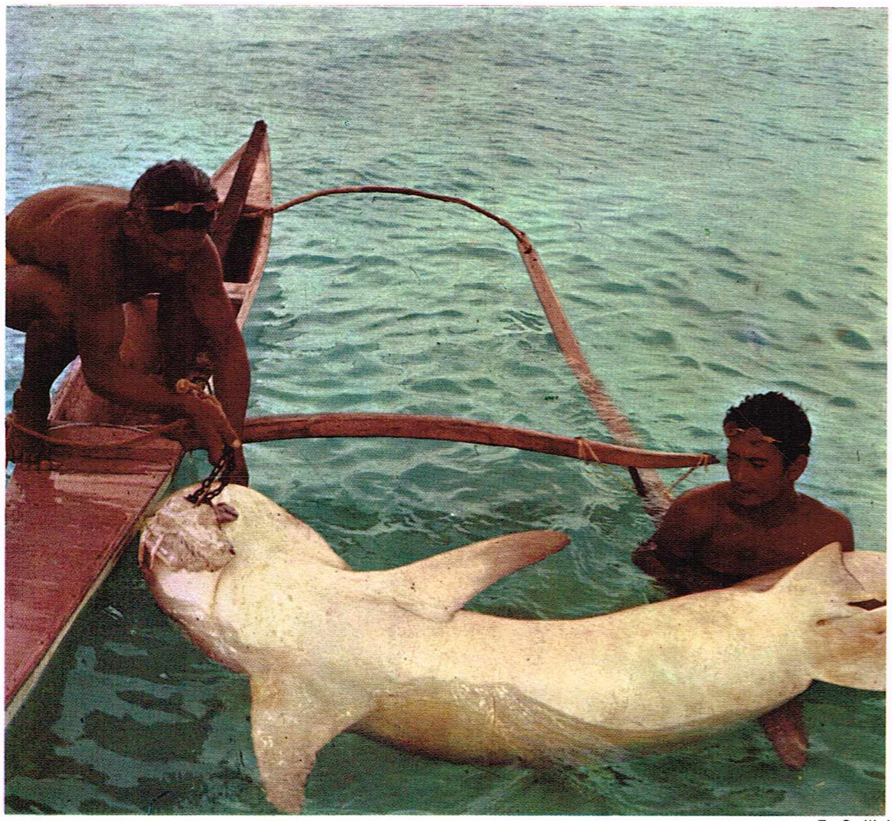

F. Quilici

▲ ***Un requin-tigre (Galeocerdo cuvieri) pêché à Tuamotu; adulte, il peut atteindre plus de 6 m.***

chez *S. stellaris* elles sont nettement séparées. On trouve ces deux espèces sur les fonds à coraux, et aussi sur les fonds vaseux pour la première. Les femelles pondent des œufs deux par deux, attachés par des filaments à des colonies de Cnidaires. La roussette à grandes taches atteint une longueur de 1,50 m, alors que la roussette à petites taches ne dépasse pas 1 m.

Les **Triakidés** *(Triakidae)* sont caractérisés par la possession d'une nageoire dorsale antérieure, un peu plus grande que la postérieure, insérée en avant du point d'attache des nageoires ventrales.

Ils comprennent des formes répandues dans les eaux tempérées et chaudes de tous les océans; en Méditerranée, ils sont représentés par le seul genre *Mustelus,* avec deux espèces, *M. mustelus,* et *M. asterias*. Le premier mesure jusqu'à 1,60 m de longueur, et le second peut-être 2 m; le premier est vivipare et le second ovovivipare.

Les **Carcharhinidés** *(Carcharhinidae)* sont caractérisés par une nageoire dorsale antérieure beaucoup plus forte que la seconde, et insérée en avant de la nageoire ventrale. Il n'y a pas de branchies insérées sur les arcs branchiaux, ni de barbillons autour de la bouche. Certains genres possèdent des spiracles, d'autres pas. La reproduction est ovipare ou ovovivipare. Il existe dans cette famille environ soixante espèces réparties en quinze genres. De taille moyenne ou grande, ces requins sont répandus principalement dans les mers chaudes; en Méditerranée, on trouve les trois genres suivants : *Galeorhinus, Carcharhinus* et *Prionace*.

Galeocerdo cuvieri, le requin-tigre, a une alimentation très diversifiée. Il vit dans les eaux tropicales du monde entier, et se rend parfois dans les zones tempérées. Ses dents sont denticulées, avec une profonde entaille d'un côté. Les petits naissent à toute époque de l'année, au nombre de dix à quatre-vingt-deux par portée, avec une moyenne de trente à cinquante. Les adultes atteignent une longueur de plus de 6 m.

Le genre *Carcharhinus* se distingue du précédent par l'absence de spiracles. On en connaît au moins trois espèces en Méditerranée.

Le genre *Prionace* comprend l'espèce unique *P. glauca,* le requin bleu, répandu dans les zones tempérées et tropicales de tous les océans, ainsi qu'en Méditerranée. C'est le squale le plus commun au large des côtes des océans Atlantique et Pacifique. Il est très prolifique et se reproduit probablement toute l'année. Vivipare, la femelle peut contenir plus de soixante embryons. Ce squale atteint une longueur maximale d'environ 5 m.

Les **Sphyrnidés** *(Sphyrnidae),* ou requins-marteaux, sont des Poissons très caractéristiques et très connus, par la forme en marteau de leur tête; leurs yeux sont situés aux extrémités latérales des lobes céphaliques. Pour le reste, ils ont les mêmes caractères morphologiques que les Carcharhinidés, avec lesquels ils présentent indubitablement d'étroites affinités. Ils peuplent surtout les mers chaudes, mais pénètrent pendant la belle saison dans les eaux tempérées; ils vivent tantôt en profondeur, tantôt plus près de la surface. Ils sont certainement dangereux pour l'homme.

Sphyrna zygaena, le mieux connu, est un excellent nageur qui atteint une longueur d'environ 4 m, et exceptionnellement un poids de 700 kg.

Sous-ordre des Squaliformes

Les **Squalidés** *(Squalidae)* possèdent deux nageoires dorsales, souvent pourvues chacune d'un aiguillon, et la nageoire anale n'existe pas, ce qui les rapproche des Rajiformes. La famille compte une vingtaine de genres, tous de petite taille, ou tout au plus de taille moyenne. Ce sont essentiellement des sténothermes froids : ils préfèrent les eaux profondes ou celles des hautes latitudes.

Le genre *Oxynotus,* connu à l'état fossile depuis le Pliocène, comprend trois espèces.

O. centrina, la centrine, se rencontre dans l'océan Atlantique oriental, les eaux d'Afrique du Sud et de la Méditerranée. Elle est trapue, avec un tronc dont la section à peu près triangulaire est accentuée par une carène cutanée médio-dorsale et deux carènes qui se trouvent entre la surface ventrale et les côtés, de l'aisselle des nageoires pectorales jusqu'à l'origine des nageoires ventrales. Les aiguillons s'élèvent à peu près à la moitié des bases des deux nageoires dorsales, et sont presque entièrement entourés par la peau. Ce Poisson atteint une longueur de 80 cm; il est ovovivipare; ses œufs sont très gros et la femelle porte de vingt à vingt-cinq embryons environ.

Le genre *Squalus* comprend cinq espèces, toutes de petite taille, avec des épines aux nageoires dorsales bien développées et sans sillons latéraux. Ces Poissons habitent tous les océans, jusqu'à des latitudes élevées, et sont souvent très abondants. Citons sur nos côtes *Squalus acanthias,* l'aiguillat, dont l'aiguillon de la seconde nageoire dorsale est plus court que celle-ci, et *S. fernandinus,* dont l'aiguillon de la seconde nageoire dorsale est plus haut qu'elle.

Le genre *Centrophorus* comprend environ dix espèces, dont les aiguillons dorsaux sont bien développés et cannelés latéralement, le second étant plus long que le premier. La nageoire caudale a souvent un lobe apical distinct.

Les yeux et les spiracles sont gros. Il s'agit de Poissons bathypélagiques qui ne dépassent pas une longueur de 1,50 m. *Centrophorus granulosus* est répandu en Méditerranée, et dans l'océan Atlantique oriental, du Portugal au Sénégal, à des profondeurs pouvant dépasser 500 m.

Le genre *Etmopterus* comprend environ quinze espèces, à aiguillons dorsaux très longs. Les dents inférieures sont plus larges que les supérieures, avec une cuspide triangulaire à bords lisses, dirigée latéralement et donc à peu près horizontale. Les dents supérieures ont plusieurs cuspides. La queue est à peu près dépourvue de lobe inférieur, mais possède un lobe apical assez net. Des photophores situés sur le ventre et sur les côtés produisent, par suite de stimuli mécaniques, une lumière assez forte pour être visible même pendant le jour. Ces organes lumineux sont composés de cellules épidermiques, dont les superficielles constituent une lentille, celles du fond formant la source lumineuse.

Toutes les espèces vivent en profondeur et ont une distribution essentiellement atlantique et pacifique.

Le genre *Centroscymnus* est caractérisé par des épines dorsales très courtes, parfois cachées par la peau. Ses dents supérieures sont fines et aiguës, avec une crête unique, sans cuspides latérales; elles sont droites et disposées à peu près verticalement; les dents inférieures sont quadrangulaires, avec une pointe très oblique et presque horizontale; les dents supérieures et infé-

rieures ont toutes des bords lisses. Le lobe caudal inférieur est peu distinct, alors que le lobe apical est assez nettement délimité.

Les nageoires dorsales des *Scymnorhinus* n'ont pratiquement pas d'aiguillon, sauf une épine rudimentaire à la première dorsale. Les dents supérieures sont étroites, lisses et aiguës; les dents inférieures ont une pointe triangulaire et sont denticulées. La queue a un lobe apical net, alors que le lobe inférieur est à peu près absent. *S. licha* se rencontre dans l'océan Atlantique oriental, de l'Irlande aux Açores et aux Canaries. Sa longueur maximale dans cette zone est de 1,80 m. Il vit en profondeur jusqu'à plus de 1 000 m (ce genre est parfois classé dans la famille suivante).

Les **Dalatiidés** *(Dalatiidae)* comprennent, entre autres, les *Somniosus* qui sont caractérisés par des dents différentes aux deux mâchoires, les supérieures étant étroites et aiguës, les inférieures ayant une pointe très oblique et lisse. La queue n'a pas de fossettes, et ses deux lobes sont bien distincts. Il peut y avoir des organes lumineux. On rencontre en Méditerranée et dans les eaux atlantiques et portugaises (Madère) *S. microcephalus*, le laimargue, long d'un peu moins de 1 m, qui vit en profondeur. Les pores des canaux sensoriels latéraux sont lumineux chez les adultes. Il est ovovivipare; on a trouvé des femelles contenant de douze à dix-sept embryons.

Aux **Échinorhinidés** *(Echinorhinidae)* appartiennent les *Echinorhinus* aux nageoires dorsales sans épines. Leurs dents ont plusieurs pointes égales aux deux mâchoires, la cuspide médiane étant plus grande que les latérales. La nageoire caudale est pointue et sans incision apicale. La peau est parsemée d'écussons osseux, à épine centrale aiguë, groupés çà et là. La ligne latérale, délimitée par deux replis cutanés, est armée d'une série de minuscules protubérances pointues. Il existe en Méditerranée une seule espèce répandue dans l'océan Atlantique oriental, de la mer du Nord au Sénégal, mais rare dans la partie ouest de l'océan Atlantique. *E. bruccus*, ou chenille de mer, atteint environ 3 m de long et vit près du fond, entre 500 m et 1 000 m dans l'Atlantique.

Les **Pristiophoridés** sont des sortes de petits requins-scies aux fentes branchiales latérales situés en avant des nageoires pectorales. *Pristiophorus* possède cinq fentes branchiales et *Pliotrema* six. Ils sont indo-pacifiques.

Les **Squatinidés**, ovovivipares, diffèrent quelque peu du groupe par leur morphologie; ils ont un corps déprimé, sans nageoire anale, et sont nettement rétrécis à l'arrière, rappelant ainsi les Rajiformes. Ils ont toutefois une bouche terminale et possèdent cinq paires de fentes branchiales de chaque côté, qui, bien qu'étendues latéro-ventralement, ne sont pas infères. Deux nageoires dorsales, à peu près égales et arrondies, sont insérées en arrière; les nageoires pectorales sont très grandes et plus étendues en avant qu'en arrière; toutefois, bien qu'elles atteignent les côtés de la tête, elles ne se réunissent pas, mais cachent en partie les fentes branchiales, situées dans une échancrure entre la tête et ces nageoires.

On connaît pour unique genre *Squatina* (présent déjà au Jurassique supérieur); benthique, il est répandu dans tous les océans, avec environ douze formes dont la systématique est encore assez incertaine.

Il en existe trois espèces en Méditerranée, dont la plus commune est *S. squatina*, l'ange de mer, connu aussi dans l'est de l'océan Atlantique, de la mer du Nord aux îles Canaries. Il atteint une longueur d'environ 2,50 m.

Ordre des Hypotremata

Il ne comprend, dans la classification adoptée, que le sous-ordre des Rajiformes *(Rajiformes)*.

Ces Poissons, essentiellement benthiques, ont un corps déprimé, c'est-à-dire aplati dorso-ventralement.

G.S. Giacomelli

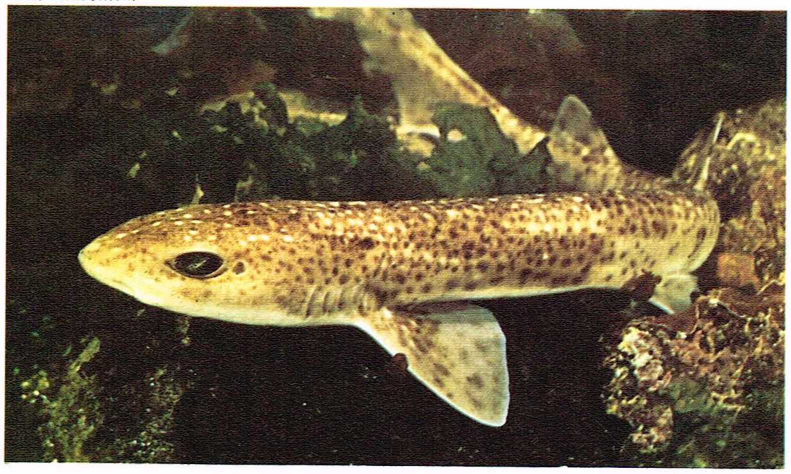

D. Faulkner

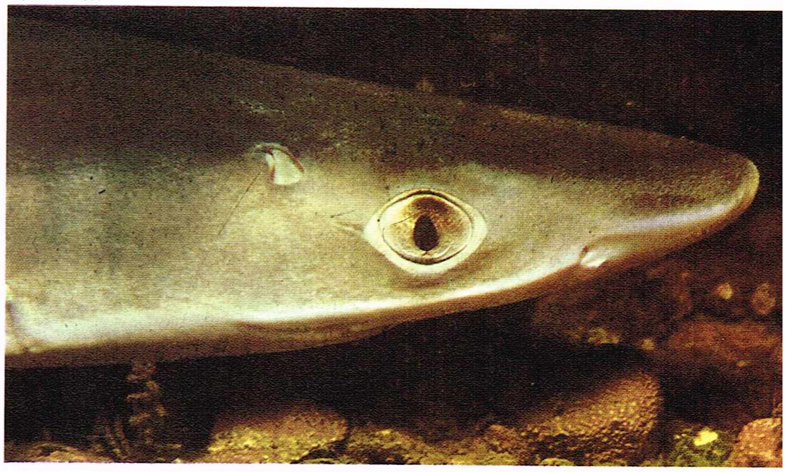

▲ *A gauche,* **Scyliorhinus caniculus,** *ou roussette à petites taches. A droite, partie antérieure d'un aiguillat* **(Squalus acanthias).**

D. Faulkner

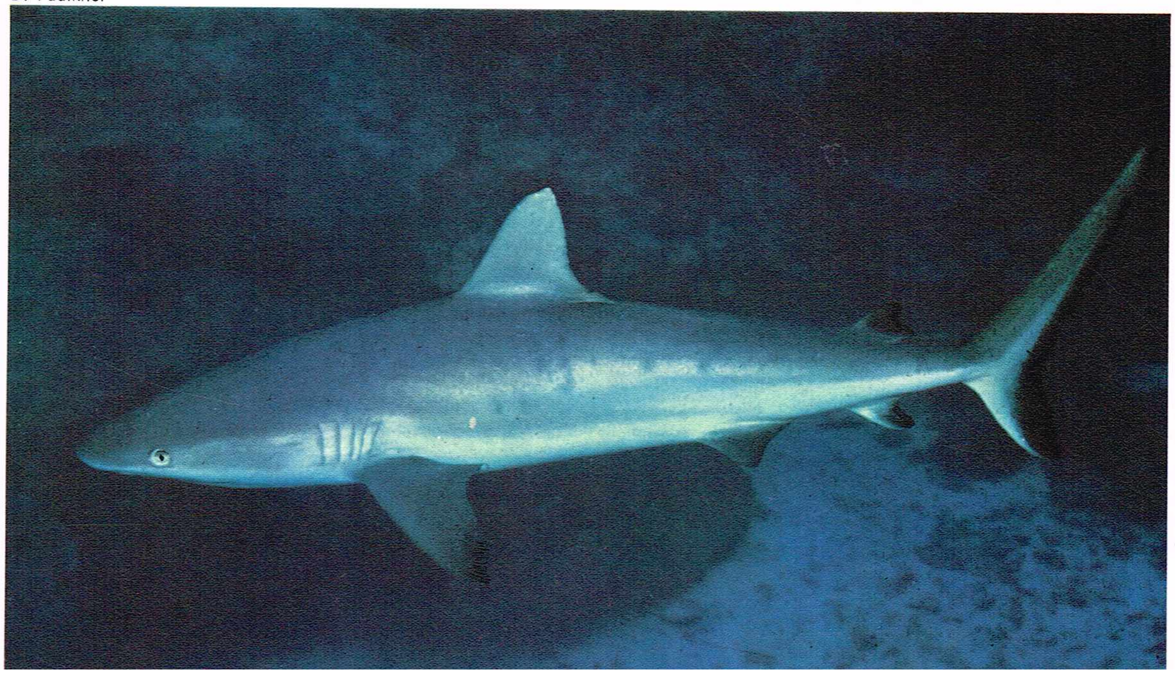

◀ *Un requin* **(Carcharhinidé)** *dans son milieu naturel.*

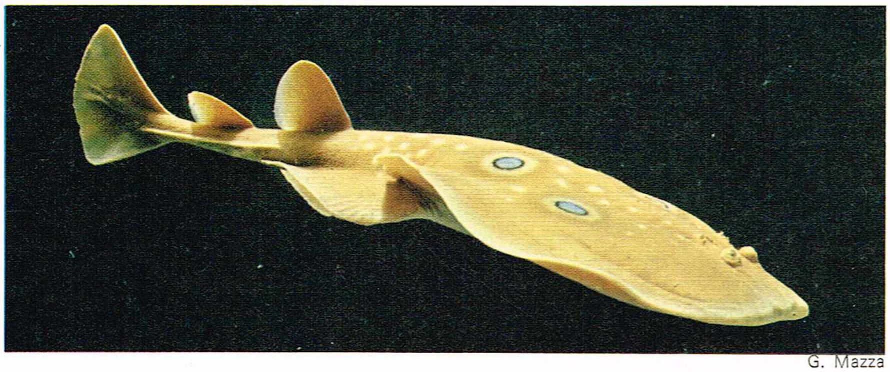

G. Mazza

▲ ***Une torpille* (Torpedo sp.)*; Poissons cartilagineux, les torpilles sont répandues dans toutes les mers, des eaux côtières jusqu'aux grandes profondeurs.***

Leur bouche et leurs fentes branchiales sont situées ventralement; leurs spiracles sont toujours vastes. La respiration s'effectue non pas par la bouche (infère), mais par les spiracles. Si l'aspiration se faisait par la bouche, quand celle-ci repose sur le fond, il entrerait dans l'appareil respiratoire non seulement de l'eau, mais aussi du sable et de la vase, ce qui finirait par léser les lamelles branchiales. Certains Rajiformes non benthiques respirent par la bouche. Par ailleurs, les yeux et les spiracles sont presque toujours dorsaux et rarement latéraux.

On observe une ou deux nageoires dorsales (parfois aucune), situées très en arrière; la nageoire anale est toujours absente, et la nageoire caudale peut être bien développée ou absente. Les nageoires pectorales sont très grandes et unies le plus souvent aux côtés de la tête; elles peuvent se rejoindre en avant et entourer le museau.

La grande majorité des Rajiformes montre un disque constitué par la fusion du tronc avec les nageoires pectorales et la queue brusquement rétrécie. Cette dernière peut être soit très longue, fine et sans nageoire, soit assez courte et grosse en portant la ou les nageoires dorsales et la nageoire caudale.

Les **Pristidés** *(Pristidae)* ont un corps très allongé, mais déprimé. Le museau est prolongé en une lame rostrale plate, portant de chaque côté une série de dents robustes, aiguës, à peu près égales, insérées dans des alvéoles, perpendiculaires à l'axe de la lame. Les dents orales sont petites. Il y a deux nageoires dorsales à peu près égales. Les nageoires pectorales ne s'étendent pas en avant au-delà des fentes branchiales, et ne fusionnent pas complètement avec la tête. La reproduction est de type ovovivipare.

Le seul genre *Pristis* est représenté par une dizaine d'espèces, répandues surtout dans les zones chaudes de tous les océans. Ce sont des Poissons essentiellement benthiques et euryhalins; ils pénètrent dans les eaux littorales et les estuaires, et remontent souvent le cours des fleuves, parfois assez en amont.

La « scie » que portent ces Poissons leur sert généralement à fouiller le fond à la recherche de proies (Poissons et Invertébrés) mais aussi à capturer des Poissons nectoniques.

Les **Rhinobatidés** *(Rhinobatidae)* ne portent pas de disque. Leur corps est typiquement allongé, et relativement déprimé. Les nageoires pectorales s'étendent en avant des fentes branchiales, et fusionnent avec les côtés de la tête, sans atteindre cependant l'extrémité du museau. Il y a deux nageoires dorsales à peu près égales; la nageoire caudale est bien développée. La reproduction, ovovivipare chez de nombreuses espèces, est peut-être ovipare chez d'autres. Les Rhinobatidés comptent actuellement une dizaine de genres présents surtout dans les eaux australiennes, chinoises et japonaises, indiennes, africaines, brésiliennes et californiennes.

Le genre *Rhinobatos* est représenté dans tous les océans au moins par une trentaine d'espèces, dont dix environ habitent l'est de l'océan Atlantique, et dont deux pénètrent dans la Méditerranée, par Gibraltar. Il ne possède pas de lobe inférieur à la nageoire caudale. Citons aussi le genre *Rhynchobatus*.

Le corps des **Torpédinidés** *(Torpedinidae)*, nettement divisé en un disque et une queue, est couvert de peau nue; le disque est ovale, elliptique, ou le plus souvent circulaire. Le museau ne fait pas saillie, et les yeux sont petits. Il y a de nombreuses papilles et vésicules sensorielles. La queue, épaisse, relativement courte, musclée, porte deux nageoires dorsales et une nageoire caudale bien développée. La reproduction est ovovivipare. Les Torpédinidés, connus à l'état fossile depuis l'Éocène, sont répandus dans toutes les mers, depuis les eaux côtières jusqu'aux grandes profondeurs.

Les **Téméridés** *(Temeridae)* n'ont qu'une nageoire dorsale. Une caractéristique de toute la famille est de posséder deux organes électriques réniformes, situés entre la partie antérieure des nageoires pectorales et le crâne. On connaît actuellement environ sept genres dont un seul, *Torpedo,* habite nos côtes. Les quelque douze espèces de *Torpedo* ou torpilles sont répandues dans les mers tropicales et tempérées; dans l'est de l'océan Atlantique, on en connaît quatre espèces, dont trois pénètrent aussi en Méditerranée. Les torpilles vivent sur les fonds sableux et vaseux, en restant souvent enfoncées pour se nourrir de petits Animaux benthiques.

Les organes électriques dérivent d'une transformation du tissu musculaire, et sont constitués essentiellement par de petits éléments formant une sorte de pile prismatique.

Le corps des **Rajidés** *(Rajidae)* est constitué par un disque et une queue, mais le disque a une forme plus ou moins nettement quadrangulaire. La peau est chagrinée et souvent constellée de piquants de différentes grandeurs. La queue est quelque peu déprimée, avec un repli cutané de chaque côté, et des rudiments d'organes électriques à peu près inactifs. Le plus souvent, elle supporte deux nageoires dorsales, à peu près égales et rapprochées l'une de l'autre, ainsi qu'une nageoire caudale plus ou moins réduite. Les nageoires ventrales sont le plus souvent bilobées.

La reproduction est ovipare, et les œufs sont protégés par une coquille cornée rectangulaire, avec à chaque angle un appendice filamenteux.

Les Rajidés sont actuellement répandus dans toutes les mers, avec environ six genres, dont l'un, *Raja,* comprend une centaine d'espèces, qui peuvent posséder un disque plus ou moins rhomboïdal ou même arrondi; leur museau est bref, ou prolongé en un rostre en saillie; la bouche est à peu près droite. Le lobe antérieur des nageoires ventrales est plus étroit que le postérieur.

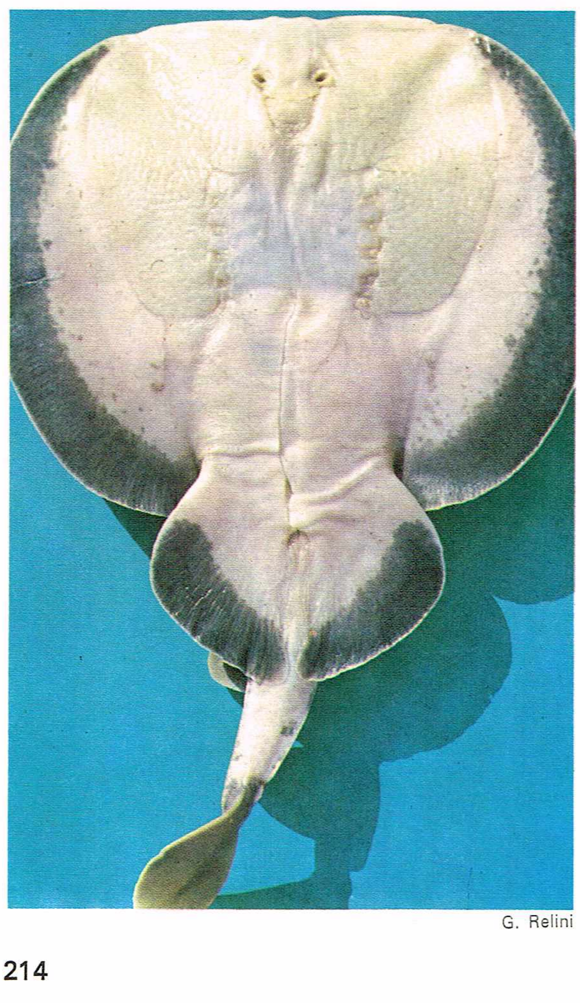

G. Relini

▶ ***Une torpille,* Torpedo sp.*, vue par la face ventrale, et dont on devine les organes électriques à travers la peau.***

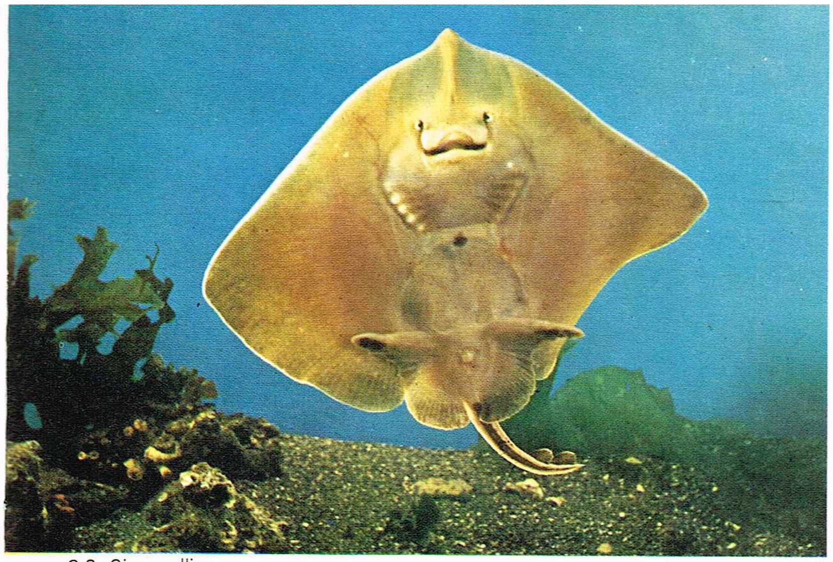

G.S. Giacomelli

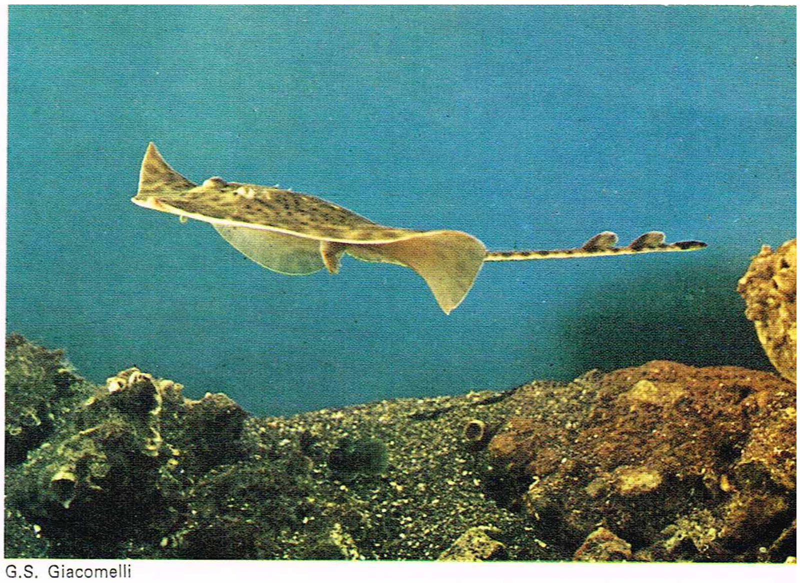

G.S. Giacomelli

▲ *A gauche, une raie,* **Raja sp.;** *on observera l'appareil buccal, les fentes branchiales et la queue effilée vers l'arrière. A droite, une raie vue de flanc; on remarquera ici l'important aplatissement dorso-ventral de l'Animal.*

La distribution géographique du genre *Raja* est très étendue, surtout dans les mers tempérées et froides; ce genre atteint les latitudes les plus élevées parmi tous les Rajiformes; quant à la distribution écologique, elle est considérable et va du littoral jusqu'aux grandes profondeurs.

Ces Poissons, sédentaires, vivent sur le fond, avec une prédilection pour le sable, et plus encore pour la vase, où ils s'enfouissent souvent, laissant seulement émerger les yeux ou les spiracles.

On distingue des espèces à museau court comme *Raja asterias* (la raie étoilée), qui atteint une longueur maximale de 70 cm, *Raja miraletus*, la raie miroir, un peu plus courte, et *Raja clavata*, la raie bouclée, les raies à museau long, comme *Raja alba*, la raie blanche, et le pocheteau blanc, *R. batis*.

Les **Dasyatidés** *(Dasyatidae)* ont des nageoires pectorales soudées à la tête, en avant du museau. Leur queue, mince, est pourvue le plus souvent d'un aiguillon. Leur reproduction est ovovivipare. Actuellement, il en existe dix genres, qui habitent de préférence les mers tempérées et chaudes. Certains sont euryhalins à un degré élevé, ou dulçaquicoles comme *Potamotrygon*.

Le genre *Dasyatis* possède un disque plus ou moins quadrangulaire, pentagonal ou à peu près circulaire, quadrangulaire chez toutes les espèces méditerranéennes. Les nageoires pectorales ont des sommets arrondis. La queue est longue et fine, pourvue d'un ou plusieurs piquants dentelés. Seul l'oviducte droit est développé. Ce genre comprend actuellement environ trente espèces, dont trois habitent la Méditerranée, et l'une, *Dasyatis violacea*, est endémique dans cette mer. *Dasyatis pastinaca*, la pastenague européenne, peut atteindre une longueur de plus de 2,50 m, et une largeur d'environ 1,50 m. *Dasyatis violacea*, la pastenague violette, n'atteint pas 1 m. Quant à *Dasyatis centroura*, la pastenague épineuse, elle dépasse 3,30 m de longueur et 2 m de largeur.

Le genre *Gymnura* a un disque beaucoup plus large que long. Sa queue très courte, en forme de fouet, est pourvue d'un aiguillon. *Taeniura* est représenté en Méditerranée par *T. grabata*, au disque circulaire.

Les **Myliobatidés** *(Myliobatidae)* sont caractérisés par un disque à peu près losangique et des nageoires céphaliques réunies en un unique lobe rostral, à l'extrémité antérieure du museau. Les spiracles et les yeux s'ouvrent latéralement. La queue, très fine, en forme de fouet, est plus longue que le disque. La nageoire dorsale existe normalement; sauf chez *Aetomyleus*, elle est suivie par un aiguillon, qui peut provoquer des plaies douloureuses.

Les Myliobatidés comptent quatre genres, une vingtaine d'espèces au total, et habitent principalement les eaux chaudes. Ils ne sont pas strictement benthiques; il leur arrive de nager dans les eaux superficielles, et il n'est pas rare de les voir faire des sauts hors de l'eau. Toutefois, ils se nourrissent essentiellement de Mollusques benthiques.

Myliobatis a un lobe rostral semi-circulaire, plus large que long; le genre, qui existait déjà au Crétacé, comprend actuellement une dizaine d'espèces, dont une seule sur nos côtes, *M. aquila*, l'aigle de mer, qui peut dépasser 1 m.

Pteromylaeus a un lobe rostral à peu près ovale, plus long que large; trois espèces en sont connues, dont l'une, *P. bovinus*, la vachette, présente sur nos côtes, atteint une longueur totale de 2,50 m pour un poids de 60 kg environ.

D. Faulkner

◀ **Dasyatis sayi,** *mimétique sur le fond de la mer (ici, près des îles Bahamas).*

▼ **Aetobatus narinari** *des mers tropicales.*

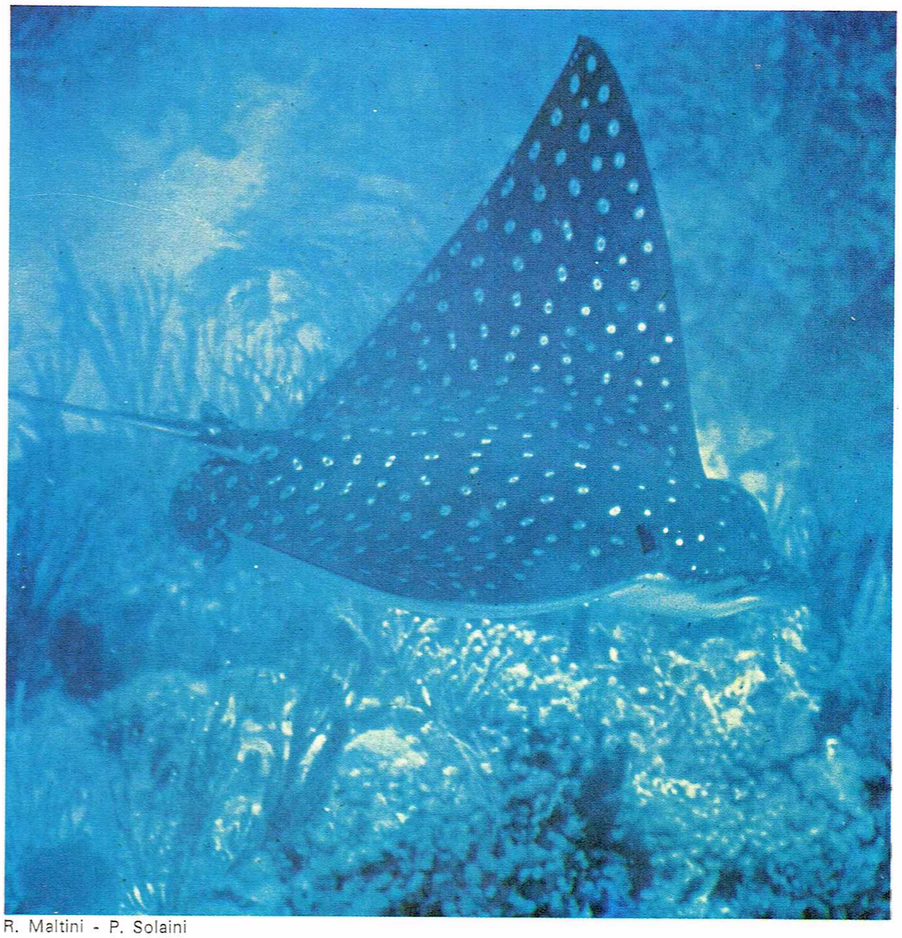

R. Maltini - P. Solaini

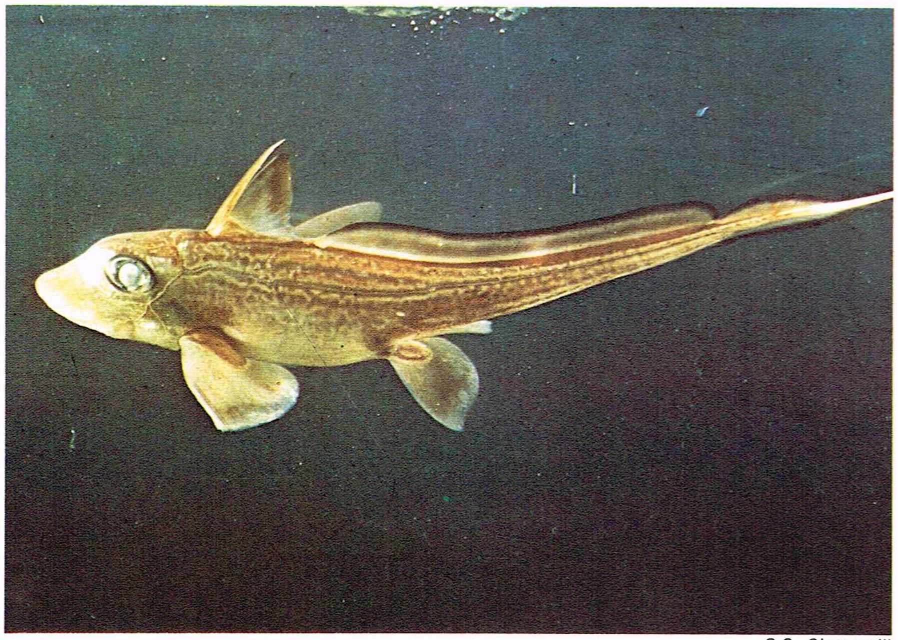

G.S. Giacomelli

▲ *Une chimère,* **Chimaera monstrosa.**

Les **Mobulidés** *(Mobulidae)* ont un disque losangique, plus large que long. Leur large bouche, en position terminale ou à peine infère, est armée de dents nombreuses et très petites.

La tête comporte des nageoires rostrales, grosses et mobiles, nettement séparées, articulées à une sorte de rotule. Les nageoires ventrales sont arrondies ; la nageoire dorsale est petite, l'aiguillon caudal petit ou absent. Les fentes branchiales sont larges et pourvues d'un filtre pour le plancton. Les spiracles sont très petits, et il est probable que la respiration se fait principalement par l'ouverture buccale.

Répandus dans toutes les mers chaudes et tempérées du globe, surtout dans les eaux néritiques, les Mobulidés forment parfois des bancs. Une espèce du genre *Manta* dépasse parfois 6,60 m de largeur et 4 tonnes. Le spectacle de certaines *Manta* sautant est impressionnant. Toutes ne sont pas gigantesques : *Mobula diabola,* par exemple, mesure au maximum 60 cm d'envergure.

Sous-classe des Bradyodontii

Les Bradyodontii, ou Holocéphales *(Holocephala),* sont des Vertébrés pisciformes à squelette cartilagineux, avec une seule fente branchiale de chaque côté, précédée et protégée par un repli cutané, que soutiennent des rayons cartilagineux. La mâchoire supérieure est réunie au neurocrâne, les os palato-carrés qui la composent et les cartilages hyomandibulaires lui étant soudés ; le crâne présente alors une suspension autostylique.

Les Bradyodontes ou Holocéphales actuels ont une forme allongée et fuselée, avec une longue queue filamenteuse. La peau des adultes est nue ou à peine granuleuse.

Les nageoires ventrales sont en position abdominale et, chez les mâles, portent des ptérygopodes. La queue est toujours longue.

Les arcs branchiaux sont au moins au nombre de cinq paires, dont les quatre premières portent des branchies ; chacun des arcs a une cloison, non reliée à la peau, en sorte que les lamelles sont libres dans la chambre branchiale. Celle-ci communique avec l'extérieur par une ouverture latérale et inférieure ou même ventrale, située en avant de l'implantation de la nageoire pectorale.

Les spiracles manquent chez les adultes. Les deux ouvertures nasales ou narines sont contiguës, et situées près du bord supérieur de la bouche.

La reproduction est ovipare, et la fécondation interne. Le cloaque est absent, et l'ouverture uro-génitale se trouve derrière l'anus.

Pondus sur les fonds vaseux, les œufs y sont fixés par un filament terminal. Pendant une partie de son développement, l'embryon présente des branchies externes filamenteuses et des spiracles qui disparaissent ensuite ; de plus, comme il n'y a pas de pédoncule, l'embryon adhère au sac vitellin par une partie de la surface ventrale du tronc. Les nouveau-nés, les embryons et les juvéniles ont une peau rugueuse car elle est recouverte d'écailles placoïdes destinées le plus souvent à disparaître chez les adultes.

Tous les Bradyodontes sont marins. Les espèces actuelles habitent les eaux froides, surtout les profondeurs. Presque toutes les formes vivantes se portent dans des eaux néritiques pendant la reproduction ; elles ont une vie essentiellement benthique. Ces Poissons zoophages se nourrissent surtout de Mollusques, de Crustacés et d'Invertébrés. Les espèces existant aujourd'hui sont peu nombreuses, environ vingt-quatre. Aucune n'est de grande taille.

Les Bradyodontes constituent une lignée évolutive bien distincte par rapport à tous les autres Poissons ; certains auteurs en font même une classe, étant donné qu'on ne connaît pas de termes de passage entre leurs fossiles et ceux des divers autres groupes. Ils présentent toutefois de nettes affinités structurales avec les Euselachii. Actuellement, ils comprennent un seul super-ordre, celui des Holocéphales composé de l'unique ordre des Chimériformes. Le super-ordre des Eubradyodontes est éteint.

Ordre des Chimériformes

Les Chimériformes *(Chimaeriformes)* ont une bouche assez petite et située ventralement. La mâchoire supérieure possède une paire de plaques broyeuses situées sur le vomer, et une paire de plaques palatines. La mandibule porte, aussi, une paire de plaques broyeuses. La tête, grosse et assez comprimée, porte bien en évidence divers canaux du système latéral. La ligne latérale est nette sur les côtés du tronc et de la queue, toujours longue et fine.

Ces Poissons ont deux nageoires dorsales, dont la première est pourvue d'un robuste piquant érectile, situé en avant. La nageoire anale est courte ; les nageoires ventrales sont bien développées, et les nageoires pectorales larges.

Chez les mâles, il existe trois appendices épineux en forme de massue, les *tenacula,* l'un sur le front, logé dans une fente, et un de chaque côté devant les nageoires ventrales, rétractile dans une poche cutanée. Les deux tenacula ventraux interviennent lors de l'accouplement. Les ptérygopodes sont libres sur toute leur longueur et insérés à l'aisselle des nageoires ventrales.

Les espèces sont réparties en trois familles : les **Chimæridés,** à museau arrondi ou à peu près conique, les **Callorhynchidés,** à rostre spatulé, et les **Rhinochimæridés,** au museau allongé et pointu.

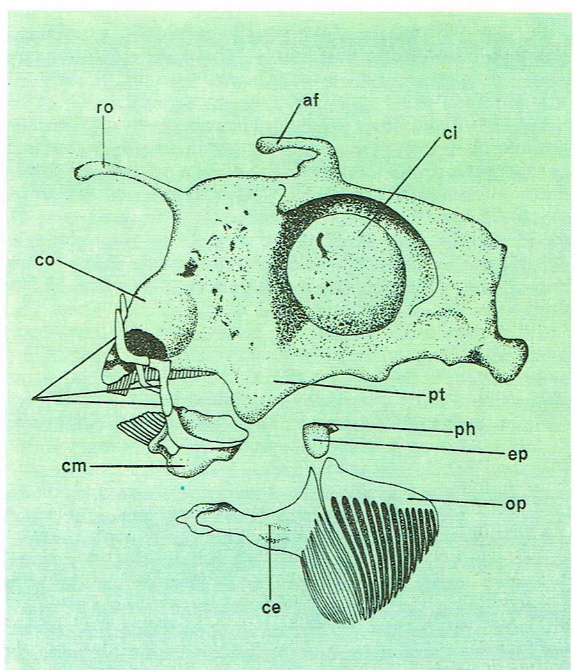

I.G.D.A.

▶ *Représentation schématique du crâne d'une* **Chimaera,** *ou chimère : ro, rostre ; af, appendice frontal ; ci, cloison interorbitaire ; pt, ptérygo-carré ; ph, pharynx ; ep, épihyal ; op, opercule ; ce, cératohyal ; cm, cartilage de Meckel ; cl, cartilage labial ; co, capsule olfactive.*

D. Faulkner

▲ *Les Actinoptérygiens sont des Vertébrés pisciformes pourvus d'un squelette ossifié. Ils comprennent la très grande majorité des Poissons : ici, un* **Apogon** *de Nouvelle-Calédonie.*

OSTÉICHTHYENS

Le squelette interne des Ostéichthyens *(Osteichthyes)*, encore cartilagineux chez les formes primitives, s'ossifie. Des éléments osseux dermiques s'ajoutent au splanchnocrâne et au neurocrâne.

Les rayons des nageoires, ou lépidotriches, sont segmentés. Il existe un parasphénoïde à la base du crâne.

Cette classe très étendue, dont la systématique est encore discutée, peut être divisée en trois sous-classes.

Sous-classe des Actinoptérygiens

Les Actinoptérygiens *(Actinopterygii)* sont des Vertébrés pisciformes pourvus d'un squelette ossifié. Ils possèdent une seule paire d'ouvertures branchiales; on observe le plus souvent des opercules composés d'éléments squelettiques osseux, en nombre variable selon les groupes. Ils n'ont pas d'hémisphères cérébraux, pas de fosses nasales ni de cloaque. Habituellement recouverte d'écailles dermiques imbriquées de type cycloïde ou cténoïde, la peau, chez certaines espèces, est nue ou bien cuirassée de plaques osseuses, grosses ou petites, rugueuses, granuleuses ou épineuses.

Les vertèbres sont le plus souvent arcocentriques et amphicœliques, mais chez de nombreuses espèces fossiles et quelques espèces vivantes, elles sont acentriques. Il existe généralement des côtes inférieures, et même parfois des côtes supérieures, attachées aux parapophyses, ou directement aux centres vertébraux. Chez les espèces dont l'organisation est moins poussée, il existe, au milieu des myoseptas, des os longs et fins, les arêtes, qui peuvent rester libres ou se rattacher aux côtes ou aux centres.

Les nageoires pectorales ont une insertion soit horizontale, soit oblique, soit enfin verticale. Dans certains cas, elles sont absentes.

Les nageoires ventrales, le plus souvent présentes (mais absentes, par exemple, chez tous les Anguilliformes), sont situées derrière les nageoires pectorales (ventrales abdominales), ou en dessous de celles-ci (ventrales thoraciques), ou encore en avant (ventrales jugulaires), ou même en position intermédiaire (par exemple, subthoracique).

La nageoire caudale peut être hétérocerque, géphyrocerque, pseudo-homocerque, ou homocerque; cette dernière forme est la plus fréquente chez les Actinoptérygiens vivant aujourd'hui; alors qu'elle est symétrique en apparence, elle présente le maximum de son asymétrie par rapport à l'axe vertébral; elle peut avoir une forme fourchue, bilobée, en croissant, quadrangulaire, triangulaire, arrondie, etc. Chez les Poissons anguilliformes, la nageoire caudale est confluente avec les nageoires dorsale et anale, toutes deux très longues.

La nageoire anale et la nageoire dorsale ont un développement équivalent chez les formes dont le centre de gravité se trouve sur l'axe longitudinal du corps. Si ce centre est au-dessus de l'axe longitudinal, la dorsale a un développement plus grand que l'anale; mais, quand le centre de gravité est en dessous de l'axe longitudinal, c'est la nageoire anale qui est la plus développée. On peut considérer que les formes nectoniques ont le plus souvent une forte nageoire dorsale, alors que les formes benthiques ont le plus fréquemment une forte nageoire anale.

Certains excellents nageurs peuvent abaisser leur nageoire dorsale dans un sillon, pour diminuer leur résistance à l'eau. Leur nage se fait le plus souvent par des battements latéraux de la caudale. Les autres nageoires servent le plus souvent, non pas de propulseurs, mais de stabilisateurs. Quand le corps est allongé, et serpentiforme ou rubané, il se déplace par mouvements ondulatoires.

Il existe chez certaines formes une vessie natatoire, qui peut communiquer (physostomes) ou non (physoclystes) avec l'œsophage, grâce au conduit pneumatique : le premier cas est généralement considéré comme un caractère primitif.

La reproduction est presque toujours ovipare, et la fécondation externe; toutefois, certaines espèces sont ovovivipares, alors que d'autres peuvent être pratiquement considérées comme vivipares : dans ces cas, la fécondation est interne et réalisée par les organes copulateurs mâles. Ceux-ci sont constitués par l'allongement soit de la papille génitale, soit des premiers rayons de la nageoire anale, et non par des modifications des nageoires ventrales, à la différence de ce qui a lieu chez les Sélaciens et chez les Holocéphales.

Les Actinoptérygiens comprennent la très grande majorité des Poissons. Ils sont répartis en quatre super-ordres, celui des Halecostomi, fossile, ne sera pas étudié.

Super-ordre des Chondrostei

Ordre des Acipensériformes

Les Acipensériformes *(Acipenseriformes)* constituent l'ordre le moins évolué parmi les Ostéichthyens.

Leur dénomination « Chondrostei » dérive du fait qu'ils ont un endosquelette en grande partie cartilagineux, et que leur crâne possède un revêtement d'os cutanés. Les clavicules et les méso-coracoïdes sont présents. Les vertèbres sont acentriques.

Selon les groupes, la peau possède ou non des plaques osseuses. Les nageoires impaires n'ont pas de rayons épineux. Les nageoires ventrales sont abdominales; la nageoire caudale possède parfois des fulcres (ou fulcrums). Ce sont des écailles, disposées en séries sur le bord antérieur de la nageoire, terme de passage graduel

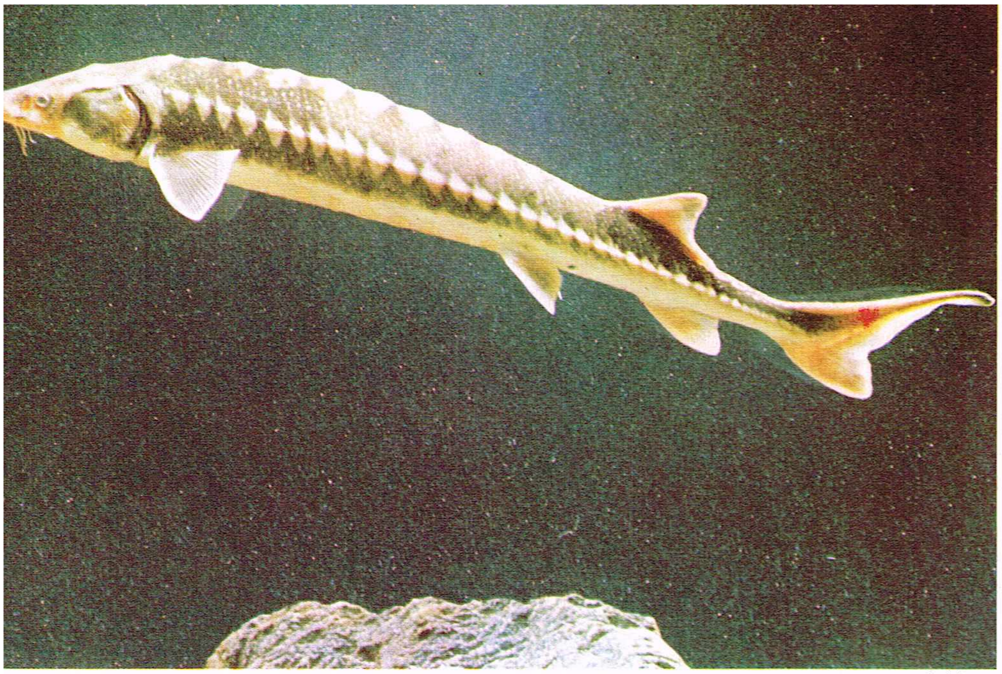

G. Mazza

▲ *Un Acipenséridé, ou esturgeon; les représentants de cette famille, célèbres par leur caviar, sont largement répandus dans les eaux tempérées et froides de l'hémisphère boréal.*

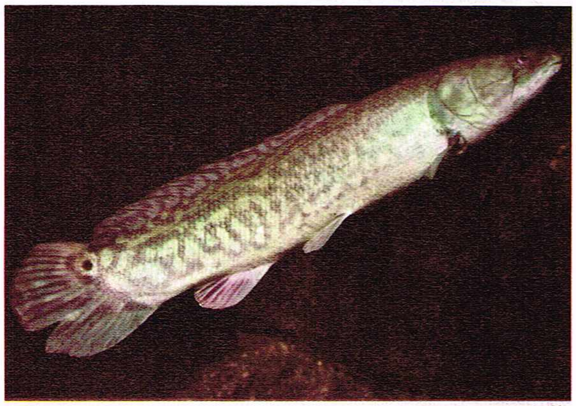

J. Six

▶ *Les Amiiformes sont presque entièrement fossiles; la seule espèce actuelle, véritable fossile vivant, est* Amia calva.

entre les écailles vraies et les lépidotriches, dont elles sont homologues.

Le museau, proéminent et pointu, porte chez certaines familles quatre courts barbillons à la face inférieure. La bouche, infère et protractile, peut s'allonger en tube, muni parfois de petites dents caduques.

Les Acipensériformes sont essentiellement détritivores, ou se nourrissent d'animalcules benthiques.

Actuellement, on en compte seulement deux familles, celles des Acipenséridés et des Polyodontidés.

Les **Acipenséridés** *(Acipenseridae)* sont les esturgeons proprement dits, célèbres par leur caviar. Ils ont un corps allongé, de section pentagonale, par suite de la présence de cinq séries longitudinales de plaques osseuses. Leur bouche est infère, protractile, petite, et toujours dépourvue de dents. Les narines sont constituées de deux fossettes latérales situées en avant des yeux. Il y a des barbillons en avant de la bouche. Les spiracles, présents chez certains genres comme *Acipenser,* manquent dans l'espèce *Scaphirhynchus platorhynchus*, par exemple.

Les Acipenséridés sont largement répandus dans les eaux tempérées et froides de l'hémisphère boréal. Certaines espèces, comme *Acipenser fulvescens* d'Amérique, habitent uniquement les eaux douces mais la majeure partie des formes sont migratrices; elles se reproduisent dans les fleuves et vivent en mer.

Il existe quinze espèces en Europe et en Asie, neuf en Amérique du Nord, et en outre de nombreux hybrides entre les diverses espèces. Les genres *Acipenser, Huso, Scaphirhynchus, Kessleria* appartiennent à cette famille.

Les **Polyodontidés** *(Polyodontidae)* sont faciles à distinguer des Acipenséridés, car leur corps est presque totalement recouvert d'une peau nue et lisse, ou tout au plus d'écailles rudimentaires. Leur museau, très allongé, en forme de spatule ou à peu près conique, ne possède pas de barbillons. Ils ont un opercule (au sens large) rudimentaire. Leur bouche est large; leurs mâchoires et leurs os palatins sont pourvus de nombreuses petites dents caduques.

La famille comprend actuellement deux genres et deux espèces seulement.

Polyodon spatula, le spatulaire, vit dans les eaux intérieures d'Amérique du Nord. Il atteint une longueur d'environ 2 m.

Psephurus gladius est localisé en Chine dans le bassin du fleuve Jaune; il atteint 6 m de longueur.

Super-ordre des Holostei

Ordre des Amiiformes

Les Amiiformes *(Amiiformes)* ou Protospondylés forment un groupe presque entièrement fossile, qui ne comprend plus actuellement que la seule espèce *Amia calva*.

Les écailles des Holostei sont lépisostéoïdes ou cycloïdes. Leurs nageoires ne possèdent pas de rayons épineux. Les fulcrums ne sont pas toujours présents. Les nageoires ventrales sont abdominales.

On trouve des restes fossilisés au moins à partir du Permien; au Paléozoïque, ils peuplèrent les eaux de l'Ancien et du Nouveau Monde, puis leur aire de diffusion se réduisit et ils disparurent à peu près complètement.

Amia calva, l'unique espèce de la famille des **Amiidés** *(Amiidae)* a des écailles cycloïdes. Ses nageoires ne possèdent pas de fulcrums, et sa caudale est arrondie. Ses vertèbres sont amphicœliques. Le cône artériel a plusieurs alvéoles. La vessie natatoire, pourvue d'un conduit, est alvéolée et capable de servir d'organe respiratoire accessoire pouvant utiliser l'oxygène atmosphérique. Il existe une valvule spirale rudimentaire dans l'intestin.

Répandue dans les eaux douces des États-Unis, l'amie est un exemple de Poisson osseux considéré comme un fossile vivant. Les mâles atteignent au total 50 cm de longueur, les femelles 70 cm : les premiers portent à la base de la nageoire caudale une belle tache noire bordée de rouge.

Ordre des Lépidostéiformes

Les écailles des Lépidostéiformes *(Lepidosteiformes)* sont d'un type particulier que l'on rencontre aussi chez d'autres ordres, par exemple chez des Amiiformes fossiles.

Ils sont recouverts de plaques osseuses losangiques, ganoïdes, disposées en séries régulières et formant une sorte de carapace continue.

Les nageoires, dépourvues de rayons épineux, possèdent des fulcres. Les ventrales sont abdominales.

Le museau est plus ou moins long et fin; les Lépidostéiformes ont de fortes dents de prédateurs. Leur cœur est pourvu d'un cône artériel. Ils possèdent une vessie natatoire et une valvule spirale rudimentaire.

La famille des **Lépidostéidés** *(Lepidosteidae)* comprend l'unique genre *Lepidosteus* apparu au Crétacé. On en trouve aujourd'hui quelques espèces seulement, environ huit, habitant l'Amérique du Nord et l'Amérique centrale ainsi que les eaux cubaines. La plus connue est *Lepidosteus osseus*. Ces Poissons sont d'excellents nageurs et des prédateurs voraces. Ils atteignent une longueur totale de 1,50 m et se déplacent souvent par bancs. Ils peuvent vivre vingt-cinq ans. Au printemps, mâles et femelles se rencontrent dans des eaux stagnantes et passent le reste de l'année dans des zones plus profondes. *Lepidosteus tristoechus,* espèce géante, peut atteindre exceptionnellement 3,50 m de longueur.

La famille est essentiellement dulçaquicole, mais certaines espèces se rendent aussi dans les eaux salées.

Super-ordre des Teleostomi

Ordre des Clupéiformes

Les Clupéiformes *(Clupeiformes)* ou Isospondyles *(Isospondyli)* constituent un ordre primitif, d'une très grande importance pour l'homme car il comprend certaines familles de grand intérêt économique.

Ces Poissons ont habituellement des écailles cycloïdes, qui, chez certaines formes éteintes, comportent des traces de ganoïne.

Les nageoires ne possèdent pas d'épines et les ventrales sont abdominales : il s'agit là de deux caractères primitifs.

La ceinture pectorale présente le plus souvent des méso-coracoïdes.

De nombreuses espèces sont dulçaquicoles : certaines sont migratrices; beaucoup sont marines et peuplent essentiellement les eaux profondes (eurybathes), et dans l'ensemble, plus fréquemment les eaux froides ou tempérées que les eaux chaudes.

Les Clupéiformes comprennent plusieurs sous-ordres et environ trente-cinq familles.

Sous-ordre des Clupéoïdes

Les Clupéoïdes *(Clupeoidei)* sont apparus au Crétacé. Leurs dents sont petites. Ils possèdent des oviductes et des méso-coracoïdes, mais n'ont pas de nageoire dorsale adipeuse. Leur dos est bleu-vert, métallique, et leur ventre argen é. Ils sont essentiellement grégaires.

Les **Élopidés** *(Elopidae)* ont des rayons branchiostèges très nombreux (vingt-sept à trente-cinq dans le genre *Elops*). Un os gulaire est présent.

Les **Mégalopidés** *(Megalopidae)* sont les tarpons, Poissons des eaux tropicales qui atteignent 2 m de long. *(Megalops atlanticus)*; la larve est leptocéphalienne.

Les **Clupéidés** *(Clupeidae)* ont un corps allongé, souvent comprimé. La nageoire caudale est nettement fourchue. Le bord ventral est caréné, effilé et denticulé. Les écailles sont cycloïdes et facilement caduques. La bouche est protractile et étroite et est pourvue ou non de petites dents; l'ouverture branchiale est importante. Les branchiospines sont fines et longues. Les Clupéidés ne possèdent pas de ligne latérale.

L'importance des Clupéidés est décisive car on en pêche des quantités fantastiques : pour les harengs, par exemple, le produit annuel de la pêche dans l'océan Atlantique et les mers adjacentes est d'environ cinq milliards d'individus. Les genres les plus importants sont *Clupea, Sardina, Sardinella* et *Alosa*.

Clupea harengus, le hareng, est répandu dans l'océan Atlantique boréal et dans la mer du Nord, la mer Baltique, etc. Il se distingue par une mandibule en saillie et des opercules lisses. Les bancs de harengs effectuent des migrations verticales et d'amples déplacements horizontaux. Des études biométriques et de dynamique des populations ont fait ressortir l'existence de plusieurs races, caractérisées chacune par un nombre défini de vertèbres, de rayons dans les nageoires, une date pour la ponte des œufs, etc.

Sprattus sprattus, le sprat, rappelle beaucoup le hareng, mais il est cependant plus petit. On le trouve aussi dans la partie orientale de l'océan Atlantique, du Portugal à la Norvège. Le sprat remonte souvent les cours d'eau sur une certaine distance.

Sardina pilchardus, la sardine se rencontre dans les eaux atlantiques orientales, du Maroc à Madère, aux îles Canaries, à la mer du Nord, etc. Dans l'océan Atlantique, la sardine atteint 25 cm de longueur à six ou sept ans; dans la Méditerranée, elle est généralement plus petite.

Alosa alosa, l'alose vulgaire, se rencontre à l'ouest de la Méditerranée et dans le nord-est de l'océan Atlantique, du Maroc à la Norvège; *Alosa fallax,* l'alose feinte, vit à l'est de la Méditerranée et à l'est de l'Atlantique, jusqu'à la Norvège.

Sardinella aurita, l'allache, habite la Méditerranée et l'Atlantique tropical. Elle atteint jusqu'à 30 cm de longueur.

Les **Dussumiériidés** *(Dussumieriidae)* diffèrent des Clupéidés par leur bord ventral arrondi et dépourvu de carène. Il en existe une quinzaine d'espèces, réunies en quatre genres. Les plus courantes sont deux espèces du genre *Spratelloides,* répandues dans toute la partie tropicale de l'océan Indien et de l'océan Pacifique.

Les **Engraulidés** *(Engraulidae)* ou anchois sont caractérisés par la forme plus ou moins oblique de leur bouche et sa position ventrale. Bien développés, leurs yeux sont protégés par des paupières adipeuses; leurs opercules sont fins et membraneux. Leur unique nageoire dorsale est insérée à peu près à mi-longueur; leurs ventrales sont abdominales, souvent opposées à la nageoire dorsale; la caudale est profondément incisée. Ces Poissons n'ont pas de nageoire dorsale adipeuse ni de ligne latérale. Chez la plupart des espèces, la longueur totale ne dépasse guère 15 cm.

Ces Poissons vivent toujours en bancs et se reproduisent généralement au printemps ou en été : leurs œufs sont pélagiques et éclosent en quelques jours. Ils vivent environ sept ans.

Il existe une centaine d'espèces d'Engraulidés, surtout dans les mers tropicales et tempérées; certaines sont adaptées aux eaux saumâtres et même aux eaux douces. On trouve abondamment dans la Méditerranée, l'Atlantique, la mer Baltique et la mer du Nord *Engraulis encrasicholus,* l'anchois proprement dit, activement pêché et objet d'un important commerce.

Sous-ordre des Salmonoïdes

Les Salmonoïdes *(Salmonoidei)* sont des formes qui possèdent pour la plupart une seconde nageoire dorsale, adipeuse. Leurs dents sont de tailles diverses. Les oviductes sont absents ou rudimentaires, en sorte que les œufs, chez la femelle, passent dans le cœlome et sortent par l'ouverture génitale, située derrière l'anus.

Les **Salmonidés** *(Salmonidae)* ont un corps plus ou moins allongé, et des écailles cycloïdes. Leur ligne latérale est bien visible; leur bouche est terminale, armée ou non de dents de différentes grandeurs. La nageoire dorsale, courte, se trouve en position médiane; on observe en outre une petite nageoire dorsale adipeuse.

S'il existe peu de genres dans cette famille, les espèces sont par contre nombreuses; la systématique des Salmonidés est des plus délicates. La grande majorité des formes vit au-delà du 40e parallèle nord.

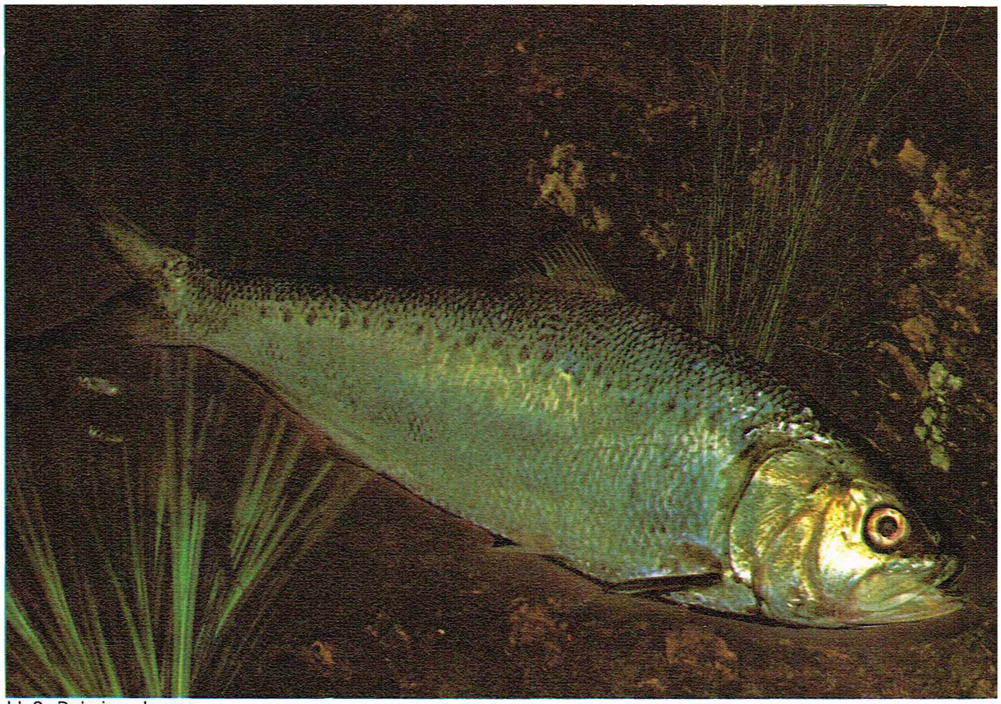

J.L.S. Dubois - Jacana

▲ ***Les Clupéoïdes représentent des quantités très importantes de pêche et comptent toutes les espèces de harengs, sardines, sprats et aloses, dont on voit ici l'espèce commune*** **Alosa alosa.**

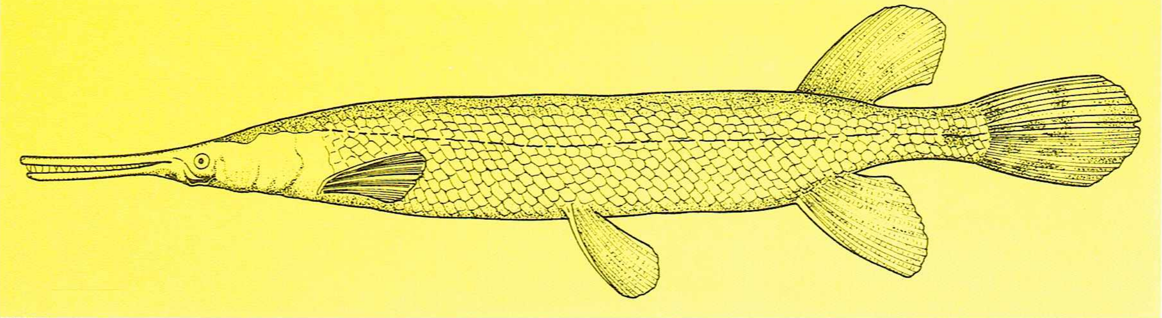

I.G.D.A.

◀ **Lepidosteus osseus,** ***caractérisé par ses écailles ganoïdes, de structure particulière et de forme losangique.***

J. Six

▲ ***Les Salmonoïdes ont le corps recouvert d'écailles cycloïdes; la grande majorité des formes vit au-delà du 40ᵉ parallèle nord, ici,*** **Salmo irideus.**

Le genre le plus important est *Salmo,* dont la bouche bien développée est armée de dents robustes, coniques et aiguës.

Salmo salar, le saumon commun, est répandu dans l'Atlantique boréal, la mer du Nord et la mer Baltique. Il remonte les fleuves pour se reproduire en eau douce. Toutefois, les populations de certains lacs septentrionaux d'Europe et d'Amérique sont sédentaires, elles ne descendent jamais à la mer. Pendant la période de reproduction, on observe des changements de coloration et de forme, surtout chez les mâles, et plus chez les races migratrices que chez les sédentaires. Ce saumon vit au plus une dizaine d'années, durant lesquelles il se reproduit trois ou quatre fois. A l'époque de la ponte, il remonte les fleuves, en sautant les petites cascades, sans se nourrir. Quand les individus sont arrivés dans les eaux fraîches des petits cours d'eau de montagne, les femelles pondent leurs œufs (d'un diamètre voisin de 0,5 cm), qui éclosent pendant l'hiver. A l'âge de deux ans environ, les juvéniles redescendent vers les eaux salées. Les adultes peuvent atteindre 1,50 m de longueur.

Les truites appartiennent aussi au genre *Salmo*. Si l'on met à part *Salmo trutta fario,* la truite de torrent, originaire d'Europe et importée en Amérique du Nord, et *Salmo trutta lacustris,* la truite lacustre, qui habite la Scandinavie et les Alpes, deux espèces qui ne quittent pas les eaux douces, les autres truites ont généralement le même mode de vie que le saumon, et vivent tant dans la mer que dans les petites rivières fraîches.

Les *Oncorhynchus* sont caractérisés par la possession d'une nageoire anale plus longue que celle des *Salmo* et des rayons branchiostèges plus nombreux. Il s'agit de saumons de l'océan Pacifique boréal, qui se reproduisent une seule fois dans les fleuves; après quoi, ils meurent. Ils sont de grande taille et pèsent très lourd, comme *Oncorhynchus tshawytscha,* le saumon royal, qui atteint un poids de 45 kg. Ce Poisson a été introduit avec succès en Nouvelle-Zélande, où on le pêche activement. Les saumons de l'océan Pacifique sont typiquement anadromes; il est intéressant d'observer qu'ils peuvent retrouver, dans leur très grande majorité, leur lieu exact de naissance pour s'y reproduire, après avoir parcouru dans l'océan des centaines de kilomètres.

Salvelinus fontinalis, le saumon de fontaine, possède des taches roses sur les côtés et le bord antérieur de ses nageoires ventrales et anale est de couleur blanche. Des formes de cette espèce, répandues le long des côtes septentrionales d'Amérique du Nord, notamment au Canada, émigrent dans la mer. Dans l'ouest de l'Amérique du Nord, de l'Alaska à la Californie, ce saumon est remplacé par une espèce très proche, *Salvelinus malma*.

Les **Thymallidés** *(Thymallidae)* se reconnaissent facilement à leur longue nageoire dorsale et à leur bouche très petite. Ils peuplent les eaux douces d'Amérique du Nord, d'Europe et d'Asie et pondent leurs œufs au printemps, sur les fonds sableux ou caillouteux. *Thymallus thymallus,* l'ombre, se trouve en Europe centro-septentrionale.

Les **Corégonidés** *(Coregonidae)* sont très proches des Salmonidés, et répandus dans l'hémisphère septentrional. Ces Poissons possèdent une nageoire dorsale adipeuse; leurs écailles sont grosses; leur bouche est petite. On les distingue facilement des Thymallidés à leur première nageoire dorsale plus petite, et à leur couleur générale, argentée, plus foncée sur le dos. La majeure partie des espèces est dulçaquicole, mais certaines vivent en mer et émigrent dans les eaux douces à l'époque de la reproduction, le plus souvent en automne. *Coregonus lavaretus,* le lavaret ou powan, habite les eaux douces du nord de l'Europe, de l'Asie et de l'Amérique, et *Coregonus oxyrhynchus,* la féra ou houting, des lacs des pays nordiques et de la Russie septentrionale, se trouve aussi dans les embouchures des fleuves de la mer Baltique et de la mer du Nord.

Sous-ordre des Stomiatoïdes

Les Stomiatoïdes *(Stomiatoidei)* ont souvent une nageoire dorsale adipeuse. Ils sont marins et surtout bathyphiles ou eurybathes. Leurs yeux sont le plus souvent assez gros. Leur squelette est faiblement calcifié. Ils possèdent presque toujours des photophores, comme souvent chez les groupes des eaux profondes. Ce sous-ordre comprend une dizaine de familles.

Les **Sternoptychidés** *(Sternoptychidae)* comprennent une quinzaine d'espèces, qu'on appelle vulgairement des haches d'argent, car leur tête et leur tronc sont hauts et

Bruce Coleman - N. Myers

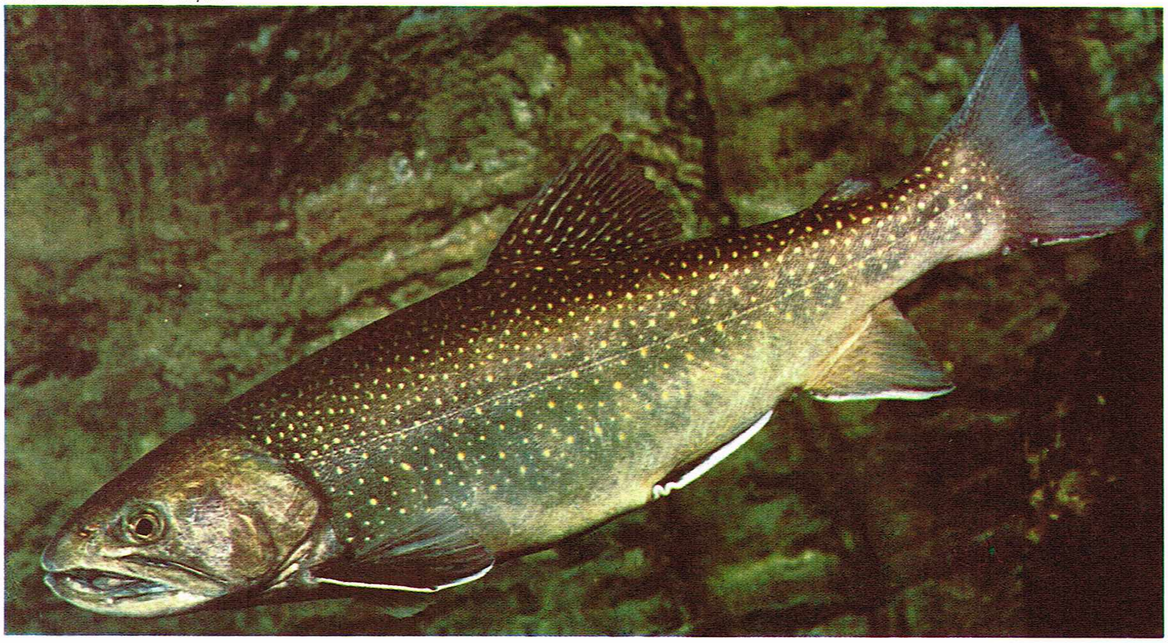

▶ ***Les Poissons possèdent des organes récepteurs, alignés longitudinalement sur les côtés du corps, constituant la ligne latérale, ou système latéral, que l'on voit ici nettement sur un Salmonidé,*** **Salvelinus fontinalis.**

comprimés, et leur pédoncule caudal est bas ; elles sont de couleur argentée. Ces Poissons possèdent de nombreux photophores. Ils ne dépassent pas 10 cm de longueur. Ils sont bathyphiles et habitent les eaux tropicales et tempérées.

Les **Stomiatidés** *(Stomiatidae)* comportent environ huit espèces dont la distribution géographique est vaste. C'est le cas de *Stomias boa*, forme très allongée, aux nombreux photophores disposés latéralement et ventralement ; ses dents sont grosses, et sa mandibule porte un barbillon avec une tache rouge à l'extrémité.

Les **Chauliodontidés** *(Chauliodontidae)* ne comprennent que le genre *Chauliodus*. Ils habitent les eaux profondes des mers chaudes et froides, et accomplissent des déplacement verticaux, sans jamais venir en surface ; pendant le jour, ils vivent entre 2 300 et 450 m de profondeur, pour remonter la nuit au-dessus de 400 m.

Sous-ordre des Ésocoïdes

Les Ésocoïdes *(Esocoidei)* sont caractérisés par la possession d'une ceinture pectorale dépourvue de méso-coracoïde.

Uniquement dulçaquicole et limité à l'hémisphère boréal, ce sous-ordre est constitué par trois familles, avec au total une douzaine d'espèces.

Les **Ésocidés** *(Esocidae)* comprennent environ cinq espèces, qui appartiennent toutes au genre *Esox*. Ces Poissons, plus ou moins marbrés, ont un museau allongé et déprimé, en bec de canard, avec de fortes dents pointues. Leur nageoire dorsale est insérée en arrière. Ce sont tous des prédateurs voraces, surtout ichthyophages, capables de capturer aussi des grenouilles, de petits Oiseaux et de petits Mammifères.

L'espèce la plus répandue est *Esox lucius*, le brochet, qui habite de nombreuses régions d'Eurasie et une grande partie du continent nord-américain. Il peut atteindre en quinze ans 128 cm pour un poids de 19,2 kg.

Sous-ordre des Notoptéroïdes

Les **Notoptéridés** *(Notopteridae)* comprennent quatre espèces, appartenant à deux genres, toutes dulçaquicoles et répandues en Asie méridionale ou en Afrique. On les reconnaît facilement à leur très longue et haute nageoire anale, qui va de la région pectorale à l'extrémité de la queue. Celle-ci sert de propulseur principal. Chez le genre type *Notopterus*, on observe également une petite nageoire dorsale, qui fait office de gouvernail. Les deux espèces asiatiques, elles aussi du même genre, sont très importantes du point de vue commercial, car elles sont comestibles et très savoureuses. *Xenomystus nigri*, l'une des deux espèces africaines, de nature peu farouche, peut être élevée en aquarium.

G. Mazza

▲ *Le brochet* **(Esox lucius)** *est un Poisson à très vaste distribution géographique ; on le rencontre dans les eaux douces d'Europe et d'Amérique du Nord.*

Sous-ordre des Mormyroïdes

Le sous-ordre des Mormyroïdes *(Mormyroidei)* est constitué par une unique famille ; d'aucuns le considèrent comme un ordre.

Les **Mormyridés** *(Mormyridae)* habitent les eaux intérieures d'Afrique ; ils comprennent environ vingt genres et plus de cent dix espèces, toutes caractérisées par un pédoncule caudal long et fin, une queue profondément fourchue, une unique nageoire dorsale et une nageoire anale opposée, ces deux nageoires impaires assez semblables étant implantées très en arrière du corps.

On observe de grandes variations de forme et de taille du museau : alors que *Gnathonemus curvirostris*, le Poisson à trompe d'éléphant, possède une sorte de trompe très longue et recourbée vers le bas, au bout de laquelle s'ouvre une petite bouche, la lèvre inférieure de *Gnathonemus petersi* est allongée et flexible ; les espèces du genre *Marcusenius* ont un museau arrondi et court, la bouche étant placée en position ventrale. De nombreuses espèces, sinon toutes, produisent des décharges électriques.

Sous-ordre des Ostéoglossoïdes

Les Ostéoglossoïdes *(Osteoglossoidei)* comprennent deux familles, que certains auteurs élèvent au rang de deux sous-ordres distincts.

Les **Ostéoglossidés** *(Osteoglossidae)* tirent leur nom de la forte structure osseuse qui supporte leur langue. Cette famille groupe quatre genres et cinq espèces des eaux douces d'Afrique, d'Amérique du Sud et de la région malayo-australienne. Ces Poissons ont des écailles en

C. Bevilacqua

◀ *Le poisson-éléphant,* **Gnathonemus petersi,** *dont on remarque, ici, la lèvre inférieure très allongée.*

▶ ***Tête cuirassée d'un arawana* (Osteoglossum bicirrhosum) *d'Amérique du Sud.***

D. Faulkner

saillie et de gros yeux. Leur tête est cuirassée. Leurs nageoires dorsale et anale sont situées très en arrière.

La plus grosse espèce est *Arapaima gigas,* l'arapaima géant, d'Amazonie, qui peut exceptionnellement atteindre 4,50 m de longueur.

Les **Pantodontidés** *(Pantodontidae)* comprennent l'unique espèce *Pantodon buchholzi,* le pantodon ou poisson-papillon, qui habite les eaux intérieures d'Afrique occidentale. Il a pour particularité d'effectuer des sauts hors de l'eau, jusqu'à 1,80 m de hauteur, et de planer ensuite grâce à ses nageoires pectorales très développées.

Sous-ordre des Gonorhynchoïdes

Les Gonorhynchoïdes *(Gonorhynchoidei)* ne renferment qu'une seule famille.

Les **Gonorhynchidés** *(Gonorhynchidae)* comprennent un seul genre et sans doute une seule espèce, *Gonorhynchus gonorhynchus,* le gonorhynque, Poisson élancé, à peu près anguilliforme, et long de 0,50 m au maximum. Son museau est allongé, avec une bouche ventrale et un unique barbillon. On le rencontre dans les eaux côtières du Japon, de Nouvelle-Zélande, des îles Hawaï et d'Afrique du Sud.

Ordre des Scopéliformes

Les Scopéliformes *(Scopeliformes)* sont constitués d'environ trois cents espèces connues, essentiellement eurybathes ou bathyphiles. Leurs nageoires ne possèdent pas de rayons épineux. Les ventrales sont abdominales. Il existe souvent une petite nageoire adipeuse sur le pédoncule caudal même. La vessie natatoire est généralement absente.

Sous-ordre des Myctophoïdes

Les Myctophoïdes *(Myctophoidei)* comprennent sept familles.

Les **Synodontidés** *(Synodontidae)* comprennent une quarantaine d'espèces, dont la tête rappelle quelque peu celle d'un lézard. Ces Poissons sont assez faciles à élever en aquarium, notamment les genres *Saurida, Synodus,* et *Trachinocephalus,* bien qu'on soit obligé de les nourrir de Poissons vivants.

Les **Aulopidés** *(Aulopidae)* rappellent beaucoup la famille précédente, mais les cinq espèces qu'ils comprennent, pourvues d'une petite nageoire adipeuse sur le pédoncule caudal, ont une tête plus courte, une nageoire dorsale plus longue, et quelques autres caractères différents.

Les **Chlorophthalmidés** *(Chlorophthalmidae)* doivent leur nom à la coloration verdâtre de leurs gros yeux. Il existe une douzaine d'espèces environ, à nageoires ventrales à peu près thoraciques, et dont la dorsale adipeuse est opposée à la nageoire anale. On trouve dans tous les océans *Chlorophthalmus agassizi* qui mesure au maximum 25 cm.

Les **Bathyptéroïdés** *(Bathypteroidae)* ont de très longs rayons au début des nageoires ventrales, et pour certains au lobe inférieur de la caudale et aux pectorales : il s'agit sans doute d'un caractère sexuel secondaire.

Les **Myctophidés** *(Myctophidae)* comptent environ cent cinquante espèces, dont certaines sont très abondantes. Essentiellement eurybathes, ils accomplissent d'importantes migrations verticales journalières, gagnant la surface pendant la nuit et redescendant en profondeur pendant le jour. Ils sont pour la plupart eurythermes. De taille modeste (longueur maximale de 7 à 15 cm), leur forme est assez semblable à celle des Clupéidés ; ils sont bleuâtres ou gris bleuâtre, foncés sur le dos, et argentés sur le ventre, avec une série de photophores.

Sous-ordre des Alépisauroïdes

Les **Paralépididés** *(Paralepididae)* ou **Sudidés** *(Sudidae)* comprennent environ dix genres, caractérisés par l'extrême allongement de leur corps, l'absence de photophores, et leur coloration entièrement blanc rosé ou brunâtre, ou encore grisâtre dorsalement et blanche ventralement. Leur denture est le plus souvent robuste.

Ces formes vivent surtout dans les eaux profondes (on les rencontre jusqu'à 3 000 m de profondeur), bien que certaines espèces des genres *Lestidium* et *Paralepis* accomplissent des migrations verticales, remontant dans les eaux superficielles pendant la nuit.

Les **Alépisauridés** *(Alepisauridae)* sont constitués par deux espèces : *Alepisaurus ferox* de l'Atlantique tropical et tempéré et de la Méditerranée, et *Alepisaurus borealis,* des régions tropicales et tempérées de l'océan Pacifique. Ces espèces ont un corps très allongé, mesurant environ 2 m de longueur. Elles sont voraces et l'étude de leur contenu stomacal est très intéressante à faire, car on y trouve de nombreux Poissons et Céphalopodes des profondeurs.

Ordre des Saccopharyngiformes

Les Saccopharyngiformes *(Saccopharyngiformes)* sont des Poissons bathypélagiques, anguilliformes, à peau nue. Leur bouche est énorme, et leurs mâchoires allongées à l'extrême. Toutes les espèces sont dépourvues d'os operculaires et de rayons branchiostèges ainsi que de vessie natatoire et de nageoires pelviennes.

Les **Saccopharyngidés** *(Saccopharyngidae)* se répartissent largement dans les océans à des profondeurs supérieures à 500 m. Le genre *Saccopharynx* possède de nombreuses dents aiguës et un estomac ample et dilatable. L'étude du contenu stomacal révèle que ces Poissons sont de voraces prédateurs.

Ordre des Cypriniformes

Cet ordre est à peu près entièrement limité aux eaux douces et comprend plus de six mille espèces. Il est cosmopolite, manquant seulement dans l'Antarctide et en Australie. Il est apparu à l'Oligocène.

Les écailles, quand elles existent, sont presque toujours cycloïdes. Les nageoires ventrales sont abdominales ; la caudale est homocerque ; seuls le premier rayon de la nageoire dorsale et celui de la nageoire anale peuvent être spiniformes. Ces Poissons sont le plus souvent physostomes et possèdent des osselets de Weber.

Les **Characidés** *(Characidae)* sont actuellement répartis par certains auteurs en six familles ou plus, avec au

total une trentaine de sous-familles. Ces Poissons peuplent les eaux intérieures de l'Amérique centrale et de l'Amérique du Sud, ainsi que de l'Afrique tropicale; ils rappellent vaguement les Cyprinidés, bien qu'ils possèdent le plus souvent des dents maxillaires, mais ils sont dépourvus de dents pharyngiennes spécialisées. Ils possèdent généralement une petite nageoire dorsale adipeuse.

Certaines espèces sont herbivores, d'autres carnivores, et d'autres encore omnivores. Les genres *Serrasalmo, Rooseveltiella* et *Pygocentrus,* d'Amérique du Sud tropicale, comprennent les piranhas (ou pirañas) qui, en bandes nombreuses, s'attaquent aux Animaux qui s'aventurent dans l'eau. Les genres *Metynnis, Myleus, Mylossoma* et *Colossoma* en sont relativement proches.

Les **Gymnotidés** *(Gymnotidae)* sont assez voisins des Characidés, mais les individus sont plus allongés, ne possèdent pas de nageoire dorsale ou ventrale, et la plupart d'entre eux ont des organes électriques.

La distribution géographique de la cinquantaine d'espèces qui constituent la famille s'étend, dans l'ensemble, du Guatemala au Rio de La Plata. *Electrophorus electricus,* l'anguille électrique d'Amérique du Sud, tire son oxygène de l'air, en sorte qu'elle doit se porter en surface tous les quarts d'heure au moins, sinon elle s'asphyxierait. Elle respire par l'intermédiaire d'un tissu vasculaire situé dans la bouche.

Les **Cyprinidés** *(Cyprinidae)* comprennent plus de douze cents espèces répandues dans toutes les zones tropicales et tempérées, à l'exception de l'Amérique du Sud, de l'Australie, de l'Antarctique, de Madagascar, et de nombreuses îles.

Comme ils sont essentiellement dulçaquicoles, ces Poissons sont généralement absents des îles et des archipels qui se sont séparés des continents à des périodes géologiques antérieures à l'apparition de ce groupe.

Certains Cyprinidés vivent dans des eaux de mer que l'apport de cours d'eau ou de glaciers d'origine continentale a beaucoup adoucies, par exemple dans la mer Baltique, et même en certains points des côtes méditerranéennes (lagunes et étangs saumâtres) où se déversent d'importants fleuves ou torrents. On observe en Extrême-Orient, dans des eaux de mer de densité moyenne, une espèce qui doit aller pour se reproduire dans des eaux dont la salinité n'est pas supérieure à 10 ‰.

Ces Poissons sont généralement allongés et un peu comprimés. Ils présentent une unique nageoire dorsale tronquée et dépourvue le plus souvent de rayons spiniformes à l'exception de certaines formes chez lesquelles le premier rayon est dur. Chez quelques espèces, le premier lépidotriche de la nageoire anale est spiniforme. La nageoire caudale est plus ou moins bilobée. La ligne latérale est plus fréquemment complète qu'incomplète. La tête est nue; les mâchoires et les autres os de la cavité orale sont dépourvus de dents; les os pharyngiens présentent, en une ou deux rangées, un nombre variable de structures caractéristiques, appelées dents pharyngiennes, qui représentent souvent un caractère taxonomique très important.

Mis à part quelques exceptions, les Cyprinidés ont des écailles cycloïdes, très développées, difficilement caduques; ils portent souvent des barbillons près de la bouche.

Pendant la période de reproduction, nombre d'espèces voient se développer sur leur tête, sur leur dos ou sur la partie supérieure des côtés de nombreuses formations cutanées cornées, appelées tubercules nuptiaux ou organes perliformes. Ceux-ci sont caractéristiques des mâles, bien qu'ils apparaissent aussi chez les femelles de certaines formes.

Chez la grande majorité des espèces, le régime est omnivore; une assez forte proportion est herbivore; rares sont celles qu'on peut considérer comme uniquement carnivores.

Il existe dans les eaux européennes une vingtaine de genres et quatre-vingts espèces environ, dont certaines ont une distribution géographique étendue et sont fréquemment différenciées en sous-espèces, alors que d'autres sont confinées à des territoires restreints.

Cyprinus carpio, la carpe, possède quatre barbillons; sur ses nageoires dorsale et anale, le premier rayon est spiniforme. Elle peut atteindre une longueur d'1 m et un poids d'environ 20 kg. Elle est probablement originaire d'Asie, mais aujourd'hui elle est présente dans une

A. Margiocco

▲ **Leporinus fasciatus** *(Characidés) des eaux douces du bassin de l'Amazone, dont on observera les zébrures régulières; le genre comprend des espèces de grande taille et agressives.*

▼ *Un piranha* (Serrasalmo sp.) *vivant dans l'Amazone.*

C. Bevilacqua

G. Mazza

C. Bevilacqua

▲ *A gauche, une ablette* **(Alburnus alburnus)** *dépourvue de barbillon; à droite, un cyprin doré* **(Carassius auratus)** *en livrée noire; les cyprins, ou poissons rouges, sont très communément élevés.*

grande partie du monde, et offre de nombreuses variétés. La variété commune a le corps entièrement recouvert d'écailles. La carpe miroir possède trois rangées de grosses écailles le long du corps. Quant à la carpe cuir, elle a la peau totalement nue.

Tinca tinca, la tanche, n'a que deux barbillons. Elle est commune dans les eaux douces de presque toute l'Europe et d'une partie de l'Asie occidentale, vivant dans les cours d'eau tranquilles ou dans les étangs à fond vaseux. Elle atteint 35 cm de longueur et pèse un peu plus d'1 kg.

Barbus barbus, le barbeau commun, qui possède quatre barbillons et atteint 60 cm de longueur, vit dans les fleuves et les lacs de l'Europe centrale et occidentale, notamment en France.

Phoxinus phoxinus, le vairon, habite communément les ruisseaux et les rivières de plaine, plus souvent encore les petits lacs et cours d'eau de montagne. On le rencontre dans une grande partie de l'Europe et en Asie occidentale. Il est dépourvu de barbillons, de même que de nombreuses autres espèces comme *Rutilus rubilio,* le gardon d'Europe méridionale, *Leuciscus souffia,* le blageon, *Leuciscus cephalus,* le chevaine, *Scardinius erythrophthalmus,* le rotengle, et *Alburnus alburnus,* l'ablette.

Carassius auratus, le carassin ou poisson rouge, présente une nageoire dorsale et une nageoire anale dont le premier rayon est spiniforme, comme chez la carpe, mais il ne possède pas de barbillons. Originaire de Chine, il a été exporté dans le monde entier. A l'état sauvage, il est de couleur brun verdâtre, mais il a subi des mutations. La carpe et le poisson rouge donnent des hybrides entre eux.

Les **Catostomidés** *(Catostomidae)* comprennent une centaine d'espèces, des eaux douces d'Amérique du Nord et d'Asie orientale, reconnaissables à leurs mâchoires dépourvues de dents et à leur bouche protractile et ventrale.

Certaines espèces du genre type *Catostomus* atteignent une longueur totale maximale de 70 cm, comme *C. catostomus,* le suceur rouge d'Amérique du Nord.

Les **Cobitidés** *(Cobitidae)* couvrent d'innombrables espèces, dont beaucoup sont riches en sous-espèces. On les trouve dans les eaux intérieures de l'Ancien Monde. Tous les Cobitidés ont une forme assez allongée, cylindrique, et de diamètre égal sur toute la longueur du corps. Ils ne possèdent pas de maxillaires; six barbillons entourent la bouche. Ils n'ont aucun rayon spiniforme. Quand elles ne manquent pas, leurs écailles sont minuscules.

Les Cobitidés présentent plus ou moins une sorte de respiration intestinale; l'air aspiré en surface est absorbé par les vaisseaux sanguins de l'épithélium intestinal. Ils peuvent donc peupler des eaux faiblement oxygénées.

Cobitis, le genre le plus commun, est pourvu d'une épine suboculaire mobile et est représenté en Europe par une dizaine d'espèces, dont certaines habitent nos régions.

Cobitis taenia, la loche de rivière, vit en Europe, en Afrique du Nord, en Transcaucasie orientale et dans certaines zones de la Turquie; il existe de nombreuses races géographiques.

Misgurnus fossilis, la loche d'étang, atteint une longueur maximale de 50 cm, et habite l'Europe centrale et occidentale.

Les **Homaloptéridés** *(Homalopteridae)* sont au nombre d'une soixantaine d'espèces. Ils présentent un cas intéressant d'adaptation au milieu, car ils sont communs dans les cours d'eau à régime torrentiel d'Asie et de la région indo-australienne; ils possèdent des nageoires paires discoïdales, formant ventouse, qui leur permettent de se fixer fermement à des substratums solides. En outre, de nombreuses espèces ont développé des dilatations du pharynx et des chambres branchiales, où elles conservent de petites quantités d'air qui facilitent leur respiration.

▼ *A gauche, le barbeau* **(Barbus barbus plebejus)** *vit dans les fleuves et les lacs en Italie; à droite, une loche du genre* **Cobitis,** *représenté en Europe par une dizaine d'espèces, dont certaines habitent nos régions.*

A. Margiocco

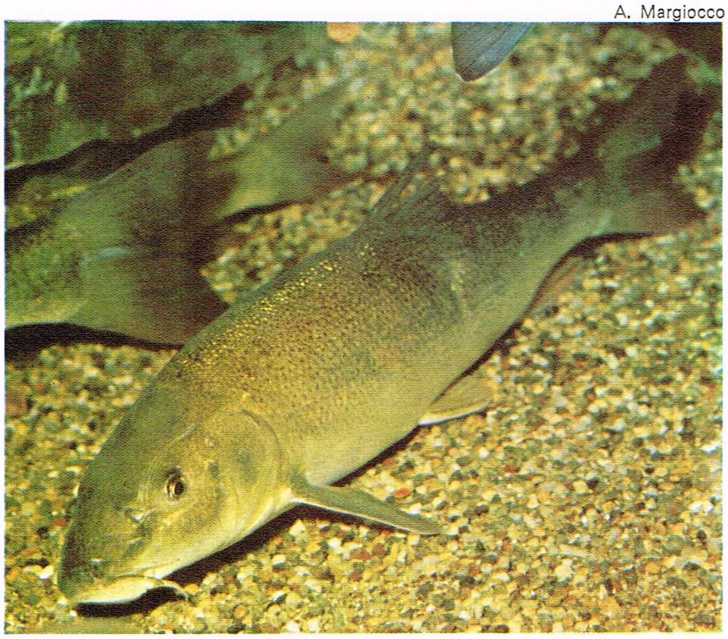

G. Mazza

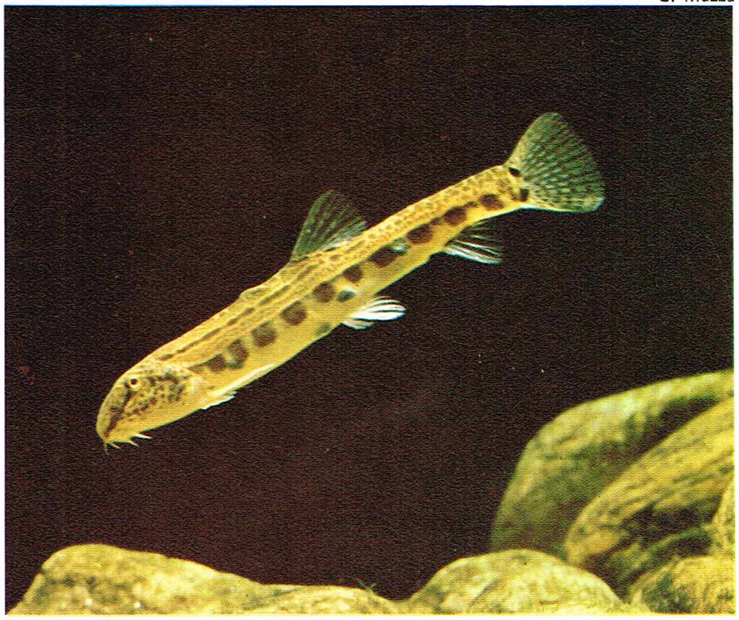

C. Bevilacqua

▲ **Un Corydoras;**
les espèces de ce genre, très nombreuses, sont pour la plupart facilement élevées en aquarium.

Ordre des Siluriformes

Les Siluriformes *(Siluriformes)* sont aussi appelés Nématognathes, car ils portent entre une et quatre paires de barbillons, souvent très longs. On les nomme aussi vulgairement poissons-chats ou silures.

Selon les groupes, leur peau est plus ou moins nue ou recouverte de plaques osseuses, caractère sur lequel se fonde leur classification.

Le premier rayon des nageoires pectorales et de la dorsale est souvent une robuste épine, parfois dentelée sur les bords et pourvue de glandes venimeuses. Les nageoires ventrales sont abdominales. La caudale est homocerque. La dorsale adipeuse est souvent présente, parfois bien développée. Il s'agit de physostomes, et ils possèdent des *osselets de Weber :* ce sont donc des Ostariophysies.

Leur aire géographique de distribution est vaste, essentiellement tropicale et subtropicale, aussi bien en eaux douces qu'en mer, en Amérique centrale et du Sud, en Asie et en Afrique. Il existe une seule espèce autochtone européenne. Les deux mille espèces connues actuellement sont réparties, selon les auteurs, en vingt-cinq à trente familles.

Les familles des Doradidés, Callichthyidés et Loricariidés forment le groupe des Siluroïdes cuirassés d'Amérique du Sud.

Les **Doradidés** *(Doradidae)* se distinguent facilement des autres Siluroïdes car leur cuirasse est composée d'une seule rangée de plaques dermiques osseuses situées le long des côtés, à mi-hauteur. Ils possèdent de quatre à six barbillons. On les nomme vulgairement poissons-marcheurs; ils ont en effet la capacité de se déplacer sur le sol émergé pour se rendre d'un cours d'eau à l'autre à l'aide de leurs nageoires pectorales. Celles-ci sont robustes et ont un premier rayon fort, dentelé et pourvu de glandes venimeuses.

Acanthodoras spinosissimus, le silure épineux, de la moyenne Amazone, atteint une longueur totale de 20 cm.

Les **Callichthyidés** *(Callichthyidae)* sont protégés par une cuirasse lisse, constituée par des plaques osseuses dermiques sur le tronc et la queue, réparties en deux rangées longitudinales de chaque côté et confluant à mi-hauteur. Leur grosse tête est aussi cuirassée. Ces Poissons portent deux barbillons à la mâchoire supérieure, et certaines espèces en possèdent deux autres à la mâchoire inférieure. Le premier rayon des nageoires pectorales et dorsales est spiniforme. Les espèces du genre *Corydoras,* au nombre de plusieurs dizaines, peuvent pour la plupart être élevées en aquarium.

Callichthys callichthys, le silure cuirassé du Brésil, atteint une longueur de 20 cm. Selon certains auteurs, il peut quitter le milieu aquatique pour se rendre d'un cours d'eau à un autre en se traînant sur la terre émergée. Son tube digestif largement vascularisé lui permettrait, en effet, de respirer l'oxygène atmosphérique.

Le corps des **Loricariidés** est recouvert d'une armature de plaques osseuses imbriquées. *Plecostomus, Otocinclus, Loricaria, Panaque* et d'autres formes sont essentiellement holophages; quant aux espèces du genre *Farlowella,* elles sont surtout végétariennes.

Les Asprédinidés, Clariidés, Siluridés et Pimélodidés appartiennent au groupe des Siluroïdes américains nus; ils sont dépourvus de cuirasse osseuse dermique, au moins sur une partie du tronc.

Les **Asprédinidés** *(Aspredinidae),* ou **Bunocéphalidés,** sont sud-américains; la plupart d'entre eux sont dulçaquicoles, bien que quelques-uns vivent dans les eaux saumâtres et salées. La femelle d'*Aspredinichthys tibicen* développe à l'époque du frai des tentacules spongieux, sur lesquels adhèrent les œufs fécondés.

Les **Clariidés** *(Clariidae)* possèdent des organes respiratoires accessoires, arborescents, reliés aux deuxièmes et quatrièmes arcs branchiaux, et logés dans des cavités communiquant avec les chambres branchiales. Leurs branchies seraient atrophiées au point d'être physiologiquement inutiles, de sorte que les individus se noieraient s'ils étaient empêchés de venir respirer en surface.

D. Faulkner

▲ ***Les Poissons du genre* Bunocephalus, *d'Amérique du Sud, sont partiellement dépourvus de cuirasse osseuse dermique et présentent des formes étranges.***

Ces Poissons sont originaires des eaux intérieures d'Afrique et des Indes orientales. *Clarias batrachus*, autochtone en Inde, à Ceylan, en Birmanie, etc., a été introduit dans certaines des îles Mariannes et Hawaï. Des espèces comme *Clarias lazera* d'Afrique se rencontrent jusque dans des puits de zones désertiques. Lors des périodes de sécheresse, elles survivent à l'état léthargique dans la vase.

Les **Siluridés** *(Siluridae)* habitent les eaux douces d'une bonne partie de l'Ancien Monde. Ils portent une paire de barbillons à la mâchoire supérieure, et une ou plusieurs paires à la mâchoire inférieure. La nageoire dorsale, quand elle n'est pas absente, est très courte et il n'y a jamais de dorsale adipeuse.

Silurus glanis habite l'Europe centrale. Il peut atteindre une longueur totale de 3 à 4 m pour 200 kg. C'est, après l'esturgeon, le plus gros Poisson des eaux intérieures de notre continent; on le trouve aussi dans une partie de l'Asie.

Les **Pimélodidés** *(Pimelodidae)*, répandus au Mexique et dans la plus grande partie de l'Amérique du Sud, possèdent des barbillons très longs (le plus souvent trois paires) et une nageoire dorsale adipeuse. Le premier rayon de la première dorsale et des nageoires pectorales est spiniforme.

Pimelodus clarias, qui atteint une longueur d'environ 30 cm, se trouve dans une aire comprise entre Panama et le Rio de La Plata. C'est pendant la nuit qu'il est en activité.

▼ ***Un* Synodontis *des eaux intérieures de l'Afrique tropicale; une espèce de ce genre,* S. nigriventris, *nage habituellement sur le dos.***

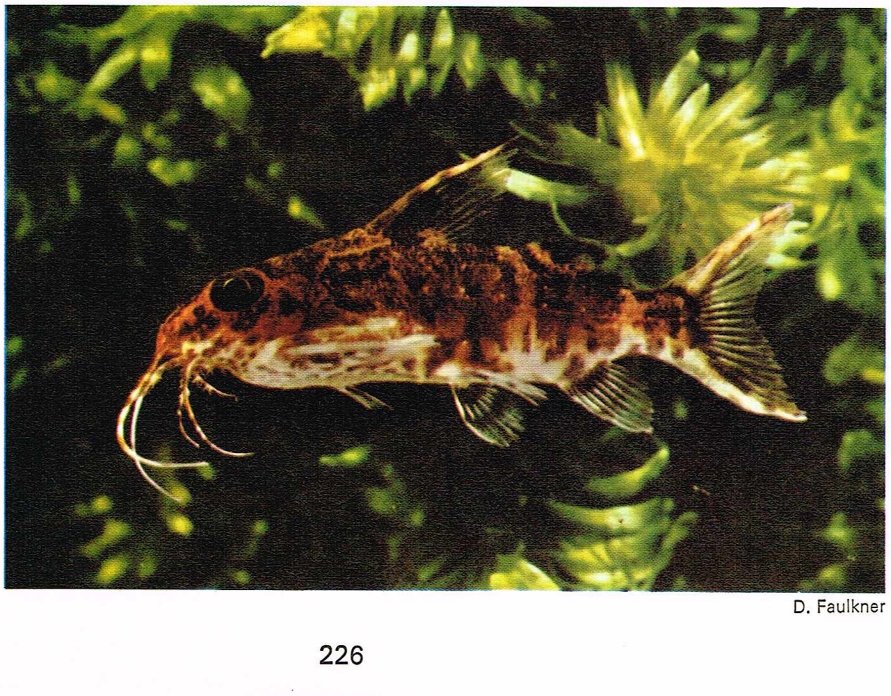

D. Faulkner

Les **Mochocidés** *(Mochocidae)*, limités aux eaux intérieures de l'Afrique tropicale, possèdent une cuirasse osseuse qui abrite la tête et la partie antérieure du tronc. Ils ont des barbillons dont certains au moins sont ramifiés, et une nageoire dorsale adipeuse. Parmi les cinq espèces du genre type *Synodontis*, l'espèce *Synodontis nigriventris* nage habituellement le ventre en l'air.

Les **Ictaluridés** *(Ictaluridae)*, groupés en une cinquantaine d'espèces, habitent les eaux intérieures du continent américain, du Guatemala au Canada. On les reconnaît facilement, notamment à leurs quatre paires de barbillons et à leur nageoire dorsale adipeuse. Le premier rayon de leurs pectorales et de la première dorsale est aigu et peut provoquer de douloureuses blessures.

On a importé des espèces du genre type *Ictalurus* dans les eaux européennes; on les confond facilement entre elles, et elles donnent en outre des hybrides. *Ictalurus melas*, originaire de l'Ontario et des régions centrales des États-Unis, a été importé en Europe au début du siècle; c'est le poisson-chat. Il vit dans les eaux lentes, stagnantes, et même vaseuses ou polluées. Il peut exceptionnellement atteindre une longueur totale de 0,50 m pour un poids de 1,5 kg.

Parmi les **Malaptéruridés** *(Malapteruridae)* on peut citer le silure électrique *(Malapterurus electricus)*, à qui il arrive de dépasser une longueur totale de 1 m; il possède six barbillons et porte sur le dos une seule petite nageoire, adipeuse. Cet Animal émet des décharges électriques d'environ 100 V, orientées de la tête vers la queue. L'organe électrique se présente sous forme d'une enveloppe entourant presque tout le corps.

Le silure électrique habite l'Afrique centrale et la vallée du Nil. Il se tient plus volontiers dans les fonds bas, vaseux, riches en végétation. Il est actif surtout la nuit.

Ordre des Anguilliformes

Les Anguilliformes *(Anguilliformes)* sont aussi nommés Apodes *(Apoda)* car ils n'ont pas de nageoires ventrales. Leur corps est serpentiforme, couvert ou non d'écailles rudimentaires. Leurs nageoires ne possèdent jamais de rayon spiniforme; la dorsale et l'anale, quand elles existent, sont très longues, réunies à la caudale. Celle-ci peut elle aussi manquer. Les Anguilliformes ont une ceinture scapulaire séparée du crâne, quand elle n'est pas absente, et leurs oviductes sont atrophiés. Les œufs sont évacués par un pore abdominal.

Leur sang contient une ichthyotoxine, qui agit sur le système nerveux mais qui est détruite par la cuisson.

Leur développement s'accompagne d'importantes métamorphoses : les œufs donnent le plus souvent une prélarve, qui passe ensuite à l'état de leptocéphale rubaniforme, puis une semi-larve leptocéphale cylindrique, forme transitoire, et enfin un adulte. La taille de ces Animaux s'accroît au cours de la phase larvaire, puis diminue lors des stades semi-larvaire et transitoire; la croissance reprend ensuite son cours.

Les **Anguillidés** *(Anguillidae)* possèdent de minuscules écailles cycloïdes incluses dans la peau et donc difficiles à discerner. Cette famille comprend environ seize espèces.

Anguilla anguilla, l'anguille, connaît une très vaste distribution géographique : les zones tempérées et tropicales de l'océan Atlantique, la Méditerranée, les eaux intérieures d'Europe, d'Afrique du Nord et de Palestine, et les parages de certaines îles atlantiques.

L'aire de reproduction de l'anguille, qui peuple les bassins hydrographiques débouchant sur l'océan Atlantique et les mers adjacentes, se trouve certainement à plusieurs centaines de mètres de profondeur, dans la mer des Sargasses. Les adultes y meurent, après avoir frayé. Les œufs pondus flottent jusqu'à la surface, et donnent des larves, qui retournent aux eaux continentales, voyage qui peut durer plusieurs années.

Les leptocéphales, quand ils ont atteint une longueur de 7 à 10 mm, se raccourcissent, et prennent une forme cylindrique au fur et à mesure qu'ils se rapprochent des zones côtières. Ce sont les civelles, ou piballes, qui se rassemblent en grand nombre à l'embouchure des cours d'eau, avant de les remonter. Selon certains auteurs, la gamétogenèse débuterait seulement chez les petites anguilles de 20 cm de longueur.

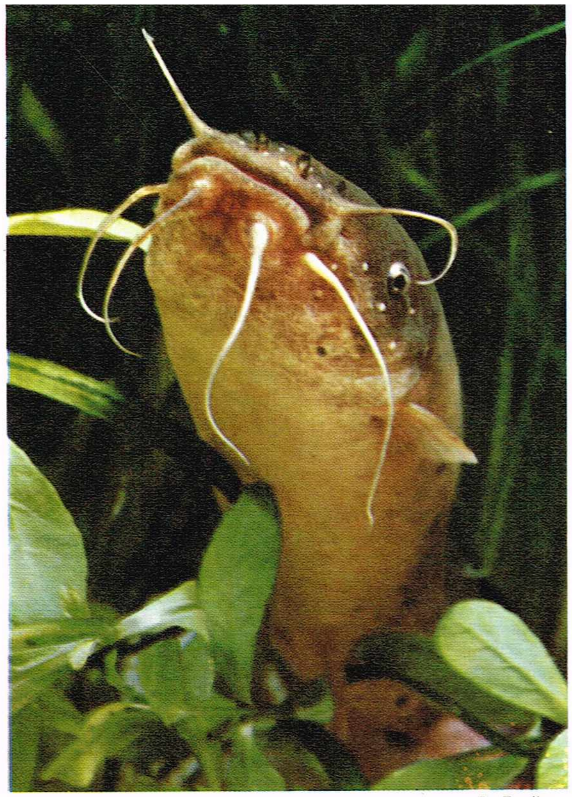

D. Faulkner

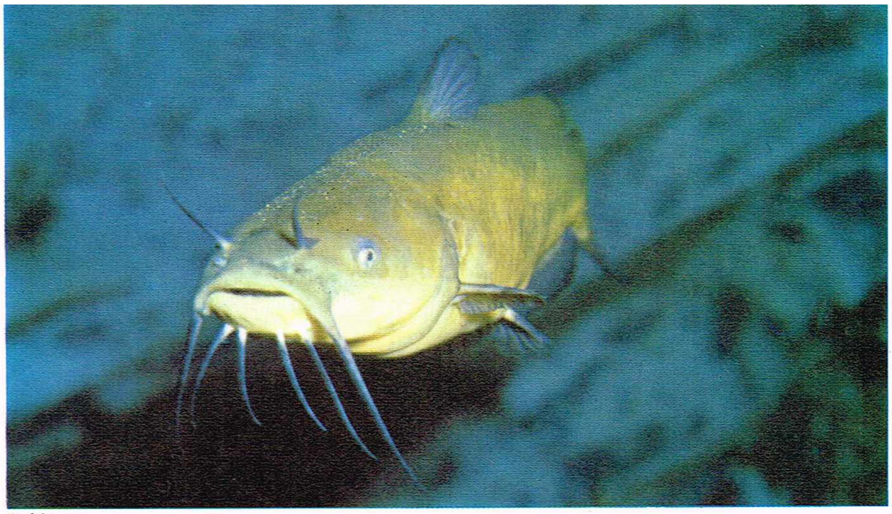

G. Mazza

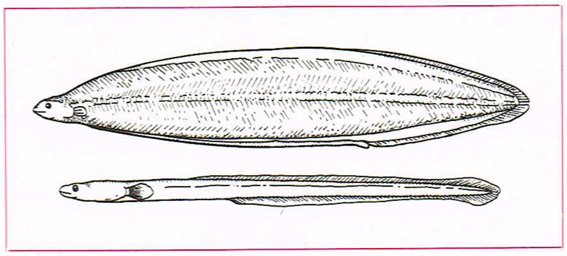

I.G.D.A.

◀▲ *A gauche, silure électrique* (**Malopterurus ou Malapterurus electricus**), *bien connu, des eaux africaines. A droite, en haut,* **Ictalurus** *ou poisson-chat, originaire des eaux douces d'Amérique du Nord; les représentants du genre portent des barbillons. En bas, leptocéphale (en haut) et jeune anguille métamorphosée (en bas).*

Alors que les anguilles en voie de croissance sont appelées anguilles jaunes (leur ventre et leurs flancs sont en effet de cette couleur), à six ou sept ans, elles deviennent anguilles argentées (les femelles seulement vers l'âge de huit à dix ans). Les mâles argentés mesurent au plus 50 cm de longueur, tandis que les femelles argentées ont 1 m. Les anguilles argentées redescendent à la mer en septembre ou octobre, pour retourner vers la mer des Sargasses.

Les **Murénidés** *(Muraenidae)* ne possèdent ni ceinture ni nageoires pectorales, et leurs fentes branchiales sont réduites. On a recensé une douzaine de genres et environ quatre-vingts espèces, dont certaines atteignent une longueur d'environ 3 m. Leur diffusion est assez large, concentrée surtout dans les mers tropicales et tempérées. Les activités des Murénidés sont nocturnes; le jour, ils se cachent dans des trous de rochers près des côtes.

Muraena helena, la murène européenne, est très commune en Méditerranée. Elle atteint exceptionnellement une longueur de 1,50 m.

Les **Congridés** *(Congridae)* comptent de nombreux genres et de très nombreuses espèces, abondamment répandues dans presque toutes les mers. *Conger conger,* le congre, qui atteint 2,80 m de long, est commun dans l'Atlantique. On connaît aussi, dans l'océan Atlantique et en Méditerranée, des espèces du genre *Ariosoma.*

Les **Ophichthidés** *(Ophichthidae)* comprennent environ deux cents espèces de Poissons dont la robuste queue, pointue, leur sert à creuser les fonds meubles pour s'y enfouir. Ordinairement, les pectorales manquent ou sont très réduites. On observe communément en Méditerranée *Ophisurus serpens,* qui ne possède pas de nageoire caudale.

Les **Némichthyidés** *(Nemichthyidae)* sont parmi les plus allongés et les plus fins des Poissons. Leur queue, très longue, est presque filamenteuse. Leurs mâchoires sont également très longues, fines, et divergent l'une de l'autre distalement.

Nemichthys scolopaceus, qui peut atteindre 1,50 m de longueur, est nettement eurybathe, et se rencontre dans la Méditerranée et l'océan Atlantique.

Pulitzer

◀ **Muraena helena;** *les activités des Murénidés sont nocturnes.*
▼ *A gauche,* **Gymnothorax moringa,** *des côtes de Floride. A droite,* **Ariosoma balearica,** *de la famille des Congridés.*

D. Faulkner

G. Mazza

J. C. Bacle - Pitch

▲ *Les Exocétidés sont pourvus de nageoires pectorales très développées qui leur permettent de planer hors de l'eau sur de très longues distances; ici, un spécimen de poisson volant.*

▼ *A gauche, mâle (coloré) et femelle (terne) de* **Lebistes reticulatus**, *communément nommé guppy. A droite,* **Xiphophorus helleri**, *le xipho ou porte-glaive de Heller.*

Ordre des Béloniformes

Les Béloniformes *(Beloniformes* ou *Synentognathi)* n'ont pas de rayons spiniformes. Le plus souvent, leurs nageoires anale, dorsale et ventrales sont situées très en arrière de la masse du corps, dans la moitié inférieure duquel vient se placer la ligne latérale. L'ordre compte environ cent vingt espèces, réparties en quelque quatre familles.

Sous-ordre des Scomberésocoïdes

Les **Bélonidés** *(Belonidae)* ont des mâchoires très allongées, formant un rostre. Leurs nageoires pectorales sont assez petites. On en connaît environ soixante espèces, habitant pour la plupart toutes les mers tempérées et tropicales; certaines font des incursions dans les eaux saumâtres et même douces.

On trouve fréquemment, dans l'est de l'océan Atlantique et en Méditerranée, *Belone belone,* l'orphie, dont la taille moyenne est de 70 cm.

La forme générale des **Scomberésocidés** *(Scomberesocidae)* est semblable à celle des Bélonidés, mais ils possèdent des mâchoires courtes et une série de cinq à sept pinnules en arrière des nageoires dorsale et anale.

Scomberesox saurus, le balaou, habite la Méditerranée et l'océan Atlantique. Il mesure de 30 à 45 cm de longueur et se reproduit en automne.

Les **Hémiramphidés** *(Hemiramphidae)* sont caractérisés par la présence d'une longue mandibule et d'une mâchoire supérieure réduite (d'où le nom courant de « demi-bec »). Leurs nageoires pectorales sont développées; chez certaines espèces, de plus, le lobe inférieur de la nageoire caudale est plus développé que le supérieur.

Les Hémiramphidés comptent une vingtaine d'espèces, pour la plupart marines, des zones chaudes et tempérées; quelques-unes cependant vivent dans des eaux saumâtres et douces des zones tropicales.

Sous-ordre des Exocœtoïdes

Chez les **Exocœtidés** *(Exocoetidae)* ou **Exocétidés** les nageoires pectorales sont si développées qu'elles permettent au Poisson, une fois qu'il a sauté hors de la mer, de planer sur une distance qui peut atteindre plusieurs centaines de mètres.

Exocoetus volitans, le poisson volant, est cosmopolite; il atteint de 18 à 25 cm de longueur. *Cypsilurus heterurus* est commun en Méditerranée et dans l'océan Atlantique.

Ordre des Cyprinodontiformes

Les Cyprinodontiformes *(Cyprinodontiformes* ou *Microcyprini)* possèdent des nageoires sans épines. Les ventrales sont abdominales ou absentes, et la ligne latérale est rudimentaire.

La reproduction est souvent vivipare, et on peut utiliser ce terme — plutôt que celui d'ovovivipare — car les embryons sont nourris par des sécrétions ovariennes spéciales, les œufs contenant parfois très peu de vitellus. Naturellement, la fécondation est fréquemment interne, du fait de la « viviparité » (ou ovoviviparité); à cet effet, des rayons de la partie antérieure de la nageoire anale du mâle sont allongés, formant un organe copulateur, ou gonopode.

Les **Cyprinodontidés** *(Cyprinodontidae)* comptent plus de deux cents formes, dulçaquicoles, d'eaux saumâtres ou marines, répandues dans les régions tempérées et tropicales de l'Ancien et du Nouveau Monde.

C. Bevilacqua

C. Bevilacqua

La famille est divisée en plusieurs sous-familles : Cyprinodontinés dont les principaux genres sont *Cyprinodon, Aphanius* et *Jordanella,* Fundulinés avec *Fundulus, Leptolucania, Chriopeops,* etc., Rivulinés avec *Aplocheilus, Epiplatys, Rivulus, Nothobranchius, Cynolebias, Pterolebias,* etc.

Parmi les diverses espèces que compte la sous-famille des Rivulinés, certaines sont nommées « poissons annuels ». Dans les régions de l'Afrique et de l'Amérique du Sud où une période de pluies succède à une période sèche, les collections temporaires d'eau formées lors des pluies s'assèchent peu à peu, ce qui provoque la mort ou le passage à l'état de vie latente de leur faune aquatique. Quand les mares ou étangs sont sur le point de se dessécher, les poissons annuels s'accouplent et ensevelissent leurs œufs dans le fond ou parmi les Mousses ; ils écloront au retour de la saison humide.

Aphanius fasciatus, le cyprinodonte d'Europe méridionale, habite toute la bordure méditerranéenne, du midi de la France jusqu'à la Turquie, à Chypre et à Rhodes. Il atteint une longueur totale de 8 cm. Ce petit Poisson, très commun dans les eaux saumâtres, peut aussi vivre en eaux douces, salées, et même hypersalées.

Gambusia affinis, le gambusie, vivipare et à fécondation interne, est originaire des États-Unis. On l'a importé dans de nombreuses régions pour lutter contre les larves d'anophèles.

Les **Pœciliidés** *(Poeciliidae)* comprennent au moins cinquante-cinq genres uniquement américains. Ce sont des Poissons ovovivipares et à fécondation interne. L'organe copulateur mâle, le gonopode, est constitué par des rayons antérieurs de la nageoire anale, modifiés et allongés. Nombreuses sont les formes de Pœciliidés qui présentent des cas de faux gonochorisme, la femelle devenant mâle après avoir engendré un certain nombre de fois.

Les genres les plus importants sont *Poecilia, Mollienisia* (les mollies), *Lebistes, Xiphophorus, Belonesox* et *Heterandria.*

Lebistes reticulatus, le guppy, est élevé par presque tous les aquariophiles ; les mâles présentent des couleurs et un développement des nageoires fort divers.

Xiphophorus helleri, le porte-glaive ou xipho, et *X. maculatus,* le platy, qui s'hybrident très facilement, ont été multipliés abondamment par les éleveurs.

Ordre des Syngnathiformes

Les Syngnathiformes *(Syngnathiformes)* sont de petits Poissons, aux formes insolites, et au corps recouvert de petites plaques osseuses de section polygonale. Les nageoires ventrales et la nageoire caudale manquent souvent. Le museau est allongé, tubuliforme, avec une petite bouche terminale sans dents.

Il existe sept familles de Syngnathiformes, répandues surtout dans les mers tempérées et chaudes, bien qu'on puisse aussi les trouver dans les mers froides.

La famille des **Syngnathidés** *(Syngnathidae)* compte deux douzaines d'espèces d'hippocampes, et environ cent cinquante espèces d'aiguilles ou syngnathes.

Ordre des Gadiformes

Les Gadiformes *(Gadiformes* ou *Anacanthini)* possèdent des nageoires sans épines. Ils ont des ventrales jugulaires, et une caudale géphyrocerque. Ce sont des physoclistes.

Il existe plusieurs familles et des centaines d'espèces. Les familles sont actuellement définies en fonction de la structure de la ceinture pectorale, du crâne, de la vessie natatoire, etc.

Les **Gadidés** *(Gadidae)* habitent principalement les eaux froides et tempérées, soit à profondeur réduite dans les hautes et moyennes latitudes, soit en profondeur sous les basses latitudes. Sauf de très rares exceptions, tous sont marins et ont le plus souvent une grande importance du point de vue économique.

Gadus callarias, la morue, ou cabillaud, vit communément dans l'océan Atlantique septentrional, la mer Baltique et la mer du Nord. Elle atteint généralement une longueur maximale de 1,10 m pour un poids de 15 kg, à l'âge de vingt ans. Sa couleur fondamentale varie en fonction du milieu, mais elle porte toujours des taches brunes. Elle possède trois nageoires dorsales, deux anales et un barbillon.

C'est un prédateur vorace, qui se rend dans les eaux côtières, au printemps et en automne, pour s'y reproduire.

Pollachius virens, le lieu noir, et *Micromesistius poutassou,* le merlan, sont tous deux communs dans la Méditerranée et l'océan Atlantique oriental.

Merluccius merluccius, le merlu, est parfois placé parmi les Gadidés, mais souvent aussi dans une famille spéciale, les Merluccidés. Il mesure environ 80 cm de longueur ; il est gris sur le dos et blanc ventralement ; il possède deux nageoires dorsales et une anale, mais pas de barbillon.

Lota lota, la lotte, est commune dans les eaux douces d'Europe, d'Asie et d'Amérique du Nord. Elle mesure environ 80 cm de longueur totale. Son corps est allongé. Elle possède deux nageoires dorsales, dont la seconde est semblable à l'anale, et un barbillon. Son corps est marbré de taches jaunâtres et brunes.

Ordre des Macrouriformes

Le corps des Macrouriformes *(Macrouriformes)* se termine par une queue longue et pointue. Leur museau est proéminent. Ils ont de gros yeux, et leurs écailles sont cténoïdes. Ils possèdent deux nageoires dorsales, dont la seconde est longue, semblable à l'anale et presque opposée à celle-ci.

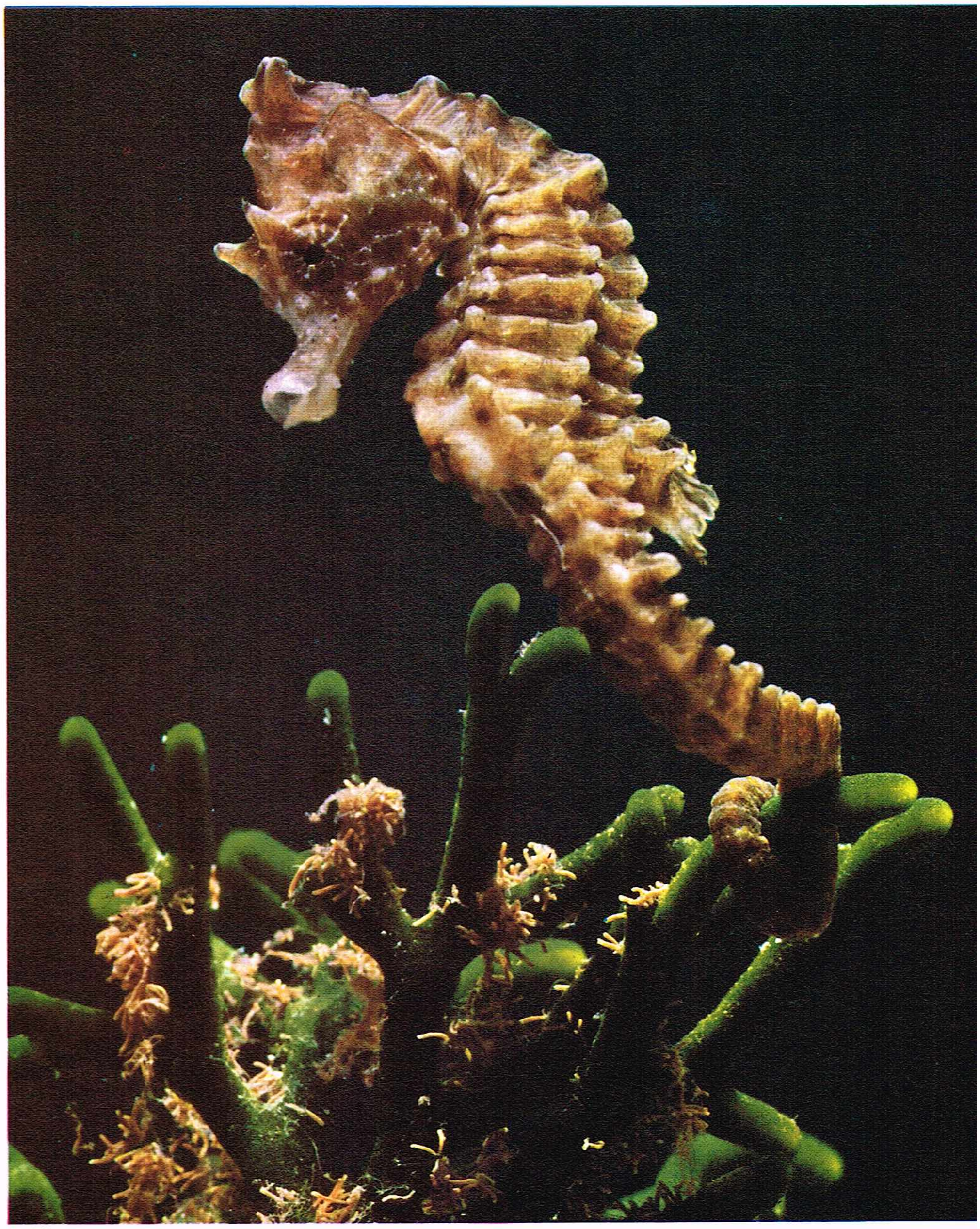

G. Mazza

▲ ***Les Syngnathiformes sont de petits Poissons aux formes insolites, qui comprennent en particulier les hippocampes, dont on voit ici une des nombreuses espèces.***

D. Faulkner

▲ **Holocentrus ruber**, *ou holocentre rouge, appartient à la famille des Holocentridés, uniquement marine.*

Les **Macrouridés** *(Macrouridae)* ou « queues-de-rats » habitent le plus souvent des eaux assez profondes. On trouve dans la Méditerranée et dans l'est de l'océan Atlantique *Coelorhynchus coelorhynchus*, le cœlorhynque, *Hymenocephalus italicus*, l'hyménocéphale, et *Trachyrhynchus scabrus*, le trachyrhynque.

Ordre des Lampridiformes

Les **Lampridés** *(Lampridae)* comptent une espèce unique, *Lampris regius*, le lampris ou opah, cosmopolite, à profil ovalaire, à bouche dépourvue de dents et à nageoire caudale fortement bilobée. Il est gris-bleu sur le dessus, et rose ou rougeâtre ventralement, piqueté de taches argentées sur les flancs. Ses yeux et ses mâchoires sont cerclés de doré, ses nageoires vermillon. Il peut atteindre une longueur de 1,80 m pour un poids de 250 kg.

Les **Trachyptéridés** *(Trachypteridae)* sont rubaniformes, très allongés, comprimés et d'aspect fragile. De couleur argentée, ils ne possèdent pas de nageoire anale, et leur dorsale s'étend sur toute la longueur du corps à partir de la tête; leur caudale, triangulaire, est située dorsalement.

Trachypterus trachypterus, le trachyptère commun, habite la Méditerranée et l'océan Atlantique oriental. Il mesure de 2,40 m à 3 m de longueur.

Les **Régalécidés** *(Regalecidae)* ne comprennent que *Regalecus glesne*, le régalec ou « roi des harengs », rubaniforme, à nageoire dorsale étendue sur tout le dos, à ventrales filamenteuses, et à nageoire caudale composée de quelques filaments libres non réunis par une membrane; il peut atteindre plus de 6 m.

▼ **Zeus faber**, *le saint-pierre, vit sur les fonds sableux et vaseux.*

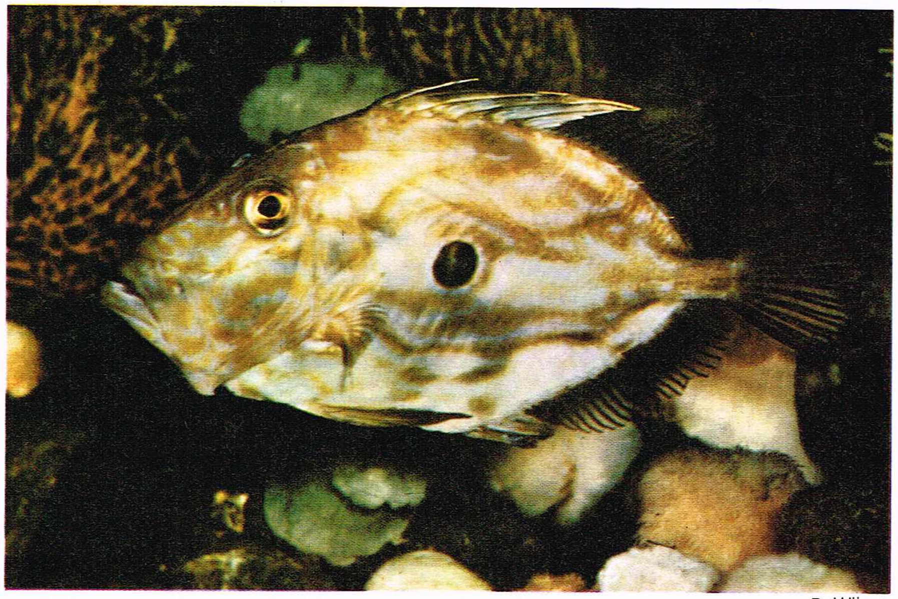

D. Wilson

Ordre des Béryciformes

Les Béryciformes *(Beryciformes)* ont un corps ovalaire, une grosse tête, et de gros yeux. Les premiers rayons de la nageoire dorsale sont spiniformes; leurs ventrales sont thoraciques, et la caudale est bilobée.

On connaît actuellement seize familles, essentiellement bathyphiles.

Si les **Bérycidés** *(Berycidae)* ne comptent que quelques genres, leur distribution géographique, par contre, est vaste.

Dans la Méditerranée et l'océan Atlantique habite *Beryx decadactylus*, le béryx rouge, qui mesure plus de 0,50 m de longueur. Il possède quatre rayons spiniformes et de dix-huit à vingt rayons mous sur la dorsale. Il est de couleur rouge, et très apprécié pour sa chair, ainsi que *Beryx splendens* du golfe de Gascogne (quatorze à seize rayons mous à la dorsale).

Les **Holocentridés** *(Holocentridae)* arborent de splendides couleurs, à dominante rouge ou rougeâtre. Il en existe environ soixante espèces, essentiellement circumtropicales, et uniquement marines. Elles apprécient les zones rocheuses et les formations madréporiques.

Ordre des Zéiformes

Les **Zéidés** *(Zeidae)* se reconnaissent facilement à la série de piquants ou de plaques qui arment de chaque côté la base de leurs nageoires dorsale et anale, ainsi qu'à la présence d'une rangée d'éléments spiniformes le long de la carène abdominale.

Dans la Méditerranée et l'est de l'océan Atlantique vit *Zeus faber*, le saint-pierre ou dorée ou poule de mer. Ses écailles sont toutes petites, gris jaunâtre. Il présente, sur les flancs, une tache noire ronde bordée de blanc. Il mesure au plus 50 cm de longueur et vit sur les fonds sableux et vaseux, jusqu'à une profondeur de 150 m. Il est très apprécié des gourmets.

Ordre des Perciformes

Les Perciformes *(Perciformes)* forment l'ordre le plus vaste des Ostéichthyens.

Ils ont un corps fuselé, aux écailles cténoïdes ou cycloïdes lorsqu'elles sont présentes. Leurs nageoires sont normalement pourvues d'un certain nombre de rayons spiniformes; les ventrales, lorsqu'elles existent, sont habituellement thoraciques. Ce sont des physoclistes. Ils comptent environ mille huit cents espèces réparties en cent vingt-cinq familles et de nombreux sous-ordres.

Sous-ordre des Percoïdes

Les Percoïdes *(Percoidei)* possèdent généralement des nageoires ventrales thoraciques; la dorsale est le plus souvent unique. Ces Poissons datent, semble-t-il, du Crétacé. Il en existe environ quatre-vingt-cinq familles; c'est le groupe de Perciformes le plus vaste.

Les **Serranidés** *(Serranidae)* comptent environ quatre cents formes, dans leur grande majorité marines; quelques-unes peuvent gagner les eaux douces, et rares sont les dulçaquicoles strictes. La plus grande partie des espèces marines sont tropicales; peu habitent les eaux tempérées, et on n'en trouve aucune dans les latitudes extrêmes. Les Serranidés, en majorité benthiques, et pour une part nectoniques, sont carnivores et voraces.

Certaines espèces deviennent adultes arrivées à la taille de 3 cm alors que pour d'autres, le seuil est à 1,20 m. Une espèce atteint 4 m pour un poids d'une demi-tonne. Il existe des cas de faux gonochorisme, par exemple chez *Centropristes striatus*, dont les juvéniles sont surtout femelles: arrivées à maturité, elles pondent des œufs normaux, et, à l'âge de cinq ans environ, elles changent en général de sexe, devenant des mâles véritables.

Ces Poissons ont le plus souvent une bouche, grande, avec de fortes dents aux mâchoires et au palais. Le bord de leur préopercule est denticulé. Leur opercule présente d'une à trois pointes dirigées vers l'arrière. Ils possèdent au plus une unique nageoire dorsale, très longue, mais certains genres en possèdent deux, distinctes; la première dorsale ou la première partie de la dorsale unique est faite d'épines; la seconde, ou la partie arrière de la dorsale unique, de rayons mous.

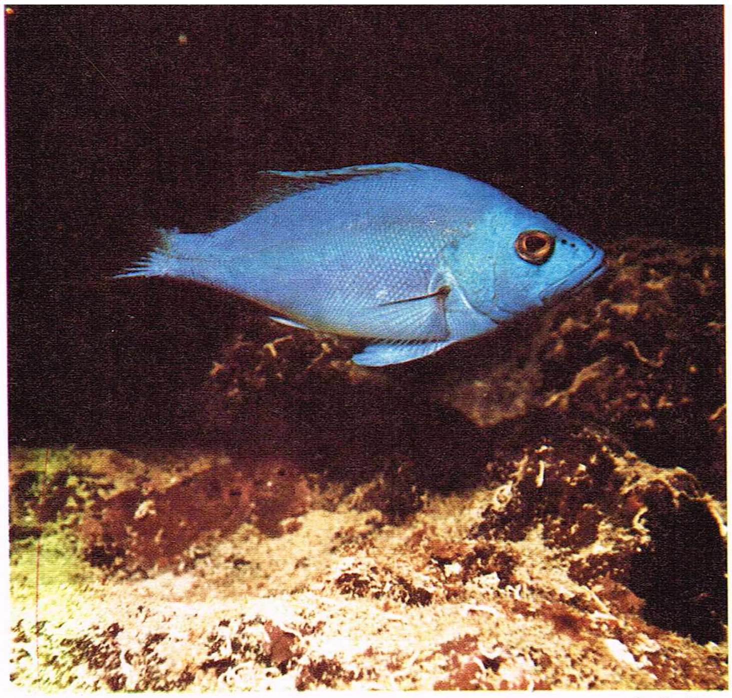

D. Faulkner

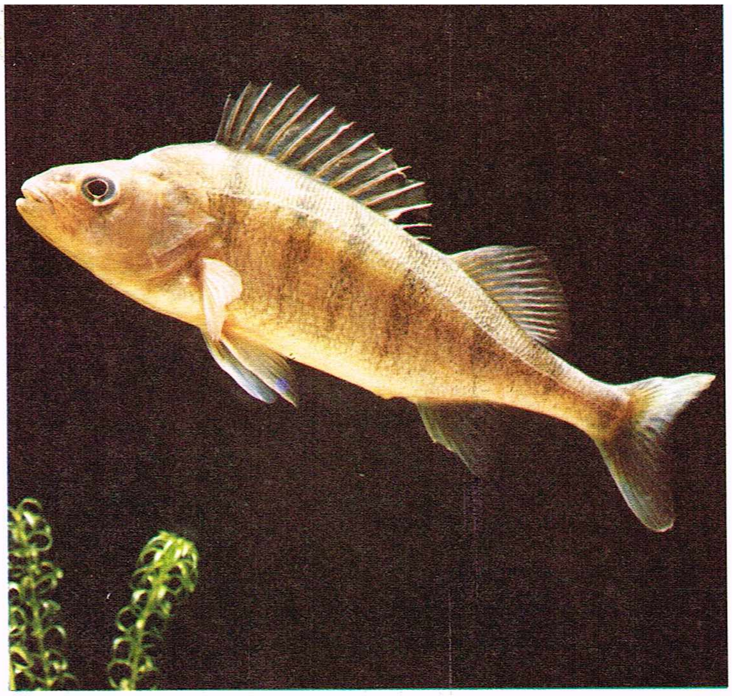

G. Mazza

▲ ***A gauche,* Hypoplectrus, *des mers de Floride, est un Serranidé, Poisson vorace et carnivore. A droite,* Perca fluviatilis, *la perche, que l'on trouve dans une grande partie des eaux douces de l'Eurasie.***

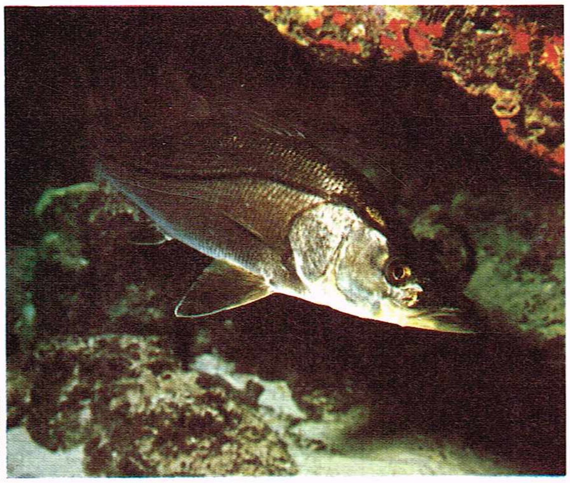

D. Faulkner

◀ **Centropomus undecimalis *(Centropomidés), des côtes de la Floride.***

Dicentrarchus labrax, le bar, ou loup, porte deux nageoires dorsales; sa longueur totale est de 1 m environ, et il pèse jusqu'à 15 kg. Ce Poisson vorace est communément pêché en Méditerranée et dans l'est de l'océan Atlantique. Il est grégaire, surtout à l'état juvénile.

Polyprion americanum, le cernier, et le mérou, de Méditerranée et de l'océan Atlantique, sont très appréciés des plongeurs sous-marins. Les *Serranus,* ou serrans, plus petits que les précédents, sont hermaphrodites.

Les **Centrarchidés** *(Centrarchidae),* originaires des eaux intérieures d'Amérique du Nord, sont maintenant largement répandus dans l'Ancien Monde. Leur morphologie est semblable à celle des Percidés, mais ils s'en distinguent par leur nageoire dorsale unique, dont la partie épineuse et la partie à rayons mous sont séparées par une encoche.

On a introduit dans les eaux intérieures d'Europe des espèces des genres *Lepomis,* ou perches-soleils, et *Micropterus,* ou black bass.

Les **Percidés** *(Percidae)* sont au nombre d'une centaine d'espèces, dans les eaux intérieures d'Eurasie et d'Amérique du Nord, certaines dans les eaux saumâtres. Ils possèdent généralement deux nageoires dorsales distinctes mais contiguës, la première portant des épines.

On trouve dans une grande partie de l'Eurasie *Perca fluviatilis,* la perche proprement dite, qui a au maximum 40 cm de longueur.

Lucioperca lucioperca, le sandre, habite l'Europe centrale. Il peut atteindre une longueur totale de 1 m.

On rencontre aussi en Europe *Acerina cernua,* la grémille, et diverses espèces du genre *Aspro.*

Les **Carangidés** *(Carangidae),* avec quelque deux cents espèces, peuplent les mers tropicales et tempérées du monde entier; certaines pénètrent dans les eaux saumâtres. Leur forme, assez variable, est généralement comprimée. Des deux nageoires dorsales, la première est épineuse. La nageoire anale a deux épines; la nageoire caudale est plus ou moins fourchue. La ligne latérale de ces Poissons est formée d'écailles normales ou de gros écussons losangiques, armés d'un piquant, surtout à la partie caudale. Elle est souvent très arquée dans sa partie antérieure.

Ces Poissons sont pélagiques, habituellement grégaires, et excellents nageurs; leur chair est bonne.

Parmi les espèces de nos mers, *Trachurus trachurus,* le chinchard, est caractérisé par les écussons qui se disposent tout le long de la ligne latérale. Les plus grands ne dépassent pas une longueur de 0,50 m. *Seriola dumerili,* la sériole, mesure jusqu'à 2 m, et *Lichia amia,* le liche, 1 m. *Naucrates ductor,* le poisson-pilote, long de 60 à 70 cm, se reconnaît facilement à sa livrée gris bleuté aux larges bandes verticales bleu-noir. Il est cosmopolite.

Les **Coryphænidés** *(Coryphaenidae)* comprennent une espèce unique, ou à la rigueur deux, très proches l'une de l'autre. Leur corps est allongé et comprimé, recouvert d'écailles très petites et cycloïdes. Leur mandibule est proéminente. Leur nageoire dorsale est très longue, allant de la tête au pédoncule caudal. La nageoire anale est aussi étendue en arrière que la dorsale, et la caudale nettement bifurquée.

Ce sont des Animaux pélagiques, cosmopolites, excellents nageurs et prédateurs voraces d'autres Poissons, comme les Exocétidés. Très répandus dans les mers chaudes, ils pénètrent aussi dans la Méditerranée. Leur chair est excellente.

Coryphaena hippurus, le coryphène doré, atteint une longueur totale d'environ 1,50 m pour un poids de 30 kg.

Les **Centropomidés** *(Centropomidae)* forment un groupe très diversifié par la forme et les mœurs. Il en existe des espèces aussi bien marines que d'eau douce, pouvant passer de la mer aux lagunes salées et aux cours

▼ ***Un mérou à l'ample ouverture buccale.***

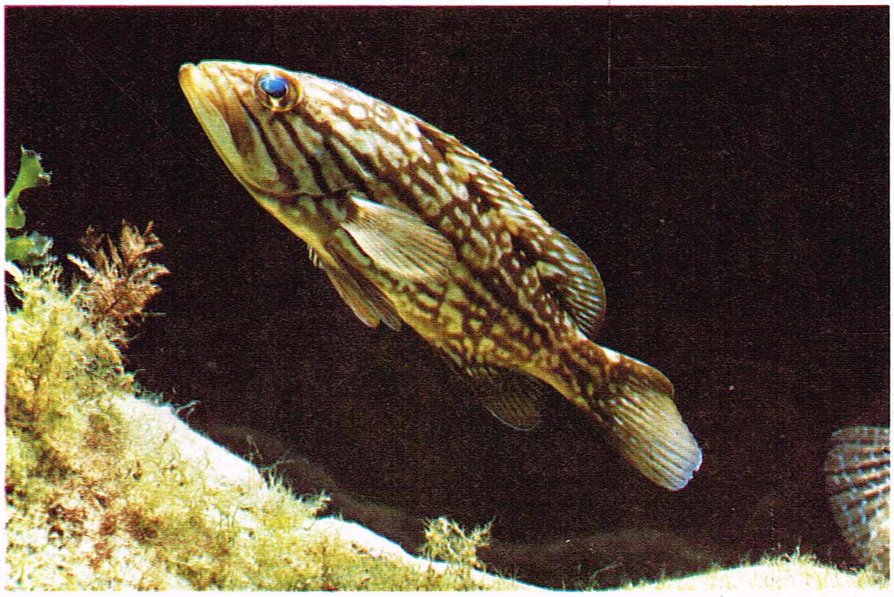

G. Mazza

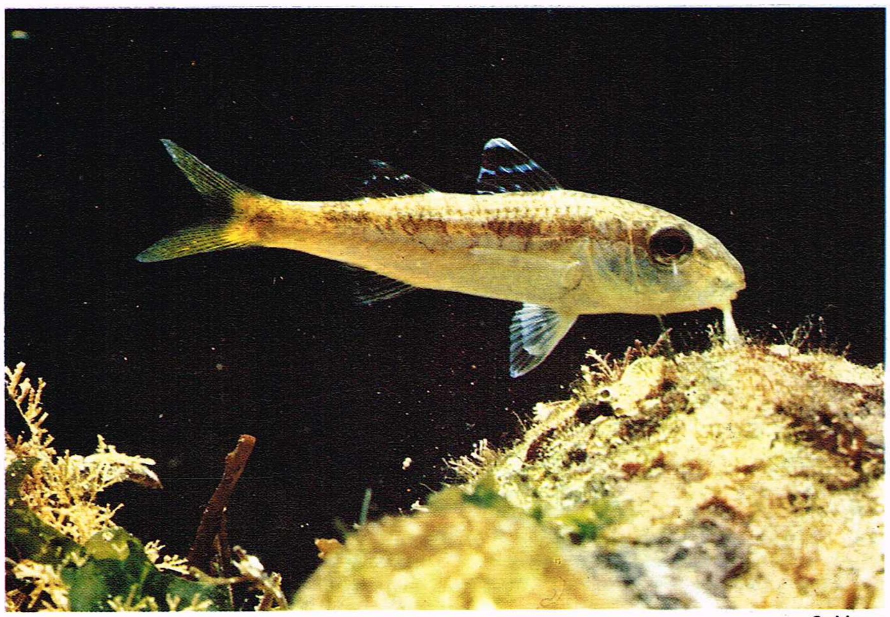

G. Mazza

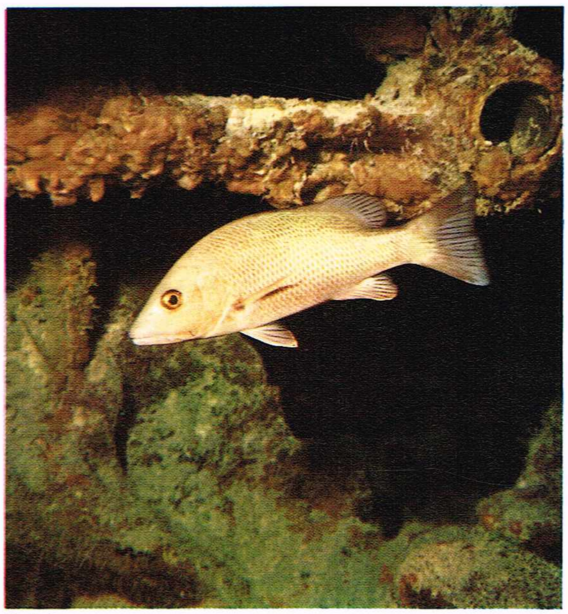

R. Dei

▲ *A gauche, surmulet ou rouget de roche* **(Mullus surmuletus).** *A droite,* **Lutjanus griseus,** *ou lutjan gris, appartient aux Lutjanidés, essentiellement marins et tropicaux.*

G. Mazza

G. Annunziata

▶ *A gauche,* **Gaterin chaetodonoides** *(Chætodontinés). A droite, deux lithognathes* **(Lithognathus mormyrus)** *appartenant à la famille des Sparidés.*

d'eau. *Lates niloticus,* des eaux douces africaines, peut atteindre des poids considérables.

Les **Lutjanidés** *(Lutjanidae)* comprennent des espèces aux livrées splendides, souvent difficiles à identifier, car celles-ci changent sensiblement au cours de leur développement.

Les Lutjanidés, essentiellement marins et tropicaux, vivent dans tous les océans. Il en existe un grand nombre d'espèces, beaucoup atteignant une longueur totale de 1 m.

Les **Lobotidés** *(Lobotidae)* comptent quelques espèces, marines, d'eaux saumâtres, ou dulçaquicoles. *Lobotes surinamensis* connaît une très vaste distribution géographique.

Les **Sciénidés** *(Sciaenidae)* sont constitués par environ cent soixante-dix espèces des mers tempérées et tropicales; certaines fréquentent les eaux saumâtres et douces.

Ils possèdent deux nageoires dorsales, généralement contiguës; la seconde est beaucoup plus longue; l'anale a deux épines; le museau est le plus souvent arrondi, et porte parfois un barbillon. Il s'agit essentiellement de Poissons littoraux, carnivores, et non grégaires.

Argyrosomus regius, le maigre, ou aigle de mer, est facile à reconnaître grâce à l'intérieur de sa bouche jaune doré. Il atteint une longueur de 2 m et un poids de plus de 65 kg. *Corvina* ou *Sciaena* ou *Johnius umbra,* le corbeau ou corb noir, a une longueur totale de 0,50 m; il est caractérisé par sa livrée brun foncé aux reflets argentés et dorés, et par ses nageoires ventrales et anale noires à marge antérieure blanche.

Umbrina ou *Sciaena cirrosa,* l'ombrine commune, possède un bref barbillon et est ornée de lignes obliques sinueuses, alternativement jaune doré et gris verdâtre. Elle a une longueur totale maximale de 70 cm pour un poids d'environ 12 kg.

Les **Mullidés** *(Mullidae)* comptent environ quarante formes marines des eaux tropicales et tempérées, généralement de petite taille. On les trouve le plus souvent près des côtes, à faible ou moyenne profondeur.

Les Mullidés sont facilement reconnaissables à leurs deux barbillons tactiles, mentonniers, et à leurs écailles cténoïdes assez grosses. Ils portent deux nageoires dorsales, dont la première est pourvue généralement de sept ou huit épines. La nageoire anale a deux épines; et la caudale est plus ou moins fourchue.

Dans la Méditerranée et l'Atlantique on connaît deux espèces du genre type *Mullus*, le « rouget de vase » *(Mullus barbatus)* et le « rouget de roche ou surmulet » *(Mullus surmuletus)*.

Les **Sparidés** *(Sparidae)* forment un groupe d'une centaine d'espèces, qui peuplent les mers tropicales et

tempérées, et sont absentes des mers froides. Certaines vont aussi dans les eaux douces et saumâtres.

Leur forme, haute et quelque peu comprimée, rappelle beaucoup celle des Serranidés; mais ils diffèrent de ces derniers par le bord du préopercule qui est lisse et les dents implantées seulement sur les mâchoires, et jamais sur le palais. Selon le régime, la forme de ces dents varie beaucoup d'une espèce à une autre.

Ces Poissons sont essentiellement littoraux et souvent grégaires; leur chair est toujours excellente.

Le genre *Dentex* compte plusieurs espèces, dont la mieux connue est *Dentex dentex*, le denté commun, qui peut atteindre plus de 1 m. Ses yeux sont situés assez haut, près du bord dorsal de la tête. Il est bleuâtre, avec des reflets dorés et argentés, et parsemé de petites taches bleues et noirâtres.

Le genre *Sparus* est représenté sur nos côtes. *Sparus auratus*, la dorade, atteint une longueur totale de 70 cm pour un poids de plus de 5 kg. *Sparus guttulatus* et *Sparus major*, respectivement d'Australie et du Japon, sont très appréciés localement.

Il existe plusieurs espèces de *Pagellus* sur nos côtes. Les plus communes sont *Pagellus acarne* ou pageau blanc et *P. erythrinus*, le pageau commun. On trouve sur nos côtes quatre espèces de *Diplodus* dont *D. vulgaris*, le sar, et *D. sargus*, le sar rayé. *Boops boops*, la bogue, pélagique et grégaire, est très pêchée. *Oblada melanura* forme de petits bancs le long des côtes rocheuses; elle mesure 30 cm au total.

Les **Platacidés** *(Platacidae)* ne comptent que deux genres; *Platax* est très aplati latéralement, avec une nageoire dorsale et une anale extrêmement hautes et développées, surtout chez les juvéniles, qui sont jaune-orangé avec des bandes verticales noires.

Les **Scatophagidés** *(Scatophagidae)* sont très proches des Chætodontidés dont ils constitueraient selon certains auteurs une sous-famille. Les Scatophagidés comptent six espèces. Ils portent quatre épines à la nageoire anale. On les trouve dans les océans Indien et Pacifique, mais ils habitent aussi les eaux saumâtres quand ils sont jeunes.

Scatophagus argus, le scatophage commun, a une livrée argentée, avec des séries verticales de taches, rougeâtres sur le dos et noirâtres sur les flancs chez les juvéniles, mais toutes noirâtres chez les adultes.

Les **Chætodontidés** *(Chaetodontidae)* sont divisés en deux groupes principaux, considérés selon les auteurs comme des sous-familles ou des familles distinctes : les *Pomacanthinés* ont chez les adultes de fortes épines ou préopercules absentes chez les *Chætodontinés*.

Il existe environ cent cinquante espèces, principalement marines; seules quelques-unes pénètrent dans les eaux saumâtres; on en trouve en grande quantité dans les formations madréporiques.

Les Pomacanthinés mesurent au maximum 60 cm de longueur, et les Chætodontinés 20 cm. Les premiers changent pour la plupart de livrée en vieillissant; les couleurs sont toujours très vives chez *Pomacanthus, Holacanthus, Centropyge* et *Angelichthys*.

Parmi les Chætodontinés, nous citerons le cocher *(Heniochus acuminatus)*, le chætodon à bec *(Chelmo* ou *Chelmon rostratus)*, et *Forcipiger longirostris*. Les *Chaetodon* proprement dits ont de magnifiques couleurs.

Les **Nandidés** *(Nandidae)* sont des Poissons dulçaquicoles d'Afrique, d'Amérique du Sud et du Sud-Ouest asiatique. L'un des plus intéressants est le poisson-feuille *(Monocirrhus polyacanthus)*, des bassins de l'Amazone, du Rio Negro, etc. Sa morphologie rappelle une feuille. D'une longueur totale maximale de 10 cm environ, il est très comprimé; son profil est ovalaire et le barbillon charnu qu'il possède rappelle un pétiole foliaire. Sa couleur varie du marron grisâtre au brunâtre, avec des taches analogues à des moisissures. Sa façon de nager elle-même fait penser à une feuille morte. Dès que le poisson-feuille est à portée d'une proie, il avance ses mâchoires très protractiles et engloutit sa victime.

Les **Cichlidés** *(Cichlidae)* renferment environ six cents espèces d'Amérique, d'Afrique, de l'Inde et de Ceylan.

Beaucoup de Cichlidés sont utilisés en aquariologie. On a obtenu de très belles variétés de *Pterophyllum*. On élève aussi en aquarium *Aequidens, Cichlasoma* d'Amérique du Sud et diverses espèces d'*Haplochromis*.

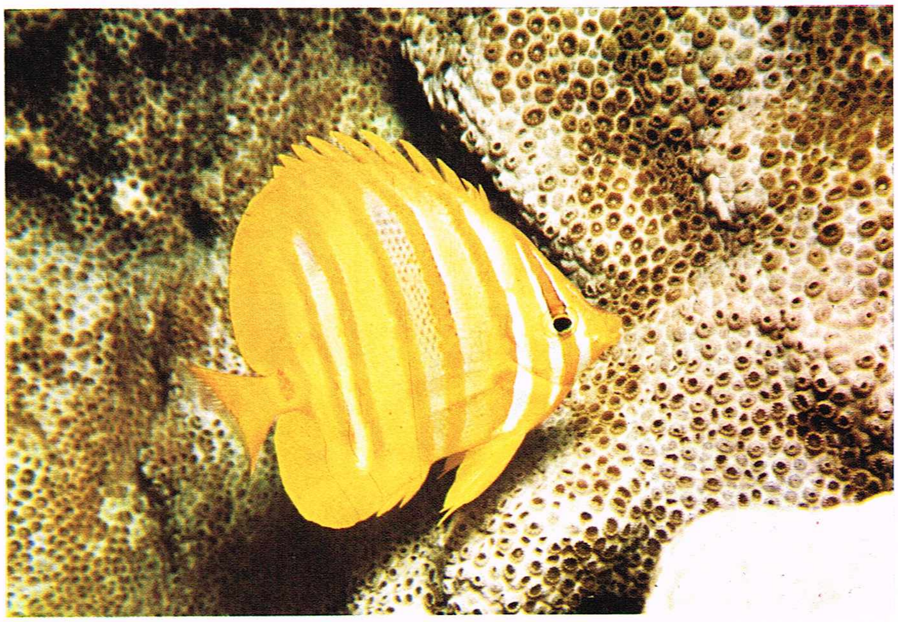

D. Faulkner

D. Faulkner

▲ ***En haut,* Chaetodon rainfordi, *des côtes du Queensland; la plupart des espèces du genre arborent de magnifiques couleurs. En bas,* Pomacanthus paru, *poisson-ange des îles Bahamas.***

G. Mazza

◀ ***Un Sparidé* (Diplodus sp.).**

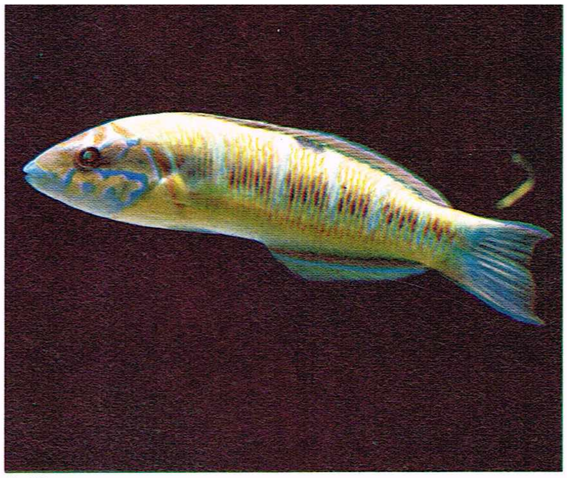

▶ *A gauche,* Cichlasoma festivum, *dulçaquicole, s'adapte bien en aquarium. A droite,* Thalassoma pavo *(Labridés) est présent en Méditerranée.*

A. Margiocco

G. Mazza

G. Mazza

▲ Coris julis *ou girelle.*

Beaucoup de *Tilapia* pratiquent l'incubation buccale. Le mâle creuse un trou sur le fond, y guide la femelle pour qu'elle y ponde, et féconde les œufs; puis, l'un des parents met en bouche les œufs et les garde jusqu'à leur éclosion. En cas de danger, les alevins peuvent venir se réfugier dans la cavité orale de leurs parents.

Les **Pomacentridés** *(Pomacentridae)* sont divisés en deux sous-familles, les *Pomacentrinés* et les *Amphiprioninés.*

Les Pomacentrinés, uniquement marins, sont communs surtout dans les mers tropicales et subtropicales; quelques espèces comme *Chromis chromis* vivent dans les mers tempérées chaudes. Répandue de l'océan Atlantique oriental (du Portugal au golfe de Guinée) à la Méditerranée, cette dernière est très commune dans les écueils, formant de grands bancs à faible profondeur. *Dascyllus* évolue par bancs de centaines d'individus sur les formations madréporiques tropicales; il est très recherché en aquariophilie. *Pomacentrus* et *Abudefduf* sont très importants en aquariologie.

▼ *Beaucoup de Cichlidés sont utilisés en aquariologie, ici un* Pterophyllum scalare, *de la variété mélanique.*

C. Bevilacqua

La sous-famille des Amphiprioninés compte quelque quinze espèces de petite taille, à très belles livrées, qui vivent en symbiose avec des anémones de mer du genre *Stoichactis,* sur les formations madréporiques tropicales des océans Indien et Pacifique.

Les **Labridés** *(Labridae)*, uniquement marins, peuplent les eaux tropicales, subtropicales, et tempérées. Ils sont essentiellement littoraux et carnivores. Ils ont des lèvres bien marquées et possèdent des dents coniques sur les mâchoires mais non sur le palais; ils ont aussi des dents pharyngiennes, broyeuses. Leur nageoire dorsale est très longue, le nombre de ses rayons épineux antérieurs variant selon les espèces; la caudale est arrondie ou tronquée. Leur livrée est habituellement vive et brillante, mais elle varie beaucoup dans une même espèce et chez un même individu.

Plusieurs espèces aiment s'ensabler la nuit, disparaissant alors complètement, alors qu'elles pullulaient le jour; c'est le cas des *Coris* ou girelles et des *Oxyjulis.*

Certains *Coris* et *Thalassoma* comptent parmi les plus beaux Labridés tropicaux. *C. julis* et *T. pavo* sont présents en Méditerranée. De nombreuses espèces de petits Labridés débarrassent d'autres Poissons des ectoparasites qui les attaquent.

De nombreux Labridés présentent un dimorphisme sexuel dans la livrée. Ainsi, *Labrus bimaculatus* ou *mixtus,* le labre varié ou la vieille coquette, commun dans le nord-est de l'océan Atlantique et dans la Méditerranée, présente deux colorations différentes : les mâles sont gris verdâtre, avec le ventre rose et des taches bleues et jaunes sur le museau et le dos; les femelles sont roses, avec des taches noirâtres cerclées de clair à la base de la nageoire dorsale.

Au printemps, le mâle prépare un nid, durant la nuit, en creusant dans le fond un trou de diamètre égal à sa propre longueur. Puis il courtise une femelle, et nage tout autour d'elle en la mordillant jusqu'à ce qu'elle se décide à s'accoupler. On observe que les couleurs du mâle, pendant les amours, pâlissent, sur le dessus de la tête et du tronc.

Le labre varié, ainsi que le labre vert (*Labrus turdus)* et le merle *(Labrus merula),* sont des hermaphrodites protérogynes. Un phénomène assez analogue a lieu chez *Coris julis* de la Méditerranée et de l'océan Atlantique oriental : on distinguait souvent, il y a encore peu de temps, *C. julis* de *C. giofredi;* en effet, certains mâles étaient confondus avec les femelles en raison de leur couleur et nommés *C. giofredi.* Les autres, multicolores, étaient considérés comme des *C. julis.* En fait, ces derniers, toujours de grande taille, sont d'anciennes femelles devenues mâles.

Les Labridés les plus communs de la Méditerranée font partie du genre *Crenilabrus,* ou crénilabre, qui compte douze espèces dont certaines sont endémiques.

Xyrichthys novacula, le rason, de la Méditerranée et de l'océan Atlantique tropical, offre un aspect insolite : son corps, couvert de grosses écailles, est très comprimé; sa ligne latérale présente une solution de continuité entre la partie antérieure et la portion caudale. La tête est effilée à l'avant; la bouche est petite, avec des dents unisériées, la livrée rose, striée de bandes d'un bleu céleste très vif.

Les **Scaridés** *(Scaridae),* au nombre d'environ quatre-vingts espèces, sont tropicaux, bien que représentés également dans les eaux tempérées : par exemple, *Sparisoma cretense,* outre l'Atlantique, habite aussi l'est et le sud de la Méditerranée.

Ces Poissons se nourrissent toujours d'organismes fixés au substratum, mais, selon les espèces, ils ont une

prédilection pour les Végétaux ou les Animaux, ou encore sont omnivores.

Leurs dents antérieures rappellent vaguement le bec des perroquets, d'où le nom de poissons-perroquets qu'on leur donne souvent. Certains arrivent à briser des coraux avec leurs dents et à les triturer à l'aide de leurs plaques pharyngiennes.

Ils sont grégaires et plutôt sédentaires. Certains Scaridés s'entourent d'un cocon de mucus, afin de se protéger pendant leur période de repos nocturne.

Les **Trachinidés** *(Trachinidae)* sont armés, à la première nageoire dorsale et à l'opercule, d'aiguillons reliés à des glandes venimeuses; leur piqûre est très douloureuse. Ils possèdent deux nageoires dorsales.

Le corps est allongé, le museau court, la bouche en position oblique, et les yeux placés haut sur la tête. Les écailles cycloïdes forment des rangées obliques.

Animaux benthiques, ils aiment s'enfouir dans le sable. En été, on les trouve à profondeur parfois très réduite; en hiver, ils descendent à environ cent mètres de profondeur.

Il existe quatre espèces de vives *(Trachinus)* dans la Méditerranée et l'océan Atlantique oriental. Les mieux connues sont la grande vive *(Trachinus draco)*, longue d'environ 40 cm, et la petite vive, longue de 10 à 15 cm.

Les **Uranoscopidés** *(Uranoscopidae)* sont au nombre d'environ vingt-cinq espèces, distribuées dans les mers tropicales ou tempérées du monde entier.

Leur corps est assez court, leur tête grosse et cuboïde. Leur bouche très oblique s'ouvre vers le haut. Leurs yeux sont sensiblement dorsaux. Ils possèdent deux nageoires dorsales; leurs ventrales sont jugulaires. Dorsalement et derrière la tête, ils présentent des piquants forts et aigus, reliés à des glandes venimeuses : les blessures qu'ils provoquent sont douloureuses et, dans certains cas, se seraient même avérées mortelles. En outre, ils possèdent des organes électriques, placés derrière les yeux, dont certains émettent des décharges d'environ 50 V.

L'individu le plus courant dans la Méditerranée et l'océan Atlantique oriental est *Uranoscopus scaber*, l'uranoscope commun, d'une longueur totale de 30 cm; il est benthique, vit près des fonds sableux et vaseux, et descend jusqu'à une profondeur de 100 m.

Sous-ordre des Acanthuroïdes

Les Acanthuroïdes *(Acanthuroidei)* comptent deux familles.

Les **Zanclidés** *(Zanclidae)* ne comprennent que l'unique genre *Zanclus*, qui vit dans les parties tropicales des océans Indien et Pacifique, parmi les bancs de coraux. Il a une sorte de bec et la pointe de la nageoire s'allonge avec l'âge. Le corps est strié de bandes verticales noires et jaunes.

Les **Acanthuridés** *(Acanthuridae)*, appelés encore les « chirurgiens », sont faciles à reconnaître : des deux côtés de leur pédoncule caudal, immédiatement en avant de la nageoire, ils portent un aiguillon tranchant comme un couteau, qui se rétracte au repos dans un sillon *(Acanthurus)*, ou bien une ou plusieurs lamelles osseuses tranchantes *(Naso)*.

Les épines des nageoires dorsale, anale ou ventrale seraient venimeuses chez certaines espèces.

Il en existe une centaine de formes marines et tropicales qui dépassent rarement 0,50 m de longueur totale.

Sous-ordre des Mugiloïdes

Les Mugiloïdes *(Mugiloidei)* possèdent deux nageoires dorsales; la première, à rayons spiniformes, est nettement séparée de la seconde, qui porte des rayons mous. Leurs ventrales sont en position abdominale.

Les **Sphyrénidés** ou **Sphyrænidés** *(Sphyraenidae)* sont constitués par une vingtaine d'espèces habitant essentiellement les mers tropicales. Leur corps est allongé et fin, leur museau long, et leur mandibule proéminente; de fortes dents garnissent leurs deux mâchoires. *Sphyraena barracuda*, le grand barracuda, atteint une longueur maximale de 3,50 m; il est dangereux, même pour l'homme. On trouve dans la Méditerranée et l'est de l'océan Atlantique *Sphyraena sphyraena*, la sphyrène, ou brochet de mer.

Les **Athérinidés** *(Atherinidae)*, appelés sur les côtes provençales souclet ou cabassoun, sont au nombre

G. S. Giacomelli

d'environ cent cinquante espèces, pour la plupart eurhyalines. Ils ont de gros yeux, des nageoires abdominales ventrales; leurs flancs sont ornés d'une bande argentée longitudinale. Très appréciés en Amérique du Sud, ils font l'objet d'une pisciculture active.

Les **Mugilidés** *(Mugilidae)* renferment une centaine de formes vivant surtout dans les zones tropicales et tempérées. Ce sont des Poissons eurhyalins, en grande majorité marins et littoraux, mais ils peuvent pénétrer dans les eaux saumâtres et douces; une minorité est dulçaquicole.

Il en existe sept espèces en Méditerranée, dont l'une est endémique, les autres vivant dans l'océan Atlantique. *Mugil cephalus*, le mugle ou mulet cabot, a d'importantes paupières adipeuses. Il atteint une longueur maximale de 90 cm pour un poids de 6 kg.

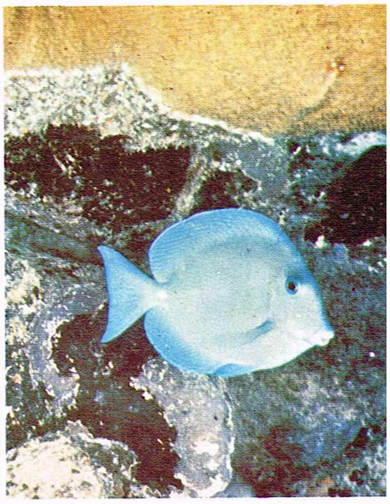

R. Maltini - P. Solaini

▲ *En haut,* **Uranoscopus scaber,** *l'uranoscope, commun en Méditerranée et dans l'océan Atlantique oriental. En bas,* **Acanthurus coeruleus,** *ou chirurgien bleu.*

Sous-ordre des Trichiuroïdes

Les Trichiuroïdes *(Trichiuroidei)* possèdent des prémaxillaires fixes. Il en existe deux familles qui habitent surtout les profondeurs.

Les **Trichiuridés** ont le corps allongé, une faible épaisseur, une couleur argentée, ce qui leur a valu le nom de « sabres ». Leur nageoire dorsale est très longue, alors que l'anale est réduite à une série de spinules, ou présente quelques rayons plus développés vers l'arrière.

Les **Gempylidés** *(Gempylidae)* comprennent quelque vingt-deux espèces marines, essentiellement des zones tempérées et tropicales. Ces Poissons ont deux nageoires dorsales, et parfois quelques pinnules derrière la nageoire anale et la seconde dorsale.

On rencontre dans la Méditerranée, l'océan Pacifique, l'océan Atlantique, etc., *Ruvettus pretiosus*, fusiforme et couvert de tubercules osseux.

Sous-ordre des Scombroïdes

L'apparition des Scombroïdes *(Scombroidei)* date au moins du Crétacé. Tous sont marins, le plus souvent pélagiques, grégaires, excellents nageurs et migrateurs; ils forment d'immenses bancs. Ils sont particulièrement abondants dans les mers chaudes ou tempérées chaudes,

▼ *Poisson de la famille des Scaridés.*

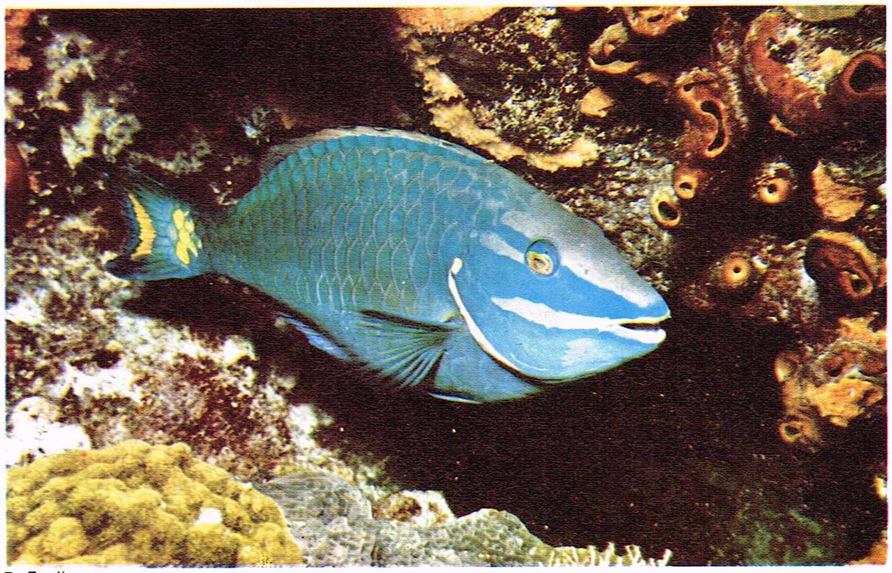

D. Faulkner

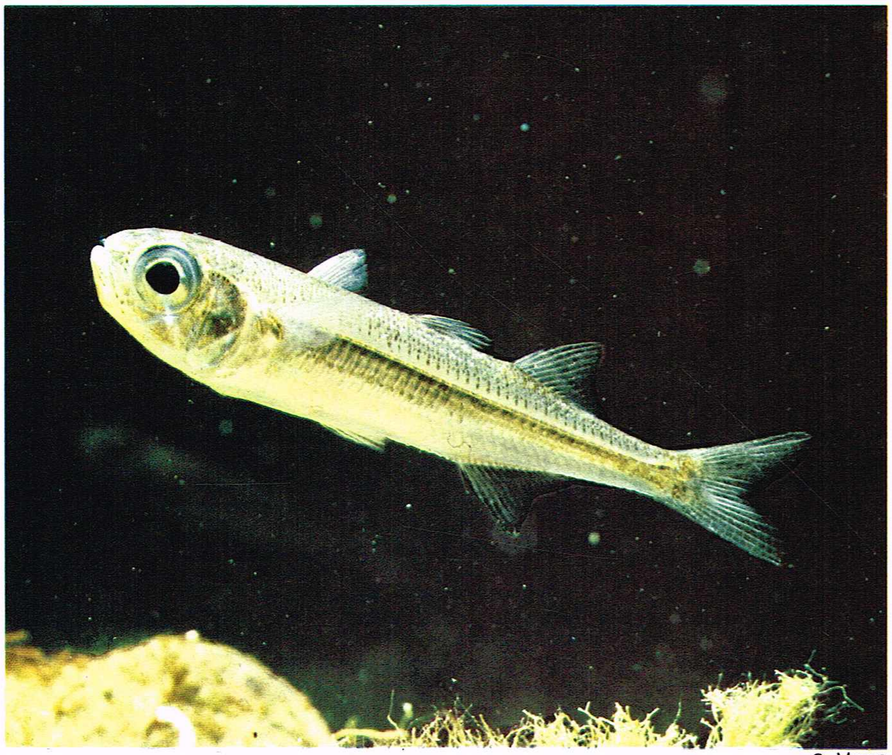

G. Mazza

▲ *Les Athérinidés* **(Atherina sp.)** *sont appelés souclet ou cabassoun sur les côtes provençales.*

et la distribution géographique de certains d'entre eux est très étendue.

Ils sont fusiformes; leur pédoncule caudal, très fin, porte des pinnules dorsalement et ventralement; leur queue est nettement fourchue, ou en croissant; leurs nageoires ventrales sont thoraciques ou absentes, leurs rayons épineux faibles, leurs écailles petites et cycloïdes, leurs opercules lisses. On a recensé une dizaine de familles.

Les **Scombridés** *(Scombridae)* ont une grande importance économique.

Scomber scombrus, le maquereau, habite la Méditerranée et l'océan Atlantique. Il peut mesurer au maximum 0,50 m. Il a le dos bleu verdâtre strié de lignes foncées, qui n'atteignent pas la ligne latérale. Ses flancs sont argentés et son ventre est blanc. Il est dépourvu de vessie natatoire. En grands bancs, il gagne les eaux superficielles pendant la belle saison, et redescend en profondeur en hiver.

Pneumatophorus japonicus, le maquereau espagnol, qui, lui, possède une vessie natatoire, est cosmopolite; il est représenté dans la Méditerranée et dans l'océan Atlantique par la sous-espèce *colias.*

Les **Scombéromoridés** *(Scomberomoridae) : Sarda sarda,* la pélamide ou bonite à dos rayé, est entièrement couverte d'écailles, celles de la partie antérieure du corps étant plus grosses que les autres et constituant une sorte de corselet. Les adultes sont bleu-noir sur le dos, avec de sept à neuf lignes noires à peu près longitudinales (à peine obliques) et légèrement sinueuses, qui s'étendent également sur une partie des flancs. Elle mesure 80 cm de longueur maximale pour un poids de 5 kg.

Orcynopsis unicolor, la palomète, de taille analogue, ne porte d'écailles que sur le corselet; les adultes sont uniformément bleuâtres sur le dos.

Les **Thunnidés** *(Thunnidae)* ont une température interne supérieure de plusieurs degrés centigrades à celle de l'eau environnante; leur respiration est particulièrement active. Ils sont couverts d'écailles, portent des dents maxillaires et palatines, et possèdent une vessie natatoire.

Thunnus thynnus, le thon rouge, cosmopolite, peut atteindre 3 m. Il vit en profondeur, jusqu'à plus de 1 000 m, mais constitue au printemps de grands bancs, qui se rendent en surface et près des côtes; en automne, ils retournent dans les eaux profondes. Ce Poisson est l'objet d'une pêche très intense.

Thunnus ou *Germo alalunga,* le germon ou thon blanc, est plus petit : il atteint à peine 1 m. Il est facile à reconnaître, car ses nageoires pectorales sont longues et s'étendent jusqu'au-delà de la seconde dorsale. Il est lui aussi cosmopolite, et effectue des migrations.

Euthynnus est une sorte de petit thon, dont il diffère par la présence d'écailles limitées en corselet; en outre, il ne possède pas de vessie natatoire. On rencontre fréquemment dans l'océan Atlantique et dans la Méditerranée *Euthynnus quadripunctatus,* au dos bleu foncé tacheté de noir, et aux mouchetures noirâtres sur les flancs, en dessous des nageoires pectorales. Il mesure au maximum 1 m. *Katsuwonus pelamis,* la bonite à ventre rayé, un peu plus petite, porte quatre ou cinq lignes longitudinales bleuâtres ou brunâtres sur la moitié inférieure des flancs.

Les **Istiophoridés** *(Istiophoridae)* renferment une dizaine d'espèces, qui rappellent quelque peu l'espadon, mais en diffèrent par leur museau plus court et de section ronde, par des dents petites, des écailles petites et oblongues, et par la présence de nageoires ventrales constituées d'un seul rayon. Leur nageoire dorsale est plus ou moins haute, mais toujours très longue; dorsale et anale sont suivies par une pinnule; leur pédoncule caudal a deux carènes de chaque côté.

Les genres les plus importants sont *Tetrapturus, Istiophorus* et *Makaira :* le premier est représenté dans la Méditerranée par deux espèces et le second par une seule. *Tetrapturus belone* a une longueur totale de 1,50 m. Les *Makaira* sont pêchés dans les zones tropicales de l'Atlantique. Ce sont les « voiliers ».

R. T. F. Gantes - Pitch

▶ *Les Istiophoridés rappellent quelque peu l'espadon; les* Makaira, *pêchés dans les zones tropicales de l'Atlantique, sont les « voiliers ».*

Les **Xiphiidés** *(Xiphiidae)* ne renferment qu'une seule espèce, cosmopolite, *Xiphias gladius*, l'espadon. Sa mâchoire supérieure, longuement prolongée, en forme de lame d'épée horizontale, présente des dents rudimentaires. L'espadon est dépourvu d'écailles, sa nageoire dorsale est bien plus courte que chez les Istiophoridés, et son pédoncule caudal a une seule carène de chaque côté. Sa caudale est en forme de croissant ; il ne possède pas de ventrales. Son dos est bleu foncé ; ses flancs ont des reflets de bronze et son ventre est blanc.

C'est un nageur solitaire très rapide et très agile. Irrité, il peut être redoutable à cause de son rostre. On en a pêché qui pesaient plus de 500 kg, pour une longueur de plus de 4,50 m.

Sous-ordre des Stromatéoïdes

Le sous-ordre des Stromatéoïdes *(Stromateoidei)*, qui compte seulement quelques familles, a été créé en fonction des particularités anatomiques de l'appareil digestif.

Les **Stromatéidés** *(Stromateidae)*, latéralement très comprimés, ont une forme ovale ; les adultes sont dépourvus de nageoires pelviennes, les jeunes en ont de petites. Citons les genres *Poronotus, Palometa* et *Stromateus ;* ce dernier est représenté dans la Méditerranée par le *Stromateus fiatola*, d'une longueur maximale de 35 cm, qui vit en profondeur à l'âge adulte. Les jeunes nagent dans les eaux de surface, et se cachent fréquemment sous de grosses méduses et d'autres Cœlentérés planctoniques, comportement fréquent chez les Stromatéoïdes de différentes familles.

Les **Centrolophidés** *(Centrolophidae)*, tous marins, ont une bouche protractile et portent des denticules sur les parois de l'œsophage. Ils possèdent des écailles cycloïdes, des nageoires à fines épines, une ou deux nageoires dorsales, et une caudale fourchue.

Chez les **Tétragonuridés** *(Tetragonuridae)*, citons *Tetragonurus cuvieri*, très caractéristique par la section quadrangulaire de sa queue, munie de deux carènes de chaque côté du pédoncule. Les écailles cténoïdes sont rugueuses, et solidement implantées, de sorte que le Poisson semble sculpté dans le bois. Les adultes habitent les profondeurs ; les juvéniles restent en surface, s'abritant parmi des Cœlentérés planctoniques, et pénétrant même dans les cavités des Salpidés.

Sous-ordre des Callionymoïdes

Les Callionymoïdes *(Callionymoidei)* se reconnaissent facilement à leur opercule muni d'une ou de plusieurs épines à nombre variable de pointes. Ce sous-ordre comprend deux familles marines.

Les **Callionymidés** *(Callionymidae)* sont benthiques. Leur tête est large et déprimée, et leur bouche située ventralement. Les yeux sont gros, le préopercule a une forte épine tournée vers l'arrière, avec deux pointes ou plus ; les ouvertures branchiales sont petites, en forme de pore. La peau est nue. Il y a deux nageoires dorsales, dont la première est élevée chez les mâles ; la caudale est oblongue ; les ventrales sont en position jugulaire. On en connaît six espèces en Méditerranée, dont l'une est endémique.

L'autre famille du sous-ordre est celle des **Draconettidae.**

Sous-ordre des Ammodytoïdes

Les Ammodytoïdes *(Ammodytoidei)* ne renferment qu'une seule famille.

Les **Ammodytidés** *(Ammodytidae)*, unique famille du sous-ordre, sont tous marins. Ils ont un corps très allongé, à peu près cylindrique (recouvert ou non de petites écailles cycloïdes), une tête longue et une grande bouche dont la mandibule est proéminente. La nageoire dorsale est basse et très étendue ; les ventrales manquent. Le plus souvent grégaires, les Ammodytidés vivent dans les eaux littorales et aiment s'enfouir dans le sable.

Les lançons ou équilles, *Gymnammodytes semisquamatus* comme *G. cicerellus*, sont communs dans l'Atlantique et la Méditerranée. Ils sont argentés, avec le dos bleu verdâtre ; leur longueur maximale ne dépasse pas 20 cm. On distingue aussi le genre *Ammodytes*.

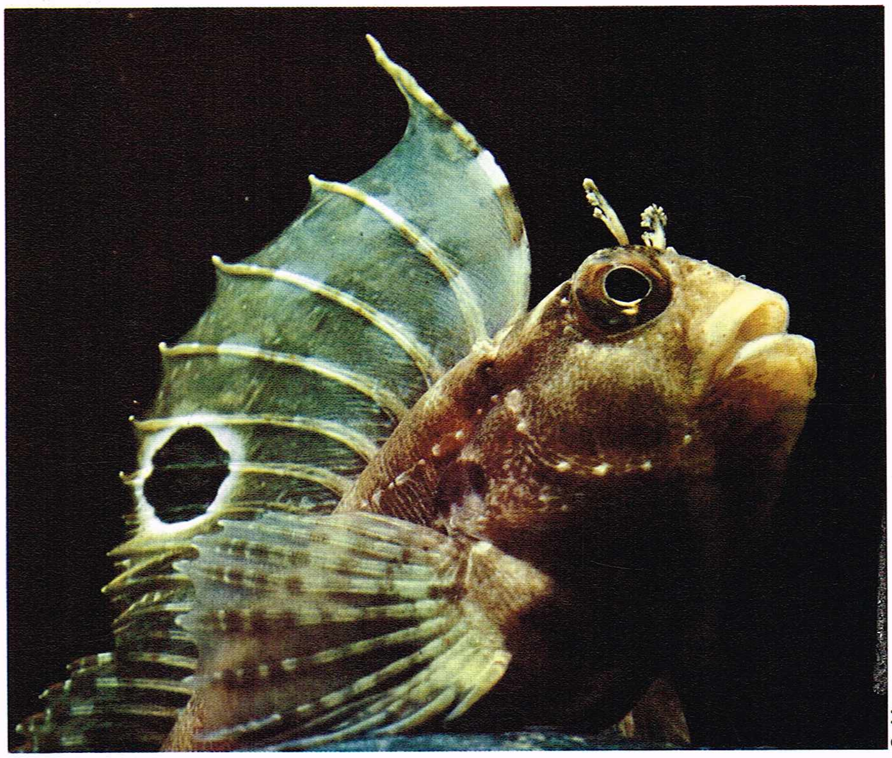

G. Mazza

▲ ***Parmi les plus grandes blennies de nos régions.*** **Blennius ocellaris,** ***la blennie-papillon.***

Sous-ordre des Blennioïdes

Les Blennioïdes *(Blennioidei)*, essentiellement marins, ont des nageoires ventrales jugulaires réduites ou manquantes ; leur dorsale est très étendue. Leur profil antérieur est plus ou moins busqué. Leurs yeux sont situés très haut et leur museau est court. Ces caractères connaissent des variantes dans l'ensemble des familles du groupe.

Les **Blenniidés** *(Blenniidae)*, presque tous de petite taille, sont benthiques ; la plupart vivent en mer ; seule une minorité habite les eaux saumâtres ou même douces.

Leur peau est nue et sécrète en abondance du mucus. Leurs nageoires ont de fins rayons épineux. La dorsale s'étend de la tête au pédoncule caudal ; la caudale est arrondie, et les pectorales sont grandes ; quant aux ventrales, elles ont un nombre réduit de rayons. On observe souvent des tentacules supra-oculaires.

On connaît en Méditerranée une vingtaine d'espèces du genre *Blennius*, les blennies, dont une douzaine sont endémiques. Il en existe dans les eaux saumâtres, et *B. fluviatilis*, la blennie fluviatile ou gagnotte, habite même des lacs et cours d'eau du pourtour de la Méditerranée et des Alpes.

Parmi les plus grandes blennies de nos régions, citons : *Blennius gattorugine* d'une longueur maximale de 20 cm, *Blennius sanguinolentus*, de 18 cm, *Blennius ocellaris*, la blennie-papillon, et *Blennius tentacularis*.

Sous-ordre des Ophidioïdes

Chez les Ophidioïdes *(Ophidioidei)*, les nageoires ventrales, lorsqu'elles existent, sont de petite taille ou formées en filaments. Aucune nageoire n'a d'épines. Dans la nageoire dorsale et la nageoire anale, les rayons sont plus nombreux que les vertèbres. Il y a trois familles dans ce sous-ordre.

Les **Ophidiidés** *(Ophidiidae)* ont un corps très allongé et couvert de petites écailles cycloïdes. Les nageoires dorsale et anale sont très longues et confluent avec la caudale ; les ventrales sont réduites et filamenteuses. *Ophidium barbatum*, la donzelle, et *Parophidium vassali* atteignent une longueur d'au moins 25 cm.

Les **Carapidés** *(Carapidae)*, qui ressemblent vaguement aux Ophidiidés, en diffèrent par l'absence d'écailles et de barbillons, par la finesse de leur queue, et l'insertion de leur anus en avant des nageoires pectorales ; ainsi, la nageoire anale commence immédiatement derrière la tête. Toutes les espèces ne possèdent pas de nageoires pectorales.

D. Faulkner

G. Mazza

▲ *A gauche,* **Pterogobius elapoides**, *du Japon. A droite, un* **Periophthalmus** *dont les yeux saillants sont adaptés à la vision dans l'air.*

Ces Poissons pénètrent, la queue la première, dans des trous de rochers ou à l'intérieur d'Animaux comme certains Échinodermes, Bivalves, Tuniciers, etc. Il en existe deux douzaines d'espèces appartenant à quatre genres ; elles sont répandues dans les mers tempérées et chaudes.

Sous-ordre des Gobioïdes

Les Gobioïdes *(Gobioidei)* comptent quatre familles ; chez deux d'entre elles, les nageoires ventrales sont soudées et constituent un disque adhésif.

Les **Gobiidés** *(Gobiidae)*, encore mal connus, ne renferment pas moins de quatre cents espèces, surtout marines, en partie eurhyalines et peu dulçaquicoles.

Leur caractère particulier est la fusion des deux nageoires ventrales en une sorte de disque ou d'éventail qui, lorsque l'Animal s'appuie sur un substratum solide, y assure son adhésion. Leurs yeux sont situés haut sur la tête et rapprochés l'un de l'autre. Leurs lèvres sont grosses, leurs écailles ordinairement cténoïdes. On observe sur leur tête des séries de pores, ou d'organes cyathiformes, à fonction sensorielle. Leurs deux nageoires dorsales sont rapprochées, et la première est soutenue par des épines.

Les Gobiidés sont généralement de petite taille. Le plus petit est *Pandaka pygmaea*, des Philippines : les mâles de cette espèce ne dépassent pas 1 cm. Il s'agit là du plus petit Vertébré connu. On rencontre dans la Méditerranée le minuscule *Brachyochirus pellucidus*, que l'on pêche à la fin de l'hiver et au début du printemps en quantités énormes ; vivant à peine un an, c'est sans doute le Vertébré dont la durée de vie est la plus courte. Les Gobiidés ont des livrées ternes, sauf certaines espèces des formations madréporiques tropicales. Leur régime alimentaire est très variable selon les espèces.

Les **Périophthalmidés** *(Periophthalmidae)* renferment les *Periophthalmus* et les *Boleophthalmus*, très intéressants du point de vue biologique. Ces Poissons, qui peuplent les zones côtières d'Afrique et d'Océanie, peuvent rester très longtemps hors de l'eau, car leurs branchies et une partie de leur corps demeurent humides : ils respirent alors l'air atmosphérique. Leurs cavités branchiales sont très vascularisées. Leurs yeux saillants sont adaptés à la vision dans l'air. Quand les fonds des mangroves sont exondés, lors des marées, ils demeurent dans la zone intercotidale. Sur le sol, ils se déplacent au moyen de leurs nageoires pectorales. Les *Periophthalmus* creusent des terriers.

Sous-ordre des Anabantoïdes

Les Anabantoïdes *(Anabantoidei)* comptent, selon les auteurs, une ou deux familles.

Les **Anabantidés** *(Anabantidae)* sont de petits Poissons tropicaux d'Afrique et d'Asie du Sud-Est. Ils sont dulçaquicoles et possèdent un appareil respiratoire spécial. Cet organe labyrinthiforme, logé dans des cavités reliées aux chambres branchiales, est constitué par des formations cartilagineuses en rosettes, recouvertes d'une membrane fortement vascularisée, permettant l'utilisation de l'air atmosphérique.

Les Anabantidés comptent en Afrique quelques formes très connues comme celles du genre *Anabas*, les « perches grimpeuses ». Pour le Sud-Est asiatique, citons *Betta splendens*, le combattant siamois, *B. bellica* et *B. brederi*. Les deux premières espèces de *Betta* fabriquent des nids d'écume ; la femelle de la troisième, après la ponte et la fécondation des œufs, les prend dans sa bouche et les apporte au mâle, qui les recueille dans une poche incubatrice. Le nom de combattant donné à *B. splendens* est dû au fait que les mâles qui se rencontrent se battent sans merci jusqu'à la victoire de l'un d'eux.

Sous-ordre des Scorpænoïdes

Les Scorpænoïdes *(Scorpaenoidei)* ont la tête plus ou moins cuirassée de plaques osseuses souvent hérissées de piquants. Les écailles sont cténoïdes, et la peau porte souvent des appendices plus ou moins développés. Les nageoires sont pourvues de fortes épines. Les ventrales sont thoraciques. Vingt familles environ, comprenant les Poissons les plus venimeux, surtout marins et benthiques, forment ce sous-ordre.

Les **Scorpænidés** *(Scorpaenidae)*, encore appelés rascasses, comprennent plusieurs centaines d'espèces, dont beaucoup sont encore mal connues aux points de vue systématique et biologique. Les Scorpænidés sont en grande partie des habitants des eaux tempérées ; il existe

C. Bevilacqua

▶ **Betta splendens** *(Anabantidés), le combattant siamois, présente la particularité de fabriquer des nids d'écume.*

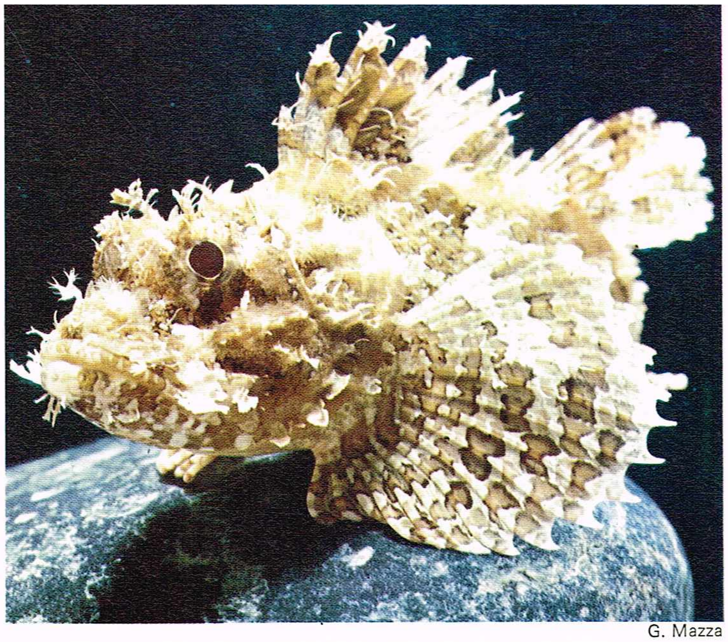

G. Mazza

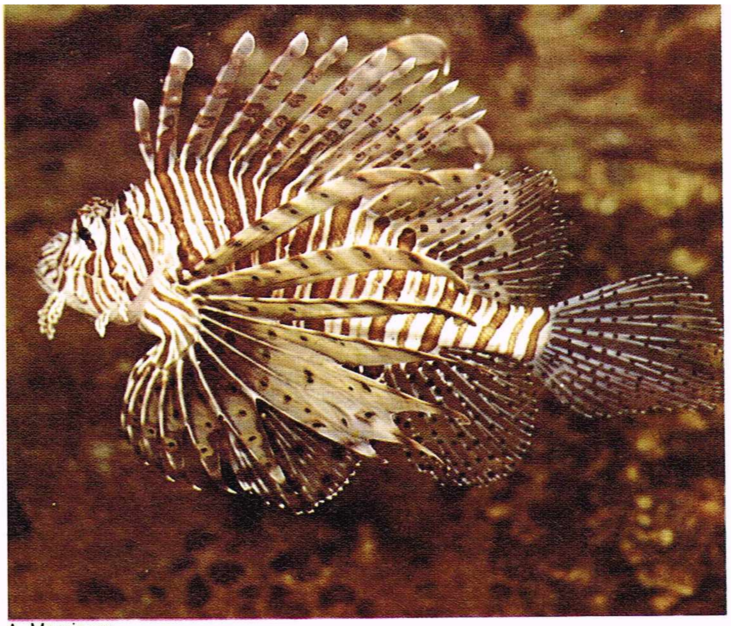

A. Margiocco

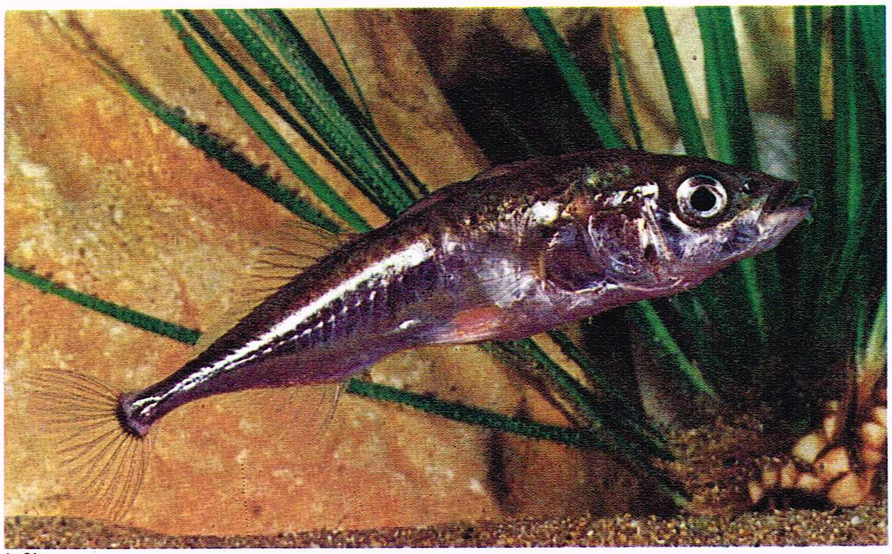

J. Six

▲ *A gauche,* **Scorpaena scrofa,** *une rascasse, appartient à la famille des Scorpænidés, qui compte quelques Poissons très venimeux. A droite, un* **Pterois sp.** *En bas,* **Gasterosteus aculeatus,** *l'épinoche à trois épines, familière de toutes les côtes d'Europe.*

aussi des formes tropicales et certaines sous-familles sont uniquement tropicales.

Le nom de *Scorpaena* (en rappel du scorpion) tient à ce que les épines des nageoires dorsales, anales et ventrales, ainsi que les piquants des opercules, sont venimeuses. Les espèces des genres *Scorpaenodes, Trachyscorpia,* etc., provoquent des blessures très douloureuses; les blessures produites par les *Pterois* et par *Synanceia verrucosa,* douée d'un mimétisme remarquable avec les fonds sur lesquels elle vit, peuvent être mortelles.

Les **Triglidés** *(Triglidae)* ont une tête à section transversale quadrangulaire, couverte de plaques osseuses rugueuses; leurs écailles sont cténoïdes. Les deux nageoires dorsales sont rapprochées, la deuxième étant assez longue et semblable à l'anale. Les pectorales sont vastes et leurs trois rayons inférieurs libres, gros, digitiformes, sont dotés d'organes sensoriels gustatifs. Les couleurs de la livrée sont souvent vives.

Les **Péristédiontidés** *(Peristediontidae),* appelés aussi parfois *Peristediidae,* comprennent des formes très proches des Triglidés, dont elles se différencient par leur corps entièrement cuirassé de plaques.

Peristedion cataphractum, le malarmat, habite la Méditerranée et l'océan Atlantique oriental. Son museau a deux longs prolongements latéraux. Il est rouge et mesure 40 cm. Il vit sur les fonds vaseux.

Les **Cottidés** *(Cottidae)* renferment environ trois cents espèces, qui habitent principalement les eaux salées et saumâtres; sous les hautes latitudes, on en trouve aussi dans les eaux douces.

Ces Poissons ont une grosse tête déprimée, avec une large bouche et des yeux contigus. Ils sont dépourvus d'écailles. Leurs nageoires ventrales sont thoraciques; ils ont deux dorsales; leur caudale est triangulaire ou presque ronde. *Cottus gobio,* le chabot, mesure 12,5 cm, et *Myoxocephalus bubalis,* 25 cm.

Sous-ordre des Dactyloptéroïdes

Les Dactyloptéroïdes *(Dactylopteroidei)* sont proches des Triglidés.

Les **Dactyloptéridés** *(Dactylopteridae)* comptent peu d'espèces, dont la plupart sont tropicales. *Dactylopterus volitans* ne vole pas, malgré ses très grandes nageoires pectorales.

Ordre des Gastérostéiformes

Les Gastérostéiformes *(Gasterosteiformes)* sont de petits Poissons au corps partiellement couvert de plaques osseuses, dont deux, plus grosses, sont situées au-dessus de la ceinture pectorale. On dénombre environ quinze espèces, réparties en deux familles, marines, dulçaquicoles ou d'eaux saumâtres, répandues surtout dans les régions tempérées et froides.

Parmi les **Gastérostéidés** *(Gasterosteidae),* citons *Gasterosteus aculeatus,* l'épinoche à trois épines, familière de toutes les côtes d'Europe. Elle doit son nom vulgaire à ses robustes épines dorsales et anales, les premières étant érectiles. Sa peau, partiellement nue, porte sur les deux flancs une série de plaques osseuses plus ou moins grosses et allongées verticalement. Sa nageoire caudale est presque triangulaire. Les couleurs de sa livrée sont variables; le plus souvent gris verdâtre, devenant rougeâtre chez les mâles, surtout ventralement, à l'époque des amours. Cette espèce atteint une longueur maximale de 8 cm. Elle est polygame, et les mâles défendent avec acharnement les nids qu'ils construisent à partir de Végétaux aquatiques, cimentés par une sécrétion spéciale de leurs reins. Chaque nid contient de quatre-vingts à cent œufs.

Spinachia spinachia, l'épinoche de mer, possède de nombreux piquants dorsaux (au moins quatorze). Elle est commune dans les eaux saumâtres et salées de la Grande-Bretagne, de la mer du Nord, et des côtes européennes dans leur ensemble.

Pungitius pungitius, l'épinochette, dont la dorsale porte sept épines au moins, douze au plus, est moins tolérant aux eaux salées que l'épinoche.

Ordre des Pleuronectiformes

Les Pleuronectiformes *(Pleuronectiformes)* sont les Poissons plats. Cet ordre comprend environ six cents espèces connues, dont la longueur totale va de quelques centimètres à plus de 3 m.

Le corps des adultes est très comprimé et asymétrique. L'un de leurs côtés est pigmenté et porte les deux yeux : c'est la face zénithale ou oculaire. Sur l'autre côté, peu pigmenté, dépourvu d'yeux, la ligne latérale est souvent réduite, voire absente : c'est la face nadirale, sur laquelle ils reposent.

Les divers organes reflètent cette dissymétrie. Ainsi, les nageoires paires des deux faces sont elles-mêmes asymétriques et différentes d'aspect. Les nageoires sont souvent dépourvues d'épines : seuls les Psettodidés en possèdent. La dorsale, normalement implantée à partir de la tête, est très longue, comme la nageoire anale. La caudale est parfois soudée à l'anale et à la dorsale. Les ventrales sont en position jugulaire. Les Pleuronectiformes

▶ **Scophthalmus rhombus,** *la barbue, vue, sur ces deux illustrations, par l'une et l'autre face.*

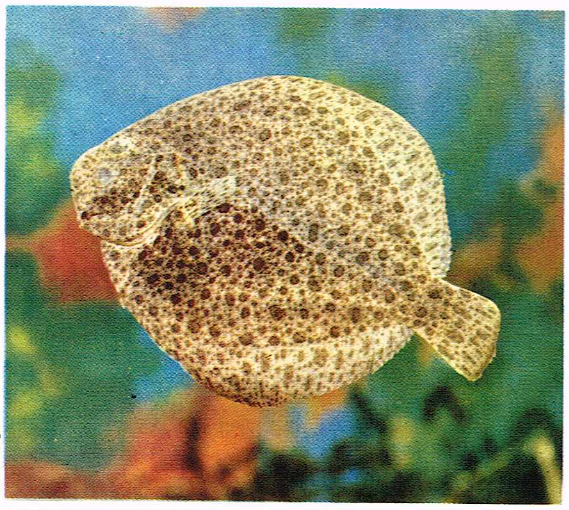

A. Margiocco

A. Margiocco

G. Mazza

n'ont pas de vessie natatoire. De nombreuses espèces présentent un dimorphisme sexuel.

Les caractères morphologiques des adultes diffèrent beaucoup de ceux des larves, dont le développement s'effectue en plusieurs métamorphoses. Quand l'alevin éclôt, il présente une symétrie bilatérale classique et mène une vie planctonique. Peu après, l'un de ses yeux émigre et se déplace vers l'autre, tandis que la pigmentation se forme sur la face zénithale. Cette dernière peut être le côté droit ou le côté gauche, selon les familles. Chez certains groupes, la translation s'effectue indifféremment à gauche ou à droite. Il existe aussi des cas anormaux. En effet, des familles aux yeux du côté droit présentent des individus dont les yeux sont à gauche, et réciproquement. On rencontre aussi fréquemment une coloration anormale sur les deux côtés (individus ambicolores).

Ce sont les seuls Vertébrés dont la symétrie bilatérale soit modifiée ; toutefois, le chiasma optique subsiste, malgré la migration d'un œil : seule la partie distale du nerf de l'œil migrant se déplace.

Les Pleuronectiformes sont apparus à l'Éocène. En majorité marins, il en est cependant d'eurhyalins ; de très rares espèces sont dulçaquicoles. On les trouve dans toutes les mers, sauf les plus froides, des faibles profondeurs aux abysses. Nombre de Pleuronectiformes sont en mesure d'uniformiser leur coloration avec celle du fond par l'action de stimuli essentiellement optiques ; les individus aveugles perdent presque totalement cette capacité. Il existe une vingtaine de familles.

Chez les **Psettodidés** *(Psettodidae)*, la nageoire dorsale est pourvue à l'avant d'épines ; elle ne s'étend pas jusqu'à la tête. L'un des six rayons des nageoires pelviennes est épineux. Le maxillaire porte un os supplémentaire et les palatins ont des dents. Les yeux se trouvent indifféremment d'un côté ou de l'autre.

Il n'existe qu'un seul genre, *Psettodes,* d'Afrique tropicale occidentale, d'Afrique orientale, de la mer Rouge et de la région indo-pacifique.

Les **Scophthalmidés** *(Scophthalmidae)* ont les yeux du côté gauche. Leurs nageoires ventrales sont bien développées. Leur ligne latérale existe généralement des deux côtés. Les femelles matures sont plus grandes que les mâles matures.

On en compte cinq genres habitant l'océan Atlantique, dont quatre vivent aussi en Méditerranée.

La barbue, du genre *Scophthalmus,* présente un corps couvert d'écailles cycloïdes de petite taille et dépourvu de tubercules osseux. Les rayons antérieurs de la nageoire dorsale sont ramifiés sur la moitié de leur hauteur. Elle est brune ou grisâtre, avec de petites taches plus claires ou plus foncées. Elle atteint une longueur maximale de 70 cm. Elle habite la partie européenne de l'océan Atlantique et la Méditerranée.

Le genre *Psetta* a le corps couvert d'écailles et de tubercules osseux épars. Les rayons antérieurs de sa nageoire dorsale ne sont réunis qu'à leur extrémité. *Psetta maxima,* le turbot, vit dans l'océan Atlantique, du Maroc à la Norvège, et dans la Méditerranée. Il est gris brunâtre, et mesure au maximum 1 m pour un poids de 20 kg.

Lepidorhombus a des écailles caduques et cténoïdes à la face zénithale, mais cycloïdes à la face nadirale. Ses nageoires ventrales sont détachées de l'anale. Il possède des dents vomériennes.

Lepidorhombus whiff-jagonis, la cardine, est jaune-brun, souvent parsemé de petites taches irrégulières et foncées ; elle atteint une longueur de 60 cm.

◀ **Bothus podas** ***est l'une des nombreuses espèces de Bothidés dénombrées dans l'océan Atlantique; celle-ci pénètre aussi dans la Méditerranée.***

Zeugopterus punctatus, ou targeur, est assez commun dans l'Atlantique, du golfe de Gascogne à la Norvège.

Les **Bothidés** *(Bothidae)* ont les yeux à gauche et la nageoire ventrale droite plus courte à la base que la gauche. On en connaît treize genres, dont deux habitent aussi la Méditerranée.

Le genre *Bothus* comprend des espèces dont les yeux sont séparés par un large espace interorbitaire, plus particulièrement chez les mâles; l'œil inférieur est toujours en avant du supérieur. On a dénombré six espèces dans l'océan Atlantique, dont l'une, *Bothus podas,* pénètre aussi dans la Méditerranée. Gris foncé avec de petites taches foncées et des ocelles, il peut mesurer jusqu'à 20 cm au total; il descend jusqu'à 400 m de profondeur, et fréquente les fonds vaseux.

Chez les *Arnoglossus,* les premiers rayons de la dorsale sont plus allongés que les autres. Certaines espèces ont les yeux peu éloignés l'un de l'autre, mais séparés par une crête osseuse ou par un espace concave interorbitaire.

Les **Pleuronectidés** *(Pleuronectidae)* ont les yeux placés sur la face droite. Leurs nageoires ventrales, à base courte, sont symétriques. Leur ligne latérale est bien développée des deux côtés. On en compte vingt-six genres, répandus dans l'hémisphère boréal, dont huit habitent les eaux atlantiques d'Europe, et deux la Méditerranée.

Pleuronectes platessa, la plie ou carrelet, vit de la mer de Barentz et de l'Islande au golfe de Biscaye. Elle peut atteindre 90 cm de longueur, la taille moyenne avoisinant les 50 cm.

Platichthys flesus, le flet, est commun dans les mers européennes. *Hippoglossus hippoglossus,* le flétan, est un Poisson du nord de l'Atlantique à la chair très savoureuse. Il peut dépasser 2 m de long. *Limanda limanda,* la limande, est un Poisson très commun du golfe de Gascogne à l'Islande; sa ligne latérale est fortement arquée dans sa portion antérieure.

Les **Soléidés** *(Soleidae)* possèdent des yeux minuscules, situés généralement à droite, l'œil supérieur venant souvent se placer devant l'autre. Dans la plupart des cas, le bord de l'opercule est caché. Les écailles du tronc suivent sans solution de continuité celles de la tête. Il y a environ trente genres.

L'espèce la mieux connue est *Solea vulgaris,* la sole, représentée dans l'océan Atlantique oriental et la Méditerranée. Elle atteint au maximum 40 cm de longueur; elle est brun grisâtre avec une tache noire à la nageoire pectorale.

Microchirus variegatus, la sole perdrix ou panachée, se reconnaît par ses barres transversales foncées sur fond brun clair.

Les **Cynoglossidés** *(Cynoglossidae)* ont les yeux et la pigmentation du côté gauche. Leur profil est elliptique, plus ou moins allongé, l'extrémité postérieure étant assez effilée. Les nageoires dorsale, anale et caudale sont contiguës.

G. Mazza

▲ ***Forme juvénile de baliste, ou poisson-gâchette*** **(Balistes carolinensis),** ***les épines de la dorsale rabattues.***

Il en existe plusieurs genres, dont *Cynoglossus* et *Symphurus,* qui comptent de nombreuses espèces comme *Cynoglossus browni* des côtes atlantiques d'Afrique, et *Symphurus nigrescens.*

Ordre des Tétraodontiformes

Les Tétraodontiformes *(Tetraodontiformes)* portent aussi le nom de Plectognathes car leurs os prémaxillaires et maxillaires sont soudés, mais cette soudure n'est pas nécessairement présente chez tous les membres de l'ordre.

Le corps des Tétraodontiformes est court, leur tête bien développée; leur bouche et leurs ouvertures branchiales, par contre, sont petites. Leur peau est pavée de plaques osseuses ou d'écailles épaisses et rugueuses, ou encore de piquants de diverses grosseurs. Leurs nageoires sont pourvues ou non d'épines; les ventrales (qui manquent très souvent), sont réduites et placées en position thoracique; la caudale est homocerque. Les côtes sont absentes. Ce sont des Poissons physoclistes.

Les Tétraodontiformes, principalement marins, le plus souvent côtiers, habitent tout particulièrement les régions tropicales. La plupart ne sont pas comestibles; certains sont toxiques et contiennent des ichthyotoxines. On a dénombré sept familles.

Les **Balistidés** *(Balistidae),* appelés balistes ou poissons-gâchette, comptent environ trente espèces marines, surtout des régions tempérées et tropicales. On rencontre dans l'Atlantique et la Méditerranée *Balistes carolinensis,*

Les noms vulgaires d'arbalétriers ou poissons-gâchette, donnés aux membres du genre *Balistes,* se réfèrent à une caractéristique morphologique des premières épines de la nageoire dorsale.

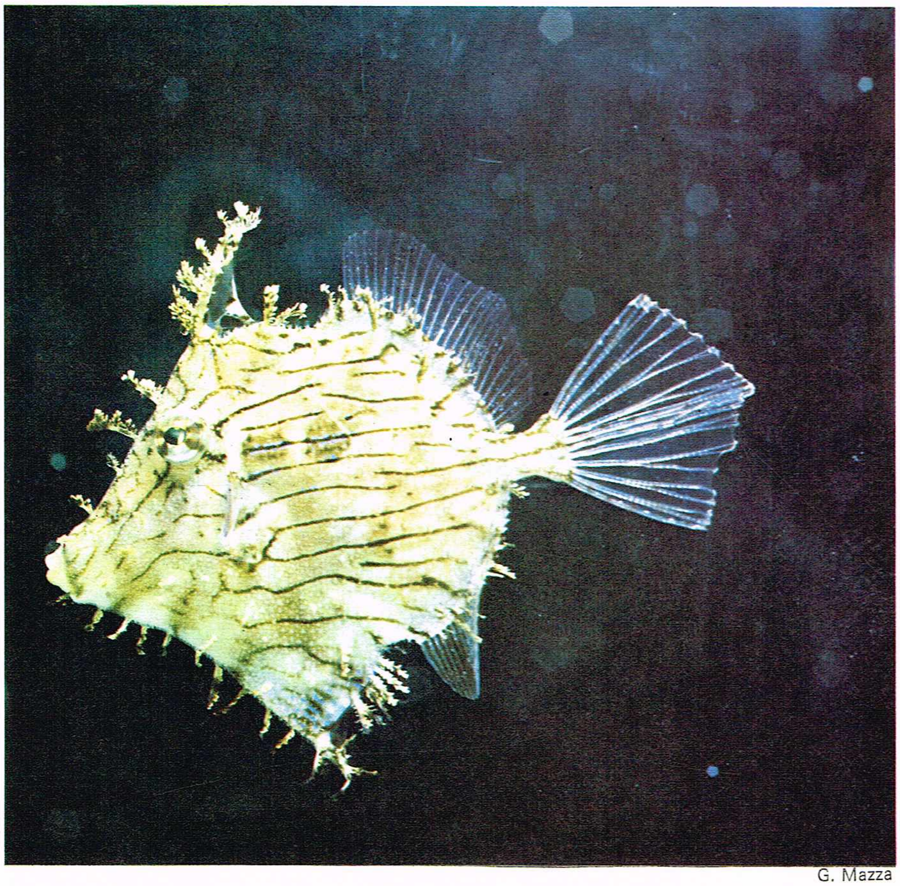

G. Mazza

▲ **Chaetoderma penicilligera** *est un Monacanthidé élevé fréquemment en aquarium.*

Les **Monacanthidés** *(Monacanthidae)* sont proches des Balistidés, dont ils diffèrent essentiellement par la première (et souvent unique) épine de la première nageoire dorsale, insérée au niveau des yeux. Ils sont le plus souvent de petite taille, mesurant de 12 à 25 cm de longueur.

Les aquariophiles élèvent les espèces des genres *Chaetoderma,* en particulier *C. penicilligera* et *Monacanthus,* ainsi que l'unique espèce du genre *Oxymonacanthus.*

Les **Tétraodontidés** *(Tetraodontidae)* sont au nombre d'environ quatre-vingt-dix espèces. Ce sont des carnivores, représentés dans toutes les mers chaudes et tempérées, y compris la Méditerranée, où l'on trouve *Ephippion guttiferum* et *Lagocephalus lagocephalus ;* on en rencontre aussi dans les eaux saumâtres et douces.

Ces Poissons, une fois retirés de l'eau, se gonflent et deviennent quasiment sphériques; rendus à leur milieu naturel, ils flottent alors pendant quelque temps, le ventre en l'air. Cette réaction, de nature émotionnelle, se produit aussi bien dans l'eau ; elle est rendue possible par la présence d'un ample diverticule ventral dans l'estomac, se remplissant d'air ou d'eau, selon le cas, grâce à de puissants sphincters dont le relâchement permet l'expulsion de l'air ou de l'eau ingurgités.

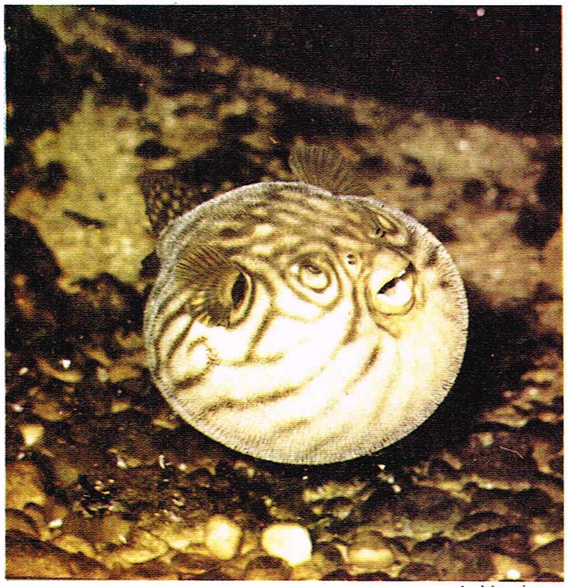

A. Margiocco

▶ **Tetraodon reticularis** *dans son attitude de défense.*

La peau des Tétraodontidés est pourvue de minuscules piquants. Ils ne possèdent pas de nageoires ventrales. Ils ont une sorte de bec constitué de deux plaques maxillaires et deux plaques mandibulaires, d'où leur nom scientifique qui signifie « à quatre dents ». Certains Tétraodontidés atteignent une longueur de 90 cm, mais la majorité ne dépasse pas 45 cm.

La chair et tous les viscères de ces Poissons contiennent de la tétrodontoxine, substance toxique pour l'homme.

Les **Diodontidés** *(Diodontidae)* comptent environ quinze espèces de toutes les mers tropicales et subtropicales. *Diodon hystrix,* le diodon commun, apparaît exceptionnellement dans la Méditerranée. Ces Poissons possèdent des piquants cutanés, et un bec formé de deux pièces, l'une supérieure et l'autre inférieure, d'où le nom générique et familial (à deux dents). Les espèces qui ont de gros piquants les tiennent appliqués contre leur corps durant la nage, ne les dressant qu'au moment où ils se gonflent d'air ou d'eau. Les plus petits individus, du genre *Chilomycterus,* possèdent des piquants courts, toujours dressés. Comme les Tétraodontidés, les Diodontidés ont un diverticule ventral à l'estomac, qu'ils peuvent gonfler de la même façon.

Les **Ostracionidés** *(Ostracionidae)* ont reçu le nom vulgaire de poisson-coffres car ils sont protégés par une robuste enveloppe osseuse constituée de plaques polygonales. Ils ont une section transversale triangulaire, quadrangulaire ou pentagonale, et présentent fréquemment des protubérances pointues. Leurs nageoires sont dépourvues d'épines; les ventrales sont absentes. Ils vivent comme enclos dans un robuste coffre dermique, percé d'orifices pour la bouche, les yeux, les nageoires, l'anus et l'orifice uro-génital.

On les trouve essentiellement dans les océans Atlantique, Indien et Pacifique.

Les **Molidés** *(Molidae)* sont les Animaux appelés poissons-lune. *Ranzania truncata* ou *laevis,* et *Mola mola,* cosmopolites, habitent surtout les mers chaudes, mais on les rencontre aussi dans la Méditerranée. Le premier, unique représentant de son genre, a le corps oblong ; il est gris argenté, avec des lignes verticales plus claires, partiellement bordées de noir; il atteint une longueur de 80 cm. Le second est presque discoïdal ; sa livrée est gris argent sur le tronc; il possède des nageoires impaires brun olive et des pectorales brun rougeâtre; il mesure jusqu'à 3 m de long, pour un poids de 2 tonnes.

On peut aussi citer la famille des **Canthigastéridés** *(Canthigasteridae).*

Ordre des Échénéiformes

Les Échénéiformes *(Echeneiformes)* ou Discocéphales *(Discocephali)* sont caractérisés par la transformation, au cours de leur développement, de leur première nageoire dorsale en un disque adhésif, étalé sur leur tête très déprimée. Ce disque présente deux rangées parallèles de lamelles transversales; il agit comme une puissante ventouse.

Les **Échénéidés** *(Echeneidae)* ont un disque adhésif dont le rôle biologique est connu depuis l'Antiquité : bien que ce soient de bons nageurs, ces Poissons se suspendent à de gros Vertébrés aquatiques ou même parfois à des bateaux, pour se laisser transporter; ils s'attachent par exemple à des requins, et se nourrissent des restes de repas et des ectoparasites de leurs hôtes.

Ordre des Gobiésociformes

Les Gobiésociformes *(Gobiesociformes),* au nombre d'une centaine d'espèces, sont surtout marins, et habitent les eaux tempérées et tropicales, à l'exception de quelques espèces des eaux intérieures du Panama et des îles Galapagos.

Ils présentent un organe adhésif discoïdal, situé sous le ventre, entre les nageoires ventrales jugulaires qui sont écartées l'une de l'autre. Ils ne possèdent ni écailles,

D. Faulkner

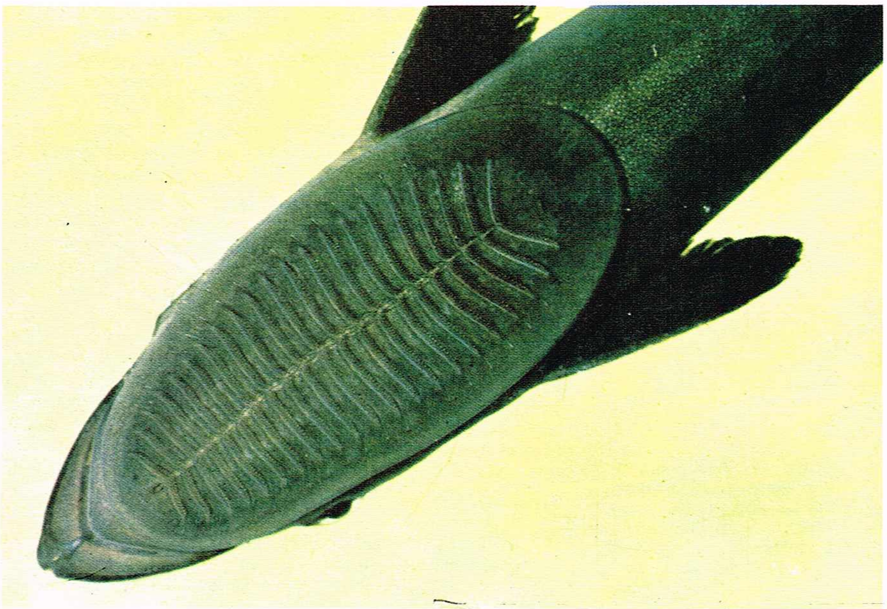

Transworld

ni vessie natatoire. Ils sont de taille moyenne ou petite (de 2 à 30 cm).

Chez les **Gobiésocidés** *(Gobiesocidae)*, citons *Gouania wildenowi* qui est endémique dans la Méditerranée. Ses courtes nageoires dorsale et anale sont unies à la caudale ; il ne mesure que 5 cm de long.

Le porte-écuelle ou barbier, *Lepadogaster lepadogaster*, a le museau plat et spatuliforme, avec un petit tentacule bifide près de chaque narine ; ses nageoires dorsale et anale, réunies à la caudale par une membrane, en sont distinctes ; il est brun verdâtre ou rougeâtre et atteint 7 cm de long ; il vit dans la Méditerranée et dans le nord-est de l'océan Atlantique.

Ordre des Batrachoïdiformes

Les Batrachoïdiformes *(Batrachoidiformes)* comptent une trentaine d'espèces. Il en existe une seule famille, qui vit dans les mers tropicales et tempérées, parfois présente dans les eaux saumâtres et douces.

Les **Batrachoïdidés** *(Batrachoididae)* ont un corps large et aplati à l'avant, rétréci vers l'arrière. Leur peau est épaisse et contient de petites écailles cycloïdes fort peu visibles. Leur grosse tête a une large bouche horizontale, pourvue d'appendices cutanés tentaculiformes, et de dents très aiguës. Leur première nageoire dorsale, petite, possède de deux à quatre épines ; la seconde est longue et molle ; les ventrales sont en éventail et situées en position jugulaire. Ces Poissons ont trois paires de branchies.

Ils ont une vaste distribution verticale et accomplissent des déplacements verticaux. On en compte environ onze genres, dont deux possèdent des glandes et des piquants venimeux.

Halobatrachus didactylus, le crapaud de mer, habite la Méditerranée, surtout dans sa partie ouest, et l'Atlantique oriental.

Ordre des Lophiiformes

Les Lophiiformes *(Lophiiformes)* ont la peau nue ou couverte de minuscules piquants. Leurs nageoires ventrales sont jugulaires ou absentes ; les pectorales sont géniculées. Le premier rayon de la première dorsale est séparé des autres (s'ils existent), articulé à la base, et porte à son sommet un appendice globuleux ou charnu, entier ou ramifié, parfois lumineux. Les côtes sont absentes. Les ouvertures branchiales sont réduites à des trous situés derrière la base des nageoires pectorales, plus ou moins près de leur aisselle. Les branchies sont en nombre réduit. Les quelque deux cent vingt-cinq espèces de cet ordre sont marines, benthiques, et, pour la plupart, bathyphiles ; certaines possèdent des photophores.

Le corps des **Lophiidae** *(Lophiidae)* est fortement rétréci dans sa partie postérieure. Leur tête est large et déprimée, avec une grande bouche pourvue de robustes dents. La première nageoire dorsale a quelques rayons indépendants, dont le premier, ou *illicium*, est un peu plus long et porte distalement un lobe charnu.

Ces Poissons vivent sur les fonds sableux et vaseux, jusqu'à plusieurs centaines de mètres de profondeur. Ils sont carnivores et voraces : agitant leur illicium, on pense qu'ils peuvent attirer des proies ; on a trouvé dans leur estomac jusqu'à de petits squales et des Oiseaux marins. Une fois pêchés, il faut les manipuler prudemment, car ils restent longtemps vivaces. Citons la baudroie ou lotte, *Lophius piscatorius*, qui peut atteindre 2 m et *L. budegassa* qui mesure moins d'1 m.

Les **Antennariidés** *(Antennariidae)* possèdent des nageoires ventrales. Ils comptent environ soixante espèces marines, le plus souvent benthiques, parfois pélagiques. Ce sont des carnivores. On en observe dans presque toutes

▲ ***A gauche, un curieux Poisson, appelé communément poisson-coffre, appartenant aux Ostracionidés. A droite, un représentant des Échénéidés dont on voit le disque adhésif.***

▼ **Lophodiodon calori** *est une espèce représentative des Diodontidés de l'océan Indien.*

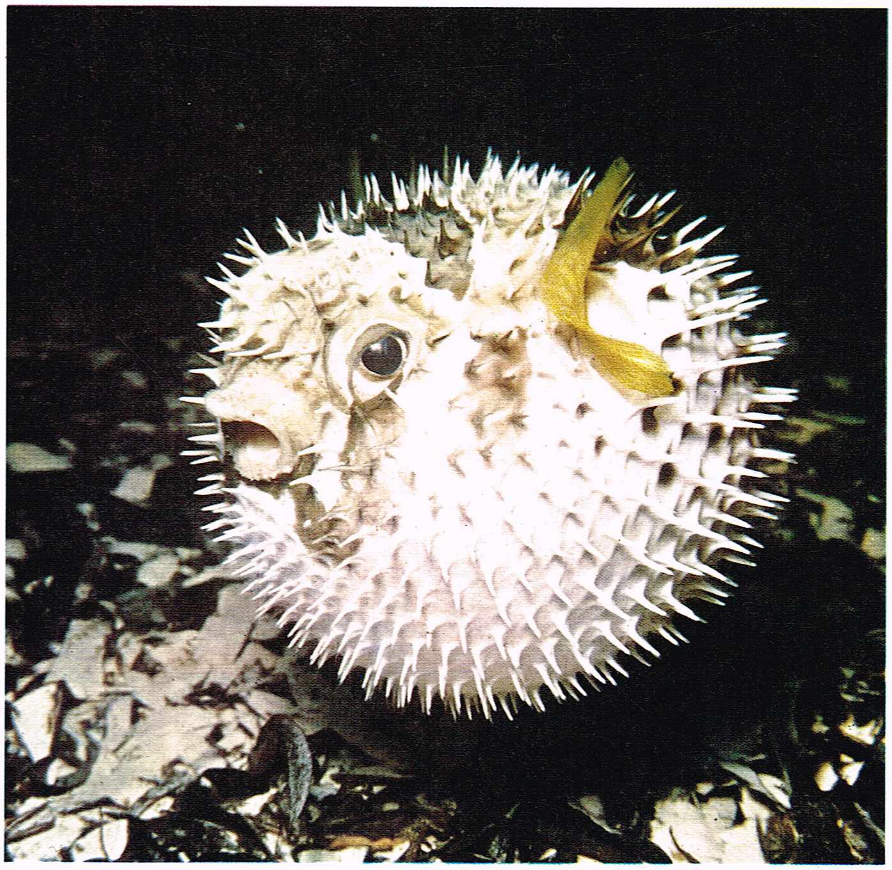

R. Dei

▶ *Histrio histrio*, *commun dans l'océan Pacifique et l'océan Atlantique, vit parmi les sargasses auxquelles il peut s'agripper.*

les mers tropicales, subtropicales et tempérées, mais pas en Méditerranée.

Les Antennariidés peuvent changer de couleur, lentement, mais nettement. On élève en aquarium divers *Antennarius*.

Histrio histrio, l'antennaire marbré, est commun dans l'océan Pacifique et l'océan Atlantique, vivant parmi les Algues flottantes comme les sargasses, auxquelles ses nageoires pectorales, quelque peu préhensiles, lui permettent de s'agripper.

Les **Ogcocéphalidés** *(Ogcocephalidae)* renferment une trentaine d'espèces des mers chaudes et tempérées, mais absentes de la Méditerranée. On en rencontre surtout en profondeur, mais certaines espèces sont côtières; quelques-unes peuvent être élevées en aquarium.

Les Ogcocéphalidés possèdent de grosses nageoires pectorales, ressemblant vaguement à des bras, et de petites nageoires ventrales faisant penser à des pattes; par ailleurs, ils se traînent sur ces deux paires de nageoires quand ils se déplacent sur le fond de la mer.

Ordre des Mastacembéliformes

Les Mastacembéliformes *(Mastacembeliformes)* ne comprennent qu'une seule famille.

Les **Mastacembélidés** *(Mastacembelidae)* comprennent environ cinquante espèces, des eaux douces d'Afrique et d'Asie. Leur forme est caractéristique : ils sont allongés, et portent un nombre variable d'éléments épineux isolés, repliables, qui précèdent la nageoire dorsale (à rayons mous) et la nageoire anale. Ils sont dépourvus de ventrales. Leurs nageoires dorsale et anale sont soudées ou non à la caudale.

De nombreuses espèces ont la possibilité de respirer l'air atmosphérique, ce qui leur permet de vivre dans des eaux pauvres en oxygène.

Les aquariophiles élèvent le mastacembelus commun *(Mastacembelus armatus)* et le mastacembelus tacheté *(M. maculatus)*.

Sous-classe des Brachioptérygiens

Les Brachioptérygiens *(Brachiopterygii)* sont représentés par l'unique ordre des Polyptériformes.

Ordre des Polyptériformes

Les Polyptériformes *(Polypteriformes)* comptent parmi les Poissons les plus primitifs qui existent actuellement. Leur corps est allongé et quelque peu serpentiforme. Leurs écailles sont losangiques et épaisses, à bord postérieur droit. Leurs nageoires pectorales sont lobées; les ventrales sont abdominales ou absentes; la caudale est géphyrocerque. La dorsale est divisée en nombreuses pinnules, précédées chacune d'une épine.

Il existe des spiracles, des opercules et des sub-opercules, mais les rayons branchiostèges sont remplacés par des plaques gulaires. La vessie natatoire ventrale, pourvue d'un canal, a des parois lisses; elle est partagée en deux parties dans sa longueur : la partie droite, plus longue, fait fonction d'organe respiratoire accessoire, capable d'absorber l'oxygène atmosphérique. Le cœur a un cône artériel plurialvéolé. L'intestin possède une valvule spirale. Les larves ont une paire de grosses branchies externes, en forme de plumes.

L'ordre remonte peut-être au Crétacé; il existait d'une façon certaine à l'Éocène.

Les **Polyptéridés** *(Polypteridae)* sont répandus dans les eaux douces d'Afrique, avec les deux genres *Polypterus* et *Calamoichthys;* le premier, plus largement diffusé, compte plus d'espèces.

Le polyptère du Nil, *Polypterus bichir,* qui habite le Nil, les lacs Rodolphe et Tchad, atteint une longueur de 1 m. Il fréquente les fonds vaseux où il trouve sa nourriture, constituée par des animalcules benthiques. Quand il en est réduit à vivre au sec, il passe dans une sorte d'état léthargique, durant lequel il respire l'air atmosphérique grâce à sa vessie natatoire, richement vascularisée. Il est comestible et facile à élever en aquarium.

Le poisson-roseau, *Calamoichthys calabaricus,* du bas Niger et du Cameroun, se distingue facilement des polyptères, car il ne possède pas de nageoires ventrales. Il est nettement plus petit (longueur maximale 40 cm). Il est actif la nuit, et sort souvent de l'eau pour aller d'une mare à une autre. Lui aussi peut utiliser l'oxygène atmosphérique à l'aide de sa vessie natatoire. Il se nourrit de toutes sortes d'animalcules. Il construit des nids de plantes aquatiques pour ses œufs.

Sous-classe des Dipneustes

Les Dipneustes *(Dipneusti)* ne sont plus représentés actuellement que par les Cératodiformes *(Ceratodi)*. Les *Dipteri* sont tous fossiles.

Ordre des Cératodiformes

Les Cératodiformes ont un crâne à suspension autostylique. Ils ne possèdent pas d'os prémaxillaires et maxillaires, et, à la place des dents, ils portent presque toujours deux grosses plaques triturantes et deux plaques mandibulaires, semblables, avec ou sans crêtes dentelées.

Leurs vertèbres sont presque constamment acentriques. Leurs nageoires paires sont toujours bisériées.

Ils ont aussi une respiration pulmonaire, et, lorsqu'ils se trouvent dans l'eau, leurs branchies et leurs poumons fonctionnent le plus souvent simultanément. Leur circulation est double et imparfaite. Leur intestin est pourvu d'une valvule spirale et se termine par un cloaque.

D. Faulkner

fentes branchiales, au nombre de cinq, débouchent non pas à l'extérieur, mais dans la chambre branchiale.

Pendant la saison sèche, certaines espèces de *Protopterus* tombent en léthargie, s'enfonçant dans la vase et formant une cavité revêtue de mucus durci ; ces Poissons respirent alors l'air atmosphérique, qui pénètre dans la cavité par un petit trou de l'enveloppe de mucus.

Sous-classe des Crossoptérygiens

Les Crossoptérygiens *(Crossopterygii)* sont apparus dans les mers du Dévonien et ont probablement évolué dans des eaux littorales où les marées étaient très importantes, ainsi que dans les marais côtiers, c'est-à-dire dans un milieu favorisant une spécialisation amphibie.

Par certains caractères, ils sont plus primitifs que la plupart des Actinoptérygiens ; par d'autres, ils se rapprochent des Vertébrés Amphibiens. Cette dernière ressemblance est plus prononcée que chez tous les autres Poissons, dont ils diffèrent par la structure des écailles, des nageoires, de divers organes internes, etc.

On peut dire que ce sont des Vertébrés housepisciformes, à squelette plus ou moins ossifié, avec une seule paire d'ouvertures branchiales, et un encéphale divisé en deux hémisphères ; par ailleurs, ils possèdent presque

▼ *Les Lophiidés sont des Poissons carnivores et voraces avalant tout ce qui est à leur portée ; ici* **Lophius piscatorius**, *la baudroie, ou lotte, européenne.*

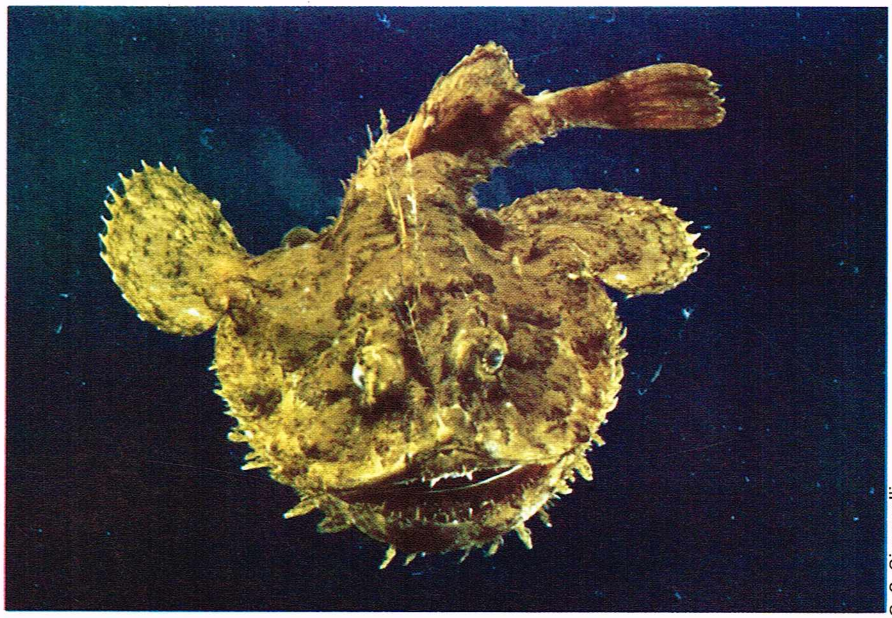

G. S. Giacomelli

On compte trois familles de Cératodiformes.

Les **Cératodidés** *(Ceratodidae)* ne comptent qu'une seule espèce vivante : le dipneuste australien *(Neoceratodus forsteri)*, qui habite certains fleuves du Queensland. Il atteint une longueur de 1,75 m. Il possède des écailles cycloïdes, très grosses. Ses nageoires paires sont très grandes. Son squelette est en grande partie cartilagineux. Il a un seul poumon, avec une seule veine pulmonaire.

Les **Lépidosirénidés** *(Lepidosirenidae)* sont aujourd'hui représentés par le dipneuste d'Amérique du Sud, *Lepidosiren paradoxa*, qui vit dans les marais du Brésil, de la Bolivie et du Paraguay. Il est serpentiforme et sa longueur dépasse 1 m. Son poumon est presque entièrement divisé en deux moitiés symétriques et comporte deux veines pulmonaires. Son développement se fait par des métamorphoses.

Les **Protoptéridés** *(Protopteridae)* comptent actuellement un seul genre, *Protopterus*, avec quatre espèces. On les rencontre dans les eaux intérieures de l'Afrique équatoriale et tropicale.

Ces Poissons ont une longueur maximale de 1,50 m. Les écailles cycloïdes sont petites. Leurs nageoires impaires sont réunies, et leurs nageoires paires réduites à peu près à leur axe. Le squelette est en grande partie cartilagineux. Le poumon, nettement divisé en deux moitiés, comporte toutefois, à l'avant, une communication entre ses deux parties ; il possède deux veines pulmonaires. Les arcs branchiaux sont au nombre de six, et les

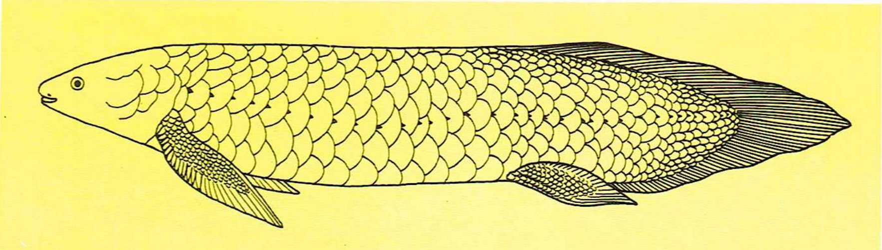

I.G.D.A.

▲ **Neoceratodus forsteri**, *ou Dipneuste australien ; on observera les grandes écailles de type cosmoïde dont il est recouvert.*

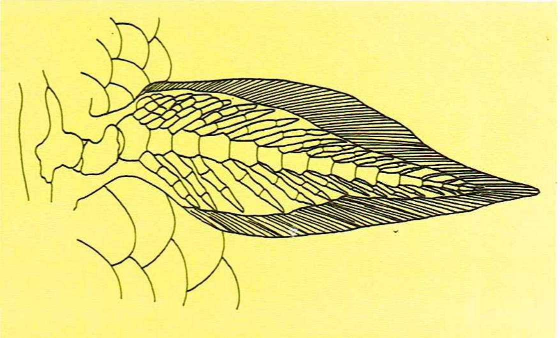

I.G.D.A.

◀ *Nageoire pectorale de* **Neoceratodus forsteri** *; on remarquera les rayons préaxiaux et postaxiaux.*

toujours des narines internes, un cloaque, une circulation simple ou double (dans ce dernier cas, elle est incomplète) ; enfin, leur respiration peut être seulement branchiale ou à la fois branchiale et pulmonaire ; dans ce cas, c'est un diverticule sacciforme et alvéolé du pharynx qui fait fonction de poumon. Leurs écailles sont cosmoïdes ou cycloïdes. L'ossification de leur squelette présente divers degrés. La chambre branchiale est protégée par des pièces osseuses operculaires ; typiquement, il existe plusieurs pièces préoperculaires. Les rayons branchiostèges manquent. La gorge présente, normalement, deux grosses plaques osseuses. Les yeux sont généralement entourés par des os sclérotiques plus ou moins nombreux. Les nageoires sont soutenues par des lépidotriches non épineux et plus nombreux que les pièces endosquelettiques de support. Les nageoires autres que la caudale, aussi bien paires qu'impaires, sont lobées. Les nageoires paires, qui présentent certaines affinités avec les membres des Tétrapodes, sont en éventail ou bisériées, et les ventrales sont presque toujours en position abdominale. La bouche est terminale et pourvue de dents coniques ou de plaques broyeuses, assez proches de celles des Holocéphales.

On distingue deux super-ordres : les Rhipidisti, tous éteints, et les Actinisti avec l'ordre des Cœlacanthiformes.

Ordre des Cœlacanthiformes

Les Cœlacanthiformes *(Coelacanthiformes)* possèdent des écailles cosmoïdes. Leurs nageoires sont en palettes ; la caudale présente un lobe médian proéminent qui correspond à l'extrémité de la notocorde. Les « vertèbres » sont représentées par les pièces basidorsales et basiventrales. La bouche ne possède pas d'os maxillaires, et son bord supérieur est constitué par les prémaxillaires, des palatins et des ptérygoïdes ; les dents sont coniques. Chez les formes fossiles on a décrit une « vessie natatoire ossifiée » qui est peut-être l'analogue du poumon dégénéré de l'actuel cœlacanthe.

Apparu au Dévonien, le groupe connut son apogée au Trias, puis régressa, de telle sorte qu'il fut longtemps considéré comme éteint. Il ne comprend que la seule famille des **Cœlacanthidés** *(Coelacanthidae)*.

C'est en 1938 que des pêcheurs ont attrapé pour la première fois un cœlacanthe vivant par 100 m de profondeur, au large de l'embouchure du Chalumna en Afrique du Sud. Il fut nommé *Latimeria chalumnae*. Plusieurs exemplaires de Cœlacanthidés ont été pêchés depuis, toujours dans la région des Comores, et étudiés par des savants français.

BIBLIOGRAPHIE

ARCANGELI A., *Il Ciprino dorato,* Hœpli, Milan, 1926. - BARNARD K. H., *A Pictorial Guide to South Africa Fishes, Marine and Freshwater,* Miller, Le Cap. - BIGELOW H. B., SCHRŒDER W. C., *Fishes of the Western North Atlantic, Part I,* 1948, Part II, 1953, Part III, 1963 ; Sears Foundation for Marine Research, Yale Univ., New Haven. - BINI G., *Atlante dei pesci delle coste italiane,* 8 vol., Mondo Sommerso, Rome, 1967. - BORGSTROM G. HEIGHWAY A. J., *Atlantic Ocean Fisheries,* Fishing News, Londres, 1961. - BOUGIS P., *Poissons marins,* in *Atlas des Poissons,* 2 vol., Boubée, Paris, 1959. - BREDER C. M., *Field Book of Marine Fishes of the Atlantic Coast,* Putnam, Londres, 1948. - BUDKER P., *The Life of Starks,* Columbia Univ. Press, New York, 1971. - CONCI C., TORCHIO M., *Pesci,* Martello, Milan, 1961. - DOTTRENS E., *Poissons d'eau douce,* 2 vol., Delachaux-Niestlé, Paris, 1951. - FABER G. L., *The Fisheries of the Adriatic and the Fish Thereof,* Quaritch, Londres, 1883. - GILBERT P. W., MATHEWSON R.F., RALL D. P., *Sharks, Skates and Rays,* Hopkins, Baltimore, 1967. - GOLVAN Y. J., *Catalogue systématique des Poissons actuels,* Masson, Paris, 1963. - *Traité de zoologie,* t. XIII, *Agnathes et Poissons,* sous la direction de GRASSÉ P. P., Masson édit., Paris, 1958. - GUIBE J., *les Poissons,* in *Encyclopédie de la Pléiade, Zoologie 3, Métazoaires,* t. III, Gallimard, Paris, 1972. - HARRISON A. C., *Fresh-water Fish and Fishing in Africa,* Nelson, Johannesburg, 1963. - HERALD E. S., *Living Fishes of the World,* Doubleday, New York, 1961. - HUBBS C.L., LAGLER K. F., *Fishes of the Great Lakes Region, University* Michigan Press, Toronto, Canada 1958. - JONES H. F. R., *Fish Migration,* Arnold, Londres, 1968. - LADIGES W., VOGT D., *Guida dei pesci d'acqua dolce d'Europa fino agli Urali e al Mar Caspio,* Labor, Milan, 1965. - LAGLER K., BARDACH J. E., MILLER R. R., *Ichthyology,* Wiley, New York, 1962. - LA GORCE O. J., *The Book of Fishes,* Nat. Geogr. Soc., Washington, 1961. - MARCUZZI G., *Ecologia animale,* Feltrinelli, Milan, 1968. - MARSHALL T. C., *Fishes of the Great Barrier Reef and Coastal Waters of Queensland,* Livingston, Sydney, 1965. - MUNRO I. S. R., *The Marine and Fresh Water Fishes of Ceylon,* Dept External Affairs, Canberra, 1955. - NIKOLSKII G. V., *Special Ichthyology,* Israel Program Sc. Transl., Jérusalem, 1961. - NORMAN J. R., *A History of Fishes,* Benn, Londres, 1963. - PALOMBI A., SANTARELLI M., *Gli animali commestibili dei mari d'Italia,* Heopli, Milan, 1961. - PINCHER C., *A Study of Fishes,* Jenkins, Londres. - POLL M., *Poissons marins,* Musée royal d'histoire naturelle de Belgique, Bruxelles, 1947. - ROUX C., *Poissons téléostéens du Plateau continental brésilien. Ann. Inst. Océan.,* fasc. X, 1973. - SCHULTZ L., *The Ways of Fishes,* Van Nostrand, Londres, 1948. - SCORTECCI G., *Gli animali,* t. V, Labor, Milan, 1953. - SMITH J. L. B., *The Sea Fishes of Southern Africa,* Central News Agency, Le Cap, 1961. - SOLJANT., *Fishes of the Adriatic,* Nolit. Publ., Belgrade, 1963. - TORCHIO M., *La vita del mare,* Ist. Geogr. De Agostini, Novara, 1967. - TORCHIO M., *Animali d'acquario,* I.P.I., Milan, 1968. - TORTONESE E., *Gli animali superiori,* S.E.I., Turin, 1949. - TORTONESE E., *Leptocardia, Cyclostomata, Selachii,* Calderini, Bologne, 1956. - TORTENESE E., *Pesci e Cetacei del Mar Ligure,* Bozzi, Gênes, 1965. - TORTONESE E., LANZA B., *Pesci, Anfibi e Rettili,* Martello, Milan, 1968. - WHITLEY G., ALLAN J., *The Sea-horse and Its Relatives,* Georgian House, Melbourne, 1958.

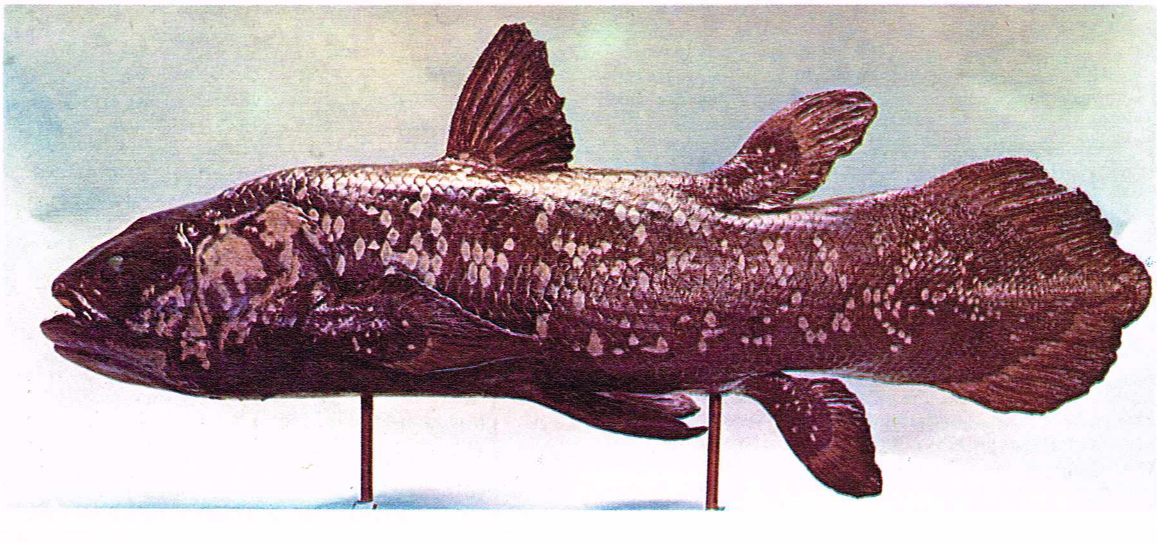

P. Summ - Jacana

▶ ***En 1938, un spécimen de* Latimeria chalumnae *fut le premier cœlacanthe à être ramené, vivant, par des pêcheurs.***

◀ ***Les Amphibiens sont répandus partout dans le monde sauf dans les régions arctiques, antarctiques et les îles océaniennes; ici, face ventrale du sonneur à ventre jaune* (Bombina variegata) *dans l'eau.***

AMPHIBIENS

Les Amphibiens *(Amphibia)* tirent leur origine des Poissons Crossoptérygiens, peut-être du genre *Eusthenopteron*, qui tentèrent d'abandonner le milieu aquatique au Dévonien, il y a plus de deux cent quatre-vingts millions d'années. L'expansion des Amphibiens a eu lieu à peu près du milieu du Carbonifère à la fin du Permien. Au Trias, ils laissèrent la place aux Reptiles, et, parmi les nombreuses formes qui survécurent, seul un nombre limité se transforma en Urodèles, Anoures et Apodes.

Les Amphibiens actuels sont caractérisés par une *peau nue,* très riche en glandes muqueuses et granuleuses, dont la sécrétion est destinée à conserver la souplesse et l'humidité des téguments. La couche cornée est quasiment absente. Ils possèdent quatre membres; les mains ont quatre doigts, et les pieds en possèdent cinq. Chez les Urodèles, ces quatre membres sont à peu près de la même taille quand les postérieurs ne sont pas absents; chez les Anoures, les pattes postérieures sont plus développées que les antérieures; quant aux Apodes, ils sont totalement dépourvus de membres. La queue, très longue chez les Urodèles, est atrophiée chez les Apodes et absente chez les Anoures.

Le *crâne* est articulé avec la colonne vertébrale par deux condyles; les côtes, lorsqu'elles sont présentes, ne s'articulent pas avec le sternum.

Le *cœur,* chez les adultes, est divisé en trois cavités; la circulation est double et incomplète; chez les larves, elle est semblable à celle des Poissons. La respiration des adultes se fait par des poumons, alors que les larves respirent au moyen de branchies. La température interne de ces Animaux est fonction de celle du milieu : les Amphibiens sont poïkilothermes, c'est-à-dire à sang froid.

La *fécondation* est soit interne (Urodèles), soit externe (Anoures). Seuls les Apodes, ainsi que les Anoures de la famille des Liopelmidés, possèdent des organes copulateurs. Les œufs, de petite taille, sont émis en faible nombre chez les Apodes, en grand nombre chez les Urodèles et en très grand nombre chez les Anoures. Les œufs les plus gros renferment une importante quantité de substances vitellines. L'embryon se développe sans être entouré par l'amnios. Les juvéniles ne ressemblent pas aux adultes; avant d'atteindre leur forme définitive et de pouvoir respirer l'air atmosphérique, ils subissent une métamorphose assez complexe, en restant habituellement dans l'eau. La métamorphose a parfois lieu dans l'œuf; les nouveau-nés ont alors l'aspect des adultes. Certains Anoures africains, et quelques Urodèles et Apodes sont vivipares.

Les Amphibiens sont répandus partout dans le monde, sauf dans les régions arctiques, antarctiques et les îles océaniennes. On en rencontre de moins 300 m à 4 500 m au-dessus du niveau de la mer. Leur systématique est assez complexe. A l'heure actuelle il n'existe pas de classification acceptée universellement. Dans le présent ouvrage nous suivrons celle de H.E. Colbert (1955). Cet auteur divise la classe des Amphibiens en deux sous-classes, les Apsidospondyles et les Lépospondyles, et en treize ordres, dont trois seulement ont survécu jusqu'à nos jours.

Classe des Amphibiens

□ *Sous-classe des Apsidospondyles*

— Super-ordre des Labyrinthodontes *
- ○ *Ordre des Ichthyostégaliens* *
- ○ *Ordre des Embolomères* *
- ○ *Ordre des Rachitomes* *
- ○ *Ordre des Trématosauriens* *
- ○ *Ordre des Stéréospondyles* *

— Super-ordre des Salientia
- ○ *Ordre des Éoanoures* *
- ○ *Ordre des Proanoures* *
- ○ *Ordre des Anoures*

□ *Sous-classe des Lépospondyles*
- ○ *Ordre des Aistopodes* *
- ○ *Ordre des Nectridiens* *
- ○ *Ordre des Microsauriens* *
- ○ *Ordre des Urodèles*
- ○ *Ordre des Apodes*

* *Groupes fossiles*

▶ *A, caractères morphologiques les plus remarquables des Ranidés : dt, doigts (numérotés de 1 à 4); av, avant-bras; br, bras; as, aisselle; cb, commissure buccale; do, diamètre oculaire; bo, bouche; mu, museau; na, narine; lt, longueur de la tête; ty, tympan; ltt, longueur tête + tronc; ss, saillies sacrées; bl, bande latéro-dorsale; co, coccyx; fe, fémur; tb, tibia; ca, calcanéum; ta, tarse; pi, pied (1 à 5 doigts), me, membrane; ge, genou; ai, aine. B, caractères morphologiques principaux des Bufonidés : pa, parotoïdes; ty, tympan; la, largeur supra-oculaire; lo, longueur supra-oculaire; na, narine; do, distance interorbitaire; cr, canthus rostralis; so, supra-oculaire; œ, œil; cc, crête du repli crânien; di, distance interparotoïdienne; bv, bande, ou trace, vertébrale; ve, verrues. C, caractères particuliers des membres antérieurs des Anoures : tubercules métacarpiens, palmaire (pa), basal (ba); 1 à 4 doigts. D, principaux caractères des membres postérieurs des Anoures : tubercules métatarsiens, interne (in) et externe (ex); 1 à 5 doigts.*

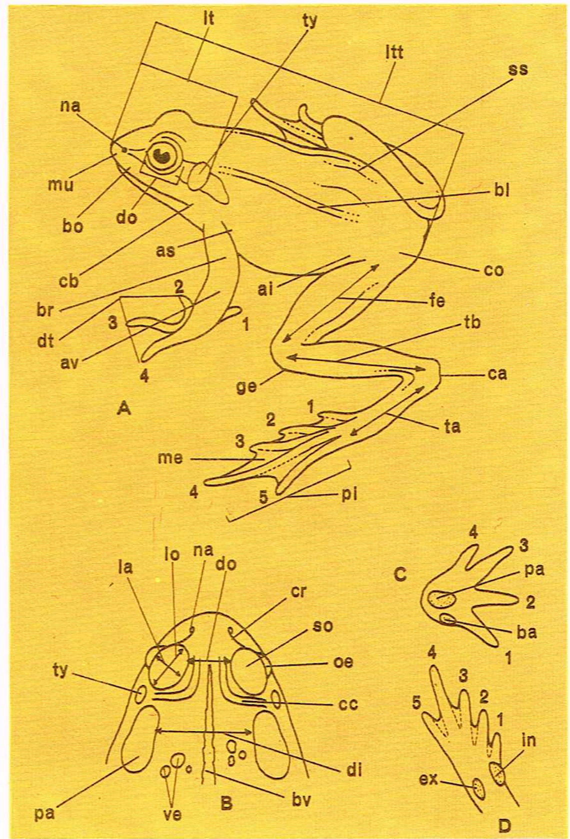

I.G.D.A.

Sous-classe des Apsidospondyles

Les Apsidospondyles (en grec, « vertèbres à arc ») étaient caractérisés par des vertèbres à arc neural net et séparé du corps sous-jacent, l'ensemble constituant une colonne vertébrale. Ils possédaient quatre membres très robustes, les mains et les pieds étant pourvus de cinq doigts. Le crâne était massif; les dents implantées sur le maxillaire et le palatin. Apparus à la fin du Dévonien ou au début du Carbonifère, ils étaient représentés par des espèces très grandes, cuirassées ou non, et semblables du point de vue ostéologique aux Crossoptérygiens les plus anciens. Au cours de leur évolution, ils se divisèrent en deux branches, auxquelles on a donné rang de super-ordres, les *Labyrinthodontes,* tous fossiles, et les *Salientia.*

Les Salientia, c'est-à-dire les Amphibiens sauteurs, remontent au Carbonifère; les plus archaïques possédaient une queue et n'étaient pas sauteurs contrairement aux grenouilles, crapauds, etc. Mais, du fait de la morphologie particulière de leur squelette, ils étaient destinés à se transformer pour aboutir aux Anoures actuels.

Ordre des Anoures

Le principal caractère des Anoures *(Anura)* est l'absence de cou.

La *tête* atteint sa largeur maximale habituellement vers l'arrière. Vue de dessus, elle a la forme d'un triangle isocèle, à sommet plus ou moins obtus; la bouche est très large; les narines, petites, situées près de l'extrémité du museau, se touchent presque; les yeux, sauf exception, sont grands et saillants. Il n'y a pas d'oreille externe, mais la membrane tympanique est visible. Chez les genres *Hemiphractus, Megophis* et *Ceratophrys,* la tête est pourvue de cornes ou d'appendices.

Les *pattes* antérieures, pourvues de quatre doigts libres, sont presque toujours plus robustes chez les mâles que chez les femelles; les pattes postérieures sont nettement plus élancées, avec cinq doigts réunis par des membranes; les formes arboricoles possèdent des disques adhésifs aux quatre doigts des membres antérieurs, doigts reliés par des membranes basilaires; les membres postérieurs sont plus musclés et beaucoup plus développés. Chez les formes terrestres, les doigts sont courts et dépourvus totalement, ou presque, de membranes, alors qu'il y en a chez les formes aquatiques. Certains Anoures sont pourvus à la partie inférieure du tarse d'un tubercule servant à creuser le sol.

La *peau,* très perméable, n'est pas fixée sur toute la surface du corps, mais seulement selon des lignes déterminées, ménageant entre elle et les tissus sous-jacents des sacs lymphatiques, très importants pour la régulation hydrique de l'Animal. Leur nombre est variable selon les espèces. La peau est riche en glandes muqueuses et granuleuses : les premières sont plus ou moins isolées et distribuées sur tout le corps; les secondes, plus grosses, sont groupées dans les verrues dorsales, derrière les orbites, sur les côtés du tronc, et donnent des formations élevées dites parotoïdes, très communes dans le genre *Bufo.* La sécrétion toxique des glandes granuleuses des *Dendrobates* est si active que les indigènes s'en servent pour empoisonner la pointe de leurs flèches. La peau peut s'imbiber d'eau, contenir des dépôts calcaires, et produire des formations cornées. On y trouve des chromatophores de trois types, disposés en trois couches : lipophores, à pigments jaunes, situés dans la couche superficielle; guanophores, à cristaux blancs de guanine, dans la couche intermédiaire; mélanophores, à pigments très foncés, dans la couche profonde. C'est la diversité de groupement de ces cellules qui détermine la coloration générale; ainsi les individus albinos sont dépourvus de chromatophores. Les changements les plus rapides de teintes ont lieu chez des formes insulaires et celles des lieux chauds et humides. Le changement de peau, ou mue, a lieu habituellement une fois par mois, mais diffère selon les genres, leur santé, la quantité et la qualité de leur nourriture et les conditions de milieu. L'Animal se débarrasse de sa dépouille en se tortillant et se grattant avec les pattes; après quoi, il dévore son exuvie.

Le *squelette* est cartilagineux et osseux; le crâne large, aplati et arrondi est constitué partiellement de cartilage. La masse encéphalique est très petite. Les principaux os crâniens sont, en haut, les fronto-pariétaux, en bas, le parasphénoïde et, en arrière, les occipitaux. Les deux branches mandibulaires, maxillaires et pré-maxillaires, sont, contrairement aux ptérygoïdes, presque toujours fines. La colonne vertébrale compte dix vertèbres (parfois seulement six), dites cervicales, thoraciques, lombaires, sacrées et coccygiennes; ces dernières sont soudées et constituent l'urostyle. Les vertèbres peuvent être amphicœles, c'est-à-dire concaves à l'avant et à l'arrière, ou procœles (concaves à l'avant), ou encore opisthocœles (concaves à l'arrière).

La ceinture scapulaire est composée de deux pré-coracoïdes et de deux coracoïdes, parfois aussi de deux clavicules situées au-dessus des pré-coracoïdes, d'un omosternum et d'un sternum; entre les coracoïdes se trouvent deux épicoracoïdes cartilagineux. A leur partie distale, les pré-coracoïdes et coracoïdes se relient aux clavicules, en formant une cavité où est logée la tête de l'humérus. Les Amphibiens ont deux types de ceinture scapulaire : arcifère et firmisterne. Dans le premier cas, l'épicoracoïde droit chevauche le gauche, alors que dans le second, les deux moitiés de la ceinture sont en contact selon la ligne médiane. La ceinture pelvienne est beaucoup plus simple, constituée de chaque côté par un os iliaque allongé qui s'appuie en avant sur l'apophyse de la vertèbre sacrée et forme, avec le pubis et l'ischion, l'acétabulum où se loge la tête du fémur. Aux membres antérieurs, l'humérus, court et robuste, s'articule distalement avec un seul os, provenant de la fusion du radius et du cubitus, relié aux carpiens. Ceux-ci portent les métacarpiens, sur lesquels s'articulent les phalanges. Le pouce n'est jamais visible quand le squelette de la main est couvert par les tissus mous. Le membre postérieur est constitué par un fémur rattaché à un os, résultant de la fusion du tibia et du péroné, lui-même articulé avec l'astragale et le calcanéum. Les cinq tarsiens sont très longs. La musculature est très développée seulement aux pattes postérieures des adultes.

La *bouche,* sauf chez les Microhylidés, est de dimension notable; la commissure buccale se situe au-delà de la verticale du bord postérieur de l'œil. La langue, absente seulement chez les Pipidés, ou Aglosses, est ovale, arrondie ou presque triangulaire, incisée au bord postérieur, adhérente au plancher buccal, ou présente le bord postérieur libre. Chez *Rhinophrynus,* la langue est triangulaire, pointue et libre à l'avant. Les dents sont minus-

cules, situées au bord interne ou supérieur des os, et peuvent se renouveler; elles se trouvent sur les prémaxillaires, les maxillaires, les mandibules, les vomers, les palatins, et plus rarement sur le parasphénoïde. Chez les mâles, des formations semblables à des dents sont implantées à l'extrémité antérieure de la mandibule.

Le *cœur* des adultes est divisé en trois cavités : deux oreillettes, celle de droite précédée d'un sinus veineux, et un ventricule, prolongé par un bulbe artériel. La circulation est double et incomplète, le mélange entre le sang veineux et le sang artériel peu marqué, grâce à un déphasage des pulsations des deux oreillettes. Chez les larves, la circulation est semblable à celle des Poissons; leur cœur ne présente que deux cavités. Au cours de la métamorphose, le système circulatoire passe par des formes intermédiaires. Le système lymphatique, important, est constitué par des vaisseaux et des sacs sous-cutanés en relation avec la cavité péritonéale.

Chez les adultes, les *échanges respiratoires* se font grâce à des poumons, mais aussi et surtout à travers la peau. Les poumons, aux parois très fines, sont petits, peu trabéculés, et situés dans la partie antérieure de la cavité viscérale. Ils sont alimentés en air par une minuscule trachée d'où partent deux grandes bronches. Le larynx, placé entre les poumons et la cavité buccale, est très développé chez les mâles et constitue l'organe vocal. Les narines communiquent avec la partie antérieure de la cavité orale. Ne possédant pas de côtes, les Amphibiens ne peuvent effectuer de mouvements respiratoires pulmonaires; ils aspirent donc l'air par leurs narines et, grâce à l'élévation et à l'abaissement du plancher buccal et de la gorge, le font passer dans les poumons. Ces mouvements rythmiques sont très rapides : on en compte jusqu'à cent quarante par minute chez *Rana temporaria* et *Bufo bufo*. Chez les larves, les échanges respiratoires se font par les branchies et à travers la peau, en particulier celle de la queue. Les sacs vocaux sont externes ou internes; les Anoures qui en sont munis peuvent émettre des sons très forts, même sous l'eau.

Chez les mâles, les *reins*, allongés, aplatis et de couleur rouge-brun, sont situés sur les côtés de la partie postérieure de la colonne vertébrale. L'uretère est indépendant de la vessie urinaire et débouche directement dans le cloaque; chez certains genres, il reçoit un oviducte rudimentaire appelé canal de Müller. Les testicules, très variables selon les familles, sont situés ventralement par rapport aux reins, et fréquemment reliés à ces derniers par des vaisseaux efférents. Le sperme, formé dans les testicules, passe par ces vaisseaux, arrive dans les tubules rénaux, puis est conduit dans le cloaque par les uretères. Chez nombre d'Anoures, les uretères, à proximité du cloaque, sont dilatés en vésicules séminales. Chez les *Bufo*, les testicules sont reliés antérieurement à l'organe de Bidder, contenant des cellules-œufs non matures; si l'on supprime les testicules, cet organe se développe et devient un ovaire fonctionnel. Chez les femelles, les reins ont la même forme et la même position que chez les mâles, mais sont toujours indépendants de l'appareil génital proprement dit. Les oviductes sont des conduits très longs qui présentent une dilatation (ovisac) dans leur tronçon terminal. Ils aboutissent dans le cloaque, en avant de l'anus. Les œufs matures, en parcourant l'oviducte, s'enveloppent de matières gélatineuses qui facilitent la segmentation, puis s'accumulent dans l'ovisac. Les organes de Bidder, présents chez les femelles du genre *Bufo*, disparaissent lors de la maturité sexuelle.

Les Anoures présentent d'intéressants caractères sexuels secondaires : taille moindre des mâles, existence de sacs vocaux impairs ou pairs sur les côtés de la tête, dilatation des doigts des mains en période de reproduction et formation d'amples replis le long des flancs et des cuisses.

La *fécondation* des œufs est externe, sauf chez *Liopelma*. La plupart des Anoures pondent les œufs dans leur milieu et ne s'en occupent plus. Seules font exception quelques espèces qui préparent des nids rudimentaires, et d'autres où les mâles s'occupent des œufs puis des larves jusqu'à leur métamorphose. Les œufs, sphéroïdaux, contiennent plus ou moins de vitellus : les premiers sont gros (jusqu'à 1 cm de diamètre) et pondus en nombre limité; les seconds, bien plus petits, sont innombrables (jusqu'à trente-cinq mille par ponte, chez *Bufo marinus*). Ils sont entourés de couches de substances gélatineuses et d'une membrane

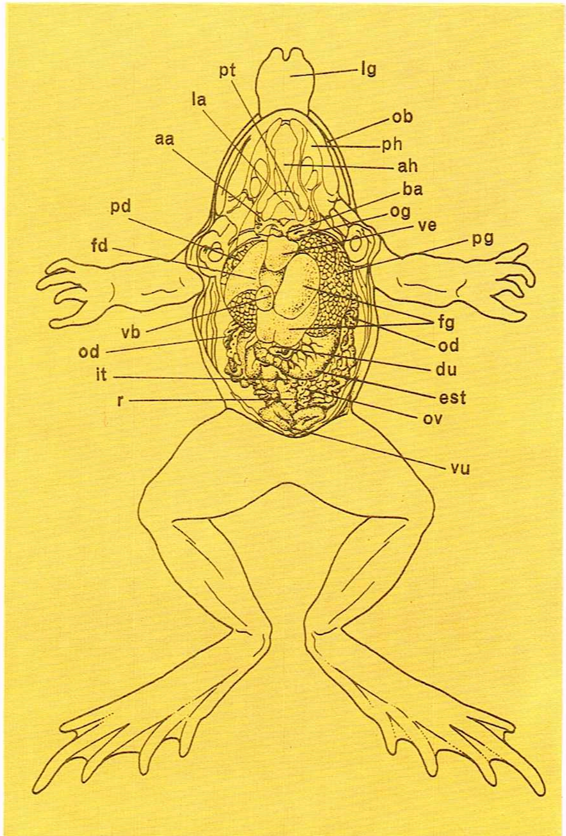

I.G.D.A.

◄ ***Structure anatomique interne d'une femelle de* Rana temporaria, *ou grenouille rousse : lg, langue dévaginée; ob, ouverture buccale; ph, processus antérieur de l'hyoïde; ah, appareil hyo-branchial; pt, processus thyroïdien de l'os hyoïde; la, larynx; aa, premier et second tronc aortique; ba, bulbe artériel; og, oreillette gauche; ve, ventricule; pg, poumon gauche; fg, lobe gauche du foie; od, oviducte; du, duodénum; est, estomac; ov, ovaire; vu, vessie urinaire; pd, poumon droit; fd, lobe droit du foie; vb, vésicule biliaire; it, extrémité de l'intestin grêle; r, rectum.***

fortement adhésive. Selon les familles, ils peuvent se développer à l'intérieur des femelles, ou être pondus sur le sol où ils se segmentent en donnant naissance à des larves qui se transforment en individus à peu près semblables à leurs parents. Le plus souvent, les œufs sont pondus dans l'eau, où ils commencent immédiatement à se segmenter.

Les phases de la métamorphose varient beaucoup selon la position systématique des espèces. Généralement, dès que les œufs sont dans l'eau, les embryons (trapus, à tête sphéroïdale à peine séparée du tronc, à queue rudimentaire, dépourvus de bouche, d'anus et d'yeux, et à branchies externes à peine ébauchées) désagrègent l'enveloppe de l'œuf, en sortent, et, grâce à deux organes adhésifs placés à l'endroit de la future bouche, s'accrochent à l'enveloppe abandonnée ou aux plantes immergées.

En quelques jours, les ébauches de branchies se développent sous forme de ramuscules, de chaque côté de la tête; la bouche se marque par un sillon transversal à l'avant et en bas de la tête; les narines et les yeux s'ouvrent; la queue s'allonge et se divise en une partie centrale musculeuse entourée de membranes natatoires; enfin, l'intestin se développe et l'anus se forme. Ensuite, les

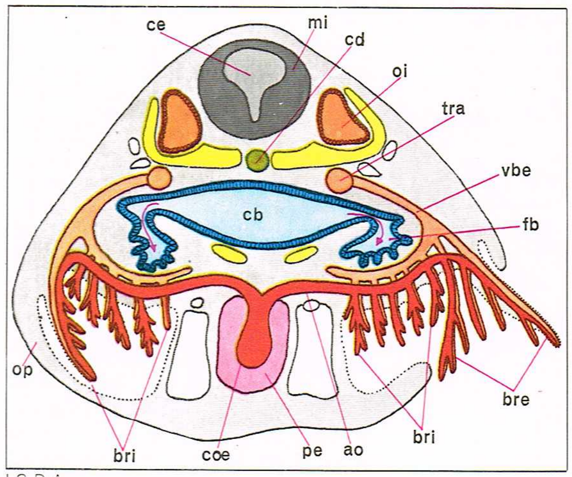

I.G.D.A.

◄ ***Coupe transversale, schématique et théorique, d'un têtard de grenouille, au niveau du premier arc branchial : ce, canal de l'épendyme; mi, moelle épinière; cd, corde dorsale; oi, oreille interne; tra, troncs aortiques; cb, cavité buccale; vbe, vaisseau branchial efférent; fb, partie buccale de la fente branchiale; bre, branchies externes; bri, branchies internes; ao, arc aortique; pe, péricarde; cœ, cœur; op, opercule.***

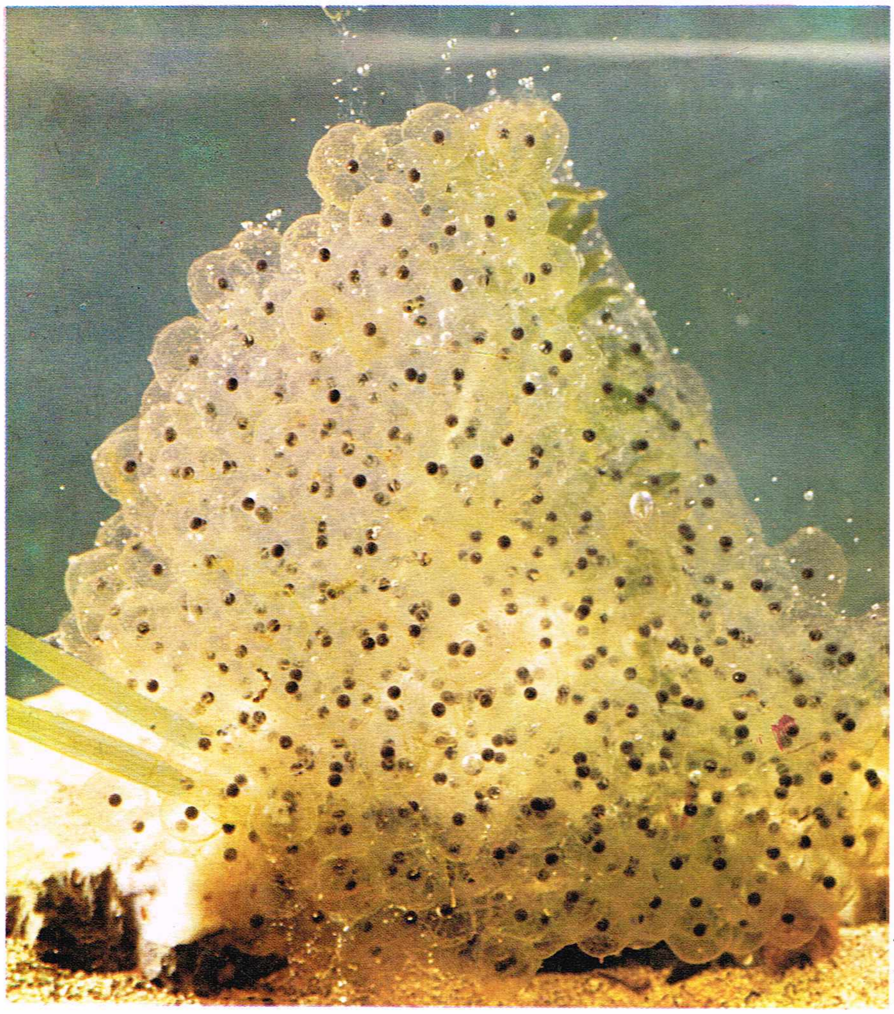

A. Margiocco

▲ *Œufs de* **Rana dalmatina** *(la grenouille agile) entourés de substance gélatineuse.*

branchies ramifiées se résorbent, remplacées par des branchies internes, d'abord protégées par un repli dermique, puis logées dans une chambre qui communique avec l'extérieur par le spiracle. Parallèlement, la tête et le tronc se constituent en un ensemble ovoïdal ; les yeux, peu saillants et dépourvus de paupières, deviennent plus évidents ; la bouche acquiert deux étuis cornés ; les lèvres s'épaississent et sur leur surface interne apparaissent des dents cornées, dont le nombre, la disposition et la structure permettent de déterminer les espèces même à l'état larvaire ; la queue enfin se développe.

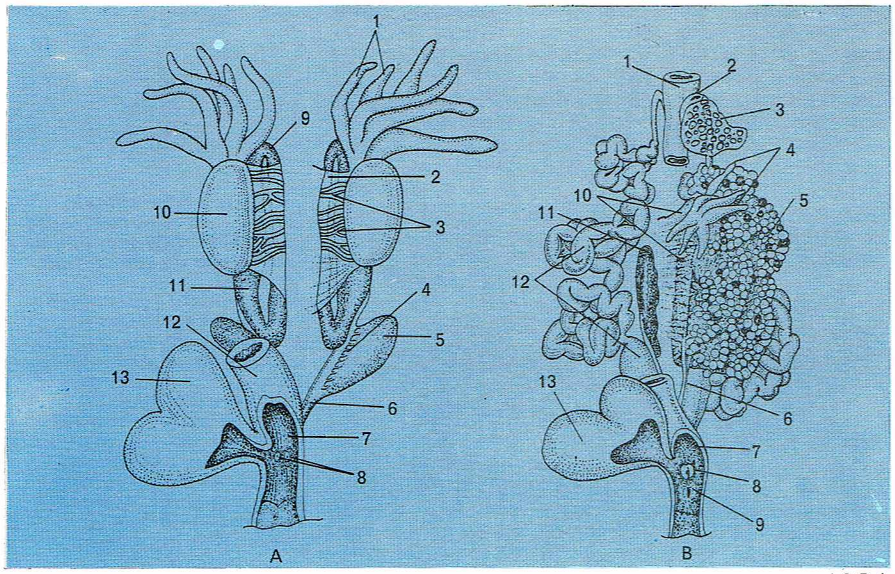

I.G.D.A.

A ce stade, la larve est un têtard qui se déplace grâce à sa queue robuste et se nourrit d'Algues filamenteuses ou de particules végétales. Après un certain temps, les membres postérieurs se forment, suivis, après un développement avancé, des membres antérieurs rompant la peau qui les recouvre. Pendant cette phase, si les pattes ou la queue sont cassées, elles sont rapidement régénérées, cette capacité de régénération diminuant lorsque la métamorphose est terminée. Enfin, la queue s'atrophie, les branchies se résorbent, remplacées par les poumons ; le spiracle disparaît, le système circulatoire se modifie, les yeux sont pourvus de paupières et la bouche prend peu à peu la forme adulte.

Le *système nerveux central* des Anoures est constitué par un encéphale assez petit, avec des lobes olfactifs soudés, des hémisphères cérébraux séparés, et un cervelet peu développé. La glande pinéale, présente chez divers têtards et adultes, reste rudimentaire ; c'est une zone arrondie, dépourvue de pigments, transparente, située à la partie supérieure de la tête. La moelle épinière s'arrête à la base de l'urostyle.

Les *yeux* sont normalement très grands, assez mobiles, et protégés par trois paupières dont la médiane, ou paupière nictitante, est très mobile et très transparente. Seules quelques rares espèces n'ont pas de paupières à l'âge adulte. En général, les Anoures sont pourvus d'oreilles moyenne et interne communiquant par la fenêtre ovale. L'oreille moyenne communique normalement avec le pharynx, par la trompe d'Eustache. L'*appareil olfactif*, très développé, consiste en une série de chambres intercommunicantes des narines à l'organe de Jacobson. Les Anoures n'ont pas un sens gustatif très développé, néanmoins ils possèdent sur la langue, les mâchoires et le palais des récepteurs gustatifs, très développés chez les têtards. Le toucher est dévolu à des terminaisons nerveuses libres, situées sur la tête, le dos et les pattes. Les organes de la ligne latérale sont présents uniquement chez les larves et certaines espèces strictement aquatiques.

A l'exception de certaines espèces arboricoles, les Anoures qui habitent loin de l'eau s'y rendent au moment de la reproduction. Le jour, presque tous restent dans l'eau ou sur les plantes ; la nuit, ils chassent toutes sortes de petits Animaux vertébrés ou invertébrés, mais sont capables de jeûner durant plusieurs mois. Ils résistent très bien aux basses températures, ainsi qu'à la canicule, dans certaines limites d'humidité atmosphérique. L'hibernation est un fait normal chez presque toutes les espèces, alors que l'estivation a surtout lieu chez les Anoures des oasis sahariennes. La taille, mesurée du museau à l'extrémité du dos, varie de moins de 2 cm *(Sminthillus limbatus)* à 30 cm *(Rana goliath)*. La longévité extrême de ces Animaux ne dépasse pas cinquante-cinq ans *(Megalobatrachus japonicus)*. Du point de vue économique, ils sont fort utiles, dévorant d'énormes quantités d'Insectes nuisibles. Exception faite des zones les plus froides et des îles volcaniques, les Anoures sont pratiquement cosmopolites, du niveau de la mer à 4 000 m d'altitude. Leur systématique est la plus compliquée de toute l'herpétologie. Actuellement, la classification la plus suivie est celle de G.K. Noble, principalement fondée sur le type des vertèbres. Cet auteur divise les quelque deux mille espèces d'Anoures en cinq sous-ordres.

Sous-ordre des Amphicœles

Les Amphicœles *(Amphicoela)* sont des Amphibiens dépourvus de queue, dont les vertèbres ont deux cavités, antérieure et postérieure. Ils comptent une seule famille.

Les **Liopelmidés** *(Liopelmidae)*, représentés par deux genres, *Liopelma* (Nouvelle-Zélande) et *Ascaphus* (nord-ouest des États-Unis), sont les Anoures actuels les plus primitifs. Ils ont une livrée à fond grisâtre, avec des barres et de petites taches noires et jaunes. Les *Ascaphus* mâles possèdent un organe copulateur saillant hors du cloaque et terminé en pointe.

Sous-ordre des Opisthocœles

Caractérisés par des vertèbres à cavité postérieure, les Opisthocœles *(Opisthocoela)* comptent trois familles.

Les **Pipidés** *(Pipidae)* ne possèdent pas de langue (Aglosses), parfois pas de dents et le plus souvent pas de paupières. La ceinture scapulaire est de type firmi-

A. Margiocco

A. Margiocco

A. Margiocco

▲ ***De gauche à droite, phases de la métamorphose de la rainette verte*** **(Hyla arborea)*****;*** ***à l'extrême droite, stade auquel l'Animal est apte à sortir de l'eau.***

sterne. On divise la famille en deux sous-familles, *Pipinés* et *Xénopinés*.

Les Pipinés comprennent deux genres, *Pipa* et *Protopipa,* tous deux d'Amérique du Sud. La femelle de *Pipa pipa* mesure 20 cm ; les doigts de la main sont raides comme des bâtonnets et pourvus à l'extrémité de quatre petits appendices en forme d'étoiles (astérodactyles) ; les doigts du pied sont palmés jusqu'à l'extrémité. Sa couleur est olivâtre, brune ou noirâtre sur le dessus, et plus claire en dessous. A l'époque de la reproduction, on voit apparaître sur le dos de la femelle une série de fossettes, dans lesquelles le mâle remonte les ovules et les féconde. Les larves naissent au bout de soixante-dix à quatre-vingts jours et se métamorphosent dans de petits alvéoles fermés par des opercules cornés qui sont rompus à l'éclosion.

Les Xénopinés vivent dans les eaux douces d'Afrique, du tropique du Cancer à l'Afrique du Sud. Les espèces *Xenopus muelleri, X. calcaratus* et *X. laevis* sont caractérisées, selon les formes, par un long tentacule sous l'œil, un tubercule corné sur le métatarse et les trois doigts internes des membres postérieurs pourvus d'étuis cornés noirs. La coloration du dos est brun verdâtre marbré, celle du ventre uniformément blanchâtre.

Les Xénopinés sont utilisés en laboratoire ; ainsi l'urine de femme enceinte, injectée à des femelles de *Xenopus,* provoque la ponte des œufs.

Les **Rhinophrynidés** *(Rhinophrynidae),* grands fouisseurs et grands prédateurs d'Insectes (surtout de termites), sont répandus au Mexique et au Guatemala. Ils ne possèdent pas de dents. Ils n'ont pas de sternum mais un omosternum rudimentaire. La langue, libre à la partie antérieure, peut être projetée hors de la bouche comme celle des Mammifères. Ils ont une livrée brun olivâtre ou gris bleuté, avec des taches jaunes irrégulières, s'unissant souvent sur le dos en une ligne vertébrale. Les deux sexes possèdent sur le pré-pouce un tubercule corné avec lequel ils creusent le sol et les nids de termites.

Les **Discoglossidés** *(Discoglossidae)* possèdent une ceinture scapulaire arcifère. La langue, discoïdale, est complètement attachée au plancher de la bouche ou à peine libre en arrière. La famille habite l'Europe, l'Afrique nord-occidentale et l'Asie, et peut vivre vingt ans dans la nature. Les *Bombina* sont représentés en Europe et autour de la Méditerranée par *Bombina bombina* ou crapaud à ventre de feu, d'Europe centrale, et *Bombina variegata* ou crapaud à ventre jaune, d'Europe occidentale, méridionale et centrale. Le mâle possède des excroissances noirâtres à la face inférieure de l'avant-bras et à certains doigts de la main et du pied. Excité, il émet une substance volatile blanchâtre très irritante pour les muqueuses ; inquiété, il peut aussi se mettre sur le dos, les mains sur les yeux et les pattes arrière renversées.

La reproduction a lieu deux ou trois fois par an, de mai à octobre. Les œufs sont pondus un à un ou par groupes, à des intervalles de plusieurs heures, au nombre d'environ quatre-vingts à cent par ponte.

Les *Discoglossus* habitent, de façon discontinue, le pourtour de la Méditerranée. Ils sont représentés par : *D. pictus* (péninsule Ibérique sauf les Pyrénées centrales, sud-ouest de la France, Afrique du Nord et îles de la Méditerranée occidentale) ; *D. sardus* (Sardaigne, Corse et îles d'Hyères) ; *D. nigriventer* (Palestine). Les discoglosses ne possèdent pas de glandes parotides ; typiquement aquatiques, ils fréquentent de préférence les étangs, les marécages, les ruisseaux, et même les eaux saumâtres. Quand la température descend en dessous de 9 °C, ils se cachent dans des trous creusés sous les pierres, sur les rives des cours d'eau, ou dans les fentes des roches ; là, ils estivent ou hivernent en groupes. L'accouplement, qui dépend uniquement de la température (environ 30 °C), est assez limité. L'amplexus est lombaire et dure moins de

Papini

◀ **Hyla arborea.**

A. Margiocco

◀ ***Sonneur à ventre jaune*** **(Bombina variegata)*****, Amphibien assez commun en Europe méridionale.***

◀ ***Page ci-contre, en bas : organes génito-urinaires de*** **Rana esculenta** ***: A, mâle ; 1, corps adipeux ; 2, replis du péritoine soutenant le testicule ; 3, canaux efférents ; 4, canaux de la vésicule séminale ; 5, vésicule séminale ; 6, uretère ; 7, cloaque ; 8, orifices de l'uretère ; 9, glande surrénale ; 10, testicule ; 11, rein ; 12, rectum ; 13, vessie urinaire. B, femelle : 1, œsophage ; 2, ouverture de l'oviducte ; 3, poumon gauche ; 4, corps adipeux ; 5, ovaire gauche ; 6, uretère ; 7, cloaque ; 8, orifice de l'oviducte ; 9, orifice de l'uretère ; 10, replis du péritoine soutenant l'ovaire ; 11, rein ; 12, oviducte ; 13, vessie urinaire.***

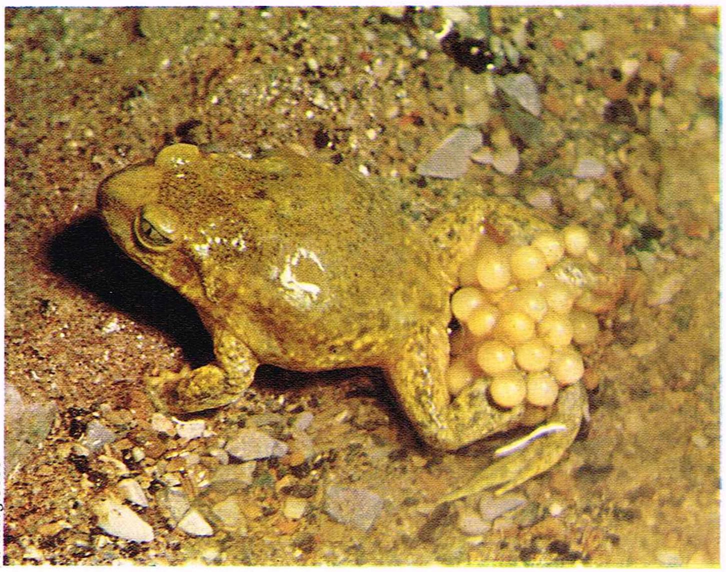

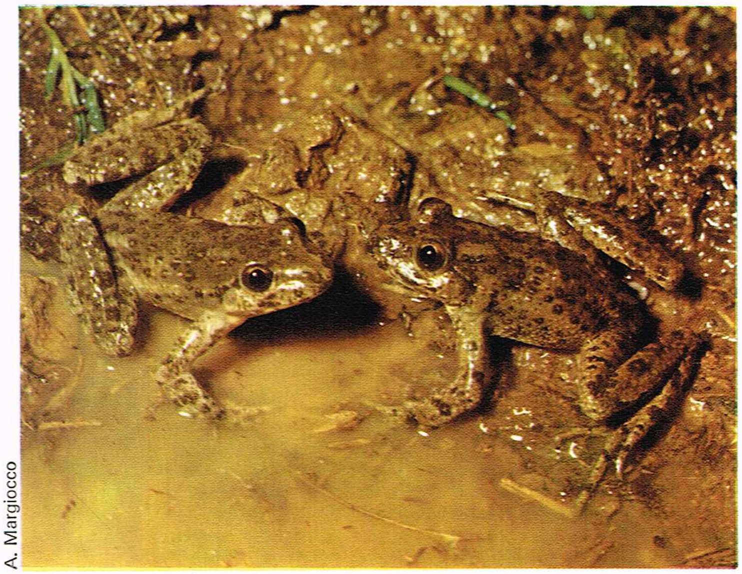

▲ *A gauche, alyte ou crapaud accoucheur* (Alytes obstetricans) *en train de féconder les œufs. A droite, deux exemplaires de pélodyte ponctué* (Pelodytes punctatus) *habitant dans le sud-ouest de l'Europe.*

deux minutes. La reproduction a lieu normalement trois fois par an, mais peut être observée toute l'année si la température et le degré hygrométrique de l'atmosphère s'y prêtent. La femelle pond environ trois cents œufs qui, au contact de l'air, gonflent rapidement. Ces œufs ne sont pas émis tous à la fois mais généralement en groupes de vingt à cinquante, et tombent au fond.

Ces Anoures se nourrissent de Diptères (moustiques et mouches), d'Araignées, de Coléoptères et de Lépidoptères. Eux-mêmes sont la proie de Mammifères, d'Oiseaux et de serpents *(Natrix* et *Coluber)*. Dans la nature, ils vivent environ 11 ans, à des altitudes de 0 à 2 250 m (au Maroc).

Semblables morphologiquement aux crapauds avec des glandes parotides plus ou moins distinctes, les *Alytes* ont la même répartition géographique : *A. cisternasii* vit dans la péninsule Ibérique et *A. obstetricans*, ou crapaud accoucheur, en Europe occidentale et au Maroc. La longueur maximale de ces espèces est de 5,5 cm. Le mâle a habituellement un corps légèrement plus court et des avant-bras plus robustes que la femelle; cette dernière possède fréquemment une rangée latérale de verrues rougeâtres. Ces Animaux nocturnes et lents résistent très bien à la sécheresse; ils fouissent à l'aide de leurs pattes antérieures, mais préfèrent les refuges naturels.

La reproduction a lieu au printemps ou en été, à terre; l'amplexus, qui dure plus d'une heure et demie, est d'abord lombaire, puis devient graduellement antérieur, de sorte que le mâle finit par embrasser la tête de la femelle. Les œufs, jaunes et gros, forment de longs chapelets que le mâle enroule autour de ses pattes postérieures. Au bout de deux à sept semaines, lorsque les œufs se sont transformés en têtards, le mâle pénètre dans l'eau et en

Papini

▶ Discoglossus sardus *habite la Sardaigne, la Corse ainsi que les îles de Montecristo, Giglio, Port-Cros, Levant et Hyères.*

ressort dès que toutes les larves se sont libérées des enveloppes ovulaires. La femelle pond vingt à soixante œufs à la fois, deux à quatre fois par an; le mâle peut s'accoupler deux ou trois fois. La métamorphose dure trois mois ou plus d'un an. En terrarium-aquarium ces Anoures vivent jusqu'à 5 ans. On les rencontre du niveau de la mer jusqu'à 2 000 m d'altitude (Pyrénées).

Sous-ordre des Anomocœles

Les Anomocœles *(Anomocoela)* représentent un sous-ordre transitoire entre les Opisthocœles et Amphicœles d'une part, et les Procœles d'autre part. Les huit premières vertèbres sont habituellement procœles, et la vertèbre sacrée est soudée au coccyx ou articulée à celui-ci par un seul condyle.

Les **Pélobatidés** *(Pelobatidae)*, unique famille de ce sous-ordre, rappellent par leur forme aussi bien les crapauds que les grenouilles. La ceinture scapulaire est arcifère, et les apophyses transverses de la vertèbre sacrée sont très dilatées. La famille est répandue dans presque tout l'hémisphère boréal, dans l'archipel indo-malais, et les îles Seychelles.

Les *Pelobates* ne possèdent pas de glandes parotides et ont un tubercule métatarsien gros, dur, semi-lunaire et à bord coupant. *Pelobates cultripes*, ou crapaud à couteaux, habite le midi de la France, la péninsule Ibérique et le Maroc, *P. syriacus* les Balkans et l'Asie Mineure, et *P. fuscus*, ou pélobate brun, presque toute l'Europe. Les mâles ont des bras pourvus dorsalement d'une grosse formation glandulaire ovoïdale et lisse; dérangés, ils émettent une sécrétion d'odeur légèrement aliacée et poussent parfois de grands cris, ouvrant la bouche comme s'ils voulaient mordre. Le pélobate brun, nocturne et bon sauteur, passe le jour dans des trous profonds qu'il creuse rapidement avec ses pattes postérieures. Il est diurne seulement à l'époque des amours, de mars à juillet.

La femelle pond de mille deux cents à deux mille trois cents œufs, réunis en un cordon gélatineux de 80 cm à 1 m, enroulé sur des Végétaux aquatiques. Cette espèce vit jusqu'à 11 ans, et se rencontre au niveau de la mer à un peu plus de 400 m d'altitude.

Les *Pelodytes* sont caractérisés par la présence des glandes parotides et par un tubercule métatarsien, petit et émoussé. *Pelodytes punctatus* habite l'Europe occidentale. Le mâle se reconnaît à ses pattes antérieures plus fortes et plus longues, et à des groupes d'excroissances cornées brun foncé ou noires sur les côtés de la poitrine, aux avant-bras et sur le bord interne des deux premiers doigts de la main. Il va à l'eau seulement au moment des amours, qui peuvent avoir lieu à tout moment de l'année. Les œufs sont pondus dans les eaux stagnantes riches en végétation, sur laquelle ils sont fixés en cordons souvent fragmentés. La femelle dépose de mille à mille six cents œufs à la fois. L'embryon, initialement dépourvu de queue et de branchies, éclôt au bout de plusieurs jours. Le mâle adulte atteint 4,5 cm de long.

◀ *Les Dendrobatinés, aux couleurs vives, ont les bouts des doigts fortement dilatés et pourvus de disques adhésifs ; ici* Dentrobates tinctorius.

J. Lescure

▼ Bufo bufo, *le crapaud commun, se nourrit d'Invertébrés et détruit de nombreux Insectes nuisibles.*

A. Margiocco

Sous-ordre des Procœles

Les diverses espèces de Procœles (*Procoela*) possèdent, comme leur nom l'indique, des vertèbres à cavité antérieure. Le coccyx est articulé avec la vertèbre sacrée par deux condyles. Elles possèdent de cinq à huit vertèbres présacrées. La musculature des pattes postérieures est très développée. Ce sous-ordre est divisé en cinq familles.

Les **Bufonidés** *(Bufonidae)* sont caractérisés par l'absence de dents, des apophyses transverses dilatées aux vertèbres sacrées, une ceinture scapulaire arcifère, l'absence fréquente de l'omosternum, et un sternum cartilagineux ou calcifié.

Le crapaud commun *(Bufo bufo)* habite le nord-ouest de l'Afrique, l'Europe et l'Asie tempérée jusqu'au Japon inclus, du niveau de la mer à 3 000 m d'altitude (au Tibet). Ses orteils sont pourvus d'un tubercule subarticulaire double ; son dos ne présente pas de taches vertes. La femelle des formes du sud de l'Europe atteint une longueur de 20 cm, le mâle ne dépassant pas 10 cm. Ce dernier a les avant-bras plus gros, avec un groupe d'excroissances cornées noires. Exclusivement crépusculaire et nocturne, sauf à l'époque de la reproduction et après la métamorphose, il se cache pendant le jour, ainsi qu'au cours de l'estivation et de l'hivernation, sous les pierres, dans les décombres, dans les galeries qu'il creuse, etc. Il se nourrit d'Invertébrés et détruit de nombreux Insectes nuisibles. Il est la proie des grosses femelles de *Natrix natrix*. Il résiste bien à la sécheresse ; il marche et saute avec maladresse, mais nage remarquablement. L'amplexus est axillaire, l'accouplement, souvent commencé à terre, s'effectue dans l'eau, et peut durer des semaines. Pendant la reproduction, le mâle émet des coassements caractéristiques. Les œufs sont pondus en un seul cordon gélatineux atteignant 5 m que la femelle enroule autour des plantes aquatiques ou qu'elle abandonne, exceptionnellement, au fond de l'eau. Les œufs, noirs, sont au nombre de deux cents à sept mille. La ponte a lieu surtout en mars et en avril, dans les eaux douces ou saumâtres calmes, peu profondes, de préférence limpides, et dont la végétation peut être abondante ou non. Les têtards sont petits et noirâtres ; ils atteignent au maximum 32 mm de long, leur queue mesurant 20 mm. Celle-ci a l'extrémité arrondie et ne remonte pas sur le dos. Vers la fin du mois de juin, les quatre membres sont bien développés, et le jeune crapaud, qui possède encore un fragment de queue, abandonne le milieu aquatique. A ce moment, les juvéniles mesurent 1 cm de long ; ils sont de couleur générale gris foncé avec le ventre noirâtre et atteignent une longueur de 5 cm en novembre. La maturité sexuelle a lieu vers l'âge de 4 ans.

En captivité, le crapaud peut vivre 36 ans, et survivre environ 15 mois sans nourriture. La bufaline et la bufoténine, que sécrètent ses glandes muqueuses et granuleuses, sont des paralysants du cœur et du système nerveux. L'injection sous-cutanée de 45 mg de venin sec par poids corporel provoque la mort du chien. Cependant, du fait de l'absence d'organe inoculateur, ces Anoures ne présentent aucun danger pour l'homme.

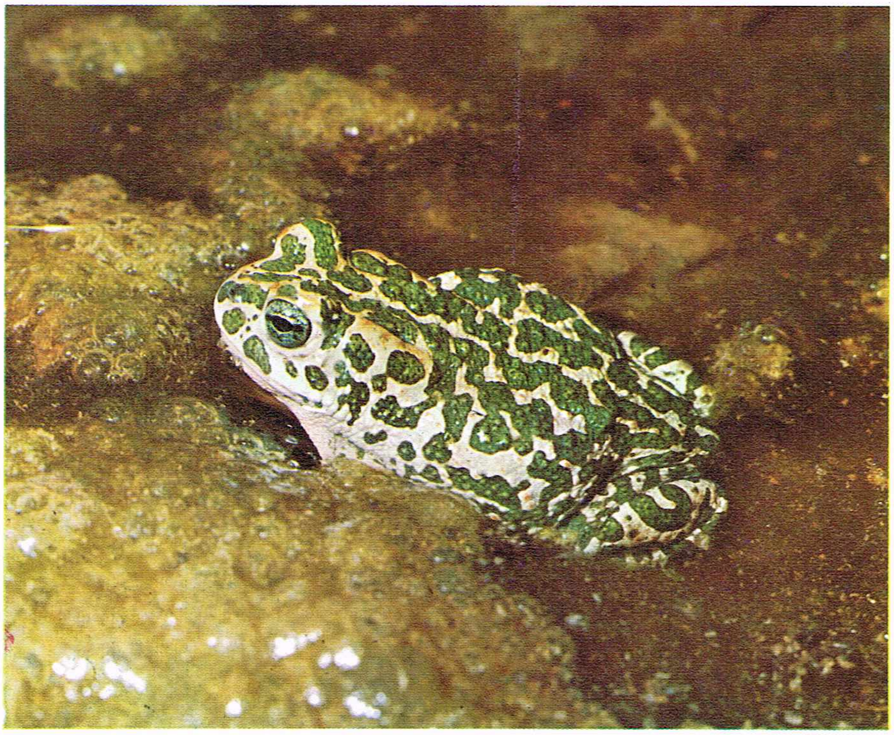

A. Margiocco

A. Margiocco

▲ ***A gauche, le crapaud vert* (Bufo viridis) *est présent dans tout le bassin méditerranéen.***
A droite, le crapaud des joncs* (Bufo calamita)*; bon grimpeur, coureur et fouisseur,il vit habituellement dans les zones sableuses, près des marais et des étangs.

▼ ***Avec ses 22 cm de long, le crapaud marin* (Bufo marinus) *est le géant de la famille des Bufonidés; il est répandu sur le continent américain.***

A. Margiocco

Le crapaud vert *(Bufo viridis)*, qui habite l'Afrique au nord du Sahara, l'Europe centrale et méridionale, ainsi que l'Asie du Sud-Ouest et centrale jusqu'à la Mongolie, est présent dans tout le bassin méditerranéen. On le rencontre du niveau de la mer à 4 700 m d'altitude (au Tibet). Il a le dos tacheté de vert, et présente également d'autres petites taches rouges légèrement en relief. Plus aquatique et plus agile que le crapaud commun, il est moins nocturne. Il passe l'hiver sous la mousse, à la base des buissons, ou sous des pierres, toujours loin de l'eau. Les amours ont lieu, selon les régions et les années, de mars à août. Les œufs sont plus petits et plus nombreux (dix à douze mille) que chez *B. bufo*. L'éclosion a lieu quatre ou cinq jours après la ponte. La période larvaire dure environ deux mois. Lorsqu'il est irrité, le crapaud vert répand une odeur alliacée. Comme de nombreuses autres espèces de *Bufo*, il vit aussi en colonies qui couvrent un territoire d'environ 3 km², et les mâles s'accouplent toujours avec les mêmes femelles.

Le crapaud des joncs *(Bufo calamita)* se rencontre dans la péninsule Ibérique, en Europe occidentale, dans le sud de la Scandinavie, en Tchécoslovaquie et en Russie occidentale. Les orteils sont réunis à la base par une membrane; on observe, le long de la zone vertébrale, une ligne jaune ou rougeâtre. Le mâle se distingue, entre autres caractères, par un sac gulaire bleuâtre ou violacé qui peut se dilater au point de devenir plus volumineux que la tête. Les deux sexes portent sur le dos de nombreuses verrues plates de différentes tailles. Grégaire, crépusculaire et nocturne, ce crapaud vit habituellement dans les zones sableuses, près des marais et des étangs; le jour, il se cache sous des Végétaux en putréfaction. Bon grimpeur, coureur et fouisseur, il se défend en sécrétant une substance écumeuse, blanchâtre, dont l'odeur rappelle celle du caoutchouc brûlé. Au printemps ou au début de l'été, la femelle pond dans l'eau de deux à quatre mille œufs, en deux longs cordons gélatineux habituellement accrochés à la végétation immergée. En captivité, ce crapaud vit jusqu'à 15 ans.

Bufo regularis (12 cm) vit du sud de l'Arabie au delta du Nil, et de certaines oasis sahariennes au cap de Bonne-Espérance. Il supporte la chaleur du désert en s'enfouissant dans le sable, à proximité des points d'eau, jusqu'à 30 à 40 cm de profondeur. *Bufo mauritanicus* habite du pays berbère et du Sahara espagnol jusqu'au Niger. La plus grosse espèce est *Bufo marinus* (22 cm), largement répandu à travers le continent américain. Nocturne et très vorace, il se nourrit d'Insectes, de Reptiles, d'Amphibiens, d'Oiseaux et de Rongeurs. Il vit environ 10 ans en captivité; c'est l'espèce la plus intelligente du genre.

A. Margiocco

◀ **Ceratophrys dorsata,** ***Amphibien Anoure, massif et quelque peu hideux.***

Nectophrynoides possède un omosternum et des phalanges terminales en forme de T. C'est le seul genre d'Anoure vivipare. *N. vivipara* et *N. tornieri* vivent dans les montagnes de Tanzanie. *N. occidentalis* a été décrit en 1943 d'après des spécimens découverts en Guinée. Au cours de la reproduction, les mâles abouchent leur ouverture cloacale avec celle des femelles, et émettent les éléments fécondateurs. Le nombre des œufs pondus varie de sept à cent trente. Les têtards, qui peuvent atteindre 10 mm et ne possèdent ni lèvres ni dents cornées, se développent dans l'utérus maternel, et sont mis au monde à la fin de la métamorphose.

Les membres de la famille des **Brachycéphalidés** *(Brachycephalidae)* ont une grande tête, une ceinture scapulaire firmisterne, des vertèbres procœles souvent soudées les unes aux autres et la musculature des membres postérieurs bien développée.

Les *Brachycéphalinés* sont caractérisés par l'absence d'omosternum et de disques digitaux, leur petite taille, leurs très belles couleurs, de nombreux petits tubercules dorsaux, et une plaque calcaire sur le dos. *Brachycephalus ephippium*, long de 2 cm, habite uniquement les forêts humides du Brésil; le dos et le ventre sont jaune vif, et la plaque calcaire est brune.

Les *Dendrobatinés*, qui vivent dans les forêts denses près des lacs d'Amérique centrale et du Sud, ont toujours un omosternum, souvent ossifié, et deux écussons dermiques au bout des doigts, fortement dilatés et pourvus de disques adhésifs.

Les espèces sont nombreuses, particulièrement dans les genres *Phyllobates* et *Dendrobates*. Les premiers, sont arboricoles, et rappellent beaucoup les rainettes. La femelle pond dans des cavités du sol remplies d'eau de pluie. Après la naissance des larves, le mâle prend les têtards sur le dos et les transporte dans des lieux humides. Les dendrobates diffèrent du genre précédent par la présence de dents maxillaires et par des couleurs très vives. *Dendrobates auratus* a le dos noir avec de grandes taches jaune verdâtre à reflets dorés et le ventre bleu. Ces Anoures possèdent des glandes sécrétrices d'un venin très actif, qui agit principalement sur le système nerveux; leur sang lui-même est venimeux.

Les *Rhinodermatinés* ont un omosternum, un sternum cartilagineux, et les doigts des mains non dilatés à l'extrémité. *Rhinoderma darwini* des forêts humides du Chili présente à l'extrémité du museau un petit appendice dermique. Cet Anoure, grimpeur agile et excellent sauteur, capture habituellement les Insectes en effectuant des sauts de 50 à 60 cm. La femelle pond jusqu'à trente œufs, réunis les uns aux autres.

Les mâles s'assemblent en grand nombre pour surveiller d'abord la ponte, puis la segmentation des œufs, qui a lieu de dix à vingt jours plus tard. Dès que l'embryon s'est développé, ils introduisent de cinq à vingt-cinq œufs dans leur sac vocal, et les gardent jusqu'à la fin de la métamorphose.

Les **Leptodactylidés** *(Leptodactylidae)* habitent tout le continent américain au sud du Canada, l'Australie et la Nouvelle-Guinée. Ils présentent des caractères semblables à ceux des Bufonidés, dont ils diffèrent par la présence de dents maxillaires et par le mode de reproduction. *Leptodactylus* possède une langue de forme ovale, à peine entaillée postérieurement; les doigts des mains sont légèrement dilatés à l'extrémité, les orteils pratiquement dépourvus de membrane. A la saison des pluies, cet Anoure pond jusqu'à quatre-vingt-dix œufs, réunis dans des masses de substance mucilagineuse fortement émulsionnée; la ponte se fait près de l'eau et à l'abri de la végétation. Dans les cañons rocheux d'Amérique centro-septentrionale vivent des représentants du genre *Eleutherodactylus*, qui recouvrent leurs œufs de terre, et dont les mâles émettent des coassements qui font penser à des aboiements. *Ceratophrys* (15 cm), massif, d'aspect hideux, polychrome, possède des « sourcils » très relevés, triangulaires et parfois porteurs d'une pointe aussi longue que le diamètre de l'œil. Quand il a peur, il se gonfle démesurément et se défend en mordant. *Notaden bennetti* est l'espèce qui augmente le plus de volume en cas de danger; elle habite les régions arides de l'Australie orientale; sa livrée est olivâtre clair sur le dos, avec une tache foncée en forme de croix.

Les **Centrolénidés** *(Centrolenidae)* ont été séparés des Hylidés et élevés au rang de famille. Très proches des rainettes du point de vue morphologique, ces Anoures sont également arboricoles; vivant à proximité des ruisseaux, ils sont répandus du Mexique au Pérou et en Argentine. *Cochranella colymbiphyllum*, du Costa Rica, ne dépasse pas 3 cm.

Les **Hylidés** *(Hylidae)*, arboricoles et terrestres, comprennent un nombre très élevé d'espèces répandues dans le monde entier, sauf en Afrique du Sud et tropicale, à Madagascar, et dans l'Indo-Malaisie.

Les quelque deux cents espèces du genre *Hyla* possèdent des doigts peu dilatés et pourvus à leur extrémité de grands disques adhésifs. La rainette verte *(Hyla arborea)* habite l'Eurasie, la basse Égypte, les îles de la Méditerranée, l'île de Madère et les îles Canaries. Pouvant atteindre 5,5 cm de long, elle est caractérisée par la présence entre l'aisselle et l'aine d'une bande foncée, continue ou coupée en taches séparées postérieurement, et plus ou moins en saillie selon les races. La rainette a la peau lisse sur le dos et finement granuleuse sur le ventre. Les mâles possèdent un sac vocal arrondi, plus gros que la tête quand il est gonflé; lorsque ce sac est vide, sa peau est ridée. Le plus souvent posée sur les plantes, la rainette se rend dans l'eau entre mars et juin, pour la reproduction. La femelle pond, habituellement la nuit, jusqu'à mille œufs, en plusieurs masses, de la taille d'une noix.

La rainette se trouve dans les Alpes jusqu'à 2 200 m d'altitude. Elle hiverne vers la fin de novembre sous terre, sous la mousse, dans les cavernes et les grottes, sous les rochers, ou même au fond des étangs. On l'élève très bien en terrarium-aquarium.

A l'époque de la reproduction, le mâle d'*Hyla faber*, des forêts brésiliennes, abandonne les arbres où il vit et se rend dans les ruisseaux à cours lent, là où le fond ne dépasse pas 10 cm de profondeur; il construit avec les pieds un bassin circulaire d'où il appelle par son chant les femelles; celles-ci pondent ensuite dans ces vasques.

Hyla lichenata, de la Jamaïque, qui atteint 12 cm de long, ne s'éloigne jamais de la végétation. Les femelles pondent les œufs dans les réserves d'eau qui se forment à la base des Broméliacées pendant la saison des pluies.

Les quelques espèces des genres *Acris* et *Pseudacris*, d'Amérique du Nord, ressemblent plus aux grenouilles proprement dites qu'aux rainettes; elles sont terrestres; leur chant, typique, ressemble à celui du grillon.

Les plus hauts en couleurs sont les *Phyllomedusa*, d'Amérique tropicale, longs de 3 à 10 cm. Ces Anoures ne quittent jamais leur habitat végétal; au moment de la reproduction, les femelles se rendent sur des branches surplombant des nappes d'eau, rapprochent deux feuilles

▼ *En haut, la rainette verte* **(Hyla arborea)**, ***arboricole et terrestre, est l'un des plus gracieux Anoures. En bas,*** **Hyla regilla** ***est une rainette du continent américain.***

Papini

A. Margiocco

J. Lescure-Pitch

A. Margiocco

▲ *A gauche,* **Otophryne robusta,** *un représentant des Microhylidés. A droite,* **Leptopelis flavomaculatus** *appartient à la famille des Rhacophoridés, petits Anoures nocturnes qui vivent, de préférence, dans les forêts de bambous.*

pour former un étui, et y encapsulent leurs œufs dans une substance mucilagineuse sécrétée par la dernière portion de leur oviducte.

Chez *Gastrotheca,* des régions humides de l'est de l'Amérique du Sud, les mâles fécondent et font pénétrer dans le marsupium, ou poche incubatrice dorsale, des femelles de quinze à vingt œufs assez gros et riches en substances vitellines. Pourvus de deux branchies en forme de cloche, qui les enveloppent complètement en position normale, les embryons se développent dans l'œuf, d'où ils sortent semblables, ou presque, à leurs parents.

Les espèces du genre *Hemiphractus* sont propres à l'Amérique tropicale.

Elles sont caractérisées, outre le marsupium, par une importante ossification dermique, qui forme sur la tête une sorte de casque, avec six appendices (trois durs et trois mous), situés sur la pointe du museau, aux orbites et au centre de la tête.

Sous-ordre des Diplasiocœles

Les Diplasiocœles *(Diplasiocoela)* ont les sept premières vertèbres procœles, la huitième vertèbre amphicœle, la vertèbre sacrée reliée au coccyx par deux condyles, et la ceinture scapulaire firmisterne.

Les **Phrynoméridés** *(Phrynomeridae),* dont le seul genre, *Phrynomerus,* a pour aire de distribution l'Afrique centro-méridionale, sont caractérisés par la dilatation des apophyses transverses de la vertèbre sacrée, l'absence de précoracoïde, et la possession de phalanges intercalaires. *P. bifasciatus* habite les zones très humides de l'Afrique orientale, et se nourrit principalement de fourmis. Les adultes, longs de 5 à 6 cm, présentent sur le dos deux bandes latérales rougeâtres.

Les **Microhylidés** *(Microhylidae)* ont des vertèbres procœles ou diplasiocœles et les apophyses transverses de la vertèbre sacrée dilatées; l'os intercalaire des phalanges est absent.

Les *Dyscophus,* de Madagascar, des îles de la Sonde et du Sud-Est asiatique, ont des tubercules particulièrement accentués sur les paupières supérieures, au voisinage du cloaque et sur le dos. *D. antongili,* des forêts orientales de Madagascar, est rouge vif sur le dos, avec une bande noir-pourpre sur les côtés; le ventre est jaune avec de petites taches brunes.

Rhombophryne testudo, long de 5 cm, possède un tronc large et trapu rappelant la carapace d'une tortue; il habite Madagascar et l'île de Nossi-bé.

A. Margiocco

▶ *Un Rhacophoridé de Madagascar.*

Les *Asterophrys,* endémiques en Nouvelle-Guinée, d'une longueur maximale de 7 cm, ont l'aspect de Bufonidés. Les embryons se développent dans les œufs, et ne possèdent ni branchies ni opercule, ni bouche; ils respirent par la queue, qui est foliacée et très vascularisée.

Les *Microhyla* sont caractérisés par l'absence de dents vomériennes et maxillaires. Ils habitent toute l'Asie sud-orientale et une zone s'étendant du sud-est des États-Unis jusqu'au Rio de La Plata.

Les *Kaloula,* présents en Asie continentale, en Indonésie et dans les Philippines, ont des mœurs nocturnes et sortent lors de la saison des pluies. Les œufs, riches en substances grasses, flottent à la surface de l'eau.

Les *Breviceps,* trapus et pansus, vivent en Afrique, aussi bien dans les régions arides qu'humides, mais toujours loin de l'eau. Comme les *Uperedon* de l'Inde, ils peuvent se dilater monstrueusement en gonflant leurs poumons; malgré ce moyen d'intimidation, ces Animaux sont souvent la proie des Ophidiens. *Holophryne* et *Parholophryne,* de Tanzanie, pondent leurs œufs à l'aisselle et dans les entre-nœuds des bambous.

Les **Rhacophoridés** *(Rhacophoridae),* qui dériveraient des Ranidés, ont les apophyses de la vertèbre sacrée cylindriques, un cartilage intercalaire aux doigts et une ceinture scapulaire firmisterne. Plus de quinze genres sont répandus dans toute l'Afrique, à Madagascar, dans le Sud-Est asiatique, aux Indes orientales, aux Philippines et au Japon. Ils ont des mœurs arboricoles. Leurs doigts et leurs orteils sont plus ou moins palmés, et leurs extrémités possèdent de larges disques adhésifs. Nocturnes, les Rhacophoridés vivent de préférence dans les forêts de bambous; le jour, ils restent cachés dans les trous d'arbres, sous les feuillages, sous les rochers ou dans les interstices des murs de pierres. A l'époque de la reproduction, la femelle se place sur les feuilles et les branches situées au-dessus de l'eau, et émet une substance fluide qu'elle émulsionne immédiatement à l'aide des pattes postérieures; puis, elle y pond ses œufs. Au bout de six à dix jours, les larves éclosent, à divers stades de développement, et plongent dans l'eau pour y accomplir leur métamorphose.

Rhacophorus reinwardti (8 cm), des îles de la Sonde, a une livrée vert olivâtre ou lilas; il semble qu'il puisse planer d'un arbre à un autre grâce à des doigts largement palmés.

Les *Hyperolius,* qui comptent plus de cent espèces, sont confinés à l'Afrique au sud du Sahara. Longs de 2 à 3 cm, ils sont arboricoles, habitent jusqu'à 1 500 et 2 500 m d'altitude et se nourrissent d'Orthoptères.

Chez les *Chiromantis,* les couples s'associent pour préparer une masse écumeuse de grandes dimensions qui entoure les œufs.

Les **Ranidés** *(Ranidae),* connus depuis le Miocène, ont un sacrum à apophyses transverses non dilatées, parfois cylindriques. C'est dans cette famille que l'on trouve les plus gros Anoures vivants. Presque cosmopolites, ils sont particulièrement nombreux en Afrique.

La grenouille verte *(Rana esculenta)* habite la plus grande partie du continent européen et la Russie occidentale. Les adultes ont toujours des replis latéro-dorsaux et ne possèdent pas, ou à peine marquée, de tache temporale. Les mâles présentent des sacs vocaux externes, qui, durant le chant, sortent d'une fente horizontale située derrière la commissure buccale. La femelle mesure de 9 à 12 cm, le mâle habituellement 7,5 cm. La longueur totale des têtards est en moyenne de 4 à 5 cm (exceptionnellement 13 cm). Cette espèce vit

A. Margiocco

◀ *Deux* **Chiromantis xerampelina,** ***Rhacophoridés du Mozambique et de certaines autres régions d'Afrique orientale.***

▶ *La grenouille-bœuf* **(Rana catesbeiana),** *originaire d'Amérique du Nord, a été importée en divers endroits d'Italie centro-septentrionale.*

dans les biotopes les plus divers, aussi bien en terrain découvert qu'en forêt, et du niveau de la mer à 1 600 m d'altitude. La grenouille verte, agile, bruyante mais très peureuse, et de mœurs crépusculaires et nocturnes, est un grand chasseur d'Insectes, de Mollusques et de Vers. La reproduction a lieu d'avril à août. La femelle pond jusqu'à dix mille œufs, bruns sur le dessus, jaunâtres en dessous qui tombent au fond de l'eau. Les mâles atteignent la maturité sexuelle à la fin de la deuxième année, et les femelles entre 2 et 3 ans. En captivité, cette grenouille vit au maximum six ans, alors qu'elle atteint dix ans dans la nature. La grenouille rieuse *(Rana ridibunda)* habite l'Afrique du Nord, la Grande-Bretagne, l'Europe centrale et méridionale (sauf les îles et presque toute la péninsule italiennes), et l'Asie occidentale. On la rencontre du niveau de la mer à 1 000 m d'altitude. Elle diffère de la grenouille verte par l'aspect de ses sacs vocaux, non distendus et noirs, et par la face postérieure des cuisses qui n'est jamais marbrée de jaune. La femelle mesure 17 cm, alors que le mâle est toujours plus petit : la longueur maximale des têtards est d'environ 20 cm. Cette espèce vit parfois plus de 7 ans. La grenouille-bœuf *(Rana catesbeiana)*, originaire d'Amérique du Nord, à l'est des montagnes Rocheuses, a été introduite à Hawaï, à Cuba, dans le nord du Mexique, et même en Italie. Les adultes sont toujours dépourvus de replis latéro-dorsaux ; ils sont brun olivâtre sur le dos, avec des marbrures foncées plus ou moins marquées, et uniformément blancs ou olivâtre clair en dessous. Les femelles adultes atteignent 20 cm de long. La reproduction a lieu de février à août dans le sud des États-Unis, et de mai à juillet au nord. Les femelles pondent jusqu'à vingt mille œufs. L'espèce se nourrit d'Invertébrés et de petits Vertébrés. Aux États-Unis, elle est spécialement chassée pour sa chair. La grenouille de Lataste *(Rana latastei)* habite le Tessin et le nord de l'Italie. Elle fait partie des « grenouilles rousses », caractérisées par une tache temporale foncée très nette, l'absence de la couleur verte sur le dos, et la présence chez les mâles de sacs vocaux internes *(Rana temporaria, Rana arvalis)* ou l'absence de ceux-ci *(Rana dalmatina, Rana graeca, Rana latastei)*. *Rana latastei* vit dans les forêts humides et dans les prés, à proximité des cours d'eau, où elle se rend en mars pour la reproduction. *Rana graeca*, longue de 6 cm, habite la péninsule balkanique et l'Italie. Cette espèce fréquente les torrents, les mares limpides, mais parfois aussi les eaux troubles et de façon sporadique les grottes. Elle est répandue du niveau de la mer à 2 000 m d'altitude (dans le Montenegro). La reproduction a lieu en mars. Les œufs, au nombre de mille à trois mille cinq cents sont enfermés dans des masses flottant à la surface de l'eau. Les adultes sont la proie des Oiseaux aquatiques, des couleuvres *(Natrix)* et des grosses *Telphusae*. Parmi les grenouilles rousses circumméditerranéennes, *Rana iberica*, la plus montagnarde, habite de 1 500 m au-dessus du niveau de la mer jusqu'aux plus hautes altitudes du Portugal et du nord-ouest de l'Espagne.

A. Margiocco

Papini

▶ *La grenouille de Lataste* **(Rana latastei)** *vit dans les forêts humides et les prés.*

▼ *A gauche,* **Rana esculenta,** *la grenouille verte, bruyante mais peureuse, est un grand chasseur d'Insectes, de Mollusques et de Vers. A droite,* **Rana graeca,** *la grenouille grecque.*

J. Six

Papini

A. Margiocco

A. Margiocco

▲ *A gauche, la grenouille agile* **(Rana dalmatina)** *est, comme son nom l'indique, la plus agile des grenouilles rousses. A droite,* **Rana goliath** *est le plus gros Anoure vivant; elle habite les forêts de l'Afrique occidentale.*

Elle fréquente les torrents et les sources limpides. C'est une espèce de petite taille, agile, active, et sauteuse. La grenouille agile *(Rana dalmatina)* est répandue de la Catalogne jusqu'à la Baltique, en Europe méridionale, en Asie Mineure, dans le Caucase et dans le nord-ouest de la Perse. Elle présente, le long de la mâchoire supérieure, une raie claire, qui va de la pointe du museau à la commissure buccale. Le mâle, dépourvu de sacs vocaux, mesure 6 cm de long, alors que la femelle peut atteindre 9 cm. Elle manifeste une prédilection pour les prairies fraîches, les champs (même secs) et les forêts, particulièrement de Conifères. On la trouve du niveau de la mer jusqu'à 1 600 m d'altitude. Après l'accouplement, très bref et précoce, elle abandonne le milieu aquatique et effectue à terre de longues pérégrinations nocturnes. Les femelles pondent jusqu'à mille quatre cents œufs. La grenouille rousse *(Rana temporaria)* vit dans toute l'Europe (sauf dans l'extrême-sud). Sa mâchoire supérieure est bordée d'une raie blanche sur toute sa longueur ou seulement en arrière. Elle atteint 7 à 10 cm de long. Elle fréquente les biotopes les plus divers, du niveau de la mer à 3 000 m d'altitude (Alpes). La reproduction a lieu de janvier à juillet. Les femelles pondent jusqu'à quatre mille œufs. La grenouille champêtre *(Rana arvalis)* habite l'Europe septentrionale et centro-orientale, ainsi que l'Asie occidentale. Les adultes ont, au gros orteil, un tubercule métatarsien très robuste et dur; le long de la mâchoire supérieure, une raie claire va du bout du museau à l'épaule. Cette espèce semble fréquenter particulièrement les plaines et les vallées marécageuses à sol argileux ou tourbeux, les jonchaies et les forêts qui bordent les rivières; on la rencontre exceptionnellement dans les prairies et les champs, mais jamais au-dessus de 700 m d'altitude. La reproduction a lieu en mars et avril; la femelle (7,8 cm de long) pond jusqu'à deux mille œufs. La grenouille-léopard *(Rana pipiens)*, d'une longueur maximale de 10 cm, habite les États-Unis, à l'exception de la côte pacifique, et s'étend au nord jusqu'à 60° de latitude, au sud jusqu'au Mexique. Elle présente deux replis glandulaires distincts sur les côtés du dos. La partie supérieure est brun grisâtre, avec de grandes taches arrondies noires, régulières et bordées de clair, et le ventre est blanchâtre. Cette espèce habite les zones très humides et se rend à l'eau, en avril et mai, pour se reproduire. C'est le plus agile des Anoures des États-Unis, qui peut effectuer des bonds de 10 m de long. Les hormones d'urine de femme enceinte, inoculées chez les mâles de cette espèce, provoquent l'émission de masses spermatiques en deux heures. *Rana tigrina,* qui atteint 15 cm, habite l'Inde, Ceylan, une partie de la Chine, et la péninsule et l'archipel malais, où elle cohabite avec *Rana macrodon.* Elle vit uniquement dans l'eau. *Rana goliath,* des forêts très humides d'Afrique occidentale, est le plus gros des Anoures. Cette grenouille atteint en effet 33 cm pour un poids de 6 kg. *Rana delalandi* et *Rana adspersa,* du Sud-Est africain, *Rana obbiana,* de Somalie, et *Rana breviceps,* d'Inde, ont plus ou moins l'aspect d'un Bufonidé; d'une longueur moyenne de 5 à 6 cm, elles peuvent vivre loin de l'eau, jusque dans des zones semi-désertiques. La reproduction a lieu pendant la saison des pluies; en période de sécheresse, les adultes s'enfoncent dans le sol où ils creusent des trous jusqu'à une profondeur de 50 cm.

La sous-famille des *Phrynobatrachininés* est caractérisée par une pupille horizontale et l'absence de dents vomériennes. Ses représentants vivent dans les sous-bois humides et les prairies du continent africain.

L'espèce la plus intéressante de la sous-famille des *Astylosterninés* est la grenouille velue *(Astylosternus robustus)*, du Cameroun, longue de 11 à 12 cm. Durant la période de reproduction, les mâles sont couverts, sur les côtés du tronc et à la partie postérieure des cuisses, d'innombrables pseudo-poils riches en glandes muqueuses et granuleuses, abondamment vascularisés et dotés d'un pouvoir respiratoire. Ils vivent dans les eaux des torrents, alors que les femelles s'abritent dans des galeries creusées dans le sol. Les têtards et les larves se fixent sur des objets immergés et résistent ainsi au courant.

On rencontre, en Afrique tropicale, les quelques espèces de la sous-famille des *Hémisinés,* caractérisées par une forme trapue, une taille maximale de 5 cm, une livrée terne, et un museau pointu. Nocturnes, elles vivent dans les zones arides. L'accouplement a lieu avant la saison des pluies, puis les femelles pondent dans de petits trous creusés dans le sol.

Les *Cornuférininés* sont répandus en Chine méridionale, en Inde, aux Philippines, aux îles Fidji, en Indo-Malaisie, en Nouvelle-Guinée, dans le nord de l'Australie, et dans une partie de l'Afrique. Les œufs pondus dans le sol sont peu nombreux. Les larves se développent entièrement dans l'œuf, sans passer par un stade aquatique.

En Chine, en Birmanie, dans le Siam, dans la péninsule malaise, l'Indonésie et les Philippines, habitent les **Stauroïdés** qui diffèrent des grenouilles proprement dites par des doigts dilatés à l'extrémité. Ils présentent de petites glandes venimeuses sur le dos et le ventre.

▼ *Deux exemplaires de* **Rana adspersa,** *ou* **Pyxicephalus adspersus,** *originaire du Sud-Est africain; ces grenouilles peuvent vivre loin de l'eau, jusque dans des zones semi-désertiques.*

A. Margiocco

A. Margiocco

A. Margiocco

▶▼ *Pages 260 et 261, de haut en bas et de gauche à droite, stades de la métamorphose du triton à crête* (**Triturus cristatus**) *; on voit, en bas et à droite (p. 261), une femelle et un mâle, la première au-dessus du second.*

Sous-classe des Lépospondyles

Le terme Lépospondyle signifie « à vertèbres munies d'une enveloppe ». L'arc neural et le centre vertébral, soudés l'un à l'autre, possèdent un revêtement osseux continu. Apparus au début du Carbonifère, ces Amphibiens étroitement inféodés au milieu aquatique et de dimensions modestes atteignirent leur apogée vers la fin de cette ère et au Permien, puis déclinèrent rapidement. La sous-classe est divisée en cinq ordres dont seuls les Urodèles et Apodes ont survécu jusqu'à nos jours.

Ordre des Urodèles, ou Caudates

A la différence des Anoures, les Urodèles *(Urodela)*, ou Caudates, Amphibiens dont le nom signifie « possédant une queue », ont la tête unie au corps, normalement par un cou.

Le *corps* est plus ou moins élancé, pourvu, dans la plupart des cas, de quatre membres à peu près de même taille, les antérieurs à quatre doigts et les postérieurs à cinq, et d'une queue presque toujours très développée. La taille varie de 4 cm à 1,50 m de long.

La *tête,* généralement petite par rapport au corps, est large et plus ou moins déprimée, avec le museau arrondi. Les narines s'ouvrent près de l'extrémité du museau. Les yeux sont de taille moyenne ou assez développés (géotritons), ou réduits et même cachés par la peau (protée). Le cou, normalement différencié, a chez les Amphiumidés d'Amérique le même diamètre que le tronc. Celui-ci est large, nettement déprimé (Cryptobranchidés), ou très élancé et presque cylindrique (Amphiumidés, Sirénidés).

Les *pattes,* peu développées et robustes, sont très courtes et disproportionnées (amphiumes, protées), les postérieures pouvant être totalement absentes (Sirénidés). Le nombre des doigts, libres ou réunis par des membranes, peut être réduit. La *queue,* fréquemment plus longue que la tête et le tronc réunis, est parfois courte, cylindrico-conique, avec la pointe obtuse ou comprimée latéralement chez les espèces aquatiques. Dans certains cas, elle est quelque peu préhensile.

La *peau,* fermement soudée aux tissus sous-jacents, est très hygroscopique et possède des glandes muqueuses et granuleuses, isolées ou réunies en groupes, qui constituent des verrues et des proéminences diverses sécrétant des substances plus ou moins toxiques. Elle est riche en chromatophores, renferme diverses terminaisons nerveuses, et collabore aux échanges respiratoires, surtout chez les espèces dépourvues de branchies et de poumons.

A. Margiocco

A. Margiocco

Le *squelette,* osseux et cartilagineux, est, dans l'ensemble, peu différent de celui des Anoures. La colonne vertébrale comprend jusqu'à cent vertèbres, l'atlas s'articulant avec les deux condyles crâniens; les vertèbres du tronc portent de courtes côtes, toujours indépendantes du sternum; la zone sacrée comporte une seule vertèbre en contact avec la ceinture pelvienne; la région caudale est composée par un nombre variable d'éléments, dont les premiers portent de courtes côtes. Chez les pleurodèles et les typhlotritons, la pointe des côtes fait saillie sous la peau, alors que, chez les Sirénidés et les amphiumes, ces dernières existent en nombre limité et seulement sur les premières vertèbres thoraciques. La ceinture scapulaire comprend des coracoïdes, des précoracoïdes, des omoplates, des supra-omoplates et un sternum, tous variables selon les familles. Seules les omoplates sont ossifiées. La ceinture pelvienne possède un prépubis cartilagineux qui joue un rôle dans la dilatation des poumons. Chez les Sirénidés, cette ceinture est totalement absente. Les pattes antérieures sont toujours dépourvues du doigt externe, et les doigts des pattes postérieures peuvent être réduits en nombre (amphiumes) et en importance.

Les *muscles* du tronc et de la queue, très développés, sont, chez certains Urodèles adultes et chez les larves, divisés en myomères semblables à ceux des Poissons et des larves des Anoures.

L'*appareil digestif* est très proche de celui des Anoures. On observe une diversité plus ou moins marquée de la bouche, plus petite, et de la langue, arrondie, ovalaire ou lancéolée. Les dents, minuscules et situées sur le bord interne des os, sont implantées sur la mâchoire, sur la mandibule (sauf chez les Sirénidés) et, selon les familles, également sur les vomers, les palatins, les ptérygoïdes et le parasphénoïde.

Le *système circulatoire* ressemble également beaucoup à celui des Anoures. Cependant, chez les Urodèles, le cœur est plus primitif : les deux oreillettes n'étant pas entièrement séparées, le sang artériel se mêle plus au sang veineux.

L'*appareil respiratoire* des adultes est différent de celui des larves, comme chez les Anoures en général. Chez les adultes, les poumons sont développés, rudimentaires ou absents. Dans ce dernier cas, les échanges gazeux s'effectuent à travers la peau, plus particulièrement à travers la muqueuse buccale et pharyngienne. Certains individus adultes (néoténiques) conservent des branchies. Les branchies des larves sont toujours externes jusqu'à leur sortie de l'eau, contrairement à ce qui a lieu chez les Anoures. Le larynx est très rudimentaire ou absent : les Urodèles, en général, n'émettent pas de sons.

L'*appareil uro-génital* est semblable à celui des Anoures. Le dimorphisme sexuel est également peu marqué : chez les mâles, on observe un plus grand développement des dents maxillaires et prémaxillaires (desmognathes) ou un gonflement du museau, pourvu dans la région naso-labiale de deux tentacules latéraux, ou encore une plus grande robustesse des membres antérieurs (pleurodèles) ; enfin, dans certains cas (tritons), les doigts des membres postérieurs sont palmés et une belle crête apparaît sur le dos et la queue.

La fécondation des œufs est externe (Cryptobranches) ou, plus fréquemment, interne. Les mâles émettent par le cloaque des groupes de spermatozoïdes enrobés dans des capsules gélatineuses (spermatophores). Les femelles les recueillent avec les lèvres du cloaque, conservent les éléments mâles dans leur spermathèque, et rejettent les capsules gélatineuses. Les œufs des Urodèles, comme ceux des Anoures, sont de deux types selon la quantité de vitellus qu'ils contiennent. Exceptionnellement, les petits peuvent naître à l'état larvaire ou complètement formés. En ce dernier cas, la mise bas a lieu sur le sol. Normalement, les œufs sont pondus à terre ou dans l'eau, isolément, ou en groupes de diverses tailles, ou englobés dans une substance mucilagineuse. Les adultes ne s'occupent pas des œufs, sauf chez certaines espèces qui les surveillent ou les portent jusqu'à leur développement complet.

A peine sorties de l'œuf, les larves ont la tête assez différenciée du tronc, des ébauches de branchies externes, des balanciers (organes en bâtonnets légèrement dilatés à l'extrémité, situés derrière et sous les yeux, destinés à la fixation de la larve aux supports) et une queue. En quelques jours, les pattes antérieures apparaissent, les balanciers se résorbent, les branchies croissent et se ramifient, les membranes caudales et la membrane dorsale augmentent, et la tête commence à prendre la forme de celle de l'adulte. Ensuite les pattes postérieures apparaissent, les membranes dorsales et caudales disparaissent, les branchies sont à leur tour résorbées, et enfin les jeunes abandonnent l'eau.

Le *système nerveux central* ressemble à celui des Anoures; toutefois, les lobes olfactifs sont séparés et la moelle épinière se prolonge jusqu'à l'extrémité de la queue.

Les *organes des sens* sont moins développés que ceux des Anoures. Les yeux, dont la pupille est arrondie ou à peu près triangulaire, sont normalement pourvus d'une paupière supérieure, d'une paupière inférieure, et d'une membrane nictitante. L'organe de l'audition ne possède ni oreille moyenne, ni tympan, ni trompe d'Eustache. Les cellules sensorielles olfactives sont situées dans le

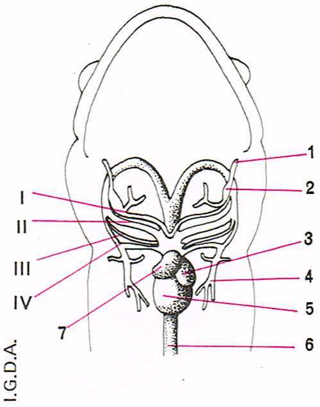

▲ Schéma de la partie centrale du système circulatoire d'une salamandre : 1, carotide; 2, glande carotidienne; 3, oreillette gauche; 4, artère pulmonaire; 5, ventricule; 6, aorte; 7, oreillette droite; I à IV, arcs aortiques.

A. Margiocco

A. Margiocco

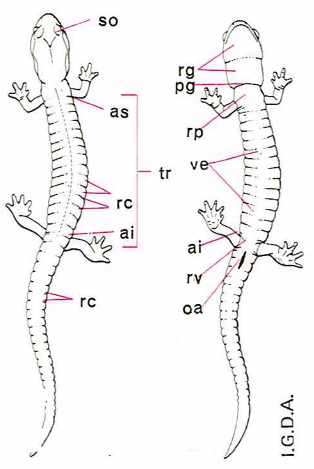

▲ ***Principaux caractères des Salamandroïdes; à gauche : so, région supra-oculaire; as, aisselle; rc, replis costaux; ai, aine; tr, tronc; à droite : rg, région de la gorge; pg, repli de la gorge; rp, région pectorale; ve, ventre; ai, aine; rv, région pelvienne; oa, orifice anal.***

conduit qui met en communication la narine externe avec la narine interne s'ouvrant devant la voûte buccale. L'odorat est supérieur chez les espèces aquatiques. Le goût, très peu développé, est exercé par des papilles sensitives du palais, de la langue et des mâchoires. Les organes de la ligne latérale sont très développés, aussi bien chez les larves que chez les adultes.

Les Urodèles sont, parmi les Amphibiens, les plus inféodés à l'eau ou aux milieux très humides; ils peuvent mener une vie active même quand la température est relativement basse (+ 14 °C). Nocturnes, ils vivent dans les sous-bois riches en végétation, les prairies marécageuses, les vallées ombreuses, les étangs, et dans les eaux tranquilles ou à cours lent. Comme les Anoures, les Urodèles sont très voraces, se nourrissant d'Arthropodes, de Mollusques, de Vers et, plus rarement, d'Amphibiens adultes ou larvaires; ils peuvent aussi être cannibales (tritons). Les différentes parties de leur corps peuvent se régénérer, même à l'âge adulte. Les Urodèles vivent jusqu'à 55 ans en captivité (Cryptobranchidés). Ils sont souvent utiles, soit parce qu'ils détruisent de nombreux Animaux nuisibles pour les cultures, soit parce qu'ils sont comestibles (Cryptobranchidés). Leur aire de distribution comprend le nord-ouest de l'Afrique, certaines régions d'Amérique du Sud, et tout l'hémisphère boréal. La plupart des espèces habitent l'Amérique du Nord et l'Asie centro-septentrionale.

Sous-ordre des Cryptobranches

Les Cryptobranches *(Cryptobranchoidea)* sont considérés comme les Urodèles les plus archaïques. Ce sont les plus grands Caudates. La fécondation est externe; les femelles pondent leurs œufs dans de petits sacs ou en deux longs cordons gélatineux qui s'attachent aux plantes aquatiques.

Les **Hynobiidés** *(Hynobiidae)*, famille la plus primitive des Urodèles, présentent un ensemble de caractères qui les rapprochent des Amphibiens des ères géologiques révolues : ils sont de taille modeste, et ont une forme de salamandre; ils se rendent à l'eau seulement pour la reproduction.

Hynobius habite l'Asie du Nord, pénétrant même en Europe orientale de même qu'*Hynobius keyserlingii*. *Batrachuperus* vit dans le Sétchouan et une partie du Tibet, *Ranodon* au Turkestan chinois, *Onichodactylus* de la Corée au Japon.

Les **Cryptobranchidés** *(Cryptobranchidae)* dérivent probablement des Hynobiidés. Ils comptent des formes du Miocène et du Pliocène, dont le fossile le mieux connu est *Andrias scheuchzeri*, que Scheuchzer prit pour un homme fossile, et qui fut identifié par Cuvier. Sans branchies, les yeux dépourvus de paupières, ils vivent en permanence dans les eaux des rivières, restant plusieurs jours complètement immobiles. La femelle pond, en août et en septembre, dans les endroits les plus abrités des torrents, jusqu'à cinq cents œufs, englobés dans des capsules gélatineuses. Pendant la ponte, l'un des deux sexes agite l'eau par de légers mouvements de la queue, afin de faciliter la respiration des embryons.

La famille comprend deux genres : *Cryptobranchus*, de l'est des États-Unis, et *Megalobatrachus*, de Chine et du Japon. Les espèces *Cryptobranchus alleganiensis* et *C. bishopi*, longues de 30 à 45 cm, nocturnes, se tiennent, presque toujours immergées, sur la vase des grands fleuves américains. En aquarium, elles vivent jusqu'à 36 ans. La « salamandre du père David » *(M. davidianus)*, confinée aux montagnes de Chine et du Tibet, et dont parlait déjà le *Shanghai-shing* (« Description de la mer et des montagnes », d'un anonyme chinois du VI[e] siècle av. J.-C.), a été dédiée par Blanchard au célèbre missionnaire qui en captura un exemplaire en 1869; cet Animal atteint plus de 1 m et pèse environ 30 kg. La salamandre géante du Japon *(M. japonicus)* vit dans les torrents de l'île de Hondo, à des altitudes de 200 à 1 000 m. Elle mesure 1,50 m et pèse de 40 à 45 kg, sa longévité est de plus de 55 ans.

Sous-ordre des Méantes

Les Méantes comprennent les **Sirénidés** *(Sirenidae)*, unique famille du groupe. Ils ont un corps anguilliforme, possèdent seulement des pattes antérieures très petites, pourvues de trois ou quatre doigts, et de minuscules yeux sans paupières. Des touffes de branchies verdâtres font saillie des deux côtés de la tête, même chez les adultes. Ceux-ci ont une livrée gris brunâtre, avec des taches ou des raies jaunâtres sur le dos, et bleuâtre ou gris-vert, avec de petites taches jaunes sur le ventre. Longue de 20 à 90 cm, la femelle pond plus de cinq cents œufs. *Siren lacertina*, des zones côtières atlantiques, se nourrit de Vers, de Mollusques et de matières végétales. En captivité, elle vit jusqu'à 25 ans.

Sous-ordre des Protéidés

Les **Protéidés** *(Proteidae)*, unique famille du sous-ordre, nettement aquatiques, ont un tronc long ou très long et une queue de taille moyenne. Les pattes, petites et graciles, portent quatre doigts, ou trois doigts aux membres antérieurs et deux aux postérieurs. Bien que possédant des poumons, ils conservent toute leur vie des touffes de branchies. Les yeux sont dépourvus de paupières, et leurs dents, minuscules, sont palatines et ptérygoïdiennes.

Le protée *(Proteus anguinus)*, uniformément blanc jaunâtre, habite les régions côtières de la Yougoslavie, l'Istrie, et la Vénétie. Il atteint au maximum 30 cm, et vit uniquement dans les eaux souterraines. Il se nourrit d'animalcules aquatiques, de microorganismes et de matières organiques contenues dans le limon qu'il ingère souvent. Dans la nature, il est probablement ovipare, mais en captivité, il devient ovovivipare. Les œufs, au nombre de douze à cinquante-six par ponte, sont attachés par groupes en dessous des pierres immergées. Le mâle les surveille, empêchant les autres protées de s'en approcher. Le protée perçoit la lumière par la peau, qui possède seulement des glandes muqueuses à sécrétion abondante, mais totalement inoffensive.

La silhouette de *Necturus* rappelle beaucoup celle des larves d'Urodèles. La tête est convexe derrière les yeux et fortement aplatie en avant de ceux-ci, et le museau est cunéiforme. Le tronc, long, déprimé, est parcouru par un sillon vertébral distinct, avec quinze paires de sillons costaux. La queue est fortement comprimée et carénée au-dessus et en dessous. *Necturus maculosus* est de couleur rouille, avec des taches arrondies bleu noirâtre sur le dos et les flancs. Le bord de la queue est rouge orangé, la partie inférieure claire avec de petites taches foncées. Les côtés de la tête sont barrés d'une bande brune. Les touffes branchiales sont rouge sang.

▼ ***A gauche, Siren lacertina, de la famille des Sirénidés, est un Urodèle dulçaquicole. A droite, le protée (Proteus anguinus), Urodèle caractéristique des eaux de certaines grottes de Dalmatie, d'Istrie et de Carniole.***

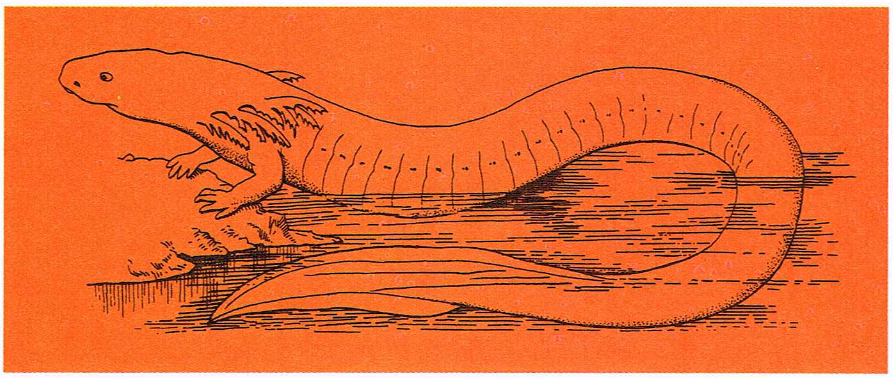

I.G.D.A.

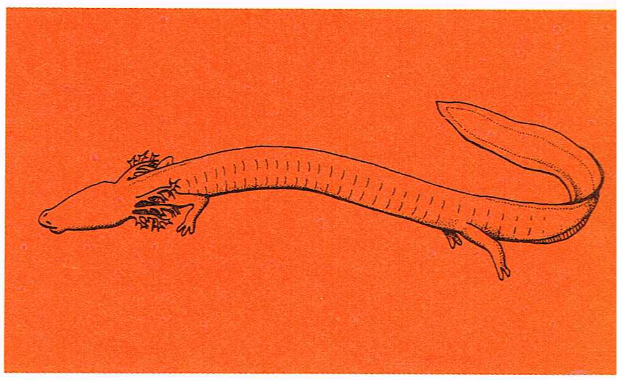

I.G.D.A.

A. Margiocco

A. Margiocco

Sous-ordre des Ambystomoïdés

Les **Ambystomidés** *(Ambystomidae)*, seule famille de ce sous-ordre, sont terrestres, sauf à l'époque de la reproduction et au stade larvaire. Ils sont pourvus de pattes courtes et massives, dotées de quatre doigts aux antérieures, et cinq aux postérieures. Les yeux sont bien développés et pourvus de paupières. La langue est large, charnue, et libre seulement sur les côtés. Les os vomériens sont pourvus de dents.

Le genre *Ambystoma,* distribué du cercle arctique au Mexique, nommé vulgairement axolotl (mot aztèque), était déjà connu des conquérants espagnols depuis 1532. *Ambystoma tigrinum* est brun foncé sur le dos et jaune olivâtre sur les flancs et le ventre. A la fin de l'hiver ou au début du printemps, à l'accouplement, la femelle recueille le spermatophore et pond une ou plusieurs masses de substance mucilagineuse, contenant chacune de cinquante à cent œufs. Trente jours plus tard, les larves, longues de 1,2 cm, commencent la vie active. Leur queue est pourvue dès l'origine d'une membrane natatoire, et elles sont nanties simultanément des quatre membres; au bout de soixante-quinze à cent jours elles ont achevé la métamorphose et mesurent 12 cm de long. Dans des conditions déterminées de milieu, les larves peuvent atteindre la taille des adultes, et la maturité sexuelle. Ces individus néoténiques, les plus nombreux, vivent dans l'eau jusqu'à 25 ans, alors que les spécimens normaux meurent vers 11 ans.

Dicampton ensatus, qui vit sur les côtes de l'océan Pacifique, de la Colombie Britannique méridionale à la Californie centrale, long de 30 cm, diffère des *Ambystoma* par l'extrême réduction des poumons et par de gros yeux saillants.

Sous-ordre des Salamandroïdés

Ce sous-ordre est le plus vaste et le plus complexe des Urodèles. Les Salamandroïdés *(Salamandroidea)* possèdent des dents à la voûte palatine. Les adultes n'ont pas de branchies et parfois pas de poumons. La fécondation est semi-interne.

Les **Salamandridés** *(Salamandridae),* famille connue pour ses espèces fossiles de l'Oligocène et du Miocène, sont répandus en Europe, en Asie, en Afrique nord-occidentale, en Amérique du Nord. Leurs représentants sont caractérisés par un corps peu allongé et lacertiforme. Les pattes antérieures possèdent toujours quatre doigts et les postérieures quatre ou cinq. La queue est arrondie ou déprimée latéralement. La petite salamandre *(Salamandrina terdigitata),* endémique en Italie (dans l'Apennin), mesure au maximum 10,7 cm. *Chioglossa lusitanica,* confiné au Portugal et au nord-ouest de l'Espagne, est extrêmement rare et protégé. D'une longueur

A. Margiocco

A. Margiocco

◀▲ A gauche, forme néoténique albinos d'un axolotl du Mexique (Ambystomidés). A droite (de haut en bas), stades de la métamorphose de la petite salamandre (**Salamandrina terdigitata*****) : au milieu, larve, quelques instants avant de sortir de l'œuf; en bas, quelques adultes et groupes d'œufs.***

A. Margiocco

▲ ***Stade larvaire d'un Salamandridé, la salamandre tachetée* (Salamandra salamandra).**

▼ ***Spécimen adulte de l'espèce* Salamandra salamandra *; celle-ci habite presque toute l'Europe et vit aussi bien en captivité que dans la nature.***

E. Hosking

de 15 cm, dont les deux tiers sont constitués par la queue, il a la faculté de s'amputer volontairement quand on le saisit. Le genre *Salamandra* possède cinq doigts aux pattes postérieures. La salamandre noire *(Salamandra atra)* habite les forêts et les prairies de montagne des Alpes, de 600 à 3 000 m d'altitude. Elle est uniformément noire et mesure 15 cm. L'accouplement a lieu en été et, dix mois à trois ans après la fécondation, la femelle met bas de deux à quatre petits, de 3 à 4 cm, complètement semblables aux adultes. La maturité sexuelle est atteinte vers 3 ou 4 ans. En captivité, cette salamandre vit en moyenne jusqu'à 12 ans. La salamandre tachetée *(Salamandra salamandra)* habite presque toute l'Europe, débordant largement à l'est et au sud. L'accouplement a lieu au printemps et en été, parfois en automne; plus ou moins longtemps après, la femelle met bas, en eau peu profonde, jusqu'à soixante-dix larves bien développées, d'environ 3 cm de long. L'Animal (32 cm de long) vit jusqu'à 25 ans, aussi bien dans la nature qu'en captivité.

Pleurodeles waltl, confiné dans la partie méridionale de la péninsule Ibérique et au Maroc, a une queue très comprimée à la racine, plus longue que la tête et le tronc réunis et pourvue sur les deux faces d'une courte membrane. Le dos est jaune ocre avec des taches arrondies de couleur brune, et la partie inférieure légèrement plus claire avec de petites taches brun noirâtre. Pouvant atteindre 23 cm, cette espèce nocturne vit presque uniquement dans l'eau. En captivité, elle vit jusqu'à 20 ans.

Euproctus platycephalus habite uniquement la Sardaigne, jusqu'à 1 800 m d'altitude. Ses glandes parotoïdes sont indistinctes. La moitié distale de la queue est pourvue, au moins durant la période de reproduction, de crêtes dorsale et ventrale. Le mâle possède la même protubérance conique cloacale que la femelle, mais diffère de cette dernière par la présence d'un éperon distal externe ressemblant à un sixième doigt, situé sur les pattes postérieures. *Euproctus montanus,* endémique en Corse, vit jusqu'à 2 260 m d'altitude. Les glandes parotoïdes sont très nettes. La protubérance cloacale conique est propre au mâle, qui se distingue en outre de la femelle par une proéminence à bord convexe du côté externe des membres postérieurs. *Euproctus asper* (Pyrénées) habite les ruisseaux, entre 700 et 3 000 m d'altitude. Tout le corps est recouvert d'une peau rugueuse et granuleuse, et la gorge présente des replis. Le mâle a une protubérance cloacale conique, alors que celle des femelles est cylindrique. Lucifuge, cet euprocte sort seulement le soir, à la recherche de petits Urodèles, de Vers et d'autres Invertébrés. La reproduction a toujours lieu dans l'eau, l'hibernation et l'estivation s'effectuant normalement à terre. Les œufs sont pondus isolément et s'attachent à la partie inférieure des pierres immergées. En captivité, l'espèce vit jusqu'à 7 ans.

Chez le genre *Triturus,* les mâles adultes possèdent une crête, particulièrement développée à la période des amours, le long de la ligne vertébrale du tronc. A l'époque de la reproduction, les couleurs et les taches deviennent plus vives dans les deux sexes. Après une danse nuptiale plus ou moins compliquée, le mâle dépose un ou plusieurs spermatophores gélatineux, que la femelle recueille dans son cloaque. Elle pond de cent à quatre cents œufs, attachés un à un aux plantes submergées. Les larves, aquatiques et pourvues de branchies externes, réalisent leur métamorphose en deux à quatre mois. Exceptionnellement, se développent des individus néoténiques matures, qui conservent leurs branchies et d'autres caractères larvaires. En aquarium, les tritons vivent jusqu'à 30 ans. *Triturus italicus,* long de 8 cm, endémique en Italie, a probablement des mœurs semblables à celles du triton vulgaire *(Triturus vulgaris),* espèce largement distribuée de la France à l'Oural. Durant les amours, le mâle de *T. vulgaris* développe une crête médio-dorsale et des membranes lobées sur les doigts des pattes postérieures; la queue se prolonge graduellement en un filament apical. Le triton à crête *(Triturus cristatus)* habite l'Europe centrale et septentrionale, débordant jusqu'au Caucase et en Asie Mineure. On l'observe jusqu'à 1 850 m d'altitude. Cette espèce a le ventre abondamment tacheté de rouge et de noir. Le mâle adulte, lors de la période des amours, a une crête dorsale dentelée sur le tronc et une bande nacrée sur les côtés

de la queue. La femelle peut atteindre 18 cm de long, alors que le mâle n'en mesure que 15. La reproduction a lieu habituellement en hiver et au printemps, mais peut se trouver retardée jusqu'en été dans les stations de haute altitude. *Triturus alpestris* habite l'Europe centrale et méridionale. Le mâle atteint une longueur de 8 cm, la femelle 11 cm. Le ventre, à de très rares exceptions près, est dépourvu de taches foncées, tout au moins dans la zone médiane, et le mâle possède, à l'époque des amours, une crête médio-dorsale jaune et noir non dentelée; ses flancs présentent une bande argentée, pointillée de noir et bordée, en dessous, d'une bande bleue. On rencontre cette espèce du niveau de la mer à 3 000 m d'altitude. *Triturus boscai,* de la péninsule Ibérique, a la gorge marquée par un sillon longitudinal foncé; le mâle ne possède pas de crête dorsale pendant les amours. *Triturus marmoratus,* ou triton marbré, habite le sud-ouest de l'Europe et mesure jusqu'à 16 cm. Il a le ventre foncé, bleuâtre ou grisâtre ponctué de clair, le dos tacheté de vert clair, les flancs et les doigts vert et noir. La crête dorsale des mâles est striée de bandes verticales jaunes. *Triturus helveticus* possède sur la tête diverses stries longitudinales foncées, dont l'une traverse l'œil. La gorge est claire et sans taches, et le dos bordé de petits cercles étroits et saillants. Pendant l'accouplement, la crête des mâles est très réduite. La queue, tronquée, se termine par un filament. Les orteils sont palmés. Cette espèce, plus inféodée à l'eau que *T. vulgaris,* se rencontre du niveau de la mer à 2 000 m d'altitude (Pyrénées). *Triturus montandoni* est confiné aux Carpathes et aux monts Tatras. Il est très proche de *T. helveticus.*

Les **Amphiumidés** *(Amphiumidae)* vivent dans les eaux douces du sud-est des États-Unis. Le corps, allongé, anguilliforme, mesure près d'1 m. Les pattes, rudimentaires et minuscules, possèdent deux ou trois doigts. Les yeux sont minuscules et dépourvus de paupières. Les branchies existent seulement chez les larves. Ils sont nocturnes, se nourrissent essentiellement de Mollusques. En été et en automne, la femelle creuse un trou dans la vase, et y pond de cinquante à cent cinquante œufs, réunis par un long cordon gélatineux. Il semble qu'elle n'abandonne pas sa ponte durant les cinq mois de l'incubation. En captivité, ces Animaux vivent près de 27 ans.

Amphiuma means, long de 90 cm, possède seulement deux doigts. La partie supérieure de la tête est brun foncé; le dos et la queue sont gris-brun; les flancs et le ventre gris clair. Il habite de la Virginie à la Floride. *Amphiuma tridactylum* mesure jusqu'à 1,15 m. Il possède trois doigts. On le rencontre dans le sud-est des États-Unis.

Les **Pléthodontidés** *(Plethodontidae),* qui mesurent de 4 à 20 cm de long, sont dépourvus de poumons; les adultes ne possèdent qu'exceptionnellement des branchies. La langue est libre au bord ou attachée seulement à sa partie postérieure. Ils ont des dents maxillaires, mandibulaires, palatines et vomériennes. Cette famille se distingue par la présence d'un sillon naso-labial net et fin. La queue est arrondie transversalement; les pieds ont cinq doigts, largement arrondis ou tronqués à l'extrémité, avec une membrane interdigitale à la base.

Les espèces européennes du genre *Hydromanthes* sont uniquement terrestres et nettement lucifuges. On les trouve en surface, seulement aux époques fraîches et humides, souvent cachées sous des abris, et en permanence dans les grottes. Leur nourriture est constituée de larves d'Insectes, de Crustacés, de Mollusques, d'Arachnides, sur lesquels ils projettent leur langue comme le font les caméléons. On a pu observer, chez *Hydromanthes genei* élevé en terrarium, des manœuvres nuptiales, pendant lesquelles les mâles montent sur le dos des femelles, ainsi que le dépôt des spermatophores. *Hydromanthes genei,* long de 13,5 cm, est endémique en Sardaigne, où il habite jusqu'à 1 200 m d'altitude. Son ventre est peu ou totalement dépigmenté. *Hydromanthes italicus* est localisé dans les Alpes de Haute-Provence, les Alpes-Maritimes, et l'Apennin septentrional et central jusqu'à 1 500 m. Atteignant 12 cm de long, il a le ventre plus ou moins pigmenté de couleurs foncées. *H. platycephalus,* petite espèce de 10 cm, habite les zones pierreuses des montagnes de la Californie centro-occidentale, jusqu'à 3 200 m d'altitude. Elle est caractérisée par un ventre clair et de petites taches foncées sous la gorge.

Les espèces du genre *Desmognathus* ont la langue rattachée en avant au plancher buccal. Elles sont nombreuses aux États-Unis et au sud du Canada. *D. fuscus,* de l'est des États-Unis, mesure jusqu'à 12 cm; la queue, épaisse à la racine, s'amincit peu à peu, et présente, vers l'extrémité, une section triangulaire. La gorge et la partie inférieure sont de couleur chair. Au printemps, les mâles stimulent les femelles en les touchant avec les glandes du museau, tout en émettant des spermatophores. De juin à août, les femelles pondent de douze à trente œufs attachés les uns aux autres. Les mères les portent autour de leur corps et ne les abandonnent jamais. Dès que les larves sont nées, elles se rendent à l'eau et se nourrissent de plancton. La métamorphose achevée, elles abandonnent l'élément aquatique.

Le genre *Plethodon* compte trente espèces, qui vivent aux États-Unis; elles ne se rendent pas à l'eau, même pour la reproduction.

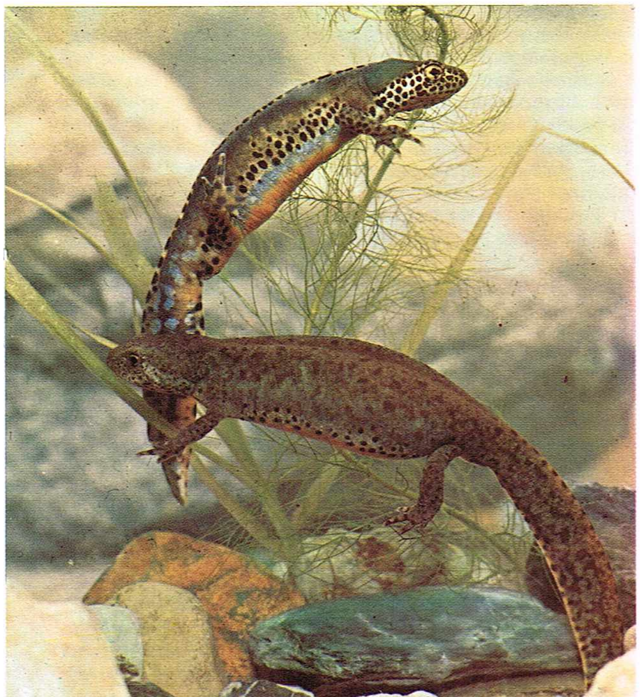

A. Margiocco

A. Margiocco

◀ ***A gauche, mâle (en haut) et femelle de triton alpestre* (Triturus alpestris)*; l'espèce habite l'Europe centrale et méridionale. A droite,* Batrachoseps attenuatus, *espèce de Californie.***

Les *Batrachoseps,* des États-Unis, ont un tronc très allongé et presque cylindrique ; la queue, plus effilée, cylindrique sur presque toute sa longueur, se termine brusquement en pointe.

Typhlomolge rathbuni vit en permanence dans l'eau, dans les cavernes du Texas. Uniformément blanchâtre, il possède des branchies rouges, qu'il ne perd jamais.

Typhlotriton spelaeus peut être observé sur les parois des grottes du haut-plateau calcaire d'Ozark (au Missouri), d'Oklahoma, de Kansas et d'Arkansas. Aveugle, blanc au point d'être presque transparent, il atteint 14 cm. Les quatre doigts des mains sont indépendants, et les cinq orteils reliés basalement les uns aux autres par une membrane. Il a des yeux minuscules, à peine visibles sous les paupières soudées l'une à l'autre.

Ordre des Apodes, ou Gymnophiones

On ne connaît pas de formes fossiles d'Apodes.

Le *corps,* assez semblable chez les divers genres, est à peu près cylindrique, légèrement affiné à l'extrémité, complètement dépourvu de membres et divisé en segments par des plis annulaires.

La *tête* est petite, à peu près conique, un peu aplatie ; le museau très en saillie porte à l'extrémité de minuscules narines. Les yeux, minuscules, sont souvent couverts par la peau ou même par les os. Entre les narines et les yeux se trouvent deux organes riches en terminaisons nerveuses. L'appareil auditif ne présente pas de traces externes. La bouche est assez grande, la queue si brève que le cloaque peut être considéré comme terminal *(Geotrypetes seraphini)* ; parfois, elle est un peu plus développée *(Ichthyophis glutinosus)* et, au lieu d'être en dôme, large et basse *(Caecilia tentaculata),* elle est légèrement comprimée latéralement *(Typhlonectes compressicauda).*

La *peau,* riche en glandes muqueuses et granuleuses, adhère fortement aux tissus sous-jacents. Les Apodes possèdent presque toujours dans la peau du dos et des flancs de petites écailles cycloïdes. Les chromatophores sont généralement moins abondants que chez les autres Amphibiens.

Le *squelette* est massif et plus solide que celui des Anoures et des Urodèles. Les orbites sont minuscules et complètement entourées par des os. La colonne vertébrale se compose de deux cents vertèbres amphicœles ; l'atlas est articulé avec les deux condyles crâniens, les autres portant des côtes rudimentaires. Seule la musculature du tronc est quelque peu développée.

L'*appareil digestif* présente quelques différences par rapport à celui des autres Amphibiens ; l'œsophage est plus long, et la bouche est constituée de façon particulière : la langue est presque immobile et les dents, en crochets, sont implantées sur les mandibules, les prémaxillaires, les maxillaires et les vomers.

Le *cœur* se trouve très en arrière. Le sang veineux se mélange plus au sang artériel que chez les autres Amphibiens. Le larynx est rudimentaire, et la trachée, assez longue, a une fonction respiratoire partielle chez les Typhlonectidés. Le poumon gauche est rudimentaire.

Les *reins* sont très allongés. Les *organes génitaux* comportent des corps gras sous forme de lobes disposés en rangées continues et très développées. La fécondation est interne. L'organe copulateur est érectile et pourvu de pointes lui permettant de s'accrocher aux parois cloacales de la femelle. Les Apodes sont ovipares ou ovovivipares *(Typhlonectes).* Les œufs sont pondus sur le sol.

Le *système nerveux* est semblable à celui des autres Amphibiens. L'appareil auditif est dépourvu d'oreilles externe et moyenne, alors que l'oreille interne est très développée. L'organe de Jacobson est plus complexe que chez les Anoures et les Urodèles. La réception des stimuli tactiles se fait par des terminaisons nerveuses libres, abondantes au niveau de la peau et du tentacule labial. Les organes de la ligne latérale sont totalement absents.

Ces Animaux atteignent une longueur de 1 m. Ils vivent dans des galeries qu'ils creusent dans le sol ou dans l'eau. Ils se nourrissent d'Invertébrés, exceptionnellement de Reptiles (Typhlopidés et Leptotyphlopidés). Ils résistent bien aux hautes températures. Leur longévité est pratiquement inconnue. Répandus dans toutes les régions tropicales humides, ils sont absents seulement à Madagascar et en Australie.

Ichthyophis glutinosus habite l'Asie continentale et insulaire. Il possède quatre cents sillons annulaires et une queue assez différenciée. Sa livrée est brun foncé ou bleu-noir, avec une large bande jaune sur les flancs. Les femelles pondent de un à vingt-deux œufs ellipsoïdaux, riches en substances vitellines, réunis les uns aux autres par de courts pédoncules. Les femelles s'enroulent tout autour pour les protéger avec leur corps. A l'éclosion, les larves possèdent trois grosses branchies ramifiées, et ont la queue plus longue que celle des adultes. La métamorphose, ou tout au moins sa dernière phase, a lieu dans l'eau.

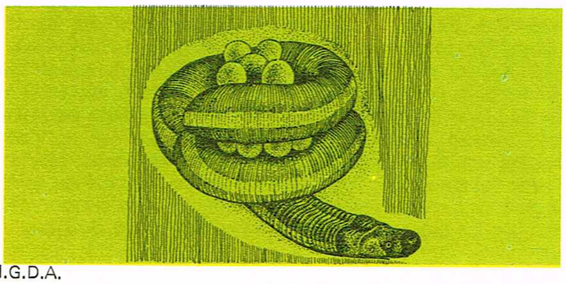
I.G.D.A.

A. Margiocco

▶ *En haut, un* Ichthyophis glutinosus *couvant ses œufs. En bas, un Amphibien Apode.*

Les représentants du genre *Caecilia,* répandus sur le continent américain, possèdent deux rangées de dents à la partie supérieure de la bouche. Ils sont couverts d'écailles cycloïdes incluses dans la peau et possèdent un petit tentacule lobulaire, entouré d'un sillon en forme de fer à cheval. *Caecilia thomsoni* atteint 1 m de long. *C. tentaculata* vit au Surinam, et se nourrit d'animalcules variés qu'il capture la nuit dans les sous-bois. *C. gracilis,* qui mesure au maximum 70 cm, habite en Guyane et en Équateur, et se nourrit essentiellement de fourmis.

Geotrypetes seraphini se rencontre en Afrique occidentale et centrale. Il est caractérisé par des dents maxillaires disposées en deux séries, un tentacule placé au centre d'un sillon en fer à cheval, et des yeux assez visibles. Il mesure près de 20 cm. La métamorphose se fait presque totalement dans l'œuf, et les jeunes ne passent pas par une période de vie aquatique.

Typhlonectes compressicauda (Guyane et Venezuela), long de 45 cm, a la queue comprimée. La peau dépourvue d'écailles est riche en glandes granuleuses et muqueuses. L'ouverture cloacale est située au milieu d'un disque adhésif. La livrée est brun olivâtre. Il vit perpétuellement dans l'eau et s'y déplace comme une anguille. Les larves, au nombre de cinq ou six, restent dans l'œuf, qui reste dans l'utérus maternel jusqu'à la fin de son développement. Au cours de la vie intra-utérine, ces larves développent trois paires de branchies, soudées pour former deux membranes richement vascularisées, qui entourent l'embryon et servent aux échanges gazeux avec la paroi de l'utérus. Les branchies s'atrophient avant la sortie du jeune dans le milieu extérieur.

A. Margiocco

▲ ***La vipère commune* (Vipera aspis) *est une espèce extrêmement répandue; elle appartient, dans le groupe des Reptiles, à la famille des Vipéridés, plus spécialement adaptés à la fonction venimeuse.***

REPTILES

Les Reptiles *(Reptilia)* sont apparus probablement, au Carbonifère, il y a deux cent soixante-quinze millions d'années. On ne sait pas avec certitude quels furent leurs ancêtres les plus éloignés; la plupart des herpétologues pensent qu'ils dérivent d'Amphibiens Stégocéphales, qui furent les premiers Vertébrés à abandonner le milieu aquatique. Le terme de passage entre les Amphibiens et les Reptiles est représenté par les Cotylosauriens, très communs au Carbonifère. De ces formes très primitives dérivèrent quatre groupes, auxquels on a donné le rang de sous-classes, et dont, aujourd'hui, la plupart ont disparu.

Au groupe des *Anapsidés* appartiennent les Testudinates, ou Chéloniens (environ deux cents espèces), qui, apparus au Permien, ont conservé à peu près inchangés leurs caractères archaïques.

Les *Parapsidés* ont connu leur apogée au Crétacé, avec les Plésiosaures et les Ichthyosaures, et se sont éteints dès la fin de l'ère secondaire.

Les *Synapsidés* dérivent des Anapsidés. Apparus au Carbonifère et disparus au Trias, ce sont probablement les ancêtres des Mammifères.

Les *Diapsidés,* qui constituent le groupe le plus vaste des Reptiles, apparurent au Permien et se scindèrent en deux super-ordres, les Archosauriens et les Lépidosauriens. Les premiers ont donné naissance à l'ordre des Crocodiliens (qui comprend actuellement vingt-trois espèces) ainsi qu'aux Saurischiens et Ornitischiens. Quant aux seconds, ils ont produit au Trias les Rhynchocéphales, représentés aujourd'hui par le sphénodon ou hatteria, et au Jurassique les Squamates, dont la plupart existent toujours. Ces derniers comprennent environ deux mille sept cents Ophidiens et trois mille Sauriens.

La taille des Reptiles actuels est assez modeste, et c'est exceptionnellement que certains atteignent 10 m.

Les Reptiles se distinguent des autres Vertébrés par une peau presque totalement dépourvue de glandes, et constituée par une couche externe cornée, très épaisse, à écailles ou à plaques, et des plaques osseuses dermiques pouvant former une véritable cuirasse. Les membres, habituellement au nombre de quatre et possédant cinq doigts, toujours armés de griffes, sont de formes diverses. Chez certains ils sont réduits à une seule paire, chez d'autres, ils manquent totalement, auquel cas les os des ceintures scapulaire et pelvienne sont très rudimentaires ou disparaissent complètement. Le squelette est ossifié et le crâne présente un seul condyle occipital.

Les Reptiles sont des Animaux poïkilothermes. Ils possèdent douze paires de nerfs crâniens.

Leur cœur est divisé en trois cavités : deux oreillettes et un ventricule. Ce dernier est pourvu d'un septum, qui est complètement fermé chez les Crocodiliens. Les arcs aortiques sont au nombre de deux, et les globules rouges sont nucléés et de forme arrondie.

La respiration s'effectue, normalement, au moyen de poumons, et dans certains cas (toujours partiellement) par le cloaque abondamment vascularisé.

La fécondation est interne et a toujours lieu au moyen d'organes copulateurs. Les œufs, plus ou moins gros, ont une coquille calcaire ou parcheminée; ils sont pondus après la fécondation ou parfois conservés dans le sein maternel jusqu'au développement complet de l'embryon. Dès la naissance, les petits ressemblent aux adultes; parfois, ils en diffèrent par la livrée.

Les sous-classes des Parapsidés et des Synapsidés, entièrement éteintes, ne seront pas étudiées ici. Seuls les Anapsidés (Chéloniens) et les Diapsidés (Crocodiliens, Rhynchocéphales et Squamates) seront traités.

Sous-classe des Anapsidés

Le nom d'Anapsidés *(Anapsida)* signifie en grec « dépourvu d'arcs »; en effet, contrairement à ce qui a lieu chez les autres Reptiles, à la partie latéro-postérieure du crâne, l'os postorbitaire et le squamosal ainsi que le jugal et le pariétal sont unis et constituent une surface plane, sans trace d'aucune fosse temporale.

Les Anapsidés dérivent directement des Amphibiens. Leurs fossiles ont été découverts dans les couches du Permien inférieur. Le passage des Amphibiens aux Reptiles a dû se faire au Carbonifère. La forme de ces Anapsidés était intermédiaire entre celle des Urodèles et celle des Sauriens et leur taille assez modeste.

Les Anapsidés comptent deux ordres : celui des Cotylosauriens, entièrement éteint, et celui des Chéloniens qui compte encore des représentants.

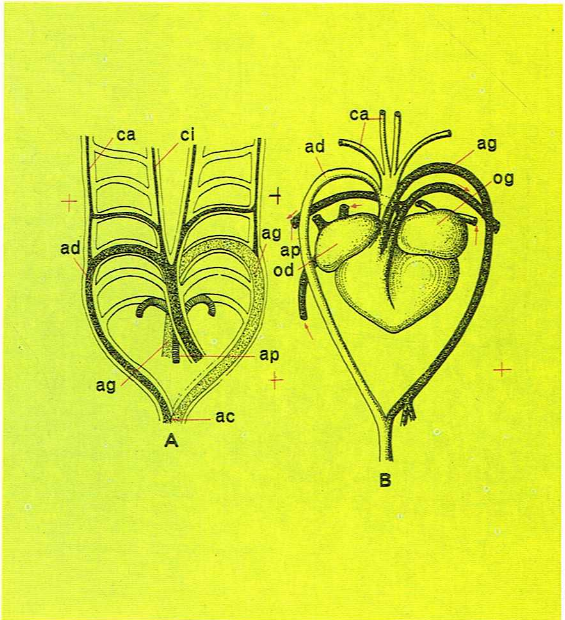

▶ *A, schéma de la transformation des arcs aortiques chez les Reptiles : ca, carotide externe; ci, carotide interne; ad, aorte droite; ag, aorte gauche; ap, aorte pulmonaire; ac, aorte commune; B, schéma du cœur et des gros vaisseaux chez une tortue : od, oreillette droite; og, oreillette gauche; ad, aorte droite, ag, aorte gauche; ca, carotides; ap, artère pulmonaire (les flèches indiquent la direction du courant sanguin).*

Classe des Reptiles

☐ *Sous-classe des Anapsidés*

- ○ *Ordre des Cotylosauriens**
- ○ *Ordre des Chéloniens*

☐ *Sous-classe des Parapsidés**

☐ *Sous-classe des Synapsidés**

☐ *Sous-classe des Diapsidés*

— Super-ordre des Archosauriens

- ○ *Ordre des Pseudosuchiens**
- ○ *Ordre des Phytosauriens**
- ○ *Ordre des Saurischiens**
- ○ *Ordre des Ornithischiens**
- ○ *Ordre des Ptérosauriens**
- ○ *Ordre des Crocodiliens*

— Super-ordre des Lépidosauriens

- ○ *Ordre des Éosuchiens**
- ○ *Ordre des Rhynchocéphales*
- ○ *Ordre des Squamates*

* *Groupes fossiles*

Ordre des Chéloniens

Le plus ancien représentant de l'ordre des Chéloniens *(Chelonia)*, ou tortues, est l'eunothosaure, petit Reptile dont le squelette incomplet a été découvert en Afrique du Sud dans les couches du Permien.

Les premières tortues proprement dites apparurent seulement au Trias moyen et, bien qu'elles aient donné des formes terrestres, d'eau douce et marines, toutes les espèces sont restées à peu près inchangées.

Ces Vertébrés ont un tronc très élargi, raccourci et protégé par une très forte *carapace,* convexe à la partie supérieure, et qui laisse, en avant, dépasser la tête et les pattes antérieures, en arrière, les pattes postérieures et la queue. Cette carapace est constituée par les os du squelette interne et par des plaques dermiques recouvertes d'écailles cornées épidermiques. Seules, quelques espèces ont la peau molle. La carapace est divisée en deux parties : l'une supérieure, le bouclier ou carapace proprement dite, et l'autre inférieure, le plastron; elles sont soudées l'une à l'autre ou réunies par des ligaments élastiques.

Le *bouclier* est constitué par cinq séries longitudinales de plaques osseuses : des plaques médianes ou vertébrales le long de la colonne vertébrale, deux plaques costales situées sur les côtés des vertébrales, et deux plaques marginales, bordant à droite et à gauche les costales. Le plastron se compose de quatre paires de plaques symétriques, plus une plaque impaire.

Sauf chez les Dermochélyidés, la partie dorso-lombaire de la colonne vertébrale des tortues est soudée à la face interne du bouclier au niveau des plaques vertébrales, et les côtes sont unies aux plaques costales. Les ceintures scapulaire et pelvienne, à la différence de ce qu'on observe chez les autres Vertébrés, se trouvent à l'intérieur des côtes. Il n'y a pas de sternum ni de clavicule. La ceinture scapulaire présente sur les côtés un os triradié; l'omoplate s'étend obliquement vers le haut et en avant, s'appuyant au bouclier; le procoracoïde est dirigé vers l'intérieur; enfin, le coracoïde est dirigé obliquement, vers l'arrière et le bas. Les trois os convergent dans l'acétabulum, où s'articule l'humérus. La ceinture pelvienne est formée par trois paires d'os typiques. Le bouclier et le plastron sont recouverts de plaques cornées, juxtaposées ou imbriquées, qui ne correspondent ni par la forme ni par le nombre aux plaques osseuses sous-jacentes.

La *colonne vertébrale* est constituée au maximum par trente-six vertèbres, et, comme les dorsales et les lombaires sont soudées au bouclier, elle est seulement mobile aux parties cervicale et caudale. Le squelette de la tête est de type anapsidé, dépourvu de foramen interpariétal, avec le carré soudé aux autres os, et possède un condyle occipital trilobé. La mâchoire et la mandibule sont totalement dépourvues de dents; celles-ci sont remplacées par quelques pièces cornées très coupantes. Le cou, la tête, les pattes et la queue peuvent rester hors de la carapace ou y être cachés. La rentrée du cou peut se faire selon un mouvement vertical ou horizontal.

Les pattes sont pentadactyles. Chez les tortues marines, les membres antérieurs ont les doigts entourés par la peau : ils sont plus robustes et mieux adaptés à la nage que les pattes postérieures. Chez les tortues d'eau douce, par contre, il n'y a pas de palettes, et tous les doigts sont unis par une membrane. Chez les tortues terrestres, enfin, les membres sont plus brefs, avec des doigts très courts à griffes robustes.

La peau de la tête, du cou, des pattes et parfois aussi la carapace peuvent être nues ou pourvues de plaques et de tubercules variés.

Les muscles thoraciques sont fort peu développés, au contraire de ceux des pattes et du cou.

En ce qui concerne l'*appareil digestif,* la langue est molle et non protractile, l'œsophage pourvu de nombreuses papilles, l'estomac habituellement simple, et l'intestin peut être dépourvu de cæcum.

Le *système respiratoire,* particulier, ne se retrouve pas chez les autres Tétrapodes : comme la cage thoracique est immobile, l'introduction et la sortie de l'air dans les poumons sont dues aux mouvements du cou et des pattes antérieures. Les espèces aquatiques respirent également par le cloaque.

Le *système nerveux* ne présente pas de caractéristiques spéciales. L'ouïe semble peu développée. L'oreille ne présente pas de conduit auditif externe, et la membrane

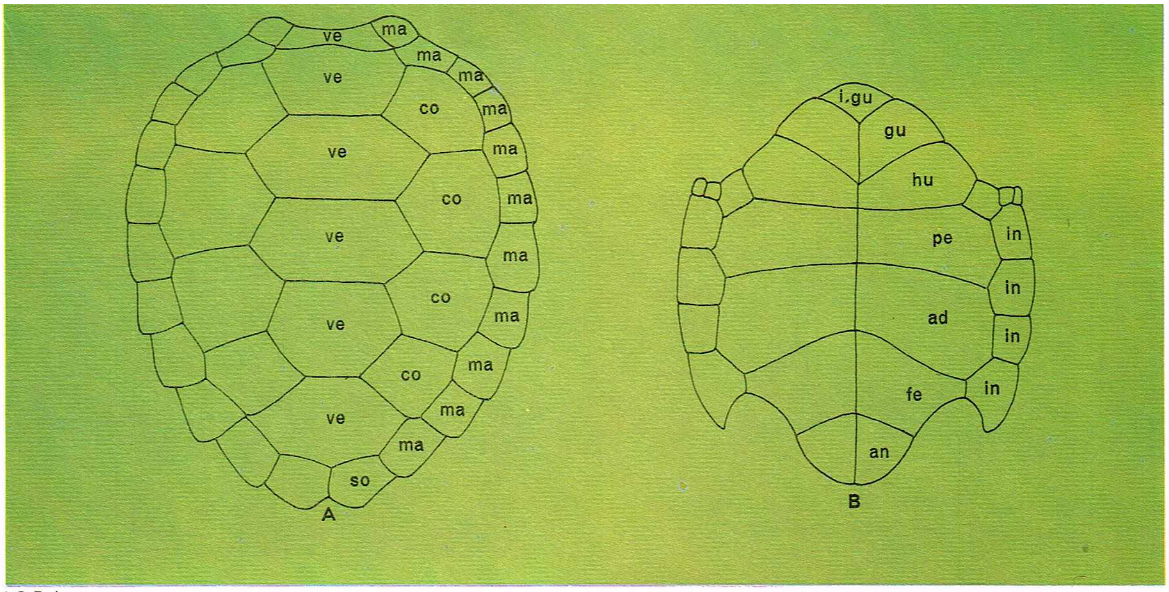

◀ *Bouclier (A) et plastron (B) de* Chelonia mydas *montrant la disposition des plaques cornées : ve, vertébrales; co, costales; ma, marginales; so, supra-caudale ou post-vertébrale; i. gu, inter-gulaire; gu, gulaire; hu, humérale; pe, pectorale; ad, abdominale; fe, fémorale; an, anale; in, infra-marginales.*

I.G.D.A.

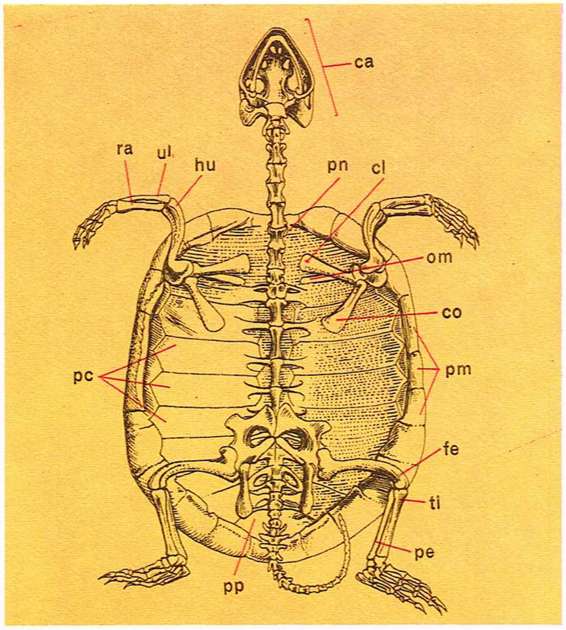

I.G.D.A.

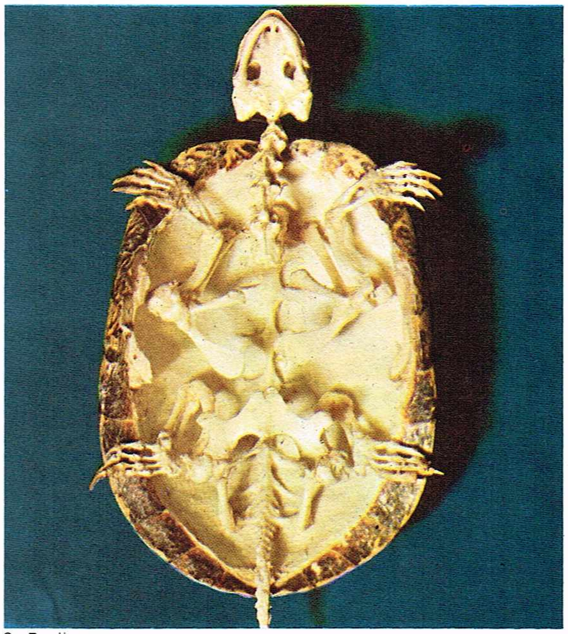

C. Bevilacqua

◀ *Représentation schématique (à gauche) et réelle (à droite) du squelette d'*Emys orbicularis *: ca, os de la tête; ra, radius; ul, cubitus; hu, humérus; pn, plaque nucale; cl, clavicule; om, omoplate; co, coracoïde; pm, plaques marginales; pc, plaques costales; fe, fémur; ti, tibia; pe, péroné; pp, plaque coccygienne.*

tympanique affleure en surface ou est invisible. L'œil est en contact avec les glandes lacrymales et les glandes de Harder; il est protégé par trois paupières. La pupille est ronde, et la sclérotique présente de nombreuses petites plaques osseuses.

A la différence de celui des autres Reptiles, l'organe sexuel mâle a un seul pénis. L'appareil sexuel femelle est caractérisé par la grande taille de l'ovaire. Les tortues se reproduisent au moyen d'œufs pondus dans des trous creusés par la femelle. L'incubation s'effectue à la température ambiante.

La longévité des tortues est grande : un exemplaire de *Testudo sumeirii*, capturé aux îles Seychelles en 1766, à un âge déjà avancé, est mort accidentellement en 1918; on peut évaluer qu'il avait près de deux cents ans. Les tortues des Galapagos vivent près de cent cinquante ans; la tortue grecque atteint cent vingt-cinq ans, et la cistude d'Europe dépasse cent ans.

Les tortues résistent fort mal aux hautes températures surtout quand celles-ci s'accompagnent d'une grande sécheresse; la mort advient lorsque la température interne dépasse 40 °C. La résistance au jeûne est très grande : ainsi, un individu d'*Emys orbicularis* est resté six ans sans se nourrir.

Les tortues sont chassées par les grands Carnivores, par divers Oiseaux de proie, certains requins, et surtout par l'homme.

La distribution géographique des Chéloniens est limitée à la bande intertropicale et aux zones situées immédiatement au nord et au sud de celle-ci.

Les Chéloniens actuels se divisent en deux grands sous-ordres. Cette séparation est établie en fonction du mode de rétraction de la tête dans la carapace. Les *Cryptodires* rétractent leur cou en décrivant une courbe dans le plan vertical, alors que chez les *Pleurodires* celle-ci est décrite dans le plan horizontal.

▼ *La classification actuelle des Chéloniens utilise le mode de rétraction de la tête dans la carapace; ici,* Testudo elegans *(Testudinidés).*

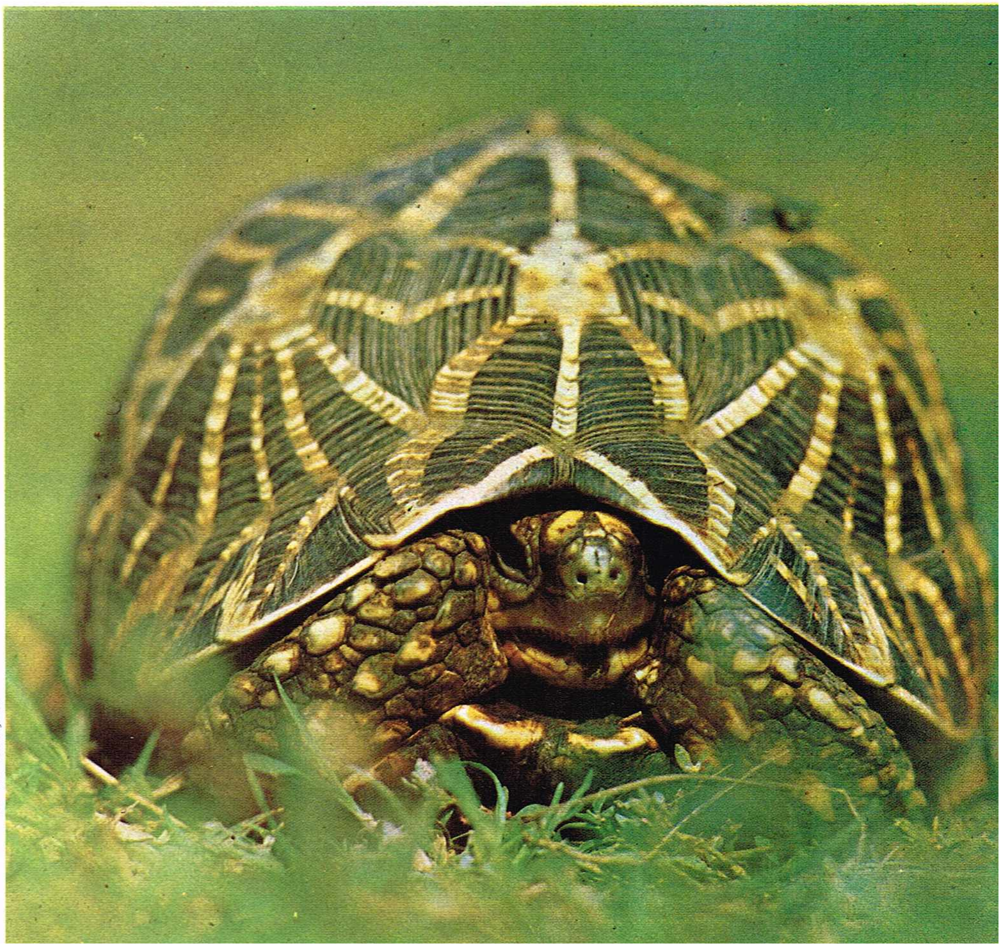

J. H. Tashjian

Sous-ordre des Cryptodires

Ce sous-ordre important comprend neuf familles.

Les **Dermatémydidés** *(Dermatemydidae)* renferment une seule espèce, *Dermatemys mawii,* dont la biologie est mal connue. La plaque nucale est pourvue d'un processus costiforme s'étendant sous les plaques marginales. La région temporale n'est pas protégée. Le plastron est relié au bouclier par un pont mobile. En outre, la carapace est très déprimée. Le cou et la queue sont entièrement rétractiles. Cette espèce se trouve dans les cours d'eau d'Amérique centrale.

Les **Kinosternidés** *(Kinosternidae)* comprennent des genres dont la plaque nucale se prolonge sous les plaques marginales par un processus costiforme. La région temporale n'est pas protégée par des os, et le plastron a une forme compliquée et variable. Ils renferment une vingtaine d'espèces d'Amérique du Nord, centrale, et d'une partie de l'Amérique du Sud.

Chez *Sternotherus odoratus,* la tortue musquée, le plastron, uni au bouclier par un pont bref, est incisé sur le lobe inférieur. La queue, dans les deux sexes, est pourvue d'une pointe cornée. Les doigts sont palmés et couverts d'une peau rugueuse. Les pattes postérieures des mâles sont armées, du côté interne, de deux groupes de plaques cornées. Cette tortue est strictement aquatique et nage très bien. Dans la seconde moitié de juin, la femelle pond dans des cavités sous la végétation riveraine. Cette espèce possède sur les flancs deux glandes, qui sécrètent une substance jaune à odeur musquée. Elle vit au Canada, et dans l'est des États-Unis jusqu'au golfe du Mexique.

Kinosternon subrubrum, la tortue boueuse, a le lobe antérieur du plastron tronqué en avant et mobile chez les adultes. Le bouclier des jeunes est parcouru par trois carènes longitudinales. Les pattes postérieures des mâles possèdent des plaques cornées sur les côtés. Le bouclier est long de 12 cm. Nageant et chassant bien, cette tortue vit dans la vase du fond des rivières et se nourrit de larves, de Vers, de Crustacés, etc. On la rencontre dans l'est des États-Unis.

Les **Chélydridés** *(Chelydridae)* comprennent des tortues d'eau douce, qui possèdent un bouclier relativement petit et aplati, complètement ossifié chez les individus âgés. Les Chélydridés sont endémiques dans toute l'Amérique et comptent très peu de genres.

Chelydra serpentina, la tortue happante, a la tête à peu près triangulaire. Le museau est pointu et porte deux appendices dermiques. Les mâchoires sont redoutables, avec la partie supérieure formant comme un bec d'Oiseau. Les pattes sont recouvertes d'une peau très rugueuse et munie de quelques plaques osseuses. La queue porte sur le dessus des plaques cornées et carénées. Le bouclier est très denté au bord postérieur. Cette tortue mesure jusqu'à 1 m de long, pour un poids maximal de 20 kg. Elle vit de préférence dans les régions marécageuses; elle passe le jour dans l'eau, se rendant à terre seulement la nuit. Les œufs sont pondus dans des trous creusés par la femelle sur les rivages des rivières et recouverts de Végétaux en décomposition. Très vorace et batailleuse, elle fait des ravages chez les Poissons, les Amphibiens, les Sauriens, les Ophidiens, les Oiseaux et les Mammifères. En quelques mois, un seul individu peut faire disparaître la faune aquatique de tout un étang. On trouve cette tortue du Canada jusqu'au Costa Rica.

Macrochelys temminckii, la tortue alligator, atteint 1,50 m de long. Sa carapace est munie de trois fortes carènes longitudinales, et son menton est pourvu de nombreux appendices dermiques. Nocturne, elle vit de préférence en eau profonde. De mêmes mœurs que la tortue happante, elle est encore plus vorace. On la rencontre dans le sud-ouest des États-Unis.

Les **Platysternidés** *(Platysternidae)* sont caractérisés par le grand développement de la tête, par l'importante dépression du bouclier, et par l'extraordinaire longueur de la queue. Cette famille comprend une seule espèce, *Platysternum megacephalum,* surtout aquatique, qui habite la Chine méridionale, le Siam et la Birmanie.

Les **Testudinidés** *(Testudinidae)* forment la famille la plus vaste de l'ordre et comprennent une centaine d'espèces. Ils possèdent un plastron composé de neuf os; les vertèbres sont procœles, et le cou est entièrement rétractile dans la carapace.

Testudo hermanni, la tortue de Hermann, possède cinq plaques vertébrales qui sont toujours plus étroites que les plaques costales, ces dernières étant légèrement convexes, et la dernière un peu plus grande que les autres. Il y a vingt-cinq plaques marginales et deux supracaudales; la nucale est petite et étroite. La longueur maximale est de 30 cm, et le poids peut atteindre près de 2 kg. Elle habite le sud de l'Europe, où elle fréquente les zones sablonneuses à température douce, riches en eau et couvertes d'une abondante végétation. Uniquement diurne, elle se nourrit de matières végétales et de quelques petits Invertébrés. En plein été, les mâles, reconnaissables à leur queue moins longue que celle des femelles, se disputent leurs compagnes en de violents combats. L'accouplement dure plusieurs heures. Les femelles pondent à l'abri de la végétation. Les petits naissent en septembre. L'hibernation, liée à la température ambiante, commence, normalement, au milieu de l'automne et se termine au milieu du printemps. Cette tortue ne supporte pas les températures supérieures à 37 °C.

T. graeca, la tortue grecque, est très semblable à la précédente. Elle en diffère essentiellement par une

▼ *En haut,* **Platysternum megacephalum** *est l'unique espèce des* **Platysternidés,** *famille caractérisée par le grand développement de la tête et par la très grande longueur de la queue. En bas,* **Testudo hermanni,** *la tortue de Hermann, habite le sud de l'Europe.*

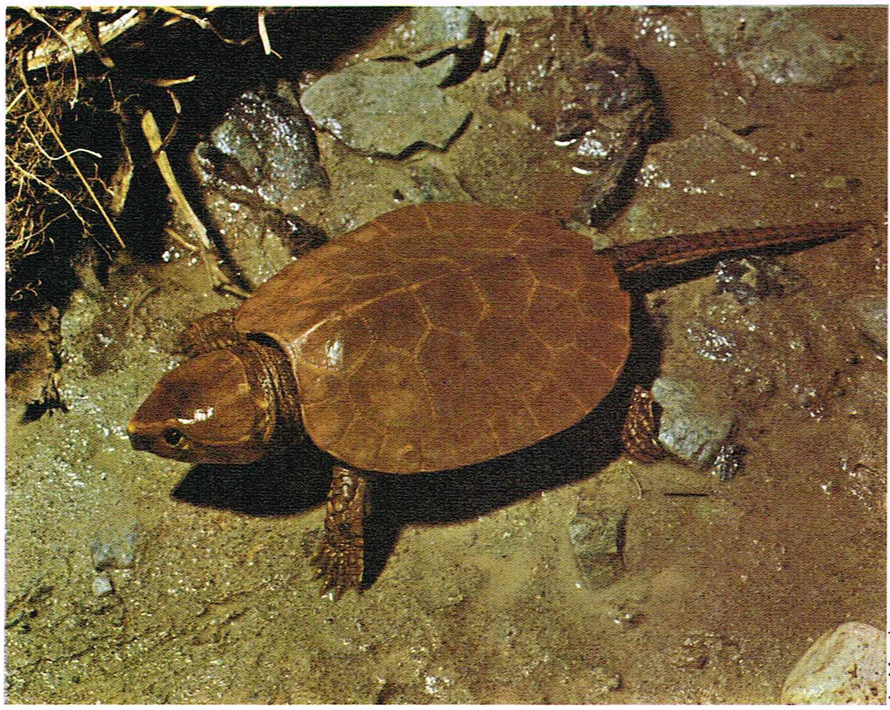

A. Margiocco

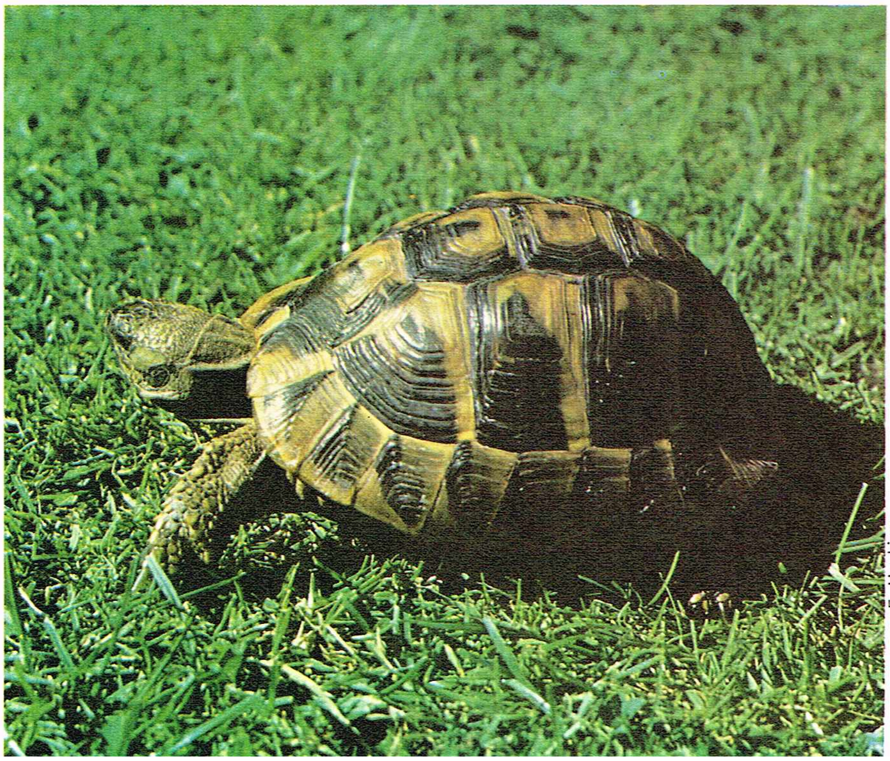

E. Hosking

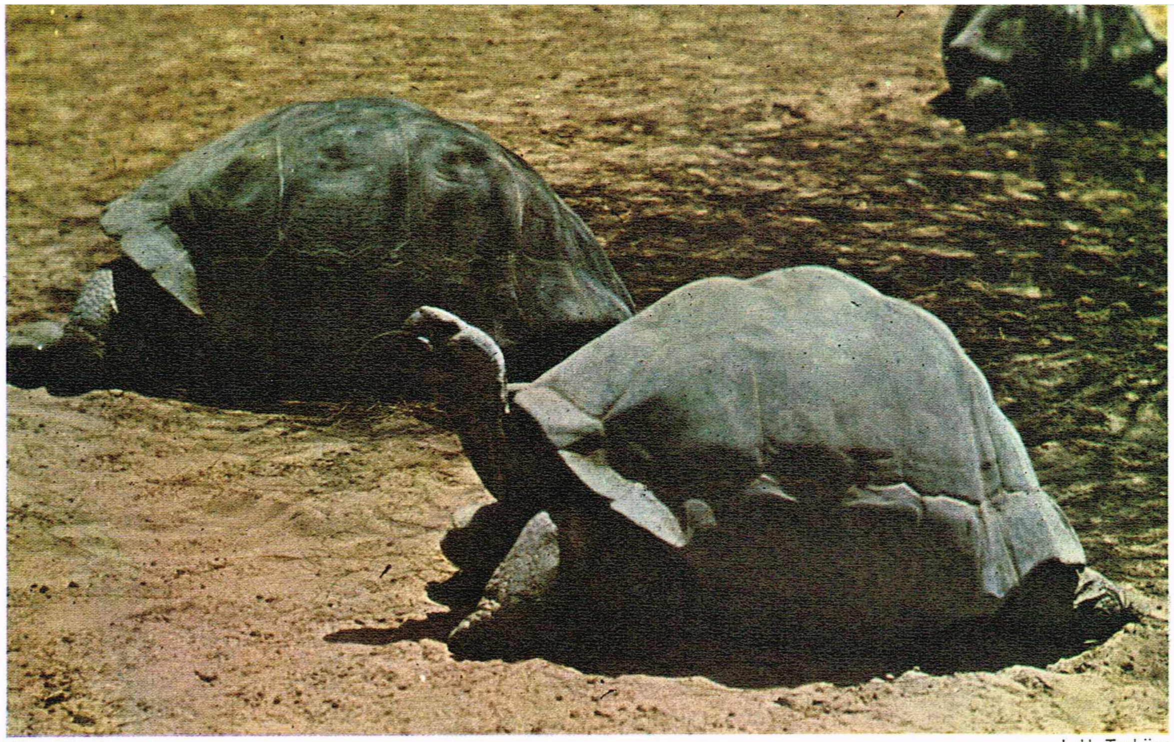

J. H. Tashjian

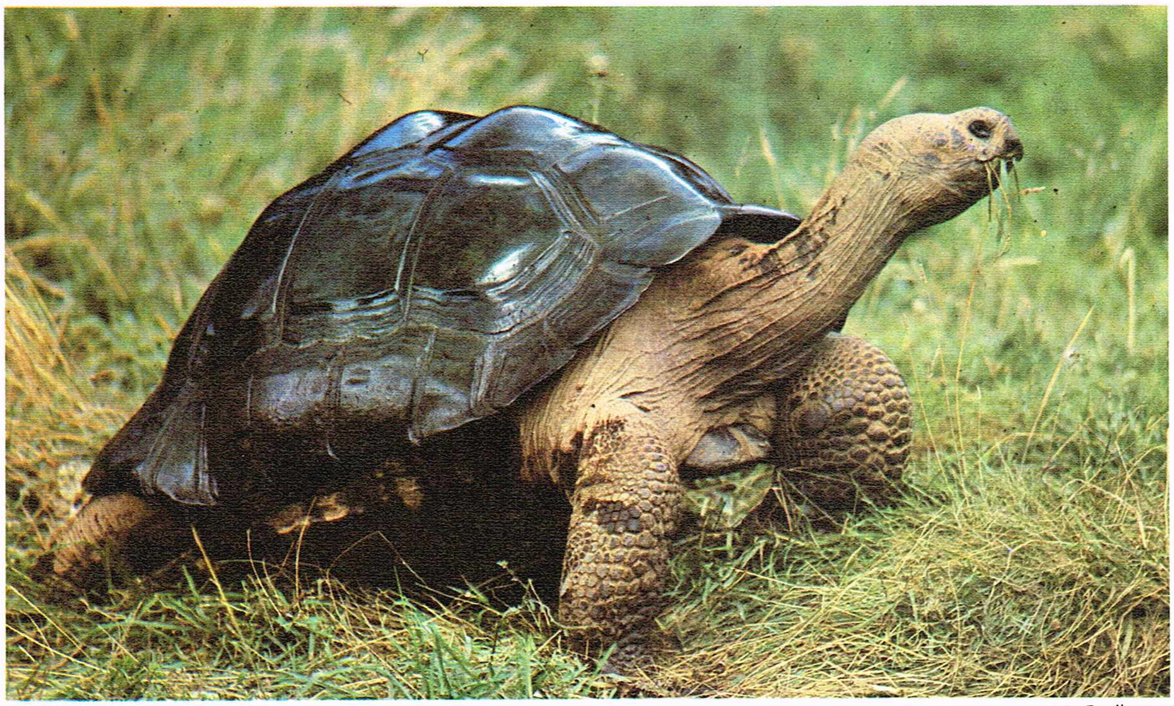

C. Bevilacqua

▲◀ *En haut,* **Testudo elephantopus,** ***espèce diurne vivant en colonies. En bas,*** **Testudo nigrita,** ***dont il existe encore quelques exemplaires aux îles Galapagos.***

plaque supracaudale unique et un grand tubercule conique sur les cuisses. Elle mesure au maximum 27 cm de long. Elle habite le sud de l'Europe, le sud-ouest de l'Asie et l'Afrique du Nord.

T. marginata est caractérisée par la convexité des plaques du bouclier, riches en stries concentriques; en outre, le bouclier est allongé et son bord postérieur très denté. Cette tortue qui atteint près de 30 cm vit dans le sud de la Grèce et en Sardaigne, où elle aurait été importée.

Testudo horsfieldi a le bouclier aplati et non bombé au niveau des plaques vertébrales. Elle possède une seule supracaudale. La queue a une pointe cornée. Cette tortue présente quatre griffes aux membres antérieurs, et cinq aux postérieurs. De mœurs semblables aux précédentes, elle vit à l'est de la mer Caspienne jusqu'au nord-ouest du Pakistan.

Les îles Galapagos abritaient de nombreuses espèces de tortues, dont la plupart sont aujourd'hui disparues. La particularité de ces formes est leur extraordinaire taille. *T. nigrita,* de l'île Indéfatigable, existe encore à quelques exemplaires. La carapace mesure plus de 1 m. *T. elephantopus,* la tortue géante, espèce diurne qui vit en colonies, est uniquement herbivore. Dans la nature ces tortues ont une longévité de plus de 100 ans.

Certaines espèces endémiques des îles Aldabras, Maurice et Rodriguez sont semblables à celles des îles Galapagos. De rares individus *Testudo gigantea,* dont la carapace mesure 1,25 m de long, y vivent encore.

T. agassizi, la tortue du désert, possède une carapace longue de 28 cm, déprimée dans la zone vertébrale et à bord antérieur incisé au milieu; le lobe antérieur du plastron est tourné vers le haut et arrive presque au niveau de la carapace. Elle fréquente les lieux sablonneux, à la fois pierreux et couverts d'arbustes. Matinale et crépusculaire, elle se nourrit exclusivement de plantes grasses. Elle résiste très bien au manque d'eau : c'est la tortue qui supporte le mieux les fortes températures (au-delà de 40 °C). On la trouve dans les déserts de l'Arizona, du Nevada, de l'Utah, et de l'État mexicain de Sonora. Ayant été victime d'une chasse sans merci, elle est maintenant protégée en Californie.

Kinixis erosa, la tortue denticulée, a le plastron articulé. Il existe, entre les deux plaques marginales et les deux costales médianes, une sorte de charnière permettant la fermeture complète de l'orifice d'où sortent les pattes postérieures et la queue. Cette espèce vit dans les endroits secs et chauds; elle est essentiellement diurne. On la rencontre dans toute la bande tropicale africaine.

Les **Emydidés** *(Emydidae)* comprennent une vingtaine de genres. Ce sont des espèces aquatiques, à carapace ovalaire, aplatie, à pattes palmées.

Terrapene carolina, la tortue-boîte, qui atteint jusqu'à 15 cm, est pourvue d'une articulation transversale située

▶ *Jeune spécimen de* **Pseudemys scripta**, *espèce très recherchée pour les aquariums.*

entre les plaques pectorales et les abdominales, ce qui permet aux lobes postérieur et antérieur de se déplacer et de rejoindre les bords antérieur et postérieur de la carapace. Cette espèce s'adapte à tous les milieux, et son alimentation est variée. La femelle, lors de la ponte, mouille ses œufs avec une sécrétion provenant du cloaque. Cette tortue habite l'est des États-Unis.

Emys orbicularis, la cistude d'Europe, est l'unique Emydidé européen fréquentant les eaux douces. Elle aussi a le bouclier relié au plastron par des ligaments fibro-cartilagineux, qui permettent une certaine mobilité des deux parties de la carapace. Les doigts sont reliés par une membrane et possèdent des griffes. La queue est allongée et ne possède pas de pointe terminale. Le bouclier possède une plaque nucale et a une plaque caudale divisée en deux. Les mâles ont un plastron concave, alors que celui des femelles est plan. La femelle est toujours plus grande que le mâle. Essentiellement palustre et aimant les fortes chaleurs, cette tortue passe le jour sur les rives des étangs, cachée dans la végétation ou parmi les galets. La nuit, elle va à la recherche de toutes sortes de proies vivantes. L'accouplement a lieu au printemps, et la femelle vient pondre à terre. Les mâles atteignent la maturité sexuelle entre six et huit ans, les femelles seulement à quinze ans. La croissance se poursuit jusqu'à quarante ans. Cette tortue tombe en léthargie en octobre et dort jusqu'au printemps. Elle habite l'Europe centro-méridionale, l'Asie occidentale et le nord-ouest de l'Afrique.

Clemmys caspica, semblable à l'espèce précédente, est caractérisée par un bouclier distinct, fortement déprimé, soudé au plastron, portant une carène longue, au maximum, de 20 cm. Elle habite le sud de l'Europe, l'ouest de l'Afrique du Nord, et l'Asie occidentale.

Pseudemys scripta est très recherchée pour les aquariums. La carapace, longue de près de 25 cm, est déprimée, ovalaire, carénée chez les jeunes, légèrement plus large à l'arrière. La tête est petite, avec un museau obtus. Les pattes sont assez longues, avec des pieds palmés et pourvus de griffes, particulièrement développées chez les mâles. Cette espèce vit dans les rivières et les étangs, cachée dans la vase du fond ou à proximité de la rive. Excellente nageuse, elle se nourrit de proies animales et de matières végétales. Au printemps, la femelle pond dans des trous du sable et près de l'eau. Cette espèce vit dans les grandes plaines des États-Unis.

Les **Chéloniidés** *(Cheloniidae)* ont le bouclier en forme de cœur, recouvert de grandes plaques cornées, juxtaposées ou imbriquées. Les pattes sont grandes, natatoires, et ont les doigts cachés par la peau et armés partiellement d'ongles. Le cou est peu rétractile. La tête est grande et forte. La queue est brève et la plaque nucale ne présente pas de processus costiforme. Ils abondent dans les mers tempérées et tropicales.

Caretta caretta, le caret, a un bouclier entièrement ossifié, couvert de plaques cornées juxtaposées. Les pattes antérieures sont très grandes, et, chez les jeunes, pourvues de deux griffes, comme les pattes postérieures. Ces griffes sont absentes chez les adultes. La taille totale ne dépasse pas 1,30 m. Uniquement marine, cette tortue vit à quelques kilomètres des côtes. Elle reste presque toujours en surface, s'endormant souvent et se laissant porter par les courants. Elle se nourrit de Mollusques, de Crustacés et de Poissons. Au moment de la reproduction, la femelle pond, la nuit, sur une plage non fréquentée par l'homme et à une certaine distance de la zone battue par la marée. Cette espèce habite la Méditerranée, l'océan Atlantique, la mer Noire, l'océan Indien et l'océan Pacifique.

Chelonia mydas, la tortue verte ou franche, a un bouclier parcouru, chez les jeunes, par une carène peu importante située le long de la ligne vertébrale. Les pattes antérieures sont plus développées que les postérieures; tous les membres portent une griffe à chaque premier doigt. La queue est très courte, la longueur totale est, au maximum, de 1,60 m. Cette tortue vit aussi bien au large que près des côtes, solitaire ou en colonies, et navigue de préférence en surface. Elle se nourrit de zostères et d'autres Phanérogames croissant à faible profondeur. A différentes époques, selon les zones, la femelle va pondre, de nuit, à environ 50 m de la zone de plage battue par les vagues, dans des endroits déserts. Il y a plusieurs pontes par an. Environ deux mois plus tard, les œufs éclosent et les petits vont dans la mer. Cette espèce, qui habite l'océan Indien, l'océan Pacifique, l'océan Atlantique et la Méditerranée, est en voie de disparition; c'est pourquoi on la protège dans certaines zones de la mer des Caraïbes et entre l'île de l'Ascension et la côte du Brésil, où elle effectue périodiquement des migrations en masse.

Eretmochelys imbricata, la tortue à écailles, a un bouclier incomplètement ossifié et couvert de grandes écailles cornées et imbriquées. Les pattes sont très grandes, natatoires, et pourvues de deux griffes. La carapace atteint 85 cm de long. Cette tortue se nourrit de matière végétale, mais aussi de Poissons ou de tout autre Animal. Elle fréquente les mêmes mers que *C. mydas.*

Les **Dermochélyidés** *(Dermochelyidae),* qui sont les plus grands Chéloniens actuels, se distinguent des autres familles de cet ordre par l'absence de carapace osseuse et de véritables écailles. En outre le plastron est formé de huit éléments et dépourvu d'endoplastron. Ils vivent dans les mers des régions tropicales.

Dermochelys coriacea, la tortue-luth, atteint une longueur totale de 2,30 m. Le bouclier est allongé, ossifié dans la région supérieure, et parcouru par sept carènes longitudinales nettement dentelées chez les adultes. La partie inférieure est seulement partiellement ossifiée et

possède cinq carènes. Tout le bouclier est recouvert par une peau coriace et très solide. La tête et les pattes ne peuvent se rétracter dans la carapace. Les membres antérieurs sont fortement aplatis et, chez les jeunes, ont la même longueur que le bouclier. La queue est pointue et presque entièrement cachée. Les *Dermochelys* vivent de préférence en haute mer, s'y nourrissant de matières végétales et d'Animaux; les jeunes mangent uniquement des Poissons. Dans les mers situées entre 15° de latitude nord et 15° de latitude sud, la ponte a lieu en juillet et en août, la nuit, sur les plages désertes, à 15 m environ de la ligne de marée. Cette ponte est interrompue par des intervalles de sept à dix jours, puis la mère abandonne définitivement la côte. Une femelle peut pondre jusqu'à mille œufs en une seule saison. Les mœurs de ce géant des mers sont encore peu connues. La tortue-luth habite l'océan Pacifique, l'océan Indien, l'océan Atlantique et la Méditerranée.

Les **Carettochélyidés** *(Carettochelyidae)* sont caractérisés par un bouclier dépourvu de revêtement corné, un plastron constitué de neuf os dermiques, des pattes transformées en palettes natatoires (seuls les deux doigts internes sont pourvus de griffes), et un cou non rétractile. L'unique espèce de la famille est *Carettochelys insculpta*, très rare, confinée à la rivière Fly de la Nouvelle-Guinée. Son bouclier mesure 50 cm de long.

Les **Trionychidés** *(Trionychidae)* ont le bouclier et le plastron dépourvus de plaques cornées. Les mâchoires sont couvertes de peau. Le museau est très allongé. La tête et le cou sont totalement rétractiles. Les pattes, palmées, ont seulement les trois doigts internes pourvus de griffes. Cette famille est représentée par une dizaine de genres, qui vivent dans les eaux douces d'Afrique, d'Asie et d'Amérique du Nord.

Amyda spinifera a une carapace longue de près de 40 cm, presque discoïdale et recouverte de peau coriace. Elle vit dans les étangs, les marais, et surtout les rives basses et vaseuses des grands fleuves. Très agile et nageuse rapide, c'est peut-être aussi la tortue qui se déplace le plus vite sur la terre ferme. Quand elle est menacée, elle s'ensevelit rapidement dans la vase; cependant, elle est également très irritable et se défend. Active seulement durant la nuit, elle pêche ou chasse, dans l'eau et sur les rives, des Poissons, des Amphibiens, des Ophidiens, des Sauriens et de jeunes Oiseaux des marais. Cette tortue habite l'Amérique du Nord : le bassin du Mississippi, vers l'ouest jusqu'au Colorado et au Montana, et au nord jusqu'aux lacs Érié et Ontario et au Saint-Laurent.

D. Faulkner

▲ *La tortue marine,* **Chelonia mydas**, *est une espèce en voie de disparition.*

A. Margiocco

◀ *La tortue à écailles* **(Eretmochelys imbricata)** *vit dans les océans Indien, Pacifique et Atlantique et la Méditerranée.*

A. Margiocco

◀ **Caretta caretta**, *le caret, est une espèce uniquement marine, restant presque toujours en surface à quelques kilomètres des côtes.*

Sous-ordre des Pleurodires

Ce sous-ordre ne comporte que deux familles.

Les **Pélomédusidés** *(Pelomedusidae)* comprennent trois genres, *Pelomedusa, Pelusios* et *Podocnemis,* les deux premiers étant répandus en Afrique centro-méridionale et à Madagascar, et le troisième habitant à Madagascar et en Amérique du Sud.

Podocnemis expansa, d'Amérique du Sud, est la plus grande espèce de la famille. Les adultes ont une carapace longue de 80 cm au maximum. La tête est très comprimée. Cette tortue vit, isolée ou par petits groupes, dans les marais de la zone tropicale, à l'est des Andes. Elle se nourrit de matières végétales. A la saison sèche, à l'époque de la reproduction, cette espèce se rassemble par troupes de centaines d'individus sur les bancs de sable. La femelle, toujours plus grosse que le mâle, pond de nuit.

Les **Chélidés** *(Chelidae),* contrairement aux Pélomédusidés, ne peuvent cacher complètement leur tête et leur long cou sous leur carapace. Cette famille comprend huit genres, dont un grand nombre d'espèces réparties en Amérique du Sud, en Australie et en Nouvelle-Zélande.

Chelus fimbriatus, la matamata, a une carapace longue de 20 cm, ovalaire et peu convexe. Les plaques cornées vertébrales et costales forment une pyramide peu élevée, le tout étant irrégulier et hérissé de crêtes. Les plaques marginales ont des pointes obtuses. Le cou est aplati, rugueux, et riche en appendices dermiques disposés en séries longitudinales. La tête est plate, triangulaire, couverte de verrues, et pourvue d'un long appendice dermique au-dessus de la région auriculaire. Le museau rappelle une trompe. Les yeux sont minuscules. Les mâchoires sont dépourvues de revêtement corné. Les pattes, courtes, sont palmées et pourvues de nombreuses plaquettes cornées à la face externe. Commune dans les eaux douces de Guyane et du Brésil, la matamata se cache durant le jour; elle sort la nuit et pêche de petits Poissons et des larves d'Amphibiens.

▼ **Chelus fimbriatus,** ***la matamata, est commune dans les eaux douces de Guyane et du Brésil où elle se nourrit de petits Poissons et d'Amphib'ens.***

A. Margiocco

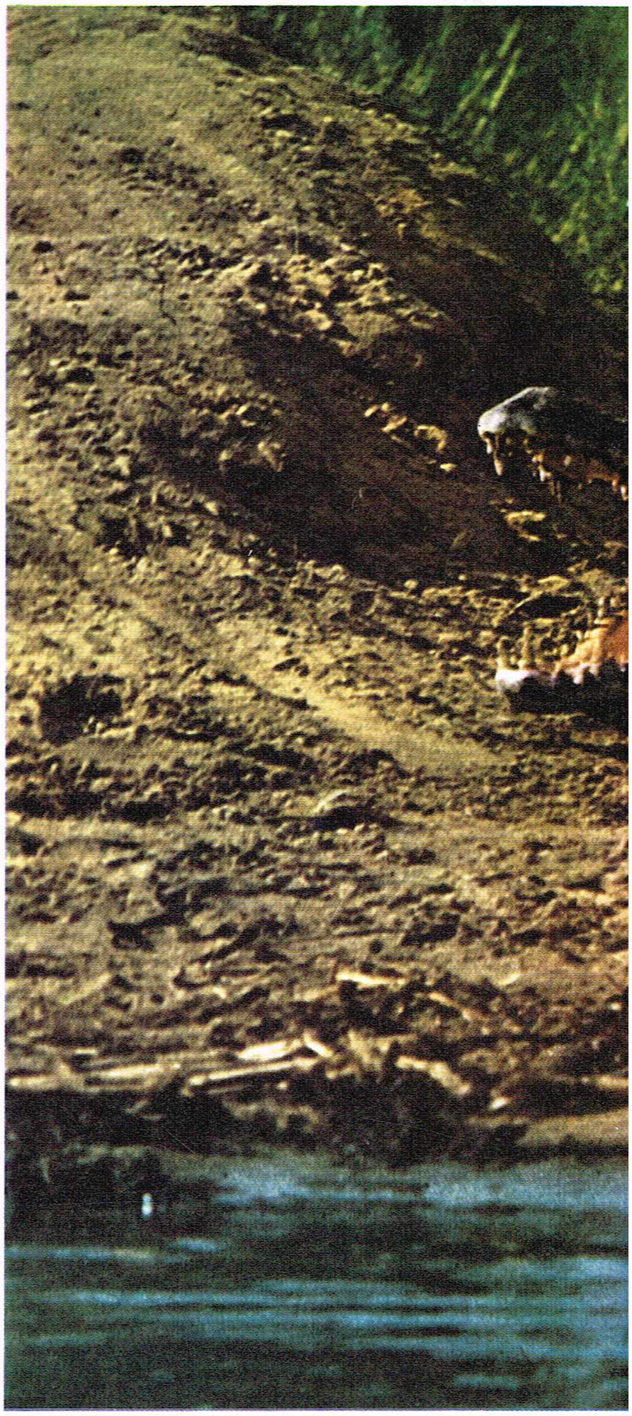

Sous-classe des Diapsidés

La sous-classe des Diapsidés *(Diapsida)* est la plus importante et la plus complexe des Reptiles. Les premiers Diapsidés vécurent au Permien. Ils étaient assez petits. C'est au Mésozoïque qu'ils commencèrent à peupler toute la terre. Ils connurent leur apogée entre le Jurassique et le Crétacé. Les plus grands s'éteignirent au Cénozoïque, et les raisons de leur disparition quasi totale demeurent encore un point d'interrogation pour les spécialistes. Le crâne présente, à la partie latéro-postérieure, deux ouvertures temporales, l'une supérieure et l'autre inférieure, séparées par un isthme constitué par un processus formé du postorbitaire et du squamosal. La sous-classe se divise en deux super-ordres : les Archosauriens, qui ont eu leur apogée au Trias et au Crétacé et qui sont parvenus jusqu'à nous avec les crocodiles, et les Lépidosauriens, peu développés dans le passé géologique et qui comprennent presque toutes les espèces actuelles.

A. Margiocco

▲ ***Les Crocodiliens appartiennent au groupe des Archosauriens; ce sont des Reptiles de grande taille vivant dans les eaux chaudes, douces et parfois saumâtres; ici,*** **Crocodylus niloticus,** ***le crocodile du Nil.***

Super-ordre des Archosauriens

Les Archosauriens furent d'abord représentés par des formes de petite taille, puis par des formes géantes, qui peuplèrent toute la terre. Ils étaient carnivores, herbivores, sauteurs, nageurs, coureurs et volants; la peau était nue ou recouverte de formidables cuirasses cornées et osseuses. Ils dominèrent le globe au Jurassique et au Crétacé, avant de disparaître ensuite presque subitement. Il ne reste d'eux qu'une descendance restreinte, constituée par l'ordre des Crocodiliens.

Ordre des Crocodiliens

Les premiers représentants de l'ordre des Crocodiliens *(Crocodylia)*, qui vécurent au Trias supérieur ou même peut-être au début du Jurassique, étaient longs au maximum de 1,20 m. Ces Protosauriens différaient des Crocodiliens actuels essentiellement par des membres postérieurs beaucoup plus longs que les membres antérieurs. Au cours des trente-cinq millions d'années que dura la période jurassique, la lignée s'enrichit de nouvelles espèces, de plus en plus semblables morphologiquement aux Crocodiliens actuels.

Dans l'ensemble, les Crocodiliens ont la tête déprimée, grande et peu distincte du cou. Leur tronc est large, aplati et porté par des pattes courtes et robustes. Les membres antérieurs sont pourvus de cinq doigts, parfois réunis par une membrane, et les membres postérieurs, plus longs, possèdent quatre doigts, toujours palmés. Les trois doigts internes des mains et des pieds sont armés de griffes. La queue a une formidable musculature : elle sert d'organe de propulsion et de défense. Les narines, à valvules mobiles et en forme de demi-lune, sont très proches et s'ouvrent à l'extrémité supérieure du museau. Les yeux, situés en arrière de la partie supérieure de la tête, sont petits, à pupille verticale et munis de trois paupières. Les orifices auditifs sont protégés par un opercule.

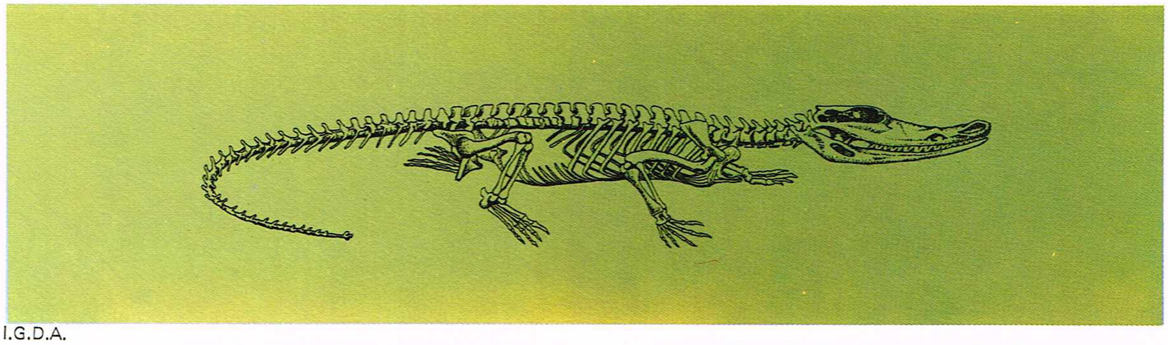

I.G.D.A.

A. Margiocco

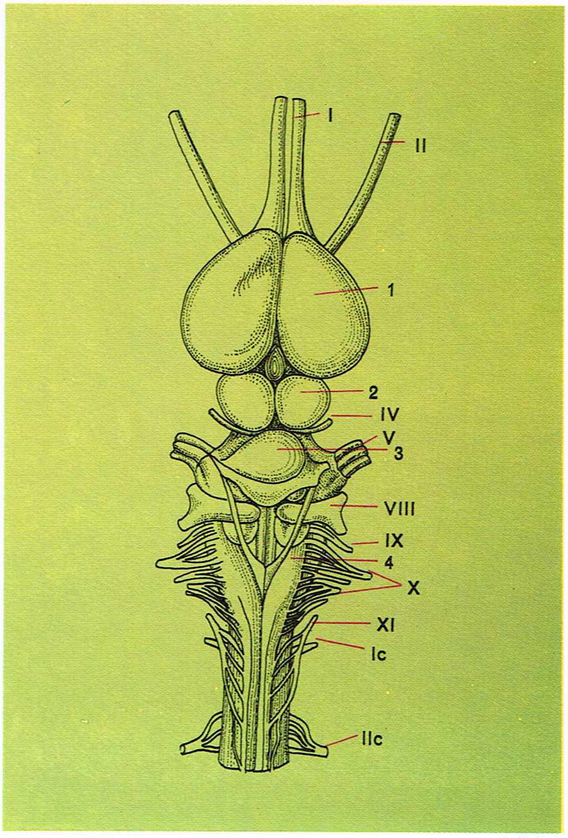

I.G.D.A.

▶ ***En haut, squelette de crocodile; ca, côtes abdominales. Au milieu, œuf ouvert d'un alligator*** **(Alligator mississippiensis)** ***montrant un embryon mature. En bas, schéma de l'encéphale d'un Reptile (caïman) vu de dessus; 1, hémisphères cérébraux; 2, tubercules bijumeaux; 3, cervelet; 4, moelle épinière (bulbe); I à IX, nerfs crâniens; Ic et IIc, premiers nerfs cervicaux.***

Une *peau* très robuste recouvre la tête, le cou, le tronc, les pattes et la queue. Elle est constituée d'une couche cornée, à plaques souvent renforcées par des plaques osseuses sous-jacentes; sur le dos, les plaques, fréquemment proéminentes, forment de longues carènes longitudinales. Le dessous du corps est, par contre, couvert de plaques lisses qui, chez certaines espèces, sont soutenues par des lames osseuses.

Le crâne est plus massif que chez les autres Reptiles, et est formé d'os épais et fortement calcifiés. Le carré est grand et soudé à la boîte crânienne; le condyle occipital est trilobé. Il existe deux temporaux : l'inférieur, toujours présent et le plus développé, et le supérieur, qui manque souvent. Les mâchoires, robustes et non mobiles, sont pourvues de nombreuses dents affilées. La mandibule est massive, comme la mâchoire, et porte de nombreuses dents coniques implantées dans des alvéoles séparés.

La *colonne vertébrale* est constituée par soixante et onze vertèbres, dont douze ou treize dorsales (chacune portant une paire de côtes) et trente-quatre à quarante-deux caudales. La ceinture scapulaire est dépourvue de clavicule. Les côtes abdominales donnent naissance à un parasternum.

La *cavité buccale* peut être séparée de l'œsophage grâce à une valvule spéciale. Les dents se renouvellent. La langue est peu développée et soudée par toute sa surface inférieure au plancher de la bouche. L'œsophage, en se dilatant postérieurement, forme un estomac à deux parties. L'intestin aboutit à un cloaque.

Le *cœur,* entouré d'un péricarde, est divisé en quatre cavités. Les arcs aortiques sont au nombre de deux et communiquent entre eux par le *foramen de Panizza*.

Les *narines,* valvulaires, sont en communication par des conduits indépendants situés dans la cavité buccale. La trachée commence derrière la langue et se divise au niveau du thorax en deux branches, pénétrant dans les poumons. La respiration est due, entre autres, à l'action d'une cloison en partie musculaire qui divise la cavité du tronc en deux régions abdominales.

L'*appareil excréteur* consiste en deux reins lobés, situés contre les vertèbres lombaires, et deux uretères qui aboutissent au cloaque, à côté des canaux sexuels. La vessie urinaire est absente.

L'organe copulateur mâle est simple et relié à quatre glandes.

Le *système nerveux* est semblable à celui des Sauriens. Il n'existe pas d'organe de Jacobson, et le sens gustatif est peu développé. Des récepteurs sensoriels situés sur les écailles forment de petites fossettes arrondies.

Les Crocodiliens, qui ont besoin pour vivre d'une température de 32 à 45 °C, habitent uniquement dans la zone tropicale. Crépusculaires et nocturnes, ils se cachent le jour parmi la végétation des rivières ou plongés dans la fange, d'où ils surveillent attentivement les environs. Insatiables prédateurs, ils mangent tout Animal qu'ils peuvent attraper.

A l'époque des amours, les mâles s'affrontent en de furieux combats. La femelle pond jusqu'à une centaine d'œufs de grande taille et munis d'une robuste coquille calcaire, dans des trous qu'elle creuse dans le sable ou bien sous des Végétaux en putréfaction. L'incubation est toujours réalisée par la chaleur ambiante. Les petits, à peine nés, sont souvent les victimes de nombreux Animaux. La croissance, rapide au cours des cinq premières années, continue jusqu'à la mort. En captivité, les Crocodiliens vivent tout au plus 80 ans.

Selon H. Wermuth, l'ordre des Crocodiliens se divise en trois familles :

Les **Crocodilidés** *(Crocodylidae)* ont un museau à peu près triangulaire et plus ou moins long. La quatrième dent mandibulaire est toujours visible extérieurement, même lorsque la bouche est fermée. Les écussons nucaux sont nettement séparés des dorsaux. Les membres postérieurs sont pourvus d'une crête d'écailles fortement carénée.

La famille comprend trois genres : *Crocodylus,* avec onze espèces, réparties en Afrique, en Asie, en Australie et en Amérique, *Osteolaemus* d'Afrique, avec une seule espèce, et *Tomistoma* d'Asie, qui renferme aussi une seule espèce.

Crocodylus niloticus, le crocodile du Nil, a les intermaxillaires pourvus de renfoncements latéraux où se loge la quatrième dent mandibulaire; la cinquième dent maxillaire est toujours plus longue que les autres. Cette espèce ne dépasse pas 4 m de long, en moyenne, et atteint rarement 7 m.

Actuellement, le crocodile du Nil a disparu de la partie septentrionale de ce fleuve, mais il habite encore les rivières des zones tropicales et subtropicales d'Afrique, de Madagascar, des Comores, des Seychelles et, peut-être, de Palestine. On l'aurait récemment observé en plein milieu du Sahara, dans le Hoggar. Il vit en colonies dans la végétation des bords des marais et des lacs, spécialement dans les endroits où émergent des bancs de sable ou de vase. Le soir, il se met à l'eau, laisse son museau affleurer et se rend là où se rassemblent les Oiseaux aquatiques; il mange aussi des Mammifères, ainsi que des Poissons et toutes sortes de charognes. Il n'hésite pas, à l'occasion, à assaillir le gros bétail et peut même s'attaquer à l'homme. Il entraîne sa proie sous l'eau.

Pendant la saison sèche, ce crocodile se nourrit de Poissons emprisonnés dans les flaques et dans les mares d'eau stagnantes; lorsqu'il a épuisé cette source de nourriture, il émigre ou s'enfouit dans des galeries, pouvant atteindre 12 m de long, qu'il creuse dans la boue; il reste là en léthargie jusqu'au retour de la saison des pluies.

Malgré la diversité des milieux qu'il habite, le crocodile du Nil s'accouple à des époques qui ne varient guère. Durant ces périodes, le mâle fait entendre des sortes de mugissements et devient encore plus irritable; les glandes placées de chaque côté du cloaque produisent une sécrétion musquée. L'accouplement a lieu durant la nuit, sur des bancs de sable ou sur les rives. La femelle pond dans des trous qu'elle creuse dans le sable et qu'elle recouvre ensuite à coups de queue. C'est un mois et demi plus tard que sortent les petits, longs de 20 à 25 cm, très vifs, qui vont immédiatement à l'eau. Avant d'y parvenir, beaucoup sont assaillis par une foule de prédateurs, il leur arrive aussi d'être mangés par les adultes de la même espèce. L'espèce a une longévité moyenne de 25 ans.

C. palustris, le crocodile des marais, peut atteindre 5 m de long; il en existe diverses races, en Inde, à Ceylan, en Birmanie, dans la péninsule de Malacca, et dans l'archipel de la Sonde; il vit dans les mêmes milieux que le crocodile du Nil et ses mœurs sont également assez semblables. C'est le crocodile le plus féroce.

C. acutus, le crocodile américain, est facilement reconnaissable grâce à son museau long et fortement élevé dans la région médiane. Il ne dépasse pas, en moyenne, 3,50 m de long, mais peut atteindre parfois 5 m. Il habite le sud de la Floride, l'Amérique centrale, les Grandes Antilles et la région septentrionale de l'Amérique du Sud. Il a une prédilection pour les eaux douces; on le trouve très rarement dans les eaux saumâtres et en mer, mais toujours près des côtes.

C. moreletii, le crocodile de Morelet, et *C. intermedius* sont assez proches du précédent. Le premier dépasse rarement 2,50 m; il habite les eaux douces du Honduras et du Guatemala. Le second, qui atteint facilement 5 m, est confiné au bassin de l'Orénoque.

C. porosus, le crocodile marin, a les doigts des mains palmés à la base et ceux des pieds entièrement palmés. Cette espèce ne dépasse pas, en moyenne, 7 m; cependant, on a capturé des spécimens qui mesuraient 10 m : c'est donc le plus grand crocodile existant. Il habite les côtes orientales de l'Inde et de Ceylan, les rivages de la Birmanie et de la Chine méridionale, et s'étend au nord de l'Australie et aux îles Fidji et Salomon. Il vit

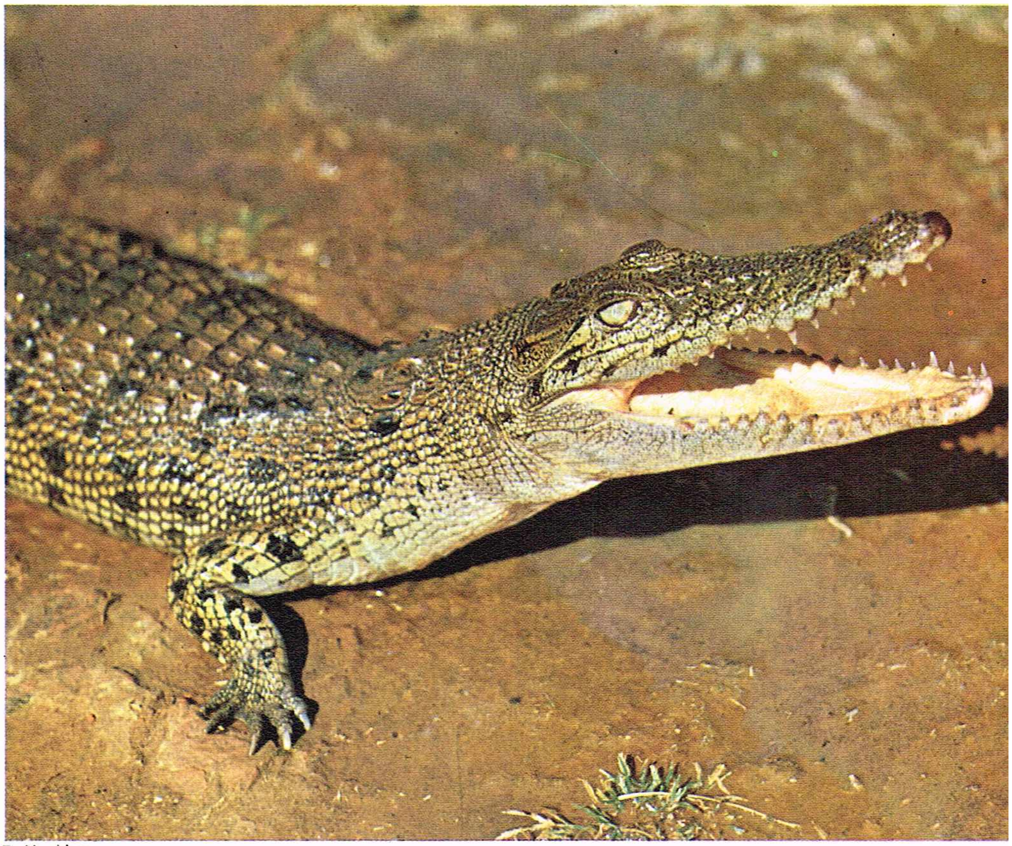

E. Hosking

▲ **Crocodylus palustris,** ***le crocodile des marais, dont il existe diverses races, est le plus féroce des crocodiles.***

▼ **Tomistoma schlegelii,** ***caractérisé par un museau très long, est commun dans la péninsule malaise, ainsi que dans les îles de Bornéo et de Sumatra.***

Van Kooles - Jacana

dans les estuaires des grands fleuves, s'éloignant parfois en mer à une certaine distance du littoral. Il se nourrit principalement de Poissons et de Crustacés.

C. cataphractus, le faux gavial, peut atteindre 4 m de long ; il habite toute l'Afrique occidentale, sur les rives des cours d'eau couverts d'une végétation dense, et aussi dans les cavernes dont l'ouverture est proche de l'eau. Chasseur nocturne, il se nourrit de Mammifères et d'Oiseaux de taille moyenne, ainsi que de Poissons et de varans.

C. johnsoni est semblable à l'espèce précédente, mais ne mesure que 2,50 m au maximum. Il est confiné à la partie septentrionale du continent australien. Les trois dernières espèces sont : *C. novaeguineae, C. siamensis,* qui peuvent atteindre 3,50 m de long, à museau aplati, et qui habitent les eaux intérieures de Thaïlande, d'Indochine, du Cambodge, de Java et du nord de la péninsule malaise, et enfin, *C. rhombiferus,* long de 5 m et endémique dans l'île de Pines et à Cuba.

Tomistoma schlegelii, semblable au faux gavial, en diffère cependant par un museau très long. Il atteint 5 m et se nourrit uniquement de Poissons. Commun dans la péninsule malaise, ainsi que dans les grandes îles de Bornéo et de Sumatra, il vit uniquement dans les eaux intérieures.

Les **Alligatoridés** *(Alligatoridae)* ont le museau très large, légèrement aplati, et arrondi à l'extrémité. La quatrième dent mandibulaire se trouve dans un alvéole

▼ ***Les Alligatoridés nagent et chassent à fleur d'eau ; ils se nourrissent plus particulièrement de Poissons.***

P. A. Milwaukee - Jacana

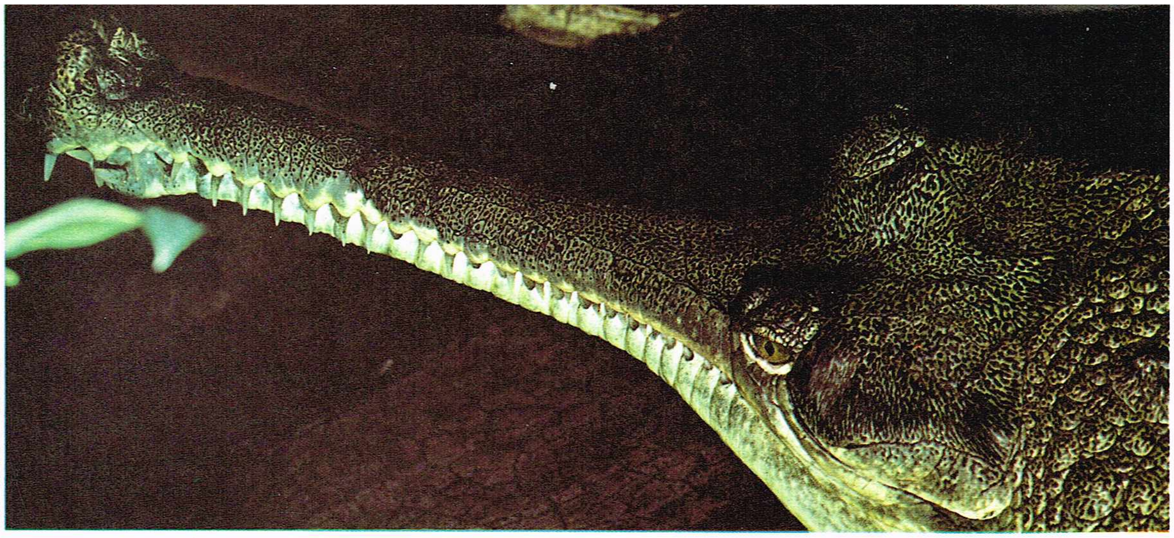

Van Kooles - Jacana

◀ *Le gavial du Gange a un museau très long et très fin; malgré son air menaçant, il est inoffensif et se nourrit uniquement de Poissons.*

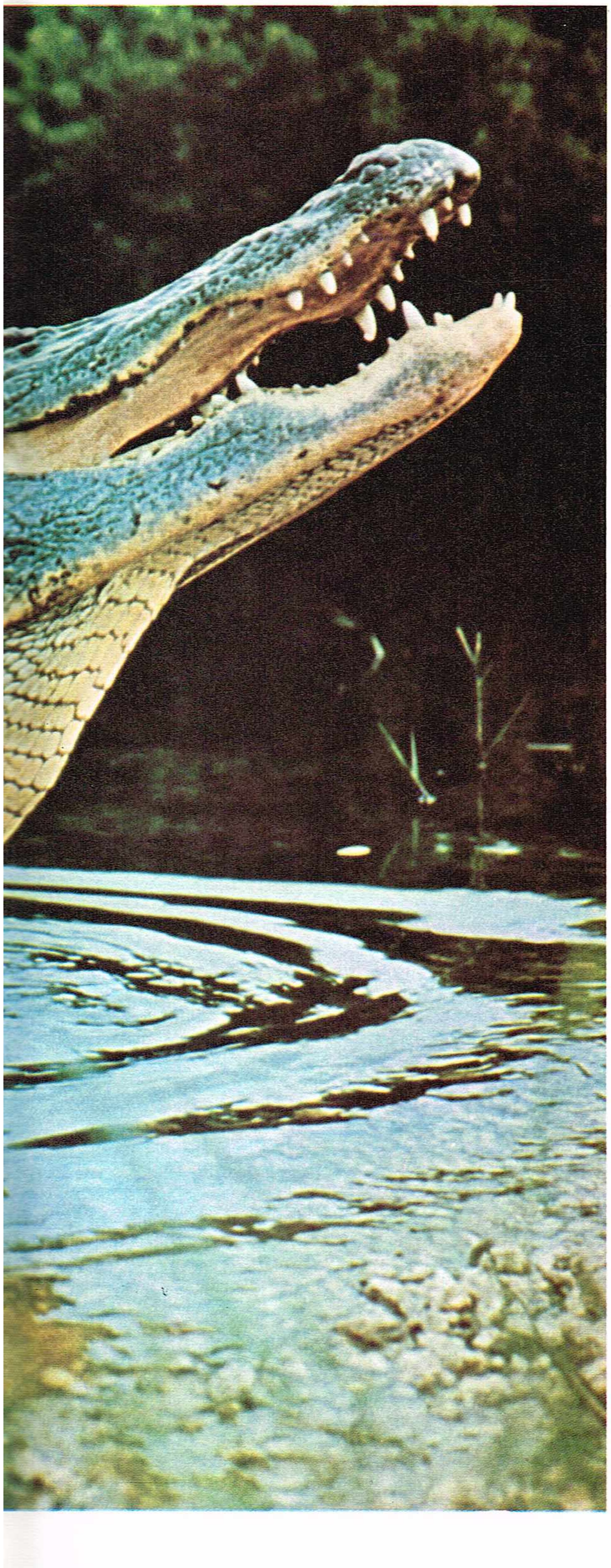

de la mâchoire et n'est pas visible lorsque la bouche est fermée. La quatrième dent maxillaire est toujours plus longue que les autres. Les écussons nucaux sont séparés des dorsaux. Des plaques osseuses de différentes tailles se trouvent aussi sur le ventre. Les pattes postérieures ne possèdent pas de crête carénée. La famille compte quatre genres et sept espèces.

Alligator mississippiensis, l'alligator du Mississippi, a un museau très déprimé, aussi long que large. Les doigts des mains sont palmés jusqu'à mi-longueur, et ceux des pieds jusqu'aux deux tiers. Cette espèce mesure au maximum 4,50 m. On la rencontre dans les eaux intérieures du sud-est des États-Unis. Elle passe le jour cachée dans la végétation riveraine, sur les bancs de sable. Au crépuscule, nageant à fleur d'eau, elle chasse toutes sortes d'Animaux, plus particulièrement des Poissons. Au printemps, la femelle fécondée rejoint les rives et prépare à l'abri de la végétation un nid qui peut atteindre une hauteur de 90 cm et un diamètre de 1,50 à 2 m. Les œufs sont déposés dans une cavité creusée au centre du nid, puis recouverts d'herbes. L'incubation s'effectue grâce à la chaleur produite par la décomposition des Végétaux amassés et dure deux mois; durant cette période, la mère ne s'éloigne pas du nid, qu'elle détruit quand les nouveau-nés sont sortis. A la naissance, les jeunes mesurent 25 cm et se nourrissent principalement d'Insectes aquatiques et de Crustacés. *A. sinensis,* de mœurs analogues, habite le bassin du Yang-Tsé.

L'unique espèce du genre *Melanosuchus* est *M. niger,* le caïman noir, qui atteint une longueur de 4,50 m. Il vit dans le bassin de l'Amazone. Son mode de vie est semblable à celui de l'alligator du Mississippi.

Caiman latirostris, le jacaré, qui atteint 2,50 m de long, habite l'Amérique du Sud, entre le bassin de l'Amazone et celui du Rio de La Plata. Il vit dans les mêmes milieux que les alligators.

Caiman crocodylus, le caïman à lunettes, se rencontre également dans le nord et dans la partie centrale de l'Amérique. Il diffère du jacaré par une tête plus longue que large, par un relief plus accusé entre les orbites, et par des plaques osseuses dermiques sur toutes les plaques ventrales.

Paleosuchus à le museau long, non aplati. Les deux seules espèces existantes, *P. palpebrosus* et *P. trigonatus,* habitent dans la zone tropicale de l'Amérique du Sud, à l'est des Andes, respectivement jusqu'à 27° et 10° de latitude sud. Ils ne dépassent pas 1,20 m de long.

Les **Gavialidés** *(Gavialidae)* ont un museau très long et très fin, avec les bords presque parallèles, et se dilatant à l'extrémité en une sorte de disque. Les dents antérieures sont plus grandes que les latérales; les première, deuxième et troisième dents mandibulaires sont appuyées, lorsque la bouche est fermée, dans des cannelures des bords de la mâchoire. Les écussons nucaux sont réunis aux dorsaux, et la partie ventrale ne présente pas de plaques osseuses dermiques. Les pattes portent une crête constituée de plaques carénées.

Gavialis gangeticus, le gavial du Gange, seule espèce de la famille, ne dépasse pas 6 m de long. Il habite le long des grands fleuves du nord de l'Inde. Inféodé à l'élément liquide plus que tout autre Crocodilien, il habite de préférence les zones où l'eau est profonde, limpide et courante. C'est seulement après les amours que la femelle se rend sur la rive pour pondre dans des trous creusés dans le sable. Elle recouvre ensuite les œufs avec du sable et des arbustes puis les abandonne. Timide et inoffensif, le gavial se nourrit uniquement de Poissons.

R. Mertens

▲ *L'hatteria,* **Sphenodon punctatus,** *Lépidosaurien Rhynchocéphale, aurait une longévité supérieure à 100 ans.*

Super-ordre des Lépidosauriens

Les Lépidosauriens *(Lepidosauria),* ou « Sauriens à écailles », sont apparus à la fin du Permien et au début du Trias et ont laissé peu de fossiles. C'est seulement au Cénozoïque, après la disparition des dinosaures, qu'ils se sont répandus dans le monde entier; ils représentent aujourd'hui la grande majorité des Reptiles. Ce super-ordre a été divisé en trois ordres : les Éosuchiens, entièrement éteints, qui ne seront pas étudiés ici, les Rhynchocéphales et les Squamates.

Ordre des Rhynchocéphales

Les Rhynchocéphales *(Rhynchocephalia),* qui sont apparus au début du Mésozoïque, possédaient un prémaxillaire en forme de bec, deux fosses temporales séparées par l'isthme postorbitaire squamosal, et un palais complet. Le carré était soudé à la boîte crânienne. Entre les deux os pariétaux se trouvait le foramen pinéal. Les vertèbres étaient amphicœliques. Ces caractères les rapprochent des Éosuchiens. Au Trias, ils se répandirent sur la surface terrestre; au Jurassique, ils furent représentés en Europe par le genre *Homeosaurus.* L'absence de ces Reptiles dans les couches du Crétacé et du Cénozoïque conduisit les paléontologues à penser qu'ils avaient disparu. Au siècle dernier, on importa de Nouvelle-Zélande (terre sans Mammifères ni serpents) des sortes de lézards qui présentaient les mêmes caractères que les *Homeosaurus.*

Sphenodon punctatus fut décrit en 1831 par J.-E. Gray, sous le nom d'*Hatteria punctata,* et inclus dans la famille des Agamidés. En 1867, A. Günther créa pour cet Animal un ordre nouveau, celui des Rhynchocéphales.

Le sphénodon, long d'environ 60 cm, a un tronc trapu, comprimé latéralement et porté par des membres robustes. Les mains et les pieds sont pentadactyles et munis de griffes; les doigts sont réunis à leur base par une membrane. Une crête de tubercules bas et épineux part de la région occipitale. Interrompue sur le cou, cette crête va jusqu'à la pointe de la queue. La tête et tout le dos sont revêtus de granules; la partie inférieure est couverte de petites plaques en rangées transversales. Les dents sont cunéiformes et fortement enfoncées sur les bords des mâchoires, comme chez les Agamidés. Les yeux sont grands, foncés et pourvus d'une membrane nictitante, comme chez les Oiseaux. Enfin, le sphénodon possède un œil pinéal. Ce troisième œil se trouve au sommet de la tête, à l'endroit du foramen pariétal, sous l'écaille du même nom, qui est translucide et bien visible chez les jeunes, et épaisse et opaque chez les adultes. Le rôle de cet organe est très discuté. Pour certains auteurs, il s'agirait d'un véritable œil; pour d'autres, il n'exercerait plus aucune fonction. Chez les adultes, il n'y a pas de liaison entre sa rétine et le cerveau; la lumière ne passe pas à travers l'écaille du foramen pariétal.

Dans les îles de la Nouvelle-Zélande, ce véritable fossile vivant a failli disparaître, victime de prédateurs importés tels que les porcs, les chats, etc. En 1949, les autorités locales ont dû ordonner de tuer ces Mammifères, pour protéger les sphénodons.

Les sphénodons se cachent dans les galeries creusées par des Oiseaux de l'espèce *Puffinus carneipes.* Ils sortent la nuit à la recherche d'Insectes et de matières végétales. Lorsqu'ils sont en pleine activité, leur température interne ne dépasse pas 13 °C et atteint en moyenne 11 °C; le métabolisme est donc très bas, et même inférieur à celui des tortues et des Sauriens.

Les mœurs nuptiales du sphénodon sont inconnues. Il semble que la maturité sexuelle ne soit pas atteinte avant l'âge de 20 ans. Les mâles sont dépourvus d'organe copulateur. Le sphénodon aurait une longévité extraordinaire : il vivrait plus de 100 ans.

Ordre des Squamates

L'ordre des Squamates *(Squamata),* le plus vaste des quatre ordres actuels de Reptiles, comprend des espèces qui possèdent en général quatre membres pentadactyles; ces membres peuvent régresser ou disparaître, de même que les ceintures. Le corps est couvert d'écailles cornées, de forme et de taille diverses. Le carré est mobile et plus ou moins grand. L'orifice cloacal est transversal. Le pénis des mâles est bifide et érectile.

A. R. Devez - Jacana

▲ *Les Varanidés, ici* **Varanus niloticus**, *comprennent les plus grands Sauriens actuellement vivants; la famille compte des espèces terrestres, aquatiques et arboricoles.*

Sous-ordre des Sauriens

Les Sauriens *(Sauria)* actuels dérivent de trois lignées : les Platynotes, les plus anciens, nombreux au Jurassique, les Iguanes et les Scincomorphes, apparus au Crétacé et à l'Éocène.

Les Sauriens ont généralement la tête et le tronc plus ou moins allongés. La queue est assez longue. Ils possèdent quatre pattes pentadactyles et armées de griffes. Toutes ces parties subissent d'importantes modifications selon les différentes familles. La longueur varie de quelques centimètres à 3,60 m (varan de Komodo).

Le corps est revêtu d'une couche cornée assez épaisse, qui forme sur la tête des plaques régulières, et sur le tronc, les membres et la queue des granulations et des plaques de taille et d'aspect très divers.

La couche cornée, du fait de son usure, et de la croissance de l'Animal, est périodiquement renouvelée, parfois plusieurs fois par an. La mue est abandonnée ou dévorée par son propriétaire. Le crâne est pourvu d'une seule fosse temporale. Le carré est mobile. Les deux branches de la mandibule sont unies à l'extrémité antérieure. Le crâne est relativement mobile; il est articulé par un seul condyle à la colonne vertébrale, constituée de seize à soixante-dix vertèbres, dont les deux premières, l'atlas et l'axis, ont une constitution différente de celle des autres. Les vertèbres caudales sont très allongées. Les Lacertidés et les Geckonidés peuvent perdre leur queue, la rupture s'effectuant non à l'articulation entre deux vertèbres, mais à mi-longueur de l'une d'entre elles.

Les ceintures scapulaire et pelvienne existent ou sont rudimentaires. Le squelette des pattes est semblable à celui des autres Tétrapodes, excepté la réduction ou la disparition de certains éléments.

Les yeux peuvent être assez grands (Geckonidés) ou très réduits (Amphisbénidés). La pupille est ronde (Lacertidés) ou ovale avec le grand axe situé horizontalement ou verticalement (Geckonidés).

Les yeux sont protégés par deux paupières mobiles et plus ou moins réduites. L'inférieure est fréquemment couverte d'écailles cornées, opaques, avec, au centre, une ou plusieurs écailles fines et transparentes permettant à l'Animal de percevoir la lumière même les yeux fermés. La membrane nictitante, ou troisième paupière, est généralement présente, bien que peu développée.

L'oreille s'ouvre à la partie latéro-postérieure de la tête par un orifice de taille et de forme variables, à demi caché parfois par un repli cutané ou par de petites touffes d'écailles épineuses. Chez les Amphisbénidés et les Anguidés, le tympan est absent. La columelle est l'unique osselet de l'organe auditif.

L'appareil olfactif commence par les deux narines, situées à l'extrémité du museau, suivies par l'atrium et la cavité olfactive. En liaison avec cet appareil, on trouve l'organe de Jacobson, situé en avant des choanes.

Le sens du goût est peu développé. Les organes tactiles se trouvent partout sur le corps et sur la langue. Des organes sensoriels généraux existent aussi sur les écailles.

G.S. Giacomelli

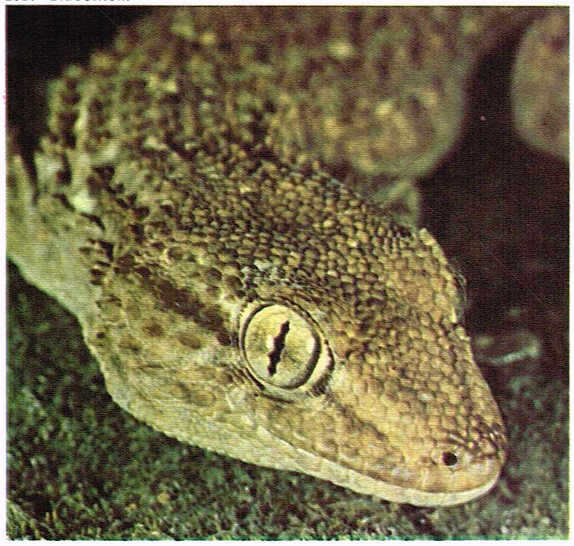

◀ *Tête de* **Tarentola mauritanica**, *espèce largement répandue dans tous les pays méditerranéens et aux îles Canaries.*

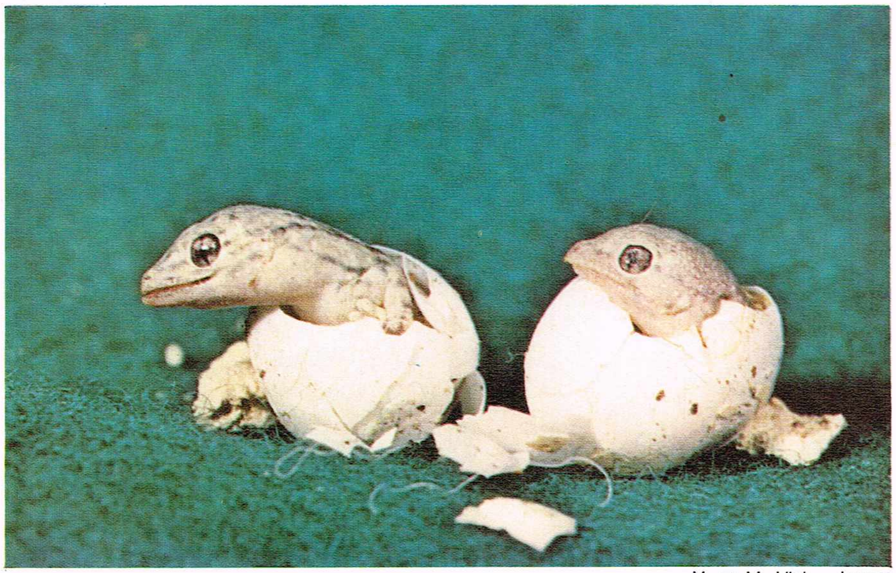

Y. et M. Vial - Jacana

▲ *Éclosion de* **Tarentola mauritanica**; *pour sortir de l'œuf, les petits se servent de la « dent de l'œuf » placée à l'extrémité du museau.*

Les seuls Sauriens émettant des sons proprement dits sont les Geckonidés, l'agame de Robecchi, et l'*Hemitheconyx;* les autres sifflent plus ou moins fortement ou sont muets.

Les dents, situées sur les mâchoires et parfois sur le palais, sont implantées sur la crête des os (acrodontes : caméléons et Agamidés) ou sur le bord interne des os (pleurodontes : la plupart des Sauriens) ; leurs formes et leurs dimensions varient beaucoup.

La respiration est réalisée au moyen de poumons. Chez les Amphisbénidés, le poumon gauche est plus développé, alors qu'on observe le contraire chez d'autres Sauriens apodes. Les poumons des caméléons sont pourvus d'appendices qui peuvent être remplis d'air. L'appareil respiratoire communique avec la bouche par une mince fente verticale ouverte dans le larynx, et atteignant parfois le plancher buccal.

L'appareil urinaire est constitué par deux reins assez longs et souvent lobés, d'où partent deux uretères qui aboutissent au cloaque.

Les femelles pondent des œufs peu nombreux et couverts d'une coquille parcheminée ou d'une enveloppe délicate. La durée de l'incubation, qui se fait grâce à la chaleur ambiante, varie beaucoup. Pour sortir de l'œuf, les petits se servent de la dent de l'œuf placée à l'extrémité du museau, et qui tombe peu après la naissance.

L'organe copulateur est bifide; il est logé dans deux cavités situées sur les côtés du cloaque.

Les mâles ont généralement des couleurs plus vives que celles des femelles, une tête plus trapue; en outre, ils possèdent des pores fémoraux sur la partie inférieure des cuisses. A l'époque des amours, ils sécrètent une substance stimulante pâteuse, blanchâtre ou jaunâtre.

Du point de vue de leur alimentation, on peut diviser les Sauriens en prédateurs phytophages et omnivores.

Les Sauriens sont diurnes ou nocturnes; ils vivent sur les arbres, sur le sol, ou, dans les zones chaudes, tempérées ou relativement froides, à l'intérieur de cavités souterraines. Certains ont absolument besoin d'eau, alors que d'autres s'en procurent facilement par voie endogène. Toutes les espèces sont actives entre 10 °C et 40 °C; celles qui vivent dans les pays tempérés le sont toute l'année; celles des régions les plus chaudes et les plus froides estivent ou hibernent quand la température dépasse la limite maximale ou minimale qu'ils peuvent supporter.

Du point de vue économique, les Sauriens sont assez utiles, car ils détruisent de nombreux Insectes nuisibles et tuent les serpents venimeux. Ils sont comestibles (Varanidés, Iguanidés, Agamidés), et leur peau est l'objet d'un commerce florissant.

Les Sauriens ne vivent pas plus de 50 ans, aussi bien dans la nature qu'en captivité. Ils sont surtout répandus entre les tropiques du Cancer et du Capricorne mais on en trouve jusqu'au nord du cercle polaire arctique

I.G.D.A.

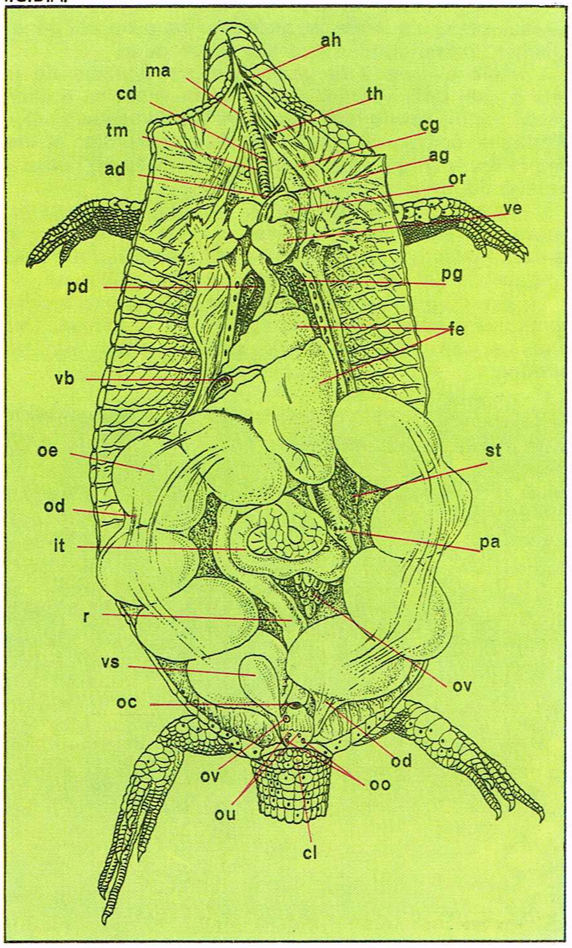

J. Six

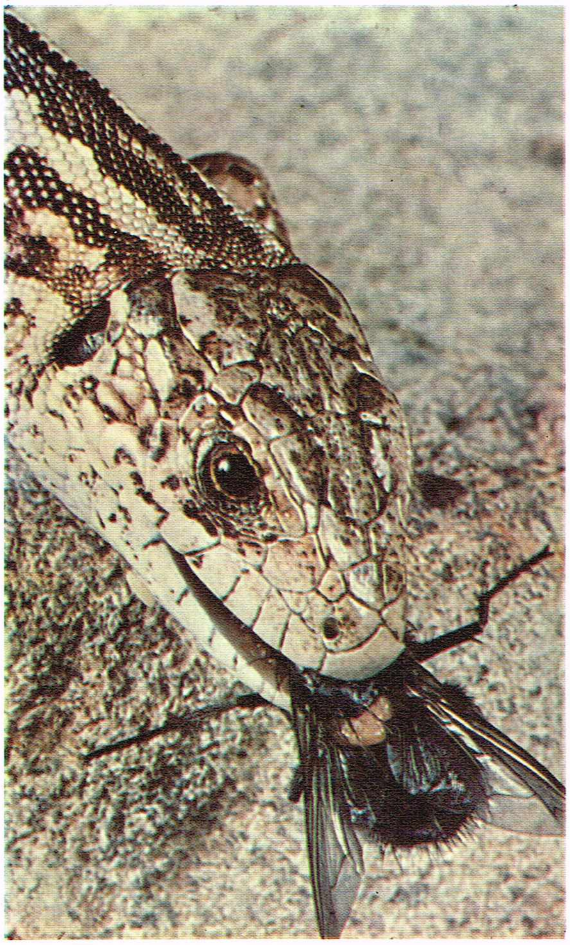

▶ *A gauche, anatomie interne d'un lézard* (**Lacerta agilis**) *femelle : ah, appareil hyoïde; th, thyroïde; cg, carotide gauche; ag, aorte gauche; or, oreillette; ve, ventricule; pg, poumon gauche; fe, foie; st, estomac; pa, pancréas; ov, ovaire; od, oviducte; oo, orifice de l'oviducte; cl, cloaque; ou, orifice de l'uretère; ov, orifice de la vessie; oc, orifice terminal de l'intestin dans le cloaque; vs, vessie; r, rectum; it, intestin grêle; œ, œufs; vb, vésicule biliaire; pd, poumon droit; ad, aorte droite; tm, thymus; cd, carotide droite; ma, mâchoire. A droite, un lézard des souches* (**Lacerta agilis**) *dévorant une mouche; les Sauriens sont utiles, car ils détruisent de nombreux Insectes nuisibles.*

A. Margiocco

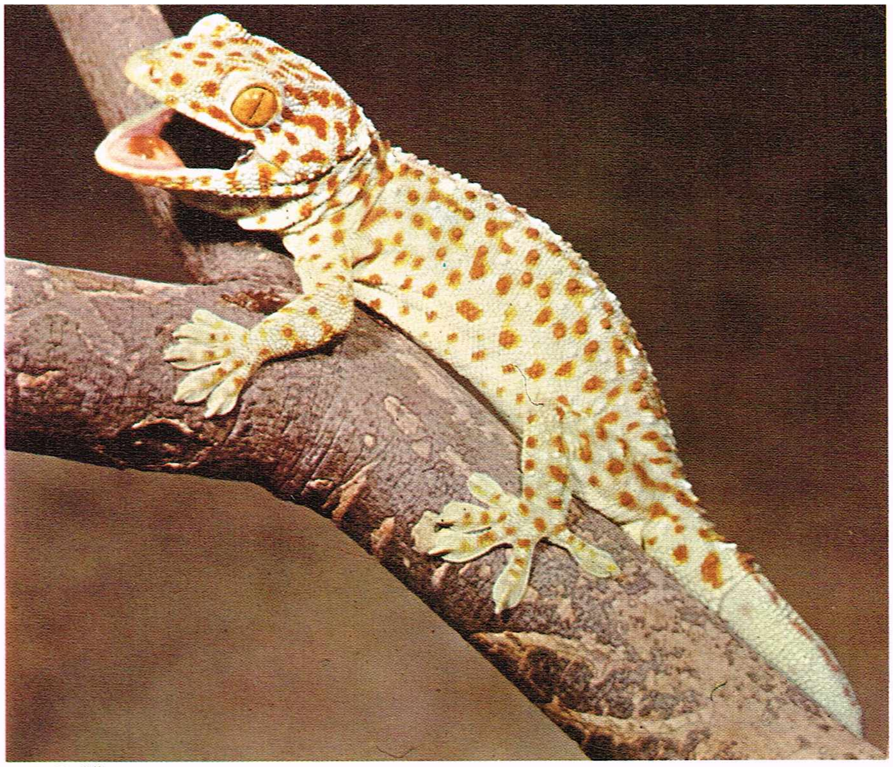

J. H. Tashjian

(*Lacerta vivipara* par exemple) et jusqu'à 50° de latitude sud (certains Iguanidés).

Le sous-ordre comprend une vingtaine de familles et quatre cents genres.

Les **Eublépharidés** *(Eublepharidae)* ont des pattes à doigts presque cylindriques, armés de griffes, et dépourvus inférieurement de lamelles adhésives. La queue est souvent très gonflée en son milieu par une accumulation de graisse.

La famille est représentée par les genres *Coleonyx,* d'Amérique centrale et du sud-ouest des États-Unis, *Holodactylus,* du Somaliland et d'Afrique orientale, *Hemitheconyx,* du Somaliland et d'Afrique occidentale, *Eublepharis,* d'Asie du Sud-Ouest et de certaines îles des côtes orientales, enfin, *Aeluroscalabotes,* endémique de Malaisie, de Sumatra et de Bornéo.

Coleonyx variegatus mesure jusqu'à 14 cm de long. Il se cache pendant le jour dans des trous, sous les pierres ou entre les racines des arbres et des buissons. Il sort au crépuscule par groupes de quatre à six individus. Assez agile et sauteur, il chasse des Insectes, des Arachnides, et d'autres petits Arthropodes. Il est la proie de nombreux serpents. Il reste en léthargie pendant toute la saison froide ou, encore, l'été si la température est particulièrement élevée. Cette espèce habite les déserts des régions du sud-ouest des États-Unis et ressemble à *C. brevis,* qui habite le sud-est du Nouveau Mexique, une partie du Texas, et le nord du Mexique.

Hemitheconyx taylori, qui se rencontre en Somalie, emmagasine dans sa queue une importante quantité de graisse qu'il utilise durant la période chaude.

Les **Sphærodactylidés** *(Sphaerodactylidae),* limités au Nouveau Monde, dans la zone des tropiques, étaient jadis unis aux Geckonidés. Ils sont caractérisés par la forme particulière des doigts : ces derniers, fins jusqu'à l'extrémité, se dilatent brusquement en un petit disque, sous lequel se trouve une écaille arrondie qui porte d'un côté une griffe fine et pointue.

Sphaerodactylus notatus mesure 55 mm de long. Son dos est couvert d'écailles terminées en pointe, imbriquées et carénées; sa face ventrale est lisse. Crépusculaire et nocturne, il vit dans les bois, sur des troncs d'arbres, sur les murs et sur les rochers. Il se nourrit de petits Insectes. Cette espèce habite les Bahamas, Cuba et le sud de la Floride.

Les **Geckonidés** *(Geckonidae)* ont le corps plus ou moins déprimé, couvert de petites écailles cornées, juxtaposées, imbriquées, ou de granulations de dimensions semblables mêlées à des plaques. La pupille est verticale ou arrondie. Les yeux ont des paupières rudimentaires. Cette famille, qui renferme cinquante genres répandus dans les régions chaudes et tempérées du monde entier, est surtout présente dans les zones tropicales.

Tarentola mauritanica, la tarentole, a une longueur maximale de 16 cm. Le tronc et la tête sont déprimés et larges. Les pattes sont courtes. Les doigts sont élargis en spatules et pourvus, à la partie inférieure, de lamelles adhésives disposées sur une seule rangée. Cette espèce est largement répandue dans tous les pays méditerranéens et aux îles Canaries.

Hemidactylus turcicus mesure au maximum 16 cm; son dos est revêtu de granulations fines et de gros tubercules nettement carénés. Ses doigts, plus ou moins aplatis, spatulés, sont pourvus inférieurement de lamelles adhésives différenciées en deux rangées longitudinales : c'est là un caractère propre aux *Hemidactylus.* Il habite toute la région méditerranéenne, l'intérieur de l'Afrique du Nord et de l'Afrique orientale, les îles de la mer Rouge, et l'Asie occidentale. De mœurs presque uniquement nocturnes, il se nourrit d'Insectes.

Le genre *Gymnodactylus,* qui comprend d'innombrables espèces, est commun à l'Asie, l'Australie, les îles de l'océan Pacifique, l'Europe et l'Afrique du Nord. Citons *Gymnodactylus kotschy,* qui atteint 8 cm, aux doigts fins, cylindriques ou légèrement comprimés latéralement, et dépourvus de lamelles adhésives.

Phyllodactylus habite l'Asie, l'Australie et l'Amérique tropicale et est représenté en Europe par *P. europaeus* (le plus petit Saurien d'Europe : il mesure 7 cm de longueur), pourvu de doigts fins jusqu'à l'extrémité, où ils se dilatent en une petite expansion en forme de feuille.

Ptychozoon homalocephalum appartient à un genre très intéressant au point de vue morphologique. On le trouve dans la péninsule de Malacca, à Java, Bornéo, Sumatra et Nicobar. Ce gecko, long de 20 cm, a de larges doigts spatulés, pourvus en dessous d'une seule rangée de lamelles et reliés entre eux par d'amples membranes. Le pouce et le gros orteil sont dépourvus de griffes. La peau forme des dilatations sur la tête, le tronc, les pattes et la queue. Cette dernière est pourvue latéralement d'expansions lamellaires arrondies. Cette espèce vit sur les arbres et accomplit de courts vols, grâce à ses expansions dermiques, pour attraper des Insectes ou éventuellement pour fuir.

Gecko verticillatus habite le nord-est de l'Inde, l'Annam, le Siam, la péninsule malaise et l'archipel Indien.

▲ A gauche, patte postérieure d'un Geckonidé* (Tarentola mauritanica)*; on observera les doigts élargis en spatules. A droite, un exemplaire de* Gecko gecko*; on notera ici l'orientation verticale de la pupille.

G.S. Giacomelli

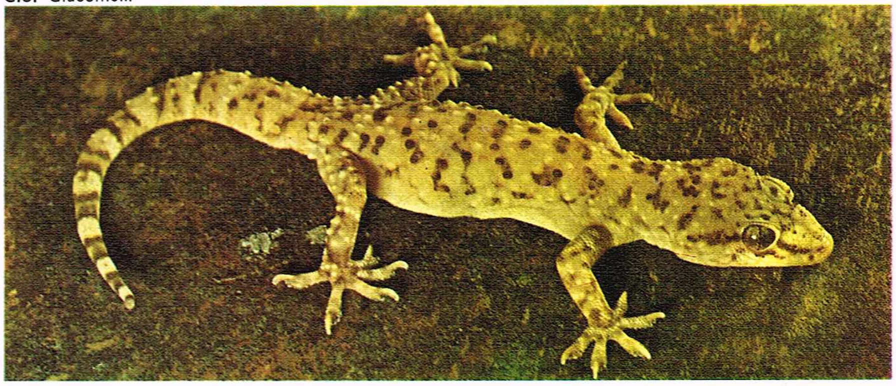

▼ Hemidactylus turcicus, *de mœurs nocturnes, se nourrit d'Insectes.*

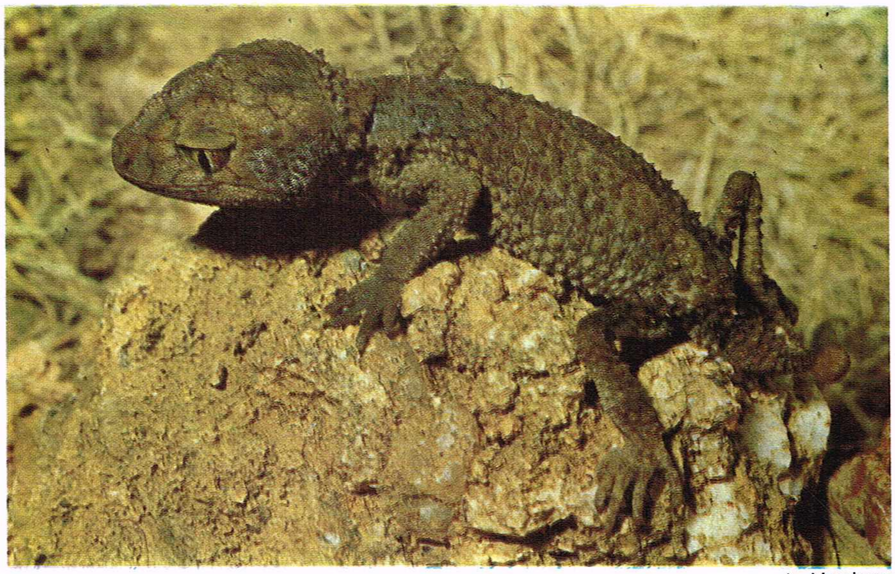

A. Margiocco

▲ **Nephrurus asper** *appartient à la famille des Geckonidés.*

▼ *A gauche,* **Basiliscus americanus** *(Iguanidés) est l'espèce la mieux connue et la plus grande du genre; elle vit du Panama au Costa Rica. A droite,* **Basiliscus plumbifrons**; *les diverses espèces du genre vivent presque toujours sur les arbres bordant des cours d'eau.*

C'est le géant de la famille, avec une longueur maximale de 35 cm. Ce genre est caractérisé par des doigts fortement dilatés, pourvus d'une seule rangée de lamelles adhésives, et armés (sauf le pouce et le gros orteil) de courtes griffes courbes. Ce gecko vit en colonies de plusieurs individus et chasse toutes sortes d'Insectes, des geckos de petite taille, des Oiseaux au nid, et des micromammifères. Il émet un cri que l'on entend jusqu'à 10 m de distance.

Ptyodactylus hasselquisti a des doigts fins sur les deux tiers de leur longueur, puis largement dilatés. L'extrémité des doigts possède un appendice à deux lobes, pourvu de lamelles adhésives lui permettant de marcher sur n'importe quelle paroi. On rencontre cette espèce dans les régions désertiques et subdésertiques.

Stenodactylus stenodactylus est répandu en Asie et en Afrique, jusqu'à 3° de latitude nord, où il est limité aux zones désertiques. Les doigts des pattes, non dilatés, sont pourvus de petites griffes courbes, aiguës et couvertes de petites écailles pointues. Cette espèce, qui atteint 9 cm, vit sous les buissons, à la lisière des zones sablonneuses, et chasse, la nuit, des Coléoptères, des Lépidoptères, des Diptères et des larves.

Uroplatus fimbriatus est endémique à Madagascar. Il atteint 30 cm environ. Ses pattes sont longues et fines avec des doigts unis à la base par une membrane, fins à la partie proximale et fortement dilatés à l'extrémité distale, en forme de feuille et pourvus de deux rangées de lamelles adhésives; chaque rangée est armée d'une petite griffe, courbe et pointue. La queue, déprimée comme le tronc, porte sur les côtés, de la base à la pointe, une expansion membraneuse. Un repli de la peau, dentelé, borde les côtés de la partie inférieure du museau et du cou, et se continue sur les membres antérieurs, les flancs et les pattes postérieures. Arboricole et nocturne, ce gecko chasse les Insectes à l'affût; il se confond avec l'écorce des arbres.

Les **Pygopodidés** *(Pygopodidae)* ont le tronc et la queue fins et très allongés. Les pattes antérieures sont absentes et les postérieures constituées par deux appendices aplatis, brefs et arrondis à l'extrémité, placés des deux côtés du cloaque. La tête est petite, peu distincte du tronc, et couverte de plaques régulières. Les yeux sont très petits. Tout le dos est couvert de petites écailles imbriquées. Les Pygopodidés vivent en Australie, en Tasmanie et en Nouvelle-Guinée. *Pygopus lepidopus* ne dépasse pas 60 cm et *Lialis burtonii* 50 cm.

Les **Dibamidés** *(Dibamidae)* présentent un aspect anguilliforme et une queue courte et obtuse. Les yeux sont recouverts par des plaques. Le corps est recouvert de petites écailles, arrondies au bord postérieur et imbriquées. La femelle ne possède pas de pattes; les mâles présentent, de chaque côté du cloaque, deux petits appendices plats et arrondis à l'extrémité.

Les quelques espèces existantes appartiennent au genre *Dibamus*, qui habite les îles Nicobar et de la Sonde, les Célèbes, les Moluques et la Nouvelle-Guinée.

Les **Anélytropsidés** *(Anelytropsidae)* sont des Sauriens apodes, à corps recouvert par des écailles renforcées par des plaquettes osseuses d'origine dermique. Les yeux sont couverts d'écailles. *Anelytropsis papillosus*, unique espèce du genre, vit dans le centre du Mexique.

Les **Xantusiidés** *(Xantusiidae)* ont la tête couverte de larges plaques, le dos de petites granulations uniformes ou de petits tubercules et le ventre de plaques disposées en rangées régulières. Les yeux n'ont pas de paupières. Ces reptiles sont ovovivipares, et mesurent au maximum 17 cm. Le genre *Xantusia* est confiné aux régions arides

A. Margiocco

J. H. Tashjian

des États-Unis. Le genre *Gaigeia* habite le sud du Mexique, sur les hautes montagnes, dans les zones à Conifères. Le genre *Lepidophyma* vit dans les plaines tropicales humides. Enfin, *Cricosaura tipica*, endémique à Cuba, a été observé seulement dans les endroits à roches calcaires. De mœurs crépusculaires et nocturnes, les Xantusiidés se nourrissent principalement d'Insectes.

Les **Iguanidés** *(Iguanidae)* possèdent quatre pattes bien développées, dont chacune est pourvue de cinq doigts. Ils sont pleurodontes. Ces Sauriens, très divers, habitent le continent américain ; c'est seulement dans les îles Fidji qu'ils cohabitent avec les Agamidés.

Le genre *Anolis,* avec ses trois cents espèces, vit dans les forêts chaudes de l'Amérique du Sud et centrale, aux Antilles et dans le sud-est des États-Unis. Ses représentants ont les doigts de toutes les pattes dilatés, aplatis au niveau de la dernière phalange et couverts à la partie inférieure par une rangée de lamelles transversales.

Anolis carolinensis, qui mesure au maximum 18 cm, a une tête allongée et un tronc légèrement comprimé sur les côtés et porté par des pattes fines, assez longues (surtout les postérieures). Les doigts sont également longs. Tout le corps est couvert de granulations juxtaposées. Dans la région gulaire, le mâle possède un repli longitudinal cutané, dont l'Animal peut augmenter à volonté la surface. La livrée de cette espèce peut changer rapidement selon la température. Elle habite de la Caroline du Nord à la Floride, et, vers l'ouest, jusqu'au Rio Grande.

Les *Anolis,* agiles, diurnes et arboricoles, aimant la chaleur, se nourrissent de petits Insectes et de larves.

Corythophanes cristatus habite les forêts du Guatemala, du Costa Rica et du Honduras, où il mène une vie uniquement diurne. Le corps est fortement déprimé et haut. Il possède des pattes fines, élancées, et une queue très longue. La tête porte une très haute crête osseuse, qui s'étend vers l'arrière, formant une sorte de casque très étroit qui se continue par un repli nucal. La gorge a une poche pendante, haute et étroite. Une autre petite crête se trouve le long de la ligne vertébrale. La longueur maximale de ce Reptile est de 34 cm. Paresseux, il ne se déplace même pas quand il est dérangé, mais il peut parfois réagir avec rapidité et fuir en sautant de branche en branche. Sur le sol, il court en se servant seulement des pattes postérieures. Pour se défendre, il dilate le sac gulaire : ainsi, il ne peut être saisi par l'ennemi. Il se nourrit d'Insectes.

Le genre *Basiliscus,* qui compte diverses espèces, dont la mieux connue et la plus grande est *B. americanus,* vit du Panama au Costa Rica. Pouvant atteindre 80 cm de long, il a le tronc et la queue comprimés. Les pattes sont très élancées, les postérieures étant pourvues de doigts longs et fins, bordés de lobes dermiques très développés qui en augmentent la superficie. Le mâle a un haut lobe céphalique, cartilagineux, qui s'étend en arrière, et deux crêtes, l'une dorsale et l'autre caudale, dont la première est supportée par des rayons osseux.

Ces Sauriens vivent presque toujours sur les arbres situés au bord des cours d'eau. Grimpeurs et marcheurs très rapides et très agiles, ils se laissent parfois, lorsqu'ils se sentent menacés, tomber des arbres surplombant l'eau et, alors, nagent rapidement. Ils se nourrissent presque exclusivement de matières végétales.

Amblyrhynchus cristatus, l'iguane marin, mesure 1,50 m de long ; il est massif et pèse jusqu'à 12 kg. La tête est courte, large, convexe, et couverte de formations cornées larges et basses. Le tronc porté par des pattes très robustes est parcouru par une crête d'écailles hautes et fines allant de la nuque à l'extrémité de la queue le long de la ligne vertébrale.

Endémique aux îles Galapagos, il vit en colonies sur les écueils et les côtes battues par les vagues. Il ne craint pas l'homme, qu'il laisse s'approcher sans bouger. Lorsqu'il est irrité, il se défend avec sa queue et ses griffes. Il vit en symbiose avec diverses espèces de Crustacés. Strictement herbivore, il se nourrit d'Algues. Au crépuscule, il va se réfugier dans les fentes et les cavernes qui s'ouvrent à fleur d'eau. Naguère très commune, cette espèce a beaucoup diminué en nombre, en raison de la chasse dont elle a été l'objet.

On trouve aussi dans les îles de l'archipel des Galapagos un iguane terrestre, *Conolophus cristatus,* très proche de l'espèce précédente. Il mesure jusqu'à 1,10 m de long. Actuellement, il est en voie d'extinction.

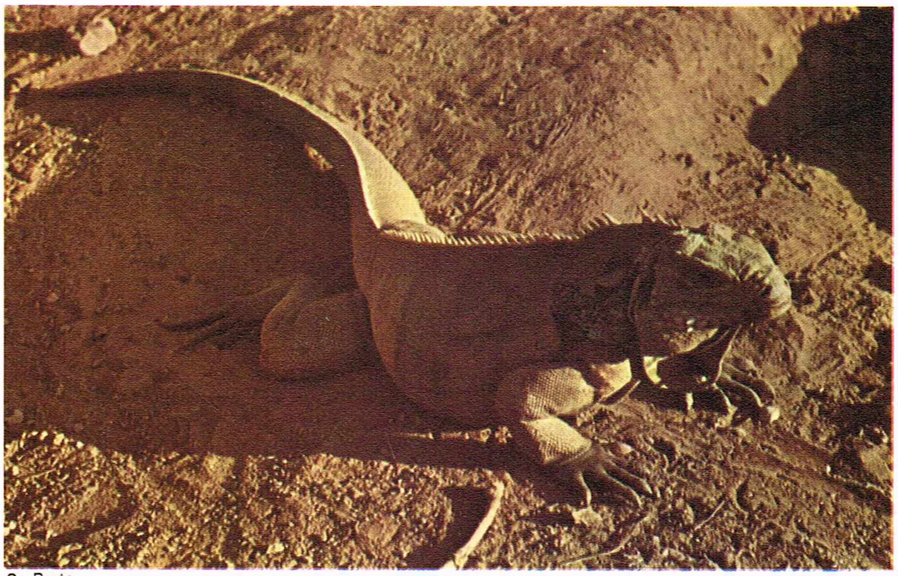

S. Prato

▲ **Cyclura cornuta,** *l'iguane-rhinocéros, rappelle les Reptiles préhistoriques ; il vit dans les zones arides de l'île d'Hispaniola.*

Dans les zones rocheuses et arides de l'île d'Hispaniola vit *Cyclura cornuta,* l'iguane-rhinocéros ; le mâle est caractérisé par trois écailles, présentant l'aspect de tubercules cornés pointus, situées sur le dessus du museau. Il mesure au maximum 1,10 m de long. Diurne, très agile et méfiant, il se cache dans les trous des rochers à l'approche de l'homme. Il se nourrit de matières végétales.

Le genre *Iguana* comprend quelques espèces, dont la plus grande et l'une des mieux connues est *I. iguana,* qui peut mesurer plus de 1,60 m de long. Sa tête est recouverte de grandes écailles lisses. Sa ligne vertébrale présente une haute crête. Le mâle possède un sac gulaire plus développé que celui de la femelle, bordé d'une rangée de lobes étroits, hauts et pointus.

Cet iguane habite en grand nombre les forêts chaudes de l'Amérique du Sud et d'une partie de l'Amérique centrale. Agile, rapide et méfiant, il préfère la fuite à la lutte, et se jette même à l'eau, où il nage bien et peut rester longtemps en plongée. Il se nourrit de feuilles, de fleurs, de fruits et souvent aussi d'Insectes. Diurne, il passe la nuit dans de longues galeries creusées dans le sol. Cette

▼ **Iguana iguana,** *dont la ligne vertébrale présente une haute crête, est bon nageur et peut rester longtemps en plongée.*

J. H. Tashjian

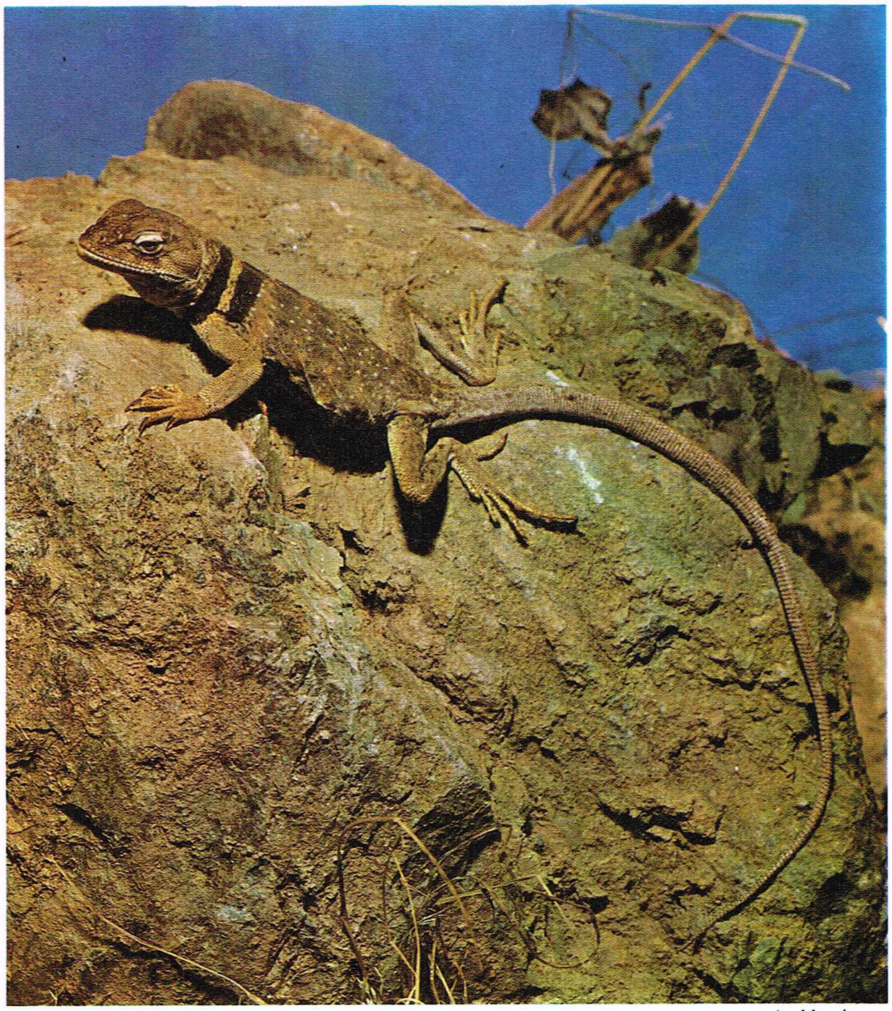

A. Margiocco

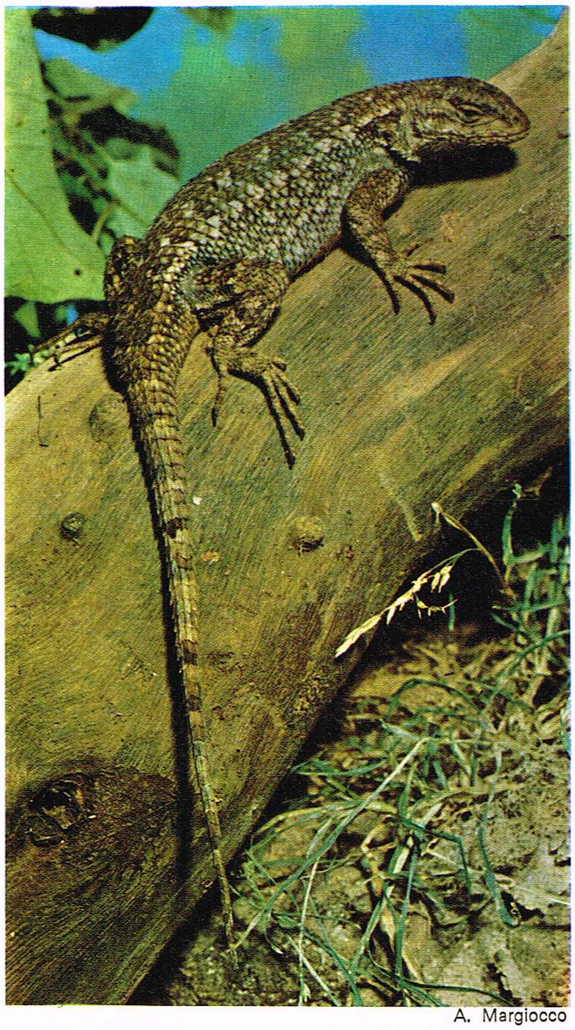

A. Margiocco

▲ *A gauche,* **Crotaphytus collaris** *de l'Arizona. A droite,* **Sceloporus gratiosus** *habite les forêts et chasse principalement les fourmis et les Arachnides.*

espèce, de même qu'*I. delicatissima,* est chassée activement pour sa chair.

Le genre *Ctenosaura,* ou faux-iguane, comprend une dizaine d'espèces habitant du Honduras aux États-Unis. *C. hemilopha* vit de la Californie du Sud à l'Arizona, ainsi qu'au Mexique. Cette espèce mesure 70 cm de long et ressemble aux *Uromastix* (Agamidés), mais en diffère par son écaillure. La queue est hérissée d'épines.

Agile, rapide et diurne, le faux-iguane vit dans les endroits rocheux plus ou moins couverts de végétation. Quand il a peur, il se cache dans les fentes des rochers. Il mord et blesse cruellement. C'est le Saurien le plus agressif de l'Amérique centro-septentrionale. Il se nourrit uniquement de Végétaux.

Crotaphytus collaris a le tronc large et déprimé, et les pattes robustes et bien développées. Le mâle mesure jusqu'à 55 cm. Il habite les zones rocheuses et désertiques du sud-ouest des États-Unis et du nord du Mexique. Il fuit en se levant sur ses pattes postérieures.

Le genre *Callisaurus* est commun dans toutes les régions subdésertiques de l'ouest des États-Unis et du nord du Mexique. Il peut atteindre 20 cm de long. Les pattes postérieures sont beaucoup plus développées que les antérieures; les doigts sont fins et longs. Il est couvert de petites écailles lisses. Animal diurne, le callisaure fréquente les milieux arides. Il chasse des Insectes, et principalement des Orthoptères, en effectuant parfois des sauts de 20 à 30 cm. Il fuit à la vitesse de 24 km/h. Lorsqu'il est poursuivi, il court en zigzag ou décrit de grands cercles; puis, il s'arrête subitement, creuse le sable avec la queue, et y disparaît.

On peut voir, dans les mêmes lieux que le genre précédent, les espèces du genre *Uma,* peut-être les plus rapides Iguanidés terrestres, puisqu'ils peuvent atteindre 32 km/h.

Le genre *Sceloporus* (plus de cent espèces) vit dans la zone située entre la Colombie Britannique et l'État de New York au nord, et le Panama au sud. Ces Iguanidés, longs au maximum de 18 cm, diurnes, très agiles et excellents coureurs, habitent les forêts, chassant principalement des fourmis et des Arachnides.

Le genre *Phrynosoma,* qui comprend un nombre d'espèces limité, est le plus étrange. On le trouve du Mexique au Canada. Long au maximum de 16 cm, il a une forme presque discoïdale. La tête, les pattes et la queue sont très courtes. En divers endroits de la tête existent des cornes plus ou moins longues. Les *Phrynosoma* se défendent en projetant à une distance de 2 m du sang qu'ils font sortir de la membrane nictitante en contractant les muscles céphaliques.

Les **Agamidés** *(Agamidae)* sont acrodontes. Leurs dents ressemblent, par la forme, aux incisives, canines et molaires des Animaux supérieurs. Très variables par la morphologie et les mœurs, les Agamidés habitent toute l'Afrique, l'Asie méridionale, l'Australie, les îles situées entre l'Asie et l'Amérique, et la Polynésie, où on les trouve dans les îles Fidji à côté des Iguanidés. Il n'y en a pas à Madagascar.

Le genre *Agama,* répandu en Afrique, dans le sud-est de l'Europe, dans diverses îles de la Méditerranée orientale, en Asie Mineure, et dans l'Asie du Sud-Ouest, comprend une cinquantaine d'espèces. Bien qu'assez variables, les agames ont généralement la tête grosse et dilatée en arrière. La queue, de longueur variable, est pointue et de section ronde. Le tronc est large et plus ou moins déprimé. Les pattes sont robustes, moyennement longues et armées de griffes courbes. Le corps est couvert d'écailles carénées ou lisses, mêlées à des écailles épineuses plus accentuées sur le dos, les flancs et l'arrière de la tête. La longueur maximale est de 40 cm.

A. stellio habite l'Europe méridionale, l'Asie occidentale et l'Afrique du Nord-Est. Il atteint 30 cm de long. Cette espèce vit dans les lieux caillouteux, plus ou moins riches en végétation, et se nourrit d'Insectes.

Le genre *Phrynocephalus* (environ quinze espèces) est ovovivipare. On le trouve en Asie occidentale et centrale et en Europe orientale.

P. mystaceus habite la Russie méridionale et orientale, jusqu'au Don et au Terek. Il mesure 25 cm de long. Animal diurne, il vit dans les lieux sablonneux, se cachant, la nuit, dans des galeries et se nourrissant d'Arthropodes. Il est assez agressif.

Le genre *Draco* compte plus de vingt espèces, réparties en Asie du Sud-Est. Ces Sauriens sont caractérisés par une forme élancée et élégante, ainsi que par la présence, sur les flancs, d'un fin repli cutané supporté par les cinq ou six dernières côtes très allongées, l'ensemble pouvant être déployé sur les côtés au gré de l'Animal. *D. volans* mesure environ 20 cm. Endémique en Asie, il est diurne et arboricole. Grâce à ses ailes dermiques, il peut franchir en vol plané une distance de 7 à 10 m.

Dans les forêts de l'Asie méridionale vivent les représentants du genre *Calotes,* caractérisés par une forme élégante. Ils possèdent, le long de la ligne vertébrale, une crête cornée, fine et pointue. Les pattes, en particulier les postérieures, sont longues et fines. Ils vivent en colonies sur les arbres, et se nourrissent d'Insectes. Ils sont très agiles et combatifs. En général, leur taille maximale ne dépasse pas 50 cm.

Chlamydosaurus kingi, unique espèce du genre, vit dans les régions boisées du nord-ouest de l'Australie. Long de 90 cm, il possède un repli cutané, ample et fin, attaché à la partie postérieure de la tête, qui forme une sorte de manteau plissé, à bords dentelés, descendant au-delà de l'attache des pattes antérieures. Ce repli est toujours plus grand chez les mâles. Diurne, cet Agamidé vit sur les arbres, où il chasse de petits Animaux, surtout des Arthropodes. Quand il est dérangé, il prend une attitude menaçante, mettant en évidence sa forte denture, tout en soulevant et en écartant la collerette qui peut atteindre un diamètre de 20 cm.

Le genre *Uromastix* compte une dizaine d'espèces, strictement terrestres, à tronc déprimé, souvent très large, et à queue épineuse. Ovipares, très doux, diurnes, herbivores, les *Uromastix* habitent les régions désertiques et subdésertiques. Ils sont communs en Afrique du Nord.

Dans les déserts de sable d'Australie, où la température monte au-dessus de 50 °C et où l'eau est très rare, vit *Moloch horridus,* long de 20 cm. Il présente, sur tout le corps, des épines, particulièrement développées au-dessus des yeux et de la nuque. Il se nourrit de matières végétales et de fourmis. Animal très doux, il vit par groupes de deux ou trois individus, dans les buissons ou le sable. Il est ovipare.

Les *Cophotis,* seuls Agamidés à queue préhensile, vivent dans les forêts denses de Ceylan et de Sumatra.

Les **Chamæléonidés** *(Chamaeleonidae),* longs de 3 à 55 cm, ont la tête et le tronc fortement comprimés latéralement et assez hauts. La partie latéro-postérieure de la tête revêt l'aspect d'un casque médiéval. Les yeux, très développés, sont protégés par une calotte dermique perforée à l'endroit de l'iris, et sont, en outre, indépendants: l'Animal peut regarder à la fois en haut et en bas, ou en avant et en arrière. Les Chamæléonidés sont acrodontes. Les pattes sont assez hautes et fines; les doigts, développés et pourvus de griffes, sont divisés en deux groupes, l'un de trois et l'autre de deux doigts, enveloppés de peau jusqu'à l'extrémité. La queue, assez longue, un peu comprimée à son attache puis cylindrique, se termine en pointe. Elle est très préhensile et sert pratiquement de main. La langue est fortement dilatée à son extrémité très longue et élastique; elle est pourvue de nombreuses cellules sécrétant un mucus visqueux. Grâce à la présence de nombreux chromatophores, les caméléons peuvent modifier notablement la couleur de leur peau. Les mâles sont

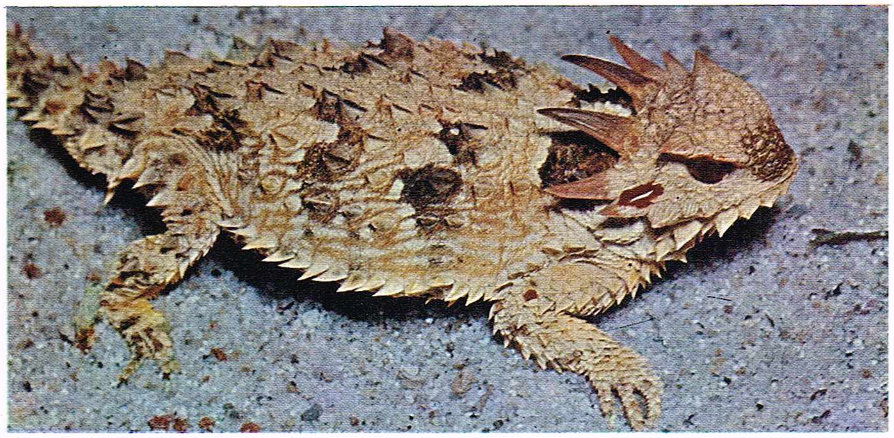

J.-H. Tashjian

▲ **Phrynosoma coronatum,** *dont la tête porte, en divers endroits, des cornes plus ou moins longues.*

▼ *A gauche,* **Agama agilis** *(Agamidés). A droite,* **Calotes versicolor,** *très commun en Inde et en Chine.*

J. H. Tashjian

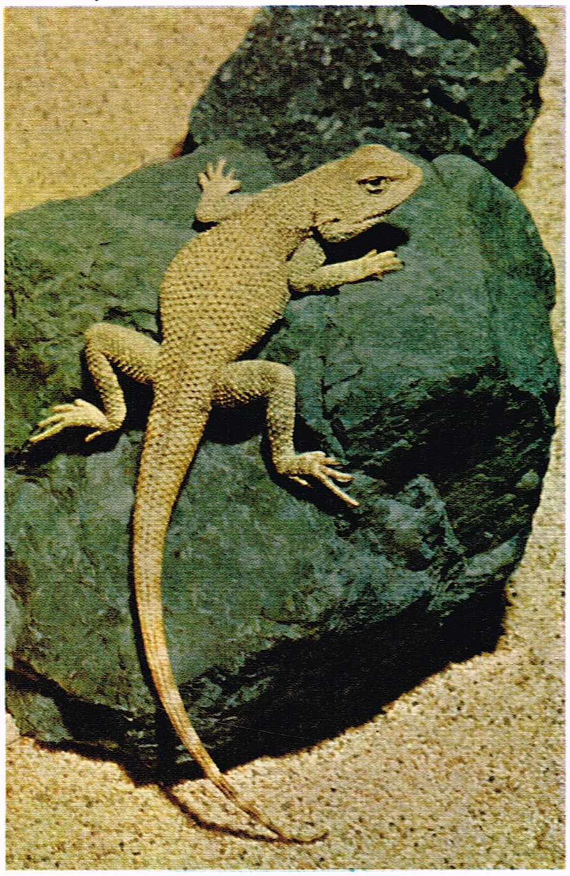

A. Margiocco

▶ **Chamaeleo jacksoni,** ***d'Afrique orientale, possède trois longues cornes; les jeunes présentent également, dès la naissance, ces trois appendices, mais réduits.***

A. Margiocco

pourvus d'une crête ou de cornes, au nombre de une à cinq, sur la tête.

La famille, divisée en quatre genres, *Chamaeleo, Rhampholeon, Brookesia et Leandria,* avec une centaine d'espèces, est répandue dans toute l'Afrique, une partie de l'Europe, en Arabie, en Inde, à Ceylan, et surtout à Madagascar.

Chamaeleo chamaeleon mesure 28 cm de long. La tête est très haute à la partie postérieure, qui présente une forme de pyramide à base triangulaire. Ce caméléon habite du sud de l'Espagne et de l'Afrique du Nord à l'Asie occidentale. Diurne et assez rapide, il vit sur les plantes arbustives. Complètement immobile, le corps revêtant la couleur du milieu environnant, il surveille attentivement, de ses yeux mobiles, les alentours, rapide à saisir les Insectes passant à sa portée, à l'aide de sa langue visqueuse.

C. parsoni, C. mulleri, C. verrucosus et *C. oustaleti* sont les géants de la famille. Ils habitent Madagascar, à l'exception de *C. mulleri,* que l'on trouve dans les montagnes d'Afrique orientale. Celui-ci mesure 63 cm de longueur.

Dans les broussailles d'Afrique orientale vit *C. jacksoni,* long de 24 cm. Les mâles et les femelles possèdent trois cornes, longues de 3 cm, dirigées en avant et situées, l'une à l'extrémité du museau, les deux autres au-dessus des orbites. L'espèce est ovovivipare. Les jeunes possèdent dès la naissance les trois appendices des adultes, mais réduits à des tubercules coniques.

Le genre *Rhampholeon,* qui habite l'est de l'Afrique équatoriale, diffère du genre *Chamaeleo* par sa petite taille (10 cm). Sa queue est courte et peu ou non préhensile.

▼ ***A gauche,*** **Chamaeleo chamaeleon** ***est un caméléon diurne, rapide à saisir, à l'aide de sa langue visqueuse, les Insectes passant à sa portée. A droite,*** **Chamaeleo ventralis.**

E. Hosking

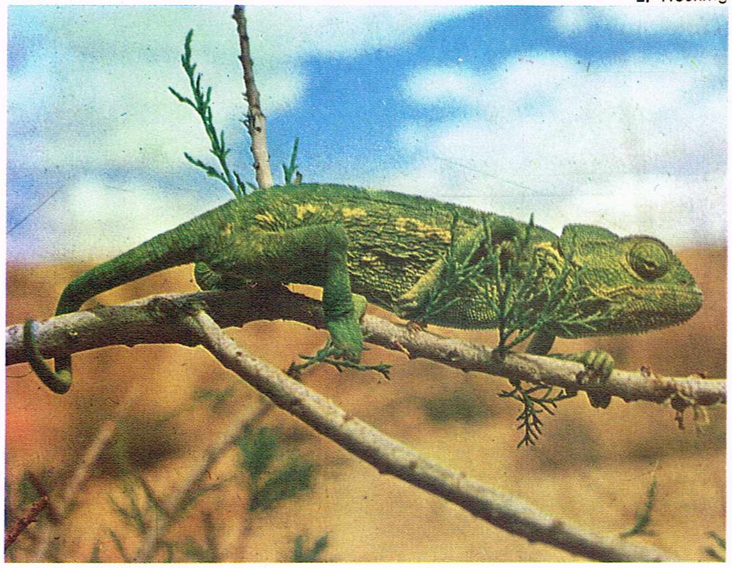

J. H. Tashjian

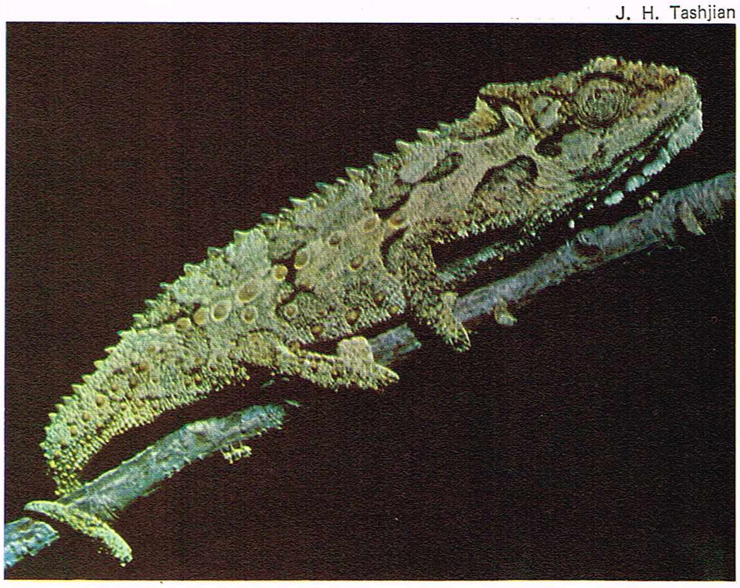

Le genre *Brookesia* est endémique à Madagascar. Il est caractérisé par une queue plus courte que le tronc et la tête réunis. Longs de 3 à 9 cm, ces caméléons vivent en forêt et se nourrissent d'Insectes.

C'est également à Madagascar que l'on trouve le genre *Leandria*, représenté par une seule espèce, *L. perarmata*. Long de 11 cm, il possède un casque dentelé, qui recouvre le cou. Le tronc et la queue sont hérissés d'épines.

Les **Scincidés** *(Scincidae)* comprennent d'une part des espèces à membres courts, et d'autre part des espèces présentant seulement des vestiges de ceintures scapulaire et pelvienne. De petite taille, les Scincidés ont le tronc très long, la queue fragile, la tête aplatie, et le museau pointu ou cunéiforme. Les pupilles sont rondes et les yeux protégés par des paupières mobiles, dont l'inférieure est souvent pourvue d'un petit disque transparent permettant la voisin même lorsque les paupières sont fermées. Les dents, petites et nombreuses, sont soudées au bord interne des mâchoires. La tête est recouverte d'écailles régulières ; celles du tronc et de la queue sont petites, imbriquées, plus ou moins carénées, et supportées par des ostéodermes. Cette famille habite principalement l'Afrique, l'Asie méridionale et l'Australie. Certains genres vivent aussi dans les régions chaudes et tempérées d'Amérique. Les genres *Ablepharus*, *Chalcides* et *Ophiomorus* sont européens.

Les *Ablepharus* sont de petite taille (10 cm) et présentent une certaine similitude avec *Chalcides chalcides* en ce qui concerne le brillant des écailles et la finesse du corps ; les pattes sont, généralement, plus développées, fréquemment de longueur normale, et les paupières inférieures transparentes. Ce genre se rencontre dans presque toutes les régions chaudes et tempérées de l'Ancien Monde et de l'Australie.

Les *Chalcides* comprennent des espèces d'une longueur maximale de 35 cm. Ils ont des pattes antérieures moins développées que les postérieures et peuvent avoir deux ou un seul doigt ou même pas du tout.

C. chalcides habite la péninsule Ibérique, l'Italie, le midi de la France et le nord-ouest de l'Afrique. Il fréquente les prés et les zones à végétation arbustive rare et se nourrit d'Insectes, de Vers et d'Arachnides. Actif aux heures les plus chaudes du jour, il passe l'hiver sous les pierres ou entre les racines des arbres. Il est ovovivipare. On le rencontre du niveau de la mer jusqu'à 2 300 m d'altitude (Haut Atlas).

C. ocellatus a le tronc très allongé et déprimé. Il atteint 28 cm et possède des pattes courtes et robustes pentadactyles. Il habite de l'Afrique du Nord jusqu'en Asie occidentale.

Le genre *Scincus* est particulièrement répandu en Afrique du Nord. Il comprend des espèces propres aux zones sablonneuses qui s'enfoncent dans le sable par un mouvement en spirale (« poissons des sables »). Ces Animaux ont un corps à écailles lisses imbriquées, fuselé aux deux extrémités.

Le genre *Mabuia*, répandu en Afrique, à Madagascar, en Asie méridionale, en Amérique centro-méridionale et aux Antilles, comprend soixante-dix espèces environ. Très agiles et rapides, ces Sauriens sont insectivores. Ils sont vivipares ou ovovivipares. Les espèces les mieux connues sont *M. striata*, qui habite le sud de l'Afrique, et *M. brevicollis*, localisée en Afrique orientale. *Corucia zebrata*, endémique dans les îles Salomon, est le plus grand Scincidé (61 cm) et l'unique espèce à queue préhensile. Il se nourrit uniquement de Végétaux, de même que *Macroscincus cocteani*, des îles du Cap-Vert.

Les espèces du genre *Ristella*, de l'Inde, possèdent de curieuses griffes rétractiles, dont la fonction n'est pas encore connue. Les représentants du genre *Tropidophorus*, qui vivent en Asie du Sud-Est, sont aquatiques ; leur femelle est ovovivipare.

Les Indes orientales sont habitées par le genre *Lygosoma*, qui comprend soixante-quinze espèces, toutes très colorées. Les espèces du genre *Tribolonotus*, propres à la Nouvelle-Guinée, ont le corps fortement charpenté et possèdent, à l'arrière, six longs aiguillons.

En Australie, on trouve les genres *Tilica*, dont la langue est bleue et les écailles très lisses, *Egernia*, dont les écailles sont épineuses et particulièrement pointues sur la queue, et *Trachysaurus*, dont la tête, le tronc et la queue sont recouverts de grosses écailles très imbriquées et rugueuses.

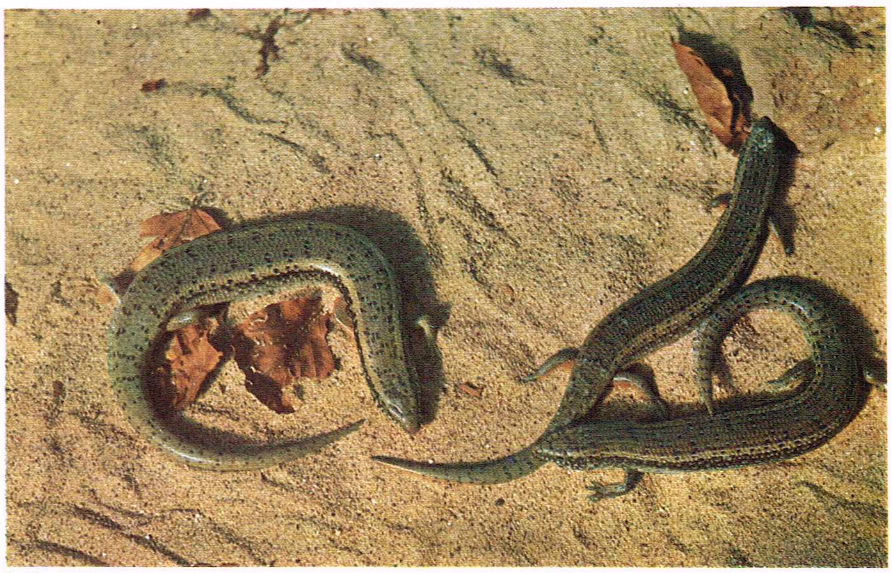

G. Papini

▲ ***Trois exemplaires de* Chalcides ocellatus *(Scincidés) au corps très allongé et aux pattes courtes et robustes.***

G. Papini

◀ **Chalcides chalcides vittatus** ***endémique de la Sardaigne.***
▼ **Scincus scincus,** ***le poisson des sables, particulièrement répandu en Tunisie.***

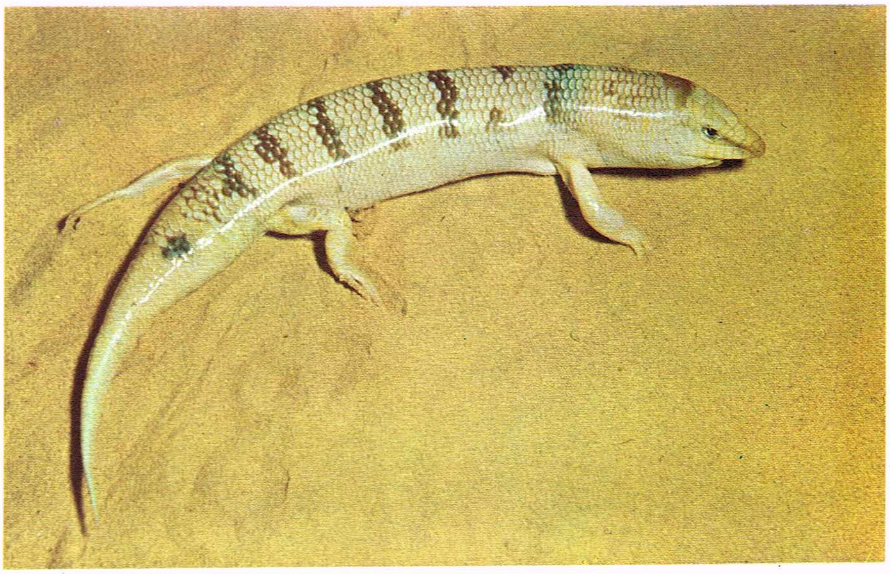

A. Margiocco

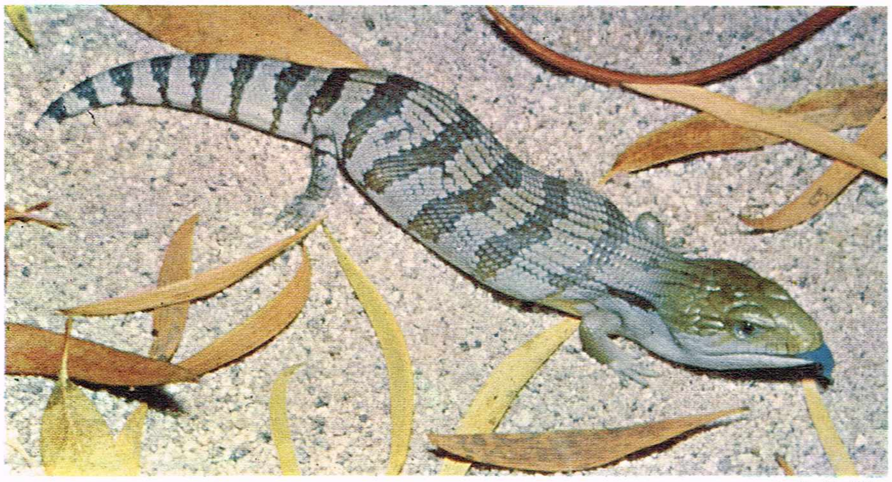

J. H. Tashjian

▲ **Tiliqua scincoides,** *dont la langue est bleue, habite l'Australie.*

Les **Feylinidés** *(Feylinidae)* sont des Sauriens apodes de petite taille. Le genre *Feylinia* habite l'Angola et l'Afrique centale. L'espèce la mieux connue, *F. currori,* mesure 30 cm de long. Ces Animaux sont fouisseurs, insectivores et ovipares.

Les **Cordylidés** *(Cordylidae)* sont endémiques en Afrique. Ils sont de petite taille et d'aspect très divers. Le corps et la queue sont protégés par de larges écailles épineuses ou carénées. Certains sont strictement terrestres, d'autres arboricoles, et d'autres encore habitent en permanence sur des rochers. Ils dévorent des Arthropodes et divers autres petits Invertébrés. Ils sont vivipares.

La famille compte vingt-trois espèces, dont la plus commune est *Cordylus cordylus,* qui peuple presque toute l'Afrique. *C. giganteus,* endémique en Afrique du Sud, atteint 35 cm de long.

Les quatre espèces du genre *Chamaesaura,* propres au territoire de l'Union sud-africaine, sont serpentiformes et ne dépassent pas 50 cm. *C. aenea,* endémique au Transvaal, est pentadactyle. *C. macrolepis* ne possède pas de pattes antérieures.

Les **Lacertidés** *(Lacertidae)* ont une forme élégante et fine. Ils sont très variables en ce qui concerne la taille et la livrée, ainsi que les mœurs. Les pattes sont bien développées, avec cinq doigts fins terminés par des griffes. La queue est longue, pointue, fragile et peut régénérer. Les yeux sont ronds et protégés par des paupières mobiles. Les Lacertidés possèdent sur la tête des écailles larges et irrégulières, et ont le dessus du corps recouvert de granulations de diverses formes et dimensions, ou de petites écailles imbriquées. La partie inférieure du tronc est couverte de plaques à peu près quadrangulaires, disposées en rangées régulières. Longs de 12 à 75 cm, ces Animaux présentent souvent de très vives couleurs. Ils habitent les milieux les plus variés, puisqu'on en trouve depuis les îles tropicales jusqu'au-delà du cercle polaire arctique, et du niveau de la mer jusqu'à 2 500 m d'altitude. Diurnes, terrestres et arboricoles, ils se nourrissent d'Insectes. Ils se reproduisent par des œufs, et sont rarement ovovivipares. Agiles, très rapides, excellents grimpeurs, et doués d'une certaine intelligence, les Lacertidés sont répandus dans toute l'Afrique, dans presque toute l'Europe, et dans la quasi-totalité de l'Asie. Ils sont absents à Madagascar et en Australie.

Le genre *Lacerta* comprend de nombreuses espèces européennes.

L. agilis habite l'Europe centro-septentrionale et l'Asie centrale. *L. bedriagae* est propre à la Corse et à la Sardaigne. *L. lepida* vit dans le sud-ouest de l'Europe et dans le nord-ouest de l'Afrique. *L. monticola* est confiné à la péninsule Ibérique et au versant français des Pyrénées. *L. muralis,* le lézard des murailles, habite l'Europe centro-méridionale et l'Asie centrale. *L. perspicillata* se rencontre au Maroc et dans les îles Baléares. *L. sicula* est distribué des îles de la mer Tyrrhénienne à l'Apennin, et de l'Istrie à la mer de Marmara. *L. viridis,* le lézard vert, habite l'Europe centro-méridionale et l'Asie Mineure. *L. vivipara,* le lézard vivipare, habite le midi de la France, le nord-ouest de l'Espagne, les Alpes, les Balkans, l'Europe centro-septentrionale, la Sibérie, la Mongolie septentrionale; on le trouve même dans l'île Sakhaline. Ces lézards habitent tous les milieux. Ils sont uniquement diurnes et, la nuit, ils se cachent sous des pierres, dans des trous qu'ils creusent ou dans des galeries abandonnées par des Rongeurs. Ils se nourrissent d'Insectes, de larves, de Mollusques, de Myriapodes, de Vers, de baies et, pour les plus grands, de petits serpents, d'œufs, d'Oiseaux, de micromammifères et d'autres lézards.

Après les amours qui ont lieu en mai et juin, la femelle pond dans de petits trous creusés dans le sol ou sous les Végétaux en décomposition. Ces lézards passent l'hiver à une profondeur de 10 à 90 cm.

Le genre *Algyroides* habite l'Afrique et le pourtour de la Méditerranée. *A. nigropunctatus* en est l'espèce la plus longue : il atteint 18 cm. Les diverses espèces se rencontrent habituellement dans les forêts de feuillus, sur les branches des buissons et sur les murs secs.

Le genre *Acanthodactylus,* représenté en Europe par *A. erythrurus,* habite la péninsule Ibérique, et est commun en Afrique du Nord et en Asie méridionale. L'espèce européenne est longue de 20 cm au maximum. Très agile, ce lézard habite les lieux sablonneux et arides, à végétation rare, jusqu'à 2 000 m d'altitude.

Le genre *Eremias* comporte de nombreuses espèces répandues en Russie, en Afrique et en Asie. Il habite à peu près les mêmes milieux que les *Acanthodactylus,* jusqu'à 1 700 m d'altitude environ.

▼ *A gauche, deux spécimens de* **Cordylus giganteus** *d'Afrique du Sud; ils dévorent des Arthropodes et divers autres petits Invertébrés. A droite, mâle et femelle de* **Lacerta agilis**; *cette espèce habite l'Europe centro-septentrionale et l'Asie centrale.*

A. Margiocco

E. Hosking

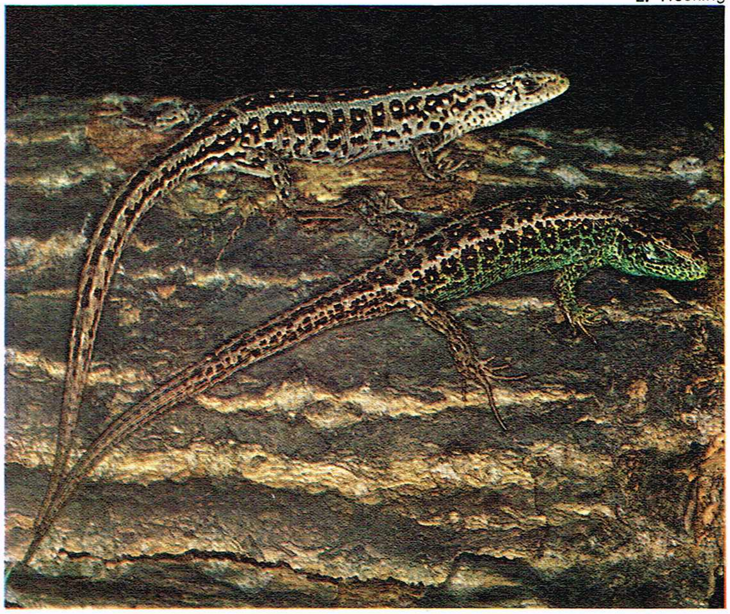

A. Margiocco

E. Hosking

Le genre *Psammodromus* compte seulement deux espèces, qui vivent dans la péninsule Ibérique, le midi de la France, et le Sahara algéro-tunisien. *P. hispanicus* atteint 13 cm, et *P. algirus* 27 cm ; ces deux espèces habitent les lieux arides, chauds, sablonneux, couverts de maigres buissons, sous lesquels ils creusent des tunnels.

Les **Téiidés** *(Teiidae)*, limités au Nouveau Monde, ont le dos couvert d'écailles juxtaposées et le ventre d'écailles disposées en rangées transversales. Les orifices auriculaires sont bien visibles. Les yeux ont des paupières. La langue est longue, bifide, et rétractile. Les dents antérieures sont coniques ; les dents latérales sont soit coniques, soit en forme de molaires. La coloration est assez vive. La famille compte environ quarante genres et deux cents espèces, ovipares ou ovovivipares, d'Amérique centro-méridionale et d'Amérique du Nord.

Tupinambis teguixin atteint près de 90 cm. Il habite de la Guyane à l'Uruguay, dans les broussailles touffues et le long des cours d'eau. Vif, bon coureur, agile et agressif, il se nourrit d'Invertébrés, de micromammifères, d'Amphibiens, de Reptiles, d'Oiseaux et surtout d'œufs. La femelle pond à la base des arbres, sous les buissons, ou plus communément dans des termitières.

Le géant de la famille est *Dracaena guyanensis,* avec 1,20 m de long. Ses écailles ressemblent à celles des alligators. Il est aquatique et se nourrit à peu près uniquement de Mollusques.

Cnemidophorus est un genre propre aux États-Unis, qui fréquente les champs et les zones sablonneuses.

Les *Ameiva,* semblables aux Scincidés (quinze à vingt espèces), vivent aux Antilles et du Mexique à la Bolivie et à l'Uruguay.

Des Téiidés vermiformes *(Scolecosaurus)* et serpentiformes *(Ophiognomon)* vivent en forêt sous les feuilles mortes ; leurs mœurs sont mal connues.

Les **Anguidés** *(Anguidae)* ont, en général, un corps serpentiforme. La tête est de section à peu près ronde. La queue est longue, pointue et d'un diamètre à peu près égal à celui du tronc. Les pattes peuvent être bien développées, ou très réduites, voire même absentes. La tête est couverte d'écailles régulières, alors que le tronc et la queue présentent des écailles imbriquées, souvent arrondies au bord postérieur, lisses et très brillantes. Quelques genres habitent l'Europe, l'Afrique du Nord, le sud de l'Asie jusqu'à Formose, et aussi l'Amérique.

Anguis fragilis, l'orvet, qu'on rencontre en Europe, en Afrique du Nord, dans le Caucase et en Perse, est long de 50 cm ; il est apode. La tête est petite, non distincte du tronc qui est subcylindrique. Il a des dents petites et courbes, parcourues par un léger sillon, comparable à celui des Ophidiens opisthoglyphes. La sécrétion de ses glandes labiales est mortelle pour de nombreux Invertébrés. On le rencontre de mars à novembre, particulièrement dans les prés humides, les clairières des forêts, sous les feuilles ou les Végétaux en décomposition, entre les racines, sous les pierres, etc. Il est actif du matin au crépuscule. Peu rapide mais relativement agile, il se nourrit d'Arachnides, d'Insectes, de Vers et de limaces. C'est un précieux auxiliaire de l'agriculture. L'orvet passe l'hiver, en colonies, dans des trous profonds de 30 à 80 cm. Il vit du niveau de la mer jusqu'à 2 100 m d'altitude.

Ophisaurus apodus, le pseudope de Pallas, habite de la péninsule balkanique à la Perse, la région transcaspienne et le Turkestan. C'est le plus grand Saurien observable en Europe : il peut atteindre 1,10 m. Il n'a pas de pattes antérieures et les pattes postérieures sont très rudimentaires. Le pseudope vit dans les forêts et les prairies, où il chasse des gros Acridiens, des Mollusques, des Amphibiens, des Sauriens, des Ophidiens, des Oiseaux nichant à terre, et des Mammifères de taille petite et moyenne. Il est rapide, vif et sauvage. La femelle est ovipare.

Les *Diploglossus* et les *Gerrhonotus,* qui habitent aux États-Unis, ont des pattes bien développées, et ressemblent aux Lacertidés, mais leur corps est assez allongé.

▲ A gauche, petit lézard* (Lacerta viridis) *nouveau-né côtoyant des œufs.
A droite,* Anguis fragilis *(femelle), l'orvet que l'on rencontre en Europe et en Afrique du Nord.

A. Margiocco

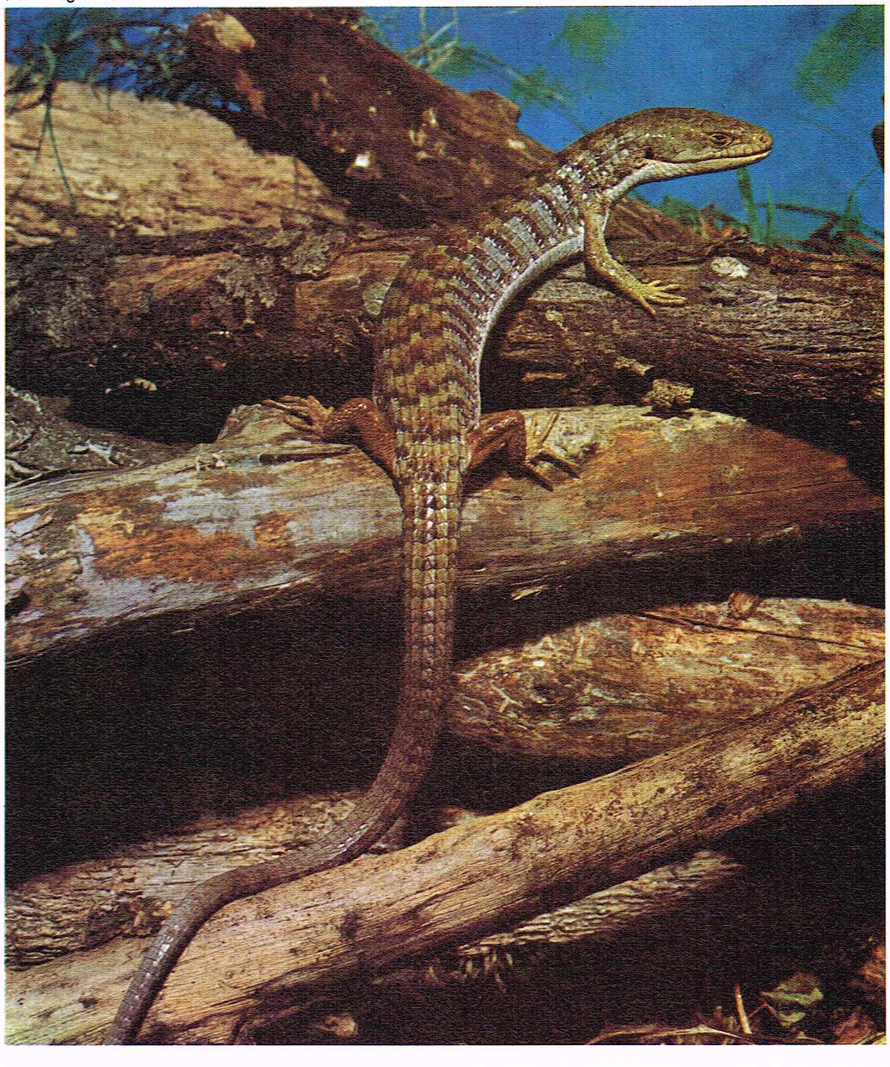

▼ Le lézard-alligator* (Gerrhonotus multicarinatus) *d'Amérique du Nord.

Frédéric - Jacana

▲ **Varanus komodoensis,** ***que l'on trouve exclusivement dans l'île de Komodo, est le plus grand des varans.***

Les **Anniellidés** *(Anniellidae)* sont confinés en Californie. Ils ont la tête cunéiforme et de même diamètre que le tronc. Ils ne possèdent pas de pattes, et la queue est courte. Longs d'un peu plus de 20 cm, fins, ils vivent dans les zones sablonneuses ou à terre meuble ; ils restent presque en permanence dans des galeries, qu'ils creusent à l'aide du museau. Diurnes, ils se nourrissent d'Insectes, d'Arachnides, etc. Ils sont ovovivipares. L'espèce la mieux connue est *Anniella pulchra*.

Les **Xénosauridés** *(Xenosauridae)*, longs au maximum de 25 cm, ont une tête et un tronc déprimés. Les pattes sont bien développées, avec des doigts armés de griffes fines et recourbées.

La famille comprend seulement deux genres : *Xenosaurus*, du Mexique, et *Shinisaurus*, avec une seule espèce, *S. crocodilurus*, de Chine méridionale.

Les **Varanidés** *(Varanidae)* comprennent les plus grands Sauriens actuellement vivants. La tête est allongée, et le cou très long ; le tronc est fort mais délié. Les pattes, moyennes et robustes, sont armées de doigts aux griffes dures et pointues. La queue est longue, pointue et souvent comprimée latéralement. Les yeux, bien développés, sont petits, à pupille ronde, et protégés par des paupières mobiles. Ils possèdent une langue longue, protractile et bifide. Les dents sont très fortes et soudées au bord interne des mâchoires.

La famille compte des espèces terrestres, aquatiques ou arboricoles. Diurnes, très agiles et sauvages, les Varanidés se nourrissent d'Oiseaux, de Reptiles, de Mammifères, de Poissons, d'Insectes et de charognes. La femelle pond des œufs à coquille molle et parcheminée, dans les cavités du sol ou dans les termitières. Attaqués, ces Animaux poussent des cris aigus et réagissent en mordant ou en donnant de grands coups de queue.

La famille ne compte qu'un genre, *Varanus*, avec une trentaine d'espèces, distribuées dans toute l'Afrique, en Asie méridionale, en Insulinde et en Australie.

Varanus niloticus, le varan du Nil, habite toute l'Afrique. Il peut atteindre 2 m. Il vit de préférence sur les îlots sablonneux sans végétation et sur les plages nues, ou encore sur les branches situées au-dessus de l'eau. Très bon nageur, il peut rester plusieurs minutes sous l'eau.

En Afrique, en Arabie et au Moyen-Orient, vit *V. griseus*, le varan du désert, espèce propre aux zones arides et désertiques.

V. salvator peut être observé sur les rives des cours d'eau et les plages de l'Asie méridionale, de l'archipel de la Sonde, des Philippines et du nord de l'Australie. Il est long de plus de 3 m.

V. komodoensis, qui dépasse 3,50 m et pèse 135 kg, est le plus grand des varans. On le trouve seulement dans l'île de Komodo, ainsi que dans deux petits îlots voisins et dans une zone très limitée de l'île Flores. Il se nourrit de petits Cervidés, de porcs sauvages et de charognes.

Bornéo et Java abritent *V. dumerili*, espèce de forêt, qui niche dans des galeries creusées dans les rives vaseuses. Près de la moitié des espèces vivantes habite l'Australie ; on y rencontre *V. brevicauda*, le plus petit (20 cm), *V. varius* et *V. giganteus*, tous deux longs de 1,80 m.

L'espèce la plus recherchée du point de vue gastronomique est *Varanus indicus*, de Polynésie, long de 1,30 m.

Les **Hélodermatidés** *(Helodermatidae)* ont une allure massive. La tête est large, plate, massive et bien distincte du tronc. Les pattes sont courtes, robustes et munies de griffes. La queue est épaisse et pointue à l'extrémité. Le dos est couvert de gros tubercules. Les dents sont soudées au bord interne des os de la mâchoire ; les dents sont crochues à la mâchoire inférieure et parcourues de la base à la pointe par un profond sillon relié à des glandes à sécrétion toxique. Les morsures, peu fréquentes, sont très graves mais semblent exceptionnellement mortelles.

Il existe deux espèces. *Heloderma suspectum*, long au maximum de 35 cm, habite le sud-ouest de l'Utah, l'Arizona, le Nevada et l'État de Sonora au Mexique ; *H. horridum*, du Mexique, mesure jusqu'à 60 cm. Ces Animaux vivent dans les lieux secs, à végétation xérophile. Ils sont peu actifs et passent le jour cachés dans des galeries ; ils sortent au crépuscule pour chasser de petits Vertébrés et manger des œufs d'Oiseaux et de Reptiles. Ils sont peu agressifs ; quand ils sont irrités, cependant, ils mordent et ne lâchent pas prise.

Les **Lanthanotidés** *(Lanthanotidae)* comprennent un seul genre et une seule espèce, très rare, de Bornéo : *Lanthanotus borneensis*, longue de 42 cm, avec le tronc allongé, déprimé, soutenu par de courtes pattes. On ne connaît pas la biologie de cette espèce.

Les **Amphisbænidés** *(Amphisbaenidae)* ont le corps vermiforme. Ils ne possèdent pas de pattes ou, alors, ont des membres antérieurs rudimentaires. La tête est assez semblable à l'extrémité caudale et couverte de plaques régulières. Les yeux sont minuscules et cachés par les écailles. Le tronc et la queue sont marqués par des sillons disposés en anneaux.

Ils se déplacent aussi bien en avant qu'en arrière, à la façon des vers de terre. Ils vivent dans le sol et sous les feuilles mortes et sont fréquents dans les termitières et les fourmilières.

La famille compte environ une vingtaine de genres. Elle est largement représentée en Afrique, dans une partie de l'Europe, en Asie occidentale, et en Amérique. Enfin dans la péninsule Ibérique, au Maroc et en Algérie vit *Blanus cinereus*, long de 21 cm.

J. Six

Sous-ordre des Ophidiens

Les Ophidiens ou serpents *(Serpentes)* sont apparus au Crétacé, à partir de formes à corps très allongé et dépourvues de membres, faisant partie des Sauriens. Ils ont le tronc et la queue très allongés. La tête est plus ou moins distincte du cou. Les membres antérieurs sont totalement absents, et les postérieurs vestigiaux (situés des deux côtés du cloaque) existent seulement chez les genres *Boa, Python* et *Eunectes*. La taille va de 10 cm (Leptotyphlopidés) à 10 m de longueur (Boïdés).

La forme du tronc est habituellement fonction du mode de vie de l'Animal : les espèces terrestres ont généralement une section transversale ovalaire, avec le grand axe de celle-ci situé parallèlement au sol *(Bitis)*. Les Leptotyphlopidés, les Typhlopidés font exception, ainsi que certains Boïdés, etc., le tronc ayant une section à peu près ronde. Les espèces arboricoles ont un tronc de section ovalaire, dont le grand axe est perpendiculaire à la surface d'appui. La queue peut être longue et terminée en pointe, ou bien être courte et se terminer brusquement. Chez les serpents de mer (Hydrophidés) la queue est large et plate, alors que, chez certains Crotalinés, elle est pourvue à l'extrémité d'une « sonnette ».

Tous les serpents ont le corps recouvert d'une importante couche cornée. La tête est normalement couverte de plaques régulières, larges, dont la forme, la taille et les rapports réciproques jouent un grand rôle en systématique. Le dos du tronc est protégé par des écailles allongées, à bord postérieur souvent arrondi, imbriquées ou juxtaposées, parfois carénées et disposées en rangées régulières. Sur le ventre les écailles sont très larges et courtes, disposées en une seule rangée. La plaque anale, plus arrondie, est facilement reconnaissable des ventrales (ou gastrostèges) et des sous-caudales (ou urostèges) ; elle est souvent divisée. Les sous-caudales ont la même forme que les ventrales, et sont parfois disposées en deux rangées.

Chez les Leptotyphlopidés et les Typhlopidés, le dos et le ventre sont couverts d'écailles de forme et de taille

▲ ***Les Ophidiens, ou serpents, habitent presque tous les milieux, du niveau de la mer jusqu'à 4 600 m d'altitude. Tous sont carnivores ; la plupart sécrètent du venin. Ici* Boiga dendrophila *(Colubridés), le serpent des palétuviers.***

▶ *Page ci-contre (en haut, à gauche) position et coupes transversale et longitudinale des dents chez les Ophidiens : A, dents aglyphes, ou pleines, non adaptées au passage du venin; B, dents opisthoglyphes, sillonnées, situées à la partie postérieure du maxillaire (*Malpolon, Telescopus, Dispholidus, Psammophis, etc.*, tous plus ou moins venimeux); C, dents protéroglyphes, situées à la partie antérieure du maxillaire, sillonnées et souvent canaliculées, propres aux Élapidés et aux Hydrophidés; D, dents solénoglyphes, mobiles, canaliculées et situées à la partie antérieure du maxillaire des Vipéridés.*

▶ *Page ci-contre (au milieu, à gauche), représentation schématique de la musculature céphalique de* Vipera aspis*; ca, cervico-angulaire; di, digastrique; cc, compresseur courbe; gv, glande à venin; cd, compresseur droit; li, ligament; vm, vertébro-mandibulaire; cm, costo-mandibulaire.*

▶ *Page ci-contre (en bas, à gauche), tête de couleuvre à collier* (Natrix natrix) *avec la nomenclature des écailles céphaliques : fr, frénale ou loréale; ft, frontale; in, internasale; li, labiale inférieure; ls, labiale supérieure; ma, mentonnière antérieure; me, mentale; mp, mentonnière postérieure; na, nasale antérieure; np, nasale postérieure; pa, pariétale; po, préoculaire; pr, préfrontale; ps, postoculaire; ro, rostrale; so, supraoculaire; ta, temporale antérieure; tp, temporale postérieure; ve, ventrale. La tête est vue de côté (A), de dessus (B), et ventralement (C).*

égales. Chez certains Vipéridés les écailles de la tête sont fragmentées et semblables à celles du dos.

La couche cornée qui recouvre le corps des Ophidiens, est renouvelée, trois ou quatre fois par an : c'est le phénomène de la mue. La dépouille reproduit tous les détails externes de l'Animal, y compris les yeux, et se détache en une seule pièce; pour s'en débarrasser, le serpent se frotte contre les rochers, les buissons, etc. Après chaque mue, les couleurs de la livrée sont toujours plus vives.

Le squelette de la tête est fortement ossifié. Il comprend un carré, qui s'articule, par l'extrémité postérieure, au squamosal, et par l'extrémité antérieure à la mandibule, dont les branches sont reliées par un ligament élastique. Il n'y a pas de fosses temporales.

La colonne vertébrale est composée au maximum de cinq cents éléments. L'atlas s'articule au crâne par un seul condyle. Chaque vertèbre porte deux côtes, dont le nombre correspond habituellement à celui des écailles ventrales. Les côtes peuvent effectuer d'importants mouvements, grâce à la façon dont elles sont liées aux vertèbres et aux muscles. La ceinture scapulaire est absente, et la ceinture pelvienne, très réduite, existe seulement chez les Leptotyphlopidés, les Typhlopidés, les Aniliidés et les Boïdés.

Les yeux peuvent être très grands ou atrophiés; la pupille est ronde ou elliptique, disposée horizontalement ou verticalement. Les paupières sont remplacées par une calotte complètement transparente. L'oreille interne comprend seulement la columelle. Les serpents perçoivent uniquement les ondes sonores transmises à travers les corps solides. Tous les serpents émettent des sifflements plus ou moins perceptibles.

L'appareil olfactif est constitué essentiellement par l'organe de Jacobson, beaucoup plus perfectionné que chez les Sauriens (à l'exception des Varanidés). Son mécanisme est encore mal connu. Les sensations tactiles sont captées par de petits organes situés sur tout le corps. Chez les Crotalinés et les Boïdés, on observe entre l'œil et la narine un organe en forme de fossette, qui permet à l'Animal de ressentir les variations de température.

La bouche, par l'élasticité de ses tissus, et par l'absence de soudure à l'extrémité antérieure des deux branches de la mandibule, peut se dilater énormément, ce qui permet aux Ophidiens d'avaler des proies beaucoup plus grosses qu'eux. Les dents, crochues et remplaçables, sont implantées au bord de la mandibule, du maxillaire, du prémaxillaire, du palatin et du ptérygoïde. Les dents peuvent être pleines (aglyphes); celles de la partie postérieure du maxillaire peuvent être sillonnées et reliées à la glande parotide (opisthoglyphes); elles peuvent être canaliculées et implantées à l'extrémité antérieure du maxillaire (protéroglyphes, solénoglyphes).

Les serpents non venimeux possèdent quatre types de glandes céphaliques : glandes de Harder, reliées aux yeux, glandes nasales, en rapport avec les narines, glandes labiales inférieures et supérieures, celles-ci pouvant être modifiées en une glande temporale supérieure (Boïdés, Uropeltidés). La glande parotide est située au niveau de l'extrémité postérieure du maxillaire, au-dessus des glandes labiales, et au-dessus de la temporale antérieure, quand celle-ci existe. Les serpents pourvus de parotides et sans dents sillonnées ne sont par venimeux. Les Élapidés, Hydrophidés et Vipéridés ont la glande à venin située à la partie latéro-postérieure de la tête, entre les yeux et la commissure de la bouche; elle est très grande, en forme de bouteille, et débouche dans les dents canaliculées.

La langue, très longue, fine, bifide, peut être sortie de la bouche même lorsque celle-ci est fermée, par une gouttière située au milieu de la lèvre supérieure. Rétractée, elle est logée dans une gaine qui s'ouvre sous l'orifice de l'appareil respiratoire. Elle porte quelques papilles gustatives, et de nombreux récepteurs tactiles et olfactifs.

L'œsophage est long, et très dilatable; les glandes digestives débouchent dans l'estomac et leur action est très rapide.

Le cœur, divisé en trois cavités, a une forme allongée et se trouve très en arrière. Le poumon gauche est petit ou atrophié, le droit est fort allongé. La trachée est très longue et aboutit à la partie antérieure du plancher buccal, ce qui permet aux serpents de respirer lorsqu'ils avalent leurs proies.

L'appareil urinaire consiste en deux reins, très longs, situés l'un derrière l'autre, et deux uretères, qui débouchent séparément dans le cloaque. Il n'y a pas de vessie.

L'appareil reproducteur mâle est constitué par deux testicules très allongés, de taille différente. Il y a deux organes copulateurs, ou hémipénis, logés chacun dans une poche particulière : lors de l'érection, ils se dévaginent comme des doigts de gants; ils portent des pointes et des crochets pour se fixer dans l'organe femelle pendant la copulation. Deux glandes en relation avec l'appareil sexuel, et dont la sécrétion est très nauséabonde, aboutissent également au cloaque.

L'appareil sexuel femelle consiste en deux ovaires reliés chacun à un oviducte; le droit est le plus long et contient un plus grand nombre d'œufs. Les sacs glandulaires, situés de chaque côté du cloaque, sont toujours plus gros chez les femelles.

L'accouplement a lieu au printemps ou en automne. Les œufs, au nombre de deux à cent, à coquille parcheminée très plastique, sont blanchâtres ou jaunâtres. Ils contiennent peu d'albumine et absorbent beaucoup d'eau immédiatement après la ponte. L'incubation se fait grâce à la chaleur ambiante; seules les femelles des Boïdés couvent leurs œufs en s'enroulant autour d'eux. Pour sortir de l'enveloppe, les petits se servent de la dent de l'œuf, qui tombe immédiatement après la naissance. Les Vipéridés, ainsi que certains Élapidés et Hydrophidés, sont ovovivipares ou vivipares.

Tous sont carnivores, et les proies sont avalées en commençant par la tête.

Les serpents habitent pratiquement tous les milieux, du niveau de la mer jusqu'à 4 600 m d'altitude. La limite septentrionale extrême de l'aire est atteinte par *Vipera berus,* qui va au-delà du cercle polaire arctique; la limite méridionale extrême est atteinte par *Philodryas scotti,* d'Amérique du Sud (44° de latitude sud). En captivité, les Ophidiens atteignent au maximum l'âge de quarante ans.

Les **Typhlopidés** *(Typhlopidae)* sont parfois considérés, en raison de la forme de leur squelette et de leur crâne, non pas comme des serpents, mais comme des Sauriens. Ils ont les yeux sous les écailles. La tête, le tronc et la queue sont à peu près cylindriques. Les os du crâne sont complètement soudés les uns aux autres. La ceinture pelvienne est rudimentaire. Les narines ainsi que la bouche sont minuscules. La mandibule ne possède pas de dents. Le tronc et la queue sont couverts d'écailles cycloïdes. La taille va de 10 à 90 cm.

La famille, représentée par les genres *Typhlops, Anomalepis, Helminthophis, Liotyphlops* et *Typhlophis,* est répandue dans toutes les régions chaudes du monde.

Le genre le plus riche est *Typhlops,* avec environ deux cents espèces d'Afrique, de Madagascar, d'Asie du Sud-Est, des Antilles, d'Australie et d'Amérique tropicale. *T. vermicularis* habite le sud-ouest de l'Europe et le sud-ouest de l'Asie. Long de 33 cm, il est nocturne, et habite aussi bien les lieux chauds et humides que les lieux désertiques. Pour se déplacer, il s'aide de la pointe caudale qui sert d'appui sur le sol. La reproduction se fait par des œufs assez gros par rapport à la taille de l'Animal. Ils sont pondus dans le sol. La seule espèce ovovivipare semble être *T. diardi,* d'Asie du Sud-Est, qui atteint 45 cm de longueur.

Les **Leptotyphlopidés** *(Leptotyphlopidae)* ont un aspect semblable à celui des Typhlopidés mais le maxillaire est dépourvu de dents, tandis que la mandibule en possède de très petites. La taille varie de 10 à 30 cm, pour un diamètre de 1,2 cm.

Ils habitent les zones chaudes d'Asie et d'Afrique, les Antilles et les deux Amériques. Ils vivent dans le sol, et mangent des larves d'Insectes, des fourmis et des termites.

La famille comprend un seul genre, avec quelques espèces, dont la plus grande est *Leptotyphlops macrolepis,* du Venezuela, et dont l'une des plus petites est *L. emini* du nord-est de l'Afrique.

Les **Aniliidés** *(Aniliidae)* ne dépassent pas 1 m. Ils ont la tête peu distincte du cou. Les yeux sont petits. Le tronc est cylindrique, avec des écailles ventrales à peine différenciées des dorsales. La queue est courte et trapue, et très semblable à sa tête. Les os crâniens sont soudés; le carré est très court. La ceinture pelvienne est très rudimentaire, on remarque des appendices à peu

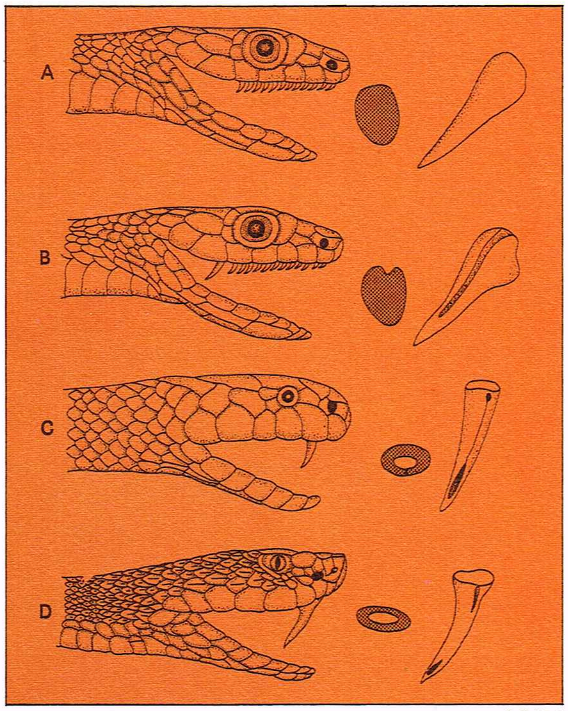

I.G.D.A.

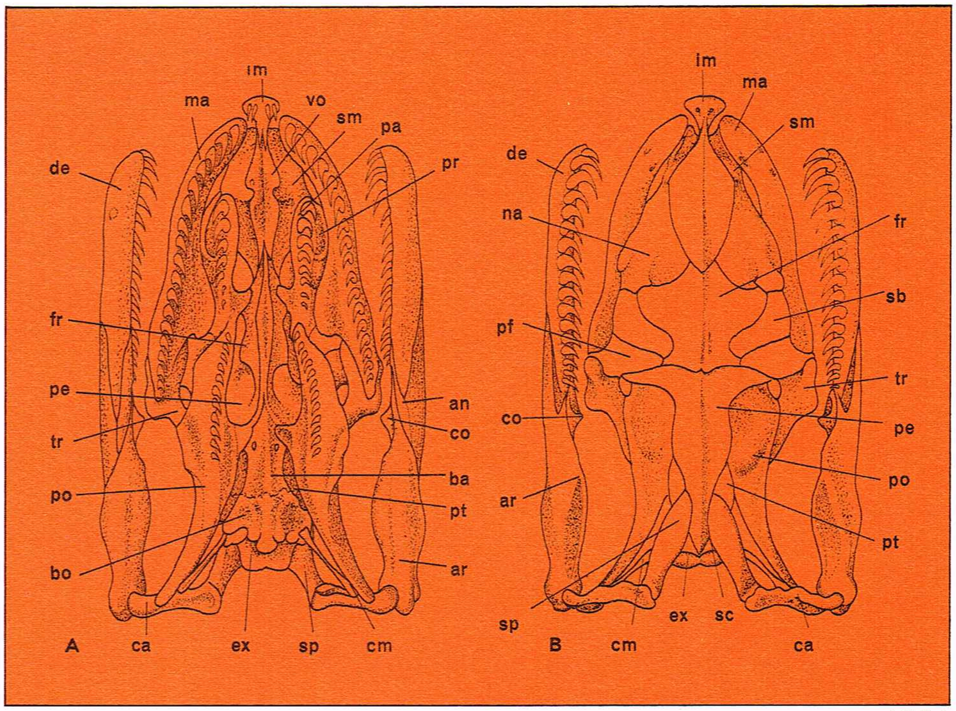

I.G.D.A.

▲ ***Squelette d'un crâne de Python, vue de dessous (A) et de dessus (B) : ma, maxillaire; im, intermaxillaire; vo, vomer; sm, septo-maxillaire; pa, palatin; pr, préfrontal; an, angulaire; co, coronoïde; ba, basisphénoïde; pt, prootique; ar, articulaire; cm, columelle; sp, os supra-temporal; ex, exoccipital; ca, carré; bo, basioccipital; po, ptérygoïde; tr, transverse; pe, pariétal; fr, frontal; de, dentaire; sb, supra-orbitaire; sc, supra-occipital; pf, postfrontal; na, nasal.***

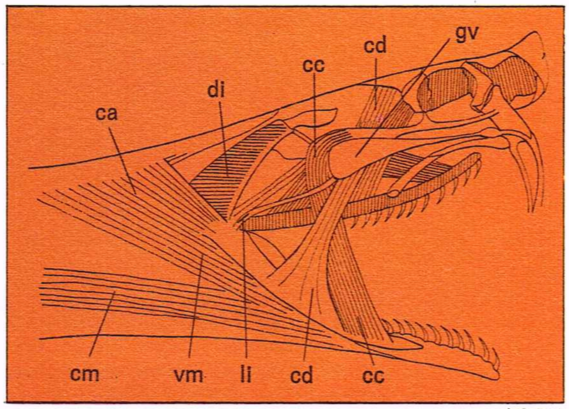

I.G.D.A.

▼ ***Principaux caractères morphologiques du tronc, de la queue et du ventre des Ophidiens : ev, écailles ventrales ou gastrostèges; ed, écailles dorsales carénées; el, écailles dorsales lisses; les nombres 1 à 15 indiquent la manière de compter les écailles dorsales; ea, écaille anale; sc, écailles sous-caudales ou urostèges simples; so, écailles sous-caudales ou urostèges doubles; te, écaille terminale.***

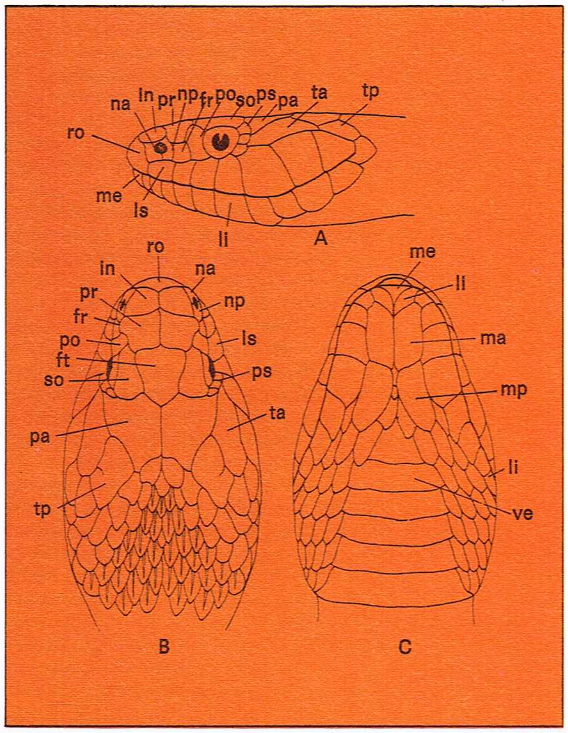

I.G.D.A.

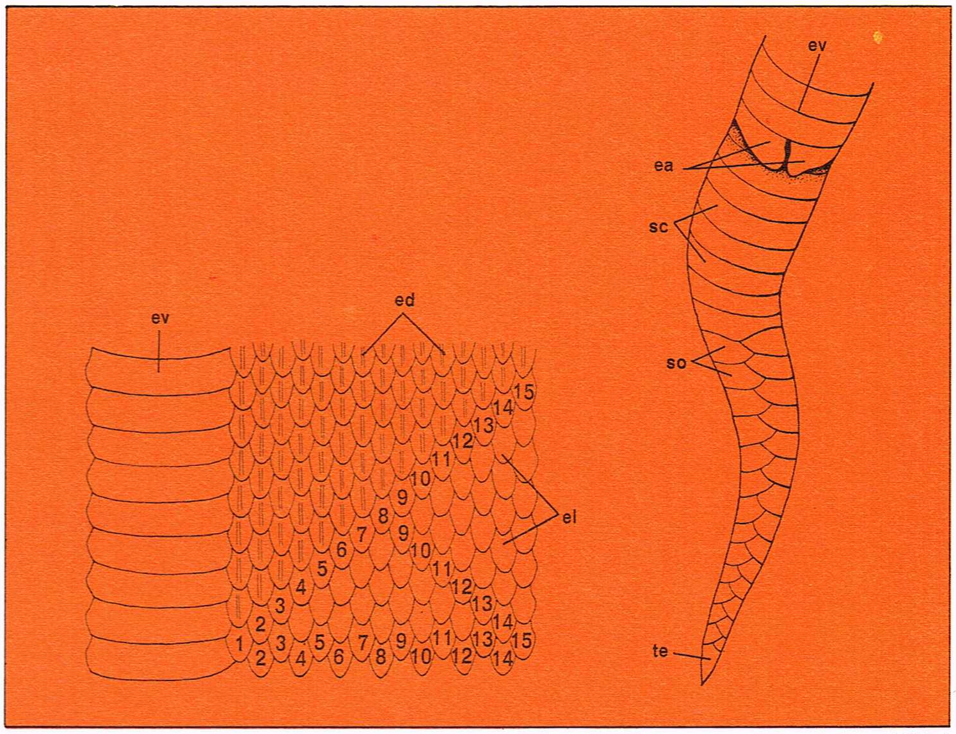

I.G.D.A.

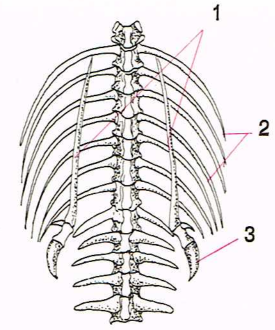

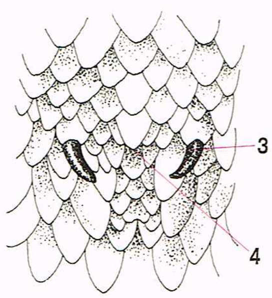

I.G.D.A.

▲ *Ceinture pelvienne et squelette appendiculaire d'un* **Python** *(en haut) et partie externe de la même région, où l'on peut voir les vestiges de membres postérieurs faisant saillie : 1, ceinture pelvienne; 2, côtes; 3, vestiges des pattes postérieures; 4, anus.*

près cylindriques sur les côtés du cloaque. Fouisseurs, ces Reptiles ne vont en surface que la nuit ou durant les journées très nuageuses. Ils se nourrissent de Vers, de serpents et d'Insectes. Ils sont ovovivipares. La famille compte trois genres : *Anilius* d'Amérique du Sud, *Anomalochilus* et *Cylindrophis,* du sud-est de l'Asie.

Les **Uropeltidés** *(Uropeltidae)* ont les os du crâne solidement soudés. Ils ont une petite tête, non distincte du cou, avec des yeux minuscules. Le tronc est cylindrique, trapu, peu flexible. La queue est très courte. Les Uropeltidés sont ovovivipares.

Leur nourriture consiste essentiellement en Vers et larves d'Insectes. Ils ne dépassent jamais 60 cm et sont totalement inoffensifs. On les trouve dans la péninsule indienne et à Ceylan où ils vivent dans des lieux boisés entre 1 000 et 2 000 m d'altitude. On en connaît divers genres.

Chez les formes les plus simples, la pointe de la queue est aplatie latéralement. Chez *Plectrurus,* elle a deux pointes aiguës; chez *Melanophidium,* l'écaille terminale possède deux crêtes; chez *Uropeltis,* toute l'extrémité de la queue est aplatie et inclinée. Enfin, dans le genre le plus évolué, *Rhinophis,* l'extrémité caudale forme une sorte d'écusson épais et rugueux. La queue sert à forer le sol et à obstruer l'entrée des galeries.

Les **Xénopeltidés** *(Xenopeltidae)* sont caractérisés essentiellement par la constitution du crâne : les os crâniens sont soudés; le prémaxillaire et le maxillaire présentent de petites dents.

La seule espèce de la famille est *Xenopeltis unicolor* qui habite l'Asie du Sud-Est et mesure jusqu'à 1 m de long. Crépusculaire et nocturne, cet Animal passe la plupart de son temps sous terre. Il se nourrit d'Insectes et de Mammifères.

Les **Acrochordidés** *(Acrochordidae),* ou serpents d'eau, ont des écailles dorsales peu ou pas imbriquées et des ventrales qui peuvent être minuscules ou semblables aux écailles dorsales, ou élargies transversalement. Les narines sont très rapprochées l'une de l'autre et situées à la partie supérieure du museau.

Ces serpents vivent dans l'eau des rivières et des lacs, et parfois en mer jusqu'à 50 à 80 km de la côte. Lors des journées particulièrement chaudes, ils se cachent à la base des plantes aquatiques, le long des rives. La nuit, ils vont à la recherche de proies, essentiellement des Amphibiens ou des Poissons. Nageurs remarquables, ils peuvent rester en plongée plus d'une demi-heure; la position particulière des narines leur permet de respirer sans avoir à sortir la tête de l'eau. Ils sont ovovivipares, et les petits sont mis bas dans l'eau, dans de petits trous cachés par les plantes aquatiques. Très vifs et facilement irritables, ils attaquent brusquement; la morsure est inoffensive car ils ne possèdent pas de dents canaliculées ni de glandes à venin.

▼ **Python molurus,** *le python molure, atteint 7,50 m de long.*

A. Margiocco

La famille comprend un petit nombre d'espèces habitant l'Asie du Sud-Est et l'Amérique centrale *(Notopsis).*

L'espèce la plus grande, *Acrochordus javanicus,* atteint 1,80 m. *Chersydrus granulatus* est le plus spécialisé pour la vie aquatique : il possède une carène longitudinale au milieu du ventre.

Les **Boïdés** *(Boidae)* sont les serpents les plus archaïques. Ils ont une ceinture pelvienne très réduite, et deux petits fémurs, recouverts à leur extrémité d'une substance cornée, et faisant saillie sur les côtés du cloaque. Les vertèbres atteignent le nombre record de quatre cent trente-cinq *(Python molurus).* Les deux poumons sont bien développés. Les écailles sont assez petites, par comparaison avec la taille du corps. La queue est souvent préhensile. Ce sont les plus grands Serpents existants; ils peuvent atteindre 10 m *(Python reticulatus).* Les plus grandes espèces sont arboricoles, les plus petites sont terrestres. Les Boïdés tuent les proies et les étouffent par enroulement, grâce à leur puissante musculature.

La famille, avec un nombre modeste de genres (vingt-deux) et près de cent espèces, est répandue sur tous les continents, et plus particulièrement en Amérique, en Afrique et en Asie. Elle est divisée en trois sous-familles, les Loxocéminés, les Pythoninés et les Boïnés.

Les *Loxocéminés (Loxoceminae)* comptent un seul genre, *Loxocemus,* fouisseur dont la biologie est mal connue. *L. bicolor,* du sud du Mexique et du Costa Rica, dépasse rarement 1 m.

Les *Pythoninés (Pythoninae)* renferment plusieurs genres tous ovipares.

Python sebae peut atteindre 7,30 m; il habite une grande partie de l'Afrique, au sud du Sahara, dans les endroits riches en végétation, sur les bords des marécages, dans les clairières herbeuses, etc. La nuit, il chasse de petites antilopes, des Rongeurs et des Oiseaux. Une fois par an, la femelle pond plus de cent œufs, dans un lieu caché et humide, sur lesquels elle se love jusqu'à l'éclosion sans prendre de nourriture.

P. reticulatus habite l'Asie du Sud-Est et toutes les grandes îles des Indes orientales jusqu'aux Philippines. Il ne dépasse généralement pas 5 m et peut peser 113 kg. Il vit dans la jungle humide, chasse au crépuscule ou pendant la nuit des antilopes, des singes, des Rongeurs et de petits Carnivores. Attaqué par l'homme, il réagit en cherchant à mordre de ses longues et puissantes dents. Il nage très bien, même en mer : c'est l'un des premiers Reptiles ayant repeuplé l'île de Krakatoa en 1883 après l'éruption du volcan. La femelle pond sur le sol ou dans de gros troncs creux, puis se love au-dessus de ses œufs.

P. molurus, le python molure, atteint 7,50 m. Il habite l'Inde, Ceylan, la Birmanie et les Indes orientales.

P. regius, le python royal, long de 1,50 m, habite l'Afrique occidentale. Quand il est dérangé, il se roule en boule, en cachant sa tête à l'intérieur.

P. curtus, qui mesure 2,70 m, habite l'Indonésie, le long des cours d'eau, où il chasse des Rongeurs.

P. spilotes, ou *Morelia argus,* habite l'Australie et la Nouvelle-Guinée. Il vit sur les arbres, le long des torrents et des rivières, et se nourrit de rats, de lapins et d'Oiseaux. Il dépasse 3,55 m.

L'espèce la plus rare du genre est *P. timorensis,* endémique à Timor, et qui atteint 3 m.

Un genre fouisseur, *Calabaria,* vit en Afrique occidentale. Il atteint rarement 1 m.

Dans la région australienne, aux Moluques, en Nouvelle-Guinée et dans l'archipel Bismarck vivent six espèces du genre *Lialis.* Elles peuvent atteindre 6 m, habitent dans les mangroves et se nourrissent d'opossums. Les *Aspidites,* longs de près de 2,40 m, sont endémiques en Australie. Ils se nourrissent de serpents même venimeux.

En Nouvelle-Guinée vit l'unique espèce du genre *Chondropython,* qui est muni d'une queue préhensile.

Les *Boïnés (Boinae)* ont des femelles ovovivipares. *Constrictor constrictor,* le boa constricteur, habite les zones paludéennes riches en végétation du sud du Mexique à l'Argentine. Il chasse des Oiseaux et des Mammifères. Son ennemi naturel est le jaguar. Il atteint 5,50 m.

Des explorateurs assurent avoir vu des spécimens d'anaconda *(Eunectes murinus)* de 19 m à 21 m; les squelettes et les individus conservés dans les musées ne dépassent jamais 7,30 m. Le diamètre du corps est toujours supérieur à celui des espèces des genres *Python* et *Constrictor.* Répandu du bassin de l'Orénoque à l'Ama-

J. Six

▲ **Constrictor constrictor**, *le boa constricteur, chasse les Oiseaux et les Mammifères; son ennemi naturel est le jaguar.*

zonie et à la Guyane, l'anaconda vit près des cours d'eau des immenses forêts tropicales ; il se place sur les branches s'étendant à peu de distance de l'eau. Il se nourrit d'Oiseaux et de Mammifères de petite et moyenne taille. Pacifique comme tous les Boïdés, il est très dangereux si l'on essaye de le capturer.

Epicrates angulifer, le plus grand Ophidien de Cuba, atteint près de 3,60 m. Cette espèce est en voie d'extinction par suite de l'accroissement continuel des cultures de canne à sucre.

Au Costa Rica et au Brésil vit *E. cenchris*, le boa arc-en-ciel, long de 1,80 m.

E. striatus chasse activement les rats. Il habite les îles Bahamas et Saint-Domingue. Il mesure jusqu'à 2,50 m.

Boa canina, le boa canin, peut atteindre 1,50 m. Sa tête est très grande. Arboricole et très doux, il habite les forêts de Guyane et du Brésil.

De forme semblable au précédent, mais très agressif, *B. cookii* se trouve dans le nord de l'Amérique du Sud. Il est arboricole et se nourrit d'Oiseaux ; il atteint 1,50 m.

Dans les régions méditerranéennes vivent les espèces du genre *Eryx*, en majorité fouisseuses, nocturnes, ovipares, de faible taille (40 à 80 cm).

E. jaculus se trouve dans le sud-est et l'est de l'Europe, en Asie et en Afrique du Nord.

E. miliaris semble confiné aux zones sablonneuses des rivages de la Caspienne et en Asie centrale.

Sanzinia madagascariensis habite les forêts de Madagascar. Il se nourrit exclusivement d'Oiseaux. Il mesure jusqu'à 2 m de long.

Les *Lichanura* habitent les régions semi-désertiques du sud-ouest des États-Unis et du nord-ouest du Mexique ; ils atteignent au maximum 90 cm.

Les **Colubridés** *(Colubridae)* forment la plus vaste famille du sous-ordre des Ophidiens. On répartissait

▼ *Arboricole et très doux,* **Boa canina** *habite les forêts de Guyane et du Brésil.*

J. H. Tashjian

A. Margiocco

▲ Eryx johni, *espèce fouisseuse de l'Inde.*

▼ *Couleuvre du genre* Natrix, *probablement un hybride entre* N. maura *et* N. tessellata.

A. Margiocco

naguère les espèces en trois groupes : les Aglyphes (à dents pleines), les Protéroglyphes (à dents sillonnées situées à l'avant du maxillaire), et les Opisthoglyphes (possédant deux ou trois dents canaliculées, situées à la partie postérieure du maxillaire), chacun de ces groupes étant à son tour divisé en plusieurs sous-familles, que certains auteurs élevèrent par la suite au rang de familles.

Les *Xénoderminés (Xenoderminae)* constituent un petit groupe vivant aux Indes occidentales et dans le sud-est de l'Asie. Ils sont caractérisés par des labiales à bord postérieur relevé.

Xenodermus javanicus, de Java, possède des écailles non imbriquées. Il vit dans les sols meubles et humides et se rend souvent dans les rizières ou dans les champs irrigués. Il se nourrit de grenouilles.

Les *Homalopsinés (Homalopsinae)* sont un petit groupe d'opisthoglyphes, qui vivent dans les eaux douces et saumâtres des côtes tropicales asiatiques, allant à l'est jusqu'au nord de l'Australie. Ils sont tous ovovivipares et possèdent entre les narines et la bouche une valvule qui leur permet de plonger dans l'eau.

Enhydris est le genre le plus abondant. *E. bocourti* dépasse 90 cm de longueur.

Du point de vue morphologique, *Herpeton*, genre habitant les côtes de la Thaïlande et de l'Indochine, est remarquable par ses deux appendices squameux sur le museau. Les *Fordonia* et les *Cerberus* vivent en symbiose avec certains crabes, dans les plaines alluvionnaires des côtes septentrionales de Java. Les *Fordonia* se nourrissent de Crustacés et les *Cerberus* de Poissons.

L'espèce la plus volumineuse (1 m) est *Homalopsis buccata*, largement répandue sur les côtes du sud-est de l'Asie et des îles des Indes orientales où elle vit dans la zone des marées.

Les *Natricinés (Natricinae)* comprennent les couleuvres d'eau *(Natrix)*, absentes seulement en Amérique du Sud, en Afrique centro-méridionale et en Australie, ainsi que les serpents-jarretières *(Thamnophis)*, qui sont les Ophidiens les plus communs d'Amérique du Nord. Les espèces de cette sous-famille ont les écailles dorsales toujours nettement carénées.

Natrix maura, la couleuvre vipérine, vit en France, dans le sud-ouest de la Suisse, le nord-ouest de l'Italie, peut-être en Sicile, dans la péninsule Ibérique, les îles Baléares, la Sardaigne et le nord-ouest de l'Afrique. Le mâle mesure au plus 83 cm de long et la femelle jusqu'à 1 m. Uniquement aquatique, cette couleuvre vit dans les étangs, les marais et les ruisseaux riches en végétation aquatique. En montagne, on la trouve dans les torrents froids jusqu'à 2 300 m d'altitude (Maroc). Lors des journées humides et pluvieuses, elle va aussi dans les prés et sur la terre nue. Elle vit en colonies, se nourrit de Poissons et d'Amphibiens. Elle passe l'hiver dans des trous s'ouvrant à fleur d'eau ou sous de gros rochers. Les amours ont lieu en mai et en automne. La femelle pond dans de petites cavités. Timide et inoffensive, cette couleuvre se défend en aspergeant l'agresseur d'une substance malodorante.

N. natrix, la couleuvre à collier, habite l'Europe, le nord-ouest de l'Afrique et l'ouest de l'Asie. Sa longueur totale maximale est de 1,10 m pour les mâles, et de 2 m pour les femelles. Moins inféodée à l'eau que l'espèce précédente, elle vit dans les ruisseaux, les torrents, les marécages, les bois de feuillus, les prés, les champs, etc., et même en mer, où elle va jusqu'à 40 km de la côte. Elle vit du niveau de la mer jusqu'à 2 500 m d'altitude (Alpes). Elle est agile, vive, peu agressive ; elle pousse de longs sifflements et émet un liquide nauséabond. Elle se nourrit d'Amphibiens, de Poissons, de Mollusques et de petits Oiseaux. Les vieilles femelles habitent toujours loin de l'eau et se nourrissent uniquement de crapauds. La femelle pond dans des lieux chauds et humides. Souvent, plusieurs femelles pondent au même endroit.

N. tessellata habite l'est de l'Europe et l'Asie centro-occidentale. La longueur maximale est de 0,62 m pour les mâles, et 1,20 m pour les femelles.

Les espèces américaines sont ovovivipares. L'espèce la mieux connue aux États-Unis est *N. sipedon*.

Les *Thamnophis*, en Amérique du Nord, vivent le long des cours d'eau et se nourrissent de tout Animal qu'ils peuvent rencontrer.

Les *Sibynophinés (Sibynophinae)* sont caractérisés par un long dentaire armé de minuscules dents. On les rencontre à Madagascar *(Parasibynophis)*, dans le Sud-

Est asiatique *(Sibynophis)* et en Amérique centrale *(Scaphiodontophis)*.

Les *Colubrinés (Colubrinae)* comprennent la majeure partie des serpents et sont cosmopolites. Ils présentent des hypapophyses tout à fait réduites, des narines latérales, des plaques ventrales très développées, et une tête couverte de larges écailles régulières. Ils possèdent deux ou trois dents canaliculées à la partie postérieure du maxillaire. La queue est longue et fine; on remarque un léger affinement du corps, à la moitié du tronc et vers le cou, accompagné de réduction de taille des écailles.

Coluber hippocrepis habite la péninsule Ibérique, le nord-ouest de l'Afrique, l'île de Pantelleria et la Sardaigne. Elle mesure au maximum 1,60 m. Elle vit dans les lieux arides et ensoleillés, où elle fréquente les zones rocheuses et les ruines. Elle est vive, irascible, sauvage et prompte à la défense. On la trouve du niveau de la mer jusqu'à 2 000 m d'altitude. Ses mœurs ressemblent à celles de la couleuvre vert et jaune, *C. viridiflavus*, qui mesure au maximum 1,90 m. Cette espèce du sud-ouest de l'Europe vit dans des lieux très variés. Diurne, très vive, ombrageuse et sauvage, elle résiste très bien à des variations thermiques importantes. C'est le dernier des Ophidiens européens à entrer en léthargie hivernale. L'accouplement a lieu à la fin de mai ou au début de juin. La ponte se fait à la fin de juin ou en juillet, mais est parfois retardée jusqu'au début de septembre. Les œufs sont pondus dans des replis du sol aux endroits bien exposés au soleil, ou sous les buissons, ou encore dans les lits sablonneux des torrents à sec. L'incubation dure de six à huit semaines. Ce serpent se nourrit de rats, de lézards, de Scincidés, d'Oiseaux au nid, de serpents, d'Amphibiens et de petits Mustélidés. Il vit du niveau de la mer jusqu'à 2 000 m d'altitude.

C. gemonensis est semblable à la couleuvre vert et jaune par l'aspect et les mœurs; on l'a même confondue avec elle. Elle habite des Balkans jusqu'en Istrie, la côte adriatique, le Péloponnèse, et la Crète. Elle mesure au maximum 1,10 m.

C. jugularis, qui dépasse 1,50 m, habite le sud-est de l'Europe et l'ouest de l'Asie.

C. najadum, le serpent d'Europe le plus rapide, habite au Caucase, dans le nord-ouest de la Perse, en Asie Mineure, dans les Balkans, les îles Ioniennes, et les grandes îles de la mer Égée proches de la côte (mais pas en Crète).

Coronella austriaca, la coronelle lisse, est répandue en Europe moyenne et méridionale, ainsi qu'en Asie Mineure jusqu'à 2 500 m d'altitude. La longueur maximale des mâles est de 83 cm. Cette espèce fréquente les lieux secs et ensoleillés, bordés par des broussailles ou des bois. Diurne, lente et très vorace, elle se nourrit de Rongeurs, de Sauriens et de serpents (même de ses propres petits). Elle est ovovivipare.

C. girondica, la coronelle girondine, habite l'Italie continentale et péninsulaire, le midi de la France, la péninsule Ibérique, le nord-ouest de l'Afrique. Elle vit dans les zones dégagées, en plaine, dans les forêts des collines, et dans les lieux secs en montagne, jusqu'à 3 700 m d'altitude. Elle est ovipare. Matinale et crépusculaire, elle se nourrit principalement de lézards.

Elaphe longissima, la couleuvre d'Esculape, habite l'Europe moyenne et méridionale, ainsi que l'Asie Mineure. Elle a une prédilection pour les lieux caillouteux couverts d'une maigre végétation, les broussailles et les prairies. On la rencontre jusqu'à 1 800 m d'altitude. Arboricole, rapide, diurne, elle est peu agressive, se nourrit de Rongeurs, d'Oiseaux, de Sauriens et d'œufs. La femelle pond en été, dans la mousse ou dans la terre humide.

E. quatuorlineata habite le sud-est de l'Europe et l'ouest de l'Asie. Elle peut atteindre 2,40 m. Elle habite les champs, les prairies, les broussailles, les taillis et les forêts de feuillus, jusqu'à 1 300 m d'altitude; elle est aussi arboricole. Diurne, peu coléreuse, timide, elle se nourrit d'œufs, de Rongeurs, de lézards et d'Oiseaux au nid.

E. scalaris, la couleuvre à échelons, habite la péninsule Ibérique, la zone méditerranéenne de la France, les îles d'Hyères et Minorque. Elle peut atteindre 1,60 m. Elle fréquente les lieux à végétation rare, les vignes et autres endroits ensoleillés; elle est également arboricole. Rapide et vive, elle se nourrit de micromammifères, de petits Reptiles, d'Oiseaux au nid et d'œufs.

A. Margiocco

J. H. Tashjian

▲ ***En haut, femelle de couleuvre à collier*** **(Natrix natrix helvetica)** ***mangeant une salamandre; la glande parotide de cette couleuvre fonctionne comme glande à venin (non dangereux pour l'homme). En bas,*** **Thamnophis elegans,** ***un serpent-jarretière.***

G. Papini

◀ **Coluber viridiflavus,** ***espèce commune d'Europe.***

Kramer

▲ **Elaphe longissima,** ***la couleuvre d'Esculape, commune en Europe et en Asie occidentale.***

On peut citer d'autres élaphes : *E. situla*, la couleuvre léopard, qui habite Malte, la Sicile, l'Italie du Sud, les Balkans, la Turquie, le Caucase et la Crimée. Elle peut atteindre 1,20 m environ.

E. guttata, des États-Unis, qui peut atteindre exceptionnellement 1,80 m.

E. taeniura habite la Chine, la Mandchourie, la Thaïlande, l'Inde et les îles de la Sonde.

Spilotes pullatus, d'Amérique du Sud, peut gonfler l'avant du tronc, grâce à l'absence de supports cartilagineux dans la membrane élastique qui recouvre la partie supérieure de la trachée.

Lorsqu'il est irrité, *Heterodon contortrix,* le serpent à groin, se livre à des contorsions, et se renverse la bouche grande ouverte, comme s'il était mort.

Les *Lampropeltis,* qui habitent du Canada à l'Équateur, sauvages et agressifs, sont longs d'environ 1 m. Crépusculaires et nocturnes, ils vivent aussi bien dans les forêts que dans les lieux découverts ou au bord des cours d'eau. Ils tuent par constriction et par morsure des micromammifères, des Oiseaux, des Amphibiens et des serpents.

Macroprotodon cucullatus, la couleuvre à capuchon, habite la péninsule Ibérique, les Baléares, Lampedusa et Galita, et de l'Afrique du Nord jusqu'en Palestine méridionale; on la rencontre jusqu'à 1 800 m d'altitude. Elle peut atteindre 60 cm. Agile, vive et nocturne, elle vit dans les lieux découverts, caillouteux et à maigres buissons. Elle se nourrit de lézards et de rats.

▼ ***On observera la belle livrée de*** **Lampropeltis doliata** ***(Colubridés).***

J. H. Tashjian

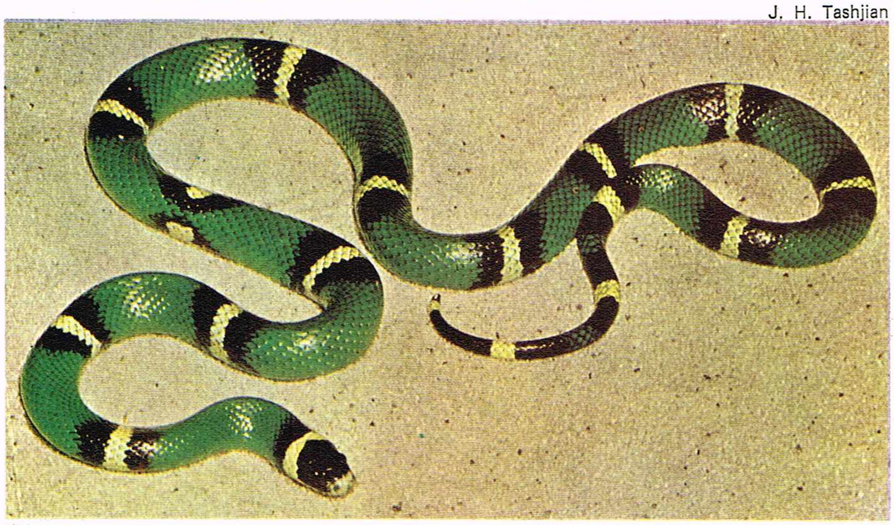

Malpolon monspessulanus, la couleuvre de Montpellier, habite le sud de l'Europe, l'Afrique du Nord et l'Asie occidentale. Les femelles peuvent atteindre 2,50 m de longueur. Diurne, arboricole, vive et irritable, cette couleuvre vit dans les endroits secs. Irritée, elle émet de puissants sifflements. Cette espèce se nourrit de Rongeurs, d'Oiseaux, de Sauriens et de serpents.

On rencontre en Afrique du Nord, en Arabie, en Irak et en Perse une espèce voisine, *Malpolon moilensis*.

Langaha nasuta, de Madagascar, possède, au bout du museau, un appendice, obtusément pointu chez les mâles, et en forme de crête chez les femelles.

On rencontre en Indonésie *Boiga dendrophila*, le serpent de mangrove. Il peut atteindre 2,10 m. Il est strictement arboricole : c'est un grand chasseur d'Oiseaux, de Sauriens et de serpents.

Clelia clelia habite l'Amérique du Sud. Il atteint près de 2,40 m. Extrêmement agile, il se nourrit presque uniquement de serpents, ce qui le fait apprécier des habitants.

Ramphiophis rostratus, des broussailles africaines, sauvage et dangereux, doit son nom à la forme de son museau, nettement recourbé vers le bas.

Les espèces du genre *Psammophis* sont nombreuses en Afrique et en Asie méridionale. *P. sibilans,* la plus répandue, habite entre le tropique du Cancer et le cap de Bonne-Espérance.

Thelotornis kirtlandii a pour caractères particuliers l'extrême finesse du tronc et de la queue, le grand allongement de la tête, un ventre caréné. C'est un grand chasseur d'Oiseaux. Il habite l'Afrique tropicale et du Sud.

Le plus venimeux des opisthoglyphes est *Dispholidus typus* d'Afrique du Sud tropicale. Cette espèce arboricole est longue de près de 1,80 m. Il se nourrit d'Oiseaux. Le dimorphisme sexuel est très marqué chez cette espèce.

Les serpents volants, du genre *Chrysopelea,* habitent l'Asie du Sud-Est; ils peuvent passer d'une branche à l'autre ou descendre à terre sans se servir de supports : soulevant les côtes dorsales et dilatant le dos transversalement, ils se lancent en l'air et planent quelque temps. Ils peuvent aussi grimper sur les troncs verticaux à écorce rugueuse.

Les *Tantilla,* d'Amérique du Nord, vivent sous les pierres ou dans les tas de Végétaux en putréfaction, et se nourrissent de Myriapodes et d'Insectes.

Les membres de la sous-famille des *Dipsadinés (Dipsadinae)* ont un maxillaire court et pourvu de quelques dents pleines. Ils possèdent une glande parotide, mais sont dépourvus de dents cannelées. La sous-famille comprend trois genres et quelques espèces, répandues du Mexique au Brésil. Longs au maximum de 70 cm, ils vivent dans les forêts, parmi la végétation; ils se nourrissent d'Insectes et de Mollusques.

La sous-famille des *Paréinés (Pareinae)* habite l'Asie du Sud-Est et les Indes orientales. Les genres *Aplopeltura* et *Pareas* sont totalement inoffensifs; surtout nocturnes, ils vivent aussi bien à terre que sur les arbres et sont ovipares.

Les *Dasypeltinés (Dasypeltinae)* ont pour caractéristique d'avaler des œufs dont le diamètre est deux ou trois fois plus gros que celui de leur tête. La bouche et le cou sont très dilatables et les hypapophyses des premières vertèbres sont très développées et coupantes. Passant à travers la paroi dorsale de l'œsophage, elles font saillie dans le tronçon initial du tube digestif. L'œuf avalé est coupé longitudinalement par ces pointes, puis brisé complètement par suite des contractions des muscles du cou; la coquille reste dans l'œsophage et est rejetée une heure après la déglutition de l'œuf.

Dasypeltis scaber habite l'Afrique, des confins méridionaux du Sahara au cap de Bonne-Espérance. Il vit dans les broussailles arides et est actif soit le jour, soit la nuit. Il atteint 70 cm de long; son sens gustatif est assez développé : en léchant la coquille d'un œuf avec la langue, il peut savoir s'il est bon ou pourri.

La sous-famille des *Atractaspinés (Atractaspinae),* placée il y a peu de temps dans la famille des Vipéridés, est considérée aujourd'hui comme faisant partie des Colubridés, grâce à des travaux récents sur la musculature, les vertèbres et la structure de la glande venimeuse.

Les Atractaspinés ont besoin de beaucoup d'humidité; on les trouve surtout dans les broussailles ou dans les zones riches en eau, et ils aiment rester sous l'humus ou dans le sol. Ils en sortent au crépuscule. La nuit, et

J. et M. Fievet - Jacana

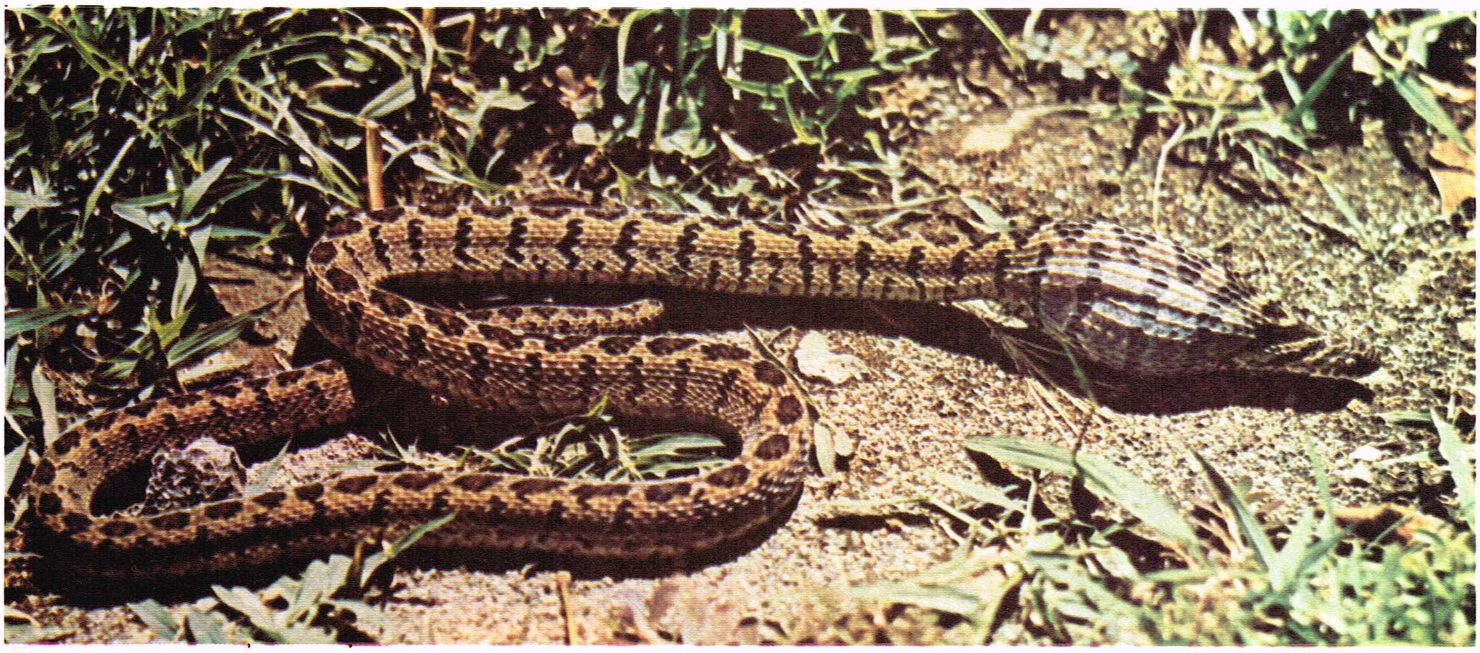

J. et M. Fievet - Jacana

▲ **Dasypeltis scaber** ***avalant un œuf dont le diamètre est deux à trois fois plus gros que celui de sa tête.***

plus rarement pendant les journées pluvieuses, ils chassent des Typhlopidés, des Leptotyphlopidés, de petits Amphibiens, et sans doute aussi des Insectes et des micromammifères. Ils ne sont pas agressifs, mais réagissent de façon brusque quand ils sont dérangés. Ils sont ovipares.

Le genre *Atractaspis,* qui compte seize espèces, est répandu en Palestine, dans la péninsule Arabique, et dans toute l'Afrique, sauf dans les régions occidentales situées au nord du Sahara. Ces espèces ne dépassent pas 60 cm de longueur.

Les **Élapidés** *(Elapidae)* sont pourvus de crochets sillonnés à l'extrémité du maxillaire supérieur. Ils sont caractérisés par la présence d'hypapophyses sur l'ensemble des vertèbres du tronc, un sulcus spermatique bifide et l'absence de fossettes sur les écailles.

Toutes les espèces possèdent une glande à venin, de chaque côté de la tête, habituellement au-dessus de la commissure buccale, et s'étendant jusqu'à la base des dents canaliculées. Dans le genre *Maticora* ces glandes sont très longues et vont de la base des dents jusqu'à proximité du cœur. Le venin des Élapidés est neurotoxique.

Les Élapidés ont une morphologie et des mœurs très variables. Ce sont les plus grands et les plus dangereux des serpents venimeux. Ils habitent tous les continents, sauf l'Europe, mais constituent la quasi-totalité de la faune ophidienne de l'Australie. Certains auteurs divisent cette famille en deux sous-familles à biologie très différente ; les Élapinés et les Hydrophinés. Nous les considérerons ici comme deux familles distinctes.

Naja naja, le cobra indien, habite le sud de l'Asie et l'archipel indo-australien. Ses pupilles sont rondes et ses écailles totalement lisses. Il mesure au maximum 1,90 m. Le dessin du cou, lorsque celui-ci est dilaté, rappelle une paire de lunettes. Ce cobra vit dans la jungle, les zones semi-désertiques, rocheuses, et les rives des cours d'eau. Crépusculaire et nocturne, il passe le jour à l'abri de la végétation. Il se nourrit de micromammifères, de Sauriens, d'Amphibiens et d'Oiseaux, qu'il poursuit et capture souvent à proximité des habitations. Il n'est pas aussi agressif que certains autres *Naja,* mais il est facilement irritable. Un homme adulte mordu par un gros individu meurt en une à six heures. Les ennemis naturels de *N. naja* sont les Rapaces diurnes et les mangoustes.

N. haje, le cobra commun, est répandu dans toute l'Afrique et dans la péninsule Arabique. On le rencontre jusqu'à 2 000 m d'altitude. Diurne et nocturne, il chasse des Rongeurs, des Reptiles, des Oiseaux et des Insectes. Il est ovipare. Il est encore plus venimeux que le cobra indien.

N. melanoleuca habite toute l'Afrique, au sud du 15e degré de latitude nord. Il atteint 2,55 m. Il fréquente les broussailles, les arbres, la savane, ainsi que les rives des cours d'eau, où il nage très bien. Il se nourrit de Poissons, de Rongeurs, d'Amphibiens, d'Oiseaux et de serpents.

N. nigricollis habite les savanes africaines au sud du 25e degré de latitude nord. Il fréquente les mêmes milieux que *N. haje*, et se nourrit d'Amphibiens, de Rongeurs et d'Oiseaux nichant à terre. Irrité, il a la propriété de lancer aux yeux de son adversaire, d'une distance de 2 m, un mélange de salive et de venin, qui peut provoquer une cécité permanente. Il ne dépasse pas 2 m.

Haemachatus haemachatus est le plus agressif des Élapidés d'Afrique centro-méridionale. Il mesure jusqu'à 1,80 m, vit dans les broussailles, et est ovovivipare.

Boulengerina annulata, assez dangereux, fréquente les cours d'eau d'Afrique centrale. Il est très agressif dans l'élément liquide.

Ophiophagus hannah, le cobra royal, est le plus grand serpent venimeux. Il habite les bois, les forêts et la jungle de la Birmanie, la péninsule de Malacca, la Chine méridionale, les îles de la Sonde et les Philippines. Il mesure jusqu'à 5 m de long. Très agile, sauvage, fort irritable et aussi bien diurne que nocturne, le cobra royal attaque sans attendre les initiatives de ses ennemis. Son venin est extrêmement actif, et il est inoculé en quantité importante. Il se nourrit essentiellement de serpents et à l'occasion de Mammifères.

Le genre *Dendroaspis*, ou mamba, comprend quatre espèces vivant dans les broussailles et les forêts de la zone tropicale et du sud de l'Afrique. Très élancés, les mambas peuvent atteindre 3,50 m. Ils grimpent aux arbres, en descendent et se déplacent à terre avec une rapidité étonnante. Leurs dents venimeuses sont plus longues que celles des autres Élapidés; le venin serait plus actif que celui de tous autres Élapidés et Vipéridés africains. Ils se nourrissent d'Oiseaux et de Rongeurs.

Le continent américain compte trois genres d'Élapidés : les *Micrurus*, les *Micruroides* et les *Leptomicrurus*. Le premier compte quarante-sept espèces, le deuxième, d'Arizona, est représenté par une seule espèce et le troisième en comprend deux.

Les *Micrurus*, ou serpents-corail, longs au maximum de 1,50 m, ont une queue très courte, une tête très petite et non distincte du cou; leur tronc à peu près cylindrique est couvert de petites écailles brillantes. Ils vivent dans le sol ou sous les pierres, ou encore dans l'humus. Ils se nourrissent de petits serpents fouisseurs ou non. Leur venin est très actif, mais les dents s'enfoncent peu dans les chairs, car elles sont courtes. Ces serpents sont assez doux et se laissent prendre à la main sans réagir.

En Asie du Sud-Est et dans les îles de la Sonde vivent les espèces du genre *Bungarus*. Les écailles de la ligne vertébrale sont larges et hexagonales. En outre, le maxillaire est bref et porte en avant deux dents courtes profondément sillonnées à bords très rapprochés.

L'espèce la plus commune, *B. fasciatus*, qui habite la péninsule indienne, la Birmanie, la Chine méridionale et l'Indochine, ne dépasse pas 1,75 m. Cette espèce nocturne, peu rapide, chasse dans les hautes herbes des Amphibiens, des Ophidiens, des Sauriens et des micromammifères.

L'espèce la plus dangereuse est *B. candidus*, qui habite dans les mêmes régions et aussi à Formose et aux Célèbes. Ce serpent mesure jusqu'à 1,20 m et vit à proximité des points d'eau et aux abords des villages. Son venin est de quatre à cinq fois plus actif que celui du *Naja haje*.

B. flaviceps est le plus grand et mesure 2 m.

Les *Acanthophis*, ou vipères de la mort, ont une morphologie qui rappelle beaucoup celle des Vipéridés et sont vivipares. Ils sont confinés en Australie, en Nouvelle-Guinée et aux Moluques. Ils ont la tête large, bien distincte du cou, couverte de plaques régulières, rugueuses, striées, et des supra-oculaires en forme de corne. Le tronc est gros, massif, déprimé, et couvert d'écailles carénées. La queue est fine, fortement comprimée à l'extrémité, et se termine par une longue épine tournée vers le haut. Les *Acanthophis* vivent dans les lieux sablonneux. Ils sont nocturnes et se nourrissent de micromammifères. L'épine caudale a pour rôle de faciliter la progression sur le sol. Apathiques et peu agressifs, ces serpents réagissent toutefois de façon brusque quand ils sont touchés; leur venin est particulièrement toxique.

Pseudechis porphyriacus habite le Queensland, la Nouvelle-Galles du Sud et l'Australie méridionale. Ce serpent a la tête petite, peu distincte du tronc, et couverte d'écailles régulières et lisses. Les yeux sont minuscules, à pupille ronde. Le tronc est à peu près cylindrique et couvert d'écailles semblables à celles de la tête. La longueur maximale est de 2,10 m. Surtout aquatique, ce Reptile peut rester longtemps en plongée et passe la majeure partie du jour caché dans la végétation, sur les fonds vaseux ou sablonneux. Il passe l'hiver dans des cavités près des cours d'eau. Aussi bien diurne que nocturne, il chasse des Amphibiens, des Sauriens, des Oiseaux et des micromammifères. Il n'est pas agressif; il attaque seulement quand il est menacé.

Le genre *Denisonia* (dix-neuf espèces) habite en Tasmanie, en Australie et aux îles Salomon. La plus grande espèce est *D. superba*, d'Australie méridionale et de Tasmanie, qui peut atteindre 1,80 m. Ce serpent vit dans les mêmes milieux que *Pseudechis* et est peu agressif. Seule la morsure des plus grands individus est grave.

Les *Demansia* sont morphologiquement semblables aux Colubridés. On les trouve en Australie et en Nouvelle-Guinée. Les glandes à venin sont petites; le venin est très actif.

Notechis scutatus, le serpent-tigre, est le serpent le plus venimeux d'Australie. Il vit dans les zones arides à maigres buissons, où abondent les Sauriens et les petits Marsupiaux qui constituent sa nourriture habituelle. S'il est en danger il attaque subitement. Il est vivipare.

Walterinnesia aegyptia, qui peut atteindre 1,28 m, habite les zones arides et buissonneuses d'Égypte, de l'Arabie, d'Asie Mineure, de l'Irak et de l'Iran. Il se nourrit de Sauriens et de Rongeurs.

Les **Hydrophidés** *(Hydrophidae)*, ou serpents marins, ont la tête allongée, de même largeur que le cou. Le tronc comprimé, haut, plus ou moins caréné, augmente de volume vers la queue qui est étroite et en forme de rame. Les narines se trouvent à la partie supérieure du museau et peuvent se fermer complètement. Les yeux sont petits et à pupille ronde. Les écailles du dos et de la queue sont polygonales et juxtaposées, souvent carénées ou granuleuses. Les ventrales sont très petites et semblables aux dorsales. Le maxillaire antérieur porte deux dents canaliculées, assez petites, suivies immédiatement ou non d'une ou de plusieurs petites dents pleines. Le venin est très actif et contient essentiellement des neurotoxines. Ces serpents ne sont généralement pas dangereux lorsqu'ils nagent en mer, même s'ils sont dérangés; toutefois, ils réagissent toujours quand ils sont touchés ou perturbés, lorsqu'ils se trouvent dans des mares d'eau de mer ou sur des coraux. Ils se nourrissent à peu près uniquement de Poissons, à l'exception de quelques espèces qui vont à terre. Ils sont vivipares et les petits sont mis au monde en mer.

Sauf l'*Hydrophis ornatus inornatus*, que l'on trouve dans certains petits lacs des Philippines où remonte la marée, toutes les autres espèces sont confinées dans les zones chaudes du Pacifique, de l'océan Indien et de la mer Rouge. On divise les Hydrophidés en deux sous-familles : les Laticaudinés et les Hydrophinés.

Les *Laticaudinés (Laticaudinae)* quittent parfois les eaux salées pour se rendre sur la terre ferme; ils ont les ventrales et les sous-caudales réduites mais individualisées. Ils comprennent trois genres, *Aipysurus*, *Emydocephalus* et *Laticauda* avec une douzaine d'espèces. *Laticauda colubrina* habite les côtes de l'océan Indien, de l'ouest de l'océan Pacifique et des îles Salomon.

Les *Hydrophinés (Hydrophinae)* comptent treize genres; *Hydrophis* et *Pelamis* comptent treize espèces.

Pelamis platurus habite pratiquement toute l'aire de la famille.

Les *Hydrophis* sont les plus grands. *H. spiralis* atteint 2 m et habite l'océan Indien ainsi que les côtes de la péninsule malaise, des Ryu Kyu, des Philippines et de l'archipel indo-australien. Si l'on considère la taille réduite de ses glandes, son venin est plus actif que celui des cobras, et il est dangereux malgré ses petites dents.

▶ ***Page ci-contre,* un Naja haje *en position d'attaque.***

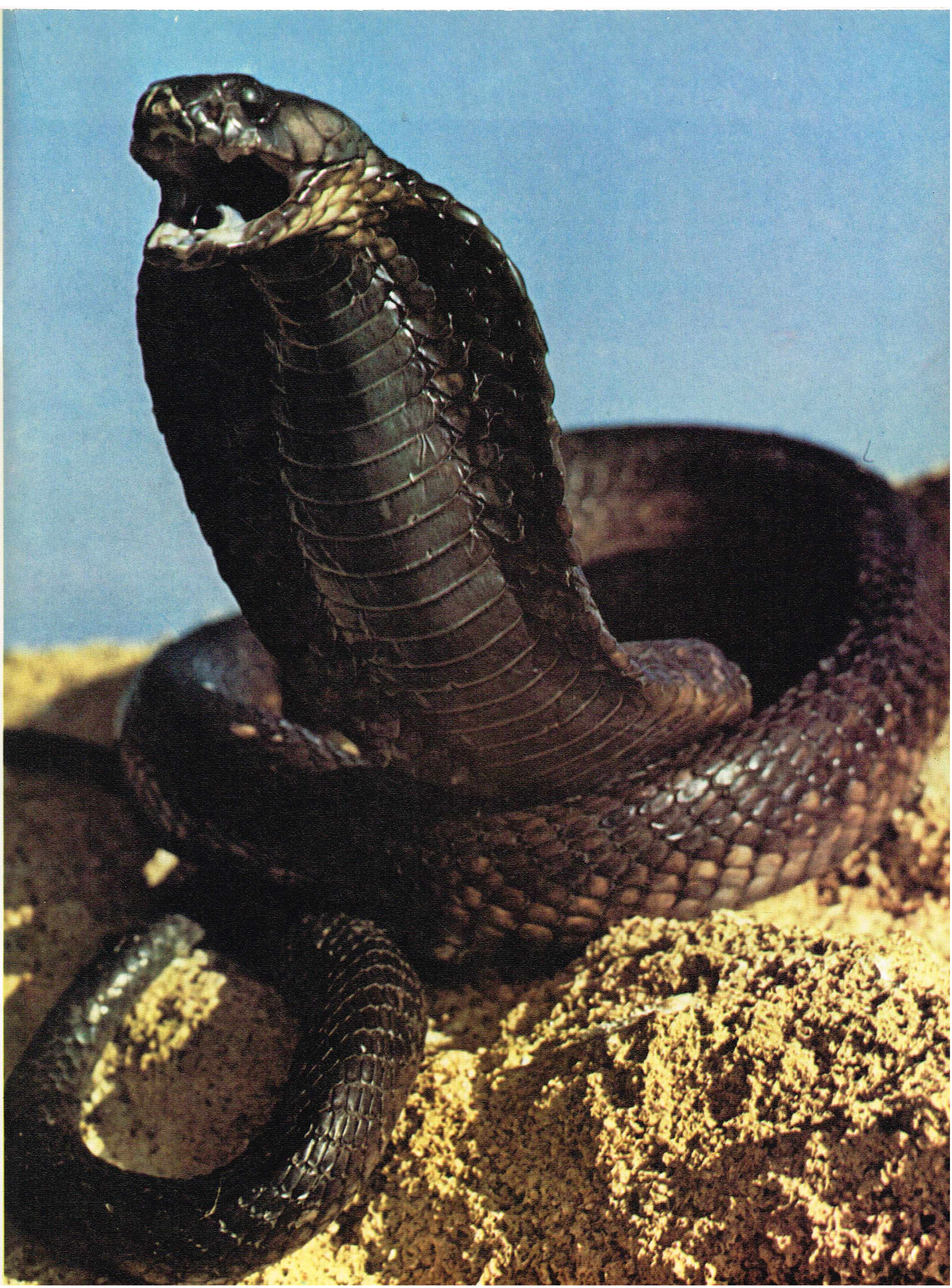

▶ *Un Hydrophidé, ou serpent marin, du genre* Laticauda *(Nouvelle-Calédonie).*

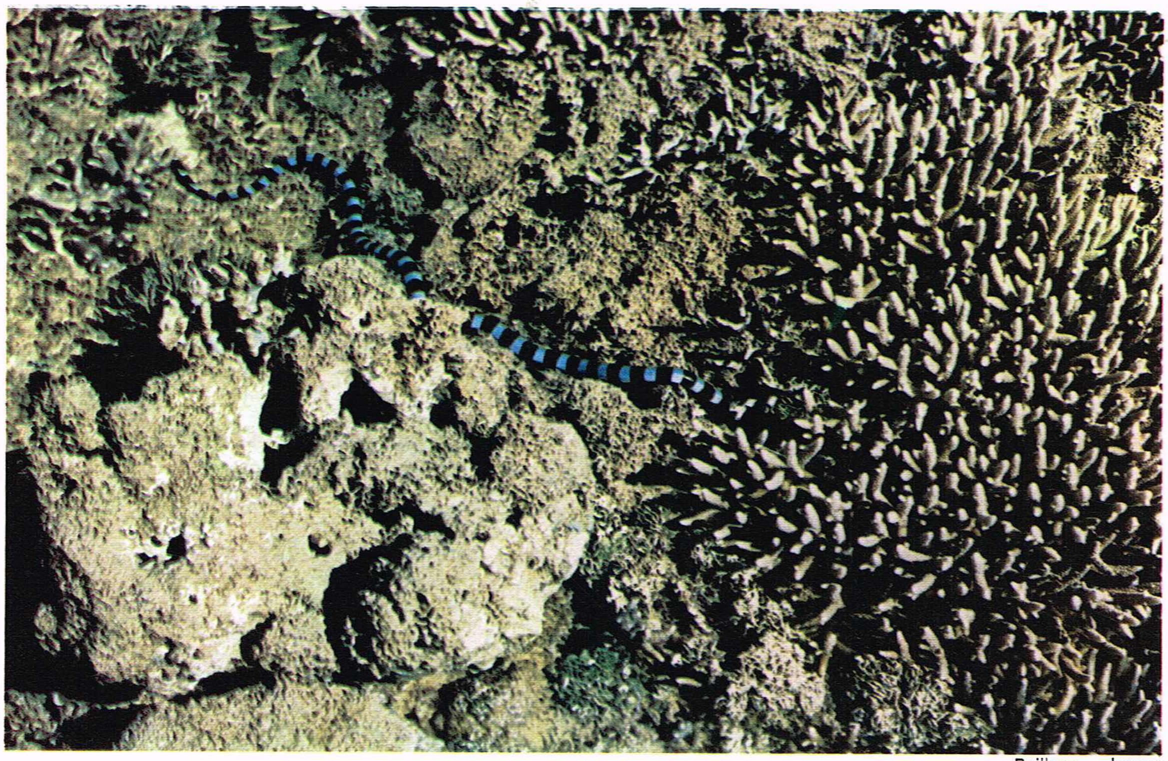

Bailleau - Jacana

▼ *En haut, tête de la vipère-rhinocéros* (Bitis nasicornis), *espèce des forêts d'Afrique centrale. En bas,* Bitis gabonica, *la redoutable vipère du Gabon; ses crochets sont très longs et son venin est mortel.*

G. Papini

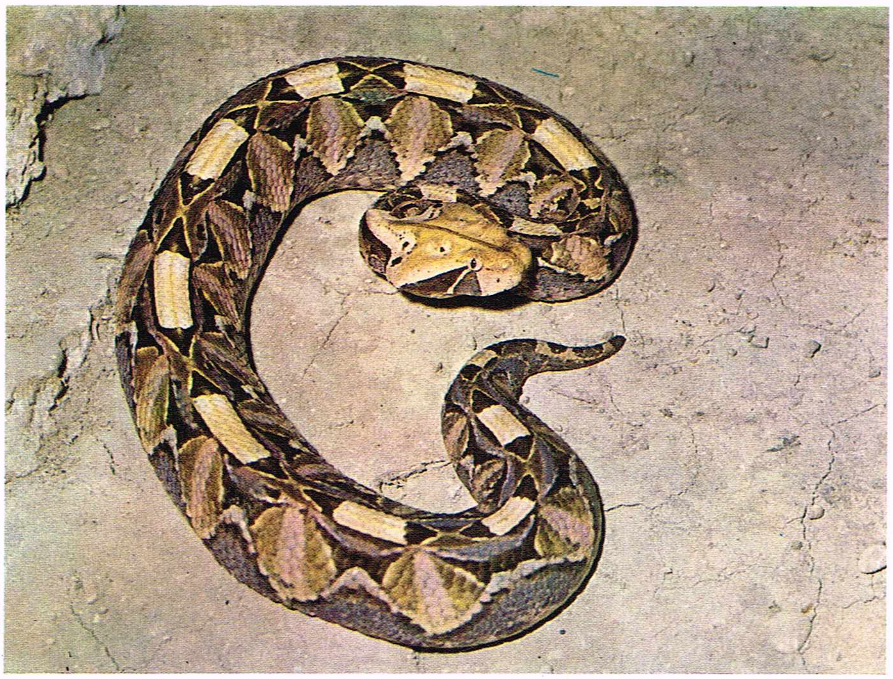

A. Margiocco

Les **Vipéridés** *(Viperidae)* ont un maxillaire très court, à dents canaliculées courbes situées dans des gaines protectrices; les antérieures, les plus longues, sont fonctionnelles, les autres, plus petites, sont des dents de remplacement. Elles sont mobiles; quand l'Animal est au repos, elles sont repliées contre la voûte buccale, la pointe vers l'arrière; elles sont reliées à deux glandes situées de chaque côté de la tête. Chez les plus grandes espèces, les glandes à venin ont la grosseur du pouce. Le venin a la viscosité de la glycérine; il est limpide, de couleur différente selon les espèces, habituellement jaune verdâtre, caractérisé par une grande proportion de substances hémolytiques; il est mortel.

Du point de vue morphologique, les Vipéridés ont la tête triangulaire, bien distincte du tronc, une queue courte et souvent préhensile. Les pupilles sont généralement verticales. La livrée, variable selon les espèces, est assez vive. Les Vipéridés sont ovovivipares ou vivipares.

La famille est répandue dans toute l'Afrique, dans une grande partie de l'Asie, en Europe et en Amérique, du cercle polaire arctique jusqu'aux régions les plus chaudes, des plaines jusqu'à 3 000 m d'altitude, et des déserts aux forêts. Terrestres ou arboricoles *(Atheris),* les Vipéridés sont crépusculaires et nocturnes; ils se nourrissent essentiellement de Rongeurs, de Sauriens, d'Amphibiens, d'Oiseaux et d'Insectes.

La famille se divise en deux sous-familles, les Vipérinés et les Crotalinés.

Les *Vipérinés (Viperinae)* sont caractérisés par un maxillaire très court et ne possèdent pas de fossette entre l'œil et la narine. Les hypapophyses sont présentes sur l'ensemble du tronc. Le sulcus spermatique est bifurqué. La sous-famille compte une dizaine de genres.

Le genre *Atheris,* d'Afrique centrale, comprend sept espèces caractérisées par un tronc légèrement comprimé latéralement, une tête recouverte d'écailles imbriquées et carénées, et une queue préhensile. Ces espèces habitent les forêts ou les zones à végétation abondante, jusqu'à 2 500 m d'altitude; crépusculaires et nocturnes, elles vivent dans les buissons des rives des cours d'eau, se nourrissant d'Anoures arboricoles, de Sauriens, d'Oiseaux et de petits Mammifères. L'espèce la plus caractéristique est *A. ceratophorus,* du Tanganyika, qui possède de trois à cinq écailles dressées en cornes dans la zone supra-oculaire. Citons encore *A. squamiger,* d'Afrique centrale et de l'île Fernando Po.

Le genre *Azemiops* compte une seule espèce, *A. feae,* longue de 60 cm, et qui possède de larges écailles symétriques sur la tête; les dorsales sont lisses.

Le genre *Bitis,* avec douze espèces, est répandu en Arabie et dans toute l'Afrique. Il est caractérisé par une tête très large, aplatie et bien distincte du cou, couverte de petites écailles imbriquées et fortement carénées, un museau obtus portant les narines à la partie supérieure, des yeux petits, à pupille verticale, un tronc trapu, massif, large (jusqu'à 20 cm chez *B. gabonica*) ; les dorsales sont fortement carénées. La queue est courte, et même très réduite par rapport à la taille. Les crochets peuvent mesurer 5 cm de longueur *(B. gabonica)*.

B. gabonica, la vipère du Gabon, habite les savanes africaines. Elle mesure près de 1,80 m. Elle est active durant la nuit et passe le jour à dormir sous les buissons. Ses mouvements sont habituellement très lents, mais son attaque est foudroyante. Le venin, très puissant, est riche en substances neurotoxiques; grâce aux longs crochets, il pénètre profondément et, quand il est directement injecté dans une veine ou une artère, il peut provoquer la

mort d'un homme en moins de cinq minutes. Les grands spécimens pèsent jusqu'à 8 kg.

Dans les savanes africaines, du Maroc à l'Arabie et jusqu'en Afrique du Sud, on peut rencontrer *Bitis arietans,* la vipère heurtante, espèce ovovivipare qui peut atteindre 1,70 m. Cette vipère est paresseuse et lente. Elle habite les broussailles maigres et les endroits semi-désertiques, jusqu'à 2 000 m d'altitude.

B. nasicornis, la vipère-rhinocéros, qui atteint un peu plus de 1 m, habite les sous-bois humides des forêts équatoriales d'Afrique.

Le genre *Causus,* avec quatre espèces africaines, a la tête plus ou moins distincte du cou et couverte d'écailles symétriques semblables à celles des Colubridés; le corps est couvert d'écailles lisses ou peu carénées, disposées plus ou moins obliquement. La queue est courte. Dans ce genre, la glande à venin, cylindrique, très longue, s'étend de la deuxième labiale supérieure au-delà de la trentième ventrale.

C. resimus, du Soudan, de Somalie, du Kenya, de l'Ouganda, du Tanganyika, du Mozambique et de la Rhodésie du Nord, atteint environ 50 cm. Son museau très proéminent est retroussé à l'extrémité. Ce serpent vit dans des zones humides à végétation abondante, à proximité de l'eau courante ou stagnante. Actif au crépuscule et durant la nuit, on ne le rencontre en plein jour qu'à la saison des pluies. Il se nourrit principalement d'Amphibiens. Il est lent, mais attaque très rapidement. Les œufs sont pondus dans l'humus.

C. rhombeatus, d'Afrique centrale, atteint près de 80 cm. Son museau plus ou moins obtus est peu proéminent. Son venin est moins actif que celui de la vipère aspic.

Le genre *Cerastes* compte deux espèces seulement. Il est caractérisé par une tête bien distincte du tronc et couverte de petites écailles tuberculées et carénées.

C. cerastes (Aspis cerastes), la vipère cornue, est largement répandue dans toute l'Afrique du Nord, en Arabie et en Asie Mineure. Elle peut mesurer 60 cm. Elle est ovovivipare. Son venin est très actif.

C. vipera habite le désert saharien, mais est répandue dans toute l'Afrique du Nord jusqu'au Sinaï et à la Palestine. Elle est longue de près de 50 cm.

Le genre *Echis* est caractérisé par une tête bien distincte du cou, mais bien moins large que chez les *Cerastes,* couverte de petites écailles imbriquées et fortement carénées.

E. carinatus habite l'Inde, le Pakistan, l'Afghanistan, la Russie orientale, l'Iran, l'Irak, la péninsule arabique et l'Afrique du Nord, et se rencontre au sud jusqu'au Kenya, à l'Ouganda, au Ghana et au Cameroun. Ce serpent, long au maximum de 83 cm, fréquente les lieux arides, caillouteux ou pierreux, à végétation maigre.

Le genre *Eristicophis* comprend une seule espèce, *E. macmahonii,* distribuée au Béloutchistan nord-occidental, dans le nord de l'Iran, en Afghanistan et au Pakistan. Elle atteint au maximum 70 cm, et rappelle assez *Cerastes vipera*. Elle est très rare et semble nocturne et confinée aux lieux sablonneux. Elle peut presque entièrement s'enfouir dans le sable, ne laissant sortir que le museau et les yeux.

Le genre *Vipera,* avec dix espèces, se caractérise ainsi : la tête est nettement distincte du cou et recouverte de petites écailles irrégulières, dont certaines, parfois dans la région supra-oculaire, sont plus grandes que celles qui les entourent et ressemblent aux écailles des Colubridés. Les yeux sont de taille moyenne et ont une pupille verticale; ils sont séparés des labiales par de petites écailles; les narines sont latérales, en contact avec la rostrale ou séparées de celle-ci par une naso-rostrale. Le corps est subcylindrique et couvert d'écailles carénées. Les sous-caudales sont disposées en deux rangs. La glande à venin est de petite taille.

V. ammodytes habite l'Europe du Sud-Est et l'Asie occidentale. Elle a au bout du museau une protubérance conique. La femelle mesure 95 cm de long alors que le mâle atteint seulement 90 cm. Cette espèce vit dans les forêts de Conifères, aux abords des clairières, le long des ruisseaux, dans les maquis ou les dolines karstiques et les pierrailles boisées; on la rencontre jusqu'à 2 500 m d'altitude (Balkans).

V. aspis, la vipère aspic, ou aspic, habite le sud-ouest de l'Europe. L'extrémité du museau est plus ou moins relevée

G. Papini

vers le haut. La frontale et les pariétales sont remplacées par de petites écailles. Il y a deux séries complètes de sous-oculaires. La longueur maximale est de 83 cm (femelles). On trouve cette espèce pratiquement dans tous les biotopes jusqu'à 3 000 m d'altitude (Alpes). Elle se nourrit de Rongeurs et d'Oiseaux au nid qu'elle chasse au crépuscule et la nuit. Les amours ont lieu habituellement en mars : quatre mois plus tard, la femelle met au monde ses petits. Cette vipère tombe en léthargie durant l'hiver, en colonies formées de vingt à trente individus. Très timide et peu agressive, elle ne se défend que si elle est touchée ou si l'on marche sur elle. Elle frappe sa proie de façon brusque et ramène immédiatement la tête dans la position de départ, prête à recommencer.

La péliade *(V. berus)* est largement répandue en Europe et en Asie centro-septentrionale. L'extrémité du museau est plate. La frontale et les pariétales sont nettement plus grandes que les écailles environnantes. Cette espèce, fort variable, est longue au maximum de 87 cm (femelles). Elle habite aussi bien les lieux secs que les endroits humides, en plaine et en montagne jusqu'à 3 000 m. Elle est surtout active le matin. Elle se nourrit de Rongeurs et d'Oiseaux au nid. Elle est plus agressive et plus irritable que les espèces précédentes, mais son venin est moins actif que le leur. Les mâles entrent en rut au printemps, et s'affrontent souvent, tête et partie antérieure du tronc dressées, en oscillant rythmiquement. Dans les régions où l'hiver n'est pas trop long ni trop rude, la reproduction a lieu tous les ans.

V. lebetina est l'une des plus grandes espèces du genre *Vipera*. Elle habite l'Afrique du Nord, les îles de la mer Égée et en Asie centrale. Les femelles peuvent atteindre 1,50 m. Cette espèce a des mœurs crépusculaires et nocturnes. Elle vit habituellement dans les lieux rocheux, à végétation clairsemée. Elle peut pénétrer dans les jardins, à la recherche des Rongeurs qui constituent sa nourriture habituelle.

V. russellii, la vipère de Russell, est asiatique. Elle peut atteindre 1,67 m. Elle a le museau trapu, avec d'amples narines. Le tronc est gros et la queue est courte. Le dos est fortement caréné. La vipère de Russell fréquente les prairies, les champs, les broussailles inextricables, et les rives des marais, jusqu'à 2 000 m d'altitude. Uniquement nocturne, elle se nourrit surtout de Rongeurs. Paresseuse et peu agressive, elle est facilement irritable quand elle est dérangée; elle émet alors de puissants sifflements, audibles à plusieurs mètres. Le venin est très actif et, s'il est introduit dans un gros vaisseau, provoque la mort en quelques secondes, sinon en quelques minutes.

G. Papini

▲ ***En haut,* Vipera ammodytes *vit dans les forêts de Conifères. En bas, détail de la tête montrant la protubérance qui orne le museau.***

Kramer

▲ **Vipera berus,** *la péliade, est largement répandue en Europe et en Asie centro-septentrionale; elle se nourrit de Rongeurs et d'Oiseaux au nid.*

V. ursinii habite l'Europe centro-orientale. Elle ressemble à *V. berus*. Elle peut atteindre 60 cm (femelles). Cette vipère vit dans les pâturages de montagne, dans les terrains rocheux, sur les genévriers, et dans l'herbe, de 1 000 à 2 400 m d'altitude. Matinale et grégaire, elle se nourrit principalement d'Orthoptères et exceptionnellement de petits Rongeurs. L'accouplement a probablement lieu en avril, après la fonte des neiges. Les petits naissent d'août à octobre.

Les espèces de la sous-famille des *Crotalinés (Crotalinae)* possèdent un organe thermo-récepteur en fossette, situé entre la narine et l'œil. Grâce à ce dernier, les crotales sont en mesure de percevoir la présence de corps à température plus élevée que la température ambiante et en conséquence la présence d'Animaux à sang chaud qui constituent leur nourriture.

Chez les espèces des genres *Crotalus* et *Sistrurus*, les dernières vertèbres de la queue sont soudées les unes aux autres, et cet ensemble soutient un organe très particulier, la « sonnette »; celle-ci est constituée par un ensemble d'anneaux cornés articulés les uns avec les autres, qui, se heurtant quand le serpent fait vibrer la queue, produisent un son grave et intense. De telles vibrations atteignent une fréquence de quarante-huit par seconde. Après chaque mue, le serpent acquiert un nouvel anneau, mais à dix ans il commence à les perdre. Les Crotalinés comptent six genres et cent vingt-deux espèces, distribuées sur le continent américain (quatre-vingt-une), en Asie (quarante) et en Europe (une seule espèce).

▼ **Vipera ursinii** *ressemble à V. berus; cette vipère vit de 1 000 à 2 400 m d'altitude, et se nourrit principalement d'Orthoptères.*

G. Papini

Le genre *Agkistrodon*, avec douze espèces, est le plus répandu. Ses représentants se trouvent dans toute l'aire de distribution. Il est caractérisé par l'absence de sonnette et a la tête couverte de grandes écailles, régulières comme chez les Colubridés.

A. piscivorus, le mocassin d'eau, habite la Virginie, la Floride et les États du golfe du Mexique, jusqu'à l'Arkansas et l'Illinois. Long au maximum de 1,50 m, il a le museau obtusément pointu et légèrement recourbé vers le haut. Ce serpent fréquente les lieux marécageux couverts d'une végétation abondante. Bon nageur, il se nourrit d'Amphibiens, de Poissons, de petites tortues, d'Oiseaux, de Sauriens et de micromammifères. Cette espèce est active aussi bien le jour que la nuit, et sort de l'eau seulement à la fin de l'automne, pour hiberner dans des trous ou parmi les rochers. Très vif et irritable, le mocassin d'eau a un venin très actif, qui provoque de graves nécroses.

A. contortrix, la tête cuivrée, habite l'est des États-Unis, du golfe du Mexique à l'Illinois et à l'État de New York, à l'ouest jusqu'au Texas, au Kansas et au Colorado. On la trouve surtout dans les lieux humides, à peu de distance de l'eau.

A. halys, largement représenté dans toute l'Asie, habite les steppes. Crépusculaire et nocturne, il se nourrit de petits Rongeurs, de Sauriens et d'Oiseaux. Il atteint 80 cm.

A. rhodostoma habite au Siam, au Cambodge, au Laos, au Vietnam, dans les îles malaises, à Sumatra et à Java.

Le genre *Bothrops*, avec quarante-huit espèces, est distribué en Amérique centrale et méridionale. *B. atrox*, le fer-de-lance, ou « jararaca », habite les régions tropicales d'Amérique du Sud, et l'Amérique centrale. Il ne possède pas de sonnette. La tête est couverte de petites écailles semblables à celles du tronc. Le fer-de-lance vit dans les broussailles humides, les zones à végétation herbacée abondante, et les plantations de canne à sucre, jusqu'à 1 000 m d'altitude. Il se nourrit uniquement de Rongeurs. Il est très irritable. Étant donné la quantité de venin qu'il inocule, le fer-de-lance est le plus dangereux des serpents venimeux du continent américain. Les toxines sécrétées par les *Bothrops*, et par cette espèce en particulier, provoquent des plaies nécrosées. En l'absence de sérum, la mort survient en quelques minutes. La femelle met bas jusqu'à soixante-dix petits par portée; une telle prolificité explique que le fer-de-lance soit l'un des Ophidiens les plus communs d'Amérique du Sud tropicale. Actuellement, il semble avoir disparu de la Martinique et de Sainte-Lucie, les gouvernements offrant des primes pour l'exterminer.

B. nummifer habite toute l'Amérique centrale, du Mexique au Panama. Il est long au maximum de 60 cm. Son venin est essentiellement hémolytique mais peu toxique.

Le genre *Crotalus*, répandu du Canada méridional au Brésil et au nord de l'Argentine, est surtout abondant dans la région centro-méridionale des États-Unis et au Mexique. Il comprend vingt-six espèces. Le caractère particulier du genre est la possession non seulement d'une sonnette, mais aussi de petites écailles sur le dessus de la tête. En outre, cette dernière est très élargie postérieurement; le tronc est massif et déprimé, la queue est très courte; la pupille est verticale; enfin, toutes les écailles de la tête et du dos sont carénées.

C. adamanteus, le diamantin, long au maximum de 2,80 m, est la plus grande espèce du genre. Il est confiné dans les zones côtières, de Caroline du Nord à la Louisiane. Ce crotale vit dans les lieux à végétation basse, et va même sur les plages, jusqu'à la limite de la haute marée. Il est essentiellement crépusculaire et nocturne. Le jour, il reste caché et toujours en alerte, à l'ombre d'un buisson ou dans les herbes. Il se nourrit de gros Rongeurs, de lapins sauvages et d'Oiseaux qui nichent au sol. Très irritable, il peut dresser sa tête à 1,30 m du sol et il attaque

C. de Klemm - Jacana

▲ **Crotalus horridus,** ***du nord-est des États-Unis, vit dans les bois et les zones rocheuses; on observera la « sonnette » à l'extrémité de la queue.***

de façon brusque tout ce qui passe à sa portée. Le bruit de la sonnette, qui précède toujours l'attaque, permet souvent de se sauver. Le venin est très actif.

C. atrox, répandu de l'Arkansas et de l'Oklahoma jusqu'au centre du Mexique, et, à l'ouest, jusqu'en Californie, vit dans les déserts et les prairies.

C. horridus, du nord-est des États-Unis, long de 1,80 m au maximum, vit dans les bois des zones rocheuses. Durant le jour, il reste caché sous les rochers, souvent à proximité de l'eau, et il chasse la nuit des campagnols, les lapins, des écureuils et des Oiseaux. Peu irritable, il attaque seulement si on le touche, et le venin est moins actif que celui des espèces précédentes. En hiver, il hiberne souvent avec les *Agkistrodon.*

C. ruber, long au maximum de 1,80 m, habite le sud-ouest de la Californie, en Basse-Californie et au Mexique, dans les zones désertiques.

C. viridis est distribué dans l'ouest de l'Amérique du Nord et au Mexique, aussi bien dans les grandes prairies centrales des États-Unis que dans les zones rocheuses de montagne et même jusqu'aux zones semi-désertiques de l'Ouest. Diurne pendant la saison froide, crépusculaire et nocturne en été, il s'abrite de la chaleur sous les rochers, dans les buissons inextricables, dans les fentes des roches, et dans des trous de Rongeurs, particulièrement dans les tanières des chiens de prairie, avec qui il semble vivre en bonne intelligence. Il se nourrit uniquement de petits Rongeurs.

C. durissus, le cascabel, habite du Mexique méridional à l'ouest des Andes. Long au maximum de 1,80 m, il se distingue assez nettement de toute autre espèce. La zone vertébrale est très élevée, de sorte que la section du tronc a la forme d'un triangle isocèle à base large. La tête est relativement petite. La queue est plus longue que chez les autres crotales, et les écailles de la zone vertébrale sont nettement tuberculées. Beaucoup plus irritable que les autres, ce crotale mord sans aucune raison. C'est l'espèce la plus venimeuse du genre. Le venin a une action fortement neurotoxique.

C. cerastes vit dans les milieux désertiques particulièrement sablonneux du sud de la Californie au Nevada méridional, dans le sud-est de l'Utah et le sud-ouest de l'Arizona. Long au maximum de 75 cm, il est caractérisé par une petite corne triangulaire sur les écailles supra-orbitaires, qui rappelle beaucoup celle de *Cerastes cerastes.* Comme les *Cerastes,* ce crotale se cache durant le jour dans le sable et se déplace latéralement en laissant sur le sable des traces obliques et parallèles. Ce mode de locomotion particulier lui permet de monter et descendre facilement les dunes de sable. L'hibernation consiste pour lui à s'enfouir dans le sable seulement pendant les jours les plus froids.

Le genre *Lachesis* compte une seule espèce, *L. mutus,* le « maître de la brousse », ou « surucucu ». Long au maximum de 3,60 m, c'est le plus grand Crotaliné. Il a la tête en forme de cœur. Les écailles céphaliques diffèrent peu des dorsales par la taille. La queue est courte et se termine en une pointe assez fine; elle est dépourvue de sonnette. Les dents dépassent 4 cm. L'espèce habite le Nicaragua, le Costa Rica, le Panama, l'île de Trinidad et le nord de l'Amérique du Sud jusqu'au Brésil, à la Bolivie et au Pérou. Ce serpent vit dans les forêts, souvent à proximité des cours d'eau, et reste toujours sur le sol, où il est mimétique avec la végétation du sous-bois. Diurne aussi bien que nocturne, il se nourrit presque uniquement de Rongeurs. Très irritable, il réagit vivement à la moindre menace. Les dents pénètrent toujours profondément. Ceci, joint à la quantité élevée de venin inoculée, fait que sa morsure est presque toujours mortelle. Il est ovipare et non vivipare comme les autres Crotalidés.

Le genre *Sistrurus,* avec trois espèces, est très proche des *Crotalus;* il en diffère par de grandes écailles céphaliques.

S. catenatus, le massasauga, est répandu dans la région centro-orientale des États-Unis, et va à l'ouest jusqu'à l'Arizona et au nord du Mexique. Il est long de 80 cm. Il vit dans les lieux très humides et fréquente les rives des cours d'eau. Il est essentiellement nocturne et se nourrit de micromammifères et d'Amphibiens.

Le genre *Trimeresurus,* avec trente-deux espèces, est largement représenté dans toute l'Asie, y compris les îles, et diffère des *Agkistrodon* (le genre systématiquement le plus proche) par une tête couverte de petites écailles carénées semblables à celles du tronc. Longs au maximum de 1,80 m *(T. flavoviridis),* les *Trimeresurus* ont une forme beaucoup moins trapue que les crotales, et la livrée est assez vive. *T. gramineus* est une espèce arboricole habitant l'Inde, le Népal, les îles Andaman, et les îles Nicobar. Qu'ils soient arboricoles ou aquatiques comme *T. flavomaculatus* des Philippines, les *Trimeresurus* vont à terre seulement pendant la nuit, et chassent des Amphibiens arboricoles ou terrestres, des micromammifères et des Insectes. Ils sont très peu irritables, se laissant généralement prendre à la main sans réagir. Leur venin, toujours très actif envers les proies, n'est guère dangereux pour l'homme.

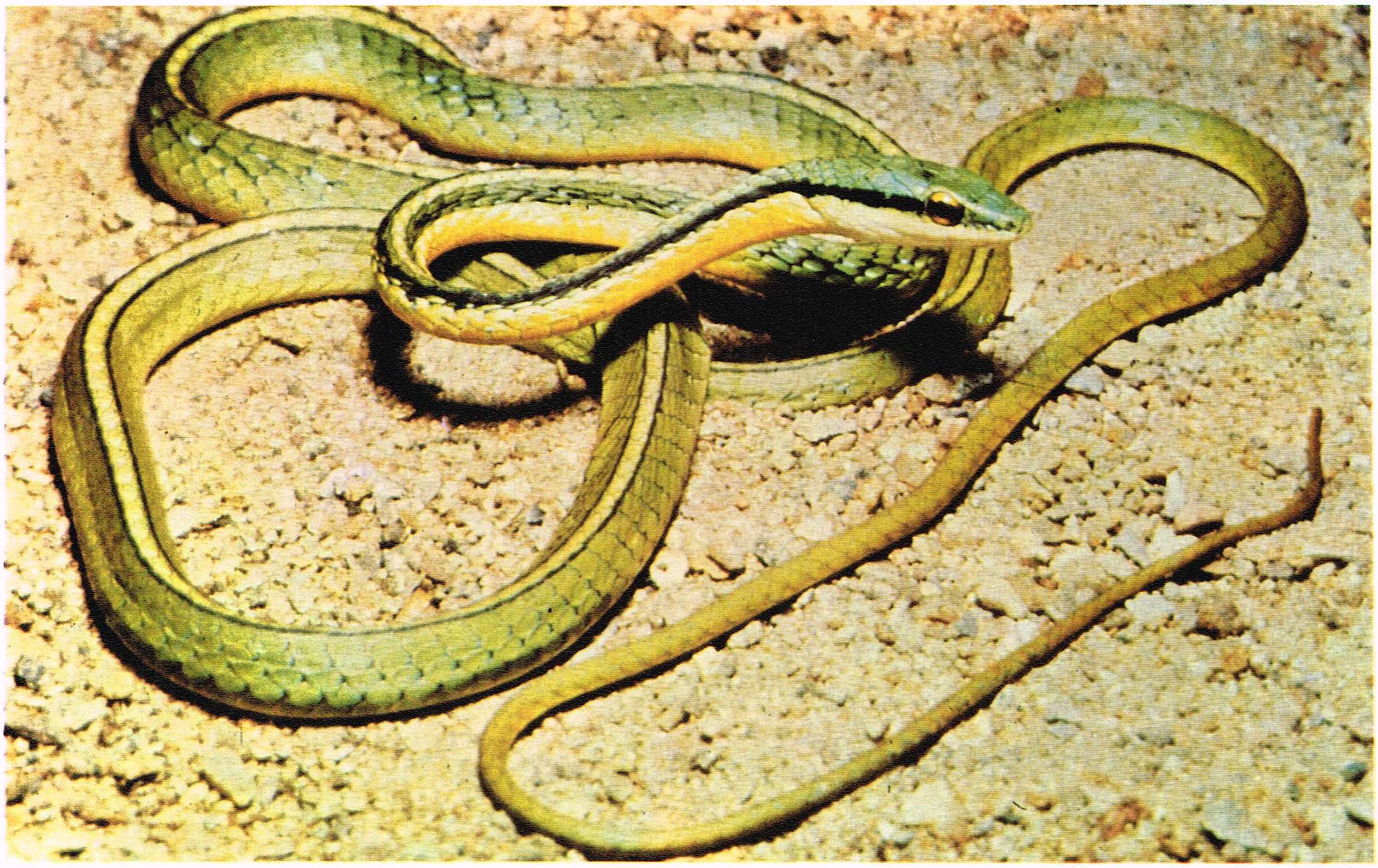

J. H. Tashjian

▲ **Leptophis diplotrophs** *est un serpent gracile de la famille des Colubridés.*

BIBLIOGRAPHIE

ANDERSON S.C., *Amphibians and Reptiles from Iran, Proceed. Cal. Acad. Sci.*, vol. 31 (16), p. 417-498, San Francisco, 1963. - ANGEL F., *Faune de France : Reptiles et Amphibiens,* Lechevalier éd., Paris, 1946. - BOULENGER G.A., *Catalogue of the Lizards in the British Museum,* Londres, 1885-1887, éd. 1964. - BOULENGER G.A., *Catalogue of the Batrachia Gradienta s. Caudata and Batrachia Apoda in the Collection of the British Museum,* Londres, 1889, éd. 1965. - BOULENGER G.A., *Catalogue of the Chelonians, Rhynchocephalians and Crocodiles in the British Museum,* Londres 1889, éd. 1961. - BOULENGER G.A., *Catalogue of the Snakes in the British Museum,* Londres, 1893-1896, éd. 1961. - BOURRET R., *les Serpents de l'Indochine,* éd. Basuyau & Cie, Toulouse, 1936. - CAPOCACCIA L., *Anfibi e Rettili,* Mondadori, Vérone, 1968. - CONANT R., *A Field Guide to Reptiles and Amphibians of Eastern North America,* Houghton Miffin Co., Boston, 1958. - DOTTRENS E., *Batraciens et Reptiles d'Europe,* Delachaux et Niestlé éd., Neuchâtel, 1963. - FITZSIMONS V.F.M., *Snakes of Southern Africa,* Purnell & S., Johannesburg, 1962. - FUHN I.E. et VANCEA S., *Fauna republicii populare Romine : Reptilia, Amphibia, Acad. Républ. Popul.*, Bucarest, 1960-1961. - GRASSÉ P.-P., *Traité de zoologie, XIV, Reptiles,* 3 fasc., Masson édit., Paris, 1970. - HOGE A.R. et LANCINI V., *Sinopsis de las Serpientes venenosas de Venezuela, Publ. Occas. Mus. Cie Nat. Zool.*, Caracas, 1962. - INGER R.F., *Systematics and Zoogeography of Philippine Amphibia,* Fieldiana, Zoology, 33, 1954. - LANZA B., *Anfibi e Rettili,* in *Piccola Fauna d'Italia,* Martello, Milan, 1968. - LIU C.C., *Amphibians of Western China, Nat. Hist. Mus.*, Chicago, 1950. - MERTENS R. et WERMUTH H., *Die Amphibien und Reptilien Europas,* Waldemar Kramer, Francfort-sur-le-Main, 1960. - MINTON S.A., *A Contribution to the Herpetology of West Pakistan, Bull. Am. du Mus. Nat. Hist.*, 134 (2), p. 31-178, New York, 1966. - NIKOLSKYI A.M., *Faune de la Russie et des pays voisins, Reptiles, Ophidia,* Saint-Pétersbourg, 1916. - NIKOLSKYI A.M., *Faune de la Russie et des pays voisins, Amphibiens, Salienta et Caudata,* Saint-Pétersbourg, 1918. - NOBLE G.K., *The Biology of the Amphibia,* Dover Pub., New York, 1954. - OKADA Y., *Fauna Japonica, Anura, Amphibia,* Tokyo Electr. Engin. College Press, Tokyo, 1967. - PASTEUR G. et BONS J., *les Batraciens du Maroc, Trav. Inst. Chérifien,* Sér. Zool., 17, Rabat, 1959. - PASTEUR G. et BONS J., *Catalogue des Reptiles actuels du Maroc. Révision de formes d'Afrique, d'Europe et d'Asie, Trav. Inst. Chérifien,* Sér. Zool., 21, Rabat, 1960. - PITMAN C.R.S., *A Guide to the Snakes of Uganda,* Kampala, 1938. - POPE C.H., *The Reptiles of China, Am. Mus. Nat. Hist.*, 10, p. 1-573, New York, 1935. - POYNTON J.C., *The Amphibia of Southern Africa,* Pietermaritzburg, 1964. - ROOIJ (de) N., *The Reptiles of the Indo-Australian Archipelago,* Brill, Leyde, 1917. - RUSSEL F.E. et SCHARFFENBERG R.S., *Bibliography of Snakes Venoms and Venomous Snakes,* Bibl. Assoc. Inc., West Covina, Californie, 1964. - SCHMIDT K.P., *A Check List of North American Amphibians and Reptiles,* Univ. Chicago Press, 1953. - SMITH M., *The Fauna of British India, Ceylon and Burma, Including the Whole of the Indo-Chinese Sub-region,* Londres, 1943. - SMITH M., *The British Amphibians and Reptiles,* Collins, Londres, 1964. - STEBBINS R.C., *Amphibians and Reptiles of Western North America,* McGraw-Hill, Londres, 1954. - TAYLOR E.H., *Amphibia Turtles, Lizards and Snakes of the Philippine Islands,* Londres, 1921-1925. - TWEEDIE M.F., *The Snakes of Malaya,* Singapour, 1954. - VILLIERS A., *Tortues et Crocodiles de l'Afrique Noire française,* I.F.A.N., Dakar, 1963. - WAGENER V.A., *The Frogs of South Africa,* Rurnell & Co., Johannesbourg, 1965. - WERMUTH H., *Systematik der rarenten Krokodile,* Mitt. Zool. Mus., Berlin, 29 (2), 1953. - WITTE (DE) G.F., *Exploration du Parc national Albert : Batraciens et Reptiles, Inst. Parcs nat. Congo belge,* 33, Bruxelles, 1941. - WITTE (DE) G.F., *Faune de Belgique : Amphibiens et Reptiles, Mus. Roy. Hist. Nat.*, Bruxelles, 1948. - WORRELL E., *Reptiles of Australia,* Angus & Robertson, Londres, 1963.

ENCYCLOPÉDIE DES SCIENCES

ZOOLOGIE

III

GRANGE BATELIÈRE

GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

ZOOLOGIE

III

GRANGE BATELIÈRE, PARIS - ÉDITIONS KISTER, GENÈVE - ÉRASME, BRUXELLES-ANVERS

Publiée sous le haut patronage de :
Messieurs les professeurs :
Jean DORST, membre de l'Institut,
Charles FEHRENBACH, membre de l'Institut,
Roger HEIM, membre de l'Institut,
Monsieur l'amiral André JUBELIN,
Messieurs les professeurs :
Pierre LÉPINE, membre de l'Institut,
Louis LEPRINCE-RINGUET, de l'Académie française,
Jean-François LEROY, professeur au Muséum national d'histoire naturelle,
Henri NORMANT, membre de l'Institut,
Monsieur Jacques PICCARD, docteur ès sciences h.c.

Réalisation	IDÉES ET ÉDITIONS 16, avenue de Friedland, 75008 Paris
Comité de direction	Cristobal de ACEVEDO, Simone DEVAUX, Uberto TOSCO.
Rédaction	Patrick PHLIPONEAU, Françoise MENU, Marie-Noëlle RENARD, Vanina DORÉ.
Recherche de l'illustration	Mathilde RIEUSSEC.
Mise en pages	Tito TOPIN et Serge BROCHE.
Illustrations techniques	Richard COLIN.
Coordinateur des dessins	Mario LOGLI.
Fabrication	Sylvie MARCHAND, Martine TOTIN.
Directeur de la publication	J.-P. BRÉVOST.

Ont collaboré à ce volume :

M. CUISIN, pour les Oiseaux.
P. PFEFFER, pour les généralités sur les Mammifères.
J.-L. BERTHIER, pour la systématique des Mammifères.

Marka

Bruce Coleman - R. Gillom

▲ *Les Oiseaux font partie des Animaux les plus populaires : on les trouve partout, des terres polaires jusqu'aux déserts, aux sommets des montagnes les plus hautes comme au-dessus des mers. Ici, un groupe de pélicans.*

OISEAUX

L'intérêt que les Oiseaux ont suscité, de tout temps, s'explique par leur faculté de voler, la beauté de leur plumage, les qualités musicales de leur chant, leurs habitudes généralement diurnes et la familiarité dont certains font preuve. Si l'on ajoute qu'on les trouve partout, des terres polaires jusqu'aux déserts, au sommet des montagnes les plus élevées comme au-dessus des mers, on comprend qu'ils fassent partie des Animaux les plus populaires.

Sur quarante mille espèces de Vertébrés il y a environ huit mille cinq cent quatre-vingts espèces vivantes d'Oiseaux. En faisant abstraction de diverses exceptions, les Oiseaux peuvent être définis comme des Vertébrés dont la peau est couverte de plumes et dont les membres antérieurs sont transformés en ailes qui leur permettent de voler. Leur température est constante et ils pondent des œufs entourés d'une coquille calcaire dure. En fait, un seul caractère, la présence de plumes, suffit à les distinguer de tous les autres Animaux.

Organisation générale

Pour décrire les Oiseaux, les spécialistes emploient des termes précis et prennent certaines mensurations dont les plus courantes sont la longueur de l'aile pliée, celle du tarse (partie de la patte), et le poids.

Peau, plumes et plumage

La *peau* des Oiseaux est très mince et sèche. On n'y trouve aucune glande sudoripare ou sébacée, seulement la glande « uropygienne » située à la base de la queue et qui produit une sécrétion grasse utilisée, au moins par certaines espèces, pour lubrifier le plumage. Les espaces de peau nue sont rares. Il y en a cependant à la base du bec (chez les pigeons, les Rapaces diurnes, etc., où la peau, qui constitue la « cire », est colorée en jaune, en gris ou autrement), sur la tête (chez les vautours, les dindons, les pintades, etc.) et sur les pattes (tarse et doigts), qui sont revêtues d'écailles dont la disposition n'est pas désordonnée.

Le *plumage* est l'ensemble des plumes ; celles-ci sont des productions de la peau (au même titre que les poils des Mammifères ou les écailles des Reptiles) prenant leur origine dans un enfoncement de l'épiderme appelé papille. Une fois qu'elles ont atteint leur taille définitive, ce sont des structures mortes car elles ne sont plus irriguées par le sang. Les plumes ne sont pas réparties uniformément à la surface du corps (sauf chez les manchots, l'autruche, l'émeu, les nandous, les casoars et les aptéryx), mais occupent des zones, les *ptérylies*, séparées par des espaces nus, les *aptéries*, où elles font défaut.

On distingue plusieurs sortes de plumes.

Les *pennes* sont les grandes plumes des ailes *(rémiges)*, de la queue *(rectrices)*, et les plumes plus petites qui recouvrent le corps et la base des ailes *(tectrices)*. Chacune de ces plumes comprend un axe central dont la base creuse (ou *tuyau*) est enfoncée dans la peau et dont la plus grande partie, pleine (le *rachis*), est garnie de chaque côté de petits éléments appelés *barbes*. Des *barbules* relient les barbes entre elles et certaines sont munies de crochets. L'ensemble des barbes d'un même côté du rachis forme un *vexille*. Les deux vexilles n'ont pas toujours la même forme : le vexille externe des rémiges (seul visible quand l'aile est repliée) est beaucoup plus étroit que le vexille interne. On distingue les rémiges primaires, fixées sur les os métacarpiens et les doigts de la main ; ce sont les plus longues, celles qui donnent en partie sa forme à l'aile. Les Oiseaux actuels en ont neuf au minimum et onze au maximum. Les rémiges secondaires, plus courtes, sont insérées sur le cubitus (avant-bras). Leur nombre varie entre six (colibris) et trente-huit (albatros). Il y a des rémiges tertiaires (attachées à l'humérus) chez les albatros, les puffins et quelques canards. Les tectrices qui recouvrent les rémiges des deux côtés de l'aile sont appelées couvertures (grandes, moyennes et petites). Un petit groupe de plumes, appelées rémiges polliciales ou bâtardes, sont fixées sur le premier doigt de la main et facilitent le vol à très faible vitesse. La base des rectrices est recouverte de plumes plus courtes appelées, selon leur situation, sus-caudales et sous-caudales.

Les *plumes de duvet*, de faibles dimensions, ont un tuyau et des barbes mais sont dépourvues de rachis et

Classe des Oiseaux

□ *Sous-classe des Archæornithes ou Saururae*

- ○ *Ordre des Archæoptérygiformes**

□ *Sous-classe des Néornithes ou Ornithurae*

- ○ *Ordre des Hespérornithiformes**
- ○ *Ordre des Ichthyornithiformes**
- ○ *Ordre des Sphénisciformes*
- ○ *Ordre des Struthioniformes*
- ○ *Ordre des Rhéiformes*
- ○ *Ordre des Casuariiformes*
- ○ *Ordre des Æpyornithiformes**
- ○ *Ordre des Dinornithiformes**
- ○ *Ordre des Aptérygiformes*
- ○ *Ordre des Tinamiformes*
- ○ *Ordre des Gaviiformes*
- ○ *Ordre des Podicipédiformes*
- ○ *Ordre des Procellariiformes*
- ○ *Ordre des Pélécaniformes*
- ○ *Ordre des Ciconiiformes*
- ○ *Ordre des Phœnicoptériformes*
- ○ *Ordre des Ansériformes*
- ○ *Ordre des Falconiformes*
- ○ *Ordre des Galliformes*
- ○ *Ordre des Gruiformes ou Ralliformes*
- ○ *Ordre des Charadriiformes*
- ○ *Ordre des Lariformes*
- ○ *Ordre des Columbiformes*
- ○ *Ordre des Psittaciformes*
- ○ *Ordre des Musophagiformes*
- ○ *Ordre des Cuculiformes*
- ○ *Ordre des Strigiformes*
- ○ *Ordre des Caprimulgiformes*
- ○ *Ordre des Apodiformes*
- ○ *Ordre des Coliiformes*
- ○ *Ordre des Trogoniformes*
- ○ *Ordre des Coraciiformes ou Coraciadiformes*
- ○ *Ordre des Piciformes*
- ○ *Ordre des Passériformes*

* *Groupes fossiles*

de barbules. Il en résulte qu'elles n'ont pas de forme définie. On les trouve sous les tectrices. Elles sont très abondantes chez les canards et les oies. Les hérons et d'autres Oiseaux (les outardes, certains Passereaux) possèdent, çà et là, des touffes de duvet dont l'extrémité se désagrège constamment en pellicules grasses, utilisées pour faire la toilette.

Les *semi-plumes* ont un axe central avec des barbes disposées régulièrement, mais leurs barbules sont dépourvues de crochets.

Les *filoplumes* ont un tuyau, un rachis et seulement quelques barbes à l'extrémité de celui-ci. Elles sont toujours associées à des pennes, à des semi-plumes ou à des plumes de duvet.

Les *vibrisses* ont un axe central raide, parfois muni de quelques barbes. On les trouve à la base du bec de nombreux Oiseaux (certains Rapaces, les gobe-mouches, etc.) ou sur les paupières (autruche), où elles forment des cils.

Plumage du jeune Oiseau. A l'éclosion, les jeunes Oiseaux peuvent être complètement nus (pic vert), présenter quelques touffes de duvet (rouge-queue à front blanc) ou, encore, être entièrement couverts de duvet (canetons). Le plumage d'adulte sera acquis progressivement : à la suite d'une première mue, les jeunes Passereaux revêtent un plumage d'immature qui est lui-même mué et remplacé par la livrée d'adulte. Chez les grandes espèces (goélands, aigles, etc.) le plumage d'adulte est acquis au bout de quatre ans au minimum, et, en attendant, l'Oiseau porte une livrée intermédiaire, renouvelée plusieurs fois et dont la coloration change.

Plumage de l'adulte. L'adulte renouvelle périodiquement son plumage : c'est le phénomène de la mue, qui a lieu au moins une fois chaque année, mais dont l'ampleur et le déroulement varient considérablement selon les groupes et les espèces. Généralement, la mue se produit en dehors des périodes de reproduction et de migration, mais cette règle souffre de nombreuses exceptions. La mue dure deux mois chez beaucoup de petits Passereaux, plus d'un an chez les grands Rapaces. Sauf exceptions (manchots), elle est progressive et l'Oiseau conserve ses capacités voilières. Cependant, les oies, les canards, les cygnes, les râles, les grues, les flamants, les plongeons et les grèbes ainsi que les anhingas perdent toutes leurs rémiges simultanément et sont incapables de voler pendant plusieurs semaines.

Fonctions du plumage. Le plumage donne au corps la forme aérodynamique indispensable à un déplacement rapide dans l'espace. Il permet le vol. Il empêche l'organisme de se refroidir ou de s'échauffer excessivement et joue donc un rôle isothermique important. Par sa coloration ou son aspect, il facilite la distinction des espèces et des sujets d'âges différents, ainsi que l'identification des sexes (ceci n'est pas valable pour toutes les espèces; par exemple, chez le grand corbeau, mâle et femelle ont la même coloration). Il sert donc de signal social. Enfin, chez certaines espèces des régions enneigées ou désertiques, il constitue un camouflage et permet à l'Oiseau de se confondre avec la couleur du milieu qu'il fréquente (lagopède alpin, alouettes).

Coloration du plumage. Les couleurs des plumes sont dues, principalement, à des grains de pigment déposés dans les barbes (noir, brun, rouge, jaune et violet) ou à des phénomènes physiques de diffusion et de réfraction de la lumière. Le bleu et le vert sont, sauf exceptions (touracos), d'origine purement physique. Il en est de même des couleurs irisées (celles des petites plumes du cou chez le pigeon ramier ou celles des rectrices de la pie par exemple) dont la tonalité varie selon la direction des rayons lumineux.

Nombre et dimensions des plumes. Les Oiseaux de petite taille sont ceux qui ont le moins de plumes. Certains colibris en possèdent seulement de 900 à 1 000. Un moineau domestique en présente, en moyenne, 1 300, un goéland bourgmestre environ 6 000. Les canards sont parmi les plus richement vêtus (jusqu'à 11 903 plumes chez le canard colvert) et, jusqu'à présent, le plus grand nombre de plumes observé l'a été chez un cygne de Bewick (25 216). Ce nombre varie légèrement selon les saisons chez les Oiseaux sédentaires des régions tempérées : la différence est de 1 000 à 1 200 plumes chez un Oiseau comme le bruant à gorge blanche, d'Amérique du Nord.

Les plus grandes plumes connues sont celles d'une race de coqs domestiques (phénix, ou onagadori) élevés sur l'île de Shikok au Japon. Les rectrices de ces Oiseaux ne sont pas muées et poussent pendant toute leur vie. Elles croissent de 90 cm par an, et le champion actuel possède une traîne de 10,40 m de long.

Légèreté des plumes. Les plumes sont à la fois très résistantes et très légères comme en témoignent ces chiffres obtenus sur quelques espèces vivant en France :

Rectrices (queue)	*Longueur de la plume*	*Poids*
Macareux moine	59 mm	21 mg
Pic noir	174 mm	74 mg
Chouette effraye	125 mm	473 mg
Fou de Bassan	231 mm	801 mg

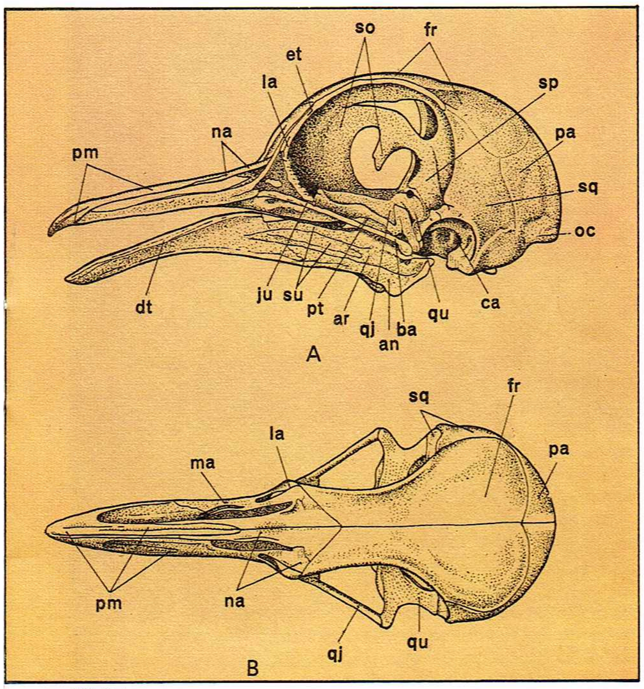

I.G.D.A.

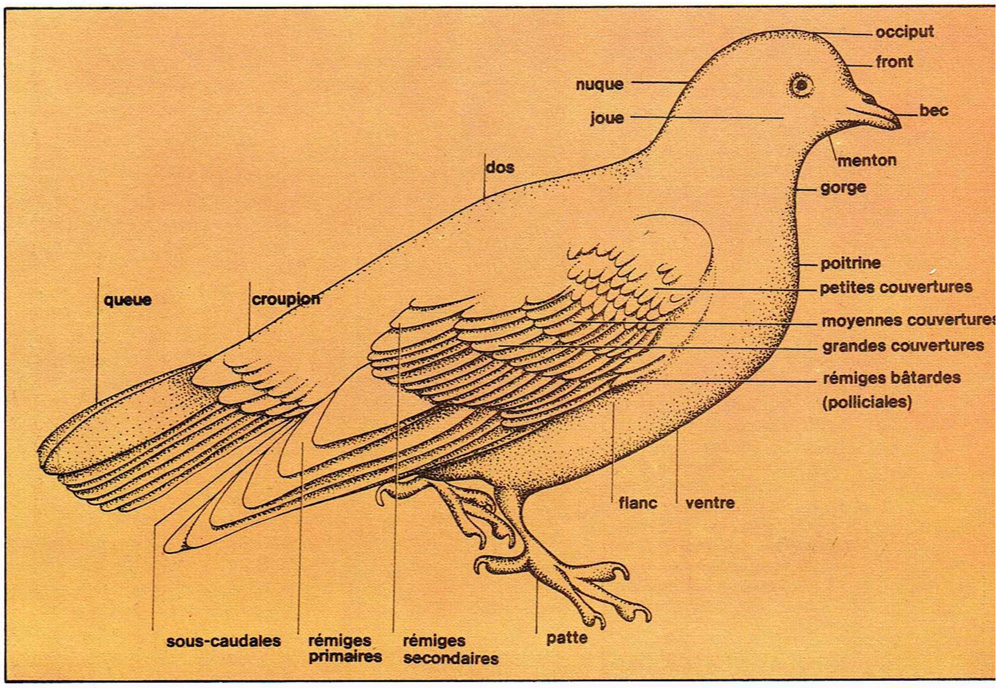

Richard Colin

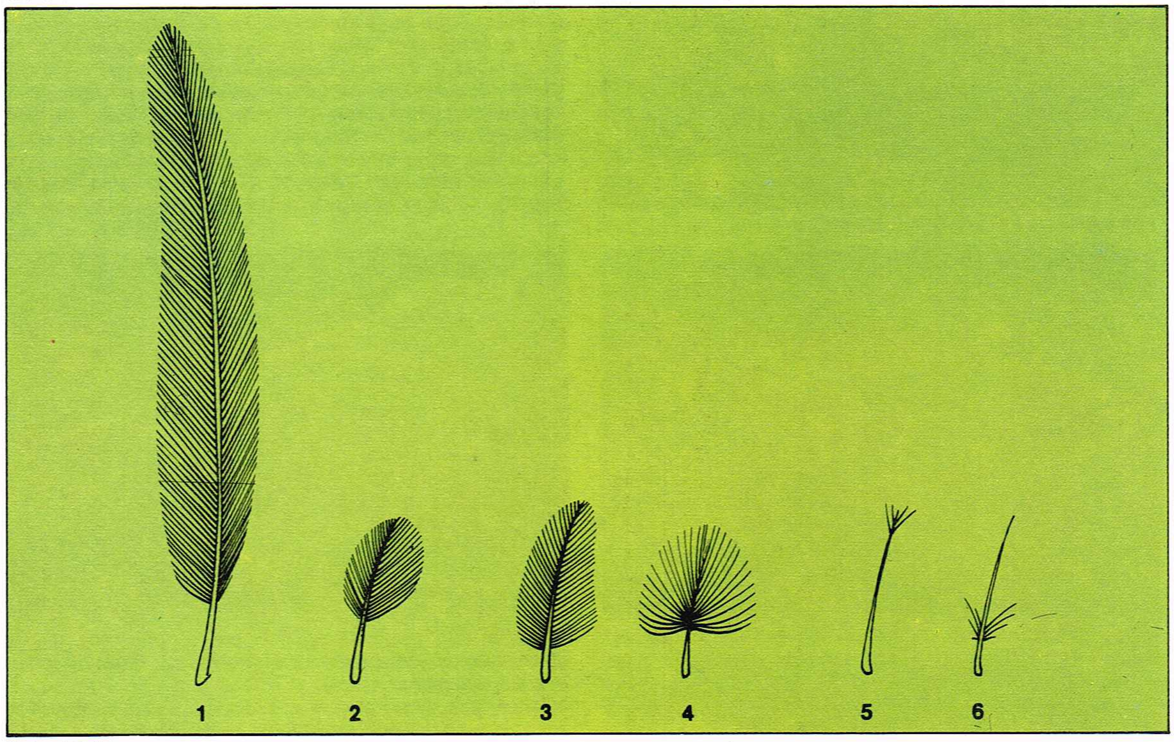

Richard Colin

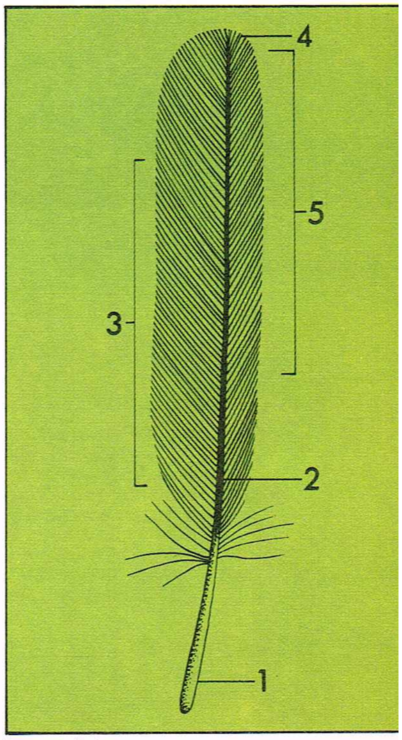

Richard Colin

▲ En haut, à gauche, structure du crâne d'un jeune pigeon vu de côté (A) et de dessus (B) : pm, prémaxillaire; na, nasal; la, lacrymal; et, ethmoïde; so, sillon inter-orbitaire; fr, frontal; sp, sphénoïde latéral; pa, pariétal; sq, squamosal; oc, occipital; ca, canal auditif; qu, carré; ba, basisphénoïde; an, angulaire; qj, quadratojugal; ar, articulaire; pt, ptérygoïde; su, sub-angulaire; ju, jugal; dt, dentaire; ma, maxillaire. A droite, topographie du corps de l'Oiseau. En bas, à gauche, différentes sortes de plumes : 1, penne (rémige); 2, penne (tectrice); 3, semi-plume; 4, duvet; 5, filoplume; 6, vibrisse; à droite, structure d'une plume : 1, tuyau; 2, rachis; 3, vexille interne; 4, barbe; 5, vexille externe.

J. Markham

◀ Ci-contre, la coloration des plumes est due principalement à des grains de pigment ou à des phénomènes physiques de diffusion et réfraction de la lumière : ici, un martin-pêcheur au plumage bleu (Halcyon malimbicus).

Bec

Le bec comprend deux mandibules revêtues d'une enveloppe cornée, de couleur variable, appelée ramphothèque. Celle-ci comprend une pièce pour chaque mandibule, sauf chez les Procellariiformes, où elle se compose de plusieurs plaques juxtaposées. Chez *Fratercula arctica,* le macareux moine, le bec se couvre, au printemps, de plaques supplémentaires de couleur vive (rouge, jaune, bleu), qui tombent après la saison de reproduction. Les narines s'ouvrent sur la mandibule supérieure, à la base du bec, sauf chez les aptéryx. Chez les Procellariiformes, elles ont la forme de deux petits tubes. Dans certains cas, le bec permet de déterminer de façon assez précise la nature des aliments consommés par l'Oiseau, mais le plus souvent il est difficile d'obtenir une certitude en raison du caractère mixte de l'alimentation. La classification donnée ci-dessous n'a donc qu'une valeur de schéma commode.

Les Oiseaux purement insectivores (hirondelles, martinets, engoulevents, la plupart des gobe-mouches européens) ont un bec court, de forme triangulaire si on le regarde par-dessus, et très largement fendu. Le gosier est particulièrement vaste. Certains Oiseaux en grande partie insectivores ont un bec de forme très différente, par exemple, la bondrée apivore et le faucon kobez, Rapaces diurnes au bec crochu.

▼ Quatre espèces différentes d'Oiseaux; quatre formes de bec, chacune adaptée à un mode particulier d'alimentation : en haut, un aigle royal (à gauche); un calao (à droite); en bas, une autruche (à gauche); un pélican (à droite).

C. Bevilacqua

C. Bevilacqua

C. Bevilacqua

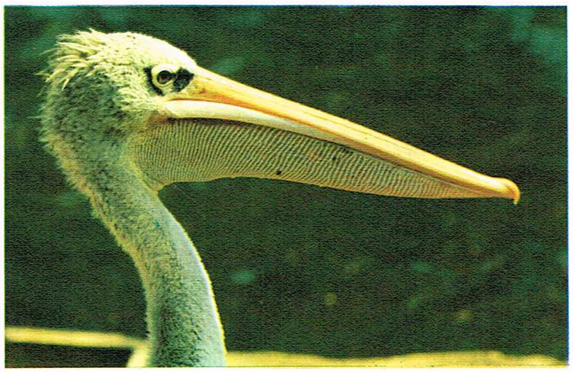

F. Arborio - Mella

Les Oiseaux carnivores (adjectif ambigu car, dans l'absolu, une hirondelle est elle aussi carnivore) ont un bec crochu, puissant, dont la mandibule inférieure a la forme d'une gouge. D'autres Oiseaux présentent un crochet au bout du bec, bien qu'ils fassent partie de groupes différents (pétrels, albatros, puffins, Oiseaux marins; mouettes et goélands, omnivores; podarges, insectivores et carnivores; perroquets et perruches, granivores). Certains Oiseaux piscivores ont un bec allongé : pélicans, fous, hérons, martins-pêcheurs, anhingas, quelques grèbes; chez d'autres (le balbuzard, un Rapace; le harle, un canard), il est d'un tout autre modèle.

Pattes

Les pattes ont quatre doigts; le plus souvent, le premier, ou pouce, se trouve en arrière et les trois autres sont tournés vers l'avant. Quelques espèces ne possèdent que trois doigts : pic tridactyle, pluviers, émeu, nandous, casoars, outardes, œdicnèmes, etc.; une seule en présente deux, l'autruche. Les doigts se terminent par des griffes plus ou moins recourbées.

En examinant les pattes d'un Oiseau on aura généralement une idée assez exacte de son genre de vie et du milieu qu'il fréquente. En effet, leurs dimensions et leur forme sont adaptées aux activités de l'Animal, et c'est seulement dans l'ordre des Passereaux, qui groupe, il est vrai, à lui seul près des deux tiers des espèces, qu'il est difficile de faire cette déduction.

Les Oiseaux qui nagent ont presque tous les pattes munies de palmures plus ou moins développées. Par exemple, chez les canards, celles-ci réunissent les trois doigts antérieurs. Chez les cormorans et des Oiseaux de familles voisines, elles englobent les quatre doigts. Les doigts des grèbes gardent leur indépendance mais possèdent chacun une palmure lobée. Enfin, certains Oiseaux nageurs sont dépourvus de toute palmure : les cincles et les poules sultanes *(Porphyrio)*.

Les Oiseaux qui grimpent ont des doigts disposés selon le schéma le plus courant (sittelles, grimpereaux) ou au contraire disposés en nombre égal, deux en avant et deux en arrière (pics).

Les Oiseaux marcheurs ont des pattes très allongées et robustes (outardes, nandous, œdicnèmes, etc.) ou de dimensions normales avec les doigts assez grands et la griffe du doigt postérieur très développée (certaines alouettes et des pipits).

Les Oiseaux qui volent beaucoup ont des pattes très courtes, dont ils se servent pour se poser et faire quelques pas ou encore pour s'accrocher à une paroi verticale (hirondelles, martinets, engoulevents, colibris, etc.). On peut ranger dans la même catégorie les Oiseaux qui chassent à l'affût et passent beaucoup de temps perchés, immobiles ou presque (guêpiers, martins-pêcheurs, todiers, par exemple).

Squelette

La légèreté et la solidité sont les deux qualités, en apparence contradictoires, du squelette des Oiseaux. La première est obtenue par la disparition progressive de la moelle à l'intérieur des os longs de l'adulte, la minceur des os du crâne, en particulier de ceux des mandibules, qui ne portent pas de dents, enfin la réduction du nombre des os des mains et des pattes. La

▶ Squelette du membre antérieur (A) : 1, humérus (bras); 2, cubitus (avant-bras); 3, radius (avant-bras); 4, os du carpe; 5, 1er doigt (une phalange); 6, métacarpiens (soudés partiellement); 7, 2e doigt (deux phalanges); 8, 3e doigt (une phalange); membre postérieur (B) : 1, fémur (cuisse); 2, tibia et péroné (jambe); 3, tarse = tarso-métatarse; 4 à 7, 1er à 4e doigt.

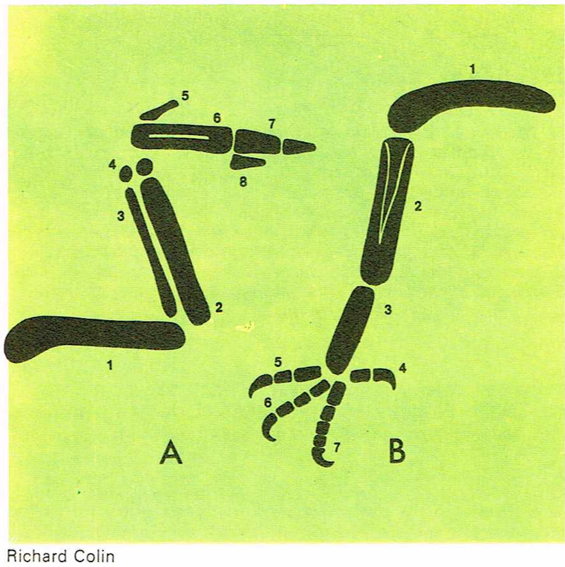

Richard Colin

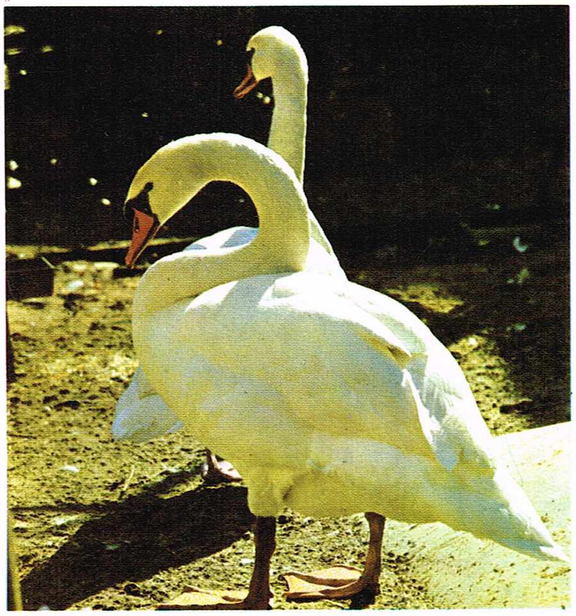

S. Prato

N. Myers

◀ *Les Oiseaux qui nagent ont presque tous les pattes munies de palmures ; ci-contre, à gauche, un cygne (Cygnus olor). A droite, l'outarde de Kori (Choriotis kori), Oiseau marcheur aux pattes très allongées et robustes.*

deuxième, particulièrement nette dans les os du membre antérieur des grandes espèces, est due à de nombreuses entretoises qui relient les deux parois des os longs et creux (l'humérus par exemple).

Le squelette d'un troglodyte (petit Passereau) représente 7,1 % du poids total de l'Oiseau. Chez la buse (Rapace) cette proportion est de 8,8 %. Elle atteint 11 % chez la poule domestique, incapable de voler, et ne dépasse pas 9 % chez le pélican blanc, Oiseau très lourd mais excellent voilier. Le squelette d'un pygargue à tête blanche (emblème des États-Unis) pesait 272 g, alors que son plumage pesait 677 g (le poids total de l'Oiseau était égal à 4 082 g).

Squelette appendiculaire (des membres). Le membre antérieur comprend le bras (un os : l'humérus), l'avant-bras (deux os : le radius et le cubitus, qui est le plus gros), le poignet (deux petits os carpiens et trois métacarpiens soudés dont un est atrophié), les doigts, au nombre de trois seulement, dont un seul possède deux phalanges, les autres n'en ayant qu'une.

Le membre antérieur est relié au sternum par la ceinture scapulaire, formée de trois os : l'omoplate, lame mince, appliquée sur les côtes, les clavicules, soudées à leur extrémité inférieure où elles forment la « fourchette » et, enfin, l'os coracoïde, articulé d'une part avec le sternum et d'autre part avec l'humérus, la clavicule et l'omoplate.

Le membre postérieur comprend la cuisse avec le fémur (complètement caché dans le corps de l'Oiseau), la jambe, avec un seul os apparent, le tibia (le péroné, très réduit, est généralement soudé à ce dernier), dont on ne voit, chez la majorité des Oiseaux, que la partie inférieure émergeant du plumage. La rangée supérieure des os du tarse est soudée à la base du tibia et la rangée inférieure fusionne avec les métatarsiens, eux-mêmes soudés, pour former un nouvel os appelé couramment « tarse », bien qu'il s'agisse en fait d'un tarso-métatarse. Les doigts possèdent de deux à cinq phalanges selon leur situation (le premier en a deux, et les autres respectivement trois, quatre et cinq).

La ceinture pelvienne attache le membre postérieur au squelette axial. Elle se compose de trois os, l'ilion, l'ischion (percé par la cavité cotyloïde où s'articule le fémur) et le pubis, soudés entre eux et avec les vertèbres thoraciques postérieures, sacrées et caudales antérieures.

Squelette axial. Il comprend le crâne, la colonne vertébrale, les côtes et le sternum. Les dimensions considérables des orbites et le volume relativement réduit de la boîte crânienne sont frappants. Les mandibules s'articulent avec le crâne, mais seule l'inférieure est capable d'effectuer des mouvements de grande amplitude, l'autre étant presque fixe.

La colonne vertébrale a de 40 (Passereaux) à plus de 60 vertèbres (cygnes), qui fusionnent au niveau du dos, où elles forment avec la cage thoracique un fuselage rigide, et du bassin. Il y a de 5 à 8 vertèbres caudales libres, dont les dernières, soudées, constituent le pygostyle (ou urostyle), sur lequel sont fixées les plumes de la queue. Le sternum, os impair, est relié à la colonne vertébrale par les côtes au nombre de 6 à 9 paires. Chacune comprend deux segments réunis par une articulation mobile. Les premières et dernières côtes sont flottantes, c'est-à-dire ne s'articulant pas avec la base du sternum. Les autres ont un crochet qui s'appuie sur la côte suivante. Le sternum, très développé, a une forme variable selon les groupes. Sa partie postérieure peut être découpée par des échancrures, très profondes chez les coqs, les dindons et les pintades. Le sternum porte sur sa partie médiane une lame verticale dirigée vers le bas, le bréchet, qui sert de surface d'insertion aux muscles moteurs des ailes. Tous les Oiseaux actuellement vivants possèdent un bréchet, à l'exception des quelques espèces autrefois rangées dans le groupe des Ratites : autruche, émeu, nandous, casoars et aptéryx (les Oiseaux possédant un bréchet étaient appelés Carinates).

Musculature

Les grosses masses musculaires sont concentrées dans la partie inférieure du corps et, plus précisément, de part et d'autre du bréchet. Ailleurs, la musculature est fine (particulièrement sur le dos) ; à l'extrémité des membres elle fait défaut, et des tendons actionnent les doigts. Même dans l'aile, la masse musculaire se trouve près du corps et l'avant-bras ne possède que des muscles grêles. Cette concentration favorise l'équilibre au cours du vol et permet une plus grande puissance. Certains Passereaux qui se nourrissent de graines dures (gros-becs, bouvreuils) et les pics qui creusent le bois avec leur bec ont les muscles de la tête très développés. La musculature de la queue est également très forte chez ces derniers (ils s'appuient sur leurs rectrices quand ils s'arrêtent de grimper) et chez les Oiseaux qui volent vite et utilisent leurs rectrices comme aérofreins.

Lorsqu'un Oiseau s'endort, il ne tombe pas de son perchoir car ses doigts, placés de part et d'autre de la branche, tirent sur les tendons, ce qui suffit à bloquer sans effort les articulations. De petites aspérités situées à la surface des tendons se fixent sur les parois internes de leur enveloppe et assurent le verrouillage.

▼ *Système de blocage des doigts : e. te, enveloppe du tendon soulevée ; te, tendon dont la surface est munie d'aspérités ; celles-ci s'engrènent sur les parois internes de l'enveloppe ; ph, phalange.*

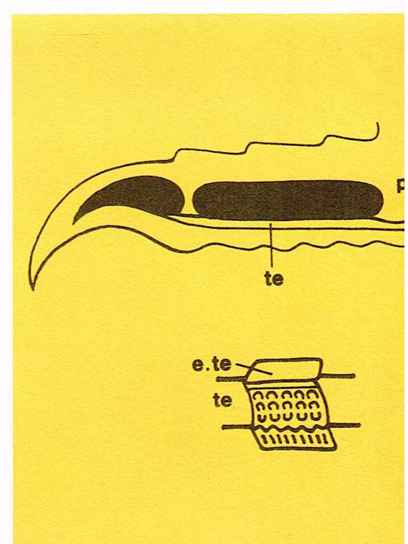

Richard Colin

Appareil circulatoire. Température interne. Métabolisme

L'appareil circulatoire des Oiseaux est, à quelques détails près, comparable à celui des Mammifères et aussi perfectionné (cœur à quatre cavités, sang artériel et sang veineux complètement séparés). Cependant, la partie gauche, où circule le sang artériel, est beaucoup plus développée que la partie droite. En outre, les globules rouges ont un noyau. Le cœur est, proportionnellement, bien plus gros chez les Oiseaux bons voiliers que chez ceux qui volent peu ou pas du tout. Il représente 0,25 %

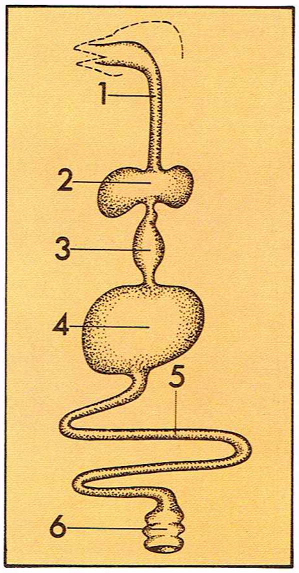

Richard Colin

▲ *Représentation schématique du tube digestif d'un pigeon (les glandes telles que le foie et le pancréas ne sont pas figurées) : 1, œsophage; 2, jabot; 3, estomac glandulaire; 4, estomac musculaire ou gésier; 5, intestin; 6, cloaque.*

du poids total chez les tinamous, 0,39 % chez le colin de Virginie, et entre 2 et 3,74 % chez les colibris. Le nombre de ses contractions est inversement proportionnel à la taille de l'Oiseau, car ce sont les plus petites espèces qui ont le taux de métabolisme le plus élevé. Quand l'Oiseau est effrayé ou en train de voler ce nombre peut être doublé (mille deux cents par minute chez certains colibris !).

	Nombre de contractions du cœur (au repos)
Dindon	93
Autruche	140
Poule domestique	212-341
Choucas	342
Moineau domestique	460
Rouge-gorge	570

Traditionnellement, les Oiseaux étaient considérés comme des Animaux homéothermes, c'est-à-dire dont la température interne est constante. Les recherches effectuées depuis quelques décennies ont montré que cette affirmation doit être nuancée. Tout d'abord, il existe des variations quotidiennes. La température est plus élevée (de 1 à 4 °C) au cours des périodes d'activité (la plupart des espèces sont actives le jour) qu'à celles où l'Oiseau se repose.

C'est surtout depuis la découverte, en 1948, d'un engoulevent américain *(Phalaenoptilus nuttallii)* en état d'hibernation dans une crevasse de rocher du désert Mohave (Arizona) que les études sur la température interne se sont multipliées. L'Oiseau était inerte et sa température ne dépassait pas 10 °C. D'autres observations montrèrent que cet état permettait à l'engoulevent de supporter des périodes défavorables (l'absence d'Insectes, l'air froid). Le métabolisme de *Phalaenoptilus* en état d'hibernation est égal à 3 % de sa valeur normale et la température minimale enregistrée chez cet Oiseau est de + 6 °C. En 1969, Schlegel a décrit comment, chez *Caprimulgus europaeus,* l'engoulevent d'Europe, les jeunes tombent en léthargie quand le temps est froid et pluvieux. Les jeunes martinets noirs *(Apus apus)* au nid sont capables de résister pendant huit à dix jours sans manger quand les conditions météorologiques sont défavorables et empêchent leurs parents de les nourrir. Leur température s'abaisse jusqu'à 20 °C. Avec le retour du beau temps ainsi que celui des adultes, l'activité physiologique retrouve rapidement son rythme normal. Plusieurs colibris *(Calypte anna, Selasphorus sasin* et *Oreotrochilus estella)* deviennent léthargiques pendant la nuit. Il s'agit d'espèces vivant en montagne, où la température nocturne de l'air est très basse, même à la belle saison, et ce ralentissement du métabolisme est un des moyens dont elles disposent pour résister au jeûne imposé par l'obscurité. Ce phénomène ne se produit pas chez les jeunes et les femelles couveuses.

La température interne des Oiseaux est, en moyenne, plus élevée que celle des Mammifères. Le maximum connu est de 45 °C chez le merle noir. Les températures les plus basses ont été notées chez les Oiseaux incapables de voler (chez le kiwi, on a observé une température de 37,8 °C).

Appareil respiratoire et appareil vocal

L'appareil respiratoire comprend les narines, les cornets, la trachée, les poumons et les sacs aériens.

Les narines ont, le plus souvent, une forme ovale ou arrondie, mais certaines sont en fente. Elles communiquent chez les vautours d'Amérique et sont indépendantes chez les autres Oiseaux. Elles sont fermées (c'est-à-dire ne sont reliées ni aux cornets, ni à la trachée) chez les fous, Oiseaux plongeurs qui respirent par le bec. Elles peuvent être nues, ou partiellement ou entièrement recouvertes par des touffes de plumes (corneille noire, etc.).

La trachée est un tube toujours ouvert, dont la rigidité est assurée par des anneaux de cartilage régulièrement espacés. Sur son trajet, on remarque le larynx (qui n'a aucune fonction vocale chez les Oiseaux) et, à l'endroit où elle se divise en deux bronches, le syrinx, qui est l'organe vocal. La structure de ce dernier est le plus compliquée chez les Passereaux (autrefois appelés « Oiseaux chanteurs »). La trachée de certaines espèces est très allongée et joue le rôle de caisse de résonance qui augmente la portée des cris. Il en est ainsi chez les grues et le cygne chanteur, où les circonvolutions se logent dans le sternum. Le syrinx est très peu développé chez les vautours, l'autruche et quelques cigognes.

Peu volumineux, les poumons des Oiseaux effectuent des mouvements limités. A l'intérieur, les bronches se divisent en parabronches, qui, à la différence des bronchioles des Mammifères, n'aboutissent pas dans des alvéoles pulmonaires en cul-de-sac, mais se raccordent à d'autres bronches (les mésobronches) en relation avec neuf sacs aériens, particuliers aux Oiseaux. Il y a deux sacs cervicaux, un sac interclaviculaire, quatre sacs thoraciques et post-thoraciques, et enfin deux sacs abdominaux. Ce sont des poches limitées par une membrane et reliées à certains os creux remplis d'air (le sac interclaviculaire communique avec le sternum et l'humérus, les sacs abdominaux avec le bassin et les fémurs).

Chez les mâles de quelques espèces, les sacs aériens sont en rapport avec des diverticules qui se gonflent d'air à l'époque des parades nuptiales. Ainsi, les frégates mâles possèdent sous la gorge une poche de peau nue et rouge, en forme de ballon, qui les fait remarquer de loin. Plusieurs tétras américains présentent, sur la poitrine, une structure analogue mais moins proéminente et dont la couleur va du rouge au jaune en passant par le violet; elle est cachée par des plumes qui sont redressées et forment une collerette au moment où elle est mise en valeur.

Le nombre des mouvements respiratoires dépend de l'activité exercée et des dimensions de l'Oiseau. En 1968, Calder a résumé les renseignements obtenus à ce sujet sur diverses espèces. L'autruche effectue 5 mouvements respiratoires par minute; le plongeon imbrin, 19; le corbeau freux, 25; le merle noir, 48; la perruche ondulée, 69; le rouge-gorge, 97. Ce rythme est fortement accéléré quand l'Oiseau vole ou est effrayé. Les Oiseaux plongeurs peuvent retenir leur respiration pendant plus ou moins longtemps : jusqu'à trois minutes chez le grèbe huppé et huit minutes chez le plongeon imbrin.

Le rôle des sacs aériens a été l'objet de longues discussions. On leur a attribué diverses fonctions : le refroidissement du corps pendant le vol, l'aération des poumons, le contrôle de la flottaison chez les espèces aquatiques. Cependant, des chercheurs américains dirigés par K. Schmidt-Nielsen ont donné une explication plus plausible : ces sacs permettraient aux Oiseaux d'utiliser l'oxygène de l'air de façon beaucoup plus complète que ne le font les Animaux purement terrestres : la proportion d'oxygène effectivement employé s'élève à 20 ou 25 % seulement chez les Mammifères; elle serait bien plus élevée chez les Oiseaux (80 à 90 %), ce qui expliquerait leur faculté de voler à très haute altitude aux époques de migration. Les observations

▼ *La cavité buccale des Oiseaux est tapissée d'une peau de couleur parfois très vive, comme on le voit chez ces oisillons de pie-grièche écorcheur* (Lanius collurio).

J. Markham

faites avec le radar ont en effet montré que des Passereaux de la taille du pinson des arbres montent jusqu'à 4 000 m d'altitude en automne quand ils franchissent la Manche. On s'était demandé comment les Oiseaux pouvaient résister à la raréfaction de l'oxygène à grande hauteur, compte tenu de leur faible taille. Il semble que ces études (toujours en cours) puissent donner une réponse satisfaisante.

Appareil digestif

L'appareil digestif comprend, successivement, le bec, la cavité buccale, l'œsophage, l'estomac, l'intestin et les glandes annexes.

La cavité buccale abrite la langue; elle est tapissée d'une peau de couleur parfois très vive, en particulier chez les oisillons des Passereaux. Elle est, par exemple, rouge (grand corbeau), rose (moineau friquet), orange (mésange bleue) ou jaune (hirondelle de cheminée).

La langue a des dimensions très variables selon les groupes : d'une façon générale, les Oiseaux qui avalent leur nourriture par grosses bouchées ont une langue très courte; il en est ainsi des cigognes, des pélicans, des cormorans, des mouettes et des goélands, des martins-pêcheurs, des rolliers, des Rapaces diurnes et nocturnes, etc. Parmi les espèces dont la langue est très longue on compte les colibris et les soui-mangas. Chez les pics, la langue elle-même est courte, mais peut être projetée loin hors du bec grâce aux cornes de l'os hyoïde, qui sont extrêmement longues, au point qu'au repos elles s'enroulent autour du crâne (pic vert). La langue des Oiseaux mangeurs de nectar peut avoir une forme voisine de celle d'un tube (méliphages) ou présenter une extrémité divisée en franges (zostérops, ou Oiseaux à lunettes) ou, encore, se terminer par une sorte de brosse (Artamidés d'Australie).

Des glandes salivaires débouchent dans la cavité buccale. Selon leur position, on distingue les glandes linguales, sublinguales, palatines, etc. Celles des martinets produisent une sécrétion très abondante, utilisée pour coller les éléments du nid et même, chez certaines espèces du genre *Collocalia,* pour confectionner le nid lui-même (ce sont les « nids d'hirondelle » de la cuisine chinoise). Cette salive durcit à l'air en prenant un aspect mucilagineux. Parmi les autres Oiseaux dont les glandes salivaires sont volumineuses, on compte les pics et notamment le pic vert, dont la salive, quelque peu gluante, facilite la capture des fourmis par la langue.

L'œsophage est un tube dont les parois sont molles et extensibles. Il est souvent situé en avant de la trachée (Passereaux, pics). Son diamètre est important chez les grèbes, les macareux, les mouettes et les goélands, les cormorans, les cigognes, les hérons et les Rapaces. Il sert souvent de réservoir pour les aliments qui seront digérés plus tard. On observe plusieurs intermédiaires entre cette situation et celle où un véritable jabot existe. Ainsi, l'œsophage des Rapaces diurnes, du moineau domestique, du verdier et du bec-croisé présente un élargissement. On ne trouve un jabot proprement dit que chez les pigeons et les tourterelles, les Oiseaux groupés sous le nom de Gallinacés (coqs, faisans, perdrix, cailles, pintades, dindons, tétras) et l'hoazin. Le jabot est une poche extensible, nettement délimitée, dans laquelle les aliments sont simplement stockés. Il ne contient aucune glande sécrétant un suc digestif. Les parois du jabot des pigeons et tourterelles produisent une masse blanchâtre (formée par la desquamation de nombreuses cellules) qui sert de premier aliment aux jeunes Oiseaux (c'est le « lait de pigeon »).

L'estomac comprend deux parties : l'estomac glandulaire, ou proventricule, ou ventricule succenturié, et l'estomac musculaire, ou gésier. Le premier, fusiforme, est très extensible chez les mouettes, les goélands, les cormorans, les hérons et les cigognes. Ses parois sont tapissées de glandes sécrétant le suc gastrique qui commence la digestion des aliments. Les albatros et les pétrels (surtout les jeunes au nid) crachent quand ils sont dérangés un liquide huileux, dont il semble qu'il s'agisse de la sécrétion de l'estomac glandulaire. La forme du gésier varie selon le régime. Les espèces qui se nourrissent d'aliments mous (nectar, pollen, fruits) ont un gésier très peu musclé, se distinguant à peine de l'estomac glandulaire (certains dicées, Passereaux d'Asie). Il a des parois minces chez les carnivores et les piscivores, très musclées chez les herbivores (oies) et les granivores (Gallinacés et nombreux pigeons au régime mixte). Dans le deuxième cas, il possède un revêtement interne résistant, kératinisé, produit par des glandes de ses parois. Cette « doublure » est de couleur jaune, verte ou brune et peut être muée régulièrement et rejetée (par le bec chez le courlis cendré). Les muscles du gésier et cette plaque écrasent la nourriture et l'émiettent. De nombreux Oiseaux granivores, herbivores et omnivores renforcent leur action en avalant des graviers.

A l'estomac fait suite l'intestin grêle, dont les circonvolutions sont disposées selon un schéma assez précis, qui présente plusieurs variantes. A la limite entre le gésier et l'intestin (région pylorique) certains Oiseaux (grèbes, hérons, cigognes, petits Échassiers) possèdent un diverticule qui, chez les grèbes, renferme des plumes et joue peut-être le rôle de filtre pour les arêtes de Poissons qui risqueraient d'abîmer la muqueuse intestinale.

Le gros intestin, très court, débouche dans le cloaque, divisé en trois parties par des replis internes, et qui communique avec l'extérieur par l'anus. Dans le cloaque aboutissent aussi les conduits en provenance des reins et des glandes sexuelles. Chez les Passereaux et les pics, les parois du cloaque renferment des glandes dont la sécrétion entoure les excréments des jeunes Oiseaux d'un sac de mucus, qui permet aux parents de les saisir dans leur bec et de les transporter au loin (ou de les avaler).

A la limite des deux parties de l'intestin se trouvent les cæcums, culs-de-sac tantôt presque nuls, tantôt extrêmement développés et de forme variée. D'une manière générale, ils sont volumineux chez les Oiseaux herbivores et chez certains omnivores, par exemple les canards, les oies, les pélicans, les râles, les chouettes, les hiboux et les Gallinacés, etc. Ils sont minuscules ou manquent chez les colibris et les martinets adultes, certains pics et pigeons, les Psittaciformes adultes et les Passereaux. Leur fonction chez les herbivores est controversée; ils serviraient à décomposer la cellulose et à absorber de l'eau ou des vitamines.

Le foie, la plus grosse glande du corps des Oiseaux, produit la bile, opère la synthèse du glycogène, isole l'acide urique, etc. La bile est stockée dans la vésicule biliaire, qui fait souvent défaut (autruche, nandous, pigeons, perroquets, pics et Passereaux). Le pancréas est une glande à sécrétion interne et externe.

La digestion est très rapide chez les Oiseaux frugivores, insectivores, carnivores et piscivores, plus lente chez les granivores et les herbivores. Des baies traversent entièrement le tube digestif d'une fauvette à tête noire *(Sylvia atricapilla)* en douze minutes. Le gypaète barbu, Rapace

▼ ***Mâle de* Fregata minor, *petite frégate des Galapagos, gonflant, à l'époque des parades nuptiales, une poche de peau nue et rouge en forme de ballon.***

Ph. Scott - Pitch

J.L.S. Dubois - Jacana

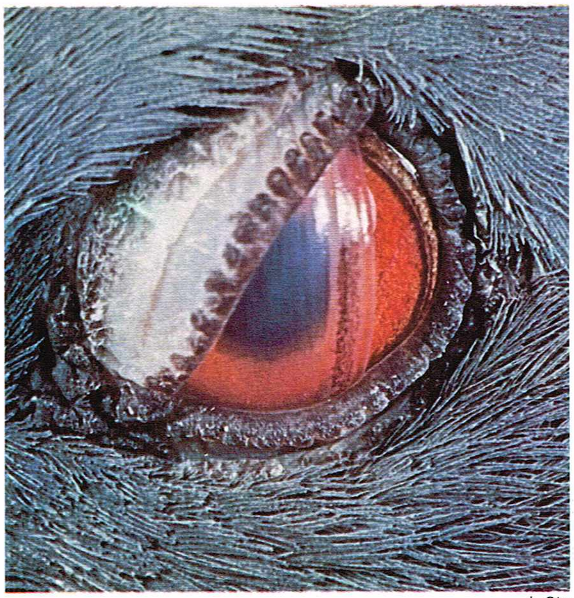

J. Six

▲ *A gauche,* **Tyto alba,** *la chouette effraye, digère en 2 h 30 un campagnol terrestre; l'intensité et la rapidité de la digestion varient selon les groupes et les types d'alimentation. A droite, l'œil de pigeon biset* **(Columba livia),** *dont on distingue la membrane transparente.*

diurne d'Eurasie et d'Afrique, digère une vertèbre de vache en un ou deux jours. Chez la poule domestique, il faut de 12 à 24 heures pour que la digestion d'une ration de grains soit achevée. En 1928, Guérin a constaté qu'au bout de 2 h 30 un campagnol terrestre (petit Rongeur de 35 à 40 g) avalé par une chouette effraye *(Tyto alba)* était digéré et qu'il n'en restait plus que les os, les poils et quelques fragments de chair.

L'intensité de la digestion varie selon les groupes : les Rapaces diurnes (aigles, éperviers, buses, etc.) ont des sucs digestifs très corrosifs qui dissolvent les os de leurs proies, tandis que chez les Rapaces nocturnes (chouettes et hiboux), au contraire, les os les plus fins (côtes et dents de souris par exemple, doigts des Batraciens) peuvent être retrouvés dans les résidus de la digestion. Ceux-ci sont de deux sortes : les excréments, auxquels est mêlée l'urine, et, chez certaines espèces (au moins huit cents), les pelotes de réjection, boulettes formées par des résidus indigestes que l'Oiseau crache de façon plus ou moins régulière. Leur examen montre qu'elles sont composées de poils, d'os, d'arêtes de Poissons, de piquants, de fragments de coquilles, de morceaux d'élytres et autres parties de la carapace des Insectes, d'écailles de Poissons, d'enveloppes dures de graines ou de fruits, et de plumes. Leur grosseur varie en fonction de la taille de l'Oiseau : celles de la pie-grièche grise mesurent environ 18 mm de long; celles de la chouette effraye, de 4 à 6 cm, celles du hibou grand-duc atteignent 10 cm de long. L'étude du contenu des pelotes des Rapaces nocturnes fournit des informations de premier ordre sur leur régime; cependant, pour d'autres espèces (Rapaces diurnes et hérons) on ne peut se fier entièrement aux résultats de leur analyse car certains aliments ne laissent aucune trace.

Appareil excréteur

Les deux reins sont situés dans la cavité abdominale, près de la colonne vertébrale. Chacun est divisé en trois lobes peu distincts. Les Oiseaux actuels n'ont pas de vessie, à l'exception de l'autruche, et les uretères vont directement au cloaque. En raison de la rapidité de leur métabolisme, les Oiseaux rejettent beaucoup d'excréments. Les reins récupèrent presque toute l'eau de l'urine et celle-ci, au lieu d'être liquide, a une consistance pâteuse. De couleur blanche, elle est généralement mêlée aux résidus de la digestion qui ont traversé l'intestin. Elle est particulièrement riche en acide urique. Jusqu'à une époque récente, on admettait volontiers qu'en l'absence de glandes sudoripares, l'évaporation de vapeur d'eau se faisait uniquement par les voies respiratoires. En fait, des travaux ont montré qu'elle s'effectue aussi au niveau de la peau en proportion non négligeable puisque, chez quatre espèces étudiées (deux Passereaux, la perruche ondulée et la caille de Chine), elle représentait de 44 à 62 % du total à une température ambiante de 30 °C (Bernstein, 1971).

De nombreux Oiseaux marins absorbent de grandes quantités de sel avec leur nourriture (l'eau de mer est trois fois plus salée que leurs humeurs). Pendant longtemps, on ne comprenait pas comment ils pouvaient supporter de telles concentrations, mais Schmidt-Nielsen a montré qu'ils possèdent des glandes supraorbitales en forme de croissant, en relation avec les narines et qui rejettent, après les repas, le sel absorbé en excès. On se rend compte du phénomène en voyant des gouttelettes couler sur leur bec : chez le goéland argenté, on a constaté le rejet de 47 gouttes en 37 minutes. La sécrétion atteint son maximum 15 minutes après le retour au perchoir. Les glandes du sel existent aussi chez le pélican brun, les albatros, des pétrels et des canards marins.

Système nerveux

Le système nerveux des Oiseaux présente la même complexité que celui des Mammifères. Le système nerveux central comprend l'encéphale, la moelle épinière et les nerfs qui en dépendent. Les systèmes sympathique et parasympathique, appelés autonomes, ont des effets antagonistes sur le rythme cardiaque, la digestion, etc. Le système nerveux présente la particularité suivante : l'encéphale est lourd par rapport au poids total. En 1961, Marshall a comparé trois Reptiles et trois Oiseaux de poids voisin et a constaté que, chez ces derniers, le cerveau était beaucoup plus pesant.

	Poids du corps (en g)	*Poids du cerveau (en g)*
Lézard agile (Reptile)	11,5	0,05
Tarin (Oiseau)	11,5	0,54
Lézard ocellé (Reptile)	19	0,09
Fauvette des jardins (Oiseau)	19	0,58
Vipère aspic (Reptile)	80	0,08
Caille des blés (Oiseau)	80	0,73

Outre son volume, le cerveau est caractérisé par le fort développement des hémisphères et du cervelet; mais l'écorce cérébrale (cortex) est fine et dépourvue des circonvolutions qui caractérisent le cerveau mammalien. En revanche, les corps striés acquièrent une importance considérable, car ils contrôlent une grande partie de l'activité instinctive. Les lobes olfactifs sont réduits, alors que les lobes optiques ont des dimensions importantes. Le cervelet, centre nerveux de l'équilibre et de la coordination des mouvements, est gros lui aussi.

Organes des sens

Deux sens dominent incontestablement chez les Oiseaux : la vue et l'ouïe. Sauf exceptions, les trois autres, le toucher, le goût et l'odorat, jouent un rôle secondaire.

Vision. L'œil a la forme d'une brioche plus ou moins aplatie. Très volumineux, il occupe une grande place

dans le crâne, en particulier chez les Rapaces diurnes et nocturnes. Le poids des yeux représente 15 % du poids de la tête chez l'étourneau *(Sturnus vulgaris)*, alors qu'il en constitue moins de 1 % chez l'homme. L'autruche a des yeux cinq fois plus gros que ceux de l'homme, et ceux du faucon pèlerin sont aussi gros que les nôtres.

La structure de l'œil ressemble à celle de l'œil humain ; toutefois, sa surface visible est protégée par une membrane dite nictitante, transparente, qui balaye la cornée quand l'Oiseau cligne de l'œil, les paupières restant immobiles. La sclérotique est renforcée par un anneau de 11 à 16 plaquettes osseuses qui entourent la cornée ; à l'intérieur de l'humeur vitrée, et proche du point d'entrée du nerf optique, se trouve un organe, le peigne, richement irrigué par des vaisseaux sanguins et possédant de nombreux replis. Son rôle exact est mal établi ; on suppose qu'il fournit à la rétine l'oxygène et d'autres substances nutritives.

Au lieu d'une seule *fovea* (point de la rétine où la vision est le plus nette), de nombreux Oiseaux diurnes (hirondelles, martinets, sternes, faucons, colibris) en ont deux ; le nombre des cellules de la rétine est, au moins chez les espèces que l'on a étudiées, beaucoup plus élevé que pour l'homme (il s'agit des cellules sensibles à la couleur) : la *fovea* d'une buse *(Buteo buteo)* possède environ 1 000 000 de cônes par millimètre carré, alors que chez l'homme il n'y en a que 200 000 ; de nombreux cônes rétiniens possèdent chacun une gouttelette d'huile jaune, rouge ou orange, qui augmente le contraste des objets colorés perçus par l'œil et servirait de filtre coloré. De la position des yeux dépend l'ampleur du champ visuel. Celui du pigeon biset *(Columba livia)* est voisin de 340°, celui des Rapaces nocturnes, de 60 à 70°, celui du faucon crécerelle de 300°, dont 50° pour la vision binoculaire.

Vision des Oiseaux diurnes. Elle est perfectionnée, ces Animaux voyant le monde en couleurs. Les Oiseaux qui possèdent deux *foveae* dans l'œil, ont une vision binoculaire stéréoscopique. Comparée à celle de l'homme, la vision des Oiseaux paraît supérieure, car ils peuvent voir beaucoup de détails en peu de temps, alors que notre œil perçoit successivement les différentes parties du champ. On admet que la vision des grands Rapaces serait deux à trois fois supérieure à la nôtre, alors que celle des petits Passereaux serait inférieure.

Vision des Oiseaux nocturnes. Chouettes et hiboux ont d'énormes yeux avec une pupille de grand diamètre quand elle est dilatée au maximum. Leur champ visuel est restreint mais ils compensent ce désavantage par la mobilité exceptionnelle de leur tête qui peut tourner sur 270° environ. Leur rétine ne possède pas de cônes, mais seulement des cellules en bâtonnets, et le pourpre rétinien (rhodopsine) est abondant. Ils n'ont qu'une seule *fovea*. En 1972, Mikkola a déterminé que la quantité de lumière nécessaire à la vision des espèces vraiment nocturnes est très inférieure à celle qu'exige la vision de l'homme.

Chouette hulotte *(Strix aluco)*	0,000 000 16	lux
Chouette de l'Oural *(Strix uralensis)*	0,000 000 24	lux
Chouette de Tengmalm *(Aegolius funereus)*	0,000 015	lux
Homme	0,000 075	lux

Ouïe. Les Oiseaux n'ont pas de pavillons auditifs. L'entrée du trou auditif (visible chez quelques vautours et Ratites) est le plus souvent recouverte de plumes. Chez certains hiboux et chouettes, deux replis de peau obturent plus ou moins le trou auditif et favorisent la captation des sons. L'oreille des Oiseaux diffère encore de celle de l'homme par les points suivants : l'oreille moyenne possède un seul osselet, la columelle, qui d'une part s'applique sur le tympan et d'autre part se trouve en contact avec la fenêtre ovale ; l'oreille interne possède une cochlée (organe auditif proprement dit) droite et non pas enroulée, dont la structure est différente ; les trous auditifs de nombreux Rapaces nocturnes, ainsi que chez la chouette de Tengmalm les côtés du crâne lui-même, présentent une asymétrie prononcée que l'on considère, en plus de la largeur de la boîte crânienne, comme favorable à la localisation des sons perçus.

En 1972, Ilytchev a attiré l'attention sur des détails qui, chez les Rapaces nocturnes, améliorent l'acuité auditive : les disques faciaux formés de petites plumes entourant les yeux et les joues, le tympan de grandes dimensions, les éléments de l'oreille interne plus développés que ceux des Oiseaux diurnes, enfin, le nombre supérieur des cellules dans les centres nerveux responsables de l'audition, qui permettent une meilleure capacité de traitement des informations acoustiques.

J. Six

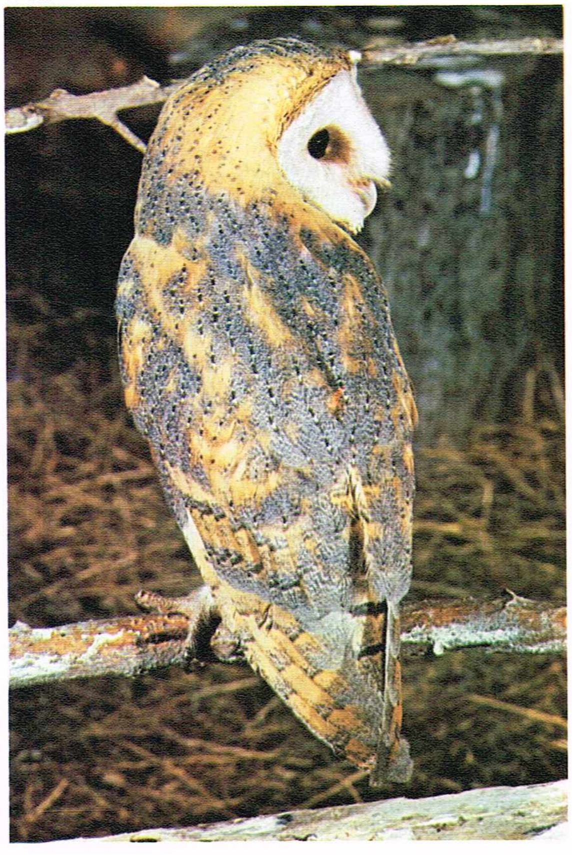

J. Six

◀ *A gauche,* **Tyto alba**, *comme la plupart des Oiseaux nocturnes, a, malgré ses énormes yeux, un champ visuel restreint, compensé par une mobilité exceptionnelle de la tête. A droite, les Oiseaux n'ont pas de pavillons auditifs ; l'entrée du trou auditif, visible sur ce vautour chauve de Malaisie, est le plus souvent recouverte de plumes.*

▶ *L'odorat joue un rôle important chez le vautour royal d'Amérique du Sud (Sarcorhamphus papa), qui se nourrit de charognes dans les forêts tropicales denses.*

L'acuité auditive des Oiseaux dont on a étudié le système acoustique est parfois voisine de celle de l'homme jeune comme le montre le tableau suivant qui indique les limites supérieure et inférieure des sons perçus (d'après Schwartkhopf, pour partie).

	Nombre de vibrations par seconde
Homme	16 à 20 000
Pigeon biset	40 à 12 000
Hibou moyen-duc	100 à 18 000
Pie	100 à 21 000
Étourneau	100 à 15 000
Chouette hulotte	200 à 21 000
Bouvreuil	200 à 25 000
Pinson des arbres	200 à 29 000

Toucher. Perception des vibrations. Divers organes sensibles au toucher existent dans la peau des Oiseaux : corpuscules de Grandry (palais) et de Merckel (peau, cavité buccale, langue). Les corpuscules de Herbst (langue des pics, pattes) seraient sensibles aux vibrations. En 1971, Burton en a dénombré 400 sur la partie supérieure du bec du bécasseau spatule et 360 sur la mandibule inférieure, contre 160 et 150 respectivement chez un autre bécasseau *(Calidris ruficollis)* dont le bec est de forme normale. Le bec des bécassines et des bécasses est riche en corpuscules de Herbst ainsi que les bourrelets colorés qui entourent le bec des jeunes Passereaux (merle noir, étourneau, etc.) et d'autres espèces (pics). On les trouve encore en grand nombre sur le bec des oies et des canards, et sur les espaces de peau nue.

Goût. Il existe, dans la cavité buccale, à la base et sur les côtés de la langue, des corpuscules du goût; mais, jusqu'à présent, on n'a pas encore réussi à savoir si tous les Oiseaux distinguent les quatre saveurs essentielles, sucré, amer, salé et acide, les expériences effectuées sur des pigeons et d'autres espèces ayant donné des résultats contradictoires.

Odorat. Le nombre des espèces chez lesquelles l'odorat est développé et joue un rôle dans la vie quotidienne semble très faible : il s'agit des aptéryx de Nouvelle-Zélande et du vautour royal d'Amérique du Sud, qui se nourrit de charognes dans les forêts tropicales denses. On croyait autrefois que les vautours vivant dans les lieux désertiques ou dans les savanes et les montagnes repéraient leurs proies à l'odeur, mais plusieurs expériences ont montré qu'il n'en était rien. Des observations faites par Murphy en 1936 sur le comportement des Procellariiformes (Oiseaux de mer) permettaient de penser que ces Oiseaux détectent olfactivement les huiles et graisses animales dont ils se nourrissent. Ces observations ont été confirmées en 1972, par Grubb, pour deux puffins et deux pétrels. Les cavités nasales de certains albatros et fulmars possèdent de petites chambres qui fonctionneraient comme des indicateurs de pression et expliqueraient, en partie, l'habileté de ces Oiseaux à utiliser les courants d'air pour planer au ras de l'eau.

Glandes endocrines

Chez les Oiseaux, ces glandes sont : l'hypophyse ou glande pituitaire, la thyroïde, les parathyroïdes, les capsules surrénales, le pancréas (en partie) et les gonades.

L'hypophyse, située à la base du crâne, produit des hormones qui agissent sur les gonades, le pancréas et la thyroïde. Cependant, elle n'a pas une influence exclusive, bien que son ablation, chez le canard et le pigeon, entraîne une réduction de la croissance, du taux du métabolisme, une diminution de la température et de l'activité, ainsi qu'une perte de poids de l'appareil digestif. Ses principales hormones sont la gonadotropine, la prolactine, l'ACTH et l'hormone lutéinisante qui agit sur les testicules.

La thyroïde, qui se trouve dans le cou, stimule le métabolisme, la croissance, le développement sexuel, la pousse des plumes; chez certaines espèces, elle agit sur la mue.

Les deux capsules surrénales, situées à la partie supérieure des reins, sécrètent des hormones agissant sur le fonctionnement des reins, sur le métabolisme des hydrates de carbone et sur les gonades.

Les parathyroïdes, au nombre de deux ou quatre, produisent une hormone qui maintient dans le sang une quantité constante de calcium.

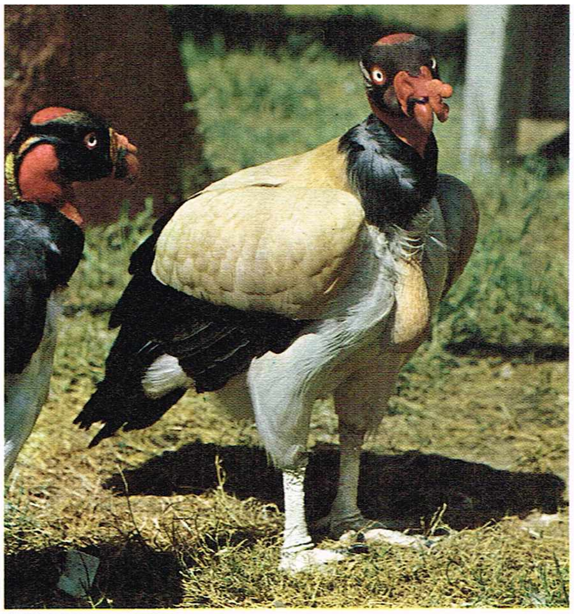

C. Bevilacqua

Les glandes sexuelles produisent aussi des hormones : les testicules sécrètent des hormones androgènes responsables de l'apparition des caractères sexuels secondaires des Oiseaux mâles.

Appareil reproducteur

Organes mâles. Les glandes sexuelles sont les deux testicules situés à la partie antérieure des reins. Leur forme est voisine de celle d'un haricot. Leurs dimensions varient selon la saison : en période de repos sexuel (l'automne et le début de l'hiver pour les Oiseaux européens), ils sont minuscules. Chaque testicule se continue par un long tube, le canal déférent, qui aboutit au cloaque. Les Oiseaux n'ont pas d'organe sexuel externe, à l'exception de l'autruche et des canards, qui ont une sorte de pénis.

Organes femelles. Ce sont les deux ovaires et les deux oviductes, mais seuls l'ovaire et l'oviducte gauches sont fonctionnels, les organes du côté droit étant atrophiés. Cependant, chez plusieurs genres de Rapaces diurnes *(Falco, Circus* et *Accipiter)* les deux ovaires sont normalement développés, mais seul le gauche est actif. A la suite de l'ovaire, se trouve l'oviducte, long tube où l'on distingue cinq parties : le pavillon (qui reçoit l'ovule, ou jaune d'œuf), le magnum (dans lequel le blanc de l'œuf est sécrété), l'isthme (où l'œuf en formation reçoit les deux membranes coquillières), l'utérus (partie où se forme la coquille et où l'œuf séjourne le plus longtemps), le vagin, qui communique avec le cloaque. L'ovaire en activité ressemble à une grappe de raisins dont les grains (ovules) sont de tailles différentes.

Les ovules se développent dans des follicules (enveloppes de tissu nourricier) situés dans la partie externe de l'ovaire; quand ils sont mûrs, les parois des follicules se rompent et les ovules gagnent l'oviducte. La fécondation d'un ovule par un spermatozoïde se produit dans la partie supérieure de l'oviducte. Du très grand nombre de follicules (jusqu'à plus de vingt mille), seuls quelques-uns donneront des œufs.

Le fonctionnement des organes sexuels mâles et femelles est sous l'étroite dépendance de plusieurs hormones.

Biologie

Nutrition

Un grand nombre d'études concernant l'alimentation des Oiseaux ont été effectuées depuis plus d'un siècle, à l'aide de méthodes qui se sont de plus en plus perfectionnées. Pendant longtemps, on s'est borné à observer ce que les Oiseaux mangeaient (ce qui est possible pour les grandes espèces, en particulier les Rapaces diurnes) ou à les tuer pour examiner le contenu de leur estomac. L'imperfection de la première de ces méthodes est évidente. Mais la deuxième présente également de sérieux inconvénients : elle est, à l'heure actuelle, inadmissible pour de nombreuses espèces car elle contribue à réduire leur nombre souvent peu élevé; en outre, elle est aléatoire, car l'estomac peut être vide ou la digestion si avancée qu'il sera impossible d'identifier les aliments avec certitude. Aussi, préfère-t-on de plus en plus d'autres procédés qui ne mettent pas en danger la vie de l'Oiseau et qui, d'autre part, permettent une

H. Courtade - Jacana

▲ *Le balbuzard* **(Pandion haliaetus)** *est un Rapace exclusivement mangeur de Poissons.*

meilleure connaissance de son régime. Il s'agit de l'examen du contenu des pelotes de réjection, de l'étude des plumées et du procédé qui consiste à empêcher les oisillons d'avaler la nourriture apportée par leurs parents. Les pelotes de réjection sont régulièrement crachées par les Rapaces nocturnes (chouettes et hiboux) et d'autres Oiseaux (goélands, corbeaux, martins-pêcheurs, etc.). Quant aux plumées, il s'agit de l'ensemble des plumes détachées du cadavre de la proie par un Rapace diurne (buse, faucon, épervier, etc.). Les Accipitridés et les Falconidés ont, en effet, l'habitude de retirer une partie des plumes des Oiseaux qu'ils ont tués avant de les manger. Cette opération est faite sur le nid ou à proximité (à l'époque de la reproduction), ou encore sur un perchoir favori. En ramassant ces plumes, on peut déterminer quelles sont les espèces chassées par le Rapace. Enfin, la méthode la plus récente est fondée sur le fait que l'œsophage des oisillons est plus souple que la trachée et qu'on peut le fermer (de l'extérieur) avec un lien qui rend la déglutition impossible. On obtient ainsi des aliments en parfait état puisqu'ils n'ont subi aucune digestion. Cette méthode est utilisée avec les espèces qui apportent beaucoup d'aliments en une fois (martinets, hirondelle de fenêtre, corbeaux, etc.) mais aussi avec celles qui donnent les proies une à une (mésanges, pouillots).

Ration quotidienne. Les Oiseaux (surtout les petites espèces) mangent proportionnellement beaucoup. La quantité de nourriture absorbée en une journée par une grive équivaut, en poids frais, à 30 ou 40 % de son propre poids. Un pouillot, un roitelet ou un troglodyte avalent quotidiennement l'équivalent de 90 à 100 % de leur poids. Chez l'hirondelle de cheminée, cette proportion atteint 120 % et, chez les colibris, 200 %. C'est pourquoi ces petits Oiseaux ne peuvent supporter une longue privation de nourriture :

Résistance au jeûne

Hirondelle	15 à 24 h
Rouge-queue à front blanc (jeune)	21 à 49 h
Martinet noir	24 h
Gobe-mouches noir (jeune)	29 h
Traquet motteux	36 h

En revanche, les grands Rapaces ne consomment en moyenne que l'équivalent de 16 % de leur poids. Ne trouvant pas régulièrement de la nourriture en toutes saisons, ils sont capables, en hiver quand il y a beaucoup de neige et qu'il gèle fort, de jeûner plusieurs jours et exceptionnellement plusieurs semaines (la durée maximale enregistrée en captivité est de quarante-cinq jours chez le pygargue à queue blanche, *Haliaetus albicilla*).

Différents régimes. Plutôt que de tracer un tableau général des principaux types de régimes alimentaires, ce qui serait très arbitraire, nous allons examiner quelques exemples spécifiques.

Régime piscivore. Le balbuzard *(Pandion haliaetus)* est un Rapace exclusivement mangeur de Poissons; survolant les grands étangs ou les lacs, il plonge sur le Poisson d'une hauteur de 10 à 50 m; il le saisit dans ses griffes et sort de l'eau (où il ne disparaît pas toujours complètement), le tenant dans le sens de la longueur et la tête dirigée vers l'avant. Les Poissons capturés appartiennent aux espèces suivantes : brochet, carpe, tanche, rotengle, perche, brême, goujon. La plupart pèsent 300 g, ce qui correspond aux besoins quotidiens d'un balbuzard adulte. La pêche de Poissons de plus de 500 g est rare (le balbuzard lui-même pèse 1 500 g), mais on en a déjà observé emportant, avec peine, il est vrai, des brochets de 1 500 g. Il arrive que l'Oiseau s'attaque à des Poissons beaucoup trop lourds (3 kg et plus). Dans ce cas, les deux adversaires restent à égalité et tous deux périssent, l'Oiseau ayant enfoncé ses griffes trop profondément dans la chair du Poisson, qui l'entraîne sous l'eau. La consommation totale d'une famille comptant deux adultes et trois petits s'élève à près de 140 kg de Poissons, durant l'élevage qui dure environ 65 jours et en comptant la période précédant la ponte (construction du nid et incubation); selon K. Moll, le poids des Poissons mangés par la même famille depuis l'arrivée des adultes au printemps jusqu'au départ en automne (de mars à septembre) ne dépasse pas 300 kg.

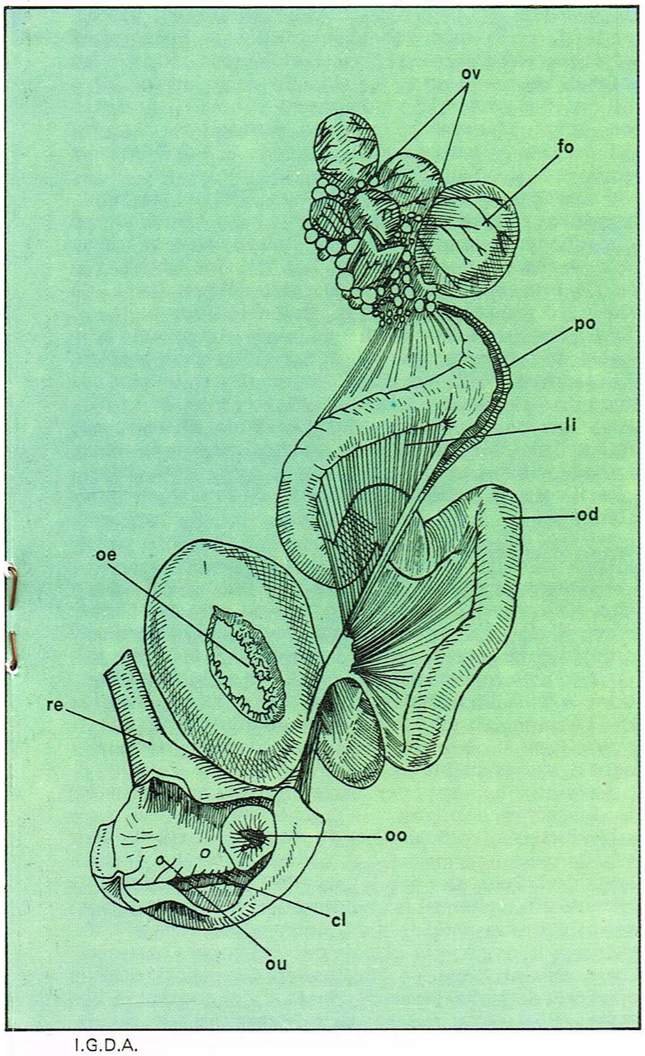

I.G.D.A.

◀ *Représentation schématique des organes génitaux d'une poule domestique : ov, ovaire; fo, follicule ovarien; po, pavillon de l'oviducte; li, ligament de l'oviducte; od, oviducte; œ, œuf; re, rectum; oo, ouverture de l'oviducte; cl, cloaque; ou, orifice de l'uretère (cloaque et utérus sont ici artificiellement ouverts).*

Régime insectivore. Plus encore que les hirondelles, qui avalent un nombre non négligeable d'Araignées, l'engoulevent d'Europe *(Caprimulgus europaeus)* est le type même de l'insectivore migrateur qui reste chez nous de la fin avril au mois d'août. Il s'agit d'une espèce crépusculaire et nocturne qui chasse en vol ou à l'affût au-dessus des friches, des landes, des pâtures sèches et des bois rabougris. La chasse est généralement interrompue entre 23 h et 1 h du matin ou quand la nuit est vraiment noire. L'engoulevent consomme chaque jour environ 17 g de nourriture (il pèse de 70 à 80 g). Il vit aux dépens de nombreuses espèces d'Insectes ailés (179, réparties entre 5 484 pièces, dans le cas d'une nichée étudiée par Schlegel en 1969) : Éphémères, Odonatoptères, Orthoptères, Coléoptères, Diptères, Papillons, Hyménoptères, Névroptères, punaises et phryganes. Dans l'exemple cité, les Papillons représentaient 62,4 % de l'ensemble; puis venaient, par ordre d'importance, les Diptères (12,2 %), les Coléoptères (7,7 %), les phryganes (7,2 %) et les Névroptères (5,7 %). Les Insectes sont apportés aux deux petits en nombre important à chaque becquée : cinquante en moyenne et parfois plus de deux cents.

La taille des proies varie en fonction de l'âge des oisillons et passe de 7,9 mm à 13,9 mm selon qu'ils ont deux jours ou plus de cinq jours. En un printemps et un été la consommation de 10 couples d'engoulevents et de leurs petits a été estimée par Schlegel à environ 750 000 Insectes.

Régime mixte. La cigogne blanche *(Ciconia ciconia)* nous en donne un bon exemple. Elle passe couramment pour une mangeuse de grenouilles, mais en fait ces Amphibiens ne jouent qu'un rôle très secondaire dans son alimentation. Hornberger, a résumé, en 1967, nos connaissances en se fondant principalement sur les résultats obtenus en Allemagne, où la population de cigognes a toujours été beaucoup plus élevée qu'en France (en 1958, 4 750 couples contre 135 en Alsace). Les principaux groupes de proies consommées par la cigogne sont les vers de terre (de 8 à 18 cm de long), les Insectes (vers blancs et hannetons adultes, grillons des champs, criquets, carabes, silphes, courtilières, chenilles de diverses espèces), les petits Mammifères (il s'agit surtout de campagnols des champs et de campagnols économes, terrestres, et de taupes). Les Mollusques, les Amphibiens (grenouilles, crapauds), les Reptiles (lézards, couleuvres à collier, vipères), les Poissons (vivants et morts) ne sont que des proies occasionnelles.

Différences de régime selon l'âge, le sexe et la saison. La nourriture consommée par les oisillons n'est pas toujours la même que celle de leurs parents, ne serait-ce que du point de vue de la taille des éléments dont elle se compose. Newton a décrit, en 1972, comment les jeunes linottes et verdiers reçoivent des Insectes, alors que leurs parents sont presque exclusivement granivores. Les jeunes pigeons et tourterelles mangent, pendant leurs premiers jours, la substance produite par le jabot de leurs parents.

Parmi les différences de régime selon le sexe, on peut noter celle qui concerne les dimensions des proies capturées : ainsi, le mâle de l'épervier *(Accipiter nisus)* chasse à peu près uniquement des Oiseaux de la taille du moineau domestique, alors que la femelle, plus forte, capture des proies de la grosseur du merle noir et du geai.

Les différences selon les saisons sont évidentes pour les Oiseaux migrateurs qui ne trouvent pas dans leurs quartiers d'hiver les mêmes espèces que dans leur patrie (bien que ces proies différentes puissent appartenir aux mêmes groupes zoologiques). Pour les espèces sédentaires, le régime hivernal peut être fort différent du régime printanier. Ainsi, comme l'a constaté en 1968 Blume, en hiver, les pics épeiches d'Allemagne mangent beaucoup de graines de Conifères, qui n'entrent que pour une part négligeable dans leur alimentation à la belle saison.

Stocks de nourriture. Quelques espèces d'Oiseaux ont l'habitude d'établir des « réserves », mais ce serait faire preuve d'anthropomorphisme que de leur attribuer des qualités de prévoyance. On peut réduire cette tendance à accumuler de la nourriture quand celle-ci abonde à un comportement instinctif. A la fin de l'été, le geai *(Garrulus glandarius)* ramasse pendant quelques semaines des glands, en met plusieurs (jusqu'à 8) dans son gosier et dans la poche de peau qui se trouve à la base de son bec, et les transporte souvent à plusieurs kilomètres, les déposant et les cachant plus ou moins sous la mousse et les feuilles mortes. Retrouve-t-il ses cachettes en hiver? Aucune observation n'a pu le prouver jusqu'à présent. Une habitude analogue a été décrite, en 1951, par Swanberg chez le casse-noix de Scandinavie *(Nucifraga caryocatactes)*, mais ici l'Oiseau retrouve les caches, même quand la couche de neige atteint 20 à 30 cm. Les réserves se composent surtout de noisettes qui sont enfoncées à quelques centimètres dans le sol ou sous la mousse, au nombre de 3 à 9 à chaque endroit.

Parasitisme alimentaire. Plusieurs Oiseaux se nourrissent aux dépens d'autres espèces en les forçant à abandonner la nourriture qu'elles transportent ou même celle qu'elles ont déjà avalée. Il s'agit des labbes, des frégates et aussi, de plus en plus fréquemment, de quelques mouettes, goélands, sternes et des foulques. En Islande, par exemple, on a vu le goéland argenté et le goéland bourgmestre piquer sur des eiders qui revenaient à la surface de la mer avec des moules et obliger ces canards à lâcher leur prise. De même, sur le lac Léman, les goélands cendrés ont pris l'habitude de voler aux foulques les moules zébrées qu'elles ramassent. Enfin, tout récemment, un parasitisme de ce genre a été observé chez la sterne arctique aux dépens de la sterne Pierre-Garin.

Reproduction

La maturité sexuelle apparaît généralement à un an chez les petits Passereaux, à quatre ou cinq ans chez la cigogne blanche, à quatre ans au moins chez le goéland argenté, entre cinq et sept ans chez le puffin à bec grêle, etc.

Saison de reproduction. A quelques exceptions près, dont la plus frappante est celle du manchot empereur de l'Antarctique, la saison de reproduction coïncide avec l'époque où les conditions météorologiques locales sont le plus favorables.

La restriction apportée concerne en particulier les espèces chez lesquelles les premières phases du cycle reproducteur (construction du nid, incubation) sont très longues, ou celles qui nichent dans les régions arctiques. Pour que les jeunes Oiseaux éclosent à la période très limitée où la nourriture sera le plus abondante et le plus adéquate, la nidification commence très tôt, même si la neige et la glace n'ont pas encore complètement disparu. Ainsi, en 1960, selon Ouspenski, dans le nord-est de la Yakoutie (Sibérie), les phalaropes à bec large *(Phalaropus fulicarius)* arrivèrent vers le 5 juin.

▼ *L'engoulevent d'Europe (Caprimulgus europaeus) est le type même de l'insectivore migrateur.*

J. Solaro - Jacana

La ponte commença vers le 15 juin ; les éclosions eurent lieu au début de juillet, et vers le 20 du même mois les jeunes volaient bien, alors que leurs parents étaient déjà repartis vers le sud.

Dans les régions tempérées de l'hémisphère Nord, les Oiseaux se reproduisent au printemps et au début de l'été. Au contraire, en Afrique centrale (au Congo), dans une bande de 4° de latitude de part et d'autre de l'équateur, il n'y a pas de période de nidification bien déterminée. En Amérique centrale, les colibris nichent surtout de novembre à février, époque où les fleurs abondent, alors que la majorité des autres Oiseaux niche en avril.

Dans ces limites, l'époque de la ponte dépend de facteurs individuels : on a démontré, par exemple, que les Oiseaux nichant pour la première fois commençaient à pondre plus tardivement que les Oiseaux âgés. La différence est de quelques jours et parfois davantage.

Formation des couples. Les futurs partenaires se rencontrent et font connaissance grâce à des signaux optiques et acoustiques (combinés ou non) accompagnés de gestes et d'attitudes ; l'ensemble de ces manifestations est appelé « parades nuptiales ». Une parade nuptiale peut donc être un chant (rossignol) ou une série de cris, suivis, précédés ou accompagnés de sons extravocaux ou d'attitudes (pics, tétras, rapaces, hérons, etc.). La parade nuptiale est, le plus souvent, effectuée par le mâle. Chez certaines espèces où la voix ne joue pas un rôle capital (canards, dindons, paons, faisans, ménures, paradisiers, manakins, coq de roche et autres Passereaux), les mâles ont un plumage somptueux qu'ils mettent en valeur. Cette livrée est un des caractères sexuels secondaires qui les distinguent immédiatement des femelles, au plumage terne et dépourvu d'ornements (ainsi, le contraste entre le faisan de Colchide mâle et la poule faisane est frappant).

Chez les Oiseaux où les deux sexes ne se distinguent pas extérieurement par la coloration (héron cendré, fou de Bassan, goélands, grèbe huppé, etc.), la parade nuptiale a pour première fonction d'éviter les méprises. Le mâle en prend l'initiative, et c'est la réaction de l'Oiseau auquel il s'adresse qui lui montrera s'il a affaire à un mâle ou à une femelle. Dans le deuxième cas, chacun des deux Oiseaux jouera un rôle dans la parade (par exemple, chez le grèbe huppé, ils accomplissent les mêmes gestes). On admet que les parades nuptiales favorisent, par leur répétition et leur symbolisme (la sterne naine mâle apporte un petit Poisson à sa femelle, le héron cendré transporte des branchettes), l'excitation sexuelle et la synchronisation du fonctionnement des appareils sexuels mâle et femelle. En effet, une fois que le couple est formé, la copulation ne tarde pas.

Sur les cent soixante-huit (ou cent cinquante-quatre) familles d'Oiseaux actuellement vivants, douze renferment environ quatre-vingt-cinq espèces chez lesquelles les parades nuptiales sont collectives et se déroulent sur des « arènes », c'est-à-dire des emplacements régulièrement fréquentés par les mâles à la période de reproduction. Parmi les plus connues, on compte le chevalier combattant *(Philomachus pugnax)*, les tétras, et des Passereaux exotiques (manakins, coqs de roche, Cotingidés). Chez le combattant, plusieurs mâles se réunissent et chacun parade sur un petit territoire qu'il se réserve dans l'arène, mais si un concurrent l'approche de trop près les deux adversaires se battent. Les combats sont également fréquents chez le tétras lyre *(Lyrurus tetrix)*. Les luttes entre Oiseaux mâles de la même espèce se terminent parfois, mais rarement, par la mort de l'un des antagonistes.

Physiologie de la reproduction. Au début de la saison de reproduction, l'organisme des mâles et des femelles subit d'importantes modifications : les testicules augmentent de volume (ceux du moineau domestique sont de 200 à 300 fois plus volumineux qu'au début de l'hiver) ; chez les femelles il en est de même pour l'oviducte et l'ovaire (l'oviducte de l'étourneau femelle pèse 2 500 mg contre 20 seulement en période de repos sexuel).

Le comportement change complètement, surtout chez les mâles qui ne se tolèrent plus (en hiver, on peut voir plusieurs merles noirs mâles assemblés dans un jardin pour profiter des fruits tombés, mais au printemps chacun est sur son domaine) et, peu à peu, délimitent un territoire, espace dans lequel ils ne supporteront la présence d'aucun congénère, sauf celle de la femelle avec laquelle ils seront accouplés. La surface du territoire, très faible chez les petits Passereaux (1 200 m² chez le merle noir, 6 000 m² chez le rouge-gorge), atteint des centaines d'hectares chez les Rapaces diurnes (700 ha pour l'épervier). Inversement, elle est presque nulle (quelques décimètres ou mètres carrés) chez les Oiseaux qui nichent en colonies (hérons cendrés, fous de Bassan).

Sauf quelques exceptions (sterne fuligineuse, albatros, vautours), les Oiseaux ont un cycle sexuel par période de douze mois, et l'on admet qu'il est déclenché par la situation du milieu dans lequel ils vivent. Cependant, en 1972, Berthold et Klein ont montré expérimentalement, après avoir soumis pendant plusieurs années des Oiseaux à des conditions d'éclairage constantes, que deux espèces (fauvettes des jardins et à tête noire) ont aussi un rythme interne indépendant de l'environnement.

Dans les zones arctique et tempérée de l'hémisphère Nord, le facteur qui provoque les changements affectant l'organisme des Oiseaux reproducteurs est l'augmentation de la durée du jour ; ce processus est expliqué de la manière suivante : par l'intermédiaire des yeux (ou même directement à travers le crâne, comme l'a montré expérimentalement Benoît en 1950) et du nerf optique, l'excitation produite par la lumière est transmise au cerveau qui l'enregistre, et l'hypothalamus, centre nerveux, stimule le lobe antérieur de l'hypophyse. Cette glande réagit en sécrétant une hormone qui va déclencher le fonctionnement des gonades et préparer l'organisme à la reproduction. A leur tour, les hormones androgènes (mâles) ou œstrogènes (femelles) des gonades agissent

J. Six

▲ ***Couple de canards mandarins* (Aix galericulata) *d'Asie orientale ; chez ces Oiseaux, où la voix ne joue pas de rôle capital, c'est sa livrée brillante que le mâle met en valeur au cours de la parade nuptiale.***

J. Six

▲ *Accouplement de cailles* (Coturnix coturnix), *de la famille des Phasianidés, dans la position la plus fréquente.*

sur le comportement de l'Oiseau et les caractères sexuels secondaires des mâles. Cette influence cyclique de la lumière a reçu le nom de photopériodisme.

Dans les pays tropicaux éloignés de l'équateur et où la longueur du jour ne varie pas au cours de l'année, c'est le régime des pluies qui exerce l'influence décisive, les Oiseaux se reproduisant quand elles tombent. On ignore encore comment ce facteur agit sur leur organisme.

Accouplement. L'accouplement est réalisé par le contact des cloaques du mâle et de la femelle. Dans la position la plus fréquente, le mâle se maintient sur le dos de la femelle en battant des ailes ou non. L'accouplement a lieu soit par terre, soit sur un perchoir. Les canards, les oies, les cygnes, les grèbes et les plongeons s'accouplent sur l'eau. Certains martinets (le martinet noir par exemple) sont les seuls Oiseaux à s'accoupler occasionnellement en vol.

Nature des liens sexuels. De nombreux Oiseaux sont monogames pendant une saison de reproduction. Autrement dit, un mâle s'accouple avec une seule femelle (par exemple la fauvette à tête noire et le merle noir) et tous deux élèvent une ou plusieurs nichées. Mais le partenaire peut changer à chaque fois chez certaines espèces (hirondelle de rivage).

La polygamie revêt deux formes : la polygynie (un mâle s'accouple avec plusieurs femelles) et la polyandrie (une femelle s'accouple avec plusieurs mâles). La polygynie a été constatée chez le gobe-mouches noir, le bruant proyer, la « mésange » rémiz, le troglodyte, le gobe-mouches à collier et le butor étoilé (Oiseaux vivant en Europe) et aussi chez les faisans, l'autruche (chez laquelle elle n'est pas une règle absolue) et le nandou. La polyandrie existe chez les turnix, les rhynchées, les phalaropes, les tinamous et les jacanas. Enfin, dans quelques groupes, aucun « lien » durable n'existe entre mâles et femelles, qui se séparent juste après l'accouplement. Vivent ainsi en promiscuité les tétras, le chevalier combattant, les manakins et certains paradisiers.

Fidélité des partenaires. Avant l'emploi de bagues colorées il était impossible (sauf exceptions) d'affirmer que deux Oiseaux étaient fidèles l'un à l'autre au cours d'une ou plusieurs saisons successives. Le nombre d'espèces chez lesquelles le mâle et la femelle se retrouvent d'année en année pour se reproduire est très faible. Certains de ces Oiseaux ont une forte taille et une longévité potentiellement élevée : les manchots et les albatros. Chez l'albatros de Buller *(Diomedea bulleri)* des îles Snares, proches de la Nouvelle-Zélande, on a observé treize cas de fidélité pendant huit ans, onze cas pendant dix ans et un cas pendant vingt-trois ans. Chez la cigogne blanche, la fidélité des partenaires n'est pas du tout la règle, et ces Oiseaux sont beaucoup plus attachés à l'emplacement du nid qu'à leur conjoint. Quant à la fidélité légendaire des pigeons et des tourterelles, elle reste à démontrer...

Le *nid* est une construction plus ou moins élaborée destinée à maintenir les œufs ensemble et à les protéger contre les précipitations atmosphériques, le froid, la chaleur et les Animaux prédateurs. Souvent il sert également à abriter les oisillons. Sauf exceptions, il n'est utilisé qu'à la saison de reproduction et n'est donc pas comparable à une « maison ». On peut classer les nids d'après leurs dimensions, leur situation, leur forme, etc. Nous distinguerons, en premier lieu, les nids rudimentaires et les nids compliqués.

Certains Oiseaux ne font pas de nid et ne modifient pas l'endroit où ils pondent leurs œufs; ceux-ci sont déposés par terre, dans la végétation ou dans un nid abandonné par une autre espèce. Ainsi, les pétrels pondent dans une fente de rocher, les engoulevents sur le sol, en plein air, de même que les guillemots et le petit pingouin sur des falaises. Les faucons adoptent le nid d'autres Oiseaux, le faucon kobez, celui du corbeau freux, le faucon hobereau, celui de la corneille noire. De même, les chouettes et les hiboux n'ont pas l'instinct d'assembler des matériaux et pondent dans un trou de mur ou d'arbre, sur un plancher ou par terre. Le manchot empereur et le manchot royal, une sterne, la gygis blanche, et les Oiseaux parasites ne construisent pas non plus de nid.

Dans la catégorie des nids rudimentaires, nous placerons tous ceux qui sont le produit d'une légère modification de substrat : le plus souvent, ils ressemblent à un petit creux ménagé dans le sol et plus ou moins tapissé d'herbes, de coquillages ou d'autres matériaux (Algues, cailloux). Ce sont les nids des petits Échassiers (bécasses, bécassines, bécasseaux, chevaliers, barges, courlis, huîtriers), des perdrix et des Gallinacés en général, des sternes, des mouettes et des goélands (sauf exceptions, comme la mouette tridactyle), des gangas, du manchot Adélie (dont le nid est une couronne de cailloux), des Ratites (autruche, nandou, émeus) et des plongeons.

Les nids élaborés, qui exigent de l'Oiseau un effort plus important, sont les plus répandus : les colibris et de nombreux Passereaux, les pigeons et les tourterelles, ainsi que les hérons, nichent dans la végétation, comme la plupart des Rapaces diurnes. Les pics forent un trou dans le bois; les macareux creusent un terrier, ainsi que les guêpiers et les martins-pêcheurs.

C'est chez les Passereaux que l'on trouve les nids les plus compliqués et les plus artistiques : nids tressés des tisserins, nids tissés de la mésange à longue queue, nids maçonnés des hirondelles, etc. Les matériaux les plus divers sont employés : herbes, branches, racines, mousse, lichen, écorce, duvets végétaux, tiges de plantes herbacées, graines, fleurs, laine, poils, morceaux de peau, os, plumes, terre, sable, cailloux, et enfin des déchets industriels (papier, fils, fragments de tissu et même copeaux de métal).

La construction du nid exige souvent plusieurs jours, voire des semaines. Un tisserin asiatique, *Ploceus bengalensis,* édifie le sien en l'espace de cinq ou six jours. En Laponie finlandaise, un petit Passereau, le sizerin, *Carduelis flammea,* met entre un jour et demi et quatre jours pour confectionner une coupe de tiges de camarine, de ramilles de genévrier, de bouleau, de lichens, de flocons de laine, d'herbes, tapissée de fleurs de saule, de poils de renne et de plumes. Notre hirondelle de cheminée passe de huit à quinze jours à préparer sa coupe de boue; les martinets salanganes, qui font un nid de salive séchée, mettent une quarantaine de jours pour achever cet étrange berceau.

Dimensions des nids. Les plus grands nids sont ceux des mégapodes de Nouvelle-Guinée, des Philippines et des îles voisines : le mégapode de Freycinet élève un tumulus de terre et de débris végétaux qui finit par mesurer, au bout de plusieurs années, 8 m de diamètre et 2 m de haut (parfois même 4 m). Au bout de plusieurs décennies, certains nids de cigogne blanche atteignent exceptionnellement 2 m de haut et le poids d'une tonne car, s'ils sont régulièrement occupés, les Oiseaux y ajoutent chaque année des matériaux.

A l'opposé, les nids des colibris ont un diamètre souvent voisin de celui d'une pièce de cinq francs. Parmi les plus petits, signalons également ceux des martinets huppés qui ont l'aspect d'une cupule de 2 à 5 cm de diamètre.

Une fois que les jeunes Oiseaux ont quitté le nid, ils n'y reviennent pas (les adultes non plus). Cette règle générale souffre cependant quelques exceptions : ainsi, les pics utilisent régulièrement leur nid comme chambre. En outre, celui-ci sert pour une seule saison chez la plupart des espèces; l'année suivante, les Oiseaux en font un nouveau. Ceci ne s'applique pas, sauf acci-

Archivio Longo

J. Six

◀ *A gauche, l'hirondelle (Hirundo rustica) élabore un nid maçonné, dans un intervalle de temps de huit à quinze jours. A droite, un mâle de tisserin à tête noire (Ploceus cucullatus) construisant seul le nid.*

▼ *Les nids de cigognes blanches, ici celui d'un couple à Dougga, Tunisie, sont parmi les plus grandes constructions observées.*

dent ou dérangement, aux grands Rapaces diurnes, aux grands Échassiers et aux pics. Chez tous ces Oiseaux, l'ancien nid est le plus souvent remanié ou même agrandi.

Qui construit le nid? Chez les tisserins, c'est le mâle seul; chez beaucoup d'espèces, les deux partenaires participent à la construction : hirondelle de fenêtre, pics, mésange à longue queue, etc. Chez les petits Passereaux, c'est souvent la femelle accompagnée ou non par le mâle (rouge-gorge, pinson, verdier, linotte); chez les perdrix et faisans, c'est la femelle seule.

Ponte. Le mot ponte a deux sens. Il désigne, d'une part, l'acte de l'Oiseau femelle qui dépose un œuf dans le nid et, d'autre part, l'ensemble des œufs que la femelle produit en un laps de temps assez bref et qui se trouvent dans le nid (quand il existe) pour y être couvés. C'est cette deuxième acception que nous envisagerons pour l'instant.

Les Oiseaux suivants ne pondent, normalement, qu'une seule fois par an : plongeons, grèbes (sauf, chez nous, le castagneux), pétrels, fous, cormorans, pélicans, hérons, cigognes, canards, oies, cygnes, de nombreux Rapaces diurnes, Gallinacés, grues, outardes, la majorité des petits Échassiers, des mouettes, goélands, guillemots, pingouins, la plupart des hiboux et chouettes, la huppe, les guêpiers, les rolliers et les pics. Chez les Passereaux, de nombreuses espèces ne pondent qu'une seule fois aussi : en Europe ce sont, par exemple, les corbeaux, sittelles, rossignols, étourneaux, rousserolles, pouillots, pies-grièches, le gobe-mouches noir, etc. Mais tous ces Oiseaux sont capables d'effectuer une *ponte de remplacement,* quand leur ponte normale a été détruite par un prédateur, par les intempéries ou par des transformations brutales du milieu telles que celles produites par la fauche de l'herbe, la coupe de bois, etc. Cependant, quelques espèces ne pondent pas de nouveau quand leurs œufs ont disparu (fulmar, puffin cendré, puffin à bec grêle, etc.).

Diverses espèces font régulièrement 2 pontes normales par an; il s'agit, en Europe, d'un certain nombre de mésanges charbonnières et bleues, de l'hirondelle de cheminée, de l'alouette des champs, des grimpereaux, du troglodyte, du cincle, de plusieurs fauvettes, des roitelets, de l'accenteur mouchet, du traquet-pâtre, de la bergeronnette grise, du verdier, du chardonneret, du pinson des arbres, du serin cini, de la majorité des bruants, du martin-pêcheur, du râle aquatique et de la poule d'eau. Pour prouver qu'un couple d'Oiseaux niche deux fois de suite régulièrement (sans faire de ponte de remplacement) il est nécessaire (sauf circonstances très favorables) qu'il soit identifié avec des bagues de couleur. C'est en appliquant ce principe rigoureux (le seul valable dans le domaine scientifique) qu'en 1970 l'Allemand Löhrl s'est aperçu que, dans le sud-ouest de son pays, seulement 21 % des mésanges charbonnières faisaient 2 pontes régulières; chez la mésange bleue, cette proportion n'était que de 4 %. L'âge de l'Oiseau femelle, la position géographique du lieu où il niche et la situation météorologique générale influent sur la régularité de la deuxième ponte.

Quelques espèces peuvent faire 3 et même 4 pontes par an : ce sont le moineau domestique (4), le merle

N. Cirani

▶ ***Ces quatre illustrations montrent le développement d'un poussin. De gauche à droite : 12 h après la fécondation (on voit le disque germinatif) ; après 10 à 11 jours ; après 12 jours ; après 21 jours, le poussin casse sa coquille à l'aide de la dent de l'œuf.***

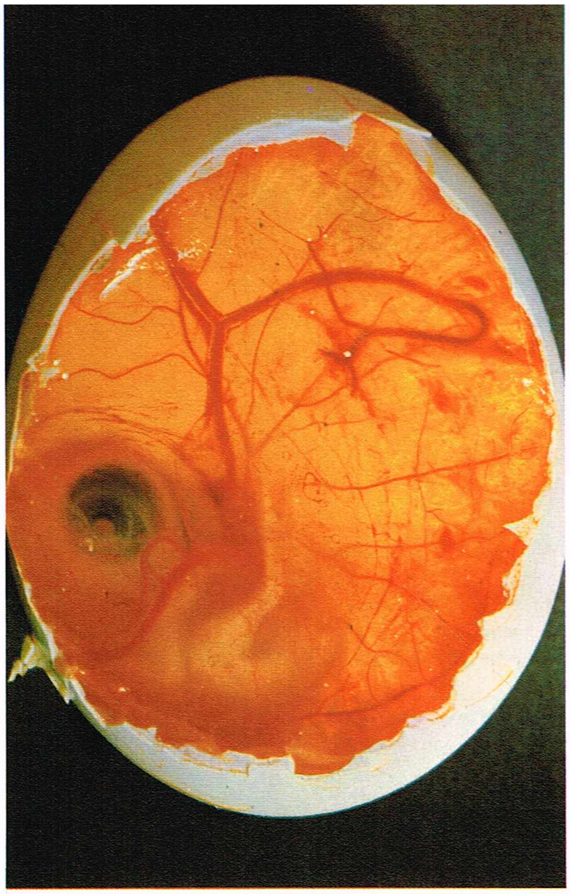

S. Prato

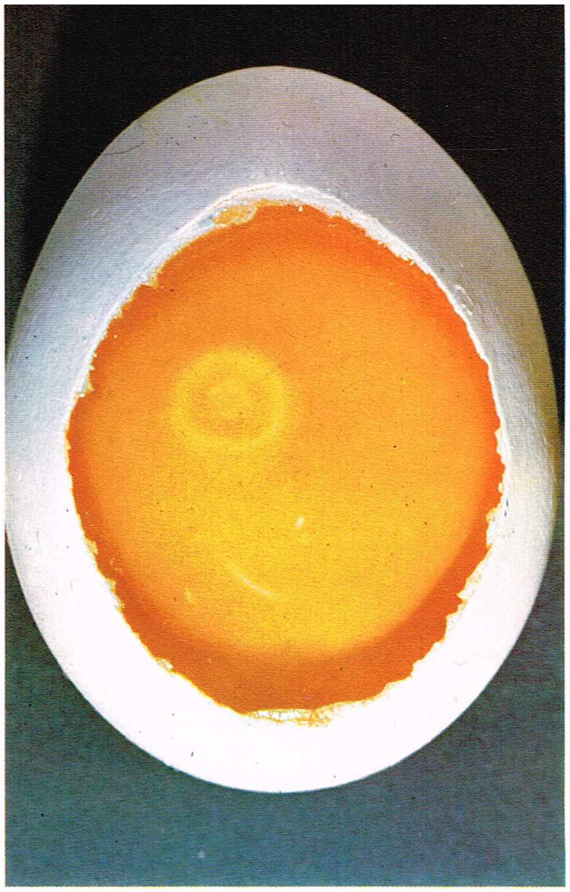

S. Prato

noir (3), le pigeon ramier (4) et la tourterelle turque (4). Mais, là encore, il s'agit seulement d'une partie des membres de ces espèces.

Importance de la ponte. Ne pondent qu'1 œuf les pétrels et puffins, le pingouin torda, les guillemots, le fou de Bassan, le vautour fauve, le circaète Jean-le-Blanc, etc. ; pondent 2 œufs les plongeons, labbes, pigeons et tourterelles (sauf exceptions), l'œdicnème criard, l'engoulevent d'Europe, la bondrée apivore ; pondent 3 œufs le pluvier guignard, les gravelots, plusieurs mouettes et goélands ; pondent 4 œufs la bécasse, les chevaliers, barges, courlis, bécassines et bécasseaux. Au-delà, le nombre des œufs n'est pas fixe, notamment chez les petits Passereaux.

Les Oiseaux dont les pontes sont les plus fortes sont le torcol (10 ou 11), la mésange charbonnière (jusqu'à 14), la perdrix grise (24), les mégapodes (jusqu'à 35) ; toutefois, chez ces derniers, la ponte s'échelonne sur plusieurs mois. Bien entendu, la poule domestique de race pondeuse est la championne toutes catégories puisque ses records sont de 344 et 353 œufs pondus en un an... En général, un œuf est pondu chaque jour, mais il y a parfois un intervalle de plusieurs jours entre la ponte de deux œufs consécutifs : deux jours chez les hérons, cigognes, outardes, colibris, martinets, trois jours chez les casoars et l'émeu, quatre à cinq jours chez le gypaète, et sept jours chez le calao terrestre.

L'œuf pondu est entouré d'une coquille calcaire percée de nombreux pores microscopiques par lesquels ont lieu les échanges respiratoires de l'embryon.

De nos jours, les plus grands œufs sont ceux de l'autruche (maximum : 17 cm de long, 14 cm de large ; poids : 1,4 kg ; épaisseur de la coquille : 1,3 à 2,1 mm). Mais les œufs de certains *Aepyornis* de Madagascar qui vivaient au début de notre ère atteignaient 32 cm de long et 23 cm de large ; leur contenance maximale était de 11 035 cm³ et leur poids a été estimé à 10 460 grammes (épaisseur de la coquille : 1,3 à 4,4 mm).

Les plus petits œufs sont ceux de plusieurs espèces de colibris : ils mesurent 10,5 mm de long et pèsent 0,25 g, et sont encore plus minuscules chez *Damophila julia*.

La coquille a une forme variable. Certains œufs sont presque sphériques, par exemple ceux de nombreux faucons ; ceux des pluviers, bécasseaux, courlis, chevaliers, guillemots, petit pingouin sont piriformes. W. Makatsch a distingué en 1967 quatre types principaux : elliptique, ovale, ovale pointu et piriforme ; pour chacun, il a compté trois formes : courte, normale et allongée.

Les œufs doivent leur couleur à des pigments déposés par des glandes situées à l'extrémité inférieure de l'oviducte, juste avant le cloaque. Excepté les blancs, leur couleur est extrêmement variable, non seulement à l'intérieur d'une même espèce mais aussi entre les différents œufs d'une ponte. En outre, la couleur peut être unie ou non ; dans ce dernier cas, des taches de teinte différente parsèment la coquille.

Les œufs sont blancs chez les pigeons et tourterelles, manchots, pics, guêpiers, martins-pêcheurs, hiboux et chouettes, martinets, pétrels, puffins, divers Passereaux comme le rouge-queue noir, le cincle, l'hirondelle de fenêtre et de rivage, etc. Les œufs ont un fond vert et sont tachetés chez le merle noir, le corbeau freux ou unis chez le rossignol et le faisan de colchide. Ils sont à fond brun chez le rossignol et le jacana asiatique. Ils sont roses et tachetés chez l'hypolaïs ictérine, roux et tachetés chez les faucons, beiges et tachés chez la sterne arctique et la mouette rieuse.

Incubation. La croissance de l'embryon n'est possible que si l'œuf est chauffé à une température voisine de 34 °C pendant un certain temps. L'Oiseau couveur qui se couche sur les œufs leur transmet la chaleur de son corps. Mais la température d'incubation varie, surtout quand la ponte est forte (mésanges par exemple) et les œufs entassés ; en effet, elle n'est pas la même sur la face de l'œuf en contact avec l'Oiseau couveur et sur celle qui touche le nid ; elle s'abaisse quand l'Oiseau s'absente ou que son partenaire vient le remplacer. C'est pourquoi les œufs sont régulièrement tournés et changés de place.

Les plumes ont des qualités isolantes si parfaites que sans l'apparition de « plaques incubatrices » la transmission de la chaleur corporelle serait impossible. Peu avant l'incubation, les Oiseaux couveurs (femelle seule ou mâle et femelle) subissent une mue spéciale sur l'abdomen : ils perdent des plumes. La peau, ainsi mise à nu, se congestionne par suite d'une circulation sanguine plus active et forme une plaque incubatrice qui sera mise en contact avec les œufs. Ce phénomène est déclenché par des sécrétions hormonales.

La durée de l'incubation varie entre 10 jours, au minimum, et 81 jours ; il est très rare qu'elle soit inférieure à 11 jours. On ne peut déterminer, à cet égard, que des moyennes, sauf pour quelques espèces où l'on observe une grande régularité (chez la poule domestique, 21 jours) ; mais, dans la plupart des cas, il y a une petite marge de variation : par exemple, 13 ou 14 jours pour la mésange charbonnière, 25 à 27 jours pour le goéland argenté et le vanneau huppé, 12 à 18 jours pour l'hirondelle de cheminée, etc. Les Oiseaux qui couvent le plus longtemps sont généralement les plus gros (manchots, grands Rapaces diurnes), mais cette règle n'est pas absolue (aptéryx).

S. Prato

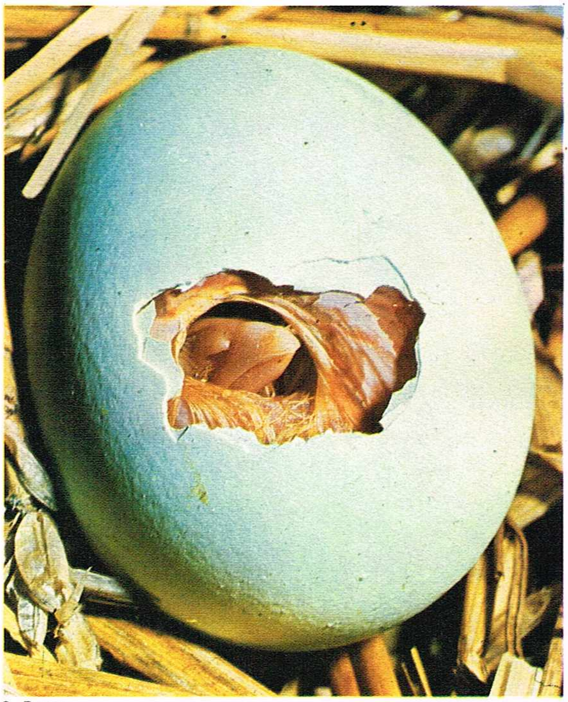

S. Prato

J .Markham

▲ ***Parmi les Oiseaux, les Passereaux sont ceux qui nourrissent leurs petits avec la plus grande fréquence ; ici, une linotte mélodieuse*** **(Carduelis cannabina)** ***avec sa nichée.***

Éclosion. Le jeune Oiseau casse la coquille de l'œuf grâce à une protubérance calcaire éphémère, appelée « dent de l'œuf » ou mieux « diamant », située à l'extrémité de la mandibule supérieure et, chez certaines espèces, sur la mandibule inférieure aussi (guillemots, Scolopacidés, sternes, phalaropes). Cette excroissance disparaît soit dans la première semaine qui suit l'éclosion, soit seulement plus tard (pic noir, petit pingouin, guillemot à miroir, macareux moine). Le temps mis par le jeune Oiseau à sortir de l'œuf varie entre quelques heures et six jours, parfois davantage, depuis les premières craquelures de la coquille. Quand la ponte comporte plus d'un œuf, l'éclosion est simultanée (c'est-à-dire qu'elle se produit en l'espace d'une journée environ ou de quelques heures à l'intérieur du nid) ou échelonnée.

Certains Oiseaux commencent à couver dès que le premier œuf (ou le deuxième) est pondu. Ceux qui sont pondus après ont un retard de un à quatre jours selon l'importance de la ponte, et les éclosions sont successives : c'est ce qui se passe chez les hiboux, chouettes et Rapaces diurnes. L'éclosion est simultanée quand l'incubation commence après que tous les œufs ont été pondus ; ce cas, le plus général, a lieu chez les canards, bécasseaux, chevaliers, perdrix, chez de nombreux Passereaux, etc.

Les *jeunes Oiseaux*. Certains, à leur sortie de l'œuf, sont couverts de duvet, peuvent marcher très rapidement, ont les yeux ouverts et sont capables de picorer la nourriture eux-mêmes. On les appelle *poussins* et on les qualifie de *nidifuges* parce qu'ils abandonnent leur nid tout de suite. Ce sont les jeunes Galliformes, Charadriiformes, Ansériformes, plongeons, grèbes, outardes, râles, flamants et Ratites. Les jeunes mouettes et goélands, sternes et Alcidés ainsi que les petits manchots ont tous les caractères des nidifuges sauf qu'ils ne se déplacent guère, au moins pendant les premiers jours, et doivent être nourris par leurs parents. Ce sont en quelque sorte de faux nidifuges.

Au contraire, d'autres jeunes Oiseaux, nus ou couverts de duvet, capables de voir ou aveugles pendant quelques jours, ne peuvent absolument pas se déplacer et se nourrir eux-mêmes. Ils restent dans le nid et dépendent entièrement de leurs parents qui viennent leur donner à manger à intervalles plus ou moins rapprochés. On les appelle *oisillons* et on les qualifie de *nidicoles* parce qu'ils ne quittent pas leur nid pendant un certain temps, variable selon l'espèce. Ce sont les petits de tous les Passereaux, des Rapaces diurnes et nocturnes, des pics, coucous, martins-pêcheurs, calaos, perroquets, martinets, colibris, albatros, pétrels, pélicans, fous, cormorans, cigognes, hérons, pigeons, etc. Leur croissance est très rapide : en deux mois une jeune cigogne blanche d'Alsace passe de 70 g à 4 kg environ (Schierer, 1972).

Élevage. Période de dépendance des oisillons vis-à-vis de leurs parents, l'élevage dure seulement une quinzaine de jours chez de nombreux petits Passereaux, mais jusqu'à 14 mois chez une frégate *(Fregata minor)* de l'île Christmas dans l'océan Pacifique. Ce sont les Passereaux qui nourrissent leurs petits avec la plus

J. Markham

◀ ***Une foulque*** **(Fulica atra)** ***couvant ses œufs.***

Archivio Longo

R. Longo

▲ *En haut, le coucou gris, dont on voit ici un jeune nourri par un rouge-gorge, exerce son parasitisme aux dépens de nombreux Passereaux. En bas, le bec-croisé des sapins* **(Loxia curvirostra)** *est un exemple typique d'Oiseau envahissant la France à intervalles irréguliers.*

grande fréquence : chez la rousserolle effarvatte *(Acrocephalus scirpaceus),* qui vit dans les roseaux au bord des étangs et des cours d'eau, les jeunes sont nourris, en moyenne, 2 800 fois au cours de leur séjour au nid qui dure 11 jours, et, comme après leur sortie les parents continuent à les nourrir, on a estimé à environ 5 000 le total des becquées (la becquée est la nourriture contenue dans le bec de l'Oiseau adulte ou dans son gosier et distribuée à un ou plusieurs oisillons au cours d'une même visite). Chez au moins cent trente espèces d'Oiseaux on a observé, plus ou moins rarement, l'existence de « nourrices » qui aident les parents à nourrir leur nichée. Parfois, les jeunes issus d'une première ponte participent à l'élevage de ceux de la deuxième (malures d'Australie, hirondelle de fenêtre, mésange à longue queue, troglodyte, cardinal).

Dans plusieurs espèces appartenant à des ordres différents, les nichées de quelques couples se réunissent en « crèches ». Ceci a été signalé plus ou moins régulièrement chez le pélican blanc, le tadorne de Belon, l'eider à duvet, les flamants et surtout les manchots (empereur, royal et Adélie). Quelques adultes, en général des sujets non reproducteurs chez le manchot empereur ou des femelles chez le tadorne, gardent les jeunes pendant que leurs parents vont à la pêche ou sont en train de muer (cas du tadorne).

Parasitisme. Environ quatre-vingts espèces parasitent d'autres Oiseaux. Ce sont une cinquantaine de coucous, le canard à tête noire *(Heteronetta atricapilla)* d'Amérique du Sud, les onze espèces de veuves (Plocéidés), les quatorze indicateurs (Indicatoridés) et quelques Ictéridés et Passereaux américains (surtout le molothre noir, *Molothrus ater*). Les espèces dont les habitudes ont été étudiées avec le plus grand détail sont le coucou gris d'Europe *(Cuculus canorus),* le molothre, ainsi que, plus récemment, les veuves.

Le parasitisme est plus ou moins compliqué. Notre coucou gris, répandu partout à la campagne (bois, prairies, roselières, alpages), en présente le type le plus achevé : il ne fait pas de nid, ne couve pas ses œufs et ne s'occupe pas de ses petits, qui sont répartis dans plusieurs nids de fauvettes, rousserolles, rouges-gorges, troglodytes ou bergeronnettes grises, pour ne citer que les espèces les plus souvent parasitées. Après avoir retiré un œuf de l'espèce-hôte, la femelle du coucou en pond un seul et va répéter ce manège de cinq à huit fois dans autant de nids de la même espèce. Son œuf présente une coloration de fond et des taches qui ressemblent plus ou moins à celles des œufs de l'hôte. Il est nettement plus gros (il mesure en moyenne 22,4 × 16,5 mm, alors que les œufs de quatre espèces fréquemment parasitées ont en moyenne 18,6 × 13,8 mm). L'incubation dure 12 jours et demi, c'est-à-dire 1 ou 2 jours de moins que celle de l'espèce-hôte. Durant les 2 ou 3 jours qui suivent son éclosion, le jeune coucou rejette par instinct en dehors du nid tout ce qui touche sa peau, en l'occurence les œufs de l'hôte et éventuellement les oisillons qui viennent d'éclore. Au prix de grands efforts, il les coince entre ses moignons d'ailes et les pose sur le bord du nid. En général, il reste donc seul. Ses parents adoptifs le nourrissent comme s'il s'agissait d'un de leurs petits, comportement apparemment aberrant qui s'explique de la façon suivante : n'étant plus à leur place dans le nid, leurs propres oisillons (ou leurs œufs) sont considérés comme des corps étrangers, et c'est le jeune coucou qui bénéficie de leurs soins puisqu'il se trouve à leur place. Cependant, certains Oiseaux rejettent souvent l'œuf du coucou ou abandonnent leur nid quand il a été parasité (la fauvette noire, notamment).

Déplacements

A tout moment de l'année il y a, dans le monde, des Oiseaux en voyage. Dans l'hémisphère Nord, la plupart des déplacements ont lieu au printemps et en automne. Chaque année, des milliards d'Oiseaux quittent les lieux où ils se sont reproduits et gagnent d'autres régions où ils passeront la saison qui leur aurait été défavorable s'ils étaient restés dans leur patrie. Du point de vue de la nature et de l'ampleur des déplacements qu'ils effectuent, les Oiseaux que l'on observe en France peuvent être répartis en plusieurs catégories.

Les *Oiseaux sédentaires* ne quittent pas notre pays, quelle que soit la saison. Ceci ne veut pas dire qu'ils passent nécessairement toute leur vie dans le même village, le même bois ou le même marais, mais seulement que leur rayon d'action est limité (quelques kilomètres à quelques dizaines de kilomètres). Dans ce premier groupe, on compte le moineau domestique, la pie, la corneille noire, etc.

Les *Oiseaux migrateurs* partent en voyage plus ou moins loin de la région où ils se sont reproduits et sont absents pendant un laps de temps variable. Considérée globalement, une migration est un mouvement de va-et-vient entre deux zones, l'aire de reproduction d'une part et les quartiers d'hiver d'autre part. La migration est donc un phénomène régulier qui a lieu chaque année, à des époques précises pour chaque espèce. Le départ se produit dans le courant de l'été ou en automne et le retour au printemps suivant. Même pendant ces saisons, tous les mouvements de bandes d'Oiseaux ne sont pas des migrations, ou mouvements migratoires. Si l'on voit en automne à la nuit tombante une troupe de corbeaux freux en vol, il peut s'agir simplement d'Oiseaux regagnant leur « dortoir ».

Dans le détail, on distingue divers types parmi les espèces migratrices.

Les grands migrateurs, ou migrateurs au long cours, sont appelés ainsi parce qu'ils franchissent de longues distances. Tous les membres d'une même espèce quittent la zone de reproduction en automne et vont passer l'hiver en Afrique. Le coucou gris, les hirondelles de fenêtre et de cheminée, le martinet noir, le faucon

hobereau, la fauvette des jardins, le pouillot siffleur en sont quelques exemples.

Les migrateurs partiels sont des espèces chez lesquelles certains individus se déplacent, alors que d'autres, vivant sous un climat plus favorable, sont sédentaires. A l'intérieur de la France, le milan royal, le pouillot véloce et le traquet pâtre appartiennent à ce groupe. Mais c'est surtout à l'échelle de l'Europe qu'apparaissent les caractères des migrateurs partiels : les pinsons des plaines françaises sont sédentaires alors que ceux du centre, de l'est et du nord de l'Europe sont franchement migrateurs, surtout les jeunes et les femelles.

Les Oiseaux de passage ne font que traverser notre pays au printemps et en automne et n'y séjournent que peu de temps, car leurs lieux de reproduction et leurs quartiers d'hiver sont situés dans d'autres régions. La grue cendrée en est l'exemple le plus typique. Le chevalier arlequin, le pipit à gorge rousse, le balbuzard fluviatile en sont d'autres.

Les visiteurs d'hiver passent seulement la mauvaise saison chez nous. Ils se reproduisent dans le nord ou l'est de l'Europe, la France étant leur quartier d'hiver. Le pinson du Nord, la grive mauvis et la grande majorité des grives litornes que l'on voit dans nos plaines en hiver entrent dans cette catégorie.

Enfin, il existe des espèces que l'on ne peut qualifier de migratrices selon le critère adopté. Ce sont, par exemple, les Oiseaux « accidentels » comme le durbec ou le harfang (qui normalement passent l'hiver au nord de la France et descendent exceptionnellement plus au sud), les Passereaux et les petits Échassiers américains qui traversent l'Atlantique en très faible nombre et aboutissent sur les côtes ou les îles bretonnes. Ils ne reviendront pas chez eux, certains franchissant l'Océan sur un bateau ou poussés par un vent violent.

Les *envahisseurs* se montrent en France à intervalles irréguliers, mais il s'agit toujours des mêmes espèces. Ces Oiseaux, originaires d'Europe orientale (Russie) ou de Scandinavie, apparaissent en nombre plus ou moins important selon l'année et se répandent dans les plaines du Nord et du Nord-Est, atteignant parfois l'Ouest et le Centre. Le bec-croisé des sapins, le casse-noix et le jaseur boréal en sont trois exemples typiques. La dernière invasion de casse-noix a eu lieu en 1968-1969 et celle de jaseurs en 1965-1966. L'étude détaillée des déplacements dans certaines régions a permis d'inclure d'autres espèces dans cette catégorie. Certaines années, il y a de véritables invasions de mésanges noires dans l'est de la France. Le pic épeiche se montre aussi en très grand nombre en automne dans le nord de l'Europe (par exemple, dans le sud de la Suède ou dans l'ancienne Prusse orientale).

A l'intérieur de la France il existe, en outre, de petites migrations où les déplacements se chiffrent seulement par dizaines ou centaines de kilomètres. Ce sont celles de quelques Oiseaux montagnards (tichodrome échelette, accenteur alpin, niverolle). Ainsi, les tichodromes des Alpes se répandent jusqu'en Bourgogne, dans le Bassin parisien et même en Normandie.

A l'époque des migrations, de nombreux petits Passereaux et d'autres espèces diurnes inversent leurs habitudes : ils voyagent de nuit et se reposent et mangent dans la journée. C'est le cas des fauvettes, des gobe-mouches et des grives. En revanche, les hirondelles, les martinets, les Rapaces diurnes et les cigognes migrent de jour. Les grues cendrées se déplacent indifféremment de jour et de nuit.

Altitude du déplacement. Une grande partie des Oiseaux migrateurs se déplacent à faible altitude, plus précisément à moins de 700 m ; il s'agit des petits Passereaux voyageant le jour. Par contre, pour ceux qui volent de nuit on a observé, à l'aide du radar, des altitudes très supérieures. Les Oiseaux de forte taille circulent régulièrement à grande hauteur, c'est-à-dire au-dessus de 500 m. On a vu des pigeons ramiers et des corbeaux freux jusqu'à 2 500 m, des grues à 4 270 m au-dessus de l'Himalaya et, aux Indes, des oies ont été observées au télescope à une altitude estimée à 9 000 m.

Vitesse des migrateurs. Elle n'est pas très grande, surtout en automne. De façon générale, à cette saison, les Oiseaux prennent leur temps, alors qu'au printemps ils effectuent le trajet beaucoup plus vite. La vitesse moyenne peut être estimée à 50-60 km/h, et seules des espèces rapides comme les martinets et les petits Échassiers parcourent de grandes distances à plus de 70 km/h.

L'emploi du temps des Oiseaux au cours de leurs voyages n'est pas connu avec certitude. On a établi par recoupements qu'ils s'arrêtent çà et là, plusieurs jours, pour se reposer et qu'ils peuvent parcourir d'une seule traite de grandes distances au-dessus de milieux hostiles (déserts, mers) ; ainsi, des traquets motteux *(Oenanthe oenanthe),* qui pèsent en moyenne 25 g et ont la taille du moineau, nichent au Groenland et vont passer l'hiver en Afrique tropicale, traversent chaque année le nord de l'océan Atlantique entre leur patrie et l'Islande, puis entre cette île et la Grande-Bretagne. De même, de nombreux Passereaux (pies-grièches, fauvettes, rouges-gorges) et d'autres Oiseaux (guêpier, huppe) traversent régulièrement la Méditerranée entre Chypre et l'Égypte et inversement. Plusieurs espèces du nord de l'Asie gagnent le continent africain en survolant l'océan Indien en diagonale depuis l'Inde et volent pendant 2 500 km au-dessus de l'eau.

▼ *Les petits Échassiers appartiennent aux rares espèces d'Oiseaux rapides; leur vitesse, sur de grandes distances, est de plus de 70 km/h. Ici, tourne-pierres* (Arenaria interpres).

E. Hosking

▶ *Les oies cendrées* (Anser anser) *apparaissent régulièrement en hivernage en France; en troupe, elles volent en chevrons.*

C. Nardin - Jacana

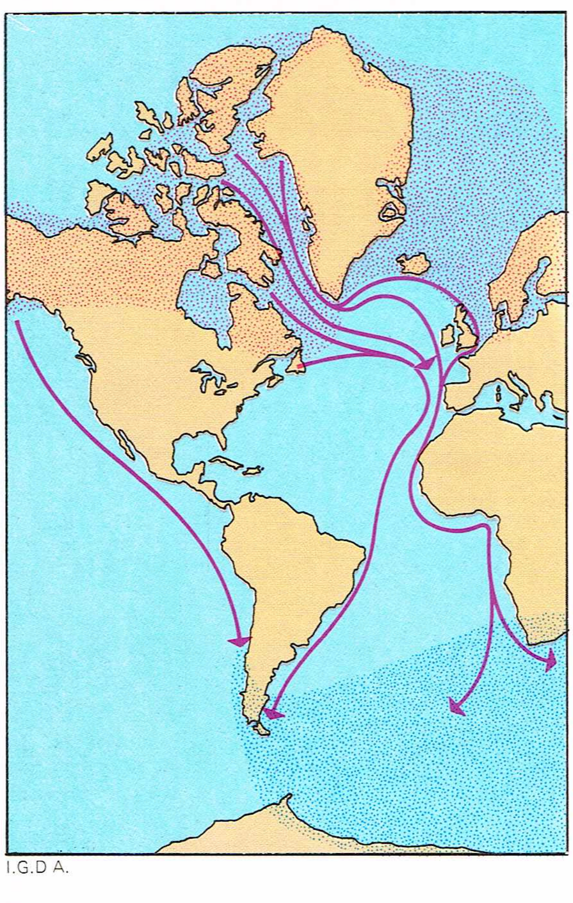

I.G.D A.

▶ *Carte montrant le plus long parcours de migration connu chez les Oiseaux : celui des sternes* (Sterna paradisea). *Sont indiquées : en rouge, l'aire de reproduction; en bleu, l'aire d'hivernage.*

Certains Oiseaux marqués sont repris à grande distance dans un délai très court après leur remise en liberté, ce qui permet de connaître les performances dont ils sont capables : un tourne-pierre (Échassier) marqué un 5 septembre sur l'île d'Héligoland fut trouvé vingt-cinq heures plus tard sur la côte du Pas-de-Calais, soit à 820 km. Une grive mauvis mit quatre jours pour parcourir les 2 500 km séparant l'Islande de la Gironde.

La durée totale du voyage peut seulement être estimée : la pie-grièche écorcheur, qui va d'Europe en Afrique orientale et méridionale, parcourt 11 000 à 12 000 km à l'aller et autant au retour. On a estimé qu'elle met soixante jours pour couvrir cette distance au printemps et cent jours en automne. Les étapes nocturnes seraient de 500 km en moyenne pour une durée de dix heures; l'Oiseau volerait deux nuits de suite et se reposerait pendant trois nuits et durant les cinq journées. Il s'agit, bien entendu, d'une hypothèse dont seulement certains détails ont été vérifiés.

Longueur du trajet. Les plus gros Oiseaux ne sont pas toujours ceux qui voyagent le plus loin. Les grues cendrées de Suède qui vont passer l'hiver en Espagne ou en Afrique du Nord ne font guère plus de 3 500 km, alors qu'un minuscule Passereau, le pouillot boréal de Sibérie, se rend en Malaisie à 6 000-8 000 km de sa patrie. Les hirondelles de cheminée, qui animent les villages suédois, passent la mauvaise saison en Afrique du Sud, à 10 000 km au moins de leur pays. Les sternes arctiques, qui se reproduisent dans le nord de l'Europe, de l'Asie et de l'Amérique se rendent au voisinage du continent antarctique, parcourant chaque année de 20 000 à 40 000 km selon l'endroit où elles passent la mauvaise saison.

Quelques migrations particulières. La migration intermédiaire est un déplacement caractéristique, en Europe, de l'étourneau sansonnet, du vanneau huppé et du héron cendré. Elle se produit après la saison de reproduction, avant le départ automnal pour la migration propre-

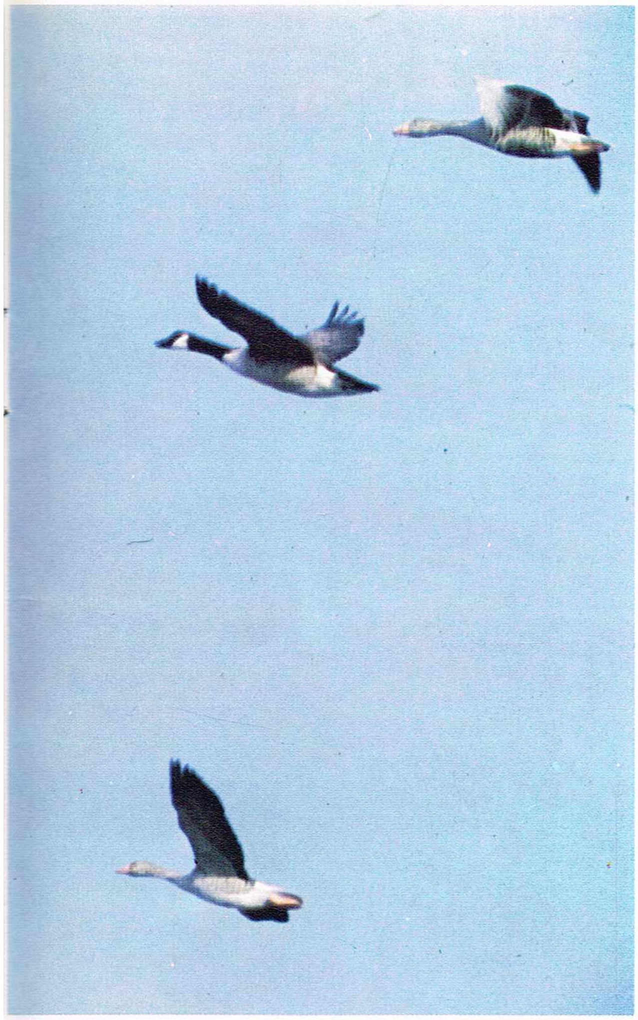

ment dite. Ainsi, en juillet et août, les étourneaux de Pologne et des républiques baltes d'U.R.S.S. viennent en République fédérale allemande (sur le cours inférieur de l'Elbe); les vanneaux huppés des mêmes régions commencent à se mettre en mouvement au mois de juin et vont sur les côtes de la mer du Nord, d'où ils gagnent l'Irlande ou la péninsule Ibérique. Les jeunes hérons cendrés se dispersent dans toutes les directions avant de se diriger vers le sud et le sud-ouest de l'Europe.

Certains Oiseaux effectuent chaque année une « migration de mue », ainsi appelée parce que sa destination est un endroit où ils pourront muer en toute tranquillité. Ces déplacements ont lieu en été et commencent juste à la fin de la saison de reproduction. Il s'agit de migrations intermédiaires car, sauf exceptions, les Oiseaux se dirigent vers les quartiers d'hiver après avoir mué. Ainsi, les tadornes de Belon de Grande-Bretagne, de Norvège et des Pays-Bas (ainsi que ceux des pays voisins) vont sur des bancs de sable proches de l'embouchure de l'Elbe, où ils perdent leurs rémiges. Au bout de trois à quatre semaines, de nouvelles plumes ont poussé et les Oiseaux repartent vers leur lieu d'origine, excepté ceux de Scandinavie qui vont en Grande-Bretagne ou en France.

Importance des migrations en Europe. Sur cinq cent quatre-vingt-neuf espèces d'Oiseaux vivant en Europe et dans le nord de l'Asie, cent quatre-vingt-trois migrent au sud du Sahara. On a estimé que ces Oiseaux comptent un milliard six cents millions d'individus (sans compter les petits Échassiers). La majorité d'entre eux passe l'hiver dans les savanes, évitant les forêts tropicales. L'avifaune s'appauvrit donc beaucoup en hiver dans le nord de l'Europe, de l'Asie et de l'Amérique, mais reste quantitativement assez abondante dans un pays comme la France, qui héberge de nombreux migrateurs venus du Nord et de l'Est : grives, merles, rouges-gorges, corbeaux freux, pinsons, alouettes et Rapaces diurnes.

Les *migrations en dehors de l'Europe.* Phénomènes d'ampleur mondiale, les migrations existent non seulement entre les pays de l'hémisphère Nord où l'hiver est froid et les pays chauds, mais aussi à l'intérieur de ces derniers. D'une façon générale, les Oiseaux migrateurs de l'hémisphère Nord prennent des directions sud, sud-ouest et parfois sud-est pour gagner leurs quartiers d'hiver (Oiseaux d'Europe, du Japon, du Canada, des États-Unis, de l'Alaska). En Sibérie, les quatre cent quatre espèces migratrices se dirigent vers le sud de l'Asie, l'Amérique du Nord, l'Asie Mineure, l'Afrique, les îles de la Sonde et les Philippines.

En Afrique, des Oiseaux indigènes se déplacent soit du nord au sud, soit dans le sens inverse après la reproduction. Par exemple, le guêpier *Merops nubicoides,* qui niche au Mozambique et en Angola, migre vers la Tanzanie et le Zaïre. En Amérique du Sud, des canards, sternes, et Échassiers, qui nichent sur les rives de l'Amazone et d'autres fleuves, effectuent des migrations régulières conditionnées par les crues (Sick, 1968).

Facteurs influant sur les Oiseaux migrateurs. Outre les facteurs internes, qui font partie, au moins pour certaines espèces étudiées, des causes profondes des migrations, plusieurs facteurs externes agissent sur les Oiseaux, favorisant ou au contraire gênant leurs déplacements migratoires. Les principaux sont la température, le vent et la nébulosité.

Température. Au printemps, en Europe, l'arrivée des Oiseaux migrateurs a lieu quand une certaine température moyenne est atteinte et les grands mouvements migratoires accompagnent les masses d'air chaud et humide. En outre, on a pu établir une relation entre les lignes joignant les points où les Oiseaux se montrent pour la première fois et celles qui relient les localités où la température moyenne est la même. Ainsi, l'hirondelle de cheminée suit, avec quelque retard, l'isotherme de 8,9 °C. Les indications obtenues de la sorte n'ont pas une valeur absolue. En effet, les Oiseaux migrateurs (Passereaux et autres espèces qui chantent) ne signalent pas immédiatement leur présence en chantant quand ils arrivent, et il peut s'écouler plusieurs jours avant qu'ils se manifestent. D'autre part, si l'on examine la température moyenne de l'époque d'arrivée on constate qu'elle est comprise entre + 5 °C et + 15 °C, mais tout observateur attentif peut constater que, par exemple, le coucou gris est là depuis quelques jours (en avril) même si la température est inférieure à 0 °C le matin (dans l'Est notamment).

Certains Oiseaux sont insensibles aux effets de la température au moment du départ automnal. Par exemple, le martinet noir quitte l'Europe à la fin de juillet ou au début d'août, en pleine canicule. De même, les cigognes blanches partent vers le 15 août, quel que soit le temps. Au contraire, l'automne venu, d'autres Oiseaux réagissent à un coup de froid en partant immédiatement. C'est le cas du vanneau huppé, très sensible aux changements de temps. Le départ massif des hirondelles de cheminée est souvent consécutif à une baisse de température.

Vent. Un vent faible soufflant dans le sens où se dirigent les Oiseaux migrateurs leur est évidemment favorable (il en est de même s'il est de sens opposé) ; en revanche, un vent contraire violent les gêne. Quand il atteint la force de la tempête, le vent peut déporter des Oiseaux de leur route. C'est ainsi que l'on explique la colonisation du Groenland par la grive litorne : une troupe d'Oiseaux norvégiens traversant en 1937 la mer du Nord pour gagner la Grande-Bretagne fut probablement déroutée et poussée par un ouragan jusqu'aux îles Verte et Jan Mayen.

Nébulosité. Les nuages, la pluie et surtout le brouillard gênent plus ou moins les migrateurs, et ce dernier arrête même leurs mouvements quand il est épais. Mais souvent les Oiseaux prennent de la hauteur et volent au-dessus de la couche opaque, à plus de 1 000 m par exemple (vanneau huppé).

Facteurs internes. Leur étude a été faite expérimentalement sur un petit nombre d'espèces (Passereaux) et d'individus; c'est pourquoi les résultats obtenus ne peuvent pas toujours être généralisés.

Chez les « grands migrateurs » (hirondelles, certaines fauvettes, etc.), la migration est un événement qui a lieu périodiquement : la migration de printemps est suivie par la période de reproduction, la mue et la migration d'automne. Chez l'Oiseau qui se prépare à partir en

voyage, on remarque une accumulation de graisse et une modification du comportement, qui se traduit par ce que l'on a appelé « l'agitation migratoire », et, chez certaines espèces, par une tendance au grégarisme.

L'accumulation de graisse est un phénomène très répandu (surtout chez les Passereaux, les Rapaces, les colibris, les pigeons, etc.). Cette graisse, qui servira de « carburant » pour le voyage, représente 30 à 40 % du poids normal, parfois même un peu plus de 50 %, contre 10 à 15 % au maximum en dehors de la période de migration. Elle est répartie dans tout l'organisme excepté le cœur. Sauf exceptions, on a constaté que le dépôt de graisse était d'autant plus important que la distance à parcourir était plus grande. La fauvette des jardins, *Sylvia borin,* qui normalement pèse environ 19 g, atteint en période prémigratoire et pendant la migration le poids de 25 à 30,7 g. La graisse est stockée très rapidement; de même, l'Oiseau migrateur qui fait étape reconstitue très vite ses provisions de lipides : un sizerin blanchâtre *(Carduelis hornemanni)* capturé sur une île écossaise pesait 14,4 g; neuf jours plus tard il fut repris au même endroit et accusait 20,2 g, soit 40 % de plus. Un autre sujet de 16,4 g atteignit 20,5 g au bout de dix-sept jours (Williamson, 1965).

Les modifications du comportement se manifestent par une réduction de l'activité diurne, suivie d'une agitation nocturne et, souvent, d'une tendance à se joindre à des congénères. Les petits Passereaux qui volent de nuit gagnent du temps (ils mangent et se reposent dans la journée) et, s'ils doivent traverser des régions désertiques, ils évitent ainsi la chaleur du jour; de plus, ils bénéficient, au moins localement, de vents plus favorables, et échappent aux attaques des Rapaces diurnes (ils sont ainsi, il est vrai, plus exposés à celles des hiboux et des chouettes, mais ceux-ci comptent peu d'espèces rapides et ne chassent pas de loin).

Le départ en migration dépend aussi de la conjonction de causes externes : baisse de température, modification de la composition des aliments, éventuellement raréfaction de ceux-ci. En faisant varier expérimentalement l'intensité lumineuse et la longueur du jour, on a pu démontrer que ces deux facteurs jouaient un rôle dans l'apparition de la disposition à migrer.

De même, il paraît certain que l'activité de la glande hypophyse stimule l'activité migratoire, sauf pour les espèces chez lesquelles on a pu mettre en évidence un rythme interne indépendant (pouillots siffleur et fitis). Chez ces deux Passereaux européens, on a prouvé expérimentalement l'existence de ce que l'on peut appeler une horloge interne qui contrôle l'activité migratoire, et Gwinner a pu formuler, en 1968, l'hypothèse suivante : l'agitation migratoire durerait le temps nécessaire à l'Oiseau pour atteindre ses quartiers d'hiver. Autrement dit, l'Oiseau « saurait » qu'il est arrivé dans son aire d'hivernage quand son agitation cesse. En comparant les durées de cette période d'agitation chez une espèce migrant au loin (pouillot fitis) et chez une autre qui n'atteint pas l'Afrique tropicale (pouillot véloce), Gwinner a constaté que, chez cette dernière, l'agitation était moins forte et durait moins longtemps. Ces conclusions ne peuvent être appliquées directement aux autres Passereaux migrateurs; cependant, des observations leur ont apporté un début de confirmation.

Orientation des Oiseaux migrateurs. Comment un jeune coucou gris trouve-t-il seul son chemin jusqu'au Cameroun ou au Nigeria, voire jusqu'au Tanganyika? Il lui faut traverser, sans se tromper, la Méditerranée, le Sahara et d'autres régions inconnues, et, au printemps suivant, faire le trajet en sens inverse. Sa connaissance de la direction à suivre doit être innée puisque ses parents l'ont précédé de plusieurs semaines.

Chez les Oiseaux qui migrent en troupe, surtout ceux de grande taille, l'expérience des sujets les plus âgés joue probablement un rôle car ils ont fait le voyage plusieurs fois, connaissent la « route » et peuvent transmettre leur expérience aux plus jeunes de façon indirecte. Parmi les dernières cigognes d'Alsace étudiées en 1973 par A. Schierer, il existait un sujet sauvage âgé de vingt et un ans. Il est certain qu'après avoir fait une quarantaine de voyages entre l'Afrique et l'Europe cet individu avait dû accumuler une expérience non négligeable.

Toutes sortes d'hypothèses ont été émises pour expliquer la façon dont les Oiseaux s'orientent au cours

Trotignon - Jacana

de leurs voyages. A ce sujet, il convient de distinguer les migrateurs diurnes des migrateurs nocturnes.

Orientation des migrateurs diurnes. Certains Oiseaux trouvent une région précise, comme s'ils avaient une carte à leur disposition. D'autres suivent seulement une direction générale.

L'expérience de Perdeck a montré cette différence : ayant pris onze mille étourneaux, adultes et jeunes, au cours de plusieurs automnes successifs, de passage en Hollande, il les fit transporter par avion à Bâle, Zurich et Genève et relâcher aussitôt après leur capture. Normalement, ces Oiseaux vont passer l'hiver dans le sud de la Grande-Bretagne et dans le nord-ouest de la France. Les jeunes Oiseaux détournés continuèrent à suivre la direction du sud-ouest sans apporter de correction et se retrouvèrent dans le sud de la France et en Espagne, tandis que les adultes se dirigèrent vers leurs quartiers d'hiver traditionnels et prirent, en majorité, une direction nord-ouest. Ces derniers étaient donc capables de situer le point où ils avaient été relâchés par rapport à leurs quartiers d'hiver.

G. Kramer a montré expérimentalement que des Oiseaux migrant de jour, comme l'étourneau, se dirigent d'après le soleil et sont capables de maintenir leur direction malgré les différences de position de cet astre au cours de la journée. Pour les Oiseaux européens qui vont en Afrique, la difficulté est renforcée du fait que le déplacement du soleil ne se fait plus dans le même sens au-dessous de l'équateur.

Orientation des migrateurs nocturnes. Les expériences menées en planétarium par Sauer en 1957 et 1960 sur la fauvette des jardins ont montré que cette espèce semble

◀ *La migration intermédiaire, après la saison de reproduction, est un déplacement caractéristique, en Europe, des vanneaux huppés. Ici, vol de vanneaux* **Vanellus vanellus.**

se guider, la nuit, d'après la position des constellations dans le ciel européen, pour autant que le planétarium reproduise la situation réelle du ciel à l'époque de la migration. Quand le ciel était « couvert », les Oiseaux étaient désorientés et se tournaient dans toutes les directions. Cependant, dans la réalité on observe couramment que, même si le ciel est couvert, les Oiseaux continuent à migrer en grand nombre; aussi les résultats de ces expériences ne peuvent-ils être considérés comme absolument probants.

Récemment, Wiltschko a montré que, chez le rouge-gorge, l'influence du champ magnétique terrestre expliquerait le maintien de la direction du vol migratoire en l'absence de repères visuels (soleil ou étoiles). Cependant, cette influence est mise en doute par de nombreux spécialistes.

L'orientation des Oiseaux déroutés n'est pas encore expliquée non plus. Six cent quatre-vingt-seize puffins des Anglais *(Puffinus puffinus)* pris au nid sur une île du pays de Galles furent dispersés au-dessus des terres à des distances variant entre 100 et 4 900 km. Ces Oiseaux ont une activité nocturne pendant la période de reproduction et sont, de surcroît, purement marins; cependant, quatre cent soixante-trois revinrent à leur terrier. Le plus éloigné avait été lâché à Boston et mit douze jours et demi pour revenir. Certains avaient été relâchés au-dessus des terres mais retrouvèrent leur nid. Jusqu'à présent, toutes les hypothèses émises pour expliquer la façon dont les Oiseaux ainsi déroutés retrouvent leur nid n'ont pu être prouvées.

Méthodes d'étude des migrations. L'étude scientifique des migrations n'a vraiment commencé qu'à la fin du

R. Longo

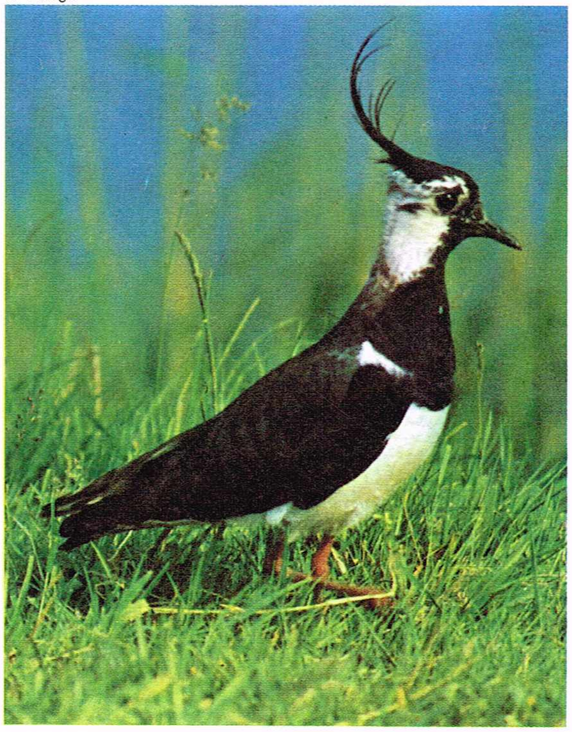

◀ *Très commun en France pendant l'hiver, le vanneau huppé* (Vanellus vanellus) *niche dans les prés et les zones marécageuses de la majeure partie de l'Europe.*

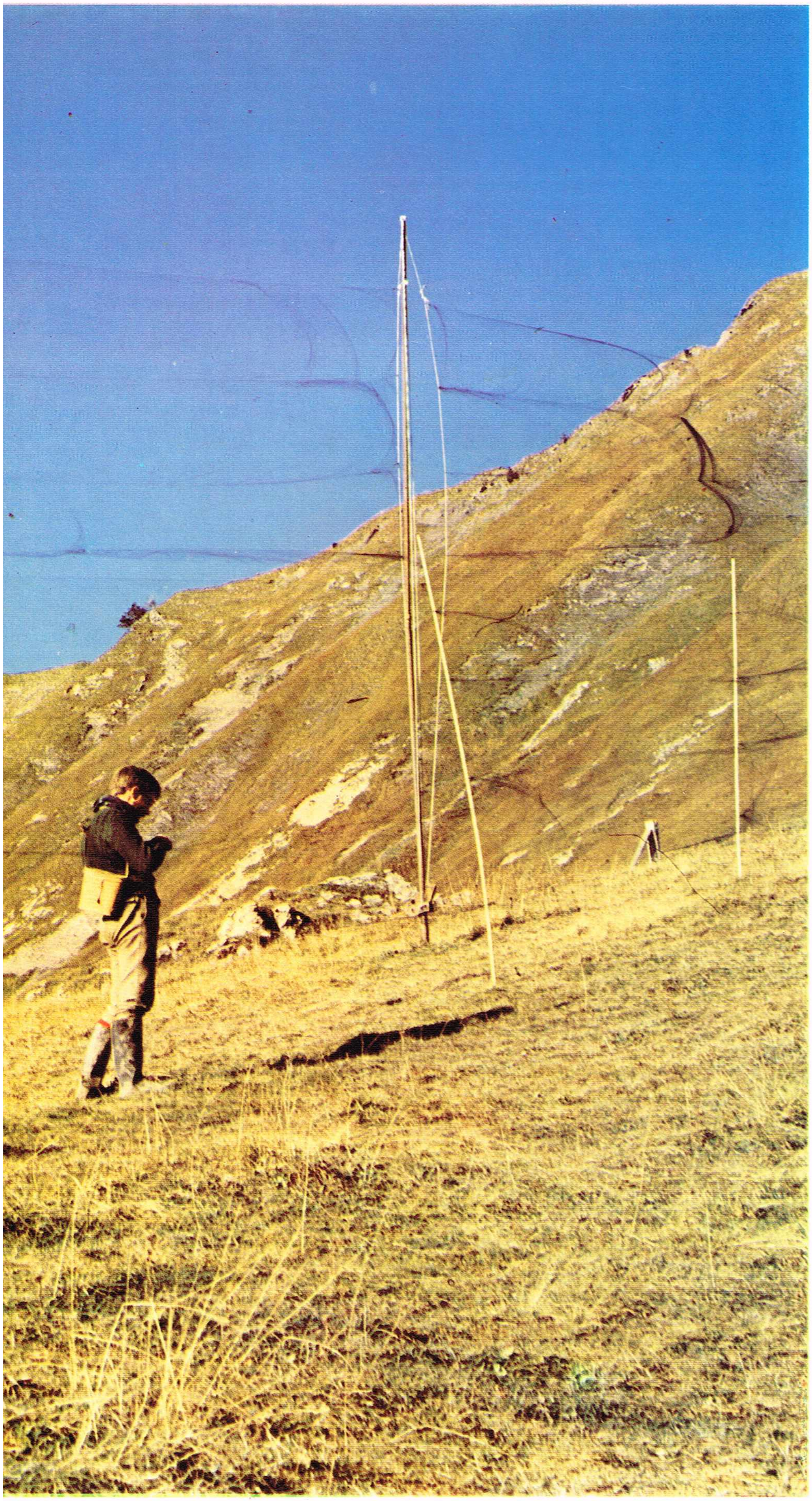

Binois - Pitch

▲ *Bagueur relevant les filets au col de la Golèze.*

Binois - Pitch

siècle dernier, en 1899, quand le Danois Mortensen imagina de fixer à la patte d'Oiseaux migrateurs capturés un anneau de métal. Depuis, on appelle baguage l'opération qui consiste à placer autour du tarse d'un Oiseau une bague (bande de métal léger et résistant) sur laquelle est gravée une inscription (numéro d'ordre et adresse de l'institut qui effectue les recherches). Cette méthode a pris une extension considérable depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale. De 1899 à 1963 on a bagué dans le monde 30 226 746 Oiseaux, dont 17 665 426 en Europe. Chaque année, on bague en France environ 250 000 Oiseaux, en Suisse de 65 000 à 70 000. Pour la capture, les bagueurs se servent de filets en Nylon noir qu'ils placent au bord d'un étang, sur une lisière, le long d'un cours d'eau, etc., et qu'ils surveillent en permanence. Les filets sont tendus le matin ou le soir, selon que l'on désire capturer des migrateurs diurnes ou nocturnes.

Le baguage, primitivement limité aux périodes de migration, est désormais pratiqué toute l'année, car il fournit nombre de renseignements biologiques. Quand un Oiseau se fait prendre, le bagueur le détache avec précautions, l'identifie et note le lieu et la date de la capture. Puis il place une bague après en avoir inscrit le numéro en face des renseignements déjà pris, et relâche l'Animal. Si celui-ci se fait reprendre plus tard, on saura quelle distance il aura parcouru depuis le lieu du baguage et, éventuellement, combien de temps il aura mis pour effectuer ce trajet. En accumulant de très nombreux renseignements de ce genre on est parvenu à se faire une idée de plus en plus précise des directions prises par les Oiseaux migrateurs et des itinéraires qu'ils empruntent. De même, on a pu déterminer quels étaient leurs quartiers d'hiver. Le pourcentage de reprises est très variable selon les espèces. Relativement élevé chez les canards (12 à 20 %) et les corbeaux (4 à 5 %), il est beaucoup plus faible chez les fauvettes (0,2 à 1,1 %) et les hirondelles (0,9 %). Il faut donc baguer un nombre considérable d'Oiseaux pour espérer obtenir quelques reprises, dont seule une infime partie (les reprises à longue distance par exemple) seront d'un grand intérêt pour la connaissance des migrations.

Quand on trouve un Oiseau mort porteur d'une bague il faut noter le lieu et la date de la trouvaille avec précision, copier l'inscription portée sur la bague, retirer celle-ci et l'aplatir avec précaution, indiquer dans quelles circonstances l'Oiseau a été trouvé (tué à la chasse, trouvé à l'état de squelette, etc.) et envoyer toutes ces indications (renseignements et bague déroulée) à l'adresse suivante : C.R.M.M.O., Muséum national d'histoire naturelle, 55, rue Buffon, 75005 Paris. L'informateur recevra ultérieurement une notice lui indiquant le nom exact de l'Oiseau, le lieu et la date du baguage. Les bagues françaises portent l'inscription « Oiseau Muséum Paris » suivie d'un numéro précédé d'une ou deux lettres.

C'est grâce au baguage que l'on a démontré la fidélité de certaines hirondelles de cheminée à leur patrie et plus récemment à leur lieu d'hivernage : sur six mille hirondelles baguées dans la région du Cap, onze furent reprises les hivers suivants, dont six au lieu même du baguage et les autres à moins de 45 km. Des sujets bagués en Afrique du Sud ont été repris depuis l'Irlande jusqu'en Sibérie (à 93° de longitude est).

Le baguage n'est pas le seul moyen d'étudier les migrations. L'observation visuelle en des lieux favorables (côtes, cols, détroits, etc.) ne doit pas être négligée. Plus récemment on a utilisé le radar pour suivre les trajets des migrateurs et connaître leur altitude et leur vitesse, mais son emploi est encore limité. Cependant, il a permis de déceler les passages nocturnes ou à très grande hauteur. Si le radar ne permet pas d'identifier les Oiseaux avec une certitude absolue, des travaux effectués récemment ont montré qu'il était possible de préciser le groupe dont ils font partie (pigeons, fringilles, etc.) d'après la fréquence des battements d'ailes.

Enfin, la biotélémétrie (fixation de minuscules appareils de radio émetteurs sur le corps des Oiseaux) a été employée avec succès aux États-Unis, notamment sur des grives, mais cette méthode, très difficile à utiliser, n'est qu'exceptionnellement appliquée aux petits Oiseaux. Une grive *(Hylocichla ustulata)* ainsi équipée fut lâchée dans l'Illinois et suivie en avion ; en une nuit elle parcourut 625 km.

Jacques Six

Vol

Avec les chauves-souris, les Oiseaux sont les seuls Vertébrés capables de voler activement; ils surpassent d'ailleurs les Chiroptères par la puissance et la grâce de leur vol. En outre, certains peuvent planer longuement et d'autres, les colibris, se dirigent en tous sens comme des hélicoptères. De nombreux détails de la morphologie, de l'anatomie et de la physiologie facilitent le vol, par exemple, le plumage : ses petits éléments, étroitement appliqués contre la peau, facilitent le déplacement dans l'air en réduisant la traînée; les plus grands (plumes des ailes) jouent le rôle de plan sustentateur et de propulseur, et les rectrices servent de gouvernail de profondeur et de direction. On distingue plusieurs types de vol, auxquels les différentes espèces d'Oiseaux sont plus ou moins aptes selon leurs dimensions et leur silhouette.

Le *vol battu*. C'est le plus courant et celui qu'emploient, au moins au départ, tous les Oiseaux capables de voler : l'Oiseau élève et abaisse alternativement ses ailes. Le mécanisme de ces mouvements est bien visible chez les jeunes Rapaces diurnes ou les jeunes cigognes blanches au nid qui exercent leurs ailes avant de prendre leur essor. D'autres jeunes Oiseaux n'ont pas la possibilité de s'entraîner de la sorte, notamment parce que leurs ailes sont très longues et que le nid où ils ont grandi se trouve dans une cavité ou un autre espace réduit. Malgré ce handicap apparent, ils sont capables, dès leur départ, de voler à peu près correctement en battant des ailes (hirondelles, martinets, pics).

Dans le vol battu, l'abaissement des ailes est le temps moteur et celui qui pousse l'Oiseau en avant tout en le maintenant à la même hauteur. L'élévation des ailes ne joue qu'un faible rôle pour la propulsion. Les grandes rémiges sont alors tournées comme les lamelles d'un store souple, ce qui limite la résistance de l'air; au contraire, quand l'aile est abaissée, elles occupent une position normale et s'appuient sur l'air. La différence dans le rôle des deux mouvements correspond d'ailleurs à une différence dans le volume des muscles qui actionnent les ailes; les grands pectoraux et les supracoracoïdaux qui abaissent l'aile représentent en moyenne 15 % du poids chez la plupart des Oiseaux, mais 31,5 % chez sept espèces de colibris (Wagner, 1967) et jusqu'à 36 % chez certains pigeons exotiques.

Le nombre de battements d'ailes par seconde dépend du type de vol et de la taille de l'Oiseau. Il est élevé chez les petites espèces : l'alouette des champs (10-12), le colibri (22-80), le maximum étant de 200 au cours du vol nuptial de certaines espèces *(Selasphorus rufus* et *Archilochus colubris)*. Les battements d'ailes sont beaucoup plus espacés au fur et à mesure que les dimensions augmentent : un par seconde chez les vautours, deux à trois chez les canards, pigeons, corneilles, et Échassiers.

Le vol ordinaire est celui de l'Oiseau qui quitte le sol ou un perchoir, prend de la hauteur et s'avance ensuite horizontalement (pigeon ramier, etc.). Cependant, les battements d'ailes peuvent être intermittents ou non. Dans le premier cas, l'Oiseau perd de la hauteur, ne retrouve

▲ Les Oiseaux sont les seuls Vertébrés, avec les Chiroptères, capables de voler activement; selon leur morphologie, leur anatomie, leur physiologie, les différentes espèces sont plus ou moins aptes à le faire. Ici, envol d'une aigrette à bec jaune.

A. Visage - Jacana

le niveau initial qu'en agitant ses ailes à nouveau, et sa trajectoire est une suite de montées et de descentes : c'est ce que l'on observe chez les bergeronnettes, les linottes, le pic-vert, etc. Dans le deuxième cas, la trajectoire est à peu près rectiligne et l'Oiseau ne perd pas de hauteur (étourneau, petits Échassiers, faucon hobereau, canards, oies, grues, etc.).

Le vol sur place est pratiqué par quelques espèces qui se maintiennent au même point en accélérant la fréquence des battements d'ailes et en prenant une position plus ou moins oblique, le corps pouvant même être vertical. Ce type de vol est très courant chez les colibris, qui, lorsqu'ils le pratiquent, ressemblent plutôt à des Insectes. En France, on l'observe chez le faucon crécerelle en train de chasser, les gobe-mouches gris et noir qui vont entrer dans leur nid ou capturer un Insecte, le martin-pêcheur, les rouges-queues, parfois la buse variable, etc.

Le *vol plané*. Le vol plané de longue durée n'est possible que chez les Oiseaux dont le poids dépasse 100 g environ. Cependant, il y a des exceptions : la niverolle, Passereau montagnard qui ne pèse que 40 g, a des ailes relativement larges et assez longues et fait des glissades de plusieurs dizaines de mètres. Les ailes, déployées et immobiles, sont légèrement abaissées ou relevées et l'Oiseau, qui avait acquis auparavant une certaine vitesse en vol battu, se laisse glisser. On observe ce type de vol chez les Rapaces, les goélands, les mouettes, les corbeaux, les grands Échassiers (cigognes, grues, hérons), etc.

Le *vol à voile*. L'Oiseau utilise les courants d'air chaud ascendants ou ceux qui résultent de la friction du vent à proximité de la surface de la mer. Il prend de la hauteur (ou se maintient toujours à peu près au même niveau) sans battre des ailes et reste pendant des heures dans l'espace. Le vol à voile est pratiqué à la perfection par les grands Rapaces (buses, aigles, milans et surtout les vautours), les grands Échassiers (marabouts en particulier), les albatros mais aussi, quand les circonstances sont favorables, par les goélands et les corbeaux. Chez les meilleurs planeurs, la queue est courte, les ailes sont larges et longues (vautours) ou bien longues et étroites (albatros).

Envol et atterrissage. A l'envol, la plupart des Oiseaux prennent de l'élan en s'appuyant sur leur perchoir, le sol ou l'eau. Certaines espèces très lourdes doivent courir plus ou moins longuement avant de s'envoler (foulques et cygnes sur l'eau, albatros sur la terre). A l'atterrissage, l'Oiseau freine en étalant les ailes, tournées vers l'avant, et la queue, ou les palmures des pattes (albatros, macareux, guillemots). Il déploie aussi les rémiges bâtardes et donne à son corps une position presque verticale.

La queue sert à tourner, à freiner et à garder l'équilibre. Chez les grèbes, les plongeons et les guillemots dont la queue est fort courte, le vol est particulièrement raide et ces Oiseaux ne peuvent effectuer de brusques changements de direction.

Le vol en groupe. Certains Oiseaux sociables qui se déplacent en troupe adoptent une formation régulière. C'est le cas des mouettes, des oies, de certains canards, des cygnes, des pélicans et surtout des grues. Chez ces espèces, la troupe dessine une ligne, un W ou un V. L'utilité de ces formations a fait l'objet de controverses, les uns soutenant qu'elles permettaient une diminution des efforts, les autres estimant qu'elles servaient surtout (dans le cas de la formation en V) à éviter les collisions en favorisant le repérage optique. Il semble bien, toutefois, que l'économie d'énergie en soit l'un des principaux avantages, mais l'Oiseau de tête (qui change parfois de place) est celui qui en bénéficie le moins. D'autres Oiseaux n'adoptent aucune formation : c'est le cas de la cigogne blanche, des pigeons, des corbeaux, des petits Échassiers et des Passereaux en général.

Vitesse en vol. Les Oiseaux dont le vol battu est le plus rapide ont des ailes assez étroites et allongées dont les rémiges primaires ne sont pas écartées. C'est le cas des martinets, des hirondelles et de certains faucons. Au contraire, les Oiseaux les plus lents ont des ailes larges, à l'extrémité relativement arrondie. Mais la forme des ailes n'est pas seule à entrer en ligne de compte : le rapport entre leurs dimensions et le poids total de l'Oiseau intervient également, ainsi que le genre de vie. La vitesse en vol est difficile à mesurer exactement.

◀ ***Page ci-contre, formation en V d'un groupe de grues cendrées* (Grus grus).**

En effet, il faut tenir compte de la vitesse du vent à l'altitude où se trouve l'Oiseau (elle peut être différente de sa vitesse à proximité du sol); c'est pourquoi les vitesses mesurées d'avion sont les plus sûres. Quand le temps est parfaitement calme, celles qui ont été prises avec un chronomètre terrestre sont également dignes de foi.

Il faut distinguer la vitesse maximale de la vitesse courante : un Oiseau effrayé ou poursuivi atteindra sa vitesse maximale pour tenter d'échapper au danger; au contraire, s'il se déplace tranquillement pour chercher à manger, il ira beaucoup plus lentement (à l'exception des Rapaces qui font des piqués). L'âge de l'Oiseau intervient également, ainsi que la saison (un Oiseau en mue volera moins bien que celui dont le plumage est au complet) et les circonstances (en migration le vol peut être localement accéléré). Chez plusieurs espèces, on a pu relever des différences de vitesses allant du simple au double; cependant, on n'avait pas tenu compte du vent ou d'autres facteurs, aussi les indications dépourvues d'explications sont-elles imprécises. Il serait donc simpliste de croire que les vitesses mentionnées ci-dessous sont les seules possibles.

Vitesse de quelques Oiseaux en km/h (minimum et maximum)

Grand corbeau	32-56
Étourneau	47-77
Pinson des arbres	33-56
Merle noir	28-53
Hirondelle de cheminée	33-61
Petit rubis (colibri)	80-96
Faucon pèlerin (en piqué)	59-289-300
Canard pilet	59-82
Pigeon ramier	53-82
Pigeon voyageur	90-128-144

Martinet noir 50-150 sur de très courtes distances.

Altitude de vol. Là encore, il faut préciser où et quand ont été effectuées les mesures. Si l'on indique 2 000 m sans dire si l'Oiseau était au-dessus d'une montagne ou d'une plaine, l'information n'aura que peu de valeur. En montagne, on a vu des Oiseaux (gypaète barbu, chocard) volant jusqu'à plus de 7 000 m (Himalaya).

Les Oiseaux incapables de voler sont peu nombreux; ce sont les Ratites (autruche, émeu, nandous, casoars, aptéryx), le cormoran aptère et plusieurs râles. D'autres, comme les kagous, hoazins, tinamous, sont tout au plus capables de faire quelques dizaines de mètres en vol plané ou se servent si peu de leurs ailes (les xéniques, qui sont de petits Passereaux, le perroquet-hibou de Nouvelle-Zélande, *Strigops*) qu'on peut les ranger dans cette catégorie. Au total, il n'y a pas plus de quarante-six espèces d'Oiseaux qui ne volent pas du tout ou à peine.

Chants et cris

Les Oiseaux communiquent entre eux au moyen de chants, de cris ou de bruits qu'ils produisent avec le bec, les ailes ou la queue, mais aussi au moyen de gestes et de mouvements de tout ou partie du corps; on ne peut guère parler de mimique, sauf en ce qui concerne l'ouverture et la fermeture du bec. Selon l'espèce, le genre de vie solitaire ou grégaire, et la structure de l'appareil vocal, c'est tel ou tel moyen de communication qui sera le plus employé : ainsi, la cigogne blanche manifeste son humeur par des claquements de bec et des mouvements tandis que le rouge-gorge utilise le chant, des cris et aussi certaines attitudes.

Le vocabulaire est plus ou moins riche selon les espèces, certaines ayant un petit nombre de cris alors que d'autres disposent d'un répertoire plus varié. Il en va de même pour le chant : certains Oiseaux répètent une phrase stéréotypée (bruant jaune, pinson des arbres, grimpereau brachydactyle), d'autres chantent des mélodies nombreuses et variées (rouge-gorge, fauvette à tête noire).

Chant. On peut définir le chant comme un ensemble de sons, groupés en phrases ou motifs, dont la structure est rigide ou souple. La plupart des Passereaux chantent, mais certains ne sont pas de vrais chanteurs, par exemple le grand corbeau, le choucas, etc., d'autres ont un chant si discret qu'on l'entend seulement à une faible distance (pie-grièche grise). En dehors des Passereaux, certains Coraciiformes (huppe) et les engoulevents, les coucous, les pigeons et les tourterelles ainsi que des rapaces nocturnes font entendre ce que l'on peut appeler un chant. Dans les autres groupes d'Oiseaux, les cris et les bruits extravocaux sont le principal moyen d'expression acoustique. Dans tous les cas, sauf de rares exceptions, comme celles du rouge-gorge, du cardinal d'Amérique du Nord (où les deux sexes chantent) et des espèces qui chantent en duo, le chant est l'apanage du mâle, les Oiseaux femelles ne faisant entendre que des cris.

En Europe presque tous les Passereaux chantent durant la saison de reproduction; en dehors de celle-ci, ils communiquent entre eux au moyen de cris. Ils chantent donc surtout entre les mois de mars et de juin compris. En juillet, l'abondance et la fréquence des chants diminuent considérablement et, après, c'est le silence presque total. Parmi les espèces qui se font entendre aux autres saisons, on compte le rouge-gorge (il ne s'arrête de chanter que pendant le mois de juillet et la première quinzaine d'août) et, en automne seulement (septembre et même octobre), le pouillot véloce et le rouge-queue noir. Enfin, le troglodyte et le cincle chantent toute l'année, même en hiver.

Le chant sert le plus souvent à proclamer la présence d'un Oiseau mâle sur le territoire de celui qui l'émet. Il a donc valeur d'avertissement. Le chant des Oiseaux non accouplés est plus fréquent et plus vigoureux que celui des mâles ayant déjà trouvé une partenaire; d'autre part, le chant diminue souvent d'intensité pendant la période d'incubation, quand le mâle participe à la couvaison (cas de la fauvette à tête noire). En bref, le chant contribue aussi bien à la défense du territoire qu'à la formation du couple. Dans le premier cas, en chantant régulièrement aux mêmes endroits de son petit domaine, l'Oiseau finit par délimiter celui-ci par rapport à celui de ses concurrents.

Le chant sert aussi à la distinction des espèces qui se ressemblent beaucoup par la taille et la coloration (pouillots véloce et fitis, grimpereaux européens). Enfin, il synchronise le cycle sexuel des mâles et des femelles.

Au printemps, les Oiseaux chantent intensivement peu après le lever du jour. La fréquence baisse au cours de la matinée, et l'après-midi est une période de repos. En revanche, à l'approche du soir l'activité vocale augmente. Certains Oiseaux chantent la nuit. Parmi les Passereaux, ce sont, toujours en Europe, les deux rossignols (qui se font entendre également dans la journée), l'alouette lulu et la rousserolle turdoïde (mais chez cette dernière, ce n'est pas régulier). Le chant en duo, appelé, par les Anglo-Saxons, antiphonal (du grec *anti*, opposé, et *phônê*, son) est pratiqué par quelques barbus africains des genres *Lybius* et *Trachyphonus*, certaines pies-grièches africaines et les Timaliidés d'Australie, etc. Émis par le mâle et la femelle d'un même couple, il

▼ ***Le chant est l'apanage du mâle, sauf à de rares exceptions, comme les rouges-gorges* (Erithacus rubecula), *dont le mâle et la femelle chantent.***

J. Markham

▶ ***Tous les Oiseaux émettent des cris dont la forme et l'intensité ont diverses significations; ici, un pétrel fulmar* (Fulmarus glacialis).**

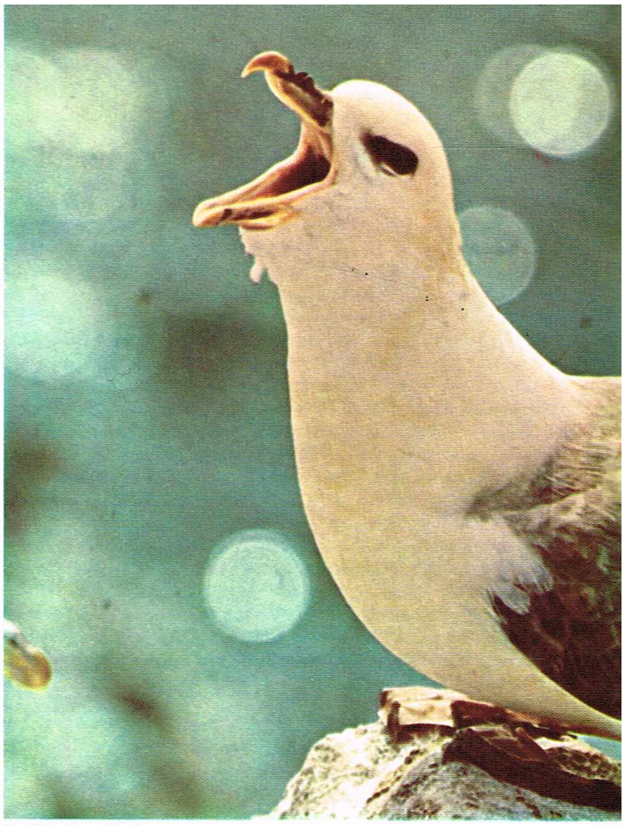

G. Dhuit - Pitch

semble faciliter le repérage des partenaires (cas des pies-grièches du genre *Laniarius*); d'une façon plus générale, il contribuerait à maintenir la cohésion du couple et, au moins provisoirement, celle de la famille (certains mâles adultes peuvent faire des duos avec leurs petits). Il existe trois types de duos : dans le premier, la femelle répond au mâle d'une façon peu coordonnée; dans le deuxième, les phrases des deux partenaires alternent, enfin, dans le dernier, la réponse de la femelle est si rapide que l'on croit entendre un seul chant : l'intervalle de temps qui sépare la phrase du mâle de celle de la femelle est alors de cent quatorze à cent soixante-dix millièmes de seconde!

Les travaux des éthologistes ont montré que le chant des Oiseaux peut être inné ou appris. Parmi les espèces dont le chant est inné, c'est-à-dire possédant dès le début les caractéristiques spécifiques essentielles, on connaît le pouillot véloce, le rouge-queue à front blanc et la fauvette grisette. Chez d'autres, au contraire, le jeune Oiseau n'émet le chant propre à son espèce qu'après avoir entendu des congénères adultes (merle noir, pinson des arbres).

Les acousticiens ont constaté qu'il existait de véritables dialectes locaux chez les Oiseaux faisant partie d'une même espèce. Ainsi, les pinsons de France et ceux des îles Canaries ont un chant bien différent. Il y a même des nuances entre ceux d'une grande partie de la France et ceux d'Allemagne occidentale. Des différences de même nature ont été signalées chez le grimpereau des jardins *(Certhia familiaris)* par Thielcke en 1970.

Un petit nombre d'espèces imitent le chant ou les cris d'autres Oiseaux et même, mais plus rarement, des bruits mécaniques ou la voix d'autres Animaux, voire celle de l'homme. En France, l'étourneau imite fort bien les miaulements de la buse et le chant du loriot. Parmi les autres imitateurs, on compte chez nous le geai, le tarier des prés, la pie-grièche écorcheur, la rousserolle verderolle et l'hypolaïs polyglotte, ou contrefaisant. Le chant de ces deux dernières espèces est en partie une sorte de pot-pourri où l'on peut reconnaître des bribes de phrases empruntées à d'autres espèces. En Amérique du Nord, le plus célèbre des imitateurs est le mime polyglotte, capable de reproduire la voix d'autres Oiseaux et des bruits aussi variés que des sonneries, des grincements de portes, des aboiements, des sifflements, etc. En Australie, un ménure, l'oiseau-lyre, et la perruche ondulée, et, en Inde, le mainate religieux *(Gracula religiosa)* sont capables de contrefaire la voix humaine; en Afrique, le perroquet gris, ou jaco, a les mêmes dispositions. Les veuves imitent la voix des Estrildidés qu'elles parasitent. Le sens de ces imitations n'est pas encore bien connu. Les seules interprétations plausibles concernent des Oiseaux captifs, tels que le grand corbeau et les perroquets; pour ces derniers, il semblerait que l'imitation de la voix de l'homme soit surtout un moyen d'attirer son attention.

Certains Oiseaux chantent en chœur. Certes, ils ne produisent pas tous la même phrase, mais ils se font entendre en même temps. C'est le cas des étourneaux quand ils sont rassemblés en automne, celui des grives mauvis en hivernage en France, et du tarin des aulnes dans les mêmes circonstances.

Les cris. Jeunes ou adultes, femelles ou mâles, tous les Oiseaux, à l'exception des espèces muettes, émettent des cris. Les cris se caractérisent avant tout par leur brièveté et la relative simplicité de leur structure acoustique. On en distingue plusieurs sortes d'après la fonction qu'ils semblent exercer. Les *cris d'alarme* sont lancés par un Oiseau qui a décelé un ennemi potentiel, par exemple, le merle noir qui voit un chat rôder autour de son nid. Les *cris de détresse* sont émis par l'Oiseau, lorsqu'il est saisi par un Rapace, un Mammifère carnivore ou un homme. Les *cris de ralliement* sont utilisés par les Oiseaux qui volent en groupe. Ils semblent servir à maintenir la cohésion de la troupe et sont jetés par quelques individus seulement. On les entend, par exemple, dans les bandes de grives qui survolent la campagne, de nuit, à l'époque des migrations. Les cris des grues cendrées en voyage remplissent, sans doute, la même fonction, bien que cela soit plus discutable, car il s'agit d'Oiseaux migrant dans la journée en troupes organisées et généralement peu importantes (peut-être aussi manifestent-ils une certaine excitation).

Autres manifestations acoustiques. De nombreux pics font entendre, surtout à l'approche de la période de nidification (en France à partir de janvier), un bruit étrange, sec, prolongé, semblable à un roulement de tambour et appelé tambourinage. Il est produit par la percussion rapide et répétée du bec contre une branche ou un tronc secs. Chez nous, le pic vert est le seul qui tambourine très peu; chez toutes les autres espèces, mâle et femelle communiquent de cette façon, et l'on admet que le tambourinage tient lieu de chant. Parmi les autres Oiseaux qui produisent intentionnellement des bruits sans utiliser leur appareil vocal, on compte les bécassines; en vol nuptial, elles écartent les rectrices et les plus externes, très étroites, vibrent tellement qu'elles engendrent un bruit que l'on a comparé à un bêlement ou à un chevrotement. Les pigeons ramier et colombin mâles claquent des ailes au cours de leur vol nuptial. Il en est de même pour l'engoulevent d'Europe et le hibou moyen-duc.

Répartition des Oiseaux dans le monde

La répartition actuelle des Oiseaux dépend surtout de la distribution des milieux naturels auxquels ils sont adaptés, mais aussi de leur histoire antérieure, difficile à reconstituer en raison du nombre infime de fossiles. Si l'on examine les cartes de répartition des cent soixante-huit ou cent cinquante-quatre familles vivantes, on constate que certaines ont des représentants sur les cinq continents, alors que d'autres ne se trouvent que sur l'un d'eux. On peut distinguer la répartition générale de la répartition selon le climat et l'altitude.

Répartition générale. Pour l'étudier on se fonde sur les divisions proposées en 1876 par le zoogéographe Wallace. Les terres émergées sont réparties en six grandes régions. Chacune possède une ou plusieurs familles endémiques. Les régions paléarctique, néarctique et orientale sont les plus pauvres à cet égard : chacune compte seulement une famille endémique. La région éthiopienne, plus riche, en comprend huit. La région australienne n'en a pas moins de quinze. L'Amérique du Sud et l'Amérique centrale (région néotropicale) sont les plus riches avec trente et une familles endémiques.

En comparant le nombre des espèces qui vivent dans ces différentes régions, on constate là encore que c'est la zone néotropicale qui est la plus favorisée, et l'Amérique du Sud mérite bien son nom de « continent des Oiseaux ». On y a recensé en effet deux mille cinq cents espèces, soit 29 % du total mondial. Les régions orientale, éthiopienne, paléarctique, néarctique et australienne en comptent respectivement mille cinq cents, mille quatre cent quatre-vingt-un, onze cents, sept cent cinquante et sept cents.

A. Margiocco

▲ ***Tetrao urogallus,*** *le grand tétras, (ici, une femelle) vit en France dans les Vosges, le Jura, les Alpes et les Pyrénées.*

A. Visage - Jacana

◀ ***Alectoris graeca,*** *la perdrix bartavelle, niche en France exclusivement dans les Alpes.*

Répartition selon le climat. Le nombre des espèces augmente régulièrement des pôles vers l'équateur : il n'y a que quatorze espèces nicheuses sur le continent antarctique (y compris la péninsule et les îles Balleny) et mille trois cent quatre-vingt-quinze en Colombie et trois cent quatre-vingt-cinq au Canada. Cependant, ce principe n'a pas une valeur générale, car la régularité de la progression est interrompue par les déserts. Ainsi, l'Afrique au nord du Sahara (des îles Canaries à l'Égypte incluse) comprend environ deux cent soixante-neuf espèces nicheuses, alors que le Sahara n'en possède que quatre-vingt-une (ou cent quarante-neuf si l'on y inclut les massifs de l'Ennedi et de l'Aïr).

Répartition selon l'altitude. Quand on gravit une montagne élevée des Alpes, on constate que la faune avienne change progressivement avec l'altitude et, dans une certaine mesure, reproduit en raccourci ce que l'on observerait en allant de France en Laponie. Jusqu'à 1 300 m ou 1 700 m localement (étage montagnard), la faune est la même qu'en plaine. A l'étage subalpin (forêt d'épicéas), dont la limite supérieure atteint au maximum 2 400 m, donc par exemple à 1 800 m, on trouve le casse-noix, le venturon, le merle à plastron, le tarin, la mésange alpestre, le grand tétras et le bec-croisé. Au dessus de 2 000 m, c'est en général l'étage alpin (zone des alpages) qui s'étend jusqu'à plus de 3 500 m et qui correspondrait à la toundra. On y observe des Oiseaux tels que le pipit spioncelle, le traquet motteux, la perdrix bartavelle, le lagopède et l'accenteur alpin. Certes, il n'y a pas de petits Échassiers, ni de canards ou d'oies comme dans la toundra, mais les caractères généraux de la végétation et dans une certaine mesure ceux de l'avifaune se ressemblent.

Répartition en France. Toujours dans notre pays, il est possible de distinguer quelques avifaunes régionales particulières. Le fou de Bassan, le pingouin torda, le macareux moine, le guillemot de Troïl, le merle à plastron (sur les collines) nichent uniquement dans la péninsule bretonne et sur les îlots voisins. Le vautour fauve, le pic à dos blanc n'existent pas en dehors des Pyrénées. Le sizerin flammé, et la perdrix bartavelle nichent seulement dans les Alpes. La Camargue, la basse Provence et le Languedoc sont les régions les plus riches en espèces particulières. Le flamant rose, la sterne hansel, le goéland railleur, les fauvettes à lunettes et mélanocéphale, l'aigle de Bonelli, le ganga cata sont, chez nous, inféodés à cette région. La Corse possède la fauvette sarde, la sittelle corse, le goéland d'Audouin et l'étourneau unicolore, ainsi que des fauvettes de la région précédemment mentionnée.

Sur le plan local, la répartition des Oiseaux (à l'échelle de la France par exemple) varie sans cesse, certains changements étant dus à des influences climatiques (régression des fauvettes méditerranéennes dans le Midi après les vagues de froid) ou à l'activité humaine (destruction directe ou indirecte, disparition du milieu favorable, etc.). Cependant il semble que certains changements dépendent uniquement d'une évolution de l'Oiseau lui-même : c'est le cas de l'expansion de la tourterelle turque depuis une vingtaine d'années.

Origine des Oiseaux

Selon les paléontologues, les ancêtres des Oiseaux furent sans doute des Reptiles du groupe des Pseudosuchiens, qui vivaient à l'ère secondaire (Trias), il y a environ deux cents millions d'années. Il existe de nombreuses ressemblances de structure entre Reptiles et Oiseaux, bien que les représentants actuels de ces deux classes soient distincts. Les caractères communs sont les suivants : articulation du crâne par un seul condyle, possession d'un os carré reliant la mandibule inférieure au crâne, existence d'un seul osselet, la columelle, dans l'oreille moyenne, absence de glandes cutanées (sauf la glande uropygienne des Oiseaux), globules rouges du sang pourvus d'un noyau, reproduction ovipare et, enfin, œufs entourés d'une coquille.

▶ **Archaeopteryx lithographica,** *le plus ancien Oiseau connu, vivait il y a environ cent cinquante millions d'années.*

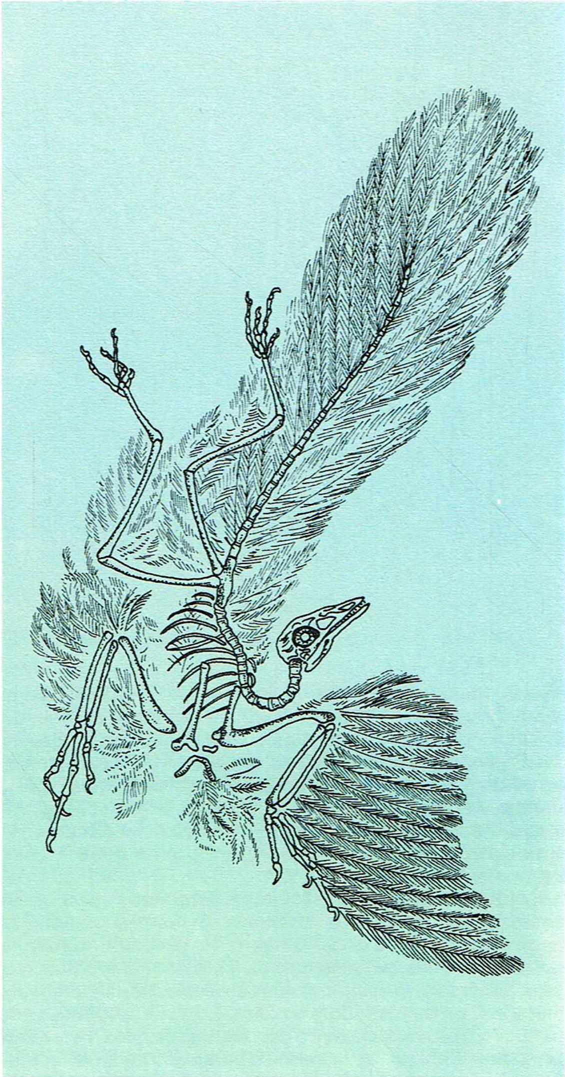

I.G.D.A.

J. Six

La documentation paléontologique relative aux Oiseaux est extrêmement pauvre, car ces Animaux sont de faible taille et leurs os, fragiles et graciles, se conservent très mal. On a trouvé seulement environ sept cent quatre-vingt-dix espèces d'Oiseaux fossiles. Le plus ancien Oiseau connu est l'archéoptéryx, *Archaeopteryx lithographica,* qui vivait il y a environ cent cinquante millions d'années, devait avoir les dimensions d'une mouette et peser environ 300 g. Trois fossiles en ont été trouvés dans des roches calcaires datant du Jurassique successivement en 1861, 1877 et 1959 (Solnhofen, Franconie). L'archéoptéryx avait des plumes, un bec, des pattes et des membres antérieurs transformés en ailes, mais il conservait des caractères reptiliens : la queue était très longue et possédait vingt vertèbres libres, les mâchoires portaient des dents, les côtes n'étaient pas articulées et n'avaient aucune relation avec le sternum, les doigts des mains avaient des griffes, et les os de la ceinture pelvienne étaient distincts. Plus encore que les deux précédents, le spécimen découvert en 1959 a montré que l'archéoptéryx était incontestablement un Oiseau : les pattes ont un véritable tarso-métatarse.

Les fossiles suivants sont beaucoup plus récents puisqu'ils remontent au Crétacé, soit trente millions d'années plus tard. Il s'agit de plusieurs espèces des genres *Ichthyornis, Hesperornis* et *Baptornis,* découvertes en Amérique du Nord. Les *Ichthyornis* possédaient un bréchet ; leur queue, au squelette très réduit, ressemblait à celle des Oiseaux actuels. On a longtemps dit qu'ils avaient des dents, mais c'est là une question aujourd'hui controversée. La présence de dents est également discutée chez *Hesperornis,* qui ressemblait probablement aux plongeons actuels par la puissance de ses pattes postérieures et la faiblesse de ses ailes. Il ne possédait pas de bréchet et devait donc être incapable de voler. Quant au *Baptornis,* qui vivait il y a environ cent millions d'années, il ressemblait aux *Hesperornis* et mesurait environ 45 cm de long.

A l'Éocène, il y a soixante-cinq millions d'années environ, la classe des Oiseaux connut un grand essor, et on a trouvé de nombreux fossiles datant de cette époque. Certains correspondent à des espèces aujourd'hui disparues *(Gastornis, Diatryma* et *Eleutherornis),* d'autres à des types encore vivants : manchots, pélicans, plongeons, hérons, ibis, râles, grues, chevaliers, mouettes, outardes, coucous, trogons, calaos, martinets, Rapaces. Plus tard, à l'Oligocène, apparurent les albatros, puffins, fous, grèbes, cigognes, pigeons, perroquets, martins-pêcheurs, fauvettes et moineaux. Parmi les espèces actuellement éteintes, il y avait, à cette époque, les *Phororhacos* de Patagonie, Oiseaux géants dont le bec mesurait 65 cm de long.

Au Miocène, l'*Osteodontornis* a été l'un des plus grands Oiseaux connus : son envergure est estimée à 4,50 m. Les familles d'Oiseaux que nous connaissons maintenant étaient sans doute toutes présentes au Pliocène, il y a dix millions d'années. Au Pléistocène et au début de l'Holocène (période actuelle), ont vécu les plus grands volatiles qui aient jamais existé (certains ont disparu il y a seulement quelques siècles) : *Teratornis incredibilis* des États-Unis devait mesurer 5 m d'envergure, et les *Dinornis,* ou moas de Nouvelle-Zélande, atteignaient 3 m de haut ; les derniers disparurent il y a environ trois cents ans. A Madagascar, plusieurs espèces d'*Aepyornis* ont vécu jusqu'au XVII[e] siècle ; les plus gros devaient peser 450 kg.

Comme on le voit, l'avifaune actuelle est le résultat d'une longue évolution.

Écologie

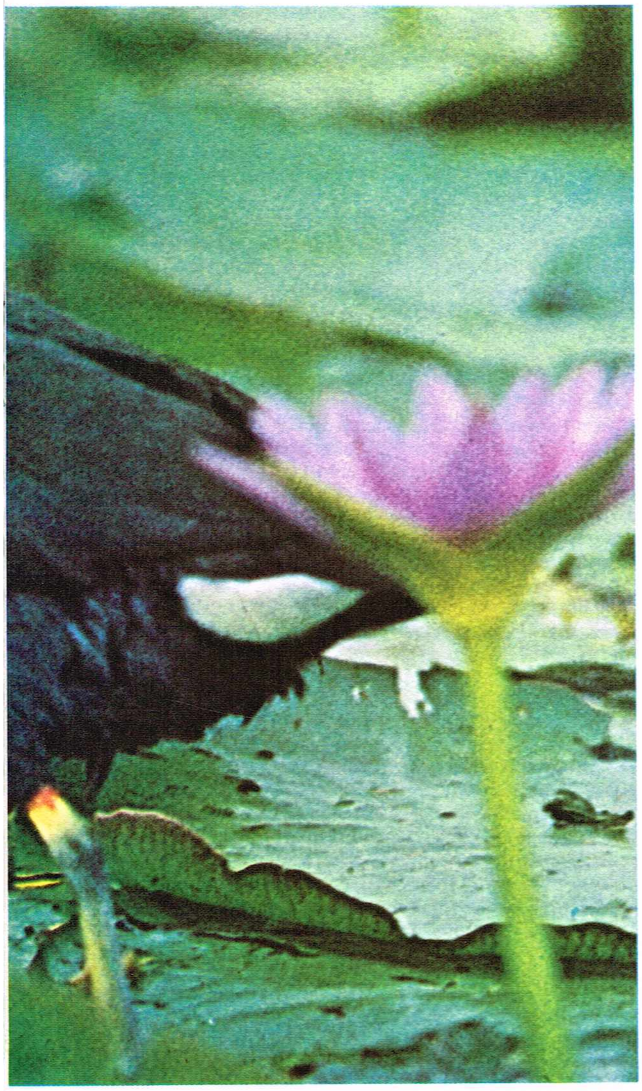

◀ **Gallinula chloropus,** ***la poule d'eau, niche dans les pièces d'eau et les lacs de plaine de presque toute l'Europe; quelques-unes hivernent en France, dans le Sud.***

Chaque espèce d'Oiseau habite un biotope particulier : par exemple, les bois, les forêts et certains jardins constituent celui du rouge-gorge, alors que la poule d'eau préfère les étangs, les rivières, les marécages et leurs environs immédiats. Dans son biotope, l'Oiseau trouve toutes les réponses à ses exigences : climat favorable, nourriture, emplacement pour le nid, abris, etc. La répartition des Oiseaux dans les différents paysages illustre les différences de leurs besoins : le pic épeiche ne vit pas sur les plages de sable et le pétrel tempête ne subsisterait pas en forêt.

Rapports des Oiseaux avec les éléments physiques du milieu. Soumis aux conditions de la zone climatique où ils vivent, les Oiseaux règlent le rythme de leur existence en fonction des saisons : dans les régions du Nord (Sibérie, Canada, Alaska, Spitzberg, Nouvelle-Zemble, etc.), la reproduction ne peut avoir lieu que durant une brève période (deux mois et demi à trois mois) alors que dans les régions tropicales (Amérique centrale par exemple) les Oiseaux nichent à n'importe quelle époque de l'année avec toutefois un maximum à la saison des pluies. En dehors de cette influence générale, les éléments du climat jouent un rôle important dans la vie de l'Oiseau.

Température. Les vagues de froid ou la sécheresse ont parfois de graves conséquences : en février 1956, en Camargue, les gelées provoquèrent la mort de plusieurs centaines de flamants roses. Un refroidissement prolongé de la température accompagné de pluie aux mois de mai et juin est souvent néfaste aux jeunes hirondelles de cheminée. En Europe occidentale, une chaleur excessive semble n'avoir aucun effet désastreux, mais en Australie elle entraîne une mortalité élevée chez le galah *(Kakatoe roseicapilla)* et la perruche ondulée *(Melopsittacus undulatus)*, car ces Oiseaux ne trouvent plus d'eau à boire. L'élévation progressive de la température moyenne au cours des dernières décennies a sans doute favorisé, en Finlande, l'expansion vers le nord de plusieurs Oiseaux : le vanneau huppé et le merle noir sont montés de plusieurs degrés de latitude.

Vent. Son influence est très grande dans les déserts de l'hémisphère Sud. Sur le continent antarctique, par exemple, il constitue l'un des facteurs aggravants de la mortalité, comme l'ont montré les travaux des membres des expéditions polaires françaises en terre Adélie. Les jeunes manchots empereurs sous-alimentés

E. Hosking

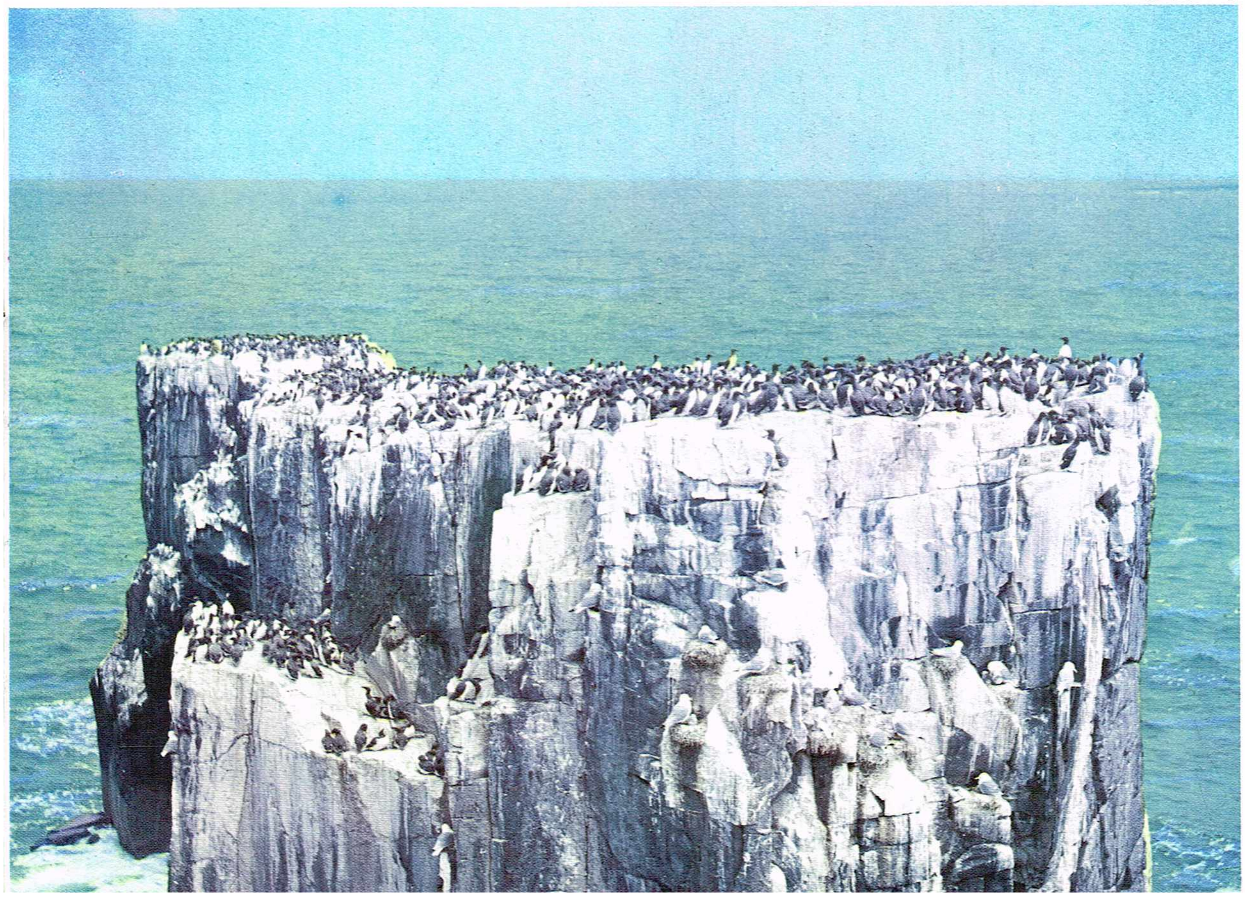

◀ ***Colonie de guillemots cohabitant avec des mouettes sur un rocher au large des côtes anglaises.***

(ils sont nourris à de rares intervalles) périssent en grand nombre quand souffle le blizzard; au contraire, si la tempête ne fait pas rage ils supportent mieux la faim (Prévost, 1958). Dans les régions tempérées, lorsque le vent est violent, il jette à terre le nid de certains Oiseaux installés en haut des arbres (héron cendré, corbeau freux, etc.).

Pluie. En Europe, les pluies torrentielles inondent les nids à ciel ouvert, et parfois aussi ceux qui sont creusés dans les troncs d'arbres, car l'eau ruisselle sur l'écorce. En faisant monter le niveau de certains étangs ou des fleuves, la pluie noie les nids de sternes ou du petit gravelot. A l'inverse, associée à la chaleur, la pluie favorise l'éclosion de nombreux Insectes, facilitant ainsi l'alimentation des Oiseaux insectivores, surtout quand ils élèvent leur nichée.

Grêle. Chaque année, des Oiseaux se font tuer par des grêlons. Parfois, il y a de véritables désastres : en 1953, cent cinquante mille canards furent assommés sur les grands lacs canadiens. En Europe, la grêle est une des causes de mortalité des jeunes cigognes blanches au nid (Hornberger, 1967) : quand elle ne les tue pas, elle peut leur casser les ailes ou les pattes.

Neige. La neige soustrait aux Oiseaux qui se nourrissent par terre la totalité des aliments qu'ils y trouvent normalement. Quelques espèces robustes grattent la neige ou la creusent pour obtenir les tiges et les feuilles cachées au-dessous : c'est le cas des lagopèdes alpin et muet. Mais, en élevant le niveau du sol, la neige permet à ces Oiseaux et aux tétras d'atteindre aisément les rameaux inférieurs des Conifères et d'en manger les pousses et les aiguilles. La nuit, ces mêmes Oiseaux creusent un trou dans la couche blanche et s'y abritent.

Pression atmosphérique. En 1972, Dorst a rappelé que la vie en haute altitude entraînait diverses adaptations physiologiques, parmi lesquelles l'augmentation du nombre des globules rouges du sang et l'accroissement du volume du cœur sont les plus frappants. Chez certains Passereaux des hauts plateaux andins du Pérou (4 000 m), il a noté que le cœur représentait 1 % ou plus du poids total, alors que chez les membres des mêmes espèces vivant en plaine ce pourcentage était inférieur à 1 %.

R. Longo

▶ La température a une très grande influence sur la vie des Oiseaux; ainsi la perruche ondulée (Melopsittacus undulatus) ne résiste pas à une chaleur excessive qui la prive d'eau.

Rapports avec les autres êtres vivants.

Monde végétal : l'existence des Oiseaux frugivores, granivores et herbivores dépend directement de la végétation. Ainsi en est-il des pigeons frugivores d'Extrême-Orient, des oies qui broutent dans les prairies, de la linotte et du bouvreuil, du casse-noix, et du bec-croisé des sapins, qui sont mangeurs de graines, etc. La végétation représente l'élément essentiel du biotope de l'immense majorité des Oiseaux. Le pouillot siffleur préfère les futaies, alors que la fauvette des jardins aime les buissons poussant sur les anciennes coupes. C'est dans la végétation que la majorité des Oiseaux construisent leur nid et passent la plus grande partie de leur existence.

L'influence des Oiseaux sur le monde végétal est multiple : les végétariens consomment une masse non négligeable de feuilles, tiges, fructifications, etc. En Australie, on a même accusé les oies céréopses *(Cereopsis novaehollandiae)* de concurrencer les moutons, car elles mangent l'herbe. D'autres Oiseaux favorisent la dissémination de certaines plantes (gui, glands, graines de Conifères, etc.) en mangeant des fruits et en rejetant au loin les graines. Dans les pays tropicaux, les colibris, méliphages, dicées, etc., qui visitent les fleurs, contribuent à les polliniser.

Animaux prédateurs des Oiseaux. Ils comprennent des Oiseaux rapaces diurnes, nocturnes, des goélands, des corneilles, la pie, la pie-grièche grise, etc. Le régime du faucon pèlerin est exclusivement composé d'Oiseaux. Celui du faucon hobereau est presque semblable, mais comprend en plus des Insectes. Chez les nocturnes, les chouettes chevêchette et de Tengmalm comptent parmi les espèces qui attrapent le plus de petits Passereaux. En terre Adélie, le pétrel géant *(Macronectes giganteus)* attaque les jeunes manchots empereurs aux mois de septembre et d'octobre. Des Animaux de tous les groupes zoologiques s'attaquent aux Oiseaux. Les *Invertébrés :* en dehors des parasites qui, dans certains cas, affaiblissent tellement leur hôte que celui-ci en meurt (cas des jeunes hirondelles de fenêtre par exemple), quelques gros crabes des régions tropicales s'attaquent aux très jeunes sternes. Guêpes ou abeilles entrent parfois en compétition avec les pics afin d'occuper une cavité pour se reproduire. Certaines Araignées de la famille des Mygales captureraient, à l'occasion, de jeunes Oiseaux. Les *Poissons :* quelques gros Poissons carnivores, comme les brochets, saisissent les jeunes Oiseaux nageurs (grèbes et canetons) et les entraînent sous l'eau pour les dévorer. Les *Reptiles :* de nombreux serpents mangent les occupants des nids placés à terre ou dans les arbres (surtout dans les régions tropicales). Les *Mammifères :* il s'agit d'espèces arboricoles, comme la martre, le chat sauvage et les singes, ou encore terrestres ou aquatiques. Sur terre, le renard s'attaque aux Oiseaux endormis ou immobiles sur leur nid et qu'il arrive à surprendre (oies, canards, Galliformes). Des Mustélidés comme la belette, l'hermine et le putois mangent aussi des œufs. Dans la forêt de Bialowieza (Pologne-U.R.S.S.) les Oiseaux représentent en moyenne 8,4 % du régime du lynx (Heptner et Sloudski, 1972); il s'agit essentiellement de gélinottes, de grands tétras, de geais, parfois de pics. Selon les mêmes auteurs, le chat du général Marguerite *(Felis margarita),* qui vit dans les déserts du Karakoum (Turkménistan), capture des alouettes, des tourterelles, des *Podoces* (Corvidés) et des huppes. Au printemps, l'écureuil pille volontiers les nids des Passereaux; le rat surmulot croque les œufs des Oiseaux qui nichent par terre (notamment sur les îles). En mer, l'orque épaulard est sans doute le principal prédateur des manchots empereur et Adélie.

Les Oiseaux prédateurs et leurs proies. Les Oiseaux prédateurs, Rapaces en particulier, sont un facteur d'équilibre démographique absolument indispensable aux populations d'Animaux qui leur servent de proies. Leur absence ou leur raréfaction, le plus souvent dues aux destructions opérées par l'homme, entraînent la pullulation de certaines espèces granivores et omnivores dont ils se nourrissent.

Ainsi, l'épervier d'Europe et le faucon crécerelle sont les principaux prédateurs naturels des moineaux domestique et friquet : localement, ceux-ci représentent jusqu'à 60 % du régime de l'épervier en hiver, et, dans l'année, de 8 à 17 % de celui du faucon crécerelle. Or, si le second

est encore commun en France, le premier est devenu rare dans de nombreuses régions. Son action régulatrice sur la population des moineaux devient donc négligeable, et c'est là une des nombreuses causes qui favorisent la multiplication de ces Passereaux. On a souvent qualifié l'épervier de « nuisible » parce qu'il mange des petits Oiseaux considérés comme « utiles » à l'agriculture (mésanges, pinsons, bruants, bergeronnettes, etc.). Les assertions de ce genre ont toujours été prononcées sans étude sérieuse, et les recherches approfondies effectuées depuis une cinquantaine d'années en ont démontré l'absolue fausseté. Par exemple, aux Pays-Bas, l'épervier se nourrit aux dépens d'environ vingt espèces de Passereaux; mais, parmi celles-ci, les quatre qui sont le plus souvent capturées sont précisément des espèces remarquables par leur fécondité (les mésanges pondent de huit à douze œufs, certaines font deux nichées régulières par an et les moineaux en ont jusqu'à quatre), communes et qui supportent parfaitement la prédation de l'épervier à laquelle elles sont adaptées depuis toujours. Normalement, proies et prédateurs ne peuvent se passer les uns des autres. La raréfaction des Rapaces diurnes en Europe explique en partie la surabondance d'Oiseaux tels que les étourneaux, les choucas, le goéland argenté et la mouette rieuse. Dans les quelques régions où les Rapaces sont encore nombreux et leurs espèces variées, on constate que la faune sauvage est le plus riche et le plus équilibrée. Quelques études récentes ont fourni de nouveaux exemples de l'influence réelle des Rapaces sur les populations de leurs proies. En Afrique du Sud, l'aigle martial se nourrit surtout de damans (petits Mammifères). La consommation annuelle d'un couple a été estimée à 200 kg de damans; or, le poids total des damans vivant sur son territoire va de soixante-huit à cent quatre-vingt-cinq tonnes. Il ne menace donc nullement l'équilibre démographique de ses proies. Il en est de même pour tous les autres Rapaces et, d'une façon plus générale, pour les prédateurs, à condition que l'homme n'intervienne pas dans leurs rapports.

Des relations un peu différentes existent entre les Oiseaux insectivores et les Insectes dont ils vivent, car les Insectes parasites jouent un rôle beaucoup plus actif dans la limitation des ravageurs. Ces relations ont été étudiées dans les forêts et les vergers où certains Insectes se multiplient à l'excès de façon périodique. On a longtemps cru que les Oiseaux pouvaient à eux seuls juguler les pullulations d'Insectes. En augmentant le nombre des Oiseaux, par l'installation de « nichoirs », on pensait venir à bout des chenilles de la phalène du pin, de la nonne, et d'autres Insectes. En fait, quand la pullulation est amorcée, les Oiseaux insectivores ne peuvent anéantir des millions d'Insectes rapidement. On a seulement réussi à établir une sorte d'équilibre en prévenant les pullulations dans les monocultures forestières; autrement dit, on a reconstitué un milieu où les effectifs de chaque espèce d'Insectes potentiellement dangereux sont maintenus dans certaines limites par les Oiseaux. Ce résultat n'a, d'ailleurs, été obtenu qu'une seule fois, en Allemagne, où l'expérience continue depuis presque cinquante ans. En conclusion, l'influence des Oiseaux insectivores sur la démographie de leurs proies est relativement limitée.

Comportement

On appelle comportement l'ensemble des habitudes d'un Animal. Le comportement se réduit, en fait, à une série de réactions à des facteurs externes qui excitent les organes sensoriels et à des facteurs internes (sensations de faim, de soif, sécrétions des glandes endocrines). D'une façon générale, les éthologistes distinguent, chez les Oiseaux comme chez les autres Animaux « supérieurs », des comportements innés et des comportements appris. Beaucoup de recherches sur l'éthologie des Oiseaux ont été faites et sont encore menées par les disciples de l'Autrichien Konrad Lorenz et du Néerlandais N. Tinbergen.

Une grande partie du comportement des Oiseaux est innée, c'est-à-dire de nature instinctive, mais l'apprentissage joue un rôle non négligeable, par exemple, dans la capture des proies chez les Rapaces. En fait, c'est surtout dans le domaine de la reproduction que l'Oiseau a un comportement vraiment instinctif. Bien que les Oiseaux âgés réussissent, en général, plus souvent leurs

Schrempp - Pitch

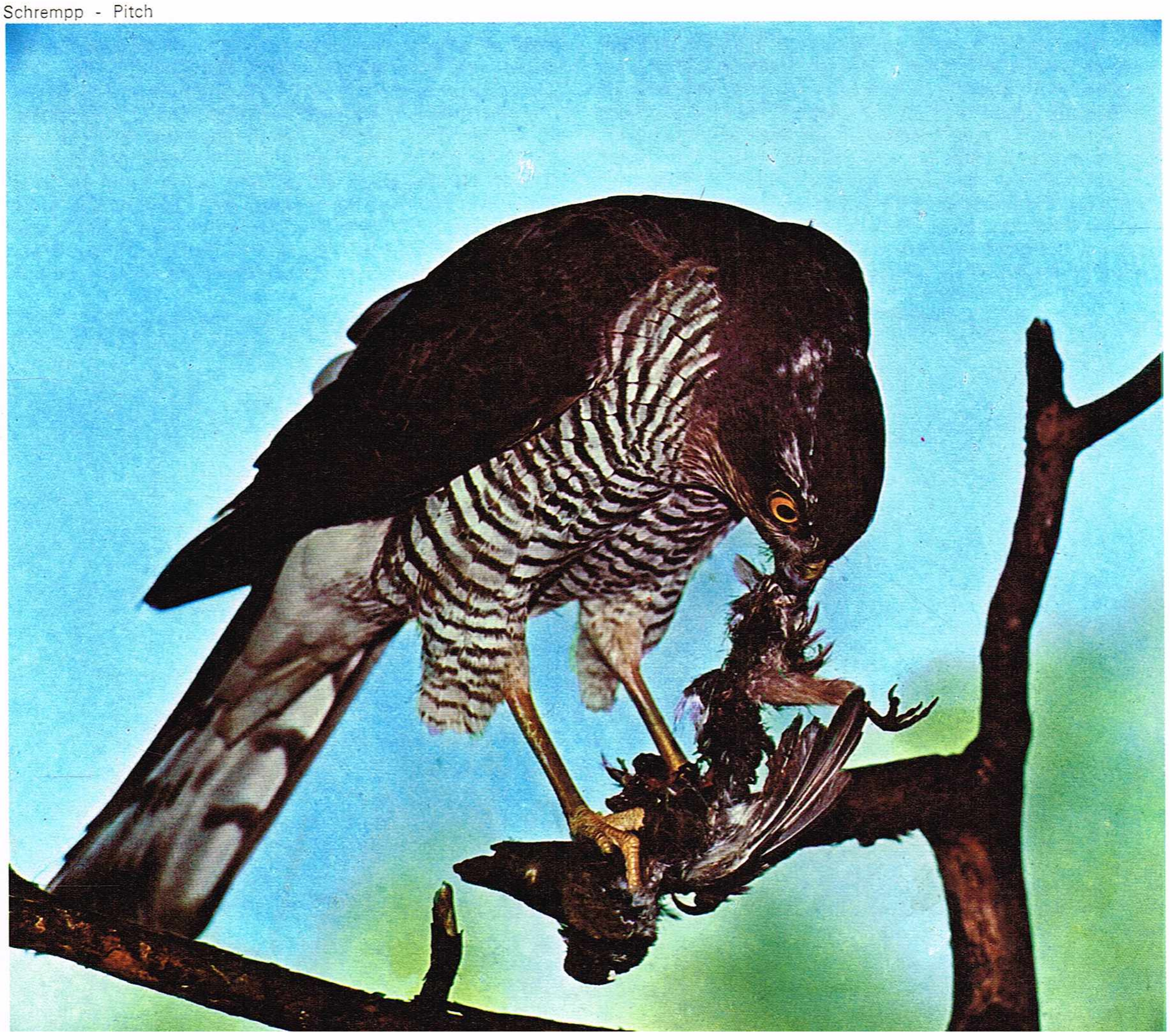

◀ *Les Oiseaux prédateurs, Rapaces en particulier, sont un facteur d'équilibre démographique de nombreux Animaux; ainsi l'épervier d'Europe* (Accipiter nisus) *est un des principaux prédateurs naturels des moineaux.*

nichées, les sujets qui se reproduisent pour la première fois construisent leur nid, couvent leurs œufs et élèvent leur nichée avec autant d'efficacité.

C'est chez les oisillons nidicoles que l'on peut suivre le plus facilement les changements de comportement au fur et à mesure que l'Animal grandit : à l'éclosion, les jeunes merles noirs *(Turdus merula)* sont aveugles et semblent ne réagir qu'aux bruits ou, d'une façon plus générale, aux vibrations. Quand un des parents vient les nourrir et ébranle le nid en se posant, ils lèvent la tête et ouvrent le bec, mais ces mouvements ne sont pas orientés. A l'âge de huit ou dix jours, leurs yeux s'ouvrent et, dès lors, ils tournent la tête vers les adultes quand ceux-ci atterrissent au bord du nid, le bec plein d'aliments.

Un autre type d'évolution du comportement est celui des jeunes huppes *(Upupa epops)*, qui se défendent contre les intrus d'une façon bien curieuse. La séquence est la suivante (Hirschfeld, 1973) : lorsqu'ils sont dérangés, les oisillons au nid commencent par émettre des sifflements; si l'excitation persiste, ils prennent une position caractéristique (le moignon de queue est rabattu en avant, la partie antérieure du corps est inclinée vers le sol, l'abdomen relevé) et expulsent avec force un jet d'excréments liquides. Simultanément, ils déversent la sécrétion nauséabonde de leur glande uropygienne. Ce comportement apparaît dès le sixième jour; les oisillons ne se tournent vers l'ennemi potentiel qu'à l'âge de dix jours.

Comportement de l'individu.

En simplifiant, on peut classer les différents comportements de l'Oiseau en deux catégories principales : ceux qui concernent sa survie et son confort et ceux qui servent à la perpétuation de l'espèce.

Chez les espèces dites solitaires (rouge-gorge, traquets, fauvettes, etc.), qui ne vivent pas en troupes et ne nichent pas en colonies, cette distinction est relativement aisée. La façon de boire, de manger la nourriture et de la rechercher, la toilette, font en principe partie des comportements « individuels ». Cependant, chez les Oiseaux sociables (mouettes, fous, guillemots, cormorans, pélicans, etc.), la prise de nourriture, par exemple, est souvent un acte collectif.

Comportement social.

Il comprend à la fois des éléments d'agressivité qui tendent à écarter l'Oiseau de ses congénères et des tendances contraires qui le poussent à rechercher leur compagnie. Cette dualité est nette chez les espèces qui vivent en colonie comme le goéland argenté, où les nids sont très proches les uns des autres. Sur leurs lieux de reproduction, ce ne sont, avant l'incubation et surtout l'éclosion, que menaces et bagarres incessantes entre voisins. Pourtant, ces Oiseaux ne peuvent se passer de leurs congénères, bien que ceux-ci soient attaqués dès qu'ils dépassent les limites de leur minuscule territoire.

Au moment de la formation des couples, l'éthologiste peut noter des comportements de menace ou d'hostilité entre les mâles et les femelles du héron cendré ou des pics. L'agressivité entre membres d'une même espèce se manifeste aussi par le maintien d'une « distance individuelle » qui sépare deux Oiseaux posés sur un même perchoir : les étourneaux adultes ne se serrent pas les uns contre les autres mais gardent entre eux un petit espace. Au contraire, des Oiseaux comme les bengalis recherchent le contact de leurs congénères et ne peuvent s'en passer.

Chez les espèces vivant en groupe, il existe souvent une hiérarchie entre les différents individus. Ce fait a été démontré chez la poule domestique par Schjelderupp-Ebbe en 1913, mais depuis, Lorenz et d'autres l'ont également décrit pour le choucas, les goélands et mouettes, etc. Au sommet de la hiérarchie, se trouvent les individus dominants, auxquels sont subordonnés les sujets dominés. On admet que les premiers jouent le rôle de modèles, sinon de « chefs », pour les autres. Ceci expliquerait la simultanéité des évolutions des troupes d'étourneaux, choucas, etc. Cette hiérarchie supprime ou réduit les conflits, car une fois qu'elle est établie, elle est généralement assez stable. Cependant étant donné la faible longévité des Oiseaux en nature, il s'y produit des variations et des « changements de situation » : par exemple, si un choucas femelle de rang inférieur s'accouple avec un mâle dominant, il acquiert du même coup une nouvelle position.

Le comportement social se manifeste aussi par la formation de « dortoirs », endroits où des Oiseaux se rassemblent pour passer la nuit ensemble. En France, les dortoirs existent chez les corbeaux freux, corneilles noires, choucas, pies, mouettes rieuses, étourneaux, moineaux domestiques, etc. Les hirondelles de cheminée et de rivage forment aussi des dortoirs avant de partir en migration, mais les plus spectaculaires sont ceux des pinsons du Nord, où l'on a déjà compté jusqu'à vingt-cinq millions d'Oiseaux.

Quelques comportements curieux.

Il existe des manœuvres destinées à détourner un ennemi du nid. Certains Oiseaux fuient en silence, en lançant un cri étouffé (rouge-gorge) ou en manifestant bruyamment leur inquiétude (fauvette à tête noire et merle noir). D'autres restent sur leurs œufs jusqu'à la dernière minute. D'autres encore réagissent en faisant semblant d'être blessés et s'efforcent d'entraîner l'intrus à distance de la ponte ou de la nichée. Ainsi, l'avocette feint-elle d'avoir une aile brisée et s'éloigne en marchant. Le bécasseau violet *(Calidris maritima)*, petit Échassier des toundras arctiques, bondit à un mètre de l'homme qui s'approche de son nid et s'enfuit en courant, en lançant un sifflement. Son plumage est hérissé et il tient la tête et les ailes abaissées. Il court de-ci, de-là, s'arrête souvent pour se dresser et regarder l'ennemi et l'entraîne jusqu'à une cinquantaine de mètres du nid. Cette « parade de détour-

▶ *Chez les goélands argentés* **(Larus argentatus)**, *les nids, construits sur les rochers, sont très proches les uns des autres.*

Frédéric - Jacana

A. Visage - Jacana

S. Prato

▲ *A gauche, les oisillons de l'espèce* **Turdus merula** *sont un des meilleurs exemples de changements de comportement liés au développement. A droite, un paon, Oiseau originaire du sud de l'Asie, domestiqué depuis quatre cents ans avant J.-C.*

nement » est commune à d'autres espèces du même milieu, comme le bécasseau variable, les pluviers doré et guignard et le chevalier combattant.

Utilisation d'outils.

Comportement exceptionnel dans le monde animal, l'utilisation d'outils est connue chez quelques espèces d'Oiseaux, comme le vautour percnoptère, le pinson-pic des Galapagos, une sittelle américaine et un oiseau-à-berceau. En Afrique orientale, certains vautours percnoptères ont l'habitude de casser les œufs d'autruche en se servant de pierres pesant de 200 à 300 g, qu'ils jettent sur la coquille après les avoir prises dans le bec; une fois l'œuf brisé, ils mangent une partie du jaune. Il leur faut souvent faire une dizaine d'essais pour réussir. Le pinson-pic des Galapagos se nourrit, au moins en partie, de larves d'Insectes xylophages qu'il se procure soit avec son bec pointu, soit en prenant dans ses mandibules une épine ou une brindille; il enfonce ce minuscule épieu dans une cavité du bois, embroche la larve repérée, la sort, la détache et l'avale. Puis il reprend son outil pour une nouvelle chasse.

J. Six

◀ **Gallus gallus,** *le coq Bankiva, serait l'espèce sauvage dont dériverait la poule* (**Gallus domesticus**), *domestiquée depuis deux mille ans.*

Rapports des Oiseaux avec l'homme

Espèces domestiquées. Les Oiseaux ont servi de nourriture d'appoint à l'homme préhistorique, mais la domestication progressive de plusieurs espèces s'est faite à une époque beaucoup plus récente.

Le pigeon biset *(Columba livia)*, espèce indigène à peu près disparue à l'état sauvage en Europe, est domestiqué depuis quatre mille ans environ. La sélection et le métissage ont abouti à la création de nombreuses races, dont la plupart ont surtout une valeur ornementale. Au contraire, chez la poule *(Gallus domesticus)*, l'action de l'homme a surtout visé à augmenter la production de chair ou d'œufs, bien que la silhouette, les dimensions et la coloration aient également, chez cet Oiseau, subi de profondes modifications. Il semble que la poule soit domestiquée depuis deux mille ans, et l'espèce sauvage dont elle dérive est probablement le coq Bankiva *(Gallus gallus)*, qui vit encore dans les forêts de l'Inde et dont l'aspect est voisin de celui des coqs nains. L'importance de la poule dans l'alimentation moderne est bien connue. En France par exemple, la production annuelle est d'environ cent huit mille tonnes, et celle des œufs a été estimée à cinq milliards quatre cents millions (chiffres valables pour 1967-1968).

Le paon *(Pavo cristatus)*, originaire du sud de l'Asie (Inde, Ceylan), est domestiqué depuis quatre cents ans avant J.-C. et a conservé son allure originelle; toutefois, on élève des sujets de couleur blanche. La pintade *(Numida meleagris)*, venue d'Afrique, et domestiquée depuis le premier siècle avant J.-C., n'a guère changé non plus. Le canard, issu du colvert *(Anas platyrhynchos)*, et l'oie, qui dérive de l'oie cendrée *(Anser anser)*, sont domestiqués depuis une époque indéterminée. Dernier en date, le dindon *(Meleagris gallopavo)* a été introduit au XVI^{e} siècle en Europe. Il nous vient d'Amérique du Nord.

Espèces non domestiquées. Au fur et à mesure qu'il augmentait les dimensions et le nombre de ses champs, l'homme s'est trouvé progressivement aux prises avec plusieurs espèces d'Oiseaux qui profitent des graines et des fruits cultivés en abondance sur une surface restreinte. La distinction courante entre Oiseaux utiles et Oiseaux nuisibles a reçu une consécration officielle au XIX^{e} siècle et surtout au début du XX^{e} quand la Convention internationale pour la protection des Oiseaux utiles à l'agriculture fut ratifiée à Paris en 1902. A cette époque et jusqu'à ces dernières années, on ne songeait qu'à lutter par tous les moyens contre les espèces considérées comme

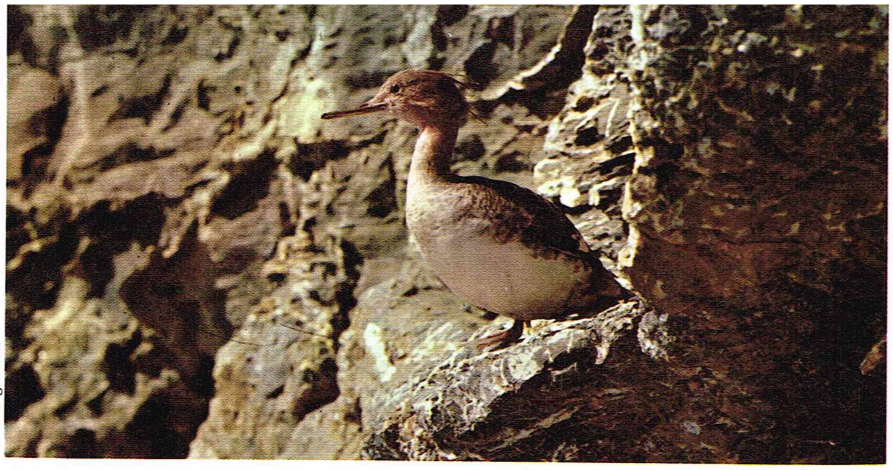

A. Margiocco

▲ **Mergus serrator,** ***le harle huppé, est une des nombreuses espèces de Palmipèdes actuellement protégées à travers le monde.***

nuisibles à l'agriculture (corbeaux, pies, moineaux, étourneaux), auxquelles on adjoignait les Rapaces diurnes qui mangeaient des Passereaux « utiles », des Oiseaux de basse-cour ou des Animaux considérés comme gibier. Mais, les abus commis par certains chasseurs et par les braconniers d'une part, les résultats des travaux accomplis par de nombreux ornithologistes et une meilleure connaissance des lois de l'écologie d'autre part, ont conduit ceux qui s'intéressent quelque peu à la nature et savent être objectifs à abandonner la distinction entre espèces « utiles » et « nuisibles ». Celle-ci n'a aucun sens si l'on examine en détail le régime de n'importe quelle espèce d'Oiseau. Tout au plus peut-on dire que quelques espèces causent des dégâts à certaines saisons, dans certains endroits et dans des circonstances particulières. Les Oiseaux qui entrent dans cette catégorie sont d'ailleurs fort peu nombreux. Il s'agit de l'étourneau *(Sturnus vulgaris)* en Europe et en Afrique du Nord, du quéléa en Afrique tropicale et, dans une moindre mesure, des moineaux et de quelques espèces de corbeaux. Bien sûr, d'autres Oiseaux sont indésirables localement, comme les mésanges et les bouvreuils dans les vergers où ils cisaillent les bourgeons des arbres fruitiers, mais leurs dégâts n'ont pas, à l'échelle nationale, l'ampleur de ceux des espèces très grégaires (étourneau par exemple). D'autre part, si l'on fait le compte du tonnage des fruits détruits par les Oiseaux et de ceux qui sont souvent dénaturés ou jetés par l'homme lorsqu'il n'arrive pas à les vendre, on s'aperçoit que, là encore, les dégâts des Oiseaux sont souvent supportables (mais on excuse la surproduction, alors que l'Animal est toujours considéré « coupable »). En fait, aucune espèce d'Oiseau n'est entièrement nuisible et aucune n'est parfaitement utile.

Espèces menacées de disparition. En l'espace de trois cents ans, soixante-dix-huit espèces d'Oiseaux ont cessé de vivre, et, actuellement, on estime à cent quarante-cinq le nombre de celles qui sont en danger d'extinction du seul fait de l'homme. Les causes essentielles de ces disparitions sont les destructions directes comme la chasse abusive, mais aussi des modifications irréversibles apportées aux biotopes ou bien l'introduction d'Animaux étrangers, prédateurs des Oiseaux indigènes qui ne sont pas adaptés à leur présence (ce dernier cas s'est surtout produit sur des îles).

▼ ***Parmi les Échassiers, l'avocette*** **(Recurvirostra avosetta),** ***qui niche çà et là en Europe, est également protégée.***

E. Hosking

Les Oiseaux les plus rares du monde sont actuellement : la crécerelle de l'île Maurice, *Falco punctatus* (quatre ou cinq sujets) ; l'ibis japonais, *Nipponia nippon* (neuf sujets en 1970) ; le pic à bec d'ivoire, *Campephilus principalis,* du sud-est des États-Unis et de Cuba (environ trente sujets) ; l'aigle des singes, *Pithecophaga jefferyi,* des îles Philippines (trente-six sujets en 1970) ; le condor de Californie, *Gymnogyps californianus* (quarante sujets) ; la grue blanche d'Amérique du Nord, *Grus americana,* (cinquante-sept sujets sauvages en 1971) ; l'albatros à queue courte, *Diomedea albatrus,* de l'île Tori-shima, au Japon (soixante-quinze à cent sujets en 1972) ; le figuier de Kirtland, *Dendroica kirtlandii,* Passereau des États-Unis (environ deux cents couples en 1972).

En France, les espèces les plus menacées sont tous les Rapaces diurnes (sauf la buse et le faucon crécerelle) et, plus spécialement, les vautours, l'aigle royal, l'aigle de Bonelli, le macareux moine, le petit pingouin, le pic à dos blanc et le goéland d'Audouin. En février 1972, la législation française a été modifiée dans le sens d'une protection accrue de la faune sauvage, mais il est nécessaire de souligner le très important décalage qui existe encore entre la loi et la réalité : un trop grand nombre de chasseurs ignorent complètement les règlements, et l'application de ceux-ci est paralysée localement par la tolérance dont bénéficient encore des braconniers travaillant à une échelle industrielle. Les espèces protégées en tout temps et en tout lieu sont actuellement les suivantes : tous les Rapaces diurnes (aigles, vautours, pygargues, buses, milans, faucons, busards, épervier, autour, balbuzard, etc.) ; tous les Rapaces nocturnes (hiboux et chouettes, y compris le hibou grand-duc) ; des Échassiers (flamant rose, grue cendrée, cigognes blanche et noire, spatule, grande aigrette, aigrette garzette, grande outarde et outarde canepetière, échasse, avocette, ibis falcinelle, butor étoilé, blongios nain) ; des Palmipèdes, tous les cygnes, les bernaches cravant, nonnette, à cou roux, du Canada, tadorne de Belon, harles huppé, piette, bièvre, fou de Bassan, macareux moine, petit pingouin, guillemot de Troïl, mergule nain, goélands et mouettes, sternes et guifettes, plongeons, grèbes ; tous les pics, torcol, coucou gris et coucou geai, huppe, rollier, guêpier, engoulevent, martinets ; femelles et jeunes coqs du grand tétras et du tétras lyre (coqs de bruyère) ; tous les Passereaux, sauf : les grives (musicienne, mauvis, litorne, draine), le merle noir et l'alouette des champs, le bruant ortolan, tous considérés comme des Oiseaux-gibier ; la corneille noire, le corbeau freux, le choucas, la pie, le geai et le casse-noix ; les moineaux, considérés comme Oiseaux « malfaisants et nuisibles ».

Il n'y a pas de liste des Oiseaux-gibier ; pourtant elle serait souhaitable car elle empêcherait toute équivoque. Certaines espèces non protégées officiellement et ne faisant pas vraiment partie du gibier mériteraient d'être épargnées : ce sont les cormorans, les pétrels et puffins, le martin-pêcheur. Les hérons (cendré, pourpré, bihoreau) sont considérés comme gibier d'eau.

Des Oiseaux-gibier (canards, petits Échassiers de rivage, râles, poules d'eau, foulques, coqs de bruyère, perdrix, faisans, cailles, grives) ce sont les perdrix, le faisan et le canard colvert qui ont la plus grande importance en France.

La protection des Oiseaux doit désormais s'inscrire dans le cadre beaucoup plus vaste de la conservation d'un environnement naturel, comprenant tout ce qui n'a pas été fait par l'homme, et où il devrait faire bon vivre. Il est donc vain de vouloir protéger uniquement les Oiseaux sans s'occuper des autres Animaux, de la flore et des paysages. Dans ce domaine, la spécialisation à outrance est des plus néfastes. Nourrir constamment les Oiseaux en hiver est une ineptie ; leur offrir des emplacements pour nicher ne doit pas être considéré comme le principal moyen de les protéger. Il est bien préférable de maintenir un bosquet que de suspendre des nichoirs dans l'« espace vert » qui l'a remplacé. Un monde où les Oiseaux auraient cessé de vivre serait assurément bien triste et leur disparition générale serait le prélude de sa mort. La conservation intelligente de toute la nature sauvage est donc essentielle et se justifie amplement par la beauté qu'elle nous offre, la gratuité absolue des plaisirs qu'elle nous procure (elle n'exige aucun aménagement) et sa nécessité : l'homme ne peut pas vivre sans elle.

SYSTÉMATIQUE

La classification des Oiseaux n'est pas immuable. Il s'agit, au contraire, d'un système dont les éléments changent de place au fur et à mesure que nos connaissances se précisent. Aux XVIII[e] et XIX[e] siècles, les classificateurs se fondaient essentiellement sur les caractères morphologiques et anatomiques pour répartir les Oiseaux entre différents groupes. Actuellement, on fait en outre appel à la biologie, à la distribution géographique, au comportement et à des détails plus subtils, comme la comparaison des protéines du blanc d'œuf. Comme l'a dit l'éminent spécialiste E. Mayr (1969), la classification est « une théorie scientifique » qui a une valeur « provisoire ».

La classification a pour buts essentiels de grouper les Oiseaux en un tableau logique qui fasse clairement ressortir la place des espèces les unes par rapport aux autres, et d'exprimer leurs relations de parenté.

Dans la classification des Oiseaux, l'espèce est la seule unité fondamentale correspondant à une réalité tangible : le traquet motteux, par exemple. On lui donne un nom scientifique formé de deux noms, le nom de genre, *Oenanthe*, et le nom d'espèce, *oenanthe*. Dans le même genre sont classées dix-sept autres espèces (Peters, 1964), qui lui ressemblent peu ou prou. Les familles réunissent en général plusieurs genres. Ainsi, dans la famille des *Turdidae* (Turdidés), on trouve, outre le genre *Oenanthe,* les genres *Turdus, Erithacus, Phoenicurus,* etc. Plusieurs familles forment un ordre : par exemple, l'ordre des Passériformes (Passereaux) compte soixante-dix familles environ. Les huit mille cinq cent quatre-vingts espèces d'Oiseaux actuellement connues sont généralement réparties en vingt-sept (ou vingt-neuf) ordres, parfois même en cinquante et un ordres (Stresemann, 1959). La séquence adoptée ici correspond, à quelques modifications près, à celle adoptée par A. Wetmore en 1960.

La sous-classe des Archæornithes ou *Saururae* (Oiseaux à queue de reptile) comprenant l'ordre des Archæoptérygiformes, représenté par une seule espèce fossile, l'*Archaeopteryx*, ne sera pas décrite.

Sous-classe des Néornithes, ou Ornithurae

La sous-classe des Néornithes, ou *Ornithurae* (à queue d'Oiseau) comprend toutes les autres espèces connues, qu'elles soient fossiles, éteintes récemment ou vivantes. Pendant longtemps, on a divisé les Néornithes en Carinates et Ratites. Les premiers, de très loin les plus nombreux, possèdent un sternum muni d'un bréchet, alors que les autres n'ont pas de bréchet. Faisaient partie des Ratites : les Struthioniformes, les Rhéiformes, les Casuariiformes, les Aptérygiformes, tous Oiseaux vivants, et, parmi les ordres disparus depuis peu ou fossiles, les Hespérornithiformes, Ichthyornithiformes, Æpyornithiformes et Dinornithiformes. La validité du groupe des Ratites a été si fortement contestée que la plupart des systématiciens modernes le rejettent ; cependant, quelques-uns ne sont pas de cet avis (Yapp, 1970).

L'ordre des Hespérornithiformes, représenté par le genre *Hesperornis* (Oiseaux fossiles), et l'ordre des Ichthyornithiformes, représenté par les *Ichthyornis* (Oiseaux fossiles), ne seront pas décrits.

Ordre des Sphénisciformes

Les Sphénisciformes comprennent, pour les espèces actuellement vivantes, une seule famille, celle des **Sphéniscidés** : ce sont les manchots et les gorfous.

Les quinze, dix-sept ou dix-huit espèces (selon les conceptions des spécialistes) de cet ordre vivent dans l'hémisphère Sud, sauf une, le manchot des Galapagos, qui niche sur cet archipel situé juste au nord de l'équateur. La taille des Sphéniscidés varie entre 39 cm et 1,20 m, leur poids entre 750 g et 40 kg, mais les deux tiers des espèces pèsent de 3 à 6 kg.

Les gorfous ont de longues plumes dorées sur les côtés de la tête ; le petit manchot bleu *(Eudyptula minor)*

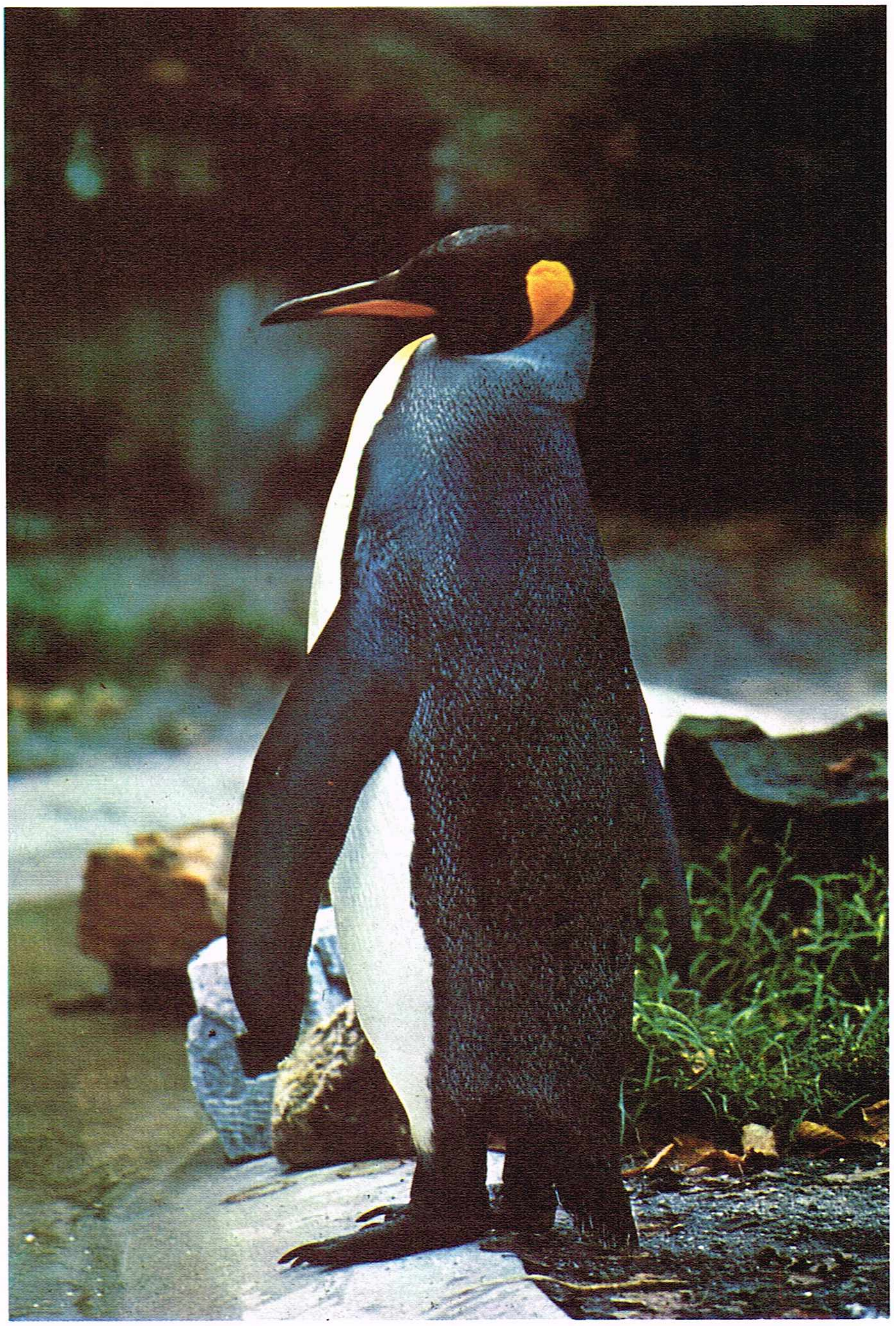

S. Prato

▲ ***La plupart des Sphéniscidés vivent dans l'hémisphère Sud ; le manchot royal*** **(Aptenodytes patagonicus)** ***forme des colonies de plusieurs millions d'Oiseaux sur l'île Macquarie.***

S. Prato

◀ **Eudyptula minor,** ***le petit manchot bleu, est le pygmée de la famille.***

est le pygmée de la famille, et les deux espèces du genre *Aptenodytes* (manchot empereur et manchot royal) sont les plus grandes.

Les manchots, souvent appelés à tort pingouins en France, sont tous incapables de voler. Leurs ailes, dépourvues de rémiges de dimensions normales, sont recouvertes, comme le reste du corps, de petites plumes très serrées ayant l'aspect d'écailles. D'autres caractères permettent de les reconnaître au premier coup d'œil : debout, ils ont une position parfaitement verticale; leur queue est courte et leur plumage toujours noir sur le dessus et blanc sur le dessous. L'eau est leur véritable élément et ils ne séjournent longuement à terre que pour se reproduire. Les ailes transformées en rames servent de propulseurs, les pattes palmées de gouvernail. Ce sont les plus rapides des Oiseaux nageurs, et c'est chez eux que l'on trouve les meilleurs plongeurs : selon les études les plus récentes, le manchot empereur serait capable de s'enfoncer jusqu'à 150 et même 200 m de profondeur et de rester de 15 à 18 minutes (maximum absolu) sous l'eau. Tous se nourrissent d'Animaux marins : Poissons, Mollusques et Crustacés. La plupart se reproduisent sur les îles ou les côtes de l'hémisphère Sud, dans les régions où le climat est froid ou sec et où les eaux marines sont poissonneuses. Deux espèces (manchots empereur et Adélie) nichent sur le continent antarctique, trois autres (manchot antarctique, manchot papou et un gorfou) sur la péninsule de ce continent, deux en Nouvelle-Zélande, une en Afrique du Sud, une en Australie et les autres sur les côtes de l'Amérique du Sud et les îles australes. Extrêmement sociables, les manchots forment, à l'époque de la reproduction, des colonies; certaines, comme celle du manchot royal sur l'île Macquarie, comptent plusieurs millions d'Oiseaux. Le nid est un cercle de pierres, d'herbes, de terre ou un terrier; il est absent chez les manchots empereur et royal.

Les manchots se reproduisent à la saison la plus favorable, sauf l'empereur qui pond et couve en plein hiver antarctique, lorsque la température s'abaisse jusqu'à — 40 °C et que les blizzards très fréquents soufflent à plus de 100 km/h. Le comportement de cette espèce et celui du manchot Adélie ont été étudiés intensivement depuis une vingtaine d'années par les Français Prévost, Sapin-Jaloustre et Isenmann. Chez le manchot empereur, les Oiseaux reproducteurs arrivent sur les lieux de nidification en avril. En mai, la femelle pond un seul œuf qu'elle confie au mâle; puis, elle retourne à la mer, laissant son compagnon couver pendant 62 jours (l'œuf, placé sur les pattes, est recouvert par un pli de la peau abdominale). Quand la femelle revient, le mâle épuisé par son jeûne prolongé va reprendre des forces car il a parfois perdu de 30 à 45 % de son poids initial. Le poussin, nourri seulement quatorze fois, en moyenne, pendant quatre mois et demi, sera d'abord gardé par l'un des adultes, puis fera partie d'une crèche pendant que ses parents iront chercher de la nourriture en mer. La mue imposera un nouveau jeûne de quarante à quarante-cinq jours à ceux-ci. Au total, y compris la période précédant la formation du couple, le manchot empereur mâle passe cinq mois sur douze sans prendre la moindre nourriture. Chez les autres manchots, excepté le manchot royal, la ponte comprend deux œufs.

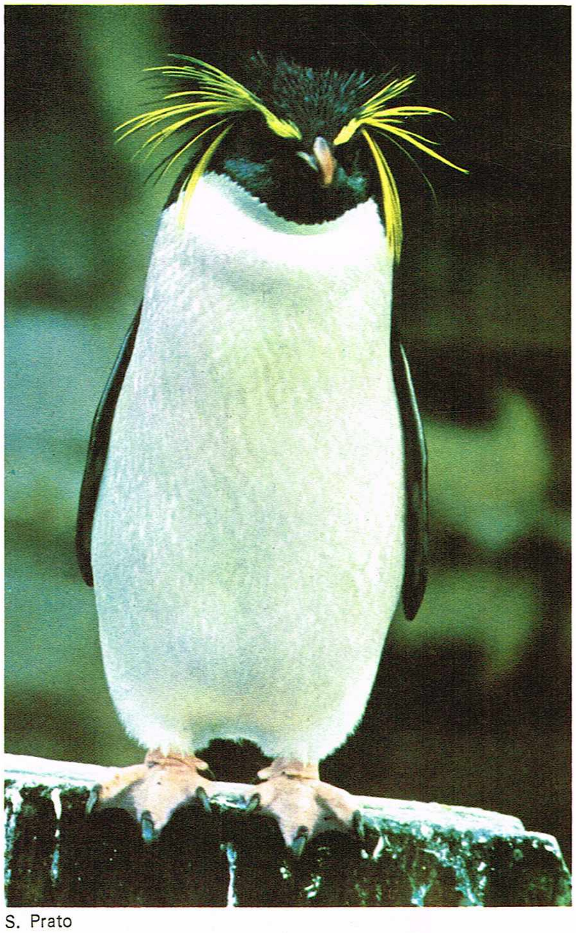

▶ ***Le gorfou* (Eudyptes crestatus) *a de longues plumes dorées sur les côtés de la tête.***

S. Prato

Ordre des Struthioniformes

L'ordre des Struthioniformes comprend la seule famille des **Struthionidés**. L'autruche *(Struthio camelus)*, seule espèce de l'ordre, est le plus grand Oiseau actuellement vivant : les mâles atteignent, au maximum, une hauteur de 2,40 m et un poids de 150 kg. L'autruche a des ailes mais ne peut pas voler; ses pattes n'ont que deux doigts. Le plumage, blanc et noir chez le mâle, brun et blanchâtre chez la femelle, ne recouvre pas la tête, le cou et les pattes; les deux premiers étant seulement garnis d'un fin duvet.

L'autruche est encore abondante en Afrique orientale; en Afrique centrale (Tchad, nord du Cameroun), elle est bien moins fréquente; en Afrique du Sud, on la tient en captivité; enfin, sur les bords du Sahara et en Arabie, elle a disparu, victime d'une chasse exagérée. A l'état libre, elle vit dans les savanes, souvent en compagnie de Mammifères ongulés (antilopes, zèbres). L'autruche est monogame ou polygame; dans le second cas, un mâle s'accouple avec deux ou trois femelles, qui pondent toutes dans le même nid. Celui-ci, vaste trou creusé dans la terre, mesure 3 m de diamètre. Les œufs, de couleur crème, au nombre de six à huit pour une femelle ou de seize à vingt-trois pour plusieurs femelles sont couvés par le mâle pendant la nuit, et par la ou les femelles durant le jour. L'incubation dure 42 jours. A l'éclosion, les poussins, au duvet brun clair, suivent leurs parents et se nourrissent comme eux d'Insectes et de leurs larves, de Scorpions, d'Araignées, de petits Rongeurs, de Reptiles, d'herbes, de feuilles de buissons et de graines. En captivité, l'autruche absorbe des objets hétéroclites (c'est sans doute là l'origine de l'expression « avoir un estomac d'autruche »). Enfin il faut faire justice de la légende selon laquelle l'autruche, comme on le dit, se cacherait la tête dans le sable en présence d'un danger : il s'agit d'une pure invention. Très bien camouflée, la femelle couveuse passe généralement inaperçue; lorsqu'elle est poursuivie, elle fuit en courant et atteint la vitesse de 45 à 50 km/h, ses ailes écartées lui servant à maintenir son équilibre.

Ordre des Rhéiformes

La seule famille des **Rhéidés** comprend deux espèces : le nandou *(Rhea americana)* et le nandou de Darwin *(Pterocnemia darwini,* ou *P. pennata)* reconnaissable à sa taille inférieure et aux taches blanches de son plumage brun. Comme l'autruche, les nandous ont des ailes mais ne possèdent pas de rectrices nettement différenciées.

Les deux espèces vivent dans les grandes plaines steppiques (pampas) d'Amérique du Sud, depuis le sud du Brésil et le sud du Pérou jusqu'en Patagonie. Ils se déplacent uniquement en marchant ou en courant, car ils ne peuvent absolument pas voler. Les mâles sont polygames. Le nid sert à plusieurs femelles et contient de vingt à trente œufs jaunâtres, mesurant 13 cm de long et pesant 600 g. Ils sont couvés par le mâle pendant 40 jours environ. Les œufs du nandou de Darwin sont verts. Ces deux espèces ont un régime voisin de celui de l'autruche.

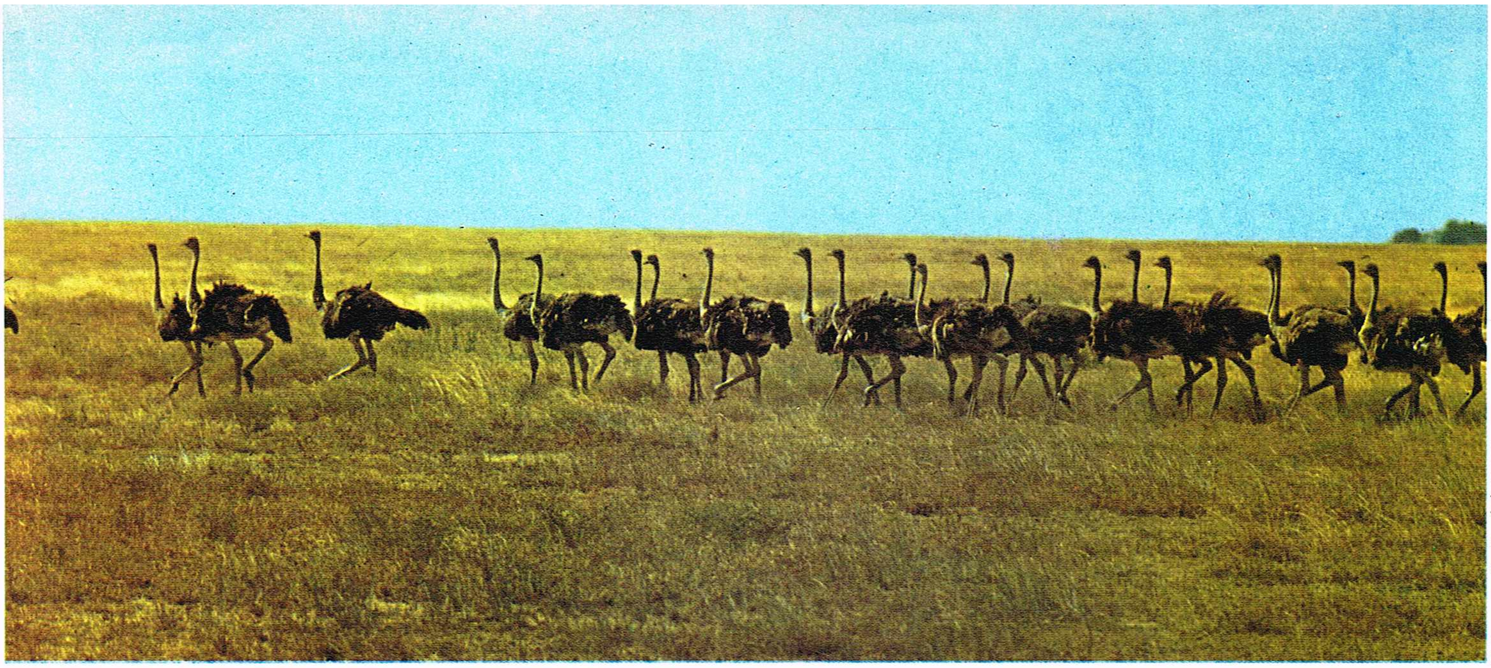

Ostman - P. R. Johanson

Ordre des Casuariiformes

Cet ordre comprend deux familles, les Casuariidés et les Dromicéiidés (ou Dromaiidés). Ces Oiseaux, incapables de voler, n'ont pas de rectrices et leurs ailes sont atrophiées. Leurs plumes possèdent un hyporachis (deuxième axe, dont la longueur est égale à celle de la hampe principale sur laquelle il est fixé) ; en outre, leurs barbes sont dépourvues de crochets et le plumage est, par conséquent, très mou.

La famille des **Dromicéiidés** n'est représentée que par une seule espèce, l'émeu d'Australie *(Dromiceius novaehollandiae)*, qui vient en second, après l'autruche, pour la taille (maximum : 1,50 m à 1,85 m de haut) ; il pèse jusqu'à 60 kg. Son plumage est brun. A la différence de l'autruche, l'émeu a la tête et le cou emplumés, sauf sur une zone de peau nue, de couleur bleue, qui se trouve sur les joues et les côtés du cou. L'émeu habite les steppes et les forêts claires du continent australien, où il se raréfie. Son régime comprenant des racines, des herbes, des fruits, il est chassé par les fermiers car il provoque des dégâts dans les champs. La femelle pond de sept à douze œufs vert clair, pesant environ 650 g, que le mâle couve une soixantaine de jours. Les petits présentent un duvet brun rayé de gris. Très rapide, l'émeu atteint 60 km/h à la course.

La famille des **Casuariidés** comprend trois espèces de casoars (maximum : 1,60 m, 40 à 60 kg), reconnaissables à leur cimier osseux et aux longues caroncules bleues, rouges ou jaunes qui pendent sur leur cou (elles font défaut chez le casoar de Bennett). Leur plumage est noir et les trois à cinq rémiges primaires ne sont représentées que par leur rachis, très rigide et piquant. Les casoars ont trois doigts aux pattes ; le plus interne possède une griffe très longue, arme défensive efficace.

Une de ces espèces vit en Australie, mais on la retrouve avec les deux autres en Nouvelle-Guinée. Les casoars habitent également les îles Aru, Jaspen, Ceram et Nouvelle-Bretagne. Ils fréquentent les forêts touffues et pondent de trois à huit œufs verts, longs de 13 cm, dans un nid placé par terre ; le mâle les couve de 49 à 52 jours. Les petits sont couverts de duvet beige à rayures sombres. Les casoars ont un régime végétarien.

Nous nous bornerons à citer l'ordre des Æpyornithiformes, réduit à la famille des Æpyornithidés (*Aepyornis* de Madagascar) et l'ordre des Dinornithiformes, représenté par la famille des Dinornithidés (*Dinornis* de Nouvelle-Zélande), dont les Oiseaux sont disparus.

C. Bevilacqua

▲ *En haut, groupe d'autruches* **(Struthio camelus)** *en Tanzanie ; ce sont les plus grands Oiseaux actuellement vivants. En bas, un nandou* **(Rhea americana)**, *Rhéiforme des grandes plaines steppiques d'Amérique du Sud.*

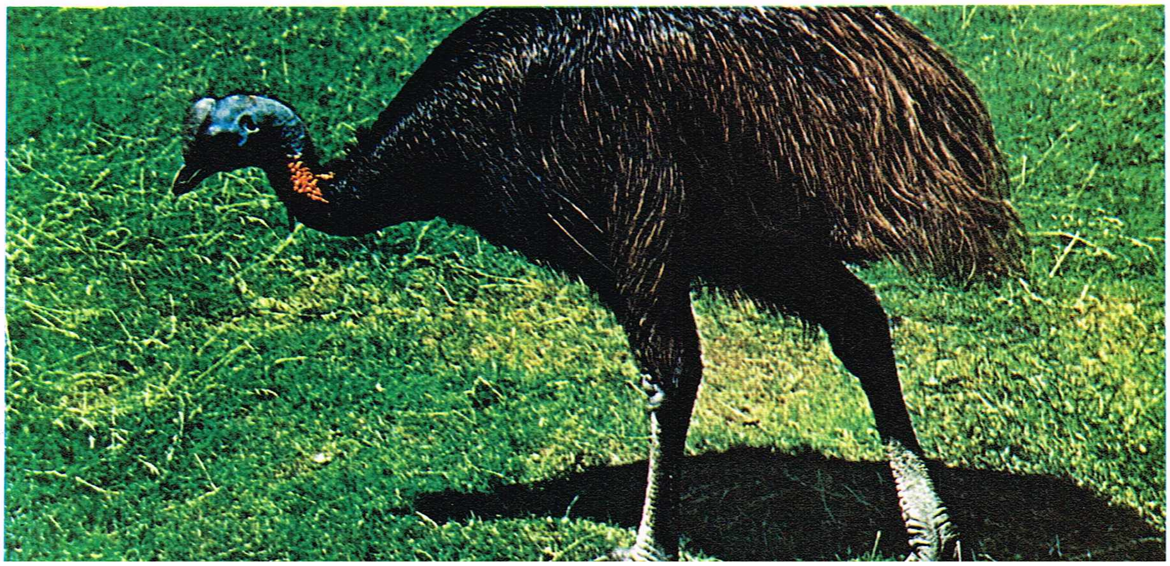

J. Six

◀ *La famille des Casuariidés comprend trois espèces de casoars. Ici un casoar unicaronculé* **(Casuarius uniappendiculatus)**.

Ordre des Aptérygiformes

Une seule famille de cet ordre est vivante, celle des **Aptérygidés,** avec trois espèces, dont la taille varie entre 50 et 80 cm. Ce sont les *Apteryx,* ou kiwis, habitants de la Nouvelle-Zélande et de l'île Stewart, qui en est proche. Les kiwis présentent plusieurs caractères étranges pour des Oiseaux : leurs plumes brunes ressemblent plutôt à des poils, leurs ailes sont réduites à des moignons invisibles et, enfin, ils n'ont pas de queue. Les yeux, relativement très petits, sont dépourvus de « peigne » ; le long bec est légèrement recourbé et entouré de grandes vibrisses à la base. Les kiwis habitent les contrées montagneuses, couvertes de Fougères et de buissons. Dans ce milieu impénétrable, ils passent facilement inaperçus, d'autant plus qu'ils sont nocturnes; c'est pourquoi leurs habitudes ne sont pas parfaitement connues. Ils se nourrissent de vers de terre, de larves d'Insectes et de fruits. La femelle pond, dans un terrier, un seul œuf blanc que le mâle couve durant 75 à 80 jours. Proportionnellement à la taille de la pondeuse, cet œuf est le plus gros qui soit. Selon une opinion courante, il pèserait un quart et même un tiers du poids de l'Oiseau; en fait, ce pourcentage dépend de l'espèce. Chez *Apteryx australis mantelli,* la femelle pèse, en moyenne, 2 400 g et son œuf 435 g environ, soit 18 % du poids de l'Oiseau (l'œuf mesure 12,5 cm de long et 7,8 cm de large. Chez *Apteryx oweni,* la femelle pèse environ 1 300 g et l'œuf 310 g, soit 24 % du poids de la pondeuse.

Titus

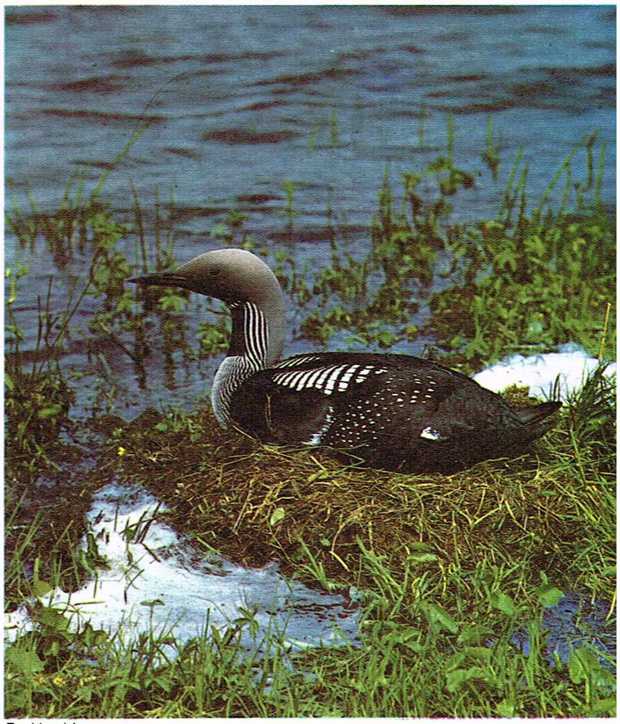

E. Hosking

▲ *A gauche, un représentant des Apteryx, ou kiwis, habitants de la Nouvelle-Zélande. A droite, une des quatre espèces de plongeons, Oiseaux aux pattes palmées capables de descendre en plongée à plus de 10 m et de s'y maintenir quelques minutes.*

Ordre des Tinamiformes

Cet ordre ne comprend qu'une seule famille, celle des **Tinamidés** (18 à 60 cm), avec quarante-deux ou quarante-cinq espèces, d'Amérique centrale et d'Amérique du Sud.

Ordre des Gaviiformes

L'unique famille des **Gaviidés** compte seulement quatre espèces propres à la partie septentrionale de l'hémisphère Nord. Ce sont les plongeons, qui nichent dans la taïga et la toundra (60 à 85 cm de long, 1 m à 1,50 m d'envergure, poids allant de 1 800 g à 4 kg selon l'espèce). Leur plumage est très sobre (blanc, noir, gris), surtout en hiver; seul le plongeon catmarin possède un plumage nuptial agrémenté d'une tache rousse. Aucun plongeon ne niche en France, mais chaque année quelques représentants de trois espèces passent l'hiver sur nos côtes ou, plus rarement, sur les plans d'eau de l'intérieur. Ces Oiseaux aux pattes palmées plongent et nagent remarquablement; en revanche, ils se traînent misérablement quand ils viennent à terre pour nicher. Ils volent assez rapidement mais, comme les avions à réaction (auxquels ils ressemblent un peu par leur silhouette raide, leurs courtes ailes et la longueur de leur « fuselage »), ils ne peuvent virer sur place ou voler en souplesse. Sur l'eau, ils diffèrent des grèbes (avec lesquels on les confond souvent) par leur taille supérieure, leur silhouette lourde et le fait qu'ils se tiennent généralement plus enfoncés. En plongée, ils descendent couramment à 10 m, parfois plus et restent invisibles durant 30 à 40 secondes, ou même quelques minutes. A la belle saison, ils se tiennent au bord des lacs et pondent tout près de l'eau. Leur nid, rudimentaire, contient deux œufs vert foncé tachés de noir que les deux sexes couvent pendant 25 à 29 jours. A l'éclosion, les poussins vont à l'eau au bout de quelques heures. Les plongeons se nourrissent de Poissons (Vers, Mollusques, Crustacés et Batraciens ne sont pas tous capturés directement par eux, une partie provenant de l'estomac des Poissons).

Ordre des Podicipédiformes

L'ordre compte une seule famille, celle des **Podicipédidés,** avec dix-sept ou dix-neuf espèces (les grèbes) répandues dans le monde entier (au sud, jusqu'en Nouvelle-Zélande). Les grèbes (longueur, de 25 à 50 cm ; envergure, de 30 à 85 cm ; poids, de 200 à 1 000 g) sont des Oiseaux aquatiques vivant en eau douce.

En France, trois espèces nichent régulièrement : ce sont les grèbes huppé, castagneux et à cou noir. D'autres se montrent en hiver mais sont beaucoup plus rares (grèbe jougris et, parfois, grèbe esclavon). Remarquablement adaptés à l'existence aquatique, les grèbes ont un plumage si doux et si épais que l'on en faisait des « fourrures » autrefois. Les couleurs (marron, roux, orangé, brun, blanc et noir) en sont plus vives que celles des plongeons, et plusieurs espèces présentent, à l'époque de la reproduction, des ornements (collerettes, huppes) bien développés. Le bec est tantôt mince et allongé (grèbe huppé), tantôt bref et relativement épais (grèbe à bec cerclé d'Amérique du Nord). Les pattes, situées, comme chez les plongeons, très en arrière du corps, ne sont pas faites pour marcher. Les rectrices ne se distinguent pas des autres plumes, et on ne peut parler de queue, à la différence de ce qui se passe chez les plongeons, où elle est nettement différenciée. Les grèbes

nagent et plongent avec aisance, mais leurs performances sont inférieures à celles des Gaviidés (ils ne descendent guère à plus de 5 à 6 m de profondeur et, en moyenne, restent de 20 à 60 secondes sous la surface).

Les grandes espèces se nourrissent surtout de Poissons, les petites y ajoutant des Insectes, des Mollusques et des Crustacés. Les Oiseaux des régions septentrionales sont migrateurs ; ainsi, les grèbes castagneux d'Europe centrale poussent jusqu'à l'ouest et au sud du continent à la mauvaise saison. Les grèbes fréquentent les lacs, les étangs ou les mares. Leur nid est un radeau de Végétaux aquatiques entassés ; l'humidité qui y règne en permanence fait pourrir les matériaux, ce qui donne à la coquille des œufs (bleuâtre, verdâtre ou blanchâtre à l'origine) une coloration plus ou moins brune. La ponte comprend de trois à dix œufs. L'incubation dure de 20 à 30 jours et, à l'éclosion, les poussins ont un duvet rayé. Pendant leurs premiers jours, ils naviguent sur le dos de leurs parents. Trois espèces sont rares et menacées de disparition : le grèbe du lac Atitlan, au Mexique *(Podilymbus gigas)*, le grèbe du lac Junin, au Pérou, et le grèbe du lac Titicaca, en Bolivie. Ce dernier est incapable de voler.

E. Hosking

◀ **Podiceps ruficollis,** ***le grèbe castagneux, niche en Europe centrale où il fréquente les lacs, les étangs ou les mares.***

Ordre des Procellariiformes

Cet ordre groupe quatre-vingt-douze espèces (albatros, pétrels, puffins, fulmars, pétrels-tempêtes, pétrels-plongeurs), réparties en quatre familles. Quelle que soit leur taille, tous ces Oiseaux ont des narines qui s'ouvrent à l'extrémité de deux petits tubes situés sur le dessus, ou sur les côtés, de la mandibule supérieure. Les pattes sont palmées ; le doigt postérieur, très petit, fait souvent défaut.

Les Procellariiformes sont des Oiseaux marins qui ne viennent à terre que pour nicher. Médiocres nageurs, ils passent la plus grande partie de leur vie à voler ou planer. La faculté de plonger n'existe vraiment que dans la famille des Pélécanoïdidés (pétrels plongeurs). La nidification se fait en colonies, sur des îlots, sur les côtes ou à plusieurs kilomètres de la mer. La ponte ne comprend qu'un seul œuf blanc. L'incubation, assurée par les deux adultes, est très longue. Les jeunes, couverts de duvet à l'éclosion mais aveugles et incapables de se nourrir par eux-mêmes, sont de véritables oisillons. Ils sont alimentés par régurgitation. Les Procellariiformes existent dans toutes les mers du monde.

La famille des **Diomédéidés** est représentée par les albatros (longueur, 70 cm à 1,30 m ; envergure, 2 à 3,40 m, maximum absolu ; poids, jusqu'à 8 kg). Des treize espèces, neuf nichent dans l'hémisphère Sud, les quatre autres dans l'hémisphère Nord (îles Galapagos, Hawaii, Japon). Les albatros sont caractérisés par la longueur et l'étroitesse des ailes. Excellents planeurs, qui survolent la mer à faible hauteur, ils ont besoin du vent pour décoller et se maintenir dans l'espace. A l'envol, ils doivent courir pour prendre de l'élan avant de battre des ailes ; à l'atterrissage, ils sont assez maladroits et culbutent fréquemment quand l'air est calme. Le plumage est blanc, mêlé ou non de gris, ou brun fuligineux (genre *Phoebetria*). Les pattes sont palmées. Leur nourriture se compose en grande partie de Mollusques Céphalopodes, mais ils consomment également les Poissons, les Crustacés, et les déchets rejetés par les bateaux qui chassent les baleines. Pour manger, ils se posent sur l'eau.

A la différence de la majorité des Procellariiformes ils font un nid à l'air libre. Celui de l'albatros hurleur *(Diomedea exulans)*, la plus grande espèce, appelée autrefois « mouton du Cap », a la forme d'un tronc de cône. Il est construit avec de la terre, de la tourbe et des plantes, et mesure de 15 à 45 cm de haut et 50 cm de diamètre. Un nouveau nid est construit chaque année, et les Oiseaux reproducteurs reviennent fidèlement au site qu'ils ont adopté. L'œuf, blanc, souvent pointillé de brun-roux, mesure en moyenne 13 × 7,8 cm. L'incubation dure de 63 à 78 jours. Le poussin reste au nid pendant 275 jours environ, après quoi il s'envole. On a cru que les parents faisaient jeûner leur petit devenu très gras et qu'ainsi celui-ci retrouvait un poids normal avant l'envol ; cependant, selon Richdale (1954), cette thèse ne serait applicable ni à l'albatros royal, ni à l'albatros hurleur, ni à une autre espèce du genre *Phoebetria* nichant sur l'île Campbell. Le cycle reproducteur de l'albatros hurleur dure onze mois et les couples nichent seulement une fois tous les deux ans. Cette espèce a une répartition circumpolaire et niche sur les îles Antipodes, Campbell, Macquarie, Kerguelen, Gough, Marion, Crozet, Tristan da Cunha, et en Géorgie du Sud.

L. Bernard - Pitch

▲ **Diomedea exulans,** ***l'albatros hurleur. Son nid est construit à l'air libre ; pour manger, cet Oiseau se pose sur l'eau.***

Les famille des **Procellariidés** compte les puffins, pétrels, fulmars et prions (18 à 90 cm), soit une cinquantaine d'espèces, répandues dans toutes les mers. Le plumage des puffins est brun ou noir, mêlé de blanc, celui du pétrel des neiges entièrement blanc. Chez plusieurs espèces, notamment le fulmar, la coloration est variable, certains sujets étant clairs et les autres foncés. Ce phénomène existe aussi chez les Oiseaux d'autres groupes (rapaces diurnes en particulier).

Les Procellariidés méritent le qualificatif de pélagiques (contrairement à la plupart des mouettes et goélands qui vivent au voisinage des côtes). Ils nichent en colonies et pondent dans un terrier, une crevasse de rocher ou à l'air libre (fulmar). Ils mènent une existence nocturne

Ormond - Pitch

▲ **Phaeton lepturus,** ***le phaéton à queue blanche, reconnaissable comme les autres représentants de la famille aux deux longues rectrices qui dépassent de la queue.***

à l'époque de la reproduction. En France, nichent le puffin cendré, le puffin des Anglais et le fulmar.

La famille des **Hydrobatidés** ou **Océanitidés** est constituée par les pétrels-tempête, Oiseaux de faible taille au plumage foncé (brun-noir avec peu ou pas de blanc). Les dix-huit à vingt-deux espèces mesurent de 13,5 à 25 cm. Leur genre de vie est assez voisin de celui des puffins. L'incubation de l'œuf dure de 40 à 45 jours, et le séjour des jeunes au « nid » de 50 à 60 jours. En France, le pétrel-tempête se reproduit sur les côtes de l'ouest, du sud-ouest et de la Corse.

La famille des **Pélécanoïdidés** est constituée par les quatre espèces de pétrels-plongeurs (17 à 25 cm), qui prennent leur nourriture sous la surface de la mer. Elles diffèrent des pétrels-tempête par leur allure plus lourde, la brièveté de leurs rectrices et la position de leurs pattes insérées très en arrière. Leur coloration et leur silhouette rappellent celles des pingouins et des guillemots, qui ont un genre de vie assez voisin : le dessus du corps noir ou brun foncé, le dessous blanc. A terre, ils se tiennent debout; en mer, on les voit plus souvent nager que voler. Les palmures des pattes sont de couleur bleue. Les pétrels-plongeurs se nourrissent de petits Poissons, de Crustacés et de Mollusques. Ces Oiseaux ne vivent que dans l'hémisphère Sud (côtes d'Australie, de Nouvelle-Zélande, du Chili, du Pérou, îles Kerguelen, Falkland et Géorgie du Sud).

Ordre des Pélécaniformes

Il réunit des Oiseaux aquatiques d'aspect très différent mais ayant en commun un caractère morphologique : les pattes ont les quatre doigts réunis par une palmure. Tous ces Oiseaux sont piscivores. Leurs petits sont des oisillons nidicoles. On distingue six familles, dont l'une (Anhingidés) n'est, en réalité, qu'une subdivision de la famille des Phalacrocoracidés (cormorans). Il y a environ cinquante-sept espèces de Pélécaniformes, également appelés Stéganopodes.

La famille des **Phaéthontidés.** Ce sont les phaétons (longs de 80 cm à 1 m), qui doivent leur pittoresque appellation de pailles-en-queue à deux longues rectrices blanches ou rouge vif, qui ressemblent à deux brins de paille, et qui dépassent les autres plumes de 30 cm environ (elles atteignent, en effet, 53 cm de long).

Les trois espèces habitent la zone tropicale. Le phaéton à bec rouge se reproduit sur les côtes des océans Indien, Pacifique et Atlantique; celui à queue rouge fréquente seulement les deux premiers et le phaéton à queue blanche se rencontre partout. Ils ressemblent aux sternes (Lariformes) par leurs pattes courtes, leurs ailes effilées, leur bec pointu, leur silhouette et leur mode d'alimentation (ils se nourrissent de petits Mollusques capturés à l'issue d'un plongeon rapide). Ils ne font pas de nid, et l'œuf unique est pondu dans un creux de rocher ou sur le sable.

L'incubation dure de 41 à 45 jours et, à l'éclosion, l'oisillon est couvert de duvet.

La famille des **Pélécanidés** compte les très populaires pélicans, qui ont inspiré poètes et artistes. Ce n'est pas à leur beauté qu'ils doivent cette faveur car ils ont une allure bien lourde à terre, en fait, à la suite d'observations mal faites ou interprétées de façon erronée, on leur a prêté des « sentiments » familiaux qu'ils n'ont pas. Ils ne se percent nullement la poitrine pour nourrir leurs petits, mais se contentent d'ouvrir leur bec rempli de Poissons.

Les six espèces de pélicans sont de gros Oiseaux aquatiques (longs de 1,25 m à 1,71 m; envergure, jusqu'à 2,75 m; poids, jusqu'à 11 kg). Ils nagent fort bien mais ne peuvent plonger (sauf le pélican brun d'Amérique) en raison des nombreuses poches d'air qui se trouvent sous leur peau et dans leur squelette. En revanche, ils volent et planent avec une aisance remarquable et pratiquent le « vol à voile ». On les reconnaît immédiatement à leur très grand bec (il atteint 45 cm de long) pourvu d'une poche de peau qui pend sous les deux branches de la mandibule inférieure. Cette poche, d'une capacité moyenne de neuf litres, est utilisée comme épuisette pour capturer les Poissons, base de leur régime alimentaire. Le plumage est blanc et noir ou brun. Excepté le pélican brun, les autres espèces vivent au bord des eaux douces des cinq continents. Les pélicans nichent en colonies, font un nid de plantes palustres et y pondent un à quatre œufs blancs, qu'ils couvent de 28 à 35 jours. Au Kenya, *Pelecanus rufescens* pond le plus souvent deux œufs qui sont couvés par les deux parents. De couleur rouge brique à l'éclosion, la peau des oisillons se couvre vite d'un blanc duvet. Ils s'envolent à l'âge de 70 à 75 jours. Les causes de mortalité sont principalement les chutes (le nid est situé dans un arbre), le vent froid et un temps trop humide : 31 % des jeunes de cette espèce meurent entre l'âge de 10 et 30 jours.

La famille des **Sulidés** est représentée par le fou de Bassan, seul Sulidé nicheur en France (Bretagne), qui se reproduit aussi en Grande-Bretagne et au Canada, et huit autres espèces de fous, réparties sur les côtes des mers du monde entier, à l'exception des zones polaires. Ces gros Oiseaux (longueur, 80 à 100 cm; envergure, 1,70 m; poids maximal, 3 kg) au plumage blanc et noir ou brun et blanc, ont un bec droit, pointu, puissant, de courtes pattes et une silhouette fuselée. Spécialistes du plongeon, ils capturent les Poissons en se laissant tomber de quelques mètres ou dizaines de mètres de haut dans la mer. L'écume qu'ils soulèvent alors permet souvent de les repérer à grande distance.

Extrêmement sociables, les fous nichent en colonies très denses sur les îlots et les côtes rocheuses. Les nids du fou de Bassan sont formés d'Algues et d'autres Végétaux; ils contiennent un seul œuf, recouvert d'un enduit calcaire blanc qui masque la couleur bleu-vert pâle de la coquille. Chez cette espèce, l'œuf est placé entre les palmures des pattes, qui jouent le même rôle que les plaques incubatrices des autres Oiseaux. L'incubation dure 42 jours environ. Les fous de Bassan d'Europe occidentale sont partiellement migrateurs : en automne, les jeunes descendent le long des côtes d'Afrique occidentale jusqu'au niveau de Dakar.

La famille des **Phalacrocoracidés** compte vingt-six espèces de cormorans (longs de 50 à 91 cm). Ils présentent un plumage sombre, agrémenté de blanc sur la face ventrale de quelques espèces de l'hémisphère Sud. Ces Oiseaux vivent partout, sauf dans les régions polaires, au Canada et en Sibérie centrale. Certains fréquentent les eaux douces, mais la plupart vivent au bord des côtes. Tous ont un bec crochu et, chose curieuse pour des Oiseaux aquatiques, un plumage qui se mouille rapidement. Aussi doivent-ils, entre deux séances de pêche, se sécher longuement. En vol, leur silhouette rappelle, avec son cou tendu, celle d'une croix noire. Ils nagent et plongent fort bien, jusqu'à plus de 10 m pour capturer des Poissons. Les cormorans se reproduisent en colonies. Le nid (en Algues ou en branchettes) abrite deux à quatre œufs bleu pâle recouverts d'une couche calcaire blanche. L'incubation dure de 21 à 30 jours, et les oisillons sont nus et aveugles à l'éclosion.

Deux espèces vivent en France sur les côtes de Normandie et de Bretagne : le grand cormoran et le cormoran huppé. Les plus grandes colonies, celles du cormoran de Bougainville, se trouvent sur les côtes péruviennes. On en exploite le *guano* (amoncellements de déjections). La densité des nids de cette espèce est stupéfiante : on en a compté 39 sur 12 m² et jusqu'à 52 sur 18 m². Sur l'île Chincha, leur population a été estimée à cinq millions après l'éclosion des petits.

L'anhinga (90 cm de long) est si proche des cormorans qu'on le considère comme faisant partie de la même famille. Il en diffère par la longueur de son cou (c'est pour cette raison qu'on l'appelle oiseau-serpent), par son grand bec droit et le fait qu'il ne vit qu'auprès des eaux douces. Sa répartition comprend le sud de l'Asie, l'Australie, l'Afrique au sud du Sahara et l'Amérique. Certains ornithologistes pensent qu'il y a quatre espèces d'anhingas, d'autres une seule, présentant une certaine variabilité. L'anhinga se nourrit de Poissons, d'Amphibiens et d'Insectes qu'il pêche en nageant et en plongeant. Il niche en petites colonies dans les arbres.

E. Hosking

▲ ***Un groupe de grands cormorans (Phalacrocorax carbo), dont l'espèce vit en France sur les côtes de Normandie et de Bretagne.***

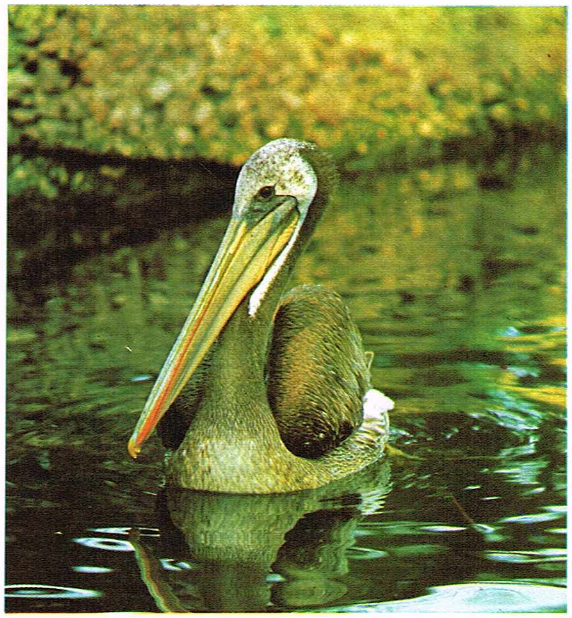

C. Bevilacqua

◀ ***Les pélicans nichent en colonies au bord des eaux douces des cinq continents; ici, un représentant de l'espèce sud-américaine (Pelecanus phabius).***

La famille des **Frégatidés** compte cinq espèces de frégates (longueur, 80 à 100 cm ; envergure, 2 à 2,10 m ; poids, 1,5 à 2 kg) ; elles ont un genre de vie essentiellement aérien. A cet égard, elles sont au moins aussi spécialisées que les albatros, bien que leur façon de voler et de planer soit différente. On les trouve sur les côtes des océans Atlantique, Pacifique et Indien, en pleine zone tropicale. En vol, leur grande taille, leur plumage foncé (noir à reflets verts) ou noir et blanc, leur grande queue fourchue et leur long bec crochu, empêchent toute confusion avec d'autres Oiseaux. Très malhabiles à terre à cause de leurs toutes petites pattes, elles se posent (et nichent) sur des arbres ou des buissons.

Comme les albatros, elles ont besoin du vent pour évoluer dans l'espace. Cependant, *Fregata magnificens* est capable de quitter son perchoir, même par temps calme. Elle peut aussi s'envoler de l'eau, mais n'y reste jamais bien longtemps car son plumage se mouille rapidement. En revanche, elle a besoin, pour atterrir, d'un vent contraire. Sur l'île Barbuda, au nord de la Guadeloupe, la frégate superbe *(Fregata magnificens)* niche en colonies sur des arbrisseaux mesurant de 30 cm à 2,60 m de haut. Normalement, elle ne pond qu'un seul œuf, dont l'incubation a une durée inconnue. Chez les autres espèces, celle-ci dure de 41 à 55 jours. L'oisillon s'envole au bout de 166 jours en moyenne, et la femelle le nourrira pendant quatre mois encore. Les frégates pratiquent largement le parasitisme alimentaire : comme les labbes (famille des Stercorariidés) elles volent à d'autres Oiseaux (fous, cormorans) la nourriture qu'ils avaient pêchée et, pour cela, les poursuivent avec acharnement. Toutefois, ce comportement n'est pas constant chez *Fregata magnificens,* qui prend une partie de sa nourriture (Poissons, Mollusques) à la surface de la mer.

Ordre des Ciconiiformes

Les représentants de cet ordre, communément appelés grands Échassiers, diffèrent par l'aspect et la biologie. Cependant, chez tous, les membres inférieurs sont très longs, le cou est grand et la queue très brève. La monogamie est de règle, et il n'y a pas de dimorphisme sexuel, sauf chez certaines espèces (le blongios nain par exemple). Les œufs présentent une coloration blanche, verte, bleue ou beige, tachetée ou unie. Les jeunes sont des oisillons nidicoles à duvet plus ou moins abondant et dont les yeux sont ouverts dès l'éclosion. Cet ordre renferme cent dix espèces réparties entre cinq familles.

La famille des **Ardéidés** est la plus importante, avec, selon les conceptions des systématiciens, quarante-deux ou soixante-trois espèces. Ce sont les hérons, butors, aigrettes, tigrisomes et hérons de nuit (bihoreaux). Leur longueur varie de 25 cm à 1,50 m. Elles sont réparties dans le monde entier. Tous les Ardéidés ont un cou en forme de S quand il est replié, et un bec droit et pointu. Leur coloration va du blanc pur (aigrette garzette) au noir (aigrette des récifs). Le gris, le brun, le noir, le roux et le verdâtre sont les couleurs les plus fréquentes.

▼ *Les frégates pratiquent largement le parasitisme alimentaire, excepté* Fregata magnificens, *qui prend une partie de sa nourriture à la surface de l'eau.*

Parides - Pitch

En France, le héron cendré, le héron pourpré, le bihoreau, le butor, le blongios nain et l'aigrette garzette ainsi que le héron crabier (en Camargue) et, depuis peu, le héron garde-bœufs nichent régulièrement. La plupart des Ardéidés fréquentent le bord des eaux douces (rivières, lacs, étangs), même pour nicher. Ils se nourrissent en grande partie de Poissons, mais aussi de Vers, d'Insectes, de Mollusques et de petits Rongeurs, les proportions de ces différents éléments variant selon l'espèce. Le nid est placé tantôt dans la végétation palustre, au niveau du sol, tantôt dans un arbre, à plus ou moins grande hauteur. La plupart des espèces nichent en colonies.

On distingue, d'après la coloration et les habitudes, plusieurs groupes naturels : les hérons proprement dits ; les aigrettes, qui ont des plumes ornementales sur les épaules et le dos ; les butors et les blongios, aux mœurs très cachées ; les bihoreaux, à la silhouette très ramassée ; les tigrisomes, qui rappellent les butors. Le savacou a parfois été placé dans une famille spéciale (celle des Cochléariidés), en raison de la forme de son bec très large (on l'appelle aussi bec-en-cuiller) ; il habite les mangroves d'Amérique centrale et du nord de l'Amérique du Sud.

La famille des **Balénicipitidés** n'est pas admise par tous les spécialistes, et certains considèrent son unique représentant, le baléniceps *(Balaeniceps rex)* ou bec-en-sabot, comme un membre de la famille des Ciconiidés. Cet Oiseau africain (1,60 m) au plumage uniformément gris hante les vastes marais à papyrus du cours supérieur du Nil et le voisinage de plusieurs lacs et rivières d'Afrique orientale (est du Zaïre, Ouganda). Son énorme bec a la forme d'un chausson à la fois très large et long, avec un crochet à l'extrémité. Le baléniceps se nourrit de jeunes crocodiles, de tortues, d'Amphibiens et de Poissons du groupe des Dipneustes. Il construit son nid par terre et y pond deux œufs blancs. Sa biologie est mal connue, car il habite un milieu difficilement accessible.

La famille des **Scopidés** compte une seule espèce, l'ombrette, *Scopus umbretta* (50 cm), qui vit en Afrique au sud du Sahara, à Madagascar et dans le sud-ouest de l'Arabie. L'ombrette a un plumage entièrement brun et sa silhouette justifie le nom vulgaire hollandais (*hammerkoep,* c'est-à-dire tête en marteau) car au bec fait pendant une huppe touffue et assez allongée. L'ombrette habite les lieux marécageux, où elle mange des Insectes, des Amphibiens, des Mollusques, des Vers et des Poissons. A cette occasion, on peut voir des groupes de trois à vingt sujets, mais elle niche par couples séparés. Le nid, bâti par le mâle et la femelle dans un arbre, présente l'aspect d'une boule de branchages et paraît démesuré par rapport à la taille de ses constructeurs : il mesure en effet jusqu'à 2 m de diamètre. Son édification exige au moins huit mille aller et retour. La chambre intérieure communique avec l'air libre par un orifice mesurant seulement 12 cm de diamètre. La ponte comprend de trois à six œufs blancs.

La famille des **Ciconiidés** comprend dix-sept espèces (75 à 150 cm de long) : neuf cigognes, deux becs-ouverts ou anastomes, trois marabouts, deux jabirus et un tantale. Les Ciconiidés sont représentés partout, sauf dans les régions polaires et subpolaires, en Océanie, Nouvelle-Zélande et Amérique du Nord. Leur bec est droit, puissant et particulièrement volumineux chez les marabouts. Les Ciconiidés fréquentent la proximité des lieux humides où ils trouvent une partie de leur nourriture ; cependant, ce ne sont pas des Oiseaux vraiment aquatiques.

Les marabouts se distinguent par leur tête presque chauve, la possession d'une poche de peau nue, plus ou moins conique, pendant sur la poitrine, et leur régime en grande partie charognard. Les autres espèces mangent des Rongeurs, Amphibiens, Reptiles, Insectes, Mollusques, Poissons et Vers. Les espèces qui nichent dans l'hémisphère Nord sont migratrices ; toutefois, la cigogne d'Abdim, qui vit en Afrique tropicale, effectue elle aussi des migrations à l'intérieur du continent noir.

La cigogne blanche *(Ciconia ciconia),* sans nul doute l'espèce la mieux connue et la plus familière, est la seule qui se reproduise en France, la cigogne noire étant chez nous un Oiseau de passage régulier mais rare. La cigogne blanche niche en Alsace ; elle a niché ou niche encore

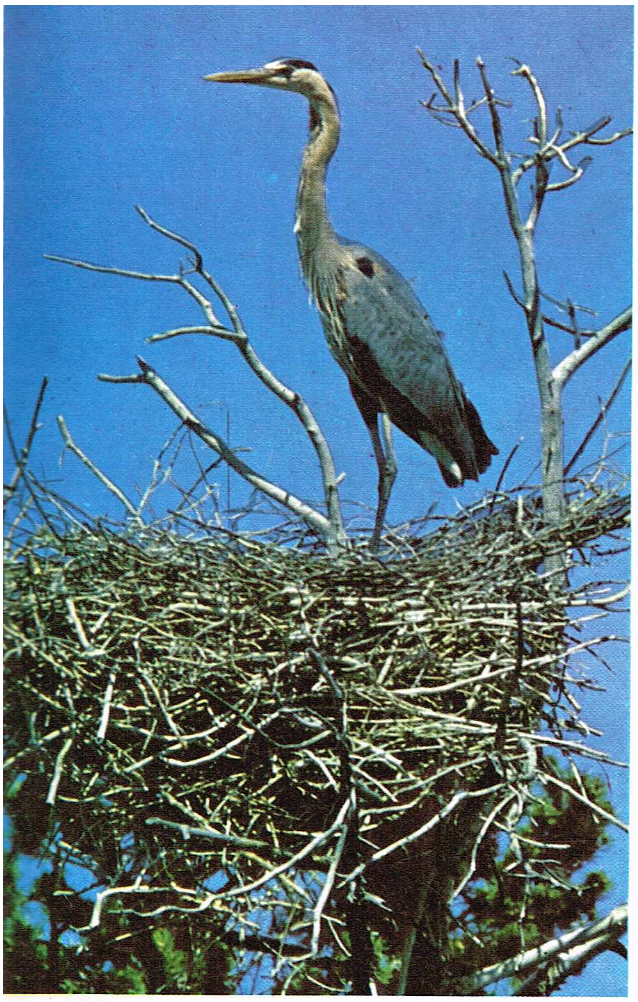

E.P.S.

N. Myers

isolément dans quelques autres régions (Lorraine, Normandie, Vendée, Bourgogne). Cependant, ses effectifs ont subi une régression catastrophique depuis une douzaine d'années et sont passés de cent vingt-deux couples ayant élevé une nichée en 1960 à dix-huit en 1970 et treize en 1972. Cette diminution, générale en Europe occidentale (France, pays de Bade, Pays-Bas), est très probablement due à la destruction systématique des Oiseaux dans leurs quartiers d'hiver (Nigeria, Mali et autres pays voisins). Le spécialiste français, A. Schierer, suit depuis 1948 l'évolution de la population des cigognes alsaciennes. Le département du Haut-Rhin a toujours été moins peuplé que celui du Bas-Rhin. Nos cigognes arrivent généralement dès la fin de février et surtout au début de mars; elles ont traversé le Sahara par sa bordure occidentale et ont franchi la Méditerranée à Gibraltar. Les Oiseaux nicheurs ont au moins trois ans et très souvent quatre ou cinq ans.

Le nid, construit sur un toit, une cheminée ou, plus rarement, un arbre, est un amas de branchages, de touffes d'herbes, de morceaux de fumier, et de débris divers. La ponte comprend quatre ou cinq œufs couvés par les deux parents pendant 32 jours environ. Les cigogneaux s'envolent à l'âge de 55 jours. Les cigognes blanches d'Europe centrale et orientale vont en Afrique orientale et en Afrique du Sud en passant par le Bosphore, la Syrie et l'Égypte. Elles migrent surtout en planant et évitent de traverser les grandes étendues marines.

La famille des **Threskiornithidés**, ou Plataléidés, ou Plégadidés, compte les vingt-quatre espèces de spatules et d'ibis (55 à 85 cm), répandues dans le monde entier à l'exception des régions polaires, subpolaires et de la Nouvelle-Zélande.

Les six espèces de spatules ont un plumage en grande partie blanc ou rose. Elles doivent leur nom à leur bec de forme particulière, long et très élargi à l'extrémité, mince et légèrement recourbé. Elles vivent dans les marais, nichent en colonies, par terre ou sur les buissons. La ponte se compose de deux à cinq œufs. Le régime alimentaire comprend de petits Animaux aquatiques (Mollusques, Crustacés, Vers, alevins, Insectes) qu'elles capturent dans l'eau en balançant le bec de gauche à droite ou en l'enfonçant rapidement, comme les hérons. Chez nous, la spatule blanche n'est qu'une espèce de passage sur les côtes de l'Ouest dont quelques sujets séjournent une partie de la belle saison en Vendée.

Les ibis ont une taille plus variable (55 à 75 cm). Leur coloration va du blanc pur au rouge vif en passant par le roux acajou et le noir à reflets verts. Plusieurs ont la tête partiellement nue. L'ibis falcinelle *(Plegadis falcinellus)*, qui niche dans le nord de l'Italie et dans les Balkans (Roumanie surtout), est accidentel dans le midi de la France et plus au nord (jusqu'en Brenne). L'ibis rouge *(Eudocimus ruber*, ou *Guara rubra)*, sans doute la plus belle espèce, niche dans les mangroves sud-américaines (Surinam, Venezuela).

Ordre des Phœnicoptériformes

La famille des **Phœnicoptéridés** n'est représentée que par quatre espèces de flamants, appartenant à trois genres *(Phoenicopterus, Phoeniconaias*, et *Phoenicoparrus)*. La taille varie entre 91 et 174 cm selon l'espèce. Plus encore que les Ciconiiformes, ces Oiseaux représentent le type même de l'Échassier tel qu'on l'imagine, avec un cou très long et des pattes démesurées (chez le flamant rose, les tarses ne mesurent pas moins de 36 cm de long). Outre la gracilité du cou et la taille des membres inférieurs,

▲ *A gauche, les Ardéidés construisent leur nid tantôt dans la végétation palustre, tantôt dans un arbre à plus ou moins grande hauteur; ici, un héron* (Ardea herodias) *sur son nid. A droite, un ibis sacré* (Threskiornis aethiopica), *espèce africaine.*

E. Hosking

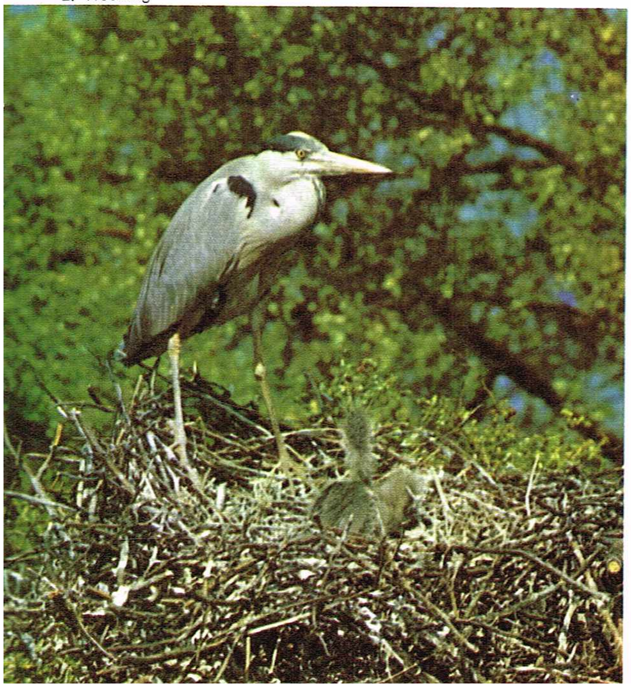

◀ *Le héron cendré* (Ardea cinerea) *niche en colonies dans des bois de grands arbres, sur lesquels il construit un nid fait de branchages.*

▶ *De haut en bas, l'oie cendrée* **(Anser anser)**, *la plus grande de nos oies; le cygne à cou noir* **(Cygnus melanocoryphus)**, *espèce d'Amérique du Sud; le cygne noir* **(Chenopsis atrata)** *vit en Australie et en Tasmanie.*

T. Okapia

C. Bevilacqua

▲ *Tête de flamant rose* **(Phoenicopterus ruber)** *montrant la singulière conformation du bec; cette espèce vit en Camargue notamment.*

C. Bevilacqua

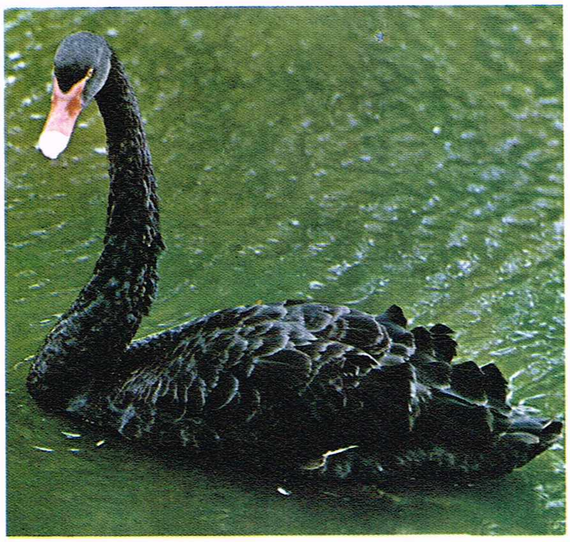

Archives P2

les flamants présentent d'autres caractères particuliers : une coloration très claire, semblable chez les deux sexes (blanc, rose, rouge avec un peu de noir sur les ailes), et un bec de forme busquée, qui paraît mal adapté à la prise des aliments, mais est, en réalité, fort efficace. La répartition des flamants est très limitée : on les trouve seulement au bord des lacs et des lagunes d'eau saumâtre, près de la mer ou jusqu'à 4 900 m d'altitude.

Le flamant rose *(Phoenicopterus ruber)* vit en Camargue, en Inde, au banc d'Arguin (côte occidentale d'Afrique), en Afrique orientale, aux Antilles, aux îles Bahamas, Galapagos, au Yucatan, dans le sud du Chili, du Pérou, en Bolivie, Argentine, Brésil et Uruguay. Ses effectifs sont estimés à sept cent mille sujets. Comme les autres espèces, il se nourrit de petits Mollusques, Crustacés, Algues (Diatomées en particulier) et de larves d'Insectes. La colonie de Camargue, la seule d'Europe, compte de trois mille à cinq mille couples environ, mais se trouve dans une situation critique car elle est située dans une région touristique et à proximité d'un grand centre industriel (Fos-sur-Mer).

Le flamant des Andes *(Phoenicoparrus andinus)* habite le sud-ouest du Pérou et l'ouest de la Bolivie, entre 4 200 m et 4 900 m environ; il compterait, au total, cent mille individus.

Le principal lieu de reproduction du flamant de James *(Phoenicoparrus jamesoni)* se trouve dans les montagnes de Bolivie, où il s'associe à l'espèce précédente. C'est le plus rare (quinze mille sujets environ).

Enfin, le flamant nain *(Phoeniconaias minor)* est le plus abondant (probablement cinq millions, dont trois millions en Afrique orientale et les autres au Cameroun, à Madagascar, dans le nord-ouest de l'Inde et au Pakistan).

Les flamants font un nid de boue ressemblant plus ou moins à un tronc de cône, au sommet duquel se trouve un léger creux qui empêche l'unique œuf, blanc, de rouler. L'incubation, assurée par les deux adultes, dure de 28 à 32 jours. Très sociables, les flamants nichent toujours en colonies. A l'éclosion, les jeunes sont couverts de duvet et quittent leur nid à l'âge de 7 à 10 jours (chez le flamant rose). Chez cette dernière espèce, les parents donnent à leur petit une production de glandes situées à la partie supérieure de leur tube digestif. Cette sécrétion, de couleur rougeâtre, est riche en glucides, lipides et protéines, et représente un volume de 200 cm^3 environ par jour. Pour se nourrir, les flamants adultes tournent sur place, grattant la vase avec leur bec, dont l'extrémité, placée en contact avec le fond, agit comme une drague. De petites lamelles cornées, situées sur les bords des mandibules, filtrent les particules alimentaires.

Ordre des Ansériformes

Il compte deux familles, les Anatidés et les Anhimidés, soit cent quarante-huit espèces au total.

La famille des **Anatidés** rassemble les oies, les cygnes et les canards dont les cent quarante-cinq espèces se ressemblent si étroitement qu'il suffit d'un seul coup d'œil pour déterminer si un Oiseau fait partie de ce groupe. La taille varie entre 31 cm (sarcelle d'hiver) et 1,62 m (cygne trompette d'Amérique du Nord), le poids entre 350 g et 12 kg et l'envergure entre 55 cm et 2,55 m.

Les Anatidés manquent seulement sur le continent antarctique et une partie de l'Océanie. Leur bec, généralement assez plat, large et plus ou moins haut, a les bords garnis de lamelles dont le rôle varie avec les espèces : chez les canards, elles servent à tamiser l'eau et à retenir les aliments; chez les oies elles arrachent l'herbe, enfin, chez les harles où elles sont particulièrement raides et prennent l'aspect de « dents », elles maintiennent les Poissons pêchés. Le bec est, en outre, couvert d'une peau nue, riche en corpuscules tactiles, et les Anatidés n'ont pas besoin de voir clair pour se nourrir. C'est ce qui explique que de nombreux canards, par exemple, se reposent dans la journée et vont manger la nuit. De même, la turbidité de l'eau ne les gêne nullement. Les pattes sont palmées et courtes, avec un petit doigt postérieur. Les Anatidés vivent près des eaux douces, au moins à l'époque de la reproduction et, dans l'hémisphère septentrional, beaucoup séjournent le long des côtes pendant la mauvaise saison. Le nid, généralement placé à terre, se trouve, chez quelques espèces, dans un trou; il est rembourré de plumes que la femelle s'arrache du ventre et de duvets qui tombent naturellement de sa peau. La ponte comprend de trois à douze œufs. L'incubation est assurée par la femelle seule (sauf exceptions). Quelques espèces nichent en colonies, mais la plupart se reproduisent par couples séparés. On distingue plusieurs groupes d'après les dimensions, la coloration, la forme du bec et des pattes et les habitudes.

Anseranas semipalmata, l'oie semi-palmée d'Australie et de Nouvelle-Guinée (85 cm), a de très grandes pattes et des palmures très réduites; en outre, son doigt postérieur est relativement long. Chez cette espèce, la mue des rémiges a lieu progressivement et non brusquement.

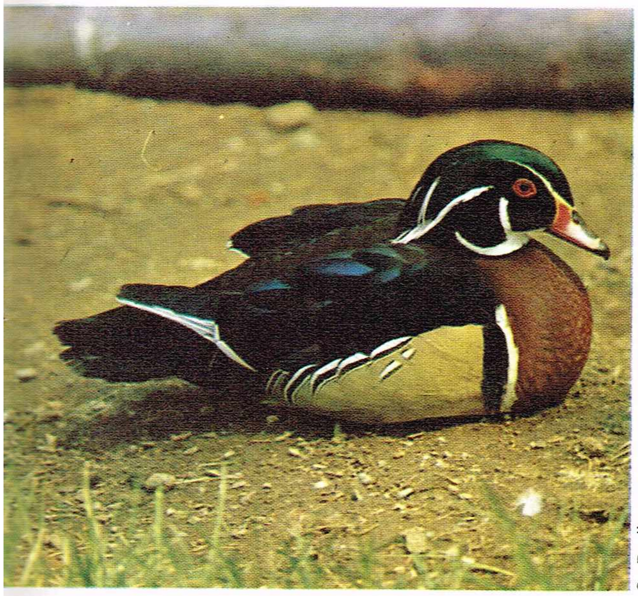

C. Bevilacqua

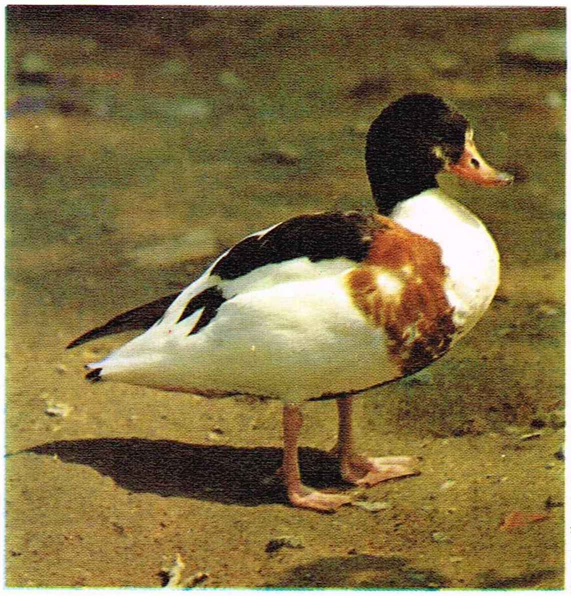

C. Bevilacqua

S. Prato

▲ *De gauche à droite, un canard carolin mâle* **(Aix sponsa)** *à livrée brillante et colorée; le tadorne de Belon* **(Tadorna tadorna)** *niche, en petit nombre, dans l'ouest de la France; une bernache* **(Branta ruficollis).**

La sous-famille des *Ansérinés* rassemble les oies, les cygnes et les dendrocygnes. Ceux-ci, appelés « canards siffleurs » dans les pays anglo-saxons, ne vivent que dans les régions tropicales d'Amérique, d'Afrique et d'Asie. Ils possèdent, eux aussi, des pattes assez grandes et se perchent souvent. Les oies et les cygnes ne présentent aucun dimorphisme sexuel.

Les sept ou huit espèces de cygnes sont les plus grandes de tous les Anatidés; leur plumage est blanc, blanc et noir ou tout noir. Aucune ne vit en Afrique, et on en trouve seulement une en Australie (cygne noir) et en Amérique du Sud (cygne à cou noir); toutes les autres habitent l'hémisphère Nord et sont migratrices. Les cygnes ont un très grand cou (supporté par vingt-cinq vertèbres, les canards en présentant seulement quinze). Malgré leur poids considérable, ils volent bien, et le cygne chanteur *(Cygnus cygnus)* atteint 80 km/h. La femelle prépare le nid et couve les cinq ou six œufs (jusqu'à onze chez le cygne muet). Leur incubation dure de 35 à 38 jours. Le mâle, ou jars, reste à côté, puis surveille les jeunes. Les cygnes peuvent prendre leur nourriture au fond de l'eau en enfonçant la partie antérieure de leur corps sous la surface. Leur régime se compose de plantes aquatiques, ainsi que de Mollusques et d'Insectes. En France, les cygnes muet (tuberculé, ou domestique [*Cygnus olor*]), chanteur et de Bewick viennent en hiver quand il fait froid, mais certains cygnes muets sont devenus sédentaires (par exemple sur le Loiret).

On distingue dix espèces d'oies proprement dites (genres *Anser, Chen, Philacte*) et quatre espèces de bernaches (genre *Branta*), plus petites et dont le plumage présente des tons noirs et roux, alors que dans celui des oies, qui est clair, dominent le blanc, le beige et le gris. Il n'y a pas de dimorphisme sexuel. Beaucoup plus terrestres que les canards et les cygnes, les oies se nourrissent en grande partie de Graminées (herbes, céréales) qu'elles broutent. Le nid, construit par terre, se trouve dans la végétation (oie cendrée) ou sur un rocher (oie à bec court). Les cinq ou six œufs sont couvés pendant 27 à 29 jours par la femelle, le jars montant la garde à proximité.

Les bernaches mangent des Zostères, plantes marines à fleurs, dont elles exploitent les herbiers (c'est surtout le cas de la bernache cravant, *Branta bernicla*).

La majorité des oies vit dans l'hémisphère Nord. L'oie des neiges *(Anser hyperboreus)* forme des colonies dans le Grand Nord. L'oie cendrée, l'oie rieuse, l'oie des moissons et la bernache cravant ne font que passer ou hiverner en France. En hivernage, l'oie rieuse est la plus rare (cent cinquante environ) et la bernache cravant la plus abondante (environ neuf mille).

La sous-famille des *Anatinés* compte les canards, les sarcelles et quelques espèces baptisées « oies » (oies des Andes, oie céréopse, oie d'Égypte, etc.). Ce vaste groupe compte cent seize espèces, chez lesquelles le dimorphisme sexuel est net (sauf exceptions) : les femelles ont un modeste plumage et les mâles une brillante livrée. Les Anatinés, les plus petits des Ansériformes, pondent généralement de huit à douze œufs, couvés par la femelle seule pendant 21 à 25 jours chez un grand nombre d'espèces; le mâle ne s'occupe absolument pas de la couvée et de la nichée. Le harle bièvre, le canard mandarin et le canard carolin nichent dans un trou d'arbre.

On distingue huit tribus, dont les principales sont les suivantes.

Les *tadornes* sont plus terrestres que la plupart des canards; par la longueur de leurs pattes, ils font la transition avec les oies. Le tadorne de Belon niche, en très petit nombre, dans l'ouest de la France.

Il y a deux groupes de *canards,* les canards de surface et les canards plongeurs. Pour chercher leur nourriture, les premiers se contentent de basculer le corps, et seul l'abdomen, la queue et les pattes émergent, tandis que les autres disparaissent entièrement sous la surface. Tous se nourrissent de Végétaux et de petits Animaux aquatiques, mais certains ne négligent pas les graines ou les fruits (par exemple, le canard colvert qui apprécie les glands, les céréales, etc.). Le canard colvert, la sarcelle d'été, le souchet, la sarcelle d'hiver et le chipeau nichent en France et, parmi les canards plongeurs, le fuligule milouin et la nette rousse s'y reproduisent.

Les *eiders* sont des canards marins vivant dans le Grand Nord. Ils font un nid chaudement tapissé de duvet (celui-ci est récolté par l'homme à cause de ses qualités isolantes). Les eiders mangent surtout des Mollusques qu'ils capturent en plongeant. L'eider à duvet *(Somateria mollissima)* est un nicheur rare en France.

Les *harles* (six espèces) ont un régime à base de Poissons. Le harle bièvre *(Mergus merganser)* niche sur la rive française du lac Léman.

La famille des **Anhimidés** compte trois espèces (deux kamichis et un chauna), Oiseaux d'Amérique du Sud, qui ont des éperons cornés sur l'aile.

Ordre des Falconiformes

Il y a deux cent soixante-quatorze espèces de Falconiformes, couramment appelés « Rapaces diurnes ». Tous ont un bec crochu, des griffes acérées, un plumage aux couleurs modestes (brun, beige, roux, gris, noir, blanc), les tarses partiellement ou entièrement recouverts de plumes. La forme des ailes varie selon le genre de vie et la façon de chasser. Les femelles sont généralement plus grandes et plus puissantes que les mâles, mais leur coloration ne diffère pas, sauf exceptions (busards par exemple).

Les Falconiformes se nourrissent de proies vivantes (les vautours font exception) et sont les prédateurs d'un grand nombre de Vertébrés et d'Invertébrés (mais ce ne sont pas les seuls Oiseaux prédateurs...). La plupart (sauf les vrais faucons) font un nid appelé aire. La ponte

Titus

▲ **Vultur gryphus,** *le condor des Andes, reconnaissable aux plumes blanches de son cou, se nourrit comme tous les Cathartidés de cadavres d'Animaux.*

E. Hosking

E. Hosking

▲▶ *En haut, à gauche,* **Gypaetus barbatus,** *le gypaète barbu, vautour charognard, vit en France; à droite, femelle de faucon hobereau* **(Falco subbuteo)** *avec sa nichée. En bas, l'aigle impérial* **(Aquila heliaca)** *vit notamment en Asie, en Grèce, en Espagne et sur une petite partie de l'Afrique.*

▶ *Le faucon pèlerin* **(Falco peregrinus)** *niche en France et se nourrit d'Oiseaux pris en vol.*

comprend de un à sept œufs selon l'espèce. Les éclosions étant échelonnées, le dernier-né périt de faim si la nourriture n'est pas très abondante, car ses frères et sœurs, plus forts, accaparent les aliments et ne lui laissent rien ; parfois même, ils le dévorent. La maturité sexuelle est tardive chez les grandes espèces.

On divise les Falconiformes en deux groupes, les *Cathartae* (une famille) et les *Falcones* (quatre familles).

Les *Cathartae* sont représentés par la famille des **Cathartidés.** Ce sont les vautours d'Amérique, distincts de leurs homologues de l'Ancien Monde par quelques caractères anatomiques. Cette famille comprend seulement cinq espèces : le condor de Californie (le plus grand, avec 3,20 m d'envergure), le condor des Andes (3,15 m d'envergure), le vautour aura, le vautour royal et l'urubu. Les deux premières espèces sont les seules à vivre en Amérique du Nord ; le vautour aura niche jusque dans le sud du Canada. Tous se nourrissent à peu près exclusivement de cadavres d'Animaux. Au Pérou, les effectifs du condor des Andes diminuent et, en Colombie, il en reste de cinquante à deux cents qui fréquentent la côte, où ils se repaissent d'otaries crevées et des restes d'autres Animaux rejetés par la mer. Ils ne fréquentent plus les îles où nichent les Oiseaux producteurs de guano (cormorans et fous) car on les y chasse (autrefois, ils pillaient les nids, prenant œufs et oisillons). Le condor des Andes ne commence à se reproduire qu'à l'âge de huit ans ; il pond un seul œuf.

Les *Falcones* groupent la famille des **Sagittariidés,** dont le serpentaire, ou secrétaire *(Sagittarius serpentarius),* est l'unique représentant. Ce Rapace africain (envergure, 2,10 m ; longueur, 1,15 m) au plumage gris et noir habite les savanes au sud du Sahara. Par sa silhouette il fait plutôt penser à un Échassier, car il a de très longues pattes et un corps svelte ; toutefois, il présente une grande queue et le bec crochu. Une huppe de vingt plumes lui donne un aspect insolite. Il marche plus qu'il ne vole et c'est en se déplaçant à pied qu'il capture les Insectes, les Arachnides, les petits Rongeurs, les Amphibiens et les serpents dont il se nourrit. Il est probablement beaucoup moins spécialisé dans la capture des Reptiles que les circaètes.

La famille des **Accipitridés** est la plus importante avec deux cent huit espèces (longueur, 19 cm à 1,50 m), dont la morphologie et les mœurs sont extrêmement variables. Cependant, plusieurs caractères anatomiques les séparent aussi bien des Cathartidés que des Falconidés. Les principaux groupes naturels se distinguent par les dimensions, la coloration, les mœurs et l'habitat.

Les *aigles :* on donne ce nom à une trentaine d'espèces, dont les plus grandes sont remarquables par leur puissance ; ainsi, on trouve en Afrique l'aigle martial et l'aigle de Verreaux, en Amérique tropicale la harpye, aux Philippines l'aigle des singes, dans l'hémisphère Nord l'aigle royal *(Aquila chrysaetos),* espèce magnifique que l'on a appelée le roi des Oiseaux. L'aigle royal est devenu rare en Europe (en France, il n'en reste plus que quarante couples environ). Les femelles, bien plus grandes que les mâles, atteignent le poids de 6 kg, 2,30 m d'envergure et 95 cm de long. Les uns et les autres ont un plumage brun foncé, plus ou moins nuancé de jaunâtre sur la nuque (d'où les autres noms d'aigle doré ou d'aigle fauve). Dans les Alpes, cette espèce se nourrit en grande partie de marmottes, mais aussi de lièvres variables, de Tétraonidés, de cadavres de chamois, de jeunes renards et de proies plus petites. Elle niche dans une falaise et pond un ou deux œufs, qui seront couvés 43 jours par la femelle.

Les *circaètes* (*Circaetus, Spilornis,* etc.) sont des Rapaces mangeurs de Reptiles (le circaète Jean-le-Blanc niche dans les deux tiers du sud de la France). Les aigles pêcheurs *(Haliastur, Haliaeetus, Icthyophaga)* et pygargues, aussi grands que les véritables aigles, en diffèrent par leur régime en partie piscivore.

Les *buses* (genres *Buteo* et voisins), de taille plus réduite, leur ressemblent par leur relative lenteur et leur habitude de chasser beaucoup à l'affût. Ce sont presque toutes des Oiseaux forestiers qui nichent dans les arbres. En France, la buse variable est un des Rapaces les plus communs. La buse pattue *(Buteo lagopus)* vient, en hiver, en très petit nombre dans les plaines de Lorraine et de Champagne. En Laponie finlandaise, elle chasse quinze à dix-huit heures par jour à la belle saison, et son

E. Hosking

territoire couvre de cinq à dix kilomètres carrés. Son régime se compose pour 80 à 90 % de petits Mammifères, le reste étant formé d'Oiseaux (jeunes grives mauvis, jeunes tétras et lagopèdes, petits Échassiers, tels que chevaliers combattants, bécassines, pluviers dorés, sarcelles, etc.). La buse pattue niche par terre, pond généralement trois ou quatre œufs, et jusqu'à six si les petits rongeurs (lemmings, campagnols) pullulent.

Les *busards (Circus)* ressemblent aux buses par leur silhouette mais en diffèrent par leur sveltesse, leur coloration et leur habitat. Ils fréquentent les paysages dégagés (landes, steppes, prairies, champs), chassent au ras du sol et nichent par terre. Les busards Saint-Martin, cendré (ou Montagu) et harpaye (ou des roseaux) se reproduisent régulièrement en France.

Les *bondrées* (genres *Pernis,* etc.), de même taille que les buses, mangent des Insectes. La bondrée apivore niche en France.

Les *milans (Milvus)* ont souvent la queue fourchue. Ce sont d'excellents planeurs. Ils mangent beaucoup de petits Animaux morts. Les milans noir et royal nichent chez nous.

R. Longo

Enfin, les *vautours* de l'Ancien Monde (quatorze espèces) sont à peu près exclusivement charognards. En France, le vautour fauve, le percnoptère et le gypaète barbu nichent mais sont devenus très rares.

La famille des **Falconidés** réunit cinquante-huit espèces dont trente-neuf faucons du genre *Falco*. Ces derniers ont un bec pourvu d'une échancrure en arrière du crochet terminal, des narines arrondies avec un tubercule au centre, des ailes pointues. Ils ne chassent que des proies vivantes, et c'est parmi eux que l'on trouve les Rapaces les plus rapides. On place également dans cette famille les caracaras (neuf espèces) d'Amérique centrale et du Sud, Rapaces marcheurs, en grande partie charognards, et les faucons des forêts. Les plus petits sont les falconelles d'Asie méridionale (14 cm) et le plus grand est le gerfaut (63 cm). En France, nichent les faucons pèlerin, crécerellette, crécerelle et hobereau. Les deux premiers sont les plus rares. Le faucon pèlerin se nourrit d'Oiseaux pris en vol (mouettes rieuses, corneilles, choucas, pigeons, vanneaux, étourneaux, martinets, etc.). Comme les autres Rapaces il rate souvent sa proie : sur cent quatre-vingt-onze chasses observées en Allemagne, 20 % seulement furent couronnées de succès.

La famille des **Pandionidés** compte une seule espèce, le balbuzard *(Pandion haliaetus)*, Rapace piscivore, presque cosmopolite et migrateur dans l'hémisphère Nord. Il se distingue par les tarses nus, couverts d'écailles, le dessous des doigts garni de pointes acérées, facilitant la prise des Poissons, et le pouce réversible. Il niche peut-être encore en Corse, mais ailleurs en France il est seulement de passage en petit nombre.

Ordre des Galliformes

Cet ordre correspond aux Gallinacés de l'ancienne classification de Cuvier. Les deux cent cinquante et une espèces connues sont réparties en six familles. Leur taille va de 12 cm (caille naine) à 2 m (argus). A l'exception des hoccos (Cracidés), les Galliformes sont des Oiseaux terrestres (bien que la plupart aiment se percher pour dormir) aux pattes robustes munies de griffes peu recourbées, avec lesquelles ils grattent le sol pour découvrir une partie de leurs aliments. Le bec est assez épais; les ailes, courtes et arrondies, sont étroitement appliquées au corps en raison de la forte courbure des rémiges.

Les Galliformes volent mal, mais sont souvent très rapides au départ. Ils se nourrissent surtout de graines et de Végétaux verts. Le dimorphisme sexuel, qui fait parfois défaut, est très marqué chez de nombreuses espèces : il porte sur la coloration du plumage, la taille, la possession d'ergots, de caroncules et autres appendices cutanés. La ponte, très forte chez quelques espèces, est faible (deux ou trois œufs) chez les Cracidés et certains Phasianidés tropicaux. Les Galliformes sont très sédentaires et se livrent tout au plus à des déplacements locaux; cependant, il existe une espèce franchement migratrice, la caille d'Europe *(Coturnix coturnix)*. La famille des Opisthocomidés (hoazin) doit être placée à côté des coucous comme l'a montré Sibley, en 1973.

La famille des **Mégapodiidés** compte les Mégapodes, qui diffèrent de tous les autres Oiseaux par leur habitude de pratiquer l'incubation artificielle de leurs œufs. Les dix espèces connues (50 à 70 cm) vivent uniquement en Australie, Indonésie, Mélanésie et Polynésie. Leur plumage est brun, beige ou noir. Il n'y a pas de dimorphisme sexuel. Ces Oiseaux fréquentent les régions boisées ou couvertes de broussailles. Leurs œufs, volumineux, sont pondus à des intervalles parfois importants et éclosent de façon échelonnée, du moins chez les espèces dont on connaît la reproduction.

Les Mégapodiidés n'utilisent pas tous la même source de chaleur pour faire incuber leurs œufs : les *Megacephalon* et *Eulipoa* comptent sur la chaleur du soleil et pondent dans le sable des plages; chez les talégalles et les genres *Alectura* et *Aepypodius*, l'incubateur est un tas de feuilles et de tiges dont la fermentation dégage la température nécessaire. *Leipoa ocellata*, l'espèce la mieux connue, vit en Australie et creuse un trou dans lequel il entasse des Végétaux qu'il recouvre de sable. Le mâle vérifie quotidiennement la température et aère le tumulus dans la matinée. L'incubation dure 60 jours et les petits sont indépendants dès la sortie; ils ne suivent pas leurs parents et sont déjà capables de voleter et de manger tout seuls.

La famille des **Cracidés** est composée d'étranges Gallinacés (longueur, 50 cm à 1 m; poids, 500 g à 4,5 kg) au plumage noir, gris, blanc ou roux, qui ont un bec court et plus ou moins crochu, la tête et parfois le cou nus avec des caroncules ou un fanon pendant. Ils mènent une existence arboricole mais descendent à terre pour prendre une partie de leur nourriture. Les différentes espèces, hoccos, pénélopes, pauxis, et chachalacas, font un nid de branches et le placent à faible hauteur. Les œufs sont couvés pendant 22 à 34 jours. Les poussins peuvent voleter au bout de quelques jours. Tous les Cracidés (trente-neuf espèces) vivent en Amérique (il existe une seule espèce dans le sud des États-Unis, au Texas).

La famille des **Tétraonidés** est parfois considérée comme une subdivision des Phasianidés. Les dix-sept espèces (30 à 88 cm) sont propres aux parties septentrionales de l'hémisphère Nord, et certaines présentent quelques adaptations à la vie dans les régions enneigées : narines couvertes de plumes, tarses emplumés sur les deux tiers de leur longueur, doigts emplumés ou munis, en hiver, d'excroissances cornées latérales qui jouent le rôle de « raquettes à neige » et facilitent les déplacements. A la différence des Phasianidés, ces Oiseaux n'ont pas d'éperons. La couleur de leur plumage varie du noir au blanc pur en passant par le brun, le beige et le roux.

Les Tétraonidés se nourrissent de matières végétales (feuilles, pousses, tiges, graines et fruits, bourgeons, chatons) mais les jeunes mangent des Insectes. La plupart vivent en forêt, mais les lagopèdes habitent les hautes montagnes, au-dessus de la limite des arbres, ou les toundras. Tous sont sédentaires et ne se déplacent que localement. On distingue trois groupes : les tétras, les gélinottes et les lagopèdes. En France, le lagopède muet *(Lagopus mutus)* vit dans les Alpes et les Pyrénées; on trouve, rarement, la gélinotte dans les Ardennes, le Jura et la Lorraine; le petit tétras habite le nord des Ardennes et les Alpes; le grand tétras subsiste dans les Vosges, le Jura, les Alpes et les Pyrénées.

La famille des **Phasianidés**, dont les cent soixante-quatorze ou cent soixante-dix-sept espèces sont absentes seulement dans les régions polaires et en Nouvelle-Zélande, a des représentants dont le poids varie de 31 g à 10 kg. Elle est composée de quatre groupes : les perdrix (quatre-vingts espèces), les faisans (quarante-neuf espèces), les colins (trente-quatre espèces) et les cailles (onze espèces).

A. Margiocco

▼ ***Couple de lagopèdes muets* (Lagopus mutus) *revêtus de leur plumage hivernal; l'espèce vit dans les Alpes et les Pyrénées.***

E. Hosking

▲ *Le faisan de Colchide* **(Phasianus colchicus),** *Oiseau forestier, est présent dans quelques régions de France.*

S. Prato

▶ **Acryllium vulturinum,** *la pintade vulturine, la plus belle du groupe, vit en Afrique orientale.*

▼ *A gauche, la grue couronnée vit en groupe le long des fleuves bordés de buissons. A droite, la grue antigone est une espèce asiatique.*

Les colins, limités à l'Amérique, sont plus petits que les perdrix de l'Ancien Monde. Le colin de Virginie a été introduit dans le sud-ouest de la France comme Oiseau-gibier.

Les perdrix (26 à 55 cm) sont très prolifiques. Elles habitent les paysages « ouverts » : champs, prairies, steppes, déserts, en plaine et en montagne. Les cinq espèces de tétraogalles ne vivent qu'en montagne. Les francolins sont des Oiseaux africains et asiatiques. En France, la perdrix grise *(Perdix perdix)* est l'Oiseau-gibier de plaine le plus connu. Les dessins des plumes de l'épaule permettent de distinguer les sexes : celles du mâle ont une bande de couleur crème le long du rachis, alors que, chez la femelle, cette bande est coupée par de petites barres transversales de la même teinte, surtout visibles sur le vexille externe. La tache rousse en forme de fer à cheval qui se trouve sur le ventre existe chez les deux sexes mais est plus marquée chez le mâle. La perdrix rouge *(Alectoris rufa)* remplace la grise dans la moitié sud du pays, et la perdrix bartavelle *(Alectoris graeca)* vit dans les Alpes.

Les cailles sont les plus petits des Galliformes et des Phasianidés. Leur plumage est assez terne ou très coloré (cailles peintes du genre *Excalfactoria*). La caille des blés (18 cm), plus ou moins commune en France selon les régions, passe en général l'hiver dans le Maghreb, mais un certain nombre restent dans le Sud-Ouest.

Les faisans et les paons sont les plus grands Phasianidés. Ils vivent en Asie méridionale, à l'exception du paon du Congo, découvert il y a quarante ans. Le faisan de Colchide a été introduit en Europe dans l'Antiquité classique et s'y est acclimaté. Le dimorphisme sexuel est très marqué chez ces Oiseaux, les mâles arborant un plumage somptueux, aux vives couleurs et pourvu d'ornements (une traîne par exemple). Il y a deux espèces de paons asiatiques. Les coqs (quatre espèces), plus petits, vivent en Indochine, en Indonésie et en Chine. Ce sont des Oiseaux forestiers. En France, le faisan de Colchide *(Phasianus colchicus)* est fréquent dans quelques régions (Alsace, Sologne, région parisienne).

La famille des **Numididés** comprend les pintades (43 à 72 cm), qui ne vivent à l'état sauvage qu'en Afrique au sud du Sahara. Les huit espèces ont un plumage où dominent le gris et le noir mais une espèce est en partie blanche et une autre est bleu, noir et roux. Une seule a des éperons aux tarses, toutes ont la tête en grande partie nue et des caroncules. Certaines possèdent

C. Bevilacqua

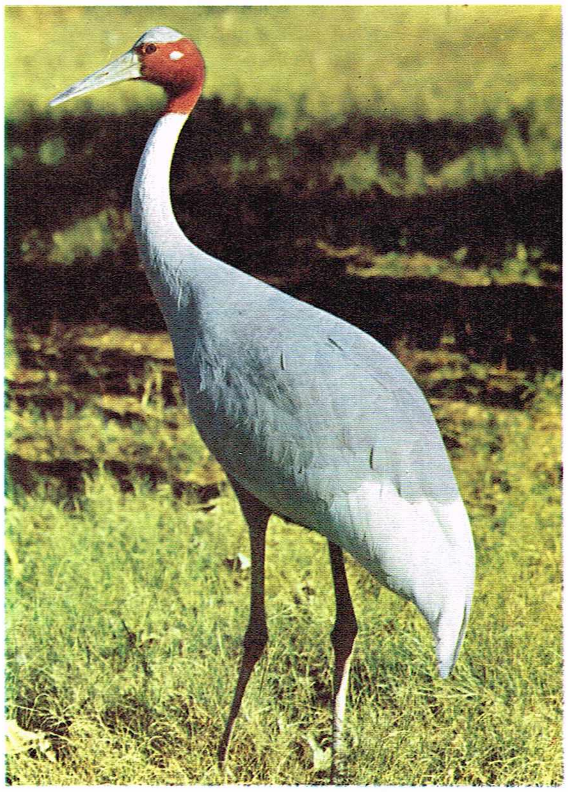

A. Margiocco

un casque osseux au sommet du crâne. Les pintades vivent dans les savanes et les broussailles, et se déplacent en troupes. Elles mangent des graines, des bulbes et des Invertébrés terrestres. Elles volent bien mais préfèrent marcher. La plus belle de toutes, la pintade vulturine *(Acryllium vulturinum)*, vit en Afrique orientale.

La famille des **Méléagrididés** compte deux espèces, le dindon ordinaire *(Meleagris gallopavo)* [1,20 m, 10 kg] et le dindon ocellé *(Agriocharis ocellata)* [90 cm, 5 kg] ; ces Oiseaux sont exclusivement américains, le premier vivant aux États-Unis et au Mexique, le second en Amérique centrale (du Honduras britannique au Guatemala). Très lourdauds, les dindons sont reconnaissables à leur tête nue, couverte de nombreuses caroncules, et à la possession d'un tubercule érectile, la « trompe ». Leur plumage, de couleur noire, est agrémenté de nombreux reflets. La queue peut être étalée quand le mâle fait « la roue ». Les dindons sont des Oiseaux forestiers qui vivent en bandes et se nourrissent de fruits, de graines et d'Insectes. Ils volent mal et sur de courtes distances seulement. La ponte comprend de huit à quinze œufs, couvés pendant 28 jours.

E. Hosking

▲ ***Femelle de râle des genêts* (Crex crex) *dans son nid.***

Ordre des Gruiformes, ou Ralliformes

Cet ordre comprend actuellement onze familles, dont certaines n'ont qu'un seul représentant. Les cent quatre-vingt-douze espèces vivantes sont de taille très variable : les plus grandes (grues) atteignent 1,80 m de long, alors que les plus petites (certains râles) ne dépassent pas 13 cm. Les premières ressemblent superficiellement aux Ciconiiformes par la longueur des pattes, du cou et du bec. Tous les Gruiformes ont des ailes arrondies, parfois si courtes que l'Oiseau en perd la faculté de voler. Ils fréquentent les régions steppiques, marécageuses ou les forêts tropicales. Les Gruiformes existent partout dans le monde sauf dans les régions polaires.

La famille des **Mésitornithidés** ou Mésitidés compte trois espèces de mésites, ou monias (25 cm), endémiques à Madagascar.

La famille des **Turnicidés** regroupe les seize espèces de turnix, ou cailles batailleuses (13 à 18 cm), qui habitent l'Ancien Monde (Espagne, Afrique, Madagascar, sud et est de l'Asie, Indonésie, région australienne, Nouvelle-Calédonie, îles Samoas) ; elles sont remarquables par l'inversion des caractères sexuels secondaires : les femelles sont plus vivement colorées que les mâles, et ce sont elles qui jouent le rôle actif au cours des parades nuptiales. De plus, elles ne couvent pas les œufs et ne s'occupent pas des poussins, ces tâches revenant aux mâles.

La famille des **Gruidés** réunit quatorze espèces (90 cm à 1,80 m de long ; poids variant entre 2 et 14 kg), qui fréquentent les marais, les toundras et les steppes d'Amérique du Nord, d'Europe, d'Afrique, d'Asie et d'Australie. Leur plumage est blanc, gris, noir, les seules taches de couleur vive étant des zones de peau nue, de teinte rouge (toutefois, la grue couronnée fait exception). Monogames, les grues nichent par terre et pondent deux œufs. Leur régime est omnivore, mais les Végétaux y occupent la première place. En dehors de la saison de reproduction, ces Oiseaux sont très sociables.

Les espèces qui vivent dans les régions paléarctique et néarctique sont migratrices. En France, la seule espèce que l'on peut observer au passage (en mars et en octobre-novembre) est la grue cendrée *(Grus grus)*, qui traverse notre pays en diagonale, des Ardennes aux Landes. Elle niche en Scandinavie (Suède et Finlande surtout), dans les pays baltes, en plus petit nombre dans le nord et le centre de l'Allemagne et, de là, jusqu'en Sibérie. Une partie des grues cendrées européennes migre en direction du sud-ouest et passe l'hiver en Espagne et au Maroc ; les autres traversent le Bosphore et poussent jusqu'à la haute vallée du Nil. La migration est précédée par des rassemblements qui commencent à la fin du mois d'août en Suède méridionale et en Allemagne orientale ; on a pu y observer jusqu'à dix mille Oiseaux. La grue cendrée fait un nid assez volumineux avec des tiges et des feuilles de plantes palustres. Les deux conjoints participent à la construction et se partagent la tâche de l'incubation des deux œufs (vert olive ou brunâtres) pendant 30 jours. Les jeunes ne peuvent voler qu'à l'âge de 8 à 10 semaines.

S. Prato

◀ ***La poule sultane* (Porphyrio porphyrio) *possède un plumage vivement coloré.***

La famille des **Aramidés** comprend une seule espèce, le courlan *(Aramus guarauna)*, hôte des marais de la Floride jusqu'à l'Argentine. Cet Oiseau (62 cm) occupe une position intermédiaire entre les grues et les râles. Il n'est pas purement terrestre et se perche volontiers ; il place son nid par terre ou dans un arbre. Il se nourrit principalement de Mollusques, mais aussi d'Insectes, d'Amphibiens, de Crustacés, de Vers et de Reptiles.

La famille des **Psophiidés** compte trois espèces d'agamis, également surnommés Oiseaux-trompettes (genre *Psophia ;* 45 cm de long) à cause de la forte intensité de leurs cris, et qui sont endémiques en Amérique du Sud. Les agamis ont un aspect massif dû à la brièveté de leur queue et de leurs ailes. Essentiellement terrestres, ils ont de robustes pattes. Leur plumage est entièrement noir ou mêlé de blanc. Ils vivent dans les forêts, et leur biologie est encore assez mal connue. On sait seulement qu'ils pondent une dizaine d'œufs blancs par terre. Apprivoisés, ils jouent le rôle de gardiens de basse-cour.

La famille des **Rallidés**, groupe cosmopolite, compte cent trente-deux espèces, longues de 13 à 52 cm. Elles ont des ailes fortement incurvées et une courte queue. Plusieurs ne peuvent pas voler. Le plumage, aux couleurs modestes sauf exceptions (les tons beiges, bruns, gris, noirs et roussâtres dominent), est moins raide que celui des Galliformes. Le corps, comprimé latéralement (sauf chez les espèces vraiment aquatiques, comme les foulques), et la colonne vertébrale très souple facilitent les déplacements à travers les fourrés végétaux qui bordent les rivières et les étangs ou envahissent les marais. Le plus souvent, les Rallidés préfèrent s'y faufiler plutôt que de s'envoler. Sauf exceptions, les poussins ont un duvet noir et des zones de peau nue et vivement colorée (en rouge ou bleu) sur la tête. Ils sont nourris de bec à bec par leurs parents.

J. Markham

▶ *Le râle d'eau* **(Rallus aquaticus)** *est commun en France.*

La tribu des *Rallini,* la plus importante, groupe les espèces les moins aquatiques. Chez nous, le râle d'eau *(Rallus aquaticus)* est commun, alors que le râle de genêts *(Crex crex)* est difficile à voir et beaucoup moins répandu. Les porzanes (poussin, marouette et de Baillon), peu visibles, sont migratrices comme le râle de genêts.

Les *Gallinulini,* beaucoup plus aquatiques, animent les plans d'eau. Ce sont, chez nous, la poule d'eau et la foulque noire (également appelée judelle), toutes deux communes (surtout la première). Les poules sultanes *(Porphyrio)* des pays tropicaux et subtropicaux possèdent un plumage aux tons verts, bleus et violacés ; comme les foulques et les poules d'eau, elles ont une plaque cornée de couleur vive qui prolonge le bec sur le front.

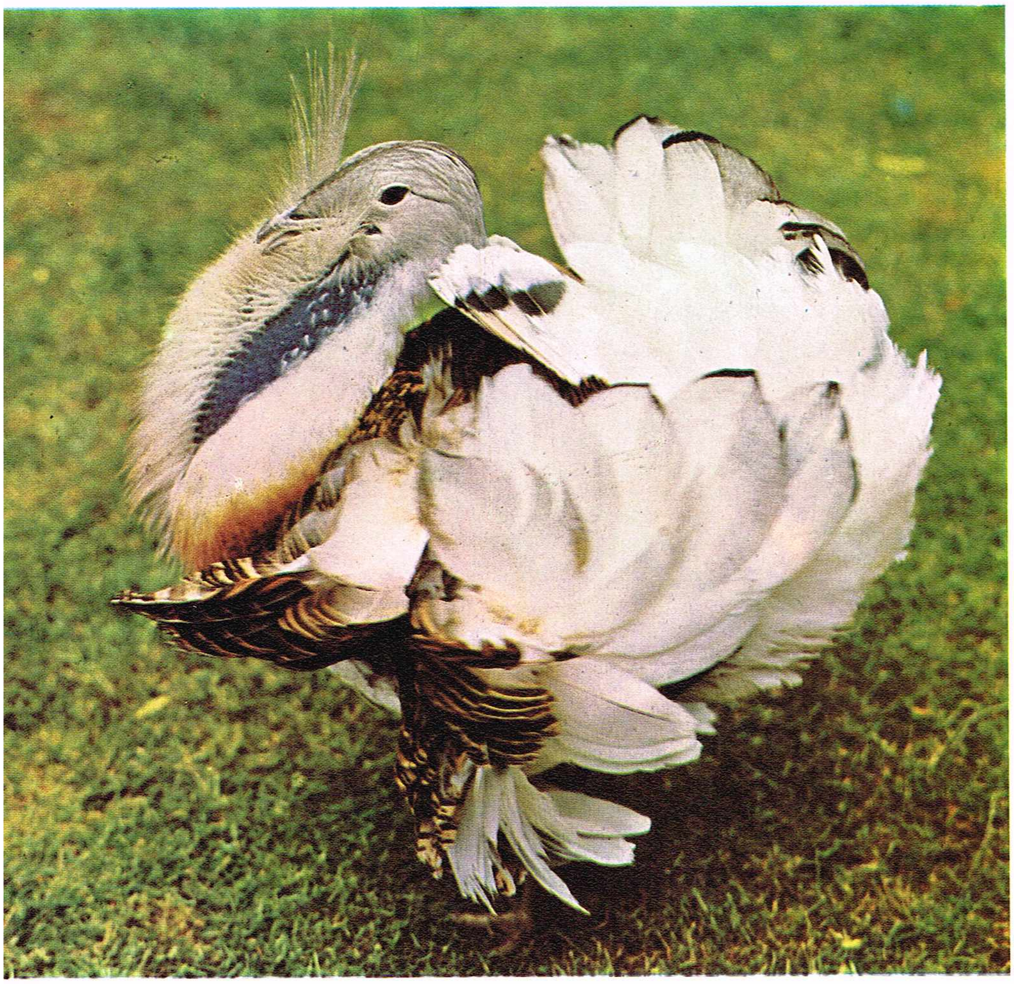

S.E.F.

▼ *L'outarde barbue* **(Otis tarda)** *est l'une des espèces les plus menacées.*

La famille des **Héliornithidés** renferme trois espèces de grébifoulques, ou podicas (30 à 60 cm de long), qui ont un aspect curieux et rappellent quelque peu de petits plongeons par leur silhouette allongée, la brièveté de leurs pattes et leurs mœurs aquatiques. Ces trois espèces habitent chacune les eaux tropicales d'un des continents africain, asiatique et américain.

La famille des **Rhynochétidés** compte une seule espèce, le kagou *(Rhynochetos jubatus),* qui vit dans les forêts de Nouvelle-Calédonie. Cet Oiseau (58 cm de long) a un plumage gris cendré, blanc, noir et roux sur les ailes, un bec assez long et pointu et une huppe occipitale. Incapable de voler vraiment, il préfère courir et effectue, tout au plus, de brefs vols planés après avoir pris de l'élan. Sa nourriture se compose d'Invertébrés terrestres. Il vit par couples. On ignore son mode de reproduction en liberté, les seules observations faites jusqu'à présent concernant uniquement des sujets captifs. Le kagou fait partie des Oiseaux menacés de disparition et ses effectifs sont estimés à quelques dizaines d'individus.

La famille des **Eurypygidés** ne compte, elle aussi, qu'une seule espèce, longue de 45 cm, le caurale soleil *(Eurypyga helias),* qui vit dans les forêts tropicales d'Amérique centrale et d'Amérique du Sud jusqu'au Brésil et en Bolivie. Sa silhouette évoque un peu celle d'un héron ; ses ailes sont assez larges. Il doit son nom à la diversité des teintes du plumage et, notamment, de ses ailes, qu'il déploie au cours des parades nuptiales, montrant leur palette de tons roux, bruns, noirs, jaunes et blancs. Comme les hérons, il possède des plaques de duvet poudreux. Mangeur d'Invertébrés, il fréquente le voisinage des cours d'eau. Le nid, placé dans un arbre, abrite deux œufs.

La famille des **Cariamidés** compte les deux espèces de cariamas, huppé et de Burmeister (90 cm), endémiques dans les pampas d'Amérique du Sud et les lieux légèrement boisés. Ils ressemblent à des Échassiers par leurs longues pattes robustes d'Oiseaux coureurs ; le doigt postérieur, inséré très haut sur le tarse, ne touche pas le sol. Le bec crochu rappelle plutôt celui d'un Rapace. Le plumage beige, gris, brun et blanc se confond assez bien avec le milieu ambiant. Les cariamas se perchent dans les arbres pour dormir et nichent, l'un par terre, l'autre à faible hauteur dans des buissons ; ils pondent deux œufs.

La famille des **Otididés** est riche de vingt et une espèces d'outardes, qui sont les plus terrestres des Gruiformes (dimensions extrêmes : 40 cm à 1,35 m). Les plus grandes espèces sont aussi les plus lourds Oiseaux capables de voler (le poids maximal est de 16 kg pour l'outarde barbue, ou grande outarde ; les poids supérieurs, de 21 kg et même 24 kg, que l'on cite parfois, sont probablement exagérés). Toutes les outardes ont de fortes pattes ; elles se déplacent généralement en marchant, bien qu'elles soient capables de voler très correctement. Elles n'ont que trois doigts (le doigt postérieur fait défaut). Leur silhouette est massive, les ailes sont courtes et arrondies, la queue brève. Dans leur plumage, les tons beiges, roussâtres, blancs et gris dominent mais certaines présentent des taches de couleur vive sur les ailes. Elles passent donc facilement inaperçues quand elles ne bougent pas. Les outardes sont omnivores ; cependant, les Végétaux (graines, pousses, feuilles) constituent la plus grande partie du régime. Elles ne sont pas de grandes migratrices, et les espèces qui nichent le plus au nord (en Europe et en Asie) se déplacent plus ou moins vers le sud selon la rigueur de la saison. A cette époque, elles sont particulièrement sociables et on peut en observer des rassemblements de plusieurs centaines. Le dimorphisme sexuel se manifeste surtout par une grande différence de taille entre le mâle et la femelle, parfois aussi par la coloration (outarde canepetière par exemple). Les œufs, au nombre de un à cinq, sont déposés dans un nid très sommaire. Les poussins éclosent au bout de 20 à 30 jours et suivent leur mère. En France, l'outarde canepetière *(Otis tetrax)* niche encore en Beauce, en Champagne, en Poitou-Charente et elle hiverne par endroits dans le sud-ouest et le sud-est du pays. L'outarde barbue *(Otis tarda)* ne se reproduit plus depuis 128 ans (les dernières nichées furent observées près de Fère-Champenoise, dans la Marne, en 1846). De nos jours, cette espèce se montre seulement, et très rarement, en automne.

E. Hosking

▲ *Les huîtriers, ou pies de mer, vivent sur les côtes des cinq continents. Ici, des représentants de l'espèce* **Haematopus ostralegus**, *qui niche en France.*

Ordre des Charadriiformes

L'ordre des Charadriiformes réunit les Oiseaux couramment appelés petits Échassiers ou Limicoles, qui fréquentent le bord des eaux douces et salées (quoique certains préfèrent les steppes ou même les forêts). Les cent soixante et onze espèces sont réparties en douze familles.

La famille des **Jacanidés**, ou jacanas, comprend sept espèces longues de 25 à 50 cm, vivant en Afrique, à Madagascar, en Asie, en Amérique et en Australie. La longueur extraordinaire de leurs doigts les distingue de tous les autres Charadriiformes; ce détail morphologique s'explique par leur genre de vie : ils passent leur existence au bord des marais et marchent sur les Végétaux flottants. Les doigts (et leurs griffes) très allongés répartissent le poids sur une grande surface, ce qui leur permet de ne pas s'enfoncer. Tous, à l'exception de deux espèces, présentent une plaque cornée sur le front et un éperon de même nature au poignet. Les œufs, au nombre de quatre, sont pondus sur un radeau de Végétaux aquatiques, et le mâle prend une large part à l'incubation et à l'élevage des poussins. Une espèce, au moins, transporte ses petits quand ils sont menacés par un danger : l'adulte écarte les ailes et laisse les poussins se glisser dessous, puis les referme et les presse contre son corps, emportant les petits à distance.

La famille des **Rostratulidés** compte deux espèces de rhynchées, ou bécasses peintes (25 cm), propres aux régions tropicales d'Amérique du Sud, d'Afrique, d'Asie et d'Australie. Ces Oiseaux ressemblent aux bécassines par leur silhouette et leur long bec mince. Toutefois, le trait le plus curieux est l'inversion des caractères sexuels secondaires : les femelles sont plus grandes que leurs compagnons, plus vivement colorées et prennent l'initiative des parades nuptiales, qu'elles exécutent devant les mâles. Ces derniers s'occupent de la préparation du nid, de l'incubation des œufs et de la conduite de la nichée.

La famille des **Hæmatopodidés** renferme quatre espèces, dont une, l'huîtrier-pie (45 cm), niche en France (Bretagne, Normandie, Camargue). Les huîtriers, encore appelés pies de mer (leur plumage est noir et blanc et tout noir chez une espèce), vivent, sauf exceptions, sur les côtes des cinq continents. Leur long bec droit est un instrument efficace avec lequel ils ouvrent les coquilles des Mollusques Bivalves (surtout des moules, les huîtres ne jouant qu'un rôle très secondaire dans leur alimentation) ; ils mangent aussi des Vers marins et des Crustacés. Ils nichent sur le sol et se contentent de pondre leurs trois œufs beiges, marqués de gris et de noir, dans un petit creux.

La famille des **Charadriidés**, avec soixante-trois espèces longues de 12 cm à 40 cm, diffère de celle des Scolopacidés par le bec plus court que la tête, renflé à l'extrémité.

Ostman - P. R. Johanson

◀ *Mâle de pluvier guignard* **(Charadrius morinellus)** *; l'espèce niche en Scandinavie et surtout en Laponie.*

Ces Oiseaux sont répartis en deux sous-familles, les *Charadriinés* (pluviers et gravelots), qui nichent dans l'hémisphère Nord et fréquentent le bord des eaux douces, les lieux herbeux et marécageux ou les côtes marines, et les *Vanellinés*. En France, nichent trois espèces de gravelots au plumage blanc, beige et noir.

La plupart des Vanellinés (vanneaux) vivent à l'intérieur des terres, au voisinage de l'eau. On les trouve en Europe, Afrique, Asie et Australie. Chez nous, le vanneau huppé *(Vanellus vanellus)* niche dans l'Ouest (Normandie, Bretagne, Vendée), mais aussi dans la région parisienne, en Sologne, en Alsace, dans le Jura, etc. En hiver, c'est un hôte très abondant qui vit en troupes dans les champs et les prés. Quelques vanneaux ont une huppe ; d'autres possèdent un éperon sur le poignet (ce sont les vanneaux « armés ») ou des caroncules à la racine du bec.

La famille des **Scolopacidés** comprend soixante-quatre ou soixante-quinze espèces, qui se séparent des Charadriidés par leur bec aussi long ou beaucoup plus long que la tête, droit ou recourbé vers le bas, et par les pattes munies de quatre doigts (sauf une exception), alors que la plupart des Charadriidés en possèdent seulement trois. Mis à part quelques bécassines, tous ces Oiseaux nichent dans l'hémisphère Nord et sont migrateurs. Ils nichent dans les toundras, les prés humides ou les bois.

Les principaux groupes naturels de cette famille sont les chevaliers, les bécassines (au long bec droit), les bécasses, les barges, les courlis (dont les plus grands atteignent 65 cm de long) et les bécasseaux (les plus petits ne mesurent que 15 cm de long). En France, nichent la bécasse des bois, le courlis cendré, la barge à queue noire, la bécassine des marais, les chevaliers guignette et gambette ; dix-neuf espèces sont de passage ou hivernent chez nous.

La famille des **Récurvirostridés** compte sept espèces (30-47 cm), qui diffèrent quelque peu par leur silhouette ou l'habitat. Les avocettes, aux couleurs contrastées (noir et blanc mêlé ou non de roux), ont un long bec fortement retroussé. Le bec des échasses est légèrement cambré vers le haut; cependant, ces deux espèces (genre *Himantopus*) sont surtout remarquables par la longueur extraordinaire de leurs pattes. Le bec-en-cimeterre *(Ibidorhynchus)* se sépare des autres par son habitat : il fréquente uniquement le bord des torrents de la région himalayenne, alors que les échasses et les avocettes vivent sur les côtes sablonneuses et au bord des lagunes. L'échasse blanche et l'avocette nichent en France.

La famille des **Phalaropodidés,** ou phalaropes, est l'une des trois familles d'Oiseaux chez lesquels les caractères sexuels secondaires et le rôle des sexes sont inversés. Les trois espèces nichent dans les toundras d'Eurasie et d'Amérique et hivernent soit en pleine mer, plus au sud, soit dans les pampas sud-américaines (cas de *Steganopus tricolor*).

Ces petits Échassiers (17 à 23,5 cm) ont les doigts munis de palmures indépendantes. Ils nagent très bien et possèdent un plumage très épais sur la face inférieure du corps. En hiver, ils se nourrissent de petits Crustacés et d'autres Animaux planctoniques, en été, d'Insectes, de Mollusques et d'autres Invertébrés d'eau douce. La ponte comprend quatre œufs verdâtres ou fauves, marqués de noir, couvés pendant 19 à 26 jours. Le phalarope à bec large *(Phalaropus fulicarius)* se montre à proximité de nos côtes en hiver.

La famille des **Dromadidés** compte une seule espèce, le drome *(Dromas ardeola),* long de 37 cm, qui possède quelques caractères si étranges qu'il peut paraître surprenant, à première vue, de le ranger dans l'ordre des Charadriiformes : il pond un seul gros œuf et le dépose au fond d'un tunnel creusé dans le sable des côtes ; à l'éclosion, le jeune Oiseau est couvert de duvet mais reste dans son abri, les adultes lui apportant à manger. Le drome, au plumage noir et blanc, vit sur les côtes de l'océan Indien et de la mer Rouge. Son bec est plus mince à la base qu'au milieu. Il se nourrit de Crustacés et de Mollusques.

La famille des **Burhinidés** comprend les œdicnèmes, qui comprennent neuf espèces mesurant de 35 à 50 cm, et vivent à l'intérieur des terres dans les lieux secs (steppes cultivées ou non). Leur plumage tacheté, beige, brun, blanc et noir, les camoufle efficacement. Ils sont actifs surtout le soir et une partie de la nuit. On les rencontre partout sauf en Amérique du Nord, en Nouvelle-Zélande, en Océanie et dans les régions polaires. Peu sociables, ils nichent par couples séparés et pondent deux œufs sans même ébaucher de nid. L'incubation dure 26 ou 27 jours. En France, l'œdicnème criard *(Burhinus oedicnemus)* niche dans les plaines de la région parisienne, de Champagne, Bourgogne, d'Alsace, du Poitou, etc. On l'appelle aussi courlis de terre, en raison de ses cris qui rappellent ceux du courlis cendré. Il mange des Insectes, lézards, Mollusques et même de petits Rongeurs.

La famille des **Glaréolidés** renferme quinze espèces de glaréoles et courvites, mesurant entre 17 et 26 cm. Ils sont, en apparence, bien différents mais possèdent néanmoins quelques caractères qui justifient leur classification dans une même famille.

▼ ***Un courlis cendré* (Numenius arquata), *le plus grand de tous les Limicoles.***

J. Markham

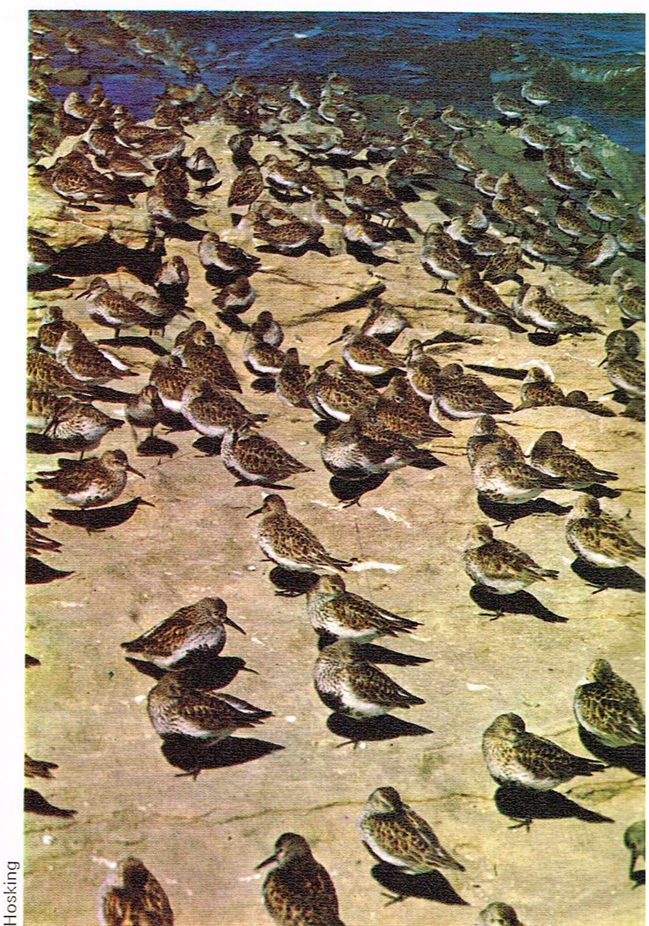

E. Hosking

Les sept espèces de glaréoles (présentes en Europe, Afrique, Australie et Asie) rappellent, quand on les voit en vol, les hirondelles : mêmes ailes pointues et fines, même queue fourchue, même allure légère. Le plumage, brun et crème, est orné de dessins plus foncés et présente, sous les ailes, des zones de couleur vive (roux ou noir). Les glaréoles mangent des Insectes qu'elles capturent dans l'espace. En Camargue, niche la glaréole à collier.

Les huit espèces de courvites sont, au contraire, de petits Échassiers aux pattes allongées et aux ailes courtes et obtuses, qui se déplacent surtout en courant (d'où leur nom vulgaire). Ils fréquentent les régions steppiques et semi-désertiques d'Australie, d'Inde et d'Afrique. Le plus célèbre est le pluvian d'Égypte *(Pluvianus aegyptius)*, l'Oiseau du crocodile, qui se tient au bord des cours d'eau africains et n'hésite pas à pénétrer dans la gueule des grands Reptiles pour y prendre des débris de nourriture. Ce fait n'a été observé que rarement et on ne peut, jusqu'à plus ample information, le considérer comme une habitude régulière et répandue.

La famille des **Thinocoridés** comprend quatre espèces de thinocores (17-20 cm), qui vivent sur les hauts plateaux des Andes, où ils mènent une existence terrestre.

La famille des **Chionididés** renferme deux espèces de chionis ou becs-en-fourreau (40 cm), endémiques sur les îles australes (Crozet, Kerguelen, etc.) et sur la péninsule du continent antarctique. Ce sont des volatiles d'allure lourde, ayant de courtes pattes, un petit bec dont la mandibule supérieure est entourée d'une sorte de cornet qui leur a valu leur nom vulgaire. En outre, de petites caroncules jaunes ou bleues entourent cet appendice. Leur poignet porte une protubérance assimilable à un éperon. Les chionis se nourrissent de cadavres d'Animaux (Pinnipèdes en particulier) et vivent aussi aux dépens des colonies d'Oiseaux de mer (manchots), dont ils mangent les œufs et les poussins. La ponte comprend deux ou trois œufs de couleur crème avec des taches foncées; ils sont couvés pendant 29 jours. Les poussins restent au nid tant qu'ils n'ont pas acquis leur plumage juvénile.

Ordre des Lariformes

Malgré les différences d'aspect extérieur et d'habitudes, les Charadriiformes et les Lariformes sont souvent réunis dans un même ordre, celui des Laro-limicoles, chaque groupe ayant alors valeur de sous-ordre. Les analogies concernent l'anatomie et le comportement. Les cinq familles de Lariformes (Stercorariidés, Laridés, Sternidés, Alcidés et Rhynchopidés) réunissent, au total, cent douze espèces.

La famille des **Stercorariidés** renferme les quatre espèces de stercoraires (45 à 58 cm), encore appelés skuas ou labbes, qui diffèrent des Laridés par l'existence d'une zone de peau nue (cire) à la base du bec, par leur plumage brun foncé, leurs mœurs prédatrices et leur parasitisme alimentaire. En outre, leur répartition est relativement limitée, puisque trois d'entre elles nichent seulement dans les régions subarctiques, la quatrième, qui est aussi la plus grande, vivant aussi dans la zone antarctique. Les labbes sont migrateurs; en hiver, ils se rapprochent de l'équateur et mènent une existence pélagique.

A la saison de reproduction, ils se nourrissent des œufs et des jeunes d'autres Oiseaux de mer et aussi des proies que ceux-ci ont capturées. Ils nichent par terre et pondent deux œufs bruns, fortement tachetés. En France, les quatre espèces se montrent au voisinage des côtes en hiver, mais le grand labbe est rare.

La famille des **Laridés** est parfois réunie à celle des Sternidés. Bien connus de ceux qui vivent au bord de la mer, mouettes et goélands ne sont pas, sauf exceptions, des Oiseaux pélagiques, c'est-à-dire passant la plus grande partie de leur vie au-dessus des océans. La plupart font plutôt partie de la faune côtière, et quelques espèces nichent indifféremment à proximité de la mer ou à l'intérieur des terres, au voisinage des eaux douces.

Les quarante-trois espèces (longues de 20 à 75 cm) ont un plumage où dominent le blanc et le gris plus ou moins foncé. A la saison de nidification quelques-unes ont un capuchon brun, gris ou noir, qui disparaît pendant

▼ *Femelle d'œdicnème criard* (**Burhinus oedicnemus**) *près de ses œufs; l'espèce niche en France dans de nombreuses plaines.*

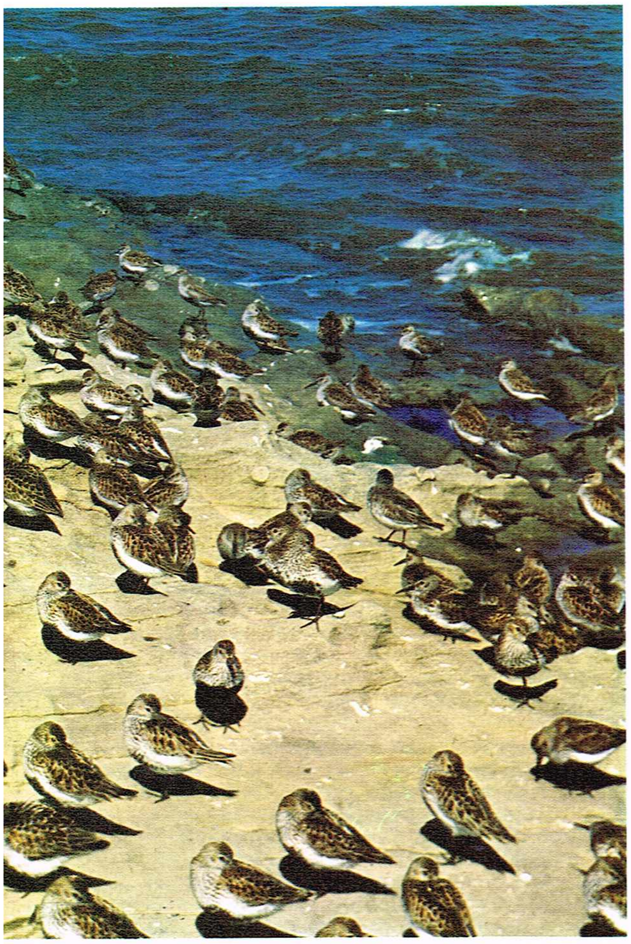

E. Hosking

J. Markham

◀ *Au centre, groupe de bécasseaux variables* (**Calidris alpina**).

◀ *A droite, très sociables, les mouettes (ici* **Rissa tridactyla**) *nichent en colonies sur les dunes, les rochers ou dans les marais.*

la période de repos sexuel. Les deux sexes sont semblables extérieurement. Très sociables, les mouettes et goélands nichent généralement en colonies installées dans les dunes, sur les rochers, les falaises où dans les marais. Le nid, plus ou moins élaboré, contient deux ou trois œufs fauves tachetés de brun ou de noir; ils sont couvés pendant 20 à 30 jours par les deux parents. Les Laridés sont omnivores et mangent aussi bien des cadavres d'Animaux (Mollusques, Crustacés, Poissons, Mammifères) que des Insectes, des fruits et des graines. Ils profitent des tas d'ordures et des égoûts qui se déversent dans la mer. Si quelques-uns méritent le nom de grands migrateurs (par exemple, la mouette de Sabine, qui niche dans le Grand Nord et passe l'hiver au large des côtes d'Afrique du Sud), la plupart ont surtout tendance à se déplacer localement. En France, nichent les goélands argenté, brun, marin, d'Audouin, cendré (les deux derniers étant très rares), la mouette rieuse et la mouette tridactyle. D'autres mouettes hivernent sur nos côtes (mouette mélanocéphale) ou sont de passage.

La famille des **Sternidés** comprend les sternes et guifettes. Beaucoup plus fines et gracieuses que les Laridés, elles ont une tête assez aplatie, des ailes très longues et pointues, la queue fourchue, de petites pattes et le bec plus droit, dépourvu de crochet. Si les Laridés nagent, marchent et volent avec une égale aisance, les Sternidés, en revanche, sont beaucoup plus spécialisés et sont surtout de grands voiliers malgré leur taille réduite (21 à 55 cm) et leur légèreté. Les trente-neuf espèces sont répandues dans le monde entier, sur les côtes marines et, pour certaines, au bord des eaux douces. La plupart présentent un plumage gris et blanc, une calotte noire, les seules exceptions étant les noddis (de couleur brune) et la sterne inca, gris foncé. Extrêmement sociables, ces Oiseaux nichent aussi en colonies. Ils se nourrissent de petits Poissons et Crustacés qu'ils capturent en plongeant. Les espèces des régions septentrionales sont toutes migratrices. Les guifettes ne vivent qu'à proximité des eaux douces. En France, deux espèces de guifettes et six espèces de sternes nichent régulièrement, en nombre plus ou moins élevé.

*▼ En haut, à gauche, le goéland brun (**Larus fuscus**) niche en France; à droite, une mouette rieuse (**Larus rudibundus**) sur son nid. En bas, quelques pingouins torda (**Alca torda**) nichent en divers points des côtes bretonnes.*

J. Markham

J. Markham

E. Hosking

La famille des **Alcidés** comprend vingt-trois espèces, longues de 20 à 40 cm. Ce sont le pingouin torda, les guillemots, les macareux, les mergules et les alques. N'ayant que de petites ailes, ils sont plutôt malhabiles en vol; en revanche, ils nagent et plongent à la perfection. Sur la face supérieure, leur plumage est noir et, dessous, blanc ou entièrement noir. Tous nichent sur les côtes de l'hémisphère Nord, et leurs colonies les plus méridionales se trouvent au Portugal et en Californie.

Les macareux nichent dans un terrier qu'ils creusent ou empruntent à des lapins.

Les guillemots pondent sur une corniche de rocher, parfois large de 10 cm seulement; ils ne font pas de nid. Leur unique petit quitte la falaise en sautant dans le vide et rejoint ses parents, qui l'attendent dans l'eau. Les Alcidés se nourrissent de Poissons marins, et leurs colonies se trouvent au voisinage des mers très poissonneuses. En Nouvelle-Zemble, les deux millions de guillemots de Brünnich consomment (de mai à août, c'est-à-dire pendant leur séjour à terre) environ 24 000 tonnes de Poissons, mesurant de 5 à 15 cm de long et pesant de 5 à 30 g (Ouspenski, 1956). Après la nidification, les Alcidés mènent une existence vagabonde en mer. Les baguages ont permis de montrer qu'ils sont fidèles à l'emplacement de leurs colonies.

Le grand pingouin, qui mesurait environ 75 cm de long et ne pouvait voler en raison de l'atrophie de ses ailes, a été exterminé en 1844; il nichait sur les îlots proches de Terre-Neuve, du Groenland, en Islande et en Scandinavie.

En France, le macareux moine, le guillemot de Troïl et le pingouin torda nichent en quelques points des côtes bretonnes. Tous sont menacés par la pollution marine, car ils passent beaucoup de temps dans l'eau.

La famille des **Rhynchopidés**. Les rhynchops ou becs-en-ciseaux présentent un détail qui permet de les reconnaître au premier coup d'œil : la mandibule inférieure est plus longue que la mandibule supérieure. Cette dissymétrie s'explique par la façon dont ces Oiseaux prennent leur nourriture : ils volent au ras de l'eau, la mandibule inférieure effleurant la surface. Dès qu'un Poisson est rencontré, le bec se referme sur lui.

Extérieurement, les trois espèces (42 à 50 cm) ressemblent aux sternes. On les trouve en Amérique du Nord et du Sud, en Afrique et en Asie, aussi bien le long des côtes plates qu'au bord des lagunes et des cours d'eau. Leur plumage est brun ou noir sur la face supérieure et blanc au-dessous. Les rhynchops nichent en colonies et pondent, sur le sable, deux à quatre œufs. Les poussins nagent peu après leur éclosion.

Ordre des Columbiformes

La famille des **Raphidés** n'a plus de représentants vivants, mais jusqu'aux XVII[e] et XVIII[e] siècles, elle comprenait trois espèces : le dronte, ou dodo de l'île Maurice, le solitaire de la Réunion et le solitaire de l'île Rodriguez, Oiseaux lourds et incapables de voler.

La famille des **Ptéroclididés** compte treize espèces, qui vivent dans l'Ancien Monde (Europe, Asie et surtout Afrique); ce sont les gangas et les syrrhaptes (25 à 45 cm, 300 à 500 g), habitants des régions désertiques (Sahara, Kalahari, Namib, Crau, Mongolie, Kazakhstan, etc.); ne pouvant, cependant, vivre sans eau, ils nichent à proximité des mares (au maximum, à 25 km de distance) et vont s'y abreuver matin et soir. Quand les petits (au nombre de trois le plus souvent) sont éclos, leurs parents leur apportent à manger. C'est le mâle qui se charge de les abreuver; pour cela, il trempe ses plumes abdominales dans l'eau. Ces plumes ont une structure spéciale qui facilite la rétention du liquide, dont une provision de 10 à 18 g peut être transportée. A l'arrivée de l'adulte, les petits pressent ces plumes entre leurs mandibules.

Les Ptéroclididés se distinguent des Columbidés par plusieurs caractères : leurs petits sont nidifuges et

E. Hosking

couverts de duvet ; leur queue est très longue, les ailes sont aiguës, les pattes très courtes et les tarses emplumés sur leur face antérieure. Ils ne boivent pas par succion et redressent la tête après chaque gorgée ; les pigeons, au contraire, gardent leur bec enfoncé dans l'eau qu'ils aspirent à longs traits. Le plumage, de tonalité générale fauve, est bariolé de dessins très fins dont les couleurs varient du jaune au noir en passant par le blanc, le brun et le roux. La nourriture se compose de graines et d'Insectes. Le ganga cata *(Pterocles alchata)* niche en Crau, et le syrrhapte paradoxal, qui envahit parfois l'Europe à intervalles irréguliers (il niche en Asie occidentale), a été signalé dans notre pays.

La famille des **Columbidés.** L'aspect des pigeons et des tourterelles ne trompe pas, et il est difficile de les confondre avec d'autres Oiseaux (excepté quelques espèces exotiques). Les deux cent quatre-vingt-cinq espèces connues (longues de 15 à 82 cm) ont un bec renflé à la racine, qui est recouverte d'une peau nue (cire). Les ailes sont arrondies, la queue est de longueur variable.

Les Columbidés volent et marchent bien. Leur régime alimentaire est en grande partie granivore. Ainsi, en hiver, le pigeon ramier mange des grains de blé, d'avoine, de seigle, des glands et des faines ainsi que des morceaux de feuilles de chou et de trèfle. La tourterelle turque absorbe des graines (tournesol, colza, maïs, orge, graminées sauvages) et des déchets de cuisine (car elle vit près de l'homme). Certains Columbidés mangent également des Insectes. Leur plumage, modeste chez les espèces européennes, est très coloré chez certains Oiseaux des régions tropicales (pigeons frugivores notamment). Le dimorphisme sexuel est plus ou moins marqué. La nidification a lieu dans les arbres ou sur des rochers, sauf chez quelques espèces d'Australie, qui nichent par terre. Le nid de brindilles abrite un ou deux œufs blancs (ou beiges) qui sont couvés pendant 14 à 30 jours. Les pigeonneaux ne réclament pas leur nourriture, comme les oisillons des Passereaux, mais attendent que leurs parents la dégorgent.

Les Columbidés sont représentés dans le monde entier, sauf dans les régions polaires, les îles australes, le nord de l'hémisphère septentrional, et la plupart vivent dans des lieux boisés. Les principaux groupes naturels sont les suivants :

Les *tourterelles* (parmi lesquelles se trouvent les plus petites espèces), ou colombes ; en France, nichent la tourterelle des bois (migratrice) et *Streptopelia decaocto,* la tourterelle turque (sédentaire).

E. Hosking

▲ *Vol de sternes caugek* (Sterna sandvicensis).

◀ *Une tourterelle* (Streptopelia chinensis) *de la famille des Columbidés.*

▼ *Vol de rhynchops, ou becs-en-ciseaux* (Rhynchops flavirostris) ; *ces Oiseaux nichent en colonies et pondent sur le sable.*

N. Myers

▶ *A gauche, un Psittaciforme australien* (Aprosmictus erythropterus) ; *à droite, une espèce amazonienne* (Amazona sp.) ; *la plupart des Psittacidés sont arboricoles.*

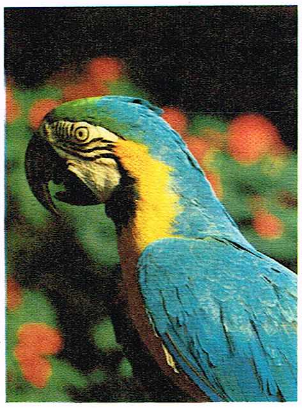

S. Prato

S. Prato

A. Margiocco

▲ *L'ararauna,* Ara ararauna, *est une espèce de perroquet bleu qui vit du Panama à l'Argentine.*

Les *pigeons* comptent les pigeons ramier, colombin et biset (à moitié domestique) qui sont largement répandus chez nous ; les pigeons couronnés ou gouras vivant seulement en Nouvelle-Guinée ; les pigeons frugivores (ptilinopes) et les pigeons impériaux *(Ducula),* de Mélanésie, d'Indonésie, d'Inde, d'Australie et d'Afrique au sud du Sahara. On trouve aussi dans ce groupe les pigeons verts (genre *Treron*).

Ordre des Psittaciformes

L'unique famille, celle des **Psittacidés**, est l'une des plus homogènes et l'une des mieux définies de la classe des Oiseaux. En effet, perroquets et perruches se reconnaissent à leur grosse tête et à leur bec très fortement recourbé et crochu. La base de la mandibule supérieure est revêtue d'une peau nue. Les doigts sont disposés deux par deux comme chez les pics, le premier et le quatrième étant tournés en arrière ; les Psittacidés s'en servent pour se percher, mais aussi pour porter leur nourriture au bec. Les ailes sont bien développées et, sauf exceptions, les Psittacidés volent avec aisance, les espèces les plus rapides étant celles qui ont une longue queue et qui vivent dans les milieux ouverts. Le plumage est remarquable par la vivacité et la variété des coloris.

Les trois cent dix-sept (ou trois cent vingt-trois) espèces de Psittacidés dont la longueur varie de 8 à 98 cm et le poids de 20 à 850 g, n'existent que dans les régions tropicales des cinq continents. La plupart sont arboricoles et fréquentent les lieux boisés, mais quelques-uns habitent les steppes désertiques, par exemple, les perruches australiennes du genre *Platycercus*. Certaines espèces vivent en montagne et effectuent l'hiver une migration locale vers les basses altitudes ; d'autres se déplacent selon les époques de fructification ou de floraison des plantes dont elles mangent les fruits ou le nectar. Le régime alimentaire comprend surtout des graines et des fruits (les petits loris des genres *Trichoglossus* et voisins mangent du nectar et du pollen), des bourgeons et des pousses. Les *Nestor* et quelques cacatoès consomment des tubercules, des racines et des larves d'Insectes. Très sociables, les Psittacidés pratiquent la monogamie et pondent des œufs blancs (deux chez les grandes espèces, six à huit chez les plus petites), qu'ils déposent dans un trou d'arbre, sur le bois nu ou sur un matelas de fibres, d'herbes et de morceaux d'écorce. L'incubation dure de 16 à 28 jours. Les petites espèces peuvent faire deux pontes régulières par an. Sauf exceptions (les perruches australiennes par exemple), les Psittacidés ont une voix rauque et désagréable. La perruche ondulée *(Melopsittacus undulatus),* originaire d'Australie, est devenue l'un des Oiseaux de cage les plus populaires dans le monde. Parmi les différents groupes, signalons les cacatoès (dix-sept espèces), les platycerques (trente et une espèces), les loris et les inséparables (quarante-sept espèces), les perroquets, les amazones et les perruches (soixante-six espèces), les aras (quinze espèces).

Ordre des Musophagiformes

La famille des **Musophagidés** comprend les vingt et une espèces de touracos (34 à 75 cm), endémiques en Afrique au sud du Sahara. Ils diffèrent de tous les autres Oiseaux par la présence dans leur plumage d'un pigment vert, la touracoverdine, et d'un pigment rouge, la touracine, de nature très particulière. La plupart ont des couleurs très vives où le vert, le rouge, le jaune et le violet dominent, mais les quatre espèces du genre *Crinifer* sont brunes ; ces dernières vivent dans les savanes, alors que les autres sont franchement forestières. Le régime alimentaire est à base de fruits et de graines. Le nid, construit en branches sèches, est placé dans un arbre et contient deux ou trois œufs blancs ou bleutés qui sont couvés pendant trois semaines environ. Les oisillons sont revêtus d'un duvet gris, brun ou noir.

Ordre des Cuculiformes

La famille des **Cuculidés** compte cent vingt-cinq espèces de l'Ancien et du Nouveau Monde : ce sont les coucous, anis et coucals (17 à 70 cm), qui fréquentent les zones tempérées et tropicales. Ces Oiseaux, arboricoles dans leur grande majorité, ont une silhouette allongée, un bec court, des pattes peu robustes (sauf exceptions, comme le « coureur de routes », *Geococcyx*). Le plumage est modeste (brun, gris et noir) ou très coloré, chez plusieurs espèces tropicales (vert bronzé, jaune). Les Cuculidés sont généralement insectivores, mais quelques espèces ajoutent à ce régime de petits Vertébrés (lézards, Rongeurs).

Les coucous passent pour être des Oiseaux parasites, c'est-à-dire qui ne s'occupent point de leur couvée et de leur nichée ; en fait, ceci n'est vrai que d'une cinquantaine d'espèces, les autres (couas, anis, coucous terrestres, etc.) s'occupant normalement des soins de la nidification.

E. Hosking

A. Margiocco

R. Longo

▲ *En haut, jeunes de* **Clamator glandarius**, *coucous parasites des nids de certains Corvidés. En bas, à gauche, couple de chouettes hulottes* **(Strix aluco)**; *à droite, un hibou grand-duc* **(Bubo bubo)**.

▼ *En haut, la chouette chevêche* **(Athene noctua)**; *en bas, le harfang des neiges* **(Nyctea scandiaca)**.

A. Margiocco

J. Markham

Les quatre espèces d'anis (genre *Crotophaga*), qui vivent en Amérique, ont un genre de vie communautaire : à l'époque de la reproduction, plusieurs femelles pondent dans le même nid. Les œufs, au nombre de dix à vingt environ, sont couvés simultanément par deux ou trois Oiseaux.

Les travaux de l'Américain C. G. Sibley (1973) ont confirmé l'opinion d'autres ornithologistes qui estimaient que l'hoazin *(Opisthocomus hoatzin)*, espèce longue de 65 cm, devait être classé avec les coucous (et, plus précisément, les anis) et non pas avec les Galliformes. L'hoazin vit dans les forêts inondées qui bordent les cours d'eau amazoniens. Il se nourrit de feuilles, de fruits et de fleurs de plantes palustres et possède un énorme jabot. Ses muscles pectoraux étant peu développés, il vole mal. En dehors de l'époque de nidification, il vit en groupes réunissant jusqu'à une quarantaine d'individus. Pour la reproduction, ces bandes se divisent en petites communautés de deux à six Oiseaux qui construisent un nid plat en branches sèches, placé dans un arbre au-dessus de l'eau. Il semble que les différents sujets soient polygames; en tout cas, ils participent à l'incubation des œufs. Ceux-ci, au nombre de deux à cinq, sont fauves avec des taches roses, brunes ou bleuâtres. Leur incubation exige environ 28 jours. Les oisillons sont revêtus de deux costumes successifs de duvet. Ils restent longtemps au nid mais excursionnent bientôt dans les branchages. Lorsqu'ils sont effrayés, ils se jettent à l'eau, nagent et se cachent dans la végétation puis remontent au nid en s'aidant des griffes qui sont situées sur leurs ailes (ces griffes, au nombre de deux, sont fixées sur les premier et deuxième doigts) Ces structures disparaissent à l'âge adulte. Les jeunes anis utiliseraient également leurs ailes (dépourvues de griffes), leur bec et leurs pattes pour se déplacer dans les branchages autour de leur nid.

Ordre des Strigiformes

Couramment appelés Rapaces nocturnes à cause de leur bec crochu, de leurs griffes acérées et de leur genre de vie, les chouettes et hiboux n'ont aucune parenté avec les Rapaces diurnes. Les cent trente et une espèces sont réparties entre deux familles : les Strigidés (hiboux et chouettes, cent vingt et une espèces) et les Tytonidés (effrayes, dix espèces).

La famille des **Strigidés** est représentée dans le monde entier, à l'exception des régions antarctiques et des îles australes. La plus petite espèce (la chouette elfe, *Micrathene whitneyi*, d'Amérique du Nord) ne dépasse pas 13,5 cm de long et la plus grande, le hibou grand-duc, atteint 70 cm. On distingue communément les hiboux des chouettes au fait que les premiers ont des « oreilles », ou aigrettes, touffes de plumes situées de chaque côté de la tête (cependant, chez le hibou des marais, ces ornements sont à peine visibles quand ils sont dressés). Les uns et les autres ont un plumage épais, duveteux, dont les couleurs fondamentales sont le brun, le beige, le roussâtre, le gris et le noir. Le harfang des neiges fait exception avec son plumage en grande partie blanc; il est, d'ailleurs, le seul à présenter un dimorphisme sexuel, qui se manifeste par une différence de coloration entre mâle et femelle. Les barbes des rémiges sont couvertes d'éléments duveteux qui contribuent à rendre les battements d'ailes silencieux, sauf chez la chouette épervière (cette espèce possède un plumage assez raide et son vol est bruyant).

Les Strigidés sont presque tous nocturnes, ce qui ne signifie pas qu'ils sont aveuglés par la lumière du soleil au point de ne pouvoir s'enfuir s'ils sont dérangés en plein jour. Plusieurs espèces sont à moitié diurnes, par exemple, la chouette chevêche et le hibou des marais; en outre, certaines n'hésitent pas à chasser en plein jour quand elles nourrissent leurs petits.

La nourriture des Strigidés se compose de proies capturées vivantes (Insectes et autres Invertébrés, Poissons, Mammifères, Reptiles, Amphibiens et Oiseaux). Parmi les espèces dont le régime est assez spécialisé, on peut citer le hibou-pêcheur *(Ketupa)* du Sud-Est asiatique. Ce Strigidé se déplace à pied le long des rivières, pénètre dans l'eau peu profonde (ses tarses sont nus) et capture des Poissons. Les Strigidés pondent par terre (hibou des marais, parfois la chouette hulotte), dans un terrier (chouette des terriers d'Amérique), dans le nid abandonné par un autre Oiseau (hibou moyen-duc, etc.), dans un trou d'arbre, de rocher, de muraille ou dans un bâtiment (chouette chevêche). La ponte comprend un à huit ou neuf œufs blancs, qui sont couvés pendant 25 à 35 jours. L'habitat des Strigidés est très varié : forêts, prairies, toundras, déserts, bord des eaux, agglomérations humaines. Les espèces migratrices sont rares.

En France, nichent quatre espèces de hiboux (grand-duc, moyen-duc, petit-duc et hibou brachyote, ou des marais) et quatre espèces de chouettes (hulotte, chevêche, de Tengmalm et chevêchette), les deux premières étant les plus communes.

La famille des **Tytonidés** réunit les effrayes, ou effraies, que l'on sépare des Strigidés sur la base des caractères suivants : les disques faciaux en forme de cœur et bien marqués, le plumage plus clair (le blanc et le roux doré dominent), la griffe du doigt médian dentelée, etc. Les effrayes (35 à 45 cm de long, poids voisin de 300 g en moyenne) manquent seulement dans les régions subarctiques, dans une grande partie de l'Asie, en Nouvelle-Zélande et à Madagascar. *Tyto alba*, qui vit en France (dans les clochers, les greniers et les ruines), est presque cosmopolite. La légende veut que ce soit un Oiseau de malheur, ce qui est une ineptie.

Ordre des Caprimulgiformes

Tous les Caprimulgiformes sont des Oiseaux nocturnes ou crépusculaires dont le plumage moucheté de divers tons de brun, beige et gris constitue, dans la journée, un excellent camouflage. Leurs yeux sont volumineux. La plupart chassent des Insectes, qu'ils capturent surtout en vol; cependant, quelques espèces de grande taille s'attaquent à des petits Vertébrés et le guacharo est frugivore. Les pattes sont très courtes; le bec tantôt minuscule, tantôt robuste et crochu, s'ouvre très largement. Sauf exceptions, ces Oiseaux ne font pas de nid et pondent de un à quatre œufs. Les petits sont des oisillons nidicoles couverts de duvet. Cet ordre réunit cinq familles et quatre-vingt-seize espèces.

La famille des **Caprimulgidés** renferme les soixante-neuf espèces d'engoulevents (17 à 32 cm), qui se ressemblent beaucoup : tous ont une large tête aplatie et une silhouette allongée. Ils diffèrent des membres des familles voisines par quelques détails de morphologie (l'absence de plaques de duvet poudreux, le nombre

J. Markham

▶ *Un jeune podarge* **(Podargus stricoides)** *; les Podargidés chassent la nuit des Invertébrés et des petits Vertébrés.*

de phalanges du quatrième doigt, la griffe du doigt médian dentelée, etc.). On les trouve dans le monde entier sauf en Amérique du Sud, en Nouvelle-Zélande et sur diverses îles. Le dimorphisme sexuel est très marqué chez quelques espèces, comme l'engoulevent porte-étendard *(Semeiophorus vexillarius)*, d'Afrique tropicale, et l'engoulevent à balancier *(Macrodipteryx longipennis)* : à l'époque de la reproduction, les mâles de ces deux espèces acquièrent des rémiges ornementales démesurées ayant l'aspect de longs rubans chez la première et de petits drapeaux chez la seconde (ces plumes atteignent respectivement 60 et 47 cm de long). Les engoulevents chassent au-dessus des lieux ouverts (prairies, friches, landes, clairières). Dans la journée, ils restent immobiles, couchés par terre ou sur une branche horizontale. Les espèces de l'hémisphère septentrional (Europe, Amérique du Nord, Asie) sont migratrices.

La famille des **Stéatornithidés** n'a qu'un seul représentant, le guacharo *(Steatornis caripensis)*, étrange Oiseau qui habite des grottes obscures dont il ne sort que la nuit pour aller chercher les fruits de palmiers dont il se nourrit. Long de 32 cm, le guacharo possède de gros yeux et des vibrisses très développées autour du bec. C'est l'un des rares Oiseaux qui utilisent l'écholocation pour se diriger dans les ténèbres : il émet des cris aigus dont les échos, réfléchis par les parois de roche, lui permettent d'éviter les obstacles. Son nid, qu'il construit sur une étroite corniche, est formé de débris de fruits et de déjections. Les deux à quatre œufs sont couvés par les deux parents. Les jeunes mettent quatre mois pour achever leur croissance. Ils pèsent environ 14 g à l'éclosion, 650 à l'âge de 70 jours et seulement 320 au moment de l'envol. Le guacharo niche dans le nord de l'Amérique du Sud et à Trinidad.

La famille des **Podargidés** comprend les trois espèces de podarges et les neuf espèces de batrachostomes (23 à 52 cm), habitants des forêts d'Australie et de Mélanésie. Le jour, elles se tiennent immobiles, dressées sur un perchoir, la nuit, elles chassent des Invertébrés et des petits Vertébrés, qu'elles capturent avec leur bec crochu. Avec le guacharo, ce sont les seuls Caprimulgiformes qui construisent un nid ; fait de brindilles, de Lichens et de duvet, il est placé dans un arbre et contient un ou deux œufs.

La famille des **Nyctibiidés** est constituée par les cinq espèces d'ibijaux, qui atteignent, au maximum, 50 cm. Ils vivent en Amérique centrale et dans le nord de l'Amérique du Sud. Ils se tiennent le plus souvent dressés comme des piquets au sommet d'un tronc cassé, où ils pondent leur œuf. A l'éclosion, l'oisillon est couvert d'un duvet blanc et adopte la même position que ses parents. La biologie d'une espèce, *Nyctibius griseus*, a été particulièrement bien étudiée par l'Américain A. F. Skutch. Les ibijaux chassent comme les gobe-mouches : ils s'élancent de leur perchoir pour capturer les proies qui passent à proximité.

La famille des **Ægothélidés.** Plus petites que les autres Caprimulgiformes (30 cm au maximum), les cinq espèces d'ægothèles en diffèrent par l'existence d'une sorte de huppe frontale, constituée par quelques plumes raides et dépourvues de barbes. Très mal connues, elles vivent dans les forêts de Nouvelle-Guinée, de Tasmanie et d'Australie. Elles nichent dans un trou d'arbre et pondent trois ou quatre œufs.

Ordre des Apodiformes

Les membres des trois familles de cet ordre, Apodidés, Hémiprocnidés et Trochilidés, ont en commun leur genre de vie aérien, des ailes pointues et de très courtes pattes. La dernière est souvent considérée comme un ordre particulier.

La famille des **Apodidés** renferme les martinets (soixante-cinq espèces), qui ont une silhouette aérodynamique : tête aplatie et large, corps trapu, ailes longues en forme de faucille, queue plus ou moins fourchue et généralement brève. Très spécialisés, ils passent la plus grande partie de leur vie à voler, et les espèces des régions septentrionales de l'hémisphère Nord migrent à grande distance. On les trouve partout, sauf en Nouvelle-Zélande, dans la plus grande partie de l'Australie et dans les régions subpolaires. Ils nichent dans des trous de murs, de rochers, sous les toits, parfois dans les arbres creux ; certains collent leur nid sur une feuille de palmier. Les martinets ont un plumage terne où les tons bruns, gris, noirs et blancs dominent. Il n'y a pas de dimorphisme sexuel. Les plus grands mesurent 22,5 cm de long et les plus petits 8,5 cm.

En France nichent le martinet noir *(Apus apus)*, commun dans les villes (et souvent appelé à tort « hirondelle »), le martinet alpin (en montagne) et le martinet pâle (en Roussillon et en Corse).

Les trois martinets huppés forment la famille des **Hémiprocnidés.** Ils vivent en Indo-Malaisie. Leur plumage comporte quelques taches de couleur vive sur la tête, qui est ornée d'une petite huppe. Ces Oiseaux nichent sur les arbres et collent leur nid en forme de coupelle sur une branche horizontale. Ils sont capables de se percher. La ponte comprend un seul œuf, de couleur bleuâtre. L'oisillon est couvert de duvet blanc à l'éclosion. Enfin, à la différence des Apodidés qui pratiquent une sorte de « pêche au chalut » du plancton aérien (bien qu'ils ne gardent pas le bec ouvert en permanence), les Hémiprocnidés font plutôt de la « pêche au coup » et prennent des Insectes qu'ils épient du haut d'un perchoir.

La famille des **Trochilidés** comprend les colibris, ou Oiseaux-mouches, qui sont peut-être les plus étonnants des Oiseaux par leur taille réduite : l'un des nains du groupe, *Calypte helenae*, mesure 6 cm de long (bec, 1,5 cm ; corps, 1,5 cm ; queue, 3 cm) et pèse 2 g ; le plus grand atteint 21 cm de long et le poids de 20 g. Ils ne sont pas moins remarquables par leur vélocité, leur faculté de voler en tous sens et la splendeur de leur plumage (qui n'est toutefois évidente que si l'incidence de la lumière est favorable) aux ornements compliqués. Le mâle du loddigésie admirable, espèce très rare des hautes vallées andines (Pérou), possède seulement quatre rectrices, dont les plus externes atteignent 15 cm de long (le corps de l'Oiseau n'en mesure que cinq) et se terminent par des sortes de raquettes que l'Animal élève au-dessus de sa tête comme des sémaphores, l'une après l'autre, quand il parade devant la femelle.

Les colibris ne vivent qu'en Amérique : les trois cent vingt espèces sont inégalement réparties de l'Alaska (trois espèces) à la Patagonie (une espèce) : le Mexique en compte cinquante-cinq, la zone équatoriale cent soixante-trois. Tous ne sont pas aussi brillamment colorés et, par exemple, les ermites (genre *Phaethornis*), des forêts tropicales, ont un plumage aux tons bronzés assez ternes. Les colibris se nourrissent d'Insectes, qui constituent l'essentiel du régime, et de nectar. La construction du nid revient à la femelle, et le mâle ne prend part ni à l'incubation des œufs ni à l'élevage des oisillons. Le nid fait de mousse, d'herbes, de tigelles, de toiles d'Araignées, de duvets végétaux présente la forme d'une coupe minuscule, mais ses parois sont souvent très épaisses et isolent la ponte de l'humidité et du froid (certaines espèces se reproduisent à plus de

D. Delattre - Pitch

4 000 m dans les Andes). Chez l'ermite de Longuemare, le nid est fixé sous une feuille et mesure 2,5 cm de diamètre et 2,8 cm de profondeur. La ponte comprend deux œufs blancs, qui sont couvés 14 à 19 jours. Les petits s'envolent au bout de 20 à 24 jours.

Ordre des Coliiformes

L'ordre ne comprend qu'une seule famille, celle des **Coliidés** (25 à 35 cm), dont les six membres vivent en Afrique, au sud du Sahara. Ils paraissent plus grands qu'ils ne sont en réalité parce que leurs rectrices sont très longues. Le plumage gris et brun est rehaussé de quelques taches bleues ou blanches sur la tête (sauf exceptions). Les colious possèdent une huppe et de courtes pattes rouges. Leur habileté à courir sur les branches d'arbre leur a valu le nom vulgaire d'Oiseaux-souris. Ils rappellent un peu les mésanges par leur façon de s'accrocher en position renversée. En petites troupes de six à huit individus, ils parcourent les savanes boisées et, le soir venu, s'agrippent les uns aux autres, formant une boule compacte. Un tel comportement de groupement pour la nuit, très rare chez les Oiseaux, se retrouve chez des Passereaux australiens, les Artamidés, chez lesquels on observe aussi des boules formées de plusieurs individus étroitement serrés. Le régime alimentaire comprend des fruits, des pousses et des Insectes. Le nid présente l'aspect d'une plate-forme ou bien d'une coupe. La femelle y pond deux à quatre œufs.

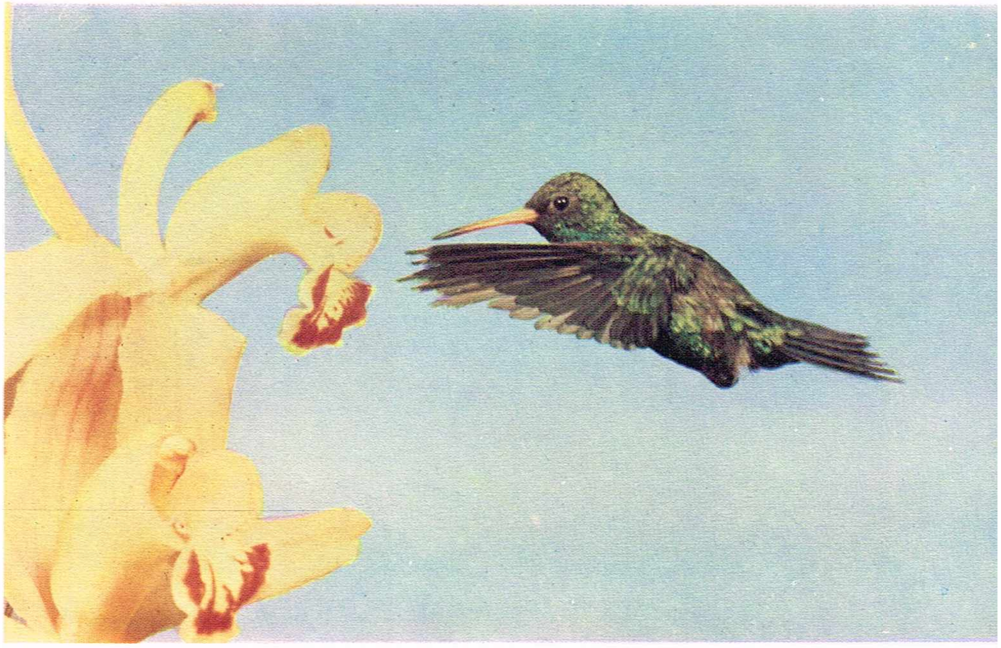

J. Markham

Ormond - Pitch

▲ *En haut, le martinet noir* (Apus apus) *passe la plus grande partie de son temps à voler ; il est commun en France dans les villes. En bas, un colibri* (Chlorostilbon aureoventris) *appartenant aux Trochilidés, famille exclusivement répartie en Amérique.*

◀ *La petite famille des Coliidés vit en Afrique au sud du Sahara ; ses représentants, ici le coliou tacheté* (Colius striatus), *possèdent une huppe et de courtes pattes rouges.*

Ordre des Trogoniformes

Par leur plumage somptueux aux couleurs vives (rouge, vert, jaune, violet, mêlés de noir et de blanc), les trogons (trente-cinq espèces mesurant de 25 cm à 1,30 m) se distinguent aisément des autres groupes d'Oiseaux exotiques. Ils habitent les forêts tropicales d'Amérique, d'Afrique (trois espèces) et d'Asie (onze espèces). Ils nichent dans un trou qu'ils creusent eux-mêmes dans le bois pourri d'un gros arbre ou dans une termitière. Les deux à quatre œufs sont couvés pendant 18 jours environ. Ce sont des volatiles arboricoles qui se nourrissent d'Insectes, de fruits et de petits Vertébrés (lézards). Parmi les caractères qui justifient leur séparation dans un ordre particulier, le plus évident est la disposition des doigts, que l'on ne retrouve chez aucun autre groupe : les premier et deuxième sont tournés en arrière, tandis que les troisième et quatrième le sont vers l'avant (chez les Piciformes et Psittaciformes, ce sont les premier et quatrième qui se trouvent en arrière).

Le plus célèbre des trogons est le quetzal, ou couroucou royal (ou magnifique), chez lequel le mâle diffère de la femelle par les plumes ornementales de la tête et surtout par celles du croupion (sus-caudales), qui forment une traîne de 1 m de long. Cette espèce était l'Oiseau-soleil des Aztèques. Elle se raréfie de plus en plus au Costa Rica.

Ordre des Coraciiformes, ou Coraciadiformes

Les membres de cet ordre ont peu de caractères anatomiques en commun; l'un des plus saillants est la soudure plus ou moins complète de deux doigts antérieurs des pattes. Du point de vue biologique, ils nichent dans des cavités (naturelles ou forées par eux). On comprend donc pourquoi certains systématiciens, comme l'éminent ornithologiste allemand E. Stresemann, ont démantelé ce groupe assez artificiel et ont distingué six ordres (au lieu d'un seul) : les *Coraciae* (Coraciidés, Leptosomatidés, Brachyptéraciidés), les *Halcyones* (Alcédinidés), les *Meropes* (Méropidés), les *Momoti* (Momotidés), les *Todi* (Todidés) et les *Upupae* (Upupidés, Phœniculidés et Bucérotidés).

La famille des **Alcédinidés** renferme les quatre-vingt-six espèces de martins-pêcheurs et de martins-chasseurs (10 à 46 cm), dont la silhouette est caractéristique : tête énorme, ailes brèves, corps ramassé, queue souvent très courte, pattes servant uniquement à se poser ou se percher, bec toujours puissant, tantôt allongé, tantôt plus court. Le plumage est, le plus souvent, brillant; il n'y a pas de dimorphisme sexuel.

***▼ Le plumage des Alcédinidés est le plus souvent brillant comme on le voit sur ce spécimen de martin-pêcheur* (Alcedo atthis).**

E. Hosking

Les martins-chasseurs, qui comprennent la plus grande espèce, le kookabura d'Australie *(Dacelo gigas)*, vivent en forêt ou dans les lieux secs et capturent des Insectes, de petits Vertébrés (Rongeurs, lézards, Amphibiens, oisillons), tandis que les martins-pêcheurs se tiennent au bord de l'eau et capturent des Poissons et des Insectes aquatiques. Ainsi (selon une étude faite en Belgique par J. Doucet), le martin-pêcheur d'Europe *(Alcedo atthis)*, qui niche en France, mange surtout des épinoches, des chabots, des vairons et, très secondairement, des truites et des Insectes.

La famille des **Todidés**. Les cinq espèces de todiers (11 à 12 cm) se ressemblent beaucoup : toutes présentent une silhouette lourde, due à la brièveté du cou, de la queue, des pattes et à l'épaisseur du corps. Le plumage est bariolé de rouge, de vert, de blanc et de jaune. Ces Oiseaux ne vivent que dans les Antilles.

La famille des **Momotidés**. Chez la plupart des momots (17 à 47 cm), les rectrices centrales, très longues, dépassent largement les autres et sont dépourvues de barbes sur leur portion médiane. A l'extrémité, se trouve une « palette », là où les barbes sont de nouveau présentes sur le rachis. Cette perte d'une partie des vexilles est due à l'usure ainsi qu'à l'activité de l'Oiseau quand il lisse son plumage. Les momots ne vivent que dans les forêts tropicales d'Amérique centrale et d'Amérique du Sud. Extérieurement, ils ressemblent quelque peu aux Méropidés par leur silhouette fuselée et leur bec assez fin. Les huit espèces se nourrissent d'Invertébrés et de petits Vertébrés. Le nid, creusé dans un talus, sert aussi de dortoir chez les espèces des régions montagneuses (en dehors de la période de reproduction).

La famille des **Méropidés**. Appelé « chasseur d'Afrique », le guêpier d'Europe *(Merops apiaster)*, qui niche en Camargue et dans quelques régions voisines, est un joyau de notre faune ailée. On dirait un Oiseau exotique égaré dans les régions tempérées, impression renforcée par le fait que tous les autres guêpiers (vingt-quatre espèces) vivent dans les régions tropicales de l'Ancien Monde : Afrique, Asie méridionale, Indonésie, Mélanésie et Australie. Les plus petits (15 cm) comme les plus grands (35 cm) ont belle allure avec leurs ailes pointues, leur queue effilée et leur silhouette élégante. Les pattes, courtes, ne sont utilisées que pour se percher ou s'accrocher devant l'entrée du nid. Dans le plumage se mêlent de vives couleurs : rouge, vert, bleu, jaune, noir, roux. Comme leur nom l'indique, les guêpiers se nourrissent d'Insectes ailés qu'ils capturent en vol; chez le guêpier d'Europe on a relevé, en Ukraine, la présence des représentants de huit ordres appartenant à plus de trente familles. Il s'agissait plus particulièrement de libellules, de punaises, de Coléoptères, d'Hyménoptères (guêpes, abeilles), de mouches et de taons (Yatsenia, 1966).

Les Méropidés habitent les savanes boisées, les steppes arides, les lisières des bois ou même les forêts. Ils nichent en colonies groupant parfois plusieurs milliers de couples.

La famille des **Coraciidés**, ou Coraciadidés. Ce sont les rolliers et les eurystomes, répandus en Europe, Asie, Afrique, en Australie et à Madagascar. En Europe, une seule espèce, le rollier *(Coracias garrulus)*, niche par endroits en France, dans le Midi méditerranéen. Les onze espèces (25 à 50 cm) sont de robustes Oiseaux au bec légèrement crochu, dont le plumage est remarquable par la vivacité de ses couleurs : les tons bleus, turquoise, violets, roux sont les plus fréquents. La queue peut être fourchue et, chez quelques espèces, les rectrices centrales dépassent largement les autres. Les rolliers capturent des Insectes, des petits Vertébrés (Rongeurs, lézards, petits Oiseaux), qu'ils chassent surtout à l'affût.

La famille des **Brachyptéraciidés**. Ce sont les rolliers terrestres (cinq espèces propres à Madagascar), dont la biologie est mal connue. Chez *Uratelornis chimaera*, le nid est une galerie creusée en pente douce dans la terre.

La famille des **Leptosomatidés** n'a qu'un seul représentant, le courol *(Leptosomus discolor)*, long de 50 cm, qui diffère des familles voisines par des particularités morphologiques et anatomiques. Le courol vit à Madagascar et sur les îles Comores.

La famille des **Upupidés**. La huppe fasciée *(Upupa epops)* en est l'unique espèce. La répartition de cet élégant Oiseau (25 cm) comprend l'Europe, l'Afrique,

Madagascar, l'Asie et Sumatra. Son plumage beige-orangé, blanc et noir, sa huppe érectile, roux et noir, enfin, son bec long, mince et nettement recourbé constituent autant de caractères qui empêchent de la confondre avec un autre Oiseau. A terre, elle se déplace en marchant sur ses courtes pattes ; en vol, elle n'est pas très rapide, car ses ailes sont arrondies, mais son allure est pleine de souplesse. Chez nous, la huppe fréquente les prairies au voisinage des bois et les friches. C'est par terre qu'elle trouve sa nourriture, composée d'Insectes, de petits Vers et de Mollusques. Elle niche dans un trou d'arbre ou de mur et pond quatre ou cinq œufs. Elle migre en automne.

La famille des **Phœniculidés.** Ces curieux Oiseaux des savanes africaines (20 à 38 cm) sont appelés moqueurs. Les six espèces présentent une grande queue et un plumage où le bleu et le vert foncé sont les teintes dominantes. Vivant en groupe, ils se déplacent d'arbre en arbre et grimpent le long des troncs et des branches, à la manière des pics. Incapables de creuser le bois, ils nichent dans un trou naturel ou préparé par un pic et y pondent trois à cinq œufs. Ils se nourrissent d'Insectes vivant à la surface de l'écorce. On peut dire qu'ils tiennent un peu sur le continent noir, au sud du Sahara, la place des grimpereaux.

La famille des **Bucérotidés.** Très généralement confondus avec les toucans, les calaos en diffèrent par leur bec beaucoup moins volumineux, muni, chez de nombreuses espèces, d'une sorte de protubérance sur la mandibule supérieure, ainsi que par leur distribution : alors que les toucans sont exclusivement américains, les calaos ne vivent que dans l'Ancien Monde (Afrique au sud du Sahara, Asie du Sud-Est, Malaisie, Indonésie, îles Philippines, Salomon et Nouvelle-Guinée). La disposition de leurs doigts correspond au modèle général chez les Oiseaux : trois doigts sont tournés en avant et le quatrième (en réalité, le premier) l'est en arrière.

Chez les grandes espèces, les paupières portent des vibrisses simulant des cils, et les environs des yeux et du bec sont nus. Les quarante-quatre espèces (longueur : 37 cm à 1,30 m ; poids : 250 g à 4 kg) habitent les régions chaudes, où elles fréquentent soit les forêts, soit les savanes. On distingue deux groupes : les calaos terrestres (deux espèces), qui vivent dans les savanes africaines et qui chassent à pied (le genre *Bucorvus* atteint la vitesse de 30 km/h en courant), et les espèces arboricoles, parmi lesquelles le genre *Tockus* réunit les plus petits représentants de la famille. Tous les calaos se nourrissent d'Insectes et d'autres Invertébrés, de Vertébrés (Reptiles, Rongeurs) et de fruits, mais seuls les calaos terrestres sont vraiment omnivores. Chez toutes les espèces (sauf les *Bucorvus*), la femelle s'enferme dans la cavité d'arbre qu'elle a choisie pour nicher, ne laissant qu'une étroite ouverture par laquelle le mâle la ravitaillera durant toute la période d'incubation (30 à 50 jours) et parfois même durant l'élevage de la nichée. La ponte comprend deux œufs chez les grandes espèces et jusqu'à cinq chez les plus petites. Pendant sa réclusion, la femelle mue les plumes de ses ailes et de sa queue.

E. Duscher - Pitch

▲ *Le guêpier d'Europe* **(Merops apiaster),** *qui niche en Camargue, est un des plus beaux Oiseaux de la faune ailée française.*

Ordre des Piciformes

Ce groupe se compose de six familles (au total trois cent soixante-dix-sept espèces), dont les membres diffèrent profondément par l'aspect. Les caractères communs qui expliquent leur réunion sont la disposition, dite zygodactyle, des doigts (deux sont dirigés en avant et deux en arrière), l'absence de véritable duvet (sauf chez les Galbulidés), la nidification dans un trou et la ponte d'œufs blancs. Les petits sont des oisillons nidicoles, nus et aveugles, sauf exceptions.

La famille des **Galbulidés.** La silhouette des quinze espèces de jacamars (12 à 27 cm) rappelle celle des guêpiers : même bec fin et pointu, même queue allongée ; en outre, le plumage présente les mêmes couleurs très vives. Les jacamars habitent les forêts tropicales d'Amérique centrale et d'Amérique du Sud. Ils chassent des Insectes pris en vol. Leur nid, creusé dans un talus, a l'aspect d'une longue galerie au bout de laquelle se trouve une chambre dans laquelle sont pondus les trois ou quatre œufs. Les oisillons sont revêtus de duvet, ce qui constitue une exception chez les Piciformes.

R. Longo

◀ *La huppe fasciée* **(Upupa epops)** *est un élégant Oiseau qui se nourrit d'Insectes, de Vers et de Mollusques et niche dans un creux d'arbre ou de mur.*

▶ *La plupart des Picidés sont exclusivement arboricoles, mais certains, comme le pic vert* (**Picus viridis**), *sont en partie terrestres et sautillent sur le sol à la recherche de fourmis.*

La famille des **Bucconidés.** Les paresseux, ou buccos (14 à 26 cm), encore appelés tamatias, sont eux aussi des Oiseaux forestiers propres à l'Amérique tropicale. Les trente espèces ont une grosse tête, un bec bref et plus ou moins crochu et une queue courte. Dans le plumage, les tons gris, bruns et verts dominent. Le nid est creusé dans une termitière ou dans un talus. Ces Oiseaux doivent leur nom commun à leur manque de vivacité.

La famille des **Capitonidés.** Les barbus et barbicans sont ainsi nommés parce que des vibrisses raides et très longues entourent la base de leur bec. Chez certaines espèces, ces plumes ont tout à fait l'aspect de moustaches (plutôt que d'une barbe). Les soixante-douze espèces (9 à 30 cm) vivent en Afrique au sud du Sahara, en Asie méridionale et en Amérique tropicale. Ils possèdent un bec robuste, et leur silhouette est massive. Ce sont de médiocres voiliers qui habitent les lieux boisés ou les savanes. Leur nourriture se compose de fruits de graines et d'Insectes. Ils creusent eux-mêmes leur nid dans le bois pourri et pondent deux à cinq œufs, que les deux parents couvent. Les barbus sont fréquemment parasités par les indicateurs.

La famille des **Indicatoridés.** Les quatorze espèces d'indicateurs (15 à 20 cm) sont réparties en Afrique (au sud du Sahara) et dans le sud de l'Asie. Tous vivent en forêt. Leur plumage est modestement coloré en gris-brun ou en verdâtre. Ils se nourrissent d'Insectes et, à l'occasion, d'abeilles sauvages dont ils apprécient les larves. Ils font partie des rares Animaux capables de digérer la cire. Une espèce au moins, le grand indicateur d'Afrique, est réputée pour son habitude de « guider » l'homme ou de gros Mammifères jusqu'à l'arbre occupé par un essaim d'abeilles et d'attendre que les rayons de miel soient mis à découvert pour se nourrir des débris qu'on lui laisse. Il ne s'agit cependant pas là d'une habitude régulière; par ailleurs, le trajet parcouru par l'indicateur qui s'efforce d'attirer l'attention d'un gros Mammifère varie entre quelques dizaines et plusieurs centaines de mètres. Le « guidage » se fait de la façon suivante : l'Oiseau se tient devant l'homme ou le Mammifère (il s'agit en fait du ratel, sorte de blaireau) et lance des cris répétés; quand il a atteint le but, il se tait.

Les indicateurs sont des Oiseaux parasites. Ils pondent leurs œufs dans les nids de pics, de barbus, et même de zostérops (Oiseaux nichant à ciel ouvert). A l'éclosion, le jeune parasite possède deux crochets pointus à l'extrémité des mandibules, qu'il utilise pour attaquer et tuer ses frères et sœurs d'adoption. Ces appendices disparaissent au bout d'une quinzaine de jours, quand il se retrouve seul occupant du nid usurpé.

La famille des **Ramphastidés.** Avec leur plumage généralement sombre et leur énorme bec bariolé de couleurs vives, les toucans ne peuvent manquer d'attirer l'attention. Les trente-sept espèces sont réparties en deux groupes, les toucans proprement dits (mesurant 60 cm de long au maximum) chez lesquels les couleurs

A. Margiocco

noire et blanche dominent, et les arassaris, ou toucanets (30 à 48 cm) au plumage plus gai (vert, bleu, rouge, etc.). Tous vivent dans les forêts tropicales d'Amérique centrale et d'Amérique du Sud. Le bec peut représenter un tiers de la longueur totale de l'Animal; il est fort léger, car sa structure interne ressemble à celle d'une éponge aux alvéoles remplis d'air.

Les toucans se nourrissent de fruits et d'Insectes. Ils ne quittent guère les arbres, où ils se déplacent en bondissant sur leurs courtes pattes. Ils pondent de deux à quatre œufs dans un trou d'arbre. La reproduction est encore fort mal connue. L'espèce la plus connue et la plus grande est le toucan toco *(Ramphastos toco)*.

La famille des **Picidés.** Sauf exceptions, les pics sont remarquablement adaptés à un genre de vie à peu près

▼ *A gauche, un toucanet à bec tacheté* (**Aulacorhynchus prasinus**). *Le plumage des toucanets est généralement plus bariolé que celui de la plupart des Ramphastidés. A droite, un Capitonidé* (**Chotorea versicolor**).

P. Summ - Jacana

A. Margiocco

exclusivement arboricole. De leur bec robuste et droit la plupart creusent le bois, soit pour y découvrir les Insectes xylophages qui constituent une grande partie de leur nourriture, soit pour y installer leur nid. Leurs courtes pattes ont les doigts munis de griffes acérées, véritables crampons grâce auxquels ils escaladent troncs et branches. Les rectrices, au rachis très raide, leur servent de support quand ils s'arrêtent de grimper.

Ces Oiseaux passent leur existence accrochés à des surfaces verticales (en dehors de l'époque où ils couvent) et conservent cette position pour dormir (cependant, ceci n'est pas valable pour toutes les espèces, même pour celles qui sont très spécialisées dans le grimper, comme le pic épeiche). Certains, comme le pic vert de chez nous, sont en partie terrestres et sautillent sur le sol, où ils trouvent l'essentiel de leur alimentation, c'est-à-dire des fourmis et leurs larves. Beaucoup ajoutent à leur régime d'Insectes des graines, des fruits et des sucs végétaux (sève), qu'ils obtiennent en pratiquant une série de petits trous dans l'écorce des arbres; ces trous sont disposés en rangées parallèles et laissent des cicatrices. Le plumage comporte des tons bruns, gris, verts, blancs, noirs, roux et rouges, jaunes. Les deux sexes se différencient par de petits détails, notamment, par des taches situées sur la tête.

Les deux cent neuf (ou cent quatre-vingt-trois) espèces habitent toutes les lieux boisés, sauf le géocolapte *(Geocolaptes olivaceus)* d'Afrique du Sud et *Colaptes rupicola,* des hauts plateaux andins, qui niche dans un trou creusé dans un talus. Les pics manquent seulement dans les régions polaires, à Madagascar, sur les îles de l'Océanie, en Australie, Nouvelle-Guinée et Nouvelle-Zélande. Ils sont sédentaires, certains se livrant, tout au plus, à des déplacements irréguliers qui entrent dans le cadre des « invasions ». Les pics nichent dans un trou foré dans le bois d'un arbre et pondent, sur les copeaux restés au fond, deux à huit œufs qu'ils couvent pendant 11 à 17 jours. L'incubation est assurée, pour la plus grande part, par le mâle. La plus grande espèce, le pic impérial du Mexique *(Campephilus imperialis),* mesure 56 cm de long et la plus petite, un picumne africain, seulement 8 cm.

On divise la famille en trois sous-familles : les *Picinés,* ou pics véritables, dont les caractères correspondent à ceux que nous venons d'énumérer. En France, nichent les pics noir, vert, cendré, épeiche, à dos blanc, mar, tridactyle, épeichette. Les *Picumninés* (huit espèces) d'Amérique, Asie et Afrique, sont de tout petits Oiseaux qui diffèrent des précédents par leur queue très courte et molle, qui ne joue aucun rôle dans le grimper. Les *Jynginés* (torcols), deux espèces dont l'une niche en France, sont les plus aberrants des Picidés : ils ne grimpent pas, leur plumage est brun et ils ne creusent pas le bois. Ils pondent dans des cavités toutes prêtes. Le torcol fourmilier *(Jynx torquilla),* espèce migratrice, vit dans la région paléarctique, tandis que l'autre espèce est africaine.

Frédéric - Jacana

A. Margiocco

▲ ***Mâle d'oiseau-lyre*** **(Menura novae-hollandiae),** ***une des deux espèces de Ménuridés vivant dans l'Est australien.***

Ordre des Passériformes

L'ordre des Passériformes (Passereaux), qui réunit à lui seul environ cinq mille cent espèces d'Oiseaux (soit les trois cinquièmes des espèces connues), est l'un de ceux dont la classification est des plus difficiles à établir. Les plus petits Passereaux sont les roitelets (8 cm de long, 5 g) et certains Estrildidés, les plus grands (ménure lyre, épimaque de Mayer) atteignant respectivement 95 cm et 1,20 m. Les caractères anatomiques et morphologiques communs à l'ensemble des membres de l'ordre sont peu nombreux : on compte quatorze vertèbres cervicales (sauf chez les Eurylaimes), les pattes sont munies de quatre doigts dont trois sont tournés en avant, les cæcums sont peu développés, la glande uropygienne est nue, l'organe vocal est bien différencié, il y a dix rémiges primaires, généralement douze rectrices (parfois seize ou seulement six). Enfin, la plupart des Passereaux mènent une existence arboricole. A terre, la majorité de ces Oiseaux se déplace en faisant de petits bonds. Le régime alimentaire est très variable; cependant, presque tous les Passereaux mangent des Insectes ou en nourrissent leurs petits. Les espèces purement granivores sont vraiment rares (becs-croisés par exemple). Les Passereaux se distinguent des autres Oiseaux par leurs facultés vocales mais ne sont pas tous de bons chanteurs. Monogames, sauf exceptions, ils font un nid, souvent très élaboré. L'incubation dure de 11 à 40 jours; les petits sont des oisillons nidicoles.

Cet ordre est représenté dans le monde entier sauf sur le continent antarctique et sur les océans. On le divise, en se fondant sur la structure et le nombre des muscles de l'appareil vocal, sur la disposition des tendons des pattes et quelques autres caractères anatomiques, en quatre sous-ordres : les *Eurylaimes,* ou *Desdomactyles;* les *Tyranni,* ou *Mesomyodae;* les *Menurae,* ou *Diacromyodae,* et enfin les *Passeres,* ou *Oscines* (également qualifiés de « chanteurs »). Les Passereaux sont répartis en soixante-neuf ou soixante-dix familles, dont une sélection seulement sera décrite ici. Cent vingt-deux espèces nichent en France.

◀ ***Le torcol fourmilier*** **(Jynx torquilla),** ***espèce migratrice, vit dans la région paléarctique et notamment en France.***

Ordre des Passériformes

L'astérisque signale que la famille est décrite dans le texte.

Sous-ordre	Famille	Nombre d'espèces	Espèces caractéristiques	Répartition
EURYLAIMI	Eurylaimidés*	14	Eurylaimes	Afrique, Asie
TYRANNI	Dendrocolaptidés	47	Dendrocolaptes	Amérique centrale et du Sud
	Furnariidés	215	Fourniers	Amérique du Sud
	Formicariidés	221	Fourmiliers	Amérique centrale et du Sud
	Conopophagidés	11	Conopophages	Amérique du Sud
	Rhinocryptidés	27	Tapaculos, Gallitos	Amérique centrale et du Sud
	Cotingidés	91	Cotingas, Oiseau-ombrelle	Amérique centrale et du Sud
	Pipridés	61	Manakins	Amérique centrale et du Sud
	Tyrannidés	364	Tyrans, Moucherolles	Amérique
	Oxyruncidés	1	Oxyramphe	Amérique centrale et du Sud
	Phytotomidés	3	Raras (Phytotomes)	Amérique du Sud
	Pittidés	25	Brèves	Afrique, Asie, Australie
	Acanthisittidés	3	Xéniques	Nouvelle-Zélande
	Philépittidés	4	Philépittes, Faux soui-manga	Madagascar
MENURAE	Ménuridés*	2	Oiseaux-lyres ou Ménures	Australie
	Atrichornithidés	2	Atrichornis	Australie
PASSERES	Alaudidés*	75	Alouettes	les 5 continents
	Hirundinidés*	79	Hirondelles	les 5 continents
	Dicruridés*	19	Drongos	Afrique, Asie, Australie
	Oriolidés	22	Loriots vrais	Eurasie, Afrique, Australie
	Corvidés*	102	Corbeaux, Pies, Geais	les 5 continents
	Cracticidés	10	Gymnorhines, Cassicans	Australie, Nouvelle-Guinée
	Grallinidés	4	Grallines	Australie, Nouvelle-Guinée
	Ptilonorhynchidés*	15	Oiseaux à berceau	Australie, Nouvelle-Guinée
	Paradiséidés*	43	Oiseaux de paradis ou Paradisiers	Australie, Nouvelle-Guinée
	Paridés*	43	Mésanges vraies	Eurasie, Amérique du Nord, Afrique
	Sittidés*	27	Sittelles	Eurasie, Amérique du Nord
	Certhiidés*	12	Grimpereaux, Tichodrome, Climacteris	Ancien Monde et Amérique du Nord
	Paradoxornithidés	25	Paradoxornis, Rémiz, Orites	Eurasie, Amérique du Nord
	Chamaéidés	1	*Chamaea*	Amérique du Nord
	Timaliidés	258	Timalies ou Grives bruyantes	Asie, Afrique, Australie
	Campéphagidés	70	Échenilleurs, Minivets	Afrique, Asie, Australie
	Pycnonotidés	119	Bulbuls	Afrique, Asie, Malaisie
	Chloropséidés = Irænidés	14	Verdins, Ioras, Oiseaux-fleurs	Asie
	Cinclidés*	4	Cincles	Eurasie, Amérique
	Troglodytidés*	60	Troglodytes	Eurasie, Amérique
	Mimidés	31	Moqueurs, Mimes	Amérique
PASSERES	Turdidés*	301	Merles, Grives, Traquets, Rouges-gorges, etc.	Eurasie, Afrique, Australie, Amérique
	Sylviidés*	404	Fauvettes, Pouillots, Rousserolles, Malures	Eurasie, Afrique, Australie
	Régulidés	5	Roitelets	Eurasie, Afrique, Amérique du Nord
	Muscicapidés	378	Gobe-mouches	Eurasie, Afrique, Australie
	Prunellidés*	12	Accenteurs	Eurasie
	Motacillidés*	48	Bergeronnettes, Pipits	les 5 continents
	Bombycillidés	3	Jaseurs	Eurasie, Amérique du Nord
	Ptylogonatidés	4	Gobe-mouches soyeux	Amérique
	Dulidés	1	Oiseau-palmiste	Haiti
	Artamidés	10	Langrayens	Asie, Australie
	Vangidés	13	Vangas	Madagascar
	Laniidés*	76	Pies-grièches, Gonoleks, Gladiateurs	Eurasie, Afrique, Amérique
	Cyclarhidés	2	*Cyclarhis*	Amérique centrale
	Prionopidés	7	Prionops, Bagadais	Afrique
	Viréolaniidés	3	Viréo à sourcils jaunes	Amérique centrale et du Sud
	Callaéidés	2	« Corneille » caronculée, Philestourne	Nouvelle-Zélande
	Sturnidés*	107	Étourneaux, Martins, Mainates	les 5 continents
	Méliphagidés*	158	Méliphages	Australie, Nouvelle-Guinée, Nouvelle-Zélande
	Nectariniidés	105	Soui-mangas	Asie, Afrique, Australie
	Dicaéidés	54	Dicées	Asie, Australie, Nouvelle-Guinée
	Zostéropidés	78	Zostérops (Oiseaux à lunettes)	Asie, Australie, Mélanésie, Nouvelle-Zélande
	Viréonidés	40	Viréos	Amérique
	Cœrébidés	26	Sucriers	Amérique centrale et du Sud
	Drépanididés	14	Hémignathe, Drépanis	îles Hawaii
	Parulidés	113	Figuiers (« Fauvettes » américaines)	Amérique
	Plocéidés*	150	Moineaux, Tisserins, Quéléas, Veuves (ou 107)	Eurasie, Afrique
	Estrildidés*	120	Astrilds, Diamants, Capucins, Bengalis, Padda	Afrique, Asie, Australie
	Ictéridés	88	Troupiales, Cassiques, Stournelles, Carouges, Molothre	Amérique
	Tersinidés	1	Tangara-hirondelle	Amérique du Sud
	Thraupidés = Tanagridés	191	Tangaras, Euphones, Pirangas	Amérique
	Catambly-rhynchidés	1	*Catambly-rhynchus*	Amérique du Sud
	Embérizidés*	197	Bruants, Juncos	manquent en Australie
	Fringillidés*	247	Pinsons, Chardonneret, Bouvreuils, Becs-croisés, Pinsons de Darwin	les 5 continents

La famille des **Eurylaimidés.** Les eurylaimes diffèrent nettement des autres Passereaux par la structure des tendons des pattes. La face postérieure de leurs tarses est couverte de petites écailles, et leurs doigts sont soudés au niveau de la première phalange. Les quatorze espèces, dont la longueur varie de 14 à 28 cm, habitent le sud-est de l'Asie et l'Afrique au sud du Sahara. Ces Oiseaux ont une silhouette lourde, impression renforcée par la grosseur de la tête et la brièveté des ailes, de la queue et du bec. Ce dernier s'ouvre largement. Le plumage présente de vives couleurs (vert, bleu, noir, roux). Les eurylaimes vivent dans les forêts tropicales; leur nourriture se compose soit d'Insectes et de petits Vertébrés (grenouilles, crapauds, lézards), soit de fruits. Ils font un nid en forme de sac, suspendu dans la végétation arbustive, et y pondent de trois à cinq œufs, de couleur unie ou tachetés.

La famille des **Ménuridés** comprend seulement deux espèces, l'oiseau-lyre *(Menura novae-hollandiae)* et l'oiseau-lyre du prince Albert *(Menura alberti)*, qui vivent dans les forêts de l'Est australien. Le premier est le plus grand (95 cm). Les ménures doivent leur nom d'oiseaux-lyres à la forme de leur queue. Celle-ci se compose de seize rectrices, et c'est chez les Oiseaux mâles qu'elle est le plus remarquable : les deux plumes les plus externes ont leur extrémité recourbée en crosse, les deux suivantes (en allant vers le centre de la queue) ressemblent à des fils et les douze dernières, de couleur blanche, ont des barbes séparées qui leur donnent l'aspect de la dentelle ; le reste du plumage est brun.

Au cours de la parade nuptiale, les mâles écartent leurs rectrices et les rabattent au-dessus de leur dos. La parade a lieu sur un monticule que les Oiseaux préparent dans la forêt. La femelle construit un nid de brindilles dans un arbre ou sur le sol. Elle y pond un seul œuf, brun et gris, qu'elle couve pendant 35 à 40 jours (cette durée est le record chez les Passereaux). A l'éclosion, l'oisillon est revêtu d'un duvet noir. Les ménures mènent une existence terrestre mais se perchent dans les arbres pour se reposer. Ils mangent des Insectes, des Vers et des Mollusques, ainsi que des Araignées.

La famille des **Alaudidés**, groupe nettement différencié, comprend des espèces adaptées à un genre de vie terrestre et habitant les paysages « ouverts » : prairies, alpages, champs, friches, steppes, déserts, en plaine et en montagne. De faible taille (11,5 à 22 cm), les alouettes ont un bec droit ou recourbé, assez fin ou massif. De petites plumes recouvrent leurs narines. Les griffes des doigts antérieurs sont courtes et recourbées; celle du doigt postérieur est la plus longue et souvent toute droite. La plupart des alouettes ont un plumage modeste, beige et brun, rayé de brun foncé, parfois plus ou moins mêlé de noir, de blanc et de jaune. On n'observe pas de dimorphisme sexuel, sauf exceptions. Granivores et insectivores, les alouettes vivent en Eurasie; il n'y en a qu'une en Australie, une en Amérique du Nord et en Amérique centrale. Sur les soixante-quinze espèces, beaucoup vivent en Afrique. Chez nous, l'alouette lulu, l'alouette des champs, le cochevis (alouette huppée), la calandrelle et la calandre sont nicheuses, les deux dernières étant les plus rares. L'alouette des champs *(Alauda arvensis)*, qui est l'espèce la plus commune en France, mesure 18 cm de long et 35 cm d'envergure (la femelle est un peu plus petite : respectivement 17 cm et 33 cm). Son poids varie entre 26 et 50 g. La griffe de son doigt postérieur est plus grande que le doigt lui-même et atteint 12 à 19 mm de long.

Au cours de la parade nuptiale, le mâle s'élève presque verticalement (en moyenne, jusqu'à 100 m de haut) et survole son territoire (qui couvre environ un hectare) en chantant sans arrêt, parfois pendant vingt minutes. Ses biotopes préférés sont les champs de céréales d'hiver, de luzerne, de trèfle. Dans l'Himalaya, l'alouette niche encore à 4 000 m d'altitude. Elle se nourrit de feuilles vertes des semis, d'Invertébrés (Coléoptères, Orthoptères, fourmis, punaises, chenilles, Araignées, Vers) et de graines de plantes sauvages. Les jeunes ne reçoivent que des Insectes. Pendant que le mâle chante, la femelle prépare, au mois d'avril, dans la végétation ne dépassant pas 20 cm de haut, le nid, qui se compose d'herbes sèches et de radicelles (autrefois, de crins de chevaux également). Il se trouve dans un petit creux du sol et contient trois à cinq œufs à fond crème, tachetés de gris et de brun. L'incubation dure environ 14 jours.

La famille des **Hirundinidés.** Extrêmement homogène, la famille des hirondelles compte soixante-dix-neuf espèces de petits Oiseaux (10 à 22,5 cm), reconnaissables à leur silhouette aérodynamique. Leurs pattes sont toutes petites et les hirondelles ne s'en servent que pour se percher (sur les fils électriques ou les branches d'arbres), s'agripper aux parois verticales et aussi se poser et marcher par terre (par exemple, pour collecter la boue nécessaire à la construction de leur nid). La coloration du plumage, identique chez les deux sexes, est sobre : le bleu, le noir, le brun, le gris, le vert et le blanc dominent, agrémentés de roux chez quelques espèces. Extrêmement actives, les hirondelles mènent une existence aérienne et capturent leurs proies en vol, n'ouvrant le bec qu'au moment où elles saisissent un ou plusieurs Insectes. Chaque année, les espèces des régions tempérées accomplissent de grandes migrations. Le nid ressemble généralement à un quart de sphère ou à une demi-sphère collée contre une paroi verticale. Il se compose de boulettes de terre humide, et l'intérieur est revêtu d'herbes sèches et de plumes. Plusieurs espèces nichent dans des trous d'arbres ou dans des galeries qu'elles creusent dans le sable.

Quatre espèces se reproduisent en France, les hirondelles de cheminée, de fenêtre, de rocher et de rivage; une cinquième, l'hirondelle rousseline, niche aussi mais en nombre extrêmement restreint. L'hirondelle de cheminée *(Hirundo rustica)*, qui vit à la campagne, revient progressivement en Europe à partir du mois de mars. Les premières sont fort discrètes et, souvent, on ne les remarque que 6 à 10 jours après leur arrivée. L'occupation progressive des nids d'un village allemand a été observée par L. Schuster en 1953 : les premiers Oiseaux se montrèrent le 30 mars et les derniers arrivèrent le 22 mai. Les cinquante-sept couples qui nichaient dans les granges et les étables s'étaient donc échelonnés sur une durée de 53 jours. L'année précédente, les quatre-vingt-un couples présents étaient arrivés en 31 jours.

La famille des **Dicruridés.** Les dix-neuf espèces de drongos constituent un groupe naturel bien distinct des autres Passereaux et dont le genre de vie rappelle un peu celui des gobe-mouches. La famille est représentée dans les lieux boisés des zones tropicale et subtropicale en Afrique (au sud du Sahara), dans le sud-est de l'Asie et de là jusqu'en Australie. La région indo-malaise est la plus riche en espèces. Le plumage est sombre (presque toujours entièrement noir avec des reflets verts et bleus), le bec robuste et très légèrement crochu ; la queue est allongée, fourchue, et, chez quelques

▼ *A gauche,* **Alauda arvensis,** *alouette des champs, est l'espèce la plus commune en France.*
A droite, **Hirundo rustica,** *l'hirondelle de cheminée, vit à la campagne et revient progressivement en Europe à partir du mois de mars.*

J. Markham

R. Longo

J. Markham

J. Markham

▲ *En haut, la corneille mantelée* (**Corvus cornix**) *;* *n bas, le choucas des tours* (**Corvus monedula**).

▼ **Ptilonorhynchus violaceus,** *l'Oiseau satin, décore son allée avec des objets divers dont la majorité est bleue ou violette.*

espèces, les rectrices externes ont le rachis partiellement dépourvu de barbes sauf à l'extrémité, où elles forment une sorte de « raquette ». On observe parfois des plumes de forme semblable sur la tête.

Les drongos, vivant isolément ou par couples, se tiennent toujours sur les arbres, et quelques-uns ne descendent jamais par terre. Ils chassent à l'affût : immobiles sur leur perchoir, ils attendent le passage d'un Insecte, s'élancent pour l'attraper et reviennent se poser. Quelques-uns utilisent le dos des gros Mammifères ongulés comme observatoire mobile et prennent les Insectes dérangés par le passage de ces Animaux. Réputés pour leur agressivité, les drongos n'hésitent pas à s'attaquer aux Corvidés et aux Rapaces diurnes qui passent aux environs de l'endroit où ils nichent. Le nid, placé dans un arbre, se compose de tiges de plantes grimpantes, de racines, d'herbes et de fils d'Araignées. La coupe, profonde, contient deux à quatre œufs blancs ou rosés, parsemés de taches brunes ou lilas. Quelques espèces ont une voix harmonieuse et sont capables d'imiter les cris d'autres Oiseaux. La taille des drongos varie entre 18 et 36 cm, mais si l'on tient compte des rectrices ornementales, certains atteignent 60 cm de longueur totale.

La famille des **Corvidés,** cosmopolite, compte cent deux espèces de corbeaux, corneilles, pies, geais, casse-noix, mésangeais et podoces, dont la taille varie entre 25 cm (podoces) et 64 cm (grand corbeau). Ces Oiseaux font défaut seulement dans les régions antarctiques, une partie de la Polynésie et le sud de l'Amérique du Sud. Doués de grandes facultés d'adaptation, ils occupent toutes sortes de paysages : forêts, champs et prés, montagnes, côtes, déserts et agglomérations humaines, dans les régions arctiques, tempérées et tropicales. Leur bec, particulièrement robuste, est légèrement crochu à l'extrémité. Le plumage, assez raide, présente deux types principaux de coloration : chez certaines espèces, il est noir, ou noir et gris, ou encore noir et blanc (corbeaux, corneilles, crave, chocard, choucas) ; chez d'autres, le brun, le bleu, le vert se mêlent aux teintes précédentes (pies, geais, etc.). Il n'y a pas de dimorphisme sexuel.

Sédentaires (sauf quelques exceptions comme les corbeaux freux d'Europe orientale et centrale), les Corvidés sont souvent sociables et plusieurs espèces nichent en colonies (choucas, corbeau freux, etc.). Le nid, en forme de coupe, est placé dans un arbre, un buisson ou un trou (d'arbre, de rocher, de muraille). Sauf exceptions, les œufs, verts ou beiges, sont tachetés de gris et de brun. Les Corvidés sont omnivores, caractère qui, joint à leurs facultés psychiques, explique que certains s'adaptent parfaitement aux transformations que l'homme fait subir à la nature. La raréfaction de leurs seuls ennemis naturels, les Rapaces diurnes, a également favorisé cette situation.

En France, le corbeau freux niche dans les deux tiers septentrionaux du pays et la corneille noire existe partout, ainsi que le choucas. Le crave, le plus rare, se reproduit en Bretagne et dans les Causses, le chocard, dans les Alpes, les Pyrénées et en Corse. Le grand corbeau vit en Bretagne, dans le Massif central, le Jura, les Alpes, les Pyrénées et en Corse. Le geai et la pie abondent partout et le casse-noix niche dans les forêts de montagne (Alpes, Jura et Vosges). La corneille mantelée, apparentée à la corneille noire, remplace celle-ci en Corse ; ailleurs, dans le Nord et le Pas-de-Calais, elle ne vient que l'hiver.

La famille des **Ptilonorhynchidés.** Les Oiseaux à berceau, d'Australie et de Nouvelle-Guinée, ont un plumage moins brillant que celui des Paradiséidés, mais ils construisent des édifices près desquels ou dans lesquels ont lieu leurs parades nuptiales. Les quinze (ou dix-huit) espèces mesurent de 23 à 36 cm. Il existe des Oiseaux qui défendent un territoire uniquement destiné à la formation du couple, mais les Oiseaux à berceau sont les seuls à préparer un accessoire pour ces parades. Leur plumage, noir ou brun, est assez terne et l'on peut penser, comme le dit Gilliard, qui les étudia en Nouvelle-Guinée, que le « berceau » remplace en quelque sorte un beau costume. D'ailleurs, les meilleurs architectes sont les moins colorés.

Certains Oiseaux à berceau font des huttes, des mâts de cocagne (en entourant le tronc d'un jeune arbre avec des branchettes entrelacées, au nombre de plusieurs centaines : huit cent seize dans un cas). Ces constructions atteignent 60 cm de haut. D'autres préparent une « allée », c'est-à-dire deux murs de brindilles reliés par un plancher. A ces édifices sont souvent annexés des parterres : l'Oiseau débarrasse le sol des feuilles mortes et y dispose des petits cailloux, des fleurs d'une certaine couleur, des globules de résine, des élytres d'Insectes, des coquillages, des fruits vivement colorés et même des morceaux de verre et de papier. Ainsi, *Ptilonorhynchus violaceus,* l'Oiseau satin, l'espèce la plus connue, décore son allée avec des objets dont la majorité est bleue ou violette ou encore jaune-vert. Cette espèce est connue pour peindre sa construction avec de la poussière de charbon de bois mêlée à de la salive, le tout étant appliqué à l'aide d'un tampon d'écorce fibreuse. Il semble que les mâles qui paradent près de leur berceau s'accouplent avec toutes les femelles qui se présentent. Mais ils ne s'occupent absolument pas de la nidification : les femelles construisent seules les nids, dans lesquels elles pondent un à trois œufs (souvent deux). Chez quelques espèces, mâle et femelle sont tous deux pareillement colorés et le premier ne construit pas de berceau ; il parade dans les arbres et s'occupe des soins à la nichée. Les Ptilonorhynchidés se nourrissent de fruits et d'Insectes, ainsi que d'autres Invertébrés.

La famille des **Paradiséidés.** Appelés Oiseaux de paradis parce que l'on croyait qu'ils vivaient constamment dans les cieux (les premiers sujets empaillés qui parvinrent, en 1522, en Europe n'avaient plus de pattes, les indigènes ayant l'habitude de les couper), les épimaques, astrapies, manucodes, sémioptères, diphyllodes et paradisiers (au total quarante-trois espèces) méritent, cependant, d'une autre manière leur nom, car le plumage nuptial des mâles présente une profusion d'ornements extraordinaires que l'on ne rencontre nulle part ailleurs dans la classe des Oiseaux : touffes de plumes ressemblant à des manteaux ou à de la dentelle, rectrices démesurément longues, plumes de couleurs irisées, etc. Ces atours n'apparaissent que chez les Oiseaux âgés de deux à cinq ans. Au cours des parades nuptiales, qui ont lieu par terre ou dans les arbres, les mâles prennent souvent des attitudes curieuses : certains se balancent la tête en bas, d'autres dansent en déployant les beautés de leur plumage. Polygames sauf exceptions, les mâles ne participent aucunement aux tâches de la nidification. Les femelles, modestement colorées, construisent le nid, couvent un ou deux œufs et élèvent les oisillons.

Les paradisiers vivent dans les forêts d'Australie du Nord et de l'Est, de Nouvelle-Guinée et des petites îles voisines de celle-ci. On les trouve aussi bien en plaine que dans les montagnes, jusqu'à 3 900 m. Leur taille varie entre 16 cm et 1,20 m. Parmi les plus étonnants, on compte l'astrapie de Mayer, dont les deux rectrices centrales atteignent 99,5 cm de long. Cet Oiseau est tout noir, et seules les plus grandes plumes de la queue sont blanches. Le plumage de *Paradisaea apoda,* auquel tout le groupe doit son nom, est beaucoup plus brillant : tête jaune, gorge verte, dos marron, plumes des flancs jaunes, formant des touffes qui atteignent 56 cm de long, rectrices centrales ressemblant à des fils de fer et mesurant 77 cm. Chez cette espèce, les parades

J. P. Ferrero - Pitch

nuptiales sont collectives, et plusieurs mâles y prennent part. Le cinéaste et naturaliste allemand H. Sielmann a récemment filmé (pour la première fois) et décrit la parade nuptiale d'une espèce voisine dans les forêts de Nouvelle-Guinée. Elle se déroule dans les arbres, à une trentaine de mètres au-dessus de la terre (on conçoit les difficultés qu'il a fallu vaincre pour en fixer les différentes phases sur la pellicule). Les paradisiers ont un régime mixte composé d'Insectes, d'Amphibiens, de lézards, mais aussi de fruits.

La famille des **Paridés**. Les vraies mésanges (7 à 20 cm) sont de petits Passereaux en majorité sédentaires, au régime en grande partie insectivore, qui vivent dans les lieux boisés. Les quarante-trois espèces habitent l'Eurasie, l'Amérique du Nord, et l'Afrique. Leur plumage, aux couleurs peu brillantes, n'est pas dépourvu d'élégance, les teintes les plus courantes étant le noir, le gris, le bleu, le jaune, le vert et le blanc. Beaucoup ont le dessus de la tête noir et les joues blanches. Il n'y a pas de dimorphisme sexuel très marqué, tout au plus remarque-t-on que, chez les femelles, les couleurs sont plus ternes et certains dessins moins marqués. Les mésanges placent leur nid dans un trou d'arbre, de mur, ou dans un emplacement insolite (boîte à lettres, tuyau, pompe, etc.). C'est un assemblage de mousse et de feuilles sèches, et la coupe est tapissée de crins et de laine. La ponte comprend de six à quinze œufs, qui sont, au moins chez les espèces européennes, blancs avec de nombreux points roux. Les mésanges ont en commun certaines habitudes caractéristiques : elles peuvent se suspendre la tête en bas pour chercher des proies et tiennent leurs aliments entre les pattes. Leur alimentation se compose d'Insectes (chenilles, Coléoptères notamment), auxquels elles ajoutent, en hiver, des graines.

Six espèces nichent en France, les plus communes étant les mésanges charbonnière *(Parus major)* et bleue *(Parus caeruleus)*; les autres sont les mésanges noire, huppée, nonnette et alpestre. On donne couramment le nom de « mésanges » à d'autres Oiseaux (en France, trois espèces) qui, en réalité, font partie de groupes différents, car leur biologie et leurs caractères morphologiques ont peu de traits communs avec ceux des Paridés. Il s'agit de la « mésange » à longue queue, ou orite *(Aegithalos caudatus)*, dont les jeunes sont nus à l'éclosion (ceux des vraies mésanges ont un peu de duvet), de la « mésange » à moustaches *(Panurus biarmicus)*, nicheur rare dans les roselières, et enfin de la « mésange » rémiz *(Remiz pendulinus)*, qui niche en Camargue. Les deux premières sont placées dans la famille des Paradoxornithidés et la troisième, parfois, dans un groupe spécial (famille des Rémizidés). Toutes font un nid globuleux qu'elles placent dans un arbre, un buisson *(Aegithalos)*, dans les roseaux *(Panurus)* ou à l'extrémité d'une branche pendante *(Remiz)*. Les vraies mésanges habitent les lieux boisés (forêts, vergers, etc.).

La famille des **Sittidés**. Quand on voit la sittelle torchepot *(Sitta europaea)* aller et venir le long d'un tronc, on peut s'étonner qu'elle ne soit pas classée parmi les « grimpeurs ». Bien supérieures aux pics dans l'art d'escalader les arbres, puisqu'elles se passent de l'appui des rectrices quand elles s'arrêtent et qu'elles montent et descendent avec une égale facilité, les sittelles sont des Passereaux exclusivement arboricoles. Trapues, de petite taille (10 à 18,5 cm), elles se distinguent par leur bec très robuste, leur queue minuscule, leurs pattes et leurs doigts assez longs, ces derniers étant munis de fortes griffes. Le plumage, où se mêlent le gris, le brun, le roux, le noir et le blanc, est presque identique chez les deux sexes.

Extrêmement actives, les vingt-sept espèces se nourrissent d'Invertébrés qu'elles trouvent à la surface des écorces ou même en dessous (elles sont capables de creuser le bois pourri), ainsi que de graines dont certaines font des sortes de « provisions ». Celles qui sont mangées sur place sont coincées dans une fente d'écorce ou de pierre, et l'Oiseau assène des coups de bec pour les décortiquer ou, quand il s'agit d'une noix ou d'une noisette, pratiquer une ouverture.

Sauf exceptions, les sittelles nichent dans des trous; c'est pour cette raison qu'on les qualifie (ainsi que d'autres petits Passereaux qui ont la même habitude : mésanges, certains gobe-mouches, etc.) un peu abusivement de « cavernicoles ». Elles ont coutume de réduire le diamètre de l'orifice de la cavité avec un mortier de terre humide. La sittelle des rochers *(Sitta neumayer)* niche dans une crevasse qu'elle ferme avec de la boue. Les œufs, blancs avec des taches rousses, ressemblent à ceux des mésanges. Les sittelles fréquentent les forêts et autres lieux boisés de l'Eurasie, du Maghreb et de l'Amérique du Nord. La sittelle des rochers, qui habite les falaises en plaine et en basse montagne, fait exception. Les seules espèces françaises sont la sittelle torchepot et la sittelle corse *(Sitta whiteheadi)*, qui est endémique en Corse.

La famille des **Certhiidés**. Aussi adaptés à l'existence arboricole que les sittelles, les grimpereaux rappellent cependant davantage les pics sous bien des rapports : comme eux, ils possèdent de courtes pattes, plus ou moins cachées dans le plumage, des rectrices allongées et raides sur lesquelles ils s'appuient quand ils cessent de grimper ; enfin, ils sont, eux aussi, incapables de descendre

G. Haüsle - Jacana

J. Markham

J. Markham

▲◄ *A gauche,* **Paradisaea apoda,** *l'Oiseau de paradis. En haut, la mésange charbonnière* **(Parus major),** *en bas, la mésange bleue* **(Parus caeruleus)** *sont toutes deux des espèces communes en France.*

R. Longo

▼ *Petites mésanges de l'espèce* **Parus caeruleus.**

Ricerche sull' Avifauna italiana di A. Pazzucconi

▲▶ *En haut,* Cinclus cinclus, *le cincle plongeur, peut effectuer des plongées de 5 à 10 secondes. Ci-contre,* Troglodytes troglodytes, *le troglodyte mignon, commun dans les plaines et les montagnes moyennes de France, construit un nid globuleux pourvu d'une petite entrée circulaire.*

A. Margiocco

le long des troncs et ne savent que monter. Ces ressemblances superficielles ne sont qu'un phénomène de « convergence » dû à un genre de vie assez voisin. Les grimpereaux ne peuvent creuser le bois, leur bec fin, allongé et légèrement recourbé n'étant pas adapté à une telle activité ; aussi capturent-ils leurs proies (Insectes et leurs œufs, Araignées) dans les fentes des écorces, qu'ils explorent minutieusement. Le grimpereau familier *(Certhia familiaris)* consomme, par exemple, des pucerons, des punaises, des charançons, des nymphes de mouches à scie, des guêpes parasites, des fourmis, des Diptères, des chenilles, ainsi que de petites graines.

Les grimpereaux ont un modeste plumage (brun, gris, blanc) qui les camoufle efficacement et leur permet de passer souvent inaperçus. Seuls leurs cris et leur chant permettent de déceler leur présence. Ils nichent et vivent exclusivement dans les bois, les forêts et autres endroits plantés d'arbres. Ils placent leur nid dans une fente de tronc, dans l'espace ménagé entre une écorce soulevée et le bois et pondent de trois à dix œufs ressemblant à ceux des sittelles et des mésanges.

La famille des Certhiidés est représentée en Eurasie, en Afrique, en Amérique du Nord et en Australie. Elle compte douze espèces, mais se compose, outre les grimpereaux (cinq espèces), du tichodrome échelette *(Tichodroma muraria)* et des *Climacteris,* propres au continent australien (six espèces). En France, vivent deux espèces de grimpereaux et le tichodrome. Ce dernier rappelle les grimpereaux par sa silhouette, mais sa coloration diffère nettement de celle de ceux-ci (il est gris, blanc, noir et rose vif), de même que sa niche écologique (en effet, ce grimpeur escalade les rochers et trouve dans leurs anfractuosités les Insectes et autres Invertébrés qui constituent son régime).

Oiseau de montagne, il effectue chaque année une migration en altitude et descend dans les plaines et sur les plateaux en automne. En France, on le voit alors en Bourgogne, jusque dans le Bassin parisien et en Normandie, où il escalade les clochers et les murs des châteaux.

La famille des **Cinclidés.** Extrêmement spécialisés, les cincles sont répandus en Europe septentrionale, en Asie (au sud, jusqu'au nord de l'Inde et à Formose) et en Amérique. De mœurs très voisines, les quatre espèces vivent au bord des eaux douces et claires (ruisseaux, rivières rapides, torrents) en montagne et en plaine.

Ce sont les seuls Passereaux réellement aquatiques. En effet, ils sont tous capables de nager et prennent une grande partie de leur nourriture en plongeant. Chez le cincle d'Europe (qui niche en France), les plongeons durent de 5 à 8 et même, parfois, 10 secondes. En Asie centrale, *Cinclus cinclus leucogaster* plonge environ mille six cents fois par jour (ce qui correspond à plus de 2 h passées sous la surface). Dans l'eau courante, le cincle d'Europe tient la tête inclinée, le corps en oblique, les ailes légèrement écartées et avance contre le courant, qui le plaque vers le fond. Il peut marcher sur le lit du cours d'eau.

A des habitudes aussi particulières correspondent évidemment des adaptations morphologiques : les cincles ont un plumage gras avec un duvet très abondant ; leurs ailes et leur queue sont courtes ; les pattes et les doigts sont robustes ; un opercule de peau ferme les narines ; le cristallin de l'œil est sphérique, tandis que la cornée est aplatie ; l'orifice auriculaire est, lui aussi, obturé par des replis de peau au cours de la plongée. Les cincles, dont la silhouette est arrondie, mesurent de 17 à 20 cm. Ils se nourrissent d'Animaux aquatiques. En Sibérie, Pastukhov a constaté que la ration quotidienne de *Cinclus cinclus leucogaster* (qui pèse de 60 à 70 g) atteignait 78,5 g, soit l'équivalent de 100 à 120 % du poids de l'Oiseau. Le régime se composait pour 88,3 % de gammares (Crustacés), pour 9,5 % de petits Poissons (gobies) et pour 2,2 % de larves d'Éphémères (Insectes).

Le nid, grosse boule de mousse, de feuilles et d'herbes, se trouve au bord de l'eau, parfois derrière une cascade. Sédentaires au bord des eaux qui ne gèlent pas, les cincles des montagnes sont parfois obligés, là où la glace et la neige recouvrent les torrents, de descendre en plaine. La pollution des eaux les menace sérieusement, car elle entame le film gras qui protège leurs plumes, rend la capture des proies plus difficile et diminue leur nombre. Aux États-Unis, dans l'État de Washington, *Cinclus mexicanus* mange beaucoup d'Insectes (Chironomides, Trichoptères, Coléoptères, Éphémères, Plécoptères) et de Mollusques. D'après les relevés de la faune benthique effectués dans les cours d'eau qu'il fréquente, on a constaté qu'il se nourrissait de tous les éléments à sa disposition, sauf les Vers du groupe des Oligochètes et les Mollusques du groupe des Pélécypodes.

La famille des **Troglodytidés.** Le troglodyte mignon *(Troglodytes troglodytes)*, tout petit Oiseau de couleur brun-roux, qui se faufile dans les buissons et reste chez nous pendant l'hiver, est le seul représentant de cette famille en Eurasie et dans le Maghreb. En effet, tous les troglodytes (soixante espèces) sont des Oiseaux américains, et notre espèce, très largement répartie, occupe tout l'hémisphère septentrional. Les troglodytes (9 à 22 cm) sont caractérisés par leur silhouette massive, leur plumage tacheté où dominent les tons bruns, gris et roux, leur bec pointu, légèrement recourbé, et leurs courtes ailes. Ils fréquentent des milieux fort divers : certains vivent dans les buissons des bois, d'autres font partie de la faune des marais, d'autres habitent même les déserts du sud des États-Unis (par exemple, le troglodyte des cactus). Tous se tiennent près du sol et volent peu (il existe cependant des espèces migratrices). Ils nichent dans des recoins, des cavités ou font un nid en forme de boule dans lequel ils pondent des œufs blancs ou rosés, parfois bruns ou bleu-vert.

Le troglodyte mignon, commun dans les plaines et les montagnes moyennes de France, se nourrit de petits Invertébrés et de menues graines. C'est un familier, qui chante la plus grande partie de l'année. Le mâle construit plusieurs nids, parmi lesquels la femelle choisit celui où elle pondra, après avoir complété le travail du mâle et rembourré l'intérieur. Extérieurement, ce nid globuleux, fait de mousse, de fibres, de feuilles sèches et parfois de quelques brindilles, se confond bien avec l'entourage ; il est pourvu d'une petite entrée circulaire. L'Oiseau le place jusqu'à 3 m de haut dans un appentis, contre un mur, un tronc, dans un vieux nid cassé d'hirondelle de cheminée, etc. Le troglodyte, qui mesure 9,5 cm de long et pèse 8,5 g, est souvent appelé « roitelet », mais les vrais roitelets sont encore plus petits que lui et s'en distinguent par un plumage verdâtre avec des taches jaune-orangé et noir sur la tête.

La famille des **Turdidés,** très vaste ensemble de trois cent une espèces (11 à 30 cm), compte, dans l'hémisphère Nord, de nombreux Oiseaux populaires : merles, grives, rouges-gorges, rossignols et traquets. Les Turdidés occupent des milieux naturels très variés (bois, jardins, champs, friches, prairies, marais). Les caractères com-

muns sont peu nombreux (tarses « bottés », c'est-à-dire couverts d'une seule plaque cornée sur la face antérieure, plumage des jeunes tacheté à la sortie du nid). La coloration varie considérablement selon les espèces, et, chez certaines, le dimorphisme sexuel est bien marqué (merles, traquets par exemple), alors que chez d'autres il est inexistant (grives européennes, rouge-gorge). Beaucoup de Turdidés ont une voix harmonieuse (rossignols, merles, grives), mais certains, comme les traquets, ne sont guère doués sous ce rapport. Le nid, le plus souvent en forme de coupe, est placé tantôt sur le sol, tantôt dans la végétation et contient des œufs souvent verdâtres et plus ou moins tachetés, rarement blancs. Le régime alimentaire est à la fois insectivore et frugivore. Les Turdidés manquent seulement dans les régions antarctique et arctique, ainsi qu'en Nouvelle-Zélande.

En France nichent deux merles, trois grives, deux rouges-queues, cinq traquets, le rouge-gorge et la gorge-bleue, ainsi que deux monticoles. Le merle noir *(Turdus merula)* est, avec le rouge-gorge, le plus familier de tous. Admirablement adapté à la vie urbaine, il niche jusque dans les parcs des plus grandes villes. A la campagne, il est resté beaucoup plus sauvage. Les grives sont reconnaissables à leur face inférieure blanchâtre, constellée de taches brun foncé. Des trois espèces françaises, la draine et la musicienne sont les plus répandues, mais la litorne *(Turdus pilaris)* est en extension dans l'Est (Jura, nord des Alpes, contreforts des Vosges), tandis qu'en hiver de nombreux sujets migrateurs venus d'Europe du Nord séjournent dans nos plaines.

La famille des **Sylviidés** est, avec quatre cent quatre espèces, l'une des plus importantes familles de Passereaux. Ses représentants vivent uniquement dans l'Ancien Monde, et les espèces des contrées septentrionales sont presque toutes migratrices. Les Sylviidés sont des Oiseaux de petite taille (8,5 à 22 cm) dont le plumage est généralement modeste (les tons bruns, beiges, gris, jaunes, crème et verdâtres dominent), les seules exceptions étant les malures d'Australie, qui ont une livrée richement colorée, du plus bel effet (bleu, noir et roux). Le dimorphisme sexuel est absent chez de nombreuses espèces, et les jeunes n'ont pas le plumage tacheté des jeunes Turdidés. Tous ont un bec mince d'insectivore, et le régime comprend essentiellement des petits Invertébrés et, accessoirement, des baies ou des fruits mous. Les pattes, grêles, sont adaptées au perchage et les Sylviidés se tiennent presque toujours dans la végétation, où ils nichent et trouvent leur nourriture. Avec les Turdidés, cette famille possède les meilleurs chanteurs du monde des Oiseaux.

Les milieux fréquentés par les Sylviidés permettent de les séparer en quelques groupes naturels : les fauvettes, les pouillots (qui sont les plus petits) et les hypolais, qui habitent les endroits boisés (forêts, parcs, jardins, bosquets, haies) ; les rousserolles, les locustelles et les phragmites (couramment appelés acrocéphales, ou fauvettes des roseaux) qui vivent presque tous dans la végétation bordant les eaux douces (lacs, marais, rivières) ; les cisticoles, qui se tiennent dans les espaces herbeux et vivent presque toutes en Afrique ; les malures, qui sont propres à l'Australie, à la Nouvelle-Guinée et à la Malaisie et dont la longue queue est souvent dressée à la verticale.

Le nid des Sylviidés a une forme variable : celui des fauvettes est une coupe placée à faible hauteur ; les pouillots font un nid en forme de four, posé par terre ou à proximité du sol ; les rousserolles construisent une corbeille profonde, accrochée à plusieurs tiges verticales de roseaux ou autres plantes palustres. De nombreux Sylviidés nichent en France : dix espèces de fauvettes, trois rousserolles, deux hypolais, quatre pouillots, deux locustelles, la cisticole des joncs, le phragmite des joncs, la bouscarle et la lusciniole à moustaches.

Chez la fauvette à tête noire *(Sylvia atricapilla)*, qui est l'une des espèces les plus largement répandues, mâle et femelle sont faciles à distinguer, le premier ayant une calotte noire et la seconde une toque rousse. Excellente chanteuse, cette fauvette est l'un des premiers Oiseaux migrateurs à revenir au printemps et l'un des derniers à nous quitter. Elle est plus ou moins sédentaire dans l'Ouest et le Midi. Il lui arrive même d'hiverner plus au nord quand la saison est douce, et, dans ce cas, elle subsiste en grande partie grâce aux baies du lierre et aux Insectes qui viennent danser devant les fleurettes de cette plante (dont le cycle est inversé par rapport à celui des autres Végétaux de notre flore).

La famille des **Prunellidés**, petit groupe de douze espèces (15 à 17 cm), est la seule qui soit endémique dans la région paléarctique. Les accenteurs ont un plumage aux couleurs ternes (gris et brun ou roussâtre) avec des stries foncées sur le dos (sauf chez une espèce). Leur bec, droit, assez fin, large à la base, se rétrécit brusquement vers la pointe quand on le regarde par-dessus. Ils vivent surtout par terre ; plusieurs espèces habitent les hautes montagnes d'Asie, d'autres les toundras boisées et la taïga. Deux espèces européennes, l'accenteur alpin (montagnard) et l'accenteur mouchet *(Prunella modularis)*, vivent en France, le deuxième à toutes altitudes au-dessous de la limite supérieure des arbres.

Insectivores et surtout granivores, ces Oiseaux ne sont pas vraiment sédentaires, et ceux qui vivent à grande altitude descendent plus bas pour passer l'hiver. Les accenteurs nichent par couples séparés ; cependant, après la nidification, certains se rassemblent en groupes réunissant jusqu'à cinquante individus (c'est notamment le cas des espèces montagnardes). Le nid est placé par terre ou dans un arbre, un buisson, à l'abri d'un rocher. Il contient de trois à cinq œufs bleu-vert.

J. Markham

H. Longo

▲ *En haut,* **Phoenicurus phoenicurus,** *le rouge-queue à front blanc, fréquente les lieux boisés et les jardins. En bas, un rossignol* **Luscinia megarhynchos** *nourrissant son petit.*

▼ *A gauche,* **Sialis sialis,** *espèce exotique américaine. A droite, femelle de* **Sylvia borin,** *la fauvette des jardins, avec sa nichée.*

E.P.S.

J. Markham

A. Margiocco

Ostman - P. R. Johanson

▲ *A gauche, une bergeronnette printanière* (Motacilla flava) ; *à droite, une bergeronnette des ruisseaux* (Motacilla cinerea).

La famille des **Motacillidés.** Malgré des différences dans la coloration du plumage et dans la longueur des rectrices, bergeronnettes et pipits sont apparentés et les quarante-huit (ou cinquante-trois) espèces sont réunies dans cette même famille, représentée sur les cinq continents. Leur taille varie entre 14 et 20 cm.

Les bergeronnettes, dont plusieurs sont appelées lavandières, se tiennent au bord des eaux douces, saumâtres ou bien en terrain parfaitement sec (cas de la bergeronnette grise) ou, encore, dans les prairies. Un autre nom qui leur est donné, celui de hochequeue, leur convient bien car beaucoup ont l'habitude d'agiter les rectrices de haut en bas (ce mouvement est particulièrement fréquent chez la bergeronnette des ruisseaux). Elles ont un plumage où le gris, le noir, le blanc, le jaune et le vert se mêlent. Le dimorphisme sexuel se manifeste par des détails de couleur. La bergeronnette des forêts *(Dendronanthus indicus)*, qui vit en Sibérie orientale, niche dans les forêts de chênes et place son nid dans une enfourchure, alors que chez les autres espèces il est construit dans une dépression, par terre ou à faible hauteur.

Les pipits, au plumage brun, tacheté sur la face inférieure, rappellent plutôt les grives par ce dernier détail. La distinction de leurs différentes espèces se fait surtout selon la voix et la coloration. Comme les bergeronnettes, ils habitent les paysages ouverts (champs, prairies, alpages, côtes marines, friches). Tous nichent par terre.

Bergeronnettes et pipits ont en commun des ailes assez pointues et de forme particulière (les dernières rémiges secondaires sont plus longues que les autres et atteignent le niveau des primaires quand l'aile est pliée). Les uns et les autres se nourrissent d'Insectes et y ajoutent des graines en automne. Ils capturent les proies en marchant ou après un court envol. Le nid contient quatre à six œufs tachetés, de couleur extrêmement variable chez certaines espèces (pipit des arbres par exemple). En France, trois bergeronnettes et quatre pipits nichent régulièrement, et tous sont plus ou moins migrateurs.

La famille des **Laniidés.** Pies grièches, gonoleks, tchagras et gladiateurs ont tous un bec crochu qui les fait ressembler à de petits Rapaces ; toutefois, ce caractère ne suffit pas à lui seul à définir la famille, car des Oiseaux d'autres groupes le présentent également (Prionopidés, Cracticidés, etc.).

Les soixante-seize (ou soixante-quatorze) espèces sont réparties entre l'Eurasie, l'Afrique et l'Amérique du Nord.

De taille moyenne (14 à 27 cm), les Laniidés peuvent être divisés en deux sous-familles : les *Malaconotinés,* (tchagras, gonoleks, gladiateurs), africains, au plumage parfois très vivement coloré (en vert, jaune et rouge) et les *Laniinés* (pies grièches proprement dites), dont les teintes sont plus discrètes (gris, blanc, noir, roux). Tous ces Oiseaux se nourrissent d'Invertébrés, ainsi que de petits Vertébrés. Une étude du régime hivernal de la pie grièche grise *(Lanius excubitor)*, effectuée dans la région de Francfort-sur-Oder (République démocratique allemande), a montré que, sur 2 628 proies, il y avait 2 534 Insectes et 94 Vertébrés (les Insectes les plus fréquents étaient des Orthoptères, Dermaptères, Coléoptères : Carabidés, Staphylinidés et Scarabéidés ; Hyménoptères et Diptères). Les Vertébrés étaient des campagnols des champs, des musaraignes, et quelques petits Passereaux (mésange bleue, rouge-gorge). A la belle saison, des Amphibiens font également partie du régime des Laniidés. Certaines pies grièches ont l'habitude d'empaler leurs proies sur une épine ou un moignon de branche avant de les manger. Les buissons qu'elles fréquentent peuvent alors ressembler à des lardoires sur lesquelles sont fixés des Insectes et d'autres petites bêtes. Les Laniidés fréquentent les campagnes cultivées, entrecoupées de haies et de buissons ou semées d'arbres isolés ; les espèces africaines vivent dans les savanes et les lieux couverts de broussailles. La voix des Laniidés est peu harmonieuse et, le plus souvent, ils lancent des cris rauques ou grinçants. De toutes les pies grièches européennes, seule la pie grièche grise est sédentaire, les autres migrant en Afrique. En France, nichent les pies grièches grise, à poitrine rose, rousse, et écorcheur.

La famille des **Sturnidés.** La répartition naturelle des cent sept espèces d'étourneaux, spréos, étourneaux métalliques, martins, mainates et buphages, ou pique-bœufs, comprend seulement l'Ancien Monde, mais l'homme a introduit plusieurs espèces, notamment l'étourneau sansonnet *(Sturnus vulgaris)*, en Amérique du Nord et ailleurs. C'est dans le Sud-Est asiatique (Indonésie) que les espèces de cette famille sont le plus nombreuses. De taille moyenne (17,5 à 42 cm) les Sturnidés ont un plumage où le noir et le brun irisés dominent, souvent mêlés à d'autres couleurs (rose, blanc, jaune). Quelques-uns possèdent des caroncules (le mainate religieux par exemple). Le bec est généralement droit et robuste, pointu, mais court et épais chez les buphages. Les ailes, assez brèves, triangulaires, leur assurent un vol rapide et direct. On peut les qualifier d'omnivores, car si les Insectes et les fruits tiennent une grande place dans leur régime, les Vers et les graines y jouent aussi un rôle non négligeable. Certains se rassemblent en troupes immenses après la saison de nidification. Les Sturnidés fréquentent toutes sortes de biotopes, le plus souvent boisés, mais quelques-uns, comme l'étourneau sansonnet, se montrent partout, sauf en haute montagne. La nidification a lieu dans un trou, et le nid, assez grossier, contient trois à cinq œufs bleu pâle ou blancs, tachetés ou de couleur unie.

Parmi les espèces anthropophiles, on compte l'étourneau sansonnet et le martin triste *(Acridotheres tristis)* de l'Inde. Les buphages se distinguent par leur régime : ils prennent les Insectes parasites fixés dans la peau des gros Mammifères africains (rhinocéros, éléphants, buffles, etc.). Le martin roselin *(Pastor roseus)* se caractérise par l'habitude de suivre les nuages de criquets migrateurs. Quand ceux-ci s'abattent sur une région, les martins nichent en toute hâte et disparaissent dès que leur source de nourriture se tarit. Les colonies n'occupent donc pas toujours les mêmes emplacements. En dehors de ces déplacements irréguliers, le martin roselin est migrateur et les sujets d'Asie centrale (Kazakhstan par exemple) vont passer l'hiver en Inde, regagnant leurs lieux de nidification en avril. En France, l'étourneau sansonnet est commun partout. Aux Oiseaux indigènes se mêlent, en hiver, des Animaux d'Europe centrale. L'étourneau unicolore niche seulement en Corse.

La famille des **Méliphagidés.** Les cent cinquante-huit espèces de méliphages (14 à 42 cm) vivent en Australie, en Nouvelle-Guinée (soixante-sept espèces), en Nouvelle-Zélande, sur les archipels de l'océan Pacifique et en Afrique du Sud (deux espèces). Toutes, à de rares exceptions près, possèdent une langue dont l'extrémité a la forme d'une brosse adaptée au ramassage du pollen dans la corolle des fleurs. Leur bec est souvent mince, allongé et recourbé. Plusieurs espèces ont des caroncules, et la tête de *Philemon corniculatus* est entièrement nue, couverte de peau noire. Dans le plumage, les tons bruns, beiges, noirs, blancs et jaunes dominent. L'aspect extérieur est très variable, car les méliphages se sont diversifiés et occupent des biotopes très divers (forêts, déserts à *Spinifex,* broussailles, jardins).

Leur nourriture est extrêmement variée; certains se nourrissent de nectar, de pollen et de petits Insectes (pris en vol, par terre ou sur les arbres) ; d'autres mangent de petits Vertébrés (grenouilles, lézards, oisillons, œufs) ; d'autres, enfin, ont une alimentation partiellement frugivore. Très agressifs, les méliphages se battent souvent entre eux; pourtant, ils sont très sociables (mais, par exemple, ne tolèrent pas le contact de leurs congénères quand ils sont perchés). Vis-à-vis des autres Oiseaux, ils ne manifestent leur animosité qu'envers les spermestes (Estrildidés).

Sauf exceptions, ils font un nid en forme de coupe, placé dans un arbre ou un buisson. La plupart pondent un à quatre œufs, que la femelle couve seule durant 11 à 16 jours. Chez quelques espèces, les jeunes de la première couvée aident leurs parents à nourrir les oisillons de la deuxième. Les méliphages jouent un rôle non négligeable dans la pollinisation des fleurs de Myrtacées et Protéacées. Beaucoup sont migrateurs, d'autres seulement nomades. Immelmann, qui a étudié vingt-neuf espèces, a constaté chez plusieurs l'existence de chants en duo (les Oiseaux des deux sexes chantent) parfois étendus à plusieurs couples, qui chantent alors tous ensemble.

La famille des **Plocéidés**. La classification des petits Passereaux granivores a, plus que toute autre, subi de nombreux changements et ne peut être considérée comme définitive. Ainsi, si la famille des Plocéidés comprend, pour certains spécialistes, quatre sous-familles (Plocéinés, Passérinés, Viduinés, Estrildinés), les derniers sont de plus en plus considérés comme une famille à part. De même, les bruants (Embérizidés) ont tantôt le statut de sous-famille, tantôt celui d'une famille particulière.

La répartition naturelle des Plocéidés (environ cent cinquante espèces) est limitée à l'Ancien Monde. L'homme l'a bouleversée en introduisant le moineau domestique *(Passer domesticus)* en Amérique, en Australie, en Nouvelle-Zélande et en Afrique du Sud. Les plus grands des Plocéidés atteignent 40 cm (veuves mâles en plumage nuptial), et les plus petits ne dépassent pas 11 cm. En dehors de quelques espèces qui vivent dans les hautes montagnes (niverolle), les Plocéidés habitent les régions cultivées, les prairies, les savanes et les steppes subdésertiques. Tous ont un bec court, plus ou moins robuste, adapté à un régime en grande partie granivore. Les Insectes sont surtout consommés pendant la nidification et les jeunes en sont parfois presque exclusivement nourris. La plupart des espèces sont très sociables, au moins une partie de l'année.

La sous-famille des *Plocéinés* compte plus de quatre-vingt-dix espèces, au plumage tantôt modeste, tantôt somptueux. Ce sont les tisserins, les évêques, les euplectes et les quéléas. Presque tous (sauf cinq espèces d'Indo-Malaisie) vivent en Afrique. Ces Oiseaux doivent leur nom à leur habileté à construire leur nid, qu'ils tissent avec des fibres et autres matières végétales. Ce berceau globuleux possède une entrée sur le côté ou en bas, située à l'extrémité d'un tunnel (parfois inexistant). C'est souvent le mâle qui fait le plus gros du travail. Le nid est fixé à une branche d'arbre ou accroché dans de grandes herbes ou des roseaux. Celui de *Malimbus scutatus* (Afrique) présente la forme d'une cornue dont le tube atteint 60 cm de long. Une des espèces les plus abondantes, le quéléa, ou travailleur à bec rouge, cause des dégâts dans les cultures car elle niche en colonies groupant parfois plusieurs dizaines de millions d'individus.

La sous-famille des *Passérinés* comprend le républicain *(Philetairus socius)*, célèbre pour les dimensions de ses nids collectifs. Cet Oiseau vit en Afrique du Sud (dans le désert de Kalahari et dans les bassins des fleuves Orange et Vaal). On y trouve aussi les moineaux *(Passer)* et les soulcies *(Petronia)*, ceux-ci préférant les lieux rocheux et secs. Il y a quinze espèces de moineaux, répandues en Europe, en Asie et en Afrique. Ces Oiseaux évitent les régions tropicales humides et, en dehors de la coloration (parfois très claire, comme chez *Passer simplex* du Sahara), ressemblent fortement, par l'allure, au moineau domestique. En France, les moineaux domestique, friquet *(Passer montanus)* et soulcie ainsi que la niverolle *(Montifringilla nivalis)* sont les seules espèces nicheuses.

A la différence du moineau domestique, le moineau friquet est une espèce campagnarde que l'on voit seulement dans les villages ou près des fermes isolées. Long de 14 cm, il pèse en moyenne 23 g (le moineau domestique pèse 10 g de plus en moyenne). Le friquet diffère aussi de son proche parent par sa coloration : chez les deux sexes, le dessus de la tête et la nuque sont marron, les joues blanches avec une tache noire, les côtés du cou blancs, le dos marron, le menton et la gorge noirs. Le friquet est répandu de l'Angleterre au Japon. A la saison de reproduction, il se nourrit d'Insectes (chenilles et chrysalides, carpocapses, cheimatobies, criocères, hannetons, coccinelles, pucerons) et, le reste de l'année, de petites graines : mouron, ortie, armoise, pavot, sétaire et grains de céréales restés en surface. Les jeunes ne reçoivent que des Insectes durant leurs cinq premiers jours de vie. Le nid, construit par les deux conjoints, avec des herbes sèches et des racines, est tapissé de plumes et de quelques feuilles ou fleurs. Il se trouve dans un trou d'arbre, de mur, un nichoir, et a la forme d'une boule plus ou moins bien formée, percée d'une ouverture située sur le côté de la partie supérieure.

La sous-famille des *Viduinés*, exclusivement africaine, groupe onze espèces, les veuves et les combassous, répandus au sud du Sahara et remarquables par leurs mœurs parasites. Chez toutes, les mâles acquièrent, au début de la saison de nidification, un plumage nuptial, de couleur foncée, qui diffère beaucoup de celui des femelles; en outre, les quatre rectrices centrales sont démesurément allongées. Chaque espèce parasite une espèce appartenant à la famille des Estrildidés, et les adaptations entre parasite et espèce-hôte atteignent un grand degré de raffinement, comme l'ont montré les travaux de l'Allemand J. Nicolai.

J. Markham

J. Markham

▲ *En haut,* **Sturnus vulgaris,** *l'étourneau sansonnet, que l'homme a introduit en Amérique du Nord. En bas,* **Passer domesticus,** *le moineau domestique, est une des quatre espèces qui nichent en France; il est sédentaire.*

Ostman - P. R. Johanson

◀ **Anthus trivialis,** *le pipit des arbres, habite les paysages ouverts et se nourrit principalement d'Insectes.*

R. Longo

A. Visage - Jacana

▲▶ *Ci-dessus, femelle de chardonneret* **(Carduelis carduelis)** *et sa nichée. A droite,* **Emblema guttata** *appartient à la famille des Estrildidés qui groupe un grand nombre d'Oiseaux de cage au plumage vivement coloré.*

La famille des **Estrildidés** est sans nul doute l'une des mieux connues, car un bon nombre de ses cent vingt espèces font partie des Oiseaux de cage. Ces oiselets (7 à 15 cm) ont un plumage souvent très coloré, qui explique la faveur dont ils jouissent. A la différence des Plocéidés, ce plumage présente souvent des dessins en forme de fines lignes parallèles, plus ou moins ondulées. On les trouve dans les lieux secs (steppes, savanes) ou au voisinage des bois, des marais, des rizières en Afrique (au sud du Sahara), en Asie méridionale, en Mélanésie, en Australie et sur une partie des archipels d'Océanie. La plupart sont très sociables. Leur nid, globuleux avec une entrée latérale, est cependant beaucoup plus simple que celui des Plocéidés. Il contient de quatre à six œufs, dont l'incubation est parfois très longue (13 à 16 et même 21 jours). Le gosier des petits a un aspect très particulier, car outre des taches de couleur, il possède sur les bords des papilles brillantes.

Les espèces les plus connues sont les astrilds, le bec-de-corail, les bengalis, le cordon-bleu, qui vivent en Afrique, les diamants (genres *Poephila* et *Taeniopygia*) d'Australie et les capucins, paddas, amadines du sud de l'Asie.

Le diamant mandarin *(Taeniopygia guttata)*, qui mesure 10 cm de long, Oiseau de cage très répandu en Europe, peut être pris comme exemple de la famille. Il habite la plus grande partie de l'Australie et quelques petites îles de la Sonde (Flores, Sumba, Timor, Alor, Letti, Sermatta et Moa), où il fréquente surtout les steppes parsemées de buissons. Presque entièrement granivore, il supporte parfaitement la sécheresse prolongée mais boit dès qu'il en a la possibilité. Sociable, il vit en troupes en dehors de la saison de reproduction, et il semble bien que les couples restent unis toute l'année. Le nid, généralement placé dans un arbuste, entre 2 et 3 m de hauteur, est bâti par les deux conjoints, avec des tiges de graminées; il est rembourré de duvet végétal, de plumes, d'herbes fines, de poils de lapin. Sa construction dure 13 jours environ et continue après la ponte.

La famille des **Embérizidés.** Les bruants (11 à 19 cm), au nombre de cent quatre-vingt-dix-sept espèces, aiment les biotopes assez dégagés (prairies, champs parsemés de haies, friches, vignobles, steppes, marais, côtes sablonneuses) dans les régions de climat tempéré et froid. Il n'y a qu'une seule espèce en Asie tropicale, sept en Afrique, et toutes les autres vivent en Europe, dans le nord de l'Asie et en Amérique. C'est d'ailleurs sur ce dernier continent qu'ils sont le plus nombreux (cent cinquante-sept espèces des genres *Junco, Zonotrichia, Melospiza* et *Pipilo,* souvent appelés « moineaux » mais à tort, parce que le terme américain *sparrow* est traduit littéralement). Ces Oiseaux ont le bec légèrement recourbé, et les deux mandibules ne sont pas étroitement appliquées l'une contre l'autre. Dans le plumage, les tons de gris, brun, roux, jaune, noir et blanc dominent. Les jeunes ont le dessous du corps rayé longitudinalement. Chez les bruants les plus typiques (genre *Emberiza*), les œufs sont marqués de lignes contournées qui les différencient de ceux des Fringillidés. Le nid est placé par terre ou à faible hauteur dans un buisson.

En France, six espèces nichent régulièrement, mais quatre seulement sont communes (bruants jaune, proyer, zizi et des roseaux), les deux autres (bruants ortolan et fou) étant beaucoup plus localisées, sinon rares.

La famille des **Fringillidés.** Les Fringillidés vivent dans le monde entier, à l'exception des régions arctiques et du continent antarctique. Les caractères communs sont peu nombreux : l'aile possède dix rémiges primaires

▼ *A gauche, le bruant jaune* **(Emberiza citrinella)** *et ses petits. A droite, femelle de pinson des arbres* **(Fringilla coelebs)** *et sa nichée; le nid, en forme de coupe profonde, est bâti sur les arbres ou dans les buissons.*

J. Markham

R. Longo

(sauf chez les Carduélinés et les Fringillinés qui en ont seulement neuf), la queue est formée par douze rectrices. La forme du bec est extrêmement variable : il est très court et renflé chez les bouvreuils, énorme chez les gros-becs; ses mandibules se chevauchent chez les becs-croisés; celui des chardonnerets, linottes et tarins est assez fin. Les Fringillidés sont répartis entre plusieurs groupes, sur la composition desquels les systématiciens ne sont pas du tout d'accord. Au total, on compte environ deux cent quarante-sept espèces, dont les dimensions vont de 10 à 25 cm.

La sous-famille des *Fringillinés* comprend seulement trois espèces, selon I. Newton, qui a mené, en 1972, une étude comparative des Fringillidés européens : le pinson des arbres *(Fringilla coelebs)*, le pinson du Nord (ou des Ardennes) et le pinson bleu *(Fringilla teydea)* des îles Canaries. Ces Oiseaux diffèrent des Carduélinés par leur régime mixte, moins spécialisé, ainsi que par des différences de comportement.

La sous-famille des *Carduélinés* compte cent vingt-deux (ou cent vingt-trois) espèces. Ces Oiseaux sont presque exclusivement granivores et l'intérieur de leur bec présente des sillons qui servent d'étau pour écraser les graines. Ils nourrissent leurs petits en régurgitant dans leur bec le contenu de l'œsophage (graines et Insectes ou graines seulement). Les trois espèces de becs-croisés arrachent les écailles des cônes de résineux : *Loxia pytyopsittacus* qui se nourrit des graines de pin sylvestre a le bec le plus puissant, tandis que *Loxia leucoptera*, le bec-croisé bifascié, qui consomme des graines de mélèze, présente un bec beaucoup plus fin, le bec-croisé des sapins *(Loxia curvirostra)* occupant, de ce point de vue, une position intermédiaire. Certains Carduélinés européens maintiennent leurs aliments entre leurs pattes, par exemple, le chardonneret, le tarin, les becs-croisés et le sizerin flammé.

Alors que les pinsons nichent par couples isolés, qui défendent un territoire sur lequel ils trouvent leur subsistance, les Carduélinés ont tendance à former des associations de couples nicheurs (qu'on peut malgré tout difficilement qualifier de « colonies ») dont les membres vont chercher leur nourriture à distance. Comme le dit Newton, la différence tient probablement au fait que les chardonnerets, verdiers, becs-croisés, etc., mangent surtout des graines, dont la répartition est peut-être moins régulière que celle des Insectes. Le nid présente une forme variable selon les espèces : celui du verdier et de la linotte, assez volumineux, se compose d'herbes, de mousse, et d'un rembourrage de poils et de racines. Les gros-becs et le bouvreuil préparent une plate-forme de brindilles sur laquelle sont entrelacées des racines et quelques herbes. Enfin, le chardonneret, le serin cini font un nid solide, dont les éléments (mousses, lichens, etc.) sont enchevêtrés et qui est garni de duvets végétaux. La saison de reproduction des pinsons est relativement plus courte que celle des Carduélinés (au moins en Europe), les Insectes servant de nourriture aux jeunes étant disponibles pendant une période plus brève que les graines : le pinson des arbres niche surtout en mai, les Carduélinés granivores entre les mois d'avril et d'août.

Outre les espèces mentionnées précédemment, la sous-famille des Carduélinés compte aussi les roselins, papes et cardinaux. Tous ces Oiseaux vivent dans les paysages boisés (vergers, jardins, parcs, forêts, haies d'arbres). Les espèces des régions subarctiques sont plus ou moins migratrices, car certaines populations hivernent sur place (par exemple, les becs-croisés et certains sizerins).

La sous-famille des *Géospizinés* mérite une place à part, ne serait-ce qu'en raison de son isolement : les treize (ou quatorze) espèces vivent uniquement sur les îles Galapagos, au large des côtes de l'Ecuador. Ce sont les pinsons de Darwin, ainsi nommés parce que c'est le grand naturaliste anglais qui les découvrit et qui, de leur observation, tira son idée de l'origine des espèces. Ces Oiseaux constituent un excellent exemple de ce que l'on appelle « radiation adaptative » : les différentes espèces se sont probablement différenciées au fur et à mesure que de petites populations de la souche originelle se spécialisaient dans l'exploitation de tel ou tel milieu. En effet, les pinsons de Darwin se distinguent par la forme de leur bec, tantôt presque aussi robuste que celui du gros-bec, tantôt nettement plus fin, voire crochu.

R. Longo

E.P.S.

▲ ***En haut, mâle de bouvreuil pivoine* (Pyrrhula pyrrhula), *et sa nichée; l'espèce se nourrit de graines, d'Insectes et de bourgeons. En bas, le cardinal rouge de Virginie* (Richmondena cardinalis).**

BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages d'identification. PETERSON R. T., MOUNTFORT G., HOLLOM P. A. D., GÉROUDET P., *Guide des Oiseaux d'Europe*, 4e éd., Delachaux et Niestlé, Neuchâtel-Paris, 1967. - HEINZEL H., FITTER R., PARSLOW J., *Oiseaux d'Europe, d'Afrique du Nord et du Moyen-Orient*, Delachaux et Niestlé, Neuchâtel-Paris, 1972. - KONIG C., *Oiseaux d'Europe*, 3 volumes A., Hatier, Paris, 1968-1971.

Ouvrages décrivant les œufs et les nids. HOEHER S., *Nids et œufs des Oiseaux d'Europe centrale et occidentale*, Delachaux et Niestlé, Neuchâtel-Paris, 1973. - WINWOOD READ, HOSKING E., *les Oiseaux et leurs nids*, F. Nathan, Paris, 1968.

Ouvrages détaillés sur la biologie des espèces d'Europe. GÉROUDET P., *la Vie des Oiseaux*, 6 volumes, Delachaux et Niestlé, Neuchâtel-Paris, 1948-1965. - BAUER K., GLUTZ von BLOTZHEIM U. N., *Handbuch der Vögel Mitteleuropas*, 5 volumes parus, Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt-am-Main, 1966-1973.

Ouvrage sur la protection des Oiseaux. HENZE O., ZIMMERMANN G., *les Oiseaux des jardins et des bois*, 2e éd., Delachaux et Niestlé, Neuchâtel-Paris, 1973.

Disques de chants d'Oiseaux. CHAPPUIS C. (Dr), *Migrateurs et gibier d'eau en hiver, Vie de la forêt en hiver*, nombreux autres titres, 2 rue Walter, Rouen. - ROCHÉ J.-C., *Guide sonore des Oiseaux d'Europe*, autres collections également, Institut Écho, 04-Aubenas-les-Alpes.

N. Myers

▲ *Considérés comme les Vertébrés les plus évolués, les Mammifères sont les seuls Animaux possédant des glandes mammaires et nourrissant leurs jeunes avec du lait; ici un zèbre* (Equus zebra) *et son petit.*

MAMMIFÈRES

Les plus récemment apparus à la surface de la terre et les plus évolués, sous l'angle psychique notamment, les Mammifères se sont adaptés aux milieux et aux modes de vie les plus variés. Il en est résulté une telle diversité que, du point de vue morphologique, cette classe est incontestablement la plus hétérogène parmi les Vertébrés.

Organisation générale

S'il est aisé, même dans les cas les plus aberrants, de reconnaître un Poisson, un Reptile ou un Oiseau, rien ne permet, à première vue, d'apparenter un pangolin à une chauve-souris ou à un dauphin. Sur quels critères anatomiques et morphologiques les systématiciens se sont-ils donc fondés pour rassembler dans une même classe des Animaux aussi différents d'apparence?

Le principal, celui qui leur a valu leur nom (du latin *mamma,* le sein, et *fero,* je porte), est la présence de glandes spécialisées, les *mamelles,* qui, sous l'influence de mécanismes hormonaux complexes liés à la reproduction, élaborent et sécrètent le lait, liquide nutritif riche en graisses, en protéines, en calcium, en sucres, en vitamines, etc. Seuls de tous les Animaux, les Mammifères (et tous les Mammifères) possèdent des glandes mammaires et nourrissent leurs jeunes avec du lait; ce n'est qu'une similitude d'apparence qui a fait appeler le liquide régurgité à leurs poussins par certains Oiseaux, notamment de la famille des pigeons, du « lait ».

En dehors de ce caractère essentiel, les Mammifères en présentent un certain nombre d'autres, moins évidents, mais qui les distinguent non moins fondamentalement des autres groupes de Vertébrés et que nous allons passer sommairement en revue.

Peau et annexes. La peau des Mammifères est formée de deux couches : une externe, l'épiderme, et une interne, le derme.

L'*épiderme* est lui-même composé de deux couches, une superficielle, ou couche cornée, qui se desquame (c'est-à-dire s'écaille continuellement et de façon imperceptible par le renouvellement de ses cellules), et une profonde, ou couche de Malpighi, qui est la partie proprement vivante de l'épiderme et qui est nourrie par des papilles dites vasculaires venant du derme.

L'épiderme est riche en terminaisons nerveuses qui forment des corpuscules sensoriels, ou *corpuscules tactiles*. Il possède, également, dans la couche de Malpighi, des *glandes sudoripares* qui éliminent la sueur (dont la composition est proche de celle de l'urine) et des *glandes sébacées* sécrétant une substance grasse, le sébum, qui lubrifie la peau et les poils. Chez de nombreux Mammifères, les glandes sébacées de certaines régions du corps forment des *glandes à odeurs,* qui produisent des substances (musc, civette, etc.) jouant un grand rôle dans la reconnaissance des individus d'une même espèce et dans leur comportement social (marquage du territoire).

Les *glandes mammaires* sont des glandes sébacées spécialisées et hypertrophiées, groupées en grand nombre pour former une mamelle avec un seul orifice à l'extrémité du mamelon. Les mamelles sont toujours paires, et leur nombre est généralement proportionné à celui des jeunes auxquels la femelle donne normalement le jour. Si les Primates ne possèdent qu'une paire de mamelles, nombre de Carnivores et de Rongeurs peuvent en avoir quatre ou cinq, tandis que certains Insectivores en présentent jusqu'à dix paires. La disposition des mamelles varie également suivant les groupes de Mammifères. Elles peuvent être pectorales (Primates et éléphants), inguinales (Ongulés) ou réparties tout au long de la face ventrale (Carnivores et Rongeurs).

Par sa couche cornée, l'épiderme est également producteur de *phanères* dont la plupart sont exclusifs aux Mammifères : ce sont les poils de toute sorte, les ongles, sabots et griffes, que l'on retrouve également chez les Oiseaux et les Reptiles, les fanons des baleines, les écailles des pangolins, les étuis cornés des Bovidés, les cornes nasales des rhinocéros. Les cornes ou bois des Cervidés ont une tout autre origine et ne sont, en quelque sorte, qu'un prolongement de l'os frontal. La plupart de ces phanères ont une croissance continue qui compense leur chute ou leur usure. Chaque poil comporte à sa base une racine, ou bulbe, qui coiffe une papille dermique, laquelle nourrit le poil et assure sa croissance à travers l'épiderme.

Le *derme* est la partie proprement nourricière de la peau. Il peut jouer un rôle de réserve alimentaire grâce à des cellules capables d'emmagasiner les graisses et, en période d'abondance, de confluer en un pannicule graisseux hypertrophié, le lard. Chez les Dasypodidés, ou tatous, le derme donne naissance à des plaques osseuses, absolument indépendantes du squelette interne, qui se soudent plus ou moins entre elles pour former une véritable cuirasse. Un épiderme corné recouvre le tout et, en certains endroits du corps, des zones de derme souple sillonnent transversalement la carapace, permettant à

l'Animal de s'enrouler comme un hérisson en cas de danger.

Enfin, tous les Mammifères ont une *musculature peaussière* développée, particulièrement au niveau de la face (muscles de l'expression).

Squelette axial. Comme chez les Oiseaux, le squelette axial des Mammifères comprend le crâne, une colonne vertébrale, des côtes et un sternum.

Le *crâne* est composé d'un nombre d'os moins élevé que chez les autres Vertébrés. C'est ainsi que le sphénoïde de l'homme résulte de la soudure de quatorze centres d'ossification qui, chez les Poissons, forment autant d'os indépendants. La boîte crânienne est constituée d'une paroi osseuse complète et robuste, qui protège bien le cerveau. Chez certaines espèces, notamment l'homme, les os crâniens sont incomplètement ossifiés à la naissance, mécanisme adaptatif qui permet au crâne de se comprimer sans risque au moment de la mise bas. Par rapport aux autres groupes de Vertébrés, le crâne des Mammifères est également caractérisé par l'apparition d'os nouveaux (turbinaux, présphénoïde, mésethmoïde), par un agrandissement de la cavité cérébrale, par la présence de deux *condyles occipitaux,* d'une seule *fosse temporale* et d'un *palais* osseux secondaire prolongé par un palais membraneux. La *mandibule* n'est formée que d'un seul os, le dentaire, avec une articulation squamoso-dentaire, alors que chez les Reptiles elle est composée de plusieurs os avec une articulation carré-articulaire. L'*oreille interne* contient trois os, le marteau, l'enclume et l'étrier, qui dérivent de l'articulaire, du carré et de la columelle des Reptiles. Enfin, on note chez les Mammifères la présence de *bulles tympaniques* osseuses, inexistantes chez les autres Vertébrés et qui sont l'homologue de l'angulaire des Reptiles.

La *colonne vertébrale* comprend une région cervicale, une région dorsale ou thoracique, antérieure au diaphragme, une région lombaire et une région caudale plus ou moins développée. Le nombre de *vertèbres cervicales* est de 7 chez tous les Mammifères, quelle que soit la longueur de leur cou. Chez l'éléphant ces vertèbres sont réduites à un disque plat, tandis que chez la girafe chacune d'elles atteint 40 cm de longueur. Les *vertèbres dorsales* sont en nombre variable suivant les espèces. Comme les précédentes, elles sont séparées les unes des autres par des disques intervertébraux fibrocartilagineux. Les *vertèbres sacrées,* au nombre de 3, sont soudées et supportent la *ceinture pelvienne*. Enfin, le nombre des *vertèbres caudales,* lorsqu'elles existent autrement qu'à l'état de rudiments, varie entre 16 et 20.

Les *côtes* sont fixées par une articulation mobile aux vertèbres thoraciques et forment, avec le *sternum,* la *cage thoracique;* celle-ci ne protège pas seulement les organes vitaux de cette région du corps (cœur, poumons, etc.), mais joue également un grand rôle dans la respiration. Les Mammifères ont un sternum segmenté en *sternèbres,* à l'exception des Monotrèmes, qui, comme les Oiseaux, présentent un « bréchet » d'une seule pièce.

Squelette des membres. Les membres sont en *position parasagittale,* c'est-à-dire parallèles au plan de symétrie du corps, sauf chez certains Monotrèmes, dont les membres sont perpendiculaires à ce plan, comme chez les Reptiles.

Les membres sont reliés au squelette axial par l'intermédiaire d'une *ceinture pectorale,* antérieure, formée de deux scapula, ou omoplates, de deux clavicules, de deux processus coracoïdes, ainsi que d'une *ceinture pelvienne* postérieure dont chaque moitié résulte de la fusion de l'ilion, de l'ischion et du pubis. Le membre antérieur des Mammifères comprend l'humérus, le radius, l'ulna, sept os carpiens, cinq métacarpiens et un nombre variable de phalanges. Le postérieur est composé du fémur, du tibia, du péroné, des sept os du tarse, de quatre ou cinq métatarses et des phalanges.

Les os du squelette des Mammifères présentent des *épiphyses* (« tête » de l'os) et une *diaphyse* (partie longue de l'os). Les épiphyses se soudent tardivement à la diaphyse et en sont séparées, pendant la période de croissance, par un cartilage de conjugaison. La croissance des Mammifères est limitée et s'effectue précisément grâce à ces cartilages de conjugaison, alors que chez les Reptiles elle se poursuit pendant toute la durée de la vie et résulte de l'allongement des extrémités des os.

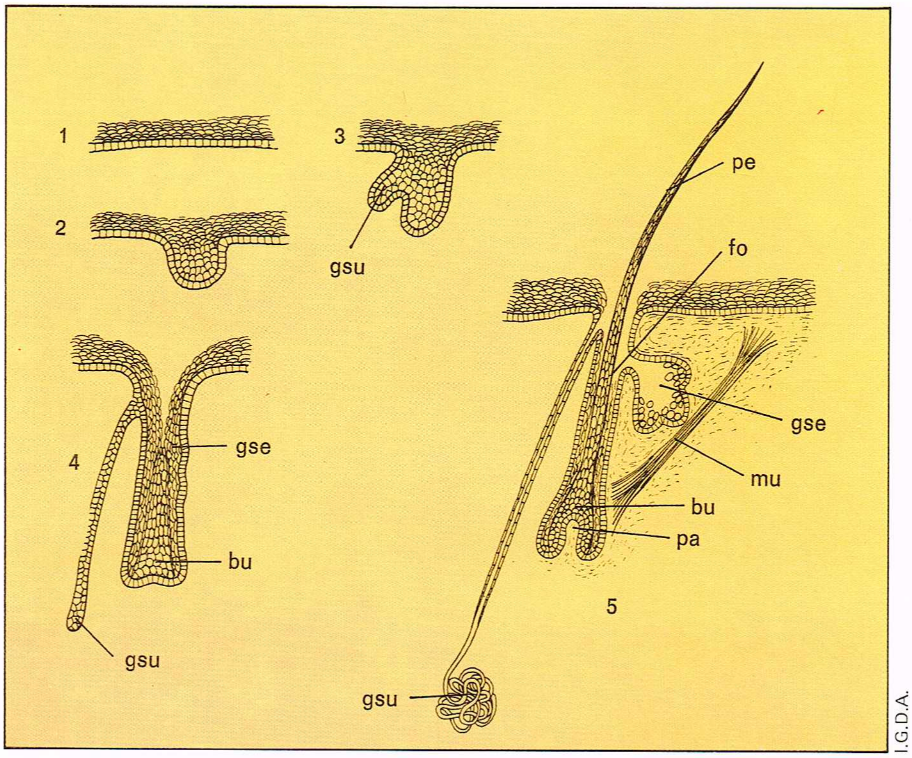

▲ ***Représentation schématique du développement d'une glande sudoripare, d'une glande sébacée et d'un poil de la peau d'un Mammifère, en coupe transversale (les chiffres 1 à 5 indiquent la progression) : gsu, glande sudoripare ; gse, glande sébacée ; bu, bulbe pileux ; pa, papille ; pe, poil ; fo, follicule pileux ; mu, muscle horripilateur.***

▼ ***Schéma montrant la position générale des os crâniens des Mammifères : turb, turbinaux ; na, nasal ; la, lacrymal ; os, orbito-sphénoïde ; fr, frontal ; pa, pariétal ; as, alisphénoïde ; so, supra-occipital ; ex. o, exoccipital ; me, mésethmoïde ; vo, vomer ; ps, présphénoïde ; pt, ptérygoïde ; p. mx, prémaxillaire ; mx, maxillaire ; md, mandibule ; ju, jugal ; pl, palatin ; bs, basi-sphénoïde ; sq, squamosal ; ty, tympanique ; mt, marteau ; en, enclume ; et, étrier ; pe, périotique ; bo, basi-occipital.***

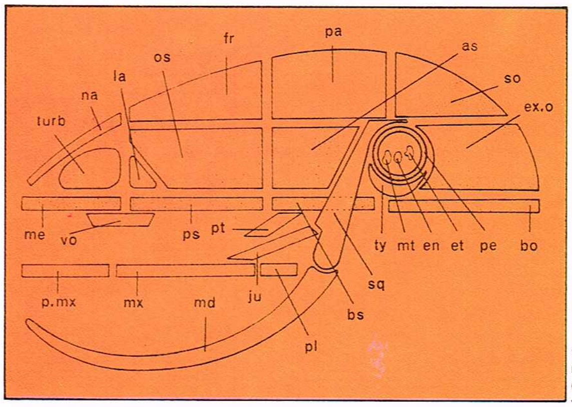

▼ ***Squelette d'un Mammifère terrestre (mouton) : ca, crâne ; in, incisive ; mx, maxillaire ; na, nasal ; po, protubérance occipitale ; te, os temporal ; fo, fosse orbitaire ; zy, os zygomatique ; md, mandibule ; cv, colonne vertébrale ; vc, vertèbres cervicales ; vd, vertèbres dorsales ; vl, vertèbres caudales ; sc, omoplate ; hu, humérus ; ra, radius ; cp, carpe ; mc, métacarpe ; sa, sabots ; cu, cubitus ; st, sternum ; co, côtes ; ba, bassin ; fe, fémur ; ti, tibia ; ta, tarse ; cc, calcanéum ; mt, métatarse.***

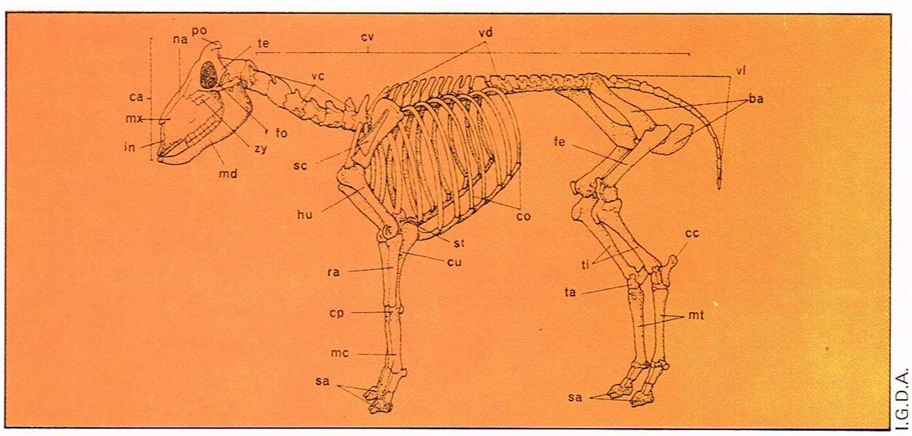

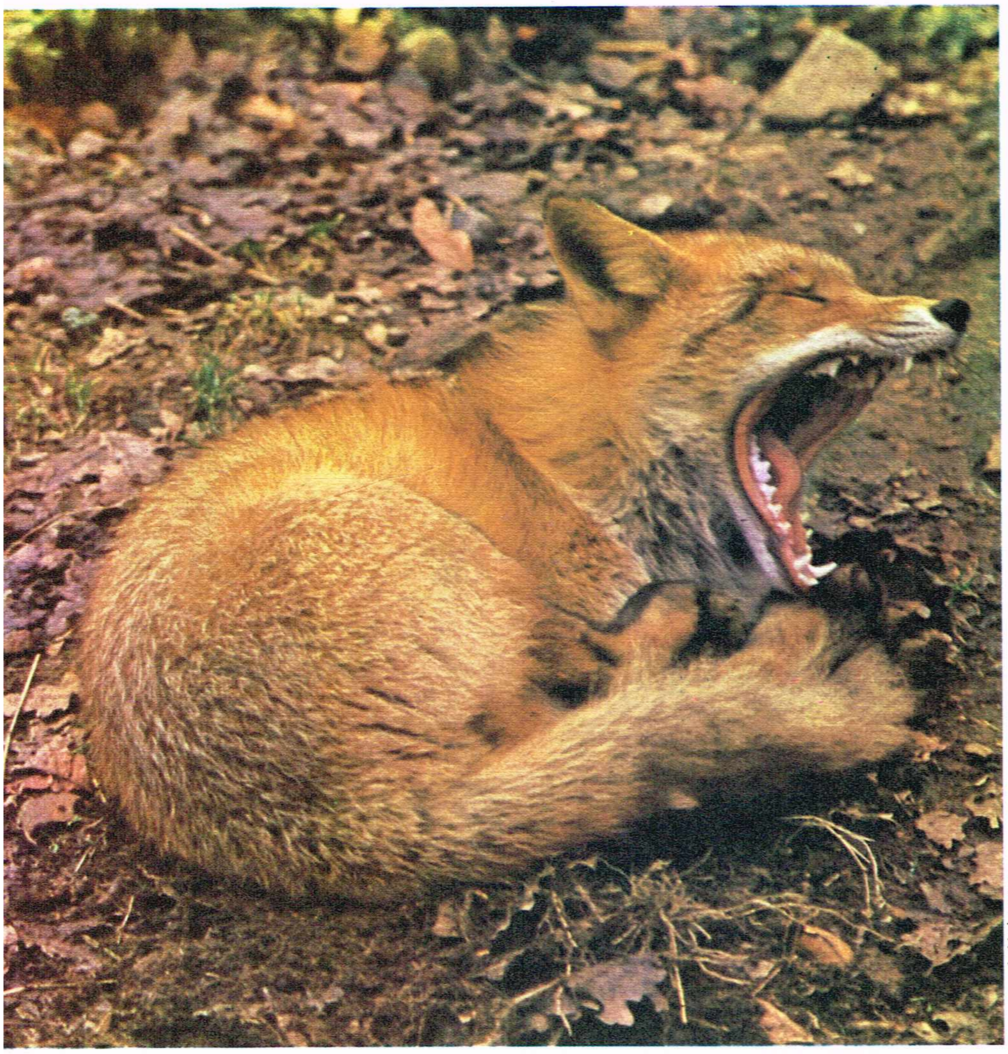

Ostman - I. Holmasen

▲ ***La denture des Mammifères (type hétérodonte) les oppose aux autres Vertébrés et est en rapport avec le type d'alimentation et la mastication des aliments; ici un renard commun*** **(Vulpes vulpes).**

Appareil digestif. Il comprend la bouche et le tube digestif proprement dit, qui se scinde en trois parties, l'œsophage, l'estomac et l'intestin.

La *bouche* des Mammifères se distingue de celle des autres Vertébrés par la présence de lèvres mobiles liées au développement de la musculature faciale. Un certain nombre d'autres particularités anatomiques permettent aux Mammifères de *mâcher* leurs aliments, à la différence des autres Animaux qui les avalent directement, en entier ou par morceaux. La première de ces particularités est l'articulation directe de la mandibule sur le crâne et le perfectionnement de la *musculature masticatrice.* La deuxième est l'existence de la *voûte du palais,* qui sépare la bouche des fosses nasales, c'est-à-dire des voies respiratoires. Cette disposition, très importante, permet aux Mammifères de mâcher (ce qui, chez les Ruminants, peut durer des heures) et de respirer en même temps. De même, la *luette* obstrue les *fosses nasales* au moment de la déglutition. Enfin, la *langue* musclée et mobile (alors qu'elle est cornée et rigide chez les Oiseaux ou, au contraire, filiforme chez de nombreux Reptiles) contribue grandement à l'efficacité de la mastication en malaxant les aliments et en les amenant au niveau des dents broyeuses, ou molaires.

L'*œsophage* est un simple tube, qui va de la bouche à l'estomac et ne prend aucune part à la digestion. Il est tapissé d'un épithélium plus ou moins corné, recouvrant un tissu musculaire et muqueux.

L'*estomac* est une poche unique ou compartimentée. Même lorsqu'il est de structure simple, comme chez l'homme ou le porc, sa paroi n'est pas homogène et présente, suivant les régions, des différences de structure glandulaire jouant chacune un rôle dans la digestion.

L'estomac des végétariens stricts est habituellement plus complexe que celui des carnivores ou des omnivores, la cellulose, constituant essentiel des plantes, ne pouvant être assimilée par l'organisme sans subir au préalable d'importantes transformations. L'adaptation la plus parfaite à ce régime particulier est présentée par l'estomac des Ruminants, formé de quatre compartiments : la *panse,* le *bonnet,* le *feuillet* et la *caillette.* L'Animal commence par emmagasiner dans sa panse une grande quantité de fourrage sans le mastiquer au préalable; puis, lorsqu'il est au repos, il régurgite par petites quantités l'aliment imbibé de salive et des sucs de la panse et le mastique soigneusement grâce à ses molaires à grande surface. Ce n'est qu'après que le bol alimentaire est définitivement avalé et que, sans transiter par la panse, il passe dans les compartiments suivants, où il subit la digestion proprement dite. Pendant ce temps, une autre bouchée remonte, grâce aux mouvements de l'œsophage, jusqu'à la bouche pour être mâchée à son tour. L'ensemble de ce processus s'appelle la *rumination.*

Bien d'autres Mammifères, tels que les singes de la famille des Colobidés ou les paresseux d'Amérique du Sud, tous strictement végétariens, présentent des adaptations de l'estomac qui ne sont pas sans rappeler celles des Ruminants (sans qu'il y ait évidemment rumination). Un cas curieux est celui des Animaux myrmécophages, fourmiliers et pangolins, qui ne se nourrissent que de fourmis et de termites, qu'ils avalent en entier grâce à leur longue langue gluante. Leur estomac est tapissé d'une épaisse couche cornée parfois armée de tubercules, qui, d'une part, protège la muqueuse gastrique d'une corrosion par l'acide formique que contiennent ces Insectes et, d'autre part, permet à ces Mammifères de broyer ces derniers grâce à une puissante couche musculaire périphérique.

L'*intestin,* séparé de l'estomac par le *pylore,* se divise en intestin grêle, cæcum et gros intestin, lui-même subdivisé en côlon et rectum.

C'est au niveau de l'*intestin grêle* que s'effectue l'absorption des aliments; ses cellules sont, en effet, à la fois sécrétrices d'enzymes digestives et absorbantes des produits de la digestion.

Le *cæcum* est une sorte de diverticule plus ou moins volumineux, se terminant chez certains Mammifères (Primates, Rongeurs) par un *appendice* vermiculaire dont le rôle est mal défini, si tant est qu'il en ait un. Le cæcum, en revanche, peut remplir une fonction non négligeable dans la digestion. Ainsi, chez les Lagomorphes (lièvres et lapins), les Rongeurs et les Équidés, il est volumineux et retient pendant un certain temps la bouillie alimentaire; sous l'influence d'une riche flore bactérienne, la cellulose y subit une fermentation partielle qui donne naissance à des acides gras de haute valeur alimentaire et à d'autres substances nutritives (vitamines). Ce processus compense donc, chez ces espèces végétariennes, l'absence du mécanisme plus élaboré de la rumination.

Le *gros intestin* a un rôle infiniment moins important. Sa longueur varie, comme celle de l'intestin grêle, suivant le régime alimentaire : court chez les carnivores, il peut être très développé et contourné chez les herbivores. Sa partie terminale, ou *rectum,* débouche chez tous les Mammifères (sauf les Monotrèmes) directement à l'extérieur par un orifice, l'*anus,* fermé par un muscle circulaire, ou *sphincter.* Chez les Monotrèmes, comme chez les Reptiles et les Oiseaux, le rectum débouche dans une cavité appelée *cloaque,* où arrivent également les conduits génito-urinaires et qui s'ouvre à l'extérieur par un orifice cloacal.

Denture. Elle se distingue de celle des autres Vertébrés par un certain nombre de particularités : la fixité du nombre total des dents pour un genre donné, la *diphyodontie,* c'est-à-dire l'existence au maximum d'une dentition de lait et d'une définitive, l'*hétérodontie,* c'est-à-dire la présence de différents types de dents, enfin, la *thécodontie,* ou implantation des dents dans des alvéoles des os qui les portent (cette particularité s'observe aussi chez les Reptiles Crocodiliens).

La *fixité* permet de définir pour chaque genre ou espèce une formule dentaire caractéristique, chose impossible chez les Reptiles ou les Poissons, qui ont un nombre de dents variable. La formule dentaire fondamentale des Mammifères supérieurs (Placentaires) est, par demi-mâchoire,

$$\text{Incisives } \frac{3}{3} \quad \text{Canines } \frac{1}{1} \quad \text{Prémolaires } \frac{4}{4} \quad \text{Molaires } \frac{3}{3}$$

soit quarante-quatre dents au total. Autour de ce chiffre fondamental, on observe, suivant les groupes et les spécialisations alimentaires, une tendance à l'augmentation ou à la réduction. Le nombre total des dents peut varier de zéro (fourmiliers, pangolins) à cent (tatou du Matto-Grosso) chez les Mammifères terrestres et atteindre deux cents chez les dauphins.

La *diphyodontie* est l'existence de deux dentitions successives au maximum, une *lactéale* (dents de lait) et une *définitive,* alors qu'une même dent peut être remplacée jusqu'à vingt-cinq fois chez les Reptiles et cent fois chez les Poissons (polyphyodontie). Beaucoup de Mammifères ne présentent, d'ailleurs, qu'une seule dentition (monophyodontie), soit que la lactéale avorte (phoques, otaries et paresseux), soit, au contraire, que la deuxième dentition, celle qui est normalement définitive, demeure à l'état de bourgeon dentaire (dauphins, marsouins, cachalots et tatous). La troisième molaire de l'homme (dent de sagesse) est dans ce cas et reste souvent sous forme d'ébauche dans le maxillaire. Chez l'éléphant, en plus des défenses, qui sont des incisives, il n'existe qu'une dent par demi-mâchoire, du type molaire, soit quatre en tout. Au fur et à mesure qu'elles s'usent, elles sont remplacées par une autre molaire, qui se forme à partir d'un bourgeon dentaire demeuré latent dans la mâchoire; ce processus a lieu six fois au cours de la vie de l'Animal qui, lorsque ses dernières molaires sont usées, meurt lentement de faim, faute de pouvoir mastiquer ses aliments.

Enfin les Mammifères sont *hétérodontes,* c'est-à-dire pourvus de dents diversifiées et spécialisées, alors que chez les Poissons et les Reptiles, à quelques exceptions près, elles sont plus ou moins homogènes (haplodontie). La différenciation des dents est liée à leur position sur les os du crâne. Les *incisives* et les *canines* supérieures sont implantées dans l'os prémaxillaire, les *prémolaires* et *molaires* supérieures dans l'os maxillaire. Toutes les dents inférieures sont évidemment plantées dans l'os mandibulaire unique ou dentaire.

Les incisives et les canines n'ont qu'une racine; leur couronne est simple et elles sont soumises au remplacement. Cette dernière caractéristique s'applique également aux prémolaires, dont la couronne est plus ou moins tuberculée et qui peuvent avoir une ou plusieurs racines. Quant aux molaires, elles ont plusieurs racines; leur couronne est complexe et elles sont d'emblée définitives.

Préhensiles et coupantes, les incisives possèdent une couronne normalement plate chez les Ongulés (sauf chez l'éléphant, où elles forment les défenses), les Primates et les Carnivores (lobées en « fleur de lys » chez les Canidés). Elles peuvent être coniques chez les Insectivores, les chauves-souris et... l'hippopotame (qui tond l'herbe avec ses lèvres) ou en dents de peigne chez les Dermoptères et certains Lémuriens. Chez le vampire, chauve-souris buveuse de sang, elles sont étonnamment tranchantes et peuvent découper un morceau de peau comme un emporte-pièce.

Les canines, réduites ou absentes chez les herbivores (sauf le cerf Muntjak, le chevrotain et le porte-musc où elles servent d'arme chez les mâles), sont généralement développées chez les Carnivores, qui s'en servent habituellement pour tuer leurs proies. Chez les Suidés et les hippopotames, elles peuvent se développer jusqu'à former les défenses, surtout chez les mâles.

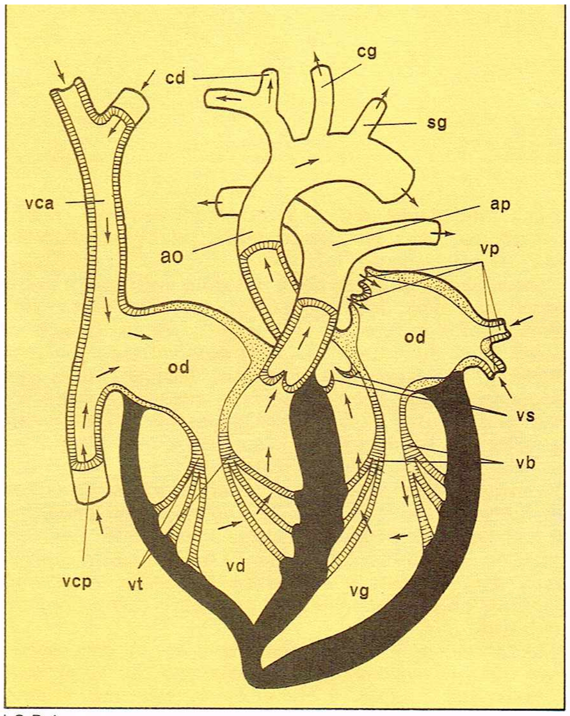

I.G.D.A.

◀ ***Les Mammifères ont une circulation sanguine double et complète; ici coupe du cœur : vca, veine cave antérieure; vcp, veine cave postérieure; cd, carotide droite; cg, carotide gauche; sg, artère sous-claviaire gauche; ao, aorte; ap, artère pulmonaire; od, oreillette droite; og, oreillette gauche; vp, veines pulmonaires; vs, valvules semi-lunaires; vt, valvule tricuspide; vb, valvule bicuspide; vd, ventricule droit; vg, ventricule gauche. Les flèches indiquent la direction du sang; on a indiqué en noir les parois des ventricules et en pointillé celles des oreillettes.***

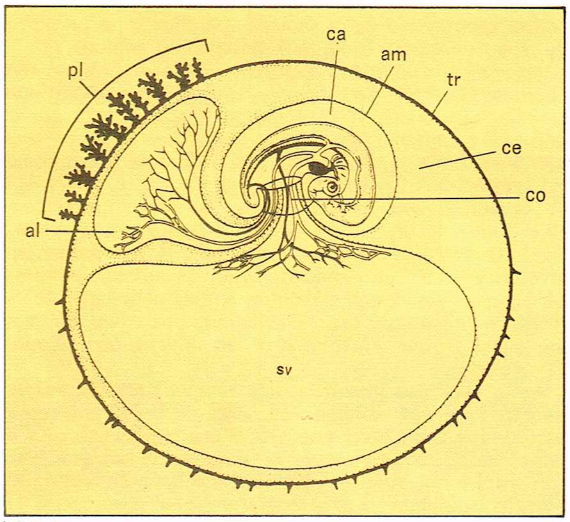

I.G.D.A.

◀ ***Coupe schématique médiane d'une vésicule blastodermique de Mammifère Placentaire : al, allantoïde; pl, placenta; ca, cavité amniotique; am, amnios; tr, trophoblaste; ce, cœlome extra-embryonnaire; co, cordon ombilical; sv, sac vitellin.***

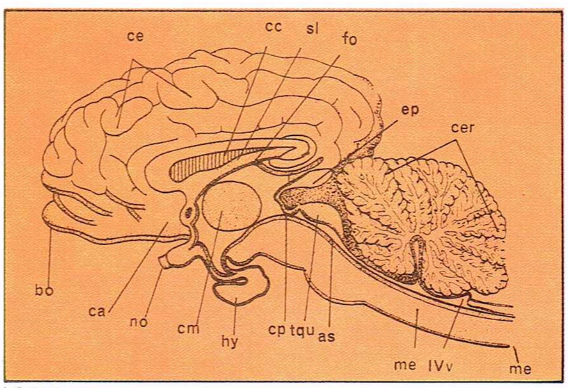

I.G.D.A.

◀ ***Schéma de l'encéphale d'un veau, en coupe médiane : bo, bulbe olfactif; ce, circonvolutions cérébrales; cc, corps calleux; sl, septum lucidum; fo, fornix; ep, épiphyse; cer, cervelet; ca, commissure antérieure; no, nerf optique; cm, commissure grise; hy, hypophyse; cp, commissure postérieure; tqu, tubercules quadrijumeaux; as, aqueduc de Sylvius; me, moelle épinière; IV v, IVe ventricule cérébral.***

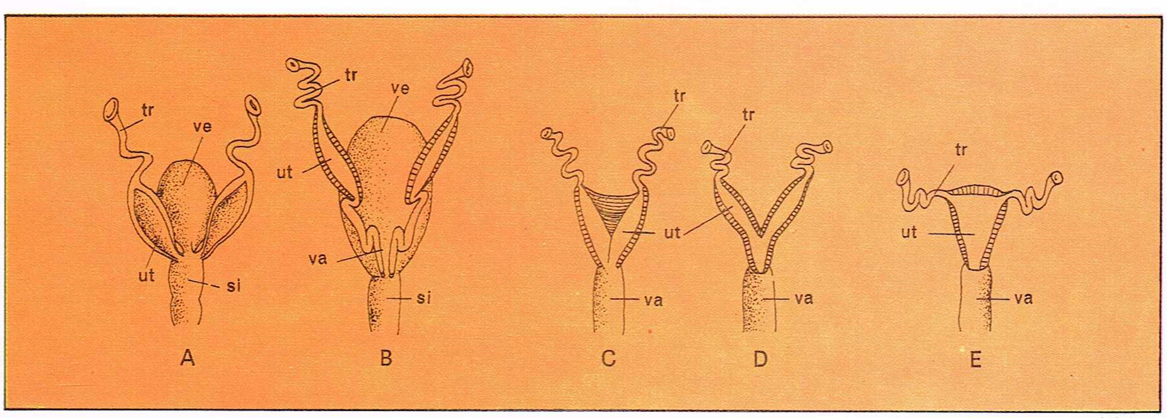

I.G.D.A.

◀ ***Représentation schématique des diverses formes d'utérus des Mammifères : A, chez les Monotrèmes; B, chez les Marsupiaux; C, utérus double; D, utérus bicorne; E utérus simple; tr, trompe; ve, vessie; ut, utérus; si, sinus urogénital; va, vagin.***

Les prémolaires ont une apparence variable, plutôt caniniforme chez les Carnivores et plutôt molairiforme chez les végétariens.

Les molaires sont les dents les plus évoluées, n'ayant pas d'équivalent, même apparent, chez les autres Vertébrés. Selon le relief de la couronne, on distingue plusieurs types de molaires. Le type *parabunodonte,* caractéristique des omnivores (Primates, Suidés), porte plusieurs tubercules arrondis. Le type *sécodonte* des Carnivores correspond à des molaires plus ou moins aplaties latéralement et formant trois pointes, ou cuspides. Les molaires *sélénodontes* et *lophodontes* sont celles des herbivores ; elles sont larges, plates et ornées de crêtes en forme de croissant pour les premières, ou parallèles et transversales pour les secondes. Les deux premiers types de molaires sont à croissance limitée, tandis que les deux derniers sont à croissance prolongée ou même continue pour compenser l'usure intense due au régime herbivore.

La *formule* et le *type* dentaires sont des critères essentiels dans la systématique des Mammifères aussi bien actuels que fossiles. L'étude de la fameuse « série évolutive du cheval » montre comment, au cours de l'ère tertiaire, la molaire lophodonte s'est formée par complication progressive de la molaire mammalienne primitive de type *bunodonte* (conique), héritée des Reptiles.

Appareil respiratoire. L'aspect le plus original de l'appareil respiratoire des Mammifères est la présence d'une cloison musculaire, le *diaphragme,* qui sépare la cavité générale (cœlome) en une partie thoracique et une partie abdominale. En position de repos, le diaphragme est bombé vers l'avant ; lorsqu'il se contracte, il s'aplatit et provoque une dilatation de la cage thoracique, c'est-à-dire un appel d'air dans les poumons (inspiration). Quand il se relâche, les poumons se contractent et chassent l'air (expiration). Chez les autres Vertébrés aériens, la respiration s'effectue simplement par déglutition de l'air ou par des mouvements des côtes d'arrière en avant (pour l'inspiration) ou inversement (pour l'expiration).

Autre caractère important des Mammifères, les *fosses nasales* sont très développées, avec de nombreux replis osseux (os turbinaux) couverts d'une muqueuse. Il y a donc un accroissement de la surface de contact avec l'air inspiré qui joue un rôle essentiel dans l'olfaction et dans la régulation de la température interne du corps.

Enfin, la structure alvéolaire extrêmement complexe du poumon mammalien contribue, de la même façon, à accroître la surface où s'effectuent les échanges gazeux entre les *globules rouges* (hématies) du sang et l'air inspiré.

Appareil circulatoire. Il est caractérisé par le cloisonnement du cœur en quatre cavités (deux oreillettes et deux ventricules), par l'existence d'une crosse aortique tournée à gauche et partant du ventricule gauche, par la disparition du système porte-rénal des Reptiles et, à l'inverse de ce qui se passe chez d'autres Vertébrés, par la présence d'hématies dépourvues de noyau. Enfin, les Mammifères, comme les Oiseaux, sont des *homéothermes,* c'est-à-dire que leur température demeure en principe constante. En fait, cette homéothermie n'est pas aussi stricte et, dans le cas de Mammifères hibernants (marmotte, loir, etc.), la température corporelle peut tomber, pendant leur léthargie, à quelques degrés centigrades au-dessus de zéro.

Système nerveux. Il est caractérisé par l'angle que forme l'*encéphale* avec la *moelle épinière* au niveau du *bulbe rachidien* et par l'énorme développement des *hémisphères cérébraux,* qui s'étendent jusqu'au *cervelet,* recouvrant ainsi le diencéphale et le mésencéphale. Pour la première fois dans la série des Vertébrés, apparaît le *corps calleux,* pont de substance blanche qui unit les deux hémisphères cérébraux.

Autres caractéristiques de l'encéphale des Mammifères : chacun des deux *lobes optiques* se dédouble, ce qui aboutit à la formation de quatre *tubercules quadrijumeaux ;* le cervelet s'accroît considérablement en volume et se trouve séparé en deux *hémisphères cérébelleux* par l'apparition du *vermis médian.*

Appareil reproducteur et reproduction. Comme chez les autres Vertébrés, le mâle des Mammifères possède deux glandes sexuelles, ou *testicules ;* cependant, alors que dans les autres groupes ces glandes sont internes, c'est-à-dire situées dans la cavité générale du corps, à proximité des reins, chez les Mammifères adultes, elles émigrent souvent dans une bourse cutanée externe, le *scrotum.*

Chez la femelle, les modifications de l'appareil reproducteur sont très importantes comparativement aux autres Vertébrés. Les *ovaires* sont normalement au nombre de deux, situés intérieurement et à proximité immédiate de deux orifices, ou *trompes,* qui débouchent chacun dans un *oviducte.* Chez les Mammifères, au lieu d'être un simple tube évacuateur de l'œuf, cet oviducte se transforme, dans sa partie supérieure, en un *utérus* où se développera l'embryon et, dans sa partie inférieure, en un *vagin* où s'effectuera l'accouplement.

Bien qu'ils possèdent déjà un utérus, les Mammifères les plus primitifs, ou Monotrèmes (ornithorynque, échidné), pondent des œufs volumineux, de type reptilien. Chez tous les autres, l'œuf fécondé se fixe dans la paroi utérine *(nidation)* et poursuit son développement aux dépens de l'organisme maternel. Chez les Marsupiaux (kangourous, etc.) cette phase intra-utérine est très brève, et le jeune naît à un stade quasi larvaire avant d'achever son développement dans un repli spécial de la peau, la poche marsupiale ou *marsupium.* Chez les Mammifères supérieurs ou placentaires, l'embryon naît à un stade beaucoup plus avancé, parfois même très proche de celui de l'adulte ; pendant toute sa vie intra-utérine il sera nourri par l'organisme maternel par l'intermédiaire d'un *placenta,* tissu formé par la fusion étroite des membranes du fœtus et de la muqueuse de l'utérus maternel.

Après leur naissance, tous les Mammifères (y compris les Monotrèmes) sont nourris de lait. La gestation et la lactation sont sous contrôle hormonal. La *progestérone,* sécrétée par le corps jaune de l'ovaire, permet la nidation de l'œuf sur la paroi utérine. La *prolactine,* sécrétée par l'hypophyse, déclenche la lactation.

▼ Les Mammifères sont, de tous les Vertébrés, ceux qui occupent les régions biogéographiques les plus diverses, et qui sont le mieux adaptés à la vie à l'air libre. Ici, une gazelle **(Gazella thomsoni)** ***et son petit.***

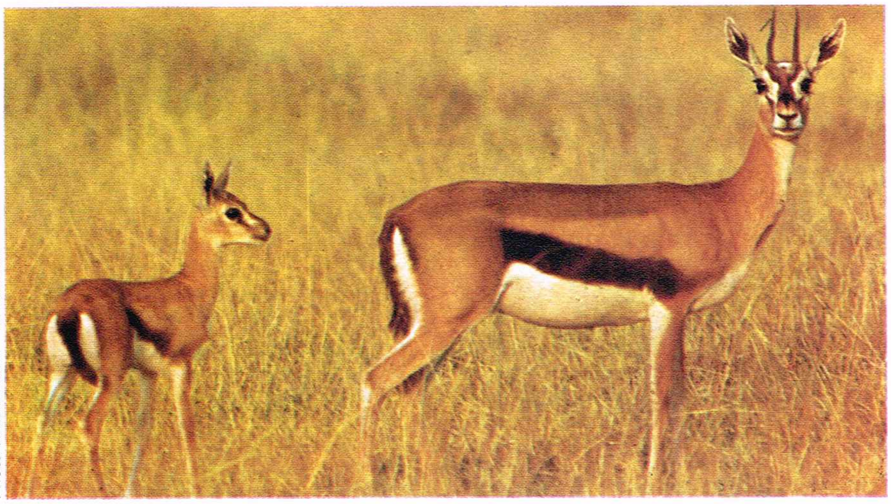

Photo Researchers - D. Bartlett

Écologie. Diversité des Mammifères

Des caractères morphologiques et anatomiques qui précèdent, il ressort à l'évidence que les Mammifères sont, de tous les Vertébrés, les mieux adaptés à la vie à l'air libre, milieu où les variations de température, d'éclairement, etc., sont infiniment plus brutales qu'ailleurs. L'homéothermie, le développement du jeune à l'intérieur de l'organisme maternel, la possession d'un pelage sont autant d'adaptations qui contribuent à rendre le Mammifère plus indépendant que les autres Vertébrés de l'environnement.

Assez curieusement, après avoir conquis la surface de la terre, les Mammifères ont secondairement colonisé ou recolonisé tous les milieux. Non seulement ils occupent les régions biogéographiques les plus diverses de notre globe, mais ils se sont adaptés à la vie aérienne et aquatique avec apparemment autant de succès que les Oiseaux et les Poissons. En outre, chaque groupe mammalien s'est adapté à sa façon à ces différents milieux, ce qui n'a fait qu'augmenter la diversité de cette classe, déjà si complexe, de Vertébrés.

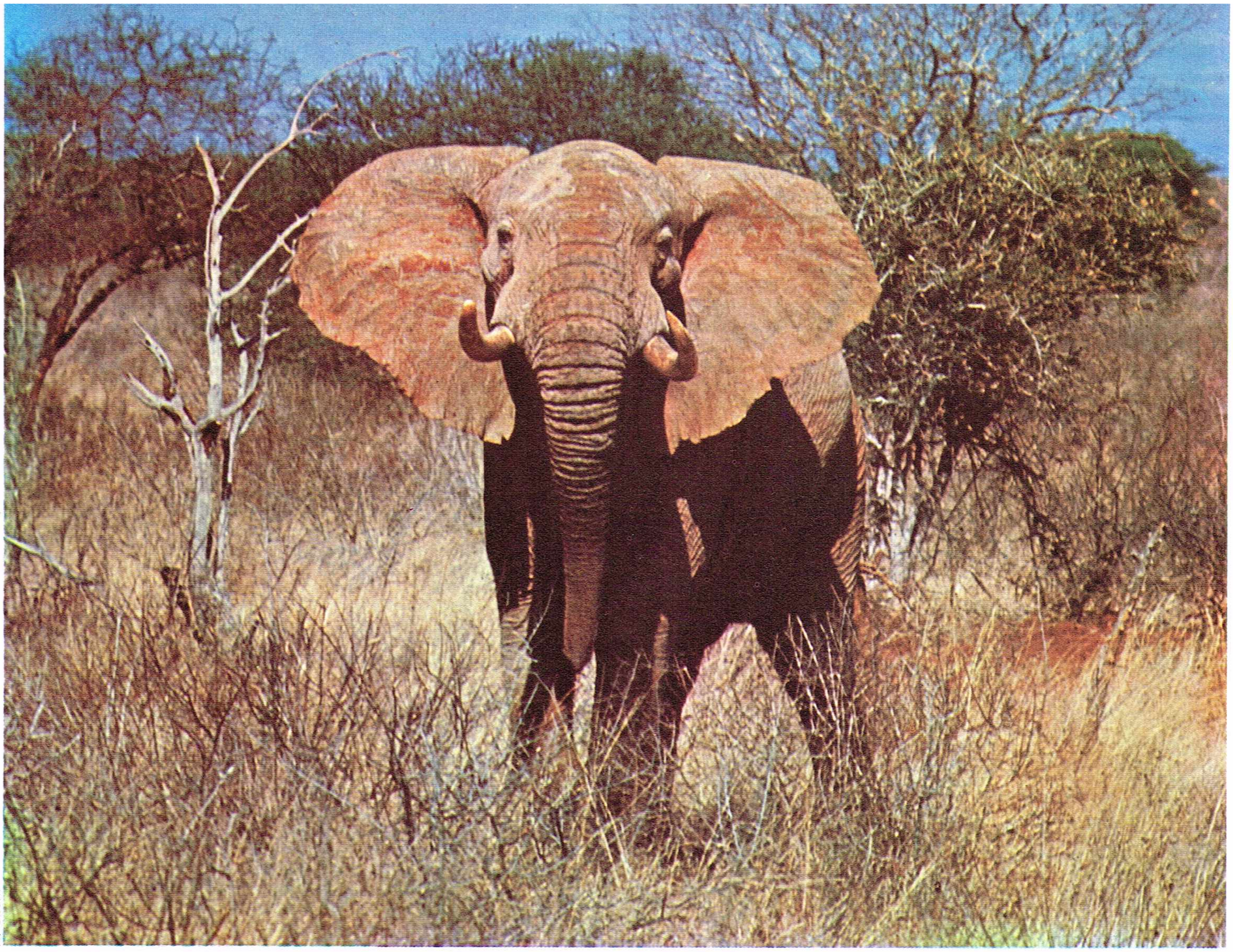

N. Cirani

▲ *On estime actuellement le nombre des espèces de Mammifères vivants à environ trois mille, regroupées en quelque cent dix-huit familles. Ici, un éléphant africain* **(Loxodonta africana),** *Mammifère Proboscidien.*

SYSTÉMATIQUE

La systématique des Mammifères est nettement moins avancée que celle des autres groupes et, en tout cas, loin d'être définitive. La classification la plus généralement adoptée à l'heure actuelle est celle du paléontologiste américain Simpson qui distingue, parmi les Mammifères, deux cent cinquante-sept familles dont cent dix-huit vivantes et cent trente-neuf éteintes (étudiées d'après leurs fossiles). Ces deux cent cinquante-sept familles se divisent en deux mille huit cent soixante-quatre genres, dont neuf cent trente-deux, soit 33 %, encore actuels et mille neuf cent trente-deux fossiles. Il semblerait donc que les Mammifères, issus des Reptiles « mammaliens » de la fin du Secondaire, aient connu au Tertiaire leur épanouissement optimal et soient en train d'achever leur évolution à l'époque actuelle, au Quaternaire (ce qui ne veut pas dire qu'ils soient condamnés à disparaître).

Quant au nombre total d'espèces vivantes de Mammifères, il varie de deux mille cinq cents à quatre mille, suivant les auteurs, pour la simple raison que la distinction entre espèce proprement dite et sous-espèce ou race géographique est encore relativement floue et, le plus souvent, subjective. Si l'on s'en tient à une définition stricte du terme et si l'on ne considère comme espèces valables que les Animaux se reproduisant normalement, c'est-à-dire indéfiniment entre eux, on peut estimer le nombre d'espèces de Mammifères vivant actuellement à environ trois mille.

Sous-classe des Protothériens

La sous-classe des Protothériens *(Prototheria)* [du grec *prôtos*, primitif, et *thêrion*, Animal, dans le sens de Mammifère] comprend les plus archaïques des Mammifères vivants. Ces Animaux sont, par de nombreux aspects, tout à fait paradoxaux, car ils possèdent des caractères tenant à la fois des Mammifères, des Reptiles, et même des Oiseaux.

Ordre des Monotrèmes

La sous-classe est constituée par l'unique ordre des Monotrèmes *(Monotremata)* [du grec *monos*, unique, et *trêma*, orifice], ainsi nommés du fait de l'un de leurs principaux caractères : ils possèdent, en effet, comme les Reptiles et les Oiseaux, un cloaque où aboutissent les canaux du système génito-urinaire et le tube digestif, ces voies communiquant donc avec l'extérieur par un orifice unique, celui du cloaque. Chez tous les autres Mammifères existants (sous-classe des Thériens), le tube digestif et les voies génito-urinaires s'ouvrent sur l'extérieur par des orifices distincts.

Une autre particularité des Monotrèmes, qui montre leur caractère archaïque, est leur reproduction par l'intermédiaire d'œufs, que les femelles couvent ensuite. Tous les autres Mammifères actuels sont vivipares. Les petits sont nourris par une sécrétion lactée des glandes mammaires d'un type particulier.

Autre caractère typique des Monotrèmes, le museau très proéminent est recouvert par une sorte d'étui corné qui ressemble à un bec, mais est cependant différent de la rhamphotèque des Oiseaux. Au niveau du squelette (ceinture scapulaire et ceinture pelvienne), les Monotrèmes possèdent des caractères nettement reptiliens. La température interne des Monotrèmes n'est pas constante, mais varie dans des limites assez étroites.

Les Monotrèmes représentent, sans aucun doute, un très ancien groupe de la classe, qui a pu survivre jusqu'à nous grâce aux conditions d'isolement propres au continent australien et aux grandes îles proches de celui-ci (essentiellement la Nouvelle-Guinée). On peut les considérer comme de véritables fossiles vivants, du plus grand intérêt pour l'étude des Mammifères; cependant, d'une part, on n'en connaît que quelques formes fossiles récentes (Pléistocène), ce qui rend très problématique l'étude de leur phylogenèse et de leurs rapports avec les autres Mammifères, d'autre part, les formes nouvelles sont très spécifiques et ne permettent guère de se rendre compte comment étaient les Mammifères primitifs. Il est

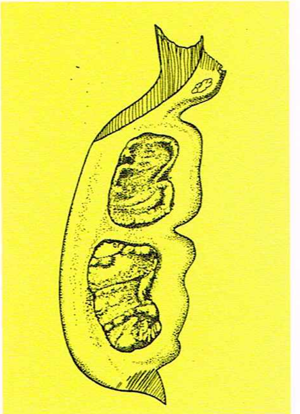

I.G.D.A.

▲ *Schéma des dents embryonnaires d'un ornithorynque.*

probable qu'il s'agit d'un phylum nettement isolé depuis très longtemps, qui se serait détaché soit de la lignée originelle des Mammifères dès le Trias, soit d'un groupe de Reptiles Synapsides. Il est toutefois certain qu'il ne s'agit pas des ancêtres des Mammifères actuels.

La morphologie externe est très différente chez les deux familles qui constituent l'ordre : les Tachyglossidés, qui comprennent les échidnés, ressemblent vaguement à de gros hérissons, avec leur corps partiellement recouvert de piquants et à long bec étroit, alors que les Ornithorynquidés, qui comptent le seul ornithorynque, sont presque complètement aquatiques, à « bec » large et déprimé, à pattes palmées et ne possèdent pas de griffes aux membres antérieurs.

Dans la robe de l'ornithorynque, constituée par des poils de bourre et par des poils de jarre (plus longs et aplatis), les poils sont groupés en faisceaux distincts, disposés assez régulièrement, surtout sur le dos. Chez l'échidné, les poils sont mêlés à des piquants mobiles, de couleur jaune où noirâtre, tous dirigés en arrière. Il existe des glandes sébacées, annexées aux poils, surtout chez l'ornithorynque; ce dernier possède également des glandes odoriférantes cutanées, situées en avant des épaules; chez les mâles, leur sécrétion est active lors de la période de reproduction.

Une des particularités des Monotrèmes est l'existence, chez les mâles, d'un éperon corné situé sur le côté interne des pattes postérieures, à la hauteur de l'articulation tarso-métatarsienne. Cet éperon mobile et courbe est parcouru par un canalicule, par lequel s'écoule la sécrétion d'une glande à venin acineuse, la glande fémorale ou crurale, située chez l'ornithorynque dans la région fémorale externe et longue d'environ 3 cm. Toujours chez l'ornithorynque, l'éperon existe chez les juvéniles des deux sexes, mais disparaît chez la femelle, sans doute sous l'effet d'une hormone inhibitrice sécrétée par l'ovaire. La taille des glandes varie en fonction du cycle sexuel, atteignant son développement maximal peu avant la période de l'accouplement; ces glandes représentent donc un caractère sexuel secondaire. Chez les mâles de l'échidné, dont l'éperon est moins développé que celui de l'ornithorynque, le venin est un liquide riche en albumine et contenant une petite quantité de protéases. On ne sait pas encore très bien à quelles substances est due sa toxicité; il n'y a aucune action hémolytique ou protéolytique mais, par contre, une importante propriété coagulante.

On s'interroge toujours sur la fonction exacte, dans la vie de l'Animal, de cet éperon et du liquide sécrété par la glande : certains chercheurs pensent qu'ils joueraient un rôle dans la lutte entre les mâles, donc dans la sélection sexuelle, et même dans les accouplements. On connaît de nombreux cas d'empoisonnements de chiens et d'hommes, accompagnés de troubles plus ou moins graves et parfois même mortels, provoqués par l'ornithorynque, surtout des cas observés à l'époque où cet Animal était chassé pour sa fourrure.

L'échidné, à certains stades, et les adultes de l'ornithorynque sont dépourvus de dents. Les juvéniles de ce dernier présentent, au cours de leurs premiers mois, un certain nombre de dents maxillaires qui présentent des signes nets de dégénérescence, ce qui rend difficile leur interprétation du point de vue phylogénétique. La formule dentaire est la suivante : $\left(I\frac{0}{0}; C\frac{0}{0}; Pm\frac{1}{0}; M\frac{2}{3}\right) \times 2 = 12.$

Les canines et les incisives $\frac{0}{5}$ subsistent seulement sous la forme de simples ébauches, qui dégénèrent rapidement. Les adultes voient leurs dents remplacées par des plaques cornées, avec des lamelles pouvant saisir et déchirer (petits Animaux, plantes, etc.) ; chez les échidnés certaines formations cornées à la base de la langue ont une fonction analogue.

Divers aspects de l'anatomie du squelette sont très importants et significatifs. Le crâne présente un mélange de caractères reptiliens et mammaliens : d'une part, ses os se soudent précocement, et les sutures tendent à s'oblitérer, spécialement chez les échidnés, d'autre part, on observe un caractère reptilien, qui a totalement disparu chez les Euthériens : la présence des processus ascendants des prémaxillaires. Il faut signaler, en outre, l'absence des glandes lacrymales et du foramen auditif osseux. La mandibule, par contre, est de type nettement mammalien.

La colonne vertébrale est peu différenciée en tronçons, un passage insensible se faisant entre les vertèbres des divers types. La formule vertébrale est, selon Cabrera : C 7; T 15-17; L 2-4; S 2-3; Cd 12-21 (noter le petit nombre de vertèbres sacrées).

L'anatomie de la ceinture scapulaire est unique chez les Mammifères : en effet, il existe, de chaque côté, outre l'omoplate et la clavicule, un os coracoïde distinct, reliant l'omoplate au sternum, et un os épicoracoïde, impair et médian, situé en avant du sternum, entre le coracoïde et l'épisternum; le coracoïde, qui se réduit chez les autres Mammifères (Thériens) à une simple apophyse de l'omoplate, existe chez les Reptiles et les Oiseaux. La ceinture pelvienne, de type plus mammalien, possède deux os marsupiaux fixés au pubis, présents chez les deux sexes.

Le cerveau, bien que conservant divers aspects archaïques, présente les caractères propres aux Mammifères : macrosmatiques, ses hémisphères sont lisses chez l'ornithorynque et circonvolutionnés chez l'échidné (ils sont très développés chez les *Zaglossus*) ; les corps calleux sont absents.

Le toucher, sens très développé, surtout au niveau du bec chez l'ornithorynque, est une nécessité pour la nage en plongée et la recherche des proies dans la vase; chez tous les Monotrèmes, on note l'absence de vibrisses. L'odorat est très fin, surtout chez les échidnés. Les yeux, relativement petits, sont pourvus d'une membrane nictitante chez l'ornithorynque. La rétine, dépourvue de vaisseaux sanguins, ne possède pas de cônes chez les échidnés; ce caractère est en relation avec leur vie entièrement nocturne. L'ouïe est très fine; on observe l'absence de trompes d'Eustache chez l'ornithorynque.

Les appareils respiratoire et circulatoire sont de type mammalien classique; il existe un diaphragme normal. L'appareil digestif comprend des glandes salivaires, très développées chez les échidnés, moins chez l'ornithorynque, une langue très longue, vermiforme et protractile chez les échidnés, très large, surtout à la base, chez l'ornithorynque, un estomac simple et dépourvu de glandes gastriques, on note la présence d'un cæcum et d'un foie, plurilobé, possédant une vésicule biliaire.

L'anatomie des organes reproducteurs et la biologie de la reproduction présentent des caractères archaïques. Les mamelles sont de type tout à fait particulier, dépourvues de mamelons et formées de glandes tubuleuses à sécrétion mérocrine, un peu semblables aux glandes sudoripares; elles constituent deux groupes symétriques de part et d'autre de l'abdomen, formant deux zones glandulaires, où chacune des glandes galactophores débouche séparément, formant des pores qui s'ouvrent à la base de gros poils. Les petits lèchent le lait qui sourd à la base de ces poils. Chez l'échidné, les deux aires mammaires s'ouvrent également symétriquement, mais à l'intérieur d'une poche cutanée incubatrice spéciale rappelant un marsupium, où est incubé l'œuf et où est élevé le petit à ses débuts. Cet incubatorium, large de 4 cm, existe seulement au moment de la ponte de l'œuf et de l'allaitement. Le lait est un liquide dense, jaunâtre, riche en protéines.

Les reins sont ovoïdes et symétriques. Chez les mâles, les uretères aboutissent d'abord dans un sinus génito-urinaire qui communique avec la vessie. Dans ce sinus débouchent aussi les canaux déférents, qui ne sont donc pas en rapport direct avec le pénis; celui-ci est inséré sur la paroi ventrale du cloaque et non, comme chez les autres Mammifères, sur les ischions, et il est parcouru par le canal spermatique, ou éjaculateur, qui évacue seulement le sperme et non l'urine; celle-ci passe pour sa part du sinus génito-urinaire au cloaque, par un pore urinaire. Les testicules sont intra-abdominaux.

Chez les femelles, le sinus génito-urinaire, large, sert de vagin; à son extrémité supérieure, s'ouvrent les deux utérus séparés, qui forment, par l'élargissement des segments postérieurs, des oviductes. L'ovaire et l'oviducte gauches sont plus développés que ceux de droite : chez l'ornithorynque, l'ovaire gauche est seul fonctionnel, alors que les deux le sont chez l'échidné. Le cloaque est fermé par un sphincter.

L'ovule mesure environ, dans l'ovaire, de 3,5 à 5 mm de diamètre : à maturité, il passe dans l'oviducte, où il est fécondé. Ensuite, traversant les tronçons successifs des trompes, l'œuf reçoit de l'albumen et quatre couches

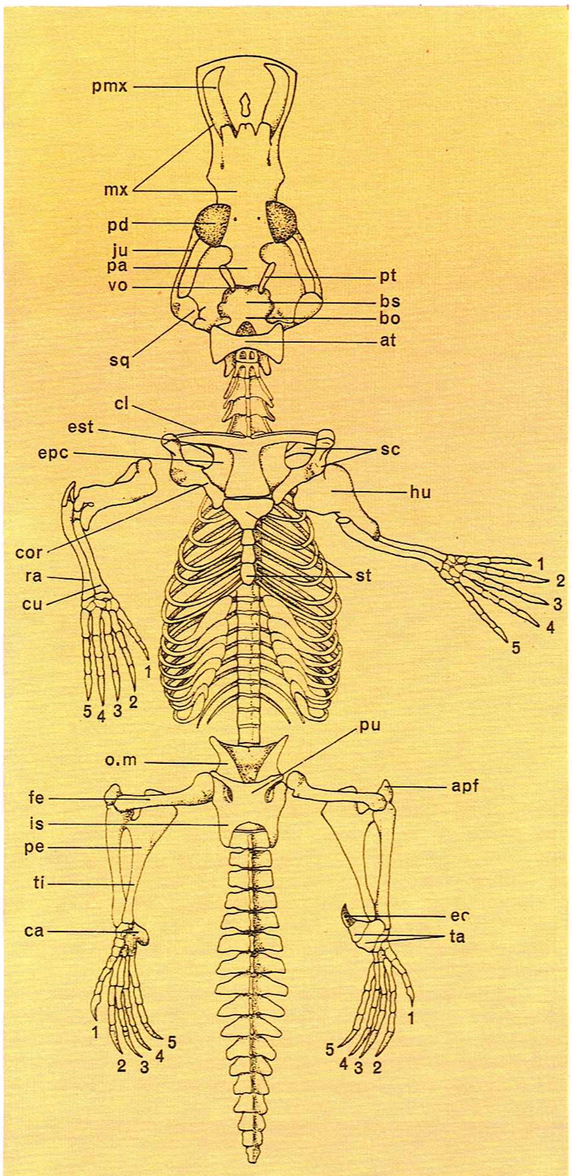

◀ ***Représentation schématique du squelette d'un ornithoryngue : pmx, prémaxillaire ; mx, maxillaire ; pd, plaque dentaire cornée ; ju, jugal ; pa, palatin ; vo, vomer ; pt, ptérygoïde ; bs, basisphénoïde ; bo, basi-occipital ; sq, squamosal ; at, atlas ; cl, clavicule ; est, épisternum ; sc, omoplate ; epc, épicoracoïde ; cor, coracoïde ; hu, humérus ; ra, radius ; cu, cubitus ; st, sternum ; o.m, os marsupial ; fe, fémur ; pu, pubis ; is, ischion ; pe, péroné ; ti, tibia ; apf, apophyse flabelliforme ; ca, calcanéum ; ec, éperon corné ; ta, tarses accessoires ; les chiffres 1 à 5 indiquent les doigts (la mandibule a été ôtée).***

Classe des Mammifères

□ *Sous-classe des Protothériens*

○ *Ordre des Monotrèmes*

□ *Sous-classe des Thériens*

Infra-classe des Métathériens

○ *Ordre des Marsupiaux*

Infra-classe des Euthériens

○ *Ordre des Insectivores*
○ *Ordre des Dermoptères*
○ *Ordre des Chiroptères*
○ *Ordre des Édentés*
○ *Ordre des Pholidotes*
○ *Ordre des Lagomorphes*
○ *Ordre des Rongeurs*
○ *Ordre des Cétacés*
○ *Ordre des Carnivores*
○ *Ordre des Tubulidentés*
○ *Ordre des Proboscidiens*
○ *Ordre des Siréniens*
○ *Ordre des Hyracoïdes*
○ *Ordre des Périssodactyles*
○ *Ordre des Artiodactyles*
○ *Ordre des Primates*

protectrices qui formeront la coquille au moment de la ponte. A terme, l'œuf de l'ornithorynque mesure environ 17 mm de longueur sur 15 mm de largeur ; celui des *Tachyglossus* est un peu plus petit. Les œufs des Monotrèmes sont télolécithes (vitellus abondant) et méroblastiques. Au moment de l'éclosion, les petits sont pourvus d'une « dent d'éclosion », située à la mâchoire supérieure, en position médiane, devant la symphyse maxillaire, ainsi que d'une caroncule située au-dessus de l'organe précédent ; ces deux formations, comme chez les Reptiles et les Oiseaux, servent aux petits pour rompre leur coquille, et disparaissent rapidement après l'éclosion.

Un aspect intéressant de la physiologie des Monotrèmes est leur température interne, plus basse que celle des autres Mammifères (en moyenne, 32,2 °C pour l'ornithorynque et 31,1 °C pour les *Tachyglossus*) ; elle varie de plusieurs degrés (de 27 °C à 33 °C) au cours de la journée et suivant la température atmosphérique : il s'agit d'une homéothermie imparfaite.

L'ordre des Monotrèmes est divisé en deux familles, les Tachyglossidés, ou échidnés, et les Ornithorynchidés, avec le seul ornithorynque, qui diffèrent par des caractères importants, à tel point que certains auteurs veulent leur donner rang de sous-ordres. Il existe, au total, trois genres et six espèces, confinées à l'Australie, la Nouvelle-Guinée et la Tasmanie.

Les **Tachyglossidés** *(Tachyglossidae)* sont les échidnés, à corps massif, recouverts de poils et de forts piquants. Leur bec est à peu près conique et possède un revêtement corné ; l'ouverture buccale est étroite, et les dents sont absentes. La langue est longue, vermiforme et protractile, à peu près comme celle des fourmiliers. Les pattes sont très robustes, les antérieures étant fouisseuses. La queue est toujours courte.

Les échidnés vivent dans les régions buissonneuses ou arborées, de préférence en terrain accidenté et rocheux. Essentiellement nocturnes, ils ne creusent pas de véritables terriers mais utilisent des abris occasionnels ; ils se réfugient entre les rochers et les racines. Si leur vue est très faible, leur ouïe est fine, et leur odorat, très développé, les guide dans la recherche de leur nourriture ; strictement insectivores, ils se nourrissent surtout de fourmis et de termites, qu'ils déterrent avec leurs pattes très robustes, capables de déplacer de grosses pierres. Ils capturent ces proies à l'aide de leur longue langue visqueuse, qu'ils meuvent très rapidement (Tachyglossidé signifie « animal à langue rapide »).

Les échidnés pondent un seul œuf (rarement deux), qui est recueilli dans l'incubatorium selon des modalités encore mal connues : la mère courberait son ventre de manière à faire aller l'œuf directement dans l'incubatorium, dès sa sortie de l'orifice cloacal. L'œuf est incubé pendant 7 à 10 jours ; le petit qui éclôt est nu et mesure environ 12 mm de long ; il est allaité dans la poche, y restant jusqu'à 6 à 8 mois, tant que ses piquants n'ont pas commencé à se développer ; puis il est laissé par la mère dans un abri sûr, où elle continue à venir l'allaiter. Les échidnés sont sexuellement matures à la fin de leur première année et atteignent en captivité l'âge de 30 à 50 ans.

La famille des Tachyglossidés compte deux genres : *Tachyglossus* et *Zaglossus*.

Les *Tachyglossus* ont un museau aigu, presque droit, plus court que celui des *Zaglossus ;* leur corps est couvert de piquants longs de 6 cm, dont la couleur va du blanc au noir ; leurs pattes sont pentadactyles et armées de larges griffes en palettes. Ils peuvent se rouler en boule pour se défendre. Il existe deux espèces : *Tachyglossus aculeatus,* échidné d'Australie ou à piquants, d'Australie et de Nouvelle-Guinée (le plus commun et le mieux connu), et *T. setosus,* échidné de Tasmanie ou à soies, confiné à la Tasmanie, plus grand, à robe plus fournie avec des piquants plus rares et plus courts.

Les *Zaglossus* ont un bec légèrement recourbé, qui atteint les deux tiers environ de la longueur de la tête. Plus robustes que les *Tachyglossus,* pouvant mesurer 80 cm de long pour 10 kg, ils sont plus rapides, leurs pattes étant plus longues et plus libres dans leurs mouvements ; par rapport au genre précédent, leur queue est

Ostman - G.R. Roberts

▲ *Un échidné à piquants (Tachyglossus aculeatus) originaire d'Australie et de Nouvelle-Guinée.*

un peu plus longue, leurs piquants sont moins nombreux et plus courts. Ils comptent trois espèces, qui habitent les zones rocheuses et même montagneuses de Nouvelle-Guinée, dont *Zaglossus bruijni,* ou échidné de Bruijn.

Les **Ornithorynchidés** *(Ornithorhynchidae)* ne comptent qu'une espèce *(Ornithorhynchus anatinus)*, l'ornithorynque, appelé platypus par les Australiens. C'est l'un des Mammifères actuels les plus extraordinaires, qui résume à lui seul les particularités des Monotrèmes. Son corps, très déprimé, atteint 45 cm de long, et sa queue, qui ressemble quelque peu à celle du castor, 12 cm. Les pattes, courtes, ont des extrémités palmées et sont pentadactyles; en outre, les antérieures sont fouisseuses et les doigts armés de griffes. La tête est petite, avec un museau proéminent qui rappelle le bec d'un Palmipède; ce « bec » grisâtre sur le dessus et rosé en dessous n'est pas dur mais recouvert de tissus mous, riches en terminaisons nerveuses et en corpuscules tactiles; l'ouverture buccale est très large; les bords du bec sont pourvus de lamelles cornées servant à saisir et à triturer les proies et la nourriture. Les yeux, petits et enfoncés, sont pourvus d'une membrane nictitante. Il n'y a pas de pavillon auriculaire. Le corps est revêtu d'une laine très dense et de poils soyeux aplatis; la livrée est brun noirâtre sur le dessus, gris clair ou châtain jaunâtre en dessous. Les mâles, plus gros que les femelles, peuvent peser jusqu'à 2kg.

L'ornithorynque habite la partie orientale de l'Australie, à partir de 138° de longitude est, et la Tasmanie. Essentiellement crépusculaire, il vit dans les plaines et les montagnes jusqu'à 2 000 m d'altitude, se tenant près des cours d'eau et des lacs, sous les rives desquels il creuse ses terriers. Nageant très bien sous l'eau il se guide surtout par le toucher pour la recherche de ses proies dans la vase. Il se nourrit d'Insectes, de larves de Crustacés, de Mollusques et de Vers. Il vit en solitaire ou par couples et fore deux galeries, dont l'une sert à l'habitation et l'autre à la reproduction ; cette dernière, creusée par la femelle, se termine par un gros nid fait de feuilles d'eucalyptus et d'autres Végétaux, qui sont toujours mouillées afin de maintenir l'atmosphère très humide nécessaire à l'éclosion.

L'accouplement a lieu dans l'eau, en août et en octobre ; ensuite, les femelles creusent les nids et s'y barricadent, fermant les entrées (deux au maximum). Chaque couvée compte un ou deux œufs (parfois trois), que la femelle couve en s'enroulant autour d'eux ; celle-ci ne se nourrit pas durant le temps nécessaire à l'incubation (7 à 10 jours). A l'éclosion, les petits, longs d'environ 25 mm, attendront une dizaine de jours pour s'allaiter ; ils tètent sur le ventre de la mère, qui est couchée sur le dos. Celle-ci sort périodiquement, laissant les jeunes enfermés. A 8 jours, ils sont actifs, à 6 semaines ils mesurent 5 cm et peuvent marcher ; à 11 semaines, les yeux s'ouvrent, et à 4 mois ils abandonnent le terrier pour aller nager. L'ornithorynque vit de 10 à 15 ans. Devenu très rare, à cause de la chasse acharnée qu'on lui a faite autrefois pour sa fourrure, il est maintenant rigoureusement protégé par la loi et sa conservation semble assurée.

Sous-classe des Thériens

La sous-classe des Thériens *(Theria)* est la seconde sous-classe de Mammifères vivants (celle des Allothériens comportant seulement des formes fossiles) ; elle comprend la totalité des espèces actuelles, à l'exception des Monotrèmes.

Il s'agit de Mammifères vivipares, dépourvus de cloaque. Les orifices anal et uro-génital sont distincts ; les uretères débouchent dans la vessie, et les oviductes sont réunis sur une partie de leur trajet. Les glandes mammaires sont pourvues de mamelons. Les œufs, tout petits, sont oligolécithes (vitellus peu abondant). Le développement de l'embryon, tout au moins sa première phase, a lieu dans l'utérus. En outre, les Thériens ont des os coracoïdes rudimentaires, soudés à l'omoplate, et l'encéphale comprend des tubercules quadrijumeaux.

La sous-classe des Thériens compte trois infraclasses : celle des Pantothériens, tous fossiles, celle des Métathériens, avec l'unique ordre des Marsupiaux, et celle des Euthériens, ou Placentaires, qui comprennent la majorité des espèces, avec vingt-six ordres, dont dix fossiles.

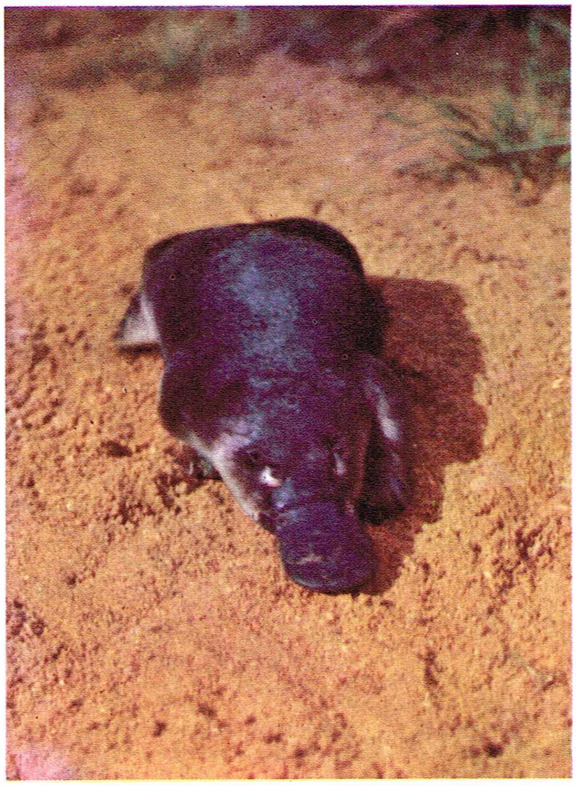

Tiofoto

▶ *Un ornithorynque (Ornithorhynchus anatinus) dont on observera le museau en forme de bec.*

Ostman - G.R. Roberts

▲ ***Femelle de*** **Macropus giganteus,** ***ou grand kangourou, appelé encore kangourou gris, avec son petit, peu avant le sevrage ; le caractère fondamental des Marsupiaux est la présence d'une poche ventrale, ou marsupium.***

Infraclasse des Métathériens

Ordre des Marsupiaux

Outre les Monotrèmes, la faune australienne comprend l'ordre des Marsupiaux *(Marsupialia),* très typique par ses caractères. Habitant aussi l'Amérique, ces Animaux se sont perpétués jusqu'à nos jours en restant à un stade d'évolution archaïque, témoignant plus que toute autre forme vivante du degré d'organisation atteint par l'ensemble des Mammifères au Mésozoïque (Crétacé).

Assez proches des Euthériens par la morphologie externe, les Marsupiaux s'en distinguent surtout par la reproduction ; en effet, les femelles possèdent une poche ventrale, le « marsupium », ou poche marsupiale, dans laquelle les petits sont élevés pendant la première partie de leur vie. Bien qu'étant un caractère fondamental, le marsupium n'existe pas chez toutes les espèces. Il s'agit d'un repli cutané de l'abdomen des femelles, à musculature propre formant sphincter ; son développement varie en fonction du cycle œstral ; souvent, les mâles présentent des rudiments de marsupium (chez *Chironectes* et *Notoryctes* par exemple). L'ouverture peut être située en avant (chez les Macropodidés) ou en arrière (chez le koala).

La morphologie externe est très variable, ainsi que la taille, qui va d'une quinzaine de centimètres à 2 m de haut (grands kangourous) ; cette richesse de forme, alliée à la variété des modes de vie, montre, sur le plan de l'adaptation, un parallélisme étonnant avec les divers Euthériens.

La robe est, le plus souvent, serrée et douce, avec une prédominance des poils de bourre sur ceux de jarre. Les livrées sont généralement fauves ou grises, plus rarement de teintes vives (par exemple, chez *Phalanger* et *Notoryctes*). Les vibrisses sont très développées sur le museau, et parfois aussi aux membres (vibrisses carpiennes et tarsiennes). Il existe des glandes sébacées et des glandes sudoripares, ainsi que d'autres glandes particulières : sternales, anales, et rectales.

La queue est généralement longue et souvent très grosse à la base, caractère très net chez de nombreuses espèces, par exemple, chez les kangourous ; elle est préhensile surtout chez les Didelphidés et les Phalangéridés, rudimentaire chez les Wombatidés et, enfin, très courte chez les Notoryctidés.

Le squelette présente non seulement des caractères archaïques, mais aussi de nombreuses spécialisations liées au mode de vie. Parmi les caractères crâniens, on observe surtout la perforation du palais osseux. La mandibule possède un processus angulaire typique, très accentué et recourbé vers l'intérieur.

Les ceintures sont constituées de la même façon que celles des Euthériens. Dans la ceinture scapulaire, l'os coracoïde est soudé à l'omoplate, dont il devient une apophyse, beaucoup plus développée que chez les Placentaires ; la clavicule est généralement présente. Le bassin est important du fait de la longueur de la symphyse ischio-pubienne : c'est sur le pubis que s'articulent les os marsupiaux, qui existent chez les deux sexes et sont situés superficiellement dans la paroi abdominale.

Les membres sont, dans la plupart des cas, pentadactyles, avec un nombre normal de phalanges ; on observe des modifications, surtout du pied, qui dépendent des modes de vie : le gros orteil est opposable chez les Didelphidés, qui sont arboricoles ; les membres postérieurs des Macropodidés, et en particulier des kangourous (*Wallabya, Macropus,* etc.), avec leur grand développement du calcanéum, sont spécialement adaptés au saut. Excepté le premier, les doigts portent des griffes, sauf chez les Notoryctidés.

La denture, qui présente un nombre élevé de dents, est monophyodonte ; seule la quatrième prémolaire est remplacée. La formule dentaire est variable.

Chez les espèces phytophages, les glandes salivaires sont très développées, et l'estomac (en particulier celui de *Macropus*) a des caractères rappelant celui des Ruminants, tandis que chez les espèces carnivores ou insectivores l'estomac est plus simple et l'intestin plus court. Il existe une vésicule biliaire.

La température interne oscille généralement entre 34 °C et 36 °C.

Le cerveau présente de nombreux caractères archaïques, comme l'absence de corps calleux, la grande extension du rhinencéphale et le faible développement des hémisphères cérébraux.

Les yeux sont pourvus d'une membrane nictitante peu développée et leur pupille est généralement ronde. La rétine est plus proche du type sauropsidé et possède, en certains cas, des gouttelettes de lipides, colorées en bleu, vert ou rouge *(Macropus)*. D'autre part, les Marsupiaux sont des Mammifères macrosmatiques.

T. Okapia

▲ *On voit ici un nouveau-né marsupial, attaché à un mamelon de sa mère, dans le marsupium.*

La reproduction des Marsupiaux diffère nettement de celle des Placentaires et représente un stade très primitif de viviparité. L'appareil génital femelle est très complexe : l'utérus et le vagin sont doubles (d'où le nom de Didelphes souvent donné à ces Animaux). Chez les mâles, sauf chez *Notoryctes,* les testicules sont renfermés dans un scrotum extra-abdominal qui se développe devant le pénis.

Selon les espèces, on observe une, deux et même trois périodes œstrales par an. Les Marsupiaux sont dits Aplacentaires : ceci est partiellement vrai étant donné que, sauf chez les *Perameles* qui possèdent un placenta allanto-chorial de type analogue à celui des Euthériens, il existe en réalité une sorte de placenta vitellin plus ou moins développé qui remplit son rôle lors des tout premiers stades de croissance de l'embryon. Le chorion de l'œuf se fixe durant peu de temps sur la muqueuse utérine, près de la vésicule ombilicale, qui contient le peu de vitellus de l'œuf : il s'agit donc d'un omphalo-placenta ; l'allantoïde est peu développée.

La durée de la gestation est très courte (de 10 à 40 jours), et le petit, qui naît à un stade très précoce, est minuscule et presque informe : seuls ses membres antérieurs et sa bouche (qui doit pouvoir se fixer fermement au téton) sont bien formés. Il rejoint le marsupium, en s'agrippant aux poils grâce aux pattes antérieures pourvues de fines griffes embryonnaires qui disparaissent rapidement. Bien que la mère lèche son pelage de l'orifice génital au marsupium, dessinant ainsi une sorte de sentier de salive, on ne connaît pas les stimuli qui guident la « larve », celle-ci possédant certainement une coordination neuro-musculaire suffisante. Le nouveau-né entre dans le marsupium, saisit avec sa bouche la mamelle, qui pénètre jusqu'au pharynx ; sous le stimulus de la succion, l'extrémité du téton gonfle dans la cavité buccale du petit, qui reste ainsi suspendu au mamelon. Sa respiration est possible grâce à la conformation particulière de son larynx.

Le nombre de mamelles limite les possibilités de survie de la progéniture. Bien que le nombre de petits soit, normalement, inférieur ou égal à celui des mamelons, il y a une mortalité prénatale importante, allant jusqu'à 50 %. Les glandes mammaires sont bien développées, et les mamelles peuvent être très nombreuses (jusqu'à vingt-sept), avec une variabilité intraspécifique. En général, ce nombre est plus élevé chez les espèces les plus primitives que chez les espèces les plus évoluées ; chez certains Didelphidés, on observe un nombre impair de mamelles, dont certaines sont situées sur la ligne médiane. Les tétons, longs, fins et presque cylindriques, sont répartis des deux côtés depuis la région inguinale jusqu'à la région pectorale, ou à l'intérieur du marsupium quand il existe. Le développement des petits est très rapide : ainsi les nouveau-nés d'opossums multiplient par trente leur poids initial en vingt jours.

Les Marsupiaux comprennent des espèces herbivores, insectivores, carnivores et omnivores, manifestant de remarquables capacités d'adaptation qui leur ont permis de coloniser divers milieux, surtout sur le continent australien. Sur le plan de l'évolution, le parallélisme avec les Mammifères Placentaires est saisissant : ils en ont, en quelque sorte, préfiguré le développement, sous une forme moins évoluée. On observe des cas très intéressants de convergence, par suite de conditions de vie très semblables. Ainsi, de nombreux Dasyuridés rappellent les Carnivores (Viverridés, chats ou Canidés), tel le thylacine ou loup marsupial, qui ressemble à un chien, ou encore les Notoryctidés ou taupes marsupiales, qui rappellent les Talpidés.

L'histoire évolutive de l'ordre est très significative. Au Mésozoïque les Marsupiaux se sont détachés des Pantothériens, et au Crétacé ils fournissent le principal ordre

▼ *A gauche, une sarigue femelle allaitant ses petits ; chez les Didelphidés, l'allaitement est très long, près de neuf semaines chez les plus grandes espèces.*

J.R. Simon

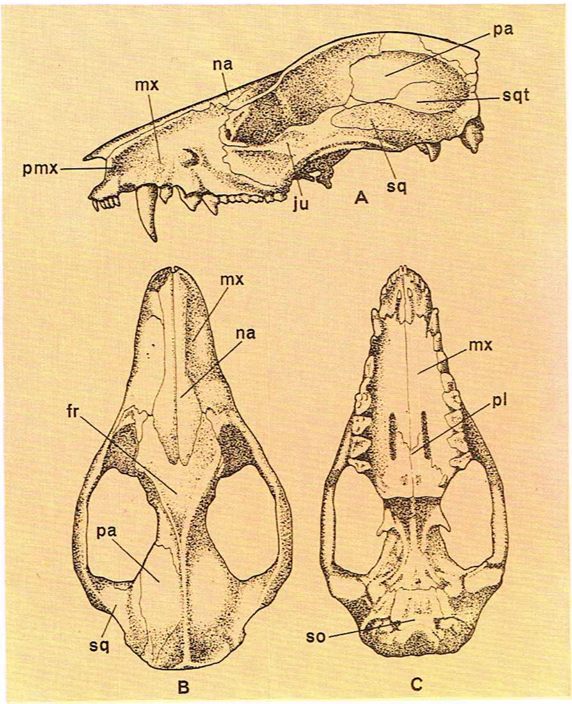

I.G.D.A.

E.P.S.

▲ *Les kangourous sont les plus connus de tous les Macropodidés; ici, femelle portant un jeune dans la poche marsupiale.*

des Mammifères. A partir de l'Éocène, par contre, ils ont dû céder le terrain presque partout aux Euthériens, supérieurs par de nombreux caractères; en Australie, l'absence presque totale de ces derniers leur a permis de prospérer sous des formes extrêmement variées, dont beaucoup, en particulier les espèces de grande taille, se sont éteintes. Ce continent s'est en effet détaché du continent asiatique à partir du Crétacé supérieur, avant que les Euthériens aient pu s'y répandre avec leurs principales lignées. En Amérique, surtout du Sud, les Marsupiaux ont survécu dans la diversité des conditions écologiques, malgré la concurrence des Placentaires, arrivés au Pliocène, grâce aux mœurs particulières d'espèces très primitives et de petite taille. Des fossiles ont été retrouvés en Europe.

L'ordre des Marsupiaux a été subdivisé par de nombreux zoologues en trois sous-ordres : les Polyprotodontes, les Paucituberculés et les Diprotodontes.

Les *Polyprotodontes,* les plus primitifs, possèdent au moins quatre incisives par demi-mâchoire supérieure et ont des canines soit à la mâchoire, soit à la mandibule : il s'agit essentiellement de formes insectivores et carnivores.

Les *Paucituberculés,* avec la seule famille des Cénolestidés, constituent un groupe intermédiaire, et se distinguent, entre autres, par la forme de leur première incisive inférieure, qui est plus grosse et est située presque horizontalement.

Les *Diprotodontes,* principalement herbivores, plus évolués et plus spécialisés, n'ont jamais plus de trois incisives par demi-mâchoire supérieure et sont dépourvus de canine inférieure.

Cette division, bien qu'elle présente un intérêt didactique, est réfutée par des spécialistes modernes, comme Simpson (1945), qui groupe les familles en cinq super-familles. Au total,les Marsupiaux comprennent cinq super-familles, huit familles, soixante-dix-neuf genres et deux cent quarante-trois espèces. Six familles habitent l'Australie, la Tasmanie, la Nouvelle-Guinée et les îles voisines, et deux seulement (les Didelphidés et les Cénolestidés) l'Amérique.

Super-famille des Didelphoïdés

La super-famille des Didelphoïdés *(Didelphoidea)* ne comprend qu'une seule famille.

Les **Didelphidés** *(Didelphidae)* habitent seulement l'Amérique. Ils ressemblent généralement à des rats, parfois à de petites loutres. Leur longueur varie de 8,5 cm, chez *Marmosa,* à 50 cm, chez la sarigue, qui est la plus typique de la famille. La couleur de la robe varie du gris au noirâtre, en passant par des tons jaunâtres, bruns et blancs.

La tête est assez allongée, avec un museau pointu, des narines latérales et une bouche largement fendue. Les oreilles sont souvent grandes, arrondies, fréquemment nues et membraneuses. Les pattes, courtes, comptent cinq doigts armés de griffes recourbées, sauf au gros orteil, qui est toujours opposable aux autres doigts. Les surfaces plantaires sont nues, avec de gros tubercules. Chez *Chironectes,* les pattes postérieures sont palmées. La queue, souvent longue et préhensile, est caractéristique car toujours nue sur une certaine longueur. Le marsupium bien développé, par exemple chez *Didelphis, Chironectes* et *Philander,* est à l'état de vestige chez d'autres genres. Les mamelles sont en nombre impair (de cinq à vingt-cinq), avec des variations intraspécifiques; une à cinq mamelles sont situées sur la ligne médiane, les autres sur deux rangées latérales. Bien sûr, elles se trouvent, le cas échéant, dans le marsupium.

Le crâne est allongé et étroit, avec de grands arcs zygomatiques. Ce sont des polyprotodontes typiques, dont la formule dentaire est : $\left(I\,\frac{5}{4};\, C\,\frac{1}{1};\, Pm\,\frac{3}{3};\, M\,\frac{4}{4}\right) \times 2 = 50$.
Les incisives sont petites, les supérieures coniques et verticales, les inférieures inclinées; les canines sont très développées et pointues, comme chez les Carnivores; les molaires supérieures sont trituberculées, les molaires inférieures ont une couronne étroite et allongée. Il y a souvent des dents surnuméraires.

La formule vertébrale est : C 7 ; T 13 ; L 6 ; S 2 ; Cd 19-35. Les clavicules sont robustes.

Les Didelphidés vivent dans les milieux les plus divers, sauf en haute altitude. Ils s'étendent du sud-est du Canada à l'est et au sud des États-Unis, au Mexique, à l'Amérique centrale et latine, jusqu'à 47° de latitude sud en Argentine. Mis à part *Chironectes,* semi-aquatique, et *Lutreolina,* qui fréquente les lieux découverts et paludéens, les Didelphidés, en majorité arboricoles, sont d'habiles grimpeurs (notamment grâce à leur queue préhensile) et dorment le jour dans des trous d'arbres ou entre des racines. Leur marche plantigrade est peu rapide; lorsqu'ils sont poursuivis par des prédateurs, ils se défendent rarement d'une façon active et se figent, simulant la mort, pour fuir ensuite, lors d'un moment d'inattention de leur adversaire (ce comportement est typique chez la sarigue) ou bien ouvrent grand la bouche, montrant leurs dents aiguës et émettant en même temps par l'anus un liquide nauséabond, produit par deux glandes spéciales.

Leur régime est généralement omnivore et plus spécialement carnivore chez les plus grosses espèces, alors que les petites sont plutôt insectivores; ils mangent surtout des petits Mammifères, des Oiseaux, des Insectes, des Crustacés, des œufs, des larves, des fruits et des racines.

Après une gestation très brève, qui dure en général trois semaines et demie, les femelles mettent bas de 3 à 16 petits, longs de 1,5 cm chez les plus grandes espèces; les nouveau-nés, fort peu développés, nus, dépourvus d'oreilles et d'yeux, ressemblent à des masses gélatineuses informes. Ils se réfugient, sans aucune aide, dans la poche marsupiale, prennent fermement un mamelon dans la bouche et ne le lâchent plus. Lorsque le marsupium n'existe pas, la mère se réfugie avec sa progéniture dans le trou d'un tronc creux ou dans une anfractuosité, où elle prépare une sorte de nid avec des matières végétales, pour y laisser temporairement ses petits; la thermorégulation des nouveau-nés est encore très imparfaite. L'allaitement est très long : au moins neuf semaines chez les plus grandes espèces. Enfin, la majeure partie des Didelphidés met au monde deux portées par an, et même parfois trois.

Les Didelphidés sont sans doute le groupe de Marsupiaux le plus ancien existant aujourd'hui (on a trouvé des fossiles dans le Crétacé d'Amérique du Nord), avec de nombreux caractères archaïques; les genres *Caluromys* et *Marmosa* semblent les plus primitifs.

◀ ***Page ci-contre, à droite, crâne de sarigue (Didelphis marsupialis), vu de côté (A), de dessus (B), et par en dessous (C) : pmx, prémaxillaire; mx, maxillaire; na, nasal; ju, jugal; pa, pariétal; sq, squamosal; sqt, squamoso-temporal; fr, frontal; pl, palatin; so, sous-occipital.***

Tom Mc Hugh - Pitch

▲ **Caluromysiops irrupta,** *l'opossum à épaules noires, est une espèce arboricole, vivant dans les forêts péruviennes.*

Les Didelphidés comptent douze genres et environ soixante-six espèces, dont beaucoup pourraient toutefois être considérées comme des sous-espèces ou des formes géographiques.

Le genre *Caluromys* comprend les trois espèces d'opossums laineux, à robe très fine, formée de longs poils, recouvrant aussi une partie de la queue, et généralement gris pâle. Longs de 20 à 30 cm, ces opossums sont également caractérisés par une barre longitudinale sur le museau et la tête, ainsi que par leur longue queue préhensile (30 à 40 cm), nue en ses parties médiane et terminale. Les arboricoles très agiles habitent les forêts, du Mexique au Brésil. Leur régime est omnivore. Le plus connu est *C. philander* des Guyanes, du Venezuela et du Brésil.

Ph. Peter - Jacana

▶ *Dépourvus de marsupium, les* **Marmosa** *ou opossums-rats (ici,* **M. karimu**) *sont répartis du Mexique au Chili et à l'Argentine, dans les zones forestières.*

Le genre *Monodelphis* comprend les opossums à queue brève, qui sont petits (10 à 14 cm), avec une fourrure raide et courte, et dont la queue, peu préhensile, représente à peine la moitié de la longueur du corps. Les douze espèces existantes, qui habitent du Panama à l'Argentine, sont les moins arboricoles des Didelphidés et vivent habituellement à terre. Nocturnes, ils se nourrissent surtout de petits Animaux. *M. domesticus,* du Brésil, vit dans les maisons et détruit de nombreux Rongeurs et Insectes.

Dromiciops australis, seule espèce de son genre, confinée au Chili du Centre et du Sud et à de toutes petites zones montagneuses de l'Argentine, mesure environ 12 cm de longueur. Nocturne et arboricole, elle vit dans les forêts denses et humides, surtout les bambuseraies, fabriquant des nids sphéroïdaux de feuilles et se nourrissant d'Invertébrés. Elle tombe en léthargie au cours de l'hiver. Au printemps, les femelles mettent bas de 2 à 5 petits, qui restent d'abord dans le marsupium puis vont dans le nid.

Les deux espèces de *Glironia* du nord de l'Amérique latine sont mal connues, ainsi que *Lestodelphys halli* de Patagonie.

Le genre *Marmosa,* à qui l'on attribue une quarantaine d'espèces, contient les opossums-rats, ou opossums murins, longs de 8,5 à 19 cm et à longue queue (10 à 30 cm) toujours préhensile. Leurs poils sont courts, fins et veloutés chez la plupart des espèces ; leur couleur va du gris foncé au brun-roux sur le dessus, alors que le dessous est blanchâtre ou jaunâtre. Ils présentent presque tous des taches foncées autour des yeux. Habituellement solitaires, ils se nourrissent de petits Animaux et de fruits. Dépourvus de marsupium, les *Marmosa* se reproduisent pratiquement durant toute l'année dans les régions tropicales ; la gestation dure environ 17 jours, l'allaitement 60 jours. Ils sont répartis du Mexique au Chili et à l'Argentine, surtout dans les zones forestières ; cependant, on en trouve, dans les pampas d'Argentine et dans certaines zones des Andes, jusqu'à 3 400 m d'altitude.

Philander oppossum, l'opossum à quatre yeux, seule espèce du genre, a une distribution très vaste, allant du Mexique à l'Argentine. Animal forestier, essentiellement arboricole, il recherche toutefois souvent ses proies à terre ; c'est aussi un habile nageur. Il atteint 30 cm de long. Sa fourrure est grisâtre. Deux taches claires et rondes ornent son museau au dessus des yeux (d'où son nom). Les femelles ont un marsupium bien développé. Il se construit un nid d'environ 30 cm de diamètre, sur les branches des arbres, dans des buissons ou même dans des creux du sol.

Metachirus nudicaudatus, également forestier, répandu du Nicaragua à l'Argentine, est aussi nommé opossum à quatre yeux, bien qu'il se distingue de ce dernier par sa couleur brun foncé.

Lutreolina crassicaudata ressemble à une belette et mesure 40 cm. Son museau est assez court, ainsi que ses oreilles, arrondies et partiellement cachées par le poil ; ses pattes sont courtes et robustes, sa queue est longue, très grosse et peu préhensile. Sa fourrure, courte et épaisse, présente des teintes rousses, elle se décolore après la mort de l'Animal, ce qui a sauvé l'espèce d'une destruction certaine par les chasseurs de fourrure. Cette espèce, nocturne, vit dans les forêts, près des cours d'eau et des lacs, ainsi que dans les pampas, milieu auquel elle est le mieux adaptée. Très agile et rapide aussi bien sur les arbres qu'à terre, elle nage aussi très bien. C'est un prédateur actif, qui se nourrit aussi de Poissons. Dépourvues de marsupium, les femelles élèvent leurs petits dans des nids d'herbe. Cet Animal est largement distribué en Amérique du Sud, à l'est des Andes, des Guyanes jusqu'à la Patagonie.

Les plus typiques et les mieux connus des Didelphidés sont les sarigues, ou opossums, du genre *Didelphis,* qui sont les plus grands Marsupiaux américains ; ils atteignent 50 cm de long pour un poids de 5 kg. Leur museau est fortement pointu. Leurs oreilles, grandes et membraneuses, sont nues. Leur fourrure, douce et serrée, est formée par une laine dense et par des poils de recouvrement longs et rigides, clairs à l'extrémité ; la livrée est généralement grisâtre, avec des tons plus ou moins noirâtres et même roux. La queue, qui peut être aussi longue que le corps, est en grande partie nue. Omnivores, ces Animaux sont essentiellement terricoles, bien qu'ils soient aussi d'excellents grimpeurs ; ils vivent dans les forêts et les endroits buissonneux. Il en existe deux espèces, que

E.P.S.

▲ ***La sarigue commune ou opossum commun* (Didelphis marsupialis) *est un Didelphidé possédant de longues vibrisses, de fortes griffes et une queue en grande partie nue.***

certains auteurs rapportent à une seule : *D. marsupialis,* la sarigue commune ou opossum commun, connue aussi sous le nom d'opossum de Virginie, répandue du Canada méridional à l'Argentine, et *D. azarae,* l'opossum ou sarigue d'Azara, qui habite uniquement l'Amérique du Sud.

Bien qu'elle soit chassée à cause des ravages qu'elle fait dans les poulaillers, la sarigue commune a étendu son aire vers le nord. Sa fourrure est très appréciée et on l'élève pour la pelleterie. Elle est solitaire; les femelles mettent bas une fois par an dans le Nord, et jusqu'à trois fois dans le Sud, après une gestation de 12 jours au maximum (c'est là le temps de gestation le plus court de tous les Mammifères). Il y a de 8 à 18 petits par portée, mais seuls un peu plus de la moitié survivent dans le marsupium, qui est pourvu de treize mamelles, et y restent environ 2 mois.

Chironectes, avec pour unique espèce *Ch. minimus,* la sarigue d'eau, ou yapok, habite du Mexique à l'Argentine septentrionale, près des fleuves et des lacs et même dans les torrents de montagne. Longue d'environ 30 cm, elle possède une livrée bien particulière : le museau et la tête sont noirs, avec deux taches cendrées sur le front, le dessus et les flancs sont gris et ornés d'une zébrure noire caractéristique, enfin, la gorge, la poitrine et le ventre sont blanchâtres. C'est le Marsupial le plus nettement aquatique, avec des pattes postérieures palmées. Nocturne, excellent nageur, il se nourrit surtout de Poissons et de Crustacés. Présent chez les deux sexes, le marsupium est pourvu, chez les femelles, d'un sphincter qui se ferme lorsque l'Animal plonge; la mère peut ainsi emporter ses petits lorsqu'elle chasse en plongée.

Super-famille des Dasyuroïdés

Les Dasyuroïdés *(Dasyuroidea)* renferment deux familles.

Les **Dasyuridés** *(Dasyuridae)* habitent la région australienne. Ils sont prédateurs et présentent de nombreux caractères archaïques. On les distingue des Didelphidés par leur queue entièrement velue (d'où leur nom, qui signifie « à queue velue »), et qui n'est jamais préhensile. Leur taille varie de 5 à 6 cm (*Planigale ingrami,* le plus petit Marsupial existant) à 1,30 m (*Thylacinus,* ou loup marsupial). Les individus de cette famille ressemblent à des musaraignes ou à des rats pour les plus petits, et à des chats ou à des genettes pour les plus grands; *Thylacinus* a l'allure d'un Canidé.

Les pattes sont à peu près toutes égales, les antérieures étant pentadactyles, les postérieures normalement tétradactyles (parfois pentadactyles); le gros orteil est rudimentaire (ou absent), toujours court et dépourvu de griffes.

Polyprotodontes, ces Marsupiaux possèdent une denture carnivore ou insectivore typique, à grosses canines, la formule dentaire étant :

$$\left(I\,\frac{4}{3};\ C\,\frac{1}{1};\ Pm\,\frac{2\text{-}4}{2\text{-}4};\ M\,\frac{4}{4}\right) \times 2 = 42\text{-}50.$$

La formule vertébrale est la suivante : C 7; D 13; L 6; S 2-3; Cd 18-25. L'estomac est simple. Il n'y a pas de cæcum. Le marsupium, qui est le plus souvent rudimentaire ou absent, s'ouvre postérieurement; souvent, il n'est bien développé que pendant la reproduction. Le nombre des mamelles est, le plus souvent, de six à huit, et ne survivent que 3 à 10 petits.

Les Dasyuridés sont surtout nocturnes et terricoles; certains sont arboricoles. Leurs sens et leur intelligence sont développés. Très vifs, ils sont prédateurs actifs, carnivores et insectivores. Il leur arrive de s'attaquer à des Animaux d'élevage; c'est pourquoi, plusieurs espèces ont été chassées sans pitié, certaines étant même menacées d'extinction, notamment le loup marsupial; d'autres ont été réduites ou ont disparu, par suite de l'importation par les colons de Placentaires carnivores qui sont entrés en compétition avec ces Marsupiaux, quand ils n'en étaient pas les prédateurs.

Les Dasyuridés sont répandus en Australie, en Tasmanie, en Nouvelle-Guinée et aux îles Normanby et Aru; ils vivent dans les forêts et même dans des zones plus découvertes, du niveau de la mer jusqu'à 3 400 m d'altitude. Il en existe vingt genres et environ cinquante espèces, répartis en quatre sous-familles, pour la description desquelles nous nous en tiendrons au traité de Walker (1968).

J.P. Ferrero - Pitch

J.P. Ferrero - Pitch

▲ *A gauche,* **Planigale tenuirostris** *est un Dasyuridé, « à queue velue », prédateur actif, carnivore et insectivore ; c'est un Marsupial de la taille d'un rat. A droite,* **Dasyurus viverrinus,** *le chat marsupial, a une fourrure brune ornée de larges taches blanchâtres.*

La sous-famille des *Phascogalinés* comprend la majeure partie de ce qu'on nomme les rats marsupiaux. Ce sont des Animaux de petite taille, dont la robe et la morphologie rappellent celles de nos petits Rongeurs. Il s'agit, dans l'ensemble, d'espèces très primitives, ayant conservé de très nets caractères archaïques.

Les *Antechinus* comptent une dizaine d'espèces, dont *A. flavipes,* la plus répandue en Australie, surtout dans l'Est. Longue d'environ 12 cm, elle est de couleur chamois ou rousse ; sa queue est couverte de poils courts. Très bonne grimpeuse et courant bien, elle vit dans les forêts, de préférence en terrain rocheux, où elle trouve plus facilement des refuges et construit de petits nids à l'aide de feuilles d'eucalyptus. Elle est fréquemment la proie d'autres Dasyuridés, de Rapaces et d'Ophidiens. L'espèce est dépourvue de marsupium ; la gestation dure environ 30 jours.

Les *Planigale,* ou planigales, sont aussi des sortes de rats marsupiaux, de petite taille (5 à 9 cm de long). Leur boîte crânienne, extrêmement aplatie, leur permet de passer par des fentes fort étroites (phénomène que l'on rencontre chez certains Chiroptères).

Les *Sminthopsis,* ou souris marsupiales, que l'on distingue à leurs grandes oreilles, comptent une douzaine d'espèces distribuées en Australie, en Nouvelle-Guinée et aux îles Aru. Très voraces, terricoles, elles vivent dans les forêts ou les zones arides, où elles se déplacent avec une démarche sautillante. Les genres *Murexia, Parantechinus* et *Pseudantechinus* sont très semblables aux précédents.

Phascogale tapoatafa, le tapoa-tafa, sorte de rat marsupial robuste, long de 23 cm, avec une queue longue (20 cm) ornée d'un panache de longs poils, possède une robe gris bleuâtre. Il est répandu au nord et à l'est de l'Australie. Nocturne, agile comme un écureuil, intelligent et féroce carnivore, il tue souvent des Oiseaux de grande taille, y compris les volailles, en les mordant à la gorge ou sous les ailes ; il détruit aussi quantité de souris et de rats. Il construit de gros nids sur les arbres ou dans les rochers.

Les *Antechinomys,* qui comptent deux espèces, sont de gracieuses souris marsupiales à queue très longue et à membres postérieurs nettement plus longs que les antérieurs, ce qui leur permet d'effectuer des sauts de plus de 2 m. Très rares, elles vivent dans les savanes ou les régions semi-désertiques du Sud et de l'Est australiens ; nocturnes et insectivores, elles sont solitaires.

La sous-famille des *Dasyurinés* comprend, outre d'autres souris et rats marsupiaux, tous les Marsupiaux carnivores australiens de taille moyenne, appelés localement chats indigènes (*Dasyurus* et genres proches), ainsi que le diable de Tasmanie *(Sarcophilus harrisii).* Parmi les formes mineures, figurent les *Neophascogale, Phascolosorex* et *Myoictis,* qui vivent dans les forêts montagneuses et pluvieuses de Nouvelle-Guinée. *Myoictis melas,* semblable à une petite mangouste, habite les îles Aru. Les *Dasyuroides* et *Dasycercus* sont australiens ; *Dasycercus cristicaudata,* caractérisé par sa grosse queue très adipeuse à la base, avec une crête dorsale de poils, vit dans le grand désert australien.

Le groupe le plus important et le plus typique des Dasyurinés est celui des chats indigènes, qui sont de véritables carnivores, bien qu'ils mangent parfois des Insectes. Se distinguant par leur robe, souvent fauve, ornée de grosses taches blanches, ils sont essentiellement arboricoles. *Satanellus hallucatus,* l'espèce la plus primitive, longue d'environ 30 cm et dont la queue mesure à peu près autant, habite l'Australie septentrionale. *Dasyurinus geoffroyi,* à peu près semblable, a été presque exterminé et ne survit que dans certaines régions de l'Ouest, du Centre et du Queensland.

Dasyurus quoll, le quoll, est l'espèce de chat indigène la plus typique et l'un des premiers Animaux observés par les naturalistes de l'expédition Cook (1770) ; il était alors très commun dans les territoires actuels des Nouvelles-Galles du Sud, de Victoria et de la Tasmanie. Long d'environ 40 cm, il a un aspect félin et viverrin à la fois et possède une fourrure noire ou brune, parfois olivâtre, avec de nettes taches blanchâtres ; sa queue (30 cm) est unie. Il vit dans les forêts aussi bien que dans les zones découvertes. Nocturne, essentiellement terricole, il se nourrit de petits Mammifères, d'Oiseaux, de petits Reptiles, d'Amphibiens, de Poissons, de Crustacés, d'Insectes et, depuis l'arrivée des colons, de souris, de rats, de lapins et de petites bêtes d'élevage. Le quoll a une seule période d'accouplement, allant de juin à août ; les femelles, qui possèdent un marsupium temporaire avec généralement six mamelles, mettent bas jusqu'à 24 petits, dont seulement 4 à 8 survivent. Ceux-ci restent attachés aux tétons pendant environ 8 semaines, ouvrent les yeux seulement à 11 semaines et commencent à sortir du marsupium à 15 semaines pour se nourrir de chair et devenir enfin indépendants, vers 4 mois et demi.

Ostman - G.R. Roberts

◀ **Sarcophilus harrisii,** ***le diable de Tasmanie, est l'un des Marsupiaux les mieux connus et les plus caractéristiques; il est devenu très rare.***

Dasyurops maculatus, le chat-tigre, vit dans les forêts à végétation luxuriante de l'Australie orientale et de la Tasmanie. Très robuste, plus gros que le quoll, son corps mesure jusqu'à 70 cm de long (plus 50 cm pour la queue); il pèse jusqu'à 3 kg. On le distingue à sa queue tachetée; en outre, son gros orteil est bien développé. Nocturne et solitaire, arboricole, il peut grimper aux troncs des grands eucalyptus pour y dévorer des œufs et des nichées; sa grande taille lui permet de s'attaquer à de petits wallabys et à de nombreux Phalangéridés arboricoles, qu'il chasse à l'affût. Agressif, il ne craint guère l'homme. Les femelles ne possèdent pas de véritable marsupium, mais deux replis cutanés, qui délimitent l'aire mammaire avec six mamelles; vers le mois de mai, après 3 semaines de gestation, elles mettent bas de 4 à 6 petits, longs d'environ 7 mm. Fait curieux, les femelles sont beaucoup plus nombreuses que les mâles.

Sarcophilus comprend l'un des Marsupiaux les mieux connus et les plus caractéristiques, *S. harrisii,* le diable de Tasmanie, confiné maintenant à la Tasmanie, où il est devenu très rare; autrefois, on le trouvait aussi en Australie méridionale, avant que les aborigènes eussent introduit le dingo, qui le fit disparaître. Son corps atteint 80 cm et sa queue 30 cm. Son poids est de 9 kg (chez les mâles). Il a une robe grossière faite de poils courts, presque noirs, avec quelques taches blanches. Rappelant une sorte d'ourson, il a une tête courte, musclée, avec un crâne massif et une denture puissante. Nocturne aussi, le diable de Tasmanie vit dans des zones rocheuses inaccessibles, couvertes d'une végétation dense; il se nourrit de toutes sortes de proies, ainsi que de viscères et de charognes, qui constituaient le principal de ses repas quand les thylacines étaient plus nombreux et lui laissaient les reliefs de leurs repas. Il peut aussi attraper des wallabys (notamment *Thylogale billardierii*), ainsi que des Animaux domestiques, raison pour laquelle il a été chassé sans pitié par les colons. Bon grimpeur quand il est jeune, il est plutôt terricole et nage aisément. Il se reproduit en mars ou avril et les petits, longs de 12 mm, naissent en mai; les femelles ont un marsupium en forme de fer à cheval, dont l'ouverture est postérieure. C'est son caractère irritable, ses cris effrayants et son aspect qui lui ont valu son nom de « diable ».

La sous-famille des *Thylacinés* comprend une seule espèce, *Thylacinus cynocephalus,* le thylacine ou loup-marsupial, appelé aussi loup de Tasmanie. C'est un des cas les plus notables de convergence morphologique entre Marsupiaux et Placentaires, sa ressemblance avec un Canidé étant presque parfaite, à l'exception des oreilles, du profil de l'arrière-train et de la queue, très grosse à la base comme chez la majorité des Marsupiaux. Long de 1 m à 1,30 m (dont 60 cm pour la queue), c'est le plus gros Marsupial carnivore. Il présente un museau de type canin, la tête massive et le corps allongé. Digitigrade, il a les membres assez courts, pentadactyles et munis de longues griffes. Ses pattes postérieures très souples lui confèrent une allure sautillante; il peut également sauter en se servant uniquement de ses membres postérieurs. La robe, caractéristique, est gris noisette, avec de seize à dix-huit bandes transversales brun foncé sur le dos, qui vont de la moitié du tronc à la base de la queue et qui sont plus larges et plus nettes à l'arrière. Le poil est serré et rude. Le thylacine peut ouvrir démesurément la bouche, au point de former un angle plat avec ses mâchoires.

Le jour, il se cache dans une tanière, située sous des fourrés profonds ou entre des rochers, et sort au crépuscule pour chasser, seul ou par couples. Étant donné qu'il est peu rapide, sa tactique de chasse consiste à fatiguer sa proie par une très longue poursuite, quitte à traverser fleuves et lacs. Il tue par morsure ses proies, qui sont habituellement les wallabys, d'autres petits Marsupiaux, des échidnés et des Oiseaux. Après l'arrivée des colons il s'attaqua aux troupeaux qu'il décima; c'est pourquoi il fut intensément chassé. On ne le trouve plus que dans les régions inaccessibles de la Tasmanie occidentale, couvertes de maquis, riches en refuges naturels, très pluvieuses et froides en hiver. A l'époque préhistorique et même historique, il vivait sur le continent australien et même en Nouvelle-Guinée; il semble avoir été supplanté puis détruit par le dingo, arrivé avec les aborigènes. Rarissime (on l'aurait vu encore en 1961), il est en voie d'extinction et une zone de protection a été créée pour lui en 1966, dans le sud-ouest de la Tasmanie.

La sous-famille des *Myrmécobiinés* a été créée pour *Myrmecobius fasciatus,* le fourmilier-marsupial, ou numbat, qui présente des caractères très particuliers. Long de 20 à 26 cm (plus 25 cm pour la queue), il a le museau allongé, et le corps très élancé. Ses pattes sont assez courtes; les antérieures sont pentadactyles, les postérieures tétradactyles. Sa fourrure est constituée par des poils courts et rudes, de couleur grisâtre mêlée de roux et de noirâtre sur le dessus du corps, avec des zébrures

J.P. Ferrero - Pitch

▲ **Isoodon obesulus,** *le bandicoot à museau court, vit en Nouvelle-Guinée, en Australie et en Tasmanie. C'est un Péramélidé massif et trapu, aux oreilles courtes et arrondies.*

caractéristiques. Sa denture (52 dents) est très caractéristique : nombre de dents sont petites et écartées les unes des autres, et les molaires sont pluritiberculées. Contrairement aux autres Dasyuridés, le numbat est surtout diurne ; c'est un Animal solitaire qui se nourrit essentiellement de fourmis et de termites, qu'il capture avec sa longue langue protractile. Un numbat élevé en captivité en consommait de dix mille à vingt mille par jour. L'espèce ne possédant pas de marsupium, les petits (4 par portée) se fixent un certain temps aux mamelons cachés dans le pelage de la mère ; celle-ci les dépose ensuite dans une sorte de nid aménagé dans une anfractuosité du sol ou dans un trou d'arbre, où ils continuent leur développement. Uniquement terricole et sans défense, le numbat est particulièrement exposé aux prédateurs ; il est devenu très rare et ne survit que dans certaines régions d'Australie méridionale. La cause principale de sa raréfaction a été l'introduction de Carnivores Placentaires, surtout des renards, qui le capturent la nuit pendant son sommeil ; une autre cause est l'altération de l'habitat. La survie de cette espèce est conditionnée par l'efficacité des mesures de protection qui sont et seront prises.

Les **Notoryctidés** *(Notoryctidae)*, appelés encore taupes marsupiales, sont adaptés à une vie principalement souterraine ; leur morphologie et leur biologie présentent un extraordinaire parallélisme avec celles des Insectivores de la famille des Chrysochloridés, ou taupes dorées d'Afrique du Sud.

Les Notoryctidés ont le corps massif, talpiforme, atteignant 20 cm de long. Leur museau, assez pointu, est protégé à sa partie terminale par un étui corné. Les yeux sont atrophiés et cachés sous la peau. Les oreilles sont dépourvues de pavillon auriculaire ; les pattes, inégales, sont courtes et robustes, et possèdent cinq doigts, armés de griffes ; les troisième et quatrième doigts de la main, plus longs, possèdent de gros ongles servant à fouir. Leur queue très courte (1 à 2 cm de long) est recouverte d'anneaux. Le pelage est soyeux et court, blanchâtre ou jaune argenté, avec des reflets iridescents ou rouge jaunâtre.

Leur formule dentaire est :

$$\left(I\ \frac{3\text{-}4}{3};\ C\ \frac{1}{1};\ Pm\ \frac{2}{2};\ M\ \frac{4}{4}\right) \times 2 = 40\text{-}42.$$

Leur formule vertébrale est : C 7 ; T 15 ; L 4 ; S 6 ; Cd 12. Les cinq dernières cervicales sont soudées et présentent une apophyse épineuse commune.

Les Notoryctidés sont strictement souterrains, comme les vraies taupes. Ils creusent des galeries assez superficielles sans constituer, du moins en été, de systèmes complexes de tunnels. L'Animal creuse avec son museau et ses pattes antérieures, et élargit le boyau par des mouvements ondulants du corps ; il sort de temps à autre à l'extérieur. Les taupes marsupiales sont surtout insectivores, mais se nourrissent aussi de Vers du sous-sol. Elles sont solitaires. Les femelles possèdent un petit marsupium, à ouverture postérieure, renfermant deux mamelons, nombre qui correspond à celui des petits mis bas à chaque portée. Peu communs, on connaît mal les Notoryctidés à cause de la difficulté à les observer dans leur habitat, limité aux régions arides et sablonneuses de l'Australie centro-méridionale et nord-occidentale.

La famille compte un genre, *Notoryctes,* avec deux espèces très semblables, dont la mieux connue est *N. typhlops,* d'Australie centro-méridionale.

Super-famille des Péraméloïdés

Les Péraméloïdés *(Perameloidea)* renferment une seule famille.

Les **Péramélidés** *(Peramelidae)*, vulgairement appelés bandicoots, comprennent des Marsupiaux de petite taille, longs de 5 cm *(Thylacomys)* à 17 cm *(Microperoryctes)*, ressemblant soit à des lapins, soit à des rats ; leurs pattes antérieures sont plus courtes que les postérieures. Ils constituent une sorte de transition entre le type polyprotodonte auquel ils appartiennent par la denture et les kangourous dont ils se rapprochent par la conformation de leurs extrémités. Les premier et cinquième doigts des pattes antérieures sont rudimentaires ou absents, ainsi que parfois le premier doigt des pattes postérieures ; les deuxième et troisième doigts de ces dernières sont soudés comme chez les Phalangéridés et les Macropodidés. La queue, de taille variable, plus ou moins velue, n'est jamais préhensile.

La denture est de type insectivore, les incisives étant petites, les prémolaires étroites et pointues, et les molaires grandes, trituberculées ou tétratuberculées. La formule dentaire est : $\left(I\ \frac{4\text{-}5}{3};\ C\ \frac{1}{1};\ Pm\ \frac{3}{3};\ M\ \frac{4}{4}\right) \times 2 = 42\text{-}48$. La clavicule est rudimentaire ou absente. Le nombre des vertèbres varie de 44 à 51 (C 7 ; T 13 ; L 6 ; S 1-2 ; Cd 17-23). L'estomac est simple et le cæcum peu développé.

Les femelles possèdent une poche marsupiale à ouverture postérieure tournée vers le bas, et six à huit mamelles. La reproduction est particulièrement intéressante : ces Marsupiaux possèdent un placenta de type allanto-chorial, dépourvu de villosités, qui ressemble à celui des Placentaires. C'est ce qui explique que les Péramélidés naissent à un stade plus avancé (14 mm de long chez *Perameles*) que les autres Marsupiaux. Nombre d'espèces se reproduisent durant l'automne austral (entre mars et juin), chaque portée comprenant de 2 à 6 petits ; ceux-ci sont souvent pourvus de griffes caduques, qu'ils perdent après être arrivés dans le marsupium.

Les Péramélidés sont très agiles ; Animaux nocturnes ou crépusculaires, ils s'activent toutefois le jour au moment de la construction des nids, lesquels consistent parfois en une accumulation de matières végétales. Ils sont terricoles, et certaines espèces sont d'habiles fouisseuses, soit pour creuser les terriers *(Thylacomys)*, soit pour rechercher leur nourriture, faite d'Insectes, de divers petits Animaux et même de Végétaux. Certaines espèces sont herbivores. Les Péramélidés habitent divers milieux : prairies à végétation herbacée abondante, près des cours d'eau et des marais, contrées buissonneuses et forêts denses pluviales ; ils fréquentent aussi les abords des villes. Utiles parce qu'ils détruisent de nombreux Insectes, ils peuvent également provoquer des dégâts dans les cultures. Ils sont la proie des varans et surtout des divers Carnivores Placentaires introduits par les Européens : de nombreuses espèces sont au bord de l'extinction, et de nombreuses races géographiques ont disparu. Actuellement protégée par la loi, cette famille compte huit genres et vingt espèces, distribuées en Tasmanie, en Australie, en Nouvelle-Guinée, aux îles Key et Aru, dans l'archipel d'Entrecasteaux, dans l'archipel Bismarck et à Ceram.

L'un des genres les plus importants et le plus caractéristiques est *Thy acomys,* auquel appartiennent les deux espèces de bandicoots à oreilles de lapin. L'espèce la plus répandue est *T. lagotis,* le bilby ou bandicoot à oreille de lapin commun, long de 30 à 50 cm, avec une queue d'environ 20 cm, noire à la base et blanche à l'extrémité. Il a le museau pointu, une fourrure longue et soyeuse, de couleur bleu grisâtre. C'est un Animal

timide, carnivore ou insectivore, vivant par couples, chaque individu ayant une tanière très profonde. Il est devenu rare dans de nombreuses régions, mais non en Australie méridionale.

Chaeropus ecaudatus, le bandicoot à pieds de cochon, est le seul représentant du genre. Long de 25 cm, il ressemble plus à une gazelle qu'au porc, dont il se rapproche néanmoins par la conformation de ses pattes antérieures, pourvues seulement de deux doigts fonctionnels. Devenu très rare, il a peut-être même déjà disparu.

Les *Perameles,* longs de 20 à 40 cm, qui ressemblent à de gros rats, ont le museau assez allongé, des oreilles petites, une robe rude faite de poils grossiers, striée de barres transversales claires et foncées sur le dos et l'arrière-train, sauf chez *P. nasuta*. Ils sont insectivores et se procurent leurs proies en creusant le sol ; certains se nourrissent aussi de Sauriens et de petits Mammifères. Ils font leur nid à terre dans la végétation. Il existe cinq espèces en Australie et en Tasmanie, surtout dans les zones découvertes (certaines comme *P. nasuta* habitent aussi les forêts). *P. eremania* habite les régions désertiques du centre australien.

Les autres genres sont répandus principalement en Nouvelle-Guinée et dans les archipels voisins ; tous ont plus ou moins l'aspect des rats, parfois de grande taille (jusqu'à 50 cm).

Les *Echymipera,* ou bandicoots à piquants, sont longs de 20 à 50 cm, avec une queue courte (10 cm au maximum), une robe rude aux poils rigides et piquants (brun rougeâtre chez *E. rufescens*). On en connaît trois espèces, qui habitent les forêts pluviales denses de la Nouvelle-Guinée et de la péninsule d'York (Australie), ainsi que l'archipel Bismarck et les îles Aru et Key.

Les *Isoodon,* de même taille, à fourrure un peu spinuleuse, sont plus trapus et plus massifs ; on les distingue à leurs oreilles courtes et arrondies, ainsi qu'à leur museau plus court. Ils vivent en Nouvelle-Guinée, en Australie et en Tasmanie.

Citons, enfin, *Rhynchomeles* (avec le seul *R. prattorum,* de l'île de Ceram), *Peroryctes* et *Microperoryctes,* des zones montagneuses de Nouvelle-Guinée (*P. longicauda* habite jusqu'à plus de 4 000 m d'altitude).

Super-famille des Cénolestoïdés

Les Cénolestoïdés *(Caenolestoidea)* vivent en Amérique. Ils renferment une seule famille.

Les **Cénolestidés** *(Caenolestidae)* ne comprennent que trois genres et sept espèces, vulgairement appelés rats-opossums. Il s'agit vraisemblablement de formes archaïques, constituant, en quelque sorte, des termes de passage entre les Polyprotodontes et les Diprotodontes, ce qui explique qu'on les classe parfois en un groupe à part, les Paucituberculés.

De petite taille (9 à 13 cm de long), ils ressemblent à des musaraignes ou à des petits rats. Leurs membres, à peu près égaux, sont pentadactyles, avec des doigts toujours séparés, et le gros orteil petit et non opposable. Leur queue est longue (6 à 13 cm) et velue jusqu'au bout. Le marsupium existe parfois chez les juvéniles, mais manque toujours chez les adultes ; les femelles possèdent deux paires de mamelles inguinales, sauf chez *Rhyncholestes*.

La formule dentaire est :

$$\left(\mathrm{I}\ \frac{3\text{-}4}{4};\ \mathrm{C}\ \frac{1}{1};\ \mathrm{Pm}\ \frac{3}{3};\ \mathrm{M}\ \frac{4}{4}\right) \times 2 = 46\text{-}48.$$

La formule vertébrale est : C 7 ; T 13 ; L 6 ; S 2 ; Cd 22-27.

Assez rares et mal connus, les Cénolestidés sont terricoles, crépusculaires et nocturnes, insectivores et quelquefois carnivores ; leur estomac est divisé en trois chambres. Confinés uniquement au secteur occidental des Andes, avec une distribution discontinue, ils vivent jusqu'à 4 300 m d'altitude dans les forêts et les zones contiguës (Colombie, ouest du Venezuela, Équateur, sud du Pérou, et une partie du Chili).

Le principal genre est *Caenolestes,* avec cinq espèces, des forêts de montagne à climat froid : les plus connues sont *C. fuliginosus* et *C. obscurus*. Citons *Lestoros inca,* des forêts montagneuses du Pérou, et *Rhyncholestes raphanurus,* des forêts côtières à climat tempéré du Chili centro-méridional et de l'île de Chiloe ; les femelles de ce dernier ne possèdent que cinq mamelles.

T. Okapia

▲ ***Les Phalangéridés ressemblent à des loirs, à des écureuils et même à certains Lémuriens ; leurs pattes sont pentadactyles.***

Super-famille des Phalangéroïdés

Les Phalangéroïdés *(Phalangeroidea),* ou Diprotodontes, comprennent les formes les plus spécialisées des Marsupiaux vivants, essentiellement végétariennes et caractérisées par la réduction du nombre d'incisives (trois au maximum à la mâchoire supérieure), l'absence de canines inférieures, et une plus grande robustesse de la dentition. Autre caractère fondamental, les deuxième et troisième doigts des membres postérieurs sont soudés entre eux.

La quasi-totalité des Phalangéroïdés vit dans la région australienne.

La famille des **Phalangéridés** *(Phalangeridae)* est l'une des plus intéressantes et des plus nombreuses de l'ordre des Marsupiaux. Elle est surtout distribuée dans la région australienne, jusque dans la partie orientale, ce qui est unique pour l'ordre.

La taille peut varier de 6 cm *(Acrobates pygmaeus)* à 80 cm (le koala) ; les Phalangéridés ressemblent à des rats, des loirs, des écureuils et même à certains Lémuriens *(Phalanger)* ou à de petits ours *(Phascolarctos)*. Leur queue est généralement longue, fréquemment préhensile, rudimentaire seulement chez le koala. Leur fourrure est souvent très serrée, laineuse ; leurs livrées sont habituellement caractéristiques avec des mouchetures très nettes (chez *Phalanger maculatus*) ou de larges bandes sur le dos et les flancs.

Les pattes sont pentadactyles : les antérieures ont les premier et deuxième doigts opposables aux autres, et les postérieures ont le gros orteil très développé, sans griffe et opposable, alors que les deuxième et troisième doigts sont soudés. Chez trois genres *(Acrobates, Petaurus* et *Schoinobates)* les membres antérieurs sont reliés aux membres postérieurs par un large patagium, qui permet à ces Marsupiaux d'effectuer de longs vols planés, comme les écureuils volants et les Dermoptères (*Pseudocheirus lemuroides* possède seulement une petite membrane).

Diprotodontes, les Phalangéridés ont une denture très variable, même au sein d'une même espèce. La formule est : $\left(\mathrm{I}\ \frac{2\text{-}3}{1\text{-}3};\ \mathrm{C}\ \frac{1}{0};\ \mathrm{Pm}\ \frac{1\text{-}3}{1\text{-}3};\ \mathrm{M}\ \frac{3\text{-}4}{3\text{-}4}\right) \times 2 = 24\text{-}42$; la première incisive supérieure est longue alors que les deuxième et troisième, quand elles existent, sont petites. La formule vertébrale est : C 7 ; T 11-13 ; L 5-8 ; S 2-3 ; Cd 8-31. Le marsupium est bien développé et son ouverture est située en avant, sauf chez le koala, où elle est postérieure. Les femelles, qui ont deux ou quatre mamelles, mettent bas des portées de 2 ou 3 petits, qui restent relativement peu de temps dans la poche marsupiale.

Essentiellement forestiers et arboricoles, souvent très lents, ces Marsupiaux sont relativement adaptés à leur

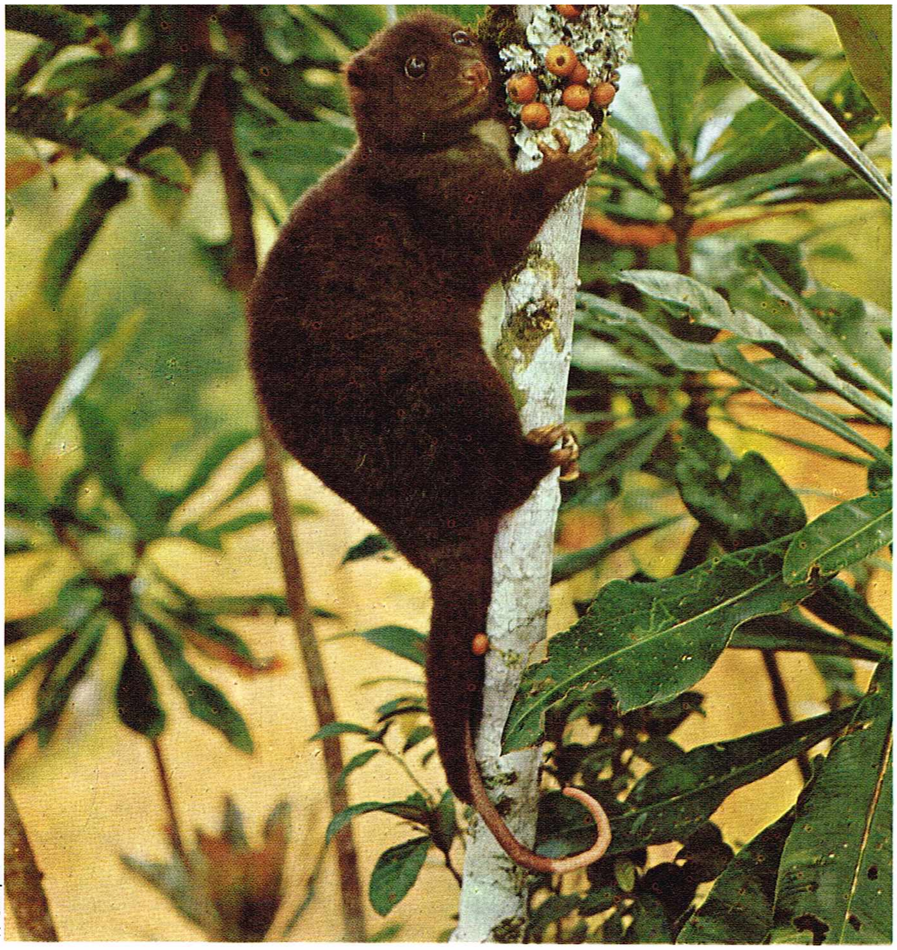
T. Okapia

▲ *Un représentant du genre* Phalanger *appartenant à la famille des Phalangéridés.*

▼ *Un des Phalangéridés les mieux connus et les plus répandus,* Trichosurus vulpecula, *dans son nid qu'il construit dans un trou d'arbre.*

T. Okapia

genre de vie, grâce à leur queue préhensile; seuls les *Trichosurus,* ainsi que quelques *Phalanger* et *Pseudocheirus dahlii,* vivent aussi à terre, trouvant refuge dans des anfractuosités de roches. Crépusculaires et nocturnes, ils se nourrissent de matières végétales (feuilles et fruits); quelques espèces dévorent aussi des Insectes; beaucoup sont omnivores.

La distribution géographique de cette famille est très vaste : la Tasmanie, la Nouvelle-Guinée, où certaines espèces se rencontrent jusqu'à près de 4 000 m d'altitude et dont elles constituent une partie importante et typique de la faune mammalienne forestière, l'archipel Bismarck, les îles Salomon, Ceram, Timor et Célèbes, et même la sous-région australo-malaise.

Les Phalangéridés comptent seize genres et quarante-trois espèces, réparties en trois sous-familles, que l'on distingue surtout par leur morphologie dentaire.

Les *Phalangérinés* possèdent des molaires bunodontes. Leur cæcum est long et simple. Il en existe douze genres et vingt-six espèces.

Au genre *Phalanger* appartiennent les cuscus, ou couscous, qui sont les plus intéressants des Phalangéridés arboricoles et forestiers; il en existe sept espèces, qui habitent des Célèbes à la Nouvelle-Guinée, aux îles Salomon, ainsi qu'au nord de la péninsule d'York et au Queensland. Longs de 30 à 65 cm environ, ils sont robustes; leur queue, aussi longue que le corps, est préhensile. Ils ressemblent quelque peu aux Lémuriens, surtout par leurs yeux saillants et bien visibles et, en outre, cerclés de jaune. Leurs oreilles sont courtes et arrondies. Leur fourrure, dense et laineuse, allant du blanchâtre au roux, et du gris au noirâtre, est parfois différente selon le sexe.

Animaux solitaires, habitant les forêts pluviales, ils se meuvent avec une certaine lenteur, rappelant par là les *Nycticebus.* Ils émettent des grognements et des aboiements. Ils se nourrissent de fruits, de feuilles, d'Insectes, d'Oiseaux et d'œufs. Ils sont chassés pour leur chair par les indigènes. Les pythons sont leurs prédateurs. Les portées sont généralement géminées.

L'espèce la plus typique est *Phalanger maculatus,* le couscous tacheté, de Nouvelle-Guinée et de la péninsule d'York. Les mâles, à la différence des femelles, présentent une très belle robe tachetée.

L'une des espèces les mieux connues et les plus répandues de Phalangéridés australiens est *Trichosurus vulpecula,* long de 50 cm, à museau pointu, à oreilles longues et à magnifique robe généralement gris argenté, très fournie (c'est pourquoi il est victime d'une chasse intense). Sa queue, préhensile, longue de 30 cm environ, est couverte d'une fourrure serrée, sauf à sa partie terminale, qui est nue. Cette espèce arboricole, nocturne et solitaire fréquente les forêts et, parfois, les zones découvertes en plaine, ainsi que les régions semi-désertiques; elle manifeste une prédilection pour les eucalyptus situés près des cours d'eau. En outre, malgré la chasse dont elle est l'objet, elle aime à fréquenter les endroits habités, s'installant dans les jardins et jusque sur les toits. Elle se construit un nid dans un trou d'arbre. La femelle, après une gestation de 17 jours, a généralement un seul petit, qui devient indépendant vers 5 ou 6 mois. Sa longévité semble être, au maximum, de 13 ans. Cet Animal vit dans une grande partie de l'Australie, en Tasmanie et dans certaines îles voisines.

T. caninus, des montagnes de l'Australie orientale, a d'abord reçu le nom commun de « possum » puis, improprement, d' « opossum », au sens d'opossum d'Australie, à l'égal d'autres membres de genres différents appartenant à la même famille. Rappelons que le nom d'opossum est exclusivement attribué aux sarigues, Didelphidés américains.

Acrobates pygmaeus, l'acrobate pygmée, minuscule (6 à 8 cm), vit surtout dans les forêts d'eucalyptus de l'Est australien. Il possède, entre les pattes et les flancs, une étroite membrane (patagium), qui lui permet d'effectuer de longs vols planés d'un arbre à un autre. Sa queue, caractéristique, est pourvue des deux côtés d'une frange de poils rigides, longs de 8 mm, formant une sorte de plume. Il vit en groupes familiaux, parfois nombreux, et se nourrit d'Insectes, de nectar et de fleurs. Chaque portée comprend, au maximum, 4 petits.

Burramys parvus, un peu plus gros, était connu seulement à travers des fossiles du Pléistocène, lorsqu'on a

découvert une espèce vivante en 1966, dans l'État de Victoria en Australie; il possède de grandes prémolaires typiques, coupantes.

Distoechurus pennatus, qui habite les forêts de la Nouvelle-Guinée, très semblable à l'espèce précédente, est long d'environ 12 cm et présente de larges taches foncées autour des yeux.

Les deux espèces de *Cercartetus,* ou loirs-opossums, ont la même taille que *D. pennatus. C. nanus,* des forêts du sud-est de l'Australie, et de Tasmanie, possède une queue typique, préhensile, cylindrique et gonflée à la base, surtout avant l'hiver. Ces Phalangéridés entrent en semi-léthargie à la mauvaise saison. Ils se nourrissent d'Insectes, de nectar et de feuilles; les femelles ont jusqu'à 6 petits par portée.

Les trois espèces d'*Eudromicia,* ou « opossums pygmées », sont très proches des précédentes. Forestières également, elles habitent la Nouvelle-Guinée (jusqu'à 4 000 m d'altitude), le Queensland et la Tasmanie. Leur queue, qui est grosse à la base, ne semble pas varier avec les saisons, à l'inverse de ce qui a lieu chez les *Cercatecus;* cependant, les *Eudromicia* comme ces derniers, en semi-léthargie pendant l'hiver.

Les *Petaurus,* ou écureuils marsupiaux, comptent trois espèces des forêts de Nouvelle-Guinée et d'Australie. Pourvus d'un patagium bien développé qui leur permet des vols planés de 50 à 90 m *(P. australis),* ils ressemblent aux écureuils volants proprement dits. Ce sont des Animaux nocturnes, très actifs et agiles. *P. breviceps,* l'espèce la plus commune, a une prédilection pour les substances sucrées. Son corps atteint 18 cm, sa queue 20 cm. Son museau est court et pointu, ses oreilles ovalaires; sa robe est serrée et douce, gris clair, ornée d'une nette bande noire allant du centre du museau à la moitié du dos. Cette espèce vit en petits groupes et se nourrit d'Insectes, qu'elle capture en plein vol, de nectar et de fleurs; agressive, elle s'attaque même aux petits Mammifères. Elle est commune dans le nord et l'est de l'Australie. Les espèces proches sont *P. norfolcensis,* longue de 25 cm, et *P. australis,* qui atteint 30 cm de long; cette dernière a une queue très fournie (40 cm de long) et vit en solitaire ou par couples, se nourrissant surtout de matières végétales.

Les *Gymnobelideus,* proches des *Petaurus,* sont représentés par *G. leadbeateri,* espèce rare dépourvue de patagium; longtemps considérée comme disparue, on l'a trouvée vivante, en 1961, dans les forêts très denses du sud de l'État de Victoria, en Australie.

Les *Dactylopsila,* ou opossums rayés, montrent un parallélisme remarquable avec l'aye-aye (Lémurien de Madagascar) : en effet, tous deux ont la première incisive supérieure très grosse et le quatrième doigt de la main très long, ce qui correspond à leur régime insectivore composé d'Insectes xylophages et de leurs larves (ce caractère est encore plus accentué chez *Dactylonax palpator* de Nouvelle-Guinée, qui a des mœurs analogues). On connaît trois espèces, dont *Dactylopsila trivirgata,* de Nouvelle-Guinée et du Queensland.

Enfin, le genre *Wyulda,* avec pour seule espèce *W. squamicaudata,* longue de 35 cm, rare, habite le nord-ouest de l'Australie; cet Animal typique par sa queue en grande partie nue, préhensile et recouverte d'écailles ovalaires, est arboricole et se nourrit de matières végétales, dont les fruits des *Macrozamia* (Cycadacées).

La sous-famille des *Phascolarctinés,* dont les individus possèdent des molaires sélonodontes, un cæcum long et très contourné, compte trois genres et seize espèces.

La seule espèce du genre *Phascolarctos, P. cinereus,* le koala, est de loin la plus intéressante. C'est le célèbre ourson marsupial, qui participe à de nombreuses légendes du Nouveau Monde. Long d'environ 80 cm, robuste et trapu, il ressemble fort à un ourson pansu : grosse tête, museau court, oreilles grandes et velues, pattes larges. Sa fourrure est dense, serrée, grisâtre sur le dessus et plus claire en dessous. Sa queue est rudimentaire. Il pèse jusqu'à 15 kg. Son appareil digestif, caractérisé par un cæcum mesurant jusqu'à 2,50 m, est adapté à son régime strictement végétarien, constitué presque uniquement de feuilles de douze espèces d'eucalyptus. Animal arboricole, le koala est solitaire, mais les mâles constituent un harem qu'ils défendent jalousement. Les femelles, avec un marsupium bien développé, à ouverture dirigée vers l'arrière, et deux mamelles, ont des portées

T. Okapia

▲ *Un loir-opossum* (Cercartetus nanus) *;*
Le genre Cercartetus *compte deux espèces; ces Phalangéridés se nourrissent d'Insectes, de nectar et de feuilles.*

▼ *Koala femelle* (Phascolarctos cinereus) *portant son petit agrippé sur son dos.*

C. Bevilacqua

▶ *Un représentant de la sous-famille des Phascolarctinés : « le queue à anneaux »* (Pseudocheirus lanuginosus).

Z.F.A.

de 1 ou (rarement) 2 petits; elles mettent bas en juin, après 25 à 30 jours de gestation. Le petit koala, pesant 5 g à la naissance, reste dans le marsupium pendant 6 mois, devient indépendant à 1 an et sexuellement mature à 3 ou 4 ans. La longévité de cette espèce est de 20 ans. Autrefois très répandu en Australie, *P. cinereus,* décimé par des maladies et chassé pour sa fourrure, est devenu rare; à présent, il est rigoureusement protégé, et on le rencontre au milieu des forêts d'eucalyptus de l'est de l'Australie (surtout dans le Queensland).

Le genre *Pseudocheirus* comprend quatorze espèces, appelées localement les « queues à anneaux », distribuées en Australie, en Nouvelle-Guinée et en Tasmanie. Essentiellement arboricoles et végétariens, ces *Phascolarctinés* ont une forme élancée (30 à 40 cm de long) et une longue queue préhensile, cylindrique et nue à son extrémité. Citons *P. peregrinus* d'Australie, le plus connu, *P. lemuroides* du Queensland, qui ressemble étrangement à certains Lémuridés, et *P. dahlii,* terricole, à queue courte et habitant les zones rocheuses.

Le genre *Schoinobates* comprend pour unique espèce *S. volans,* vulgairement appelé « pétauriste » ou écureuil marsupial volant, qui habite les montagnes d'Australie orientale. C'est l'un des plus grands Phalangéridés volants (jusqu'à 50 cm de long), qui possède un grand patagium lui permettant d'effectuer des vols planés de 100 m. Sa queue, plus longue que le corps, est préhensile. La couleur de sa fourrure serrée et soyeuse va du noir au gris clair. Strictement arboricole, il se nourrit de feuilles et de bourgeons, surtout d'eucalyptus.

La sous-famille des *Tarsipédinés,* caractérisée, notamment, par des molaires très petites en voie de réduction, ne comprend qu'une seule espèce, *Tarsipes spenserae,* la souris à miel, qui ressemble à une souris. Longue de 8 cm, avec une queue de 10 cm fuselée et préhensile, elle est caractérisée par son museau pointu et allongé. Sa fourrure, gris clair, ornée de trois bandes longitudinales brunes, est formée de poils courts et rudes. Solitaire ou vivant par couples, la souris à miel est un agile grimpeur : elle vit sur les arbres et les buissons, se réfugiant pendant le jour dans les nids d'Oiseaux ou dans des nids qu'elle construit elle-même. Elle se nourrit de nectar (grâce à sa langue), de miel et d'Insectes. Les femelles mettent bas jusqu'à 4 petits par portée. Cette espèce est encore assez commune dans les zones côtières du Sud-Ouest australien.

Les **Phascolomidés** *(Phascolomidae),* ou **Wombatidés,** présentent des caractères étonnamment proches de ceux des Rongeurs : un corps trapu et lourd, ressemblant à celui d'un ourson, avec une grosse tête, un museau court, de petits yeux, des oreilles courtes, un cou peu marqué. Leurs pattes sont courtes et robustes, les antérieures ont cinq doigts fouisseurs armés de griffes, et les postérieures ont les deuxième et troisième doigts en partie

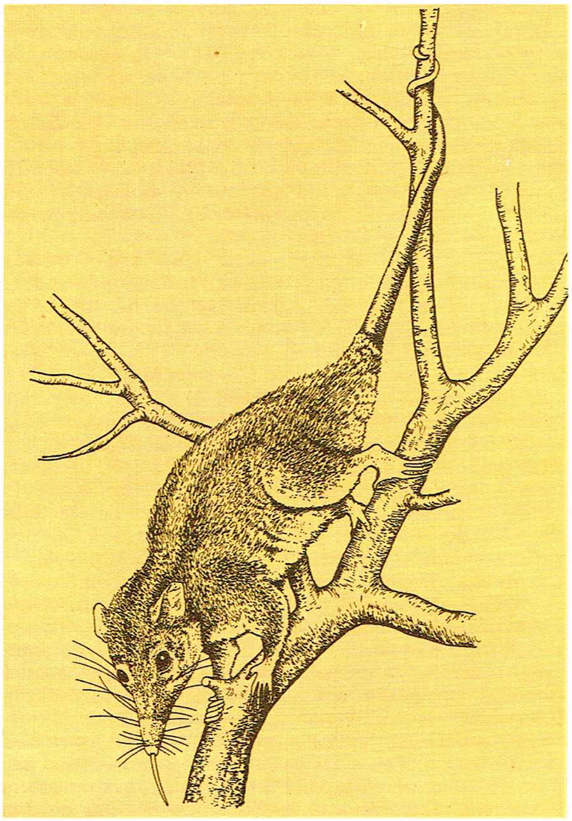
I.G.D.A.

▶ *La souris à miel ou tarsipe* (Tarsipes spenserae) *dont on observera le long museau d'où sort la langue protractile.*

soudés, tandis que le gros orteil est rudimentaire et dépourvu de griffe. La queue est très courte. Les adultes, longs de 70 cm à 1,20 m, peuvent peser 30 kg.

La denture, dont la formule est :

$$\left(I\,\frac{1}{1};\;C\,\frac{0}{0};\;Pm\,\frac{1}{1};\;M\,\frac{4}{4}\right)\times 2 = 24,$$

présente une nette convergence avec celle des Rongeurs : croissance continue, incisives développées, recouvertes d'émail seulement à la partie antérieure et séparées des dents maxillaires par une large diastème. La formule vertébrale est : C 7 ; T 13-15 ; L 4-6 ; S 4 ; Cd 10-16. L'estomac est simple et le cæcum court et large.

Généralement nocturnes et solitaires, les Phascolomidés sont difficiles à observer, car ils sont craintifs. Habiles et vigoureux fouisseurs, ils vivent dans les forêts de montagne ou dans les savanes, où ils se creusent de longs terriers (mesurant jusqu'à 30 m) avec un gros nid d'herbes au fond. Se nourrissant de Végétaux (herbes, feuilles, racines et écorces), ils peuvent même abattre des arbres en en rongeant les troncs à la base, comme les castors.

Les femelles, qui possèdent une poche marsupiale à ouverture postérieure et une seule paire de mamelles, mettent bas, généralement de janvier à juillet, un petit par portée, qui reste dans le marsupium jusqu'en décembre. Ces Marsupiaux trapus ont été exterminés dans de nombreux endroits, à cause des dégâts qu'ils faisaient aux cultures en creusant leurs longues tanières, refuges commodes pour les lapins et danger constant pour le bétail qui se fracturait les membres en effondrant les galeries. Leur chair, qui sent le musc, est appréciée par les indigènes.

La famille compte deux genres et trois espèces, distribuées en Australie et en Tasmanie.

Phascolomis ursinus, le wombat commun, qui est le plus grand, a l'extrémité du museau nue, les oreilles courtes et arrondies, et une fourrure grossière et très rude. Il vit dans les régions montagneuses du sud-est de l'Australie, aux îles Flinders (dans le détroit de Bass) et en Tasmanie.

Le second genre, *Lasiorhinus,* est caractérisé par l'extrémité velue de son museau. *L. latifrons,* qui atteint 1 m de long, a la pointe du museau blanchâtre. Il présente des oreilles plus longues et pointues et une fourrure plus douce que le wombat commun. Il habite deux zones distinctes, en Australie orientale et en Australie méridionale. *L. gillespiei,* qui a le bout du museau non tacheté de blanc, vit dans la partie centro-méridionale du Queensland.

Les **Macropodidés** *(Macropodidae)* forment une famille très nombreuse et très importante, comprenant les kangourous, qui sont devenus le symbole de l'Australie. Leur caractère morphologique fondamental est la disproportion entre les membres antérieurs, courts et servant peu à la locomotion, et les postérieurs, très longs et robustes, typiquement conformés pour le saut : Macropodidé vient du grec et signifie « à grands pieds ». La taille de ces Marsupiaux va de 23 cm de long (chez les *Hypsiprymnodon*) à 1,60 m sans la queue (chez certains kangourous qui peuvent atteindre 2 m de haut en position dressée et peser plus de 90 kg, les mâles étant toujours plus gros que les femelles). La queue est habituellement longue, grosse à la base, velue, et préhensile seulement chez *Bettongia* et *Potorous ;* elle tient lieu de membre complémentaire pour l'appui, parfois d'organe propulseur et même de balancier pour le saut. Les pattes antérieures, très petites (sauf chez *Dendrolagus*), sont pentadactyles, alors que les postérieures sont toujours dépourvues du premier doigt (sauf chez les *Hypsiprymnodon*) ; les deuxième et troisième doigts de pied sont soudés ; le quatrième doigt est très long et robuste avec une forte griffe et le cinquième est court.

La tête est petite avec des oreilles assez grandes. La formule dentaire est : $\left(I\,\frac{3}{1};\;C\,\frac{1\text{-}0}{0};\;Pm\,\frac{2}{2};\;M\,\frac{4}{4}\right)\times 2 = 32\text{-}34.$ Les canines peuvent être absentes ; les prémolaires sont étroites et coupantes. Les dents sont surtout adaptées pour brouter l'herbe chez les plus grandes espèces (wallabys et kangourous), et à un régime phytophage chez les espèces de taille inférieure. Il existe une diastème entre la canine supérieure et les dents maxillaires ; en outre, la présence d'un nombre exceptionnel de molaires est observé chez les *Paradorcas*. La formule vertébrale est : C 7 ; T 13 ; L 6 ; S 2 ; Cd 21-25.

C. Bevilacqua

▲ *Le lasiorhine à front large* **(Lasiorhinus latifrons)** *est un Phascolomidé de l'est et du sud de l'Australie.*

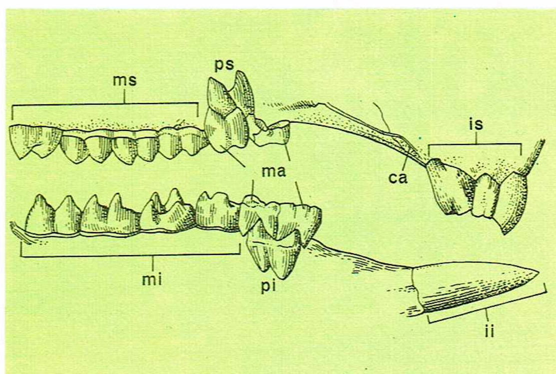

I.G.D.A.

◀ *Denture d'un jeune kangourou (Marsupial herbivore) : ms, molaires supérieures ; mi, molaires inférieures ; ps, prémolaire supérieure ; pi, prémolaire inférieure (les prémolaires inférieures sont les seules dents de remplacement et sont ici dans la gencive) ; ma, molaires antérieures (correspondant aux molaires de lait) ; ca, canines ; is, incisives supérieures ; ii, incisive inférieure.*

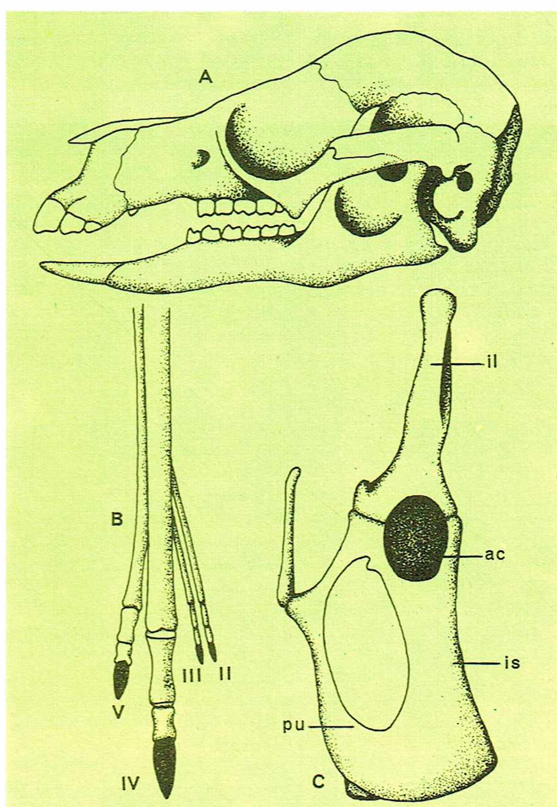

I.G.D.A.

◀ *Représentation schématique du crâne (A) du pied (B) et des os du bassin (C) d'un kangourou ; il, ilion ; ac, cavité cotyloïde ; is, ischion ; pu, pubis ; les chiffres romains indiquent les doigts.*

P. Castel - Jacana

▲ **Potorous tridactylus,** *le potoroo, avec son petit.*

Herbivores, les Macropodidés présentent beaucoup d'analogies avec les Ruminants et occupent, dans l'écosystème australien, une place équivalente à celle de ces derniers. Leur estomac est un long sac, à replis très nombreux, conformation qui rappelle celle du côlon ; la zone du cardia permet, grâce à des sillons œsophagiens spéciaux, la régurgitation du contenu gastrique en vue d'une seconde mastication, analogue à la rumination. Le cæcum est bien développé. La richesse et la densité de la flore intestinale permettent à ces Animaux de se nourrir d'une vaste gamme de Végétaux : ils peuvent ainsi coloniser des zones où d'autres Herbivores ne trouveraient pas à se nourrir.

▼ **Wallabya eugenii,** *connu sous le nom de tammar ou dama, est la plus petite espèce du genre.*

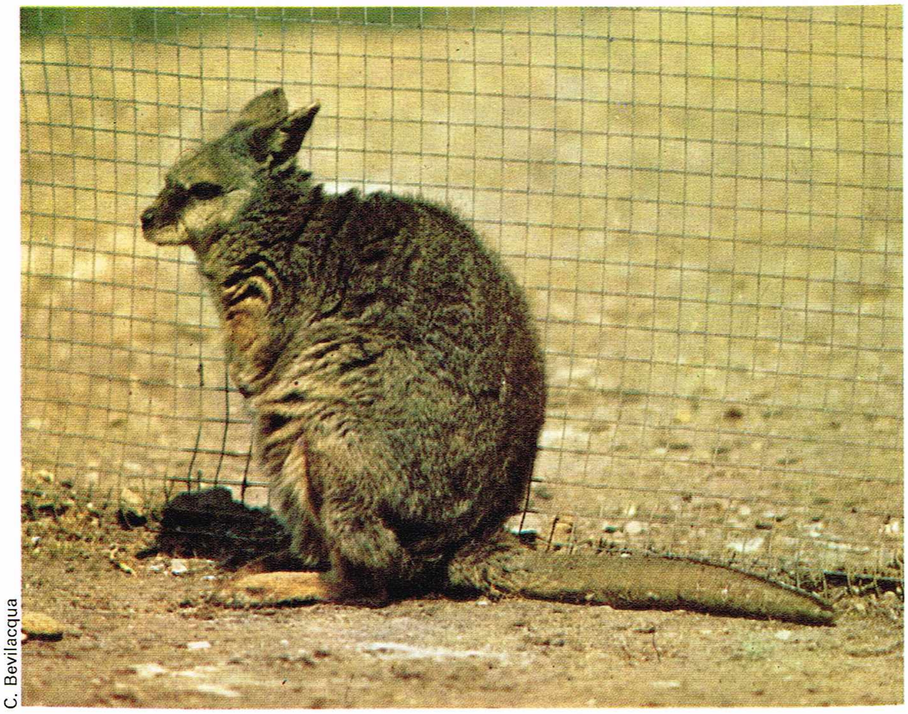

C. Bevilacqua

La poche marsupiale, toujours bien développée, présente une ouverture située en avant. Il y a quatre mamelles, dont deux, généralement, sont fonctionnelles. Les femelles mettent bas un seul petit par portée, rarement des jumeaux, et, le plus souvent, une seule portée par an ; la gestation dure, selon les espèces, de 27 à 40 jours. Chez de nombreuses espèces, il y a nidation différée : lorsqu'il y a ovulation, suivie de fécondation juste après la mise bas, l'œuf ne se fixe pas et reste en attente jusqu'à un moment plus propice à la reprise de la gestation.

Certaines espèces sont nocturnes, d'autres sont actives aussi bien le jour qu'au crépuscule ou durant la nuit. Mis à part *Dendrolagus,* qui est arboricole, les Macropodidés sont terricoles et se déplacent par bonds, grâce à leurs robustes pattes postérieures, en particulier les grands kangourous *(Macropus).*

Les Macropodidés vivent dans divers milieux, de la forêt à la savane, des prairies aux zones arides et désertiques, et jusqu'à 3 000 m d'altitude. On les trouve en Australie, en Tasmanie, en Nouvelle-Guinée et dans diverses îles voisines, et dans l'archipel Bismarck. La famille compte dix-sept genres et cinquante-deux espèces, réparties en trois sous-familles : Hypsiprymnodontinés, Potoroïnés, et Macropodinés.

La sous-famille des *Hypsiprymnodontinés* ne renferme qu'une seule espèce, *Hypsiprymnodon moschatus,* le rat-kangourou musqué, long d'environ 25 cm, avec une queue de 16 cm recouverte d'écailles. Il possède une robe veloutée et épaisse, grise, mêlée de rouge-orangé. Il se distingue des autres Macropodidés par le premier doigt des pattes postérieures bien développé, ainsi que par ses pattes antérieures mieux proportionnées, qui lui permettent une course quadrupède. Par divers caractères, il fait transition entre les Phalangéridés et les Macropodidés. Le rat-kangourou, à forte odeur musquée, vit isolé ou par couples ; il est actif pendant le jour. Terricole, il se nourrit d'Insectes, de larves, de tubercules et de diverses matières végétales. En février, les femelles donnent le jour à des jumeaux. Cette espèce habite les forêts du Queensland septentrional, souvent à proximité des cours d'eau et des lacs.

La sous-famille des *Potoroïnés* comprend tous les autres rats-kangourous, longs au maximum de 50 cm, et à queue velue, parfois préhensile et servant au transport des matériaux pour la construction des nids. Ces Marsupiaux ressemblent beaucoup à de minuscules kangourous, mais présentent des formes moins fines ; ils jouent, en Australie, un rôle comparable à celui des gros Rongeurs. Ils vivent dans les milieux les plus variés et se nourrissent de matières végétales ; Animaux nocturnes, ils sont généralement solitaires. Il en existe quatre genres et huit espèces rarissimes et en voie d'extinction.

L'une des espèces les plus typiques et l'une des plus rares est *Bettongia penicillata,* la bettongie à queue en pinceau, longue de 35 cm, à tête courte, et à oreilles courtes et arrondies. Sa livrée est brun verdâtre, avec le ventre blanc. Sa queue est préhensile, longue de 30 cm, et possède une frange typique de longs poils noirs à la partie terminale. *B. cuniculus,* proche de l'espèce précédente, vit en Tasmanie.

Aepyprymnus rufescens, assez fréquent dans les régions côtières de l'Australie orientale, habite, parfois en petits groupes, dans les lieux découverts. Long d'environ 50 cm, c'est le plus grand des rats-kangourous ; ses oreilles sont plus longues que celles de *Bettongia.* Sa fourrure est gris-roux ; sa queue, non préhensile, ne possède pas de pinceau de poils.

Caloprymnus campestris, le rat-kangourou du désert, habite les régions arides de l'Australie (région du lac Eyre).

Parmi les espèces du genre *Potorous,* appelées rats-kangourous à museau long, le plus intéressant est *P. tridactylus,* le potoroo, long d'environ 40 cm, à museau pointu et à oreilles rondes. Sa fourrure est brun verdâtre. Il possède une queue courte et préhensile. Commun en Tasmanie, il habite aussi les forêts denses du Sud-Est australien.

La sous-famille des *Macropodinés,* la plus importante et la plus nombreuse, compte douze genres et quarante-trois espèces, avec les wallabys, ou petits-kangourous, les kangourous proprement dits *(Macropus),* et les kangourous arboricoles, ou dendrolagues *(Dendrolagus).* Ils se distinguent par leurs molaires lophodontes.

Un premier groupe est constitué par les petits wallabys-lièvres *(Lagorchestes* et *Lagostrophus),* longs de 30 à 50 cm, qui diffèrent des rats-kangourous par leurs oreilles plus grandes. Animaux nocturnes, vivant parmi les buissons, dans les zones découvertes, leur nombre a fortement diminué. *Lagostrophus fasciatus,* grégaire, a le dos orné de bandes transversales foncées. Les trois espèces de *Lagorchestes* ont une robe uniforme et sont solitaires, la plus commune étant *L. conspicillatus,* d'Australie septentrionale.

Les genres *Petrogale* et *Paradorcas* comprennent les wallabys, ou kangourous des rochers. Très habiles, ils vivent dans les zones rocheuses, effectuant parfois des bonds de 4 m de longueur, lorsqu'ils sont poursuivis par leurs ennemis (dingos, renards, pythons et l'homme). *Petrogale penicillata,* une des espèces les mieux connues, mesure 70 cm de long et possède une queue très fournie; il vit, par petits groupes, en Australie orientale. *Paradorcas concinna,* long de 40 cm, d'une belle couleur roux-orangé, avec le ventre gris clair, habite l'Australie septentrionale. Il possède 7 molaires par demi-mâchoire.

Les trois espèces d'*Onychogalea* portent à l'extrémité de leur queue une curieuse production cornée dont le rôle est inconnu. Elles vivent dans une grande partie de l'Australie, à des altitudes peu élevées, surtout dans les forêts de Conifères ou dans les prairies. *O. fraenata,* longue de 60 cm, est caractérisée par la présence sur chaque flanc d'une bande claire bordée de noir, allant de l'oreille à l'épaule et aux aisselles.

Les thylogales, ou wallabys pademelons *(Thylogale),* comprennent quatre espèces, qui ne dépassent pas 70 cm. Nocturnes, ils habitent l'Australie, la Nouvelle-Guinée et la Tasmanie, fréquentant les zones buissonneuses et les sous-bois.

Le genre *Wallabia,* appelé vulgairement wallaby, qui renferme onze espèces, est très important. Ses représentants ressemblent beaucoup aux grands kangourous du genre *Macropus,* dont ils se distinguent par leur grande taille : ils mesurent de 50 cm à 1 m de long, pour un poids maximal de 25 kg; la longueur des pieds est de 11 à 13 cm. Un autre caractère qui les différencie est la persistance de la dernière prémolaire. Ces kangourous vivent en Australie, Tasmanie et Nouvelle-Guinée, dans les broussailles maigres ou les prairies. De nombreuses espèces, chassées pour leur fourrure, sont devenues rarissimes. Certaines sont diurnes, d'autres nocturnes; il en existe aussi bien des solitaires que des grégaires, notamment *W. parryi* et *W. dorsalis.* Beaucoup sont très agiles.

W. eugenii, le tammar, ou dama, est la plus petite espèce du genre; très rare, elle vit encore dans le Sud australien, ainsi que dans quelques îlots (dont l'île des Kangourous). Citons aussi *W. irma,* le wallaby à gants noirs, nommé ainsi à cause de ses extrémités noires.

W. agilis, corpulent et long de 1 m, d'une belle couleur gris sable, est l'une des espèces les plus communes encore de nos jours. Habitant principalement le nord de l'Australie, il est nocturne et grégaire. Enfin, *W. dorsalis* se distingue par la nette ligne noire de son dos et les barres claires de ses flancs.

Le genre *Macropus* est celui des kangourous proprement dits, ou kangourous géants, qui mesurent de 80 cm à 1,60 m de long, sans la queue, qui peut dépasser 1 m. Le poids des grands mâles, plus important que celui des femelles, dépasse vraisemblablement 90 kg. La croissance étant continue, les dimensions de l'Animal varient avec son âge. Les principaux caractères du genre sont, entre autres, l'absence de la dernière prémolaire supérieure, qui s'oblitère avec la disparition de la troisième molaire, et la longueur des pieds, supérieure à 26 cm. L'aspect typique des kangourous, déjà perceptible chez les wallabys, s'accentue chez les *Macropus :* l'arrière-train est très large et massif, les pattes postérieures, très développées, sont dotées d'une puissante musculature et deux fois plus longues que les antérieures. La queue est grosse et musclée, surtout à la base. Les kangourous effectuent, normalement, des bonds de 1 à 2 m, mais lorsqu'ils sont menacés, ils peuvent sauter 9 m en longueur et jusqu'à 3 m en hauteur; leur vitesse maximale atteint, sur de brefs parcours, 50 km/h.

En général, les petits naissent en hiver, après une gestation de 30 à 40 jours. Ils mesurent environ 25 mm de long, ce qui est la taille minimale, pour des Mammifères, par rapport à celle des adultes (soit moins de 1/10 000 du poids des adultes). Ils restent attachés aux mamelons pendant 2 mois au moins, ne sortent de la poche marsupiale que vers le sixième mois et l'abandonnent définitivement à un an. La longévité des kangourous est de 15 à 20 ans.

Ostman - G.R. Roberts

▲ ***Un exemplaire de* Wallabya bicolor, *dont on observera des parties noires sur le museau, les pattes et la queue.***

Seigneurs de la savane australienne, les kangourous vivent aussi dans la forêt claire et les broussailles, menant une existence grégaire, par troupes d'importance variable. Ils se nourrissent surtout la nuit et peuvent rester longtemps sans boire (jusqu'à deux ou trois mois chez *M. robustus*). Ce sont des Animaux inoffensifs et craintifs; cependant, lorsqu'ils sont attaqués, ils se défendent avec leurs pattes arrière, très puissantes et armées d'une griffe au quatrième doigt : ils peuvent ainsi éventrer d'un seul coup de patte un gros chien et même un homme. Leurs principaux ennemis sont les chiens, les dingos, et surtout l'homme, qui les a chassés et les chasse encore soit pour leur fourrure, soit à cause des dégâts qu'ils provoquent, quand ils sont trop nombreux, dans les cultures et les pâturages. Le genre *Macropus* compte trois espèces.

M. giganteus, le kangourou gris, ou grand kangourou, présente les formes les plus puissantes (il atteint jusqu'à 3 m de long, queue comprise, et plus de 2 m en position dressée) ; il est revêtu d'une robe gris brunâtre. En partie diurne, il habite typiquement la savane à eucalyptus de l'Est et du Sud-Ouest australiens et de la Tasmanie.

M. rufus, le kangourou roux, est de taille un peu plus petite, et présente des formes plus harmonieuses. Il atteint 1,65 m de long, plus 1,15 m pour la queue, et possède une très belle fourrure laineuse à poils courts; sa tête est gris bleuâtre chez les deux sexes, le corps roux

A. Margiocco

T. Okapia

▲ *A gauche un kangourou roux* (Macropus rufus); *à droite, un kangourou des arbres* (Dendrolagus sp.).

chez les mâles et gris bleuâtre chez la femelle; les côtés du museau sont traversés par deux barres blanches; la queue, enfin, est claire. Très grégaire, vivant en troupes pouvant compter une centaine de têtes, il est encore assez répandu dans les plaines intérieures de l'Australie.

M. robustus, le wallaroo, ou euro, est plus petit et plus trapu que les précédents. Il habite les zones rocheuses d'Australie. Il est combatif et peu grégaire, les vieux mâles étant même solitaires.

Setonyx brachyurus, le quokka, ou wallaby à queue courte, est très curieux : long d'environ 60 cm, trapu, il possède une queue très courte. Nocturne, il vit solitaire ou par petits groupes en quelques points du sud-ouest de l'Australie et se rencontre en nombre assez important dans les îles de Rottnest et de Bald. Il sert d'Animal de laboratoire.

Les *Dorcopsis* et *Dorcopsulus* comprennent, au total, cinq espèces, appelées dans leur ensemble wallabys des forêts; ils vivent en Nouvelle-Guinée, jusqu'à 3 000 m d'altitude.

Les *Dendrolagus,* dendrolagues, ou kangourous des arbres, longs de 50 à 80 cm, sont les seuls Macropodidés arboricoles. Ils ont les pattes antérieures un peu moins longues que les postérieures et une longue queue non préhensile, qui atteint 90 cm. Leur fourrure présente de très belles couleurs. Véritables acrobates, capables de sauter d'une hauteur de 15 m jusqu'au sol, ils habitent des lieux inextricables et se nourrissent de feuilles et de fruits, descendant parfois à terre pour manger et boire. Ils vivent par petits groupes composés d'un mâle et de plusieurs femelles et ont des mœurs nocturnes. Les dendrolagues constituent l'un des groupes les plus typiques de la faune mammalienne de la Nouvelle-Guinée, deux espèces étant représentées dans le Queensland septentrional. Le genre compte cinq espèces, les principales étant *D. ursinus* et *D. lumholtzi*.

Infraclasse des Euthériens

L'infraclasse des Euthériens *(Eutheria),* ou Placentaires *(Placentalia),* est de loin le groupe le plus évolué et le plus florissant de toute la classe, comprenant 94 % des espèces de la faune mammalienne actuelle. Les plus anciens genres connus ont été retrouvés en Mongolie dans les couches du Crétacé supérieur. De très petite taille et certainement très rares, ils peuvent être considérés comme des formes primitives d'Insectivores.

Parmi les caractères communs à tous les ordres de cette infraclasse, nous citerons les suivants : la reproduction vivipare, d'un type plus évolué que celle des Marsupiaux; il y a toujours un placenta allantoïdien (Placentaires) permettant un long développement embryonnaire dans l'utérus, et les petits naissent ainsi à un stade beaucoup plus avancé que ceux des Marsupiaux et des Monotrèmes; l'absence de marsupium ou d'os marsupiaux; la séparation des orifices anal et génito-urinaire par un espace appelé périnée; la simplicité et l'imparité du vagin et de l'utérus (Monodelphes), qui, en certains cas, peuvent se dédoubler secondairement; la présence quasi constante de dents de lait, la denture de l'adulte comptant fondamentalement 44 dents (cependant, il y a souvent une importante réduction numérique, ou, notamment chez certains Édentés et les Cétacés Odontocètes, elles peuvent être plus nombreuses, acquérant un caractère homodonte); l'existence constante, dans le cerveau, du corps calleux, qui relie à la base les deux hémisphères cérébraux; le volume de la boîte crânienne, sensiblement plus grand que celui des sous-classes et de l'infraclasse précédentes, par suite du plus grand développement de l'encéphale; la présence constante du palais secondaire; la mandibule n'a jamais de processus angulaire tourné en dedans, au contraire de ce qui a lieu chez les Aplacentaires; l'os tympanique peut être développé, formant parfois une bulle tympanique, très volumineuse en certains cas (Rongeurs); la soudure de l'os coracoïde à l'omoplate, le premier devenant une simple apophyse.

L'œuf des Euthériens est très petit (190 à 250 μ de diamètre). La vésicule ombilicale disparaît précocement, tandis que l'allantoïde adhère au chorion; celui-ci est en rapport constant avec la paroi utérine par des villosités dans lesquelles pénètrent les vaisseaux sanguins de l'allantoïde. Il s'ensuit une compénétration intime des villosités du chorion et de la muqueuse utérine, avec formation d'un placenta allantoïdien, par l'intermédiaire duquel l'embryon se nourrit, respire et élimine les catabolites. Il existe divers types de placentas. C'est avec les Placentaires que les Vertébrés ont atteint le degré d'évolution le plus élevé et le plus efficace sur le plan de la reproduction, avec une autonomisation progressive par rapport au milieu environnant. Les petits ont une probabilité de survie bien supérieure, et les soins des parents à leur progéniture sont beaucoup plus longs et beaucoup plus complexes.

La distribution géographique des Euthériens coïncide avec celle de la classe; ces Animaux sont rares seulement en Australie, où les Marsupiaux (ne parlons pas des espèces importées et élevées artificiellement) constituent l'élément dominant de la faune indigène.

Ordre des Insectivores

Les Insectivores *(Insectivora)* constituent l'ordre le plus primitif des Mammifères Placentaires. Étant apparus au Crétacé, ils nous ont légué un type archaïque de Mammifères, très intéressant pour l'étude de l'origine et des rapports phylogénétiques des autres Placentaires. Ils comptent les plus petits Mammifères vivants : *Suncus etruscus* (Soricidés), le pachyure étrusque, mesure tout au plus 5,2 cm et pèse 2 g. *Echinosorex gymnurus*

(Érinacéidés) est le plus grand Insectivore : il mesure 45 cm de longueur sans la queue.

L'aspect de ces Animaux est très variable selon les familles, le genre de vie et les adaptations. On peut distinguer plusieurs types : un habitus « soricoïde », coureur, à corps allongé, à pattes courtes, à museau long et à robe veloutée ; un habitus « talpoïde », fouisseur, à corps massif, à membres antérieurs aptes à fouir et à robe veloutée ; un habitus « érinacoïde », dont le représentant typique est le hérisson d'Europe, à corps massif et portant sur le dessus des piquants ; enfin, un habitus sauteur, propre aux Macroscélidés, dont les pattes postérieures sont plus longues que les antérieures et plus aptes au saut.

La queue peut être très courte ou très longue. Le caractère le plus commun est la forme du museau, qui se prolonge en une sorte de petite trompe, renforcée par des cartilages, à fonction tactile.

Les dents, qui ont toutes une racine, sont hétérodontes et diphyodontes. La formule dentaire est :

$$\left(I\,\frac{2\text{-}3}{1\text{-}3};\ C\,\frac{0\text{-}1}{0\text{-}1};\ Pm\,\frac{1\text{-}4}{1\text{-}4};\ M\,\frac{2\text{-}4}{2\text{-}4}\right) \times 2 = 26\text{-}44.$$

Les canines ont souvent l'aspect d'incisives ou de prémolaires ; ces dernières et les molaires sont cuspidées, trituberculées sectorielles, avec une tendance à devenir tétra- et pentatuberculées. Les dents maxillaires présentent deux types de reliefs : le type ralambdodonte, avec les trois cônes primaires disposés en V, et le type dilambdodonte, par adjonction de deux autres tubercules aux trois cônes primaires (on obtient un relief en W).

Certains Insectivores (Soricidés et Solénodontidés) possèdent des glandes spéciales à venin sous-maxillaires, sécrétant des subtances hautement toxiques pour les petites proies qui leur servent de nourriture.

L'appareil digestif est caractérisé par la forme simple de l'estomac et par l'absence de cæcum chez toutes les familles à l'exception des Macroscélidés.

Le crâne a une constitution archaïque. Il existe une clavicule, sauf chez les Potamogalinés. Les pattes sont presque toujours pentadactyles ; le pouce et l'orteil ne sont pas opposables aux autres doigts. La locomotion est de type plantigrade ou semi-plantigrade. Le cerveau, nettement macrosmatique, présente un gros développement des lobes olfactifs, ainsi que des caractères très primitifs. Les hémisphères cérébraux sont de petite taille et ne présentent pas de circonvolutions.

Les principaux sens sont l'odorat et le toucher, ce dernier concernant à peu près tout le corps, en particulier, le museau et les vibrisses. L'oreille a souvent un développement normal, mais peut ne pas posséder de pavillon. La vue est certainement un sens secondaire, et les yeux, petits, sont parfois très réduits et même recouverts par la peau chez les espèces fouisseuses telles que la taupe.

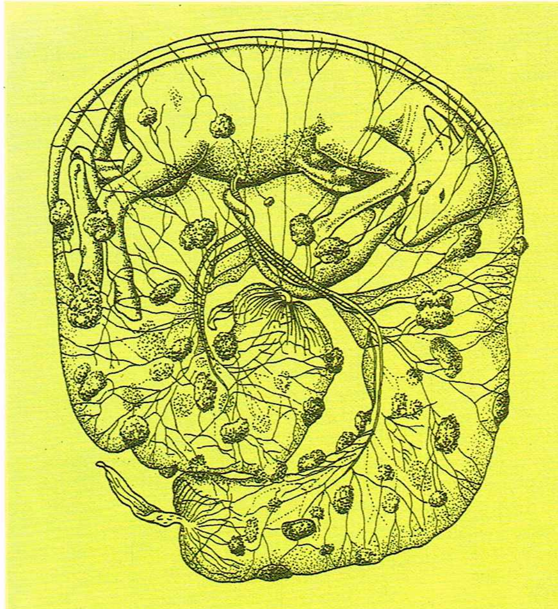

I.G.D.A.

◀ ***Représentation schématique d'un embryon de mouton, avec les membranes amniotiques et les cotylédons du chorion.***

La biologie de la reproduction présente des modalités très complexes. L'utérus est bicorne et le placenta discoïdal ; les testicules sont intra-abdominaux ou périnéaux mais jamais extra-abdominaux (comme chez les Tupayidés, considérés désormais comme des Primates). Chez les Chrysochloridés, les Tenrécidés et dans une certaine mesure les Soricidés, il existe un faux cloaque, cavité commune, où débouchent l'anus et les voies génito-urinaires. Les femelles ont de une à douze paires de mamelles. Les petits sont incapables de subsister par eux-mêmes.

Les Insectivores sont essentiellement nocturnes et, en majorité, terricoles ; certains sont souterrains (Chrysochloridés et Talpidés), d'autres aquatiques. Carnivores et insectivores, ils consomment quotidiennement une grande quantité de nourriture, parfois supérieure à leur poids. Leur rôle écologique est donc considérable, car ils limitent beaucoup le nombre des Insectes et de nombreux autres petits Animaux, y compris des Vertébrés.

Leur distribution s'étend à presque tout le monde peuplé par les Mammifères terricoles, à l'exception de l'Australie, de la plupart des terres arctiques, et d'une grande partie de l'Amérique du Sud, où ils ne sont représentés dans le Nord-Ouest que par le genre *Cryptotis* (Soricidés).

L'ordre des Insectivores comprend trois sous-ordres : les Chrysochloroïdes, les Euinsectivores et les Macroscélidoïdes, qui renferment au total soixante-quatre genres et environ trois cent soixante-dix espèces.

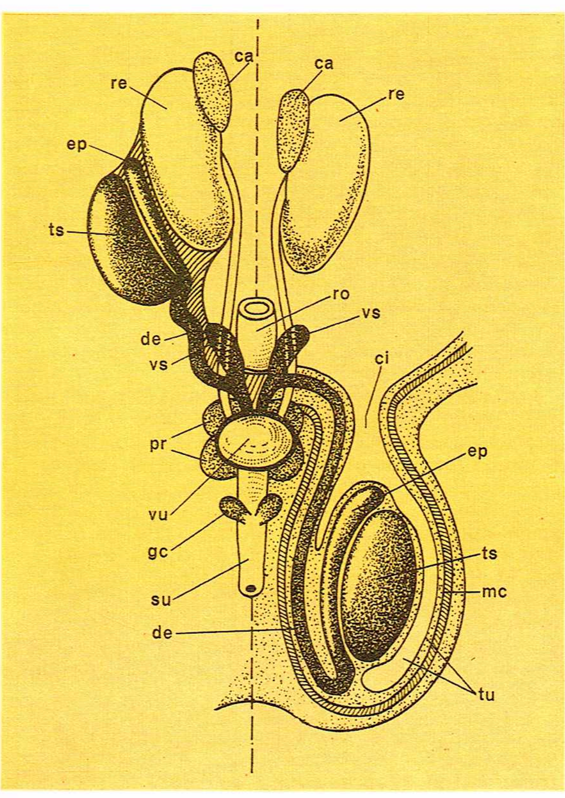

I.G.D.A.

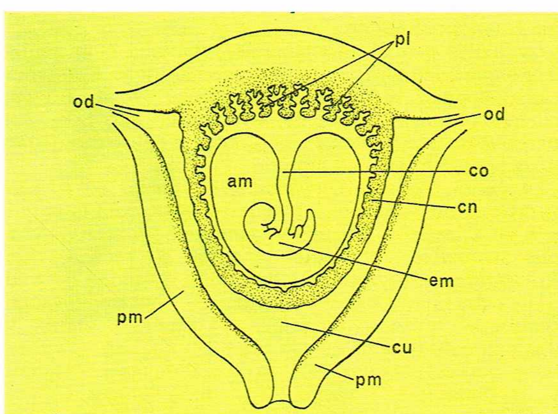

I.G.D.A.

◀ ***A gauche, schéma de l'appareil génital des Mammifères Euthériens (la moitié gauche représente la conformation primitive, et la moitié droite la conformation observée après la descente du testicule et la formation du scrotum) : ca, capsule surrénale ; re, rein ; ep, épididyme ; ts, testicule ; de, canal déférent ; ci, canal inguinal ; pr, prostate ; ro, rectum ; vs, vésicule séminale ; vu, vessie urinaire ; gc, glande de Cowper ; su, sinus uro-génital ; mc, muscle crémaster ; tu, tunique vaginale. A droite, coupe schématique de l'utérus durant la gestation : pl, placenta ; od, oviductes ; am, amnios ; co, cordon ombilical ; em, embryon ; cn, chorion ; cu, cavité utérine ; pm, paroi musculaire de l'utérus.***

Sous-ordre des Chrysochloroïdes

Le sous-ordre des Chrysochloroïdes *(Chrysochloroidea)* constitué par un groupe archaïque adapté à la vie hypogée, présente des caractères très différents de ceux des autres Insectivores, surtout en ce qui concerne le crâne. C'est certainement l'un des types les plus primitifs de Placentaires vivant actuellement. Ce sous-ordre ne renferme qu'une seule famille.

Les **Chrysochloridés** *(Chrysochloridae)*, qui vivent en Afrique, comprennent les taupes dorées, qui n'ont rien à voir avec les taupes vraies (famille des Talpidés), bien que, du fait de leur adaptation à un même mode de vie, elles leur ressemblent beaucoup par leur morphologie externe.

Ces Insectivores de petite taille (8 à 23 cm de long) ont un corps massif et à peu près cylindrique, un cou court et épais, et un museau tronconique, nu à son extrémité. Ils ne possèdent pas d'oreille externe visible. Leurs yeux sont très réduits ou recouverts par la peau. Leurs pattes sont courtes, les antérieures tétradactyles avec les deux doigts médians pourvus d'énormes griffes fouisseuses, et les postérieures pentadactyles avec les doigts reliés par une membrane et armés de courtes griffes. La queue est rudimentaire. La robe, touffue, est faite d'une fine laine soyeuse et présente des teintes iridescentes et métalliques, tirant sur le vert, le violet jaunâtre, le bronze et le doré (d'où le nom de Chrysochloridés, qui signifie étymologiquement « animaux vert doré »).

Le corps est entouré par une enveloppe musculaire sous-cutanée. Les mamelles sont au nombre de quatre, soit une paire thoracique et une paire inguinale.

Les Chrysochloridés possèdent généralement 40 dents. La formule est : $\left(I\frac{3}{3}; C\frac{1}{1}; Pm\frac{3}{3}; M\frac{3}{3}\right) \times 2 = 40$; cependant, il y a d'importantes variations, même individuelles : ainsi, les *Amblysomus* ont seulement 36 dents. Les dents maxillaires sont de type zalambdodonte. Les dents de lait tombent très tard.

Presque uniquement hypogées, les taupes dorées creusent des galeries ou habitent celles des Rongeurs, surtout des Bathyergidés. Elles vivent dans les zones arides ou sablonneuses, les prairies ou même les forêts. Plus actives à la saison des pluies, elles sont sujettes au phénomène de l'estivation pendant les périodes chaudes et sèches. Diurnes ou nocturnes, elles se nourrissent d'Insectes, de Vers, de larves de Sauriens apodes et d'autres Animaux du sous-sol, chassant rarement leurs proies en surface (comme le font les *Chrysospalax*). Les femelles ont 2 petits par portée.

La famille des Chrysochloridés comprend cinq genres et quelque onze espèces, qui se répartissent du Cameroun à l'Ouganda, à la Tanzanie et jusqu'au cap de Bonne-Espérance ; très abondants en Afrique du Sud, ces Insectivores y sont chassés à outrance, à cause des dégâts qu'ils occasionnent aux cultures.

Le genre type est *Chrysochloris*, présent en Afrique centrale et du Sud, avec les deux espèces, dont la principale est *C. asiatica*. Le second genre important, *Amblysomus*, semblablement distribué, compte six espèces, dont *A. hottentotus*, l'amblysome hottentot, d'Afrique du Sud.

Les autres genres, tous sud-africains, sont les suivants : *Eremitalpa*, qui comprend la seule espèce *E. granti*, la plus petite de la famille avec ses 8 cm de long, *Chrysospalax*, qui compte deux espèces de grande taille atteignant 23 cm de long, et *Chryptochloris*, dont l'unique espèce, *C. wintoni*, a pour particularité de faire la morte quand elle est accidentellement délogée de son terrier, lors des travaux des champs par exemple.

Sous-ordre des Euinsectivores

Le sous-ordre des Euinsectivores *(Euinsectivora)* comprend la grande majorité des espèces de l'ordre, groupées en cinq familles, elles-mêmes rassemblées en trois super-familles : Tenrécoïdés, Érinacoïdés, et Soricoïdés. Nous suivrons ici les nombreux auteurs qui considèrent les Potamogalidés comme une sous-famille des Tenrécidés (Potamogalinés).

Super-famille des Tenrécoïdés

Les Tenrécoïdés *(Tenrecoidea)* comprennent deux familles : les Solénodontidés et les Tenrécidés.

Les **Solénodontidés** *(Solenodontidae)*, dont font partie certains des plus gros et des plus rares Insectivores, forment une petite famille confinée aux Antilles et présentant des affinités marquées avec les Tenrécidés.

Les solénodontes (*Solenodon*, le seul genre dont l'existence soit connue) ressemblent à des musaraignes géantes, sont longs d'environ 30 cm et pèsent entre 1 et 13 kg ; ils ont un museau se prolongeant en une petite trompe, nue à l'extrémité, avec des narines latérales, et munie à la base de nombreuses et longues vibrisses. Si leurs yeux sont minuscules, par contre, leurs oreilles sont grandes. Leurs pattes sont pentadactyles. Leur queue, fort semblable à celle des rats, est très grosse, longue de 25 cm et pourvue d'écailles. Ces Animaux possèdent des glandes odorantes aux aisselles et à proximité de l'anus.

La formule dentaire est : $\left(I\frac{3}{3}; C\frac{1}{1}; Pm\frac{3}{3}; M\frac{3}{3}\right) \times 2 = 40$; la couronne de leurs molaires supérieures présente des reliefs en V, comme chez les Tenrécidés (type zalambdodonte). Leur langue, en ovale, est très longue. Leur estomac, court, est en grande partie enveloppé par la rate, laquelle est très développée. Leur cerveau possède d'énormes lobes olfactifs, et le cervelet est très volumineux.

Les solénodontes vivent le plus souvent solitaires dans les forêts et les endroits buissonneux, surtout en montagne et dans les terrains rocheux accidentés. Leurs cris sont assez variés, avec soit des notes stridentes et aiguës, comme les Rapaces nocturnes, soit de petits grognements. Craintifs et nocturnes, ils passent le jour cachés dans les anfractuosités du sol ou dans les vieux troncs d'arbres abattus. La nuit, ils sont très actifs. Ils sont omnivores, mais se nourrissent surtout d'Insectes, d'Arachnides, de Sauriens, et de petits Animaux vivant dans l'humus et le bois en putréfaction, qu'ils retirent de leur abri soit en fouissant avec le museau, soit en se servant de leurs incisives supérieures médianes en forme de crochet, soit encore en creusant avec les griffes. Ils mangent en position bipède, s'appuyant sur la queue. Lorsqu'ils marchent, ils sont plantigrades sur leurs pattes antérieures et digitigrades sur leurs pattes postérieures. Ils tiennent alors, horizontalement, leur queue, qui est peu mobile.

Les femelles, qui possèdent deux mamelles inguinales, ont de 1 à 3 petits par portée, parfois deux fois par an ; elles les déposent, nus et aveugles, dans un nid rudimentaire d'herbes, de feuilles et de poils.

Le genre *Solenodon* compte seulement deux espèces. *S. paradoxus*, le solénodonte d'Haïti, ou solénodonte paradoxal, possède une fourrure grossière brun-roux, avec le dessous et les pattes claires. La nuque porte une tache claire caractéristique. Des glandes sous-maxillaires spéciales sécrètent un liquide toxique, qui se mélange à la salive et sert vraisemblablement à tuer les proies dont il se nourrit. Considéré comme disparu au début du siècle, on le trouve néanmoins au nord de l'île d'Haïti.

S. cubanus, le solénodonte de Cuba, ou almiqui, diffère du précédent par son poil plus long et plus fin, brun-fauve ; ses cuisses sont noires, sa face est jaunâtre avec de longs poils constituant, en arrière, une petite collerette sur les épaules. Devenue rarissime, cette espèce survit encore dans les forêts de l'est de l'île de Cuba ; on a proposé la création d'une zone de protection, dans les forêts montagneuses de la province orientale, afin d'éviter la disparition de ce très intéressant Insectivore. La sous-espèce *S. cubanus poeyanus* se distingue, entre autres, par son adaptation à grimper.

Les raisons du déclin des solénodontes sont essentiellement l'énorme déboisement, et l'introduction d'Animaux étrangers à la faune des Antilles. Isolée depuis très longtemps, la faune de cette région jouissait de l'absence de prédateurs autochtones d'une certaine taille ; ces conditions permettaient à des formes spécialisées d'Insectivores et de Rongeurs, souvent de grande taille, de prospérer tout en étant terricoles. L'arrivée de chiens, de chats, de rats et surtout des mangoustes (celles-ci ont été introduites bien malencontreusement dans l'île vers 1870 pour combattre les serpents et les rats) a été catastrophique et même fatale à certaines espèces, surtout à cause du peu de défense des espèces locales incapables de grimper aux arbres.

Selon divers zoologues (comme Mac Dowell en 1958), on devrait compter parmi les Solénodontidés le genre *Nesophontes*, certainement éteint ; d'autres chercheurs (Simpson en 1945 et Walker en 1964) le considèrent

comme l'unique genre d'une famille distincte. On a récemment mis en évidence certaines affinités particulières de ces Animaux avec les solénodontes. On en a décrit quelque six espèces, connues seulement par des crânes et des fragments de squelettes; toutes habitaient les Antilles (Cuba, Haïti, île des Pins, Porto-Rico). La grande majorité des *Nesophontes* s'est éteinte après l'arrivée des Espagnols, ce qui est prouvé par le fait que leurs restes ont été découverts mêlés à ceux de souris du genre *Mus* et de rats du genre *Rattus* dans les dépôts de nombreuses cavernes. En 1930, on a découvert à Haïti des restes de *Nesophontes* dans des déjections de Rapaces : on peut donc supposer que quelques spécimens isolés, quasi inconnus, survivent encore.

Les **Tenrécidés** *(Tenrecidae)* habitent uniquement Madagascar, à l'exception de deux genres bien distincts, appartenant à la sous-famille des Potamogalinés, qui vivent en Afrique centro-occidentale.

De taille assez variable (4 à 40 cm de long), les Tenrécidés constituent du point de vue de la morphologie externe le groupe le moins homogène de l'ordre : ils ressemblent soit aux hérissons (*Tenrec, Echinops*, etc.), soit à des musaraignes *(Microgale)* ou à des musaraignes d'eau *(Limnogale)*, soit même à des petites loutres *(Potamogale)* ou à des taupes *(Oryzorictes)*.

Leur crâne, étroit et allongé, présente des affinités avec celui des Soricidés; leur musculature rappelle celle des Érinacéidés; la clavicule est absente chez les Potamogalinés. Ils ont, généralement, 40 dents mais ce nombre varie selon la formule

$$\left(I\frac{2\text{-}3}{2\text{-}3};\ C\frac{1}{1};\ Pm\frac{3}{2\text{-}3};\ M\frac{2\text{-}4}{2\text{-}4}\right) \times 2 = 32\text{-}40.$$

Les molaires supérieures sont de type zalambdodonte ou dilambdodonte.

Le cerveau a des lobes olfactifs très développés.

En majorité nocturnes, les Tenrécidés ont des mœurs très variées : certains creusent une tanière *(Oryzorictes)*, d'autres sont aquatiques (*Limnogale* et Potamogalinés), d'autres enfin sont arboricoles *(Microgale)*. Leur nourriture est constituée en majorité de Vers, de Mollusques et d'Arthropodes.

Les femelles possèdent de deux à douze paires de mamelles; la période de gestation est assez brève (cinquante jours chez les *Hemicentetes*) et le nombre de petits par portée est parfois très élevé. De nombreuses espèces sont rares, et leur biologie est mal connue.

Les Tenrécidés habitent les forêts, les prairies et les cours d'eau; on les répartit en trois sous-familles, avec au total onze genres et vingt-quatre espèces.

Les membres de la sous-famille des *Tenrécinés* ressemblent à nos hérissons. Leur queue est atrophiée; leurs doigts sont libres; leur fourrure est constituée de piquants et de poils spinuleux. Les quatre genres habitent Madagascar et les Comores.

Tenrec ecaudatus, le tenrec proprement dit, seule espèce du genre, est de grande taille (30 à 40 cm de long). Sa tête est volumineuse, son museau pointu, ses yeux petits et ses oreilles rondes, son cou bien marqué. Ses pattes sont pendactyles, les antérieures plus courtes que les postérieures, avec des griffes robustes. Sa queue est rudimentaire (1 à 2 cm de long). Robuste et musclé, le tenrec a une fourrure formée de longs poils épais, avec d'abondantes soies, sortes de piquants moins rigides que ceux de nos hérissons, que l'Animal dresse lorsqu'il a peur; il ne peut toutefois se rouler en boule pour se défendre.

Nocturne, caché le jour dans un terrier, il habite de préférence les zones buissonneuses sèches et sablonneuses, ainsi que les forêts de montagne les moins humides où on le trouve jusqu'à 1 000 m d'altitude. Actif au cours de la saison humide, il connaît une période d'hibernation pendant la saison sèche (de mai à octobre). Il se reproduit au retour de la saison des pluies. C'est l'un des Mammifères les plus prolifiques : on a trouvé jusqu'à 32 embryons dans une femelle, celle-ci possédant douze paires de mamelles. Les tenrecs sont indolents et peu intelligents.

Les autres genres, tous plus petits que le tenrec, sont *Setifer* avec *S. setosus*, le tenrec-hérisson, qui peut se mettre en boule pour se défendre, *Hemicentetes*, *Echinops*, avec *E. telfairi*, celui qui ressemble le plus à nos hérissons, et *Dasogale*, avec *D. fontoynonti*, long seulement de 10 cm.

B. Fritz - Jacana

▲ ***Le tenrec* (Tenrec ecaudatus) *est l'un des Mammifères les plus prolifiques.***

La sous-famille des *Oryzorictinés* comprend des espèces très semblables aux musaraignes, toujours pourvues de piquants et à queue bien développée; elle compte quatre genres et quinze espèces, confinées à Madagascar.

Les *Oryzorictes*, qui ressemblent quelque peu aux taupes, ont un museau conique, des yeux minuscules et des pattes courtes robustes et fouisseuses. Longs de 12 cm, dont 4 cm pour la queue, ils présentent une robe veloutée et une queue pourvue d'écailles. Animaux nocturnes, ce sont d'habiles fouisseurs qui fréquentent les zones humides et paludéennes où ils creusent des galeries à la recherche de Mollusques, de Vers et de racines de plantes aquatiques, causant parfois des dégâts dans les rizières.

Le genre *Microgale* compte dix espèces, de 4 à 12 cm de long. D'aspect très semblable à celui des musaraignes, les microgales, diurnes ou nocturnes, vivent surtout dans les forêts où la végétation est dense; diverses espèces arboricoles possèdent une queue longue et préhensile en sa partie distale.

Limnogale mergulus, le limnogale plongeur, long d'environ 12 cm, ressemble à un rat : sa tête est courte et déprimée, ses oreilles sont brèves. Sa queue est longue, robuste, et pourvue d'écailles. Il possède une membrane interdigitale, plus développée sur les pattes arrière et bien adaptée à sa vie aquatique. Les limnogales se nourrissent surtout de tubercules de plantes aquatiques, en particulier, d'*Aponogeton*. Ils deviennent de plus en plus rares et sont donc mal connus.

La *Geogale aurita*, ou géogale dorée, est l'unique espèce de son genre; elle ressemble aux musaraignes. Elle est très rare et sa biologie est pratiquement inconnue.

La sous-famille des *Potamogalinés* diffère des Tenrécidés types par de nombreux caractères; certains zoologistes considèrent qu'elle forme une famille en soi. La découverte récente du *Micropotamogale*, d'Afrique centro-occidentale, a permis de trouver des affinités entre les deux groupes; il semble donc qu'il s'agit d'une même famille. Les Animaux de mœurs aquatiques habitent les forêts d'Afrique centro-occidentale.

Potamogale velox, le potamogale, ressemble un peu à une petite loutre. Long de 30 à 35 cm, plus 30 cm pour

▶ **Potamogale velox** *est très agile et excellent nageur; il se nourrit de Crustacés, de Poissons et d'Amphibiens. Les Potamogalinés habitent les forêts d'Afrique centro-occidentale.*

A.R. Devez - Jacana

la queue, il a le museau large, le tronc allongé et les pattes non palmées; sa queue robuste, comprimée latéralement, sert d'organe propulseur pour la nage. Sa fourrure très douce, à poils courts et denses, est brun foncé sur le dessus et blanc jaunâtre en dessous. Très agile et excellent nageur, le potamogale vit solitaire ou par couples. Crépusculaire et nocturne, il se cache durant le jour, près des rives des cours d'eau, dans sa tanière dont l'entrée est immergée. Il se nourrit de Crustacés, de Poissons et d'Amphibiens. Chassé et pris dans les filets des pêcheurs, il était devenu rare; il est actuellement protégé.

Micropotamogale, le micropotamogale, compte deux espèces d'environ 20 cm de long. Il est mal connu, mais on sait qu'il est nocturne et moins nettement aquatique que *Potamogale velox*.

Super-famille des Érinacoïdés

Les Érinacoïdés *(Erinacoidea)* renferment la seule famille des Érinacéidés.

Les **Érinacéidés** *(Erinaceidae)* forment une importante famille d'Insectivores, dont le plus connu est le hérisson européen, qui habite uniquement l'Ancien Monde. De taille variable (de 12 cm pour *Hylomys* à 45 cm pour *Echinosorex*), ils ont des formes massives; leurs yeux et leurs oreilles sont bien développés; leur museau est pointu et plus ou moins large à la base. Leurs pattes sont pentadactyles, sauf chez divers *Erinaceus* africains, dont les pattes postérieures sont tétradactyles. La locomotion est plantigrade. La fourrure est grossière et le dos est couvert de piquants chez les Érinacéinés. La queue mesure de 1 à 30 cm de long. La musculature est très développée, surtout chez les Érinacéinés, lesquels, grâce à leurs gros muscles peauciers, se roulent en boule pour se défendre.

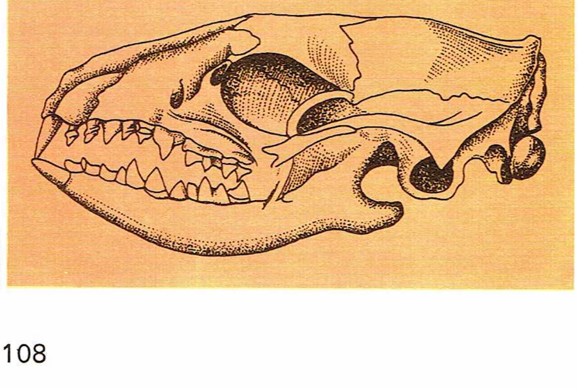

▶ *Représentation schématique du crâne d'un hérisson européen* (Erinaceus europaeus), *Insectivore typique.*

I.G.D.A.

La formule dentaire est :

$$\left(I\,\frac{3}{2\text{-}3};\ C\,\frac{1}{1};\ Pm\frac{3\text{-}4}{2\text{-}4};\ M\,\frac{3}{3}\right)\times 2 = 36\text{-}44.$$

La langue est longue, mais assez large. L'estomac est de forme variable, et l'intestin qui mesure de sept à douze fois la longueur du corps est de calibre à peu près uniforme. Le foie est très volumineux, avec une grosse vésicule biliaire. Les femelles ont de deux à cinq paires de mamelles.

Essentiellement crépusculaires et nocturnes, les Érinacéidés se réfugient habituellement dans les tanières d'autres Animaux. Ils vivent dans les milieux les plus variés, des forêts aux déserts. Leur distribution géographique couvre toute l'Afrique et l'Eurasie, de la limite des forêts décidues au nord, à l'archipel malais au sud. La famille n'est représentée ni au Japon, ni à Ceylan, ni à Madagascar.

Les Érinacéidés, qui comptent huit genres et seize espèces, sont divisés en deux sous-familles : les Échinosoricinés ou Gymnoures et les Érinacéinés.

La sous-famille des *Échinosoricinés* est caractérisée par l'absence de piquants et la présence de 3 incisives inférieures (au total de 40 à 44 dents). Il y a cinq genres comprenant chacun une seule espèce, distribués en Asie du Sud-Est.

L'espèce la plus importante est *Echinosorex gymnurus*, le gymnoure, ou grand gymnoure; le géant des Insectivores vivants mesure jusqu'à 45 cm et pèse de 1 kg à 1,4 kg. Il est pourvu d'une longue queue (20 cm), nue et recouverte d'écailles. La fourrure, formée de longs poils et de bourre fine, est noirâtre, et la tête, les épaules et le bout de la queue sont blanchâtres. Le corps est très comprimé latéralement, peut-être par adaptation à la vie dans les fentes étroites des roches, où cet Insectivore cherche habituellement ses proies (qui sont surtout des Insectes mais aussi des Amphibiens). Nocturne et solitaire, il habite les forêts, fréquentant aussi les cours d'eau où il chasse les Poissons. Il a une odeur caractéristique très forte. Il habite le Ténasserim (Thaïlande), la péninsule malaise, Sumatra et Bornéo.

Les autres espèces sont les suivantes : *Hylomys suillus*, long de 12 cm, partiellement arboricole, répandu de la Chine méridionale à la Malaisie; *Neohilomys hainanensis*, de l'île Haïnan; *Podogymnura truei*, des montagnes de Mindanao (Philippines); *Neotetracus sinensis*, de Chine méridionale et d'Indochine.

La sous-famille des *Érinacéinés* comprend des espèces très semblables à notre hérisson, toujours pourvues de piquants; ils possèdent 36 dents avec seulement 2 incisives inférieures. De forme ramassée et lourde, ils pré-

A. Margiocco

◀ ***Le hérisson* (Erinaceus europaeus) *est l'un des Insectivores les mieux connus d'Europe ; il habite les forêts, les zones buissonneuses et les cultures.***

G.S. Giacomelli

◀ ***Ce même hérisson peut, pour se défendre, se rouler en boule, grâce à des muscles peauciers particuliers.***

sentent une enveloppe musculo-cutanée très développée. Ils sont distribués dans tout l'Ancien Monde, excepté l'Asie sud-orientale. Selon Walker (1964), il en existe trois genres : *Erinaceus*, qui est à la fois le genre type et le plus important avec ses six espèces, dans lequel on peut inclure aussi les *Aethechinus* et *Atelerix*, *Hemiechinus*, avec deux espèces, et *Paraechinus*, avec trois espèces.

Erinaceus europaeus, le hérisson d'Europe, ou européen, a les oreilles courtes, le crâne relativement large et court, le museau prolongé par un groin charnu divisé par un sillon longitudinal, sur les côtés duquel s'ouvrent de larges narines, et des canines non différenciées. Son corps, trapu et court, est porté par des pattes assez fortes, à cinq doigts courts ; sa queue est moins longue que ses pieds. Les piquants, qui existent seulement sur le dessus du corps, sont longs et rigides, de couleur fauve plus ou moins clair, avec une section noirâtre près du sommet. Le dessous du corps est grisâtre ou brun sale. L'Animal mesure de 20 à 30 cm de long, avec une queue de 1 à 4 cm et pèse jusqu'à 1 kg.

Le hérisson habite les forêts, les zones buissonneuses et les cultures, là où il peut trouver des Insectes et des abris (tas de bois, feuilles sèches ou vieux murs) ; il évite généralement les hautes futaies et les résineux, ainsi que les lieux paludéens. Dans les Alpes, on le rencontre jusqu'à 2 000 m d'altitude. C'est un sédentaire : il reste des années sur un territoire de quelques centaines de

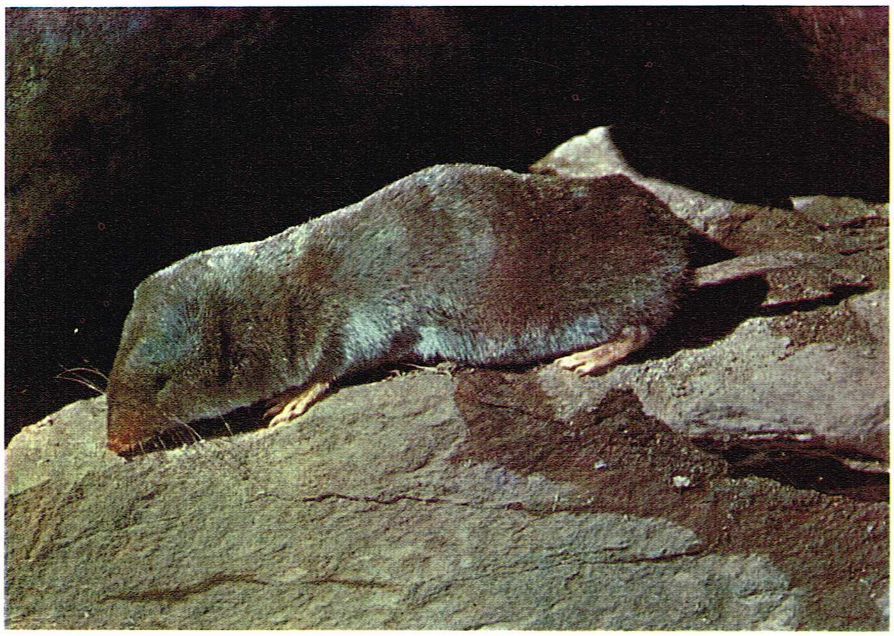

E.P.S.

▲ ***Un Soricidé américain, exemple représentatif des Euinsectivores.***

mètres de rayon. Il est solitaire, et de mœurs crépusculaires et nocturnes. Son régime est omnivore, mais surtout zoophage : Insectes (Coléoptères et Orthoptères), larves, limaces, lombrics, grenouilles, crapauds, lézards, serpents, petits Rongeurs, nichées d'Oiseaux, etc. Il se nourrit aussi de Champignons, de fruits et de tubercules. Prédateur occasionnel des vipères, il en tue un bon nombre en leur brisant la colonne vertébrale ou en leur écrasant la tête. Il n'est pas immunisé contre le venin, bien qu'il soit quarante fois plus résistant que le cobaye ; il doit son salut à ses piquants qui empêchent les Reptiles de mordre. La protection du hérisson s'impose, car celui-ci est un des meilleurs facteurs limitants des vipères, dont la multiplication est préoccupante dans toute l'Europe.

Le hérisson construit, le plus souvent, un nid d'herbes ou de feuilles sèches, dans un buisson ou une anfractuosité du sol ; parfois il occupe des terriers abandonnés. En hiver, il entre dans une longue léthargie, et reste roulé en boule. Les femelles, après 5 à 6 semaines de gestation, mettent bas de 3 à 7 petits, une ou deux fois par an (printemps et automne). Les nouveau-nés sont aveugles et possèdent seulement des piquants blancs et mous ; ils sortent du nid à trois semaines, et n'acquièrent leurs piquants définitifs qu'à un mois. Les mères s'occupent attentivement de la progéniture.

Parmi les ennemis du hérisson, mis à part l'homme, nous citerons le putois, l'autour, la hulotte et le grand-duc. Le hérisson est porteur de nombreux parasites.

Sa distribution couvre toute l'Europe sauf les parties les plus septentrionales de la Scandinavie, la Sibérie, et l'Asie mineure.

Parmi les cinq autres espèces d'*Erinaceus*, toutes africaines, citons *E. algirus*, le hérisson d'Algérie, qui habite les côtes méditerranéennes de l'Espagne et de la France, les Baléares, les Canaries et l'Afrique du Nord. Ses piquants sont plus clairs que ceux de notre hérisson et forment sur son front deux touffes séparées.

Le genre *Hemiechinus*, qui compte deux espèces, propres à l'Égypte et à une grande partie de l'Asie, se distingue par ses oreilles très longues, ses piquants à bande longitudinale et ses pattes plus longues. Ce hérisson vit dans les zones désertiques et les steppes arides.

On trouve, dans ces mêmes milieux, les trois espèces de *Paraechinus*, qui vivent en Afrique du Nord, en Asie occidentale et centrale et en Inde ; elles possèdent des piquants à nettes bandes granuleuses ; *P. aethiopicus* est sujet à l'estivation.

Super-famille des Soricoïdés

Les Soricoïdés *(Soricoidea)* sont répartis en deux familles : les Soricidés et les Talpidés.

Les **Soricidés** *(Soricidae)* forment la famille la plus nombreuse, qui comprend les musaraignes au sens large, de forme plus ou moins murine, à museau allongé et pointu, à yeux petits, à oreilles généralement visibles (parfois cachées dans la fourrure), à pattes courtes et pentadactyles, enfin à queue toujours bien développée. Ces Animaux sont de petite taille (*Suncus etruscus* appartient à ce groupe), les plus grands atteignant tout au plus 18 cm de long.

Leur fourrure, brune ou grisâtre, est constituée d'un poil court, très serré et doux ; sur les flancs existent souvent des glandes cutanées, qui sécrètent une substance d'odeur désagréable, laquelle répugne aux Carnivores (c'est pourquoi ces derniers ne mangent pas les musaraignes) ; ces glandes constituent certainement un caractère sexuel secondaire. Le crâne long et étroit ressemble à celui des taupes, bien que l'arcade zygomatique soit absente. La denture est caractéristique, avec une seule incisive inférieure, très développée et dirigée vers l'avant ; il existe aussi à la mâchoire supérieure une incisive de grande taille.

Le nombre de dents varie de 26 à 32 selon la formule :

$$\left(I\,\frac{2\text{-}3}{1};\ C\,\frac{0}{0};\ Pm\,\frac{2\text{-}4}{2\text{-}3};\ M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 26\text{-}32.$$

Cette formule est toutefois très discutée : en effet entre la première grosse incisive et la dernière prémolaire existent à la mâchoire supérieure plusieurs petites dents unicuspides dont la nature exacte est difficile à déterminer. Selon des recherches ontogénétiques, il semble certain qu'il n'existe pas de canines, et il est établi que les dents de lait sont précocement résorbées chez l'embryon, ce qui a pour conséquence que les dents de ces Insectivores restent inchangées depuis leur naissance. Les molaires supérieures ont une couronne en W.

Agiles et très vifs, ces Animaux sont généralement terricoles, certains étant aquatiques. Essentiellement nocturnes, ils peuvent aussi être actifs le jour dans les zones ombreuses ; ils n'entrent jamais en léthargie et sont très irritables.

Leur physiologie est particulière : par exemple, lorsqu'ils sont apeurés, à la suite par exemple d'un grand bruit, leur rythme cardiaque peut atteindre mille deux cents battements par minute. Leur métabolisme est très actif. Selon Pearson, *Sorex cinereus* a le métabolisme basal le plus élevé de tous les Mammifères ; en effet, sa consommation d'oxygène est supérieure à 10 cm^3 par gramme de poids corporel et par heure. Une telle dépense d'énergie nécessite une alimentation abondante et continuelle ; celle-ci comporte, en certains cas, des proies de poids supérieur à celui de l'Animal ; ces Insectivores meurent quand ils sont à jeun pendant plus de dix heures. Ils sont essentiellement insectivores et carnivores, quelquefois phytophages ; leur nourriture habituelle consiste en Insectes, Arachnides, petits Rongeurs, larves, etc. Les espèces aquatiques se nourrissent également de Poissons, d'Amphibiens, etc. En hiver, ils se nourrissent d'Arthropodes en hibernation. Il semble que les musaraignes ne boivent pas, à l'exception des formes aquatiques. Guidés surtout par l'odorat, les Soricidés cherchent leurs proies en s'insinuant entre les herbes, les mousses, les feuilles sèches et même dans les terriers et les anfractuosités du sol ; ils peuvent renverser des pierres avec leur museau, grâce à la très robuste musculature de leur nuque.

La salive de certaines espèces contient des substances toxiques, mortelles pour les Animaux qu'elles mordent : *Blarina brevicauda*, d'Amérique du Nord, a des glandes sous-maxillaires contenant une quantité de venin deux cents fois supérieure à la dose nécessaire pour tuer une taupe pesant 20 g. On en constate l'efficacité à la rapidité avec laquelle se manifestent les effets de l'empoisonnement chez les petits Rongeurs. Parmi les autres espèces venimeuses, citons *Neomys fodiens* et *Sorex cinereus*. On connaît des cas de morsures douloureuses même chez l'homme.

Les Soricidés sont généralement solitaires, sauf *Cryptotis parva*. Leurs populations connaissent d'importantes fluctuations numériques au cours de l'année. Ils se construisent des nids, avec des herbes, des mousses, etc., dans une anfractuosité du sol ou dans une galerie souterraine. Après une gestation de 17 à 28 jours, les femelles mettent bas jusqu'à 10 petits par portée, plusieurs fois par an. Les petits naissent nus et aveugles, sont très bien soignés par leur mère pendant les premières semaines et deviennent très vite indépendants. Ils sortent du nid avec la mère, en se tenant en file indienne par la

F. Bricoux - Pitch

▲ ***Les musaraignes sont essentiellement nocturnes; elles n'entrent jamais en léthargie et sont très irritables.***

queue, le premier tenant entre ses dents la queue de la mère (par exemple chez *Sorex araneus* et *Crocidura leucodon*).

La période de la reproduction s'étend de mars à novembre dans les régions tempérées de l'hémisphère Nord, et dure toute l'année sous les tropiques. La longévité, très réduite, est en général inférieure à un an et atteint, au maximum, un an et demi. Les Soricidés sont répandus dans le monde entier, excepté l'Australie, les Antilles, les régions polaires et l'Amérique du Sud (sauf la partie septentrionale, qui héberge le genre *Cryptotis*). Cette famille compte vingt-deux genres et environ deux cent quatre-vingts espèces; la systématique de certains genres, *Crocidura* par exemple, est très difficile à déterminer.

La répartition en trois sous-familles est encore très discutée.

La sous-famille des *Soricinés* est caractérisée par la coloration roussâtre de la pointe des dents. Il en existe neuf genres, dont le plus important est le genre type *Sorex*, qui comprend une quarantaine d'espèces, parmi lesquelles les musaraignes proprement dites. On rencontre dans nos régions *S. araneus*, *S. minutus* et *S. alpinus*.

Sorex araneus, la musaraigne commune, ou musaraigne carrelet, longue de 6 à 8 cm, plus 3 à 6 cm pour la queue, pèse habituellement moins de 10 g. La couleur de sa fourrure varie du bistre au brun foncé sur le dessus et les flancs, le dessous étant gris fumé plus ou moins clair. Largement répandue en Asie paléarctique et en Europe, cette espèce manque dans les îles méditerranéennes. Elle fréquente les forêts, les champs et les buissons, mais semble préférer les lieux humides et paludéens.

S. alpinus, la musaraigne alpine, très proche de la précédente, vit sur les montagnes d'Europe centrale et méridionale, jusqu'à 3 000 m d'altitude dans les Alpes.

L'autre genre de notre faune, *Neomys*, auquel appartient *N. fodiens*, la musaraigne aquatique, ou musaraigne d'eau, qui ressemble à la musaraigne commune, possède des pieds plus gros, à doigts ornés d'une frange dense de poils, et à queue pourvue à la face inférieure d'une crête de poils clairsemés et durs. Longue de 7 à 9,5 cm, avec une queue de 5 à 7 cm, cette musaraigne possède une fourrure épaisse et soyeuse (les poils atteignent 9 mm), essentiellement aux parties inférieures, de couleur gris ardoise foncé sur le dessus, nettement blanchâtre en dessous. Fréquentant les bords des cours d'eau, des lacs

A. Margiocco

▲ ***Détail du museau de la musette, ou crocidure rousse* (Crocidura russula).**

et des étangs, aussi bien en plaine qu'en montagne, cette espèce fouisseuse creuse un terrier à proximité immédiate de l'eau, avec plusieurs sorties dont une immergée ; elle occupe souvent des galeries de taupes et de Rongeurs qu'elle adapte à ses besoins ; excellente nageuse, elle peut plonger pendant un certain temps lorsqu'elle chasse ses proies : petits Poissons et Amphibiens, ainsi que de nombreux Mollusques et Arthropodes. La musaraigne d'eau vit dans une grande partie de l'Europe et de l'Asie paléarctique.

Parmi les genres exotiques, citons *Blarina brevicauda*, grosse musaraigne nord-américaine, qui atteint parfois 10 cm de longueur plus 3 cm pour la queue. Elle fréquente surtout les forêts et peut monter sur les arbrisseaux.

Cryptotis, genre très important, avec environ trente espèces toutes américaines, dont certaines habitent le nord de l'Amérique du Sud, constitue l'unique peuplement d'Insectivores de ce demi-continent. *C. parva* est grégaire.

Les cinq autres genres sont : *Microsorex* et *Notiosorex*, américains, *Soriculus* et *Blarinella*, asiatiques.

La sous-famille des *Crocidurinés*, caractérisée par des dents blanches sans pointe roussâtre, compte douze genres et environ deux cents espèces.

Le genre *Crocidura* comprend plus de cent cinquante espèces, dont beaucoup ne sont que des sous-espèces ou des races géographiques ; il est distribué en Europe, en Afrique, en Asie et jusqu'aux Philippines. Il en existe dans nos régions trois espèces, très semblables aux *Sorex*, mais un peu plus lourdes et dont les oreilles émergent de la fourrure.

C. russula, la crocidure rousse, ou musette, longue de 6 à 10 cm, plus de 3 à 5 cm pour la queue, a une robe serrée, bistre foncé sur le dessus, avec l'extrémité des poils argentée et teintée de châtain, et gris clair teinté de jaunâtre au-dessous. Vivant de la plaine à la montagne jusqu'à 1 500 m d'altitude, elle aime les lieux découverts, les clairières et les prairies sèches ; surtout nocturne, elle chasse même en hiver.

Le genre *Suncus* est très répandu dans le midi de l'Europe, en Asie, en Afrique, et à Madagascar ; il a été introduit par l'homme dans divers groupes insulaires. On rencontre en Europe *Suncus etruscus*, le pachyure étrusque, ou musaraigne étrusque, le plus petit Mammifère du monde, qui mesure de 3,5 à 5,2 cm de long, plus 3 cm pour la queue. Il pèse à peine 2 g. Il a des oreilles bien visibles, le dessus brun ardoisé et le dessous grisâtre. Il fréquente les forêts, les zones buissonneuses, les champs cultivés et les jardins, surtout dans les régions méditerranéennes.

Les autres genres sont : *Paracrocidura*, *Praesorex* (avec *P. goliath*, long de 18 cm, géant des musaraignes), *Myosorex*, *Surdisorex*, tous africains, ainsi que *Feroculus*, *Solisorex* et *Chimarrogale*, asiatiques.

Citons encore trois genres : *Diplomesodon* des régions steppiques et semi-désertiques d'Asie centro-occidentale ; *Anourosorex* à habitus talpoïde, avec *A. squamipes* des montagnes d'Asie orientale qui vit principalement sous terre en creusant des galeries ; enfin, *Nectogale*, asiatique, avec *N. elegans* nettement aquatique, pourvu de pattes palmées, excellent nageur et mangeur de Poissons et d'animalcules vivent dans l'eau ; il a une très belle fourrure, gris foncé tendant au noirâtre sur le dessus, et argenté en dessous. Il vit dans les montagnes du Tibet, du Sikkim, de la Birmanie et de la Chine méridionale.

La sous-famille des *Scutisoricinés* est constituée par l'unique genre *Scutisorex*, avec deux espèces centro-africaines, dont la principale, *S. congicus*, du bassin de l'Ituri (au Zaïre), ressemble beaucoup à une grosse musaraigne. Elle mesure 15 cm de long, plus 8 cm pour la queue. La conformation de sa colonne vertébrale est unique, avec de nettes exostoses aux vertèbres dorsales et lombaires : de la septième dorsale à la dernière lombaire, les apophyses latérales, qui s'élargissent, sont disposées les unes sur les autres comme des tuiles et se replient vers le bas, de sorte que, vue par-dessous, la colonne ressemble à une pirogue renversée. Selon Grassé, il s'agit probablement d'une anomalie de la calcification, d'origine endocrinienne et devenue héréditaire.

A. Margiocco

▶ ***La musaraigne d'eau* (Neomys fodiens), *de la famille des Soricidés, est une espèce venimeuse.***

Mammifrance-Jacana

▲ ***Certains Talpidés, comme les Desmaninés, sont adaptés à la vie aquatique :* Galemys pyrenaicus, *le desman des Pyrénées, chasse à la nage des Poissons, des Insectes aquatiques et des Crustacés.***

Les **Talpidés** *(Talpidae)*, malgré une nette convergence morphologique avec les Chrysochloridés, sont beaucoup plus proches des Soricidés, avec lesquels ils forment la super-famille des Soricoïdés. Ils sont de taille moyenne (6 à 21 cm), avec un corps à peu près cylindrique, un museau conique qui se prolonge parfois en une trompe. Leurs yeux sont minuscules et parfois recouverts par la peau ; leurs oreilles ne possèdent généralement pas de pavillon. Leurs pattes, courtes et pentadactyles, sont adaptées au fouissage ou à la nage. La fourrure est très serrée et douce. Le crâne est aplati, long et étroit, avec des arcades zygomatiques très fines.

Le nombre de dents varie selon la formule :

$$\left(\mathrm{I}\,\frac{2\text{-}3}{1\text{-}3};\ \mathrm{C}\,\frac{1}{0\text{-}1};\ \mathrm{Pm}\,\frac{3\text{-}4}{3\text{-}4};\ \mathrm{M}\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 34\text{-}44.$$

La couronne de molaires supérieures est en W.

Notons l'épaisseur inhabituelle de la clavicule, le grand développement des muscles pectoraux, ainsi que des pattes antérieures chez les espèces fouisseuses. Le métabolisme est bien moins élevé que chez les Soricidés.

Les Talpidés, en majorité fouisseurs et endogés (sauf *Galemys*, *Desmana* et *Condylura*, qui sont aquatiques), creusent des galeries et des parcours souterrains souvent très compliqués. Actifs toute l'année (certaines espèces américaines fouissent sous la neige), ces Animaux sont grégaires ou solitaires selon les espèces et les conditions de milieu.

Leur régime, insectivore et zoophage au sens large, comprend tous les petits Animaux du sol, surtout les lombrics ; certains Talpidés consomment aussi des matières végétales. Dans sa recherche de la nourriture, la taupe est guidée par les vibrations du sol, puis par l'odorat, dans un rayon de moins de 10 cm, et enfin par le toucher. Les femelles possèdent trois ou quatre paires de mamelles ; elles mettent bas de 1 à 7 petits, une ou deux fois par an ; la durée de gestation est de 28 à 42 jours. La maturité sexuelle est atteinte vers 1 an.

Les Talpidés vivent habituellement dans les sols meubles et mous, tels que les prairies, les forêts, les champs cultivés, et la proximité des marais. Leur distribution est très vaste : on les rencontre en Eurasie, jusqu'à 63° de latitude nord, et en Amérique du Nord, du sud du Canada au Mexique.

La famille comprend douze genres et vingt espèces, groupées en cinq sous-familles :

La sous-famille des *Uropsilinés*, la plus primitive, comprend une seule espèce : *Uropsilus soricipes*, de la Chine méridionale et de la haute Birmanie, plus semblable à une musaraigne qu'à une taupe. Longue d'environ 8 cm, avec une queue un peu moins longue que le corps, elle possède des oreilles à pavillon et des pattes normales. Elle présente 2 incisives à chaque demi-mâchoire supérieure. Forestière, elle vit jusqu'à 4 500 m d'altitude.

La sous-famille des *Desmaninés* est adaptée à la vie aquatique : pas de pavillon auriculaire, un museau prolongé en une petite trompe très mobile, des pattes antérieures avec une membrane interdigitale partielle et des pattes postérieures très longues et palmées. Il existe deux genres, eurasiatiques, *Galemys* et *Desmana*.

Galemys pyrenaicus, le desman des Pyrénées, ou galémyde, long de 12 cm (avec une queue de 15 cm, cylindrique et comprimée latéralement), pesant 80 g, a une très belle fourrure brun foncé, avec des reflets métalliques sur le dessus, blanc argenté en dessous, et jaunâtres sur la poitrine. Nocturne, actif le jour par temps couvert, il chasse à la nage, dans les cours d'eau et les lacs, des petits Poissons, des Insectes aquatiques et des Crustacés. Se cachant parfois dans des terriers de rats d'eau, on le rencontre de 300 m à 1 200 m d'altitude dans les Pyrénées et le nord-ouest de l'Espagne.

Desmana moschata, le desman musqué, plus grand (20 cm de long), avec une queue longue de 50 cm environ, comprimée latéralement sur toute la longueur, sauf à la base où elle est dilatée, possède sur le ventre des glandes sécrétant un liquide à forte odeur de musc. Sa fourrure, très appréciée, est brun-roux sur le dessus, gris cendré avec des reflets argentés en dessous. Il vit en Russie méridionale entre le Don et la Volga et dans une partie de l'Asie nord-occidentale ; il préfère les eaux à cours lent ou stagnantes, et creuse, dans les rives, des galeries obliques à entrée immergée ou au niveau de l'eau, avec, à l'extrémité et au-dessus du niveau des crues, une grande chambre servant de nid. Nageant, comme la loutre, à l'aide de sa robuste queue, il chasse activement même sous la glace. Deux fois par an, les femelles mettent bas de 3 à 5 petits.

A. Margiocco

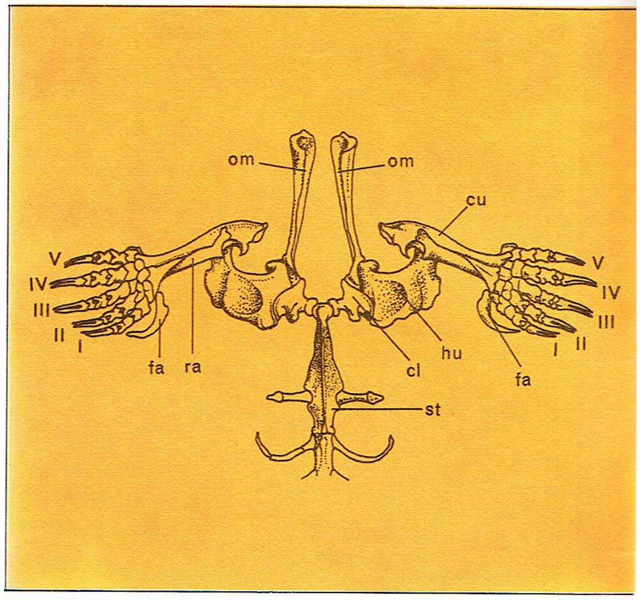

I.G.D.A.

▲ ***A gauche, on observera la conformation particulière des pattes antérieures de la taupe d'Europe*** (Talpa europaea) ***; ces membres, très larges, sont robustes et pourvus de fortes griffes fouisseuses.***

A droite, schéma des pattes antérieures du même Animal : om, omoplate ; cu, cubitus ; hu, humérus ; cl, clavicule ; st, sternum ; ra, radius ; fa, os falciforme ; les chiffres romains I à V indiquent les doigts.

▼ ***L'ensemble des galeries que creusent les taupes est compliqué. Sur ce dessin figure, en représentation schématique et théorique, une taupinière, selon la conception classique, avec ses galeries.***

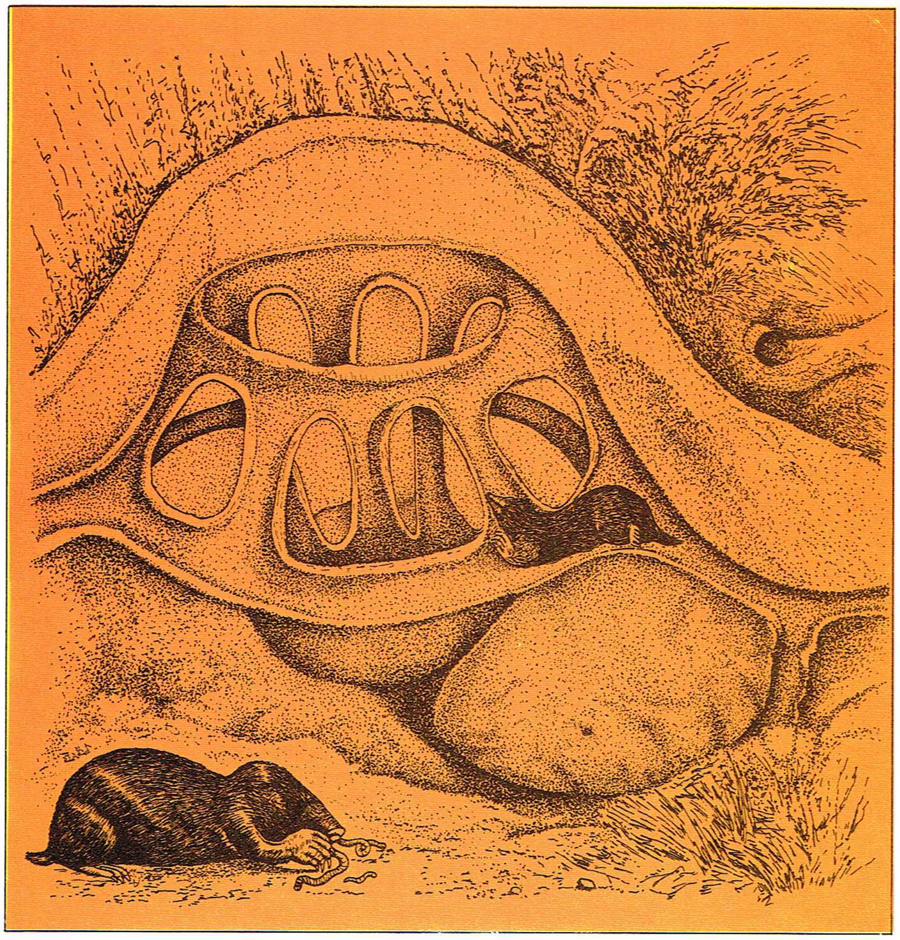

I.G.D.A.

La sous-famille des *Talpinés*, la plus typique, contient des espèces dont le museau est pointu mais ne constitue pas une trompe. Les yeux sont minuscules, cachés par la fourrure et parfois sous la peau. Il n'y a pas d'oreilles externes. Le cou n'est pas distinct ; les pattes avant sont très larges, robustes, pourvues de fortes griffes fouisseuses, les paumes étant toujours tournées extérieurement ; la queue est courte. La fourrure, veloutée et rase, est faite de poils très courts, implantés presque verticalement. Les canines supérieures sont très robustes, les inférieures peu développées ou manquantes. La première prémolaire inférieure est grosse et caniniforme.

Nous classerons, comme Scott (1951) et Walker (1964), les cinq espèces en un genre unique, *Talpa* ; d'aspect et de mœurs semblables, elles sont distribuées en Europe et en Asie. *T. europaea*, la taupe d'Europe, longue de 12 à 16 cm (plus 2 à 4 cm pour la queue), d'un poids de 130 g, a une fourrure noire avec des reflets bruns, gris ou bleus, certains spécimens présentant des taches claires. La taupe vit sous terre, ne montant à la surface que pour ôter la terre à l'entrée de ses galeries. Elle préfère les sols humides, gras et humifères, où elle creuse facilement et trouve ses proies. On la rencontre très fréquemment dans les cultures. Dans les Alpes, on la trouve jusqu'à 2 000 m d'altitude.

L'ensemble des galeries creusées par les taupes est très compliqué. Schématiquement on distingue un refuge, des galeries permanentes et un territoire de chasse. Le refuge consiste en une chambre ellipsoïdale, celle-ci formant à la base une sorte de puits, d'où part une galerie horizontale. Dans ce refuge, la taupe construit un nid d'herbes et de feuilles sèches pour le repos et la reproduction. Les tunnels permanents, d'un diamètre légèrement supérieur à celui de l'Animal, rayonnent à partir du refuge central, et, selon Godet, servent de routes « à grande circulation ». Le territoire de chasse, que la taupe défend contre les intrus, est constitué par des galeries irrégulières et provisoires, que chaque taupe creuse à partir d'un tunnel permanent. Après s'être nourrie, celle-ci retourne à son refuge, déposant les excréments dans les tunnels et non dans son nid. Les tumulus externes de terre sont formés uniquement quand le sol est compact et dans le cas de tunnels très superficiels.

Les taupes avancent en enfonçant leur museau comme un coin ; en marchant, elles posent les pattes antérieures deux fois plus souvent que les postérieures ; leur vitesse peut atteindre 1 m/s. Elles nagent bien et peuvent même grimper. Leur voix ressemble à une sorte de murmure. Ce sont des Animaux solitaires, qui se nourrissent de lombrics, d'Insectes et de leurs larves, de Myriapodes, de Crustacés, de Mollusques et de quelques matières végétales. La taupe est active aussi bien le jour que la nuit, selon les circonstances.

Les femelles construisent, pour la reproduction, un refuge approprié, plus simple que le refuge permanent ou de repos hivernal ; elles y mettent bas de 2 à 7 petits,

après une gestation de 4 à 6 semaines. Elles allaitent 3 semaines, avec leurs quatre paires de mamelles, les petits, qui restent dans le terrier pendant un mois. La taupe est distribuée en Europe jusqu'au Caucase et à l'Oural ; on la rencontrerait aussi en Sibérie et en Mongolie.

T. caeca, la taupe aveugle, d'Europe méridionale (jusqu'à l'Asie Mineure et au Caucase), *T. romana*, la taupe romaine, d'Italie centro-méridionale et de Sicile, et enfin *T. micrura*, à vaste distribution asiatique, sont très proches de la précédente.

La sous-famille des *Scalopinés* comprend sept genres et douze espèces, semblables à nos taupes, mais à museau plus allongé, et dont la canine et la première prémolaire supérieures sont très petites : *Scaptonyx*, *Urotrichus* et *Scapanulus*, d'Asie orientale, *Neurotrichus*, *Parascalops*, *Scapanus* et *Scalopus*, d'Amérique du Nord (sauf *Scapanus fusicaudus*, des hautes montagnes de la Chine méridionale et de haute Birmanie, qui a une queue très développée).

Nous citerons *Neurotrichus gibbsii*, la taupe-musaraigne américaine longue de 8 cm, plus la queue (4 cm), et à fourrure gris noirâtre avec une belle iridescence pourprée. Excellente fouisseuse, elle creuse de longues galeries, jusque sous les ruisseaux ; elle est souvent très active à ciel ouvert, grimpant sur les arbustes, à la recherche d'Insectes. Elle fait son nid dans le sol ou sous les troncs d'arbres tombés. Elle habite les régions humides du versant pacifique de l'Amérique du Nord, de la Colombie britannique à la Californie centrale, jusqu'à plus de 1 000 m d'altitude. Les *Urotrichus* du Japon ont des mœurs analogues.

La sous-famille des *Condylurinés* comprend *Condylura cristata*, la taupe à museau étoilé ; longue d'environ 12 cm, dépourvue de pavillon auriculaire, elle a une queue longue de 7 cm, qui augmente de volume en hiver. De couleur noirâtre, son museau caractéristique se termine par une sorte de disque nu, sur lequel sont implantés en étoile vingt-deux appendices charnus de couleur rose. Répandue du Canada à la Géorgie, creusant l'hiver dans la neige, elle préfère les sols humides ou paludéens ; c'est une très bonne nageuse, qui consomme beaucoup d'Animaux aquatiques.

Sous-ordre des Macroscéloïdés

Les Macroscéloïdés *(Macroscelidoidea)* présentent, entre autres particularités, une bulle tympanique parfaitement formée avec un os endotympanique jouant un rôle important, et un cæcum. Ce groupe très particulier, qui présente des affinités avec les Tupayidés (Primates), est très homogène et compte une seule famille, les Macroscélidés, africains.

Les **Macroscélidés** *(Macroscelidae)*, appelés rats à trompe, mesurent de 10 à 30 cm de long (plus 8 à 26 cm pour la queue) ; ils ont le museau prolongé par une minuscule trompe, très mobile. Leurs yeux sont assez grands et leurs oreilles moyennes. Les pattes postérieures, adaptées au saut, sont beaucoup plus longues que les antérieures (étymologiquement leur nom signifie « à longues jambes »), avec des pieds très longs.

La formule dentaire est :

$$\left(\mathrm{I}\ \frac{0\text{-}3}{3};\ \mathrm{C}\ \frac{1}{1};\ \mathrm{Pm}\ \frac{4}{4};\ \mathrm{M}\ \frac{2}{2\text{-}3}\right) \times 2 = 34\text{-}42.$$

Les incisives sont tétratuberculées ; la langue est étroite et longue.

Le cerveau possède des lobes olfactifs très gros, mais les tubercules quadrijumeaux antérieurs sont complètement découverts.

Surtout diurnes, tendant à devenir nocturnes à la saison chaude, ils vivent isolés ou par couples, sauf certains *Elephantulus*, qui forment de petits groupes. Ils fréquentent les zones arides ou des régions à végétation dense et même forestière. Ils se réfugient souvent dans des trous de rochers, des buissons ou des creux de termitières ; ils creusent parfois des terriers, mais utilisent souvent ceux des Rongeurs. Avec leur trompe mobile, ils reniflent, sous les pierres et dans le sol, à la recherche d'Insectes, qui constituent la quasi-totalité de leur nourriture. Les femelles, qui possèdent deux ou trois paires de mamelles, mettent bas 1 ou 2 petits, après une gestation d'environ 2 mois. Leur longévité semble être de 1 an.

E.P.S.

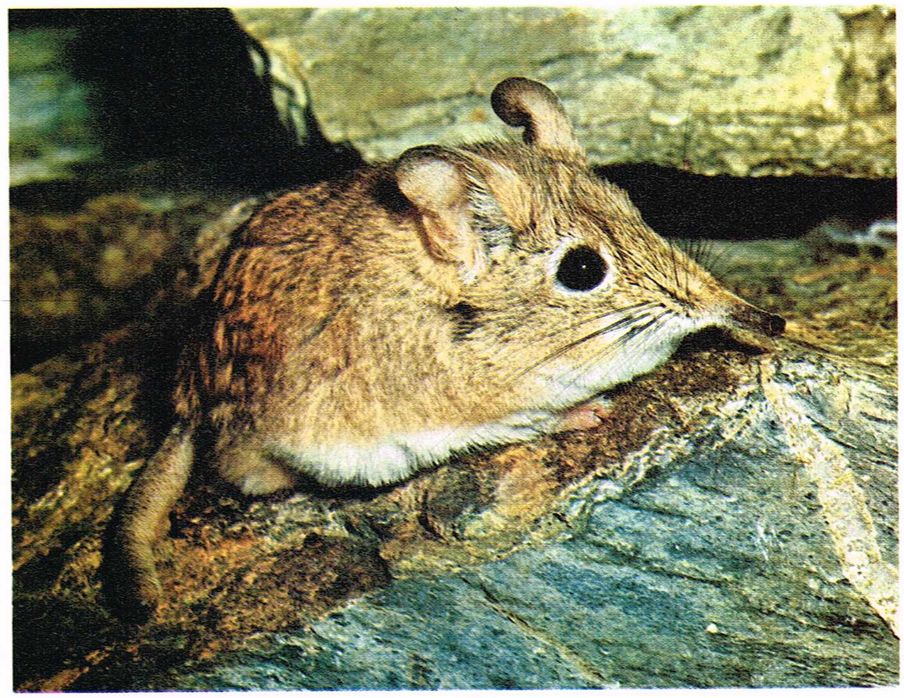

A. Visage-Jacana

▲ ***En haut, un spécimen de la taupe d'Europe*** **(Talpa europaea).** ***En bas, un Macroscélidé, du genre*** **Elephantulus,** ***caractérisé par un museau prolongé par une minuscule trompe, très mobile.***

La famille est distribuée dans le nord-ouest de l'Afrique et au sud du Sahara. On la divise en deux sous-familles qui comprennent quatre genres et quatorze espèces.

Les *Macroscélidinés*, qui possèdent cinq doigts aux pattes antérieures, et trois incisives supérieures, ont un pelage fin et dense. Il y a trois genres : *Petrodromus*, avec *P. tetradactylus* d'Afrique centrale et sud-orientale qui est parfois forestier, *Macroscelides*, le genre type, et *Elephantulus*.

Macroscelides proboscideus, long de 11 cm, est talpiforme. Il a de grandes oreilles, une trompe de 2 cm, une queue de 12 cm, et une fourrure longue et douce, gris brunâtre sur le dessus et blanchâtre en dessous. Il habite les zones semi-désertiques du sud-ouest de l'Afrique.

Elephantulus, le genre le plus important, avec neuf espèces dont certaines sont grégaires, est répandu dans les zones arides et les savanes. *E. rozeti* est confiné au Maghreb, jusqu'à plus de 1 000 m d'altitude dans l'Atlas.

Les *Rhynchocyoninés* comptent des formes de plus grande taille (25 cm à 30 cm de long), avec seulement quatre doigts à toutes les pattes, et une seule incisive supérieure (parfois absente) ; leur fourrure est rude et tachetée sur le dessus. Elles habitent les forêts du Zaïre, du Kenya, de la Rhodésie et jusqu'à Zanzibar.

▶ *Les Chiroptères sont des micromammifères dont la biologie est marquée par deux caractères fondamentaux : la locomotion aérienne et la vie dans l'obscurité ; ici, une chauve-souris du genre* **Rousettus.**

Ordre des Dermoptères

Les Dermoptères *(Dermoptera)* ou Galéopithèques constituent un tout petit ordre de Mammifères, présentant des affinités avec les Insectivores, caractérisé essentiellement par la possession d'un ample patagium qui leur permet d'effectuer de longs vols planés. Leur museau ressemble à celui de certains Mégachiroptères; leur pavillon auriculaire est petit et de forme simple. Leur corps, long de 40 cm, plus 25 cm pour la queue, est entièrement couvert de poils, ainsi que le patagium, plus développé que chez les autres Mammifères volants. Ce *patagium* diffère beaucoup de la membrane alaire des Chiroptères, car il est constitué par un repli cutané étendu, divisé en trois régions de chaque côté du corps : *propatagium* entre le cou et la patte antérieure, *plagiopatagium* entre les pattes antérieures et postérieures, enfin, *uropatagium* entre la patte postérieure et la queue. Il existe un patagium interdigital.

Les pattes sont pentadactyles, le cinquième doigt toujours plus long que les autres, et tous les doigts possèdent de courtes griffes recourbées. Ces Animaux ne possèdent que des glandes sudoripares et sébacées. L'anus est situé au fond d'un sac profond, caractère qui rappelle les *Cryptoprocta* (Viverridés).

La face, sensiblement aplatie, se prolonge en un museau prononcé; les orbites sont de grande taille, la branche ascendante de la mandibule est peu haute, et le processus angulaire est très marqué.

La formule vertébrale est : C 7, T 13-14, L 5-9, S 3-5, Cd 15-19. La ceinture scapulaire a pour particularité la position parasagittale de l'omoplate, analogue à celle des quadrupèdes marcheurs. La clavicule est bien développée.

Leur dentition lactéale est à peu près identique par le nombre et la forme des dents à la dentition définitive. La formule dentaire est : $\left(I\frac{2}{3}; C\frac{1}{1}; Pm\frac{2}{2}; M\frac{3}{3}\right) \times 2 = 34$; certains auteurs considèrent que la canine supérieure est une prémolaire. Les incisives inférieures, très larges et dirigées vers l'avant, présentent de nombreux et profonds sillons qui leur donnent un aspect pectiné; chez les vieux individus, les deux premières incisives inférieures prennent une consistance fibreuse et deviennent flexibles. Les dents maxillaires sont de type insectivore dilambdodonte.

La langue est longue, l'estomac simple et transversal. L'intestin est cinq à six fois plus long que le corps. Il y a un gros cæcum où le contenu intestinal subit une stase. Le foie, tétralobé, possède une vésicule biliaire. Les poumons ne sont pas lobés. Le cerveau est macrosmatique, les hémisphères étant peu développés. L'odorat est le sens le plus fin.

L'appareil génital du mâle est caractérisé par des testicules extra-abdominaux contenus dans un scrotum, dans lequel ils descendent. Les femelles possèdent un utérus bicorne. Elles sont pourvues d'une paire de mamelles à peu près axillaire et mettent bas un seul petit (rarement des jumeaux) par portée, après une gestation de 2 mois; elles portent un certain temps leur progéniture suspendue à leur ventre.

Arboricoles, les Galéopithèques vivent dans les forêts de l'Asie du Sud-Est. Ce sont des Animaux nocturnes; le jour, ils se suspendent, immobiles, à une branche, mains et pieds rapprochés, le dos fortement arqué, la tête repliée sur la poitrine, et la queue posée sur le ventre. Très mimétiques, ils possèdent des taches claires, disposées irrégulièrement sur la tête, les pattes, les flancs et le patagium.

Ils se nourrissent de feuilles et de fruits, qu'ils prennent et portent à leur bouche avec leurs mains. Ils émettent des cris aigus, audibles de loin. Grâce à leur patagium, ils s'élancent du haut des arbres, tenant les pattes bien écartées, pour effectuer des vols planés de plusieurs dizaines de mètres; le record enregistré est de 136 m entre deux arbres, avec une différence de niveau entre les points de départ et d'arrivée de 10 cm à 12 m seulement.

Cet ordre comprend la seule famille des **Cynocéphalidés,** avec un genre, *Cynocephalus,* qui compte deux espèces : *C. volans,* des Philippines, et *C. variegatus,* dont l'aire recouvre le Tenasserim, l'Indochine, la péninsule malaise, Sumatra, Java, Bornéo et nombre de petites îles.

B. Fritz-Jacana

Ordre des Chiroptères ou Chéiroptères

Les Chiroptères *(Chiroptera)* sont les seuls Mammifères capables d'un vol actif, grâce à une spécialisation très poussée, les autres espèces dites « volantes », Marsupiaux Phalangéridés, l'ordre entier des Dermoptères et les Rongeurs Sciuromorphes ne pouvant que planer à partir des hautes branches d'arbres, grâce à leur patagium.

Quelle est l'origine de ces curieuses créatures? Les fossiles les plus anciens, connus jusqu'à présent, remontent à l'Éocène supérieur : il s'agit de chauves-souris déjà très proches des espèces actuelles. On ne connaît pas de formes de transition, plus primitives, qui pourraient nous documenter au sujet des groupes à partir desquels ces Animaux se différencièrent. Il est presque certain que leurs ancêtres étaient de petits Placentaires, probablement des Insectivores primitifs, avec lesquels les Chiroptères présentent le plus d'affinités; c'étaient sans doute des formes arboricoles de petite taille, qui développèrent progressivement une membrane alaire. D'abord planeurs, par perfectionnements progressifs du membre antérieur se transformant en aile, ils acquirent la possibilité de voler. Ils entrèrent alors inévitablement en concurrence avec les Oiseaux insectivores et frugivores qui existaient déjà ; ces derniers étant diurnes pour la plupart, les Chiroptères évoluèrent vers un type de vie nocturne. Lors de cette spécialisation progressive, la biologie des chauves-souris fut marquée par deux caractères fondamentaux : la locomotion aérienne et la vie dans l'obscurité.

Morphologie et anatomie

Dans l'ensemble, on peut considérer les Chiroptères comme des micromammifères : 3 cm de long *(Caelops)* à 40 cm *(Pteropus).* Le plus souvent, leur tronc ressemble à celui d'une taupe ou d'un rat.

Ce sont les Mammifères qui présentent le maximum de développement relatif du système cutané : ceci est dû à l'extension du patagium, qui entoure aussi la partie postérieure du corps, ainsi qu'à la présence éventuelle de pavillons auriculaires étendus et de formations faciales spéciales.

Tous les Chiroptères, à la seule exception de *Cheiromeles torquatus* (Molossidés), exotique et presque nu, ont la plus grande partie du corps recouverte par une fourrure douce, plus ou moins serrée. Les poils sont

comprimés, légèrement fusiformes, acuminés au sommet, et rétrécis à leur tiers inférieur ; parfois, ils semblent constitués par une série de troncs de cônes insérés les uns dans les autres, le sommet tourné vers le bas, portant parfois des épines latérales. Cette morphologie très variable sert en systématique. Les poils de certaines espèces *(Pipistrellus)* sont digérés par les Rapaces nocturnes, ce qui laisse supposer qu'ils sont constitués d'une kératine spéciale. Les vibrisses faciales très développées ont une disposition rappelant celle observée chez les Insectivores ; il existe parfois des vibrisses tarsiennes, ou localisées à d'autres endroits du corps. La livrée, quelquefois très claire, est généralement gris foncé et noirâtre, présentant toute une gamme de bruns, de gris, de marrons, de fauves et même de roux.

Il y a de nombreuses glandes cutanées : les sébacées, présentes presque sur tout le corps, et des groupes glandulaires spécialisés (faciaux, jugulaires, pectoraux, scapulaires, etc.), souvent plus développés pendant la période des amours, à sécrétions odorantes ; les glandes sudoripares semblent manquer.

Les feuilles nasales, production cutanée caractéristique, développées dans la zone nasale des Rhinolophoïdés et des Phyllostomatoïdés, confèrent au museau de ces Chiroptères un aspect inhabituel.

La morphologie du pavillon auriculaire, ou conque, mobile, est également intéressante : simple chez les Mégachiroptères, il est très compliqué chez un grand nombre de Microchiroptères. La face interne, ou antérieure, du pavillon auriculaire peut présenter des reliefs transversaux ou longitudinaux. L'un de ces reliefs, situé devant le méat auditif, généralement très développé, constitue une formation distincte : le *tragus*.

Dans l'ensemble, mis à part les productions cutanées de la tête, la morphologie externe des Chiroptères est très uniforme, la plus nette, peut-être, de tous les ordres de Mammifères d'une certaine importance numérique, à l'exclusion des Cétacés ; ceci est naturellement dû à un phénomène de convergence morphologique, par suite de l'adaptation au vol.

La caractéristique première de l'ordre est la transformation du membre antérieur en aile. L'omoplate, surtout chez les Microchiroptères, est très développée, de même que la musculature alaire. Le radius est beaucoup plus long que l'humérus et le cubitus est réduit chez l'adulte. Les métacarpiens, à l'exception du premier, sont très allongés ; les phalanges, du deuxième au cinquième doigt, sont également longues et fines ; la troisième phalange est partiellement ossifiée et remplacée, du troisième au cinquième doigt, par une structure en bâtonnet, cartilagineuse, qui se prolonge jusqu'au bord libre de l'aile. Ces doigts très allongés jouent un rôle essentiel comme tenseurs de la membrane alaire, à l'exception du pouce libre et pourvu d'une robuste griffe recourbée ; le deuxième doigt des Mégachiroptères, relativement indépendant, possède une griffe, alors que celle-ci n'existe jamais du troisième au cinquième doigt.

La membrane alaire, ou patagium, consiste en un repli cutané qui s'étend entre les membres, le corps et la queue, s'insérant d'ordinaire sur les côtés du dos ; rarement, la ligne d'attache est plus haute, atteignant presque la région vertébrale. Le patagium comprend trois régions : le *propatagium,* qui s'étend des épaules au long de la partie antérieure du bras, incluant parfois tout l'os métacarpien du pouce ; le *plagiopatagium,* partie la plus importante, est compris entre le deuxième doigt, la partie postérieure de l'avant-bras et du bras, les flancs et le membre postérieur ; il recouvre les troisième, quatrième et cinquième doigts de la main ; l'*uropatagium,* tendu entre l'extrémité postérieure du corps et les membres postérieurs, recouvre partiellement ou totalement la queue.

Le patagium, généralement nu mais portant parfois certaines zones pileuses, a de nombreux corpuscules tactiles. Il est pourvu d'une musculature propre et d'un système complexe de fibres élastiques, le tout servant au repliement de l'aile en position de repos.

Le pied, toujours pentadactyle, est court et étroit, avec des doigts rapprochés, de longueur et de forme à peu près égales ; les griffes sont courbes et bien développées. Les chauves-souris se servent de leurs pieds pour se suspendre la tête en bas aux branches des arbres ou aux parois rocheuses, quand elles se reposent. Il s'agit d'un accrochage proprement dit, et non d'une prise active par les doigts : seules sont utilisées les griffes des pieds, grâce à leur conformation anatomique, permettant un accrochage automatique sans contraction musculaire ; ainsi, de gros *Pteropus* tués à coups de fusil sur les arbres restent suspendus une fois morts. Lorsque les chauves-souris se déplacent à terre, elles s'appuient sur le premier doigt des mains et sur la plante des pieds.

On observe une grande variabilité de la morphologie crânienne. Chez les Mégachiroptères, on observe divers degrés de réduction du massif facial. Les os du crâne se soudent précocement et les sutures disparaissent.

La formule vertébrale est : C 7, T 11-12, L 5-7, S 3-4, Cd jusqu'à 15. La soudure de diverses parties du squelette,

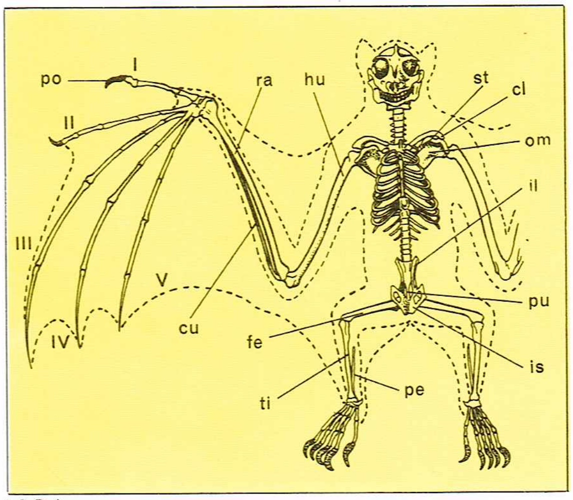

I.G.D.A.

◀ ***Représentation schématique d'un* Pteropus edulis *:***
st, sternum ; cl, clavicule ; om, omoplate ; il, ilion ; pu, pubis ; is, ischion ; hu, humérus ; ra, radius ; po, pouce ; cu, cubitus ; fe, fémur ; ti, tibia ; pe, péroné ; les chiffres romains I à V indiquent les doigts.

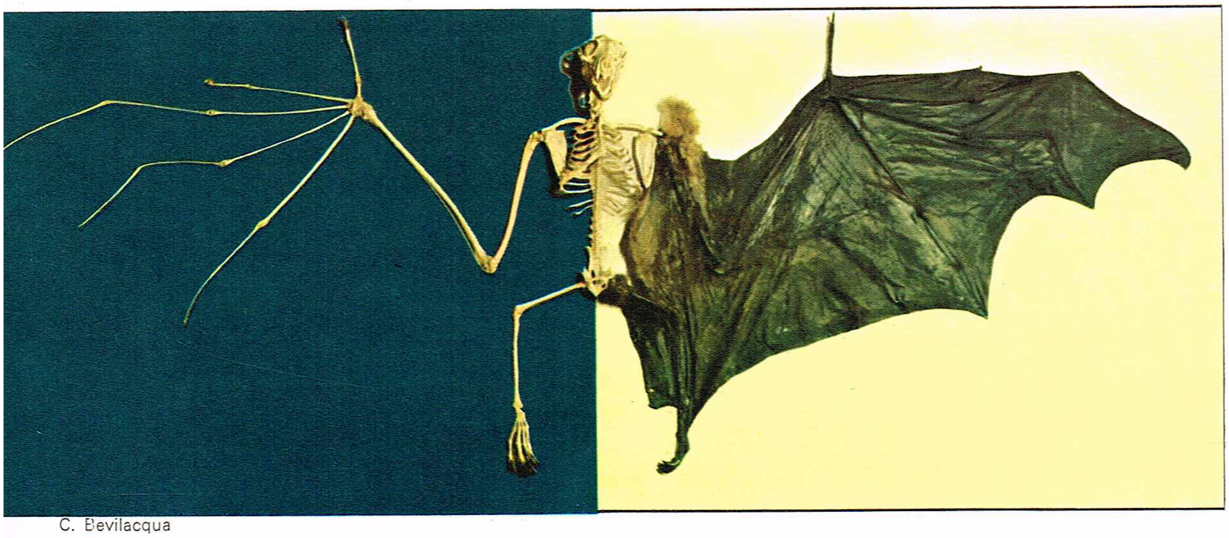

C. Bevilacqua

◀ ***Préparation anatomique montrant les détails du squelette et du patagium d'un Ptéropidé. On observera l'allongement marqué des doigts (Milan, Muséum d'histoire naturelle).***

▶ *Tête de grand fer-à-cheval* (**Rhinolophus ferrum-equinum**) *montrant la puissante denture des Chiroptères.*

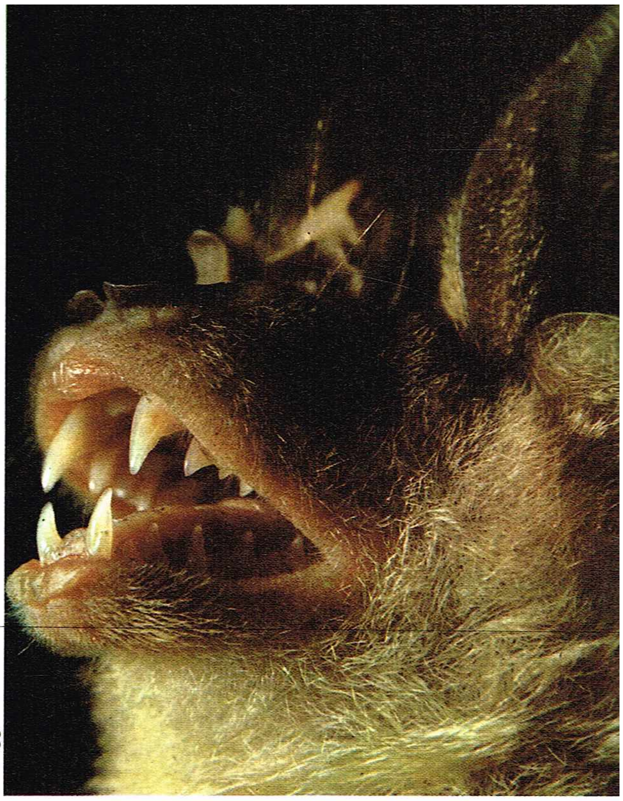

spécialement de vertèbres cervicales et thoraciques, entre les divers segments mésosternaux et entre des côtes successives, donne ampleur et rigidité à la cage thoracique, ce qui est nécessaire à l'attache des muscles du vol. Le sternum est pourvu d'un prosternum, ou manubrium, large, massif, et fortement caréné, ainsi que d'un mésosternum, faiblement caréné ou lisse chez les Microchiroptères, mais à carène plus prononcée chez les Mégachiroptères. La clavicule a un rôle assez secondaire. La ceinture pelvienne est caractérisée par des os iliaques étroits, allongés, presque parallèles à la colonne vertébrale, par la présence d'une symphyse pubienne fibreuse, et par le fait que la fosse acétabulaire est dirigée en dehors et un peu vers le haut, au contraire des autres Mammifères; ceci entraîne que les pattes postérieures sont tournées en dehors et dorsalement, le genou se trouvant alors situé en arrière.

La denture des Chiroptères est de type insectivore dilambdodonte, avec des incisives diversement conformées, des canines en forme de défenses et toujours présentes, et enfin des maxillaires à cuspides pointues, formant un W sur les molaires supérieures (type dilambdodonte); les prémolaires sont caniniformes. Il y a des adaptations aux divers régimes : par exemple, les *Pteropus*, frugivores, ont des molaires à couronne aplatie. La formule dentaire varie énormément selon les familles; seules constantes C $\frac{1}{1}$ et M $\frac{3}{3}$, sauf quelques exceptions.

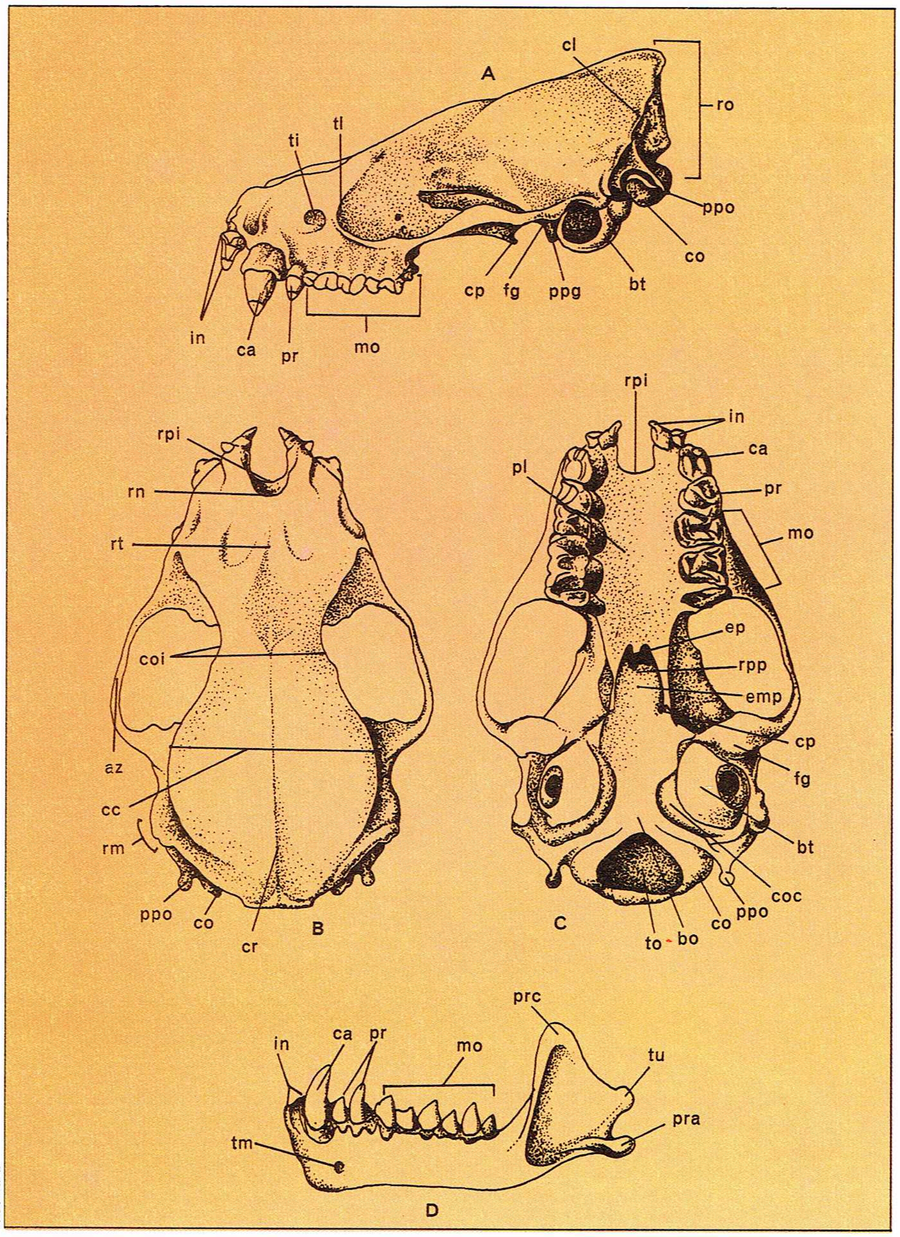

Les dents de lait présentent des traces évidentes de réduction : petites, souvent bifurquées et trilobées, très différentes des dents définitives : les juvéniles s'en servent pour s'attacher aux mamelons maternels pendant le vol. La formule des dents de lait la plus fréquente est la suivante : Il $\frac{2}{3}$; Cl $\frac{1}{1}$; Pml $\frac{2}{2}$. Chez les Rhinolophidés et chez les *Lavia* (Mégadermatidés), les dents de lait disparaissent avant la naissance.

Les lèvres, qui sont parfois très développées, ont une forme caractéristique; elles sont fréquemment mobiles et protractiles. La langue des Mégachiroptères est longue et couverte de papilles cornées, sorte de denticules, et fonctionne à la façon d'une râpe pour entamer la pulpe des fruits. Chez les autres groupes, la forme est très variable. Les glandes salivaires ont un développement normal.

Chez les Microchiroptères, l'estomac est simple, en forme de cornemuse; il devient très long chez les espèces hématophages (Phyllostomatidés, Desmodinés) qui ont aussi une conformation différente des glandes gastriques, normalement bien développées chez toutes les autres chauves-souris : le tube digestif est plus long chez les Mégachiroptères (six fois et demie la longueur du corps chez *Eidolon*) que chez les Microchiroptères (deux à trois fois la longueur du corps) essentiellement insectivores. Les *Rhinopoma* ont un tube digestif dont la longueur représente seulement les 4/5 de celle du corps (cas extrême chez les Mammifères). La vésicule biliaire est toujours présente, alors que le cæcum existe seulement chez quelques genres.

L'appareil respiratoire montre un larynx très développé, avec des cartilages fréquemment ossifiés, pourvu d'une importante musculature, qui permet l'émission, en vol, de sons et d'ultra-sons continus. Dans le larynx, à la partie antérieure de la trachée, s'ouvrent les sacs laryngés, qui servent de modulateurs de son; en outre, la position du larynx et ses rapports avec le début de l'œsophage permettent la déglutition, sans interruption des sons. Les poumons sont très volumineux, du fait de la physiologie du vol et de l'ampleur de la cage thoracique; le poumon droit est généralement plus grand que le gauche et la lobation est variable suivant les familles. Pendant le vol, l'inspiration est assurée en grande partie par l'abaissement du diaphragme.

Le système circulatoire a des particularités propres. Les veines des membres, au nombre de cinq à sept comme les artères, et celles de la membrane alaire, peuvent se contracter en effectuant des mouvements péristaltiques qui favorisent la circulation.

Les hémisphères cérébraux sont assez grands : la lissencéphalie et la réduction des lobes olfactifs sont marquées chez les Microchiroptères. En ce qui concerne les sens, le toucher est bien développé, alors que l'odorat

serait plus fin chez les Mégachiroptères que chez les Microchiroptères. Les yeux sont normalement conformés ; les globes oculaires sont assez grands par rapport au corps. La vue, toutefois, ne joue pas un rôle important dans la vie de ces Animaux crépusculaires et nocturnes (tout au moins les Microchiroptères). Le sens le plus important et le plus efficace est l'ouïe, perfectionnée au maximum, comme nous le verrons au sujet de la faculté des Chiroptères de s'orienter dans l'obscurité grâce à des ultra-sons. Le sens statique est également bien développé.

L'appareil urinaire ne présente pas de particularité. Les testicules, intra-abdominaux en périodes de repos sexuel, descendent dans un scrotum temporaire, pré- ou post-anal, à l'époque de la reproduction. Il y a souvent un os pénien. L'utérus présente différentes formes (chez les Mégachiroptères il tend à être double). Les caractères sexuels secondaires sont le plus souvent peu importants ou inexistants.

Les mamelles sont généralement au nombre de deux et situées non loin du creux axillaire ou presque dorsales. Les Rhinolophoïdés possèdent aussi une paire de pseudo-mamelles, inguinales, servant de points d'attache pour les petits, qui s'y attachent par la bouche pendant le vol de la mère.

Biologie et écologie

Essentiellement nocturne, la vie des Chiroptères est liée à deux sortes de rythmes : l'un, court, quotidien ou nycthéméral, et l'autre, long, saisonnier. Dans le rythme nycthéméral, on distingue deux phases : l'une, diurne, de repos, l'autre nocturne, d'activité.

Mis à part de rarissimes exceptions, les chauves-souris ne construisent pas de nids ; en dehors des grands *Pteropus,* qui n'ont pas à se défendre en raison de leur taille, et qui se suspendent aux branches des arbres par leurs pattes, la grande majorité des espèces, petites ou même minuscules, a besoin de se cacher. Pratiquant une sorte de « parasitisme écologique », les Chiroptères se sont habitués à occuper les cavités les plus diverses : tanières d'autres Animaux, troncs d'arbres creux, trous du sol, anfractuosités des roches, et surtout grottes et cavernes. Puis, après l'apparition des civilisations, ils ont peu à peu colonisé les maisons inhabitées et les édifices divers, montrant, surtout chez certains groupes, une tendance à la synanthropie. Provenant selon toute probabilité de formes arboricoles, les Chiroptères utilisent toutes les possibilités de logement offertes par les arbres. Les espèces dendrophiles, s'installant sur les arbres vivants, sont essentiellement tropicales, et se tiennent le plus souvent à découvert, beaucoup s'accrochant aux écorces. Les *Pteropus* restent souvent exposés au soleil et aux intempéries sans éprouver de gêne. D'autres espèces se réfugient dans le feuillage, comme les *Artibeus* et les *Lasiurus,* américains. Les palmiers et les bananiers offrent souvent asile à diverses chauves-souris, les protégeant contre le soleil et la pluie. Les troncs d'arbres morts, pleins de trous, de grandes fentes, souvent déjà aménagés par d'autres Animaux comme les Oiseaux, offrent aussi une riche gamme d'abris. *Kerivoula picta,* petite chauve-souris asiatique à fourrure brun-roux, se cache dans les touffes de feuilles sèches pendant à l'extrémité des branches, exploitant ainsi le mimétisme de sa livrée ; il y a d'autres cas de mimétisme vis-à-vis des écorces couvertes de Lichens et de Mousses.

Cependant la majorité des espèces se réfugie dans les cavités souterraines, souvent par colonies immenses (jusqu'à plusieurs millions d'individus comme dans le cas de la *Tadarida brasiliensis*). La masse d'excréments accumulés et décomposés (guano) laissée par ces Animaux a une grande influence sur le micro-climat de ces refuges. En Amérique centrale, les *Chilonycteris,* les *Pteronotus* et les *Natalus* habitent des cavernes où la chaleur et les émanations ammoniacales sont intolérables pour l'homme. Les chauves-souris peuvent facilement respirer de l'air chargé d'un taux d'ammoniac mortel pour les autres Mammifères. Les Chiroptères utilisent ainsi la chaleur produite par la dégradation chimique de leurs propres déjections, compensant l'imperfection de leur thermo-régulation ; de plus, la puanteur fait fuir les prédateurs. Leur morphologie ne permettant pas aux Chiroptères de creuser des galeries, certains occupent les tanières d'autres Animaux : mis à part les nids abandonnés dans les troncs d'arbres, nous citerons *Tonatia minuta* qui vit dans les nids du termite *Microcerotermes arboreus* dans l'île de Trinidad, et partage, semble-t-il, son gîte avec un petit perroquet *(Forpus passerinus)* qui y pond ses œufs, et *Kerivoula harrisonii,* du Gabon, qui habite les toiles de l'araignée *Agelena consociata*. Enfin, les deux Phyllostomatidés *Artibeus cinereus* et *Uroderma bilobatum* présentent certaines aptitudes à la construction, transformant de grosses feuilles en abris plus confortables, par incision des bords. Il est des adaptations physiologiques et morphologiques, liées aux divers types de refuges et à la position de l'Animal pendant son repos, qui sont fort intéressantes. On peut distinguer deux types de chauves-souris à cet égard : celles qui se suspendent par les pieds, aux branches ou aux saillies des roches, se laissant pendre dans le vide la tête en bas, et prenant une forme en œuf caractéristique, les ailes enroulées autour du corps, ce qui les protège contre la lumière et les intempéries (par exemple les *Pteropus* et les *Rhinolophus*) ; d'autre part, celles qui s'agrippent aux parois rocheuses ou aux écorces des arbres avec tous leurs membres. Chez ces dernières, on observe une tendance à l'aplatissement, parfois très poussée, qui permet à l'Animal de se réfugier même dans d'étroites fentes de rocher ou sous l'écorce des arbres. Les espèces se suspendant aux grandes feuilles ont acquis des ventouses, tels les Thyroptéridés et les Myzopodidés.

Exceptionnellement diurnes, les Chiroptères sont actifs la nuit et au crépuscule ou à l'aurore ; les heures et les modalités de sortie des abris diurnes varient selon les espèces, les refuges occupés, la saison et d'autres facteurs influant sur leur vie sociale. Une fois sorties les chauves-souris se dirigent généralement vers leur territoire de chasse, en suivant des parcours immuables ; dans les forêts tropicales, on observe d'imposantes colonnes de chauves-souris le long de véritables « routes » (chez divers *Hipposideros*). En Afrique et en Asie, de grandes troupes de *Pteropus* se déplacent parfois en bandes serrées, jusqu'à des distances de 100 km, passant des bras de mer pour rejoindre leurs lieux de nourriture et revenant ponctuellement à l'aube. La recherche de la nourriture est coupée de pauses, certainement pour l'absorption de la cueillette. La majorité des espèces de petite taille effectue probablement deux ou trois vols de chasse. Malheureusement, on connaît peu de chose sur les mœurs de ces Mammifères pendant leurs activités nocturnes et pratiquement rien sur leur vie sociale à cet égard. L'aspect, l'étendue et la situation du territoire de chasse varient énormément avec les espèces. Pour la plupart insectivores, les Chiroptères capturent leurs proies en vol, rarement à terre, selon des techniques de chasse variables d'une espèce à l'autre, utilisant les ultra-sons comme moyen de localisation des objets se trouvant devant eux. Certaines espèces, essentiellement des Ptéropidés et certains groupes de Phyllostomatidés,

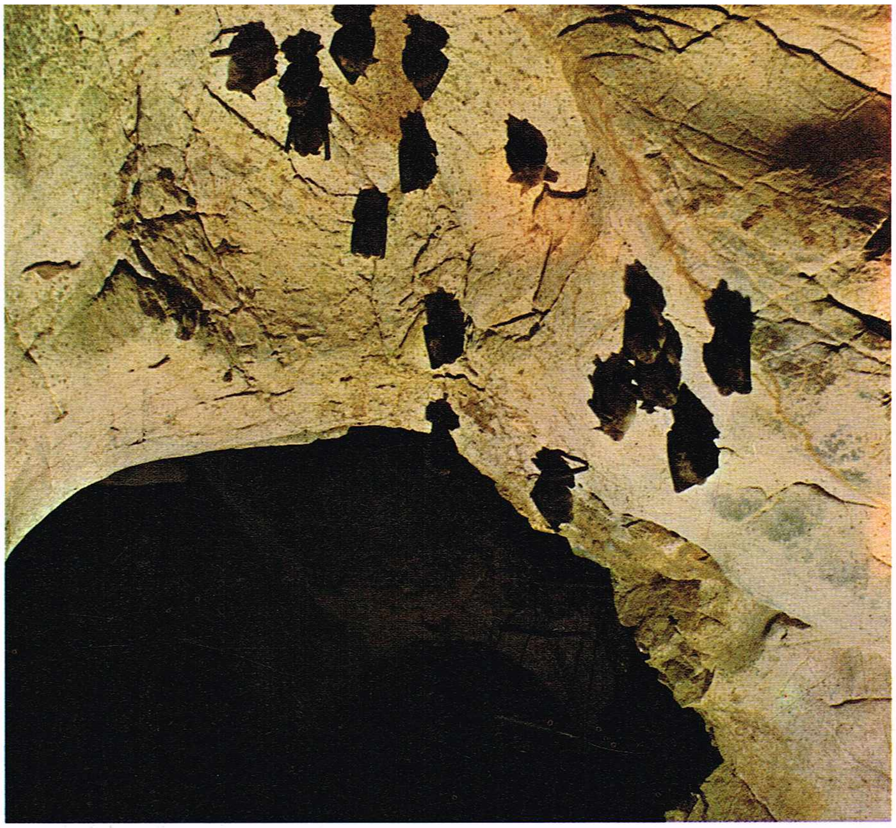

S. Ferri-Ricchi

▲ Les Chiroptères se sont habitués à occuper les cavités les plus diverses, surtout les grottes et les cavernes, pratiquant ainsi une sorte de « parasitisme écologique ».

◀ Page ci-contre, crâne de **Vespertilio serotinus,** ***vu de côté (A), de dessus (B), de dessous (C), et D, mandibule à part ; ro, région occipitale ; cl, crête lambdoïde ; tl, trou lacrymal ; ti, trou intra-orbitaire ; in, incisives ; ca, canine ; pr, prémolaire ; mo, molaire ; cp, crochet ptérygoïde ; fg, fosse glénoïde (= mandibulaire) ; ppg, processus postglénoïde ; bt, bulle tympanique ; co, condyle occipital ; ppo, processus para-occipital ; rpi, renfoncement palatin inférieur ; rn, renfoncement nasal ; rt, rostre ; az, arcade zygomatique ; coi, constriction intra-orbitaire ; cc, boîte crânienne ; rm, région mastoïdienne ; cr, crête sagittale ; pl, palais ; ep, épine palatine ; rpp, renfoncement palatin postérieur ; emp, espace méso-ptérygoïde ; coc, cochléa ; bo, basi-occipital ; to, trou occipital ; prc, processus coronoïdien ; tu, tubercule condyloïdien ; pra, processus angulaire ; tm, trou mandibulaire.***

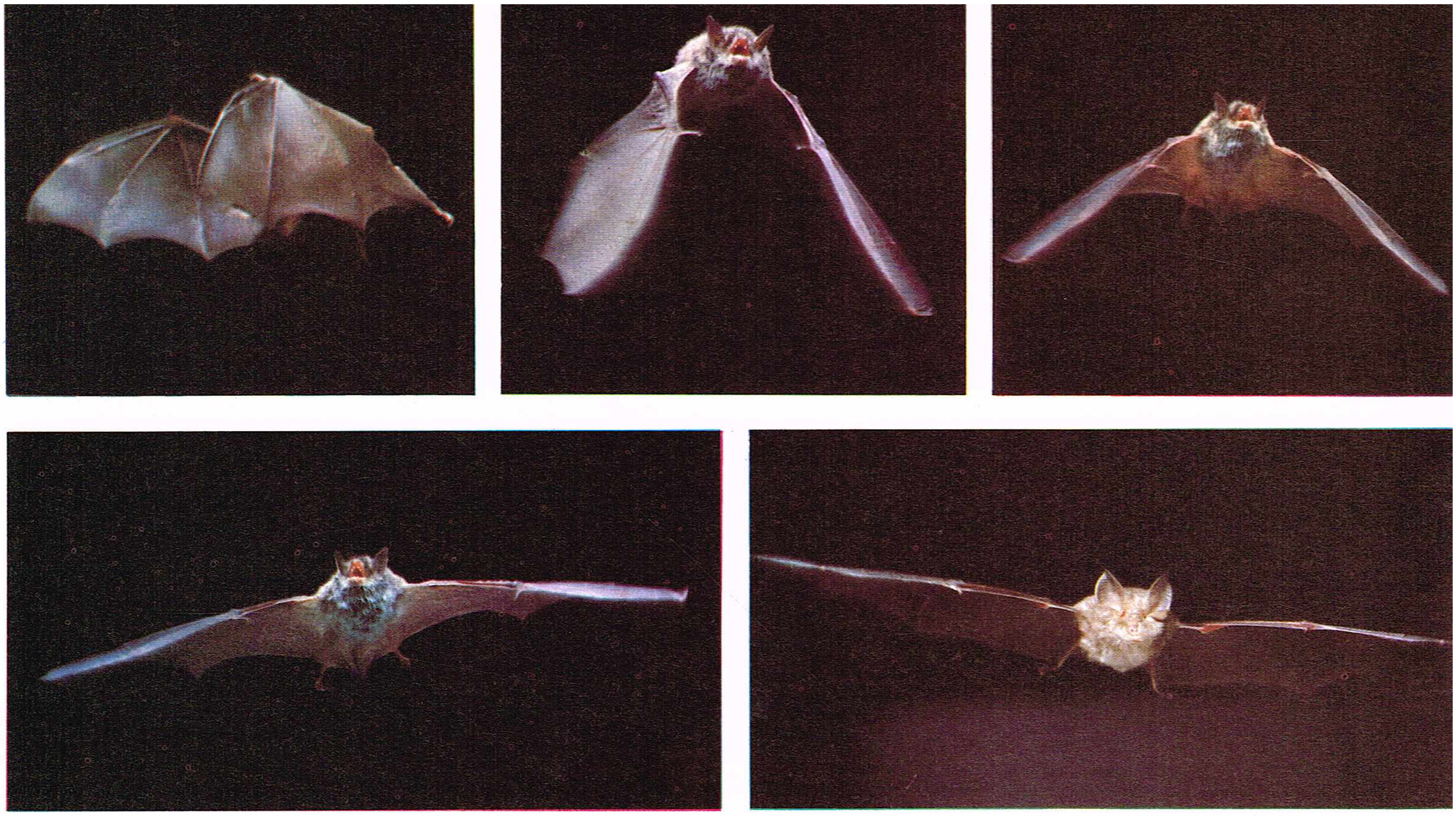

S. Ferri-Ricchi

▲ ***Décomposition du vol d'une pipistrelle dans les phases les plus caractéristiques. Celles-ci ont été photographiées au millième de seconde et avec une « barrière » de rayons infrarouges de façon à fixer les images très rapides du battement alaire.***

▶ ***Le système d'écholocation, ou localisation des obstacles par les ultra-sons, est un des aspects les plus intéressants des Microchiroptères et des*** **Rousettus** ***(seuls Macrochiroptères à en être pourvus). Ici, l'organe du son de*** **Rousettus aegyptiacus** ***est situé près de la langue.***

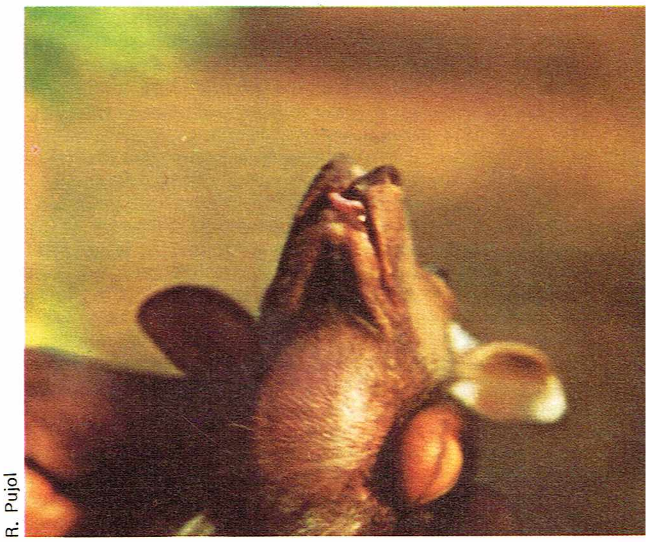

R. Pujol

sont frugivores, parfois nectarivores et pollinivores, pollinisant de nombreuses plantes tropicales à floraison nocturne (par exemple, les *Parkia*, les *Kigelia*, etc.). Ils présentent des adaptations diverses à leur nourriture végétarienne, surtout en ce qui concerne la langue. Il existe enfin des espèces carnivores, comme la *Megaderma lyra*, d'Asie méridionale, qui dévorent des petits Oiseaux, des micromammifères, des geckos, des grenouilles, etc. Trois espèces au moins sont ichtyophages : *Noctilio leporinus* et *Pizonyx vivesi*, américaines, et *Myotis macrotarsus*, asiatique, qui capturent des Poissons près de la surface de l'eau, en se servant de leurs robustes pattes. Les hématophages, enfin, comptent seulement les Phyllostomatidés Desmodinés, américains, ou vampires vrais.

Les caractéristiques du vol des chauves-souris dépendent essentiellement de la forme de leurs ailes. Les espèces à ailes courtes et larges, généralement plus primitives, ont un vol indécis, papillonnant, très lent et de peu de durée ; les espèces à ailes longues et étroites ont un rythme de battements moins fréquent, accomplissent des parcours plus longs en vol plané, et en général un vol plus rapide et plus durable. On sait peu de chose sur la vitesse du vol. *Myotis myotis*, par exemple, se déplace environ à 15 km par heure, effectuant onze ou douze battements d'ailes par seconde ; *Miniopterus schreibersi* peut atteindre 50 km/h, et *Tadarida brasiliensis* volerait à près de 100 km/h.

Mais l'aspect le plus intéressant de la biologie des Chiroptères est leur système « d'écholocation » ou localisation des obstacles par les ultra-sons, leur permettant de voler en pleine obscurité. Leur évolution vers la vie nocturne, et particulièrement troglophile, est l'un des motifs fondamentaux de l'acquisition de cette extraordinaire faculté. Résumons les principales étapes par lesquelles il a été possible de découvrir, récemment, le processus de ce système.

En 1794, l'abbé Spallanzani démontra que des chauves-souris aveuglées volaient normalement ; en l'absence d'explication plausible, il supposait qu'elles possédaient un sixième sens ; en 1798, Jurine, confirmant les expériences de Spallanzani, démontrait aussi que l'occlusion des méats auditifs faisait perdre la capacité de voler dans la nuit ; en 1900, Rollinat et Trouessart reconnurent le rôle fondamental de l'oreille interne dans la perception de la direction mais pensèrent que les Chiroptères se dirigent par l'ouïe et le toucher simultanément ; en 1920, Hartridge émettait l'hypothèse selon laquelle le système de guidage des chauves-souris dans l'obscurité était fondé sur les ultra-sons, émis et captés en vol ; en 1938, Pierce et Griffin démontraient que les Chiroptères avaient la capacité d'émettre certains ultra-sons ; enfin, en 1941, Griffin et Galambes, confirmant expérimentalement l'hypothèse de Hartridge, prouvaient en particulier que les chauves-souris perdent leur capacité de s'orienter en vol dans l'obscurité quand on leur obture la bouche et les narines. Des études ultérieures ont permis d'éclaircir de nombreux aspects des phénomènes physiques et physiologiques mis en jeu pour l'écholocation, variant énormément selon les familles de Chiroptères.

Seuls les Microchiroptères et les *Rousettus* émettent des ultra-sons. Les Macrochiroptères autres que *Rousettus* n'en n'auraient pas la capacité.

Chez les Microchiroptères, les ultra-sons sont produits par le larynx, pourvu d'une forte musculature, alors que chez *Rousettus*, les ultra-sons plus simples sont produits à l'aide de la langue.

Chez les Vespertilionidés, les Phyllostomatidés, les Molossidés et les Emballonuridés, l'émission se fait par la bouche, ouverte pendant le vol ; chez les rhinolophes, l'émission se fait par le nez, les feuilles nasales ayant sans doute un rôle accessoire de délimitation et de direction des faisceaux d'ondes. Pour la réception, l'oreille externe a un rôle auxiliaire mais non essentiel ; ce rôle semble plus important chez les Rhinolophidés, dont les pavillons auriculaires sont dotés d'une grande mobilité.

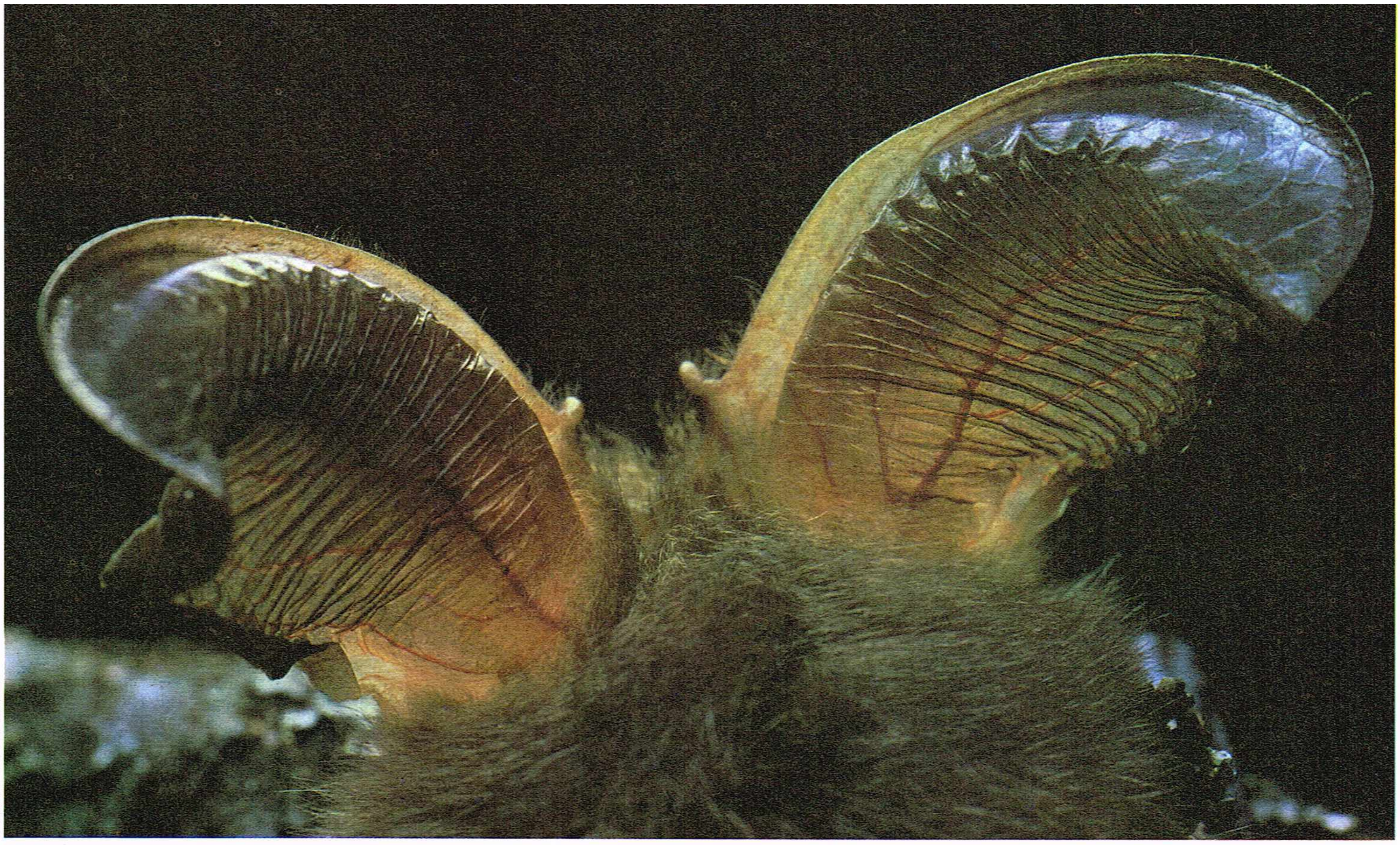

Ostman-J. Holmasen

A. Margiocco

▲ *On observera les délicates structures des pavillons auriculaires de* **Plecotus auritus** *ou oreillard ; malgré leur importance, ces oreilles externes n'auraient, pour la réception des sons, qu'un rôle auxiliaire.*

◀ *Chez* **Rhinolophus ferrum-equinum**, *par contre, dont les pavillons auriculaires sont dotés d'une grande mobilité, ce rôle semble plus important.*

La variété des ultra-sons émis est très grande, et chaque espèce a son type propre, sinon exclusif, tout au moins en ce qui concerne les détails. Les espèces qui capturent des Insectes en vol sont les plus spécialisées à ce sujet, se servant des ultra-sons pour localiser avec une grande précision leurs petites proies mobiles dans l'atmosphère. Les divers types d'émission d'ultra-sons semblent liés à la différence des techniques de chasse ; en tout cas, ils sont en relation avec des spécialisations anatomiques différentes. L'écholocation ne semble pas avoir été une faculté primitive de l'ordre, mais plutôt une acquisition secondaire, liée particulièrement à l'adaptation à la vie troglophile. Il est significatif à cet égard que les *Rousettus*, troglophiles, soient les seuls Mégachiroptères qui utilisent l'écholocation, alors que tous les autres genres, arboricoles, en sont incapables.

Les Chiroptères présentent une homéothermie imparfaite, subissent des variations de leur thermorégulation selon les conditions du milieu. D'innombrables espèces, et en particulier celles des régions tempérées, tombent en léthargie l'hiver, restant des mois en état d'inanition et subvenant aux besoins minimaux de leur organisme grâce aux réserves accumulées au cours de la période active. Toutefois, il peut y avoir de brèves périodes de réveil, par exemple à la suite d'un abaissement excessif de la température entraînant l'Animal à tenter de trouver un abri plus chaud. Dans le midi de l'Europe, la léthargie hivernale commence quand la température ambiante descend au-dessous de 10° ; au-dessus de cette valeur, il peut y avoir de courtes périodes d'hibernation partielle, quand par exemple l'Animal ne sort pas durant la nuit à cause des trop mauvaises conditions atmosphériques.

Les Chiroptères effectuent parfois des déplacements importants, aussi bien journaliers que saisonniers, pouvant être en certains cas comparés aux migrations des Oiseaux. Les quartiers d'été et d'hiver, pour une espèce donnée, ne sont normalement pas les mêmes, et les deux sortes d'abris qui leur correspondent peuvent être distants de plusieurs centaines de kilomètres. La technique du baguage a permis, outre l'étude de ces déplacements, d'étudier la longévité, la grande fidélité aux lieux de refuge, et la composition des populations.

La biologie de la reproduction chez les Chiroptères présente des aspects très variés. Schématiquement, il y a trois types de comportement : les espèces ayant une période limitée par an, l'accouplement étant suivi par l'ovulation et la fécondation ; c'est le cas des Mégachiroptères et de la plupart des Microchiroptères tropicaux ; les espèces dont l'accouplement a lieu à la fin de l'été, mais dont l'ovulation et la fécondation ont lieu au printemps : il y a alors fécondation différée, les spermatozoïdes restant vivants pendant l'hiver dans les voies génitales des femelles ; cas des Rhinolophidés et des Vespertilionidés (le minioptère exclu) des régions tempérées et froides, soit la quasi-totalité des chauves-souris de nos régions ; les espèces dont l'accouplement a lieu en tout temps, les femelles étant polyœstrales durant toute l'année ; c'est le cas par exemple du vampire vrai *(Desmodus rotundus murinus)*.

La durée de la gestation est très variable, et dépend beaucoup des conditions du milieu, en particulier de la température ; à égalité de poids corporel, les espèces néarctiques et paléarctiques ont une gestation plus courte que les espèces tropicales : 45 jours pour les *Pipistrellus*, 60 jours pour les *Myotis*, 70 jours pour *Rhinolophus ferrum-equinum* ou rhinolophe fer-à-cheval, et pour *Nyctalus noctula* ou noctule. Sous les climats chauds, la durée s'allonge : 5 à 6 mois chez les grands *Pteropus*, 4 mois chez *Cynopterus sphynx*, et 3 mois chez les petits *Hipposideros*. Ces nombres, toutefois, sont considérés comme tout à fait approximatifs. La gestation ralentie est observée surtout chez les espèces tropicales ayant colonisé les régions tempérées : le cas le mieux connu est celui du minioptère *(Miniopterus schreibersi)*, dont l'accouplement et la fécondation immédiate en automne sont suivis par un ralentissement exceptionnel du développement du fœtus pendant toute l'hibernation,

E.P.S.

▲ ***Femelle de Microchiroptère avec son petit. Chez les Vespertilionidés, le nouveau-né est recueilli dans l'uropatagium et s'agrippe immédiatement aux poils de sa mère.***

A. Margiocco

de sorte que la mise bas a lieu au mois de mai ou juin de l'année suivante.

Le nombre des petits est généralement d'1 ou 2, rarement 3 ; certaines espèces, exceptionnellement, en ont 4 *(Lasirius)*. Ce faible taux de natalité doit être mis en relation d'une part avec la longévité des Chiroptères (nombre d'espèces dépassant 10 ans, certaines arrivant jusqu'à 20 ans), laquelle est fonction de leur taille, d'autre part avec la faible pression prédatrice à laquelle les espèces sont soumises. Les nouveau-nés, le plus souvent nus et aveugles, sont assez gros : leur poids va de 1/6 à 1/3 de celui de la mère, ce qui est un record pour des Mammifères. La présentation du petit lors de la mise bas se fait habituellement par les pieds : chez les Vespertilionidés, le nouveau-né est recueilli dans l'uropatagium de la mère, que celle-ci tient rabattu ventralement comme une poche. Le petit s'agrippe immédiatement aux poils de la mère ; en d'autres cas, les petits sont laissés par les mères en groupes isolés dans leurs refuges, qu'elles visitent périodiquement pour l'allaitement. Il y a alors un curieux phénomène, très rare, d'allaitement collectif, qui présuppose l'existence de colonies très nombreuses *(Miniopterus schreibersi* et *Tadarida brasiliensis)* : les femelles retournent à l'aube dans leurs antres et se posent sur la masse fourmillante des petits affamés, donnant leur lait aux deux premiers qui peuvent saisir leurs mamelles. On observera que chaque femelle, généralement, n'a qu'un petit par portée : donc il est certain qu'elle nourrit de temps à autre des petits qui ne lui appartiennent pas.

Les membres antérieurs, moins développés à la naissance que les postérieurs, ont une croissance plus rapide. L'allaitement dure 5 mois chez les *Pteropus*. En règle générale, les juvéniles des Microchiroptères peuvent commencer à voler à l'âge de 30 à 40 jours, et acquièrent leur indépendance vers 2 mois.

Les Chiroptères ont un rôle écologique important, car ils détruisent de grandes quantités d'Insectes. C'est l'ordre le plus répandu sur le globe, avec un maximum de densité dans les régions tropicales, à l'exception des zones froides. On l'observe aussi en Nouvelle-Zélande où deux espèces constituent la totalité de la thériofaune indigène.

L'ordre des Chiroptères est divisé en deux sous-ordres : les Mégachiroptères et les Microchiroptères ; les premiers, uniquement exotiques, comprennent la seule famille des Ptéropidés, alors que les seconds, qui comprennent la grande majorité des espèces, comptent quatorze familles. Au total, le nombre des espèces est de sept cent quatre-vingt-un, réparties en cent soixante-dix-neuf genres. C'est le second ordre de Mammifères en nombre après les Rongeurs.

Dans l'exposé qui suit, nous traiterons en détail de toutes les familles et genres, et nous décrirons les principales espèces. Toutefois, étant donné leur nombre élevé et leur manque d'uniformité morphologique, la partie descriptive portera essentiellement sur la vie et les mœurs de ces Animaux. Mis à part quelques légères modifications, nous suivrons la classification de Grassé (1955), à l'exclusion des genres, pour lesquels nous nous sommes référés au tout récent traité de Walker (1968), qui fait autorité.

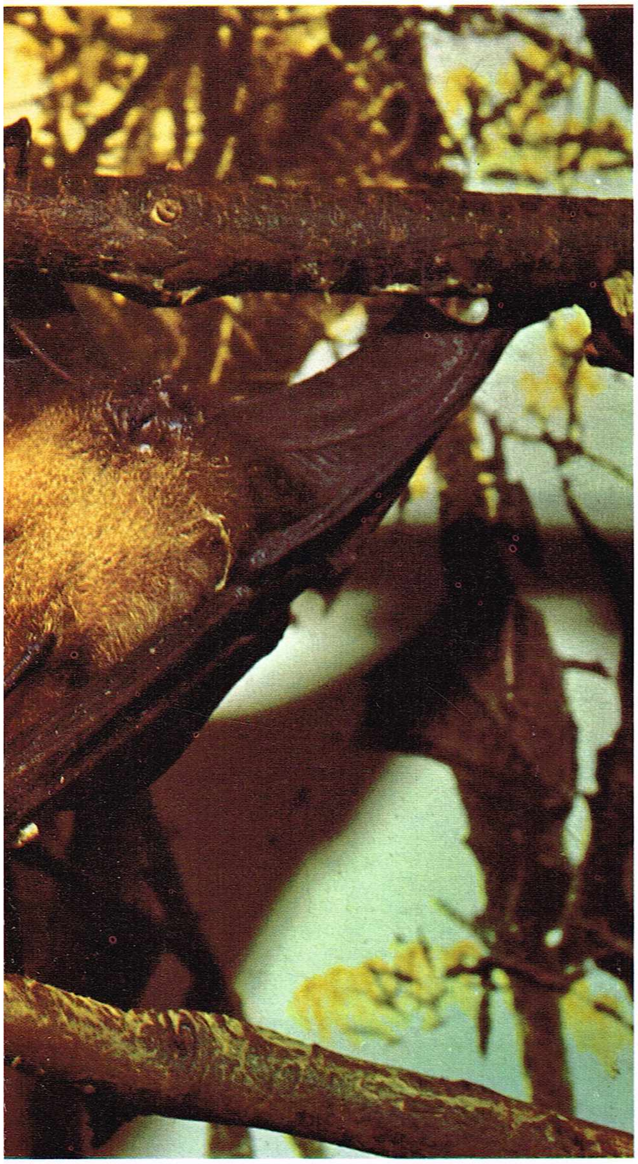

Sous-ordre des Mégachiroptères

Le sous-ordre des Mégachiroptères *(Megachiroptera)*, qui est constitué par l'unique famille des **Ptéropidés** *(Pteropidae)*, forme un groupe nettement à part au sein de l'ordre, par suite de ses caractères anatomiques et surtout par ses particularités biologiques. Les Mégachiroptères, plus primitifs que les Microchiroptères par leur anatomie alaire et leur vol, ont une denture, par contre, qui présente une spécialisation poussée du fait de leur régime frugivore. Ce sont les plus grands de tous les Chiroptères, puisqu'il en existe de 40 cm de longueur *(Pteropus)*, avec une envergure de 1,70 m; certaines espèces pèsent jusqu'à 900 g. Il est aussi de toutes petites espèces, 5 cm pour *Syconycteris*. Les mâles sont parfois plus grands que les femelles et plus colorés; ils possèdent souvent des caractères sexuels secondaires.

Les Ptéropidés ont généralement une tête très grosse, à museau allongé (d'où le nom donné à certaines espèces de chiens volants ou renards volants), avec la région nasale nue et de forme normale (sauf chez les Nyctiméninés). Ils possèdent de grands yeux, des oreilles ovalaires et longues, avec un pavillon de structure simple et dépourvu de tragus, et une robe généralement serrée, de diverses couleurs (le plus souvent brun foncé).

Leur membre antérieur, bien que parfaitement adapté au vol, est morphologiquement moins évolué que chez les Microchiroptères : le premier doigt est plus développé que chez ces derniers ; le deuxième est formé de trois phalanges, souvent pourvu d'une griffe, et très indépendant des autres; le troisième enfin, toujours le plus long, supporte le patagium. La ceinture scapulaire est moins rigide et il n'y a pas de soudures vertébrales comme chez les Microchiroptères. Leur membre postérieur est normalement conformé. Le patagium s'y insère dorsalement et non de côté comme chez les autres Chiroptères; leur queue, enfin, sauf chez *Notopteris*, est courte ou rudimentaire, partiellement incluse dans l'uropatagium, avec une insertion dorsale.

Leur langue, riche en papilles, joue un rôle important dans la prise de la nourriture : extensible chez les Macroglossinés nectarivores et pollinivores, elle sert à perforer, à sucer et à râper chez les espèces frugivores qui sont la grande majorité, enfin elle aide à la mastication, puisqu'elle sert à écraser les fruits contre les crêtes de la muqueuse palatine. Seuls certains Nyctiméninés sont partiellement insectivores.

La denture présente des signes de réduction et de spécialisation du fait du régime frugivore; la musculature masticatoire est faible. Les incisives, petites, sont le plus souvent au nombre de 2 par demi-mâchoire ; les canines sont bien développées; les molaires ont une couronne basse, allongée, avec les cuspides arrondies et très réduites. La formule dentaire est :

$$\left(I\ \frac{1\text{-}2}{0\text{-}2};\ C\ \frac{1}{1};\ Pm\ \frac{1\text{-}2}{2\text{-}3};\ M\ \frac{1\text{-}2}{2\text{-}3}\right) \times 2 = 24 \text{ à } 34.$$

Les Ptéropidés, généralement crépusculaires et nocturnes, certaines espèces étant également actives en plein soleil, sont habituellement grégaires, parfois de façon très poussée. Ils se reposent le jour, suspendus la tête en bas, le plus souvent dans des arbres, des cavernes, des grottes ou jusque dans des édifices. La nuit, pour rechercher leur nourriture, ils accomplissent de longs vols, certaines espèces couvrant des dizaines de kilomètres en une seule nuit, et revenant au matin dans leurs refuges, auxquels elles sont très inféodées. Les Mégachiroptères, à l'exception des *Rousettus,* se dirigent en se servant surtout de leur vue, et, pour trouver les fruits dans un rayon restreint, de l'odorat. Très voraces, ils consomment de grandes quantités de fruits, provoquant souvent de grands dégâts aux cultures, notamment en Australie. Aux États-Unis, il est rigoureusement interdit de les importer vivants. Leur vol est très rapide et très efficace, avec un envol en chute libre à partir d'un support élevé ; à l'occasion, ils grimpent très bien, à l'aide des premiers doigts de mains et de pieds. On ne connaît pas d'espèces sujettes à tomber en léthargie. La gestation dure environ 15 semaines; les femelles ont normalement une seule portée par an, d'un seul petit ou tout au plus de jumeaux.

Les Ptéropidés peuvent être domestiqués et ont une certaine intelligence; on en a élevé en captivité jusqu'à l'âge d'environ 20 ans. Certaines espèces sont chassées par les indigènes, qui les mangent. Ils habitent les zones arborées tropicales et subtropicales. Leur distribution couvre l'Afrique avec Madagascar, l'Asie Mineure, l'Asie méridionale (surtout l'archipel de la Sonde), les Philippines, la Nouvelle-Guinée, l'Australie et nombre d'îles d'Océanie occidentale. La famille compte trente-neuf genres et cent vingt-sept espèces groupées en quatre sous-familles.

La sous-famille des *Ptéropinés,* la plus importante et la plus nombreuse, est caractérisée par une langue courte et une denture à conformation normale. On en compte vingt-neuf genres et cent cinq espèces, à très vaste diffusion.

Le genre le mieux connu et le plus important est *Rousettus,* avec une dizaine d'espèces assez petites (12 cm de long maximum), à tête allongée et à museau pointu. Leur denture a pour particularité : I $\frac{2}{2}$, dents maxillaires $\frac{5}{6}$. Leur queue est courte. On les rencontre en Afrique, au Proche-Orient jusqu'en Palestine, et à l'est jusqu'aux îles Salomon, à l'exclusion de l'Australie. Ces Chiroptères forment des colonies importantes de quelques dizaines à plusieurs milliers d'individus, sédentaires ou migratrices : en forêt équatoriale, ils sont plutôt sédentaires, alors que dans l'ouest de l'Inde, du fait des variations de climat et donc de la quantité de nourriture disponible, ils accomplissent d'importants déplacements.

Les *Rousettus* sont une exception à divers titres dans la famille : tous troglophiles, ils vivent dans des grottes, des anfractuosités de roches, des puits, des tombes, dans les temples et les édifices obscurs, où ils s'installent côte à

Gérard-Jacana

▲ ***Les épomophores* (Epomophorus gambianus) *représentent l'un des groupes de Mégachiroptères les plus répandus et les plus abondants. Ils vivent en forêt et sont strictement arboricoles, frugivores et en partie nectarivores.***

◄▲ ***Au centre,* Pteropus celaeno *ou* edulis *appartient à la famille des Ptéropidés qui comptent les plus grands de tous les Chiroptères; ils se reposent le jour, suspendus la tête en bas.***

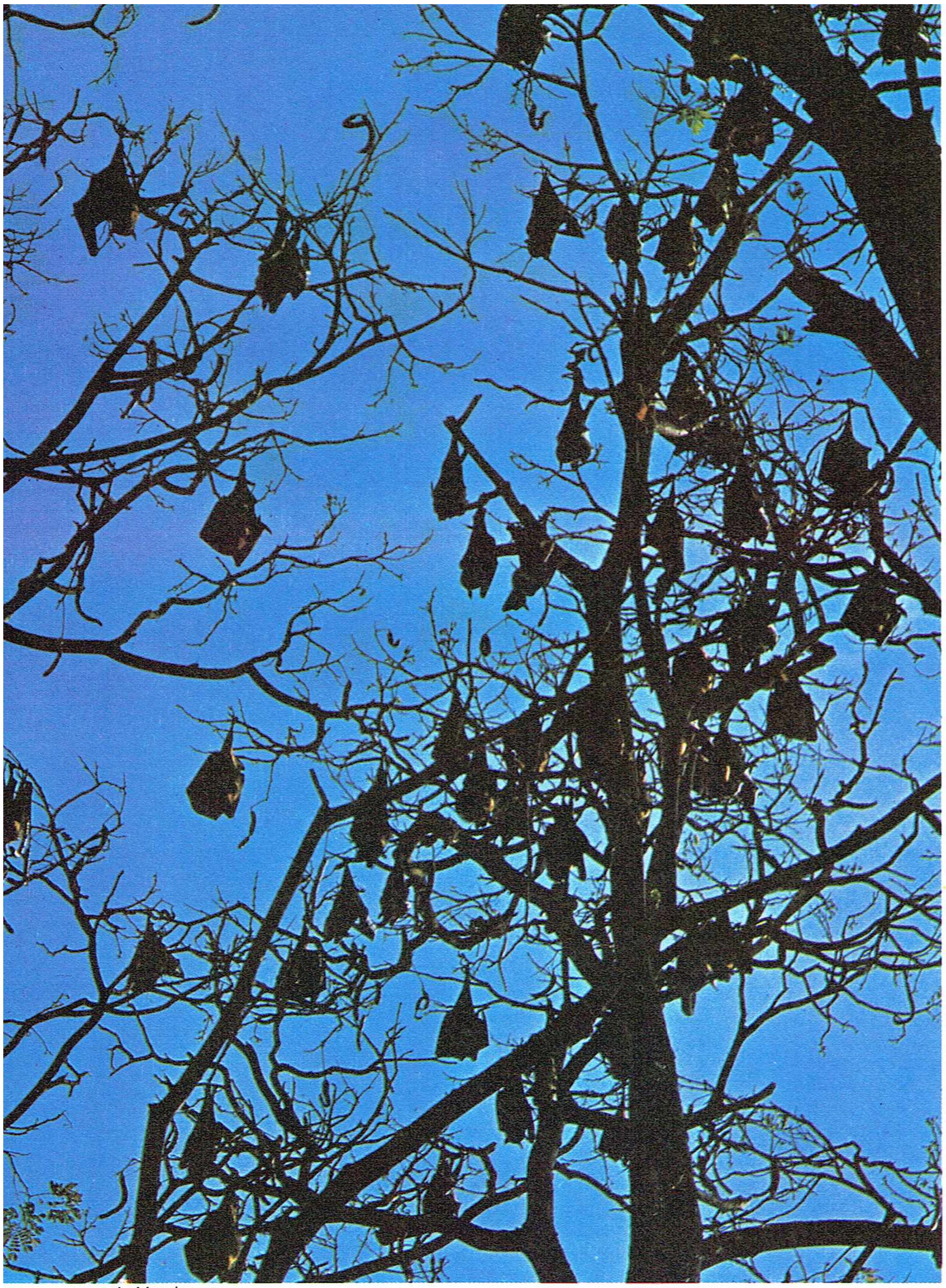

A. Margiocco

▲ ***Au repos, les Ptéropidés se posent sur les arbres en colonies souvent innombrables mais à une certaine distance l'un de l'autre.***

côte, ou en rassemblements très compacts. Ils sont très bruyants. Leur vol est assez lourd. Le trait le plus notable est leur capacité d'émettre des ultra-sons, ce qui est en relation avec leur vie troglophile comme chez les Microchiroptères.

La roussette d'Égypte *(R. aegyptiacus),* très connue, est commune dans une partie de l'Afrique, aussi bien en forêt équatoriale qu'en savanes et dans les zones cultivées. On la rencontre jusqu'à 4 000 m d'altitude sur le Ruwenzori.

Les épomophores *(Epomophorus),* avec huit espèces d'Afrique tropicale, représentent l'un des groupes de Mégachiroptères les plus répandus et les plus abondants. Ils sont de grande taille (jusqu'à 25 cm), avec 50 cm d'envergure. Les mâles portent une sorte d'épaulette de longs poils. Leurs dents maxillaires sont au nombre de $\frac{3}{5}$. Strictement arboricoles, frugivores, en partie nectarivores, ils vivent en forêt (surtout forêts-galeries), avec une prédilection pour les cours d'eau et les marais, et parfois aussi dans des zones découvertes et même arides. Formant de petits groupes jusqu'à une cinquantaine d'individus, ils se cachent dans le feuillage et mangent de préférence les fruits des hautes branches.

Le genre *Epomops,* très proche du précédent, compte trois espèces d'Afrique tropicale. *E. franqueti,* très commun dans les forêts du Zaïre, est intéressant en ce qui concerne la voix des mâles, sorte de chant, probablement d'amour.

Les mâles de *Hypsignathus monstruosus,* d'Afrique équatoriale, se réunissent en des points déterminés, au bord des rivières, formant de véritables « chœurs ». Cette espèce, seule du genre qui atteint 30 cm de long, a une tête massive, fort laide, tronquée à l'avant, avec d'énormes lèvres pendantes. Cette chauve-souris vit en petits groupes ou isolément, le long des cours d'eau, dans les mangroves, et jusqu'à 2 000 m d'altitude.

Le genre *Eidolon* compte trois espèces, dont l'une habite l'Arabie, la seconde Madagascar, et la troisième, la principale, *E. helvum,* est largement répandue en Afrique tropicale. Ces Chiroptères, longs d'environ 20 cm, ont un museau très pointu et sont le plus souvent de couleur jaunâtre ; leurs ailes sont longues et étroites, leur permettant de longs vols. Les incisives sont au nombre de $\frac{2}{2}$ et les dents maxillaires de $\frac{5}{6}$. Ils sont très communs, sauf dans la grande forêt équatoriale, surtout à proximité des villages, des villes et des régions cultivées. Strictement arboricoles, ils sont nettement grégaires, vivant en colonies comptant jusqu'à plusieurs dizaines de milliers d'individus, se serrant par dizaines sur les plus hautes branches des arbres ou sur les palmiers. La nuit, ils volent en file ou en groupes. Frugivores, ils ne dédaignent pas le nectar et les rameaux tendres. Ils accomplissent des migrations régulières sur de longues distances, s'arrêtant, disparaissant puis réapparaissant dans une région donnée, suivant, semble-t-il, les phases successives de la maturation des fruits.

L'Afrique compte encore les genres *Myonycteris,* arboricoles et solitaires, habitant les savanes ; *Micropteropus, Scotonycteris, Nanonycteris, Casinycteris,* probablement partiellement insectivore, et *Plerotes* ; tous de petite ou moyenne taille.

Les genres asiatiques, austro-malais et océaniens présentent une grande variété de formes. Le plus important parmi les Chiroptères (trente-cinq espèces et de large distribution) est *Pteropus* (40 cm de long et 1,70 m d'envergure). Leur robe est le plus souvent contrastée, la région des épaules étant jaunâtre ou fauve et le reste noirâtre. Les *Pteropus* se posent sur les arbres, en colonies souvent innombrables, mais à une certaine distance l'un de l'autre, se laissant pendre des branches comme de gros fruits. En Inde, ils fréquentent en grand nombre les villages, où ils sont protégés ; en Australie, chassés, ils peuplent les zones sauvages. Ils accomplissent d'importants déplacements nocturnes, passant à l'occasion de grands bras de mer, sur plus de 100 km, entre les côtes et les groupes d'îles, pour aller à la recherche de fruits ; en Australie, ils réalisent des migrations saisonnières, en fonction de la floraison et de la fructification ; *P. scapulatus,* en particulier, mange de grandes quantités de fleurs d'eucalyptus. Les *Pteropus,* éminemment grégaires, vivent en colonies qui peuvent atteindre cent mille individus (en Australie), avec une vie sociale présentant même une certaine ségrégation sexuelle. Les femelles mettent bas, après 5 à 6 mois de gestation, souvent au printemps, un seul petit qui reste à peu près jusqu'à l'âge de 5 mois avec elles. Nous citerons seulement le kalong ou ptérope comestible *(P. celaeno ou edulis),* largement répandu en Malaisie et dans l'archipel de la Sonde.

Les *Cynopterus,* ou cynoptères, avec trois espèces très répandues de l'Inde à Ceylan, en Chine méridionale, en Indochine, en Indonésie, aux Philippines, se nourrissent de toute sorte de fruits et surtout de ceux des *Ficus,* qu'ils cueillent en vol et vont manger dans un lieu écarté ; ils sont également avides de nectar et de pollen. Silencieux et volant légèrement, ils vivent de préférence seuls, formant au maximum des groupes de quelques individus, les juvéniles et les plus vieux étant à part. La nuit, ils se réunissent autour des arbres, en bandes plus nombreuses, parfois avec d'autres espèces, dont font partie les gros ptéropes.

Les *Dobsonia* groupent neuf espèces troglophiles répandues des Célèbes aux Moluques, aux îles Salomon, en Australie septentrionale et aux Philippines. Leur patagium s'insère sur la ligne dorsale, le long de la colonne vertébrale, d'où le nom de chauves-souris à dos nu, nom qu'ils partagent avec les *Pteronotus,* américains (famille des Phyllostomatidés). Les incisives sont au nombre de $\frac{1}{1}$ et les dents maxillaires de $\frac{4}{6}$.

Citons enfin les genres *Chironax, Thoopterus, Dyacopterus, Penthetor, Sphaerias, Megaerops, Balionycteris, Neopteryx, Acerodon,* et *Aethalops,* de l'Asie du Sud-Est et en particulier des îles de la Sonde, Célèbes incluses, où l'on trouve uniquement *Boneia* et *Styloctenium,* ainsi que *Ptenochirus* et *Haplonycteris* des Philippines et *Pteralopex* des îles Salomon.

La sous-famille des *Macroglossinés* est caractérisée par une langue longue et très extensible, par la forte réduction des molaires et des incisives, et par le régime essentiellement pollinivore et nectarivore. De taille moyenne ou petite (5 à 12 cm de long), ils ont la queue courte. Il existe sept genres et quatorze espèces, essentiellement répartis des îles de la Sonde à la région australienne, un genre étant africain, un autre polynésien.

Eonycteris spelaea habite en nombreuses colonies les côtes de l'Indochine et des îles de la Sonde. Les mâles ont sur les côtés du cou une sorte de collier de longs poils plus foncé que le reste de la robe.

R. Pujol

A. Margiocco

◀▲ *A gauche,* **Micropteropus pusillus,** *espèce africaine qui vit en savane depuis le Sénégal jusqu'à l'Angola et au Tanganyika, frugivore; la prise de nourriture se fait la tête en bas; ici le microptère consomme une figue sauvage.*
A droite, groupe de **Rhinolophidés (Rhinolophus euryale)** *en état de léthargie dans la grotte du Renard, près de Bargagli, en Italie.*

Les *Syconycteris,* de petite taille, comptent trois espèces de l'Australie, de la Nouvelle-Guinée et des îles du Pacifique occidental, longues d'à peine 5 à 6 cm, et à livrée brun-roux.

Notopteris macdonaldi, de Polynésie, est typique, avec sa queue très longue et libre.

L'unique espèce africaine est *Megaloglossus woermanni,* commune dans les forêts du Zaïre, nocturne et solitaire, et probablement uniquement pollinivore. Citons enfin *Macroglossus, Melonycteris* et *Nesonycteris.*

La sous-famille des *Nyctiméninés* forme un groupe bien distinct, avec deux genres, les *Nyctimene* (le type) et les *Paranyctimene,* et sept espèces, de la région australienne. Ces chauves-souris ont d'étranges narines tubulaires, tournées vers les côtés du museau, lequel semble porter à son extrémité une sorte de bouche charnue. Elles possèdent seulement 24 dents, avec $I\ \frac{1}{0}$ et $M\ \frac{1}{2}$. Leur queue est bien développée. Forestières, elles se reposent suspendues à de gros troncs couverts de mousse, à taches colorées, se mimétisant très bien avec ce fond, grâce à leur patagium portant lui-même de grandes taches. Elles sont solitaires et pour partie insectivores.

Enfin la sous-famille des *Harpyionyctérinés* compte une seule espèce, *Harpyionycteris whiteheadi,* de Célèbes et des Philippines, sans queue, avec 30 dents,

$$\left(I\ \frac{1}{1}\ \text{et}\ M\ \frac{2}{3}\right),$$

multituberculées. Sa biologie est pratiquement inconnue.

Sous-ordre des Microchiroptères

Le sous-ordre des Microchiroptères *(Microchiroptera)* comprend la grande majorité des espèces et présente une grande variété de formes et d'adaptation. Rappelons que le deuxième doigt des Microchiroptères est peu ou non libre, pressé contre le troisième et dépourvu de griffe, avec une tendance à la réduction des phalanges; le troisième doigt, très long, a un rôle fondamental pour le support de l'aile, qui devient longue et étroite (ce qui aboutit à un vol très perfectionné). La région thoracique est plus robuste et rigide que chez les Mégachiroptères, du fait de la soudure de ses éléments (vertèbres, côtes, sternum).

Essentiellement insectivores, les Microchiroptères ont des dents à tubercules pointus, leur permettant de couper et d'écraser les Insectes. Il en est dérivé d'importantes modifications du squelette facial, avec réduction des prémaxillaires et raccourcissement du museau. Le processus angulaire de la mandibule est bien développé. Le pavillon auriculaire est très developpé, parfois très compliqué, avec un tragus habituellement présent.

Il existe aussi nombre d'espèces non insectivores mais frugivores, nectarivores, hématophages et ichtyophages, appartenant pour la plupart à la famille des Phyllostomatidés. Le sous-ordre compte quatorze familles, avec au total cent quarante genres et six cent cinquante-quatre espèces, dont la distribution couvre toute l'aire géographique de l'ordre. Les quatorze familles sont groupées en quatre super-familles : les Rhinolophoïdés, Phyllostomâtoïdés, Emballonuroïdés et Vespertilionoïdés.

Super-famille des Rhinolophoïdés

Les Rhinolophoïdés *(Rhinolophoidea)* constituent le groupe qui a conservé les caractères les plus primitifs, à l'exception de diverses particularités très évoluées des Rhinolophidés. Selon Winge, les Rhinolophoïdés peuvent être considérés comme en bas de l'échelle évolutive des Microchiroptères ; toutes les autres familles proviendraient de formes archaïques de cette super-famille.

Les principaux caractères sont les suivants : le deuxième doigt de la main possède ou non une phalange, le troisième doigt a deux phalanges ; on observe toujours des appendices nasaux plus ou moins complexes ; les oreilles sont grandes ou très grandes ; les ailes sont également grandes et enveloppent le corps au repos ; la queue est incluse dans l'uropatagium. Insectivores en général, rarement carnivores, ils possèdent de 26 à 32 dents. Cette super-famille comprend les trois familles des Nyctéridés, Mégadermatidés et Rhinolophidés, auxquelles de nombreux zoologistes ajoutent celle des Hipposidéridés, que nous considérons ici comme une sous-famille des Rhinolophidés, les Hipposidérinés. Leur aire de distribution couvre l'Ancien Monde et l'Australie.

Les **Nyctéridés** *(Nycteridae)* sont des chauves-souris de taille moyenne (5 à 7 cm de long, la queue étant de la même longueur). Ils ont un sternum peu développé, des pouces assez longs, une queue très longue, entièrement incluse dans le patagium et se terminant en un processus cartilagineux, caractéristique, en forme de T renversé. La région nasale est enfoncée et parcourue extérieurement par un sillon, lequel débouche en arrière dans une fosse et est délimité par trois paires de lobes charnus superposés. Les oreilles sont grandes, plus longues que la tête, et possèdent un tragus arrondi. Les ailes sont larges.

Insectivores, les Nyctéridés possèdent 32 dents

$$\left(\mathrm{I}\ \frac{2}{3};\ \mathrm{C}\ \frac{1}{1};\ \mathrm{Pm}\ \frac{1}{2};\ \mathrm{M}\ \frac{3}{3}\right) \times 2 = 32,$$

les incisives supérieures étant bi- ou trilobées. La robe est gris noirâtre, et en quelques cas orangée.

Peu grégaires (*Nycteris grandis* est l'un des rares Chiroptères vraiment solitaires), les Nyctéridés vivent dans des grottes et cavernes, dans les trous d'arbres, dans les maisons abandonnées, dans des tanières d'autres Animaux (porcs-épics, oryctéropes), dans des anfractuosités de rochers, etc., aussi bien en forêt que dans les steppes arborées. Leur reproduction n'est pas saisonnière : chaque portée est d'un seul petit, lequel est longtemps porté par sa mère, suspendu à ses pseudo-mamelons, et est sevré seulement quand il est aussi gros qu'elle. Leur vol est lent et peu soutenu ; ils chassent à proximité de leurs refuges diurnes, le long des murs, sur les arbres, et même en vol rasant le sol. La *Nycteris thebaica* capture aussi des Scorpions. Ces chauves-souris n'entrent pas en léthargie.

La famille comprend un seul genre : *Nycteris,* avec douze espèces, dont la distribution est très discontinue, toute l'Afrique au sud du Sahara, Madagascar, Égypte, Palestine, Corfou, Arabie, péninsule malaise, Sumatra, Java, Bornéo, Timor et peut-être Célèbes. On aurait signalé quelques *N. thebaica* dans le sud de l'Italie.

Les **Mégadermatidés** *(Megadermatidae)* ont des représentants de taille moyenne ou grande (7 à 14 cm de long, maximum chez les Microchiroptères). Le deuxième doigt de la main n'a qu'une phalange ; le troisième doigt en a deux. La septième vertèbre cervicale est soudée à la première dorsale, formant un ensemble rigide composé également du présternum et de la première paire de côtes. La queue est courte ou absente. Ces chauves-souris ont de très grandes oreilles, soudées l'une à l'autre, avec un grand tragus bifide. Ils possèdent une ample feuille nasale, de forme simple, avec un pli longitudinal proéminent. L'uropatagium est réduit. Insectivores et carnivores, ils ont 26 ou 28 dents :

$$\left(\mathrm{I}\ \frac{0}{2};\ \mathrm{C}\ \frac{1}{1};\ \mathrm{Pm}\ \frac{1\text{-}2}{2};\ \mathrm{M}\ \frac{3}{3}\right) \times 2 = 26 \text{ à } 28.$$

Ils vivent dans les forêts et les savanes des régions tropicales et subtropicales, en Afrique, Asie méridionale (y compris l'archipel malais), aux Philippines et en Australie.

Il en existe trois genres, avec au total cinq espèces, qu'on nomme vulgairement faux-vampires ou chauves-souris à ailes jaunes.

Les trois espèces du genre *Megaderma,* les mégadermes, d'Asie méridionale, des Philippines et d'Afrique orientale, sont cavernicoles, et se suspendent aux voûtes et parois, sans constituer de rassemblements compacts. Elles volent rapidement et en ligne droite ; leur territoire de chasse se trouve à proximité de leurs refuges diurnes, sur des surplombs, sur les troncs, etc. Elles chassent quelquefois à l'affût de gros Insectes.

M. lyra, ou mégaderme lyre, de l'Inde, est uniquement carnivore, se nourrissant de petits Oiseaux rupicoles, d'autres chauves-souris, de geckos, d'Amphibiens et de petits Poissons ; elle possède un système d'écholocation à courte distance pour la localisation de proies au sol ; les *Megaderma* forment de petites colonies. On observe une fréquence particulière de jumeaux chez *M. spasma. M. gigas,* des régions tropicales de l'Australie septentrionale et occidentale, le plus grand des Microchiroptères (14 cm de long, chaque aile a 10 cm de long), est carnivore et ses mœurs sont semblables à celles de *M. lyra.*

La dernière espèce de la famille, *Lavia frons,* est une étrange chauve-souris à corps gris bleuâtre et à patagium, oreilles et feuille nasale orangés. Partiellement diurne et insectivore, elle fréquente surtout les zones buissonneuses des savanes de l'Afrique orientale, où sa livrée est très mimétique.

Les **Rhinolophidés** *(Rhinolophidae)* de petite ou grande taille, à robe allant du brun à l'orangé, sont des chauves-souris qui ont pour particularité des formations cutanées nettes, foliacées, dans la région nasale. Leurs oreilles, petites ou grandes, sont toujours dépourvues de tragus. Le deuxième doigt de leur main ne consiste qu'en sa partie métacarpienne ; leur troisième doigt possède trois phalanges. Leur crâne présente des crêtes sagittales et lambdoïde très développées. Leur formule dentaire est : $\left(\mathrm{I}\ \frac{1}{2};\ \mathrm{C}\ \frac{1}{1};\ \mathrm{Pm}\ \frac{1\text{-}2}{2\text{-}3};\ \mathrm{M}\ \frac{3}{3}\right) \times 2 = 28$ à 32. Les femelles possèdent des mamelles pectorales et deux pseudo-mamelons abdominaux. Insectivores, les Rhinolophidés chassent surtout en vol, seuls quelques-uns d'entre eux capturent des Insectes sur les fruits et les feuilles.

Troglophiles, habituellement grégaires, ils peuplent les régions tropicales, subtropicales et tempérées de l'Ancien Monde : forêts, savanes et déserts, de l'Europe occidentale et de l'Afrique occidentale jusqu'au Japon, aux Philippines et aux Nouvelles-Hébrides. On en trouve aussi à Madagascar. La famille comprend les deux sous-familles des Hipposidérinés et des Rhinolophinés, groupant au total onze genres et environ quatre-vingt-dix espèces.

Les *Hipposidérinés* sont de taille très variable, depuis les plus petits des Chiroptères, *Caelops* (longs de 3 cm), jusqu'à 11 cm chez *Hipposideros gigas,* géant du genre. Les formations cutanées nasales, moins complexes que celles des Rhinolophinés, consistent en une partie antérieure représentant vaguement un fer à cheval, et en une feuille dressée, placée en travers, qui correspond à la *lancette* des Rhinolophinés ; il n'y a pas de *selle* comme chez ces derniers. L'aile est large. La queue, de taille variable, quand elle existe, est incluse dans l'uropatagium. Les dents sont au nombre de 28 ou de 30, avec Pm $\frac{1\text{-}2}{2}$. Le squelette a enfin pour particularité un double anneau constitué par la fusion de la septième vertèbre cervicale avec la première et la deuxième dorsale, les deux premières paires de côtes et le présternum ; les vertèbres lombaires sont également soudées.

Les portées comptent un petit, rarement des jumeaux. On connaît peu de chose sur leur hibernation, phénomène semblant être limité à quelques espèces. La sous-famille des Hipposidérinés compte neuf genres et quarante espèces, des zones tropicales et subtropicales d'Afrique, de Madagascar, d'Asie méridionale, jusqu'aux Philippines, aux îles Salomon, aux Nouvelles-Hébrides et à l'Australie.

Le principal genre, *Hipposideros* (le type), avec environ vingt-cinq espèces, peuple presque toute l'aire de la famille. Les *Hipposideros* forment parfois des colonies très nombreuses (les plus nombreuses du continent africain), se réfugiant généralement dans des grottes, mais aussi dans des tanières de gros Animaux, des arbres creux, dans des cavités artificielles, etc. Nettement sédentaires, ils ont un territoire de chasse toujours en lieux

fixes, très proche de leurs refuges, quand les colonies sont peu nombreuses, et plus éloigné lorsque les colonies sont importantes. Leur vol est bas et lent, destiné à explorer les alentours des buissons et le sol; les espèces les plus grégaires chassent en bandes, comme *H. caffer* et *H. lankadiva*. Il ne manque toutefois pas d'espèces plus ou moins solitaires (par exemple, *H. cyclops*) ; par contre, *H. galeritus*, solitaire en Inde, forme des colonies de plus de cent mille têtes, au Sarawak. On observe couramment des associations d'*Hipposideros* entre eux et de *Rousettus*. Seules les plus grandes espèces présentent des périodes d'activité ralentie, ne semblant pas être une véritable léthargie.

Un autre genre important est *Asellia*, dont une seule espèce, *A. tridens*, est propre aux régions arides et désertiques de l'Afrique centro-septentrionale et de l'Asie du Sud-Ouest. Longue d'environ 6 cm, *A. tridens* est troglophile : elle s'installe typiquement dans les « rhettaras » sahariennes, tunnels artificiels qui amènent l'eau dans les palmeraies où elle forme des colonies de centaines d'individus, accrochés aux parois par leurs quatre membres.

Le genre *Rhinonycteris* compte aussi une seule espèce, *R. aurantia*, d'Australie; mesurant 5 cm de long, elle est d'un beau jaune doré, avec diverses teintes brunes et roses; elle semble se cacher dans le feuillage et parmi les fleurs, en exploitant l'effet mimétique de sa livrée inhabituelle.

Citons enfin le genre *Coelops*, avec trois espèces asiatiques, qui sont les plus petits Chiroptères (3 à 4 cm de long), et même cas limite chez les Mammifères.

La sous-famille comprend encore les genres *Anthops* (îles Salomon), *Paracoelops* (Indochine), *Aselliscus* (Asie du Sud-Est et Nouvelle-Guinée), *Triaenops* (Asie occidentale, Afrique et Madagascar), et *Cleotis* (Afrique), tous de petite taille.

La sous-famille des *Rhinolophinés* représente, par certains aspects, le stade le plus évolué de tout l'ordre, bien que conservant certains caractères primitifs ; chez eux, le péroné persiste, mais par contre l'articulation de l'épaule, avec une vaste surface articulaire secondaire, est hautement spécialisée. Le deuxième doigt de leur main est constitué seulement par le métacarpien. Les doigts des pieds, sauf le gros orteil, possèdent trois phalanges. La queue est toujours longue. L'anneau préthoracique est constitué par la soudure de la septième vertèbre cervicale et de la première vertèbre dorsale, ainsi que de la première paire de côtes, du présternum et d'une partie de la seconde paire de côtes ; les vertèbres lombaires ne sont pas soudées. La région nasale est fortement dilatée, avec des appendices foliacés compliqués, qui, chez les *Rhinolophus*, forment un fer à cheval, horizontal et antérieur, auquel font suite une *selle* et une *lancette*, verticales, réunies l'une à l'autre par une crête. Ces Chiroptères ont généralement 32 dents, avec Pm $\frac{2}{3}$. Il y a deux genres : *Rhinolophus* et *Rhinomegalophus*, ce dernier constitué par l'unique espèce *R. paradoxolophus*, du Tonkin, à oreilles énormes.

Les *Rhinolophus* ou rhinolophes (ou encore fer-à-cheval) comptent environ cinquante espèces, des régions tropicales et tempérées de l'Ancien Monde et de l'Australie, la plupart des espèces étant tropicales. Les rhinolophes sont sensibles aux conditions microclimatiques et ont besoin, dans les zones tempérées, d'abris estivaux chauds, et d'abris hivernaux bien protégés; présentant une synanthropie accentuée, ils fréquentent toutes sortes d'édifices. Leur distribution dans une région donnée dépend surtout de l'existence ou de l'absence d'abris diurnes convenables, plus encore que du type de milieu formant le territoire de chasse. Hibernant quelquefois même dans les régions tropicales, dans la zone paléarctique leur léthargie est essentiellement hivernale et a lieu dans des cavités souterraines bien abritées à humidité élevée.

Leur vie sociale est très variable : il est des espèces hautement grégaires *(R. euryale)*, d'autres moins et d'autres enfin solitaires *(R. lanosus)*. Les colonies se présentent le plus souvent avec les individus en ordre éparpillé, suspendus à la voûte de la cavité du refuge, et rarement en groupes compacts *(R. lepidus* et *R. fumigatus)*. Chez le grand fer-à-cheval *(R. ferrum-equinum)* on observe aussi bien des individus isolés que des rassemblements serrés. On observe souvent des associations interspécifiques. Chez de nombreuses espèces, la ségrégation des sexes est de règle, avec isolement des femelles du printemps à l'été. La reproduction est strictement saisonnière, au printemps austral de l'hémisphère Sud. Chez les espèces paléarctiques, l'accouplement a lieu en automne, suivi par une longue période de pause hivernale, correspondant aux mois de léthargie, au cours de laquelle les spermatozoïdes sont conservés dans les voies

E. Hosking

▲ **Rhinolophus ferrum-equinum** ***ou grand fer-à-cheval, en vol, vu de face. Les rhinolophes sont sensibles aux conditions microclimatiques et ont besoin d'abris bien protégés toute l'année.***

Ostman-J. Holmasen

◀ ***Le même Rhinolophidé en position de repos; on observera les détails du patagium.***

génitales des femelles (fécondation différée) ; l'ovulation et la fécondation ont lieu au début du printemps, immédiatement après la reprise de l'activité. Le nouveau-né, unique, est porté par la mère suspendu aux pseudo-mamelons. La longévité de ces Animaux peut dépasser 20 ans. Volant assez mal, ils chassent les Insectes à proximité des frondaisons, dans les prés et le long des murs. Ils se reposent fréquemment, revenant plusieurs fois à leurs abris durant la nuit ; ils ne chassent pas quand il pleut ; plutôt sédentaires ils se déplacent peu.

Parmi les cinq espèces européennes, nous citons avant tout le grand fer-à-cheval ou grand rhinolophe *(R. ferrum-equinum)*, très fréquent dans les régions méditerranéennes. Long environ de 6 cm avec une queue de 4 cm et une envergure de 36 cm, il a une fourrure serrée et douce, marron clair ou grisâtre. Comme les autres rhinolophes de nos régions, il est surtout troglophile sauf l'été où il occupe de plus petites cavités. Pénétrant jusqu'à plusieurs centaines de mètres à l'intérieur des cavernes, il se suspend par les pieds aux voûtes et aux parois, jamais dans les fentes, formant parfois des colonies avec d'autres espèces. La léthargie est interrompue par des périodes d'activité, consistant en déplacements à l'intérieur de la grotte ou en recherche d'autres refuges. Le grand fer-à-cheval est coléreux et mord sauvagement quand il est capturé. Sa nourriture consiste essentiellement en papillons et Scarabéidés, qu'il capture en sortant dès le crépuscule, avec un vol papillonnant, bas et lent.

Le petit fer-à-cheval *(R. hipposideros)*, lui aussi très fréquent, est la plus petite espèce européenne du genre (4 cm de long et 25 cm d'envergure). Il se distingue entre autres par son fer à cheval très grand, et presque aussi large que son museau.

Super-famille des Phyllostomatoïdés

Provenant, selon Winge, de Rhinolophoïdés plus primitifs, les Phyllostomatoïdés *(Phyllostomatoidea)* constituent un ensemble de lignées phylogénétiques, très évolué, et à spécialisations caractéristiques. Leur deuxième doigt possède au maximum une phalange ; l'extrémité de leur troisième doigt est longue et souvent ossifiée. Ils possèdent d'ordinaire 34 dents,

$$\left(I\,\frac{2}{2};\ C\,\frac{1}{1};\ Pm\,\frac{2}{3};\ M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 34;$$

ce nombre peut varier de 20 à 36. La queue est absente ou très courte, et fait saillie au-dessus de l'uropatagium. Il existe des appendices nasaux, sauf chez les *Noctilio*.

Essentiellement entomophages, certains par contre ont des régimes spécialisés : frugivores *(Sténodderminés* et *Glossophaginés)*, hématophages *(Desmodinés)*. Confinés à l'Amérique centrale et du Sud, ils comprennent deux familles, les Noctilionidés et les Phyllostomatidés (les Desmodinés sont considérés ici comme une sous-famille des Phyllostomatidés, selon Grassé).

Les **Noctilionidés** *(Noctilionidae)*, famille de l'Amérique centrale et du Sud, comprennent pour seul genre *Noctilio*, avec deux espèces. Ces chauves-souris ont un museau pointu, sans appendices foliacés. Leurs narines ouvertes vers l'avant sont pointues, grandes, bien séparées, et pourvues d'un petit tragus. Leurs ailes sont étroites et longues. Leur queue bien développée s'étend environ jusqu'à la moitié de l'uropatagium. Leur lèvre inférieure présente des petites fossettes ; il existe des bajoues. La formule dentaire est :

$$\left(I\,\frac{2}{1};\ C\,\frac{1}{1};\ Pm\,\frac{1}{2};\ M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 28.$$

On observera encore que le deuxième doigt de la main a une phalange atrophiée. Enfin, le pied est très caractéristique ; il est énorme chez *N. leporinus*, le calcanéum allongé et aplati portant un éperon osseux ; les griffes sont fortes comme chez beaucoup d'ichtyophages.

La chauve-souris pêcheuse *(N. leporinus)* habite du Mexique au nord de l'Argentine. Longue de 10 à 12 cm, elle a une robe orangée chez les mâles et grisâtre chez les femelles, avec une ligne plus claire sur le dos. Elle vit dans les cavernes, les troncs creux et divers édifices, en colonies de plusieurs dizaines de têtes près des cours d'eau. *N. leporinus* chasse des Poissons qu'elle capture avec ses pieds, lorsqu'ils se trouvent près de la surface ; elle les porte immédiatement à sa bouche, les accumulant dans ses bajoues quand elle ne les mange pas en vol. Ces chauves-souris se nourrissent parfois de Crustacés et de gros Insectes. Leurs refuges sont faciles à déceler à cause de l'odeur nauséabonde de leurs excréments de piscivores. Nous avons déjà parlé de la biologie de l'espèce dans le paragraphe concernant les Chiroptères ichtyophages ; l'autre espèce *N. labialis* est insectivore.

Les **Phyllostomatidés** *(Phyllostomatidae)*, famille très complexe et variable quant au régime alimentaire et aux mœurs, sont distribués du sud des États-Unis au nord de l'Argentine et aux Antilles. Leur taille va de 4 à 13 cm de long, comprenant le vampire spectre *(Vampyrum spectrum)* qui est le plus grand Chiroptère américain. Les Phyllostomatidés possèdent habituellement des appendices foliacés sur le museau, mais moins que chez les Rhinolophidés, des oreilles assez développées et pointues, et toujours pourvues d'un tragus. Le deuxième doigt de leur main a une seule phalange bien développée, et le troisième doigt en possède trois. La formule dentaire est généralement : $\left(I\,\frac{2}{2};\ C\,\frac{1}{1};\ Pm\,\frac{2}{3};\ M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 34;$ ce nombre est souvent réduit.

Cette famille comprend cinquante-cinq genres et cent trente-sept espèces formant huit sous-familles groupées en fonction de leur régime alimentaire : entomophages, à molaires normales (Chilonyctérinés et Phyllostomatinés) ; frugivores et nectarivores, à molaires anormales, de type spécialisé (Glossophaginés, Carolliinés, Sturnirinés, et Sténoderminés et Phyllonyctérinés) ; hématophages, à incisives supérieures spécialisées et à molaires réduites (Desmodinés, que nombre d'auteurs élèvent au rang de famille).

Les *Chilonyctérinés*, sous-famille que l'on peut considérer comme la plus primitive, sont dépourvus de feuilles nasales. Leur denture typique compte 34 éléments. Leur queue est longue, un peu plus que l'uropatagium. Leur lèvre inférieure a une forme inhabituelle : repliée en arrière et formée par deux plis parallèles, séparés par un profond sillon transversal ouvert vers le bas. Leur régime est insectivore. Il en existe trois genres et une dizaine d'espèces.

Le genre *Chilonycteris*, troglophile, vit en colonies dans les régions forestières, ou à végétation dense, surtout en Amérique centrale. Ils sont agressifs et volent rapidement en ligne droite. *Mormoops* et *Pteronotus* ont une biologie très semblable ; les seconds ont un patagium qui s'insère sur la ligne dorsale comme chez *Dobsonia* (Ptéropidés), ce qui fait qu'ils ont aussi le dos nu.

La sous-famille des *Phyllostomatinés* compte douze genres répartis en trente-deux espèces. Ils sont très proches les uns des autres et présentent encore certains caractères primitifs, comme la longueur de la queue et la conformation normale des molaires. Il existe des feuilles nasales. Ils ont 30 à 31 dents et un régime essentiellement insectivore, quelques espèces étant carnivores.

Le genre *Micronycteris* compte dix espèces, qui habitent du Mexique au Brésil. Ce sont de petites chauves-souris de 4 à 5 cm de long, communes, qui forment de petites colonies de quelques individus se réfugiant dans des cavités souvent exposées à la lumière. Ils se déplacent lentement, entrecoupant leurs vols de planés, et se nourrissent d'Insectes et de fruits.

Les *Macrotus*, très proches du genre précédent, ont une queue plus longue et des oreilles plus grandes. Il en existe trois espèces, du sud de l'Amérique du Nord et des Antilles. Très éclectiques pour leurs refuges diurnes, fréquentant en particulier les maisons, ils se nourrissent de gros Insectes, sauterelles et papillons qu'ils dévorent dans leurs abris.

Le genre *Phyllostomus* compte quatre espèces, d'Amérique tropicale, qui habitent grottes, cavernes et cavités, de grande taille. Elles s'y réfugient en colonies très nombreuses, et chassent également en groupes : *P. hastatus* vole par bandes de cinquante à cent individus. Elles se nourrissent aussi de fruits.

Trachops cirrhosus, unique espèce de son genre, essentiellement carnivore, féroce et agressive, s'attaque surtout aux petits Vertébrés, notamment aux Sauriens.

Vampyrum compte une unique espèce *(V. spectrum)*, le vampire spectre, très connu, qu'on ne doit confondre avec le vampire vrai *(Desmodus rotundus)*. Long de 13 cm avec une envergure de 90 cm, c'est le plus gros Chiroptère américain, et l'un des plus grands Microchirop-

tères du monde. Très rare et peu grégaire, il habite par colonies de quelques individus seulement des arbres creux (surtout les grands *Ceiba* des régions tropicales). Carnivore (et non hématophage comme on le croit), il se nourrit d'Oiseaux et de Rongeurs, qu'il mange tout entiers. Son aire de distribution va du Mexique au Brésil.

Citons encore *Barticonycteris, Lonchorhina, Macrophyllum, Tonatia, Mimon, Phylloderma,* et *Chrotopterus* qu'on rencontre essentiellement en Amérique centrale.

Les *Glossophaginés* comprennent le genre *Glossophaga*, dont l'espèce la plus connue, *G. sorina*, est largement répandue en Amérique tropicale ; ce genre est très éclectique, quant à son écologie. Les *Glossophaga* habitent des cavernes, des arbres creux, des cavités creusées par l'homme (mines, tunnels, grosses conduites, etc.), dans des zones cultivées, et même en ville, formant de petites colonies, souvent associés avec d'autres espèces. Ces Chiroptères sont insectivores et frugi-pollinivores ; de leur vol rapide et assuré, ils visitent les fleurs pendant la nuit, s'arrêtant une fraction de seconde ; ce sont des agents pollinisateurs très spécialisés de diverses plantes sud-américaines à floraison nocturne.

Les *Anoura*, avec trois espèces habitant du Mexique au Brésil, sont plus nettement troglophiles et forment des colonies très compactes. Leur langue, plus longue que leur corps, pénètre dans les fleurs pour recueillir le pollen.

Les *Leptonycteris*, de couleur blanchâtre, également troglophiles, forment des colonies dans les cavernes et les mines abandonnées. Se nourrissant de pollen, de fleurs et de fruits, ils contribuent à la pollinisation de diverses Cactacées.

Les autres genres sont *Lionycteris, Lonchophylla, Platalina, Monophyllus, Musonycteris, Choeronycteris, Choeroniscus, Scleronycteris, Hylonycteris* et *Lichonycteris*.

La sous-famille des *Carolliinés* constitue un petit groupe, avec seulement deux genres et cinq espèces, d'aspect semblable aux *Phyllostomus*, mais de taille moindre avec une queue qui sort du milieu de l'uropatagium.

Le genre *Carollia* compte quatre espèces, très communes en Amérique tropicale, vivant dans les grottes, ou dans les frondaisons des arbres. Très sociales, elles se nourrissent de fruits (bananes).

Le second genre, *Rhinophylla*, compte une seule espèce sud-américaine.

La sous-famille des *Sturnirinés* comprend aussi deux genres : *Sturnira*, avec quatre espèces, et *Corvira* avec une espèce. Les premières, très répandues en Amérique centrale et du Sud, ont une denture semblable à celle des Ptéropidés, des oreilles moyennes, bien séparées, une feuille nasale très développée, un uropatagium très réduit, une queue absente et un régime frugivore.

La sous-famille des *Sténoderminés*, vaste groupe spécialisé pour le régime frugivore, compte dix-huit genres et quarante-cinq espèces. On y observe une tendance à la réduction du nombre des molaires, avec disparition, chez certains, de la troisième molaire. De petite ou de moyenne taille, possédant ou non une feuille nasale, toujours dépourvus de queue, ils ont de grandes oreilles en relation avec leur activité essentiellement crépusculaire.

Les quatre espèces du genre *Brachyphilla*, distribuées seulement aux Antilles, sont principalement insectivores : elles forment parfois de nombreuses colonies, même dans les ruines.

Uroderma bilobatum, qui habite du Mexique au Brésil, est arboricole : elle se réfugie par petits groupes sous les feuilles des bananiers et des palmiers, qu'elle coupe partiellement, de façon à se faire un abri ; elle est frugivore.

Les quatre espèces de *Chiroderma* ont une biologie analogue, et des mœurs partiellement arboricoles, ainsi que les genres *Vampyrops, Vampyrodes, Vampyressa,* et *Vampyriscus* ; il en existe une dizaine d'espèces centro-américaines et sud-américaines, frugivores, caractérisées par deux lignes claires sur les côtés de la tête (comme chez *Uroderma*).

Le genre *Artibeus*, l'un des plus intéressants, compte huit espèces, du Mexique à l'Argentine septentrionale, avec un grand nombre d'individus. Les plus grandes espèces (10 cm de long) sont arboricoles, se réfugiant dans le feuillage, ou même cavernicoles ; les plus petites (5 cm de long au maximum) sont uniquement arboricoles. Les colonies troglophiles sont toujours les plus nombreuses. Ces chauves-souris, très connues, ont un vol en ligne droite et soutenu ; frugivores, elles consomment des fruits de toute sorte.

Artibeus watsoni se construit une sorte de refuge temporaire, en coupant et en modifiant de façon voulue les feuilles du palmier de l'espèce *Geonoma decurrens*, dans le Panama. Les grands *Artibeus* vivent et se reproduisent en captivité.

Le genre *Centurio* compte une seule espèce, *C. senex*, très curieuse, probablement frugivore, qui se réfugie le jour dans le feuillage, par groupes de deux ou trois individus. Longue d'environ 6 cm, elle a un museau court, large et nu, recouvert d'une série de replis cutanés, à fonction peut-être protectrice ; elle vit en Amérique centrale. Citons encore : *Ectophylla, Enchisthenes, Ardops, Phyllops, Ariteus, Stenoderma, Pygoderma, Sphaeronycteris* et *Ametrida*.

Confinée à la région antillaise, la sous-famille des *Phyllonyctérinés* comprend deux genres *(Phyllonycteris* et *Erophylla)* et six espèces frugivores qui ressemblent beaucoup aux Glossophaginés : ils ont le museau allongé, une langue protractile, avec des papilles cornées et filiformes et une feuille nasale petite ou rudimentaire.

La sous-famille des *Desmodinés* constitue un important groupe de Chiroptères américains que de nombreux zoologues élèvent au rang de famille (Desmodontidés). Ce sont les vampires vrais, dont l'anatomie et la biologie sont très marquées par leur régime hématophage. La denture présente une importante réduction des dents maxillaires, alors que les deux incisives supérieures sont très robustes, particulièrement coupantes et adaptées pour trancher la peau des gros Animaux. La formule dentaire la plus typique est celle des *Desmodus* dont la spécialisation est la plus poussée :

$$\left(I\,\frac{1}{2};\ C\,\frac{1}{1};\ Pm\,\frac{2}{3};\ M\,\frac{0}{0}\right) \times 2 = 20;$$

le nombre est de 22 chez *Diaemus* et de 26 chez *Diphylla* qui possède 2 incisives supérieures.

Le principal genre est *Desmodus*, le type, avec l'unique espèce *D. rotondus*, le vampire vrai, dont la distribution est très vaste depuis le Mexique jusqu'à l'Argentine septentrionale et au Chili central (sauf les Antilles), du niveau de la mer jusqu'à 2 500 m d'altitude dans les Andes. Essentiellement nocturne et lucifuge, le vampire

▼ **Desmodus rotundus,** ***le vampire vrai, dont la distribution est très vaste, est dangereux : son régime hématophage et les propriétés anticoagulantes de sa salive en font un vecteur de maladies graves pour le bétail notamment.***

Renaud-Jacana

vrai est de préférence troglophile, bien qu'on puisse le rencontrer dans les maisons abandonnées et les ruines. Il constitue généralement des colonies de peu d'importance, sans groupes compacts. Il se déplace par bonds rapides sur les parois quand il est dérangé. Il s'associe souvent à d'autres espèces de chauves-souris. Long de 9 cm au maximum, il a les oreilles très pointues. Son pouce énorme est pourvu de deux protubérances striées, qui permettent aux pattes l'adhésion au substratum. L'uropatagium est réduit et la queue absente. Sa feuille nasale est particulière et ses lèvres sont modelées de manière à former une sorte de ventouse, qui s'applique entièrement sur les plaies qu'ouvrent les dents; la lèvre inférieure est bifide.

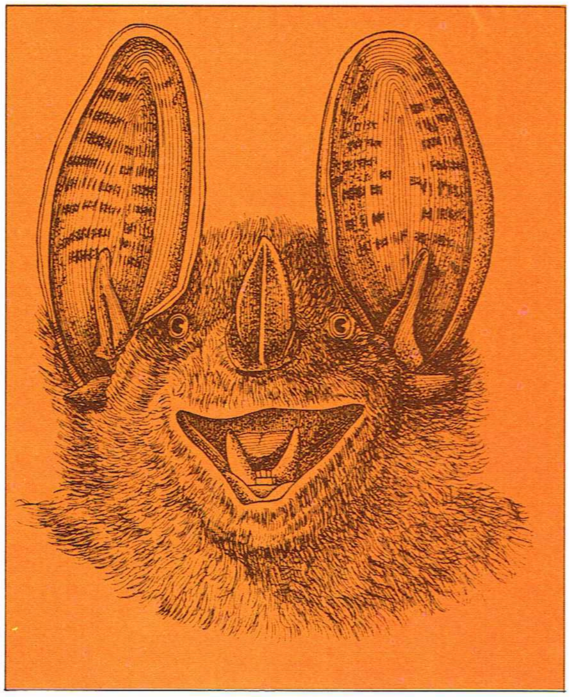

▶ ***Tête de vampire vrai* (Desmodus rotundus), *Desmodiné d'Amérique du Sud.***

I.G.D.A.

Le vampire se nourrit du sang de Vertébrés supérieurs, homéothermes, et en particulier de gros Mammifères, s'attaquant surtout aux Bovidés et aux Équidés domestiques, depuis l'arrivée des Européens. Son vol, bas et rapide, est guidé par les ultra-sons émis, ainsi que par l'odorat et la mémoire pour la recherche des proies. Il se pose silencieusement sur l'Animal endormi, le corps soulevé sur la plante des pieds et les callosités du pouce, les ailes repliées. Il choisit les zones ou la peau est fine : mamelles chez les porcs, museau chez les Bovidés, oreilles et épaules chez les Équidés; l'homme, surtout au Brésil, est mordu surtout aux doigts de pied, à la face et aux mains. Avec ses incisives supérieures très coupantes, le vampire ouvre une plaie superficielle et indolore, en arrachant un lambeau de peau triangulaire (environ 13 mm de long, 6 mm de large et 5 mm de profondeur). Le sang est sucé directement, grâce à l'action combinée des lèvres et de la langue de l'Animal. La salive du vampire a des propriétés anticoagulantes, entraînant chez les Animaux mordus la perte de leur sang quand le prédateur est parti. Un vampire peut absorber 15 ml de sang en une nuit. Après s'être rassasié, il se réfugie dans son abri ou dans un refuge provisoire, pour digérer péniblement son repas, parfois pendant plus de 10 heures. Ses fèces diffèrent beaucoup du guano des espèces insectivores; de couleur noirâtre (par suite de la décomposition de l'hémoglobine absorbée), elles sont particulièrement nauséabondes. Il semble que le vampire morde souvent le même individu, rouvrant à l'occasion une plaie précédente. On a constaté en captivité un cycle de 24 h pour l'alimentation, on ne sait ce qu'il en est dans la nature. Il est intéressant d'observer que ce prédateur, aussi spécialisé, ait pu s'installer sur un continent pauvre en gros Mammifères; l'arrivée des Européens avec le bétail domestique a sans doute favorisé l'extension numérique des vampires. Le vampire est dangereux, non seulement du fait de l'anémie qu'il inflige au bétail, mais aussi à cause des maladies qu'il peut propager, notamment la rage. Il est donc chassé activement, mais ce sont souvent d'autres espèces inoffensives qui sont détruites.

Intelligent, le vampire supporte très bien la captivité; un individu y a vécu 13 ans. Sa reproduction a lieu pendant toute l'année, la gestation durant de 4 à 5 mois; le nouveau-né unique de chaque portée est très gros et n'est pas emporté par sa mère quand elle vole.

Les deux autres genres ont une biologie partiellement analogue; les *Diphylla,* moins communs que *Desmodus,* vivent dans les grottes jusqu'à plus de 1 000 m d'altitude; *Diaemus,* avec pour unique espèce *D. youngi,* s'attaque de préférence aux Oiseaux.

Super-famille des Emballonuroïdés

Les Emballonuroïdés *(Emballonuridea)* ont le deuxième doigt (sauf chez *Rhinopoma*) dépourvu de phalanges, tandis que les troisième, quatrième et cinquième doigts en possèdent deux. Leurs molaires sont normales. Ils ont le museau tronqué obliquement sans lèvres nasales, avec les narines situées plus en avant que l'ouverture buccale, (rudimentaires chez *Rhinopoma*), et de grandes oreilles à petit tragus.

Les **Rhinopomatidés** *(Rhinopomatidae)* comptent pour seul genre *Rhinopoma,* avec quatre espèces caractérisées surtout par une queue longue (6 cm), libre sur sa plus grande partie, qui fait saillie du bord postérieur de l'uropatagium, lui-même bref, d'où le nom local de chauve-souris à queue de rat. Longs de 6 à 8 cm, ces Chiroptères présentent divers caractères archaïques, notamment : deux phalanges au deuxième doigt de la main (cas unique chez les Microchiroptères); arrondissement de la tête de l'humérus, non articulée avec l'omoplate; absence du processus orbitaire, etc. Ils possèdent une feuille nasale rudimentaire. Leurs oreilles, grandes, sont unies l'une à l'autre. La denture de type insectivore normal a pour formule :

$$\left(I\,\frac{1}{2};\ C\,\frac{1}{1};\ Pm\,\frac{1}{2};\ M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 28.$$

Ces chauves-souris sont distribuées en Afrique du Nord, Arabie, Asie occidentale et méridionale jusqu'à Sumatra, dans les régions arides, désertiques et semi-désertiques. Troglophiles, elles se sont très bien adaptées aux maisons et édifices de toutes sortes (temples de l'Inde, pyramides d'Égypte), aux « rhetteras » sahariennes, etc., où elles forment les colonies les plus nombreuses.

Les Rhinopomatidés s'agrippent aux parois par leurs quatre pattes ou se suspendent comme les rhinolophes, *R. microphyllum* formant des groupes compacts de milliers d'individus. *R. hardwickei,* de l'Inde, forme lui de petits groupes d'individus, très dispersés. Il existe une ségrégation des sexes. Les accouplements ont lieu en mars et pour partie en juin. Ces Animaux n'entrent pas en léthargie, mais peuvent rester longtemps à jeûn grâce à l'accumulation de graisse dans la base de leur queue. Leur régime alimentaire est mal connu.

Les **Emballonuridés** *(Emballonuridae)* ont le deuxième doigt de la main réduit au seul os métacarpien, les autres doigts ayant deux phalanges. Leur queue est courte, incluse dans l'uropatagium au début de sa longueur, puis libre dorsalement par tronçon. Ils ne possèdent pas de feuille nasale. Leur formule dentaire est :

$$\left(I\,\frac{1\text{-}2}{2\text{-}3};\ C\,\frac{1}{1};\ Pm\,\frac{2}{2};\ M\,\frac{3}{2}\right) \times 2 = 30 \text{ à } 40.$$

Ils sont de taille moyenne.

Ils vivent dans les régions tropicales et subtropicales, aussi bien en forêt que dans des zones à végétation rare, et même dans des lieux arides. Ils sont insectivores; leur distribution couvre l'Amérique centrale, une partie de l'Amérique du Sud, l'Afrique, Madagascar, l'Asie méridionale, la région australienne et divers archipels de l'océan Pacifique occidental jusqu'aux îles Samoa. La famille compte treize genres et quarante-quatre espèces.

Le genre type *Emballonura,* peut-être le plus primitif, se distingue par la possession de 34 dents (dont 2 incisives supérieures). Il en existe sept espèces, de Madagascar à l'Asie méridionale, à l'Australie et aux îles Salomon. Du fait de leurs affinités, on peut grouper les six genres américains, *Saccopteryx, Cormura, Peropteryx, Peronymus, Centronycteris* et *Balantiopteryx,* qui comptent une douzaine d'espèces, assez indifférentes à la lumière, et de mœurs soit troglophiles, soit arboricoles (vivant

alors dans les cavités des troncs, sous l'écorce, dans le feuillage) ; elles aiment les forêts humides. Peu grégaires, elles forment fréquemment des colonies interspécifiques, jamais compactes. Chez certains genres *(Saccopteryx, Cormura, Peropteryx* et *Peronymus)*, il existe une curieuse poche glandulaire formée par le propatagium, s'ouvrant dorsalement, et située en général près du coude, qui sécrète une substance rougeâtre et fortement odorante.

Rhynchonycteris naso, seule espèce d'un genre américain, caractérisée par son museau allongé, est petite (4 cm de long), et commune en Amérique tropicale ; elle se repose le jour en des lieux découverts, sur des rochers ou encore sur des troncs, où sa livrée est mimétique avec l'écorce. Elle vit en petites colonies, parfois en rang, sur les arbres, et chasse les Insectes à la surface de l'eau.

Le genre *Taphozous*, très important, compte une douzaine d'espèces, habitant de l'Afrique à Madagascar, aux îles Salomon et à l'Australie. Elles vivent soit dans des grottes ou des cavernes, soit dans toutes sortes de refuges naturels et édifices, évitant le plein soleil. Certaines espèces constituent des colonies nombreuses, d'autres de petits groupes, s'agrippant aux parois en y collant leur corps. Elles se glissent avec aisance dans les fentes les plus étroites, peuvent reculer et sautent agilement. Elles n'entrent pas en léthargie, mais les espèces adaptées aux déserts peuvent accumuler de la graisse dans leur uropatagium en fonction de cycles saisonniers.

Citons encore *Diclidurus*, avec trois espèces, d'Amérique tropicale, solitaires, à robe blanche caractéristique ; enfin *Coleura* d'Afrique, *Drepanycteris* et *Cyttarops*, d'Amérique.

Super-famille des Vespertilionoïdés

Les Vespertilionoïdés *(Vespertilionoidea)* sont le groupe le plus nombreux de Chiroptères, et dont la distribution est, en outre, la plus vaste. Selon Winge, ils dérivent des Rhinolophoïdés les plus primitifs. Parmi les caractères communs aux diverses familles, nous citerons : l'absence de feuilles nasales ; la taille moyenne ou grande des oreilles, à tragus bien développé ; enfin, le développement toujours complet de la queue, incluse dans l'uropatagium. Ces chauves-souris possèdent habituellement 3 incisives inférieures ; leurs molaires sont normales. Leur deuxième doigt possède ou non une seule phalange, le troisième en comptant deux ou trois. Les Vespertilionoïdés comptent sept familles : Natalidés, Furiptéridés, Thyroptéridés, Myzopodidés, Vespertilionidés, Mystacinidés et Molossidés.

Les **Natalidés** *(Natalidae)* sont des petits Chiroptères (3,5 à 5,5 cm de long), dont les membres postérieurs et la queue sont généralement très longs. Le premier doigt de leur main a une griffe bien développée, le deuxième est dépourvu de phalange, les deux autres ayant deux phalanges. Les oreilles sont grandes, séparées et à tragus court. La formule dentaire est :

$$\left(I\,\frac{2}{3};\ C\,\frac{1}{1};\ Pm\,\frac{3}{3};\ M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 38.$$

Vivant en Amérique centrale, y compris les Antilles, et dans la partie nord de l'Amérique du Sud, le seul genre *Natalus* compte quatre espèces, surtout troglophiles, qui vivent isolément ou en petites colonies souvent associées à d'autres espèces. Elles volent rapidement et sont insectivores.

Les **Furiptéridés** *(Furipteridae)* sont une petite famille confinée à la partie tropicale de l'Amérique du Sud, très proche des Natalidés, dont elle diffère, entre autres, par le présternum élargi à l'avant avec une crête bien développée. Le pouce et sa griffe sont rudimentaires. Les ailes sont longues ; la queue courte se termine à la moitié de l'uropatagium. La formule dentaire est : $\left(I\,\frac{2}{3};\ C\,\frac{1}{1};\ Pm\,\frac{2}{3};\ M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 36$, avec des canines petites. Il y a deux genres, *Furipterus et Amorphochilus*, chacun représenté par une espèce unique dont la biologie est mal connue.

Les **Thyroptéridés** *(Thyropteridae)*, autre minuscule famille, comptent un seul genre, *Thyroptera*, avec deux espèces des régions forestières d'Amérique tropicale. De petite taille, ils ont comme particularités : le deuxième doigt de la main réduit à la partie métacarpienne, rudimentaire, et le troisième doigt possédant trois phalanges ; au pied, des doigts anormaux à deux phalanges chacun. En outre, la première et la deuxième vertèbre dorsale sont soudées ; le péroné est atrophié. La formule dentaire est : $\left(I\,\frac{2}{3};\ C\,\frac{1}{1};\ Pm\,\frac{3}{3};\ M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 38$. Le caractère le plus étonnant est la présence, aux pouces et aux plantes des pieds, de disques adhésifs, véritables ventouses circulaires portées par un pédoncule, permettant à ces

▼ Les minioptères* (Miniopterus sp.) *sont de petits Chiroptères troglophiles, très grégaires, habitant de préférence les zones boisées ou accidentées où ils se déplacent, en file indienne, d'un vol rapide et habile.

R. Pujol

Ostman-J. Holmasen

▲ **Miniopterus schreibersi** *est fréquente dans le midi de la France. Elle reste éloignée des endroits habités et chasse assez tôt le soir.*

Animaux de se coller à des surfaces très lisses, en particulier les feuilles de bananiers et d'*Heliaconia,* où ces chauves-souris se réfugient durant le jour.

Les **Myzopodidés** *(Myzopodidae),* dont l'unique espèce, *Myzopoda aurita,* habite Madagascar, ont un grand intérêt zoogéographique du fait de leurs affinités avec les Thyroptéridés et les Natalidés, américains. Parmi leurs caractères distinctifs, citons : à la main, le deuxième doigt dont la partie métacarpienne est bien développée, et le troisième doigt formé de trois phalanges; au pied, des doigts anormaux à deux phalanges. La conformation de l'oreille est unique : le méat auditif est oblitéré partiellement par un processus fungiforme. Les pouces et les plantes de pied ont des disques adhésifs sans pédoncule. *M. aurita* s'abrite sous des feuilles comme les *Thyroptera*. La formule dentaire est la même que chez ceux-ci.

Les **Vespertilionidés** *(Vespertilionidae)* constituent une très importante famille comprenant les 3/4 des chauves-souris de la faune européenne. Leur distribution est immense et coïncide à peu près avec celle de l'ordre. De taille très variable (3,2 à 10,5 cm de long), ils ont le museau et les lèvres normales. Leurs oreilles, à tragus bien développé, sont parfois grandes et le plus souvent séparées. Le museau ne possède pas de formation foliacée distincte, sauf chez *Nyctophilus* et *Pharotis*. Leur robe varie du noirâtre au grisâtre, avec toutes les teintes de brun, à l'exception de *Scotomanes ornatus* et *Euderma maculata,* qui ont des livrées inhabituelles. Parmi les caractères anatomiques, citons la présence d'une seule phalange rudimentaire au deuxième doigt de la main, et de trois phalanges au troisième doigt. La septième vertèbre cervicale n'est pas soudée (sauf chez *Tomopeas*). Le péroné est rudimentaire. Quant à l'articulation entre le *tuberculus majus* de l'humérus et l'omoplate, elle est plus développée et plus perfectionnée que chez les Rhinolophidés. La formule dentaire est :

$$\left(I\ \frac{1\text{-}2}{2\text{-}3};\ C\ \frac{1}{1};\ Pm\ \frac{1\text{-}3}{2\text{-}3};\ M\ \frac{3}{3}\right) \times 2 = 28 \text{ à } 38.$$

Dans l'ensemble insectivores, les Vespertilionidés capturent le plus souvent leurs proies en plein vol, qui est très perfectionné et n'a d'égal que celui des Molossidés. Leur distribution est très vaste, à l'exception de quelques îles du Pacifique : c'est la famille de Mammifères non marins dont la diffusion est la plus grande : on les trouve même en Nouvelle-Zélande. Les Vespertilionidés habitent les régions tropicales et tempérées, poussant à peu près jusqu'à la limite des forêts. Ils représentent un des sommets évolutifs de l'ordre, surtout par leur vol. La famille, de systématique très complexe compte trente-sept genres et deux cent soixante-quinze espèces, réparties en six sous-familles : les Murininés, Nyctophilinés, Miniopterinés, Kérivoulinés, Tomopéatinés et Vespertilioninés.

La sous-famille des *Murininés* est caractérisée par des narines tubulaires et par une fourrure serrée sur le dessus de l'uropatagium. Ils possèdent 34 dents avec $I\ \frac{2}{3}$ et $Pm\ \frac{2}{2}$. Il y a deux genres : *Murina,* le type, avec une dizaine d'espèces d'Asie méridionale et orientale, jusqu'à la Nouvelle-Guinée et aux Philippines, et *Harpiocephalus,* avec l'unique espèce *H. harpia* (Chine et Asie du Sud-Est). Leur biologie est mal connue; ces chauves-souris habitent le plus souvent les régions montagneuses ou collinéennes, à végétation dense.

La sous-famille des *Nyctophilinés,* caractérisée par de grandes oreilles, un museau se terminant par une sorte de fer à cheval, et une denture de 28 ou 30 dents avec $\left(I\ \frac{0}{2\text{-}3},\ \text{et}\ Pm\ \frac{1}{2}\right)$, comprend trois genres : *Antrozous,* avec trois espèces de l'Amérique du Nord, du Mexique et de Cuba; *Nyctophilus,* le type, de Nouvelle-Guinée, d'Australie et de Tasmanie; *Pharotis,* très proche du précédent, de Nouvelle-Guinée.

Antrozous est répandu dans les régions arides et désertiques des États-Unis et du Mexique septentrional. Troglophiles, ces Chiroptères sortent seulement en pleine nuit, avec un vol bas, lent et rectiligne, se posant fréquemment à terre, pour capturer de gros Coléoptères, des sauterelles et même des Scorpions. *A. pallidus,* « chauve-souris pâle ou du désert », est migratrice, au moins dans la partie septentrionale de son aire. L'accouplement a lieu en octobre, et est suivi d'une période de léthargie, la fécondation étant différée jusqu'au printemps suivant. En avril, mâles et femelles se séparent, ces dernières formant des groupes de nourrices de trente à cent unités. Après 9 semaines de gestation, elles ont en moyenne 2 petits (1 à 3) qui, non portés par leur mère, sont laissés en groupes séparés et élevés individuellement.

La sous-famille des *Miniopterinés* comprend le seul genre *Miniopterus,* ou minioptère, qu'on distingue à ses oreilles courtes et arrondies, ainsi qu'à l'extrême allongement de la deuxième phalange du troisième doigt de la main, trois fois plus longue que la première. Les dents sont au nombre de 36, avec $I\ \frac{2}{3}$ et $Pm\ \frac{2}{3}$. Le genre compte dix espèces, habitant l'Eurasie méridionale, l'Afrique, Madagascar, la région australienne et les Nouvelles-Hébrides, surtout dans la bande tropicale et subtropicale.

Ce sont de petits Chiroptères troglophiles, très grégaires, formant des colonies qui peuvent compter quatre mille individus au m² (on en a dénombré plus de dix mille dans la colonie de Robbes Caves, en Inde). Ils habitent de préférence dans les zones boisées et accidentées, où ils se déplacent en file indienne, à mi-hauteur des arbres, d'un vol rapide et habile, se nourrissant surtout de petits Insectes tendres. Leur distribution et leur vie sociale sont intéressantes. Il s'agit de populations bien individualisées, peuplant parfois de vastes zones, avec un ou deux centres de regroupement périodique, pour la reproduction ou pour l'hibernation. Il peut y avoir une grotte mère d'hibernation, vaste avec des galeries supérieures en cul-de-sac offrant en hiver une température assez clémente, autour de laquelle la population vit le reste de l'année, peuplant temporairement des cavités plus petites. Il y a souvent associations avec d'autres espèces. Au printemps, chaque femelle met bas un petit, placé avec les autres nouveau-nés de la colonie, en un groupe distinct des adultes. L'allaitement est collectif, chaque femelle allaitant les deux premiers petits qui peuvent saisir ses mamelles.

L'espèce la plus importante, la seule de notre faune, fréquente dans le midi de la France, est le minioptère proprement dit *(M. schreibersi),* dont la distribution est l'une des plus vastes de tous les Mammifères non anthropophiles : Europe, Afrique, Japon et Australie, jusqu'à 2 000 m d'altitude, les colonies étant souvent séparées par des centaines de km. Le minioptère, qui a 6 cm de long et 35 cm d'envergure, a une fourrure douce et serrée. Restant assez éloigné des endroits habités, il se réfugie dans les cavités souterraines, se montrant assez sédentaire. Il chasse assez tôt le soir, volant haut, comme les hirondelles et les martinets auxquels il lui arrive de se mêler. L'accouplement automnal est immédiatement suivi par la fécondation, cas unique chez les Chiroptères européens.

La sous-famille des *Kérivoulinés,* à sternum court et large, à oreilles courtes et arrondies, possédant 38 dents $\left(\text{avec I } \frac{2}{3}\text{; Pm } \frac{3}{3}\right)$, compte deux genres : *Anamygdon,* avec le seul *A. salomonis* des îles Salomon, et *Kerivoula,* avec quinze espèces environ, d'Afrique, d'Asie méridionale, des Philippines et de la région australienne. Forestiers, ces petits Vespertilionidés exotiques ont des couleurs inhabituelles (orangé et écarlate avec les ailes noires [*K. picta*], souvent rouge-brun, jaunâtre, olive, brunâtre, etc.) et un pelage long, d'aspect laineux. Sans doute communs, ils sont d'observation difficile, se réfugiant en des lieux inattendus, comme les nids abandonnés *(K. lanosa),* de grandes toiles d'Araignées *(K. harrisoni),* des touffes de feuilles sèches, ou dans de petits trous d'arbres. Ils n'ont aucune tendance à l'anthropophilie; leur organisation sociale est souvent fondée sur le groupe familial, et il n'y a jamais de colonies importantes. Leur vol est peu soutenu, semblable à celui des gros papillons.

La sous-famille des *Tomopéatinés* compte une seule et rare espèce du Pérou, *Tomopeas ravus,* caractérisée par la soudure de la septième cervicale avec la première dorsale. Sa bulle tympanique est discoïdale; le nombre de dents est de 28 $\left(\text{avec I } \frac{1}{2} \text{ et Pm } \frac{1}{2}\right)$. Elle rappelle certains Molossidés, surtout par la forme de ses oreilles. Sa biologie est inconnue.

La sous-famille des *Vespertilioninés* compte vingt-huit genres et deux cent vingt-cinq espèces, que nous grouperons en quatre tribus, suivant en cela Grassé : les Myotinés, Pipistrellinés, Nycticéinés et Lasiurinés. Parmi les caractères communs : la septième cervicale non soudée à la première dorsale, des narines simples, la troisième prémolaire supérieure réduite ou absente, enfin 3 incisives inférieures.

La tribu des *Myotinés* compte des espèces à museau allongé, dont les troisièmes prémolaires inférieure et supérieure sont généralement présentes et plus ou moins réduites. Les femelles possèdent une seule paire de mamelles.

Myotis, le type, avec soixante espèces, est le genre de Mammifères terrestres le plus distribué, sauf dans certains groupes insulaires océaniques. Le nombre de dents est de 38 $\left(\text{avec I } \frac{2}{3} \text{ et Pm } \frac{3}{3}\right)$. Ce genre tient une grande place dans la faune chiroptérienne des régions paléarctiques et néarctiques; ses populations tropicales sont moins nombreuses et peu connues. Ces chauves-souris s'installent dans divers refuges, naturels ou artificiels, souvent à proximité de l'eau. Dans les régions tempérées, leurs abris estivaux, différents des abris hivernaux, sont le plus souvent de grandes cavités souterraines, humides. Très grégaires *(M. myotis),* ou quasi solitaires *(M. bechsteini),* elles ont un comportement variable, en fonction de l'espèce et des conditions de milieu; chez certaines espèces la ségrégation sexuelle est nette. Elles sont insectivores, rarement piscivores. Les espèces paléarctiques entrent dans une léthargie coupée de périodes d'activité, avec d'éventuels déplacements d'une grotte à une autre. Parmi les neuf espèces de notre faune, citons le grand murin *(M. myotis),* très commun en Europe centrale et méridionale. C'est le plus grand du genre (7 cm de long pour 40 cm d'envergure) et le plus gros Chiroptère européen, après le molosse de Cestoni. Il a des oreilles larges ainsi que les ailes, dont le bord inférieur s'insère à la base du pied. Le sommet de la dernière vertèbre de la queue est libre par rapport à l'uropatagium. Aimant les lieux habités, on le rencontre aussi bien en plaine qu'en montagne. Des expériences de baguage ont montré que cette espèce est fidèle à ses refuges, bien que ses quartiers d'été et d'hiver puissent être séparés par plus de 200 km. Nocturne, le grand murin chasse les Insectes, et surtout les papillons de nuit, durant 4 à 5 heures après le coucher du soleil.

Le genre *Cistugo,* très proche du précédent, compte deux espèces africaines.

Pizonyx vivesi est répandue sur les côtes et les îlots au large de la Californie et d'une partie du Mexique. Se cachant le jour à l'abri des rochers, elle se nourrit de Poissons et de Crustacés; elle saisit ses proies avec ses gros et robustes pieds, lesquels sont pourvus de longues griffes.

E.P.S.

▲ *Les Myotinés* (Myotis sp.) *comptent des espèces à museau allongé. Insectivores et rarement piscivores, ces chauves-souris s'installent dans divers refuges, souvent à proximité de l'eau.*

▼ *Groupe de* Myotis daubentoni *;*
les Myotis *sont grégaires ou quasi solitaires et ont un comportement variable en fonction de l'espèce et des conditions de milieu.*

E. Hosking

Ostman-J. Holmasen

E.P.S.

▲ *A gauche,* **Plecotus auritus**, *l'oreillard, aux énormes oreilles ovales. Troglophile, l'hiver, il vit solitaire ou en petites troupes. A droite, un* **Plecotus** *en vol.*

▼ *Les pipistrelles sont caractérisées par un museau assez court. La plupart habitent les régions tempérées et chaudes de l'Ancien Monde, se glissant dans les fentes des rochers ou des arbres et aimant les édifices divers.*

G. Mazza

Lasionycteris noctivagans, arboricole, dont la livrée a des reflets argentés, vit dans les forêts du Canada méridional et des États-Unis, surtout le long des cours d'eau, mais aussi en montagne, dans les Conifères, s'abritant dans les troncs, les écorces et les feuillages.

Plecotus compte cinq espèces, d'Europe, d'Afrique du Nord et d'Amérique du Nord, dont l'oreillard *(P. auritus),* long de 4 à 5 cm, et dont les énormes oreilles ovales (3 à 6 cm de long) lui ont valu son nom. Sa fourrure est douce et serrée, brune ou brun jaunâtre, à reflets variables. Sa queue fait saillie de l'uropatagium sur 1 à 2 mm. Il fréquente les zones à végétation dense, se cachant dans les arbres à la belle saison; troglophile l'hiver, il vit solitaire ou en petites troupes. Le soir, il sort après le coucher du soleil, volant comme un papillon, chassant dans les frondaisons les Insectes qu'il capture aussi sur les rameaux et les feuilles. Pour attraper ses proies (papillons de nuit, Scarabéidés, etc.), il se sert de son uropatagium, rabattu ventralement comme une poche. Ses amours ont lieu en automne; les femelles ont 1 ou 2 petits de mai à juillet.

Euderma, avec pour unique et rare espèce *E. maculata,* des États-Unis et du Mexique, a une fourrure brun-roux foncé, avec des taches blanches aux épaules et à la base de la queue.

La tribu des *Pipistrellinés* est un vaste groupe, caractérisé par un museau plus court que celui des Myotinés, par l'absence d'une troisième molaire supérieure et inférieure (sauf chez *Eudiscopus*). Les femelles possèdent une seule paire de mamelles.

Pipistrellus, ou pipistrelle, le type, compte quarante espèces à diffusion très large, exception faite de l'Amérique du Sud; la plupart habitent les régions tempérées et chaudes de l'Ancien Monde, où, en de nombreux endroits, le nombre des individus est supérieur à celui de toutes les autres espèces de chauves-souris additionnées. Longues de 3,5 à 10,5 cm, les pipistrelles ont un mode de vie très uniforme : se glissant dans des fentes de rochers ou des trous d'arbres, aimant les maisons et édifices divers; elles sont, en période précédant la léthargie, partiellement troglophiles dans les régions septentrionales. Assez sédentaires, elles chassent d'un vol papillonnant à proximité de leurs refuges, étant les premiers Chiroptères à voler au crépuscule, et les derniers à disparaître à l'aube. Dans nos régions l'accouplement a lieu en automne et la fécondation, différée jusqu'au printemps, est suivie d'une gestation de 46 jours. Notre faune en compte quatre espèces dont les plus communes sont la pipistrelle de Kuhl *(P. kuhli)* et la pipistrelle proprement dite *(P. pipistrellus),* qui est le plus petit Chiroptère européen.

Le genre *Nyctalus* compte six espèces, répandues des îles Açores au Japon et aux Philippines. On les distingue des pipistrelles par le raccourcissement du cinquième doigt de la main. Arboricoles, plus communes dans les zones montagneuses et boisées, elles se réfugient dans les trous d'arbres. Leurs abris estivaux et hivernaux sont souvent les mêmes. Les *Nyctalus* chassent au crépuscule et même le jour, d'un vol soutenu, haut et droit, entrecoupé de planés et de piqués, capturant des Insectes, surtout des Coléoptères. Grégaires, ils présentent une stricte ségrégation des sexes pendant l'été, jusqu'au moment des amours. Chaque portée est généralement gémellaire. Les populations paléarctiques ont une longue léthargie hivernale. L'espèce la plus courante dans nos régions est la noctule proprement dite *(N. noctula)*; longue de 7 cm, robuste et trapue, elle a un museau large pourvu d'un gros renflement glandulaire, des oreilles courtes et arrondies, avec un tragus très court, des ailes longues et étroites (40 cm d'envergure). Non troglophile, elle vit par colonies importantes dans les forêts et les parcs. Fidèle à ses abris, elle accomplit d'importantes migrations; volant haut (jusqu'à 100 m d'altitude) elle chasse même sous la pluie.

Le genre *Vespertilio* (incluant *Eptesicus*), avec plus de trente espèces, est un grand groupe à peu près cosmopolite, et dont le mode de vie se rapproche de celui de *Pipistrellus,* avec une synanthropie accentuée, dérivant de mœurs arboricoles originelles. Peu spécialisés, ils vivent en petites colonies et chassent en groupes. On compte dans nos régions quatre espèces, les sérotines, rarissimes, sauf la sérotine commune *(V. serotinus).*

Barbastella, dernier genre de notre faune, comprend la barbastelle proprement dite *(B. barbastellus),* de forme élancée, avec un museau large et court, des oreilles larges mais très courtes, réunies sur la tête par un repli cutané, et une fourrure très foncée. Peu commune, résistante aux basses températures, elle s'installe pendant l'hiver dans des refuges mal abrités, se déplaçant fréquemment. Le plus souvent solitaire, elle chasse très tôt, parfois le jour par temps couvert.

Citons encore le genre *Glauconycteris,* avec six espèces arboricoles des forêts pluviales et des savanes africaines. Appelées chauves-souris papillons, elles ont souvent une livrée avec des taches et des bandes claires très visibles.

La tribu des Pipistrellinés comprend encore : *Eudiscopus, Hesperoptenus* et *Tylonycteris* (Asie méridionale), *Rhinopterus, Mimetillus* et *Laephotis* (Afrique), *Histiotus* (Amérique du Sud), *Glischropus* (Asie du Sud-Est et Australie), *Philetor* (Nouvelle-Guinée), et enfin *Chalinolobus* avec une seule espèce, *C. tuberculatus* (Australie, Nouvelle-Zélande et Tasmanie).

La tribu des *Nycticéinés,* caractérisée par des incisives et des prémolaires très modifiées, ainsi que par une seule incisive supérieure et une troisième molaire souvent réduite, compte deux genres : *Nycticeius* avec quatorze espèces d'Amérique du Nord, d'Afrique, d'Asie méridionale et d'Australie, et *Scotophilus* avec dix espèces

◀ *A gauche,*
Nyctalus noctula,
la noctule, l'espèce la plus courante de nos régions, est non troglophile et vit en colonies importantes dans les forêts et les parcs. A droite, un Vespertilionidé exotique **(Lasiurus sp.).** *Ces Chiroptères à fourrure roux-orangé ou jaunâtre aiment les lieux découverts, exploitant le mimétisme de leur livrée en se réfugiant dans les arbres.*

asiatiques et africaines, grégaires, arboricoles, se réfugiant souvent dans le feuillage. Citons enfin : *Otonycteris* et *Scotomanes,* asiatiques, et *Rhogeessa* et *Baeodon,* américains.

La tribu des *Lasiurinés* est constituée par l'unique genre *Lasiurus,* très spécialisé, à crâne court et arrondi, et à incisive supérieure unique. Les femelles possèdent quatre mamelles fonctionnelles et ont de 1 à 4 petits. Leur fourrure a des tons roux-orangé ou jaunâtre, l'uropatagium étant couvert d'une robe touffue. *Lasiurus* compte une douzaine d'espèces, américaines, habitant jusqu'aux îles Hawaii et Galapagos. Non troglophiles, aimant les lieux découverts, elles exploitent le mimétisme de leur livrée en se réfugiant dans le feuillage et sur l'écorce des arbres. Le genre compte des espèces migratrices, au vol puissant; ce sont les seuls Chiroptères (avec *Tadarida brasiliensis*) à accomplir des migrations saisonnières à l'instar des Oiseaux.

Les **Mystacinidés** *(Mystacinidae),* minuscule famille de Nouvelle-Zélande, comptent une seule espèce, *Mystacina tuberculata,* dont les affinités sont incertaines, se rapprochant plutôt des Vespertilionidés et des Molossidés. Longue d'environ 6 cm, à queue courte (2 cm au plus), elle a une fourrure serrée, brun grisâtre sur le dessus, plus pâle en dessous, des oreilles séparées, avec un long tragus pointu. Ses griffes sont très pointues, son pouce est armé d'une grosse griffe, avec une dent basale. Leur denture, de type insectivore, compte 28 dents :

$$\left(\mathrm{I}\,\frac{1}{1};\ \mathrm{C}\,\frac{1}{1};\ \mathrm{Pm}\,\frac{2}{2};\ \mathrm{M}\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 28.$$

▼ **Vespertilio murinus,**
le grand murin, appartient à un groupe de Chiroptères peu spécialisés, vivant en petites colonies et chassant en groupes.

▶ **Tadarida toeniotis,** *le molosse de Cestoni, est l'unique et peu fréquente espèce du genre que l'on trouve en Europe. Dans le sud des États-Unis, cette espèce constitue les plus grandes colonies de Chiroptères connues, atteignant d'un à vingt millions d'individus.*

Mammifrance-Jacana

Caractère distinctif, la troisième phalange du deuxième doigt de la main est complètement ossifiée. *M. tuberculata* a acquis une membrane secondaire le long du corps, qui, dans la partie alaire, permet le repliement et le logement d'une partie du patagium, quand l'Animal ne vole pas, conférant au membre une possibilité de marche « quadrupède ». Cette particularité anatomique permet à *M. tuberculata* de se déplacer agilement sur les branches et les rochers pour chasser les Insectes, lui conférant ainsi des mœurs essentiellement terrestres. Elle se nourrit à l'occasion de charognes. Strictement forestière, elle se cache durant le jour, par petits groupes, dans des trous d'arbres; fuyant l'homme, elle s'est réfugiée dans des forêts d'îles éloignées.

Les **Molossidés** *(Molossidae)*, dernière famille de Chiroptères, sont proches des Vespertilionidés, mais en diffèrent cependant par d'importants caractères. De formes robustes, longs de 4 à 14 cm, ils ont le corps couvert d'une fourrure courte, veloutée, et paraissent quelquefois nus *(Cheiromeles)*. Ils sont brunâtres, grisâtres, ou noirs, avec parfois deux phases de coloration *(Molossus)*. Leurs oreilles sont larges, de forme variable, toujours pourvues d'un grand et d'un petit tragus. Leur museau est carré et tronqué obliquement, les narines sont situées au sommet. Leurs lèvres sont épaisses et charnues, la supérieure marquée de sillons verticaux. Leurs ailes sont longues et étroites, le patagium est épais et coriace. Leurs pieds sont courts et larges. Leur queue épaisse, parfois bien développée, dépasse toujours sur une longue portion l'étroit uropatagium (les auteurs de langue anglaise les nomment chauves-souris à queue libre). On note encore la fusion de la septième vertèbre cervicale et de la première vertèbre dorsale, l'élargissement et l'aplatissement de la boîte crânienne, et les particularités suivantes de la main : le deuxième doigt à phalange rudimentaire, la première phalange du troisième doigt repliée dorsalement sur le métacarpien, enfin la troisième phalange du troisième de nature cartilagineuse. La formule dentaire est : $\left(\mathrm{I}\ \frac{1}{1\text{-}3};\ \mathrm{C}\ \frac{1}{1};\ \mathrm{Pm}\ \frac{1\text{-}2}{2};\ \mathrm{M}\ \frac{3}{3}\right) \times 2 = 26$ à 32. Le régime est insectivore. Du fait du perfectionnement de l'articulation secondaire de leur épaule (entre le *tuberculum majus* de l'humérus et l'omoplate) et de la longueur de leurs ailes, les Molossidés ont atteint le plus haut degré d'adaptation au vol chez les Chiroptères; leurs membres postérieurs présentent, eux, des caractères primitifs.

Dendrophiles et troglophiles, en certains cas hautement grégaires, les Molossidés couvrent une aire très vaste dans les Amériques, une partie de l'Europe, en Afrique, en Asie, jusqu'à l'Australasie et aux îles Salomon. La famille compte douze genres et soixante-quinze espèces.

Le principal genre, *Tadarida,* avec environ trente-cinq espèces, peuple toutes les régions tropicales et une partie des zones subtropicales jusqu'en Europe méridionale (molosse de Cestoni ou *T. teniotis*). C'est l'un des groupes les plus nombreux de toute la faune chiroptérienne de la majeure partie des régions tropicales. Plus rare en Afrique du Nord et en Asie occidentale, il forme des colonies très importantes en Amérique et en Asie méridionale. Les *Tadarida* ont des mœurs très uniformes et bruyantes. Sortant tôt au crépuscule, en colonnes serrées, d'un vol rapide et rectiligne, ils chassent sur des territoires souvent éloignés des abris diurnes, évitant les forêts. Le molosse du Brésil constitue dans le sud des États-Unis les plus grandes colonies de Chiroptères connues, atteignant d'un à vingt millions d'individus (Ney Caves et Braken Caves). Quand ils partent chasser à la nuit, leurs colonnes serrées constituent un spectacle impressionnant, ressemblant à la fumée d'un volcan.

Hivernant, sans léthargie continue, le molosse du Brésil *(T. brasiliensis)*, grégaire, a une prédilection pour les étroites fentes de roches, les interstices et les endroits resserrés où il se repose. Il forme sur les voûtes des cavernes des rassemblements compacts, les individus se touchant l'un l'autre. Il s'envole en partant en chute libre, ses refuges étant toujours sous des surplombs.

T. plicata forme aussi des rassemblements énormes dans les grottes et cavernes d'Asie méridionale. L'unique espèce européenne, peu fréquente, est le molosse de Cestoni *(T. toeniotis)*. Dans l'ensemble, les *Tadarida* sont des chauves-souris très robustes, supportant de longues périodes sans manger ni boire, ainsi que des températures atteignant 50 °C, auxquelles elles sont parfois exposées lorsqu'elles se réfugient sous des toits en tôle.

Otomops compte six espèces, dont les aires sont très disjointes : Afrique, Madagascar, Inde, Java et Nouvelle-Guinée. Généralement très rares, de mœurs troglophiles ou phytophiles, elles se cachent dans les fentes des voûtes des grottes ou dans le feuillage, ainsi que dans des trous pratiqués par les Oiseaux. Forestières, ayant un vol très puissant, elles sont grégaires, parfois solitaires.

Molossus, formant des colonies très nombreuses, compte dix espèces d'Amérique tropicale, parfois fort abondantes en des zones déterminées, se réfugiant dans les abris les plus divers; sous les toits, les planchers, sur les écorces, parmi les feuilles de palmiers, etc. Elles sont essentiellement crépusculaires.

Citons encore *Cheiromeles* (avec *C. torquatus,* le type), dont on connaît deux espèces, habitant la Malaisie, les îles de la Sonde, les Philippines et Célèbes. Ces Chiroptères sont gros et massifs, d'une longueur de plus de 13 cm. Presque entièrement nus, ils possèdent des poches membraneuses sur les flancs, dans lesquelles se logent les ailes repliées, leur permettant un déplacement quadrupède. Leur peau, épaisse et élastique, a une couleur allant du brun foncé au noir. Les oreilles sont séparées, les lèvres sont lisses; ils possèdent aussi des bajoues. Ces étranges chauves-souris se cachent dans des arbres creux ou de petites cavités du sol, ou encore parmi les rochers, habituellement en groupes peu nombreux. Au Sarawak, par contre, on a observé une colonie d'environ vingt mille têtes dans une caverne, en groupes compacts; les Dayaks les chassent pour leur chair.

Citons enfin les genres *Eomops, Xiphonycteris, Sauromys* et *Platymops,* d'Afrique, le dernier de ceux-ci présentant un extrême aplatissement de la boîte crânienne, dont la hauteur est seulement le tiers de la largeur, ainsi que les genres *Molossops, Neoplatymops, Promops* et *Eumops* d'Amérique.

S. Prato

▲ ***Les Édentés sont exclusivement américains. Les espèces actuelles comptent trois types morphologiques; les fourmiliers arboricoles ou terrestres (ici,* Myrmecophaga tridactyla*) à museau typiquement allongé; les bradypes arboricoles; et les tatous uniquement terricoles.***

Ordre des Édentés

On classait autrefois dans l'ordre curieux des Édentés *(Edentata)* les pangolins et l'oryctérope, qui constituent, dans la classification moderne, respectivement les ordres des Pholidotes et des Tubulidentés (ces derniers présentant des affinités plus évidentes avec les Ongulés). Les Édentés sont uniquement américains. Ils comptent seulement trois familles, lignées survivantes d'un groupe beaucoup plus important de Mammifères du Tertiaire et du Quaternaire, parfois de taille gigantesque, et qui a marqué tout particulièrement la faune mammalienne du Nouveau Monde au cours de ces ères.

Les espèces actuelles, qui font partie du sous-ordre des Xénarthres, sont d'aspect hétérogène; elles peuvent cependant être ramenées à trois types morphologiques : les fourmiliers, de forme très élancée, à museau typiquement allongé, à fourrure épaisse et de mœurs arboricoles ou terricoles; les paresseux, ou bradypes, arboricoles, à museau court, qui ressemblent extérieurement à certains Lémuriens et Platyrhiniens; enfin, les tatous, uniquement terricoles, à corps large et déprimé, recouverts d'une cuirasse, et à pilosité très clairsemée.

Morphologie et anatomie

Sur le plan de la morphologie externe, l'unique caractère commun est la grosseur et la robustesse des griffes, souvent falciformes, lesquelles remplissent des fonctions diverses chez les formes terricoles ou arboricoles.

Les caractères ostéologiques, très importants, sont souvent aberrants. Le crâne présente une forme très variable qui est fonction du développement des os

faciaux; il est allongé chez les tatous, à peu près tubulaire chez certains fourmiliers, et sphéroïdal chez les paresseux; la cavité crânienne est de faible volume. La mandibule, avec ses deux branches, a une forme de V, du fait de la disparition des incisives. Chez les Myrmécophagidés (fourmiliers), dépourvus de dents, chacune des branches est en forme de baguette, plus ou moins recourbée, avec un fort abaissement de la branche ascendante, caractère qui est en relation avec la disparition de la fonction masticatoire. La mandibule est robuste chez les Bradypodidés. La colonne vertébrale a une morphologie exceptionnelle : chez les Bradypodidés, il y a 6 vertèbres cervicales chez *Choloepus hoffmani*, 7 chez *C. didactylus*, ou bien encore 8 ou 9. La huitième et la neuvième cervicale peuvent porter une paire de côtes flottantes, non reliées au sternum. Le nombre des vertèbres dorsales est variable selon les familles et les genres. Un autre caractère exceptionnel, propre à ces Euthériens archaïques, est la présence aux dernières vertèbres dorsales et lombaires d'apophyses surnuméraires, ou *xénapophyses*, antérieures et postérieures, supports d'articulations particulières, accessoires, dites articulations *xénarthrales*, d'où le nom de Xénarthres donné au sous-ordre. On observe parfois plusieurs dizaines de vertèbres caudales chez les Myrmécophagidés. Chez les Bradypodidés, le nombre des côtes est le plus élevé de tous les Mammifères : 25 paires chez les *Choloepus*. Ces Édentés ont un thorax exceptionnellement développé dans le sens transversal, peut-être du fait de leur posture en suspension, qui est typique. Il existe une tendance à l'aplatissement des côtes, plus nette pour les Myrmécophagidés et surtout pour les *Cyclopes*, chez lesquels elles se recouvrent un peu comme les éléments d'une jalousie à l'italienne, conformation unique chez les Mammifères. La partie sternale des côtes est ossifiée (os sterno-costal). La clavicule, toujours présente chez les genres actuels, joue un rôle secondaire; elle est rudimentaire chez *Myrmecophaga* et *Tamandua*. En ce qui concerne les membres antérieurs, le radius et le cubitus ne sont jamais soudés l'un à l'autre. Les Myrmécophagidés et Dasypodidés (tatous) sont plantigrades.

▶ ***Représentation schématique d'un crâne de bradype (en haut) et d'un crâne de fourmilier (en bas).***

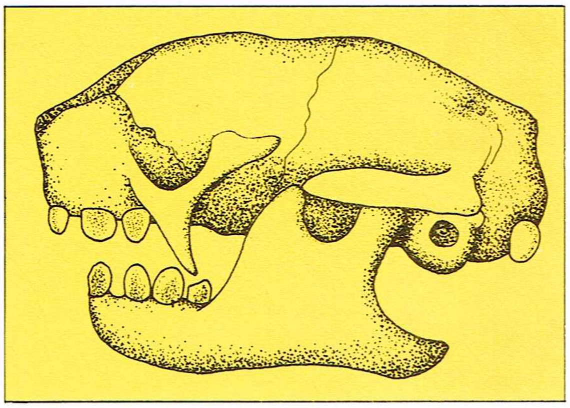

I.G.D.A.

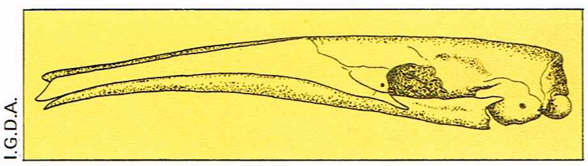

I.G.D.A.

▼ ***Crâne d'un Édenté* (Euphractus sexcinctus *ou tatou à six bandes*) *vu latéralement (A) et par la face ventrale (B)* [*une moitié*] *: cn, cloison nasale; na, nasal; pmx, prémaxillaire; mx, maxillaire; fr, frontal; ju, jugal; pa, pariétal; sq, squamosal; so, supra-occipital; ty, tympanique; co, condyle occipital; bt, bulle tympanique; pt, palatin; bo, basi-occipital.***

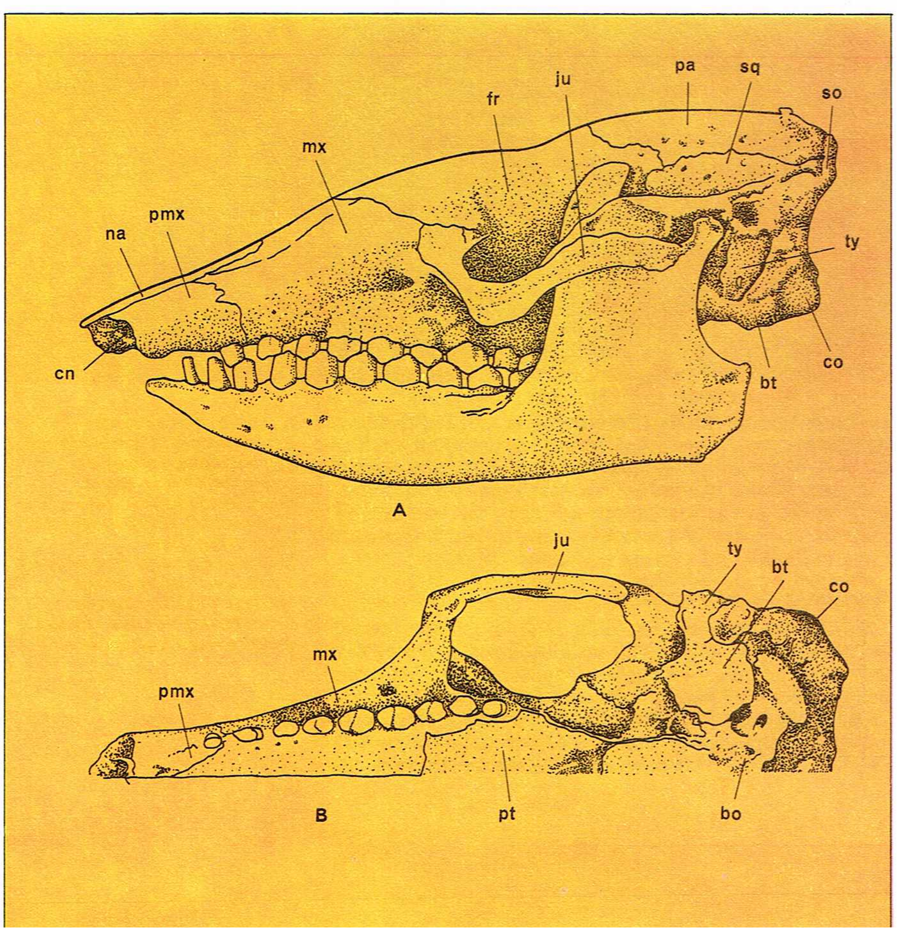

I.G.D.A.

Comme l'indique leur nom, les Édentés ont une denture très spéciale. Les Myrmécophagidés et les Dasypodidés possèdent des dents plus ou moins réduites, de conformation anormale, dépourvues de racines et d'émail et à croissance continue. Presque toujours cylindriques et molariformes, elles sont presque homodontes : selon certains auteurs, les incisives et les canines sont absentes, bien que, dans certains cas *(Choloepus)*, il puisse exister une grosse dent caniniforme à chaque demi-mâchoire supérieure et inférieure; selon d'autres, les éléments distals peuvent être considérés comme des incisives ou des canines (voir Grassé). En tout cas, dans ses formes actuelles, cet ordre offre un exemple typique de réduction avancée de la denture, peut-être par suite d'une spécialisation alimentaire. Les Dasypodidés, qui sont diphyodontes, possèdent également des dents de lait, alors que les Bradypodidés en sont dépourvus (monophyodontes), leurs dents définitives apparaissant avant la naissance.

La langue et les glandes salivaires sont diversement développées chez les trois familles. L'estomac, très complexe chez les bradypes, est simple chez les tatous, insectivores, et beaucoup plus compliqué chez les fourmiliers, surtout en ce qui concerne la région pylorique.

Les poumons sont petits, sans lobes nets chez les bradypes, normaux chez les deux autres familles.

En ce qui concerne l'appareil circulatoire, on observera surtout la présence de « réseaux admirables » ou *rete mirabili*, particulièrement dans les membres, plus développés chez les Bradypodidés, lesquels sont arboricoles. La fonction des structures circulatoires anormales n'est pas bien connue; on suppose qu'il s'agit de la persistance d'un caractère embryonnaire chez l'adulte, ou même d'une conformation ancestrale. La veine cave postérieure est double dans sa partie postrénale.

Le cerveau est de type macrosmatique : le néopallium, peu développé, ne recouvre pas le cervelet et présente peu de sillons et de scissures.

Parmi les sens, on note le développement important de l'odorat. L'œil présente diverses particularités, encore mal connues : la rétine est toujours dépourvue de vaisseaux sanguins (anangique) et ne possède que des bâtonnets chez les Dasypodidés; la pupille des bradypes est ronde et guère plus grosse qu'un trou d'épingle; les paupières des tatous, enfin, ne recouvrent pas les globes oculaires, mais se resserrent quand ceux-ci sont retournés.

L'appareil uro-génital a pour particularité la situation intra-abdominale des testicules; il n'y a pas d'os pénien. Les orifices génito-urinaires des femelles et l'anus débouchent dans une dépression cutanée peu profonde, qui constitue un pseudo-cloaque, pigmenté. Les organes génitaux femelles présentent des caractères archaïques : l'utérus est simple; le placenta est décidué et discoïdal chez les fourmiliers. Les mamelles sont pectorales, avec une paire abdominale en plus chez *Cyclopes*, et une paire inguinale chez *Dasypus*.

Les femelles mettent généralement bas 1, parfois 2, petits par portée, à l'exception du genre *Dasypus*, chez lequel on observe le phénomène de la polyembryonnie; ce dernier phénomène est plus net chez *D. septemcinctus* et *D. novemcinctus*, qui donnent naissance à des portées de 4 à 12 petits. Dans la polyembryonnie, après un développement normal lors des tout premiers stades suivant la fécondation, l'ectoblaste s'épaissit à un moment

Photo Researchers International-D. Bartlett

◀ **Cyclopes didactylus,** *le fourmilier nain, est uniquement nocturne et strictement arboricole. Il habite les forêts tropicales, du Mexique méridional au Brésil et à la Bolivie.*

donné en deux endroits, formant deux coussinets, lesquels, par dédoublements successifs, deviennent quatre, puis huit, etc., symétriquement, chaque coussinet donnant un embryon. La durée de gestation est variable ; elle est souvent très longue, à cause du phénomène très fréquent de la nidation différée de l'ovule fécondé. Les petits naissent à un stade avancé.

Les Édentés sont des homéothermes imparfaits ; leur température interne varie de plusieurs degrés, en fonction de la température atmosphérique : soit de 28 °C à 35 °C chez les bradypes, de 32 °C à 35 °C chez *Myrmecophaga*, et de 32 °C à 36 °C chez *Dasypus*.

La systématique de l'ordre est simple quant aux espèces vivantes, mais beaucoup plus complexe si l'on compte les nombreuses formes fossiles ; celles-ci formant en effet, selon Simpson, sept familles et cent treize genres, alors qu'il n'existe que trois familles et quatorze genres actuellement ; ceci donne une idée de l'importance de ce groupe de Mammifères archaïques dans le passé.

Parmi les formes éteintes, nous citerons les *Megatherium,* Xénarthres terricoles énormes et massifs, qui atteignent 7 m de long ; ces Animaux vécurent dans les pampas d'Argentine jusqu'au Pléistocène et furent même contemporains de l'homme, de même que les *Glyptodon,* plus proches des tatous, dont le corps était protégé par une puissante cuirasse hémisphérique, formée par une mosaïque de plaquettes osseuses et polygonales. On a découvert à Haïti et à Porto-Rico des squelettes fossiles des genres *Acratocnus* et *Parocnus* (famille des Mégalonichidés), associés à des restes humains ; il s'agissait de bradypes terricoles de très grande taille : on pense que les *Acratocnus* pesaient environ 70 kg. Certains *Mylodon,* comme *M. listai* (famille des Mylodontidés), ont certainement été contemporains de l'homme dans certaines régions de l'Argentine.

L'ordre des Édentés est divisé en deux sous-ordres : les Paléanodontes, éteints, et les Xénarthres, les seuls dont nous parlerons ici. Nous suivrons la classification de Cabrera (1959), qui a dénombré quatorze genres et trente et une espèces, répandus surtout en Amérique centrale et du Sud.

Sous-ordre des Xénarthres

Les **Myrmécophagidés** *(Myrmecophagidae)* comprennent les fourmilliers, à corps robuste et allongé, légèrement comprimé latéralement. Ils sont longs de 15 cm *(Cyclopes)* à 1,20 m *(Myrmecophaga),* possèdent des pattes bien développées et une queue longue, préhensile chez les formes arboricoles *Tamandua* et *Cyclopes.* La tête présente un profil très particulier, surtout chez *Myrmecophaga,* le grand fourmilier, très allongé avec un museau presque tubulaire et légèrement incurvé vers le bas ; les oreilles sont petites et arrondies ; l'ouverture buccale est très petite et très étroite, et la cavité orale, infundibuliforme, est occupée presque entièrement par une très longue langue, vermiforme ; chez le grand fourmilier, elle mesure jusqu'à 1 m de long, pour un diamètre de 10 à 15 mm seulement. Protractile, très visqueux, doté d'une puissante musculature (qui s'insère jusqu'à l'apophyse xiphoïde du sternum), cet organe est essentiel à la nourriture de cet Animal dépourvu de dents. Les fourmiliers se nourrissent principalement de termites et de fourmis. Rétractée, la langue se replie sur elle-même, se disposant sur le plancher buccal. Les glandes salivaires sont très développées.

La fourrure est fournie, avec des poils très longs et assez grossiers chez le grand fourmilier, plus courts et plus fins chez les espèces arboricoles. Le troisième doigt est très développé et les membres sont plantigrades. Les Myrmécophagidés s'appuient principalement sur le bord externe des mains, pourvues de gros coussinets ; les doigts, aux griffes très fortes et falciformes, restent partiellement superposés et tournés vers l'arrière. En posture de défense, ces Animaux, à demi dressés, lèvent les pattes avant, prêts à frapper avec leurs griffes, s'appuyant sur les pattes arrière et sur la queue (celle-ci, chez les espèces arboricoles, est enroulée solidement autour d'une branche). Le jaguar lui-même évite de lutter avec le grand fourmilier, qui, apparemment sans défense, est un adversaire redoutable. Les grosses griffes des mains servent surtout à casser les termitières et à ôter le dessus des fourmilières. L'odorat est excellent, mais la vue et l'ouïe sont beaucoup moins fines.

S. Prato

E.P.S.

▲ *A gauche,* **Myrmecophaga tridactyla,** *le grand fourmilier, ou tamanoir, vit dans les forêts humides, les zones paludéennes, ou les savanes, du Honduras britannique au nord de l'Argentine. A droite,* **Tamandua tetradactyla** *est un Animal essentiellement arboricole, nocturne, se nourrissant de termites, de fourmis, de divers autres Insectes, ainsi que de miel.*

Les Myrmécophagidés habitent généralement les forêts tropicales denses, ainsi que les savanes, du Mexique au Paraguay et à l'Argentine septentrionale. Ils sont souvent solitaires, tout au plus peut-on les voir en couples. La famille comprend trois genres : *Myrmecophaga, Tamandua* et *Cyclopes,* qui comprennent, au total, quatre espèces (trois selon certains auteurs).

Myrmecophaga tridactyla, le grand fourmilier, ou tamanoir, ou myrmécophage tridactyle est la plus grande espèce : il mesure jusqu'à 1,20 m de long, pour un poids de 20 kg, avec 60 cm de hauteur au garrot. Sa queue, très fournie, longue de 60 à 90 cm, est tenue bien levée, attitude caractéristique de l'espèce. La morphologie externe est vraiment unique : sa fourrure, faite de soies, forme une frange sur la ligne vertébrale, les pattes et la queue, celle-ci se terminant en panache. La tête, la partie antérieure du tronc et les pattes sont cendrées et noirâtres. Le cou, la poitrine, le ventre, les pieds et la partie inférieure de la queue sont bruns. Une large bande noire, bordée de blanc, barre la poitrine et se prolonge sur les flancs jusqu'à la région sacrée, en s'atténuant progressivement. Les mains sont pourvues de cinq doigts, dont trois seulement portent de robustes griffes, les pieds ayant cinq griffes, plus petites, à peu près égales.

Le tamanoir vit dans les forêts humides, les zones paludéennes, parfois dans les savanes, du Honduras britannique au nord de l'Argentine. Strictement terricole, essentiellement diurne dans les zones sauvages, il tend à devenir nocturne quand la présence de l'homme le perturbe. C'est un bon nageur, qui peut traverser de larges fleuves. Bien qu'il soit habile fouisseur, il ne se creuse pas de tanière, et se réfugie dans les trous ou d'autres abris forestiers, où il se repose enroulé sur lui-même. Après une gestation de 190 jours, les femelles mettent bas un seul petit, qu'elles portent longtemps agrippé à leur croupe. En captivité, cette espèce atteint 14 ans.

Tamandua compte une espèce : le tamandua tétradactyle *(T. tetradactyla)* ; selon Cabrera, ce genre comprend également le tamandua à longue queue *(T. longicaudata),* dont l'existence est cependant discutée. Très différents des *Myrmecophaga,* les tamanduas sont essentiellement arboricoles, bien qu'ils se déplacent fréquemment et maladroitement à terre.

Ils sont de taille moyenne : leur corps mesure un peu moins de 60 cm et leur queue atteint la même longueur. Celle-ci est cylindro-conique, préhensile, nue en dessous et au bout. Leur fourrure, courte et touffue, est constituée par des poils soyeux, brillants, recouvrant une laine légère : de couleur jaunâtre, elle est traversée par une nette bande noirâtre qui, partant de la partie supérieure du tronc, bifurque en deux branches qui atteignent les épaules et les côtés de la poitrine. Le tamandua diffère du grand fourmilier par son museau plus court, ses oreilles plus grosses, ainsi que par sa queue ornée seulement de taches noires et irrégulières.

C'est un Animal nocturne, qui passe la plus grande partie de son temps sur les arbres, où il se déplace lentement. Il se nourrit de termites, de fourmis, et divers autres Insectes, les attrapant avec sa longue langue ; il semble qu'il se nourrisse aussi de miel. Les femelles n'ont qu'un petit, au printemps. Les tamanduas préfèrent les zones forestières, mais on les trouve aussi dans les savanes, du sud du Mexique à la Bolivie et au Brésil.

Cyclopes, le dernier genre, compte une seule espèce, le fourmilier nain *C. didactylus* (18 cm de long), qui ressemble au tamandua. Son museau est court, et sa queue, qui atteint 20 cm, est préhensile. Ce petit fourmilier présente, contrairement aux autres, une fourrure très douce et soyeuse, dont les teintes vont du gris-brun au jaune doré, avec des tons plus foncés sur le dessus et une ligne dorsale noire. L'extrémité du museau est rose ; les plantes des pieds sont rougeâtres ; les yeux sont noirs. Les mains ne portent que deux griffes bien développées et recourbées, aux deuxième et troisième doigts.

Uniquement nocturne et strictement arboricole, le fourmilier nain n'a qu'un petit par portée, qui est mis à l'abri, par la mère, dans un nid de feuilles séchées, à l'intérieur d'un trou d'arbre. Les principaux ennemis de cette espèce sont certains Rapaces (des genres *Spizaetus, Spizastur* et *Pulsatrix*) et surtout la harpye ; sa principale défense est sa livrée mimétique. Il habite également les forêts tropicales, du Mexique méridional au Brésil et à la Bolivie.

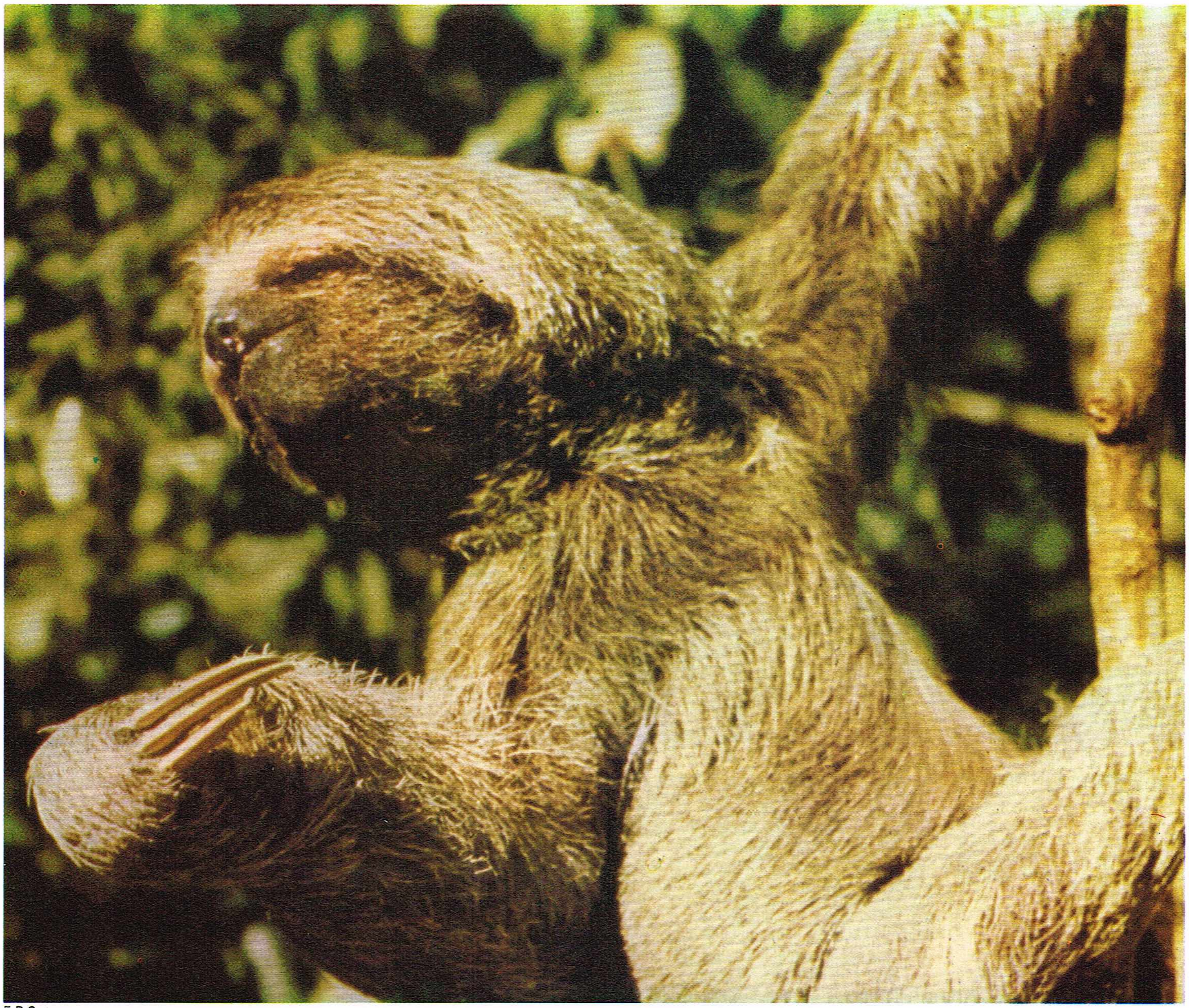

E.P.S.

▲ ***Les* Bradypus *(*B. tridactylus*) ont les pattes antérieures très longues, et, particularité exceptionnelle chez les Mammifères, les poils de leur fourrure, sur le ventre, sont orientés vers le dos.***

Les **Bradypodidés** *(Bradypodidae)* sont les plus étranges des Édentés et, par de nombreux caractères, parmi les plus aberrants et les plus singuliers des Mammifères. Ils rappellent un peu certains Lémuriens et Cébidés, avec leur tête arrondie à museau bref et recouvert de courts poils. Ils sont longs de 50 à 75 cm; leur queue mesure à peine 7 cm chez les *Bradypus,* et est rudimentaire ou absente chez *Choloepus;* le poids d'un adulte varie de 4 à 7 kg. La fourrure, touffue et grossière, est faite de longs poils rudes, recouvrant une laine et réunis en faisceaux; chez *Bradypus,* chaque groupe est composé d'un poil plus long et grossier, et de deux ou trois poils plus petits, dépourvus de moelle, alors que, chez *Choloepus,* les poils sont géminés et contiennent tous une moelle. A la différence de ceux de tous les autres Mammifères, les poils sont orientés sur le ventre vers le dos; ce trait est en rapport avec l'habitude acquise de se suspendre aux branches, le dos en bas, dans le milieu particulier de grandes forêts américaines, où les pluies sont quasi quotidiennes : l'eau s'écoule sur les poils sans entrer en contact avec la peau. Une autre particularité tout à fait exceptionnelle de la fourrure des bradypes est la présence, dans leurs poils, d'Algues unicellulaires appartenant à différentes espèces, lesquelles peuvent vivre grâce à l'importante humidité du milieu. Ce sont, par exemple, *Trichophilus welckeri* (Chlorophycée) ainsi que *Cyanoderma bradypi* et *Cyanoderma choloepi* (Cyanophycées) ; la présence de ces Algues donne à la robe des Bradypodidés, surtout sur le dos, des tons verdâtres inhabituels, que l'on peut observer, en particulier, chez les populations des forêts les plus humides.

Le trait morphologique le plus remarquable est la grande longueur des pattes antérieures, qui dépassent d'un tiers la longueur du corps, les postérieures étant aussi longues que ce dernier. Cette croissance allométrique commence vers la fin de la période embryonnaire et s'accentue au début de la vie des nouveau-nés, ce qui laisse supposer que le phénomène a une origine relativement récente et qu'il constitue une adaptation au mode de vie. Strictement arboricoles, ces Animaux ne se déplacent à terre que lorsqu'ils y sont contraints, en rampant appuyés sur les avant-bras et les pieds. Leurs mains sont longues et étroites et leurs doigts sont réunis par une unique enveloppe cutanée (syndactylie), seules les très fortes griffes, arquées, étant libres. Les *Bradypus* ont cinq doigts aux mains, le premier et le cinquième étant rudimentaires; les *Choloepus* n'en n'ont que quatre, le premier et le quatrième étant rudimentaires. Les pieds sont toujours tridactyles, le premier et le cinquième doigt manquant constamment.

Ces Animaux sont extrêmement lents, ce qui leur a valu leur nom de paresseux, ou bradypes (en grec « Animaux à pieds lents »), ou encore Tardigrades. Les seuls gestes rapides qu'ils accomplissent sont ceux de la mandibule,

E.P.S.

▲ **Choloepus hoffmanni,** ***le paresseux de Hoffmann, se rencontre du Nicaragua à la Colombie et au Pérou.***

quand ils mangent (jusqu'à quatre-vingt-dix actes masticatoires par minute). Pour le reste, ils font preuve d'un calme exaspérant, et vivent à peu près comme si le monde qui les entoure ne les concernait pas. Pourtant, des observations ont montré que les bradypes, qui peuvent passer toute leur vie sur un même arbre, effectuent aussi d'assez longs déplacements dans la forêt : ils passent d'une branche à l'autre et, en certains cas, descendent à contre-cœur à terre, pour de brefs parcours. Un paresseux tridactyle *(Bradypus tridactylus),* observé par Beebe, a été retrouvé plus tard par cet auteur, à plus de 8 km de distance.

Les paresseux, qui vont spontanément à l'eau, nagent lentement (500 m/h), mais y sont cependant plus rapides qu'à terre, où ils se déplacent à 250 m/h. Ils se suspendent aux branches par leurs griffes, déplaçant leurs pieds et leurs mains les uns après les autres ; cependant, alors que les *Choloepus* sont suspendus par leurs quatre extrémités, les *Bradypus,* dont les membres antérieurs sont plus longs, se suspendent souvent seulement par les pattes postérieures, gardant les mains libres. Malgré la lenteur de leurs mouvements, ils sont habiles grimpeurs et atteignent tranquillement les rameaux terminaux ; c'est ainsi qu'ils échappent souvent aux Carnivores prédateurs, comme les jaguars, qui ne peuvent les atteindre au plus haut des arbres. Rappelons que leur tête peut accomplir une rotation de 270° sans déplacement du corps. Leur immobilité fréquente et leur mimétisme poussé rendent ces Animaux difficilement visibles dans le feuillage.

Outre leurs singularités biologiques, on observe chez les Bradypodidés des caractères anatomo-physiologiques respiratoires et circulatoires exceptionnels, lesquels sont étroitement liés au comportement. La trachée est très longue, permettant la torsion du cou au-delà de la normale ; il est probable aussi que la trachée, les bronches et le reste des voies respiratoires servent de réserves d'air, ce qui expliquerait la résistance des bradypes en plongée (le paresseux tridactyle peut rester 40 mn en plongée). Ce dernier a, au repos, une fréquence respiratoire de 6 à 15 mouvements respiratoires par minute, avec de longues pauses, qui atteint 140 par mn quand la température ambiante dépasse 37 °C. Il s'agit, selon toute probabilité, d'une sorte de compensation, du fait de l'homéothermie imparfaite de ces Animaux. La superficie respiratoire des poumons est faible : elle atteint environ 5 m² pour environ six millions d'alvéoles (alors qu'on observe respectivement 20 m² et quatre cents millions d'alvéoles chez les chats).

Le cœur des bradypes est tout petit et représente environ 0,3 % du poids total du corps : il y a de 60 à 130 battements par minute, selon les espèces et les circonstances. D'autre part, outre les réseaux admirables, on observe le passage de rameaux veineux spéciaux à travers les perforations des côtes et des vertèbres dorsales et lombaires, ce qui est un caractère exclusif des Bradypodidés et des Mylodontidés (fossiles). Ces rameaux veineux partant de chaque veine cave postérieure dans des plexus veineux spéciaux, situés près de chaque artère iliaque, traversent les corps vertébraux, entrent dans le canal rachidien et soustraient aux veines caves une bonne partie du sang qui retourne au cœur.

Il y a 18 ou 20 dents $\left(\frac{5}{4\text{-}5} \times 2\right)$, presque cylindriques et à peu près homodontes. Le régime alimentaire, presque uniquement phytophage, consiste surtout en feuilles de *Cecropia peltata* ; en conséquence, l'estomac, très volumineux, est complexe et composé principalement de trois sacs : le premier, le plus ample, est lui-même subdivisé, le second est un estomac glandulaire, et le troisième un estomac musculaire. Il est vraisemblable qu'il se produit des fermentations bactériennes stomacales. Il n'y a pas de cæcum, et le rectum se dilate en une ample cavité qui reçoit une grande quantité de fèces, émise seulement tous les sept ou huit jours, à raison de 500 g à 1 kg à la fois. La miction a également lieu à de longs intervalles. Les mouvements péristaltiques intestinaux sont très lents, ce qui est en accord avec toute l'allure de ces Mammifères vraiment uniques.

Les femelles ont une paire de mamelles pectorales. Après une gestation de quatre à huit mois, elles mettent bas un seul petit, très développé, qui s'agrippe à la poitrine et au dos de sa mère. Le sevrage a lieu au bout de trois à quatre semaines.

Les bradypes vivent solitaires mais possèdent un répertoire vocal particulier grâce auquel ils se tiennent en contact les uns avec les autres : les *Bradypus* émettent des cris aigus, sorte de « aïe-aïe », d'où le nom de « aïs » (à ne pas confondre avec les « ayes-ayes »), et probablement des ultra-sons. La famille des Bradypodidés, répandue dans les forêts d'Amérique tropicale, du Honduras au Paraguay et à l'Argentine septentrionale, compte deux genres : *Bradypus* (avec quatre espèces) et *Choloepus* (avec deux espèces).

Bradypus, communément appelé bradype, ou aï, de couleur gris-brun (avec la tête plus foncée), a trois griffes aux mains et aux pieds et une queue courte (7 cm). L'espèce la mieux connue est le paresseux tridactyle, *B. tridactylus,* qui habite le Venezuela, les Guyanes, et les régions contiguës du Brésil, ainsi que l'Amérique centrale jusqu'au Honduras. Son front est blanc. Il présente deux étroites bandes noires entre les yeux et les tempes, et, sur le dos, une bande longitudinale châtain, bordée d'orange, plus nette sur les épaules.

Les deux autres espèces proches sont : *B. boliviensis,* le paresseux de Bolivie, qui vit de la Bolivie au Paraguay et au nord de l'Argentine, et *B. infuscatus,* largement distribué en Amérique du Sud.

B. torquatus, le paresseux à collier, considéré un moment comme un genre séparé *(Scaepus),* habite seulement à l'est du Brésil.

Les *Choloepus,* vulgairement appelés unaux, sont un peu plus grands que les *Bradypus.* Leurs pattes avant sont proportionnellement plus courtes ; les mains n'ont que deux griffes. Les oreilles sont plus amples, leur première dent est plus développée que chez les autres paresseux et caniniforme. La queue est absente ou vestigiale. Leur fourrure est faite de poils plus longs et moins rudes.

C. didactylus, le paresseux bidactyle, a une robe grisâtre tendant au marron, surtout vers la tête ; sa nuque, son dos et ses épaules sont d'un beau gris brillant. Il vit en Guyane, au Venezuela et au Brésil.

C. hoffmanni, le paresseux de Hoffman, dont les races géographiques sont nombreuses, se rencontre du Nicaragua à la Colombie et au Pérou.

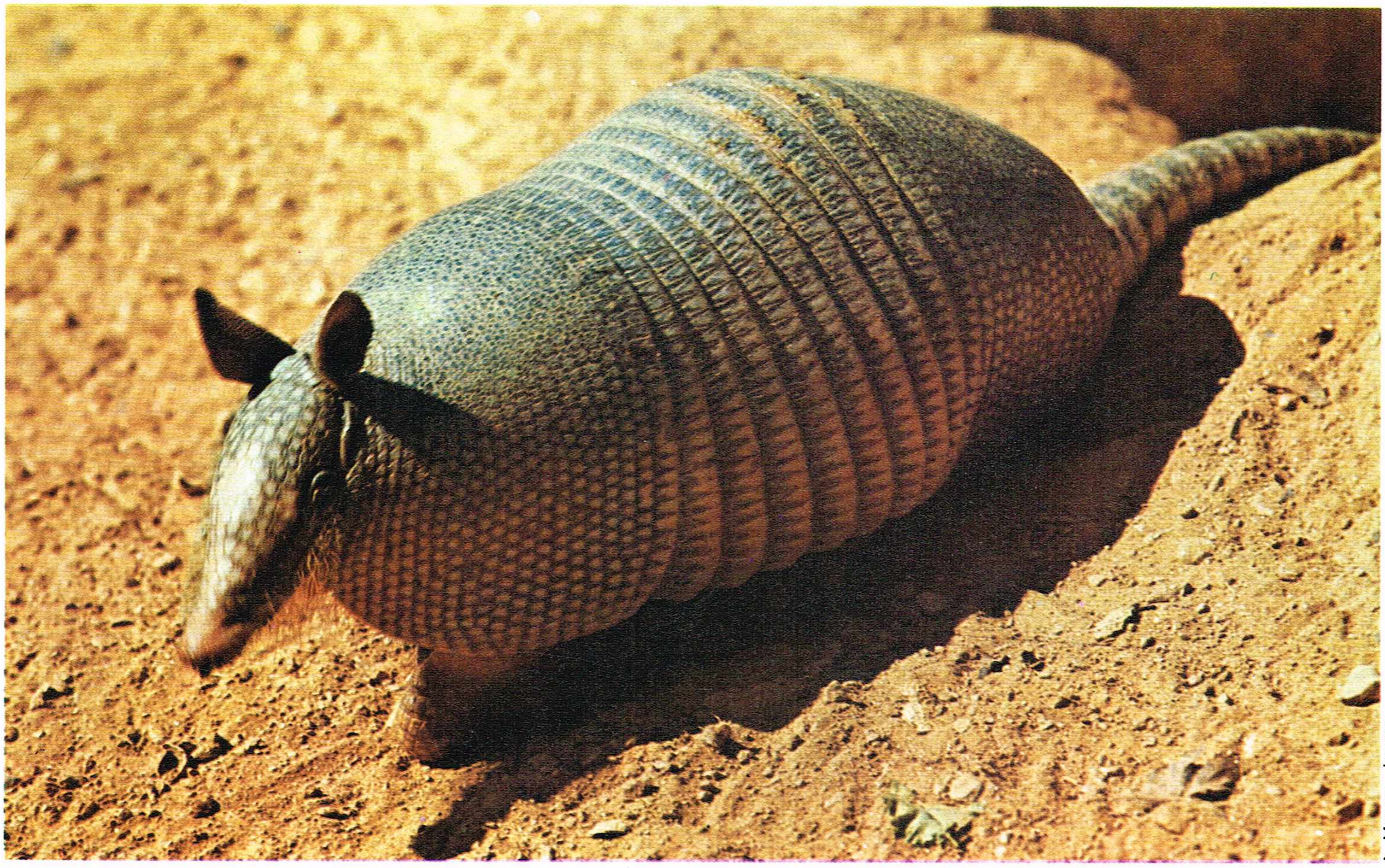

A. Monza - Jacana

▲ **Dasypus novemcinctus,** ***le tatou à neuf bandes, essentiellement nocturne et grégaire, peut s'enterrer en deux minutes.***

Les **Dasypodidés** *(Dasypodidae),* ou tatous, présentent une morphologie externe particulière, car ils possèdent sur une grande partie du corps une cuirasse. La tête est allongée, le crâne déprimé, et le museau proéminent, la bouche étroite, les yeux petits, et les oreilles courtes. Le tronc, massif, est de largeur à peu près uniforme. La queue, très longue, est cylindro-conique. Les pattes, brèves et courtes, sont pentadactyles. Les mains sont diversement syndactyles, avec une prédominance des deuxième et troisième doigts, selon les genres. Les membres antérieurs sont armés de puissantes griffes fouisseuses parfois énormes; les griffes des membres postérieurs sont plus petites. Les tatous, ou Loricates, sont de taille très variable, d'un minimum de 13 cm de longueur (le chlamydophore tronqué) à un maximum de 1 m (le tatou géant, qui peut peser plus de 60 kg) ; la plupart des espèces mesurent 30 à 50 cm, sans la queue (25 à 50 cm).

La cuirasse est composée d'éléments juxtaposés, qui ressemblent à des écussons polygonaux ou carrés, recouvrant la tête, le tronc, les flancs et quelquefois aussi les pattes. La peau des Dasypodidés forme des écailles cornées, qui revêtent entièrement le corps des juvéniles; pendant la croissance, la plupart des écailles exposées à la lumière (le dos, les flancs, etc.) s'ossifient, restant en certains endroits indépendantes les unes des autres, se soudant ensemble en d'autres points, par suite d'un processus d'ossification du tissu conjonctif qui les sépare. Il en résulte la formation d'une cuirasse proprement dite, formée de plusieurs parties : trois boucliers fixes, dont un céphalique, qui recouvre la tête, un scapulaire, qui protège l'avant du tronc, et un pelvien, qui recouvre tout l'arrière du corps; il y a aussi des sangles, bandes circulaires, mobiles, faites de rangées de plaques, situées le plus souvent entre les boucliers scapulaire et pelvien et interrompues au ventre (d'où le nom vulgaire de Cingulés, synonyme de Loricates). Ces sangles, qui permettent l'articulation des diverses parties de la cuirasse, servent de caractères de détermination des différentes espèces. Il existe, dans certains cas, une sangle préscapulaire, alors que la partie supérieure du cou et la queue sont protégées par des rangées de plaques (diadème). Le ventre porte des rangées transversales d'écailles cornées très nombreuses et petites, entre lesquelles pousse un fin pelage de poils soyeux. Sur le reste du corps, la pilosité est très clairsemée, sauf chez certaines espèces : ainsi, *Chaetophractus villosus* a de nombreux poils entre les écailles du dos. Les seuls genres à fourrure plus développée sont *Clamyphorus* et *Burmeisteria*. La cuirasse des tatous n'est pas liée au squelette interne, sauf chez les Chlamyphorinés et *Tolypeutes mataco,* dont le bouclier pelvien a des rapports avec les os du bassin. La musculature a évolué parallèlement à la formation de la cuirasse : ce trait permet à ces Animaux de déplacer les diverses parties de la cuirasse (les *Tolypeutes* se roulent même en boule).

La denture présente un minimum de 7 dents par demi-mâchoire et un maximum de 25 dents (genre *Priodontes*). L'estomac est simple. Quant au squelette, on note que 2 à 4 vertèbres se soudent dans la région cervicale, constituant un os mésocervical spécial; on observe également la soudure, dans la région sacrée, de 8 à 13 vertèbres; il existe une clavicule, et le tibia et le péroné sont soudés entre eux.

▼ ***Ces deux Animaux ont vécu dans les pampas argentines, à des époques reculées; ils ressemblaient aux tatous actuels; il s'agit de*** **Doedicurus clavicaudatus** ***(à gauche) et de*** **Glyptodon clavipes** ***(à droite).***

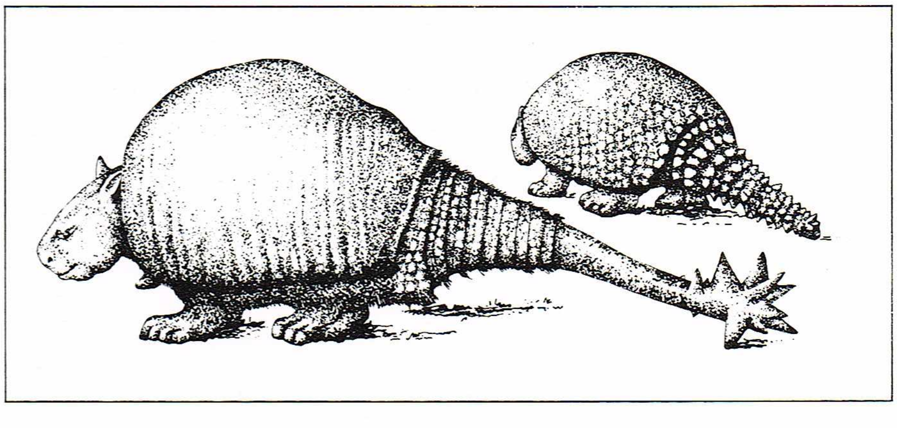

I.G.D.A.

▶ **Euphractus sexcinctus,** ***le tatou à six bandes, habite de préférence les savanes de Bolivie, du Brésil et du nord de l'Argentine.***

Ostman - J.R. Simon

Les tatous vivent solitaires ou par couples, plus rarement en petites bandes. Ils sont terricoles et fouisseurs. Ils creusent très rapidement un trou pour s'y réfugier ou chercher leur nourriture ; ils se reposent dans une tanière. La spécialisation en vue du fouissage est très poussée chez ces Animaux, qu'on a divisés, de ce point de vue, en trois types. Le premier type *(Chlamyphorus, Priodontes* et *Chaetophractus)* comprend les fouisseurs les plus spécialisés et qui courent le plus rapidement ; leur cuirasse, épaisse et plus ou moins rigide, est très large et peu développée sur les flancs ; incapables de se rouler en boule, ils peuvent seulement replier leur thorax sur le ventre ; le deuxième type *(Dasypus)* fouisseur, meilleur coureur, a une cuirasse très convexe débordant largement sur les flancs ; enfin, le troisième type *(Tolypeutes)* a une cuirasse très rigide et parfaitement articulée, ce qui lui permet de se rouler en boule ; sa capacité à fouir est moins développée que chez les précédents.

Les tatous sont insectivores et végétariens et, dans certains cas, charognards. Ils ont des sens très développés. Beaucoup d'espèces sont nocturnes. Bien qu'ayant une thermorégulation imparfaite, ils n'entrent pas habituellement en léthargie ; le *Zaedyus pichiy* hiberne dans certaines zones de l'Argentine et du Chili méridional. Rappelons que ces Animaux présentent une polyembryonie, et une nidation différée, ce qui rend leur gestation très longue.

La famille des Dasypodidés a la plus vaste distribution de tous les Édentés. On les trouve dans le sud des États-Unis et la quasi-totalité de l'Amérique centrale et du Sud, sauf l'extrême Sud et les Antilles. Les tatous vivent généralement dans les lieux découverts, la savane ou la pampa (en Argentine) et les zones arides (en Patagonie) ; certains préfèrent les forêts. La famille compte, au total, neuf genres et vingt et une espèces, réparties en deux sous-familles : les Dasypodinés et les Chlamyphorinés.

La sous-famille des *Dasypodinés* est caractérisée par une cuirasse qui adhère complètement à la paroi du corps. Elle comprend la majorité des genres : *Chaetophractus, Euphractus, Zaedyus, Priodontes, Cabassous, Tolypeutes* et *Dasypus,* et leurs espèces.

Les *Chaetophractus,* longs de 25 à 28 cm, ont une queue de 10 cm. Ils possèdent 6 à 8 sangles mobiles et, en général, des dents au nombre de $\frac{9}{10}$. Excellents fouisseurs, surtout nocturnes, ils vivent généralement dans les endroits découverts à savane. Les femelles mettent bas des jumeaux, après une gestation d'environ deux mois. Il en existe trois espèces : *C. nationi,* de Bolivie et d'Argentine septentrionale, *C. vellerosus* et *C. villosus,* qui habitent une grande partie de l'Argentine. On les appelle aussi tatous à fourrure, du fait de la légère pilosité de la cuirasse ; ils sont chassés pour leur chair.

Le deuxième genre de cette sous-famille compte une seule espèce, *Euphractus sexcinctus,* ou tatou à six bandes (40 cm de long), qui habite la Bolivie, le Brésil, et le nord de l'Argentine, de préférence dans les savanes. Sa queue mesure 25 cm ; il possède de 6 à 8 sangles et $\frac{8}{10}$ dents. Ce tatou fouisseur et nocturne se distingue aussi par sa tête aplatie et pointue.

Le genre *Zaedyus* compte également une seule espèce, *Z. pichiy,* petit tatou des pampas de Patagonie. Il préfère les zones arides et sablonneuses. Il a les oreilles courtes, $\frac{8}{9}$ dents, et sa fourrure est développée sur le dos. Les autres Dasypodinés ont une pilosité dorsale rare ou absente.

Le géant des tatous est *Priodontes giganteus,* ou tatou géant, ou encore priodonte géant, long de 75 cm à 1 m, avec une queue de 50 cm. Il pèse jusqu'à 60 kg. Il possède de grandes oreilles, une griffe très importante au troisième doigt des mains, et de 12 à 13 sangles mobiles (d'où une mobilité accrue). Les dents, nombreuses, varient d'un individu à l'autre, et suivant le côté des mâchoires (en moyenne $\frac{15}{19}$ et, au maximum, 25 par demi-mâchoire). Cette espèce, de préférence sylvicole, fouisseuse, agile, nocturne et insectivore, abonde à proximité de l'eau. Elle vit dans une grande partie de l'Amérique du Sud tropicale, à l'est des Andes, plus commune dans le Mato Grosso et le Grand Chaco. Plantigrade pour les membres postérieurs et onguligrade pour les membres antérieurs, le tatou géant prend parfois la position bipède, s'appuyant sur ses pattes postérieures.

Le genre *Cabassous* est très proche du précédent, avec $\frac{8}{10}$ dents, un dos peu convexe et 11 à 13 sangles. Il en existe cinq espèces, répandues dans une partie de l'Amérique centrale *(C. centralis)* et surtout de l'Amérique du Sud, jusqu'au Paraguay et au nord de l'Argentine *(C. hispidus, C. loricatus, C. tatouay* et *C. unicinctus).* Ce dernier, ou tatou à une bande, est long d'environ 70 cm.

Les deux espèces existantes de *Tolypeutes* sont nettement différentes des précédentes. *T. matacus* habite la Bolivie, le sud du Brésil et le Chaco paraguayen et argentin. *T. tricinctus,* ou tatou à trois bandes, vit dans le nord-est et le centre du Brésil. Longs d'environ 40 cm, ces tatous, appelés localement « bolitas », se reconnaissent à la courbure sphéroïdale de leurs boucliers scapulaire et pelvien ; la forme de leur cuirasse leur permet de se protéger en cas de danger. Ce sont des Animaux diurnes, qui habitent les forêts claires et les savanes. Habiles fouisseurs, ils occupent les tanières abandonnées par d'autres Animaux. Ils ont $\frac{8}{8}$ dents.

Le dernier genre, *Dasypus,* compte cinq espèces, répandues du sud des États-Unis *(D. novemcinctus)* à l'Amérique du Sud. Longs d'environ 40 cm, ces tatous ont une très longue queue (de 30 à 37 cm de long). Ils possèdent de 7 à 10 sangles mobiles, $\frac{7}{9}$ dents ; les femelles ont deux paires de mamelles, l'une pectorale, l'autre inguinale. Essentiellement nocturnes, ils ont des mœurs grégaires. Les tatous à neuf bandes *(D. novemcinctus)* peuvent s'enterrer en deux minutes. Leur aire de distribution va du sud des États-Unis à l'Argentine : au cours des dernières décennies, ce domaine s'est étendu vers le nord. Les autres espèces de ce genre, toutes d'Amérique du Sud, sont le *D. hybridus,* le *D. kappleri,* le *D. mazzai,* le *D. pilosus,* et le *D. septemcinctus.*

La sous-famille des *Chlamyphorinés* compte de petits tatous d'aspects différents. Leur cuirasse dorsale est formée uniquement de bandes mobiles et uniformes d'écussons peu ossifiés, sans continuité avec la région céphalique. Le bouclier pelvien, disposé verticalement, est directement en rapport avec les os du bassin. Le corps est recouvert d'une fourrure touffue à poils clairs et soyeux. Les yeux sont très petits. Cette sous-famille compte deux genres seulement, le *Chlamyphorus,* le type, et le *Burmeisteria.*

Chlamyphorus truncatus est le plus petit tatou : il mesure 13 cm de long, avec une queue de 2,5 cm. Il est caractérisé par une cuirasse qui, à la différence des autres espèces de la famille, n'adhère au corps que le long de la ligne dorsale ainsi qu'à l'avant et à l'arrière ; c'est pourquoi la fourrure pousse aussi sous une partie de l'armure. Cette espèce, appelée chlamydophore, habite les zones arides de l'Argentine centro-occidentale.

Burmeisteria retusa est un peu plus grande ; sa cuirasse adhère complètement au corps. Elle vit dans le Chaco de la Bolivie et du nord de l'Argentine.

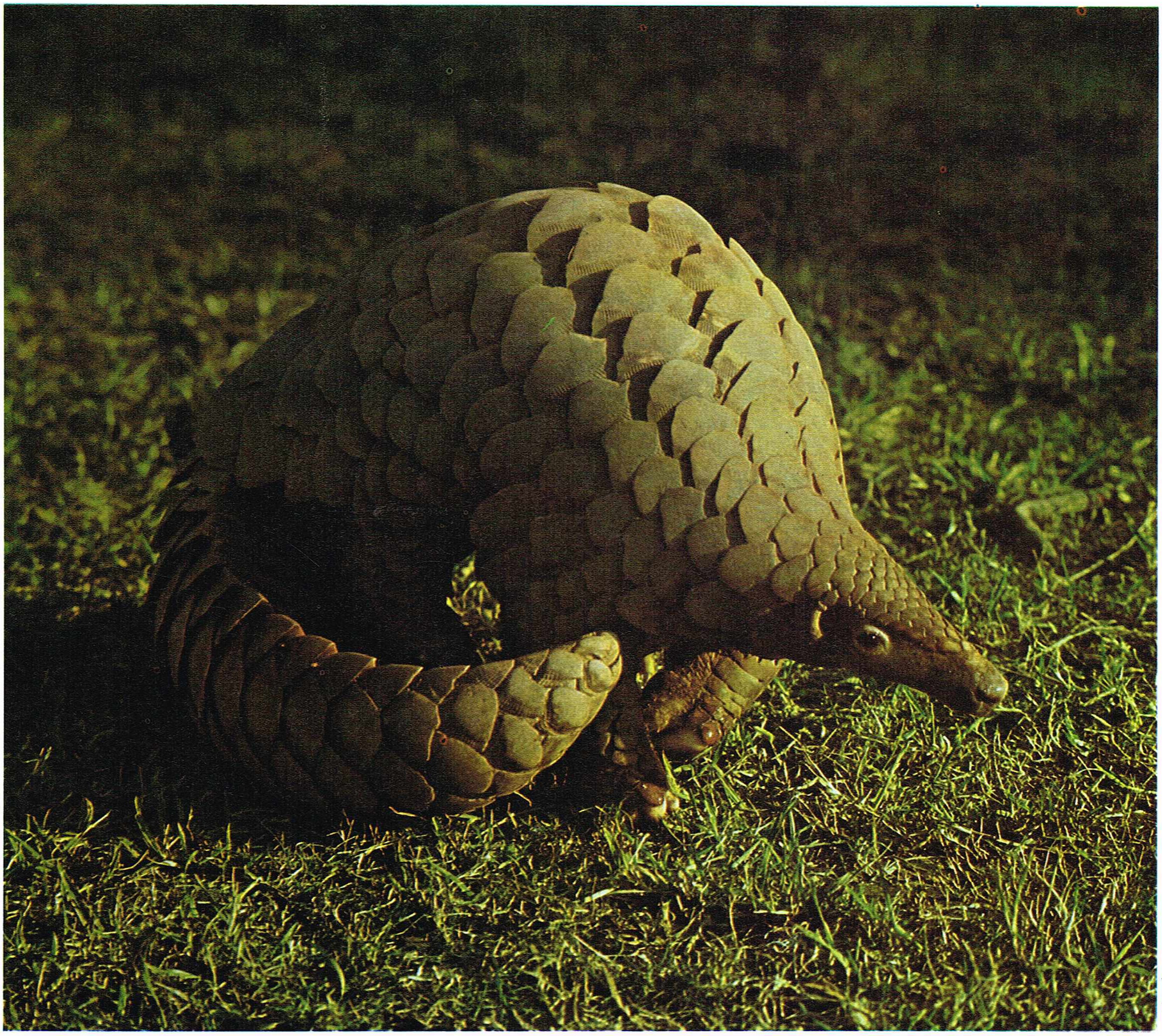

A. Margiocco

▲ **Manis crassicaudata,** ***le pangolin indien ou à grosse queue, appartient à l'ordre des Pholidotes; ces Mammifères habitent généralement les régions forestières.***

Ordre des Pholidotes

L'ordre des Pholidotes *(Pholidota)* comprend les pangolins, qui sont des Euthériens au corps très allongé. On les rangeait autrefois chez les Édentés, en établissant l'ordre hétérogène des Édentés proprement dits. Cette classification était fondée sur des caractères qui étaient dus, en réalité, à une évolution parallèle et, par conséquent, à une convergence morphologique et éthologique des deux groupes. En effet, les pangolins ne présentent aucune affinité avec les Édentés actuels, les diverses ressemblances constatées étant dépourvues de valeur du point de vue phylogénétique.

La tête, courbe et conique, la région dorsale, la queue et la face externe des pattes des Pholidotes sont recouvertes de grosses écailles imbriquées, cornées, et d'origine épidermique. Le nombre des écailles dorsales (distribuées symétriquement en rangées longitudinales) varie suivant les espèces. La pilosité est réduite, sauf aux endroits dépourvus d'écailles; de rares poils peuvent accompagner les écailles.

Les pattes sont plantigrades et pentadactyles, avec des doigts pourvus de robustes griffes. La longueur du corps varie de près de 30 cm à 90 cm; la queue a la même taille. Le poids des adultes varie de 5 à 27 kg. Chez certaines espèces, la queue est préhensile, adaptée à la vie arboricole. Rappelons, enfin, que les pangolins peuvent se rouler en boule, la queue entourant le corps.

Le crâne est moins allongé que chez les fourmiliers. Les branches mandibulaires sont en forme de bâtonnets, les processus angulaire et coronoïde étant peu développés. La colonne vertébrale compte de 19 à 22 vertèbres thoraco-lombaires et de 3 à 5 vertèbres sacrées; les vertèbres caudales sont très nombreuses, au nombre de 26 au minimum; *Manis tetradactyla* en possède 49, chiffre record chez les Mammifères. Le sternum présente un développement particulier du xyphisternum, sur lequel s'insère la langue. Il n'y a pas de clavicule. Le cerveau, macrosmatique, est de volume et de poids très peu importants par rapport à la taille de l'Animal (environ 0,3 % du poids corporel). L'odorat est très développé. Les pavillons auriculaires sont petits ou absents.

La langue est très longue, vermiforme, assez aplatie à l'extrémité et protractile; comme chez les fourmiliers, les glandes salivaires, très développées, produisent une substance muqueuse abondante, qui permet à l'Animal de capturer par engluement des fourmis, des termites et d'autres Insectes.

▶ *Représentation schématique du crâne d'un pangolin malais ou de Java* (Manis javanica), *vu de côté (A), avec la mandibule (A 1), de dessus (B), de dessous (C), par la face arrière (D).*

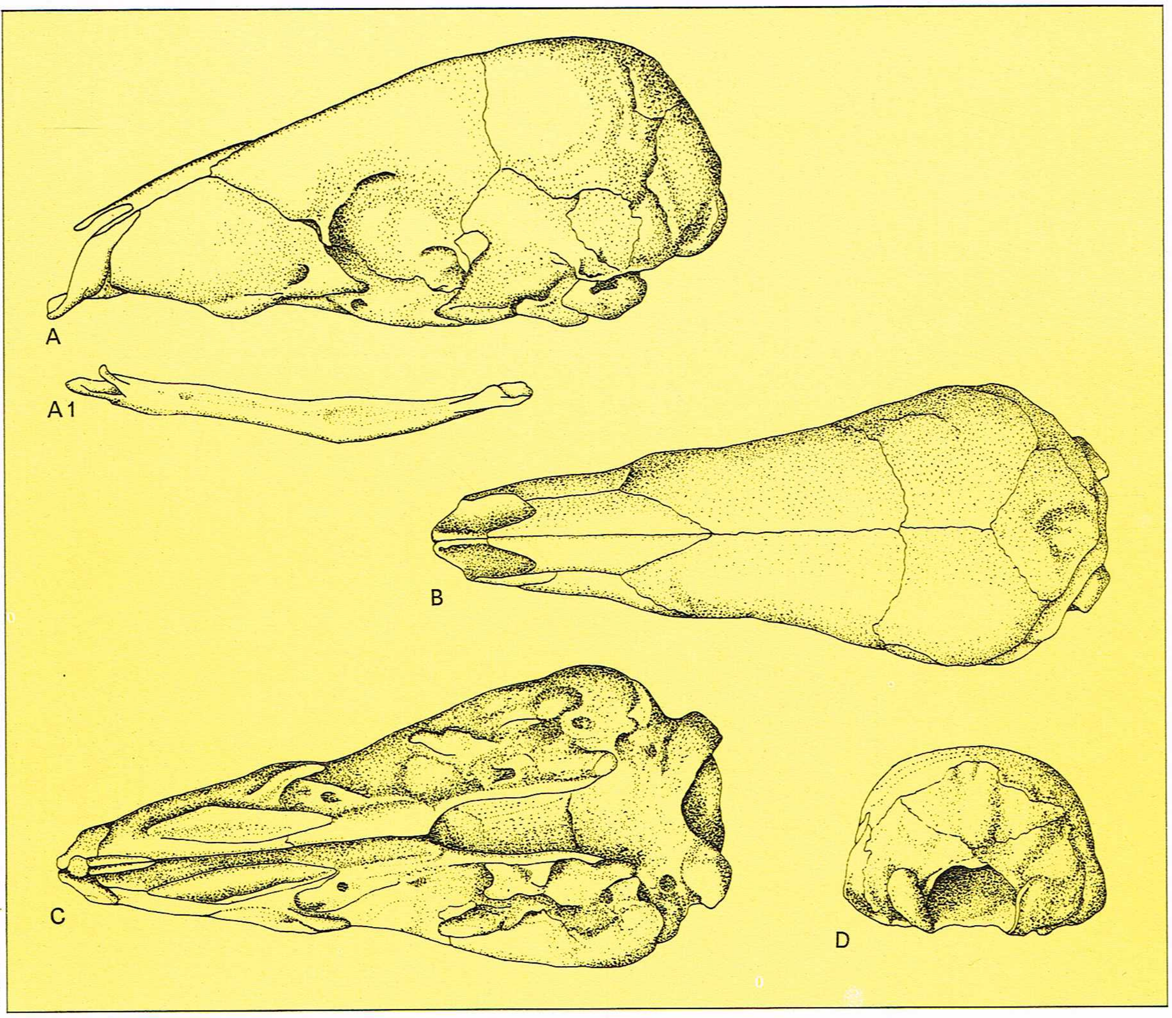

La denture est totalement absente, et il est peu probable qu'il en existe une ébauche chez les embryons. L'estomac, en forme de cornemuse, a une morphologie très spéciale : il est revêtu intérieurement d'un épithélium kératinisé, à plusieurs replis, les glandes étant disposées par groupes. Au niveau du pylore, à la partie supérieure, la paroi gastrique est plus épaisse et forme une proéminence recouverte de denticules cornées, l'ensemble servant d'organe de trituration. Tout l'estomac est recouvert d'une forte musculature, circulaire et longitudinale. Ces structures servent à la trituration de la masse d'Insectes que l'Animal ingère sans aucune mastication. Il n'existe pas de cæcum.

L'appareil génital femelle est très simple ; l'utérus est bicorne. Le placenta est de type diffus et décidué ; l'allantoïde est énorme. Les femelles possèdent deux mamelles axillaires. Elles n'ont qu'un petit à la fois, qu'elles portent longtemps sur le dos ou à la base de la queue. Chez le mâle, les testicules sont sous-cutanés, en dehors du canal inguinal.

Comme les fourmiliers, les pangolins se nourrissent presque exclusivement de fourmis et de termites, qu'ils débusquent de leur nid à l'aide de leurs robustes griffes. Nocturnes, ils se roulent pendant le jour en un lieu écarté, où ils dorment, les espèces arboricoles dans un trou d'arbre, et les espèces terricoles dans une tanière qu'elles creusent. Ils peuvent marcher en position bipède, en s'appuyant sur leur queue, et l'arrière-train soulevé. Ces Mammifères habitent généralement les zones forestières, surtout les forêts-galeries ; cependant certaines espèces vivent dans les zones découvertes.

L'ordre des Pholidotes comprend l'unique famille des **Manidés** *(Manidae),* dont le seul genre, *Manis,* compte sept espèces des régions tropicales d'Afrique et d'Asie du Sud-Est. C'est un groupe très homogène, bien qu'il existe de légères différences morphologiques et anatomiques entre les espèces africaines et asiatiques. Ces dernières, qui sont au nombre de trois, présentent sur la queue une rangée médiane d'écailles ; les rangées dorsales sont symétriques, à quelques exceptions près. Des poils persistent à la base des écailles chez les adultes. Les oreilles sont plus ou moins développées, et le xyphisternum est en forme de boule. Ces trois espèces sont : le pangolin de Chine, ou pentadactyle *(M. pentadactyla),* long de 80 cm, dont la queue mesure 45 cm, et qui habite l'Asie sud-orientale ; le pangolin indien ou à grosse queue *(M. crassicaudata),* de même taille que le précédent, et qui vit dans la péninsule indienne et Ceylan ; enfin, le pangolin de Malaisie ou de Java *(M. javanica),* répandu en Birmanie, en Indochine, dans l'archipel malais et les Philippines occidentales.

Chez les quatre espèces africaines, les rangées dorsales d'écailles sont situées au niveau de la queue, non symétriques, et la rangée centrale ne va pas jusqu'au bout ; les adultes n'ont pas de poils à la base des écailles ; il n'y a pas de pavillons auriculaires ; le xyphisternum est très allongé. Le pangolin commun, ou petit pangolin *(M. tricuspis),* est très répandu dans les forêts d'Afrique tropicale. Il est long de 40 cm environ et sa queue, préhensile, mesure plus de 50 cm ; il est arboricole ; son tronc porte de 19 à 22 rangées d'écailles. Le pangolin à longue queue, ou tétradactyle *(M. tetradactyla,* ou *longicaudata),* est également arboricole et à queue préhensile ; il mesure environ 40 cm de longueur ; son corps porte de 10 à 13 rangées d'écailles ; il vit aussi en Afrique occidentale. Le pangolin géant *(M. gigantea),* long de 80 cm, possède une queue large et relativement courte (65 cm de longueur) ; les écailles sont très grosses sur le dos, et sur le tronc il en existe de 15 à 17 rangées ; il pèse jusqu'à 30 kg ; il habite les savanes et les broussailles d'Afrique centro-occidentale. La dernière espèce, le pangolin terrestre, ou de terrier *(M. temminckii),* est trapue ; sa queue, large et déprimée, est courte et arrondie à l'extrémité ; l'Animal se déplace à demi dressé, au lieu de marcher en s'appuyant sur les pattes avant et sur la queue ; il habite l'Afrique de l'Est et du Sud.

Ordre des Lagomorphes ou Duplicidentés

L'ordre des Lagomorphes *(Lagomorpha)*, ou Duplicidentés *(Duplicidenta)*, est un petit ordre de Mammifères qui joue dans la nature un rôle important. Le type morphologique fondamental est celui du lièvre et du lapin (Léporidés), auquel s'ajoute une seconde famille, d'aspect différent, mais secondaire du point de vue numérique.

Ces Animaux de taille moyenne (12 à 75 cm de long) ont une queue courte sinon absente, une fourrure très touffue, formée de bourre fine et serrée avec un jarre diversement développé. Chez certaines espèces, la robe change de couleur en fonction des saisons, devenant plus fournie et blanche en hiver ; ce sont *Lepus arcticus*, ou lièvre arctique, *L. americanus*, ou lièvre américain, et *L. timidus*, ou lièvre variable des Alpes. Le changement de couleur intervient à la suite d'une mue, *L. americanus* présentant, pour sa part, trois mues, dont deux en automne (la première donnant un poil coloré et la seconde un poil blanc), et une au printemps, avec chute du poil blanc et formation de la nouvelle fourrure d'été. Les mues sont déterminées non par la température, mais par la durée d'éclairement quotidien : il s'agit d'un cas de photopériodisme. Chez *L. timidus*, en outre, le déclenchement de la seconde mue automnale dépend des situations géographiques diverses des nombreuses races.

On observe de nombreuses glandes sébacées alvéolaires, mais pas de glandes tubulaires sudoripares : il existe aussi des glandes tégumentaires spécialisées (inguinales, paraproctodéales chez *Oryctolagus*, etc.).

Les vibrisses sont nombreuses et bien développées sur le museau ; celui-ci comporte une zone glabre (rhinarium) autour des narines qui s'étend à la lèvre avec une forme typique en Y : les narines se trouvent sur les branches divergentes du Y, la branche principale fendant verticalement la lèvre supérieure jusqu'aux incisives. Sur les bords de la lèvre supérieure ainsi qu'à la lèvre inférieure se trouvent des lobes couverts de poils courts ; une bande recouverte de poils existe aussi dans la cavité buccale, le long de chaque joue, à la hauteur des molaires.

Les membres antérieurs ont toujours cinq doigts, le troisième étant peu développé, et le premier réduit à une griffe ; les membres postérieurs sont pentadactyles chez les Léporidés (le premier doigt étant réduit) et tétradactyles chez les Ochotonidés, seconde famille de l'ordre.

Le splanchnocrâne est relativement développé par rapport au neurocrâne ; les orbites sont amples ; les os maxillaires sont grands et criblés de trous, surtout chez les Léporidés ; les bulles tympaniques sont formées par l'os ectotympanique, l'endotympanique semblant manquer ; le palais osseux est réduit à un pont transversal étroit. Les Ochotonidés ont le crâne aplati, nettement différent de celui des Léporidés. La mandibule, dont les branches s'unissent par une longue et solide symphyse médiane, effectue des mouvements antéro-postérieurs, pour ronger, et latéraux, pour mastiquer. Contrairement à celle des Rongeurs, la cavité glénoïde est relativement large dans le sens transversal ; l'omoplate est très rétrécie en avant, avec un acromion long et étroit ; le radius et le cubitus sont généralement bien distincts, bien qu'ils soient en contact sur une longue portion et puissent être plus ou moins soudés ; le cubitus est très réduit chez *Lepus* ; les os du carpe sont au nombre de neuf ; le bassin des Ochotonidés ne possède pas de symphyse pubienne ; le tibia et le péroné sont plus ou moins soudés dans leur portion distale ; les métatarsiens sont longs.

Les dents de lait sont complètement remplacées au bout d'environ 18 jours. Dans la denture définitive, les incisives sont très grosses, arquées et en saillie, implantées dans des alvéoles moins profonds que ceux des Rongeurs. Il y a deux paires d'incisives à la mâchoire supérieure, la seconde paire, plus petite, étant placée derrière la première. Ces incisives, comme celles de la mâchoire inférieure (une seule paire), ont une croissance continue ; cependant, contrairement à celles des Rongeurs, elles sont entièrement recouvertes d'émail. Cette croissance, limitée par l'usure continuelle, est importante : chez le lapin domestique, elle serait de 2 mm par semaine pour les incisives supérieures, et de 2,5 mm pour les inférieures, soit respectivement environ 10,5 cm et 12,5 cm par an. Les prémolaires et les molaires sont prismatiques ou cylindriques, sans racines et à croissance continue.

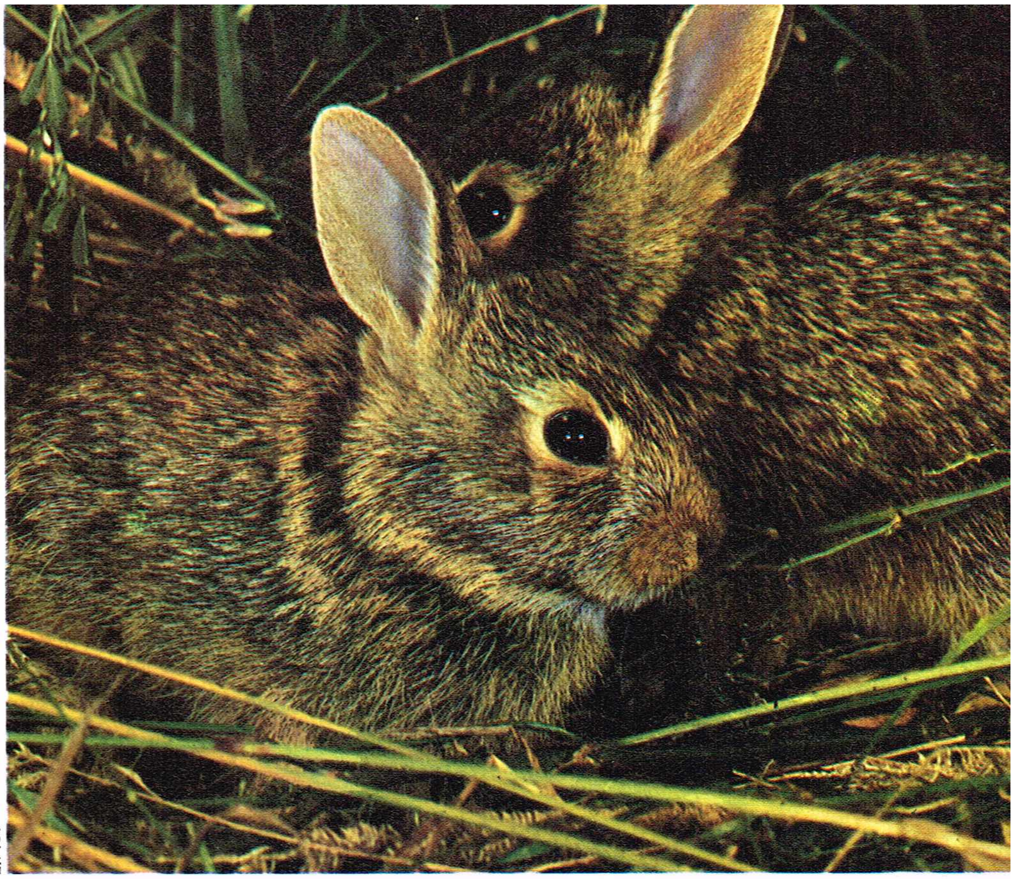

E.P.S.

▲ ***Deux Léporidés du genre** Sylvilagus **d'Amérique du Nord et du Sud ; ces Animaux appartiennent à l'ordre des Lagomorphes, dont la distribution, à présent, est cosmopolite.***

▼ ***Représentation schématique du crâne et de la mandibule du lièvre européen*** **(Lepus europaeus)**, ***vus de côté (A) et par-dessous (B) ;***
is, incisives supérieures ;
ii, incisives inférieures ; pm, prémolaires ; mo, molaires ; pmx, prémaxillaires ;
na, nasal ; ju, jugal ; fr, frontal ; ap, apophyse postorbitaire ; pa, pariétal ;
sq, squamosal ; so, supra-occipital ;
ty, tympanique ; co, condyle occipital ;
ma, mastoïde ; bu, bulle tympanique.

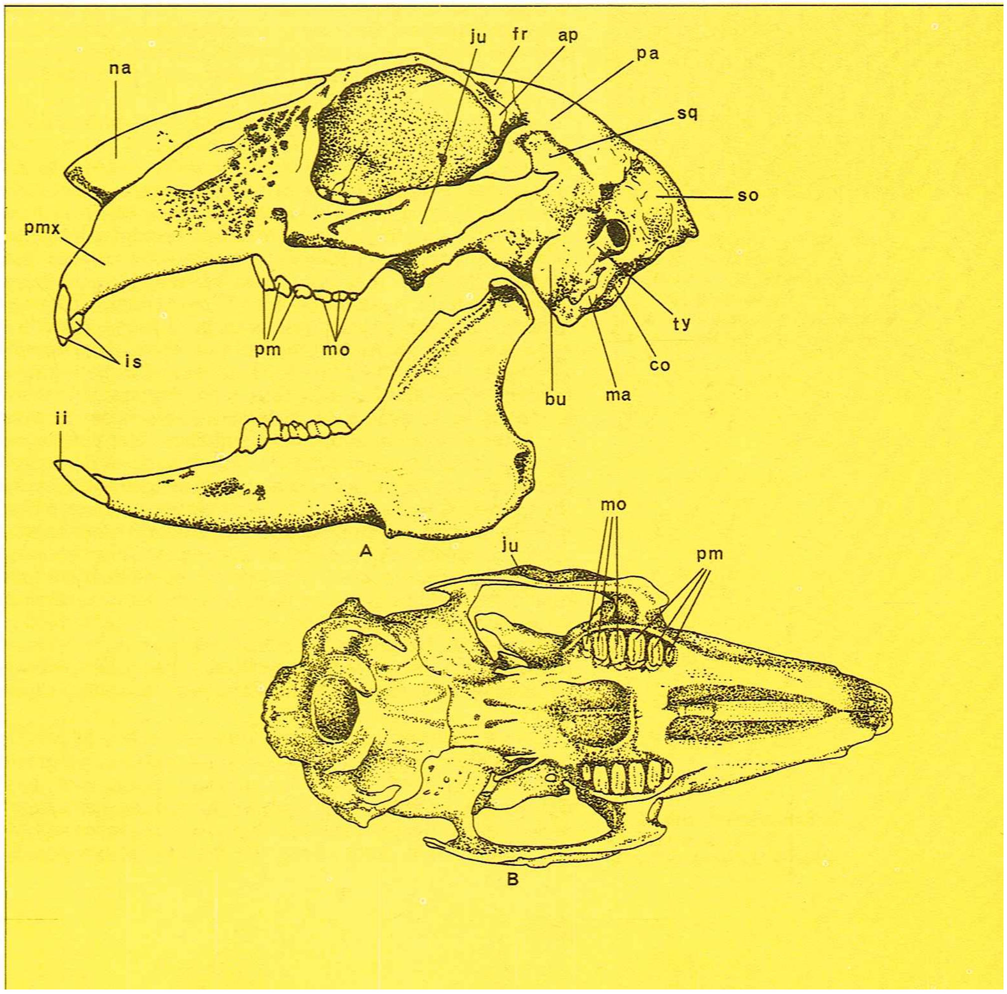

I.G.D.A.

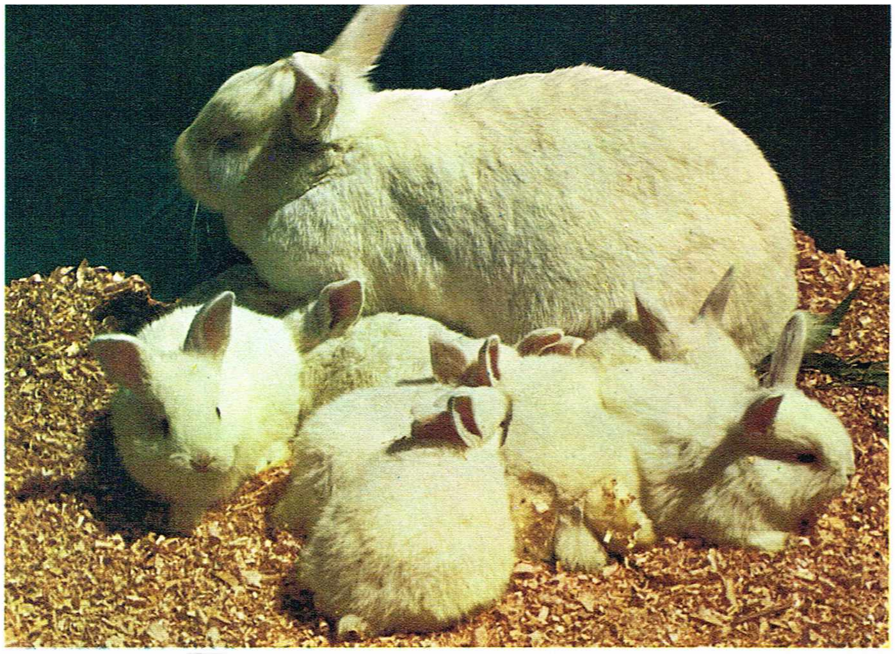

E.P.S.

▲ ***Chez les Léporidés, le rythme de la reproduction est intense; la femelle de lapin creuse un terrier spécial, ou « rabouillère », pour mettre bas.***

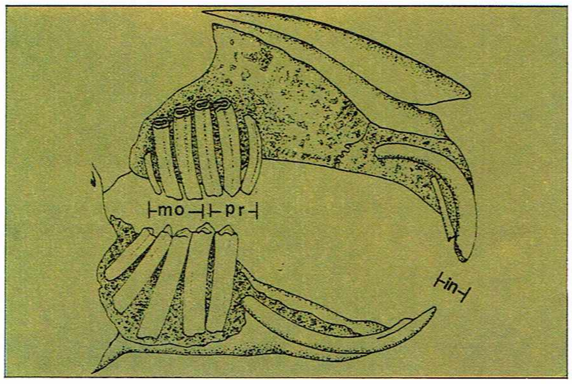

I.G.D.A.

▶ ***Coupe longitudinale des mâchoires d'un lièvre montrant la position et la taille des dents : mo, molaires; pr, prémolaires; in, incisives.***

Les glandes salivaires sont normalement développées. L'estomac est un sac très allongé, à revêtement entièrement muqueux. Le canal de Wirsung débouche dans le duodénum en arrière du canal cholédoque. Le cæcum, énorme, qui est la partie la plus volumineuse de l'intestin, a, chez le lapin, une capacité équivalente à dix fois environ celle de l'estomac. Dans le cæcum se trouvent une valvule spiralée, ainsi qu'une autre valvule : ces deux organes, qui commandent le passage des aliments dans le côlon, provoqueraient leur stase cæcale.

Les Léporidés présentent le curieux phénomène de la cæcotrophie (coprophagie physiologique), que l'on observe aussi chez de nombreux Rongeurs : la plus grande partie des aliments (environ 80 %) passe deux fois par le tube digestif. Chez le lapin, par exemple, les crottes sèches que l'on trouve dans les clapiers sont déféquées seulement pendant le jour; la nuit, l'Animal expulse des crottes différentes, boules molles et humides entourées de mucus, d'un diamètre de 2 à 12 mm; lorsque celles-ci sortent de l'anus, le lapin les prend avec ses lèvres et les avale sans les mastiquer; le matin, elles peuvent représenter la moitié du contenu gastrique. On pense que les Léporidés réussissent grâce à ce processus insolite à récupérer la précieuse vitamine B élaborée par les Bactéries de leur cæcum, ainsi qu'à utiliser, lors du second passage dans l'intestin grêle, les produits de dégradation de la cellulose élaborés sous l'action de la flore bactérienne du cæcum. C'est en raison de cette cæcotrophie que l'on qualifie aussi ces Lagomorphes de « pseudo-ruminants ».

Les poumons sont constitués par quatre lobes à droite et trois à gauche. Les reins possèdent seulement une pyramide de Malpighi. Les testicules sont intra-abdominaux et ne descendent dans un scrotum que pendant la phase active. Le placenta est discoïdal. Le rythme de la reproduction est intense et présente des phénomènes complexes que nous verrons dans les descriptions par genre.

De nombreuses espèces ont une vie sociale, la mieux connue étant celle du lapin de garenne. Les mâles de cette espèce sont dominants, chacun ayant une aire d'influence. La polygamie semble être de règle. Les stimuli et les communications, surtout ceux qui concernent la sexualité, se font, entre autres, par le « tambourinement », qui consiste en battements pressés et répétés des pattes postérieures sur le sol (on observe les mêmes mœurs chez certains Rongeurs).

Les Lagomorphes actuels comptent deux familles, les Léporidés et les Ochotonidés, avec au total dix genres et soixante-quatre espèces. Leur distribution géographique naturelle couvre le monde entier, sauf l'Australie, Madagascar, les Philippines, de nombreuses îles de l'Asie du Sud-Est, les Antilles et quelques autres groupes insulaires. Introduits par l'homme dans ces régions, ils sont à présent cosmopolites.

Les **Léporidés** *(Leporidae)* comprennent les lapins, les lièvres, et les espèces proches; leur formule dentaire est : $\left(I\,\frac{2}{1};\ C\,\frac{0}{0};\ Pm\,\frac{3}{2};\ M\,\frac{2\text{-}3}{3}\right) \times 2 = 26$ ou 28. Les oreilles sont longues et étroites, la queue courte, les pattes postérieures plus longues et plus robustes que les antérieures. Ils possèdent 19 vertèbres thoraco-lombaires et leurs clavicules sont rudimentaires. Ce sont généralement des Animaux coureurs et sauteurs. Leur longueur varie de 25 cm à 75 cm.

Les Léporidés habitent les forêts, les zones buissonneuses, les prairies, les toundras et les montagnes. Ils comptent neuf genres et cinquante espèces, classés en deux sous-familles : les Paléolaginés et les Léporinés.

La sous-famille des *Paléolaginés* comprend de nombreuses formes fossiles et quatre genres exotiques actuels.

Pentalagus, à caractères aberrants, possède seulement 2 molaires supérieures; il a des oreilles et des pieds courts; son pelage est rude. Il compte une seule espèce : *P. furnessi,* qui habite les îles Ryu-Kyu.

Le genre *Pronolagus,* plus léporin, avec une fourrure rousse, compte quatre espèces, d'Afrique orientale et du Sud, notamment, *P. crassicaudatus.* Ce sont des formes rupicoles, qui mesurent jusqu'à 50 cm et vivent dans des zones rocheuses à refuges commodes; ils se livrent à des manifestations vocales quand ils sont inquiétés.

Poelagus majorita, ou lièvre des buissons, ou des broussailles, vit au Soudan, en Ouganda et au Zaïre, dans les savanes et les forêts. Proche de l'espèce précédente, il a cependant des yeux assez petits et des pattes courtes.

Le dernier genre, *Romerolagus,* de petite taille (30 cm de long), présente des oreilles courtes et arrondies et une queue presque totalement absente. L'unique espèce est *R. diazi :* il s'agit sans doute d'une forme survivante, car on ne la trouve que dans une petite zone volcanique, longue de 40 km environ, située à 50 km au sud-est de Mexico, jusqu'à 3 600 m d'altitude. C'est un Animal nocturne, qui semble étroitement lié à certaines associations végétales de cette zone.

La sous-famille des *Léporinés* compte cinq genres, parmi lesquels les formes les plus typiques sont notamment le lièvre et le lapin.

Le genre *Lepus* compte environ vingt-six espèces, répandues dans une grande partie de l'aire de la famille, mais absentes en Amérique du Sud et dans une partie de l'Afrique centro-occidentale. Leurs oreilles sont plus longues que la tête; les pattes arrière et les pieds sont longs, avec les soles recouvertes de poils. Les petits naissent couverts de poils et les yeux ouverts.

Le lièvre d'Europe ou commun *(Lepus europaeus)* est l'espèce la plus répandue dans nos régions. Il est long de 50 à 70 cm. Son corps est élancé et comprimé latéralement. Sa tête est assez petite et bien distincte du corps. Ses yeux sont grands, ses oreilles longues (9 à 14 cm), et sa queue mesure un peu moins de 10 cm. Les pattes postérieures sont beaucoup plus longues que les antérieures, le troisième doigt de celles-ci étant le plus long. Les surfaces palmaires et plantaires sont pileuses et dépourvues de callosités. La couleur dominante de la robe est fauve grisâtre, avec du noir sur le dos; les extrémités sont bordées de noir, et la queue est blanche en dessous. Se nourrissant de toutes sortes de Végétaux, il aime les terrains plats et fréquente les zones cultivées, ainsi que les forêts; on le trouve jusqu'à 2 000 m d'altitude. Sédentaire et solitaire, essentiellement nocturne, il sort de son gîte le jour, là où il n'est pas chassé. Il accomplit de très longs sauts et court rapidement et longtemps, avec des écarts imprévus. Ne creusant pas de terrier, il se repose dans un gîte sec et abrité, dont il change de temps en temps. Chaque femelle met au monde de 1 à 4 petits par portée, deux, trois ou quatre fois par an, de mars à

J. Markham

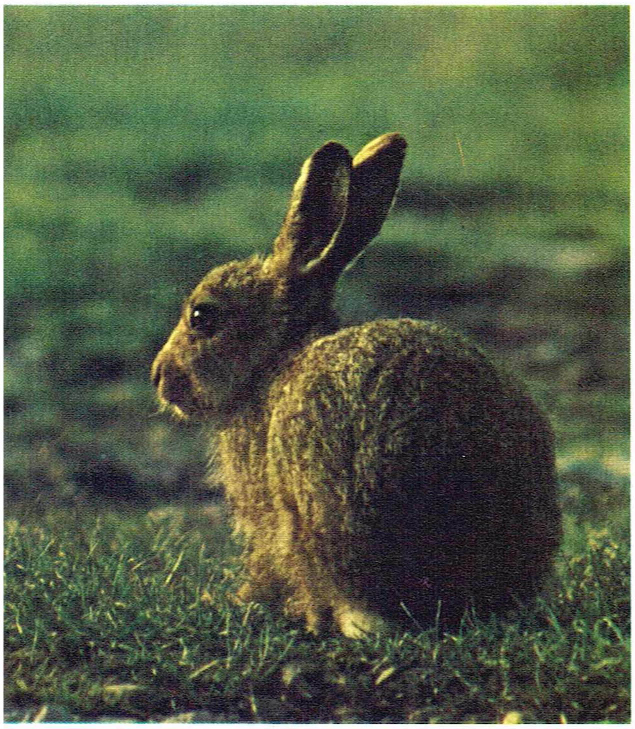

Tiofoto

◀ **Lepus europaeus,** ***le lièvre commun, est l'espèce la plus répandue dans nos régions; en haut, un très jeune lièvre (les petits naissent couverts de poils et les yeux ouverts); au-dessous, un juvénile de la même espèce.***

octobre. La durée de la gestation, qui atteint environ 41 jours, a été difficile à déterminer à cause du phénomène de « superfœtation » : en effet, fréquemment, les femelles sont refécondées 2 à 3 jours après la mise bas. La longévité de l'espèce est de 10 à 12 ans.

L. capensis, le lièvre ibérique, ou sarde, ou encore méditerranéen, largement répandu en Afrique et en Asie (ainsi que dans le sud de l'Espagne à partir de Burgos, au Portugal, aux îles Baléares et en Sardaigne), diffère du précédent par une plus petite taille; certains auteurs pourtant rassemblent les deux espèces en une seule.

Le lièvre variable *(L. timidus)* mesure de 46 à 60 cm de long; moins élancé que *L. europaeus,* il a surtout des oreilles et une queue plus courtes, et une fourrure plus touffue. En été, sa couleur dominante est un mélange de bruns grisâtres, alors qu'en hiver, il devient blanc ou gris pâle, l'extrémité des oreilles restant noire. Dans nos régions, il vit dans les Alpes au-dessus de 1 200 m d'altitude, habitant les forêts pendant l'hiver. Il supporte bien le climat de haute montagne et se laisse parfois recouvrir par la neige. Il est nocturne. Les femelles mettent bas, de mai à août, de 2 à 5 petits par portée. Le lièvre variable vit de 10 à 12 ans.

Le genre *Lepus* comprend encore le lièvre variable d'Amérique du Nord *(L. americanus)* et le lièvre variable arctique *(L. arcticus)*. Signalons également le lièvre de Californie, ou Jack rabbit *(L. californicus),* long de 70 cm, qui a des pattes postérieures très développées, des oreilles énormes, ainsi qu'une queue plus longue que celle des autres lièvres et pendante; il vit dans les zones arides et désertiques des États-Unis, en nombre très important; enfin, *L. alleni,* ou Jack rabbit antilope, est très proche du précédent.

Le lapin *(Oryctolagus cuniculus),* originaire du Bassin méditerranéen, s'est répandu dans divers continents, notamment en Australie où il constitue un véritable fléau (rappelons que, pour le combattre dans ce pays, on a déclenché une épidémie de myxomatose qui, en se propageant au monde entier, a provoqué une autre catastrophe). Le lapin est plus trapu et moins élancé que les lièvres, et a les oreilles plus courtes; sa couleur est un mélange de brun clair, de roux, de gris et de poils noirs; sa nuque porte une tache fauve-roux; ses flancs sont plus gris, son dessous est blanchâtre, sa queue noire sur le dessus. Il fréquente les plaines et les collines, de préférence sèches et sablonneuses, recouvertes de buissons, de maquis, etc. Grégaire, crépusculaire, il se repose le jour dans des terriers très complexes, qui abritent un seul couple. Lorsqu'elles sont gravides, les femelles creusent un terrier spécial, ou « rabouillère », pour y mettre bas; elles ont de 5 à 6 petits par portée.

Le genre *Sylvilagus* compte treize espèces, d'Amérique du Nord et du Sud (jusqu'à l'Argentine). Vivant plutôt dans les zones arides, ces Léporidés ne creusent pas de terriers (sauf les femelles, qui creusent un nid peu profond pour abriter les petits). Il s'agit, entre autres, du lapin queue de coton *(S. floridanus),* qui, à cause de sa grande prolificité, constitue un fléau pour les cultures aux États-Unis.

Citons, enfin, les genres *Caprolagus,* de l'Himalaya, et *Nesolagus,* avec pour seule espèce *N. netscheri,* rare, habitant uniquement les forêts de montagne de Sumatra; ce dernier a pour particularité des oreilles très courtes et une fourrure à dessin bien net, composé de taches et de larges bandes noires longitudinales.

Les **Ochotonidés** *(Ochotonidae)* sont les pikas, ou lièvres siffleurs, dont il existe un seul genre, *Ochotona,* avec douze espèces habitant l'Asie, du sud-est de la Russie à la Sibérie, au Kamtchatka et à l'Himalaya, ainsi que deux espèces des montagnes d'Amérique du Nord. De petite taille (12 à 13 cm de long), dépourvus de queue, ils ont des oreilles courtes et arrondies. Leur crâne est aplati, leur palais osseux court, leurs clavicules complètes; ils ne possèdent pas de symphyse pubienne. On observera que les pattes postérieures sont sensiblement égales aux pattes antérieures. Leur formule dentaire est : $\left(\mathrm{I}\,\frac{2}{1};\ \mathrm{C}\,\frac{0}{0};\ \mathrm{Pm}\,\frac{3}{2};\ \mathrm{M}\,\frac{2}{3}\right) \times 2 = 26.$

L'une des espèces les mieux connues est *O. princeps,* des montagnes Rocheuses, longue d'environ 20 cm. Elle se nourrit, comme la plupart des autres espèces de haute montagne, de végétaux secs, qu'elle emmagasine dans sa tanière.

Ostman - J.R. Simon

▲ **Oryctolagus cuniculus,** ***le lapin, originaire du Bassin méditerranéen, est grégaire et crépusculaire, et fréquente les plaines et les collines.***

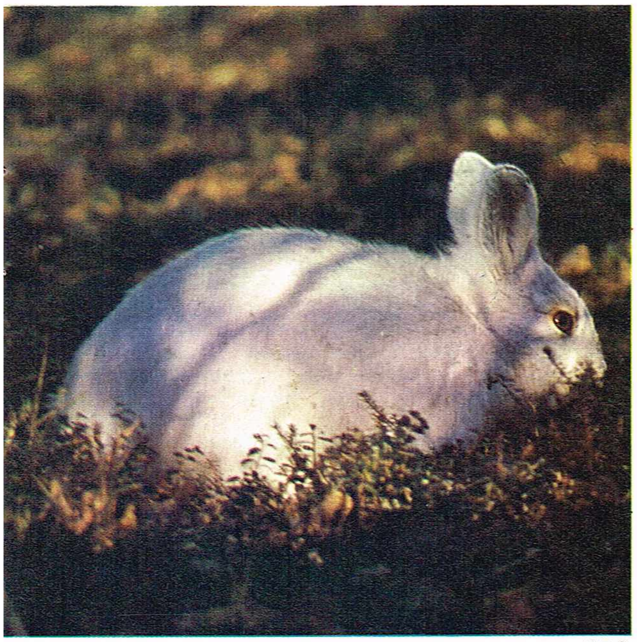

E.P.S.

◀ **Lepus americanus,** ***le lièvre variable d'Amérique du Nord.***

F

J. Markham

▶ *Les Rongeurs sont des Euthériens de taille souvent petite; certains sont spécialisés pour la course, d'autres sont adaptés à la vie arboricole comme cet écureuil gris* (Sciurus carolinensis) *dont la distribution géographique est importante.*

Ordre des Rongeurs

Les Rongeurs *(Rodentia)*, ou Simplicidentés, sont des Euthériens de taille très variable, le plus souvent petite; cependant, le capibara atteint 1,20 m de long et pèse 50 kg. Ils sont le plus souvent trapus; la partie inférieure du tronc est typiquement volumineuse, du fait du développement particulier de la masse des viscères. Les pattes sont généralement peu distinctes du corps. Le type fondamental est représenté par le rat d'égout, dépourvu de spécialisation morphologique; toutefois, dans les différentes familles, on constate des adaptations morphologiques progressives liées aux modes de vie les plus divers, souterrains, aquatiques, arboricoles, etc.; ces évolutions ont produit toute une variété de types spécialisés.

Le type fouisseur est représenté par des formes plus trapues que les autres, caractérisées par des pavillons auriculaires et des yeux plus réduits, une queue rudimentaire ou absente, les incisives et les griffes des pattes antérieures plus développées, ainsi que par d'autres caractères particuliers. Il existe, naturellement, toute une gamme de formes intermédiaires (arvicoles, par exemple) et même des formes extrêmes, talpoïdes *(Spalax)*, ou aveugles.

Les formes steppiques et désertiques présentent, pour leur part, un plus grand développement des yeux et des oreilles, ainsi qu'un allongement des métatarses et de la queue (Gerbillidés et certains Muridés australiens). Il existe même des formes spécialisées pour le saut, que nous qualifierons de kangouroïdes, dont les membres postérieurs sont plus longs que les antérieurs, et qui présentent une réduction numérique des doigts, comme chez les Dipodidés (on observe, à ce sujet, d'intéressants parallélismes par rapport aux Marsupiaux et aux Insectivores).

Certains Rongeurs sont spécialisés en vue de la course, d'autres, encore, sont adaptés à une vie arboricole, en particulier, les espèces pourvues d'un patagium et capables de planer (les Pétauristinés et les Anomaluridés).

La fourrure des Rongeurs est très variable, étant constituée de poils rudes ou fins combinés dans les proportions les plus diverses. Elle est plus grossière chez les Muridés, plus fine chez les formes souterraines ou déserticoles; il existe parfois des soies spinuleuses et même des véritables piquants (Éréthizontidés et Hystricidés). On observe (par exemple sur la queue des Muridés) la présence d'écailles épidermiques, caractère vraisemblablement archaïque.

La peau ne présente jamais de glandes tubulaires sudoripares, mais seulement des glandes alvéolaires sébacées. Chez les Cricétidés et les Microtidés, il existe des glandes spéciales sur les flancs, de type sébacé, à sécrétion holocrine, grasse et odorante, ayant certainement un rôle dans l'attraction sexuelle. On observe, enfin, de nombreuses glandes spécialisées (anales, périanales, périnéales, etc.).

La conformation des mains et des pieds, fondamentalement pentadactyles, est si variée qu'il est impossible de citer ici tous les cas. En règle générale, les mains et les pieds sont larges, les pattes postérieures présentant une conformation plantigrade plus accentuée; le cinquième doigt a souvent subi une importante réduction. Le genre *Dolichotis* est adapté à la course rapide sur sol dur. Les formes aquatiques, le castor, par exemple, ont des pattes palmées.

La queue est très variable : chez certaines espèces (par exemple, chez *Muscardinus* et *Apodemus*), elle est autonome et se détache dès qu'on la saisit.

Le crâne est généralement bas et allongé. La voûte crânienne comporte souvent un os interpariétal, les pariétaux étant réduits. Le palais osseux est étroit et, en conséquence, les rangées de dents maxillaires sont proches. Les os nasaux, lacrymaux et maxillaires sont allongés; la fosse temporale n'est pas entièrement circonscrite par des os. Les maxillaires présentent un foramen infra-orbitaire, parfois très large, traversé par un gros faisceau du muscle masséter. L'apophyse angulaire de la mandibule peut être tournée soit vers l'extérieur (type hystricognathe) du fait de l'insertion du masséter, soit, au contraire, vers l'intérieur (type sciurognathe) par suite de l'absence de cette insertion. La mandibule exécute des mouvements antéro-postérieurs et de courts mouvements latéraux.

Le nombre des vertèbres est variable, surtout en fonction du développement de la queue. Certaines vertèbres cervicales peuvent se souder. Il y a généralement 19 vertèbres thoraco-lombaires, dont 12 ou 13 costales et 6 ou 7 lombaires.

L'omoplate est assez étroite, avec un long acromion et une apophyse coracoïde courte. La clavicule est

généralement présente, mais peu développée, en particulier, chez les espèces adaptées à la course. Le radius et le cubitus ne sont jamais soudés, mais peuvent être étroitement serrés, perdant ainsi leur mobilité relative.

La symphyse pubienne est en général très restreinte. Le tibia et le péroné sont indépendants ou soudés de diverses façons; les métatarses des espèces sauteuses sont allongés et tendent à fusionner en un os canon commun, le pied pouvant alors devenir digitigrade.

L'habitude de ces Animaux de ronger est très évidemment en relation avec la denture, les os du crâne et la musculature masticatrice (le masséter est très développé) ; c'est pourquoi l'anatomie de ces parties du corps est utilisée en systématique. Il existe des lobes labiaux spéciaux, inférieurs et supérieurs, couverts de poils, qui pénètrent dans la bouche à peu près au niveau de la diastème dentaire. Il s'ensuit une division de la cavité buccale en deux chambres : l'une antérieure, limitée frontalement par les incisives, et l'autre postérieure, entièrement revêtue par la muqueuse buccale. Chez de nombreuses espèces, la chambre antérieure se continue par de volumineuses invaginations, ou abajoues, où l'Animal accumule de la nourriture qu'il rapporte dans sa tanière.

En ce qui concerne la denture, notons la présence constante de robustes incisives $\left(I\,\frac{1}{1}\right)$ avec des surfaces d'usure en onglet, l'absence de canines, la variété des dents maxillaires, avec également une grande diversité des reliefs sur les faces occlusales. Il y a une tendance générale vers la monophyodontie.

L'estomac est simple, sauf chez les Muridés, qui présentent une partie pylorique et une partie cardiale. L'intestin est long, et il y a toujours un cæcum bien développé ; le foie est généralement pentalobé. La cæcotrophie est assez répandue. De nombreuses espèces sont dépourvues de vésicule biliaire. Le poumon droit est généralement tétralobé et le gauche trilobé.

▲ ***Groupe de mulots gris* (Apodemus sylvaticus), *espèce dont les larges fluctuations numériques semblent suivre celles de ses prédateurs (Carnivores, Rapaces, Ophidiens).***

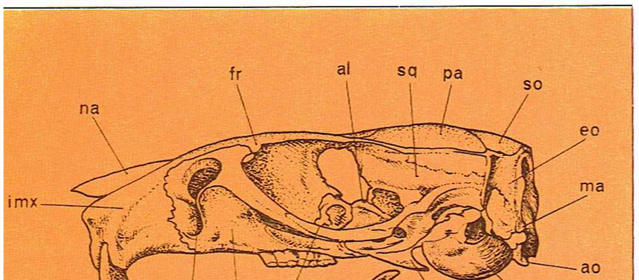

I.G.D.A.

◀ ***Représentation schématique du crâne et de la mandibule d'un rat noir* (Rattus rattus), *vus de côté (A), et ventralement (B); imx, intermaxillaire et prémaxillaire; na, nasal; fr, frontal; al, alisphénoïde; sq, squamosal; pa, pariétal; so, supra-occipital; eo, exoccipital; ma, mastoïdien; ao, apophyse para-occipitale; bt, bulle tympanique; ac, apophyse condyloïde; ap, apophyse ptérygoïde; ju, jugal; mx, maxillaire; ci, canal infra-orbitaire; in, incisives; sy, symphyse mandibulaire; co, condyle; aa, apophyse angulaire; ti, trou incisif; fp, foramen palatin; pt, palatin; pr, présphénoïde; ca, canal alisphénoïde; fg, fosse glénoïde; cc, canal carotidien; fc, foramen occipital; bo, os basi-occipital; bs, basi-sphénoïde; tdp, trou déchiré postérieur; tda, trou déchiré antérieur; fo, foramen ovale.***

Les Rongeurs sont macrosmatiques et ont un rhinencéphale très développé; l'encéphale est allongé, avec des hémisphères cérébraux lisses chez les petites espèces, et plus complexes chez les grandes. Le sens principal est l'odorat, mais la vue et l'ouïe sont également fines.

Les testicules sont intra-abdominaux, mais descendent dans un scrotum à l'époque de la reproduction; chez la plupart des espèces, il existe un os pénien. L'utérus est bicorne, mais il peut y avoir deux utérus séparés (par exemple, chez les viscaches). Le placenta est discoïdal et de type hémo-chorial labyrinthique.

La polyœstrie est de règle. La gestation est de courte durée et les petits mis au monde sont généralement nombreux, plusieurs portées étant observées annuellement. Les nouveau-nés sont tout à fait incapables de se mouvoir ; chez les Sciuroïdés et les Muroïdés, ils sont nidicoles, ont les yeux clos et présentent une robe clairsemée; par contre, chez diverses familles exotiques, la progéniture est typiquement nidifuge.

Les Rongeurs vivent dans les milieux les plus divers et ont des mœurs extrêmement variées. Leur distribution géographique naturelle couvre le monde entier, y compris l'Australie (Muridés), mais excepté la Nouvelle-Zélande et certains archipels océaniques. Ils sont devenus cosmopolites à la suite de l'homme.

Ces Mammifères constituent un maillon essentiel de la chaîne alimentaire des Vertébrés terrestres. Leur prolificité est nécessaire pour compenser la pression prédatrice importante qu'ils subissent de la part de Carnivores, de Rapaces et d'Ophidiens, dont ils sont la nourriture principale. Inversement, en limitant la prolifération des Rongeurs, ces prédateurs assurent l'équilibre biologique de l'ordre. Ainsi, on observe pour nombre d'espèces de Rongeurs (*Lemmus, Microtus* et *Apodemus* par exemple) de larges fluctuations numériques, cycliques, suivies par celles des populations de prédateurs. Divers écureuils (*Sciurus carolinensis,* ou écureuil américain, et *S. vulgaris* du nord de la Russie) accusent ce même phénomène, et lorsque leur nombre s'accroît trop, effectuent d'importants déplacements d'une région à l'autre.

On pense que parmi les causes provoquant ces pullulements la quantité et la qualité de la nourriture jouent un rôle déterminant. En effet, les Végétaux élaborent des substances susceptibles d'accroître l'activité ovarienne

et le nombre des ovocytes produits dans l'organisme des femelles (chez les Rongeurs notamment) : par exemple au Brésil et à Madagascar, les années de plus grande abondance des rats coïncident avec la fructification des bambous. La courbe de population de ces Rongeurs, après avoir atteint un maximum, redescend brusquement, même en l'absence de maladie contagieuse et d'une pression prédatrice particulière.

Le surpeuplement entraîne de profondes perturbations du comportement, comme l'augmentation anormale et pathologique des contacts sociaux, la disparition des manifestations de l'instinct de territorialité individuelle et de groupe, l'augmentation de l'agressivité, ainsi qu'un accroissement de la concurrence pour les ressources alimentaires et, fait important, des conditions anormales de l'élevage des petits.

En ce qui concerne les rapports sociaux, on a constaté qu'un excès de messages sociaux entraîne dans la thyroïde et les cortico-surrénales, par l'intermédiaire du système nerveux, une série de réactions qui, en se répercutant dans tout le système neuro-endocrinien, modifient le comportement de l'individu et l'excitent pathologiquement. Ainsi la glycémie, qui, chez le campagnol des champs, varie généralement de 50 à 180 mg par 100 cm^3 de sang, descend à moins de 30 mg chez les individus épuisés, à la fin des périodes de pullulement. Ces phénomènes semblent plus importants que les maladies et l'action des prédateurs. Il est enfin inutile d'insister sur le caractère nocif de nombreux Rongeurs dans l'économie humaine.

La systématique très complexe des Rongeurs n'est pas définitive; cet inachèvement est dû non seulement au nombre et à la variété des espèces, mais aussi au faible nombre et au caractère fragmentaire des documents fossiles, lesquels ne permettent pas de dégager avec suffisamment de clarté les lignées évolutives et, par conséquent, les rapports phylogéniques entre les divers groupes. L'histoire de la mammalogie a connu divers systèmes de classification, aboutissant plus ou moins à la formulation qu'en a donnée, en 1945, Simpson, qui divise l'ordre en trois sous-ordres : les Sciuromorphes, les Myomorphes, et les Hystricomorphes. Dans l'état actuel de la science, la classification de Stehlin et de Schaub, adoptée par Grassé, est fondamentale; elle est essentiellement fondée sur la morphologie dentaire, élément primordial pour la détermination des affinités et divergences phylogéniques. C'est pour cette raison que nous lui donnerons la préférence. Dans cette classification les Rongeurs seront divisés en trois sous-ordres : Non-Pentalophodontes, Myodontes, Pentalophodontes. En ce qui concerne la précarité des groupes subordinaux constitués, on observera encore que l'ordre ne s'est peut-être pas développé par différenciation très ancienne en groupes phylogénétiques; c'est pourquoi une super-famille représenterait plus réellement le *status* effectif.

Sous-ordre des Non-Pentalophodontes

Les Non-Pentalophodontes *(Non-Pentalophodonta)* constituent un groupe très complexe et probablement assez peu naturel, caractérisé, notamment, par des molaires non comparables au type pentalophodonte. Ils comprennent les super-familles des Aplodontoïdés, des Sciuroïdés, des Éomyoïdés, des Gliroïdés, des Géomyoïdés et des Cténodactyloïdés.

Super-famille des Aplodontoïdés

Les Aplodontoïdés *(Aplodontoidea)* ne renferment qu'une seule famille.

Les **Aplodontidés** *(Aplodontidae)* forment un groupe très archaïque, dont la formule dentaire est :

$$\left(I\,\frac{1}{1};\ C\,\frac{0}{0};\ Pm\,\frac{2}{1};\ M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 22.$$

La première prémolaire supérieure est minuscule et à peu près cylindrique; les autres dents maxillaires ont une surface occlusale en forme de coquille, de type très particulier; les dents maxillaires sont dépourvues de racines.

Les Aplodontidés comprennent une seule espèce, *Aplodontia rufa,* connue sous le nom de castor de montagne, qui habite uniquement les régions forestières humides de l'ouest de l'Amérique du Nord, depuis la Colombie britannique jusqu'à la baie de San Francisco et la Sierra Nevada. Non grégaire, le castor de montagne fréquente les zones peu éloignées de l'eau et creuse de profondes tanières, parfois sur plusieurs dizaines de mètres. Il n'entre pas en léthargie.

Long de 30 à 40 cm, cet Animal est trapu, avec une tête aplatie, des oreilles très courtes et des petits yeux. Ses pattes sont pentadactyles, armées de grandes griffes. Sa queue est très courte et couverte de longs poils.

Super-famille des Sciuroïdés

Les Sciuroïdés *(Sciuroidea)* ne comprennent qu'une seule famille.

Les **Sciuridés** *(Sciuridae)* constituent un groupe très homogène, comprenant les écureuils, les marmottes et les formes très proches, à caractères dentaires archaïques. Le crâne est bombé, le museau court et les grandes cavités orbitaires sont délimitées en arrière par des apophyses bien développées. Les bulles tympaniques sont très proéminentes, avec un marteau et une enclume libres. La mandibule est assez développée en arrière, avec une partie angulaire fléchie. La symphyse pubienne est longue. Le péroné et le tibia sont partiellement soudés l'un à l'autre. Les pattes antérieures sont tétradactyles et les pattes postérieures pentadactyles.

La formule dentaire est :

$$\left(I\,\frac{1}{1};\ C\,\frac{0}{0};\ Pm\,\frac{1\text{-}2}{1};\ M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 20\text{-}22.$$

Les dents maxillaires, sans racines, sont hypsodontes ou brachyodontes; les supérieures, à section plus ou moins quadrangulaire, sont cuspidées; les inférieures sont simples avec des faces occlusales concaves. La mandibule peut effectuer d'amples mouvements d'avant en arrière et inversement, ainsi qu'une rotation sur son axe.

Arboricoles dans leur grande majorité (certains sont terricoles), les Sciuridés sont diurnes, à l'exception des écureuils volants. Ils sont répandus partout sauf en Australie, à Madagascar, dans la partie méridionale de l'Amérique du Sud et dans certaines régions désertiques de l'Arabie et de l'Égypte. Il en existe cinquante-deux genres avec deux cent quatre-vingt-douze espèces, réparties en deux sous-familles.

La sous-famille des *Sciurinés* comprend les écureuils vrais (arboricoles) et les écureuils terrestres. On les répartit en cinq groupes : écureuils, funambules, xérus, callosciures et marmottes, avec au total trente-neuf genres et deux cent quarante-quatre espèces.

Le premier groupe compte sept genres avec les *Sciurus,* ou écureuils proprement dits, qui comprennent une cinquantaine d'espèces d'Eurasie et d'Amérique. Ils sont longs de 20 à 30 cm, et leur queue, de même longueur, est très velue et assez aplatie. Leurs oreilles, parfois pourvues d'une touffe terminale, atteignent le nez lorsqu'on les replie en avant.

A. Margiocco

▶ ***Sciurus vulgaris,* l'écureuil européen, dont la distribution géographique couvre l'Europe et l'Asie paléarctique, fait son nid dans la fourche d'un arbre et se nourrit essentiellement de noisettes, de glands, de noix et de graines de Conifères.**

E.P.S.

S. vulgaris, l'écureuil européen, ou commun, très répandu dans nos régions, est de couleur brun-roux, avec des variations (certains sont partiellement noirs). Il fait son nid dans la fourche d'un arbre et se nourrit de noisettes, de glands, de noix, de graines de Conifères, etc. Il n'entre pas en léthargie. Les femelles ont 1 ou 2 portées de 3 ou 4 petits. Arboricole parfait, cet écureuil se déplace dans la ramure avec une grande agilité. Sa distribution géographique couvre l'Europe et l'Asie paléarctique. *S. carolinensis,* l'écureuil gris, ou américain, de l'est de l'Amérique du Nord, est également très important.

Les autres genres sont : *Syntheosciurus* d'Amérique centrale, *Microsciurus* et *Sciurillus* d'Amérique du Sud (*S. pusillus* mesure, au maximum, 9,5 cm), *Prosciurillus* des Célèbes, *Rheithrosciurus* de Bornéo (avec pour seule espèce *R. macrotis,* long de 50 cm), et *Tamiasciurus* avec deux espèces d'Amérique du Nord, dont *T. hudsonicus,* essentiellement mycophage.

Le second groupe, celui des « funambules », écureuils arboricoles africains et asiatiques, compte douze genres. Les *Funambulus* sont très caractéristiques avec leur robe striée, gris brunâtre, parfois noirâtre, et parcourue sur le dessus par trois ou cinq bandes longitudinales claires. Ressemblant aux *Tamias* et aux *Eutamias,* ces écureuils, longs de 11 à 17 cm, peuplent les forêts et les palmeraies, se nourrissant à terre ou sur les arbres ; appelés écureuils rayés des palmiers, ils habitent l'Inde, Ceylan et le Béloutchistan.

Ratufa compte quatre espèces, d'Asie méridionale, vulgairement appelées écureuils géants, de taille peu commune (près de 50 cm de long) et pesant jusqu'à 3 kg. Elles se nourrissent de fruits, d'Insectes et d'œufs d'Oiseaux.

Les autres genres sont : *Protoxerus, Epixerus, Funisciurus, Paraxerus, Heliosciurus, Myosciurus, Dremomys, Sciurotamias, Nannosciurus* et *Exilisciurus. Myosciurus* compte une seule espèce, *M. pumilio* d'Afrique orientale, le plus petit Sciuridé, avec 6 à 7 cm de long. *Nannosciurus melanotis* (long de 7 à 10 cm) et les deux espèces d'*Exilisciurus,* de l'archipel malais, sont également très petits.

Le groupe des rats-palmistes comprend trois genres d'écureuils terricoles d'Afrique. Les genres *Xerus* et *Geosciurus* sont proches et occupent une aire très vaste, jusqu'aux confins des déserts. Plus gros que les Sciuridés arboricoles, ils ont le pelage court, avec des poils très rudes, presque spinuleux, et comparables à des herbes sèches. Les oreilles sont courtes, et la queue longue et très touffue. Une bande longitudinale claire parcourt les flancs. Vivant soit en forêt, soit dans les zones découvertes, parfois arides, ils creusent des galeries dans le sol. *Geosciurus inauris* vit dans les zones rocheuses d'Afrique du Sud, alors que *Xerus erythropus,* le rat-palmiste proprement dit, habite les forêts de la zone équatoriale. *Atlantoxerus getulus,* à pelage très rude, vit au Maroc et en Algérie ; c'est l'unique écureuil d'Afrique du Nord.

Le groupe des callosciures compte neuf genres d'écureuils arboricoles asiatiques. *Callosciurus* comprend environ vingt espèces d'Asie du Sud-Est et de Formose, de couleur très vive. Les autres genres, également asiatiques, sont : *Sundasciurus, Tamiops, Menetes, Rhinosciurus, Lariscus, Gliphotes, Spermophilopsis* (des régions désertiques d'Asie occidentale) et *Hyosciurus,* confiné aux montagnes des Célèbes.

Le dernier groupe, celui des marmottes au sens le plus large, comprend les écureuils terrestres eurasiatiques et américains. Ils sont caractérisés le plus souvent par un corps plus trapu, par une queue moins longue, et par des mœurs typiquement fouisseuses. Il en existe huit genres.

Le genre *Marmota,* la marmotte, compte seize espèces des montagnes d'Europe, d'Asie et d'Amérique du Nord. Très trapues, les marmottes ont une grosse tête, à oreilles courtes et à gros yeux ; leurs pattes sont courtes. Elles mesurent, au maximum, 60 cm de long et possèdent une queue de 10 à 25 cm ; leur poids peut dépasser 7 kg. Grégaires, ce sont des fouisseurs qui entrent en léthargie hivernale.

M. marmota, la marmotte proprement dite, habite les zones rocheuses des Alpes et d'une partie des Carpates, de 1 500 à 3 000 m d'altitude, et vit en colonies d'une douzaine d'individus au plus. Elle passe six mois en léthargie dans la grande chambre d'hibernation de sa tanière d'hiver à ouverture unique, et creuse une autre tanière pour l'été.

M. bobak, la marmotte bobak, vit en colonies nombreuses dans les steppes de l'Europe orientale, jusqu'à 60° de longitude est, dans l'Himalaya et en Sibérie. *M. monax,* du Canada et du nord des États-Unis, est solitaire ou forme de petits groupes, le plus souvent aux lisières des forêts.

◄ **Tamiasciurus hudsonicus,** ***écureuil d'Amérique du Nord, est essentiellement mycophage.***

Ostman - J. Holmasen

E.P.S.

◄▼ ***A gauche,*** **Sciurus carolinensis,** ***écureuil de l'est de l'Amérique du Nord. A droite,*** **Marmota marmota,** ***la marmotte, est le Rongeur le plus typique et le plus intéressant des Alpes.***

E.P.S.

La sous-famille des *Pétauristinés* est celle des écureuils volants proprement dits. Leur denture a pour particularité Pm $\frac{2}{1}$. Leur trait morphologique fondamental est la présence d'un patagium qui s'étend de chaque côté du corps, des pattes antérieures aux pattes arrière, à partir du pouce, où il est supporté par un cartilage spécial; cette membrane inclut la cheville et la base de la queue. Quelquefois, il existe une membrane rudimentaire interfémorale, dite uropatagium. Le patagium a une musculature propre. Ces Rongeurs nocturnes peuvent effectuer de longs vols planés d'une branche à une autre : ils se laissent tomber en chute libre pour un court trajet, puis déploient leur patagium, et planent jusqu'à ce qu'ils s'agrippent quelque part. Leur queue sert de gouvernail. Les grands *Petaurista* peuvent planer sur plusieurs centaines de mètres. La sous-famille compte treize genres avec trente-huit espèces d'Europe nord-orientale, d'Asie et d'Amérique du Nord.

Le genre le plus important est *Petaurista,* les pétauristes, ou écureuils arboricoles, avec cinq espèces, qui habitent l'Asie. De grande taille (30 à 60 cm de long, avec une queue de même longueur), ils ont une fourrure douce, gris jaunâtre ou brunâtre sur le dessus, et plus claire ou très claire en dessous. Strictement arboricoles, forestiers, ils se tiennent sur les hautes cimes des arbres; ils se nourrissent de fruits, de graines, de feuilles, de bourgeons et peut-être aussi de petits Animaux.

▲ ***Citellus harrisi*** ***appartient à la famille des Sciuridés dont de nombreuses espèces ont des mœurs sociales et territoriales, encore mal connues.***

Citellus, le spermophile, et les genres proches *(Otospermophilus, Ammospermophilus* et *Callospermophilus)* constituent un groupe de vingt-cinq espèces, essentiellement nord-américaines, mais qu'on trouve aussi en Europe orientale (le spermophile d'Europe, ou souslik d'Europe, *Citellus citellus,* et le spermophile tacheté, ou souslik tacheté, *C. suslicus*) et en Asie paléarctique, formant transition entre les marmottes et les *Tamias.* Leur longueur varie de 15 à 40 cm. Leur corps est moins massif que celui des marmottes. Leur tête, assez grosse, avec des oreilles très courtes et des yeux situés très haut, possède des abajoues. Leur queue est courte (la moitié de la longueur du corps), avec une touffe de poils distiques à l'extrémité. Les femelles (huit à quatorze mamelles) sont très prolifiques. Sujets à l'hibernation ou à l'estivation, selon les régions, ces Animaux creusent des terriers très compliqués, faciles à identifier à cause des tumulus de terre rejetée à l'entrée. De nombreuses espèces ont des mœurs sociales et territoriales; celles-ci sont cependant mal connues.

Le genre *Cynomys* comprend cinq espèces, vulgairement appelées chiens de prairie, qui habitent l'Amérique du Nord et le Mexique. Ressemblant aux marmottes en plus petit (30 cm de long au maximum), ils possèdent des abajoues. *C. ludovicianus,* le chien de prairie à queue noire, vit dans les plaines du centre des États-Unis et jusqu'à 2 000 m d'altitude. Il creuse des tanières très profondes, à plusieurs chambres, protégées des inondations dues aux pluies abondantes par un cratère externe, infundibuliforme, haut d'environ 60 cm à l'entrée. Très grégaires, les *Cynomys* forment des communautés nombreuses, dont l'organisation sociale est encore mal connue. Ils émettent un cri d'alarme caractéristique, proche de l'aboiement du chien, d'où leur nom. Autrefois très nombreux (on estime que leur population au Texas représentait huit cents millions d'individus au siècle dernier), ils ont été décimés par les éleveurs de bétail, à cause de leur consommation importante d'herbe. Pourtant, leur présence est très utile pour l'aération du sol, le drainage des eaux et donc le développement de la végétation.

Les deux derniers genres de la sous-famille des Sciurinés, *Tamias* et *Eutamias*, comptent quinze espèces, les chipmunks, avec une fourrure à larges bandes longitudinales foncées, sur fond clair, dont le nombre, la forme et la couleur caractérisent chaque espèce.

Tamias compte une seule espèce, *T. striatus,* de l'est de l'Amérique du Nord. Long d'environ 15 cm, avec une queue touffue, il vit dans les zones forestières et buissonneuses, de préférence à terre, où il creuse une tanière.

Eutamias comprend une quinzaine d'espèces, très proches, habitant l'Amérique du Nord et l'Asie; une seule espèce, *E. sibiricus,* vit en Russie orientale, en Sibérie, en Mongolie, en Chine et au Japon. Elles se nourrissent de fruits et de graines.

Ph. Janou - Jacana

▶ ***Les Anomaluridés (Anomalurus peli) portent sur la queue des écailles qui leur permettent de s'agripper aux troncs d'arbres.***

L'unique espèce européenne est *Pteromys volans,* le polatouche, qui vit sur un vaste territoire, de la Finlande à la Chine septentrionale et même au Japon. Long d'environ 20 cm, ce gracieux écureuil volant présente des tons gris argenté et gris châtain sur le dessus et très clair sur le dessous. Il a de gros yeux noirs et saillants. Bien qu'il soit arboricole, il descend parfois à terre.

Glaucomys, très sembable et répandu en Amérique du Nord, compte deux espèces : *G. volans,* le polatouche d'Amérique du Nord, plus petit et propre à l'est des États-Unis, et *G. sabrinus.* Uniquement forestiers, de taille modeste (20 à 25 cm de long), les *Glaucomys* peuvent effectuer des vols planés d'une cinquantaine de mètres.

Les autres genres, tous asiatiques, de taille moyenne ou petite, sont : *Aeromys, Hylopetes, Petinomys, Pteromyscus, Petaurillus, Iomys,* d'Asie méridionale (surtout de l'archipel de la Sonde), *Belomys,* à très vaste diffusion, *Aeretes* et *Trogopterus* de Chine, enfin, *Eupetaurus* à fourrure très touffue et laineuse, espèce rupicole du Tibet et du Cachemire.

Super-famille des Éomyoïdés

Les Éomyoïdés *(Eomyoidea)* renferment une seule famille.

Les **Anomaluridés** *(Anomaluridae),* dont la position systématique n'est pas encore bien déterminée, comprennent des formes arboricoles, d'aspect très semblable aux écureuils volants, habitant les forêts d'Afrique centrale et occidentale.

Parmi leurs caractères anatomiques, nous citerons, pour le crâne, le foramen infra-orbitaire assez gros, le palais très rétréci, leurs grandes bulles tympaniques, et la jonction assez lâche des deux branches mandibulaires. Le péroné n'est pas soudé au tibia. Les pattes sont pentadactyles. Excepté *Zenkerella,* ces Rongeurs sont pourvus d'un ample patagium qui inclut le tiers proximal de la queue, et qui est supporté par une longue formation en forme de bâton, cartilagineuse, articulée avec l'olécrâne. A la partie inférieure de la queue et vers la base, existent deux séries caractéristiques d'écailles cornées, au-delà desquelles la queue est couverte de longs poils, formant un panache à l'extrémité.

Les dents maxillaires, pourvues de racines et non hypsodontes, ont des replis d'émail peu profonds. La formule dentaire est : $\left(I\,\frac{1}{1};\ C\,\frac{0}{0};\ Pm\,\frac{1}{1};\ M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 20.$

Il existe quatre genres d'Anomaluridés.

Les *Anomalurus,* ou anomalures, comptent cinq espèces, de grande taille (30 à 40 cm de longueur), pourvues d'une robe laineuse, et répandues sur presque toute l'aire de la famille. Surtout nocturnes, ils vivent en général dans les forêts-galeries. Les écailles qu'ils portent sur la queue leur permettent de s'agripper aux troncs d'arbres, leurs pattes, leur patagium et leur queue adhérant à l'écorce; ils sont donc difficiles à voir. Ils peuvent réaliser des vols planés d'une cinquantaine de mètres.

Idiurus compte quatre espèces, de très petite taille (7 à 9 cm de long), avec une queue très longue, qui vivent en petits groupes et construisent des nids dans des troncs d'arbres. On les rencontre du Cameroun au lac Kivu.

Zenkerella, dépourvu de patagium, est représenté par l'unique espèce *Z. insignis,* du Cameroun, qui ressemble à un loir.

Super-famille des Gliroïdés

Les Gliroïdés *(Gliroidea),* qui forment un groupe bien distinct des Muroïdés, auxquels on les rattachait jadis, comprennent des Rongeurs arboricoles ou rupestres, de taille modeste, à museau allongé. Leurs pattes avant sont tétradactyles, et leurs pattes arrière pentadactyles. Leur queue est au moins partiellement touffue.

Leurs dents maxillaires ont une couronne aplatie à peu près discoïdale, avec des crêtes transversales et parallèles. Leurs bulles tympaniques sont assez grandes. Leur tube digestif ne présente pas de délimitation nette entre l'intestin grêle et le côlon; par ailleurs, il n'existe pas de replis sur la muqueuse intestinale et le cæcum est absent.

Les sujets des zones froides et tempérées de l'Ancien Monde entrent en léthargie hivernale, quand ils sont devenus très gras.

Cette super-famille comprend les familles des Gliridés et des Sélévinidés.

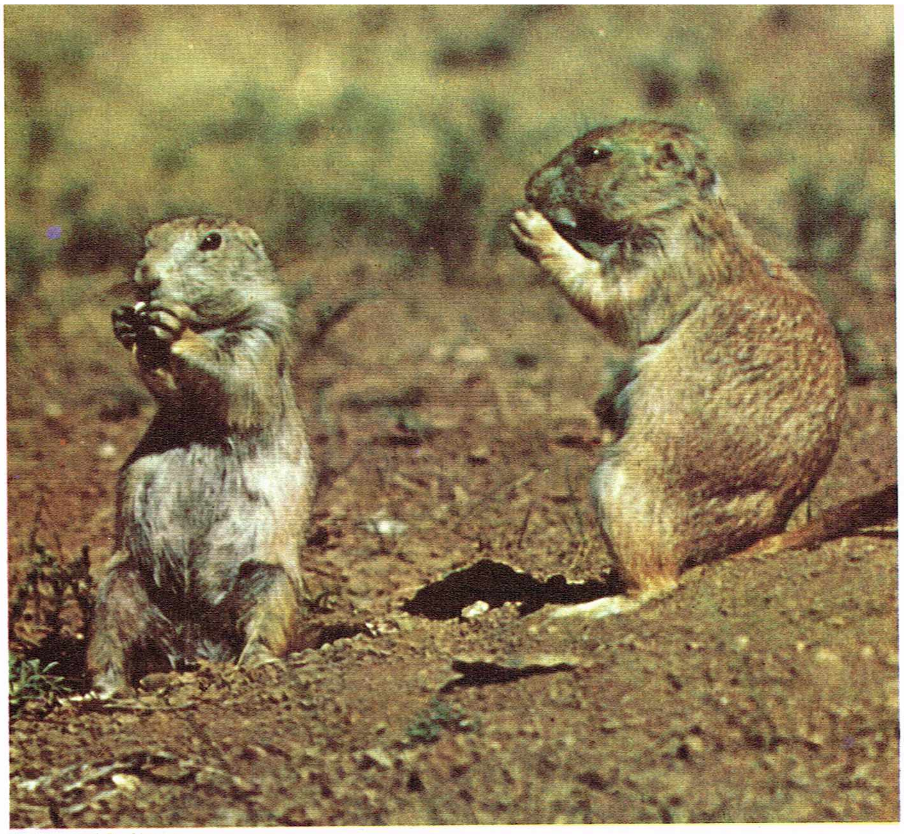

Ostman - J.R. Simon

▲ **Cynomys ludovicianus,** ***le chien de prairie à queue noire, autrefois décimé par les éleveurs de bétail, forme des communautés dans les prairies du centre des États-Unis.***
▼ ***En haut, deux jeunes spécimens de*** **Glaucomys sp.,** ***ou polatouches; uniquement forestiers, ces Rongeurs peuvent effectuer des vols planés d'une cinquantaine de mètres. En bas,*** **Glis glis,** ***le loir gris, est grégaire et se construit deux sortes de nids : l'un, estival, pour la reproduction, l'autre, hivernal, pour y entrer en léthargie.***

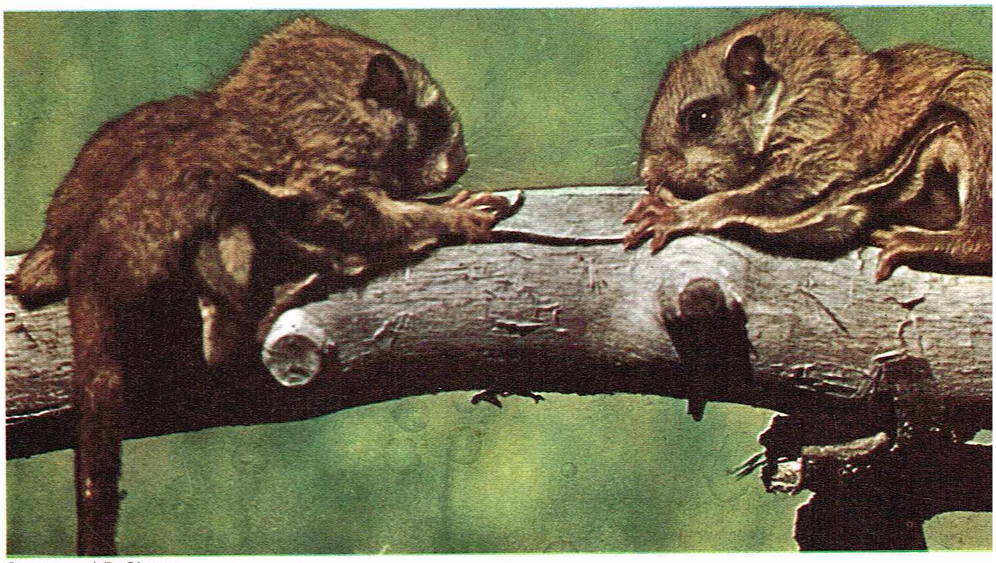

Ostman - J.R. Simon

A. Margiocco

Les **Gliridés** *(Gliridae),* dont la formule dentaire est : $\left(I\,\frac{1}{1};\ C\,\frac{0}{0};\ Pm\,\frac{1}{1};\ M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 20$, comptent des Rongeurs presque tous arboricoles, nocturnes et essentiellement frugivores. On les divise en deux sous-familles : les Glirinés et les Graphiurinés, avec au total sept genres et dix espèces, d'Eurasie et d'Afrique.

La sous-famille des *Glirinés* est caractérisée, notamment par les arcades zygomatiques fortement inclinées vers le haut. Elle renferme six genres, tous paléarctiques, dont certains font partie de notre faune.

Glis comprend une seule espèce, *G. glis,* le loir gris, largement répandu en Europe et en Asie jusqu'à la Palestine, la Perse et le Turkestan. Il a un corps fin, long de 15 à 20 cm, avec des oreilles petites et une queue touffue, uniformément velue, longue de 12 à 15 cm. Ses pieds sont robustes. Sa robe est gris-brun argenté sur le dessus et blanc jaunâtre en dessous. Il habite les forêts de feuillus, en particulier les noiseraies et les chênaies, les parcs, les cultures d'arbres fruitiers, et dans les forêts de Conifères

▶ *Un muscardin* **(Muscardinus avellanarius)** *surpris en pleine léthargie, dans son nid, et entouré de coquilles vides de noisettes, sa principale nourriture.*

A. Margiocco

▶ *Femelle et petits de* **M. avellanarius** *près de leur nid.*

A. Margiocco

jusqu'à 1 000 m d'altitude. Il se nourrit de toutes sortes de fruits, de bourgeons, d'écorces et d'œufs. Il est grégaire, et se construit deux sortes de nids; l'un estival pour la reproduction (les portées sont de 2 à 7 petits), et l'autre hivernal pour y entrer en léthargie, avec des réserves de nourriture qu'il utilise au réveil.

Muscardinus avellanarius, le muscardin, plus petit que le loir (7 à 9 cm de long) habite de l'Europe à la Russie et à l'Asie Mineure. Il a de gros yeux saillants, une queue un peu plus courte que le corps, uniformément velue, mais moins touffue que celle du loir gris. Sa robe est châtain clair, tendant au fauve jaunâtre. Il habite dans les forêts de feuillus et dans les zones buissonneuses, en plaine et en montagne, jusqu'à 1 500 m d'altitude, et manifeste une certaine prédilection pour les noiseraies. Il vit en groupes et aménage deux sortes de nids : l'un pour la reproduction (chaque portée est de 3 ou 4 petits), et l'autre pour la période de léthargie.

Eliomys quercinus, le lérot, proche de l'espèce précédente, est caractérisé par le masque noir sur son museau, la bande noire qui court du nez à l'arrière de l'oreille en couvrant l'œil. Sa queue, grise au-dessus, blanche en dessous, très foncée distalement, avec une touffe de poils et une pointe claire, est aplatie.

Dryomys nitedula, le lérotin, intermédiaire entre le loir et le lérot, mesure 10 cm environ. Il habite l'Europe orientale et une grande partie de l'Asie centrale et occidentale. Dans nos régions, il vit dans la Basse-Engadine, le Tyrol, l'Italie du Nord et la Styrie; une sous-espèce vit dans le sud de l'Italie et en Grèce.

Glirulus compte pour unique espèce *G. japonicus,* qui habite les forêts de montagne du Japon. Long de 6 à 8 cm, il ressemble assez au muscardin et présente une large bande foncée sur le dos.

Myomimus personatus, des régions transcaspiennes et de l'Iran, considéré comme l'un des Mammifères les plus rares, ressemble plutôt à un rat; il est essentiellement terricole.

La sous-famille des *Graphiurinés* compte un seul genre, avec trois espèces, qui vivent dans les forêts et, quelquefois, les zones arides de l'Afrique, au sud du Sahara. Citons *Graphiurus murinus,* qui ressemble un peu à notre lérot.

Les **Sélévinidés** *(Selevinidae)* renferment une espèce unique : *Selevinia betpakdalaensis,* des zones désertiques du Kazakhstan. Longue de 7 cm, elle possède une fourrure touffue, douce et soyeuse et une longue queue couverte de poils courts. Elle a pour formule dentaire :

$$\left(I\,\frac{1}{1};\ C\,\frac{0}{0};\ Pm\,\frac{0}{0};\ M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 16$$

avec des molaires très petites, à une seule racine. Elle semble se nourrir seulement d'Insectes et d'Arachnides et entre en léthargie.

Super-famille des Géomyoïdés

Les Géomyoïdés *(Geomyoidea),* d'aspect murin, sont fouisseurs ou sauteurs. Ils possèdent de grandes abajoues, ouvertes à l'extérieur de la bouche et pileuses intérieurement. Le tibia et le péroné sont soudés distalement. Les pattes sont pentadactyles. La formule dentaire est : $\left(I\,\frac{1}{1};\ C\,\frac{0}{0};\ Pm\,\frac{1}{1};\ M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 20$, avec des dents maxillaires hypsodontes à reliefs occlusaux très caractéristiques. On divise ces Rongeurs en deux familles : les Hétéromyidés et les Géomyidés, toutes deux américaines.

Les **Hétéromyidés** *(Heteromyidae)* sont généralement aptes au saut, avec des pattes postérieures beaucoup plus développées que les pattes antérieures. Leur tibia et leur péroné sont fusionnés. Leurs pieds sont longs et étroits. Leur queue est longue et velue. Leurs bulles tympaniques sont volumineuses. Leurs yeux sont grands et leurs oreilles longues. Leurs dents maxillaires sont radiculées (sauf chez *Dipodomys*).

La famille, qui renferme cinq genres et environ soixante-dix espèces, vit dans des milieux très divers (forêts, prairies, zones arides et désertiques) du Canada à la partie septentrionale de l'Amérique du Sud. On la divise en trois sous-familles : les Hétéromyinés, les Pérognathinés et les Dipodomyinés.

Les *Hétéromyinés,* vulgairement appelés rats à piquants et à abajoues, sont petits, murins et non sauteurs; leur fourrure est riche en soies spiniformes. Les os nasaux sont longs et dépassent nettement les incisives; les bulles

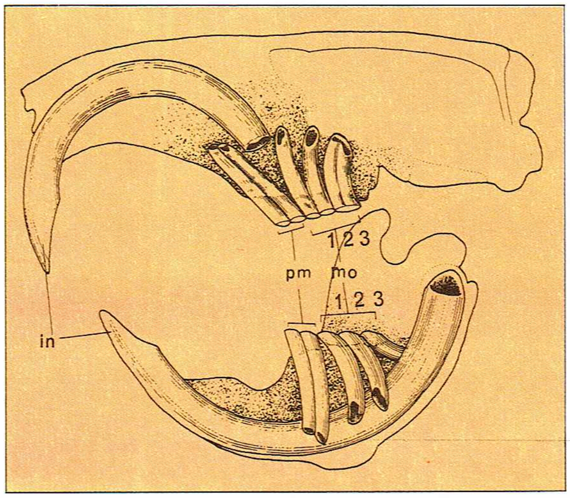

◀ ***Représentation schématique du crâne de* Geomys *(Rongeur) : in, incisives; pm, prémolaires; mo, molaires.***

▲ ***Un Géomyidé, dont on observera les yeux et les oreilles très petits par rapport à sa taille.***

tympaniques ne sont pas très grosses. Ces Rongeurs sont répandus en Amérique, du sud du Texas à l'Équateur. *Lyomys* compte onze espèces des zones arides et semi-désertiques, et *Heteromys* une dizaine d'espèces, qui vivent de la forêt tropicale jusqu'à 2 500 m d'altitude.

Les *Pérognathinés,* aptes au saut, sont petits (6 à 12 cm de long) et munis d'une queue très longue. Il en existe deux genres : *Perognathus,* le genre type, avec vingt-cinq espèces des prairies et régions arides d'Amérique du Nord, nocturnes et fouisseuses, et les *Microdipodops,* ou rats-kangourous (qui sont pygmées).

Les *Dipodomyinés* comprennent un seul genre : *Dipodomys,* avec vingt-deux espèces, vulgairement nommées rats-kangourous. Longs de 10 à 20 cm, ils possèdent de gros yeux, des pattes postérieures très allongées et une queue très longue. Excellents sauteurs, ils effectuent des bonds qui peuvent atteindre 2,20 m. Ils vivent dans les zones arides et sablonneuses de l'ouest des États-Unis et du Mexique, jusqu'au Panama, parfois en populations très denses par endroits. Ils creusent des terriers très compliqués, avec plusieurs entrées, de vastes labyrinthes, des chambres d'habitation et des magasins à nourriture.

Les **Géomyidés** *(Geomyidae)* ont un corps massif et trapu, des oreilles et des yeux petits, et une queue courte. Ils possèdent de grandes abajoues ouvertes extérieurement. Leurs pattes sont pentadactyles et armées de robustes griffes. Leur crâne est aplati, leurs dents maxillaires, dépourvues de racines, sont simples, avec des prémolaires plus grosses que les molaires.

De mœurs essentiellement hypogées, il en existe huit genres, avec environ trente espèces, qui habitent de l'Amérique du Nord jusqu'au Panama.

Geomys, le type, largement répandu dans le centre des États-Unis, compte quatre espèces, dont *G. bursarius,* le gauphre à poche ; ce curieux Rongeur, long de 20 cm environ, dont la fourrure ressemble à celle des taupes, creuse, dans les zones herbeuses humides, de profonds terriers comprenant des chambres d'habitation et des magasins, où il accumule des racines, des tubercules (de topinambour), etc., qu'il transporte dans ses abajoues. Les systèmes de galeries sont très complexes et varient selon les espèces, la latitude et la saison. Les *Geomys* creusent à l'aide de leurs pattes antérieures et de leurs dents. Ils sont solitaires. Les femelles mettent bas de 1 à 3 petits par portée.

Les autres genres sont : *Thomomys, Pappogeomys, Cratogeomys, Orthogeomys, Heterogeomys, Macrogeomys,* et *Zygogeomys.*

Super-famille des Cténodactyloïdés

Les Cténodactyloïdés *(Ctenodactyloidea)* renferment une seule famille.

Les **Cténodactylidés** *(Ctenodactylidae)* sont des Rongeurs de forme trapue, longs de 16 à 24 cm, à queue velue (1 à 5 cm). Le crâne est aplati, les bulles tympaniques volumineuses ; la mandibule n'a pas d'apophyses coronoïdes ; le péroné n'est pas soudé au tibia, et les pattes sont tétradactyles. Chacun de leurs doigts porte de petites touffes de poils rigides, en brosse ou en peigne, avec lesquels ces Animaux nettoient leur fourrure.

La formule dentaire est :

$$\left(I\,\frac{1}{1};\ C\,\frac{0}{0};\ Pm\,\frac{1\text{-}2}{1\text{-}2};\ M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 20\text{-}24\,;$$

la denture est rarement complète, les adultes perdant leurs prémolaires ; les molaires radiculées sont simples.

Ces Animaux habitent les zones arides, semi-désertiques et désertiques, et sont plutôt adaptés à la vie rupestre, grimpant très bien et se réfugiant dans les fentes des roches en s'aplatissant à l'extrême.

La famille comprend quatre genres et six espèces, qui vivent en Afrique orientale et du Nord, de la Somalie au Maroc. *Pectinator spekei,* qui ressemble à un cobaye, avec une fourrure touffue et très douce, habite l'Afrique orientale, souvent mêlé à des damans. *Ctenodactylus gundi,* qui vit de la Libye au Maroc, est caractérisé par une petite queue (1 à 2 cm); il fait le mort quand il est en danger. *Massoutiera* habite le Sahara centro-occidental, et *Felovia* le Sénégal, la Mauritanie et le Rio de Oro.

Sous-ordre des Myodontes

Les Myodontes *(Myodonta)* forment le plus vaste sous-ordre de Rongeurs; ce groupe comprend entre autres les familles à habitus plus spécialement murin. Nous étudierons successivement les trois super-familles de ce groupe : les Dipodoïdés, les Muroïdés et les Pédétoïdés.

Super-famille des Dipodoïdés

Les Dipodoïdés *(Dipodoidea),* d'aspect variable, peuvent ressembler aussi bien à des rats ou des souris qu'à la gerboise du désert. On observe chez eux une tendance à l'allongement des pattes arrière, par suite de l'adaptation au saut. Les molaires sont radiculées. Cette super-famille comprend les familles des Zapodidés et des Dipodidés.

Les **Zapodidés** *(Zapodidae)* ont un aspect murin, avec des membres postérieurs très peu allongés. Leurs bulles tympaniques sont moyennes. Leur formule dentaire est :

$$\left(I\,\frac{1}{1};\ C\,\frac{0}{0};\ Pm\,\frac{1}{1\text{-}0};\ M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 18\text{-}20.$$

On les divise en deux sous-familles, les Sicistinés et les Zapodinés, comprenant au total quatre genres et une dizaine d'espèces d'Europe septentrionale et nord-orientale, d'Asie et d'Amérique du Nord.

La sous-famille des *Sicistinés* est constituée par l'unique genre *Sicista,* dont les pattes sont à peu près égales et la queue très longue. Celui-ci compte six espèces répandues de la Norvège à la Mandchourie et à l'Himalaya. *S. betulina,* la souris des bouleaux, vit dans les forêts humides des pays scandinaves et de nombreuses régions d'Europe orientale.

La sous-famille des *Zapodinés* comprend des espèces plus allongées et conformées pour le saut. Le genre type *Zapus,* d'Amérique du Nord, compte trois espèces de faible taille (7 à 10 cm de long), d'habitus murin, qui présentent un allongement sensible des pieds (jusqu'à 1/3 de la longueur du corps) et une queue très longue (15 cm). *Z. hudsonicus,* du Canada, peut réaliser des sauts de 3 m de long. *Eozapus setchuanus* vit en Chine, et *Napaeozapus insignis* au Canada.

▼ **Jaculus jaculus** ***habite surtout l'Égypte et la Palestine, dans les trous de roches et de murs, et se nourrit d'Insectes.***

E. Hosking

Les **Dipodidés** *(Dipodidae)* sont particulièrement adaptés au saut : le tibia et le péroné sont très longs et soudés distalement; ils peuvent prendre une attitude presque bipède. Leur tête est sphéroïdale; leurs oreilles sont grandes, fines et facilement pliables; leurs yeux sont globuleux. Leurs vibrisses, très développées (surtout les labiales), peuvent être aussi longues que le corps, qui mesure de 4 à 15 cm. Leur queue (7 à 25 cm) porte une touffe terminale de poils. Leurs pieds ont de 2 à 7 cm de long; enfin, leur fourrure, soyeuse, très délicate, le plus souvent jaune pâle, est très mimétique.

La formule dentaire est :

$$\left(I\,\frac{1}{1};\ C\,\frac{0}{0};\ Pm\,\frac{1\text{-}0}{1\text{-}0};\ M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 16\text{-}20.$$

Ces Rongeurs nocturnes habitent les zones arides, les steppes et les déserts d'Asie et d'Afrique du Nord. Il en existe dix genres et vingt-cinq espèces, réparties en trois sous-familles : les Cardiocraniinés, les Euchoreutinés et les Dipodinés.

La sous-famille des *Cardiocraniinés* compte des formes minuscules, qui habitent l'Asie. Les *Salpingotus,* avec quatre espèces typiques, des grands déserts de l'Asie centrale, sont des Rongeurs nains : le corps ne dépasse pas 4 cm et la queue atteint 10 cm. *Cardiocranius paradoxus,* de Chine et de Mongolie, possède des bulles tympaniques énormes.

La sous-famille des *Euchoreutinés* est constituée par l'unique espèce *Euchoreutes naso,* du Turkestan et de Mongolie, aux oreilles énormes, aux pieds atteignant la moitié de la longueur du corps, et à la queue très allongée, pourvue, à l'extrémité, d'une belle touffe de poils noirs et blancs. Ce petit Rongeur vit dans les zones arides et sablonneuses.

La sous-famille des *Dipodinés* comprend les formes les plus nettement spécialisées pour le saut. Elles ont des métatarses soudés, formant un os canon, et leurs pieds ont seulement les trois doigts médians fonctionnels. Il existe sept genres, représentés en Asie et en Afrique du Nord.

Allactaga, qui compte une dizaine d'espèces, ressemble à la gerboise. Sa queue est cylindrique, avec un panache aplati à l'extrémité. Les formes pentadactyles sont largement répandues en Asie, et *A. tetradactyla* vit en Égypte. L'ouïe et la vue sont très fines. Ces Rongeurs se déplacent souvent en bipèdes, uniquement par sauts. Crépusculaires et nocturnes, ils se cachent le jour dans leurs tanières, qui peuvent être de quatre types différents suivant la saison. La chambre d'habitation est sphéroïdale et garnie d'herbe et de paille. Les Animaux creusent les galeries à l'aide de leurs incisives, déplaçant la terre avec leurs mains.

Le genre *Jaculus,* caractérisé par des pieds tridactyles seulement, ainsi que par l'absence de prémolaires, compte quatre espèces d'Afrique nord-orientale et d'Asie; *J. jaculus,* qui habite l'Égypte, la Palestine et les zones contiguës de l'Asie du Sud-Ouest, possède une fourrure de couleur sable, de grandes oreilles et des touffes de poils blancs sur les pieds. Très grégaire, il vit dans les trous de roches et de murs, se nourrissant d'Insectes et, semble-t-il, d'Animaux morts.

Le genre *Dipus,* le type, ne compte qu'une espèce, *D. sagitta,* la gerboise, qui habite les zones sablonneuses semi-désertiques, de la Russie à la Chine. Ce Rongeur creuse aussi des types de terriers différents selon leur utilisation et la saison.

La sous-famille compte, en outre, les genres *Paradipus, Stylodipus, Alactagulus* et *Pygeretmus,* tous asiatiques.

Super-famille des Muroïdés

Les Muroïdés *(Muroidea)* constituent le plus vaste groupe de Rongeurs : ils comptent mille espèces. La grande majorité est de type murin, ressemblant aux souris, aux rats et aux campagnols.

On constate la disparition des prémolaires et, chez certains, la régression des molaires postérieures; la formule dentaire générale est :

$$\left(I\,\frac{1}{1};\ C\,\frac{0}{0};\ Pm\,\frac{0}{0};\ M\,\frac{2\text{-}3}{2\text{-}3}\right) \times 2 = 12\text{-}16.$$

Les molaires sont ou non radiculées, la première étant la plus forte.

Les autres caractères marquants sont les suivants : une petite arcade zygomatique, des bulles tympaniques peu développées (sauf chez les Gerbillinés), un péroné

toujours soudé très haut avec le tibia, une queue de longueur variable, en général peu velue et pourvue d'écailles, et une taille petite ou moyenne.

Les Muroïdés, adaptés à des modes de vie très variés, sont en expansion évolutive active, et ont une distribution cosmopolite. Selon la classification adoptée ici, la super-famille est divisée en cinq familles : les Cricétidés, les Platacanthomyidés, les Microtidés, les Gerbillidés et les Muridés. Les Cricétidés sont entendus ici *stricto sensu,* c'est-à-dire sans les Microtinés. Certains auteurs considèrent qu'il n'existe qu'une seule grande famille, celle des Muridés, divisée en deux sous-familles, les Cricétinés et les Microtinés.

Les familles de cet énorme groupe ne seront pas traitées en détail, comme celles des autres groupes ; toutefois, nous signalerons tous les genres existants.

Les **Cricétidés** *(Cricetidae)* comprennent des formes à dents maxillaires soit de structure laminaire avec des lames séparées par de larges replis, soit de structure cuspidée avec des cuspides en deux rangées longitudinales, soit encore de structure prismatique, les molaires étant radiculées dans ce cas.

La famille est divisée en quatre sous-familles : Hespéromyinés, Cricétinés, Myospalacinés, et Nésomyinés, qui comprennent au total soixante-dix genres et quatre cent soixante-quatre espèces.

La sous-famille des *Hespéromyinés* compte cinquante-cinq genres et quelque quatre cent trente espèces, toutes américaines, qui constituent la grande majorité des Muroïdés du Nouveau Monde.

Le genre *Oryzomys* peuple, avec une centaine d'espèces, les deux Amériques, du New Jersey à la Patagonie, et, dans l'océan Pacifique, les îles Galapagos. De morphologie murine, longs de 10 à 20 cm, ils sont essentiellement arboricoles, se tenant souvent près de l'eau, où ils plongent et nagent habilement. Nommés vulgairement les rats du riz, ils sont considérés comme très nuisibles aux rizières.

Les trois espèces de *Megalomys,* de plus grande taille (30 à 40 cm de long), aimant l'eau et habitant de grandes tanières dans les petites Antilles, ont été exterminées par l'homme à cause des dommages qu'elles provoquaient dans les cultures ; on pense qu'elles sont actuellement éteintes.

Les genres proches : *Melanomys, Neacomys* (à poils spinuleux), *Scolomys, Nectomys* (de grande taille atteignant 25 cm et de mœurs aquatiques), *Rhipidomys, Thomasomys* (quarante espèces, forestières, vivant surtout en montagne, jusqu'à plus de 4 000 m d'altitude en Amérique du Sud), *Wilfredomys, Phaenomys, Chilomys, Tylomys, Ototylomys, Nyctomys, Otonyctomys* et *Rhagomys,* presque tous d'Amérique centrale et du Sud, présentent un moindre intérêt.

Peromyscus compte cinquante-cinq espèces, répandues de l'Amérique à la Colombie. De formes murines, longs de 8 à 17 cm, ils ont de grandes oreilles, une fourrure douce et soyeuse, une longue queue, et des abajoues ; ils sont nommés vulgairement rats à pattes blanches, ou rats-cerfs. Très répandus dans les milieux les plus divers (forêts, prairies, etc), avec une différenciation locale très accentuée, ils ont été très étudiés sur les plans génétique et écologique. Ces Rongeurs non grégaires sont nocturnes et végétariens ; ils n'entrent pas en léthargie.

Les seize espèces de *Reithrodontomys,* assez semblables aux précédentes, ne possèdent pas d'abajoues ; elles font des nids d'herbe sphéroïdaux, au sol ou à faible hauteur.

Laissant de côté *Ochrotomys, Baiomys* et *Onichomys,* d'Amérique du Nord, nous citerons *Akodon,* sud-américain, qui compte une soixantaine d'espèces, dont l'aspect rappelle celui des mulots ou des campagnols : le museau est court, et la queue ne dépasse guère la moitié de la longueur du corps. Ils sont diurnes ou nocturnes selon les espèces. *A. arviculoides,* très commun dans le sud-est du Brésil, creuse de longues galeries dans les forêts, ainsi que dans les terres cultivées.

Blarinomys (*B. breviceps* du Brésil), talpiforme, très adapté à la vie hypogée avec ses petits yeux, ses oreilles cachées dans le pelage, sa queue courte et ses griffes fouisseuses, vit dans les forêts, à l'intérieur de galeries.

Phyllotis, avec seize espèces andines, vit jusqu'à 5 000 m d'altitude, ainsi que *Chinchillula sahamae,* forme rupicole.

R. Tercaes - Jacana

▲ ***Cricetus cricetus,*** ***le hamster d'Europe, construit deux tanières dont l'hivernale, à plusieurs magasins, peut renfermer des dizaines de kilos de vivres, et de blé notamment.***

Les *Reithrodon,* ou rats-lapins, qui atteignent 20 cm de long et ont de grands yeux, habitent les grandes plaines herbeuses d'Argentine, et les zones montagneuses des pays avoisinants.

Les *Holochilus,* avec deux espèces sud-américaines, sont appelés « rats-loutres » ; une longue queue écailleuse et des pattes postérieures partiellement palmées leur permettent de mener une vie semi-aquatique.

Neotoma compte une vingtaine d'espèces d'Amérique du Nord, qui font des nids à terre ou sur les arbres, avec toutes sortes de matériaux. Solitaires et territoriaux, ils restent longtemps fidèles à leur logis.

Les sept espèces d'*Ichthyomys,* ou rats pêcheurs, qui ressemblent à nos rats communs, vivent près des cours d'eau et dans les régions paludéennes du nord de l'Amérique du Sud (sauf au Brésil) jusqu'à 3 000 m d'altitude ; ils sont nettement aquatiques et se nourrissent de Poissons et autres Animaux capturés dans l'eau.

La sous-famille des *Cricétinés* comprend les Cricétidés typiques, guère nombreux ; ils présentent un espace interorbitaire étroit, un os squamosal sans *crista orbitalis,* l'apophyse angulaire de la mandibule, étroite avec un angle postérieur fortement incurvé vers l'extérieur. Leurs dents maxillaires sont radiculées et ont des surfaces occlusales diverses ; ces dernières résultent de la fusion de tubercules contigus par leurs bases et ont l'aspect d'une série de losanges, avec le grand axe situé transversalement, incluant un îlot entouré d'émail. Ces Rongeurs possèdent des abajoues. La sous-famille compte sept genres et quatorze espèces (douze eurasiatiques et deux africaines).

Cricetus, qui compte une seule espèce, *C. cricetus,* le hamster d'Europe, habite de l'Europe centrale et orientale jusqu'à l'Asie occidentale et une partie de la Sibérie. Long d'environ 25 cm, il a un corps trapu, une queue courte, de petits yeux et des oreilles moyennes. Sa fourrure est jaune ocre clair, noire à la partie inférieure, avec une bande transversale blanche à la poitrine et des taches claires sur les côtés de la tête et du cou. Habitant typique des steppes, il aime les terrains secs et sablonneux, où il creuse deux sortes de tanières : la tanière estivale, peu profonde, avec un seul grenier à grain, et la tanière

▼ ***Nichée de Cricétidés du genre*** **Peromyscus** ***; ces Rongeurs, nocturnes et végétariens, sont répandus dans les milieux les plus divers.***

Ostman - J.R. Simon

J. Markham

Archives P 2

▲ *A gauche, le rat d'eau,* **Arvicola amphibius,** *dont l'espèce est très proche du campagnol terrestre* (**Arvicola terrestris**), *habite aussi en France et dans le Nord. A droite, le rat musqué,* **Ondatra zibethica,** *creuse une tanière sur les rivages des cours d'eau, ou se construit une cabane en rameaux, ou bien encore s'aménage un refuge dans un amas de Végétaux.*

hivernale, profonde, qui comprend une ou deux chambres et plusieurs magasins. On y a retrouvé plus de 10 kg de blé et 90 kg de vivres; le hamster d'Europe est donc très nuisible pour les cultures de céréales. Solitaire, très territorial, il est plutôt crépusculaire. En hiver, il entre en léthargie discontinue, s'éveillant à intervalles réguliers (tous les sept jours par exemple) pour manger, déféquer et uriner. Les femelles mettent bas deux fois par an, 5 petits ou plus, après une gestation de 16 à 20 jours.

Mesocricetus auratus, le hamster doré, plus petit que *C. cricetus,* sans pelage noir aux parties inférieures, a une queue encore plus courte. Il habite l'Europe orientale et l'Asie Mineure; il est largement utilisé comme Animal de laboratoire, et très apprécié comme Animal de compagnie.

Cricetulus, distribué de la Russie à la Chine, ainsi qu'en Asie Mineure, possède une queue plus longue. *C. migratorius* vit dans le sud-est de la Russie et en Grèce.

Les genres *Calomyscus,* à queue très longue et à grandes oreilles, et *Phodomys,* tous deux asiatiques, ainsi que *Mystromys,* d'Afrique du Sud, ont une importance moindre.

Lophiomys comprend l'unique espèce *L. imhausi,* des forêts d'Afrique orientale, au-dessus de 1 200 m d'altitude. C'est un Animal rare. Long de 30 à 35 cm, il ressemble de loin aux porcs-épics arboricoles américains. Sa fourrure, très touffue, est faite de poils longs et laineux, formant sur la ligne dorsale une sorte de crinière érectile; il présente le long des flancs une bande de poils courts, durs et grisâtres. Il a une tête arrondie, avec un museau obtus, et un gros orteil partiellement opposable aux autres doigts. Fait unique chez les Rongeurs, la surface externe des os du crâne est finement granuleuse. Cet Animal arboricole est nocturne et très timide.

La sous-famille des *Myospalacinés* est formée par l'unique genre *Myospalax,* avec cinq espèces, répandues de la Russie à la Sibérie et à la Chine, dans les zones forestières, surtout en montagne. Appelés aussi rats-taupes, longs de 15 à 27 cm, les *Myospalax* sont strictement souterrains; ils ont le crâne aplati, de petits yeux, une queue très courte; les griffes de leurs pattes antérieures très robustes, surtout aux deuxième, troisième et quatrième doigts, sont très efficaces pour le fouissage; ils sont dépourvus de pavillon auriculaire. Les incisives supérieures sont très développées et très larges; les molaires, prismatiques, sont dépourvues de racines. La soudure des vertèbres cervicales (de la troisième à la septième) renforce le squelette et permet une meilleure adaptation à la vie fouisseuse.

Très rapides dans leurs galeries, ces Animaux sont lents en dehors. Ils se nourrissent seulement durant la nuit. Ils creusent, surtout au printemps, de vastes terriers, dont les galeries atteignent parfois 30 m de long, et qui comprennent des corridors latéraux en cul-de-sac et des magasins; on y trouve de 3 à 9 kg de provisions entassées. Les *Myospalax* creusent en hiver des tunnels sous la neige mais n'entrent pas en léthargie. *M. fontanieri,* de Chine, fréquente les forêts à proximité des cours d'eau.

La sous-famille des *Nésomyinés,* dont les membres habitent uniquement Madagascar, constitue à elle seule toute la population des Rongeurs autochtones. Ces Cricétidés, caractérisés, entre autres, par le processus angulaire de la mandibule, très large et sans angle postérieur replié vers l'extérieur, présentent des dents maxillaires de type bunodonte, avec quatre tubercules, ou encore de type lamellaire. Par suite d'un phénomène de convergence, lié à l'isolement géographique, ces Rongeurs ont évolué de façon autonome et présentent divers types dentaires, que l'on retrouve chez d'autres familles.

Les Nésomyinés comptent sept genres et quinze espèces soit de taille modeste et d'habitus murin *(Macrotarsomys, Eliurus, Gymnuromys,* et *Brachyuromys),* soit de taille un peu supérieure (de 20 à 30 cm) et semblables à des rats *(Nesomys, Brachytarsomys* et *Hypogeomys).*

Hypogeomys antimena (35 cm de long) a l'arrière-train plus haut que l'avant-train, ce qui laisse supposer une certaine aptitude au saut; très rare, il vit dans de profonds terriers, près des cours d'eau, surtout dans la région de Ménabé.

Les **Platacanthomyidés** *(Platacanthomyidae)* ont de petites bulles tympaniques et pour formule dentaire :

$$\left(I\,\frac{1}{1};\ C\,\frac{0}{0};\ Pm\,\frac{0}{0};\ M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 16.$$

Il existe seulement deux genres, chacun étant unispécifique.

Platacanthomys lasiurus, espèce arboricole des zones montagneuses de l'Inde méridionale, vulgairement appelé loir à piquants, long de 20 cm, a le museau pointu, de grandes oreilles, et des pieds larges; il présente de nombreux piquants sur le dos et un large panache de poils sur la queue.

Typhlomys cinereus, des montagnes de Chine et d'Indochine, adapté à la vie souterraine, est dépourvu de piquants et a la queue glabre.

Les **Microtidés** *(Microtidae)* tiennent une grande place dans la faune de micromammifères de nos régions. Ils ont généralement un habitus fouisseur. Leur crâne présente des crêtes d'insertion du masséter bien marquées, un arc zygomatique robuste, un canal infra-orbitaire étroit, des bulles tympaniques volumineuses à parois finement alvéolées. Leurs molaires, sauf chez *Clethrionomys, Dolomys, Ellobius, Ondatra, Phenacomys* et *Prometeomys,* sont à croissance continue, possèdent ou non des racines, et sont constituées typiquement par deux rangées alternantes de prismes triangulaires. Leurs incisives inférieures ont des alvéoles très profonds. La symphyse pubienne est très courte. La queue est plus brève que le corps.

La famille, répandue dans les régions holarctiques d'Eurasie et d'Amérique, comprend dix-neuf genres et cent deux espèces.

Clethrionomys (= Evotomys) occupe une aire énorme, circumpolaire, dans l'Ancien et le Nouveau Monde, jusqu'au sud de l'Italie, à la Chine et au Colorado. Entre

▼ **Clethrionomys glareolus,** *le campagnol roussâtre, est un Animal de forme trapue, qui se nourrit de matières végétales et dont la longévité moyenne est de 2 ans.*

J. Markham

autres espèces, citons *C. glareolus*, le campagnol roussâtre, qui habite toute la péninsule italienne. Cet Animal de forme trapue a une fourrure brun grisâtre, avec le dos roux ; il mesure de 10 à 12 cm de long, avec une queue d'environ 6 cm. Il vit aussi bien en plaine qu'en montagne jusqu'à 2 000 m d'altitude. Il se nourrit des matières végétales les plus variées et creuse de petites galeries. Les femelles peuvent avoir jusqu'à 3 portées annuelles, avec un total de 10 petits. La longévité moyenne est de 2 ans.

Citons également les genres : *Eothenomys, Alticola* (des montagnes d'Asie, jusqu'à 5 700 m d'altitude), *Hyperacrius, Dolomys* (avec *D. bogdanovi* = *D. milleri*, ou campagnol de Nehring, des montagnes de Yougoslavie) et *Phenacomys*, avec cinq espèces nord-américaines, toutes arboricoles.

Arvicola compte *A. terrestris*, le campagnol agreste, ou campagnol aquatique nordique. Cette espèce, de grande taille, mesure 12 à 20 cm de long, sa queue représentant un peu plus de la moitié de la longueur du corps ; elle est trapue et lourde, avec une tête arrondie. Sa fourrure est brune, variant fréquemment. Elle fréquente les plaines et les vallées humides, les rives des cours d'eau, des étangs, des marais et des canaux, etc., là où poussent une végétation palustre et des joncs, et se nourrit de plantes aquatiques, de racines, de tubercules, et à l'occasion de petits Animaux. Les femelles mettent bas de 2 à 6 petits par portées, 3 ou 4 fois par an. *Arvicola* vit de 2 à 4 ans.

Ondatra (Fiber) zibethica, l'ondatra, ou rat musqué, originaire d'Amérique du Nord, a été introduit en différentes régions d'Europe. Long de 30 à 35 cm, il a une queue un peu moins longue, presque nue, comprimée latéralement. Ses pattes postérieures, partiellement palmées, possèdent une frange de poils. Mâles et femelles possèdent une glande à musc, périnéale, donnant à l'Animal une odeur caractéristique ; on le chasse pour sa fourrure, qui est appréciée en pelleterie.

Le rat musqué creuse une tanière sur les rivages des cours d'eau, ou se construit une cabane en rameaux sur un petit îlot, ou, encore, peut s'aménager un refuge en entassant un amas de Végétaux. La tanière se compose d'une galerie à entrée immergée, conduisant à un système d'autres galeries à plusieurs chambres : une habitation garnie d'herbes et de feuilles, une salle à manger, un lieu de défécation, et des couloirs d'aération. Les cabanes communiquent avec l'extérieur par une ou plusieurs galeries à entrée subaquatique et comportent une chambre à litière de feuilles. Certaines cabanes atteignent, après deux ou trois ans d'existence, 3 m de diamètre et 1,50 m de haut. En général, le logement est individuel ; toutefois, surtout en hiver, plusieurs individus se réunissent parfois dans un terrier commun.

Neofiber alleni, de Géorgie et de Floride, assez semblable au précédent, plus petit et à queue cylindrique a des mœurs également aquatiques.

Les *Pitymys*, avec onze espèces, vulgairement appelées campagnols, importants dans la faune européenne, se trouvent aussi en Amérique du Nord et en Asie Mineure. Ils sont petits, très trapus, possèdent une queue très courte, et sont d'habiles fouisseurs. *P. subterraneus*, le campagnol souterrain, long de 8 à 10 cm, a une queue de 3 cm. Crépusculaire et nocturne, il fréquente les clairières des bois, les prés humides et les champs jusqu'à 2 000 m d'altitude (dans les Alpes). Il creuse de longues galeries ramifiées, avec des salles de séjour et des nids d'herbe. Deux ou trois fois par an, les femelles mettent bas 2 ou 3 petits (parfois 5). Le genre *Blanfordimys*, du Pamir et de l'Afghanistan, est proche du précédent.

Microtus, avec quatre espèces, qui joue un rôle essentiel dans la faune mammalienne d'Europe, habite aussi une partie de l'Asie et de l'Amérique du Nord. Longs de 8 à 17 cm, ces Rongeurs ont une queue courte (moins de la moitié de la taille du corps) ; leurs molaires ne sont pas radiculées. Les *Microtus*, qui ne suivent pas le rythme nycthéméral, ont une intense activité, interrompue par des pauses toutes les deux à trois heures : ils connaissent donc, en vingt-quatre heures, une dizaine de phases distinctes, avec des périodes prolongées d'activité pendant la nuit. La quantité de nourriture consommée est considérable. Ils vivent seulement 1 à 2 ans.

M. arvalis, le campagnol des champs, est très prolifique : la femelle met bas 4 à 12 petits par portée, 3 à 6 fois par an ; les populations de cette espèce sont sujettes à de forts accroissements cycliques, avec des maximums dangereux pour l'agriculture, car ce Rongeur se nourrit de graines, de racines, etc.

M. nivalis, le campagnol des neiges, typique, vit dans les Alpes entre 1 500 m et 4 000 m d'altitude. En hiver, il n'entre pas en léthargie, mais creuse toutefois des tunnels sous la neige pour aller à la recherche de sa nourriture.

M. pennsylvanicus, le campagnol de Pennsylvanie, est très prolifique. Les femelles, sexuellement matures à 25 jours, peuvent avoir 17 portées par an, de 4 à 8 petits chacune, après une gestation de 21 jours ; une femelle peut ainsi mettre bas plus de 100 petits par an.

Lagurus, avec trois espèces eurasiatiques et nord-américaines, rappelle un peu les lemmings. *L. lagurus*, de Sibérie et de Russie, habite de préférence les steppes argileuses, où pousse une armoise, *Artemisia austriaca*, sa nourriture préférée. Les femelles ont 6 portées par an, de 3 à 7 petits chacune. Lors de l'année de pullulement de sa population, il accomplit des déplacements massifs.

Citons *Prometheomys*, qui compte une seule espèce, du Caucase, et *Ellobius*, l'ellobie de Russie et d'Asie centrale, de forme talpoïde, avec *E. talpinus*, ou ellobie proprement dit, de Russie, vivant dans les steppes herbeuses, à sol non sablonneux, où il creuse des systèmes compliqués de galeries. Il n'entre pas en léthargie.

Les quatre genres suivants peuvent être réunis en un groupe distinct, celui des lemmings au sens large, dont les incisives inférieures sont assez courtes et dont les dents maxillaires sont dépourvues de racines.

Dicrostonyx est répandu dans les régions très froides de l'hémisphère boréal ; en hiver, les troisième et quatrième doigts des mains des mâles possèdent d'énormes

A. Margiocco

▲ **Pitymys savii, *le « campagnol » de Savi.***

Ostman - J. Holmasen

Photo Researchers International - J. Burton

▼ ***En haut, refuge de rat musqué, dans son milieu de marécages. En bas, les* Microtus (Microtus arvalis) *ont une intense activité, consomment une quantité de nourriture considérable et sont très prolifiques.***

J. Markham

▲ *Le rat des moissons* **(Micromys minutus)** *a une queue extrêmement longue et partiellement préhensile. Les espèces du genre, d'origine orientale, ont été introduites récemment en Europe occidentale.*

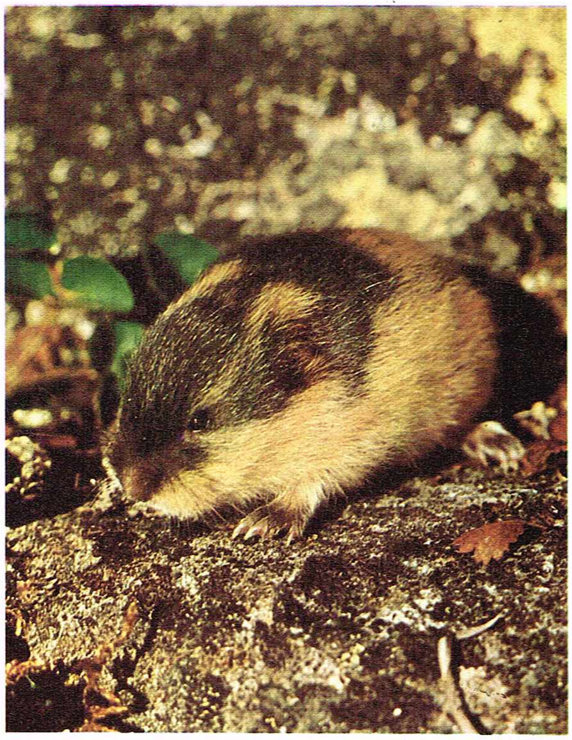

Ostman - J.R. Simon

▶ **Lemmus lemmus,** *le lemming d'Europe ou commun, vit dans les pays scandinaves. Quittant leur habitat naturel, des populations réalisent de longs voyages à la recherche de nouvelles sources de subsistance.*

griffes, qui tombent au printemps suivant pour laisser la place à des griffes estivales et automnales, normales. Ceci est vraisemblablement lié au fouissage des longues galeries effectué en hiver. Ces Animaux habitent en Russie septentrionale, en Nouvelle-Zemble et en Sibérie jusqu'au-delà du 75e degré de latitude nord *(D. torquatus)*, ainsi qu'au nord du Canada et au Groenland.

Lemmus compte quatre espèces, dont *L. lemmus,* le lemming d'Europe, ou commun, qui vit dans les pays scandinaves. Long d'environ 12 cm, ce célèbre Rongeur a une grosse tête et une queue rudimentaire. Il creuse des galeries dans le sol tourbeux, dans les zones de bouleaux et de genévriers, se nourrissant d'herbes, de racines et de Lichens. Il n'entre pas en léthargie.

Il présente d'importants cycles de fluctuation numérique qui durent de 9 à 11 ans environ. Quittant leur habitat naturel, des populations réalisent de longs voyages à sens unique, à la recherche de nouvelles sources de subsistance, descendant le long des vallées et franchissant des centaines de kilomètres. Quand il rencontre d'importants obstacles, comme les fleuves et les mers, le flot des lemmings se rassemble en troupes immenses, puis se jette à l'eau, avance toujours et se noie. Sur les lieux d'origine, il ne reste alors que peu d'individus, qui reconstituent vite des populations normales. Les migrateurs sont le plus souvent des juvéniles de un an ou moins.

Citons *Myopus schisticolor,* le lemming des forêts, qui vit de la Scandinavie à la Sibérie et *Synaptomys* d'Amérique du Nord.

Les **Gerbillidés** *(Gerbillidae)* présentent des adaptations particulières à la vie dans les steppes et dans les zones arides et désertiques. De forme à peu près murine, et rappelant assez l'habitus des Dipodoïdés, ils ont la fourrure uniformément de couleur sable ou rousse. Leurs pattes postérieures sont plus ou moins allongées, sans cependant présenter une aptitude au saut. Leur queue, généralement longue, se termine par une touffe de poils. La boîte crânienne est large, les bulles tympaniques sont très volumineuses, et la région faciale est étroite, de même que l'orifice infra-orbitaire.

La formule dentaire est :

$$\left(I\,\frac{1}{1};\ C\,\frac{0}{0};\ Pm\,\frac{0}{0};\ M\,\frac{3}{2\text{-}3}\right)\times 2 = 14\text{-}16.$$

Les molaires sont hypsodontes et radiculées, mais sans croissance continue (sauf chez *Rhombomys,* où elles ne sont pas radiculées).

Cette famille, que de nombreux auteurs considèrent comme une sous-famille des Cricétidés, comprend treize genres et une centaine d'espèces, d'Afrique et d'Asie.

Les *Gerbillus,* ou gerbilles, longs d'une dizaine de centimètres, à grands yeux et à grandes oreilles, ont une fourrure très fine et soyeuse, de couleur sable, plus ou moins teintée de roux. Leurs pattes arrière, très longues, ont des pieds étroits, avec le gros orteil et le cinquième doigt très allongés. La queue est plus longue que le corps et ornée d'un panache apical. Il existe une cinquantaine d'espèces, répandues dans les zones planes, arides et sableuses, à végétation rare, du Pakistan occidental à toute l'Afrique, y compris la zone du sud-ouest. En majorité grégaires, les gerbilles sont plutôt nocturnes; elles creusent une tanière très simple et se nourrissent de plantes et d'Insectes.

Monodia, très proche du genre précédent, compte une seule espèce, *M. mauritanica,* du Sahara occidental, longue d'à peine 5 à 6 cm.

Les *Tatera* sont nettement plus grands (10 à 20 cm), d'un type plus murin, avec une fourrure très fine et une queue très longue (jusqu'à 24 cm). Leurs pieds, étroits, ont le cinquième doigt plus court que les trois médians. *Tatera* compte onze espèces, d'Inde, d'Asie occidentale et d'Afrique (à l'exception des forêts équatoriales). Nocturnes et grégaires, elles creusent dans le sable des terriers constitués de labyrinthes inextricables. *T. indica* a des tendances carnivores. Ces Rongeurs peuvent être les agents de transmission de la peste bubonique.

Il faut signaler également les genres africains, d'importance moindre : *Taterillus,* qui ressemble à de petits rats à grandes oreilles et à queue très longue, se rencontre du Sénégal à l'Éthiopie, *Desmodillus* avec l'espèce *D. auricularis* qui vit dans le désert du Kalahari, *Desmodilliscus, Pachyuromys* avec *P. duprasi,* des régions sahariennes, à queue courte et en massue, et *Ammodillus.*

Les douze espèces de *Meriones,* ou rats des sables, d'Afrique du Nord et d'Asie centro-occidentale, sont importantes. Longs de 12 cm environ, avec une fourrure touffue, ces Rongeurs habitent les zones semi-désertiques à végétation rare, où ils creusent des tanières peu profondes (10 à 20 cm à peine) et en forme de labyrinthe, sur deux étages, avec plusieurs entrées et des magasins. Leurs besoins en eau sont minimes.

Citons, enfin, les genres asiatiques *Sekeetamys, Brachiones, Rhombomys* et *Psammomys,* que l'on rencontre également en Afrique du Nord.

Les **Muridés** *(Muridae)* constituent la famille la plus nombreuse après les Cricétidés. Ce sont les Rongeurs de type murin au sens strict (souris domestique et rat), avec une tête distincte du tronc et une longue queue écailleuse. Ils ont un crâne allongé, avec des arcades zygomatiques étroites, des foramens infra-orbitaires larges, des bulles tympaniques à parois sans alvéoles, et des fosses ptérygoïdes peu profondes.

Leur formule dentaire est :

$$\left(I\ \frac{1}{1};\ C\ \frac{0}{0};\ Pm\ \frac{0}{0};\ M\ \frac{1\text{-}3}{1\text{-}3}\right) \times 2 = 8\text{-}16.$$

Chez la plupart des espèces, on dénombre $\frac{3}{3}$ molaires, brachyodontes et radiculées, les supérieures présentant trois rangées longitudinales de tubercules, ou bien des lames pressées les unes contre les autres. L'immense variété des espèces de cette famille s'accompagne d'une importante variation de la morphologie dentaire.

Cette lignée de Rongeurs, en pleine expansion évolutive, et peut-être à son apogée, avait autrefois son centre de rayonnement dans les régions tropicales d'Asie, d'où elle se serait ensuite répandue dans les régions malaise et australienne, probablement au Miocène et au Pliocène, grâce à sa grande capacité d'adaptation, ainsi qu'à sa rapidité de différenciation, comme en témoignent certaines formes très spécialisées de Nouvelle-Guinée et de zones périphériques de son aire de distribution.

Ils vivent dans toute l'Afrique (sauf Madagascar), en Europe, en Asie (sauf les régions les plus septentrionales), dans les Philippines, en Nouvelle-Guinée, en Australie, en Tasmanie et en Micronésie. Leur présence est massive en Nouvelle-Guinée, avec vingt-trois genres, dont dix-neuf exclusifs, et surtout en Australie, où, avec treize genres dont neuf exclusifs, ils constituent, à l'exception des Chiroptères, la seule faune mammalienne placentaire autochtone.

La majeure partie des espèces vit dans les régions tropicales, occupant les habitats les plus divers et présentant des mœurs très variées : terrestres, arboricoles, fouisseuses, aquatiques, etc.

La famille des Muridés, qui compte quatre-vingt-dix-neuf genres et quatre cent soixante-trois espèces, est répartie en six sous-familles : les Murinés, les Rhynchomyinés, les Hydromyinés, les Dendromurinés, les Déomyinés et les Otomyinés.

La sous-famille des *Murinés,* la plus vaste, comprend les espèces typiques. On en connaît quelque quatre cent quatre, réparties en soixante-quatorze genres. En général, la première molaire supérieure est plus grande que les autres.

Micromys minutus, le rat des moissons, ou rat nain, qui habite l'Europe et une partie de l'Asie paléarctique, long de 6 à 7 cm, a une tête courte, des pattes proportionnellement plus longues que celles des *Apodemus* et possédant cinq tubercules palmaires et six plantaires. Sa queue, aussi longue que la tête et le corps réunis, annelée et nue dans sa portion distale, est partiellement préhensile. L'Animal est brun-roux en été, et brun foncé en hiver, avec les parties inférieures grisâtres.

Les *Micromys,* d'origine orientale, dont on pense qu'ils ont été introduits récemment en Europe occidentale, sont proches d'un groupe de genres arboricoles, essentiellement asiatiques, comme *Hapalomys* et *Chiropodomys* (à gros orteils opposables), *Lenomys* (les grands rats des Célèbes, longs de 30 cm), et *Vandeleuria,* ainsi que d'*Anisomys* et *Pogonomys* de Nouvelle-Guinée.

Enfin, citons deux genres non arboricoles, *Vernaya,* de Chine, et *Tokudaia,* des îles Ryu-Kyu.

Le genre *Apodemus,* appelé mulot, important dans la faune européenne, compte sept espèces, répandues dans les régions tempérées et subtropicales de l'Ancien Monde, et limitées en Afrique à la zone méditerranéenne.

Les *Apodemus,* dont les populations subissent des fluctuations importantes (moins toutefois que celles des *Microtus*), sont fréquemment des commensaux de l'homme, entrant dans les maisons et provoquant quelquefois de gros dommages aux cultures.

Très commun chez nous, *A. sylvaticus,* le mulot ordinaire ou sylvestre, mesure de 8 à 11 cm, avec une queue de même longueur, à anneaux distincts et à poils épars. Il possède des oreilles ovales, qui, repliées en avant, dépassent l'œil. Ses pattes postérieures, plus longues que les antérieures, ont des pieds assez longs avec des surfaces plantaires à cinq callosités. Sa robe va du brun-roux au fauve grisâtre, avec les parties inférieures claires. Il fréquente les lieux peu humides, forêts et champs, jusqu'à plus de 2 500 m d'altitude. C'est un Animal crépusculaire et nocturne ; il court, saute (jusqu'à 60 cm), grimpe et nage bien. Il creuse un terrier souterrain, mais n'entre pas en léthargie. Après une gestation de 23 jours, les femelles mettent au monde de 3 à 8 petits, 3 fois par an au maximum. Cette espèce vit environ 3 ans.

Les espèces proches sont *A. flavicollis,* le mulot à collier roux, à tache jugulaire jaune qui constitue souvent un collier, et *A. agrarius,* le mulot agraire, ou rayé, avec une bande noire sur le dos.

Citons, sans les décrire, les genres : *Thamnomys, Grammomys, Oenomys, Mylomys, Dasymys, Pelomys, Hybomys, Stenocephalomys* et *Thallomys,* africains ; *Pithecheir, Hadromys, Golunda, Millardia* et *Dacnomys,* asiatiques ; *Carpomys, Mindanaomys* et *Batomys,* des Philippines, essentiellement arboricoles ; *Hyomys,* de Nouvelle-Guinée ; enfin, *Conilurus, Zizomys* et *Mesembriomys,* d'Australie.

Les deux espèces de *Conilurus* (de 16 à 20 cm de long) ont les pattes postérieures et la queue très longue, d'où leur nom vulgaire de rats à queue, ou rats-lapins. Ils sont arboricoles, comme les *Mesembriomys (M. gouldi* et *M. macrurus)* et longs de plus de 30 cm.

Arvicanthis, avec quatre espèces, habite l'Afrique et l'Arabie. Les *Thallomys,* arboricoles, fréquentent surtout les acacias, d'où leur nom de « rats des acacias ». Le genre *Lemniscomys* compte six espèces, vulgairement appelées rats de Barbarie ; leur robe est ornée de bandes longitudinales sur le dos et les flancs, ces bandes pouvant se réduire à des taches alignées. Enfin, *Rhabdomys pumilio,* assez semblable aux *Lemniscomys,* présente des bandes moins nombreuses.

Le genre *Rattus,* les rats proprement dits, qui compte cent vingt espèces et quelque cinq cent soixante-dix sous-espèces et races géographiques, présente un très

▼ *Les mulots (ici* **Apodemus flavicollis)** *sont fréquemment des commensaux de l'homme, entrant dans les maisons et provoquant quelquefois de gros dommages aux cultures.*

Ostman - J. Holmasen

J. Markham

▲ ***Le rat-surmulot, ou rat d'égout*** **(Rattus norvegicus),** ***dont les pieds sont légèrement palmés, est un redoutable vecteur de germes pathogènes.***

grand intérêt. Il est répandu en Europe et en Asie, le rat noir et le surmulot étant devenus cosmopolites à la suite de l'homme. Les innombrables formes de ce genre ont une longueur très variable (8 à 30 cm); la qualité et la densité du pelage (parfois touffu et doux), ainsi que la longueur de la queue, sont également très diverses.

R. rattus, le rat noir, est relativement fin : il est long de 16 à 23 cm, avec une queue de 19 à 25 cm. Ses oreilles sont assez grandes. Sa queue, peu velue, est nettement annelée (de deux cents à deux cent soixante anneaux). Sa fourrure, assez douce, avec des poils rudes et épars, peut être de couleur ardoise foncé au-dessus, ce qui contraste avec le reste *(R. rattus alexandrus),* ou encore brun-fauve au-dessus et blanc crème en dessous (*R. rattus frugivorus,* espèce méditerranéenne).

R. norvegicus, le rat-surmulot, ou rat d'égout, plus robuste que le précédent, mesure de 21 à 27 cm de long avec une queue de 17 à 22 cm, toujours plus courte que la tête et le corps réunis, avec de cent soixante à cent quatre-vingt-dix anneaux. Sa fourrure est moins rude que celle du rat noir, et ses oreilles plus courtes. Ses pieds sont légèrement palmés.

Le rat noir existait en Europe au Pléistocène; par contre, le surmulot n'est venu que plus tard, d'Asie centrale : il a passé la Volga en 1727, est arrivé en Allemagne en 1750, à Paris en 1753, en Norvège en 1762, et a atteint l'Espagne en 1800. Depuis, il a conquis toutes les régions habitées par l'homme. Sa résistance, sa remarquable capacité d'adaptation, ainsi que sa prolificité, expliquent l'énorme diffusion du genre *Rattus*. Le rat noir et le surmulot sont entrés en concurrence biologique, le second prenant un certain avantage. Ils n'occupent pourtant pas les mêmes biotopes : le rat noir, à tendance arboricole, préfère les lieux secs, alors que le surmulot, plus terricole, aime les lieux humides. Nocturnes, tous deux sont très voraces. Ils ont de 6 à 12 petits, trois ou cinq fois par an. Les rats sont une véritable calamité pour l'économie humaine et ils sont aussi de redoutables vecteurs de germes pathogènes.

Il existe, par ailleurs, un intéressant groupe de rats d'Australie, de Nouvelle-Guinée et des îles voisines : *Gyomys, Leporillus, Pseudomys, Pogonomelomys, Melomys, Solomys* (des îles Salomon), *Xenuromys, Uromys* (rats géants de la Nouvelle-Guinée et des îles voisines, ainsi que de l'archipel Bismarck).

Leporillus compte trois espèces australiennes; longues d'environ 20 cm, grégaires, celles-ci construisent des habitations complexes à faible hauteur dans les buissons, sur les petits arbres et dans la végétation ou même à terre. *L. conditor* élabore des nids à deux chambres et à ouvertures extérieures. *L. jouesi* fabrique de grands nids où habitent de nombreux individus.

Citons encore *Tryphomys,* des Philippines, et *Malacomys,* d'Afrique centro-occidentale, qui aiment les zones humides et paludéennes à végétation dense; on les nomme rats des marais, rats à pieds longs, ou, encore, rats à grandes oreilles.

Outre les rats proprement dits, il existe un groupe de genres de taille moindre, dont le plus typique est *Mus,* avec environ quinze espèces d'Afrique et d'Eurasie; parmi celles-ci, signalons *M. musculus,* la souris domestique, devenue cosmopolite et commensale active de l'homme; elle est fine, avec un museau assez pointu, des grandes oreilles et des petits yeux. Ses pattes, courtes, montrent cinq callosités aux antérieures et six aux postérieures; les pieds sont plus courts que ceux des *Apodemus* mais plus robustes. La queue, souvent plus longue que la tête et le corps réunis, est velue et annelée (de cent quarante à deux cents anneaux). Sa livrée est gris-brun, plus foncée sur le dessus et fauve sur les flancs, avec les parties inférieures claires sans ligne nette de démarcation. Les pieds sont foncés. Selon certains auteurs, les formes sauvages ont le ventre blanc et une queue plus courte, alors que les formes commensales de l'homme ont le ventre gris et la queue plus longue.

La souris vit dans la campagne et les lisières de forêts; elle manifeste une prédilection pour les habitations et édifices de toutes sortes. On la rencontre jusqu'à 2 500 m d'altitude. Omnivore, ne faisant pas de provisions, elle peut endommager des denrées et divers matériaux. Elle est surtout nocturne, et grimpe très bien; sa posture assise est typique quand elle se nettoie avec ses pattes avant. Elle a 4 à 6 portées par an, avec 4 à 8 petits chacune; ces derniers sont placés dans un nid doux. La souris vit de 2 à 4 ans.

Les souris vivent en groupes familiaux, ayant chacun un territoire propre, délimité par un marquage olfactif, et incluant habitations, refuges, nids, etc. A l'intérieur du territoire familial, certains individus peuvent habiter un nid qui leur est propre, ou bien, en cas de manque d'espace, peuvent vivre à plusieurs dans un nid commun.

Les genres proches sont : *Haeromys,* avec deux espèces arboricoles naines (7 cm), de Bornéo et des Célèbes, *Chiromyscus* et *Diomys,* asiatiques, *Zelotomys* et *Muriculus,* africains, et *Leggadina,* australien.

Les *Notomys,* avec dix espèces australiennes, présentent une surprenante convergence morphologique et éthologique avec les *Dipodomys,* américains (famille des Hétéromyidés). Ils ont les pattes postérieures très longues, aptes au saut, avec des pieds longs, étroits et tétradactyles. Leurs oreilles sont grandes et leur fourrure délicate. *N. richardsoni* accomplit des migrations saisonnières dans le sud-ouest de l'Australie.

La faune indienne comporte *Bandicota indica,* le rat géant de Malabar, long de 35 cm, qui creuse des terriers où il accumule d'importantes provisions; cette espèce cause des dégâts dans les cultures, de même que *Cricetomys gambianus,* le rat géant de Gambie (40 à 45 cm de long), largement répandu en Afrique, qui a la seconde moitié de la queue blanche et qui possède des abajoues ayant une grande contenance.

Echiothrix leucura, rat à piquants ou musaraigne des Célèbes, long de 20 cm, a un museau très allongé et une fourrure mêlée de soies spinuleuses. Les deux genres des Philippines, *Crateromys* et *Phloeomys,* sont très beaux et encore plus bizarres. *Crateromys schadenbergi* est un extraordinaire Rongeur des forêts de montagne, de l'île de Luçon (Philippines); de grande taille (36 cm de long, queue de 40 cm), il a une fourrure très touffue, à bourre dense et long jarre, avec une coloration et des dessins variables : habituellement brun très foncé sur le dessus et les flancs, gris métallique au ventre, certains individus ayant les parties antérieures blanchâtres ou avec un collier clair; sa queue est également couverte d'un pelage très touffu et très long. Crépusculaire et arboricole, il se cache le jour dans des trous d'arbres. Il a une étrange voix stridulante.

Les *Phloeomys,* avec 2 espèces des Philippines, encore plus grands (50 cm pour *P. cummingi,* le plus grand des Muridés), ont une fourrure moins touffue et une queue à pelage court. Leurs pieds sont très larges par adaptation à la vie arboricole. Les molaires ont une structure lamellaire. Devenus très rares, leur biologie est mal connue. Les deux rats arboricoles géants, *Mallomys rothschildi,* de Nouvelle-Guinée, et *Papagomys armandvillei,* de Flores, mesurent environ 45 cm de longueur.

Citons enfin les genres : *Colomys, Lophuromys, Leimacomys, Uranomys, Beamys, Saccostomus,* africains;

J. Six

▲ **Hystrix cristata (Hystricidae),** ***le porc-épic, hérissé en attitude d'attaque; ses piquants, robustes, varient de 3 à 30 cm de long.***

Acomys, afro-asiatique; *Nesoromys* et *Melasmothrix,* asiatiques; *Crunomys,* philippin; *Macruromys* et *Lorenzimys,* néo-guinéens; *Mastacomys,* australien.

La sous-famille des *Rhynchomyinés* comprend pour unique espèce *Rhynchomys soricoides,* ou rat-musaraigne de l'île de Luçon (Philippines); longue d'environ 20 cm, elle a le museau pointu, une fourrure lisse et soyeuse, et une queue assez courte; ses incisives supérieures sont réduites, et elle a seulement 2 molaires $\left(M\,\frac{2}{2}\right)$ par demi-mâchoire; supposé insectivore, ce rat est très mal connu quant à sa biologie.

La sous-famille des *Hydromyinés* compte treize genres, de Nouvelle-Guinée surtout, mais aussi des Philippines et d'Australie, avec dix-huit espèces. Encore proches des Murinés, ces formes ont une tendance à la réduction des dents (avec disparition des 2 dernières molaires chez *Mayermys*) et une tendance à la vie aquatique.

Avec trois espèces d'Australie, de Nouvelle-Guinée et de petits groupes insulaires, *Hydromys* compte les rats d'eau australiens et les rats-castors. Longs d'environ 30 cm, avec une queue un peu plus longue, ces gros Rongeurs présentent une adaptation poussée à la vie aquatique, avec des pieds partiellement palmés; ils vivent en effet près des rivières et des étangs, se nourrissant de Mollusques, de Crustacés, de Poissons, d'Amphibiens et même d'Oiseaux. Ils creusent leur terrier près des rives et sont nocturnes. Leur fourrure est appréciée en pelleterie. La structure de leurs molaires $\left(M\,\frac{1\text{-}2}{1\text{-}2}\right)$, leur haut degré de spécialisation écologique et leur vaste diffusion dans la région australienne font penser que les Hydromyinés seraient l'une des lignées de Rongeurs ayant pénétré le plus anciennement dans cette région.

Mayermys ellermani, découvert en 1954 dans les montagnes de Nouvelle-Guinée, possède une seule molaire par demi-mâchoire, et sa formule dentaire est la plus réduite de tous les Mammifères à denture hétérodonte normale, à savoir :

$$\left(I\,\frac{1}{1};\; C\,\frac{0}{0};\; Pm\,\frac{0}{0};\; M\,\frac{1}{1}\right) \times 2 = 8.$$

Les autres genres sont : *Chrotomys* et *Celaenomys* des Philippines; *Crossomys, Parahydromys, Neohydromys, Leptomys, Microhydromys, Paraleptomys, Baiyankamys* et *Pseudohydromys,* de Nouvelle-Guinée; enfin, *Xeromys* d'Australie.

La sous-famille des *Dendromurinés,* africaine, comprend des Rongeurs ayant la troisième molaire toujours très réduite, la rangée de cuspides longitudinaux internes des première et deuxième molaires supérieures ayant disparu, à l'exception d'un seul cuspide. Certains sont arboricoles et ont la queue préhensile, mais tous sont de taille très modeste. Il en existe sept genres : *Dendromus, Malacothrix, Dendroprionomys, Prionomys, Petromyscus, Delanymys* et *Steatomys,* avec au total douze espèces.

La sous-famille des *Déomyinés* compte une seule espèce, *Deomys ferrugineus,* du bassin du Congo, semblable à un rat, longue de 15 cm, à grandes oreilles, à fourrure légèrement spinuleuse, et à queue préhensile très longue (jusqu'à 20 cm), qui est arboricole.

La sous-famille des *Otomyinés* comprend des formes murines à queue relativement courte et velue. Les molaires sont robustes, hypsodontes, constituées d'une série de lamelles transversales, la dernière molaire étant plus grosse que les deux autres. Il en existe trois genres : *Otomys, Myotomys* et *Parotomys,* avec vingt-sept espèces, toutes africaines.

Super-famille des Pédétoidés

Les Pédétoïdés *(Pedetoidea)* comprennent la seule famille des **Pédétidés** *(Pedetidae).*

Nous adoptons ici la position de Grassé pour ce groupe *incertae sedis,* très spécialisé pour la course bipède par sauts. Ils ont un crâne massif, avec des arcades zygomatiques robustes, un foramen infra-orbitaire profond et une mandibule à apophyse courte, non repliée vers l'extérieur. Les pattes antérieures sont très courtes, pentadactyles, armées de robustes griffes. Les pattes postérieures sont tétradactyles (disparition du gros orteil) et avec des griffes ressemblant à des onglons; elles sont beaucoup plus longues que les antérieures, avec le tibia et le péroné soudés distalement, et un métatarse, un calcanéum et un astragale très longs. La formule dentaire est : $\left(I\,\frac{1}{1};\; C\,\frac{0}{0};\; Pm\,\frac{1}{1};\; M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 20.$ Les molaires sont hypsodontes et ont des reliefs simples.

Le seul genre existant est *Pedetes,* avec deux espèces habitant en Afrique au sud du Sahara, dans les zones arides et sablonneuses. Il s'agit des lièvres-sauteurs (avec *P. capensis*) qui, à l'exception de leur queue en panache de poils serrés, ressemblent à certains wallabys. Ayant jusqu'à 40 cm de long, ils ont le museau obtus, de gros yeux, et de longues oreilles avec une sorte de petit tragus à la base.

Ils vivent aussi bien en plaine qu'en montagne, dans les régions steppiques du Kenya et de l'Afrique australe. Nocturnes et grégaires, ils se cachent pendant le jour dans des tanières creusées à l'aide de leurs pattes antérieures. Ils se nourrissent surtout de racines. Ils peuvent effectuer des sauts de plus de 6 m de long. Il y a 1 petit, rarement 2, lors de l'unique portée annuelle.

Sous-ordre des Pentalophodontes

Le sous-ordre des Pentalophodontes *(Pentalophodonta)* comprend les Rongeurs dont les molaires ont une structure pentalophodonte ou analogue : la face occlusale présente cinq crêtes transversales ou, suivant Stehlin et Schaub, cinq anticlinaux séparés par quatre synclinaux. Ce type de molaire, apparu à l'Éocène supérieur (genres *Trechomys* et *Theridomys*), est considéré comme le point de départ d'un grand nombre d'autres types qui en dérivèrent à la suite de complications, simplifications et régressions.

La systématique du sous-ordre n'est pas encore bien définie; celui-ci comprend, en tout cas, tous les Hystricomorphes des autres classifications, plus quelques autres groupes de Myomorphes et Sciuromorphes. Ce sont, dans l'ensemble, des formes assez naturelles, dont les rapports phylogénétiques internes sont toutefois mal établis. Selon la classification adoptée ici, le sous-ordre est divisé en deux infra-ordres : les Palæotrogomorphes et les Nototrogomorphes, le premier comprenant des formes de l'Ancien Monde et d'Amérique du Nord et le second des formes presque uniquement d'Amérique centrale et d'Amérique du Sud (région néotropicale). On

observera que cette répartition géographique est la conséquence de transformations évolutives et paléogéographiques, qui ont influé sur la genèse de la faune des Rongeurs du Nouveau Monde, et non le résultat d'un critère de classification.

★ *Infra-ordre des Palæotrogomorphes*

L'infra-ordre des Palæotrogomorphes *(Palaeotrogomorpha)* comprend les familles des Hystricidés, des Castoridés, des Thryonomyidés, des Pétromyidés, des Bathyergidés, des Spalacidés, et des Rhizomyidés, à diffusion holarctique, paléotropicale ou orientale.

Nous avons rangé le genre *Eupetaurus* à sa place traditionnelle, bien que ses affinités réelles soient discutables (on verra à ce propos les Sciuridés Pétauristinés).

Les **Hystricidés** *(Hystricidae)* comprennent les porcs-épics de l'Ancien Monde, de taille moyenne ou grande (de 40 à 70 cm de long). Ils sont massifs et fouisseurs. Leurs pattes sont assez courtes et pentadactyles. Leur fourrure est faite de poils plus ou moins rigides ou transformés en piquants sur le dessus du corps et sur les flancs; ces piquants forment un moyen de défense efficace. Les os du crâne tendent à se pneumatiser dans la zone faciale.

La formule dentaire est :

$$\left(I\,\frac{1}{1};\ C\,\frac{0}{0};\ Pm\,\frac{1}{1};\ M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 20.$$

Les molaires, hypsodontes et radiculées, ont une structure lamellaire. Le bout de la langue est pourvu de rangées transversales de disques cornés, à pointes. Les poumons sont divisés en petits lobes. Les clavicules sont incomplètes et le tibia et le péroné sont distincts.

Les Hystricidés, avec quatre genres et vingt et une espèces, sont répandus de nos régions à l'Afrique, à l'Asie du Sud-Est et à la Chine méridionale. Ce sont des Animaux nocturnes, qui vivent dans les forêts, les savanes, et les zones arides.

Hystrix comprend environ douze espèces, d'Europe méridionale, d'Afrique et d'Asie du Sud-Est, dont *H. cristata,* le porc-épic à crête, long de 50 à 70 cm. Il a la tête trapue, les yeux assez grands et de petites oreilles peu visibles. Ses pattes sont courtes, avec les pieds et les mains larges et courts. Sa fourrure, composée de soies rudes sur la tête, les épaules, les parties inférieures du corps et les extrémités, forme également une sorte de crête sur la nuque et sur le cou. Le dessus et l'arrière du dos sont recouverts par de gros et robustes piquants, dont la taille varie de 3 cm à 30 cm. La queue est longue de 5 cm. La livrée est brun noirâtre, avec des soies

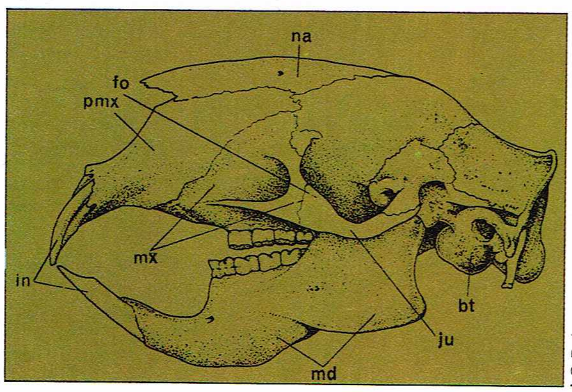

▶ *Représentation schématique d'un crâne de porc-épic à crêtes* **(Hystrix cristata)** *: pmx, prémaxillaire; fo, foramen infra-orbitaire; na, nasal; ju, jugal; mx, maxillaire; md, mandibule; bt, bulle tympanique.*

▼ **Castor canadensis,** *le castor du Canada, dont les populations ont fortement diminué et ont disparu de plusieurs bassins fluviaux.*

blanches et éparses, surtout sur la crinière; les piquants sont noirâtres, avec des anneaux blanchâtres.

Ce porc-épic fréquente les plaines, les collines et les zones montagneuses, jusqu'à 800 m d'altitude, surtout dans les endroits buissonneux et le maquis. Il se nourrit de fruits et de Végétaux divers et ronge les écorces. Nocturne, courant rapidement, c'est aussi un excellent fouisseur : il élargit les cavités naturelles pour s'en faire des abris. Il vit solitairement ou par groupes familiaux. Les femelles ont 1 ou 2 petits par portée. L'espèce vit de 10 à 15 ans.

Thecurus comprend trois espèces, qui vivent dans l'archipel malais et les Philippines; plus petit que les porcs-épics proprement dits, il possède des piquants moins longs et abondants.

Les *Atherurus,* ou athérures, avec quatre espèces de l'Asie méridionale et d'Afrique, de taille analogue à *Thecurus* (50 cm de long) et pourvus de piquants, sont caractérisés essentiellement par leur queue, pourvue d'un gros panache de soies sommitales; *A. macrourus,* d'Indochine, est très connu.

Enfin, *Trichys,* long de 40 cm au maximum, avec une fourrure faite de soies et de piquants très courts, compte deux espèces, *T. lipura* de Bornéo et *T. macrotis,* de la péninsule malaise et de Sumatra.

Les **Castoridés** *(Castoridae)* sont longs de 75 cm à 1,30 m, et peuvent peser jusqu'à 32 kg. Leur fourrure est très dense, à bourre très fine et à jarre assez grossier, de couleur brunâtre avec certaines variations. Leur queue et leurs pattes sont plus foncées et parfois noirâtres. Leurs yeux sont petits, pourvus d'une membrane nictitante, et leurs oreilles sont petites et velues. Ces Rongeurs ont le crâne massif, sans apophyse postorbitaire, et à arcades zygomatiques très bombées.

Leur formule dentaire est :

$$\left(I\,\frac{1}{1};\ C\,\frac{0}{0};\ Pm\,\frac{1}{1};\ M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 20.$$

Les incisives sont particulièrement développées et très robustes; les dents maxillaires, hypsodontes, n'ont pas de croissance continue; la prémolaire est aussi développée que les molaires.

Le tibia et le péroné sont soudés à la base. Les pattes sont pentadactyles, avec des pieds palmés et pourvus de robustes griffes. La queue, très caractéristique, est longue de 25 à 35 cm et large de 12 à 16 cm; sa partie basale, de section circulaire, est couverte de poils; pour le reste, elle est fortement aplatie dorso-ventralement et carénée sur la ligne médio-dorsale; elle est recouverte d'écailles plus ou moins hexagonales, juxtaposées et non imbriquées, dont certaines sont pourvues à l'arrière de quelques poils courts et rigides, plus abondants chez les juvéniles. Le castor d'Europe possède de quatre-vingt-dix à cent quatre rangées d'écailles sur la queue.

Les orifices anal et uro-génital débouchent dans une sorte de pseudocloaque. Il existe des glandes anales spéciales, plus développées chez les mâles; chez le castor d'Europe, elles sont sacciformes. Ce sont des glandes acineuses, pourvues d'une musculature externe, de type holocrine, avec une sécrétion huileuse abondante.

La famille compte pour seul genre *Castor,* dont la distribution est holarctique. Celui-ci comprend deux espèces : *C. fiber,* le castor d'Europe, qui habite l'Eurasie, et *C. canadensis,* le castor du Canada, qui vit en Amérique du Nord; certains auteurs considèrent que ces deux formes ne constituent qu'une seule espèce. Les castors se tiennent près des cours d'eau et des lacs.

Le castor d'Europe, trop chassé, est maintenant confiné en Scandinavie, en Pologne et en Russie, dans de toutes petites zones de son aire primitive. Il en existe encore quelques spécimens dans la vallée du Rhône et dans le bassin de l'Elbe. Un repeuplement est tenté près de Genève. Hors d'Europe, il vit encore dans le Caucase et dans certaines régions de la Sibérie et de la Mongolie. Crépusculaire et nocturne, le castor d'Europe a une vue médiocre mais son ouïe et son odorat sont très fins.

Le castor du Canada vit du Canada septentrional jusqu'à Rio Grande, dans une aire fragmentée; ses populations ont fortement diminué et ont disparu de plusieurs bassins fluviaux.

Les castors s'éloignent très peu des cours d'eau, des lacs et des étangs. Assez gauches à terre, ils nagent très bien, en repliant leurs pattes antérieures contre leur corps, avançant grâce à la poussée de leurs pattes postérieures

T. Okapia

palmées, leur queue servant de gouvernail. Quand ils nagent et plongent, leurs narines et leurs oreilles sont fermées hermétiquement. Ils peuvent rester longtemps en immersion (jusqu'à un quart d'heure) effectuant en quatre à cinq minutes des trajets parfois longs de 700 m.

Les castors sont surtout connus par leurs constructions, leurs barrages et leurs cabanes faits de branches et de divers matériaux. Leurs nids sont longs de 4 à 10 m et ont une entrée toujours immergée. Leurs édifices ont un diamètre de 1,50 m à 3,50 m et dépassent quelquefois le niveau de l'eau de 2 m. Ce sont des abris très solides et très durables. Quand le niveau de l'eau monte, les castors élèvent le sol de leurs cabanes, qu'ils n'abandonnent qu'en cas de graves inondations. Le même abri peut être habité pendant des années (jusqu'à plus de trente ans).

Les castors construisent des digues destinées à barrer les cours d'eau, afin que les entrées de leurs galeries d'accès aux cabanes soient toujours submergées. Ils coupent avec leurs incisives les troncs et les branches qui servent à la construction et les cimentent avec de la vase et de la terre; les grandes digues, qui sont l'œuvre de plusieurs générations, peuvent dépasser 100 m de long. A l'occasion, les castors aménagent aussi des sortes de canalisations, ou mieux des voies d'eau, où ils peuvent transporter des morceaux d'arbres pour la construction de leur digue.

Strictement végétariens, les castors se nourrissent d'écorces, de parties hypogées de plantes (tubercules, rhizomes, racines) qu'ils emmagasinent parfois pour l'hiver, ainsi que de toutes sortes de plantes herbacées. Quand

▲ Amas de branchages réalisé par des castors, dans un cours d'eau, en montagne; leurs constructions peuvent atteindre de 4 à 10 m de long et ont une entrée toujours immergée.

ils mangent, ils tiennent leur nourriture avec leurs pattes antérieures.

Leur organisation sociale est encore mal connue; on sait qu'ils se réunissent essentiellement par plusieurs groupes familiaux; le castor du Canada forme des familles de douze têtes au maximum. Les castors sont territoriaux; la sécrétion de leurs glandes anales sert au marquage. Ce sont des Animaux monogames; l'accouplement s'effectue en hiver (janvier et février) et la mise bas a lieu en avril et mai, à raison de 2 à 4 petits (8 au maximum) par portée. La longévité des deux espèces est de 15 à 20 ans. Les castors sont sédentaires mais se déplacent lorsque leurs populations deviennent trop nombreuses.

Les **Thryonomyidés** *(Thryonomyidae)* renferment un seul genre : *Thryonomys,* avec six espèces (les rats de roseaux, ou rats à piquants, africains), qui vivent près des bords des fleuves, des lacs, des marais et, plus rarement, dans des zones rocheuses. Ils sont généralement solitaires. Longs de 40 à 60 cm, avec une queue de 10 à 25 cm, ils sont trapus. Leurs pattes sont tétradactyles. Leur fourrrue est rude et presque épineuse.

Leur formule dentaire est :

$$\left(I\,\frac{1}{1};\ C\,\frac{0}{0};\ Pm\,\frac{1}{1};\ M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 20.$$

Leurs incisives sont très longues et très puissantes; leurs dents maxillaires sont quelque peu hypsodontes et radiculées.

T. swinderianus, l'aulacode, d'Afrique occidentale, est brun-roux. Il creuse de profonds terriers à proximité des zones cultivées, dans lesquelles il provoque des dégâts.

Les **Pétromyidés** *(Petromyidae)* ne comptent qu'une espèce : *Petromus typicus,* qui fréquente les zones rocheuses et montagneuses de l'Afrique du Sud-Ouest. De forme murine, long de 14 à 20 cm, avec une queue de 13 à 18 cm, il a une fourrure longue et non touffue. Ses oreilles sont courtes.

Sa formule dentaire est :

$$\left(I\,\frac{1}{1};\ C\,\frac{0}{0};\ Pm\,\frac{1}{1};\ M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 20.$$

Cet Animal diurne se nourrit principalement de fleurs de certaines Composées.

Les **Bathyergidés** *(Bathyergidae)* comprennent les rats-taupes africains et les « blesmols », hautement spécialisés dans la vie souterraine. Ce sont des Animaux trapus, longs de 8 à 30 cm. Leurs yeux et leurs oreilles sont petits ou minuscules. Leurs pattes et leur queue sont courtes. Leur péroné est entièrement soudé au tibia. Leurs mains et leurs pieds sont gros, pentadactyles, palmés et à plantes nues. Leur crâne est très robuste, avec des arcades zygomatiques étroites, un palais très étroit, et une mandibule à processus angulaire fortement replié vers l'extérieur.

Leur formule dentaire, variable, est :

$$\left(I\,\frac{1}{1};\ C\,\frac{0}{0};\ Pm\,\frac{2\text{-}3}{2\text{-}3};\ M\,\frac{0\text{-}3}{0\text{-}3}\right) \times 2 = 12\text{-}28.$$

Chez *Heliophobius,* les dents maxillaires sont au nombre de $\frac{6}{6}$ mais toutes ne sont pas simultanément présentes. Les incisives sont particulièrement longues et robustes, alors que les molaires n'ont pas de croissance continue.

La famille est répandue seulement en Afrique, au sud du Sahara, dans des zones à sol meuble ou sablonneux; elle comprend cinq genres et cinquante-six espèces, dont beaucoup ne sont, en fait, que des races géographiques.

Georychus, avec pour seule espèce *G. capensis,* habite l'Afrique australe jusqu'au Cap. Il a une fourrure longue et touffue, avec le dessus marron ou brun-orangé et le dessous plus clair. Strictement fouisseur, il passe toute sa vie sous terre.

Cryptomys, avec environ cinquante formes, a une très vaste diffusion. Sa fourrure veloutée est à poils courts. En Afrique du Sud, il entre en hibernation ou, tout au moins, reste inactif pendant les mois froids. Ils se nourrit de tubercules, de racines et de bulbes, ainsi que de divers Invertébrés du sous-sol.

Heliophobius vit dans les zones sablonneuses, de 700 à 1 500 m d'altitude. Il comprend trois espèces, à long pelage grisâtre, sable clair ou roux.

Bathyergus suillus, ou bathyergue maritime, creuse ses tanières dans les régions côtières de l'Afrique australe. Il atteint 30 cm de long et est muni de longues griffes, surtout aux mains.

Heterocephalus, avec pour seule espèce *H. glaber,* l'hétérocéphale, des régions arides d'Afrique orientale, vit entre 600 à 1 800 m d'altitude. Long d'environ 9 cm, avec une queue de 3 à 4 cm, il est presque entièrement nu. Ses yeux et ses pavillons auriculaires sont très réduits. Sa peau, de couleur rose chair, est assez ridée; il s'agit d'une forme extrême d'adaptation à la vie souterraine, l'hétérocéphale passant sa vie entière dans ses galeries fort compliquées.

Les **Spalacidés** *(Spalacidae)* étaient précédemment classés, avec les Rhizomyidés, chez les Myomorphes; ils sont très adaptés à la vie souterraine. D'aspect talpoïde, sans queue visible, ils ont des pattes très courtes et inégales, cachées sous le pelage; ils portent une fourrure très douce, veloutée, mais présentent cependant une rangée de poils clairs rigides courant de chaque côté de la tête.

La région occipitale de leur crâne très large et aplati est inclinée d'arrière en avant. Leurs arcades zygomatiques sont très proéminentes. Leur formule dentaire est :

$$\left(I\,\frac{1}{1};\ C\,\frac{0}{0};\ Pm\,\frac{0}{0};\ M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 16.$$

Leurs dents maxillaires, semi-hypsodontes et radiculées, ont une surface occlusale, marquée d'un dessin typique en Z ou en S, qui peut être ramenée cependant au type pentalophodonte. Les incisives énormes et lisses servent, encore plus que les pattes, à creuser. Leurs griffes sont moyennement développées.

Le seul genre est *Spalax,* avec trois espèces, répandues de l'Europe de l'Est au Turkestan et au Proche-Orient.

S. leucodon, le spalax occidental, long d'un peu moins de 20 cm, et *S. microphtalmus,* le spalax oriental, plus gros (30 cm), sont répandus dans les régions steppiques du sud-est de l'Europe, le premier atteignant à l'ouest la Hongrie, la Yougoslavie et une partie de la péninsule hellénique. *S. ehrenbergi,* lui, est propre à l'Asie occidentale, à la Libye et à l'Égypte.

Les spalax ont une prédilection pour les steppes herbeuses, à sol compact et à riche couverture végétale, qui leur fournit leur nourriture, composée de racines, de tubercules et de rhizomes. Ils creusent de longues et tortueuses galeries, surtout le matin et le soir. Leurs tanières reconnaissables aux petits monticules de terre accumulés extérieurement se présentent, en général, sous forme de tunnels horizontaux et superficiels, servant à la recherche de la nourriture (galeries d'alimentation), et de galeries profondes avec des chambres d'habitation et des magasins pour les provisions, etc. Les tunnels ont une section circulaire d'un diamètre de 5 à 6 cm et sont continuellement nettoyés et lissés par leurs propriétaires. Chaque individu a sa propre tanière et vit solitairement. Les Spalacidés n'entrent pas en léthargie.

Les **Rhizomyidés** *(Rhizomyidae),* adaptés à la vie souterraine, portent une fourrure plus ou moins touffue et rude selon la latitude où ils vivent. Leurs yeux et leurs oreilles sont visibles. Ils mesurent de 16 à 46 cm de long, avec une queue de 5 à 15 cm. Leur crâne est large et aplati comme celui des spalax, mais à région occidentale beaucoup moins inclinée en oblique. Leur formule dentaire est : $\left(I\,\frac{1}{1};\ C\,\frac{0}{0};\ Pm\,\frac{1}{1};\ M\,\frac{2}{2}\right) \times 2 = 16.$ Ils habitent l'Asie du Sud-Est et l'Afrique et comptent trois genres et dix-huit espèces.

Tachyoryctes compte quatorze espèces de rats-taupes, qui vivent en Afrique centrale et orientale, jusqu'à 3 700 m d'altitude. *T. splendens* creuse des galeries de faible profondeur, dans les terrains herbeux.

Rhizomys, le genre type, comprend trois espèces, d'Asie méridionale et du Sud-Est, répandues de la Chine méridionale à l'Assam, la Birmanie et Sumatra. Elles vivent dans les forêts denses de bambous, de 1 300 à plus de 4 000 m d'altitude. Elles ont une fourrure très touffue, surtout chez les formes septentrionales. Avec leur corps trapu, leurs pattes petites et leur queue très courte, ces « rats des bambous » ressemblent aux Géomyidés. Ils possèdent de puissantes griffes et, surtout, des incisives fort robustes, proéminentes et orangées, qui font saillie hors des lèvres.

Cannomys, avec pour seule espèce *C. badius,* est propre au Népal, à l'Assam et à l'Indochine.

Ostman - J. R. Simon

▲ ***Les Éréthizontidés sont des Rongeurs hautement spécialisés pour la vie arboricole;*** **Erethizon dorsatum,** ***l'ourson coquau, habite surtout les forêts de Conifères et les plantations de peupliers en Alaska, au Canada et dans une grande partie des États-Unis.***

★ *Infra-ordre des Nototrogomorphes*

Les Nototrogomorphes *(Nototrogomorpha)* comprennent tous les Pentalophodontes néotropicaux (une seule famille vit également en Amérique du Nord : celle des Éréthizontidés). Cet infra-ordre est divisé en quatre super-familles : les Éréthizontoïdés, les Cavioïdés, les Dinomyoïdés et les Octodontoïdés.

Super-famille des Éréthizontoïdés

Les Éréthizontoïdés *(Erethizontoidea)* renferment une seule famille.

Les **Éréthizontidés** *(Erethizontidae)* sont des Rongeurs arboricoles, longs de 30 à 86 cm, avec une queue dont la longueur varie de 4 à 75 cm. Celle-ci est préhensile chez de nombreuses espèces, particulièrement chez les cœndous, où elle s'enroule par sa face dorsale. Leur fourrure est constituée de poils très rudes, soyeux, et mêlés à des piquants rigides et assez courts. Leurs pieds sont dépourvus de gros orteil, et portent à la place une forte callosité avec une formation osseuse spéciale, qui augmente la surface plantaire. Leur crâne, qui présente une convergence sensible avec celui des Échimyidés, est caractérisé par de grosses bulles tympaniques. Leur formule dentaire est :

$$\left(I\,\frac{1}{1};\ C\,\frac{0}{0};\ Pm\,\frac{1}{1};\ M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 20;$$

les molaires sont radiculées. A la naissance, les petits sont déjà très développés.

La famille est divisée en deux sous-familles : les Chætomyinés et Éréthizontinés, avec au total quatre genres et vingt-trois espèces.

Les *Chætomyinés* sont munis de piquants seulement sur la partie antérieure du corps. *Chaetomys subspinosus,* long de 45 cm, avec une queue de 25 cm, nue et partiellement préhensile, vit au nord-est du Brésil.

E.P.S.

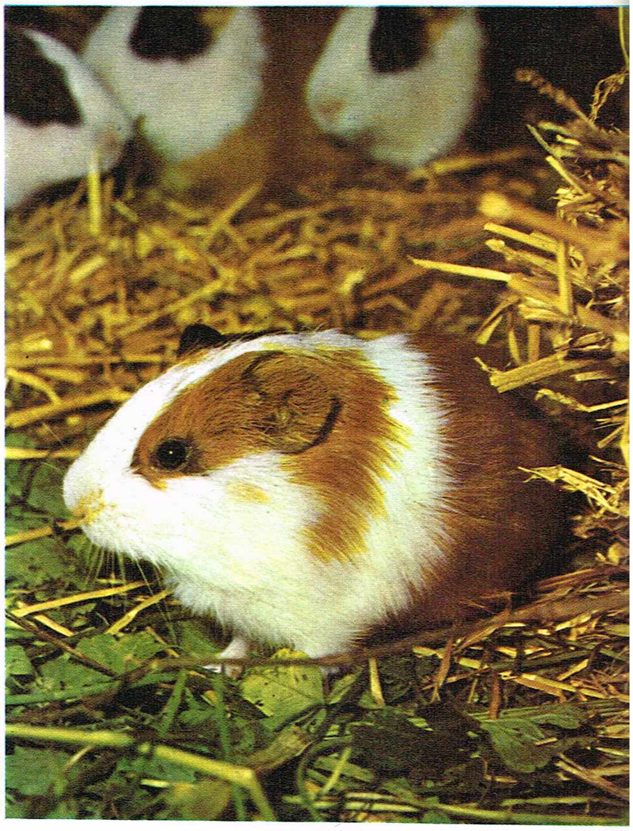

G. Mazza

▲ *A gauche,* **Coendou prehensilis** *appartient à un genre très typique avec son museau court en forme de groin et sa fourrure constituée d'un mélange de poils soyeux et de courts piquants. A droite,* **Cavia porcellus,** *le cobaye, est la forme sauvage la plus proche de celle que l'on élève actuellement.*

▶ *Page ci-contre, de haut en bas :* **Dolichotis patagona,** *le mara, ou lièvre de Patagonie, a l'habitude de rester longtemps au soleil.* **Hydrochoerus hydrochaeris,** *le capibara, est le plus grand Rongeur vivant du monde; il mène une vie semi-aquatique dans les forêts paludéennes touffues et le long des fleuves, à l'est des Andes jusqu'au Paraná.* **Cuniculus paca,** *le paca, habite les lisières des forêts et nage très bien.*

Les *Éréthizontinés* possèdent des piquants sur toute leur partie dorsale.

Le genre *Erethizon* compte une seule espèce, *E. dorsatum,* l'ourson coquau, qui habite surtout dans les forêts de Conifères et dans les plantations de peupliers, en Alaska, au Canada, dans une grande partie des États-Unis et jusqu'au nord du Mexique. Long de 60 à 85 cm, il possède une queue courte (30 cm au maximum), épaisse et épineuse, et il peut peser jusqu'à 7 kg. Il a une tête obtuse, un corps trapu et une longue fourrure touffue, hérissée de courts piquants, le dos portant une sorte de haute crinière. Excellent grimpeur, il aménage une tanière dans un gros arbre creux ou sous un rocher. Au printemps et en automne, il effectue des déplacements de plusieurs kilomètres. Il se nourrit de plantes herbacées, de feuilles, d'écorces et de divers fruits sauvages, et ronge aussi des os et des bois de Cervidés.

Le genre *Coendou* est très typique, avec son museau court formant un groin et sa fourrure constituée par un mélange de poils soyeux et de courts piquants, très abondants et distribués sur presque tout le corps. Les coendous sont parmi les Rongeurs les mieux adaptés à la vie arboricole. Ils sont nocturnes. Les femelles ont le plus souvent un seul petit par portée. Les coendous comptent différentes espèces, distribuées du Mexique à l'Argentine.

C. prehensilis, le coendou à queue préhensile, long de 30 à 60 cm, possède une longue queue (30 à 45 cm), totalement préhensile et nue dorsalement à son extrémité. Ses pattes ont quatre doigts fonctionnels.

Citons, enfin, le genre *Echinoprocta,* avec pour seule espèce *E. rufescens,* à queue très courte et qui vit en Colombie.

Super-famille des Cavioïdés

Les représentants des Cavioïdés *(Cavioidea)* présentent parmi leurs caractères distinctifs une crête située sur les côtés externes de la mandibule et servant à l'insertion d'une partie du muscle masséter. Leur formule dentaire générale est : $\left(I\,\frac{1}{1};\ C\,\frac{0}{0};\ Pm\,\frac{1}{1};\ M\,\frac{3}{3}\right)\times 2 = 20.$ Les dents maxillaires, à croissance continue, sont hypsodontes, plus ou moins prismatiques, et ont de profonds sillons latéraux.

La clavicule est absente, et le péroné imparfaitement soudé au tibia. La queue est rudimentaire.

Cette super-famille, caractéristique de la faune néotropicale, compte deux familles : les Caviidés et les Hydrochéridés.

Les **Caviidés** *(Caviidae)* présentent un développement particulier de la troisième molaire et un palais très bref.

Cette famille, divisée en deux sous-familles, ne comprend que trois genres et vingt-trois espèces.

La sous-famille des *Caviinés* renferme les genres *Cavia* et *Kerodon. Cavia,* le cobaye, avec environ vingt espèces d'Amérique du Sud, comprend des Rongeurs longs de 22 à 35 cm, aux oreilles petites et aux pattes courtes et pourvues de griffes coupantes, les antérieures étant tétradactyles et les postérieures tridactyles. La queue est absente. La fourrure est plutôt longue, grossière et rude chez les espèces sauvages, alors qu'elle est courte et lisse chez les formes domestiques. Grégaires, les cobayes fréquentent toutes sortes de milieux; ils vivent dans des tanières par petits groupes de cinq à dix individus. Leur reproduction a lieu toute l'année et les femelles mettent bas de 1 à 4 petits par portée chez les espèces sauvages. Ils vivent environ 8 ans. *C. porcellus* est la forme sauvage la plus proche de celle qu'on élève actuellement; elle était déjà domestiquée par les Incas pour sa chair, ainsi que l'espèce très proche, *C. cutleri.*

Kerodon rupestris, à museau étroit et plus long que celui des genres précédents, est rupicole et habite le Brésil.

Les représentants de la sous-famille des *Dolichotinés* présentent un important allongement des pattes, qui sont armées de grosses griffes ressemblant à de petits sabots; il s'agit d'un cas de convergence avec les Ongulés, par suite de l'adaptation à la course.

Le seul genre est *Dolichotis,* qui compte deux espèces: *D. patagona,* le mara, ou lièvre de Patagonie, et *D. (Pediolagus) salinicola.* Le mara, le plus typique, long d'environ 70 cm, ressemble un peu au lièvre par ses attitudes, ainsi que par sa queue très courte et par ses grandes oreilles. Les individus les plus gros peuvent peser jusqu'à 16 kg. Surtout diurnes, les maras vivent en groupes de huit à trente individus, dans de grandes tanières qu'ils creusent eux-mêmes ou des terriers abandonnés par d'autres Animaux. Ils ont l'habitude de rester longtemps au soleil. Chaque année, les femelles mettent bas, dans la tanière, de 2 à 5 petits.

Les **Hydrochœridés** *(Hydrochoeridae)* ou **Hydrochéridés** dont la troisième molaire est extrêmement déve-

loppée, ne comptent qu'un genre, *Hydrochoerus*, avec deux espèces.

H. hydrochaeris, le cabiai, ou capibara, est le plus grand Rongeur vivant (1 m à 1,30 m de long) et pèse jusqu'à 50 kg. Il habite en Amérique du Sud, à l'est des Andes jusqu'au Paraná. Son corps est robuste, ses pattes relativement courtes, et ses oreilles peu développées. Sa fourrure est très grossière, avec des poils en forme de soies. Les pattes antérieures sont tétradactyles et les postérieures tridactyles (avec une membrane interdigitale pour ces dernières).

Le capibara mène une vie semi-aquatique dans les forêts paludéennes touffues, le long des fleuves, formant des bandes de dix à vingt têtes. C'est un Animal diurne, qui cherche toujours refuge dans l'eau lorsqu'il est apeuré ; il nage remarquablement, le corps immergé et laissant seulement dépasser ses narines, ses yeux et ses oreilles. Les femelles mettent au monde de 2 à 8 petits par portée, après une gestation de 15 à 18 semaines. Ce Rongeur est chassé par les indigènes pour sa chair. *H. isthmius*, de taille bien inférieure, vit au Panama.

Super-famille des Dinomyoïdés

Les Dinomyoïdés *(Dinomyoidea)* comptent trois familles : les Cuniculidés, les Chinchillidés et les Dinomyidés.

Les **Cuniculidés** *(Cuniculidae)* comprennent les pacas, Rongeurs typiques d'Amérique tropicale (du Mexique au Brésil). De grande taille (60 à 80 cm de long), ils ont une queue ne dépassant pas 2 à 3 cm ; leurs pattes ne sont guère développées, les antérieures ayant quatre doigts et les postérieures cinq, dont les trois médians sont fonctionnels. Leur crâne, très haut, présente d'énormes arcades zygomatiques. Leurs dents maxillaires sont nettement hypsodontes et semi-radiculées. Leur fourrure, grossière, est caractérisée par des bandes longitudinales de taches jaunâtres, qui ressortent sur le fond brun.

Cuniculus paca, le paca proprement dit, diurne, habite les lisières des forêts, où il creuse sa tanière. Il nage très bien. *C. (Stictomys) taczanowskii*, le paca de montagne, vit en Équateur, au Venezuela et dans les Andes, jusqu'à plus de 3 000 m d'altitude.

Les **Chinchillidés** *(Chinchillidae)* possèdent des molaires à croissance continue, hypsodontes, et à faces occlusales constituées par trois îlots transversaux entourés d'émail. Ces Animaux sont conformés pour la course et le saut : leurs pieds sont allongés et possèdent trois ou quatre doigts, dont trois seulement fonctionnels. Le péroné, réduit, est indépendant du tibia. Les Chinchillidés comptent trois genres et sept espèces, d'Amérique du Sud.

Lagostomus maximus, la viscache des plaines, longue de 66 cm, est typique des pampas argentines. Massive et trapue, avec une tête large et aplatie, elle possède des vibrisses très développées. Ses pieds sont assez grands. Sa queue, très touffue, mesure environ 20 cm de long. Sa fourrure, également très touffue, est gris foncé sur le dessus et blanchâtre en dessous ; les joues portent une large bande noire, bordée de blanc.

Ce gros Rongeur vit en groupes de quinze à trente individus ayant à leur tête un mâle adulte. Chaque groupe a son ensemble de terriers avec de nombreuses entrées ; il semble que ces refuges soient habités pendant très longtemps, peut-être des siècles. Les mâles vivent isolés des femelles durant une grande partie de l'année. Normalement, ces dernières mettent bas 2 petits, une fois par an. *L. crassus*, du Pérou, espèce plus grosse que la précédente, a presque sûrement disparu.

Le genre *Lagidium* comprend quatre espèces, de la cordillère des Andes. *L. peruarum*, la viscache de montagne, vit jusqu'à 5 000 m d'altitude, surtout dans les zones rocheuses. Son adaptation à l'altitude se manifeste par la haute teneur en oxygène de son sang et par l'épaisseur de sa fourrure, laineuse et douce. Diurnes et grégaires, les viscaches forment des colonies de plus de cinquante têtes, composées de petits groupes familiaux.

Chinchilla laniger (C. chinchilla), le chinchilla, très connu, long de 20 à 35 cm, possède de gros yeux et de grandes oreilles. Il possède une des fourrures les plus appréciées, à longs poils soyeux et d'une exceptionnelle douceur. Habitant typique de haute montagne, il vit dans de toutes petites zones rocheuses du Chili, de Bolivie et du Pérou, entre 3 000 et 5 000 m d'altitude. Naguère fort

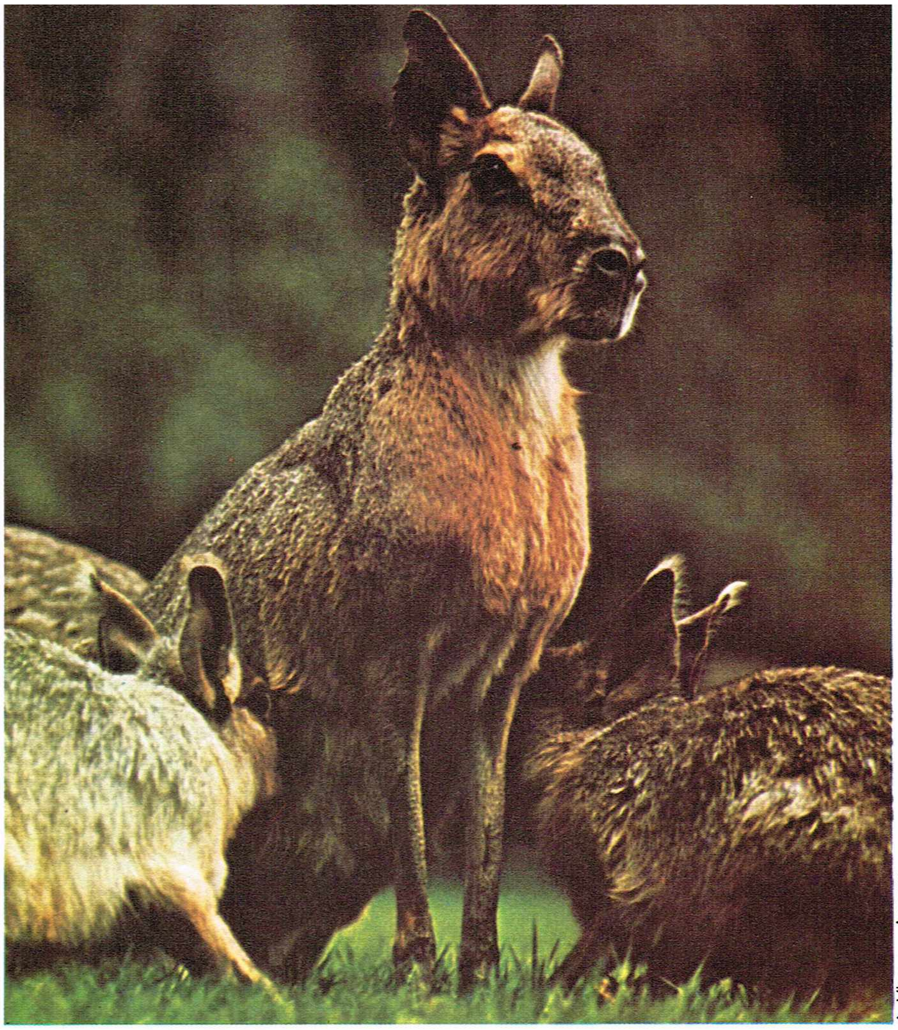

A. Visage - Jacana

Archives P 2

A. Visage - Jacana

▶ **Chinchilla laniger,** *dont la fourrure est très appréciée, est un habitant typique des hautes montagnes du Chili, de la Bolivie et du Pérou.*

E.P.S.

nombreux à l'état sauvage, les chinchillas ont été presque exterminés. Leur survie semble désormais assurée, la chasse ayant perdu tout intérêt économique, étant donné qu'on les élève en différentes parties du monde, pour leur fourrure. Le chinchilla est monogame.

Les **Dinomyidés** *(Dinomyidae)* renferment une seule espèce : *Dinomys branickii,* le pacarana, gros Rongeur long de 70 à 80 cm, à queue de 20 cm et pesant de 10 à 15 kg. Il rappelle le paca par ses bandes longitudinales de taches claires sur les flancs. Ses membres sont tétradactyles et munis de griffes robustes. Ses dents maxillaires, fortement hypsodontes, ont une structure lamellaire. Sa formule dentaire est :

$$\left(I\ \frac{1}{1};\ C\ \frac{0}{0};\ Pm\ \frac{1}{1};\ M\ \frac{3}{3}\right) \times 2 = 20.$$

Le pacarana, propre aux basses vallées andines de Colombie et du Pérou, ainsi qu'à une partie du Brésil, vit dans les forêts et habite de grands terriers qu'il ne creuse pas mais adapte en exploitant des cavités naturelles ou des tanières abandonnées par d'autres Animaux. Lent et innoffensif, il est souvent la victime de prédateurs. Il mange en tenant la nourriture dans ses mains. Actuellement rarissime, il semble qu'il soit en voie de disparition.

Signalons, en appendice des Dinomyidés, la famille des **Heptaxodontidés** *(Heptaxodontidae),* qui comprend entre autres, quatre genres : *Heptaxodon, Elasmodontomys, Amblyrhiza* et *Quemisia,* qui vivaient uniquement aux Antilles et qui se sont éteints à des époques assez récentes. Leurs dents maxillaires, qui présentaient de quatre à sept lames, avec des crêtes presque parallèles, étaient disposées obliquement par rapport à l'axe du crâne. Ils étaient de grande taille et parfois gigantesques (*Amblyrhiza inundata* avait un crâne long de 40 cm). Ils étaient terricoles. On les connaît d'après des restes de squelettes et de dents découverts dans des grottes, et des accumulations de déchets d'origine domestique, près de lieux habités, dans les îles d'Haïti, de Porto-Rico, d'Anguilla et de Saint-Martin. On pense qu'ils ont été chassés à des fins alimentaires, ce qui aurait entraîné leur disparition.

Super-famille des Octodontoïdés

La super-famille des Octodontoïdés *(Octodontoidea)* comprend les familles des Capromyidés, des Échimyidés, Abrocomidés, Cténomyidés et Octodontidés, toutes néotropicales. En annexe nous placerons les Dasyproctidés, dont la position systématique est incertaine.

Les **Capromyidés** *(Capromyidae)* vivent presque uniquement aux Antilles, sauf *Myocastor,* d'Amérique du Sud. Plus massifs et d'habitus moins murin que les Échimyidés, les Capromyidés ont une longueur de 20 à 60 cm environ. Trapus, ils ont les membres courts et une queue variable selon les espèces, velue, partiellement écailleuse, et préhensile chez certaines espèces arboricoles. Ils sont terricoles, arboricoles ou aquatiques *(Myocastor).*

Selon Grassé, les genres *Plagiodontia* et *Myocastor* n'en feraient pas partie et formeraient une famille distincte : les Myocastoridés; cependant nous les classerons dans la famille des Capromyidés, laquelle sera divisée en deux sous-familles : Capromyinés et Myocastorinés.

Les *Capromyinés,* appelés « rats-piloris », ont des molaires sans racines, hypsodontes et à croissance continue; leurs incisives sont étroites. Leur tête est large, avec un museau modérément obtus et des yeux petits. Leurs pieds sont larges et robustes, avec des plantes nues et granuleuses, sans tubercules. Leur queue est velue ou nue, partiellement écailleuse chez *Plagiodontia* et préhensile chez *Capromys.*

Ces Animaux vivent dans les forêts, les zones cultivées et même en montagne. Ils habitent uniquement la sous-région antillaise, à l'exception de *Geocapromys thoracatus,* de l'île de Swan, dans le golfe du Honduras (selon Walker). Ils ont été introduits par l'homme dans des villes, ce qui tend à faire considérer la présence de certaines formes, au-dehors de l'aire antillaise, comme la conséquence d'une importation : c'était probablement le cas de *Procapromys geayi,* espèce présumée du Venezuela, dont on a rencontré un seul spécimen, probablement un juvénile de *Capromys pilorides.*

Les Capromyinés ont vu leurs populations diminuer, par suite de la chasse qui leur a été faite, de la transformation des conditions de milieu à la suite de la colonisation européenne, et surtout de l'introduction de Carnivores exotiques, comme les mangoustes.

Capromys compte quatre espèces, de Cuba et de l'île des Pins; ressemblant à de très gros rats, les *Capromys* sont longs de 30 à 50 cm, avec une queue de 15 à 30 cm, et pèsent jusqu'à 7 kg. Leur fourrure, rude, est de couleur variable avec le dessous plus clair. Une espèce au moins, *C. prehensilis,* a la queue préhensile. Diurnes, forestiers et arboricoles, les *Capromys* se nourrissent de matières végétales et de petits Animaux, comme des Sauriens du genre *Anolis.* Après une gestation de 17 à 18 semaines, les femelles mettent bas de 1 à 3 petits, immédiatement actifs après leur naissance et pouvant se nourrir à 10 jours. Les rats-piloris sont chassés par les indigènes pour leur chair. Le plus connu est *C. pilorides.*

Les *Geocapromys,* qui comptent trois espèces, de la Jamaïque, de Cuba et des îles Bahamas, sont plus petits que les *Capromys* et ont la queue courte; ils sont terrestres.

Le genre *Plagiodontia* comprend deux espèces éteintes et deux vivantes, bien que rarissimes : *P. aedium* et *P. hylaeum,* de Haïti. Longs de 30 à 40 cm, ils ont la queue à peu près nue, recouverte d'écailles et longue de 15 cm. Ces Animaux nocturnes sont d'habiles grimpeurs.

Nous citerons trois genres désormais éteints de la région antillaise : *Hexolobodon, Aphaetreus* et *Isolobodon,* connus d'après des restes de squelettes découverts dans des grottes ou dans des déchets situés près des lieux habités par l'homme. Ils se sont éteints probablement peu avant la colonisation. Ils constituaient la proie préférée du grand rapace nocturne *Tyto ostalaga,* luimême disparu. Certaines espèces ont dû être élevées à l'état semi-domestique par l'homme.

La sous-famille des *Myocastorinés* comprend une seule espèce, *Myocastor coypus,* le ragondin, ou myopotame, ou encore coïpou, originaire des parties centrales et méridionales de l'Amérique du Sud. Introduits aux États-Unis et en Europe, pour l'élevage, des individus échappés ont formé des populations sauvages. Long d'environ 60 cm et pesant de 7 à 9 kg, très massif et lourd, il ressemble un peu au castor par la tête et le tronc. Ses pattes sont courtes et très robustes; les antérieures possèdent quatre doigts (avec un pouce rudimentaire) et les postérieures cinq, dont les quatre premiers palmés et le cinquième libre. Leur queue, longue de 25 à 40 cm, se termine en pointe, et porte des écailles entre lesquelles passent des poils soyeux. Sa fourrure, marron sur le dessus, rousse sur les flancs et noirâtre au ventre, est formée d'une bourre fine et douce, surmontée d'abondants poils soyeux et durs.

Le crâne est très robuste, avec une crête sagittale très prononcée et un processus angulaire de la mandibule fort long. Ses molaires ont un repli d'émail, dont l'épaisseur augmente de l'avant vers l'arrière; elles sont hypsodontes, à croissance continue et partiellement radiculées.

Le ragondin, qui ressemble à un gros ondatra, sauf par la queue, qui n'est pas comprimée latéralement, est un excellent nageur : il vit dans les lacs, les cours d'eau, les marais et les canaux, et creuse sa tanière dans les berges. Il se nourrit de Végétaux et occasionnellement de petits Animaux, surtout des Mollusques. Les femelles mettent au monde 2 ou 3 petits par an, après une gestation de 120 à 150 jours.

Les **Échimyidés** *(Echimyidae)* forment la famille la plus nombreuse des Nototrogomorphes, avec dix-neuf genres et soixante-quinze espèces, toutes de la région néotropicale, y compris les Antilles, lesquelles ne comptent que des genres disparus récemment. D'aspect le plus souvent murin, les Échymyidés ont un museau pointu ou quelque peu tronqué. Leur fourrure présente parfois des soies spiniformes (sous-famille des Échimyinés). Ils mesurent de 10 à 50 cm de long, et possèdent une queue de 5 à 40 cm. Le premier doigt des pattes avant est rudimentaire.

Leur formule dentaire est :

$$\left(I\,\frac{1}{1};\,C\,\frac{0}{0};\,Pm\,\frac{1}{1};\,M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 20.$$

Les dents maxillaires, radiculées et non hypsodontes, ont une structure lamellaire.

Les Échimyidés, de mœurs nocturnes, se réfugient le jour dans des trous d'arbres, entre des rochers, ou dans des tanières qu'ils creusent. Ce sont des herbivores, qui ont besoin d'une grande quantité d'eau et meurent s'ils sont transportés dans des zones arides. Ils vivent dans les forêts ou les zones découvertes, toujours à proximité des rivières et des marais. Les femelles mettent bas deux portées par an, en général, de 1 à 3 petits, mais qui peuvent en compter jusqu'à 6; ces derniers, velus à la naissance, deviennent actifs en quelques heures, se nourrissent de Végétaux à 11 jours et sont entièrement indépendants à 2 mois. La chair de ces Animaux est très appréciée par l'homme.

La famille des Échimyidés est divisée en deux sous-familles : les Échimyinés et les Dactylomyinés.

Les *Échimyinés,* appelés rats à piquants, portent une fourrure pourvue de soies rigides et spiniformes. Leurs pattes antérieures sont tétradactyles et leurs pattes postérieures pentadactyles.

Echimys, le type, compte vingt espèces, répandues dans le nord et le centre de l'Amérique du Sud; *E. armatus* a probablement été introduit par l'homme à la Martinique.

Ostman - J. R. Simon

▲▼ *Ces deux illustrations montrent toute l'habileté dans l'eau du ragondin, ou myopotame, ou encore coïpou,* Myocastor coypus, *originaire des parties centrales et méridionales de l'Amérique du Sud. Il vit dans les lacs, les cours d'eau, les marais et les canaux, et se nourrit de Végétaux et occasionnellement de Mollusques.*

Ostman - R. J. Spurr

▶ *Page ci-contre, en haut, les agoutis, Rongeurs typiques néotropicaux, ressemblent à des antilopes en miniature; diurnes dans les zones où ils ne sont pas inquiétés par l'homme, ils se nourrissent de fruits, de racines et de fleurs, qu'ils tiennent dans leurs mains; ici,* **Dasyprocta sp.**

Longs de 17 à 35 cm, les *Echimys* possèdent une queue de 15 à 30 cm, velue ou recouverte d'écailles, et dépourvue de panache de poils. Leur fourrure est constituée par des soies rudes, spinuleuses sur le dos chez certaines espèces; leur livrée est brune ou châtain sur le dessus, chamois ou blanche en dessous. Leurs pieds sont larges et armés de grosses griffes, en relation avec leur vie arboricole : ils vivent, en effet, très souvent sur les arbres, à proximité des cours d'eau ou dans les forêts paludéennes. Ils aménagent des nids de feuilles dans des trous d'arbres, où ils se réfugient par petits groupes pendant le jour pour en sortir au crépuscule ou à la nuit. Leur voix est haute et puissante. Ils semble que les femelles mettent bas 1 ou 2 petits par portée.

Proechimys compte également vingt espèces, répandues dans le nord et le centre de l'Amérique du Sud, ainsi que dans l'île de Trinidad. Elles habitent la forêt, dans les zones proches de l'eau. Leur fourrure présente un faible nombre de soies spinuleuses, souvent moins développées que chez *Echimys*.

Les autres genres sont : *Hoplomys, Euryzygomatomys* (fouisseur), *Clyomys, Carterodon, Cercomys, Mesomys,* avec six espèces de la région amazonienne, *Lonchothrix, Isothrix* et *Diplomys;* enfin, quatre genres antillais disparus après la colonisation européenne : *Heteropsomys* et *Homopsomys* de Porto-Rico, *Brotomys* d'Haïti et *Boromys* de Cuba.

Les *Dactylomyinés* ne présentent jamais de soies spinuleuses mais, au contraire, des poils très doux. Leurs doigts sont très allongés. Leur queue est généralement très longue. Leurs dents maxillaires sont brachyodontes. Ils sont arboricoles. Cette sous-famille comprend les genres *Dactylomys, Lachnomys, Kannabateomys* et *Thrinacodus,* ce dernier étant typique des forêts à massifs serrés de bambous, dans les montagnes de Colombie, au-dessus de 2 000 m d'altitude.

Les **Abrocomidés** *(Abrocomidae)* comprennent l'unique genre *Abrocoma,* ou rat-chinchilla. Celui-ci compte deux espèces vivantes : *A. cinerea,* qui vit sur les hauts plateaux andins, au Pérou, en Bolivie et dans une partie du Chili, et *A. bennetti,* des régions les plus côtières des Andes chiliennes. Longues de 15 à 25 cm, à queue peu longue, elles ont un pelage laineux, long et très doux, un peu semblable à celui des chinchillas. Leur intestin est très long (2,50 m) et elles possèdent dix-sept paires de côtes (nombre maximal chez les Rongeurs).

▼ **Octodon degus,** *le dégu, des montagnes côtières du Pérou et du Chili, est un Animal particulièrement prolifique, qui rôde parfois autour des maisons.*

N. Poroniev - Jacana

Leur formule dentaire est :

$$\left(I\,\frac{1}{1};\ C\,\frac{0}{0};\ Pm\,\frac{1}{1};\ M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 20;$$

les dents maxillaires, à croissance continue, sont sillonnées de replis très profonds, de sorte que les lobes sont réunis par des ponts très étroits.

Les rats-chinchillas sont grégaires et vivent dans des tanières et des galeries qu'ils aménagent dans les zones rocheuses ou dans les anfractuosités de rochers ou du sol.

Les **Cténomyidés** *(Ctenomyidae),* ou tuco-tucos, d'Amérique du Sud, diffèrent des Géomyidés d'Amérique du Nord, en particulier par l'absence d'abajoues. Ils comprennent un seul genre : *Ctenomys,* qui compte cinquante espèces environ, dont beaucoup sont en réalité de simples races géographiques; ces Animaux sont répandus en Amérique du Sud, du Pérou méridional et du Mato-Grosso septentrional jusqu'à la Terre de Feu, dans des milieux très divers : prairies, steppes, zones côtières, forêts, hauts plateaux andins. En général, ils préfèrent les terrains sablonneux et secs et semblent éviter les terres cultivées.

Ils sont trapus, avec un tronc à peu près cylindrique, une grosse tête et un museau aplati. Leurs yeux et leurs oreilles sont petits. Leur cou est bref et musculeux. Leurs pattes sont courtes et très robustes, avec des extrémités larges pourvues de très robustes griffes; les paumes et les plantes portent une frange de longs poils soyeux qui les bordent comme des peignes. Longs de 17 à 25 cm, avec une queue courte (6 à 11 cm), ces Animaux pèsent de 200 à 700 g. La fourrure, très variable selon les espèces, est souvent douce et touffue. La mandibule a une apophyse angulaire étendue et nettement fléchie vers l'extérieur.

La formule dentaire est :

$$\left(I\,\frac{1}{1};\ C\,\frac{0}{0};\ Pm\,\frac{1}{1};\ M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 20;$$

les molaires sont très simples, de section réniforme, et de taille décroissante dans le sens antéro-postérieur; la dernière est rudimentaire.

Crépusculaires, les tuco-tucos vivent presque tout le temps dans leurs terriers, signalés par un tumulus de terre, ou à proximité immédiate. Le même terrier est habituellement occupé par un couple, et, chez *C. peruanus,* par plusieurs femelles adultes. Celles-ci mettent bas, une fois par an, de 1 à 5 petits. Les tuco-tucos se nourrissent de parties hypogées de plantes dont ils font des provisions; il semble qu'ils trouvent toute leur eau dans les Végétaux dont ils se nourrissent. *C. lewisi,* semi-aquatique, creuse des galeries dans les rives des cours d'eau.

En général très communs, les Cténomyidés sont devenus rares dans certaines zones, à cause de leur destruction par les éleveurs et par le bétail qui effondre les tunnels des terriers. Leurs ennemis naturels sont *Dusicyon culpaeus, Felis pajeros, Conepatus rex* et divers Rapaces.

Les **Octodontidés** *(Octodontidae)* comptent cinq genres et huit espèces, d'aspect murin et souvent adaptées à la vie souterraine. On les rencontre surtout dans les zones rocheuses et arides, éventuellement dans les terres cultivées, au Pérou, en Bolivie, au Chili, en Argentine, des régions côtières jusqu'à plus de 3 500 m d'altitude dans les Andes.

Longs de 12 à 20 cm, avec une queue de 4 à 18 cm, les Octodontidés ont une fourrure touffue et épaisse. Leurs oreilles sont assez courtes et arrondies. Les quatre doigts des pieds sont bordés de soies rigides, constituant des peignes.

Leur formule dentaire est :

$$\left(I\,\frac{1}{1};\ C\,\frac{0}{0};\ Pm\,\frac{1}{1};\ M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 20.$$

Les molaires, hypsodontes et à croissance continue, sont de forme simple, avec une surface occlusale formant un 8 caractéristique, d'où le nom de la famille.

Ce sont d'excellents fouisseurs, qui creusent des systèmes complexes de galeries souterraines. Essentiellement nocturnes, ils sont très agiles et grimpent parfois sur les arbres. Ils se nourrissent de diverses parties de plantes succulentes (notamment, des Cactacées).

Octodon degus, le dégu, des montagnes côtières du Pérou et du Chili, ressemble à un rat. Sa queue est aussi longue que le corps, tête comprise. C'est un Animal particulièrement prolifique, qui rôde parfois autour des maisons.

Octodontomys gliroides, à longue queue ornée d'un panache de poils (d'où son nom local de « rat à queue en pinceau »), vit dans les montagnes de la Bolivie et du Chili septentrional, et n'est pas particulièrement fouisseur.

Les autres genres sont *Spalacopus, Aconaemys,* tous deux des Octodontidés à queue courte, des Andes chiliennes, et *Octomys*, le type, qui compte pour seule espèce *O. mimax* appelé rat-viscache, de l'Argentine.

Les **Dasyproctidés** *(Dasyproctidae)* sont considérés par Grassé comme occupant une position incertaine dans la systématique. Il en existe deux genres, avec une dizaine d'espèces. Ce sont des Rongeurs de grande taille (30 à 60 cm de long), conformés pour la course : leurs pattes sont longues et fines, les antérieures possédant quatre doigts et les postérieures trois doigts, pourvus d'ongles en forme de minuscules sabots ; les pattes postérieures un peu plus longues leur permettent aussi de sauter. La clavicule est absente.

La formule dentaire est :

$$\left(\text{I}\ \frac{1}{1};\ \text{C}\ \frac{0}{0};\ \text{Pm}\ \frac{1}{1};\ \text{M}\ \frac{3}{3}\right) \times 2 = 20.$$

Les molaires sont hypsodontes, à croissance non continue, semi-radiculées, et présentent des sillons délimitant des îlots d'émail.

Le genre *Dasyprocta*, avec sept espèces, comprend les agoutis vrais, qui habitent du sud du Mexique jusqu'au Brésil. Ces Rongeurs, longs de 40 à 60 cm et de forme élancée, ont une tête allongée et un museau un peu obtus. Leurs oreilles, moyennes, sont bien visibles. Leur arrière-train est un peu plus large que l'avant-train. Leur queue est très courte (1 à 3 cm). Leur fourrure, assez rase, à poils lisses, présente des teintes variables, allant du brun au jaunâtre et à l'orangé sur le dessus, le dessous étant plus clair.

Diurnes dans les zones où ils ne sont pas inquiétés par l'homme, ces Animaux, solitaires, vivent surtout dans les prairies, à la lisière des grandes forêts tropicales. Ils se nourrissent de fruits, de racines, et même de fleurs, et tiennent leur nourriture avec leurs mains. Ils courent très rapidement et font alors penser à une minuscule antilope ou à un tragule.

Les femelles ont deux portées par an, de 1 à 4 petits à chaque fois, qu'elles mettent bas dans une tanière, après une gestation d'environ 3 mois. Les nouveau-nés sont très développés, de sorte qu'après très peu de temps (une heure selon certains auteurs) ils sont capables de se nourrir d'un peu d'herbe. Leur longévité peut atteindre 20 ans. Leur chair est très bonne et ils constituent un gibier de choix pour de nombreuses populations d'Amérique du Sud, la faune forestière de ce continent étant pauvre en herbivores d'une certaine taille. L'espèce la plus connue est *D. aguti,* l'agouti commun, ou doré.

Titus

Les deux espèces de *Myoprocta* (les acouchys) sont plus petites et différentes des agoutis par leur queue un peu plus longue (4 à 7 cm). Elles habitent uniquement l'Amérique du Sud, dans les forêts, et sont probablement grégaires.

▼ **Myoprocta acouchy** ***habite uniquement les forêts d'Amérique du Sud.***

J. Six

D. Faulkner

▲ *Parmi les Mammifères ayant acquis l'adaptation à la vie aquatique, les Cétacés sont les seuls Animaux à vivre, de la naissance à la mort, dans l'eau. Ils comptent en outre des espèces dont la taille est supérieure à celle des plus grands Mammifères terrestres, et dont le poids peut dépasser 100 t. Ici un Delphinidé.*

Ordre des Cétacés

Les Cétacés *(Cetacea)* sont le groupe le plus hautement spécialisé parmi les Mammifères, ayant acquis l'adaptation la plus poussée à la vie aquatique : ce sont les seuls de ces Animaux qui vivent de la naissance à la mort dans l'eau, à la différence des Siréniens, par exemple, qui se rendent occasionnellement sur les rivages. Dérivant de formes terrestres, les Cétacés ont subi au cours de leur évolution de profondes transformations anatomiques lesquelles ont rendu leur aspect et leur organisation très différents du type des Mammifères, tel qu'on l'observe chez tous les autres ordres, y compris les Siréniens. En outre, ils ont développé des adaptations physiologiques quant à la respiration et la circulation sanguine, dont la fonction essentielle est de leur permettre de plonger longtemps et profondément.

La morphologie externe des Cétacés, comme celle des Ichtyosaures du Mésozoïque, est pisciforme. C'est là l'un des cas les plus remarquables de convergence évolutive et de parallélisme morphologique entre des groupes distincts d'Animaux d'un même type; en l'occurence, ayant évolué pour conquérir le même milieu, c'est-à-dire la mer, les Poissons, les Ichtyosaures et les Cétacés ont acquis des formes externes très semblables du fait de modifications morphologiques et de conformations anatomiques de même nature, en vue des mêmes fonctions. Ces trois groupes constituent, à cet égard, une extraordinaire triade.

La morphologie externe des Cétacés est, chez la majorité des espèces, tout à fait hydrodynamique : leur corps est fusiforme, plus ou moins allongé (par exemple, chez les dauphins et les Balénoptères), parfois plus court et plus massif (Mégaptères).

Leur tête, plus ou moins conique et allongée, se termine en un museau, parfois pointu et constituant alors un rostre, ou « bec », distinct (Platanistidés et Delphinidés) ou plus obtus (marsouins et épaulards); en certains cas (cachalots et baleines), la tête a un développement énorme (jusqu'à 1/3 de la longueur totale de l'Animal). Chez tous les Cétacés, l'ouverture buccale est très ample (énorme chez certaines baleines), mais ne présente cependant pas de lèvres différenciées. Sauf dans certains cas exceptionnels (Platanistidés), le cou est absent. La langue n'a pas d'extrémité libre chez les Mysticètes, et est toujours pourvue de papilles. Les dents, qui existent seulement chez les Odontocètes, sont simples, coniques et uniradiculées; elles sont homodontes, ce qui est un caractère secondaire, les Cétacés dérivant probablement de formes hétérodontes normales. Le nombre des dents peut être très élevé. Il n'y a qu'une seule dentition *(monophyodonte)*. Chez les Mysticètes, les dents existent à l'état d'ébauche à l'âge embryonnaire et ne sortent jamais; elles sont remplacées par des fanons qui constituent un équivalent fonctionnel adapté à leur alimentation très spécialisée. Il n'existe pas de narines à proprement parler : les fosses nasales communiquent avec l'extérieur par un évent, comprenant une (Odontocètes) ou deux (Mysticètes) ouvertures, généralement situées au sommet de la partie frontale de la tête. Les yeux sont petits et affleurants. Les oreilles sont dépourvues de pavillons auriculaires.

Seuls les membres antérieurs existent; ceux-ci sont très réduits par rapport au corps, et transformés en nageoires pinniformes, bien distinctes du tronc, raccourcies à la partie proximale et plus développées à la partie distale; elles sont enveloppées par la peau et l'on ne distingue pas extérieurement les doigts, qui sont, par contre, bien développés du point de vue anatomique. Les membres postérieurs ont disparu et, chez les espèces actuelles, ne persistent que sous la forme de petits rudiments du bassin.

Le corps, à sa partie postérieure, se rétrécit graduellement pour former la queue, puissant organe musculaire de propulsion, se terminant par une nageoire caudale; celle-ci est située dans un plan horizontal, à la différence de celle des Poissons, qui est située dans un plan vertical. La queue est actionnée par de puissants muscles moteurs, qui s'insèrent sur les vertèbres et le tissu fibreux, grâce à de robustes tendons. La nageoire caudale, plus épaisse à la base et plus aplatie distalement, présente un axe proximal, dans lequel se termine la colonne vertébrale, et une partie dilatée, avec une face supérieure et une face inférieure; ces dernières sont divisées, par une incision médiane du bord postérieur, en deux ailes symétriques, plus ou moins pointues. Du point de vue anatomique, cette nageoire est constituée, sous l'épiderme et le pannicule adipeux, par deux importantes couches de fibres horizontales et perpendiculaires entre elles, ainsi que par un ensemble de fibres dorso-ventrales, en position normale par rapport aux deux faces de la nageoire, plus un certain nombre de tendons et de muscles. Cet ensemble de caractères confère à la nageoire caudale, étroitement liée au tronc, une robustesse et une force extraordinaires, lesquelles en font l'organe propulseur principal chez les Cétacés, les nageoires pectorales servant surtout de balanciers et de gouvernails.

L'avant-train des Cétacés, à la différence de celui des Pinnipèdes, dont la mécanique natatoire est tout à fait différente, est pratiquement immobile : les nageoires pectorales elles-mêmes doivent leur mobilité uniquement à l'articulation de l'humérus avec l'omoplate, étant donné que les autres articulations sont devenues progressivement non fonctionnelles. Pour conclure, signalons que la nageoire caudale effectue surtout des mouvements dans le sens vertical, grâce à la contraction des muscles de la partie terminale du tronc; les mouvements dans le sens latéral comportent, pour leur part, une flexion de la colonne vertébrale. La nageoire dorsale, bien développée chez la plupart des espèces, mais parfois réduite ou absente chez les grosses baleines, est grossièrement triangulaire; son bord antérieur est convexe et son bord postérieur concave. Elle est constituée par un repli de la peau et du tissu sous-cutané, qui se soulèvent le long de la ligne médiane du dos, à peu près à mi-distance entre la tête et la queue. Dépourvue de parties osseuses, elle ne comporte que du tissu conjonctif, des faisceaux fibreux et surtout du tissu adipeux.

La taille des Cétacés est toujours importante : nombre d'espèces ont une taille supérieure à celle des plus grands Mammifères terrestres. Le rorqual, ou grande baleine bleue *(Balaenoptera musculus)*, avec ses 30 à 33 m de long, est, en l'état actuel de nos connaissances, l'Animal

le plus grand ayant jamais existé. Les plus petites espèces mesurent environ 1 m de long, mais la plupart dépassent 1,50 à 2 m. Chez quelques espèces, le poids du corps dépasse 100 tonnes. Malgré l'importante quantité de graisses présentes dans le corps des Cétacés, leur densité est supérieure à celle de l'eau : ils doivent nager pour flotter, et les individus morts coulent. Chez la baleine des Basques, ou encore baleine franche *(Eubalaena glacialis)*, ainsi que chez le cachalot *(Physeter catodon)*, la densité est un peu inférieure, ce qui oblige ces Animaux à nager activement lorsqu'ils sont en immersion.

La peau des Cétacés est nue et fort rugueuse. Leur épiderme est très fin (3,25 mm d'épaisseur chez le marsouin, par exemple, lequel mesure plus de 1,50 m de long). Leur derme est constitué par du tissu conjonctif, avec des papilles dermiques relativement peu nombreuses, ainsi que des fibres parallèles à l'axe du corps; dépourvu de fibres musculaires lisses, il est irrigué par des artérioles et des veinules qui se capillarisent dans les papilles. Dans sa partie la plus profonde, le derme constitue le pannicule adipeux, ou lard, formé par un réseau de faisceaux renfermant d'énormes cellules adipeuses. L'épaisseur du lard, toujours très importante, varie selon les espèces, la saison et, naturellement, la partie du corps : chez le marsouin, elle est de 2 cm environ; chez le rorqual bleu mâle (long de 24 à 26 m), elle est de 11 à 13 cm, et chez la femelle de la même espèce (longue de plus de 26 m), elle atteint de 14 à 16 cm; enfin, elle est de 20 cm chez le béluga. En outre, il existe, dans le tissu sous-cutané de la région supérieure de la tête des Physétéridés et du narval, des cavités spéciales remplies de graisse liquide. La peau des Monodontidés (narval et béluga) a un épiderme et un derme très épais, et fournit un cuir très résistant, grâce surtout aux fibres présentes dans le derme.

Les Cétacés présentent le maximum de réduction du revêtement pileux observé chez les Mammifères. Chez les Mysticètes, par exemple, le rorqual présente au menton deux rangées longitudinales de poils, au nombre de 20 à 30, très écartés les uns des autres, d'autres poils pouvant se trouver sur le museau. Chez les Delphinidés, on observe quelques poils à l'extrémité du museau chez les fœtus et les juvéniles, les adultes en ayant perdu toute trace. Les Monodontidés ne possèdent, pour leur part, aucun poil. Certains Delphinidés portent à la partie supérieure de leur corps des tubercules cornés épidermiques. Enfin, les Cétacés sont dépourvus de glandes épidermiques et d'ongles. La livrée des Cétacés est rarement de couleur uniforme; en ce cas, elle est grisâtre ou noire, exceptionnellement très claire ou blanche (Monodontidés). Le plus souvent, elle est composée d'un mélange de tons bruns et noir ardoisé, avec du blanc distribué de façon variable; généralement, les parties supérieures sont plus foncées et les parties inférieures blanchâtres; on rencontre aussi des livrées mouchetées ou tachetées.

Les Cétacés ont des os où prédomine le tissu spongieux, imprégné de graisse, parfois fluide. La topographie du crâne diffère sensiblement de celle des autres Mammifères. La télescopie, c'est-à-dire le fait que le splanchnocrâne a subi un processus d'allongement alors que le neurocrâne est raccourci, est caractéristique. Les maxillaires, les prémaxillaires et le vomer sont très allongés, tandis que la boîte crânienne est courte et aussi développée en hauteur qu'en largeur. La télescopie se constitue durant le développement postembryonnaire, la morphologie crânienne du fœtus étant plus normale. L'os frontal est réduit à une large bande transversale, constituant la voûte de l'orbite. Les fosses nasales se trouvent reportées très en arrière de la boîte crânienne. La mandibule se termine par des condyles peu développés. Chez les Odontocètes, les branches mandibulaires sont soudées le long de la symphyse, parfois très développée; chez les Mysticètes, elles sont réunies de façon lâche par du tissu conjonctif. Chez les Odontocètes, il y a une nette asymétrie du crâne, en partie haute (surtout chez le cachalot et les Hypéroodontidés). Les condyles occipitaux sont assez aplatis. La colonne vertébrale, assez droite, se compose de 7 vertèbres cervicales, le plus souvent soudées les unes aux autres, et d'un nombre variable (même au sein d'une même espèce) de vertèbres thoraco-lombaires et caudales. Du fait de l'absence de zygapophyses, les vertèbres ne sont pas articulées entre elles, mais unies par des disques intervertébraux. Par suite de l'atrophie du bassin, on ne distingue pas les vertèbres sacrées des caudales. La

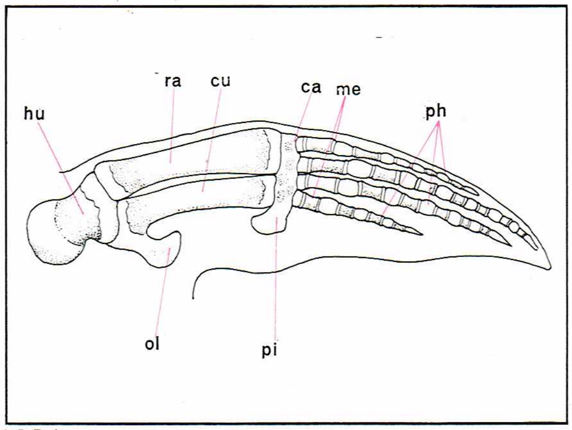

I.G.D.A.

◀ ***Représentation schématique d'une nageoire pectorale de Mysticète* (Balaenoptera musculus) *: hu, humérus; ra, radius; cu, cubitus; ca, carpiens; me, métacarpiens; ph, phalanges; ol, oléocrâne; pi, pisiforme. On observera ici l'hyperphalangie de la main.***

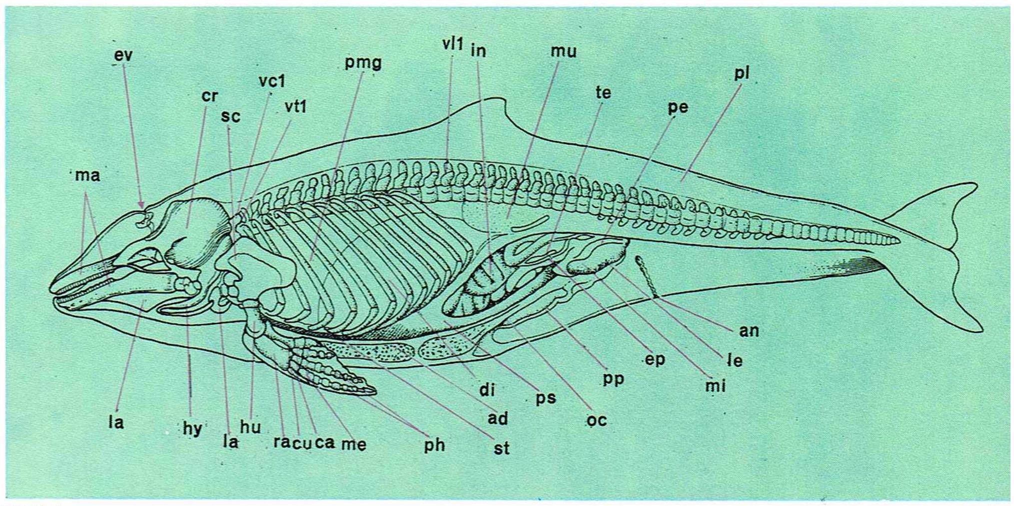

I.G.D.A.

▲ ***Schéma de la structure anatomique d'un Cétacé Odontocète* (Phocaena sp.) *: ma, mâchoires; ev, évent; cr, crâne; sc, omoplate; vc 1, première vertèbre cervicale; vt 1, première vertèbre thoracique; pmg, poumon gauche; vl 1, première vertèbre lombaire; in, intestin; mu, masse musculaire dorso-latérale; te, testicules; pe, pelvis; pl, peau; la, langue; hy, hyoïde; la, larynx; hu, humérus; ra, radius; cu, cubitus; ca, carpiens; me, métacarpiens; ph, phalanges; st, sternum; ad, graisse; di, diaphrame; ps, péritoine; oc, organe copulateur; pp, poche préputiale; ep, épididyme; mi, muscle ischio-caverneux; le, ligament rétracteur de la poche préputiale; an, anus.***

▼ ***En haut, squelette de cachalot* (Physeter catodon)*, sous-ordre des Odontocètes. En bas, squelette de la baleine des Basques ou de Biscaye* (Eubalaena glacialis)*, sous-ordre des Mysticètes.***

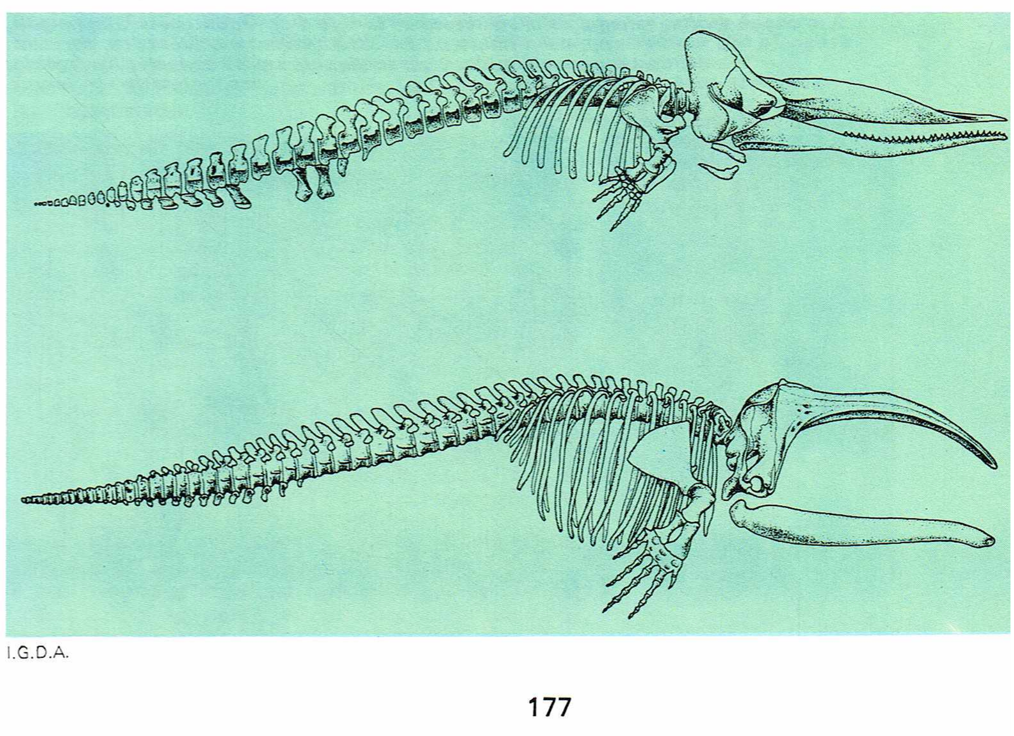
I.G.D.A.

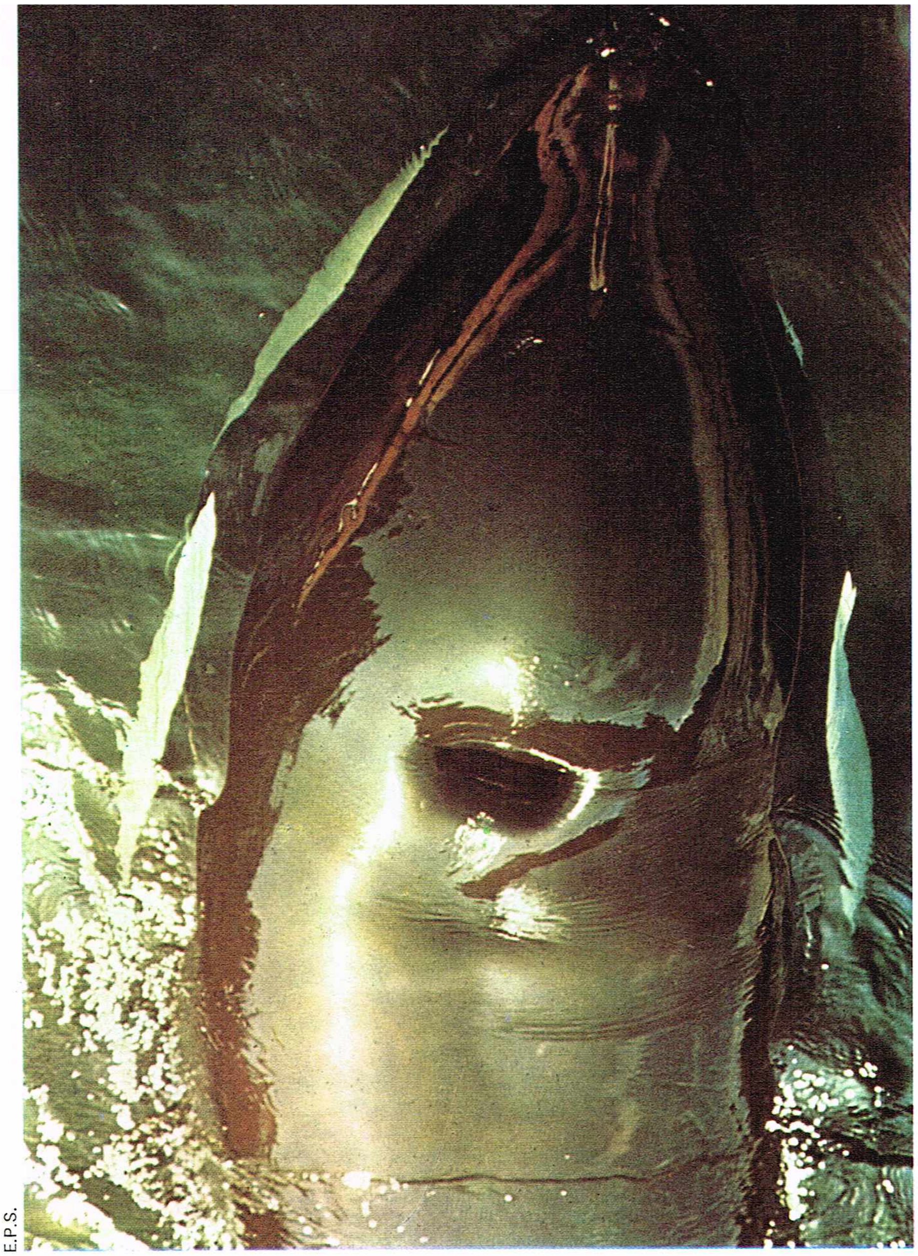

E.P.S.

▲ ***Un Odontocète faisant surface : il s'agit de l'orque*** **(Orcinus orca)** ***dont on observera l'orifice de l'évent.***

▼ ***A gauche, appareil respiratoire du marsouin proprement dit*** **(Phocaena phocaena)** ***vu de dos : ep, épiglotte ; la, larynx ; œ, œsophage ; tr, trachée-artère ; br, bronches ; pg, poumon gauche ; pd, poumon droit. A droite, schéma de la structure de la tête d'un Odontocète : la, langue ; np, naso-pharynx ; sn, sacs nasaux ; ev, évent ; ce, cerveau ; ca, cartilage aryténoïde ; tr, trachée ; cb, cavité buccale ; hy, hyoïde ; ep, épiglotte ; lx, larynx.***

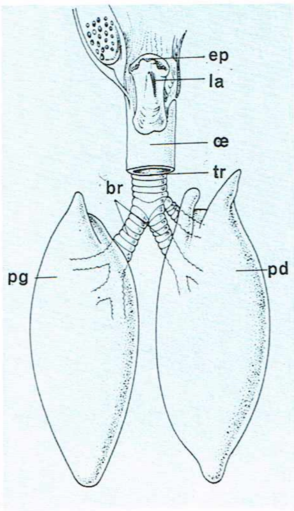

I.G.D.A.

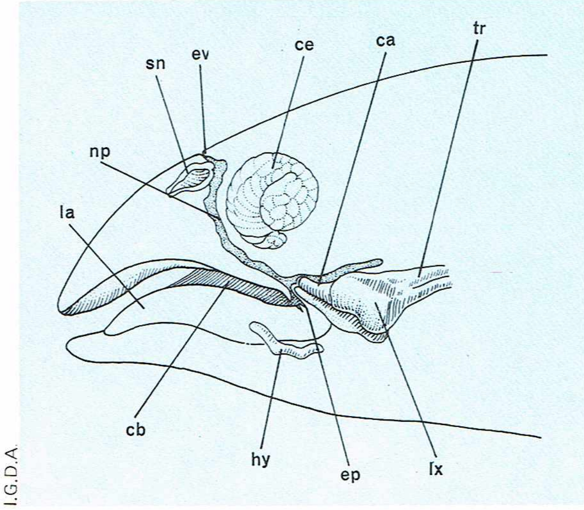

I.G.D.A.

cage thoracique comprend, généralement, 4 ou 5 vraies côtes et 5 à 8 fausses côtes. Le sternum est constitué par 4 ou 5 sternèbres rudimentaires. La clavicule est absente, l'omoplate est large et dilatée, avec un acromion et des apophyses coracoïdes développées. L'humérus est très bref et massif ; le radius et le cubitus sont raccourcis. La main, par contre, présente une hyperphalangie. Les pattes postérieures persistent à l'état de rudiments (fémur et tibia) chez certains Mysticètes et quelques Odontocètes (cachalot) ; chez les embryons, elles forment des saillies visibles. Le bassin persiste sous forme de deux petits vestiges, englobés dans la masse musculaire et indépendants de la colonne vertébrale.

Les voies alimentaires et respiratoires sont séparées, ce qui est indispensable pour la plongée : le pharynx est traversé par le larynx, qui se poursuit directement dans les cavités nasales ; ayant fait le tour du larynx, les aliments déglutis passent dans l'œsophage, sans que l'eau puisse s'introduire dans les poumons. L'estomac, très compliqué, présente de 3 à 14 chambres ; l'intestin est très long (seize fois et demie la longueur du corps chez le cachalot) et relativement simple. Le foie est généralement petit, non lobé ou bilobé, et dépourvu de vésicule biliaire.

L'appareil respiratoire, très particulier, est adapté aux immersions prolongées. L'orifice externe est constitué par l'évent à orifice unique chez les Odontocètes et à une paire d'orifices chez les Mysticètes ; ces évents s'ouvrent en position médiane à la partie supérieure de la tête, sauf dans le cas du cachalot, chez qui ils sont asymétriques. Les conduits nasaux osseux se continuent par le naso-pharynx, traversé par le pharynx et pourvu de cartilages. Il existe plusieurs systèmes de régulation de la circulation d'air : deux valvules situées en haut, et un sphincter constitué par les muscles palato-pharyngiens. Quand le Cétacé émerge, il expire immédiatement de l'air, produisant un jet caractéristique de vapeur, ou souffle, qui peut atteindre plusieurs mètres de haut. Ces Animaux ne possèdent pas de cordes vocales, mais leur larynx leur permet d'émettre des sons. Leurs poumons sont particulièrement riches en tissu élastique et non lobés ; les alvéoles pulmonaires sont très grands, et l'épaisseur des cloisonnements et de la plèvre est importante. Les poumons s'étendent plutôt dorsalement, étant donné la position oblique du diaphragme.

Le système circulatoire présente aussi des adaptations très poussées à la vie aquatique. Les réseaux admirables sont très développés ; leur fonction probable est de freiner le courant circulatoire et de constituer des réserves sanguines en vue d'une distribution appropriée de l'oxygène pendant les longues plongées. Le cœur est de type normal. L'hémoglobine des Cétacés possède un pouvoir élevé de fixation de l'oxygène.

Le volume du cerveau, haut, large, sphéroïdal, est relativement grand ; les hémisphères présentent un grand nombre de circonvolutions ; le cervelet est assez gros. Les lobes olfactifs sont rudimentaires ou absents, alors que les centres acoustiques, dont le développement est prépondérant, permettent une acuité auditive élevée qui compense la faiblesse de la vue et de l'odorat. Les yeux, aplatis dans le sens antéro-postérieur, ont une sclérotique épaisse, et présentent un cristallin tendant à la sphéricité. Le système d'accommodation est très réduit : la courbure du cristallin est telle que les images se forment sur la rétine ; la chambre antérieure de l'œil a un indice de réfraction égal à celui de l'eau de mer.

Les reins ont une forme extérieure simple, mais sont constitués intérieurement par plusieurs petits reins, possédant chacun un système vasculaire autonome.

En ce qui concerne l'appareil génital, signalons que, chez les mâles, les testicules sont intra-abdominaux et les vésicules séminales réduites ou absentes. Les femelles, dont l'utérus est bicorne, sont pourvues d'un sinus galactophore aboutissant à deux mamelles, situées symétriquement des deux côtés du sinus uro-génital. Le lait est expulsé activement dans la bouche du nouveau-né, grâce à une musculature spéciale qui entoure les mamelles.

Le caractère physiologique le plus remarquable des Cétacés est leur capacité d'effectuer des plongées profondes et longues, dont la durée varie de 5 mn à 2 h *(Hyperoodon)*. Les plongées profondes sont souvent entrecoupées de plongées plus superficielles, nombreuses, qui ont probablement un rôle dans le mécanisme de la respiration.

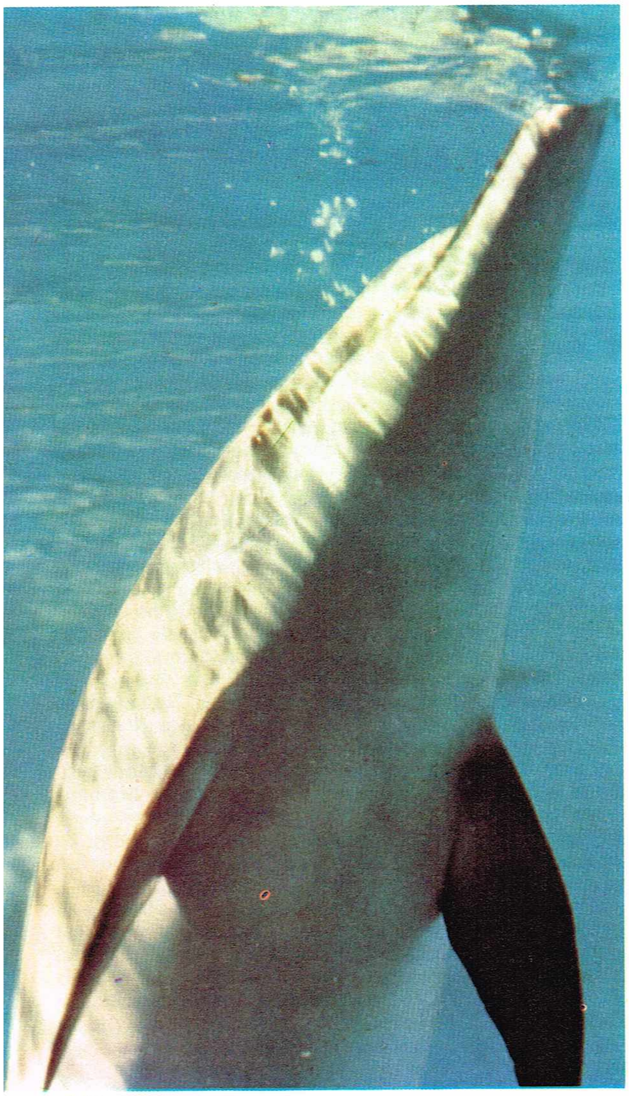

E.P.S.

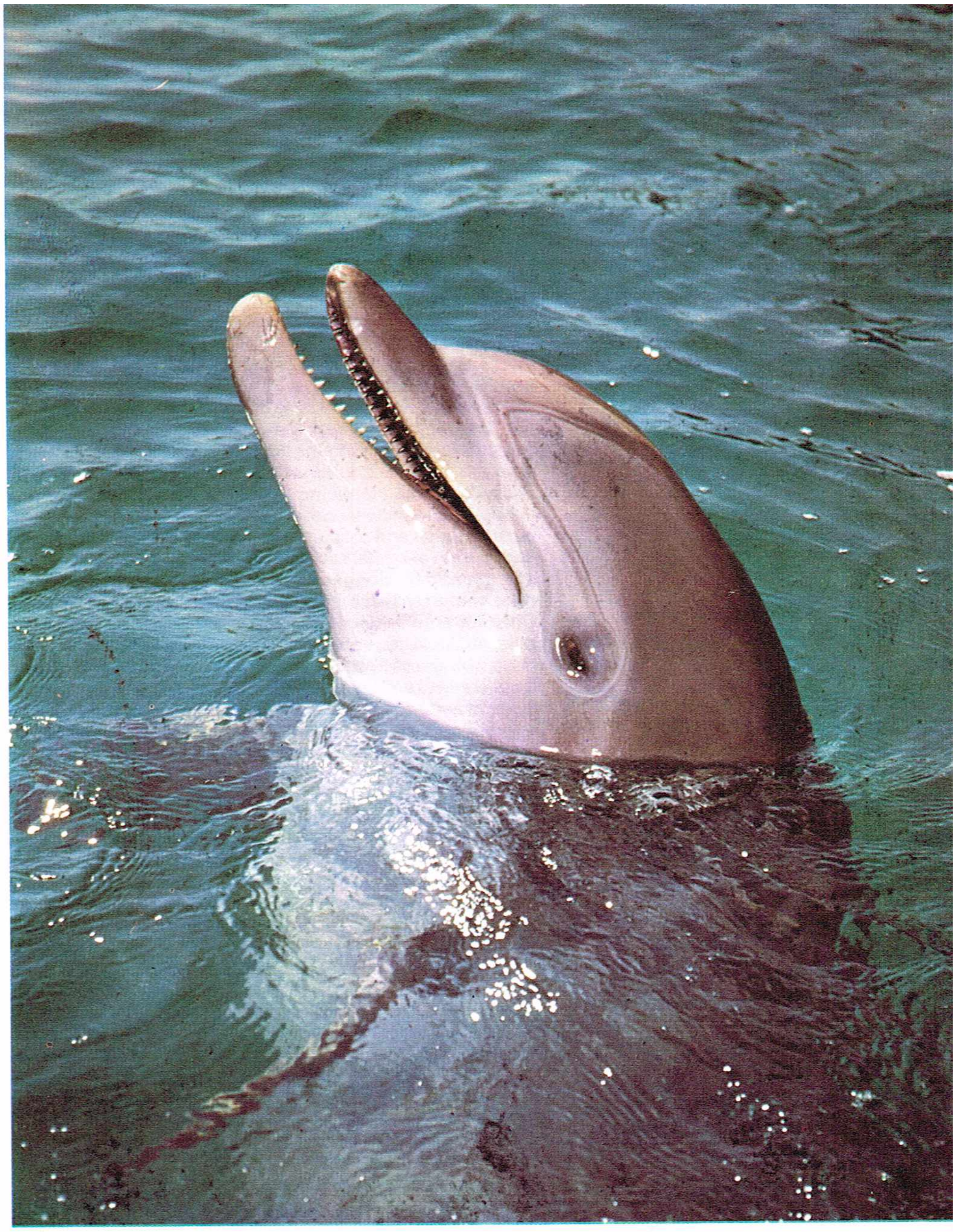

E.P.S.

◄▲ *A gauche, un Odontocète dont on observera la forme hydrodynamique. Ces Cétacés sont caractérisés par leur très grande capacité à effectuer des plongées extrêmement profondes et longues. A droite,* **Tursiops sp.**, *représentant les Cétacés Odontocètes dont le caractère fondamental est la possession de dents par les adultes.*

Les profondeurs maximales sont atteintes par certains Odontocètes qui se nourrissent de Céphalopodes, et surtout par le cachalot.

Les Cétacés ont un psychisme développé et possèdent pour certains une sorte de « langage », formé de sons diversement modulés, qui leur permettent probablement de communiquer entre eux. Grégaires, ils forment parfois des bancs très nombreux, dans lesquels il doit exister une certaine organisation sociale, encore peu connue (le dauphin-pilote et le souffleur nésarnack par exemple).

Leur distribution couvre toutes les mers du monde et même les grands fleuves. Elle est généralement conditionnée par la température de l'eau et les disponibilités en nourriture : Poissons, Céphalopodes, plancton. La plupart des espèces effectuent de véritables migrations, empruntant des parcours assez réguliers entre les zones de reproduction et de nourriture.

Enfin, ces Mammifères fournissent d'importantes quantités d'huile, de graisses, de viande et de produits divers. Ainsi est née, au cours des siècles derniers, une industrie destinée à leur exploitation, avec des flottilles de navires spécialement équipés pour leur chasse. En conséquence, de nombreuses espèces (surtout les baleines) se sont fortement raréfiées, et certaines sont au bord de l'extinction.

L'ordre des Cétacés est divisé en trois sous-ordres : les Archæocètes, les Odontocètes et les Mysticètes. Les Archæocètes sont totalement éteints et comprennent des formes ancestrales, proches de la souche originelle des deux autres sous-ordres. Nous traiterons des quatre-vingts espèces de Cétacés vivant actuellement, selon le catalogue de Hershkovitz (1966) ; nous nous référerons au traité fondamental de Tomilin (1957) pour l'anatomie et la biologie.

Sous-ordre des Odontocètes

Le caractère fondamental des Odontocètes *(Odontoceti)* est la possession de dents par les adultes. L'orifice nasal externe est, pour sa part, unique. Les mâles sont généralement plus grands que les femelles, contrairement à ce qui a lieu chez les Mysticètes. Le sous-ordre, qui comprend la grande majorité des espèces, est réparti en trois super-familles : les Platanistoïdés, les Delphinoïdés et les Physétéroïdés.

Super-famille des Platanistoïdés

Les Platanistoïdés *(Platanistoidea)* comptent une seule famille.

Les **Platanistidés** *(Platanistidae)* [dauphins d'eau douce et dauphins fluviaux] sont des Odontocètes archaïques, en général strictement confinés à certains grands fleuves asiatiques et sud-américains, dans les estuaires ou le long du cours d'eau, qu'ils remontent sur de longues distances. *Stenodelphis blainvillei* fréquente aussi une partie des côtes atlantiques de l'Amérique du Sud.

De taille très modeste par rapport aux autres Cétacés (1,50 m à 3 m de long pour un poids inférieur à 225 kg), ils ont le corps extrêmement élancé. La tête est fortement dilatée à la partie inférieure ; le rostre est long et étroit et le front habituellement obtus. *Platanista* et *Inia* présentent une ébauche plus ou moins marquée de cou.

Les nageoires pectorales sont courtes et larges, et la nageoire dorsale est diversement développée. Le crâne, à peu près symétrique, est caractérisé par de grandes fosses temporales, non recouvertes par le processus supra-orbitaire de l'os frontal et de l'os maxillaire. L'os squamosal présente une importante apophyse zygomatique ;

les os lacrymal et jugal sont soudés; les os ptérygoïdes recouvrent entièrement les os palatins, lesquels, à la partie ventrale du crâne, sont séparés sur la ligne médiane; les deux branches mandibulaires sont soudées ou, au moins, étroitement serrées l'une contre l'autre sur une grande partie de leur longueur. Les vertèbres cervicales sont libres; la colonne vertébrale compte de 41 à 45 vertèbres. Les côtes postérieures s'articulent selon un type propre aux Archæocètes *(Inia* et *Platanista)* ou à la manière des Delphinidés *(Stenodelphis* et *Lipotes)*. Le nombre total des dents varie de 100 à 130, sauf chez *Stenodelphis,* où il atteint de 200 à 222. L'estomac est de type musculaire. La vue est peu développée : ainsi chez *Platanista,* l'œil est même dépourvu de cristallin.

Les Platanistidés sont des Cétacés absolument inoffensifs. Ils vivent solitairement ou par groupes de deux à douze individus. Ils sont moins actifs que les dauphins et effectuent des plongées d'une durée maximale de quelques minutes. Ils se nourrissent de Poissons et de petits Crustacés, qu'ils découvrent en explorant la vase avec leur museau, doté d'une sens tactile très fin. Certains, notamment *Inia geoffroyensis,* semblent posséder la capacité de localiser les proies par écholation, ce qui leur permettrait aussi d'éviter les obstacles. Ils effectuent souvent des migrations locales : des *Inia geoffroyensis,* par exemple, vont périodiquement dans les forêts envahies par les eaux, ainsi que dans les petits cours d'eau et les lacs, pendant la période des inondations, pour retourner ensuite dans les grands fleuves lors du retrait des eaux. La gestation dure de 8 à 9 mois chez *Platanista*. Ces singuliers Cétacés ne sont malheureusement pas à l'abri de la prédation humaine : on les chasse pour leur chair, leur graisse et divers sous-produits ayant de prétendus emplois thérapeutiques.

La famille des Platanistidés comprend quatre genres : *Platanista, Inia, Lipotes* et *Stenodelphis,* que de nettes différences anatomiques permettent de répartir en trois sous-familles : les Platanistinés, les Iniinés et les Sténodelphinés. On observera cependant que la découverte de restes fossiles pourrait faire changer cette classification : seul le genre *Platanista* ferait partie de cette famille, alors qu'*Inia* et *Lipotes* en formeraient une autre, tandis que *Stenodelphis* serait inclus dans celle des Delphinidés.

La sous-famille des *Platanistinés* compte des Platanistidés dont les maxillaires sont pourvus, à la base, d'une haute crête faisant saillie en avant; l'orifice nasal est oblong et longitudinal; la nageoire dorsale est petite et triangulaire; il existe un cæcum rudimentaire. Ils comptent une seule espèce, le dauphin du Gange, ou plataniste du Gange *(Platanista gangetica = Susu gangetica),* long de 2 à 3 m, qui vit dans les fleuves de l'Inde septentrionale (Gange, Brahmapoutre et Indus), de leurs embouchures jusqu'aux pentes de l'Himalaya. De couleur noir plombé uniforme, et à ventre plus clair, il possède un rostre long d'environ 20 cm, pourvu de 28 ou 29 dents par demi-mâchoire. Ses yeux sont tout petits et dépourvus de cristallin. Sa nageoire caudale est large de 46 cm. Il effectue généralement un acte respiratoire toutes les 90 secondes à 2 minutes. Le plataniste nage par groupes de trois à dix individus, allant à la recherche de proies. Il effectue des migrations locales. Il n'y a qu'un seul petit par portée, qui naît après une gestation de 8 à 9 mois, entre avril et juillet. Le nouveau-né est, en moyenne, long de 45 cm et pèse environ 7 kg.

▼ ***Crâne et mandibule d'Inia geoffroyensis, le boutou, caractérisé par un museau quelque peu recourbé vers le bas.***

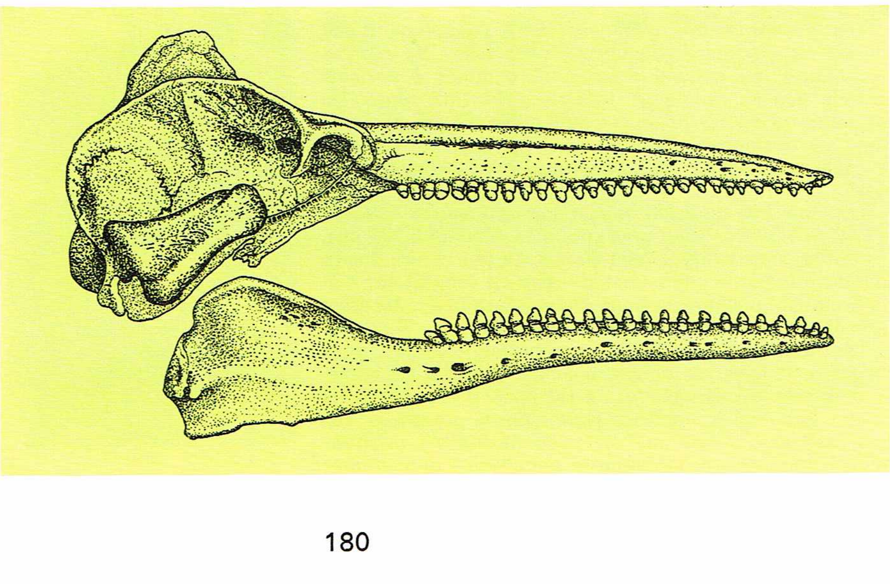

I.G.D.A.

La sous-famille des *Iniinés* comprend les Platanistidés chez lesquels le maxillaire ne présente pas de crête élevée. L'évent est en demi-lune. La nageoire dorsale est peu élevée mais assez longue. Il n'existe pas de cæcum. Le corps est très allongé, avec une différenciation plus nette de la région du cou; le rostre est plus long et plus pointu que chez *Platanista*. Les Iiinés sont répartis en deux genres, *Inia* et *Lipotes,* chacun comptant une seule espèce.

Le boutou *(Inia geoffroyensis)* habite les bassins fluviaux de l'Orénoque et de l'Amazone; on le trouve dans l'intérieur des terres jusqu'à la Colombie, la Bolivie et le Pérou; il vit uniquement dans les eaux douces. Sa longueur est de 2 à 3 m et la largeur de sa nageoire caudale atteint 50 cm environ. Le dessus est noirâtre et le dessous rosé, blanchâtre ou rose chair, certains individus étant très peu pigmentés; en outre, la couleur varie avec l'âge de l'Animal. Le boutou est caractérisé par un museau quelque peu recourbé vers le bas et couvert de poils, avec 132 à 136 dents au total. Sa nageoire dorsale, longue et basse, ressemble plutôt à une crête. Cet Iniiné réalise parfois des sauts d'un peu plus de 1 m au-dessus de l'eau. Il semble qu'il se serve de l'écholocation pour situer ses proies relativement petites sous l'eau. Les femelles mettent bas un petit par portée.

L'autre espèce est *Lipotes vexillifer,* de Chine, qui vit dans le lac Tung-ting-hu, à environ 960 km de l'embouchure du Yang-tsé-kiang, ainsi que dans d'autres zones fort restreintes de ce grand fleuve. Long de 2 m à 2,50 m, il est gris bleuâtre sur le dos et blanc en dessous. Son évent se trouve déplacé un peu sur la gauche. Il se nourrit essentiellement de Poissons.

La sous-famille des *Sténodelphinés,* ou Sténodelphinés, comprend les plus petits Platanistidés. Ces Mammifères ont le museau très étroit, pointu, et dépourvu de poils; la tête est arrondie; l'évent est semi-lunaire. Le cou est indistinct. Il existe une seule espèce, le dauphin du Rio de la Plata *(Stenodelphis* [*Pontoporia*] *blainvillei),* qui mesure de 1,50 m à 1,75 m et pèse de 30 à 60 kg. Il est gris sur le dessus et plus pâle par-dessous. Son rostre est particulièrement allongé et il possède de 200 à 222 dents, coniques et pointues. Il vit dans l'estuaire du Rio de la Plata et le long des côtes atlantiques de l'Amérique du Sud, entre 30° et 43° de latitude sud. Il se nourrit de Poissons et de Céphalopodes.

Super-famille des Delphinoïdés

Les Delphinoïdés *(Delphinoidea)* sont un vaste groupe de Cétacés Odontocètes, de taille petite ou moyenne (l'orque a un peu moins de 10 m de long). Ils ont la gorge lisse et dépourvue de sillons (caractère de différenciation très important). La nageoire dorsale, de taille variable, située le plus souvent vers la moitié de la ligne dorsale, peut manquer. La nageoire caudale présente une profonde incision médiane au bord postérieur. L'évent est situé en haut de la tête; il est plus ou moins semi-lunaire ou en fer à cheval, le côté convexe tourné vers l'arrière. Le crâne est asymétrique et ne présente pas de crête élevée derrière les os nasaux; les os ptérygoïdes sont fins et normalement développés; les orbites sont d'importance moyenne; les os palatins sont en contact sur une certaine portion; les os nasaux sont relativement petits; les os lacrymaux sont indépendants; la distance entre les demi-mâchoires supérieures est plus ou moins équivalente à celle qui existe entre les branches de la mandibule; enfin, la symphyse mandibulaire est assez courte (inférieure au tiers de la longueur de la mandibule elle-même). Les dents, nombreuses aux deux mâchoires, sont, dans certains cas exceptionnels, absentes à la mâchoire supérieure *(Grampus)* ou réduites à 1 ou 2 *(Monodon)*. Les vertèbres dorsales et lombaires présentent des processus latéraux très développés; les côtes postérieures sont articulées avec les vertèbres selon le type delphinoïde.

Cette grande super-famille présente en commun avec les Physétéridés des fosses temporales, relativement petites, recouvertes en avant par les os frontal et maxillaire. Elle comprend deux familles : les Delphinidés et les Monodontidés, ou Delphinaptéridés, que Tomilin considère comme des sous-familles d'une famille plus vaste de Delphinidés.

Les **Delphinidés** *(Delphinidae)* représentent la plus nombreuse et la plus importante famille de Cétacés

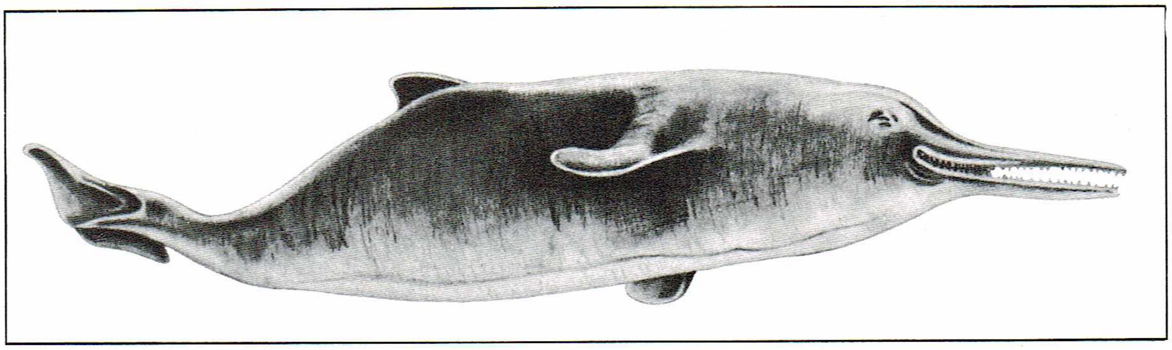

I.G.D.A.

◀ **Stenodelphis blainvillei,** ***le dauphin du Rio de la Plata, possède un rostre particulièrement allongé, armé de 200 à 222 dents coniques et pointues.***

Odontocètes, avec dix-huit genres et quarante-six espèces, qu'on rencontre dans tous les océans, tous les estuaires des grands fleuves et même dans les cours de ces derniers.

La nageoire dorsale, bien développée (sauf chez *Lissodelphis* et *Neophocaena*), est située à la moitié de la ligne dorsale ou un peu en avant de ce point. Le rostre, de forme variable, est bien différencié chez certains genres *(Delphinus, Stenella, Tursiops* et *Lissodelphis),* moins net chez d'autres et parfois absent (*Pseudorca* et *Phocoena*). Les nageoires pectorales sont habituellement pointues. Les dents, en nombre très variable (260 au maximum), sont implantées plus ou moins perpendiculairement sur les mâchoires. Les orbites sont plus postérieures que chez les Monodontidés. Les première et deuxième vertèbres cervicales sont toujours soudées (chez certaines espèces, la fusion concerne 6 vertèbres cervicales), le nombre total de vertèbres variant de 50 à 98. Les Delphinidés mesurent de 1,20 m à 9 m et même davantage *(Orcinus)*.

Cette famille comprend les Cétacés les plus agiles et les plus rapides. Ce sont de parfaits nageurs, à mouvements réguliers, qui sautent souvent hors de l'eau et qui peuvent atteindre une vitesse considérable (près de 50 km/h dans le cas du dauphin proprement dit, *Delphinus delphis*). Habituellement grégaires, les Delphinidés nagent en bancs constitués parfois de plusieurs centaines de têtes (surtout chez les *Globicephala* et les *Lagenorhynchus*), bien qu'on puisse en rencontrer de solitaires. Certaines espèces accomplissent de véritables migrations; d'autres effectuent des déplacements plus limités à la recherche de nourriture. Ils sont généralement très intelligents : le développement de leur psychisme a été mis en évidence par les récentes études concernant les sons qu'ils émettent et leur « langage ». Il est significatif à cet égard que des représentants de différentes espèces (par exemple, *Tursiops truncatus,* le souffleur nésarnack, *Lagenorhynchus obliquidens,* le dauphin à dents obliques, et *Grampus griseus,* le dauphin gris) puissent être l'objet d'un dressage intensif. Ils ont la capacité d'émettre une riche variété de sons et d'utiliser l'écholocation pour détecter des objets situés sous l'eau. Leur ouïe est plus développée que leur vue. Les Delphinidés se nourrissent principalement de Poissons et de Céphalopodes. La gestation dure de 9 à 19 mois, et la longévité maximale de nombreuses espèces atteint de 25 à 35 ans. Certains genres *(Globicephala)* font partie du gibier de la chasse baleinière.

Il existe deux principaux types morphologiques chez cette famille : le type du dauphin, généralement de taille modeste, avec le corps élancé et fuselé, et le type du marsouin, également de taille modeste, mais à museau obtus et à corps plus trapu. On a constitué deux sous-familles, les Delphininés, qui comptent les plus grands représentants de la famille, et les Phocéninés.

La sous-famille des *Delphininés* est caractérisée par divers traits morphologiques et anatomiques. Ses représentants ont le museau aussi long ou plus long que la boîte crânienne. Leurs dents sont en nombre très élevé, petites, coniques, très semblables les unes aux autres, distribuées également aux deux mâchoires (sauf chez *Grampus*), mais jamais implantées sur le prémaxillaire. Les deux premières vertèbres cervicales sont soudées. Ces Cétacés possèdent moins de 8 côtes à double articulation. Leur nageoire dorsale est plus ou moins falciforme, parfois très développée et dans certains cas absente. Ils sont ichtyophages et prédateurs.

La sous-famille compte quinze genres et environ quarante espèces.

Le genre *Steno* comprend pour unique espèce le sténo rostré *(S. bredanensis = S. rostratus),* long de 1,75 m à 2,50 m. Sa nageoire pectorale mesure environ 30 cm et sa nageoire dorsale est haute de 15 cm. Ses parties supérieures sont de couleur ardoise ou pourpre foncé, avec des tachetures diverses, alors que ses parties ventrales sont blanc-rose tacheté d'ardoisé. Le rostre, allongé et comprimé latéralement, est peu séparé de la région faciale, de couleur blanchâtre. Les nageoires sont foncées. Les dents, dont le nombre varie de 80 à 108, présentent une conformation très caractéristique, avec leur couronne sculptée de rugosités typiques et de sillons verticaux. Le sténo rostré est largement répandu dans les océans Atlantique, Pacifique et Indien, surtout dans les eaux tropicales et tempérées. On le trouve encore dans la mer des Caraïbes, la mer de la Sonde, la mer Rouge et quelquefois dans la Méditerranée.

Les espèces du genre *Sotalia* rappellent les *Steno* et les *Tursiops* mais en diffèrent par le fait qu'elles possèdent de 10 à 15 vertèbres en moins. Longs de 90 cm à 2,50 m, et pesant en moyenne de 50 à 70 kg (parfois jusqu'à plus de 150 kg) les *Sotalia* ont un corps peu élancé et assez trapu à la partie médiane. Leur front n'est guère saillant. Leur rostre est bien distinct et assez long. Ils possèdent selon les espèces de 32 à 150 dents, très robustes. Leurs nageoires pectorales atteignent 30 cm de long et sont larges à la base. Leur nageoire dorsale, habituellement triangulaire, est haute de 12 à 15 cm; leur nageoire caudale est grisâtre ou blanchâtre *(S. chinensis* et *S. borneensis)*. La livrée est uniforme ou composite.

Les *Sotalia* vivent dans les mers chaudes de l'Amérique du Sud (océan Atlantique), de l'Afrique, de l'Inde et de l'Asie orientale; ils fréquentent les embouchures des grands fleuves, qu'ils remontent souvent sur une certaine distance (ce qui les fait appeler vulgairement « dauphins de rivière »). Ils nagent habituellement seuls ou par petits groupes de deux à cinq têtes. Ichtyophages, ils se montrent plus actifs au petit matin et vers le soir. Les femelles mettent bas un petit à la fois.

Les *Sotalia* comptent huit espèces. Un premier groupe, américain, en comprend trois : *S. fluviatilis,* qui vit dans l'Amazone jusqu'au Pérou, se distingue d'*Inia geoffroyensis* (Platanistidés), également amazonien, par la forme et

▼ ***Représentation schématique du crâne de l'orque,*** **Orcinus orca.**

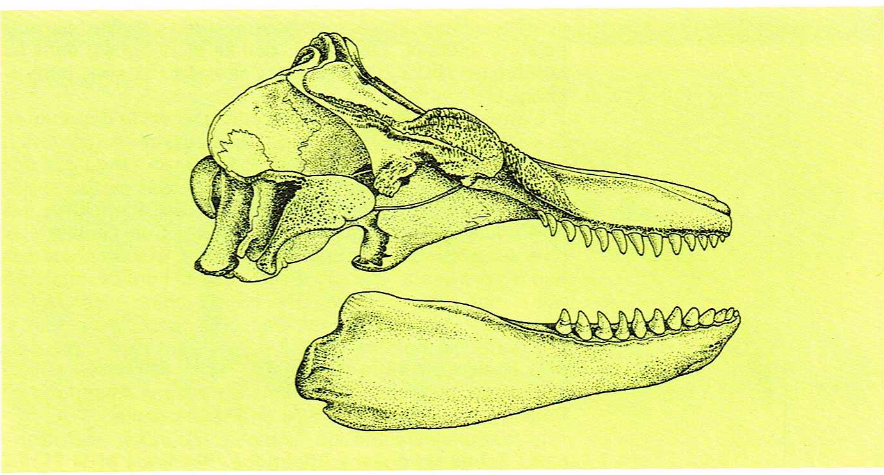

I.G.D.A.

la longueur de la nageoire dorsale, basse et longue chez ce dernier, ainsi que par la forme de la tête; *S. guianensis* fréquente les côtes des Guyanes et du Venezuela, y compris le lac de Maracaïbo; *S. brasiliensis* vit dans la baie de Rio de Janeiro. Le groupe d'Afrique occidentale n'est représenté que par *S. teuszi*, qui vit dans les eaux côtières et les estuaires du Sénégal au Cameroun. Considéré autrefois comme uniquement herbivore et très rare, on s'est aperçu que ce Cétacé est ichtyophage et plus abondant qu'on ne le pensait. Le troisième groupe, essentiellement asiatique, compte quatre espèces. *S. chinensis* occupe une aire vaste, du Sarawak (Bornéo) à une grande partie des mers des côtes chinoises, et remonte le Yang-tsé-kiang. *S. borneensis* vit du Sarawak au golfe de Thaïlande. *S. lentiginosus*, le plus largement distribué, est répandu dans le golfe du Bengale et dans les eaux de l'Afrique orientale, ainsi que peut-être dans les eaux australiennes. Enfin, *S. plumbea* vit à Bornéo, dans le golfe du Bengale et jusqu'à la mer Rouge.

Le genre *Stenella (= Prodelphinus)*, dont la systématique est très discutée, comprend une dizaine d'espèces des eaux chaudes du monde entier. Pélagique, elles fréquentent des eaux plus profondes et transparentes. Longues de 1 m à 3 m, elles ont des nageoires pectorales de 15 à 20 cm de long et une nageoire caudale large d'environ 50 cm; les adultes des espèces de grande taille peuvent peser jusqu'à 160 kg. La livrée est habituellement gris brunâtre ou marron, plus ou moins foncée sur le dessus, plus claire en dessous; diverses espèces sont tachetées de blanc *(S. frontalis)*, alors que d'autres possèdent une livrée caractéristique, avec des bandes longitudinales, blanches ou bleues, sur les flancs. Le museau est allongé, avec un rostre bien distinct. La symphyse mandibulaire est courte, et il n'y a pas de sillons palatins latéraux. Les dents, petites et pointues, sont au nombre de 150 à 200 environ. Ces Animaux sont ichtyophages.

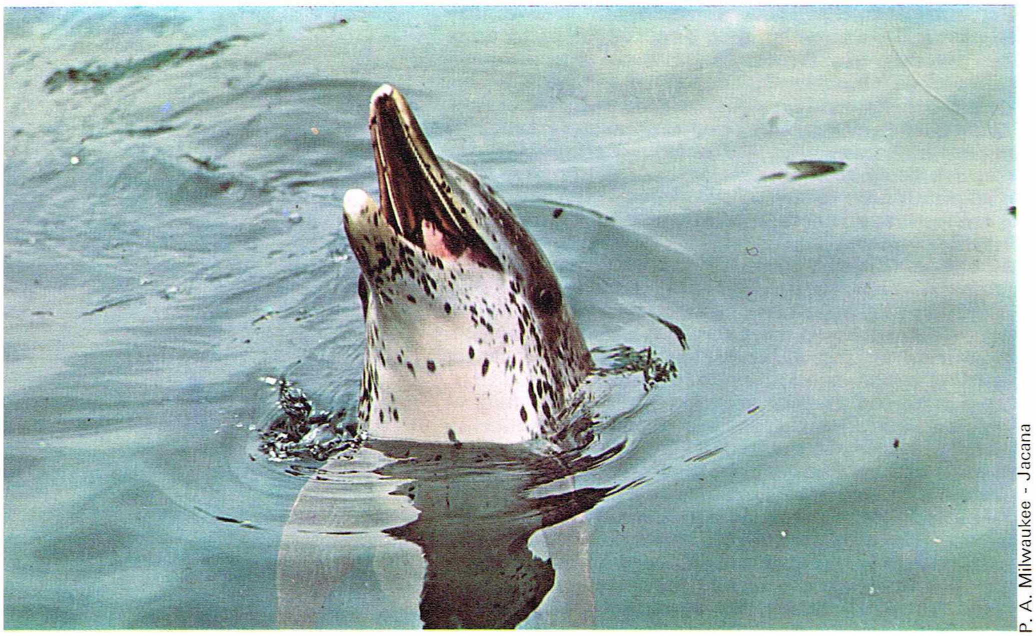

▼ **Stenella plagiodon (= S. pernettyi)** *vit dans l'océan Atlantique septentrional, le golfe du Mexique et les eaux brésiliennes.*

P. A. Milwaukee - Jacana

L'une des espèces les mieux connues est le dauphin de Thétis *(S. caeruleoalba = S. euphrosyne = S. styx)*. Cet Animal est long de 2 m à 2,40 m. Sa forme est très semblable à celle du dauphin commun. Ses parties supérieures sont noirâtres, son dessous est blanchâtre, et l'extrémité de ses mâchoires est noire. Son caractère le plus remarquable est une bande noir bleuâtre sur ses flancs, dessinant une ligne de l'œil à l'orifice anal. En outre, sur chaque flanc, une bande noire, séparée par une bande blanche, va de l'œil à la nageoire pectorale. Les dents, au nombre de 172 à 200, sont réparties à peu près également entre la mâchoire et la mandibule. Cette espèce est plus abondante dans les océans Atlantique et Pacifique, mais a été signalée en Méditerranée.

Le dauphin tacheté ou douteux *(S. dubia = S. frontalis)* habite les océans Atlantique, Pacifique et la Méditerranée. Il mesure environ 2 m de long. Il est noirâtre sur le dessus, avec des taches blanchâtres ou gris clair, également sur les nageoires; il est plus clair en dessous, avec des taches foncées, formant en quelque sorte un « négatif ». Les côtés de la tête, enfin, portent une sorte de « jugulaire » foncée, qui va du rostre à l'œil. Il possède normalement de 140 à 152 dents. Le dauphin tacheté habite aussi la Méditerranée.

Les autres espèces sont : *S. asthenops, S. clymene, S. crotaphiscus*, et *S. graffmani*, cette dernière répandue dans l'océan Pacifique oriental, des côtes du Mexique jusqu'à celles de la Colombie; *S. longirostris*, qui habite l'océan Pacifique, l'océan Atlantique et l'océan Indien. Enfin, *S. pernettyi (= S. plagiodon)*, qui vit dans l'océan Atlantique septentrional, le golfe du Mexique et les eaux brésiliennes.

Delphinus, le type, compte une seule espèce, le dauphin commun *(D. delphis)*, répandu dans presque toutes les mers tempérées et chaudes du monde. Relativement petit (1,50 m à 2,60 m de long), pesant jusqu'à 115 kg, il a des nageoires pectorales longues de 40 à 60 cm et larges d'environ 20 cm; la nageoire dorsale, falciforme à l'arrière, atteint une hauteur équivalente au 1/10 de la longueur du corps. Le dauphin commun a une tête assez petite (le crâne mesure 45 cm de long), sphéroïdale, et prolongée en avant par un rostre de 13 à 15 cm, séparé du front par une gouttière en V. Ses yeux sont petits (2 à 2,5 cm de diamètre chez les adultes), ronds, à pupilles cordiformes, et sont situés un peu en arrière et au-dessus de l'angle de la bouche. Ses orifices auriculaires sont minuscules. Sa couleur est variable : ses parties supérieures sont noirâtres, tendant au verdâtre ou au brun foncé, et ses parties inférieures sont blanchâtres; ses nageoires, ainsi que les parties supérieures, sont brunes. Sur les flancs, de larges stries brun jaunâtre, grisâtre ou blanchâtre, tendent à se superposer.

Ses dents, pointues et coniques, sont petites : elles ont un diamètre de 2,5 à 3 mm; on en compte de 160 à 200, disposées sur toute la longueur du rostre. La mandibule, à symphyse courte, s'étend légèrement au-delà de l'extrémité de la mâchoire supérieure. Ce Delphininé possède de 73 à 75 vertèbres, dont la formule la plus complète est la suivante : C 7; D 14; L 21; Cd 33; les premières vertèbres cervicales au moins (et parfois toutes les vertèbres cervicales chez les adultes) sont soudées. Il possède en outre de 13 à 15 paires de côtes, dont les 4 premières sont articulées avec le sternum. Il a des rudiments de ceinture pelvienne, longs d'environ 7 cm. Selon Tomilin, il existe aussi, exceptionnellement, des vestiges des membres postérieurs, visibles également à l'extérieur.

Pélagique, le dauphin est un nageur exceptionnel, qui peut effectuer de longs déplacements et fréquente le plus souvent la haute mer. Lorsqu'il saute hors de l'eau, il émet des sons audibles par l'homme. Il se nourrit essentiellement de Poissons et secondairement de Céphalopodes. Il suit les bancs de harengs et de sardines, dont il est très friand. Dans la mer Noire, le dauphin forme en hiver des bancs nombreux qui poursuivent les anchois, et, dans la partie nord-orientale de cette mer, il se rassemble en très grand nombre (de mille cinq cents à deux mille et même cinq mille têtes au kilomètre carré). Dans les mers italiennes, où on le rencontre par groupes de dix à cent têtes, c'est le Cétacé le plus commun. Cet Animal au caractère joueur a l'habitude de suivre les navires et parfois de les dépasser, effectuant des sauts et des cabrioles. Sa vitesse est habituellement de 35 km/h mais il peut atteindre 50 km/h.

Les mâles sont légèrement plus nombreux que les femelles. Après une gestation d'environ 10 mois, ces dernières mettent au monde, en juin ou juillet, un seul petit, long de 50 à 60 cm; ce dernier, qui suit sa mère, est occasionnellement défendu aussi par son père. Dans les bancs, les juvéniles nagent les premiers, suivis par les femelles puis par les mâles, lesquels restent à l'arrière-garde, défendant le groupe en cas d'attaque (d'épaulards, de requins, etc.); cependant, c'est le plus souvent leur grande vitesse qui permet aux dauphins de s'échapper. Le dauphin manifeste une remarquable intelligence; il se sert certainement d'un « langage » pour ses communications sociales, disposant d'une gamme étendue de sons et d'une ouïe très fine. La durée maximale de sa vie est de 20 à 30 ans.

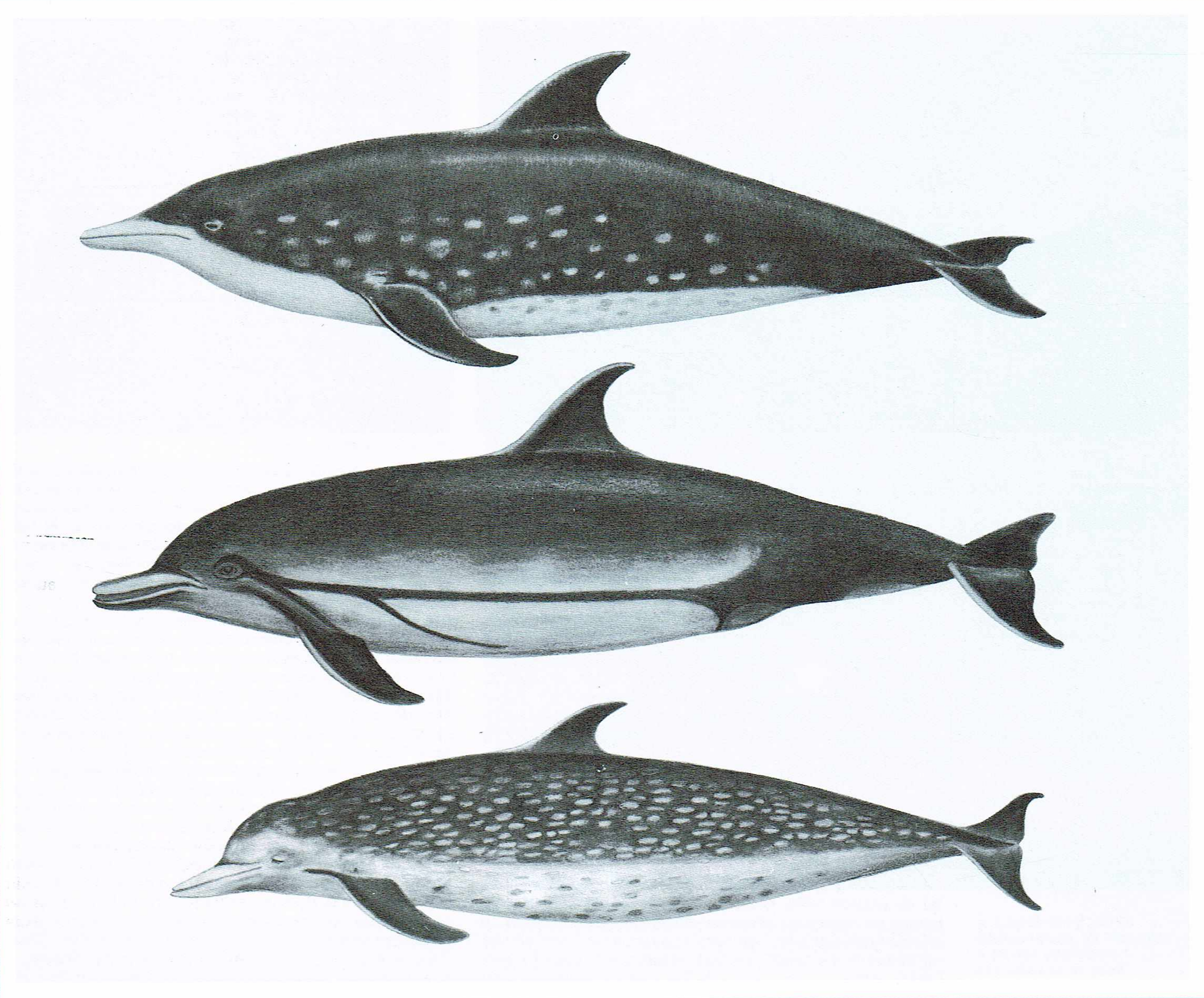

I.G.D.A.

▲ *De haut en bas,* Steno bredanensis, *le sténo rostré, est largement répandu dans les océans Atlantique, Pacifique et Indien, surtout dans les eaux tropicales et tempérées ; sa taille varie de 1,75 à 2,50 m.*
Stenella caeruleoalba, *le dauphin de Thétis, dont le caractère le plus remarquable est une grande bande bleuâtre sur les flancs, dessinant une ligne de l'œil à l'orifice anal ; il mesure de 2 m à 2,40 m de long.*
Stenella frontalis, *le dauphin tacheté ou douteux, habite les océans Atlantique et Pacifique et la Méditerranée ; il mesure environ 2 m de long.*
▼ *Deux exemplaires de dauphin commun* (Delphinus delphis) *dont l'espèce est répandue dans presque toutes les mers tempérées et chaudes du monde. Nageur exceptionnel, le dauphin peut effectuer de longs déplacements ; lorsqu'il saute hors de l'eau, il émet des sons audibles par l'homme ; il se nourrit essentiellement de Poissons et secondairement de Céphalopodes.*

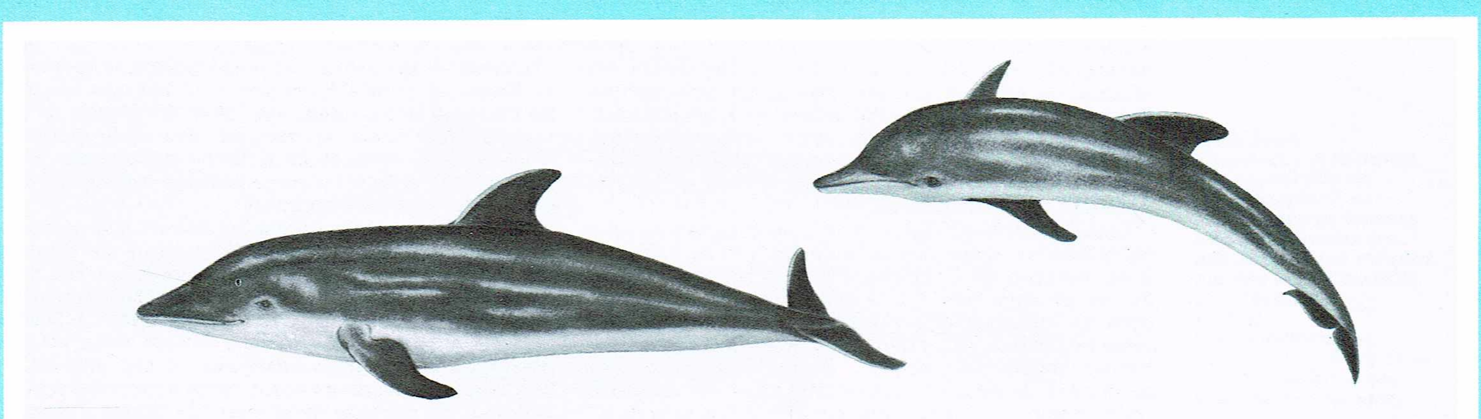

I.G.D.A.

E.P.S.

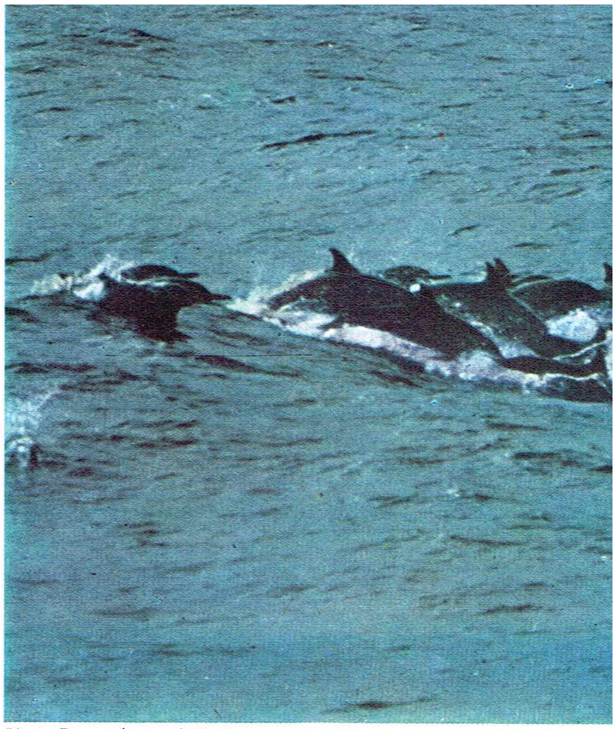

Photo Researchers - J. Burton

▲▶ *A gauche, couple de souffleurs nésarnacks (famille des Delphinidés). A droite, groupe de souffleurs* (Tursiops sp.,) ; *ces Animaux, grégaires, vivent en bancs de quelques dizaines de têtes ; ils peuvent nager à une vitesse de 30 km/h.*

Tursiops comprend deux espèces, que les auteurs anglo-américains nomment les « bottle-nosed dolphins » ou « dauphins à nez en bouteille ». Le souffleur nésarnack, ou grand dauphin, appelé encore dauphin à grand nez *(T. truncatus),* plus grand que le dauphin commun, atteint 4 m de long (mesurant le plus souvent de 2,50 m à 3,60 m) et pèse de 150 à 200 kg. Il a un rostre court et robuste (75 cm de long). Ses nageoires pectorales sont longues de 30 à 50 cm et falciformes. Sa nageoire caudale est large d'environ 60 cm. Ressemblant au dauphin commun, il a le museau plus court et plus large, légèrement dilaté vers l'extrémité, et séparé du front par un sillon. Sa nageoire dorsale, assez grande, courbe et pointue, est située à la moitié du tronc ; il a le dessus noirâtre ou foncé et le dessous blanchâtre. Sa mandibule dépasse quelque peu l'extrémité de la mâchoire supérieure. Les dents, au nombre de 80 à 104, ont un diamètre d'environ 1 cm, avec une pointe tendant à se rabattre en arrière. On compte 63 ou 64 vertèbres et 12 à 14 paires de côtes.

Le souffleur nésarnack fréquente les eaux côtières et les baies, ainsi que les estuaires des fleuves, qu'il peut parfois remonter sur un bref tronçon. Ichtyophage, il se nourrit de Poissons benthiques, quelquefois de moyenne ou de grande taille. C'est un Animal grégaire, qui vit en bancs de quelques dizaines de têtes au maximum. Il effectue des sauts hors de l'eau et peut nager à une vitesse de 30 km/h. Le souffle sortant de son évent peut s'élever parfois entre 1 m et 1,50 m de haut. Les femelles mettent bas entre mars et juin, après une gestation de 11 à 12 mois ; le nouveau-né mesure environ 1 m de long, pèse 12 kg, et devient indépendant vraisemblablement à 1 an. Dans la Méditerranée, cette espèce n'est pas aussi commune que le dauphin proprement dit.

Lissodelphis comprend lui aussi deux espèces : *L. peroni,* des mers australes, ainsi que, rarement, des mers antarctiques, et *L. borealis,* du nord de l'océan Pacifique. *L. peroni,* long de 1,80 m, a la partie supérieure de la tête et le dos noirs ou bleu noirâtre ; son rostre, ses nageoires pectorales, ses flancs, sa queue et ses parties ventrales sont blancs. *L. borealis* est plus grand que le précédent (2,50 m de long) et son ventre est plus blanc. Ces deux espèces ont de 172 à 188 dents. La nageoire dorsale est absente. Ce sont des Animaux océaniques, qui vivent en bancs et se nourrissent de Poissons et de Céphalopodes.

Lagenodelphis compte une seule espèce, *L. hosei,* propre à Bornéo. On en connaît un seul exemplaire, capturé et décrit en 1956, qui mesurait 2,50 m de long et possédait 170 dents.

Lagenorhynchus compte six espèces répandues dans les océans des deux hémisphères. Longues de 1,50 m à 3 m, celles-ci ont des nageoires pectorales d'environ 30 cm de long. Leur livrée est généralement noire ou grise sur le dessus, plus claire aux parties inférieures, et présente parfois, de façon très caractéristique, des bandes et des raies contrastées. Leurs vertèbres sont au nombre de 80 à 90. Ces dauphins ont un rostre très court et leurs nageoires pectorales et dorsales sont pointues. Ils possèdent de 88 à 180 dents. Ces Delphinidés forment parfois des bancs énormes (notamment *L. acutus* et *L. albirostris*), atteignant mille cinq cents têtes. Dans d'autres cas, ils constituent de petits groupes (jusqu'à moins de dix têtes). Il arrive également que leurs bancs effectuent de longs déplacements à la recherche de nouvelles sources de nourriture, et s'associent aux globicéphales et aux dauphins. Ils se nourrissent de Poissons, de Crustacés et de Céphalopodes.

L. obliquidens, le dauphin à dents obliques, accomplit de véritables migrations saisonnières entre les eaux côtières (où il vit en hiver et au printemps) et la haute mer (qu'il fréquente l'été). La gestation dure environ 10 mois, et l'unique nouveau-né mis au monde mesure 1 m de long. Ce dauphin est chassé et sert d'Animal de spectacle dans les grands océanariums américains ; il est toutefois moins habile que *Tursiops.*

Les eaux européennes sont fréquentées par deux espèces : le dauphin à flancs blancs *(L. acutus),* long de 2 à 3 m, qui présente de grandes zones longitudinales blanches sur les flancs et possède de 120 à 160 dents, est répandu dans l'océan Atlantique septentrional et une partie de l'océan Glacial Arctique, ainsi que dans l'Adriatique ; le dauphin à bec blanc *(L. albirostris),* de même taille, et qui a le dessus des flancs gris et le dessous clair, se distingue du précédent par la partie antérieure de son museau, claire et parfois blanche, et vit aussi dans l'océan Glacial Arctique et le nord de l'océan Atlantique. Les autres espèces sont : *L. cruciger,* des mers du Sud et de l'océan Glacial Antarctique ; *L. electra,* des eaux tropicales, au nord de 10° de latitude sud, connu en Inde, en Indonésie, à Hawaii, au Sénégal et en Guinée ; *L. obliquidens,* de l'océan Pacifique septentrional ; enfin, *L. thicolea,* connu seulement aux îles Falkland.

Cephalorhynchus, limité aux mers australes, compte quatre espèces, caractérisées généralement par des livrées de couleurs très contrastées. L'espèce la plus typique est *C. commersoni,* qui fréquente les eaux atlantiques d'Amérique du Sud. Sa teinte générale est blanchâtre, avec des zones noires disjointes. Les *Cephalorhynchus* sont longs de 1,20 à 1,80 m et ne possèdent pas de rostre nettement distinct. Ils ont, au total, de 100 à 128 dents ; ils fréquentent les eaux froides et se nourrissent de Crustacés et de Céphalopodes. *C. eutropia* fréquente les côtes chiliennes (entre les 33ᵉ et 40ᵉ degrés de latitude sud). *C. hectori* vit dans les mers de la Nouvelle-Zélande, de Bornéo et de la Chine méridionale. Enfin, *C. heavisidei* habite l'océan Atlantique méridional et la partie africaine de l'océan Indien.

Orcaella brevirostris, unique espèce de son genre, vit dans les eaux côtières chaudes, à proximité des estuaires fluviaux de l'Asie du Sud-Est, y compris les îles de la Sonde : dans l'Irrawaddy, de Haute-Birmanie, il remonte le cours jusqu'à 1 440 km de l'embouchure. Ce Delphinidé est long d'un peu plus de 2 m ; son corps est bleu ardoisé, avec les parties inférieures un peu plus claires. Son front est proéminent et son rostre minuscule, presque indistinct. Sa nageoire dorsale est très courte. Il possède de 48 à 76 dents et se nourrit de Poissons.

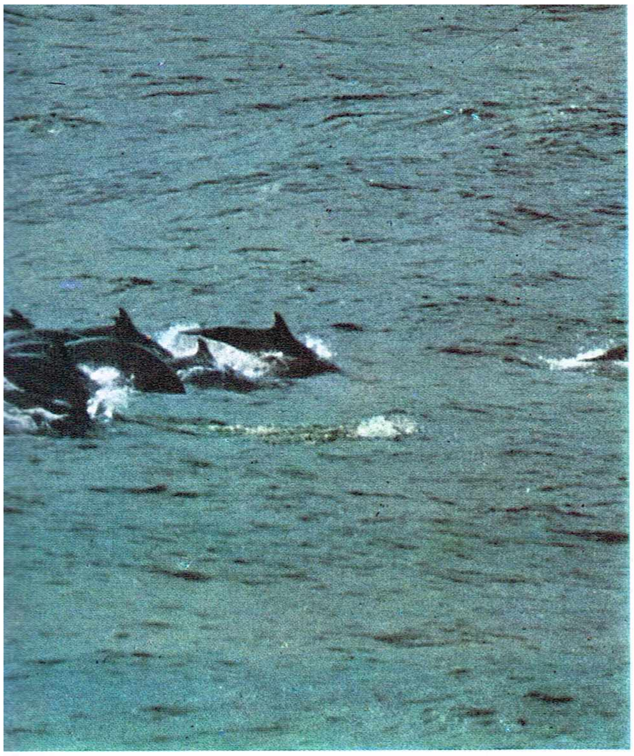

Pseudorca comprend également une seule espèce, le pseudorque ou faux-épaulard *(P. crassidens)*, répandu dans toutes les mers sauf les mers polaires. De grande taille (6 m de long pour les mâles et 4,75 m pour les femelles), il atteint un poids de 1,5 t. Son museau est arrondi. Sa livrée est uniformément noire. Bien que très semblable à l'épaulard, ou orque proprement dit *(Orcinus)*, il en diffère extérieurement, non seulement par sa moindre taille et sa livrée, mais aussi par son corps plus fin, sa tête plus fuselée, et le moindre développement de sa nageoire dorsale, dont la forme est différente et la pointe tournée en arrière. *Pseudorca* possède 32 ou 34 dents, grosses et robustes, de section circulaire, alors que celles d'*Orcinus* ont une section ovale. *P. crassidens* est une espèce océanique des mers profondes. Elle est connue surtout par ses bancs massifs (jusqu'à trois cents têtes) qui s'échouent. Il est probable que ce Cétacé, hautement grégaire, se déplace à la recherche de nourriture (Poissons et Céphalopodes), en troupes de plusieurs centaines d'individus des deux sexes et de tous les âges. La gestation dure de 10 à 12 mois, et il naît un seul petit, qui mesure de 1,70 m à 2 m. Le pseudorque se rencontre occasionnellement en Méditerranée.

I.G.D.A.

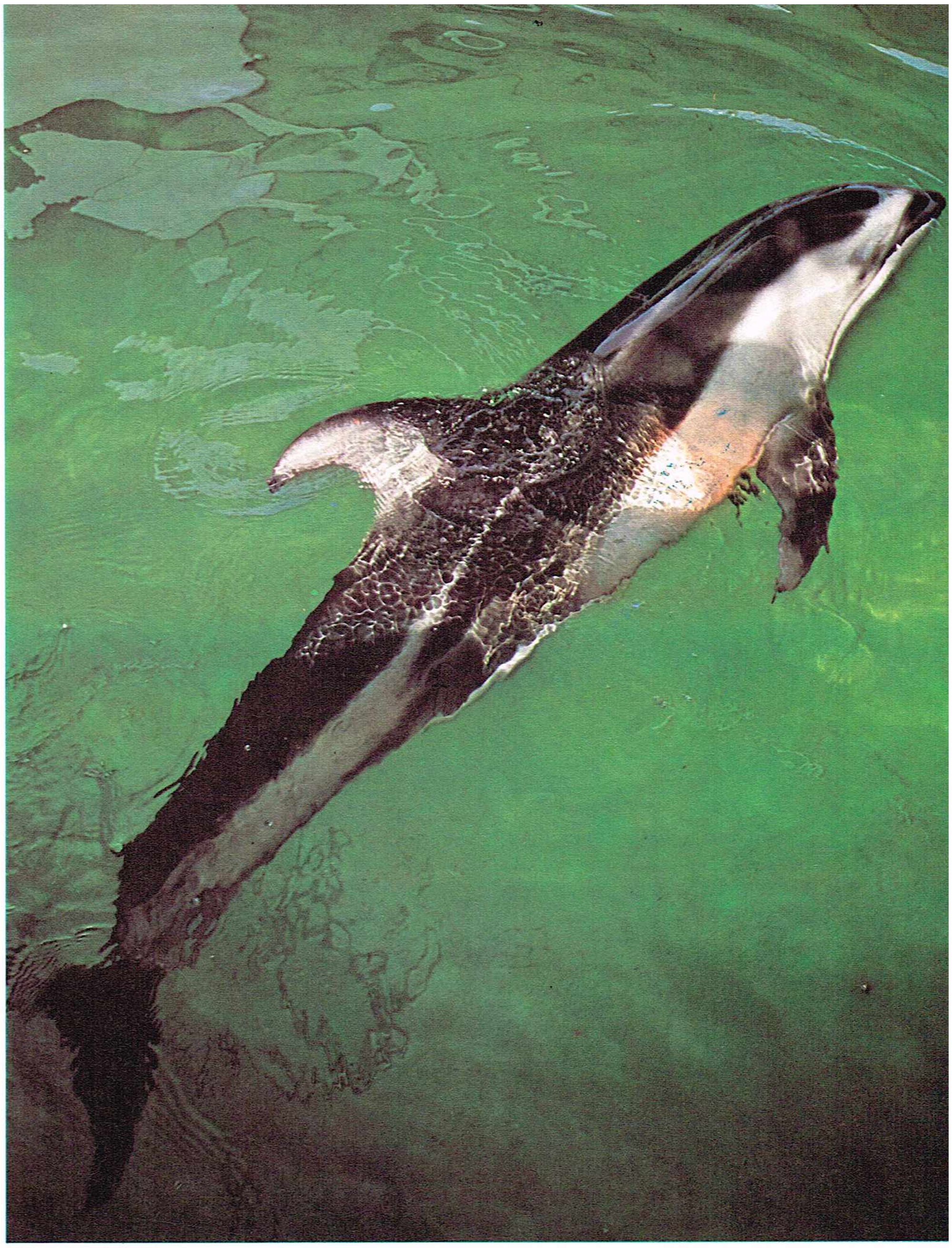

P. A. Milwaukee - Jacana

▲ Lagenorhynchus obliquidens, *le dauphin à dents obliques, est chassé et sert d'Animal de spectacle dans les grands océanariums américains.*

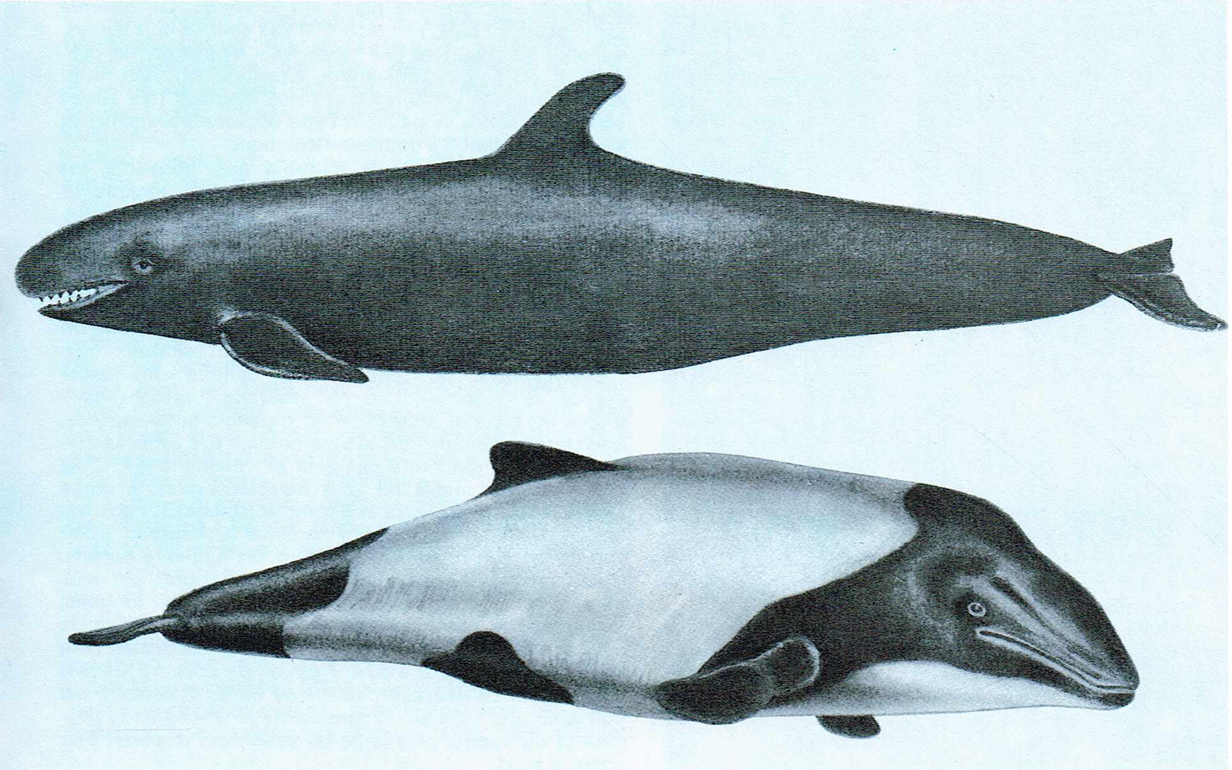

◀ *En haut,* Pseudorca crassidens, *le pseudorque ou faux-épaulard, est une espèce océanique des mers profondes; elle est connue surtout par ses bancs massifs qui s'échouent. En bas,* Cephalorhynchus commersoni *fréquente les eaux atlantiques d'Amérique du Sud; il ne possède pas de rostre nettement distinct.*

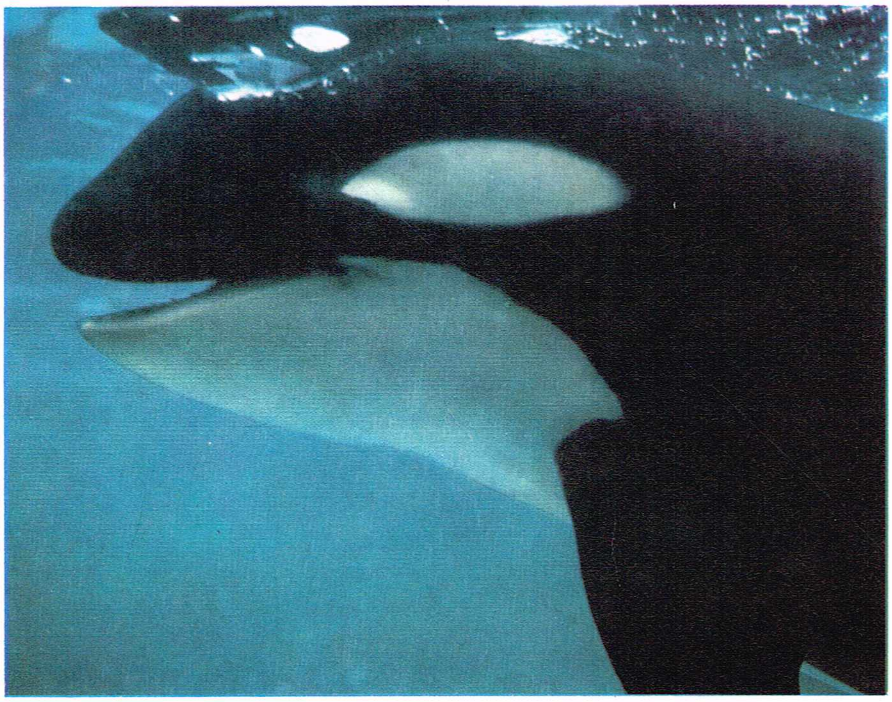

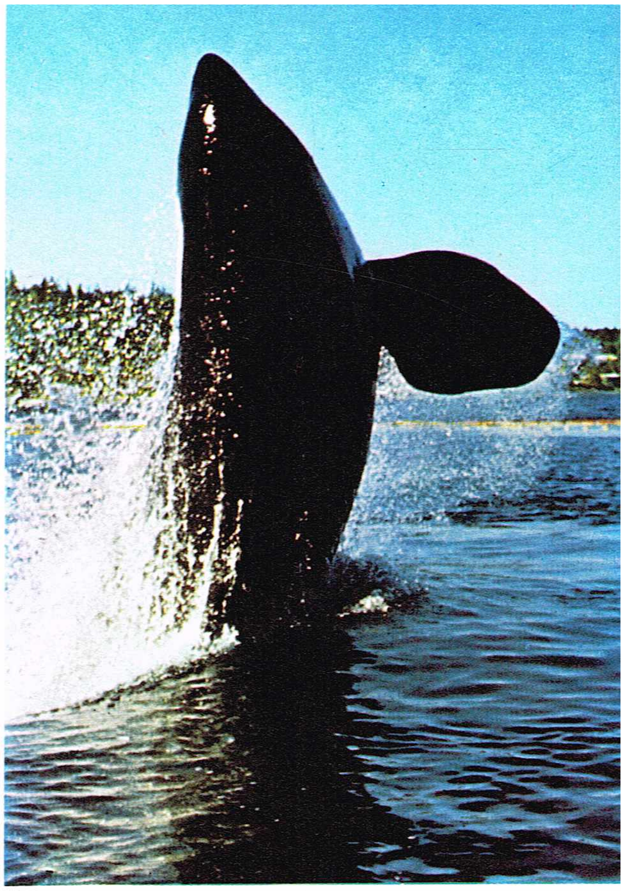

▲▶ ***Ces deux illustrations montrent l'orque,* Orcinus orca, *d'aspect très typique, sous l'eau et effectuant un saut hors de celle-ci; l'orque fréquente toutes les mers et est certainement le plus grand prédateur actuel.***

Orcinus compte le plus grand Delphinidé, l'orque, ou épaulard, dont les mâles mesurent 9,50 m de long (exceptionnellement 10 m), et les femelles 7 m. Cet Animal quasi cosmopolite, qui habite aussi les eaux polaires, est le plus grand prédateur marin. Sa forme est caractéristique : sa tête est arrondie, avec un museau obtus, sans rostre bien distinct; son tronc est puissant; sa nageoire dorsale, typique, plus ou moins triangulaire, dressée sur le dos et pointue, atteint 1,80 m de haut, et connaît un développement plus important chez les vieux mâles; ses nageoires pectorales, larges et ovales, présentent un sommet arrondi et sont longues d'environ 2 m chez les mâles; sa nageoire caudale est grande, bilobée et a des pointes aiguës. Sa livrée est également très typique : ses parties supérieures sont noirâtres et ses parties inférieures blanches. De chaque côté des nageoires pectorales, des zones noires s'étendent vers le ventre, se rapprochant sans se toucher. La dernière partie du tronc est également noire. Une tache blanche, elliptique, se trouve au-dessus de l'œil. Les vertèbres sont au nombre de 50 à 52, les deux ou trois premières cervicales étant normalement soudées. Ses dents, coniques, très robustes, atteignent, au maximum, 10 cm de long et 5 cm de diamètre; leur nombre est de 40 à 56 au total.

L'orque fréquente toutes les mers, se tenant généralement au large, mais se rapprochant parfois des côtes à la recherche de proies. Il peut, en certains cas, remonter sur un bref tronçon le cours des grands fleuves dont il fréquente les estuaires. C'est certainement le plus grand prédateur actuel, non seulement parmi les Animaux marins, mais également, comparativement, parmi les formes terrestres, étant donné sa grande taille et son extraordinaire voracité. Il se nourrit de Poissons, de Pinnipèdes, et de Cétacés, toujours d'une dimension appropriée à celle de sa bouche, et il s'attaque aussi à des Cétacés de grande taille et même à des baleines, auxquels il inflige de terribles blessures, parfois mortelles. Un individu long de 6,50 m avait un estomac (1,80 m sur 1,30 m) qui contenait : 6 phoques, des restes de 6 ou 7 phoques semi-digérés et de 13 marsouins, sans compter 2 phoques pratiquement intacts restés encore dans l'œsophage. Grégaire, l'épaulard vit et chasse en bancs (formant des troupes de trente têtes au maximum), ce qui le rend encore plus redoutable pour ses victimes. Quand il nage en surface, on l'aperçoit nettement du fait de sa haute et caractéristique nageoire dorsale. Il atteint une vitesse de 37 km/h. L'accouplement a lieu en hiver, et les petits (longs de 2 m à la naissance et bien développés) sont mis au monde environ 12 mois plus tard. L'orque est accidentel dans les eaux méditerranéennes de nos régions.

Grampus comprend une seule espèce, le dauphin gris *(G. griseus)*, qui atteint 4 m de long. Il est caractérisé par l'absence de dents à la mâchoire supérieure : il ne possède, en effet, que 4 à 14 dents, implantées dans la région de la symphyse mandibulaire; très rarement, on observe une ou deux dents à la mâchoire supérieure. Le dauphin gris a le corps allongé, avec une tête peu distincte du tronc et se terminant en un museau obtus, dépourvu de « bec », un peu comprimé latéralement, et à mâchoire supérieure débordant de la mandibule. Le profil de son front est presque perpendiculaire à la mâchoire. Sa nageoire dorsale est située à peu près à la moitié du dos; haute de 30 cm, fine et recourbée, elle a le bord antérieur falciforme, alors que le bord postérieur est concave. Ses nageoires pectorales mesurent de 50 à 60 cm, et sa nageoire caudale est large de 50 à 70 cm. Cette espèce a le dessus gris foncé ou noirâtre, et le dessous gris ou blanchâtre, presque blanc sur le ventre. On observe sur la peau, çà et là, des taches et des striures plus claires, qui sont les cicatrices des blessures infligées par les prédateurs. En ce qui concerne le squelette, on peut noter les 2 premières vertèbres cervicales soudées (les autres vertèbres cervicales peuvent l'être occasionnellement) et les 12 côtes dont 6 à double articulation.

A la saison chaude, le dauphin gris fréquente les mers froides, se déplaçant vers l'équateur lorsque la température baisse. Cet Animal quasi cosmopolite s'observe fréquemment en Méditerranée. Il se nourrit essentiellement de Céphalopodes. Grégaire, il vit également isolé, comme on peut l'observer en Méditerranée orientale. Ses accouplements ont lieu de janvier à mars; après 12 mois de gestation, les femelles mettent bas un petit, long d'environ 1,75 m et déjà très developpé.

Globicephala, ou globicéphale, compte une seule espèce, le dauphin-pilote *(G. melaena)*, présent dans toutes les mers et différencié en plusieurs sous-espèces, que certains auteurs considèrent comme des espèces distinctes. On le rencontre rarement en Méditerranée. C'est l'un des Delphinidés les plus caractéristiques, à corps massif, à tête globuleuse et à front sensiblement convexe, faisant saillie au-dessus de l'extrémité du museau (d'où son nom). Son rostre est très court. Sa nageoire dorsale, située un peu au-delà de la moitié du tronc, est plus haute que large. Ses nageoires pectorales sont longues, falciformes et pointues. Les femelles atteignent 6 m de long et les mâles 8,70 m. Les vertèbres cervicales sont toutes soudées, et il existe 6 paires de côtes, à double articulation. Le dauphin-pilote a de 32 à 52 dents. Il est noir avec une zone blanchâtre médiane le long de la poitrine et du ventre, plus large en avant, qui disparaît peu après la mort.

C'est une espèce pélagique qui se nourrit surtout de Mollusques Céphalopodes. Très grégaire, le globicéphale vit en bancs de plusieurs dizaines d'individus (parfois plusieurs centaines ou milliers), qui échouent occasionnellement sur les plages où les individus succombent. Ces bancs sont généralement guidés par un vieux mâle (d'où le nom de dauphin-pilote). Lorsque ce dernier émerge pour respirer, il fait entendre un bruit semblable à un aboiement. Le globicéphale effectue des migrations régulières des mers septentrionales, où il vit en été, aux mers chaudes, où il s'accouple pendant l'hiver boréal; puis de septembre à décembre, après 10 à 12 mois de gestation, naît un unique petit, long d'environ 1,60 m.

Feresa attenuata, unique espèce de son genre, est rare. Il est connu surtout dans l'océan Pacifique septentrional, sur les côtes du Sénégal et dans l'océan Atlantique septentrional. Mesurant 2,30 m, il a une nageoire pectorale longue d'environ 44 cm et possède de 40 à 52 dents.

La sous-famille des *Phocéninés* est caractérisée par un rostre court, qui n'atteint qu'exceptionnellement la longueur de la boîte crânienne, et par ses dents, lobées et à couronne comprimée latéralement. Il s'agit d'Animaux de petite taille (en général, de 1,20 m à 2 m), à corps moins élancé que les Delphinidés. Leur tête est conique et leur museau plus ou moins pointu. La nageoire dorsale, triangulaire, est peu développée, et absente chez le *Neophocaena.* Les nageoires pectorales sont courtes, la nageoire caudale étroite. La sous-famille comprend trois genres : *Phocaena, Phocaenoides* et *Neophocaena,* qui comptent, au total, six espèces.

Phocaena (= Phocoena) comprend les marsouins, dépourvus de nageoire dorsale, et dont les 6 premières vertèbres cervicales sont soudées. La principale espèce est le marsouin commun *(P. phocaena),* qui habite surtout les mers de l'hémisphère boréal. Long de 1,30 m à 2 m, il a la tête plutôt petite et peu distincte du tronc; son front descend en pente douce vers le museau, obtus et dépourvu de bec. Le tronc est plus trapu et plus ramassé que chez les dauphins. La nageoire dorsale, triangulaire et basse, est implantée un peu au-delà de la moitié du corps. Les nageoires pectorales, petites, sont ovalaires. La livrée est essentiellement noire sur le dessus, et les nageoires gris fer sur les flancs et blanches ventralement. Cette espèce a de 88 à 112 dents, petites, avec une couronne dilatée et comprimées transversalement; des sillons verticaux leur confèrent un aspect lobé. La durée de gestation est d'environ 10 à 11 mois. Le marsouin fréquente de préférence les eaux côtières, remontant aussi les cours des grands fleuves. Il se nourrit de Poissons et, secondairement, de Crustacés et de Mollusques et vit en bancs plus ou moins nombreux. Il est plutôt accidentel près de nos côtes méditerranéennes. Sa chair, comestible, est appréciée depuis l'Antiquité. Les autres espèces sont : *P. spinipinnis,* des côtes atlantiques et pacifiques de l'Amérique du Sud; *P. sinus,* de l'océan Pacifique septentrional; enfin, *P. dioptrica,* de l'océan Atlantique méridional, jusqu'à l'Antarctique.

Phocaenoides est le plus grand Phocéniné. L'unique espèce, *P. dalli,* mesure un peu plus de 2 m de long et pèse 125 kg. Sa livrée présente un dessin très net, avec les parties antérieures et supérieures noires et une tache blanche, régulière, très étendue, sur le ventre et les flancs, et qui s'étend de la nageoire dorsale jusqu'à l'extrémité du corps. *Phocaenoides* a des dents plus petites et plus nombreuses (de 76 à 108) que celles du marsouin proprement dit, et en plus grand nombre sur la mandibule. Ce genre présente un caractère exceptionnel : la présence, parmi les dents, de protubérances cornées gingivales. Il est surtout ichtyophage; sa distribution géographique couvre l'océan Pacifique septentrional, de la mer de Behring au Japon et à la Californie.

Le dernier genre de Phocéninés est *Neophocaena (= Neomeris),* avec pour unique espèce *N. phocaenoides,* long d'environ 1,50 m et dépourvu de nageoire dorsale. Il a le front saillant et les 3 premières cervicales soudées. Il vit le plus souvent en solitaire ou par couples, fréquentant les eaux côtières, les estuaires, les fleuves, et même les lacs de l'Asie méridionale et orientale (Inde, Pakistan, Chine, Japon, et îles de la Sonde). On l'a signalé dans le Yang-tsé-kiang, jusqu'à 1 600 km de l'estuaire.

Les **Monodontidés** *(Monodontidae)* ou Delphinaptéridés *(Delphinapteridae)* constituent une minuscule famille d'Odontocètes, de grande taille. Leur tête est petite, arrondie et dépourvue de rostre. Ils possèdent de 50 à 55 vertèbres, les 2 premières cervicales étant toujours libres. Ils ont 11 paires de côtes, dont 7 ou 8 présentent une double articulation. Leur cubitus est dépourvu d'oléocrâne. Les nageoires pectorales sont larges, et la nageoire dorsale absente. Ils manifestent une tendance caractéristique à la dépigmentation, laquelle est plus ou moins accentuée.

La famille, largement répandue dans les eaux polaires boréales, comprend deux genres : *Delphinapterus (= Beluga),* le type, et *Monodon,* chacun comptant une seule espèce.

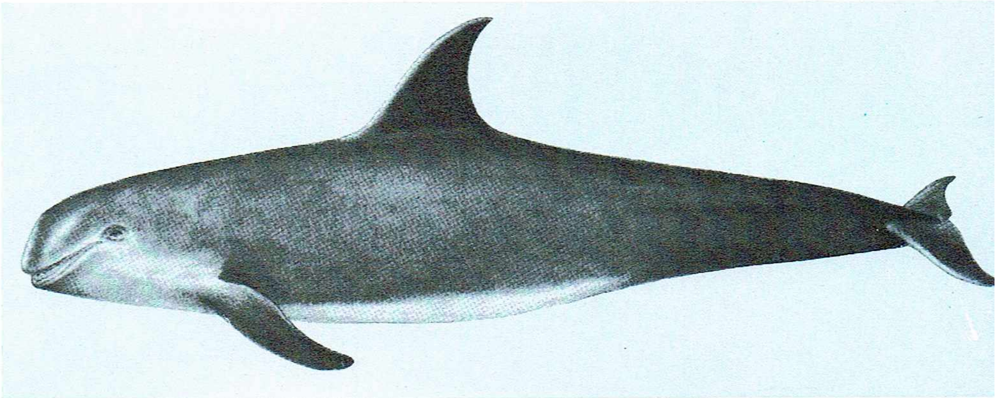

I.G.D.A.

▲ ***Grampus griseus,*** ***le dauphin gris, caractérisé par l'absence de dents à la mâchoire supérieure, est un Animal quasi cosmopolite qui se nourrit essentiellement de Céphalopodes.***

Ph. Poroniev - Jacana

▼ ***Globicephala melaena,*** ***le dauphin-pilote, est une espèce pélagique.***

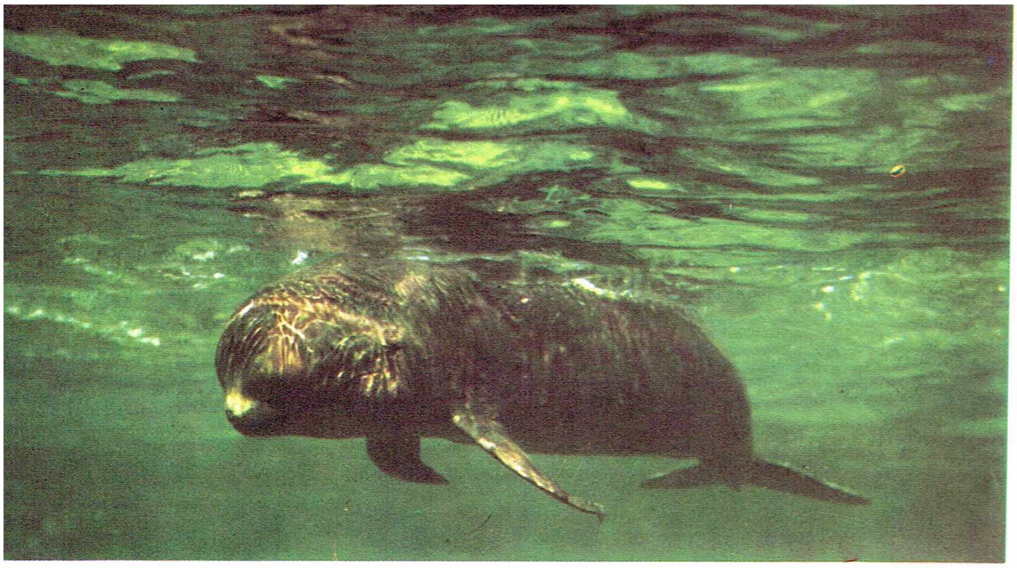

E.P.S.

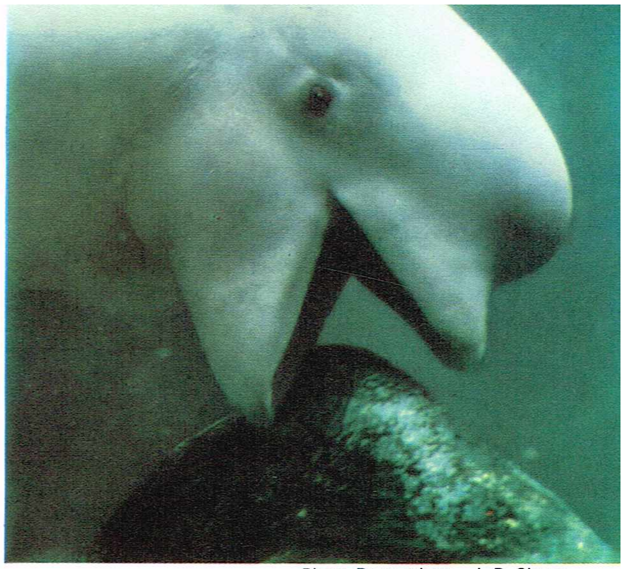

Photo Researchers - J. R. Simon

▲ **Delphinapterus leucas,** *le beluga vrai ou baleine blanche, est une espèce activement chassée pour sa graisse et sa chair, consommée directement ou transformée en provende pour l'élevage des visons; à droite, détail de la tête.*

Le béluga vrai, ou baleine blanche *(Delphinapterus leucas)*, est long d'environ 3 à 6 m. Son museau est très court et son front élevé. Chez les adultes, la livrée est blanc crème ou jaunâtre, alors qu'elle est d'abord gris foncé, puis tachetée, chez les juvéniles. Cette baleine possède de 32 à 40 dents, et 50 ou 51 vertèbres. Elle a une diffusion circumpolaire et fréquente surtout les eaux littorales peu profondes, vivant habituellement par petits groupes de cinq à dix individus (ce nombre peut s'élever à trente et, quelquefois, à plusieurs centaines ou milliers lorsque la nourriture est exceptionnellement abondante dans une zone donnée). Le béluga remonte fréquemment le cours des grands fleuves du Nord et accomplit des migrations régulières en fonction des possibilités alimentaires, se nourrissant surtout de Poissons benthi-pélagiques de grosse taille. La gestation dure environ 14 mois. Cette espèce est activement chassée pour sa graisse et sa chair, consommée directement ou transformée en provende pour l'élevage des visons.

Le narval *(Monodon monoceros)*, de taille semblable (4 à 6 m) à celle du béluga, a la tête petite et arrondie. Il a une couleur très claire, surtout sur les flancs et au ventre, avec d'innombrables petites taches noires ou foncées, plus nettement marquées aux parties supérieures. Les nageoires pectorales sont longues d'environ 30 cm; la nageoire dorsale manque, et la nageoire caudale est large de 1 m au minimum. Les vertèbres sont au nombre de 50 à 55. L'une des caractéristiques notables de ce Monodontidé est l'extrême réduction numérique de ses dents, qui peuvent chez les femelles rester entièrement cachées dans les gencives. Chez les mâles, il en existe normalement 2, situées uniquement à la mâchoire supérieure : la dent de gauche (et, rarement, la droite) prend un développement énorme, formant une défense spiralée (dont la torsion va de gauche à droite), à croissance continue, longue de plus de 2 m (exceptionnellement 3 m) pour un diamètre de 10 cm, et située horizontalement. Cet organe spécialisé représente un caractère sexuel secondaire.

Le narval fréquente les eaux littorales des mers arctiques, surtout entre 70° et 80° de latitude nord; il peut aussi remonter les cours d'eau. Rapide, actif et plus ou moins grégaire, il vit en groupes de six à vingt têtes (parfois de cent à trois cents), composés habituellement d'individus du même sexe. Actuellement, il est devenu rare. Il effectue de profondes plongées jusqu'à 400 m et peut rester sous l'eau pendant 30 minutes au maximum. En automne, il émigre en grand nombre au-delà de la limite des glaces, pour retourner au printemps dans les mers libres. Il se nourrit essent ellement de Céphalopodes, et, secondairement, de différentes espèces de Poissons. A la naissance, le petit mesure 1,50 m. Le narval est chassé non seulement pour sa longue dent, mais également pour sa graisse et pour sa chair, mangée par les Esquimaux et largement employée par ces derniers pour nourrir leurs chiens. Le morse est le principal ennemi du narval, qu'il guette près des trous dans la glace où il vient respirer.

▼ **Monodon monoceros,** *le narval, effectue des plongées profondes jusqu'à 400 m et peut rester sous l'eau pendant 30 mn au maximum; il est chassé pour sa longue dent, sa graisse et sa chair. Son principal ennemi est le morse.*

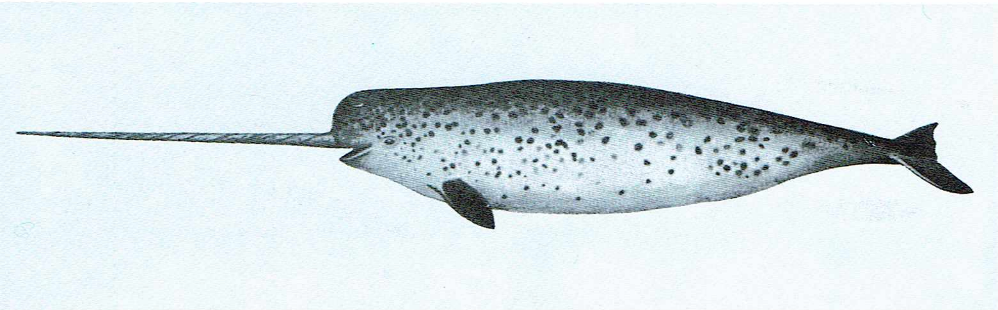

I.G.D.A.

Super-famille des Physétéroïdés

La super-famille des Physétéroïdés *(Physeteroidea)* comprend les deux familles des Physétéridés et des Hypérodontidés (ou Hypéroodontidés).

Les **Physétéridés** *(Physeteridae)* comptent seulement deux genres : *Physeter* et *Kogia*, chacun avec une seule espèce, respectivement, le cachalot commun *(Physeter catodon)* et le cachalot nain, ou kogia *(Kogia breviceps)*, ou encore cachalot pygmée, très différent par l'aspect et plus encore par la taille : les mâles du premier mesurent habituellement de 15 à 18 m (ils peuvent atteindre une longueur de 20 m), alors que le second ne dépasse pas 4 m.

Le corps, très massif, est à peu près cylindrique. La tête est très grande, surtout chez le cachalot proprement dit. Les nageoires pectorales sont brèves, et la nageoire dorsale est courte (chez le kogia) ou absente (chez le cachalot). La bouche, située à la partie inférieure de la tête, est caractérisée par la forme particulière de la mandibule, très restreinte et largement en retrait par rapport à la mâchoire supérieure. La symphyse mandibulaire est très étendue. La mâchoire supérieure est normalement dépourvue de dents fonctionnelles (elle en compte, au maximum, 1 ou 2 paires), alors que la mandibule en porte de 7 à 30 paires; il y a généralement de 36 à 60 dents au total. Le crâne, nettement asymétrique, est concave sur le dessus et se prolonge en avant par un rostre très large; il existe une crête fronto-occipitale très développée. On observera, de plus, que les os zygomatiques et lacrymaux sont soudés réciproquement, ainsi que l'os pétro-tympanique, qui est fermement rattaché au crâne. Au-dessus de la région rostrale du crâne, se trouve le grand organe du spermaceti, ou du blanc (de baleine), qui contient une importante masse huileuse. Les vertèbres sont au nombre de 50 à 54; les cervicales sont partiellement soudées, mais l'atlas est toujours libre. La famille des Physétéridés est répartie en deux sous-familles : les Physétérinés et les Kogiinés.

La sous-famille des *Physétérinés* comprend naturellement le cachalot *(Physeter catodon = P. macrocephalus)*, qui est le plus grand Odontocète et l'un des plus grands Cétacés existants : le mâle est long de 15 à 18 m et la femelle de 12 m au maximum. On capturait naguère des spécimens de 22 à 24 m de long, et peut-être même plus grands (sans doute jusqu'à 30 m). Les mâles pèsent de 30 à 50 tonnes.

La tête du cachalot, très grosse, mesure environ 1/3 de la longueur du corps; elle est légèrement convexe sur le dessus, tronquée en avant et concave sur les côtés. Le tronc atteint un diamètre maximal en arrière des yeux. L'ouverture buccale, située au-dessous de la tête, est longue et large, avec des commissures qui arrivent jusque sous les yeux et très près des attaches des nageoires pectorales. La langue est très grosse et charnue. L'évent est une fente en forme de S, située à l'extrémité antéro-

Photo Researchers - V. Serventy

◀ *Les Physétéridés comptent deux espèces de cachalots dont* **Physeter catodon**, *le plus grand des Odontocètes (15 à 18 m de long) et l'un des plus grands Cétacés existants.*

supérieure de la tête, mais sensiblement du côté gauche. Les yeux, très petits, se trouvent au-dessus et en avant des minuscules ouvertures auriculaires, situées entre la bouche et les nageoires pectorales. L'œil droit est plus grand que le gauche. Les nageoires pectorales ont jusqu'à 2 m de long et sont larges de 1 m, alors que la nageoire caudale peut atteindre 4,50 m de large. La nageoire dorsale est absente : à sa place, il existe quelques appendices le long de la ligne dorsale, entre lesquels est située une crête. La livrée est gris foncé sur le dessus, blanchâtre ou argentée aux parties inférieures et presque toute blanche au ventre. La peau présente de nombreuses cicatrices et griffures, dues soit à des attaques de la part d'autres Cétacés (essentiellement l'épaulard), soit à des luttes avec de gigantesques Céphalopodes. Le dimorphisme sexuel est très net.

Le nombre des dents est de 48 (42 pour les spécimens capturés en Méditerranée) avec, de toute façon, d'importantes variations individuelles et une asymétrie fréquente. Les dents sont dépourvues d'émail; elles sont longues de 16 à 20 cm et pèsent 500 g chacune. Le crâne forme une sorte de large bassin, qui renferme l'organe du spermaceti. Ce dernier est constitué, à sa partie inférieure, par une masse fibreuse et élastique, remplie d'huile au-dessus de laquelle se trouve une autre grosse poche, remplie du spermaceti proprement dit, substance incolore, oléagineuse et transparente, qui fut autrefois considérée comme du sperme, d'où l'origine de son nom (*sperma ceti* = sperme de baleine). Chaque individu contient de une à cinq tonnes de blanc de baleine. La fonction de cet organe n'est pas encore bien connue. Il aurait une action sur le mécanisme de fermeture de l'évent durant les immersions profondes, et jouerait un rôle hydrostatique, favorisant la flottaison de ce Cétacé cyclopéen. Le nombre normal des vertèbres est de 50; les cervicales sont soudées les unes aux autres, à l'exception de l'atlas, cas unique chez les Cétacés. Il y a 11 paires de côtes, dont 8 ont une double articulation; seules les 3 premières paires de côtes s'articulent avec le sternum, lequel est tripartite et court. L'omoplate est étroite.

Le cachalot fréquente de préférence les mers tempérées ou chaudes, se tenant normalement en haute mer, et seulement occasionnellement plus près des côtes, où il peut s'échouer (les mâles surtout). Son souffle, très caractéristique, est dirigé en avant, selon une inclinaison de 45° environ, et mesure de 5 à 10 m de hauteur; il est émis dès le début de l'émersion et dure une ou deux secondes.

Après chacune de ses longues immersions, il émerge généralement pendant une dizaine de minutes, pour effectuer de 60 à 70 actes respiratoires, puis réalise de nombreuses petites plongées; lorsqu'il plonge à nouveau, il saute hors de l'eau. Il nage habituellement, en surface, à la vitesse de 5 à 10 km/h, mais peut atteindre une vitesse maximale de 20 km/h. Sa capacité de résistance aux fortes pressions et à l'apnée en plongée est vraiment exceptionnelle; les physiologistes ne sont pas encore parvenus à en élucider les mécanismes. La nourriture de l'Animal est fondamentalement teutophage, à base de Mollusques Céphalopodes, même de grande taille. Les Poissons, les Crustacés et d'autres Animaux marins représentent une fraction très secondaire de son régime. Le cachalot chasse non seulement dans les couches supérieures de la mer, mais aussi en profondeur, jusqu'à plusieurs centaines de mètres (de 900 à 1 000 m, selon certains auteurs); il peut rester pendant une heure en plongée. Lorsqu'il recherche des Céphalopodes, il drague littéralement les fonds vaseux avec sa bouche, engageant parfois de furieuses luttes avec les espèces les plus grandes (du genre *Architeuthis*), qu'il entraîne en surface.

Le cachalot est grégaire et polygame; il vit habituellement en troupes de quinze à vingt individus, qui peuvent s'accroître et atteindre plusieurs centaines de têtes lors des migrations. On le rencontre pendant l'hiver dans les eaux tropicales; au printemps, il émigre dans les mers tempérées. A la différence de ce qui a lieu chez les autres Cétacés, les aires de distribution des mâles et des femelles ne coïncident pas, les femelles ne dépassant normalement pas les limites des eaux tropicales et subtropicales, ce qui répond aux besoins des juvéniles, lesquels ne possèdent pas encore une protection de lard suffisante. Les mâles, par contre, pénètrent en été dans l'hémisphère Nord, jusqu'aux mers de Barentz et de Behring et, au sud, jusqu'à la limite des glaces. La grande majorité des cachalots habite entre 40° de latitude nord et 40° de latitude sud, ce qui coïncide avec la bande où l'on trouve le plus de Céphalopodes. Le cachalot vient régulièrement en Méditerranée, parfois en troupes, selon un cycle périodique de migration.

La gestation de l'espèce dure de 12 à 16 mois; le nouveau-né (les naissances gémellaires sont rares), long de 5 m, est allaité durant au moins 6 mois, et sevré quand il atteint 6 m de long. On a constaté sur des individus marqués une longévité de 32 ans pour les mâles et de 22 ans pour les femelles.

Le cachalot est chassé pour sa graisse, son spermaceti et l'ivoire de ses dents, ainsi que pour la matière appelée ambre gris que l'on trouve dans son tube digestif. Il s'agit d'une concrétion intestinale spéciale, provenant de restes de Mollusques Céphalopodes; on l'utilise en parfumerie. Chaque individu peut en fournir jusqu'à 65 kg; malheureusement, la chasse intense à laquelle les cachalots ont été soumis a actuellement abouti à une réduction très sensible de leurs populations dans toutes les mers.

La sous-famille des *Kogiinés* est représentée aussi par une unique espèce, le cachalot pygmée *(Kogia breviceps)*, ou kogia. Il a une longueur maximale de 4 m et diffère du cachalot proprement dit par sa tête, qui représente seulement 1/6 de la longueur du corps; en outre, celle-ci est conique et se termine en un rostre obtus, avec une mandibule sensiblement en arrière par rapport à la mâchoire supérieure. L'organe du spermaceti est moins développé que chez le cachalot. Son évent est en fer à cheval et situé obliquement à la partie supérieure de la

▼ **Kogia breviceps**, *le cachalot pygmée, long de 4 m au maximum, est grégaire; il se déplace l'été dans les eaux froides, revenant en automne et en hiver dans les eaux chaudes pour la reproduction.*

I.G.D.A.

▶ *Page ci-contre, de haut en bas :* **Mesoplodon europaeus,** *la baleine à bec de Gervais, vit dans le nord de l'océan Atlantique, le golfe du Mexique, et la mer des Caraïbes.* **Mesoplodon mirus,** *la baleine à bec de True, habite le nord et la zone africaine de l'océan Atlantique.* **Ziphius cavirostris,** *la baleine à bec de Cuvier, fréquente toutes les mers, sauf celles des régions polaires.* **Hyperoodon ampullatus,** *la baleine à bec commune, se rencontre dans les mers de l'hémisphère boréal.*

tête. Il possède une nageoire dorsale à profil postérieur falciforme, et située vers la moitié de la ligne dorsale. Sa livrée est noire sur le dessus et gris clair en dessous. Sa mâchoire supérieure peut présenter une ou deux paires de dents, peu développées, alors que sa mandibule en porte de 9 à 14 paires, fonctionnelles, recourbées et coniques. Toutes les vertèbres cervicales sont ankylosées. Il y a 13 ou 14 paires de côtes.

Le cachalot pygmée est vraisemblablement grégaire; on sait qu'il se déplace l'été dans les eaux froides, revenant en automne et en hiver dans les eaux chaudes, pour la reproduction. Sa gestation dure environ 9 mois, et les femelles mettent au monde un petit. Il se nourrit de Céphalopodes et de Crustacés. Il est distribué dans presque tous les océans.

La famille des **Hypéroodontidés** *(Hyperoodontidae)*, ou Ziphiidés, comprend des Odontocètes de tailles moyenne et grande. Leur tête se termine par un rostre bien différencié, peu distinct du front, au contraire des Delphinidés. Les Ziphiidés sont aussi nommés baleines à bec (genres *Ziphius* et *Mesoplodon* surtout). Leur longueur varie de 4,50 à près de 13 m, et leur poids de 1 à 4,5 t. Leurs nageoires pectorales sont peu développées, ovalaires et insérées très bas, sur les flancs. Leur nageoire dorsale, plus ou moins falciforme, se trouve à la moitié postérieure de la ligne dorsale. Leur nageoire caudale, enfin, ne présente pas à son bord postérieur d'incision médiane.

La gorge présente de 2 à 6 courts sillons qui, convergeant en avant au menton sans se réunir, dessinent une sorte de V. A l'exception de *Tasmacetus,* chez lequel les dents sont nombreuses et bien développées aux deux mâchoires, ces Cétacés présentent la plus importante réduction dentaire observée chez les Odontocètes, après le narval : ils ne possèdent qu'une ou deux paires de dents bien développées et fonctionnelles, uniquement à la mandibule; la paire antérieure, plus développée que l'autre, est caractéristique; en outre, les dents sont plus développées chez les mâles que chez les femelles (chez celles-ci, elles sont parfois incluses dans les gencives). Sauf chez *Berardius,* les os du crâne présentent une importante asymétrie; les os ptérygoïdes sont très élargis; les os lacrymaux, assez gros, sont indépendants. La mandibule, qui se prolonge au-delà de l'extrémité du rostre facial, a généralement ses deux branches plus écartées que celles de la mâchoire supérieure, dont les bords externes, à bouche close, se trouvent à l'intérieur des bords de la mandibule. Il existe de 43 à 49 vertèbres, les cervicales étant plus ou moins soudées les unes aux autres; il y a, au plus, 10 paires de côtes, dont la partie sternale n'est pas ossifiée. L'estomac présente de 9 à 14 loges et n'est pas musclé.

Si certains Hypéroodontidés sont à peu près solitaires ou constituent de petits groupes, d'autres sont plus grégaires (par exemple, *Ziphius cavirostris,* ou baleine à bec de Cuvier), formant des troupeaux de plusieurs dizaines de têtes. Ce sont d'excellents nageurs, qui peuvent plonger très rapidement. Teutophages, ils se nourrissent surtout de Céphalopodes, proies molles et visqueuses qui sont retenues par leur mandibule et pressées contre la superficie rugueuse du palais. La cavité buccale est revêtue d'un robuste épithélium corné. Certains Céphalopodes, comme les *Moroteuthis* et les *Gonathus* à tentacules pourvus de robustes crochets, provoquent de nombreuses égratignures à la peau de ces prédateurs. Ces derniers portent, en outre, des traces fréquentes de griffures et de plaies superficielles occasionnées lors de combats entre mâles ou, occasionnellement, entre femelles et juvéniles.

La gestation dure environ un an; les naissances ont lieu entre la fin de l'hiver et le début de l'été; le nouveau-né mesure environ un tiers de la longueur de sa mère. Certaines espèces de grande taille sont chassées.

La famille des Hypéroodontidés compte cinq genres : *Tasmacetus, Berardius, Mesoplodon, Ziphius* et *Hyperoodon,* avec seize espèces répandues dans tous les océans; on sait que les *Hyperoodon* accomplissent des migrations régulières entre les eaux chaudes et froides. Ce sont des Animaux pélagiques, dont de nombreuses espèces sont mal connues (également du fait de leur rareté, au moins apparente).

Tasmacetus compte pour unique espèce *T. shepherdi,* décrit en 1937 d'après un individu long de 5 mètres, échoué sur les côtes occidentales de l'île du Nord de la Nouvelle-Zélande, et en mauvais état de conservation; d'autres ont été capturés dans les mêmes zones. C'est probablement un genre primitif, beaucoup moins spécialisé quant à la denture : il possède 90 dents fonctionnelles, situées à la mâchoire et à la mandibule, à l'extrémité distale de laquelle se trouve également une paire de dents nettement plus robustes, à couronne conique.

Berardius compte deux espèces, très semblables l'une à l'autre, mais à aires bien distinctes. *B. arnuxi* vit dans l'océan Atlantique méridional, dans l'océan Pacifique et dans l'océan Indien, du degré 33 de latitude sud à la limite des glaces antarctiques. *B. bairdi,* un peu plus grand, vit dans l'océan Pacifique septentrional, de la mer de Behring à la Californie et au Japon. La longueur de ces Cétacés varie de 9 à 12 m. Leur crâne atteint jusqu'à 1,50 m. Ce sont les géants de leur famille; ils figurent parmi les plus gros Odontocètes vivants. Leur nageoire pectorale a environ 1 m de long, leur nageoire dorsale 30 cm de haut, et leur nageoire caudale 2,50 à 3 m de large. La mandibule s'étend peu au-delà de l'extrémité du rostre facial. Le museau est fuselé. Le front est bien délimité et le crâne plus symétrique que chez les autres genres d'Hypéroodontidés. La mandibule porte habituellement 2 paires de dents, implantées en correspondance de la symphyse, la paire antérieure étant plus développée (7 à 8 cm de long). Il existe 47 ou 48 vertèbres, les 3 premières cervicales étant soudées. Le sternum est composé de 5 segments.

La livrée des *Berardius* est brun foncé uniforme, parfois avec des taches blanches irrégulières aux parties inférieures. Ils se déplacent en troupes très serrées, d'une vingtaine d'individus. Quand ils plongent, ils soulèvent leur nageoire caudale. Très vigilants, ils sont difficiles à capturer; ils se nourrissent de Céphalopodes (calmars et espèces de très grande taille), ainsi que de Poissons. Après une gestation d'environ 10 mois, la femelle met bas un nouveau-né, qui mesure un tiers de la longueur de la mère.

Chez *B. bairdi,* la maturité sexuelle est atteinte lorsque l'Animal mesure 10 m de longueur (il atteint 12 m de long au maximum).

Mesoplodon compte dix espèces, qui peuplent tous les océans (*M. bidens,* ou baleine à bec de Sowerby, vit en Méditerranée). Leur longueur varie de 3 à 7 m. Ils ont la tête petite, avec un rostre allongé, plus étroit que chez les autres Ziphiidés. La mandibule déborde légèrement à l'extrémité par rapport au rostre facial, la symphyse étant très développée (celle-ci représente 1/3 à 1/5 de la longueur de la mandibule elle-même). Les nageoires pectorales ont de 20 à 50 cm de long, la nageoire dorsale à peine 15 cm de haut, et la nageoire caudale environ 1 m de large. La livrée est variable, habituellement noir ardoisé ou noir bleuâtre, avec les parties inférieures nettement plus claires. Il existe seulement une paire de dents bien développées à la mandibule, plus grosses chez le mâle, situées assez en arrière par rapport à l'extrémité de la mandibule. Très comprimées latéralement, les dents font saillie hors de la cavité buccale à bouche fermée. Chez *M. layardi, M. stejnegri* et *M. bidens,* les dents sont très grosses et constituent de véritables défenses très robustes, tout en assurant une fermeture parfaite de la bouche, lorsque le Cétacé enserre entre ses mâchoires de gros Céphalopodes. Il peut aussi y avoir de petites dents aux deux mâchoires; chez *M. grayi,* ou baleine à bec de Gray, il existe normalement une série de rudiments dentaires à la mâchoire supérieure. On compte de 46 à 48 vertèbres, les 2 premières cervicales étant soudées (parfois 3). Le sternum est constitué de 5 (rarement de 4) segments. Un caractère étrange du genre *Mesoplodon* est la densité et le poids des os constituant le rostre : ainsi, chez *M. densirostris,* ou baleine à bec de Blainville, les os ont un poids spécifique supérieur de 34 % à celui de l'ivoire des défenses d'éléphant.

Les mésoplodontes, ou baleines à bec, sont des espèces de haute mer, qui se nourrissent de Céphalopodes et de Poissons. Ils vivent normalement isolément ou en petits groupes. Ce sont des Animaux assez rares et mal connus. La période de reproduction, à la fin de l'hiver et au printemps, est suivie par une gestation d'environ un an; le nouveau-né mesure de 1,50 à 2,50 m; il est allaité pendant un an environ et croît pendant ce temps de 1 m au minimum.

La baleine à bec de Sowerby, *M. bidens*, qui vit dans l'océan Atlantique septentrional et dans la Méditerranée, mesure jusqu'à 6 m de long ; elle est noir bleuâtre, avec les parties inférieures gris clair ou blanchâtres. Les mâles ont leurs 2 dents implantées vers le tiers de la longueur de la mandibule, en partant de l'extrémité. Cette baleine vit par couples ou par petits troupeaux (lesquels comptent jusqu'à vingt-cinq têtes).

Cette espèce émet des sons proches des meuglements de vache.

La baleine à bec de Gervais *(M. europaeus = M. gervaisii)*, légèrement plus grande que la précédente, a 2 dents beaucoup plus petites et implantées vers le sixième de la longueur de la mandibule à partir de l'extrémité. Elle vit dans le nord de l'océan Atlantique, dans le golfe du Mexique, et dans la mer des Caraïbes.

La baleine à bec de Gray *(M. grayi)*, très semblable à la baleine à bec de Sowerby, mais plus petite (elle mesure, au maximum, 6,40 m de long), présente une livrée plus claire, et une paire de dents implantée plus en avant. Elle est très commune dans l'hémisphère austral et dans le nord de l'océan Atlantique.

La baleine à bec de True *(M. mirus)*, longue d'environ 5 m, a des dents de section ovale et implantées à l'extrémité de la mandibule. Sa livrée, élégante, est ardoise foncé sur le dessus, violet et jaunâtre en dessous, avec de nettes taches noires. Cette espèce habite le nord de l'océan Atlantique et la zone africaine de l'océan Atlantique Sud.

Les autres espèces sont : *M. ginkgodens*, du nord de l'océan Pacifique et de l'océan Indien ; *M. layardi*, des mers de l'hémisphère austral ; *M. stejnegeri* et *M. carlhubbsi*, tous deux de l'océan Pacifique septentrional, et enfin *M. bowdoini*, qui est répandu de la Nouvelle-Zélande à l'ouest de l'Australie.

Ziphius, le type, compte pour seule espèce *Z. cavirostris*, ou baleine à bec de Cuvier, qui habite toutes les mers sauf celles des régions polaires ; depuis quelque temps, elle s'échoue assez fréquemment sur certaines côtes méditerranéennes. Sa tête, de taille moyenne, quelque peu différenciée du corps, se termine par un museau assez court mais large, caractérisé par la saillie de la mandibule. Son corps est cylindrique. Elle possède une petite nageoire dorsale, triangulaire, située à la moitié postérieure du tronc. Ses nageoires pectorales sont petites. Sa livrée, variable, est noirâtre ou noir pourpré sur le dessus et grisâtre sur les flancs. Certains individus ont la tête et les parties ventrales claires ou blanchâtres, devenant foncées *post mortem* ; par ailleurs, la peau est fréquemment recouverte de cicatrices. Cette baleine mesure de 5,50 m à 8,50 m de long, les femelles atteignant, au maximum, 6 m. La nageoire pectorale a 50 cm de long, la nageoire dorsale 30 cm de haut et la nageoire caudale 1,50 m de large. La mandibule, très caractéristique, avec une symphyse de longueur moyenne, a la partie antérieure redressée vers le haut et porte, à l'extrémité, 1 paire (rarement 2) de dents, bien développées chez le mâle, petites ou rudimentaires chez la femelle. Les 4 premières vertèbres cervicales sont soudées. La biologie de cette espèce est mal connue, bien qu'il s'agisse d'une espèce assez commune. Grégaire, cette baleine se déplace par troupes de quelques dizaines de têtes, à la recherche de sa nourriture, qui est constituée de Céphalopodes. Les individus capturés dans la Méditerranée ont le plus souvent l'estomac vide. La gestation de l'espèce dure environ un an.

Citons enfin *Hyperoodon*, avec deux espèces : *H. ampullatus*, ou *rostratus*, ou baleine à bec commune, des mers de l'hémisphère boréal (surtout l'océan Glacial Arctique, le nord de l'océan Atlantique et le nord de l'océan Pacifique) ; et *H. planifrons*, des mers de l'hémisphère austral, de l'océan Atlantique Sud jusqu'à l'Australie. La baleine à bec commune, dont les mâles peuvent atteindre 9 m de long (pour un poids de 3 t) et les femelles 7,50 m, possède un bec nettement différencié du front. Il y a une paire de dents à l'extrémité de la mandibule. Pélagique, cette baleine forme de petits troupeaux de quatre à douze têtes. Très agile, elle saute presque entièrement hors de l'eau et peut plonger jusqu'à plus de 1 000 m de profondeur ; normalement, ses immersions profondes durent de 10 à 20 mn. Cette espèce est très rare en Méditerranée (on peut cependant l'observer au large des côtes françaises).

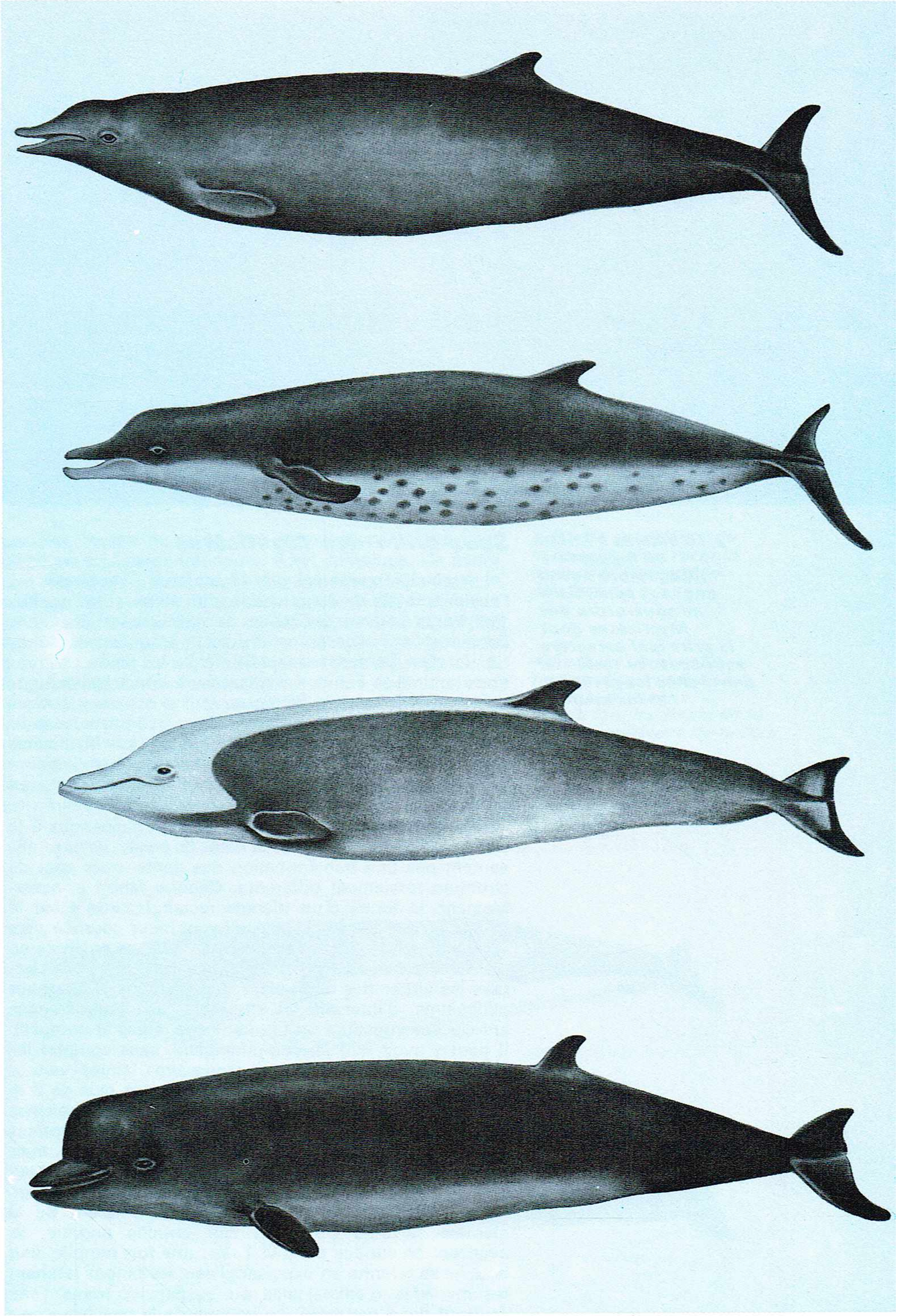

I.G.D.A.

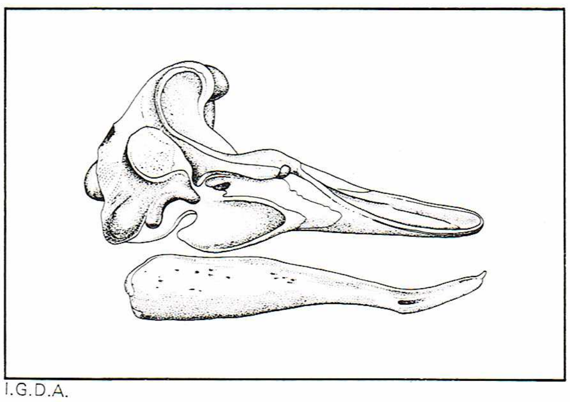

I.G.D.A.

◀ ***Représentation schématique du crâne et de la mandibule de* Ziphius cavirostris *; la mandibule, caractéristique, porte une paire (rarement deux) de dents bien développées chez le mâle.***

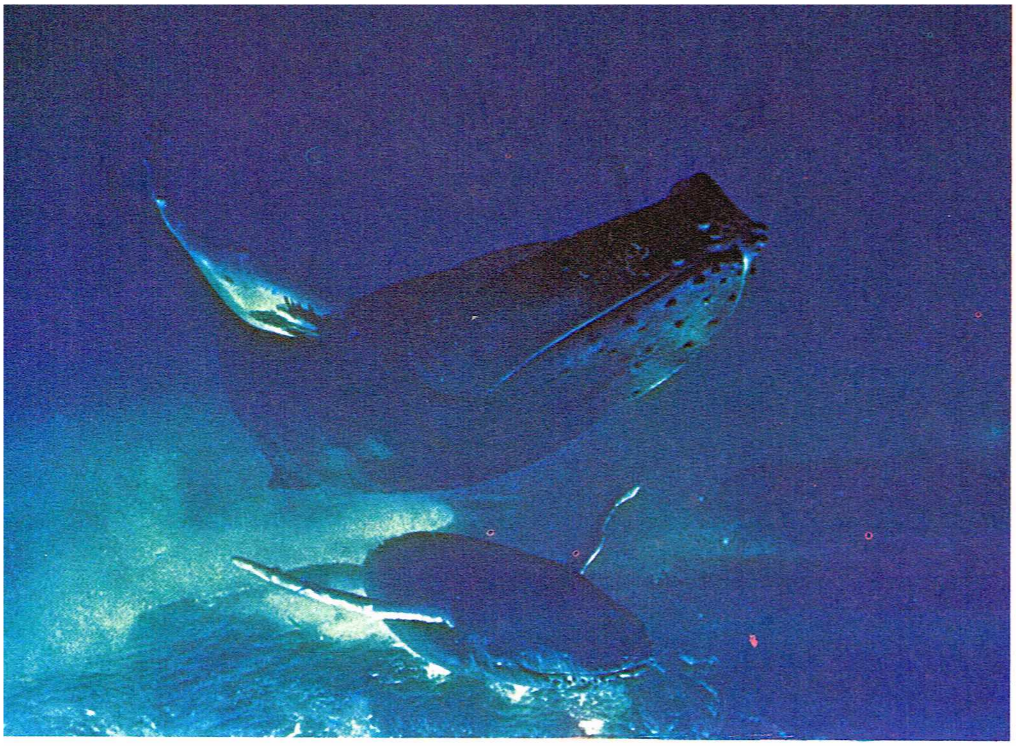

Photo I.R.A. - Groupe Cousteau

▲ *La baleine à bosse ou mégaptère* (Megaptera novae angliae) *appartient au sous-ordre des Mysticètes dont le principal caractère est l'absence totale de dents chez les juvéniles et les adultes.*

Sous-ordre des Mysticètes

Le principal caractère des Mysticètes *(Mysticeti)* est l'absence totale de dents chez les juvéniles et les adultes (les fœtus peuvent présenter de nombreuses ébauches dentaires, qui régressent ensuite). L'équivalent fonctionnel de la denture est représenté par les fanons, formations laminaires cornées, implantées à la mâchoire supérieure. Leur face est symétrique, et il existe deux orifices nasaux distincts, mais associés. Leur symphyse mandibulaire est ligamenteuse. Ils ont un cæcum. Les Mysticètes sont toujours très gros, sauf *Caperea;* les femelles sont plus grandes que les mâles, qu'elles dépassent, en moyenne, de 50 cm.

Les fanons sont disposés par séries et suspendus à la mâchoire supérieure, des deux côtés du palais; ils ne représentent pas une transformation des dents, mais sont de structure totalement différente. Chaque fanon a, sensiblement, la forme d'un triangle rectangle, inséré sur la mâchoire par son petit côté, l'hypoténuse tournée vers l'intérieur de la bouche; de ce côté, le fanon se divise en filaments grossiers. Les fanons sont disposés les uns derrière les autres des deux côtés de la bouche, à quelques millimètres d'intervalle. L'ensemble de leurs franges entrelacées constitue un filtre efficace, épais et compact. Il peut y avoir 800 fanons principaux, sans compter les fanons de moindre taille et accessoires, situés vers le centre. Les fanons sont plus longs (jusqu'à plus de 3 m de long), plus étroits et plus flexibles chez les baleines proprement dites *(Balénidés);* chez les Balénoptères (Balénoptéridés), ils sont plus courts et plus larges, mais moins flexibles; ils ont une croissance continue. Leur présence est liée au régime essentiellement planctophage de ces Animaux. Les Mysticètes se nourrissent de la manière suivante : ouvrant leur bouche énorme, ils avancent en surface ou sous l'eau; une fois remplie, leur bouche se referme en expulsant l'eau, les fanons retenant les myriades d'animalcules en suspension dans l'eau (surtout des Crustacés). Le volume de la cavité buccale diminue non seulement du fait de la fermeture de la bouche, mais aussi sous l'action de muscles puissants, qui poussent la langue contre le palais, chassant toute l'eau. On a calculé que le poids de la langue d'un Balénoptère représente l'équivalent de celui d'un éléphant. Parmi les nombreuses espèces planctoniques qui font partie de la nourriture de ces Cétacés, on trouve, dans les régions côtières tempérées de l'hémisphère austral, surtout des larves pélagiques d'un Crustacé Anomoure, *Munida gregaria;* dans les mers antarctiques, il s'agit presque uniquement d'un autre Crustacé, *Euphosia superba,* qui forme d'importants peuplements, aussi bien en surface qu'en profondeur. Le poids de Crustacés contenu dans l'estomac d'un Balénoptère dépasse couramment une tonne. Dans l'hémisphère boréal, la nourriture des Mysticètes, toujours planctonique, est plus variée, formée dans sa quasi-totalité de Crustacés. Parfois, les Mysticètes mangent aussi des Poissons.

Les Mysticètes sont divisés en trois familles : les Eschrichtiidés, les Balénoptéridés (ou Balænoptéridés) et les Balénidés (ou Balænidés), qu'on rencontre dans presque tous les océans.

Les **Eschrichtiidés,** ou **Rachianectidés** *(Eschrichtiidae,* ou *Rachianectidae),* qui représentent la plus grande famille, comptent une seule espèce : la baleine grise *(Eschrichtius gibbosus = E. glaucus = Rachianectes glaucus),* qui habite l'océan Glacial Arctique et le nord de l'océan Pacifique, de 72° de latitude nord jusqu'au Mexique et au Japon. Elle a récemment disparu de l'océan Atlantique septentrional, à cause de la chasse. Longue de 13 à 15 m, elle pèse de 25 à 37 t. Ses nageoires pectorales atteignent environ 2 m de long, et sa nageoire caudale 3 m de large; elle est dépourvue de nageoire dorsale, à la place de laquelle on observe de 8 à 10 petites gibbosités à la partie postérieure du dos. Sa gorge est parcourue par 2 à 4 courts sillons (c'est là une affinité avec les Balénoptéridés). Elle possède, de chaque côté de la bouche, de 130 à 180 fanons, longs de 35 à 45 cm; les deux séries de fanons, cependant, ne se réunissent pas frontalement, comme chez les Balénoptéridés. La fente buccale est un peu incurvée vers le haut. La livrée est noirâtre ou noir ardoisé, avec de nombreuses taches blanches et des bosses. Cet Eschrichtiidé possède 56 vertèbres, les cervicales n'étant pas soudées.

La baleine grise fréquente même au cours de sa période de reproduction les eaux côtières, les golfes, les criques et les baies. Sa gestation dure de 11 à 12 mois. Le nouveau-né mesure de 4 à 5 m de long et pèse 1,5 t. Devenue très rare à cause de la chasse, cette espèce est maintenant protégée, et ses effectifs se sont quelque peu reconstitués (on compterait six mille têtes, en hiver, dans les eaux mexicaines).

Les **Balénoptéridés** *(Balaenopteridae)* sont la famille des géants. Ils comptent le rorqual bleu, ou de Sibbald, ou grande baleine bleue *(Balaenoptera musculus),* qui atteint de 30 à 33 m de long. Ces Animaux sont caractérisés par trois points particuliers de leur morphologie externe : la présence de la nageoire dorsale (petite, cependant, par rapport au corps); la présence de nombreux sillons jugulaires, s'étendant du dessous de la bouche jusqu'à une partie du ventre; enfin, le profil de la fente orale, qui n'est pas recourbé vers le haut comme chez les baleines. En outre, la tête est plus réduite que chez les Balénidés et les fanons sont moins longs et moins flexibles. Les nageoires pectorales sont très développées et généralement pointues. On distingue deux genres : *Balaenoptera* et *Megaptera,* avec au total six espèces.

Le petit rorqual, ou rorqual à rostre *(Balaenoptera acutorostrata),* est long, au maximum, de 10 à 11 m, pour un poids avoisinant plus de 1 t. C'est le plus petit balénoptère. Sa livrée est gris-bleu ou gris-noir sur le dessus, et presque blanche au ventre, qui porte de 50 à 70 sillons; il a une large bande blanche à la partie supérieure des nageoires pectorales, et de 260 à 325 fanons. Plus littoral que les autres Balénoptéridés, il vit en groupes de 2 ou 3 têtes. Il effectue parfois des bonds hors de l'eau. Il a l'habitude de plonger plus profondément 5 à 8 fois avant d'effectuer une immersion profonde d'une durée de 3 à 5 minutes. On le rencontre dans toutes les mers et même en Méditerranée. *B. edeni* est une espèce proche.

Le rorqual boréal, ou de Rudolphi *(B. borealis),* dépasse 18 m de long et pèse 13 t chez les femelles. On le distingue à sa nageoire dorsale plus développée, à ses nageoires pectorales plus petites (le onzième de la longueur totale), à ses sillons jugulaires (50 en moyenne), qui se terminent à la hauteur des nageoires pectorales. Cet Animal possède 330 fanons, généralement de couleur noire, de chaque côté de la bouche. Il est pélagique, très rapide (55 km/h), et vit en troupeaux; lorsqu'il émerge, son museau sort obliquement de l'eau. Il fréquente toutes les mers. Le rorqual commun *(B. physalus),* présent en Méditerranée, mesure de 18 à 25 m de long et pèse environ 50 t. Ses caractères distinctifs sont : la longueur de ses nageoires pectorales (1/9 à 1/10 de la longueur totale) et ses 70 à 110 sillons jugulaires et ventraux. Sa livrée est grise sur le dessus, et blanche en dessous, mais la demi-mandibule droite est blanche, alors que la gauche est grise. Intérieurement, son rostre est, quant à lui, coloré sur la droite et dépigmenté sur la gauche. Il a 320 à 420 fanons de chaque côté, blancs à droite dans le premier tiers antérieur, alors que les autres et tous les fanons du côté gauche sont

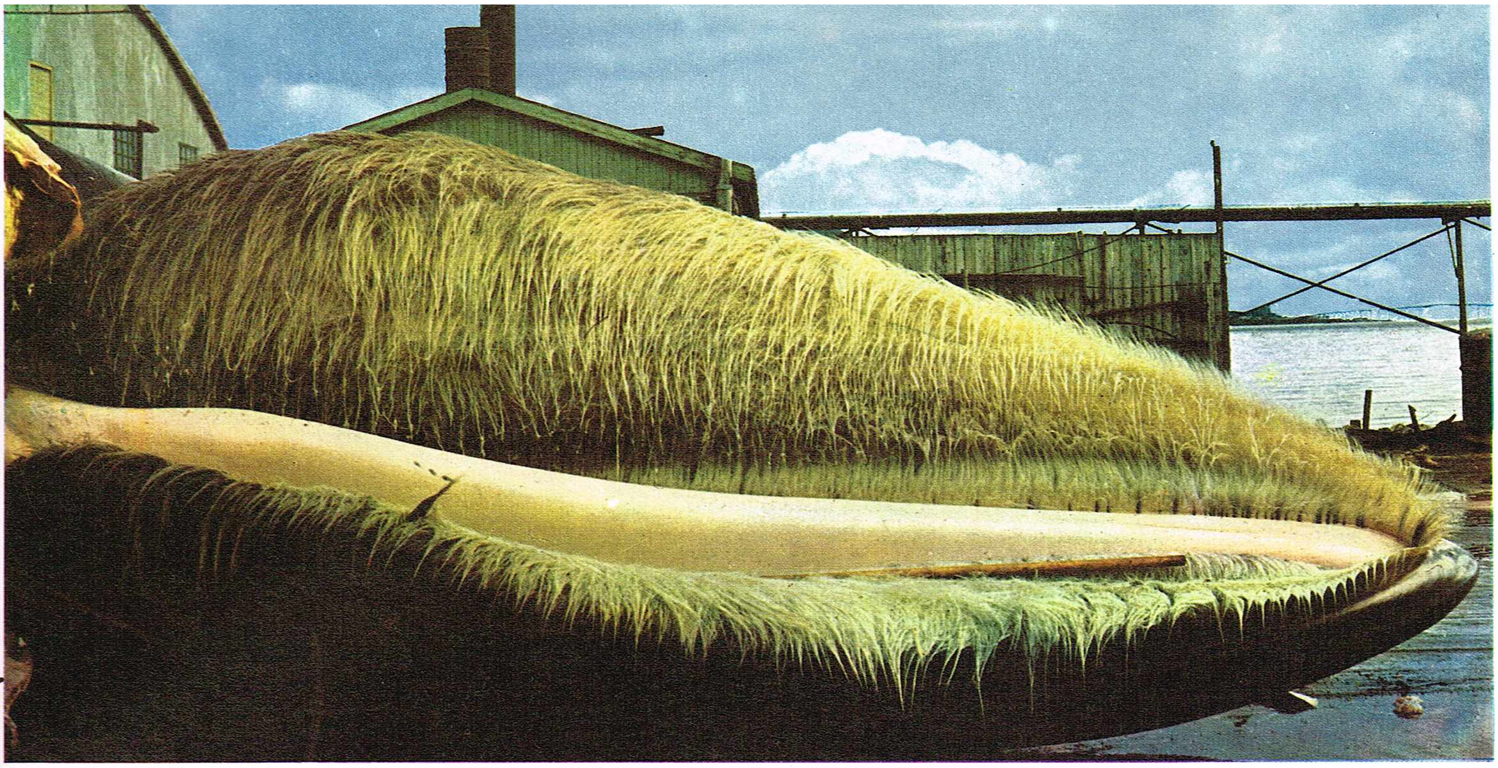

B. Zuccoli

B. Zuccoli

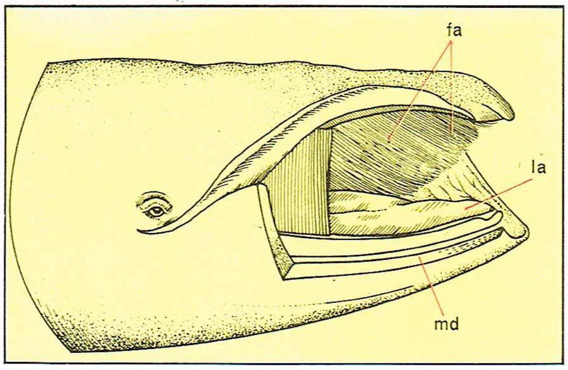

I.G.D.A.

gris-bleu tendre ou rayés. Ses nageoires pectorales sont blanches à la partie inférieure. Il est pélagique. Ce genre comprend, enfin, le géant de tous les Animaux connus, le rorqual bleu, ou de Sibbald, ou grande baleine bleue *(B. musculus = Sibbaldus musculus)*, long en moyenne de 25 m, mais atteignant 33 m. Les mâles pèsent jusqu'à 90 t et les femelles 120 t. Les nageoires pectorales, longues et pointues, mesurent environ 1/7 de la longueur totale. Il possède en moyenne 90 sillons jugulaires. Sa livrée est ardoisée ou gris bleuâtre, avec les parties inférieures souvent jaunâtres, à cause de la présence de myriades de Diatomées, Algues unicellulaires qui trouvent là de bonnes conditions de développement. Sa bouche est pourvue de 300 à 400 fanons. Pélagique, ce rorqual

▲ Partie supérieure de la bouche d'un rorqual montrant l'ensemble des fanons.

◀ En haut, à gauche, fanons d'un rorqual. En bas, à gauche, coupe longitudinale de la partie antérieure de la tête d'un Mysticète **(Balaenoptera sp.)** ***: fa, fanons ; la, langue ; md, mandibule.***

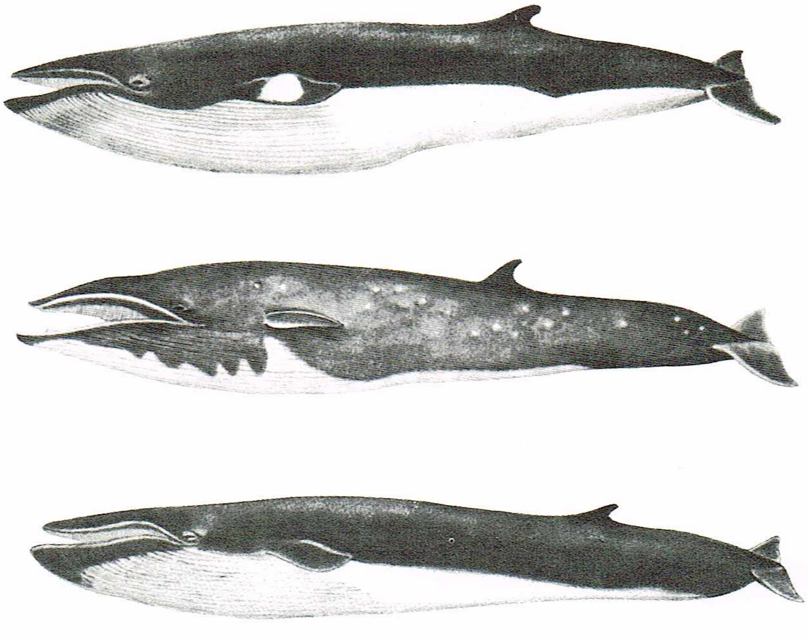

▲ Sur cette planche de dessins sont représentées trois espèces de Balénoptéridés : de haut en bas, **Balaenoptera musculus,** ***le rorqual bleu, ou de Sibbald, dont la taille varie de 25 à 33 m.***
Balaenoptera acuto-rostrata, ***le petit rorqual, ou rorqual à rostre, est long au maximum de 10 à 11 m.***
Balaenoptera borealis, ***le rorqual boréal, ou de Rudolphi, dépasse 18 m de long.***

I.G.D.A.

▶ *Les Carnivores représentent le groupe de Mammifères dont les formes et le genre de vie sont les plus variés. Ils sont également ceux chez qui la prédation est la plus diverse et la plus marquée. Ici, le lion* (Panthera leo) *est le type parfait des Carnivores.*

effectue de longues migrations. C'est un Animal très timide, qui vit généralement par couples ou par troupes de trois. Il plonge jusqu'à 200 m de profondeur.

Le dernier genre, *Megaptera,* compte une seule espèce, le mégaptère, ou jubarte, ou encore baleine à bosse *(M. novae angliae = M. longimana = M. nodosa = M. boops)*. Long de 16 m, on le distingue à première vue à son corps très massif, aux nodosités irrégulières et aux excroissances biscornues que portent sa tête et ses nageoires, ainsi qu'à ses très longues nageoires pectorales, qui atteignent 1/3 de la longueur totale. Il possède de 15 à 36 sillons jugulaires. Essentiellement pélagique, le mégaptère effectue des migrations par des routes déterminées, vers le nord au printemps et dans le sens inverse l'été.

Les **Balénidés** *(Balaenidae)* se distinguent des Mégaptéridés par l'absence de nageoire dorsale (sauf chez *Caperea*) et de sillons jugulaires. En outre, ces Cétacés sont plus massifs et moins élancés. Ils ont une tête plus volumineuse, dont la partie supérieure est nettement convexe. Leur mâchoire supérieure est arquée, ce qui confère un profil analogue à la fente orale. Leurs longs fanons, qui mesurent juqu'à 3 m, sont très étroits.

Caperea marginata (= Neobalaena marginata) habite uniquement l'hémisphère austral, dans les mers baignant l'Australie, la Nouvelle-Zélande, l'Afrique du Sud et l'Amérique du Sud. Longue d'à peine 6 m, c'est le plus petit Mysticète vivant. Elle a une petite nageoire dorsale, haute de 25 cm, implantée à la partie postérieure du dos.

La baleine franche, ou baleine des Basques, ou de Biscaye, dite aussi baleine sarde *(Eubalaena glacialis),* est longue de 18 m et pèse près de 40 à 50 t. Sa tête représente 1/4 de la longueur totale du corps et porte une excroissance cornée, caractéristique. La livrée est noire, parfois avec quelques taches blanches en dessous. Les fanons, également noirs, sont longs de 2,50 m, et sont au nombre de 220 à 260 de chaque côté. Cette espèce pélagique est devenue très rare ; on distingue, parfois, une forme septentrionale et une méridionale *(E. glacialis australis)* considérées par certains auteurs comme des espèces distinctes.

La baleine du Groenland *(Balaena mysticetus),* le type, devenue rarissime, ne se trouve plus que dans certaines parties de l'océan Glacial Arctique, près du Canada occidental, et dans la mer de Behring. Longue en moyenne de 21 m (24 m au maximum), elle a une tête énorme (1/3 à 2/5 de la longueur totale du corps), dont le profil supérieur est très convexe. Ses nageoires pectorales sont grandes et larges ; sa nageoire caudale est très large. Son corps, noirâtre, présente de vastes taches blanchâtres au menton et sur une partie de la mandibule. Son énorme bouche possède de 300 à 360 fanons de chaque côté, longs de 3,5 m. Cette baleine vivait en petits troupeaux de trente à cinquante têtes, et même solitairement ou par couples, toujours à proximité des glaces flottantes. Très lente (elle nage à 7 km/h), elle peut plonger jusqu'à 1 000 m ou peut-être 1 500 m de profondeur, et reste de 50 à 80 minutes sous l'eau. Son souffle, presque toujours double, s'élève de 3 à 4 m.

▼ **Balaena mysticetus,** *la baleine du Groenland, devenue rarissime, ne se trouve plus que dans certaines parties de l'océan Glacial Arctique et dans la mer de Behring.*

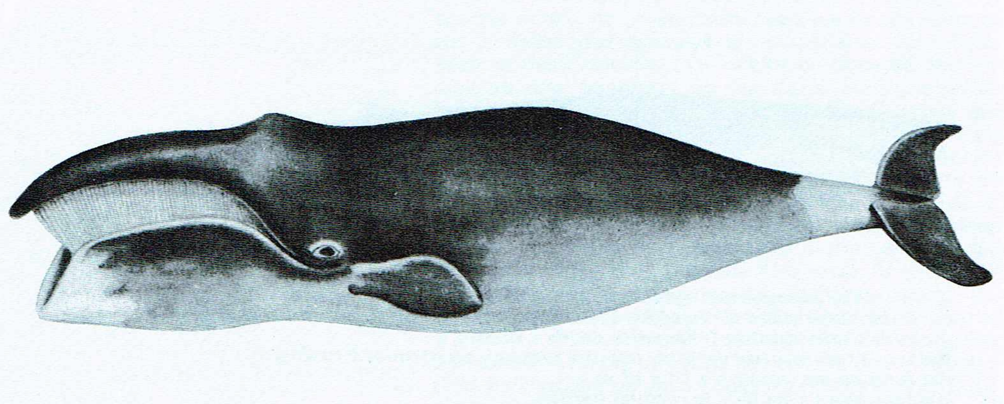

I.G.D.A.

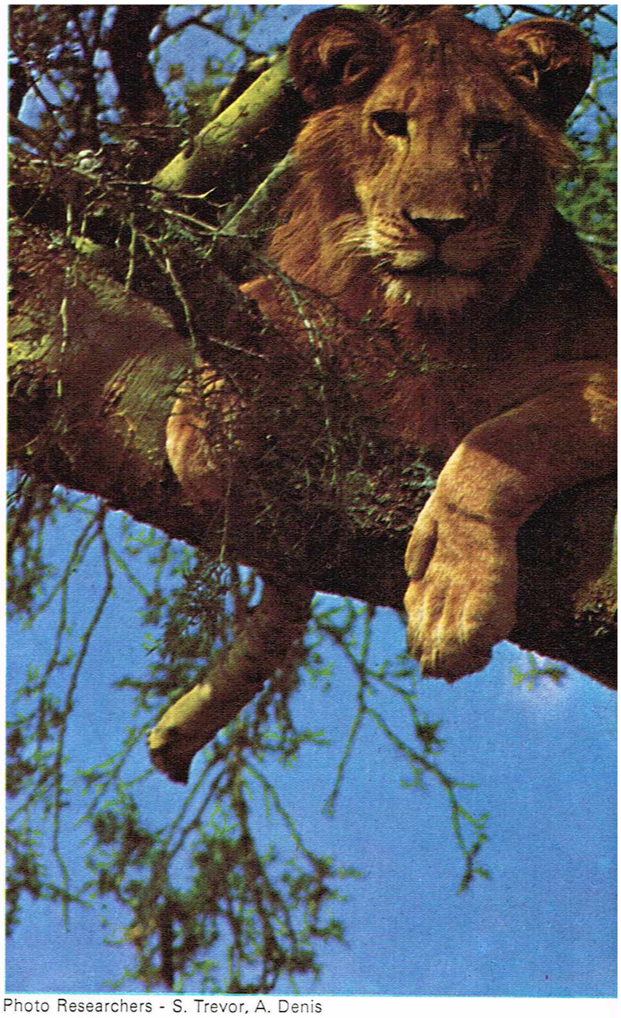

Photo Researchers - S. Trevor, A. Denis

Ordre des Carnivores

Dans tous les phylums se sont formés des groupes plus spécialisés, qui se procurent de la nourriture aux dépens d'autres Animaux, pour la capture et la mise à mort desquels ils ont acquis des qualités particulières de force, de robustesse et de rapidité de mouvements. Ainsi est né le type classique du prédateur, au sens strict du terme. Les Vertébrés en offrent les exemples les plus significatifs, aussi bien chez les fossiles que chez les espèces vivantes ; parmi les formes terrestres, la plupart de ces dernières sont des Mammifères, appartenant surtout à l'ordre des Carnivores. Il existe, il est vrai, dans la classe des Mammifères, de nombreux groupes de véritables prédateurs, carnivores et insectivores : la famille des Dasyuridés (Marsupiaux), tous les Insectivores, les Cétacés Odontocètes, etc. C'est cependant chez les Carnivores que la prédation est la plus variée et la plus marquée, avec une très riche diversité d'espèces et de types de vie, que même les Reptiles du Mézosoïque n'ont peut-être pas connue.

Les Carnivores *(Carnivora)* représentent, à l'égal des divers ordres d'Ongulés, l'un des groupes fondamentaux de Mammifères, par le nombre, la taille, les adaptations de la denture et des membres, le perfectionnement des organes des sens, ainsi que du système nerveux, et surtout par le rôle essentiel qu'ils jouent dans l'économie de la nature à notre ère, en limitant et en sélectionnant les populations. Ce très vaste ordre est plus facile à définir au niveau des sous-ordres ; en effet, d'importantes adaptations, surtout à la vie aquatique (Pinnipèdes), ont parfois marqué de façon très spécialisée aussi bien la morphologie que l'anatomie et la physiologie de ces Animaux, qui conservent dans leur ensemble une indiscutable unité d'origine et de conformation. Suivant le schéma classique, nous diviserons les Carnivores en trois sous-ordres : les Créodontes (tous éteints), les Fissipèdes et les Pinnipèdes (il faut signaler que, pour certains auteurs, les Fissipèdes ne sont pas un groupe « naturel »).

L'ordre des Carnivores est aussi le groupe dont les formes et le genre de vie sont les plus variés de tous les Mammifères : ils comprennent notamment de nombreuses espèces hautement spécialisées pour la vie marine. Leur distribution couvre presque toutes les mers du globe. Il en existe, au total, deux cent quatre-vingt-cinq espèces, appartenant à dix familles.

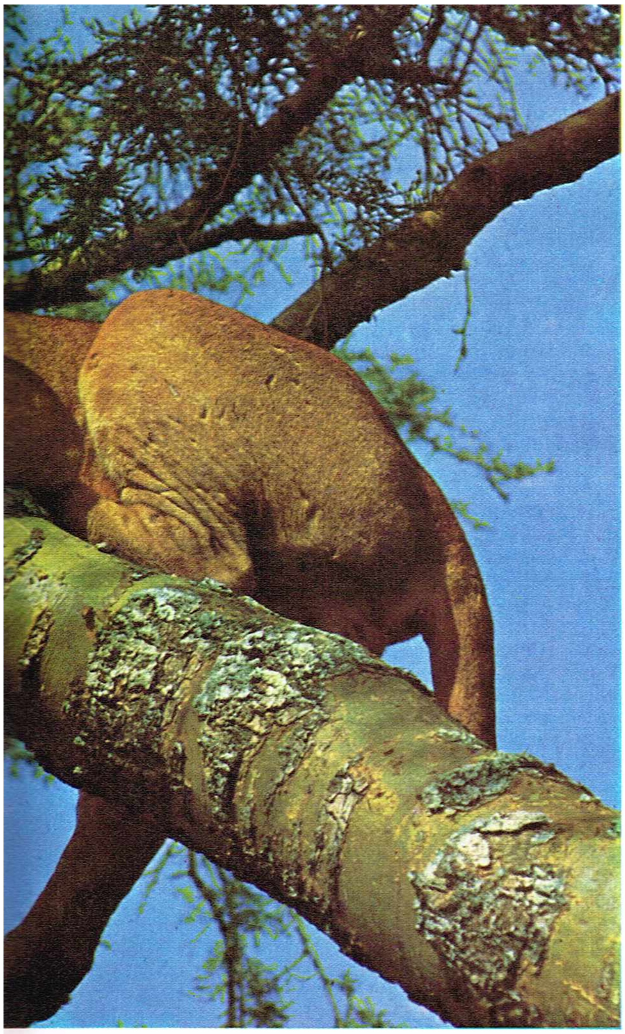

Sous-ordre des Fissipèdes

Les Fissipèdes *(Fissipeda)* comprennent les Carnivores terrestres (parfois semi-aquatiques, comme les Lutrinés), pour la plupart carnivores, certains également omnivores, et exceptionnellement phytophages (Ailurinés).

Leur fourrure est généralement très développée, constituée de poils de jarre et de poils de bourre, ces derniers parfois très clairsemés (chez certains Canidés). Chez nombre d'espèces, il se forme des poils d'aspect et de structure intermédiaires ; les crinières, les collerettes, et les touffes sont constituées de soies et de crins. Les vibrisses sont très développées, surtout celles de la lèvre supérieure (mais elles ont régressé chez les Ursidés).

Les glandes sudoripares et sébacées ne manquent jamais ; toutefois, chez le chien, seules les glandes sudoripares situées dans les espaces interdigitaux sont fonctionnelles, la transpiration se faisant par voie pulmonaire.

Les glandes anales existent chez presque toutes les espèces, mais sont plus développées, par exemple, chez les Viverridés et les Mustélidés. On observe habituellement, des deux côtés de l'anus, une poche ou sac anal, invagination tégumentaire tapissée de glandes tubuleuses de type sébacé ou sudoripare, et revêtue par une tunique musculaire, à contrôle volontaire. Chez les mouffettes (genres *Mephitis*, *Spilogale* et *Conepatus*), ces sacs glandulaires atteignent un volume maximal, presque celui d'un œuf de pigeon ; ces Animaux développent une musculature qui leur permet d'en pulvériser le contenu à plusieurs mètres de distance. La sécrétion de ces glandes anales est toujours désagréable pour notre odorat, et même insupportable dans le cas des mouffettes. Chez d'innombrables Viverridés (sauf justement chez les genres *Fossa, Eupleres, Prionodon, Poiana et Cryptoprocta*), il existe aussi une glande périnéale ou préscrotale, spéciale : la glande à musc, ou *viverreum,* sac profond et volumineux (qui mesure de 30 à 35 mm de long sur 20 mm de large chez la civette asiatique). Il existe, en outre, chez les Hyénidés, quelques Mustélidés *(Meles)* et divers autres types, des glandes supra-anales, toujours dans la région ano-génitale, spécialement actives à l'époque de la reproduction ; elles servent au marquage du territoire et jouent un rôle dans l'attraction sexuelle.

Chez les Fissipèdes, on observe toute une variété d'ongles, le plus souvent du type de la griffe, émoussés ou pointus (rétractiles chez les Félidés).

Le crâne, généralement allongé, avec la partie faciale normalement très proéminente, est surmonté par une robuste crête sagittale en rapport avec les muscles masticateurs (temporal, masséter et ptérygoïdes). Chez certains Félidés, il est plus sphéroïdal. La fosse temporale communique largement avec l'orbite ; le palais osseux est complètement ossifié. L'anatomie de l'os tympanique est très utilisée en systématique. En ce qui concerne la mandibule, on observe une robuste apophyse coronoïde et une profonde fosse massétérienne, ce qui correspond au grand développement des muscles masticateurs, alors que l'apophyse angulaire est peu importante ; le condyle articulaire est développé surtout dans le sens transversal avec une surface semi-cyclindrique, qui s'insère tout au fond de la cavité glénoïde, façonnée en gouttière transversale. Ce type d'articulation permet presque uniquement des mouvements de la mandibule dans le sens vertical (les dents servent d'éléments tranchants). L'os hyoïde est relié à l'os tympanique par un os tympano-hyal.

La colonne vertébrale présente un nombre variable de vertèbres dorsales et lombaires selon les familles et même les genres ; les vertèbres sacrées sont au nombre de 3 (sauf chez *Proteles* et *Crossarchus*, qui en ont 2). Le nombre total des vertèbres est généralement de plus de 20. La queue peut être préhensile, chez les genres *Potos* (Procyonidés) et *Arctictis* (Viverridés). La clavicule est rudimentaire ou absente, sauf chez les Félidés où elle est bien développée.

Les mains et les pieds sont originellement pentadactyles, avec une prédominance des 3ᵉ et 4ᵉ doigts ; le 1ᵉʳ doigt est toujours le plus court et non opposable. Les Ursidés, les Procyonidés et les Mustélidés sont plantigrades ou semi-plantigrades ; les Viverridés tendent à être semi-digitigrades, alors que les Canidés, excellents coureurs, sont parfaitement digitigrades, ainsi que les Félidés coureurs et sauteurs. Le pouce et le gros orteil ont tendance à régresser ou à disparaître. Les Ursidés, typiquement plantigrades, possèdent cinq doigts bien développés à tous les membres. Dans l'ensemble, à l'exception des griffes rétractiles des Félidés, les extrémités des Fissipèdes ne présentent pas d'adaptations ni de spécialisations particulières ; chez les Lutrinés (Mustélidés), il existe une membrane interdigitale, adaptation à la vie aquatique.

La denture des Fissipèdes est spécialisée en fonction de leur régime carnivore. Le type primitif qu'on n'observe plus chez les formes vivantes, mais que possédaient les Créodontes au tertiaire, avec des incisives coupantes, des canines recourbées, des prémolaires sécodontes et des molaires tuberculées, peut être ramené à la formule suivante : $\left(I\frac{3}{3};\ C\frac{1}{1};\ Pm\frac{4}{4};\ M\frac{3}{3}\right) \times 2 = 44$. L'évolution de la denture s'est faite en différentes directions : il y a eu tendance à la réduction du nombre des dents, notamment des premières prémolaires et des dernières molaires, le maximum de spécialisation étant atteint chez les Félidés (Carnivores au sens le plus strict), qui présentent également une réduction numérique maximale de la denture aboutissant au stade sécodonte parfait. En règle générale,

▼ En haut, exemple de patte digitigrade (chien domestique) : 1, péroné ; 2, tibia ; 3, calcanéum ; 4, astragale, 5, naviculaire ; 6, cunéiforme ; 7, cuboïde ; 8 et 9, métacarpiens ; les chiffres romains indiquent les doigts. En bas, crâne de Carnivore (chien domestique) ; A, vu de dessus ; B, vu de dessous ; C, vu de côté : pmx, prémaxillaire ; na, nasal ; mx, maxillaire ; la, lacrymal ; fr, frontal ; ju, jugal ; pz, processus zygomatique ; pa, pariétal ; pl, palatin ; sq, squamosal ; pm, portion mastoïdienne ; bu, bulle tympanique ; md, mandibule.

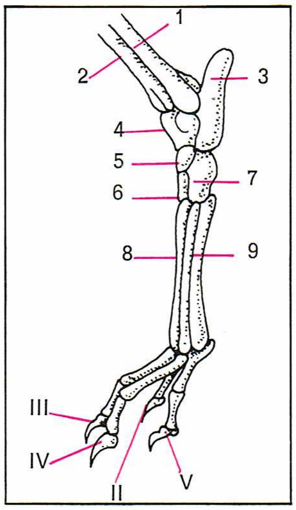

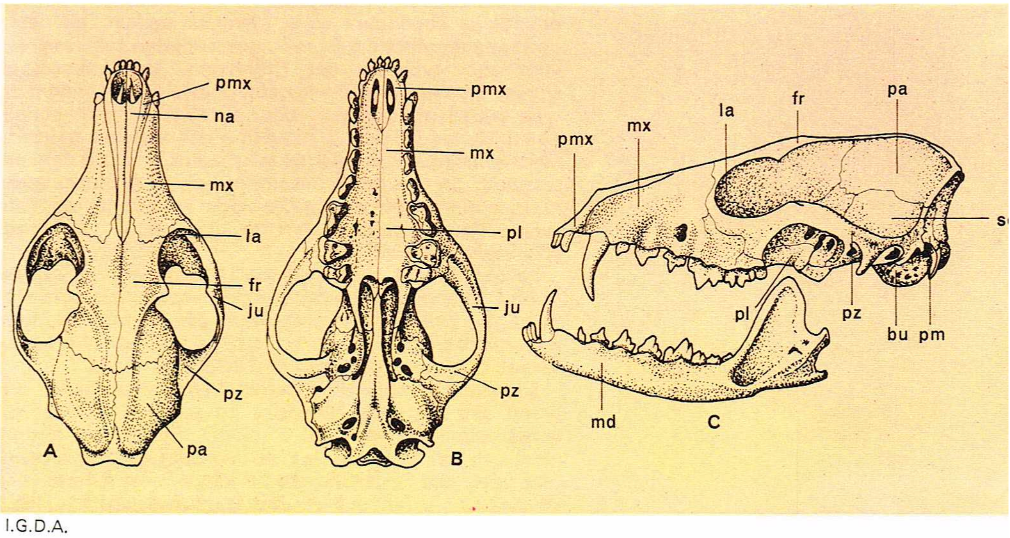

I.G.D.A.

▶ *Crâne de* Machairodus, *genre de Carnivores eurasiatiques éteints, dont on observera l'extraordinaire développement des canines supérieures.*

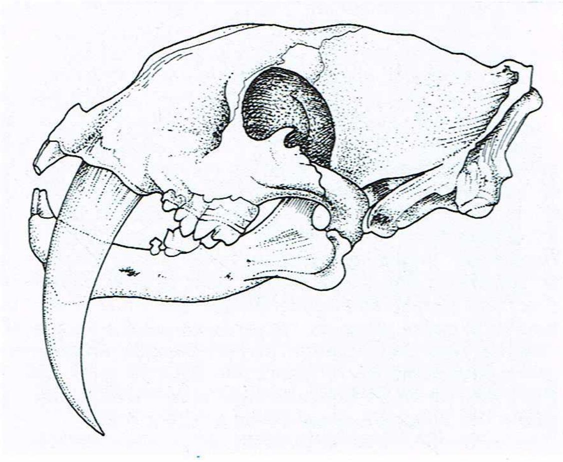

I.G.D.A.

S. Prato

▶ *La distribution géographique des Fissipèdes est très vaste ; elle s'étend à presque toute l'aire des Euthériens, sauf l'Australie, de nombreux archipels océaniques et les Antilles ; seul, le genre* Procyon, *ici* Procyon lotor, *fait exception ; on le rencontre à la Guadeloupe et aux Barbades.*

chez les Fissipèdes, les incisives, aplaties dorso-ventralement, sont coupantes, les canines sont très développées et transformées en crocs pointus, recourbés vers l'arrière, à racine unique, la canine de la mâchoire supérieure étant précédée par un diastème permettant le logement de la canine correspondante de la mandibule. Les dents maxillaires sont beaucoup plus diversifiées. La quatrième prémolaire supérieure et la première molaire inférieure deviennent prépondérantes et sont appelées carnassières : elles sont typiques des Carnivores. Les prémolaires situées en avant des dents carnassières appartiennent au type sécodonte typique ; chez les Hyénidés et encore plus chez les Félidés, la réduction des molaires coïncide avec le raccourcissement de la mandibule ; cette dernière comporte un plus grand développement de la musculature masticatoire, avec une saillie plus importante de l'arc zygomatique ; en définitive, la tête prend un aspect sphéroïdal (Félidés).

Le cerveau est nettement macrosmatique : les hémisphères cérébraux, bien développés, recouvrent partiellement le cervelet et présentent des circonvolutions importantes. Parmi les sens, c'est l'odorat qui est prépondérant, bien que l'ouïe et la vue soient fort fines.

L'estomac, simple, est en forme de poche piriforme ; son grand axe est perpendiculaire ou parallèle à celui du corps, selon les espèces. L'intestin, du fait du régime carnivore, est assez court, avec un côlon court et à peine plus large que l'intestin grêle ; le cæcum est diversement développé : il fait défaut chez la plupart des Cynoïdés (excepté les Canidés), alors qu'il existe toujours chez les Féloïdés.

Les reins sont de forme simple : chez les Ursidés et les Lutrinés, ils sont multilobés et présentent des uretères ramifiés. Les testicules sont extra-abdominaux et postpéniens. L'utérus est bicorne ; le placenta est décidué, de forme variée, et toujours de type endothélio-chorial. Les mamelles, en nombre variable, sont diversement situées.

La taille des représentants du sous-ordre est très variable : de 13 à 15 cm pour *Mustela rixosa*, le plus petit Carnivore vivant, jusqu'à 3 m pour certaines races géantes de grizzli *(Ursus arctos)*, d'Alaska, lesquelles pèsent près de 800 kg.

La très vaste distribution géographique et écologique des Fissipèdes montre leur haut degré d'adaptation. Parfois, des individus de la même espèce habitent des milieux très différents. Le renard commun, par exemple, vit de la toundra de l'Asie septentrionale aux déserts de l'Asie centrale et de l'Europe à l'Extrême-Orient ; en outre, il pousse fréquemment jusqu'à des altitudes élevées dans les grandes chaînes de montagne eurasiatiques. D'autres espèces, par contre, sont beaucoup plus inféodées à un milieu donné : c'est le cas de la panthère longibande et plus encore du panda géant. Parmi les facteurs du milieu influant sur la vie des Carnivores, la température a une grande importance, alors que l'humidité joue un rôle très modeste : nombre d'espèces habitent des zones arides et désertiques, où l'eau est très rare ou pratiquement inexistante. Ainsi, le margay *(Felis margarita)* semble pourvoir à ses besoins hydriques par l'absorption de l'eau contenue dans ses proies. D'autres espèces sont très inféodées au milieu aquatique (surtout les loutres). La végétation joue un rôle important bien qu'indirect sur la vie des Fissipèdes : c'est elle, en effet, qui détermine directement la présence et le nombre des proies (Rongeurs, Ongulés, Oiseaux). La couverture végétale offre également une protection aux prédateurs.

Le type terricole domine parmi les Fissipèdes, même parmi ceux qui habitent les forêts. Il existe aussi nombre d'espèces arboricoles et, le plus souvent, semi-arboricoles : à la différence d'autres ordres d'Euthériens, les Carnivores arboricoles sont rarement hautement spécialisés, car il s'agit souvent d'espèces qui se rendent aussi sur les arbres (surtout quand ceux-ci représentent la partie principale de leur territoire de chasse), alors qu'elles vivent habituellement à terre.

On observe, par contre, des adaptations particulières aux divers modes de chasse, surtout à l'affût ou à la course. De nombreux Mustélidés, l'hermine par exemple, sont conformés en vue de la chasse dans les terriers de leurs victimes, qui sont essentiellement des Rongeurs : ils présentent, en conséquence, des pattes et un corps longs et déliés. Il n'existe pas de forme hautement spécialisée pour le saut, et les espèces fouisseuses sont rares. Les Fissipèdes ont en général une tanière bien protégée, surtout pour élever les petits, souvent incapables de subvenir à leurs besoins ; ils utilisent volontiers des cavités naturelles et des terriers d'autres Animaux. La plupart des espèces chassent solitairement ou par couples ; les loups, au contraire, chassent en groupe. Enfin, les populations subissent d'importantes fluctuations numériques, coïncidant souvent avec celles de leurs proies.

La distribution géographique des Fissipèdes est très vaste : elle s'étend à presque toute l'aire des Euthériens, à la seule exception de l'Australie (où le dingo a été certainement introduit par l'homme) et de nombreux archipels océaniques et des Antilles ; seul fait exception le genre *Procyon* (Procyonidés), que l'on rencontre à la Guadeloupe et aux Barbades.

Le sous-ordre des Fissipèdes est divisé en deux super-familles : les Cynoïdés (ou Arctoïdés), comprenant les familles des Canidés, des Ursidés, des Procyonidés et des Mustélidés, et les Féloïdés (ou Ailuroïdés), comprenant les familles des Viverridés, des Hyénidés et des Félidés. Cette subdivision en deux super-familles est fondée, notamment, sur l'anatomie de la région temporale et, en particulier, de la région tympanique. Chez les Cynoïdés, l'os tympanique, plus ou moins patelliforme, constitue le principal de la bulle tympanique, laquelle peut être parfois très développée (elle atteint son maximum chez le fennec). Chez les Féloïdés, par contre, l'os tympanique, plus ou moins semi-circulaire et parfois même circulaire, constitue seulement la partie antérieure de la bulle.

Ostman - P. R. Johanson

▲ *Les Canidés constituent une famille répandue sur presque toute la terre. Ils sont agiles et musclés; leurs longues oreilles sont dressées et leurs pattes sont longues et fines; ici, forme juvénile du chacal à chabraque* **(Canis mesomelas).**

Super-famille des Cynoïdés

Les Cynoïdés *(Cynoidea)* ou Arctoïdés *(Arctoidea)* sont des Fissipèdes possédant une bulle tympanique non cloisonnée. Leurs pattes sont tétra- ou pentadactyles, avec des griffes non rétractiles (semi-rétractiles chez *Ailurus*), et présentent tous les types intermédiaires de la plantigradie à la digitigradie. Ils ont un os pénien bien développé. Les Cynoïdés comprennent les familles des Canidés, des Ursidés, des Procyonidés et des Mustélidés.

Les **Canidés** *(Canidae)* constituent une famille homogène, répandue sur presque toute la terre. Ils présentent des caractères plus primitifs que ceux d'autres familles de Fissipèdes. Ils sont agiles et musclés. Leur museau est très proéminent, leurs grandes oreilles sont dressées, et leurs pattes longues et fines. Leur queue, bien développée, est couverte d'une fourrure longue et touffue. Ils sont, par rapport aux autres membres du sous-ordre, de taille moyenne ou assez grande (de 35 cm, chez le fennec, à 1,30 m de long, chez le loup) ; ils pèsent de 1 à 75 kg. Leurs pattes sont digitigrades ou semi-digitigrades, les antérieures étant pentadactyles et les postérieures tétradactyles (sauf chez *Lycaon*, dont la main est également tétradactyle) ; le pouce est toujours plus court que les autres doigts et ne touche pas le sol. Leurs griffes, émoussées, ne sont jamais rétractiles. Leur livrée est très changeante.

Leur crâne est remarquable par le volume de la boîte crânienne et par l'allongement du squelette facial ; les bulles tympaniques sont très développées. La denture, de type tranchant et broyeur, est puissante ; elle compte en général 42 dents : $\left(I\,\frac{3}{3};\ C\,\frac{1}{1};\ Pm\,\frac{4}{4};\ M\,\frac{2}{3}\right) \times 2 = 42$; font exception *Speothos* qui a 38 dents $\left(M\,\frac{1}{2}\right)$ et *Cuon* qui en a 40 $\left(M\,\frac{2}{2}\right)$. Les incisives sont normales, les canines longues et pointues, les prémolaires coupantes, les carnassières très développées ; enfin, les molaires post-carnassières ont des couronnes à surface essentiellement triturante. Bien que les Canidés soient essentiellement carnivores, leur denture dénote dans son ensemble un régime omnivore ; diverses espèces se nourrissent assez abondamment de matières végétales *(Urocyon)*. L'intestin est dépourvu de cæcum.

Strictement terricoles, les Canidés sont bien conformés pour la capture de leurs proies, surtout à la course. Dans les endroits où l'homme ne les dérange pas, sous climat tempéré, ils sont diurnes et nocturnes. Sous les tropiques, par contre, leur activité se déroule surtout à l'aube et au crépuscule. Leurs refuges sont des tanières, des cavités du sol, des anfractuosités de rochers ou même des trous d'arbres. Sauf *Nyctereutes*, ils sont actifs toute l'année.

Leurs allures sont : le trot (sur de longues distances), l'amble, le petit galop et le galop proprement dit. Le coyote *(Canis latrans)* semble être le plus rapide : il atteint 65 km/h. Les *Urocyon* grimpent parfois aux arbres, ce qui est exceptionnel au sein de la famille ; quant au *Speothos venaticus*, c'est un habile plongeur et nageur.

Les loups, les cuons et les lycaons sont grégaires, s'associant pour chasser en bandes qui comptent jusqu'à plus de trente individus. Les membres des autres genres chassent isolément, par couples ou en meutes. Toutes les espèces ont des sens très développés, y compris la vue, bien que la détection des proies s'accomplisse surtout grâce à l'odorat.

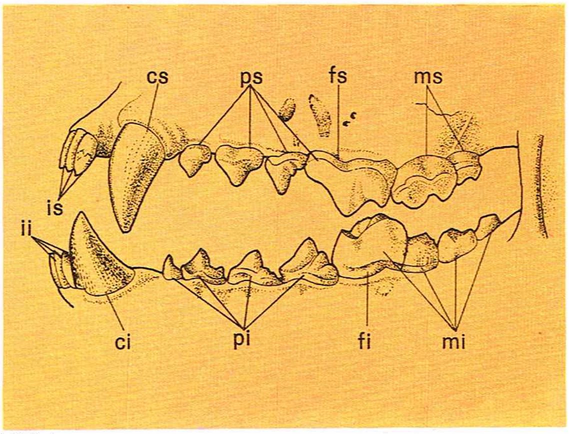

I.G.D.A.

▶ ***Représentation schématique de la denture d'un chien domestique : is, incisives supérieures ; ii, incisives inférieures ; cs, canine supérieure ; ci, canine inférieure ; ps, prémolaires supérieures ; pi, prémolaires inférieures ; fs, carnassière supérieure ; fi, carnassière inférieure ; ms, molaires supérieures ; mi, molaires inférieures.***

Les Canidés sont très prolifiques. Les femelles, qui possèdent habituellement de 3 à 7 paires de mamelles, ont chaque année 1 ou 2 portées, comptant chacune de 2 à 13 petits, dont la mise bas et l'élevage ont lieu dans un terrier bien abrité, où peuvent se trouver plusieurs femelles. Chez de nombreux genres, la durée de la gestation varie de 50 à 70 jours, avec une moyenne de 63 ; mais on observe des durées nettement supérieures, par exemple chez le cynhyène (80 jours) et les *Nyctereutes* (79 jours). Les nouveau-nés sont aveugles, incapables de subvenir à leurs besoins, mais déjà velus. L'allaitement peut durer de 6 *(Canis)* à environ 10 semaines. La maturité sexuelle est atteinte vers 1 ou 2 ans ; la longévité, à l'état sauvage, est comprise entre 10 et 18 ans.

La famille des Canidés comprend quatorze genres et environ quarante espèces répandues dans toute l'aire des Mammifères, à l'exception des Antilles, de Madagascar, des Célèbes, de la Nouvelle-Guinée, de la Mélanésie, de la Polynésie, des Moluques et de Formose. On en rencontre un genre dans les terres arctiques : *Alopex* (les renards polaires). On divise les Canidés en trois sous-familles : les Caninés, les Simocyoninés et les Otocyoninés.

La sous-famille des *Caninés* est de loin la plus importante et la plus nombreuse. Elle comprend des genres typiques, qui possèdent 42 dents et des pouces aux pattes. Ce sont les genres *Canis, Alopex, Vulpes, Fennecus, Urocyon, Nyctereutes, Dusicyon, Atelocynus, Cerdocyon et Chrysocyon*.

Le genre *Canis* comprend : les loups, le chien domestique, le dingo, le coyote et les chacals, avec dix espèces, qu'on observe dans presque toute l'aire de la famille, à l'exception de l'Amérique du Sud. Les caractères communs de ces Animaux sont leur grande taille, leur front plus droit que chez les autres genres, et leur queue moins touffue que celle des renards. Leurs yeux ont une pupille ronde. Du point de vue éthologique, les *Canis* forment des groupes familiaux plus stables que les autres genres de Caninés ; ce sont des groupes de durée variable dont l'activité est coordonnée surtout en vue de la chasse (par exemple chez le loup et le coyote).

L'espèce la plus importante de la région paléarctique est le loup *(C. lupus)*, largement répandu en Eurasie, non seulement paléarctique, mais aussi dans une partie de l'Inde, ainsi que dans toute l'Amérique du Nord *(gray wolf* et *timber wolf)*. Presque totalement détruit en France et dans les pays d'Europe centrale, on l'observe encore dans la péninsule Ibérique, en Italie centro-méridionale, en Europe orientale et dans les pays scandinaves.

Le loup (1 m à 1,40 m de long) possède une queue de 30 à 40 cm de long ; sa hauteur au garrot est de 70 à 80 cm ; son poids est habituellement de 25 à 50 kg, avec un maximum de 70 kg. Sa tête a un museau allongé, qui se termine par une truffe nue. Ses oreilles sont grandes. Il a des membres robustes, avec des mains tétradactyles, des pieds relativement courts et identiques, et des griffes robustes et peu recourbées. La teinte dominante de sa fourrure est le brun jaunâtre ou fauve et même noirâtre.

Le loup fréquente toutes sortes d'habitats : les forêts, les zones buissonneuses, les steppes, les régions cultivées, etc., aussi bien en plaine qu'en montagne. En Italie, il est maintenant confiné à des lieux inaccessibles, ainsi que dans l'Apennin, les Abbruzzes et la Sicile. Ses proies diffèrent selon les zones, l'habitat et la saison ; il s'agit de petits Animaux et de charognes ; ce Canidé se nourrit aussi de bulbes et de tubercules. Non territorial, il se déplace continuellement, parfois sur de très longues distances ; les femelles sont sédentaires durant l'élevage des petits. Nocturne (surtout dans les régions les plus peuplées par l'homme), le loup est grégaire, sauf à l'époque de l'accouplement ; on en rencontre même de solitaires. Les meutes sont beaucoup plus nombreuses en hiver.

L'accouplement a lieu de décembre à janvier et même au-delà de cette période, selon les régions ; la gestation dure environ 2 mois. Les femelles mettent bas, dans un abri, de 4 à 6 petits (dans certains cas jusqu'à 10) qui ouvrent les yeux seulement au bout de 12 jours, et dont la croissance est assez lente ; l'allaitement dure environ 2 mois, les mâles aidant les femelles à chercher la nourriture jusqu'à ce que la progéniture soit indépendante (vers 6 mois). La longévité de l'espèce est de 14 à 16 ans.

Le loup est certainement la principale espèce de laquelle ont dérivé les chiens domestiques *(C. familiaris)* ; il existe d'ailleurs des hybrides de ces deux Canidés.

Le dingo *(C. dingo)*, qui vit en Australie, a été très anciennement importé par l'homme. Actuellement, les dingos de race pure sont rares du fait des croisements avec les chiens domestiques introduits par les Européens. Le dingo ressemble au loup. Son tronc est fort et massif ; sa fourrure est roussâtre ; la plus grande partie de ses pattes est blanche. Ce chien, qui vit en petits groupes, évite l'homme. Son gibier préféré est le kangourou. Il a probablement joué un rôle essentiel dans la disparition du thylacine, ainsi que dans la destruction de diverses espèces de Marsupiaux.

Le deuxième groupe de Canidés est celui des chacals, avec quatre espèces, toutes eurasiatiques et africaines. Ils sont plus petits que le loup et présentent un front plus fuyant que lui. Ils se nourrissent de petits Animaux, de Végétaux (fruits), de charognes et de restes abandonnés par les grands Carnivores. Peu grégaires, ils chassent isolément ou par couples.

Le chacal doré *(C. aureus)* vit dans une aire qui s'étend du sud-est de l'Europe jusqu'à la Thaïlande, l'Arabie et l'Afrique du Nord et de l'Est. Mesurant 1 m de long, avec une queue de 20 à 24 cm, il est haut de 50 cm au garrot et pèse jusqu'à 20 kg. Il habite surtout les endroits semi-découverts, les steppes et les zones paludéennes. Il est nocturne, bon coureur et bon nageur. Le soir, il fait entendre des cris longs et perçants, mêlés d'aboiements. Il pénètre dans les villages et même dans les maisons, pour y manger des Animaux d'élevage.

Le chacal rayé *(C. adustus)*, très semblable au précédent, a les oreilles arrondies, des pupilles plus ovales et situées horizontalement. Sa robe est gris-brun, avec des bandes longitudinales jaunâtres, bordées de noir sur la poitrine et les flancs. Strictement forestier, on le rencontre en Afrique de l'Est, du Centre (jusqu'au Cameroun) et du Sud (jusqu'au Transvaal).

Le chacal gris *(C. anthus)* est confiné à l'Afrique orientale. Sa fourrure, touffue, est grise, plus ou moins foncée, avec de nombreuses taches noires ; il présente sur les flancs des bandes noirâtres ou jaunâtres.

Le chacal à chabraque, ou à dos noir *(C. mesomelas)*, a des oreilles pointues et rapprochées à la base. Sa robe est jaune-roux, sauf sur le dos, où le poil, plus long, est gris argenté avec des taches noires. Commun du Soudan à l'Afrique australe, il occupe surtout la brousse et la savane.

Le chien du Semien ou caberu *(C. simensis)* habite l'Éthiopie, en particulier les monts Semien. Cette espèce assez rare, de forme intermédiaire entre le loup et le

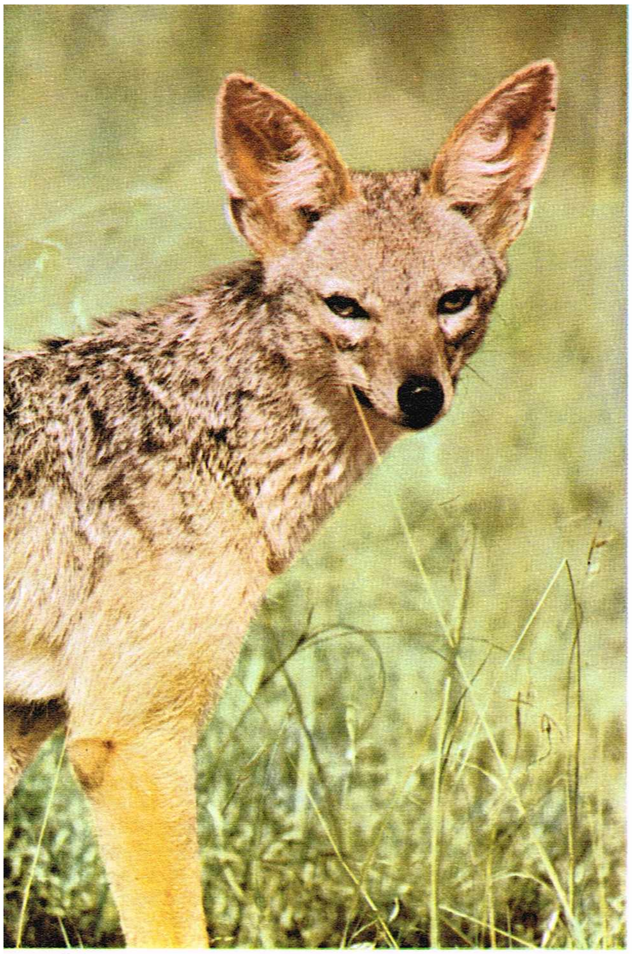

Z.F.A.

Ostman - G. R. Roberts

▲ *A gauche, forme adulte du chacal à habraque cou à dos noir* **(Canis mesomelas)**; *commun du Soudan à l'Afrique australe, il occupe surtout la brousse et la savane.*

A droite, le dingo **(Canis dingo)**, *très anciennement importé par l'homme, vit en Australie; son gibier préféré est le kangourou.*

chacal, a une fourrure rousse, une queue très touffue, et vit par petits groupes, dans les gorges sauvages. Elle semble se nourrir surtout de Rongeurs.

Enfin, le coyote *(C. latrans)* habite l'Amérique du Nord et l'Amérique centrale, surtout dans les régions de l'Ouest et du Centre, de l'Alaska au Costa Rica. Il ressemble au loup par son tronc robuste et sa queue, et au renard par son museau pointu et ses grandes oreilles, pointues et droites. Il tient sa queue basse quand il marche. Il atteint 95 cm de long, avec une queue de 30 cm, et peut peser plus de 20 kg. Sa robe, touffue et serrée, est gris jaunâtre avec des mouchetures brun noirâtre, plus foncée sur le dessus. C'est un excellent coureur qui atteint 64 km/h. Le coyote vit actuellement dans des conditions différentes de celles qui lui étaient naturelles. Naguère plus nombreux, il formait des meutes se montrant en plein jour. Aujourd'hui, il est devenu crépusculaire ou nocturne, et vit par couples ou en petits groupes. Il tient un peu, dans le Nouveau Monde, la place du chacal en Afrique. Il aménage sa demeure dans une tanière qu'il creuse ou qu'il adapte lorsqu'il en a trouvé une. Son organisation sociale est très développée, et les couples sont assez stables. Ce Canidé lance des hurlements prolongés et se nourrit d'Animaux variés, vivants ou morts.

▼◀ *Le coyote* **(Canis latrans)** *habite l'Amérique du Nord et l'Amérique centrale; c'est un excellent coureur qui atteint 64 km/h; il lance des hurlements prolongés. Il aménage (à gauche) sa demeure dans une tanière qu'il creuse ou qu'il adapte.*

Ostman - J. R. Simon

Ostman - J. R. Simon

Ostman - P. R. Johanson

Ostman - J. R. Simon

▲ *Ces deux illustrations montrent le renard polaire* (Alopex lagopus) *de type « bleu » dans sa livrée gris bleuâtre d'été (à gauche), et celui de type « blanc » dans sa fourrure d'hiver.*

▶ *Page ci-contre,* Fennecus zerda, *le fennec, habite les régions de l'Afrique du Nord, du Sinaï et de l'Arabie; c'est le plus petit renard; sa longévité atteint 12 ans.*

▼ *La femelle de* Vulpes vulpes, *le renard commun, que l'on voit ici avec ses petits, met bas, par portée, de 3 à 8 renardeaux, aveugles jusqu'à 10 jours.*

T. Okapia

Le genre *Alopex* compte une seule espèce, le renard polaire *(A. lagopus),* qui, avec l'ours blanc, constitue le groupe de Mammifères dont l'aire est le plus septentrionale. C'est une espèce holarctique, circumpolaire, qui habite dans la région arctique de l'Ancien Monde et du Nouveau Monde, habituellement au-delà de la limite de la végétation arborescente, et plutôt à proximité des côtes; on peut aussi rencontrer des individus dans les forêts, et même sur les glaces flottantes. Il est long de 50 à 67 cm, avec une queue de 25 à 40 cm, et mesure 30 cm de haut au garrot. Il pèse au maximum 9 kg. Ses oreilles sont courtes. Sa fourrure est très touffue. Il présente deux types de variations saisonnières de couleur : le type « blanc » où l'Animal est brunâtre en été et blanc en hiver; le type « bleu » où l'Animal est gris bleuâtre foncé en été et gris bleuté plus clair en hiver. Aux îles Pribilov, les renards polaires sont brunâtres toute l'année. Au Canada, 1 % des renards polaires fait partie du type « bleu », alors qu'il y en a 50 % au Groenland occidental. Les populations de cette espèce, très fluctuantes du point de vue numérique, dépendent le plus souvent étroitement de celles des lemmings. Les femelles mettent bas, en mai ou en juin, après une gestation de 51 à 57 jours de 4 à 11 petits, dans une tanière.

Vulpes est un genre très important, qui comprend les renards communs, avec une dizaine d'espèces en Europe, en Asie, en Afrique et en Amérique du Nord. De taille moyenne, ils ont le corps très allongé, les pattes courtes et fines, et le museau long et pointu. Leurs oreilles sont hautes, triangulaires et pointues. Leurs yeux ont une pupille elliptique. Leur fourrure est touffue et de couleur rousse ou gris-roux sur le dessus, rarement brun foncé. Leur queue, très velue, représente plus de la moitié de la longueur du corps. Le crâne est bas et fin, avec une région orbitaire peu surélevée. La région faciale est allongée et étroite. Leurs canines sont longues et fines : les extrémités des supérieures arrivent, lorsque les mâchoires sont fermées, au niveau inférieur de la branche mandibulaire. Leur formule dentaire est celle des Caninés.

Le renard vulgaire *(V. vulpes)* habite toute la région paléarctique, y compris l'Afrique du Nord, ainsi que la région orientale de l'Asie méridionale et une grande partie de l'Amérique du Nord. C'est un Animal fin, avec un museau typique, long et pointu, des oreilles hautes et pointues. Ses pattes sont assez courtes, avec des mains et des pieds à plantes très velues. Le dessus est brun-fauve roussâtre; le cou, les épaules et les flancs sont plutôt grisâtres, et les parties inférieures sont blanchâtres. On observe aussi des spécimens foncés, dont le masque facial, les parties inférieures du cou et les pattes sont particulièrement noirs. Ce renard mesure de 60 à 80 cm de long (quelquefois 90 cm pour les individus asiatiques), pèse de 6 à 10 kg et atteint 35 à 40 cm de hauteur au garrot.

Les renards d'Amérique du Nord présentent quatre phases principales de coloration. Outre les deux phases

déjà vues, ainsi que la phase noire, qui est rare, il en existe une argentée (renard argenté). Étant donné le faible nombre d'individus vivant dans la nature, le renard argenté a été l'objet d'un élevage rentable depuis la fin du siècle dernier, à cause de la demande croissante du marché. Il fréquente généralement les milieux les plus divers, en plaine et en montagne, préférant les lieux sauvages, riches en abris naturels. Il se nourrit surtout de petits Animaux (notamment des campagnols et des souris), de juvéniles d'Animaux de plus grande taille (par exemple, des petits chamois), de fruits et d'œufs. Il est principalement nocturne, mais on peut aussi le rencontrer en plein jour. Il évite autant que possible l'homme, fréquentant cependant les alentours des villages pour dévorer occasionnellement le petit bétail. Utilisant les abris naturels les plus variés (en particulier les tanières de blaireaux en Europe), il creuse souvent un terrier à plusieurs galeries. Après une gestation d'environ 2 mois, les femelles mettent au monde, en avril ou mai, de 3 à 8 petits, aveugles jusqu'à 10 jours, allaités pendant environ 1 mois et indépendants à 3 ou 4 mois. La longévité de l'espèce est de 12 ans.

Le renard corsac *(V. corsac)* habite les régions steppiques et désertiques de la Russie sud-orientale, du Turkestan (y compris dans sa partie chinoise), de la Mongolie et d'une partie de l'Asie sud-occidentale. Il se nourrit essentiellement de Rongeurs. Il atteint au maximum 60 cm de long, mais ses pattes sont un peu plus longues que celles du renard vulgaire; ses oreilles sont plus larges, surtout à la base. Sa livrée présente des tons gris-roux clair, plus intenses sur le dos et sur les épaules.

En Afghanistan, en Perse septentrionale, au Bélouchistan et au Turkestan russe, on rencontre le renard gris, ou renard de Blandford *(V. cana)*, l'un des plus rares. Long de moins de 50 cm, avec une queue de 30 à 40 cm, très touffue, il possède une fourrure gris clair, brunâtre sur le dos. Les autres espèces de la région paléarctique sont : le renard du Bengale *(V. bengalensis)*, de l'Inde et du Népal; le renard famélique, ou du désert *(V. ruppelli)*, d'Asie Occidentale, d'Arabie, d'Afrique du Nord, du Soudan et de Somalie; enfin, le renard des sables tibétain *(V. ferrilata)*, du Tibet et du Népal.

Le renard du Cap *(V. chama)*, d'Afrique du Sud, fait partie des « renards pâles ». Long d'un peu plus de 50 cm, il a les oreilles très développées, une robe fauve clair, plus foncée sur le dessus, et une queue noire à l'extrémité. Son museau, petit, est orné d'un masque marron. Il erre dans les régions semi-désertiques et est chassé, surtout par les Hottentots, pour sa fourrure.

Il reste deux espèces de *Vulpes* confinés au centre et à l'ouest de l'Amérique du Nord : le renard pygmée américain ou *kit fox (V. macrotis)* et *V. velox* ou *swift fox* (très probablement une sous-espèce de *V. macrotis*). Ce dernier est très semblable au fennec africain : on peut le considérer comme la version dans le Nouveau Monde de son congénère des déserts africains. Long de 40 à 50 cm, il a une queue d'environ 30 cm, des oreilles très grandes, une fourrure touffue, grisâtre, et une queue très foncée. Nocturne et agile, il vit principalement dans les vastes régions semi-désertiques de l'ouest des États-Unis.

Le fennec *(Fennecus zerda)*, qui habite les régions arides et désertiques de l'Afrique du Nord, du Sinaï et de l'Arabie, est à la fois le plus petit renard et celui dont la livrée est la plus claire. Il est long d'environ 40 cm, plus 30 cm pour la queue. Il a de grandes et larges oreilles, hautes de plus de 15 cm. Sa robe est roux crème sur le dessus, très claire, parfois blanchâtre, et encore plus claire aux parties inférieures; sa queue est noire à l'extrémité. Sa fourrure, longue et touffue, est très mimétique avec le milieu désertique. Ce renard creuse une tanière dans les sables du désert avec une telle rapidité qu'il semble s'enfoncer à vue d'œil. Il se nourrit d'Insectes, de Reptiles, de Rongeurs, d'Oiseaux, d'œufs et de matières végétales, et peut rester longtemps sans boire. Sa longévité atteint 12 ans.

Le genre *Urocyon*, américain, comprend les deux espèces de renards gris : *U. cinereoargenteus*, qui habite du Canada méridional à la partie septentrionale de l'Amérique du Sud, et *U. littoralis*, confiné à certaines îles proches de la Californie.

U. cinereoargenteus, long d'environ 60 cm, est encore plus fin que les renards européens. Ses pattes sont plus longues, ses oreilles plus courtes et sa queue, touffue et

Jacques Six

Mallet - Jacana

▲ **Nyctereutes procyonoides,** *le chien viverrin, commun en Asie orientale, est connu pour son habileté à attraper des Poissons avec ses pattes.*

▼ **Otocyon megalotis,** *l'otocyon, principalement insectivore, avec une prédilection pour les termites et les fourmis, est l'un des plus typiques Canidés africains.*

très développée, présente une bande dorsale noire allant jusqu'à l'extrémité, noire elle aussi. Sa robe est grisâtre sur le dessus, rouille ou fauve clair au-dessous et sur les côtés des pattes.

Les *Urocyon* ont l'habitude, exceptionnelle chez les Canidés, de grimper, parfois spontanément, sur les arbres; en outre, ils ne creusent pas de tanières. Ils fréquentent les zones arides, rocheuses, parfois buissonneuses, et même boisées.

Le genre *Nyctereutes* compte une seule espèce, le chien viverrin *(N. procyonoides),* qui porte sur le museau un masque noir très semblable à celui du raton laveur *(Procyon).* Long de 60 à 70 cm, il possède une queue de 20 à 25 cm, et ne mesure que 30 cm de hauteur au garrot. Son tronc est trapu et large à l'arrière. Sa fourrure est longue et très touffue, brun grisâtre aux parties supérieures et très foncée aux parties inférieures, ainsi qu'aux pattes.

Titus

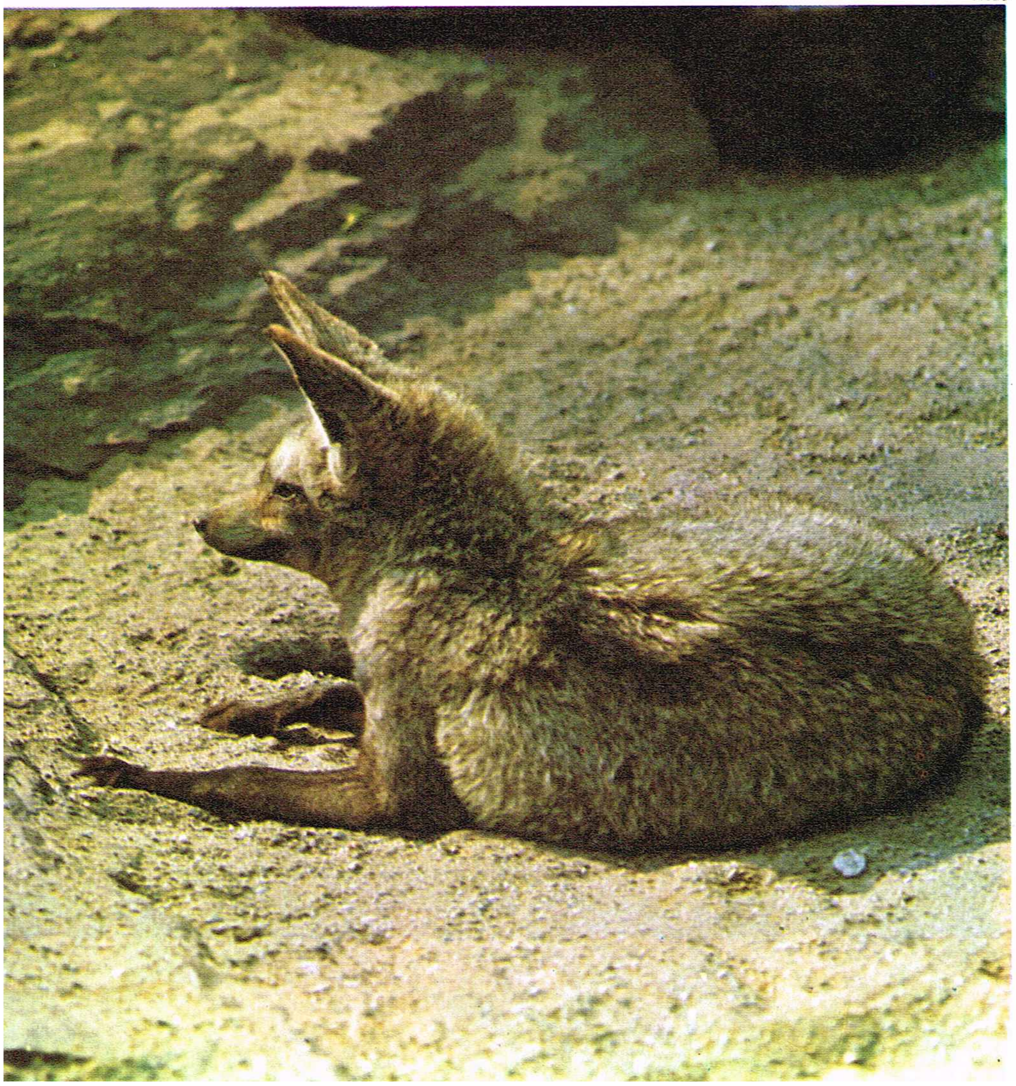

Commun en Asie orientale, il a été introduit récemment dans différentes régions d'Europe de l'Est. Essentiellement nocturne, il vit par petits groupes familiaux ou solitairement, se réfugiant dans des creux de rochers, dans la végétation dense et dans les arbres creux. Pendant l'hiver, il passe de nombreux mois en état de sommeil prolongé, sans toutefois entrer en une véritable léthargie. Sa nourriture comprend, pour une bonne part, des matières végétales. Son habileté à attraper des Poissons avec ses pattes l'a fait aussi appeler localement chien pêcheur.

Dusicyon (= Pseudalopex) comprend six espèces (huit selon Cabrera), distribuées dans les Andes et en Patagonie. De formes fines, avec de grandes oreilles et une longue queue touffue, elles mesurent de 60 cm à 1 m de long. La couleur de leur robe va du roux au brunâtre et au noirâtre. Elles sont omnivores et vivent dans les plaines ou en montagne, jusqu'à 4 000 m d'altitude dans les Andes.

Le renard des pampas *(D. gymnocercus),* ou loup gris des pampas (localement appelé *aguará chaí*), est long d'environ 80 cm. Il habite les plaines découvertes et, de façon typique, les pampas argentines; on le rencontre du Brésil méridional au Paraguay, à l'Uruguay, et à une grande partie de l'Argentine. Le jour, il se réfugie dans des trous du sol ou des tanières de viscaches. L'une des étranges habitudes de cet Animal solitaire consiste à accumuler dans des lieux déterminés toutes sortes d'objets, surtout de cuir.

Les autres espèces sont : *D. culpaeolus*, de l'Uruguay; *D. culpaeus*, largement répandu dans les Andes, de l'Équateur au détroit de Magellan; *D. fulvipes,* confiné à l'île de Chiloé, au Chili; *D. griseus,* du Chili et de l'Argentine; *D. inca* du Pérou; *D. sechurae,* des zones arides du Pérou et de l'Équateur; et *D. vetulus,* du Brésil centro-méridional. *D. australis*, le chien des Falkland, s'est éteint en 1876.

Atelocynus microtis, le renard à oreilles courtes, vit dans les forêts d'Amazonie, du bassin de l'Orénoque et dans une partie du Venezuela. Il mesure de 70 cm à 1 m de long et possède des oreilles rondes, longues de 5 cm à peine. C'est un Animal de couleur foncée, aux pattes courtes et dont les attitudes ressemblent quelque peu à celles des Félidés.

Cerdocyon thous, le renard des forêts ou des bois, commun en Colombie et au Venezuela, habite l'Amérique du Sud jusqu'à l'Argentine septentrionale. Il fréquente les forêts à grandes clairières et les prairies. Il chasse seul ou par couples, et se nourrit de toutes sortes d'Animaux, y compris des Insectes; il mange également les œufs de la tortue du genre *Podocnemys*, qu'il met à jour en creusant le sol; il absorbe, enfin, beaucoup de fruits. Il est facile à domestiquer.

Le loup à crinière, ou chrysocyon *(Chrysocyon brachyurus),* est long de 1,25 m avec une queue de 30 cm, et mesure 75 cm de hauteur au garrot. Ses pattes sont très longues. Sa robe est fauve jaunâtre, la partie inférieure de ses pattes étant très foncée ou noire. Son poil, long, forme une crinière érectile sur son cou et ses épaules. Il aime surtout les endroits découverts, où il chasse les gros Rongeurs, notamment les pacas et les agoutis. Il est commun au Brésil, en Uruguay, au Paraguay, dans l'est de la Bolivie et dans le nord de l'Argentine.

La sous-famille des *Simocyoninés* comprend trois genres : *Speothos,* d'Amérique du Sud; *Cuon,* asiatique; *Lycaon,* africain, qui sont des Canidés à museau court et à pouces réduits. Leurs doigts, armés de griffes, sont seulement au nombre de 4 aux pattes antérieures; chez *Lycaon*, toute trace de pouce a disparu. Leur denture est variable.

Speothos, ou *Icticyon*, *(Speothos venaticus = Icticyon venaticus)* est l'un des plus rares Canidés du monde et certainement l'un des moins bien connus. Il a été décrit d'après des squelettes fossiles trouvés dans des grottes du Brésil, avant qu'on ait découvert des individus vivants; en outre, sa classification a été très controversée, du fait qu'il a été considéré par certains auteurs comme un Mustélidé (d'où son nom générique d'*Icticyon*, qui signifie chien mustélin, ou chien-belette). Nettement forestier, il habite la partie septentrionale de l'Amérique du Sud. Trapu et massif, à pattes très courtes, il est long de 60 à 75 cm, et possède une queue de 15 cm. Sa fourrure est châtain brunâtre, les parties antérieures étant plus

S. Mc Cutcheon

▲ *Les Ursidés comprennent les plus grands Carnivores terrestres;* **Ursus arctos** *ssp., ou kodiak, l'ours brun d'Alaska, atteint 3 m de long.*

claires. Il semble être particulièrement grégaire, formant des groupes de dix têtes au maximum pour chasser ses proies; celles-ci consistent essentiellement en Rongeurs (surtout pacas et capibaras), qu'il poursuit même dans les cours d'eau et dans les marais. Il possède 38 dents $\left(\text{avec M } \frac{1}{2}\right)$, nombre minimal chez les Canidés.

Cuon (Cyon), avec 40 dents, compte une seule espèce : *C. alpinus,* long de 80 cm à 1 m, et dont la queue mesure environ 40 cm. D'aspect canin, avec une tête massive, il a les oreilles courtes et arrondies. Sa fourrure, roussâtre, tire sur le gris brunâtre selon les saisons. Il est largement répandu à l'intérieur d'une aire dont les limites sont, au nord, le bassin de l'Amour, au sud, les îles de la Sonde et, à l'est, la péninsule indienne. Cet Animal diurne vit en bandes formées de groupes familiaux se réunissant pour la chasse. Ses proies sont constituées de nombreux Mammifères, parfois très gros, comme les Ruminants de grande taille.

Le *Lycaon,* ou cynhyène *(Lycaon pictus),* est le plus grand et le plus caractéristique des Canidés africains. Il est long de 80 cm à 1 m, a une queue de 30 à 40 cm et mesure 60 cm de hauteur au garrot. C'est une forme robuste, aux pattes bien proportionnées, dont la tête et le museau sont larges. Il ressemble quelque peu à la hyène, d'où son nom de cynhyène (chien-hyène). Sa livrée caractéristique consiste en de larges taches et bigarrures noires et blanches, bordées de foncé et jaunâtres; certains spécimens ont une livrée surtout foncée, alors que chez d'autres, le jaune roussâtre domine. Le lycaon habite typiquement les maquis et les broussailles peu denses de l'Afrique, au sud du Sahara, jusqu'à la région du Cap. Il chasse en meutes aussi bien le jour que la nuit, errant à la recherche de toutes sortes de proies, habituellement des gazelles, des antilopes et même des Ongulés de grande taille. Peu rapide, il est infatigable, de sorte qu'il réussit à forcer les meilleurs coureurs de la savane. Son ennemi principal est le lion. La gestation dure de 63 à 80 jours, et il y a de 6 à 8 petits par portée.

La sous-famille des *Otocyoninés* compte une seule espèce, africaine, l'otocyon *(Otocyon megalotis),* répandu dans les régions arides d'Afrique orientale et d'Afrique du Sud. Il possède un grand nombre de dents (jusqu'à 48 et même 50), avec Pm $\frac{4}{4}$ et M $\frac{3}{4}$, qui sont petites. Il ressemble au renard : ses oreilles sont grandes et hautes d'environ 12 cm, ses pattes sont élancées. Il mesure de 50 à 60 cm de long, avec une queue de 30 cm, et sa hauteur au garrot est de 40 cm. Sa robe présente des teintes jaunâtres ou brun jaunâtre, ses pattes et sa queue étant partiellement noires. Nocturne, il vit solitaire ou par couples, parfois en petits groupes (jusqu'à six têtes). Sa nourriture se compose surtout d'Insectes, et il montre une prédilection pour les termites et les fourmis; il consomme également beaucoup de Végétaux, des petits Mammifères et des charognes, s'attaquant rarement aux Animaux domestiques. La gestation dure de 60 à 70 jours, et chaque portée compte de 2 à 5 petits.

Les **Ursidés** *(Ursidae)* comprennent les plus grands des Carnivores terrestres : les ours. Leur aspect est à peu près constant d'une espèce à l'autre. Ils sont très lourds; leur tête est grande et large, et se termine par un museau le plus souvent court, et tronqué à l'extrémité; leur cou est musclé, leur tronc trapu; leur queue, rudimentaire, est cachée dans le pelage. Leurs yeux sont toujours petits, et leurs oreilles, courtes ou moyennes, sont arrondies. Leurs pattes, courtes et très robustes, sont pentadactyles, plantigrades et armées de robustes griffes recourbées, jamais rétractiles, leur permettant de lacérer et de creuser; les paumes des mains et les plantes des pieds sont couvertes, en tout ou en partie, de poils (ce dernier cas se présente chez les formes qui sont également arboricoles, comme *Euarctos* et *Helarctos*).

La longueur des Ursidés varie de 1,20 m *(Helarctos malayanus)* à 3 m (race d'*Ursus arctos* de l'Alaska). Ils pèsent de 30 à plus de 800 kg. Les mâles mesurent généralement plus que les femelles. La fourrure de ces Animaux, à poils longs et hirsutes, est de couleur uniforme, tendant au brun, au noir ou au marron foncé, sauf chez l'ours polaire, blanchâtre; certaines espèces présentent sur la poitrine et la tête des bandes claires et des taches.

Le crâne, particulièrement robuste, laisse voir la présence du canal alisphénoïde, qui manque toujours chez les Procyonidés, sauf *Ailurus;* les bulles tympaniques sont aplaties. La denture est de type franchement omnivore : les canines sont puissantes, les prémolaires de taille réduite, les molaires plus développées (pourvues, en outre, de nombreux tubercules accessoires) et les carnassières tuberculées. La formule dentaire, fréquemment incomplète, est : $\left(\text{I}\frac{3}{3}; \text{C}\frac{1}{1}; \text{Pm}\frac{4}{4}; \text{M}\frac{2}{3}\right) \times 2 = 42$. Les Ursidés dérivent probablement de formes très anciennes de Canidés; ils présentent une spécialisation de la morphologie dentaire adaptée au régime omnivore. Ils ont toujours un os pénien bien développé.

La majeure partie des espèces vit dans les forêts ou les zones montagneuses; seul l'ours polaire *(Thalassarctos maritimus)* habite le fin fond des régions arctiques. Différentes espèces forestières grimpent bien aux arbres; toutes manifestent un certain goût pour l'eau et nagent habilement. La distribution géographique des Ursidés couvre l'Europe, l'Asie (y compris au sud), l'Amérique du Nord et une partie de l'Amérique du Sud. Ils sont

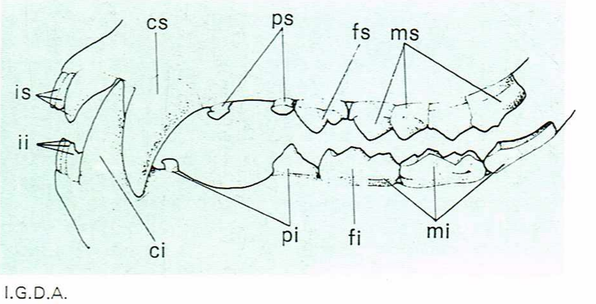

I.G.D.A.

◄ *Représentation schématique de la denture d'un ours : is, incisives supérieures; ii, incisives inférieures; cs, canine supérieure; ci, canine inférieure; ps, prémolaires supérieures; pi, prémolaires inférieures; fs, carnassière supérieure; fi, carnassière inférieure; ms, molaires supérieures; mi, molaires inférieures.*

absents de l'Afrique où ont probablement existé, toutefois, des ours bruns dans le Nord-Ouest (Atlas), sous une forme aujourd'hui éteinte. Ils sont également absents de l'Australie et de l'Antarctique. La présence de l'ours blanc dans l'Arctique est un phénomène très intéressant du point de vue zoogéographique. Dans les régions tropicales et tempérées, les Ursidés sont surtout crépusculaires et nocturnes, l'ours polaire étant diurne. La présence de l'homme est déterminante à cet égard, puisqu'elle pousse les ours à la vie nocturne, spécialement l'ours brun. Les ours sont des marcheurs remarquables, surtout l'ours polaire. Ils ont cependant un territoire plus ou moins défini, très vaste, dans lequel chaque individu vit habituellement, sauf à l'époque de la reproduction.

Dans les régions tempérées et froides, à l'approche de l'hiver, ils aménagent une cavité ou anfractuosité naturelle pour s'y cacher et passer la période hivernale dans un sommeil profond interrompu de réveils; il ne s'agit cependant pas d'une léthargie : la température corporelle ne descend guère. La prise de nourriture et de boisson est totalement suspendue. Au cours de ce repos hivernal, les femelles mettent bas leurs petits (1 ou 2, rarement 3 ou 4), et les allaitent normalement, ce qui montre qu'elles ne sont pas en état de léthargie. Les nouveau-nés sont tout petits par rapport à leurs parents : ils pèsent généralement de 225 à 450 g (soit 1/600 du poids de la mère chez l'ours brun, ce qui constitue un record chez les Euthériens). Cette mise bas et l'allaitement, peu fatigants pour la mère, sont compatibles avec l'état de repos. La gestation, qui dure de 6 à 9 mois, est influencée par le retard de la fécondation et de la nidation de l'ovule. Les petits restent avec leur mère au moins jusqu'au premier automne, et souvent pendant une partie de l'année suivante.

Les ours sont typiquement omnivores; certaines espèces présentent une tendance vers un régime essentiellement végétarien, surtout au printemps, au sortir du sommeil hivernal. L'ours polaire est franchement carnivore : il se nourrit de Poissons, de phoques, et d'autres Animaux présents dans son milieu.

Si la vue et l'ouïe ne sont guère sensibles, par contre, l'odorat est excellent. Normalement pacifiques, les ours peuvent être fort dangereux lorsqu'on les contraint à se défendre. Ils ont très peur de l'homme.

La famille des Ursidés est divisée de façon très différente selon les auteurs : le nombre de genres, variable, atteint au maximum sept (ils sont alors tous monospécifiques, sauf *Ursus*). Nous nous en tiendrons à la classification de Walker, qui dénombre sept genres au total avec sept à neuf espèces.

Les ours d'Amérique du Sud comptent une seule espèce, le *Tremarctos ornatus*, ours à lunettes; c'est un Animal rare, qui vit plus précisément dans les régions montagneuses du Venezuela occidental, de la Colombie, de l'Équateur, du Pérou et de la Bolivie occidentale, allant en altitude jusqu'à 3 000 m. Il est long de 1,50 m à 1,80 m, avec une queue de 7 cm seulement, et haut de 80 cm au garrot; il pèse de 140 à 150 kg au maximum. Sa fourrure est entièrement noire ou brun noirâtre, à l'exception de deux grands cercles ou demi-cercles autour des yeux, et d'un autre demi-cercle blanc à la gorge, qui s'étend à une partie de la poitrine (ce dessin est très variable). Sa biologie est mal connue.

Essentiellement sylvicole, bon grimpeur, l'ours à lunettes fréquente aussi les savanes et les zones buissonneuses. Il est surtout végétarien et se nourrit principalement de feuilles et de racines. Il lui arrive aussi de manger des Mammifères de grande taille (cerfs, guanacos, vigognes). Selon certains auteurs, il s'aménagerait une sorte de nid dans les arbres, mais cette observation n'a pas été confirmée.

Selenarctos thibetanus, l'ours à collier, est l'une des trois espèces d'ours uniquement asiatiques : il vit en Asie méridionale et orientale, du Bélouchistan au Japon et à Formose; son aire couvre également l'Himalaya et divers autres grands systèmes orographiques d'Asie.

Plus petit que l'ours brun, il a le tronc et les pattes élancés. Il mesure de 1,50 à 2 m de long, avec une queue de 10 cm au maximum, et pèse de 120 à 190 kg. Sa robe est faite d'un poil très touffu, long de 10 cm sur le dos, et plus encore sur les épaules et le cou. Il est noir, parfois brun-roux, avec du blanc sur la gorge et un collier blanc caractéristique sur la poitrine, en Y ou en V, avec la pointe en bas. Sa tête est aplatie; son museau est allongé et assez pointu; ses oreilles sont longues, larges, arrondies, et saillent de la fourrure; ses narines et ses lèvres sont très mobiles.

Il habite typiquement les grandes forêts de feuillus et, occasionnellement, les zones buissonneuses de montagne, jusqu'à la limite de la végétation arborescente. Selon les disponibilités en nourriture, il habite les forêts de Conifères pendant l'été, puis se déplace dans les forêts mixtes ou de feuillus. On le trouve l'été jusqu'à plus de 3 000 m d'altitude, et il descend à 1 500 m et même moins durant l'hiver; d'octobre à mai, il tombe dans un long et profond sommeil, plus prolongé que celui de l'ours brun. L'abri hivernal, souvent un gros arbre creux (peuplier, orme, cèdre ou tilleul), est situé le plus souvent à 4 à 6 m de hauteur, l'entrée se trouvant plus haut (jusqu'à 20 m au-dessus du sol). Avant de l'occuper, l'ours l'aménage, pour le rendre plus confortable, avec toutes sortes de matériaux, comme du feuillage et des branches, qu'il jette d'en haut. Nettement arboricole et excellent grimpeur, il se fait des lits sur les arbres, où il dort en été. C'est également un bon nageur. Les avis sont partagés en ce qui concerne son agressivité : certains le considèrent comme dangereux, d'autres comme doux et timide. Il se nourrit de matières végétales (feuilles, bourgeons, fruits sylvestres), ainsi que d'Insectes (notamment les abeilles), de miel, de petits Vertébrés, comme des Oiseaux et des Mammifères, et occasionnellement d'Animaux de grande taille. Il semble tout à fait exceptionnel qu'il s'attaque à l'homme.

En janvier ou en février, la mère met au monde 1 ou 2 petits. Lorsqu'ils sortent de leur tanière, la mère et les petits restent dans les forêts de montagne. L'ours à collier est l'objet d'un culte de la part des Aïnous, au Japon, qui le considèrent comme un véritable intermédiaire entre la divinité et l'homme : on le tue au cours de la « Fête de l'ours » afin de pouvoir obtenir l'intercession désirée.

Ursus comprend, selon les zoologues, une ou plusieurs espèces, qu'il est difficile de déterminer à cause de l'extrême variabilité de ces Animaux et de leur immense distribution géographique, laquelle couvre toute l'Eurasie paléarctique, une partie de l'Asie méridionale et, originellement, l'Amérique du Nord. Nous nous en tiendrons ici à l'étude de Pieter (1953), fondée aussi sur les fossiles, qui conclut à l'existence d'une unique espèce d'ours brun *(Ursus arctos)*, à diffusion holarctique et dont nous indiquerons les grandes formes.

Les formes d'Eurasie, ou ours bruns proprement dits, sont de gros ou de très gros Animaux : ils sont longs de 2 m ou plus, et pèsent, en moyenne, de 150 à 250 kg (jusqu'à 480 kg). Les femelles sont plus petites et moins lourdes. La queue mesure de 6 à 14 cm de long, et la hauteur au garrot est de 1 m ou plus. La tête est large en arrière, pointue en avant, et terminée par un museau tronqué. Les oreilles, courtes et très rondes, n'atteignent pas l'œil quand elles sont repliées en avant. Les yeux sont assez petits et possèdent une pupille ronde et un iris brun foncé. Les pattes sont relativement courtes et trapues, avec des mains et des pieds plantigrades; les griffes sont très robustes, longues et recourbées aux pattes antérieures, et plus courtes aux pattes postérieures, lesquelles sont très longues et présentent une grande callosité sur presque toute la plante. La queue, fort courte, est à demi cachée par la toison. La couleur de la robe est brun plus ou moins clair, plus foncé aux parties externes des pattes et des extrémités; à cet égard, la variété est grande selon les races géographiques, et même les individus et l'âge (les juvéniles sont plus clairs). L'ours brun mue totalement une seule fois par an, généralement en juin ou juillet.

Très agile, excellent grimpeur, il court et nage bien malgré son poids. Doté d'une force exceptionnelle, il peut traîner ses victimes, même lourdes, à travers de longues zones boisées, jusqu'à l'entrée de sa tanière, où il les dévore tranquillement. Lorsqu'il marche normalement, il dodeline du corps de façon caractéristique, levant ou abaissant simultanément les pattes d'un même côté; quand il est moins pressé, il marche différemment, levant ses extrémités en diagonale. Lorsqu'il galope, il effectue en réalité une série de sauts successifs, essentiellement sous l'action des pattes arrière, et peut atteindre une vitesse de 50 km/h. Lorsqu'il mange, il s'asseoit souvent de façon très caractéristique, et utilise ses pattes

E.P.S.

▲ *On observera l'extrême petitesse des yeux par rapport à l'importance de la tête de cet ours brun à robe claire.*

A. Margiocco

◀ **Selenarctos thibetanus,** *l'ours à collier, est l'une des trois espèces d'ours uniquement asiatiques : il vit en Asie méridionale et orientale et habite typiquement les grandes forêts de feuillus.*

antérieures, en particulier sa main droite, pour tenir sa nourriture. Omnivore parfait, à prédominance végétarienne, son régime n'est pas mixte, mais plutôt alternant : végétarien lorsqu'il est juvénile ou adulte, il peut devenir carnivore quand il vieillit. En général, il préfère le régime carné lorsque la végétation ne lui offre pas la variété d'aliments qu'il aime, ou quand son état physiologique le réclame. Il est friand de toutes sortes de fruits des bois, comme les fraises, les framboises, les myrtilles et les baies en général; il sait en outre chercher à terre les champignons, les rhizomes, les bulbes et les racines. Très gourmand de miel et de larves de fourmis, il dévaste les ruches sauvages et les fourmilières. Quant à ses proies, elles sont généralement de petite ou moyenne taille. Il s'attaque rarement aux troupeaux, tout au moins en Europe. Sylvicole et montagnard, l'ours brun aime les forêts touffues et ombreuses de sapins et de hêtres; il fuit la chaleur, ainsi que les lieux secs ou trop ensoleillés.

Nocturne dans les régions où la présence de l'homme le perturbe, il est diurne dans les immenses forêts de Sibérie. On observe rarement deux ou trois adultes ensemble; les mâles adultes vivent solitairement, allant vers les femelles au moment de la reproduction; cette période passée, ils ne participent pas à la vie familiale, et se désintéressent des petits, lesquels sont généralement au nombre de 1 ou 2 (rarement 3 et tout à fait exceptionnellement 4). Les femelles vivent, par contre, en famille avec leurs petits de la dernière année, et même avec ceux de l'année précédente, en général jusqu'à ce qu'ils aient atteint l'âge de 18 mois.

Rappelons que l'ours brun passe les mois d'hiver dans une tanière, en un état de profond sommeil; c'est au cours de cette période que les femelles, qui possèdent six mamelles, mettent au monde leurs petits et les allaitent.

L'ours brun étendait autrefois son domaine sur la majeure partie de l'hémisphère boréal. Repoussé par l'avance progressive de la civilisation, il n'est resté que dans des zones très éloignées les unes des autres, presque toujours dans des chaînes de montagnes, à l'exception de l'immense aire sibérienne et asiatique, où l'espèce a pu conserver une grande partie de son intégrité. Actuellement, sa distribution va de 22° à 75° de latitude nord. En Europe, excepté l'U.R.S.S., le maximum de densité et d'extension de l'aire de l'ours se trouve dans les zones montagneuses des États de l'Est. On le trouve encore, au nord, en Suède et en Norvège, alors qu'à l'ouest il survit en Espagne (chaîne cantabrique) et dans les Pyrénées et en Italie (Trentin et Abbruzzes). En France, il est protégé, en particulier dans le parc national des Pyrénées, où il reste quelques dizaines d'individus.

En Amérique du Nord, la diffusion de l'ours brun est très vaste, bien que fragmentée. Nous parlerons seulement des deux principales formes. En Alaska et dans de nombreuses petites îles (de Kodiak, d'Afognak, de Shuyak, etc.), on rencontre des races gigantesques d'ours bruns, comme *U. arctos gygas, U. arctos middlendorffi,* l'ours kodiak, et d'autres encore. Ces ours mesurent jusqu'à 2,80 m de long (le record est de 3 m, pour un poids de 800 kg). Ce sont les plus grands Carnivores terrestres vivants. La livrée est variable, allant du gris-brun au marron clair, avec des variantes très foncées ou plus claires. Ils errent continuellement dans les landes désolées, à la recherche d'une nourriture hétérogène, constituée en grande partie de Poissons qu'ils capturent dans les ruisseaux et les rivières (surtout de gros saumons). Ils sont aussi peu agressifs que leurs parents eurasiatiques.

L'ours gris, ou grizzli *(U. arctos horribilis)*, que beaucoup considèrent comme une espèce distincte, habite l'ouest de l'Amérique du Nord (de l'Alaska au nord de la Californie). Il est confiné actuellement aux forêts de montagnes. Long de 2,50 m, au maximum, et pesant jusqu'à 400 kg, il est plus trapu et plus lourd que l'ours brun commun.

Euarctos, confiné à l'Amérique du Nord, est très proche d'*Ursus* chez lequel certains auteurs le classent; il compte une seule espèce, l'ours noir, ou baribal *(Ursus americanus = Euarctos americanus)*, qui peuplait originellement presque toutes les forêts du Canada et des États-Unis et descendait jusqu'au Mexique central; confiné aujourd'hui à une aire plus réduite, c'est toujours l'ours le plus commun d'Amérique, particulièrement abondant dans certains parcs nationaux. Cet Animal, long de 1,50 à 1,80 m (sa queue mesure 12 cm), haut de 90 cm au garrot, pèse de 120 à 150 kg. Il diffère de l'ours brun par sa tête plus étroite, son museau plus long et pointu, et ses extrémités plus petites, lesquelles laissent sur le sol des traces caractérisées par leur brièveté. Ses griffes sont également plus courtes. Il est brun roussâtre, brun noirâtre, ou entièrement noir. Il existe une phase blanche, plus commune dans les régions côtières de l'océan Pacifique septentrional, et une phase bleuâtre, chez les populations de l'Alaska (mont Saint-Élie).

Sylvicole, c'est un excellent grimpeur, qui passe une partie de son temps sur les arbres. Après une gestation de 100 à 200 jours, les femelles mettent bas 2 ou 3 petits, parfois même 4, dans une tanière, lors du sommeil hivernal. Les petits restent avec leur mère environ jusqu'à l'automne, La longévité de l'espèce est de 25 ans au moins.

L'ours blanc ou polaire *(Thalassarctos maritimus)* est à diffusion arctique circumpolaire. Sa présence, liée à

▼ *A gauche,* **Ursus arctos horribilis,** *l'ours gris ou grizzli, est confiné actuellement aux forêts de montagnes à l'ouest de l'Amérique du Nord. A droite,* **Euarctos americanus,** *l'ours noir américain ou baribal, dont on voit ici deux individus de phases chromatiques différentes (brune et noire), fort typiques.*

S. Mc Cutcheon

Ostman - J. R. Simon

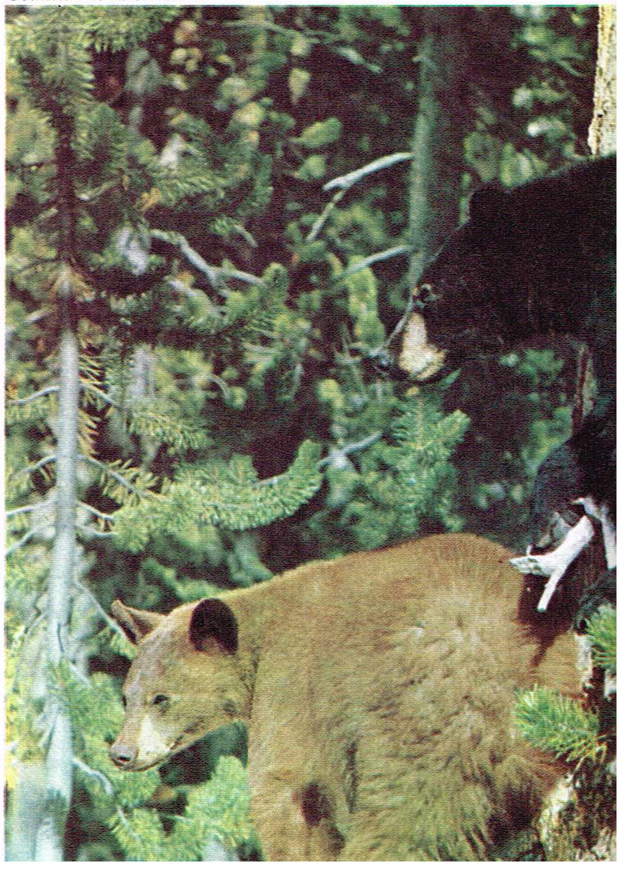

celle des phoques (sa principale nourriture), suit approximativement la limite méridionale de la banquise. Il a une longueur de 2,20 à 2,50 m; sa queue mesure 12 cm; sa hauteur au garrot est de 1,60 m et son poids de 400 kg (jusqu'à 700 kg). Sa fourrure est toujours blanc crème, plus claire ou plus jaunâtre. Sa tête est relativement plus petite que celle des autres ours et un peu aplatie; son cou est long. Les paumes et les plantes des pieds sont presque entièrement recouvertes de poils, adaptation à la vie sur la glace et sur la neige. C'est un infatigable marcheur, car il est obligé d'effectuer d'immenses parcours à la recherche des proies. Excellent nageur, il se laisse transporter en été par les glaces flottantes. Seules les femelles passent par une période de sommeil hivernal, s'aménageant une sorte de tanière dans la neige, pour y mettre bas, en mars ou avril, après une gestation d'environ 9 mois.

L'ours polaire est le plus carnivore et le plus prédateur des ours : il se nourrit de phoques, de Poissons, de renards polaires, de lièvres polaires, occasionnellement de rennes, ainsi que de toutes sortes d'Animaux, y compris d'Oiseaux.

L'ours malais ou des cocotiers *(Helarctos malayanus)* est une espèce rare qui vit dans les forêts de la Birmanie, d'Indochine, de la péninsule malaise, de Sumatra et de Bornéo, et peut-être aussi de Chine méridionale. C'est le plus petit des ours : il mesure de 1,20 à 1,40 m de long, avec 70 cm de hauteur au garrot, et pèse jusqu'à 65 kg. Ses caractères sont : la grosseur de sa tête par rapport au corps, ses oreilles toutes petites, son museau court, son arrière-train très bas et rétréci en largeur, sa fourrure très courte, et la robustesse de ses pattes, à grosses griffes et à paumes et plantes nues. Sa robe, noirâtre avec un dessin clair ou orangé, forme une ébauche de V sur la poitrine; son museau est grisâtre ou orangé.

Nocturne et arboricole, il se repose durant le jour sur un arbre, où il se construit une sorte de nid à l'aide de branches brisées ou recourbées. C'est un grimpeur remarquable. Son régime, omnivore, est composé de fruits, de feuilles, d'Insectes, d'Oiseaux, d'œufs, et de petits Mammifères. Il n'entre pas en sommeil hivernal. Les femelles mettent bas 2 petits dans un abri du sol. Cette espèce est assez rare.

La dernière espèce est l'ours lippu *(Melursus ursinus)*, confiné aux forêts de l'Inde et de Ceylan avec pour limite septentrionale les pentes du sud de l'Himalaya. Long jusqu'à 1,80 m, d'une hauteur au garrot de 60 à 90 cm, et pesant 100 kg, il se distingue à première vue par sa tête très aplatie, au front large, et se terminant par un long

S. Mc Cutcheon

museau étroit; il possède des lèvres longues et très mobiles, qu'il peut allonger à volonté, pour former une sorte de trompe par laquelle il sort sa longue langue, afin de sucer et d'aspirer divers aliments (dont le miel) ou quantité de petits Insectes, comme les fourmis ou les termites. Il a de tout petits yeux, des oreilles petites et cachées dans le poil, un cou robuste et court, un tronc massif et des pattes se terminant par des mains et des pieds larges et forts, armés de griffes longues et recourbées.

Sa fourrure, touffue et très longue, forme une crinière emmêlée et de couleur noir brillant surtout chez les adultes; ces derniers ont le museau très blanc, une tache en V ou en U marquée sur la poitrine et des griffes couleur corne. Les dents sont petites, au nombre de 40 (les incisives supérieures médianes sont absentes). Les femelles ont 2 ou 3 petits par portée; les juvéniles, soignés par les deux parents, restent avec eux jusqu'à 2 ou 3 ans.

▲▼ **Thalassarctos maritimus,** ***l'ours blanc ou polaire, vit dans les étendues glacées et perdues des régions arctiques. C'est un infatigable marcheur et un excellent nageur; il se nourrit de phoques, de Poissons, de renards et de lièvres polaires.***

C. Bevilacqua

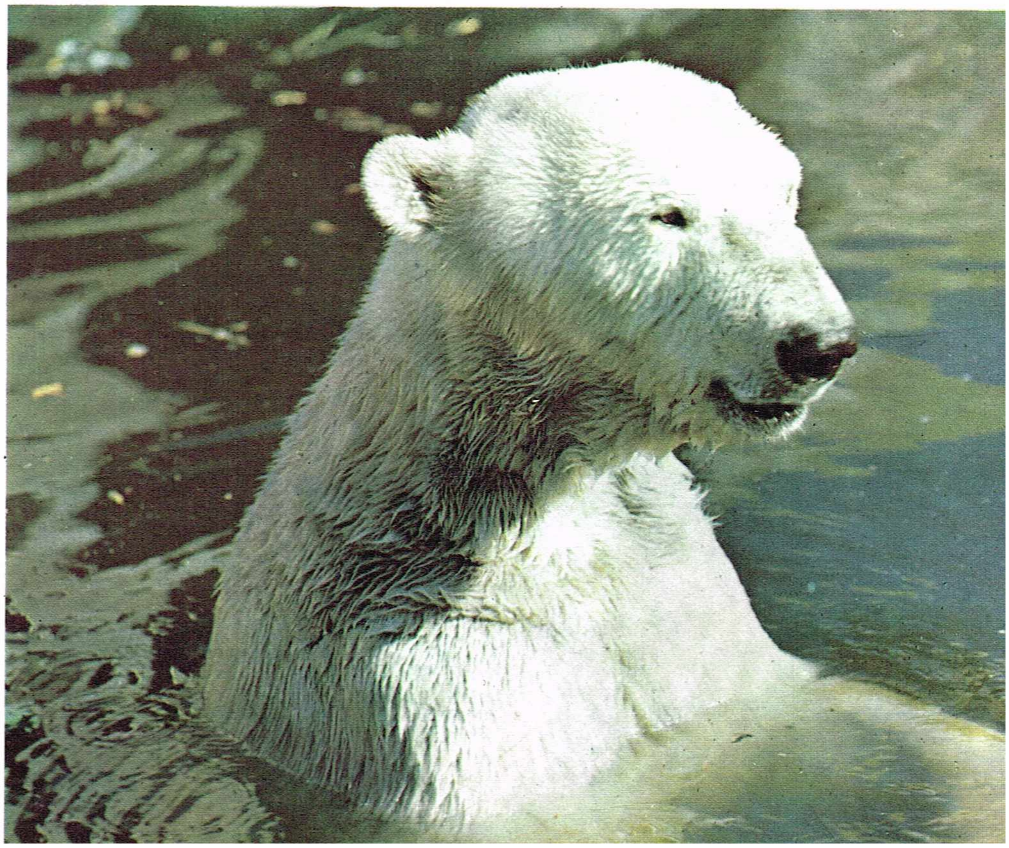

Les **Procyonidés** *(Procyonidae)* comprennent huit genres de Carnivores plantigrades ou semi-plantigrades, qui habitent les régions tropicales et tempérées de l'Amérique et de l'Asie centro-orientale. Par leur aspect varié, ils rappellent les Félidés, les Viverridés ou encore les Mustélidés. Cependant, dans son ensemble, cette famille présente des affinités avec les Canidés et, encore plus, avec les Ursidés. Les habitats de ces Carnivores sont soit terrestres, situés à proximité de l'eau, soit arboricoles.

Longs de 30 cm à 1,50 m (panda géant), avec pour poids maximal 100 kg, ils ont des pattes toujours pentadactyles, le troisième doigt étant plus long que les autres; leurs griffes sont courtes, comprimées, recourbées et, chez quelques espèces, semi-rétractiles. La queue est préhensile chez *Potos*, ce qui est exceptionnel pour des Carnivores. Le canal alisphénoïde est généralement absent, sauf chez *Ailurus*. L'os pénien existe toujours.

La formule dentaire est :

$$\left(I\,\frac{3}{3};\ C\,\frac{1}{1};\ Pm\,\frac{3\text{-}4}{3\text{-}4};\ M\,\frac{2}{2\text{-}3}\right) \times 2 = 36\text{-}42;$$

les carnassières sont petites. Le régime de ces Mammifères est généralement mixte, *Ailuropoda* étant uniquement végétarien. La gestation dure de 60 à 77 jours (90 jours chez *Ailurus*), sauf chez le panda géant (7 à 9 mois), sans doute à cause d'une nidation retardée de l'œuf. Chaque portée compte de 1 à 6 petits.

La distribution géographique de la famille présente une discontinuité qu'on ne retrouve que chez les Camélidés et les Tapiridés : les Procyonidés sont répandus dans l'Est asiatique, et dans la très vaste aire des deux Amériques. Cette discontinuité correspond à la division en deux sous-familles : les Procyoninés, américains, et les Ailurinés, asiatiques. Ce groupe de Carnivores compte huit genres et sept espèces.

La sous-famille des *Procyoninés* groupe six genres : *Bassariscus, Procyon, Nasua, Nasuella, Potos, Bassaricyon*, avec quinze espèces, toutes américaines.

Bassariscus est caractérisé par la possession de 40 dents $\left(Pm\,\frac{4}{4};\ M\,\frac{2}{2}\right)$, avec des canines à pointe obtuse, et des prémolaires et molaires de type canidé. Il en existe deux espèces.

▼ **Procyon lotor**, ***le raton laveur, fréquente les régions forestières, de préférence à proximité de l'eau, dans laquelle il a l'habitude de passer sa nourriture avant de la manger.***

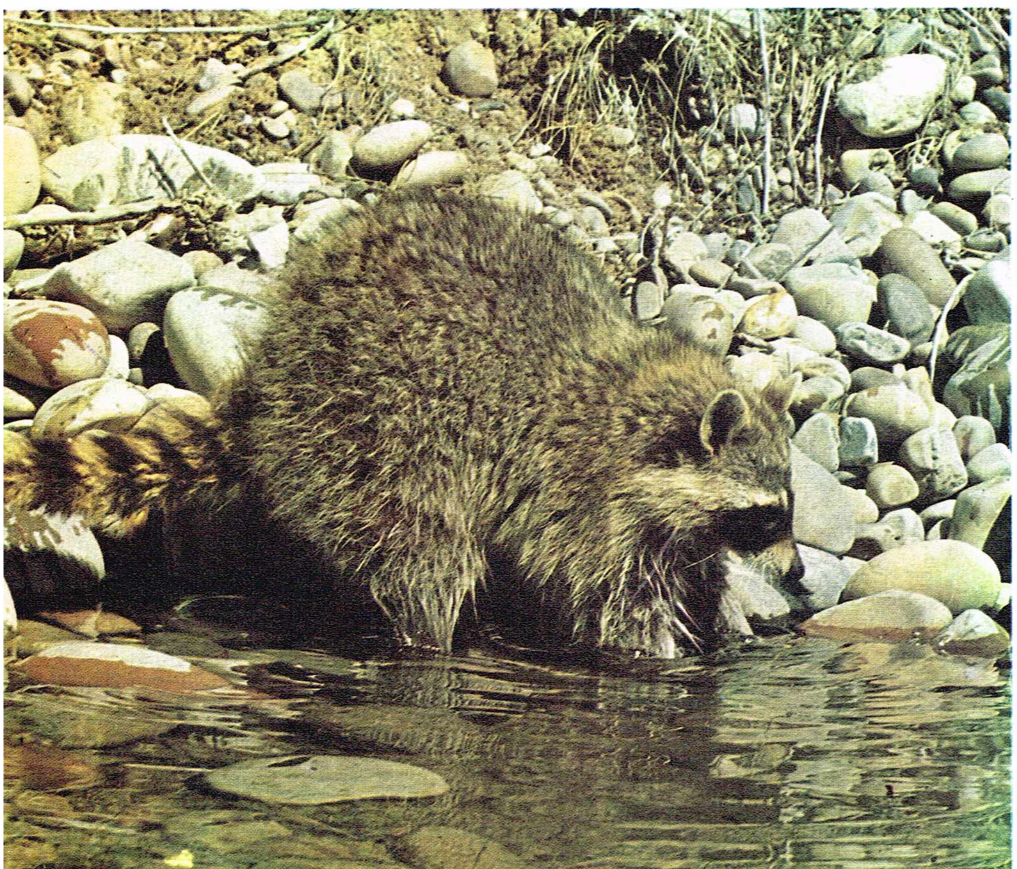

Ostman - J. R. Simon

B. astutus, le bassariscus proprement dit, appelé aussi localement chat à queue annelée, vit en Amérique du Nord, de l'Oregon, du Colorado et du Texas jusqu'au Mexique méridional; il habite de préférence les lieux rocheux et les éboulis, souvent à proximité de l'eau. Long d'un peu plus de 35 cm, à queue de 44 cm, il a une hauteur au garrot de 16 cm, pour un poids de 1 kg. Son museau est assez proéminent; ses yeux sont bien apparents, ses oreilles bien développées et arrondies. Sa longue queue touffue est ornée d'anneaux alternés blancs ou jaunâtres, fauve clair et brunâtres. Sa livrée est brun grisâtre sur le dessus; son museau est couvert de poils clairs, excepté les joues et le front qui sont gris foncé. Ses griffes sont semi-rétractiles. Le bassariscus est nocturne et omnivore. C'est un excellent grimpeur qui trouve un abri dans les rochers, les arbres creux et les ruines. A certaines périodes de l'année, il devient grégaire. Habituellement, les femelles mettent bas 3 ou 4 petits, en mai ou en juin.

B. sumichrasti est une espèce rare des forêts tropicales d'Amérique centrale (sauf les Antilles), dont la distribution a pour limite septentrionale le midi du Mexique, où commence l'aire de l'espèce précédente. De taille un peu inférieure à cette dernière, il a des oreilles pointues et non arrondies, une queue plus longue, des paumes et des plantes nues, des griffes non rétractiles, et une livrée marron grisâtre. Il est plus arboricole et se construit un nid dans les arbres. C'est une espèce rare.

Le genre *Procyon*, bien connu, compte sept espèces, dont deux seulement ont été décrites. De taille moyenne, à queue modérément longue, les procyons possèdent également 40 dents (avec des molaires tuberculées) et sont omnivores. Ils couvrent le continent américain.

Le raton laveur, ou procyon laveur *(Procyon lotor)*, d'une longueur de 60 cm, avec une queue de 40 cm et une hauteur de 30 cm au garrot, est assez robuste. Ses pattes, peu développées, ont des paumes et des plantes nues; les doigts sont fins et de longueur moyenne. La tête, caractéristique, se prolonge par un petit museau court et pointu. Les yeux sont très rapprochés et les oreilles rondes. La robe est touffue et de couleur gris jaunâtre strié de noir, avec un masque noir, caractéristique, sur les joues et autour des yeux; le reste du museau est clair. La queue présente une série d'anneaux clairs et foncés, plus ou moins marqués. Les extrémités ne sont pas palmées, et les griffes ne sont pas rétractiles.

Le raton laveur est un Animal nocturne et grégaire. Bon grimpeur et bon nageur, il fréquente surtout les régions forestières, de préférence à proximité de l'eau; il trouve abri dans les arbres creux ou les rochers. Son territoire a un rayon de 1 km à 1,5 km, et la densité normale est de 1 individu pour 4 hectares. Il est omnivore, avec une préférence pour les Animaux aquatiques; il a l'habitude de laver, c'est-à-dire de passer dans l'eau, sa nourriture avant de la manger (surtout en captivité). Après une gestation de 60 à 73 jours, les femelles mettent bas 3 ou 4 petits (jusqu'à 7) qui suivent ensuite leur mère durant 7 mois. L'aire du raton laveur couvre presque toute l'Amérique du Nord et centrale; on ne le rencontre pas en Amérique du Sud.

Les espèces proches, mal connues, sont : *P. insularis*, des îles Las Tres Marias, au large de la côte pacifique du Mexique; *P. maynardi*, de l'île de Cozumel, au large du Yucatan; *P. minor*, de la Guadeloupe, et *P. gloveralleni*, des Barbades. Ce sont des formes insulaires, dont l'attribution à des espèces distinctes est discutable; en tout cas, elles présentent un grand intérêt zoogéographique, car elles représentent les seuls Carnivores de la sous-région antillaise.

La seule espèce sud-américaine est le raton crabier *(P. cancrivorus)*, ou mangeur de crabes, qui habite du Panama à l'Argentine septentrionale, toujours à l'est des Andes. Cet Animal bien connu est un peu plus petit que le raton laveur, a des pattes plus longues et des oreilles plus courtes. Sa fourrure est habituellement jaunâtre aux parties supérieures et blanchâtre aux parties inférieures. Son museau présente un masque semblable à celui des ratons laveurs d'Amérique du Nord, et sa queue est ornée de 3 ou 4 anneaux noirs alternant avec d'autres, blancs. Il vit dans les forêts, isolément ou par groupes de quelques têtes seulement. Nocturne, il chasse surtout près des rivières. Il n'a pas l'habitude de laver sa nourriture. Il est chassé pour sa chair.

Après *Procyon,* le genre le mieux connu et le plus intéressant de Procyoninés est *Nasua*, ou coati, avec trois espèces, des deux Amériques. Longs de 40 à 70 cm environ, avec une queue de même longueur, les coatis sont caractérisés par un museau très long et proéminent se terminant par une sorte de minuscule trompe mobile, ainsi que des yeux situés à la base du front (très déprimés). Les oreilles sont petites et rondes. Le tronc est à la fois fort et élancé, les pattes portent cinq doigts partiellement reliés par des membranes. La fourrure est longue et touffue. Forestiers, les coatis vivent souvent en groupes. Leur activité étant surtout diurne, ils recherchent cependant souvent les refuges frais. Ils sont omnivores, et leur long nez sert à chercher leurs proies. Sur les arbres, ils utilisent leur longue queue (partiellement préhensile) comme balancier et comme appui. Les *Nasua* sont caractérisés par le fait qu'ils trottinent et sautillent, leur queue annelée dressée et leur museau à ras de terre. Ils émettent une sorte de murmure ou de sifflement. Les femelles mettent bas de 2 à 6 petits, au printemps ou au début de l'été, après une gestation de 77 jours.

Le coati roux *(N. nasua = N. rufa)* habite une grande partie de l'Amérique du Sud. Cet Animal a les parties supérieures brun-roux très vif, et les parties inférieures jaune roussâtre; sa queue présente des anneaux roussâtres et noirs alternés; ses oreilles, ses pattes et son museau sont bruns; les lèvres sont claires, et le tour des yeux également.

Les deux autres espèces sont : *N. narica,* qui habite principalement l'Amérique centrale, ainsi que le sud-ouest des États-Unis et l'extrême nord-ouest de l'Amérique du Sud, et *N. nelsoni,* de l'île de Cozumel, au large du Yucatan.

Nasuella olivacea vit dans les Andes du Venezuela, de la Colombie et de l'Équateur. Bien qu'il soit très semblable aux *Nasua*, il en diffère par sa queue plus courte, sa livrée gris-brun et ses anneaux caudaux alternativement jaune grisâtre et brun foncé. On l'appelle localement le petit coati de montagne. Sa biologie est mal connue; on suppose que son régime est omnivore et comprend une importante proportion d'Insectes.

Potos compte une seule espèce, le kinkajou *(P. flavus)*, qui habite les forêts tropicales, du Mexique méridional jusqu'au Mato Grosso, au Brésil. Ressemblant à certains lémuriens, il a une tête ronde, un museau court et des oreilles bien développées; le tronc est assez élancé; les pattes sont armées de brèves griffes, sa queue, très longue, est préhensile; les pieds sont plus longs que les mains. Il mesure environ 50 cm de long, avec une queue de même longueur; il atteint 25 cm de hauteur au garrot et pèse environ 2,5 kg. Sa fourrure est châtain olivâtre aux parties supérieures, avec une ligne noire dorsale chez certains individus, et jaune brunâtre aux parties inférieures. Leur museau est foncé. Le kinkajou est strictement arboricole, nocturne et vit seul ou en couples. C'est un grimpeur remarquable. Il est essentiellement frugivore. Les femelles mettent bas 1 ou 2 petits par portée.

Bassaricyon présente certaines affinités avec *Potos*. La seule espèce, le bassaricyon, ou lingo *(B. gabbii = B. alleni)*, habite l'Amérique centrale et le nord de l'Amérique du Sud. Long de 40 à 45 cm, avec une queue de même longueur, ce Procyonidé diffère du kinkajou par son museau plus pointu, son tronc plus élancé et sa queue vaguement annelée mais non préhensile. C'est une espèce très rare, grégaire, nocturne et arboricole, essentiellement frugivore, qui préfère les jungles tropicales denses, jusqu'à 2 000 m d'altitude.

La sous-famille des *Ailurinés* groupe les Procyonidés asiatiques, avec deux genres, *Ailurus* et *Ailuropoda,* caractérisés par leurs molaires tuberculées, qui correspondent à un régime encore moins carnivore que celui des espèces précédentes.

Ailurus compte une seule espèce, le petit panda *(A. fulgens),* qui vit dans les forêts, essentiellement de bambous, du Yunnan, du Sétchouan, de la Birmanie septentrionale, du Sikkim et du Népal. Long d'environ 60 cm, à queue de 40 à 50 cm, et pesant jusqu'à 4,5 kg, le petit panda est d'aspect quelque peu félin. La tête est ronde, et les oreilles grandes et pointues. La longue queue n'est pas préhensile. Les paumes et les plantes ne sont pas velues, et les griffes sont semi-rétractiles. La fourrure est longue, touffue et douce, y compris sur la queue, où elle présente des anneaux mal marqués. Le museau, les joues, le front et les bords des oreilles sont très clairs ou blancs, excepté une bande foncée qui s'étend des yeux à la bouche. Pour le reste, les parties supérieures sont châtain rouille, plus foncées sur la ligne médiane du dos, alors que les parties inférieures sont brun roussâtre ou très foncées. La formule dentaire est : $\left(I\,\frac{3}{3};\ C\,\frac{1}{1};\ Pm\,\frac{3}{4};\ M\,\frac{2}{2}\right) \times 2 = 38$. Le petit panda possède un canal alisphénoïde.

Nocturne, il dort pendant le jour sur les arbres, pelotonné, avec sa queue sur la tête, ou bien assis. Il est principalement végétarien, se nourrissant occasionnellement de petits Animaux et d'œufs. Il trouve souvent sa nourriture à terre. Il se déplace en couples ou en petits groupes. Les femelles mettent bas 1 ou 2 petits (jusqu'à 4) au printemps, dans un trou d'arbre ou un refuge parmi les rochers, après une gestation de 90 à 150 jours, période qui varie du fait de la nidation différée de l'œuf. Les petits, plus pâles que les adultes et à queue non annelée, ouvrent les yeux entre 20 et 30 jours; ils restent avec leurs parents (tout au moins avec leur mère) une année environ. Cette espèce assez rare est facile à domestiquer.

Albert Visage - Jacana

▲ **Nasua nasua = Nasua rufa,** ***le coati roux, habite une grande partie de l'Amérique du Sud.***

▼ **Ailurus fulgens,** ***le petit panda, vit essentiellement dans les forêts de bambous du Yunnan, du Sétchouan et de la Birmanie septentrionale.***

C. Bevilacqua

S. Prato

▲ Ailuropoda melanoleuca, *le grand panda ou panda géant, vit dans les forêts denses de bambous de certaines zones d'Asie orientale; ses ennemis sont le léopard et les cuons, dont il se met à l'abri en montant dans les arbres. Il est très rare.*

▼ *Les Mustélidés sont, pour la plupart des espèces, caractérisés par des formes fines, un corps allongé et souple et des pattes courtes. Leur fourrure, touffue, habituellement très appréciée, présente de nombreuses variations saisonnières.*

T. Okapia

Ailuropoda compte également une seule espèce, le grand panda ou panda géant *(A. melanoleuca)*, appelé aussi ours des bambous et ours du père David (du nom du célèbre missionnaire, explorateur et naturaliste, qui l'a découvert en 1869, dans les monts Moupin, en Chine). Sa position systématique est mal établie : il fait partie des Procyonidés par le crâne (absence du canal alisphénoïde) et par de nombreux caractères de l'appareil génital, alors qu'il se rapproche des Ursidés par son port, sa queue très courte et ses pattes plantigrades.

C'est, de loin, le plus grand Procyonidé, il est long de 1,20 m à 1,50 m et peut peser jusqu'à 160 kg ; sa queue mesure tout au plus 12 cm. Il ressemble à un ours, mais son museau est plus court ; par ailleurs, les paumes de ses mains et les plantes de ses pieds sont très velues. Sa formule dentaire est :

$$\left(I\,\frac{3}{3};\ C\,\frac{1}{1};\ Pm\,\frac{3\text{-}4}{3};\ M\,\frac{2}{3}\right) \times 2 = 38 \text{ ou } 40\,;$$

les prémolaires et les molaires, très développées, sont caractérisées par leur adaptation au régime phytophage. Sa fourrure, touffue, assez rude, est blanc et noir : la tête est blanche, avec 2 grandes taches noires dans la région des yeux ; les oreilles, les pattes, la poitrine, le haut de l'abdomen et le bas du tronc sont noirs ; le reste du corps est blanc. La tête est large et massive, du fait de l'ampleur des arcades zygomatiques et du grand développement des muscles masticateurs. Sa main a acquis une curieuse adaptation, qui favorise la préhension des branches : le sésamoïde radial, très développé, s'articule avec le scaphoïde, et sert de sixième doigt, opposable aux autres.

Le panda géant vit dans les régions montagneuses de la Chine méridionale, ainsi que dans une partie de l'est du haut-plateau tibétain, où il se réfugierait en été (province du Chinghaï). Confiné aux forêts très denses de bambous, il est distribué en altitude de 1 500 m à 3 300 m. Cet Animal paraît actif toute l'année. Il vit en contact avec une faune qui est l'une des plus intéressantes et des plus rares de l'Asie, où figurent le rhinopithèque, l'ours à collier, le muntjak, le sérow, et le bœuf takin. Ses ennemis sont le léopard et les cuons ; cependant, il se met facilement à l'abri en montant dans les arbres. Il vit à terre et se repose dans de grands troncs creux ou dans des anfractuosités de roches.

Il est solitaire, sauf à l'époque de la reproduction (au printemps). En janvier, les femelles mettent au monde 1 ou 2 petits, qui pèsent environ 2 kg à la naissance. Son régime est à peu près monophage ; il se nourrit principalement de bambous, et quelquefois de petits Mammifères. Il passe de 10 à 12 h par jour à manger. Sa rareté apparente est due en partie à ce qu'on ne le connaît que dans des régions difficiles d'accès ; en fait, il semble exclu qu'il soit en voie d'extinction. Étant donné que son exportation est interdite, il est très rare dans les grands jardins zoologiques ; en 1959, on ne pouvait en admirer, dans tous les zoos du monde, que neuf spécimens, dont cinq à Pékin.

Les **Mustélidés** *(Mustelidae)* représentent la famille la plus importante de la faune européenne de Carnivores. Ils comportent une importante variété de formes et de tailles, mais la majorité des espèces est caractérisée par des formes fines, un corps allongé et souple, et des pattes courtes. Leur fourrure, touffue, habituellement très appréciée, présente chez différentes espèces une importante variation saisonnière. La longueur du corps varie de 15 cm chez *Mustela rixosa*, qui pèse au maximum 70 g, à 1,50 m chez certaines loutres, pesant jusqu'à 36 kg ; les mâles sont normalement plus gros que les femelles. Leurs pattes sont semi-plantigrades ou plantigrades (exceptionnellement subdigitigrades) ; ils possèdent 5 doigts, armés de griffes comprimées et recourbées, jamais rétractiles ; chez les loutres, les extrémités sont palmées.

Les incisives ne sont pas spécialisées, les canines sont allongées, les prémolaires en nombre réduit, les carnassières bien développées, et les molaires, en nombre réduit, sont pointues et tuberculées chez la plupart des espèces, alors qu'elles sont obtuses chez d'autres, ce qui correspond à la grande variété des régimes. La formule dentaire est : $\left(I\,\frac{3}{2\text{-}3};\ C\,\frac{1}{1};\ Pm\,\frac{2\text{-}4}{2\text{-}4};\ M\,\frac{1}{1\text{-}2}\right) \times 2 = 28\text{-}38$ (le nombre théorique de 26, qui pourrait résulter de cette formule,

ne se présente chez aucune espèce). Les autres caractères généraux sont l'absence de canal alisphénoïde, la présence d'un os pénien, et l'important développement chez de nombreuses espèces des glandes anales, lesquelles sécrètent des substances d'odeur très pénétrante (typique chez le genre *Mephitis*).

Les Mustélidés sont diurnes ou nocturnes ; ils fréquentent toutes sortes d'habitats, principalement terrestres, en bonne partie arboricoles, et dans une moindre mesure semi-aquatiques. Certaines espèces (comme le blaireau) utilisent des tanières et toutes se réfugient généralement dans des trous d'arbres ou du sol. Chez certains genres, on observe une période de sommeil hivernal. La plupart sont de véritables prédateurs, et même des carnivores féroces, tandis que d'autres sont omnivores. Pour chasser, ils sont guidés essentiellement par l'odorat. La gestation dure de 39 à 65 jours. Cependant, la nidation différée existe chez différents genres : chez *Lutra canadensis*, les mises bas peuvent survenir jusqu'à 12 mois et demi après les accouplements. Le nombre des petits varie de 1 à 13 par portée. La longévité de nombreuses espèces atteint 20 ans. Les Mustélidés ont une très vaste diffusion, qui exclut seulement l'Australie, Madagascar, les Antilles et, naturellement, l'Antarctique et de nombreuses îles océaniques. Il en existe vingt-quatre genres et environ soixante-dix espèces, réparties en cinq sous-familles : les Mustélinés, les Mellivorinés, les Mélinés, les Méphitinés et les Lutrinés.

La sous-famille des *Mustélinés*, la plus importante, a une répartition géographique qui coïncide avec celle de la famille. Il existe des espèces terrestres et arboricoles (au moins partiellement) à pattes courtes. On connaît dix genres : *Mustela, Vormela, Martes, Tayra, Grison, Lyncodon, Ictonyx, Poecilictis, Poecilogale* et *Gulo*, avec, au total, trente-trois espèces.

Mustela compte, selon la classification adoptée ici, seize espèces, qui habitent l'Eurasie, l'Asie méridionale (y compris les îles), l'Afrique du Nord, l'Amérique du Nord, l'Amérique centrale et une bonne partie de l'Amérique du Sud ; leur absence de toute l'Afrique paléotropicale est significative. Le genre comprend les plus petites espèces de la famille, à corps fin et très allongé, à pattes courtes, à petites oreilles arrondies, et à queue assez courte (celle-ci mesure au plus, la moitié de la longueur de l'Animal). La formule dentaire est : $\left(I\,\frac{3}{3};\ C\,\frac{1}{1};\ Pm\,\frac{3}{3};\ M\,\frac{1}{2}\right) \times 2 = 34$. Leur régime est carnivore au sens strict ; tous sont terrestres, sauf le vison d'Amérique et le vison d'Europe (partiellement aquatiques).

L'hermine *(M. erminea)*, l'une des espèces les plus typiques, est largement distribuée : elle couvre l'Europe, l'Asie, sauf la partie méridionale, l'Amérique du Nord, sauf la partie méridionale, et l'Afrique du Nord. Longue de 20 à 30 cm, avec une queue de 10 cm, elle a un corps allongé, fin et cylindrique. Ses pattes sont très courtes, sa tête est aplatie, et son museau bref ; ses oreilles sont courtes, arrondies et velues. La fourrure, dense et douce, est, au cours de la phase estivale, de couleur brun clair et blanchâtre aux parties inférieures et internes, avec une nette ligne de démarcation ; pendant la phase hivernale, par contre, la livrée est entièrement blanche, avec quelques nuances jaunâtres ; la pointe de la queue est noire en toute saison, ce qui permet, entre autres caractères, de distinguer l'hermine de la belette. Ce dimorphisme saisonnier ne se présente que dans les pays froids, à des altitudes optimales. Ce Mustélidé fréquente aussi bien les forêts que les zones buisonneuses, et se nourrit de micromammifères (surtout des campagnols des neiges), d'Oiseaux (ainsi que de leurs œufs), de Reptiles, d'Amphibiens, de Mollusques et d'Insectes. Diurne et nocturne, l'hermine est très active ; elle chasse isolément ou par petits groupes. Elle court, galope, saute, nage et grimpe bien aux arbres. Elle se réfugie habituellement dans des tanières et des abris d'autres Animaux. Les femelles, pourvues de 8 mamelles, mettent au monde, d'avril à juin, de 4 à 7 petits qui ouvrent leurs yeux seulement vers 40 à 45 jours ; ils sont allaités durant 7 semaines et deviennent indépendants à 3 ou 4 mois. La longévité de l'espèce est d'environ 10 ans.

La belette *(M. nivalis)*, un peu plus petite que l'hermine, est largement répandue en Europe, en Asie (sauf dans toute la partie du sud de l'Himalaya) et en Afrique du Nord. Sa robe, qui peut présenter une phase hivernale blanche, ressemble à celle de l'hermine, mais la pointe de sa queue n'est jamais noire, et sa livrée estivale n'a pas de démarcation nette entre les parties supérieures et inférieures. La belette vit aussi bien en plaine que dans les régions collinéennes et en montagne ; elle se nourrit des mêmes proies que l'hermine. Très vive, elle s'introduit dans toutes les cavités, et surtout celles qui constituent des refuges pour les Rongeurs. Cet Animal nocturne vit solitairement ou par groupes familiaux et s'attaque aussi à des Mammifères assez gros, comme le lièvre, les égorgeant ou les mordant à la nuque. Les femelles mettent bas de 4 à 7 petits par portée.

La belette de l'Altaï *(M. altaica)*, longue de 25 cm, est largement répandue dans le sud de l'U.R.S.S., en Asie centrale, en Mandchourie et dans diverses zones de la Chine méridionale. Espèce montagnarde, elle vit jusqu'à plus de 3 500 m d'altitude. Elle fréquente la taïga, les steppes et divers types de forêts. Elle chasse surtout des Rongeurs de petite taille, et ses populations suivent les fluctuations numériques de ces derniers.

La belette de Sibérie *(M. sibirica)*, espèce proche de la précédente, est surtout répandue dans les immenses forêts de Sibérie, mais on la trouve aussi dans une grande partie de l'Asie centrale et méridionale. Un peu plus grande que la belette de l'Altaï, elle mesure jusqu'à 45 cm de long. Son habitat typique est la taïga et les forêts de montagne ; elle préfère les vallées sillonnées par des cours d'eau abondants, ainsi que les environs des lacs, où elle chasse des Rongeurs et d'autres Animaux.

La belette à ventre jaune *(M. kathiah)* et *M. strigidorsa* habitent l'Asie du Sud-Est. *M. lutreolina*, de Java, et *M. nudipes*, de Sumatra, sont uniquement asiatiques.

La belette naine, ou pygmée *(M. rixosa)*, nord-américaine, très rare, est le plus petit Carnivore du monde, puisqu'elle mesure 15 cm. La belette à longue queue *(M. frenata)* a la pointe de la queue toujours noire ; elle présente, dans le nord du continent, une phase hivernale blanche. Sa distribution couvre presque toute l'Amérique du Nord, l'Amérique centrale et les régions andines, jusqu'au Pérou et à la Bolivie ; on la trouve jusqu'à 3 600 m d'altitude. La belette à pieds noirs, *M. nigripes*, longue de 45 cm, vit dans les prairies d'Amérique du Nord. Sa livrée est brun jaunâtre, avec un masque caractéristique ; ses pattes et la pointe de sa queue sont noires.

Ostman - R. J. Spurr

▲ **Mustela erminea**, ***l'hermine, dans sa livrée hivernale.***
▼ **Mustela frenata** ***(la belette à longue queue), dont la distribution couvre presque toute l'Amérique du Nord, l'Amérique centrale et les régions andines.***

E.P.S.

Le vison d'Amérique *(M. vison)*, originaire d'Amérique du Nord, est aussi élevé en Europe et en Asie. Des individus se sont échappés et sont redevenus sauvages, produisant de nouvelles populations. Sa fourrure est brun foncé sur le dessus et brune avec des taches blanchâtres au-dessous. Il mesure 40 cm de long, plus 20 cm pour la queue. Excellent nageur, il fréquente les alentours des rivières et des lacs, et se nourrit d'Animaux aquatiques. C'est un Animal peu grégaire et surtout nocturne. *M. macrodon*, plus gros, a disparu depuis 1860 ; il habitait l'Amérique du Nord.

De mœurs analogues, le vison d'Europe *(M. lutreola)* est long de 40 cm, plus 14 cm pour la queue. Il ressemble au vison d'Amérique, dont il se distingue par les taches blanches qu'il porte au menton et à la lèvre supérieure.

Le putois *(M. putorius)* est commun en Europe, en Asie paléarctique, en Asie Mineure et dans une partie de l'Afrique du Nord. Long d'environ 40 cm, avec une queue de 15 cm, il est assez élancé et possède une fourrure touffue. Sa tête est aplatie. Son museau est large, ses yeux sont petits, ses oreilles rondes et basses. Ses pattes sont courtes, avec des mains aux griffes partiellement rétractiles et des pieds très robustes. Sa robe est brun noirâtre, plus foncée aux pattes, aux parties inférieures et à la queue. La bourre est habituellement grisâtre ou jaunâtre, alors que le jarre qui la surmonte est noirâtre. Il est absent des îles méditerranéennes, où il est remplacé, partiellement, par le furet *(M. putorius furo = M. furo)*, probablement originaire d'Afrique du Nord ou d'Espagne, puis domestiqué ou introduit, surtout comme auxiliaire pour la chasse au lapin sauvage. Le furet est devenu subspontané en certains endroits. Sa fourrure est plus jaunâtre, presque blanchâtre. Il existe des individus albinos. Le putois a un régime carnivore, composé de Rongeurs, de lapins, de volailles, de divers Oiseaux, d'œufs et d'Invertébrés, souvent complété par des fruits. Il décapite ses proies et fait des ravages inutiles, comme la fouine, en tuant un nombre de victimes bien supérieur à ses besoins. Lorsqu'il est en danger, il émet un liquide nauséabond par ses glandes anales. Il fréquente toutes sortes d'habitats, aussi bien en plaine qu'en montagne, sans compter la proximité des lieux habités. Les femelles ont de 4 à 6 petits. Signalons également le putois d'Eversmann *(M. putorius eversmanni)*, d'Europe orientale. Enfin, *M. africana*, uniquement sud-américain, habite le bassin de l'Amazone, l'Équateur et le Pérou.

Le deuxième genre est *Vormela*, qu'on rencontre dans les steppes, du sud-est de l'Europe jusqu'au désert de Gobi et à la Mongolie. Long d'environ 35 cm, il a le dessus marbré, avec de larges taches marron et jaunâtres, jusqu'à la moitié de la queue, et le dessous brun noirâtre. Il ressemble beaucoup au putois.

Martes, genre important, compte huit espèces, répandues en Europe, en Asie (y compris l'archipel malais) et en Amérique du Nord (Canada, Alaska, et une partie des États-Unis). Beaucoup plus grand que *Mustela*, *Martes* en diffère par un museau plus pointu, des oreilles bien développées, à pointe arrondie, et des pattes moins courtes. La livrée est caractérisée par une nette tache jugulaire. La formule dentaire générale est :

$$\left(I\,\frac{3}{3};\ C\,\frac{1}{1};\ Pm\,\frac{4}{4};\ M\,\frac{1}{2}\right) \times 2 = 38.$$

Ces Animaux solitaires sont actifs aussi bien le jour que la nuit, et jusqu'au plus profond de l'hiver, pendant lequel les populations de montagne peuvent descendre les pentes. Généralement arboricoles et excellents marcheurs, ils peuvent franchir plus de 15 km en une nuit.

La martre *(M. martes)*, largement répandue en Europe (sauf la péninsule Ibérique et la péninsule Balkanique), habite aussi l'Asie, jusqu'à l'Ob et à l'Irtich, l'Asie Mineure et la Perse. De grande taille (42 à 52 cm de long avec une queue de 25 cm environ), elle pèse jusqu'à 2,5 kg. Son corps est allongé, son museau est pointu, ses yeux sont assez petits, et ses oreilles rondes font saillie hors du pelage. En hiver, des poils recouvrent une grande partie de ses callosités palmaires et plantaires. Sa robe est brunâtre, tendant au noirâtre ou au jaunâtre ; la tête et le dessus sont plus clairs que le dessous ; la gorge et la partie antérieure de la poitrine sont ornées d'une tache jaune.

La martre vit dans les forêts de haute futaie, de préférence de Conifères, mais aussi de feuillus ou mixtes, ainsi que dans les maquis denses ; elle évite les grands centres d'habitation. C'est un Animal principalement nocturne, fort agile et excellent grimpeur, qui cherche refuge dans les arbres, entre les racines ou parmi les rochers. Elle chasse en grande partie sur les arbres, se nourrissant de loirs, d'écureuils et divers autres Rongeurs, d'Oiseaux et de leurs œufs, ainsi que de Lagomorphes. Elle s'attaque aussi aux Animaux domestiques de taille moyenne. Les accouplements ont lieu de juin à août et la gestation dure 9 mois en moyenne (il y a nidation différée) ; les petits naissent en mars ou en avril, à raison de 3 à 5 par portée ; ils sont blanchâtres et aveugles pendant 1 mois environ ; ils sont assez indépendants vers 3 mois, bien qu'ils restent encore avec leur mère. Le nid de la martre est le plus souvent un trou d'arbre bien protégé.

La fouine *(M. foina)*, de taille analogue, diffère de la martre par sa tache jugulaire blanche, partiellement divisée en deux. Sa fourrure, plus foncée et plus grisâtre, est moins fine. La distinction entre ces deux espèces est difficile à faire lorsqu'elles sont en livrée hivernale. La fouine évite le plus souvent les forêts de haute futaie et se tient dans les zones plus découvertes (buissons, lisières des bois, etc.), surtout en terrain accidenté et rocheux ; on l'observe aussi à proximité des maisons. Elle se nourrit de toutes sortes de proies vivantes, de taille convenable, notamment d'Animaux domestiques lorsqu'elle peut entrer dans les poulaillers et les clapiers. Essentiellement nocturne, elle vit normalement à terre, où elle se fait des refuges. Elle vit solitairement ou par petites familles. La gestation dure de 8 à 9 mois. Chaque portée compte de 3 à 5 petits. La longévité de l'espèce est de 12 ans. Sa distribution géographique couvre presque toute l'Europe (sauf la Sicile et la Sardaigne) jusqu'à l'Asie centrale.

La zibeline, ou martre zibeline *(M. zibellina)*, qui mesure jusqu'à 45 cm de long, a une fourrure très fine et très douce, caractérisée par une large tache jugulaire jaune-roux ou jaune-brun au contour mal défini. Ses oreilles sont assez pointues. Ses pattes sont robustes, surtout aux extrémités. On la rencontre sur une aire discontinue, en U.R.S.S., en Mandchourie, en Mongolie et au Japon ; naguère, on la trouvait aussi en Scandinavie.

La martre à ventre jaune *(M. flavigula)* est largement répandue en Asie orientale, d'une grande partie de la Sibérie jusqu'aux îles de la Sonde (à l'exclusion de l'Inde), et au Japon. Très grande (80 cm de long avec une queue de 45 cm), elle a une fourrure rude. La partie supérieure de la tête et du cou, ainsi que les pattes et la queue sont brun foncé ; la partie antérieure du dos est brunâtre ; l'abdomen est jaune clair ; l'angle de la bouche, la lèvre supérieure et le menton sont blancs ; les côtés et le dessous du cou et de la poitrine sont jaune doré. Cette espèce forestière se nourrit de proies de moyenne taille : petits Ongulés, jeunes Ruminants, gros Rongeurs et Lagomorphes (écureuils, lièvres, etc.), et Oiseaux.

Les deux autres espèces asiatiques sont : la martre du Japon *(M. melampus)* confinée au Japon et à la Corée, et la martre à gorge jaune *(M. gwatkinsi)*, de l'Inde méridionale.

La martre américaine *(M. americana)*, longue de 42 cm, très semblable à notre martre, est arboricole ; la martre de Pennant *(M. pennanti)*, dite aussi pékan, ou « fisher » (ce qui signifie « pêcheur »), longue de 60 cm, est massive. Elle habite les forêts du Canada et d'une partie des États-Unis jusqu'à la Californie, fréquentant surtout les zones proches des rivières et des lacs. Ces deux dernières espèces, essentiellement nocturnes, chassent toutes sortes de proies, y compris les Poissons et les Amphibiens. Leur fourrure est fort appréciée ; elles ont souvent été presque décimées par la chasse. On en fait l'élevage pour la pelleterie.

Le genre *Tayra (Eira = Galera)* comprend une seule espèce, le tayra *(T. barbara)*, qui habite les forêts, du Mexique au Paraguay et à l'Argentine ; on l'observe également dans l'île de Trinidad. Long de 60 à 70 cm, avec une queue de 40 cm, il a une tête volumineuse, avec un museau court. Ses oreilles, arrondies, sont peu saillantes. Son corps est fin et souple. Ses pattes, courtes et fortes, ont les paumes et les plantes nues. Sa fourrure est dense, assez douce, brun foncé, avec une tache jaune clair à la gorge. Sa denture se distingue par trois prémolaires par hémimâchoire.

Ph. Frédéric - Jacana

Habile grimpeur, le tayra chasse par couples ou par groupes familiaux, capturant des Oiseaux et des Mammifères, parfois de grosse taille comme les petits cerfs du genre *Mazama*; il se nourrit aussi de fruits. La femelle met au monde 3 ou 4 petits, dans un nid aménagé à terre.

Les grisons *(Grison = Galictis)* comptent deux espèces, américaines, de taille inférieure au tayra (40 à 55 cm), et à queue très courte (15 à 20 cm). Leurs pattes sont plus courtes, avec des paumes et des plantes velues. Leur port est plutôt mustélin. Leur livrée est caractéristique : le museau, les parties inférieures, les flancs et les pattes sont noirâtres; les parties supérieures et la tête (comprimée) sont grisâtres, avec une bande claire qui va du front à l'arrière en passant au-dessus des yeux et à la base des oreilles, et se perd sur les côtés du cou. Les prémolaires sont au nombre de $\frac{3}{3}$.

G. vittatus (= G. allamandi), répandu du Mexique méridional au Brésil et au Pérou, et *G. cuja (Grisonella cuja)*, des régions centrales et méridionales de l'Amérique du Sud, vivent dans les forêts ou même en terrain découvert; ils se réfugient habituellement dans des tanières d'autres Animaux, comme celles des viscaches. De mœurs grégaires et carnivores, ce sont d'excellents grimpeurs et nageurs. Chaque portée compte de 2 à 4 petits.

Le lyncodonte de Patagonie *(Lyncodon patagonicus)*, espèce typique des pampas de l'Argentine et d'une partie du Chili, est long de 30 à 55 cm, porte une queue de 6 à 9 cm et ressemble aux grisons, excepté son front, lequel est blanc. Il est caractérisé par Pm $\frac{2}{2}$. Sa biologie est encore mal connue.

Parmi les trois espèces de zorilles africains, le zorille du Cap *(Ictonyx striatus = Zorilla capensis)* habite presque toute l'Afrique au sud du Sahara, sauf la majeure partie du bassin du Congo. De taille moyenne (jusqu'à 40 cm), il a un tronc long et massif, une tête large au museau allongé. Sa livrée, typique, est noire avec des reflets brillants et de larges bandes longitudinales blanches. Sa queue, très fournie, est plus ou moins blanche. Ces zorilles sont nocturnes, solitaires, terrestres, et un peu fouisseurs. Excités, ils rejettent par l'anus un liquide d'odeur intense, moins fétide toutefois que celui des moufettes d'Amérique. Carnivores, ils mangent aussi des œufs. Leur denture a pour formule :

$$\left(\mathrm{I}\,\frac{3}{3};\ \mathrm{C}\,\frac{1}{1};\ \mathrm{Pm}\,\frac{3}{3};\ \mathrm{M}\,\frac{1}{2}\right) \times 2 = 34.$$

Le zorille du Sahara *(Poecilictis lybica)*, très semblable au précédent, plus petit (25 cm), habite l'Afrique du Nord, jusqu'au Soudan et au Nigeria; le zorille à nuque blanche *(Poecilogale albinucha)*, d'Afrique centrale et du Sud, présente une livrée analogue, avec un poil court et la partie supérieure de la tête blanche; il est surtout terrestre et creuse des terriers.

Le dernier genre est *Gulo*, avec une seule espèce, le glouton *(G. gulo)*, qui vit dans la taïga et dans la toundra du nord de l'Eurasie et de l'Amérique du Nord. C'est le plus gros des Mustélidés terrestres; il a 70 à 87 cm de long, avec 20 cm de queue, une hauteur au garrot de 40 à 45 cm, et un poids de 27 kg; les femelles sont plus petites. La tête, grosse, large en arrière, se termine par un museau assez long, bien proportionné; le tronc est massif; les pattes, fortes, sont armées d'ongles longs, très solides et recourbés; la queue est brève. La fourrure, touffue, est souvent composée de longs poils, avec une bourre douce; elle est de couleur brune plus ou moins grisâtre et noirâtre, avec une tache claire sur le crâne.

C. Bevilacqua

▲ *En haut,* **Gulo gulo,** *le glouton, est le plus gros Mustélidé terrestre. Il s'attaque à de gros Animaux et accomplit dans la toundra des migrations saisonnières, notamment pour chasser les rennes. En bas,* **Mellivora capensis,** *le ratel africain, fort gourmand d'abeilles, dévaste leurs nids en « association » avec les Oiseaux indicateurs.*

L'espèce a 38 dents, avec I $\frac{3}{3}$ et Pm $\frac{4}{4}$. Le glouton est solitaire et territorial. Bien qu'il s'agisse d'une espèce terrestre, il grimpe habilement. Il s'attaque à de gros Animaux : des rennes, des chevreuils, des jeunes élans, des chevrotains, des daims, etc., mais se contente souvent de petites proies. Il accomplit dans la toundra des migrations saisonnières, notamment pour chasser des rennes. Les mises bas ont lieu de février à mai et comptent 2 ou 3 petits (jusqu'à 5) ; il y a nidation différée ; l'allaitement dure 8 à 10 mois, et les petits restent avec la mère pendant 2 ans.

La sous-famille des *Mellivorinés* comprend une seule espèce : le ratel africain *(Mellivora capensis)*. Rappelant quelque peu le blaireau, le ratel mesure jusqu'à 77 cm de long, avec 20 à 30 cm de queue. Sa fourrure est très rude, son poil assez long ; il présente une livrée caractéristique. Ses pattes, robustes et fortes, sont assez courtes, avec des ongles puissants et arqués. Les yeux sont petits. La formule dentaire est : $\left(I\frac{3}{3}; C\frac{1}{1}; Pm\frac{3}{3}; M\frac{1}{1}\right) \times 2 = 32$. Le ratel vit dans la plus grande partie de l'Afrique, ainsi que dans d'importantes zones de l'Asie, de l'Asie Mineure à l'Inde. Surtout terrestre, habile fouisseur, il fréquente toutes sortes de milieux. Aussi diurne que nocturne, il se nourrit des proies les plus variées et s'attaque à des Animaux de grande taille, tels que les moutons. Fort gourmand d'abeilles, et, en général, de tous les Hyménoptères sociaux produisant du miel, il dévaste leurs nids en « association » avec les Oiseaux indicateurs *(Indicator indicator)* ; ceux-ci, qui se nourrissent aussi de couvain d'abeilles, font entendre un cri caractéristique lorsqu'ils aperçoivent un Mammifère, signalant ainsi à ce dernier la ruche. Les femelles possèdent 2 paires de mamelles, inguinales. La gestation est de 6 mois, et il y a 2 petits par portée.

La sous-famille des *Mélinés*, eurasiatique et nord-américaine, comprend les blaireaux au sens large, qui appartiennent à six genres : *Meles, Arctonyx, Mydaus, Suillotaxus, Taxidea, Melogale*, soit, au total, huit espèces. Ils sont assez massifs ; leur queue est courte ; leurs pattes, courtes et robustes, semi-plantigrades ou plantigrades, sont armées de robustes griffes fouisseuses. Leur fourrure est grossière. Ces Animaux nocturnes se réfugient dans des terriers qu'ils creusent eux-mêmes. Ils sont omnivores (la couronne de la molaire supérieure est large).

Le blaireau commun *(Meles meles)*, unique espèce du genre, est le type du groupe. Haut de 30 cm au garrot, long de 60 à 70 cm, portant une queue de 15 à 20 cm, il pèse de 10 à 17 kg (parfois plus de 20 kg et, exceptionnellement, jusqu'à 27 kg). Sa tête est aplatie et pointue ; ses yeux ont une pupille ronde ; ses oreilles, petites et rondes, émergent de la pelisse. Sa fourrure est rude, plus rare aux parties inférieures et plus longue sur les flancs. La robe est noir grisâtre, avec du blanc sale mélangé sur le dos, et noir plus clair sur les flancs ; la tête est claire, avec deux larges bandes noires qui partent peu après les narines, s'étendant en arrière à travers la région des yeux et des oreilles, jusqu'aux côtés du cou ; la queue est blanche vers la pointe. La formule dentaire est : $\left(I\frac{3}{3}; C\frac{1}{1}; Pm\frac{4}{4}; M\frac{1}{2}\right) \times 2 = 38$.

Le blaireau émet des grognements et des souffles, et hurle quand il est irrité. Typiquement omnivore, il chasse les Animaux les plus divers : Mammifères de petite et moyenne taille, Vers, Insectes, Reptiles ou Amphibiens, et se nourrit aussi de fruits de toutes sortes, de racines, de tubercules, etc., ainsi que de plantes cultivées, comme le maïs. Il fréquente les vallées, les bois, les buissons, les endroits pierreux, évitant les zones de cultures intenses. Principalement nocturne, il vit solitairement ou par groupes familiaux. Il se creuse un terrier à galeries, à cheminées d'aération et à plusieurs sorties, qui comprend une chambre principale tapissée de feuilles et de foin ; c'est là qu'il passe son sommeil hivernal, plus long et plus profond aux hautes altitudes. Il lui arrive de partager sa tanière avec le renard. Il est doué d'un odorat très fin. Les femelles ont 3 paires de mamelles. La période de reproduction s'étend d'avril à août. Les petits, au nombre de 4 ou 5 par portée normale, sont mis au monde dans le terrier, de janvier à avril, après 7 à 8 mois de gestation (il y a nidation différée) ; ils sont soignés par leur mère durant 5 à 6 mois. La longévité de l'espèce est d'environ 15 ans. La distribution du blaireau couvre l'Europe et l'Asie, jusqu'au Tibet, à la Birmanie septentrionale et à la Chine méridionale ; il est absent des îles méditerranéennes.

Le blaireau à groin *(Arctonyx collaris)*, qui ressemble au précédent, mais a une gorge blanche, vit en Chine, dans le nord-est de l'Inde, dans le Sud-Est asiatique et à Sumatra, aussi bien en plaine qu'en montagne.

Le blaireau malais, ou télédu *(Mydaus javanensis)*, est propre à Sumatra, Java et Bornéo, ainsi qu'aux îles Natuna et Bunguran. Plus petit que les précédents (50 cm de long au maximum), il a le museau plus allongé et la queue plus courte (6 cm) ; sa robe est uniformément brune, avec une bande dorsale blanche.

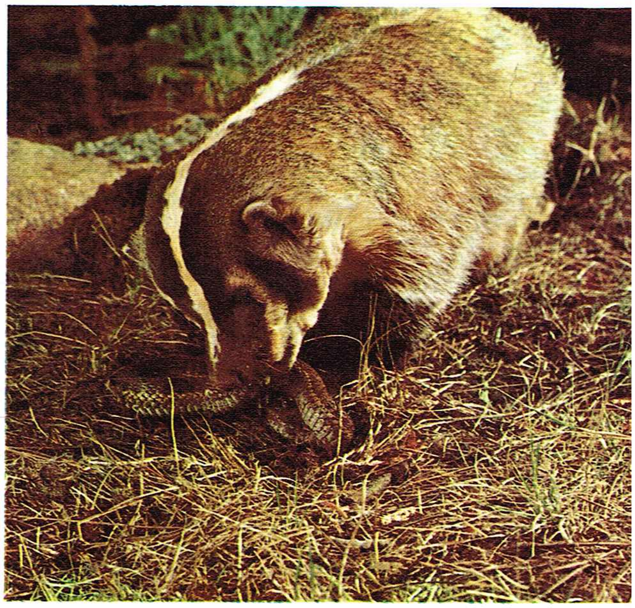

▶ **Taxidea taxus**, *le blaireau américain, est un Animal solitaire, plus carnivore que les autres espèces : on le voit ici dévorant un serpent.*

E.P.S.

▼ **Meles meles**, *le blaireau commun, est omnivore ; il émet des grognements, des souffles et même des hurlements quand il est irrité.*

Tiofoto

Suillotaxus marchei, des îles Palawan et Calamian, au nord et à l'est de Bornéo, proche du *Mydaus javanensis,* en diffère par l'absence de bande blanche dorsale, sa denture plus robuste, et sa queue encore plus courte (2 à 4 cm). Cette espèce est encore mal connue.

Taxidea ne compte qu'une seule espèce, *T. taxus,* ou blaireau américain, répandu du Canada méridional au Mexique central. Long jusqu'à 70 cm, avec une queue de 10 à 15 cm, il a les parties supérieures grisâtres, avec une bande blanche, qui s'étend du nez aux épaules. Son museau et ses joues sont ornés de larges taches noires; son menton, sa gorge et la région médiane de son ventre sont blanchâtres; enfin, le reste de ses parties inférieures est de couleur chamois et ses pattes sont noires. Sa fourrure, très touffue, est constituée par un long poil sur les flancs, où elle forme comme un manteau. Cet Animal solitaire est plus carnivore que les autres espèces. Sa formule dentaire est : $\left(I\frac{3}{3}; C\frac{1}{1}; Pm\frac{3}{3}; M\frac{1}{2}\right) \times 2 = 34$.

Melogale (= Helictis) compte trois espèces, d'Asie méridionale, dont la morphologie rappelle plutôt celle du furet : elles sont appelées localement blaireaux-furets. Longs de 30 à 40 cm, avec une queue de 15 à 23 cm de long, ces Mustélidés ont un museau plus allongé et plus étroit que les autres, ainsi qu'un large masque noir, caractéristique, contrastant avec les autres parties de la face, blanchâtres ou jaunâtres. Les blaireaux-furets vivent aussi bien dans les forêts que dans les zones de plaine à végétation herbacée. Ce sont des fouisseurs et des grimpeurs. Ces Animaux sont souvent protégés par l'homme, qui les utilise comme des auxiliaires pour la destruction des Insectes. La formule dentaire de ces omnivores est : $\left(I\frac{3}{3}; C\frac{1}{1}; Pm\frac{4}{4}; M\frac{1}{2}\right) \times 2 = 38$.

Les trois espèces sont : *Melogale personata,* du Népal, de l'Assam, de la Birmanie, et de l'Indochine; *M. moschata,* de Chine, de Formose, de l'Assam, de la Birmanie et de l'Indochine; *M. orientalis,* de Java, et de Bornéo.

La sous-famille des *Méphitinés,* exclusivement américaine, comprend les moufettes, ou skunks, répartis en trois genres : *Mephitis, Spilogale* et *Conepatus,* soit au total, onze espèces. Ce sont des Mustélidés robustes, à longue queue velue et semi-plantigrades. Leurs glandes anales, très développées, peuvent projeter leur sécrétion à distance avec précision, éventuellement contre un agresseur. Leur fourrure, très caractéristique, est noire avec des bandes ou des taches blanches.

Mephitis compte deux espèces. La moufette commune *(M. mephitis)* habite du Canada méridional au Mexique septentrional. Atteignant 45 cm de long, avec une queue de 20 cm, elle a une livrée noire, avec 2 bandes blanches de la nuque à la base de la queue.

M. macroura vit du sud-ouest des États-Unis jusqu'au Nicaragua. Un peu plus petit que le précédent, il possède une queue plus longue (40 cm) et une livrée différente, qui comporte une phase à dos clair et une phase à dos noirâtre. Les moufettes habitent les régions forestières, les prairies et mêmes les zones arides; surtout nocturnes, elles sont omnivores, avec une prédominance carnivore. Leur formule dentaire est : $\left(I\frac{3}{3}; C\frac{1}{1}; Pm\frac{3}{3}; M\frac{1}{2}\right) \times 2 = 34$. Elles sont grégaires. Pendant l'hiver, dans les régions septentrionales, elles passent par une longue période de sommeil.

Spilogale comprend les moufettes plus petites mais de même formule dentaire. On les distingue des *Mephitis* par leur robe ornée de bandes et de taches blanches. Leur queue est noire avec la pointe blanche. Il en existe deux espèces : *Spilogale putorius,* ou moufette tachetée, qui compte de nombreuses races géographiques, répandues de la Colombie britannique et jusqu'au Costa Rica; *S. pygmaea,* des zones côtières du Mexique, dont on ne connaît que quelques spécimens, et qui semble être une variété de l'espèce précédente. *S. putorius,* quand il est excité, a pour curieuse habitude de marcher sur les mains, menaçant son ennemi, avant de l'asperger du contenu fétide de ses glandes anales. Les femelles portent de 3 à 5 paires de mamelles. Il y a 4 ou 5 petits par portée.

Conepatus compte sept espèces, qui habitent du sud-ouest des États-Unis au détroit de Magellan. Longues de 30 à 50 cm, avec une queue de 15 à 40 cm, elles ont une fourrure plus rude et grossière que les autres Méphitinés; leur museau est nu. Elles possèdent 32 dents, avec Pm $\frac{2}{3}$. Les femelles portent seulement 3 paires de mamelles. Elles se nourrissent de toutes sortes d'Animaux de petite et moyenne taille, et même de serpents venimeux, dont le venin n'est que partiellement toxique pour elles. La durée de leur gestation est d'environ 42 jours, et les femelles ont de 2 à 5 petits par portée.

C. mesoleucus, assez semblable au ratel par la robe, excepté sa longue queue blanche et touffue, vit dans le sud-ouest des États-Unis, au Mexique et dans une partie de l'Amérique centrale. *C. leuconotus* est propre aux régions côtières du Mexique oriental; *C. semistriatus* est répandu du Mexique méridional au Brésil, à la Colombie et au Pérou; *C. castaneus* peuple l'Argentine; *C. chinga (= C. suffocans)* habite le Brésil méridional, l'Uruguay, l'Argentine et le Chili; *C. humboldtii* vit en Patagonie et dans le sud du Chili; enfin, *C. rex* est propre au grand altiplano andin.

E.P.S.

E.P.S.

▲ ***En haut,*** **Mephitis mephitis,** ***la moufette commune, à fourrure caractéristique, habite du Canada méridional au Mexique septentrional. En bas,*** **Mephitis macroura,** ***le skunk à capuchon, un peu plus petit que l'espèce précédente, vit du sud-ouest des États-Unis jusqu'au Nicaragua.***

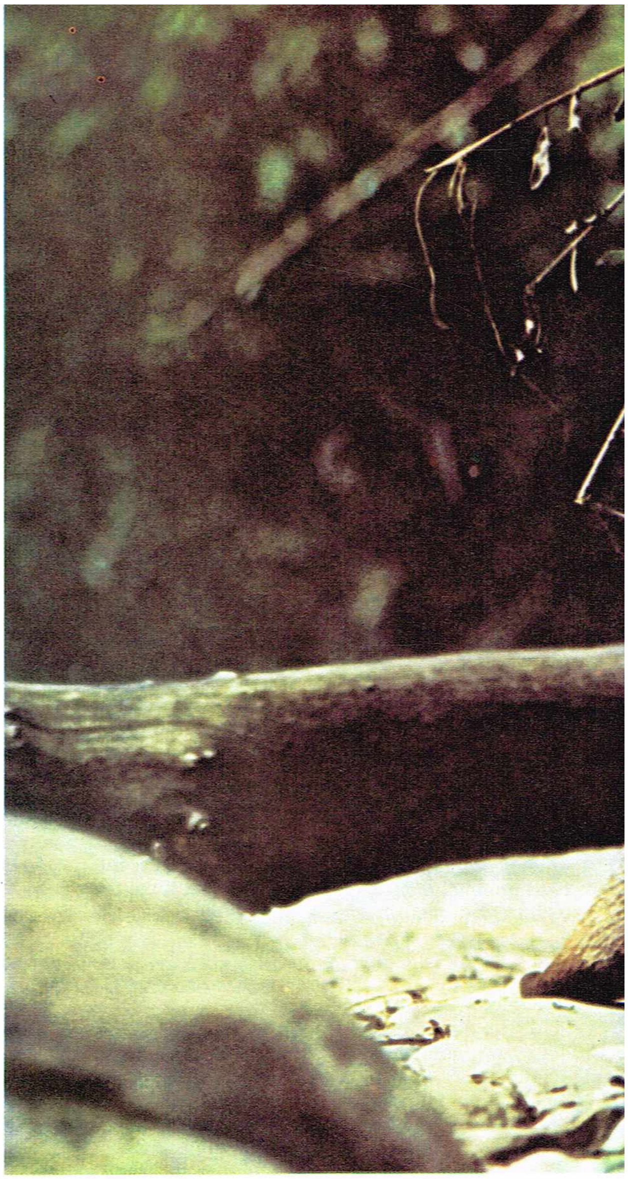

Ostman - J. R. Simon

▲▼ *La loutre d'Europe* (Lutra lutra), *dont on voit deux exemplaires ici, vit le long des cours d'eau et, comme toutes les autres espèces du groupe, est un plongeur et un nageur habile. De tempérament doux et sociable, les loutres sont des Animaux fort joueurs.*

C. Bevilacqua

La sous-famille des *Lutrinés* comprend les loutres, Mustélidés conformés en vue de la vie semi-aquatique : leur corps est allongé, leurs pattes courtes ont les extrémités palmées, et leur queue, très développée, joue un rôle important dans la nage. Leur fourrure est très serrée. Les Lutrinés couvrent toute l'aire des Carnivores, excepté Madagascar et l'Australie, et comptent six genres *(Lutra, Pteronura, Amblonyx, Aonyx, Paraonyx* et *Enhydra)* et une vingtaine d'espèces.

Lutra comprend les loutres typiques, dont la formule dentaire est : $\left(I\,\frac{3}{3};\ C\,\frac{1}{1};\ Pm\,\frac{4}{3};\ M\,\frac{1}{2}\right)\times 2 = 36$. Longues de 55 à 80 cm, avec une queue de 30 à 50 cm, elles pèsent de 4,5 à 14 kg. Leur fourrure est généralement constituée d'un poil court et serré, au-dessus brunâtre et au-dessous plus clair ; leur tête est large et leur museau pointu ; leur cou est court et large ; leur tronc est cylindrique ; leur queue, très épaisse à la base, devenant plus fine à l'extrémité, est très musclée et peut effectuer d'amples mouvements de flexion. Leurs pattes sont courtes, avec des doigts largement palmés et pourvus de griffes bien développées. Leurs oreilles, petites, et leurs narines peuvent être fermées quand l'Animal est dans l'eau. Les femelles possèdent trois paires de mamelles.

Les loutres sont d'excellentes nageuses et plongent remarquablement. Diurnes et nocturnes, elles chassent isolément ou par couples, et se nourrissent surtout d'Animaux aquatiques : Poissons, écrevisses, grenouilles, tortues, etc., s'attaquant aussi à des Mammifères terrestres, ainsi qu'à des Oiseaux. De tempérament doux et sociable, ce sont des Animaux fort joueurs, et les mâles ne se combattent qu'à la période des amours. La gestation dure 2 mois chez la loutre d'Europe, mais peut atteindre de 9,5 à 12,5 mois (nidation différée) chez la loutre du Canada. Il y a de 1 à 5 petits par portée, lesquels naissent dans une tanière et sont allaités pendant 4 mois. La famille reste unie huit mois. Certaines loutres ont vécu en captivité jusqu'à 19 ans.

Jacques Six

◀ **Amblonyx cinerea,** ***la loutre naine, douée d'un sens tactile très fin, se nourrit presque exclusivement de Mollusques et de Crustacés dulçaquicoles.***

Lutra, qui couvre presque toute l'aire de la sous-famille, comprend douze espèces, qui peuplent les rivières, les lacs et les eaux côtières. La loutre d'Europe *(L. lutra)*, longue de 60 à 85 cm, avec une queue de 35 à 55 cm, pèse de 6 à 15 kg. Elle est brun foncé à reflets métalliques, avec le sous-poil gris clair, les parties inférieures de couleur crème plus foncé en hiver qu'en été. Surtout nocturne, elle est difficile à observer. Elle court à terre en ondulant et en rampant. Son nombre diminue, et elle a même disparu dans certaines régions de France. Elle est répandue dans une grande partie de l'Europe et de l'Asie, y compris l'Indo-Malaisie et la Palestine, ainsi que le Maghreb.

La loutre du Canada *(L. canadensis)*, longue de 90 cm à 1,30 m (y compris la queue), est très répandue en Amérique du Nord (sauf l'extrême nord-ouest), depuis le cercle polaire arctique jusqu'à 25° de latitude nord.

Les autres espèces sont : *L. sumatrana,* de l'Assam, du Siam, de la péninsule malaise, de Sumatra, et du nord de Bornéo ; *L. perspicillata,* de la région du Tigre à la Chine méridionale et aux îles de la Sonde ; *L. maculicollis* loutre à cou tacheté, d'Afrique, au sud de 10° de latitude nord ; *L. annectens*, de l'Amérique centrale et d'une partie de l'Amérique du Sud ; *L. enudris,* de Trinidad, du Venezuela, des Guyanes et de l'est du Brésil ; *L. felina,* des côtes occidentales d'Amérique du Sud, de l'Équateur au sud du Chili ; *L. incarum,* du Pérou et d'une partie de la Bolivie ; *L. mesopetes,* du Costa Rica ; *L. platensis,* de l'Uruguay et des zones limitrophes de l'Argentine et du Brésil ; *L. provocax,* du Chili méridional et des régions avoisinantes de l'Argentine.

Pteronura compte une seule espèce : la loutre géante du Brésil, ou arirai *(P. brasiliensis),* qui mesure 2,20 m de long (dont 70 cm pour la queue) et pèse jusqu'à 34 kg. De livrée brune, à menton blanchâtre ou crème, elle a la queue très aplatie et pourvue des deux côtés d'une carène bien distincte ; ses extrémités largement palmées portent des doigts longs, armés de robustes griffes. Diurne et grégaire, habitant les eaux douces du Venezuela, des Guyanes, du grand système fluvial amazonien du Rio Parana et du Rio Uruguay, cette loutre aime les cours d'eau assez lents, se réfugiant dans les cavités naturelles des rives entre les rochers ou les racines des gros arbres. Elle se nourrit de Poissons (qu'elle emporte à terre pour les consommer), de Mammifères et d'Oiseaux. Elle peut tuer ses proies à coups de queue. Les femelles mettent bas 1 ou 2 petits par portée.

La loutre naine *(Amblonyx cinerea),* unique espèce du genre, habite l'Asie du Sud-Est, une partie de l'Inde, la Chine méridionale et l'archipel malais. De taille modeste (au maximum 60 cm de long, avec une queue de 30 cm), elle porte des griffes très réduites et presque dressées ; la palmure des pattes s'étend seulement jusqu'à la hauteur des coussinets digitaux. La première prémolaire supérieure est réduite ou absente et les molaires sont très développées, ce qui est en relation avec leur régime, presque uniquement composé de Mollusques et de Crustacés dulçaquicoles. La couleur de la fourrure varie du brun-gris pâle au brun foncé. Par suite de la réduction des griffes, les doigts ont acquis un sens tactile très fin, lequel permet à l'Animal de localiser remarquablement ses proies.

Aonyx capensis, ou loutre à bajoues blanches, est de grande taille : elle est longue de 1 m, porte une queue de 55 cm, et pèse jusqu'à 23 kg ; elle habite du Libéria à l'Éthiopie et du bassin du Congo à l'Afrique du Sud, sur une aire très discontinue. Elle aime les eaux à cours lent. Ses mains sont peu palmées et dépourvues d'ongles ; ses pieds sont palmés jusqu'à la phalange terminale des doigts, également dépourvus de griffes, sauf les troisième et quatrième doigts, armés d'ongles rudimentaires. Elle vit solitairement ou par groupes familiaux et se nourrit essentiellement de Mollusques et de Crustacés (ce qui est en relation avec la robustesse de ses molaires) ; elle n'entre donc pas en concurrence biologique avec les différentes loutres africaines, qui, elles, se nourrissent

surtout de Poissons. C'est un Animal robuste, se défendant habilement, dont l'ennemi principal est le crocodile.

Paraonyx, très semblable au genre précédent, comprend des loutres de taille inférieure (80 cm à 1 m de long). Les doigts de leurs mains sont dépourvus de griffes et de palmure; les doigts de leurs pieds possèdent des ongles, rudimentaires, seulement du deuxième au quatrième doigt, et sont palmés jusqu'à la base de la deuxième phalange. La denture est plus faible que celle des *Aonyx*, leur nourriture étant constituée de proies assez molles (Poissons, grenouilles, Mammifères terrestres, œufs, etc.). Principalement terrestre, ce genre compte trois espèces : *P. congica*, du Zaïre, *P. microdon* du Cameroun et du Nigeria et *P. philippsi*, de l'Ouganda.

Enfin, *Enhydra* compte une seule espèce, *E. lutris*, la loutre de mer, unique Carnivore Fissipède marin. Elle fréquente les eaux côtières, où la profondeur va généralement de 3 à 20 m, sans s'aventurer trop au large. Elle mesure jusqu'à 1,20 m de long, possède une queue de 25 à 37 cm, et peut peser 37 kg. La couleur de sa robe varie du noir au brun foncé, excepté la tête, la gorge et la poitrine, lesquelles sont grisâtres ou crème. Sa tête est large et obtuse; son cou est court et épais; ses oreilles sont courtes et pointues; ses pattes, sa queue ainsi que ses mains sont courtes; ses pieds sont nettement palmés. Sa fourrure est très belle; c'est pourquoi on l'a chassée à outrance, risquant de la faire disparaître. Sa formule dentaire est : $\left(I\frac{3}{2}; C\frac{1}{1}; Pm\frac{3}{3}; M\frac{1}{2}\right) \times 2 = 32$. Les dents maxillaires ont une couronne large, avec des tubercules obtus, sans trace de la structure sectorielle carnivore : ce caractère est en relation avec le régime, composé d'Animaux benthiques capturés sur les hauts fonds (Mollusques, holoturies, oursins, crustacés, etc.).

La loutre de mer vient rarement à terre; elle nage sur le dos, grâce à de petits mouvements de la queue, et dort en pleine mer, souvent dans des bancs d'algues superficiels. La gestation dure de 8 à 9 mois, et les femelles mettent au monde un seul petit, déjà très développé. Autrefois répandue sur presque toutes les côtes de l'océan Pacifique septentrional, des îles Kouriles au Kamtchatka, à l'Alaska, et à la Californie méridionale, cette espèce est actuellement réduite à des populations résiduelles, heureusement protégées, près de la Californie, de l'Alaska occidental ainsi que des îles Comander et Kouriles.

Super-famille des Féloïdés

Les Féloïdés *(Feloidea)*, ou Herpestoïdés, présentent des spécialisations particulières, surtout en ce qui concerne la morphologie dentaire. Leurs caractères sont : des bulles tympaniques cloisonnées à la formation desquelles participe l'os endotympanique, ainsi que le canal carotidien, court ou absent. Leurs pattes sont digitigrades ou semi-plantigrades. L'os pénien, de taille variable, est parfois réduit ou absent. Les Féloïdés comprennent trois familles : les Viverridés, les Hyénidés et les Félidés.

Les **Viverridés** *(Viverridae)* sont des Carnivores de taille petite ou moyenne. Leur crâne, bas et allongé, est généralement pourvu d'un canal alisphénoïdien.

Leur formule dentaire est typique :

$$\left(I\frac{3}{3}, C\frac{1}{1}; Pm\frac{4}{4}; M\frac{2}{2}\right) \times 2 = 40,$$

avec quelquefois Pm $\frac{3}{3}$ et M $\frac{1}{1}$; les carnassières sont bien développées. Ces Carnivores de l'Ancien Monde ont de 20 cm *(Helogale parvula)* à près de 1 m de long *(Arctictis binturong)*. La fourrure présente souvent des taches ou des bandes, particulièrement sur la queue, à laquelle celles-ci confèrent un aspect annelé. Le corps est élancé, souple et fin, les pattes moyennes ou courtes et la queue longue. La tête, allongée, se termine par un museau très pointu. Les mains et les pieds sont penta- ou tétradactyles, et possèdent des griffes semi-rétractiles ou rétractiles. Les femelles ont deux ou trois paires de mamelles situées sur l'abdomen. Chez les mâles, l'os pénien est présent.

Chez de nombreuses espèces, les glandes anales sont très développées et sécrètent des substances ayant une odeur forte, utilisées en parfumerie. Une formation particulière à cette famille est la poche du parfum, (poche pré-scrotale ou périnéale), ensemble glandulaire qui existe chez presque tous les genres, à l'exception de *Fossa, Eupleres, Prionodon, Poiana* et *Cryptoprocta*. C'est une poche très volumineuse et profonde, située dans le périnée ou tout au moins dans la région génitale; elle dérive d'une invagination cutanée sacciforme, communiquant avec l'extérieur par une fente longitudinale, longue de 1 ou 2 cm, ou guère plus. A l'intérieur, la peau conserve sa pilosité. La sécrétion des glandes de cette poche est caractérisée par un parfum intense, une couleur blanche et un aspect butyreux (chez *Civettictis* et *Viverra* : c'est le viverreum typique). Les Viverridés sont essentiellement carnivores. Leurs mœurs sont très variées. Certains genres comme *Cynictis, Paracynictis* et *Suricata* sont grégaires et vivent en colonies dans des refuges souterrains, ce qui est exceptionnel chez les Carnivores.

La famille compte trente-sept genres et environ soixante-quinze espèces, qui habitent le sud-ouest de l'Europe, l'Afrique, Madagascar, et l'Asie (y compris l'Indonésie et les Philippines). Les Viverridés constituent l'unique famille de Carnivores de Madagascar et la grande masse des Carnivores (de petite ou de moyenne taille) des régions tropicales d'Afrique et d'Asie méridionale. Leur introduction en différentes parties du monde a été accompagnée de conséquences désastreuses, particulièrement aux Antilles, où les mangoustes ont contribué de façon déterminante à la raréfaction et à la disparition de nombreuses espèces de la faune indigène.

Selon Simpson, la famille est divisée en six sous-familles : les Viverrinés, les Paradoxurinés, les Hémigalinés, les Galidiinés, les Herpestinés et les Cryptoproctinés.

La sous-famille des *Viverrinés* est divisée en deux tribus : les Viverrinés et les Prionodontinés.

La tribu des *Viverrinés* comprend des Viverridés typiques, terrestres, non fouisseurs et généralement arboricoles. Leurs pattes sont armées de griffes courtes, pointues et semi-rétractiles. Ils ont une formule dentaire typique. Leur système glandulaire odorifique, surtout périnéal, est très développé. Il existe six genres, africains et asiatiques.

Le genre *Poiana* est représenté par l'unique espèce *P. richardsoni*, ou linsang d'Afrique. Cette espèce très rare habite l'Afrique occidentale (Sierra Leone, Libéria, Cameroun, Zaïre) et l'île de Fernando Póo. Longue de 33 cm, avec une queue de 38 cm, elle possède une fourrure touffue et très douce. Sa livrée est jaunâtre ou gris-brun clair, plus ou moins teintée de rose, avec de petites taches noires; sa queue présente de larges anneaux foncés alternant avec de larges anneaux clairs. Cette espèce diffère des linsangs asiatiques par des taches plus petites, lesquelles ne tendent pas à former des bandes ou des lignes, sauf sur la tête et les épaules, ainsi que par une étroite bande nue à la plante des pieds.

Le linsang d'Afrique, omnivore et nocturne, vit dans les forêts. Il construit, à plus de 2 m au-dessus du sol et à l'aide de matières végétales vertes, un nid rond; celui-ci est utilisé plusieurs jours simultanément par quelques individus, puis abandonné, les occupants en fabriquant un nouveau. Les femelles ont 2 portées par an, de 2 ou 3 petits chacune.

Le genre *Genetta* compte sept espèces, qui habitent l'Afrique, sauf le Sahara; seule la genette d'Europe, *G. genetta*, habite aussi l'Arabie, l'Asie Mineure et le sud-ouest de l'Europe. Les genettes sont caractérisées par un corps très allongé et un museau long et pointu. Leur queue, très longue (40 à 50 cm), est fine à l'extrémité. Les genettes mesurent de 40 à 60 cm de long et pèsent de 1 à 2 kg. Leur robe, claire, est ornée de taches foncées plus ou moins nettes; ces dernières sont souvent disposées en séries longitudinales et forment sur la ligne du dos une bande continue foncée ou noirâtre, à poils parfois essentiellement érectiles. Leur queue est marquée d'anneaux clairs et foncés. Leur museau est généralement foncé, la lèvre supérieure couverte de poils blanchâtres, et le dessous des yeux orné d'une tache blanche. Les autres caractères marquants sont : les oreilles arrondies et proéminentes, les pattes plutôt brèves et toutes pentadactyles, la denture composée de 40 dents, les paumes des mains et les plantes des pieds velues (sauf une ligne longitudinale nue) et, enfin, les deux paires de mamelles abdominales des femelles.

Les genettes fréquentent les forêts, les zones buissonneuses denses et les plaines herbeuses. Elles restent le jour dans un arbre creux ou dans un refuge parmi les

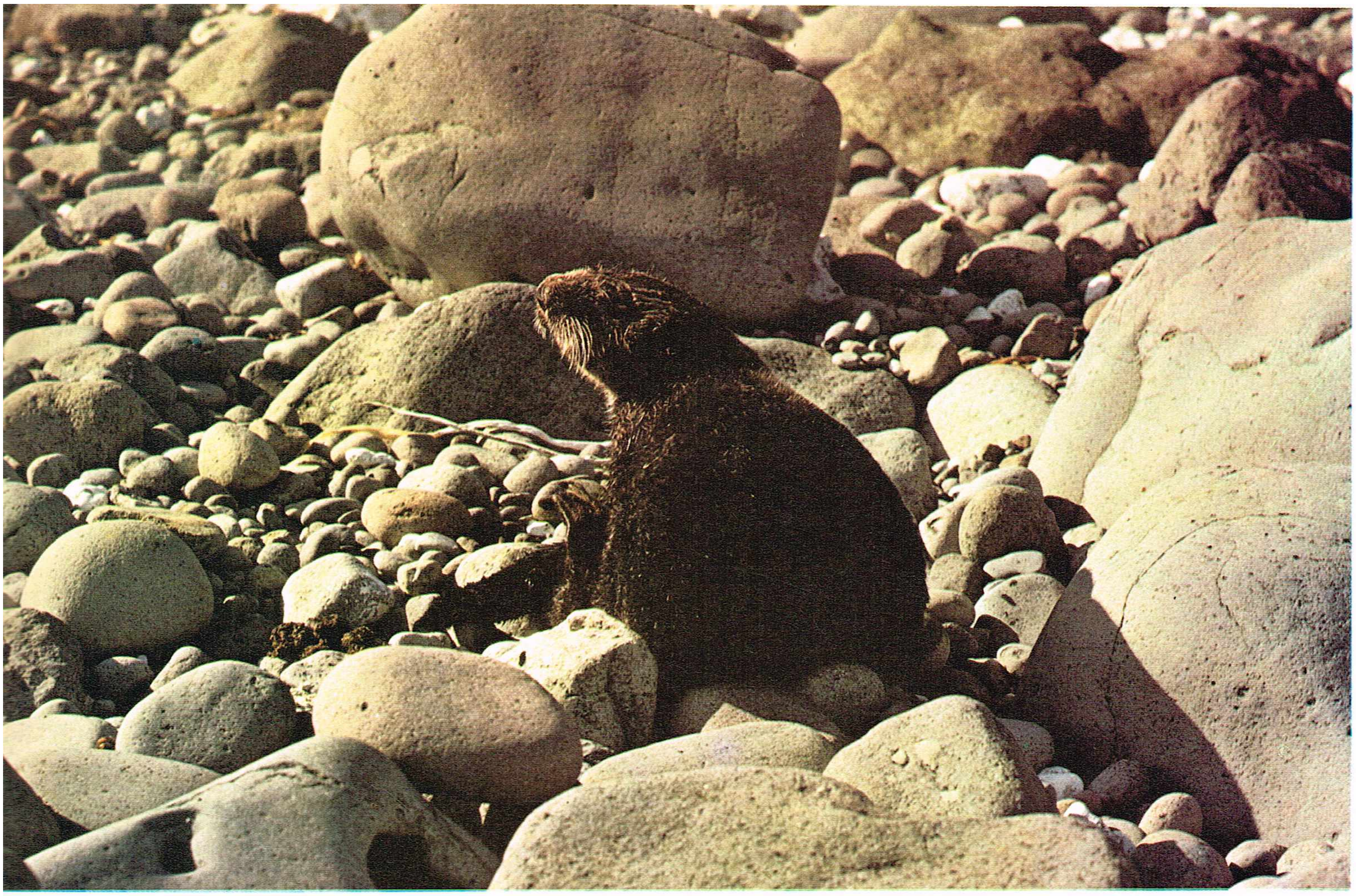

S. Mc Cutcheon

rochers, et sortent, généralement la nuit, seules ou par couples. Leur régime est carnivore : elles chassent beaucoup au sol, ainsi que sur les arbres, où elles grimpent très bien. Elles se nourrissent de Rongeurs et d'autres petits Mammifères, d'Oiseaux, de Reptiles et d'Insectes. Les femelles ont 2 portées par an, de 2 ou 3 petits chacune.

La systématique du genre *Genetta* est très complexe ; nous considérerons ici sept espèces (avec de nombreuses sous-espèces ou formes géographiques).

G. genetta, la genette d'Europe, ou commune, qui comprend de nombreuses sous-espèces, habite la France, la péninsule Ibérique, l'Asie Mineure, l'Arabie et de nombreuses zones d'Afrique. Son aire tend à s'étendre en Europe : on l'a signalée en Belgique, en diverses localités d'Allemagne et en Suisse.

Son corps atteint parfois 58 cm de long et sa queue un peu moins de 50 cm ; elle mesure environ 20 cm au garrot. Sa fourrure, formée de poils assez longs, est jaune grisâtre, avec 4 ou 5 séries de taches brun noirâtre sur les flancs ; son cou porte 4 bandes noires et sa gorge est grise. La genette vit dans les zones collinéennes et les montagnes, le plus souvent parmi les éboulis et dans les endroits arides où la végétation n'est pas abondante ; on peut toutefois la rencontrer aussi dans les lieux bien irrigués. Son corps est souple et sa conformation lui permet de s'aplatir au sol ou de s'introduire dans d'étroites fentes et des petits trous, où elle reste longtemps immobile ; lorsqu'une proie passe à proximité, elle bondit de façon fulgurante. Elle est assez facile à apprivoiser.

Les autres espèces sont toutes confinées à l'Afrique, au sud du Sahara. *G. dongolana,* la genette dongolane, vit en Afrique orientale ; la sous-espèce *G. dongolana tedescoi,* à la fourrure très courte, fréquente les broussailles arides. *G. abyssinica,* la genette d'Éthiopie, habite l'Éthiopie, comme son nom l'indique. *G. tigrina,* la genette tigrine, d'Afrique centrale et du Sud, est assez commune, surtout dans les savanes. Sa queue présente 7 ou 8 anneaux et l'extrémité noire.

Les autres espèces sont : *G. servalina,* la genette servaline d'Afrique occidentale ; *G. rubiginosa,* la genette roussâtre d'Afrique du Sud ; *G. lehmani,* la genette de Lehmann, découverte récemment au Libéria. On connaît aussi *G. villiersi,* la genette de Villiers, qui habite du Sénégal à la Côte-d'Ivoire ; certains spécialistes considèrent que cette espèce forme un genre séparé, *Pseudogenetta :* en effet, les dessins de sa robe sont différents de ceux des genettes proprement dites : le dos est orné de 3 ou 4 bandes longitudinales formées par la réunion des taches de formes allongées ; les paumes des mains et les plantes des pieds présentent, entre les coussinets métacarpiens et digitaux, des espaces nus.

Viverricula indica, seule espèce de son genre, habite actuellement une aire s'étendant de l'Inde à la Chine méridionale et aussi à Sumatra, Java et Bali. Elle a été introduite à Socotora, aux Comores, dans les Philippines

▲ **Enhydra lutris,** *la loutre de mer, est l'unique Carnivore Fissipède marin.*

▼ *On observera (ci-dessous) le museau caractéristique de cette même espèce, pourvu de longues vibrisses.*

S. Mc Cutcheon

J. Six

et à Madagascar. De taille moyenne (50 à 60 cm), avec une queue de 40 cm, elle a un front étroit et des oreilles assez rapprochées. Les flancs portent des taches irrégulières, peu étendues; son dos présente de 6 à 8 bandes foncées et sa queue de 6 à 9 anneaux clairs alternant avec autant d'anneaux foncés. On distingue cette forme des espèces du genre *Viverra* par les caractères suivants : la taille plus petite, l'absence de crête dorsale formée de poils érectiles, la queue plus courte, enfin, le moindre développement des glandes odorifiques. Cette espèce est essentiellement carnivore et nécrophage, mais elle mange aussi des fruits et des racines.

Osbornictis piscivora, la civette aquatique du Congo, dont on ne connaît que très peu d'exemplaires, habite uniquement le Zaïre. Sa robe, non tachetée, est colorée de brun roussâtre sur le dessus et plus claire en dessous; ses joues et son espace interoculaire sont blancs; sa queue est noire. Elle mesure 50 cm de long. Partiellement aquatique, elle vit dans la grande forêt équatoriale, se nourrissant de Poissons et d'autres Animaux aquatiques. Sa biologie est fort mal connue.

Le genre *Viverra* comprend trois espèces, d'Asie méridionale (ce sont les civettes proprement dites) : *V. zibetha,* la civette asiatique, vit en Chine méridionale, au Népal, dans le Sud-Est asiatique et jusqu'à la péninsule malaise; *V. megaspila* habite une grande partie de la péninsule indienne et jusqu'à la péninsule malaise; *V. tangalunga* peuple l'Indonésie et les Philippines. Ces Animaux occupent une grande variété d'habitats. Leur longueur varie de 60 à 80 cm et leur queue de 30 à 50 cm.

V. zibetha, la plus grande espèce du genre (83 cm et 11 kg au maximum), possède une fourrure à longs poils, qui forme une sorte de crête sur la ligne médiane du dos; elle présente des taches noires serrées, sur fond grisâtre ou brun-fauve, avec quelques larges bandes blanches et noires, se détachant nettement sur les côtés du cou et de la gorge et formant comme des colliers (3 noirs et 2 blancs); ses extrémités sont noires; ses griffes sont rétractiles.

Les civettes asiatiques, solitaires et nocturnes, restent le plus souvent au fond de la forêt ou dans la végétation des prairies pendant le jour; mais elles ne craignent pas de s'approcher des villages. Essentiellement terrestres, grimpant de temps en temps aux arbres, elles se nourrissent de Vertébrés de petite taille, de Poissons *(V. zibetha),* d'Insectes et de Crustacés, ainsi que de fruits et de racines. Les femelles ont 2 ou 3 petits par portée, qu'elles abritent dans un nid. La longévité de ces espèces semble atteindre 15 ans. Leurs glandes anales produisent une sécrétion abondante nommée civette; cette substance est utilisée en parfumerie.

Le genre *Civettictis* ne comprend qu'une seule espèce, *C. civetta,* qui habite l'Afrique, du Sénégal à la Somalie et à l'Afrique du Sud, surtout dans les zones buissonneuses. Longue de 70 à 80 cm, avec une queue de 45 cm, elle présente des formes robustes. Son museau est très pointu et ses oreilles petites et légèrement pointues; son poil, long mais non touffu, est gris brunâtre, avec des taches et des bandes noires. De sa nuque à la base de sa queue s'étend une longue crinière noire, érectile. Ses extrémités sont pentadactyles et ses plantes et paumes sont velues. Nocturne, terricole, elle vit seule ou par couples; elle nage très bien; son régime est mixte. Les femelles ont normalement 2 portées par an, de 2 ou 3 petits chacune.

La tribu des *Prionodontinés* comprend pour seul genre *Prionodon,* avec deux espèces appelées toutes deux linsangs, caractérisées par des griffes rétractiles, par l'absence de glandes odorifiques péri-anales, et par la disparition de la deuxième molaire supérieure. Longs de 40 cm, ces Animaux ont une queue de 30 à 35 cm, et un long museau pointu; leur fourrure, douce et touffue, est formée de poils courts.

P. linsang, le linsang à bandes, possède une robe blanc grisâtre ou gris brunâtre, avec sur le dos 4 ou 5 bandes transversales, noirâtres, larges et irrégulières, et sur les côtés du cou 1 large bande, également noirâtre; ses flancs et ses pattes sont tachetés, et sa queue nettement annelée, avec des anneaux foncés plus larges que les anneaux clairs. Ce linsang vit dans l'archipel malais et en Indonésie.

P. pardicolor, le linsang tacheté, plus petit, présente de grosses taches noirâtres, formant sur le dessus des séries

plus ou moins nettes, longitudinales; sa queue porte de 8 à 10 anneaux foncés. Il vit au Népal, en Assam, en Birmanie, et en Indochine.

Les linsangs habitent les forêts denses et les jungles; excellents grimpeurs, ils chassent surtout sur les arbres. Ils sont diurnes. Les femelles ont 2 portées par an, de 2 ou 3 petits chacune.

La sous-famille des *Paradoxurinés* comprend trois tribus : les Nandiniinés, les Arctogalidiinés, et les Paradoxurinés proprement dits.

La tribu des *Nandiniinés* compte une seule espèce : *Nandinia binotata,* le nandinia, qui vit du Sénégal et du Soudan méridional jusqu'à l'Angola et la Rhodésie du Sud. Long de 57 cm, avec une queue de même longueur, il a une livrée foncée, discrètement tachetée, avec, de chaque côté des épaules, une tache jaunâtre ou blanchâtre très caractéristique. Les paumes et les plantes sont nues et finement sillonnées. Cet Animal aux mœurs nocturnes est terricole et arboricole; il se nourrit en grande partie de fruits, d'Oiseaux et de petits Mammifères. L'une de ses victimes est le potto. La gestation dure 64 jours. Il y a 2 portées annuelles, de 2 ou 3 petits chacune. Le nandinia s'adapte très bien à la vie auprès de l'homme.

La tribu des *Arctogalidiinés* compte une seule espèce, *Arctogalidia trivirgata,* propre à l'Asie du Sud-Est et l'Indonésie. Ce Féloïdé habite la forêt dense, mais fréquente aussi les palmeraies et les cocoteraies. Arboricole et nocturne, il se nourrit de fruits et d'Animaux arboricoles (écureuils). Long de 50 cm, avec une queue de plus de 65 cm, il n'a pas de livrée caractéristique, et porte 2 ou 3 rangées de taches foncées mal définies. Les glandes odorifiques sont développées seulement chez la femelle.

La tribu des *Paradoxurinés* proprement dits renferme quatre genres asiatiques; ils ont des pattes courtes et larges, avec le troisième et le quatrième doigt des pieds à callosités sommitales réunies à leur base et non séparées, comme chez les autres genres. Les deux sexes possèdent des glandes odorifiques.

Le genre *Paradoxurus* compte trois espèces, appelées civettes des palmiers ou musangs. Longues de 40 à 70 cm, portant une queue de même longueur, ces espèces sont arboricoles et nocturnes; leur régime alimentaire est mixte. Les femelles possèdent trois paires de mamelles et mettent bas de 2 à 4 petits par portée. *P. hermaphroditus,* le paradoxure hermaphrodite, est répandu en Asie méridionale, du sud de la Chine et de l'Inde (y compris Ceylan), à la Birmanie, à l'Indochine, à l'archipel malais, à Timor, à Ceram, à Kei et aux Philippines. Il peut, lorsqu'il est irrité, projeter le contenu de ses glandes anales.

Les deux autres espèces sont *P. jerdoni,* le paradoxure de Jerdon, qui vit dans le sud de l'Inde, et *P. zeylonensis,* le paradoxure de Ceylan.

Paguma larvata, qui atteint parfois 76 cm de long et porte une queue de 60 cm, possède une fourrure grise ou brun roussâtre, avec la partie antérieure de la tête ornée d'un masque typique à bandes claires et foncées. Les femelles n'ont que deux paires de mamelles. Les deux molaires peuvent être réduites. Cette espèce mal connue fréquente les forêts et les zones buissonneuses et vit au Cachemire, dans le sud-est de la Chine et en Indonésie; elle a été introduite au Japon.

Macrogalidia musschenbroecki, dont la queue est annelée, est assez rare et habite le nord-est de Célèbes. Il se nourrit de Rongeurs et de fruits (notamment de papayes).

Arctictis binturong, le binturong, le plus grand Viverridé, atteint 96 cm de long avec une queue de 90 cm et pèse jusqu'à 14 kg. Il a un corps robuste et allongé, une tête grosse et large, qui se termine par un museau proéminent, orné de longues vibrisses. Sa fourrure très rude, à poils très longs, est noir mat, plus grisâtre à la tête, bleutée aux pattes et blanchâtre aux bords des oreilles (au sommet desquelles se trouvent des touffes de poils); les jeunes individus sont plus jaunâtres. La queue, longue, couverte de longs poils touffus, est préhensile. Les femelles possèdent deux paires de mamelles. Strictement arboricole, le binturong se nourrit surtout de matières végétales, quelquefois de petits Animaux et même de charognes. Essentiellement nocturne, il se déplace lentement (tout au moins pendant le jour). Il habite de l'Assam (et peut-être du Népal et du Sikkim) à l'Indonésie.

La sous-famille des *Hémigalinés* est divisée en quatre tribus : les Fossinés, les Hémigalinés proprement dits, les Cynogalinés et les Euplérinés.

La tribu des *Fossinés* comprend pour unique espèce *Fossa fossa,* le fanaloka, très rare, qui vit uniquement à Madagascar, où il est protégé (à ne pas confondre avec le fossa ou cryptoprocte féroce : *Cryptoprocta ferox*). Très semblable à une genette, long d'environ 40 cm, il a une livrée qui porte des taches disposées en séries le long du dos et des flancs. Il ne possède pas de glandes anales. Ses pattes sont fines et digitigrades. C'est un Animal strictement nocturne, qui se nourrit de fruits et de petits Animaux.

La tribu des *Hémigalinés* comprend trois genres asiatiques : *Hemigalus, Chrotogale,* et *Diplogale,* comptant chacun une seule espèce.

Hemigalus derbyanus, ou hémigale de Derby, long de 40 à 50 cm, possède une très belle fourrure, un peu laineuse, ornée sur le dos et la croupe de larges bandes transversales foncées contrastant avec le fond blanchâtre. Les glandes anales, petites, existent chez les deux sexes. Cette espèce vit au Tennasserim, dans la péninsule malaise, à Sumatra, à Bornéo et aux îles Padji.

Chrotogale owstoni, le chrotogale, ou crotogale, ressemble au genre précédent avec, en outre, de larges bandes sur les flancs. Il vit au Vietnam et au Laos. Mal connu, il semble qu'il se nourrisse, entre autres, de Vers.

Diplogale hosei, le diplogale, considéré par certains auteurs comme une seconde espèce d'*Hemigalus,* habite uniquement les forêts de montagne de Bornéo, de 600 m à 1 200 m d'altitude. C'est un Féloïdé arboricole et omnivore. Sa livrée est uniforme et foncée avec seulement un masque sur le museau.

La tribu des *Cynogalinés* est constituée par l'unique espèce *Cynogale bennetti,* ou cynogale, long de 65 cm, et à queue de 15 à 20 cm seulement. Il ressemble vaguement à une loutre (d'où son nom de civette-loutre). Son tronc est très élancé, et ses pattes sont brèves; ses doigts sont partiellement palmés; sa tête et son museau sont allongés; ses oreilles sont courtes; ses narines et ses oreilles peuvent se fermer à volonté : ce sont des adaptations à la vie aquatique. La livrée, à poils courts, est gris-brun. La lèvre supérieure et les côtés du museau sont pourvus de longues vibrisses blanchâtres. Les femelles possèdent deux paires de mamelles. Le cynogale vit dans les forêts, près de l'eau, se nourrissant d'Animaux aquatiques (Poissons, Crustacés, Mollusques), d'Oiseaux, de Mammifères et de fruits. Il ne semble pas être un bon nageur mais grimpe bien aux arbres. Il habite l'Indochine, la Malaisie, Sumatra et Bornéo.

La tribu des *Euplérinés* comprend pour seul genre *Eupleres,* qui vit uniquement à Madagascar. Il a un museau proéminent et aigu, une tête étroite et allongée. Ses dents, petites et coniques, ressemblent à des dents d'Insectivores. Ses longues griffes, arquées et comprimées, sont peu ou pas rétractiles. Ces Animaux ne possèdent pas de glandes périnéales. Il y a deux espèces : *E. goudoti,* long de 30 à 40 cm, et *E. major,* un peu plus grande. Elles ressemblent à la fois aux civettes et aux mangoustes; leur fourrure est touffue et laineuse, de teinte uniforme, la queue étant couverte de très longs poils. Leur biologie est mal connue : il semble qu'elles soient fouisseuses; elles se nourrissent essentiellement d'Insectes, de Vers, d'Amphibiens et de Sauriens. Elles sont actives seulement la nuit.

La sous-famille des *Galidiinés* comprend quatre genres, avec sept espèces habitant toutes uniquement à Madagascar. Les caractères propres à ces Viverridés sont la position des pouces et des gros orteils, peu élevés, les griffes non rétractiles, l'absence de canal alisphénoïde et, pour les femelles, un utérus double et une seule paire de mamelles.

Galidia elegans, long d'un peu moins de 40 cm, avec une queue de 30 cm, a une robe roux marron foncé, et une queue annelée de noir. Sa formule dentaire est $\left(I\frac{3}{3};\ C\frac{1}{1};\ Pm\frac{3}{3};\ M\frac{2}{2}\right) \times 2 = 36$. La deuxième prémolaire supérieure est très petite. Ce Viverridé, très rare, diurne, vit solitairement ou en couples; c'est un excellent grimpeur. Essentiellement carnivore, il se nourrit de petits Oiseaux, de Mammifères, de Reptiles et d'Insectes.

Les *Galidictis* possèdent une livrée portant une série de larges bandes longitudinales, claires et foncées, qui rappellent celles de certains Sciuridés des genres *Tamias, Eutamias,* etc. Ils sont longs de 35 cm, avec une queue

◀ ***Page ci-contre,* Genetta tigrina *(Viverridés), la genette tigrine, est commune en Afrique centrale et du Sud.***

de 33 cm. Il en existe deux espèces : *G. striata,* avec 5 bandes longitudinales noires sur le dos et les flancs, et une queue uniformément blanchâtre; *G. fasciata,* avec 8 à 10 bandes. Les femelles possèdent des glandes odorifiques. Le régime alimentaire semble être omnivore.

Mungotictis a aussi une livrée à bandes longitudinales, très étroites et foncées. On en connaît deux espèces : *M. substriatus,* de couleur gris olivâtre et plus jaunâtre aux parties inférieures et aux pattes, avec 10 bandes longitudinales étroites brun-roux sur le dos et les flancs, atteint 35 cm de longueur; *M. lineatus,* à livrée gris pâle, avec une tête plus foncée, le dessous jaunâtre, et 11 bandes longitudinales brun noirâtre de largeur inégale.

Le genre *Salanoia (Hemigalidia)* a pour caractéristique sa formule dentaire : $\left(I\,\frac{3}{3};\,C\,\frac{1}{1};\,Pm\,\frac{4}{3};\,M\,\frac{2}{1}\right)\times 2 = 36$; son museau est très pointu et ses griffes très aiguës. Il existe deux espèces : *S. unicolor* et *S. olivacea,* qui mesurent un peu plus de 30 cm de long, et dont la queue est un peu moins longue que le corps. Leur fourrure présente quelques taches noires sur un fond brun roussâtre chez la première, et jaunâtre sur fond olive foncé chez la seconde.

La sous-famille des *Herpestinés* comprend les mangoustes, ou ichneumons au sens large, et les formes proches. C'est la plus importante sous-famille de Viverridés, avec treize genres et trente espèces, vivant surtout en Afrique, sauf huit espèces d'*Herpestes* propres à l'Asie et la péninsule Ibérique, ainsi qu'*Ichneumia albicauda,* qui habite aussi en Arabie. De taille modeste, ces espèces ont des griffes bien développées et non rétractiles. Elles n'ont pas de glandes périnéales. Leur fourrure, non tachetée, est parfois ornée de bandes transversales; leur queue n'est jamais annelée. Leurs extrémités sont tétradactyles ou pentadactyles, avec des paumes et des plantes généralement assez nues. L'anus s'ouvre dans une poche anale. Les Herpestinés sont généralement de mœurs diurnes.

Suricata (Ryzanea) compte une seule espèce, *S. suricatta,* propre à l'Afrique du Sud, principalement au sud du fleuve Orange. Cette espèce, longue de 30 cm, présente une livrée claire sur la tête avec des lunettes foncées et des oreilles noires; la robe, très touffue, est marquée de barres transversales foncées; la bourre est de couleur rouille foncé; la queue est jaunâtre avec la pointe noire.

La formule dentaire est :

$$\left(I\,\frac{3}{3};\,C\,\frac{1}{1};\,Pm\,\frac{3}{3\text{-}4};\,M\,\frac{2}{2}\right)\times 2 = 36\text{-}38.$$

Les pattes sont tétradactyles. Les femelles possèdent trois paires de mamelles abdominales.

Le suricate, ou mangouste sud-africaine, est grégaire et peut s'associer avec d'autres mangoustes (par exemple, *Cynictis*). Elle fréquente surtout les zones arides et rocheuses. De mœurs diurnes, habile fouisseuse, elle se nourrit de racines, d'Insectes (surtout de sauterelles), de petits Invertébrés et de leurs œufs; elle mange aussi des souris, des gerboises et des écureuils terrestres (du genre *Geosciurus*). Elle se dresse souvent sur ses pattes postérieures, un peu comme les marmottes et les chiens de prairie. Elle est souvent domestiquée pour lutter contre les Rongeurs. Les femelles mettent bas de 2 à 4 petits par portée.

Le genre *Herpestes* (quelquefois appelé par certains auteurs *Galerella, Myonax* ou *Xenogale*) compte quinze espèces, distribuées dans la péninsule Ibérique, dans toute l'Afrique, l'Asie occidentale et méridionale; on en a introduit aux îles Hawaii et aux Antilles. Elles ont un corps allongé, des pattes, courtes, pentadactyles, des paumes et des plantes généralement nues. Leur lèvre supérieure est divisée par un sillon.

Leur formule dentaire est :

$$\left(I\,\frac{3}{3};\,C\,\frac{1}{1};\,Pm\,\frac{3\text{-}4}{3\text{-}4};\,M\,\frac{2}{2}\right)\times 2 = 36\text{-}40.$$

Longues de 23 à 64 cm, avec une queue de 23 à 51 cm, elles pèsent de 0,5 à 3 kg; les espèces asiatiques sont les plus grandes. Leur fourrure est très variable quant à la couleur et à la longueur du poil. Il existe une glande anale, bursiforme, dont la sécrétion peut être projetée à distance.

Les habitats sont très variés, allant des zones arides jusqu'à la forêt tropicale. Le caractère éthologique le plus connu de ces espèces est leur habitude de lutter contre les serpents, même les plus venimeux (cobras); elles ne sont pas immunisées contre les venins, mais simplement très rapides et très habiles; le plus souvent, elles tuent les serpents et les dévorent; elles se nourrissent, en outre, de petits Mammifères, d'Amphibiens, de Poissons, d'Insectes, de Crustacés et même d'Oiseaux; certaines espèces sont partiellement frugivores et végétariennes. Les femelles possèdent deux ou trois paires de mamelles. La durée de la gestation est d'environ 60 jours; chaque portée est de 2 à 4 petits. La longévité peut dépasser 12 ans.

Herpestes ichneumon, la mangouste ichneumon, habite le sud de la péninsule Ibérique, en Afrique et en Asie Mineure (Palestine); malheureusement pour la faune locale, elle a été introduite à Madagascar.

H. edwardsi, la mangouste grise de l'Inde, habite l'Asie méridionale, de l'Arabie à l'Assam. Elle a été introduite en Malaisie, aux îles Maurice, dans les Ryu Kyu et récemment aussi en Italie pour combattre les vipères. Elle est grisâtre et longue de 40 à 45 cm, avec une queue atteignant 40 cm. Elle fréquente les endroits ensoleillés et arides, à végétation buissonneuse; en Italie, elle s'est habituée au maquis méditerranéen.

Les autres espèces asiatiques sont : *H. javanicus,* la mangouste de Java, qui habite l'Indochine, la Malaisie et Java; *H. auropunctatus* répandue à travers l'Asie occidentale et méridionale, ainsi qu'en Malaisie; introduite aux Antilles ainsi qu'aux îles Hawaii, elle y a provoqué des désastres irréparables dans la faune; *H. sminthi, H. fuscus* et *H. viticollis,* toutes trois d'Inde et de Ceylan; *H. urva,* ou mangouste crabière, de Chine méridionale et d'Asie du Sud-Est; *H. brachyurus,* ou mangouste à queue courte, de Malaisie et d'Indochine; enfin, *H. semitorquatus,* de Bornéo et Sumatra, et *H. hosli,* de Bornéo.

Les autres espèces sont africaines : *H. sanguineus,* la mangouste rouge ou naine, vit dans une grande partie de l'Afrique, au sud du Sahara; *H. pulverulentus* peuple l'Afrique du Sud; *H. microdon (Xenogale microdon)* habite l'Afrique de l'Ouest et du Centre; *H. ochracea (H. gracilis)* est propre à l'Éthiopie et à la Somalie.

Le genre *Helogale* compte pour unique espèce *H. undulata (H. parvula),* l'hélogale. C'est le plus petit Viverridé : il mesure de 17 à 23 cm de long; il ressemble à *Herpestes.*

Sa formule dentaire est :

$$\left(I\,\frac{3}{3};\,C\,\frac{1}{1};\,Pm\,\frac{3}{3};\,M\,\frac{2}{2}\right)\times 2 = 36.$$

Ses extrémités sont pentadactyles. Les femelles possèdent trois paires de mamelles abdominales. Grégaire, l'hélogale forme des bandes allant jusqu'à douze têtes, qui habitent des tanières. Il vit en Afrique orientale et du Sud, dans les zones arides et les savanes buissonneuses (quelquefois en forêt), jusqu'à 1 800 m d'altitude. Il se nourrit de toutes sortes de proies et de fruits.

Dologale dybowskii, le dologale, long de 30 cm, vit dans les savanes du Soudan, de l'Ouganda et du Zaïre.

Atilax (Herpestes) paludinosus, la mangouste des marais, mesure jusqu'à 60 cm de long. Ses griffes sont très courtes. De mœurs nocturnes, nageant bien, elle fréquente les cours d'eau, les étangs, les marais et les estuaires, s'y nourrissant d'Amphibiens, de Poissons, de Crustacés, ainsi que d'Ophidiens, de Rongeurs et d'Oiseaux. Elle habite une grande partie de l'Afrique au sud du Sahara.

Mungos mungo, la mangouste rayée, longue de 40 cm, habite du Soudan et de la Somalie jusqu'au Nigeria et au fleuve Orange. Sa livrée présente sur l'arrière du dos une série de barres transversales claires et foncées. Grégaire, formant des bandes qui comptent jusqu'à vingt individus, elle se déplace fréquemment. C'est un Animal crépusculaire, dont le régime est mixte. Les femelles possèdent trois paires de mamelles et mettent bas de 3 à 6 petits par portée.

Le genre *Crossarchus* comprend trois espèces : *C. obscurus,* d'Afrique occidentale, *C. ansorgei,* du Zaïre et de l'Angola, et *C. alexandri,* du Zaïre. Elles possèdent une fourrure grossière à longs poils de couleurs brune, grise, et jaunâtre, le plus souvent mêlées; la tête est plus claire que le corps. Elles ont de 30 à 40 cm de long, avec une queue de 15 à 25 cm. De mœurs diurnes et de régime omnivore, elles vivent en troupes de dix à vingt-cinq têtes et ne restent pas plus de deux jours en un même lieu, logeant momentanément dans toutes sortes d'abris naturels.

▼ Suricata suricatta, ***ou mangouste sud-africaine, est souvent domestiquée pour lutter contre les Rongeurs.***

E.P.S.

J. Six

◀ **Helogale undulata** = **H. parvula** *est le plus petit Viverridé; il vit dans les zones arides et les savanes buissonneuses de l'Afrique orientale et du Sud.*

Liberiictis kuhni est une espèce rare qui habite le Libéria; on l'a décrite seulement en 1958 après la découverte de huit crânes.

Ichneumia albicauda, la mangouste à queue blanche, très connue, vit du Ghana au sud de l'Arabie et à l'Afrique australe. Elle fréquente les lisières des forêts et les végétations des bords de rivières. Longue de 60 cm, cette mangouste se distingue par sa queue touffue, très claire ou blanche, contrastant avec le corps grisâtre; les parties inférieures des pattes sont noirâtres. Cet Animal nocturne vit par couples et se nourrit surtout de Mammifères (Rongeurs, damans, etc.), d'Oiseaux, de Reptiles, etc. Il détruit aussi de grandes quantités de criquets au moment des migrations de ces derniers.

Le genre *Bdeogale* possède une livrée caractéristique : la tête, les parties supérieures et la queue sont plus claires que les parties inférieures et les pattes. Longs de 40 à 60 cm, ces Viverridés sont tétradactyles. Ils se nourrissent de serpents venimeux. On en connaît deux espèces, très rares : *B. crassicauda,* le bdéogale à queue touffue, appelé aussi mangouste à quatre doigts, du Kenya, de Tanzanie et de Mozambique, et *B. nigripes (Galeriscus nigripes),* le bdéogale à pattes noires, du Kenya et du Gabon.

Rhynchogale melleri, le rhynchogale, est long de 45 à 48 cm, avec une queue de 30 à 40 cm. Ses paumes et ses plantes sont velues. Il possède 40 ou 42 dents; partiellement diurne, solitaire, il vit en Afrique orientale et du Sud. Les femelles ont deux paires de mamelles abdominales.

Cynictis penicillata, la mangouste jaune, d'Afrique du Sud, est de couleur jaune-orangé foncé, et mesure jusqu'à 38 cm de long; elle a les pattes antérieures pentadactyles et les pattes postérieures tétradactyles. Elle possède 40 dents. Les femelles ont trois paires de mamelles abdominales. Cette espèce grégaire forme des bandes de cinquante individus ou plus, lesquels creusent et habitent des systèmes complexes de tunnels souterrains, ou encore vivent dans des terriers abandonnés. Par contre, elle chasse seule ou par couples. Elle est habituellement diurne, mais devient nocturne là où elle est dérangée par l'homme. Les troupes se déplacent sans cesse, surtout pour rechercher de nouvelles sources de nourriture.

Paracynictis selousi, espèce proche de la précédente, vit en Afrique du Sud, dans les zones arides et sablonneuses; ses pattes, toutes tétradactyles, sont bien adaptées au fouissage.

La sous-famille des *Cryptoproctinés* comprend une seule espèce, *Cryptoprocta ferox,* le fossa, ou cryptoprocte féroce, qui vit à Madagascar (à ne pas confondre avec *Fossa fossa,* le fanaloka). Cette espèce rare, l'un des phénomènes zoologiques de la région malgache, présente

M. Lelo - Jacana

◀ **Ichneumia albicauda,** *la mangouste à queue blanche, se nourrit principalement de Mammifères mais détruit aussi de grandes quantités de criquets au moment de leurs migrations.*

N. Myers

C. Bevilacqua

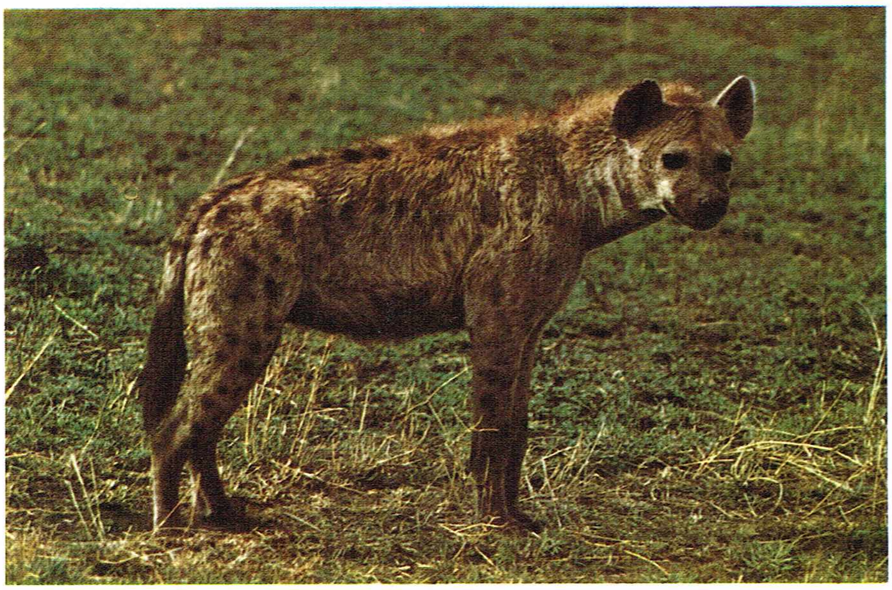

Ostman

▲ *En haut et ci-dessus,* **Crocuta crocuta,** *l'hyène tachetée, que l'on voit, à gauche, sortant d'un bain de boue, est la plus agressive de la famille; sa nourriture est composée de charognes.*
En haut, à droite, **Hyaena striata,** *l'hyène striée, habite l'Asie occidentale et une partie de l'Inde, ainsi que l'Afrique du Nord et de l'Est.*

des caractères archaïques et peut être considérée comme un fossile vivant. Classé autrefois dans la famille des Félidés, le fossa rappelle un peu les chats, en particulier par sa tête et ses extrémités pourvues de longues griffes rétractiles; il ressemble au jaguarundi d'Amérique du Sud.

C'est le plus gros Carnivore indigène de Madagascar : il mesure de 60 à 76 cm de long, avec une queue de même longueur. Sa fourrure, très touffue et douce, à poils courts, est marron ou rouille; les individus mélaniques ne sont pas rares. Ses pattes sont assez courtes, les postérieures étant plus longues que les antérieures, avec des mains et des pieds pentadactyles et plantigrades. Il possède un sac glandulaire anal. Les femelles ont un utérus double. Sa formule dentaire est :

$$\left(I\,\frac{3}{3};\ C\,\frac{1}{1};\ Pm\,\frac{3}{3};\ M\,\frac{1}{1}\right) \times 2 = 32.$$

La première prémolaire est très petite et tombe très tôt.

Le cryptoprocte féroce est nocturne, carnivore et sylvicole; bon grimpeur, il poursuit ses proies jusque sur les arbres; c'est un prédateur spécifique des gros Lémuridés. Pendant la période de la reproduction, il constitue des groupes de quatre à huit têtes, devenant alors plus dangereux; il fuit habituellement à la simple vue de l'homme. Les femelles mettent bas 2 ou 3 petits par portée. Sa longévité semble être de 17 ans. Sa biologie est mal connue. Les hommes, impressionnés par sa férocité et son agilité, ont inventé de nombreuses légendes et fables à son sujet.

Les **Hyénidés** *(Hyaenidae)* constituent une petite famille de Féloïdés assez gros, à corps puissant, atteignant jusqu'à 1,60 m de long *(Crocuta)* et pesant jusqu'à 80 kg. Leur tête est large et massive. Leur avant-train est plus élevé et plus robuste que leur arrière-train; leurs pattes sont longues, surtout les antérieures; leurs membres sont digitigrades et portent des griffes émoussées et non rétractiles. Ils ne possèdent ni canal alisphénoïde, ni os pénien; ils sont pourvus de glandes anales.

Leur formule dentaire est :

$$\left(I\,\frac{3}{3};\ C\,\frac{1}{1};\ Pm\,\frac{3\text{-}4}{3};\ M\,\frac{1}{1}\right) \times 2 = 32\text{-}34;$$

les incisives ne sont pas spécialisées et les canines sont très développées et robustes.

Les femelles ont deux ou trois paires de mamelles. Après une gestation de 90 à 100 jours, elles mettent bas en une seule portée de 1 à 4 petits, aveugles à la naissance. Certaines hyènes vivent jusqu'à 25 ans en captivité.

Les Hyénidés habitent la savane buissonneuse et parfois les forêts claires. Ils sont surtout nocturnes, mais certains sont également diurnes. Pour chasser, ils sont guidés par leur odorat développé.

La famille est divisée en deux sous-familles : les Protélinés et les Hyéninés, avec au total quatre espèces.

La sous-famille des *Protélinés* comprend une seule espèce : *Protelés cristatus,* le protèle, d'Afrique orientale et surtout d'Afrique du Sud. C'est une espèce assez rare, insectivore et nocturne; sa denture est réduite (3 prémolaires supérieures seulement). Assez gracile, le protèle mesure au maximum 80 cm de long et 45 à 50 cm de hauteur au garrot. Sa livrée est brun jaunâtre, avec des bandes transversales; son pelage est long et forme sur la ligne dorsale une crinière bien marquée. A la différence des hyènes, cet Animal a les membres antérieurs pentadactyles et les membres postérieurs tétradactyles. Il vit solitairement ou par couples, se cachant le jour dans des tanières d'oryctérope. Les femelles mettent bas de 2 à 6 petits par portée.

La sous-famille des *Hyéninés* comprend les hyènes proprement dites, caractérisées par un corps robuste et massif. Leurs pattes sont tétradactyles. La denture est robuste, avec 4 prémolaires supérieures pouvant broyer des os, même ceux de gros Ruminants. On connaît deux genres et trois espèces.

Crocuta crocuta, l'hyène tachetée, est répandue du Soudan et de la Somalie jusqu'au Sénégal, au Zaïre et à l'Afrique du Sud. Longue de 1,30 à 1,65 m, elle peut atteindre une hauteur au garrot de 90 cm et peser 80 kg. Sa queue mesure 30 cm de long. Sa fourrure, gris jaunâtre, porte des taches rondes et foncées. Ses mandibules sont puissantes et robustes. Elle diffère de l'hyène rayée par sa livrée, ses oreilles plus courtes, sa conformation plus trapue et sa tête plus massive. Elle est nocturne et vit dans de grandes tanières souterraines, dans des cavités entre les rochers et même dans la végétation dense. Elle est plus agressive que les autres hyènes. Sa nourriture est composée surtout de charognes. Elle court à la vitesse de 65 km/h.

Le genre *Hyaena* comprend deux espèces : *H. striata,* l'hyène striée, qui habite l'Asie occidentale et une partie de l'Inde, ainsi que l'Afrique du Nord et de l'Est, et *H. brunnea,* l'hyène brune, propre à l'Afrique du Sud, notamment la région du Kalahari.

Z.F.A.

Les **Félidés** *(Felidae)*, les plus évolués des Fissipèdes, sont des prédateurs par excellence, au régime nettement carnivore : ce sont les Animaux les mieux conformés pour capturer et dévorer des proies vivantes de toutes tailles, y compris des Ongulés. Doués d'une grande force, ils ont des sens très développés. Leur tête est ronde, avec un museau court et des arcades zygomatiques largement développées. Leur mandibule, courte et robuste, est mue par de très puissants muscles masticateurs et peut accomplir des mouvements uniquement dans le sens vertical. Ils ne possèdent pas de canal alisphénoïde. Leur bulle tympanique, ample, est divisée en deux par une cloison.

Leur formule dentaire, typique, est :

$$\left(\mathrm{I}\,\frac{3}{3};\ \mathrm{C}\,\frac{1}{1};\ \mathrm{Pm}\,\frac{3}{2};\ \mathrm{M}\,\frac{1}{1}\right) \times 2 = 30\,;$$

la première prémolaire peut être absente et la molaire supérieure est assez rudimentaire. Leur denture, hautement spécialisée, comprend essentiellement des éléments coupants : les incisives sont petites, les canines grosses et pointues, les dents maxillaires réduites (surtout les molaires) et coupantes. Les pattes sont pentadactyles à l'avant, tétradactyles à l'arrière, et portent des griffes bien développées, arquées, coupantes et rétractiles (sauf chez *Acinonyx*). L'os pénien est rudimentaire.

La répartition géographique de la famille est très vaste par rapport à celle des Fissipèdes : ils sont absents seulement de Madagascar. Ils occupent des milieux très divers, et certaines espèces sont arboricoles.

La classification des Félidés est encore controversée ; nous considérerons quatre genres : *Lynx, Felis, Panthera,* et *Acinonyx,* avec, au total, trente-huit espèces.

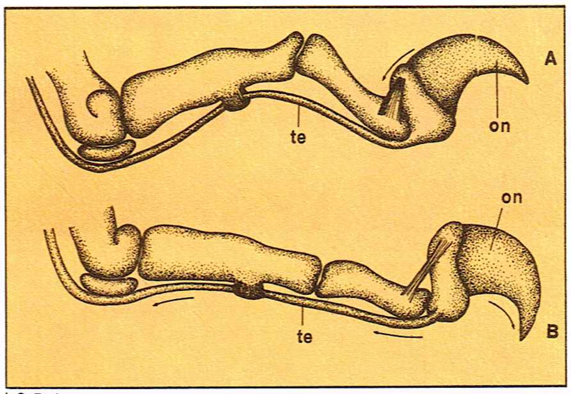

I.G.D.A.

▲ ***Les Félidés, doués d'une grande force, sont des prédateurs par excellence, au régime nettement carnivore. Leur répartition géographique est très vaste; ils occupent des milieux très divers. Ici, un tigre*** **Panthera tigris.**

◀ ***Représentation schématique des griffes rétractiles d'un Félidé : A, griffe rétractée; B, griffe sortie : on, ongle; te, tendon; les flèches indiquent la direction des mouvements.***

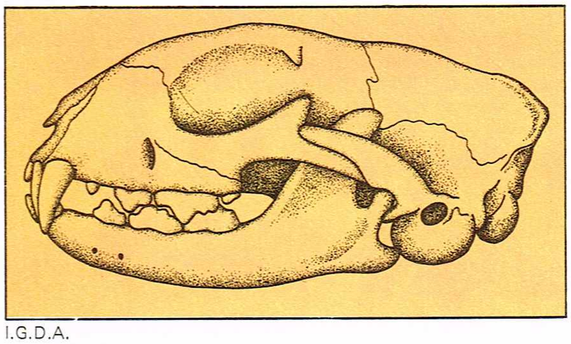

I.G.D.A.

◀ ***Crâne de Félidé.***

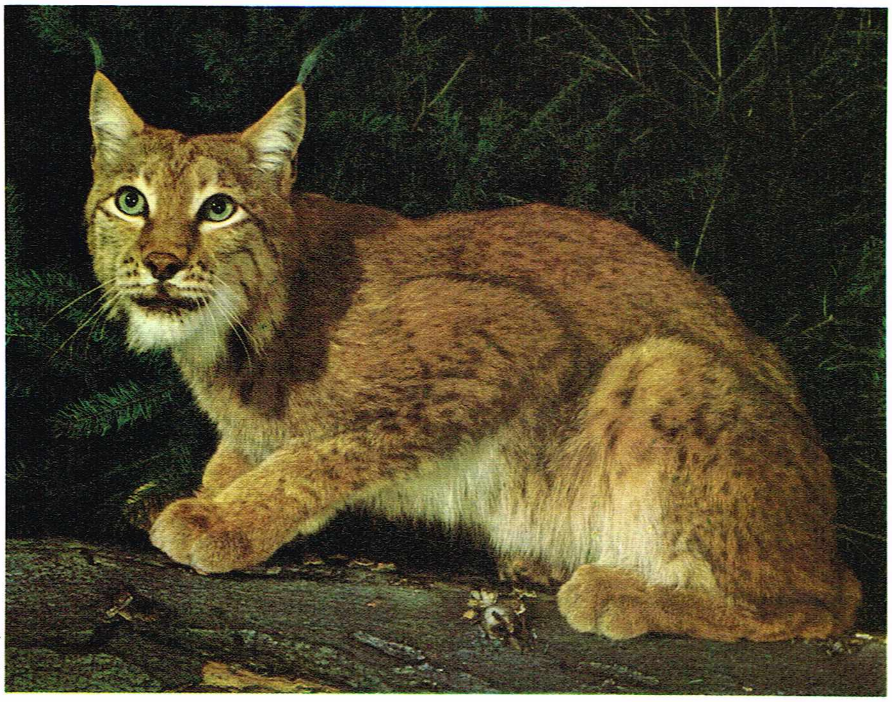

T. Okapia

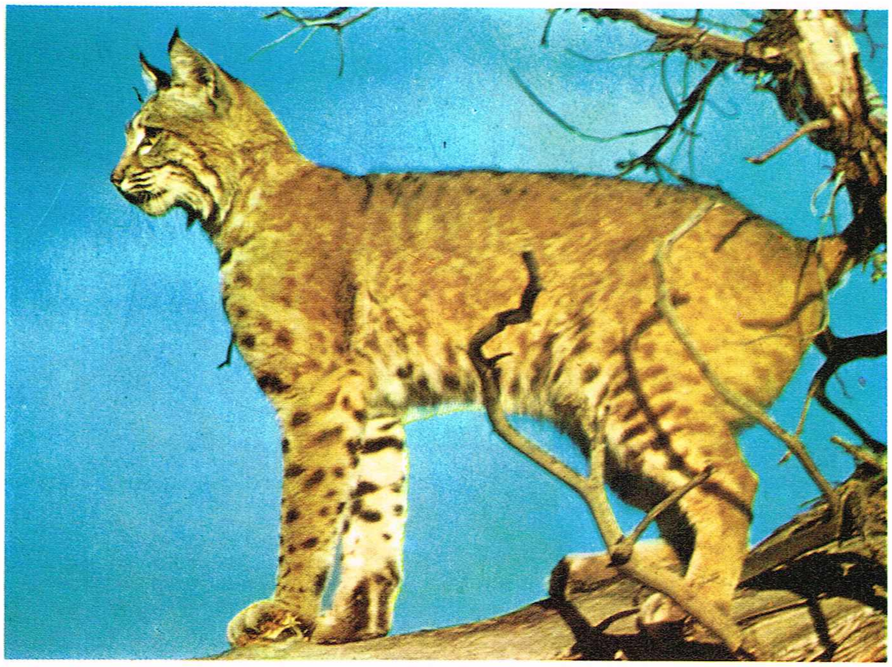

E.P.S.

▲ ***En haut,*** **Lynx lynx,** ***le lynx d'Europe, dont il existe quelques rares survivants dans les Pyrénées et les Alpes. En bas,*** **Lynx rufus,** ***le lynx roux ou « bobcat », vit en Amérique du Nord.***

Le genre *Lynx* compte cinq espèces, caractérisées par des oreilles se terminant par une touffe de poils rigides et serrés, par une queue courte et par la présence de deux prémolaires seulement.

L. lynx, le lynx d'Europe, ou commun, qui a une fourrure gris roussâtre, striée de blanc et couverte de nombreuses taches peu visibles (ce qui le distingue du lynx pardelle), mesure jusqu'à 1,30 m de long, porte une queue de 24 cm au maximum, et atteint une hauteur au garrot de 75 cm. Sa queue se termine par une large pointe noire. C'est un prédateur actif, actuellement confiné aux forêts de certaines zones restreintes d'Europe (Russie, Scandinavie, Carpates, Pologne, Balkans), mais largement répandu en Asie. Il reste quelques rares survivants dans les Pyrénées et les Alpes.

L. pardina, le lynx d'Espagne, ou lynx pardelle, que certains auteurs ne différencient pas du précédent, se rencontre actuellement dans la péninsule Ibérique, dans les Carpates et dans une partie de la péninsule Balkanique.

En Amérique du Nord vivent deux espèces, *L. canadensis* le lynx du Canada, et *L. rufus,* le lynx roux, ou « bobcat ».

L. caracal, le caracal, ou lynx africain, vit en Asie méridionale et occidentale, ainsi que dans une grande partie de l'Afrique ; on le rencontre dans les zones arides.

Felis est un genre très important, avec ses quelque vingt-six espèces, qu'on rencontre dans presque toute l'aire de la famille. Il s'agit des chats vrais, dont le chat domestique est le meilleur type. Ils sont de taille petite ou moyenne, atteignant 1,50 m (chez le puma). *Felis* est caractérisé par la possession d'un appareil suspenseur de l'hyoïde bien ossifié, ne permettant que des mouvements limités du larynx par rapport à la tête. Toutes les espèces ont des griffes rétractiles. Leur livrée est variable ; le mélanisme, l'érythrisme et, parfois, l'albinisme sont assez fréquents. Les *Felis* sont habituellement nocturnes, ce qui est prouvé par la structure de leurs yeux. La gestation dure de 55 à 80 jours (90 jours chez le puma) ; il y a de 1 à 6 petits par portée (en moyenne de 2 à 4), et plusieurs portées par an chez les petites espèces ; la longévité de ces Animaux varie de 16 à 20 ans.

Felis sylvestris, le chat sauvage d'Europe, vit en Europe et en Asie Mineure. Long de 50 à 80 cm (plus grand que le chat domestique), avec 35 à 40 cm de hauteur au garrot, il pèse jusqu'à 18 kg. Sa livrée présente toujours des bandes foncées plus ou moins nettes, et sa grosse queue, longue de 26 à 35 cm, nettement annelée, a la pointe émoussée. Cette espèce n'est pas l'ancêtre du chat domestique.

F. libyca, le chat ganté, ou chat sauvage africain, est selon toute vraisemblance l'ancêtre du chat domestique. Son aire couvre essentiellement l'Afrique, l'Asie occidentale et une partie de l'Afrique australe, ainsi que les régions méditerranéennes. *F. libyca sarda,* le chat de Sardaigne, est une sous-espèce distincte.

Les espèces asiatiques sont les suivantes : *F. bieti,* le chat du désert de Chine, habite la Mongolie, le Kansou et le Sétchouan. *F. chaus,* le chat des marais, a une aire qui s'étend de l'Égypte à l'Asie du Sud-Est et à la Chine. *F. margarita,* le chat des sables, vit dans les régions semi-désertiques et désertiques d'Afrique du Nord, d'Arabie et d'Asie occidentale. *F. manul,* le manul, qui se rencontre dans les régions arides et steppiques de l'Asie centrale, est probablement l'ancêtre du chat persan, car il possède une longue fourrure très touffue. *F. marmorata,* le chat marbré, est répandu du Népal à l'Indochine ainsi qu'à Sumatra et Bornéo. *F. badia,* le chat marbré de Bornéo, habite uniquement cette île. *F. temmincki,* le chat doré, vit en Chine méridionale, en Birmanie, en Indochine et à Sumatra. *F. bengalensis,* le chat du Bengale, ou chat-léopard, vit en Asie orientale, aux Philippines et dans une grande partie des îles de la Sonde. Enfin, *F. rubiginosa* vit en Inde méridionale et à Ceylan et *F. planiceps* dans la péninsule malaise, à Sumatra et à Bornéo.

F. viverrina, le chat viverrin, long de 50 à 70 cm, vit dans les forêts et les prairies à végétation dense, et fréquente les rives des cours d'eau, où il pêche des Poissons. Il est propre à l'Inde, à l'Indochine, à Java et à Sumatra.

F. serval, le serval, est largement répandu dans toute l'Afrique, y compris l'Afrique du Nord. Il est très élancé, avec ses pattes longues, ainsi que ses oreilles, et un tronc fin. Il mesure environ 1 m de long, avec une queue de 40 cm. C'est un Animal très rapide, excellent grimpeur, qui capture sur les arbres des damans des arbres *(Dendrohyrax)*. Les autres espèces propres à l'Afrique sont : *F. nigripes, F. brachyura* et *F. aurata.*

Neuf espèces de *Felis* peuplent le Nouveau Monde. *F. concolor,* le puma, ou couguar, est répandu de la Colombie britannique à la Patagonie. Avec un peu moins de 2 m de long et une queue de 70 à 80 cm, c'est la plus grande espèce du genre ; il peut peser jusqu'à 100 kg (mais habituellement beaucoup moins). Sa livrée est uniforme, brun jaunâtre sur le dessus et les flancs, et plus claire ventralement ; les juvéniles sont tachetés.

F. yaguaroundi, le jaguarundi, a une livrée uniforme. C'est un Animal très élancé (jusqu'à plus de 60 cm de long), aux pattes courtes et à la queue longue. Il vit dans les forêts, à proximité des rivières. Son aire couvre une grande partie de l'Amérique du Sud, et s'étend au nord jusqu'au Texas et à l'Arizona.

F. pardalis, l'ocelot, espèce très connue par sa fourrure, habite le nord et le centre de l'Amérique du Sud.

Les autres espèces sont : *F. colocolo (F. pajeros),* le kudmu, qui habite de l'Ecuador à la Patagonie ; *F. geof-*

froyi et *F. guigna,* des Andes chiliennes et argentines; *F. tigrina, F. wiedi* et, enfin, *F. jacobita,* qui peuple les zones arides de haute montagne du Chili, du Pérou, de Bolivie et d'Argentine.

Le genre *Panthera,* avec six espèces, comprend des Félidés de grande taille, pourvus de griffes rétractiles. L'appareil suspenseur de l'os hyoïde est imparfaitement ossifié, ce qui permet une importante mobilité du larynx.

P. leo, le lion, typiquement africain, était répandu naguère en Asie, surtout à l'ouest, et même jusque dans l'est du bassin méditerranéen. Actuellement, on ne le trouve plus qu'en Afrique au sud du Sahara, à l'exception d'une seule population qui a survécu en Asie dans la forêt de Djir au Kathiawar (nord-ouest de l'Inde). Le lion est un Animal typique de la grande savane africaine, où il trouve toutes sortes de proies parmi les nombreux Ongulés qui la fréquentent. Sa longueur varie de 1,80 m à 2,50 m, avec une queue de 60 à 90 cm. Il est polygame et se reproduit toute l'année; il présente un dimorphisme sexuel important.

P. tigris, le tigre, uniquement asiatique, comprend différentes sous-espèces, qui habitent de la Sibérie aux îles de la Sonde (Sumatra, Java, Bali, mais non Bornéo). Les races septentrionales ont une fourrure plus touffue, à poils plus longs et plus clairs, que les races méridionales. Long de 2 m à 2,80 m, le tigre est le plus grand prédateur de la jungle; il chasse à l'affût; sa livrée, à larges bandes irrégulières foncées sur fond rouille, lui permet de passer inaperçu quand il épie sa proie, dans les bambouseraies ou au milieu de la végétation dense, où alternent des raies de lumière et de longues ombres irrégulières. Le tigre de Sibérie, de plus grande taille, vit dans les grandes forêts de Conifères.

P. pardus, le léopard, a la répartition la plus vaste de tous les Félidés : il habite l'Asie et l'Afrique. Les formes des îles de la Sonde présentent fréquemment des individus mélaniques (les panthères noires). Le léopard mesure jusqu'à 1,50 m de long, avec une queue de 90 cm, et présente une robe tachetée typique. Il fréquente divers habitats : la forêt tropicale, les zones rocheuses, les régions à végétation rare, et même les pentes des montagnes himalayennes sous climat froid. C'est un grimpeur très agile, qui chasse en silence, solitairement ou par couples.

P. onca, le jaguar d'Amérique, atteint 1,80 m de long, porte une queue de 90 cm et pèse jusqu'à 130 kg. Sa livrée tachetée diffère de celle du léopard par des taches plus grandes formant des sortes de rosettes, avec une ou plusieurs petites taches à l'intérieur. En outre, la tête du jaguar est plus massive et son corps est plus trapu. Largement répandu en Amérique, du sud-ouest des États-Unis jusqu'à 40° de latitude sud, il a été exterminé dans de nombreuses zones. Il vit aussi bien dans les grandes forêts équatoriales que dans les zones à végétation rare et même arides; il se nourrit de toutes sortes de proies de moyenne et grande taille, particulièrement de pécaris, de caïmans et de tortues, sans compter les Animaux domestiques.

Les deux autres espèces sont asiatiques. *P. nebulosa (Neofelis nebulosa),* la panthère longibande, mesure au maximum 1 m de long, avec une queue de 90 cm. Sa robe présente de grandes taches, assez régulières, polygonales

D. Faulkner

▲ ***Tête de puma* (Felis concolor), *espèce répandue de la Colombie britannique à la Patagonie et dont la livrée est uniforme.***

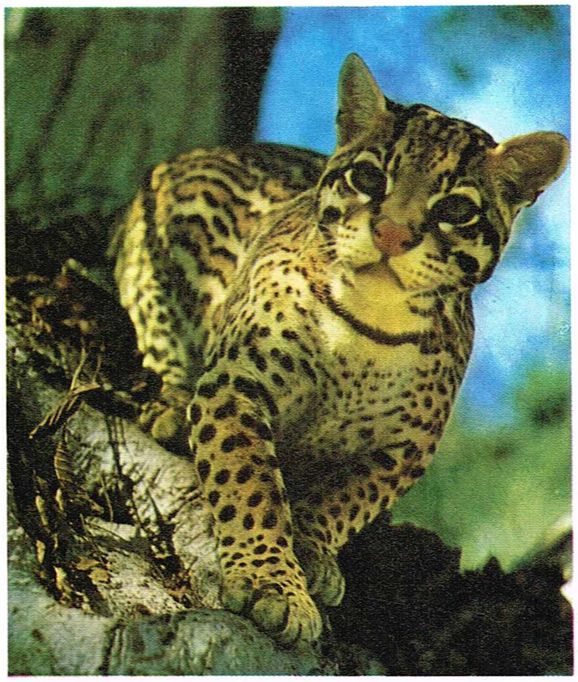

C. Bevilacqua

◀ **Felis pardalis, *l'ocelot, espèce très connue pour sa fourrure, habite le nord et le centre de l'Amérique du Sud.***

▼ ***Le léopard* (Panthera pardus) *compte parmi les plus gros et les plus agiles grimpeurs des Félidés.***

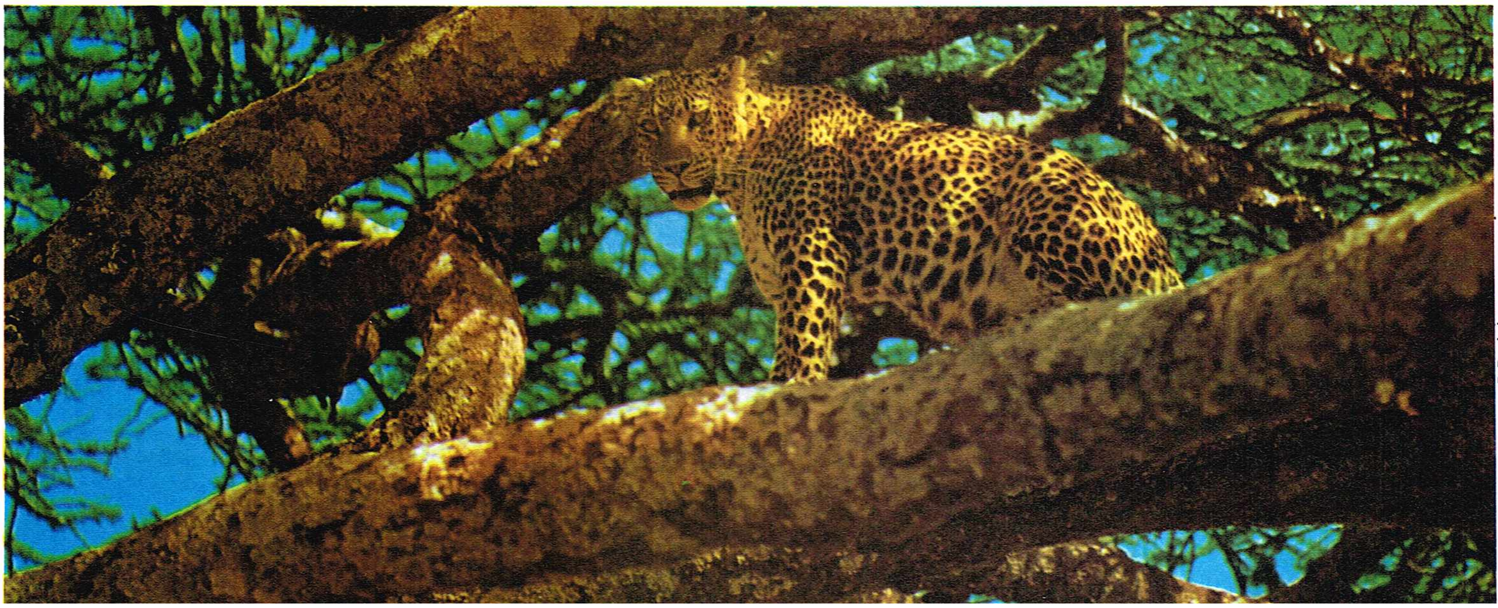

Ostman - P.R. Johanson

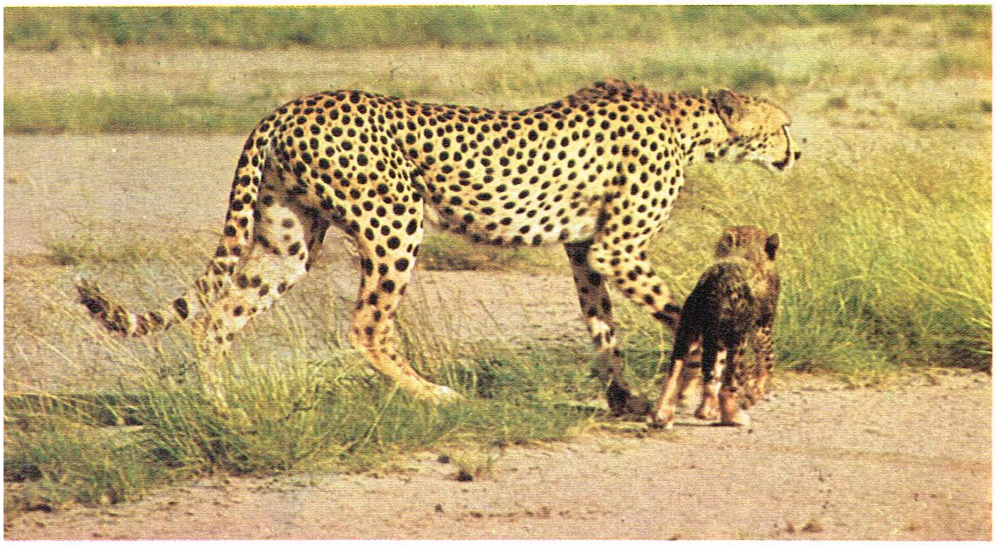

Photo Researchers - S. Trevor

▲ *Le guépard* (Acinonyx jubatus) *est le plus rapide de tous les Mammifères. Il vit de l'Inde jusqu'à l'Afrique du Nord et dans une grande partie de l'Afrique au sud du Sahara.*

▼ *Les Pinnipèdes comprennent des Carnivores hautement spécialisés pour la vie aquatique, presque uniquement marine. La majeure partie d'entre eux a des mœurs grégaires, telles ces otaries à fourrure, de l'espèce* Arctocephalus doriferus, *que l'on voit ici dans leur milieu naturel (eaux de l'Australie méridionale et de la Tasmanie).*

Photo Researchers - G. Pizzey

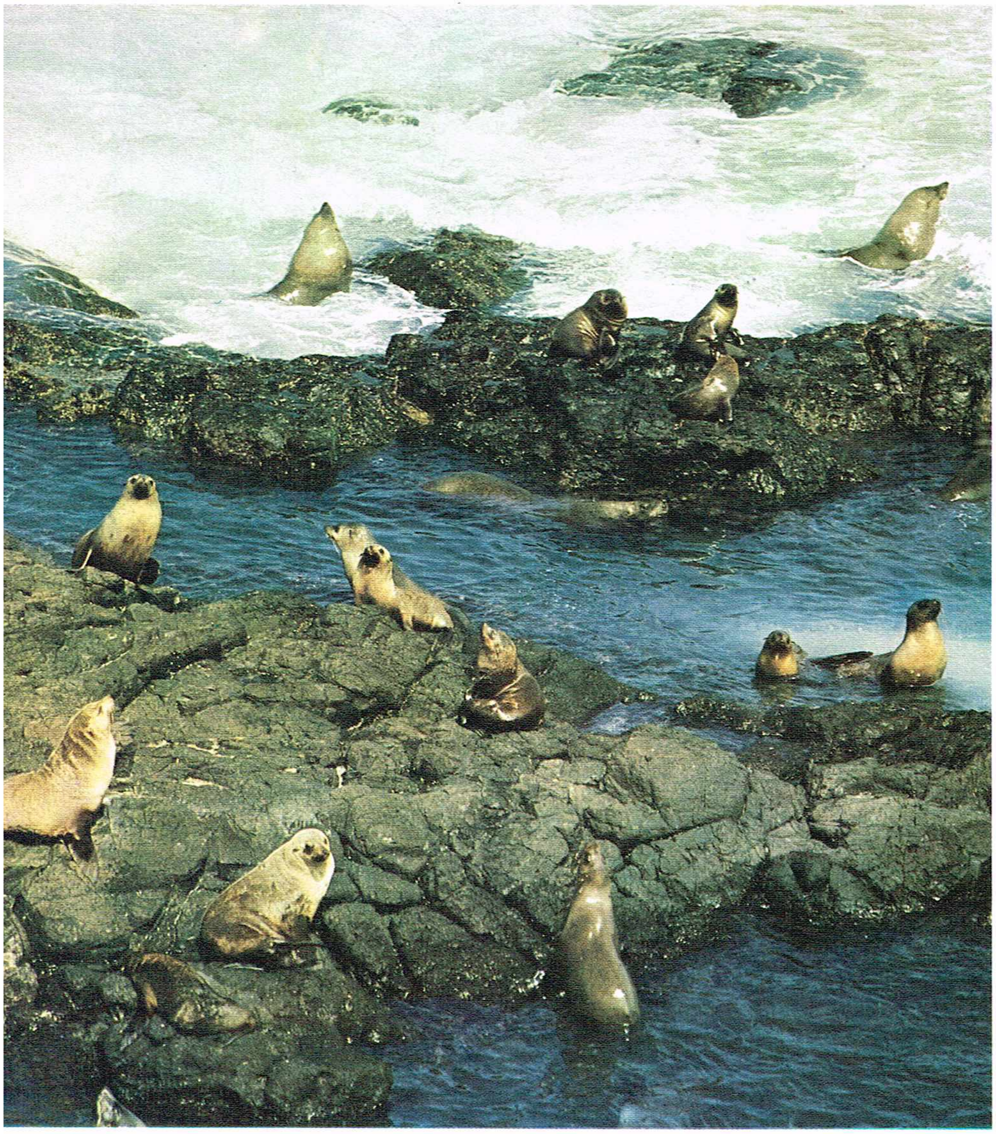

et toujours assez floues. Cette espèce est très arboricole et chasse beaucoup sur les arbres (surtout les singes). On la trouve du Népal à la Chine méridionale et à Bornéo ; elle est rare.

P. uncia, la panthère des neiges, atteint parfois 1,50 m de long, avec une queue représentant les trois quarts de la longueur du corps ; elle présente une fourrure blanchâtre ou grisâtre, portant des taches qui forment plus ou moins des rosettes irrégulières. Cette espèce habite les hautes montagnes d'Asie centrale, du Turkestan russe oriental jusqu'aux monts Altaï, au Tiem-Chan et au Tibet. Elle vit le plus souvent en terrain rocheux au-delà de la limite de la végétation arborescente. En été, elle vit près de la limite des neiges éternelles, soit entre 3 500 et 4 000 m d'altitude ; en hiver, elle descend vers 1 800 m d'altitude. Ses proies sont les moutons sauvages, les chevrotains, les lièvres et de nombreux Rongeurs, ainsi que de gros Oiseaux de montagne (Tétraonidés et Phasianidés), sans compter le bétail domestique. On connaît peu de chose sur ses mœurs, sinon qu'elles sont nocturnes.

Le genre *Acinonyx (Cynailurus)* compte une seule espèce : *A. jubatus,* le guépard, qui atteint parfois 1,50 m, avec une queue de 75 cm. Son museau est très bref. Le guépard a une livrée de couleur ocre, tachetée, et porte une petite crinière sur la ligne médiane du cou. Ses griffes ne sont pas rétractiles. C'est le plus rapide de tous les Mammifères terrestres (sa vitesse atteint 113 km/h) et il chasse à la course. Les femelles mettent bas de 2 à 4 petits par portée, après une gestation de 84 à 95 jours. Cet Animal vit de l'Inde jusqu'à l'Afrique du Nord et dans une grande partie de l'Afrique, au sud du Sahara.

Sous-ordre des Pinnipèdes

Les Pinnipèdes *(Pinnipedia)* comprennent des Carnivores hautement spécialisés pour la vie aquatique, presque uniquement marine. Leur anatomie diffère de celle des Fissipèdes surtout par la morphologie externe, le squelette et différentes adaptations physiologiques à la vie aquatique. Leur corps est plus ou moins fusiforme ; leurs membres ont des segments proximaux très courts ; leurs mains et leurs pieds sont palmés, avec des doigts longs servant de nageoires.

Le crâne, aplati, présente un squelette facial peu développé et raccourci ; il n'y a pas d'os lacrymal et la bulle tympanique est constituée par un os endotympanique et par un os tympanique supportant le conduit auditif. L'avant-train est, en général, plus large et plus massif que l'arrière-train. La cage thoracique est très robuste ; la clavicule est absente ; la ceinture scapulaire est sensiblement plus développée et plus robuste que la ceinture pelvienne, du fait de l'adaptation à la nage ; la colonne vertébrale est très flexible, les vertèbres lombaires étant isoclines. Leur queue est courte ou rudimentaire. Les mâles possèdent des testicules extra-abdominaux. Les femelles ont un utérus bicorne ; le placenta est zonal et décidué. Les nouveau-nés viennent au monde à un stade assez avancé.

Les phoques sont plus aptes à la vie dans l'eau qu'à la vie sur terre, où ils ne peuvent accomplir que des mouvements de reptation ; cependant, les otaries et les morses, dont les membres postérieurs servent quelque peu dans la déambulation sur terre, s'y déplacent un peu plus rapidement, bien que gauchement. L'extrémité libre des doigts se prolonge largement au-delà de l'insertion de l'ongle et de la phalange distale, grâce à la présence d'un lobe fibro-cartilagineux spécial, lequel permet une importante augmentation de la superficie de la palmure.

Le corps a une morphologie plus ou moins hydrodynamique, moins prononcée cependant que chez les Cétacés. L'oreille externe est réduite à un petit pavillon auriculaire chez les otaries ; chez les phoques et les morses, elle a disparu, persistant uniquement pendant le développement embryonnaire chez les phoques. Les muscles de l'oreille sont transformés en un sphincter, lequel ferme l'ouverture auditive durant l'immersion.

La fourrure est habituellement formée de poils raides ; chez certaines espèces d'otaries, elle est épaisse, avec une bourre très longue. Pour les autres espèces, la bourre est abondante seulement chez les juvéniles. Les vibrisses sont parfois fort développées. Chez les adultes, l'isolement thermique n'est pas réalisé par le pelage, mais par le pannicule adipeux sous-cutané et par la graisse qui recouvre

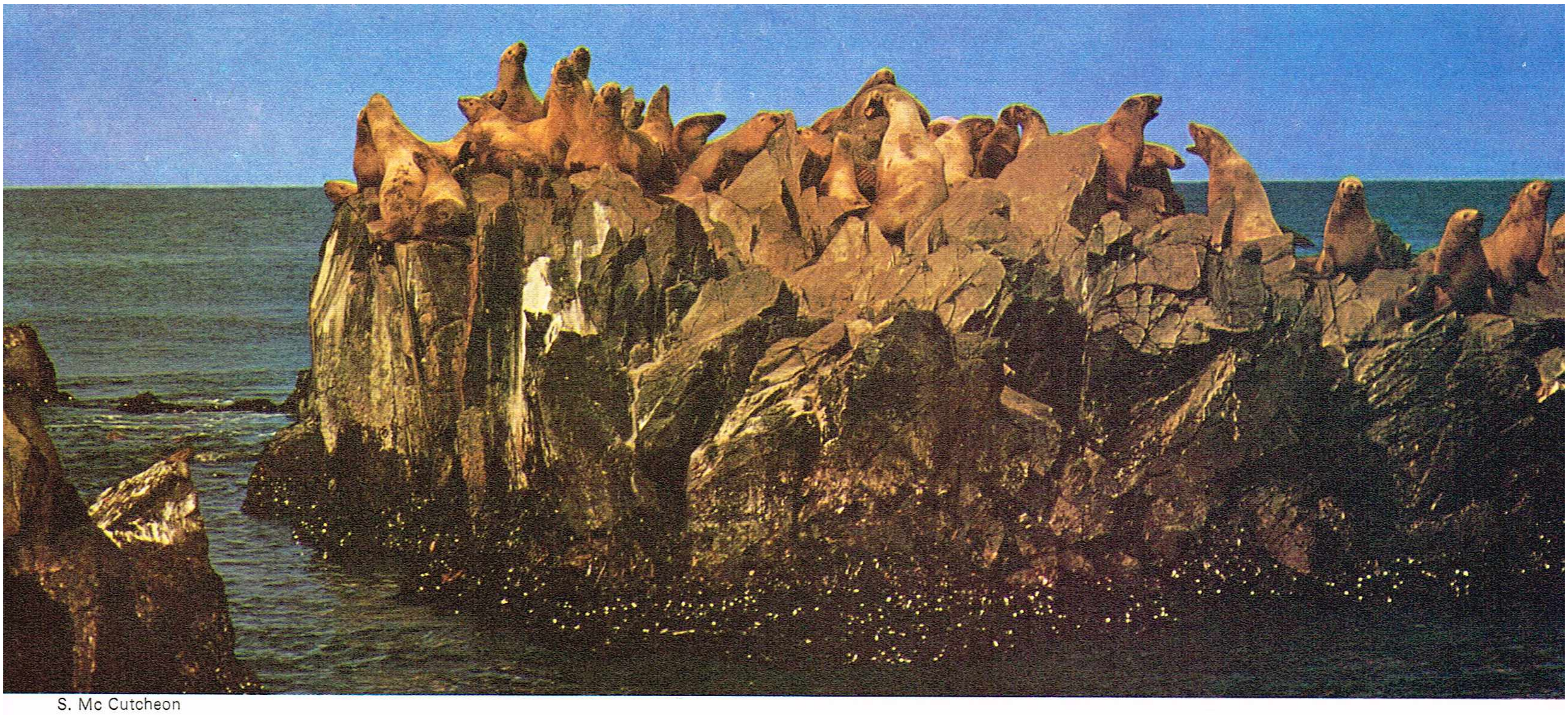

S. Mc Cutcheon

▲ ***Groupe de lions de mer de Steller*** **(Eumetopias jubata)** ; ***cette espèce, unique de son genre, compte les plus grands Otariidés.***

l'intestin : l'abondance du tissu adipeux joue un rôle important dans la compensation du poids spécifique du corps : il se trouve ainsi abaissé. La livrée, normalement uniforme, présente dans certains cas des mouchetures, des taches ou des anneaux ; à cet égard, on observe de nettes différences en fonction de l'âge. Le brun jaunâtre est la coloration la plus habituelle chez les otaries et les morses. Les mues ont habituellement lieu en été (en automne chez les morses). Les glandes sébacées et sudoripares sont bien développées.

Le thorax est constitué par quinze paires de côtes (morses) ou quatorze paires avec, respectivement, cinq ou six vertèbres lombaires. Les côtes sont particulièrement larges chez *Mirounga*. Le sternum est formé de six ou sept sternèbres (alors qu'il y en a normalement huit ou neuf chez les Fissipèdes) ; le manubrium est très allongé en avant.

En ce qui concerne le membre antérieur, le scaphoïde, le lunaire et le central sont soudés, formant un os unique. Le pouce est allongé à l'extrême, contribuant largement à la palmure de la main ; les premier et cinquième doigts du membre postérieur sont plus longs que les autres ; les ongles sont très réduits.

La denture présente divers degrés de réduction numérique et une tendance à l'uniformisation de ses éléments. Les incisives sont au nombre de 3 ou 2 et même 1 chez les vieux morses, alors que les juvéniles de la même espèce en ont 3 ; les canines sont normalement bien développées, et les supérieures sont transformées, chez les vieux mâles du morse, en énormes défenses ; les dents maxillaires sont au nombre total de : $\frac{5}{5}\left(\text{Pm}\ \frac{4}{4};\ \text{M}\ \frac{1}{1}\right)$. L'impossibilité d'opérer la mastication sous l'eau et la nécessité de retenir des proies glissantes et visqueuses (Céphalopodes, Poissons, Crustacés, etc.) ont provoqué une réduction de la surface occlusale des dents maxillaires et leur compression transversale. Les dents de lait ne sortent pas chez les otaries, ainsi que chez certaines espèces de phoques, ou elles sont résorbées avant de sortir des gencives et même parfois avant la naissance. Dans les autres cas, elles sont remplacées très rapidement après la naissance.

Les phoques avancent dans l'eau grâce à l'action des nageoires postérieures, qui fonctionnent un peu comme la queue des Poissons, par des battements latéraux : la nage est facilitée par des flexions du tronc dans les sens vertical ou horizontal. A ce type de nage évoluée s'oppose celui des otaries, qui nagent surtout grâce à l'action des membres antérieurs, puissantes nageoires servant de rames. En outre, ces Pinnipèdes arquent leur dos et peuvent sauter hors de l'eau. A terre, les otaries se déplacent en s'appuyant sur leurs quatre membres, alors que les phoques posent seulement leurs membres antérieurs à terre.

Le système nerveux des Pinnipèdes est caractérisé par un cerveau extrêmement volumineux, à lobes olfactifs réduits, et à nombreuses circonvolutions. La topographie de celles-ci et le rapport entre les poids respectifs de l'encéphale et du corps se rapprochent beaucoup de ce qu'on observe dans le même domaine chez de nombreux Fissipèdes. Le cerveau des Pinnipèdes présente, en outre, un important développement de l'appareil moteur central, duquel dépendent les mouvements réflexes, vraisemblablement en relation avec la mécanique natatoire.

L'appareil respiratoire, avec un grand volume pulmonaire, est conformé pour permettre de longues périodes d'apnée durant les plongées (qui durent de 5 à 20 mn) ; le diaphragme descend obliquement de la colonne vertébrale au sternum, en avant.

Le système circulatoire est caractérisé, comme chez les Cétacés, par la forte dilatation de la partie sous-diaphragmatique de la veine cave postérieure ; cette veine est commandée à la hauteur du diaphragme par un sphincter spécial qui règle le débit sanguin. Il existe, surtout chez les phoques, des réseaux admirables dans les nageoires.

L'estomac est orienté dans le sens de la longueur du corps, et l'intestin a une longueur considérable (23 m chez *Hydrurga*, 32 m chez *Arctocephalus*, et 80 m chez *Eumetopias*). Le cæcum est par contre très court ; le foie est plurilobé et dépourvu de vésicule biliaire. Les Pinnipèdes ne boivent jamais, leur nourriture contenant suffisamment d'eau.

La gestation est longue (ce qui est dû à la nidation différée), sans multiparité (sauf quelques gémellités). En général, des nouveau-nés, très avancés du point de vue morphologique et physiologique, sont allaités durant très peu de temps : de quelques jours (chez *Lobodon*) à 3 à 6 semaines au maximum. Font exception : le morse (18 mois) et *Otaria byronia*, chez qui les petits sont allaités pendant 26 à 50 semaines. Les Pinnipèdes, excepté le morse, se reproduisent une seule fois par an. Les femelles possèdent deux ou quatre mamelles abdominales.

La majeure partie des Pinnipèdes a des mœurs grégaires, tout au moins au moment de la reproduction : seuls *Ommatophoca rossi* et *Hydrurga leptonyx* sont solitaires. Les *Callorhinus, Arctocephalus australis* et *Phoca groenlandica* forment des troupes nombreuses, fréquemment victimes des carnages des chasseurs. Les troupeaux d'otaries sont constitués de plusieurs harems dont chacun compte un mâle et de nombreuses femelles (de trente à soixante-dix chez *Callorhinus* et *Arctocephalus australis*).

Les mâles arrivent les premiers sur les lieux de reproduction (les « roockeries ») et s'y installent, prenant possession de leurs territoires respectifs à travers des combats parfois sanglants. Les femelles viennent quelques jours plus tard, pour mettre bas et être immédiatement fécondées à nouveau. Les jeunes mâles forment le plus souvent des groupes à part. Chez les phoques, il existe une promiscuité très nette, et il n'y a pas de véritables harems (sauf chez *Erignathus barbatus* et *Halichoerus grypus*). Les *Phoca groenlandica* s'accouplent en pleine mer.

Le régime alimentaire, très varié, consiste principalement en Poissons, Mollusques et Crustacés. En majeure partie, les Pinnipèdes capturent leurs proies dans l'eau ; d'autres, comme *Odobenus* et *Erignathus*, les recherchent au fond. Nombre d'espèces vivent dans les régions froides et passent l'hiver sous les glaces, venant respirer régulièrement par des trous qu'elles creusent et entretiennent grâce à leurs incisives et leurs canines. Beaucoup de Pinnipèdes effectuent des migrations; celles-ci sont liées soit à la reproduction et se font alors des régions polaires vers les zones moins froides *(Phoca groenlandica)*, soit à la poursuite de bancs de Poissons.

A l'exception de la quasi-totalité de l'océan Indien, les Pinnipèdes sont représentés dans toutes les mers, surtout les mers polaires (où leur grande densité est liée à l'abondance du plancton). Les Phocidés sont beaucoup plus nombreux dans l'océan Glacial Arctique et dans le nord des océans Atlantique et Pacifique : seule la sous-famille des Lobodontinés est typiquement antarctique. Les Otariidés sont des habitants typiques des mers australes. Le morse est uniquement boréal.

Les ennemis des Pinnipèdes sont les requins, l'orque, l'ours blanc, le loup et, par-dessus tout, l'homme. Les Esquimaux tirent des phoques le principal de leurs ressources. Plusieurs espèces sont en voie de disparition.

Le sous-ordre des Pinnipèdes est divisé en trois familles : les Otariidés, les Odobénidés, et les Phocidés, les deux premières comportant des caractères communs. Pour la nomenclature et la classification de toutes les espèces, nous avons suivi Walker et la monographie de Scheffer (1958).

Les **Otariidés** *(Otariidae)*, comme les Odobénidés (morses), ont les membres postérieurs orientés vers l'avant, ce qui leur permet de mieux marcher à terre. Les doigts des membres postérieurs sont tous à peu près de la même longueur, les premier et cinquième, ainsi que ceux des membres antérieurs, portant des griffes rudimentaires ou absentes. Ces Animaux ont un canal alisphénoïde. Leur caractère fondamental est la présence de pavillons auriculaires et d'un scrotum. La formule dentaire est : $\left(I\frac{3}{2}; C\frac{1}{1}; Pm\frac{4}{4}; M\frac{2}{1}\right) \times 2 = 36$; les incisives supérieures sont bifides, et les dents maxillaires sont plus grosses que celles des autres Pinnipèdes.

Les Otariidés, répandus dans toutes les mers, surtout dans l'hémisphère austral, comptent six genres et douze espèces, réparties (surtout en fonction de leur fourrure) en deux sous-familles : les Otariinés, et les Arctocéphalinés. Selon Walker, la population mondiale des Otariidés atteindrait trois à quatre millions de têtes.

La sous-famille des *Otariinés* comprend les lions de mer. Les adultes possèdent une fourrure dépourvue de bourre ; les mâles adultes ont, le plus souvent, une sorte de crinière sur le cou et à l'avant du dos.

Le genre *Otaria* comprend une seule espèce, *O. byronia*, le lion de mer de Patagonie, ou otarie à crinière, qui habite dans l'Atlantique, du Brésil au détroit de Magellan, et dans le Pacifique jusqu'aux côtes du Pérou. Les gros mâles peuvent peser plus de 500 kg et mesurer jusqu'à 2,50 m de long, alors que les femelles ont un peu moins de 2 m de long. Cette espèce, surtout marine, remonte quelquefois les fleuves (300 km en amont de l'embouchure du Rio de la Plata). Cette otarie n'est jamais chassée activement; elle compte actuellement une population totale de sept cent mille à un million de têtes.

Eumetopias jubata, le lion de mer de Steller, unique espèce de son genre, vit dans la mer de Behring, près des îles Aléoutiennes, le long des côtes occidentales de l'Amérique du Nord jusqu'à la Californie, et à proximité des côtes asiatiques, du nord de l'océan Pacifique jusqu'au Japon. C'est le plus grand Otariidé (les mâles mesurent jusqu'à 3,50 m de long et pèsent plus d'une tonne). Les adultes ont la peau pratiquement nue.

Zalophus californianus, l'otarie de Californie, est réparti en trois populations isolées : sur les côtes occidentales de l'Amérique du Nord *(Z. c. californianus)*, aux îles Galapagos *(Z. c. wollebaecki)* et dans les mers du Japon méridional *(Z. c. japonicus)*; cette dernière forme, maintenant disparue, a probablement existé jusqu'en 1950. L'espèce est typique des mers tempérées et subtropicales. Les mâles atteignent 2,30 m de long et pèsent jusqu'à 280 kg. La livrée est noirâtre lorsqu'elle est mouillée et devient plus claire (du chamois foncé au sépia) lorsqu'elle est sèche. Cette otarie est celle qu'on voit dans les zoos et les cirques.

Le genre *Neophoca* comprend deux espèces, des mers australes : *N. cinerea*, le lion de mer australien ou lion de mer cendré, aujourd'hui confiné dans les côtes méridionales de l'Australie, et *N. hookeri*, des mers de Nouvelle-Zélande.

La sous-famille des *Arctocéphalinés* compte deux genres : *Arctocephalus* et *Callorhinus*, appelés dans leur ensemble ours marins, ou otaries à fourrure. Ils sont caractérisés par la persistance de la bourre dans la fourrure de l'adulte.

Il existe six espèces d'*Arctocephalus : A. pusillus*, qui vit à proximité des côtes d'Afrique du Sud ; *A. forsteri*, des mers de Nouvelle-Zélande et des environs de minuscules îles subantarctiques ; *A. doriferus*, des eaux de l'Australie méridionale et de la Tasmanie ; *A. tropicalis*, des îles

▼ *A gauche,* Eumetopias jubata *; les adultes ont la peau pratiquement nue.*
A droite, Otaria byronia, *le lion de mer de Patagonie, est une espèce surtout marine, qui remonte quelquefois les fleuves.*

T. Okapia

E.P.S.

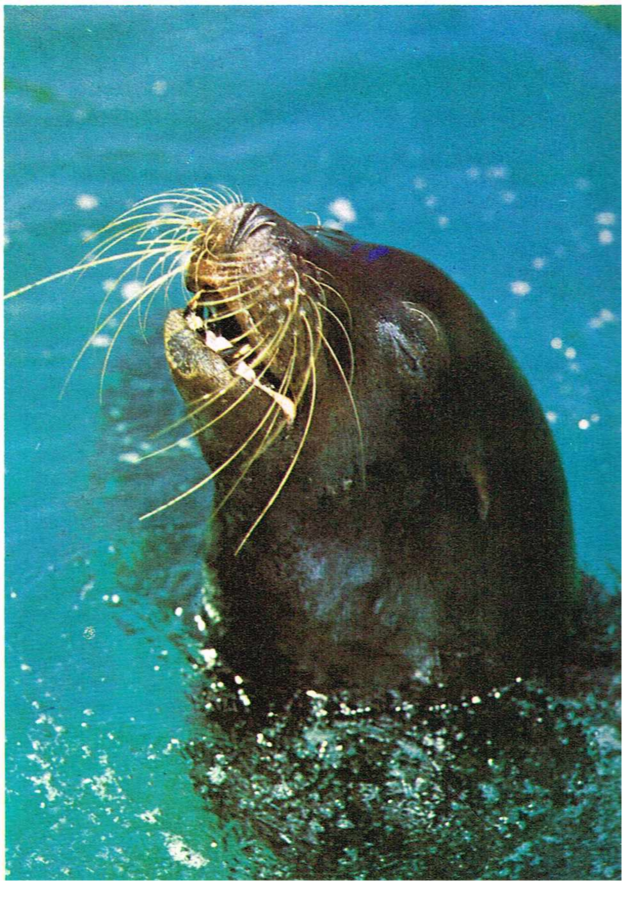

subantarctiques de l'océan Indien méridional et de l'océan Atlantique méridional; *A. australis*, des eaux du Brésil, de l'Argentine, du Chili et du Pérou, y compris les îles Falkland et les îles Galapagos; enfin, *A. philipii*, qu'on rencontre près de la Guadeloupe. La longueur de ces espèces varie de 1,50 m à 2 m, et atteint 2,50 m chez *A. pusillus*. Leur livrée est marron grisâtre.

Le genre *Callorhinus* compte pour unique espèce *C. ursinus*, l'otarie à fourrure proprement dite, ou ours marin proprement dit, ou encore callorhine de l'Alaska, longue de 2 m et pesant de 200 à 300 kg. Les mâles adultes sont gris foncé ou marron aux parties supérieures avec les épaules et l'avant du cou gris, le ventre et les nageoires brun roussâtre. Très chassée pour sa fourrure, cette espèce n'a pu survivre que grâce à des mesures internationales de protection.

Pendant l'été et l'automne, le callorhine se reproduit dans quelques îles des mers de Behring et d'Okhotsk. En hiver et au printemps, on le rencontre plus au sud, en différents endroits de l'océan Pacifique septentrional, jusqu'au Japon et à la Californie. Actuellement, sa population mondiale est estimée, au total, à un million et demi de têtes.

Les **Odobénidés** *(Odobenidae)* comptent une seule espèce, *Odobenus rosmarus*, le morse, répandu seulement dans l'hémisphère boréal (mers Arctiques, près de la limite de la banquise). Son aire actuelle couvre presque uniquement les côtes nord-orientales de la Sibérie et de l'Alaska, ainsi que le littoral du Groenland septentrional. Les vieux mâles peuvent mesurer jusqu'à 3,70 m de long, pour un poids de 1 200 kg. Le pelage, fourni seulement chez les juvéniles, est très court et clairsemé chez les adultes. Plus proche des otaries que des phoques, le morse a les membres antérieurs susceptibles de se retourner en avant, mais ne possède pas de pavillon auriculaire ni de scrotum.

Sa formule dentaire est :

$$\left(\mathrm{I}\,\frac{1}{0};\ \mathrm{C}\,\frac{1}{1};\ \mathrm{Pm}\,\frac{3}{3};\ \mathrm{M}\,\frac{1}{0}\right) \times 2 = 20.$$

Sa denture est réduite, à l'exception des canines, qui, chez les mâles, prennent un développement énorme, formant des défenses; les vieux mâles présentent M $\frac{1}{0}$.

Les mâles ne se servent pas de leurs défenses pour se battre, mais pour détacher du fond les proies (surtout des Mollusques et des Crustacés). Les femelles possèdent deux paires de mamelles.

Le morse ne s'éloigne guère du bord de la banquise ou des côtes arctiques; c'est un Animal grégaire, qui n'effectue pas de longues migrations.

Les **Phocidés** *(Phocidae)* sont les Pinnipèdes dont l'adaptation à la vie marine est la plus poussée. Leurs membres postérieurs, très réduits, sont toujours tournés en arrière et ils marchent très difficilement. Tous leurs doigts sont pourvus de griffes, ceux des membres antérieurs étant plus développés. Au pied, les premier et cinquième doigts sont les plus longs. Les pavillons auriculaires et le scrotum sont absents. La bourre existe seulement chez les tout jeunes, puis tombe sans être renouvelée. La formule dentaire est :

$$\left(\mathrm{I}\,\frac{2\text{-}3}{1\text{-}2};\ \mathrm{C}\,\frac{1}{1};\ \mathrm{Pm}\,\frac{4}{4};\ \mathrm{M}\,\frac{1}{1}\right) \times 2 = 30\text{-}34.$$

La famille comprend treize genres et dix-huit espèces, qu'on classe en quatre sous-familles : les Phocinés holarctiques; les Lobodontinés, uniquement antarctiques; les Monachinés, des mers tropicales et subtropicales des deux hémisphères; les Cystophorinés, avec un genre arctique et un autre genre antarctique.

La sous-famille des *Phocinés*, avec six genres, est caractérisée par I $\frac{3}{2}$, des griffes bien développées à tous les membres et des doigts de pieds de longueur à peu près égale.

Phoca vitulina, le phoque veau-marin, se rencontre dans les eaux côtières des océans de l'hémisphère boréal.

Pusa, genre très proche du précédent (certains auteurs l'incluent dans le genre *Phoca*), compte trois espèces : *Pusa hispida*, le phoque marbré, à diffusion circumboréale; *P. sibirica*, le phoque de Sibérie, qui habite uniquement le lac Baïkal; *P. caspica*, le phoque de la Caspienne, propre à la mer Caspienne. La longueur de ces espèces est habituellement inférieure à 1,50 m.

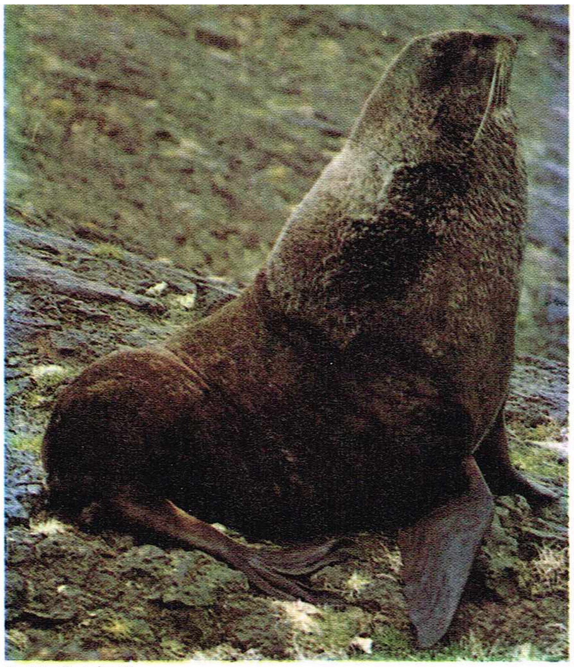

S. Mc Cutcheon

◀ **Callorhinus ursinus**, *la callorhine de l'Alaska, très chassée pour sa fourrure, n'a pu survivre que grâce à des mesures internationales de protection.*

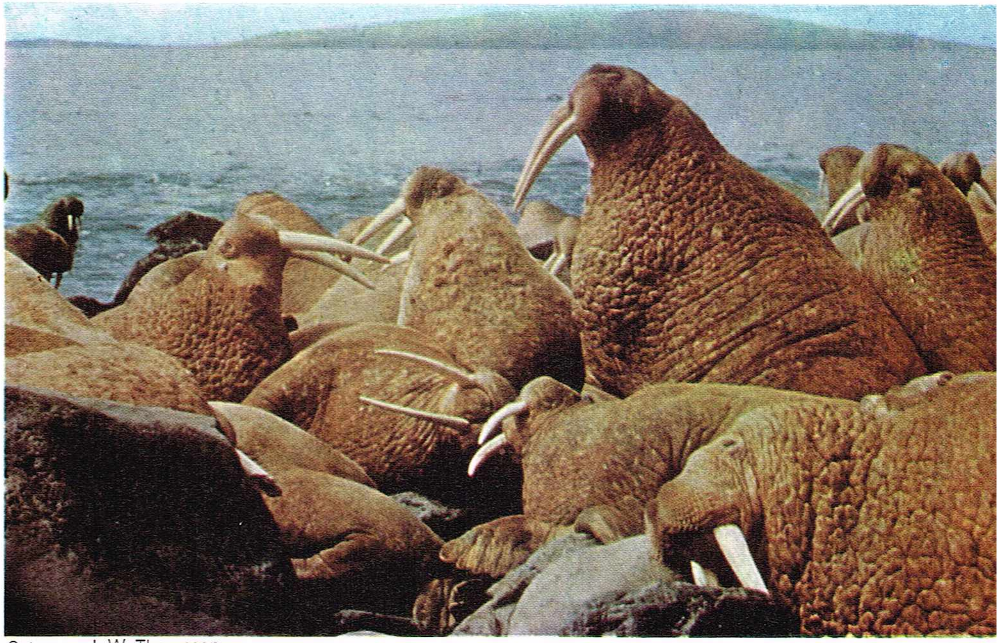

Ostman - J. W. Thompson

C. Bevilacqua

▼ *En haut, le morse* (**Odobenus rosmarus**) *est un Animal grégaire, répandu seulement dans l'hémisphère boréal. En bas, otaries de Californie* (**Zalophus californianus**), *que l'on voit dans les zoos et les cirques.*

S. Mc Cutcheon

▲ *Groupe de phoques veaux-marins* (Phoca vitulina) *que l'on rencontre dans les eaux côtières des océans de l'hémisphère boréal.*

Histriophoca fasciata, des mers de Behring, d'Okhotsk, et des alentours du Japon, présente une livrée ornée de 2 larges bandes jaunâtres, qui, partant de la tête, courent sur chaque flanc pour remonter sur la croupe.

Pagophilus groenlandicus est une espèce migratrice, qui se reproduit dans les mers Arctiques et dans l'extrême nord de l'océan Atlantique ; à l'ouest, il vit jusqu'à l'embouchure du fleuve Mackenzie, et à l'est jusqu'à la Nouvelle-Zemble. La limite méridionale de sa diffusion se trouve environ à 50° de latitude nord.

Halichoerus grypus, le phoque gris, espèce grégaire des eaux tempérées et froides du nord de l'océan Atlantique, a le dessus gris plus ou moins foncé avec des taches et des mouchetures foncées, et le dessous p us clair. Les mâles atteignent 3 m de long, pour un poids de 250 kg.

Erignathus barbatus, le phoque barbu, fréquente les bords des banquises arctiques et a une diffusion circumpolaire. C'est l'un des plus gros phoques : les mâles mesurent jusqu'à 3,75 m pour un poids de 400 kg. Sa livrée est gris jaunâtre ; son museau porte de longs poils soyeux, formant des sortes de moustaches.

La sous-famille des *Lobodontinés* est caractérisée par la présence de 2 incisives seulement de chaque côté ; les dents maxillaires ont un bord coupant tricuspidé ou dentelé (typique chez *Lobodon*) ; les premier et cinquième doigts des membres postérieurs sont beaucoup plus longs que les autres. La diffusion de ces Pinnipèdes est australe.

Chez *Lobodon carcinophagus*, le phoque crabier, les dents maxillaires ont des couronnes munies de trois petites pointes recourbées à leur bord postérieur. Cette espèce se nourrit surtout de Crustacés.

Ommatophoca rossi, le phoque de Ross, confiné aux extrêmes latitudes australes, semble pouvoir plonger plus profondément que tous les autres Pinnipèdes.

Hydrurga leptonyx, le léopard de mer, des eaux australes, est un prédateur de jeunes phoques et de manchots. Sa livrée est tachetée. Son habitat s'étend de la banquise antarctique jusqu'à la Patagonie, aux îles Falkland, à la Nouvelle-Zélande, à l'Australie méridionale et à la Tasmanie. *Leptonychotes weddelli*, le phoque de Weddell, fréquente toutes les mers australes.

La sous-famille des *Monachinés*, de diffusion tropicale et subtropicale, est constituée par le genre *Monachus*, qui comprend trois espèces, dont *M. monachus*, le phoque-moine, unique phoque vivant dans les eaux méditerranéennes. Il faudrait protéger cette espèce menacée d'extinction, pour en sauver les dernières colonies, qui peuplent les rivages de la mer Noire aux côtes du Maroc. Les deux autres espèces sont : *M. tropicalis*, de la mer des Caraïbes, et *M. schuinslandi*, des îles Hawaii, toutes deux devenues très rares. Elles se nourrissent essentiellement de Céphalopodes. Leur formule dentaire est :

$$\left(I\,\frac{2}{2};\ C\,\frac{1}{1};\ Pm\,\frac{4}{4};\ M\,\frac{1}{1}\right) \times 2 = 32.$$

La sous-famille des *Cystophorinés* compte deux genres et trois espèces. Ces phoques se distinguent par la structure de leur nez, qui, chez les adultes, peut se gonfler à volonté comme une vessie surmontant le front *(Cystophora)*, ou former une trompe *(Mirounga)*. Leurs incisives sont seulement au nombre de $\frac{2}{1}$.

Cystophora cristata, le phoque à capuchon, de grande taille (les gros mâles sont longs de 3,50 m), pèse jusqu'à 400 kg. Sa livrée est gris jaunâtre avec des taches brun foncé. Il est répandu dans la partie boréale de l'Atlantique, ainsi que dans l'océan Glacial Arctique, et accomplit de longues migrations. Il est très chassé.

Le genre *Mirounga* compte deux espèces : *M. angustirostris*, l'éléphant de mer nordique, de l'océan Pacifique septentrional, et *M. leonina*, l'éléphant de mer du Sud, qui vit dans les eaux australes, se reproduisant dans une zone comprise entre l'île Gough, l'Argentine et les îles Shetland. *M. leonina* est le plus gros Pinnipède vivant : les grands mâles, qui peuvent peser trois tonnes et demie, ont jusqu'à 6 m de long. Pendant l'été austral, ils vont par milliers dans une grande partie des îles de l'océan Glacial Antarctique, notamment aux îles Kerguelen, pour la reproduction et la mue. L'hiver, ils restent en mer. Sur les lieux de reproduction, contrairement à ce qu'on observe chez les otaries, ce sont les femelles qui arrivent les premières, se réunissant en bandes de quinze ou vingt têtes ; une dizaine de jours après les mises bas, elles sont de nouveau fécondées. La gestation dure 11 mois. Ces Animaux se nourrissent de Céphalopodes.

▼ **Halichoerus grypus**, *le phoque gris, est une espèce des eaux tempérées et froides du nord de l'océan Atlantique.*

Photo Researchers

T. Okapia

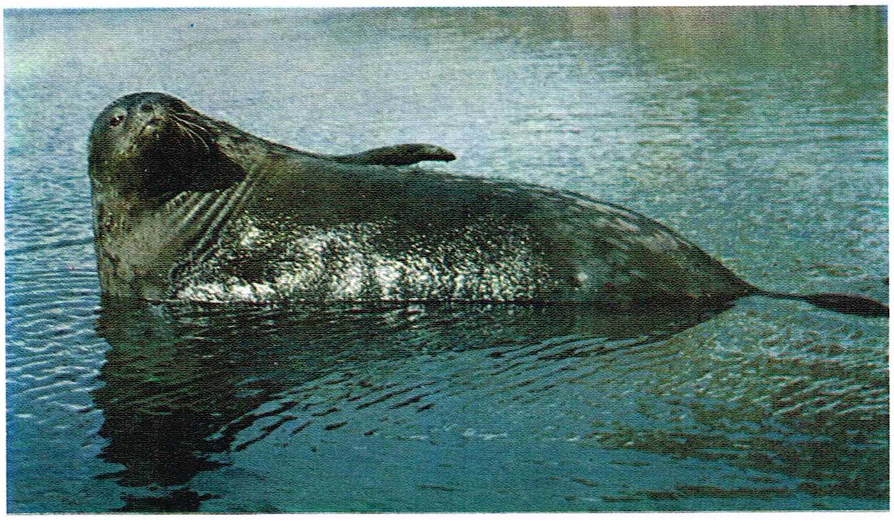

Magnum Photos

E.P.S.

▲◀ *En haut, à gauche, un jeune de* **Phoca vitulina.** *A droite, un éléphant de mer* **(Mirounga sp.)** *; les deux espèces du genre se nourrissent de Céphalopodes. En bas, l'oryctérope* **(Orycteropus afer),** *unique représentant de l'ordre des Tubulidentés, dont la distribution est quelque peu parallèle à celle des termites, dont il se nourrit en grande quantité.*

Ordre des Tubulidentés

Les Tubulidentés *(Tubulidentata),* petit ordre africain, comprennent la seule espèce *Orycteropus afer,* l'oryctérope, qui constitue la famille des **Oryctéropodidés** *(Orycteropodidae).*

L'aire de l'oryctérope s'étend sur une grande partie de l'Afrique, au sud du Sahara, depuis le Soudan, à l'exception des forêts denses. En général, sa distribution est quelque peu parallèle à celle des termites, car il se nourrit surtout de ces Insectes.

Cet Animal est caractéristique : la tête est très longue, avec un museau étroit, presque cylindrique et un peu gonflé à l'extrémité; les oreilles sont larges et longues; le cou est bref, le corps massif, avec un dos arqué; les pattes sont très robustes; enfin, la queue est grosse et bien musclée. La morphologie externe de l'oryctérope rappelle celle des fourmiliers, et surtout celle du porc (on l'appelle parfois le porc de terre, ou fourmilier africain). Sa longueur atteint 1,50 m à 1,60 m, plus environ 50 cm pour la queue; son poids varie de 50 à 70 kg.

La fourrure, à poils courts, est clairsemée; la tête porte de longues vibrisses. Les pattes antérieures sont tétradactyles par suite de la disparition du pouce; les doigts ont de puissantes griffes, fouisseuses, avec lesquelles l'Animal creuse son terrier et détruit les termitières; les pieds sont pentadactyles et munis de griffes moins longues; les pattes sont principalement digitigrades. Le crâne est allongé. La formule vertébrale est : C 7; D 13; L 8; S 6; Cd 25. Il n'y a pas de côtes flottantes et les clavicules sont bien développées et robustes en raison de l'adaptation au fouissage. Enfin, le bassin, long et étroit, présente une longue symphyse pubienne.

La denture, caractéristique, est constituée par des dents colonnaires, très semblables les unes aux autres, à croissance continue, sans émail et revêtues intérieurement d'une couche de cément; elles sont constituées par une série de prismes hexagonaux en ivoire (dentine), disposés parallèlement les uns aux autres, et parcourus le long de leur axe par une cavité tubulaire (d'où le nom de l'ordre). Le nombre des prismes (mille cinq cents pour la deuxième molaire) varie selon la grosseur des dents. Celles-ci, remplies de pulpe dentaire dans leur canal, sont implantées chacune dans un alvéole bien défini. Enfin, le nombre des dents fonctionnelles est généralement de 5 par demi-mâchoire. Il y a une dentition de lait.

L'ouverture buccale, petite, est entourée par d'épaisses lèvres; la langue, longue et protractile, sert à capturer les termites. Les glandes salivaires sont très développées. L'estomac, sacciforme, est simple; sa région pylorique possède une forte musculature; le cæcum est peu développé; le foie est bilobé et possède une vésicule biliaire.

Le cerveau est très macrosmatique, le néopallium étant peu développé; les hémisphères cérébraux ne recouvrent ni le cervelet, ni les bulbes olfactifs; il existe pourtant une différenciation corticale importante, assez semblable à celle des Ongulés.

Les yeux, de la grosseur de ceux du lapin, sont très petits par rapport au corps. La rétine possède seulement des bâtonnets, ce qui représente une adaptation à la vie crépusculaire et nocturne. L'odorat est le sens le plus développé et sert de guide pour la recherche de la nourriture.

Les testicules des mâles sont inguinaux, internes, et totalement dépourvus de scrotum. L'utérus des femelles est double : chaque corne utérine débouche indépendamment dans un canal utérin servant de vagin; le placenta est zonal; il y a deux paires de mamelles, l'une ventrale, l'autre inguinale. Les femelles mettent bas normalement un petit par portée (rarement des jumeaux) en octobre (novembre en Afrique centrale), au début de la seconde saison des pluies.

L'oryctérope est presque uniquement termitophage et fort peu myrmécophage. Nocturne et solitaire, il se cache pendant le jour dans une profonde tanière, qu'il creuse dans le sol, parfois très rapidement : il est capable de s'enterrer complètement en quelques minutes. Son terrier, qui est parfois très profond (3 m) et a, en général, une inclinaison de 45°, peut comprendre plusieurs ouvertures.

Les affinités de l'oryctérope ne sont guère nettes; il se rapproche plus de l'ensemble des Ongulés que de l'ancien groupe hétérogène des Édentés au sens large (Édentés et Pholidotes). D'après l'examen des fossiles, on peut considérer que l'oryctérope était à l'origine un pré-Ongulé; sa souche est constituée par les *Premesaxonia* de Frechkop, qui, restés très proches du type ancestral des Ongulés proprement dits, se sont précocement spécialisés pour un genre de vie tout à fait particulier (régime insectivore et fouissage).

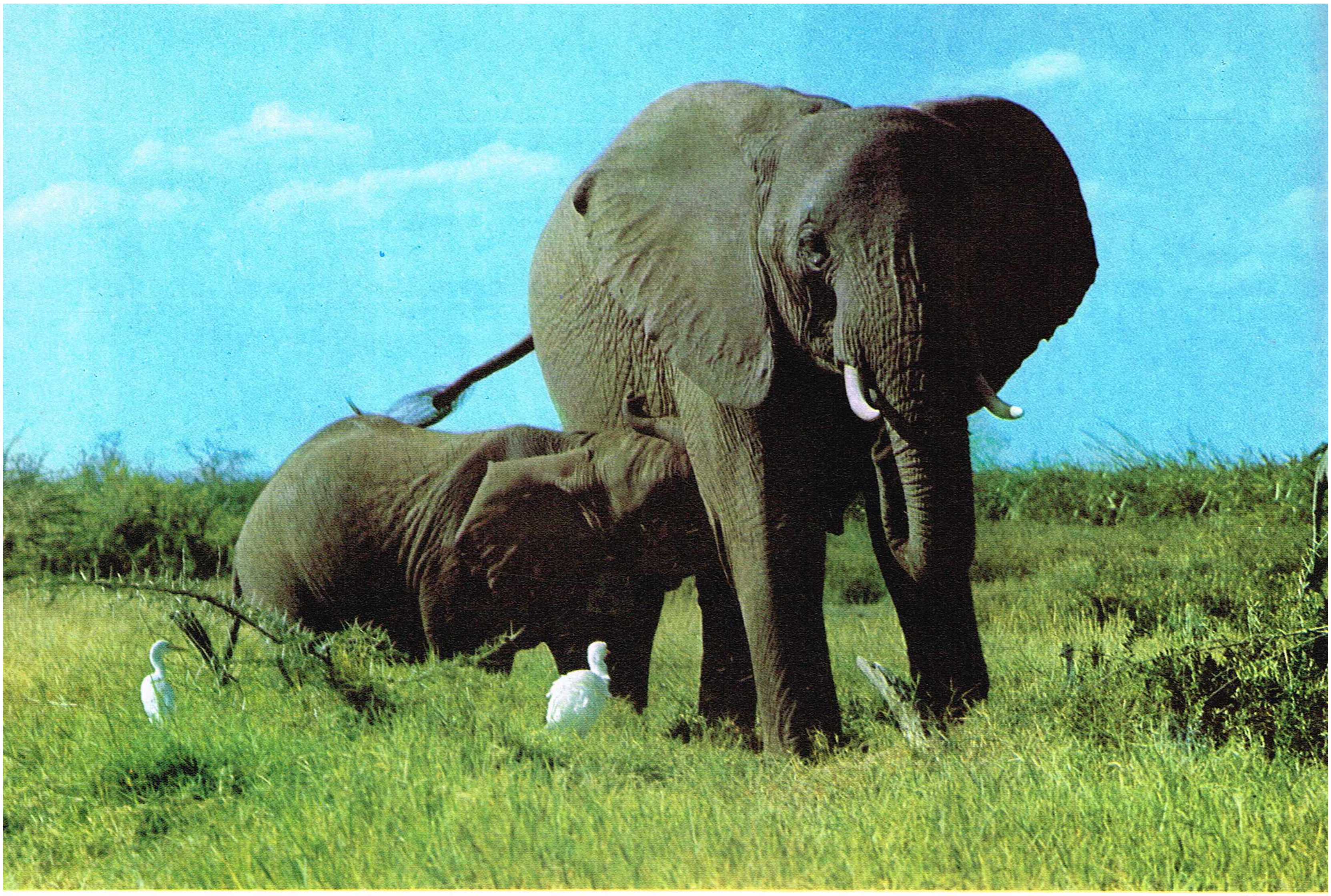

N. Myers

▲ *L'ordre des Proboscidiens comprend la seule famille des Éléphantidés qui compte les plus gros Animaux terrestres vivants. Ici, femelle et jeune d'éléphant d'Afrique* (**Loxodonta africana**), *dont on observera l'ampleur des oreilles.*

Ordre des Proboscidiens

L'ordre des Proboscidiens *(Proboscidea)* comprend la seule famille des **Éléphantidés** *(Elephantidae)*. Les Proboscidiens ont constitué un ordre florissant au Tertiaire et au Quaternaire, avec une très riche variété de formes, souvent de taille colossale ; celles-ci sont presque toutes éteintes, et seules nous sont parvenues deux espèces d'éléphants : *Loxodonta africana,* l'éléphant d'Afrique, et *Elephas maximus,* l'éléphant d'Asie.

Les éléphants sont les plus gros Animaux terrestres vivants, atteignant 4 m de haut pour un poids de 7 tonnes. Ils ont le corps fort volumineux et massif, mais sont dotés d'une grande mobilité. Leur tête est grande et leur cou bref. Leur hauteur est à peu près égale à leur longueur, ce qui leur confère un remarquable équilibre. Leur caractère principal est la possession d'une longue trompe (d'où le nom de l'ordre, dérivé du latin *proboscis*) ; celle-ci sert à la respiration, au toucher, comme pompe pour l'aspiration de l'eau (ensuite rejetée dans la bouche) et, enfin, à la préhension des aliments.

Leur peau est verruqueuse, ce qui est dû à une hypertrophie papillaire aboutissant à la formation de saillies cutanées. L'augmentation de la superficie de la vascularisation qui en résulte permet sans doute une meilleure thermorégulation. La couche dermique a environ 2 cm d'épaisseur. Les glandes cutanées manquent, sauf aux paupières et en quelques rares endroits de la tête. Le système pileux est très clairsemé, mais relativement uniforme, sauf au menton et sur la tête, ainsi qu'à l'extrémité de la queue, où se trouve une touffe de poils noirs.

Le crâne, très volumineux, présente d'importants processus de pneumatisation des os. La formule vertébrale est : C 7 ; D 19-21 ; L 3-5 ; S 3-6 ; Cd 24-34. Chaque vertèbre dorsale porte 1 paire de côtes, dont 5 ou 6 sont des côtes vraies. Il y a environ 7 paires de fausses côtes chez *Elephas,* et 4 ou 5 chez *Loxodonta*.

Les éléphants ont des pattes très longues, colonnaires et presque verticales : leurs extrémités sont pentadactyles ; leurs doigts sont englobés dans une sorte de coussin élastique. L'appui des membres est digito-plantigrade ou subplantigrade. A la différence des Ongulés vrais (Artiodactyles et Périssodactyles), les pattes antérieures sont plus robustes que les postérieures, à cause du grand poids de la tête qui pèse sur l'avant-train.

L'estomac est un sac unique très volumineux (1 m de long) dont le grand axe est plus ou moins vertical ; il présente surtout un grand développement de l'ensemble glandulaire sur la petite courbure. L'intestin, de structure simple, est de type primitif ; le cæcum, long et sacculé, rappelle celui des Siréniens. Il n'y a pas de vésicule biliaire.

La denture des éléphants actuels compte seulement 6 dents fonctionnelles, bien développées et présentes simultanément, dont 4 masticatoires, selon la formule : $\left(I\,\frac{1}{0}; C\,\frac{0}{0}; Pm/M\,\frac{1}{1}\right) \times 2 = 6$. La formule dentaire totale et théorique étant $\left(I\,\frac{1}{0}; C\,\frac{0}{0}; Pm\,\frac{3}{3}; M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 26$. Les 12 dents maxillaires sortent et deviennent fonctionnelles seulement à des moments successifs, se remplaçant au fur et à mesure dans le sens postéro-antérieur. La troisième et dernière molaire deviendrait fonctionnelle vers l'âge de 30 ans ; son usure au cours de la vieillesse de l'éléphant provoquerait des difficultés à mastiquer, et constituerait vraisemblablement l'un des facteurs limitants de la longévité, qui est habituellement de 60 à 70 ans, et même 80 ans. Les dents maxillaires ont une couronne déprimée, à nombreuses lames verticales d'ivoire, recouvertes d'émail et séparées par du cément.

L'unique incisive supérieure croît pendant toute la vie, se transformant en défense, recourbée vers le haut, atteignant 3,40 m de long, 60 cm de diamètre maximal, et un poids de 117 kg (de telles dimensions extrêmes ne sont pas rares). Les défenses sont plus développées chez les mâles en général, et chez l'éléphant d'Afrique en particulier. Le développement et la couleur des défenses semblent directement en relation avec la nourriture : la couleur de l'ivoire varie du brun foncé (Animaux des

forêts du Zaïre) au rosé, au blanc crème, ou à des teintes plus claires encore.

L'encéphale des Proboscidiens adultes dépasse en poids absolu (5 430 g, selon Weber) et en volume (6 686 cm³ pour *Elephas maximus* et 6 651 cm³ pour *Loxodonta africana*, selon Osborn) les valeurs observées chez tous les Mammifères terrestres vivants. Selon Weber et Dexler, le poids de l'encéphale par rapport au poids corporel varie dans la proportion suivante chez l'éléphant d'Asie : 0,8% chez les juvéniles, 0,17% chez les adultes. Cet indice élevé de céphalisation, qui semble supérieur à celui des singes Anthropomorphes, est sans doute lié au développement et à l'emploi multiforme de la trompe, comparable à une main par ses fonctions préhensiles et tactiles, ainsi qu'à la grande acuité de l'odorat. Cependant, l'intelligence très connue de ces Proboscidiens doit être rapportée plutôt à la morphologie cérébrale qu'au poids et au volume de l'encéphale.

Les reins sont lobulés. Les testicules sont intra-abdominaux. L'utérus est bicorne ; le placenta est mixte, zonal et décidué, ce qui s'accompagne du type diffus des aires polaires, lesquelles ne sont pas déciduées. Il n'y a qu'une paire de mamelles, pectorales, qui donnent un lait cinq fois plus riche en matières grasses que celui de la vache. *Elephas maximus* présente une gestation de 607 à 641 jours, chaque portée comptant un seul petit, très rarement des jumeaux. Le nouveau-né pèse environ 90 kg et a une hauteur de 1 m au garrot. L'espèce atteint sa maturité sexuelle vers 8 à 12 ans et sa taille maximale vers 25 ans. *Loxodonta africana* a une gestation d'environ 660 jours.

Les éléphants sont grégaires et strictement végétariens, se nourrissant d'herbes, de feuilles, de rameaux tendres, d'écorces, de racines et de fruits. Dans la savane et les broussailles africaines, ils effectuent chaque année des migrations régulières, liées à la maturation des fruits. Le minimum de fourrage nécessaire par jour à un adulte est de 40 kg pour l'éléphant d'Asie et de 50 kg au minimum pour l'éléphant d'Afrique.

Loxodonta africana, l'éléphant d'Afrique, habite une grande partie de l'Afrique orientale, centrale et australe ; naguère, on le trouvait aussi en Afrique du Nord. Il vit dans toute sorte d'habitats : les savanes, les régions proches des grands fleuves, les broussailles (mêmes arides) et les forêts équatoriales. On distingue un certain nombre de races géographiques plus ou moins distinctes, dont la systématique est fort complexe. L'éléphant d'Afrique est le plus grand Mammifère terrestre vivant : sa longueur, trompe comprise, est de 6 m à 7,50 m ; sa queue est longue de 1 m à 1,30 m ; sa hauteur au garrot est de 3 à 4 m ; enfin son poids varie de 5 à 7,5 tonnes.

Elephas maximus, l'éléphant d'Asie, a une longueur totale (trompe comprise) de 5,50 m à 6,40 m ; sa queue est longue de 1,20 à 1,50 m ; sa hauteur au garrot est de 2,50 m à 3 m ; il pèse 5 tonnes. Il vit dans les jungles denses et les plaines herbeuses de l'Asie méridionale (Inde, Assam, Ceylan, Birmanie, Siam, Malaisie et Sumatra). Il a été introduit à Bornéo. Sa distribution est actuellement réduite et a été fortement influencée par l'homme et par la domestication.

On peut distinguer les éléphants par les caractères suivants.

Éléphant d'Afrique :

Oreilles grandes recouvrant en position normale presque toute l'épaule.

Forme du front, vu par l'avant : convexité.

Profil du dos : concave.

Pattes antérieures possédant 4 ou 5 ongles. Pattes postérieures possédant 3 ongles (5 à l'avant et 4 à l'arrière chez les éléphants de forêt).

Extrémité de la trompe : présente 2 appendices digitiformes.

Taille plus grande.

Éléphant d'Asie :

Oreilles petites.

Forme du front, vu par l'avant : concavité médiane.

Profil du dos : convexe.

Pattes antérieures possédant 5 ongles. Pattes postérieures possédant 4 ongles.

Extrémité de la trompe : présente seulement 1 appendice digitiforme.

Taille plus petite.

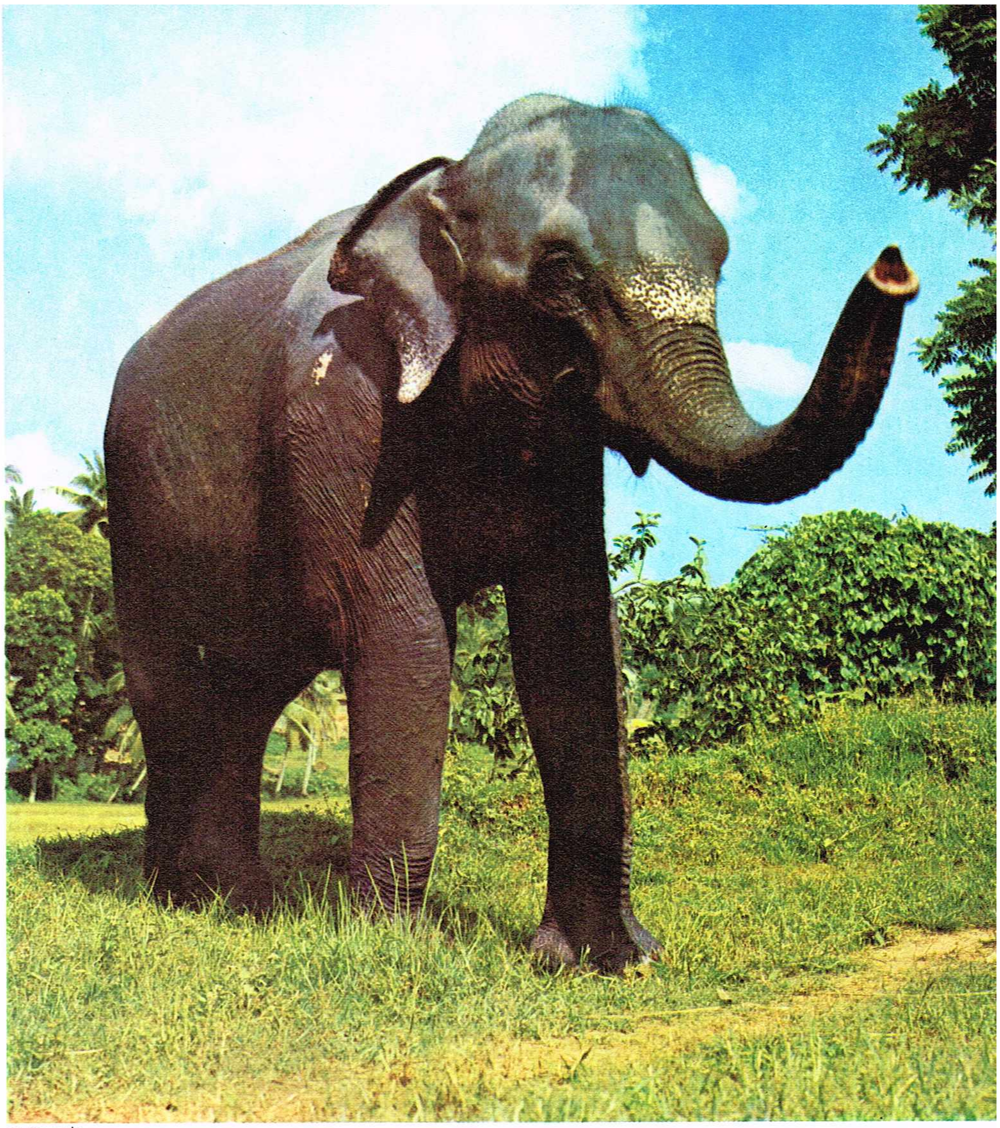

T. Poggio

▲ ***Elephas maximus,** l'éléphant d'Asie, caractérisé par des oreilles petites, vit dans les jungles denses et les plaines herbeuses de l'Asie méridionale.*

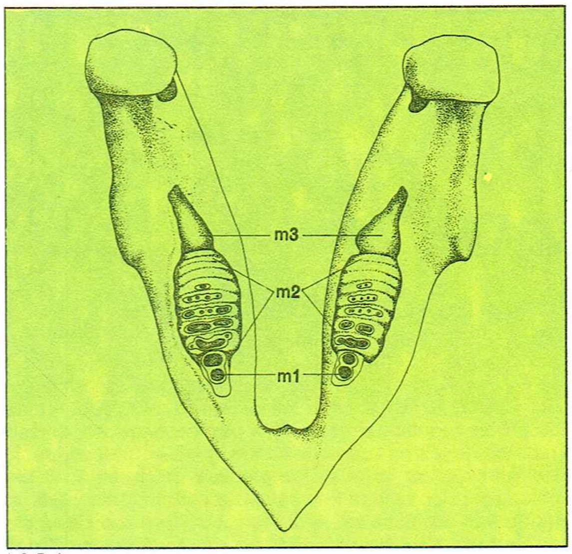

I.G.D.A.

◀ ***Représentation schématique de la mandibule d'un jeune éléphant d'Asie, où l'on observe trois molaires de chaque côté (m1, m2, m3).***

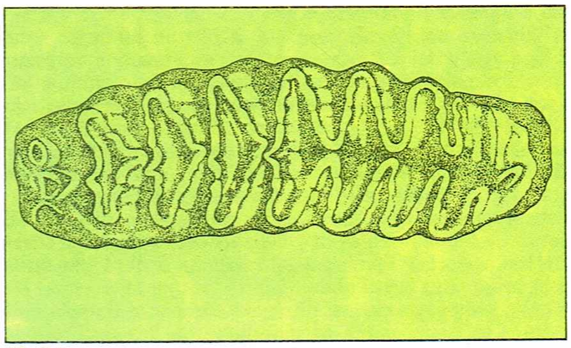

I.D.G.A.

◀ ***Molaire d'éléphant d'Afrique, vue de dessus (face occlusale).***

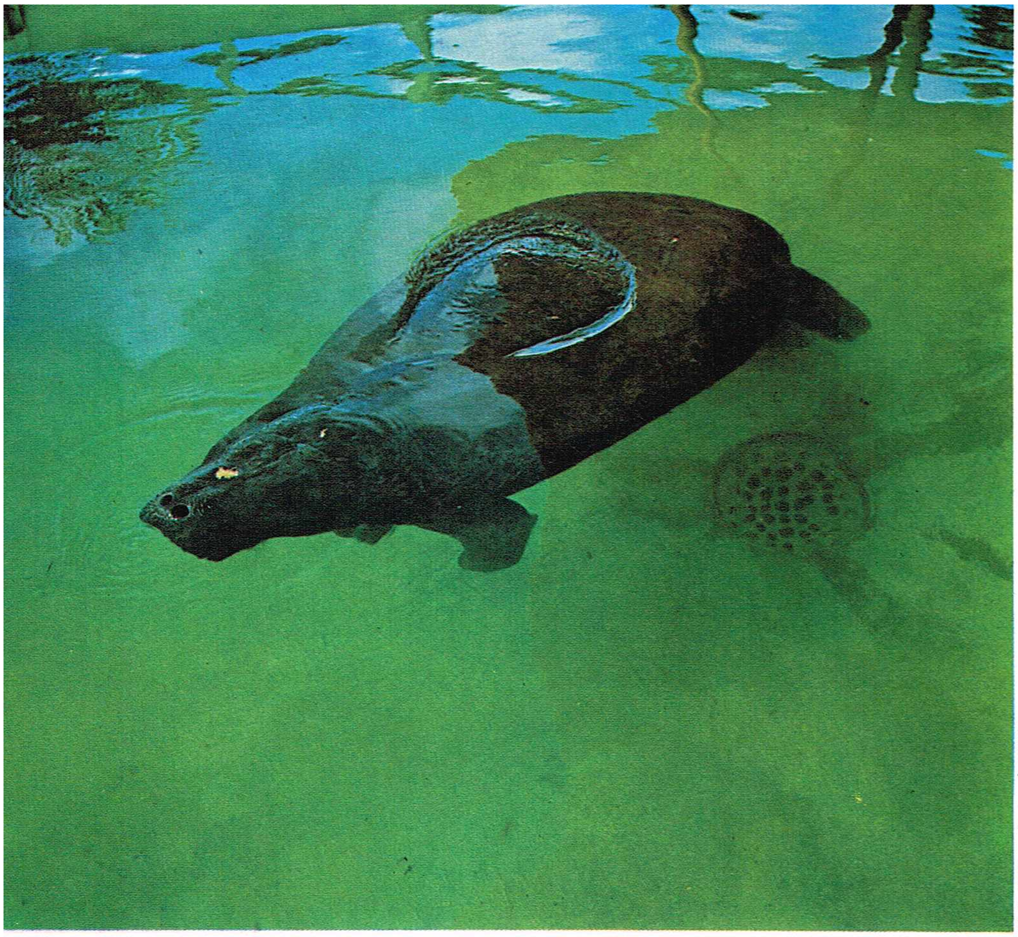

P.A. Milwaukee - Jacana

▲ **Trichechus manatus** *(Sirénien Trichéchidé), le lamantin d'Amérique, vit dans les eaux côtières et les rivières du sud des États-Unis, des Antilles, et d'une partie de l'Amérique centrale et du Sud.*

Ordre des Siréniens

Sur le plan de l'adaptation au milieu aquatique, les Siréniens *(Sirenia)* se situent entre les Pinnipèdes (les moins spécialisés) et les Cétacés (les plus spécialisés).

Le terme de Sirénien a été adopté par Illiger en 1811, pour exprimer la très vague ressemblance que certains de ces Animaux présentent vis-à-vis des sirènes de la mythologie. Les femelles de dugong, en effet, présentent une certaine analogie avec ces dernières : elles possèdent une paire de mamelles en position à peu près pectorale.

Le corps des Siréniens est fondamentalement fusiforme, ce qui est plus net chez le dugong que chez les lamantins. L'avant-train est massif. La tête présente un museau arrondi, pourvu de grosses lèvres caractéristiques, et un cou indistinct. Le tronc s'élargit jusqu'à la hauteur des parties postérieures des nageoires pectorales, puis s'amincit jusqu'à la base de la nageoire caudale, laquelle est située horizontalement. Les pattes sont réduites aux deux seules nageoires pectorales, les postérieures ayant disparu. Les nageoires pectorales s'insèrent très en avant du tronc; leur épaisseur va en diminuant du bord antérieur, arrondi, au bord postérieur, plus fin et plus flexible. Seuls la main et l'avant-bras sont visibles, tandis que le bras est interne. Les nageoires sont assez petites, par rapport au corps. Chez les lamantins, elles sont armées de griffes rudimentaires. Il n'y a pas de nageoire dorsale.

La couleur de la peau est brun grisâtre, plus claire sur les flancs et sur la tête; les parties inférieures sont rose pâle, avec des taches foncées pour certains lamantins. La longueur corporelle est de 2,50 m à 3,20 m chez les mâles de dugong (les femelles sont un peu plus petites), et de 2 à 4,50 m chez les lamantins; le poids peut atteindre 700 kg chez les lamantins.

La peau est très épaisse (10 à 25 mm selon les zones du corps), de sorte que certains auteurs ont considéré ces Animaux comme des pachydermes aquatiques. La plus grande partie est représentée par le derme, puisque l'épiderme est très mince. Par contre, selon Steller, la rhytine, espèce disparue à peu près certainement durant la seconde moitié du XVIIIe siècle, avait un épiderme cinq fois plus épais que le derme : cette caractéristique, observée aussi chez les Monodontidés, est exceptionnelle chez les Mammifères. Le pelage est très réduit; bien développé chez l'embryon, il se limite à quelques zones du corps chez les adultes.

Les orifices nasaux sont situés à la partie dorsale de la tête. Les yeux, petits et globuleux, se trouvent sur les côtés et assez haut. Le cristallin est lenticulaire; la sclérotique est épaisse, moins toutefois que celle des Cétacés. Les paupières sont grosses et rigides. Il existe une membrane nictitante bien développée, mais pas de véritables glandes lacrymales. La vision est fort peu développée. Les orifices auriculaires, fort petits (quelques millimètres de diamètre) et non visibles extérieurement, s'ouvrent dans la direction du prolongement de l'angle postérieur des yeux.

Le principal trait du squelette est la présence de 6 vertèbres cervicales seulement chez les lamantins, ce qui est rarissime pour des Mammifères et qu'on ne trouve que chez les Édentés; par contre, le dugong en possède 7, ce qui est normal. La ceinture scapulaire est bien développée, alors que la ceinture pelvienne est très réduite, avec seulement des rudiments en suspension dans la masse musculaire (il n'y a plus de membres postérieurs). Chez le dugong, les deux rudiments du bassin représentent chacun, par leur partie antérieure, l'ilion, et, par leur partie postérieure, l'ischion. Il y a souvent réduction des côtes et du sternum, ce qu'on interprète comme une adaptation à une meilleure mécanique respiratoire.

Le cerveau a peu de circonvolutions (type lissencéphale) et présente dans son ensemble un stade très primitif d'évolution. Celui du dugong adulte pèse de 225 g à 280 g et mesure environ 8,5 cm à sa plus grande largeur; en général, le cerveau des Siréniens est plus petit que celui des Mammifères aquatiques de taille analogue. Il existe un vaste réseau admirable près de la base du cerveau, entourant l'hypophyse et les troncs nerveux, jusqu'à la sortie du crâne. Le cervelet n'est pas recouvert, même partiellement, par des hémisphères cérébraux; il n'y a pas de glande pinéale.

Le cœur des Siréniens est assez petit et caractérisé, notamment, par un sillon qui divise sa pointe en deux parties, correspondant chacune à un ventricule. Les globules rouges, de forme quelque peu variable, ont un diamètre habituel de 6 à 7 μ.

En ce qui concerne l'appareil respiratoire, la trachée est très brève, tandis que les bronches sont fort longues. Les poumons occupent la plus grande partie de la cage thoracique et sont en forme de sacs allongés; chez un dugong de 2,50 m de long, ils peuvent être longs de 60 cm et larges de 25 cm. Les poumons possèdent des sacs à air spéciaux, appelés aussi *alvéoles géants*, cylindriques ou tubulaires, longs de 6 mm et larges de 1 à 2 mm; les plus grands sont périphériques et situés dorsalement, alors que les plus petits sont internes.

La bouche des Siréniens est pourvue de robustes plaques masticatoires, à tissu corné épais. La denture, adaptée à un régime phytophage particulier, présente des phénomènes de réduction. Chez la rhytine, elle était totalement absente. Son interprétation exacte est très complexe, et il est difficile d'en donner une formule précise.

Chez le dugong, la formule dentaire est généralement la suivante : $\left(I\frac{1}{0};\ C\frac{0}{0};\ Pm\frac{0}{0};\ M\frac{3}{3}\right) \times 2 = 14$; il existe en réalité 2 prémolaires, mais celles-ci s'oblitèrent précocement; quant aux molaires, elles se développent plus tard. Les canines ont été observées seulement chez les espèces fossiles. Les vieux individus possèdent seulement 8 molaires en tout : $\left(M\frac{2}{2} \times 2\right)$. Les lamantins présentent $I\frac{2}{2}$; ces incisives tombent avant l'âge adulte : les dents maxillaires qui apparaissent ensuite peuvent atteindre le nombre de 10 à chaque demi-mâchoire, mais il en existe rarement plus de $\frac{6}{6}$ simultanément.

Les dents sont à peu près cylindriques, à croissance continue et dépourvues d'émail. Le nombre de dents maxillaires augmente progressivement, avec la sortie successive des dents postérieures, ce qui correspond à la croissance des mâchoires : les dents antérieures (au nombre de 1 ou 2 et jusqu'à 5) tombent, par résorption des racines; le nombre des molaires est compris entre 10 et 15.

La langue est peu mobile. L'œsophage, étroit, se termine par un robuste sphincter, auquel fait suite une première poche gastrique, glandulaire; celle-ci présente un appendice (l'appendice glandulaire d'Owen), puis une portion allongée, considérée comme une seconde cavité

gastrique. Le côlon est dépourvu de cæcum. Le foie est trilobé et possède une vésicule biliaire (plus grande chez les lamantins). Le pancréas est peu développé.

Les reins sont lisses chez le dugong, et présentent des traces de lobulation chez les lamantins. Les testicules sont intra-abdominaux. Le placenta est diffus, en partie zonal et indécidué.

Conformés pour la vie aquatique, les Siréniens se déplacent avec difficulté à terre (un lamantin peut y vivre une journée, le dugong deux jours) : sous le poids du corps, la cage thoracique s'affaisse progressivement (comme pour les Cétacés échoués), ce qui comprime le cœur et les poumons, aboutissant à l'arrêt de la circulation et de la respiration.

Les Siréniens se rattachent essentiellement à la lignée des Ongulés au sens large, et, en particulier, aux Proboscidiens et aux Hyracoïdes. On n'a constaté aucune parenté avec les Cétacés. Cet ordre est apparu brusquement à l'Éocène avec des formes archaïques d'Égypte *(Eotherioides)* et du Nouveau Monde (*Parastomus,* de la Jamaïque), à denture complète; ces formes étaient cependant déjà nettement spécialisées; les espèces fossiles connues étaient plus nombreuses et avaient une distribution plus vaste que les espèces actuelles, qui habitent presque uniquement les eaux tropicales, marines ou douces, et remontent les grands fleuves sur de longs parcours. Ainsi, la rhytine de Steller vivait dans la mer de Behring et était adaptée à la vie dans les eaux froides.

L'ordre est divisé en deux familles : les Dugongidés et les Trichéchidés, ou Manatidés : la première comprend le dugong et la rhytine de Steller (disparue) ; la seconde renferme les lamantins, ou manates. Au total, l'ordre compte deux genres et quatre espèces vivantes.

Les **Dugongidés** *(Dugongidae)* comptent une seule espèce, *Dugong dugong = D. australis = Halicore dugong,* le dugong d'Australie, qui habite la mer Rouge, le long des côtes orientales de l'Afrique, à proximité des îles du golfe du Bengale, dans l'archipel Malais et aux environs des côtes tropicales de l'Australie. Parmi les caractères de différenciation de cette famille, nous citerons la nageoire caudale, qui forme deux ailes symétriques.

Les dugongs, plus marins que les lamantins, vivent habituellement en couples ou par groupes de trois à six têtes; ils fréquentent pendant la nuit les hauts fonds, broutant les prairies sous-marines et la végétation proche de la côte. Ils se servent de leur grande lèvre supérieure pour explorer les fonds et choisir les plantes : Algues et autres plantes, telles que *Halophila ovalis* et *Zostera capricorni* en Australie, et *Cymodocea ciliata* à Madagascar. Après une gestation de 11 mois environ, les femelles mettent au monde 1 seul petit, qui naît sous l'eau et monte immédiatement à la surface pour respirer; celui-ci est ensuite soigné avec beaucoup d'attention par sa mère, et parfois porté par elle sur son dos. La chasse a entraîné une diminution des populations et même, dans certaines régions, la disparition de l'espèce.

En 1742, on a découvert une nouvelle espèce de Sirénien, *Hydrodamalys stelleri = Rhytina gigas,* la rhytine de Steller. Cet Animal vivait dans une aire relictuelle : autour de l'île de Behring, et de quelques petites îles du groupe des Komandorsk. Il était de grande taille (7 à 8 m de long et plus de 6 m de circonférence maximale) et dépourvu de dents. La population était estimée à mille cinq cents têtes. Mais vingt-sept ans après sa découverte, décimée par la chasse, la rhytine était considérée comme disparue.

Les **Trichéchidés** *(Trichechidae),* ou **Manatidés** *(Manatidae),* comprennent les lamantins, ou manates *(Trichechus),* avec trois espèces. Parmi les divers caractères distinctifs, citons la nageoire caudale, arrondie et présentant, uniquement chez les juvéniles, une petite entaille médiane.

T. senegalensis, le lamantin du Sénégal, habite les rivières et les eaux côtières d'Afrique occidentale, à peu près du fleuve Sénégal (16° de latitude nord) au fleuve Kuanaga (10° de latitude sud) ; on le trouve, entre autres, dans le bassin du Niger et dans le cours inférieur du Congo, ainsi que dans le bassin du lac Tchad.

T. manatus, le lamantin d'Amérique, comprenant *T. latirostris* comme sous-espèce, vit dans les eaux côtières et les rivières du sud des États-Unis, des Antilles, d'une partie de l'Amérique centrale et de la zone septentrionale de l'Amérique du Sud.

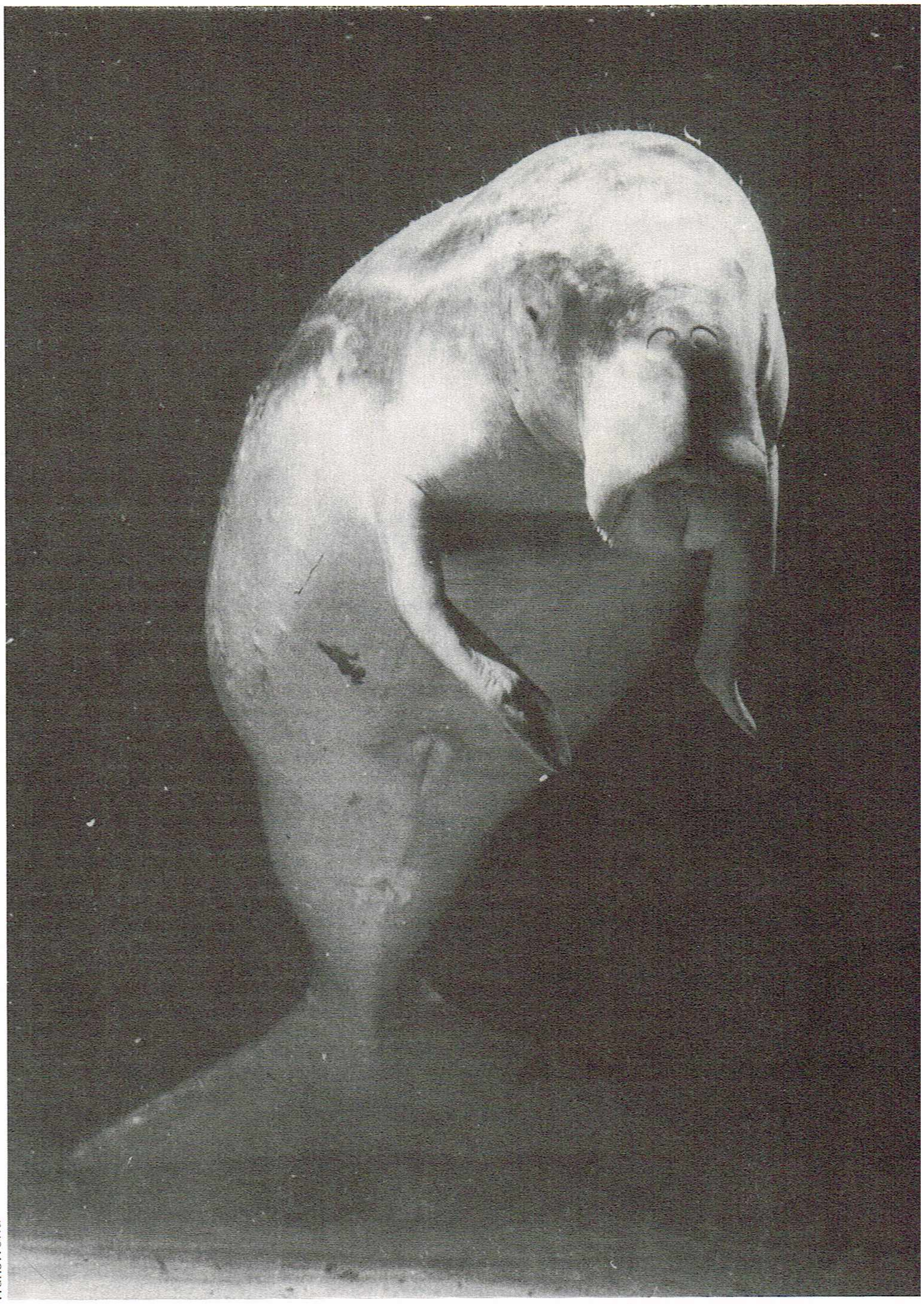

Transworld

▲ **Dugong dugong,** ***dont on observera la nageoire caudale qui forme deux ailes symétriques. Les dugongs se servent de leur grande lèvre supérieure pour explorer les fonds et choisir les plantes qu'ils broutent.***

T. inunguis habite les bassins fluviaux de l'Orénoque et de l'Amazone; strictement fluvial, il remonte les cours d'eau jusqu'à leurs tronçons de montagne.

Actifs aussi bien de jour que de nuit, les lamantins se nourrissent, surtout la nuit, de nombreuses plantes aquatiques marines ou fluviales, comme les zostères, les ulves et les cymodocées, et, parfois, de plantes croissant près des rives. Pour prendre leur nourriture, ils se servent de leur lèvre supérieure; en observant des individus captifs, on a découvert qu'ils utilisent leurs nageoires pour porter la nourriture à leur bouche, ainsi que pour se frotter le museau.

Les lamantins forment quelquefois des troupes de quinze à vingt têtes. Après une gestation de 150 à 180 jours, les femelles mettent bas 1, parfois 2 petits, sous l'eau; les nouveau-nés viennent immédiatement en surface pour respirer. Les lamantins ont été trop chassés pour leur chair et leurs populations ont diminué. En Guyane britannique, ils ont été utilisés pour débarrasser les canaux et autres voies d'eau des Algues et plantes aquatiques.

Ostman - R.J. Spurr

▲ *Les Hyracoïdes comptent la seule famille des Procaviidés;* **Procavia capensis,** *ou daman des rochers, vit parfois en groupes sociaux de trente à soixante têtes.*

Ordre des Hyracoïdes

L'ordre des Hyracoïdes *(Hyracoidea)*, ou damans, qui présente de nombreux caractères archaïques, fait partie par de nombreux aspects du groupe des Ongulés au sens large. Avec leur corps trapu et ramassé, leur tête liée au tronc par un cou épais et court, ces curieux parents des éléphants ressemblent plus aux Lagomorphes et aux Rongeurs qu'aux Ongulés, et rappellent surtout les marmottes. Longs de 30 à 60 cm, avec une queue fort courte (1 à 3 cm) ou même absente, les damans ont une fourrure à poils très courts, rudes chez les espèces rupicoles et arboricoles, doux chez les formes montagnardes. Leur livrée est habituellement jaune clair, mais varie aussi du brun au roux et au noirâtre, avec parfois des taches blanches, surtout dans la région dorsale; c'est là que, dans une touffe de longs poils, s'ouvre une glande cutanée spéciale, la glande dorsale, qui sécrète (essentiellement à la période de reproduction) une substance odorifique. Ces Animaux ne possèdent ni glandes sudoripares ni glandes anales.

La lèvre supérieure est divisée par un sillon très profond, de chaque côté duquel part un groupe de 6 longues vibrisses; plus en arrière, sur les joues, se trouve un autre groupe de 2 à 4 grandes vibrisses.

Les Hyracoïdes sont plantigrades; leurs paumes et leurs plantes sont dépourvues de coussinets élastiques. Les doigts de la main sont réunis par de la peau jusqu'aux ongles (aplatis), lesquels ressemblent un peu à ceux de singes. Aux pieds, les deux doigts externes sont réunis par de la peau jusqu'à la dernière phalange; le doigt interne, qui peut se mouvoir indépendamment, possède un ongle formant griffe à double tranchant, contournant l'extrémité de la phalange; celle-ci est fourchue à sa partie terminale, avec deux pointes disposées l'une sur l'autre; ces deux pointes s'insèrent dans un prolongement corné spécial de l'ongle, lui donnant une base très solide.

Le squelette présente de nombreux traits particuliers. Excepté certains caractères propres du crâne qui dénotent des affinités avec les Paléothères (disparus), ainsi qu'avec les rhinocéros et les Notongulés Typothériens, il faut signaler la conformation de la mandibule, dont la branche montante est haute, large et robuste, la région antérieure étant étroite. La colonne vertébrale présente une forte convexité dorsale et a pour formule : C 7; T 20-21; L 7-9; S 5-7; Cd 4-8. Il y a 19 à 21 paires de côtes dont 7 ou 8 reliées directement au sternum, et 6 constituées par de fausses côtes, les autres se terminant librement dans les muscles. Le sternum compte 7 sternèbres; la clavicule est absente; l'omoplate possède une grosse apophyse épineuse mais pas d'acromion; le radius et le cubitus se croisent partiellement et sont soudés seulement chez les individus d'âge avancé. Le premier doigt de la main est représenté seulement par une formation cartilagineuse, qui ne fait pas saillie sous la peau; le quatrième doigt est raccourci, mais possède trois phalanges comme les autres doigts; le troisième doigt, par lequel passe l'axe du membre, est plus long. Les pieds possèdent seulement trois doigts, les premier et cinquième ayant disparu.

Le cerveau, pauvre en circonvolutions, est fortement macrosmatique; l'odorat est très développé. Les yeux sont pourvus d'une membrane nictitante. Les oreilles présentent des affinités avec celles des Périssodactyles.

La formule dentaire, chez l'adulte, est :

$$\left(I\,\frac{1}{2};\ C\,\frac{0}{0};\ Pm\,\frac{4}{4};\ M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 34.$$

L'unique incisive supérieure, courbe, pourvue de longues

racines et revêtue d'une épaisse couche d'émail, a une croissance continue; cette dent, qui ressemble un peu à celle des Rongeurs, est plus développée chez les mâles. Les deux incisives supérieures sont séparées l'une de l'autre par un intervalle de 5 à 10 mm; les incisives inférieures, plus petites, ont une croissance limitée. Entre les incisives et les dents maxillaires se trouve une large diastème, autre ressemblance avec les Rongeurs. Les prémolaires tendent à disparaître chez l'adulte, mais les molaires restent bien développées. La mastication se fait surtout par des mouvements obliques et transversaux de la mandibule. La dentition de lait, qui a pour formule

$$\text{I} \frac{3}{3};\ \text{C} \frac{1}{1};\ \text{Pm} \frac{4}{4},$$ disparaît très vite.

Les glandes salivaires sont volumineuses. L'estomac, en forme de cornemuse, est divisé en deux parties par une constriction : une portion cardiaque, essentiellement musculeuse et peu glandulaire, et une portion pylorique, muqueuse et riche en glandes tubulaires. L'intestin grêle possède un premier cæcum, de grande capacité, où les aliments subissent une longue stase. C'est là, selon toute probabilité, que les Bactéries attaquent la cellulose; c'est là aussi que vivent d'énormes Infusoires du genre *Pycnothrix,* qui atteignent 5 mm de long. Le côlon, plus étroit, débouche dans un second cæcum, pourvu de deux volumineux appendices en forme de cornes, et séparé du côlon par plusieurs valvules. La seconde partie du côlon, plus longue, se termine par le rectum. Le foie est nettement bilobé et ne possède pas de vésicule biliaire.

Le poumon droit compte quatre lobes et le gauche trois. En ce qui concerne le système circulatoire, signalons l'existence de réseaux admirables sur le trajet des artères des membres. Les reins, non lobés, et possédant une seule papille, rappellent ceux des Périssodactyles.

Les testicules sont intra-abdominaux, et il n'y a pas de scrotum; l'os pénien est absent. Les femelles ont un utérus bicorne, deux ou quatre mamelles inguinales (quelquefois deux autres axillaires). Le placenta, décidué, de type hémochorial, est apparemment semblable à un placenta zonal. On sait peu de chose sur la reproduction : *Procavia capensis* a des portées de 2 ou 3 petits, mis au monde en novembre ou décembre; la gestation dure 7 mois et demi.

Les Hyracoïdes sont largement répandus en Afrique, au sud d'une ligne joignant le fleuve Sénégal au Hoggar au Tibesti et à l'Éthiopie; on en rencontre également au Proche-Orient. L'ordre comprend pour seule famille les Procaviidés, avec trois genres.

Le genre *Dendrohyrax* compte trois espèces, appelées damans; leur fourrure est rude et grossière; et les femelles n'ont que deux mamelles inguinales. *D. dorsalis,* le daman des arbres proprement dit, vit surtout dans la grande forêt équatoriale du Zaïre, de l'Ouganda et du Cameroun. *D. arboreus* est largement répandu en Afrique orientale et australe. *D. validus* est essentiellement confiné au Tanganyika et à ses alentours. Les damans des arbres sont d'excellents grimpeurs (ils grimpent même aux bambous); leurs pattes postérieures servent de propulseurs, et leurs pattes antérieures embrassent les branches et les troncs. Leur nourriture est à base de feuilles, de bourgeons et de fruits. Ils sont nocturnes.

Heterohyrax, le daman de steppe, compte deux espèces grégaires, qui peuplent principalement les steppes, les montagnes (jusqu'à 2 000 m d'altitude) et les forêts peu denses : *H. chapini,* du Zaïre, et *H. syriacus,* d'Afrique orientale et d'une partie de l'Afrique australe.

Le genre *Procavia* comprend les damans typiques, ou damans de rochers, dont on compte quatre espèces : *P. capensis, P. johnstoni, P. habessinica* et *P. ruficeps,* avec de nombreuses races géographiques. Ces Hyracoïdes sont largement répandus en Afrique dans les régions steppiques et semi-désertiques, des massifs sahariens (Aïr, Tibesti) jusqu'à la vallée du Nil, et dans une grande partie de l'Afrique au sud du Sahara; on en rencontre aussi en Asie occidentale. Ils habitent seulement les régions rocheuses, surtout arides, jusqu'à 4 000 m d'altitude au Kenya. Là où ils ne sont pas perturbés par l'homme, ils sont diurnes. Ils se nourrissent d'herbes même sèches, d'écorces et de Lichens. Ils vivent parfois en groupes sociaux comptant de trente à soixante têtes *(P. capensis),* ayant leur territoire, où ils creusent de nombreux terriers. Les juvéniles sont élevés d'une manière collective.

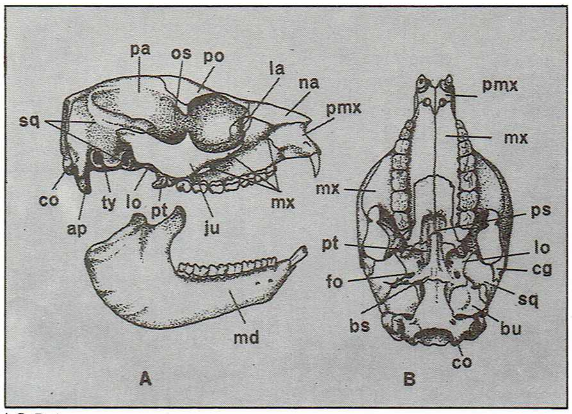

I.G.D.A.

◀ ***Crâne d'un Hyracoïde* (Procavia capensis) *vu de côté (A); et par-dessous (B); ap, apophyse occipitale; co, condyle occipital; sq, squamosal; pa, pariétal; os, os orbito-sphénoïde; po, processus post-orbitaire; la, lacrymal; na, nasal; pmx, prémaxillaire; mx, maxillaire; ju, jugal; pt, ptérygoïde; lo, lame obturante; ty, tympanique; md, mandibule; cg, cavité glénoïde; fo, foramen ovale; bs, basisphénoïde; bu, bulle tympanique; ps, présphénoïde.***

A. Margiocco

◀ ***Le daman des arbres* (Dendrohyrax sp.) *est un excellent grimpeur; sa nourriture est à base de feuilles, de bourgeons et de fruits.***

▼ ***Le daman des steppes* (Heterohyrax sp.) *peuple principalement l'Afrique orientale et une partie de l'Afrique australe.***

A. Margiocco

G. Haüsle - Jacana

▲ Equus prjewalski *(Hippomorphe Équidé) est l'unique forme vivante de cheval sauvage. Naguère très répandu dans l'hémisphère boréal, il est aujourd'hui confiné dans une zone restreinte d'Asie et menacé d'extinction.*

Ordre des Périssodactyles

Les Périssodactyles *(Perissodactyla)* constituent un ordre important d'Ongulés Mésaxoniens, c'est-à-dire chez lesquels l'axe des pattes passe par le troisième doigt, qui est le plus développé et qui supporte l'essentiel du poids du corps. Contrairement à ce qui est souvent affirmé, les Périssodactyles ne sont pas des imparidigités au sens strict : parfois, les pattes antérieures possèdent quatre doigts (les deuxième, troisième, quatrième et cinquième), alors que les postérieures en ont seulement trois (les deuxième, troisième et quatrième), mais toujours avec un plus grand développement du troisième (Rhinocérotidés et Tapiridés). Seuls les Équidés sont des imparidigités vrais.

Les Périssodactyles actuels représentent une toute petite partie de l'ordre, qui compte un grand nombre d'espèces éteintes; citons les Brontothériens de l'Oligocène (d'Amérique du Nord), et les Chalicothériens du Pliocène (d'Europe).

Les Périssodactyles vivants sont des Ongulés de grande taille. Leur corps est lourd. Leur tégument est parfois épais (pachydermes), nu ou presque (chez les rhinocéros) ou, encore, recouvert d'un pelage plus ou moins uniforme, sauf sur certaines parties du corps où il peut y avoir une crinière (chez les Équidés et Tapiridés); la queue porte parfois une touffe de poils. La robe, habituellement uniforme, présente de nets contrastes chez les zèbres et les tapirs d'Asie. Les extrémités sont pourvues d'ongles spéciaux, en forme de sabots; il existe aussi des formations cornées, de type particulier chez les rhinocéros.

En ce qui concerne le squelette, on observe la présence d'une crête sous-trochantérienne très développée, du côté externe du fémur, et l'absence de clavicule.

Uniquement herbivores, ces Euthériens ont une denture hétérodonte, avec une importante réduction des canines, lesquelles disparaissent chez les femelles des Équidés. Les molaires sont larges et compliquées, plus ou moins étroitement serrées avec des crêtes transversales en V de type lophodonte (chez les Tapiridés et les Rhinocérotidés) ou de forme semi-lunaire (sélénodonte, chez les Équidés). Les incisives et les molaires, à croissance prolongée, ne deviennent jamais complètes et présentent au cours de la vie d'un même individu une certaine différence.

Dans l'estomac, simple, on observe une nette diversification de la muqueuse entre la partie pylorique et la partie cardiaque. L'intestin, très long, a une surface d'absorption très étendue; l'intestin grêle a une lumière faible; le côlon très volumineux présente souvent des élargissements et est replié plusieurs fois sur lui-même, formant divers segments : le cæcum est volumineux. Les glandes salivaires, le pancréas et le foie sont très développés. Le foie est divisé en lobes principaux et secondaires. Les reins, simples, présentent une surface uniforme et possèdent un bassinet non ramifié.

Les testicules sont logés en position subinguinale; l'organe copulateur mâle, dépourvu d'os pénien, est rentré, en position de repos, dans une formation engainante constituant un étui et étroitement accolée à la paroi abdominale. L'utérus est bicorne; le placenta est diffus; il n'y a qu'une seule paire de mamelles inguinales. Les portées sont normalement unipares, rarement gémellaires; la gestation est très longue.

Ordinairement pacifiques, ces grands herbivores savent se défendre et peuvent être fort dangereux : c'est, notamment, le cas du rhinocéros.

Leurs allures sont le pas, le trot, et l'amble ou le galop selon les cas.

Les populations sauvages de Périssodactyles sont actuellement peu importantes et deviennent de plus en plus rares. Nombre d'espèces sont menacées d'extinction plus ou moins imminente. La distribution géographique de l'ordre couvre l'Amérique, l'Afrique et l'Asie, chacune des familles occupant une zone très caractéristique.

L'ordre des Périssodactyles est divisé en deux sous-ordres : les Hippomorphes et les Cératomorphes. Il existe au total quinze espèces.

Sous-ordre des Hippomorphes

Le sous-ordre des Hippomorphes *(Hippomorpha)* ne renferme plus actuellement que la famille des Équidés.

Les **Équidés** *(Equidae)* comprennent, si l'on ne considère que les formes vivantes (sous-famille des *Équinés*), les chevaux, les ânes et les zèbres, groupés dans l'unique genre *Equus*.

De formes assez élancées et à longues pattes, les Équidés actuels sont caractérisés par leur monodactylie, laquelle provient du très important développement de leur troisième doigt, ainsi que de la réduction et de la disparition des autres doigts, qui subsistent tout au plus sous forme de rudiments très atrophiés. Les membres ont un appui unguligrade.

Les formations unguéales, les plus complexes de celles des Périssodactyles, constituent un sabot : c'est un étui corné, tronconique chez les chevaux, et à peu près cylindrique ou comprimé latéralement chez les ânes, avec une base tronquée obliquement et portant au sol par la surface de la section.

La colonne vertébrale est composée de 50 à 56 vertèbres, réparties selon la formule : C 7 ; T 18-19 ; L 5-6 ; S 5-6 ; Cd 15-18. Il n'y a pas de clavicule ; les omoplates, triangulaires, sont grandes.

La formule dentaire est :

$$\left(I\ \frac{3}{3};\ C\ \frac{0\text{-}1}{0\text{-}1};\ Pm\ \frac{3\text{-}4}{3};\ M\ \frac{3}{3}\right) \times 2 = 36\text{-}42.$$

Entre les incisives et les dents maxillaires existe une diastème, divisée en deux par les canines (quand elles existent, car elles manquent habituellement chez les femelles). Les dents maxillaires ont une croissance continue et ne se développent jamais complètement. La dentition de lait a pour formule : $Il\ \frac{3}{3};\ Cl\ \frac{0}{0};\ Pml\ \frac{3\text{-}4}{3}$.

Le pelage, d'épaisseur variable selon les espèces et la saison, est constitué par des poils courts et fins en été, plus longs en hiver ; certaines espèces portent une crinière de poils courts et dressés (excepté les formes domestiques) ; enfin, la queue est plus ou moins fournie de longs crins. La livrée est de couleur habituellement uniforme, avec une bande dorsale et, chez certains ânes, scapulaire, en croix ; par contre, les zèbres présentent une robe contrastée à bandes claires et foncées.

Les femelles d'Équidés sont des polyœstres saisonnières. Les chaleurs ont lieu au printemps (en automne pour l'hémisphère austral), et, quand une femelle n'a pas été fécondée, elles recommencent en été ou plus tard. Le cycle œstral est de 22 jours chez la jument et de 28 jours chez l'ânesse. La gestation dure, chez la jument, de 329 à 345 jours, chez l'ânesse, 365 jours, chez le zèbre de Grévy, 390 jours et, chez le zèbre de Burchell, de 340 à 365 jours. Les différentes espèces donnent de nombreux hybrides, y compris les zèbres avec des chevaux ou des ânes ; les hybrides mâles sont toujours stériles.

Les Équinés sont essentiellement herbivores et vivent surtout dans les steppes herbeuses ; les races domestiques sont devenues granivores. Le grégarisme se manifeste de façon variable : le zèbre de Grévy forme des troupes très nombreuses, alors que le zèbre de montagne et le zèbre de Hartman constituent seulement de petites bandes. On rencontre souvent de grands rassemblements près des points d'eau.

La structure des troupeaux de chevaux sauvages est mal connue : on y observe des unités (harems) isolées ou juxtaposées, chacune constituée généralement par trois ou quatre femelles avec leurs petits ; ces derniers semblent rester près de leur mère jusqu'à l'âge de trois ou quatre ans. En Mongolie, les troupes d'hémiones peuvent compter en été de trois cents à quatre cents têtes, et sont divisées en groupes comprenant un mâle, trois ou quatre femelles, et deux ou trois petits de un à deux ans. Chez l'âne de Nubie, par contre, les groupes de mâles et les groupes de femelles sont séparés, ces dernières ayant avec elles les juvéniles.

Les chevaux et les ânes ont été domestiqués par l'homme depuis la plus haute antiquité ; les zèbres, qui ont presque totalement échappé à l'influence de l'homme, n'ont pas donné de races domestiques.

Les Équidés actuels appartiennent seulement à l'Ancien Monde ; on les divise en un groupe asiatique, avec le cheval de Prjewalski et les ânes du type de l'hémione (hémione, hémippe et onagre), et un groupe africain, avec les ânes d'Afrique et les zèbres.

L'unique forme vivante de cheval sauvage est le cheval de Prjewalski, ou cheval sauvage de Mongolie *(Equus caballus prjewalski)*, proche du tarpan des steppes *(E. caballus gmelini)*, actuellement disparu. Le cheval de Prjewalski, découvert en Asie centrale en 1879, est assez petit, de forme robuste et à tête massive. Ses oreilles sont petites. Il a une crinière touffue, toujours dressée. Sa queue porte des crins très serrés. Sa robe est jaunâtre, avec une bande dorsale ; sa crinière, sa queue et les extrémités de ses pattes sont noires. Son pelage est court en été, long et épais en hiver ; sa robe hivernale peut atteindre 10 cm de long et former une sorte de barbe sous la mandibule.

Ce cheval, naguère très répandu dans l'hémisphère boréal, ne se rencontre plus que dans une zone restreinte d'Asie, sur deux versants de l'Altaï, ainsi que dans l'ouest de la Mongolie et en Dzoungarie, plus particulièrement dans le massif du Takhin-Sharnuru, dans un habitat de montagne semi-désertique. Les populations sont réduites et l'espèce est menacée d'extinction. Les causes du déclin de ce cheval sont la chasse pratiquée par les Mongols et les Chinois, ainsi que la concurrence biologique et les perturbations que provoquent les troupeaux de bétail domestique paissant dans ces zones. Le cheval de Prjewalski ne peut être considéré comme l'ancêtre direct du cheval domestique ; ce dernier descend plutôt du tarpan *(E. caballus gmelini)*, désormais éteint.

Le groupe des Asinés peut être divisé en deux sous-groupes : les Asinés asiatiques ou Hémioninés avec la seule espèce *E. hemionus*, et les Asinés africains ou Asinés vrais avec *E. asinus*. Chaque espèce est divisée en plusieurs sous-espèces.

Les Asinés asiatiques présentent des caractères intermédiaires entre les Asinés vrais et les chevaux. *E. hemionus*, de taille modeste, possède un pelage fin et serré et une crinière touffue ; sa livrée est jaune pâle, avec des teintes rousses et gris roussâtre. Les crins de la crinière et de la queue ainsi que les extrémités des oreilles et des pattes sont noirs ; on observe une bande dorsale, et parfois une bande scapulaire croisée avec la première, ainsi que quelques zébrures sur les pattes. Cet Équidé

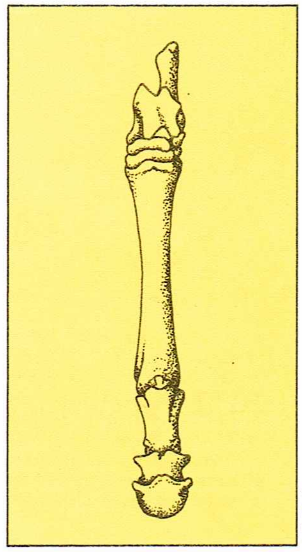

I.G.D.A.

▲ ***Exemple de pied de Périssodactyle vivant, du genre*** **Equus.**

▼ ***Le tarpan*** **(Equus caballus gmelini)*****, sous-espèce d'Équiné éteinte. Il a été « reconstitué » par des croisements.***

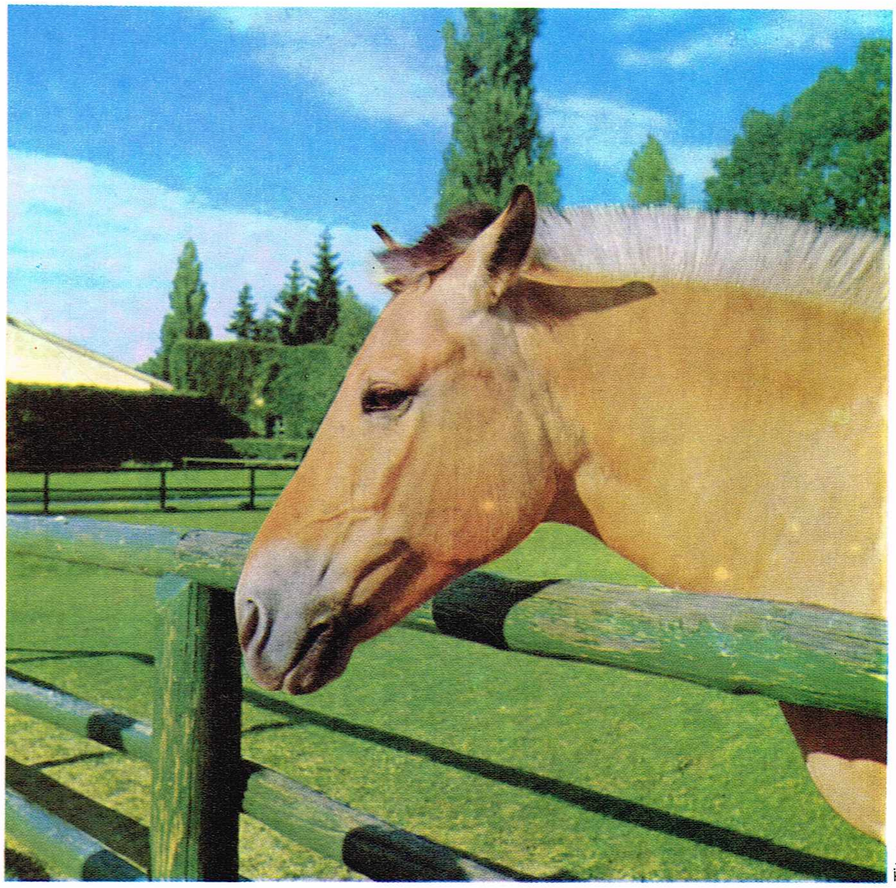

Titus

vit en troupes plus ou moins nombreuses en Asie centrale et occidentale, dans les régions steppiques et désertiques du Turkestan, de la zone himalayenne, de l'Iran, de la Mongolie, etc.

E. hemionus hemionus, l'hémione, localement appelé « kulan », rappelle le cheval de Prjewalski, mais avec une tête plus fine, et mesure environ 1,20 m de haut au garrot. Sa livrée est isabelle, moins uniforme cependant que celle des espèces précédentes. Autrefois, l'hémione vivait dans toute la Mongolie et en de minuscules aires de la Sibérie et de la Mandchourie ; aujourd'hui, ses populations, réduites, vivent dans une zone restreinte en Mongolie centrale.

E. hemionus onager, l'onagre, vit dans les régions désertiques du nord de l'Iran et du sud de la mer Caspienne (onagre de Perse), ainsi que dans la haute vallée de l'Indus (onagre de l'Inde, ou khur). Ses populations sont très réduites.

Les autres formes asiatiques sont *E. hemionus kiang*, le kiang, de la région himalayenne, et *E. hemionus hemippus*, l'hémippe, du désert syrien, probablement disparu.

▼ **Equus hemionus**, *localement appelé « kulan », vit en populations réduites, dans une zone restreinte en Mongolie centrale.*

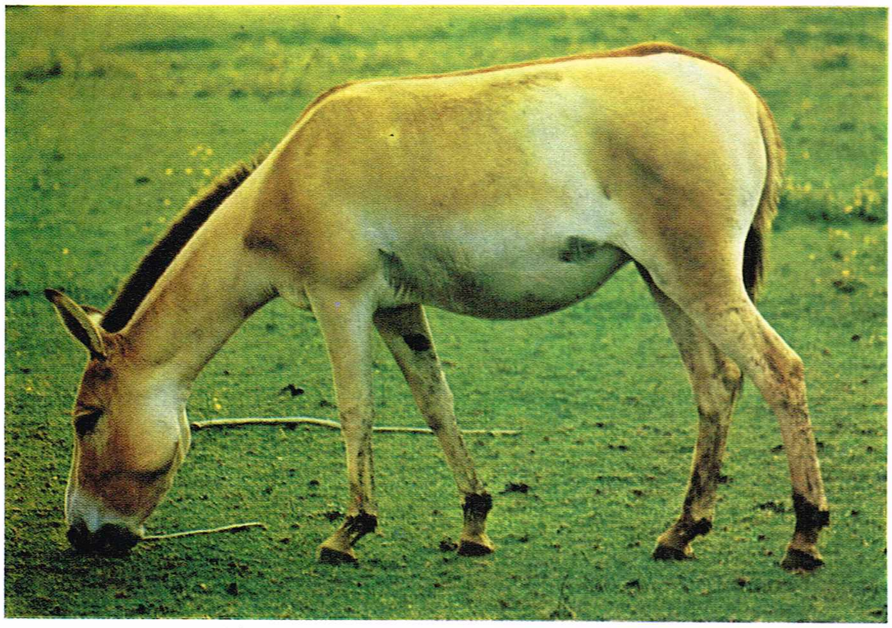

Archives P2

Les Asinés africains, ou ânes vrais *(E. asinus)*, sont caractérisés par des oreilles plus grandes, une tête plus grosse, des sabots plus hauts et fortement comprimés latéralement, l'absence de crinière et la brièveté de la queue, qui présente une touffe terminale de crins. *E. asinus somalicus*, l'âne sauvage de Somalie, dont il reste seulement quelques centaines de têtes, vit en Éthiopie et en Somalie. *E. asinus africanus*, l'âne sauvage de Nubie, le plus rare, a peut-être déjà disparu.

Les zèbres habitent l'Afrique orientale et l'Afrique du Sud. Leur robe, caractéristique, est ornée de bandes transversales. Les bandes noires ou brun roussâtre foncé sont séparées par des bandes claires, blanches ou jaunâtres, plus ou moins roux clair, sur lesquelles peuvent se superposer des bandes intercalaires, secondaires, moins foncées que les bandes principales. Chez les formes vivantes, les zébrures s'étendent pratiquement à tout le corps.

Le corps est trapu, avec un cou robuste, surmonté par une crinière courte et toujours dressée. La tête est de type asinien ou chevalin. Certains zoologues considèrent les zèbres comme appartenant à deux genres distincts, *Dolichohippus* et *Hippotigris*, que nous traiterons ici comme des sous-genres d'*Equus*.

E. (Dolichohippus) grevyi, le zèbre de Grévy, ou zèbre royal, très commun en Afrique orientale, présente une robe à zébrures serrées, recouvrant entièrement les pattes, avec des bandes plus nombreuses que chez les autres espèces. Il possède de grandes oreilles et une queue de type asinien.

Les autres espèces appartiennent au sous-genre *Hippotigris*.

E. zebra, le zèbre de montagne, très rare, compte deux sous-espèces. *E. zebra zebra* survit dans le Mountain Zebra National Park : on en a recensé soixante-quinze têtes en 1965 dans toute l'Afrique du Sud, alors qu'il était naguère très répandu dans les montagnes d'Afrique australe. Sa robe est entièrement zébrée, avec 12 à 14 bandes latérales, qui ne se prolongent pas sous le ventre, les bandes noires étant plus larges que les bandes claires. Une zone triangulaire à bandes transversales est dessinée sur la croupe, avec le sommet du dessin tourné vers la base de la queue.

E. zebra hartmanni, le zèbre de Hartmann, qui vit dans le sud-ouest de l'Afrique et en Angola, compte une population plus nombreuse. *E. burchelli boehmi*, le zèbre de Grant, est encore abondant en Afrique orientale et dans une partie de l'Afrique centro-méridionale. Les autres formes sont : *E. burchelli burchelli* = *E. quagga burchelli*, le zèbre de Bürchell, sous-espèce actuellement disparue qui habitait l'Afrique australe ; *E. burchelli antiquorum* =

Ostman - E. Muench

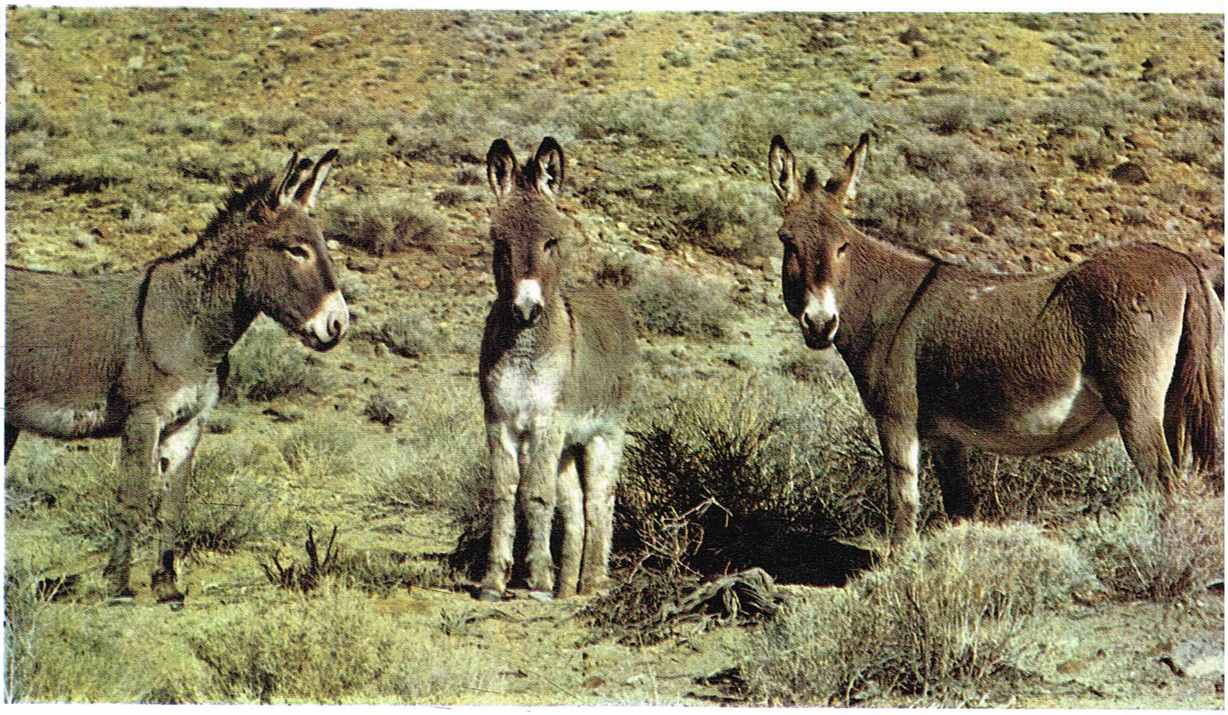

▶ *Asinés africains ou ânes vrais* (**Equus asinus**).

E. quagga chapmanni, le zèbre de Chapmann ; enfin *E. quagga quagga,* le quagga, vivait dans la colonie du Cap, où il fut exterminé il y a environ un siècle. Il avait le corps zébré seulement à l'avant.

Sous-ordre des Cératomorphes

Le sous-ordre des Cératomorphes *(Ceratomorpha)* comprend deux familles : les Tapiridés et les Rhinocérotidés.

Les **Tapiridés** *(Tapiridae)* sont les plus petits Périssodactyles. Leur corps, lourd et massif, est assez allongé. La tête, portée par un cou bref, est fortement arquée. La tête se termine par un long museau, avec le nez et la lèvre supérieure allongés, formant une petite trompe conique, très mobile, à l'extrémité de laquelle s'ouvrent les narines, par deux fentes transversales. Les yeux et les oreilles sont également petits. Les pattes sont très robustes ; la queue est courte.

Les pattes antérieures sont munies de quatre doigts et les postérieures en ont trois ; les mains sont dépourvues de pouce et les pieds ne possèdent ni premier ni cinquième doigt.

Les tapirs sont longs de 1,80 à 2,50 m, avec 5 à 10 cm pour la queue, et mesurent de 70 cm à 1 m de hauteur au garrot pour un poids de 220 à plus de 300 kg. Leur peau rappelle celle des Équidés : épaisse mais assez douce, elle est couverte de poils serrés, très courts. La formule dentaire est : $\left(I\frac{3}{3}; C\frac{1}{1}; Pm\frac{4}{3\text{-}4}; M\frac{3}{3}\right) \times 2 = 42\text{-}44.$

Animaux craintifs et doux, vivant isolément ou par couples, les tapirs fréquentent les forêts, surtout près des cours d'eau. Ils se nourrissent d'herbes, de racines et de parties hypogées de diverses plantes, même arbustives. Ils aiment beaucoup l'eau.

La gestation dure de 390 à 400 jours, chaque portée étant unipare, rarement gémellaire. La longévité peut atteindre 30 ans en captivité.

La famille comprend un seul genre : *Tapirus,* avec quatre espèces, une asiatique, et trois d'Amérique centro-méridionale.

T. indicus, le tapir à chabraque de l'Inde, le plus grand, peut mesurer 2,50 m de long. Il a une robe ornée d'un caparaçon blanc argenté sur le dos, la croupe et les flancs, contrastant avec le reste du corps, qui est noir. Naguère répandu dans de vastes zones de toute l'Indo-Malaisie, on le trouve actuellement en haute Birmanie, en Thaïlande, en Indochine, dans la péninsule malaise et à Sumatra.

Les tapirs américains sont revêtus d'une livrée uniformément foncée ; cependant, les juvéniles ont, comme chez la forme asiatique, une robe striée, avec des bandes longitudinales claires, surtout sur les flancs. *T. terrestris,* le tapir terrestre, habite de la Colombie et du Venezuela jusqu'au Gran-Chaco du Paraguay et au sud-est du Brésil. *T. roulini,* le tapir des Andes, ou tapir de montagne, est propre aux Andes de la Colombie et de l'Ecuador, et peut-être d'une partie du Pérou septentrional et du Venezuela occidental. De taille modeste (gros comme un poney), il vit dans les forêts de montagne, au-dessus de 3 500 m d'altitude. *T. bairdi,* le tapir de Baird, est répandu du Mexique méridional jusqu'à la Colombie et à l'Ecuador, sur le versant occidental des Andes.

Les **Rhinocérotidés** *(Rhinocerotidae)* ont conservé des caractères archaïques et sont les plus grands des Périssodactyles actuels. Leur corps est lourd et massif. Leur peau est très épaisse (ce sont des pachydermes) et, généralement, nue ou presque. Ils possèdent une ou deux cornes nasales, de structure très particulière. Leurs pattes, courtes et très robustes, se terminent par trois doigts.

La tête est courte chez certaines espèces, allongée chez d'autres (rhinocéros blanc). La partie crânienne, volumineuse, est surélevée par rapport à la portion faciale ; le profil est plus ou moins déprimé ou camus. Les cornes nasales sont situées l'une devant l'autre, l'antérieure étant plus développée ; on observe, exceptionnellement, une troisième corne plus ou moins reliée à la postérieure. Les cornes sont constituées par l'association fort étroite d'un grand nombre d'éléments cornés, fibreux ou à tubes, dans une gangue également cornée ; elles peuvent se régénérer. Les yeux sont petits, latéraux et quelque peu cachés sous les paupières repliées. Les oreilles sont petites et insérées très haut. La queue, brève, se termine par une touffe de poils courts et grossiers.

La formule vertébrale est : C 7 ; D 18-20 ; L 3-4 ; S 4-5 (soudées) ; Cd 17-20. Il existe de 17 à 20 paires de côtes. La formule dentaire est :

$$\left(I\frac{0\text{-}2}{2}; C\frac{0}{0}; Pm\frac{3\text{-}4}{3\text{-}4}; M\frac{3}{3}\right) \times 2 = 28\text{-}36.$$

Les incisives sont légèrement coniques et réduites.

Malgré leur allure impressionnante, les rhinocéros sont craintifs et ne chargent que pour se défendre. Ils peuvent passer du pas au trot, à l'amble, et même exceptionnellement au galop, atteignant alors la vitesse maximale de 45 km/h.

Les rhinocéros vivent dans les plaines steppiques, les savanes et les broussailles, à proximité de l'eau, et se tiennent surtout dans les zones découvertes. Ils se baignent souvent dans les mares et les étangs, d'où ils ressortent couverts de boue, ce qui les protège contre les Insectes. Ils se nourrissent de diverses herbes, de parties tendres de plantes, de racines et de fruits.

La durée de gestation est en moyenne de 18 mois ; chaque portée est habituellement unipare. Les rhinocéros atteignent leur maturité sexuelle vers l'âge de 4 à 5 ans. Leur longévité est de 40 à 50 ans.

▼ ***En haut, le zèbre de Grant*** **(Equus burchelli boehmi)** ***et son poulain. En bas,*** **Tapirus terrestris,** ***le tapir terrestre, revêtu d'une livrée uniformément foncée, appartient aux Tapiridés qui sont les plus petits Périssodactyles.***

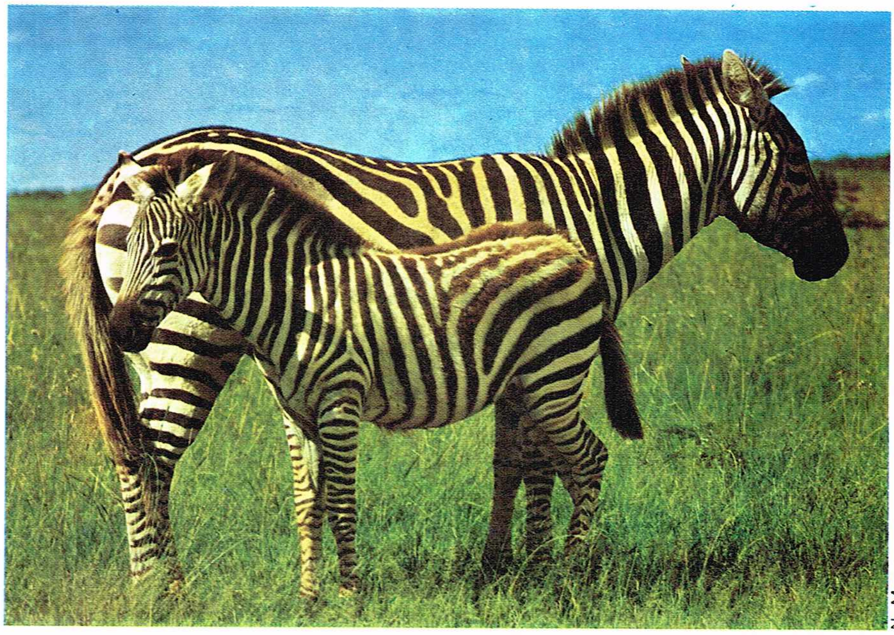

N. Myers

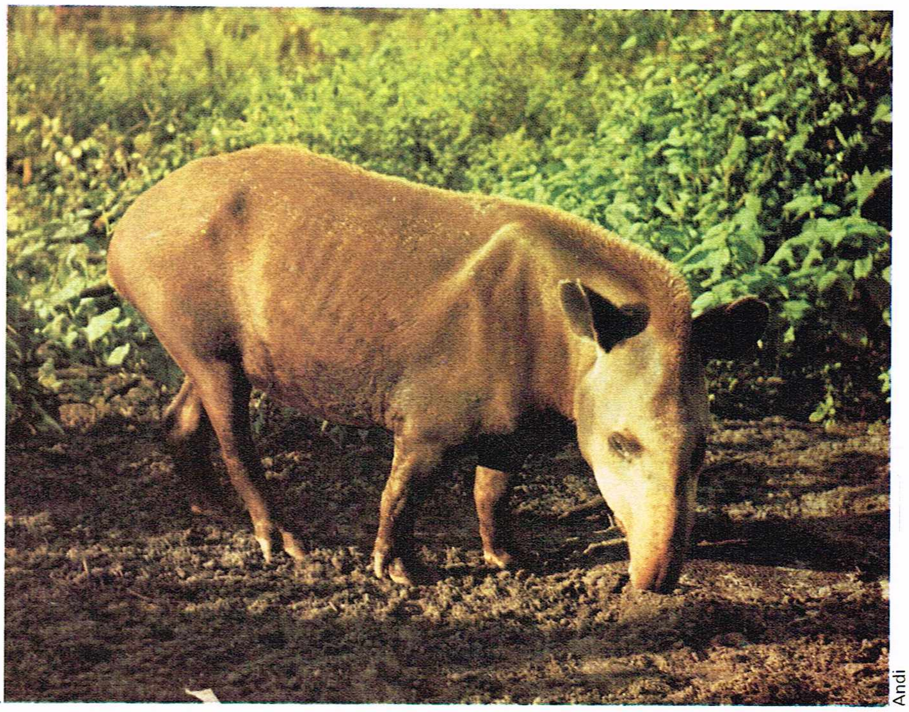

Andi

C. Bevilacqua

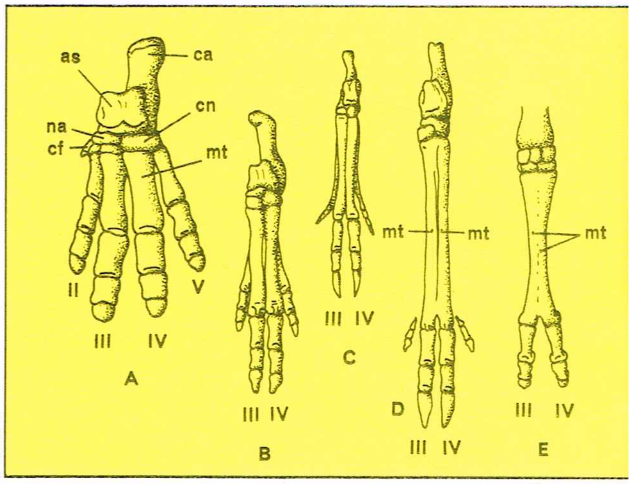

I.G.D.A.

▲ *A gauche, le rhinocéros de l'Inde* (**Rhinoceros unicornis**) *a un corps particulièrement massif et protégé par une robuste cuirasse de plaques cutanées. A droite, exemples de pieds d'Artiodactyles; A, hippopotame; B, porc; C, tragule; D, cerf; E, chameau; as, astragale; ca, calcanéum; na, naviculaire; cf, cunéiforme; cn, central; mt, métatarsiens; les chiffres romains indiquent les doigts.*

Les Rhinocérotidés sont des formes archaïques en période de déclin; leurs populations sont fort peu nombreuses, et certaines espèces sont sérieusement menacées d'extinction. On les divise en deux sous-familles : les Rhinocérotinés et les Dicérorhinés.

La sous-famille des *Rhinocérotinés* compte un seul genre, *Rhinoceros*, avec deux espèces asiatiques. De grande taille (2 à 4 m de long, pour un poids de 2 à 4 tonnes), ces Animaux sont unicornes; ils ont une peau très épaisse, formant de vastes plaques rigides, articulées les unes aux autres par des replis de peau molle. Plus forestiers que les autres espèces, ils habitent les plaines et les régions montagneuses jusqu'à 2 000 m d'altitude.

R. unicornis (R. indicus), le rhinocéros unicorne de l'Inde, est le plus grand. Son corps, particulièrement massif, est protégé par une robuste cuirasse de plaques cutanées. Il possède I $\frac{1-2}{2}$ et Pm $\frac{3}{3}$. Naguère répandu en de nombreuses régions forestières de l'Inde, on le trouve aujourd'hui seulement dans huit réserves de l'Inde, ainsi que dans le Teraï népalais; il fréquente les plaines et les zones paludéennes et vit le plus souvent en solitaire. En 1961, ses effectifs étaient évalués à quatre cent quarante têtes en Inde et cent soixante au Népal. Les causes de son déclin sont l'altération de son milieu forestier et la chasse dont il a été la victime, du fait de la croyance chinoise dans les propriétés médicinales de sa corne.

R. sondaicus, le rhinocéros unicorne de la Sonde ou de Java, est devenu extrêmement rare : on trouve quelques individus au Tennasserim et dans la région d'Udjung Kulong (environ vingt-cinq têtes), à l'extrême ouest de Java. Il habite les forêts de montagne.

La sous-famille des *Dicérorhinés* comprend les rhinocéros bicornes, dont la corne antérieure est toujours plus grande que l'autre. Leur peau ne forme jamais de plaques articulées. On en connaît trois genres monospécifiques, deux africains et un asiatique.

Didermocerus sumatrensis (Dicerorhinus, ou *Ceratorhinus)*, ou rhinocéros de Sumatra, est le plus petit et le plus primitif des rhinocéros. Long au maximum de 2,80 m et d'une hauteur au garrot de 1,50 m, il pèse une tonne au plus. Son pelage est laineux. Répandu de

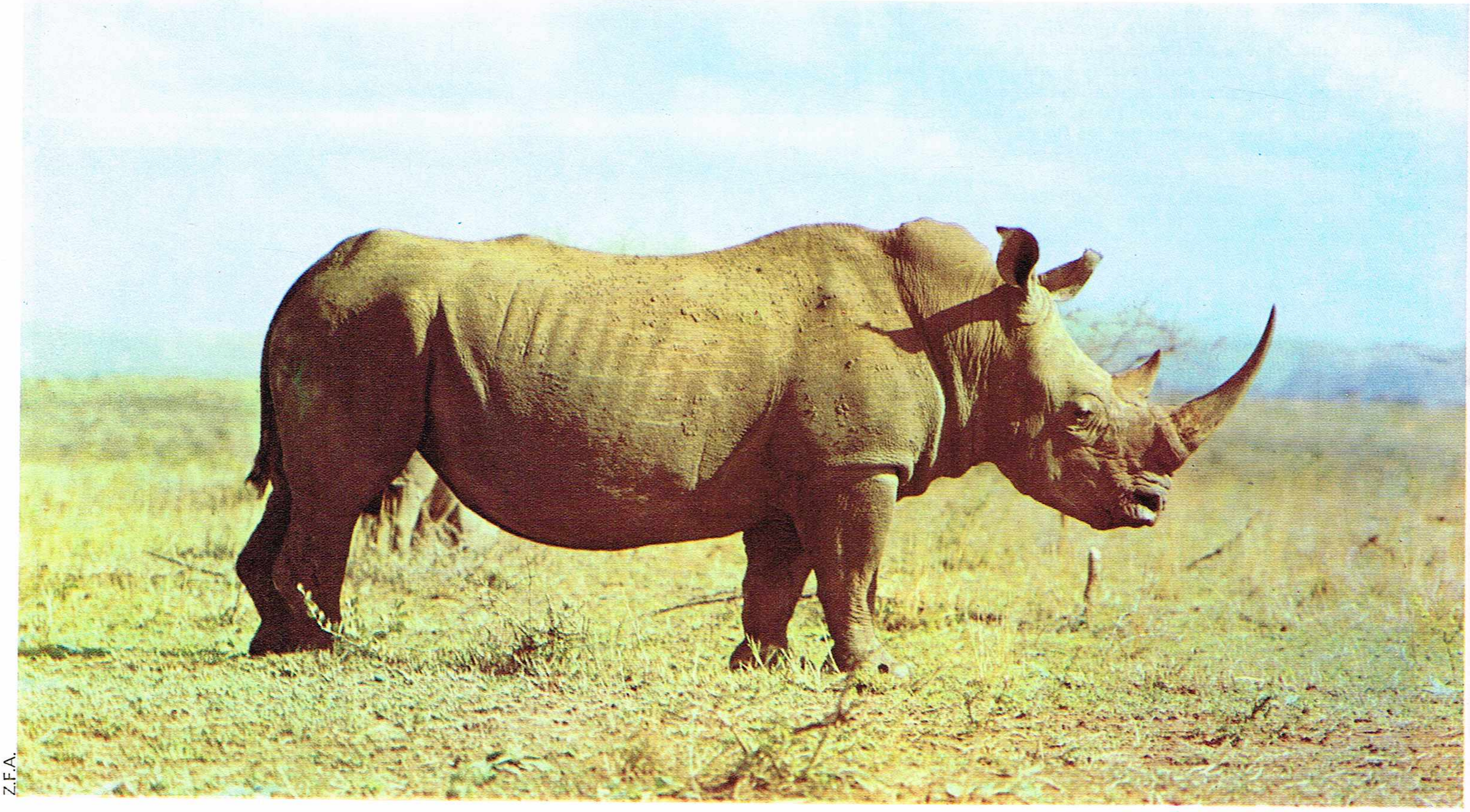

Z.F.A.

l'Assam à Bornéo, il est devenu rarissime (cent à cent soixante-dix têtes) et survit éparpillé en petites populations éloignées les unes des autres.

Diceros bicornis, le rhinocéros noir africain, est l'espèce la plus commune, bien que ses populations aient sensiblement diminué. Long de 3 m à 3,75 m, avec une queue de 70 cm, il peut peser 1,8 tonne. Sa tête est assez petite par rapport à la taille de son corps. On le distingue du rhinocéros blanc à sa lèvre supérieure, qui possède un appendice très mobile et préhensile, servant à saisir le feuillage, les rameaux, etc. Il n'a pas de canines.

Ceratotherium simum, le rhinocéros blanc, appelé encore rhinocéros de Burchell, est uniquement africain. C'est le plus grand Mammifère terrestre après les éléphants : il atteint une longueur maximale de 5 m, avec une hauteur au garrot de 2 m et un poids de 3,6 tonnes. On le distingue à sa taille plus grande que celle du rhinocéros noir, à sa dolichocéphalie crânienne (sa tête mesure jusqu'à 80 cm de longueur) et à sa lèvre supérieure tronquée transversalement. Ses cornes sont très développées, surtout l'antérieure (jusqu'à 1,50 m de long). Le rhinocéros blanc a failli disparaître, mais grâce à des mesures de protection ses populations se sont rétablies et accrues en différentes zones.

Ordre des Artiodactyles

L'ordre des Artiodactyles *(Artiodactyla)* comprend les Ongulés Paraxoniens, c'est-à-dire ceux chez lesquels l'axe des membres passe par les troisième et quatrième doigts, qui sont égaux et plus longs que les deuxième et cinquième doigts; ces derniers sont, le plus souvent, réduits ou atrophiés. Le nombre de doigts des espèces actuelles est pair (deux ou quatre) à chaque patte (d'où le nom d'Artiodactyles, qui signifie à doigts pairs), à l'exception des Tayassuidés, dont les pattes postérieures ont seulement trois doigts fonctionnels. Dans la plupart des cas, les métapodes médians (métacarpiens et métatarsiens des troisième et quatrième doigts) sont soudés les uns aux autres, et forment un unique élément : l'os canon. Les métapodes latéraux (deuxième et cinquième doigt) sont souvent réduits à de fines structures osseuses, accolées aux métapodes médians, ou peuvent même être totalement absents. Le radius constitue, presque à lui seul, le squelette de l'avant-bras; le cubitus est fréquemment rudimentaire dans sa partie oléocrânienne, derrière le radius. Aux pattes postérieures, les tibias sont très développés, alors que les péronés peuvent être très réduits.

Tous les Artiodactyles actuels sont unguligrades, sauf les Camélidés, qui sont digitigrades. En outre, chez toutes les espèces vivantes, à l'exception des Hippopotamidés, seuls les ongles des doigts médians s'appuient à terre, tandis que ceux des doigts latéraux (habituellement plus petits et situés du côté postérieur des pieds) servent seulement pendant la course rapide.

Le nombre des vertèbres thoraco-lombaires ne dépasse pas 19, avec 12 vertèbres thoraciques chez les Camélidés, 15 ou 16 chez les Hippopotamidés, et 13 ou 14 chez les autres familles. Le crâne est toujours allongé. Les orbites sont le plus souvent séparées des fosses temporales et forment chacune un anneau complet.

L'un des caractères les plus typiques d'innombrables Artiodactyles (Cervidés, Antilocapridés, Bovidés et Giraffidés) est la présence des cornes, situées symétriquement des deux côtés du front au-dessus ou en arrière des orbites. Les cornes se forment en tant que processus des os frontaux, sur lesquels s'insèrent des os d'origine dermique; quand ceux-ci sont soudés de façon stable aux processus frontaux, ils donnent des chevilles, os pairs qui peuvent être recouverts soit par la peau avec du poil, faisant suite à la peau de la tête (chez les Giraffidés), soit par une gaine cornée, ou étui (chez les Bovidés, Antilocapridés, qui sont des cavicornes). Chez les Bovidés l'étui corné n'est pas soumis à une mue périodique, alors que celle-ci est annuelle chez les Antilocapridés. Par contre, chez les Cervidés (plénicornes), les cornes, ou « bois », compactes, ramifiées, ne sont pas entourées par un étui corné, et se renouvellent totalement chaque année.

A la seule exception des Suidés, omnivores, les Artiodactyles sont strictement végétariens; les espèces forestières se nourrissent principalement de feuilles, de bourgeons, de rameaux tendres, de fruits sylvestres, alors que celles des grandes plaines herbeuses, des savanes et des prairies sont herbivores et partiellement granivores.

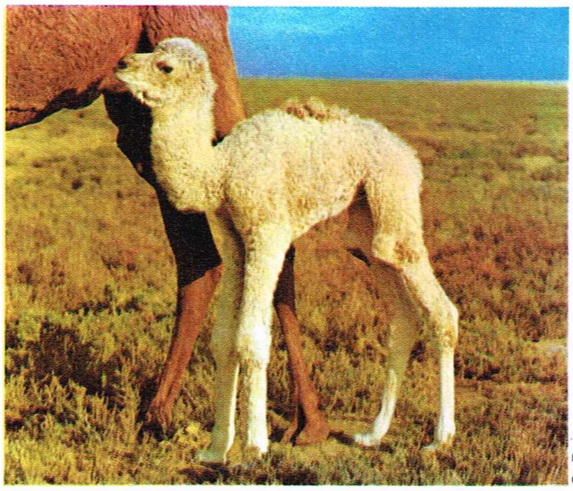

S. Prato

◀ Dans l'ordre des Artiodactyles, les femelles ont toujours des portées unipares ou gémellaires (excepté les Suidés); la livrée juvénile diffère chez certaines espèces de celle des adultes; ici, un petit dromadaire (Camélidé) au pelage blanc.

Chez les Ruminants, les incisives supérieures sont normalement absentes, alors que les inférieures, auxquelles est associée de façon étroite la canine inférieure, incisiforme, servent à trancher l'herbe que prennent les lèvres; il existe à la mandibule une diastème entre les dents antérieures et les dents maxillaires. L'extrémité du museau présente souvent une différenciation typique en un groin (Suidés, Tayassuidés) ou en un museau nu et toujours humide, caractéristique d'une grande partie des Ruminants.

Dans l'ensemble, les Suiformes ont un estomac simple. Chez les Sélénodontes, ou Ruminants, par contre, l'estomac est typiquement divisé en 4 chambres, dont les fonctions diffèrent, et qui permettent la rumination. L'intestin est généralement long : 77 m chez la girafe, 49 m chez l'éland du Cap, 38 m chez le renne, etc.

Les femelles ont normalement deux paires de mamelles inguinales; chez les Suidés, il existe en plus des paires abdominales. Excepté chez les Suidés, les portées sont toujours unipares ou gémellaires; la livrée juvénile diffère parfois chez certaines espèces de celle des adultes (notamment chez les Suidés et les Cervidés).

Les yeux possèdent une pupille allongée horizontalement chez les Ruminants, arrondie chez les Suiformes; pour les premiers, le grand axe de la pupille reste toujours parallèle au sol, indépendamment de la position de la tête.

L'ordre des Artiodactyles a une grande importance dans l'économie de la nature, puisqu'il comprend la très grande majorité des moyens et gros herbivores actuels; il a fourni à l'homme les Animaux domestiques les plus précieux dans l'agriculture et l'élevage. La distribution zoogéographique de l'ordre est très vaste, puisqu'elle s'étend sur tous les continents, à l'exception de l'Australie, et de l'équateur jusqu'au-delà du cercle polaire arctique *(Ovibos, Rangifer)* et jusqu'à la Patagonie et au cap de Bonne-Espérance.

Les Artiodactyles ont une systématique fort complexe; la classification est fondée, entre autres, sur la morphologie dentaire, l'anatomie des membres et la conformation de l'estomac. L'ordre est divisé en trois sous-ordres : les Suiformes ou Bunodontes, les Tylopodes et les Ruminants. On observera que la dénomination de Ruminants, dans cette acception, a une valeur uniquement taxonomique et non pas physiologique, étant donné que la rumination a lieu aussi chez les Tylopodes; cela explique que certains auteurs (comme Grassé) distinguent seulement deux sous-ordres, les Suiformes, ou Non-Ruminants, et les Ruminants *lato sensu,* lesquels comprennent alors la super-famille des Tylopoïdés, ou Camélidés. Cependant, des caractères anatomiques et phylogénétiques ont conduit certains savants à considérer les Tylopodes comme un groupe distinct. Dans notre exposé nous suivrons, pour la classification des diverses familles et de toutes les espèces, l'étude fondamentale de T. Haltenorth, dans le traité de Kükenthal de 1963, lesquel distingue soixante-huit genres, cent cinquante-quatre espèces et huit cent quarante-deux formes distinctes.

◀ *Page ci-contre, en bas,* **Ceratotherium simum,** *le rhinocéros blanc uniquement africain, est le plus grand Mammifère terrestre après l'éléphant : sa longueur maximale est de 5 m et son poids de 3,6 t.*

▶ ***Les femelles de sanglier* (Sus scrofa) *mettent bas jusqu'à 12 petits par portée; les juvéniles ont le plus souvent une robe à bandes longitudinales. Ici, une laie et ses petits de la race de la Maremme (Italie).***

Sous-ordre des Suiformes ou Non-Ruminants

Le sous-ordre des Suiformes *(Suiformes)*, ou Bunodontes, appelés encore Non-Ruminants *(Non-Ruminantia)*, comprend les Artiodactyles dont l'estomac n'est pas typiquement divisé en chambres comme chez les Ruminants, et qui sont donc incapables de ruminer; mais ceci n'exclut pas une certaine division résiduelle de l'estomac, avec une différenciation sensible de la muqueuse des parois internes.

La denture est toujours complète, avec présence des incisives supérieures et des canines. Les incisives inférieures sont inclinées vers l'avant (proclives), et se trouvent même parfois en position horizontale; habituellement, les canines ont une croissance continue et sont transformées en défenses plus ou moins développées, faisant saillie hors de la bouche (Suidés) ou logées dans l'épaisseur des lèvres très amples quand la bouche est close (Hippopotamidés). Les molaires sont typiquement de type bunodonte évolué (néo-bunodonte), avec des tubercules arrondis, et ont une couronne assez peu élevée (elles sont brachyodontes). Les cavités orbitaires ne sont pas séparées des fosses temporales; la pupille est ronde.

En ce qui concerne les membres, le cubitus et le péroné sont peu réduits. Les métacarpiens et les métatarsiens sont au nombre de quatre de chaque côté, et ceux des troisième et quatrième doigts ne sont pas soudés pour former un os canon, sauf chez les Tayassuidés, qui en possèdent des rudiments.

La peau est épaisse et typiquement dotée de la faculté d'engendrer une couche de lard, parfois très épaisse. Les poils sont assez clairsemés. Il n'y a pas de cornes.

Le sous-ordre des Suiformes compte trois familles : les Suidés, les Tayassuidés et les Hippopotamidés. Les deux premières, que certains auteurs considèrent comme des sous-familles d'une unique grande famille, les Suidés, diffèrent sensiblement de la troisième, et forment avec les formes fossiles l'infra-ordre des *Suina* en opposition à celui des *Ancodonta,* qui comprend les Hippopotamidés.

Les **Suidés** *(Suidae)*, dont le sanglier et le porc domestique sont les plus typiques représentants, ont le museau allongé typique se terminant par un groin caractéristique, charnu à l'extrémité, de contour circulaire, et à l'extrémité duquel s'ouvrent les narines. Le groin est supporté par deux os spéciaux, néo-formés, reliés aux os nasaux, aux prémaxillaires et même au mésethmoïde; ces os sont pourvus de cartilages, qui entourent les narines. Les canines forment des défenses plus développées chez les mâles, à croissance toujours continue, et courbées en arrière ou vers le haut. Chez certains genres *(Sus, Potamochoerus)*, les canines supérieures s'usent contre les inférieures et restent plus courtes que ces dernières; chez *Hylochoerus* et *Phacochoerus*, c'est l'inverse qui a lieu. Les incisives inférieures sont proclives. Les dents maxillaires sont bunodontes, caractère lié au régime omnivore typique, constitué surtout de parties hypogées de Végétaux, de fruits, de Champignons et occasionnellement d'Animaux, habituellement très petits. La formule dentaire des Suidés est :

$$\left(I\,\frac{1\text{-}3}{2\text{-}3};\ C\,\frac{1}{1};\ Pm\,\frac{3\text{-}4}{2\text{-}4};\ M\,\frac{3}{3}\right)\times 2 = 32\text{-}44.$$

Le cou des Suidés est court, ce qui limite les mouvements de leur tête. Leur formule vertébrale est :

C7; D 13-14; L 5-7; S 3-6 ; Cd 7-24.

Leur thorax, formé de 13 ou 14 paires de côtes, est prolongé par un abdomen pansu; leur queue est fine et assez courte. Leurs pattes sont courtes et graciles, par comparaison avec le volume de leur corps; leurs troisième et quatrième métatarsiens n'ont pas tendance à se souder. Seuls les doigts médians (troisième et quatrième) appuient au sol, alors que les latéraux (deuxième et cinquième), situés plus en arrière, touchent terre seulement pendant la course rapide. Les yeux sont petits et logés dans des orbites situées très en arrière, l'os lacrymal se trouve devant l'orbite. Les bulles tympaniques sont allongées verticalement. La fourrure, généralement dépourvue de bourre, forme souvent une sorte de crinière le long du dos.

L'estomac est une formation sacciforme simple, avec une ébauche de division en 2 chambres (plus accentuée

C. Bevilacqua

chez *Babirousa* et les Tayassuidés). L'ouïe et l'odorat sont les sens dominants.

Les mâles ont un scrotum peu saillant. Les femelles possèdent deux ou trois (six chez *Sus*) paires de mamelles, situées à la partie postérieure du ventre. Les juvéniles ont le plus souvent une robe à bandes longitudinales, qui diffère de celle de leurs parents. Les femelles des Suidés mettent bas de 2 à 14 (chez le porc domestique) petits par portée, le nombre étant de 12 chez le sanglier; beaucoup d'espèces en ont 4. La durée de la gestation varie de 112 à 175 jours. Les mâles de certains genres sont polygames. Les Suidés vivent en groupes familiaux ou par petites troupes, dans les forêts, préférant les zones proches de l'eau, des marais et des marécages, surtout quand ceux-ci sont fangeux, car ils aiment prendre des bains de boue (se « souiller »). Ils sont habituellement nocturnes. Ils peuvent parfois être agressifs lorsqu'ils sont perturbés ou encore plus lorsqu'ils sont blessés, et deviennent alors très dangereux pour l'homme : c'est surtout le cas de notre sanglier. La famille est limitée à l'Ancien Monde et peuple l'Europe, l'Asie (y compris le Sud) et l'Afrique. Il en existe cinq genres et huit espèces.

Le potamochère *(Potamochoerus porcus)*, unique espèce du genre, a des oreilles à pointe très allongée et pourvue d'une touffe de longs poils. Long de 1 m à 1,50 m, avec une queue de 30 à 45 cm, il mesure 60 cm de hauteur au garrot et peut peser 130 kg. Il ressemble par sa morphologie à *Sus scrofa*. Il possède $I\,\frac{3}{3}$ et $Pm\,\frac{4}{3}$. Sa livrée varie du brun-roux au noir, avec de nombreux poils clairs sur les côtés de la tête, où ils forment de gros favoris, et le long de la ligne dorsale, où l'on observe une ébauche de crinière. Les juvéniles sont ornés de bandes longitudinales jaune pâle ou chamois, contrastant avec le fond brun foncé. Répandu dans une grande partie de l'Afrique, au sud du Sahara et à Madagascar (où vit la sous-espèce *P. porcus larvatus*, ou sanglier à masque, que bien des auteurs considèrent comme une espèce distincte : *P. larvatus*), il fréquente surtout les forêts-galeries, ainsi que les zones paludéennes et marécageuses. Il est essentiellement nocturne. Grégaire, il vit par troupes comptant jusqu'à vingt têtes. Le potamochère est l'unique espèce de Mammifère terrestre, à l'exclusion des Chiroptères, qu'on trouve aussi bien en Afrique qu'à Madagascar.

Le genre *Sus*, très important, compte quatre espèces, répandues en Europe, en Afrique du Nord et en Asie. Il possède $I\,\frac{3}{3}$ et $Pm\,\frac{4}{4}$. Les canines sont très développées, saillantes et recourbées. La principale espèce est le sanglier *(Sus scrofa)*, long de 1 m à 1,50 m, à queue de 12 à 20 cm, atteignant 90 cm au garrot et pesant pour les mâles jusqu'à 180 kg. La robe est brun noirâtre, tendant parfois au jaunâtre ou au roussâtre, le museau, la queue et les pattes étant plus foncés; son iris est brun foncé. Les juvéniles sont brun clair, avec des bandes longitudinales plus ou moins noirâtres.

Le sanglier fréquente les bois touffus à sous-bois, des régions humides mais aussi arides, aussi bien en plaine qu'en montagne, jusqu'à la limite supérieure de la végétation arborescente. En France, on le rencontre presque partout, surtout dans les forêts mixtes et de préférence à proximité des étangs, des marais et des cours d'eau. Il est essentiellement crépusculaire et nocturne, mais est plutôt diurne dans les endroits ou il n'est pas perturbé par l'homme. En été, il se tient dans les endroits humides et ombragés, et se « souille » fréquemment. Cet Animal parcourt souvent de grandes distances : il a pu, notamment, repeupler les Alpes occidentales et orientales. Les mâles sont le plus souvent solitaires.

Omnivore, il se nourrit de plantes, de faînes, de châtaignes, de tubercules, de bulbes, de céréales, de divers fruits et de petits Animaux (aussi bien des Invertébrés que des Vertébrés, parmi lesquels, notamment, des Amphibiens et des Reptiles, y compris les vipères), des œufs et nichées d'Oiseaux, etc. Il peut provoquer de gros dégâts dans les cultures.

La gestation dure de 16 à 20 semaines et les mises bas ont lieu le plus souvent en avril ou mai, dans des bauges bien à l'abri, à raison de 3 ou 4 (parfois jusqu'à 12) petits à la fois. Il y a quelquefois 2 portées par an. Les femelles possèdent six paires de mamelles. Les sangliers sont adultes à 5 ans et ont une longévité de 20 à 25 ans.

La distribution de l'espèce couvre l'Europe continentale et centro-méridionale, l'Asie (y compris Sumatra, Java, Florès et Timor), la Nouvelle-Guinée, les îles Salomon, les îles Bismarck, une partie du nord-ouest de l'Afrique, le Soudan, etc. Les autres espèces du genre sont : *S. barbatus*, de Bornéo, de Sumatra et des îles voisines; *S. verrucosus*, de Java, des Célèbes et de Ceram, et *S. (Porcula) salvanius*, ou sanglier pygmée ou nain; ce dernier, propre aux régions forestières de l'Himalaya oriental, mesure jusqu'à 65 cm de long et a une hauteur au garrot de 25 à 30 cm.

Phacochoerus ne compte qu'une espèce, le phacochère *(P. aethiopicus)*, Suidé typique des savanes et des forêts peu touffues au sud du Sahara, à crâne très large entre les orbites. Sa denture compte $I\,\frac{1}{3}$ et $Pm\,\frac{3}{2}$ $\left(Pm\,\frac{2}{1}\text{ chez les adultes}\right)$; les défenses, grandes, sont incurvées vers le haut. Les pouces sont pourvus, à leur partie antérieure, d'une épaisse callosité, visible déjà chez le fœtus : celle-ci semble consécutive à l'habitude qu'a cet Animal de s'appuyer au sol sur ses pouces pour gratter ou manger. Il a 1,50 m de long et mesure de 70 à 80 cm de hauteur au garrot. Sa peau grisâtre est recouverte de soies très clairsemées; il porte une crinière, formée de très longs crins sur la nuque et sur le dos. Les femelles, qui possèdent trois paires de mamelles, mettent bas de 3 à 6 petits par portée, après une gestation d'environ 170 jours. Le phacochère se cache parfois dans les tanières de l'oryctérope. Il peut courir à la vitesse de 47 km/h.

L'hylochère, ou sanglier géant *(Hylochoerus meinertzhageni)*, vit dans les forêts denses et les jungles à bambous de l'Afrique centrale, sous l'équateur. Long jusqu'à 1,80 m et d'une hauteur au garrot de 1 m, il pèse un peu moins de 300 kg. Son groin est large de 16 cm et haut de 10 cm. Sa denture compte $I\,\frac{1}{2\text{-}3}$ et $Pm\,\frac{3}{2}$. Il est pourvu d'un long pelage noir très clairsemé. Cette espèce diurne forme des bandes atteignant vingt têtes.

Le babiroussa (*Babirousa babirussa*, nom qui signifie porc-cerf) est caractérisé par un tronc assez court et un profil dorsal convexe. Son pelage est très clairsemé. Il a des pattes très élancées et une tête assez petite. Il mesure 85 cm à 1 m de long, porte une queue de 30 cm et atteint une hauteur au garrot de 70 à 80 cm, et peut peser 90 kg. Sa denture compte $I\,\frac{2}{3}$ et $Pm\,\frac{3}{3}$; chez les mâles, les canines supérieures, dépourvues d'émail et à croissance continue, poussent vers le haut dès leur sortie; elles perforent la peau de la partie supérieure du museau entre les yeux et la pointe du groin, puis continuent à croître, en décrivant une courbe tournée vers l'arrière. Les canines inférieures sont également très développées et dirigées vers le haut. Le babiroussa n'habite que Célèbes, les îles Todjan, Buru et Sula; il aime les forêts humides, les cannaies et les rives des fleuves et des lacs.

N. Myers

▲ **Phacochoerus aethiopicus,** *le phacochère, est un Suidé typique des savanes et des forêts peu touffues au sud du Sahara.*

Les **Tayassuidés** *(Tayassuidae)*, ou pécaris, sont les représentants dans le Nouveau Monde des Suidés, auxquels ils ressemblent beaucoup. Leurs canines supérieures, à croissance continue, ont la pointe dirigée vers le bas; les molaires tendent vers le type lophodonte, ou mieux bilophodonte, ce qui est net chez *Platygonus*, pécari fossile. Leur formule dentaire est :

$$\left(I\,\frac{2}{3};\ C\,\frac{1}{1};\ Pm\,\frac{3}{3};\ M\,\frac{3}{3}\right)\times 2 = 38.$$

L'os lacrymal est situé presque entièrement entre l'orbite et la bulle tympanique, qui est cordiforme, avec la pointe dirigée en avant. Une glande odorifique s'ouvre sur le dos, caractère qui rappelle les Hyracoïdes, et qui a été naguère interprété comme un second ombilic (d'où le nom générique *Dicotyles*). Les pécaris possèdent quatre doigts aux pattes antérieures et trois doigts fonctionnels aux postérieures : les métatarsiens des troisième et quatrième doigts ont tendance à se souder l'un à l'autre par leurs extrémités supérieures. La formule vertébrale est : C7; D 14; L 5; S 3-5; Cd 6-9. Ces Animaux sont longs de 75 cm à 1 m; leur hauteur au garrot est de 45 cm à 57 cm, et leur queue a 2 à 5 cm de long. L'estomac est divisé en 3 chambres. Les femelles ne possèdent que deux paires de mamelles et mettent au monde 2 petits par portée; la gestation dure de 142 à 148 jours chez le pécari à collier.

Les pécaris vivent en petites bandes, du Texas, du Nouveau-Mexique et de l'Arizona à la Patagonie. Il en existe deux espèces : le pécari à collier *(Tayassu tajacu)*, et le pécari à lèvres blanches *(T. pecari = T. albirostris)*; toutes deux forestières, la première, répandue dans toute l'aire de la famille, fréquente aussi les régions arides, la seconde étant plus typique des forêts pluviales, du Mexique méridional au Paraguay.

Les **Hippopotamidés** *(Hippopotamidae)*, colosses des Artiodactyles, se distinguent par leur corps massif et lourd, très bien adapté à leurs mœurs semi-aquatiques. Leur tronc, très volumineux, a la forme d'un tonneau. Ils possèdent 15 ou 16 paires de côtes. Leurs grosses pattes courtes, à peu près colonnaires, ont des extrémités tétradactyles. Leur formule vertébrale est :

C 7; D 15; L 4; S 3-6; Cd 12-16.

Leur tête, très massive, a un museau très large; la position périscopique des organes sensoriels et des narines permet à l'Animal de rester immergé, en laissant hors de l'eau seulement la partie supérieure de la tête et du museau.

▼ **Tayassu tajacu,** *le pécari à collier, vit en petites bandes, du Texas, du Nouveau-Mexique et de l'Arizona à la Patagonie.*

C. Bevilacqua

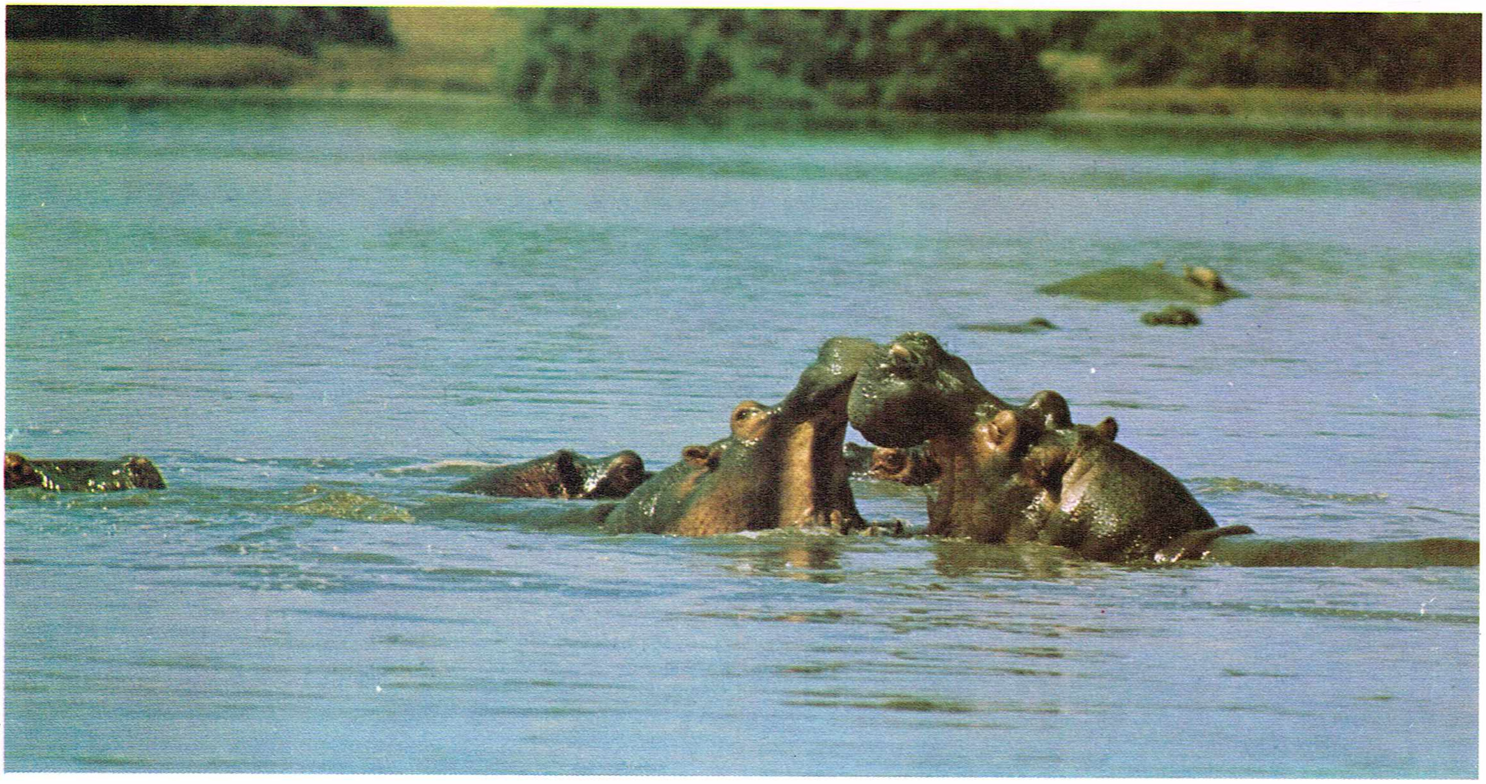

N. Myers

▲ *L'hippopotame* **(Hippopotamus amphibius)** *a une prédilection pour les régions riches en lacs et en rivières; les petits sont mis au monde et allaités sous l'eau*

▼ **Choeropsis liberiensis,** *l'hippopotame nain ou pygmée, contrairement au précédent, est forestier et ne va à l'eau que pour se baigner.*

Unguligrades, les pattes des hippopotames ont les doigts réunis par des membranes, servant à la nage. Leur queue, courte et comprimée latéralement, joue le rôle d'organe directionnel; à terre, elle sert à disperser les excréments sur les côtés de la piste que tracent ces pachydermes afin de marquer leur territoire.

Les hippopotames, à l'exception de l'espèce naine, mesurent de 4 m à 4,50 m de long, pour une hauteur de 1,40 m à 1,65 m au garrot, et un poids de 3 à 4,5 tonnes. La queue mesure seulement 50 cm. La peau, atteignant 5 cm d'épaisseur, rose chair à la naissance, devient par la suite plus ou moins gris ardoise, presque noire quand elle est mouillée. Les narines, les lèvres et les oreilles sont pourvues de nombreuses soies rigides. Le troisième doigt est un peu plus long que le quatrième, tous deux étant plus longs que les latéraux : mais les quatre doigts existants appuient normalement sur le sol. La formule dentaire est : $\left(I\frac{2}{1\text{-}2}; C\frac{1}{1}; Pm\frac{4}{4}; M\frac{3}{3}\right) \times 2 = 38\text{-}40$; les incisives et les canines ont tendance à se disposer, comme chez les Carnivores, selon une ligne transversale; les canines inférieures, courbées latéralement, peuvent se développer considérablement, jusqu'à plus de 1 m de long (racines comprises) pour un poids de 3 kg. Les incisives et les canines, à croissance continue, ont un ivoire plus dur que celui des éléphants. L'estomac, énorme, avec une grande courbure de 4 m de long, est divisé en trois parties. L'intestin a de 50 à 60 m de long; il n'y a ni cæcum ni vésicule biliaire. Les poumons, volumineux et très longs, permettent à l'hippopotame de rester en plongée plus de 5 mn. La famille des Hippopotamidés est répandue en Afrique, au sud du Sahara (au sud de 17° de latitude nord); elle comprend deux genres : *Hippopotamus* et *Choeropsis*, chacun monospécifique.

L'hippopotame proprement dit *(Hippopotamus amphibius)* habite toute l'aire de la famille; il vit très largement dans l'eau (son nom signifie « cheval de fleuve »), fréquentant les cours d'eau, les lacs, les grands marais, en troupes de plusieurs dizaines d'individus. Il lui arrive souvent, surtout pendant la nuit, de se rendre à terre, où il se déplace fort légèrement malgré son poids, pour pâturer dans les plaines herbeuses. Les hippopotames suivent toujours les mêmes pistes, qui sont bien indiquées sur le sol, et utilisées pendant de nombreuses générations par la population d'un lieu donné. Ils possèdent $I\frac{2}{2}$.

La maturité sexuelle est atteinte, chez les femelles, vers l'âge de 7 ans. La gestation dure de 227 à 240 jours, et chaque portée est unipare, rarement gémellaire, les petits naissant et étant allaités sous l'eau : pour allaiter, la mère se place au fond, sur le flanc (ses petits sont capables de rester immergés jusqu'à 3 mn). Les juvéniles, qui pèsent à la naissance de 27 à 45 kg, sont allaités pendant 2 mois environ; les femelles possèdent une paire de mamelles, inguinales. La longévité de l'espèce est de 40 à 50 ans.

L'hippopotame nain, ou pygmée *(Choeropsis liberiensis)*, est à peu près de la taille d'un sanglier : 1,50 à 1,75 m de long, 75 cm à 1 m de hauteur au garrot; il pèse jusqu'à 240 kg. Sa denture compte seulement $I\frac{2}{1}$. Contrairement au précédent, il est forestier et ne va à l'eau que pour se baigner; il aime cependant les zones très proches de l'eau. Il est nocturne et solitaire. Les femelles mettent bas un unique petit, à terre, après une gestation de 200 à 210 jours. C'est une espèce assez rare, mal connue, qui vit en Afrique occidentale, dans la bande forestière qui va du Liberia à une partie de la basse Nigeria.

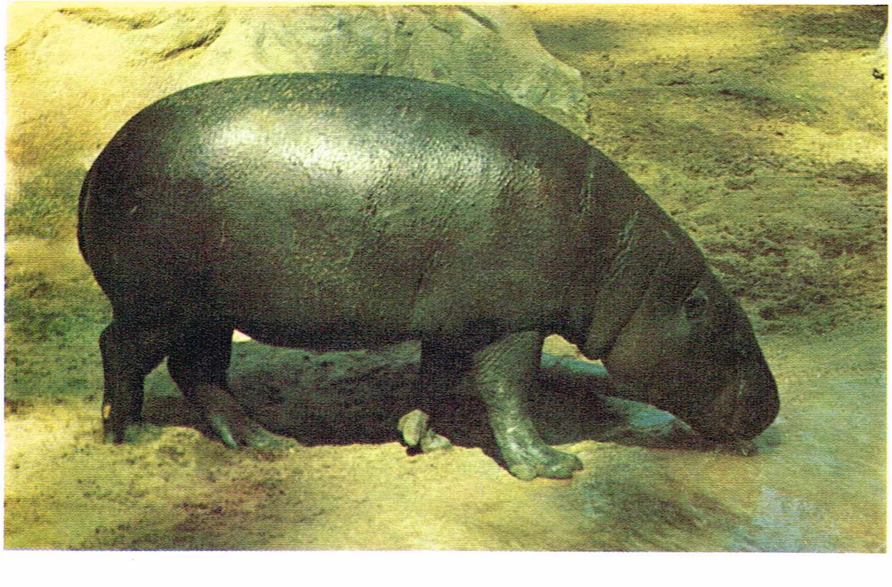

Ostman - J.W. Thompson

⋆ *Groupe des Ruminants* lato sensu

Suivant Simpson et Haltenorth, nous séparons ici, du point de vue taxonomique, le groupe des Ruminants, ou Sélénodontes, en Tylopodes (Camélidés) et en Ruminants; cependant nous les regrouperons pour étudier les aspects les plus importants de leur anatomie, notamment la morphologie dentaire, et la physiologie de leur appareil digestif.

Tous ces Artiodactyles sont végétariens, très souvent nettement herbivores. Par adaptation à ce type d'alimentation les dents maxillaires sont devenues de type sélénodonte, avec une couronne hypsodonte, et croissent fréquemment de façon continue; elles sont habituellement au nombre de 6 par demi-mâchoire. Le contour de la surface occlusale des prémolaires est triangulaire, alors que celui des molaires est plus ou moins quadrangulaire. Du fait de l'existence de sillons particuliers sur les flancs de ces dents, les surfaces occlusales présentent un dessin caractéristique, avec quatre replis semi-lunaires ou falciformes orientés dans le sens de la mâchoire (d'où le nom de Sélénodontes, qui signifie « à dents en forme de lune »). Ces demi-lunes présentent également deux séries de crêtes longitudinales à chaque arcade dentaire, servant à écraser les fibres végétales durant la mastication, grâce aux mouvements latéraux de la mandibule, typiques. On considère que la morphologie sélénodonte dérive d'un type ancestral quadrituberculé bunodonte, avec transformation des quatre éléments falciformes. Chez les Ruminants les moins évolués, c'est-à-dire les Tragulidés, les prémolaires sont encore de type quelque peu sectoriel.

L'estomac des Ruminants est divisé en 4 compartiments, dont la forme, la structure, le volume et les fonctions diffèrent : le rumen, ou panse; le réseau, ou réticulum (ou encore bonnet); l'omasum, ou feuillet (appelé encore psaltérium), et l'abomasum, ou caillette.

Le rumen, dans lequel débouche l'œsophage, est la partie la plus volumineuse; son grand axe est situé transversalement par rapport à l'axe du corps; en outre, il peut présenter des diverticules ou sacs accessoires, et sa paroi interne est couverte d'innombrables papilles, qui n'existent pas chez les Tylopodes : celles-ci ont une fonction thermorégulatrice importante en vue de certaines fermentations.

Puis fait suite le réseau, plus ou moins sphéroïdal, à paroi interne alvéolaire et tapissée de papilles différentes de celles du rumen; ces dernières lui confèrent un aspect réticulé et jouent un rôle spécifique vis-à-vis de la partie liquide de la nourriture.

La troisième chambre, l'omasum, est allongée et sa muqueuse présente une série de replis longitudinaux, ressemblant un peu aux pages d'un livre (d'où le nom de feuillet) : c'est là que l'eau est absorbée.

Enfin, la quatrième chambre, de structure assez proche, est un véritable estomac glandulaire, riche en glandes gastriques. Entre le cardia et l'omasum, plus précisément à la partie supérieure, s'étend une gouttière qui permet une communication directe.

Dans le rumen a lieu une fermentation bactérienne, laquelle permet la digestion de la cellulose grâce à des micro-organismes cellulolytiques (par exemple *Clostridium),* accompagnés habituellement de certains Infusoires, eux aussi capables de digérer la cellulose; ces Infusoires, qui passent dans les tronçons suivants, sont digérés et apportent à l'Animal une quantité non négligeable de matières protéiques. La nourriture, ingurgitée en grande quantité et à la hâte, s'accumule dans la panse, où elle subit une fermentation; puis du fait de contractions régulières elle passe dans le réseau. Là, elle est divisée en de nombreux petits bols alimentaires, lesquels sont ensuite régurgités pour être mastiqués soigneusement et bien insalivés. Ceux-ci sont de nouveau avalés, passant directement dans l'omasum, grâce à la gouttière œsophagienne, pour aller ensuite dans l'abomasum et enfin dans l'intestin. L'une des 4 chambres, l'omasum en particulier, peut être réduite ou à peine ébauchée (chez les Tragulidés, par exemple, il existe seulement 3 compartiments); chez les Camélidés, la panse comporte des diverticules supplémentaires. L'énorme estomac et le très long intestin confèrent aux Ruminants leur typique aspect pansu.

En ce qui concerne le squelette des membres, les Ruminants présentent certains caractères intéressants. L'omoplate proprement dite, bien développée, est surmontée par une suprascapula cartilagineuse. Le radius prédomine sur le cubitus, lequel est situé en arrière de lui ou lui est soudé. Les extrémités, généralement longues et assez grêles par rapport à la taille et à la hauteur de l'Animal, comptent seulement deux doigts fonctionnels (les troisième et quatrième), dont les éléments métapodiaux sont soudés en un unique élément, l'os canon, ou bien tendent à l'être, chez les formes les plus primitives (Tragulidés). Les doigts latéraux sont réduits ou même atrophiés chez les Giraffidés et les Camélidés : le plus souvent, ils ne touchent pas le sol. La dernière phalange des doigts est recouverte par le sabot, corné, asymétrique pris seul, mais symétrique dans sa juxtaposition avec celui du doigt correspondant du même pied; les sabots des doigts latéraux ont plutôt l'aspect d'éperons. Les Tylopodes (Camélidés) sont digitigrades, alors que les Ruminants, au sens strict, sont unguligrades.

En ce qui concerne les organes des sens, l'ouïe est particulièrement développée, les pavillons auriculaires étant très amples; les yeux sont assez grands et ont une pupille horizontale. Les Ruminants possèdent diverses glandes caractéristiques : glandes préorbitaires ou lacrymales, sébacées et sudoripares, glandes carpiennes, tarsiennes et métatarsiennes, glandes inguinales, glandes postcornières (chamois), glande dorsale *(Antidorcas),* glandes du musc *(Moschus),* glandes caudales *(Capra),* etc. Ces glandes servent à l'appel sexuel, à la reconnaissance sociale ou individuelle, et au marquage territorial. La plupart sont fonctionnelles surtout ou seulement pendant la période de reproduction. Les femelles possèdent une ou deux paires de mamelles, et, dans le second cas, l'une de ces paires est rudimentaire; la position inguinale des mamelles semble être la conséquence de l'adaptation au galop. Le placenta est polycotylédoné, (sauf chez les Tragulidés, où il est diffus). On observe des cycles annuels monœstriens uniquement chez les espèces sauvages; les autres espèces sont polyœstriennes. L'ovulation est spontanée et les testicules sont le siège d'une gamétogenèse cyclique. Le nombre des petits est de 1 ou 2 par portée, sauf quelques exceptions (4 à 6 chez *Hydropotes*). La fourrure des juvéniles diffère souvent de celle des adultes par le ton général du pelage.

Les Ruminants sont en général terrestres; mais un certain nombre d'espèces aiment l'eau, surtout des rivières et des marais, et mènent une vie partiellement semi-aquatique. Ce sont les espèces sylvicoles qui ont conservé le plus de caractères archaïques; c'est pourquoi on pense que la forêt constitue le milieu originel, surtout dans les régions boréales; mais, grâce à des adaptations morphologiques et physiologiques, d'innombrables genres de Ruminants ont colonisé des biotopes très divers, comme les grandes prairies, les savanes, les steppes, les zones rocheuses, les hautes montagnes et même les déserts (par rapport auxquels certaines gazelles et antilopes présentent des adaptations physiologiques surprenantes).

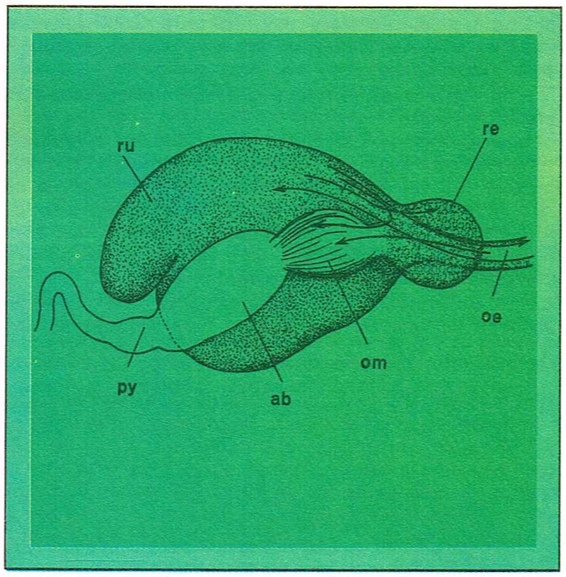

◀ ***Schéma de l'estomac des Ruminants; œ, œsophage, re, réseau ou réticulum ou encore bonnet; om, omasum ou psaltérium ou encore feuillet; ab, abomasum ou caillette; ru, rumen ou panse; py, pylore; les flèches indiquent le trajet des aliments.***

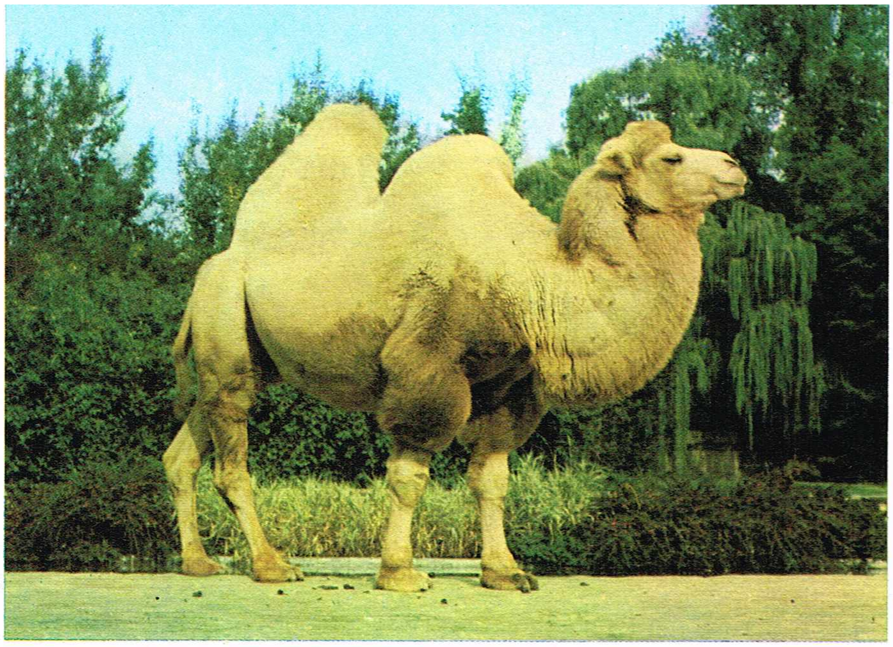

T. Okapia

▲ **Camelus bactrianus,** ***le chameau, originaire du Turkestan chinois et de Mongolie, n'est présent, à l'état sauvage, que dans une zone restreinte du désert de Gobi.***

Sous-ordre des Tylopodes

Le sous-ordre des Tylopodes *(Tylopoda)* comprend l'unique famille des **Camélidés** *(Camelidae)*. De grande ou très grande taille, ces Animaux ont une fourrure assez rude et parfois très longue (chez l'alpaga). Ils sont didactyles (les deuxième et cinquième doigts ayant disparus) et digitigrades, au contraire des Ruminants, qui sont unguligrades. Les doigts portent sur le sol par des coussinets élastiques; il existe en outre des callosités spéciales, situées, chez le chameau, aux articulations des coudes, des pouces et des genoux, ainsi que sur la poitrine au niveau du sternum (le nom de Tylopodes signifie « à pieds calleux »). L'allure de ces Animaux est l'amble. L'os frontal ne porte pas de cornes. La formule vertébrale est : C 7; L 7; S 4-5; Cd 12-21. Il existe 12 paires de côtes. La formule dentaire est :

$$\left(I\,\frac{1}{3};\ C\,\frac{1}{1};\ Pm\,\frac{2\text{-}3}{1\text{-}3};\ M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 30 - 36.$$

L'estomac est tripartite, car l'omasum manque; les parois du rumen présentent des cavités spéciales — cellules aquifères — où s'accumule l'eau absorbée par les Animaux. La vésicule biliaire est absente, et le cæcum court et simple. Les glandes occipitales du chameau, importantes, forment deux masses sphéroïdales à la partie haute de la nuque; elles sont volumineuses chez le mâle et atteignent leur développement maximal à l'époque de la reproduction.

Les Camélidés présentent une particularité unique chez les Mammifères : l'ossification partielle du diaphragme. Un autre trait spécifique de cette famille est la forme ovalaire des globules rouges et leur nombre très élevé : 14 000 000/mm³ chez le lama et 19 000 000/mm³ chez le chameau.

Les Camélidés manifestent une aptitude marquée pour la vie dans les régions arides et désertiques *(Camelus)* ou en haute montagne *(Lama)*. La graisse accumulée dans les tissus sous-cutanés forme chez le chameau deux bosses caractéristiques, alors qu'il y en a une seule chez le dromadaire. Ces importantes réserves et la présence d'eau dans les alvéoles aquifères de l'estomac permettent aux *Camelus* d'effectuer de longues marches qui durent plusieurs jours dans les déserts, sans prendre ni eau, ni nourriture. En outre ces Animaux utilisent l'eau métabolique provenant de l'oxydation des graisses. Les Camélidés sont essentiellement grégaires et diurnes. Ils ont la curieuse habitude, plus marquée chez le lama, de cracher un jet de salive quand ils sont irrités. La gestation dure de 370 à 440 jours chez *Camelus*, et de 10 à 11 mois chez *Lama*. Le placenta est diffus.

Originaires d'Amérique du Nord, les Camélidés ont colonisé l'Asie et l'Amérique du Sud. Actuellement, la famille comprend deux genres : *Camelus*, d'Asie centrale et occidentale, et *Lama*, des hautes régions andines du Pérou à la Patagonie et à la Terre de Feu.

Camelus est caractérisé par une très grande taille (le chameau est long d'environ 3 m, mesure 2 m de hauteur au garrot, et pèse de 450 à 700 kg), ainsi que par la présence sur le dos d'une (dromadaire) ou de deux (chameau) bosses. La denture compte habituellement Pm $\frac{3}{2}$ (parfois $\frac{2\text{-}4}{2\text{-}3}$). Il a de larges coussinets plantaires, adaptés à la marche dans les zones désertiques et en plaine, surtout sur le sable. La queue est moyenne (50 cm).

Le chameau *(C. bactrianus)*, originaire du Turkestan chinois et de Mongolie, n'est présent à l'état sauvage que dans une zone restreinte du désert de Gobi (environ cinq cents têtes, vivant en troupes de vingt-cinq à trente individus).

Le dromadaire *(C. dromedarius)*, qui n'existe plus qu'à l'état domestique en Afrique du Nord et en Asie, est utilisé comme Animal de bât et de selle dans les caravanes. Probablement originaire d'Asie occidentale, peut-être d'Arabie, il a été introduit non seulement en Afrique du Nord, mais aussi dans les zones arides du Texas, de l'Arizona et du Nouveau-Mexique aux États-Unis, ainsi que dans l'ouest de l'Australie; il s'y est très bien acclimaté, redevenant plus ou moins sauvage.

Lama, sud-américain, se distingue par sa taille moyenne, l'absence de bosses, des oreilles plus longues et une queue courte. La denture compte Pm $\frac{2}{1}$. Ce genre ne comprend actuellement que deux espèces à l'état sauvage, le guanaco *(L. guanacoe = L. huanachus)* et la vigogne *(L.* [*Vicugna*] *vicugna)*; cette dernière, devenue très rare à cause de la chasse effrénée qui lui a été faite pour sa fourrure, habite les Andes de 10° à 29° de latitude sud, entre 3 500 et 5 700 m d'altitude. Le lama *(L. glama = L. pervana)* et l'alpaca *(Lama pacos)* survivent seulement à l'état domestique.

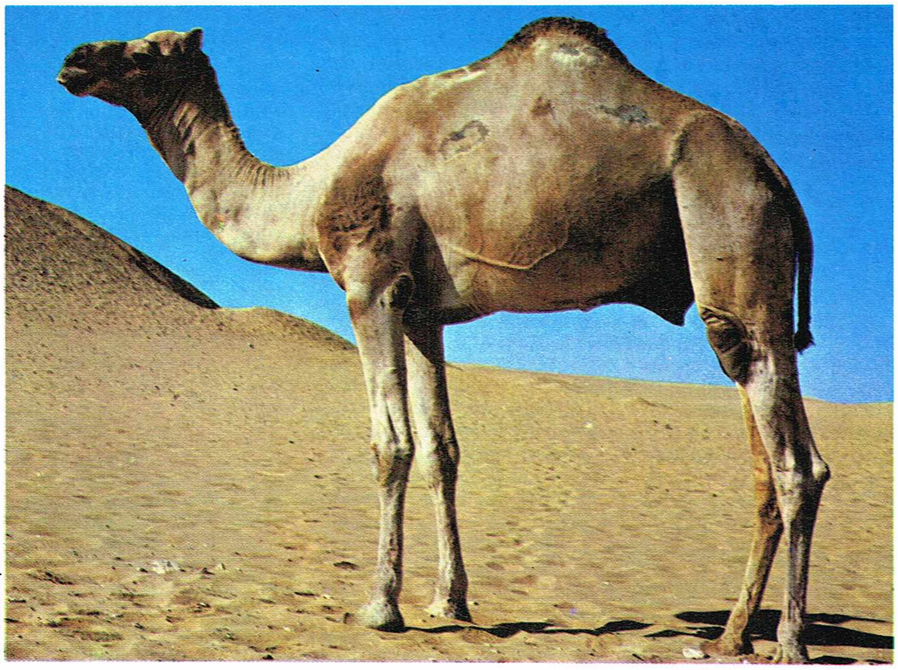

C. Bevilacqua

▲ **Camelus dromedarius,** ***le dromadaire, qui n'existe plus qu'à l'état domestique en Afrique du Nord et en Asie, est utilisé comme Animal de bât et de selle dans les caravanes.***

C. Bevilacqua

▶ **Lama glama** ***survit seulement à l'état domestique en Amérique du Sud.***

Sous-ordre des Ruminants

Le sous-ordre des Ruminants *(Ruminantia)* comprend les Ruminants vrais, à estomac divisé en 4 compartiments (à l'exception des Tragulidés), tous unguligrades et le plus souvent pourvus de cornes. Il compte les familles suivantes : Tragulidés, Cervidés, Giraffidés, Antilocapridés, et Bovidés. Certains auteurs considèrent les Moschinés, qui dans la systématique classique font partie des Cervidés, comme une famille en soi, celle des Moschidés.

Les **Tragulidés** *(Tragulidae)* constituent la famille qui présente les caractères les plus archaïques. Les métacarpiens des troisième et quatrième doigts peuvent être distincts, sans présence d'un os canon. L'extrémité inférieure du péroné est soudée au tibia. Il existe 13 paires de côtes. La formule vertébrale est :

C 7 ; D 13 ; L 6 ; S 5 ; Cd 8-13.

La formule dentaire est :

$$\left(I\ \frac{0}{3};\ C\ \frac{1}{1};\ Pm\ \frac{3}{3};\ M\ \frac{3}{3}\right) \times 2 = 34;$$

les canines supérieures forment de petites défenses ; les prémolaires sont de type sectoriel.

L'estomac est tripartite, avec un omasum à peine ébauché. Le placenta est diffus. Les femelles possèdent deux paires de mamelles. La gestation dure de 120 à 155 jours, et les portées sont unipares ou gémellaires. Les Tragulidés sont les plus petits Ruminants vivants ; ils habitent l'Asie méridionale et une partie de l'Afrique. La famille compte deux genres : *Tragulus* et *Hyemoschus,* avec au total quatre espèces.

La plus petite espèce des Ruminants actuels est le tragule indien *(Tragulus javanicus),* long de 40 à 47 cm et d'une hauteur au garrot de 20 à 25 cm. Son dos est arqué. Ses pattes sont fines et pourvues de quatre doigts à petits sabots. Sa queue mesure 4 cm de long. Sa tête, petite, porte de grands yeux et est dépourvue de cornes. Chez les mâles, les canines supérieures font saillie comme deux petites défenses. Le tragule vit en Indochine, en Malaisie, et dans les îles de la Sonde ; il aime les forêts humides et les zones paludéennes. Crépusculaire et nocturne, très timide, il vit par couples. Il se nourrit de feuilles et de fruits. Les autres espèces de *Tragulus* sont *T. napu,* dont l'aire est analogue à celle de l'Animal précédent, et *T. meminna,* largement répandu en Inde et à Ceylan.

Le second genre compte une unique espèce : le chevrotain aquatique *(Hyemoschus aquaticus),* un peu plus grand que les précédents et à pattes plus courtes et plus robustes. Il habite les forêts tropicales pluviales d'Afrique occidentale, de la Gambie jusqu'au Zaïre oriental.

La famille des **Cervidés** *(Cervidae)* est, après celle des Bovidés, la plus nombreuse des Artiodactyles. Elle comprend des Ruminants dont les pattes sont fines et fortes, et presque toujours pourvues de sabots accessoires. Leur tête présente un museau allongé, et de grands yeux, devant lesquels se trouve une grande glande lacrymale typique.

Le principal caractère familial est la présence de cornes, ou « bois », ramifiées chez les mâles (seules les femelles de rennes en possèdent aussi) ; toutefois, ces cornes ne se développent pas chez *Moschus* et *Hydropotes.* Elles sont différentes de celles des Bovidés : non seulement elles sont constituées par de la matière osseuse compacte (ce sont des plénicornes), sans étui corné (au contraire des Bovidés, qui sont des cavicornes), mais de plus, elles sont renouvelées selon un cycle annuel (ce sont des caducicornes). Leur pousse et leur chute sont soumises au cycle de l'activité hormonale sexuelle ; excepté chez le renne, ces cornes doivent être considérées comme des caractères sexuels secondaires. Elles se forment sur des bases ou des bosses implantées sur les os frontaux. Durant leur croissance, elles sont revêtues par une peau très vascularisée, le « velours », qui se dessèche quand les cornes sont formées, par oblitération des vaisseaux sanguins ; cette oblitération est due à la formation d'un cercle osseux basal (couronne) ; la peau tombe par lambeaux, laissant l'os à nu, très compact, un peu semblable à l'ivoire, et portant extérieurement les traces de vaisseaux sanguins qui irriguaient précédemment le velours. Les cornes, qui tombent simultanément ou non, repoussent très rapidement. Jusqu'à un certain âge, elles croissent chaque année en se ramifiant de plus en plus, normalement jusqu'à la maturité, stade auquel elles présentent l'aspect typique de l'espèce (le nombre de ces ramifications, ou « cors », n'est pas un critère sûr pour juger de l'âge de l'Animal). Selon les genres, il s'agit soit de cornes ramifiées en arborescence, soit — par soudure de la hampe avec certaines pointes — de cornes palmées (élan, daim).

La formule vertébrale des Cervidés est :

C 7 ; D 12-14 ; L 5-7 ; S 4-6 ; Cd 6-18.

Il existe normalement 13 paires de côtes. La formule dentaire est :

$$\left(I\ \frac{0}{3};\ C\ \frac{0\text{-}1}{1};\ Pm\ \frac{3}{3},\ M\ \frac{3}{3}\right) \times 2 = 32 \text{ ou } 34.$$

Les femelles possèdent deux paires de mamelles. Le placenta est polycotylédoné.

Essentiellement sylvicoles, les Cervidés fréquentent souvent les lisières des forêts et les zones paludéennes ; ils aiment beaucoup l'eau. Leurs habitats sont cependant variés : forêts, toundras arctiques, broussailles, marais et marécages, et même zones arides. Certains se sont adaptés à la vie sous les tropiques, d'autres aux climats froids. Ils se nourrissent essentiellement d'herbes et de feuillages, de bourgeons tendres, de baies, de Champignons, etc., mais, en période de disette, ils savent se contenter d'écorces et de Lichens.

La plupart des espèces sont grégaires et forment des groupes constitués normalement de nombreuses femelles avec leurs petits, auxquels se joint un mâle adulte durant la période de reproduction. Certains, comme les élans, sont au contraire solitaires. La lutte entre mâles à l'époque du rut est un comportement tout à fait typique de ces Ruminants. Chaque portée compte 1 ou 2 petits ; ceux-ci ont chez de nombreuses espèces une livrée tachetée. Le dimorphisme saisonnier de la robe (comme chez le chevreuil et le cerf) n'est pas rare.

La famille a une très vaste diffusion en Europe, en Asie (y compris le Sud-Est asiatique), dans le nord-ouest de l'Afrique et dans le Nouveau Monde jusqu'à 40° de latitude sud en Amérique du Sud. Sa classification est complexe et controversée. Pour plus de clarté, en ce qui concerne les sous-familles, nous suivrons avec quelques variantes celle de Flerov (1952) ; nous reprendrons la systématique d'Haltenorth pour la définition des espèces, au nombre de trente-trois. La famille est divisée en cinq sous-familles : les Moschinés, les Cervulinés ou Muntiacinés, les Hydropotinés, les Cervinés et les Néocervinés.

La sous-famille des *Moschinés* que certains auteurs (Flerov) considèrent comme une famille en soi, compte une unique espèce, le porte-musc *(Moschus moschiferus),* répandu en Asie centrale et nord-orientale, de l'Himalaya à la Sibérie et à Sakhaline dans les forêts et les maquis, entre 2 500 et 3 600 m d'altitude. Par certains caractères,

C. de Klemm - Jacana

▲ **Tragulus javanicus,** ***le tragule indien, est la plus petite espèce des Ruminants actuels ; crépusculaire et nocturne, très timide, il aime les forêts humides et les zones paludéennes.***

G. Haüsle - Jacana

▲ **Muntiacus muntjak,** ***le cerf muntjak, appartient à la famille des Cervidés dont le principal caractère est la présence de cornes ou « bois », ramifiées chez les mâles, et caduques. Celles de cette espèce sont petites, pourvues d'une seule branche et dirigées obliquement vers l'arrière.***

on peut le rapprocher des Tragulidés. Dépourvu de cornes, de glandes lacrymales et de vésicule biliaire, il est caractérisé par la présence chez le mâle de canines supérieures fort longues (75 mm de long), formant de véritables petites défenses ; en outre, toujours chez le mâle, il existe une glande préputiale, sacciforme, qui produit une substance fortement odorante et très recherchée en parfumerie, le musc. Le porte-musc mesure environ 1 m de long et a de 50 à 70 cm de hauteur au garrot, pour un poids de 10 à 17 kg. La denture compte C $\frac{1}{1}$. La gestation dure environ 160 jours et les portées sont unipares (rarement gémellaires) ; les juvéniles sont tachetés. Les femelles possèdent une seule paire de mamelles.

Cette espèce vit normalement dans les montagnes inaccessibles, s'y nourrissant de feuilles, d'herbes, de fruits, de fleurs et de Lichens.

La sous-famille des *Cervulinés* ou *Muntiacinés* compte des Cervidés de petite taille, dont la hauteur au garrot ne dépasse pas 70 cm, et dont la queue est longue de 10 à 20 cm. Les cornes sont peu développées et existent seulement chez les mâles. Les protubérances osseuses de l'os frontal, qui portent les cornes, sont longues. L'espace nu du museau est très important et comprend les narines. Les glandes lacrymales sont grosses. La denture compte C $\frac{1}{1}$. La livrée est habituellement brun châtain et non tachetée. Il existe deux genres monospécifiques.

Muntiacus muntjak, le muntjak ou cerf muntjak, compte une vingtaine de races ou sous-espèces, qui habitent de la Chine au Népal, à Ceylan et à une grande partie des îles de la Sonde. Il vit dans les plaines de moyenne altitude, dans la végétation dense. Long au maximum de 1 m, il porte de petites cornes d'une longueur maximale de 15 cm, pourvues d'une seule branche et dirigées obliquement en arrière.

Elaphodus cephalophus, de Chine méridionale et de Birmanie, est un peu plus grand (1,60 m de long, 70 cm de hauteur au garrot) et porte des cornes minuscules. Solitaire, il fréquente les alentours des rivières de forêt entre 900 et 2 600 m.

La sous-famille des *Hydropotinés* ne compte qu'une espèce : l'hydropote *(Hydropotes inermis)*, de Chine et de Corée. D'une hauteur au garrot de 60 cm, il est dépourvu de cornes ; les mâles portent des incisives supérieures très développées, en forme de défense. Cet Animal vit solitaire ou par couples ; il est très craintif. Les adultes ont une livrée unicolore, plus claire sur le ventre ; les juvéniles sont tachetés.

La sous-famille des *Cervinés* est la plus nombreuse, avec seize espèces. Elle représente le type de la famille. Il en existe, selon Flerov, quatre genres : *Capreolus, Cervus, Elaphurus* et *Alces ;* l'inclusion chez les *Cervus* de certaines espèces comme *Dama* et *Axis* que nous considérons ici comme des sous-genres, est contestée par certains zoologues, qui les rangent dans des genres distincts ; la position systématique de *Capreolus* est également controversée.

Bruce Coleman - J.R. Simon

▲ ***Troupeau de cerfs du Canada ou wapitis* (Cervus elaphus canadensis) *que l'on rencontre en Amérique du Nord; cette sous-espèce, plus grosse que la forme européenne, se distingue au grand développement des bois des mâles.***

Les Cervinés, dans le sens où nous les entendons ici, sont des formes de petite, moyenne, grande et parfois très grande taille *(Alces)*. Ils possèdent toujours des cornes, mais seulement chez les mâles. Les glandes lacrymales, parfois rudimentaires, sont toujours présentes. La partie nue du museau est en certains cas très réduite. La queue est de longueur variable. Les canines supérieures sont petites ou absentes. La livrée est variable et peut être tachetée, même chez l'adulte. La distribution de la sous-famille est très vaste : seules les zones de la toundra arctique et de l'Amérique au sud du Mexique en sont exclues.

Capreolus est représenté par une seule espèce : le chevreuil *(C. capreolus)*, largement répandu en Eurasie paléarctique, dans les zones tempérées, de l'océan Atlantique et la Méditerranée à l'océan Pacifique. Long de 90 cm à 1,35 m, à queue de 2 à 3 cm seulement, il mesure au garrot de 65 à 75 cm (jusqu'à 90 cm pour les formes orientales) ; il pèse de 15 à 30 kg (jusqu'à 50 kg). Il a une tête petite et triangulaire, avec un museau fin et étroit. Ses yeux sont grands et ovalaires. Ses oreilles sont grandes et fines. Ses bois, droits, petits et courts, sont pourvus chez les adultes de 3 branches seulement, avec une hampe assez grosse, cylindrique et rugueuse; ils tombent en novembre ou en décembre; les bois anormaux sont fréquents. Sa fourrure, à poils courts, est rousse en été, grisâtre et plus touffue en hiver. Le pelage du disque caudal, ou « miroir », blanchâtre, est en partie érectile, sous l'effet d'émotions. Les femelles possèdent quatre mamelles et mettent bas, le plus souvent, 2 petits par portée. La durée de gestation peut être très longue (de 9 à 10 mois dans les régions septentrionales), à cause de la nidation différée. Souvent forestier, le chevreuil fréquente plaines, collines et montagnes, du niveau de la mer jusqu'à la limite supérieure de la végétation arborescente. Territorial, il vit par petites troupes de trois ou quatre têtes, parfois plus, constituées de femelles et de juvéniles, les mâles adultes se tenant à part; en hiver, les bandes sont nombreuses et comptent jusqu'à trente individus.

Cervus, selon la classification adoptée ici, compte treize espèces, dont la plus importante est le cerf élaphe, ou d'Europe *(C. elaphus)*. Long de 1,60 m à 2,50 m, à queue de 12 à 15 cm, il a une hauteur au garrot de 1 m à 1,50 m, et pèse de 90 à 250 kg. Son corps est robuste, sa tête haute, son cou très musclé, son garrot saillant, et son dos droit. Il a des pattes robustes et élancées. Sa queue, relativement longue, est touffue et se termine en pointe. Sa fourrure est rugueuse avec un jarre épais et long, de couleur brun-fauve, tendant au roux en été et au gris plus ou moins foncé en hiver; ses parties inférieures sont plus claires. Son iris est brun clair au centre, et brun-roux à la périphérie. Enfin, ses pattes sont noires à la base. Les juvéniles ont une livrée brun clair, tachetée de blanc aux parties supérieures.

Les « bois », très développés, ont un fût cylindrique, rugueux (perlé), présentant une légère concavité interne. Le « merrain », ou partie inférieure, est fixé sur le pivot, apophyse de l'os frontal, et porte des branches, ou « andouillers » (« cors »), formant à la partie supérieure une couronne (dite « fourchée » lorsqu'il y a 2 andouillers, « trochure » lorsqu'il y en a 3 ou 4, et « paumure » quand il existe au moins 5 andouillers). Le nombre d'andouillers augmente avec l'âge, puis diminue au cours de la vieillesse.

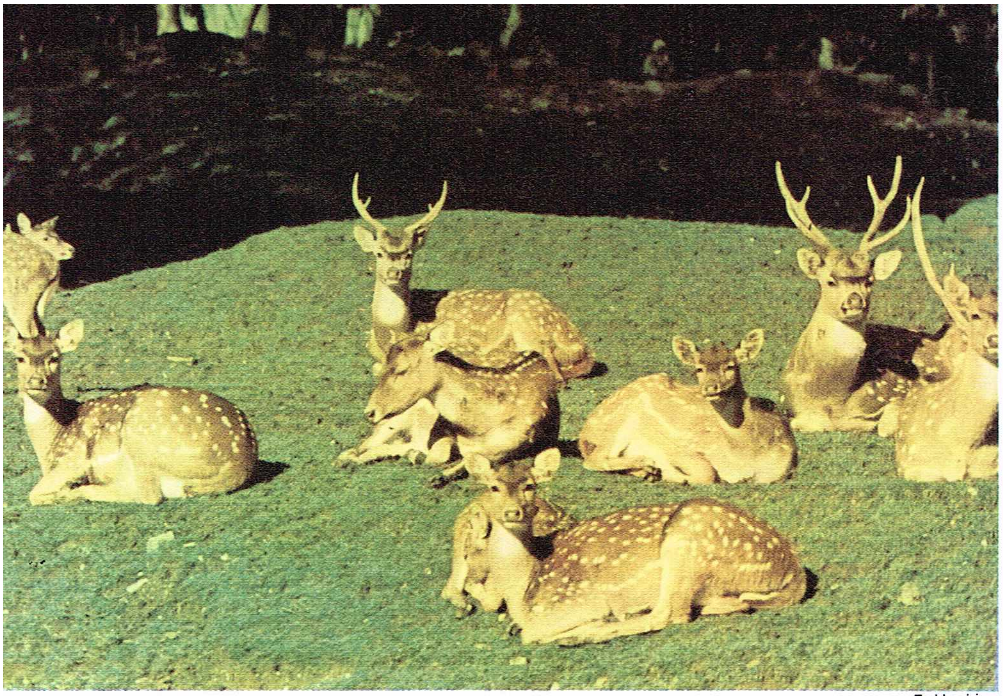

E. Hosking

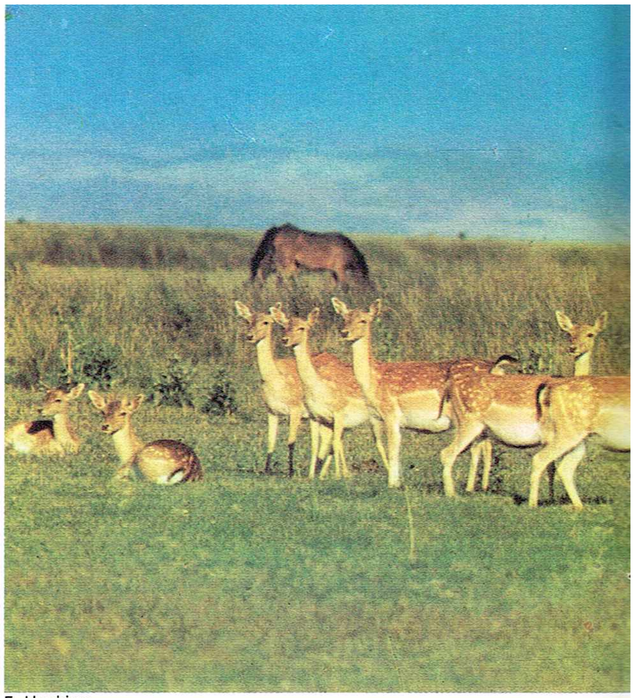

E. Hosking

▲ *A gauche, groupe de cerfs axis* (**Cervus axis**), *dont on observera l'élégance de la tête et la beauté de la robe tachetée de blanc. A droite, femelles du daim* (**Cervus [Dama] dama**); *celles-ci ont deux petits par portée, qui deviennent indépendants entre 9 et 12 mois.*

Le pivot commence à se former à huit mois, la première branche pousse à un an et tombe à la fin de la deuxième année. En vénerie, on désigne le cerf d'après le nombre des andouillers portés par ses 2 bois; on en observe au moins 8 lors du développement maximal et, quelquefois, 10 (cerfs « dix-cors »). Le renouvellement annuel des bois se fait normalement de mars à juin.

Typiquement sylvicole, le cerf fréquente les forêts de feuillus ou mixtes, cherchant toujours la présence de l'eau. Il s'adapte très bien aux forêts de montagne, jusqu'à la limite de la végétation arborescente, qu'il dépasse en été. Généralement sédentaire, il se déplace par nécessité, descendant en hiver vers l'aval dans les régions de montagne. Crépusculaire et nocturne, il se repose dans les bois pendant le jour; il semble qu'il fréquentait originellement les milieux ouverts et qu'il était diurne : c'est la pression de l'homme qui l'aurait rendu forestier et nocturne. Les femelles forment avec les juvéniles des hardes, guidées par une femelle adulte qui a aussi son faon; les mâles adultes ne rejoignent les femelles qu'à la période de la reproduction; le rut a lieu en septembre ou en octobre. Après une gestation de 33 à 34 semaines, les femelles mettent bas, en mai ou juin, au profond des taillis, 1 ou rarement 2 petits, peu précoces et qui resteront tachetés jusqu'à la mue du premier automne; les juvéniles deviennent indépendants entre 8 et 10 mois. La longévité de l'espèce est de l'ordre de 20 ans.

La distribution du cerf, très vaste, s'étend de l'Europe occidentale et du nord-ouest de l'Afrique (où il est cependant rare) à la Sibérie orientale, à la Mandchourie, les limites méridionales étant le Yang-Tsé-Kiang et les pentes du sud de l'Himalaya. Les individus qu'on trouve en France représentent un vestige d'une distribution passée plus vaste; toutefois, dans l'ensemble, les populations augmentent de nouveau. Il en existe plusieurs races : *C. elaphus hippelaphus*, grand, d'Europe centrale; *C. e. elaphus*, également grand, rarissime, qui habite le midi de la Suède; *C. e. atlanticus*, plus petit, vivant sur la côte de la Norvège, jusqu'à 65° de latitude nord; *C. e. scoticus*, de Grande-Bretagne, assez semblable au précédent; *C. e. hispanicus*, petit, plutôt gris, de la péninsule Ibérique; enfin, *C. e. corsicanus*, petit et de couleur foncée, qui habitait la Corse et qui a peut-être disparu.

En Amérique du Nord, on rencontre le wapiti *(C. e. canadensis)*, que certains auteurs considèrent comme une espèce distincte *(C. canadensis)*. En effet, plus grosse que la forme européenne, elle peut peser jusqu'à 350 kg; on la distingue, notamment, à son long pelage touffu et foncé, à la grande tache blanc jaunâtre qui orne sa croupe et le haut de la partie postérieure de ses cuisses, à la teinte foncée de ses parties inférieures, et au grand développement des bois des mâles (chacun mesurant jusqu'à 1,75 m).

Le cerf-cochon *(C. [Axis] porcinus = Hyelaphus porcinus)*, d'une hauteur au garrot d'environ 60 cm, habite le Népal, l'Assam, le Pendjab, Ceylan, la Birmanie et l'Indochine. Le cerf axis *(C. [Axis] axis)* a une hauteur au garrot de presque 1 m; sa livrée est roux-fauve vif aux parties supérieures, avec de nombreuses taches sur les flancs et le dos; en outre, une bande blanche parcourt la ligne médiane, flanquée à droite et à gauche de deux autres bandes étroites constituées d'une série de taches ; il est répandu du Népal et du Sikkim jusqu'à Ceylan. Le cerf sika *(C. [Sika] nippon)*, qu'on observe en Asie orientale, y compris au Japon, présente également une livrée tachetée; ses bois possèdent au maximum 5 andouillers, plus simples que ceux du cerf élaphe. Le cerf de Thorold, ou à museau blanc *(C. albirostris)*, habite le Setchouan, le Kansou, le Tibet et près du lac Koukou-Nor. Le cerf des marais ou barasingha *(C. [Rucervus] duvauceli)* vit dans le nord de l'Inde. Le cerf de Schomburgk *(C. [Rucervus] schomburgki)*, de Thaïlande, a vraisemblablement disparu. Le tameng *(C. [Rucervus] eldi)* est observé à Haïnan, en Birmanie, en Indochine et dans la péninsule malaise. Le sambar *(C. [Rusa] unicolor)*, largement répandu dans l'Asie méridionale et du Sud-Est, y compris l'Inde et la Malaisie, les îles de la Sonde, Célèbes et les Philippines, dépasse 1,30 m de hauteur au garrot; son museau est gros et ses oreilles grandes; il possède de volumineuses glandes lacrymales; sa livrée est brun foncé avec une crinière sur le cou et la gorge; ses bois comptent habituellement 3 andouillers et mesurent environ 90 cm. Le cerf de Timor *(C. [Rusa] timorensis)*, qui peuple les îles du sud de l'Indonésie, est très proche du précédent; citons enfin *C. (Rusa) mariannus*, des Philippines.

Le daim *(C. [Dama] dama)*, que certains ont classé dans un genre à part, *Dama*, est long de 1,30 à 1,55 m, avec une hauteur au garrot de 80 cm à 1,10 m, et peut peser 85 kg. Plus petit que le cerf élaphe, il a les oreilles moins grandes, ovales et les pattes un peu plus courtes. Sa tête, fine, se termine par un museau nu. Ses glandes lacrymales sont peu développées. Ses bois, typiques, ont un merrain cylindrique et des perlures peu saillantes; les parties supérieures, réunies à la base et aplaties, forment une palme plus ou moins digitée ou dentelée. Son cou est gracile. Il a le corps trapu et arrondi. Ses pieds sont très larges et ronds. Sa queue est assez longue (16 à 19 cm). Sa livrée est fauve roussâtre aux parties supérieures et sur les flancs, avec, en été, des taches blanches plus ou moins évidentes; le long de la ligne médiane du tronc, on distingue fréquemment une bande noirâtre qui se continue sur la queue, laquelle est blanche latéralement et en dessous. En hiver, la robe est grisâtre et les taches disparaissent presque complètement. Il existe des cas d'albinisme et d'autres anomalies chromatiques. Les canines supérieures sont normalement absentes.

L'aire originelle du daim comprend les zones non désertiques des régions méditerranéennes et de l'Asie Mineure, d'où il fut largement exporté à travers le monde, en particulier dans de nombreux pays d'Europe. C'est une espèce rare, présente maintenant en Espagne, en Sardaigne, en Grèce, à Rhodes, en Asie Mineure et au nord de la Palestine. Il fréquente les forêts de haute futaie, les clairières, les prairies, les champs, sans compter les broussailles (Sardaigne) et le maquis méditerranéen; chez nous, il n'habite plus guère que les parcs. C'est un Animal généralement sédentaire, crépusculaire et nocturne. Les femelles, qui possèdent quatre mamelles,

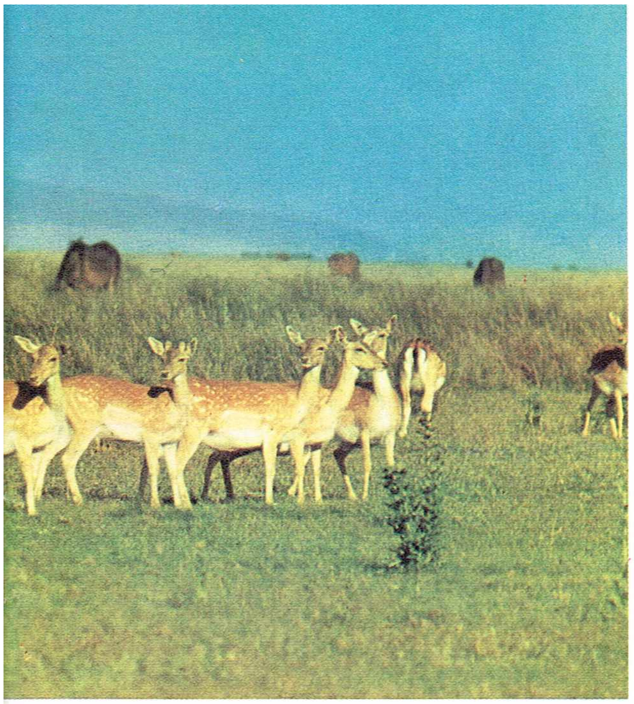

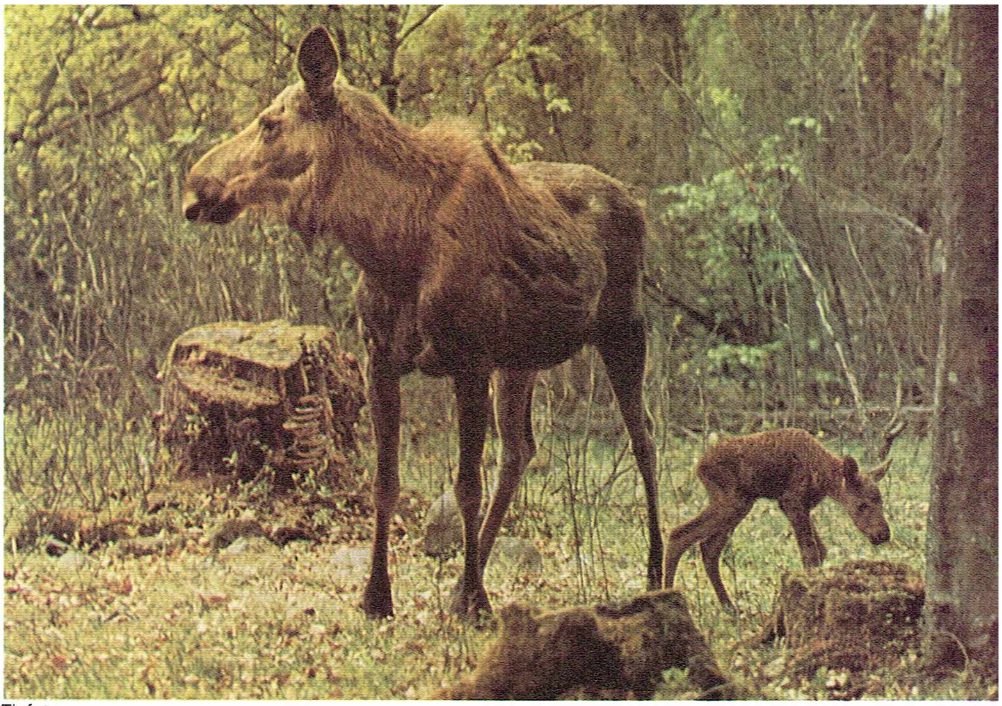

Tiofoto

▲ ***Femelle d'élan** (Alces alces) avec son petit; l'espèce, typiquement forestière, a pour habitat la grande taïga, fréquentant surtout les clairières herbeuses et humides.*

mettent au monde 2 petits (plus rarement 1 ou 3) par portée, qui deviennent indépendants entre 9 et 12 mois.

C. d. mesopotamicus, forme distincte, un peu plus grande, habite la Perse, dans de minuscules aires, et dans certaines parties de l'Asie Mineure. Selon toute probabilité, seuls quelques spécimens survivent dans les parcs et les zoos.

Elaphurus est représenté par l'unique cerf du père David *(E. davidianus),* d'une hauteur au garrot de 1,40 m. Ses grands bois typiques ont un merrain à peu près cylindrique, qui se ramifie ensuite dichotomiquement, avec les andouillers dirigés en arrière. Ce cerf devait originellement peupler les grandes prairies de la Chine septentrionale, dans les zones marécageuses. Quand il fut observé par le missionnaire, naturaliste et explorateur Armand David (1865), il n'existait déjà plus que rigoureusement protégé, dans le parc impérial de chasse de Pékin. Après bien des avatars, le père David réussit à se procurer deux peaux de cet Animal, puis la légation française de Pékin obtint deux spécimens vivants, d'après lesquels H. Milne Edwards décrivit l'espèce. Deux individus vivants furent envoyés à Londres en 1869, ainsi que deux autres en 1883; le duc de Bedford s'intéressa providentiellement à la conservation de l'Animal et en acquit un certain nombre pour son parc de Woburn Abbey. En Chine, les individus du parc impérial subirent des vicissitudes et disparurent, notamment à cause de la révolte des Boxers de 1895, un seul de ces cerfs ayant survécu à Pékin jusqu'en 1920. Les descendants de la harde du duc de Bedford servirent toutefois à fournir divers parcs et jardins zoologiques en cette rare espèce, qui a ainsi échappé à l'extinction. Il en existe environ quatre cents têtes, réparties en divers pays du monde.

Alces compte pour unique espèce l'élan *(A. alces),* le géant des Cervidés actuels. Il est répandu dans une grande partie des régions forestières (taïga) de l'Eurasie septentrionale (de la Norvège à la Mongolie) et de l'Amérique du Nord (Alaska, Canada et une partie du nord-ouest des États-Unis). Il mesure de 2,50 à 3 m de long, avec une queue de 5 à 7 cm seulement; il peut avoir une hauteur au garrot de 2 m et peser 800 kg (jusqu'à 1 tonne). Sa tête est longue et son front large. Il possède des petits yeux et des glandes lacrymales peu développées. Sa lèvre supérieure, très grande, est tronquée en avant. Ses grandes oreilles sont très mobiles. Ses très grands bois, qui pèsent chacun plus de 20 kg et sont de forme unique, sont constitués par un merrain très court, lequel supporte une grande palme plus ou moins horizontale, divisée grossièrement en deux lobes; chaque bois est pourvu marginalement d'un certain nombre de gros andouillers. L'élan a le cou très court, un tronc massif et assez bref, et des grandes pattes, avec de longs sabots étroits. Sa robe est faite de poils longs et rudes, de couleur brun jaunâtre ou brun noirâtre, la couleur variant selon les saisons. Sa denture présente $C\frac{0}{1}$.

L'espèce, typiquement forestière, a pour habitat la grande taïga; elle fréquente les lieux très paludéens, à rivières et à lacs abondants, avec un sol plat et imbibé d'eau, aimant à se plonger dans l'eau, où il lui arrive de manger des plantes aquatiques. Les femelles, après une gestation de 242 à 250 jours, mettent bas de 1 à 3 petits. La longévité est de l'ordre de 20 ans.

La sous-famille des *Néocervinés,* ou *Odocoïléinés,* comprend essentiellement les Cervidés américains (et tous les Cervidés sud-américains), à la seule exception, selon Flerov, des *Rangifer,* qui vivent également en Eurasie. A l'exclusion des *Lama,* elle constitue la totalité des Ruminants indigènes de l'Amérique du Sud. Elle compte au total quatre genres *(Mazama, Pudu, Odocoileus* et *Rangifer)* et treize espèces, de petite ou moyenne taille, dont la hauteur au garrot varie de 34 cm à 1,30 m. Les adultes sont toujours unicolores et les juvéniles parfois tachetés. Les bois, toujours présents chez les mâles, poussent aussi chez les femelles de *Rangifer.* Les glandes lacrymales, bien que fréquemment rudimentaires, sont toujours présentes. La partie nue du museau est parfois réduite ou manquante. La queue est de longueur variable. Les pattes conservent des vestiges proximaux ou distaux des métapodes (type télémétacarpien). En ce qui concerne la denture, la canine supérieure est absente.

▼ ***Le mâle d'Alces alces** est le géant des Cervidés actuels; on observera ses bois, en cours de croissance, encore couverts de « velours ».*

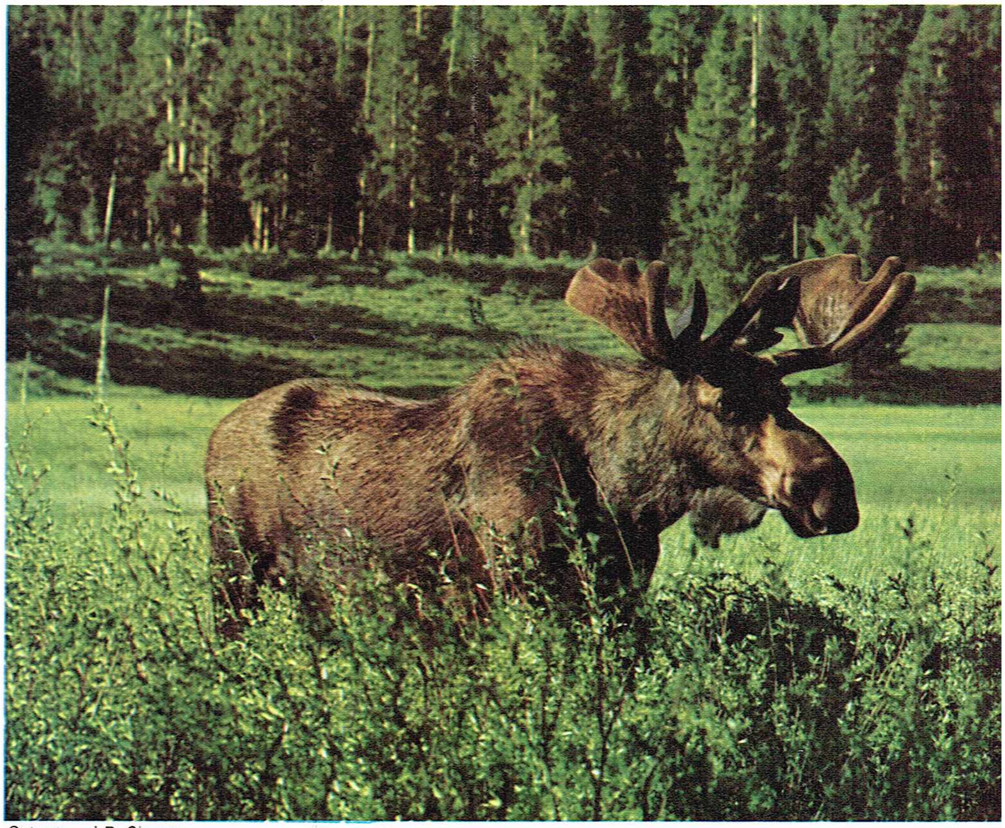

Ostman - J.R. Simon

Ostman - E. Muench

▲ ***Le cerf-mulet* (Odocoileus hemionus) *est répandu dans le centre et l'ouest de l'Amérique du Nord.***

Mazama compte quatre espèces, répandues du Mexique au sud de l'Argentine. La plus importante est le mazama roux *(M. americana = M. rufa)*, d'une hauteur au garrot de 65 à 75 cm et long jusqu'à 1,35 m. Cette espèce a des cornes réduites à de simples merrains, pointus et peu développés. Sa livrée est roussâtre, et blanchâtre aux parties inférieures. Forestière, crépusculaire et nocturne, elle vit isolément ou par couples. On la rencontre du Mexique au Paraguay, et au nord de l'Argentine. *M. gouazoubira (= M. simplicicornis)*, légèrement plus petit, habite du Yucatan à l'Argentine; moins sylvicole, il fréquente les lieux découverts. *M. nana*, haut seulement de 50 cm au garrot, est répandu de la Colombie et du Venezuela au nord de l'Argentine et à la Bolivie. Enfin, *M. bricenii*, encore plus petit (40 cm de hauteur au garrot), sylvicole, habite l'ouest du Venezuela, l'Équateur, ainsi que les Andes péruviennes et boliviennes.

Pudu compte deux espèces : le pudu proprement dit *(P. pudu)*, de Bolivie et du Chili, jusqu'aux régions côtières proches du détroit de Magellan, vit dans les forêts tempérées du niveau de la mer jusqu'en moyenne altitude, sur les pentes de la cordillère des Andes; *P. (Pudella) mephistopheles* peuple l'Équateur et de toutes petites zones des Andes péruviennes et colombiennes, entre 3 000 et 4 000 m d'altitude. Les *Pudu* sont les nains des Cervidés : ils ont une hauteur au garrot de 30 à 35 cm seulement. Ils portent de petites cornes, longues de quelques centimètres et faisant à peine saillie hors du pelage. Les glandes lacrymales sont développées seulement chez *P. pudu*, et les canines supérieures sont absentes. Nocturnes et très craintifs, ces Néocervinés vivent le plus souvent solitairement ou par couples, rarement en petites hardes; ils sont devenus fort rares.

▼ ***Le renne* (Rangifer tarandus) *est un Cervidé caractéristique des régions arctiques dans lesquelles il est élevé par différents peuples, notamment les Lapons, qui s'en servent comme Animal de bât et de trait et utilisent ses productions.***

Z.F.A.

Les *Odocoileus* constituent un genre très important, de taille moyenne (longueur : 1,10 m à 2 m; hauteur au garrot : 70 cm à 1,20 m). Ils ont le museau allongé avec une ample partie nue. Leurs yeux sont petits; leurs glandes lacrymales sont bien développées. Ils possèdent des pattes antérieures et postérieures à peu près égales. Leurs épaules et leur croupe sont au même niveau. Leur queue, de longueur variable, n'est jamais plus longue que l'oreille. Leurs cornes peuvent être très développées *(O. virginianus* et *O. hemionus)* ou non. Leur canine supérieure est absente ou présente.

Ce genre compte six espèces qui habitent le Nouveau Monde. Le cerf de Virginie, ou cerf à queue blanche *(O. virginianus)*, le plus grand du genre, habite l'est de l'Amérique du Nord; le cerf-mulet, ou cerf à queue noire *(O. hemionus)*, est répandu dans le centre et l'ouest de l'Amérique du Nord. Ces deux espèces sont importantes dans la faune des États-Unis. Le cerf des marais *(O. [Blastoceros] dichotomus)* vit de préférence dans les zones très humides et paludéennes du Paraguay, du Brésil, de l'Uruguay, et d'une partie de l'Argentine. Le cerf des pampas *(O. bezoarticus = O. campestris = Ozotoceros bezoarticus)* vit dans le Gran Chaco brésilien ou paraguayen et dans les pampas de l'Argentine jusqu'à la Patagonie. Il possède des cornes à 3 andouillers seulement et a une hauteur au garrot de 70 à 75 cm. Le cerf des Andes *(O. [Hippocamelus] bisulcus)* est l'un des Animaux les plus caractéristiques de la chaîne andine; il mesure environ 80 cm au garrot; il présente des formes trapues et des pattes assez courtes; il possède des canines supérieures; ses cornes, longues au maximum de 30 cm, présentent seulement 2 andouillers; ce cerf vit dans les Andes du Chili méridional, ainsi qu'en Patagonie. *O. (Hippocamelus) antisensis*, propre aux Andes de l'Équateur au Chili septentrional, très proche de l'espèce précédente, fréquente les zones comprises entre 3 000 et 5 000 m d'altitude.

La dernière espèce de Néocervinés, que certains auteurs considèrent comme faisant partie d'une sous-famille distincte, est le renne *(Rangifer tarandus)*, qui comprend les formes américaines appelées « caribous ». Le renne, habitant typique de la toundra, a une aire couvrant pratiquement toutes les régions de l'Arctique. Long de 2 m à 2,20 m et d'une hauteur au garrot de 1,40 m au maximum, il peut peser plus de 300 kg. Sa tête est allongée et présente un museau élargi dans la région des narines, avec le bout velu; ses oreilles sont courtes et rondes; ses yeux sont petits; son cou est assez court. Son tronc est quelque peu élancé. Il possède des pattes assez courtes. Sa robe est touffue, très serrée, avec des poils plus longs sur le cou, formant une crinière; sa livrée est assez variable. Les bois, présents chez les deux sexes (mais moins développés chez les femelles), sont caractéristiques : souvent asymétriques, leur merrain décrit une sorte de demi-cercle ouvert en avant et en haut, et se termine par une palme de forme très variée suivant l'âge. La queue est longue de 10 à 20 cm. Les canines supérieures, présentes chez les deux sexes, sont peu développées et restent souvent incluses dans la muqueuse gingivale.

Le renne est fort bien adapté à la vie dans les régions arctiques très froides et dans la toundra, grâce, notamment, à la conformation de ses sabots : longs et très divisés, ils sont flanqués de petits sabots secondaires, latéraux, presque fonctionnels et touchant terre sur les sols sans résistance; leur surface d'appui très importante permet à l'Animal de progresser sur la neige ou les terrains mous de la toundra. Grégaire, le renne vit en hardes d'importance variable; l'été, il préfère les zones découvertes, se réfugiant plus au sud dans les forêts de Conifères en hiver. Il se nourrit d'herbes, de Lichens, et de divers Végétaux de son milieu, ainsi que d'écorces, de Mousses, etc.

La gestation dure 240 jours, et les petits naissent en été, au nombre de 1 ou 2 par portée.

Le renne est élevé par différents peuples, notamment les Lapons, qui s'en servent comme Animal de selle, de bât et de trait, utilisant aussi ses productions. Pendant la préhistoire, les rennes étaient beaucoup plus répandus et peuplaient de vastes régions en zone tempérée.

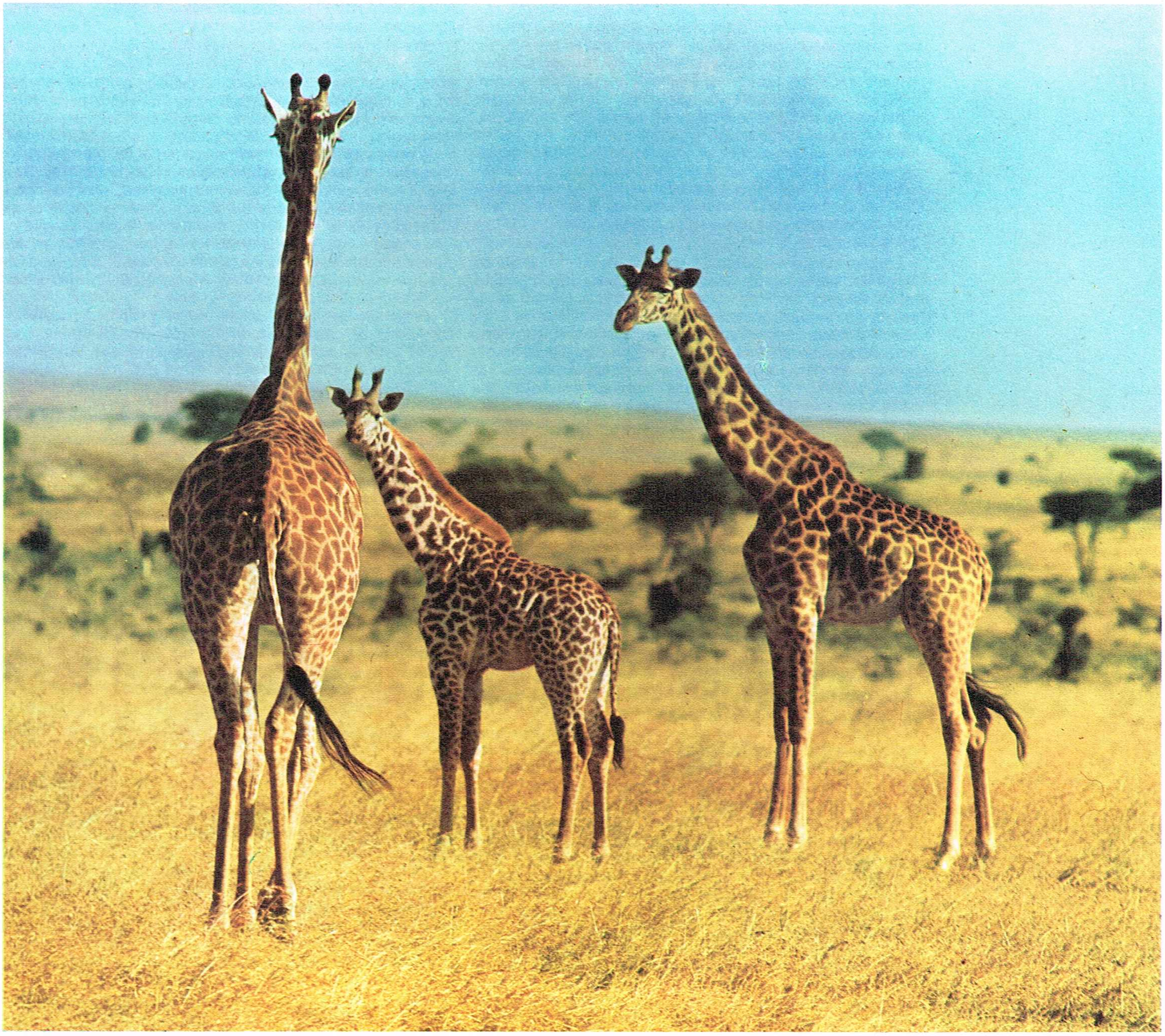

A. Margiocco

▲ ***Groupe de girafes*** **(Giraffa camelopardalis)*****;*** ***ces Mammifères, caractérisés par la longueur du cou, due à l'allongement exceptionnel des vertèbres cervicales, habitent uniquement l'Afrique au sud du Sahara.***

Les **Giraffidés** *(Giraffidae)* habitent uniquement l'Afrique au sud du Sahara. Les deux genres actuels de la famille, *Giraffa* et *Okapia*, sont caractérisés par une grande ou très grande taille, ainsi que par un cou immense (girafe) ou très long (okapi). Leur tête est longue, avec un museau aplati. Leur dos est incliné, le garrot étant plus haut que la croupe, ce qui influe aussi sur leur amble, qui est leur allure typique. Leurs extrémités sont parfaitement bidactyles, les doigts latéraux ayant totalement disparu. La tête porte de petites cornes en nombre variable : deux paires chez les mâles d'okapi, et trois ou cinq chez les girafes des deux sexes ; ces cornes, recouvertes d'une peau veloutée, se terminent par une touffe de poils chez la girafe, par un étui corné, rudimentaire et caduc, chez l'okapi. Une crinière orne le cou de la girafe et des jeunes okapis. La queue est pourvue d'un panache de longs crins. La formule vertébrale est :

C 7 ; D 14 ; L 5 ; S 3-5 ; Cd 13-20.

Les côtes sont au nombre de 14 paires. Les glandes lacrymales sont absentes. La formule dentaire est : $\left(I\,\frac{0}{3};\ C\,\frac{0}{1};\ Pm\,\frac{3}{3};\ M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 32$; les canines, pressées contre les incisives, se distinguent par un sillon dans la couronne, qui leur confère un aspect bilobé ; les dents maxillaires sont de type brachyodonte. La langue est protractile et préhensile, surtout chez l'okapi, caractère lié au régime de ces Animaux, à base de feuillage et de rameaux tendres. Il n'y a pas de vésicule biliaire.

La girafe *(Giraffa camelopardalis)* est caractérisée par la longueur du cou, due à l'allongement exceptionnel des vertèbres cervicales. En outre, elle possède des pattes très hautes et très fines. Son tronc est gros et court, avec le dos très incliné. Sa tête, fine, porte deux petites saillies osseuses recouvertes par la peau à la partie supérieure. La girafe est à la fois le plus haut et le plus court des Mammifères. En effet la longueur de son tronc, cou et tête non compris, ne dépasse pas 2,25 m, alors que sa hauteur au garrot est de 3 m à 3,70 m, et que sa tête se trouve à une hauteur de 5 m à 5,80 m ; son poids est habituellement de 500 à 1 000 kg. Sa queue mesure environ 1 m de long. Sa livrée, typique, brune ou marron, est ornée de dessins polygonaux irréguliers.

Craintive, la girafe est grégaire et forme des troupes de dix à vingt individus (jusqu'à soixante-dix), sous la direction d'un mâle adulte. Il ne semble pas que sa vitesse maximale dépasse 47 km/h. La girafe habite typiquement les savanes africaines peu boisées, ou les régions de broussailles clairsemées et d'arbustes de 7 à 8 m de haut ;

elle évite la forêt dense et les prairies à végétation uniquement herbacée. L'un de ses milieux typiques est constitué par les broussailles d'acacias, en particulier en Afrique orientale, où vit la girafe réticulée *(G. camelopardalis reticulata)*. Sa nourriture est à base de feuillage, y compris celui des acacias épineux. Quand elle désire se nourrir d'herbes ou de plantes basses, ou lorsqu'elle veut boire, elle est obligée d'écarter, de façon typique, ses pattes antérieures. La durée de sa gestation est de 420 à 450 jours, et les portées sont habituellement unipares. Le nouveau-né, haut de 1,70 m à 2 m à la naissance, pèse environ 250 kg. Il semble que sa longévité dans la nature soit de 20 ans. L'espèce est représentée par huit races et formes géographiques.

L'okapi *(Okapia johnstoni)*, de taille inférieure à celle de la girafe, est sylvicole. Cette forme, vraisemblablement relictuelle, est confinée dans une zone très restreinte du bassin de l'Ituri, dans l'est du Zaïre. Il est de la taille d'un cheval moyen (longueur : 2,10 m ; queue : 30-40 cm ; hauteur au garrot : 1,60 m-1,70 m ; poids : environ 250 kg). Son cou est plus court que celui de la girafe, et son dos est moins incliné. Son pelage, court et brillant, est noir roussâtre, avec une très grande tache sur chaque joue, et présente des zébrures typiques, à bandes claires horizontales, sur les pattes. Durant le jour, cette livrée est très mimétique dans la forêt dense équatoriale. Comme la girafe, il a pour allure l'amble. Animal très craintif, nocturne, il vit solitairement ou en couples. Très rare, il est maintenant protégé. Il se nourrit de feuilles et de frondes de toutes sortes d'arbres, qu'il attrape avec sa longue langue préhensile. Les femelles mettent au monde, après une gestation de 14 mois, un seul petit. L'histoire de la découverte de l'okapi, plus proche que la girafe de certaines espèces fossiles, est fort curieuse : les premières études, d'après des fragments de peau, avaient fait croire qu'il s'agissait d'une nouvelle forme de zèbre ; l'espèce ne fut reconnue qu'au début du siècle, grâce aux observations de sir Harry Johnston.

Les **Antilocapridés** *(Antilocapridae)* ne comptent qu'une seule espèce, l'antilope Pronghorn *(Antilocapra americana)*, par certains aspects intermédiaire entre les Cervidés et les Bovidés. Ses cornes sont implantées sur un pivot osseux pérenne ; longues de 25 cm, peu ramifiées, bifurquées, elles ont une petite pointe tournée vers l'avant et un andouiller, plus grand, tourné vers le haut. Ces cornes, comme celles des Bovidés, sont constituées par une partie interne, osseuse, pérenne, et une gaine cornée ou étui externe, laquelle est caduque et se renouvelle annuellement. Les cornes, présentes chez les deux sexes, sont bien plus réduites chez les femelles. Le bassin est relié aux deux vertèbres sacrées (caractère commun également aux Cervidés et aux Giraffidés). La formule vertébrale est : C 7 ; D 13 ; L 6 ; S 4 ; Cd 8-10. Les métacarpiens latéraux sont complètement oblitérés et les extrémités sont parfaitement bidactyles. La vésicule biliaire est présente. La fomule dentaire est :

$$\left(I\,\frac{0}{3};\ C\,\frac{0}{1};\ Pm\,\frac{3}{3};\ M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 32.$$

Les dents maxillaires sont hypsodontes. Une grosse glande médiane très caractéristique, située à la partie postérieure du dos, est entourée de poils érectiles (ce caractère rappelle le springbok). Long jusqu'à 1,50 m, avec une queue de 10 cm environ, cet Animal est plus haut aux hanches qu'au garrot, où il atteint de 80 cm à 1 m. Son tronc est fin et fort. Ses pattes, très robustes, sont pourvues de petits sabots pointus qui rappellent ceux des chèvres sauvages. Sa robe présente, sur le cou, le haut du dos et les cuisses, une teinte isabelle foncé, contrastant avec les flancs, les parties postérieures autour de la queue et les parties inférieures, de couleur blanche ; les cornes et les sabots sont noirs.

Originaire des zones arides et des prairies d'Amérique du Nord, du sud-ouest du Canada jusqu'à l'ouest des États-Unis et au nord du Mexique, l'antilope Pronghorn formait autrefois des populations de dizaines de millions de têtes. En 1922, il n'en restait plus que trente mille. Actuellement, elle a presque disparu de toutes les grandes prairies ; quelques hardes d'une certaine importance survivent dans des zones des montagnes Rocheuses, le dernier refuge de l'espèce.

Les **Bovidés** *(Bovidae)* sont la famille la plus importante non seulement des Ruminants et des Artiodactyles, mais aussi de tous les Ongulés actuels. Leur importance dans l'économie humaine est immense, car ils comprennent les plus précieux des Animaux domestiques. Ce sont des Ruminants de taille habituellement grande, parfois très grande, mais aussi dans certains cas très modeste ou petite (dik-diks). On observe des types d'aspects extrêmement variables, comme ceux du buffle, de la chèvre ou des gazelles. Le caractère externe le plus typique de toute la famille est la présence des cornes, au nombre d'1 seule paire (exceptionnellement 2 paires chez le genre *Tetraceros*), qui existent aussi chez les femelles (moins développées toutefois que chez les mâles). Ces cornes, implantées sur l'os frontal, sont creuses (ce sont des cavicornes), à la différence de celles des Cervidés ; elles sont constituées par une gaine ou un étui corné, externe, se développant autour d'un pivot osseux et qui ne se renouvelle pas (ce sont des pérennicornes) et ne présente pas de ramifications. Les doigts latéraux sont absents ou rudimentaires. La formule vertébrale est : C 7 ; D 11-15 ; S 3-6 ; Cd 5-22. La formule dentaire est :

$$\left(I\,\frac{0}{3};\ C\,\frac{0}{1};\ Pm\,\frac{2\text{-}3}{2\text{-}3}\ ;\ M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 28\text{-}32\ ;$$

les molaires sont le plus souvent hypsodontes.

La distribution géographique des Bovidés couvre l'Eurasie, y compris l'Indonésie et les Philippines, l'Afrique et l'Amérique du Nord jusqu'au Mexique sep-

▼ *A gauche, l'okapi* **(Okapia johnstoni)**, *de taille inférieure à la girafe, est sylvicole ; sa livrée, typique, est, durant le jour, très mimétique dans la forêt dense équatoriale. A droite, tête de l'antilope Pronghorn* **(Antilocapra americana)**, *dont les cornes, présentes chez les deux sexes, sont bien plus réduites chez la femelle.*

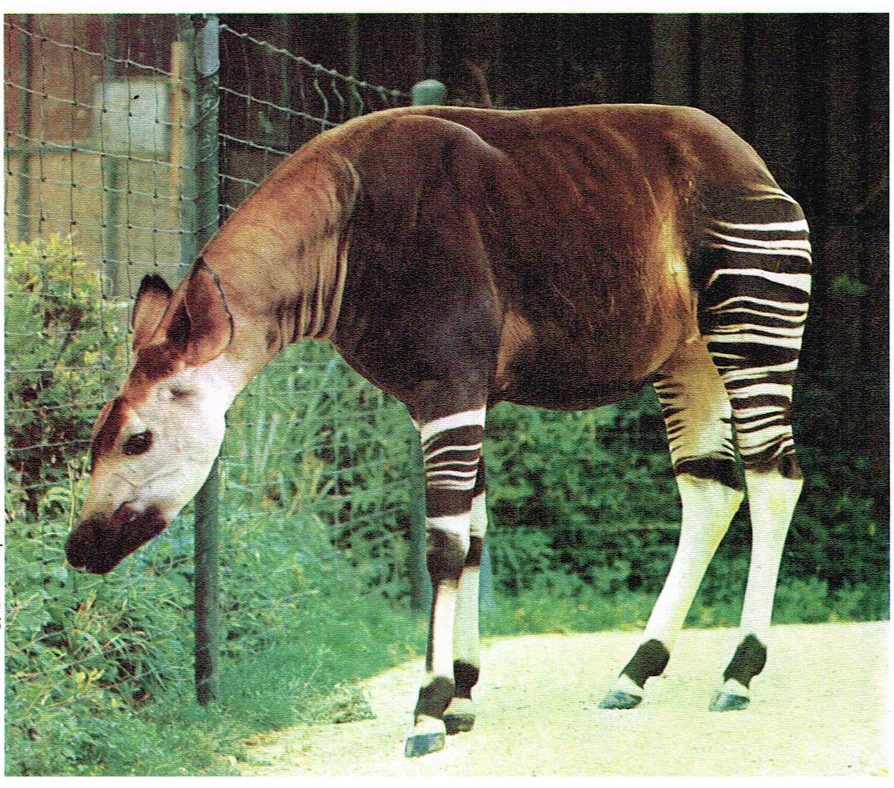

C. Bevilacqua

Ostman - J.R. Simon

tentrional. Ce groupe de Mammifères, qui comprend des espèces très variées, a colonisé les milieux les plus divers. des forêts jusqu'aux savanes, et des zones désertiques jusqu'aux hautes montagnes et aux régions arctiques; c'est ainsi que se sont formés des types hautement spécialisés. Sur les plans biogéographique et écologique, il est intéressant d'observer la présence massive — par le nombre d'espèces, la variété et le nombre d'individus — des Bovidés en Afrique, ce continent conservant un peuplement d'Ongulés très important, sans comparaison avec aucune autre partie du globe. L'Afrique présente, en effet, une énorme étendue de savanes et de brousse, habitat de choix pour d'innombrables espèces de Ruminants, sans parler des forêts, qui offrent refuge à un nombre non négligeable d'autres espèces. Par contre, les espèces montagnardes sont plus nombreuses en Eurasie.

La classification des Bovidés est très complexe et controversée. Celle que nous suivons ici est tirée en grande partie de Halternorth ainsi que du très récent Grzimeks Tierleben (1968). La famille est ainsi divisée en dix sous-familles : Céphalophinés, Néotraginés, Tragélaphinés, Bovinés, Alcélaphinés, Hippotraginés, Réduncinés, Antilopinés, Saïginés et Caprinés. Au total, il existe cent espèces, avec quatre cent soixante et une sous-espèces et races géographiques.

La sous-famille des *Céphalophinés* comprend des antilopes moyennes ou petites, d'une hauteur au garrot de 32 à 85 cm. La queue, de longueur moyenne, est touffue. Ce sont des formes minuscules, à tête allongée et étroite, et à grandes glandes lacrymales fendues, situées devant les yeux. Les os nasaux participent à la formation de la fosse préorbitaire (caractère distinct de la sous-famille); il n'existe pas de foramens ethmoïdaux; les nerfs optiques sortent par un orifice commun (comme chez les Tragulidés). Le museau est nu. Les glandes interdigitales et les sabots secondaires latéraux sont bien développés. Les cornes sont petites, coniques, situées en arrière par rapport aux orbites, et presque toujours présentes chez les femelles. Il existe une touffe de poils caractéristiques entre les cornes (d'où le nom de la sous-famille). La denture présente Pm $\frac{3}{3}$; les incisives médianes sont plus larges que les autres. Il y a 14 vertèbres thoraciques. Les femelles possèdent deux paires de mamelles.

Habitant uniquement l'Afrique intertropicale et australe, les Céphalophinés sont en grande partie forestiers : on les rencontre dans les forêts-galeries et la savane à broussaille dense. Il en existe deux genres, *Sylvicapra* et *Cephalophus*, avec quinze espèces.

Le céphalophe de Grimm, ou céphalophe couronné *(Sylvicapra grimmia)*, appelé duikerbok en Afrikaander, est l'unique espèce du premier genre. Ses cornes, assez longues (10 à 15 cm), formant un angle obtus avec le front, dirigées en arrière et vers le haut, sont habituellement présentes seulement chez les mâles. Les oreilles sont plus longues que chez le genre suivant. Ce céphalophe, long de 1,15 m, d'une hauteur au garrot de 50 cm à 70 cm, avec une queue de 15 cm, pèse environ 15 kg; les femelles sont un peu plus grosses que les mâles. Sa fourrure, à poils assez durs et ras, est de couleur gris jaunâtre. Solitaire ou vivant par petits groupes, il habite les maquis et les zones à haute végétation herbacée, du Sénégal à l'Afrique orientale et australe; il évite les grandes forêts.

Les *Cephalophus*, avec quatorze espèces, ont un corps plus massif et plus pansu, bien que toujours petit. Leurs oreilles sont courtes ainsi que leur queue. Leurs petites cornes, droites, se trouvent plus ou moins dans l'alignement de la ligne frontale; elles existent aussi très souvent chez les femelles. La livrée est brun noirâtre ou marron, et parfois gris ardoise avec des reflets bleuâtres (« blue duiker », ou céphalophe bleu).

Le céphalophe à dos jaune *(C. silvicultor)* a une hauteur au garrot de 80 cm environ. Sa livrée est brun foncé, avec une large bande jaunâtre dans la région lombaire. Il habite l'Afrique centrale et l'Afrique occidentale. Le céphalophe zébré *(C. zebra)*, haut de 40 à 50 cm, possède une livrée roux-orangé, présentant des zébrures noires sur tout le dos; c'est une espèce rare qui habite les forêts du Libéria et de la Sierra Leone. Le céphalophe à bande dorsale noire *(C. dorsalis)* a une livrée roussâtre, avec une bande médiane noire qui va de la base du museau à la queue; il habite l'Afrique occidentale. Les espèces les plus petites sont le céphalophe à flancs roux *(C. rufilatus)*, le céphalophe de Maxwell *(C. maxwelli)* et le céphalophe de montagne *(C. monticola)*, qui ont une hauteur au garrot de 30 à 40 cm. Les autres espèces sont le céphalophe du Natal *(C. natalensis)*, le céphalophe rouge *(C. harveyi)*, le céphalophe d'Ogilby *(C. ogilbyi)*, le céphalophe à ventre blanc *(C. leucogaster)*, le céphalophe noir *(C. niger)*, le céphalophe à front noir *(C. nigrifrons)*, le céphalophe de Jentink *(C. jentinki)* et le céphalophe spadix *(C. spadix)*.

La sous-famille des *Néotraginés* comprend treize espèces d'antilopes, habituellement de taille modeste, mais fort différentes par leurs caractères anatomiques et morphologiques, de sorte que de nombreux zoologues les ont classées dans plusieurs sous-familles distinctes. Il y a neuf genres, tous africains.

L'antilope royale *(Neotragus pygmaeus)*, d'Afrique occidentale, a une hauteur au garrot d'environ 30 cm. Les mâles possèdent de petites cornes, droites et tournées en arrière. La livrée est brun châtain sur le dessus et blanchâtre en dessous. L'espèce vit en Afrique occidentale.

Le suni *(Neotragus moschatus)* et l'antilope de Bates *(Neotragus batesi)*, espèces proches l'une de l'autre, sont répandus aussi dans une partie de l'Afrique orientale et centro-méridionale.

Madoqua comprend les dik-diks typiques, minuscules antilopes, bien connues, qui habitent les broussailles d'Afrique tropicale et une partie de l'Afrique australe. Leur hauteur au garrot est de 30 à 45 cm. Leurs pattes sont aussi fines que des doigts d'enfants. La tête est petite et peu longue, avec un petit museau velu, légèrement gonflé à l'extrémité, où est ébauchée une sorte de très courte trompe. Leurs yeux ont, proportionnellement, très gros, tout noirs et très vifs. Seuls les mâles portent de petites cornes, longues de 5 à 6 cm, noires et annelées à la base. La queue est très courte. Ils ont une livrée gris brunâtre ou gris roussâtre. Il existe trois espèces, qui habitent l'Afrique tropicale, en particulier, l'Afrique centro-orientale; il s'agit de *M. saltania*, *M. phillipsi* et *M. swaynei*.

Le dik-dik de Günther *(Rhynchotragus guentheri)* et le dik-dik de Kirk *(R. kirki)* sont très proches des espèces précédentes et ont une distribution analogue; le second est l'une des formes les plus communes en Afrique orientale.

Les antilopes naines comprennent aussi le beira *(Dorcatragus megalotis)*, d'une hauteur au garrot de 50 cm. Il a de grandes oreilles et des cornes d'environ 10 cm. Il vit en petites troupes dans les broussailles arides de Somalie.

L'oréotrague sauteur *(Oreotragus oreotragus)* a le tronc un peu plus court et un peu plus trapu. Ses longues pattes sont fines. Il mesure de 50 cm à 60 cm de hauteur au garrot. Sa queue est très courte. Sa fourrure est dense et dressée. Très bon sauteur, il court avec une grande agilité dans les zones rocheuses des régions montagneuses d'Afrique centro-orientale et centro-méridionale.

▼ **Cephalophus silvicultor,** ***le céphalophe à dos jaune, habite l'Afrique centrale et occidentale.***

Ph. Fievet - Jacana

Bruce Coleman - C.A.W. Guggisberg

Photo Researchers - D. Bartlett

▲ *A gauche, les Tragélaphinés comptent des antilopes de moyenne, grande ou très grande taille; leurs cornes sont souvent longues, spiralées et faiblement annelées. Ici, des* **Tragelaphus strepsiceros**, *ou grands koudous. A droite,* **Taurotragus oryx**, *l'éland du Cap, est le colosse des antilopes; il vit dans les plaines et les régions faiblement collinéennes d'Afrique centrale et australe.*

L'ourébi *(Ourebia ourebi)* est long d'un peu plus de 1 m et mesure environ 60 cm au garrot. Il est caractérisé par une petite frange de poils assez longs, qui pendent à la hauteur de l'articulation entre le carpe et le métacarpe. Il est propre à l'Afrique australe et orientale et compte de nombreuses sous-espèces. Citons encore le grisbok *(Raphicerus melanotis)* et le steenbok *(R. campestris)*, dont la distribution est analogue.

La sous-famille des *Tragélaphinés* compte des antilopes de moyenne, grande ou très grande taille. Leurs cornes sont souvent longues, spiralées, faiblement annelées et pourvues d'une carène longitudinale. Chez les deux genres asiatiques, par contre, elles sont courtes et présentent une morphologie différente. Les cornes peuvent n'exister que chez les mâles. Les femelles possèdent deux paires de mamelles.

Les formes africaines sont des formes typiques de la grande forêt équatoriale ou de biotopes d'origine forestière (savanes, forêts de montagne, zones paludéennes à papyrus, etc.). Elles ne courent pas rapidement. Elles présentent, au-dessus des pieds, des taches blanches ou foncées typiques; un V blanchâtre orne l'espace interoculaire. Cette sous-famille, essentiellement africaine mais également indienne, comprend quatre genres et dix espèces.

Tragelaphus est un genre très important (nous le rangeons ici avec les *Strepsiceros*) et compte six espèces. Le guib harnaché *(Tragelaphus scriptus)*, d'Afrique orientale et australe, est long de 1,50 m et a une hauteur au garrot de 1 m. Ses cornes sont peu écartées et torsadées. Sa fourrure est à poils courts, de couleur rouille sur le dessus, et grisâtre au-dessous, avec une bande très foncée du museau jusqu'à l'orbite. Il présente des taches et bandes blanches sur la tête, les pattes et les flancs. On le rencontre fréquemment dans les endroits proches de l'eau, dans les forêts et dans les zones à végétation buissonnante touffue. Le nyala *(T. angasi)* porte une longue frange de crins sous le cou et une partie de la poitrine; il habite le sud-est de l'Afrique. Le nyala de montagne *(T. buxtoni)* vit dans le sud de l'Éthiopie. Le guib d'eau, ou sitatunga *(T. [Limnotragus] spekei)*, vit en Afrique centrale (bassin du Niger, partie haute des bassins du Congo et du Zambèze, régions proches du lac Victoria, Soudan méridional); il est haut de 1 m environ; ses sabots allongés, typiques, lui servent à marcher sur les sols meubles et paludéens. Le grand koudou *(T. strepsiceros)*, superbe antilope longue de 2 m à 2,45 m et d'une hauteur au garrot de 1,30 à 1,50 m, présente (chez les mâles) d'importantes cornes hélicoïdales, de section à peu près triangulaire, se terminant en pointe et atteignant 1,15 m de long; sa robe, gris jaunâtre ou gris fer chez les mâles et gris roussâtre chez les femelles, est toujours ornée sur les flancs de 4 ou 5 bandes verticales blanches (Afrique orientale et australe). Le petit koudou *(T. imberbis)* a une hauteur au garrot de 1,15 m; il ne possède pas de touffe de poils à la gorge.

A. Margiocco

▶ **Boselaphus tragocamelus**, *le nilgau, est l'un des plus beaux Ruminants de l'Inde.*

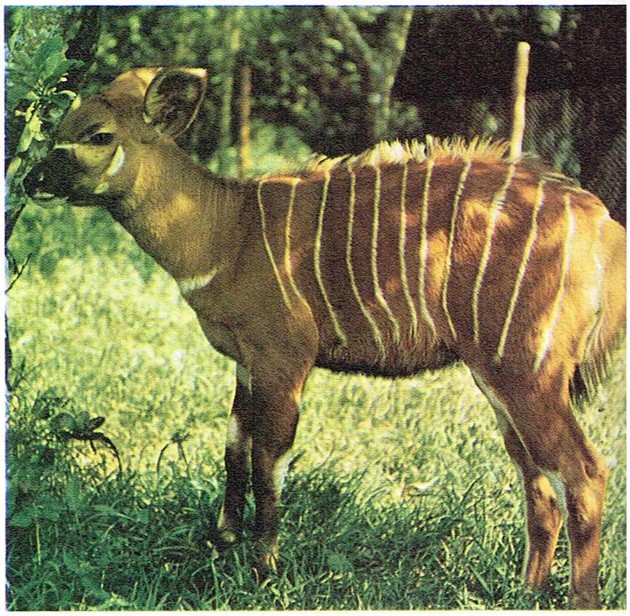

T. Okapia

▶ **Taurotragus euryceros**, *le bongo, est une espèce rare des forêts denses de l'Afrique équatoriale, du Kenya jusqu'à la Sierra Leone.*

Taurotragus comprend l'éland du Cap *(T. oryx)*, d'Afrique centrale et australe, vivant dans les plaines ou les régions faiblement collinéennes. C'est le colosse des antilopes : il est long de 2 m à 3,40 m, a une hauteur au garrot de 1,80 m et pèse 900 kg ; son corps très robuste est d'aspect presque bovin; ses cornes, massives, sont implantées l'une près de l'autre, dirigées vers le haut et en arrière — dans l'alignement du museau — spiralées dans leur première partie et plus droites à leur partie distale. L'une des formes particulière de cette espèce est l'éland de Derby *(T. oryx derbianus)*, que certains auteurs considèrent comme une espèce à part *(T. derbianus)*, qui habite le Soudan, le Sénégal et le Nigeria. Enfin, le bongo *(T. euryceros = Boocercus euryceros)* est une espèce rare des forêts denses de l'Afrique équatoriale, du Kenya jusqu'à la Sierra Leone, entre 2 000 et 3 000 m d'altitude; sa fourrure, rase, de couleur rouille et luisante, porte environ 15 bandes blanches, étroites, situées transversalement sur les flancs.

Les deux genres asiatiques sont nettement distincts. *Boselaphus* compte le seul nilgau *(B. tragocamelus)*, l'un des plus beaux Ruminants de l'Inde, haut de 1,20 à 1,50 m, et à profil dorsal déclinant (plus haut au garrot qu'aux lombes) ; sa tête, quelque peu bovine, présente chez les deux sexes des cornes moyennes, lisses et pointues. Les *Tetraceros* sont représentés par l'unique antilope à 4 cornes *(T. quadricornis)*, haute d'environ 60 cm; chez les mâles, la tête présente 4 cornes (cas unique chez les Bovidés), dont 2 sont hautes de 3 cm seulement et sont implantées au-dessus des orbites, alors que les 2 autres, longues d'environ 12 cm, sont en position normale.

La sous-famille des *Bovinés* compte des espèces généralement de grande taille ou massives, le plus souvent à museau bien développé. Elles sont typiquement dépourvues de glandes lacrymales. Leur queue, le plus souvent longue, se termine par une touffe de poils. Leurs cornes ne présentent pas de nodules transversaux ni de crêtes longitudinales; elles prennent naissance sur le crâne, sensiblement en arrière des orbites, et plus ou moins transversalement par rapport au plan sagittal; elles existent chez les deux sexes. Les femelles possèdent deux paires de mamelles. La diffusion des Bovinés couvre pratiquement toute l'aire de la famille.

Le buffle de l'Inde, ou arni *(Bubalus bubalis)*, a une hauteur au garrot de 1,80 m. Ses cornes, souvent gigantesques, sont très rapprochées l'une de l'autre à la base, larges et aplaties, d'abord dirigées vers le bas et l'extérieur, puis dirigées en arrière et vers le haut; leur extrémité est pointue. Cet Animal habite l'Inde et les îles de la Sonde. Il a été largement domestiqué et introduit dans d'autres zones, notamment en Italie.

Une autre espèce, nettement distincte, est habituellement rangée dans un genre en soi : l'anoa *(Bubalus,* ou *Anoa depressicornis)*. Ce Ruminant est de taille très modeste : il mesure 1,70 m de long et a une hauteur au garrot de 70 cm à 1 m. Il est propre aux régions forestières et aux jungles denses des Célèbes et de Mindoro (Philippines). Il s'agit d'un Animal très rare.

Le buffle d'Afrique *(Syncerus caffer)*, plus connu, est largement répandu dans une grande partie de l'Afrique au sud du Sahara, où il a donné lieu à diverses races et formes géographiques; on peut définir deux groupes : les buffles de savane à pelage noir et à grandes cornes réunies par leur base sur le front, de l'est et du sud du continent; et les buffles de forêt à robe marron, de taille moindre, aux cornes plus réduites et non réunies à leur base, d'Afrique centrale et occidentale.

Enfin, le genre *Bos* comprend plusieurs espèces. Le banteng *(B. [Bibos] banteng)* vit dans les forêts très denses et très humides des grandes îles de la Sonde, entre 1 200 et 2 000 m d'altitude. Le gayal *(B. [Bibos] frontalis)* a des cornes très courtes à base large et à peu près coniques; son front est très large; il habite les zones de montagne de l'Inde et de Ceylan. Le gaur *(B. gaurus = Bibos frontalis gaurus)*, dont les mâles sont longs d'un peu moins de 3 m et atteignent 1,90 m de hauteur au garrot, est le géant des zones boisées montagneuses de l'Inde et de Ceylan. Citons le couprey ou kouprey *(B. sauveli)* et l'aurochs *(B. primigenius)*, espèce sylvicole disparue qui existait encore en Europe au XVII[e] siècle et qui fait partie de la lignée de nos Bovidés domestiques *(B. taurus)*, que l'on a reconstituée artificiellement. Enfin, le genre est complété par le yak *(B. [Phoephagus] grunniens)*, de corps plus élancé, à membres relativement plus courts, et couvert d'une longue fourrure serrée. Il habite les hauts plateaux tibétains (jusqu'à 6 000 m d'altitude). Il est largement répandu à l'état domestique, avec des formes plus petites que la race sauvage. Il grimpe remarquablement sur les rochers.

Les deux dernières espèces de la sous-famille sont les bisons. Le bison d'Amérique *(Bison bison)* était naguère fort répandu dans les grandes prairies de l'Amérique du Nord; décimé par les colonisateurs blancs, qui cherchaient ainsi à affamer les Amérindiens, il a frisé la disparition totale; il survit, avec des populations croissantes, dans les parcs nationaux et les réserves. Le bison d'Europe *(Bison bonasus)*, plus sylvicole, a également survécu malgré la stupidité humaine, mais sa race n'est plus pure; il est maintenant l'objet de protections rigoureuses, notamment dans la forêt de Bialowieza en Pologne, et, sous sa forme caucasienne, dans le Caucase.

La sous-famille des *Alcélaphinés* comprend des antilopes de grande taille, à tête allongée, museau aplati et truffe nue. Elles sont habituellement plus hautes au garrot qu'aux lombes. Leurs pattes sont longues et fines, et pourvues de sabots secondaires latéraux bien développés. Leurs cornes, qui existent chez les deux sexes, présentent une courbure sigmoïde typique (sauf chez *Connochaetes*). Les glandes lacrymales sont présentes. Les femelles possèdent une seule paire de mamelles. Ces

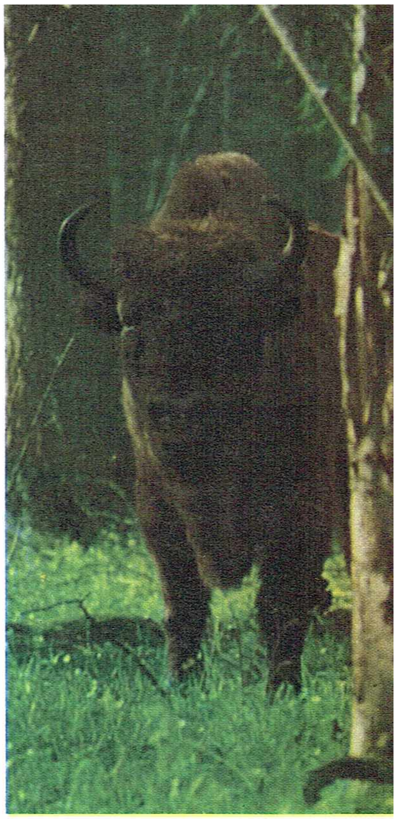

Tiofoto

▲ **Bison bonasus**, ***le bison d'Europe, a survécu, grâce à des mesures de protection rigoureuses, en Pologne et dans le Caucase.***

▼ ***A gauche,*** **Bos (Phoephagus) grunniens**, ***le yak, habite les hauts plateaux tibétains; il grimpe remarquablement sur les rochers.***
A droite, **Syncerus caffer**, ***le buffle africain, répandu au sud du Sahara.***

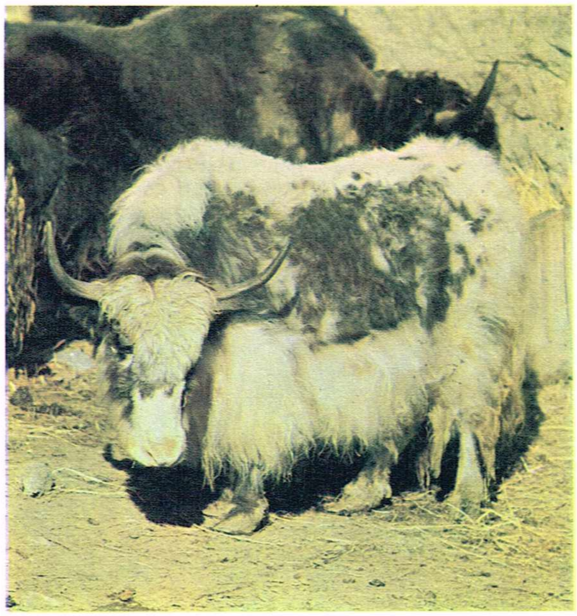

C. Bevilacqua

A. Margiocco

▶ ***Groupe d'Antilopinés* (Gazella sp.).**

Animaux vont souvent au trot. Ce sont des antilopes typiques des grandes prairies et de la savane, répandues en Afrique paléotropicale.

Alcelaphus compte deux espèces : le bubale *(A. buselaphus)* et le bubale du Liechtenstein *(A. lichtensteini)*, d'Afrique orientale et australe. Toutes deux ont des cornes nettement annelées et très rapprochées à la base.

Damaliscus compte aussi deux espèces : le sassabi *(D. lunatus)* et le bontebok *(D. dorca)*, qu'on rencontre dans une grande partie de l'Afrique.

Le gnou à queue blanche *(Connochaetus gnu)*, rarissime, et le gnou à queue noire *(C. taurinus)*, le plus connu du genre, habitent spécialement l'Afrique orientale.

La sous-famille des *Hippotraginés* comprend également de grandes antilopes à cornes annelées, à peu près égales chez les deux sexes. Leur queue est moyenne ou longue. Les femelles possèdent deux paires de mamelles. On compte trois genres.

Les *Hippotragus* possèdent des cornes à ample courbure, des sabots pointus et une longue crinière sur le cou et la partie antérieure du dos; l'hippotrague, ou antilope chevaline *(H. equinus)*, est haut de 1,60 m au garrot; l'hippotrague noir *(H. niger)* porte des cornes plus longues et à courbure plus ample.

Les *Oryx*, typiques des régions arides et désertiques, ont des cornes soit droites, soit légèrement arquées. Leurs sabots sont pointus. Ils sont dépourvus de crinière. Ce sont : l'oryx d'Arabie *(Oryx leucoryx)*, d'Arabie et d'Irak; l'oryx algazelle *(O. dammali= O. algazel= O. tao)*, de Libye et du Sahara; l'oryx beisa *(O. beisa)*, le plus commun, qui habite surtout l'Afrique orientale; enfin, le gemsbok *(O. gazella)*, d'Afrique du Sud.

Les *Addax* sont représentés par l'unique addax *(A. nasomaculatus)*, à cornes spiralées et à sabots non pointus et courts; cette espèce est typique des régions désertiques du Sahara, de la Sénégambie jusqu'à l'Algérie et le Soudan; il a une hauteur au garrot de 1 m. Très adapté à la vie en zone aride, il est devenu très rare, à cause de la chasse.

La sous-famille des *Réduncinés* comprend des formes plus petites et à corps plus massif que les gazelles. Les cornes (qui n'existent que chez les mâles) présentent des anneaux bien distincts, au moins à la base, et ont des pointes tendant à converger. On les rencontre uniquement en Afrique, au sud du Sahara. Ils manifestent une prédilection pour les endroits humides : les plaines riches en eau, les forêts-galeries, les rives des cours d'eau et la proximité des marécages.

Le cobe à croissant *(Kobus ellipsiprymnus)* et le cobe defassa, ou onctueux *(K. defassa)*, sont typiques à cet égard. Les autres espèces sont : le cobe de Buffon *(K. [Adenota] kob)*; le cobe lechwe *(K. [Adenota] leche)*; le cobe de Mrs. Gray *(K. [Adenota] megaceros)*, le cobe des roseaux, ou redunca *(Redunca arundinum)*, et, enfin, le rhebuck, ou pelea *(Pelea capreolus)*, d'Afrique du Sud, plus propre aux zones de montagnes ou accidentées, à terrain souvent rocheux.

La sous-famille des *Antilopinés* comprend les gazelles et les genres proches, habitant surtout les steppes et les zones arides, parfois désertiques (gazelle dorcas). Leur taille est moyenne (hauteur : 60 cm à 1 m). Leurs pattes sont très fines et relativement longues. Leurs cornes sont annelées. Ils ont le bout du museau velu. La robe de ces Bovidés est le plus souvent fauve, avec des tons brun roussâtre ou grisâtre, et homochrome avec les sables et le sol rocheux. Le ventre est très clair ou blanc et délimité chez de nombreuses espèces par une bande foncée plus ou moins étendue, sur les flancs.

Gazella, le type, compte dix espèces, de formes légères et de taille moyenne ou petite. Leur tête est petite et leur museau court; leurs yeux sont très vifs. Les cornes existent chez les deux sexes et sont toujours annelées. On les rencontre en Afrique et en Asie méridionale.

La gazelle dorcas *(G. dorcas)* habite les régions désertiques du Sahara. La gazelle de Grant *(G. [Nanger] granti)* vit dans les broussailles d'Afrique orientale. *G. subgutturosa* est observé dans les steppes de l'Asie occidentale. Les autres espèces sont : la gazelle de Soemmering *(G. soemmeringi)*, la gazelle dama, ou « biche Robert » *(G. [Nanger] dama)*, la gazelle à front roux *(G. rufifrons)*, la gazelle de Thomson *(G. thomsoni)*,

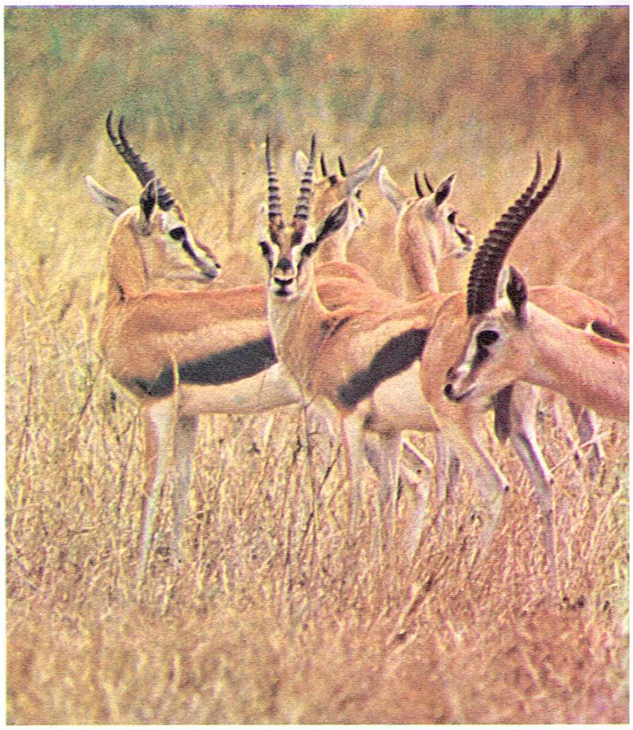

Marka

G. tilonura, la gazelle de Speke *(G. spekei)*, la gazelle de Pelzen *(G. pelzeni)*, et la gazelle leptocère, ou rhim *(G. leptoceros)*.

Le genre *Procapra* compte deux espèces asiatiques : *P. gutturosa*, de Sibérie, de Mongolie et de Chine, et *P. picticaudata*.

L'antilope cervicapre *(Antilopa cervicapra)* habite typiquement l'Inde et le Pakistan occidental en plaine, hors des forêts. La gazelle-girafe, ou gerenuk *(Litocranius walleri)*, vit dans les régions buissonneuses ou de maquis de l'Afrique orientale; le nom de cette antilope est dû à sa posture dressée quand elle broute les feuilles des arbres.

Les trois autres genres sont : *Ammodorcas*, avec la gazelle de Clarke *(A. clarkei)*, ou dibatag, antilope très agile des régions arides de Somalie; *Antidorcas*, avec le springbok *(A. marsupialis)*; et *Aepyceros*, avec l'impala *(A. melampus)*, l'une des plus belles et des plus célèbres antilopes des savanes d'Afrique orientale et centro-méridionale, qui effectue des bonds atteignant 7 à 8 m de long.

La sous-famille des *Saïginés* comprend seulement deux espèces, l'une asiatique et l'autre européenne. Il s'agit du chiru, ou antilope du Tibet *(Pantholops hodgsoni)*, qui habite le haut plateau tibétain et la région de Laddak, entre 3 700 et 5 500 m d'altitude, et de l'antilope saïga *(Saiga tatarica)*, qui était naguère distribuée de la Pologne au Caucase et à la mer Caspienne, mais qu'on ne trouve plus actuellement que dans la partie inférieure du bassin de la Volga, jusqu'au Kazakhstan et à la Dzoungarie. Ses populations sont en augmentation.

La dernière sous-famille, celle des *Caprinés*, comprend des Animaux typiquement montagnards, ressemblant à la chèvre ou au mouton. Sa distribution couvre l'Europe, l'Asie (surtout paléarctique) et l'Amérique du Nord, ainsi que l'Afrique du Nord. Nous nous limiterons aux espèces les plus importantes. Le goral *(Naemorhedus goral)* habite de la Sibérie méridionale à la Chine et à la Birmanie, surtout dans les zones boisées de montagne, à faible altitude. Le serow *(Capricornis sumatrensis)* est propre à l'Asie du Sud-Est et orientale, y compris la région himalayenne, Sumatra, Formose et le Japon. Le takin, ou bœuf takin *(Budorcas taxicolor)*, habite les forêts du Boutan, de la haute Birmanie et de la Chine méridionale, surtout entre 2 500 et 4 000 m d'altitude. Le mouflon à manchette *(Ammotragus lervia)* vit dans la plupart des chaînes de montagnes d'Afrique du Nord : c'est l'unique Capriné important en Afrique. Le thar *(Hemitragus jemlahicus)* vit dans l'Himalaya, en Inde et en Arabie (avec de nombreuses sous-espèces). Le bharal *(Pseudois nayaur)* peuple les montagnes de Chine, de Mongolie, du Népal et du Cachemire.

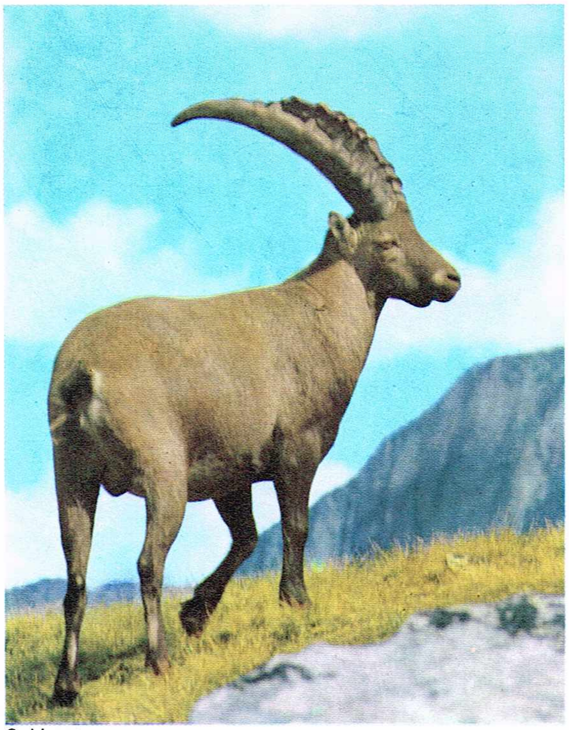

G. Mazza

◀ Capra ibex, *le bouquetin, dont la forme alpine a été sauvée de l'extinction dans des parcs nationaux et des réserves.*

▼ *En haut, deux spécimens de l'impala* (Aepyceros melampus), *l'une des plus belles antilopes des savanes d'Afrique orientale et centro-méridionale, capable d'effectuer des bonds de 7 à 8 m de long. En bas, à gauche,* Ovis musimon, *le mouflon, originaire de Corse et de Sardaigne, est largement distribué en Europe. A droite,* Rupicapra rupicapra, *le chamois, habitant typique des Alpes.*

Citons, en outre, les genres *Rupicapra, Oreamnos, Capra, Ovis* et *Ovibos*. Le premier comprend le chamois *(R. rupicapra)*, répandu en Europe et en Asie Mineure, habitant typiquement les Alpes, long de 1 m à 1,30 m et d'une hauteur au garrot de 70 à 80 cm. La chèvre des montagnes Rocheuses *(Oreamnos americanus)*, qui vit dans les montagnes de l'Alaska et de certaines zones de l'Amérique du Nord, a une robe blanche typique. Le genre *Capra* compte le bouquetin *(Capra ibex)*, dont la forme alpine a été sauvée de l'extinction dans des parcs nationaux et des réserves, la chèvre ægagre *(C. aegagrus)* et le markhor *(C. falconeri)*, de l'Asie occidentale. *Ovis* comprend, selon certains auteurs, une seule grande espèce, *O. aries*, ou mouton domestique, répandu aussi bien en Eurasie qu'en Amérique du Nord. Selon d'autres, il en existe au moins cinq espèces : le mouflon *(O. musimon)*, originaire de Corse et de Sardaigne, et largement diffusé dans de nombreuses régions d'Europe ; le mouflon Argali *(O. ammon)*, des montagnes d'Asie ; l'urial *(O. orientalis)*, d'Asie occidentale et de Chypre ; enfin, deux espèces nord-américaines, *O. dalli* et le bighorn *(O. canadensis)* ; ce dernier habite aussi dans le nord-est de l'Asie. Le dernier genre, *Ovibos*, comprend le bœuf musqué *(O. moschatus)*, du Canada et du Groenland. Cet Animal est de grande taille, mesurant 2,45 m de long, avec une hauteur au garrot de 1,30 m à 1,45 m, pour un poids atteignant 400 kg. Il ressemble à un bœuf. Il possède de grandes cornes aplaties, recourbées vers le bas, et à bases près du centre du front. Son pelage, très long, pend à ses pieds. Cet habitant typique de la toundra arctique vit en été par petites troupes, et en hiver par groupes importants, formés d'individus des deux sexes.

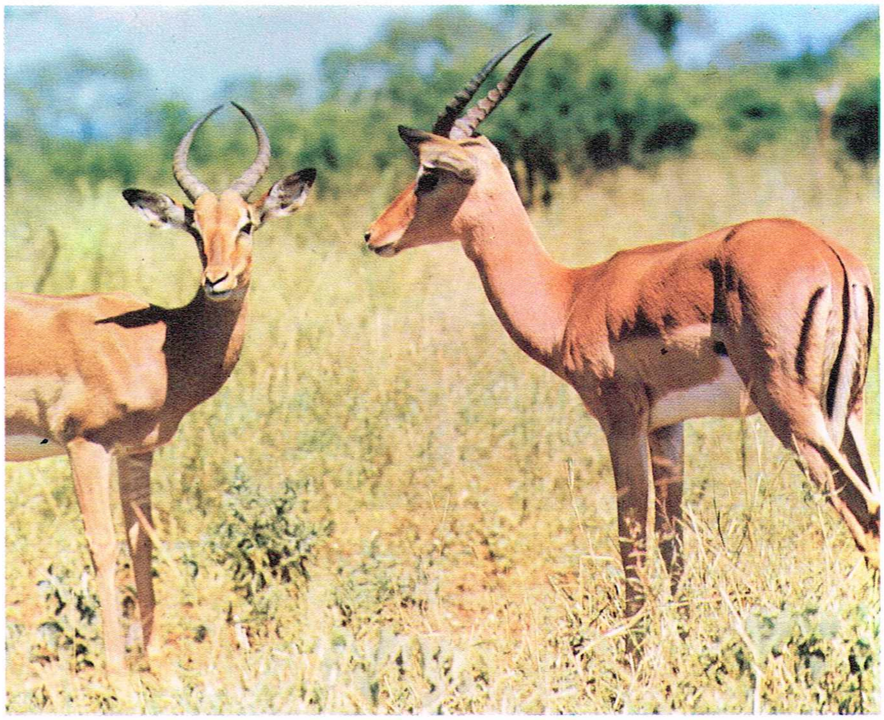

Z.F.A.

S. Stefenelli

Z.F.A.

Photo Researchers - D. Bartlett

▲ *Les Primates constituent l'ordre le plus évolué de tous les Mammifères, en particulier au niveau du développement des facultés psychiques. Le groupe comprend, outre l'homme, les Animaux connus sous les noms de lémuriens et de singes. Ici, une femelle de cercopithèque* (Cercopithecus aethiops) *et son petit.*

Ordre des Primates

Les Primates *(Primates)* constituent, dans leur ensemble, l'ordre le plus évolué de tous les Mammifères; c'est, en particulier, chez eux que le développement des facultés psychiques a atteint le plus haut niveau dans le monde animal. En plus de l'homme, qui, du point de vue biologique, en fait partie, l'ordre comprend les Mammifères connus communément sous les noms de lémuriens et de singes.

Les caractères essentiels de cet ordre sont, en résumé, les suivants. Ce sont des Placentaires plantigrades, pentadactyles, essentiellement conformés pour la vie arboricole, avec le pouce et le gros orteil presque toujours opposables aux autres doigts (ce sont des quadrumanes). Le volume du crâne est important, et les orbites sont dirigées plus ou moins en avant. La mandibule effectue des mouvements surtout verticaux. La clavicule est toujours présente; en outre, le radius et le cubitus ne sont pas soudés, ce qui permet à la main d'amples mouvements de pronation et de supination. L'encéphale est toujours bien développé et présente une réduction progressive du rhinencéphale, ainsi qu'un grand développement du néopallium. Le nombre des incisives ne dépasse jamais 2, et celui des prémolaires et molaires jamais 3; par ailleurs, les molaires sont multituberculées. Le foie est lobé et pourvu d'une vésicule biliaire. Les testicules, chez l'adulte, sont extra-abdominaux. L'utérus est simple et bicorne. Chaque portée compte généralement un unique petit.

Le facteur biologique fondamental qui a marqué l'évolution, l'anatomie et la vie des Primates est l'adaptation à la vie arboricole, qui a atteint chez eux le maximum de perfection parmi les Mammifères. La vie arboricole, en facilitant la libération progressive des membres antérieurs par rapport à la locomotion quadrupède, a favorisé le développement déterminant de la main; celle-ci est donc devenue un organe de préhension. La première conséquence directe de cette évolution a été la tendance au redressement du tronc et l'acquisition de la station debout, qui n'est pleinement atteinte que chez l'homme, mais qui se manifeste à des degrés divers chez les autres familles. Cette caractéristique a été accompagnée du raccourcissement progressif du tronc et de l'élargissement du thorax, lequel a perdu peu à peu sa forme carénée, typique chez les quadrupèdes terrestres.

L'emploi de la main à des opérations de plus en plus variées et complexes a favorisé de façon déterminante le développement de l'intelligence, rendue possible par le perfectionnement du cerveau. Il est également certain que la vie arboricole, par la complexité de ses conditions de milieu et donc la richesse de ses stimuli, a favorisé l'évolution nerveuse et psychique des Primates.

Selon le coefficient de céphalisation de Dubois, qui exprime approximativement le degré de développement cérébral, on observe 0,28 chez les lémuriens, 0,40 et même 0,50 pour les singes Non-Anthropomorphes, 0,75 pour les Anthropomorphes, et enfin 2,82 pour l'homme. Le crâne est devenu de plus en plus volumineux, alors que le squelette facial s'est progressivement réduit. Il y a eu une évolution dans la statique et dans l'orientation de la tête, avec un déplacement conséquent du foramen occipital, lequel, de postérieur, est devenu peu à peu inférieur. Les orbites se sont orientées en avant, ce qui a permis l'acquisition de la vision binoculaire (les yeux ont une partie de leur champ visuel commun) et de la vision du relief, laquelle joue un rôle de premier plan dans la vie arboricole.

Il est intéressant d'observer qu'à côté de ces caractères très évolués, les Primates en présentent d'autres très primitifs comme la présence de la clavicule et de membres pentadactyles. De fait, la vie arboricole, pour laquelle ces deux derniers caractères sont essentiels, est plus en adéquation avec le plan anatomique primitif des Mammifères, et n'a pas nécessité d'importantes adaptations, comme la vie dans les milieux terrestre, aquatique ou aérien (Ongulés, Cétacés et Chiroptères). Les Primates sont donc en fait beaucoup moins spécialisés que d'autres ordres (les Artiodactyles et les Périssodactyles par exemple). On a pu dire qu'ils étaient les spécialistes de la non-spécialisation, ce qui leur a laissé une plus grande marge d'adaptation, d'où leur réussite. C'est pour cela que nous avons placé les Primates à la fin de la systématique des Mammifères, leur attribuant, selon la tradition, la plus haute place sur l' « échelle de l'évolution », bien que les mammalogues modernes tendent à les situer beaucoup plus bas, immédiatement après les Insectivores et les Chiroptères, et attribuent le degré maximal d'évolution aux Ongulés.

L'origine des Primates remonte, selon toute probabilité, à une lignée d'Insectivores primitifs à tendance déjà arboricole; les toupayes, classés traditionnellement parmi les Insectivores, mais que la majorité des mammalogues actuels tend à considérer comme des Primates archaïques, nous en donnent une idée. Ceci est encore plus évident lorsqu'on compare les fossiles de toupayes et de lémuriens de l'Éocène.

Les plus anciens Primates connus datent du Paléocène et de l'Éocène; ils étaient déjà différenciés, constituant les principaux groupes de Prosimiens, sauf les Lorisiformes qui apparurent plus tard.

L'origine des Primates date du Mésozoïque avec pour souche des Insectivores primitifs (d'où dérivèrent aussi les Rongeurs).

Les Primates sont essentiellement distribués dans les zones chaudes, à l'exception de l'Australie : ils peuplent les aires paléarctique (mais en tout petit nombre), paléotropicale, malgache, orientale et néotropicale. Au Tertiaire, leur diffusion était beaucoup plus vaste : elle incluait aussi l'Europe et l'Amérique du Nord; c'est, selon toute probabilité, l'Asie qui a été leur centre de diffusion.

Les espèces actuelles sont essentiellement forestières; mais certaines se sont secondairement adaptées à des milieux différents, par exemple, le milieu rupicole pour les singes cynocéphales.

L'ordre des Primates est divisé en trois sous-ordres : les Lémuroïdes, les Tarsioïdes et les Anthropoïdes, ou Simioïdes. Les deux premiers correspondent aux Prosimiens, le troisième comprend les singes et les Hominidés. Il en existe au total cent quatre-vingt-seize espèces.

Sous-ordre des Lémuroïdes

Le sous-ordre des Lémuroïdes *(Lemuroidea)* comprend les Primates les plus primitifs, soit la quasi-totalité des Prosimiens. On peut y distinguer trois grands groupes, d'importance différente, ayant valeur d'infra-ordres : les Tupaïformes, les Lémuriformes et les Lorisiformes. Les Tupaïformes, qui ont des caractères très primitifs, entrent seulement partiellement dans le type primate proprement dit, car ils sont intermédiaires entre celui-ci et les Insectivores. Les Lémuriformes et les Lorisiformes, par contre, possèdent la totalité des caractères anatomiques et biologiques des Primates, bien qu'ils aient atteint un stade peu évolué. Pour développer plus complètement ces deux infra-ordres, nous négligerons systématiquement toute référence spécifique aux Tupaïformes. Ces derniers seront décrits en détail un peu plus loin, étant donné leur position fort particulière.

La taille des Lémuriformes et des Lorisiformes est généralement moyenne ou petite : ils ne mesurent guère plus de 70 cm. Leur tronc est allongé, et leur queue, habituellement bien développée, n'est jamais préhensile. L'un de leurs traits archaïques est l'allongement du museau : on observe toutefois, à cet égard, d'importantes exceptions, comme chez *Cheirogaleus* (Lémuridés), *Galago* (Lorisidés) et *Daubentonia* (Daubentonidés), qui ont le crâne plus arrondi et le museau plus court; ces caractères constituent la première phase d'un processus évolutif, que l'on retrouve de façon plus évidente chez les Tarsioïdes, et qui est totalement réalisé chez les Anthropoïdes. La fourrure couvre la face, sauf à l'extrémité du museau.

Essentiellement arboricoles, les Lémuroïdes ont les membres bien développés et capables d'amples mouvements. Les membres postérieurs sont généralement plus longs que les antérieurs, en particulier chez les espèces adaptées au saut. Les mains et les pieds sont préhensiles et ont le quatrième doigt toujours plus long que les autres. Le pouce est plus ou moins opposable aux autres doigts; chez les Indridés, il tend à être réduit. Le gros orteil, court et épais, est toujours opposable. Les doigts sont en général pourvus d'ongles plats *(ungulae)*, sauf le deuxième doigt des pieds, qui possède toujours un ongle comprimé latéralement *(tegulae)* et ressemblant un peu à une griffe, mais de structure différente de celle des véritables griffes *(falculae)*. *Daubentonia*

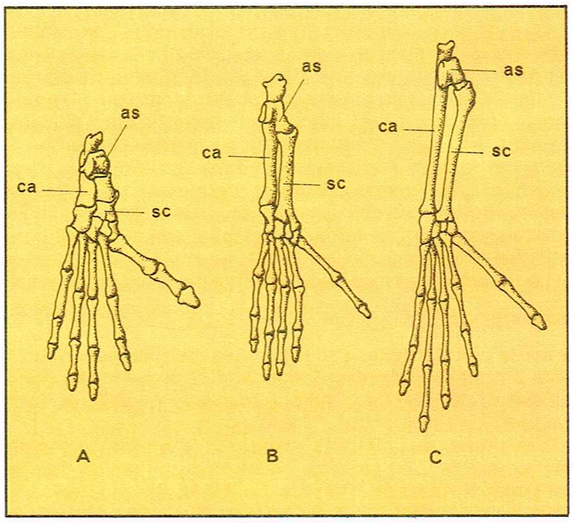

◀ *Squelette du pied de quelques Primates : A,* **Cheirogaleus major** *; B,* **Galago sp.** *; C,* **Tarsius syrichta** *; on observera l'allongement progressif du calcanéum (ca) et du scaphoïde (sc); as, astragale.*

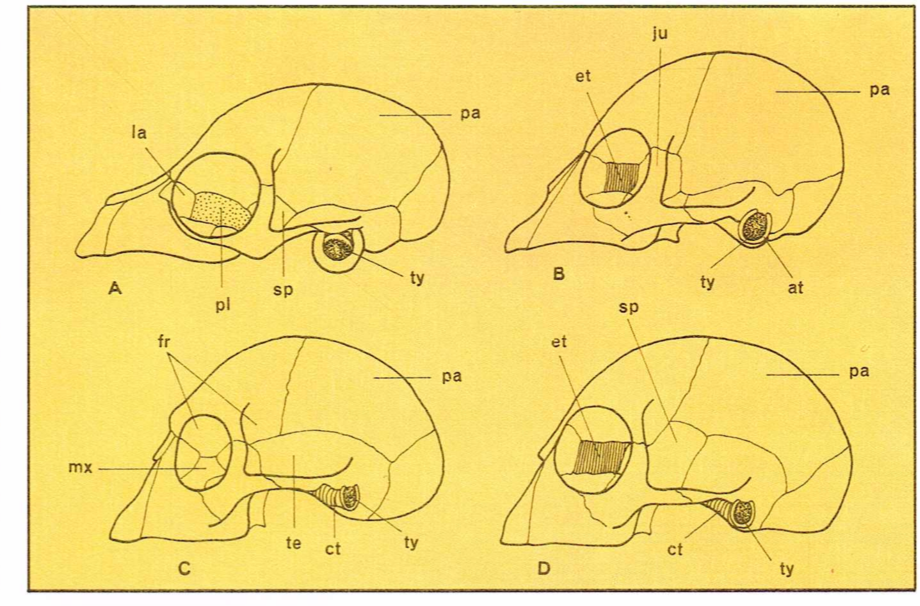

▼ *Schéma des variations de la paroi latérale du crâne chez les Primates : A, type lémurien; B, platyrhinien; C et D, catarhinien; pa, pariétal; la, lacrymal; sp, sphénoïde; ty, tympanique (à l'intérieur de la bulle tympanique du type A); ju, jugal; at, anneau tympanique; mx, maxillaire; te, temporal; ct, conduit tympanique; pl, palatin; et, ethmoïde; fr, frontal.*

madagascariensis, l'aye-aye, ou aïe-aïe (Daubentonidés), fait exception : tous ses ongles sont des griffes, sauf ceux des pouces, lesquels sont armés d'un ongle plat.

Chez diverses espèces, le squelette des pieds présente des transformations liées à l'adaptation au saut : il y a allongement en bâtonnets du calcanéum et du scaphoïde, qui diffère beaucoup de la forme observée chez les autres Mammifères. Cet allongement est très marqué chez les Cheirogaléinés (Lémuridés) et encore plus chez les Galaginés (Lorisidés). On retrouve une disposition analogue chez les Tarsidés, par suite d'un intéressant phénomène de parallélisme morphologique.

L'élargissement du thorax, observé surtout chez les Indridés, dont les membres antérieurs tendent à ne plus servir à la déambulation quadrupède, atteint son maximum chez les Lorisidés (*Loris, Galago, Nycticebus,* etc.).

Le cerveau est encore de type macrosmatique, avec des lobes olfactifs bien développés, lesquels présentent toutefois des signes de réduction. Dans l'ensemble, il s'agit nettement du type général des Primates, les principales aires de l'écorce cérébrale étant comparables à celles des Primates supérieurs, de même que la topographie des sillons, qui annonce celle des singes. Chez les espèces les plus grandes (appartenant, entre autres, aux Indridés), les sillons sont plus nombreux et plus complexes que chez les espèces de petite taille, dont les hémisphères sont presque lisses. Excepté chez les Indridés, le cerveau ne recouvre pas le cervelet.

Les narines s'ouvrent directement sur le museau, formant en dessous une zone nue *(rhinarium),* riche en glandes, constituant la partie médiane de la lèvre supérieure : ce caractère archaïque disparaît chez tous les autres Primates. Les yeux sont fort volumineux, en particulier pour les espèces strictement nocturnes (cas des galagos), chez lesquelles ils sont logés dans des orbites très vastes. La pupille, ovale, a son grand axe vertical. La rétine est à peu près ou totalement dépourvue de cônes, comme c'est généralement le cas de nombreux Mammifères nocturnes. Les yeux sont tournés vers l'avant, bien qu'encore imparfaitement ; ils peuvent seulement réaliser de faibles déplacements dans les orbites ; c'est pourquoi ces Animaux doivent tourner la tête afin de percevoir un nouveau champ de vision. Les pavillons auriculaires, qui se terminent généralement en pointe, sont bien développés.

La majorité des espèces présente la formule dentaire suivante : $\left(I\,\frac{2}{2};\ C\,\frac{1}{1};\ Pm\,\frac{3}{3};\ M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 36$; cependant, il existe d'importantes variations. Les incisives supérieures sont en général petites et largement séparées sur la ligne médiane ; les canines supérieures sont aiguës et font saillie.

L'estomac est simple, alors que l'intestin présente d'importantes particularités, notamment, l'extraordinaire longueur du cæcum chez les Lorisidés, et, plus encore, chez les Indridés (1,28 m de longueur). Le régime alimentaire, très varié, est essentiellement frugivore et insectivore. Enfin, le poumon gauche possède trois lobes, et le poumon droit quatre.

Les femelles ont un utérus bicorne, et le placenta est de type diffus et indécidué, c'est-à-dire que les villosités du chorion se développent sur toute la surface de l'œuf, la muqueuse utérine restant à leur niveau intacte. Cette conformation est très primitive, encore plus que chez les Insectivores actuels. Les femelles ont normalement deux ou quatre mamelles, parfois six. Chaque portée est généralement unipare ; seuls les galagos et microcèbes ont 2 petits à la fois.

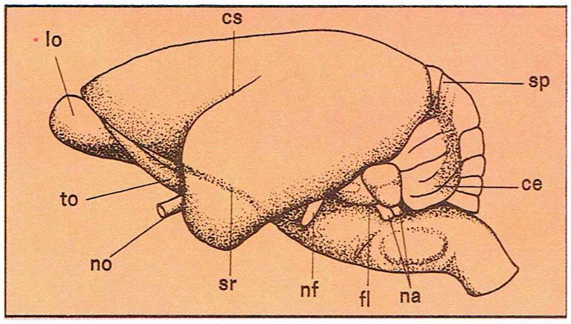

▶ *Encéphale de* **Microcebus sp.** : *cs, complexe sylvien ; lo, lobe olfactif ; to, tubercule olfactif ; no, nerf optique ; sr, scissure rhinale ; nf, nerf facial ; fl, floculus ; na, nerfs auditifs ; ce, cervelet ; sp, scissure primaire.*

I.G.D.A.

Arboricoles et de mœurs principalement crépusculaires et nocturnes, les Lémuroïdes sont distribués dans les régions tropicales de l'Afrique et de l'Asie médidionale ; certaines familles vivent uniquement à Madagascar, dont elles constituent la faune la plus caractéristique, ainsi que la majeure partie de la population de Mammifères. L'actuelle répartition, qui se trouve à peu près autour de l'océan Indien, avait amené d'anciens zoologues à émettre l'idée que l'aire originelle des Prosimiens serait un continent disparu, la Lemuria ou Lémurie de Sclater, qui aurait autrefois servi de pont entre l'Inde, Madagascar et l'Afrique. Cette hypothèse semble toutefois à écarter aujourd'hui.

La présence de nombreux fossiles de Lémuridés du Paléocène et de l'Éocène, en Europe occidentale et en Amérique du Nord, tend à démontrer que le centre de diffusion des Lémuroïdes (et, sans doute, de tous les Primates) doit être une région de l'Asie. L'installation des Lémuridés à Madagascar, très ancienne, remonte probablement à l'Éocène ; c'est le très long isolement ultérieur qui aurait favorisé la grande spécialisation que présentent les espèces actuelles.

A. Visage - Jacana

★ *Infra-ordre des Tupaïformes*

L'infra-ordre des Tupaïformes *(Tupaiformes)* comprend une seule famille : les Tupaiidés.

Les **Tupaiidés** *(Tupaidae)* ne sont plus considérés, selon les théories modernes, comme des Insectivores, mais comme le groupe le plus primitif de tous les Primates actuels. Ils ressemblent un peu à de petits écureuils (d'où leur nom, qui dérive du malais « tupai », écureuil). Leur museau est long et pointu ; leurs oreilles ne sont pas très grandes. Leur corps est fin. Leurs membres sont bien proportionnés, pentadactyles, et pourvus de griffes recourbées. Leur taille varie de 10 à 20 cm, et de 9 à 25 cm pour la queue.

Leur fourrure est souvent douce et épaisse. Leur queue est longue et peu velue (chez les *Ptilocercus,* elle est en partie nue).

La formule dentaire est :

$$\left(I\,\frac{2}{3};\ C\,\frac{1}{1};\ Pm\,\frac{3}{3};\ M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 38 ;$$

les incisives supérieures sont très développées et quelque peu caniniformes.

Le cerveau présente un grand développement des hémisphères et une réduction des lobes olfactifs, caractères qui montrent une indubitable affinité avec les Primates, confirmée par l'important perfectionnement et le grand développement de l'appareil visuel. L'ouïe et l'odorat sont également très fins.

La vie de ces Animaux est fort mal connue. Ils habitent les forêts. Leur régime est composé principalement d'Insectes, de fruits, parfois d'autres petits Animaux, d'œufs, ainsi que de toutes sortes de substances végétales. Ce sont de rapides coureurs et d'excellents grimpeurs; ils aiment l'eau, qu'ils recherchent pour boire et se baigner. Excepté *Ptilocercus,* ils sont diurnes.

On connaît fort peu de chose sur la reproduction des Tupaiidés. Les femelles possèdent deux, quatre ou six mamelles. La gestation dure de 46 à 50 jours chez *Tupaia glis,* un peu plus chez *Urogale.* Les petits, au nombre de 1 à 2 (jusqu'à 4) par portée, sont mis bas dans un nid de mousse et sevrés vers 40 jours. On a observé une longévité de 2 ans pour un *Tupaia javanica* gardé en captivité.

Les Tupaiidés comptent cinq genres et quinze espèces, des forêts du Sud-Est asiatique, de l'Inde jusqu'à la Chine méridionale, et de l'archipel malais aux Philippines. On les répartit en deux sous-familles : les Ptilocercinés et les Tupaiinés.

La sous-famille des *Ptilocercinés* comprend pour unique espèce *Ptilocercus lowi,* le ptilocerque, ou ptilocerque de Low, qui habite les forêts de la péninsule malaise

et d'une partie des îles de la Sonde (notamment Sumatra et Bornéo). Il est très rare. Plus primitif par de nombreux caractères que les toupayes, le ptilocerque est de la taille d'un rat (10 à 14 cm de long). Sa tête porte des vibrisses bien développées, qui manquent chez les toupayes vrais, et des oreilles plus grandes que celles des autres genres. Sa fourrure est gris foncé sur le dessus, et gris jaunâtre en dessous. Sa queue, très caractéristique, d'une longueur maximale de 19 cm, est nue, sauf à la partie terminale où elle porte une belle touffe de poils disposés comme les barbes d'une plume d'Oiseau.

De mœurs crépusculaires et nocturnes, le ptilocerque passe le jour caché dans un tronc creux. A terre, il se déplace par sauts, la queue dressée en l'air; cette dernière sert de balancier et aussi d'organe sensoriel. Quand il grimpe aux arbres, il peut s'agripper même à des troncs très lisses.

La sous-famille des *Tupaiinés* comprend les toupayes, ou tupayes proprement dits, ainsi que les formes proches qui possèdent tous une queue entièrement recouverte de poils et sont de mœurs diurnes. Le genre le plus important est *Tupaia,* avec dix espèces, les toupayes, qui habitent toute l'aire de la famille. La plupart de ces derniers vivent de préférence à terre ou sur la végétation mais à faible hauteur; peu d'entre eux sont arboricoles. Ils vivent solitaires ou en couples; ils sont toujours en mouvement, à la recherche de la nourriture, explorant les trous du sol, les buissons et les anfractuosités des troncs abattus, en dessous desquels ils trouvent souvent refuge. Ils mangent assis, prenant leur nourriture entre leurs pattes antérieures.

T. glis, le toupaye-loir, est le plus commun; il compte de nombreuses sous-espèces. Sa distribution, très vaste, va de la Chine jusqu'à l'Inde et à l'archipel malais. *T. nicobarica,* le toupaye des îles Nicobar, vit seulement dans ces îles et dans le golfe du Bengale.

Les autres genres de Tupaiinés ont une morphologie analogue et, fréquemment, des mœurs fort semblables. *Anathana ellioti,* encore plus arboricole que *Dendrogale,* habite uniquement l'Inde péninsulaire; il est caractérisé par sa petite taille (15 cm de long) et par sa queue couverte de poils. Le genre *Dendrogale* comprend deux espèces : *D. murina,* d'Indochine, et *D. melanura,* de Bornéo (où il vit en montagne, entre 900 m et 1 500 m d'altitude).

Le genre *Urogale* compte seulement une espèce : *U. everetti,* l'urogale, long d'environ 20 cm; il est propre à l'île de Mindanao et aux Philippines. Il fait son nid à terre ou parmi les rochers. Son régime est omnivore. Cet Animal émet des sons curieux : il s'agit soit d'un gémissement, soit d'une stridulation suivie d'un souffle. C'est le Tupaiidé le mieux connu en captivité, où il arrive à se reproduire.

◀ **Tupaia glis,** *le toupaye-loir, a une distribution très vaste qui s'étend de la Chine jusqu'à l'Inde et à l'archipel malais.*

★ *Infra-ordre des Lémuriformes*

Les Lémuriformes *(Lemuriformes)* sont limités à Madagascar; ils comprennent trois familles : les Lémuridés, les Indridés et les Daubentonidés. Les deux premières présentent de nettes affinités entre elles.

Les **Lémuridés** *(Lemuridae),* qui comprennent les plus typiques des Prosimiens de Madagascar, présentent une grande variété d'espèces. De taille petite ou moyenne (12 à 44 cm de long), ils sont caractérisés par un museau plus ou moins proéminent. Leurs yeux sont grands, rapprochés et dirigés en avant chez *Cheirogaleus, Microcebus* et *Phaner;* ils sont plus petits et dirigés latéralement chez *Hapalemur, Lemur* et *Lepilemur.* Leurs oreilles sont généralement courtes et au moins partiellement recouvertes de pelage. Leur corps est fin. Leurs pattes postérieures sont plus longues que les antérieures. Leur queue, touffue, mesure de 12 à 49 cm de long. Leur fourrure est habituellement douce, épaisse, laineuse, et faite de longs poils serrés; la livrée, souvent typique, est élégante. *Lemur macaco,* le maki, présente un très net dimorphisme sexuel.

La formule dentaire, de type normal, est :

$$\left(I\,\frac{2}{2};\ C\,\frac{1}{1};\ Pm\,\frac{3}{3};\ M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 36.$$

Les incisives supérieures tendent à être réduites.

Les Lémuridés descendent parfois à terre, mais, à l'exception du lémur catta *(Lemur catta),* ils sont typiquement arboricoles, grimpant et sautant très bien. Ils

▼ *Crâne de* **Lemur mongoz,** *vu de dessous (A); B, la mandibule ayant été détachée; C, vu de côté : ca, canines; pr, premières prémolaires; mo, premières molaires supérieures et inférieures; ba, bulle auditive; oc, occipital; fc, foramen carotidien; pmx, prémaxillaire; na, nasal; fl, foramen lacrymal; la, lacrymal; fr, frontal; pa, pariétal; sq, temporo-squamosal; sp, sphénoïde; ju, jugal; pl, palatin; mx, maxillaire.*

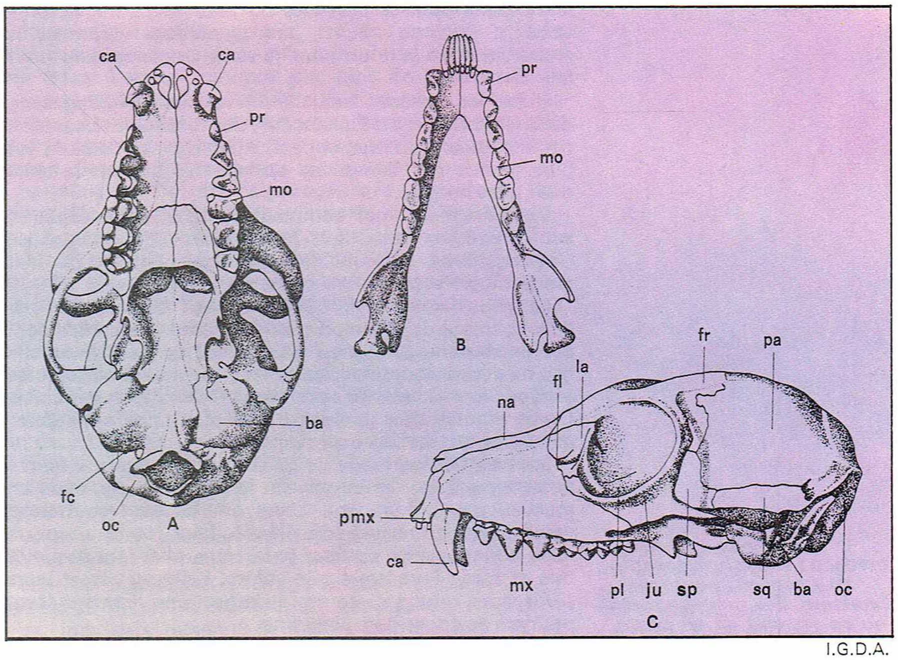

I.G.D.A.

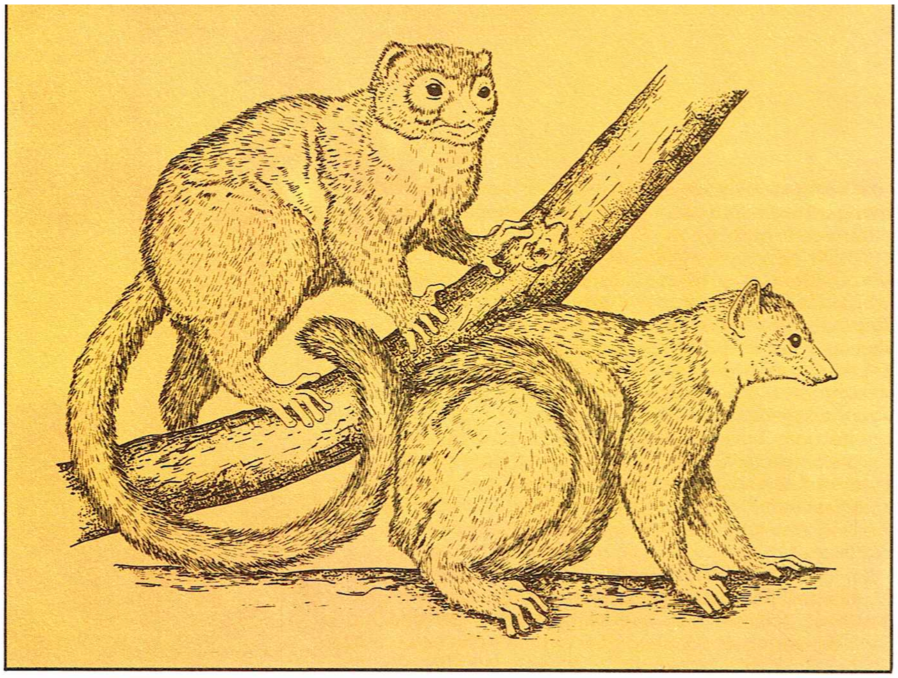

I.G.D.A.

▲ **Hapalemur griseus** *(à gauche) et* **Lepilemur mustelinus** *(à droite); tous deux sont nocturnes et vivent dans les zones forestières de Madagascar.*

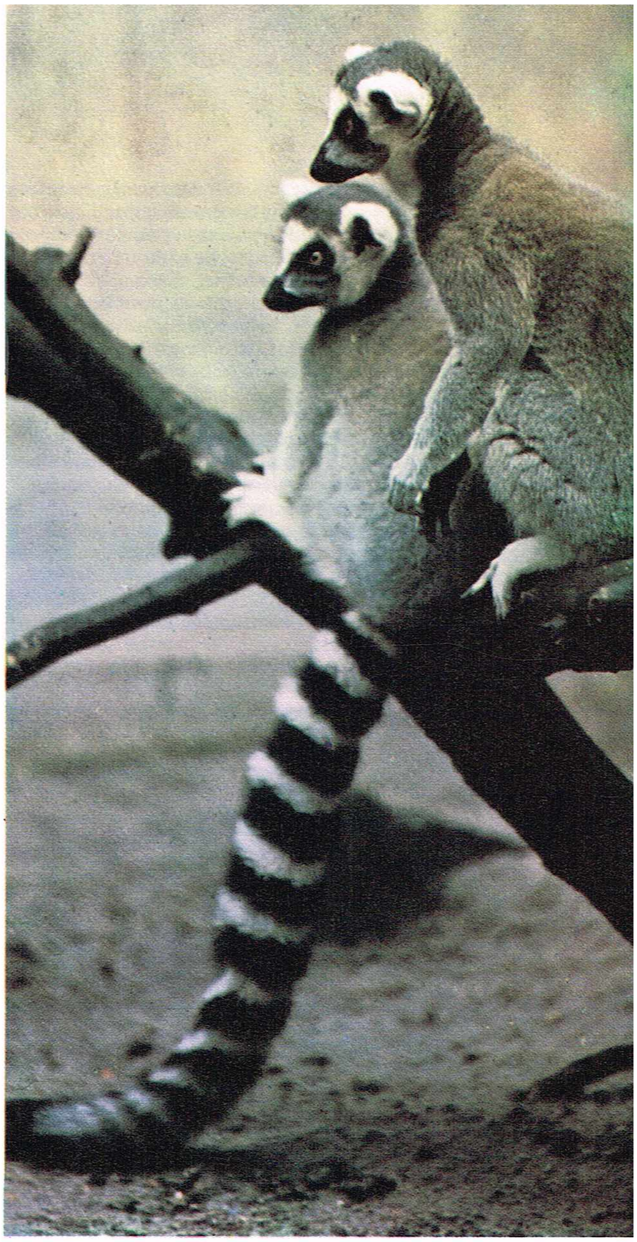

S. Prato

▶ *Deux spécimens de* **Lemur catta**, *caractérisés par leur longue queue annelée de blanc et de noir; très vif et très actif, le* **Lemur catta** *attaque d'autres Animaux; il habite le sud de Madagascar.*

T. Okapia

▶ *Femelle de* **Lemur macaco**; *les représentants de l'espèce, nocturnes, émettent des cris lugubres qu'on entend de très loin.*

vivent généralement dans la cime touffue des arbres et des bambous, parfois aussi dans la végétation buissonneuse et les hautes herbes. Ils sont généralement de mœurs nocturnes, mais certaines espèces sont partiellement diurnes : ainsi, le lémur catta vit surtout le jour. Ce sont des Animaux très agiles et toujours en mouvement. Ils recherchent leur nourriture sur les arbres et à terre; ils s'abreuvent en lapant l'eau. Certaines espèces passent les périodes difficiles de la saison sèche en état d'estivation, après avoir accumulé de la graisse dans le corps.

Les Lémuridés s'associent, normalement, en groupes familiaux ou en bandes de plus de vingt individus. Ils peuvent enrouler leur queue autour de leur corps ou de celui de leur voisin. Souvent, ils se nettoient l'un l'autre. Leurs cris, très variés, comprennent des grognements et des grondements qui semblent indiquer un état de bien-être ou de satisfaction, et divers cris ou sifflements déchirants, assez lugubres.

Les femelles possèdent deux mamelles pectorales, et parfois aussi deux mamelles inguinales. Elles mettent bas 1 ou 2 portées par an. Chez les plus grandes espèces, la gestation dure de 4 à 5 mois. Les petits naissent avec une très grosse tête disproportionnée; ils ont les yeux ouverts et sont couverts d'un poil dense et court. Les deux parents s'occupent des juvéniles durant plusieurs mois; chez les lémurs, la mère porte son petit agrippé à son ventre. La longévité de ces Mammifères n'est pas connue; toutefois, on a gardé en captivité une femelle de lémur fauve *(Lemur fulvus)* pendant plus de 25 ans.

Les Lémuridés sont inoffensifs s'ils ne sont pas perturbés; ils supportent bien la captivité et peuvent être facilement domestiqués. Ils se servent de leurs mains et de leurs dents pour se défendre ou pour se battre. Ils provoquent peu de dégâts aux plantations, bien qu'ils recherchent de la nourriture. Ils sont parfois chassés pour leur chair.

Outre les espèces actuelles, il existe à Madagascar, dans les couches du Pléistocène, des fossiles intéressants, comme ceux des *Megaladapis;* ces derniers étaient les plus grands des Lémuridés connus; ils avaient la taille d'un petit homme.

Les Lémuridés, qui comptent au total seize espèces, sont divisés en deux sous-familles, les Lémurinés et les Cheirogaléinés, qui sont nettement caractérisées par leur morphologie et par leurs mœurs.

La sous-famille des *Lémurinés* est caractérisée par l'allongement de la tête, laquelle se termine généralement par un museau prononcé, parfois vulpin. Les Lémurinés ne sont pas toujours nocturnes; en outre, différentes espèces font alterner des périodes arboricoles et terricoles. On en connaît trois genres : *Hapalemur, Lemur* et *Lepilemur,* avec au total dix espèces.

Les *Hapalemur,* longs de 30 à 45 cm, avec une queue aussi longue que le corps, ont la tête arrondie, avec un museau peu proéminent. Leurs oreilles sont courtes et velues. Leur tronc est très élancé. Leur fourrure, courte mais douce, est de couleur brun-roux, plus foncée sur la tête et blanc jaunâtre sur le ventre. Leurs pattes et leurs pieds sont robustes, courts et larges, ces derniers étant pourvus de coussinets plantaires.

Les *Hapalemur* habitent par groupes de deux ou trois individus les zones forestières de Madagascar, en particulier en montagne, dans les forêts de bambous. Ils sont nocturnes et se nourrissent de tiges et de bourgeons de bambous, se servant de leurs incisives inférieures comme d'un grattoir; ils mangent aussi des Insectes, en particulier des sauterelles. Ils font entendre de longs cris bruyants et pénétrants, que certains comparent à ceux du canard.

On en connaît deux espèces, *H. griseus*, l'hapalémur gris, ou bokombouli, le plus répandu, et *H. simus*, l'hapalémur à nez large.

Le genre le plus important est *Lemur;* ce sont les lémurs typiques, que l'on voit souvent dans les zoos. Il existe six espèces, dont deux peuplent non seulement Madagascar, mais aussi les Comores (*L. fulvus* et *L. mongoz*). Ces Lémuridés, de taille moyenne ou grande, sont recouverts d'une fourrure douce et particulièrement touffue, formant parfois une sorte de collier autour du cou et des oreilles. Leur queue est longue.

De tous les Lémuridés, ce sont les plus typiquement quadrupèdes aussi bien pour marcher que pour courir ou sauter. Ils vivent par groupes de cinq à vingt têtes. Omnivores, ils mangent assis en tenant leur nourriture avec leurs pattes antérieures. En liberté, ils peuvent passer de longues périodes sans boire. Après une gestation de 4 à 5 mois (146 jours chez *L. macaco*), les femelles donnent naissance généralement à 1 ou, souvent, 2 petits, qui s'agrippent à la fourrure de la mère et sont allaités pendant environ 6 mois. En captivité, certains lémurs vivent plus de 25 ans.

L. catta, le lémur catta, possède une longue queue annelée de blanc et de noir. Long d'un peu plus de 50 cm, il a la tête gris foncé et ornée de deux nets anneaux noirs autour des yeux. Les parties supérieures de son corps sont gris cendré, légèrement rosâtres. Sa face, ses oreilles, et la partie inférieure de son corps sont claires ou blanchâtres. Le lémur catta diffère des autres Lémuridés par ses mœurs essentiellement diurnes et terrestres. Il fréquente les zones découvertes et même arides, passant le jour à terre, parmi les rochers. Ses paumes et ses plantes sont longues, lisses et coriaces. Ses gros orteils sont très réduits et adaptés à la prise sur les roches. Le lémur catta se nourrit de fruits non épineux, qu'il ouvre à l'aide de ses canines. Très vif et très actif, il ne craint pas d'attaquer d'autres Animaux, même les chiens lorsqu'il est assailli par eux. Il habite le sud de Madagascar.

L. Cagnolaro

L. variegatus, le lémur vari, ou vari, très connu, est le plus gros des Lémuridés (il mesure 60 cm de long et porte une queue aussi longue). Sa fourrure est noire sur la tête, aux mains, aux pieds et à la queue, alors que les autres parties sont très claires. Il possède un collier touffu, fait de longs poils, sur les côtés de la tête et autour du cou. C'est un Animal arboricole et nocturne. Sa voix puissante a été comparée au rugissement du lion. Le lémur vari, qui vit seulement dans les forêts du nord-est de Madagascar, se nourrit de feuilles, de fruits et, dans une moindre mesure, de petits Animaux.

Chez *L. macaco,* le lémur macaque, ou maki, le dimorphisme sexuel est si marqué que naguère on croyait que les deux sexes étaient des espèces différentes. Les mâles sont entièrement noirs alors que les femelles ont les parties supérieures de couleur rouille et le cou, les pattes et la queue jaune-roux, et les parties inférieures de couleur crème. Les deux sexes portent un beau collier de longs poils, noirs chez les mâles, blanchâtres chez les femelles. Les makis mesurent environ 50 cm de long.

Les lémurs macaques vivent dans les forêts denses, sur les grands arbres. Au début de la nuit, ils commencent à s'agiter et émettent des cris lugubres, qu'on entend de très loin. Ils courent et sautent très agilement sur les branches, de sorte que leurs déplacements ont pu être comparés au vol des Oiseaux. Vivant par petits groupes, ils se nourrissent d'Animaux, notamment d'Oiseaux et Sauriens nocturnes (Geckonidés). Pendant le jour, ils se réfugient dans des trous d'arbres ou à la fourche des grosses branches et entrent dans un profond sommeil. Leur distribution couvre principalement les zones forestières des côtes du nord-ouest de Madagascar.

L. mongoz, le lémur mongoz, plus commun que les précédents, est long de 40 cm environ. Sa fourrure est gris cendré, avec le front foncé et le museau et la gorge blanchâtres. Il est arboricole, de mœurs partiellement diurnes et se nourrit de Végétaux. Il habite les forêts du nord de Madagascar et des Comores.

Les deux autres espèces sont *L. fulvus,* le lémur fauve, qui habite la totalité de Madagascar, et *L. rubriventer,* le lémur à ventre rouge.

Les plus petits Lémuridés appartiennent au genre *Lepilemur,* qui compte deux espèces : *L. ruficaudatus,* le lépilémur à queue rousse, le plus commun, qui habite l'ouest de Madagascar, et *L. mustelinus,* le lépilémur mustélin, qui vit sur les pentes humides de la partie orientale de l'île de Madagascar. Certains chercheurs pensent qu'ils ne constituent en fait que deux races géographiques distinctes. Les lépilémurs mesurent environ 35 cm de long, plus 30 cm pour la queue. Leur livrée est variable mais généralement roussâtre, avec la tête noire, les pattes cendré pâle, les parties inférieures du corps blanches ou jaunes. Leur corps est mustélin. Leur tête est tronconique et leurs oreilles arrondies et membraneuses.

Nocturnes et strictement arboricoles, les lépilémurs vivent dans les forêts, surtout dans les zones côtières, et se réunissent par petits groupes. Ils sont craintifs et très difficiles à observer. Durant le jour, ils se cachent dans des trous d'arbres ou dans des nids de feuilles et de rameaux qu'ils ont construits. Ils s'animent la nuit, se mettant à sauter en tous sens. Ils se nourrissent principalement de matières végétales. Vers le mois de septembre, les femelles mettent au monde un seul petit.

La sous-famille des *Cheirogaléinés* comprend des Lémuridés de petite et de moyenne taille (12 à 30 cm de long), parmi lesquels se trouvent les plus petits des Primates actuels, à l'exclusion des toupayes. Leur tête est arrondie et leur museau pointu. Leur queue, très longue, est touffue. Leurs pattes postérieures sont plus adaptées au saut que celles des autres Lémuridés.

Ils passent les moments difficiles de la saison sèche en état d'estivation, se tenant pelotonnés dans des nids de feuilles, et utilisant les réserves de graisses qu'ils ont accumulées, surtout à la base de la queue. Ils sont nocturnes, arboricoles, et grégaires. Ils se nourrissent essentiellement de matières végétales. Des recherches assez récentes ont prouvé que *Cheirogaleus medius* est un homéotherme imparfait.

La sous-famille comprend trois genres : *Cheirogaleus, Microcebus* et *Phaner,* avec au total six espèces.

Les *Cheirogaleus*, ou cheirogales, sont très rares. Longs de 12 à 25 cm, ils ont une fourrure très douce et de grands yeux, lumineux pendant la nuit. Durant le jour, ils se

◀ ***Le lémur mongoz* (Lemur mongoz) *est arboricole et se nourrit de Végétaux; ses mœurs sont partiellement diurnes.***

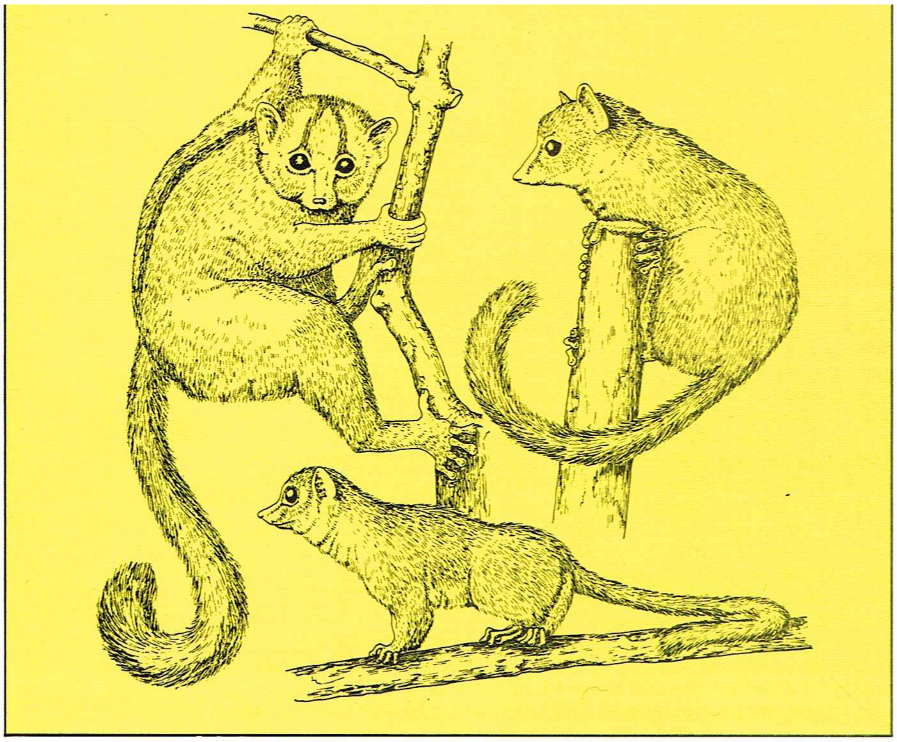

▲ *En haut, à gauche :* Phaner furcifer, *le phaner à fourche ; à droite,* Cheirogaleus major, *le grand cheirogale ; en bas,* Microcebus murinus, *le microcèbe murin.*

tiennent cachés dans des trous d'arbres, souvent à quelques mètres seulement du sol (on voit parfois dépasser leur museau). La nuit, ils sont continuellement actifs, se déplaçant dans les branches, à quatre pattes comme les écureuils, ou en effectuant de grands sauts. Il en existe trois espèces : *C. medius,* le cheirogale moyen, *C. major,* le grand cheirogale, dont les femelles mettent au monde 3 petits, et *C. trichotis,* probablement éteint.

Les *Microcebus,* ou microcèbes, sont très petits : *M. murinus,* le microcèbe murin, mesure 12 à 15 cm de long et pèse au maximum 80 g ; c'est l'un des plus petits Primates ; *M. coquereli,* le microcèbe de Coquerel, est un peu plus grand. Ces minuscules Lémuridés vivent dans des milieux très divers de Madagascar et habitent surtout la cime des arbres. Les femelles ont généralement 3 petits par portée. *M. murinus* est la proie d'un épervier *(Accipiter hensti).*

Phaner, qui compte une seule espèce, *P. furcifer,* le phaner à fourche, habite surtout la partie septentrionale de Madagascar. Long de 26 cm, il présente un étrange dessin sur la tête : il s'agit d'une sorte de fourche noire, qui, continuant une ligne noire que porte le dos, bifurque sur le crâne et forme deux taches circulaires autour des yeux. La queue mesure plus de 30 cm de long. Essentiellement arboricole et nocturne, le phaner vit parfois dans des zones plus découvertes. Très agile, il réalise d'énormes sauts. Il se nourrit de fruits, de miel et d'Insectes. Il vit par couples et on ne rencontre que rarement des groupes de trois.

Les **Indridés** *(Indridae)* sont les plus grands Prosimiens ; ils mesurent jusqu'à plus de 70 cm de long. Leur très court museau leur confère un aspect plus simiesque que celui des Lémuridés. Leurs oreilles sont petites et leurs yeux sont grands. Leur thorax, aplati dans le sens antéro-postérieur, porte chez les femelles une seule paire de mamelles, en position pectorale. Leurs pattes antérieures sont plus courtes que les postérieures ; leurs mains sont plus longues et plus étroites que celles des Lémuridés, avec un pouce réduit et peu fonctionnel, alors que les doigts de pied, du deuxième au cinquième, sont réunis par une sorte de membrane et que le gros orteil est parfaitement opposable.

La denture présente une réduction par rapport au schéma fondamental des Lémuroïdes :

$$\left(\mathrm{I}\,\frac{2}{2};\ \mathrm{C}\,\frac{1}{0};\ \mathrm{Pm}\,\frac{2}{2};\ \mathrm{M}\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 30;$$

les canines et les prémolaires existent en nombre normal dans la dentition de lait. Le cerveau, volumineux, est riche en circonvolutions et recouvre entièrement le cervelet. En ce qui concerne l'intestin, le côlon est très long, et le cæcum, en spirale, est de grande taille.

Essentiellement arboricoles, les Indridés sont des grimpeurs habiles mais lents ; ils descendent des arbres gauchement, à reculons. Ils se déplacent de branche en branche par sauts ; ils sont encore plus sauteurs à terre, où ils se rendent de temps à autre. Les Indridés vivent dans les forêts et les zones buissonneuses de Madagascar,

▶ Propithecus verreauxi, *le propithèque ou sifaka de Verreaux, diurne et essentiellement arboricole, se rend parfois à terre où il a une marche bipède.*

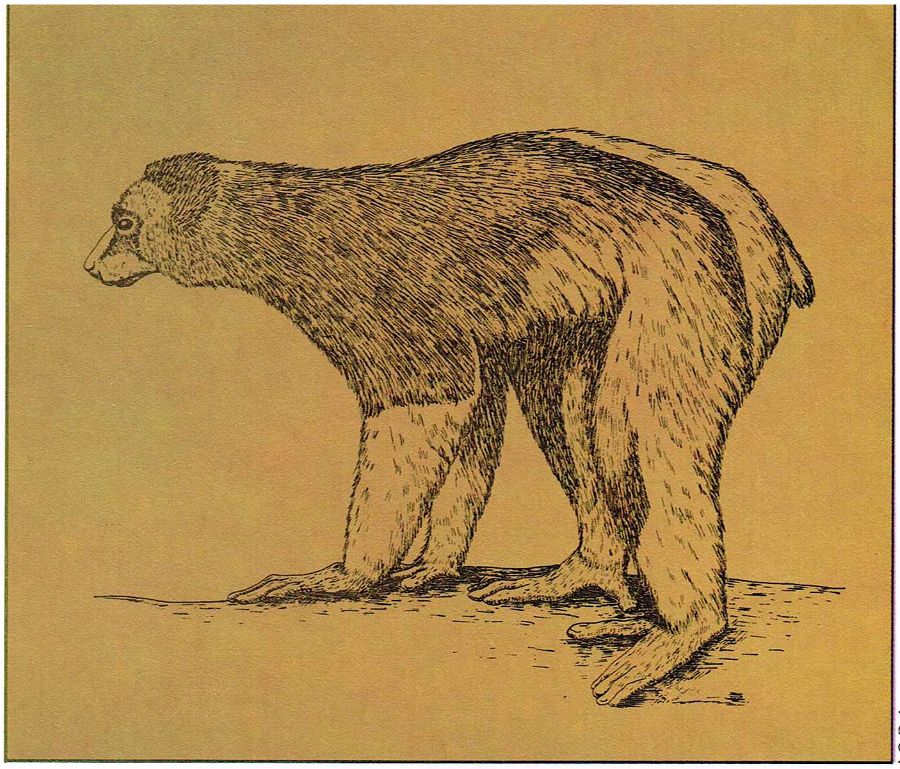

par groupes de huit à douze têtes et même plus. Ils sont de mœurs diurnes, à l'exception de l'avahi. Leur voix est puissante et leurs cris sont variés. Leur nourriture est uniquement végétarienne et se compose surtout de bourgeons, de feuilles, de fleurs, et même d'écorces succulentes.

Les femelles donnent naissance à un seul petit par portée, après une gestation de 4 à 5 mois au maximum (2 mois seulement chez l'indri) ; ces chiffres sont peu sûrs, étant donné qu'il est difficile de garder ces Animaux en captivité. Le petit est porté par sa mère durant quelques mois, d'abord agrippé au ventre, puis sur le dos lorsqu'il est plus grand.

Les Indridés tiennent à Madagascar la place qui appartient en Afrique et en Asie aux singes folivores (Colobinés), et en Amérique aux singes hurleurs.

On compte trois genres : *Avahi, Propithecus* et *Indri,* avec au total quatre espèces. Le genre *Avahi* comprend une seule espèce, *A. laniger = Lichanotus laniger,* l'avahi laineux, qui diffère des autres Indridés par des caractères importants. Long de 30 à 45 cm, il a une belle fourrure, touffue et laineuse, à reflets soyeux, qui recouvre aussi sa longue queue (30 à 40 cm). Sa livrée, aux teintes très variables, est brun grisâtre, avec des taches claires. Ses mains et ses pieds sont blancs ; sa queue est orangée.

L'avahi est généralement solitaire, et l'on ne trouve qu'occasionnellement deux ou trois individus réunis. De mœurs nocturnes, il passe la plupart de son temps sur les arbres. Pendant le jour, il dort dans des trous ou au profond du feuillage. Il se déplace par des mouvements plus lents que ceux des autres Indridés et descend, au besoin, à terre où il marche en position dressée. Il semble peu intelligent. Il vit, avec deux sous-espèces distinctes, dans les forêts des montagnes du nord-ouest et de la chaîne volcanique de Madagascar.

Propithecus comprend les sifakas, ou propithèques, avec deux espèces, *P. diadema*, le propithèque diadème, et *P. verreauxi*, le propithèque de Verreaux, ou sifaka de Verreaux, qui habitent Madagascar, dans les forêts de la bande côtière ainsi que certaines zones du haut plateau central, le premier à l'est et le second à l'ouest. Les sifakas mesurent environ 50 cm de long avec une queue aussi longue, *P. diadema* étant l'espèce la plus grande. La fourrure varie du blanc au noir chez cette dernière espèce, et tire au blanchâtre chez *P. verreauxi*.

Diurnes et essentiellement arboricoles, ces lémuriens se rendent parfois à terre, où ils ont une marche bipède, leurs mains étant alors levées comme celles de l'indri. Ils prennent leur nourriture avec la bouche et rarement avec les mains. Ils émettent des sons qui font penser au caquetage des poules et parfois à des aboiements aigus. Les sifakas sont actuellement fort peu nombreux ; certaines sous-espèces risquent même de disparaître à cause de la destruction des forêts. Les indigènes les respectent généralement.

Le genre *Indri* est représenté par la seule espèce *I. indri*. C'est le plus grand Prosimien vivant (70 cm de long), mais il a une très courte queue (3 à 5 cm). Son pelage est long et abondant, de couleur assez variable ; en général, la face est noire ou très foncée ; la tête, le cou, le dos et les bras sont noirs ; les avant-bras sont gris blanchâtre ; une bande blanche, partant du milieu du dos, couvre la partie postérieure des jambes et de la queue ; enfin, les mains et les pieds sont noirs.

Diurne et essentiellement arboricole, l'indri vit le plus souvent par groupes de trois à cinq têtes ; mais on en trouve parfois des isolés. Cet Animal a une voix très puissante, sorte de hurlement ou d'aboiement. Ses cris sont amplifiés par un sac laryngé spécial, situé entre la trachée et l'œsophage.

Sa distribution est limitée aux forêts de la chaîne de montagnes volcaniques, à l'est de Madagascar, entre la baie d'Antongil au nord et la rivière Masora au sud ; on le rencontre du niveau de la mer jusqu'à environ 1 800 m d'altitude ; sauf en certaines zones, il est généralement fort rare.

Les **Daubentonidés** *(Daubentonidae)* comprennent l'un des plus étranges et des plus rares Mammifères du monde : *Daubentonia madagascariensis*, l'aye-aye, l'unique espèce vivante de la famille. L'aye-aye vit dans une zone restreinte de Madagascar, où il a été découvert en 1780 par Sonnerat, qui lui a donné le nom indigène d'aye-aye, sans doute par référence à sa voix. Buffon considérait cet Animal comme une nouvelle sorte d'écureuil, suivi en cela plus tard par Gmelin et Cuvier ; ce dernier avait toutefois constaté que l'Animal présentait des caractères crâniens du type primate. C'est Schreber qui, le premier, le classa chez les Prosimiens, essentiellement en fonction de la conformation de ses extrémités. Du fait de la ressemblance avec les Rongeurs, il fut un moment nommé *Chiromys,* c'est-à-dire « rat à mains ».

L'aye-aye est à peu près de la taille d'un chat. Sa tête est arrondie et son museau court. Ses yeux sont grands, ainsi que ses oreilles, qui sont nues et membraneuses. Son corps et ses pattes sont maigres. Il mesure environ 40 cm de long, porte une queue de 60 cm et pèse environ 2 kg. Sa fourrure, très grossière, est constituée de poils courts et laineux, mêlés à des poils longs et grossiers, lesquels, à la queue, atteignent 10 cm de long. Les poils courts sont blanchâtres à la base et noirs à l'extrémité, et la livrée, qui dans son ensemble va du brun foncé au noir, présente des zones plus claires, surtout au museau, autour des yeux, aux joues, à la gorge et aux parties inférieures, où prédomine le jaune clair ; les mains et les pieds sont noirs.

Parmi les caractères les plus remarquables de cet Animal, nous citerons la formule dentaire et la conformation des pattes. Par suite d'un processus de réduction et de spécialisation, les incisives, très développées, sont courbes et à croissance continue, avec de l'émail seulement à la face antérieure, ce qui les rend semblables à celles des Rongeurs. La formule dentaire est :

$$\left(I\,\frac{1}{1};\ C\,\frac{0}{0};\ Pm\,\frac{1}{0};\ M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 18.$$

A la place des canines existe une large diastème entre les incisives et les dents maxillaires, ce qui renforce encore la ressemblance avec les Rongeurs. La main est curieuse : les doigts sont longs et étroits, le troisième étant très fin, squelettique et très mobile. Tous les doigts possèdent des ongles arqués, sauf le gros orteil, volumineux et opposable, qui possède un ongle plat.

▲ **Indri indri** ***est le plus grand Prosimien vivant (70 cm de long), mais il a une queue très courte. Cet Animal a une voix très puissante, sorte de hurlement ou d'aboiement.***

I.G.D.A.

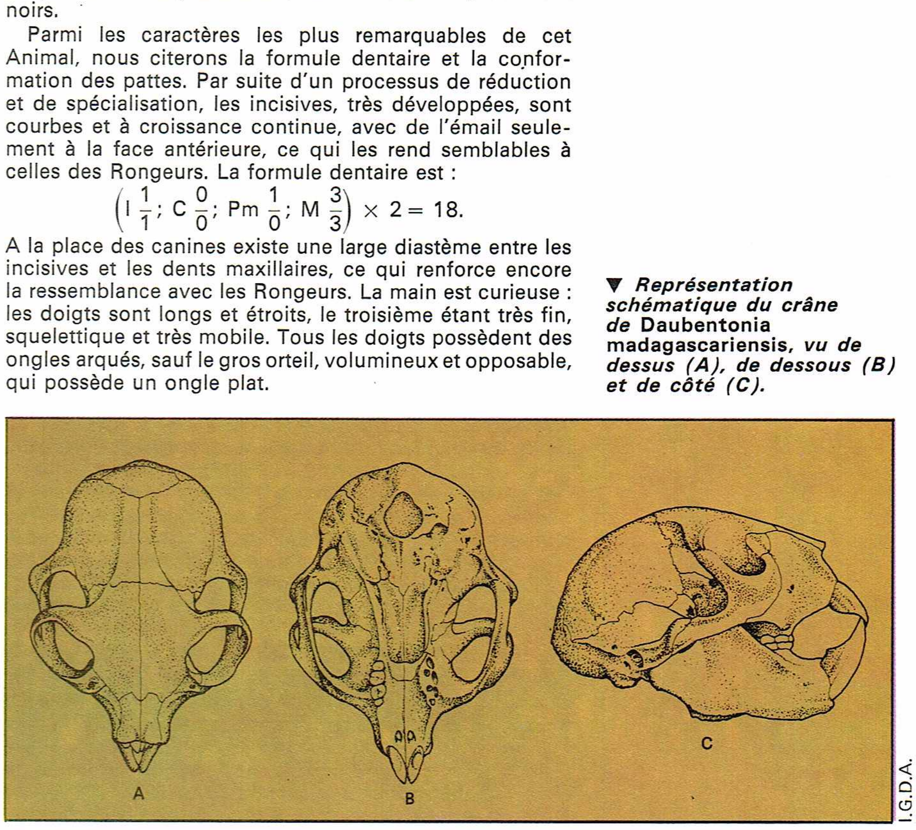

▼ ***Représentation schématique du crâne de*** **Daubentonia madagascariensis,** ***vu de dessus (A), de dessous (B) et de côté (C).***

I.G.D.A.

L. Cagnolaro

▲ **Daubentonia madagascariensis,** *l'aye-aye, unique espèce vivante de la famille des Daubentonidés, se nourrit essentiellement de fruits et de larves d'Insectes (Milan, Muséum d'histoire naturelle).*

▼ *En haut, pied droit de potto doré* **(Arctocebus calabarensis).** *En bas, denture de* **Loris tardigradus.**

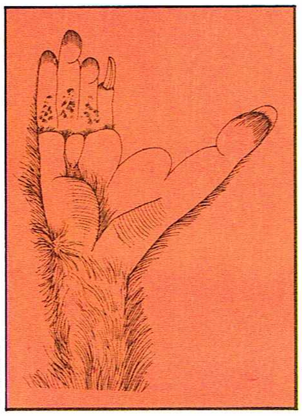

I.G.D.A.

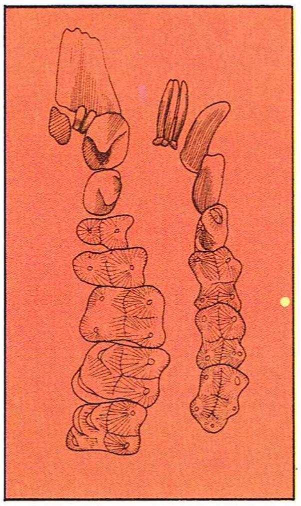

I.G.D.A.

Le cerveau présente des caractères archaïques. Les yeux sont grands et pourvus d'une membrane nictitante bien développée, et la pupille, ronde, se ferme en une fente verticale quand la lumière est trop abondante.

La biologie de l'aye-aye est encore mal connue, à cause des difficultés d'observation et du très faible nombre d'individus existant. Strictement nocturne, l'aye-aye vit isolément ou par couples dans les forêts denses. Pendant le jour, il s'abrite dans des trous d'arbres ou dans l'entrelacs des branches, et s'il est perturbé, il ne peut se déplacer que lentement. Au crépuscule, il devient actif, sautant de branche en branche, comme les lémurs. Il est généralement très silencieux, mais émet parfois un cri caractéristique, comparable au crissement produit par le frottement de deux morceaux de métal.

Il se nourrit essentiellement de fruits, d'Insectes et de larves d'Insectes (spécialement de larves xylophages) ; il lui arrive de manger des œufs et diverses matières végétales, comme la moelle de bambou. Sa technique de chasse des larves du bois est très caractéristique : il brise l'écorce avec ses robustes incisives, puis extrait ses proies à l'aide de son troisième doigt. Il a les sens très fins, surtout l'ouïe et le toucher ; ainsi, il repère la présence des larves dans le bois aux légers bruits qu'elles produisent, et tapote souvent les branches avec ses doigts pour provoquer leur déplacement. Il se nourrit aussi de noix de coco, en pratiquant une ouverture dans la coque très dure, grâce à ses incisives. Pour en absorber le suc, il utilise aussi son troisième doigt très mince, qu'il plonge à l'intérieur et suce ensuite rapidement, geste qu'il accomplit aussi pour boire de l'eau.

Les femelles possèdent deux mamelles, inguinales. Les portées semblent être d'un seul petit à la fois et la mise bas à lieu en février ou en mars. La mère construit, dans un trou d'arbre ou parmi les branches, un gros nid sphéroïdal, avec une ouverture latérale, pour y élever son petit. Ce nid se trouve très souvent sur l'arbre du voyageur *(Ravenala madagascariensis)*. Il existe aussi des nids de repos. La longévité de l'espèce est inconnue, mais on a gardé un individu durant 9 ans au zoo de Londres.

L'aye-aye est actuellement l'un des Mammifères les plus rares du monde. Distribué naguère dans les forêts, surtout côtières, du nord-ouest et du nord-est de Madagascar, il est aujourd'hui confiné à une minuscule région de l'est de son aire, entre Antalaha (au nord de Maroantsetra) et Mananjary ; depuis 1932, il n'a plus été signalé dans le nord-ouest de l'île.

Sa disparition est due, dans une large mesure, à la destruction de vastes parties de la forêt côtière typique et aussi à son faible taux de reproduction. Il semble en exister, au total, seulement vingt à trente individus. L'aye-aye ne vivant dans aucune des zones protégées de l'île, l'Union internationale pour la conservation de la nature en a fait transporter quelques spécimens dans l'îlot de Nossi-Mangabé (Nossi-bé), réserve totalement protégée.

★ *Infra-ordre des Lorisiformes*

Les Lorisiformes *(Lorisiformes)* renferment une seule famille : les Lorisidés.

Les **Lorisidés** *(Lorisidae)* comprennent une douzaine d'espèces à vaste distribution africaine et asiatique (aucune ne se rencontre à Madagascar). Ils sont généralement très petits (15 à 39 cm de long) et possèdent une fourrure serrée et douce, de consistance laineuse.

Leur formule dentaire est :

$$\left(I\,\frac{2}{2};\ C\,\frac{1}{1};\ Pm\,\frac{3}{3};\ M\,\frac{3}{3}\right)\times 2 = 36.$$

Les incisives supérieures sont réduites et largement séparées sur la ligne médiane.

Ces Animaux sont, dans leur quasi-totalité, nocturnes, comme l'attestent leurs grands yeux. La famille est divisée en deux sous-familles : les Lorisinés, asiatiques et africains, et les Galaginés, africains. Ces groupes sont suffisamment différenciés pour que de nombreux zoologistes les élèvent au rang de familles.

La sous-famille des *Lorisinés,* à la différence de celle des Galaginés, comprend les Lorisidés dont les membres postérieurs ne sont pas plus longs que les antérieurs. Leurs tarses sont normaux. Leur tête est courte, leurs oreilles sont petites, et leur queue courte ou absente. Ils présentent d'intéressantes adaptations à la vie arboricole, à laquelle ils sont strictement inféodés. En particulier, leurs mains et leurs pieds fonctionnent comme des pinces pour saisir les branches, les pouces et les gros orteils étant parfaitement opposables aux autres doigts : le pouce est opposable au quatrième et parfois aussi au cinquième doigt, l'index étant atrophié et le troisième doigt réduit ; les gros orteils sont opposables à tous les doigts de pied. Tous les doigts portent des ongles plats, sauf le second doigt de pied, qui possède un ongle très arqué. Les membres possèdent un réseau admirable (cas unique chez les Primates), caractère embryonnaire qui persiste chez l'adulte ; ce réseau admirable permet aux muscles de rester longtemps contractés sans se fatiguer et facilite les échanges respiratoires des fibres musculaires. C'est pourquoi ces Animaux peuvent rester longtemps suspendus aux branches, comme les paresseux, auxquels ils ressemblent par leur façon de se mouvoir sur les arbres en s'agrippant successivement de la main et du pied du même côté, selon un mouvement lent et sinueux.

Les Lorisinés vivent solitairement ou par couples, et passent le jour dans un profond sommeil, pelotonnés sur eux-mêmes en un endroit abrité d'un arbre. Ils sont essentiellement insectivores, mais se nourrissent aussi de lézards (surtout des Geckonidés nocturnes), d'œufs, d'oisillons et même de fruits. Ils boivent l'eau en lapant. Ils ont l'étrange habitude d'uriner sur leurs mains avant de faire leur toilette ; leur urine sert aussi à marquer leur territoire. Ils supportent bien la captivité et peuvent y vivre 10 ans.

Z.F.A.

E. Hosking

◀ *Au centre,* **Loris tardigradus,** *le loris grêle, est un Animal calme et prudent qui n'attaque que des proies faciles qu'il tue d'une morsure à la tête. A droite,* **Perodicticus potto,** *largement répandu dans les forêts d'Afrique équatoriale, vit dans les parties basses des arbres.*

T. Okapia

◀ **Nycticebus coucang,** *le nycticèbe coucang, habite de l'Assam à l'Indochine ainsi que l'archipel malais et les Philippines.*

Les femelles possèdent deux ou trois paires de mamelles. Après une gestation d'environ 6 mois (3 mois pour le nycticèbe), elles mettent bas en général un seul petit (parfois 2), couvert de pelage, et dont les yeux sont ouverts ; il est transporté suspendu au ventre de la mère.

Les Lorisinés comptent quatre genres : deux asiatiques, *Loris* et *Nycticebus*, et deux africains, *Perodicticus* et *Arctocebus,* avec au total cinq espèces.

Les forêts de l'Inde méridionale et de Ceylan, jusqu'à 1 800 m d'altitude, abritent l'espèce la plus caractéristique, *Loris tardigradus,* le loris grêle. Celui-ci a le corps gracile et allongé ; il mesure de 17 à 25 cm. Ses pattes sont longues et maigres. Son museau est quelque peu proéminent. Ses énormes yeux orangés sont très rapprochés et lumineux la nuit. Ses oreilles sont arrondies. Il ne possède pas de queue. Sa fourrure varie du gris jaunâtre au brun foncé sur le dessus du corps ; elle est très foncée autour des yeux, blanchâtre au museau, et gris argenté au-dessous. Un peu plus agile que le nycticèbe, ce loris est très calme et prudent, et n'attaque aucun Animal dont il ne pourrait avoir rapidement et facilement raison : il tue ses proies d'une morsure à la tête.

Largement répandu en Asie du Sud-Est, *Nycticebus*, genre proche du précédent, en diffère cependant par une plus grande taille, un corps plus robuste, une tête ronde, un museau plus court, des oreilles plus courtes, et des membres plus robustes, à mains et pieds plus gros. Sa queue est très réduite. Sa fourrure, gris-roux clair en dessous, varie sensiblement chez les nombreuses sous-espèces et races géographiques ; sur le dos, on observe une ligne foncée typique, qui se prolonge sur le cou et la tête et bifurque sur le front, pour rejoindre plus ou moins distinctement les taches foncées qui entourent les yeux. Plus lents que le loris grêle, les nycticèbes se déplacent fréquemment la tête en bas. Il en existe deux espèces : *N. coucang*, le nycticèbe coucang, qui habite de l'Assam jusqu'à la quasi-totalité de l'Indochine, une grande partie de l'archipel malais ainsi que (selon certains auteurs) les Philippines, et *N. pygmaeus*, le nycticèbe nain, long de 20 cm seulement et limité à l'Indochine.

Les deux espèces suivantes, que l'on rencontre en Afrique, ne sont guère différentes par les mœurs et par le genre de vie.

Perodicticus potto, le potto de Bosman, très semblable aux nycticèbes, en diffère par une queue plus longue (de 5 à 10 cm). Son corps, robuste, mesure 35 cm de long. Ce potto possède une fourrure dense, de teinte grisâtre ou brun-roux foncé. Les longues apophyses épineuses de ses vertèbres cervicales soulèvent la peau du cou en formant une série de tubercules cornés, caractéristiques. Largement répandu dans les forêts d'Afrique équatoriale, il vit dans les parties basses des arbres. Il est la proie, en particulier, d'un Viverridé : le nandinia *(Nandinia binotata)*.

Arctocebus calabarensis, le potto de Calabar, ou potto doré, est très rare ; il vit dans les cimes des arbres, dans les forêts d'Afrique occidentale, du Niger au Zaïre. Son corps est plus élancé et moins long que celui du potto, et son museau plus saillant. Sa fourrure, très réduite, est brillante.

La sous-famille des *Galaginés* présente, par suite de l'adaptation au saut, un allongement considérable des membres postérieurs, en particulier de l'astragale et du scaphoïde, qui représentent le tiers de la longueur du tibia. Les autres caractères notables sont le museau assez proéminent, les oreilles très développées et mobiles, et la longue queue (17 à 40 cm) couverte d'un pelage touffu. La taille des Galaginés varie de 15 à 38 cm.

A la différence des Lorisinés, les Galaginés, ou galagos au sens large, sont des Animaux vifs et très agiles, qui se déplacent d'une branche à une autre par de longs sauts. Des coussinets palmaires et plantaires spéciaux facilitent la prise des branches. A terre, ils tendent à prendre une position semi-dressée et à sauter un peu comme les kangourous (c'est, notamment, le cas du galago du Sénégal, alors que le galago à grosse queue, plus grand, est plutôt quadrupède à terre). Ces Animaux peuvent faire tourner leur tête à 180°. Ils émettent une riche variété de cris et de sons.

T. Okapia

Grossa - Jacana

▲ **Galago demidowi** *est un Lorisidé très agile et partiellement diurne; strictement inféodé à la grande forêt pluviale, il est distribué du Sénégal à la Guinée et au Zaïre, ainsi que dans l'île de Fernando Poo.*

▶ **Tarsius syrichta,** *le tarsier des Philippines, dont on observera les doigts, longs et graciles, présentant des extrémités aplaties et pourvues de disques adhésifs, qui lui permettent de grimper aux arbres et de s'accrocher à des surfaces lisses.*

Les Galaginés vivent dans les forêts et surtout dans les broussailles arides (particulièrement celles à acacias). Leurs mœurs sont essentiellement nocturnes; au repos, ils sont grégaires, alors que, lorsqu'ils recherchent leurs proies, ils vont le plus souvent par couples ou seuls. Ils utilisent leurs mains pour se défendre, pour prendre leur nourriture et pour examiner les objets. Ils se nourrissent d'Insectes, en particulier de sauterelles, d'œufs, d'Oiseaux, de divers petits Animaux, de fruits, de feuilles et de fleurs.

En général, les femelles mettent au monde 1 ou 2, rarement 3, petits par portée, après une gestation de 110 à 120 jours; la période des mises bas varie d'avril à novembre selon la latitude. La mère prépare un nid pour son petit, qu'elle transporte par la suite, agrippé à sa fourrure, pendant les premiers temps de sa vie. L'allaitement dure environ 3 mois et demi, mais, dès la fin du premier mois, les juvéniles sont en mesure de prendre de la nourriture solide; ils effectuent leurs premiers sauts à 2 semaines. La longévité des Galaginés dépasse 10 ans.

Les Galaginés comprennent deux genres : *Galago* et *Euoticus*, avec cinq espèces en tout.

La plus grande espèce (le plus grand des Lorisidés) est *Galago crassicaudatus*, le galago à queue épaisse, qui atteint 80 cm de long, dont plus de la moitié pour la queue. Sa fourrure, touffue et très douce, est brun grisâtre, avec des taches blanches aux parties inférieures. Ses yeux sont grands. Ce galago vit surtout dans les forêts, à proximité des savanes. Il a une prédilection pour les substances sucrées de différentes plantes, comme les palmiers, ce qui le fait aussi appeler localement « rat des cocotiers ». Il fréquente également les mangroves. Il est distribué dans une grande partie de l'Afrique orientale, centrale et australe, et compte une dizaine de sous-espèces et de races géographiques, très variables, dont l'une est propre à Zanzibar.

G. senegalensis, le galago du Sénégal, est peut-être l'espèce la plus typique. Long d'environ 20 cm, avec une queue légèrement plus longue que le corps, il a le museau et les doigts proportionnellement plus courts que ceux de l'espèce précédente. Sa fourrure est moins longue et sa queue plus fine. Ses yeux, volumineux, ont un iris jaune olivâtre. Strictement arboricole et très habile sauteur, il compte une douzaine de formes, distribuées dans les savanes, du Sénégal à l'Afrique orientale et à l'Angola, à l'exception du Cameroun et du bassin du Congo. Il s'adapte bien à la vie dans les maisons.

G. alleni, le galago d'Allen, très semblable au galago du Sénégal, mais de couleur très foncée, est une espèce forestière qui vit du Niger au Zaïre, et dans l'île de Fernando Poo.

G. demidowi, le galago de Demidoff, long d'environ 15 cm, possède une queue un peu plus longue que son corps. Son museau, conique, est pourvu de longues vibrisses. Ses oreilles sont petites et ses yeux énormes. Sa fourrure présente une vague teinte vert doré. Ce galago, très agile, est partiellement diurne, ce qui est unique chez les Lorisidés. Strictement inféodé à la grande forêt pluviale, il est distribué du Sénégal à la Guinée et au Zaïre, ainsi que dans l'île de Fernando Poo.

Le genre *Euoticus* comprend une seule espèce : *E. elegantulus,* le galago élégant, ou galago mignon, qui habite les forêts d'Afrique équatoriale occidentale, autour du golfe de Guinée. Long de 22 cm, avec une queue d'environ 30 cm, il possède une fourrure très touffue de couleur cannelle, avec une ligne foncée sur le dos. Il diffère des autres Galaginés par ses ongles carénés et aigus, sauf au premier doigt, qui possède un ongle plat.

Sous-ordre des Tarsioïdes

Les Tarsioïdes *(Tarsioidea)* comprennent la seule famille des Tarsidés.

Les **Tarsidés** *(Tarsiidae)* occupent, par toutes sortes de caractères particuliers, une place bien à part au sein des Primates; s'ils ne comptent qu'un genre et trois espèces, ils sont toutefois très importants des points de vue anatomique et évolutif.

Les Tarsidés sont de petite taille; certaines races qui mesurent de 9 à 16 cm de long et pèsent de 80 à 150 g, figurent parmi les plus petits Primates. Ils ont la tête ronde, le cou court et le corps plus trapu que celui des Lémuroïdes. Leur queue, très longue (13 à 27 cm) et nue, se termine par une touffe de poils; la queue du tarsier spectre est pourvue à la face inférieure de formations squamiformes, caractère très archaïque. La tête, à museau court, aux énormes yeux ronds dirigés en avant, peut tourner complètement en arrière sans aucun mouvement du tronc.

Les pattes antérieures sont courtes et les postérieures très longues, avec un développement exceptionnel du tarse par suite de l'adaptation marquée au saut. Les doigts, longs et graciles, présentent des extrémités aplaties et pourvues de disques adhésifs bien développés, lesquels servent à grimper : c'est ce qui permet aux tarsiers de s'accrocher même à des surfaces lisses. Tous les doigts portent des ongles plats, sauf les deuxième et troisième doigts de pied, qui possèdent des griffes. Les pouces et les gros orteils sont opposables.

Ces étranges Animaux sont couverts d'une fourrure laineuse et courte, moins touffue que celle des lémurs. Leur crâne, d'aspect tout à fait particulier, avec ses énormes orbites très rapprochées et rondes, présente des caractères communs à la fois aux Lémuroïdes et aux Primates supérieurs, ce qui laisse supposer une lointaine origine commune aux Tarsioïdes et aux Anthropoïdes (ceci est confirmé par l'anatomie et la physiologie de l'appareil génital).

En ce qui concerne le squelette, on observe un développement transversal du thorax, avec un aplatissement du sternum, ce qui est lié à la station semi-dressée de ces très habiles sauteurs. La clavicule est longue et fine. Aux pieds, on observe un extraordinaire allongement du tarse (d'où le nom de l'Animal) et, plus particulièrement, du cuboïde et du scaphoïde, par suite de l'adaptation au saut.

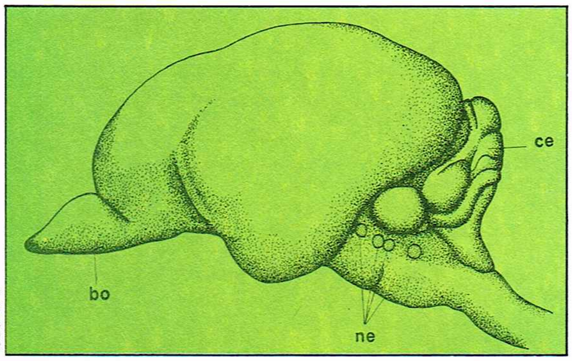

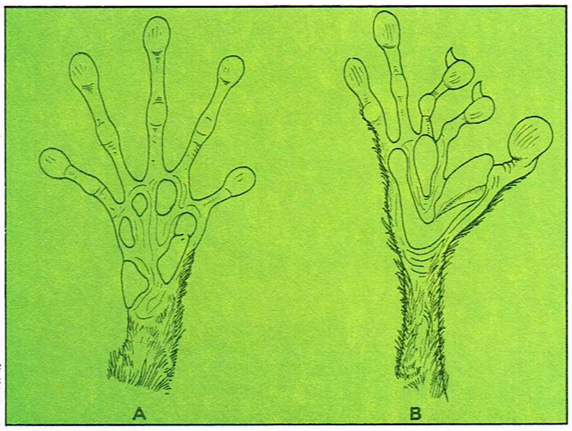

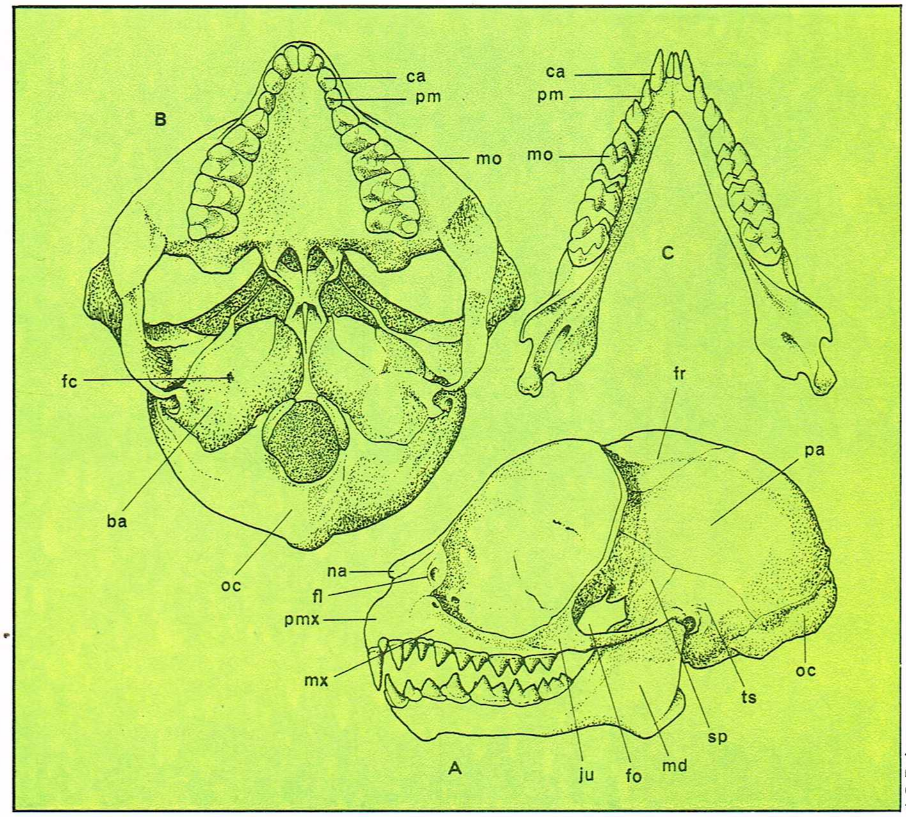

▲ ***A gauche, en haut : encéphale de tarsier spectre*** **(Tarsius spectrum)** ***vu de côté; bo, bulbe olfactif; ce, cervelet; ne, nerfs faciaux, auditif et glosso-pharyngien; en bas, main (A) et pied (B) de Tarsidé. Ci-dessus, crâne de*** **Tarsius spectrum**, ***vu de côté (A); par-dessous (B); et mandibule (C) : ca, canines; pm, prémolaires; mo, molaires; fc, foramen carotidien; ba, bulle auditive; oc, occipital; na, nasal; fl, foramen lacrymal; pmx, prémaxillaire; mx, maxillaire; ju, jugal; fo, fissure orbitaire; md, mandibule; sp, sphénoïde; ts, temporo-squamosal; pa, pariétal; fr, frontal.***

Le cerveau est tout petit (il pèse environ 3 g), mais proportionnellement très large, avec une région occipitale qui recouvre partiellement le cervelet; l'encéphale, sans sillons bien distincts, présente à la fois des caractères archaïques, rappelant ceux des Insectivores et des Marsupiaux, et des caractères très spécialisés, semblables à ceux des singes, comme l'atrophie du rhinencéphale et surtout le grand développement des centres visuels, dont les couches cellulaires ont une différenciation plus poussée que celle des autres Primates, y compris l'homme. L'odorat est donc très secondaire, alors que la vue est primordiale : les yeux sont énormes et représentent 2,25 % du poids corporel, contre 0,2 à 0,5 % chez les Lémuridés et 0,3 à 0,5 % chez les singes. La rétine n'est pourvue que de bâtonnets; en outre, il n'y a pas de tache jaune ni de fovea centrale. L'oreille externe, d'aspect quelque peu simiesque, est grande et très mobile.

Les Tarsidés ont pour formule dentaire :

$$\left(I\,\frac{2}{1};\ C\,\frac{1}{1};\ Pm\,\frac{3}{3};\ M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 34.$$

La denture présente des caractères primitifs, surtout en ce qui concerne les molaires, les supérieures étant trituberculées et les inférieures de type tuberculo-sectoriel.

L'intestin, très simple, présente divers caractères archaïques rappelant ceux des Insectivores et même des Reptiles; il n'y a pas d'appendice cæcal. Le poumon droit a généralement six lobes et le gauche quatre.

Les femelles possèdent généralement deux paires de mamelles, l'une pectorale et l'autre abdominale; il existe parfois aussi une seconde paire pectorale. L'utérus est bicorne; le placenta est discoïdal et décidué. Chaque portée consiste en un seul petit, minuscule (25 g) mais déjà fort développé : il est couvert de poils, a les yeux ouverts et peut s'agripper au ventre de sa mère et effectuer de petits déplacements seul; la mère, qui ne fabrique pas de nid, le transporte aussi dans sa bouche. Les durées de gestation et d'allaitement ne sont pas connues. Le jeune est capable de sauter à 1 mois. La longévité atteint 10 ans en captivité.

Nocturnes et arboricoles, les Tarsidés vivent solitaires ou par couples, dans les lieux buissonneux, les jungles et les forêts assez clairsemées; durant le jour, ils se cachent dans la végétation, le plus souvent en groupes, sur de petites branches verticales, la queue étroitement serrée contre le support. Sur les arbres et dans les buissons, ce sont de remarquables acrobates, effectuant de longs bonds de plusieurs mètres sans effort apparent. Ils se nourrissent surtout d'Insectes, parfois aussi de Sauriens (surtout des Geckonidés) ainsi que de Crustacés. Ils ne mangent pas de fruits et boivent l'eau en la lapant. Ils sont généralement silencieux, mais émettent parfois des sons caractéristiques, comme de faibles cris, la bouche légèrement ouverte.

La famille, distribuée seulement dans l'archipel de la Sonde, aux Célèbes et aux Philippines, a un seul genre : *Tarsius*, avec trois espèces. Le sous-ordre des Tarsioïdes comprend cependant de nombreuses espèces fossiles, d'Amérique du Nord et d'Europe.

T. syrichta, le tarsier des Philippines, mesure de 12 à 15 cm de long et présente une livrée grisâtre, avec les mains et les pieds brun foncé. Sa queue, presque nue, sauf à l'extrémité, est dépourvue d'écailles. Ses tarses sont pratiquement nus. Il habite les Philippines méridionales.

T. bancanus, le tarsier malais, ou occidental, possède une fourrure brun foncé, aux nuances roussâtres, ou encore de couleur chamois. Sa queue, dépourvue d'écailles, portant une touffe terminale de poils, est vivement colorée à sa partie dorsale. Une grosse tache blanche marque le périnée. Le tarsier malais compte plusieurs races locales, qui habitent le sud-est de Sumatra, les îles Bangka, Billiton et Natuna, et une grande partie de Bornéo.

T. spectrum, le tarsier spectre, ou des Célèbes, a une queue pourvue d'écailles au-dessous et d'une abondante touffe terminale de poils. La livrée a un fond grisâtre. Il existe, derrière les oreilles, une tache blanche bien marquée. Cette espèce vit aux Célèbes et dans quelques îles proches, comme Sangi Salajar et Poulo Peleng.

Sous-ordre des Anthropoïdes

Le troisième sous-ordre des Primates, de loin le plus important et celui qui compte le plus d'espèces, est celui des Anthropoïdes *(Anthropoidea)*, ou Simioïdes, qui comprend tous les singes, ainsi que l'homme. Chez les Anthropoïdes, les caractères évolutifs des Primates atteignent leur expression la plus complète, en particulier le redressement progressif du tronc, l'accroissement de volume de la boîte crânienne, le développement cérébral et intellectuel, et la réduction du squelette facial. Ce dernier caractère, toujours évident chez les juvéniles, est parfois masqué par un allongement secondaire du museau

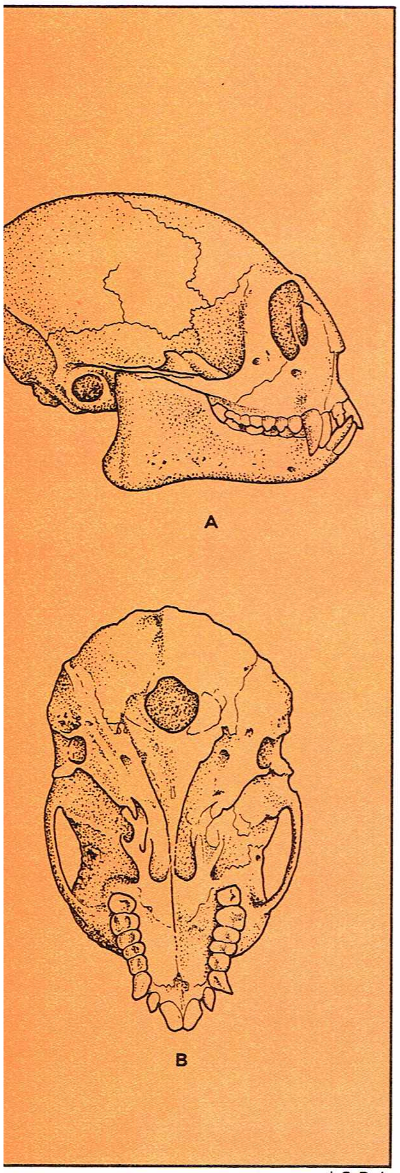

I.G.D.A.

▲ ***Crâne de ouistiti (Hapale jacchus), vu de côté (A) et par-dessous (B).***

chez les adultes de certains Cercopithécidés et des singes Anthropomorphes.

La peau, très pigmentée, présente des tons qui vont du grisâtre au noir : chez certaines espèces, elle peut être nettement colorée à la face ou aux fesses (par exemple chez les cynocéphales et les macaques). La fourrure est très touffue, chez les Platyrhiniens, moins chez les Cercopithécidés et encore moins chez les Anthropomorphes, à l'exception des gibbons qui sont très velus; c'est chez l'homme qu'on observe la pilosité minimale.

La coloration de la fourrure, qui peut être très vive (par exemple, chez les *Cercopithecus* et les Colobinés), présente parfois des différences importantes liées au sexe et à l'âge (chez les Colobinés et les gibbons) ; il existe, en outre, des différences observées en fonction des races géographiques. Les vibrisses faciales sont développées seulement chez les Hapalidés.

Parmi les glandes, les sudoripares ont beaucoup d'importance. Il n'existe pas d'ensemble glandulaire spécialisé, à l'exception de la glande sternale de certains Cercopithécidés, des gibbons et de l'orang-outan, bien développée chez les mâles et de type odorifique.

Les mains et les pieds des singes sont conformés en vue de la préhension (ce sont des quadrumanes) ; les pouces sont opposables, sauf chez les Hapalidés. Les *Ateles* et diverses formes plus typiquement arboricoles de Colobinés ont des pouces très réduits ou même absents. Aux mains, le troisième et, éventuellement, le quatrième doigt sont plus longs que les autres, alors qu'aux pieds c'est le troisième seulement qui est le plus long; les gros orteils, toujours présents, sont parfaitement opposables et exercent une forte prise. Tous les doigts sont pourvus d'ongles plats (*ongulae*), allongés et souvent comprimés latéralement; les Hapalidés font exception, car ils possèdent des griffes (*tegulae*), sauf aux pouces qui portent un ongle plat.

Les membres ont une grande liberté de mouvements; leur développement est lié au type de locomotion propre à chacun des groupes. On peut distinguer : un type grimpeur normal, la majorité des singes; un type marcheur, caractéristique des Cercopithécidés, qui vivent de préférence à terre (par exemple les cynocéphales) ; et un type à suspension brachiale, propre à de nombreuses formes plus typiquement arboricoles, comme les singes-araignées et les Anthropomorphes, qui se déplacent en se suspendant aux branches par les bras. Dans ce dernier cas, les membres antérieurs sont plus longs que les postérieurs (parfois presque deux fois plus longs). A ces trois types peut être ajouté celui de la marche bipède, typique de l'homme, dont les membres antérieurs sont plus courts que les postérieurs.

La queue, présente chez la très grande majorité des espèces, sauf chez le magot et les Anthropomorphes, est presque toujours très longue; elle est préhensile chez divers Platyrhiniens.

L'augmentation de volume de la boîte crânienne s'est effectuée, notamment, par le redressement de l'os frontal, la croissance en hauteur du squamosal et le développement progressif de l'écaille de l'occipital. Les orbites sont dirigées en avant et sont séparées en arrière de la fosse temporale par une cloison osseuse. Le développement des maxillaires, moindre chez les Platyrhiniens, est considérable chez certains Cercopithécidés, où il contribue à la formation d'un museau proéminent. La mandibule est raccourcie, entraînant une diminution de la longueur du palais, et sa branche verticale augmente progressivement de hauteur.

Le sternum, étroit chez la majorité des singes, est élargi chez les Anthropomorphes. De manière analogue, le thorax, caréné chez les Plathyrhiniens et les Cercopithécidés, comme chez tous les Mammifères quadrupèdes, s'élargit chez les formes arboricoles spécialisées, comme les singes-araignées et les Anthropomorphes.

En ce qui concerne la musculature, on observe un développement progressif des muscles mimiques, auxquels sont dues la grande mobilité et la grande expressivité de la face.

Le développement progressif de l'encéphale est très important, avec une augmentation surtout en hauteur : le cerveau arrive à recouvrir le cervelet. Le caractère fondamental est le développement important des circonvolutions, encore peu évidentes chez les Hapalidés, qui sont les singes les plus primitifs.

L'odorat a un rôle très secondaire, alors que la vue acquiert un rôle de plus en plus important.

Les yeux, toujours dirigés en avant, sont encore relativement volumineux chez les Platyrhiniens et deviennent plus petits chez les Catarhiniens; les pupilles sont rondes. La rétine est dépourvue de cônes seulement chez les *Aotes* qui ont des mœurs nocturnes. Les pavillons auriculaires diversement développés (le maximum est observé chez les Hapalidés), généralement ovalaires ou quadrangulaires, ne dépassent pas le sommet du crâne. Les dents sont au nombre de 36 ou 32.

Les femelles possèdent seulement deux mamelles pectorales. L'utérus est simple et le placenta discoïdal et décidué.

Les Anthropoïdes sont beaucoup plus grands que les Prosimiens : ils mesurent de 15 cm chez *Cebuella pygmaea*, qui pèse 70 g, à 2,30 m chez le gorille, qui peut peser 275 kg. Essentiellement arboricoles et forestiers, les Anthropoïdes sont distribués dans toute l'aire des Primates, à l'exception de Madagascar.

Le sous-ordre est divisé en deux infra-ordres : les Platyrhiniens, tous américains, avec les familles des Hapalidés, ou Callithricidés, et des Cébidés; les Catarhiniens, de l'Ancien Monde, avec les familles des Cercopithécidés et des Pongidés, ou Anthropomorphes. La dernière famille de Catarhiniens est celle des Hominidés, dont nous ne parlerons pas.

★ *Infra-ordre des Platyrhiniens*

Les Platyrhiniens *(Platyrrhina)* ont pour particularité une cloison nasale large, avec des narines éloignées l'une de l'autre et dirigées en avant. Ces Animaux sont dépourvus de callosités fessières. Ils possèdent 32 ou 36 dents. Tous sont arboricoles et habitent essentiellement les immenses forêts équatoriales d'Amérique.

Les **Hapalidés** *(Hapalidae)*, ou **Callithricidés** *(Callithricidae)* étaient autrefois appelés également Arctopithèques, c'est-à-dire « singes-ours », à cause de la forme de leurs ongles. Ils constituent la première et la plus archaïque famille des Platyrhiniens. Ce sont les plus petits singes existants : ils mesurent de 15 à 37 cm de long, pour un poids de 70 à 900 g. Leur fourrure est épaisse, à longs poils, surtout à la tête, laquelle porte souvent une sorte de crinière ou des touffes de poils. La livrée est tantôt sobre, tantôt très colorée, conférant à certains de ces petits singes un aspect bien particulier; la fourrure est souvent très belle et d'aspect soyeux. La queue, longue de 15 à 42 cm, n'est jamais préhensile et toujours très velue.

La tête, plus ou moins ronde, porte des oreilles plus développées que chez les autres singes. Le corps est assez allongé. Les pattes sont bien développées, les postérieures étant plus longues que les antérieures. Les mains et les pieds ont une conformation qui diffère sensiblement de celles des autres singes : aux mains, les pouces, plus courts que les autres doigts, leur sont accolés et ne peuvent effectuer de mouvements indépendants; il existe parfois aussi une membrane interdigitale, diversement développée (par exemple, chez *Leontocebus*). Les pieds sont très longs et possèdent quatre doigts à peu près identiques, et un gros orteil, petit, nettement divergent et opposable. Tous les doigts sont pourvus d'ongles en griffes semblables à celles des écureuils, sauf le gros orteil, qui possède un ongle plat.

La formule dentaire est: $\left(I\frac{2}{2}; C\frac{1}{1}; Pm\frac{3}{3}; M\frac{2}{2}\right) \times 2 = 32.$

Callimico fait exception, avec 36 dents (il possède 3 molaires au lieu de 2 par demi-mâchoire). Chez les autres Hapalidés, on observe de toute façon une tendance à la réduction de la deuxième molaire.

Les Hapalidés diffèrent des Cébidés par un certain nombre de caractères primitifs. Excepté ceux qui concernent les membres, nous citerons la structure archaïque du cerveau, de type lissencéphale (bien que celui-ci soit de volume fort considérable par rapport à la minuscule taille de ces Animaux), ainsi que divers caractères concernant la reproduction et le développement embryonnaire. En outre, la structure du crâne, de la colonne vertébrale et de certains éléments de la musculature présente de lointaines affinités avec celle des Tarsioïdes, dont cette lignée de Platyrhiniens semble tirer son origine à partir de formes du Paléocène.

Visage - Jacana

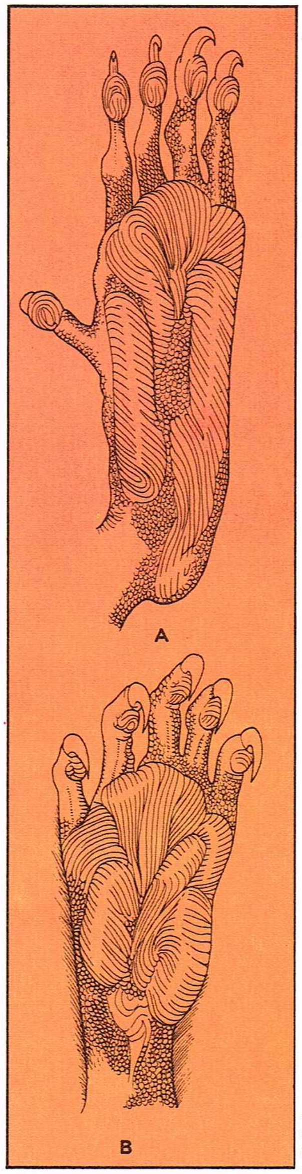

I.G.D.A.

◀ ***A gauche,* Hapale jacchus, *le ouistiti commun ou marmouset, habite la partie la plus orientale du Brésil, à moins de 500 km de la côte; c'est un singe qui se déplace avec l'agilité d'un écureuil et qui émet sans cesse une sorte de caquetage.***
A droite, représentation schématique du pied (A) et de la main (B) de ce même Hapalidé.

Uniquement diurnes, les Hapalidés sont parfaitement adaptés à la vie arboricole. Leur façon de grimper, différente de celle des autres singes, ressemble plutôt à celle des écureuils ou des chats : ils s'agrippent aux troncs grâce à leurs griffes courbes. Ils sont très agiles et très actifs; leurs mouvements sont rapides et subits.

Les mouvements des globes oculaires, très limités, sont compensés par la grande capacité de rotation de la tête. La gamme d'expressions faciales se limite essentiellement à des mouvements de lèvres ainsi qu'à des battements de paupières. Les mouvements des oreilles sont également remarquables. Les Hapalidés ont un répertoire de cris assez variés, qui leur permet de manifester des états émotifs particuliers selon les circonstances. Leurs sens sont très fins, en particulier la vue et l'ouïe; leur odorat semble aussi très développé.

Les Hapalidés vivent par petits groupes ou par noyaux familiaux. Ils se nourrissent principalement d'Insectes, d'Arachnides et de larves; il leur arrive aussi de capturer de petits Oiseaux, qu'ils tuent en les mordant à la tête, et dont ils mangent également les œufs. Leur régime comprend aussi une certaine proportion de matières végétales, fruits et graines; certaines espèces sont principalement phytophages *(Oedipomidas spixi)*. Quand ils mangent, les Hapalidés se servent de leurs mains pour prendre et tenir leur nourriture, et, dans une moindre mesure, pour la porter à la bouche. Ces Animaux nettoient soigneusement et longuement leur corps, moins cependant que d'autres singes et que les Prosimiens; ils nettoient leur queue en la faisant passer dans leurs mains comme les lémuriens.

On connaît mal le cycle menstruel des femelles. Après une gestation de 130 à 150 jours, celles-ci mettent au monde de 1 à 3 petits; il en survit généralement 1 seul, ou au maximum 2 (s'il y en avait 3); le second ou le troisième meurt, soit par manque de soins, soit qu'il est tué par la mère.

Selon A. Schultz, 78 % des naissances sont gémellaires, 17 % unipares et 5 % triplées. Chez les femelles gravides d'*Oedipomidas spixi*, Wisloecki a observé, respectivement, 87,5 %, 7,5 %, et 5 %. A la naissance, les petits, qui ont les yeux ouverts, ne ressemblent pas du tout aux adultes, mais plutôt, comme le font remarquer Cabrera et Yepes, à des Cébidés en miniature, car ils sont dépourvus des touffes de poils caractéristiques qu'ils auront plus tard et présentent une livrée uniforme.

Le comportement reproducteur des Hapalidés est fort intéressant. Chez *Hapale jacchus,* par exemple, après une gestation de 140 à 150 jours, la femelle se prépare à mettre bas dans un nid fait de toutes sortes de matériaux. A l'approche de la mise bas, la femelle devient plus dolente et réclame constamment les soins du mâle, lequel se montre très attentionné vis-à-vis d'elle. Le père assiste à la mise bas et prend grand soin du petit, qu'il tient et nettoie. Dès la naissance ou, tout au plus, au bout de 2 à 3 jours, le petit va sur le dos du père, qui le transporte toujours, ne le confiant à la mère que pour l'allaitement. Enfin le père (qui est remplacé par un autre

E.P.S.

▲ *Groupe de trois tamarins labiés* (Tamarinus mystax), *espèce répandue en haute Amazonie.*

mâle, jamais par une femelle, quand il vient à disparaître) corrige le petit lorsque celui-ci fait des bêtises, en lui donnant des coups et en lui tirant les poils.

Le transport par le père dure de 6 à 7 semaines, mais à 3 semaines, le petit peut déjà se déplacer un peu tout seul, jouant et sautant, et commençant dès la deuxième semaine à manger des nourritures solides mais tendres. L'allaitement se prolonge pendant 2 mois ; passé cette période, le petit se déplace seul, mais se réfugie encore sur le dos du père en cas de danger. On observera, encore, la curieuse habitude qu'a le père de donner à son petit de la nourriture déjà mastiquée. La maturité sexuelle est atteinte entre 12 et 15 mois ; en captivité, certains ouistitis vivent plus de 16 ans.

Les Hapalidés habitent les forêts tropicales d'Amérique centrale et d'Amérique du Sud, de l'isthme de Panama jusqu'au sud-est du Brésil. L'espèce la plus septentrionale est le tamarin pinché, l'unique espèce d'Amérique centrale. En Amérique du Sud, les Hapalidés occupent une vaste aire, couvrant la grande forêt amazonienne, depuis les côtes atlantiques des Guyanes et du Brésil, jusqu'aux contreforts de la cordillère des Andes, en Colombie, en Équateur, au Pérou et en Bolivie. C'est seulement en Colombie et dans une grande partie de l'Équateur que les Hapalidés habitent aussi à l'ouest des Andes *(Tamarinus* et *Oedipomidas).* On rencontre certaines espèces dans les buissons ou dans la végétation herbacée haute ; c'est le cas pour le ouistiti argenté au Mato-Grosso.

Les Hapalidés forment un groupe très homogène (sauf le genre *Callimico)* et d'aspect typique, contrairement, par exemple, aux Cébidés, beaucoup plus variables d'aspect et de mœurs. Ils sont divisés en deux sous-familles : les Hapalinés, ou Callithricinés, dont les caractères sont ceux que nous venons de décrire ; et les Callimiconinés, qui diffèrent principalement par la possession de 36 dents et sont représentés par une unique espèce, le callimico de Goeldi. Au total, la famille compte neuf genres et trente-six espèces, pour la classification desquelles nous suivrons le traité de W. C. Osman Hill, sauf en ce qui concerne le genre *Callimico,* que nous considérerons comme formant une sous-famille distincte.

La sous-famille des *Hapalinés,* ou *Callithricinés,* comprend huit genres : *Tamarin, Tamarinus, Marikina, Oedipomidas, Leontocebus, Mico, Hapale* et *Cebuella.* Les quatre premiers comptent les nombreuses espèces de tamarins (au sens large), et les quatre autres les ouistitis et formes proches (« titis » et « marmousets » au sens strict). Signalons que de nombreux auteurs adoptent une autre systématique : les Hapalidés prennent le nom de Callithricidés et les genres sont alors les suivants: *Callithrix (Hapale* et *Mico) Leontideus (Leontocebus), Saguinus* (incluant et remplaçant *Tamarin, Tamarinus, Marikina* et *Oedipomidas*), *Cebuella* et *Callimico ;* le nombre des espèces est également réduit.

Les tamarins diffèrent des autres Hapalidés par divers caractères, dont les oreilles plus grandes et les incisives inférieures plus courtes. Plusieurs espèces ont de longs poils sur la tête, formant une houppe qui couvre partiellement le cou, ainsi que sur les lèvres, qui sont ornées de moustaches. Ils vivent, de préférence, dans les forêts proches des cours d'eau, par petits groupes, rarement de plus de six individus. Il n'est pas rare d'en rencontrer à l'état libre ou semi-domestique dans les cases des Indiens, qui leur donnent de la nourriture en échange du précieux service que ces Primates leur rendent en chassant les Insectes et autres petits Animaux indésirables.

Le genre *Tamarin* comprend les tamarins à face noire, caractérisés par une face dépourvue de poils blancs et de zones dépigmentées. Il en existe trois espèces, dont les deux principales sont *T. tamarin,* le tamarin noir, et *T. midas,* le tamarin aux mains rousses, très proches l'une de l'autre ; en fait, il est possible qu'elles forment, avec la troisième, *T. inustus,* une espèce unique.

T. tamarin, qui a 23 cm de long et une queue de 40 cm, possède une fourrure noir brillant, avec quelques bandes transversales jaunâtres mal définies à la partie postérieure du dos. Il vit surtout dans la partie aval de l'Amazone, à l'est du Rio Xingu, et, au-delà, à l'est du Rio Tocantins, dans l'État de Para, au Brésil. Il tolère bien la présence de l'homme, et on peut le rencontrer dans les faubourgs de grandes villes comme Belem.

T. midas a des stries foncées sur la croupe, des mains et des pieds ocre rouge ou cannelle. Sa queue est plus longue que celle de *T. tamarin.* Il habite des Guyanes jusqu'au cours inférieur de l'Amazone. On le rencontre aussi dans l'île de Marajo, à l'embouchure de l'Amazone. *T. inustus* habite le centre de l'Amazonie.

Le genre *Tamarinus* compte treize espèces de tamarins, de petite taille, à corps plus fin que celui des précédents, et caractérisés, entre autres, par la présence de zones dépigmentées ainsi que par des formations de poils blancs autour de la bouche. Leur aire de répartition, plus vaste que celle du genre *Tamarin*, comprend aussi la haute Amazonie, de la Colombie au nord jusqu'à la Bolivie et une partie du Pérou oriental au sud. C'est uniquement en Colombie qu'il existe aussi sur le versant occidental des Andes.

T. illigeri, le tamarin d'Illiger, présente, sur le dos et sur les flancs, des teintes allant du roux foncé au noirâtre. Sa tête est noir brillant, de même que sa gorge, la partie interne de ses bras, ses mains, ses pieds et sa queue ; ses épaules, la partie externe de ses bras et ses membres postérieurs sont roux vif, de même que la poitrine et le

▼ **Tamarinus imperator,** *qui porte de longs poils blancs, en forme de moustaches, autour de la bouche, est l'espèce d'Hapaliné la plus connue.*

E.P.S.

ventre. Autour de sa bouche se trouvent des poils blancs touffus. Long de 22 cm, plus 35 cm pour la queue, il vit en Colombie et au Pérou.

T. pileatus, le tamarin à tête rousse, a le dessus de la tête roux cannelle vif, contrastant avec le corps noir et grisâtre, à l'exception de la zone de poils blancs entourant la bouche. Il habite la haute Amazonie.

T. mystax, le tamarin labié, a la face semblable à celle du précédent. Il est très répandu en haute Amazonie. Il est caractérisé par une large zone blanche autour de la bouche et du nez et vers les yeux.

T. imperator, le tamarin empereur, qui porte autour de la bouche de très longs poils blancs formant deux longues moustaches, est l'espèce la plus connue. Sa tête est grise et les parties inférieures de son corps sont roussâtres, contrastant avec les épaules, le dos et les flancs, couverts de longs poils gris; les mains et les pieds sont noirs. Cet Animal atteint 30 cm de long, avec une queue de 40 cm environ. Il habite la haute Amazonie, dans la région brésilienne proche de la Bolivie septentrionale. Citons encore : *T. nigricollis*, le tamarin à cou noir, du Pérou; *T. weddelli*, le tamarin de Weddell, du nord de la Bolivie et de l'ouest du Brésil; *T. fuscicollis*, le tamarin à cou brun de la haute Amazonie; *T. tripartitus* et *T. graelsi*, qui vivent dans les forêts, le long du Rio Napo, en Équateur et au Pérou, le premier sur la rive droite, le second sur la rive gauche; *T. pluto* de l'aval du Rio Purus; *T. labiatus* et *T. melanoleucus*, de la haute Amazonie; *T. leucopus*, de la côte pacifique de la Colombie.

Le genre *Marikina*, très proche, que certains auteurs incluent dans le genre *Tamarinus*, compte deux espèces : *M. bicolor* et *M. martinsi*, distribuées sur une vaste superficie, du côté de la rive gauche de l'Amazone, entre le Rio Negro à l'ouest et le Rio Paru à l'est. *M. bicolor*, le tamarin bicolore, long d'environ 30 cm, avec une queue de 35 à 40 cm, a le front et une partie de la tête nus et noirs, la nuque ornée d'une petite crinière de poils blancs, le dos et les membres postérieurs gris foncé, et le ventre rouille.

Le genre *Oedipomidas* est caractérisé par de longues touffes, qui ornent la partie antérieure de la tête, et par les oreilles plus petites que celles des autres tamarins. Il en existe seulement deux espèces : *O. oedipus* et *O. spixi*.

O. oedipus, le tamarin pinché, est le plus caractéristique : long de 25 cm, avec une queue de 40 cm, il porte une crinière blanche, allant du front à la nuque et aux côtés de la tête. Sa face et son front, nus et noirs, portent de nombreuses rides; les parties inférieures du corps et des bras sont blanches; le dos et les flancs sont gris. *O. spixi*, le tamarin de Geoffroy, diffère de l'espèce précédente par l'absence de crinière, remplacée par des touffes de poils blancs plus courts.

Ces deux tamarins occupent l'extrême nord de l'aire des Hapalidés, de l'est de Panama jusqu'au nord de la Colombie (avec pour limite le Rio Magdalena). Leurs mœurs sont peu connues : on sait qu'ils vivent dans les forêts de montagne jusqu'à 700 m d'altitude, par petits groupes de six têtes au maximum. Ils courent et sautent dans les branches avec une grande agilité, faisant entendre une sorte de ramage quelque peu semblable à celui des Gallinacés. Ils sont parmi les plus rares Hapalidés.

Le genre *Leontocebus* comprend les tamarins à crinière, dont l'aspect rappelle celui du lion; ils possèdent une crinière sur la nuque et les côtés de la tête. La ressemblance est encore plus nette chez la principale espèce, le tamarin rosalia, dont la fourrure est entièrement fauve. Ces singes constituent une sorte de transition entre les tamarins proprement dits et les ouistitis. Leurs mains et leurs pieds, caractéristiques, sont longs et étroits; en outre, il existe une membrane interdigitale entre le deuxième et le troisième, et surtout entre le troisième et le quatrième doigt. Du fait de la conformation particulière de leurs extrémités, ces Animaux sont plus adaptés au saut que les autres Hapalidés.

On en connaît trois espèces, confinées aux zones côtières du Brésil méridional : *L. rosalia*, le tamarin rosalia, long de 25 cm et d'une belle couleur jaune doré; *L. chrysomelas*, le tamarin à crinière dorée; et *L. chrysopygus*, le marikina à queue jaune. Le tamarin rosalia vit dans les forêts de la Serra do Mar, dans l'État de Rio de Janeiro, entre 500 et 1 000 m d'altitude. Il se nourrit non seulement d'Insectes et de fruits, mais aussi de petits Sauriens comme les *Anolis*.

T. Okapia

◄ **Oedipomidas oedipus**, *le tamarin pinché, est le plus caractéristique avec sa crinière blanche, et l'un des plus rares Hapalidés.*

▼ **Leontocebus rosalia** *est, du fait de la conformation caractéristique de ses mains et de ses pieds, plus adapté au saut que les autres espèces de la famille.*

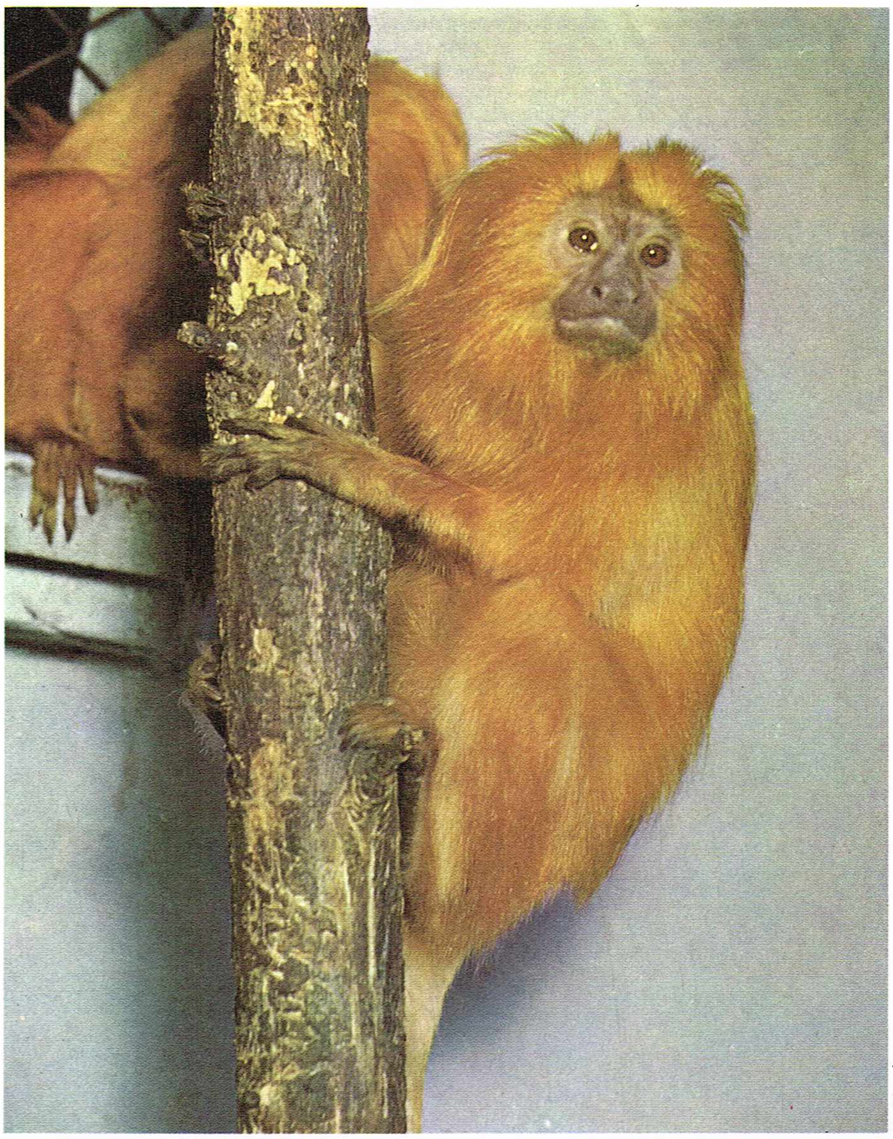

T. Okapia

Le genre *Mico* ne compte qu'une seule espèce, que nombre d'auteurs considèrent comme faisant partie d'un simple sous-genre d'*Hapale : M. argentatus,* ou *Hapale argentata,* le ouistiti argenté ; cette espèce est divisée en plusieurs sous-espèces, assez variables. Assez semblable aux ouistitis communs, *Mico* en diffère à première vue par sa fourrure blanc brillant, soyeuse et à reflets argentés, contrastant avec sa longue queue noire. Sa face est nue et roussâtre. Ses oreilles sont également nues. C'est un Animal très silencieux, ce qui le fait souvent passer inaperçu. Il vit par petites troupes de huit à douze individus, parfois même plus, sur les arbres ou dans les buissons, préférant souvent la végétation basse. Il est distribué dans le sud de l'Amazonie jusqu'au Mato Grosso, avec pour limite occidentale le Rio Tapajos et pour limite orientale le Rio Xingu. Il est facile à domestiquer.

Le genre *Hapale* est, avec le genre *Tamarinus,* celui qui comprend le plus d'espèces. Il est le type de la famille. Il s'agit, en effet, des ouistitis proprement dits, qui, dans la classification suivie ici, sont répartis en dix espèces (certaines sont peut-être simplement des sous-espèces, la systématique étant encore peu claire). On les appelle aussi *Callithrix*.

Leur fourrure est douce, formée de longs poils serrés et de couleur généralement claire ; les oreilles sont couvertes de longues touffes de poils, lesquelles, chez certaines espèces, forment des éventails sur les côtés de la tête ; la queue est toujours plus ou moins annelée. Les incisives supérieures médianes sont plus larges que les latérales et les inférieures sont très longues. Enfin, le caractère particulier de ce genre est la présence, dans la région inguinale, d'un grand nombre de glandes qui sécrètent une substance odorante.

Les mœurs de ces singes sont mieux étudiées que celles des autres genres d'Hapalidés, notamment parce que ce sont les Platyrhiniens les plus anciennement connus. Ils vivent dans les forêts par petits groupes ou par couples, se tenant presque toujours sur les arbres, dans les branches desquels ils se déplacent avec l'agilité d'écureuils : ils se servent de leur queue comme balancier, ou pour s'y appuyer brièvement lorsqu'ils prennent une position semi-dressée. Ils émettent sans cesse une sorte de caquetage qui ressemble un peu à celui de certains Oiseaux. Leur distribution géographique couvre seulement l'est et le sud-est du Brésil ; en Argentine, aucune espèce n'est indigène.

▼ **Cebuella pygmaea,** *le ouistiti mignon, est le plus petit singe du monde et l'un des plus petits Primates existants ; strictement arboricole, très agile et très vif, il vit dans les forêts de la haute Amazonie.*

A. Monza - Jacana

Hapale jacchus, le ouistiti commun, ou marmouset, est le type. Il mesure environ 22 cm, avec une queue de 30 cm ; sa fourrure est gris noirâtre, avec une série de bandes gris jaunâtre, très confuses, et sa queue est annelée. Ses oreilles sont entourées d'une touffe de poils blanchâtres, qui se terminent parfois par une pointe foncée. On observe assez fréquemment des cas d'albinisme, ainsi que chez d'autres espèces du genre. Ce ouistiti habite la partie la plus orientale du Brésil, de l'état de Para au nord jusqu'à celui de Bahia au sud, et on ne le rencontre généralement pas au-delà de 400 à 500 km de la côte.

H. chrysoleucos, le ouistiti blanc et doré, qui vit au cœur de l'Amazonie, sur la rive droite du cours inférieur du Rio Madeira, présente une fourrure blanc brillant, à l'exception du ventre, de la queue et des pattes, qui sont roux doré. Ses oreilles sont couvertes de longs poils blancs.

H. aurita, le ouistiti à pinceaux blancs, a la face et le front blancs, avec, devant chaque oreille, une belle touffe également blanche. Son dos est noir roussâtre. Ses mains et ses pieds sont roussâtres, et la partie inférieure de son corps est noire. On le rencontre dans l'État de São Paulo.

H. penicillata, le ouistiti à pinceaux noirs, porte de longs poils noirs aux oreilles. Il habite le sud-est du Brésil. Très proche du ouistiti commun et fort semblable, il ne s'hybride pas avec celui-ci lorsqu'il est en liberté ; mais ce phénomène a été constaté dans les zoos.

H. leucocephala, le ouistiti à tête blanche, ou de Geoffroy, habite l'État d'Espirito Santo, dans l'est du Brésil. Il a la partie antérieure de la tête, la face, la gorge et une partie de la poitrine entièrement blanches, et porte de longues touffes noires devant les oreilles.

Les autres espèces d'*Hapale* sont : *H. flaviceps,* du nord-est du Brésil ; *H. santaremensis,* répandu sur la rive gauche du Rio Tapajos ; *H. petronius,* de l'est du Minas Gerais ; enfin *H. humeralifer* et *H. albicollis,* de l'État de Bahia.

Le dernier genre, *Cebuella*, comprend une seule espèce : *C. pygmaea,* le ouistiti mignon. C'est le plus petit singe du monde et l'un des plus petits Primates existants : sa longueur totale est d'environ 15 cm ; l'adulte pèse 70 g. On l'a longtemps confondu avec un juvénile d'une autre espèce. Sa tête et son cou sont couverts de longs poils touffus, brun foncé avec des nuances allant du gris au chamois ; ses oreilles sont couvertes par le pelage ; son dos est gris foncé mêlé de fauve, avec des teintes verdâtres ; les parties inférieures sont orangées, ainsi que les mains, les pieds et la queue, laquelle, longue de 15 à 20 cm, est annelée de noir et de fauve. Outre sa taille, ses caractères distinctifs sont l'absence de touffes de poils aux oreilles et ses yeux en amande. Strictement arboricole, le ouistiti mignon est très agile, vif et jamais au repos. Il vit dans les forêts de la haute Amazonie, en particulier dans les régions limitrophes du Brésil et de la Colombie, ainsi que du Brésil et du Pérou.

La sous-famille des *Callimiconinés* comprend un seul genre, *Callimico*, avec pour unique espèce *C. goeldii,* le tamarin de Goeldi, espèce rare de la haute Amazonie, dont l'aire s'étend sur l'ouest du Brésil, l'est du Pérou et le nord de la Bolivie. Découvert seulement au début du siècle, il est très intéressant car il possède de nombreux caractères intermédiaires entre les Hapalidés et les Cébidés. Il a l'aspect et la taille d'un tamarin, les mains et les pieds d'un Hapalidé, mais certains caractères crâniens et dentaires (il possède 36 dents) des Cébidés. Certains zoologues le rangent chez les Hapalidés, d'autres chez les Cébidés, d'autres, enfin, font une famille distincte. Il mesure 20 cm de long, avec une queue de 30 à 32 cm ; sa livrée est gris foncé, ses pattes, son ventre et sa queue étant noirs. Son pelage est plus long sur la tête et le cou mais ne forme pas de véritable crinière.

Ses mœurs et sa distribution exacte sont inconnues. Il semble former des bandes de vingt à trente individus (selon Walker), dans les étages moyens et inférieurs de la forêt équatoriale. Par suite de l'importante demande des jardins zoologiques et des importateurs d'Animaux, ce singe risque de devenir très rare.

A. Margiocco

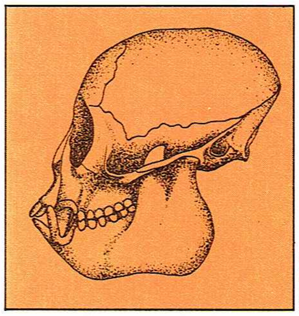

I.G.D.A.

▲ *A gauche,* **Aotes trivirgatus,** ***le dourouculi ou singe de nuit, est l'unique singe nocturne; il vit dans les forêts, du niveau de la mer jusqu'à plus de 2 000 m d'altitude. A droite, représentation schématique d'un crâne de Cébidé.***

Les **Cébidés** *(Cebidae)* sont beaucoup plus variés, nombreux et intéressants que les Hapalidés. Dans l'ensemble, ces Primates ont un niveau évolutif supérieur à celui de la famille précédente, ce qui se manifeste dans leur éthologie. Leur taille varie de 20 à 90 cm environ, et leur poids de 600 g à 9 kg; ils sont donc plus robustes que les Hapalidés, mais sont généralement plus petits que la majeure partie des Catarhiniens.

Leur corps est généralement allongé, les pattes postérieures étant un peu plus longues que les antérieures. Le tronc est raccourci chez les Alouattinés (singes hurleurs) et encore plus chez les Atélinés, ce qui est en rapport avec le type de locomotion suspendue qu'ils ont adopté; celle-ci entraîne, par ailleurs, chez les Atélinés, un allongement des membres antérieurs, lesquels peuvent alors dépasser en longueur les postérieurs.

La queue est toujours bien développée, et velue, sauf chez *Cacajao;* elle est aussi longue que le corps, et souvent même plus. Chez les Alouattinés et les Atélinés, elle est préhensile et s'enroule très fortement par sa face ventrale autour des branches, ce qui lui permet de soutenir facilement le poids de l'Animal. Chez les deux sous-familles, la queue est également dotée d'une grande sensibilité, car elle est pourvue de papilles tactiles à la partie terminale, nue, de la face ventrale : elle constitue, de ce fait, une véritable cinquième main. Dans la sous-famille des Cébinés, la queue peut s'enrouler plus ou moins en volute, mais elle n'est pas préhensile, sauf chez le sajou capucin.

Les mains et les pieds sont normalement conformés. Le gros orteil est opposable, alors que le pouce, réduit et parfois atrophié (chez les Atélinés), effectue seulement des mouvements d'adduction et d'abduction. Les ongles sont plats, diversement carénés, mais jamais en forme de griffes.

La fourrure, touffue, parfois d'aspect laineux, présente essentiellement des teintes brun noirâtre; il existe une certaine variabilité selon les sexes (par exemple, chez *Pithecia*) et l'âge, avec un maximum de différenciation chez les adultes mâles. Aucun Cébidé ne possède d'abajoues ni de callosités fessières.

La formule dentaire est :

$$\left(\mathrm{I}\ \frac{2}{2};\ \mathrm{C}\ \frac{1}{1};\ \mathrm{Pm}\ \frac{3}{3};\ \mathrm{M}\ \frac{3}{3}\right) \times 2 = 36,$$

avec une certaine tendance à l'atrophie de la troisième molaire : cette dernière est réduite chez *Aotes* et absente chez *Ateles*.

Les orbites sont amples et dirigées en avant et les yeux sont protégés par des paupières bien développées; les yeux sont grands seulement chez *Aotes,* et la rétine ne possède que des bâtonnets, caractère lié à la vie nocturne; chez tous les autres genres, les yeux sont normalement conformés, avec une rétine typique à cônes et à bâtonnets, adaptée à la vision diurne.

Parfaitement adaptés à la vie arboricole, pour laquelle certains genres ont acquis un haut degré de spécialisation (par exemple, les singes-araignées et tous ceux qui ont la queue préhensile), les Cébidés vivent dans les

forêts, se tenant sur les arbres et ne descendant guère à terre que pour boire. Ils sont très agiles, courant et sautant de branche en branche et se lançant d'un arbre à l'autre; certaines espèces, cependant, sont moins rapides et plus prudentes dans leurs mouvements. En tout cas, ces Platyrhiniens effectuent des mouvements plus harmonieux et mieux coordonnés que ceux des Hapalidés. Beaucoup d'espèces vivent par petites bandes, mais l'unité de base reste le groupe familial.

Les Cébidés présentent une riche gamme d'expressions, aussi bien faciales que gestuelles et vocales; les singes hurleurs occupent, à cet égard, la première place parmi les Mammifères.

Si leur régime alimentaire est omnivore, on observe une certaine prédominance frugivore; il ne manque cependant pas d'espèces se nourrissant largement aussi d'Insectes et d'autres petits Animaux. Ils boivent l'eau, non en la lapant, mais en la suçant.

Chez certains genres, on a observé un cycle menstruel défini; la gestation dure de 140 à 180 jours selon les espèces, et les portées sont généralement d'un seul petit. Bien que pouvant être facilement domestiqués, surtout lorsqu'ils sont capturés jeunes, ces singes tolèrent moins bien la captivité que les Catarhiniens.

La distribution géographique des Cébidés qui s'étend sur toute l'aire des Platyrhiniens, est donc plus ample que celle des Hapalidés. La limite septentrionale se trouve à peu près à 23° de latitude nord, dans l'État mexicain de San Luis de Potosi, avec *Ateles geoffroyi vellerosus*, et la limite méridionale se trouve à 27° de latitude sud, avec différentes espèces que l'on trouve jusqu'en Argentine. En Amérique du Sud, l'aire s'étend à l'ouest jusqu'aux régions andines de l'Équateur et du Pérou, atteignant des altitudes de 1 000 à 2 000 m. Les Cébidés sont surtout nombreux en Amazonie, dans les Guyanes et une partie du Venezuela et de la Colombie, où la grande forêt équatoriale est plus favorable à leur existence.

A la différence des Hapalidés, les Cébidés ont une riche typologie, avec des formes et des genres de vie différents. On peut distinguer six sous-familles, qui, selon toute probabilité, représentent des lignées évolutives distinctes, dont certaines, comme les Alouattinés et les Atélinés, ont atteint un haut degré de spécialisation. Ces sous-familles sont les suivantes : les Aotinés, les Callicébinés (ce sont les deux plus primitives), les Pithécinés, les Cébinés, les Alouattinés et les Atélinés. Au total, les Cébidés comptent onze genres et quarante et une espèces, pour la classification desquelles nous suivrons, à quelques légères variantes près, le traité fondamental de W. C. Osman Hill.

La sous-famille des *Aotinés* comprend une seule espèce *Aotes trivirgatus*, le douroucouli, ou singe de nuit. Il présente un ensemble de caractères très archaïques, et, fait unique chez les singes, il est nocturne. C'est pourquoi certains zoologues l'ont comparé aux Prosimiens. Il a la tête ronde, le museau peu proéminent, de grands yeux rapprochés et de petites oreilles cachées sous le poil; sa cloison nasale est étroite, de type semblable à celle des Catarhiniens et ses orbites sont très grandes. Le pouce est très développé et les ongles sont étroits et fortement carénés.

Ce singe, long d'environ 25 à 35 cm, et qui pèse selon les races géographiques de 600 g à 1 kg, est couvert d'une fourrure courte, touffue et laineuse, grise sur le dessus avec des nuances foncées et argentées et ocre ou orangée aux parties inférieures. Sa face porte deux taches blanches supra-orbitaires séparant trois bandes longitudinales foncées. Sa queue, longue de 30 à 40 cm, n'est jamais préhensile.

Strictement nocturnes, les douroucoulis dorment le jour en petits groupes cachés dans des trous d'arbres ou dans le feuillage dense; la nuit, ils chassent par petites troupes : ils se nourrissent essentiellement d'Insectes, d'Arachnides, d'Oiseaux, et de petits Mammifères, mais aussi de feuilles et de fruits. Ils ont une voix très puissante, capable d'émettre toute une gamme de cris, de sifflements, d'aboiements, etc., et amplifiée grâce à l'extensibilité de la trachée et la présence de sacs vocaux.

La femelle met au monde un seul petit par portée (il y a une seule portée par an), qui pèse environ 100 g. Il semble que la longévité de l'espèce soit d'environ 20 ans.

Le douroucouli vit dans les forêts, du niveau de la mer jusqu'à plus de 2 000 m d'altitude; il couvre une aire très vaste, qui s'étend de façon discontinue du Nicaragua au nord-est de l'Argentine, et des Guyanes au Pérou et à l'Équateur; il est absent d'une grande partie du Brésil, au sud de l'Amazone. Il présente une grande variété de sous-espèces et de formes géographiques.

La sous-famille des *Callicébinés*, très primitive, présente certaines affinités avec celle des Aotinés, mais en diffère, notamment, par la conformation platyrhinienne normale de la cloison nasale, ainsi que par l'ampleur moindre des orbites. En outre, la face est plus saillante et les canines, petites, dépassent à peine le niveau des incisives; la troisième molaire est fréquemment rudimentaire.

La tête est petite et ronde; les oreilles, bien développées, sont souvent cachées par le pelage. Le corps est fin et la queue est longue, mais jamais préhensile. La taille varie, selon les espèces, de 24 à 60 cm de long, avec de 26 à 55 cm de queue.

Leur fourrure est constituée de longs poils doux, dont la couleur varie du gris roussâtre au jaunâtre et au brun foncé; elle est plus claire aux parties inférieures. Certaines espèces ont le front orné d'une large bande noire ou blanche, et portent parfois une sorte de collier.

On ne connaît guère les mœurs des Callicébinés. Strictement diurnes et arboricoles, ils vivent par couples, ou par petits groupes composés généralement de cinq ou six individus. Ils fréquentent les arbres, où ils se tiennent au plus haut, ou même des bosquets clairsemés ou de gros buissons. Ils sont omnivores, se nourrissant de fruits, de matières végétales, d'Insectes, et, à l'occasion, d'œufs et de petits Oiseaux. Ils portent leur nourriture à la bouche à l'aide de leurs mains. Certains possèdent une voix très puissante; tous ont une odeur spécifique. Ils effectuent des sauts très rapides. Lorsqu'ils marchent, à quatre pattes, ils ont le dos courbé et ressemblent un peu aux ouistitis. Ils sont très craintifs.

Les Callicébinés comprennent pour seul genre *Callicebus*, distribué dans les régions forestières d'Amérique du Sud, de la Colombie jusqu'au Chaco du Paraguay; ils occupent de très vastes zones de l'Amazonie, en particulier à l'ouest, et deux espèces vivent également dans les forêts côtières du sud-est du Brésil. La systématique du genre n'étant pas définitive, beaucoup de formes décrites sont considérées avec réserve.

C. torquatus, le callicèbe à collier, est l'espèce la plus connue. Il est long d'environ 45 cm; son collier et ses mains sont blancs, contrastant avec la teinte châtain foncé du reste du corps; son front porte une large bande transversale noire; sa queue et une partie des membres antérieurs sont noires. Son aire couvre le Venezuela, au sud de l'Orénoque, les Guyanes et la haute Amazonie. On a décrit une demi-douzaine de formes et de races géographiques.

C. cupreus, le callicèbe roux, a le dos châtain et les parties inférieures roussâtres. Il habite la Colombie et la haute Amazonie. Il compte environ une douzaine de sous-espèces et de races locales.

Les autres espèces amazoniennes sont : *C. ollalae*, *C. moloch*, et *C. cinerescens*. Enfin, les deux dernières espèces existantes occupent le sud de l'aire du genre : il s'agit de *C. gigot*, le chico, très rare, et de *C. personatus*, le callicèbe à masque.

Ce dernier, qui est l'un des plus beaux callicèbes, a la tête noire, la nuque et les épaules blanc jaunâtre, le dos gris ou roussâtre, les mains et les pieds noirs. Il habite les forêts côtières du sud-est du Brésil.

Les représentants de la sous-famille des *Pithécinés* sont caractérisés par une fourrure très touffue, formée de longs poils souvent très rudes. Ces singes ont la tête ronde, avec des yeux rapprochés. Leur queue n'est pas préhensile. Leurs incisives, situées obliquement, sont saillantes; elles sont séparées des canines, de grande taille, par une large diastème. La cloison nasale est très large. Ces Cébidés ont un aspect étrange. Il en existe trois genres : *Pithecia*, *Chiropotes* et *Cacajao*, avec au total neuf espèces.

Le genre *Pithecia* comprend les sakis proprement dits, avec deux espèces : *P. monachus*, le saki moine, et *P. pithecia*, le saki à tête blanche. Ces singes possèdent une fourrure très touffue qui couvre abondamment la queue. Sur la nuque, les poils sont répartis à peu près comme si on les avait peignés pour partie en avant et sur les côtés de la tête, couvrant le front et les joues, et pour partie en arrière. La face est couverte de poils courts et

T. Okapia

A. Margiocco

clairsemés; la gorge est nue. Les sakis ont de 30 à 70 cm de long, plus 25 à 50 cm pour la queue; les adultes pèsent de 700 g à plus de 1,5 kg.

Les sakis habitent les forêts, entre 200 et 800 m d'altitude, et sont essentiellement arboricoles, bien qu'ils descendent parfois à la recherche de nourriture dans les branches les plus basses et dans les buissons. De caractère doux, ils vivent soit solitairement, soit, le plus souvent, en groupes comptant jusqu'à une douzaine de têtes. Ils sont difficiles à observer, à cause de leur fourrure mimétique; ces Animaux sont très actifs, et, quand ils pressentent un danger, ils fuient très rapidement; ils peuvent à l'occasion effectuer de grands sauts et même marcher en position dressée sur des branches horizontales, les mains en l'air et en file indienne. Ils se nourrissent essentiellement de fruits, de feuilles et de fleurs, mais capturent souvent de petits Oiseaux et Mammifères, qu'ils tuent et lacèrent avec leurs mains avant de les manger. Ils ont une voix très pénétrante, sorte de gémissement ou de lamentation. En captivité, ces singes sont très dociles et même affectueux.

P. monachus, le saki moine, présente une livrée noire mêlée de jaunâtre plus ou moins foncé; sa poitrine et son ventre ne portent pas de poils mais sont recouverts par une longue fourrure qui tombe des côtés du corps. Les mains et les pieds sont blanchâtres. De nombreux individus, surtout des femelles, ont les côtés de la tête et une partie du corps blanc sale. Le saki moine vit dans les Guyanes et dans une grande partie de l'Amazonie centro-méridionale.

P. pithecia, le saki à tête blanche, est plus petit et présente un net dimorphisme sexuel : les mâles ont la tête blanche, contrastant avec le reste du corps, qui est noir, et les femelles ont la tête et le corps grisâtres. Ils habitent les Guyanes ainsi qu'une zone très limitée de l'Amazonie centrale, au nord de l'Amazone.

Les *Chiropotes,* ou sakis barbus, très proches des précédents, ont une fourrure moins touffue; tout leur corps est couvert d'un poil généralement noir, qui forme sur la tête une sorte de béret, et sous le menton une longue barbe épaisse. Leur taille varie de 40 à 50 cm environ, avec une queue de même longueur. Ils sont essentiellement frugivores. Il en existe trois espèces : *C. satanas,* le saki noir, ou satanique, de basse Amazonie; *C. chiropotes,* le saki capucin, largement répandu entre l'Orénoque et la rive gauche de l'Amazone; *C. albinasa,* le saki à nez blanc, qui vit dans l'État de Para au Brésil.

Les *Cacajao,* ou ouakaris, qui comptent quatre espèces, ont pour caractéristique la brièveté de leur queue (15 à 20 cm), presque toujours inférieure au tiers de la longueur totale (environ 55 cm); leur corps est plus robuste que celui des sakis. La partie supérieure de la tête, la face et les joues nues sont souvent de couleur rougeâtre et peuvent devenir écarlates lorsque l'Animal connaît certains états émotifs. Les oreilles sont grandes et assez semblables à celles des humains. Ces singes arboricoles et uniquement végétariens fréquentent, par petites bandes, les parties les plus élevées des grands arbres et descendent rarement à terre. Ils marchent rapidement mais ne sautent pas. Très craintifs et calmes, ils ont une expression mélancolique. Ils supportent mal la captivité, comme généralement tous les Pithécinés, et y vivent peu de temps. Les ouakaris, toujours très rares, vivent surtout en haute Amazonie.

C. calvus, le ouakari chauve, a une livrée gris jaunâtre clair, et châtain clair sur les côtés de la tête, la gorge et la poitrine.

C. rubicundus, le ouakari rubicond, de livrée ocre rouge vif, a le haut du front couvert de petits poils gris.

▲ ***Les sakis, dont on voit deux spécimens ici* (Pithecia sp.), *sont caractérisés par une fourrure très touffue qui couvre abondamment la queue; ces singes sont essentiellement arboricoles; en captivité, ils sont très dociles et même affectueux.***

▼ **Cacajao rubicundus, *le ouakari rubicond, est une espèce très rare, qui vit surtout en haute Amazonie.***

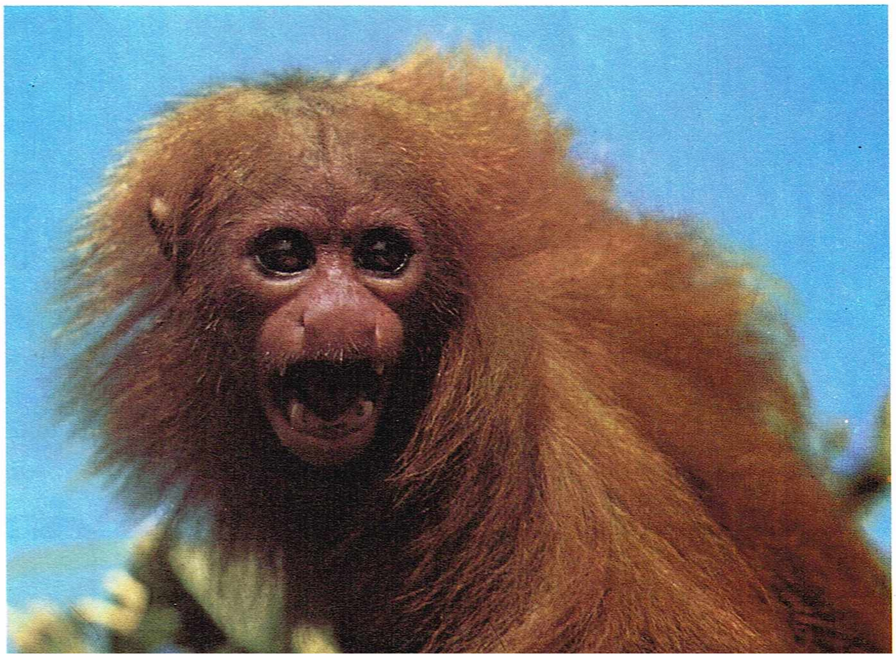

T. Okapia

▶ ***Les sajous, ici* Cebus sp., *sont très intelligents et ont une riche gamme d'expressions.***

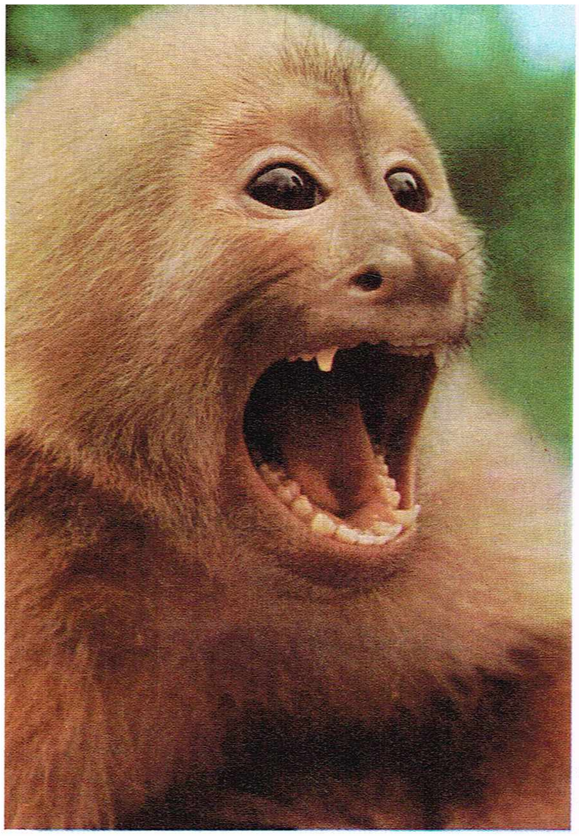

D. Faulkner

C. melanocephalus, le ouakari à tête noire, diffère des deux précédents par la couleur noire de la partie antérieure de son corps, de sa tête et de ses membres; la partie postérieure de sa croupe est grise; ses hanches, ses cuisses et une partie de sa queue sont châtain. Il habite les forêts baignées par le Rio Negro, entre le Cassiquiare et le Rio Branco.

C. roosevelti est une espèce rare, confinée aux forêts de l'amont du Gy-Parana, dans le nord du Mato-Grosso; il est entièrement noir, sauf la face, qui est rose et partiellement couverte de courts poils blanchâtres.

La sous-famille des *Cébinés* comprend les singes les plus communs du Nouveau Monde; très vifs, ils rappellent par leurs mœurs les singes de l'Ancien Monde. Il existe deux genres et neuf espèces, avec un nombre très élevé de sous-espèces et de races géographiques.

Les caractères particuliers de la famille sont : l'allongement du crâne, surtout vers la base, dans la région occipitale; le développement considérable des canines (lesquelles font saillie hors des lèvres chez les mâles de *Cebus*); enfin, la position verticale des incisives. La queue est très longue; chez les sajous, elle est partiellement préhensile.

Les *Saimiri,* appelés singes-écureuils, ou saïmiris, sont les plus petits Cébidés; ils mesurent de 26 à 36 cm de long, et leur queue varie de 35 à 40 cm. Ils ont la tête à profil ovale caractéristique, et le corps couvert d'un pelage court, touffu et doux, de couleur très vive. Leurs oreilles sont très développées et presque toujours ornées d'une touffe de poils. Leurs yeux sont grands et très rapprochés. Le volume du cerveau est considérable : son rapport pondéral avec le corps est le plus élevé qu'on puisse observer chez les Mammifères (de 1/7 à 1/22), y compris l'homme (1/35); toutefois sa structure est archaïque, et l'intelligence est peu développée.

En général, ces singes présentent autour de la bouche et des narines une tache sombre, contrastant avec le blanc d'une grande partie de la face, des oreilles, de la gorge et des côtés du cou; le dessus de la tête est noir ou grisâtre. Le dos, les pattes antérieures, les mains et les pieds sont rougeâtres ou jaunes, parfois teintés de gris, alors que les parties inférieures sont blanchâtres ou ocre clair. La queue est de la couleur du corps, sauf l'extrémité qui est noire.

Très actifs et grégaires, les saïmiris vivent presque toujours sur les arbres, et forment des bandes comptant de douze à cent individus. Leur régime est largement omnivore. Bien qu'ils aient une voix puissante, ils sont généralement peu bruyants. Ils sont extrêmement propres. Ils supportent très bien la captivité. Dans des conditions favorables, ils peuvent vivre jusqu'à l'âge de 20 ans.

Les saïmiris sont distribués du Costa Rica au nord-ouest du Brésil et à la Bolivie; ils comprennent d'innombrables formes, qui ont été groupées provisoirement par Hill en cinq espèces. Walker admet seulement deux espèces : *S. oerstedi,* le saïmiri d'Œrsted, du Costa Rica et de Panama, et *S. sciureus,* le saïmiri sciurin, le plus commun, qui vit en Amérique du Sud.

T. Okapia

▶ ***Le saïmiri sciurin* (Saimiri sciureus), *le plus commun, vit en Amérique du Sud.***

Ostman - J.R. Simon

Le genre *Cebus* comprend les sajous ou sapajous, appelés parfois improprement capucins, nom qui désigne une des espèces seulement. Ce sont les singes d'Amérique les plus connus; ils s'adaptent bien à la vie en captivité. En outre, ce sont les Platyrhiniens qui rappellent le plus par la morphologie et par les mœurs les singes de l'Ancien Monde, en particulier les cercopithèques.

Ils sont de taille moyenne (ils mesurent de 30 à 50 cm de long pour un poids de 1,5 à 4 kg). Leur fourrure, faite de poils plus longs que chez *Saimiri*, présente des teintes très variées (surtout en fonction de l'âge et du sexe), généralement grises, jaune-roux, ou noirâtres. La queue, longue de 40 à 50 cm, présente divers degrés de semi-préhensilité; elle est totalement préhensile chez le sajou capucin, elle peut alors s'enrouler en spirale autour des branches. Elle est nue à la partie terminale ventrale.

Strictement arboricoles et très agiles, les sajous vivent dans les forêts denses, habitant surtout la partie haute des grands arbres et descendant très rarement à terre. Ils font souvent des incursions dans les plantations, cueillant les fruits pour les manger dans la forêt. Ils vivent par troupes très nombreuses, qui comptent parfois plus de quarante individus, chaque groupe ayant un territoire assez bien délimité. Chapman, qui a réalisé des observations fondamentales sur divers Platyrhiniens de l'île de Barro Colorado (zone du canal de Panama), a constaté que les bandes de sajous capucins sont moins grégaires que celles des singes hurleurs : on voit, en effet, fréquemment des individus s'éloignant du groupe, auquel ils sont toutefois reliés par l'intermédiaire d'un cri particulier d'appel.

L'activité de ces singes commence peu avant l'aube, les membres du groupe s'appelant les uns les autres et commençant à se mettre en mouvement. Puis la bande se dirige vers la zone de nourriture, où elle fait un premier repas. Les sajous passent des heures aux occupations les plus diverses : les juvéniles jouent, sautent et grimpent, alors que les adultes font leur toilette ou prennent le soleil. Puis fait suite un deuxième repas, qui n'est pas obligatoire, après lequel les Animaux font une pause lors des heures les plus chaudes. Un troisième repas est consommé au début de l'après-midi. Enfin, le soir, toute la bande se met en route vers l'endroit où elle se reposera durant la nuit. Kuhlhorn a observé que les sajous se mettent toujours en marche dans le même ordre : d'abord les juvéniles des deux sexes, puis les femelles adultes, ensuite les mâles adultes, et enfin les femelles avec des petits. Il semble aussi que ces singes aient des quartiers préférentiels pour le repos nocturne, d'où ils repartent chaque matin pour explorer la forêt environnante.

Les sajous sont très intelligents et ont une riche gamme d'expressions ainsi qu'un grand répertoire de cris. L'une de leurs curieuses habitudes consiste à jeter violemment par terre les objets les plus divers, geste qui rappelle leur façon d'ouvrir les fruits dont la coque est dure.

Les nouveau-nés, qui viennent au monde après une gestation de 6 mois environ, s'accrochent tout de suite aux poils du dos maternel par leurs mains et par leurs pieds, et ne descendent sur le ventre de leur mère que pour y être allaités. La croissance est rapide : à 1 mois, les juvéniles utilisent leurs deux mains simultanément pour examiner les objets; à 6 mois, ils sont déjà assez indépendants. Les parents prennent soin de leur progéniture. La longévité des espèces peut dépasser 25 ans.

La distribution géographique est très vaste, allant du Honduras au nord de l'Argentine, avec un nombre élevé de formes et de races géographiques, dont la classification spécifique est très ardue et très controversée. Selon Hill, il y aurait quatre espèces.

Cebus capucinus, le sajou capucin, ou capucin, qui atteint 45 cm de long, est uniformément noir, sauf à la partie médiane et antérieure de la tête, sur les côtés du cou, à la gorge, aux épaules, à la poitrine et à la partie antérieure des bras, qui sont blanc jaunâtre; les parties nues de la face et des oreilles sont rose chair. On ne rencontre cette espèce que du Honduras à la Colombie septentrionale et au Venezuela nord-occidental, ainsi que dans certaines îles de l'océan Pacifique proches des côtes.

C. griseus, le sajou sai, vit du Venezuela et des Guyanes jusqu'au cours moyen et inférieur de l'Amazone. Plus robuste que le capucin, il possède des membres plus longs et est généralement de couleur brunâtre.

C. albifrons, le sajou à front blanc, est plus petit et ressemble à un capucin. On le rencontre de façon éparse, avec une douzaine de sous-espèces et de races, en Colombie, au Venezuela, en Équateur et en haute Amazonie.

C. apella, le sajou brun, est caractérisé par des touffes de poils bien développés sur le crâne. Il a une distribution très étendue, sur toute l'aire sud-américaine des Primates; il compte environ quinze formes distinctes.

La sous-famille des *Alouattinés* comprend les singes hurleurs, ou alouates, les plus grands de tous les Platyrhiniens (ils mesurent 55 à 90 cm de long, avec une queue de 60 cm à 90 cm, et pèsent de 7 à 9 kg). Ils sont robustes, ont les membres bien développés et une longue queue préhensile, nue à la face ventrale du tiers terminal.

T. Okapia

◀▲ ***Deux exemplaires de sajou brun* (Cebus apella) *dont la distribution, très étendue, couvre l'aire sud-américaine des Primates.***

E.P.S.

▼ ***Groupe de saïmiris sciurins* (Saimiri sciureus).**

A. Rainon - Pitch

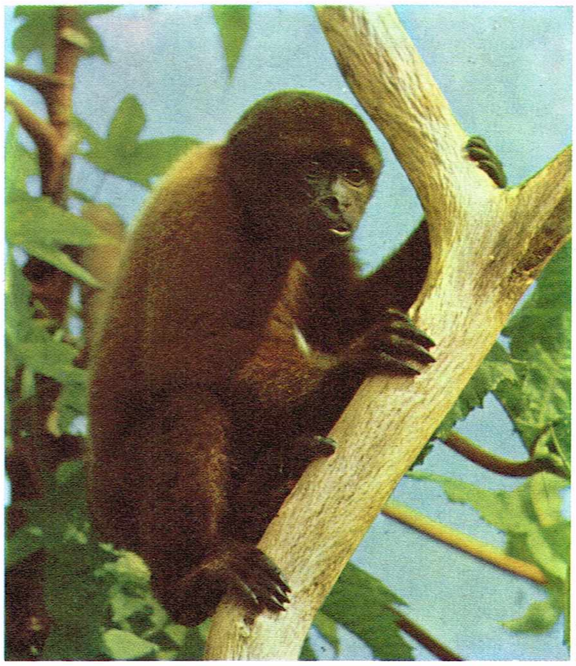

E.P.S.

▲ ***A gauche, les Alouattinés, ou singes hurleurs, descendent rarement à terre; peu vifs et d'aspect un peu mélancolique, ces singes se livrent à des démonstrations vocales assourdissantes. A droite, le singe laineux, ou lagotriche*** **(Lagothrix sp.)**, ***est un Animal placide, souvent victime des chasseurs qui en apprécient beaucoup la chair.***

Leur fourrure, très touffue et brillante, est formée de longs poils grossiers qui, sur les côtés de la tête, les épaules et la gorge, sont très développés, surtout chez les mâles; plus rares sur le ventre, ils manquent totalement sur la face et dans la région anale. La livrée est très variable, notamment en fonction de l'âge et du sexe; elle peut présenter des teintes brun jaunâtre, rousses ou noires. En outre, ces singes diffèrent des singes-araignées, ou atèles, par la curieuse conformation de leur tête, la robustesse de leur corps, la moindre longueur de leurs membres et de leur queue, et leur pouce normalement développé.

Le principal caractère des singes hurleurs est le développement exceptionnel de l'os hyoïde et du larynx, qui leur confère une voix de type nettement primate. En effet, chez les mâles, la taille de l'os hyoïde, déjà importante chez *Callicebus* et *Pithecia,* atteint un maximum et s'accompagne d'un grand développement du sinus osseux (8 cm de long et 5,5 cm de large chez *Alouatta seniculus*) ; celui des femelles ne représente que le 1/4 ou le 1/5 en volume. Ce sinus sert de caisse de résonance. Les branches de la mandibule sont plus divergentes, et les branches montantes sont devenues considérables; le crâne, prognathe, a une forme pyramidale avec la région occipitale tronquée. Les incisives inférieures sont situées verticalement, alors que les supérieures sont inclinées en avant; les canines sont très robustes.

Strictement arboricoles, ces singes se déplacent en saisissant les branches avec leurs mains (pouces opposables à l'index) et leurs pieds (gros orteils opposables à tous les autres doigts), et en se servant de leur queue comme d'une cinquième main; celle-ci fait aussi fonction de balancier et de stabilisateur. Dans certains cas, la queue peut aussi être utilisée pour retirer des petits Animaux du creux des arbres.

Les singes hurleurs habitent dans les forêts denses, où ils se tiennent normalement au plus haut des arbres. Ils forment des bandes dont le nombre varie de quatre ou cinq singes à quarante, et comprennent des individus des deux sexes et de tous âges (il y a trois ou quatre femelles pour un mâle). La troupe est commandée par un ou deux vieux mâles (selon le nombre d'individus) et, lors des déplacements, un mâle marche en premier, suivi des femelles avec les petits, puis des juvéniles. Chaque troupe a un territoire assez bien délimité, les limites étant fréquemment des cours d'eau ou des endroits à la végétation plus clairsemée. Le territoire peut être divisé en plusieurs zones appartenant à des groupes différents, sans que cela aboutisse à de véritables luttes lorsque les bandes se rencontrent : tout se borne à des démonstrations réciproques accompagnées d'interminables hurlements.

Les Alouattinés descendent rarement à terre, où ils sont assez gauches; ils évitent, sauf en cas d'absolue nécessité, de traverser les cours d'eau à la nage. Ils préfèrent passer rapidement de branche en branche, ou se balancer à des lianes.

Se nourrissant principalement de feuilles, secondairement de fruits, et étant carnivores à l'occasion, ce sont de gros mangeurs (ils consomment jusqu'à 1,5 kg par repas) : Carpenter a observé, dans l'île de Barro Colorado, que les *Alouatta palliata* mangent au moins cinquante-trois espèces différentes de plantes, passant environ le quart de leur temps à se nourrir quand il y a abondance; puis ils se déplacent lorsqu'ils ne trouvent plus de nourriture. Les singes hurleurs ont donc un régime alimentaire fort analogue à celui des singes de l'Ancien Monde de la sous-famille des Colobinés ainsi qu'à celui des Indridés (Lémuroïdes). Il leur arrive de descendre à terre pour boire, mais, normalement, ils trouvent l'eau dans les Végétaux dont ils se nourrissent.

Peu vifs, d'aspect un peu mélancolique, ces singes se livrent à des démonstrations vocales assourdissantes, consistant en des cris et hurlements prolongés et profonds, accompagnés de grognements sourds et modulés, dont la signification est assez précise; Carpenter a réussi à en analyser une dizaine, qui concernent divers événements de la vie de ces Primates. Les hurlements, qu'on peut entendre à plus de 3 km en forêt, ont parfois été comparés aux rugissements des lions. C'est normalement le mâle guide qui fait entendre sa voix, suivi par d'autres individus qui hurlent par intermittence mais sous sa direction. Les cris de ces singes sont, notamment, un moyen de défense.

La durée de gestation est d'environ 140 jours; la portée annuelle est normalement d'1 seul petit, élevé avec soin pendant 1 an. Les juvéniles, toutefois, mangent des fruits dès l'âge de 2 ou 3 semaines, alors qu'ils sont encore allaités.

Les Alouattinés sont représentés par l'unique genre *Alouatta,* diffusé du sud du Mexique jusqu'au nord de l'Argentine. Ces Primates peuplent généralement les forêts très humides et se tiennent de préférence près des cours d'eau; cependant, on les rencontre aussi à haute altitude. Selon Hill, il en existe six espèces.

A. villosa, le hurleur du Guatemala, est caractérisé par sa fourrure presque uniformément noire. Sa distribution couvre de petites aires du Guatemala.

A. palliata, le hurleur à manteau, habite de l'État de Veracruz au Mexique à la baie de Guayaquil en Équateur, où il peuple les forêts du versant occidental des Andes, entre 900 et 2 000 m d'altitude. De couleur chocolat très foncé, parfois noire, il est caractérisé par une sorte de manteau de longs poils qui lui tombe sur les flancs.

Dans le nord de l'Amérique du Sud et, en particulier, en haute Amazonie, vit *A. seniculus,* le hurleur roux, ou hurleur alouate, l'une des espèces les plus anciennement connues des Européens. On en distingue une dizaine de sous-espèces, dont l'une, propre à l'île de Trinidad, est de taille supérieure à celle des deux espèces précédentes et très variable par la livrée, essentiellement châtain roux, la tête étant plus foncée.

A. guariba, le hurleur brun, vit dans les chaînes de montagnes parallèles aux côtes atlantiques du Brésil méridional, de l'État de Bahia jusqu'à celui de Rio Grande do Sul, ainsi que dans le territoire de Misiones en Argentine septentrionale, où il habite dans les forêts denses d'*Araucaria angustifolia*. Son pelage est très long et touffu, de couleur brun foncé, avec des reflets dorés sur le dos.

A. belzebul, le hurleur à mains rousses, qui vit au sud de l'Amazone et dans certaines îles de son estuaire, ainsi que dans l'État de Maranhão, a le poil noir, les mains, les pieds et la partie terminale de la queue étant roussâtres.

A. caraya, le hurleur noir, est caractérisé par une nette différence de livrée entre les mâles et les femelles : les premiers sont noirs et les secondes jaune olivâtre. De taille supérieure à la moyenne du genre, ce singe occupe une aire couvrant le sud-est de la Bolivie, le Mato-Grosso et certaines régions du Brésil méridional, ainsi que le nord de l'Argentine.

La sous-famille des *Atélinés* comprend les atèles, ou singes-araignées, et les lagotriches, ou singes laineux. Parmi leurs caractères généraux, citons : la tête arrondie à front haut et à face aplatie, avec un os hyoïde normal, les pattes longues et fines, et, enfin, la queue très longue. Cette dernière, dont la partie terminale est pointue, est très préhensile et pourvue à sa partie nue distale, ainsi qu'à la face inférieure, d'un sens tactile très développé. En ce qui concerne la denture, la troisième molaire est réduite et peut même manquer.

Les Atélinés sont arboricoles et présentent une suspension brachiale, un tronc un peu plus court que celui des autres Cébidés, et un thorax plus plat. Leurs pattes antérieures sont plus longues que les postérieures. Leurs mains tendent à se transformer en un organe d'accrochage, ce qui aboutit à l'atrophie ou à la disparition des pouces. Bien des caractères morphologiques et anatomiques les rapprochent de certains Cercopithécidés et, surtout, des gibbons (Hylobatinés).

La sous-famille des Atélinés compte trois genres bien distincts : *Lagothrix, Brachyteles* et *Ateles*.

Le genre *Lagothrix* comprend les singes laineux, ou lagotriches. Ceux-ci possèdent une fourrure dense et d'aspect laineux, formée de poils courts. Les lagotriches diffèrent des singes-araignées, entre autres, par leur corpulence plus importante, par leurs pattes plus robustes et plus courtes, ainsi que par leurs pouces normalement développés; l'un de leurs traits typiques est un certain gonflement du ventre. Ils mesurent de 50 à 65 cm de long, plus 60 à 72 cm pour la queue, et atteignent un poids de 6 kg.

Les autres caractères particuliers sont les suivants : la tête, massive et arrondie, est couverte d'un poil très court et velouté; les pieds, relativement courts, sont pourvus comme les mains d'ongles longs, étroits et pointus; la queue est nue seulement sur une faible partie terminale de sa face ventrale; la couleur des parties supérieures du corps va du gris clair au brun foncé, avec des tons tendant au châtain ou au bleuâtre. Les parties inférieures sont soit plus claires, soit plus foncées, mais ne présentent jamais de contrastes nets. Les parties nues de la face sont à peu près noires.

Grégaires et strictement diurnes, les lagotriches vivent en groupes d'une douzaine d'individus au minimum et se montrent souvent sociables vis-à-vis d'autres singes, essentiellement des sajous, des atèles, des hurleurs et des tamarins. Arboricoles, ils descendent cependant souvent à terre, où ils marchent en position dressée. Dans les arbres, ils ont une marche quadrupède et se servent au maximum de leur queue robuste, par laquelle ils se suspendent fréquemment. De tempérament placide, ils n'ont pas de mouvements très vifs; c'est pourquoi ils sont souvent victimes des chasseurs, qui en apprécient beaucoup la chair. Ils se nourrissent surtout de fruits et ont un répertoire de cris très varié. La durée de gestation est d'environ 140 jours.

T. Okapia

▲ **Alouatta seniculus,** ***le hurleur roux, est l'une des espèces les plus anciennement connues des Européens.***

Les lagotriches sont très communs dans les forêts de la haute Amazonie, et leur distribution couvre en général seulement la partie nord-ouest de l'Amérique du Sud; on en rencontre dans les Andes jusqu'à 2 100 m d'altitude. Il en existe trois espèces.

Lagothrix lagothricha, le lagotriche de Humboldt, long d'environ 50 cm, a la tête et le corps de couleur grise. Il habite la Colombie, le Venezuela, et de toutes petites zones du nord-ouest du Brésil ainsi que du nord du Pérou.

L. cana est caractérisé par sa tête noire, plus foncée que le reste du corps. Sa livrée est très variable selon les diverses sous-espèces. Il habite l'Amazonie et la Colombie.

L. hendeei, le lagotriche d'Hendee, vit dans une zone restreinte des Andes, au nord du Pérou. Il est caractérisé par des pattes plus courtes que celles des deux autres espèces, par des doigts entièrement couverts d'un pelage touffu et par une livrée noire à la tête et aux parties antérieures du corps, et lie-de-vin aux parties postérieures.

Le genre *Brachyteles* est représenté par une seule espèce, *B. arachnoides,* l'atèle-araignée, le singe américain le plus rare et le moins bien connu. Confiné aux forêts du Tupi, dans la chaîne côtière du sud-est du Brésil, il est menacé d'extinction, du fait de la destruction des forêts pour l'extension des terres cultivées. Sa survie est liée aux mesures de protection qui seront prises; toutefois, il semble que l'espèce soit de toute façon destinée à disparaître à cause d'un processus de dégénérescence.

Ostman - J.R. Simon

◀ ***Un spécimen de*** **Lagothrix sp.,** ***dont on observera la fourrure dense, à poils courts.***

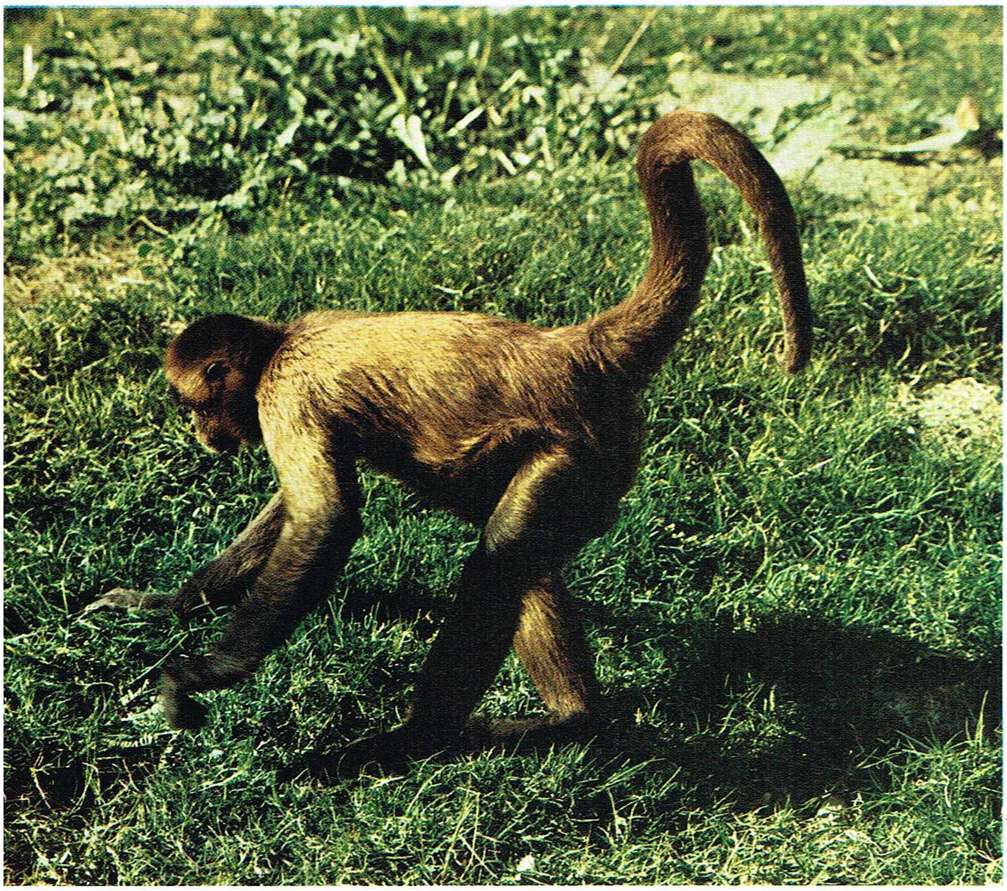

A. Margiocco

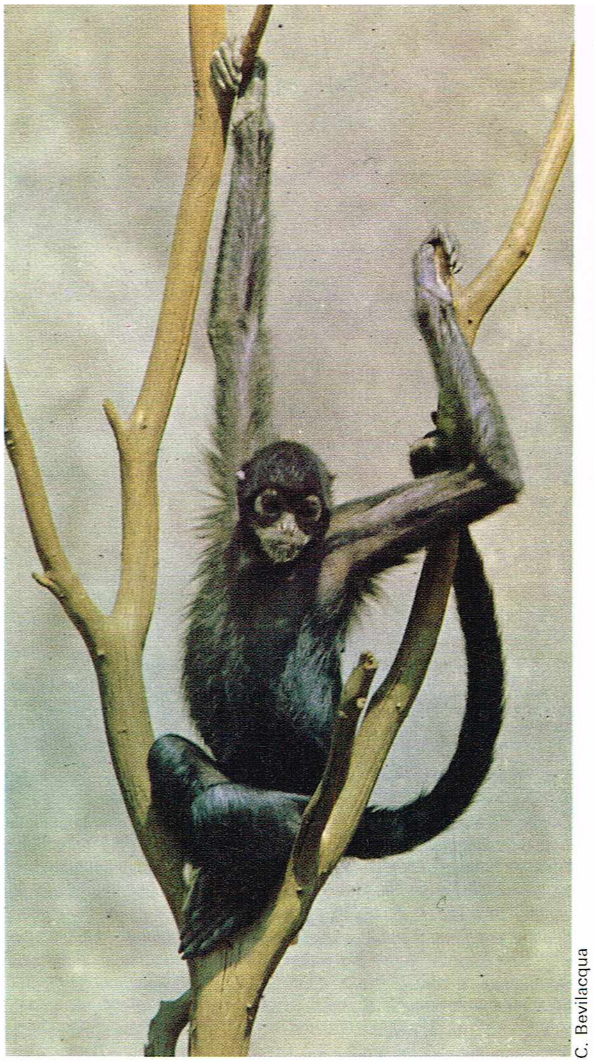

C. Bevilacqua

▲ *A gauche,* **Ateles geoffroyi**, *l'atèle aux mains noires, est l'espèce de singes-araignées que l'on rencontre seulement du sud du Mexique à l'extrême nord-ouest de la Colombie. A droite,* **Ateles paniscus**, *le coaita noir, habite la haute Amazonie, les Guyanes et le nord-est du Brésil.*

Les atèles-araignées sont, en quelque sorte, un terme de passage entre les singes-araignées proprement dits, ou atèles, dont ils ont l'aspect général, et les lagotriches, auxquels ils ressemblent par le tronc volumineux, la fourrure particulièrement laineuse et les poils courts de la tête. La couleur dominante de la livrée est le jaune grisâtre ou le brun cendré. En outre, ce singe possède des pouces rudimentaires, et sa cloison nasale, étroite, est de type catarhinien. Il peut mesurer plus de 60 cm de long, plus 80 cm environ pour la queue. Ses mœurs sont fort mal connues : on sait seulement qu'il est strictement arboricole et végétarien.

Le genre *Ateles* comprend les véritables singes-araignées, qui, avec les singes hurleurs, peuvent être considérés comme les plus caractéristiques du Nouveau Monde. Parmi leurs traits morphologiques, on observe la gracilité du corps et la grande longueur des membres et de la queue, laquelle est très préhensile ; ces caractères, du point de vue éco-éthologique, font de ces Primates l'un des exemples les plus remarquables de spécialisation à la vie arboricole : ils sont dépassés en adresse et en agilité seulement par les gibbons du Sud-Est asiatique.

De taille importante (environ 40 à 60 cm de long, avec une queue de 50 à 90 cm), ils pèsent jusqu'à 6 kg dans la nature, et plus en captivité. Leurs pattes antérieures sont plus longues que les postérieures, et leurs pouces sont toujours atrophiés et même souvent absents.

Leur fourrure est caractéristique : sur le dos, les flancs, les côtés des pattes et la queue, elle est très longue, rude, à poils grossiers et sans bourre. Sur la tête, les poils, dirigés en avant, forment une touffe caractéristique avec ceux du front, qui sont longs. La couleur de leur livrée est très variable : sur le dessus, elle est gris jaunâtre ou gris foncé tendant parfois au noir, avec des nuances roussâtres, alors que sur les flancs elle est jaune doré, jaunâtre ou roussâtre. Les parties inférieures sont plus claires, habituellement blanchâtres ou jaunâtres.

Strictement arboricoles, les singes-araignées sont très agiles et possèdent une queue très préhensile. Ils descendent rarement à terre. Sur les grosses branches à peu près horizontales, ils ont une marche quadrupède, tenant la queue levée au-dessus du dos et en spirale ; ils descendent des arbres, la tête en haut, à la différence des hurleurs, qui vont la tête en bas. Leur agilité leur permet d'effectuer de longs sauts d'une branche à une autre, sur des distances d'environ 1 m.

Les atèles vivent généralement par groupes peu importants de deux à huit individus, qui se réunissent en bandes de quinze à vingt têtes, surtout pour la recherche de la nourriture. Celle-ci est constituée principalement de fruits et consommée surtout le matin. Chaque bande occupe un territoire déterminé, toutefois mal délimité, et dont la configuration dépend des possibilités de nourriture ainsi que de la localisation des arbres servant de refuges. Les groupes sont moins cohérents que ceux des hurleurs. Les femelles, en nombre légèrement supérieur à celui des mâles, tiennent parfois un rôle actif dans la direction du groupe.

Quand ils se déplacent, les atèles marchent en file indienne, précédés par un vieux mâle, lequel est suivi des femelles avec leurs petits sur le dos ; tous tiennent toujours leur queue levée, laquelle leur sert à s'agripper à tout instant aux branches, même les plus ténues. La voix des atèles ressemble à une sorte d'aboiement, surtout quand ils sont en groupe ; isolés, ils font entendre une sorte de hennissement. Ils sont assez intelligents.

Après une gestation de 140 jours, les femelles mettent bas, en toute saison, un seul petit, qui est dépendant de la mère durant environ 10 mois.

Les atèles habitent les forêts de plaine et de montagne et on les rencontre jusqu'en haute altitude. Leur distribution va du centre du Mexique jusqu'à une grande partie du nord-ouest de l'Amérique du Sud. Il en existe cinq espèces.

A. geoffroyi, l'atèle aux mains noires, ou de Geoffroy, présente une livrée variée, avec une dominante roussâtre et isabelle sur la tête et le corps, et noire aux extrémités et à la queue. Sa face est également noire, avec les lèvres et le tour des yeux couleur chair. C'est l'espèce la plus septentrionale : on la rencontre seulement du sud du Mexique à l'extrême nord-ouest de la Colombie.

A. fusciceps, l'atèle à tête brune, a une livrée noirâtre. Il habite surtout le versant pacifique des Andes de Colombie et de l'Équateur ainsi qu'au Panama.

A. belzebuth (A. variegatus), l'atèle chuva, ou coaita à ventre blanc, est l'un des mieux connus et des plus

largement répandus. Généralement, sa livrée présente un contraste entre les parties dorsales foncées et les parties ventrales claires. Il vit dans des parties de la haute et de la basse Amazonie, de la Colombie et du bassin de l'Orénoque.

Les deux autres espèces sont : *A. paniscus,* le coaita noir ou cayou, qui a normalement une livrée noire et habite la haute Amazonie, les Guyanes et le nord-est du Brésil, et *A. rufiventris,* l'atèle à ventre roux, espèce discutée et limitée à la Colombie.

Pour terminer avec les Cébidés et les Platyrhiniens, signalons la controverse à propos de l'existence de singes Anthropomorphes dans le Nouveau Monde. En l'état actuel de nos connaissances, la réponse est négative, bien que certains zoologues pensent que le dernier mot n'a pas été dit à ce sujet.

L'origine de cette discussion, qui a longtemps agité le monde scientifique, a été la description, en 1929, par l'anthropologue Montandon, de l'*Ameranthropoides loysi,* nouvelle espèce présumée d'un grand Primate américain. La détermination fut faite sur le témoignage d'un explorateur qui avait vu et photographié, quelques années auparavant, dans les forêts du Venezuela, un gros spécimen du type atèle, mort et appuyé à une caisse. Toutefois, ni le crâne ni la peau n'en avaient été conservés. Selon Montandon, ce singe possédait une denture de type humain et était dépourvu de queue. Par la suite, il considéra qu'il pouvait s'agir d'un Cébidé, et que les caractères anthropomorphes avaient été interprétés de façon erronée. Selon Hill, il pourrait s'agir d'un individu de grande taille d'une sous-espèce d'atèle *(A. belzebuth hybridus).*

★ *Infra-ordre des Catarhiniens*

Les Catarhiniens *(Catarrhina)* ont la cloison nasale étroite, avec des narines rapprochées et ouvertes vers le bas. Chez un très grand nombre d'espèces, il existe des callosités fessières. Ces singes possèdent 32 dents. Leur queue n'est jamais préhensile. Ils présentent une riche variété de formes et de mœurs, bien qu'ils soient principalement arboricoles. Mis à part les Hominidés, on connaît deux familles : les Cercopithécidés, ou Cynomorphes, et les Pongidés, ou Anthropomorphes, tous habitant l'Ancien Monde.

Les **Cercopithécidés** *(Cercopithecidae),* dont le nom provient du grec *kerkos,* queue, et *pithêkos,* singe, constituent la famille la plus nombreuse de l'ordre des Primates : ce sont les singes par excellence, connus depuis la plus haute antiquité; avec soixante espèces, ils constituent la majorité des Catarhiniens et le gros de la population des Primates de l'Ancien Monde.

De taille presque toujours supérieure à celle des Platyrhiniens (variant de 35 cm chez le petit talapoin à 1,10 m chez certains babouins), les Cercopithécidés ont la tête arrondie, avec la face nue, plus ou moins proéminente, formant un véritable museau, qui est bien développé chez les cynocéphales (babouins, hamadryas, etc.). Leurs narines sont rapprochées et leur nez est généralement plat (sauf chez certains Colobinés), surtout chez *Rhinopithecus* et plus encore chez *Nasalis.* Leurs oreilles sont de forme ovale ou arrondie.

Les Cercopithécidés sont généralement arboricoles de type grimpeur normal ou, éventuellement, marcheurs terrestres; ils sont plantigrades ou semi-plantigrades; leurs pattes antérieures sont le plus souvent plus courtes que les postérieures (ce caractère est plus net chez les formes arboricoles). Les mains et les pieds sont longs et étroits, les premières, toutefois, étant plus courtes que les seconds. Les pouces et les gros orteils sont nettement opposables; chez les Colobinés, les pouces peuvent être réduits ou absents; les ongles sont plats et parfois carénés.

La queue est presque toujours longue (en moyenne, plus longue que le corps), mais elle peut être courte et même manquante (chez le magot). Excepté lors des tout premiers stades juvéniles de certains cercopithèques (par exemple, chez le pétauriste), elle n'est jamais préhensile.

La fourrure est beaucoup moins touffue que celle des Platyrhiniens; sa teinte est souvent verdâtre, mêlée de gris et de brun; il ne manque pas d'espèces à robe élégante ou à parties vivement colorées. La peau présente des zones bien différenciées : au museau (celui du mandrill est orné d'un net dessin bleu et rouge vif)

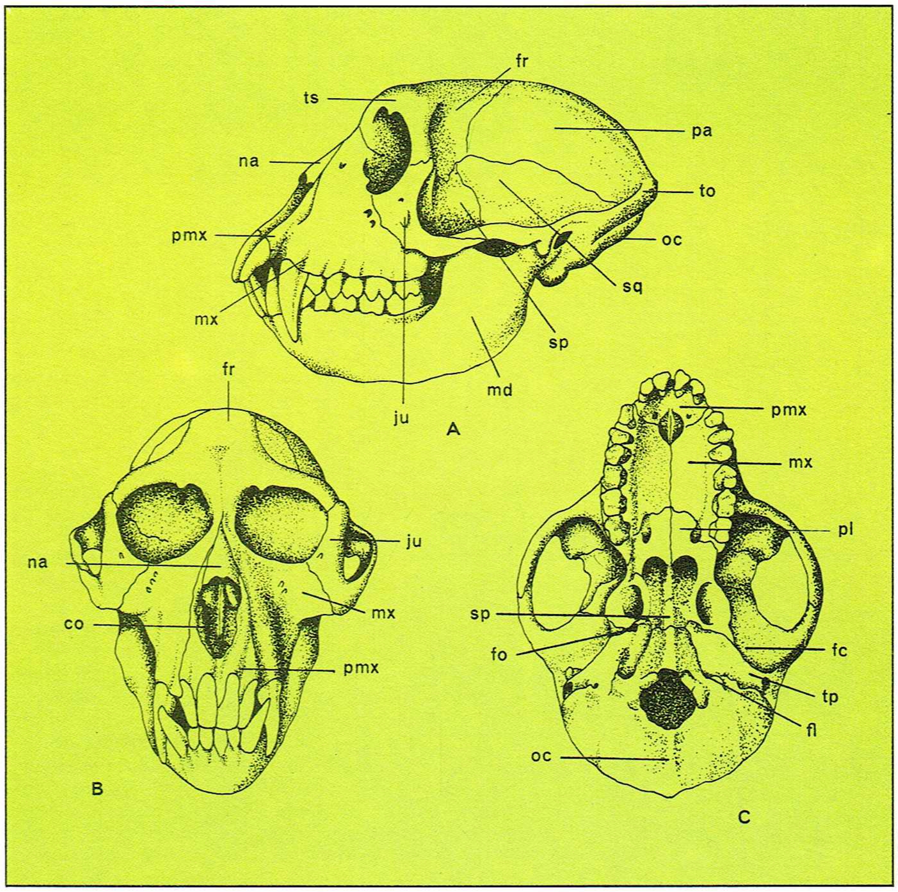

I.G.D.A.

▲ ***Représentation schématique du crâne du singe rhésus*** **(Macaca mulatta),** ***vu de côté (A), de face (B), et de dessous (C) :***
pmx, prémaxillaire; na, nasal; ts, torus supra-orbitaire; fr, frontal; pa, pariétal; to, torus occipital; oc, occipital; sq, temporo-squamosal; sp, sphénoïde; md, mandibule; ju, jugal; mx, maxillaire; co, cornet (ou concha) inférieur; pl, palais; fo, foramen ovale; fc, foramen carotidien; tp, temporo-pétreux; fl, foramen lacerum posterius.

ou surtout aux callosités et aux tubérosités fessières. Ces dernières, qui existent aussi chez les chimpanzés (Anthropomorphes), se forment dans la région anogénitale des femelles, avec des modifications périodiques liées au cycle de reproduction : lors de la période œstrale, la peau de cette région se tuméfie, formant une volumineuse saillie, rose ou rougeâtre, du fait d'un processus œdémateux, dû à la présence d'un liquide intercellulaire. Ce phénomène est particulièrement remarquable chez les macaques et les babouins.

Les callosités fessières, toujours présentes, sont d'interprétation difficile; ce sont de larges épaississements cornés, nus, de couleur rouge ou violette. Déjà visibles chez le fœtus, elles s'amplifient avec l'âge, surtout chez les mâles; elles deviennent très étendues chez les cynocéphales, confluant derrière l'anus sur la ligne médiane, en une large demi-lune.

Les Cercopithécidés possèdent 32 dents, selon la formule : $\left(\mathrm{I}\frac{2}{2}; \mathrm{C}\frac{1}{1}; \mathrm{Pm}\frac{2}{2}; \mathrm{M}\frac{3}{3}\right) \times 2 = 32$. Les incisives médianes sont plus grosses que les latérales; les canines sont ordinairement fort développées; chez les mâles de cynocéphales, les canines supérieures font saillie comme des défenses.

En ce qui concerne l'appareil digestif, on observe la présence, typique chez les Cercopithécinés, d'abajoues, et chez les Colobinés, d'une conformation spéciale de l'estomac. Les poumons présentent quatre lobes à droite et, généralement, deux seulement à gauche.

Quant au système nerveux, on y observe une évolution significative de l'anatomie encéphalique : la gyrencéphalie est constante et évidente avec une disposition des sillons de l'écorce cérébrale qui annonce déjà celle de l'homme. Cependant, le lobe frontal est encore peu développé par rapport aux lobes temporal et occipital.

Les sens sont très fins, surtout celui de la vue. Les globes oculaires sont relativement gros, et la rétine est de type diurne, avec une prédominance des cônes sur les bâtonnets; en général, la conformation oculaire est essentiellement semblable à celle de l'homme. La perception des couleurs a été prouvée. L'ouïe est aussi très fine, étant suivie, en ordre décroissant d'acuité, par le toucher, l'odorat et le goût; l'appareil olfactif présente le

maximum de réduction observé chez les Primates. Si presque tous les Cercopithécidés sont diurnes, certains semblent avoir une certaine activité nocturne (le cercopithèque à tête de hibou par exemple).

Les cynocéphales sont surtout terrestres; les macaques sont arboricoles ou terrestres; tous les autres groupes sont nettement arboricoles. Chez tous, la locomotion est quadrupède, le corps étant normalement horizontal et les quatre pattes appuyant alternativement sur le sol; la position dressée du tronc est normalement prise par les individus assis. Les Colobinés, plus spécialisés pour la vie arboricole, se déplacent dans les arbres avec beaucoup d'agilité et à grande vitesse, effectuant de longs sauts. Nombre d'espèces nagent remarquablement.

Les Cercopithécidés sont les plus agiles et les plus vifs des Primates, à l'exception des gibbons (Anthropomorphes). A leurs qualités acrobatiques, ils joignent un tempérament exubérant et sont toujours en mouvement, poussés par un besoin inné d'exploration et une propension à prendre tout objet attirant leur attention. Doués d'une remarquable intelligence, ils ont toujours une personnalité beaucoup plus marquée que celles des autres Primates inférieurs. Ils ont un riche répertoire de cris, actuellement à l'étude.

Les Cercopithécidés vivent par groupes familiaux, polygames; ils constituent souvent des bandes, parfois très nombreuses, composées de plusieurs dizaines et même de plusieurs centaines d'individus et dirigées par de vieux mâles. Ces troupes sont généralement confinées à un territoire plus ou moins bien délimité; certaines espèces accomplissent cependant d'importants déplacements, en particulier pour chercher de la nourriture. Il arrive que ces singes provoquent des dégâts considérables dans les cultures, car ils y effectuent des incursions massives : c'est surtout le cas des babouins, des langhurs de l'Inde et de quelques autres espèces.

Les femelles des Cercopithécidés ont un cycle menstruel variant de 30 à 40 jours selon les espèces. La gestation dure de 140 à 210 jours, sauf exceptions (elle est de 270 jours chez les mandrills). Les portées sont unipares ou gémellaires; les petits sont allaités durant des périodes variables; la puberté est atteinte entre 3 et 5 ans; la longévité peut dépasser 25 ans (et même 40 ans chez certains babouins en captivité).

Les Cercopithécidés sont des omnivores, mais surtout des végétariens, les Colobinés étant strictement végétariens. Ils se nourrissent de toutes les parties des plantes et complètent leur régime par des œufs, des Oiseaux et d'autres petits Animaux. Ils boivent en suçant l'eau; toutefois, certaines espèces se contentent de celle qui est contenue dans les plantes dont elles se nourrissent.

En majorité, les Cercopithécidés habitent les grandes forêts pluviales, tropicales, fréquentant les parties les plus hautes des arbres, où ils trouvent de la nourriture en abondance. D'autres, notamment les macaques et les cynocéphales, ont acquis secondairement l'aptitude à la vie à terre et habitent alors les savanes ou les endroits dénudés, parfois rocheux. Un certain nombre d'espèces vivent dans les régions subtropicales et tempérées (Asie et Afrique du Nord), d'autres vont jusqu'en haute montagne, comme le gélada qui vit dans les montagnes d'Éthiopie jusqu'à 5 000 m d'altitude ainsi que certains *Presbytis* et *Macaca,* qu'on rencontre jusqu'à 4 000 m d'altitude dans l'Himalaya ou dans des zones enneigées une grande partie de l'année au Tibet.

La distribution géographique de la famille, très vaste, couvre pratiquement toute l'aire de l'Ancien Monde habitée par des Primates, à la seule exception de Madagascar, où l'on ne trouve que des Prosimiens. Une trentaine d'espèces habitent l'Afrique paléotropicale, au sud du Sahara (lequel est peuplé seulement partiellement ou marginalement par les babouins *Papio doguera* du Tibesti, et par le patas qui vit aussi dans des régions semi-désertiques comme l'Aïr et l'Ennedi). En Afrique, la limite septentrionale se trouve à environ 20° de latitude nord, et la limite Est est dans la zone du Soudan septentrional.

En des temps assez récents, les babouins vivaient aussi en Égypte. L'hamadryas se trouvait également dans certaines zones du sud-ouest de l'Arabie. Au nord du Sahara, on rencontre seulement le magot, qui vit aussi à Gibraltar et qui est l'unique singe européen. Dans l'ensemble, l'Afrique est essentiellement peuplée par les cercopithèques et les genres proches, ainsi que par les cynocéphales.

En Asie, la famille est beaucoup plus largement répandue, du Tibet jusqu'au Japon et à l'archipel malais, dépassant la ligne Wallace, puisqu'on trouve des macaques jusqu'à Célèbes et Timor, limite sud-orientale extrême de tous les Primates. La population asiatique est constituée par la sous-famille des Colobinés (sauf le genre *Colobus* africain) et par des macaques. Le genre le plus répandu est *Macaca,* que l'on observe du Maroc jusqu'à Timor et au Japon. D'autres ont une distribution très limitée, comme *Cynopithecus, Simias* et *Nasalis.* La limite septentrionale de tous les Primates est occupée par le macaque à face rouge, dans la péninsule de Shimokita de l'île de Hondo (Japon). Il est intéressant d'observer que les îles asiatiques sont presque toujours habitées par des Cercopithécidés : Ceylan, les îles Andaman, les îles Nicobar, l'archipel Malais, Haïnan, Formose et l'archipel Japonais; les îles Maldives et Lakkadives en sont exclues. L'île de Fernando Póo est un exemple remarquable pour l'Afrique.

La grande famille des Cercopithécidés, qui compte quatorze genres et soixante espèces, est divisée en deux sous-familles nettement distinctes : les Cercopithécinés et les Colobinés, que de nombreux zoologues actuels élèvent au rang de familles.

La sous-famille des *Cercopithécinés* rassemble des singes à corps robuste et parfois massif. Leur face est, chez diverses espèces, allongée, formant un museau proéminent. Leurs membres antérieurs ne sont guère plus courts que les postérieurs, et parfois égaux ou même plus longs *(Mandrillus).* Leurs mains et leurs pieds sont plus courts et plus larges que ceux des Colobinés. Leurs pouces sont bien développés. Leurs callosités fessières sont plus importantes que chez les Colobinés.

Les Cercopithécinés possèdent des abajoues, qui sont deux larges diverticules situés sous les joues, des deux côtés de la bouche, allant parfois jusque sous le menton. Ces abajoues permettent d'emmagasiner en hâte une grande quantité de nourriture, laquelle est ensuite mastiquée tranquillement. Certaines espèces peuvent régurgiter dans leur bouche le contenu de leur estomac. A la différence des Colobinés, l'estomac des Cercopithécinés est normal. Le régime est omnivore.

La sous-famille, typiquement africaine, est cependant bien représentée en Asie par de nombreux macaques. Il existe au total huit genres et trente-neuf espèces rassemblées en trois groupes, en fonction de leur morphologie et de leurs mœurs : les cercopithèques au sens large et les cercocèbes, ou mangabeys *(Cercopithecus, Erythrocebus* et *Cercocebus),* essentiellement arboricoles et tous africains, au corps plus allongé que celui des singes des autres groupes et qui semblent plus primitifs que ceux-ci; les macaques *(Macaca* et *Cynopithecus),* à corps plus massif et partiellement adapté à la vie à terre, essentiellement asiatiques; enfin, les cynocéphales *(Papio, Mandrillus* et *Theropithecus),* à tête de forme canine, et typiquement terrestres.

Les *Cercopithecus,* ou cercopithèques proprement dits, sont caractérisés par leur corps fin et leurs formes élancées. Longs de 35 à 70 cm, ils ont une face peu proéminente. Leurs pattes sont longues, les postérieures plus que les antérieures. Les doigts des mains sont réunis à la base par une membrane. La queue, toujours très longue (50 cm à plus de 1 m), au moins autant que le corps, est normalement tenue levée. Les callosités fessières, peu développées, sont séparées par une zone velue, sauf chez le cercopithèque noir et vert, chez lequel elles sont en contact.

Les cercopithèques possèdent souvent une robe à teintes vives spécialement à la tête, à la gorge et à la poitrine. Leurs poils sont nettement annelés de couleurs claires et foncées.

Les cercopithèques ont des mœurs plutôt crépusculaires; ce sont des Animaux très vifs qui se tiennent généralement sur les arbres, sauf certaines espèces, dont le grivet, ou vervet, qui vit de préférence dans les broussailles et les savanes. Tous ont des endroits préférés pour dormir la nuit : ils s'y réfugient chaque soir dans le feuillage dense des arbres. Plusieurs espèces de cercopithèques peuvent se rassembler pendant les déplacements diurnes, parfois en associations tout à fait temporaires, avec des cercocèbes et des colobes; par contre,

elles évitent soigneusement les babouins et les chimpanzés. L'importance des troupes dépend de divers facteurs, essentiellement, la disponibilité en nourriture, qui conditionne les déplacements : en général, ces groupes comptent de six à quelques dizaines de têtes au maximum. Normalement, chaque portée est unipare ; le petit est porté dans son jeune âge par sa mère, agrippé à son ventre.

Les cercopithèques ont peu de prédateurs : à part l'homme, qui les chasse pour leur peau et qui détruit leur milieu naturel, les autres prédateurs sont l'aigle couronné *(Stephanoaetus coronatus)*, le léopard et le python de Séba.

Les cercopithèques sont les singes africains les plus communs, avec les babouins ; ils peuplent toute l'Afrique au sud du Sahara, avec treize espèces et de nombreuses sous-espèces ; toutefois, on les rencontre principalement en Afrique centrale et occidentale, en particulier, dans le bassin du Congo. Nous en donnerons la description complète, suivant en grande partie la monographie de W.O. Hill.

Cercopithecus mitis, le cercopithèque à diadème, est long de 65 cm et a une queue d'environ 80 cm. Ses parties supérieures sont gris verdâtre, tendant au bleuté, parfois même au jaune roussâtre, avec une grande variabilité ; sa tête est noirâtre sur le dessus et porte une bande claire au front ; il possède des favoris clairs ; le menton et les lèvres sont blancs. Ses pattes antérieures et ses épaules sont noires, de même que la partie haute du dos, laquelle forme une sorte de très beau manteau. Typiquement forestier, il vit dans le bassin du Congo, en Afrique orientale et dans une grande partie de l'Afrique centro-méridionale, jusqu'au Cap (on le trouve jusqu'à 3 000 m d'altitude). Dans l'est et le sud de l'Afrique, il est représenté par une sous-espèce distincte, *C. mitis albogularis*, le cercopithèque à gorge blanche.

C. nictitans, le hocheur, a une robe généralement foncée et possède une tache blanche sur le nez. Son corps mesure environ 65 cm de long et sa queue 90 cm. Il vit en Afrique occidentale, du Libéria jusqu'au fleuve Congo.

Dans les forêts de l'Afrique centrale, au Zaïre oriental, dans le Rwanda, en Urundi et dans une grande partie de l'Ouganda, vit *C. l'hoesti*, le cercopithèque de l'Hoest, à long pelage gris noirâtre avec des nuances roussâtres sur le dessus et noires en dessous. Sa face, noire, est entourée par un collier blanc. Il mesure jusqu'à 70 cm de long. Il existe une sous-espèce distincte, *C. l'hoesti preussi*, dans les forêts de montagne du Cameroun et dans l'île de Fernando Póo.

C. mona, le mone, bien connu, est distribué de la Guinée à une grande partie du bassin du Congo. Sa robe, caractéristique, a les parties supérieures plus ou moins foncées et rousses sur le dos, contrastant avec les parties inférieures, blanc pur, tendant à l'orangé chez certaines formes. En outre, les oreilles présentent une courte touffe roux-orangé ou jaunâtre. Au-dessus des yeux part latéralement une bande foncée, séparant les parties claires du front des longs favoris, également clairs. Ce singe atteint, au maximum, 50 cm de long.

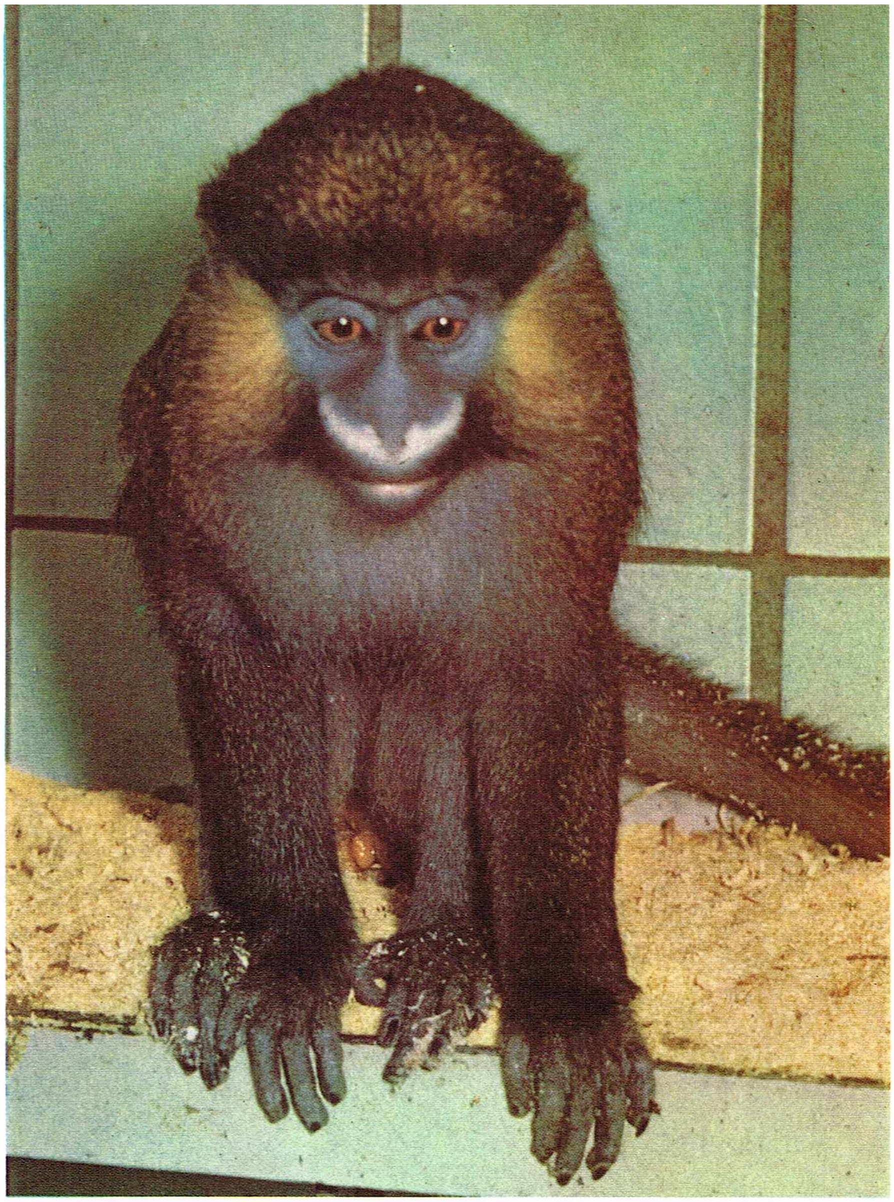

T. Okapia

▲ **Cercopithecus cephus,** ***le moustac, est l'une des espèces les plus communes de celles qui peuplent les forêts denses et les forêts-galeries du Cameroun; strictement arboricole et fort agile, il peut réaliser des sauts de 20 m d'un arbre à l'autre.***

C. pogonias, le cercopithèque pogonias, proche du précédent, est assez commun et vit en bandes qui comptent jusqu'à plus de cinquante individus, dans les forêts denses du Cameroun, près du fleuve Congo. Sa voix ressemble à celle du paon.

C. petaurista, le pétauriste, de petite taille, présente généralement une livrée vert foncé, striée de noir, avec une tache claire sur le nez. Il vit dans les forêts denses et les forêts-galeries d'Afrique occidentale, de la Guinée-Bissau jusqu'au nord de l'Angola et en Ouganda. Il a été l'objet sur le terrain d'importantes études éthologiques.

C. cephus, le moustac, est l'une des espèces les plus communes parmi celles qui peuplent les forêts denses et les forêts-galeries du Cameroun jusqu'au fleuve Congo.

Gillon - Jacana

◀ **Cercopithecus mona,** ***le mone, est distribué de la Guinée à une grande partie du bassin du Congo.***

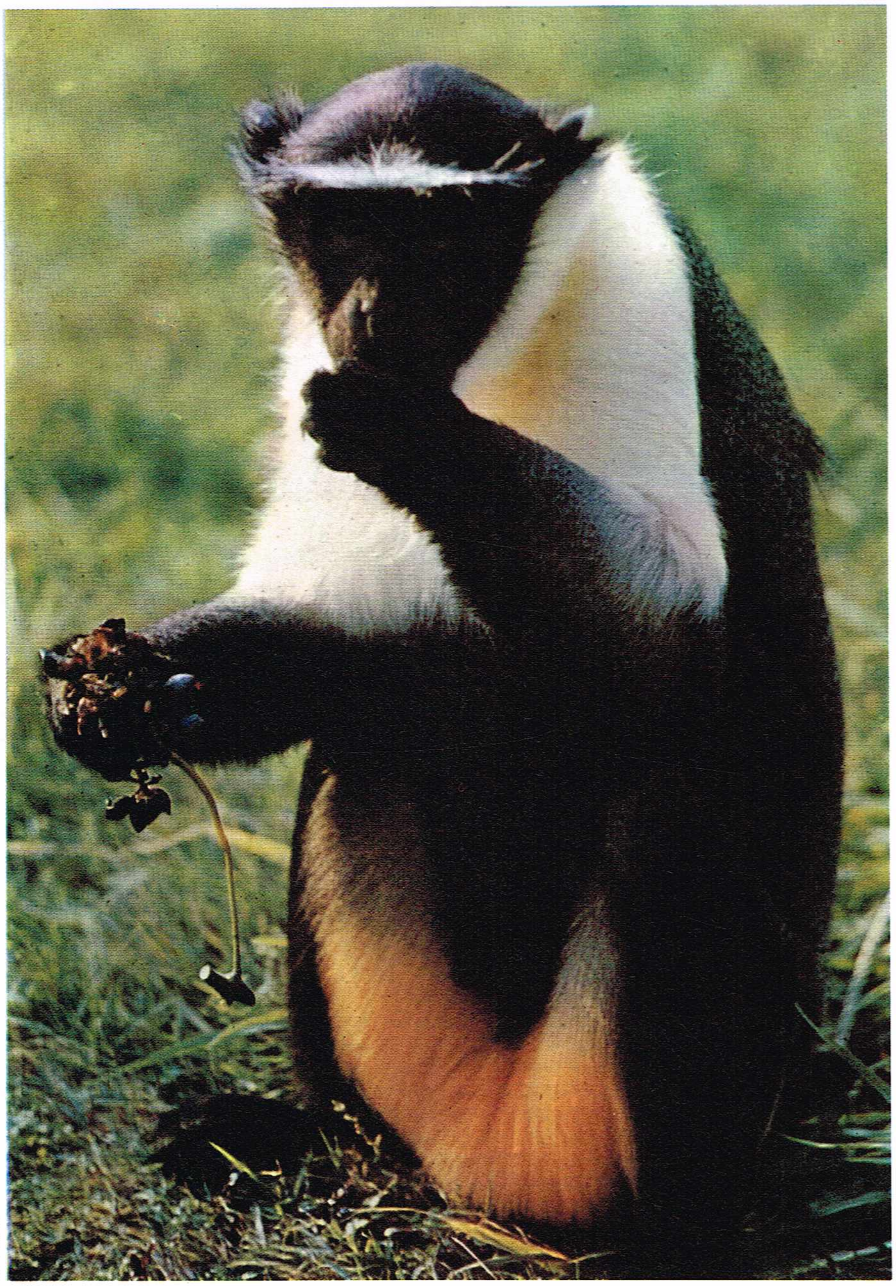

S. Prato

▲ **Cercopithecus diana,** ***le cercopithèque diane, à fourrure contrastée, habite les forêts pluviales d'Afrique occidentale.***

Il est long de 60 cm au maximum. Sa face présente une belle couleur gris-bleu ou bleu cobalt, avec une bande transversale claire au-dessus de la lèvre supérieure, encadrée par des favoris blancs ou jaunes. Les parties supérieures de son corps sont jaunes ou roux brunâtre, striées de noir ; ses parties inférieures sont gris foncé. Ce singe strictement arboricole est fort agile et peut réaliser des sauts de 20 m d'un arbre à un autre. On le rencontre parfois dans les mangroves des estuaires.

C. hamlyni, le cercopithèque à tête de hibou, l'un des singes les plus étranges et les moins connus, vit, à ce qu'on sait, dans une zone restreinte de la forêt dense équatoriale du bassin oriental du Congo. Il mesure environ 50 cm de long. Ses parties supérieures sont généralement gris verdâtre, avec des nuances jaunâtres et orangées ; ses parties inférieures sont noires. Sa robe est longue, y compris aux pattes. Son trait caractéristique est une bande blanche verticale, sur le nez et la partie basse du front, contrastant avec la teinte noirâtre de la face. Il semble partiellement nocturne.

C. neglectus, le cercopithèque de Brazza, très robuste, est long de 60 cm. Il présente au-dessus des yeux une étroite bande transversale noire, surmontée par une bande en diadème d'un rouge plus ou moins vif ; cette dernière, chez les adultes, est surmontée par une autre bande noire. Ce singe est caractérisé par un masque noir autour des yeux et une barbe blanche, souvent très longue. Sa queue, qui mesure environ 70 cm de long, est noire sauf à la base, d'où part, à proximité de l'anus, une bande blanche, se développant sur les côtés des cuisses. Cet Animal a une prédilection pour les forêts situées le long des rivières et fréquente beaucoup les rives marécageuses ; on le trouve aussi dans les forêts denses de montagne, jusqu'à 2 000 m d'altitude. Il est répandu dans une grande partie du bassin du Congo et dans le nord-ouest du Kenya.

C. diana, le cercopithèque diane, a la face, les parties supérieures de la tête, les épaules, les flancs et une partie des membres de couleurs très foncées, contrastant avec la couleur blanche des parties inférieures. En outre, le dos et les parties postérieures des cuisses sont d'un beau rouge ou orangé foncé, et la barbe est blanche ; la poitrine, également blanche, présente parfois une bordure jaune citron. Ce singe habite les forêts pluviales d'Afrique occidentale, de la Sierra Leone jusqu'au fleuve Volta.

L'espèce la plus commune est *C. aethiops,* qui comprend un grand nombre de sous-espèces et races géographiques, répandues dans toute l'aire du genre. Il est principalement gris jaunâtre, avec des nuances vert olivâtre ; sa face, noire, présente une nette ligne supraciliaire blanche et des touffes claires au-dessus des oreilles ; les côtés de son museau sont clairs ; les parties inférieures du corps sont blanc jaunâtre ; ses mains et ses pieds sont brun foncé. La fourrure est variable selon les sous-espèces, dont certaines sont fréquemment considérées comme des espèces distinctes, comme *C. aethiops aethiops,* le grivet, d'Afrique centrale et orientale, *C. aethiops pygerythrus,* le vervet, d'Afrique orientale et australe, et *C. aethiops sabaeus,* le callitriche, ou singe vert proprement dit, qui habite l'Afrique occidentale, de la Sénégambie jusqu'au Niger. A la différence des autres espèces du genre, le grivet vit habituellement dans la savane et les broussailles, formant parfois de très importantes bandes, qui accomplissent de grands déplacements saisonniers, non sans provoquer au passage de grands dommages aux cultures.

Les deux autres espèces ont une place distincte ; elles ont des caractères si particuliers que certains mammalo-

Ostman - E. Muench

A. Margiocco

gues en ont fait deux genres distincts : *Miopithecus,* le miopithèque, et *Allenopithecus,* l'allénopithèque, ce qui nous semble abusif.

Cercopithecus (Miopithecus) talapoin, le talapoin, le plus petit des cercopithèques, mesure de 32 à 45 cm de long, avec une queue de 40 cm. Sa morphologie et sa robe sont très proches de celles des autres cercopithèques, et sa tête est proportionnellement plus longue. Il vit dans les forêts du Cameroun méridional jusqu'au Gabon et en Angola.

Cercopithecus (Allenopithecus) nigroviridis, le cercopithèque noir et vert, présente certains caractères, qui rappellent le genre *Papio,* notamment l'importance des callosités fessières, il mesure 50 cm, et sa queue est aussi longue que son corps. Il est gris noirâtre sur le dessus, et gris clair en dessous. Répandu dans les forêts du bassin du moyen Congo, il vit dans les zones paludéennes et à sol fréquemment inondé. Il semble aller volontiers à l'eau, où il compléterait son régime, surtout frugivore, par des petits Poissons, des Crustacés et des Mollusques.

Le genre *Erythrocebus,* représenté par l'unique espèce, *E. patas,* le singe rouge, ou patas, ou encore singe pleureur, se distingue facilement des cercopithèques proprement dits par la morphologie et les mœurs. Plus grand que la moyenne de ces derniers, puisqu'il mesure plus de 80 cm de long, avec une queue encore plus longue, il pèse jusqu'à 25 kg. Ses parties supérieures sont habituellement roussâtres, et ses parties inférieures blanchâtres. Ses pattes sont très longues ; ses mains et ses pieds sont plus courts que ceux des cercopithèques. Le patas se tient de préférence à terre, dans les endroits découverts, à la lisière des forêts ou dans les savanes ; il se rend seulement occasionnellement dans les forêts, surtout pour boire. Sa distribution s'étend de la région de la Mauritanie et du Sénégal au Soudan et à une grande partie de l'Afrique orientale.

On observe des caractères de transition entre les cercopithèques, les macaques et les cynocéphales chez les cercocèbes, ou mangabeys *(Cercocebus),* formes typiquement arboricoles, qui habitent les forêts équatoriales, de la Gambie à l'Ouganda, au Kenya et à la Rhodésie du Nord. Ils atteignent 80 cm de long, possèdent une longue

◀▲ A gauche, au centre, le vervet, ou grivet (Cercopithecus aethiops), est généralement arboricole. A droite, chez la même espèce, on notera l'importance que les singes donnent aux soins qu'ils prodiguent aux petits.

T. Okapia

◀ Erythrocebus patas, ***le singe rouge ou patas, se tient de préférence à terre, dans des endroits découverts, à la lisière des forêts ou des savanes.***

queue, d'importantes callosités fessières (en contact chez les mâles), et présentent un net prognathisme. Leur troisième molaire inférieure a cinq tubercules, comme chez les macaques, à la différence des cercopithèques, lesquels en ont quatre. Leur robe est généralement unicolore. Presque tous ont les paupières et le tour des yeux blancs, contrastant avec la teinte foncée de la face.

Les cercocèbes se tiennent le plus souvent sur les arbres, habituellement par groupes de quatre à quatorze individus. Ils se nourrissent de fruits, et dans une moindre mesure, de petits Animaux. Ils ne sont nullement agressifs. Selon Sanderson, ces singes pourraient communiquer entre eux par de rapides battements de paupières et de langue. On ne connaît pas la signification de ces différents gestes. Presque tous les auteurs reconnaissent quatre espèces de cercocèbes.

Cercocebus aterrimus, le cercocèbe noir, long d'environ 70 cm, a le pelage noir brillant et la tête surmontée d'une grosse touffe de poils se terminant en pointe. Il vit dans les forêts au sud du fleuve Congo ; il se tient normalement dans les hauteurs des arbres, mais descend souvent à terre pour chercher de la nourriture, surtout le long des cours d'eau.

C. albigena, le cercocèbe à joues grises, propre au Gabon, au Cameroun et au Zaïre, porte également une touffe de poils sur la tête.

C. galeritus, le cercocèbe agile, a les poils de la partie supérieure annelés de roussâtre et de brun ; sa poitrine et son ventre sont clairs. Il habite du Cameroun au Kenya.

C. torquatus, le cercocèbe à collier blanc, est le plus connu. Il possède une sorte de capuchon roux et un large collier blanc. Il est répandu de la Gambie au Gabon. Ces deux dernières espèces ne portent pas de touffe de poils sur la tête.

Le second groupe de Cercopithécinés comprend les macaques au sens large, à formes plus trapues ; ce sont des singes bien adaptés à la vie à terre et à diffusion presque uniquement asiatique. On en connaît deux genres : *Macaca,* avec douze espèces, et *Cynopithecus,* avec une seule espèce, confinée aux Célèbes.

Les *Macaca,* ou macaques, ont une taille très variable (de 40 à 80 cm), même au sein d'une même espèce, en fonction de la distribution géographique, souvent très vaste. Les mâles sont plus gros que les femelles. Le tronc est généralement robuste (ces singes sont moins fins que les cercopithèques et les colobes). La tête est volumineuse, le museau assez saillant, mais avec les narines assez en arrière par rapport à la lèvre supérieure. La visière supra-orbitaire est prononcée. Les callosités fessières ont une superficie variable et confluent chez les mâles. La queue est généralement très longue, mais chez certaines espèces elle est courte, rudimentaire ou même absente (chez le magot). La troisième molaire inférieure est pentatuberculée.

La livrée présente des teintes variant de l'olivâtre au brun foncé, et toujours plus claires aux parties inférieures ; certaines espèces possèdent une sorte de béret de poils sur la tête. La variabilité de la fourrure est telle, même au sein d'une même espèce, que les descriptions que nous en donnons n'ont qu'une valeur indicative.

Les macaques vivent habituellement en troupes commandées par un mâle, et comprenant plusieurs dizaines d'individus des deux sexes et de tous âges. Les mâles sont très combatifs et entrent parfois en rivalité. Il existe aussi des groupes uniquement de mâles et même des mâles solitaires. Ces singes intelligents ont une organisation sociale structurée.

Principalement forestiers, ils sont très bien adaptés à la vie arboricole, mais certaines espèces sont quelque peu terrestres. Ces singes, très agiles, de mœurs diurnes, et de régime omnivore, aiment assez l'eau et nagent très bien ; certains, comme le macaque crabier, vivent aussi sur les plages et près des cours d'eau. D'autres, enfin, ont une prédilection pour les zones découvertes et rocheuses.

La reproduction a lieu toute l'année dans les régions tropicales, et seulement en été dans l'Himalaya. La gestation dure de 5 à 7 mois, chaque portée étant unipare ou, au maximum, gémellaire. Le nouveau-né, presque nu et pesant un peu moins de 0,5 kg, est soigné et allaité pendant près de 1 an par la mère ; la maturité sexuelle est atteinte vers 4 ans.

Les macaques s'adaptent très bien à la captivité, où certains individus vivent plus de 30 ans. Ils sont utilisés pour la recherche médicale comme Animaux de laboratoire ; ils ont permis de réaliser d'importantes découvertes, comme celles du facteur Rhésus du sang (du nom du singe rhésus, ou *Simia rhesus,* remplacé depuis par celui de *Macaca mulatta*), du vaccin de la poliomyélite, etc. On les a même envoyés dans l'espace !

Les macaques ont la plus grande aire de distribution de tous les Primates, à l'exclusion de l'homme. Ils vivent de l'Afrique du Nord jusqu'à l'Asie du Sud-Est et au Japon. Il en existe au total douze espèces, dont certaines sont très communes.

M. silenus, le macaque silène, très caractéristique, a une fourrure touffue, à poils plus longs sur le dos, noire ou brunâtre aux parties supérieures. Les vieux mâles possèdent autour de la tête une couronne de longs poils blanchâtres qui forme une grande crinière avec la barbe, de même couleur et aussi longue ; le tour des yeux, du nez et de la bouche est noir. Long de 60 cm environ, ce macaque a une queue mesurant seulement 25 cm, avec une grosse touffe terminale de poils. Il vit dans la péninsule indienne, à l'intérieur des forêts perdues des Ghatts occidentaux, des côtes jusqu'en altitude.

On rencontre aussi en Inde péninsulaire *M. radiata,* le macaque commun, ou à bonnet, dont la tête porte une sorte de bonnet de poils foncés. Il est de taille moyenne et a une longue queue. Surtout arboricole, il se déplace cependant souvent à terre par bandes de vingt à trente individus, qui effectuent de grands dégâts dans les cultures. Il est très commun, habite de la côte aux régions de montagne et même près des villages ; il jouit de la faveur et de la protection de l'homme.

M. sinica, le macaque couronné, plus petit que les précédents, est confiné à l'île de Ceylan. Fort craintif, remarquablement intelligent, il manifeste une curiosité extrême.

L'espèce dont la distribution est la plus vaste est *M. irus,* le macaque crabier, forme très importante qui comprend un grand nombre de sous-espèces et de

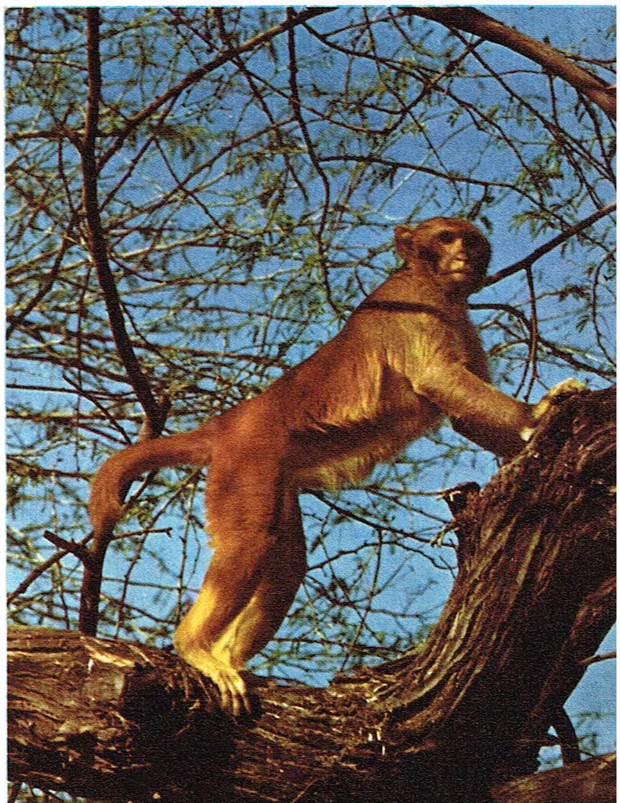

A. Margiocco

▶ *Groupe de* Macaca mulatta, *ou singes rhésus ; ces Animaux sont utilisés pour la recherche médicale en laboratoire.*

E.P.S.

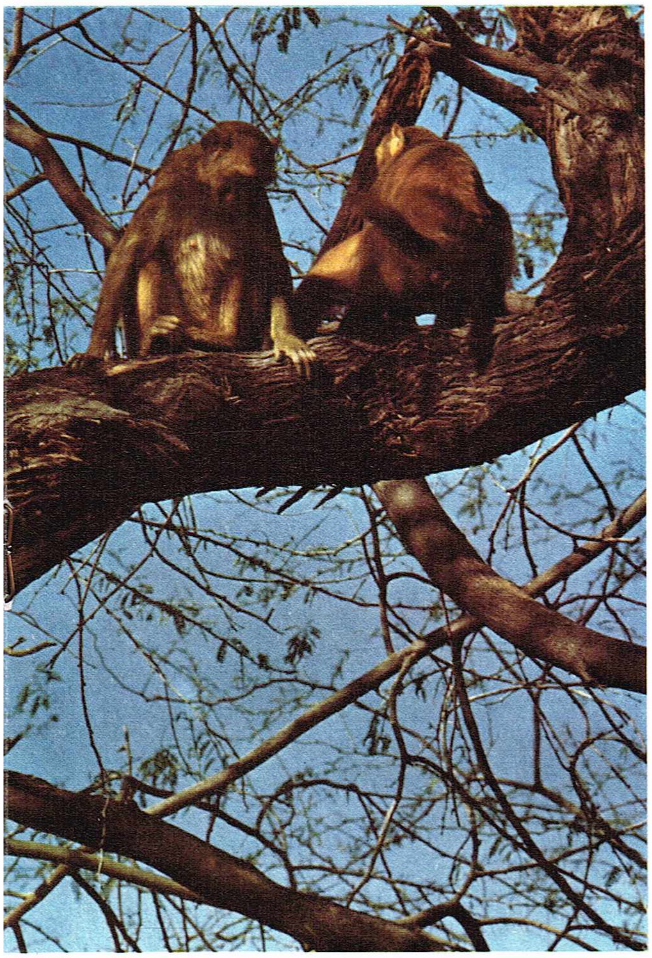

races géographiques, habitant de vastes zones de l'Asie du Sud-Est, de la haute Birmanie jusqu'à l'Indochine, à la péninsule Malaise et aux îles de la Sonde; on en rencontre à l'est, jusqu'à Timor et aux Philippines. Il en existe aussi aux îles Nicobar.

C'est l'un des trois Cercopithécidés qui habitent au-delà de la ligne Wallace (*Presbytis cristatus,* qui vit à Lombok, y a peut-être été introduit); les deux autres vivent uniquement aux Célèbes : il s'agit de *M. maura,* le macaque maure, et *Cynopithecus niger,* le cynopithèque noir.

Le macaque crabier est très intéressant du point de vue zoogéographique, du fait du nombre élevé de formes qui se sont différenciées par suite de l'isolement géographique de leurs populations disséminées dans l'archipel malais.

De corps très robuste, ce singe a une grosse tête et des pattes courtes. Les mâles mesurent environ 55 cm de long, et ont une queue de 50 cm de long. La fourrure est très variable. Il vit surtout dans les zones plates, habituellement à proximité des côtes et des cours d'eau; étant donné sa diffusion surtout insulaire, la majorité des individus habite sur les littoraux, dans les mangroves. Ce macaque nage par bandes dans les anses et les embouchures des fleuves, chassant les Animaux marins, en particulier des Crustacés et des Mollusques, qui constituent le principal de sa nourriture.

M. mulatta, le singe rhésus, ou rhésus, a une diffusion plus septentrionale, son aire s'étendant de l'Afghanistan oriental jusqu'au Fou-kien (Chine méridionale) et à l'Indochine. Dans l'Himalaya, on en observe des populations particulièrement robustes de corps et à fourrure naturellement plus fournie. Long d'environ 60 cm, il est brun jaunâtre, avec la tête et le dos plus foncés; sa face, souvent rose pâle ou de couleur chair, peut être gris clair. C'est l'une des espèces les plus variables. Les mâles sont beaucoup plus grands que les femelles et ont le museau presque aussi développé que celui des babouins. Le singe rhésus se déplace en bandes très importantes, dans les forêts ou le long des rivières ou, encore, à proximité des villages; il vit beaucoup à terre, surtout pour se nourrir.

M. assamensis, le macaque de l'Assam, autre espèce montagnarde, est long de 60 cm et possède une queue de 20 cm seulement. Il est couvert d'une fourrure touffue. Il habite les forêts du Népal, du Sikkim, du Bhoutan, de l'Assam, du Yunnan, de la haute Birmanie et d'une partie de l'Indochine.

M. nemestrina, le macaque à queue de cochon, ou macaque maimon, est assez semblable au rhésus. Il est long d'environ 50 cm, et possède une queue, assez courte, mesurant moins de 20 cm. Par contre, ses membres sont très longs. Sa face, ses oreilles et ses callosités fessières sont de couleur chair foncé, sa robe de teinte olive, souvent foncée. Il vit dans la jungle dense. Sa distribution coïncide largement avec celle d'autres espèces de macaques; elle va de l'Assam et de la haute Birmanie à Bornéo, Sumatra et quelques autres îles malaises. Il semble que les individus vivant aux îles Andaman y aient été introduits. La forme typique de Sumatra est la plus grande. Les mâles de cette race, très robustes, sont improprement nommés rhésus géants. Les juvéniles et les femelles ont été dressés depuis des temps immémoriaux, surtout à Sumatra, à cueillir les noix de coco et autres fruits.

M. speciosa vit dans les très hautes montagnes, de l'Assam à la Chine méridionale (Sétchouan, Yunnan jusqu'au Fou-kien), en Birmanie, dans une partie de l'Indochine et dans la péninsule malaise. Long de 40 à 70 cm, avec une queue mesurant jusqu'à 40 cm, il présente un accroissement de la longueur en allant du sud au nord et atteint sa taille maximale chez les races de montagnes, gigantesques, dont certaines, comme *M. speciosa tibetana,* le macaque du Tibet, sont observées jusqu'à 3 000 m d'altitude. Ce singe effectue des migrations saisonnières d'une chaîne de montagnes à l'autre.

Deux espèces sont également propres à l'Extrême-Orient : *M. cyclopa,* le macaque cyclope, ou de Formose, confiné à cette île, et *M. fuscata,* le macaque à face rouge, ou macaque japonais, nettement caractérisé, lorsqu'il est adulte, par sa face d'un rouge vif très brillant. Long d'environ 60 cm, à queue très courte (6 à 8 cm), ce dernier a une fourrure touffue, brun foncé et olivâtre et plus foncée sur la ligne dorsale. On le rencontre encore

◀ **Macaca silenus,** *le macaque silène; ici un mâle âgé portant une grande crinière et une barbe blanchâtres caractéristiques.*

▶ **Cynopithecus niger,** *le cynopithèque noir ou singe des Célèbes, porte sur la tête une touffe de poils érectiles caractéristique.*

communément dans les îles de Yakushima et de Nippon, par exemple, sur les collines près de Kyoto (collines des singes) où il est très respecté.

M. sylvana, le magot, est l'unique macaque africain et le seul singe qui habite l'Europe. Sa distribution couvre l'Algérie et le Maroc (d'où son nom de singe de Berbérie) ainsi que le rocher de Gibraltar (où, en fait, il a probablement été importé il y a fort longtemps). Cependant, du point de vue zoogéographique, il n'appartient pas à l'Afrique paléotropicale, mais à la région paléarctique, englobant l'Afrique du Nord; son aire actuelle est le vestige d'une distribution beaucoup plus vaste, qui couvrait naguère l'Europe et, selon toute probabilité, touchait l'Asie. Les magots errent par bandes dans les montagnes couvertes de Conifères. Ils se nourrissent de fruits, de graines, d'herbes et de feuilles, ainsi que de petits Animaux. Ils se tiennent de préférence à terre, surtout dans les endroits rocheux.

Ce singe a toujours été connu à Gibraltar, où il a failli disparaître vers le milieu du siècle dernier. En 1863, il n'en restait plus que trois ou quatre individus et le gouverneur de Gibraltar en importa quatre autres du Maroc. Sévèrement protégés, ces singes s'accrurent de nouveau numériquement. Toutefois, ils ont continué à être maltraités et à exercer pour leur part bien des ravages; c'est pourquoi ils ne purent être laissés en liberté totale et sont maintenant en état de semi-domesticité.

Le magot est l'un des plus gros macaques, puisqu'il est long de 75 cm. Son tronc, robuste et massif, est dépourvu de queue. Sa fourrure, touffue et courte, est de couleur brun foncé sur la tête, brun grisâtre sur le dos et les membres, et jaune clair sur le ventre.

M. maura, le macaque maure, que certains auteurs rangent dans le genre distinct *Cynomacaca,* vit seulement aux Célèbes et dans quelques îles proches; contrairement à ce qui est parfois dit, on ne le rencontre pas dans les îles Aru. Bien qu'omnivore, il est considéré comme carnivore par les indigènes.

Dans le nord des Célèbes et quelques îles proches, vit *Cynopithecus niger (Macaca nigra),* le cynopithèque noir, ou singe des Célèbes, ou encore macaque à crête car il porte une touffe de poils érectiles sur la tête. Par de nombreux caractères, il est intermédiaire entre les macaques et les cynocéphales. Long de 50 à 65 cm, il a un museau allongé, avec la crête maxillaire typique des cynocéphales, mais ses narines sont plutôt celles des macaques. Ses callosités fessières, de couleur chair, confluent chez les mâles. Sa queue ne mesure que 5 cm. Ses mœurs sont mal connues : on sait qu'il est essentiellement arboricole et se nourrit en grande partie de fruits.

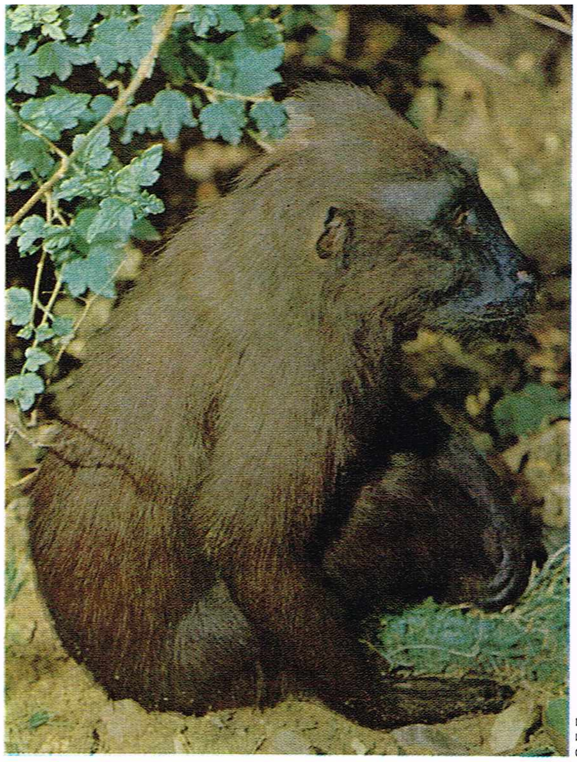

S.E.F.

Le troisième groupe de Cercopithécinés est constitué par les cynocéphales, très grands et robustes. Leur museau est fort long, surtout chez les mâles, et de forme canine (cynocéphale signifie : « à tête de chien »), avec une visière supra-orbitaire très prononcée et le maxillaire pourvu d'une crête longitudinale. Les callosités fessières sont très importantes et vivement colorées. La denture est très robuste; chez les mâles, les canines sont de véritables défenses, remarquablement efficaces, même contre les gros Carnivores. La queue est très variable. Les pattes, robustes, sont conformées pour la marche à terre.

Ces singes, essentiellement terrestres, vivent le plus souvent dans les endroits découverts, et, fréquemment, rocheux. Seuls les *Mandrillus* sont forestiers. D'une force peu commune et d'un grand courage, ils se montrent facilement irascibles. On a beaucoup exagéré cet aspect, les jugeant d'un point de vue anthropomorphique et leur attribuant des qualités et des défauts imaginaires. Des études approfondies réalisées ces dernières années ont mis en évidence d'intéressants aspects de leur organisation sociale et de leurs mœurs, permettant de définir leur éthologie de façon plus rigoureuse.

▼ *Les babouins* **(Papio sp.)** *sont les singes les mieux connus d'Afrique; ils vivent en bandes importantes; leur marche est peu gracieuse, mais très assurée.*

Ostman - E. Muench

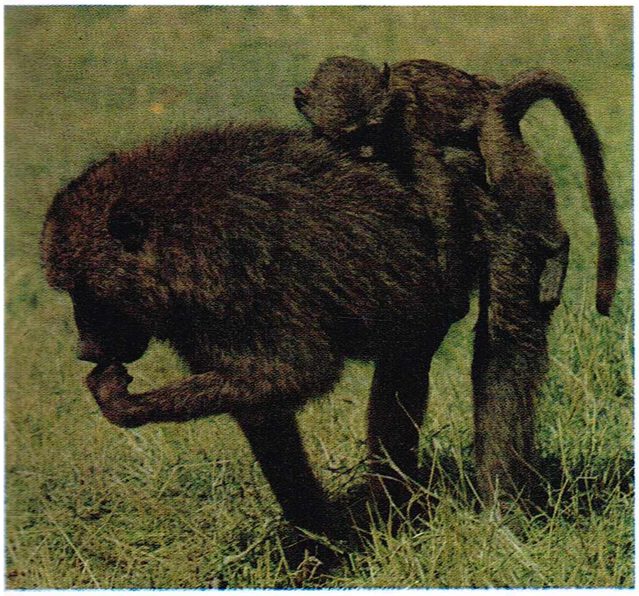

Photo Researchers - N. Myers

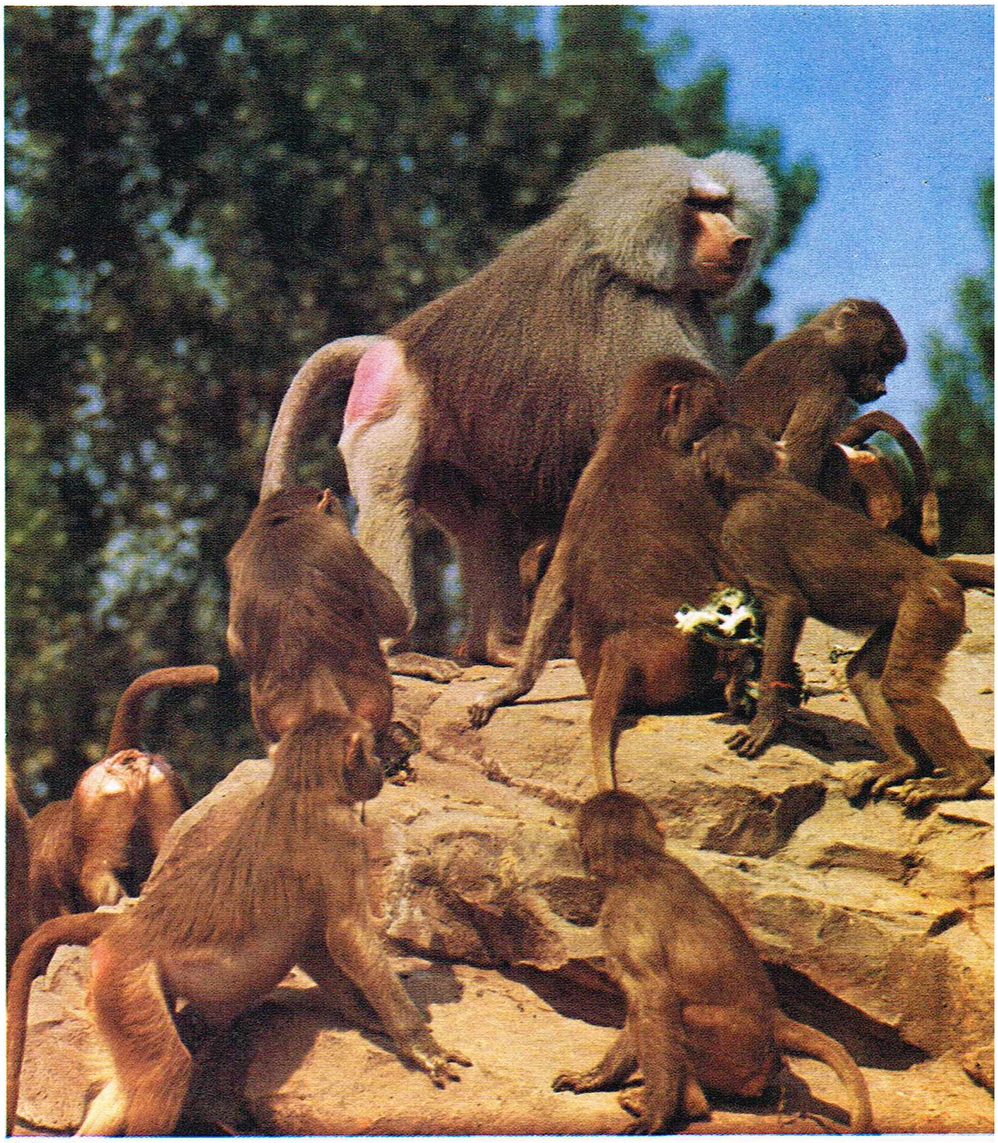

T. Okapia

▲ *A gauche, une femelle de babouin jaune,* Papio cynocephalus, *portant son petit à cheval sur le dos. A droite, groupe d'hamadryas* (Papio hamadryas) *; l'organisation sociale de l'espèce est très stricte et s'aménage sous la conduite d'un vieux mâle ou sous la tutelle de nombreux mâles.*

Les cynocéphales comptent trois genres, tous de la zone paléotropicale, c'est-à-dire de l'Afrique au sud du Sahara, et de l'Arabie du Sud (pour l'hamadryas). Il s'agit des *Papio, Mandrillus* et *Theropithecus,* qui comptent au total huit espèces.

Le genre *Papio* comprend les babouins et l'hamadryas. Ce sont les singes les mieux connus d'Afrique. Longs de 50 cm à plus de 1,10 m, ils sont parmi les plus gros Cercopithécidés, puisqu'ils peuvent peser jusqu'à 40 kg. Leur queue est longue de 50 à 70 cm. Leur fourrure, très grossière, est brune ou brun olivâtre, avec des nuances tendant au jaunâtre. Leurs mains, leurs pieds et leur queue sont souvent noirâtres. Chez les mâles, le pelage est plus long autour du cou et aux épaules, formant même chez l'hamadryas une importante crinière. Leur marche est peu gracieuse, mais très assurée. Leur nourriture est omnivore dans le sens le plus large : ils mangent en effet toutes sortes de Végétaux et de grandes quantités de petits Animaux, y compris des Vers et des Scorpions. Ils ont un grand besoin d'eau.

Les *Papio* vivent en bandes, dans les zones rocheuses et très rarement dans les lieux boisés. Leurs troupes peuvent compter plusieurs dizaines de têtes chez les babouins et plusieurs centaines chez l'hamadryas. Un vieux mâle sert de guide; il existe une organisation sociale et une hiérarchie nettement définies. La bande est constituée d'unités sociales plus petites, que l'on considère comme des harems, composées d'un mâle, de plusieurs femelles et des petits. Certains mâles sont marginaux, ne faisant pas vraiment partie de la société simiesque et étant plus ou moins tolérés par celle-ci. Des veilleurs sont postés, qui préviennent le groupe de tout danger. Pendant la nuit, ces singes se retirent dans des zones bien déterminées ou dans des anfractuosités de rochers, ou encore sur de grands arbres. Leur principal ennemi est le léopard; les vieux mâles, toutefois, particulièrement robustes et courageux, se défendent avec succès contre les prédateurs; il leur arrive même de s'attaquer à l'homme. Les babouins ont une voix caractéristique, ressemblant à un fort et profond aboiement. Lorsqu'ils mangent ensemble, ils émettent des grognements et des grondements.

La gestation dure de 6 à 7 mois. Chaque portée est généralement unipare ou, rarement, gémellaire. Le nouveau-né est tout de suite porté par sa mère, suspendu à sa poitrine, et plus tard à cheval sur le dos. Les *Papio,* toujours fort propres, s'épouillent réciproquement avec grand soin. Ils provoquent souvent de grands dégâts dans les cultures.

Il existe quatre espèces de babouins, plus l'hamadryas, qui a une place à part et que certains auteurs rangent dans un genre différent : *Comopithecus.*

Papio ursinus, le chacma, vit en Afrique australe, dans les zones rocheuses, où il se montre excellent grimpeur. Il est gros et sa livrée gris noirâtre présente des reflets verdâtres.

P. cynocephalus, le babouin jaune, habite les savanes et les zones arborées ouvertes d'Afrique orientale et centrale. C'est le plus commun du genre.

Les deux autres espèces sont : *P. doguera,* le babouin doguera, ou anubis, qui peuple l'Afrique centro-orientale, montant jusqu'au Tibesti, et *P. papio,* le babouin de Guinée, qui n'est peut-être qu'une forme du babouin jaune et qui peuple l'Afrique occidentale, du lac Tchad au Sénégal, au nord de la grande forêt équatoriale.

P. hamadryas, l'hamadryas, est facile à distinguer, avec son grand manteau de longs crins chez les mâles, recouvrant le cou, les épaules et une bonne partie du thorax. Les mâles possèdent en outre sur la tête une crinière qui se continue sur les côtés et sur le museau. La robe est gris clair. C'est un Animal de grande taille, avec une longueur maximale de 75 cm, une hauteur au garrot de 50 cm et une queue de 50 cm.

L'hamadryas vit actuellement au Soudan, dans une grande partie de l'Éthiopie et de la Somalie ainsi que dans le sud-ouest de l'Arabie; autrefois, on le rencontrait aussi en Égypte, où il était considéré comme un Animal sacré. Ayant été chassé sans pitié, ce singe ne forme plus aujourd'hui que des bandes de cinquante à cent têtes, alors que celles-ci atteignaient trois cents à quatre cents individus dans le passé. L'organisation sociale est très stricte : chaque groupe, sous la conduite d'un vieux mâle ou sous la tutelle de nombreux autres mâles, a généralement un lieu pour la nuit, souvent sur une petite colline rocheuse, où la défense contre les gros Carnivores est plus facile.

L'Afrique occidentale abrite un genre bien différent de cynocéphales : *Mandrillus,* qui est forestier, mais

non arboricole. Ce genre est probablement le stade terminal de la lignée évolutive des cynocéphales; on y observe toutes les caractéristiques les plus typiques de ces singes, accentuées à l'extrême. Même leurs mœurs sont plus avancées que celles des autres espèces du groupe; par ailleurs, ils montrent un courage remarquable.

De corps très robuste et d'une grande force musculaire, ils ont le tronc assez court. Leurs membres antérieurs sont plus longs que les postérieurs. Leur queue est très courte (5 à 7 cm). Leur longueur varie de 60 cm à plus de 80 cm; les gros mâles de mandrill pèsent un peu plus de 50 kg, ce qui est le poids maximal chez les Cercopithécidés. La tête est énorme par rapport au corps, avec un museau très long et massif, orné de coussinets cutanés, en saillie, supportés par des structures osseuses et une visière supra-orbitaire très accentuée.

Ces singes plutôt sédentaires vivent dans les forêts d'Afrique occidentale, de préférence à terre. Leur nourriture est très variée. Ils grimpent assez habilement aux arbres où ils s'installent pour leur repos nocturne. Ils forment des troupes comptant parfois cinquante individus, mais généralement moins. Pour le reste, ils ressemblent beaucoup aux *Papio*. La durée de gestation est de 7 à 9 mois, et la longévité atteint 40 ans en captivité.

Le genre compte deux espèces : *Mandrillus sphinx (Papio mandrillus)*, le plus gros, d'une hauteur au garrot atteignant 50 cm, qui habite au Nigeria et dans le nord du Cameroun, et *Mandrillus leucophaeus (Papio leucophaeus)*, du Cameroun, d'une partie du Zaïre et du Gabon.

M. sphinx, le mandrill, a le museau orné, chez les mâles adultes, d'une série de sillons arqués, longitudinaux, sur deux coussinets latéraux, à l'extrémité desquels s'ouvrent les narines, rouges chez les mâles et noires chez les femelles. Cette espèce, plus encore que *M. leucophaeus*, présente un important dimorphisme sexuel en ce qui concerne la taille et la couleur du museau. Chez les mâles, celui-ci est rouge vermillon de même que les sillons, alors que les reliefs des coussinets sont d'un beau bleu. La fourrure, clairsemée, longue et hérissée, est brunâtre sur le dos et les flancs, jaunâtre à la poitrine et blanchâtre sur le ventre; la tête porte une touffe de poils brun foncé. La couleur du museau et des callosités fessières est très variable en fonction de l'âge; chez les sujets matures, elle varie en fonction des cycles endocriniens.

M. leucophaeus, le drill, a le museau noir, le menton rouge et une barbe blanchâtre ou grisâtre. Il est moins arboricole que le mandrill.

Le dernier genre de cynocéphales est *Theropithecus*, représenté par la seule espèce *T. gelada (Papio gelada)*, le gélada, forme typique de montagne, qui vit dans les montagnes de l'Éthiopie centrale et septentrionale, dans les zones découvertes et escarpées, entre 2 000 m et 5 000 m d'altitude.

Long de 75 cm au maximum, il possède une queue qui atteint 80 cm de long. Son museau est moins long que celui des genres précédents et possède des narines terminales; selon de nombreux zoologues, il présente des caractères de transition avec les macaques. Ses callosités fessières sont plus réduites, jamais confluentes et de couleur noire. Son corps est fin et très robuste. Les mâles pèsent deux fois plus que les femelles. La fourrure, brun foncé, est abondante sur tout le corps sauf à la poitrine et sur une partie de la gorge, où elle laisse une zone nue de couleur rouge vif. Les mâles possèdent, en outre, une touffe de poils sur l'occiput et un abondant manteau de crins, plus serrés contre le corps que chez l'hamadryas.

Terrestre et principalement végétarien, le gélada se tient à proximité des précipices et sur des arêtes rocheuses, et dort à l'abri des rochers ou dans des anfractuosités. Hautement grégaire, il peut former des bandes de quatre cents individus; toutefois, il ne s'agit pas d'agrégats sociaux stables, au contraire de ce qu'on observe chez les babouins, mais de réunions temporaires de diverses unités sociales, dans des circonstances particulières, par exemple, lorsqu'il y a abondance de nourriture dans une zone. Toutefois, bien que temporaire, ce grégarisme n'est pas la résultante de facteurs purement occasionnels, mais dépend d'une aptitude innée de ces Primates. Selon de récentes études effectuées en Éthiopie (Crook J. H., 1966), les grandes troupes de cette espèce sont formées par des agrégats mineurs de deux types : des groupes à un seul mâle, qui sont les unités de reproduction de la population, consistant en un mâle adulte, un certain nombre de femelles avec ou sans petits, et des juvéniles; on peut y trouver aussi des mâles subadultes; ces groupes sont de règle là où la population est suffisamment dispersée; de petits groupes à cohésion limitée à quelques semaines sont constitués uniquement de mâles adultes et jeunes.

La sous-famille des *Colobinés* comprend des formes uniquement arboricoles. Leur tronc est généralement élancé. Leurs membres antérieurs sont nettement plus courts que les postérieurs. Leurs mains et leurs pieds sont plus étroits et plus longs que ceux des Cercopithécinés.

▼ *A gauche, le gélada,* Theropithecus gelada, *forme typique de montagne, vit en Éthiopie centrale et septentrionale, entre 2 000 et 5 000 m d'altitude. A droite, le curieux museau du mandrill,* Mandrillus sphinx, *singe cynocéphale qui habite le Nigeria et le nord du Cameroun.*

T. Okapia

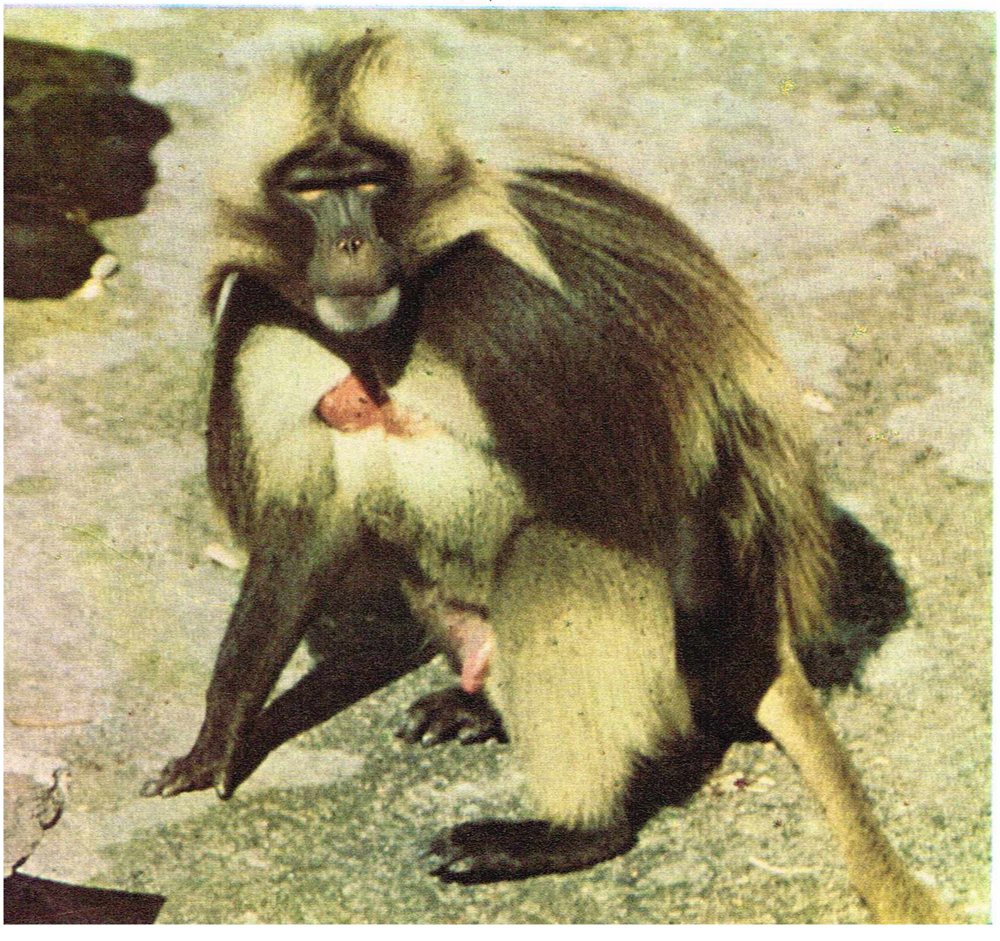

T. Okapia

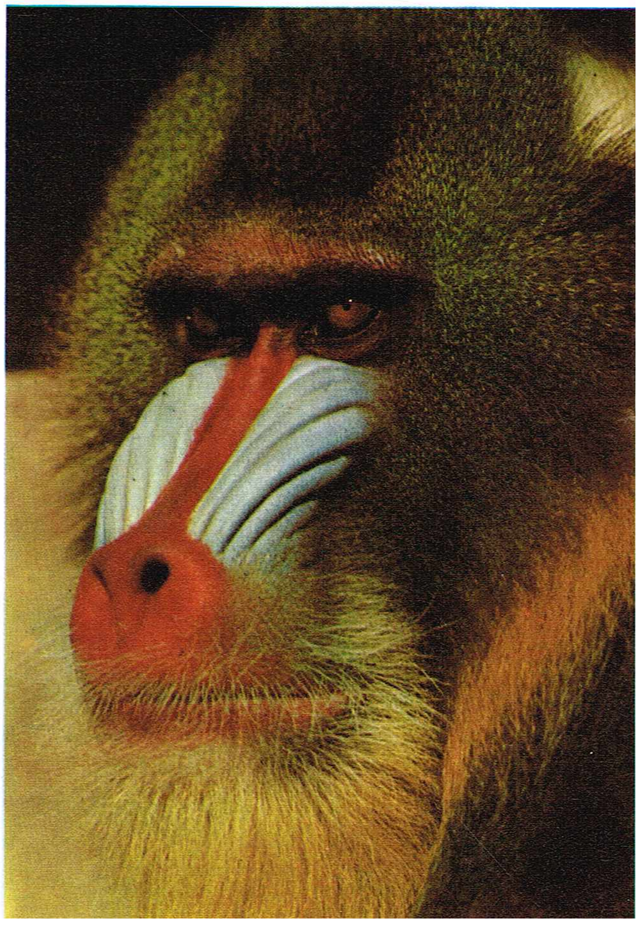

Leurs pouces sont réduits ou même absents. Leur queue est longue, sauf chez *Simias*. Leurs callosités fessières ne sont guère développées et sont toujours séparées. Leur crâne ne présente pas de véritable visière supra-orbitaire. Leur face est peu ou non proéminente et développée surtout en hauteur.

Les Colobinés ne possèdent pas d'abajoues (au contraire des Cercopithécinés), sauf *Colobus,* qui en présente des réduites. Leur estomac a une conformation très spécialisée, avec un allongement et une division en plusieurs chambres, ou lobes principaux, partiellement séparés par des cloisons ou, mieux, par des constrictions; celles-ci sont pourvues de muscles. Cette anatomie gastrique, unique chez les Primates et quelque peu comparable à celle des Ruminants, est adaptée au régime principalement folivore de ces singes; les Colobinés absorbent une grande quantité de feuilles, qui s'emmagasinent dans la première cavité stomacale; en vue d'une digestion efficace des aliments cellulosiques, la surface interne de l'estomac est considérablement accrue par le développement des loges que celui-ci comprend. Le foie, du fait de la taille de l'estomac, est très petit et richement lobé.

La robe est souvent de couleur vive. Par ailleurs, chez de nombreuses espèces, on observe un tel dimorphisme entre la fourrure du nouveau-né et celle du juvénile qu'il est difficile de reconnaître le même Animal à des périodes différentes de sa vie.

D'autre part, les Colobinés ont un tempérament très réservé pour des singes, ce qui, selon Sanderson, les aurait fait considérer comme sacrés par les asiatiques. Leur habitat typique est la grande forêt, au plus haut des arbres, et ils descendent rarement à terre.

Au total, la sous-famille compte six genres et vingt et une espèces, dont les mœurs sont presque inconnues, et dont certaines sont très rares. On les a réunis en trois groupes distincts : les colobes (genre *Colobus*), tous africains, les langhurs au sens large (genres *Presbytis* et *Pygathrix*), asiatiques, et, enfin, un troisième groupe fort curieux, lui aussi asiatique, qui comprend les genres *Simias, Rhinopithecus* et *Nasalis*.

Colobus, le genre type, comprend les colobes, très beaux singes africains, longs de 50 à 70 cm et pesant à l'âge adulte jusqu'à plus de 12 kg. Ils ont le tronc élancé et une très longue queue (60 à 90 cm) terminée par un gros panache de poils. Leur fourrure, soyeuse, est très variable : on observe une prédominance de robes noir et blanc, rouille et même olivâtres. Les nouveau-nés peuvent présenter une livrée toute blanche, laquelle fonce rapidement pour donner graduellement la livrée de l'adulte. Ces singes ont des callosités fessières normalement développées, et des abajoues réduites.

Les colobes sont les singes africains les plus arboricoles; ils descendent fort rarement à terre. Ce sont d'exceptionnels acrobates. Ils habitent les forêts denses jusqu'à 3 000 m d'altitude et vivent par groupes familiaux ou par bandes comptant une vingtaine d'individus. Ils se nourrissent seulement de bourgeons et de feuilles. Leur distribution couvre l'Afrique tropicale, de l'Éthiopie jusqu'à Zanzibar à l'est, et du Sénégal jusqu'à l'Angola à l'ouest. Il en existe de nombreuses formes, dont la classification n'est pas sûre et qu'on réunit en trois espèces (quatre au maximum).

Le plus primitif par certains aspects est *C. verus (Procolobus verus),* le colobe de Van Beneden, long d'un peu plus de 50 cm. Sa livrée est vert olive. Sa tête, proportionnellement plus petite que celle du colobe guéréza, est ornée d'une crête médiane de poils olive roussâtre. C'est une espèce assez rare, habitant l'Afrique occidentale, aussi bien dans les forêts pluviales que dans les forêts de type plus sec; il lui arrive de descendre au sol. Il vit solitairement ou par couples.

C. badius (Piliocolobus badius), le colobe bai, présente une fourrure brunâtre et roussâtre. Il mesure jusqu'à 75 cm de long, et possède une queue de 90 cm. Cette espèce assez rare vit en Afrique centrale et occidentale.

C. polykomos, le colobe blanc et noir d'Afrique occidentale, compte de nombreuses sous-espèces et races géographiques, parmi lesquelles certains auteurs considèrent *C. polykomos abyssinicus,* le colobe guéréza, comme une espèce distincte. Chez sa forme la plus caractéristique, la tête, le tronc et les membres sont couverts d'une robe douce, d'un noir très brillant, alors que le front, les joues, la gorge et la queue sont blancs.

T. Okapia

▲ **Colobus badius,** ***le colobe bai, appartient à la famille des singes africains les plus arboricoles; ce sont d'exceptionnels acrobates.***

Les côtés et la partie postérieure du tronc sont couverts par une abondante frange tombante, faite de poils très longs et blancs. Cette très belle fourrure lui a valu d'être chassé sans pitié depuis fort longtemps; devenu rare, il est maintenant protégé. Il se tient de préférence sur des arbres élevés, à proximité des cours d'eau, et semble se nourrir aussi de fruits. Ses cris monotones font penser à des lamentations de pleureuses antiques.

C'est en Asie que vivent, en très grand nombre, les langhurs, localement appelés aussi singes mange-feuilles. Ce sont les plus typiques de la sous-famille, avec les genres *Presbytis* et *Pygathrix,* le premier comptant treize espèces, le second une. Les langhurs au sens large ont le corps élancé. Leur taille varie de 45 à 80 cm et ils possèdent une queue très longue (50 cm à plus de 1 m). Leur fourrure est serrée. Leur tête est très ronde. Leurs membres antérieurs sont beaucoup plus courts que les postérieurs; leurs mains et leurs pieds sont longs et étroits; leurs pouces et leurs gros orteils sont assez courts. Plusieurs espèces portent sur la tête des poils disposés en auréole ou une touffe formant chapeau. La livrée est très souvent vivement colorée.

Bien qu'ils courent et sautent très bien à terre, comme les colobes, ces singes descendent rarement des arbres, et seulement pour boire ou se déplacer d'une zone à une autre. Ils forment aussi des bandes, commandées par un mâle adulte. Leur distribution géographique, très vaste, s'étend du Cachemire et de l'Himalaya (jusque dans les zones à long enneigement) à la Chine méridionale, Haïnan, l'Indochine et à une grande partie de l'archipel malais.

Le plus connu est *Presbytis entellus,* l'entelle, ou langhur commun, ou encore hanouman. C'est le singe sacré de l'Inde; on le rencontre très communément

Ostman - A. Bergman

▲ *Les langhurs, ou singes mange-feuilles* (Presbytis sp.), *sont des singes essentiellement asiatiques; bien qu'ils courent et sautent très bien à terre, ils n'y descendent que rarement, seulement pour boire ou se déplacer d'une zone à l'autre.*

▼ *Le singe à lunettes,* Presbytis obscurus, *ici en famille, est une espèce caractéristique qui vit du Yunnan à la péninsule malaise; on observera la fourrure très claire du petit par rapport à celle de l'adulte.*

T. Okapia

jusque dans les villages et même dans les grandes villes, près des temples où les Indiens le vénèrent. Assis, ce gros singe est haut de 75 cm; sa queue mesure 1 m de long. Sa tête et son corps sont couverts d'un long pelage blanc jaunâtre ou gris clair; quant à la face, aux mains et aux pieds, ils sont noirâtres, avec des nuances tendant au violet. Sur la tête, on observe une sorte de visière de poils en auréole. Les côtés de la face et le menton portent respectivement des favoris et une barbe. La robe des nouveau-nés est très foncée.

Bien que typiquement arboricole, l'entelle a une prédilection nettement plus marquée que les autres langhurs pour la vie à terre; on le rencontre surtout près des maisons et des villages, et même dans les endroits rocheux; mais il lui faut absolument disposer d'eau à proximité. Il est strictement végétarien. Pour manger, il forme occasionnellement des groupes mixtes avec les macaques, mais se repose à part durant la nuit. Il constitue des bandes assez importantes, composées d'individus de tous âges et des deux sexes, sous la conduite d'un mâle. Son pire ennemi est le léopard. En Inde péninsulaire, les petits naissent entre janvier et mars; dans l'Himalaya, les mises bas ont lieu à la fin du printemps ou au début de l'été.

L'entelle, répandu de l'extrême sud du Tibet, du Sikkim et du Cachemire jusqu'à toute l'Inde et à Ceylan, compte plusieurs sous-espèces, qui diffèrent par la taille et la livrée. Les formes himalayennes, plus grandes, ont une fourrure plus fournie; on les observe jusqu'à plus de 4 000 m d'altitude, même dans les zones à long enneigement, où certains individus restent en hiver, vivant alors sur les Conifères. D'autres individus, par contre, descendent plus bas pendant la mauvaise saison à cause du manque de nourriture.

P. johni, le semnopithèque des Nilgiris, vit en Inde méridionale, surtout dans les montagnes, entre 1 000 et 2 000 m d'altitude. Il possède une magnifique robe, soyeuse, très foncée, noire ou brune; sa tête est brun jaunâtre. Sa longue queue est grisâtre.

P. senex, le semnopithèque blanchâtre, confiné à Ceylan, a une livrée qui varie du gris argenté au noir, avec la face rouge violacé tendant au noirâtre. Il est long d'un peu plus de 50 cm et sa queue mesure environ 80 cm.

L'Indochine, la péninsule malaise, Sumatra, Java, Bornéo et de nombreuses îles de la Sonde sont la patrie de *P. cristatus,* le boudeng, long de presque 50 cm. Ce singe, de couleur noir brillant, même à la face et aux membres, possède une sorte de colback de poils sur la tête ainsi qu'une barbe. Les juvéniles ont une très belle fourrure jaune doré. Les boudengs vivent par troupes parfois importantes, au plus profond des forêts; on les chasse pour leur fourrure.

Les îles Mentawei, situées à quelque 100 km à l'ouest de Sumatra, hébergent une flore et une faune du plus grand intérêt, fort bien conservées à cause de l'isolement. Ce petit archipel est peuplé par des *Simias* et un gibbon qui vivent uniquement là; en outre, on y rencontre à l'état endémique *P. potenziani,* espèce caractéristique, à fourrure noire sur le dessus et à reflets orangés au-dessous, avec les joues et la gorge blanches. Les nouveau-nés de cette espèce sont tout entiers de couleur or brillant.

Dans l'Assam, en Birmanie septentrionale et dans le Yunnan, vit *P. pileatus,* le langhur à bonnet, nommé ainsi pour le bonnet très serré de poils foncés qu'il possède sur la tête. Long de 60 à 70 cm, avec une queue de près de 1 m de long, ce Primate présente une face noire, des favoris blancs, le dos et les pattes gris foncé, les joues et les parties inférieures fauve pâle ou orangées.

P. phayrei, le semnopithèque de Phayre, possède également une sorte de crête sur la tête. Il habite la Birmanie, le Tennaserim et la Thaïlande.

Du Yunnan à la péninsule malaise vit une espèce tout à fait caractéristique, *P. obscurus,* le singe à lunettes, qui ne possède pas de touffe sur la tête. Il est gris très foncé et présente d'amples zones de peau dépigmentée autour des yeux et de la bouche.

Deux nettes bandes blanches, qui vont de la bouche aux joues et aux oreilles, caractérisent *P. francoisi,* le semnopithèque de François, qui, par ailleurs, possède une robe noirâtre et une petite crête sur la tête. Il vit au Vietnam du Nord et dans une partie du reste de l'Indochine.

On observe, toujours dans cette région de l'Asie du Sud-Est ainsi qu'à Sumatra et Bornéo, *P. melalophos (P. femoralis),* espèce de couleur brun foncé aux parties supé-

rieures, et blanc grisâtre aux parties inférieures, avec une bande bien visible sur les cuisses. Cette espèce possède également une crête de poils sur la tête. Ses oreilles et sa face sont noires, et contrastent avec sa gorge blanche.

P. rubicundus, propre à Bornéo, est couleur lie-de-vin, avec les mains et les pieds noirs chez les adultes, alors que les petits sont blancs. *P. frontatus,* également de Bornéo, très rare, a le front nu. Enfin, *P. aygula,* de Java, Bornéo et Sumatra, a la fourrure gris foncé sur le dessus, contrastant avec les parties inférieures, lesquelles, du menton à la pointe de la queue, sont blanches. C'est le plus bruyant de tous les langhurs; il ne craint pas la présence de l'homme et s'approche des villages et des cultures. Il a pour curieuse habitude, entre autres, de manger des Mollusques.

Le genre *Pygathrix* est représenté par une unique espèce, *P. nemaeus,* le douc, dont la livrée est très variée. Il mesure jusqu'à 75 cm et possède une queue aussi longue que le corps. La forme typique présente une tête brune, la face jaune vif ou couleur chair, des favoris blancs et une bande châtain passant sous les oreilles; le corps est gris bigarré, plus foncé sur le dessus, avec la croupe et la queue blanches, tandis que les parties inférieures sont brun jaunâtre avec des bigarrures blanches; les parties supérieures des membres sont noires, ainsi que les mains et les pieds, alors que le dessous des bras est blanc et celui des jambes marron roussâtre; le menton, les joues et la gorge sont blancs et une large bande roussâtre autour du cou forme comme une cravate. A la différence des *Presbytis,* les juvéniles de cette espèce ont une livrée semblable à celle des adultes. Très rare, le douc vit dans les forêts de l'Indochine et de la péninsule de Haïnan.

Le dernier groupe de Colobinés comprend des espèces très étranges et peu connues, confinées généralement dans des zones fort restreintes. Ils ont un nez bizarre, camus chez les *Simias* et les *Rhinopithecus,* et très long chez les *Nasalis.*

Le genre *Simias* compte une seule espèce : *S. concolor,* qui habite uniquement certaines îles Mentawei. Ce singe, long d'environ 50 cm, possède une queue courte (environ 15 cm) et nue, sauf à l'extrémité. Son corps est plutôt trapu. Il possède une fourrure brun foncé, plus claire aux épaules et à la partie supérieure des membres antérieurs. Ses mains, ses pieds et ses callosités fessières sont noirs. Ses doigts sont particulièrement longs. Dans l'ensemble, il ressemble plus à un macaque (surtout au macaque à queue de cochon) qu'à un langhur.

Cette espèce principalement arboricole vit dans les forêts paludéennes, d'accès difficile, de ces îles éloignées. C'est l'un des Primates les moins bien connus; il semble compléter son régime essentiellement végétarien par la consommation d'Animaux aquatiques. On ne l'a jamais élevé en captivité.

Les *Rhinopithecus,* ou rhinopithèques, qui habitent essentiellement la Chine, sont mal connus. Ils ont le nez camus, le museau aplati, un tronc et des membres plus robustes que ceux des langhurs; leurs pattes antérieures sont presque aussi longues que les postérieures. Leur tête, arrondie, présente une importante réduction des os nasaux; les narines sont très larges. Leur robe est longue, touffue et douce. Au contraire des *Simias,* les rhinopithèques possèdent des mains et des pieds longs, tandis que leurs doigts sont courts. On en connaît quatre formes, que nous rapporterons à deux espèces seulement.

R. avunculus, le rhinopithèque du Tonkin, vit en Indochine. Il mesure de 60 à 75 cm de long et sa queue atteint une longueur de 1 m.

R. roxellanae, le rhinopithèque de Roxellane, vit dans les hautes montagnes de Chine centrale et du Sud-Ouest (Kan-sou, Sseu-tchouan, Yunnan et Kouei-tchou) et peut-être aussi dans une partie du Tibet et de l'Assam. Les trois sous-espèces sont considérées comme les singes les plus rares du monde : *R. r. bieti,* du Yunnan, *R. r. brelichi,* le plus grand, qui habite la chaîne des Vanh-Ging-Chang, en Chine centrale, et *R. r. roxellanae,* ou singe doré, qui vit dans une zone allant jusqu'au Tibet et peut-être l'Assam. Cette dernière forme possède une très belle robe. Chez les mâles, la face et le nez sont bleus, les yeux sont bruns, le cou, le dos, l'arrière de la tête et la queue sont gris noirâtre, avec de longs poils argentés, tandis que le front, les oreilles, les côtés de la tête, les pattes et les parties inférieures sont roux doré. Les femelles, plus ternes, sont plutôt brunâtres; quant aux juvéniles, ils sont de couleur chamois clair.

Les rhinopithèques vivent par grandes bandes dans les forêts des hautes montagnes enneigées durant la plus grande partie de l'année; la plupart sont mi-arboricoles et mi-terrestres. Ils vivent dans les régions à bambous, lesquels constituent leur nourriture principale. Dans le passé, les rhinopithèques ont été chassés pour leur fourrure; actuellement, la loi chinoise les protège.

Le genre *Nasalis* est représenté par l'unique espèce *N. larvatus,* le nasique. Son caractère le plus remarquable est la longueur du nez des adultes mâles, qui atteint 10 cm et forme comme une trompe; pendant et élargi vers sa base, cet appendice est mobile et parcouru longitudinalement par un sillon médian. Ses narines s'ouvrent en dessous. Le nasique vit dans les forêts pluviales de Bornéo, souvent à proximité des mangroves ou des marais, ou encore sur les rives des cours d'eau; il aime l'eau, nage et plonge très bien. Il est plus actif le matin. Il vit par petites troupes et est uniquement végétarien. Il émet un cri guttural caractéristique.

La famille des **Pongidés** *(Pongidae),* ou **Anthropomorphes,** est le groupe le plus intéressant des Primates actuels du fait qu'elle comprend les espèces les plus proches de l'homme. Bien qu'ils constituent une lignée collatérale à celle des Hominidés et n'aient aucun rapport direct avec l'évolution de ces derniers, les Pongidés en sont proches par nombre de traits physiologiques

▼ **Pygathrix nemaeus,** *le douc, est une espèce très rare, qui vit dans les forêts de l'Indochine et de la péninsule de Haïnan.*

Jacana - Van Kooles

E.P.S.

▲ **Nasalis larvatus,** *le nasique, est une espèce uniquement végétarienne, qui vit dans les forêts pluviales de Bornéo, à proximité des cours d'eau dans lesquels il aime à nager et à plonger.*

et anatomiques. En outre, les Pongidés sont les plus intelligents des Animaux.

Si l'on met de côté les formes fossiles, fort nombreuses, la famille comprend les gibbons, les orang-outans, le chimpanzé et le gorille. Ces singes, dont certains sont les plus grands des Primates, diffèrent des Cercopithécidés, ou Cynomorphes, par de nombreux caractères importants, notamment : la grande longueur des membres antérieurs par rapport aux postérieurs, la conformation du tronc et l'absence totale de queue.

La tête est de forme variable, souvent arrondie, à museau parfois proéminent (chimpanzé et gorille), avec une lèvre supérieure très haute. Les yeux sont enfoncés dans les orbites. Le nez est petit avec des cartilages très réduits; l'appendice nasal consiste en une sorte de coussinet plus ou moins saillant qui entoure les narines. Les oreilles sont petites, sauf chez le chimpanzé.

Le tronc est plus court que celui des Cercopithécidés; le thorax, qui présente un développement transversal marqué, est aplati dorso-ventralement, à l'inverse de ce qu'on observe chez les Cynomorphes. Selon Schultz, alors que l'indice thoracique (le rapport entre la largeur du thorax et sa profondeur) est, chez ces derniers, de 88 %, il est de 120 % chez les gibbons, et varie de 126 % à 145 % chez les Ponginés (chez l'homme, il est de 128 %).

Ce caractère fondamental s'accompagne d'un important allongement des membres antérieurs par rapport au tronc et aux membres postérieurs. Cette conformation est en relation avec la locomotion de type brachial en suspension liée la vie arboricole. La marche à terre est généralement très secondaire, sauf chez le gorille. L'allongement des pattes antérieures atteint son maximum chez les formes les plus nettement arboricoles : Ponginés et en particulier l'orang-outan. Toujours selon Schultz, le rapport de la longueur des membres antérieurs avec le tronc est, au maximum, de 274 % chez certains gibbons, 202 % pour l'orang-outan, 183 % pour le gorille de plaine, 172 % pour le chimpanzé, et 153 % pour le gorille de montagne, qui est le Pongidé le moins arboricole. La différence de longueur entre les membres antérieurs et postérieurs est bien moins importante chez le fœtus; elle s'accentue avec la croissance et devient très marquée chez l'adulte.

Les mains sont toujours au moins aussi longues que les pieds, lesquels sont longs et étroits chez les gibbons et les orang-outans, permettant un appui efficace sur les grosses branches, alors que chez les chimpanzés, ils présentent une conformation liée à la marche à terre, avec une plante plus large et des doigts plus courts, surtout chez le gorille de montagne. Les pouces et les gros orteils, toujours opposables, sont diversement réduits chez l'orang-outan, dont les gros orteils peuvent être dépourvus d'ongles et partiellement atrophiés. Les ongles, plats chez les Ponginés, sont carénés, sauf aux pouces et aux gros orteils, chez les Hylobatinés (gibbons).

La peau est normalement pigmentée. Les gibbons possèdent des callosités fessières très réduites, alors que les Ponginés n'en ont pas ou des rudimentaires. Le pelage est dense chez les gibbons et plus clairsemé chez les Ponginés, mais toujours environ trois fois plus dense sur le dos que sur le ventre. Les poils de l'avant-bras sont dirigés vers le coude et non vers la main, à l'inverse de ce qu'on observe chez les Cercopithécidés. Il n'y a pas de fourrure à la face ainsi qu'aux paumes et aux plantes.

Le crâne est de forme très variable, y compris au sein de chaque espèce. D'après Valois, l'indice céphalique endocrânien (c'est-à-dire le rapport entre la longueur et la largeur de la boîte crânienne) varie chez le gorille de 72,1 à 86,3 ; on observe tous les intermédiaires entre la dolichocéphalie prononcée et la brachycéphalie marquée.

Le volume de la boîte crânienne, faible chez les gibbons (97,5 cm³ pour les *Hylobates*, et 124,6 cm³ pour *Symphalangus syndactylus*), atteint chez les Ponginés des dimensions importantes, supérieures à toutes celles des autres Primates, excepté l'homme : 410,5 cm³ pour l'orang-outan, 443 cm³ pour le chimpanzé, et 532 cm³ pour le gorille (avec un maximum absolu de 685 cm³). Ces valeurs concernent les mâles, les femelles présentant des volumes légèrement inférieurs. Le crâne des Ponginés est également caractérisé, surtout chez les mâles, par une importante visière frontale ainsi que par des crêtes sagittale et occipitale ; ces caractères, inexistants chez les nouveau-nés, sont très peu marqués chez les gibbons, alors qu'ils sont forts nets chez certains gorilles adultes.

Le trou occipital, encore assez en avant par rapport à la base du crâne chez les juvéniles, se déplace progressivement vers l'arrière au cours de la croissance, plus chez les Ponginés que chez les Hylobatinés. Selon Grassé, l'indice nasal de Bolk (c'est-à-dire la distance entre le trou occipital et l'extrémité antérieure de la cavité crânienne exprimée en pourcentage de la longueur totale de cette cavité) est, en effet, chez les juvéniles, de 52 pour l'orang-outan, de 53 pour le chimpanzé et 54 pour le gorille ; chez les adultes, ces valeurs passent respectivement à 61, 64 et 61.

La colonne vertébrale présente, par comparaison avec celle des Cercopithécidés, une réduction numérique des vertèbres lombaires (le nombre des dorso-lombaires varie de 15 à 18), une augmentation du nombre des vertèbres sacrées, et une extrême réduction des vertèbres caudales, lesquelles sont plus ou moins atrophiées. La cage thoracique, outre son aplatissement, est soutenue par un sternum court et large.

La musculature présente d'intéressants caractères intermédiaires entre celle des singes inférieurs et celle de l'homme. Les muscles mimiques, bien différenciés, permettent à ces Animaux d'exprimer toutes sortes d'états émotifs, ce qui est lié à leur degré d'intelligence.

Le cerveau des Anthropomorphes atteint une taille maximale parmi les Primates (à l'exclusion de l'homme) et pèse 450 g chez le gorille. Son poids représente 1/70 de celui du corps pour les gibbons, 1/90 pour le chimpanzé, 1/80 pour l'orang-outan, et 1/235 pour le gorille. L'indice de céphalisation de Dubois est plus significatif : sa valeur est de 0,70 pour les gibbons, de 0,75 pour les Ponginés, et de 0,50 pour les Cercopithécidés (il est de 2,82 pour l'homme). La disposition des circonvolutions cérébrales et la topographie des aires corticales sont très semblables à celles qu'on observe chez l'homme.

L'appareil olfactif est moins réduit que chez les Cercopithécidés.

La denture, moins spécialisée que celle des Cercopithécidés, conserve quelques caractères primitifs chez les Hylobatinés. Les canines sont longues et pointues ;

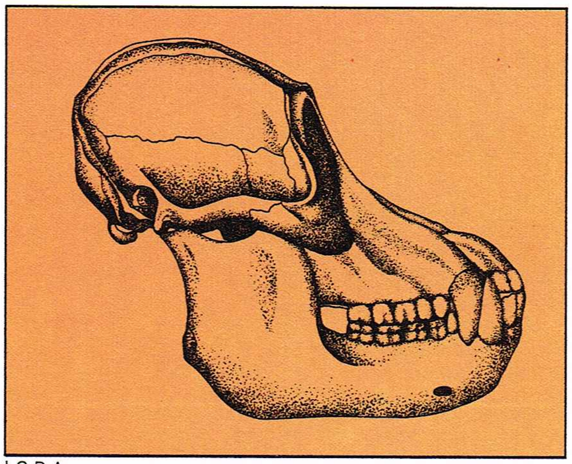

I.G.D.A.

◀ *Représentation schématique du crâne de l'orang-outan* (Pongo pygmaeus).

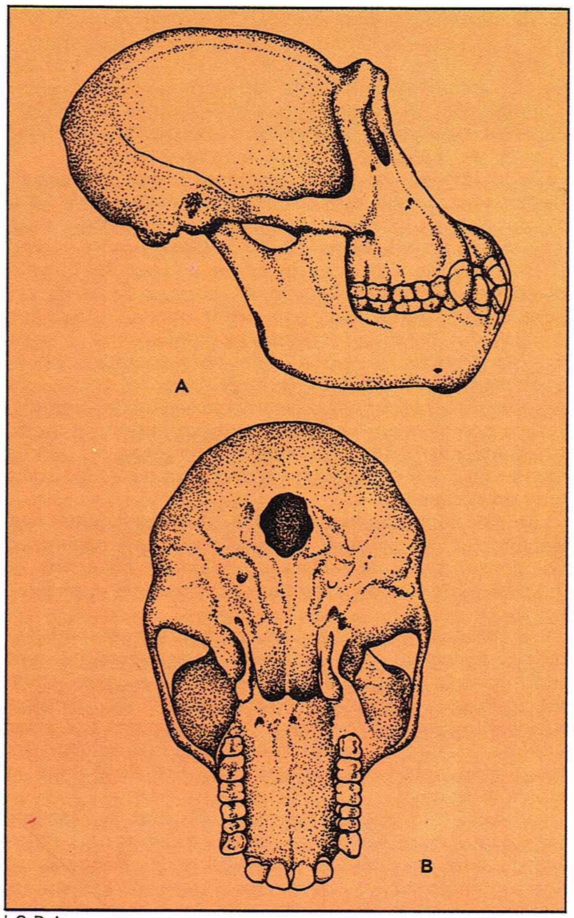

I.G.D.A.

◀ *Représentation schématique du crâne de chimpanzé* (Pan troglodytes) *vu de côté (A) et de dessous (B).*

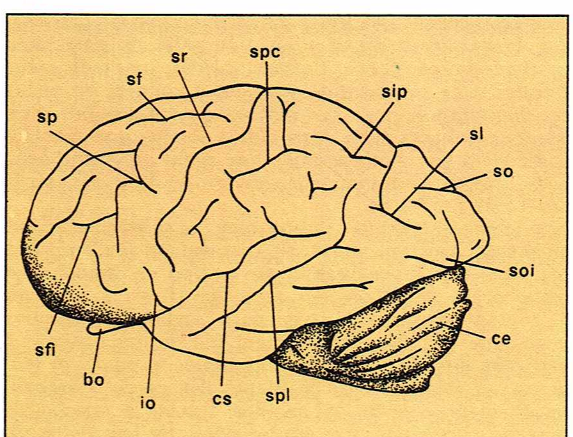

I.G.D.A.

◀ *Encéphale de gorille : cs, complexe sylvien ; io, incisure operculaire ; sr, sillon central ou de Rolando ; sp, sillon précentral ; spc, sillon postcentral ; sf, sillon frontal supérieur ; sfi, sillon frontal inférieur ; spl, sillon parallèle ; sip, sillon interpariétal ; sl, sillon en croissant ; so, sillon occipital supérieur ; soi, sillon occipital inférieur ; ce, cervelet ; bo, bulbe olfactif.*

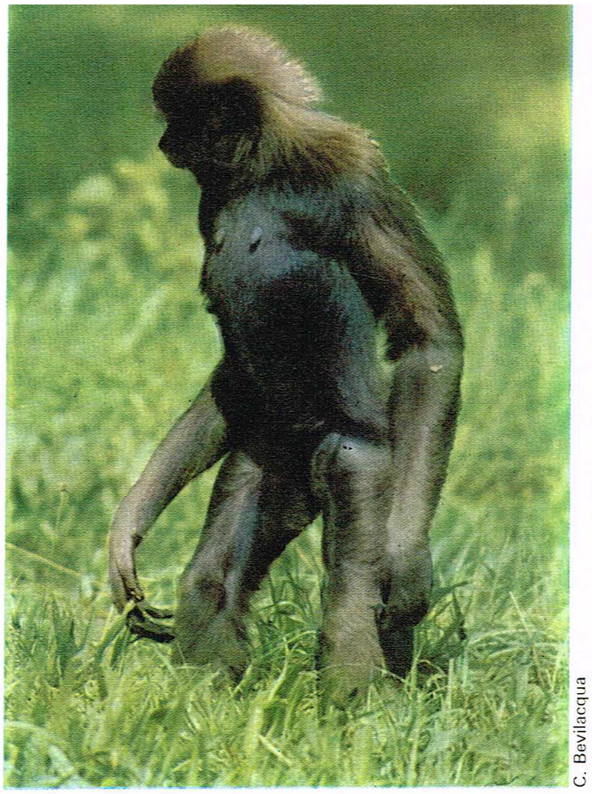

C. Bevilacqua

▶ *Les Hylobatinés, ou gibbons, asiatiques, sont strictement forestiers et arboricoles; lorsqu'ils descendent à terre, leur marche est spontanément bipède en position à peu près dressée, ici* **Hylobates sp.**

elles sont petites chez les gibbons, plus grosses chez les Ponginés, et atteignent un maximum chez les mâles du gorille. Les molaires sont pourvues de tubercules bien distincts, généralement au nombre de 4 pour les supérieures, et de 5 pour les inférieures. L'une des particularités de ces dents est l'existence, sur leur surface occlusale, de très fins replis d'émail dont le développement est plus marqué chez l'orang-outan. La formule dentaire est identique à celle des Cercopithécidés et de l'homme :

$$\left(I\,\frac{2}{2};\ C\,\frac{1}{1};\ Pm\,\frac{2}{2};\ M\,\frac{3}{3}\right) \times 2 = 32.$$

L'appareil digestif ne présente aucun caractère vraiment particulier.

En ce qui concerne l'appareil respiratoire, on observe, au contraire de ce qui a lieu chez les Cynomorphes, l'inexistence de sacs laryngés sub-épiglottiques; par contre, sauf chez les *Hylobates,* chaque ventricule latéral donne un sac fort volumineux surtout pour les mâles; chez *Symphalangus syndactylus,* ces deux sacs sont symétriques; ils ont alors une fonction amplificatrice de la voix; chez les autres genres et espèces, leur présence est diversement interprétée. Le poumon gauche est bilobé; le poumon droit est tétralobé chez les gibbons et trilobé chez le gorille et le chimpanzé (dans tous les cas, par suite d'une importante réduction du lobe azygos). L'orang-outan fait à cet égard exception chez les Primates : ses poumons ne sont pas lobés mais seulement pourvus de quelques scissures incomplètes.

Les mamelles, pectorales, situées haut, sont peu développées. Le cycle menstruel des femelles dure 24 à 28 jours chez les gibbons et l'orang-outan, environ 35 jours chez le chimpanzé, et de 40 à 45 jours chez le gorille. Au moment de l'œstrus, on observe, chez la femelle du chimpanzé, un gonflement de la peau de la région génitale; ce gonflement est moins marqué chez les femelles des gorilles. La gestation dure environ 7 mois chez les gibbons, 8 mois et demi chez l'orang-outan et le chimpanzé, et environ 9 mois chez le gorille. Le placenta discoïdal est assez semblable à celui de l'homme. Il n'y a normalement qu'1 seul petit par portée; la croissance est beaucoup plus longue que chez les autres singes : de 7 à 9 ans chez les gibbons, et de 10 à 12 ans chez les Ponginés.

Les Anthropomorphes sont les plus intelligents des Mammifères; de ce point de vue, la primauté revient au chimpanzé, qui, par ailleurs, ressemble beaucoup à l'homme par différents caractères anatomiques et physiologiques.

Les Pongidés vivent dans les forêts et sont essentiellement arboricoles (sauf le gorille), caractères qui ont profondément marqué leur biologie. Leur distribution géographique, beaucoup plus étendue au Tertiaire qu'actuellement, est confinée à deux zones très éloignées l'une de l'autre : la grande forêt équatoriale de l'Afrique centro-occidentale, et l'Asie du Sud-Est (Indochine et îles de la Sonde).

La famille est divisée en deux sous-familles, que nombre de mammalogues élèvent au rang de familles : les Hylobatinés, avec les gibbons, asiatiques, et les Ponginés ou Anthropomorphes au sens strict, avec l'orang-outan, asiatique, le gorille et le chimpanzé, tous deux africains. Au total, la famille compte cinq genres et dix espèces.

La sous-famille des *Hylobatinés* comprend les gibbons, qui, bien que montrant toute une série de caractères proches de ceux des Cercopithécidés, en présentent d'autres se rapprochant de ceux des Ponginés; on ne les considère pas comme des éléments de transition entre les deux groupes cités, mais plutôt comme une branche particulière des Anthropomorphes ayant suivi une évolution propre. Leur longueur varie de 45 à 90 cm, et ils pèsent de 5 à 13 kg.

Strictement forestiers, arboricoles, ils se déplacent fort agilement dans les arbres, se suspendant aux branches par leurs très longs bras et se lançant de branche en branche; ils effectuent des sauts de 10 m; à terre, où ils descendent de temps en temps, ce sont les seuls singes ayant une marche spontanément bipède, en position à peu près dressée : ils font alors porter le poids de leur corps sur la totalité de la plante des pieds, marchant gauchement, à petits pas rapides. Durant la marche, ils laissent leurs longs bras sur les côtés de leur corps ou les replient sur leur tête. Seules les femelles en gestation ont une marche quadrupède à terre. Les gibbons ne sont

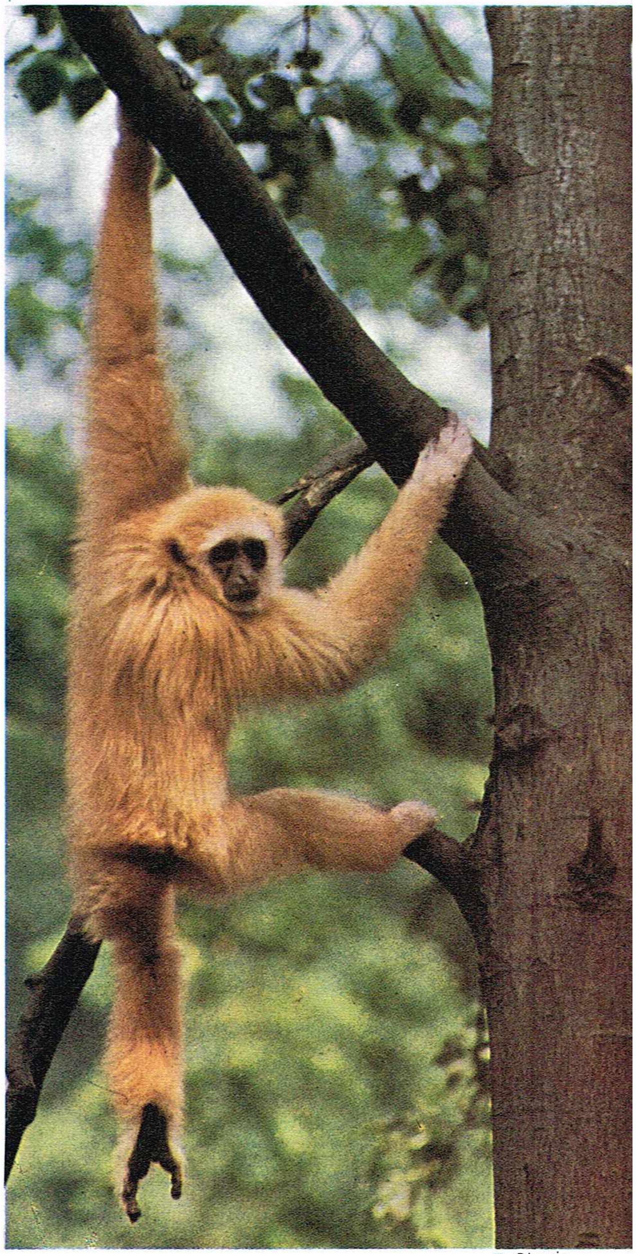

T. Okapia

▶ **Hylobates lar,** *le gibbon à mains blanches, a une distribution qui s'étend de la Thaïlande et du Cambodge à la péninsule malaise et à Sumatra.*

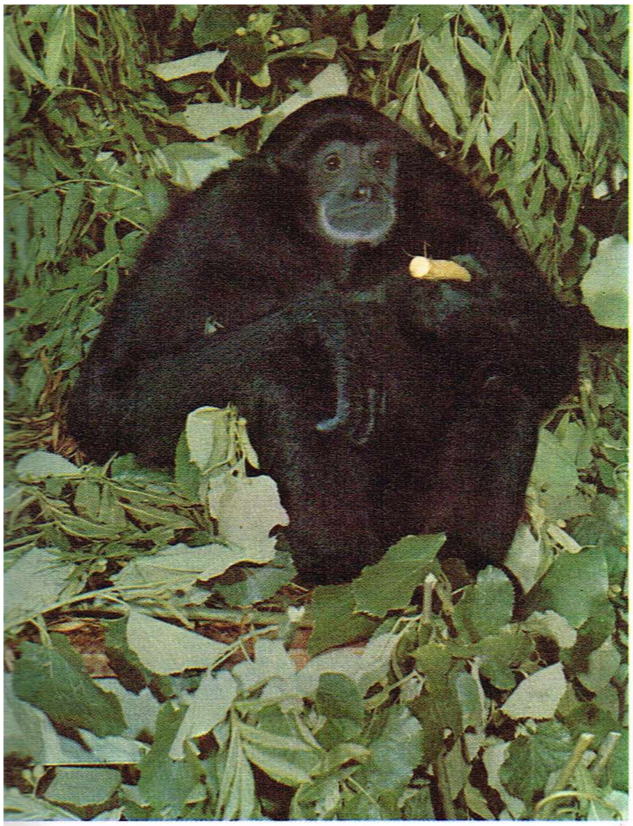

T. Okapia

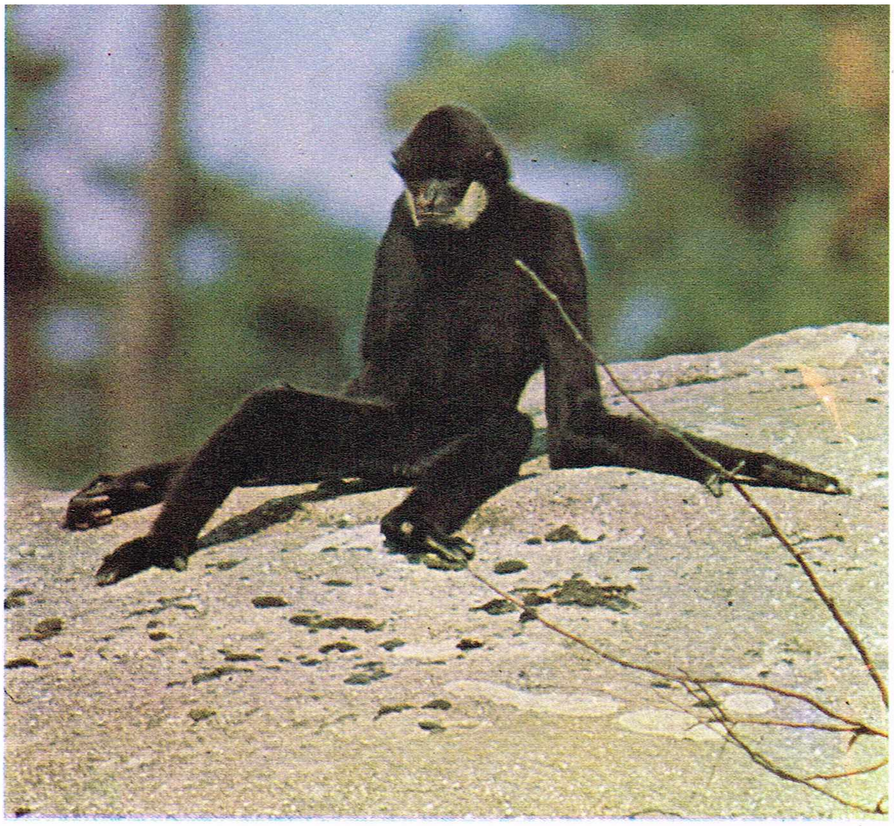

C. Bevilacqua

pas capables de nager, sauf peut-être le gibbon houlock. La nuit, ils se cachent au profond des feuillages, mais ne font pas de nid pour y dormir. Ils manifestent une certaine tendance à la sédentarité. Leurs populations sont peu denses et ils vivent par groupes constitués d'un couple et de quelques juvéniles; occasionnellement, deux ou trois groupes familiaux se rassemblent. Le régime alimentaire est mixte, à prédominance frugivore.

La durée de gestation est d'environ 7 mois. Le petit, qui naît les yeux ouverts et peu velu, reste environ 2 ans près de sa mère. La longévité de ces Primates semble atteindre au maximum 30 ans.

La communication entre individus se fait par une riche gamme de cris, sonores et pénétrants, que l'on entend de loin. Leur signification est encore mal connue; toutefois, on sait qu'ils jouent un rôle dans la défense territoriale. On entend ces cris surtout au lever du soleil et le matin; ce sont les mâles qui ont la voix la plus puissante.

Les Hylobatinés comptent seulement deux genres : *Hylobates,* les gibbons proprement dits, avec cinq espèces, et *Symphalangus,* les siamangs, avec une espèce (ou deux selon certains auteurs). Ils habitent les forêts jusqu'à près de 3 000 m d'altitude, des contreforts himalayens de l'Assam aux îles de la Sonde (Java, Sumatra, Bornéo et quelques îles proches).

Le genre *Hylobates* est caractérisé principalement par l'absence des sacs laryngés et par le faible développement des membranes interdigitales, quand elles existent. La couleur de la fourrure est extraordinairement variable, non seulement au sein d'une même espèce, mais aussi chez le même individu en fonction de l'âge; la détermination des formes est donc très complexe et la systématique du genre encore mal définie.

Hylobates lar, le gibbon à mains blanches, a une livrée très variable, allant du noir au brun clair et au crème. Sa face est entourée par une bande de poils blancs, contrastant avec le reste de la fourrure chez les individus foncés; on observe également une bande frontale et de courts favoris, également de couleur blanche. Sa distribution va de la Thaïlande et du Cambodge à la péninsule malaise et à Sumatra.

H. hoolock, le gibbon houlock, ou gibbon hoolock, est long d'environ 60 cm. Les mâles adultes sont noirs et possèdent une bande frontale blanche; les femelles sont gris jaunâtre; à la naissance, mâles et femelles sont blanc grisâtre. Ce gibbon est le plus septentrional : il est répandu en Assam, au Yunnan et en Birmanie.

Chez *H. concolor,* le gibbon concolore, les mâles sont noirs et possèdent des favoris clairs, et les femelles sont gris fumée. Sa distribution couvre l'île de Haï-Han et une grande partie de l'Indochine.

H. agilis, le gibbon agile ou à mains noires, d'aspect assez semblable au précédent, est de couleur noire, brune ou fauve clair; il possède une bande supraciliaire blanche. Il habite la péninsule malaise et Sumatra.

Java et Bornéo sont la patrie de la dernière espèce du genre, *H. moloch,* le gibbon cendré, appelé encore uau-uau. Il est uniformément gris argenté et possède aussi une bande supraciliaire blanchâtre. Il est en voie de disparition à cause du déboisement réalisé à Java.

Le genre *Symphalangus* est caractérisé par la présence d'une membrane bien développée entre les deuxième et troisième doigts de pieds. Il existe, en principe, une seule espèce : *S. syndactylus,* le siamang. Quant à *S. klossi,* le siamang ou gibbon de Kloss, le plus petit des Hylobatinés, entièrement noir et dépourvu de sacs laryngés (alors que le siamang proprement dit en possède), nombre d'auteurs nient qu'il s'agisse d'une espèce de ce genre et le rangent dans le genre *Hylobates.* Il est confiné aux îles Mentawei.

S. syndactylus, le siamang proprement dit, est le plus grand des gibbons, puisqu'il mesure, au maximum, 90 cm de long. Sa fourrure est entièrement noire; sa gorge et ses deux gros sacs laryngés, qui forment un gonflement à la partie antérieure du cou, sont nus. Il vit à Sumatra, dans les forêts de montagne, jusqu'à 3 000 m d'altitude.

La sous-famille des *Ponginés* comprend les singes Anthropomorphes *stricto sensu,* les plus gros des Primates actuels. Ils sont essentiellement arboricoles, diversement conformés pour la marche quadrupède, avec le tronc dirigé obliquement (à cause de la différence de longueur des membres antérieurs et postérieurs). A terre, les pieds de l'orang-outan appuient seulement sur leur bord externe, le gros orteil étant très écarté pour servir d'appui du côté interne. Chez le chimpanzé et le gorille par contre, les pieds appuient sur la majeure partie de leur plante, mais leur bord interne reste légèrement soulevé. Les mains s'appuient également à terre, par leur paume chez les juvéniles, et par la face dorsale des deuxièmes phalanges chez les adultes. A la différence des gibbons, les Ponginés ne marchent jamais spontanément en position bipède; quand ils le font (en captivité ou par imitation), leurs genoux sont légèrement fléchis.

Chez les Ponginés, il existe un dimorphisme sexuel accentué concernant essentiellement la taille : les mâles sont beaucoup plus robustes que les femelles. Par ailleurs, on observe chez ces singes l'habitude de fabriquer des nids dans les arbres.

Les Ponginés ont une indubitable supériorité psychique sur tous les autres Primates; ce sont eux qui présentent, de ce point de vue, le plus d'affinités avec l'homme. D'innombrables recherches expérimentales ont été faites en ce domaine, démontrant chez ces Primates de remarquables qualités de mémoire, d'imitation et d'intelligence, sans compter une grande affectivité et des possibilités d'expression surprenantes. Mais, en général, leur développement intellectuel, rapide pendant la jeunesse, cesse vite : en effet, la période de perfectionnement cérébral est très brève par rapport à l'homme. On constate toutefois, à cet égard, d'importantes variations individuelles.

▲ *A gauche,* **Symphalangus syndactylus,** ***le siamang, est le plus grand des gibbons avec 90 cm de long; il vit à Sumatra dans les forêts de montagne.***
A droite, **Hylobates concolor,** ***le gibbon concolore, espèce dont les mâles, à fourrure noire, portent des favoris clairs.***

T. Okapia

▲ **Pongo pygmaeus,** *l'orang-outan, est actuellement la plus rare des trois grandes espèces d'Anthropomorphes. Ce Pongidé aménage son nid dans les arbres, et se nourrit de fruits mûrs.*

▶ *Page ci-contre, en haut,* **Pan troglodytes,** *le chimpanzé, reste volontiers à terre, fréquentant les forêts et les forêts-galeries, le long des cours d'eau. En bas,* **Gorilla gorilla,** *le gorille, est le plus grand et le plus fort des singes : il peut mesurer 2 m et peser 275 kg. Il fabrique aussi un nid de repos, à terre pour les mâles, à faible hauteur sur les arbres pour les femelles.*

Il existe trois genres de Ponginés : *Pongo, Pan* et *Gorilla,* chacun représenté par une unique espèce.

Pongo pygmaeus, l'orang-outan, dont le nom malais signifie « homme de la forêt », est assez massif avec le dos courbé et un ventre proéminent. Sa tête est haute et très allongée verticalement (il est dolichocéphale). Il possède de petites oreilles, de petits yeux très rapprochés, un museau proéminent, et une région nasale déprimée. Sa caractéristique majeure est l'existence, chez les mâles adultes, de protubérances adipeuses, en forme de demi-lunes, aux joues. Le cou est très gros, par suite de la présence de sacs laryngiens, énormes chez les vieux mâles.

Les membres antérieurs sont très longs et atteignent les chevilles lorsque l'Animal est debout ; l'envergure des bras atteint 2,25 m et parfois plus ; les pouces sont réduits ; les membres postérieurs sont beaucoup plus courts et arqués. La hauteur de l'orang-outan (debout) est de 1,25 à 1,50 m pour les mâles et de 1 m à 1,10 m pour les femelles. Le poids est respectivement de 80 kg (jusqu'à 100 kg) et 40 kg. On observera cependant que, en captivité, l'orang-outan peut devenir plus gros et plus lourd qu'à l'état sauvage.

La fourrure n'est guère fournie, et est même très clairsemée en certaines zones du corps, comme la poitrine ; elle est plus abondante sur les épaules, les flancs et les membres, où le poil est souvent très long. La livrée est brun-roux ; les parties nues sont de couleur chair brunâtre ou gris ardoise, avec des reflets bleuâtres chez les vieux mâles.

L'orang-outan est arboricole et se déplace par de lents mouvements bien calculés : il appuie précautionneusement ses pieds sur les branches en se tenant aux troncs par ses longs bras. A terre, où il descend rarement, il a toujours une marche quadrupède. Il habite de préférence les forêts paludéennes de plaine, mais on le rencontre jusqu'à 1 500 m d'altitude. Il se nourrit de fruits, en particulier de dourians, mais aussi de feuilles, de graines, d'œufs et de petits Oiseaux. Il vit solitairement ou par couples ou bien encore par petits groupes familiaux ; cependant, les mâles restent de préférence isolés, sauf au moment de la reproduction. Ce Pongidé fabrique des nids dans les arbres qui ne sont ni trop hauts ni trop touffus, amoncelant des branches et des feuilles pour aménager un lit de 1 m de diamètre.

Pendant la saison des pluies, l'orang-outan se protège avec de grandes feuilles et même aussi sous une accumulation de branches. Il passe la nuit sous son refuge et l'abandonne après le lever du jour. Le même nid peut être habité plusieurs nuits de suite. Pendant la journée, l'orang-outan cherche des fruits, effectuant à l'occasion de longs déplacements afin de trouver des fruits mûrs.

La gestation dure environ 8 mois et demi. A la naissance, le nouveau-né pèse un peu plus de 1 kg (maximum : 1,5 kg). L'allaitement dure environ 1 mois et demi. La croissance est achevée entre 10 et 12 ans, et la maturité sexuelle atteinte un peu plus tard ; l'orang-outan peut vivre jusqu'à 30 ou 40 ans.

C'est actuellement la plus rare des trois grandes espèces d'Anthropomorphes. Sa distribution, qui au cours de la préhistoire, couvrait la plupart de l'Asie du Sud-Est, est maintenant limitée à Sumatra et à Bornéo, avec un total de cinq mille individus (dont mille pour Sumatra). Les causes de son déclin numérique sont la chasse, la capture pour les zoos et les cirques, et surtout l'altération de l'habitat forestier (nombre d'endroits de son aire sont déboisés ou sillonnés par des routes). L'espèce est monotypique.

Pan troglodytes, le chimpanzé, est un peu plus haut que l'orang-outan, puisque les mâles atteignent une taille maximale de 1,70 m, et les femelles de 1,30 m ; son poids varie entre 50 et 80 kg, les femelles étant moins grosses que les mâles (le dimorphisme sexuel est toutefois moins marqué que pour l'orang-outan et le gorille). Ses lignes sont plus fines que celles de l'orang-outan, et ses membres mieux proportionnés. Les pouces de ses mains sont bien développés. Sa tête, caractéristique, est ronde et porte des oreilles très développées. Son pelage abondant est généralement noirâtre et tend à devenir gris avec l'âge.

Intermédiaire entre l'orang-outan et le gorille en ce qui concerne les aptitudes arboricoles, le chimpanzé reste volontiers à terre. Il évite les endroits déboisés et

fréquente essentiellement les grandes forêts et les forêts-galeries, le long des cours d'eau. Il ne sait pas nager. Surtout végétarien, il mange des fruits, des feuilles, des bourgeons et des racines, qu'il recueille soit à terre, soit sur les arbres. Il construit une sorte de plate-forme sur les arbres, généralement très haut, pour y passer la nuit; le nid semble être habité une seule nuit, puis abandonné définitivement.

Le chimpanzé forme des bandes d'importance diverse (jusqu'à vingt individus), guidées par un mâle adulte, avec un ou plusieurs mâles subalternes, des femelles et des petits. Les individus solitaires sont exceptionnels. Les troupes errent dans la forêt et restent vraisemblablement dans un territoire donné. Les membres d'une troupe passent généralement la nuit dans leurs nids, sur le même arbre ou sur des arbres très rapprochés. Les chimpanzés communiquent par un riche répertoire de cris (on en a distingué trente-deux uniquement pour les juvéniles) ainsi que par toutes sortes de mimiques faciales et de nombreux gestes.

Après une gestation d'environ 8 mois et demi, les femelles mettent au monde 1 seul petit (exceptionnellement 2), qui reste agrippé durant 4 à 6 mois. A 6 mois, le juvénile commence à marcher et reçoit une véritable éducation. Le chimpanzé passe du poids de 2 kg à la naissance à un poids d'environ 28 kg à 7 ans, et grandit jusqu'à 12 ans; il atteint sa puberté entre 7 et 8 ans; il a une longévité qui ne dépasse sans doute pas 40 ans.

Ce singe vit dans les grandes forêts équatoriales d'Afrique, de la Gambie à l'ouest jusqu'aux lacs Albert et Victoria à l'est. Malgré l'opinion contraire de certains zoologues du passé, il semble bien que l'espèce soit unique. Cependant, on peut distinguer quatre races géographiques, assez distinctes : *Pan troglodytes verus,* le plus occidental, que l'on rencontre de la Gambie à la haute Guinée; *P. t. troglodytes,* le chimpanzé chauve, qui habite la basse Guinée et le Zaïre; *P. t. schweinfurthi,* la race la plus orientale; enfin *P. t. paniscus,* le chimpanzé nain, forme rare qui vit dans une zone restreinte de la rive gauche du fleuve Congo, et qui est à la fois le plus petit et le plus fin.

Le troisième et dernier grand Anthropomorphe est *Gorilla gorilla,* le gorille. C'est aussi le plus grand et le plus fort des singes (y compris, semble-t-il, les espèces fossiles). Sa force est exceptionnelle, car il possède une très puissante musculature. Sa taille est vraiment impressionnante : les mâles adultes peuvent mesurer près de 2 m de haut (la moyenne est de 1,80 m), 1,75 m de tour de poitrine, et peuvent peser 275 kg. Les femelles, bien plus petites, atteignent, au maximum, 1,50 m de haut; elles diffèrent aussi des mâles par l'absence de la crête osseuse, importante, que les mâles portent sur le crâne. La fourrure est noire ou gris-noir, avec des zones blanchâtres chez les vieux individus.

De mœurs surtout terrestres, le gorille fréquente uniquement la grande forêt équatoriale pluviale, en Afrique occidentale et centrale. Il en existe deux sous-espèces distinctes : *G. gorilla gorilla,* le gorille de plaine, qui habite la partie occidentale de la grande forêt équatoriale, au Gabon, dans l'ouest du Zaïre et du Cameroun, et *G. gorilla beringei,* le gorille de montagne, qui vit plus à l'est, dans les zones montagneuses et forestières du Zaïre oriental et des territoires limitrophes, en particulier dans les régions du lac Kivu et des monts Virunga, volcaniques. La race de montagne, la plus rare, dont les membres sont plus courts, est encore plus adaptée à la vie terrestre (c'est le moins arboricole des Ponginés). Les aires des deux sous-espèces sont séparées.

Les troupes des formes de plaine comptent de cinq à vingt individus, celles des formes montagnardes pouvant en comprendre quarante. Les bandes, toujours sous la direction d'un mâle, se déplacent continuellement à la recherche de nourriture, laquelle est uniquement composée de matières végétales. Les gorilles fabriquent aussi des nids pour le repos; les mâles les aménagent à terre, alors que les femelles les construisent à faible hauteur sur les arbres.

Cette espèce a une durée de gestation de 9 mois environ; sa longévité semble atteindre 50 ans. Ses mœurs ne sont pas très bien connues. Comme l'orang-outan, le gorille doit être protégé par des mesures très strictes, car ses effectifs ne sont guère nombreux : selon Walker, il en existerait moins de dix mille têtes.

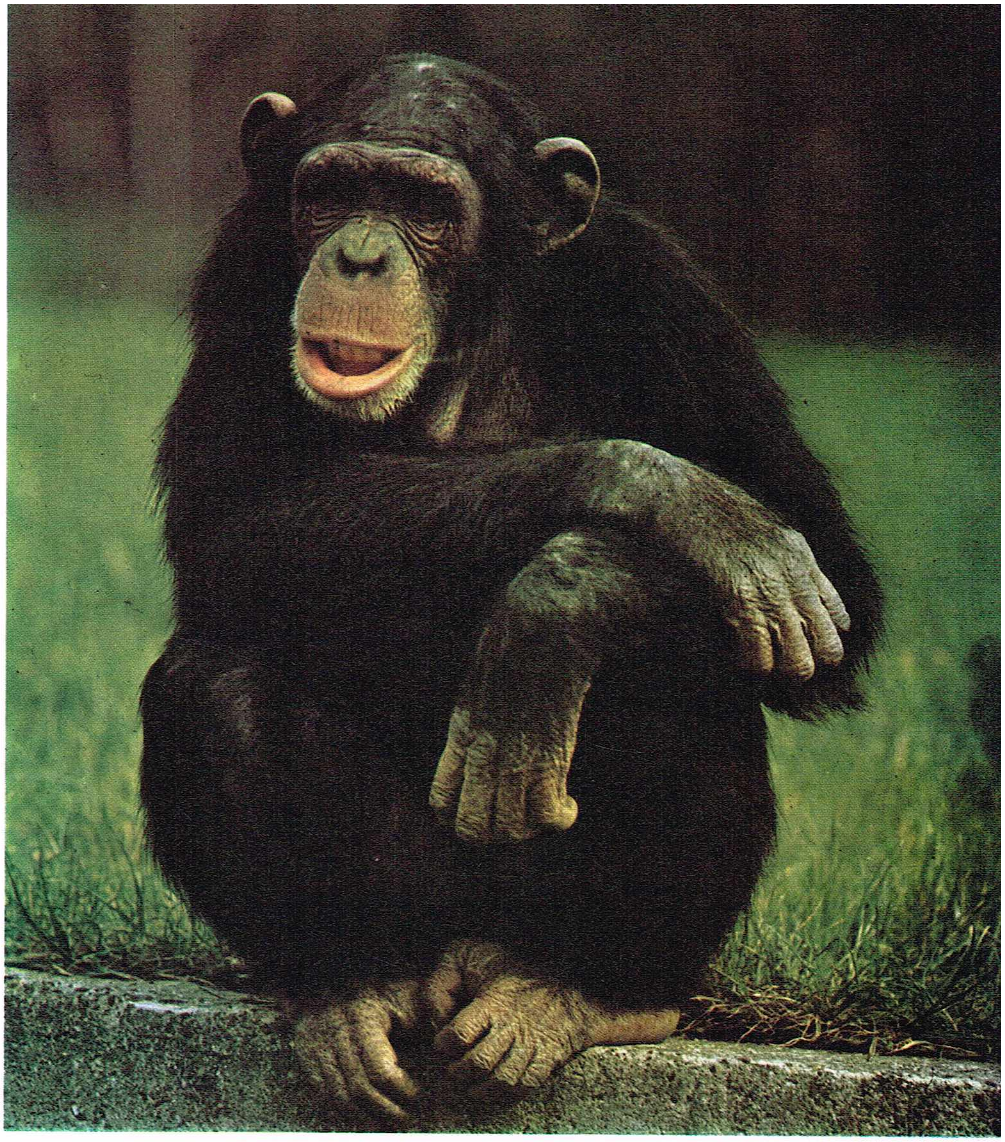

Z.F.A.

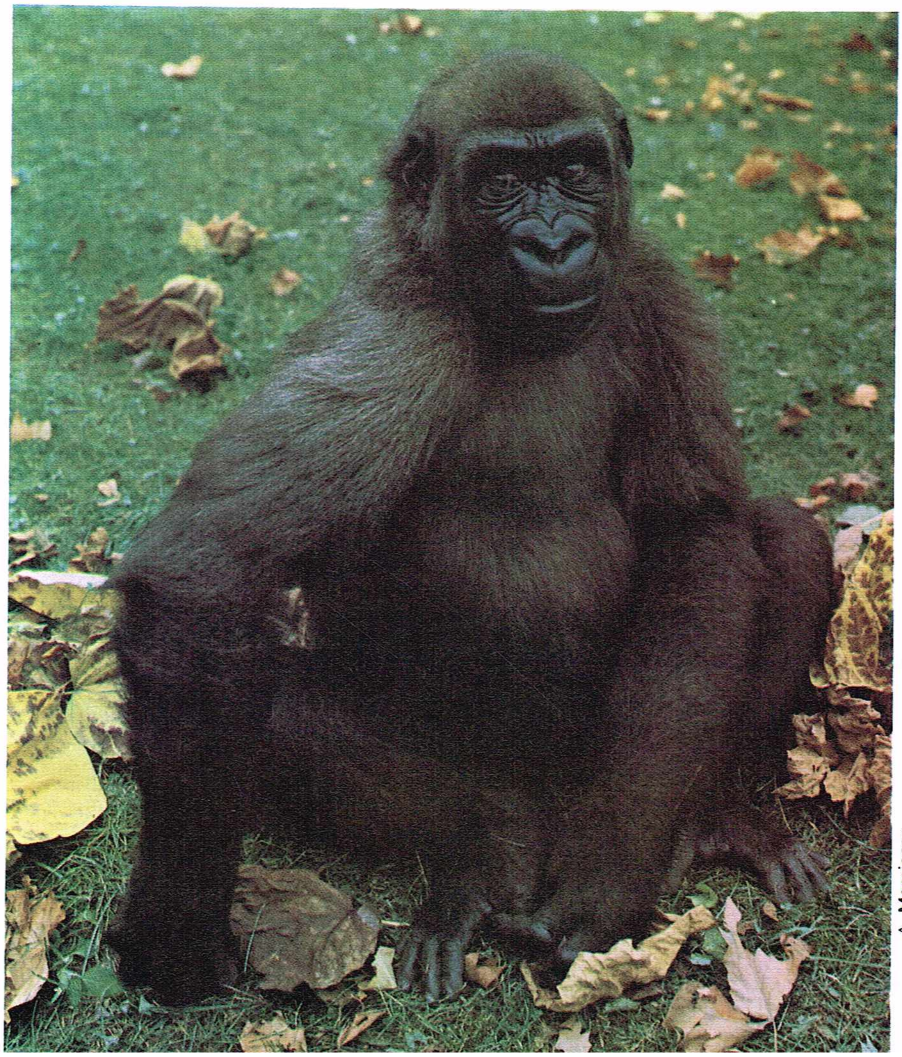

A. Margiocco

E.P.S.

▲ **Felis wiedi** *est un Félidé, vivant dans les zones arides des hautes montagnes du Chili, du Pérou, de la Bolivie et de l'Argentine.*

BIBLIOGRAPHIE

Monotrèmes et Marsupiaux

BREEDEN S. and K., *Living Marsupials,* Sidney, 1970; *The Life of the Kangaroo,* Sidney, 1967. - BURREL H., *The Platypus,* Sidney, 1927. - CABRERA A., *Genera Mammalium : Monotremata, Marsupiala,* Madrid, 1919. - FISHER P.H., *les Animaux d'Australie,* Paris, 1959. - GRIFFITHS H., *Echinidas,* Londres-New York, 1968. - LYNE G., *Marsupials and Monotremes of Australia,* Sidney, 1967.

Insectivores et Dermoptères

CABRERA A., *Genera Mammalium : Insectivora, Galeopithecia,* Madrid, 1925. - CORBET G.B., HANKS J., *A Revision of the Elephant-Shrews, Family Macroscelididae,* in *Bull. Br. Mus. Nat. Hist., Zool.* vol. 16, (2), Londres, 1968. - CROWCROFT P., *The Life of the Shrew,* Londres, 1957. - TRUTAT E., *le Desman des Pyrénées,* Toulouse, 1891.

Chiroptères

ALLEN G.M., *Bats,* New York, 1939. - ANDERSEN K., *Catalogue of the Chiroptera,* Londres, 1912. - BROSSET A., *la Biologie des Chiroptères,* Paris, 1966. - DOBSON G.E., *Catalogue of the Chiroptera,* Londres, 1878 (rééd. 1966).

Édentés

POCOCK R.I., *The External Characters of the South American Edentates,* in *Proceed. Zool. Soc. London,* p. 983-1031, vol. II, Londres, 1924.

Pholidotes

POCOCK R.I., *The External Characters of the Pangolins,* in *Proceed. Zool. Soc. London,* p. 707-723, Londres, 1924.

Rongeurs et Lagomorphes

ELLERMANN J.R., *The Families and Genera of Living Rodents,* Londres, 1940-1941 (rééd. 1966). - ELTON M.C., *Voles, Mice and Lemmings,* Oxford, 1942. - LOCKLEY R.M., *The Private Life of the Rabbit,* Londres, 1964. - MOHR E., *Die freilebende Nagetiere Deutschlands,* Iéna, 1938. - SCHAUB S., *Simplicidentés,* in PIVETEAU J., *Traité de paléontologie,* t. VI (2), Paris, 1958.

Cétacés

ANDERSEN H.T., *The Biology of Marine Mammals,* New York, 1969. - DUGUY R., et ROBINEAU D., *Cétacés et Phoques des côtes de France. Guide d'identification,* in *Annales de la Société des sciences naturelles de Charente-Maritime,* 1973. - MORZER-BRUYNS W.F.J., *Field Guide of Whales and Dolphins,* Amsterdam, 1971. - NORMAN J.R., FRASER F.C., *les Géants de la mer,* Paris, 1938. - NORRIS K.S., *Whales, Dolphins and Porpoises,* Berkeley, 1966. - SLIJPER E.J., *Whales,* Londres, 1962. - TOMILIN A.G., *Cetacea-Mammals of the USSR and Adjacent Countries,* t. IX, Moscou, 1957, trad. IPST Jérusalem, 1967.

Carnivores

Pour l'ordre entier : EWER R.F., *The Carnivores.* The World Naturalist, Londres, 1973. Pour les Fissipèdes : COUTURIER M., *l'Ours brun,* Grenoble, 1954. - DAVIS D.D., *The Giant Panda, Fieldiana : Zoology Memoirs,* Chicago, 1964. - ERDBRINK D.P., *A Review of Fossil and Recent Bears of the Old World,* 2 vol., Deventer, 1953. - HALTENORTH T.H., *Die Wildkatzen der Alten Welt,* Leipzig, 1953. - HARRIS C.J., *Otters, a Study of Recent Lutrinae,* Londres, 1968. - HINTON H.E., and DUNN A.M.S., *Mongooses,* Londres, 1967. - LYDDEKER R., *A Handbook to the Carnivora,* Londres, 1896. - MIVART S.T., *Dogs, Jackals, Wolves and Foxes : a Monograph of the Canidae,* Londres, 1890. - NEAL E., *The Badger,* Londres, 1969. - PERRY R., *The World of the Tiger,* Londres, 1964. - POCOCK R.I., *Catalogue of the Genus Felis,* Londres, 1951. - SCHALLER G.B., *Golden Shadows, Flying Hooves,* New York, 1973. - SCHMOOK A., *Vie et mœurs du renard,* Paris, 1954. - THEVENIN R., *les Petits Carnivores d'Europe,* Paris, 1952. Pour les Pinnipèdes : DUGUY R., et ROBINEAU D., *Cétacés et Phoques des côtes de France. Guide d'identification,* in *Annales de la Société des sciences naturelles de Charente-Maritime,* 1973. - KING J.E., *Seals of the World,* Londres, 1964. - SCHEFFER V.B., *Seals, Sea-Lions and Walruses,* Stanford, 1958.

Siréniens

KAISER H.E., *Morphology of the Sirenia,* Bâle, 1974.

Proboscidiens

BERE R., *The African Elephant,* Londres, 1966. - EVANS G.H., *Traité sur les éléphants : leurs soins habituels et leur traitement dans les maladies,* Paris, 1904.

Hyracoïdes

GEORGE M., *Monographie anatomique du genre Daman,* in *Ann. Sc. Nat.,* Paris, 1874. - MOLLARET C., *le Daman (Dendrohyrax, Gray, 1868), Animal de laboratoire,* Thèse de médecine, Paris, 1958.

Périssodactyles

GROVES C.P., *Horses, Asses and Zebras in the Wild,* Londres, 1974. - HEPTNER V.G., NAUMOV N.P., *Die Säugetiere der Sowjetunion, Paarhufer und Unpaarhufer,* Iéna, 1966. - MOHR E., *The Asiatic Wild Horse,* Londres, 1971.

Artiodactyles

BOURLIERE F. et VERSCHUREN J., *Introduction à l'écologie des Ongulés du parc Albert,* Bruxelles, 1960. - COUTURIER M., *le Chamois,* Grenoble, 1938; *le Bouquetin des Alpes,* Grenoble, 1962. - FEGNER H., *The Roe Deer,* Londres, 1951. - FLEROV K.K., *Musk Deer and Deer,* in *Fauna of the USSR Mammals,* t. I, nº 2, Moscou, 1952, trad. IPST, Jésuralem, 1960. - HAINARD R., *Mammifères sauvages d'Europe,* t. II, Delachaux et Niestlé, Neuchâtel, 1962. - FRASER DARLING F., *A Herd of Red Deer, A Study in Animal Behaviour,* Londres, 1956. - HALTENORTH T., *Klassifikation der Säugetiere : Artiodactyla,* in KUKENTHAL-KRUMBACH. *Handbuch der Zoologie,* t. VIII, (32), 1963. - HEPTNER V.G., NAUMOV N.P., *Die Säugetiere der Sowjetunion, Paarhufer und Unpaarhufer,* t. I, Iéna, 1966. - SCLATER P.L., THOMAS O., *The Book of Antelopes,* 4 vol., Londres, 1894-1900. - WHITEHEAD G.K., *Deer of the World,* Londres, 1972.

Primates

CROOK J.H., *Gelada Baboon Kend Structure and Movement,* in, *Play, Exploration and Territory in Mammals,* Londres, 1966. - CHIARELLI A.B., *Taxonomic Atlas of Living Primates,* Londres, 1972. - DA CRUZ LIMA E., *Mammals of Amazonia,* vol. I., *General Introduction and Primates,* Belém do Para, Rio de Janeiro, 1945. - GENET-VARCIN E., *les Singes actuels et fossiles,* Paris, 1963. - HILL W.C.O., *Primates, Comparative Anatomy and Taxonomy,* vol. I, *Strepsirhini,* 1953, vol. II, *Haplorhini, Tarsioidea,* 1955, vol. III, *Pithecoidea, Platyrrhini, Hapalidae,* 1957, vol. IV, *Cebidae* - Part A, 1960, vol. V, *Cebidae* - Part B, 1962, vol. VI, *Catarrhini, Cercopithecoidea, Cercopithecinae,* 1966, Édimbourg. - HOFER H., SCHULTZ A.H., STARCK D., *Primatologia,* vol. I, Bâle-New York, 1966. - MOSCOVICI S., *la Société contre-nature,* Coll. 10-18, Paris, 1973. - NAPIER J.R., NAPIER P.H., *Old World Monkeys,* New York 1970. - PETTER J.J., PETTER A., *The Aye-aye of Madagascar,* in : *Social Communication among Primates,* Chicago-Londres, 1967. - REYNOLDS, *The Apes,* Londres, 1968. - SANDERSON I.T., *The Monkey Kingdom,* Londres, 1957. - SCHALLER G.B., *The Mountain Gorilla,* Chicago, 1963. - URBAIN A., RODE P., *les Singes anthropoïdes,* Paris, 1948. - VAN LAWICK-GOODALL J., *les Chimpanzés et moi,* Coll. « J'ai lu », Paris, 1973. - YERKES R.M., YERKES A.W., *The Great Apes,* New Haven, 1953. - YERKES R.M., *Chimpanzees,* New Haven, 1948. - ZUCKERMAN S., *la Vie sexuelle et sociale des singes,* Gallimard, Paris, 1937.

LEXIQUE DE ZOOLOGIE

SUPPLÉMENT AUX VOLUMES I, II ET III DE LA GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

ABRÉVIATIONS

adj.	adjectif	*n.*	nom	*spécialt.*	spécialement
ex.	exemple	*par ext.*	par extension	syn.	synonyme

A

abomasum. *n.* Syn. de *caillette.*

aboral. *adj.* **(pôle).** Voir *apical.*

abysses. *n.* Grandes fosses océaniques d'une profondeur minimale de 2 000 m.

acalèphe ou **acraspède** ou **acraspédote.** *adj.* Qualifie les méduses dépourvues de velum et appartenant à la classe des Scyphozoaires.

acanthella. *n.* Deuxième stade larvaire des Acanthocéphales.

acanthor. (larve). Premier stade larvaire des Acanthocéphales, caractérisé par la présence de crochets antérieurs et un corps recouvert de piquants.

accommodation. *n.* Mécanisme par lequel l'œil des Vertébrés fait la mise au point sur les objets qu'il fixe en modifiant la focale du cristallin par différents procédés.

acère. *adj.* Qualifie un Animal dépourvu d'antennes. *Ex.* Les Insectes Protoures ou les mâles d'Homoptères Membracidae.

acétabulum. *n.* Voir *fosse acétabulaire.*

acicules. *n.* Soies fortes et peu saillantes des parapodes des Polychètes, servant d'insertion aux muscles qui font mouvoir les bulbes sétigères.

acide ascorbique. Vitamine C. Substance à six atomes de carbone, avec une fonction alcool secondaire, voisine des sucres, mais présentant une double liaison. Abondante dans les légumes et les fruits (citrons) ; sa carence provoque le scorbut.

acide désoxyribonucléique, ADN ou **DNA.** Substance organique complexe comportant des molécules de bases organiques et le même nombre de molécules d'un sucre à cinq atomes de carbone et d'acide phosphorique, liées les unes aux autres en longues chaînes. La molécule d'ADN est généralement formée de deux de ces chaînes unies de manière lâche. Présent dans les chromosomes et d'autres organites (mitochondries, plastes). Les bases sont disposées le long de la chaîne selon un ordre invariable qui sera reflété par celui des acides aminés des protéines de la cellule. Ces dernières sont responsables de toute l'édification de l'organisme (le métabolisme dépend des enzymes, qui sont des protéines). L'ADN représente l'information, le code génétique de l'organisme. L'ADN des chromosomes des gamètes assure donc la transmission de ce code d'une génération à l'autre.

acide lactique. Acide organique à trois atomes de carbone, présentant une fonction alcool secondaire (CH_3—CHOH—COOH). Peut être formé par la fermentation du lactose présent dans le lait qui, dans ce cas, « caille ».

acide linoléique. Acide gras à dix-huit atomes de carbone avec deux doubles liaisons. Lié au glycérol dans l'huile de lin.

acide ribonucléique, ARN ou **RNA.** Molécule organique voisine de l'acide désoxyribonucléique, mais dans laquelle le sucre à cinq atomes de carbone est différent. Il en existe plusieurs formes, dont le poids moléculaire est différent. Deux d'entre elles au moins sont essentielles à la synthèse des protéines : l'*ARN messager* et l'*ARN de transfert.* Le premier est formé sur le modèle de l'ADN et passe dans le cytoplasme pour s'associer aux ribosomes. C'est à son contact que seront unis les acides aminés qui constitueront une protéine déterminée. Chaque acide aminé arrive fixé à une molécule d'ARN de transfert particulière, plus petite, qui s'unit transitoirement et spécifiquement à un point donné du premier ARN et place l'acide aminé au bon endroit.

acide urique. Composé organique de formule $C_5N_4H(OH)_3$, présent dans l'urine de l'homme en quantité variable (0,3 à 0,2 g par jour). Il constitue le déchet principal du métabolisme de l'azote chez les Reptiles, les Oiseaux (le guano, principale source de cet acide, peut en renfermer jusqu'à 20 %) et chez les Échinodermes.

acœle. *adj.* **(vertèbre).** Voir *amphiplane.*

acœlomate. *adj.* **(organisme).** Métazoaire triploblastique dépourvu d'un vrai cœlome. Les Plathelminthes, les Mésozoaires, les Acanthocéphales, les Priapuliens, les Némertes, les Némathelminthes et les Rotifères sont des acœlomates.

acône. *adj.* Qualifie le type d'ommatidie dépourvue de véritable cône cristallin que l'on trouve chez quelques Hémiptères, Coléoptères et Diptères.

acontie. *n.* Filament endodermique portant de nombreux nématocystes et attaché au bord libre, dans le tiers inférieur, des cloisons de la cavité gastrale de certaines anémones de mer (Cnidaires Hexacoralliaires Actiniaires). Très contractile grâce à la présence de fibres musculaires, cet organe, en cas de danger, peut se dérouler et s'éjecter par les cinclides.

acraspède. *adj.* Voir *acalèphe.*

acraspédote. *adj.* Voir *acalèphe.*

acromion. *n.* Apophyse par laquelle l'omoplate s'articule avec la clavicule, chez les Mammifères.

acron. *n.* Région céphalique primaire d'un Arthropode ; homologue du *prostomium* d'une Annélide.

acrorrhages. *n.* Protubérances ovoïdes ou réniformes que présente le bourrelet de jonction colonne-disque oral du corps de l'anémone de mer (Cnidaire Anthozoaire Actiniaire).

acrotrophique. *adj.* Type d'ovaire, propre aux Insectes Hémiptères et Coléoptères, dans lequel les trophocytes restent groupés au sommet de chaque ovariole.

A.C.T.H. ou **Adrenocorticotropic hormone.** Hormone sécrétée par l'antéhypophyse et agissant sur le fonctionnement des capsules surrénales.

actine. *n.* Protéine fibrillaire constitutive du muscle et impliquée dans sa contraction. Voir *contraction musculaire.*

actinodonte. *adj.* **(charnière).** Type de charnière de la coquille des Bivalves caractérisé par des dents nombreuses divergeant à partir du sommet de la coquille vers l'extérieur.

actinopharynx. *n.* Syn. de *stomodéum,* chez les Cnidaires Anthozoaires.

actinostome. *n.* Ouverture orale, bordée par deux lèvres et située au centre de la couronne tentaculaire de l'anémone de mer (Cnidaire Anthozoaire Actiniaire).

actinotrocha ou **actinotroque. (larve).** Désigne la larve ciliée pélagique des Phoronidiens. Celle-ci se caractérise par un lobe préoral, des tentacules, une couronne ciliée périanale et se transforme par métamorphose en jeune Phoronidien.

actinule. (larve). Larve libre nageuse, longue de 1 mm, ornée de petits tentacules et issue de l'œuf fécondé, lors de la reproduction sexuée des Cnidaires.

acuité. *n.* Degré de sensibilité des sens chez les Animaux. *Ex. Acuité visuelle :* angle qui mesure le pouvoir séparateur de l'œil.

acuminé. *adj.* Se terminant brusquement par une pointe allongée.

adectique. *adj.* **(nymphe).** Qualifie la nymphe dépourvue de mandibules mobiles chez de nombreux Insectes, tels que les Coléoptères, les Diptères, les Hyménoptères, etc.

ADN. Voir *acide désoxyribonucléique.*

aéropyles. *n.* Fins canaux, localisés au pôle antérieur de l'œuf des Insectes, traversant le chorion et permettant la pénétration d'air, indispensable à l'embryon.

æsthetasc. *n.* Filament sensoriel, à rôle olfactif ou gustatif, localisé sur les antennes des Crustacés (Malacostracés notamment).

afférent. *adj.* Caractérise un nerf ou un vaisseau qui conduit l'influx nerveux ou le flux sanguin à un organe ou un tissu.

agamète. *n.* Cellule germe conduisant, par une série de divisions, à la formation d'embryons chez les Mésozoaires Orthonectides.

agamogonique. *adj.* Syn. de *asexué.*

aglyphe. *adj.* Caractérise des serpents dont les dents sont pleines et qui ne possèdent pas de crochets venimeux.

agnathe. *adj.* Qualifie un Animal qui ne possède pas de mâchoires. *N.* Sous-embranchement du phylum des Vertébrés.

ahermatypique. *adj.* Qualifie le mode de vie de polypiers simples ou coloniaux peu sensibles aux facteurs physiques de l'océan (luminosité, salinité, aération, limpidité, bathymétrie, température).

aile dermique. Expansion latérale cutanée du corps de certains Vertébrés (Reptiles et Mammifères) qui fait office de parachute (*ex.* dragon volant chez les Reptiles) ou de véritable aile (*ex.* chauve-souris chez les Mammifères).

ailes génitales. Expansions latérales, en forme de lames plates, qui s'étendent sur toute la longueur des portions pharyngienne et hépatique du corps des Entéropneustes (Stomocordés). Elles protègent les branchies et contiennent les gonades.

aire. *n.* Nid des Rapaces diurnes (Oiseaux).

aires corticales. Surfaces du cortex cérébral dont la topographie et le rôle sont assez bien connus. On distingue des aires motrice, auditive, visuelle, etc.

albinisme. *n.* Anomalie correspondant à une dépigmentation de la peau qui se rencontre chez de nombreux Mammifères, par exemple, chez le lapin, l'ouistiti, l'homme...

alcaloïdes. *n.* Substances organiques, souvent complexes, azotées, de structure variable, de réaction alcaline. Présentent des réactions caractéristiques; par exemple, ils forment un précipité brun avec la solution iodo-iodurée et des précipités orangés ou rouges avec l'iodobismuthite de potassium, ou réactif de Dragendorff.

aldéhyde. *n.* Substance organique possédant un groupe —CHO, comme l'aldéhyde formique (H—CHO).

alécithe. *adj.* Se dit d'un œuf sans vitellus, que l'on rencontre chez les Animaux vivipares comme les Mammifères.

aliphatique. *adj.* **(substance organique).** Dont le squelette carboné forme une chaîne et non un cycle.

allantoïne. *n.* Produit résultant de l'hydrolyse de l'acide urique et qui peut conduire à l'urée.

allanto-placenta ou **placenta allanto-chorial.** Placenta caractérisé par l'irrigation allantoïdienne des villosités choriales. *Ex.* Placenta des Mammifères Euthériens.

allométabole. *adj.* Qualifie un Insecte dont le dernier stade larvaire ne correspond ni à une pupe ni à une véritable nymphe. Les Homoptères aleurodes passent par un développement de ce type.

allométrie. *n.* Syn. de *hétérogonie.*

alule. *n.* Partie membraneuse, située à l'angle postérieur de la base de l'aile, chez les Insectes Diptères et chez quelques Coléoptères.

ambitus. *n.* Désigne la zone annulaire de plus grand diamètre horizontal de la couronne du *test* d'un Échinide Régulier.

amble. *n.* Type de marche d'un Vertébré quadrupède qui se déplace en levant en même temps les deux pattes du même côté.

ambre gris. Concrétion intestinale du cachalot, provenant des restes de Mollusques Céphalopodes ingérés par le Cétacé.

ambulacre ou **radius** ou **zone radiaire.** Aire en fuseau, partant de la bouche des Échinodermes et qui, en alternance avec cinq autres zones dites *interambulacraires,* divise la surface du corps en dix secteurs qui soulignent la symétrie pentamère de l'Animal.

améiose ou **apomixie.** *n.* Méiose modifiée ne provoquant pas de réduction du nombre de chromosomes : des ovules vierges sont ainsi diploïdes et se développent par parthénogenèse.

amétabole. *adj.* Qualifie un Insecte dont le développement larvaire est très simple : la larve augmente seulement de taille et acquiert sa maturité sexuelle pour donner la forme imaginale. *Ex.* Les Collemboles et les Protoures. *N.* Un *amétabole.*

amictique. *adj.* Qualifie une femelle diploïde qui ne peut s'accoupler, et se reproduit alors par parthénogenèse.

amidon. *n.* Polymère insoluble du glucose. Substance de réserve très répandue chez les plantes, formée dans des plastes spéciaux, qui deviennent alors des grains d'amidon de forme caractéristique. Les fécules (pomme de terre, maïs, manioc) sont des amidons.

amitose. *n.* Modalité de division cellulaire directe sans différenciation de chromosomes distincts. Ce processus se réalise, par exemple, au niveau des macronuclei des Infusoires et chez les Amœbiens.

ammocète. *n.* Nom donné à la larve de lamproie (Agnathe).

ammonotélie. *n.* Enrichissement préférentiel en déchets ammoniacaux de l'urine, chez tous les Animaux vivant en eau douce (en particulier, les Mollusques et les Poissons; les branchies de la carpe excrètent jusqu'à 10 % de l'azote total rejeté sous forme d'ammoniaque).

amnios. *n.* Enveloppe interne, d'origine ecto-mésodermique, protégeant l'embryon chez les Insectes et les Vertébrés amniotes.

amnioséreuse. *n.* Chez les Insectes, membrane formée par l'embryon et entourant le vitellus lorsque amnios et séreuse font défaut.

amphiblastula. *n.* Stade de développement embryonnaire des larves de Spongiaires : il y a inversion des surfaces de la larve ciliée, nageuse et libre, à structure de *blastula,* qui devient sphérique et polarisée (seules les cellules de la moitié inférieure sont ciliées). Le même phénomène de retournement est observé chez les *Volvox* (Protistes Végétaux).

amphicœle. *adj.* **(vertèbre).** Qualifie une vertèbre dont le corps présente des concavités antérieure et postérieure. *Ex.* Chez les Poissons, quelques Amphibiens Urodèles et Reptiles primitifs.

amphides. *n.* Organes sensoriels situés sur la tête de nombreux Nématodes libres.

amphigonie. *n.* Modalité de reproduction nécessitant la fécondation des ovules par les spermatozoïdes.

amphiplane ou **acœle.** *adj.* **(vertèbre).** Qualifie un type de vertèbre dont le corps a les deux faces planes, et qui se trouve chez les Mammifères.

amphipneustique. *adj.* Caractérise l'appareil respiratoire des Insectes (*ex.* larves de Diptères) dont les seuls stigmates fonctionnels sont ceux du prothorax et du dernier segment abdominal.

amphytrion. *n.* Nom parfois donné à une chenille parasitée par des larves (parasitoïdes) d'Hyménoptères Ichneumonides. Les larves hôtes sont, le plus souvent, celles des Coléoptères, des Diptères et des Lépidoptères.

amplexus. *n.* Modalité d'accouplement propre aux Vertébrés Amphibiens chez lesquels le mâle se place au-dessus de la femelle et la maintient à l'aide de ses pattes antérieures.

ampoules de Lorenzini. Cavités tapissées de cellules sensibles aux vibrations de l'eau, disposées le long de la ligne latérale des Poissons.

ampoules pédieuses. Extrémités renflées des *podia,* situées sur la face interne du corps des Échinodermes. Ces vésicules contractiles, alimentées par les diverticules des cinq canaux radiaires, sont destinées, en se remplissant et en se vidant, à faire saillir ou se rétracter les *podia.*

amylase. *n.* Enzyme susceptible de décomposer l'amidon en polymères plus petits (dextrines) et en maltose.

anabiose. *n.* Retour à la vie active après une phase de vie ralentie due à une forte déshydratation, chez les Tardigrades des Mousses.

anadrome ou **potamotoque.** *adj.* Qualifie les Poissons marins qui remontent les fleuves pour venir pondre dans les eaux douces. *Ex.* Le saumon.

anaérobie. *adj.* 1° Qui peut vivre sans oxygène. Une forme anaérobie peut l'être de façon facultative ou « stricte »; dans ce dernier cas, l'oxygène est toxique pour elle. 2° Qui se produit sans oxygène (réaction du métabolisme).

analoschémie. *n.* Phénomène d'imitation, par certains Insectes, de la texture du substrat sur lequel ils vivent. Ainsi, certaines mantes peuvent prendre l'aspect de fleurs, de feuilles mortes ou d'un élément granité, comme le sable.

anamorphe. *adj.* Qualifie un organisme se développant par *anamorphose.*

anamorphose. *n.* Type de développement post-embryonnaire des Myriapodes et des Insectes Protoures chez lesquels les larves doivent, pour atteindre l'état imaginal, acquérir graduellement, à la suite de mues, la métamérisation définitive et le nombre total d'appendices.

anangique. *adj.* Se dit de la rétine lorsqu'elle est dépourvue d'irrigation sanguine.

anaphylaxie. *n.* Phénomène de sensibilisation de l'organisme humain à une substance (comme le liquide venimeux des méduses) telle que la seconde injection de celle-ci détermine des effets beaucoup plus violents et graves que la première.

anaplasmose. *n.* Maladie infectieuse des bovins et des ovins entraînant une forte anémie.

anastomose. *n.* Union de deux cellules ou vaisseaux, par un canal ou un orifice.

anastréphoptère. *adj.* Qualifie une larve d'Insecte Orthoptère présentant, à la suite d'un retournement, une disposition alaire telle que les ébauches d'ailes membraneuses recouvrent les ébauches d'élytres.

anatrepsie ou **anatrepsis.** *n.* Passage de l'embryon de la face ventrale à la face dorsale de l'œuf.

ancestrula. *n.* Loge fondatrice d'une colonie de Bryozoaires résultant de la métamorphose des larves et engendrant par bourgeonnement les loges suivantes.

andouiller. *n.* Syn. de *cor.*

androconies. *n.* Écailles odoriférantes des ailes de certains mâles de Lépidoptères.

androgène. *adj.* Qualifie une sécrétion ou une substance faisant apparaître les caractères sexuels mâles.

androphore. *n.* Femelle parthénogénétique ne donnant que des mâles. Ce type de femelle se rencontre chez les Hyménoptères *(Biorhiza pallida)* et chez certains Aphidiens.

angustipenne. *adj.* Qualifie une aile étroite.

ankylostomiase. *n.* Anémie tropicale due aux Nématodes des genres *Ankylostoma* ou *Necator.*

anneau de Weismann. Ensemble formé des *corps allates* et des *corps cardiaques* chez les Insectes Diptères supérieurs.

anneau préthoracique. Ensemble osseux rigide, chez les Microchiroptères, constitué par la soudure

de la septième vertèbre cervicale et de la première vertèbre dorsale, ainsi que de la première paire de côtes et d'une partie de la seconde paire de côtes.

annexes embryonnaires. Organes temporaires de l'embryon nécessaires à son développement : vésicule vitelline, séreuse, amnios, allantoïde et placenta.

anodonte. *adj.* Qualifie des dents implantées sur la crête de la mâchoire des Vertébrés.

anophtalme. *adj.* Qualifie un Animal endogé ou troglobie, privé d'yeux, tel que l'Insecte Coléoptère *Geotrechus*.

anoxie. *n.* Diminution de la teneur en oxygène ou absence de celui-ci.

antarctique. *adj.* Qui habite les régions entourant le pôle Sud, jusqu'au sud de la Nouvelle-Zélande et de la Patagonie.

antennes. *n.* Organes sensitifs situés dans la région antérieure du corps de très nombreux Animaux autres que les Cordés. Sont généralement stimulées soit par contact, soit par des substances chimiques.

antennules. *n.* Première paire d'appendices céphaliques des Crustacés, en général uniramés et constitués par un pédoncule de trois articles surmonté de deux fouets multiarticulés.

anthocodie. *n.* Portion supérieure, rétractile, comprenant un disque buccal entouré d'un ou plusieurs cercles de tentacules chez les individus d'une colonie de Cnidaires Anthozoaires Octocoralliaires (ordre des Stolonifères).

anthophile. *adj.* Qualifie un Insecte recherchant les fleurs. *Ex.* Hyménoptères, abeilles. *N.* Un *anthophile*.

anthostèle. *n.* Portion basale des individus d'une colonie de Cnidaires Anthozoaires Octocoralliaires (ordre des Stolonifères).

anthropomorphique. *adj.* Caractérise toute théorie qui tend à transposer chez les Animaux le comportement humain.

anthropophile. *adj.* Qui recherche la présence de l'homme (certains Oiseaux et Mammifères).

antiphonal. *adj.* Qualifie le chant en duo de certains Oiseaux. *Ex.* Quelques barbus et pies-grièches africains.

apex. *n.* Extrémité supérieure et point de départ de l'enroulement de la coquille des Mollusques Gastéropodes et Céphalopodes.

aphænopsien. *adj.* Qualifie un Insecte troglobie ressemblant au genre *Aphaenops*, caractérisé par sa dépigmentation, sa cécité, son aptérisme et l'allongement de son corps ainsi que de ses appendices.

apical ou **aboral.** *adj.* **(pôle).** Qualifie le pôle supérieur ou dorsal occupé par le *périprocte*, montrant un anus fonctionnel excentrique et opposé à la face orale chez les Échinodermes.

apnée. *n.* Arrêt des mouvements respiratoires chez les Animaux; il peut être très long (il dure 60 minutes chez les Mammifères Cétacés).

apnéique. *adj.* Qualifie un Animal effectuant peu de mouvements respiratoires. *Ex.* Larves de Scarabéidés.

apneustique. *adj.* Caractérise l'appareil respiratoire des Insectes dépourvus de stigmates. *Ex.* Larves de certains Diptères, comme le chironome.

apode. *adj.* **(larve).** Qualifie la larve dépourvue de pattes et à tête réduite des Insectes Hyménoptères supérieurs, des Diptères, des Siphonaptères, de certains Coléoptères, Strepsiptères et Lépidoptères.

apodème. *n.* Invagination cuticulaire servant de zone d'insertion à certains muscles, chez les Arthropodes.

apolyse. *n.* Processus de dégradation de l'ancienne cuticule des Insectes sous l'action de l'hormone de mue.

apoméiose. *n.* Méiose modifiée qui ne provoque pas de réduction de moitié du nombre des chromosomes.

apophyse coracoïde. Apophyse de l'omoplate sur laquelle s'articule l'humérus.

apophyse xiphoïde. Extrémité postérieure du sternum.

appareil ambulacraire. Syn. d'*appareil aquifère*.

appareil aquifère ou **ambulacraire.** Système hydrostatique de canaux et de vésicules internes, complexes, caractérisant tous les Échinodermes. Dépendant du cœlome et en relation permanente avec l'eau de mer extérieure, il assure la circulation à l'intérieur du corps par les canaux radiaires en rapport avec les pieds ambulacraires périphériques et sert à la locomotion (chez les formes libres) ou à la respiration (chez les formes fouisseuses). Il a peut-être en outre une fonction excrétrice et canalisatrice de particules alimentaires.

appariement. *n.* 1° Rapprochement de deux individus de sexes opposés n'impliquant pas forcément l'accouplement; 2° Rapprochement des chromosomes homologues lors de la division cellulaire.

appendice glandulaire d'Owen. Deuxième cavité gastrique de forme allongée, propre aux Mammifères Siréniens.

apprentissage. *n.* Acquisition par un Animal de certaines séquences comportementales qui complètent les séquences innées ou instinctives. Cette partie du comportement affecte surtout les méthodes de chasse.

aptérie. *n.* Zone du corps des Oiseaux dépourvue de plumes.

aptérisme. *n.* Perte des ailes chez certains Insectes ou Oiseaux; le phénomène, lié au type d'habitat, se rencontre chez des Animaux insulaires, cavernicoles, ou chez des êtres vivant en haute montagne.

aqueduc. *n.* Chez certains Vertébrés Agnathes, canal aveugle formé par la réunion des sacs branchiaux.

aragonite. *n.* Carbonate de calcium comme la calcite mais cristallisant dans le système orthorhombique au lieu du système rhomboédrique. Cette espèce minérale est le constituant essentiel de squelettes d'organismes vivants ou fossiles (Madréporaires particulièrement), de la couche nacrée interne des coquilles de nombreux Mollusques, ainsi que des perles fines.

arboricole. *adj.* Qualifie un Animal vivant dans les arbres. *Ex.* Certains singes.

arc aortique. Originellement, vaisseaux pairs se détachant latéralement de l'aorte ventrale des Vertébrés pour entourer le pharynx entre les fentes viscérales; chaque arc comprend deux artères, afférente et efférente, par rapport au pharynx.

arc branchial ou **arc viscéral.** Ensemble d'éléments cartilagineux ou osseux qui entoure les cavités buccale et pharyngienne des Poissons. Les arcs branchiaux, qui sont originellement au nombre de sept et sont situés entre les fentes viscérales du pharynx, portent les branchies.

arc hyoïde. Deuxième arc viscéral du *splanchnocrâne* des Poissons.

arc mandibulaire. Premier arc viscéral du *splanchnocrâne* des Poissons. Constitue les mâchoires.

arc neural. Partie de la vertèbre qui entoure la moelle épinière.

arc viscéral. Syn. d'*arc branchial*.

arcade zygomatique. Limite inférieure de la fosse temporale des Mammifères. Elle est constituée par l'os jugal antérieur et une apophyse de l'os temporal postérieur.

archæocytes ou **archéocytes.** *n.* Cellules mobiles à caractère embryonnaire, se trouvant dans le *parenchyme* et les *gemmules* des Spongiaires, et dont dérivent toutes les autres cellules (amibocytes, gonocytes, etc.).

archentéron. *n.* Cavité digestive primitive (limitée par le feuillet interne, ou endoblaste) qui se forme, lors de la gastrulation, par invagination de la *blastula*, au cours du développement embryonnaire d'un œuf de Métazoaire (type oursin).

architomie. *n.* Modalité de reproduction asexuée des Annélides (*ex.* lombric) au cours de laquelle les processus de régénération succèdent à la scissiparité.

arctico-alpin. *adj.* Qui habite à la fois la région arctique (autour du pôle Nord) et les hautes montagnes de l'hémisphère Nord, qui ont pu être atteintes par l'espèce lors des périodes glaciaires.

arctique. *adj.* Qui habite les régions entourant le pôle Nord, jusqu'au nord du Canada et de la Sibérie.

aréole. *n.* Espace compris entre les nervures de l'aile d'un Insecte. Elle peut être de forme variée et sert de critère de classification.

aréolium. *n.* Ventouse adhésive située à l'extrémité des pattes de certains Arachnides et des Insectes.

arginine. *n.* Acide aminé possédant deux fonctions basiques aminées.

arista. *n.* Soie portée par la partie basale du dernier article des antennes des Diptères Cyclorraphes.

ARN. Voir *acide ribonucléique*.

arrhénotoque. *adj.* Qualifie la parthénogenèse ne produisant que des mâles : la reine des abeilles donne ainsi naissance aux faux-bourdons.

arthrobranchies. *n.* Branchies insérées au niveau de l'articulation avec le tronc des cinq paires d'appendices locomoteurs, chez les Crustacés Décapodes.

arthropodine. *n.* Protéine hydrosoluble constitutive de la cuticule des Arthropodes.

ascaridiose. *n.* Voir *helminthiase*.

ascidiozoïdes. *n.* Individus analogues, à structure d'ascidie (Tuniciers), rattachés ou empâtés dans une tunique commune à la colonie.

ascon. *n.* Structure anatomique simple de type *asconoïde*.

asconoïde. *adj.* Qualifie le type morphologique fondamental, le plus simple, réalisé par les Éponges Calcaires, dont la paroi interne de la cavité gastrale (en forme de sac et tapissée de choanocytes) se ramifie en formant de nombreuses digitations.

asexué ou **agamogonique.** *adj.* Dépourvu d'organes sexuels ou s'effectuant sans recours aux organes sexuels.

astérodactyles. *n.* Appendices en forme d'étoile, à l'extrémité de chacun des quatre doigts de la main chez *Pipa* (Amphibien Anoure).

astragale. *n.* Os du tarse.

atlas. *n.* Première vertèbre cervicale des Vertébrés Tétrapodes.

atriopore. *n.* Orifice ventral, situé en avant de l'anus aux deux tiers du corps de l'amphioxus (Céphalocordés) et servant à l'expulsion de l'eau traversant la cavité péribranchiale (ou atriale).

atrium. *n.* 1° Cavité du cœur des Vertébrés qui reçoit le sang collecté par le sinus veineux et l'envoie dans le ventricule. 2° Renflement antérieur de la cavité nasale situé entre la narine et la cavité olfactive chez les Reptiles Sauriens (lézards). 3° *Atrium génital*. Carrefour où débouchent les voies génitales mâles et femelles chez les espèces hermaphrodites.

aubier. *n.* Bois jeune, récemment issu du cambium. Plus tendre, moins coloré, plus riche en eau que le bois de cœur, qui est plus central et plus ancien. C'est essentiellement à travers l'aubier que circule la sève brute, qui vient des racines.

auricularia. **(larve).** Larve nageuse, vivant en eau profonde et se développant lors de la reproduction sexuée des Holothurides (Échinodermes). Cette

larve, à symétrie bilatérale, est munie d'une seule bande ciliée circumorale, dont les lobes rappellent un peu l'oreille humaine, d'où son nom.

auricules. *n.* Rebords saillants qui appartiennent à la ceinture pérignathique du test des oursins. Sont formés par la soudure de deux expansions internes des plaques interambulacraires, en forme d'arceaux et situés au-dessus des zones ambulacraires.

autohémorrhée ou **hémaphrorrhée.** *n.* Émission réflexe de sang chez les Insectes, s'effectuant, en réponse à une stimulation, soit par la bouche, soit par l'anus, ou encore au niveau de certaines articulations des pattes.

automixie. *n.* Modalité de régulation par laquelle l'ovocyte haploïde redevient diploïde par suite d'une fusion de son noyau avec celui de l'un des deux globules polaires provenant de la méiose; ce mécanisme permet à des ovules vierges de se développer par parthénogenèse.

autopode. *n.* Segment distal constitutif du *membre chiridien* et correspondant à la main ou au pied.

autoradiographie. *n.* Méthode de localisation d'une substance radioactive injectée dans un organe. Par exemple, les coupes d'un organe sont recouvertes, après injection, d'une émulsion photographique qui sera impressionnée seulement à l'endroit où se trouve fixé le traceur radioactif.

autosomes. *n.* Chromosomes non sexuels.

autotomie. *n.* Faculté de certains Animaux d'abandonner par rupture réflexe un appendice, afin d'échapper à la capture. *Ex.* Un opilion saisi par la patte s'enfuit, amputé, de même qu'un Insecte et qu'un lézard saisi par la queue.

autotrophe. *adj.* Susceptible d'incorporer dans sa propre substance vivante un élément emprunté au monde minéral. *N.* Un *autotrophe*. *Ex.* Un autotrophe pour le carbone (plante verte) incorpore le gaz carbonique de l'air.

autozoécie. *n.* Logette de type normal abritant un individu chez une colonie de Bryozoaires Ectoproctes.

autozoïde. *n.* Individu sexué, de structure normale et de grande taille, jouant un rôle dans la nutrition (absorption de nourriture) et la reproduction d'une colonie de Cnidaires Octocoralliaires.

aviculaire. *n.* Individu en forme de crâne d'Oiseau, pouvant saisir les Animaux rampant ou les corps étrangers tombés sur la surface d'une colonie de Bryozoaires Ectoproctes (*ex. Bugula*).

avifaune. *n.* Faune constituée par les Oiseaux.

axis. *n.* Deuxième vertèbre cervicale des Vertébrés Tétrapodes.

axone. *n.* Long prolongement isodiamétrique, constitutif du neurone.

axopodes. *n.* Filaments rappelant des flagelles plus ou moins rigides, chez les Acanthaires (Actinopodes).

axostyle. *n.* Tige rigide et élastique partant du centrosome et pouvant émerger du corps de certains Flagellés *(ex. Trichomonas)*.

B

baculum. *n.* Voir *os pénien*.

bajoue. *n.* Partie musculaire de la face d'un Mammifère qui s'étend de l'œil à la mâchoire. Elle peut parfois se dilater pour emmagasiner temporairement des aliments récoltés. *Ex.* Chez le hamster doré, certaines chauves-souris.

balancier. *n.* 1° Organe d'équilibration remplaçant l'aile postérieure chez les Insectes Diptères. 2° Baguettes glandulaires paires que portent au début de leur développement les jeunes larves de nombreux Urodèles (Amphibiens); situées près de la bouche, ce sont des organes de fixation.

bandelette germinative. Zone provenant des divisions du blastoderme et qui conduira, après différenciation, à la formation de l'embryon et des aires extra-embryonnaires.

barbe. *n.* Élément constitutif de la plume des Oiseaux.

barbule. *n.* Élément constitutif de la plume des Oiseaux reliant les barbes entre elles.

barre. *n.* Voir *diastème*.

basibranchial. *n.* Os impair et ventral qui réunit les deux hypobranchiaux gauche et droit d'un même arc branchial, chez les Poissons.

basipodite ou **basis.** *n.* Deuxième article appartenant au premier élément (ou protopodite) d'un appendice biramé type, sur lequel s'articulent les deux rames, chez les Crustacés.

basiproboscis. *n.* Partie basale, ou rostre, de la trompe des mouches.

basiptérygium. *n.* Pièce basale de la nageoire pelvienne des Poissons cartilagineux qui porte les ptérygophores.

basis. *n.* Syn. de *basipodite*.

basitarse ou **métatarse.** *n.* Article basal du tarse des Insectes.

bathyphile. *adj.* Qualifie un Animal marin qui affectionne les grandes profondeurs.

bâtonnet. *n.* Cellule photoréceptrice de la rétine de l'œil des Vertébrés. De forme cylindrique, allongée et grêle, contient un pigment, le pourpre rétinien; est sensible aux faibles éclairements.

bec. *n.* Formation cornée des lèvres supérieure et inférieure existant chez les Animaux dépourvus de dents tels les Chéloniens, Oiseaux et Mammifères Monotrèmes.

benthique. *adj.* Qui concerne le benthos.

benthos. *n.* Ensemble des êtres marins qui vivent au contact du fond, souvent même fixés à lui.

bilharziose. *n.* Maladie due à l'action de Vers parasites des genres *Bilharzia* ou *Schistosoma*, dont l'espèce *haematobium* entraîne des troubles de la vessie et l'espèce *mansoni* des troubles de l'intestin.

biomasse. *n.* Dans un endroit donné, masse d'êtres vivants par unité de surface ou parfois de volume.

bionomie. *n.* Ensemble du vocabulaire relatif à la matière vivante.

biotope. *n.* Milieu défini où vivent un organisme ou une population. *Ex.* Les falaises rocheuses d'altitude supérieure à 2 000 m constituent souvent le biotope de l'aigle royal.

bipède. *adj.* Qualifie un Animal en position dressée et qui se déplace sur ses deux pieds. *Ex.* Certains singes Anthropoïdes, l'homme.

bipinnaria. (larve). Larve pélagique nageuse comportant deux bandes ciliées, préorale et postorale, totalement séparées mais pouvant se lober en une douzaine de bras inertes. Cette larve est issue des œufs fécondés lors de la reproduction des étoiles de mer (Échinodermes Stellérides).

bivium. *n.* Face dorsale comprenant deux radius et trois interradius, chez les Échinodermes Holothurides.

bivoltine. *adj.* **(espèce).** Qualifie une espèce présentant deux générations par an.

blastoderme. *n.* Bandelette embryonnaire composée d'une seule couche de cellules indifférenciées et provenant de la segmentation partielle des œufs riches en vitellus.

blastogénétique. *adj.* Qualifie la thèse sur l'interprétation du déterminisme des castes de termites : la caste à laquelle appartiendra le futur termite est déjà déterminée dans l'œuf sous forme de matériel génétique, celui-ci fixant définitivement la voie dans laquelle se fera le développement.

blastokinèse ou **blastocinèse.** *n.* Mouvement de déplacement de l'embryon dans l'œuf au cours de son développement.

blastomères. *n.* Cellules formées par la segmentation de l'œuf.

blastopore. *n.* Orifice extérieur de l'*archentéron* résultant de la gastrulation par invagination de la *blastula* lors du développement embryonnaire d'un œuf de Métazoaire. Il donnera l'anus chez les Deutérostomiens (les Échinodermes et les Cordés notamment) et la bouche chez les Protostomiens (la plupart des autres Métazoaires).

blastozoïde. *n.* 1° Nouvel individu (polype) se formant lors de la reproduction asexuée par bourgeonnement, chez les Cnidaires (*ex.* l'hydre). 2° Ascidiozoïdes agrégés et sexués issus du bourgeonnement à partir d'un stolon chez les Thaliacés (Urocordés ou Tuniciers).

blastula. *n.* Premier stade embryonnaire apparaissant à la fin de la segmentation de l'œuf et précédant la *gastrula.*

blépharoplaste. *n.* Granule présent à la base d'un cil ou d'un flagelle, chez les Bactéries et les cellules munies d'un appareil locomoteur, comme les Péridiniens. Il est intracytoplasmique dans le second cas. Contient parfois de l'ADN.

bois. *n.* Formations osseuses caduques des mâles des Cervidés. Elles sont constituées d'une tige principale, ou *merrain,* se ramifiant en *cors,* ou *andouillers*.

bombykol. *n.* Phéromone sexuelle sécrétée par le *proctodéum* de la femelle du bombyx du mûrier.

bonnet ou **réseau** ou **réticulum.** *n.* Compartiment le plus antérieur de l'estomac des Ruminants caractérisé par les replis de sa muqueuse, lesquels simulent les alvéoles d'une ruche.

bord columellaire. Limite de l'ouverture de la coquille des Mollusques Gastéropodes située du côté de l'axe d'enroulement (ou *columelle*) et à laquelle l'Animal adhère au moyen d'un *muscle columellaire*.

botryoïdal. *adj.* Qualifie le tissu de remplissage, ou cœlenchyme, présent dans la cavité du corps des Hirudinées. Ce tissu intervient dans le métabolisme des glucides et l'excrétion des protéines.

botté. *adj.* Qualifie le tarse des Oiseaux Turdidés, qui est couvert d'une seule plaque cornée sur sa face antérieure.

bouclier. *n.* Désigne les parties dures ou cornées qui constituent le test des Animaux articulés.

bouclier buccal ou **oral.** Grosse plaque impaire appartenant à chacune des cinq mâchoires interradiaires de la bouche chez les Échinodermes Ophiurides.

bouclier céphalique. Cuirasse exosquelettique constituée d'épaisses écailles articulées qui recouvrait la tête des premiers Vertébrés pisciformes (Ostracodermes et Placodermes).

bouclier gastrique. Région de la paroi de l'estomac des Mollusques servant à la trituration des aliments. Cette région est de nature chitineuse.

bouclier oral. Voir *bouclier buccal*.

boucliers radiaires. Très grandes plaques dorsales situées à l'aplomb de chaque bras chez les Échinodermes Ophiurides.

bourses. *n.* Organes de respiration chez les Échinodermes Ophiurides, où se déversent, à maturité, les produits génitaux. Chez certains de ces Animaux, ces invaginations de la paroi ventrale du disque central jouent aussi un rôle excréteur.

brachidium. *n.* ou **squelette brachial.** Ensemble des pièces de nature calcaire, de forme plus ou

moins complexe, constituant une différenciation de la valve dorsale de tous les Brachiopodes et servant de guide ainsi que d'armature, partielle ou totale, au *lophophore*.

brachiolaria. (larve). Larve pélagique possédant, au-dessus de la bouche, un appareil fixateur formé d'une ventouse adhésive, ciliée, faisant saillie entre les bases de trois bras terminés par des papilles. S'observe dans le développement embryonnaire de certaines astéries (Échinodermes Stellérides).

brachioles. *n.* Chez de nombreuses espèces d'Échinodermes Cystoïdes, bras convoyeurs d'aliments prolongeant extérieurement les cinq gouttières nourricières convergeant vers la bouche.

brachycéphalie. *n.* État d'un Animal présentant un crâne aussi large que long.

brachyodonte. *adj.* Chez les Mammifères, qualifie les dents à croissance limitée. *Ex.* L'homme.

branchicténie. *n.* Syn. de *branchiospine*.

branchiospine ou **branchicténie.** *n.* Chez les Poissons cartilagineux, appendice situé sur le bord interne de l'arc branchial et servant à filtrer le plancton.

branchiostège. *n.* Rayon protégeant les branchies chez les Poissons Téléostéens.

branchiostégites. *n.* Expansions latérales de la carapace thoracique formant deux chambres symétriques où est logé l'appareil branchial des Crustacés Décapodes.

bréchet ou **carène.** *n.* Lame ventrale axiale du sternum servant de surface d'insertion aux muscles des ailes chez les Oiseaux.

brosse à pollen. Organe de nettoyage disposé sur la face interne du *basitarse* postérieur des abeilles.

bufaline. *n.* Substance cardio- et hémotoxique que sécrètent les glandes muqueuses et granuleuses du crapaud.

bufoténine. *n.* Substance voisine de la *bufaline* sécrétée par les glandes muqueuses et granuleuses du crapaud.

bulbe éjaculateur. 1° Portion supérieure renflée du canal éjaculateur des Insectes où débouchent les glandes annexes. 2° Chez les Araignées, organe copulateur mâle situé dans une dépression du tarse des *pédipalpes*.

bulbille. *n.* Renflement contractile à l'origine des artères irriguant les *septa* des fentes branchiales chez l'amphioxus (Céphalocordés).

bulle tympanique. Paroi osseuse globulaire du crâne de certains Mammifères, constituée par une partie de l'os squamosal, de la capsule otique et de l'os occipital, et protégeant les oreilles moyenne et interne.

byssus. *n.* Tige cornée en forme de cône allongé où s'attache une touffe de filaments résistants, visqueux et adhésifs, sécrétés par la *glande byssogène* (sous le pied) et constituant un faisceau divergeant, sortant entre les deux valves de la coquille de certains Mollusques Lamellibranches (tels que la moule) qui vivent fixés à un substrat solide.

C

cæcotrophie. *n.* Phénomène de coprophagie physiologique observé chez les Léporidés et de nombreux Rongeurs, dont environ 80 % des aliments passent deux fois par le tube digestif. Les lapins récupèrent ainsi, grâce à ce processus, la vitamine B élaborée par les Bactéries du cæcum, de même que les produits de dégradation de la cellulose.

cæcum. *n.* Diverticule de l'intestin. *Cæcum hépatique* : long diverticule, aplati dans le sens transversal, débouchant de l'extrémité postérieure de l'œsophage et replié sur l'estomac, vers l'avant, dans la cavité péripharyngienne droite du corps de l'amphioxus (Céphalocordés) par exemple.

cage thoracique. Squelette du thorax des Vertébrés Amniotes, constitué en arrière par la partie dorsale de la *colonne vertébrale*, en avant par le *sternum*, et latéralement par les côtes et les cartilages costaux.

caillette ou **abomasum.** *n.* Compartiment de l'estomac des Ruminants où s'effectue la digestion proprement dite.

calamistrum. *n.* Peigne situé sur le tarse de la quatrième paire de pattes de certaines Araignées et formé de poils recourbés.

calcanéum. *n.* Os du tarse formant la saillie du talon.

calcifié ou **calcifère.** *adj.* Chargé de calcaire. On dit souvent *incrusté* ou *encroûté* de calcaire.

calice. *n.* Corps central des Échinodermes Crinoïdes, en forme de coupe ou de cône, contenant les viscères et soutenu par un squelette, ou *thèque*, constitué de deux ou trois cycles de plaques calcaires.

calicinal. *adj.* Qui concerne le *calice* des Échinodermes Crinoïdes.

calicoblaste. *n.* Cellule ectodermique des Scléractiniaires intervenant dans l'édification de leur squelette calcaire.

callosités. *n.* 1° Épaississements cornés des pouces permettant aux mâles des Amphibiens Anoures de maintenir la femelle lors de l'accouplement. 2° Épaississements cornés, nus, fortement colorés et localisés au niveau des fesses de certains singes (*ex.* chimpanzés, babouins).

campaniforme. *adj.* **(sensille).** Qui est en forme de cloche. Les sensilles campaniformes, groupées à la base des ailes, chez les Diptères par exemple, ou disposées sur divers segments des pattes, sont sensibles aux variations de pression de l'air.

campodéiforme. *adj.* **(larve).** Qualifie la larve carnassière, pourvue de pièces buccales broyeuses et de fortes pattes, des Insectes Névroptères, Coléoptères, Strepsiptères et Thysanoptères.

canal alisphénoïde. Canal formé par des os (alisphénoïdes) soudés de part et d'autre du crâne des Mammifères, et dans lequel se trouvent les ganglions des nerfs trijumeaux et faciaux ainsi que certains vaisseaux sanguins.

canal carotidien. Vaisseau qui relie dorsalement les deux premiers arcs aortiques chez quelques Amphibiens (notamment le triton) et quelques Reptiles (divers lézards).

canal hydrophore. Tube issu du *canal oral circulaire* et permettant la communication de l'appareil aquifère des Échinodermes avec l'eau de mer, par une *plaque madréporique*, ou avec le liquide cœlomique de la cavité générale (comme chez la plupart des Holothurides).

canal de Müller. Voir *oviducte*.

canal nasopalatin. 1° Chez les Agnathes, canal qui relie les sacs olfactifs à la cavité bucco-pharyngée. 2° Chez certains Mammifères (Ruminants, Carnivores), canal qui relie l'*organe de Jacobson* avec la cavité buccale en traversant le palais secondaire en arrière des incisives.

canal nasopituitaire ou **canal nasohypophysaire.** Chez certains Cyclostomes, canal qui relie la narine au pharynx par l'intermédiaire de l'hypophyse.

canal oral circulaire. Partie principale de l'appareil aquifère des Échinodermes d'où partent les cinq *canaux radiaires* alimentant les *podia* et le *canal hydrophore*. Ce canal annulaire, entourant l'œsophage, porte aussi une ou plusieurs *vésicules de Poli*.

canaux de Cuvier. Veines transversales qui raccordent l'une à l'autre les veines cardinales antérieure et postérieure d'un même côté chez les Céphalocordés. Ces deux canaux se jettent dans le *sinus veineux*.

canaux radiaires. Branches émises par le canal oral circulaire de l'*appareil aquifère* des Échinodermes et qui se ramifient pour alimenter les *podia*; elles sont au nombre de cinq.

canaux semi-circulaires. Diverticules membraneux de l'*utricule* de l'oreille interne des Vertébrés qui, disposés dans les trois plans de l'espace, constituent un organe d'équilibration.

canine. *n.* Dent labiale postérieure de la mâchoire des Vertébrés. Essentiellement utilisée pour la préhension, elle est très développée chez les Carnivores, où elle porte le nom de *croc*.

cantharidine. *n.* Produit pharmaceutique utilisé pour ses propriétés vésicantes. Il est sécrété par certains Insectes Coléoptères (*Lytta* ou *Mylabris*), communément appelés « cantharides ».

canton. *n.* Voir *territoire*.

capitulum. *n.* 1° Ensemble du corps (sauf le pédoncule de fixation) des Lépadomorphes (Crustacés Cirripèdes Thoraciques). 2° Partie antérieure du céphalothorax, parfois mobile, des Acariens (Chélicérates Arachnides). 3° Portion supérieure du *polype* des Cnidaires Anthozoaires Hexacoralliaires.

caprification. *n.* Maturation du caprifiguier due à l'action d'un Insecte symbiotique, *Blastophaga psenes,* lequel, au cours de son développement, permet la fécondation de la fleur en transportant le *pollen* d'un réceptacle initial sur un autre.

capsules surrénales. Glandes endocrines coiffant les reins et intervenant dans le fonctionnement de ces organes et dans celui des gonades.

captacule. *n.* Long filament, mince et visqueux, dilaté à son extrémité, mobile et extensible. Il est utilisé par les Mollusques Scaphopodes, comme les *Dentalium,* pour capturer des micro-organismes.

caractères sexuels secondaires. Chez les Animaux, caractères morphologiques ou physiologiques qui sont sous la dépendance d'hormones sexuelles. Sont très marqués chez les Oiseaux, en particulier chez les Gallinacés : barbillons, crête, lancettes, faucilles et ergots sont les caractères sexuels secondaires du coq.

carapace. *n.* 1° Enveloppe chitineuse calcifiée du corps des Crustacés. 2° Enveloppe osseuse formée de plaques dermiques qui protège le corps des Reptiles Chéloniens (*ex.* tortues).

cardia. *n.* Orifice mettant l'estomac des Mammifères en communication avec l'œsophage.

cardo. *n.* Voir *maxille*.

carène. *n.* Plaque calcaire dorsale impaire renforçant les valves de la carapace chitineuse des Lépadomorphes (Crustacés Cirripèdes Thoraciques).

carnassières. *n.* Dents particulièrement développées, caractéristiques des Mammifères Carnivores. Il s'agit de la dernière prémolaire de la demi-mâchoire supérieure et de la première molaire de la demi-mâchoire inférieure, lesquelles correspondent lors de la fermeture des mâchoires.

carnitine. *n.* Triacide aminé constitutif du tissu musculaire, encore appelé *vitamine* B_T. Cette substance est indispensable à certains Ténébrionides.

caroncule. *n.* Protubérance épidermique cornée portée par l'extrémité supérieure du bec des Oiseaux; tombe après avoir servi à briser la coquille de l'œuf. Syn. de *dent de l'œuf*.

caroténoïde. *n.* Substance constituée d'une longue chaîne, munie de doubles liaisons, formant ou non un cycle à chaque extrémité et portant des groupements méthyle (—CH_3) en plusieurs endroits. *Ex.* Le carotène des carottes et le lycopène des tomates. Les caroténoïdes sont des colorants solubles dans les graisses. Leur molécule possède quarante atomes de carbone en tout.

carré. *n.* Os postérieur du *splanchnocrâne* des Poissons osseux; participe à l'articulation entre les deux mâchoires.

cartilage. *n.* Chez les Vertébrés, tissu de type conjonctif dans lequel les cellules, ou *chondrocytes,* sont disséminées au sein d'une substance fondamentale imprégnée d'une glycoprotéine, le chondromucoïde, qui lui confère son élasticité et sa résistance.

cartilage de conjugaison. Cartilage situé entre les *épiphyses* et la *diaphyse* des os et par lequel s'effectue la croissance en longueur des os des Mammifères.

cartilage de Meckel. Cartilage qui constitue la mâchoire inférieure des Poissons Sélaciens.

caryolymphe. *n.* Syn. de *suc nucléaire*.

casque. *n.* Pièce ossifiée, portant six appendices, qui recouvre la tête de certains Amphibiens Anoures.

castration parasitaire. Ensemble des modifications provoquées sur un hôte par un *endoparasite* qui perturbe son métabolisme d'une telle façon qu'il provoque la stérilité. Ce phénomène est fréquent chez les mâles de crabes (Crustacés) parasités par un autre Crustacé (sacculine).

catabolisme. *n.* Voir *métabolisme*.

catabolites. *n.* Produits résultant du *catabolisme*.

catadrome ou **thalassotoque.** *adj.* Qualifie les Poissons d'eau douce qui vont pondre en mer. *Ex.* L'anguille.

catarhinien. *adj.* Caractérise des singes Anthropoïdes possédant une étroite cloison nasale et des narines rapprochées. *Ex.* Les Cercopithécidés.

catatrepsie ou **catatrepsis.** *n.* Passage de l'embryon, allant de la face dorsale de l'œuf jusqu'à la face ventrale (sa position antérieure).

cauda. *n.* Extrémité abdominale de certains pucerons.

cavernicole. *adj.* Qualifie un Animal vivant dans les cavernes. On distingue trois catégories de cavernicoles : les *troglobies,* qui passent toute leur vie dans les grottes, les *troglophiles,* qui y vivent d'une façon moins permanente, et les hôtes provisoires, ou *trogloxènes*.

cavicorne. *adj.* Caractérise un Animal portant des cornes creuses. *Ex.* Les Bovidés.

cavité bucco-pharyngée. Cavité antérieure du tube digestif des Vertébrés adultes, constituée par la fusion de la cavité buccale et du pharynx, par rupture de la membrane pharyngienne.

cavité cœlentérique. Chez les Cnidaires et les Cténaires, cavité digestive interne tapissée par l'*endoderme* et reliée au milieu extérieur par un orifice unique servant de bouche et d'anus.

cavité cotyloïde. Voir *fosse acétabulaire*.

cavité glénoïde. Cavité portée par le processus de l'*arcade zygomatique* et servant à l'articulation de la mandibule, chez les Mammifères.

cavité olfactive. Région postérieure de la cavité nasale des lézards. Elle correspond à de simples conduits sans communication avec les organes de Jacobson.

cavité palléale. Sillon profond, ou poche, à peu près clos, des Mollusques, déterminé par le développement d'un pli libre du manteau, où se localisent les branchies et dans lequel débouchent l'anus, les orifices urinaires et génitaux.

cavités cloacales. Cavités latérales du corps des Urocordés, ou Tuniciers, se réunissant sur la face dorsale où débouche l'anus et s'ouvrant à l'extérieur par un siphon cloacal. L'eau venant du sac branchial y circule.

ceinture arcifère. Type de *ceinture scapulaire* où l'*épicoracoïde* droit chevauche le gauche; présente chez certains Amphibiens Anoures, comme les Pipidés et les Discoglossidés.

ceinture pectorale ou **ceinture scapulaire.** Partie antérieure du squelette zonal, cartilagineuse ou osseuse, sur laquelle s'articulent les membres antérieurs des Vertébrés. Elle comporte originellement trois os : le *procoracoïde,* le *coracoïde* et la *scapula*.

ceinture pelvienne. Partie postérieure, du squelette zonal, cartilagineuse ou osseuse, sur laquelle s'articulent les membres postérieurs des Vertébrés. Comporte trois os chez les Vertébrés Tétrapodes : le *pubis,* l'*ischion* et l'*ilion*.

ceinture pérignathique. Système circulaire situé sur le bord interne de la zone péribuccale du *test* des oursins. Il est constitué de plaques interradiales étroites et d'auricules servant à l'insertion basale des muscles de la *lanterne d'Aristote*.

ceinture scapulaire. Voir *ceinture pectorale*.

cellobiose. *n.* Disaccharide constitutif de la cellulose, libéré lors de l'hydrolyse de cette dernière, sous l'action de la cellulase.

cellulase. *n.* Enzyme permettant la transformation de la *cellulose* en cellobiose.

cellule. *n.* Structure de base des êtres vivants, limitée par une *membrane cytoplasmique* souple et formée d'un *cytoplasme* contenant un *noyau* et divers autres *organites*. La cellule représente l'unité morphologique et physiologique des êtres vivants.

cellules aquifères. Cavités de la paroi de la panse des Camélidés dans lesquelles s'accumule l'eau absorbée.

cellules folliculaires. *n.* Cellules à rôle nourricier, disposées en feuillet autour du gamète femelle, ou *ovocyte,* des Mammifères notamment.

cellules de Hesse et de Joseph. Cellules en forme de petit œil très rudimentaire, noyées dans les parois de la moelle épinière (à partir du troisième myotome) de l'amphioxus (Céphalocordés). Seraient peut-être des organes photorécepteurs.

cellules neurosécrétrices de la *pars intercerebralis* (C.N.P.S.I.). Cellules du cerveau antérieur des Insectes libérant le facteur cérébral, ou *ecdysiotropine*.

cellules péritonéales. Organes excréteurs des Échinodermes Crinoïdes. Ces cellules, vibratiles, de la paroi cœlomique élaborent de gros granules brunâtres que des phagocytes capturent lors de leur expulsion et digèrent partiellement, pour les transporter dans le tissu conjonctif ou pour passer à l'extérieur.

cellules de Semper. Groupe des quatre cellules sous-cornéennes formant le cône cristallin de l'*ommatidie* de l'*œil composé* des Insectes.

cellulose. *n.* Polymère insoluble d'une forme de glucose, à longues molécules en forme de chaînes, elles-mêmes groupées en faisceaux. Constituant essentiel des parois squelettiques des Végétaux.

cément. *n.* Tissu osseux entourant la racine des dents et recouvrant parfois leur couronne.

cénozoécie. *n.* Logette évoluant en système de fixation (rhizoïdes, épines) dans une colonie de Bryozoaires Cyclostomes.

centre cellulaire ou **centriole** ou **cinétosome.** Organite intracytoplasmique caractéristique des cellules animales, jouant un rôle important au moment de la division cellulaire. De cet élément dérivent les cils et les flagelles des cellules mobiles (*ex.* Protozoaires).

centrogaster. *n.* Estomac central du système gastrovasculaire, chez les méduses Scyphozoaires.

centrolécithe. *adj.* Caractérise le type d'œuf dont les réserves vitellines occupent la partie centrale. *Ex.* Les œufs des Insectes.

centroplaste. *n.* Vésicule centrale du corps d'un Héliozoaire, d'où émergent les *axopodes*.

cénure. *n.* Nom de la larve de *Taenia multiceps,* parasite du chien. Ce cysticerque, volumineux, se localise dans les centres nerveux de l'hôte, chez lequel il provoque des troubles de l'équilibration.

céphalisation. *n.* Processus de développement du cerveau.

céphalon. *n.* Région céphalique d'un Crustacé, constituée de l'*acron* et de six à sept *métamères*.

céphalopodium. *n.* Ensemble constitué par la tête et le pied dans le corps de tous les Mollusques; est marqué surtout chez les Mollusques Céphalopodes où il y a fusion de la tête et d'une grande partie du pied en une masse unique.

cérambycoïde. *adj.* Caractérise les larves de Coléoptères *xylophages*.

cératotriche. *n.* Rayon de scléroprotéine fibreuse qui soutient la partie périphérique non musculaire de la nageoire des Poissons cartilagineux.

cercaire. *n.* Quatrième stade larvaire libre (de la douve, parasite du foie, par exemple), succédant à la *rédie* et caractérisé par l'existence d'une queue.

cérébrosides. *n.* Lipides complexes non phosphorés dérivant de la *sphingosine* et présents dans le cerveau.

cérinula. *n.* Larve pélagique libre des Cérianthaires.

cerques. *n.* Chez les Insectes, appendices du onzième segment abdominal, ou parfois du dixième; présents chez les Aptérygotes, la plupart des Hémimétaboles et seulement chez quelques Holométaboles, comme les Mécoptères. Les cerques sont sensibles aux stimulations tactiles et aux vibrations de l'air.

cespiticole. *adj.* Qualifie un organisme vivant dans les touffes d'herbes.

chætosema. *n.* Renflement sétigère situé sur le *vertex,* en arrière des antennes, chez les Lépidoptères.

chambre filtrante. Dispositif complexe de l'intestin des Homoptères constitué par l'anastomose des deux extrémités de l'intestin moyen. Permet la filtration de l'eau et des sels minéraux.

chambre de fuite. Logette de la coque d'habitation des Appendiculaires (Urocordés) par laquelle l'Animal inquiété s'échappe en rompant une cloison très fine, rejetant ainsi définitivement sa coque.

chambre incubatrice. Désigne, chez certaines espèces (notamment les Insectes), une cavité dans laquelle les embryons peuvent se développer.

chambres du piège. Premières logettes antérieures de la coque d'habitation des Appendiculaires (Urocordés). En forme d'entonnoir conduisant l'eau vers la queue de l'Animal, ces deux chambres s'ouvrent extérieurement par deux orifices inhalants, grillagés, qui arrêtent les organismes planctoniques volumineux.

champ anal. Région souple et flexible, englobant généralement les nervures anales et située entre la partie antérieure et le *champ jugal* de l'aile postérieure, chez certains Insectes Néoptères.

champ jugal ou **neala.** Surface en éventail, membraneuse, plus ou moins développée, présentée par les ailes postérieures (dans leur partie basale) chez certains Insectes Néoptères et qui en augmente la surface portante.

chant. *n.* Moyen de communication utilisé par les Oiseaux et certains Insectes, constitué par un ensemble de sons groupés en phrases ou motifs. Peut être une phrase stéréotypée ou une mélodie.

chanterelle. *n.* Rebord interne d'un *élytre* qui, en frottant sur la râpe de l'élytre opposé, provoque la stridulation chez certains Insectes Orthoptères (*ex.* le grillon).

charnière. *n.* Système pourvu ou non de dents et de fossettes, constituant un dispositif d'engrenage plus ou moins complexe qui assure dorsalement l'articulation des deux valves de la coquille des Mollusques Bivalves, de Brachiopodes ou de Crustacés Ostracodes.

chélicère. *n.* Appendice des Chélicérates à fonction préhensile servant à la capture des proies.

chélipèdes. *n.* Première paire d'appendices thoraciques portant deux grosses pinces terminales parfois dissymétriques et servant à la préhension, à

l'attaque et à la défense chez les Crustacés Décapodes (*ex.* les crabes, les homards, les écrevisses).

chétotaxie. *n.* Distribution des soies chez les Invertébrés.

chiastoneurie ou **streptoneurie.** *n.* Configuration en 8 de l'anse nerveuse viscérale des Mollusques Gastéropodes (sous-classe des Prosobranches surtout), due à la torsion de 180° de la masse viscérale.

chilaria. *n.* Appendices, non segmentés, situés sur le segment prégénital de l'abdomen des xiphosures, comme la limule.

chimère. *n.* 1° Organisme anormal formé de parties disparates. 2° Poisson cartilagineux.

chiroptérygium. *n.* Voir *membre chiridien.*

chitine. *n.* Polymère comparable à la cellulose, mais azoté, car formé de glucose aminé. Abondante dans le règne animal, en particulier dans la carapace des Insectes, la chitine se trouve aussi chez beaucoup de Champignons.

chitineux. *adj.* Qui renferme de la chitine.

chitinoïde. *adj.* Constitué de chitine ou d'une substance voisine.

chloragogène. *adj.* Qualifie des cellules de l'intestin du lombric intervenant dans le métabolisme des glucides et des protides.

chloroplaste. *n.* Organite des Végétaux Eucaryotes possédant des lamelles sur lesquelles est fixée la chlorophylle qui permet la photosynthèse.

choane. *n.* Communication entre la cavité nasale et la cavité buccale existant chez les Amphibiens, les Reptiles, les Oiseaux et les Mammifères.

choanocytes. *n.* Cellules à collerette tapissant la paroi interne de la cavité digestive des Éponges et intervenant dans la capture et la digestion des particules ingérées.

cholestérol. *n.* Lipide complexe dérivant d'un stérol ou alcool polycyclique. Il est présent dans les œufs, la cervelle, le foie, mais peut être synthétisé par l'organisme. Il intervient dans la synthèse des hormones sexuelles et cortico-surrénales. En excès dans le sang, il provoque l'athérosclérose.

chondrocrâne. *n.* Crâne cartilagineux, définitif chez les Agnathes et les Poissons cartilagineux. Il s'édifie par chondrification du mésenchyme squelettogène.

chondrocytes. *n.* Cellules typiques du tissu cartilagineux des Vertébrés. Elles sont noyées dans la substance fondamentale du cartilage.

choriogenèse. *n.* Formation du chorion.

chorion. *n.* 1° Enveloppe dure de l'œuf des Insectes sécrétée par les cellules folliculaires. On y distingue, de l'extérieur vers l'intérieur, deux couches : l'*exochorion,* renfermant une lipoprotéine, la *chorionine,* et l'*endochorion,* comprenant des protéines associées à des polyphénols. 2° Élément constitutif du placenta chez les Mammifères Euthériens.

chorionine. *n.* Lipoprotéine constitutive de l'exochorion.

chromatographie. *n.* Technique de séparation physique de substances organiques en mélange. On utilise l'aptitude différente de ces substances à migrer dans des colonnes de poudre de cellulose, d'alumine, etc., sur des feuilles de papier ou dans des couches de gel de silice, lorsqu'elles sont entraînées par divers solvants. On peut aussi *chromatographier* des mélanges gazeux, dont les constituants sont diversement entraînés par un gaz inerte à travers une colonne adsorbante.

chromatophore. *n.* Cellule pigmentaire contractile du tégument des Animaux (Amphibiens, Reptiles, etc.).

chromocentre. *n.* Zone des chromosomes correspondant à une condensation due à une spiralisation persistante.

chromosomes. *n.* Éléments en général allongés, formés par le noyau de la cellule lors de sa division. Sont constitués d'ADN et constituent le support de l'hérédité. Leur nombre et leur forme sont caractéristiques d'une espèce donnée.

chrysalide. *n.* Nymphe de Lépidoptère.

cibarium. *n.* Partie antérieure de la bouche des Insectes, située entre l'hypopharynx et le clypéus.

cimier. *n.* Protubérance osseuse en forme de casque que portent sur la tête les casoars.

cinclide. *n.* Pore de communication entre la cavité gastrale et l'extérieur, chez l'anémone de mer (Cnidaire Anthozoaire Actiniaire), permettant l'éjection des filaments urticants internes.

cinétosome. *n.* Voir *centre cellulaire.*

cire. *n.* Zone de peau nue à la base du bec des Oiseaux. Selon les espèces, porte ou non les narines.

cirres. *n.* 1° Organites ciliaires, complexes, servant d'appendices locomoteurs chez les Protozoaires Ciliés (Spirotriches, Hétérotriches, Hypotriches). 2° Paire de tentacules dorsaux de l'appareil rotateur des Rotifères. 3° Organes sensoriels, allongés, portés latéralement par le péristomium de la tête, ainsi que dorsalement et ventralement par les parapodes du tronc chez les Annélides Polychètes (type *Nereis*). 4° Prolongements buccaux, mobiles, bordant la bouche de l'amphioxus (Céphalocordés). 5° Paire de longs fouets poilus représentant les rames des appendices thoraciques biramés des Crustacés Cirripèdes et dont les mouvements facilitent la capture des particules alimentaires. 6° Formations accessoires en verticille portées par la tige des Crinoïdes fossiles (type *Pentacrinus*), ou appendices fixateurs, crochus et formés d'articles successifs chez les Crinoïdes actuels (type comatule).

cirrhe. *n.* Tentacule entourant la bouche des myxines (Agnathes).

clade. *n.* Syn. de *phylum.*

claspers. *n.* Pièces sclérifiées, en forme de pinces, de l'appareil copulateur du mâle de certains Insectes Lépidoptères et Hyménoptères.

classe. *n.* Ensemble d'ordres apparentés.

clausilium. *n.* Lame mobile tenant lieu d'opercule chez les *Clausiliidae* (Mollusques Gastéropodes Pulmonés Stylommatophores).

clavicule. *n.* Os de la ceinture pectorale secondaire dermique des Vertébrés autres que les Amphibiens.

clavules. *n.* Minuscules piquants s'articulant sur de petits tubercules dont la disposition dessine les *fascioles* du test des oursins Irréguliers.

cléthrophage. *n.* Mangeur de graines sèches. *Spécialt.,* Insecte parasite des denrées qui creuse des galeries dans les graines. *Ex.* Le charançon.

cline. *n.* Existence, au sein d'une espèce, de variations de caractères dues à des modifications de facteurs externes.

clitellum. *n.* Renflement épidermique, dû à la multiplication de cellules muqueuses, présent dans le tiers antérieur du corps de certains Oligochètes, et sécrétant le cocon.

clypeus. *n.* Plaque médiane et inférieure de la tête d'un Insecte.

cnidoblastes ou **nématoblastes.** *n.* Cellules urticantes du corps des Cnidaires ayant un rôle défensif. Leur action provoque une réaction cutanée, lorsqu'il se produit un contact tactile avec une méduse par exemple.

cnidocil. *n.* Petit prolongement sensoriel du cnidoblaste, en forme de cil. Les cnidocils font saillie à la surface de l'*épithélium* dont font partie les cellules urticantes des Cœlentérés. Sensible à la moindre excitation le cnidocil commande la dévagination du filament urticant.

coalescence. *n.* Soudure entre deux pièces, voisines mais distinctes, d'un organisme.

cocon. *n.* 1° Enveloppe protectrice des œufs des Annélides constituée de mucus. 2° Enveloppe protectrice des chenilles de Lépidoptères où s'effectue la dernière mue.

cœlenteron. *n.* Cavité endodermique, à la fois générale et gastrique, du corps des Cnidaires et des Cténaires, communiquant avec l'extérieur par un seul orifice à rôles buccal et anal.

cœlomate. *adj.* **(organisme).** Métazoaire triploblastique pourvu d'un *cœlome. N.* Les Annélides, les Mollusques, les Arthropodes, les Échinodermes, les Procordés et les Vertébrés sont des cœlomates.

cœlome. *n.* Cavité close provenant du creusement du mésoderme et contenant un liquide. Chez les Annélides, chaque segment comporte deux sacs cœlomiques distincts, alors que, dans d'autres groupes, il n'existe qu'une seule cavité cœlomique, ou cavité générale.

cœlomocytes. *n.* Cellules libres du liquide cœlomique des Polychètes.

cœlomoductes. *n.* Canaux d'origine mésodermique reliant la cavité cœlomique avec l'extérieur et servant à l'émission des produits génitaux. On trouve ce type de formations chez les Annélides Polychètes.

cœnenchyme ou **cœnosteum.** *n.* Squelette des Scléractiniaires sécrété par le *cœnosarque.*

cœnosarc ou **cœnosarque** ou **cénosarque.** *n.* Ensemble formé par la masse de *mésoglée* et le réseau complexe de canaux endodermiques reliant les cavités des divers polypes d'une colonie de Cnidaires. Ce dernier sécrète le feuillet calcaire comblant les espaces entre les polypes, comme chez les Madréporaires.

cœur. *n.* Organe contractile et pulsatile des Animaux qui permet la diffusion du sang dans tout le corps. Originellement formé, chez les Vertébrés, par le *sinus veineux,* une ou deux *oreillettes,* un ou deux *ventricules* et le *bulbe artériel* antérieur.

collagène. *n.* Fibre scléroprotéique extracellulaire, constituant essentiel de l'architecture organique des Métazoaires (de la méduse à l'homme), et remarquable par la diversité de ses propriétés mécaniques : transparence de la cornée, résistance du cuir, viscosité de la gélatine, dureté de certaines Éponges.

collétériques ou **collétériales.** *adj.* **(glandes).** Qualifie les glandes accessoires de l'appareil reproducteur des Insectes femelles : ces organes sécrètent une matière visqueuse servant à coller les œufs entre eux ou à les fixer sur un support.

collier. *n.* Partie du corps des Entéropneustes (Stomocordés) dans le prolongement du *proboscis* antérieur. Extérieurement lisse, cette région sécrète du mucus, et la bouche s'ouvre ventralement au fond de la dépression qui sépare le proboscis du collier.

colloblaste. *n.* Cellule caractéristique des tentacules des Cténaires, qui capturent les proies grâce à l'adhérence de leurs globules glutineux.

colloïdal. *adj.* Qualifie la nature d'une solution constituée de macromolécules insolubles dans l'eau et formant une sorte de gelée visqueuse. *Ex.* Le blanc d'œuf dans l'eau, le cytoplasme des cellules.

colonne vertébrale. Axe squelettique, souple, caractéristique des Vertébrés et constitué de vertèbres superposées et séparées par des disques cartilagineux. On distingue, de l'avant vers l'arrière, les régions cervicale, dorsale, lombaire, sacrée et coccygienne.

columelle. *n.* 1° Axe, creux ou plein, de l'enroulement en spirale de la coquille des Mollusques Gastéropodes et Céphalopodes. Cette partie axiale de la coquille est donc constituée par le bord le plus interne des tours. 2° Structure styliforme axiale saillant au fond du calice des polypiers des Anthozoaires Hexacoralliaires et Tétracoralliaires (Cnidaires). 3° Syn. d'*étrier.* Osselet de l'oreille moyenne des Vertébrés provenant de l'*hyomandibulaire.*

commensal. *n.* Qui vit en association avec un autre organisme, sans en être parasite et, en général, sans s'y trouver fixé.

commensalisme. *n.* Relation entre organismes profitant de la même nourriture mais sans se comporter en parasites. *Ex.* Les hyènes mangent les restes laissés par les lions et les tigres.

commissure. *n.* Lien transversal entre deux ganglions nerveux symétriques.

compas. *n.* Petite pièce calcaire, fine et légère, supportée par chaque *rotule* de la *lanterne d'Aristote* des oursins. Cette baguette, en forme de Y et dont l'extrémité bifurquée est arquée vers le bas, sert à l'insertion de muscles actionnant cet appareil masticateur.

comportement. *n.* Ensemble des attitudes et conduites des êtres vivants dans leur milieu. On distingue le comportement inné, ou instinct, et le comportement acquis, ou apprentissage.

conceptacles séminaux. Poches extragénitales des femelles des Hémiptères où s'accumulent les spermatozoïdes après l'insémination traumatique pratiquée par le mâle.

conchula. *n.* Extrémité des deux lèvres buccales qui reste béante lorsque l'Animal ferme la bouche et permet la circulation de l'eau dans les gouttières ciliées du pharynx, chez les anémones de mer (Cnidaires Anthozoaires Actiniaires).

conchyliophile. *adj.* Qualifie des Insectes Hyménoptères qui nidifient à l'intérieur de vieilles coquilles d'escargots. *Ex.* Mégachilidés.

conchyoline. *n.* Protéine voisine de la kératine et entrant dans la constitution de la couche externe de la coquille des Mollusques.

concrescent. *adj.* Soudé congénitalement. Deux structures concrescentes sont nées, fusionnées à partir d'un primordium unique, et ont crû ensemble, sans jamais se séparer. Leur anatomie manifeste, malgré tout, leur dualité.

condyle articulaire. Excroissance globuleuse d'un os qui s'emboîte dans la cavité d'un autre os pour former une articulation.

condyle occipital. Surface articulaire située à la base du crâne des Vertébrés sur laquelle s'emboîte la première vertèbre.

cône. *n.* Cellule photoréceptrice de la rétine de l'œil des Vertébrés. Courte, trapue et conique, elle contient de l'iodopsine, pigment sensible aux couleurs et aux forts éclairements.

conjugaison. *n.* Modalité de reproduction sexuée au cours de laquelle deux gamontes échangent entre eux un noyau haploïde. *Ex.* La paramécie.

connectif. *n.* Cordon nerveux longitudinal reliant entre eux deux ganglions.

connexivum. *n.* Expansion latérale membraneuse de l'abdomen des Insectes Hétéroptères.

contraction musculaire. Réponse du muscle à une excitation efficace entraînant un raccourcissement dû à un glissement des filaments d'actine des myofibrilles sur les filaments de myosine.

conulaire. *adj.* État de la surface d'une Éponge lorsque la charpente principale est fibreuse. *Ex.* Les Éponges siliceuses et cornées (Démosponges).

conule. *n.* Petit cône simple ou ramifié, épineux ou obtus, faisant saillie à la surface des Éponges siliceuses et cornées (Démosponges), formé par la membrane ectosomique tendue comme une toile entre les extrémités des fibres cornées du squelette.

convergence. *n.* Ressemblance apparente entre des organismes différents due à une adaptation à un même mode de vie. *Ex.* Requin, ichthyosaure et dauphin.

copépodite. *adj.* Troisième stade larvaire succédant aux stades *nauplius* et *métanauplius* dans le développement des Crustacés Copépodes libres ou parasites. *N.* Un *copépodite.*

coprophage. *adj.* Syn. de *coprophile.*

coprophile. *adj.* Qui se développe sur, ou dans, les matières fécales.

copularium. *n.* Chez les termites, chambre nuptiale creusée, avant la copulation, par un couple de sexués, organisés en tandem, lors de la fondation de nouvelles sociétés.

copulation. *n.* Acte d'accouplement entre deux individus de sexes opposés.

coquille. *n.* 1° Enveloppe externe du corps des Mollusques sécrétée par le tégument et formée d'une substance organique, la *conchyoline,* et imprégnée de calcaire. Elle peut être univalve (Gastéropodes Scaphopodes) ou bivalve (Lamellibranches). 2° Enveloppe protéino-calcaire externe de l'œuf des Reptiles et des Oiseaux.

cor ou **andouiller.** *n.* Ramification des *bois* des Cervidés.

coracidium. *n.* Embryon cilié porteur de six crochets et inclus dans une enveloppe, elle-même ciliée (embryophore), chez les Pseudophyllidiens comme les bothriocéphales.

coracoïde. *n.* Os ventral et postérieur de la ceinture pectorale des Vertébrés.

corbeille à pollen. Organe collecteur du *pollen* souvent localisé sur la face externe du tibia postérieur des abeilles.

corde dorsale. Voir *notocorde.*

corie. *n.* Élément constitutif de l'*hémélytre* des Insectes Hémiptères.

cormidie. *n.* Terme désignant la concentration, le long d'un stolon, de petits groupes d'individus d'une colonie de Cnidaires Hydrozoaires Siphonophores.

cornéagène. *adj.* Qualifie les cellules entourant le cône cristallin de l'*ommatidie* et formant la cornée.

cornée. *n.* Dans l'œil des Vertébrés, partie antérieure transparente de la *sclérotique.*

cornéule. *n.* Cornée de l'*ommatidie.*

cornicules. *n.* Paire d'appendices situés sous le sixième segment abdominal de certains pucerons.

cornuti. *n.* Épines sclérifiées, disposées à la surface du pénis des Lépidoptères, évitant la séparation des individus accouplés. Elles peuvent être abandonnées après l'insémination.

coronate. *adj.* Caractérise, chez les chenilles de Lépidoptères, la fausse patte munie de crochets chitineux sur tout le pourtour de sa sole.

corps allates ou **corpora allata (C.A.).** Glandes endocrines des Insectes situées dans la tête et sécrétant l'hormone juvénile.

corps blanc de Hensen. Organe hématopoïétique logé dans la capsule optique des Mollusques Céphalopodes et où s'élaborent les amibocytes sanguins.

corps brun. Formation particulière des Bryozoaires obtenue par la dégénérescence des tissus polypidiens d'une *zoécie* qui se concentrent en une ou plusieurs masses, à la suite d'une accumulation excessive de déchets.

corps calleux. Pont de substance blanche reliant les deux hémisphères cérébraux des Mammifères.

corps cardiaques ou **corpora cardiaca (C.C.).** Organes pairs d'origine nerveuse, situés dans les parois latérales de l'aorte et en relation avec le cerveau et les *corps allates* chez les Insectes. Ces glandes permettent l'accumulation de l'*ecdysiotropine.*

corps jaune. Glande provenant de la modification de l'ovaire, après la ponte ovulaire, chez certains Poissons, les Reptiles et tous les Mammifères. Chez ces derniers, cet organe sécrète la *progestérone.*

corps pédonculés. Formations latérales du protocérébron, ou cerveau antérieur, des Insectes.

corps de Tiedemann. Chez les étoiles de mer (Échinodermes Stellérides), paire de petits organes renflés, irréguliers, faits de tubes groupés très colorés, à sécrétion interne mais de fonction inconnue, et situés dans chaque interradius sur le côté interne du canal ambulacraire.

corpuscules de Grandry. Corpuscules tactiles, localisés sur le palais des Oiseaux.

corpuscules de Herbst. Corpuscules tactiles, localisés principalement sur le bec des Oiseaux et constitués par une terminaison nerveuse encapsulée de façon caractéristique.

cortex cérébral. Syn. d'*écorce cérébrale.*

corticole. *adj.* Qualifie un Animal vivant sur les écorces.

cosmine. *n.* Dentine de structure particulière qui caractérise l'écaille cosmoïde des Poissons Sarcoptérygiens. Elle est constituée par une série de tubercules séparés par des cavités s'ouvrant à la surface de l'écaille par des pores.

côtes. *n.* Baguettes endosquelettiques métamérisées, articulées ou soudées aux vertèbres, dont l'extrémité est libre ou soudée au sternum, l'ensemble constituant la cage thoracique.

couche de Malpighi. Couche profonde et vivante de l'épiderme de la peau des Vertébrés, dont l'assise la plus proche du derme, ou *membrane basale,* assure le renouvellement des cellules épidermiques.

courbure endogastrique. Chez les Gastéropodes, déformation en U, faisant saillir, dans le sens ventrodorsal, les viscères au cours du développement embryonnaire, en reportant l'anus en avant sous la bouche.

couronne. *n.* 1° Région du test d'un oursin Régulier, située entre les zones péribuccale et périproctale, et dont les plaques calcaires sont disposées selon dix fuseaux : cinq ambulacraires et cinq interambulacraires. 2° Partie supérieure, extérieure à la mâchoire, de la dent des Vertébrés.

coussinets. *n.* Formations cutanées palmaires et plantaires très développées chez les Animaux arboricoles (*ex.* certains Lémuriens).

couvaison. *n.* Période durant laquelle les Oiseaux couvent leurs œufs pour assurer la température optimale nécessaire au développement des embryons.

couvée. *n.* Ensemble des œufs en incubation, couvés par l'un des deux parents, chez les Oiseaux.

coxa. *n.* 1° Syn. du *coxopodite* des Crustacés. 2° Premier article des pattes des Arthropodes Chélicérates et des Arthropodes Mandibulates.

coxales. *adj.* Qualifie les glandes excrétrices situées sur la hanche, ou coxa, chez les Arachnides.

coxite. *n.* Syn. de *sympodite.*

coxopodite. *n.* Article basal, appartenant au premier élément (ou protopodite) d'un appendice biramé type, caractéristique des Crustacés.

crâne. *n.* Région antérieure du squelette des Vertébrés constitué par une partie protectrice de l'encéphale *(neurocrâne)* et une partie en liaison avec la région antérieure du tube digestif *(splanchnocrâne).*

craspédote. *adj.* Qualifie des méduses à cavité gastrique non cloisonnée et à bord ombrellaire rétréci par un velum (*ex.* les méduses de la classe des Hydrozoaires).

crèche. *n.* Ensemble des nichées de plusieurs couples d'Oiseaux. *Ex.* Chez le pélican blanc, les flamants, les manchots.

crémaster. *n.* Partie apicale du dernier segment abdominal, en forme d'épine ou de crochet et servant d'organe de fixation chez des larves d'Insectes.

crête occipitale. Protubérance de l'os occipital, présente, par exemple, sur le crâne du gibbon.

crête sagittale. Protubérance médiane de l'os frontal, présente, par exemple, sur le crâne des gibbons.

cri. *n.* Son inarticulé émis par les Animaux. On en distingue trois types principaux : le cri d'alarme, le cri de détresse et le cri de ralliement.

cri d'alarme. Cri émis par un Animal effrayé. Peut servir à avertir des congénères.

cri de détresse. Cri émis par un Animal qui voit approcher la mort lorsqu'il est saisi par un prédateur.

cri de ralliement. Cri utilisé par les Animaux qui se déplacent en groupe, permettant de maintenir la cohésion de celui-ci.

cribellum. *n.* Plaque transversale située en avant des premières filières de certaines Araignées, et perforée par les multiples orifices des microfusules (voir *fusule*) émettant une soie gluante.

cristallin. *n.* Partie du globe oculaire constituée par une lentille épithéliale transparente qui focalise les rayons lumineux sur la rétine.

croisé. *adj.* Qualifie le type de *pédicellaires* des étoiles de mer (Échinodermes Stellérides) dont les mors se croisent.

croissance allométrique. Croissance disharmonique d'un organisme, tel le corps d'un Insecte dont chaque partie se développe selon un rythme propre.

croupion. *n.* Région caudale des Oiseaux, constituée par les sept vertèbres caudales dont la dernière, ou *pygostyle*, porte les rectrices.

crumena. *n.* Poche tégumentaire, ventrale et céphalique, dans laquelle s'enroulent les longs stylets buccaux des cochenilles.

crura. *n.* Baguettes latérales du squelette brachial calcaire des Brachiopodes servant à la fixation de cet appareil à la valve dorsale de la coquille et soutenant la base du *lophophore*.

cryptique. *adj.* Caractérise la livrée d'un Animal qui permet à ce dernier de se confondre avec le milieu environnant.

cryptogastre. *adj.* Caractérise certains adultes de Coléoptères dont les premiers sternites abdominaux sont peu visibles car étroitement soudés entre eux, par suite de fusion.

cryptomitose. *n.* Division cellulaire des Protozoaires caractérisée, à la différence de celle des Métazoaires, par la persistance, tout au long du processus, de la membrane nucléaire.

cryptonéphridisme. *n.* Système excréteur des larves de certains Ténébrionides par exemple, comprenant l'extrémité des tubes de Malpighi reliés à la paroi rectale par une membrane imperméable.

cténidie. *n.* Appareil respiratoire, ou branchie, présent chez les Mollusques Gastéropodes Prosobranches et les Mollusques Bivalves Prosobranches.

cténodonte. *adj.* **(charnière).** Type de charnière des coquilles de Bivalves caractérisé par des dents nombreuses, semblables entre elles et convergeant vers le centre de la coquille. *Ex.* Charnière de *Nucula*.

cténoïdes. *adj.* **(écailles).** Qualifient les productions dermiques des Poissons Téléostéens, dont le bord postérieur est dentelé.

cubitus. *n.* Syn. de *ulna*.

cuboïde. *n.* Os externe du tarse des Mammifères.

cucullus. *n.* Plaque mobile prolongeant la carapace et protégeant les chélicères chez les Ricinules.

cuilleron. *n.* Écaille membraneuse bordée par un épaississement en bourrelet frangé de soies, située entre l'alule et le thorax chez les Insectes Diptères supérieurs.

cunéiforme. *adj.* **(dent).** Dent de Vertébrés en forme de coin.

cunéus. *n.* 1° Petite pièce cornée triangulaire située sur l'hémélytre membraneuse de certains Hétéroptères. 2° Pièce triangulaire sclérifiée située entre les yeux composés des Odonates. 3° Cornutus (voir *cornuti*) très développé des Lépidoptères.

cuspide. *n.* Tubercule de la dent des Vertébrés.

cuticule. *n.* Partie constitutive du tégument d'un Arthropode constituée de chitine et de protéines et comprenant, de l'extérieur vers l'intérieur, une *épicuticule* très fine imprégnée de cire et et de cuticuline, une *exocuticule* dure et ambrée recouvrant une *endocuticule* plus épaisse et sclérotinisée.

cutis. *n.* Tissu conjonctif situé sous le tégument des Némertiens.

cyathozoïde. *n.* Individu asexué ou oozoïde, fondateur du stade initial tétrazoïde d'une colonie de Pyrosomes (Tuniciers Thaliacés) par découpage d'un gros diverticule (*stolon*) poussant à la partie antérieure du corps resté à l'état embryonnaire et qui se résorbe alors complètement.

cycle menstruel ou **cycle œstral.** Cycle sexuel de la femelle des Mammifères, de durée variable selon les espèces et débutant par un écoulement de sang, ou menstrue, qui signale les remaniements de la muqueuse utérine.

cycle ontogénique. Période durant laquelle s'effectue le développement complet d'un individu prêt à se reproduire.

cyclolabia. *n.* Forme de Dermaptère caractérisée par des cerques en pinces, ou forceps, de petite taille.

cymbacalypte. *n.* Espace situé entre la timbale et le volet dorsal typique de certaines cigales.

cymbale. *n.* Syn. de *timbale*.

cypris. **(larve).** Stade larvaire postérieur au stade *nauplius* dans le développement des Crustacés Cirripèdes. Se caractérise par une carapace bivalve et six paires d'appendices, et précède la phase de fixation.

cysticerque. *n.* Stade larvaire succédant à l'oncosphère chez les Cyclophyllidiens, tel le ténia. Il correspond à une vésicule pleine de liquide, au niveau de laquelle se différencie un scolex par invagination de la paroi interne.

cystide. *n.* Région vivante composée d'un épiderme à paroi squelettique externe et à couche mésodermique interne, disposée à la périphérie de chaque *zoécie* (logette) d'une colonie de Bryozoaires.

cystide. *adj.* **(stade).** Qualifie, chez les Échinodermes Crinoïdes, la phase larvaire postérieure à la fixation de la larve en tonnelet. Cet organisme, long de 3 à 4 mm, est formé d'un calice surmontant un pédoncule à base adhésive.

cystine. *n.* Acide aminé constitué par l'union de deux molécules de cystéine et caractérisé par un groupement disulfure (S-S).

cystocinèse. *n.* Scission du cytoplasme lors de la division d'une cellule initiale en deux cellules filles.

cystozoïde. *n.* Individu chargé de la fonction d'excrétion dans une colonie permanente de Cnidaires (Hydrozoaires Siphonophores).

cytochrome. *n.* Protéine très répandue dans les tissus, servant de transporteur d'électrons et impliquée dans les oxydations cellulaires.

cytophore. *n.* Masse glandulaire autour de laquelle se multiplient les spermatogonies des Polychètes.

cytoplasme. *n.* Ensemble des éléments d'une cellule, à l'exclusion du noyau, enfermés dans la membrane cytoplasmique. Comprend le hyaloplasme et les divers organites qui s'y trouvent (notamment l'appareil de Golgi, les mitochondries et le réticulum endoplasmique).

cytoprocte ou **cytopyge.** *n.* Point localisé à la surface de la membrane d'un Protozoaire où s'effectue l'élimination des déchets solides de la digestion.

D

dactyle. *n.* 1° Syn. de *dactylopodite*. 2° Deuxième article du tarse élargi chez certains Insectes Hyménoptères et Cœlifères par exemple.

dactylopodite ou **dactyle.** *n.* Article terminal mobile de la pince d'un Crustacé.

dactylozoïde. *n.* Individu stérile, garni de batteries de *nématoblastes* et chargé de la défense d'une colonie permanente de Cnidaires Hydrozoaires.

décidué. *adj.* Caractérise un type de *placenta* intimement associé à la muqueuse utérine : celle-ci est en partie expulsée au moment de la naissance. *Ex.* Chez l'éléphant, chez l'homme.

dectique. *adj.* **(nymphe).** Qualifie la nymphe pourvue de mandibules fonctionnelles chez les Insectes Névroptères, Mécoptères, Trichoptères et chez quelques Lépidoptères.

dégénérescence. *n.* 1° Décomposition d'une structure, généralement par autodigestion. 2° Perte d'importance d'une structure au cours de la phylogénie.

déirides. *n.* Papilles cervicales des Nématodes, au rôle sans doute tactile.

deltidium. *n.* Organe constitué de deux plaques calcaires, soudées ou non, obstruant l'orifice subtriangulaire qui existe entre la charnière et le crochet saillant de la valve ventrale d'une coquille de Brachiopode; il permet le passage d'un pédoncule de fixation.

dendrites. *n.* Ramifications constitutives du *neurone*.

dendrophile. *adj.* Qualifie un Animal vivant essentiellement dans les arbres.

dent. *n.* Organe dur, fortement minéralisé, implanté le plus souvent dans les mâchoires des Animaux et servant à la préhension et à la mastication des aliments. Chaque dent comprend une racine basale surmontée d'une couronne visible.

dent de l'œuf ou **diamant.** Excroissance calcaire située à l'extrémité de la mandibule (en général supérieure) du jeune Oiseau avec laquelle celui-ci brise la coquille de l'œuf pour éclore.

dentine. *n.* Substance fibrillaire calcifiée qui constitue la majeure partie de la dent des Vertébrés. Elle est sécrétée par des cellules spéciales : les *odontoblastes*. Syn. d'*ivoire*.

dent mandibulaire. Dent portée par la mâchoire inférieure des Vertébrés.

dent maxillaire. Dent portée par la mâchoire supérieure des Vertébrés.

dents cardinales. Catégorie de dents placées au voisinage du crochet et approximativement perpendiculaires au bord interne du plateau cardinal des valves d'une coquille de Mollusques Bivalves.

dents pharyngiennes. Dents renouvelables qui se développent directement sur l'*épithélium* pharyngien des Poissons Téléostéens.

dermatoptique. *adj.* **(sens).** Qualifie le sens correspondant à une sensibilité à la lumière par toute la surface du corps.

desmodonte. *adj.* **(charnière).** Caractérise les coquilles de Mollusques Bivalves par une réduction plus ou moins complète des dents et par le développement de cuillerons ligamentaires, comme chez les Myidés.

deutérostomien. *adj.* **(organisme).** Chez lequel le *blastopore* de la *gastrula* donne l'anus, tandis que la bouche est une néo-formation. *Ex.* Échinodermes, Stomocordés, Pogonophores, Tuniciers, Céphalocordés et Vertébrés.

deutocérébron. *n.* Cerveau moyen des Arthropodes comprenant les centres olfactifs.

développement postembryonnaire. Seconde période du développement d'un organisme correspondant à la transformation de la larve issue de l'embryon en une forme adulte.

dextre. *adj.* Qualifie l'enroulement en spirale d'une coquille de Mollusque Gastéropode quand il se fait, dans le sens horaire, à partir du sommet (apex) jusqu'à l'ouverture dirigée alors vers le bas, à droite (c'est le cas le plus fréquent).

diactine. *n.* Spicule en forme d'aiguille terminée par deux pointes et appartenant au type monaxone (développement selon un seul axe). Les diactines caractérisent certaines Éponges calcaires.

diamant. *n.* Syn. de *dent de l'œuf.*

diapause. *n.* Arrêt du développement de l'œuf, de l'embryon, de la larve ou de l'imago chez les Insectes. Provoqué par des facteurs externes (photopériode, température), cet arrêt est sous la dépendance des hormones du cerveau.

diaphragme. *n.* Cloison musculaire séparant, chez les Mammifères, le thorax de l'abdomen et jouant un grand rôle dans la respiration.

diaphyse. *n.* Partie longue ou « corps » de l'os.

diapside. *adj.* Caractérise le squelette du crâne d'un Animal possédant deux fosses temporales.

diastase. *n.* Voir *enzyme.*

diastème ou **barre.** *n.* Espace de la gencive des Vertébrés non pourvu de dents. *Ex.* Cas du cheval.

diastomien. *adj.* Se dit d'un organe, ou d'un organisme, possédant deux orifices.

diaulie. *n.* Caractéristique de l'appareil reproducteur hermaphrodite des Gastéropodes Opisthobranches quand l'oviducte s'ouvre à l'extérieur par un orifice placé en arrière de celui du pénis.

dichotomique. *adj.* Qui se divise en deux. *Ex.* Bois des Cervidés.

dicyclique. *adj.* Qualifie le squelette du calice des Crinoïdes (Échinodermes Pelmatozoaires) lorsque sa partie basale est formée de trois cycles de plaques calcaires : les cinq basales et infrabasales intercalées et les cinq radiales.

diencéphale. *n.* Vésicule embryonnaire moyenne constitutive du cerveau des Vertébrés au niveau de laquelle se différencie l'hypothalamus, qui est en relation avec l'hypophyse. Ce complexe hypothalamo-hypophysaire commande ainsi la régulation de nombreuses fonctions : l'homéothermie, la reproduction, etc.

digitigrade. *adj.* Qualifie un Mammifère se déplaçant sur les doigts. *Ex.* Le chien.

digitigradie. *n.* Position du membre des Mammifères, comme le chat, qui repose sur le sol par ses doigts seulement.

dilambdodonte. *adj.* Qualifie le relief *occlusal* des dents *jugales* de Mammifères Insectivores, chez lesquels deux tubercules surnuméraires s'ajoutent aux trois tubercules fondamentaux pour former un W.

dimorphisme. *n.* 1° Possibilité, pour un organe ou un organisme, de se présenter sous deux formes différentes. 2° *Dimorphisme sexuel :* cas dans lequel, indépendamment des caractères sexuels primaires, les individus mâles et les femelles peuvent être d'aspect bien différent.

diphycerque. *adj.* Voir *géphyrocerque.*

diphyodontie. *n.* Existence, observée chez de nombreux Mammifères, de deux dentitions successives : la dentition de lait et la dentition définitive.

diplobiontique. *adj.* Qualifie le cycle d'un organisme dont la phase *diploïde* est prépondérante par rapport à la phase *haploïde* réduite. *Ex.* Cycle des Ciliés.

diploblastique. *adj.* Qualifie un Métazoaire dont les organes dérivent de deux feuillets embryonnaires : l'ectoderme et l'endoderme. Les Spongiaires, les Cnidaires et les Cténaires ont une organisation de ce type.

diploïde. *adj.* Qui possède un nombre de chromosomes double de celui des noyaux des gamètes. C'est le cas de l'œuf notamment.

diplopodie. *n.* Caractère double de certains segments du corps (deux paires de pattes par exemple), apparent chez les Myriapodes Diplopodes mais latent seulement chez les autres Myriapodes.

diplosomite. *n.* Anneau abdominal réunissant deux segments du corps des Myriapodes Diplopodes et portant des organes doubles (appendices, stigmates respiratoires...).

diporpa. *n.* Larve de *Diplozoon paradoxum,* Plathelminthe monogène parasite des branchies des Cyprinidés. Cette larve n'atteint sa maturité sexuelle qu'à condition de se fusionner avec une autre larve du même âge.

diprotodonte. *adj.* Qualifie certains Marsupiaux dont la denture ne comporte jamais plus de trois incisives par demi-mâchoire supérieure et ne comporte pas de canine inférieure. *N.* Un *diprotodonte.*

discoïdal. *adj.* Qualifie le type de *placenta* au niveau duquel les villosités choriales sont groupées dans une zone circulaire. *Ex.* Insectivores, Chiroptères, Rongeurs et Primates.

disque central. Région d'où rayonnent les bras et qui renferme les organes essentiels du corps des Stellérides et des Ophiurides (Échinodermes).

disque imaginal. Amas de cellules embryonnaires qui sont à l'origine des organes de l'adulte chez les Animaux à métamorphose. *Ex.* Les Insectes.

disruptive. *adj.* Qualifie une coloration provoquant la *somatolyse.*

dissépiment. *n.* Cloison musculaire séparant les segments, ou *métamères,* chez les Annélides.

distal. *adj.* Situé du côté libre d'un organe, par opposition à proximal.

distiproboscis. *n.* Partie distale de la trompe des mouches.

distomatose. *n.* Maladie provoquée par la présence de Vers parasites du groupe des Distomiens possédant deux ventouses. *Ex.* Les douves sont responsables de la distomatose des Ruminants.

doigt. *n.* Chez les Vertébrés Tétrapodes, une des cinq terminaisons articulées du membre chiridien. Ils forment l'*acropode* du membre et sont constitués de deux ou trois phalanges.

dolichocéphalie. *n.* Allongement antéro-postérieur du crâne. *Ex.* Chez le rhinocéros blanc.

doliolaria. (larve). Chez les Échinodermes Holothurides, larve secondaire en tonnelet provenant de la transformation de l'*auricularia.* Elle est cerclée de cinq à six bandes ciliées transversales et parallèles, accompagnées d'une aire ciliaire à son extrémité antérieure.

dormance. *n.* Phénomène correspondant, chez les Arthropodes et certains Vertébrés tels que les Mammifères, à un arrêt du développement embryonnaire, de la croissance ou de l'activité reproductrice.

dortoir. *n.* Endroit où les Oiseaux se rassemblent pour passer la nuit ensemble.

dulçaquicole ou **dulcicole.** *adj.* Qui vit dans l'eau douce.

duvet. *n.* Ensemble de petites plumes, ou plumules, qui recouvrent le corps des Oiseaux. Les *plumules* ont un *rachis* très peu développé, et leurs *barbes* sont longues et grêles.

dysodonte. *adj.* **(charnière).** Type de charnière de la coquille des Bivalves présentant une atrophie des dents, réduites à des crénelures. La régression de la dentition peut être totale.

E

écaille cosmoïde. Plaque exosquelettique permanente à croissance continue caractéristique des Poissons Sarcoptérygiens fossiles. Elle est constituée d'os compact, d'os spongieux, d'une dentine particulière, nommée *cosmine,* et d'une très mince couche d'émail.

écaille ganoïde. Plaque exosquelettique permanente à croissance continue, caractéristique des Poissons Actinoptérygiens fossiles. Elle est constituée d'os compact et de plusieurs couches superposées de *ganoïne.*

écailles cycloïdes. Chez les Poissons Téléostéens, productions dermiques non dentelées mais présentant des lignes concentriques, qui traduisent leur croissance.

écailles placoïdes. Productions dermo-épidermiques très dures caractéristiques des Poissons Chondrichthyens. Elles correspondent à des dents cutanées constituées par un cône de dentine recouvert d'une mince couche d'émail.

écarlate. *n.* Sécrétion de certaines cochenilles (Insectes Homoptères). Utilisée au Moyen Age pour la teinture.

ecdysial. *adj.* 1° *Ligne,* ou *suture, ecdysiale.* Qualifie les zones de rupture du tégument des Arthropodes permettant à ceux-ci d'abandonner leur ancienne cuticule. 2° *Glande ecdysiale.* Organe localisé dans la tête ou dans le prothorax des Insectes et sécrétant l'hormone de mue, ou *ecdysone.*

ecdysiotropine ou **facteur cérébral.** Neurohormone, vraisemblablement de nature protéinique, sécrétée par les cellules du cerveau antérieur des Insectes et stimulant le fonctionnement de la *glande ecdysiale.*

ecdysone ou **hormone de mue.** Substance libérée par la glande ecdysiale des Insectes sous l'action du facteur cérébral et intervenant dans les phénomènes de mue. Interviendrait aussi dans le dépôt de certains pigments, les processus de régénération et, peut-être, dans la spermatogenèse de certains Lépidoptères.

échinopluteus. *n.* Larve planctonique à symétrie bilatérale, caractéristique des Échinodermes. Son corps, étiré en pointe et pourvu d'un tube digestif avec bouche et anus, se prolonge par quatre ou cinq paires de bras ciliés natatoires, soutenus par des axes calcaires. L'Animal définitif, à symétrie rayonnée, se formera dans le flanc gauche de ce petit organisme, qui ressemble à l'*ophiopluteus* des ophiures.

échinospire. *adj.* Qualifie la larve *véligère* de certains Mollusques Gastéropodes Prosobranches, chez laquelle coexistent une coquille larvaire et une coquille définitive.

écholocation. *n.* Phénomène par lequel certains Animaux émettent des ondes qui, après s'être réfléchies sur un obstacle, sont captées par l'appareil auditif de l'Animal émetteur. *Ex.* Chauve-souris (Mammifère) ; guacharo (Oiseau cavernicole).

écologie. *n.* 1° Étude des rapports entre les êtres vivants et le milieu où ils vivent. 2° Étude des conditions de vie dans un milieu donné (écologie des landes), ou des conditions de vie d'un être ou d'un groupe d'êtres donnés.

écomorphose. *n.* Phénomène progressif d'arrêt du développement, mais non des mues, dû à des conditions externes difficiles (le froid par exemple), et accompagné de modifications morphologiques et anatomiques. Cas des Insectes Collemboles.

écorce cérébrale ou **cortex.** Couche externe du cerveau dont la structure se complique au fur et à mesure que l'on s'élève dans l'échelle de l'évolution animale.

ectadénies. *n.* Glandes génitales annexes, d'origine ectodermique, chez les mâles de certains Insectes.

ectoblaste. *n.* Feuillet externe de l'embryon de Vertébré au stade *gastrula.*

ectoderme. *n.* Feuillet cellulaire externe de l'embryon dont dérivent le système nerveux, les organes des sens, l'épiderme et les glandes cutanées.

ectoparasite. *n.* Parasite vivant au contact de son hôte, mais aussi dans le milieu externe. *Ex.* Un pou ou une puce.

ectophyte. *adj.* Caractérise un Animal qui se développe sur les Végétaux. *N.* Un *ectophyte.*

ectoptérygoïde. *n.* Os dermique externe du *splanchnocrâne* des Poissons osseux. Participe à la constitution du palais des Vertébrés supérieurs.

ectosome. *n.* Membrane dermique, transparente, mince et dépourvue de spicules, ou bien plus épaisse avec des spicules abondants. Forme la paroi externe du corps des Éponges siliceuses (Hexactinellides) et des Démosponges.

écusson dermique. Pièce adhésive qui termine l'extrémité des doigts de certains Amphibiens.

écusson nuccal. Plaque formée d'écailles épidermiques, située dans la région postérieure du crâne de nombreux Reptiles.

édéage. *n.* Organe copulateur du mâle d'Insecte.

efférent. *adj.* Caractérise un nerf ou un vaisseau par lesquels l'influx nerveux ou le sang quittent un organe ou un tissu.

effet de groupe. Apparition chez les individus d'une même espèce, de formes, ou « phases », présentant des caractères morphologiques, anatomiques et physiologiques différents selon que ces organismes ont évolué isolément ou en groupe. *Ex.* Le criquet « solitaire » se distingue du criquet « grégaire » par la couleur de son tégument et la forme de son *pronotum.*

éléphantiasis. *n.* ou **filariose lymphatique.** Maladie due à la présence dans l'organisme d'un Nématode, la filaire de Bancroft; se manifeste par une hypertrophie des membres inférieurs et de l'appareil génital masculin.

élytres. *n.* 1° Cirres pédieux dorsaux transformés en lames aplaties chez certains Polychètes comme les Aphroditidés. 2° Ailes antérieures de certains Insectes. *Ex.* Coléoptères.

émail. *n.* Substance calcifiée recouvrant les dents des Mammifères, sécrétée par des cellules spéciales : les adamantoblastes.

embranchement. *n.* Voir *phylum.*

embryogenèse. *n.* Période initiale du développement d'un organisme, correspondant à la transformation de la cellule de l'œuf en un embryon.

embryon. *n.* Nom donné à l'œuf entre le moment où il commence sa segmentation et celui où il se dégage des enveloppes vitellines. *Spécialt.* Chez l'homme, désigne l'organisme résultant de la conception, jusqu'à la fin du deuxième mois de la grossesse.

encéphale. *n.* Partie antérieure, très différenciée, du système nerveux, localisée dans le crâne et dont le développement varie suivant les groupes de Vertébrés. De l'avant vers l'arrière, il est constitué par le cerveau, le cervelet et le bulbe rachidien.

enclume. *n.* Osselet de l'oreille des Mammifères dérivant de l'*os carré.*

encroûtant. *adj.* Qui s'étale sur son support comme une croûte.

endémique. *adj.* Caractérise une espèce dont l'aire de répartition est limitée. *Ex.* Le koala d'Australie.

endites. *n.* Rangée de lobes internes portés par le premier élément basal d'un appendice d'Arthropode et remplissant des fonctions diverses (mastication, respiration branchiale).

endochorion. *n.* Couche interne constitutive du *chorion.*

endocrinien. *adj.* En rapport avec les glandes endocrines, qui déversent leur sécrétion directement dans le sang.

endocuticule. *n.* Couche profonde constitutive de la *cuticule.*

endocycle. *adj.* **(forme).** Désigne les oursins Réguliers, ou presque, dont le *périprocte* est apical et l'anus parfois légèrement excentré.

endoderme. *n.* Feuillet cellulaire interne de l'embryon dont dérivent le tube digestif et ses glandes annexes ainsi que l'appareil pulmonaire.

endoécie. *n.* Habitacle principal d'une termitière où se trouvent la cellule royale, le couvain, les réserves alimentaires et les meules à Champignons.

endogène. *adj.* 1° Se dit d'un élément anatomique qui prend naissance à l'intérieur de l'élément qui l'engendre. 2° Se dit des substances élaborées par les cellules propres de l'organisme ou par les éléments parasites qu'il contient.

endogés. *adj.* Qualifie les organismes vivant dans les couches profondes du sol tels que des Insectes Collemboles, des Acariens, des Vers, etc.

endoparasite. *n.* Parasite vivant à l'intérieur des différents tissus d'un organisme végétal ou animal.

endophyte. *adj.* Caractérise un Animal qui se développe à l'intérieur de tissus végétaux. De nombreuses larves d'Insectes Coléoptères et Lépidoptères ont ce mode de vie. *N.* Un *endophyte.*

endopodite. *n.* Rame interne multiarticulée de l'appendice biramé typique des Arthropodes.

endoptérygoïde. *n.* Os dermique interne du *splanchnocrâne* des Poissons osseux. Participe à la constitution du palais des Vertébrés supérieurs.

endosome. *n.* Syn. de *nucléole.*

endosquelette. *n.* Ensemble des os qui se forment par une ossification telle que le cartilage embryonnaire préexistant disparaît plus ou moins complètement.

endostylaire. *adj.* Qui concerne l'*endostyle.*

endostyle. *n.* Profonde gouttière ciliée, largement ouverte, qui parcourt l'axe médio-ventral du pharynx des Urocordés et des Céphalocordés. Elle sécrète en permanence un film de mucus enveloppant les particules alimentaires retenues par le pharynx.

énéanème. *adj.* Qualifie la structure d'un organite cellulaire constitué de neuf triplets de trois tubules. *Ex.* Centriole, flagelle.

entogastre. *n.* Pièce squelettique, interne, médioventrale, sur laquelle se fixe le muscle tympanique de l'appareil sonore des cigales mâles.

entomologiste. *n.* Spécialiste de l'étude des Insectes.

entomophage. *adj.* Qui se nourrit d'Insectes.

entoneural. *adj.* **(système).** Qualifie la partie profonde du système nerveux des Crinoïdes (Échinodermes Pelmatozoaires) située au fond du *calice,* qui commande aux muscles articulaires, aux *cirres* et aux *pédoncules* des espèces fixées; coordonne les mouvements natatoires et d'accrochage de l'Animal libre.

entonnoir. *n.* 1° Organe musculeux, tubuleux, appartenant à l'ensemble du pied des Mollusques Céphalopodes, fixé ventralement à l'ouverture de la cavité palléale, et servant à la propulsion rapide par réaction. 2° Partie élargie de l'oviducte du système génital femelle des Pogonophores. 3° Invagination profonde de la région œsophagienne de l'intestin antérieur des Insectes.

envergure. *n.* Distance qui sépare les extrémités des membres antérieurs écartés de certains Vertébrés (les Oiseaux, l'homme).

enzyme ou **diastase.** *n.* Molécule protéique permettant la réalisation, dans un organisme, de réactions chimiques (synthèses ou dégradations) qui n'auraient pas lieu spontanément dans les conditions propres à cet organisme.

éperon. *n.* Formation cornée, située sur le côté interne des pattes postérieures, au niveau de l'articulation tarso-métatarsienne, des mâles des Mammifères Monotrèmes (ornithorynque, échidné). Cet organe est en relation avec la *glande fémorale.*

éphippium. *n.* Épaississement, en forme de petite selle de cheval, de la partie dorsale de la carapace des daphnies, ou puces d'eau (Crustacés Cladocères), apparaissant lors de leur reproduction sexuée. De nature chitineuse, très résistante, cette sorte de coque protectrice se détache au moment de la mue avec les œufs fécondés.

éphyrule. *n.* Petite formation discoïde libérée par la segmentation transversale d'un polype d'une colonie de Cnidaires (Scyphozoaires).

épicoracoïdes. *n.* Cartilages situés entre les *coracoïdes* dans la *ceinture scapulaire* des Amphibiens Anoures.

épicrâne. *n.* Partie supérieure du crâne d'un Insecte, front non compris.

épicuticule. *n.* Couche superficielle constitutive de la *cuticule.*

épimère. *n.* Division postérieure d'un pleure thoracique d'Insecte; chez les Coléoptères, il forme la cavité qui reçoit la bouche antérieure. Est souvent un critère de classification.

épimorphe. *adj.* Qualifie le type de développement postembryonnaire des Myriapodes Opisthogonéates (Scolopendromorphes et Géophilomorphes), dans lequel la segmentation du corps et le nombre définitif d'appendices de l'adulte sont présents chez le jeune dès l'éclosion.

épiphragme. *n.* Membrane très fragile, faite de mucus desséché et plus ou moins riche en calcaire, sécrétée par la glande pédieuse des Mollusques Gastéropodes Pulmonés et qui obture l'ouverture de la coquille lorsque l'Animal se retire pour un séjour prolongé (sécheresse, hiver).

épiphyse. *n.* Extrémité, ou « tête », d'un os.

épiphyte. *adj.* Qui vit sur d'autres plantes, sans être parasite.

épipodite. *n.* Branchie résultant de la transformation des expansions externes (ou *exites*) lamelleuses du premier élément basal d'un appendice biramé type chez les Crustacés.

épiprocte. *n.* Partie dorsale du onzième et dernier segment abdominal vestigial chez les Insectes (Éphéméroptères notamment).

épipubis. *n.* Voir *os marsupiaux.*

épisterne. *n.* Division antérieure d'un pleure thoracique d'Insecte. Il est séparé de l'*épimère* par la suture pleurale.

épistome. *n.* 1° Petite languette mobile, ciliée, assurant l'occlusion de l'ouverture zoéciale chez les Bryozoaires Ectoproctes Gymnolæmates (Eurystomes). 2° Lèvre postérieure bordant la cavité buccale chez les Phoronidiens. 3° Organe surmontant la région buccale des Myriapodes Diplopodes et Chilopodes (Arthropodes Mandibulates).

épistroma. *n.* Système de granules sculptant les plaques du test des *Stirodontida Arbaciidae* (oursins Réguliers).

épithélium. *n.* Tissu composé de cellules formant une ou plusieurs couches et qui recouvre toutes les surfaces du corps. *Ex.* Épiderme.

épitoque. *adj.* Qualifie une forme ayant subi l'*épitoquie.*

épitoquie. *n.* Modification liée à la maturité sexuelle se traduisant par le passage d'une forme benthique *Nereis*, par exemple, à une forme pélagique nageuse *Heteronereis* permettant la fécondation à la surface de l'eau.

épizoïque. *adj.* Qualifie une espèce qui vit fixée sur une autre espèce animale.

épizootique. *adj.* **(maladie).** Maladie propre à une espèce animale. *Ex.* La myxomatose du lapin.

ergot. *n.* Pointe osseuse recourbée, située au niveau du métatarse des Oiseaux Gallinacés mâles.

érinacoïde. *adj.* Caractérise un Animal porteur de piquants et ressemblant à un hérisson.

éruciforme. *adj.* Qui a la forme d'une chenille. *Ex.* Larves des Coléoptères Curculionidés.

érythrocruorine. *n.* Pigment voisin de l'hémoglobine et présent dans le *plasma* des Annélides terricoles.

espèce. *n.* Ensemble des individus possédant des caractères morphologiques, anatomiques, chromosomiques et biochimiques identiques et susceptibles de donner une descendance féconde.

esthète. *n.* Petit organe sensoriel en forme de papille, inclus dans le tégument superficiel des plaques calcaires des Mollusques Polyplacophores.

estivation. *n.* Période pendant laquelle certains Animaux, tel le crapaud, entrent en léthargie par suite des fortes chaleurs de l'été.

éthmolytique. *adj.* Désigne les oursins dont le *madréporite* s'étend en dehors du système apical.

éthmophracte. *adj.* Désigne les oursins dont le *madréporite* est inclus totalement dans le système apical.

éthologie. *n.* Science qui étudie le comportement des Animaux.

eucéphale. *adj.* Caractérise certaines larves d'Insectes Diptères Nématocères dont la tête est très développée et porte des appendices normaux.

eucone. *adj.* Qualifie le type d'*ommatidie* bien séparée de ses voisines par un manchon opaque constitué de cellules pigmentaires.

eudoxie. *n.* Cloche où mûrissent les produits génitaux et qui peut se détacher d'une colonie de Calicophores (Cnidaires Hydrozoaires Siphonophores), cette libération permettant la dissémination des gamètes dans l'eau de mer.

euryhalin. *adj.* Qualifie un organisme tolérant vis-à-vis de variations importantes de salure du milieu.

eurytherme. *adj.* Qualifie un organisme peu sensible aux variations thermiques du milieu.

eutélie. *n.* Développement harmonieux d'un organe s'opposant à toute régénération (cas fréquent chez les Nématodes et les Rotifères).

euthyneure. *adj.* Qualifie les formes des sous-classes des Pulmonés et des Opisthobranches (Mollusques Gastéropodes) chez qui l'anse nerveuse viscérale n'est pas croisée.

évagination. *n.* Saillie creuse d'une membrane ou d'une couche de cellules.

évent. *n.* Ouverture de la cavité nasale située sur la tête des Mammifères Cétacés. Possède soit une ouverture (Odontocètes), soit deux ouvertures (Mysticètes).

exarate. *adj.* **(nymphe).** Qualifie la nymphe dont les appendices sont dégagés du corps, chez les Insectes Thysanoptères, Hémiptères, Hyménoptères, Coléoptères, Strepsiptères et quelques Diptères.

exites. *n.* Prolongements externes portés par le premier élément basal d'un appendice d'Arthropode et remplissant des fonctions diverses (respiration branchiale par exemple).

exochorion. *n.* Couche externe constitutive du *chorion*.

exocuticule. *n.* Couche moyenne constitutive de la *cuticule*.

exocycle. *adj.* **(forme).** Désigne les oursins Irréguliers à symétrie bilatérale où le *périprocte*, excentré par rapport à l'appareil apical, se situe soit sur la face aborale, soit sur l'*ambitus*, soit sur la face orale (où la bouche migre vers l'avant).

exoécie. *n.* Partie de la termitière comprenant un système de cavités ne communiquant ni avec l'*endoécie* ni avec la *périécie*, mais seulement avec l'extérieur, par de larges ouvertures.

exogastrique. *adj.* Qualifie l'enroulement spiral de la bosse dorsale de la masse viscérale lors du développement des Mollusques Gastéropodes. Cet enroulement correspond à celui de la coquille embryonnaire en sens inverse de la courbure endogastrique.

exombrelle. *n.* Partie supérieure de l'ombrelle du corps des méduses (Cnidaires).

exopodite. *n.* Rame externe multiarticulée de l'appendice birамé typique des Arthropodes.

exoptérygote. *adj.* Caractérise un Insecte dont les ailes se développent extérieurement.

exosquelette. *n.* Ensemble des formations cuticulaires externes du corps d'un Arthropode et revêtement interne des intestins antérieur et postérieur.

exostose. *n.* Apophyse latérale des vertèbres dorsales et lombaires modifiées chez les Mammifères Soricidés.

exudatoria. *n.* Diverticules renfermant des organes sensoriels fixés sur l'abdomen de certains Insectes termitophiles.

exuvie. *n.* Enveloppe chitineuse abandonnée par un Arthropode au moment de la mue.

F

face nadirale. Flanc de repos, aveugle et dépigmenté, chez les Poissons plats, ou Pleuronectiformes. Il est droit ou gauche selon les familles.

face oculaire. Voir *face zénithale*.

face zénithale ou **oculaire.** Flanc pourvu d'yeux et pigmenté chez les Poissons plats, ou Pleuronectiformes. Il est droit ou gauche selon les familles.

facial. *adj.* Qualifie les os qui constituent la face des Mammifères. *Ex.* Os frontal, os nasal, os prémaxillaire, os jugal, etc.

facteur rhésus. Caractère génétique sanguin découvert chez le singe *Simia rhesus*.

falciforme. *adj.* En forme de faux. *Ex.* Griffes du paresseux (Mammifère Xénarthre).

falculae. *n.* Syn. de *griffes*.

famille. *n.* Ensemble de genres ayant en commun certains caractères morphologiques. *Ex.* Les Félidés constituent une famille comportant, notamment, le lion, le léopard, le tigre, etc.

fanons. *n.* Formations cornées épidermiques, suspendues au maxillaire supérieur des Cétacés Mysticètes, et réalisant une sorte de filtre à l'avant de la bouche.

faon. *n.* Petit des Cervidés.

fascioles. *n.* Étroite bande brunâtre de minuscules tubercules dessinant sur le *test* des oursins Irréguliers des contours variés. Leur localisation est d'une grande importance systématique.

fécondation. *n.* Union de deux gamètes haploïdes mâle et femelle pour former un œuf à un seul noyau diploïde. Cette rencontre peut être *externe* et s'effectuer dans l'eau (Poissons, Amphibiens, etc.) ou *interne* et se réaliser dans les voies génitales de la femelle (Oiseaux, Mammifères, etc.) après copulation.

fémur. *n.* 1° Os de la cuisse des Vertébrés Tétrapodes. 2° Troisième segment de la patte d'un Insecte ou d'un Myriapode, situé entre le *trochanter* et le *tibia*.

fenêtre ovale. Perforation du labyrinthe osseux de l'oreille moyenne des Vertébrés excepté les Mammifères. *Ex.* Oiseaux.

fentes bursales. Orifices respiratoires et génitaux des *bourses* situées de part et d'autre des cinq bras des Ophiurides (Échinodermes). Longs et étroits, ils sont bordés de pièces calcaires protectrices.

feuillet ou **omasum** ou **psaltérium.** *n.* Compartiment de l'estomac des Ruminants caractérisé par les replis lamellaires de sa muqueuse.

fibre musculaire. Cellule musculaire de grande taille entourée par une enveloppe, ou *sarcolemme*, contenant du cytoplasme, ou *sarcoplasme*, et renfermant de nombreux noyaux périphériques et des *myofibrilles* axiales.

fibrocytes. *n.* Cellules mobiles de la *mésoglée* séparant les deux couches de la paroi du corps des Spongiaires et sécrétant les fibres cornées de leur charpente.

fibula ou **péroné.** *n.* Os externe de la jambe des Vertébrés Tétrapodes.

fièvre jaune. Maladie virale de l'homme dont l'agent pathogène est le virus amaril, transmis par des moustiques (Diptères hématophages) du genre *Aedes*. Elle débute par des troubles digestifs suivis d'ictère hémorragique et se prolonge par une urémie mortelle.

filaments mésentériques. Bords libres ou mésentères, des cloisons des Cnidaires Octocoralliaires, épaissis en bourrelets, soit courts et endodermiques (assurant alors la fonction digestive), soit longs et ectodermiques (contribuant alors à la fonction respiratoire en provoquant un courant d'eau exhalant dans la cavité polypaire).

filariose lymphatique. Voir *éléphantiasis*.

filoplumes. *n.* Plumes réduites à un *rachis* portant quelques barbes à son extrémité.

firmisterne. *adj.* Qualifie la ceinture pectorale de certains Amphibiens Anoures chez lesquels les os coracoïdes s'unissent sur la ligne médiane par un double cartilage : l'*épicoracoïde*.

flabellé. *adj.* Qualifie un organe présentant une forme d'éventail.

flacherie. *n.* Maladie, sans doute virale, des vers à soie se traduisant par une dysenterie qui évolue en septicémie.

flagellum. *n.* Groupe de soies raides situées sur le doigt fixe des chélicères des Pseudoscorpions et servant d'organe de nettoyage.

flotteur. *n.* Voir *pneumatophore*.

fœtus. *n.* 1° Produit du développement de l'œuf qui montre déjà tous les caractères de l'espèce. 2° Désigne aussi l'organisme humain à partir du troisième mois de grossesse.

folivore. *adj.* Qui mange des feuilles.

fondatrice ou **fundatrix.** *n.* Femelle issue de l'œuf fécondé et donnant par parthénogenèse d'autres femelles, ou *fundatrigeniae*, chez les pucerons.

foramen. *n.* Chez les Vertébrés, perforation d'un tissu mou ou osseux permettant le passage d'un vaisseau, d'un nerf ou de la moelle épinière *(foramen magnum)*.

foramen de Panizza. Communication entre les crosses aortiques droite et gauche chez les Reptiles Crocodiliens.

foramen pariétal. Syn. de *foramen pinéal.*

foramen pinéal ou **foramen pariétal.** Orifice situé entre les os pariétaux de certains Reptiles, fossiles et actuels, dans lequel est situé l'œil pariétal.

forcipiforme. *adj.* Désigne les grands pédicellaires croisés présents chez les Échinodermes Asteroïdea Forcipulatida.

forcipule. *n.* Chez les Myriapodes (Chilopodes), appendice, à quatre articles distincts, appartenant au premier segment du corps et modifié en patte-mâchoire avec une glande à venin au niveau de la griffe terminale.

formations squamiformes. Sortes d'écailles recouvrant la face inférieure de la queue du tarsier spectre.

fosse acétabulaire ou **acétabulum** ou **cavité cotyloïde.** Cavité située à la jonction du *pubis*, de l'*ischion* et de l'*ilion* et dans laquelle s'articule le fémur.

fosse temporale. Ouverture dans le toit dermique du crâne des Vertébrés amniotes. Située en arrière de l'orbite, elle laisse voir, en dessous, le neurocrâne qui protège le cerveau.

fossile. *n.* Restes conservés d'êtres vivants archaïques correspondant aux parties dures de leur organisme (*ex.* coquille d'Ammonite, dents de Mammifères) ou aux traces subsistantes de leur activité (pistes de Vers).

fourchée. *n.* Couronne formée par les bois des Cervidés lorsqu'ils comportent deux *andouillers.*

fourchette. *n.* Formation squelettique des Oiseaux, de forme caractéristique, résultant de le soudure de la partie inférieure des deux clavicules.

fourrure. *n.* Terme zoologique désignant la pilosité d'une espèce animale et, plus particulièrement, son implantation.

fovea. *n.* Dépression située sur la rétine, dans l'axe optique, et au niveau de laquelle la vision est la plus nette, car chaque cellule visuelle n'est en relation qu'avec un seul neurone bipolaire et un seul neurone multipolaire.

frayère. *n.* Zone de reproduction des Poissons.

frein ou **frenulum.** *n.* Dispositif de couplage des ailes antérieures et postérieures chez certains Insectes. Il peut être constitué, chez le mâle des Lépidoptères, par une épine et, chez la femelle, par des soies.

frugivore. *adj.* Qui mange des fruits.

fulcres. *n.* Écailles disposées sur le bord antérieur de la nageoire caudale des Poissons Acipensériformes.

fulcrum. *n.* Pièce impaire constitutive des mâchoires, ou *trophi*, des Rotifères.

fundatrigeniae. *n.* Descendantes parthénogénétiques de la *fondatrice* chez les pucerons.

fungiforme. *adj.* Qui a la forme d'un Champignon.

funicule. *n.* Organite des Bryozoaires Ectoproctes pouvant porter les organes génitaux femelles et reliant le tube digestif à la paroi de la *zoécie.*

furca. *n.* 1° Terminaison de l'abdomen constituée par une rame caudale, souvent double, formée de longs filaments ou crochets et prolongeant le *telson* des Crustacés, excepté chez les adultes des Malacostracés autres que les Leptostracés. 2° Appendice anal servant au saut chez les Insectes Thysanoures. 3° Partie de l'appareil copulateur des Insectes Lépidoptères. 4° Baguette fourchue de la charpente des pièces buccales des Insectes Diptères.

furcocercaire. (larve). Stade larvaire libre correspondant à des formes possédant une queue bifide, chez les Trématodes Digéniens tels les Strigéidés.

fusules. *n.* Fins tubules situés sur les filières des Araignées et où aboutissent les conduits des glandes séricigènes.

G

gaine radulaire. Région de l'appareil buccal des Mollusques d'où émerge la *radula.*

galea. *n.* 1° Petite glande filière située sur le doigt mobile des *chélicères* chez les Pseudoscorpions. 2° Pièce des *maxilles* d'un Insecte.

galle ou **cécidie.** *n.* Production de forme définie, déterminée par un Champignon ou par la piqûre d'un Insecte (qui pond en un point déterminé de la plante) et qui abritera alors la ponte et les larves.

galop. *n.* Allure la plus rapide de certains quadrupèdes. Elle consiste à avancer les pattes antérieures simultanément, puis les pattes postérieures.

gamazoïde. *n.* Organe où se localisent les gonades chez les formes coloniales de Cnidaires.

gamètes. *n.* Cellules reproductrices mâles ou femelles contenant seulement *n* chromosomes (nombre *haploïde*), soit la moitié du nombre présent dans toutes les autres cellules de l'organisme (2*n*, ou nombre *diploïde*).

gamétogamie. *n.* Fécondation mettant en cause des gamètes.

gamonte. *n.* Forme *haploïde* apparaissant au cours du développement des Sporozoaires et des Foraminifères, et conduisant à l'élaboration de gamètes mâles ou femelles.

gamontogamie. *n.* Union entre deux gamontes conduisant à la formation de gamètes ou à l'échange de noyaux particuliers.

ganoïne. *n.* Substance constitutive de l'*écaille ganoïde* des Poissons Brachioptérygiens. Amorphe, dure, brillante et transparente, elle est peu différente de l'émail.

gastérozoïdes. *n.* Individus pédonculés, à branchie et tube digestif hypertrophiés mais sans cloaque, et fixés sur le côté gauche de l'appendice caudal de l'individu (= *oozoïde*) maternel lors du cycle de développement des Dolioles (Tuniciers Thaliacés). Ces individus nourrissent l'oozoïde dégénérescent et le reste de la colonie.

gastre. *n.* Nom donné soit à l'estomac soit à l'abdomen des Insectes.

gastrioles. *n.* Syn. de *vacuoles digestives* (voir *vacuole*) chez les Protozoaires.

gastrostège. *n.* Plaque écailleuse ventrale des Reptiles Ophidiens (serpents).

gastrozoïde. *n.* Individu spécialisé dans la nutrition d'une colonie de Cnidaires Hydrozoaires. Un « filament pêcheur » basal accompagne souvent ce type d'individu.

gastrula. *n.* Stade embryonnaire succédant à la *blastula* et au cours duquel s'effectue la mise en place des feuillets embryonnaires : il y a formation de l'intestin primitif.

gattine. *n.* Maladie virale du ver à soie donnant à la chenille une allure gonflée.

gelée royale. Sécrétion salivaire labiale fournie comme aliment par les nourrices aux larves qui donneront les reines des abeilles.

gémellaire. *adj.* Qualifie la naissance de deux jumeaux.

géminés. *adj.* Qualifie les pores associés deux par deux et qui laissent le passage aux racines d'un *podia* chez les Échinodermes.

gemmiparité. *n.* Reproduction asexuée par bourgeonnement. *Ex.* Chez les Ciliés Acinétiens.

gemmulation. *n.* Processus de formation de bourgeons enkystés (ou *gemmules*) qui s'effectue au cours de la reproduction asexuée des Spongiaires.

gemmule. *n.* Chez certains Spongiaires, forme de résistance assurant la reproduction asexuée. Les gemmules sont libérées à la mort de l'éponge souche et sont constituées de fragments globuleux de 1 à 2 mm de diamètre, renfermant presque toutes les catégories cellulaires qui permettront une régénération facile.

gena. *n.* Syn. de *joues.*

genitalia ou **gonapophyses** ou **terminalia.** *n.* 1° Pièces externes constitutives de l'*ovipositeur* des femelles de nombreux Insectes (Orthoptères, Hémiptères, Hyménoptères...). 2° Pièces externes de l'appareil reproducteur des mâles de nombreux Insectes comprenant le *phallus* et les *paramères.*

génome. *n.* Information héréditaire des cellules d'un organisme, portée par leur acide désoxyribonucléique.

génotype. *n.* Ensemble des caractères pour lesquels l'information nécessaire se trouve stockée dans le code génétique (acide désoxyribonucléique) d'un être. Certains de ces caractères sont exprimés dans son phénotype, d'autres le seront dans celui de ses descendants, d'autres, encore, ne le seront probablement jamais, du moins normalement.

genre. *n.* Ensemble d'espèces présentant entre elles des caractères communs qui leur donnent un aspect caractéristique. Le plus souvent, les espèces d'un genre donné, si elles peuvent être croisées, ne donnent pas de produits fertiles. Des espèces appartenant à deux genres différents se croisent bien plus rarement encore et les produits sont alors très rarement fertiles ; cependant, il y a des exceptions et certains genres semblent n'exister que du fait d'un isolement géographique.

géphyrocerque ou **diphycerque.** *adj.* Qualifie la nageoire caudale des Poissons Dipneustes *(Neoceratodus)*, quand elle résulte de la soudure de la nageoire dorsale et de la nageoire anale.

germarium. *n.* Portion apicale des *ovarioles* de l'ovaire des Insectes.

gésier. *n.* Estomac musculaire, caractéristique des Oiseaux granivores et herbivores, où s'effectue la trituration des aliments grâce à la musculature puissante, à la cuticule interne et à la présence des graviers avalés par l'Animal.

gestation. *n.* Période, de durée variable selon les espèces, pendant laquelle la femelle vivipare porte son petit.

glabelle. *n.* Région médiane de la tête d'un Trilobite.

gladius ou **plume de calmar.** Coquille dorsale et interne des calmars (Mollusques Céphalopodes Décapodes) réduite à une lame chitineuse, souple et transparente, légèrement déformée en gouttière.

glande. *n.* Organe d'origine épithéliale à fonction sécrétrice.

glande de l'albumine. Organe annexe de l'appareil génital hermaphrodite des Mollusques Gastéropodes Pulmonés; produit un liquide riche en protides qui sert de réserve aux œufs.

glande anale. Voir *sac anal.*

glande axiale ou **organe axial.** Structure spongieuse et volumineuse, chez les Crinoïdes, logée dans l'espace laissé libre par l'intestin, dans l'axe du calice. Elle est à sécrétion interne, à fonction probablement hormonale, et contribue à la lutte contre l'infection.

glande brune. Organe ovoïde et brunâtre appartenant au *système axial* des Échinides, des Stellérides et des Ophiurides, constitué de cavités déchiquetées et séparées par des cloisons de tissu conjonctif. Cet organe, dans lequel circulent des amibocytes qu'apparemment il produit lui-même, exerce sans doute une fonction excrétrice. Mais son rôle reste inconnu chez les Ophiurides.

glande byssogène. Organe logé dans une saillie conique située sur la ligne médio-ventrale du pied des Mollusques Bivalves, comme la moule, et sécrétant les filaments du *byssus.*

glande dorsale. Glande cutanée odorifique fonctionnant, au moment de la reproduction, chez les Mammifères Hyracoïdes.

glande de Dufour. Chez les Insectes Hyménoptères, glande dont la sécrétion alcaline réagit sur les sécrétions acides des glandes venimeuses.

glande fémorale ou **crurale.** Glande située sur le fémur des mâles de certains Mammifères Monotrèmes et sécrétant un venin qui jouerait un rôle dans la sélection sexuelle.

glande galactophore. Syn. de *glandes mammaires*.

glande de Harder. Chez les Vertébrés Tétrapodes, glande orbitaire à sécrétion huileuse qui protège l'œil.

glande hyponeurale. Glande plurilobée, appliquée ventralement au ganglion nerveux et débouchant par un court canal dans le tubercule vibratile. Joue un rôle endocrinien fondamental dans le cycle biologique des Tuniciers, en particulier dans l'activité génitale.

glande labiale. Glande buccale des Amphibiens et des Reptiles à sécrétion muqueuse qui peut devenir venimeuse chez certains Reptiles.

glande lacrymale. Glande sécrétant les larmes qui assurent, par leur fluidité, la protection du globe oculaire des Mammifères.

glande de Nasonoff. Glande odoriférante située sous le sixième *tergite* abdominal de l'abeille.

glande périnéale. Glande à sécrétion d'odeur désagréable, située dans la région périnéale, qui joue un rôle dans l'attraction sexuelle chez de nombreux Fissipèdes Viverridés. Syn. de *glande préscrotale, viverreum,* ou *poche du parfum*.

glande pituitaire. Voir *hypophyse*.

glande préscrotale. Voir *glande périnéale*.

glande sébacée. Glande épidermique simple ou composée, annexée au follicule pileux et sécrétant une substance grasse, le *sébum*, qui lubrifie la peau et les poils des Mammifères.

glande du sinus. Glande céphalique, située à la base de l'œil des Crustacés Malacostracés, sécrétant une contractine (substance intervenant dans la contraction des chromatophores) et accumulant l'hormone inhibitrice de la mue sécrétée par les *organes X*.

glande sternale. Glande odorifique située sur le sternum des mâles de certains Cercopithécidés, des gibbons et de l'orang-outan.

glande sudoripare. Glande épidermique des Mammifères, formée d'un tube comprenant une portion pelotonnée en un *glomérule* sécréteur et une portion superficielle excrétrice de la sueur.

glande supra-anale. Voir *sac anal*.

glande uropygienne. Glande située à la base du croupion des Oiseaux et qui produit une sécrétion grasse servant parfois à lubrifier le plumage.

glande vermiculaire. Nom donné à la *spermathèque* chez certains Insectes Hémiptères.

glandes antennaires. Organe excréteur pair formé d'un saccule cœlomique et d'un canal s'ouvrant à la base des antennes des Crustacés. Fonctionnel chez les Branchiopodes larvaires et certains Malacostracés adultes (sa structure est alors complexe, comme chez les Décapodes), cet organe reste vestigial chez les Ostracodes et Malacostracés Leptostracés adultes.

glandes fundiques. Glandes de l'épithélium de la région fundique de l'estomac des Vertébrés. Elles élaborent une enzyme protéolytique, la pepsine, et l'acide chlorydrique indispensable à l'action de cette enzyme.

glandes mammaires. Glandes sébacées spécialisées et hypertrophiées, regroupées en mamelle. Elles sécrètent le lait indispensable à la nutrition du petit chez les Mammifères.

glandes maxillaires. Organe excréteur pair s'ouvrant à la base des appendices maxillaires des Crustacés. Fonctionnel chez les Branchiopodes adultes et les Malacostracés Décapodes larvaires, cet organe reste vestigial chez les Ostracodes et Malacostracés Leptostracés adultes.

glandes muqueuses. Glandes cutanées, très développées chez les Amphibiens, qui sécrètent un mucus protégeant l'épiderme nu contre l'évaporation.

glandes nidamentaires. 1° Organes volumineux, au nombre de deux paires inférieure et supérieure, situés ventralement et dont la sécrétion protéinique forme (en durcissant au contact de l'eau) la coque des œufs chez les Céphalopodes femelles. 2° Glandes sexuelles annexes situées dans la cavité du lophophore chez les femelles et les hermaphrodites incubant les embryons des Phoronidiens.

glandes parathyroïdes. Glandes endocrines, d'origine pharyngienne, localisées au voisinage de la thyroïde et sécrétant chez les Vertébrés une hormone intervenant dans le métabolisme du calcium.

glandes parotides. Principales glandes salivaires des Mammifères, situées en arrière de la branche montante de la mandibule, et qui sécrètent l'amylase (enzyme digestive).

glandes parotoïdes. Glandes cutanées à sécrétion venimeuse, qui jouent un rôle défensif. Situées en arrière du tympan, elles sont très développées chez les crapauds et les salamandres (Amphibiens).

glandes pyloriques. 1° Paire de glandes ramifiées, située le long de l'intestin et débouchant dans l'estomac des Urocordés ou Tuniciers. 2° Glandes digestives de l'estomac des Vertébrés, situées dans la région pylorique postérieure.

glandes supra-orbitales. Glandes en forme de croissant, en relation avec les narines et par lesquelles les Oiseaux marins (*ex.* le goéland) rejettent le sel absorbé en excès.

glaucothoé. (larve). Dernier stade larvaire, proche de l'adulte mais encore symétrique, dans le développement des pagures ou bernard-l'ermite (Crustacés Anomoures).

globifère. *adj.* Qualifie le type de *pédicellaires* volumineux des Échinides terminés par des mors acérés, ornés de crochets inoculateurs car ils possèdent une glande à venin sur leur face externe.

globulus. *n.* Petite vésicule close, pédonculée, entourée de soies aplaties formant une corbeille et portée par les antennes chez les Myriapodes (Pauropodes). C'est un organe sensoriel dont le rôle n'est pas établi.

glochidium. (larve). Larve migratrice d'Unionidés (Mollusques Bivalves Eulamellibranches d'eau douce) sans bouche ni anus, et possédant une coquille aux deux valves munies de crochets et un long cil adhésif provisoire. Se fixe, pour vivre en parasite, aux branchies ou aux nageoires de Poissons Cyprinidés (carpe, goujon, tanche...), où elle forme un kyste.

glomérule. *n.* Appareil excréteur de type rénal, dérivé du cœlome du proboscis chez les Entéropneustes (Céphalocordés) ; constitué de plissements situés sur les parties antérieure et latérale du sinus sanguin central, il entoure sur l'avant la stomocorde.

glomérule de Malpighi. Appareil de filtration du sang dans le rein des Vertébrés. Il est constitué par un peloton de capillaires en relation avec le *tube urinifère*.

glucide. *n.* Sucre ou substance apparentée, comprenant du carbone, de l'oxygène et de l'hydrogène, avec des fonctions alcool et aldéhyde ou cétone. Les glucides sont des sucres simples (glucose, etc.), et leurs dérivés et leurs polymères (cellulose, amidon, glycogène, etc.), sont dits parfois *hydrates de carbone*.

glucoside. *n.* Syn. d'*hétéroside*.

glycérides. *n.* Lipides simples, esters du glycérol, ou glycérine, et d'un acide gras. *Ex.* La palmitine et l'oléine présentes dans l'huile d'olive.

glycocolle ou **glycine.** *n.* Acide aminé comportant une seule fonction amine et une seule fonction acide.

glycogène. *n.* Polymère du glucose qui y est disposé en chaîne ramifiée. Présent surtout chez les Animaux (« amidon animal »), il se trouve aussi chez les Champignons. Il se colore en brun acajou en présence d'eau iodée.

gnathobase. *n.* Prolongement basal, très sclérifié, des pièces buccales ; modifié en pièces masticatrices chez les Crustacés.

gnathochilarium. *n.* Pièce complexe de l'appareil buccal des Myriapodes Diplopodes. C'est une sorte de lèvre inférieure large et aplatie résultant de la soudure et de la transformation d'une paire de mâchoires et du sternum du premier segment du corps.

gnathosome. *n.* Voir *protérosome*.

gnathostome. *n.* 1° Animal qui possède des mâchoires. 2° Sous-embranchement du phylum des Vertébrés.

gonades. *n.* Organes dans lesquels les cellules reproductrices sont produites et où elles effectuent, en général, leur maturation.

gonadotropine. *n.* Hormone sécrétée par le lobe antérieur de l'hypophyse et stimulant le développement et le fonctionnement des gonades.

gonapophyses. *n.* Voir *genitalia*.

gonochorisme. *n.* Processus au cours duquel, dans une espèce donnée, les sexes sont séparés.

gonocoxite. *n.* Pièce basale permettant l'articulation des gonapophyses sur le corps des Insectes.

gonoducte. *n.* Canal évacuateur des produits génitaux mâles ou femelles.

gonophore. *n.* Organe porté par les individus reproducteurs d'une colonie de Cnidaires Hydrozoaires Athécates et Hydrocoralliaires et à l'intérieur duquel se forment les produits génitaux.

gonopode. *n.* Organe copulateur mâle chez les Arthropodes.

gonoporique. *adj.* Désigne l'extrémité du conduit génital débouchant à la surface de la thèque chez les Échinodermes Pelmatozoaires.

gonothèque. *n.* 1° Urne obturée par un opercule et enfermant les individus reproducteurs groupés d'une colonie de Cnidaires Hydrozoaires Thécates. 2° Vésicule à paroi mince située sous le flotteur et contenant les loges embryonnaires initiales d'une colonie élémentaire de Graptolites.

gonozoécie. *n.* Logette spécialisée dans la reproduction sexuée d'une colonie de Bryozoaires Cyclostomes. Elle se transforme en chambre d'incubation lorsque le polypide a dégénéré.

gonozoïde. *n.* 1° Dans une colonie de Cnidaires Siphonophores, individu reproducteur (mâle ou femelle) de structure très voisine de celle des méduses, et produisant soit des méduzoïdes, soit de vraies méduses. 2° Bourgeon où se développent les gonades hermaphrodites des dolioles (Urocordés Thaliacés).

gouttière épipharyngienne. Canal dorsal qui parcourt l'axe médian du plafond du pharynx chez l'amphioxus (Céphalocordés) et qui porte un cordon de mucus agglutinant les proies de l'Animal.

grand pectoral. Muscle des Vertébrés supérieurs inséré sur le sternum et abaisseur du membre antérieur. Joue un rôle prépondérant dans le vol des Oiseaux.

granivore. *adj.* Qui se nourrit de graines. *Ex.* Linotte, poule.

grasserie. *n.* Maladie des vers à soie provoquée par un virus à polyèdre. Les chenilles prennent l'aspect de « vers gras ».

gravide. *adj.* Qualifie une femelle pleine, ou gestante.

grégariaptes. *adj.* Qualifie des organismes susceptibles de *grégarisme*.

grégariens ou **gregaria** ou **grégaires.** *adj.* Qualifie les criquets migrateurs vivant à l'état grégaire et constituant des bandes organisées, ou « nuages », qui dévastent les cultures (voir *grégarisme*).

grégarigène. *adj.* **(aire).** Qualifie une zone géographique où les criquets migrateurs, par exemple, passent de la phase solitaire et sédentaire à la phase grégaire et migratrice.

grégarisme. *n.* Tendance, chez les individus d'une même espèce, à se rassembler en groupe important, sous l'effet d'un instinct puissant, pour essaimer, comme les criquets migrateurs, ou hiverner, comme les coccinelles.

griffe. *n.* 1° Terminaison sclérifiée spiniforme des pattes de nombreux Insectes. 2° Étui corné qui se développe autour de la phalange terminale des doigts des Amniotes, qui peut être rétractile (chat) ou non (chien).

groin. *n.* Extrémité charnue du museau de certains Animaux. *Ex.* Hérisson, taupe, porc.

guano. *n.* Excréments décomposés de certains Vertébrés qui peuvent atteindre une grande épaisseur.

guanobie. *adj.* Qualifie des Insectes cavernicoles se nourrissant du *guano* des chauves-souris. *Ex.* Des Insectes Collemboles, des Diptères, des chenilles de Lépidoptères.

guanophore. *n.* Syn. d'*iridocyte*.

gula. *n.* Gorge ou région ventrale sclérifiée de la tête des Insectes Hémiptères.

gynandromorphisme. *n.* Existence, chez un même organisme, des caractères sexuels secondaires mâles et femelles. Cette anomalie, qui ne conduit pas à un hermaphrodisme fonctionnel, se rencontre chez de nombreux Insectes Lépidoptères et quelques Hyménoptères.

gynécophore. *adj.* Qualifie le canal formé par le corps du mâle et dans lequel se loge la femelle chez les Schistosomidés (Trématodes).

gynéphore. *n.* Désigne, chez les Insectes, une femelle parthénogénétique dont les œufs ne donnent que des femelles. Ce type de femelle se rencontre chez un Hyménoptère *(Biorrhiza pallida)* et chez certains Aphidiens (Insectes Homoptères).

gyrencéphalie. *n.* Torsion affectant l'organisation du système nerveux des Mammifères.

H

halophile. *adj.* Qui vit en milieu salé. *Ex.* La salicorne.

haplobiontique. *adj.* Qualifie le cycle d'un organisme dont la phase *haploïde* est prépondérante par rapport à la phase *diploïde*, réduite. *Ex.* Cycle des Sporozoaires.

haplo-diplobiontique. *adj.* Qualifie le cycle d'un organisme caractérisé par l'alternance de deux générations d'égale durée, l'une *haploïde* et l'autre *diploïde*. *Ex.* Cycle des Foraminifères.

haploïde. *adj.* Qui possède un nombre de chromosomes de moitié inférieur à celui des cellules somatiques. C'est le cas des gamètes, formés après réduction chromatique, ou *méiose*, et dont l'union (la fécondation) produira un œuf diploïde.

hapteur. *n.* Appareil de fixation constitué soit par une ventouse et des crochets, soit par une série de pinces ou d'épines et situé dans la partie postérieure des Vers parasites.

haptocystes. *n.* Organites vulnérants des tentacules des Acinétiens.

hectocotyle. *n.* Quatrième bras ventral gauche des Mollusques Céphalopodes mâles (calmars et seiches) modifié, au moment de la reproduction, en organe copulateur assurant le transfert des *spermatophores* dans la *cavité palléale* ou le repli labial de la femelle. Ce bras se détache du corps après l'acte sexuel chez l'argonaute.

hélicoïdal. *adj.* Disposé en hélice; hélicoïdal et spiralé sont souvent employés l'un pour l'autre, bien qu'une spirale soit, au contraire d'une hélice, disposée dans un plan.

helminthiase ou **ascaridiose.** *n.* Maladie due à la présence dans l'organisme d'un Ver parasite. *Ex.* Ascaridiose due à un Nématode, l'ascaris.

hémaphrorrhée. *n.* Syn. d'*autohémorrhée*.

hémélytre ou **hémiélytre.** *n.* Aile antérieure des Insectes Hémiptères caractérisée par l'existence de deux zones de consistance différente : une région basale et dure, appelée *corie*, et une membrane apicale.

hémicéphale. *adj.* Chez certaines larves d'Insectes Diptères, caractérise la tête, dont la structure est intermédiaire entre le type *acéphale* et le type *eucéphale*.

hémimétabole. *adj.* Qualifie un Insecte dont le développement larvaire est incomplet et simple : dans ce cas, la larve ressemble à l'adulte mais en diffère par la taille, l'immaturité des gonades et parfois l'absence d'ailes. *N.* Les Aptérygotes (sauf les Protoures) et des Ptérygotes comme les Odonates, les Orthoptères, et les Hémiptères sont des hémimétaboles.

hémipneustique. *adj.* Caractérise l'appareil respiratoire des Insectes dont quelques *stigmates* seulement sont fonctionnels, comme chez de nombreuses larves.

hémisphères cérébelleux. Excroissances latérales paires du *cervelet* des Mammifères. Ces formations contrôlent la motricité volontaire.

hémisternite. *n.* Chez les femelles d'Insectes Coléoptères, moitié du *sternite* du neuvième *urite;* entre les deux hémisternites, s'ouvre l'orifice génital.

hémochorial. *adj.* Qualifie un type de *placenta* dans lequel les villosités choriales forment avec les capillaires utérins des lacunes sanguines. *Ex.* Rongeurs, Primates.

hémocœle ou **hémocèle.** *n.* Cavité générale du corps des Arthropodes contenant le sang.

hémocyanine. *n.* Pigment respiratoire renfermant du cuivre et présent dans le sang de nombreux Invertébrés.

hémocyte. *n.* Élément figuré du sang des Invertébrés.

hémolymphe. *n.* Sang des Invertébrés contenant des éléments figurés, ou *hémocytes*, baignant dans un liquide riche en diverses substances organiques et en substances minérales.

hémolyse. *n.* Libération de l'hémoglobine par destruction des globules rouges. Lorsque ceux-ci sont hypertoniques par rapport au milieu externe, l'eau qu'ils absorbent les fait éclater.

hépatopancréas. *n.* Glande digestive des Mollusques et des Arthropodes Crustacés. Elle élabore et sécrète des diastases digestives et accumule des produits de réserves (glycogène, calcaire).

herbivore. *adj.* Qualifie un Animal qui se nourrit d'herbe. *Ex.* Ruminants, certains Oiseaux.

hermatypique. *adj.* Qualifie le mode de vie de polypiers récifaux dont la vie en association avec des Algues nécessite une température de 18 °C à 30 °C, un éclairement suffisant permettant la *photosynthèse*, et donc une profondeur inférieure à 60 m.

hétérocerque. *adj.* Qualifie la nageoire caudale à lobes dissymétriques, avec prédominance du lobe dorsal, des Poissons Chondrichthyens. *Ex.* Le requin.

hétérocœles. *adj.* **(vertèbres).** Qualifient les vertèbres des Oiseaux caractérisées par leur forme de selle.

hétérodonte. *adj.* 1° **(charnière).** Type de charnière de la coquille des Bivalves caractérisée par un nombre réduit de *dents cardinales* (1 à 3), disposées en éventail sous les crochets, et de dents latérales (0 à 2), placées en arrière du ligament comme chez *Cyrena* ou *Lucina*. 2° **(dent).** Chez les Vertébrés, caractérise des dents morphologiquement différentes (dents labiales et dents jugales). *Ex.* L'homme possède des dents hétérodontes.

hétérogamétique. *adj.* Qualifie le sexe produisant deux types de gamètes différents par leurs chromosomes, les uns donnant des mâles et les autres des femelles. Chez les Lépidoptères et les Trichoptères, les femelles sont hétérogamétiques, tandis que chez tous les autres Insectes, ce sont les mâles.

hétérogonie. *n.* 1° Phénomène par lequel les différentes parties du corps d'un organisme ne croissent pas toutes à la même vitesse. 2° (ou **allométrie**). Type de reproduction propre à certains Insectes Homoptères (pucerons), Hyménoptères (Cynipidés), Diptères (Cécidomyidés) et caractérisée par une alternance de génération parthénogénétique et sexuée.

hétéroneure. *adj.* Caractérise un Insecte dont les deux paires d'ailes ont une nervation différente.

hétéroside. *n.* Substance organique résultant de l'union d'un sucre (glucose le plus souvent) avec un corps différent, qui est l'*aglycone*. On dit aussi *glucoside*.

hétéroxène. *adj.* Qualifie le cycle d'un parasite comportant plusieurs hôtes. *Ex.* L'agent du paludisme, *Plasmodium falciparum*, se développe sur deux hôtes successifs, l'anophèle et l'homme.

hétérozoécie. *n.* Logette de forme particulière abritant les individus différenciés en vue d'une fonction spéciale (défense, nettoyage, reproduction...) dans une colonie de Bryozoaires Ectoproctes Gymnolæmates.

hexacanthe. *adj.* Qualifie l'embryon des Cestodes porteur de trois paires de crochets.

hexactine. *n.* Spicule à six pointes disposées sur trois branches orthogonales. Cette forme de type triaxone (développement selon trois axes) caractérise des Éponges siliceuses de la classe des Hexactinellides.

hibernacule. *n.* Bourgeon à paroi protectrice épaisse, qui se différencie à l'automne chez quelques espèces de Bryozoaires Ectoproctes Eurystomes, notamment *Victorella*, puis se développe au printemps après être resté inerte pendant l'hiver.

hibernation. *n.* Période pendant laquelle certains Animaux entrent en léthargie par suite de mauvaises conditions (froid, neige).

hirudine. *n.* Substance sécrétée par les glandes buccales des sangsues, qui rend le sang de leur victime incoagulable.

hispide. *adj.* 1° Couvert de poils longs et épais. 2° État de la surface de l'Éponge lorsque les spicules font relief hors de celle-ci.

histochimiques. *adj.* **(méthodes).** Méthodes permettant d'identifier et de localiser les constituants chimiques des tissus par des techniques spécifiques de coloration.

hivernation. *n.* Période pendant laquelle certains Animaux entrent en léthargie par suite des basses températures de l'hiver. *Ex.* Crapaud, marmotte, etc.

holarctique. *adj.* Qui habite dans tout l'hémisphère Nord.

holométabole. *adj.* Qualifie un Insecte dont le développement larvaire complet se caractérise par une métamorphose totale se réalisant au cours de la *nymphose*. *N.* Les Lépidoptères, les Hyménoptères, les Coléoptères, les Diptères, par exemple, sont des holométaboles.

holonéphridies. *n. Néphridies* s'ouvrant dans le cœlome par un *néphrostome* cilié, qui se prolonge par un canal néphridial dans le segment suivant, chez les Oligochètes.

holoplancton. *n.* Correspond aux formes en permanence planctoniques. *Ex.* Cténaires.

holopneustique. *adj.* Caractérise l'appareil respiratoire des Insectes dont tous les *stigmates* sont fonctionnels.

homélytre. *n.* Aile antérieure de consistance uniforme, présente, par exemple, chez les Homoptères.

homéo-osmotique. *adj.* Se dit d'une solution physiologique saline dont la concentration reste constante. *Ex.* Plasma sanguin.

homéotherme. *adj.* Qualifie un Animal dont la température interne est constante et indépendante de celle du milieu extérieur. *Ex.* Les Oiseaux et les Mammifères.

homocerque. *adj.* Qualifie la nageoire caudale, à lobes symétriques, des Poissons Téléostéens. *Ex.* Grondin.

homochromie. *n.* Ressemblance, portant sur la couleur, entre un Animal et le substrat sur lequel il vit, lui permettant de se soustraire à l'attention de ses prédateurs.

homodonte. *adj.* Chez les Vertébrés, caractérise des dents toutes semblables, qui ont un rôle de préhension, jamais de mastication. *Ex.* Dents du requin.

homodontie. *n.* Caractères des dents de Vertébrés qui sont toutes semblables pour une espèce donnée.

homogamétique. *adj.* Qualifie le sexe produisant un seul type de gamètes.

homoneure. *adj.* Caractérise un Insecte dont les quatre ailes ont une nervation semblable. *Ex.* Cas des ailes de Lépidoptères.

homonomes. *adj.* Qualifie des organes construits sur le même plan.

homotypie. *n.* Ressemblance morphologique entre un Animal et certains éléments du milieu dans lequel il vit : le phasme présente ainsi l'aspect d'une brindille, la phyllie celui d'une feuille.

hormone. *n.* Substance excitatrice d'organes élaborée par des glandes à sécrétion interne (endocrines) et déversée dans la circulation générale par l'intermédiaire du sang. *Par ext.,* voir *phéromones.*

hormone juvénile. Syn. de *néoténine.*

hormone de mue. Syn. d'*ecdysone.*

humérus. *n.* Os du bras des Vertébrés Tétrapodes.

humeur vitrée. Milieu transparent de l'œil des Vertébrés.

humicole. *adj.* Qui vit sur ou dans l'humus (ensemble de substances complexes résultant de l'action des Bactéries, Champignons, Insectes, etc., sur les débris organiques, en particulier les feuilles mortes, qui forment la litière).

huppe. *n.* 1° Touffe de plumes, érectiles ou non, que certains Oiseaux portent sur la tête. 2° Touffe de poils dressés sur la tête de certains singes.

hybride. *n.* Animal ou Végétal issu du croisement de deux parents appartenant à des espèces différentes. Improprement employé à la place de métis, qui est le produit du croisement de deux individus de la même espèce hétérozygote.

hydatique. *adj.* Qualifie le kyste formé par la larve du ténia échinocoque, parasite du chien ou de l'homme.

hydranthe. *n.* Individu nourricier, isolé, porté à l'extrémité des ramifications de la tige axiale d'une colonie de Cnidaires Hydrozoaires Athécates.

hydrocaule. *n.* Tige axiale dressée et dont les ramifications portent les individus d'une colonie de Cnidaires Hydrozoaires Athécates ou de Graptolites.

hydropore. *n.* Orifice du canal hydrophore à la surface de la thèque des Cystoïdes (Échinodermes Pelmatozoaires fossiles).

hydrorhize. *n.* Système de canaux radiculaires fixé sur le substrat et en relation avec la tige porteuse des individus d'une colonie de Cnidaires Hydrozoaires Athécates.

hydrospires. *n.* Sacs plissés, à parois minces, situés, par paire, autour de la bouche, à la base de chaque zone ambulacraire chez les Blastoïdes (Échinodermes fossiles) ; ils ont des rôles variés (respiratoire, génital, et excréteur peut-être).

hydrothèque. *n.* Cornet protecteur constitué d'une cuticule d'épaisseur variable, sécrétée par l'ectoderme, et entourant la tête d'un individu d'une colonie de Cnidaires Hydrozoaires Thécates.

hyomandibulaire. *n.* Os dorsal pair du deuxième arc viscéral du *splanchnocrâne* des Poissons Sélaciens. Il assure la liaison entre la mâchoire supérieure et le *neurocrâne.*

hypermétamorphose. *n.* Développement caractérisé par l'apparition de plusieurs formes larvaires successives et propre à certains Insectes parasites tels que des Coléoptères (Staphylinidés, Rhipiphoridés, Méloïdés) et les Strepsiptères.

hyperparasite. *n.* Parasite vivant aux dépens d'un autre parasite. *Ex.* Certains Hyménoptères vivant sur des chenilles sont parasités, à leur tour, par d'autres Insectes (Ichneumonides et Chalcidiens).

hypertélique. *adj.* Qualifie un organe dont le développement, excessif, peut être gênant pour l'Animal. *Ex.* Le *prothorax* de certains Insectes Cælifères, les mandibules de lucanes et même les bois des Cervidés.

hypocéphale. *adj.* Chez de nombreux Insectes, désigne une larve courbée dont la tête est dirigée vers le bas par suite du grand développement du *prothorax.* Se rencontre chez de nombreux Insectes, en particulier, les fourmis.

hypoderme. *n.* Couche cellulaire située sous la cuticule chez les Némathelminthes et les Arthropodes notamment.

hypognathe. *adj.* Qualifie la disposition ventrale des pièces buccales, chez le criquet par exemple.

hyponeurien. *adj.* Qualifie un organisme dont la chaîne nerveuse est ventrale et située sous le tube digestif. *Ex.* Les Vers.

hypopharynx. *n.* Organe allongé situé dans la bouche des Insectes et qui forme le plancher du *pharynx* dans la cavité buccale.

hypophyse ou **glande pituitaire.** Glande endocrine d'origine embryonnaire complexe, en relation avec le plancher du diencéphale. Elle est constituée de trois lobes : antérieur, moyen et postérieur.

hypopneustique. *adj.* Caractérise l'appareil respiratoire des Insectes dont une ou plusieurs paires de stigmates ne sont pas fonctionnelles ou ont disparu, comme chez les Mallophages ou chez les Coléoptères Scarabéides ou Curculionides.

hypopygium. *n.* Ensemble, constitué par les derniers urites, qui porte les *genitalia* chez certains Insectes (Diptères en particulier).

hyporachis. *n.* Petite plumule accessoire qui part du bord de l'ombilic supérieur dans la plume de certains Oiseaux.

hypostome. *n.* Plaque convexe couvrant la bouche chez un Trilobite.

hypostracum. *n.* Couche interne de la coquille des Mollusques, soit lamelleuse, soit porcelanée ou nacrée, et formée d'aragonite instable alternant avec des lamelles cornées.

hypothalamus. *n.* Plancher du *diencéphale* des Vertébrés comprenant des centres coordinateurs du système sympathique et siège de neurosécrétions transmises jusqu'à l'*hypophyse.*

hypsodonte. *adj.* Caractérise la dent jugale de certains Vertébrés, dont la croissance est continue et la couronne haute. Selon le dessin de la table d'usure, on distingue les *molaires sélénodontes* et les *molaires lophodontes.*

hypurales. *adj.* Chez les Poissons osseux, caractérise les vertèbres antérieures à l'urostyle, qui portent la majorité des rayons caudaux.

hystérosome. *n.* Partie postérieure du corps d'un Acarien formée, en avant, du *métapodosome* portant les deux dernières paires de pattes et, en arrière, de l'*opisthosome,* ou abdomen.

I

ichthyophage. *adj.* Qui se nourrit de Poissons.

ichthyoptérygiums. *n.* Membres pairs caractéristiques des Poissons osseux (nageoires) et comprenant les nageoires pectorales et pelviennes.

ichthyotoxine. *n.* Substance toxique contenue dans le corps de certains Poissons et agissant sur le système nerveux humain, comme la tétraodontoxine des Tétraodontiformes.

ilion ou **os iliaque.** *n.* Processus osseux dorsal de la ceinture pelvienne des Vertébrés Tétrapodes qui assure la liaison entre l'ensemble pubis-ischion et la colonne vertébrale.

illicium. *n.* Premier rayon, plus long et indépendant des autres (s'ils existent), de la première nageoire dorsale des Poissons Lophiiformes comme la baudroie. Articulé à la base et portant à son sommet un lobe charnu, entier ou ramifié, parfois lumineux, il constitue un filament pêcheur que l'Animal agite pour attirer les proies.

incubation. *n.* Période comprise entre la ponte d'un œuf et son éclosion et durant laquelle s'effectue le développement embryonnaire.

incubatorium. *n.* Poche cutanée incubatrice caractéristique de la femelle de l'échidné. Cette formation, dans laquelle s'ouvrent les aires mammaires, n'apparaît qu'au moment de l'allaitement.

incus. *n.* Nom donné à l'ensemble constitué par le fulcrum et les rami, éléments constitutifs du *mastax,* ou estomac masticateur des Rotifères.

indécidué. *adj.* Caractérise un type de *placenta* associé de façon assez lâche à la muqueuse utérine, laquelle n'est pas lésée au moment de la naissance. *Ex.* Jument.

indice céphalique endocrânien. Rapport entre la longueur et la largeur de la boîte crânienne.

indice de céphalisation. Rapport entre le poids de l'encéphale et celui du corps d'un organisme.

indice nasal. Distance séparant l'épine nasale antérieure de la suture naso-frontale.

indice thoracique. Rapport entre la largeur du thorax et sa profondeur.

infra-orbital. *n.* Os des Vertébrés constituant la partie inférieure de l'orbite.

infundibuliforme. *adj.* En forme d'*entonnoir.*

infundibulum. *n.* 1° Chambre antérieure de la cavité gastrique d'un Cténaire. 2° Groupe de cellules de la région antérieure du tube nerveux à rôle thermo-ou photorécepteur chez les Procordés. 3° Diverticule du diencéphale, qui constitue le pédoncule de l'hypophyse chez les Vertébrés.

infusoriforme. *n.* Individu provenant de la fécondation de l'œuf chez les Dicyémides. Il assure la dissémination de l'espèce, mais sa destinée est mal connue.

infusorigène. (larve). Troisième stade larvaire des Dicyémides correspondant à des individus producteurs de gamètes, ovules et spermatozoïdes.

inguinal. *adj.* Situé dans la partie inférieure de l'abdomen. *Ex.* Mamelles inguinales.

inquilin. *adj.* Désigne un Animal qui vit en commensal avec d'autres Animaux pour rechercher un abri sans qu'il y ait parasitisme. *N.* Un *inquilin.*

inquilinisme. *n.* État qui caractérise des Animaux inquilins.

interambulacre ou **interradius** ou **zone interradiaire.** Aire en fuseau, partant de la bouche des Échinodermes et qui, en alternance avec cinq autres zones dites *ambulacraires*, divise la surface du corps en dix secteurs soulignant la symétrie pentamère de ces Animaux.

interdigital. *adj.* Qui est situé entre les doigts. *Ex.* Membrane interdigitale de la patte de la grenouille.

intermaxillaire. *n.* Os du crâne des Vertébrés situé entre le prémaxillaire et le maxillaire.

intermue. *n.* Période de vie active comprise entre deux mues successives chez les Arthropodes.

interradius. *n.* Syn. d'*interambulacre.*

intersexué. *n.* Organisme possédant un appareil reproducteur fonctionnel d'un sexe, associé à des caractères de l'autre sexe.

intertidale. *adj.* **(zone).** Zone de balancement des marées.

intertropical ou **tropical.** *adj.* Qui concerne la zone comprise entre les tropiques ou qui y vit.

intestin. *n.* Portion postérieure du tube digestif.

intestin hépatique. Prolongement de l'œsophage situé entre les régions branchio-génitale et caudale et muni de papilles dorsales sécrétrices chez la plupart des Entéropneustes (Stomocordés).

intima. *n.* Couche mince cuticulaire tapissant la paroi interne des parties antérieure et postérieure du tube digestif des Insectes.

introvert. *n.* Trompe rétractile des Priapuliens.

iridocyte ou **guanophore.** *n.* Cellule ellipsoïdale, opaque et réfléchissante, située notamment dans la couche profonde de la peau des Mollusques Céphalopodes, et qui donne les reflets argentés ou nacrés de la seiche par exemple, par diffraction de la lumière à travers les plaquettes d'urate et de guanine qui y sont incluses.

iris. *n.* Partie colorée de l'œil située entre la cornée et le cristallin et percée par la *pupille.*

ischion. *n.* 1° Article basal de la rame interne d'un appendice biramé type des Crustacés. 2° Os postérieur de la ceinture pelvienne des Vertébrés Tétrapodes.

isodonte. *adj.* **(charnière).** Type de charnière de la coquille des Bivalves, où une fosse ligamentaire triangulaire sépare de chaque côté une grosse dent et une fossette dentaire, comme chez les Spondylidés, le tout pouvant se réduire jusqu'à l'effacement (comme chez les Pectinidés) ou à la disparition des dents (comme chez les Ostréidés).

isopédine. *n.* Substance constitutive des écailles cosmoïdes des Poissons Dipneustes.

isopleure. *adj.* Qualifie les Mollusques Gastéropodes fossiles à coquille enroulée dans un plan rigoureux, donc symétrique, comme *Bellerophon.*

isoxanthoptérine ou **vitamine B_{12}.** *n.* Vitamine hydrosoluble du groupe B, facteur antianémique du foie.

isthme. *n.* Portion rétrécie de l'oviducte des Oiseaux sécrétant les deux membranes coquillières de l'œuf.

J - K

jabot. *n.* Dilatation de l'œsophage caractéristique des Oiseaux granivores et servant de réservoir où les aliments sont stockés.

jars. *n.* Mâle du cygne et de l'oie.

joues. *n.* 1° Régions latérales de la tête d'un Trilobite situées de part et d'autre de la glabelle. 2° Régions latérales de la tête d'un Insecte situées sous les yeux. 3° En général, régions latérales de la face.

jugal. *n.* Os du crâne des Vertébrés Tétrapodes situé sous l'orbite.

jugum. *n.* Lobe saillant du bord interne de l'aile antérieure, théoriquement séparé du *vannus* par un pli jugal, chez les Insectes. *Ex.* Chez les Lépidoptères.

kératine. *n.* Protéine fibrillaire imprégnant les cellules superficielles de l'épiderme de la peau des Vertébrés terrestres et qui est à l'origine de la formation de la couche cornée et des productions épidermiques (poils, cheveux, cornes et sabots, etc.).

kyste. *n.* En biologie, forme de résistance par laquelle une cellule (Bactérie, Protozoaire) ou un petit organisme s'entoure d'une paroi épaisse et entre en vie ralentie.

L

labium. *n.* Lèvre postérieure impaire d'un Insecte provenant de la soudure médiane de deux pièces symétriques et s'insérant sur la capsule céphalique par un *postmentum*, subdivisé en un *submentum* et un *mentum*. Ce dernier se prolonge en un *prémentum.*

labre. *n.* 1° Bord externe (par rapport à l'axe d'enroulement) de l'ouverture de la coquille des Mollusques Gastéropodes. 2° Lèvre inférieure chitinisée des Myriapodes. 3° Lèvre supérieure des Insectes.

labrum. *n.* Bord postérieur épaissi de la bouche chez les Spatangoïdes (oursins Irréguliers). Cette lèvre en forme de bec de cuiller est utilisée par l'Animal pour fouiller le sable ou la vase.

labyrinthe. *n.* Ensemble de cavités remplies d'un liquide clair, l'*endolymphe*, qui constitue le système stato-acoustique de l'oreille interne des Vertébrés.

lacertiforme. *adj.* Qualifie un Animal qui a la forme d'un lézard.

lacinia. *n.* Pièce constitutive des *maxilles* chez les Arthropodes.

lactéale. *adj.* Qualifie la première dentition des Mammifères *diphyodontes.*

lacune absorbante. Cavité principale du *système hémal* enveloppant l'intestin des Échinodermes.

lacune nourricière ou **de distribution.** Cavité principale du *système hémal* des Échinodermes allant au système nerveux, aux organes génitaux et aux *podia.*

lamelles cornées. Petites pièces de cornes situées sur le bord des *mandibules* des flamands roses et qui servent à filtrer les particules alimentaires trouvées dans la vase.

lancette. *n.* Dépression nasale constituée de quatre cavités chez les Mammifères Chiroptères de la famille des Rhinolophidés.

langue. *n.* Organe musculaire de la cavité buccale des Vertébrés Tétrapodes servant à la préhension et au brassage des aliments. Chez l'homme, est, de plus, indispensable à la phonation.

languettes. *n.* Cloisons secondaires minces séparant, après leur dédoublement, les fentes branchiales chez l'amphioxus (Céphalocordés).

lanterne d'Aristote. Puissant appareil masticateur, très complexe, des oursins. Il est constitué de vingt pièces calcaires, très dures, formant une pyramide pentagonale, traversée par l'œsophage, et dont chaque plan correspond à une mâchoire, ou *pyramide*. Sa base étant tournée vers l'intérieur du *test*, son sommet présente cinq dents pointues qui font saillie dans la bouche.

larve. *n.* Forme présentée au cours de leur développement par les Insectes et les Amphibiens, et très différente de l'adulte. L'acquisition de la forme définitive nécessite une *métamorphose.*

larve en tonnelet. Larve libre (trois jours), nageuse, presque cylindrique, issue de l'œuf des Crinoïdes (Échinodermes Pelmatozoaires). Dépourvue de bouche, cerclée de cinq bandes ciliées transversales et parallèles et ornée d'une houppe apicale, elle se fixe par une fossette adhésive préorale au support.

larynx. *n.* Partie antérieure différenciée de la trachée des Vertébrés. Il est renforcé par des éléments cartilagineux qui proviendraient des derniers *arcs branchiaux.*

latipenne. *adj.* Qualifie une aile élargie et arrondie.

lécithines. *n.* Lipides complexes phosphorés et azotés, présents dans le jaune d'œuf par exemple.

leishmaniose. *n.* Maladie des Vertébrés provoquée par des Protozoaires endocellulaires *(Leishmania)* parasitant les globules blancs et transmis par des phlébotomes (Insectes Diptères). Elle est caractérisée par l'hypertrophie du foie et de la rate et l'abaissement du taux de globules blancs.

lemnisque. *n.* Organe lacunaire, situé à la base de la trompe des Acanthocéphales, et dont le rôle est mal établi.

leptocéphale. (larve). Désigne la jeune larve d'anguille (Poisson) comprimée et transparente qui entreprend la migration depuis la mer des Sargasses, où elle est née, jusqu'aux côtes européennes.

leptodiroïde. *adj.* Qualifie un Insecte troglobie ressemblant au genre *Leptodirus* et caractérisé par l'étirement de son avant-corps et la dilatation de son arrière-corps.

leptophragmes. *n.* Cellules en coupole de la paroi des tubes de Malpighi, riches en chlorures et élevant la pression osmotique interne chez les larves de Coléoptères, de Lépidoptères, de Symphytes et de Myrméléontides.

leuconoïde. *adj.* Qualifie le type morphologique fondamental complexe réalisé chez les Éponges calcaires Hétérocèles et quelques Éponges siliceuses fossiles (les Lithistides).

ligne latérale. Système sensoriel formé par une disposition régulière de papilles situées sur le côté du corps d'un Poisson, par exemple, et qui recueille les variations de pression de l'eau.

lignine. *n.* Substance s'incrustant dans les parois des cellules du bois, responsable de la lignification. Polymère de composés aromatiques à fonction aldéhyde. Difficilement attaquable, elle est pourtant décomposée par certains Champignons.

lipide. *n.* Corps gras, généralement non azoté, parfois phosphoré. Formé essentiellement de glycérol estérifié par trois acides gras.

lipophore. *n.* Catégorie de *chromatophores* intradermiques des Vertébrés (Poissons, Amphibiens, Reptiles surtout) dont les vacuoles lipidiques contiennent des pigments caroténoïdes jaunes ou rouges, dissous.

liquide amniotique. Liquide remplissant la cavité amniotique de l'embryon.

liquide hémal. Sorte de « sang » formé de *plasma* et de constituants cellulaires (dont les hémocytes, les amibocytes) qui circule dans le *système hémal* des Échinodermes.

lissencéphale. *adj.* Qualifie le cerveau de certains Vertébrés, dépourvu ou faiblement pourvu de circonvolutions.

lithophile. *adj.* Qui recherche la présence de pierres.

livrée. *n.* Aspect extérieur que présente, temporairement ou non, un Animal. *Ex.* Livrée nuptiale de l'épinoche (Poisson) ; livrée du lièvre des Alpes.

lobe. *n.* Partie arrondie faisant saillie à la surface d'un organe.

lobe azygos. Pédicule pulmonaire droit bien développé chez certains Mammifères (*ex.* gibbon), et réduit chez d'autres (*ex.* gorille, chimpanzé et homme).

lobes optiques. Centres de relai visuel, formés de deux tubercules des Poissons jusqu'aux Oiseaux, et de quatre chez les Mammifères. Le développement de ces structures est lié au perfectionnement de la vision chez les Vertébrés.

lophodonte. *adj.* Caractérise la molaire dont la couronne large et plate est ornée de crêtes disposées en bandes transversales. *Ex.* Chez les éléphants.

lophophore. *n.* Organe spécial à triple fonction captatrice, respiratoire et excrétrice chez les Bryozoaires, Brachiopodes et Phoronidiens. Il est parfois guidé ou supporté par une production minérale (*ex.* brachiosquelette des Brachiopodes).

lorica. *n.* Carapace formée de plaques cuticulaires protégeant le corps des Rotifères et celui des Mollusques Polyplacophores.

lorum. *n.* Voir *plaques mandibulaires.*

losanges poriques. Pores disposés symétriquement par rapport aux lignes de sutures des plaques et dessinant des losanges à la surface de la *thèque* des Cystoïdes Rhombifères (Échinodermes Pelmatozoaires fossiles).

luciférase. *n.* Enzyme dégradant la *luciférine* en oxyluciférine avec production de lumière.

luciférine. *n.* Substance albuminoïde donnant par oxydation, dans les cellules photogènes de certains Insectes Diptères et Coléoptères, de l'oxyluciférine avec production de lumière, sous l'action d'une enzyme, la luciférase.

lucifuge. *adj.* Qui fuit la lumière.

lumière polarisée. Lumière dont les ondes vibrent toutes dans un seul plan privilégié, dit de polarisation, faisant un angle de 90° avec la direction de propagation. Les Hyménoptères sociaux utilisent cette propriété (la lumière solaire est polarisée les jours de ciel bleu) pour s'orienter par rapport à leur nid.

lunule. *n.* 1° Plage en forme de croissant près des orbites des Insectes Hyménoptères. 2° Dépression située au-dessus des antennes et qui marque l'emplacement du *ptilinum* chez les Diptères supérieurs du groupe des Schizophores. 3° Longues fentes perçant les bords aplatis du *test* de nombreuses espèces de Scutellidés (oursins Irréguliers de l'ordre des Clypeastroïda).

lycophore. *n.* Larve de certains Cestodaires, parasites de Poissons : elle porte postérieurement cinq paires de petits crochets.

lymphe. *n.* Liquide interstitiel qui baigne les tissus de nombreux Animaux. Chez les Vertébrés, il ne contient pas de cellules et provient du sang par filtration au travers des parois capillaires.

lysine. *n.* Acide aminé possédant deux fonctions basiques aminées.

lysosomes. *n.* Petites vésicules intracytoplasmiques contenant les enzymes nécessaires à l'autolyse.

M

macrocnèmes. *n.* Désignent les mésentères parfaits possédant un muscle rétracteur et joignant l'actinopharynx à la colonne chez les anémones de mer.

macrolabia. *n.* Forme de Dermaptères caractérisée par des cerques en pinces ou forceps de grande taille.

macrosmique. *adj.* Caractérise un organisme ayant un sens olfactif subtil lié à un rhinencéphale développé. *Ex.* Le chien.

madréporite ou **plaque madréporique.** Plaque interradiale, plus grande que les autres, remarquable au niveau du disque des Stellérides et du pôle anal des Échinides. Constitué de fines lamelles verticales percées d'une multitude de trous microscopiques où aboutit le canal hydrophore, elle permet les échanges entre l'eau de mer et le contenu de l'appareil aquifère des Échinodermes. Elle est libre dans la cavité générale des Holothurides (sauf chez les Élasipodes).

magnum. *n.* Portion glandulaire de l'oviducte des Oiseaux sécrétant l'albumine de l'œuf.

maladie du sommeil. Maladie exotique humaine provoquée par un trypanosome transmis par la mouche tsé-tsé, ou glossine (Insecte Diptère). La maladie commence par un état insomniaque, suivi d'un sommeil prolongé sur lequel se greffe parfois un état de démence.

malléoles ou **raquettes.** *n.* Organes sensoriels situés sur les hanches de la dernière paire de pattes ambulatoires chez les Solifuges.

malleus. *n.* Nom donné à l'ensemble constitué par les *unci* et les *manubria,* éléments constitutifs du *mastax,* ou appareil masticateur des Rotifères.

mallophagose trichodectique ou **phthiriase.** Ensemble des troubles cutanés dus, chez le bétail, à la présence du mallophage ectoparasite *Trichodectes bovis* et, chez les Oiseaux, à celle de *Menopon pallidum.*

mammalien. *adj.* Qui a rapport aux Mammifères.

mammalogie. *n.* Étude des Mammifères.

mammalogue. *n.* Spécialiste de l'étude des Mammifères.

mandibules. *n.* Appendices céphaliques masticateurs des Arthropodes (Crustacés, Myriapodes, Insectes), biramés ou réduits à une seule pièce dure, à bord dentelé.

manteau. *n.* Tégument complexe enveloppant inégalement la masse viscérale des Mollusques, des Brachiopodes et des Tuniciers. Les productions calcaires qu'il sécrète sont très diverses (tubes, spicules, plaques, coquille univalve ou bivalve).

manubria. *n.* Pièces paires constitutives des mâchoires, ou *trophi,* des Rotifères.

manubrium. *n.* 1° Sorte de trompe, de taille variable, correspondant à la région œsophagienne, à l'extrémité de laquelle s'ouvre l'orifice buccal, et qui pend comme un battant de cloche au centre de l'ombrelle du corps des méduses (Cnidaires). 2° Syn. de *prosternum* chez les Mammifères Chiroptères.

marge. *n.* Bourrelet soulignant la jonction de la colonne cylindrique avec le disque oral supérieur du corps d'une anémone de mer (Cnidaire Anthozoaire Actiniaire).

marsupium. *n.* 1° Organe d'incubation se développant par différenciation d'une partie des lames branchiales des larves d'Unionidés (Mollusques Bivalves). 2° Poche incubatrice que les femelles de certains Anoures portent sur le dos et dans laquelle les œufs sont incubés. 3° Repli cutané abdominal qui forme, chez les Mammifères Marsupiaux, une poche dans laquelle les embryons achèvent leur développement après avoir quitté les voies génitales de leur mère.

marteau. *n.* Un des quatre osselets de l'oreille interne des Mammifères.

masséter. *n.* Principal muscle masticateur des Mammifères. Il s'insère sur le dentaire de la mandibule et dans la fosse temporale du crâne.

mastax. *n.* Estomac masticateur des Rotifères constitué de pièces mobiles, les mâchoires, ou *trophi.*

maxillaire. *n.* Os postérieur de la mâchoire supérieure dermique des Vertébrés.

maxilles. *n.* 1° Troisième paire d'appendices céphaliques buccaux, ou deuxièmes mâchoires postérieures des Crustacés, constituées par des prolongements internes, doubles, masticateurs et par deux rames : l'une, interne, courte et non segmentée, l'autre, externe, très développée en lame arquée (le scaphognathite). 2° Mâchoires d'un Insecte comportant chacune une base de deux articles : *cardo* et *stipes* sur lesquelles sont fixées deux lames masticatrices, une interne, la *lacinia,* et une externe, la *galea,* ainsi qu'un *palpe* latéral à cinq articles.

maxillipèdes. *n.* 1° Syn. de *pattes-mâchoires :* première, deuxième et troisième paires d'appendices thoraciques buccaux des Crustacés avec, de la première à la troisième paire, une réduction de la base masticatrice et un développement de l'aspect pédiforme et de la fonction respiratoire. 2° Syn. de *pédipalpes* ou *palpes maxillaires :* deuxième paire d'appendices des Arachnides.

maxillules. *n.* Deuxième paire d'appendices céphaliques buccaux ou premières mâchoires antérieures des Crustacés, constituées par des prolongements internes, simples, masticateurs de l'article basal, et par une seule rame, interne, modifiée en palpe.

mediproboscis. *n.* Partie moyenne de la trompe des mouches.

méduzoïde. *n.* Individu reproducteur en forme de méduse très régressée et dont les produits génitaux peuvent arriver à maturité et être libérés avant son détachement, et même son achèvement, dans une colonie de Cnidaires Hydrocoralliaires.

mégalope. *adj.* Qualifie le dernier stade larvaire du développement des Brachyoures et Anomoures (Crustacés Décapodes Marcheurs). Le corps microscopique diffère peu de celui de l'adulte.

méiose. *n.* Ensemble de deux divisions cellulaires successives par lesquelles une cellule mère fournit quatre cellules filles possédant moitié moins de chromosomes qu'elle-même.

mélanine. *n.* Pigment noir de la peau, des cheveux, etc.

mélanophore. *n.* Cellule du tégument des Animaux renfermant un pigment noir, la *mélanine,* dont la répartition est sous contrôle neuro-endocrinien, et détermine les changements de coloration.

méliphage. *adj.* Qui se nourrit de miel (*par ext.* de pollen).

mélolonthoïde. (larve). Désigne les larves d'Insectes molles et courbées dont les pattes sont bien développées. *Ex.* Larves de Coléoptères Scarabéides.

membrane. *n.* 1° Couche limitant la cellule tout entière et ses organites. Peut s'étendre à l'intérieur de ceux-ci. Les membranes sont formées de molécules de lipides et de protides. Au niveau des membranes se trouvent certaines substances comme la chlorophylle, ou diverses enzymes (sur la membrane interne des mitochondries par exemple). Les membranes remplissent une fonction primordiale dans la régulation des échanges entre la cellule et le milieu ou entre les organites eux-mêmes. 2° A l'échelle des organismes, le terme de membrane désigne un tissu en forme de lame mince.

membrane cytoplasmique ou **pellicule ectoplasmique** ou **membrane protoplasmique.** Membrane limitant le cytoplasme de la cellule. En première approximation, de même structure que les autres membranes cellulaires.

membrane interdigitale. Expansion cutanée qui relie les doigts de la patte des Vertébrés.

membrane nictitante. Paupière verticale, mobile d'avant en arrière, présente chez certains Vertébrés Amniotes. *Ex.* Oiseaux.

membrane péristomienne. Tégument ventral, souple, dépourvu de piquants et au centre duquel s'ouvre la bouche (ou péristome) chez les Échinodermes (oursins, étoiles de mer).

membrane protoplasmique. Voir *membrane cytoplasmique*.

membre chiridien. Membre caractéristique des Vertébrés terrestres. Chaque membre comprend trois segments articulés : un proximal, le *stylopode*, un moyen, le *zeugopode* et un distal, l'*autopode*.

méninges. *n.* Membranes protectrices et nourricières du système nerveux central des Vertébrés.

mentum. *n.* Voir *labium*.

méroblastique. *adj.* Qualifie un œuf à segmentation incomplète due à l'abondance du *vitellus*. *Ex.* Œufs de Reptiles, d'Oiseaux ou de Monotrèmes.

méroïstique. *adj.* **(ovaire)**. Type d'ovaire des Insectes dans lequel les ovogonies produisent, par division, d'autres ovogonies, mais aussi des cellules nourricières, ou trophocytes.

méronéphridies. *n.* *Néphridies* (en grand nombre par segment) pouvant s'ouvrir à la surface du corps ou dans le tube digestif chez les Oligochètes.

merrain. *n.* Tige principale des bois des Cervidés.

mérus. *n.* Deuxième article à partir de la base de la rame interne d'un appendice biramé type des Crustacés.

mésadénie. *n.* Chez les mâles de certains Insectes, glande génitale annexe, d'origine mésodermique, constituée par une évagination du canal déférent.

mésencéphale. *n.* Vésicule embryonnaire postérieure constitutive du cerveau des Vertébrés et au niveau de laquelle se différencient les lobes optiques.

mésenchyme. *n.* Tissu animal dérivant des cellules qui migrent à partir du *blastoderme* ou d'un des feuillets embryonnaires.

mésentère. *n.* 1° Chez les Cnidaires, syn. de *sarcosepte*. 2° Tissu de soutien de nature conjonctive reliant les anses intestinales des Vertébrés.

mésentéron. *n.* Intestin moyen, d'origine endodermique, chez les Arthropodes.

mésethmoïde. *n.* Os de cartilage de la région antérieure du plancher du *neurocrâne* des Vertébrés.

mésobronches. *n.* Bronches des Oiseaux reliées aux sacs aériens.

mésocœlome. *n.* Cavité cœlomique du lophophore correspondant au second segment, ou *mésosome*, du corps des Phoronidiens.

mésoderme. *n.* Feuillet cellulaire de l'embryon situé entre l'ectoderme et l'endoderme. Il est à l'origine des éléments du tissu conjonctif, du squelette, des muscles, du sang, des organes excréteurs et des glandes reproductrices. N'existe que chez les Animaux triploblastiques.

mésoglée. *n.* Gelée riche en eau, située entre l'ectoderme et l'endoderme, chez les organismes diploblastiques (*ex.* la méduse).

mésonéphron ou **mésonéphros**. *n.* Rein secondaire apparaissant en arrière du *pronéphros* et devenant fonctionnel chez les adultes des Poissons et Amphibiens. Cet organe est transitoire chez les Reptiles, les Oiseaux et les Mammifères, et évolue en un *métanéphron*.

mésoptérygium. *n.* Pièce basale et médiane de la nageoire pectorale des Poissons cartilagineux qui porte les *ptérygophores*.

mésosome. *n.* 1° Région moyenne du corps des Phoronidiens portant une couronne tentaculaire, ou *lophophore*, et séparée de la région postérieure par une constriction. 2° Segment des Pogonophores prolongeant le *prosome*.

mésosternum. *n.* Région médiane du sternum.

mésothorax. *n.* Deuxième segment du thorax des Insectes, portant la première paire d'ailes et la deuxième paire de pattes.

mésozoïde. *n.* Dans une colonie de Cnidaires Octocoralliaires, individu stérile et de petite taille.

métabolisme. *n.* Ensemble des transformations chimiques aboutissant aux synthèses *(anabolisme)* ou aux dégradations *(catabolisme)* de substances présentes dans une cellule ou un organisme vivant.

métacercaire. (larve). Cinquième stade larvaire (de la douve par exemple) enkysté chez un Mammifère.

métacœlome. *n.* Cavité cœlomique, spacieuse et subdivisée en compartiments, correspondant au troisième segment, *métasome*, du corps des Phoronidiens.

métamère. *n.* Segment du corps d'un Annélide par exemple. Comprend, dans la région moyenne du corps : la cuticule, des muscles, deux sacs cœlomiques, deux ganglions nerveux, deux métanéphridies et deux appendices.

métamérie. *n.* Division du corps d'un Animal en segments successifs, ou *métamères*.

métamérique. *adj.* Caractérise l'anatomie d'un organisme chez lequel des organes identiques se répètent dans des segments successifs, ou *métamères*. *Ex.* Chaque anneau de la région moyenne du corps de *Nereis* comporte deux sacs cœlomiques, deux canaux excréteurs, deux ganglions nerveux, etc.

métamorphisme. *n.* Ensemble des phénomènes dus à de fortes pressions et à de fortes températures qui entraînent une transformation de la structure et de la composition minéralogique des roches. Celles-ci sont souvent feuilletées : schistes ardoisiers, gneiss, etc.

métamorphose. *n.* Passage, avec changement de forme, du stade larvaire à celui de l'adulte. Ce phénomène se traduit par des modifications organiques, souvent accompagnées d'une variation du mode de vie. *Ex.* La larve aquatique de la libellule et l'Insecte adulte, le têtard et la grenouille.

métanauplius. (larve). Désigne le deuxième stade larvaire succédant à la *larve nauplius* dans le développement des Crustacés Branchiopodes, Copépodes et Malacostracés. Est caractérisé par une segmentation de la région postérieure du corps et par l'apparition d'appendices nouveaux (quatre paires).

métanéphridie. *n.* Organe excréteur d'origine mésodermique, formé par un pavillon cilié s'ouvrant dans un premier segment, tandis que le canal sinueux qui le prolonge débouche, par un pore, dans le segment suivant. Ce type d'organe existe chez les Annélides.

métanéphron ou **métanéphros**. *n.* Rein tertiaire se différenciant en arrière du *mésonéphron* et correspondant à l'organe fonctionnel des adultes des Reptiles, des Oiseaux et des Mammifères.

métapleures. *n.* Replis latéraux bordant la face ventrale aplatie du corps de l'amphioxus (Céphalocordés), de la bouche jusqu'à l'atriopore. Ces bourrelets font partie de deux invaginations ectodermiques qui se sont soudées pour constituer la cavité péribranchiale lors du développement embryonnaire de l'Animal.

métapneustique. *adj.* Caractérise l'appareil respiratoire des Insectes dont les seuls stigmates fonctionnels sont ceux du dernier segment abdominal. *Ex.* Larves de Culicides, de Tipulides et de Dysticides.

métapode. *n.* Élément constitutif de l'autopode du membre chiridien et correspondant au métacarpien ou au métatarsien.

métapodosome. *n.* Voir *hystérosome*.

métaptérygium. *n.* Pièce basale et interne de la nageoire pectorale des Poissons cartilagineux ; porte les *ptérygophores*.

métaptérygoïde. *n.* Os dermique du *splanchnocrâne* des Poissons osseux. Participe à la constitution du palais des Vertébrés supérieurs.

métasome. *n.* 1° Région postérieure, ou tronc, cylindrique dont la terminaison inférieure est une ampoule d'ancrage, et qui constitue la plus grande partie du corps des Phoronidiens. 2° Tronc très long des Pogonophores, avec une gouttière ventrale antérieure aux bords garnis de papilles de fixation et portant postérieurement des plaquettes chitineuses.

métasomite. *n.* Segment postérieur de chaque anneau abdominal double du corps des Myriapodes Diplopodes.

métastomium. *n.* Région du corps d'un Polychète, comprise entre le *prostomium* et le *pygidium*, et constituée d'une succession de métamères tous identiques.

métatarse. *n.* Syn. de *basitarse*.

métathorax. *n.* Troisième segment du thorax des Insectes, portant la deuxième paire d'ailes et la troisième paire de pattes.

métencéphale. *n.* Vésicule embryonnaire constitutive du cervelet des Vertébrés.

métissage. *n.* Mélange de deux sous-espèces (ou de deux races d'une même espèce) qui donne des individus possédant des caractères propres à l'un et à l'autre de leurs parents.

métrophage. *adj.* Caractérise un individu qui dévore sa mère. *Ex.* La larve pédogénétique des Coléoptères Micromalthides donne un œuf d'où sortira une larve qui dévorera sa mère.

micellaire. *adj.* Qui a rapport aux *micelles*, ou agrégats de molécules de grande taille.

microclimat. *n.* Caractéristiques climatiques d'un milieu extrêmement limité : zone située sous une pierre, dans une anfractuosité de tronc d'arbre, etc. Souvent confondu avec *climat local*, qui s'applique à une zone plus vaste : espace abrité par une falaise, par un bouquet d'arbres, etc.

microcnèmes. *n.* Désignent les mésentères imparfaits, à bordure libre et dépourvus de toute musculature, chez les anémones de mer.

micropyles. *n.* Canaux traversant le chorion, au pôle antérieur de l'œuf des Insectes, et permettant la pénétration des spermatozoïdes.

microsclères. *n.* Spicules d'Éponge, de taille microscopique, disposés au sein de la mésoglée ; ils ne constituent jamais de réseaux squelettiques, et leurs formes très variées servent de critère de détermination spécifique chez les Éponges actuelles.

microscope. *n.* Instrument d'optique permettant d'agrandir des structures. 1° Le *microscope photonique* utilise l'énergie lumineuse et permet des grossissements de 1 000 à 2 000 fois. 2° Le *microscope électronique* utilise comme source d'énergie un bombardement d'électrons sous vide et permet d'atteindre des grossissements de 100 000 fois. 3° Le *microscope électronique à balayage* est caractérisé par sa grande profondeur de champ et sa capacité d'explorer de grandes surfaces.

microsmique. *adj.* Caractérise un organisme ayant un pouvoir d'olfaction réduit, lié à un rhinencéphale peu développé. *Ex.* L'homme.

microsomes. *n.* Corpuscules protidiques intracytoplasmiques.

microtriches. *n.* Petites soies, sans articulations basales, que l'on trouve sur les ailes des Insectes Mécoptères, Lépidoptères et de certains Diptères.

mictique. *adj.* Qualifie une femelle fécondable.

miellat. *n.* Production sucrée de l'intestin postérieur de certains Insectes, tels les Homoptères.

migration. *n.* Déplacement cyclique d'une zone à une autre, avec retour, effectué par divers Animaux évoluant en groupe (parfois sur de très longues distances). *Ex.* Thons, sternes arctiques.

mimétique. *adj.* Qualifie une espèce dotée de mimétisme. *Ex.* Les phasmes, qui prennent l'aspect de brindilles.

mimétisme. *n.* Phénomène par lequel un Animal peut prendre la forme ou la couleur du substrat sur lequel il est posé.

mimiques. *adj.* **(muscles).** Qualifient les muscles faciaux responsables de l'expression des grimaces. *Ex.* Les muscles mimiques des singes Anthropoïdes et de l'homme.

miracidium. *n.* Embryon cilié aquatique des Trématodes Digéniens, comme la douve du foie.

mitose. *n.* Division du noyau d'une cellule en deux noyaux fils, ces derniers conservant le même nombre de chromosomes que la mère. *Par ext.* Division de la cellule elle-même, qui implique celle de son cytoplasme, ou cytodiérèse.

mola. *n.* Partie basale saillante ou mamelonnée de la mandibule des Insectes.

molaire. *n.* Dent jugale postérieure des Mammifères, destinée à la mastication des aliments. Elle présente de grandes variations structurelles suivant les groupes et n'est pas remplacée.

monactine. *n.* Spicule en forme d'aiguille, terminée par une seule pointe et appartenant au type monaxone (dont le développement s'effectue selon un seul axe). Les monactines caractérisent certaines Éponges siliceuses.

monaulie. *n.* Caractéristique de l'appareil reproducteur des Gastéropodes Opisthobranches dont le conduit hermaphrodite aboutit à un orifice commun.

monaxone. *adj.* Désigne un des types fondamentaux de spicule de Spongiaire, qui se développe selon un seul axe. L'association de spicules de ce type engendre un réseau squelettique de structure monaxiale, que l'on rencontre dans la classe des Démossponges (ordre des *Hadromerida*).

monocyclique. *adj.* 1° Qualifie le développement d'un organisme présentant une seule génération sexuée. On trouve ce type de développement chez certains Rotifères. 2° Qualifie le squelette calicinal des Crinoïdes (Échinodermes Pelmatozoaires) lorsque sa partie basale comprend deux cycles de plaques calcaires : les cinq basales, ou interradiales, et les cinq radiales.

monodactylie. *n.* Existence d'un seul doigt développé, chez les Équidés par exemple.

monogame. *adj.* Qualifie un Animal s'accouplant avec une seule femelle. *Ex.* Le merle noir.

monophage. *adj.* Caractérise un Insecte ne mangeant qu'une seule plante. *Ex.* Le ver à soie se nourrit exclusivement de mûrier.

monophyodontie. *n.* Existence, propre à certains Mammifères, d'une dentition unique, due soit à l'avortement de la dentition de lait (*ex.* phoques, otaries, etc.), soit au maintien à l'état d'ébauche de la dentition définitive (*ex.* dauphins, marsouins, etc.).

monotypique. *adj.* Caractérise une espèce qui présente un seul *phénotype*.

monoxène ou **monogène.** *adj.* Qualifie le cycle d'un parasite ne comportant qu'un seul hôte. *Ex.* Le cycle de *Trypanosoma equiperdum* est monoxène.

mors. *n.* Petites pièces calcaires des Échinodermes, de formes variées, criblées de trous comme une dentelle et qui s'articulent au niveau du renflement terminal des pédicellaires.

moulin gastrique. Appareil broyeur, calcifié, constitué d'un système de pièces masticatrices, articulées et mues par de puissants muscles. Cet ensemble forme l'armature interne de l'estomac antérieur des Crustacés Décapodes.

mouvement d'abduction. Mouvement qui consiste à éloigner du corps un membre ou un segment de membre.

mouvement d'adduction. Mouvement qui consiste à rapprocher du corps un membre ou un segment de membre.

mucipare. *adj.* Qualifie une cellule glandulaire sécrétrice de mucus.

mucopolysaccharides. *n.* Molécules complexes, d'origine glucidique, tapissant la membrane de certains Protozoaires.

mucus. *n.* Sécrétion glucoprotéique protégeant le tégument de nombreux Invertébrés (*ex.* Vers) et des Vertébrés aquatiques (*ex.* Amphibiens). Cette substance protège également la muqueuse digestive des Vertébrés et facilite le transport des aliments.

mue. *n.* 1° Renouvellement périodique du tégument (Arthropodes) ou des formations cutanées (plumes des Oiseaux, poils des Mammifères). 2° Dépouille d'un Animal ayant subi une mue.

multituberculée. *adj.* Qualifie une dent portant plusieurs tubercules. *Ex.* Molaires des Primates.

muraille. *n.* 1° Formation compacte et poreuse de la loge calcaire, ou calice, où vit le polype, chez les coraux. 2° Désigne la carapace des Balanomorphes (Crustacés Cirripèdes), composée de pièces calcifiées fixes, formant une sorte de loge tronconique dont le sommet est obturé par des pièces mobiles.

musc. *n.* Substance odorante sécrétée par les glandes prépuciales de certains Mammifères Cervidés, en particulier, le porte-musc.

muscardine. *n.* Maladie des vers à soie provoquée par un Champignon.

muscle columellaire. Muscle puissant reliant le pied des Mollusques Gastéropodes à la *columelle* et servant à la rétraction de l'Animal dans la coquille.

muscle palato-pharyngien. Sphincter obturant l'évent des Mammifères Cétacés lors de la plongée.

mutation. *n.* Modification brusque d'un être vivant, immédiatement héréditaire parce que sa cause première est une perturbation stable du patrimoine héréditaire (acide désoxyribonucléique).

mycétocytes. *n.* Cellules constitutives du *mycétome*.

mycétome. *n.* Amas de cellules spéciales, présent dans l'intestin des Hémiptères et des Diptères parasites, et contenant des micro-organismes symbiotiques assurant l'apport vitaminique nécessaire aux Insectes.

mycotètes. *n.* Sphérules, de couleur blanc pur, produites en surface par le mycélium dans les meules à Champignons *Termitomyces* d'une termitière et consommées par les ouvriers (peut-être comme substances de croissance ou vitamines).

myofibrilles. *n.* Éléments contractiles et constitutifs de la fibre musculaire. Chaque myofibrille du muscle strié comporte une alternance de disques sombres et de disques clairs.

myomère. *n.* Segment musculaire métamérisé, chez les Poissons par exemple.

myonèmes. *n.* Fibrilles intracytoplasmiques très contractiles présentes chez les Protozoaires.

myosepte. *n.* Cloison conjonctive séparant les *myomères*.

myosine. *n.* Protéine fibrillaire constitutive du muscle et impliquée dans sa contraction. Voir *contraction musculaire*.

myrmécophile. *adj.* Qualifie un Animal vivant, en commensal ou en parasite, dans le nid des fourmis. *Ex.* Les Acariens, les Insectes Collemboles, les Thysanoures, les Homoptères et les Coléoptères.

myxoptérygium. *n.* Voir *ptérygopode*.

N

nacelle. *n.* Ensemble des œufs de moustique que la femelle agglutine au moment de la ponte et qui flotte à la surface de l'eau.

nageoire. *n.* Organe locomoteur des Procordés et des Cordés inférieurs aquatiques (Agnathes et Poissons), formé par un repli cutané, en forme de palette, soutenu par des rayons squelettiques. On distingue les nageoires impaires (dorsale, caudale et anale) et les nageoires paires (pectorales et pelviennes).

narines. *n.* Orifices externes de la gouttière olfactive qui apparaît phylogénétiquement chez les Sauropsidés. Généralement situées en avant du crâne, paires ou impaires, elles peuvent s'ouvrir sur sa face dorsale (chez les Cétacés).

nasuti. *adj.* Qualifie un type de soldat appartenant aux termites du genre *Cubitermes*, à tête en forme de poire, dépourvue de mandibules et prolongée à l'avant par une sorte de seringue pouvant projeter un jet de sécrétion visqueuse sur les ennemis.

nauplius. (larve). Première phase larvaire typique dans le développement de tous les Crustacés. C'est un organisme microscopique, pélagique, au corps ovoïde, transparent et sans trace de segmentation, comportant un œil médian et trois paires d'appendices natatoires (futures antennules, antennes, mandibules).

neala. *n.* Voir *champ jugal*.

néarctique. *adj.* Qui habite la région zoologique formée par les quatre provinces canadienne, alleghanienne (région cultivée des États-Unis), des montagnes Rocheuses, californienne.

nécrophage. *adj.* Qui se nourrit de cadavres. *Ex.* Certains Coléoptères Sirphides.

nécrose. *n.* Mortification d'un tissu vivant qui conduit à sa décomposition.

nectar. *n.* Liquide sucré sécrété par certaines glandes (nectaires), le plus souvent portées par des organes floraux, et qui est consommé par les Insectes qu'il attire.

nectonique. *adj.* Qui vit et nage en pleine eau (Poissons et Cétacés).

nectozoïde. *n.* Cloche natatoire située sous le flotteur, à l'extrémité supérieure d'une colonie de Cnidaires Hydrozoaires Siphonophores.

nématoblaste. *n.* Voir *cnidoblaste*.

nématogène. *n.* Stade larvaire des Dicyémides parasites des sacs urinaires des Céphalopodes. Le *nématogène fondateur* donne naissance, par division des cellules germes, à de nouveaux individus, appelés *nématogènes primaires*.

néonate. *adj.* Qualifie la larve à sa sortie de l'œuf.

néopallium. *n.* Structure nouvelle du pallium des Vertébrés qui apparaît chez les Mammifères, formée de six couches de neurones pyramidaux, et constituée d'aires sensorielles, qui sont les projections des récepteurs sensitifs (œil, oreille, etc.), et d'aires de la motricité volontaire.

néoténie. *n.* Persistance prolongée de l'état larvaire. Elle peut être partielle et retarder l'apparition de l'adulte, ou totale. Dans ce dernier cas, elle s'accompagne d'un développement normal des organes génitaux qui permet aux individus de se reproduire à l'état larvaire *(ex. Axoloth)*.

néoténine. *n.* ou **hormone juvénile.** Substance sécrétée par les *corps allates* des Insectes déterminant, selon sa concentration, le type de mue, laquelle peut être larvaire, nymphale ou imaginale. Cette hormone agit aussi dans la maturation sexuelle des femelles.

néotropical. *adj.* Qui concerne ou habite la zone tropicale américaine.

néphridie. *n.* Organe excréteur typique des Vers, des Mollusques et de certains Pararthropodes. Selon l'origine embryonnaire et la structure de cet organe, on distingue différents types, dont les deux fondamentaux sont la *protonéphridie* et la *métanéphridie*.

néphridiopore. *n.* Pore de la *néphridie*.

néphridium. *n.* Poche ectodermique où sont localisées la néphridie et ses annexes.

néphrocyte. *n.* Cellule excrétrice de certains Arachnides (opilions), Crustacés et Insectes.

néphron. *n.* Voir *tube urinifère.*

néphrostome. *n.* Pavillon cilié de la néphridie.

neurocrâne. *n.* Partie du chondrocrâne constituée par une boîte cartilagineuse entourant l'encéphale, chez les Poissons cartilagineux.

neuromère. *n. Métamère* contenant deux ganglions nerveux pouvant fusionner en une masse unique.

neurone. *n.* Cellule nerveuse formée d'un corps cellulaire prolongé de fines ramifications, ou dendrites, et d'un long axone. Cette cellule spécialisée capte l'excitation et conduit l'influx nerveux.

neuropodium. *n.* Rame ventrale du parapode d'un Polychète.

niche écologique. Ensemble des paramètres qui conditionnent l'environnement physique d'une espèce et son rôle dans la communauté des êtres vivants.

nichée. *n.* Ensemble des oisillons d'une même couvée qui n'ont pas encore quitté le nid.

nichoirs. *n.* Emplacements artificiels créés par l'homme pour permettre aux Oiseaux d'effectuer leur nidification ; destinés à attirer certaines espèces dans des régions habituellement non colonisées.

nidation. *n.* Fixation de l'œuf fécondé des Mammifères dans la muqueuse utérine, au niveau de laquelle celui-ci poursuit son développement.

nidicole. *adj.* Qualifie l'oisillon incapable de se déplacer et de se nourrir par lui-même, et qui reste au nid un certain temps sous la dépendance de ses parents. *Ex.* Oiseaux Passereaux, Rapaces, etc.

nidification. *n.* Édification du nid, qui est une construction plus ou moins élaborée, destinée à maintenir les œufs ensemble et à les protéger contre les agents externes et les prédateurs. *Ex.* Chez les Oiseaux.

nidifuge. *adj.* Qualifie le jeune poussin susceptible de voir et de se déplacer pour se nourrir tout seul, et qui abandonne le nid immédiatement après l'éclosion. *Ex.* Poussins des Oiseaux Galliformes, Charadriiformes, etc.

nivicole. *adj.* Qualifie un Animal vivant au niveau des névés, tels que des Insectes Coléoptères Carabiques.

nodosité. *n.* 1° Renflement déterminé dans la racine de diverses plantes, en particulier les Légumineuses, par la présence de Bactéries symbiotiques. C'est au niveau des nodosités qu'est fixé l'azote atmosphérique. 2° En général, tout renflement d'une structure quelconque.

notocorde. *n.* ou **corde dorsale.** Baguette rigide et élastique, dorsale par rapport au tube digestif, faite de cellules turgescentes, et qui constitue le premier élément du squelette axial des Cordés.

notopodium. *n.* Rame dorsale du parapode d'un Polychète.

notum. *n.* Tégument, lisse ou hérissé de papilles respiratoires, remplaçant le manteau qui protège la masse viscérale des Nudibranches (Gastéropodes Opisthobranches).

noyau. *n.* Organite fondamental des cellules eucaryotes. Une membrane double, dont le feuillet externe est continu avec le réticulum endoplasmique, percée de pores, délimite un espace renfermant la chromatine, dont l'élément essentiel est l'acide désoxyribonucléique.

nucléole. *n.* Formation globuleuse située à l'intérieur du noyau, produite par un ou plusieurs chromosomes, formée de granules et de fibrilles. C'est là que sont produits les ribosomes, qui passent ensuite dans le cytoplasme par les pores de la membrane nucléaire.

nucléoplasme. *n.* Voir *suc nucléaire.*

nucléus. *n.* Protubérance ventrale et postérieure où sont logés certains viscères vivement colorés (l'anse intestinale, le cœur) et constituant, à ce niveau, une tache sur le corps des salpes (Tuniciers planctoniques).

nymphose. *n.* Phase de vie ralentie au cours de laquelle la larve des Insectes Holométaboles subit un remaniement profond pour se transformer en une nymphe qui conduira à l'imago, ou Insecte parfait.

O

oblongum. *n.* Cellule fermée, typique, de l'aile membraneuse des Insectes Coléoptères Adéphages.

obtectée. *adj.* **(nymphe).** Qualifie la nymphe dont les appendices sont englués dans une sécrétion cuticulaire, chez les Insectes Lépidoptères, Coléoptères et certains Diptères.

occipital. *n.* 1° Os de la région postérieure du crâne des Vertébrés. 2° Os du crâne des Mammifères qui résulte de la fusion, autour du *foramen magnum,* du basi-occipital, du supra-occipital et des deux occipitaux latéraux.

occlusale. *adj.* Qualifie la surface des dents jugales des Mammifères qui est en contact avec celle des dents de la mâchoire opposée.

ocelle. *n.* Œil simple constitué d'un amas de cellules photosensibles et pigmentées.

odontoblastes. *n.* Noyaux de croissance des dents de la *radula,* situés dans la partie postérieure de la gaine radulaire, au fond de la cavité buccale des Mollusques.

odontophore. *n.* Support cartilagineux, dur, mû par de nombreux muscles et sur lequel glisse, par des mouvements de va-et-vient, l'extrémité antérieure de la langue rapeuse, ou *radula,* des Mollusques.

œcophylle. *adj.* Qualifie un Animal qui recherche les lieux d'habitation.

œil. *n.* Organe photorécepteur des Animaux, constitué de trois parties : des cellules photoréceptrices reliées au cerveau par un nerf optique, un système optique plus ou moins perfectionné suivant les groupes, et une paroi protectrice. On distingue les *yeux simples* et les *yeux composés.*

œil nauplien ou **médian.** Œil impair, en forme de X, résultant de la juxtaposition de trois ocelles, présent au stade nauplius du développement larvaire des Crustacés. Unique chez les Copépodes, persistant aux côtés des yeux chez les Branchiopodes, cet organe de vision est vestigial ou absent chez les Malacostracés.

œnocytes. *n.* Cellules spéciales du corps gras des Insectes. Jouent un rôle dans le métabolisme et produisent la cire de l'épicuticule.

œstrogène. *adj.* Qualifie une sécrétion ou une substance faisant apparaître les caractères sexuels femelles.

œstrus. *n.* Chez les femelles des Vertébrés, période qui suit la ponte ovulaire, et durant laquelle la folliculine (hormone sécrétée par le follicule de De Graff) provoque des transformations du tractus génital qui conditionnent l'accouplement.

œuf. *n.* Voir *zygote.*

oïkoplastes. *n.* Cellules glandulaires contenues dans l'épithélium tégumentaire des Appendiculaires (Urocordés), comme *Oïkopleura,* et sécrétant la coque gélatineuse, non cellulosique, dans laquelle vit l'Animal.

oléocrâne. *n.* Extrémité proximale du *cubitus.* Dépasse l'articulation huméro-cubitale, bloquant ainsi le membre lorsque celui-ci est en extension.

oléocyste. *n.* Capsule endodermique, contenant une goutte d'huile, située ventralement à l'intérieur de la cloche supérieure d'une colonie de Cnidaires Hydrozoaires Siphonophores (Calicophores) et assurant la stabilité de la colonie.

olfactives. *adj.* **(sensilles).** *Sensilles* sensibles aux odeurs.

oligophage. *adj.* Caractérise un Insecte se nourrissant de plantes appartenant à des espèces voisines. *Ex.* Le doryphore, qui consomme surtout de la pomme de terre, mais parfois aussi de la tomate.

oligopode. *adj.* 1° Qualifie la phase du développement embryonnaire des Insectes caractérisée par la segmentation totale des appendices céphaliques et thoraciques et une régression des appendices abdominaux. 2° Qualifie les larves libres d'Insectes ne comportant que des pattes thoraciques : on distingue les larves campodéiformes et les larves scarabéiformes.

oligopore. *adj.* Qualifie certaines formes des Échinides, qui présentent trois paires de pores par plaque ambulacraire composée.

olynthus. *n.* Voir *ascon.*

omasum. *n.* Syn. de *feuillet.*

ombilic. *n.* Vide axial, en forme d'entonnoir, constitué par la partie visible des différents tours contenus à l'intérieur du dernier tour d'une coquille de Mollusques Gastéropodes et Céphalopodes. C'est aussi l'extrémité de la columelle lorsque celle-ci est creuse. L'ombilic peut éventuellement être masqué par un col.

ombrelle. *n.* Partie du corps des méduses (Cnidaires), en forme de dôme ou de cloche (globuleuse, conique, cubique ou discoïde), pourvue ou non d'un *velum* et auréolée de tentacules et d'organes sensoriels.

ommatidie. *n.* Élément constitutif de l'œil composé des Arthropodes, formé par quelques *cellules rétiniennes,* un *cristallin,* sécrété par les cellules cristalliniennes, et une *cornéule.* Chaque ommatidie est entourée par des *cellules pigmentaires.*

ommatidien. *adj.* **(angle).** Angle correspondant à celui que forme la limite de l'*ommatidie* au niveau de la membrane basale qui supporte les ommatidies.

ommatophores. *n.* Tentacules oculaires, rétractiles, invaginables et portés en arrière des tentacules tactiles sur la face dorsale de la tête des Mollusques Gastéropodes Pulmonés terrestres.

omoplate. *n.* Syn. de *scapula.*

omosternum. *n.* Pièce osseuse médiane et antérieure au sternum chez les Amphibiens Anoures.

omphalium. *n.* Garniture cuticulaire complexe de l'orifice de la glande odorifique métasternale chez certains Hémiptères.

omphalo-placenta ou **placenta chorio-vitellin.** *placenta* caractérisé par une irrigation vitelline des villosités choriales. *Ex.* Cas des Marsupiaux. Par ailleurs, ce type de placenta coexiste avec l'*allanto-placenta* chez certains Euthériens, Rongeurs et Insectivores.

onchocercose. *n.* Maladie due à la filaire *Onchocerca* qui provoque des tumeurs sous-cutanées et peut entraîner des troubles oculaires.

oncosphère. *n.* Syn. d'*embryon hexacanthe.* Voir *hexacanthe.*

ongle. *n.* Production épidermique cornée et plate de l'extrémité des doigts chez les Mammifères Primates.

onguéal. *adj.* Qui se rapporte aux *ongles.*

ongulae. *n.* Ongles plats. *Ex.* Chez les Lémuroïdes.

onguligrade. *adj.* Qualifie un Animal prenant appui sur l'extrémité des ongles. *Ex.* Le cheval.

onisciforme. *adj.* Qui a la forme de cloporte. Caractérise certaines chenilles de Lépidoptères Lycémides ainsi que les larves de Coléoptères Sirphides.

ontogenèse. *n.* Voir *ontogénie*.

ontogénie ou **ontogenèse.** *n.* Développement des organismes ou des organes. Science qui étudie ce développement.

ookyste. *n.* Zygote protégé par une coque épaisse.

oostégites. *n.* Lamelles portées par l'article basal de certains appendices thoraciques et formant, avec la face ventrale du thorax, une cavité incubatrice lors de la *mue* suivant la fécondation chez la femelle des Péracarides (Crustacés Malacostracés).

oothèque. *n.* Capsule protectrice des œufs de certains Insectes, tels que les Orthoptères, et provenant d'une sécrétion qui durcit à l'air.

ootype. *n.* Carrefour où aboutissent les canaux des glandes vitellogènes, l'oviducte et l'utérus, chez les Monogènes, les Cestodes et les Trématodes.

oozoïde. *n.* 1° Polype issu de l'œuf fécondé lors de la reproduction sexuée des Cnidaires. 2° Individu asexué solitaire qui provient de l'œuf et bourgeonne des *blastozoïdes* à l'aide d'un *stolon* chez les Thaliacés (Urocordés ou Tuniciers).

opercule. *n.* 1° Plaques osseuses latérales qui protègent les arcs branchiaux situés en arrière de la tête chez les Poissons. 2° Pièce protégeant l'orifice auditif des Reptiles Crocodiliens.

ophicéphale. *adj.* Qualifie le type de *pédicellaires* des Échinides terminés par des *mors* dentés en forme de tête de serpent.

ophiopluteus. *n.* Larve pélagique, à symétrie bilatérale caractéristique des Ophiurides (Échinodermes). Elle a la forme d'un cône aplati, à sommet inférieur, et porte : un anus sur la face ventrale, et une aire buccale dans une vaste dépression à la base supérieure.

opisthocœles. *adj.* **(vertèbres).** Qualifient les vertèbres dont le corps est concave postérieurement et convexe antérieurement. *Ex.* Amphibiens Urodèles.

opisthoglyphe. *adj.* Qualifie les serpents dont le venin est injecté par des dents sillonnées, situées en arrière de la cavité buccale.

opisthorhynque. *adj.* Qualifie la disposition ventrale des pièces buccales transformées en une trompe orientée vers l'arrière (*ex.* chez les pucerons).

opisthosome. *n.* Région postérieure du corps d'un Chélicérate, souvent segmentée et correspondant à l'abdomen. Voir *hystérosome*.

ordre. *n.* Actuellement, groupe de familles supposé naturel, de rang inférieur à la classe. La délimitation des ordres est fort délicate; leur nombre est donc variable et tend, avec les progrès de la classification, à augmenter. Plus les ordres sont petits, plus ils sont « naturels », mais moins ils sont utiles, car beaucoup ne comprennent alors qu'une seule famille.

oreillette. *n.* 1° Chez les Invertébrés, cavité cardiaque qui reçoit le sang veineux. 2° Chez les Vertébrés, partie de l'*atrium* cardiaque, lorsque celui-ci est cloisonné.

oreillettes. *n.* Excroissances latérales, parfois inégales, existant au niveau du crochet des valves de la coquille de certains genres de Mollusques Bivalves, tels *Pecten*, *Malleus*, *Chlamys*.

organe axial. Voir *glande axiale*.

organe de Bojanus. *Néphridie* des Mollusques Lamellibranches et des Gastéropodes Pulmonés comprenant un réservoir, un rein typique et un orifice de communication avec le péricarde.

organe de Jacobson. Diverticule de l'organe olfactif des Vertébrés (excepté les Oiseaux) qui semble en rapport avec la perception de stimuli olfactifs provenant des aliments présents dans la bouche.

organe lymphoïde. Organe des Vertébrés dans lequel se forment les lymphocytes, cellules de la *lymphe* (liquide qui baigne les espaces intercellulaires).

organe piriforme. Organe antérieur des larves mûres, à rôle à la fois nerveux, glandulaire et sensoriel, d'une colonie de Bryozoaires Ectoproctes Gymnolæmates (Eurystomes) et de celle de Stomocordés Ptérobranches.

organe X ou **de Hanström.** Glande endocrine céphalique paire sécrétant une hormone inhibitrice de la *mue* et dont dépendent les phénomènes d'adaptation chromatique, de gamétogenèse et de différenciation sexuelle chez les Crustacés Malacostracés.

organes arborescents. Longs tubes ou « poumons », pairs, très ramifiés, annexés au cloaque et remontant vers la bouche dans la cavité générale du corps des Échinodermes Holothurides.

organes chordotonaux ou **scolopidies.** Organes sensoriels profonds des Insectes, constitués d'un ensemble de trois cellules : une cellule sensorielle, une cellule intermédiaire enveloppante et une cellule terminale. Ils sont répartis sur les antennes, sur les pattes et sur le thorax. Peuvent être sensibles aux mouvements de l'air ou être associés aux organes auditifs.

organes cribiformes. Lames vibratiles à fonction respiratoire, intercalées entre les plaques marginales de la base des bras chez les Porcellanastéridés (Échinodermes Stellérides) où les papules n'existent pas.

organes de Hancock. Organes gustatifs ou olfactifs, localisés sur les côtés de la tête, présents uniquement chez les Mollusques Gastéropodes Opisthobranches.

organes de Johnston. Organes *chordotonaux* situés sur le second article des antennes des Insectes.

organes perliformes. Tubercules cornés arrondis, apparaissant sur le tégument des mâles de certaines espèces de Cyprinidés (Poissons) durant la période de reproduction.

organes rétrocérébraux. Formation paire, à fonction mal connue, peut-être tactile, et située sur le bord inférieur du ganglion cérébral chez les Chétognathes.

organes de Stewart. Volumineuses vésicules gonflées d'eau, suspendues aux cinq angles radiaires de la *lanterne d'Aristote* chez les Cidarides, les Échinothurides (oursins Réguliers) et quelques Clypéastroïdes (oursins Irréguliers). Elles servent de compensateurs de pression du liquide cœlomique.

organes de Tömösvary. Organes postantennaires sensoriels situés, dans des cavités de forme variable, sur les côtés de la tête des Myriapodes Progonéates (la plupart des Diplopodes et des Symphyles). Leur fonction est inconnue, mais on sait que ces organes sont plus développés chez les espèces aveugles cavernicoles.

organes Y ou **organes frontaux latéraux.** Glandes endocrines céphaliques paires dont dépendent la croissance (et même la régénération des appendices locomoteurs) ainsi que les mues chez les Crustacés Malacostracés.

organite ou **organelle.** *n.* Structure entrant dans la composition d'une cellule et fonctionnant comme un de ses « organes ».

orifice auriculaire. Orifice externe de l'oreille chez certains Vertébrés.

ornithologiste. *n.* Spécialiste de l'étude des Oiseaux.

orthomitose. *n.* Division cellulaire au cours de laquelle les chromosomes sont associés aux fibres du fuseau achromatique et se regroupent dans le même plan à la métaphase. Se rencontre chez les Coccidies, les Grégarines...

orthoptéroïde. *adj.* Qualifie le champ anal bien développé et plissé des ailes postérieures chez les Insectes Plécoptères.

osmatérium. *n.* Organe odoriférant, situé sur le *prothorax* des chenilles, qui aurait la propriété d'éliminer les substances nocives de certaines plantes.

osmotrophe. *n.* Organisme se nourrissant par diffusion d'aliments à l'état dissous, présents dans le milieu ambiant (eau pour une forme libre, sang ou liquide cavitaire de l'hôte pour un parasite). *Adj.* Qualifie la nutrition à partir d'aliments à l'état dissous.

os canon. Élément du squelette des membres des Artiodactyles résultant de la soudure des métapodes médians.

os endotympamique. Os de l'oreille moyenne des Mammifères ayant la forme d'un anneau sur les bords duquel est tendue la membrane tympanique.

os iliaque. Syn. de *ilion*.

os lacrymal. Os dermique de la face des Mammifères, relié antérieurement au *jugal*.

os marsupiaux ou **épipubis.** Os pairs, articulés en avant des pubis, caractéristiques de la *ceinture pelvienne* des Mammifères Monotrèmes et Marsupiaux.

os pénien ou **baculum.** Tige osseuse disposée dans l'axe longitudinal du pénis de nombreux Mammifères, Carnivores Pinnipèdes, Rongeurs, Lémuriens, Microchiroptères et quelques Insectivores.

os pharyngiens. Os constituant le *splanchnocrâne* des Vertébrés.

os radial. Voir *scaphoïde*.

os de seiche. Voir *sépion*.

os sterno-costal. Partie sternale ossifiée des côtes chez certains Mammifères.

os turbinaux. Os de la cavité olfactive des Sauropsidés et des Mammifères qui augmentent la surface sensorielle de celle-ci.

os tympano-hyal. Os reliant l'os hyoïde à l'os tympanique chez les Mammifères Fissipèdes.

os zygomatique. Syn. de *jugal*.

osphradie. *n.* Bourrelet sensoriel bordant la base des branchies des Mollusques : Gastéropodes aquatiques, Polyplacophores et quelques Bivalves. Cet organe exerce une fonction sensorielle olfactive (et peut-être tactile) qui permettrait à l'Animal d'apprécier les qualités de l'eau pénétrant dans sa cavité palléale.

osselets de Weber. Chez les Poissons Téléostéens Ostariophysaires, chaîne de quatre osselets qui transmettent les vibrations de la vessie gazeuse à un sinus périlymphatique impair.

ostariophyse. *n.* Nom donné à la chaîne des osselets de Weber chez les Poissons Téléostéens.

ostéocrâne. *n.* Crâne osseux des Vertébrés adultes (sauf chez les Agnathes et les Poissons cartilagineux). Il s'édifie par ossification du *chondrocrâne* embryonnaire et ossification dermique qui ajoute des os de revêtement.

ostéoderme. *n.* Plaque osseuse logée dans le derme sous les écailles cornées de certains Lacertiliens (lézards).

ostéologique. *adj.* Qui a un rapport avec le squelette.

ostiole. *n.* Petite ouverture plus ou moins arrondie.

ostracum. *n.* Couche moyenne calcaire de la coquille des Mollusques, particulièrement résistante du fait de l'agencement des cristaux de calcite (structures prismatique, entrecroisée ou fribreuse).

ouvriers de termite. Caste d'individus stériles, à mandibules normales, toujours aptères et aveugles et qui assurent tous les travaux d'entretien de la société de termites : ils construisent la termitière, recherchent et constituent les réserves nutritives, nourrissent les autres castes.

ovarioles. *n.* Tubes constitutifs de l'ovaire des Insectes, comprenant au sommet le *germarium*, où s'effectue la multiplication des cellules sexuelles

femelles, et à la base le *vitellarium*, où se réalisent leur maturation et l'accumulation de leurs réserves vitellines.

ovicelle. *n.* Poche incubatrice bourgeonnant au sommet d'un individu producteur d'œufs chez les Bryozoaires Ectoproctes Gymnolaemates *(Bugula)*.

oviducte. *n.* Canal de l'appareil génital femelle qui conduit les ovules à partir de l'ovaire (chez les Vertébrés : *canal de Müller;* dans l'espèce humaine : trompe de Fallope).

ovigère. *n.* Appendice servant à porter les œufs chez le mâle des Pycnogonides.

ovipare. *adj.* Qui pond des œufs. *Ex.* Chez les Invertébrés, de nombreux Crustacés, Insectes, Échinodermes et chez les Vertébrés, les Poissons, les Batraciens, beaucoup de Reptiles et les Oiseaux.

ovipositeur ou **oviscapte.** *n.* Appendice différencié chez la femelle des Insectes, comme la sauterelle, permettant la ponte des œufs. Il est constitué d'un ensemble de valves caractéristiques.

oviposition. *n. Syn.* de *ponte* chez les Insectes.

ovirupteur ou **ruptor ovi.** *n.* Pointe saillante située sur la tête ou le *prothorax* des embryons des Insectes leur permettant, lors de l'éclosion, de déchirer les enveloppes de l'œuf.

ovisacs. *n.* Sacs cœlomiques contenant les ovaires chez les sangsues.

oviscapte. *n.* Voir *ovipositeur*.

ovocytes. *n.* Gamètes femelles n'ayant pas terminé leur différenciation.

ovogonies. *n.* Cellules initiales diploïdes des gamètes femelles ou ovules.

ovovivipare. *adj.* Qui donne naissance à des petits vivants après rupture de l'enveloppe de l'œuf dans l'organisme maternel. *Ex.* Cas de certains Insectes ou certains Reptiles.

ovulation. *n.* Émission des ovules.

oxydo-réduction. *n.* Processus chimique au cours duquel un corps est *réduit* par fixation d'électrons, arrachage d'oxygène ou fixation d'hydrogène, tandis qu'un autre est *oxydé* par arrachage d'électrons ou d'hydrogène ou fixation d'oxygène.

P

pachyderme. *n.* Animal possédant un tégument épais. *Ex.* Rhinocéros.

pædogenèse ou **pédogenèse.** *n.* Mode de reproduction parthénogénétique se réalisant chez les larves d'Insectes Diptères (Chironomidés, Cécidomyidés) et Coléoptères (Micromalthidés) : ces larves vivipares se développent dans l'organisme de la larve mère.

pædogénétique. *adj.* Qui a rapport à la *pædogenèse*.

palatin. 1° *n.* Os dermique du *splanchnocrâne* des Poissons osseux. 2° *Adj.* Élément participant à la constitution du palais chez les Vertébrés supérieurs.

palato-carré ou **ptérygo-carré.** *n.* Cartilage qui constitue la mâchoire supérieure des Poissons Sélaciens.

paléarctique. *adj.* Qualifie la région zoologique constituée des quatre provinces européenne (Europe moins la région méditerranéenne), méditerranéenne, sibérienne, mongolienne (Nord-Est de la Chine, archipel du Japon).

palettes natatoires. 1° Appendices de certains Animaux Invertébrés servant à la locomotion aquatique. 2° Membre chiridien de certains Vertébrés adapté à la locomotion aquatique. *Ex.* Tortue marine.

palmure. *n.* Expansion cutanée des doigts de certains Vertébrés Tétrapodes. Peut être indépendante à chaque doigt (*ex.* chez les Oiseaux Phalaropodidés et Mammifères Castoridés) ou les réunir entre eux (*ex.* chez les Oiseaux Anatidés).

palpes. *n.* 1° Chez les Insectes, voir *maxille*. 2° Groupes de trois *podia* situés sur les bords festonnés des gouttières orales des bras de Crinoïdes. Ces organites, tactiles et peut-être respiratoires, enduits de mucus, participent à la capture et au transport de la nourriture vers la bouche de l'Animal.

paludéen. *adj.* 1° Qui est atteint de paludisme. 2° Qualifie une région dans laquelle le paludisme est endémique.

paludisme. *n.* Maladie tropicale de l'homme, due au Protozoaire *Plasmodium vivax*, transmis par le moustique anophèle (Diptère). Débute par une fièvre suivie d'une forte diarrhée et se prolonge souvent par un coma fatal.

palustre. *adj.* Relatif aux marais.

panoïstique. *adj.* Type d'ovaire, caractéristique des Insectes Thysanoures, Odonates et Orthoptères, dans lequel les ovogonies ne produisent, par division, que d'autres ovogonies.

panse ou **rumen.** *n.* Compartiment le plus développé de l'estomac des Ruminants où est emmagasinée la nourriture non mastiquée.

papille. *n.* Petite protubérance, parfois susceptible de s'ouvrir pour laisser passer des cellules mobiles, ou donnant accès à un flagelle. Une *papille flagellaire* est une petite protubérance cytoplasmique à la base d'un flagelle.

papille génitale. Orifice terminal du *canal de Müller* des femelles de Vertébrés.

papilles buccales. Petites pièces calcaires des Ophiurides, pointues ou rectangulaires, portées par les plaques orales et adorales ; chez certaines espèces, elles peuvent fermer complètement la bouche.

papules ou **branchies.** *n.* Petites évaginations transparentes des étoiles de mer (Échinodermes Stellérides), gonflées de liquide et saillant à la surface du tégument. Elles correspondent à de très minces expansions de la paroi interne, à fonction respiratoire, et passent entre les plaques dorsales et ventrales du disque central du corps.

parabronches. *n.* Bronches tertiaires des Oiseaux se raccordant à d'autres bronches *(mésobronches)*.

parabunodonte. *adj.* Caractérise la molaire dont la couronne porte des tubercules arrondis, chez les Mammifères omnivores (Primates, Suidés).

parade de détournement. Ensemble de manœuvres, chez les Oiseaux, destinées à détourner un ennemi du nid. *Ex.* Rouge-gorge, avocette.

parade sexuelle. Chez certaines espèces animales, comportement des individus précédant leur accouplement. Voir *pariade*.

paraécie. *n.* Espace libre aménagé par certains termites entre leur nid souterrain et la terre environnante.

paraffines. *n.* Substances organiques simples constituées de carbone et d'hydrogène, à molécules en longues chaînes et par conséquent insolubles.

paramères. *n.* Pièces articulées, mobiles, situées au voisinage du phallus des Insectes et facilitant la fixation et l'intromission de ce dernier dans les voies génitales de la femelle.

paramétaboles. *adj.* Qualifie les Homoptères Coccidés dont le développement diffère selon les sexes : les femelles sont *paurométaboles*, alors que les mâles sont *holométaboles*. *N.* Un *paramétabole.*

paranota. *n.* Expansions latérales, thoraciques, non articulées, utilisées par les ancêtres des Insectes Ptérygotes, sans doute pour planer.

paraplasme. *n.* Ensemble des inclusions cytoplasmiques inertes correspondant aux produits de synthèse ou de déchets d'une cellule, tels que les graisses, le glycogène, les sels minéraux, etc.

parapode. *n.* Expansion latérale des *métamères* des Annélides où sont fixées les soies chitineuses.

parapophyse. *n.* Expansion du corps vertébral des Vertébrés Tétrapodes sur laquelle s'articule la côte.

paraprocte. *n.* Pièce sclérifiée latérale de l'ensemble des éléments qui entourent l'anus des Insectes et des Myriapodes Diplopodes.

parasagittal. *adj.* Situé au voisinage de l'axe de symétrie. *Ex.* L'omoplate est en situation parasagittale chez les Mammifères Dermoptères.

parasite. *n.* Qui vit aux dépens d'un autre être vivant en lui empruntant tous les éléments nécessaires à son entretien. On distingue les *parasites facultatifs*, qui peuvent vivre soit en parasite, soit à l'état libre, indifféremment ou, surtout, suivant leur degré de développement, les *parasites obligatoires*, qui ne peuvent vivre qu'en parasites, et les *parasites stricts*, parasites obligatoires qui ne peuvent pas se développer sur milieu artificiel.

parasitisme. *n.* Relation entre deux êtres vivants dont l'un, le « parasite », vit totalement aux dépens de l'autre, considéré comme son « hôte ». *Ex.* La puce du chien, la douve du mouton, le ver solitaire de l'homme.

parasitisme alimentaire. Désigne le *parasitisme* d'un Animal qui se nourrit d'aliments récoltés par d'autres individus. *Ex.* Cas de certaines espèces de mouettes volant les Poissons pêchés par d'autres Oiseaux ; des labbes ou des frégates.

parasitoïde. *n.* Organisme parasite pendant une période de sa vie, comme de nombreux Insectes Hyménoptères et Diptères.

parasphénoïde. *n.* Os dermique impair, médian et postérieur, qui fait partie du plafond buccal des Vertébrés.

parasternum. *n.* Chez les Crocodiliens et les Rhynchocéphales, ensemble d'écailles dermiques qui fusionnent pour donner sept paires de fausses côtes abdominales.

paratergite. *n.* Région latérale et marginale du *tergite*.

paratomie. *n.* Modalité de reproduction asexuée des Annélides, caractérisée par des processus de régénération précédant la scissiparité, ce qui conduit à la formation de chaînes d'individus.

parenchyme. *n.* Tissu de remplissage d'origine mésodermique, chez les Acœlomates, comme les Plathelminthes (Turbellariés, Cestodes et Trématodes).

parenchymella ou **parenchymula.** *n.* 1° Stade larvaire, de forme dérivée de l'amphiblastula, lors du développement embryonnaire des Spongiaires. 2° Stade larvaire, à ectoderme cilié et endoderme plein, postérieur à la *blastula* et antérieur à la larve *planula*, chez les Cnidaires Hydrozoaires.

pariade. *n.* Aspect et comportement que prennent certains Animaux, au moment de la reproduction, pour attirer un représentant de l'autre sexe. *Ex.* Le paon fait la roue pour séduire la paonne.

pariétal. *n.* Os du crâne des Vertébrés Tétrapodes, situé au-dessus de l'orbite.

paronychium. *n.* Pièce médiane plus ou moins développée et située entre deux griffes à l'apex des pattes des Insectes Homoptères Aleurodes.

parotoïdes. *adj.* Qualifient les formations saillantes, correspondant aux glandes granuleuses, productrices de venin, groupées derrière les orbites et sur les côtés du tronc, chez les Bufonidés et Salamandridés (Vertébrés Amphibiens Anoures).

pars intercerebralis. Partie médiane du *protocérébron*, ou cerveau antérieur, des Insectes.

pars stridens. Râpe constituée de petites dents, localisée sur la face interne de l'élytre de certains Insectes Orthoptères. Frottée par le rebord interne

de l'élytre opposé, cette râpe transmet des ébranlements qui provoquent la stridulation (chez le grillon par exemple).

parthénogenèse. *n.* Développement d'un gamète (le plus souvent femelle) sans fécondation. Si ses premières divisions sont normales, l'individu qui en résulte est haploïde ; mais, souvent, des phénomènes de régulation se produisent et il est diploïde, comme s'il y avait eu fécondation. Si le gamète est déjà diploïde (cas d'apoméiose), le nombre diploïde est conservé sans régulation particulière.

patagium. *n.* 1° Lobe de la base de l'aile antérieure des Insectes Lépidoptères. 2° Dispositif d'adaptation au vol acquis par les Mammifères Dermoptères, Chiroptères et certains Rongeurs, constitué par des replis cutanés tendus entre le cou, le membre antérieur, le bord latéral du corps, le membre postérieur et la queue de l'Animal.

patte palmée. Patte de Vertébrés dont les doigts sont réunis par une membrane cutanée interdigitale.

pattes-mâchoires. Voir *maxillipèdes*.

paumure. *n.* Couronne formée par les bois des Cervidés lorsqu'ils comportent au moins cinq andouillers.

paurométabole. *adj.* Qualifie un Insecte *hémimétabole* chez lequel les mues s'arrêtent dès l'acquisition du stade imaginal. *Ex.* Les Isoptères, les Phasmides, les Orthoptères sont paurométaboles. *N.* Un *paurométabole.*

pavillon. *n.* Partie terminale de l'oviducte des Vertébrés qui reçoit l'ovule.

paxille. *n.* Petite saillie des étoiles de mer (Échinodermes Stellérides), terminée par un ou plusieurs piquants mobiles et soulevant le tégument qui cache les pièces squelettiques du disque et des bras.

pébrine. *n.* Maladie des vers à soie provoquée par un Sporozoaire, qui entraîne l'apparition, chez les chenilles, de taches noirâtres ayant l'aspect de grains de poivre.

pectinase. *n.* Enzyme détruisant les composés pectiques.

pédalies. *n.* Renflements de la périphérie de l'ombrelle portant soit un tentacule soit une rhopalie, chez les Cuboméduses et les Coronates (Cnidaires Scyphozoaires).

pédicellaire. *n.* Organite d'attaque et de défense à l'échelle microscopique, situé, entre les piquants, en divers points du corps des Échinodermes. Il comporte une tige calcaire articulée sur un tubercule du *test* et prolongé par un filament musculaire à terminaison en général tridactyle. *Pédicellaire en salière :* pédicellaire dont les deux mors se rabattent dans de petites logettes et qui existent chez les étoiles de mer (Échinodermes Stellérides).

pédicelle. *n.* Deuxième article des antennes des Insectes.

pédipalpes. *n.* Voir *maxillipèdes*.

peigne. *n.* 1° Organe tactile et d'équilibration, situé sur le deuxième segment abdominal des Scorpions et consistant en une pièce transverse porteuse de lamelles. 2° Chez les Insectes, ensemble de soies dressées, serrées les unes contre les autres, servant généralement au nettoyage. 3° Organe richement irrigué, à rôle nourricier, situé près du point d'entrée du nerf optique dans l'humeur vitrée de l'œil des Oiseaux.

peigne brachial. Ensemble constitué de courtes tigelles calcaires formant un arc, qui entoure la base des bras, chez les Ophiurides (Échinodermes).

pélagique. *adj.* 1° Qui vit en mer au sein de l'eau. *Ex.* Méduses, dauphins. 2° Qui concerne le milieu correspondant.

pellicule ectoplasmique. Voir *membrane cytoplasmique*.

pelotes de réjection. Boulettes formées par les résidus indigestes de l'alimentation des Oiseaux et régurgitées par ceux-ci.

pénis. *n.* Organe copulateur du mâle, permettant l'intromission du sperme. Syn. *phallus*.

pennes. *n.* Plumes du vol chez les Oiseaux.

pentacrinoïde. *adj.* Qualifie le dernier stade embryonnaire à symétrie radiaire chez les Crinoïdes (Échinodermes). Cet état est surtout marqué par le développement des bras, du tube anal et par l'achèvement du calice.

pentactula (stade). Dernière phase de la larve nageuse, provenant de la transformation de la *doliolaria* et précédant la formation de l'holothurie (Échinoderme). Celle-ci possède, à ce stade, cinq tentacules libres à l'extrémité antérieure du corps et une paire de *podia* postérieurs.

pentadactyle. *adj.* Se dit du *membre chiridien*, chez les Vertébrés Tétrapodes, qui possède cinq doigts.

péréion. *n.* Région antérieure du tronc d'un Crustacé, typiquement constitué de huit segments et correspondant au thorax.

péréiopodes. *n.* Nom des cinq paires d'appendices thoraciques à fonction locomotrice (et parfois nutritive pour les deux premières paires) des Crustacés. Comprennent une base de deux articles avec un prolongement branchial (pour les quatre premières paires), une longue rame interne de cinq articles terminée par une griffe ou une pince (pour les trois premières paires).

pérennicorne. *adj.* Caractérise un Animal portant des cornes permanentes. *Ex.* Les Bovidés.

péricarde. *n.* Enveloppe membraneuse du cœur.

périécie. *n.* Réseau de galeries mettant en relation l'habitacle d'une termitière avec les sources alimentaires ainsi que celles des matériaux de construction.

périnéal. *adj.* Qui se rapporte au *périnée.*

périnée. *n.* Espace séparant l'orifice anal de l'orifice génito-urinaire, chez les Mammifères Euthériens.

périodomorphose. *n.* Processus de croissance d'un Myriapode Diplopode adulte présentant un retour à un stade précédent par une *mue* régressive. *Ex.* Les mâles des iules subissent, après l'accouplement, une *mue* avec perte de leurs appendices copulateurs.

périostracum. *n.* Couche la plus externe de la coquille des Mollusques, formée d'une cuticule de *conchyoline* où se localisent les pigments de coloration.

péripneustique. *adj.* Caractérise l'appareil respiratoire des Insectes dont les stigmates métathoraciques ne sont plus fonctionnels, comme chez de nombreuses larves terrestres d'Holométaboles.

périprocte. *n.* Large aire apicale du corps des Échinides. Recouverte par une membrane incrustée de plaquettes calcaires où débouche l'anus, souvent excentré, cette zone est entourée par une rosace de plaques génitales et ocellaires.

périsarc. *n.* Enveloppe protectrice des polypes coloniaux sécrétée par l'ectoderme, mince, de nature chitineuse chez les Athécates, plus développée chez les Thécates, et de nature calcaire chez les Hydrocoralliaires.

péristaltisme. *n.* Contractions périphériques de certains conduits (artères, intestin) servant à faire circuler les éléments qui y sont contenus.

péritrème. *n.* Sclérite annulaire entourant l'orifice externe du stigmate chez les Insectes.

péritrophique. *adj.* Qualifie la membrane constituée de chitine et de protéine qui entoure les aliments en voie de digestion dans l'intestin des Insectes.

péroné. *n.* Syn. de *fibula*.

pH. Indice permettant de noter l'acidité ou la basicité d'une solution. Celle-ci est neutre à pH 7, acide en dessous, et basique de pH 7 à pH 14.

phacelle. *n.* Filament gastrique des Stauroméduses.

phagocytose. *n.* Ingestion intracellulaire d'aliments à l'état figuré captés par des expansions cytoplasmiques. *Ex.* Une amibe englobe une Bactérie, la fragmente et la digère.

phagotrophe. *adj.* Qui se nourrit de proies captées par phagocytose.

phallus. *n.* Syn. de *pénis.*

phanères. *n.* Formations cutanées visibles, telles que les écailles d'un Poisson ou d'un Reptile, les plumes des Oiseaux ou les poils, les cornes et les ongles des Mammifères.

phanérique. *adj.* Caractérise la livrée d'un Insecte nettement apparent dans son milieu.

pharyngo-branchial. *n.* Premier des quatre os, disposés dorso-ventralement, qui constituent l'arc branchial des Poissons.

pharynx. *n.* Segment antérieur du tube digestif des Cordés. Originellement percé de fentes pharyngiennes chez les Cordés inférieurs, il assure des fonctions nutritive et respiratoire. Cette dernière a disparu chez la plupart des Vertébrés.

phasmides. *n.* Glandes unicellulaires postérieures des Nématodes parasites.

phénomène de régénération. Faculté de reformer une partie du corps amputée accidentellement ou naturellement (autotomie) très courante chez les Spongiaires, les Cnidaires (Hydrozoaires et Anthozoaires), les Plathelminthes, les Crustacés Décapodes et les Échinodermes Stellérides. Cette capacité se manifeste aussi expérimentalement chez les Annélides Polychètes (lombric) et Hirudinés (sangsue), les Turbellariés (planaire) et les Batraciens (tritons).

phéromones. *n.* Sécrétions glandulaires, libérées par un individu, susceptibles de déclencher une réaction appropriée chez un congénère. Ces substances interviennent dans le comportement sexuel (*ex.* chez les Lépidoptères) et aussi dans les effets de groupe chez des Insectes sociaux comme les Hyménoptères.

pholéobie. *adj.* Qualifie un organisme passant toute sa vie, en commensal, dans le gîte d'un Mammifère ou celui d'un Oiseau.

pholéophile. *adj.* Qualifie les Animaux qui vivent sous les pierres, dans les trous, les terriers et les nids.

pholéoxène. *adj.* Qualifie un organisme pouvant vivre occasionnellement, en commensal, dans le gîte d'un Mammifère ou d'un Oiseau.

pholéuonoïde. *adj.* Qualifie un Insecte troglobie, ressemblant au genre *Pholeuon*, caractérisé par l'allongement du *prothorax,* des antennes et des pattes.

phorésie. *n.* Aptitude de certains Animaux à se faire transporter par d'autres. *Ex.* Le Pseudoscorpion du genre *Chelifer* s'accroche à la patte d'une mouche.

phorocytes. *n.* Très grosses cellules amiboïdes des dolioles (Tuniciers Thaliacés), servant au transport des bourgeons, nés du stolon, de l'extrémité de celui-ci vers le côté gauche de l'appendice caudal dorsal, en passant toujours par le flanc droit du corps de l'oozoïde.

phorozoïdes. *n.* Individus pédonculés, pourvus d'un cloaque et fixés dans la région médiane dorsale de l'appendice caudal de l'individu maternel, lors du cycle de développement des dolioles (Tuniciers Thaliacés). Devenus adultes, ces individus se détachent et mènent une vie planctonique libre en emportant sur leur pédoncule plusieurs géniteurs de gonozoïdes.

photocytes. *n.* Cellules spécialisées dans l'émission de lumière colorée. Sont en général groupées en une masse assez dense chez les organismes luminescents comme certains Céphalopodes et quelques Annélides Polychètes.

photopériodisme. *n.* Alternance de phases lumineuses et de phases obscures. Son importance est énorme sur la physiologie des Animaux ; celle-ci

varie en fonction des durées respectives des deux phases. La photopériode à « jour court » (8 heures de jour, 16 heures de nuit) induit chez les Animaux des ralentissements du métabolisme (hivernation, diapause).

photophores. *n.* Organes capables de produire une lumière continue ou intermittente et d'en varier la couleur. Ils sont situés sur le corps de certains Mollusques Céphalopodes et à la base des appendices de certains Crustacés Eucarides.

photorécepteur. *n.* Organe ou organite sensible à la lumière. *Adj.* Syn. de *photosensible.*

photosensible. *adj.* Sensible à la lumière.

photosynthèse. *n.* Processus par lequel les Végétaux autotrophes pour le carbone fixent celui du gaz carbonique de l'air. L'énergie nécessaire à cette réaction est fournie par la lumière; elle est captée grâce aux chlorophylles.

phototaxie. *n.* Réaction d'orientation poussant un Insecte, par exemple, à se diriger vers la lumière.

phragmocône. *n.* Partie cloisonnée de la coquille calcaire des Mollusques Céphalopodes Nautiloïdes, Belemnoïdea et Sepioïdea, constituant l'ensemble des loges d'habitation successives, moins la dernière, et servant souvent de chambres aérifères à l'Animal.

phthiriase. *n.* Voir *mallophagose trichodectique.*

phyllodes. *n.* Extrémités orales des fuseaux ambulacraires, fortement élargies et dessinant de courts pétales, chez les Spatangoïdes (oursins Irréguliers)

phyllogenèse. *n.* Modifications progressives d'une espèce animale ou végétale au cours de son évolution.

phyllosome. *n.* Stade larvaire issu de l'œuf, remarquable par son corps plat et transparent, aux très longs appendices, et par sa longue vie planctonique avant l'âge adulte, chez les cigales de mer, ou Scyllares, et les langoustes.

phyllozoïde. *n.* Individu aplati en écaille ou en bouclier, à rôle protecteur, situé au sommet d'une colonie élémentaire de Cnidaires Hydrozoaires Siphonophores.

phylogénie. *n.* 1° Cours de l'évolution d'un groupe. 2° Son étude.

phylum ou **embranchement** ou **clade.** *n.* Ensemble d'organismes apparentés et dérivant d'une même souche.

physe. *n.* Disque pédieux, adhésif et arrondi lorsqu'il est enfoncé dans le substrat, situé à la base du corps d'une anémone de mer (Cnidaire Anthozoaire Actiniaire).

physogastre. *adj.* Qualifie un organisme présentant le phénomène de *physogastrie.*

physogastrie. *n.* 1° Dilatation de l'abdomen d'Insectes myrmécophiles et termitophiles, due à une accumulation, chez ces Animaux, de graisses de réserve. 2° Dilatation de la partie postérieure du corps d'Insectes Coléoptères cavernicoles, due au renflement des élytres qui constituent une chambre respiratoire.

phytophile. *adj.* Qui recherche la présence de feuillage.

pièces nodales. Articles calcaires empilés saillant du pédoncule et portant parfois des verticilles de cirres, chez les Échinodermes Crinoïdes articulés fixés.

pilidium. *n.* Larve des Némertiens caractérisée par sa forme de casque conique et sa touffe ciliée aborale.

pinacocytes. *n.* Cellules plates et ectodermiques, recouvrant la surface et la cavité centrale des Éponges.

pince à cire. Organe formé par l'articulation entre le tibia et le tarse des pattes postérieures des abeilles et servant à couper la cire.

pinnule. *n.* Ramification ténue portée par les bras des Crinoïdes (Échinodermes) et les tentacules des Cnidaires Anthozoaires et des Pogonophores.

pinocytose. *n.* Modalité cellulaire d'ingestion d'aliments à l'état de gouttelettes, captés dans le milieu extérieur par des invaginations de la membrane plasmique.

piquant ou **radiole.** *n.* Organite de protection recouvrant, inégalement, le corps des Échinodermes (sauf aux pôles). Simple excroissance conique, dure et rigide, contenue sous la peau qui la produit; cette baguette peut être indépendante, mobile, et, articulée sur un tubercule sphérique des plaques du *test,* servir de béquilles pour le déplacement de l'Animal.

piroplasme. *n.* Agent infectieux, voisin de la forme *leishmania* du trypanosome, inoculé par un Diptère et provoquant une forte fièvre irrégulière et persistante.

pivot. *n.* Apophyse de l'os frontal sur laquelle se fixent les bois des Cervidés.

placenta. *n.* Annexe embryonnaire des Mammifères au niveau de laquelle s'effectuent les échanges entre l'organisme maternel et le fœtus.

placentaire. *adj.* Caractérise un Mammifère possédant un *placenta. N.* Un placentaire.

plagiopatagium. *n.* Partie latérale du *patagium* des Mammifères tendue entre le membre antérieur, le bord latéral du corps et le membre postérieur de l'Animal.

plancton. *n.* Ensemble des êtres vivants animaux (zooplancton) ou végétaux (phytoplancton) vivant en suspension dans les eaux douces ou salées, à faible profondeur. On qualifie de *nanoplancton* la partie du plancton comprenant les organismes de taille microscopique.

planctonique. *adj.* Qui se rapporte au plancton.

planidium. (larve). Type de larve errante que l'on rencontre chez les Insectes Hyménoptères à hypermétamorphose. Elle est recouverte de plaques segmentaires fortement sclérifiées et pourvue de prolongements locomoteurs épineux.

plante hôte. Plante habituellement parasitée par une espèce animale déterminée. *Ex.* Le pied de pomme de terre est la plante hôte du doryphore.

plantigrade. *adj.* Qualifie un Mammifère se déplaçant sur la plante des pieds.

plantigradie. *n.* Position du membre qui repose sur le sol par toute la surface du pied ou de la main, propre à certains Mammifères (*ex.* l'homme et l'ours).

plaque axillaire. Plaque brachiale qui précède chaque bifurcation au niveau des bras chez les Crinoïdes (Échinodermes).

plaque centro-dorsale. Grande pièce calcaire pentagonale épaisse, située au centre du pôle aboral du *calice* des Crinoïdes (Échinodermes Pelmatozoaires). Elle est évidée intérieurement pour loger la masse nerveuse et représente les premiers articles fusionnés du pédoncule. Une plaque voisine existe sur le côté dorsal du disque des Ophiurides.

plaque cornée. Plaque de couleur vive qui prolonge le bec sur le front de certaines poules tropicales.

plaque deltoïde. *Plaque interradiale* qui existe chez les Blastoïdes (Échinodermes Pelmatozoaires).

plaque incubatrice. Zone déplumée abdominale des Oiseaux couveurs permettant à la peau, où la circulation sanguine est très active, d'être directement en contact avec les œufs, de telle sorte qu'elle transmet à ceux-ci la chaleur corporelle.

plaque madréporique. Voir *madréporite.*

plaque nucale. Pièce osseuse antérieure du *bouclier* de la carapace des tortues.

plaques adambulacraires. Petites plaques bordant les côtés des gouttières radiaires des bras des étoiles de mer (Échinodermes Stellérides) et portant des petits piquants mobiles capables de se rabattre sur la gouttière pour la protection des *podia.*

plaques ambulacraires. Plaques pavant, en deux rangées, le plancher de chaque gouttière radiaire des bras des étoiles de mer (Échinodermes Stellérides) et percées pour le passage du canal reliant les *podia* à leur vésicule contractile interne.

plaques anchorales. Type de plaques squelettiques des Échinodermes Holothurides Apodes servant de support aux spicules en forme d'ancre.

plaques basales. Plaques calcaires, au nombre de cinq, formant le couvercle, ou *rosette,* de la *plaque centro-dorsale* chez les Crinoïdes. Ces plaques alternent avec les *plaques radiales* ou avec les *plaques infrabasales* lorsqu'elles existent.

plaques brachiales. Petites pièces discoïdales, articulées entre elles et dont l'empilement, qui existe sur la face externe, constitue le squelette des bras chez les Crinoïdes (Échinodermes).

plaques génitales. Cycle de cinq plaques interradiaires situées autour du *périprocte* des Échinides et portant chacune l'orifice d'une glande génitale. L'une de ces plaques, plus grande que les autres, est la *plaque madréporique,* percée d'une multitude de trous microscopiques.

plaques gulaires. Petits os, à disposition rayonnante et contenus dans un plan, qui bordent les trois pièces osseuses des palettes natatoires pectorales chez les Poissons Brachioptérygiens, comme *Polypterus.*

plaques infrabasales. Plaques calcaires au nombre de cinq, groupées en position radiale autour de la *plaque centro-dorsale* chez les Crinoïdes dicycliques et s'ajoutant aux cycles de *plaques basales* et *radiales* présents chez toutes les formes de Crinoïdes (Échinodermes Pelmatozoaires).

plaques inframarginales. Plaques constituant une rangée ventrale sur les côtés des bras des étoiles de mer (Échinodermes Stellérides) et souvent ornées de granules ou de *piquants.*

plaques interradiaires. Série de plaques de grande taille qui constituent les interradius du *test* des Échinides et qui ne portent que des piquants.

plaques interradiales. Plaques calcaires alternant avec les *plaques radiales* chez les Échinodermes Pelmatozoaires.

plaques lorales. Voir *plaques mandibulaires.*

plaque madréporique. Voir *madréporite.*

plaques mandibulaires ou **plaques lorales** ou **lorum.** Formations antérieures de la tête des Insectes Rhynchotes situées de part et d'autre de leur trompe, ou *rostre.*

plaques maxillaires. Formations de la tête des Insectes Rhynchotes, issues de la modification des maxilles et situées en arrière des *plaques mandibulaires.*

plaques ocellaires. Cycle de cinq petites plaques situées autour du *périprocte* des Échinides et placées à l'extérieur des *plaques génitales,* en alternance avec elles. Chacune présente un trou microscopique pour le passage d'un *podia* terminal modifié.

plaques osseuses ou **ostéodermes.** Pièces ossifiées qui se forment dans le derme de certains Reptiles. Elles peuvent être indépendantes les unes des autres (cas de certains lézards) ou soudées (cas des tortues).

plaques radiaires. Double série de petites plaques constituant les *radius* du *test* des Échinides. Elles sont percées de pores correspondant au passage des racines des *podia* et sont ornées de tubercules portant les *piquants* et les *pédicellaires.*

plaques radiales. Plaques calcaires, au nombre de cinq, accolées au bord externe de la *plaque centro-dorsale* et venant jusqu'au niveau de la *rosette* chez

tous les Crinoïdes (Échinodermes Pelmatozoaires). Elles s'articulent avec les premières pièces des bras.

plaques supramarginales. Plaques constituant une rangée dorsale sur les côtés des bras des étoiles de mer (Échinodermes Stellérides) et souvent ornées de granules ou de *piquants*.

plasmatocyte. *n.* Type d'hémocyte des Invertébrés caractérisé par son grand pouvoir de *phagocytose*.

plasmode. *n.* Syn. de *structure syncytiale*. Voir *syncytiale*.

plasmotomie. *n.* Syn. de *cytocinèse*.

plastron. *n.* Partie ventrale de la carapace des Reptiles Chéloniens (tortues).

plastron interambulacraire ou **sternum.** *n.* Ensemble de plaques reliant le *labrum* ou *périprocte* chez les oursins Irréguliers.

plateau cardinal. Épaississement dorsal du bord de la coquille (sous le crochet de chaque valve) des Mollusques Bivalves, présentant des organes, en saillie (les dents) et en creux (les fossettes), qui réalisent l'articulation des valves.

plateau continental. Plateau, d'une profondeur inférieure à 200 m, situé entre le littoral et le talus continental abrupt qui mène aux fosses abyssales.

platyrhinien. *adj.* Caractérise les singes Anthropoïdes possédant une large cloison nasale avec des narines éloignées l'une de l'autre. *Ex.* Chez les Callithricidés. *N.* Un *platyrhinien.*

pléométropique ou **polygyne.** *adj.* Qualifie une colonie d'Insectes Hyménoptères, par exemple, caractérisée par la présence simultanée de plusieurs femelles fondatrices. *Ex.* Les colonies de polistes.

pléon. *n.* Région postérieure du tronc d'un Crustacé, typiquement constituée de sept segments et correspondant à l'abdomen.

pléopodes. *n.* Les six paires d'appendices abdominaux (ou pattes abdominales, pattes natatoires, fausses pattes) à fonction locomotrice chez les Crustacés. Ces appendices, courts, avec une base et deux rames foliacées (sauf pour les deux antérieurs, modifiés en fonction du sexe), peuvent servir à retenir les œufs chez la femelle.

plérocercoïde. *n.* Troisième stade larvaire des Pseudophyllidiens dérivant du *procercoïde*. Ce stade se développe souvent chez un Poisson.

pleure. *n.* Partie latérale du segment thoracique chez les Insectes, constituée par l'*épimère* et l'*épisterne*.

pleurite. *n.* Plaque cuticulaire latérale du corps d'un Arthropode reliant le *tergite* et le *sternite*.

pleurobranchie. *n.* Série de branchies fixées sur les côtés de chaque segment thoracique des Crustacés Décapodes.

pleurodonte. *adj.* Qualifie des dents implantées sur le bord interne de la mâchoire des Vertébrés.

pleuromitose. *n.* Division cellulaire au cours de laquelle les chromosomes restent associés à la membrane nucléaire et ne se regroupent pas en métaphase (chez certains Protozoaires).

pleuropodes. *n.* Organes glandulaires situés sur le premier segment abdominal de l'embryon de certains Insectes et qui serviraient à digérer les enveloppes de l'œuf.

plèvre. *n.* 1° Région latérale du thorax d'un Trilobite. 2° Membrane enveloppant les poumons chez les Vertébrés supérieurs.

plexus. *n.* Entrelacement de nerfs.

plume de calmar. Voir *gladius*.

plumes. *n.* Productions cutanées, caractéristiques des Oiseaux, constituant un revêtement isolant contre l'eau ainsi que le froid et facilitant le vol. Chacune comporte une base creuse, ou *tuyau*, surmonté d'un axe plein, ou *rachis*, garni de chaque côté d'un ensemble de *barbes* formant un *vexille*. Les barbes sont reliées entre elles par des *barbules* munies de crochets.

plumes de duvet ou **plumules.** *n.* Petites plumes dépourvues de *rachis* et de *barbules* et réduites à quelques *barbes* insérées sur un *tuyau* très court.

pneumatisation. *n.* Phénomène par lequel les os sont creusés de cavités remplies d'air, ce qui diminue leur densité. *Ex.* Os des Oiseaux, os du crâne des éléphants.

pneumatophore. *n.* Vésicule apicale, comprenant parfois plusieurs loges, pleine d'un mélange gazeux (dont l'azote, l'oxygène, l'argon, etc.) et servant d'organe d'équilibration, de flotteur, chez les colonies de Cnidaires Hydrozoaires Siphonophores ou de Stomocordés fossiles, comme les Graptolites.

pneumostome. *n.* Orifice du poumon des Mollusques Gastéropodes Pulmonés.

poche du noir. Voir *sac de l'encre*.

poche du parfum. Voir *glande périnéale*.

poches spermatiques gnathales. Organes de stockage des spermatophores recueillis par la femelle dans la sous-classe des Symphyles (Arthropodes Mandibulates, Myriapodes Progonéates).

podia ou **tubes ambulacraires.** Organes périphériques de l'*appareil aquifère* des Échinodermes. L'extrémité externe de ces minuscules tubes charnus et très souples s'élargit en disque à rôle de ventouse. Ils reçoivent, des *canaux radiaires* et par les *ampoules pédieuses*, un liquide permettant leur extension et leur rétraction (locomotion) ; toutefois, dépourvus de ventouse, ils ont un rôle respiratoire chez les Ophiurides et les Stellérides.

podobranchie. *n.* Série de branchies fixées sur l'article basal des cinq paires d'appendices thoraciques locomoteurs des Crustacés Décapodes.

pœcilotherme ou **poïkilotherme.** *adj.* Qualifie tout organisme dont la température du corps varie avec celle du milieu ambiant. *Ex.* Tous les Invertébrés et certains Vertébrés comme les Poissons, les Amphibiens et les Reptiles.

poil. *n.* Production épidermique, caractéristique des Mammifères. Les poils, dans leur ensemble, constituent la fourrure qui facilite le maintien de la température interne.

poil de bourre. Poil de Mammifères, sans mœlle, fin et court.

poil de jarre. Poil typique des Mammifères, long, raide et gros.

poliomyélite. *n.* Maladie virale entraînant une destruction de la substance grise de la mœlle épinière, ce qui provoque des paralysies plus ou moins étendues suivant l'importance de la zone atteinte.

pollen. *n.* Poussière, en général jaune, émise par les sacs polliniques des étamines des plantes à fleurs.

polyandrie. *n.* Forme de polygamie, existant notamment chez les Oiseaux (voir *polygame*). *Ex.* Chez les phalaropes, les tinamous.

polycyclique. *adj.* Qualifie le développement d'un organisme présentant au moins deux générations sexuées. On trouve ce type de développement chez les Rotifères.

polyembryonie. *n.* Développement de plusieurs embryons à partir d'un œuf unique. Le phénomène se rencontre fréquemment chez des Insectes Hyménoptères et Strepsiptères parasites, ainsi que chez des Mammifères Édentés, comme le tatou.

polygame. *adj.* Qualifie un Animal qui peut s'accoupler avec plusieurs partenaires du sexe opposé. La polygamie peut être le fait du mâle qui recherche plusieurs femelles *(polygamie)* ou celui de la femelle recherchant plusieurs mâles *(polyandrie)*.

polygyne. *adj.* Syn. de *pléométropique*.

polygynie. *n.* Forme de *polygamie* existant chez les Oiseaux par exemple (voir *polygame*). *Ex.* Chez le butor étoilé, certains faisans, etc.

polyholoside, polyoside ou **polysaccharide.** *n.* Substance à haut poids moléculaire formée par la polymérisation de sucres simples, ou oses. *Ex.* Amidon, cellulose, glycogène.

polymorphe. *adj.* **(espèce).** Qui peut se présenter sous des formes très diverses.

polyœstral ou **polyœstre** ou **polyœstrien.** *adj.* Qualifie les femelles des Mammifères présentant plusieurs *œstrus* au cours d'une année.

polype. *n.* Stade fixé (généralement benthique) et asexué des Cnidaires. Parfois solitaire et d'organisation simple (sac à double paroi et orifice unique entouré de tentacules), il peut être très polymorphe, associé en colonie et se spécialise alors dans différentes fonctions (reproduction, nutrition, défense, protection, excrétion, etc.). Rarement nu, il sécrète souvent une enveloppe ectodermique chitineuse ou calcaire (cas du polypier).

polyphage. *adj.* Caractérise un Insecte omnivore, comme la blatte.

polyphyodontie. *n.* Remplacement multiple des dents chez les Reptiles et les Poissons.

polypide. *n.* Ensemble des tissus de l'appareil digestif, des systèmes musculaire et nerveux, qui constitue, avec le *cystide*, un individu (zoïde) d'une colonie de Bryozoaires. Cette région peut s'invaginer en cas de danger ou bien disparaître (formation de « corps bruns ») et se reformer à partir du cystide.

polypiérite. *n.* Nom du squelette sécrété par l'ectoderme du polype chez les Scléractiniaires.

polyploïdie. *n.* Anomalie de la mitose conduisant, chez les cellules filles, à la présence d'un nombre multiple de chromosomes supérieur au nombre diploïde de la cellule mère.

polypode. *adj.* 1° Qualifie la phase du développement embryonnaire des Insectes, caractérisée par une segmentation partielle des appendices céphaliques et thoraciques ainsi que par une métamérisation complète de l'abdomen, porteur d'ébauches d'appendices. 2° Qualifie les larves libres des Insectes Mécoptères, Trichoptères, Lépidoptères et Hyménoptères inférieurs.

polypore. *adj.* Qualifie les formes, chez les Échinides, qui ont plus de trois paires de pores par plaque ambulacraire composée.

polyprotodonte. *adj.* Qualifie certains Marsupiaux dont la denture comporte au moins quatre incisives par demi-mâchoire supérieure et des canines soit à la mâchoire, soit à la mandibule. *N.* Un *polyprotodonte.*

polysaccharide. *n.* Syn. de *polyholoside*.

polytroche. *adj.* Qualifie la larve véligère, en forme de tonnelet orné de trois couronnes ciliées, des Gymnosomes (Gastéropodes Opisthobranches).

polytrophique. *adj.* Type d'ovaire de nombreux Insectes Holométaboles dans lequel les trophocytes restent accolés à chaque ovocyte.

polyvoltine. *adj.* **(espèce).** Qualifie une espèce présentant plusieurs générations par an. *Ex.* Le charançon du blé.

ponte. *n.* 1° Dépôt des œufs dans le nid par la femelle. 2° Ensemble des œufs produits par la femelle.

pore fémoral. Orifice externe des glandes inguinales situées sur la face interne des cuisses de Sauriens (lézards).

pores à rosettes. Orifices minuscules groupés sur des plaques permettant la communication entre les individus d'une colonie de Bryozoaires Ectoproctes.

porrigés. *adj.* Se dit d'organes dressés (palpes labiaux, maxillaires ou antennes).

postmentum. *n.* Voir *labium*.

postorbitaire. *n.* Os du crâne des Vertébrés Tétrapodes situé en arrière de l'orbite.

potamotoque. *adj.* Voir *anadrome.*

poumons. *n.* 1° Organes respiratoires formés de lamelles empilées chez certains Arachnides (Scorpions). 2° Organes respiratoires (généralement vessie gazeuse modifiée) chez les Dipneustes Cératodiformes. 3° Organes respiratoires provenant d'une dilatation du *pharynx*, au niveau desquels s'effectuent les échanges gazeux entre le sang et l'air chez les Amphibiens adultes, les Reptiles, les Oiseaux et les Mammifères.

précoxa. *n.* Article basilaire du coxite existant chez les formes primitives d'Arthropodes.

prédateur. *n.* Qui capture et dévore des Animaux.

préhensile. *adj.* 1° Qualifie la main et parfois le pied des Mammifères Primates, qui peuvent saisir des objets grâce à leur pouce opposable aux autres doigts. 2° Se dit de la queue de certains singes (*ex.* atèle) qui, en s'enroulant, leur permet de s'agripper aux branches.

préhension. *n.* Faculté de saisir un objet grâce aux pouces qui sont opposables aux autres doigts et parfois aux orteils. *Ex.* Les singes.

prémaxillaire. *n.* Os antérieur de la mâchoire supérieure dermique des Vertébrés.

prémentum. *n.* Voir *labium.*

prémolaire. *n.* Dent jugale antérieure de la mâchoire des Mammifères servant à la mastication. Elle est *diphyodonte* (soumise au remplacement).

préopercule. *n.* Os impair sur lequel s'articulent les os dermiques du repli operculaire (opercule, sous-opercule et interopercule) chez les Poissons.

prépubis. *n.* Région antérieure du *pubis* chez certains Vertébrés.

présphénoïde. *n.* Os arrière du plancher crânien des Vertébrés. Chez l'homme, il forme, avec le post-sphénoïde, le sphénoïde unique.

présternum. *n.* Voir *prosternum.*

prétarse. *n.* Segment terminal de la patte d'un Insecte ou d'un Myriapode.

primibrachiale. *adj.* Se dit de la première plaque brachiale des Crinoïdes (Échinodermes), située au-dessus de la plaque radiale correspondante, que sa portion proximale soit libre (comme chez les Inadunates) ou incorporée en calice (comme chez les Articulés).

proboscis. *n.* 1° Organe fouisseur des Entéropneustes (Stomocordés), très musclé, en forme de gland de chêne, enchâssé dans le *collier* et situé en avant de la bouche. Cette partie antérieure du corps contient la *stomocorde.* 2° Trompe dévaginable des Némertiens, Vers pour la plupart marins et carnassiers.

procercoïde. *adj.* Deuxième stade larvaire des Pseudophyllidiens, caractérisé par l'appendice postérieur. Ce stade se développe chez un Crustacé.

processus angulaire. Saillie du bord de la mandibule à laquelle se fixe une partie du muscle *masséter* chez les Mammifères.

processus coronoïde. Point d'attache du muscle temporal sur la mandibule chez les Mammifères.

proclive. *adj.* Caractérise un organe incliné vers l'avant. *Ex.* Les incisives inférieures des Suiformes.

procœles. *adj.* **(vertèbres).** Qualifient les vertèbres dont le corps est concave antérieurement et convexe postérieurement. *Ex.* Chez les reptiles et Amphibiens Anoures.

procoracoïde. *n.* Pièce ventrale de la ceinture pectorale qui s'ossifie chez tous les Vertébrés excepté les Poissons cartilagineux.

proctodéum. *n.* Intestin postérieur des Arthropodes, d'origine ectodermique.

proctodone. *n.* Hormone sécrétée par l'intestin postérieur des Insectes et qui interviendrait dans la levée de *diapause.*

prodissoconque. *n.* Coquille embryonnaire équivalve et équilatérale des Mollusques Bivalves. Sécrétée par la glande coquillière de la larve véligère, elle subsiste souvent sur les sommets de la coquille adulte, de nature calcaire.

progestérone. *n.* Hormone sécrétée par le *corps jaune* des Mammifères et permettant la gestation (nidation de l'œuf).

proglottis. *n.* Segment du corps d'un Cestode (*ex.* solitaire) contenant les organes génitaux.

prognathe. *adj.* Qualifie la disposition antérieure des pièces buccales, chez le ver blanc du hanneton par exemple.

prognathisme. *n.* Disposition antérieure des mâchoires, chez les singes Anthropoïdes par exemple.

prolactine. *n.* ou **L.T.H.** Hormone sécrétée par le lobe antérieur de l'*hypophyse* et provoquant la sécrétion lactée après l'accouchement.

proline. *n.* Acide aminé cyclique caractérisé par son noyau « pyrrol ». Entre dans la constitution de la cuticule des Insectes.

pronation. *n.* Mouvement de rotation de l'avant-bras plaçant le dos de la main par-dessus et le pouce vers l'intérieur.

pronéphron ou **pronéphros.** *n.* Rein primaire antérieur, fonctionnel chez les embryons ou larves des Poissons et des Amphibiens. Cet organe reste rudimentaire et non fonctionnel chez les adultes des Vertébrés inférieurs (Cyclostomes, Poissons Téléostéens) et disparait chez tous les adultes des Vertébrés terrestres.

pronotum. *n.* Face dorsale du *prothorax* des Insectes.

pro-ostracum. *n.* Prolongement dorsal de la paroi externe du *phragmocône* de la coquille des Bélemnites (Mollusques Céphalopodes fossiles). Cette lame très fragile, de nature cornée et chargée d'aragonite, est très rarement conservée intacte.

propatagium. *n.* Partie antérieure du *patagium* des Mammifères, située entre le cou et le membre antérieur.

propneustique. *adj.* Caractérise l'appareil respiratoire des Insectes dont le seul stigmate fonctionnel est celui du *prothorax. Ex.* Chez quelques Diptères.

propode. *n.* Syn. de *propodite.*

propodite ou **propode.** *n.* Article terminal fixe de la pince d'un Crustacé.

propodosome. *n.* Voir *protérosome.*

propolis. *n.* Mélange de résine et d'une gomme provenant des bourgeons de certains arbres et utilisé comme ciment par les abeilles lors de la construction de la ruche.

proptérygium. *n.* Pièce basale et externe de la nageoire pectorale des Poissons cartilagineux qui porte les *ptérygophores.*

prosome. *n.* 1° Région antérieure du corps d'un Chélicérate non segmentée et sur laquelle sont fixés divers appendices, dont les chélicères. 2° Court segment antérieur portant de très longs tentacules, fins et garnis de pinnules, chez les Pogonophores.

prosomite. *n.* Segment antérieur de chaque anneau abdominal double du corps des Myriapodes Diplopodes.

prosternum ou **présternum.** *n.* 1° Face ventrale du *prothorax* des Insectes. 2° Région antérieure du sternum de certains Vertébrés.

prostomium. *n.* Région antérieure du corps d'un Annélide Polychète portant les organes sensoriels : palpes, antennes et yeux.

protéine ou **protide.** *n.* Substance formée de l'union de nombreux acides aminés. Éléments essentiels des êtres vivants, les protéines constituent toutes les enzymes et forment avec des lipides les membranes cellulaires.

protélien. *adj.* Qualifie un organisme parasite à l'état larvaire mais menant une vie libre à l'état adulte.

protéolyse. *n.* Destruction des protéines par les enzymes (protéases) produites par des êtres vivants.

protérandrique ou **protandrique.** *adj.* Qualifie un organisme hermaphrodite chez lequel les gonades mâles arrivent à maturité avant les gonades femelles.

protéroglyphe. *adj.* Qualifie des serpents qui injectent leur venin par l'intermédiaire de crochets venimeux situés à l'avant de la cavité buccale.

protérogynes. *adj.* Qualifie les Animaux hermaphrodites dont les organes femelles mûrissent avant les mâles, ce qui rend toute autofécondation impossible.

protérosome. *n.* Partie antérieure du corps d'un Acarien constituée, en avant, du *gnathosome* portant les pièces buccales, et, en arrière, du *propodosome* portant les deux premières paires de pattes.

prothorax. *n.* Premier segment du thorax des Insectes ; porte la première paire de pattes.

protistologie. *n.* Science qui étudie les organismes unicellulaires animaux ou végétaux.

protocérébron. *n.* Cerveau antérieur des Arthropodes comprenant des centres d'association et des centres optiques.

protocerque. *adj.* Qualifie la nageoire caudale, en forme de pointe, des embryons de Poissons.

protocœlome. *n.* Cavité cœlomique rudimentaire du premier segment, ou *protosome*, du corps des Phoronidiens.

protoconque. *n.* Coquille initiale calcaire sécrétée par les Mollusques Céphalopodes avant la formation de la première cloison et qui deviendra la loge initiale, après le dépôt de cette première cloison.

protonéphridie. *n.* Organe excréteur d'origine ectodermique, constitué par une cellule munie d'une flamme vibratile, existant chez certains Vers comme les Turbellariés.

protonymphon. *n.* Larve des Pycnogonides pourvue de trois paires d'appendices correspondant aux *chélicères*, aux *palpes* et aux *ovigères.* Cette forme peut, jusqu'à la fin de la métamorphose, rester fixée sur les ovigères du mâle ou vivre en parasite sur des Hydraires.

protopode. *adj.* 1° Qualifie la phase du développement embryonnaire des Insectes caractérisée par une métamérisation incomplète du corps ainsi que par un abdomen encore incomplètement segmenté et dépourvu des appendices correspondants. 2° Qualifie la larve indifférenciée des Insectes, Hyménoptères et Diptères parasites.

protopodite. *n.* Premier élément basal, composé de deux articles (coxa et basis), sur lequel s'articulent les rames externe et interne d'un appendice biramé type, caractéristique des Crustacés.

protosome. *n.* 1° Région antérieure, réduite à une languette préorale, du corps des Phoronidiens. 2° Lobe préoral, en forme de disque, surmonté d'un faisceau de douze bras tentaculifères chez *Cephalodiscus* (Stomocordé Ptérobranche).

protostoma. *n.* Chambre antérieure de la capsule buccale des Némathelminthes.

protostomien. *adj.* **(organisme).** Chez lequel la bouche provient de l'évolution du blastopore de la *gastrula. Ex.* Annélides.

proventricule. *n.* 1° Syn. de *gésier ;* chez les Insectes, en particulier les Coléoptères et les Orthoptères, portion de l'intestin antérieur, située en arrière

du jabot et revêtue d'une cuticule épaisse formant des dents qui triturent les aliments. 2° Syn., chez les Oiseaux, d'*estomac glandulaire*.

psaltérium. *n.* Syn. de *feuillet*.

psammophile. *adj.* Qui affectionne les milieux sableux.

psammophore. *n.* Sorte de râteau que possèdent les ouvriers de certaines fourmis, servant à transporter le sable et constitué de soies raides disposées en arrière de la bouche, sur la face ventrale de la tête.

pseudergates. *n.* Caste de faux ouvriers chez les termites inférieurs (Calotermitidés), dérivant soit de larves jeunes, soit de larves âgées.

pseudocœlocyte. *n.* Cellules géantes contenues dans la cavité du corps, ou pseudocœle, des Nématodes.

pseudocône. *adj.* Qualifie le type d'*ommatidie* possédant un cristallin gélatineux.

pseudo-oculi. *n.* 1° Chez les Myriapodes Pauropodes, large espace clair, de fonction inconnue, situé derrière chaque antenne. 2° Paire d'organes portés par la tête des Insectes Protoures, qui pourraient être des rudiments d'antennes, et seraient des récepteurs sensibles à l'humidité.

pseudo-trachée. *n.* 1° Chez les Isopodes terrestres (Crustacés Péracarides), invagination de la surface externe des exopodites des appendices abdominaux qui constitue une chambre ramifiée en tubes, à rôle respiratoire. 2° Chez les mouches (Insectes Diptères), nombreux petits canaux dont les orifices criblent les deux lobes spongieux de l'extrémité de la trompe de l'appareil buccal réalisé et qui permettent d'aspirer les liquides.

ptérostigma. *n.* Partie sclérifiée, parfois colorée, du bord costal de l'aile des Insectes. Est souvent utilisé comme critère de classification.

ptérothèque. *n.* Fourreau alaire des larves d'Insectes.

ptérothorax ou **synthorax.** *n.* Segment résultant de l'union des *méso-* et *métathorax* en une seule masse, de grand volume (du fait de puissants muscles alaires et d'importants sacs aériens), chez les Odonates, ou libellules.

ptérygo-carré. *n.* Syn. de *palato-carré*.

ptérygophore. *n.* Pièce de la nageoire des Poissons cartilagineux fixée sur les *proptérygium, mésoptérygium* et *métaptérygium* et qui porte les *cératotriches*.

ptérygopodes ou **myxoptérygium.** *n.* Organes copulateurs des Poissons cartilagineux, différenciés sur le bord postéro-interne des nageoires pelviennes. Ils sont constitués par un rayon de la nageoire creusé d'une gouttière permettant l'écoulement du sperme.

ptérylies. *n.* Zones du corps des Oiseaux où s'insèrent les plumes.

ptilinum. *n.* Organe céphalique interne des Insectes Diptères supérieurs, situé au-dessus de l'insertion des antennes. Sous la pression sanguine, il fait saillie à l'extérieur et permet à l'Insecte de fendre le *puparium* au moment de l'émergence.

puberté. *n.* Passage, chez les Mammifères, du stade juvénile au stade adulte, correspondant au fonctionnement des gonades et au développement des caractères sexuels secondaires, parmi lesquels la pilosité est le plus remarquable.

pubis. *n.* Os antérieur de la ceinture pelvienne des Vertébrés Tétrapodes.

puerulus (larve). Dernier stade larvaire du développement des langoustes (Crustacés Décapodes Palinoures).

pulpe dentaire. Partie vivante interne d'une dent contenant les vaisseaux sanguins et le nerf.

pulvillus. *n.* Coussinet charnu situé entre les griffes des pattes de certains Arachnides (Amblypyges) ou des Insectes, et permettant à ces Animaux de se déplacer sur les surfaces lisses et verticales.

puparium. *n.* Enveloppe protégeant la pupe des Diptères Cyclorrhaphes et correspondant à la dernière peau larvaire, qui est durcie.

pupille. *n.* Ouverture, de forme variée, par laquelle la lumière pénètre dans l'œil des Vertébrés. Son diamètre varie, par voie réflexe, selon l'éclairement.

pygidium. *n.* 1° Région postérieure du corps d'un Polychète dépourvue de sacs cœlomiques et de parapodes. 2° Queue d'un Arthropode.

pygophore. *n.* Plaque génitale ventrale du neuvième sternite qui protège le *phallus* des mâles d'Hémiptères.

pygopodes. *n.* 1° Ébauches d'appendices, situés sur le douzième segment abdominal, chez les Insectes Protoures. 2° Appendices de fixation situés sur le dixième segment abdominal de certaines larves des Insectes Mécoptères.

pygostyle. *n.* Syn. d'*urostyle*.

pyramides. *n.* Pièces calcaires, en position interradiale, dont l'assemblage constitue la *lanterne d'Aristote* des oursins. Chacune de ces pièces est formée de deux mâchoires accolées par leurs faces latérales de façon à constituer une pyramide creuse, ajourée, à section triangulaire et à pointe tronquée vers le bas, servant de guide à une dent à croissance continue.

Q-R

quadrumane. *adj.* Caractérise un Animal dont les deux pouces sont opposables aux autres doigts de la main et les deux orteils à ceux des pieds. *Ex.* Certains Primates.

quadrupède. *adj.* Qualifie un Animal se déplaçant sur ses quatre pattes. *Ex.* Chat, chien.

quiescence. *n.* Arrêt temporaire du développement d'un organisme sous l'effet de conditions externes défavorables.

rabouillère. *n.* Terrier spécial creusé par les femelles gravides de lapins pour y mettre bas.

rachis. *n.* 1° Partie supérieure d'une colonie de Pennatulaires (Cnidaires Anthozoaires Octocoralliaires) portée par un pédoncule et où naissent les individus dimorphes. 2° Région médiane du tronc des Trilobites. 3° Élément axial constitutif de la plume des Oiseaux.

racine. *n.* 1° Base des nerfs céphaliques ou rachidiens des Cordés. 2° Chez les Cordés, partie basale des vaisseaux cardiaques efférents. 3° Chez les Vertébrés, partie de la dent implantée, normalement, dans l'os alvéolaire.

radiation adaptative. Phénomène évolutif par lequel un groupe animal ou végétal connaît une grande prolifération, par suite de modifications climatiques ou de disparitions de population, qui élargissent ses possibilités d'adaptation au milieu.

radioles. *n.* Syn. de *piquants*.

radius. *n.* 1° Syn. d'*ambulacre*. 2° Os constitutif du *zeugopode* du membre chiridien.

radula. *n.* Pièce masticatrice des Mollusques, en forme de ruban charnu, plus ou moins longue, garnie de rangées de denticules cornées, dont la forme, le nombre et la disposition sont des caractères spécifiques de chaque espèce. Cette languette fonctionne à la façon d'une râpe.

rami. *n.* Pièces paires constitutives des mâchoires, ou *trophi*, des Rotifères.

raphé. *n.* Ligne médio-dorsale du *pharynx*, ou branchie, des Urocordés, constituée d'une lame ou de languettes fines rassemblant les particules alimentaires en un cordon.

raquette à neige. Excroissances cornées latérales, disposées sur les doigts et diminuant l'enfoncement du corps dans la neige chez les Oiseaux Tétraonidés.

raquettes. *n.* Syn. de *malléoles*.

rayon. *n.* 1° Baguette cartilagineuse ou osseuse qui soutient la branchie des Poissons. 2° Baguette dermique cartilagineuse ou osseuse qui soutient la partie périphérique non musculaire de la nageoire des Poissons.

receptaculum seminis. Syn. de *spermathèque* chez les femelles des crabes (Crustacés Brachyoures).

rectrices. *n.* Pennes de la queue des Oiseaux.

rédie. *n.* Troisième stade larvaire, de la douve par exemple, provenant du *sporocyste* et caractérisé par la présence de la bouche, d'un tube digestif, de ganglions nerveux et de *protonéphridies.*

régurgitation. *n.* Action par laquelle un Animal rejette par la bouche les aliments qu'il a avalés. *Ex.* De nombreux Oiseaux régurgitent pour nourrir leurs petits.

rein. *n.* Organe d'épuration du sang. Constitué, chez les Invertébrés, de simples canalicules qui filtrent celui-ci et évacuent les déchets à l'extérieur du corps ; il est formé par un amas de *glomérules de Malpighi* filtrants chez les Vertébrés.

rein d'accumulation. Vésicule creuse, excrétrice, située sur la droite de la branchie, le long du cœur chez les ascidies Stolidobranches, et due au groupement de cellules spécialisées précipitant et stockant des produits d'excrétion sous forme d'urates.

rélictuelle. *adj.* Qualifie une forme qui, par suite de l'évolution paléogéographique, s'est trouvée isolée dans une zone très restreinte de son ancienne aire d'extension. *Ex.* L'okapi est ainsi resté confiné dans le bassin de l'Ituri, à l'est du Zaïre.

rémiges. *n.* Grandes *pennes* de l'aile fixées sur la main et l'avant-bras. Se recouvrant les unes les autres, elles forment un plan presque continu.

rémigium. *n.* Région antérieure de l'aile d'un Insecte, jouant un rôle propulseur pendant le vol.

réseau. *n.* Syn. de *bonnet*.

résiline. *n.* Protéine entrant dans la constitution de l'endocuticule des Insectes.

rete mirabile ou **réseau admirable.** Réseau de capillaires sanguins intercalés sur le trajet des artères chez les Mammifères Cétacés et chez les Mammifères Édentés. Il pourrait s'agir d'une réserve de sang à caractère embryonnaire.

réticulé. *adj.* Qui présente une ornementation en réseau ou en filet, ou qui est formé d'éléments disposés en réseau.

réticulum. *n.* Syn. de *bonnet*.

rétinacle ou **ténaculum.** *n.* Appendice des Aptérygotes situé sur le troisième sternite abdominal et permettant de maintenir en place la *furca* portée par le sternite suivant.

rétine. *n.* Membrane interne photosensible de l'œil des Vertébrés.

rétinule. *n.* Cellule rétinulaire, ou cellule rétinienne.

rhabdite. *n.* Petits bâtonnets de l'épiderme des Turbellariés constitués de substances protéiques sulfurées et combinées à du calcium.

rhabdome. *n.* Ensemble des *rhabdomères* de cellules contiguës.

rhabdomère. *n.* Bâtonnet sécrété sur leur face interne par les cellules rétiniennes.

rhabdosome. *n.* Colonie élémentaire de Graptolithes (Stomocordés fossiles) constituée de loges abritant des individus tous semblables et supportées par un axe soit simple et linéaire (rectiligne ou courbe), soit ramifié et enroulé en spirale.

rhamphothèque. *n.* Enveloppe cornée, de couleur variable, entourant le bec des Oiseaux.

rhéophile. *adj.* Qualifie un Animal aquatique adapté aux eaux rapides grâce à des dispositifs variés (ventouses, crochets, etc.). *Ex.* Larves d'Insectes Diptères Blépharocérides.

rhinarium. *n.* Zone glabre, très riche en glandes muqueuses, entourant les narines externes de nombreux Mammifères (*ex.* chat, lapin).

rhinophore. *n.* Tentacule sensoriel, très sensible (surtout tactile), porté antérieurement par la tête des Mollusques Gastéropodes Pulmonés (comme l'escargot) et Opisthobranches (comme l'aplysie).

rhizoïde. *n.* Fibre radiculaire développée à la base d'une colonie de Bryozoaires et autorisant sa fixation sur un substrat meuble.

rhombogène. *n.* Deuxième stade larvaire des Dicyémides résultant de la transformation des *nématogènes.*

rhopalie. *n.* Organe sensoriel, souvent très complexe, porté par le bord ombrellaire des Scyphoméduses.

rhynchocœle. *n.* Cavité renfermant la trompe des Némertiens.

rhynchodéum. *n.* Vestibule de la trompe des Némertiens.

rickettsiose. *n.* Maladie due à une rickettsia (micro-organisme unicellulaire) provoquant, par exemple, le typhus exanthémathique chez l'homme, et dont l'agent vecteur est un pou.

ripicole. *adj.* Qualifie les Animaux qui vivent sur le bord des eaux courantes (*ex.* de nombreuses espèces d'Insectes Coléoptères, notamment *Bembidium*).

roockerie. *n.* Territoire où se regroupent les mâles des Pinnipèdes au moment de la reproduction.

rosette. *n.* Couvercle constitué par l'union des cinq plaques basales et qui surmonte la cavité pentagonale de la *plaque centro-dorsale* chez les Crinoïdes.

rostre. *n.* 1° Couronne de crochets chitineux (ou rostellum) situés au sommet du scolex de nombreux ténia (Plathelminthes Cestodes endoparasites). 2° Partie postérieure de la coquille calcaire des Bélemnites (Mollusques Céphalopodes fossiles) évoquant la forme d'un cigare avec, à sa partie supérieure, un alvéole conique permettant l'enchâssement du *phragmocône.* 3° Éperon médian, le plus souvent immobile, prolongeant antérieurement la carapace dorsale du céphalothorax des Crustacés, surtout Malacostracés; permet à ces Animaux de fouir. 4° Pièce pointue, ou stylet, de l'appareil buccal piqueur-suceur réalisé chez les Insectes Rhynchotes (punaise, cigale, puceron, pou). 5° Extrémité antérieure, en pointe émoussée, du corps de l'amphioxus (Céphalocordés). 6° Région antérieure, cartilagineuse, du *chondrocrâne* des Poissons Sélaciens.

rostré. *adj.* Qualifie le type de *pédicellaires* des Échinides Irréguliers terminés par des *mors* étroits, recourbés et contigus à leur extrémité supérieure.

rotule. *n.* Petite pièce calcaire, plate et triangulaire, radiaire et placée horizontalement sous chaque *compas* de la *lanterne d'Aristote* des oursins. Elle s'articule avec les épiphyses basales de deux mâchoires, ou pyramides, voisines, leur fournissant un point d'appui dans leur mouvement.

rumen. *n.* Syn. de *panse*.

ruptor ovi. Voir *ovirupteur*.

rythme nycthéméral. Alternance d'une période lumineuse et d'une période obscure s'étendant sur vingt-quatre heures.

S

sabot. *n.* Production épidermique cornée protectrice de l'extrémité des doigts des Mammifères Ongulés. *Ex.* Cheval, vache.

sabulicole. *adj.* Qualifie un Animal qui vit dans le sable.

sac anal ou glande supra-anale. Invagination tégumentaire de la plupart des Mammifères Fissipèdes, tapissée de glandes tubuleuses sébacées ou sudoripares et revêtues par une tunique musculaire à contrôle volontaire. Ces glandes, dont la sécrétion a une odeur désagréable, servent au marquage du territoire.

sac branchial. Pharynx perforé des Tuniciers constituant la première partie, la plus importante, du tube digestif. Joue un double rôle de respiration et de filtration des particules alimentaires.

sac du dard. Poche à paroi musculeuse dont le fond sécrète un stylet calcaire, dur et acéré, appartenant à l'appareil génital hermaphrodite des Mollusques Gastéropodes Pulmonés. Le dard, piquant la paroi de l'autre partenaire, l'excite au début de l'accouplement.

sac de l'encre ou **poche du noir.** Organe propre aux Mollusques Céphalopodes où s'élabore une substance noirâtre *(sépia)*, contenant des grains de mélanine à grand pouvoir colorant, et expulsée au niveau de l'anus sous la forme d'un nuage opaque lorsque l'Animal, inquiété, veut fuir rapidement.

sac gulaire ou **sac vocal.** Diverticule du *larynx,* faisant office de caisse de résonance et caractéristique du mâle de certains Amphibiens Anoures tel le crapaud.

sac laryngé ou **laryngien.** Dilatation du *larynx* servant de modulateur aux sons émis par certaines espèces de Vertébrés. *Ex.* Chauve-souris.

sac olfactif. Organe récepteur sensoriel des Cordés Agnathes, des Poissons et des Amphibiens, constitué par une invagination ouverte au niveau des narines externes. Il est relié au télencéphale du cerveau par le « nerf » olfactif.

sac perlier. Invagination de l'épithélium palléal de certains Mollusques Bivalves (moules, huîtres, *Unio, Pecten*), provoquée par l'intrusion d'un corps étranger (grain de sable, parasite) entre la coquille et le manteau, lequel réagit en sécrétant des couches concentriques de nacre, de calcite, de conchyoline autour de ce « noyau » de la future perle.

sac vitellin. Enveloppe qui entoure le vitellus des œufs *télolécithes* lors de leur développement. Sa présence caractérise la plupart des Poissons, les Sauropsidés, et les Mammifères Monotrèmes.

sac vocal. Syn. de *sac gulaire.*

saccule cœlomique. Petite dilatation terminale du canal sinueux composant les glandes antennaires ou maxillaires, organes excréteurs urinaires des Crustacés.

saccules. *n.* 1° Petites vésicules incolores bien enfoncées dans le tégument, de chaque côté du sillon nourricier des bras des Crinoïdes (Échinodermes). Elles sont pleines de sphérules réfringentes formées de cellules épithéliales groupées et présentent une affinité très grande pour les colorants; leur fonction est mal connue (elles ont peut-être un rôle excréteur, ou de réserve pour des protides). 2° Partie dorsale du labyrinthe de l'oreille interne des Vertébrés.

sacs aériens. Diverticules extrapulmonaires caractéristiques des Oiseaux et reliés, par exemple, à certains os creux remplis d'air.

salivarium. *n.* Poche des Insectes située à la base de l'hypopharynx et dans laquelle s'ouvrent les glandes salivaires.

saprozoïque. *adj.* Caractérise un organisme se nourrissant de matières organiques animales en décomposition.

sarcolemme. *n.* Enveloppe comprenant une membrane basale externe et une membrane plasmatique interne, caractéristique de la *fibre musculaire.*

sarcomère. *n.* Unité fonctionnelle de la *myofibrille* comprenant un disque sombre et deux demi-disques clairs.

sarcoplasme. *n.* Cytoplasme non différencié et présent entre les *myofibrilles* de la fibre musculaire.

sarcoseptes ou **mésentères.** *n.* Cloisons membraneuses des Cnidaires Anthozoaires, verticales et radiales, divisant la cavité polypaire.

savane. *n.* Formation végétale tropicale comportant de hautes herbes (80 cm au moins) et, parmi elles, des Végétaux plus bas et des arbres disséminés, isolés ou en bosquets.

scape. *n.* Premier article des antennes de type annelé chez les Insectes Thysanoures et Ptérygotes.

scaphognathite. *n.* Prolongement très marqué d'une des deux rames de la paire de maxilles (troisième paire d'appendices céphaliques buccaux des Crustacés); forme une lame arquée dont les mouvements assurent la circulation de l'eau autour des branchies.

scaphoïde. *n.* ou **os radial.** Os proximal interne du carpe, poignet des Mammifères.

scapula ou **omoplate.** *n.* Pièce dorsale de la ceinture pectorale qui s'ossifie chez les Vertébrés, excepté les Poissons cartilagineux.

scarabéiforme. *adj.* **(larve).** Qualifie la larve, pourvue de pattes faibles et d'un abdomen mou, des Insectes Coléoptères et Hyménoptères.

schizodonte. *adj.* **(charnière).** Caractérise les coquilles de Mollusques Bivalves ne comportant qu'un nombre réduit de dents cardinales, souvent lamellaires et striées, localisées sous le crochet, comme chez les Trigonidés et les Unionidés.

schizogonie. *n.* Reproduction asexuée par division multiple du corps d'un Protozoaire conduisant à des éléments uninucléés ou schizozoïtes. *Ex.* La schizogonie se rencontre chez *Eimeria perforans*, provoquant la coccidiose du lapin, ainsi que chez *Plasmodium*, agent du paludisme.

scissure. *n.* Sillon affectant la surface de certains organes comme les poumons ou le cerveau. *Ex.* La scissure interhémisphérique divise le cerveau en deux hémisphères.

sclérite. *n.* Pièce rigide renforçant le tégument d'un Arthropode. *Ex.* Tergite, sternite, pleurite.

sclérocœle. *n.* Cavité cœlomique entourant le tube nerveux de l'amphioxus (Céphalocordés).

sclérocyte. *n.* Cellule ectodermique mobile sécrétant les spicules chez les Spongiaires et les Cnidaires Anthozoaires Octocoralliaires.

sclérotine. *n.* Protéine qui, associée à des phénols et à des quinones, assure le durcissement de la cuticule des Insectes.

sclérotinisation. *n.* Durcissement de la cuticule des Insectes dû à la présence de *sclérotine.*

sclérotique. *n.* Dans l'œil des Vertébrés, tunique conjonctive protectrice, fibreuse et rigide, sur laquelle s'insèrent les muscles oculaires.

scolopal. *adj.* Qualifie le manchon cuticulaire qui entoure l'extrémité distale de la cellule sensorielle d'une *sensille* chez un Insecte.

scolopidie. *n.* Voir *organes chordotonaux.*

scrotum. *n.* ou **bourses.** Sacs cutanés externes des mâles de nombreux Mammifères (*ex.* chien, cheval, homme, etc.) contenant les testicules.

scuta. *n.* Désigne les deux plaques calcaires inférieures ventrales (les plus proches du pédoncule de fixation) renforçant les valves de la carapace chitineuse des Lépadomorphes (Crustacés Cirripèdes).

scutellum. *n.* Partie dorsale et postérieure du mésothorax des Insectes Rhynchotes.

scyphistome ou **scyphopolype.** *n.* Chez les Cnidaires Scyphozoaires, véritable polype, de 1 mm à 1 cm au plus, issu de la transformation de la larve planula, qui se fixe. Donnera ensuite le *strobile.*

scyphopolype. *n.* Voir *scyphistome.*

sébum. *n.* Sécrétion grasse des *glandes sébacées.*

sécodonte. *adj.* Caractérise la molaire des Mammifères Carnivores dont la couronne porte des tubercules aigus, à crêtes tranchantes.

secondibrachiale. *adj.* Caractérise la plaque brachiale située à la base de la première ramification d'un bras chez les Crinoïdes (Échinodermes) et supportée par une plaque axillaire.

sélection. *n.* Choix d'individus présentant des caractères dont on désire la conservation dans une lignée. Parmi les individus choisis, croisés entre eux, certains ne transmettront pas ces caractères à tous leurs descendants, d'autres par contre, qu'on finira par isoler, le feront et produiront une lignée pure.

sélection naturelle. Théorie selon laquelle, au cours de l'évolution, les conditions de milieu et de compétition avec les autres êtres agissent comme un sélectionneur, et ne laissent survivre que les individus présentant, grâce à des mutations survenues par hasard, tel ou tel avantage. Certains affirment que toutes les nouveautés apparues au cours de l'évolution seraient nées ainsi, c'est-à-dire que tous les caractères seraient ou auraient été, à un moment donné, adaptatifs. Cette hypothèse néo-darwinienne ne semble pas entièrement acceptable.

sélénodonte. *adj.* Caractérise la molaire dont la couronne large et plate est ornée de crêtes en formes de croissant. *Ex.* Chez les Ruminants.

selle. *n.* Appendice nasal en forme de fer à cheval, présent chez les Mammifères Chiroptères de la famille des Rhinolophidés.

sénestre. *adj.* Qualifie l'enroulement en spirale d'une coquille de Mollusques Gastéropodes quand il se fait, dans le sens antihoraire, à partir du sommet (apex) jusqu'à l'ouverture dirigée alors vers le bas, à gauche (c'est un cas rare). *Ex.* Chez *Physa* (Gastéropode Pulmoné d'eau douce).

sensille. *n.* Récepteur sensoriel des Insectes.

sensoria. *n.* Organites sensoriels situés sur les antennes des pucerons.

sépion ou **os de seiche.** Coquille dorsale et interne des seiches (Céphalopodes Décapodes), de nature calcaire, en forme de lame épaisse, allongée, à bords amincis, cornés, convexe à sa partie supérieure, présentant de très nombreuses cloisons friables, superposées (ou *phragmocône*) à sa face ventrale concave, et une pointe postérieure, ou *rostre,* fragile.

septa. *n.* Cloisons primaires épaisses séparant les fentes branchiales chez l'amphioxus (Céphalocordés).

septentrional. *adj.* Qui est situé au nord.

séreuse. *n.* 1° Enveloppe externe d'origine ecto-mésodermique, protégeant l'embryon des Insectes. 2° Fine membrane tapissant certains organes et cavités du corps.

séricigène. *adj.* Qualifie les glandes sécrétrices de la soie chez l'Araignée.

serratulé. *adj.* Qui ressemble à une scie ou à un peigne.

sésamoïde. *adj.* Caractérise certains os de Mammifères qui se développent dans les tendons. *Ex.* La rotule qui se développe dans le tendon du muscle quadriceps crural.

sex-ratio. Rapport ou proportion relative des sexes dans une population donnée.

sexuales. *n.* Femelles parthénogénétiques sexuées issues des *sexupares* des pucerons et dont certaines donneront des mâles *(andropara)* et d'autres des femelles *(gynopara)*.

sexupares ou **sexupara.** *n.* Femelles parthénogénétiques issues des *fundatrigeniae* chez les pucerons.

sigmoïde. *adj.* Qualifie la courbure typique des cornes des antilopes par exemple.

simiesque. *adj.* Qui se rapporte à un singe.

sinus galactophore. Réceptacle de la mamelle des Mammifères qui collecte le lait provenant des différents *acini* avant son écoulement par l'extrémité du mamelon.

sinus génito-urinaire. Chez les Mammifères Monotrèmes, région recevant les canaux urinaires et génitaux et où débouche ventralement la vessie. Chez le mâle, il s'ouvre dans le cloaque; chez la femelle, il joue le rôle de vagin.

sinus veineux. Large vaisseau contractile, courbé en U, et situé au milieu de la face ventrale du corps de l'amphioxus (Céphalocordés). Il propulse dans les branchies le sang reçu par les *canaux de Cuvier* et les veines intestinale et hépatique.

siphon abdominal. Tube terminal de l'abdomen de certains Hémiptères aquatiques adultes. Il permet à l'Insecte de respirer en conduisant l'air au niveau des stigmates métathoraciques et de la première paire de stigmates abdominaux.

siphon buccal. Orifice inhalant antérieur permettant la pénétration de l'eau dans le *sac branchial* des Tuniciers ou Urocordés.

siphon cloacal. Ouverture extérieure dorsale rejetant l'eau des *cavités cloacales* chez les Urocordés (ou Tuniciers).

siphonoglyphe. *n.* Gouttière pharyngienne, ciliée, longitudinale, laissant circuler l'eau dans la cavité générale lors de la contraction d'un individu chez les Cnidaires Anthozoaires. Elle peut être unique et ventrale (chez les Octacoralliaires) ou double (chez les Hexacoralliaires).

siphonozoïde. *n.* Individu de petite taille jouant un rôle dans la circulation de l'eau dans une colonie d'Anthozoaires Octocoralliaires.

siphonula. (larve). Désigne l'évolution du stade planula engendrant une colonie de Cnidaires Siphonophores et qui présente à son sommet un nodule creux, ébauche du *pneumatophore*, pendant que l'autre extrémité s'allonge et donne un *gastrozoïde* avec filament pêcheur.

sitophore. *n.* Sillon creusé dans l'hypopharynx des Insectes Trichoptères.

skototaxie. *n.* Réaction d'orientation poussant un Insecte, par exemple, à rechercher l'ombre.

sociotomie. *n.* Mode de fondation de nouvelles sociétés de termites : une partie de la colonie comprenant toutes les castes quitte la termitière pour en créer une autre plus loin.

soldats blancs. Caste d'individus appartenant à une colonie de termites, identiques à l'imago mais présentant un comportement larvaire. Ces individus, issus soit de larves du deuxième stade de développement, soit d'ouvriers, donneront, en muant, des soldats.

soldats de termite. Caste d'individus stériles, aveugles, à tête hypertrophiée, appartenant à une colonie de termites. Ces individus possèdent de grandes mandibules coupantes ou appartiennent au type *nasuti* et défendent la termitière contre toute incursion ennemie.

solénia. *n.* Canaux endodermiques permettant la communication des cavités gastrales des divers individus d'une colonie de Cnidaires Anthozoaires Octocoralliaires.

solénoglyphe. *adj.* Qualifie un serpent dont les crochets venimeux, situés dans la région antérieure de la cavité buccale, sont percés d'un canal d'injection.

solitariens ou **solitaria** ou **solitaires.** *adj.* Phases de criquets migrateurs vivant en solitaires.

somatolyse. *n.* Atténuation des limites corporelles d'un Animal par l'existence de taches colorées appelées *colorations disruptives*.

somatopleure. *n.* Paroi externe du mésentère chez les Cœlomates.

somite. *n.* Segment primitif apparaissant latéralement sur la chorde dorsale, chez l'embryon, et donnant, principalement, les muscles. Syn. de *métamère*.

sonnette. *n.* Appareil terminal de la région caudale de certains serpents, constitué d'étuis cornés emboîtés les uns dans les autres et qui vibrent au rythme des mouvements de l'Animal.

soricoïde. *adj.* Caractérise un Animal ressemblant à une musaraigne (Soricidés).

sorite. *n.* Voir *gemmule*.

spadix. *n.* Groupe de quatre tentacules modifiés assurant le transfert du sperme chez le nautile (Mollusque Céphalopode).

spéciation. *n.* Processus par lequel naissent de nouvelles espèces au cours de l'évolution. Les mutations, telles qu'elles sont connues actuellement, y jouent probablement un grand rôle.

spermaceti. *n.* Sécrétion graisseuse, dans le crâne du cachalot, qui constitue l'organe du blanc.

spermalèges. *n.* Poches, ou tubes, d'origine tégumentaire, localisées dans la paroi abdominale du corps des femelles de certains Insectes (Hémiptères Cimicidés) qui subissent l'insémination traumatique. Ces formations renferment des cellules sanguines et sont le siège de la copulation.

spermathèque. *n.* Poche de l'appareil génital de nombreuses femelles servant à la réception et à la rétention des spermatozoïdes en attendant la fécondation.

spermatide. *n.* Cellule sexuelle mâle *haploïde* qui conduira, après différenciation, au spermatozoïde mûr, muni de son flagelle.

spermatogenèse. *n.* Transformation des cellules initiales mâles en spermatozoïdes mûrs s'effectuant dans les testicules.

spermatogonie. *n.* Cellule *diploïde* initiale du spermatozoïde conduisant à la formation du spermatocyte.

spermatophore. *n.* Dispositif permettant le transfert du sperme dans l'organisme femelle. Il peut y avoir perforation du tégument de la femelle dans le cas de la fécondation *hypodermique* (nombreux Vers) ou dépôt au voisinage de l'orifice génital de la femelle (nombreux Insectes).

spermatozeugmata. *n.* Spermatozoïde à chromatine rare ou absente, contenu dans le sperme de certains Gastéropodes et auquel on attribue une fonction peut-être nourricière.

spermatozoïde. *n.* Cellule sexuelle mâle de petite taille et mobile.

spermiophore. *n.* Dispositif permettant le transfert du sperme après pénétration dans la cavité générale de la femelle.

sphénoïde. *n.* Os du plancher du crâne résultant de la soudure de nombreux os.

sphéridies. *n.* Saillies ovoïdes de un ou deux dixièmes de millimètre, à contenu calcaire, revêtues d'un épithélium vibratile, et très bien innervées. Ces organites sont articulés sur de petits mamelons, peu nombreux, des zones ambulacraires du *test* des Échinodermes (sauf chez les *Cidaris*).

sphincter. *n.* Muscle circulaire fermant un orifice. *Ex.* Sphincter anal, sphincter de la vessie.

sphingosine. *n.* Dialcool aminé entrant dans la composition des lipides complexes du cerveau ou *cérébrosides*.

sphragis. *n.* Pièce cornée que portent les femelles de certains Lépidoptères à l'extrémité de l'abdomen. C'est une sécrétion de l'appareil génital mâle durant l'accouplement et non un appendice abdominal.

spicules. *n.* Pièces élémentaires de taille variable, de nature calcaire ou siliceuse et de formes très variées, qui composent le squelette dermique des Échinodermes et le *brachidium* des Brachiopodes ainsi que le squelette des Spongiaires et de certains

Protozoaires Rhizopodes et Actinopodes (les Radiolaires), ou qui se trouvent dans le cloaque des Nématodes et dans la tunique de certains Tuniciers de la classe des Ascidies.

spiculum. *n.* Pièce de l'appareil copulateur mâle de certains Insectes Coléoptères, constituée par l'allongement des pleurites sur la face sternale.

spiniforme. *adj.* En forme d'épine, relativement rigide.

spinule. *n.* Chez les Insectes, petite épine ou appendice exocuticulaire semblable à une soie.

spiracle. *n.* Chez les Poissons Sélaciens, par exemple la roussette, première fente branchiale réduite.

spiracules. *n.* Orifices expirateurs des deux tubes branchiaux qui encadrent latéralement l'anus ventral chez les Appendiculaires (Urocordés).

spire. *n.* Ensemble des tours, moins le dernier, dans une coquille à enroulement spiral de Mollusques Gastéropodes.

spirocystes. *n.* Catégorie de cellules urticantes, à capsule dévaginable, caractéristiques des Cnidaires Anthozoaires et très nombreuses au niveau de leurs tentacules où elles participent à la capture des proies.

splanchnocrâne. *n.* Partie inférieure du *chondrocrâne* des Poissons cartilagineux, constituée par les sept paires d'arcs viscéraux qui entourent la cavité pharyngienne.

splanchnopleure. *n.* Paroi interne du mésentère constituant la musculature de l'intestin chez les Cœlomates.

spongine. *n.* Fibre scléroprotéique cornée servant à la fixation ou au renforcement du squelette (par la réunion des spicules siliceux) des Démosponges. L'éponge de toilette doit son élasticité et sa capacité d'imbibition à la capillarité de ses fibres de spongine.

sporocyste. *n.* Deuxième stade larvaire, de la douve par exemple, succédant au *miracidium* et se développant chez la lymnée. Le sporocyste peut donner naissance, par division de ses cellules génitales, à des sporocystes fils ou à des *rédies*.

sporogonie. *n.* Phase de reproduction asexuée des Sporozoaires.

sporozoïte. *n.* Forme résultant de la sporogonie chez les Sporozoaires.

squamosal. *n.* Os du crâne des Vertébrés Tétrapodes situé entre le postorbitaire et le carré.

squamules. *n.* Chez les Insectes, écailles, colorées ou non, qui recouvrent la base des ailes et peuvent se détacher facilement.

squelette dermique. Ensemble des os de revêtement dont l'origine n'est pas due à l'ossification d'un cartilage préexistant.

stade trimère. Symétrie axiale d'ordre trois existant chez certains fossiles des Cystoïdes (Échinodermes Pelmatozoaires).

stase. *n.* Arrêt momentané d'un élément circulant. *Ex.* Stase gastrique du bol alimentaire.

statoblaste. *n.* Bourgeon enkysté dormant, muni d'un flotteur et de crochets de fixation, et assurant la survie des espèces au cours de la reproduction asexuée des Bryozoaires Ectoproctes.

statocyste. *n.* Organe sensoriel, simple ou multiple, avec une ou plusieurs concrétions (ou *statolithes*), et intervenant dans l'orientation et l'équilibre du corps chez de nombreux Invertébrés.

statolithe. *n.* Petit grain calcaire, plus ou moins sphérique, simple ou multiple, et logé dans la cavité ciliée des *statocystes*.

statorécepteur. *adj.* Caractérise l'organe sensoriel responsable du maintien de l'équilibre chez un organisme.

stégoptère. *adj.* Qualifie un Insecte dont les ailes, au repos, sont disposées en toit, comme celles des psoques.

stemmates. *n.* Yeux simples latéraux des larves d'Holométaboles.

sténotherme. *adj.* Qualifie un organisme exigeant une température constante du milieu.

stéréome. *n.* Couche intermédiaire, la plus épaisse des trois couches constituant la thèque chez les Échinodermes Pelmatozoaires.

sternèbre. *n.* Élément constitutif du *sternum* des Mammifères.

sternite ou **sternum.** *n.* Plaque cuticulaire ventrale du corps d'un Arthropode.

sternum. *n.* 1° Chez les Arthropodes, voir *sternite*. 2° Pièce endosquelettique impaire de la paroi antéro-ventrale du tronc des Vertébrés Tétrapodes, reliée antérieurement aux coracoïdes de la ceinture pectorale et latéralement aux extrémités antérieures des côtes.

stichocytes. *n.* Cellules glandulaires dans lesquelles le *pharynx* des Trichuridés et des Trichinellidés est inclus.

stigmates. *n.* 1° Chez les Insectes, orifices respiratoires mettant en communication les trachées avec le milieu extérieur. 2° Fentes embryonnaires dont le recoupement donne les nombreuses perforations ciliées de la paroi du sac branchial des Tuniciers ou Urocordés.

stigmatique. *adj.* Qualifie l'orifice respiratoire *(stigmate)* des Arthropodes.

stigmergie. *n.* Mécanisme de construction de la termitière, dans lequel les ouvriers de la colonie de termites sont guidés et stimulés par leur propre travail architectural.

stipes. *n.* Voir *maxille*.

stolon. *n.* Fin cordon endodermique, creux, contractile, générateur de bourgeons, reliant chaque individu à l'organisme mère et les faisant communiquer entre eux chez les formes coloniales de Cnidaires, d'Endoproctes, d'Ascidies (Tuniciers).

stomocorde. *n.* Diverticule du *pharynx*, à direction antérodorsale, et localisé au-dessus de la bouche (ou stoma) chez les Stomocordés. Ce cul-de-sac, à cavité nulle ou très petite et communiquant avec le tube digestif, est analogue par sa structure histologique (cellules vacuolaires) à la corde dorsale des Cordés. Il a un rôle de soutien.

stomodéum ou **actinopharynx.** *n.* 1° Invagination de la couche ectodermique formant un pharynx dans la cavité interne des organismes larvaires et adultes des Cnidaires (Anthozoaires) et des Cténaires. 2° Ensemble comprenant un pharynx, un œsophage et un jabot et constituant l'intestin antérieur des Insectes (Arthropodes).

strate. *n.* En général, toute couche. Spécialement, couche de cellules; l'épiderme, formé généralement d'une seule strate, en comporte parfois plusieurs.

streptoneurie. *n.* Voir *chiastoneurie*.

stridulant ou **stridulatoire.** *adj.* Qualifie les organes ou appareils assurant la *stridulation*.

stridulation. *n.* Émission de sons stridents dûs au frottement réciproque de deux organes rugueux. *Ex.* Les élytres des grillons. Ce phénomène joue un rôle important dans la rencontre des sexes.

strobile. *n.* 1° Désigne le polype fixé (ou *scyphistome)* après sa segmentation transversale (ou strobilisation) lui donnant l'allure d'une pile de soucoupes, lors du développement des Cnidaires Scyphozoaires. 2° Désigne l'ensemble de l'organisme segmenté des Cestodes Cyclophyllidiens (comme le ténia, Plathelminthe endoparasite).

strobilisation ou **strobilation.** *n.* 1° Phénomène de segmentation transversale par creusement de constrictions annulaires à partir du sommet du polype fixé (ou scyph stome) au cours du cycle de reproduction sexuée des Cnidaires Scyphozoaires. 2° Processus de fragmentation du corps s'effectuant lors de la reproduction de certains Urocordés (Aplousobranches, Pyrosomes et Salpes).

style. *n.* 1° Prolongement dorsal des appendices abdominaux des Collemboles (Insectes Aptérygotes). 2° Prolongement tubulaire à l'extrémité de l'abdomen des Aphides (Insectes Hémiptères). 3° Fourreau externe des *genitalia* mâles de Coccides (Insectes Homoptères). 4° Saillie des gonapophyses de l'*oviscapte* des Odonates (Insectes). 5° Organe mobile placé sous les forceps des Tipulidés mâles (Insectes Diptères). 6° *Arista* articulée chez les Diptères. 7° Gonapophyse de certains Insectes Orthoptères et Isoptères.

stylet cristallin. Fine tige translucide et jaunâtre faisant saillie dans la partie postérieure de l'estomac des Mollusques Bivalves et de quelques Gastéropodes. Animée de continuels mouvements de rotation (10 à 80 fois par minute) et butant contre le bouclier gastrique, cette pièce, dont l'extrémité antérieure se dissout lentement en libérant des enzymes digestives, contribue au brassage des particules alimentaires.

styloïdes. *n.* Lames constitutives de l'*ovipositeur* chez les femelles des Insectes.

stylopisé. *adj.* Caractérise un Insecte qui est parasité par une larve d'Insecte Strepsiptère.

stylopode. *n.* Segment proximal constitutif du *membre chiridien* et correspondant au bras ou à la cuisse.

subarctique. *adj.* Qualifie la région zoologique limitée par la ligne isotherme de 0 °C. La faune y est très pauvre.

subgenual. *adj.* Qualifie l'organe constitué d'un groupement d'*organes chordotonaux* et localisé sur la partie proximale du tibia des Orthoptères.

subimago. *n.* Stade intermédiaire des Insectes Éphéméroptères très proche de l'état adulte (imago) ailé et s'intercalant entre celui-ci et la larve (après la *mue* de celle-ci). Cet individu passe au stade imago à la suite d'une dernière mue.

submentum. *n.* Voir *labium*.

suc nucléaire ou **nucléoplasme** ou **caryolymphe.** Substance fondamentale du noyau cellulaire, correspondant à un gel protéique, pouvant contenir des glucides, des lipides et divers acides ribonucléiques.

sulcus. *n.* Nom donné au siphonoglyphe ventral chez les individus de l'embranchement des Cnidaires Anthozoaires Hexacoralliaires.

superfœtation. *n.* Phénomène de reproduction, chez les Mammifères Léporidés et certains Poissons vivipares, où les femelles continuent à avoir un cycle sexuel normal tout en étant gravides.

supination. *n.* Mouvement de rotation de l'avant-bras plaçant la paume de la main par-dessus et le pouce vers l'extérieur.

supracoracoïdal. *n.* Muscle des Vertébrés supérieurs abaisseur du membre antérieur.

supraorbital. *n.* Os des Vertébrés constituant la partie supérieure de l'orbite.

suprascapula. *n.* Formation cartilagineuse surmontant l'omoplate chez les Ruminants.

suture. *n.* 1° Sillon plus ou moins profond marquant la ligne d'accolement d'un tour de spire au suivant, dans une coquille de Mollusque Gastéropode. 2° Articulation fixe entre deux os. *Ex.* La boîte crânienne des Mammifères présente des sutures nettes.

syconoïde. *adj.* Qualifie le type morphologique fondamental fréquemment réalisé chez les Éponges calcaires et quelques Éponges siliceuses (Hexactinellides).

sylvicole. *adj.* Qui vit en forêt.

symbionte ou **symbiote**. *n.* Organisme vivant en symbiose avec un autre organisme. *Ex.* Les bernard-l'ermite et les anémones de mer sont des symbiontes.

symbiose. *n.* Association étroite de deux êtres dont chacun bénéficie des produits de l'activité de l'autre.

symétrie pentamère ou **pentaradiée**. Symétrie axiale, d'ordre cinq, caractéristique de l'organisation générale des Échinodermes adultes (Stellérides, Ophiurides, Échinides Réguliers) et parfois oblitérée par la superposition d'une symétrie bilatérale (chez les Échinides Irréguliers, les Holothurides et des formes fossiles), ou absente chez quelques formes primitives fossiles.

symphyse. *n.* Soudure entre deux os. *Ex.* Symphyse pubienne des Amphibiens qui relie les deux pubis entre eux.

symplectique. *n.* Os du crâne des Poissons osseux, situé entre le carré et l'hyomandibulaire.

sympodite ou **coxite**. *n.* Partie basilaire triarticulée de l'appendice, typique des Arthropodes.

synanthropie. *n.* Tendance qu'ont certains Animaux à rechercher les lieux fréquentés par les hommes.

synapse. *n.* Zone de contact entre les prolongements des cellules nerveuses.

synapside. *adj.* Caractérise le squelette du crâne d'Animaux ne possédant qu'une seule fosse temporale.

syncytiale. *adj.* Qualifie une masse cytoplasmique plurinucléée sans territoires cellulaires individualisés.

syndactylie. *n.* Doigts réunis par une unique enveloppe cutanée. *Ex.* Le bradype (Mammifère Édenté) et certains gibbons.

synthorax. *n.* Voir *ptérothorax*.

syrinx. *n.* Organe vocal des Oiseaux, situé au niveau de la bifurcation en deux bronches de la trachée artère.

système axial ou **complexe**. Ensemble constitué de la *glande brune* se développant sur la face interne de la lacune axiale, que longe le *canal hydrophore*, chez les Échinides, les Stellérides et les Ophiurides (Échinodermes).

système ectoneural. Cordon nerveux superficiel des Échinodermes, à fonction sensitivo-motrice, et qui innerve le tégument, les *podia* et les organites recouvrant le corps de l'Animal (piquants, pédicellaires, sphéridies).

système hémal ou **lacunaire sanguin**. Réseau de canaux et de cavités dépourvus de parois propres, et dont la disposition entre les organes rappelle celle de l'*appareil aquifère*, chez les Échinodermes. Ces lacunes, très développées chez les Crinoïdes, les Holothurides et les Stellérides, renferment et font circuler le *liquide hémal*.

système hyponeural. Cordon nerveux des Échinodermes, profond, uniquement moteur, et dont les nombreuses ramifications innervent les fibres musculaires ou les organes génitaux chez les Stellérides, les palpes, le tube anal et les pinnules chez les Crinoïdes.

système lacunaire sanguin. Voir *système hémal*.

système nerveux viscéral. Système nerveux contrôlant le fonctionnement des viscères et la contraction des muscles lisses. Il est constitué de deux ensembles antagonistes : le *système parasympathique* et le *système orthosympathique*.

système octoneural. Portion du système nerveux des Échinodermes comprenant un anneau périœsophagien avec des ramifications reliées aux tentacules, au *pharynx* et à la membrane buccale et cinq rubans radiaires.

système orthosympathique. Système constitutif du système nerveux viscéral, formé d'une chaîne ganglionnaire en relation avec des nerfs particuliers Provoque, notamment une accélération du rythme cardiaque.

système paragénital. Ensemble d'organes extragénitaux, comme les spermalèges et les conceptacles séminaux, propres aux femelles des Hémiptères Cimicidés qui sont soumises à une insémination traumatique.

système parasympathique. Système constitutif du système nerveux viscéral dont les centres localisés au niveau du bulbe sont en relation avec des nerfs particuliers. Il provoque, notamment, un ralentissement du rythme cardiaque.

syzygie. *n.* 1° Appariement en file de deux gamontes, l'un femelle et l'autre mâle, chez les grégarines parasites de l'intestin des Insectes. 2° Articulation spéciale, dépourvue de muscles, dont la jointure est perpendiculaire à l'axe longitudinal des bras des Crinoïdes (Échinodermes Pelmatozoaires) et au niveau de laquelle les bras se brisent facilement.

T

tænioles. *n.* Bourrelets saillants dans la cavité gastrique avec, le long de leurs bords, deux rangées de *phacelles* chez les formes méduses et polypes des Cnidaires Scyphozoaires.

tagme. *n.* Région du corps d'un Arthropode ayant subi une différenciation morphologique et physiologique.

taïga. *n.* Forêt de Conifères des pays froids. Se trouve en Amérique et en Eurasie, au sud de la *toundra* et au nord des forêts de feuillus.

talpiforme ou **talpoïde**. *adj.* Caractérise un Animal ressemblant à une taupe.

tangorécepteur. *adj.* Qualifie les organes jouant un rôle dans l'équilibration chez les Planaires.

tapetum. *n.* Membrane (ou tapis) à reflet métallique tendue sous la rétine et au-dessus d'une couche de cellules à pigment sombre dans les yeux pédonculés, palléaux des coquilles Saint-Jacques par exemple (Mollusques Bivalves).

tarière. *n.* Oviscapte en forme de pointe qui permet à certaines femelles d'Insectes de percer ou tarauder un substrat pour y déposer leurs œufs.

tarse. *n.* 1° Segment mobile comprenant plusieurs articles et situé à l'extrémité du *tibia* de la patte d'un Insecte ou d'un Myriapode. 2° Os constitutif du pied chez les Vertébrés.

tarso-métatarse. *n.* Os résultant de la fusion entre les tarsiens et les métatarsiens et servant de train d'atterrissage chez les Oiseaux.

taxodonte. *adj.* **(charnière)**. Type de charnière des coquilles de Mollusques Bivalves comportant des dents très nombreuses, toutes semblables et disposées selon deux modes (cténodonte ou actinodonte). *Ex. Arca* à charnière rectiligne et *Pectunculus* à charnière courbe.

téchodontie. *n.* Mode d'implantation des dents dans les alvéoles des mâchoires de Mammifères.

tectrices. *n.* Petites plumes recouvrant le corps des Oiseaux.

tegmen. *n.* Membrane orale ou ventrale, plus ou moins couverte de petites plaques et au centre de laquelle s'ouvre la bouche des Échinodermes Crinoïdes.

tegmentum. *n.* Couche externe pigmentée, chitineuse et incomplètement calcifiée, de la zone libre des huit plaques dorsales de la coquille des Mollusques Polyplacophores, tel le chiton.

tegmina. *n.* Syn. d'*élytres*.

tegula. *n.* Petite écaille surmontant l'insertion des ailes, par exemple, chez les Insectes Lépidoptères et certains Homoptères.

tegulae. *n.* Ongles comprimés latéralement, portés par le deuxième doigt des pieds des Lémuroïdes.

tégument. *n.* Revêtement externe du corps d'un Animal qui peut être de nature diverse : 1° Simple épithélium de certains Vers libres (Planaires). 2° Couche de cuticule, doublée d'un épithélium, des Vers parasites (*ex.* ascaris) de quelques Mollusques (Polyplacophores). 3° Carapace chitineuse des Arthropodes. 4° Peau des Vertébrés formée d'un épiderme d'origine ectodermique et d'un derme profond d'origine mésodermique.

télencéphale. *n.* Vésicule embryonnaire antérieure constitutive du cerveau des Vertébrés et à partir de laquelle se différencient les hémisphères cérébraux.

télofilum. *n.* Appendice médian, impair, filiforme et multiarticulé prolongeant l'*épiprocte* chez les Insectes Éphéméroptères.

télolécithe ou **télolécithique**. *adj.* Qualifie un œuf renfermant un abondant vitellus. La segmentation de cet œuf est partielle. *Ex.* L'œuf de poule.

télopodes. *n.* Type particulier de gonopodes dû à la différenciation des deux dernières paires d'appendices chez les mâles des Myriapodes Ospithandriques.

télopodite. *n.* Syn. d'*endopodite*.

telostoma. *n.* Chambre postérieure de la capsule buccale des Némathelminthes.

telson. *n.* Segment terminal du corps des Arthropodes (Crustacés, Myriapodes), en général dépourvu d'appendices.

temporal. *n.* Os latéral du crâne des Vertébrés Tétrapodes.

tenacula. *n.* Chez le mâle de chimère (Poisson cartilagineux), appendice épineux logé soit sur le front, soit de chaque côté des nageoires ventrales.

tenaculum. *n.* Syn. de *rétinacle*.

ténidie. *n.* Élément constitutif des trachées des Insectes équivalent à un filament d'origine épicuticulaire qui permet de maintenir béante la lumière de ces tubes.

tentorium. *n.* Endosquelette de la tête présent chez la plupart des Insectes, sauf chez les Hémiptères.

terga. *n.* Ensemble des deux plaques calcaires supérieures renforçant les valves de la carapace chitineuse des Lépadomorphes (Crustacés Cirripèdes Thoraciques).

tergite ou **tergum**. *n.* Plaque cuticulaire dorsale du corps d'un Arthropode.

tergum. *n.* Voir *tergite*.

terminalia. *n.* Syn. de *genitalia*.

termitophage. *adj.* Qualifie un Animal qui se nourrit de termites.

termitophile. *adj.* Qualifie un Animal vivant en commensal dans les termitières. *Ex.* Certains Insectes Collemboles, des Homoptères, des Hémiptères, des Coléoptères.

terpène. *n.* Substance résultant de l'union de deux molécules d'isoprène formant éventuellement un ou deux cycles porteurs ou non de fonctions alcool, aldéhyde, cétone ou éther. Les terpènes sont odorants et très importants dans les huiles essentielles de la rose, du géranium, de l'orange, de l'eucalyptus, de la menthe, etc.

terricole. *adj.* Qui vit sous la surface de la terre. Syn. d'*endogé*.

terrier. *n.* Logement que certains Animaux creusent dans la terre. *Ex.* Mammifères (lapin, renard) ; Oiseaux (macareux).

territoire. *n.* Zone entourant le nid ou l'habitat d'un Animal (Oiseau ou Mammifère), dans laquelle celui-ci trouvera une alimentation suffisante et pourra se reproduire.

test. *n.* Squelette continu et externe des Échinides, formé de plaques calcaires solides et soudées par leur bord, ce qui donne une très grande rigidité à l'ensemble.

testicule. *n.* Glandes génitales mâles élaborant les spermatozoïdes.

tétractine. *n.* Spicule de type *tétraxone*, composé de quatre branches, associées comme les perpendiculaires menées du centre d'un tétraèdre régulier sur ses faces. Cette forme caractérise des Éponges siliceuses ou calcaires.

tétradactyle. *adj.* Qualifie une patte de Vertébré Tétrapode possédant quatre doigts.

tétraodontoxine. *n.* Substance, dont l'action sur l'homme est neurotoxique et hémolytique, contenue dans la chair et les viscères des poissons-globes (ou *Tétraodon*) et des poissons porc-épics (ou *Diodon*) [Poissons Tétraodontiformes].

tétratuberculée. *adj.* Caractérise une dent qui présente quatre tubercules. *Ex.* Molaire de Mammifères.

tétraxone. *adj.* Qualifie un des types fondamentaux de spicule qui se développe selon quatre axes et caractérise des Éponges siliceuses de la sous-classe des Tétractinomorphes.

tétrazoïde. *adj.* **(stade).** Qualifie le stade de développement d'une colonie primaire de Pyrosomes (Tuniciers Thaliacés) constitués de quatre individus primordiaux, asexués et disposés en croix, issus de la segmentation du *cyathozoïde*. Ces individus forment le pôle fermé du futur *manchon* colonial édifié par bourgeonnement.

teutophage. *adj.* Qui se nourrit de Mollusques Céphalopodes. *Ex.* Cachalot.

thalassotoque. *adj.* Syn. de *catadrome*.

thélycum. *n.* Réceptacle séminal complexe, indépendant des oviductes et porté sur la face ventrale du dernier segment thoracique chez certaines crevettes femelles du groupe des Pénéides (Crustacés Malacostracés).

thélytoque. *adj.* Qualifie la parthénogenèse ne conduisant qu'à une descendance femelle, chez les pucerons par exemple.

thériofaune. *n.* Ensemble des Animaux sauvages. *Ex.* Léopard.

thermorégulateur. *n.* Syn. de *homéothermie*.

thyroïde. *n.* Glande endocrine, localisée au niveau du cou des Vertébrés, provenant d'une invagination du *pharynx* et dont l'hormone agit sur le métabolisme, la croissance, le développement sexuel...

tibia. *n.* 1° Os en position interne de la jambe des Vertébrés Tétrapodes. 2° (ou **jambe**). Quatrième segment de la patte d'un Insecte ou d'un Myriapode situé entre le fémur et le tarse.

timbale ou **cymbale.** *n.* Pièce de l'appareil sonore située sur le premier segment abdominal de certains Homoptères comme la cigale.

tormogène. *adj.* Qualifie la cellule produisant chez les Insectes la membrane basale d'une soie.

tornaria. *n.* Type de larve ciliée, pélagique, nageuse, apparaissant lors du développement avec métamorphoses chez les Entéropneustes (Stomocordés). Elle ressemble à la larve *bipinnaria* des étoiles de mer et se caractérise par sa rotation continue autour de son axe d'allongement vertical.

toundra. *n.* Végétation croissant au nord de la limite des forêts (taïga), et correspondant, dans la zonation de la végétation en latitude, à l'étage alpin de la zonation en altitude.

touracine. *n.* Pigment rouge spécifique de la plume des Oiseaux de l'ordre des Musophagiformes (touracos).

touracoverdine. *n.* Pigment vert spécifique de la plume des Oiseaux de l'ordre des Musophagiformes (touracos).

trachéate. *adj.* Se dit d'un Animal respirant par des trachées. *Ex.* Myriapodes et Insectes.

trachée. *n.* 1° Tube respiratoire des Myriapodes et des Insectes provenant d'une invagination ectodermique et constituée d'une couche de cellules épithéliales tapissée intérieurement d'une cuticule épaisse renforcée par un ruban enroulé en spirale ou ténidie. 2° Canal qui assure le passage de l'air du larynx vers les bronches chez les Vertébrés supérieurs.

trachéoblaste. *n.* Cellule étoilée formant les *trachéoles*.

trachéole. *n.* Ramification très fine des trachées qui aboutit à une cellule.

tractus. *n.* 1° Formation, d'origine conjonctive généralement constituée par des faisceaux de fibres formant réseau. 2° Ensemble des organes constitutifs d'un appareil. *Ex.* Tractus génital.

tragus. *n.* Expansion verticale de la face interne du pavillon auriculaire des Vertébrés Microchiroptères, située devant le méat auditif.

tréhalase. *n.* Enzyme permettant la transformation du tréhalose en glucose (voir *tréhalose*).

tréhalose. *n.* Disaccharide non réducteur qui est hydrolysé en glucose par une enzyme, la tréhalase. Ce sucre est la principale source d'énergie chez les Insectes.

triactine. *n.* Spicule de type triaxone composé de trois branches en diapason ou rayonnant dans un seul plan en formant trois angles égaux de 120°. Ce spicule est typique des Éponges calcaires (Pharétronide).

triangle pygidial. Formation caractéristique du dernier *tergite* abdominal chez les abeilles primitives.

triaulie. *n.* Caractéristique de l'appareil reproducteur hermaphrodite des Gastéropodes Opisthobranches lorsque les orifices de l'oviducte, du vagin et du pénis sont séparés.

trichites. *n.* Bâtonnets ectoplasmiques non extensibles servant d'organes de défense chez les Ciliés.

trichobothries. *n.* Fines soies mobiles implantées dans le tégument des Arachnides et des Insectes et sensibles aux vibrations de l'air.

trichocystes. *n.* Bâtonnets ectoplasmiques disposés perpendiculairement à la membrane et servant à la capture des proies chez les Ciliés. Sous l'effet de certaines stimulations, la paramécie, par exemple, détend ces organites et les projette à l'extérieur.

trichogène. *adj.* Qualifie la cellule produisant la soie d'une sensille trichoïde d'un Insecte.

trichoïde. *adj.* Qualifie un type de *sensille* ou organe sensoriel portant sur sa face externe un poil ou une soie.

tridactyle. *adj.* 1° Qualifie le type de *pédicellaire* des Échinides terminé par trois *mors* grêles, allongés comme des doigts, dentés sur leur bord interne et formant comme une pince à sucre à poussoir. 2° Formé de trois doigts chez les Vertébrés Tétrapodes. *Ex.* Patte du rhinocéros.

trifolié. *adj.* Qualifie le type de petits *pédicellaires* des Échinides, terminés par trois *mors* arrondis et plats en forme de feuille.

triongulin. *n.* Larve primaire *campodéiforme* des Insectes Strepsiptères, caractérisée par la présence de trois griffes sur chaque tarse.

triploblastique. *adj.* Caractérise un Métazoaire dont les organes dérivent des trois feuillets embryonnaires : ectoderme, mésoderme et endoderme. *Ex.* Les Plathelminthes, les Némathelminthes, les Annélides, les Mollusques, les Arthropodes, les Échinodermes, les Procordés et les Vertébrés.

tritocérébron. *n.* Cerveau postérieur des Arthropodes.

trivium. *n.* Face ventrale des Holothurides (Échinodermes), aplatie ou non en sole de reptation, comprenant trois radius et deux interradius.

trochanter. *n.* Deuxième article de la patte d'un Insecte ou d'un Myriapode, situé entre la *coxa* et le *fémur*.

trochophore. *n.* Larve ciliée nageuse formée des trois feuillets embryonnaires, caractéristique des Annélides et des Mollusques.

trochure. *n.* Couronne formée par les bois des Cervidés lorsqu'ils comportent trois ou quatre *andouillers*.

troglobie. *adj.* Qualifie un Animal vivant en permanence et se reproduisant dans les grottes, tels que des Insectes Coléoptères carabiques *(Aphaenops)*, des Crustacés *(Niphargus)* et des Amphibiens *(Proteus)*. Voir *cavernicole*.

troglophile. *adj.* Qualifie un Animal prédisposé à vivre dans le milieu souterrain. Cas de certains Insectes Collemboles, Arachnides et Chiroptères. Voir *cavernicole*.

trogloxène. *adj.* Qualifie un Animal vivant temporairement dans le milieu souterrain. *Ex.* Des Insectes Lépidoptères et Trichoptères, des Oiseaux, des Chiroptères. Voir *cavernicole*.

trompe. *n.* Dispositif d'aspiration constitué par les pièces buccales modifiées chez les Insectes, Diptères et Lépidoptères. Également chez certains Mammifères comme l'éléphant.

trophallaxie. *n.* Échange de nourriture entre Insectes sociaux (abeilles, fourmis, termites) jouant peut-être un rôle dans la différenciation sexuelle des individus.

trophi. *n.* Mâchoires des Rotifères constituées de sept pièces dont une, impaire, le *fulcrum* et les autres, paires, *rami*, *unci* et *manubria*.

trophoblaste. *n.* Au stade morula, assise cellulaire externe de la cavité dans laquelle l'embryon se localise dans le bouton embryonnaire (Mammifères).

trophoblastique. *adj.* Qui a rapport avec le trophoblaste.

tropisme. *n.* Mouvement orienté d'un organisme en réponse à une excitation. Il est considéré comme « positif » ou « négatif » suivant que l'organisme s'approche ou s'éloigne de la source du stimulus. *Ex.* Phototropisme.

trot. *n.* Allure de certains quadrupèdes caractérisée par des pas exécutés successivement par deux membres diagonalement opposés.

tryptophane. *n.* Acide aminé dont la molécule contient un groupement cyclique azoté (indole).

tube anal. Forte saillie tronconique débouchant dans un interradius, sur la face orale et dans le *plan crinoïdien* chez les Crinoïdes (Échinodermes). Ce cône de plaques, percé d'un anus terminal festonné de papilles, se contracte rythmiquement, aspire et expulse l'eau en éliminant les déchets et joue aussi un rôle respiratoire.

tube épicardique. Cæcum endodermique indépendant, apparaissant au fond de la paroi pharyngienne pendant la vie larvaire des Ascidies (Urocordés) et partageant l'abdomen en deux régions : l'une, dorsale, avec l'intestin, l'autre, ventrale, avec le cœur en partie recouvert.

tube néphritique. Voir *tubes urinifères*.

tube ventral. Appendice ventral porté par le premier segment abdominal des Collemboles. Assurant l'ancrage de l'Insecte à la surface de l'eau grâce à son extrémité mouillable, il semble permettre l'absorption d'eau et jouer un rôle respiratoire.

tubes ambulacraires. Voir *podia*.

tubes de Cuvier. Faisceau d'organes de défense et d'excrétion, attachés à la partie supérieure du cloaque chez les Holothurides Aspidochirotes. Rejetés par l'anus, ces tubes, gonflés d'eau, forment de

longs fils où l'ennemi s'englue. Ils interviennent aussi dans le rejet des déchets (ammoniaque, acide urique, créatine).

tubes de Malpighi. Organes excréteurs situés à la jonction des intestins moyen et postérieur chez la plupart des Arthropodes terrestres.

tubes urinifères ou **néphron** ou **tubes néphritiques.** Tubes constitutifs du rein des Vertébrés au niveau desquels se fait la filtration du sang à partir des *glomérules de Malpighi.*

tubercule métatarsien. Expansion robuste et dure que portent certaines grenouilles sur le gros orteil.

tubercules cornés. Saillies situées au niveau du cou et dues aux longues apophyses épineuses des vertèbres cervicales chez certains Lorisinés. *Ex.* Cas du potto de Bosman.

tubercules quadrijumeaux. Formations provenant du dédoublement des deux lobes optiques chez les Mammifères.

tuberculus majus. Mamelon de l'épiphyse proximale de l'humérus sur lequel s'articule l'omoplate.

tubérosités fessières. Saillies très colorées de la région ano-génitale des femelles de singes Anthropoïdes (*ex.* macaques, babouins), en relation avec le cycle de reproduction.

tularémie. *n.* Maladie infectieuse des lapins transmise par la tique *Dermacentor andersoni* inoculant le *Bacterium tularense.*

tunicine. *n.* Substance constituée d'un glucide voisin de la cellulose végétale (60 %) uni à des substances azotées (27 %), et formant avec des éléments inorganiques la tunique des Urocordés ou Tuniciers.

tunique. *n.* Enveloppe externe protégeant le corps des Tuniciers ou Urocordés. Souvent transparente, très épaisse, ornementée et de consistance très variable (semblable à la gélatine ou au cuir), elle est constituée de *tunicine* et renferme de nombreuses cellules migratrices, des vaisseaux sanguins et parfois des spicules calcaires.

turgescence. *n.* Augmentation de volume d'une cellule due à la rétention d'une quantité d'eau qui dépend de la résistance de la paroi squelettique cellulaire. L'entrée de l'eau est due elle-même à la pression osmotique déterminée par la concentration du contenu de la cellule.

tuyau. *n.* Élément basal du *rachis* constitutif de la plume des Oiseaux.

tympaniques. *adj.* **(organes).** Organes auditifs des Insectes comprenant une fine membrane cuticulaire ou membrane tympanique tendue sur une cavité remplie d'air. Ces organes sont localisés, suivant les Insectes, soit dans le tibia des pattes antérieures, soit dans le mésothorax ou encore sur le premier segment abdominal.

typhlosolis. *n.* Invagination médio-dorsale de l'intestin chez les Annélides terricoles, (*ex.* le lombric), augmentant la surface de l'épithélium intestinal et contenant des cellules chloragogènes.

typhus marin. Forme endémique bénigne du typhus transmise par les puces du rat (généralement rat de grenier).

tyrosine. *n.* Acide aminé cyclique caractérisé par son noyau benzénique. La tyrosine entre dans la constitution de la cuticule des Insectes.

U

ubiquiste. *adj.* Qualifie une espèce répandue sur tous les continents.

ulna ou **cubitus.** *n.* Os, en position externe, de l'avant-bras des Vertébrés Tétrapodes.

umbo. *n.* Sommet (ou crochet) des valves de coquille de Mollusques Bivalves indiquant toujours la partie dorsale.

unci. *n.* Pièces paires constitutives des mâchoires, ou *trophi,* des Rotifères.

uncini. *n.* Soies à crochets des rames ventrales des parapodes des Polychètes sédentaires.

univoltine. *adj.* **(espèce).** Qualifie une espèce présentant une seule génération par an. *Ex.* Le ver à soie.

uretère. *n.* Canal de l'appareil urinaire des Vertébrés qui conduit l'urine des reins à la vessie; l'urètre la conduisant de la vessie à l'orifice extérieur.

uricotélie. *n.* Enrichissement de l'urine en déchets d'acide urique chez les Mollusques Gastéropodes terrestres, les Reptiles et les Oiseaux (la poule excrète 87 % de l'azote total rejeté sous forme d'acide urique).

urite. *n.* Syn. de *segment abdominal* (ou *métamère*) chez un Insecte.

urocyste. *n.* Vésicule contractile unique des Rotifères dans laquelle débouchent les canaux des *protonéphridies.*

urogomphes. *n.* Expansions sclérifiées (styles, cerques, pseudocerques, cornicules), articulées ou non, fixées ordinairement sur le dixième tergite abdominal de certaines larves d'Insectes.

uropatagium. *n.* Partie du patagium des Mammifères fixée entre le membre postérieur et la queue de l'Animal. *Ex.* Écureuil volant.

uropode. *n.* Sixième et dernière paire d'appendices abdominaux, chez les Crustacés, et dont les deux rames, aplaties, très élargies et à bords ciliés, forment, avec le *telson* terminal, une palette caudale natatoire.

urostège. *n.* Plaque écailleuse sous-caudale des Reptiles Ophidiens (serpents).

urostyle ou **pygostyle.** *n.* Partie terminale de la colonne vertébrale résultant de la soudure des vertèbres caudales chez certains Poissons, Amphibiens Anoures et Oiseaux.

utérus. *n.* Partie de l'appareil génital où débouchent les oviductes chez les femelles vivipares de Vertébrés et où se développe l'embryon.

utricule. *n.* Partie ventrale du labyrinthe de l'oreille interne des Vertébrés.

V

vacuole. *n.* Cavité du cytoplasme contenant en solution des substances variées. Il existe aussi chez les Protozoaires des vacuoles spécialisées : les *vacuoles digestives,* où s'effectue la phagocytose, et les *vacuoles pulsatiles* intervenant dans l'excrétion.

vaisseau endostylaire. Artère ventrale contractile qui prolonge vers l'avant le *sinus veineux* et propulse le sang dans les branchies chez l'amphioxus (Céphalocordés).

valvulaire. *adj.* Qualifie le type de *pédicellaires* directement articulés sur le *test* chez les étoiles de mer (Échinodermes Stellérides).

valvule. *n.* 1° Repli de la paroi d'un conduit qui empêche le retour en arrière des éléments circulants. 2° Chez certains Vertébrés, partie mobile qui obstrue la narine.

vannus. *n.* Voir *champ anal.*

vecteur. *n.* Animal transporteur d'un agent pathogène. *Ex.* La glossine (Insecte Diptère) est le vecteur du trypanosome de la maladie du sommeil.

veine cave. Vaisseau *afférent* qui ramène le sang dans l'oreillette droite du cœur. La veine cave supérieure collecte le sang ayant irrigué les membres antérieurs et la tête, la veine cave inférieure reçoit celui qui revient du tronc, des viscères et des membres postérieurs.

veines cardinales. Vaisseaux latéraux antérieur et postérieur, appartenant au système veineux ventral de l'amphioxus (Céphalocordés) et irriguant les gonades.

vélarium. *n.* Membrane qui clôt en grande partie la cavité ombrellaire des Cuboméduses (Scyphozoaires).

véligère. (larve). Forme larvaire planctonique, libre, caractéristique des Mollusques, présentant une couronne ciliée vibratile, puissante, bordant un voile (ou *vélum*) préoral, ample et festonné, permettant la nage et la nutrition. Un rudiment de coquille transparente coiffe la partie inférieure et dorsale du corps.

vélum. *n.* 1° Voile chargé de la fonction locomotrice, formant un diaphragme incomplet obturant partiellement la cavité sous-ombrellaire chez les Hydroméduses. 2° Couronne ciliée, lobée, de la larve trochophore des Mollusques et des Annélides Polychètes. 3° Diaphragme séparant la bouche du *pharynx* des Céphalocordés (amphioxus).

vena spuria. 1° Épaississement sclérifié de l'aile de certains Insectes ayant l'apparence d'une nervure. 2° Fausse nervure longitudinale de l'aile des Diptères Syrphides ou de certains Névroptères.

vénerie. *n.* Art de la chasse à courre.

ventricule. *n.* 1° Région moyenne de l'intestin des Insectes correspondant à l'estomac (mésentéron). 2° Ventricule chylifère : estomac vrai dans lequel la digestion commence. 3° Cavité contractile du cœur, séparée de l'oreillette par des valvules.

ventricule succentorié. Voir *proventricule.*

vermis. *n.* Partie médiane constitutive du cervelet des Mammifères.

vertèbre. *n.* Petit os constitutif de la *colonne vertébrale.*

vertex. *n.* Prolongement dorsal du front d'un Insecte.

vésicule antérieure. Différenciation du tube nerveux chez l'amphioxus (Céphalocordés) en une ébauche de cerveau, frontale et neurosécrétrice, avec une tache pigmentaire antérieure (considérée comme un organe sensoriel à rôle inconnu).

vésicule biliaire. Dilatation terminale du canal cystique dans laquelle la bile est stockée avant son utilisation. Des contractions rythmiques l'évacuent dans le canal cholédoque au moment de la digestion.

vésicule cardiopéricardique. Poche entièrement close et contractile coiffant le sinus sanguin central chez les Entéropneustes (Stomocordés). Cet organe, rempli d'un liquide clair, sans éléments figurés chez l'adulte, sert à régler la pression dans le sinus et assure, par ses contractions, la propulsion sanguine.

vésicule de Poli. Réservoir contractile jouant un rôle régulateur pour le liquide de l'*appareil aquifère* des Échinodermes. Cette ampoule (dont le nombre varie suivant les espèces et les individus) est suspendue par un pédoncule, ou *canal oral circulaire,* à l'intérieur de la cavité générale de l'Animal.

vésicule de Savi. Organe sensoriel cutané de certains Sélaciens (raie), constitué de minuscules follicules nerveux innervés par un rameau de la cinquième paire de nerfs crâniens.

vésicule séminale. Réservoir de la semence du mâle.

vessie. *n.* Sac d'accumulation de l'urine avant son évacuation à l'extérieur du corps.

vessie aérostatique. Vésicule remplie d'air, allégeant le corps des Insectes Éphéméroptères et constituée par leur tube digestif non fonctionnel.

vessie gazeuse. Voir *vessie natatoire.*

vessie natatoire ou **vessie gazeuse.** Diverticule impair et dorsal de la paroi de l'œsophage des Poissons. Elle peut rester en communication avec l'œso-

phage (Chondrostéens, Holostéens et Téléostéens primitifs) ou non (Téléostéens évolués). Rôle hydrostatique, respiratoire et auditif par l'intermédiaire des *osselets de Weber*.

vexille. *n.* Partie constitutive de la plume des Oiseaux.

vibraculaire. *n.* Individu possédant un long fouet mobile pour nettoyer la surface d'une colonie de Bryozoaires Ectoproctes (Eurystomes : *Bugula*).

vibrisse. *n.* Longs poils de certains Vertébrés localisés autour de la bouche. *Ex.* Chez le chat.

viscéro-pallium. *n.* Ensemble prolongeant, vers l'arrière, le céphalopodium dans le corps des Mollusques et constitué par la masse viscérale enveloppée dans le manteau et souvent protégée par une coquille.

visière frontale. Syn. de *visière supra-orbitaire*.

visière supra-orbitaire ou **visière frontale.** Ensemble formé par les arcades sourcillières saillantes chez les singes Anthropoïdes. *Ex.* Chez le macaque.

vision binoculaire. Vision assurée par les deux yeux qui permet une perception du relief. *Ex.* Chez les Primates.

vitamines. *n.* Substances indispensables, en faible quantité, à la vie d'un organisme. Leur carence peut provoquer des troubles graves, voire mortels. *Ex.* Le manque de vitamine C entraîne le scorbut.

vitamine B_{12}. Voir *isoxanthoptérine*.

vitellarium. *n.* Portion basale constitutive des *ovarioles* de l'ovaire des Insectes.

vitellogène. *adj.* Qualifie les glandes annexes de l'appareil reproducteur femelle qui sécrètent les cellules vitellines chez certains Vers plats.

vitellophages. *n.* Cellules provenant du blastoderme et digérant le vitellus de l'œuf des Insectes.

viverreum. *n.* Voir *glande périnéale*.

vivipare. *adj.* Qui donne naissance à des petits vivants. *Ex.* Chez les Invertébrés, certains Vers, Mollusques et Insectes; chez les Vertébrés, les Mammifères.

vol. *n.* Mode de locomotion aérien des Insectes, des Oiseaux et de quelques Reptiles (fossiles) et Mammifères. La sustentation et la propulsion s'effectuent grâce à des ailes correspondant soit à des expansions tégumentaires du tergite du thorax (Insectes), soit à une adaptation des membres antérieurs (Oiseaux).

vol plané. Vol de l'Oiseau qui consiste pour celui-ci à se laisser glisser sur l'air, les ailes étendues et immobiles.

vol ramé ou **vol battu.** Vol dans lequel les battements des ailes provoquent la force motrice de propulsion chez les Oiseaux.

vol à voile. Chez les Oiseaux, type de vol plané qui consiste à louvoyer sans battements d'ailes.

vomer. *n.* 1° Crochet ventral situé sur le dixième anneau abdominal des mâles des Phasmes et servant à l'accouplement. 2° Os dermique du *splanchnocrâne* des Poissons osseux situé en avant des *palatins*.

voûte du palais. Cloison osseuse secondaire séparant la bouche des fosses nasales chez les Mammifères.

X-Y-Z

xanthophore. *n.* Cellule du tégument des Animaux renfermant des pigments jaunes.

xénapophyse. *n.* Apophyse surnuméraire des vertèbres dorsales et lombaires chez les Mammifères Édentés.

xénarthrale. *adj.* Caractérise l'articulation des vertèbres dorsales et lombaires propres aux Mammifères Édentés (Xénarthres). Elle se fait grâce à des apophyses surnuméraires, ou xénapophyses.

xérophile. *adj.* Qui affectionne les milieux secs. Se dit d'une plante.

xylophage. *adj.* Caractérise un Insecte qui se nourrit de bois. *Ex.* Termite.

xyphisternum ou **xiphisternum.** *n.* Partie postérieure du *sternum* chez les Mammifères. Elle est ossifiée vers l'avant, cartilagineuse à l'arrière.

yeux « en turban ». Yeux composés divisés en deux zones distinctes, inférieure et supérieure, différentes par leur structure et leur rôle visuel chez les Insectes Éphéméroptères mâles.

zalambdodonte. *adj.* Qualifie la surface occlusale des dents jugales des Mammifères Insectivores, dont les trois cônes primaires sont réunis par une crête formant un V.

zeugopode. *n.* Segment moyen constitutif du *membre chiridien* et correspondant à l'avant-bras ou à la jambe.

zoarium. *n.* Ensemble des *zoécies* (logettes) d'une colonie de Bryozoaires. Sa taille normale est de l'ordre du millimètre; il peut être très polymorphe : arborescent, massif, encroûtant, lamellaire...

zoé. (larve). Stade larvaire libre, pélagique, remarquable dans le développement de la plupart des Crustacés Malacostracés Décapodes. Cette larve microscopique présente deux yeux, une carapace dorsale recouvrant le céphalothorax (portant sept paires d'appendices) et un abdomen fin et bien segmenté, dépourvu d'appendices.

zoécie. *n.* Logette de l'ordre de 0,1 mm, à enveloppe gélatineuse, cornée ou calcaire, pouvant se fermer antérieurement par un opercule et abritant un individu d'une colonie de Bryozoaires ou de Ptérobranches (Stomocordés). Sa morphologie est très variable en fonction des groupes considérés.

zoïde. *n.* Individu, très petit, vivant dans une des logettes constituant une colonie de Bryozoaires Ectoproctes (Lophophoriens) de Graptolites et de Ptérobranches (Stomocordés), d'Ascidies (Tuniciers).

zonal. *adj.* Qualifie un type de *placenta* dans lequel les villosités choriales sont groupées dans une zone annulaire entourant le fœtus. *Ex.* Placenta des Carnivores.

zone interradiaire. Voir *interambulacre*.

zone radiaire. Voir *ambulacre*.

zoogéographe. *n.* Géographe spécialisé en faunistique.

zoogéographique. *adj.* Qui a rapport à la zoogéographie, science étudiée par le *zoogéographe*.

zoophage. *adj.* Qui se nourrit d'Animaux vivants.

zygodactyle. *adj.* Caractérise la patte des Oiseaux (*ex.* le perroquet), qui comprend deux doigts tournés vers l'avant et deux doigts tournés vers l'arrière.

zygote ou **œuf.** *n.* Cellule résultant de l'union des deux gamètes, ou cellules sexuelles, produite au cours de la fécondation. Œuf fécondé.

ERRATA

Volume I

Page 262, légende du haut, lire : *Lampyris* et non *Lampyrus*.

Volume II

Page 52, titre colonne de droite : Super-famille des Fulgoroidea.

Page 55, 12e ligne colonne de droite, lire : *Thelaxidae* et non *Thexalidae*.

Page 93, colonne de droite, en haut, lire :
Quant à *Graellsia isabellae*, magnifique nocturne très localisé dans les Alpes du Sud-Est, en France, et dans les sierras espagnoles, c'est le seul représentant en Europe des Actiens, aux ailes postérieures caudées et de couleur verte ou jaune. Un Agliiné, la hachette, *Aglia tau*, est commun au printemps en plein jour dans nos forêts.

Page 204, sous le titre « organes des sens », au deuxième paragraphe, lire : *Chlamydoselachus* et non *Chlamidoselachus*.

Volume III

Page 102, légende du bas, et page 103, légende, lire : *Wallabia* et non *Wallabya*.

Page 136, légende, lire : *Tadarida teniotis*.

Page 143, colonne de droite, 8e ligne, lire : *Chlamyphorus* et non *Clamyphorus*.

Page 143, colonne de droite, 10e ligne, lire : *Tolypeutes matacus* et non *Tolypeutes mataco*.

Page 199, légende du haut, lire : A gauche, forme adulte du chacal à chabraque, ou à dos noirs.

INDEX DES NOMS CITÉS

L'index donne tous les noms d'espèces, de genres, de familles, d'ordres et de groupements supérieurs qui figurent dans les volumes I, II et III (Zoologie).

Les espèces et les genres — et exceptionnellement les groupes supérieurs — sont indiqués par leur nom latin (en italique), en général suivi du nom français (en caractères droits), lorsque ce dernier est expressément cité dans le texte. En ce cas, on trouvera le renvoi, par un astérisque, du nom français au nom latin. Des renvois ont également été utilisés pour toutes les variantes désignant un même groupe. *Ex. :*

Cuniculus taczanowskii (Stictomys taczanowskii) [paca de montagne] III - 171
Stictomys taczanowskii
* *Cuniculus taczanowskii*
paca de montagne
* *Cuniculus taczanowskii*

Les familles, les ordres et les groupements supérieurs sont mentionnés soit par leur nom français, suivi éventuellement par leur nom latin, soit uniquement par leur nom latin si celui-ci figure seul dans l'ouvrage.

La référence est donnée par l'indication du volume I, II ou III en chiffres romains et du numéro de la page où se trouve la citation, suivi, le cas échéant, des lettres *a* ou *b*, indiquant respectivement la colonne de gauche et la colonne de droite de chaque page.

Les références sont données, pour les illustrations, par le numéro de la page en caractères gras, et, pour le texte, par le numéro de la page en caractères maigres pour une simple citation, et en italique pour un développement plus complet.

ABRÉVIATIONS

cl.	classe	gr.	groupe	s/esp.	sous-espèce	s/sect.	sous-section
div.	division	inf.-ord.	infra-ordre	s/fam.	sous-famille	sup.-cl.	super-classe
embr.	embranchement	ord.	ordre	s/gen.	sous-genre	sup.-fam.	super-famille
fam.	famille	sect.	section	s/gr.	sous-groupe	sup.-ord.	super-ordre
gen.	genre	s/cl.	sous-classe	s/ord.	sous-ordre	tr.	tribu

A

D

E

F

G

H

I

M

N

P

Q

R

U - V

W - X - Y - Z

ENCYCLOPÉDIE DES SCIENCES

BOTANIQUE

I

GRANGE BATELIÈRE

GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

GRANGE BATELIÈRE, PARIS - ÉDITIONS KISTER, GENÈVE - ÉRASME, BRUXELLES-ANVERS

LES VÉGÉTAUX

I

Publiée sous le haut patronage de :
Messieurs les professeurs :
Jean DORST, membre de l'Institut,
Charles FEHRENBACH, membre de l'Institut,
Roger HEIM, membre de l'Institut,
Monsieur l'amiral André JUBELIN,
Messieurs les professeurs :
Pierre LÉPINE, membre de l'Institut,
Louis LEPRINCE-RINGUET, de l'Académie française,
Jean-François LEROY, professeur au Muséum national d'histoire naturelle,
Henri NORMANT, membre de l'Institut,
Monsieur Jacques PICCARD, docteur ès sciences h.c.

Réalisation	IDÉES ET ÉDITIONS 16, avenue de Friedland, 75008 Paris
Comité de direction	Cristobal de ACEVEDO, Simone DEVAUX, Uberto TOSCO.
Rédacteurs en chef	Michelle TALANDIER, pour la partie des Sciences naturelles, géologiques et biologiques Patrick PHLIPONEAU, pour la partie des Sciences techniques.
Assistante	Françoise MENU.
Recherche de l'illustration	Mathilde RIEUSSEC.
Mise en pages	Tito TOPIN et Serge BROCHE.
Illustrations techniques	Richard COLIN.
Coordinateur des dessins	Mario LOGU.
Fabrication	Émile REGNAULT - Martine TOTIN.
Directeur de la publication	J.P. BRÉVOST.

ont collaboré aux volumes
consacrés aux Végétaux

J.P. LARPENT, pour les Bactéries.
P. BOURRELLY, pour les Cyanophycées et les Algues.
F. ARDRÉ, pour les Rhodophytes et les Phéophycées.
J. NICOT, pour les Champignons.
M.A. LETROUIT, pour les Lichens.
S. JOVET, pour les Bryophytes.
M.L. TARDIEU-BLOT, pour les Ptéridophytes.
C. LEMOINE-SEBASTIAN, pour les Gymnospermes.
M. GUÉDÈS, pour les Angiospermes.

Quatre-vingt-dix pour cent de l'ensemble des scientifiques qui ont vécu depuis le début de l'histoire, sont actuellement en vie. Le nombre de revues scientifiques à travers le monde était d'une centaine au début du dix-neuvième siècle, d'un millier en 1850 et de 10 000 en 1930 ; il atteignait 100 000 en 1960 et s'est accru depuis. Si cette augmentation exponentielle continuait à se manifester pendant quelque temps encore, il paraîtrait chaque année plus de publications scientifiques et techniques qu'au cours de toute la période antérieure.

Les connaissances humaines ont fait récemment des progrès vertigineux. Les horizons se sont régulièrement élargis. Ainsi, en biologie, on étudie maintenant, bien en deçà des formes grossières des chromosomes, les acides nucléiques et les molécules de protéines dont les images sont dorénavant visibles. A l'opposé, le fonctionnement des écosystèmes, gigantesques organes à l'échelle de la biosphère formés d'innombrables espèces groupées en communautés, fait l'objet d'analyses et de mesures précises. Et que dire de la physique où les connaissances acquises un jour sont sitôt dépassées?...

Bien plus, les frontières entre les disciplines s'estompent un peu plus chaque jour. Tel chercheur ne sait plus bien s'il est chimiste, physicien ou biologiste. L'écologiste déborde même vers les sciences humaines, devant sans cesse se référer à l'ethnologie, à la sociologie et à l'économie politique.

Ces vastes connaissances, en perpétuel enrichissement, sans cesse remaniées dans leurs inter relations, ne sont pas seulement académiques. Sitôt acquise, une découverte passe dans le domaine des applications. Chaque jour, nous bénéficions des progrès de la science, convertis par une technologie de jour en jour plus raffinée.

Nul ne peut donc rester en dehors de ce prodigieux mouvement. Mais le grand problème de l'heure présente est celui de l'information, de la mise à la disposition du public des connaissances nouvelles, dont beaucoup modifient des conceptions vieilles de quelques années à peine.

A nulle époque ne s'est plus fait sentir le besoin d'une Encyclopédie synthétisant autant qu'elle résume le savoir de l'homme. De nombreux spécialistes se sont groupés pour présenter celle-ci d'une manière attrayante au lecteur avide de se renseigner et surtout de comprendre selon une formule moderne et bien adaptée aux besoins de notre époque.

Souhaitons qu'au-delà de l'accumulation de connaissances se dégage ainsi, grâce à cette synthèse, un humanisme qui nous permettra d'aborder en confiance les rivages du siècle à venir.

Jean Dorst

Nectaridag Jacana, Milwaukee

LES VÉGÉTAUX

Bien que la vie elle-même soit difficilement définissable, chaque être vivant peut du moins être caractérisé comme une structure d'existence temporaire formée à partir d'un germe issu lui-même d'un autre être semblable ou presque. Ce germe subit un développement en obéissant à un programme qu'il renferme en lui — à ce que Claude Bernard appelait sa consigne et dont on commence à saisir maintenant la base moléculaire. Ce développement s'accompagne le plus souvent d'une croissance, c'est-à-dire d'une augmentation souvent énorme de la masse de l'individu. Une pareille augmentation est possible grâce à la faculté d'assimilation de matières du milieu externe qui sont élaborées puis incorporées à l'être vivant par lui-même. Cette assimilation existe, d'ailleurs, même en l'absence de croissance puisqu'elle fournit également les combustibles nécessaires à la couverture des dépenses d'énergie que nécessite l'activité de l'être vivant, et permet la synthèse de nouvelle matière vivante, qui vient remplacer celle qui est perdue constamment par suite de destructions liées à l'activité organique ou nécessitées par des remaniements structuraux. L'être vivant est ainsi, suivant l'expression de Cuvier, le siège d'un constant « tourbillon vital ».

L'ensemble des processus qualitatifs du développement et des processus quantitatifs de la croissance conduit l'être vivant à l'état adulte, pendant lequel il est apte à produire de nouveaux germes, sources de nouvelles générations.

▲ Les êtres vivants dépendent étroitement les uns des autres. Ainsi la fécondation croisée des plantes est souvent assurée par des Animaux : Insectes, Oiseaux, voire Chauves-souris.

La plante, être vivant

Le mouvement est à peu près universel chez les êtres vivants. Puisque la croissance se marque par une modification de taille, il y a mouvement de croissance, lent en général, parfois rapide (une hampe florale de bambou peut croître de plus d'un mètre en une nuit). De même, le déploiement des inflorescences ou l'ouverture des fleurs constituent autant de mouvements. Toutefois, chez la plupart des Animaux, l'être adulte est susceptible de se déplacer dans son ensemble ou du moins de mouvoir certains organes, particularité qui manque à la majorité des plantes pluricellulaires. Chez celles-ci, pourtant, divers organes sont aptes à des mouvements sans rapport avec la croissance,

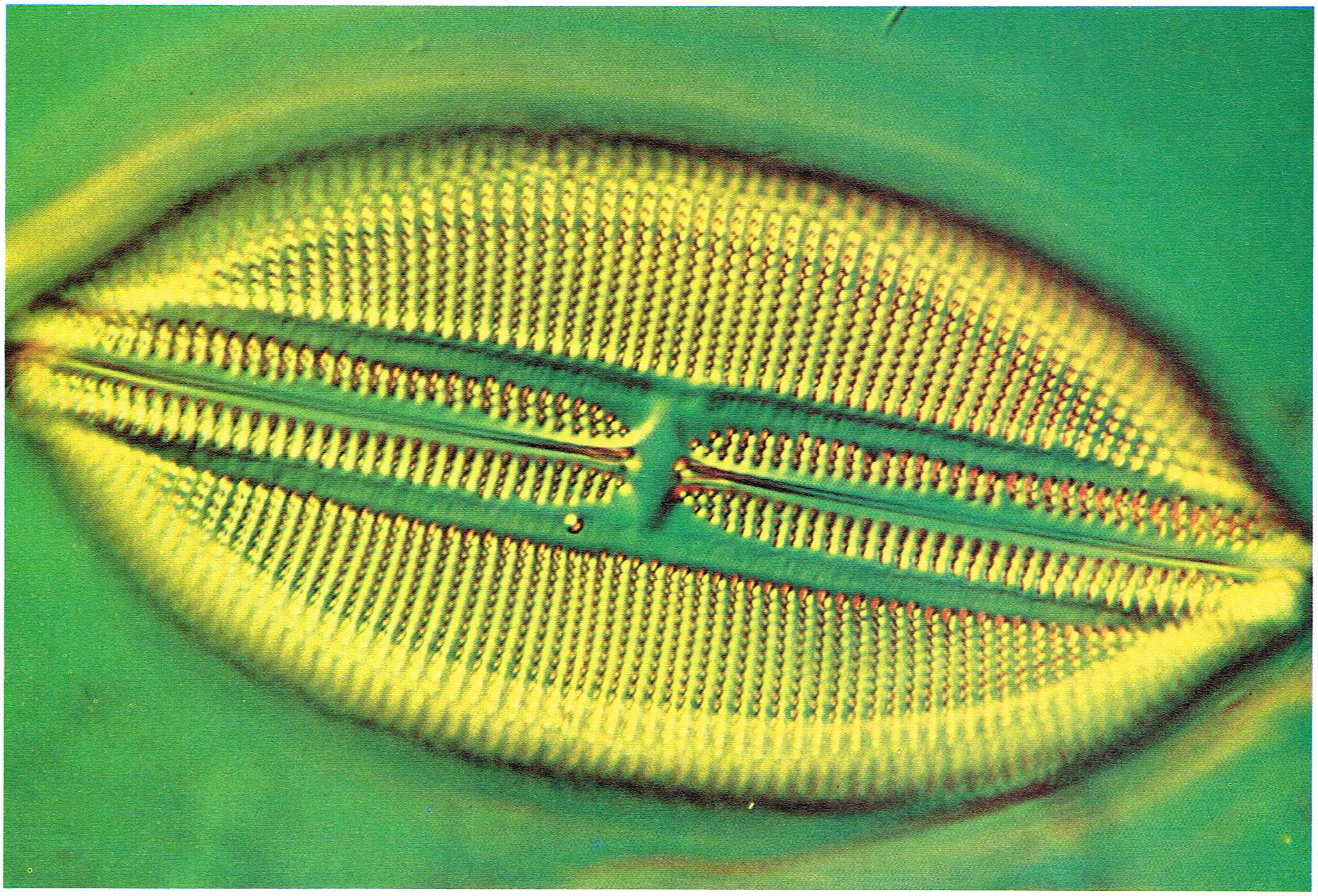

M. Ricard

▲ *Les Diatomées* (*ici,* **Navicula robertsiana**) *sont des Algues unicellulaires à pigments jaunes et à carapace siliceuse bivalve délicatement sculptée.*

ou bien d'origine interne, ou bien déclenchés par des stimulations externes, lumineuses, thermiques, mécaniques. Il en est de même des gamètes mâles de beaucoup de Cryptogames et de quelques Gymnospermes, qui sont attirés par les cellules femelles, sans doute du fait d'un chimiotactisme.

On peut admettre que tous les êtres vivants ont une organisation cellulaire et possèdent deux types de molécules d'acides nucléiques (acides ribo- et désoxyribonucléique), les Virus *mis à part, car un seul des deux acides nucléiques est présent au contraire chez un Virus donné, qui ne peut se reproduire lui-même mais doit l'être par une cellule dont il est parasite.*

De la Bactérie à la tulipe

Dans toute cellule, un cytoplasme, *d'abord considéré comme une substance simple, et qui s'est révélé comme un mélange de plus en plus complexe, contient des organites figurés et abrite au moins une énorme molécule d'acide désoxyribonucléique (ADN), support de la consigne du germe dont il a été question, et qui demeure dans la cellule adulte, ou dans toutes les cellules si l'être est pluricellulaire. Le cytoplasme renferme aussi, lié en partie à certains granules ou* ribosomes, *le second acide nucléique, nécessaire au déchiffrement du code contenu dans le premier. Le cytoplasme est enveloppé d'une membrane cytoplasmique très mince.*

Dans les cas les plus simples l'être est unicellulaire et ne comporte pour tous organites que les ribosomes mentionnés. C'est un mycoplasme, *parasite endocellulaire d'Animaux ou de Végétaux, mais susceptible d'être cultivé sur des milieux acellulaires artificiels. Il se reproduit par scissiparité. Les mycoplasmes ont été considérés comme des plantes, et, en 1967, on a constitué pour eux une classe des* Mollicutes *entrant dans l'ensemble des* Schizophytes. *Toutefois la plupart des auteurs les rangent encore parmi les Bactéries.*

L'organisation peut se compliquer lorsqu'il s'ajoute une paroi squelettique complexe extérieurement à la membrane cytoplasmique, laquelle tend de plus à former des proliférations vers l'intérieur de la cellule. On obtient une structure bactérienne. Les Bactéries peuvent d'ailleurs se dégrader en « formes L » très voisines des mycoplasmes. La possession de la paroi dure rapproche, un peu superficiellement, les Bactéries des plantes dont les cellules ont aussi une paroi squelettique, mais de composition chimique fort différente. Un argument plus sérieux pour ce rapprochement est la possession de chlorophylle par certaines Bactéries, mais il ne s'agit pas de la même chlorophylle que chez les plantes proprement dites, et son support cellulaire est différent.

Les Algues bleues ou Cyanophycées sont assez voisines des Bactéries ; leur nature végétale n'est plus douteuse, la présence de chlorophylle est générale et il s'y ajoute d'autres pigments. Ces

Claude Rives - Marina Cedri

Claude Rives - Marina Cedri

▲ Les Laminariales, Algues brunes, présentent un appareil conducteur quelque peu comparable au liber des plantes vasculaires (à gauche). Les acétabulaires, Algues vertes constituées d'une seule cellule géante pendant une grande partie de leur vie, servent actuellement à de nombreux travaux de physiologie cellulaire (à droite).

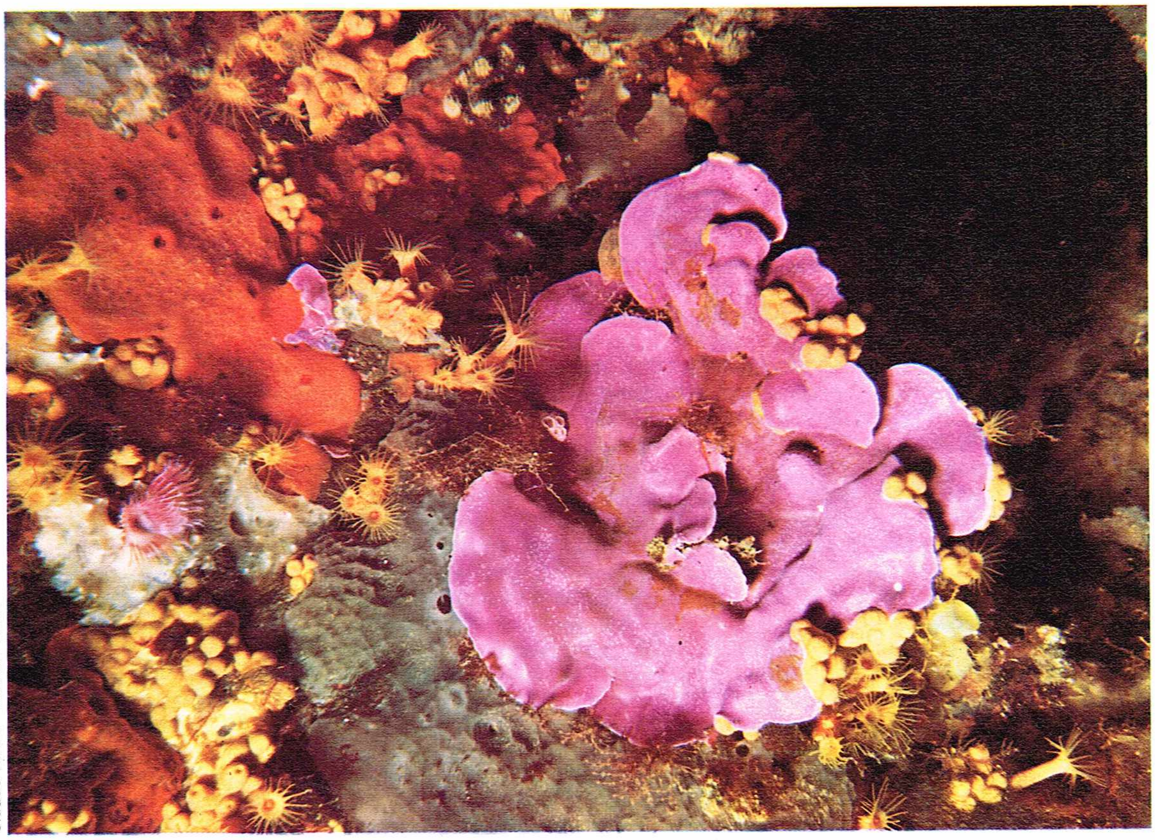

Claude Rives - Marina Cedri

◀ Les Algues rouges de la famille des Corallinacées, comme ici le Pseudolithophyllum expansum, *ont des parois incrustées de calcaire, et leur accumulation a pu donner naissance à des roches.*

▶ *Les Agaricales (ici, l'amanite des Césars) sont des Champignons à basides dont les spores naissent sur les lamelles inférieures du chapeau.*

Bavestrelli, Bevilacqua, Prato

Yves Lanceau - Jacana

▼ *Les Mousses du genre* Splachnum *ont leur capsule dilatée inférieurement en parapluie. Les mouches attirées par cet appendice se couvrent de spores gluantes et concourent à leur dissémination.*

Bernard Mallet - Jacana

substances sont fixées sur des diverticules internes de la membrane cytoplasmique. Il n'y a toujours qu'un peloton nucléique par cellule, mais le cytoplasme abrite aussi des structures membranaires constituant des vacuoles, certaines gazeuses, cela en plus des ribosomes. Les cellules restent parfois isolées, mais elles sont souvent groupées en filaments ou encore en masses tridimensionnelles. La structure de l'épaisse paroi externe est plus comparable à celle des parois des cellules des Végétaux supérieurs.

La présence de chlorophylle permet le processus de la photosynthèse : comme les Bactéries chlorophylliennes, les Cyanophycées sont autotrophes en ce qui concerne leur nutrition carbonée. Elles utilisent le gaz carbonique de l'air pour synthétiser leur propre substance. Et comme, à la différence de la photosynthèse bactérienne, cette photosynthèse s'accompagne de production d'oxygène, on a envisagé que les Cyanophycées aient produit ou contribué à produire l'oxygène de l'atmosphère terrestre. Elles se rencontrent en effet peut-être parmi les plus anciens fossiles connus, vieux de plus de 3 milliards d'années. Les Algues bleues, comme les Bactéries, lorsqu'elles ne sont pas parasites, sont inféodées à un milieu au moins partiellement aquatique.

Parce qu'ils n'ont pas de vrai noyau, enveloppé par une membrane et possesseur de certaines protéines, les Schizophytes, c'est-à-dire les Mycoplasmes, les Bactéries et les Cyanophycées sont considérés comme des Procaryotes *par opposition aux* Eucaryotes *qui vont suivre.*

Chez ces Procaryotes, au moins chez les Bactéries, l'ADN est disposé en une boucle fermée unique. Il n'y a pas de véritable reproduction sexuelle, avec copulation de deux gamètes, mais il existe pourtant une sexualité, bien étudiée chez les Bactéries et dont l'analyse a été abordée chez les Cyanophycées. Une cellule mâle injecte une partie de son ADN, dont la boucle s'ouvre pour la circonstance, à une Bactérie réceptrice femelle qui peut alors acquérir par recombinaison des caractères du segment injecté.

Chez les Eucaryotes, la cellule possède un noyau, c'est-à-dire que l'ADN, qui est bien plus abondant, est réparti en plusieurs filaments ou groupes de filaments alors accompagnés de protéines spéciales et qui sont les chromosomes. *Impossibles à déceler le plus souvent lorsqu'ils sont actifs métaboliquement, c'est-à-dire lorsque la cellule est au repos, en interphase, ils vont s'individualiser en se contractant lors de la division de cette cellule et chacun se clivera de sorte que chaque moitié longitudinale aille dans une cellule fille. De plus, cet ensemble nucléique est enveloppé d'une membrane nucléaire qui d'ailleurs n'empêche pas les rapports cytoplasme et noyau et disparaît le plus souvent lors de la division cellulaire pour se reformer ensuite. Le cytoplasme est beaucoup plus complexe : il comporte des inclusions mitochondriales, siège des enzymes essentielles de la respiration qui, chez les Schizophytes, doivent se tenir sur la membrane cytoplasmique. Un appareil de Golgi est responsable de diverses synthèses, glucidiques en particulier (mais aussi, chez les Diatomées, de la sécrétion de silice). Un réticulum endoplasmique dont la membrane nucléaire est une portion et qui est continu avec l'appareil de Golgi collabore avec ce dernier pour sécréter des protéines. Les ribosomes sont souvent en relation avec lui. Si l'Eucaryote est chlorophyllien, sa chloro-*

S. Prato

phylle est enfermée dans des chloroplastes où elle est portée par des thylacoïdes membranaires. Il y a plusieurs chlorophylles, mais il n'y a pas de chlorophylle bactérienne et la photosynthèse se fait avec émission d'oxygène.

Il existe dans la grande majorité des cas une véritable reproduction sexuée : des cellules particulières (gamètes) sont différenciées; leur fusion totale aux niveaux cytoplasmique et nucléaire forme un œuf qui est le germe de la génération suivante.

Tous les Animaux sont des Eucaryotes, et aucun Animal ne possède de chlorophylle. On voit donc que la connaissance des plantes les plus simples, ou du moins des êtres qu'on leur rapporte un peu conventionnellement, est essentielle à la compréhension de la vie en général, puisqu'il y a évidemment intérêt à en considérer les formes les plus élémentaires pour comprendre les êtres plus complexes qui nous sont plus familiers. Parmi les Végétaux, d'ailleurs, les Dinoflagellés (Algues unicellulaires) méritent peut-être de constituer un grand groupe spécial des Mésocaryotes car leur noyau possède une membrane sans qu'il y existe les protéines spéciales caractéristiques des Eucaryotes (Dodge).

La possession de chlorophylle n'est pas universelle chez les plantes eucaryotes, et l'ensemble des Champignons en est dépourvu. Toutefois la présence d'une paroi squelettique propre à chaque cellule les rapproche des plantes. Pourtant la structure chimique de celle-ci est particulière, et on n'y trouve guère de cellulose, qui est alors atypique. Il y existe au contraire de la chitine, présente aussi dans la cuticule des Arthropodes. Les Champignons possèdent du glycogène comme les Animaux. Pourtant, il s'agit assez vraisemblablement de plantes, mais on ne peut nier qu'ils forment un groupe bien à part, comme le souligne le schéma de Whittaker qui en fait un règne séparé. On leur a pourtant trouvé des analogies avec certaines Algues (Chadefaud).

La structure filamenteuse y est la règle, mais certains sont unicellulaires. Quelques-uns ont des cellules mobiles, avec un appareil locomoteur du type de celui des Eucaryotes, et bien plus complexe que celui des Bactéries.

Si nombre de Champignons vivent en milieu aquatique, beaucoup s'en sont aussi affranchis, et l'absence de cellules nageuses les en rend spécialement indépendants, mais, du fait qu'ils sont dépourvus d'appareil conducteur, ils ne peuvent atteindre de grandes tailles.

Chez les Algues, la présence de chlorophylle est générale ; c'est occasionnellement qu'elle a pu disparaître au cours de l'évolution. Elle est toujours contenue dans des chloroplastes qui, dans ce groupe, ont acquis des formes souvent remarquables. Les Algues forment un ensemble qui a dû évoluer depuis très longtemps de façon indépendante et on y trouve presque tous les niveaux d'organisation : cellules isolées, filaments, lames bidimensionnelles, masses tridimensionnelles peu différenciées, et enfin corps massifs d'organisation complexe, avec différenciation de portions latérales comparables à des feuilles, de méristèmes apicaux et même d'un appareil conducteur qui n'est pas sans ressemblance avec le liber des plantes vasculaires. Mais il n'y a pas de bois. La paroi squelettique est souvent très complexe ; elle est essentiellement formée de cellulose, mais elle peut être remplacée

▲ *Le* Pteridium aquilinum *est la fougère-aigle. Seules, les grandes feuilles très ramifiées ou frondes sont apparentes ; elles sont insérées sur une tige souterraine.*

◀ *Les Lichens résultent de l'association d'un Champignon et d'une Algue verte ou d'une Cyanophycée. Le* Cladonia coccifera *forme des « podétions » dressés, bordés de pourpre.*

P. Castano

P. Castano

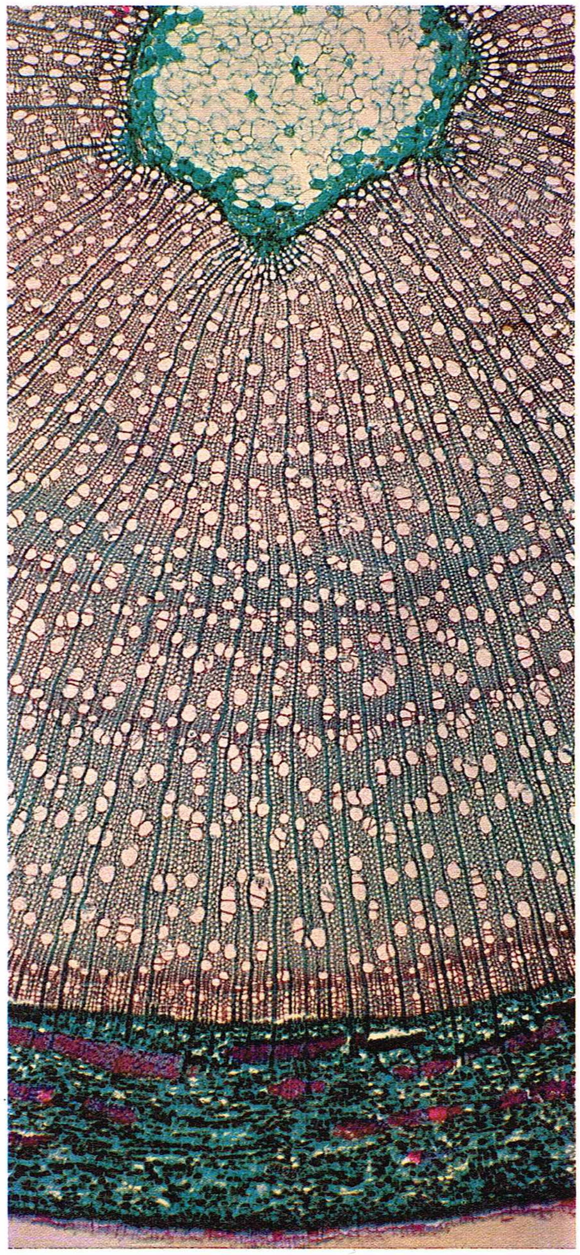

▲ **Les Cycadacées (ici Cycas revoluta) sont des Gymnospermes dont les feuilles sont ramifiées et, dans leur jeunesse, enroulées en crosse comme celles des Fougères. Elles forment des feuilles sexuées qui ne sont pas sans rappeler les pièces florales des Angiospermes.**

▶ **Les Angiospermes Dicotylédones sont les seules plantes actuelles à présenter des formations libéro-ligneuses secondaires, comme celles de ce rameau de peuplier vues en coupe transversale.**

par une carapace cellulosique intérieure cependant à la membrane cytoplasmique chez les Dinoflagellés ou par une pellicule ectoplasmique soudée intérieurement à celle-ci chez les Euglènes.

La nature des chlorophylles et des autres pigments est en bonne corrélation avec d'autres caractères et permet donc de distinguer des groupes d'Algues, vertes, jaunes, brunes et rouges. L'immense majorité des Algues est inféodée au milieu aquatique.

On a voulu voir des rapports entre certaines Algues vertes et les Animaux. Certains stades du cycle vital des Volvox *rappellent ainsi des étapes de l'embryologie des Animaux. Le cycle des Algues rouges a été comparé à celui de certains Champignons ; de même, certains aspects des organes de la fécondation ont été rapprochés dans les deux groupes.*

Les Végétaux eucaryotes considérés jusqu'à maintenant constituent l'ensemble des Thallophytes, *par opposition aux* Cormophytes, *quoiqu'ils soient un groupe bien moins homogène que le second. Ces Thallophytes ne montrent pas de différenciation en tiges et feuilles, sauf chez certaines Algues brunes ; de toute manière, ils ne forment pas de bois, même s'ils présentent un appareil conducteur. Leurs cellules reproductrices ne sont pas élaborées dans des organes complexes à paroi elle-même pluricellulaire, ou* gamétanges, *elles se différencient à l'intérieur d'une seule cellule mère ou* gamétocyste.

Les Cormophytes comprennent les Muscinées ou Bryophytes, les Fougères ou Ptéridophytes et les plantes à graines (Spermaphytes ou Spermatophytes). La plupart d'entre eux ont conquis plus ou moins parfaitement le milieu aérien. Malgré les différences considérables d'aspect, on peut dire qu'il s'agit d'un groupe homogène. L'organisation en tige et feuilles est constante, quoique, chez des Bryophytes et quelques Spermaphytes, on trouve des exemples de régression à une structure de thalle. L'appareil conducteur présente du liber et du bois. Il y a du bois, et peut-être de la lignine chez quelques Bryophytes. Le liber, présent chez un plus grand nombre de ces dernières, est assez comparable à celui des plantes à fleurs, et elles possèdent souvent aussi un tissu analogue au

George Rodger - Magnum

Bavestrelli, Bevilacqua, Prato

bois, même s'il n'est pas lignifié. L'existence de cellules conductrices permet de parler de Trachéophytes au lieu de Cormophytes, encore qu'on évite classiquement d'inclure les Bryophytes dans les Trachéophytes, mais à tort.

Les structures reproductrices sont des gamétanges. La comparaison entre elles est aisée pour ce qui est du gamétange femelle, encore que l'homologation des archégones des Bryophytes, Ptéridophytes ou Gymnospermes avec les cellules sexuées du sac embryonnaire des Angiospermes soit très problématique. Pourtant les Cormophytes peuvent être appelées aussi Archégoniates, tant l'ensemble de l'organisation rapproche les Angiospermes des plantes à archégones classiques.

Il est possible que les Bryophytes dérivent par régression de groupes de Cormophytes plus évolués.

Les Spermaphytes se caractérisent par la présence d'une graine, organe de dissémination par la plante mère et renfermant la spore femelle qui, elle-même, contient le prothalle femelle, dont un ou plusieurs gamètes femelles ont été fécondés ou vont l'être peu après la dissémination. Le plus souvent, un embryon est déjà formé lorsque la graine est disséminée, en particulier chez les Angiospermes. Il est entré en vie ralentie. La graine contient les réserves qui permettront le début de son développement ou germination.

Chez les Angiospermes, les ovules, qui sont les structures dont la transformation va donner les graines, sont enclos dans un ovaire. Celui-ci est constitué de carpelles laminaires reployés, souvent unis les uns aux autres, et portant les ovules sur leurs marges, encore que cette disposition fondamentale soit parfois difficile à saisir. L'ovaire se transformera en fruit après la fécondation ; il est par ailleurs organisé pour la faciliter. Chez les Gymnospermes, les ovules sont souvent aussi portés par des sortes de carpelles, mais ils sont alors le plus souvent dorsaux et les carpelles ne sont jamais clos. Ils forment au contraire de simples écailles (Conifères). Les ovules des Gymnospermes peuvent aussi être portés par l'axe.

▲ ***Le fruit de l'arbousier** (Arbutus unedo), **arbuste propre aux régions méditerranéennes, est une baie globuleuse de saveur légèrement acide (à droite).***

◀ ***Les saules sont dioïques et leurs fleurs sont groupées en chatons. Leur grande simplicité peut être le fait d'une évolution régressive.***

R. Bazzano

▲ **Dans cette forêt des pentes du Kilimandjaro (Tanzanie), la végétation est plus clairsemée que dans la forêt dense, mais les épiphytes sont encore très abondants.**

Étamines et carpelles sont homologues des feuilles végétatives. A ces phyllomes sexués s'ajoutent des phyllomes stériles à rôle protecteur ou attracteur d'Animaux facilitant éventuellement la pollinisation : le calice et la corolle. L'ensemble forme une fleur.

Par la possession de ces fleurs, les Spermaphytes méritent aussi le nom d'Anthophytes, et, comme ces fleurs rendent leur appareil reproducteur très voyant (φανερός), on parle de Phanérogames, *par opposition aux autres plantes ou* Cryptogames.

Une évolution buissonnante

Il semble que les différentes lignées de Végétaux aient manifesté au cours de leur différenciation des aptitudes communes : toutes sont sans doute parties de l'état unicellulaire puis ont formé des thalles filamenteux, laminaires et tridimensionnels. La complication de leur corps a nécessité le développement d'un appareil conducteur au moins par deux fois, chez les Algues et les Cormophytes ; chez ces derniers il a permis l'apparition de formes aériennes très grandes.

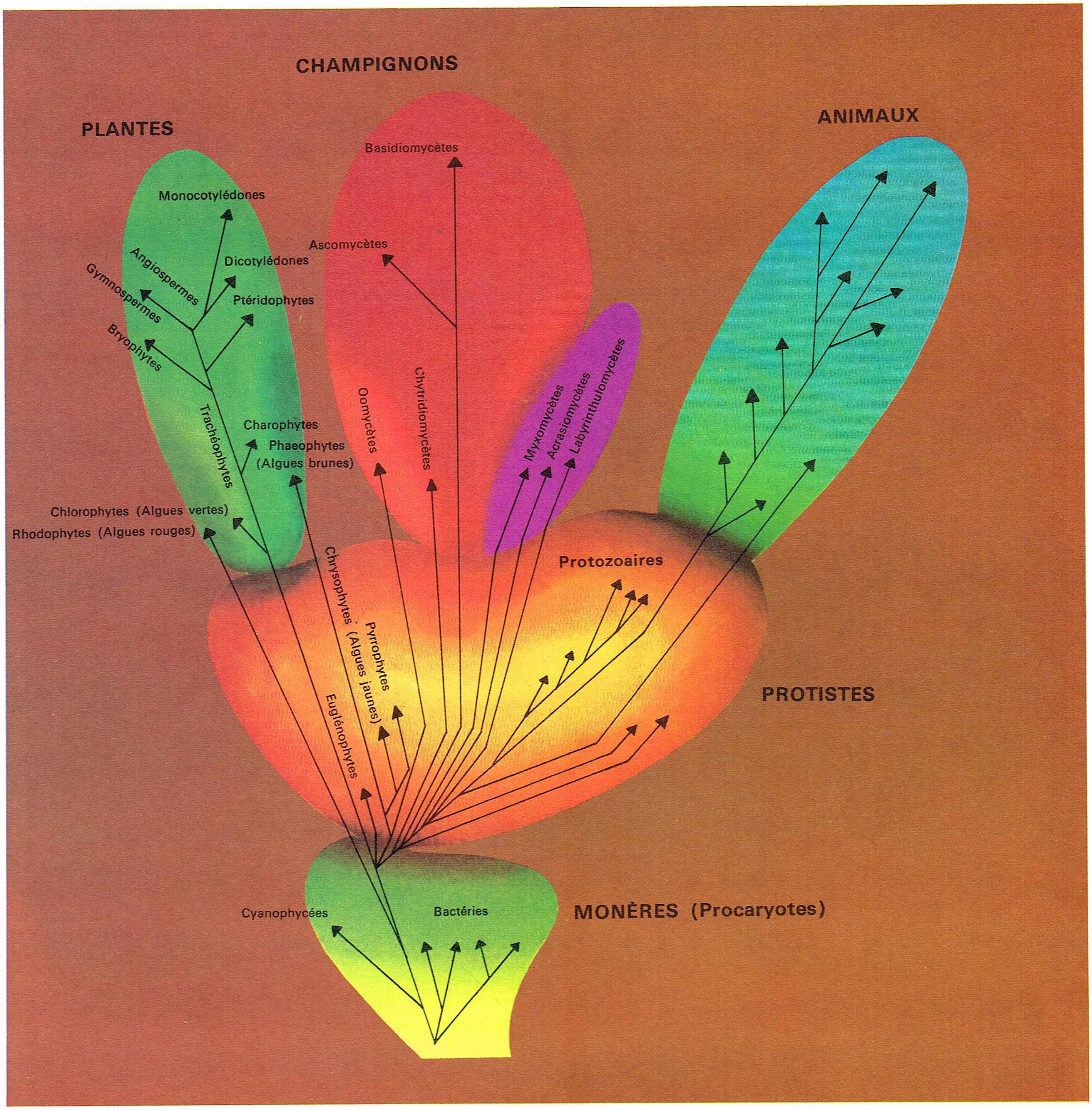

En présence de tels faits, on peut admettre que la nécessité de s'adapter à des conditions communes est seule responsable de la ressemblance entre les groupes présentant le même niveau d'organisation et appartenant à différentes lignées : Algues et Champignons unicellulaires par exemple. Une simple convergence de ce genre rend peu intéressante la formation de « groupes horizontaux » comme celui qui rassemble tous les êtres unicellulaires, Animaux et Végétaux, car ceux-ci sont extrêmement variés, souvent très évolués à leur façon, et d'une manière buissonnante.

Un groupe synthétique disparu d'êtres unicellulaires a dû exister, mais il est perdu. Nous n'avons aujourd'hui que des formes spécialisées de phylums différenciés à partir de ce groupe.

Comme, à un certain point de vue, cet ensemble est cependant le reflet d'une unicellularité ancestrale, on peut partant le considérer comme définissant un niveau d'organisation des Protistes, compris entre celui des Procaryotes (Monères) et celui des Eucaryotes pluricellulaires. C'est ce que représente le schéma de Whittaker (1969). Mais ce tableau ne doit pas être considéré comme un arbre généalogique. Des Bactéries, situées tout à la base, appartiennent au monde actuel et sont aussi évoluées à leur manière que les Angiospermes ou les Arthropodes.

▲ Système du monde vivant à cinq règnes, d'après Whittaker, 1969 (modifié). Dans ce système, les Champignons ne sont pas considérés comme des plantes.

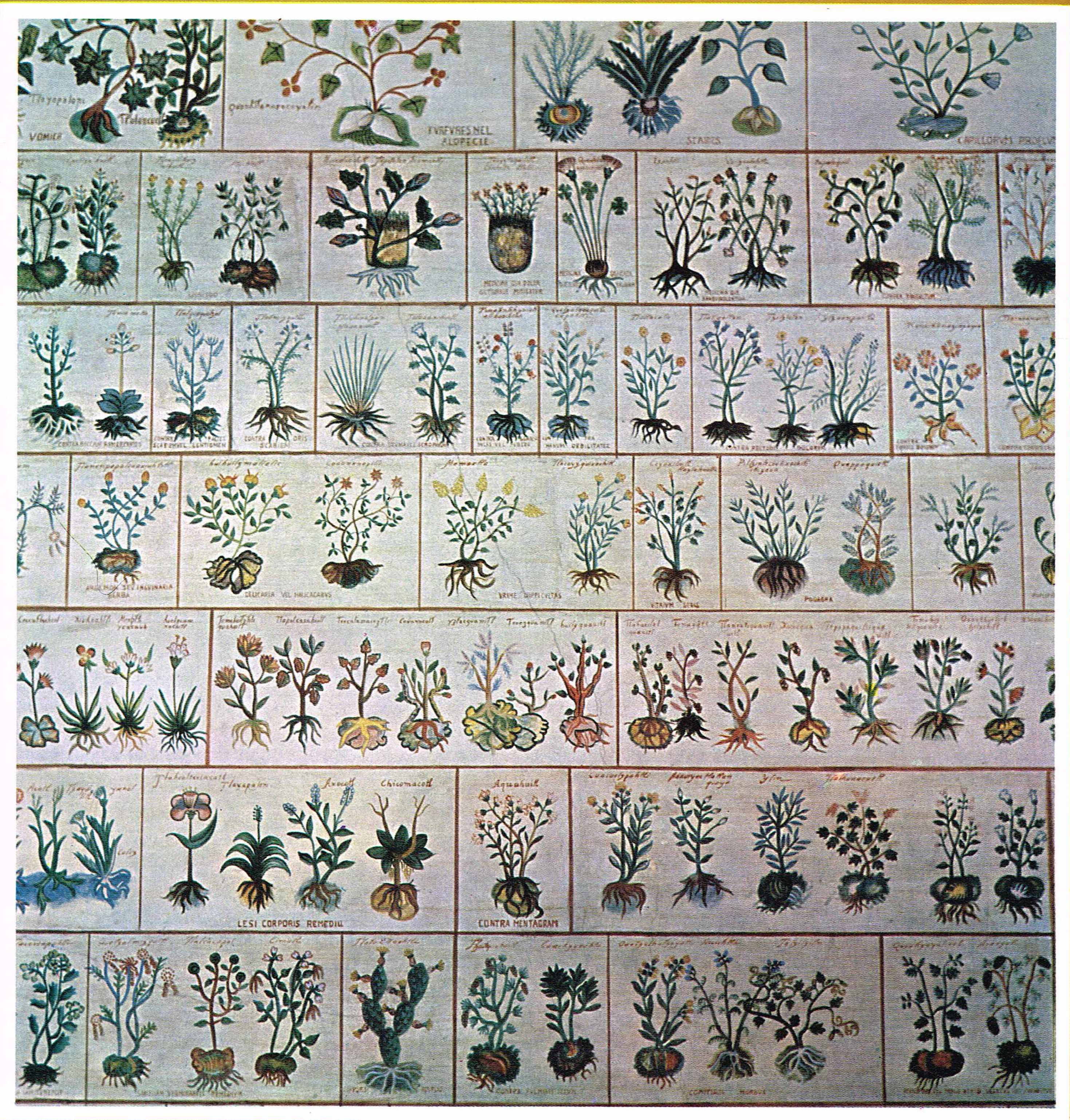

Bavestrelli

▲ *Les hommes comprirent très tôt l'intérêt utilitaire des Végétaux. Les ouvrages relatifs aux plantes médicinales font partie du patrimoine culturel des civilisations les plus reculées. Ainsi le peintre contemporain mexicain Diego Rivera (1886-1957) s'inspira de manuscrits anciens pour composer cette fresque (Mexico).*

ESQUISSE HISTORIQUE DE LA BOTANIQUE

Bien que la plante constitue un objet moins attrayant que l'Animal du point de vue anthropomorphique, dans la mesure où la vie y est moins apparente, l'intérêt utilitaire qui lui fut vite reconnu conduisit de très bonne heure les hommes à se pencher sur elle. Et la réflexion spéculative commença à s'associer, pour le moins dans le monde de la "philosophie" grecque, à la recherche empirique.

Il est remarquable de constater l'ancienneté de la découverte par l'homme des plantes utiles à son alimentation, qu'il s'agisse de céréales de l'Ancien Monde ou du maïs en Amérique, et il faut reconnaître que les trois ou quatre derniers millénaires n'ont apporté que des améliorations à des céréales déjà reconnues sans que de nouvelles espèces puissent être découvertes qui s'ajouteraient aux premières ou les supplanteraient. Cela ne signifie pas d'ailleurs que, même d'un point de vue utilitaire, la préservation de la flore dépourvue apparemment d'intérêt économique soit à négliger. Ainsi, le téosinte, plante voisine du maïs et non exploitable directement, est la source de gènes qui, par hybridation, sont incorporables au génome de la plante utile et peuvent permettre chez elle l'apparition de formes intéressantes qui ne pourraient être obtenues autrement.

*La nécessité dans laquelle nous nous trouvons encore de l'étude à la fois purement descriptive et pratique d'une flore restée relativement vierge comme celle de Madagascar nous replace dans la situation qui était celle de la botanique européenne depuis l'époque antique jusqu'au XVI*e *siècle. L'intérêt pratique avait conduit déjà les* rhizotomes *grecs (« coupeurs », exploiteurs de racines) à élaborer une nomenclature des plantes, et, naturellement, des ressemblances apparaissaient entre elles, conduisant à donner à des groupes de plantes un nom commun, c'est-à-dire à établir une taxonomie. Des divisions et subdivisions du groupe étaient indiquées par des noms supplémentaires correspondant à chacune d'elles, jusqu'à celui d'une plante dont tous les individus étaient ou paraissaient identiques, c'est-à-dire d'une espèce. Mais, comme, souvent, une division suffisait dans le groupe, on aboutissait déjà à une nomenclature binaire.*

*Toutefois, et ceci jusqu'au XVI*e *siècle, la cause des rapprochements de deux ou plusieurs plantes n'était pas toujours tirée de caractères empruntés à la plante elle-même. Ainsi, pour prendre des exemples relevés par Sprague dans les* Herbarum vivae eicones *d'O. Brunfels (1530-36), le rassemblement de plantes disparates sous le nom de* Consolida *reposait sur leur utilisation pour aider à la cicatrisation des blessures. Ou bien des ressemblances très superficielles suffisaient à donner un nom commun à un groupe de plantes : la forme de la feuille conduisait à associer les plantains et l'*Alisma plantago-aquatica*; ou bien une verveine, un séneçon et un sisymbre, par exemple, étaient placés dans le même genre parce que leurs feuilles étaient pinnatifides et leur port, leur* habitus *assez voisins. On comprend aisément que, dans cet ordre d'idée, les herbes et les arbres devaient être séparés en deux grands groupes fondamentaux, et cela depuis l'Antiquité avec Théophraste (370-285 av. J.-C.) jusqu'à la fin du XVIII*e *siècle.*

L'esprit de ces premières classifications survit d'ailleurs dans des classifications populaires actuelles, et il serait intéressant de les comparer à celles qui sont en usage chez des populations « primitives » d'aujourd'hui.

Une appréciation plus précise des vrais rapports des plantes ne pouvait manquer d'apparaître à la suite d'une observation plus soigneuse. Le simple examen détaillé de la feuille d'une verveine et d'un séneçon aurait montré bien des différences. Mais surtout la séparation apparut flagrante quand on considéra l'appareil reproducteur. Des descriptions de fleurs intéressantes mais confuses se trouvent déjà chez Théophraste, mais c'est à André Césalpin (1519-1603), dont le De plantis *parut en 1583, que revient le mérite d'avoir, le premier, utilisé ce critère pour chercher à grouper les plantes. Césalpin s'intéressait spécialement au nombre de loges du fruit, au nombre de ses graines, et au caractère infère ou supère de ce fruit.*

*Charles Linné (1707-1778) dominera la botanique du XVIII*e *siècle, et demeure encore à juste titre le plus célèbre des botanistes. Il serait très dangereux de le juger d'après son seul système sexuel, dont lui-même reconnut toujours le caractère artificiel; il s'attribuait comme un de ses titres de gloire essentiels d'avoir reconnu des genres naturels : ceux de ses prédécesseurs ne l'étaient que dans l'intention, les siens le seront vraiment, dit-il, car il se fondera sur la « fructification », sur l'appareil reproducteur pour leur établissement. Linné était un lecteur de Césalpin, et son approche à ce sujet révèle la même dualité : un certain apriorisme existe, mais l'expérience du botaniste instruit par les confusions de ses ancêtres joue un rôle essentiel. L'appareil végétatif, disait-il en reprenant une vue de Césalpin, n'est que la « chenille » de la plante. Sa métamorphose va donner la fleur, et, comme pour un Insecte, c'est cet imago qu'on étudiera préférentiellement. Quant aux caractères à utiliser parmi ceux de la fleur, Linné était très éclectique : aucune règle préétablie ne vaut alors, c'est le genre qui fait le caractère et non le caractère le genre. La « symétrie » générale de toutes les parties de la fleur doit être utilisée.*

A l'intérieur de ces genres, Linné se vantait d'avoir su reconnaître de vraies espèces, constantes, parce qu'il les avait distinguées de ce qu'il nommait des variétés. Celles-ci étaient pour lui des modifications contingentes des espèces sous l'effet du milieu. Bon nombre des rassemblements qu'il fit ainsi ont dû être à nouveau démembrés, mais il est bien vrai qu'il eut raison de grouper dans une même espèce de nombreuses formes cultivées dont la ressemblance avait échappé aux botanistes qui ne se préoccupaient pas assez de l'appareil reproducteur.

Ces genres peuvent être disposés arbitrairement dans les classes du système sexuel établies d'après le nombre d'étamines, de carpelles ou de styles et de stigmates, la taille relative des étamines, les soudures qui existent entre étamines et ovaire ou entre étamines entre elles, ou la présence d'un seul sexe sur un individu donné. Les classes en question permettent de trouver le nom du genre puis de l'espèce, qui permettra à son tour d'avoir accès à toutes les connaissances qui ont pu être acquises sur elle :

F. Arborio Mella

▲ ***Le premier, Césalpin accorda la plus grande attention à la structure des fruits dans son*** **De plantis** ***paru en 1583.***

▼ ***En publiant en 1694 ses*** **Éléments de botanique,** ***Tournefort inventoria le règne végétal suivant un système qui ne fut détrôné que par la méthode naturelle d'A.-L. de Jussieu, un siècle plus tard.***

Roger-Viollet

Nomina si nescis, perit et cognitio rerum *(Si tu ignores les noms, disparaît aussi la connaissance des choses). Mais cette disposition n'est pas naturelle, la nature rassemble les genres en ordres que Linné commençait à chercher en 1738, auxquels il s'intéressait toujours en 1751 et 1764 et qu'il enseignait en 1764 et 1771. A trois reprises au moins il publia la liste à laquelle il était arrivé. Mais comme il l'écrivait à André Thouin, il n'était pas satisfait de ses résultats, car il ne savait pas trouver de caractères empruntés à l'appareil reproducteur pour définir ses ordres. La réserve que l'étude des botanistes passés l'avait conduit à manifester à l'égard de* l'habitus *l'empêchait alors, comme l'a vu Daudin, d'accorder pleine confiance à ses ordres naturels. Pourtant la comparaison avec les tentatives contemporaines de Bernard de Jussieu et d'Adanson a montré à Stafleu que les résultats de Linné étaient similaires, et Linné est bien l'un des pères de la classification naturelle supragénérique. Il a aussi remarqué l'existence de rapports multiples entre les plantes et comparé le plan du règne végétal à une carte géographique, plutôt qu'à une série linéaire. Il s'opposait en cela à l'idée de chaîne, dominante de son temps, et était certainement dans le vrai.*

Linné, comme on sait, est surtout connu pour la création de la nomenclature binaire. *A l'intérieur de chaque genre, les auteurs prélinnéens cherchaient en général à caractériser chaque espèce par une phrase descriptive qui pouvait être assez longue et qui permettait non seulement* de nommer, *mais de décrire* brièvement *l'espèce. Linné, à partir de 1749 et surtout de 1753, munit chaque espèce d'un* nom trivial, *formé d'un seul mot permettant simplement de la nommer, sans la décrire. La nomenclature binaire fut adoptée très rapidement par les auteurs ; elle est toujours actuellement employée.*

Linné publia les inventaires critiques, descriptifs et synonymiques les plus complets du règne végétal, et son Species plantarum *(1753) ainsi que la partie botanique de son* Systema naturae, *maintes fois réédités et augmentés, prirent la place des livres de Bauhin et Tournefort. Le*

▶ Les peintures de ce manuscrit persan du XVe siècle (Topkapi Sarayi, Istanbul) montrent une stylisation comparable à celle des manuscrits occidentaux de la même époque.

▼ Dans les manuscrits médiévaux, les illustrations de plantes copiées les unes sur les autres devenaient méconnaissables, il en fut de même dans les premiers ouvrages imprimés.

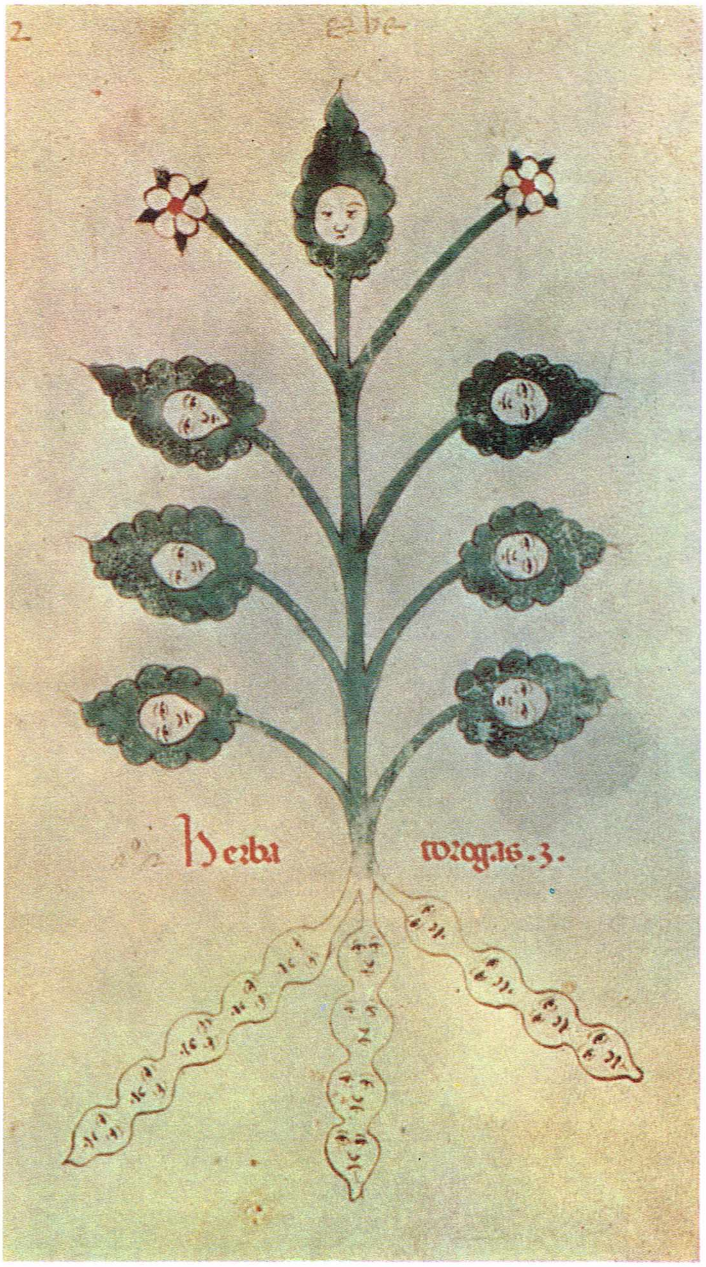

Bavestrelli

Roland et Sabrina Michaud - Rapho

Species *était encore réédité et refondu durant le premier tiers du XIX*e *siècle.*

Michel Adanson (1727-1806) est important pour avoir lourdement et justement insisté sur la nécessité de tenir compte de tous les caractères des plantes dans l'établissement de leurs rapports.

Ensuite, suivant les cas, on pourra choisir tel ou tel organe pour caractériser une famille. Toutefois, on vient de le voir, la démarche de Linné n'était pas tellement différente. Le désir de rechercher des caractères floraux était sage, et, encore aujourd'hui, les familles sont caractérisées essentiellement d'après leurs fleurs.

Le système de Bernard de Jussieu (1699-1777) comportait dans son dernier état des familles comparables aux ordres naturels de Linné dont il s'était probablement inspiré. Comme l'a vu Dumortier, celles-ci étaient rangées en Acotylédones (Cryptogames), Mono- et Dicotylédones, puis, à l'intérieur de chacun de ces groupes, ordonnées suivant les classes fondées sur l'insertion des étamines et proposées

Bibliothèque nationale - Snark International

◀ *Le* Traité des simples, *de Platearius, ici en manuscrit, devait servir à la compilation de certains des premiers livres de botanique, à la fin du XV*e *siècle.*

par Gleditsch en 1749 et 1764. C'est au neveu de Bernard, Antoine-Laurent, qu'est due en fait l'expansion de la classification naturelle. Ce dernier exposa en 1773 ses principes généraux, tenant compte de l'insertion des étamines. Il perfectionna ensuite son système et l'utilisa en 1789 pour son Genera plantarum *dont le retentissement considérable marque l'introduction effective de la méthode naturelle dans le monde des botanistes.*

A.-L. de Jussieu établit lui aussi ses familles, au nombre de cent en 1789, en s'appuyant principalement sur son intuition, mais, à la différence

Muséum national d'histoire naturelle, Paris

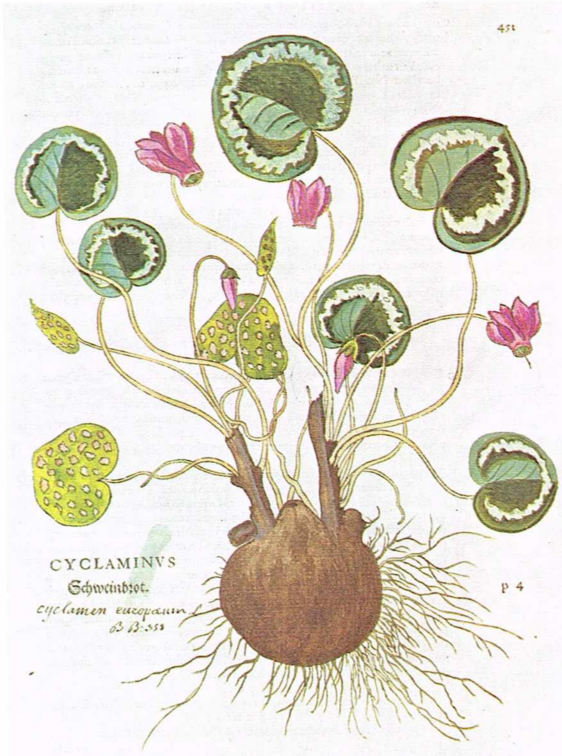

◀ *En 1542, paraît le* De historia stirpium *de L. Fuchs qui contient de beaux dessins de plantes faits d'après nature, moins vivants pourtant que ceux de Weiditz. Certains exemplaires, tel celui-ci, étaient vendus coloriés par leur éditeur bâlois, M. Isengrin.*

de Linné, il sut leur trouver des caractères fondés sur la structure florale, sans négliger nullement d'ailleurs l'appareil végétatif, et il ne craignit pas de s'en servir pour établir une classification pratique. Toutefois, en ce qui concerne l'établissement des groupes supérieurs, il accorda un peu trop d'importance aux caractères effectivement utiles de l'insertion des étamines (hypo-, épi- ou périgyne), importance qui lui paraissait révélée par la constance de ces caractères dans les familles naturelles bien délimitées. Il aboutit ainsi à la création de groupes plus ou moins artificiels.

A.-P. de Candolle (1778-1841) fut en France puis en Suisse le successeur le plus direct d'A.-L. de Jussieu.

Pour tous ces auteurs, la recherche de la méthode naturelle n'allait pas de pair avec celle du fondement matériel de la parenté. A vrai dire, Linné avait cherché à rendre compte de la ressemblance entre groupes en envisageant une origine naturelle des uns à partir des autres, par l'hybridation. Bien qu'il soit souvent considéré comme un parangon du fixisme, il faut tout au contraire voir en lui un des tout premiers savants à avoir réalisé que la reconnaissance d'une parenté naturelle *impliquait la recherche d'une* cause naturelle des ressemblances. *Là comme ailleurs, il apparaît comme un auteur résolument « moderne ». Jussieu ou Candolle, au contraire, ne se préoccupaient absolument pas du problème.*

La méthode naturelle triomphait, et, dans la perspective adansonienne, on allait faire intervenir de plus en plus de caractères dans la recherche des affinités, mais l'interprétation génétique de celles-ci n'était pas envisagée. Ainsi Robert Brown (1773-1858), John Lindley (1799-1865), George Bentham (1800-1884) et Joseph D. Hooker (1817-1911), grands descripteurs de groupes et d'espèces nouveaux et auteurs d'ouvrages généraux essentiels, ne se préoccupaient point de la question de façon

Muséum national d'histoire naturelle, Paris

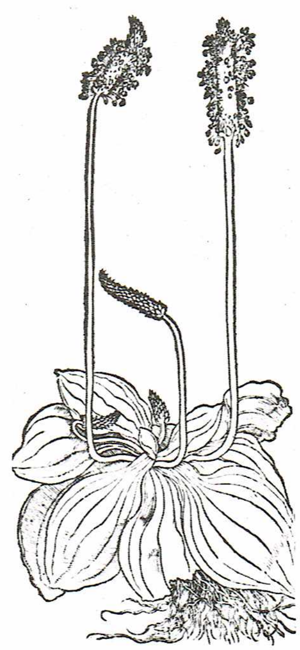

▼ *Par les dessins d'H. Weiditz qu'elles contiennent, les* Herbarum vivae eicones *d'O. Brunfels (1530) marquent une date essentielle de l'histoire de l'illustration botanique.*

F. Arborio Mella

▲ ***A. P. de Candolle, au début du siècle dernier, créa la morphologie des plantes à fleurs, répandit l'usage de la méthode naturelle et fut l'un des plus féconds descripteurs de taxons nouveaux.***

apparente, bien que Hooker fût un ami personnel de Darwin, et qu'il eût pris prudemment position en faveur du transformisme.

En vérité, le siècle se marque surtout par l'apport de matériel nouveau, dû aux voyages d'exploration. Ainsi, tandis qu'au milieu de sa vie, Linné connaissait un peu plus de huit mille cinq cents espèces végétales, Persoon, en 1807, pouvait inventorier vingt-six mille Phanérogames, et, tandis que, dans la première édition de son Nomenclator botanicus, *Steudel, en 1824, reconnaissait un peu moins de cinquante-six mille espèces au règne végétal tout entier, il trouvait soixante-dix-huit mille Phanérogames dans sa seconde édition, en 1844.*

La description des espèces nouvelles s'est poursuivie, et, actuellement, près de trois cent mille Phanérogames sont inventoriées. La liste en est donnée par un index général établi et mis constamment à jour aux Royal Botanic Gardens *de Kew, d'où son nom d'*Index Kewensis. *Il fut entrepris à l'initiative de Darwin. L'inventaire est encore loin d'être terminé.*

Phylogénie et botanique

L'idée d'évolution introduite par Darwin, malheureusement inextricablement mêlée à une théorie explicative qui était et demeure beaucoup plus hypothétique, ne pouvait manquer finalement d'influencer la botanique. Il fallait chercher à reconstituer l'histoire du monde végétal, c'est-à-dire à interpréter par des rapports génétiques les relations observées actuellement entre les groupes. Dans le cas des Angiospermes, la paléontologie ne fournit pratiquement aucun fossile qui éclaire leur origine et les rapports de parenté entre leurs divers groupes. La nouvelle science de la phylogénie *était donc réduite à une interprétation historique des résultats de l'étude des plantes actuelles.*

Celle-ci, fondée sur la comparaison des plantes grâce à une morphologie de plus en plus précise, avait conduit aux études typologiques. On s'était aperçu, déjà avec Linné, surtout avec Goethe (1749-1832) et Candolle, que des organes d'aspect différent pouvaient avoir la même signification, parce que des intermédiaires gradués existaient entre eux chez la même espèce ou des espèces voisines. Les deux organes étaient analogues *au sens de Geoffroy Saint-Hilaire ou de Turpin, ou, comme on dit aujourd'hui,* homologues.

D'un point de vue métaphysique, comme disait Moquin-Tandon, les êtres membres d'un même groupe étaient « dérivés » du type de ce groupe. Il allait suffire aux évolutionnistes, à commencer par Darwin, de considérer que cette parenté jusque-là imagée était bien réelle. Comme il y avait plusieurs façons de comprendre les groupes et leurs types, on ne tarda pas à constater qu'il allait hélas y avoir plusieurs phylogénies possibles, et que la phylogénie ne pourrait en aucune façon trancher entre les possibilités issues de l'étude des Végétaux actuels, puisqu'elle n'en était elle-même que le reflet.

La taxonomie classique, lors même qu'elle n'était pas évolutionniste, cherchait à approfondir l'étude des plantes pour mieux saisir leurs rapports. L'état des connaissances où nous nous trouvons aujourd'hui ne doit donc pas être porté entièrement au crédit des théories évolutionnistes. Il est probable pourtant que le désir d'établir une phylogénie plus solide a été une incitation à chercher les rapports entre plantes d'une façon toujours plus approfondie.

C'est encore ce qui se passe de nos jours. Il ne faut pourtant pas manquer de souligner que la paléobotanique, dont Ad. Brongniart (1801-1876) fut en quelque sorte le Cuvier, a connu de beaux succès avec l'étude de groupes totalement disparus qui nous donnent, par exemple, une idée précise du mode de genèse des plantes

▶ ***Durant la seconde moitié du XVII**[e]** siècle, l'Académie des sciences de Paris voulut préparer une grande*** **Histoire des plantes.** ***Seules trois cent dix-neuf magnifiques gravures virent le jour. Celle-ci, due à Abraham Bosse, appartient à une série d'épreuves coloriées de la bibliothèque du Muséum d'histoire naturelle.***

▶ ***Linné, prince des botanistes, fit au début de sa carrière un voyage en Laponie et écrivit une*** **Flora lapponica.** ***Il est représenté vêtu d'un costume lapon sur ce portrait extrait du*** **Temple of Flora** ***(1799) de R. J. Thornton (à droite).***

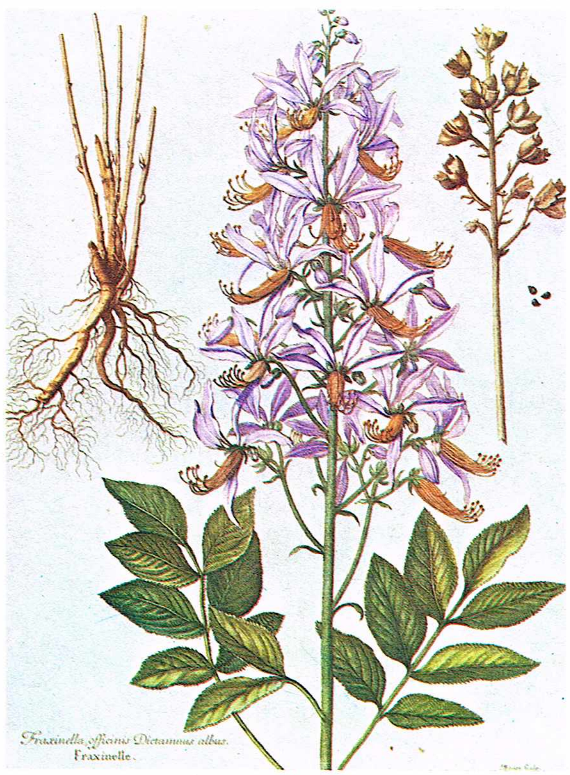

Muséum national d'histoire naturelle, Paris

Muséum national d'histoire naturelle, Paris

vasculaires au Silurien et au Dévonien. Celles-ci nous révèlent l'existence, lors de l'évolution, de tendances générales qui vont pouvoir être appliquées raisonnablement à la reconstitution de la phylogénie de groupes pour lesquels aucun fossile n'est connu. C'est ce à quoi tend l'ensemble de concepts morphologiques que Zimmermann a précisés après Lignier et réunis sous le nom de théorie du télome.

La paléobotanique a aussi bel et bien pu éclairer directement l'évolution de quelques groupes modernes pour lesquels des fossiles étaient disponibles. C'est par exemple le cas de l'appareil reproducteur femelle des Conifères. Mais, même en présence de fossiles, les formes modernes, plus nombreuses et plus accessibles, doivent toujours être prises en considération, et bien souvent elles sont seules disponibles.

*En étudiant les homologies entre formes modernes, Geoffroy Saint-Hilaire ou Candolle avaient été amenés à insister sur la notion d'organes rudimentaires, inutiles pour l'individu mais existant sous une forme fruste parce qu'ils se trouvaient dans le type plus complexe dont « dérivait » l'Animal ou la plante en question. Transposé sur le plan historique, cela devait conduire à la notion d'*évolution régressive*. Bien que la tendance à la complication soit très généralement admise encore dans beaucoup de cas par les évolutionnistes, il ne faut pas en effet négliger l'existence de structures qui ne sont simples que par simplification secondaire à partir d'ancêtres complexes. Elles sont, si l'on veut,* surévoluées*. C'est le cas, on le sait, de beaucoup de parasites ou de plantes aquatiques.*

Mais, bien souvent, on hésitera entre l'interprétation d'une structure comme réellement primitive ou comme surévoluée.

La notion d'évolution régressive a rencontré un grand succès dans les pays anglo-saxons, qu'il s'agisse d'interpréter l'évolution des plantes à fleurs ou celle des Cryptogames. Dans le cas des premières, on se trouva ainsi dès la fin du siècle dernier en présence de deux grandes conceptions qui se partagent encore les botanistes, quoique fort inégalement. Ou bien, avec l'Américain C. E. Bessey (1845-1915) et la grande majorité des auteurs actuels, on interprétera les plantes arborescentes à fleurs simples (« Amentifères ») comme fort évoluées et simplifiées par rapport aux types à périanthe complexe et à étamines nombreuses que représentent les Magnoliacées ou les Renonculacées. Ou bien, avec l'Allemand A. Engler (1844-1930), on n'acceptera pas que la simplicité soit toujours secondaire et on pensera qu'une partie au moins des plantes à fleurs provient de plantes comparables aux « apétales » arborescentes à structure florale simple. Et on ne peut effectivement nier que, si des Magnoliales sont connues très anciennement, dès le Crétacé, les Fagacées, Bétulacées ou Salicacées sont tout aussi anciennes. On se trouve donc réduit là encore à l'étude des formes modernes pour reconstituer la phylogénie.

Si l'on reconnaît la primitivité de certaines structures simples, il ne faudrait pas d'un autre côté vouloir en faire dériver toutes les autres formes, et Engler ne tombait pas dans ce travers. Bien des théories modernes, au contraire, ont été proposées qui ne sont pas si prudentes : elles ne peuvent s'appuyer sur aucun fossile, et elles négligent les acquis solides de l'étude des formes actuelles.

Muséum national d'histoire naturelle, Paris

▲ De bonne heure, l'homme a su domestiquer des plantes utiles à son alimentation. J. S. Kerner publia entre 1803 et 1815 un grand ouvrage sur le raisin.

Phylogénie et anatomie

Dans la recherche de la parenté entre groupes, on a été amené à utiliser de plus en plus des caractères « anatomiques », c'est-à-dire, souvent, histologiques, et plus particulièrement la structure du bois, qui est fréquemment la seule partie utilisable des fossiles.

*Beaucoup d'auteurs acceptent sans critique sérieuse les arguments fondés sur l'histologie du bois. Pourtant des Gymnospermes fossiles, là encore, sont très démonstratives et incitent à la prudence. On connaît des bois fossiles à structure proche de celle des bois d'*Araucaria *actuels, mais, pourtant, on a des raisons solides de penser qu'ils n'en sont point les ancêtres directs.*

Il faut en fait insister sur deux précautions à prendre dans ce genre d'études : ne pas accorder hâtivement trop d'importance à l'histologie du bois, et ne pas considérer que l'existence de caractères très probablement primitifs chez une

▶ *Le bois s'est souvent fossilisé; parfois des fûts entiers forment des forêts pétrifiées comme celle-ci photographiée en Arizona (U.S.A.). La connaissance de l'anatomie du bois permet la classification de ces restes.*

Inge Morath - Magnum

▼ *Les* Otozamites *et* Ptilophyllum *sont des Bennettitales, Gymnospermes fossiles de l'ère secondaire dont les structures reproductrices ont de superficielles analogies avec des fleurs d'Angiospermes.*

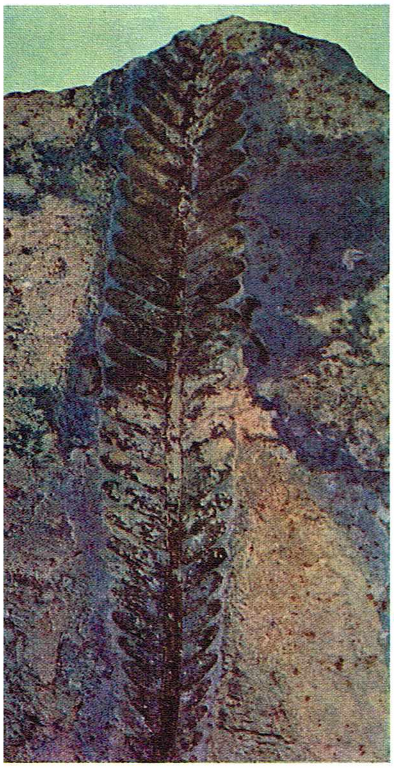

Bavestrelli, Bevilacqua, Prato

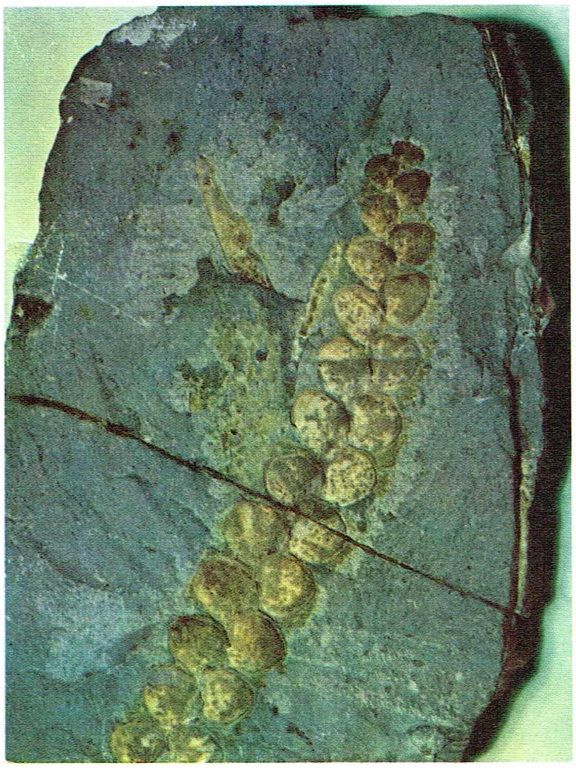

Bavestrelli, Bevilacqua, Prato

plante entraîne la primitivité de tous les autres. Il n'en est pas moins vrai que des corrélations solides existent dans bien des cas entre les degrés d'évolution des caractères, ce que Sporne en particulier s'est attaché à démontrer, mais, pour reprendre l'exemple du bois, on trouve des structures primitives chez des Gamopétales, par exemple.

La nouvelle systématique et la phylogénie

Certains des arbres généalogiques du passé étaient fondés déjà sur des arguments de type bien différent, en particulier celui de Carl Mez (1866-1944), publié vers 1925, qui s'appuyait en partie sur des arguments sérologiques et admettait le monophylétisme des plantes à fleurs, avec les Renonculacées proches de leur origine. Les méthodes sérologiques furent ensuite longtemps négligées mais connaissent à nouveau une certaine faveur : il s'agit de chercher si des anticorps préparés à partir des protéines d'une certaine plante vont réagir plus ou moins avec les protéines antigéniques issues d'une autre. Une parenté antigénique pourra être établie. Les nouvelles tentatives ne paraissent pas encore avoir permis de vue d'ensemble des plantes à fleurs ou des Angiospermes.

Le déchiffrement direct du code génétique des plantes est loin d'être envisageable. Et

comme le remarquait Heslop-Harrison, si même il l'était, il n'est pas sûr qu'il livrerait la clef des parentés, puisque les identités structurales entre groupes voisins au départ se sont naturellement obscurcies au cours de l'évolution. Toutefois le degré de différence des codes des divers organismes serait peut-être une mesure de leur parenté plus ou moins grande. C'est évidemment déjà le cas en ce qui concerne les ressemblances morphologiques ou autres, mais on peut penser que celles-ci n'expriment qu'une partie du code, et que sa connaissance totale sera plus instructive.

A défaut de pouvoir déchiffrer la structure de l'ADN tout entier, on a du moins cherché à comparer sa concentration par cellule, ou les rapports des concentrations des bases qui y sont contenues. Mais, surtout dans le cas des plantes supérieures, on a voulu comparer la structure d'une même protéine chez diverses plantes. C'est ainsi que les séquences d'acides aminés de la protéine du cytochrome C (hétéroprotéine impliquée dans le transfert des électrons lors de la respiration cellulaire) ont permis à Boulter et à ses collaborateurs (1972) de proposer une phylogénie raisonnable des espèces étudiées. Pour cela, les auteurs ont apprécié mathématiquement l'ordre dans lequel on doit placer leurs plantes pour que les structures les plus différentes soient les plus éloignées. Il faut évidemment admettre alors que la ressemblance ne résulte pas de surévolution ou de convergence : à quelque niveau qu'il se place, le phylogéniste sans fossiles rencontre toujours les mêmes problèmes, qui, dans ce cas, seraient plus ou moins cernables mathématiquement.

La chimiotaxonomie

On a aussi beaucoup développé l'étude chimique des constituants des plantes en tentant d'en utiliser les résultats pour l'appréciation des affinités, c'est-à-dire de faire de la chimiotaxonomie.

Là comme ailleurs, il faudra se méfier de convergences flagrantes : présence de nicotine chez les tabacs, mais aussi chez des Equisetum (prêles), présence du même hétéroside cardiotonique, inconnu ailleurs, chez le muguet et la giroflée. Mais dans bien des cas, des problèmes particuliers ont pu être débrouillés grâce à des recherches chimiques : le genre Helleborus par exemple peut être caractérisé par la présence de bufadiénolides (substances proches des principes actifs des venins de crapauds), le genre Pyrus (poirier) possède de l'arbutine, tandis que le genre Malus (pommier) n'en possède pas, et cela est un argument pour leur séparation ; une certaine catégorie de pigments (bétacyanines) qu'elles possèdent en commun rapproche les Didiéréacées et les Cactacées des Centrospermales, comme des morphologistes l'avaient déjà pressenti. Mais l'absence de ces mêmes pigments chez les Caryophyllacées et les Molluginacées n'empêche pas qu'on doive les rapporter au même ordre des Centrospermales. Les alcaloïdes de la famille de la benzylisoquinoline caractérisent bien l'ensemble des Magnoliales et des Ranunculales, et leur présence chez les Rutacées et les Papavéracées est un argument pour le rapprochement de tous ces groupes. Mais les alcaloïdes en question se trouvent aussi dans des familles bien différentes : Aracées, Orchidacées, Euphorbiacées... Il s'en trouve également chez les Aristolochiacées dont le rapprochement avec les Magnoliales-Ranunculales a été proposé sur d'autres bases.

Il est clair que les arguments chimiques ne peuvent intervenir que parmi d'autres. Pourtant Meeuse ou Bate-Smith se sont récemment fondés sur eux pour proposer de nouveaux systèmes des Angiospermes. Bate-Smith aboutit à l'idée d'un triphylétisme des Angiospermes, et les Magnoliales en particulier ne sont plus a source que d'une petite partie de ces plantes, l'essentiel des Angiospermes se partageant entre deux lignées issues des Hamamélidacées et des Dilléniacées. L'absence d'acide ellagique chez les plantes de la première lignée conduit à leur isolement. On peut évidemment se demander pourquoi une telle importance est attribuée à cet acide. Les Rutacées dont nous disions tout à l'heure la parenté possible avec les Renonculacées, ne se trouvent plus maintenant dans la même lignée, bien que le fondement de la classification soit chimique dans les deux cas !

La cytotaxonomie

Les idées évolutionnistes devaient aussi conduire à des préoccupations plus modestes mais à résultats plus tangibles. Les rapports entre bien des familles demeuraient pour beaucoup peu accessibles à l'expérience et même à

Muséum national d'histoire naturelle, Paris

▶ *Les* Michelia, *voisins des magnolias, appartiennent aux Angiospermes qui semblent avoir conservé le plus de caractères primitifs. (K. L. Blume,* Flora Javae, *1828-1829.)*

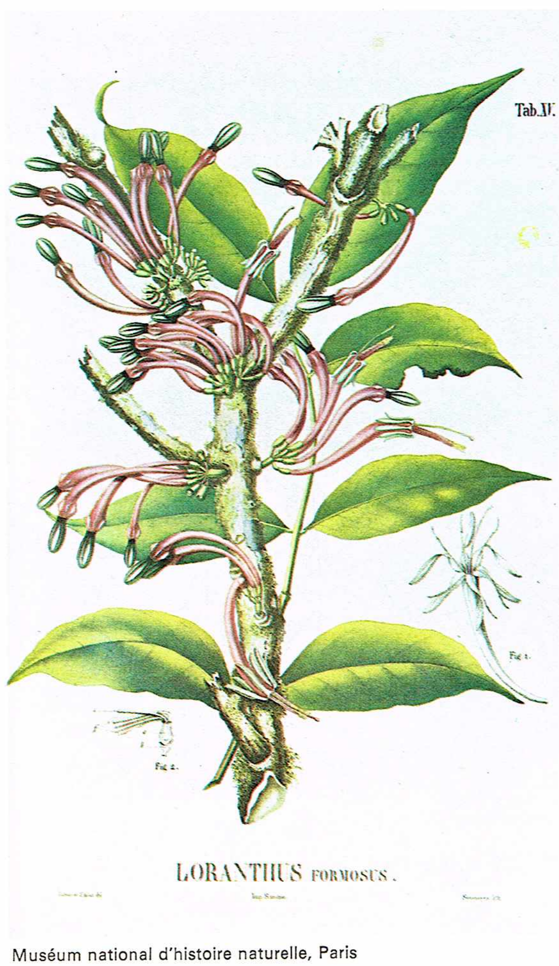

▶ *Les* Loranthus *sont des plantes hémiparasites abondantes sous les tropiques. Leur famille n'est représentée en France que par deux espèces dont le gui. (K. L. Blume,* Flora Javae.)

Muséum national d'histoire naturelle, Paris

l'observation. On se contentait à leur sujet de dispositions commodes mais assez artificielles. Néanmoins, puisque les espèces se modifiaient et que la biologie générale montrait comment, dans une certaine mesure, par apparition de mutations, on allait pouvoir au moins préciser les rapports entre espèces voisines, et non plus entre groupes plus ou moins éloignés. Parce que les différences étaient moins grandes, on pouvait espérer reconstituer en partie par l'expérience les transformations survenues chez les ancêtres d'espèces actuelles. Et puis rien n'empêchait d'espérer assister à la genèse spontanée d'espèces qui devaient bien naître encore de nos jours.

Ces attentes ont été réalisées. Toutefois il ne faudra pas se hâter d'extrapoler et d'admettre que les processus de la spéciation *ainsi mis en évidence fournissent l'explication de l'évolution tout entière. On a vu se former des espèces, mais non des groupes supérieurs nouveaux à organisation profondément neuve.*

Lorsque le rôle génétique des chromosomes fut connu, on fut tenté de leur accorder une grande importance comme critère de classification. Mais, pas plus que la fleur dans son ensemble, les chromosomes ne peuvent être considérés comme le support de caractères toujours décisifs. Ils fournissent simplement souvent des caractères utiles.

Leur nombre est le critère le plus facile à apprécier, et souvent des espèces ou des sous-espèces difficiles à distinguer morphologiquement vont avoir des nombres chromosomiques bien distincts : le polypode vulgaire comporte de nombreuses formes dont les rapports étaient obscurs ; on a pu les répartir en trois espèces qui possèdent 74, 148 ou 222 chromosomes.

Mais, fréquemment, des espèces extrêmement distinctes auront le même nombre chromosomique, ou bien une espèce unique montrera divers cytotypes *à nombres chromosomiques différents, mais absolument indistincts morphologiquement. Et ceux-là différeront soit parce que les uns ont deux ou quatre fois plus de chromosomes que les autres (polyploïdie), soit parce que certains ont quelques chromosomes seulement de plus (aneuploïdie).*

Assez souvent, quelques problèmes ont pu être résolus en montrant que certaines espèces proviennent de croisements entre espèces préexistantes dont les produits, d'abord stériles, ont acquis la fertilité par doublement de leur nombre chromosomique. Ces interprétations se vérifient directement par la synthèse *de l'espèce en question. De beaux exemples en ont été fournis chez les Fougères, les Labiées ou les Crucifères.*

Dans l'ensemble, cette cytotaxonomie (taxonomie à l'échelle de la cellule) a donc fourni sur les rapports entre espèces beaucoup de précisions de détail du plus grand intérêt à condition qu'elles soient confirmées par d'autres données. Elle permet aussi de se faire une idée de certaines relations entre groupes plus vastes, comme Ehrendorfer *et ses collaborateurs l'ont montré dans le cas des familles de Magnoliales.*

Elle a été associée à l'étude de l'écologie et de la biogéographie dès qu'on a trouvé que la différenciation des cytotypes était liée en partie à la diversification des milieux rencontrés par une plante qui se répand à partir d'un certain centre de dispersion. Cela vaut pour les polyploïdes, qui sont généralement plus résistants

Claude Nardin - Jacana

que les diploïdes et colonisent des régions où le climat est plus rigoureux. Entamés vers 1930 par G. Tischler et I. Manton, ces travaux cytologiques et biogéographiques furent poursuivis en particulier par l'école de C. Favarger à Neuchâtel.

La palynologie

Parmi les autres orientations de la taxonomie moderne, on doit signaler la grande importance prise par les recherches morphologiques concernant les pollens et les spores. La substance de la paroi externe de ces éléments, ou sporopollénine, étant l'une des plus résistantes qui soient formées par les êtres vivants, les paléobotanistes ont cherché à utiliser les pollens et les spores qui sont souvent les seuls restes dont ils puissent disposer. Partant de là, on s'est avisé que l'étude des pollens pouvait servir à la recherche d'affinités entre les plantes actuelles. Dans la période contemporaine, la morphologie du pollen a été très étudiée, alors que la morphologie végétale en général tombait plus ou moins en désuétude. Là encore, il n'y a pas lieu d'accorder au critère pollinique d'importance particulière, son originalité essentielle étant d'être difficile à voir. Ainsi, il a permis récemment de distinguer deux genres d'Annonacées. L'auteur qui a procédé à cette révision signale qu'il existe en faveur de cette séparation des arguments de morphologie florale. Il faut bien voir que ceux-ci, à eux seuls, auraient pu suffire. L'étude des carpelles ou des feuilles, si délaissée actuellement, aurait peut-être pu apporter également d'autres critères tout aussi respectables, et bien plus accessibles.

Dans d'autres cas, la palynologie a effectivement été précieuse. L'existence d'un pollen à un seul sillon, de type monocotylédonoïde, chez les Nymphéacées proprement dites est intéressante en ce qui concerne la phylogénie des Monocotylédones. Au contraire, le Nelumbo (lotus), classiquement rangé parmi les Nymphéacées, possède un pollen à trois pores, de type dicotylédonoïde. Phytochimiquement, d'ailleurs, le Nelumbo est la seule Nymphéacée à ressembler aux Polycarpiques par la possession d'alcaloïdes à benzylisoquinoline. La distinction d'une famille des Nélumbacées peut donc parfaitement être envisagée. Des différences morphologiques importantes la justifient aussi : seul parmi les Nymphéacées, Nelumbo n'a pas d'albumen ni de périsperme, et son embryon est particulièrement volumineux.

▲ *Le* **Caltha palustris** *est une Renonculacée très polymorphe et à nombre chromosomique très variable, sans qu'on puisse définir des taxons bien nets parmi toutes ces formes.*

▼ *L'étamine de tulipe s'ouvre par deux sillons longitudinaux, le pollen qui s'échappe pourra germer sur le stigmate sessile tout proche.*

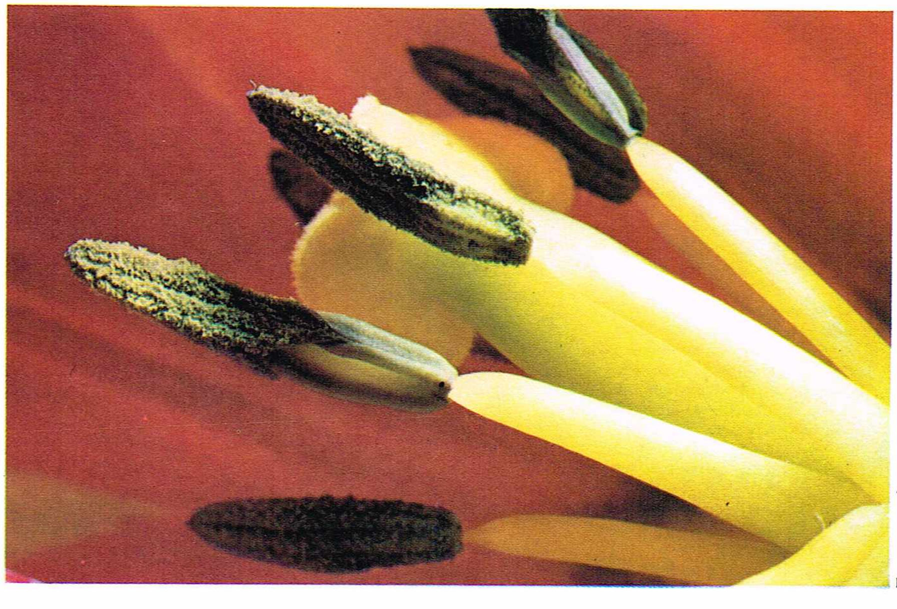

Teurtroy - Jacana

Physiologie et taxonomie

Tandis que la taxonomie se modernisait, la physiologie végétale, en liaison avec la biochimie, connaissait un essor remarquable, et apparaît maintenant le problème de son application taxonomique. Il est inévitable que la taxonomie bénéficie de l'apport de la physiologie comparée, encore peu développée en ce qui concerne le monde végétal.

*Ici se pose la question de l'utilisation des caractères adaptatifs, qui vont sans doute être particulièrement nombreux en physiologie. A vrai dire, il en est de même en chimiotaxonomie, et Hegnauer souligne par exemple que la possession de substances toxiques par des plantes sans lien taxonomique direct s'explique par une adaptation commune à la défense contre les prédateurs. De la même façon, après la découverte d'une nouvelle voie biochimique de la photosynthèse (cycle de Hatch et Slack), il ne faut pas trop se hâter de fonder des espoirs taxonomiques sur l'étude de sa répartition. Cette voie se rencontre chez des Graminées et des Cypéracées, familles qu'on a par ailleurs des raisons, contestables, de rapprocher, mais elle se trouve aussi chez des Amarantacées, Chénopodiacées, Nyctaginacées, Euphorbiacées, Zygophyllacées et Composées, qui n'ont point de rapports entre elles. C'est une aptitude biochimique générale qui s'est révélée, en liaison probablement avec des facteurs climatiques. Pourtant on a fait remarquer récemment que, chez les Euphorbiacées, seul un sous-genre d'*Euphorbia *possède cette particularité, de même seul le genre* Pectis *chez les Composées; parmi les* Panicum *(Graminées) enfin, quelques espèces seulement n'ont* pas *cette aptitude, et devront probablement être exclues du genre. Ainsi la physiologie comparée pourra-t-elle servir à la taxonomie à condition d'être utilisée avec la même prudence que les autres méthodes.*

La taxonomie numérique

L'ensemble de la taxonomie moderne met en œuvre le principe adansonien : étudier les plantes sous tous leurs aspects pour définir des groupements qu'on caractérisera d'après leurs traits saillants. Sans doute, il ne faut pas accorder a priori *une importance à un caractère quel qu'il soit, même s'il ne peut être étudié qu'avec des techniques très complexes. Mais cela ne signifie pas que tous les caractères doivent être mis indéfiniment sur le même plan. C'est qu'en effet, certains d'entre eux conditionnent la présence même de la structure qui portera les autres. Ainsi la possession d'une tige, qui va de pair avec celle de feuilles, est indispensable pour qu'existent des fleurs, et tous les caractères révélés par des fleurs ne peuvent exister sans tiges. Dans ces conditions, il est licite de former avec le caractère* présence de tige *(et de feuilles nécessairement) un groupe de rang supérieur à ceux qui seront fondés sur la présence ou l'absence de fleurs, ou, ces fleurs existant, la présence ou l'absence de pétales. Ainsi des Cormophytes comprendront-elles à la fois les Bryophytes et les Ptéridophytes qui n'ont pas de fleurs, et les plantes à fleurs et graines. L'existence de ce groupe est d'autant mieux établie que les structures reproductrices sont étroitement comparables, au niveau cytologique, même si elles semblent disparates à première vue. L'importance d'un caractère pourra être soupçonnée par son degré de généralité parmi l'ensemble des êtres : le caractère* possession de tige *s'applique à plus de Végétaux que le caractère* possession de pétales, *sa supériorité par rapport à un autre se vérifiant alors s'il est la condition nécessaire à l'existence de cet autre caractère. Ainsi le caractère* présence de chlorophylle *est plus répandu encore que le caractère* présence de tige, *mais il ne conditionne nullement le second. Un groupe réunissant les Cormophytes et les Algues du fait de la présence commune de chlorophylle paraît alors peu indiqué.*

Si les caractères sont de plus en plus nombreux, leur manipulation va devenir longue et fastidieuse. Aussi a-t-on cherché à utiliser des machines calculatrices pour mesurer le degré de ressemblance entre plusieurs plantes envisagées à beaucoup de points de vue. Quoi qu'on en ait dit, Adanson ne peut être considéré comme le précurseur d'une pareille méthode numérique; Lamarck, au contraire, eut l'idée de calculs de ce genre, mais n'en réalisa pas. Il ne faut pas, là encore, accorder de confiance aveugle aux résultats de ces techniques. A vrai dire, les caractères utilisés sont ceux du taxonomiste ordinaire, et la machine ne sert qu'à leur comparaison plus rigoureuse.

Le choix des caractères utilisés et l'importance qu'on doit leur attribuer restent fondamentaux, et la machine n'est souvent d'aucun secours pour ce travail préliminaire. Elle pourra déterminer le degré de fréquence d'un caractère parmi l'ensemble des Végétaux étudiés, mais le second critère mentionné ci-dessous : importance d'un caractère fondée sur le fait qu'il est condition nécessaire de l'existence possible des autres, ne pourra l'être que par le taxonomiste.

De plus, si l'on veut obtenir une classification phylogénique, il faudra éviter de choisir des caractères adaptatifs susceptibles d'être apparus dans plusieurs lignées indépendantes. Peut-être des études numériques préalables portant sur des Végétaux variés du même milieu permettraient-elles de définir rigoureusement les caractères qui ne doivent pas être utilisés pour la recherche d'un système phylogénique. Il ne semble pas qu'on se soit beaucoup préoccupé de la question.

C'est qu'en effet, le but des travaux menés grâce à ces méthodes n'est pas toujours très clair. Les résultats en sont souvent présentés sous forme d'un « dendrogramme » qui ressemble beaucoup à un arbre généalogique, mais n'en est un que si les caractères avec lesquels il a été établi ont été soigneusement choisis. Sinon les rapprochements seront purement phénétiques *(fondés sur l'apparence actuelle), et parfois le mâle et la femelle d'une espèce dioïque ne figureront pas dans le même groupe! Si, par exemple, on faisait entrer dans la préparation d'un de ces diagrammes les caractères* port arborescent, feuilles découpées, présence de poils, *etc., par opposition à leur absence, on voit bien qu'on créerait des rapprochements entre des Végétaux très divers que nul ne songe à placer dans le même groupe naturel. Mêlés à des traits plus révélateurs de la parenté, ces caractères, dûment exploités mathématiquement, tendront à l'obscurcir. C'est dire que les méthodes numériques ne peuvent guère s'appliquer qu'à des groupes déjà assez bien compris, sur lesquels le chercheur est assez bien renseigné pour choisir à bon escient ses caractères.*

▲ *L'Hyphaene thebaica, palmier du nord-est de l'Afrique, est ramifié dichotomiquement, fait exceptionnel chez les Phanérogames. (K. F. P. von Martius,* Historia naturalis palmarum, *1823-1850.)*

Il faut rappeler que ces méthodes ont été appliquées d'abord aux Bactéries dont la classification est souvent notablement artificielle. Les Bactéries sont fréquemment rapprochées d'après de simples aptitudes enzymatiques communes, qui ont bien des chances d'être apparues en maints endroits lors de l'évolution. La phylogénie n'était pas la préoccupation des fondateurs de la taxonomie numérique, au premier rang desquels on doit placer R. Sokal et P.H.A. Sneath. En somme, les différents critères « modernes » n'ont pas révolutionné la taxonomie, ils l'ont simplement affinée de-ci de-là. Il est bien évident que la taxonomie classique doit s'adresser à des structures macroscopiques convenablement étudiées, de manière à s'assurer qu'elles sont bien homologues et que la ressemblance entre elles n'est pas due au hasard des convergences superficielles. Mais, cela étant acquis, le degré de parenté que l'identité de structures compliquées comme un gynécée, une fleur, une inflorescence de type remarquable révèle entre deux Végétaux,

F. Arborio Mella

▲ *A. W. Eichler (1839-1887) étudia la morphologie de l'appareil reproducteur de l'ensemble des Phanérogames. Il travailla aussi à la systématique des plantes du Brésil.*

Page ci-contre :
▶ *Chez plusieurs Cactées, comme ici le* Selenicereus grandiflorus, *les fleurs ne durent qu'une nuit. Dans un souci de précision, l'auteur de cette gravure a situé la plante dans un décor nocturne. On remarquera l'horloge indiquant minuit. (R. J. Thornton,* Temple of Flora.*)*

est certainement plus profond que celui qui ne se marque que par l'aptitude à synthétiser une seule substance chimique. D'innombrables gènes doivent être nécessaires à la réalisation d'une inflorescence de Borraginacée, et la probabilité est d'autant plus faible qu'un pareil ensemble ait pu apparaître par pur hasard dans des groupes sans lien direct. Au contraire, si une ou deux enzymes seulement sont nécessaires pour produire une certaine substance, il est à craindre qu'elles ne soient apparues ici et là, et leur présence ne révèle pas de vraie parenté. La présence d'une voie métabolique complexe identique dans deux Végétaux est évidemment déjà plus probante, comme l'affirme Hegnauer.

Au total, on peut dire avec Stafleu que bien des développements modernes ne font que rendre hommage à la qualité essentielle de la taxonomie classique.

C'est pourquoi l'étude simplement morphologique garde toujours un rôle fondamental en taxonomie, même si elle doit souvent être précisée par d'autres méthodes. Elle est le premier moyen d'approche, par lequel on doit aborder l'étude d'une flore peu connue, pour en faire assez rapidement un inventaire assez précis. L'étude de la fleur, nous l'avons dit, y joue un rôle essentiel, et, en 1875-1878, A. W. Eichler (1839-1887) publia une revue générale des structures florales et inflorescentielles dans l'ensemble des plantes à graines. Dans ces Blüthendiagramme, *il systématisa l'utilisation des diagrammes dont l'invention semble due à Candolle. L'ouvrage d'Eichler est encore la bible du morphologiste. Mais il ne faut pas oublier que la morphologie s'est complétée récemment d'une micromorphologie permise par l'introduction du microscope électronique à balayage, qui, par l'examen qu'il permet de détails très ténus sans qu'il soit besoin de coupes, mènera sans doute à des développements utiles, quoique assez limités pour l'instant. Enfin, la morphologie est étroitement dépendante de l'anatomie, et spécialement de l'anatomie florale, comme on le verra plus bas.*

La nomenclature

La poursuite de l'inventaire de la végétation a conduit à la multiplication des familles, genres, espèces, sous-espèces, variétés et groupes supérieurs et inférieurs, en un mot des différents taxons. *Si la création de la nomenclature binaire avait beaucoup allégé la nomenclature des espèces, elle ne réglait pas le problème de la synonymie. Beaucoup de plantes ont reçu depuis toujours des noms divers très nombreux. Au début du XVIIe siècle déjà, Gaspard Bauhin publia un index synonymique de tous ces noms, le* Pinax theatri botanici *(1623), qui est la clef de toute la littérature botanique ancienne, puisque Linné de son côté cite toujours Bauhin lorsqu'il parle d'une plante connue de ce dernier. Après la parution du* Species plantarum *de Linné (1753), l'usage de la nomenclature binaire se répandit, mais les noms linnéens ne furent pas toujours adoptés, et beaucoup d'espèces se trouvèrent vite posséder plusieurs noms binaires. On se mit d'accord assez récemment pour uniformiser la nomenclature en appliquant un* Code international de nomenclature botanique *fondé sur le principe de priorité. C'est le premier nom attribué à une plante à un certain rang (espèce, variété) qui doit être conservé.*

BOTANIQUE GÉNÉRALE ET TAXONOMIE

L'étude de ce que les plantes ont en commun entre elles conditionne évidemment la compréhension des caractères particuliers qui permettent de les classer. Mais cette étude ne doit être examinée que maintenant car elle resta longtemps bien moins en honneur que la taxonomie, et c'est ce qui explique en partie que cette dernière soit demeurée et demeure encore bien imparfaite.

Il n'est pas surprenant que deux des grands découvreurs en matière de botanique générale, Linné et Candolle, aient été aussi deux des plus grands systématiciens, qui cherchaient par là à affermir les bases de leurs descriptions et de leurs comparaisons. Mais la botanique générale dut aussi beaucoup à des savants qui ne se préoccupaient pas de décrire systématiquement le monde vivant et étaient déjà des morphologistes, des anatomistes ou des physiologistes.

Morphologie, anatomie, ontogénie

On trouve chez Théophraste ou dans le traité pseudo-aristotélicien De plantis *des réflexions sur la constitution des plantes en général. Il est compréhensible que l'idée de les comparer aux autres êtres vivants dans leurs fonctions vitales et dans leur structure que nous dirions aujourd'hui cellulaire ou tissulaire soit déjà venue à l'esprit des Anciens.*

Après l'introduction du microscope, les études concernant l'anatomie furent menées de pair au XVIIe siècle par Marcello Malpighi (1628-1694) et Nehemiah Grew (1628-1711).

La compréhension de la morphologie d'ensemble d'une plante à fleurs commença à se préciser chez Linné. Bien que celui-ci adoptât les vues théoriques erronées de Césalpin, au sujet de la naissance des feuilles et des bourgeons, il fut le premier à concevoir ce qu'on nomme maintenant la théorie de la métamorphose : *la plante est formée d'une tige qui porte des appendices (phyllomes), et ceux-ci, depuis les cotylédons jusqu'aux carpelles, sont identiques « dans le principe ». En particulier, les pièces florales ne sont pas essentiellement distinctes des feuilles en lesquelles elles peuvent se transformer tératologiquement, même lorsqu'elles sont normalement méconnaissables et unies en un gynécée. La fleur est donc une sorte de bourgeon particulier dont certaines pièces foliaires sont sexualisées.*

Les vues de Linné, souvent citées, ne furent pas comprises et leur influence fut nulle sur le cours de la morphologie, sauf peut-être pour inspirer Goethe. Celui-ci publia en 1790 son célèbre Versuch die Metamorphose der Pflanzen zu erklären *(Essai d'expliquer la métamorphose des plantes). Le terme de métamorphose est pris là au sens de développement, et la « théorie de la métamorphose » au sens usuel sert à l'explication du mode de réalisation de ce développement. Goethe n'était pas un botaniste de profession, et certaines de ses explications manquent peut-être un peu de clarté. Pourtant il a parfaitement compris la signification des calices ou corolles à pièces soudées, ou des gynécées pluricarpellés.*

Candolle, dans sa Théorie élémentaire de la botanique *de 1813, cherchait à préciser les*

Muséum national d'histoire naturelle, Paris

descriptions morphologiques en vue d'une meilleure systématique et était parvenu à l'idée de pièces multivalentes par soudure de pièces simples, ainsi qu'à la notion d'avortement chez certaines espèces de pièces présentes dans le type du groupe. Mais c'est, semble-t-il, seulement après avoir lu Goethe qu'il comprit l'identité des pièces végétatives et florales, et c'est lui qui, dans son Organographie végétale, en 1827, assura l'expansion de cette découverte. Un rôle comparable fut joué par A. Braun (1805-1877) dans les pays de langue allemande, et la théorie acquit droit de cité dans le domaine de la botanique et est magnifiquement illustrée actuellement par l'œuvre de W. Troll et de ses élèves.

Diverses discussions eurent lieu qui ne mettaient pas en cause la théorie goethéenne du Végétal, qui, dans sa forme la plus classique, reçut une confirmation remarquable avec le travail de Ph. Van Tieghem (1839-1914) sur la Structure du pistil et l'anatomie comparée de la fleur (1871). L'utilisation de l'anatomie vasculaire date de cette époque et est toujours fort importante. Par ailleurs, les études tératologiques furent poursuivies par L. J. Celakovsky (1834-1902), mais à son époque, malheureusement, l'intérêt de telles études commençait à échapper à la plupart des botanistes. Ce discrédit très regrettable s'est prolongé jusqu'à une période récente ; leur intérêt, qui a été souligné en France par P. Gavaudan et ses élèves (Dupuy, Guédès), commence à être reconnu à nouveau ailleurs.

Dès la fin du XIX^{e} siècle pourtant, quelques auteurs mirent en doute la conception goethéenne du Végétal dans son ensemble. On commençait à parler d'organes de nature sui generis ou de formations de nature intermédiaire entre tige et feuille. Ces vues ne connurent guère de succès et furent surtout le fait d'auteurs peu compétents en morphologie. Des tentatives récentes du même genre sont tout aussi contestables.

▶ **Les auricules sont un groupe de primevères fort prisées en horticulture. Par un effet de perspective, elles revêtent ici un aspect démesuré. (R. J. Thornton, Temple of Flora.)**

Muséum national d'histoire naturelle, Paris

Si l'anatomie de la fleur avait beaucoup servi à asseoir l'interprétation générale du Végétal, la connaissance de l'anatomie de l'appareil végétatif allait aussi faire de grands progrès au siècle dernier, en particulier avec C. W. Naegeli (1817-1891) et Van Tieghem, puis avec A. de Barry (1831-1888), H. Solereder (1860-1920) et bien d'autres. On a déjà évoqué son intérêt taxonomique, sur lequel J. Vesque (1848-1895) insistait aussi spécialement. Au début de ce siècle, la compréhension des relations entre la structure anatomique de la racine et de la tige fut illuminée par la théorie de l'évolution vasculaire de G. Chauveaud (1859-1933), et cela avait un grand intérêt pour la reconstitution de la phylogénie des plantes vasculaires. L'étude de l'histologie du bois a été spécialement poussée dans une perspective phylogénique. C. F. Brisseau-Mirbel (1776-1854) avait déjà vu que le vaisseau n'est qu'une suite de cellules à parois communes perforées. La présence ou l'absence de vaisseaux ligneux vrais ainsi continus, la disposition sur les parois longitudinales et transversales des perforations et des ponctuations (qui les amincissent mais ne les perforent pas), la longueur des cellules des vaisseaux, l'obliquité de leurs parois communes allaient être autant de critères phylogéniques, pour Van Tieghem déjà, mais surtout pour I. W. Bailey (1884-1967) et ses continuateurs.

A un niveau plus global il reste beaucoup à faire en anatomie. L'étude du parcours des faisceaux libéro-ligneux primaires de la tige, qui mérite mieux le nom d'étude anatomique que l'examen histologique habituellement qualifié d'anatomie par les botanistes, avait été délaissée depuis près d'un siècle, mais, il y a une dizaine d'années, on s'est aperçu des lacunes de nos connaissances en ce domaine et de l'intérêt taxonomique de ces recherches.

Cytologie. Bactériologie

Les études microscopiques poursuivies sur les plantes avaient occupé une grande place au début du XIX^{e} siècle, et le nom de Schleiden est associé à celui de Théodore Schwann lorsqu'il s'agit de chercher l'origine de la théorie cellulaire.

Plus tard, c'est chez des plantes qu'E. Stasburger (1844-1912) étudia la division des cellules et montra l'individualisation des chromosomes.

Du point de vue phylogénique, une intéressante hypothèse a fait revivre la théorie des symbiotes de Paul Portier (1901) : il se pourrait que les inclusions cytoplasmiques, mitochondries et plastes, proviennent d'organismes procaryotes devenus symbiotes obligatoires des cellules vivantes. La découverte d'acides nucléiques comparables à ceux des Bactéries dans les mitochondries et les plastes apporte un argument en faveur de ces vues. Le caractère pour ainsi dire parasite des organites plastidiaux et mitochondriaux n'est peut-être pas vraiment obligatoire puisqu'on serait parvenu à obtenir leur multiplication in vitro.

Reproduction. Génétique

L'étude de la reproduction des Végétaux commence avec l'établissement de la sexualité des plantes à fleurs par Grew, Camerarius, Vaillant, Bradley et quelques autres à la fin du

XVII^e siècle et au début du XVIII^e, puis par Linné qui réalisa un intéressant travail expérimental sur ce sujet en 1760. Le début du XIX^e siècle voit, avec Amici et Brongniart, l'étude de la germination du pollen, mais Schleiden égare la science en soutenant que l'extrémité du tube pollinique est la seule source de l'embryon. Mirbel, pourtant, qui, en 1828-29, avait bien étudié la morphologie de l'ovule, postule en 1833 que cet embryon provient de la fusion d'un « utricule » (cellule) mâle et d'un utricule femelle.

Le développement de l'œuf des plantes à fleurs est étudié par Hanstein dès 1870. Il se révèle varié, et de nombreux auteurs s'attachent à le décrire. Mais c'est surtout R. Souèges (1876-1967) qui réalise un examen systématique du développement embryonnaire. Il peut ainsi établir un système « embryonomique » qui peut fournir des données pour l'appréciation des rapports entre les groupes.

A côté du développement de l'embryon, le mode de réalisation des structures reproductrices mâles et femelles fournit aussi d'intéressants critères taxonomiques, en particulier aux mains de P. Maheshwari (1904-1966) et ses nombreux élèves.

Mais, avant même que les processus cytologiques de la fécondation fussent compris, W. Hofmeister (1824-1877) sut réaliser, dès 1851, une synthèse remarquable des différents types de cycles de développement chez les Végétaux cryptogames et phanérogames. Il montra l'existence générale et l'importance matérielle très variable du gamétophyte, qui produit les gamètes. Hofmeister sut comprendre que le grain de pollen et le sac embryonnaire de la plante à fleurs correspondent ainsi au prothalle de la Fougère ou à la tige feuillée de la Mousse, et il fallait certainement, comme le remarque le professeur J.-F. Leroy, « une rare perspicacité et une belle assurance » pour homologuer ces structures dès 1851.

C'est grâce à une expérimentation portant sur des plantes que les lois de l'hérédité furent découvertes d'abord par Mendel (1865) dans un travail génial mais, il faut, hélas! le dire, inutile puisqu'il n'eut alors aucun écho.

L'idée de Mendel était de faire appel à des éléments matériels présents dans les cellules sexuelles, mais dont il ne pouvait évidemment préciser la nature, pour expliquer la transmission des caractères héréditaires.

Les lois de Mendel furent redécouvertes par d'autres botanistes qui ne lui devaient rien, H. de Vries (1848-1935), C. Correns (1864-1933) et E. Tschermak (1871-1962) en 1899-1900. A cette époque, la connaissance des chromosomes allait bientôt permettre de trouver le support matériel des éléments inventés par Mendel, mais il ne faut pas oublier que, dès 1885, le rôle héréditaire de la substance nucléaire (« nucléine ») avait été envisagé et qu'il était admis par le zoologiste Wilson en 1896.

Découverte grâce à des Végétaux, la génétique progressa surtout ensuite, dans les mains de T. H. Morgan, grâce à l'utilisation de la drosophile. Mais son autre volet essentiel fut représenté par l'étude génétique du maïs, parmi les spécialistes duquel on doit citer Barbara Mc Clintock. Les travaux de génétique végétale sont évidemment du plus grand intérêt en vue de l'amélioration des plantes utiles, et tout spécialement des céréales.

BIOGÉOGRAPHIE. ÉCOLOGIE. GÉNÉCOLOGIE

La description de la végétation préoccupait déjà les Anciens, et Théophraste en particulier. Au XVI^e siècle, on indique toujours le territoire géographique occupé par les espèces, donc leur répartition biogéographique, et le type de station où elles vivent, donc leur répartition écologique.

Teurtroy - Jacana

▲ *Le tube pollinique de la tulipe commence à se développer. Il permettra l'arrivée des noyaux reproducteurs jusqu'au sac embryonnaire de l'ovule qui, ainsi fécondé, pourra devenir une graine.*

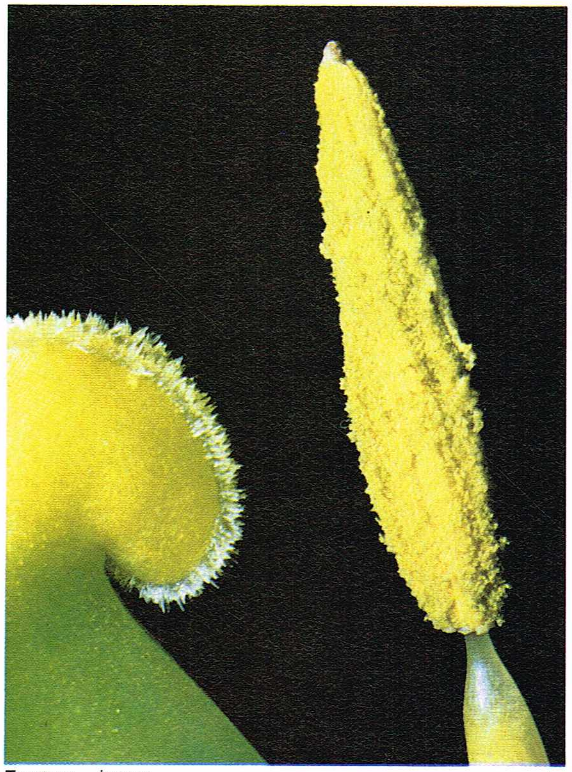

Teurtroy - Jacana

▶ *L'étamine a un filet aminci à son sommet, qui se loge dans un puits formé par la base de l'anthère.*

Bavestrelli, Bevilacqua, Prato

De pareils renseignements sont donnés aussi par Linné, qui s'applique même à trouver certains caractères propres aux plantes de chacune des parties du monde.

Plus généralement, Linné cherche à étudier l'harmonie qui existe entre les êtres vivants et leur milieu et entre ces êtres eux-mêmes. Il étudie la « police de la nature ». Il fait de l'écologie générale. Mais pour lui, il s'agit de découvrir le mode de fonctionnement du monde mis en place par le Créateur. Contrairement à ce que soutenait récemment Limoges en rééditant des textes linnéens sur ces sujets, il n'y a pas lieu de refuser à ces préoccupations le qualificatif d'écologique parce que l'écologie n'y est pas envisagée comme beaucoup le font actuellement.

Avec Chambers ou Darwin, la biogéographie va devenir un argument essentiel pour la conception évolutionniste; les particularités de la répartition géographique des êtres s'expliqueront au mieux s'il est admis qu'un lien génétique existe entre eux. De plus, Darwin va faire jouer à l'écologie un rôle créateur, puisque le tri qui s'effectuera par sélection naturelle, sous l'effet de la « pression » des conditions écologiques, sera responsable des modifications évolutives des êtres. Pour le néo-darwinien, ce sont les mutations qui expliqueront la variabilité, et la manière dont celles-ci apparaissent, se transmettent et réalisent des phénotypes qui sont sélectionnés par le milieu, sera l'objet de la génécologie (génétique écologique). Cette science sera alors la clef de l'évolution.

Mais, bien que l'adaptation des espèces à leur milieu ne soit pas douteuse, il n'est guère niable non plus, comme des botanistes tels qu'A. Cronquist l'ont récemment encore maintenu, que beaucoup de caractères, ceux, justement, qui sont utiles au taxonomiste, semblent ne posséder aucune valeur adaptative. Ils se sont modifiés pourtant au cours des temps. Il semblerait donc bien surprenant que l'écologie puisse servir à expliquer toute l'évolution, même si elle joue un grand rôle dans la spéciation. De toute manière, l'étude des relations écologiques entre les êtres et leurs milieux reste respectable, quelque opinion que l'on ait sur le rôle évolutif de l'écologie. De la même façon, encore actuellement, un fixiste pourrait parfaitement être un excellent anatomiste, physiologiste et même paléontologiste. D'ailleurs, les créateurs de l'écologie moderne, E. Warming ou Ch. Flahault (1852-1935), n'avaient pas de préoccupations évolutionnistes.

A l'heure actuelle, les études de biogéographie ont aussi connu un regain d'intérêt avec la démonstration définitive du phénomène de dérive des continents. Cette nouvelle certitude permet d'envisager la solution de problèmes biogéographiques qui paraissaient désespérés.

Par ailleurs, il faut mentionner l'existence d'un ensemble de travaux purement descriptifs consacrés à l'analyse de la végétation. En Suisse et en France, on s'est orienté avec J. Braun-Blanquet vers la phytosociologie. Des groupements de plantes ont été considérés comme des associations immuables, fort nombreuses et pour lesquelles on a créé une volumineuse nomenclature latine. D'autres, comme A. Gleason et P. Jovet, ont adopté des systèmes descriptifs beaucoup plus souples, conscients qu'ils étaient des intermédiaires innombrables entre groupements végétaux, dont les variations écologiques

rendent justement compte. Des auteurs américains comme Whittaker ont cherché à fondre la souplesse et la rigueur en mathématisant la description des intermédiaires qui forment un « continuum ».

Les études de biologie florale peuvent être considérées comme un aspect de l'écologie. La sexualité des plantes à fleurs étant bien connue, il était normal qu'on s'interroge sur les modalités de la fécondation de l'ovaire par le pollen. C. K. Sprengel (1750-1816) expliqua en 1793 comment la structure des fleurs est en relation étroite avec le mode de transport de leur pollen par le vent ou par les Insectes sur une autre fleur de la même espèce. En effet, très généralement, une fécondation croisée est de règle ; la fleur, quoique hermaphrodite, ne se féconde pas elle-même. Les travaux de biologie florale consisteront à mettre en évidence les adaptations des fleurs à l'utilisation des Insectes ou des autres Animaux pollinisateurs, ou bien encore des agents physiques assurant aussi la pollinisation. Ils seront très actifs à la fin du XIX^{e} siècle avec H. Müller (1829-1883) ou P. Knuth, et G. Bonnier y prendra part. Darwin leur trouvera un grand intérêt évolutionniste : la fécondation croisée fournit des produits plus résistants, les dispositifs qui la permettent sont favorisés par la sélection, c'est ce qui explique leur succès. De longues études seront consacrées par Darwin à ces questions, chez les orchidées notamment.

Après un moment d'éclipse, la biologie florale connaît un regain d'intérêt, parallèle à l'essor de la génécologie, en particulier aux États-Unis avec V. Grant. De plus, par l'étude de la coévolution des plantes et de leurs pollinisateurs, on a voulu rendre compte de la progression des formes dans les deux règnes au cours des temps géologiques : les plantes primitives étaient pollinisées par de petits Coléoptères, qui s'attaquaient à leurs organes, elles durent former des structures protectrices pour leurs ovules, et c'est l'origine de l'angiospermie. Bien plus tard apparurent, par exemple, des fleurs à long tube gamopétale en relation avec l'existence à ce moment de papillons à longue trompe susceptibles d'aller recueillir le nectar au fond du tube sans y pénétrer. Quoi qu'on pense des rapports de cause à effet entre les deux évolutions, le parallélisme entre celle des Insectes et celle des fleurs, tel qu'il a été souligné par E. E. Leppik à maintes reprises, semble effectivement digne d'un certain intérêt.

TABLEAU GÉNÉRAL DU RÈGNE VÉGÉTAL

Tandis que le tableau de Whittaker visait à établir des relations entre les types d'organisations tels qu'ils s'observent actuellement en fonction de leur complexité et de leur parenté, relations qui sont forcément buissonnantes, un ordre linéaire doit obligatoirement être suivi dans un livre. Le tableau reproduit ici résume celui que l'on a adopté. Les caractères essentiels des divisions sont exposés dans la première partie de cette introduction. On remarquera que le tableau comporte une division qui ne correspond pas à un véritable groupement systématique, mais rassemble des associations symbiotiques entre Champignons et Algues vertes ou Cyanophycées (Lichens). En principe, il serait plus normal de faire figurer les constituants de ces organismes complexes dans leurs groupes respectifs, mais l'association qu'ils forment, dont l'étude est d'ailleurs un problème de biologie générale

Page ci-contre :
◀ Dans les montagnes, au-dessus de la forêt, débute l'étage alpin où seules vivent des Phanérogames de petites tailles. Plus haut encore, la végétation se réduit à des Cryptogames.

EMBRANCHEMENTS

PROCARYOTES
- SCHIZOPHYTES

VÉGÉTAUX EUCARYOTES
- **THALLOPHYTES**
  - **PHYCOPHYTES OU ALGUES**
    - RHODOPHYTES
    - PYRRHOPHYTES
    - CHROMOPHYTES
    - EUGLÉNOPHYTES
    - CHLOROPHYTES
  - **MYCOPHYTES OU CHAMPIGNONS**
    - MYXOMYCOPHYTES
    - EUMYCOPHYTES
- **LICHENS (symbiose Champignons - Algues)**
- **CORMOPHYTES**
  - **ARCHÉGONIATES**
    - BRYOPHYTES
    - PTÉRIDOPHYTES
  - **SPERMAPHYTES**
    - GYMNOSPERMES
    - ANGIOSPERMES

fort intéressant, présente une morphologie caractéristique, qui dépend du Champignon dans le cas des Lichens : il y a des Peltigera dont l'Algue est une Algue verte, d'autres dont elle est une Cyanophycée. D'autre part, l'étude détaillée des deux symbiotes est loin d'avoir toujours été faite. L'usage est donc de traiter ces associations comme des êtres simples et de les nommer de la même façon.

Parmi tous les groupes de ce tableau, les Spermaphytes sont de loin le plus important. Leur importance est due à l'existence des Angiospermes, qui sont le grand succès de l'évolution végétale et renferment près de 300 000 espèces. Le groupe le plus nombreux est ensuite celui des Champignons, mais il ne doit pas dépasser 60 000 espèces.

Pourtant, on doit terminer modestement en faisant sentir la relative pauvreté du monde végétal par rapport au monde animal. La zoologie, comme le soulignait Lameere, égale au moins dix fois la botanique. Et effectivement, les seuls Coléoptères sont certainement plus nombreux que l'ensemble des plantes à fleurs !

Michel Guédès.

▼ *Les* Victoria *sont des Nymphéacées d'Amérique tropicale à gigantesques feuilles peltées qui peuvent atteindre jusqu'à 2 m de diamètre. Leur face inférieure est parcourue par un réseau de nervures qui retient l'air assurant ainsi la flottaison.*

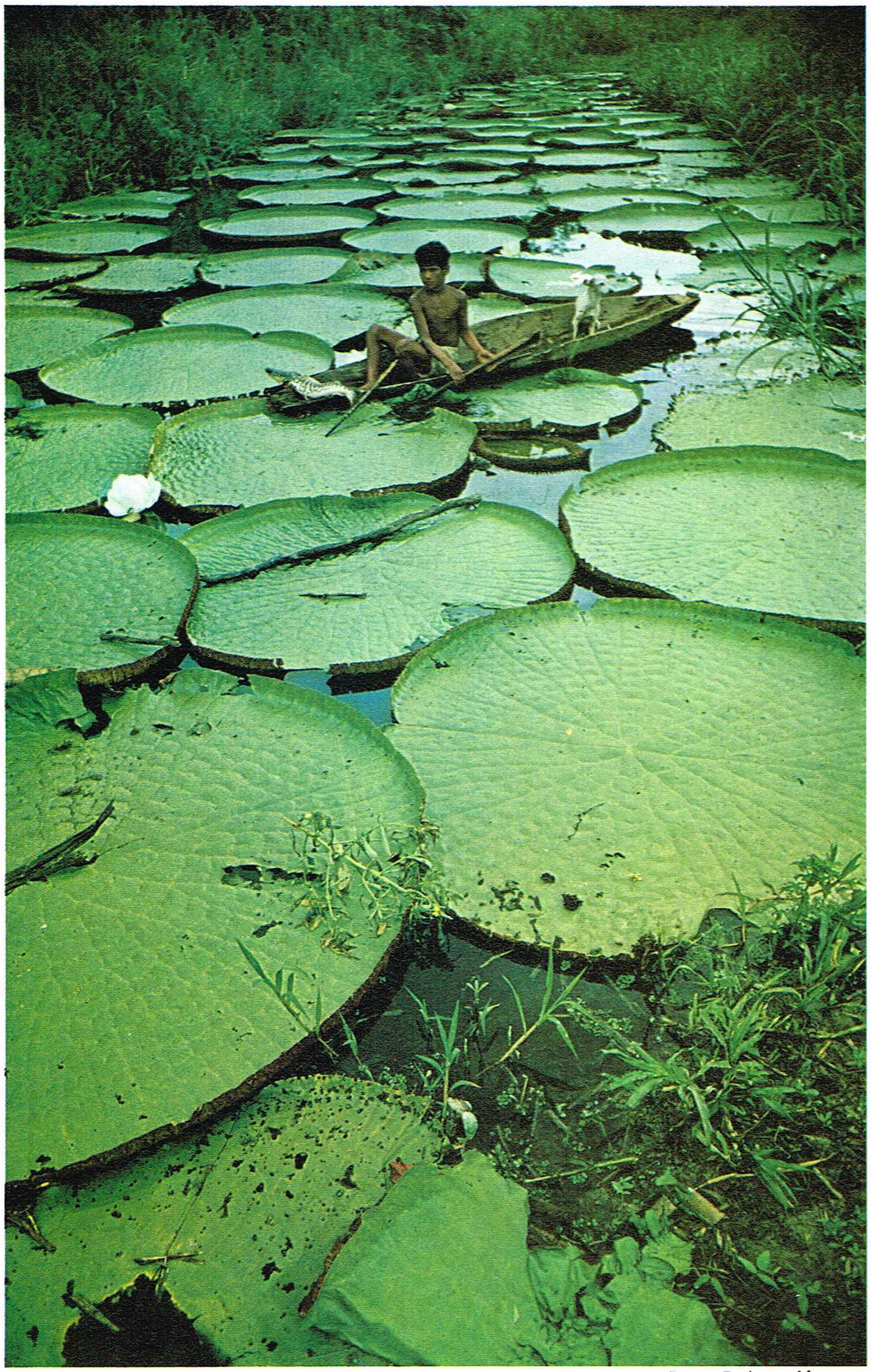

Bruno Barbey - Magnum

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

ARBER A., *Herbals, their Origin and Evolution,* Cambridge, 1938 (réimpr. 1953). - AUGIER J., *les Unités naturelles du monde végétal,* Paris, 1942. - BIDAULT M., *Variation et spéciation chez les végétaux supérieurs,* Paris, 1971. - CRONQUIST A., *The Evolution and Classification of Flowering Plants,* Londres, 1968; On the Relationships between Taxonomy and Evolution. *Taxon,* 18, 1969, 167-187. - DAUDIN H., *De Linné à Jussieu,* Paris, 1926. - DAVIS P. H. et HEYWOOD V., *Principles of Angiosperm Taxonomy,* Édimbourg, 1963. - *ENGLERS, Syllabus der Pflanzenfamilien,* 12e éd. 2 vol. Berlin, 1954-1963. - GRANT V., *The Origin of Adaptations,* New York, 1953; *Plant Speciation,* New York, 1971. - GROSSHEIM A.A., *Review of Modern Systems of Flowering Plants* (en russe), Tbilisi, 1966. - GUÉDÈS M., la Méthode taxonomique d'Adanson, *Rev. Hist. Sc.,* 20, 1967, 361-386; la Théorie de la métamorphose en morphologie végétale. Des origines à Goethe et Batsch, *ibid.,* 22, 1969, 323-362; A. P. de Candolle et P. J. F. Turpin, *ibid.,* 25, 1972, 252-270; la Métamorphose et l'idée d'évolution chez Alex. Braun, *Episteme,* 7, 1973, 32-51; le Botaniste Lamarck, *Colloque international Lamarck,* Paris, 1971, 47-85, 261-262. - GUINOCHET M., *Logique et dynamique du peuplement végétal,* Paris, 1955; *Phytosociologie,* Paris, 1973. - HEGNAUER R., Pflanzenstoff und Pflanzensystematik. *Naturwissenschaften,* 58, 1971, 585-598. - HESLOP-HARRISON J., *New Concepts in Flowering Plant Taxonomy,* Londres, 1953. - HEYWOOD V.H., *Plant Taxonomy,* Londres, 1967. - HUGHES A., *A History of Cytology,* Londres, 1959. - JESSEN K. F. W., *Botanik der Gegenwart und Vorzeit,* Leipzig, 1864 (réimpr. Waltham, 1948). - LAWRENCE G. H. M., *Taxonomy of Vascular Plants,* New York, 1951 (nelle éd. en prép.). - LEROY J. F., la Botanique et la Physiologie végétale, dans R. Taton, éd. *Histoire générale des sciences, la science moderne,* 679-697, 2e éd., 1969 (avec Ad. Davy de Virville); *la Science contemporaine, le XIXe siècle,* 426-441, 451-468, 1961; *id., le XXe siècle,* 735-795, 1964, Paris; *Histoire de la notion de sexe chez les plantes,* Paris, 1959; *Darwin,* Paris, 1965. - LINDMAN C.A.M., Carl von Linné als botanischer Forscher und Schriftsteller. In *Carl von Linné's Bedeutung als Naturforscher und Artzt,* Iéna, 1909, IV-188 p. (réimpr. Wiesbaden, 1968). - MAGDEFRAU K., *Geschichte der Botanik,* Stuttgart, 1973. - MÖBIUS M., *Geschichte der Botanik,* Iéna, 1937 (réimpr. Stuttgart, 1968). - OLBY R.C., *Origins of Mendelism,* Londres, 1966. - ROBERTS H. F., *Plant Hybridization before Mendel,* Princeton, 1929. SACHS J., *Histoire de la botanique,* trad. par H. de Varigny, Paris, 1892. - SCHWANITZ F., *Die Evolution der Kulturpflanzen,* Munich, 1967. - SPORNE K. R., *The Mysterious Origin of Flowering Plants,* Oxford, 1971. - STAFLEU F. A., *Linnaeus and the Linneans,* Utrecht, 1971. - STEBBINS G. L., *Variation and Evolution in Plants,* New York, 1950. - TAKHTAJAN A., *Flowering Plants, Origin and Dispersal,* Édimbourg, 1969.

LES SCHIZOPHYTES

Les Schizophytes ou Procaryotes comprennent les Algues bleues ou *Cyanophycées*, organismes avec chlorophylle a, et les *Bactéries* sans chlorophylle ou à chlorophylle particulière (bactériochlorophylle) ne produisant pas d'oxygène lors de la photosynthèse.

Ces organismes présentent avec les Eucaryotes (Algues, Champignons, Protozoaires) des différences structurales fondamentales que nous allons préciser.

— Chez les Eucaryotes, le noyau est entouré d'une membrane et renferme plusieurs chromosomes qui sont nettement visibles dans la cellule végétative au cours de la mitose ou de la méiose. En revanche, les images classiques mitotiques ou méiotiques n'existent pas chez les Procaryotes dont le matériel nucléaire n'est pas entouré de membrane. Un unique chromosome correspond chez les Procaryotes à un seul groupe de liaison des gènes. L'ADN (acide désoxyribonucléique) y est lié à des polyamines et non à des histones, ce qui est le cas pour les Eucaryotes.

— La respiration est assurée chez les Eucaryotes par les mitochondries, alors que cette fonction est remplie par des mésosomes et la membrane cytoplasmique chez les Procaryotes.

— La photosynthèse est localisée pour les Eucaryotes au niveau des chloroplastes tandis que chez les Procaryotes elle s'effectue au niveau des chromatophores (organites lamellaires, vésiculaires ou tubulaires).

— Les flagelles des Eucaryotes ont une constitution complexe à neuf paires de fibrilles périphériques et une paire axiale. Ce qui est sans équivalent chez les Procaryotes.

— La paroi cellulaire des Procaryotes est constituée, au moins en partie, d'un complexe mucopeptidique contenant des D acides aminés et de l'acide diaminopimélique (ou de la L-lysine). Ce complexe est détruit par le lysozyme (enzyme abondante dans le blanc d'œuf, les larmes, etc.) et sa synthèse est inhibée par la pénicilline. Rien de tel chez les Eucaryotes dont les parois sont composées de cellulose, de chitine, de mannanes ou de pectines.

— Des stérols entrent dans la composition de toutes les membranes internes des Eucaryotes mais sont le plus souvent absents chez les Procaryotes.

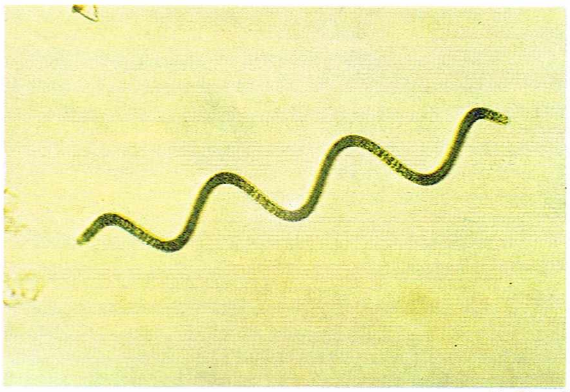

M. Ricard

◄ **Oscillatoria platensis.** ***Cette Cyanophycée pousse en abondance dans le lac Tchad. On tente de la cultiver à des fins alimentaires.***

	Embranchements	*Classes*	*Réserves*
PROCARYOTES	**Schizophytes**	Bactéries	
		Cyanophycées	*Amylopectine (proche du glycogène)*
ALGUES EUCARYOTES	**Rhodophytes**	Rhodophycées	*Amidon floridéen (proche du glycogène)*
	Pyrrhophytes	Cryptophycées Dinophycées	*Amidon extraplastidial*
	Chromophytes	Chrysophycées Diatomophycées Phéophycées Xanthophycées Raphidophycées	*Laminarine ou Chrysolaminarine (polysaccharide)*
	Euglénophytes	Euglénophycées	*Paramylon extraplastidial polysaccharide proche de la laminarine*
	Chlorophytes	Chlorophycées Prasinophycées Zygophycées Charophycées	*Amidon intraplastidial*

Biliprotéides — Chlorophylle A — Chlorophylle B — Chlorophylle C D E

BACTÉRIES

Deux caractères séparent les Bactéries des Cyanophycées : 1° absence de chlorophylle a ; 2° absence de pigments biliprotéides hydrosolubles : phycoérythrine rouge et phycocyanine bleue.

Les Bactéries ou Schizomycètes sont des organismes typiquement unicellulaires. Les cellules de petites tailles, parfois ultramicroscopiques, sont fréquemment mobiles et possèdent un ou plusieurs noyaux de type procaryote dépourvus de membrane nucléaire. Certaines espèces sont chlorophylliennes. La multiplication se fait, dans la plupart des cas, par simple fission transversale, ou, rarement, par bourgeonnement.

Morphologie

Les cellules bactériennes sont de petites dimensions, de 0,1-0,25 μ *(Rickettsia)*, jusqu'à 20-50 μ *(Spirillum)*. Elles présentent des formes et des modes de groupement variés. Ainsi les cellules arrondies ou coques peuvent être isolées *(Micrococcus)*, associées en paires ou diplocoques *(Pneumococcus)*, en chaînettes *(Streptococcus)*, en amas cubiques *(Sarcina)*, en amas irréguliers *(Staphylococcus)*. La forme en bâtonnet est également très répandue (*Bacillus, Lactobacillus,* Entérobactériacées). Les bâtonnets peuvent être droits *(Bacillus, Clostridium)*, incurvés *(Vibrio)* ou spiralés *(Spirillum)*.

Certaines Bactéries comme les Spirochètes sont déformables et nagent dans le milieu environnant. Cependant des cellules peuvent rester associées après la division cellulaire et s'intégrer dans des structures plus ou moins complexes. Ainsi les Bactéries à trichomes sont des filaments dont les cellules demeurent groupées dans une gaine commune. Certaines sont très voisines des Cyanophycées. Chez les Actinomycètes s'édifie un véritable mycélium dont la structure et la complexité rappellent celles du mycélium des Champignons. D'autres Bactéries ont perdu au cours de l'évolution la faculté de synthétiser une paroi. La cellule est alors très petite et sans forme bien définie *(Mycoplasma)*. Enfin certaines Bactéries ont des morphologies très curieuses : Bactéries bourgeonnantes *(Hyphomicrobium* et *Rhodomicrobium)*, Bactéries pédonculées *(Caulobacter)* ; d'autres sont de très grandes dimensions *(Caryophanon, Achromatium)*. Cependant la morphologie des Bactéries est trop simple pour que l'on puisse identifier toutes les souches bactériennes à l'aide d'un simple examen microscopique à l'état frais. C'est pourquoi des bactériologistes ont mis au point des techniques de coloration qui facilitent cette identification. Dans la technique de Gram, on colore les cellules bactériennes tuées et fixées sur la préparation avec un colorant basique, le violet de gentiane, puis du lugol (iode en solution dans l'iodure de potassium). La différenciation se fait ensuite en lavant la préparation à l'alcool. Les Bactéries qui se décolorent sont dénommées Gram négatives (on les recolore en rose avec de la fuchsine diluée), tandis que celles dites Gram positives restent violettes. Cette propriété est liée à la constitution de la paroi. Ainsi les Bacillacées sont Gram positives, les Entérobactériacées sont Gram négatives, et, parmi les Bactéries pathogènes Gram positives, on trouve les staphylocoques, streptocoques, entérocoques (streptocoques fécaux), pneumocoques, le bacille de la diphtérie, la bactérie du charbon, le bacille botulique, le bacille du tétanos, le bacille de la lèpre, le bacille de Koch. En revanche, les méningocoques (méningites), gonocoques (blennorragie), *Brucella* (fièvre de Malte), *Pasteurella* (peste, tularémie), *Salmonella* (typhoïde et paratyphoïde), *Shigella* (dysenterie), vibrion cholérique (choléra), *Hemophilus* (responsable d'infections secondaires post-grippales), bacille pyocyanique (septicémie), colibacilles (infections urinaires) sont Gram négatifs.

La coloration de Ziehl-Neelsen, ou acido-résistance, caractérise les mycobactéries. On colore les cellules tuées et fixées sur la préparation avec de la fuchsine à chaud. On fait agir de l'alcool, puis un acide minéral concentré (nitrique ou sulfurique) comme agent de décoloration. A la fin, le bleu de méthylène recolore en bleu les cellules non acido-résistantes (la plupart des Bactéries), tandis que les mycobactéries apparaissent teintées en rose.

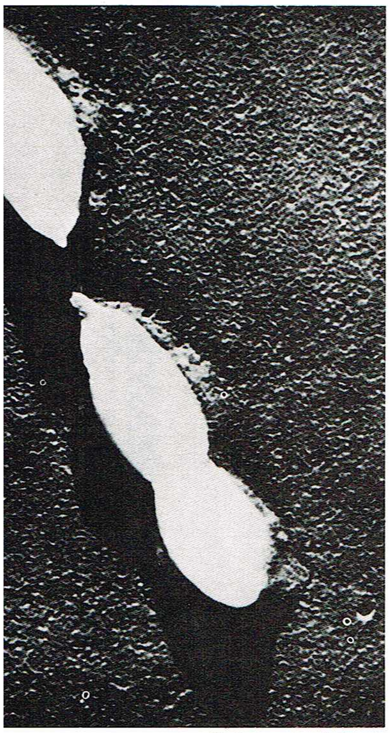

P. Castano - I.G.D.A.

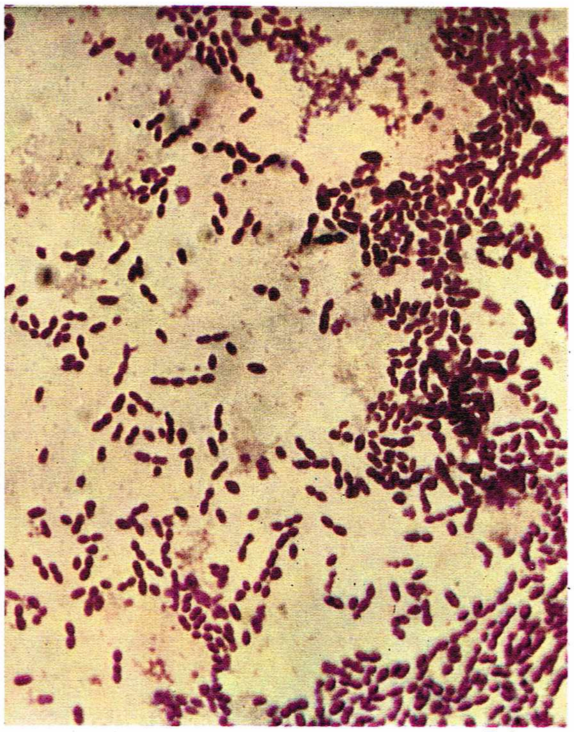

F. Scanga

▼ ▶ **Diplococcus pneumoniae** *ou pneumocoque se présente sous forme de cellules arrondies, associées en paires. A droite, cliché pris au microscope optique (× 800), à gauche, au microscope électronique (× 40 000).*

Structure de la cellule bactérienne

Les divers éléments constituant la cellule bactérienne peuvent être rangés en deux catégories : — les éléments permanents : paroi (sauf chez les *Mycoplasma*), membrane cytoplasmique, noyau, ribosomes. Les éléments facultatifs : chromatophores, granules de réserve, flagelles, *fimbriae* et *pili* (poils sexuels), capsules.

La composition chimique d'une cellule bactérienne est variée. Il y a 75 à 85 % d'eau. Les principales substances minérales sont le phosphore, le soufre et le fer. Il y a des traces de zinc et de divers oligo-éléments (Cu, Co, K, Na, etc.). En poids sec, on trouve 35 à 75 % de protéines, 10 à 30 % de glucides (surtout dans la paroi) et 15 à 25 % d'acides nucléiques.

La paroi est en relation intime avec la membrane cytoplasmique. Elle représente environ 20 % du poids sec de la cellule. Sa structure est très complexe et varie selon les Bactéries. En règle générale, la paroi des Bactéries Gram négatives est plus complexe que celle des Gram positives. Le composant essentiel de la paroi bactérienne est le mucocomplexe (muréine ou mucopeptide). C'est un polymère qui comprend des sucres aminés, des acides aminés L, des acides aminés D (D-alanine, D-acide glutamique). Ce mucopeptide est détruit par le lysozyme qui fait donc éclater les Bactéries. La pénicilline bloque la synthèse de ce polymère. A ce mucopeptide qui constitue la trame de la paroi, se surajoutent des composants complexes que nous énumérons rapidement : acides teichoïques (polyols phosphates provenant de la polymérisation, selon les espèces, du ribitol ou du glycérol) ; polysaccharides ; protéines ; lipides. Les Bactéries Gram positives sont pauvres en lipides (sauf les mycobactéries). Au contraire, chez les Gram négatives, les lipides peuvent s'associer aux polysaccharides et constituer des lipopolysaccharides, comme les endotoxines des bacilles Gram négatifs.

Le rôle de la paroi bactérienne est important car celle-ci protège la cellule contre les changements éventuels de pression osmotique du milieu ambiant et contrôle la forme et la rigidité cellulaire. Les cellules Gram positives peuvent être facilement débarrassées expérimentalement de leur paroi (lysozyme, pénicilline) ; on obtient alors des protoplastes sphériques. Dans ce cas, les cellules sont très sensibles au choc osmotique, mais leur métabolisme reste intact.

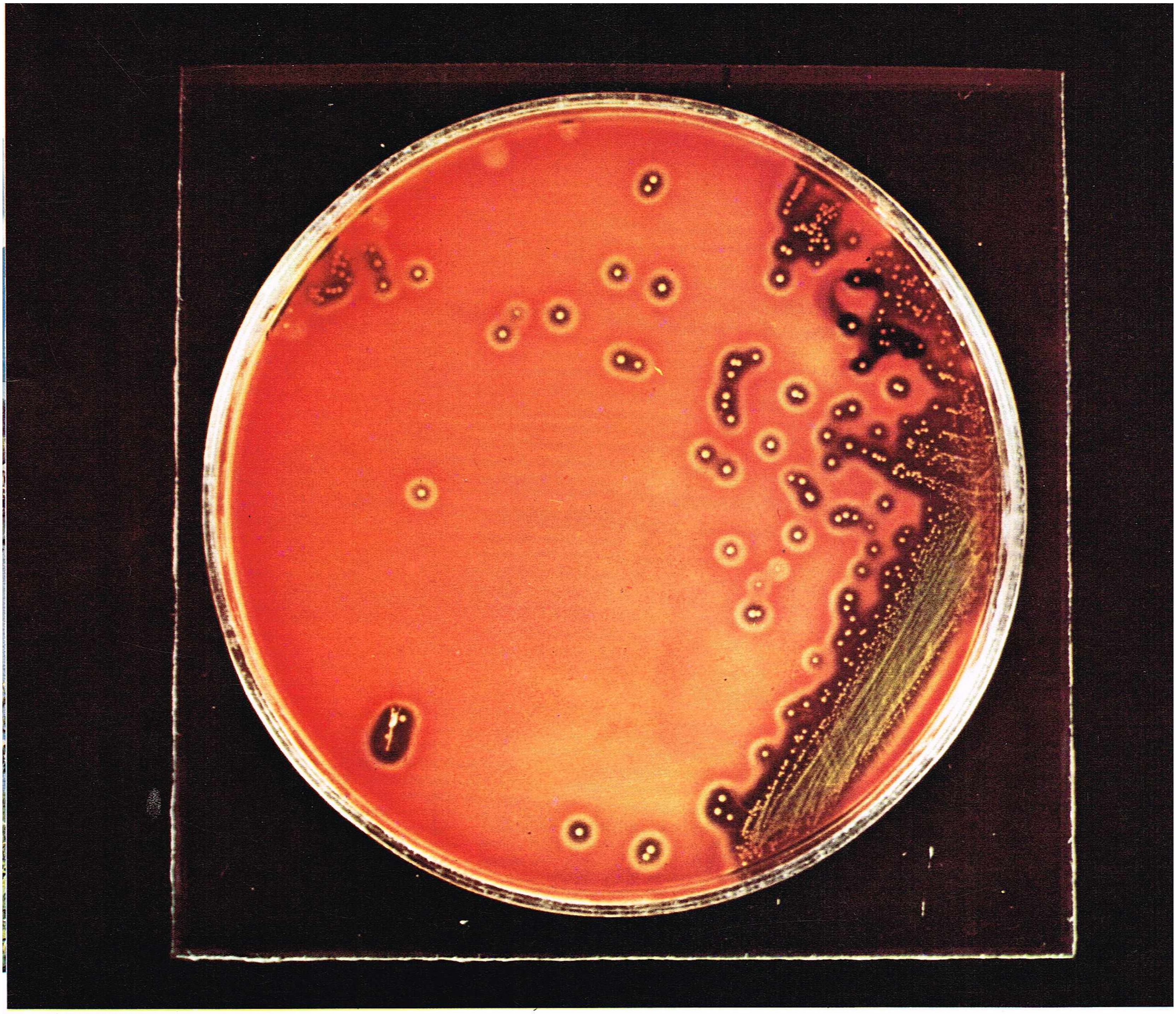

Institut Pasteur

▲ ***Culture dans une boîte de Petri contenant de la gélose au sang de streptocoques β hémolytiques.***

La paroi est en outre le siège des antigènes (polymères de type lipopolysaccharides, par exemple) responsables du caractère pathogène de certaines Bactéries (entérobactéries entre autres). C'est également au niveau de la paroi que les bactériophages (Virus attaquant les Bactéries) trouvent leur site de fixation.

La membrane cytoplasmique, dont l'épaisseur atteint 50 à 75 Å, composée de protéines et de lipides, protège directement le cytoplasme. Son rôle est considérable, car à son niveau se règle la perméabilité cellulaire. Des enzymes de type perméases contrôlent la pénétration des ions et des molécules nécessaires au métabolisme de l'organisme. Cette membrane contient la quasi-totalité des cytochromes bactériens et plusieurs enzymes dont la phosphatase acide, la nitrate réductase et des déshydrogénases (succinique, D.L-lactique et céto-glutarique). A son niveau se déroule donc un grand nombre d'étapes de la respiration cellulaire qui, chez les Eucaryotes, se situe dans les mitochondries. Chez les Bactéries, une différenciation locale de la membrane cytoplasmique, les *mésosomes,* a un rôle capital comme site respiratoire privilégié et comme centre de contrôle lors de la formation du *septum* séparant les deux cellules filles après la division cellulaire. La fixation du matériel nucléaire au niveau des mésosomes permet une synchronisation de la division du noyau et du cytoplasme.

Le matériel nucléaire se présente au microscope électronique sous l'aspect de zones plus claires que le cytoplasme. L'acide désoxyribonucléique (ADN) non entouré de membrane est visible sous forme de filaments enchevêtrés. Après des traitements ménagés, il est possible de les « dérouler » et l'on constate qu'il s'agit d'un filament circulaire de 700 à 900 μ de long. Cependant, chez les Bactéries, en dehors de ce chromosome, des fragments d'ADN nommés « épisomes » ou « plasmides » supportent également des déterminants génétiques spécifiques (facteur R de polyrésistance aux antibiotiques, par exemple).

Le cytoplasme est bourré de granulations sphériques, les *ribosomes,* très riches en acides ribonucléiques (ARN). Ces ribosomes qui ont une constante de sédimentation de 70 S se rapprochent donc de ceux qui existent dans les mitochondries et les plastes des Eucaryotes, mais sont différents des ribosomes du cytoplasme des Eucaryotes dont la constante de sédimentation atteint 80 S. Ces ribosomes très nombreux (18 000 pour une cellule de *Escherichia coli*) sont le lieu de synthèse des protéines.

Parmi les organites facultatifs, on peut citer d'abord les capsules correspondant à des enveloppes supplémentaires pour la cellule. Leur nature chimique est très variable. Ce sont des polypeptides (polymères d'acide D-glutamique dans le cas de *Bacillus anthracis*) ou des polysaccharides.

Leur rôle est important en ce qui concerne certaines Bactéries pathogènes. En effet, lorsque les pneumocoques perdent la propriété de s'encapsuler, ils ne sont plus pathogènes. Morphologiquement la perte de la capsule

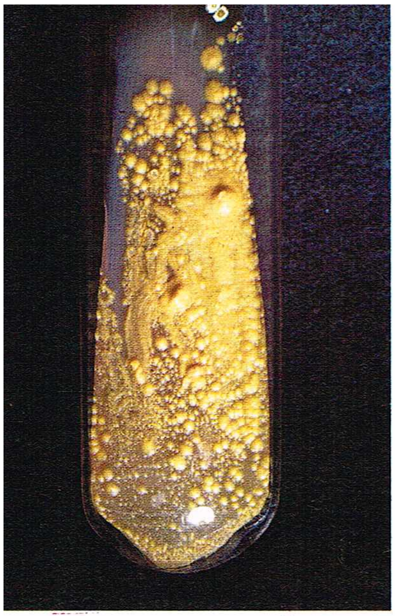

Archives I.G.D.A.

Archives I.G.D.A.

▲ *En haut, culture sur milieu carotte gélosée,* **de Sarcina lutea.** *Morphologie microscopique de cette Bactérie qui fait partie des cocci Gram positives.*

▼ *Mode de division du staphylocoque. On remarquera que le processus de fission s'effectue selon plusieurs plans de l'espace (× 15 000) pour aboutir à une formation en grappe (× 12 500).*

se traduit par le fait que les colonies bactériennes « smooth » (lisses, luisantes, à contours bien définis) deviennent « rough » (rugueuses, mates et à contours irréguliers).

L'appareil photosynthétique de certaines Bactéries est constitué de vésicules *(Chromatium, Thiospirillum)*, de tubules (Thiorhodacées) ou de lamelles *(Rhodospirillum iridis)*. Ces structures sont des spécialisations de la membrane cytoplasmique qui contiennent les pigments chlorophylliens et parfois des caroténoïdes.

Des granules de réserve sont souvent abondants dans la cellule bactérienne. Les polyphosphates (volutine) forment les granules métachromatiques et sont importants dans certains groupes (corynébactéries par exemple). Les glucides peuvent s'accumuler sous forme de glycogène tandis que des polymères de l'acide poly β hydroxybutyrique représentent pour d'autres Bactéries la forme de réserve du carbone organique. Les lipides sont souvent emmagasinés sous forme de globules. Enfin, certaines Bactéries chimiolithotrophes sont bourrées de soufre (résultat de l'oxydation des sulfures).

Dans le cytoplasme de certaines Bactéries, on peut mettre en évidence au microscope électronique des *microtubules*, et les *bactériocines*, protéines bactéricides ayant des propriétés antibiotiques vis-à-vis de souches appartenant à la même espèce que la souche qui les a synthétisées.

Les cils et les flagelles sont responsables de la mobilité de nombreuses cellules bactériennes.

Selon les groupes, ces flagelles sont insérés tout autour de la cellule (flagelles péritriches des Entérobactériacées) ou à un seul pôle de la cellule (insertion polaire des Pseudomonadales). Cette insertion polaire peut être de type monotriche (un ou deux flagelles chez les Pseudomonadales) ou lophotriche (une touffe de flagelles chez les Spirillacées). La présence de flagelles dépend de la constitution du milieu de culture (pression osmotique, consistance, viscosité), mais aussi de l'équipement génétique de la cellule. Les flagelles peuvent s'observer au microscope optique après coloration (coloration de Leifson, par exemple). C'est cependant grâce au microscope électronique que l'on a étudié leur structure. Ce sont des filaments dont la longueur peut atteindre plusieurs fois celle de la cellule et dont le diamètre varie de 10 à 20 mμ selon les organismes. Ils sont insérés au niveau de la membrane cytoplasmique sur un blépharoplaste situé dans le cytoplasme. Les fibres flagellaires sont composées d'une protéine pure, la flagelline, dont le poids moléculaire atteint 20 000. Cette protéine particulière ne contient pas de cystine, ni de tryptophane, et correspond à un antigène important des Bactéries (antigène H.).

Les flagelles sont les organes locomoteurs des Bactéries. Le mouvement est en général déterminé par une contraction rythmique du cil, mais les flagelles polaires des spirilles n'ondulent pas et tournent en cercle plus ou moins à angle droit avec l'axe de l'hélice cellulaire.

Certains groupes bactériens sont mobiles tout en étant dépourvus de flagelles. Comme certaines Cyanophycées, les *Beggiatoa* glissent sur le substrat dans un mucus qu'elles sécrètent. De même, dans tout le groupe des Myxobactériales, les cellules se déplacent en un mouvement parfois coordonné sur un mucus sécrété à travers la paroi cellulaire.

En plus des flagelles locomoteurs, certaines Bactéries possèdent des appendices filamenteux (*fimbriae* et *pili* sexuels). Les *fimbriae*, qui, chez les Entérobactériacées, sont des filaments très fins et beaucoup plus courts que les flagelles, contrôlent l'adhésivité et la charge électrique des cellules bactériennes, ainsi que la tendance de certaines d'entres elles à se développer à la surface des milieux liquides.

Les *pili* sexuels beaucoup plus longs et d'un diamètre supérieur sont en nombre peu élevé. Ils conditionnent les transferts génétiques lors de la conjugaison bactérienne.

Techniques bactériologiques

En premier lieu, il faut éliminer toutes les cellules bactériennes viables (cellules végétatives ou spores) présentes dans l'environnement et qui se développent dès que le milieu devient favorable.

C'est pourquoi on commence toujours par stériliser le matériel (récipients et milieux de culture). La présence de spores thermorésistantes chez les Bacillacées pose des problèmes très difficiles à résoudre. La plupart des Bactéries ont une bonne croissance dans des conditions artificielles. Il s'agit des milieux de culture liquides (bouillon de viande, sérum, lait) ou solides (gélose nutritive, carottes). Les cultures sont faites dans des tubes à essais, des fioles ou des ballons, des boîtes de Pétri. L'incubation à une température convenable, voire une agitation et parfois un éclairement favorisent la croissance.

L'ensemencement des Bactéries dans les milieux de culture se fait en inoculant le prélèvement (contenant les cellules bactériennes) à l'aide d'une boucle métallique préalablement stérilisée après avoir été portée au rouge dans la flamme d'un bec de gaz. On examine les colonies apparues dans les milieux gélosés et on les purifie par diverses techniques de façon à obtenir une souche ou culture pure, population provenant d'une cellule initiale.

Si la cellule bactérienne reste indéfiniment apte à se diviser dans un milieu de culture favorable, il n'en est pas de même si le substrat ne permet plus une croissance rapide. Dans ce cas, certaines Bactéries (*Bacillus, Clostridium, Plectridium,* certains Actinomycètes) acquièrent une propriété particulière : la cellule végétative, après une dernière division cellulaire qui isole deux cellules filles de taille inégale, se transforme en une cellule de résistance à vie ralentie, l'endospore ; la cellule qui sporule s'entoure de nombreuses parois (cortex, tunique, exosporium) contenant une molécule nouvelle absente dans la cellule végétative, l'acide dipicolinique.

La spore bactérienne résiste aux conditions défavorables du milieu telles que températures élevées, radiations, rayons ultra-violets, rayons X, dessiccation... Elle ne retrouve une vie active que si les facteurs ambiants redeviennent propices, mais parfois ne germe que si sa « dormance » a été supprimée par un processus physique ou chimique (choc thermique, surfactants, chélateurs).

D'autres cellules bactériennes (*Azotobacter,* Myxobactériales) forment des kystes quand le milieu leur est défavorable. Les cellules se déshydratent et passent à l'état de vie ralentie. Leur résistance est cependant beaucoup moins forte que celle des endospores.

Enfin le mycélium des Actinomycètes peut se fragmenter en arthrospores, ou former d'autres types de spores (conidies en chaînettes ou pédonculées). Dans ce cas, les spores sont beaucoup plus des organes de multiplication que des cellules de résistance et sont fondamentalement différentes des endospores.

La stérilisation du matériel est réalisée par la chaleur sèche (four Pasteur) ou par la chaleur humide (autoclave). Il ne faut pas oublier que certaines formes de résistances supportent des températures élevées. Dans

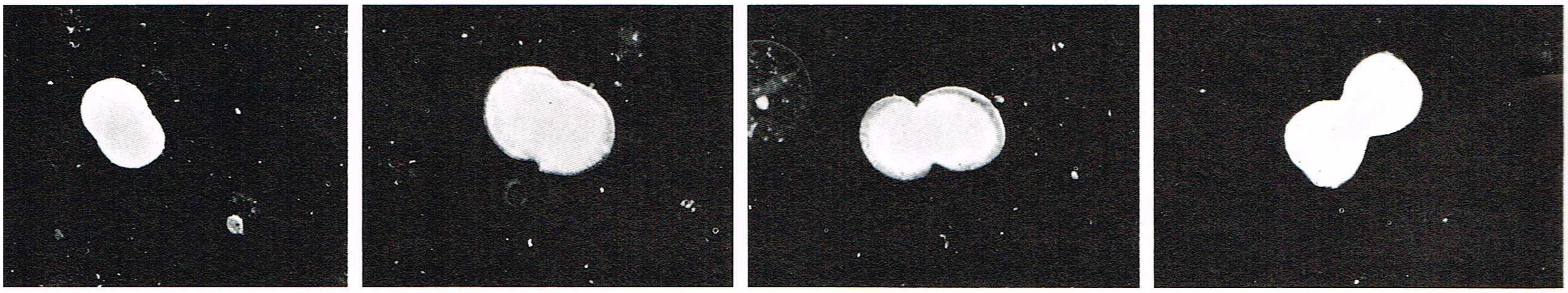

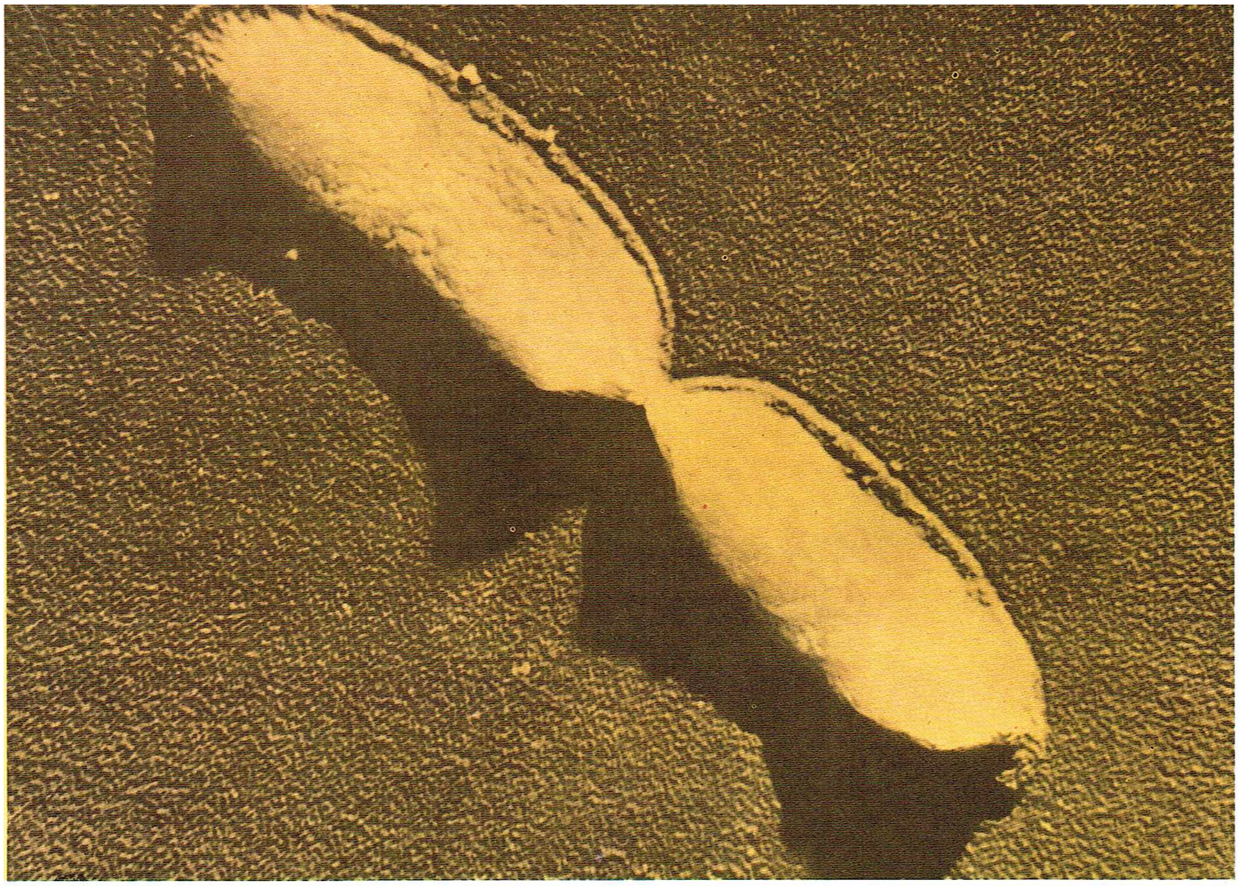

◀ **Escherichia coli** *en phase terminale de division : un fragile pont de cytoplasme relie encore les deux cellules.*

F. Scanga

la pratique courante, au laboratoire, le temps de stérilisation est de 20 minutes à 120 °C. Si les milieux de culture contiennent des substances fragiles (sucres, vitamines), il est parfois nécessaire de filtrer le milieu sur des membranes qui retiennent toutes les Bactéries (mais laissent passer les Virus et les *Mycoplasma*).

Lorsque toute trace de vie a disparu, on peut alors isoler les Bactéries que l'on désire étudier. Pour ce faire sont utilisés dans un premier temps des milieux « sélectifs » éliminant plus ou moins totalement les germes autres que ceux qui sont désirés. A partir de ces milieux « sélectifs », des étalements en stries ou des dilutions successives permettent d'obtenir des colonies bactériennes séparées les unes des autres. Celles-ci proviennent en général d'une seule cellule. Une colonie isolée sera ensuite repiquée sur un milieu de culture convenable ; on aura ainsi une souche dont les caractères resteront en principe constants (sauf mutation). Il faudra vérifier pendant toute la recherche entreprise que les caractères morphologiques, cytologiques, biochimiques et biologiques demeurent toujours identiques à ceux de la souche de départ.

Biologie et physiologie des Bactéries

Tous les types physiologiques se rencontrent chez les Bactéries. Très schématiquement, il est possible de classer les microorganismes d'après les sources d'énergie qu'ils utilisent pour leur croissance ou d'après les sources de carbone servant à édifier leurs molécules organiques.

Sources d'énergie. Comme toutes les synthèses biologiques sont endergoniques (c'est-à-dire qu'elles nécessitent de l'énergie), les cellules bactériennes doivent se procurer l'énergie indispensable dans le milieu extérieur. On trouve, suivant le cas, des phototrophes, des chimiotrophes et des paratrophes.

Les phototrophes utilisent la lumière comme source d'énergie. Les Algues (comme les plantes supérieures, d'ailleurs) produisent des molécules réduites (glucides) à partir du gaz carbonique, l'eau étant le donneur d'électrons. Les photolithotrophes utilisent les sulfures comme donneurs d'électrons pour réduire le gaz carbonique (Thiorhodacées), tandis que les photoorganotrophes (Athiorhodacées) utilisent une molécule organique (alcool, acide).

Pour les chimiotrophes, l'énergie nécessaire à la cellule provient de l'oxydation chimique d'une molécule. Cette molécule peut être une molécule minérale : chimiolithotrophes ou une molécule organique : chimioorganotrophes.

Les chimioorganotrophes oxydent des substances organiques pour en tirer de l'énergie. Ils dépendent donc d'autres organismes qui leur fournissent ces molécules. De nombreuses Bactéries et tous les Animaux présentent ce type de métabolisme.

On range dans les paratrophes les Bactéries qui ont perdu le pouvoir de faire certaines réactions chimiques essentielles pour leur métabolisme et sont donc des parasites obligatoires intracellulaires. Les *Rickettsia* appartiennent à ce groupe.

Sources de carbone. Les Bactéries phototrophes et chimiolithotrophes (autotrophes) sont censées utiliser comme source de carbone le gaz carbonique atmosphérique. En revanche, les Bactéries chimioorganotrophes (hétérotrophes) exigent pour leur croissance du carbone organique.

Cette distinction est en fait difficile à établir car de nombreuses Bactéries « autotrophes » ont besoin de molécules organiques jouant le rôle de métabolite essentiel, tandis que des Bactéries hétérotrophes peuvent incorporer, à partir du gaz carbonique, une fraction du carbone qui leur est indispensable : c'est le cas des *Brucella, Neisseria*...

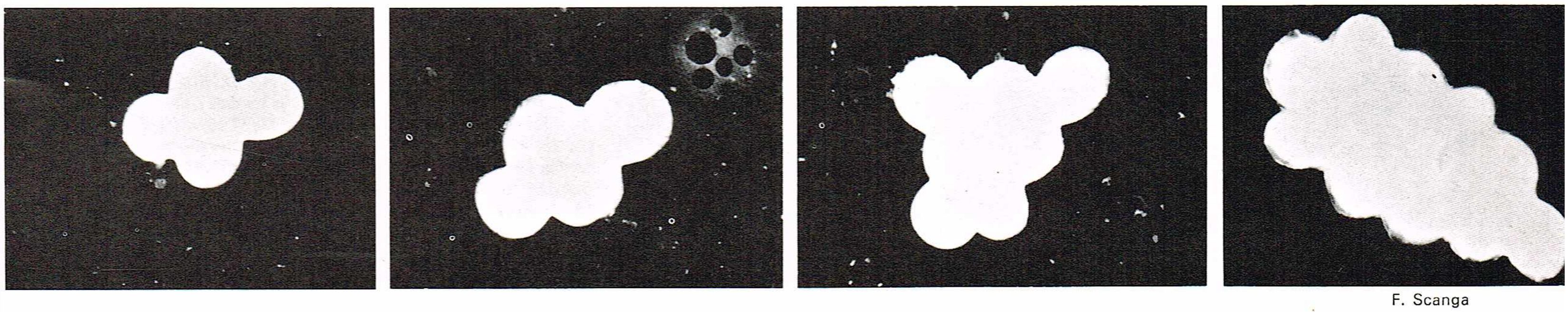

F. Scanga

▶ **Vibrio cholerae** ***ou*** **Vibrio comma,** ***agent pathogène du choléra. En raison de sa forme incurvée, il reçut le nom de bacille virgule.***

F. Scanga

Enfin on connaît des auxotrophes, souvent des mutants, qui exigent une ou plusieurs molécules organiques et ont perdu la propriété de les synthétiser (vitamines, acides aminés, bases puriques). Le milieu de culture doit donc les leur apporter.

Métabolisme énergétique

Dans le cas des chimioorganotrophes, les cellules bactériennes ont à leur disposition des molécules organiques réduites qu'elles vont oxyder pour en tirer l'énergie nécessaire à toutes leurs synthèses. Il s'agit, en fait, d'oxydoréductions qui sont réalisées au cours de la respiration ou de la fermentation du substrat.

La respiration est le processus au cours duquel le substrat est dégradé en CO_2 et H_2O en présence d'O_2 atmosphérique. Ce type de métabolisme fournit beaucoup d'énergie.

Certains groupes de Bactéries sont des aérobies obligatoires et ne peuvent réaliser que ce type d'oxydation (*Mycobacterium tuberculosis* et certaines Bacillacées). Les Bactéries aérobies strictes ont un équipement cellulaire complet en transporteurs d'électrons. Le flot d'électrons venant du substrat et passant par le NAD (nicotinamide-adénine-dinucléotide), une flavoprotéine et plusieurs cytochromes, est accepté par l'oxygène. Au cours de ce processus est synthétisé un composé riche en énergie, l'ATP (adénosine triphosphate), qui devient disponible pour la cellule.

▼ **Streptomyces scabies,** ***Bactéries aérobies, pathogènes de la pomme de terre.***

Institut Pasteur

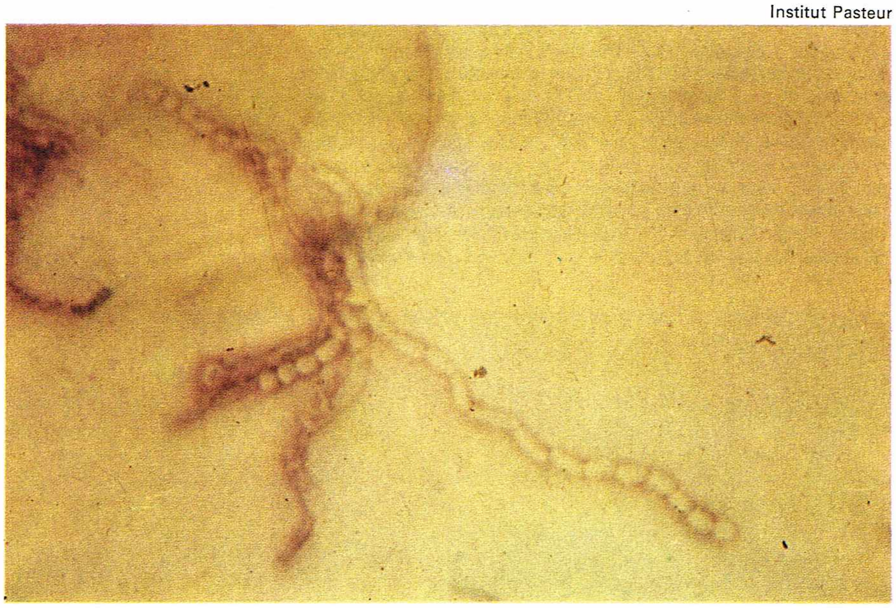

Ce type de Bactérie est inhibé par une tension insuffisante en oxygène et se développe toujours en surface dans les milieux de culture.

De très nombreux types bactériens supportent cependant l'absence d'oxygène, mais restent capables de vivre en sa présence. Ce sont des anaérobies facultatifs. Les Entérobactériacées appartiennent à ce groupe. En présence d'air un métabolisme respiratoire s'établit, mais si l'oxygène devient rare, le substrat est oxydé par un processus tout à fait différent : la fermentation.

Ce processus est en fait très varié, mais peut se résumer de la manière suivante ; les électrons, provenant du substrat qui est oxydé, sont acceptés par des substances organiques diverses (acide pyruvique par exemple pour la fermentation lactique, acétaldéhyde pour la fermentation alcoolique).

Ce processus fournit beaucoup moins d'énergie. Dans le second cas, deux molécules d'ATP seulement sont formées pour une molécule de glucose. Le sous-produit (éthanol) est en effet, potentiellement, très riche en énergie. Il permet encore aux Bactéries acétiques *(Acetobacter)* de se développer.

Par ces processus fermentaires, les molécules organiques sont très rapidement détruites. L'homme en a tiré parti pour sa propre alimentation.

Dans la *fermentation lactique,* il y a production finale d'acide lactique. Des lactobacilles et des streptocoques interviennent toujours dans la fabrication des fromages. En effet il y a au début une coagulation du lait grâce à l'acide lactique produit par ces microorganismes aux dépens du lactose. Certaines fermentations sont au contraire néfastes. C'est le cas de la fermentation butyrique qui est responsable d'accidents de fabrication en fromagerie (gruyère).

Il existe enfin des Bactéries anaérobies strictes *(Sphaerophorus, Clostridium),* qui ne peuvent se développer qu'en absence totale d'oxygène. L'effet toxique de l'oxygène est dû soit à l'absence de catalase (enzyme détruisant les peroxydes bactéricides), soit à l'inhibition de certaines enzymes par l'oxygène (fumarate réductase par exemple).

Métabolisme de l'azote

Les Bactéries ont besoin d'azote pour synthétiser leurs protéines. Un grand nombre de Bactéries saprophytes (responsables des putréfactions ou d'une protéolyse) hydrolysent des substances protéiques pour se procurer les acides aminés. La décomposition des protides en éléments plus simples se réalise grâce aux protéases que produisent de très nombreuses espèces bactériennes. Ces réactions interviennent au cours de la destruction et de la transformation dans la nature des matières organiques : déchets végétaux ou animaux, cadavres... Leur intérêt est immense car cette activité bactérienne remet en circulation le carbone et l'azote immobilisés dans les macromolécules organiques.

Cependant quelques Bactéries peuvent synthétiser leurs acides aminés et leurs protéines à partir de l'azote atmosphérique. Elles sont dites fixatrices d'azote. Il en existe deux types, celles qui sont libres et celles qui vivent en symbiose.

Les Bactéries dites « libres » se trouvent dans le sol et sont aérobies *(Azotobacter, Beijerinckia, Derxia)* ou anaérobies *(Clostridium, Methanobacterium, Desulfovibrio).* Certaines même sont non seulement capables de fixer l'azote gazeux, mais peuvent utiliser le gaz carbonique comme source de carbone grâce à l'énergie lumineuse *(Chlorobium, Rhodospirillum, Rhodopseudomonas).* Ces dernières sont donc capables de vivre dans un milieu purement minéral (CO_2, N_2 et sels minéraux), mais exigent souvent certaines molécules organiques (vitamines par exemple).

Les Bactéries symbiotiques *(Rhizobium)* vont fixer l'azote atmosphérique lorsqu'elles vivent dans les racines de certaines plantes supérieures (Légumineuses). La plante fournit à la Bactérie du carbone organique, résultat de sa propre photosynthèse, et récupère des molécules azotées synthétisées par la Bactérie à partir de l'azote gazeux. C'est un exemple remarquable de symbiose, dont l'importance est considérable en agronomie pour un bon développement des plantes appartenant à ce groupe des Légumineuses (trèfle, luzerne, soja). Ces

plantes, grâce aux Bactéries, enrichissent le sol en azote organique qui sera assimilable par d'autres organismes. C'est le principe des engrais dits « verts ».

Les Bactéries de la nitrification (Nitrobactériacées) interviennent dans le cycle de l'azote d'une tout autre manière. Ces chimiolithotrophes oxydent l'ammoniac en nitrites *(Nitrosomonas)*, puis les nitrites en nitrates *(Nitrobacter)*. Cette oxydation leur fournit l'énergie dont elles ont besoin pour leurs propres synthèses. La présence de ces Nitrobactériacées est essentielle dans un sol. En effet les nitrates représentent par excellence la forme d'azote assimilable par les plantes supérieures. Inversement, dans un sol mal aéré (anaérobiose), les nitrates serviront d'accepteur d'électrons et seront réduits en azote gazeux. Ce processus de dénitrification est le fait d'un petit nombre de Bactéries hétérotrophes *(Bacillus, Spirillum, Pseudomonas, Micrococcus denitrificans)* et conduit à la perte d'azote sous forme d'azote gazeux dans l'atmosphère.

Métabolisme du soufre

Comme nous venons de le voir, le métabolisme bactérien est essentiel pour que les cycles du carbone et de l'azote se déroulent normalement dans la nature. Le soufre est également un élément essentiel pour toutes les cellules (acides aminés soufrés par exemple) et le cycle du soufre dans la nature est aussi sous la dépendance des Bactéries. Au cours de la protéolyse les Bactéries de la putréfaction libèrent sous forme de sulfures le soufre organique. Des Bactéries sulfo-oxydantes *(Thiobacillus)* oxydent les sulfures en sulfates assimilables par les plantes supérieures. Rappelons que cette oxydation des sulfures libère de l'énergie et que les Bactéries oxydant le soufre sont des chimiolithotrophes. Certaines Bactéries anaérobies utilisent les sulfates (au lieu d'oxygène) comme accepteur d'électrons. C'est le cas des Bactéries sulfato-réductrices *(Desulfovibrio desulfuricans)* qui réduisent les sulfates en sulfures.

Bactéries saprophytes, parasites, symbiotiques et antagonistes

Des Bactéries hétérotrophes, qui sont incapables de tirer des molécules minérales leur subsistance, peuvent être *symbiontes :* c'est le cas des *Rhizobium* dont nous avons signalé l'intérêt. On considère également comme symbiontes les Bactéries qui pullulent dans l'appareil digestif des herbivores, ruminants ou non, et qui sont souvent cellulolytiques; elles ont pour rôle de métaboliser la cellulose en substances directement assimilables par les phytophages.

Le commensalisme est le fait des Bactéries qui, vivant dans des organismes en bonne santé, ne leur apportent aucun avantage et ne provoquent aucun trouble. C'est le cas de certaines souches d'*Escherichia coli*, qui, dans l'intestin humain, ne sont pas pathogènes en l'absence de conditions de déséquilibre pathologique.

Les saprophytes sont les Bactéries qui vivent aux dépens de tissus ou d'organismes morts; ils sont fort nombreux (agents de la putréfaction, par exemple). Toutefois, des espèces commensales et saprophytes peuvent devenir pathogènes : c'est le cas des staphylocoques et des colibacilles.

Les Bactéries parasites, et par conséquent pathogènes, sont la cause d'une multitude de maladies des plantes *(Agrobacterium tumefaciens,* agent du cancer végétal; *Xanthomonas, Corynebacterium michiganense)*, des Animaux et de l'homme (*Mycobacterium tuberculosis* responsable de la tuberculose; *Erysipelothrix insidiosa*, rouget du porc; *Listeria monocytogenes*, encéphalites des ovins et des hommes; *Corynebacterium diphteriae*, diphtérie).

Dans la nature, il arrive fréquemment que certaines Bactéries inhibent plus ou moins la croissance d'autres souches. Ce phénomène peut être dû à la libération dans le milieu de métabolites. L'acide lactique, par exemple, libéré par les Lactobacillacées, empêche la croissance des Bactéries de la putréfaction. De nombreuses Bactéries élaborent des substances plus spécifiques, tels des antibiotiques ou des bactériocines. Les antibiotiques sont

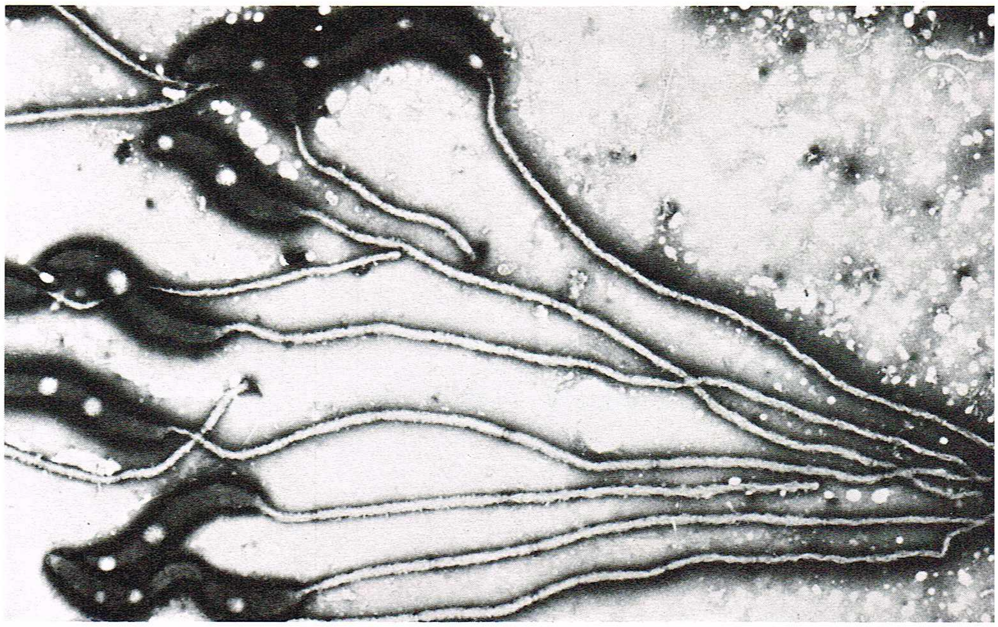

P. Castano - I.G.D.A.

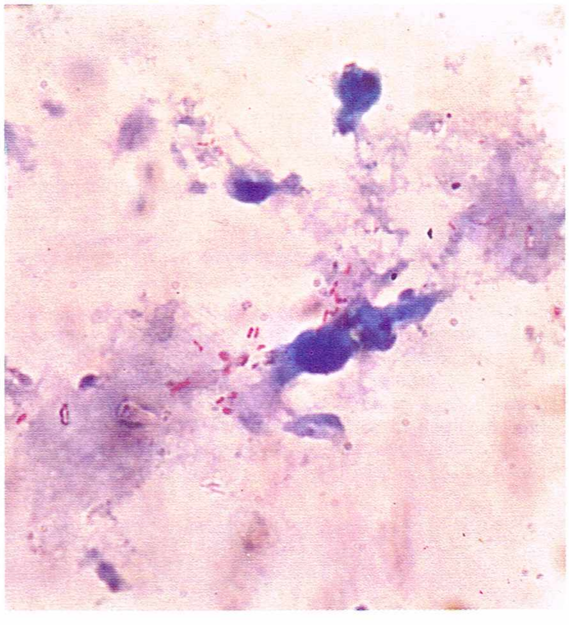

▲ **Caulobacter crescentus** *(× 7 750), photographie due à l'obligeance du professeur J.-M. Schmidt.*

◀ **Mycobacterium tuberculosis** *coloré selon la méthode de Ziehl-Neelsen. Les bacilles responsables de la tuberculose chez l'homme apparaissent en rouge-violet.*

▼ *Structure chimique du mucopeptide de* **Staphylococcus aureus.** *N : N - acétyl glucosamine; NAMA : acide N-acétyl muramique; D ou L ala : D ou L-alanine; D glu : acide D-glutamique; Gly : glycine; L lys : L-lysine.*

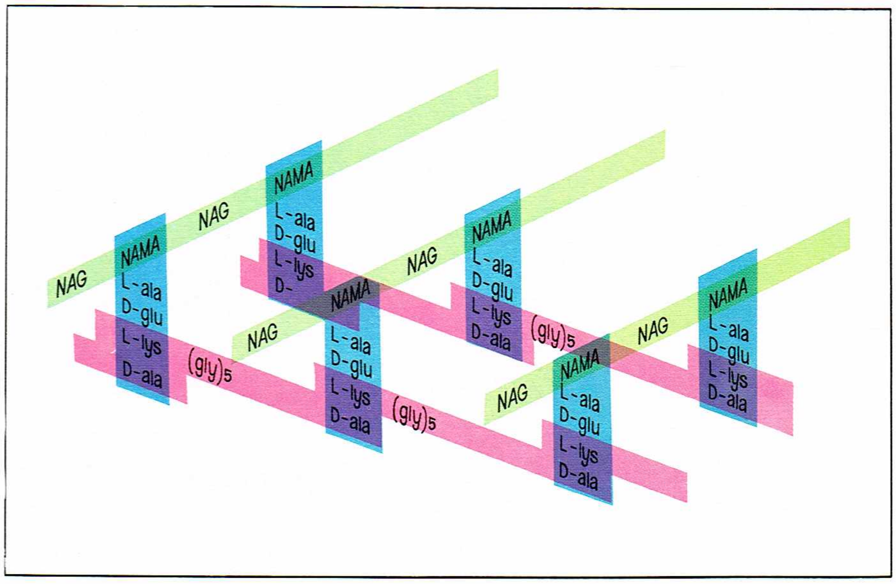

Institut Pasteur

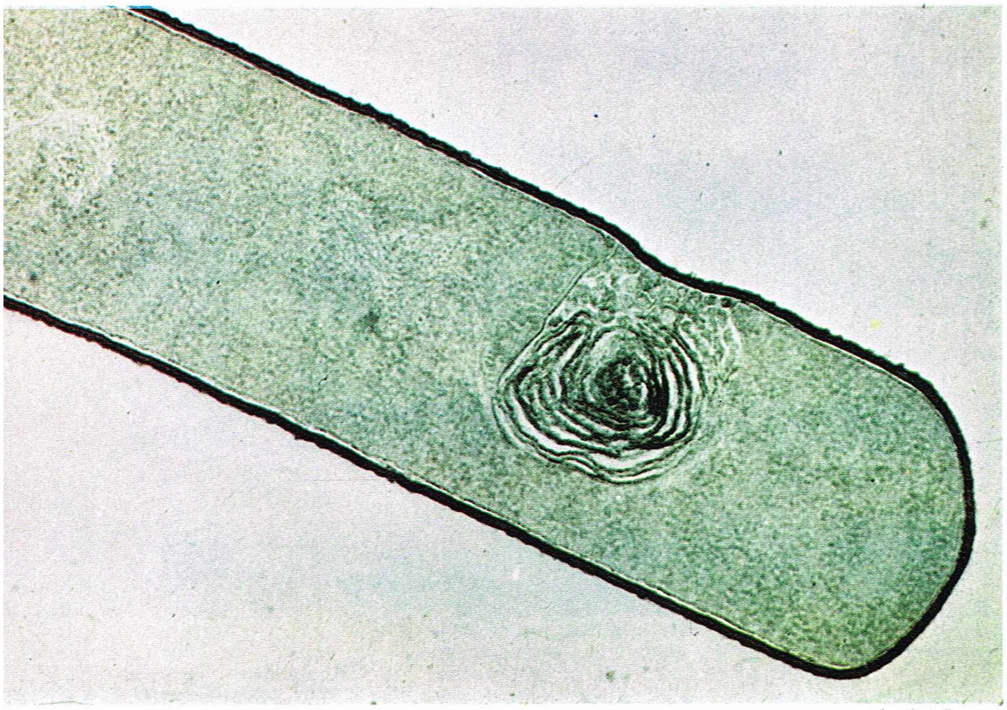

▲ **Bacillus subtilis.** *On distingue nettement le mésosome. Aspect de croissance.*

fabriqués maintenant à l'échelle industrielle. Les Actinomycètes représentent le groupe de Bactéries fournissant le plus grand nombre d'antibiotiques (érythromycine, tétracycline, streptomycine) qui servent à soigner les maladies de l'homme, des Animaux et des plantes.

SYSTÉMATIQUE

En bactériologie, la taxonomie obéit aujourd'hui à deux orientations générales : celle de la systématique naturelle qui essaye d'établir des filiations évolutives entre les organismes et celle de la systématique adamsonnienne qui, après constat de la faillite de la taxonomie naturelle, choisit le plus grand nombre possible de critères précis, pour les transmettre à un ordinateur afin d'établir des groupes.

La « taxonomie » naturelle est fondée sur des critères morphologiques : les formes bactériennes sont peu nombreuses (bacilles, vibrions, spirilles, coques), mais, malheureusement, pour une même espèce, elles varient souvent selon les conditions de culture. La disposition des flagelles caractérise des groupes entiers (flagellation polaire des Pseudomonadales). Cependant les cellules perdent facilement leurs flagelles et ceux-ci n'apparaissent que dans des conditions de culture bien définies. La présence d'une capsule est également fonction de la composition du milieu. Certaines souches dites « smooth » sont capsulées, mais mutent fréquemment et donnent des souches « rough » non capsulées. Or le *Bacillus anthracis* pathogène ne diffère que par la présence d'une capsule du *Bacillus cereus* saprophyte banal du sol. La coloration de Gram est un bon critère morphologique s'il est soigneusement utilisé, mais malheureusement il varie selon l'état physiologique de la culture.

Pour distinguer entre eux les organismes supérieurs, les systématiciens se servent volontiers du critère d'interfertilité : deux espèces sont distinguables si les hybrides nés du croisement sont stériles. Chez les Bactéries, ce critère d'interfertilité ne peut être utilisé puisque, dans toute la famille des Entérobactériacées par exemple, il est possible d'obtenir des échanges génétiques.

Les critères de détermination physiologique ne sont pas plus fidèles, puisque, pour distinguer les *Escherichia* des *Salmonella,* on utilise par exemple le critère de la fermentation du lactose. De nombreux mutants d'*E. coli* ne dégradent pas ce sucre et ne sont cependant pas sortis du genre *Escherichia*.

La taxonomie adamsonnienne ou taxonomie numérique est au contraire fondée sur le principe de rapprochement des Bactéries possédant le plus grand nombre possible de caractères dont on définit la stabilité. Cette taxonomie n'est malheureusement pas terminée ; seuls les groupes des Entérobactériacées, des Lactobacillacées, des Mycobactéries et des *Bacillus* ont été étudiés de ce point de vue.

Actuellement, la systématique bactérienne ne peut qu'être un compromis plus ou moins valable entre les diverses classifications proposées par les bactériologistes. Dix ordres ont été définis : Les Pseudomonadales, les Chlamydobactériales, les Hyphomicrobiales, les Eubactériales, les Caryophanales, les Actinomycétales, les Flexibactériales, les Myxobactériales, les Spirochétales, et les Rickettsiales.

Les Mycoplasmatales constituent désormais la classe des Mollicutes.

Institut Pasteur

▶ **Escherichia coli** *en division. On distingue aisément sur ce cliché la paroi, la membrane cytoplasmique, les ribosomes et le noyau diffus (zones plus claires que le cytoplasme), non entouré de membrane.*

Institut Pasteur

Salmonella typhi *ou bacille d'Eberth. Les flagelles mis en évidence après coloration montrent une disposition péritriche. Alors que le bacille mesure de 0,6 à 2,3 μ de longueur, les cils atteignent de 8 à 12 μ et même davantage.*

Pseudomonadales

Ces Bactéries, Gram négatives, sont des bâtonnets droits, incurvés ou spiralés, en général mobiles, grâce à des flagelles à insertion polaire. Certaines familles possèdent des pigments photosynthétiques.

1) Les Thiorhodacées et Athiorhodacées sont colorées en rouge, pourpre ou brun par des caroténoïdes et, comme les Chlorobactériacées, possèdent également des chlorophylles. Les bactériochlorophylles a, b, c et d absorbent la lumière à des longueurs d'onde de 358 à 425 nm et de 651 à 771 nm. Les spectres d'action varient donc légèrement selon les molécules de chlorophylle présentes dans les chromatophores.

Les cellules de Thiorhodacées *(Thiosarcina, Lamprocystis, Thiospirillum, Chromatium)* contiennent des globules de soufre qui peuvent disparaître selon l'état physiologique des cultures.

L'énergie lumineuse est employée à réduire le CO_2 en composés organiques, le H_2S sert de donneur d'électrons.

Les Athiorhodacées *(Rhodopseudomonas, Rhodospirillum)* utilisent comme donneurs d'électrons des alcools, des acides gras ou des acides cétoniques mais peuvent se développer à l'obscurité en anaérobiose si on leur fournit du carbone organique.

Les Chlorobactériacées *(Chlorobium, Pelodictyon)* comme les Thiorhodacées utilisent le H_2S comme donneur d'électrons mais sont colorées en vert (absence de caroténoïde).

2) Les Pseudomonadales non pigmentées par des pigments chlorophylliens comprennent un grand nombre de familles dont le métabolisme est divers : Nitrobactériacées, Méthanobactériacées, Thiobactériacées, Pseudomonadacées, Caulobactériacées, Sidérocapsacées, Spirillacées.

Les Nitrobactériacées *(Nitrosomonas* et *Nitrobacter)* sont les Bactéries de la nitrification. L'oxydation d'un composé minéral (NH_3 ou NO_2) leur fournit l'énergie dont elles ont besoin. Ce sont les chimiolithotrophes. Les cellules se divisent par bourgeonnement.

Les Méthanomonadacées *(Methanomonas, Hydrogenomonas)* oxydent le méthane, l'hydrogène ou l'oxyde de carbone pour se procurer l'énergie.

Les Thiobactériacées *(Thiobacillus)*, en présence d'oxygène, oxydent le soufre.

Les Pseudomonadacées sont des chimioorganotrophes dont certaines espèces sont parasites de l'homme et des Animaux. Elles attaquent le glucose par oxydation et non par fermentation. Ce type de métabolisme les différencie donc fondamentalement des Entérobactériacées. Certains *Pseudomonas* peuvent croître à des températures très basses (inférieures à 10 °C), d'autres s'adaptent à des milieux riches en NaCl (ce sont des halophiles). Certaines espèces sont parasites de l'homme *(Pseudomonas aeruginosa)* ou des Végétaux *(Xanthomonas)*. Les Bactéries appartenant au genre *Acetobacter* sont responsables des fermentations acétiques très utilisées industriellement : fabrication du vinaigre par oxydation de l'alcool éthylique en acide acétique.

Les Caulobactériacées *(Caulobacter, Gallionella)* sont des Bactéries très curieuses, pédonculées. Les *Gallionella* oxydent les sels de fer ferreux en sels de fer ferrique. Cette réaction leur fournit un peu d'énergie.

Les Sidérocapsacées oxydent également des sels de fer et des sels de manganèse. Ce sont des autotrophes facultatifs ou des hétérotrophes.

Les Spirillacées regroupent les genres dont les cellules sont incurvées *(Vibrio)* ou spiralées *(Spirillum)*. Les *Desulfovibrio* anaérobies réduisent les sulfates en H_2S, les *Methanobacterium* réduisent le CO en CH_4 et sont les agents des fermentations méthaniques importantes dans les processus d'épuration biologique des eaux usées. Les *Cell vibrio* et les *Cell falcicula* dégradent la cellulose et remettent donc en circulation le carbone organique immobilisé dans les polymères des parois des Végétaux supérieurs. Le vibrion du choléra est un pathogène dangereux pour l'homme. Certains *Vibrio* (tels que le *Vibrio costicolus*) sont halophiles et interviennent dans le processus des salaisons de viande en réduisant les nitrates en nitrites, aboutissant à la formation d'un pigment rouge gardant sa couleur après cuisson.

Chlamydobactériales

Ces Bactéries Gram négatives *(Sphaerotilus, Leptothrix)* sont assez comparables à des Cyanophycées incolores. Les cellules restent associées en un filament après la division cellulaire. Une gaine protège le filament et s'imprègne d'oxyde de manganèse ou de fer. La reproduction se fait par des spores nageuses ou par des conidies immobiles. Il n'y a jamais d'endospores.

Hyphomicrobiales

Gram négatives, les Hyphomicrobiales se multiplient par bourgeonnement comme les levures. Les bourgeons peuvent être sessiles ou apparaître à l'extrémité d'un mince filament qui se développe à partir du pôle d'une cellule mère ou d'un filament unissant deux cellules.

Institut Pasteur

▲ ***Spores de Bacillus subtilis.***

F. Scanga

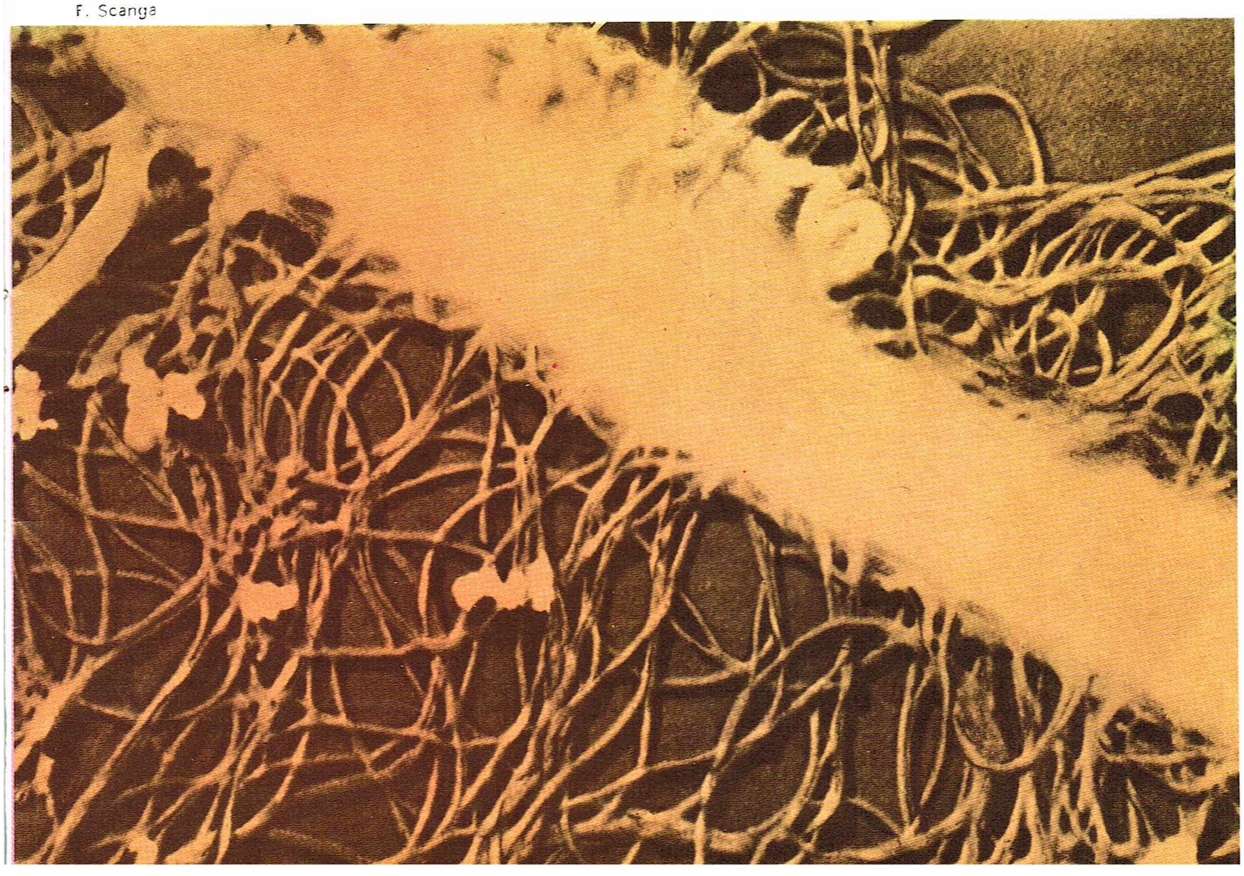

◄ ***Les cils sont insérés au niveau de la membrane cytoplasmique sur un blépharoplaste situé dans le cytoplasme.***

Immobiles ou mobiles par flagelle monotriche, ces organismes dulçaquicoles sont parfois parasites des Crustacés d'eau douce.

Eubactériales

Cet ordre bactérien est de loin le plus important. Les cellules sont sphériques ou en bâtonnets. Les formes mobiles sont péritriches. Une famille, celle des Bacillacées, forme des endospores. Toutes les espèces sont chimioorganotrophes, parasites ou saprophytes.

Deux grands groupes peuvent être définis :

1) *Les Gram négatifs*. Ils comprennent les familles suivantes : Azotobactériacées, Rhizobiacées, Achromobactériacées, Entérobactériacées, Brucellacées, Bactéroïdacées, Neisseriacées.

a) Les Azotobactériacées sont des bâtonnets de grande taille (2 à 3 μ x 3 à 6 μ). Dans des conditions défavorables, ces Bactéries forment des kystes, qui ne sont pas comparables cytologiquement aux endospores et qui résistent mal, contrairement aux endospores, aux températures élevées. Les *Azotobacter* sont des fixateurs d'azote libres dans le sol.

b) Les Rhizobiacées fixent l'azote lorsqu'elles vivent en symbiose avec les Légumineuses. La forme « bactéroïde » dans le nodule est cependant seule capable d'utiliser l'azote atmosphérique. La forme libre consomme l'azote organique.

Le métabolisme de réduction de l'azote met en jeu une nitrogénase contenant du fer et du molybdène. Une protéine spéciale, la ferredoxine, intervient dans le transfert des électrons. Les nodules des Légumineuses contiennent une hémoglobine (la léghémoglobine) dont le rôle encore mal connu est cependant essentiel dans la fixation de l'azote. La famille des Rhizobiacées regroupe encore deux genres très différents *(Agrobacterium* et *Chromobacterium). Chromobacterium violaceum* donne des colonies pigmentées en violet et vit dans le sol. *Agrobacterium tumefaciens* est l'agent du cancer végétal. Après une infection par cette Bactérie, les cellules végétales se divisent d'une manière anarchique en engendrant des tumeurs qui peuvent se greffer sur une plante saine et induire un nouveau cancer. C'est une véritable transformation tumorale assez comparable à celle observée pour les cellules animales sous l'action de certains Virus.

c) Les Achromobactériacées sont des saprophytes ou des parasites qui attaquent les sucres en aérobiose. Le genre *Acinetobacter* peut devenir en milieu hospitalier un parasite humain redoutable.

d) Les Entérobactériacées se caractérisent par le fait qu'elles fermentent le glucose avec ou sans dégagement de gaz ($CO_2 + H_2$) et réduisent les nitrates en nitrites. Ces Bactéries, abondantes dans le tube digestif des Mammifères, sont parfois très pathogènes. Ce groupe est bien étudié car dans toute recherche d'hygiène (hygiène de l'eau, des aliments, etc.), la présence d'Entérobacté-

▼ Afin d'éviter l'ensemencement de germes autres que ceux qui doivent être étudiés, il faut stériliser le matériel. Cette boucle en platine destinée à prélever des Bactéries pour les inoculer dans un milieu de culture est préalablement présentée à la flamme d'un bec de Bunsen.

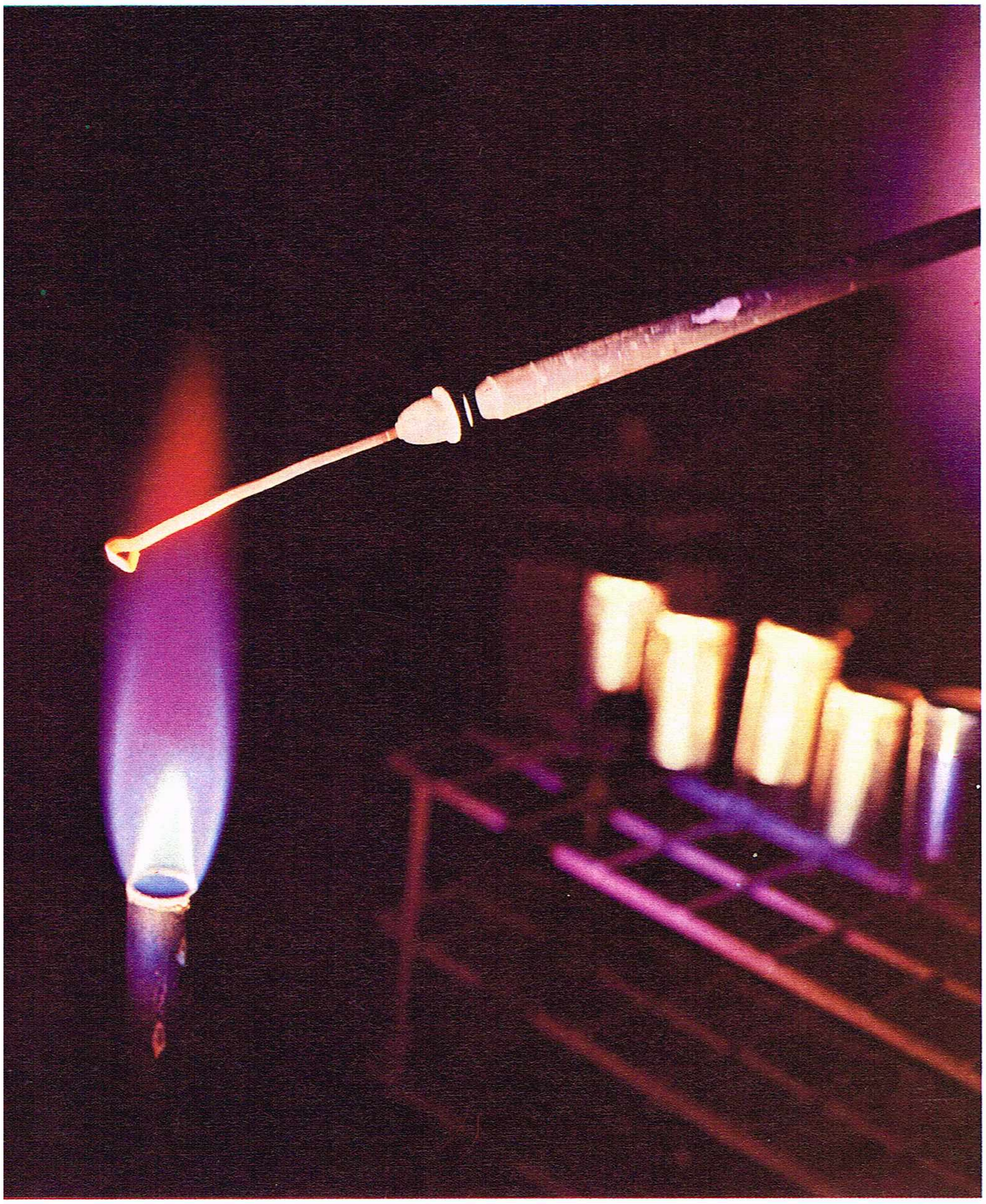

P. Castano - I.G.D.A.

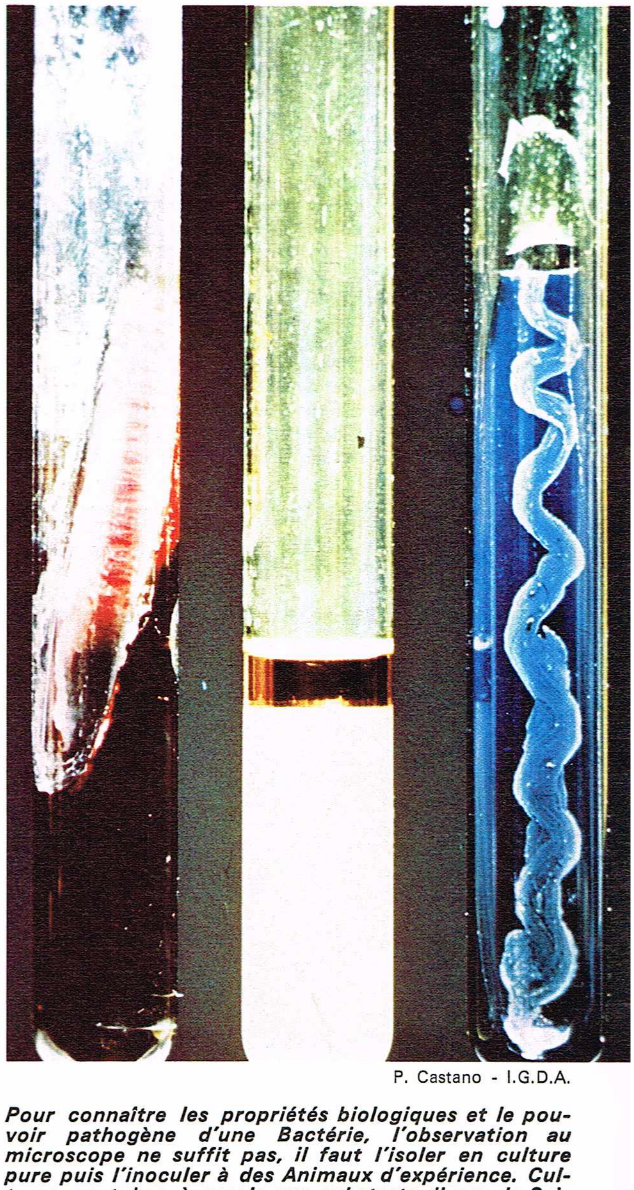

P. Castano - I.G.D.A.

***Pour connaître les propriétés biologiques et le pouvoir pathogène d'une Bactérie, l'observation au microscope ne suffit pas, il faut l'isoler en culture pure puis l'inoculer à des Animaux d'expérience. Cultures en tubes à essais sur substrats divers de* Salmonella paratyphi B.**

riacées est souvent un indice de contamination fécale.

Les *Escherichia coli* sont les agents de la colibacillose et des gastroentérites infantiles, les *Klebsiella* de certaines infections respiratoires. Les *Proteus* peuvent provoquer des septicémies, les *Salmonella (S. typhi, S. paratyphi A et B, S. typhimurium)* sont les Bactéries responsables des salmonelloses dont la typhoïde est la plus connue. A côté de ces pathogènes des Animaux, les *Pectobacterium* sont parasites des Végétaux, agents des pourritures, grâce à leurs pectinases hydrolysant les pectines, ciment intercellulaire des plantes supérieures.

e) Les Brucellacées sont de tout petits bâtonnets ou coccobacilles parasites des Animaux. La maladie se transmet facilement à l'homme. Certains exigent pour être cultivés plusieurs facteurs de croissance et sont habituellement entretenus sur des milieux organiques complexes (sang, sérum sanguin). Très souvent, une atmosphère riche en CO_2 (10 %) stimule leur développement.

Les *Brucella* sont responsables de la fièvre de Malte, les *Yersinia* de la peste, *Francisella tularensis* de la tularémie des rongeurs, *Bordetella pertussis* de la coqueluche, *Haemophilus ducreyi* d'une maladie vénérienne (le chancre mou). Les *Moraxella* déclenchent des conjonctivites, des septicémies et des méningites. Tous sont donc des agents pathogènes redoutables pour l'homme et pour les Animaux.

f) Chez les Bactéroïdacées, on rencontre aussi des espèces pathogènes comme le *Sphaerophorus necrophorus*, ou des saprophytes. Ces Bactéries sont anaérobies. Les cellules sont très polymorphes et exigent pour leur croissance des liquides biologiques (sang, par exemple).

g) Les formes cellulaires sphériques (coques Gram négatifs) appartiennent à la famille des Neissériacées, et sont parasites des Mammifères. Les deux plus importants représentants sont : *Neisseria gonorrhoeae* ou gonocoque agent de la blennorragie ; *Neisseria meningitidis* ou méningocoque agent de la méningite cérébrospinale.

2) *Les Gram positifs.* Ils comprennent : les Micrococcacées, Lactobacillacées, Propionibactériacées, Corynébactériacées, Bacillacées.

a) Les cocci Gram positifs sont regroupés dans la famille des Micrococcacées. Les *Sarcina* anaérobies sont abondants dans les sols, les *Micrococcus* sont aérobies stricts, alors que les *Staphylococcus* sont aérobies-anaérobies facultatifs. Les staphylocoques sont saprophytes, ou pathogènes. Les staphylocoques pathogènes possèdent des enzymes caractéristiques (coagulase, désoxyribonucléase et phosphatase). Toutefois, sans être forcément pathogènes, les staphylocoques libèrent dans le milieu des entérotoxines thermostables qui peuvent déclencher des toxiinfections alimentaires graves.

b) La famille des Lactobacillacées se caractérise par le fait que ses espèces fermentent le lactose avec production d'acide lactique. Microaérophiles ou anaérobies, elles sont en général immobiles (sauf les espèces marines).

Les formes sphériques peuvent être groupées par deux *(Diplococcus)* ou en chaînette *(Streptococcus)*. Les formes bacillaires sont les *Lactobacillus*.

Parmi les formes sphériques, certaines sont pathogènes (*Streptococcus pyogenes, Streptococcus* des mammites, *Diplococcus pneumoniae* ou pneumocoques), d'autres sont saprophytes (streptocoques fécaux).

Physiologiquement, ces formes coques peuvent être divisées en deux groupes ; les anaérobies obligatoires *(Peptostreptococcus)* et les anaérobies facultatifs ou microaérophiles, tels les *Diplococcus*, les *Streptococcus* et les *Pediococcus* qui fermentent le lactose sans dégager de gaz (on les dit homofermentaires). Les anaérobies facultatifs qui libèrent du gaz au cours de la fermentation du lactose sont les *Leuconostoc* (hétérofermentaires).

Parmi les *Lactobacillus*, les anaérobies stricts sont les *Eubacterium* et *Catenabacterium*. Les aérobies-anaérobies facultatifs sont soit homofermentaires thermophiles *(L. acidophilus, L. bulgaricus)* ou mésophiles *(L. casei, L. plantarum)*, soit hétérofermentaires *(L. fermenti, L. viridescens)*.

Les streptocoques lactiques et les lactobacilles jouent un rôle très important pour l'alimentation humaine. Ils interviennent dans toutes les fermentations lactiques (saucisson, choucroute, produits laitiers et fromages). Ils synthétisent les substances aromatiques responsables des arômes des produits laitiers *(St. diacetilactis, Leuconostoc citrovorum)*.

Archives I.G.D.A.

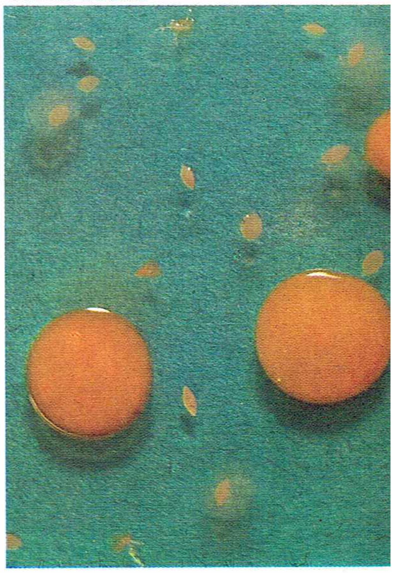

◀ ▲ **Flavobacterium.** ***Colonies obtenues après isolement et étalement.***

c) Les Propionibactériacées sont très voisines des Lactobacillacées, mais produisent des acides propionique et acétique en même temps que l'acide lactique. Elles interviennent dans l'élaboration de certains fromages (trous de l'emmental, du gruyère) et dans la synthèse de la vitamine B_{12} en fermentation industrielle.

d) Le groupe des Corynébactériacées est très hétérogène. Les cellules se présentent souvent sous la forme de bacilles renflés en forme de massue. Après la division cellulaire, elles se disposent parfois en palissade. Ce groupe joue un faible rôle dans la fermentation des sucres.

Elles vivent dans le sol (et dégradent la cellulose), dans les produits lactés *(Microbacterium, Arthrobacter)*, ou sont parasites des Végétaux *(Corynebacterium sepedonicum)*, d'Animaux et de l'homme (*Erysipelothrix*, agent du rouget du porc, *Listeria monocytogenes*, des méningites ; *Corynebacterium diphteriae*, de la diphtérie).

e) Les Bacillacées, seule famille de sporulées, se caractérisent par l'existence d'endospores dont nous avons défini les caractéristiques. Les organismes aérobies sont des *Bacillus*, les anaérobies des *Clostridium* ou des *Plectridium*.

Dans le genre *Bacillus*, nous citerons le *B. subtilis* que l'on observe dans les infusions de foins, le *B. anthracis* pathogène pour les Mammifères et l'homme (maladie du charbon), le *B. thuringiensis* qui synthétise au moment de la sporulation une toxine insecticide puissante. Les *B. larvae, B. popilliae, B. lentimorbus*, sont pathogènes pour les Insectes.

Chez les *Clostridium*, le *Cl. perfringens* provoque des septicémies et la gangrène gazeuse. Le *Cl. botulinum*

▼ ***Vibrion cholérique, cliché obtenu au microscope électronique avec un grossissement de 50 000.***

Institut Pasteur

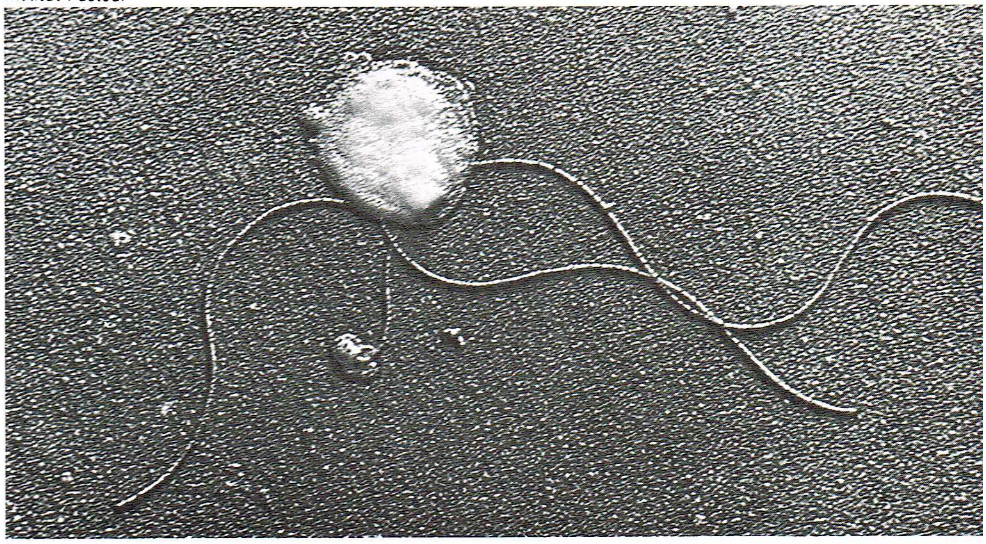

F. Albergon

▲ *Les nodosités des Légumineuses sont le résultat d'une association à bénéfice réciproque entre la plante et des Bactéries du genre* **Rhizobium** *: la Légumineuse fournissant le carbone organique, la Bactérie des molécules azotées synthétisées à partir de l'azote gazeux.*

est à l'origine du botulisme. Un grand nombre de *Clostridium* sont des saprophytes du sol et dégradent les polysaccharides végétaux. Certains peuvent même fixer l'azote atmosphérique.

Plectridium tetani est un pathogène redoutable, agent du tétanos.

Les Bacillacées posent d'innombrables problèmes aux industries de la conserverie alimentaire. En effet la présence d'endospores thermorésistantes impose des températures de stérilisation très élevées.

Actinomycétales

Les cellules tendent à se ramifier en formant un mycélium plus ou moins différencié. La plupart des espèces vivent dans le sol ou moins fréquemment dans les eaux douces. Quelques-unes sont pathogènes. Plusieurs produisent des antibiotiques. La nouvelle classification définie par Cross et Goodfellow dénombre les familles suivantes : Actinomycétacées, Actinoplanacées, Dermatophilacées, Frankiacées, Micromonosporacées, Mycobactériacées, Nocardiacées, Streptomycétacées, Thermoactinomycétacées, Thermomonosporacées.

a) Les Actinomycétacées, non acido-alcoolo-résistantes, sont fréquemment anaérobies. Le mycélium est peu évolué. Les Actinomycètes sont les agents des actinomycoses chez les bovins et l'homme. Ces maladies affectent les tissus conjonctifs et sous-cutanés *(A. israeli)*. *Bifidobacterium* est chez l'être humain un hôte fréquent de l'intestin, du vagin et de la bouche, mais colonise également le rumen des bovins.

b) Les Actinoplanacées se caractérisent par l'existence d'un véritable mycélium portant des spores de multiplication enfermées dans un sporange. Fréquents dans les sols, les genres *Actinoplanes, Ampullariella, Pilimelia* développent un mycélium intramatriciel qui ne se fragmente pas et ne forme pas de mycélium aérien. Dans les genres *Spirillospora* ou *Streptosporangium* le mycélium aérien porteur des sporanges apparaît bien différencié. Les spores sont parfois mobiles *(Actinoplanes, Spirillospora)*.

c) Le mycélium des Dermatophilacées se réduit après septation longitudinale et transversale en élément plus ou moins allongé qui constitue des zoospores de multiplication possédant une touffe de cinq à sept flagelles. Ces Actinomycétales sont des pathogènes du bétail et déclenchent des maladies de la peau.

d) Comme les Rhizobiacées (Eubactériales), les Frankiacées sont des Bactéries symbiontes des plantes autres toutefois que les Légumineuses. Symbiontes obligatoires, les espèces appartenant à l'unique genre *Frankia* sont des hôtes des plantes suivantes : *Alnus* (aulne), *Eleagnus, Coenothus, Myrica, Casuarina, Dryas*. L'endophyte est capable de survivre dans le sol, mais dans des nodules racinaires peut fixer l'azote atmosphérique.

e) La famille des Micromonosporacées ne forme pas de mycélium aérien, mais sur un mycélium intramatriciel bien développé apparaissent des conidies (aleuriospores) isolées et terminales sur un petit conidiophore. Ce groupe est très fréquent dans les sols.

f) Les Mycobactériacées représentent incontestablement le groupe le plus dangereux pour les Mammifères. Le mycélium est rudimentaire ou même absent. Les cellules acido-alcoolo-résistantes sont souvent bacilliformes. Aucune espèce n'est capable de sporuler. Le *Mycobacterium tuberculosis* ou bacille de Koch est responsable de la tuberculose chez l'homme *(M. hominis)* et chez les bovins *(M. bovis)*. Une espèce *(M. avium)* est pathogène pour les Oiseaux. Le *M. leprae* ou bacille de Hansen, très proche des espèces précédentes, provoque la lèpre.

g) Les Nocardiacées, très comparables aux Mycobactériacées, forment un mycélium qui se fragmente en éléments de multiplication (arthrospores) et sont les agents de nombreuses actinomycoses, attaquant les tissus sous-cutanés et même osseux.

h) Les Streptomycétacées comprennent essentiellement le genre *Streptomyces* aérobie. Ces Actinomycètes très fréquents dans les sols forment un mycélium intramatriciel qui ne se fragmente pas en spore, mais qui porte des hyphes aériennes fructifères. Les spores naissent en chaînes.

Une espèce pathogène, le *Streptomyces scabies*, provoque la gale commune de la pomme de terre. De nombreuses espèces produisent des vitamines comme *S. griseus* qui fabrique de la vitamine B_{12} ; d'autres servent à la production industrielle d'antibiotiques remarquables.

Le *S. aureofaciens* élabore, par exemple, la chlortétracycline ou auréomycine ; celle-ci est active contre un grand nombre de germes. L'amphotéricine B est produite par *S. nodosus*, la blasticidine par *S. griseochromogenes*, la cycloheximide par *S. griseus*, la cyclosérine par *S. orchidaceus*, l'érythromycine par *S. erythreus*. *Micromonospora purpurea* synthétise la gentamicine, *Streptomyces kanamycetis*, la kanamycine, *S. noursei*, la nystatine, *S. antibioticus*, l'oléandomycine, *S. griseus*, la streptomycine.

Les antibiotiques, selon les concentrations utilisées, bloquent la croissance ou même détruisent les micro-organismes. Les mécanismes d'action sont cependant fort différents. Certains, tels que la cyclosérine, la vancomycine, ou la novobiocine, empêchent la synthèse de la paroi bactérienne, d'autres (nystatine) détruisent la membrane cytoplasmique. Les synthèses protéiniques sont inhibées par le chloramphénicol, l'auréomycine, la puromycine et l'érythromycine. C'est à la synthèse des acides nucléiques que s'attaquent les mitomycines et les actinomycines.

i) Les Thermonosporacées sont des organismes formant un mycélium intramatriciel et aérien porteur de

spores isolées. A la différence des Streptomycétacées, le mycélium intramatriciel peut se fragmenter.

j) Les Thermoactinomycétacées différencient un mycélium aérien porteur de spores isolées et terminales comme les *Micromonospora,* mais, à la différence de ce germe, se développent à des températures élevées de 50 à 65°.

Caryophanales

Les Caryophanales sont des organismes disposés en trichomes (filaments pluricellulaires). Chaque cellule contient un « noyau », visible dans les cellules vivantes, se présentant sous l'aspect d'un corpuscule central ou d'un disque annulaire. Présents dans les eaux douces, on les rencontre également dans l'intestin des Arthropodes et dans la matière organique en décomposition. Plusieurs genres sont mobiles et les cellules ont alors une ciliation péritriche.

Flexibactériales

Ces Bactéries ne forment pas de spores et sont mobiles par glissement sur le substrat. Elles sont finalement très voisines des Cyanophycées.

Citons le genre *Beggiatoa* qui oxyde le H_2S en soufre pour se procurer de l'énergie. Les *Vitreoscilla* sont hétérotrophes, et les *Flexithrix* vivent en milieu marin.

Myxobactériales

Les Myxobactériales sont de curieuses Bactéries qui par leurs colonies édifient des structures pluricellulaires rappelant les Champignons Myxomycètes ou les Acrasiales. Elles se présentent sous la forme de bacilles incolores non flagellés et se meuvent par glissement sur les surfaces solides. Les cellules se groupent souvent en « essaims » aplatis envahissant rapidement la surface du substrat par mouvements actifs des cellules situées à leur périphérie. Les formes de résistances (kystes) sont situées dans des structures volumineuses dénommées fructifications. Celles-ci sont soit des groupements de formes de résistances englobées dans une masse visqueuse, soit des ensembles de kystes portés par des tiges muqueuses simples ou ramifiées. Les Myxobactéries sont des hôtes caractéristiques du sol. *Chondrococcus columnaris* est pathogène pour les Poissons.

Spirochétales

L'ordre des Spirochétales est constitué par des Bactéries à diamètre très faible (1 μ) spiralées, et souvent très longues : de 30 à 500 μ pour les Spirochétacées, et de 4 à 16 μ pour les Tréponématacées.

La cellule est mobile, flexible et effilée aux deux extrémités. Les mouvements sont rapides et s'effectuent par rotation autour de l'axe longitudinal. Des fibrilles intracellulaires assurent la contraction du cytoplasme.

Dans ce groupe, on rencontre des formes aquatiques libres, saprophytes ou vivant dans le tube digestif des Mollusques Lamellibranches. *Treponema pallidum* est l'agent de la syphilis ; *Borrelia recurrentis* est responsable de la fièvre récurrente dont l'agent vecteur est le pou ; *Leptospira ictero hemorragiae* provoque la spirochétose ictéro-hémorragique transmise par des eaux contaminées par des déjections de rats infectés.

Rickettsiales

Ces microorganismes doivent être classés en dehors des Bactéries que nous venons d'étudier. Ce sont des microorganismes parasites obligatoires intra- ou extracellulaires.

Les cellules sont de très petite taille (0,3 μ de diamètre) et traversent les filtres habituellement utilisés pour retenir les Bactéries. Leur comportement est donc comparable à celui des Virus et pour cette raison les auteurs avaient longtemps classé ces microorganismes parmi les Virus. Ils s'en distinguent pourtant radicalement par le fait que les cellules contiennent toujours de l'acide désoxyribonucléique (ADN) et de l'acide ribonucléique (ARN). Les Virus, au contraire, sont soit à ARN, soit à ADN.

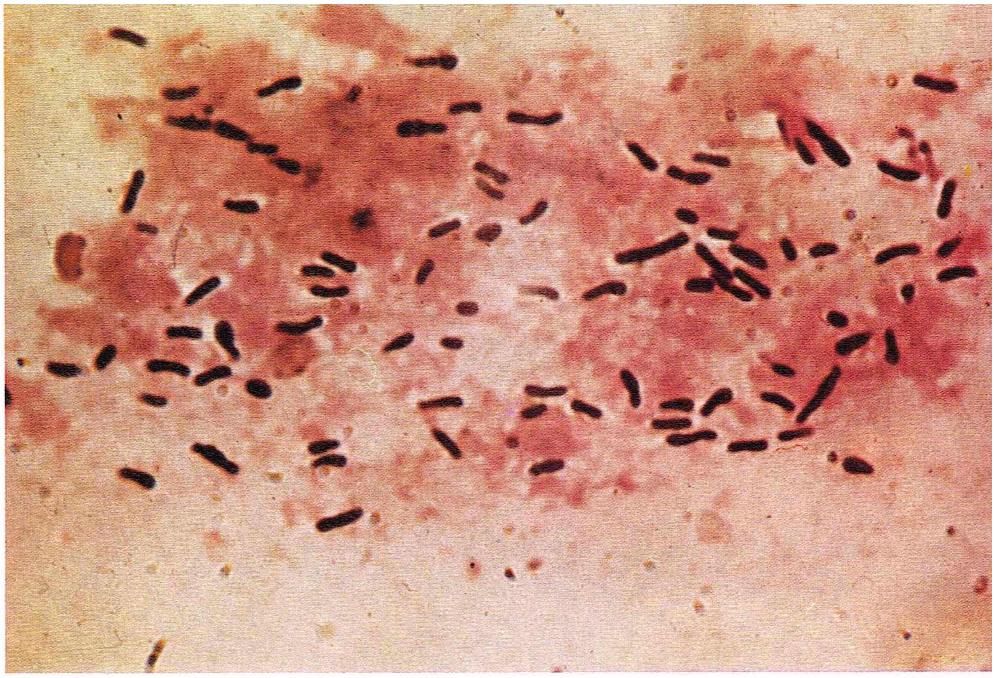

Institut Pasteur

▲ **Corynebacterium diphteriae,** ***agent de la diphtérie, se présente sous forme de bâtonnets longs de 2 à 6 μ.***

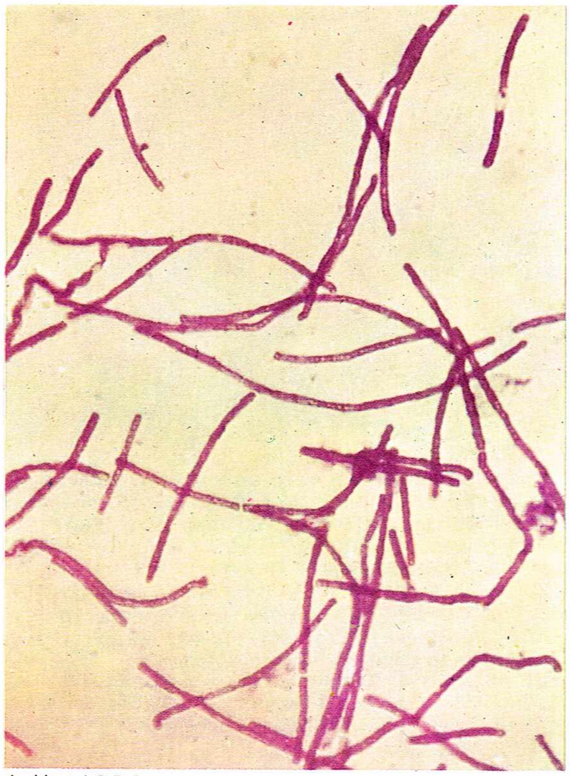

Archives I.G.D.A.

◀ **Bacillus anthracis,** ***agent du charbon, comme toutes les Bacillacées se caractérise par la présence d'endospores. Il est aérobie.***

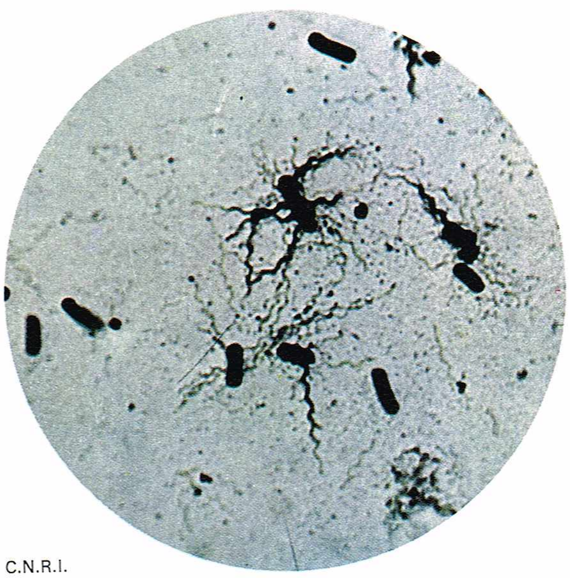

C.N.R.I.

◀ **Clostridium septicum,** ***responsable de la gangrène gazeuse et d'autres accidents pathogènes.***

▶ **Streptomyces fradiae** ***(a) (× 4 650),*** **Streptomyces viridochromogenes** ***(b),*** **Streptoverticillium cinnamomeum** ***(c) (× 5 000). Clichés dus à l'obligeance du professeur Baldacci.***

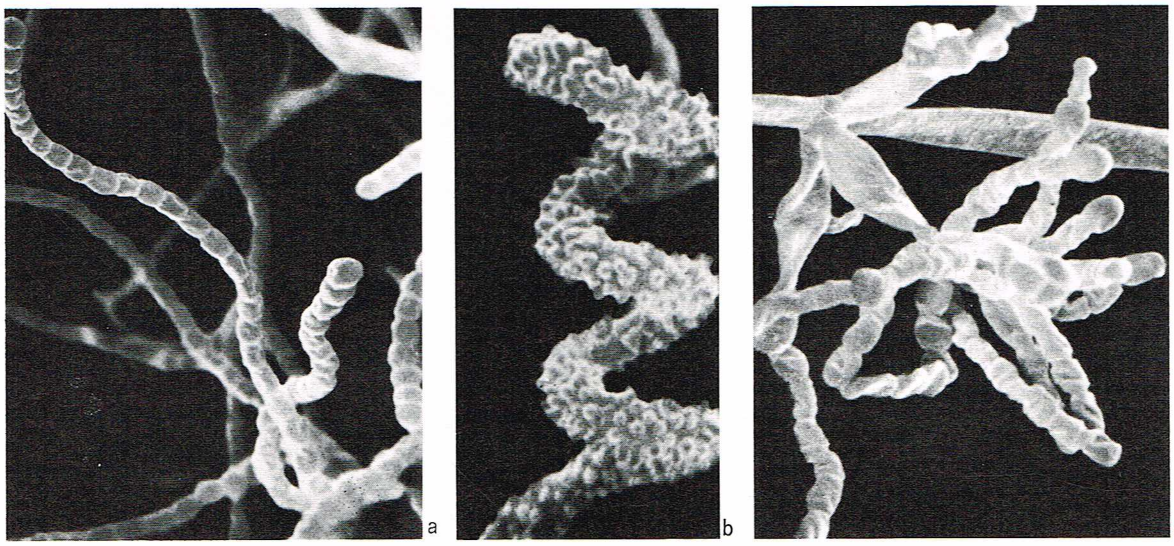

Leur parasitisme obligatoire est dû au fait qu'ils manquent d'un métabolisme énergétique convenable. La membrane cytoplasmique est très perméable et peut laisser perdre des molécules indispensables pour la cellule (acides aminés).

Coxiella burnettii est l'agent de la fièvre Q des bovins et de l'homme. Les *Chlamydia* provoquent le trachome et la psittacose, les *Bartonella* sont parasites des hématies de nombreux Mammifères. Le typhus est une maladie redoutable due à *Rickettsia prowaseki.*

Mycoplasmatales ou Mollicutes

Ces organismes (autrefois appelés PPLO : *Pleuropneumoniae like organisms*) très pléomorphes sont très fragiles car ils ne possèdent pas de paroi. Le cytoplasme n'est protégé que par la membrane cytoplasmique très sensible aux chocs osmotiques. Ils peuvent se cultiver dans des milieux riches dont les caractéristiques physiques doivent être définies avec précision. Les colonies sont alors très petites et dites « en œuf sur le plat ». Les *Mycoplasma* exigent souvent pour leur croissance un stéroïde et des protéines sériques.

Les *Mycoplasma* déclenchent de nombreuses maladies chez les Animaux (pleuro-pneumonie des Bovidés) et chez les Végétaux. Depuis 1967, les *Mycoplasma* ont été élevés au rang de classe dite des *Mollicutes.*

BIBLIOGRAPHIE

BERGEY D. H., *Manual of Determinative Bacteriology,* Williams et Wilkins, Baltimore, 1957. - GOULD G. W. et HURST A., *The Bacterial Spore,* Ac. Press, 1969. - LAMBIN S. et GERMAN A., *Précis de microbiologie,* Masson, 1969. - LARPENT J.-P., *De la cellule à l'organisme, Monographies de botanique et de biologie végétale,* Coll. P. Champagnat, Masson, 1970. - LARPENT J.-P., *Microbiologie pratique,* Hermann, Coll. Méthodes, 1970 - LECHEVALLIER H. A. et PRAMER D., *The Microbes,* J. B. Lippincott Cy, Philadelphie. - NORRIS J. R. et RIBBONS D. W., *Methods in Microbiology,* Acad. Press., tome I, 1969, tome VI, 1971. - PRÉVOT A. R., *Traité de systématique bactérienne,* Dunod, 1961. - SENEZ J.-C., *Microbiologie générale,* Doin, 1968. - SIMON P. et MEUNIER R., *Génie biochimique et Microbiologie industrielle,* Masson, 1970. - STANIER R. Y., DOUDOROFF M. et ADELBERG. E. A., *The Microbial World,* 3e Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs H.J., 1970. - SYKES G. et SKINNER F. A., *Actinomycetales,* Ac. Press, 1973. - WAKSMAN S. A., *The Actinomycetes, A Summary of Current Knowledge,* New York, Ronald Press, 1967.

▼ **Mycoplasma arthritidis** ***(à gauche).*** **Mycoplasma pulmonis** ***(à droite). Ces organismes dépourvus de paroi sont désormais isolés des Bactéries et forment la classe des Mollicutes (1967).***

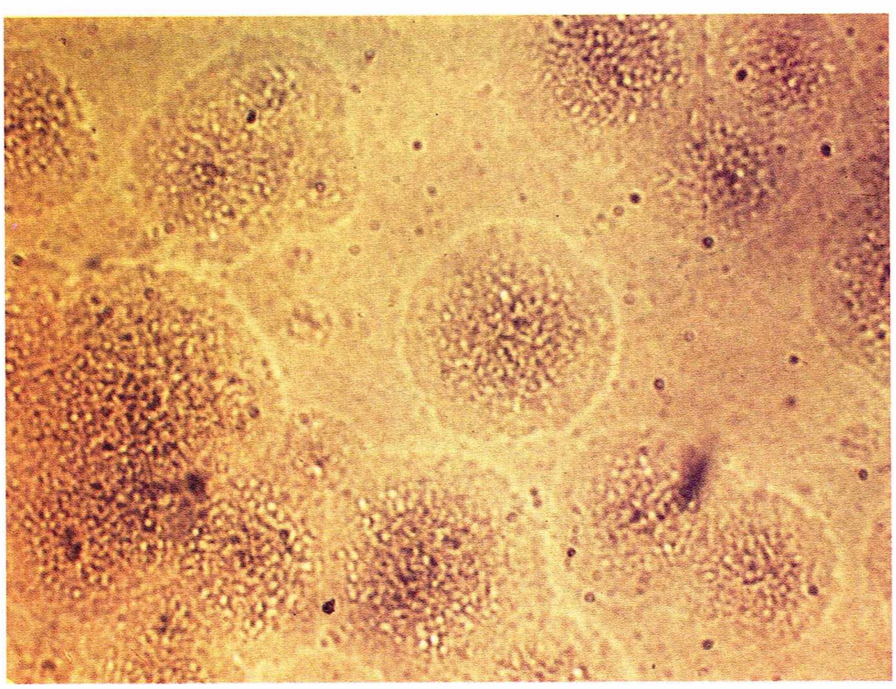

Institut Pasteur

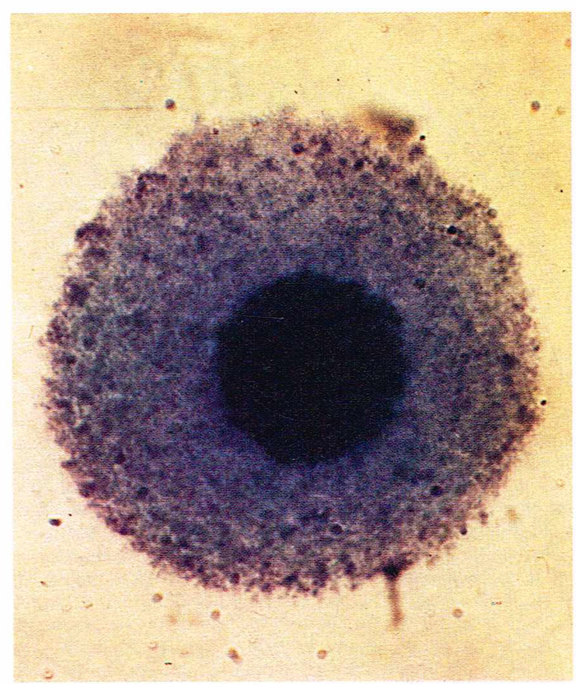

Institut Pasteur

Richard Colin-Topin

▲ *Les Cyanophycées ont une distribution géographique très vaste. Elles vivent aussi bien dans les eaux salées que dans les eaux douces et certaines espèces parviennent à supporter des températures extrêmes, puisqu'on en retrouve dans les eaux thermales très chaudes ou même sur la neige.*

CYANOPHYCÉES

Les Cyanophycées sont des Procaryotes que l'on appelle aussi Algues bleues ou Schizophycées, ou Myxophycées. Ce sont des organismes autotrophes, c'est-à-dire capables d'utiliser le gaz carbonique et l'eau, sous l'action de la lumière qui constitue la source d'énergie, et d'effectuer ainsi la synthèse des hydrates de carbone.

Cytologie

Les cellules montrent une teinte homogène allant, suivant les espèces, du bleu acier au rouge en passant par le bleu-vert (bleu canard) et le violet. Cette couleur varie suivant les proportions de la chlorophylle verte, des biliprotéides bleu et rouge et des caroténoïdes orangés (xanthophylles variées et β carotène).

Au microscope optique, on reconnaît une zone périphérique colorée ou *chromoplasma* et une zone centrale incolore ou *centroplasma*. Le microscope électronique montre dans le chromoplasma des lamelles doubles ou *thylacoïdes* qui sont les organites photosynthétiques ; ils portent les granules de chlorophylle a. Les grains de biliprotéides sont localisés dans l'espace séparant les thylacoïdes. Cette structure rappelle celle des plastes des Algues et des Végétaux supérieurs, mais, chez les Cyanophycées, il n'y a pas de membrane plastidiale spécialisée.

Les thylacoïdes, outre la photosynthèse, ont d'autres fonctions : respiration et, chez certaines espèces, fixation de l'azote atmosphérique. Cette dernière propriété a fait utiliser aux Indes certaines Cyanophycées *(Anabaena* et *Nostoc)* comme engrais vert au même titre que les Légumineuses.

Le *centroplasma* (ou nucléoplasma) fait fonction de noyau et renferme de l'acide désoxyribonucléique colorable par les réactifs classiques (hématoxyline et Feulgen) et visible en microscopie électronique sous forme de fines aiguilles de 25 Å.

Cependant le centroplasma n'est pas limité par une membrane spéciale, il ne possède pas de nucléole et lors de la division n'apparaissent ni chromosomes ni fuseau. La cellule renferme de plus de nombreuses inclusions : ribosomes riches en ARN, grains de cyanophycine (réserve protéique), polyphosphates (ou volutine), globules lipidiques, grains de polyglucoside voisin du glycogène. Quelques Cyanophycées planctoniques possèdent de plus des pseudo-vacuoles gazeuses, faisceau de petits cylindres creux à extrémités coniques de 0,074 μ de diamètre et de longueur variable : 0,2 à 1 μ.

Les cellules sont entourées d'une fine membrane souvent doublée par une gaine épaisse mucilagineuse riche en caroténoïdes. Le microscope électronique permet de reconnaître trois ou quatre couches dans la membrane : la plus interne renferme des mucopeptides. Chez les espèces filamenteuses mobiles, une ceinture de pores entoure les cloisons intercellulaires.

Chez de nombreuses Cyanophycées filamenteuses, on observe des cellules particulières à membrane épaisse, à pores apicaux marqués et à contenu jaune homogène : les *hétérocystes,* qui ne se divisent pas et ont l'aspect de cellules mortes. Leur ultrastructure est bien différente de celle des autres cellules, cependant ce sont des cellules vivantes qui ont conservé leur activité respiratoire tandis qu'elles ont perdu leur pouvoir photosynthétique et celui de fixer l'azote de l'air. Dans certains cas, on observe, de plus, une germination des hétérocystes qui se comportent alors comme des spores.

La cytologie des Cyanophycées se définit donc par des caractères négatifs : absence de membranes nucléaire et plastidiale ; absence de mitochondries, d'appareil de Golgi, de vacuoles ; absence de chromosomes ; absence de sexualité et de stade flagellé.

Structure du thalle

Les structures sont fort variées, des formes unicellulaires simples aux formes thalloïdes complexes du type

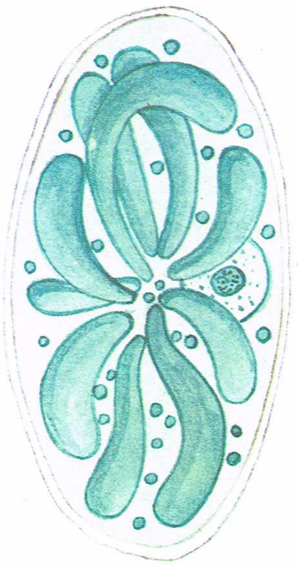

▲ **Glaucocystis nostochinearum** *(× 2 500); à droite : le noyau. Des endocyanelles remplacent les plastes.*

▼ *De haut en bas :* **Gloeocapsa alpina** *(× 880),* **Coelosphaerium kuetzingianum** *(× 1 500),* **Merismopedia glauca,** *colonie tabulaire (× 930).*

Richard Colin-Topin

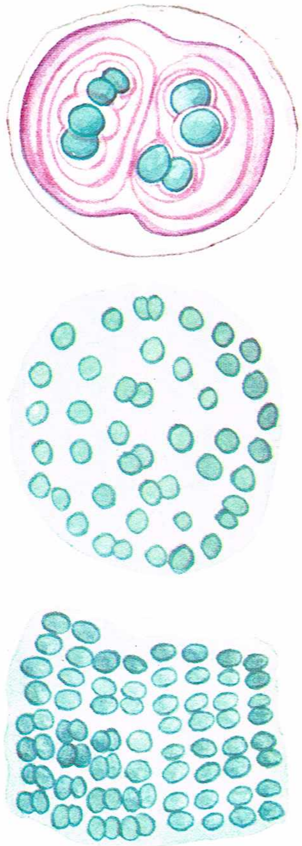

cladomien (voir plus loin la définition de ces termes).
Chez les *Chroococcales,* nous trouvons des *archéthalles,* paquets irréguliers de cellules parfois orientées en files; chez les *Chamæsiphonales,* le thalle est réduit à un sporocyste unicellulaire. Les *Pleurocapsales* et quelques *Stigonématales* forment des *protothalles* avec filaments rampants et filaments dressés. Les *Stigonématales* les plus évoluées ont parfois des cladomes avec une file de cellules axiales centrales entourées d'un manchon de cellules péricentrales et des liaisons cytoplasmiques intercellulaires.

Chez les *Nostocales,* le thalle est réduit à un sporocyste filamenteux ou *trichome* souvent entouré d'une gaine. Les formes filamenteuses unisériées ont parfois des ramifications qui se ramènent à deux types : 1) véritables ramifications avec base en T *(Hapalosiphon),* en V ou Y *(Mastigocladus);* 2) fausses ramifications où le trichome perce la gaine et donne des rameaux simples *(Tolypothrix)* ou doubles, géminés *(Scytonema).* Chez les *Rivularia,* nous observerons des fausses ramifications simples, mais les trichomes s'effilent en longs poils incolores cloisonnés.

Multiplication et reproduction

Les Cyanophycées se reproduisent par simple division végétative et par spores : spores unicellulaires (coccospores) ou pluricellulaires (hormogonies ou hormospores).

Dans le cas des coccospores, la cellule mère se transforme en sporocyste, divise son contenu et libère des *endospores (Pleurocapsa).* Parfois le sporocyste s'ouvre précocement et libère un chapelet d'*exospores (Chamaesiphon).* Les spores sont mobiles par glissement ou reptation mais ne possèdent jamais de flagelle.

Les *akinètes (Nostoc* ou *Anabaena)* sont des spores durables, unicellulaires, simples cellules qui se chargent de réserves, augmentent de taille, s'entourent d'une membrane épaisse et germent en un nouveau thalle.

La reproduction sexuée est inconnue, cependant certaines cultures laissent présager l'existence de combinaisons parasexuelles analogues à celles décrites chez les Bactéries.

Biologie et écologie

Les Cyanophycées ont une distribution géographique très vaste; elles vivent dans les eaux salées ou saumâtres où elles font partie du benthos et du plancton ainsi que dans les eaux douces, les étangs, les mares et les fossés. Certaines espèces se développent sur les troncs humides, les feuilles, les rochers, les murs des serres sous forme d'un enduit visqueux vert bleuté ou d'une pellicule gélatineuse.

Les Algues bleues sont pour la plus grande part autotrophes mais peuvent souvent devenir saprophytes. Quelques-unes, appartenant aux genres *Nostoc, Calothrix* et *Anabaena,* assimilent l'azote atmosphérique : c'est grâce à elles et surtout aux Bactéries des genres *Azotobacter, Clostridium* et *Rhizobium,* que le sol se trouve pourvu de l'azote nécessaire à la croissance des plantes.

Les Algues bleues sont parfois des symbiotes d'autres Végétaux, inférieurs ou supérieurs, de Protozoaires. Elles remplacent des chloroplastes dans les *Glaucocystis,* Algues unicellulaires et incolores. Certaines s'associent aux Rhizopodes du genre *Paulinella.* Nombreuses sont les espèces qui, en association avec des Champignons, forment des Lichens. Des *Anabaena* vivent dans les tissus des *Azolla* (fougère aquatique), et des nostocs dans ceux des lentilles d'eau et des Hépatiques. D'autres nostocs végètent dans les racines des *Cycas* ou les feuilles des *Gunnera* (Angiospermes de l'hémisphère austral). Des *Aphanocapsa* et des *Phormidium* ont été observés dans des Éponges marines et un genre proche d'*Anabaena* se rencontre souvent dans le cytoplasme des Diatomées planctoniques marines *(Rhizosolenia).* Quelques Cyanophycées *(Rivularia haematites)* peuvent fixer le calcaire et former ainsi des croûtes calcifiées dans les torrents et les cascades.

Certaines résistent à des températures élevées (jusqu'à 73-74 °C) et croissent dans les eaux thermales. Ce phénomène d'adaptation thermique poussé à ses limites extrêmes

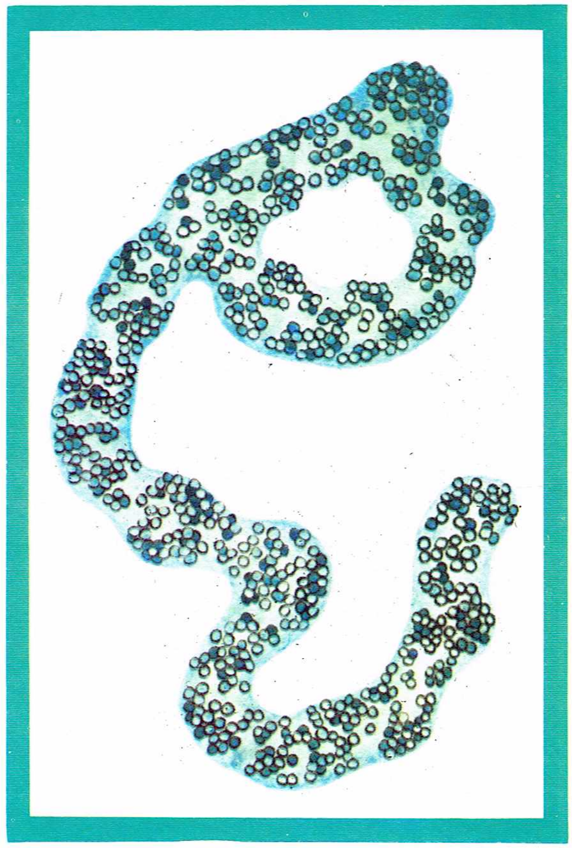

Archives I.G.D.A.

est une des caractéristiques que les Cyanophycées partagent avec les Bactéries.

Les espèces thermophiles les plus résistantes sont *Phormidium laminosum, Aphanocapsa thermalis, Calothrix calida* et surtout les genres *Mastigocladus* et *Synechococcus.* Dans les sources chaudes carbonatées, ces

F. Magne

Page ci-contre :
◀ Microcystis aeruginosa.
▼ Rivularia bullata.

◀ Stigonema minutum *(à gauche × 620).* Hapalosiphon fontinalis *(à droite × 730) : axe avec deux véritables ramifications latérales.*

▼ *De gauche à droite :* Pleurocapsa minor *(× 1 800), coupe transversale d'un thalle avec, à droite, filaments sporulants;* Dermocapsa prasina *(× 850);* Chamaesiphon confervicola *(× 1 150) avec production d'exospores;* Cyanocystis *du groupe* Dermocarpella *(× 1 260) avec sporulation itérative;* Pascherinema moniliforme *(× 1 450) avec formation d'endospores (d'après Pascher).*

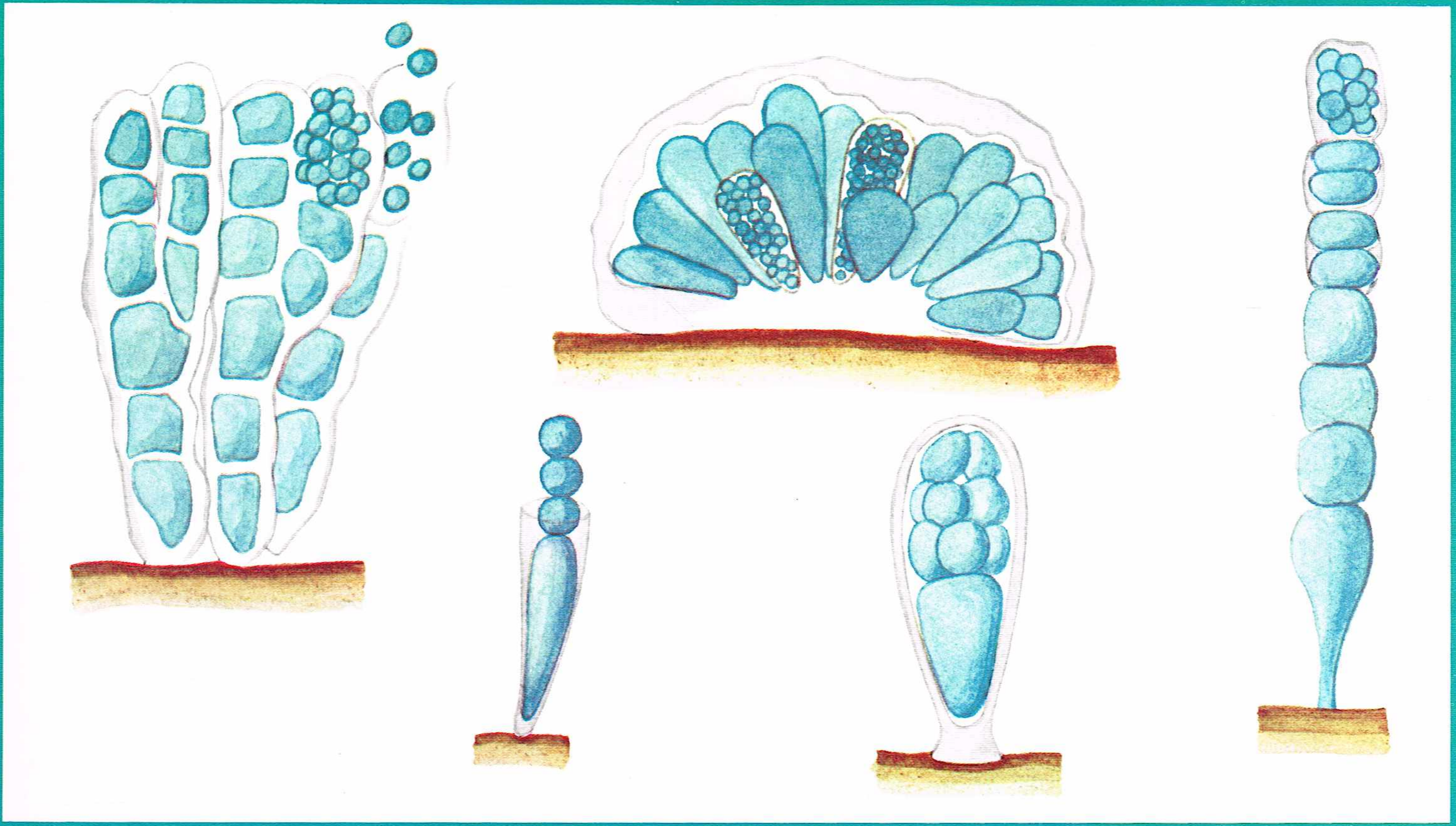

Archives I.G.D.A.

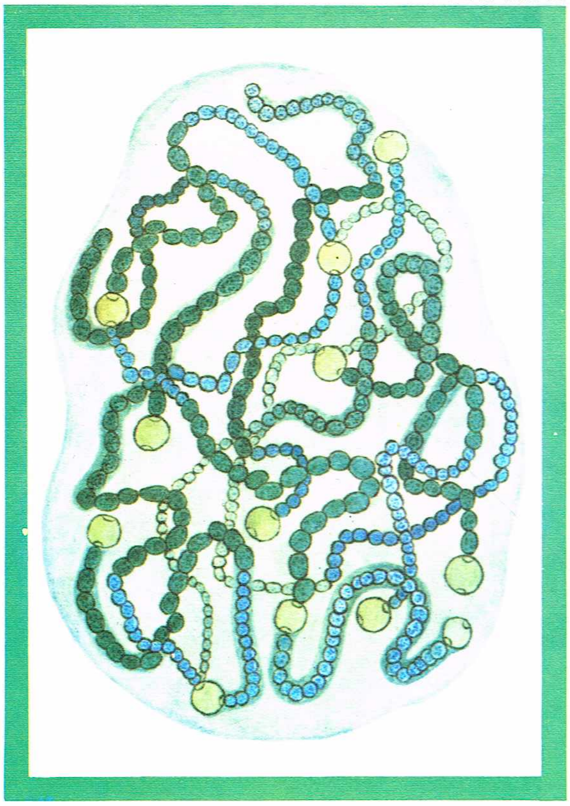

▶ ***Les représentants du genre* Nostoc *(ici,* Nostoc linckia*) ont des thalles de grande taille renfermant de nombreux filaments enchevêtrés moniliformes.***

Archives I.G.D.A.

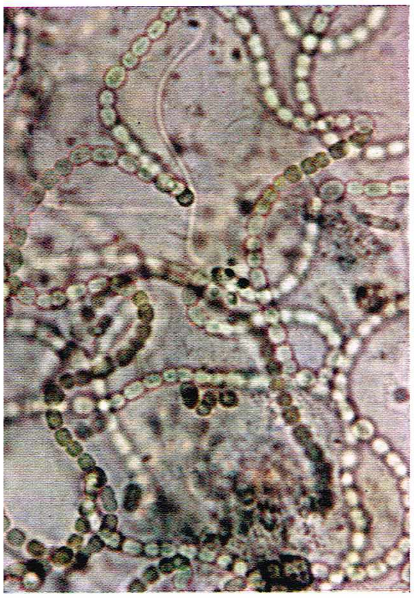

▲ ***Espèce de Cyanophycée du genre* Nostoc.**

Algues précipitent les sels de calcium et de magnésium et constituent ainsi des tufs et des travertins.

A l'inverse, les espèces du genre *Hyella,* grâce à leur sécrétion acide, solubilisent le carbonate de calcium des roches, des coquilles de Mollusques, et même celui des incrustations de nombreuses Algues rouges marines.

D'autres Cyanophycées peuvent vivre à des températures très basses : ce sont celles qui pullulent sur les rochers et dans les ruisseaux de haute montagne et même sur la neige.

Mais les milieux préférés des Cyanophycées sont les endroits humides, les rochers suintants, les eaux douces et le sol; elles abondent parfois après les pluies sur ce dernier, surtout au printemps, sous forme de gelées vert bleuté foncé ou olivâtre, de masses informes, cérébroïdes, visqueuses, atteignant la taille d'un œuf (ex. : *Nostoc commune,* ou « crachat de lune »).

Celles qui vivent dans les étangs sont parfois si abondantes qu'elles constituent une sorte de voile superficiel très fin de couleur bleu-vert ou rouge, auquel on donne le nom de « fleur d'eau ». Ce phénomène est dû notamment à *Aphanizomenon flos aquae, Anabaena flos aquae* et à certaines espèces des genres *Microcystis* et *Oscillatoria.* Ainsi, *Oscillatoria rubescens* colore en rouge les eaux des lacs subalpins pollués par les déchets des villes riveraines. D'autres *Oscillatoria* marines *(O. erythraea),* par leur prodigieuse multiplication, donnent une teinte rouge ou jaune orange à la mer Rouge.

Il en est de nombreuses qui sont adaptées à la vie dans les grottes et les cavernes où l'on rencontre beaucoup de *Gloeocapsa* dans des conditions d'éclairement souvent très réduit; elles représentent, avec certaines Algues vertes, le type extrême des Végétaux susceptibles de vivre à l'intérieur des grottes, à l'exclusion de certains Champignons cavernicoles, lesquels, naturellement, peuvent subsister en l'absence absolue de lumière puisqu'ils sont hétérotrophes.

Origine et phylogénie

Une mise au point récente indique que la photosynthèse a fait son apparition il y a environ trois milliards deux cents millions d'années : une atmosphère riche en CO_2 y remplace alors le méthane et l'ammoniac.

Il y a trois milliards cent millions d'années apparaissent les premières Chroococcacées et des Bactéries. Au Précambrien supérieur (un milliard trois cents millions) débutent les organismes eucaryotes.

Des Cyanophycées à hétérocystes rappelant les *Aulosira* (voisines des *Nodularia*) sont vieilles d'un milliard d'années. Enfin, on peut reconnaître dans les dépôts australiens des « Biller Springs », âgés de neuf cents millions d'années, des Chroococcacées, des Rivulariacées et des Oscillatoriacées (et peut-être aussi des Dinophycées et des Algues rouges et vertes).

Si l'on peut affirmer une parenté évidente entre les Bactéries sulfuraires incolores (*Beggiatoa* par exemple) et les Algues bleues, il est impossible de savoir si les Bactéries vraies sont plus anciennes que les Cyanophycées ou si, au contraire, elles sont des Cyanophycées dépigmentées. Signalons cependant que S. M. Siegel et B. Z. Siegel (1968, Amer. Journ. Bot. 55,6) ont obtenu, sous atmosphère d'ammoniac, des cultures de Bactéries du sol rappelant une forme fossile précambrienne vieille de deux milliards d'années.

Ces Schizophytes pourraient être la souche des Bactéries photosynthétiques d'où dériveraient les Cyanophycées. Certains auteurs reprennent et modifient la vieille hypothèse d'Altmann sur l'origine symbiotique des mitochondries. On suggère ainsi que les chloroplastes des Algues pourraient être des Cyanophycées endosymbiotiques (comme chez *Glaucocystis*). Cela expliquerait la présence d'ADN dans les plastes. Il est logique de penser que les Rhodophytes et les Pyrrhophytes, qui possèdent des phycobilines, sont apparues après les Cyanophycées et peut-être en dérivent. Les Rhodophytes, dépourvues d'éléments flagellés et présentant des pigments voisins de ceux des Cyanophycées, ont sans doute le même ancêtre que ces dernières.

Pour conclure, nous dirons que les Algues bleues sont un groupe de Végétaux très anciens qui peut-être est à l'origine de tout le règne végétal.

SYSTÉMATIQUE

La classe des Cyanophycées comprend près de deux mille espèces avec cent vingt genres, vingt-deux familles et cinq ordres. Elle est divisée en deux sous-classes : les Coccogonophycidées, à reproduction par coccospores (ordres des Chroococcales, des Pleurocapsales et des Chamæsiphonales); les Hormogonophycidées, à reproduction par hormogonies (ordres des Stigonématales et des Nostocales).

Chroococcales

Ce sont des Cyanophycées unicellulaires ou groupées en colonies de formes variées (tabulaire, cubique, sphérique, etc.) ou en archéthalle (paquets de cellules non différenciées). La multiplication se fait par bipartition, plus rarement par coccospores.

Citons dans cet ordre les *Synechococcus* à cellules solitaires, cylindriques ou ellipsoïdales, les *Gloeocapsa* à cellules arrondies, à larges gaines stratifiées et souvent colorées. Ces Algues constituent des colonies gélatineuses qui croissent volontiers sur les rochers humides. Les *Microcystis* du plancton lacustre, où ils forment des fleurs d'eau, ont de petites cellules groupées dans une gelée commune. Chez les *Coelosphaerium* des lacs et des étangs, les colonies sphériques ont une seule couche de cellules périphériques. Quant aux *Merismopedia,* leurs cellules se divisent suivant deux directions et forment ainsi des colonies tabulaires très régulières. Les *Entophysalis* des rochers marins et les *Chlorogloea* d'eau douce ont des groupements en coussinets gélatineux où les cellules, quoique indépendantes, s'alignent en files radiales. Ce phénomène se retrouve, mieux marqué encore, chez *Johannesbaptista,* genre d'eau saumâtre (Camargue par exemple) où les cellules discoïdales sont parfaitement alignées dans une gaine muqueuse.

Pleurocapsales

Ces Cyanophycées fixées sur les rochers forment des protothalles à filaments rampants portant des filaments dressés, ramifiés. Ces derniers ont des cellules sporifères donnant des coccospores. Cette description convient

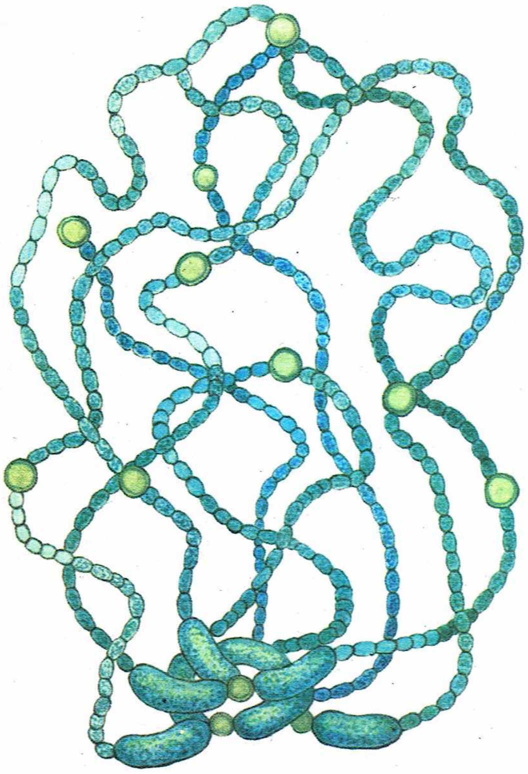

Archives I.G.D.A.

Archives I.G.D.A.

◄◄ Anabaena lemmermannii *(à gauche).*

◄ *Photographie d'*Oscillatoria *(à droite).*

▼ *De gauche à droite :* Oscillatoria rubescens *(× 1800);* Lyngbia aestuarii, *détail d'un filament avec hormogonie (× 640);* Oscillatoria (Spirulina) platensis *(× 815).*

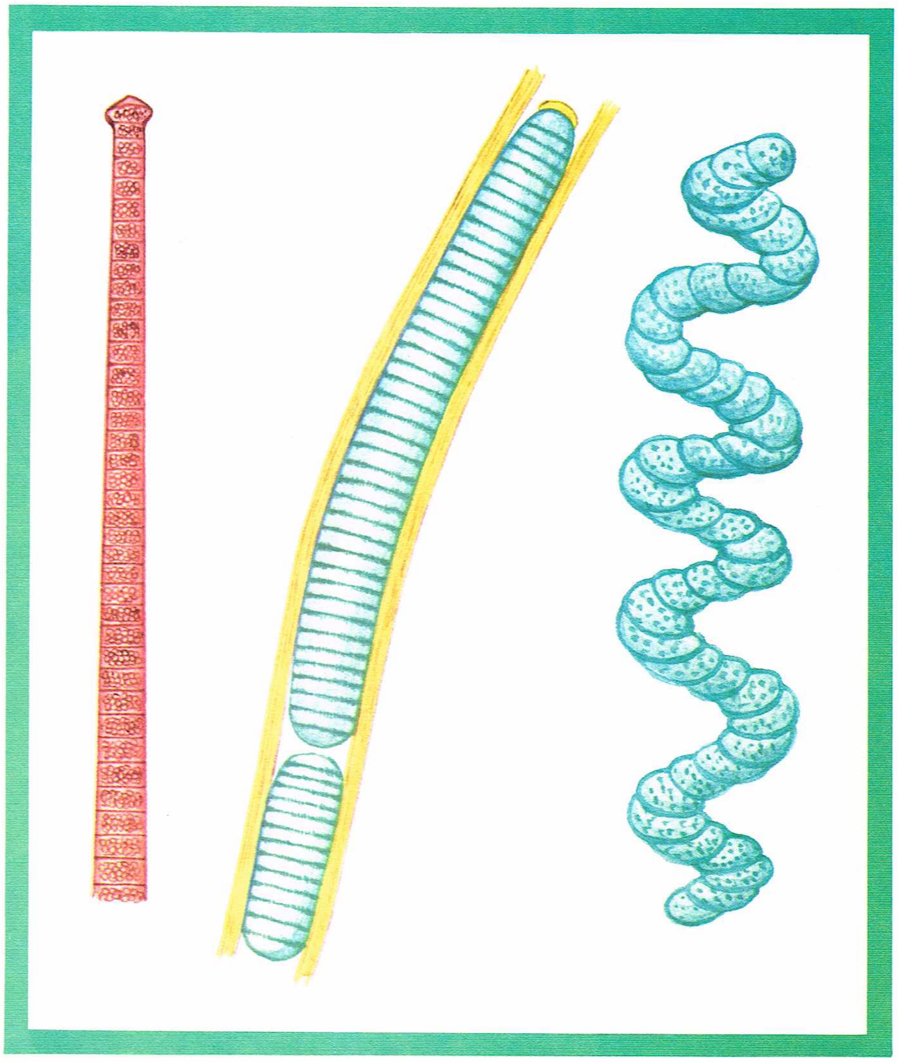

parfaitement pour les *Pleurocapsa* qui donnent des thalles en croûte croissant sur les rochers. Les *Hydrococcus* (ou *Oncobyrsa*) ont une structure voisine mais les thalles sont hémisphériques à filaments rayonnants. L'ordonnance des filaments disparaît chez les *Dermocarpa* (ou *Xenococcus*) épiphytes sur les Algues marines. Les *Hyella,* qui perforent les roches et les coquilles calcaires, ont des filaments ramifiés, irréguliers, elles se multiplient évidemment comme toutes les Pleurocapsales par endospores.

Chamæsiphonales

Les Chamæsiphonales ont un thalle unicellulaire, fixé, plus rarement filamenteux, qui donnera un sporocyste producteur d'endospores ou d'exospores. *Cyanocystis versicolor* a des cellules en poire fixées par la partie étroite et dont tout le contenu se transforme en endospores. Chez les espèces du sous-genre *Dermocarpella,* la division est itérative et seule la partie supérieure de la cellule produit des endospores; la partie basale pourra reprendre ensuite le même processus de sporulation.

Les *Chamaesiphon* dulçaquicoles recouvrent les pierres des lits des torrents alpestres d'un mince enduit couleur chocolat, la cellule y donne de façon itérative un chapelet d'*exospores.*

Dans le genre *Pascherinema (= Endonema),* enfin chaque cellule du filament fixé produira itérativement des endospores.

Stigonématales

Cet ordre groupe six familles de Cyanophycées filamenteuses ramifiées, uni- ou plurisériées, présentant souvent des hétérocystes et se multipliant par hormogonies pluricellulaires. Le thalle est un protothalle avec partie rampante et partie dressée. Parfois même on observe chez les *Stigonema* plurisériés de véritables cladomes avec des axes à croissance indéfinie portant des pleuridies latérales qui donneront des hormogonies. Le genre *Hapalosiphon* des tourbières à sphaignes a des filaments unisériés avec des ramifications latérales.

Mastigocladus, des eaux thermales du monde entier, est lui aussi unisérié, mais les ramifications en V renversé ou en Y sont très caractéristiques.

▶ *Colonies de* **Gloeothece rupestris.**

M. Ricard

▼ *De gauche à droite :* **Schizothrix friesii,** *vue d'ensemble (× 140) et détail (× 1 190) d'un apex;* **Microcoleus chthonoplastes,** *vue d'ensemble (× 200) et détail (× 1 000).*

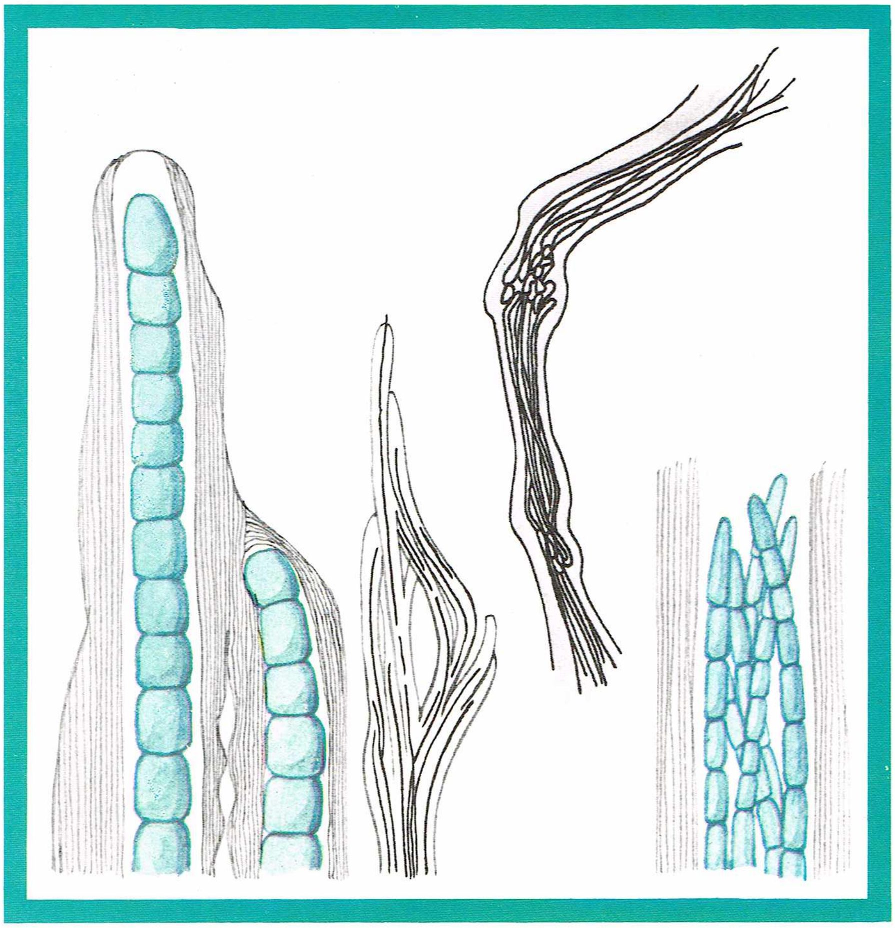

Nostocales

Dans cet ordre, avec six familles, se placent des Cyanophycées filamenteuses, unisériées, avec ou sans hétérocystes, se multipliant par hormogonies ou akinètes. Les filaments (ou trichomes) sont parfois ramifiés, mais il s'agit toujours de *fausses ramifications.*

Nostoc, type de la famille des Nostocacées, a des thalles de grande taille, aquatiques ou terrestres, très gélatineux, qui renferment de nombreux filaments enchevêtrés, moniliformes (à cellules en grains de chapelet). Ces filaments non ramifiés présentent des hétérocystes et des akinètes, cellules renflées à parois épaisses qui résisteront à la dessiccation.

Anabaena, espèce planctonique dulçaquicole fréquente dans les « fleurs d'eau », a des trichomes de même structure, mais toujours isolés. Les *Cylindrospermum* leur ressemblent mais avec une polarité bien marquée : le trichome débute par un hétérocyste suivi d'un akinète.

Dans les *Oscillatoriacées,* le trichome est toujours dépourvu d'hétérocystes et d'akinètes. La multiplication se fera uniquement par hormogonie.

Les *Oscillatoria* n'ont pas de gaine et sont douées de mouvements pendulaires hélicoïdaux très particuliers. Le genre renferme de très nombreuses espèces marines et dulçaquicoles. Les *Spirulina* sont des *Oscillatoria* enroulées en hélice. *S. platensis* qui croît en masse dans le lac Tchad est utilisée comme source d'aliments riches en protéines. Les essais de culture de cette Cyanophycée laissent présager de bons résultats. Les *Lyngbya* sont des *Oscillatoria* à trichome entouré d'une gaine ferme. Chez les *Schizothrix* et les *Microcoleus,* les trichomes sont groupés en faisceaux enrobés dans une gaine commune. Citons *Microcoleus chthonoplastes* qui forme avec *Lyngbya aestuari* des couches épaisses dans le fond des marais salants.

La famille des Rivulariacées présente des trichomes effilés en poil, avec chacun un hétérocyste basal. La multiplication se fait par hormogonie et parfois par akinète.

Rivularia, marin ou dulçaquicole, forme de gros thalles hémisphériques, gélatineux, dépourvus d'akinètes. *Gloeotrichia* du plancton des eaux douces ou saumâtres a des thalles globuleux qui se distinguent de ceux de *Rivularia* par la présence d'akinètes basaux.

Les *Calothrix* répandus dans le milieu aquatique ne forment pas de colonies mais sont groupés en gazons ou en touffes.

La famille des Scytonématacées a des filaments cylindriques pourvus d'hétérocystes et présentant des fausses ramifications simples chez les *Scytonema* et doubles chez les *Tolypothrix.* Ces Cyanophycées sont abondantes dans les eaux douces et les stations subaériennes.

BIBLIOGRAPHIE

ALLSOPP A., *Phylogenetic Relationships of the Procaryota and the Origin of the Eucaryotic Cell,* New Phytol., 68, 1969. - BORNET E. et FLAHAULT C., *Révision des Nostocacées hétérocystées,* in Ann. Sc. Nat. Bot., 7e Sér., 3-4-5-7, 1886-1888, rééd. Cramer, 1959. - BOURRELLY P., *Les Algues d'eau douce,* vol. III, Paris, 1970. - CHADEFAUD M. et EMBERGER L., *Traité de botanique systématique,* t. I, *les Végétaux non vasculaires (cryptogamie),* Paris, 1960. - DROUET F., *Revision of the Classification of Oscillatoriacea,* in Acad. Nat. Sc. Nat., Philadelphia, Monogr. 15, 1968. - DROUET F. et DAILY W. A., *Revision of the Coccoïd Myxophyceae,* in Bulter Univ. Bot. Stud., 12, 1956. - ECHLIN P. et MORRIS I., *The Relationships between Blue-Green Algae and Bacteria,* in Biol. Rev., 40, 1965. - FRÉMY P., *Les Myxophycées de l'Afrique équatoriale française,* in Arch. Bot., 3, 1929-1930. - FRÉMY P., *Les Cyanophycées des côtes d'Europe,* in Mém. Soc. Nat. Sc. Nat. Math., Cherbourg, 51, 1934. - GEITLER L., *Cyanophyceae,* in Rabenhorst's Krytogamenflora, 14, 1930-1932. - GOMONT M., *Monographie des Oscillariées,* in Ann. Sc. Nat., Sér. 7, Bot. 15-16, 1892, rééd. Cramer, 1962. - LANG N. J., *The Fine Structure of Blue Green Algae,* in Ann. Rev. Microbiol., 22, 1968.

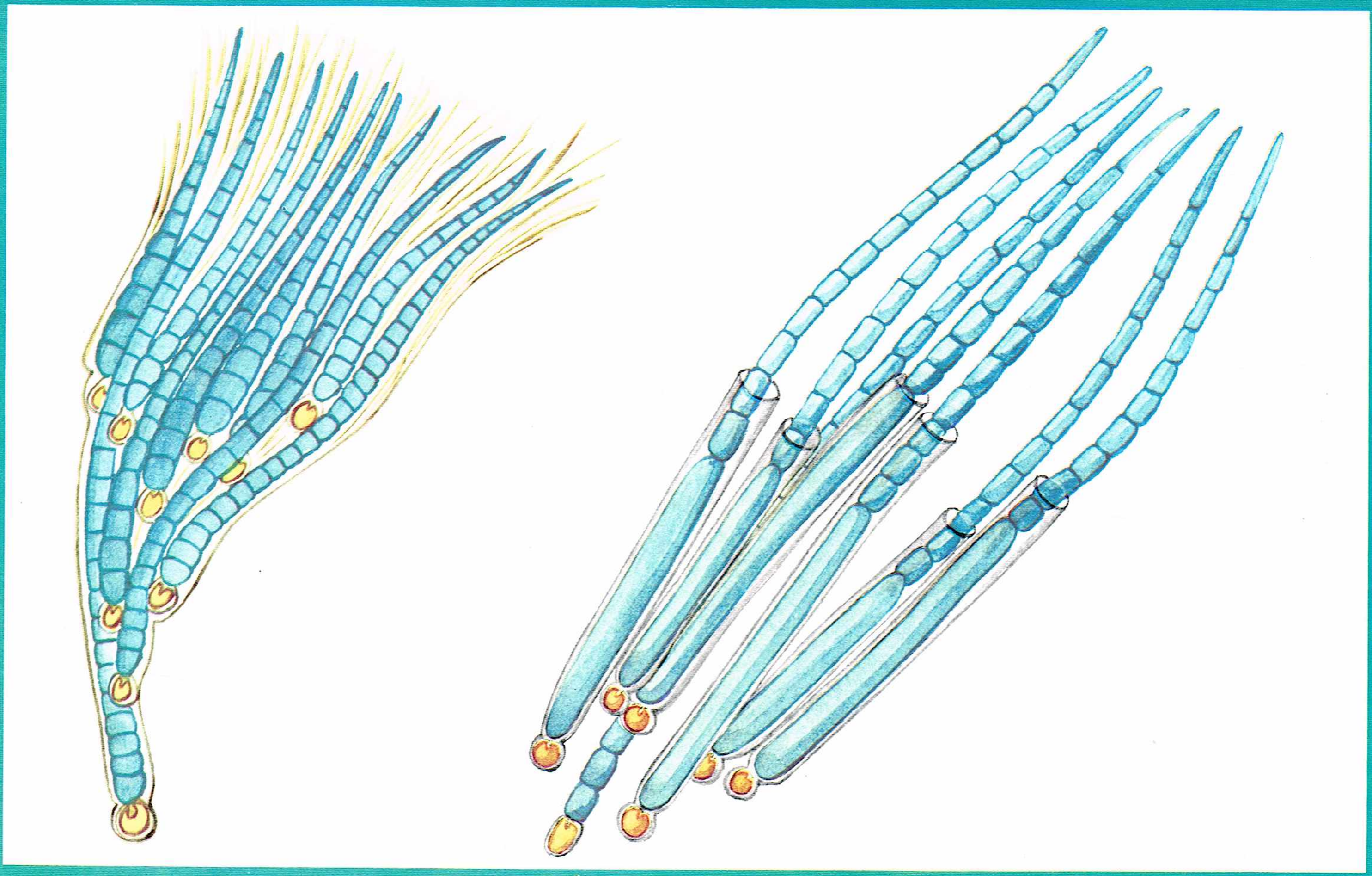

▲ *De gauche à droite :* **Rivularia atra** *(× 880), fragment de thalle,* **Gloeotrichia pisum** *(× 620), fragment de thalle.*

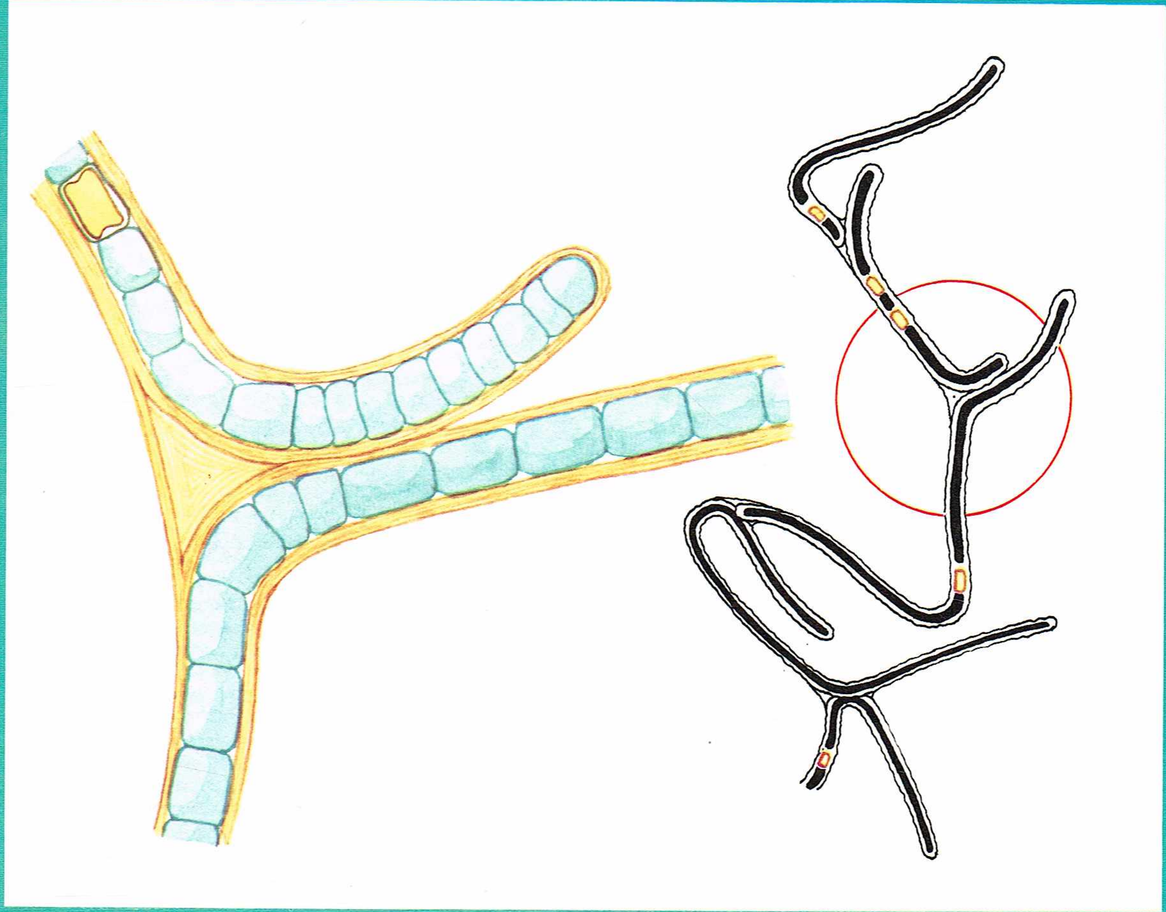

◀ **Scytonema guyanense :** *vue d'ensemble (× 190) et détail plus grossi d'une fausse ramification géminée (à gauche).*

ALGUES EUCARYOTES OU PHYCOPHYTES

EMBRANCHEMENT DES RHODOPHYTES

Classe des Rhodophycées

Sous-classe des Bangiophycidées
Ordres des Porphyridiales
Bangiales
Compsopogonales

Sous-classe des Floridéophycidées
Ordres des Acrochætiales
Némalionales
Gélidiales
Gigartinales
Rhodyméniales
Cryptonémiales
Bonnemaisoniales
Céramiales

EMBRANCHEMENT DES PYRRHOPHYTES

Classe des Cryptophycées
Ordres des Tétragonidiales
Cryptomonadales

Classe des Dinophycées

Sous-classe des Adinophycidées
Ordres des Desmomastigales
Prorocentrales
Desmocapsales

Sous-classe des Dinophycidées
Ordres des Dinotrichales,
Dinococcales
Dinophysiales,
Péridiniales,
Ébriales

EMBRANCHEMENT DES CHROMOPHYTES

Classe des Chrysophycées

Sous-classe des Acontochrysophycidées
Ordres des Phæoplacales
Stichogloéales
Chrysosaccales
Rhizochrysidales

Sous-classe des Hétérochrysophycidées
Ordres des Chromulinales
Ochromonadales
Dictyochales

Sous-classe des Isochrysophycidées
Ordres des Isochrysidales
Prymnésiales

Sous-classe des Craspédomonadophycidées
Ordre des Monosigales

Classe des Diatomophycées

Sous-classe des Centrophycidées
Ordres des Coscinodiscales
Rhizosoléniales
Biddulphiales

Sous-classe des Pennatophycidées
Ordres des Diatomales
Eunotiales
Achnanthales
Naviculales

Classe des Phéophycées

Sous-classe des Phéosporophycidées
Ordres des Ectocarpales
Tiloptéridales
Sphacélariales
Culteriales
Dictyotales,
Scytosiphonales
Chordariales
Desmarestiales
Sporochnales
Dictyosiphonales
Laminariales

Sous-classe des Cyclosporophycidées
Fucales

Classe des Xanthophycées
Ordres des Chloramœbales
Rhizochloridales
Hétérogloéales
Mischococcales
Tribonématales
Vaucheriales

Classe des Raphidophycées
Ordre des Vacuolariales

EMBRANCHEMENT DES EUGLÉNOPHYTES

Classe des Euglénophycées
Ordres des Euglénales
Péranématales
Colaciales

EMBRANCHEMENT DES CHLOROPHYTES

Classe des Prasinophycées
Ordres des Pyramimonadales
Pédinomonadales
Halosphærales
Prasinocladales

Classe des Chlorophycées

Sous-classes des Chlorophycidées
Ordres des Volvocales
Tétrasporales
Chlorococcales

Sous-classe des Ulothricophycidées
Ordres des Ulothricales,
Ulvales,
Chætophorales,
Chlorosarcinales,
Trentepohliales

Sous-classe des Œdogoniophycidées
Ordre des Œdogoniales

Sous-classe des Bryopsidophycidées
Ordres des Sphæropléales
Acrosiphonales
Dasycladales
Siphonocladales
Codiales
Caulerpales
Dichotomosiphonales

Classe des Zygophycées
Ordres des Zygnématales
Desmidiales

Classe des Charophycées
Ordre des Charales

Lemanchec Explorer

LES ALGUES EUCARYOTES

▲ *Le mot « Algues » évoque irrésistiblement la mer. Mais ces Végétaux parfois visibles, souvent microscopiques, peuvent prospérer dans tous les milieux.*

Dans les pages précédentes, nous avons étudié les organismes Procaryotes, Algues bleues et Bactéries, à cellules dépourvues de noyau individualisé séparé du cytoplasme par une membrane.

Tous les autres êtres vivants — Végétaux et Animaux — qui possèdent un véritable noyau dans leurs cellules sont nommés Eucaryotes. Les Algues Eucaryotes groupent donc des Algues autres que les Cyanophycées.

Il est impossible de donner une définition simple et brève des Algues. Il s'agit en effet de Végétaux à cytologie et à structure très variées. Ce sont des *Thallophytes autotrophes,* c'est-à-dire des êtres unicellulaires (solitaires ou coloniaux) ou pluricellulaires et dans ce dernier cas formant des *thalles* sans feuilles, ni tige, ni racine, ni vaisseaux conducteurs. Ils sont autotrophes, ce qui signifie qu'ils fabriquent eux-mêmes, grâce à la fonction chlorophyllienne, les substances organiques dont ils ont besoin.

Le thalle peut être réduit à une seule cellule de taille microscopique ou au contraire en grouper des milliers et atteindre jusqu'à 50 m de longueur. Les Algues unicellulaires sont soit immobiles, soit mobiles grâce à des flagelles ou des pseudopodes. Elles se groupent parfois en colonies ou en organismes pluricellulaires à structure définie, de forme variée : filaments simples ou ramifiés, lames à une ou plusieurs couches de cellules, vésicules. Nous pouvons avec Chadefaud définir chez les Algues trois grands types morphologiques :

Archéthalle : simple amas de cellules qui se multiplient par bipartitions successives et dont les constituants peuvent se transformer en *sporocystes* produisant des spores flagellées ou non (zoospores ou aplanospores). Parfois les cellules se séparent après chaque bipartition et donnent un archéthalle dissocié.

Protothalle (ou *nématothalle*) à filaments rampants d'où naissent d'autres filaments dressés. Les cellules possèdent les mêmes propriétés que celles des archéthalles : division par bipartition ou formation de spores. Les filaments peuvent être simples ou ramifiés, plurisériés ou siphonés (c'est-à-dire à plusieurs noyaux sans cloison séparant les unités cellulaires). Le nématothalle peut se réduire soit à la partie rampante, soit à la partie dressée. Il peut même par perte de la possibilité de bipartition se transformer en un sporocyste unicellulaire.

Thalle à cladomes : les filaments dressés, à croissance illimitée, s'allongent et présentent latéralement des verticilles ou bouquets de filaments courts ramifiés, à croissance définie, les *pleuridies.* Chaque *cladome* est l'ensemble d'un axe (type *uniaxial*) ou d'un faisceau d'axes (type *multiaxial*) et des pleuridies qui garnissent l'axe ou le faisceau. Les pleuridies peuvent rester distinctes ou se réunir en un *cortex,* qui entoure l'axe. Les filaments du cladome sont *haplostiques,* s'il y a uniquement des divisions transversales, ou *polystiques,* si l'on observe des divisions transversales et longitudinales.

Les cladomes primaires peuvent donner des cladomes secondaires qui naîtront soit à la place d'une pleuridie, soit à son aisselle. Les *Batrachospermum,* Rhodophycées d'eau douce, sont un bon exemple de cladome uniaxial : les cellules cylindriques de l'axe forment un filament unisérié ; à la base de chaque cellule axiale, des petites cellules coxales donnent naissance aux verticilles des pleuridies et aussi à des filaments rampants qui recouvrent l'axe d'un cortex. Chez les *Lemanea,* Rhodophycées d'eau douce, les cladomes uniaxiaux ont des verticilles de quatre pleuridies dont les parties distales forment un cortex tubulaire qui enveloppe l'axe cladomien. Ces trois grands types de structures morphologiques : archétalle, protothalle et thalle à cladomes, se retrouvent dans les grandes séries algales, aussi bien chez les Rhodophycées que chez les Phéophycées et les Chlorophycées ; il est donc fort probable que l'évolution a suivi une marche ascendante, partant d'un archéthalle, passant par un protothalle et s'achevant en un thalle à cladomes.

Cytologie

L'étude de la structure cellulaire ou cytologie montre que les Algues possèdent les constituants normaux de toute cellule végétale ; une paroi cellulaire entoure le cytoplasme qui renferme un ou plusieurs noyaux, des plastes chlorophylliens, des vacuoles, des mitochondries, un appareil de Golgi, un réticulum endoplasmique, des

Claude Rives, Marina Cedri

▲ ***En dépit de la ressemblance que présentent certaines espèces avec les Végétaux supérieurs, les Algues sont toutes dépourvues de racines, de tiges, de feuilles et de vaisseaux conducteurs. Ici,*** **Codium tomentosum.**

ribosomes, parfois (Chrysophytes) des *physodes* ou corps physoïdes à substances phénoliques, des corps mucifères et trichocystes (Pyrrhophytes, Euglénophytes, Chrysophytes) et enfin des substances de réserves. Les formes flagellées détiennent de plus un appareil locomoteur ou appareil cinétique souvent en relation avec le noyau.

La *membrane* est souvent rigide et de nature pectocellulosique. Chez les gamètes flagellés et les unicellulaires mobiles, elle est très mince et forme une cuticule. Dans certains groupes d'Algues : Euglénophytes, Dinophycées, membrane et cuticule ont une ultrastructure très complexe. Dans les thalles, les cellules sont séparées les unes des autres par leur membrane, mais, chez certaines Algues, ce cloisonnement n'existe pas, et le thalle a l'aspect d'un long cylindre, simple ou ramifié, ou d'une vésicule sans cloisons mais à nombreux noyaux et nombreux plastes; c'est une structure *siphonée* ou *cœnocytique* (*Vaucheria* chez les Xanthophycées ou *Caulerpa* et *Codium* chez les Chlorophycées). Parfois le thalle est fragmenté en articles renfermant plusieurs noyaux et plusieurs plastes, on parle alors de thalle hémisiphoné (*Cladophora* par exemple).

En général, le *noyau* des Algues diffère peu de celui des Végétaux supérieurs. Cependant les Dinophycées ont un noyau très particulier *(dinocaryon)*, tant par sa structure que par son mode de division. La mitose des Euglénophycées avec persistance du nucléole et absence de fuseau est aussi fort originale.

L'appareil cinétique. De nombreuses Algues unicellulaires, des zoospores végétatives, des gamètes sont mobiles grâce à des flagelles dont les racines sont en général en relation avec le noyau. Ces flagelles montrent en microscopie électronique une structure remarquablement uniforme. En section transversale, ils renferment une partie axiale avec deux microtubules et une partie périphérique avec neuf paires de microtubules. Certains flagelles sont lisses, nus, d'autres, au contraire, présentent sur leurs flancs deux rangées opposées de très fins poils (ou *mastigonèmes*) et ont alors un aspect plumeux, ce sont des flagelles pleuronématés. Le nombre des flagelles, leur structure sont des caractères systématiques fort importants. Ainsi les cellules nageuses des Chlorophycées possèdent deux, quatre, huit flagelles de même longueur, sans mastigonèmes; les Chromophytes ont en général deux flagelles inégaux (disposition hétérocontée), l'un avec mastigonèmes, l'autre nu. Chez les Prasinophycées, nous trouverons souvent quatre flagelles égaux et pleuronématés. Chez les Dinophycées, le fouet longitudinal possédera deux rangées de mastigonèmes courts, tandis que le fouet transversal spiralé n'aura de longs mastigonèmes que sur un côté. Chez les Euglénophycées, nous trouverons aussi deux flagelles pleuronématés mais de longueurs très différentes. Signalons que parfois (Chrysophycées, Prasinophycées) les flagelles sont entourés d'un manchon de minuscules écailles organiques, qui sont seulement visibles au microscope électronique.

Les *plastes* sont de forme très variée mais à ultrastructure relativement simple. En microscopie électronique, ils apparaissent formés d'un empilement de minces membranes doubles, les *thylacoïdes*, qui ressemblent à de minuscules ballons écrasés dont les deux parois sont très rapprochées. Ces thylacoïdes doubles sont groupés par deux, trois ou davantage pour former les *lamelles* plastidiales. Le nombre de thylacoïdes par lamelle varie suivant les embranchements et les classes d'Algues : un thylacoïde chez les Rhodophytes (et les Cyanophycées), deux chez les Cryptophycées, trois chez les Dinophycées, Euglénophytes, Chromophytes, beaucoup plus nombreux chez les Chlorophytes et les plantes supérieures. Le plaste est de plus entouré par une enveloppe complexe le plus souvent en relation avec le réticulum endoplasmique. Les plastes renferment fréquemment un *pyrénoïde*, masse protéique traversée par des thylacoïdes. Chez les Algues vertes, ce pyrénoïde est entouré d'une coque de grains d'amidon.

Parfois le bord du plaste, chez les formes flagellées, est coloré en rouge par l'accumulation de petites gouttes huileuses, régulièrement disposées et chargées de carotène; c'est le *stigma*. Chez les Euglénophytes, chez quelques Xanthophycées et Dinophycées, le stigma, organe photosensible, est indépendant du plaste.

Les plastes sont de formes très diverses, mais caractéristiques et constantes pour une Algue donnée. Chez les *Prasiola*, les *Bangia* et certains *Chlamydomonas*, le plaste est central, avec un pyrénoïde médian et des rayons disposés en piquants d'oursin.

Chez les *Chlorhormidium*, le plaste est pariétal, placé sur un côté de la cellule; chez les *Ulothrix*, il s'étend davantage et forme un fourreau entourant la paroi. Chez les *Spirogyra*, il prend l'aspect d'un mince ruban disposé en ressort à boudin. Chez les *Oedogonium*, il devient un manchon pariétal fenestré, et, chez les *Cladophora* ou les *Hydrodictyon*, il constitue un réseau de petites parties polygonales réunies par des tractus. Enfin, chez les *Vaucheria* ou les *Chara*, les plastes sont très nombreux, discoïdaux et pariétaux.

Quelle que soit leur forme, ces plastes sont porteurs de la chlorophylle et de pigments accessoires. Selon la nature de ces pigments, ils paraîtront verts (Chlorophytes et Euglénophytes), bruns ou jaunes (Chromophytes), ou rouge violacé (Rhodophytes et certains Pyrrhophytes). Tous les plastes renferment de la *chlorophylle a*, associée, chez les plantes supérieures, les Chlorophytes et les Euglénophytes, à la *chlorophylle b*. Cette *chlorophylle b* sera remplacée par de la *chlorophylle c* chez les Chromophytes et par de la *chlorophylle d* chez les Rhodophytes.

Toutes les Algues possèdent du β carotène et des xanthophylles (dérivés oxygénés de ce corps), mais ces dernières sont particulièrement abondantes chez les Chromophytes où elles arrivent à masquer la couleur verte des chlorophylles. Les Rhodophytes et quelques Pyrrhophytes (et aussi les Cyanophycées) renferment dans leurs plastes, associés aux chlorophylles et aux xanthophylles, des pigments solubles dans l'eau : des *bilichromoprotéides*, l'un rouge *(phycoérythrine)*, l'autre bleu *(phycocyanine)*. Ces pigments facilitent la fonction chlorophyllienne en captant l'énergie lumineuse des régions du spectre non utilisées directement par la chlorophylle a et en la transférant à cette dernière. Comme on le sait, la chlorophylle se sert de l'énergie solaire pour faire la synthèse des hydrates de carbone en partant du gaz carbonique dissous dans l'eau. La chlorophylle possède deux maximums d'absorption, l'un dans le

rouge-orangé, le plus important, l'autre dans le bleu. Mais en mer, selon la profondeur, on assiste à une absorption progressive et sélective des radiations lumineuses; il y a à la fois diminution de la lumière et modification spectrale. A 30 m de la surface, sur la côte Ouest de Suède par exemple, la lumière est très réduite et il ne reste que des radiations jaune-vert (500-550 mμ), radiations inactives pour la chlorophylle. Alors interviendront les xanthophylles des Chromophytes et des Pyrrhophytes qui ont leur maximum d'absorption vers 530 mμ, et la phycoérythrine des Rhodophytes active dans le vert (570 mμ) ; ces pigments transmettent ainsi l'énergie qu'ils absorbent à la chlorophylle, seul agent actif de la photosynthèse. Trois nombres montreront l'importance de la photosynthèse algale : la production annuelle mondiale de phytoplancton marin est de l'ordre de 150 milliards de tonnes; celle du zooplancton marin « herbivore » est de 15 milliards, celle des Poissons de 30 millions de tonnes. Cette production primaire est énorme mais le rendement de la chaîne alimentaire est très faible : de 0,02 %.

Produits de réserve. Les produits nés de la photosynthèse varient avec le groupe d'Algues considéré. Ainsi, seules les Chlorophytes forment de l'amidon à l'intérieur des plastes et autour des pyrénoïdes; les Rhodophytes mettent en réserve au sein du cytoplasme un polyholoside (amidon floridéen). Les Chromophytes dans leur vacuole produisent un polyholoside, la laminarine (ou chrysolaminarine). Chez les Euglénophytes, ce corps prend le nom de paramylon. De plus, on trouve chez toutes les Algues des lipides sous forme de gouttelettes grasses, souvent colorées en orange par une xanthophylle (astaxanthine). Les Rhodophytes synthétisent en outre des hétérosides dérivés du galactose (floridoside), et les Phéophycées du mannitol.

Reproduction

La reproduction asexuée des Algues peut se faire par fragmentation du thalle ou par division répétée d'une cellule qui se transforme en *sporocyste* et donne des spores immobiles *(aplanospores)* ou mobiles flagellées *(zoospores)*.

La reproduction sexuée ou *gamie*, assez rare chez les Algues unicellulaires, consiste en l'union de deux *gamètes* qui, après fusion de leur cytoplasme et de leurs noyaux, produisent un œuf ou *zygote* qui redonnera après germination une nouvelle génération. Pour cela une cellule mère, par divisions répétées, se transforme en *gamétocyste* engendrant des gamètes flagellés mobiles *(zoogamètes* ou *planogamètes)* ou immobiles *(aplanogamètes)*. Si les gamètes sont de même taille, il y a *isogamie*, sinon *hétéro-* ou *anisogamie*. Lorsque seul le gamète mâle est flagellé et de petite taille, on parle d'*oogamie*.

Les sporocystes et les gamétocystes sont toujours dépourvus d'une enveloppe de cellules stériles, contrairement aux sporanges et aux gamétanges des Végétaux supérieurs toujours entourés d'une gaine de cellules.

Les gamètes ont un noyau à *n* chromosomes (haploïde) ; de ce fait, le zygote qui provient de la fusion de deux gamètes aura 2 *n* chromosomes (diploïde) : il sera donc indispensable avant la production de nouveaux gamètes qu'une réduction chromatique ou *méiose* s'opère afin que le nombre 2 *n* des chromosomes soit ramené à *n*. Ainsi la vie de l'Algue se partagera en deux phases : l'une, qui va de la gamie à la méiose, la *diplophase* à 2 *n* chromosomes, l'autre, de la méiose à la gamie, ou *haplophase* à *n* chromosomes. La méiose se place à un moment déterminé et constant du cycle vital ; il y a trois possibilités : 1) la méiose a lieu lors de la germination du zygote, tout de suite après la gamie (*Spirogyra* par exemple) ; seul le zygote est diploïde et l'organisme entier est haploïde. 2) Chez les *Fucus*, c'est l'inverse : tout le cycle est en diplophase et la méiose se produit au moment de la formation des gamètes. Dans ces deux cas, le cycle est *monogénétique*. 3) Chez les *Ulva*, nous trouvons une position intermédiaire, le zygote germe en un sporophyte à 2 *n* qui donne des spores flagellées après méiose. Ces spores haploïdes produisent un gamétophyte (à *n* chromosomes) qui engendre des gamètes dont la fusion redonnera un zygote. Il y a donc une alternance de phases

Photo J. Lecomte - C.N.R.S. Laboratoire Arago - Banyuls-s.-Mer

▲ *En milieu marin, la distinction des espèces végétales est, en premier lieu, conditionnée par la pénétration des radiations lumineuses. Sur ce cliché, peuplement d'Algues vertes* (Halimeda) *à 18 m de profondeur.*

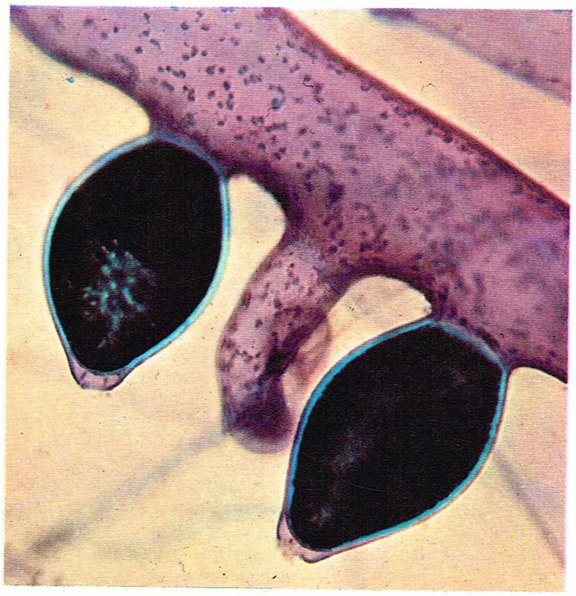

Archives I.G.D.A.

◀ Vaucheria sessilis. *Filament portant oogone et anthéridie (× 500).*

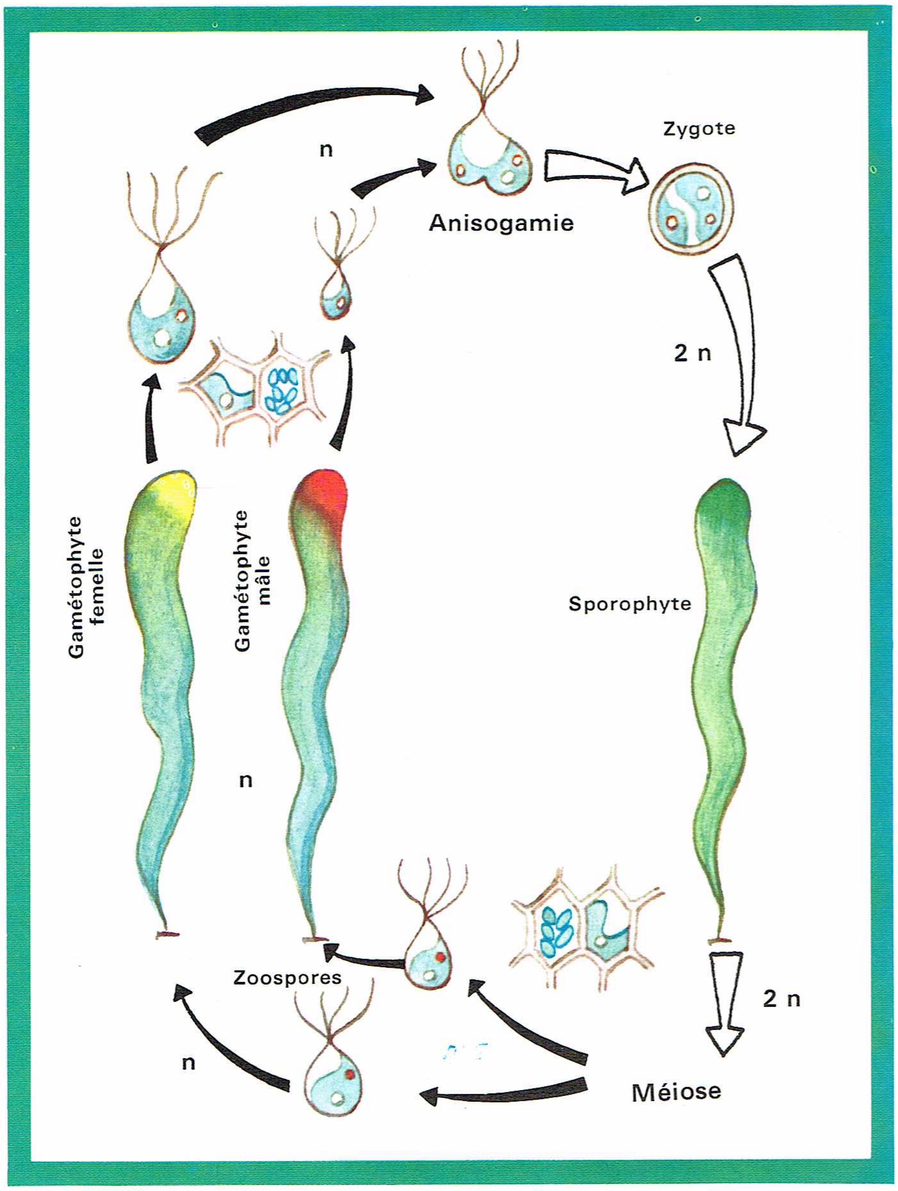

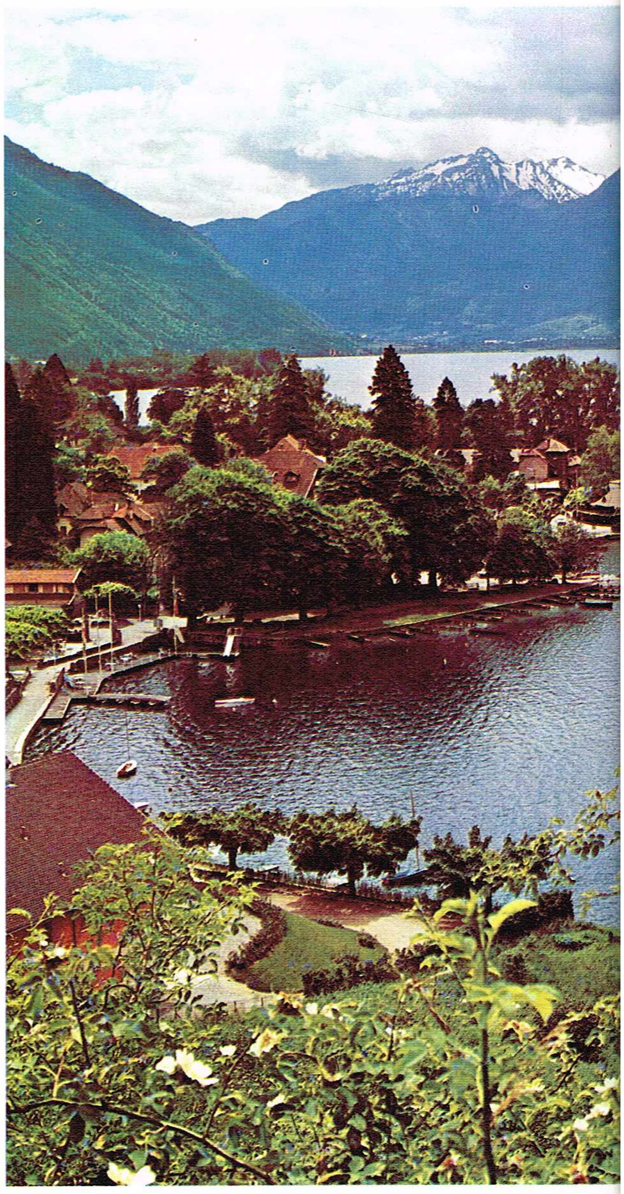

▲ ***Exemple de cycle digénétique.***
Enteromorpha intestinalis.

▶ ***Le lac d'Annecy renfermait avant qu'il soit pollué un phytoplancton oligotrophe. Les apports massifs de déchets organiques et industriels, en perturbant la composition chimique du lac, ont également modifié son équilibre biologique. Grâce à des travaux récents d'épuration ce beau lac retrouve peu à peu sa flore originelle.***

cytologiques à *n* et à 2 *n* chromosomes qui coïncide avec une alternance de générations : le cycle est *digénétique*. Dans le cas des *Ulva*, le sporophyte et le gamétophyte ont le même aspect structural et morphologique : on parlera de cycle *isomorphe ;* par contre, chez les *Derbesia*, par exemple (Chlorophycée marine), le sporophyte est formé par de fins filaments ramifiés tandis que le gamétophyte, appelé *Halicystis*, a l'aspect d'une minuscule vésicule verte : le cycle est *hétéromorphe* car *Derbesia* et *Halicystis* semblent être deux Algues différentes et non deux phases d'un même organisme. Chez certains Rhodophytes, comme nous le verrons plus loin, le cycle est *trigénétique* car la phase diploïde se dédouble : les carpospores d'un *carposporophyte* issu du zygote et croissant en parasite sur le gamétophyte donnent un thalle diploïde ; ce dernier, le *tétrasporophyte*, émettra des *tétraspores* après réduction chromatique ; ces tétraspores germent en *gamétophyte* haploïde.

Distribution et écologie

Les Algues sont des Végétaux qui se rencontrent partout dès qu'il y a de l'air, de la lumière, de l'eau ou simplement de l'humidité. Abondantes dans les mers chaudes ou froides, dans les eaux douces stagnantes ou courantes, elles peuvent aussi se développer dans des conditions fort ingrates : Algues croissant à la surface des glaciers et des neiges ou dans les eaux thermales très chaudes. Certaines peuvent même végéter dans les eaux chaudes et acides des solfatares, tandis que d'autres colonisent les rochers à peine humides des hautes montagnes et parviennent à supporter des insolations intenses suivies de rigoureux froids nocturnes.

La vitalité des Algues est considérable, et l'exemple récent de la colonisation de l'île volcanique de Surtsey qui a surgi en novembre 1963 à 30 km au sud de l'Islande est particulièrement démonstratif. Dès l'été 1965, des petites touffes d'Algues vertes *(Urospora)* étaient visibles au niveau des pleines mers. Elles étaient accompagnées de masses gélatineuses de Diatomées épiphytes *(Synedra, Licmophora)*. En 1966 apparaissaient d'autres Chlorophycées marines : *Enteromorpha, Ulothrix* et quelques Algues rouges *(Porphyra)* puis des Phéophycées *(Petalonia, Ectocarpus, Pylaiella, Alaria)*. Sur l'île même, les Algues d'eau douce, surtout celles des sols humides ou compagnes des Mousses, sont déjà fort nombreuses.

En 1968, des cultures ont permis de reconnaître dix espèces de Cyanophycées, une vingtaine d'Algues vertes unicellulaires et soixante-dix espèces de Diatomées. Au total plus de cent espèces d'Algues d'eau douce, avec dominance des petites formes subaériennes.

Les Algues marines de taille macroscopique qui peuplent nos côtes sont toujours fixées au substrat : elles forment le *benthos* qui s'oppose au *phytoplancton* constitué par une infinité d'Algues microscopiques qui vivent flottant librement dans les couches superficielles des mers.

Belzeaux-Rapho

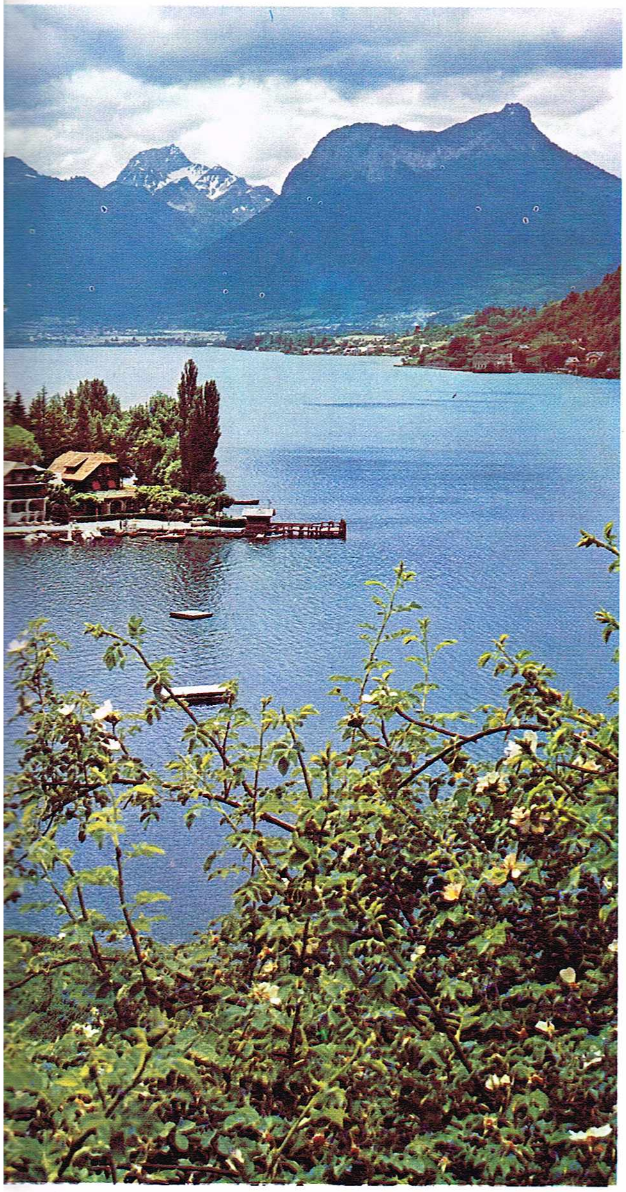

Les Algues marines benthiques sont sous la dépendance du milieu où elles vivent : citons rapidement les facteurs importants qui président à la répartition des Algues littorales. Le *substrat,* meuble ou solide, sable, vase, gravier, rocher, opère déjà une sélection : ainsi les *Vaucheria* et les Diatomées peupleront les vasières, tandis que les *Fucus* coloniseront les côtes rocheuses. La *température* de l'eau, plus ou moins fonction de la latitude et des courants, est un facteur important pour leur distribution. La *lumière* joue un rôle primordial, et sur nos côtes atlantiques, à partir de 50 m de profondeur, son absorption presque totale amène la disparition de toute vie végétale. Les *facteurs chimiques,* comme le pH, la teneur en chlorure de sodium et autres sels dissous, interviennent de façon considérable dans les mers fermées ou à demi fermées comme la Baltique, la mer Noire ou la Caspienne, et nous trouvons là une flore très particulière. Le même phénomène se produit dans les estuaires, les marais salants, les lagunes littorales. Les remontées d'eau profonde (up-welling) qui amènent en surface, sous l'action des vents réguliers, alizé ou mousson, et des courants, des sels nutritifs abondants, favorisent le développement du phytoplancton marin. Les variations saisonnières des sels dissous (nitrates et phosphates) conditionnent les poussées planctoniques qui, dans nos mers, montrent en général deux maximums : l'un au printemps, le plus important, l'autre en automne.

Les Algues benthiques sont aussi très sensibles à l'*action des vagues :* les zones battues et les zones calmes ont de ce fait des végétations très différentes. L'émersion journalière sur les côtes soumises à la marée est un phénomène important qui modèle la répartition des Algues dans la zone intertidale.

L'ensemble de ces facteurs permet sur nos côtes atlantiques de reconnaître trois étages à végétation caractéristique :

1° l'étage *supralittoral* situé au-dessus des plus hautes mers et recevant uniquement des embruns : il est peuplé par des lichens marins ;

2° l'étage *médiolittoral* entre le niveau supérieur des hautes mers et le niveau inférieur des basses mers, entièrement découvert lors des grandes marées : il est surtout riche en Algues brunes, *Pelvetia, Fucus, Ascophyllum ;*

3° l'étage *infralittoral* qui n'émerge jamais et où croissent les *Laminaria,* les *Saccorhiza* et de nombreuses Rhodophycées.

Les Algues d'eau douce, le plus souvent microscopiques, peuplent les eaux stagnantes (lacs, étangs, mares, marécages, tourbières) et les eaux courantes. Elles croissent aussi sur les rochers mouillés, la terre humide, les troncs d'arbres, les neiges, les glaciers. Même les eaux thermales, jusqu'à une température de 70 °C, permettent la vie de certaines Algues, notamment des Cyanophycées. Quelques espèces (Chlorophycées de l'ordre des Trentepohliales) poussent sur les feuilles et les écorces d'arbres dans les régions humides.

Les Algues d'eau douce vivent dans un milieu beaucoup plus varié et variable dans sa composition chimique que le milieu marin. De ce fait, chaque collection d'eau présente une flore particulière qui dépend étroitement de ses conditions physico-chimiques. Les principaux facteurs qui régissent la vie des Algues dulçaquicoles sont la température, le taux d'oxygène dissous, les sels dissous (nitrate, phosphate, silice, sels de calcium, chlorure de sodium, fer, etc.).

Les lacs de plaine, relativement peu profonds, sont en général des lacs *eutrophes :* ils sont entourés d'une ceinture de plantes littorales. Leur eau, de couleur verte, est riche en sels nutritifs mais, dans les couches profondes, l'oxygène fait défaut et il s'y dépose une vase abondante. Le phytoplancton est très riche, tant par le nombre des espèces (surtout Cyanophycées, Chlorophycées et Péridiniens) que par celui des individus. L'été, le lac produit des *fleurs d'eau :* production massive de phytoplancton qui monte à la surface (Cyanophycées, *Botryococcus,* etc.). Cette sorte de lacs héberge une faune abondante, surtout des Poissons blancs, gardons, brochets, perches.

Les lacs profonds des régions alpestres sont appelés *oligotrophes :* leur eau très pure, de couleur bleue, renferme de l'oxygène jusque dans les couches les plus inférieures ; ils sont pauvres en vase et en phytoplancton (surtout Diatomées et Chrysophycées). Ils ne forment jamais de fleur d'eau et sont habités par des Salmonidés (omble-chevalier et corégone) amateurs d'eau pure très oxygénée.

Enfin, dans les pays scandinaves se trouvent des lacs *dystrophes* à fond tourbeux, à eau de couleur brune, pauvre en sels nutritifs et en calcaire, et dont l'oxygène se raréfie dans les couches profondes. Ces lacs, exceptionnels en France (lacs de Lispach et de Blanchemer dans les Vosges), ont un plancton peu abondant mais qui renferme de nombreuses Desmidiacées et Chrysophycées des eaux acides ; les fleurs d'eau y sont exceptionnelles, les Salmonidés sont absents.

Les lacs ne sont pas des milieux stables, mais au contraire en perpétuelle évolution. Le lessivage des terrains par l'eau de pluie et les rivières, les apports d'engrais, les déchets organiques rejetés par les égouts modifient leur composition chimique. Il y a ainsi une augmentation des taux d'azote et de phosphore qui conduit à une *eutrophisation* croissante. Les rejets des sucreries, papeteries, distilleries, etc., contribuent aussi à la pollution des rivières et des masses lacustres. Les lacs oligotrophes enrichis ainsi en matières organiques fermentescibles perdent l'oxygène de leurs couches profondes et leur phytoplancton se modifie, les Algues vertes et bleues s'installent et forment des fleurs d'eau (surtout à *Oscillatoria rubescens* pour les lacs subalpins). La faune des Poissons est changée : les Salmonidés disparaissent, remplacés par des Poissons blancs de moindre valeur économique.

▼ **Micrasterias** ***est une Algue verte très répandue dans les tourbières à sphaignes.***

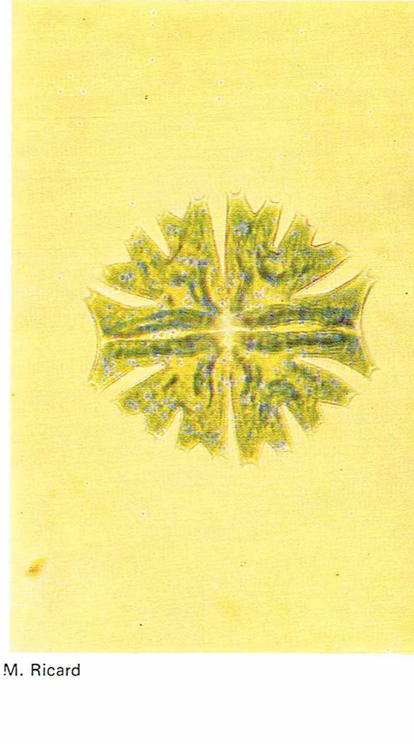

M. Ricard

▶ *Les Algues d'eau douce sont d'excellents indicateurs de pollution. Sur ce cliché : une vue du lac Léman.*

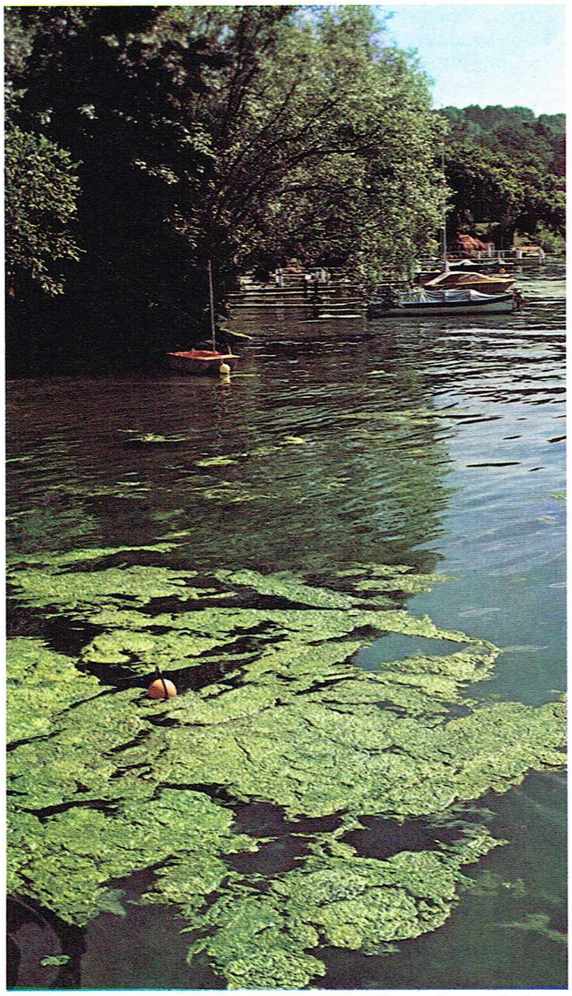

Serge Berton-Parimage

▼ *Dans les régions côtières, l'intérêt utilitaire des Algues est reconnu depuis des temps fort anciens. Au Portugal, les pêcheurs abandonnent durant une courte période leurs filets pour récolter les plantes de la mer.*

Photo Boubat - Top-Réalités

Cette pollution des lacs a été combattue avec succès dans la région d'Annecy. L'étude du plancton indiquait une dégradation de ce beau lac oligotrophe ainsi qu'une eutrophisation et une pollution croissantes. Un grand égout collecteur le ceinture maintenant entièrement. Les eaux usées sont ainsi récupérées et traitées, et non plus renvoyées dans le lac, mais dans le Fier, affluent du Rhône. Ainsi le lac, lentement, retrouve son plancton oligotrophe et la pureté de ses eaux.

Les Algues d'eau douce sont d'excellents indicateurs biologiques de la pollution : ainsi les *Batrachospermum* et les *Lemanea*, Rhodophycées d'eau douce, n'existent que dans les torrents ou les eaux courantes; l'espèce *Ceratium hirundinella* vit dans les étangs et les lacs eutrophes tandis que *Ceratium cornutum* ne prospère que dans les eaux acides dystrophes des étangs tourbeux en compagnie des grandes *Pinnularia* (Diatomées) et de nombreuses Desmidiées *(Micrasterias* et *Euastrum)*. En revanche, les Cyanophycées, *Anabaena, Microcystis, Oscillatoria, Aphanizomenon,* forment des fleurs d'eau dans les étangs et les lacs eutrophes. Lorsque les eaux sont déjà très polluées, on trouve en grande quantité des Euglénophycées et parfois même des fleurs d'eau à *Euglena* rouges ou vertes. Enfin, dans les zones dites *polysaprobes* (zones où la pollution atteint son maximum), les Algues disparaissent presque entièrement et sont remplacées par des Bactéries sulfuraires comme *Beggiatoa* ou des Bactéries filamenteuses, tel *Sphaerotilus*.

Les Algues symbiotiques

De nombreuses Algues forment avec d'autres organismes animaux ou végétaux des symbioses, associations à bénéfices réciproques pour les deux partenaires. Les symbioses lichéniques entre Champignons et Algues vertes ou bleues sont bien connues et seront étudiées ultérieurement. Citons aussi les *Zoochlorelles,* Algues vertes Chlorococcales vivant en symbiose dans le tissu des Hydres d'eau douce ou des Éponges dulçaquicoles, les *Zooxanthelles* (Dinophycées), symbioses de nombreux Animaux marins. Les Cyanophycées du genre *Anabaena* se retrouvent dans les tissus des *Azolla* (Fougère aquatique) et dans les racines des *Cycas (Gymnospermes)*. D'autres Cyanophycées unicellulaires forment des endocyanoses avec des Algues incolores où elles remplacent les plastes (*Glaucocystis,* par exemple).

Utilisation des Algues

Les Algues sont utilisées dans l'industrie, l'agriculture, la médecine et l'alimentation. Nous en reparlerons lors de l'examen des différentes espèces. Mais le rôle primordial des Algues n'est pas dans les utilisations multiples que nous avons brièvement indiquées. Leur importance se manifeste dans le milieu aquatique où elles constituent, grâce au phytoplancton, le premier maillon de la biogenèse. Elles sont le point de départ de la chaîne alimentaire, en captant grâce à l'énergie solaire le carbone du gaz carbonique et en faisant ensuite la synthèse des hydrates de carbone et de la matière organique. Ainsi le phytoplancton est dévoré par le zooplancton et certains Poissons planctonophages. Ce zooplancton sert à son tour de nourriture aux Poissons qui seront consommés par l'homme.

Les Algues ont produit au cours des temps géologiques d'importants dépôts calcaires (craies, par exemple) et siliceux; il se pourrait aussi qu'elles ne soient pas étrangères à la formation des gisements pétroliers.

Ce sont des Végétaux très anciens. Les premières formes fossiles remontent à près de 600 millions d'années (Précambrien) et semblent avoir été les ancêtres des Cyanophycées ou Algues bleues, probablement les mieux adaptées à vivre dans les conditions qui régnaient alors (température élevée et atmosphère très riche en azote). Par la suite, la composition de l'atmosphère se modifiant, les Algues rouges seraient apparues, puis dans des mers peu profondes les Algues brunes, avec au sommet de l'évolution les Chrysophycées et les Pyrrhophytes, et enfin les Chlorophycées. Ces dernières pourraient être à l'origine des plantes supérieures, tandis que les Chrysophycées, par l'intermédiaire des Spongiaires, seraient à la base de Métazoaires.

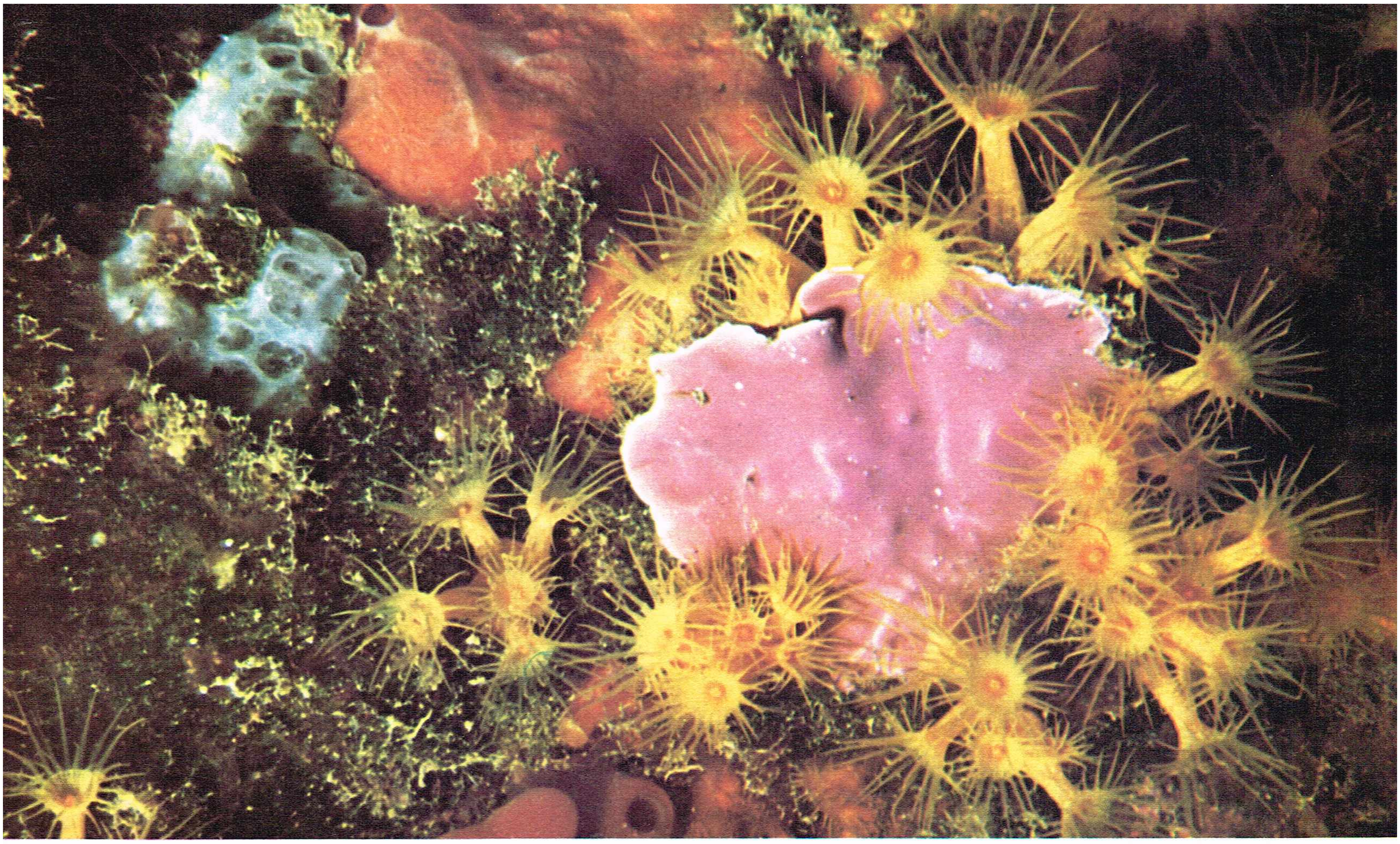

Claude Rives - Marina - Cedri

▲ ***Les lames foliacées du*** **Pseudolithophyllum expansum** ***constituent une partie importante du concrétionnement calcaire des fonds coralligènes en Méditerranée.***

LES RHODOPHYTES

Les Rhodophytes, ou Algues rouges, ne comprennent qu'une seule classe, celle des *Rhodophycées.*

RHODOPHYCÉES

Elles constituent la majorité des Algues marines macroscopiques; on en connaît plus de quatre mille espèces dont moins de 2 % seulement se rencontrent dans les eaux douces. Généralement de taille modeste, elles mesurent de quelques millimètres à quelques décimètres. La couleur rouge qui les caractérise est cependant loin d'être uniforme puisque leur teinte peut varier du rose pâle au rouge vif et au violet.

Morphologie

L'appareil végétatif des Rhodophycées peut être de forme et d'importance très variables. Le plus simple est constitué par des groupes de cellules semblables entre elles, et entourées d'une enveloppe de gelée (certaines Bangiophycidées). A un degré plus évolué le thalle est formé de filaments dont toutes les cellules, sauf celles de la base, conservent la possibilité de se diviser; dans certains cas, les cloisonnements aboutissent à la formation de cordons ou de lames *(Bangia* et *Porphyra).*

L'appareil végétatif peut être beaucoup plus complexe : le thalle est alors formé de cladomes, c'est-à-dire de filaments à croissance terminale illimitée portant latéralement des filaments courts (ou pleuridies) à croissance limitée. L'axe filamenteux du cladome est soit unique (structure uniaxiale; Céramiales), soit constitué d'un faisceau de filaments à croissance synchrone (structure multiaxiale; la plupart des Némalionales). Les pleuridies peuvent se souder entre elles pour former un tissu cortical entourant plus ou moins étroitement l'axe cladomien.

Dans de nombreux cas (Némalionales, Gigartinales, Cryptonémiales), les cladomes ne naissent pas directement de la spore; celle-ci germe en donnant tout d'abord un protonema constitué de filaments rampants portant de petits bouquets de filaments dressés; certains des filaments dressés s'allongent et sont à l'origine d'un cladome. Cependant, si de nombreuses espèces sont ainsi constituées, certaines sont réduites toute leur vie au seul protonema (Acrochætiales), tandis que d'autres (Céramiales) ne comportent que des cladomes, le stade protonema étant « sauté ».

Cytologie

La paroi cellulaire est constituée d'un mélange de cellulose, de composés pectiques et de divers mucilages dans la composition desquels entrent d'importantes quantités soit de mannanes, soit de xylanes, soit de galactanes. Les parois se gélifient facilement; c'est pourquoi certaines espèces sont à l'origine de la fabrication industrielle de nombreux hydrocolloïdes. Certaines Rhodophycées (Corallinacées) fixent dans leurs parois cellulaires du carbonate de calcium associé à du carbonate de magnésium sous forme de calcite, tandis que chez d'autres le carbonate de calcium se dépose dans le mucilage intercellulaire sous forme d'aragonite.

Chez la grande majorité des Rhodophycées, la paroi qui sépare deux cellules voisines est pourvue d'une synapse, pore parfois assez large occupé par un bouchon lipo-protéique, en contact direct avec le cytoplasme des deux cellules.

Les cellules de ces Algues eucaryotes possèdent un ou plusieurs noyaux. Les plastes, rarement uniques dans les cellules et généralement dépourvus de pyrénoïdes, sont formés de thylacoïdes isolés les uns des autres. Ils supportent un complexe pigmentaire composé de chlophylles a et d (de couleur verte), d'α et β carotènes (jaunes), de lutéine ou oxycarotène (jaune), de phycoérythrine (rouge) et de phycocyanine (bleue); ces deux derniers pigments, en proportions variables selon les espèces, sont des phycobiliprotéines qui masquent la couleur des chlorophylles.

Les Algues rouges synthétisent des réserves glucidiques proches des dextrines et du glycogène, sous la forme de grains d'amidon floridéen, épars dans le

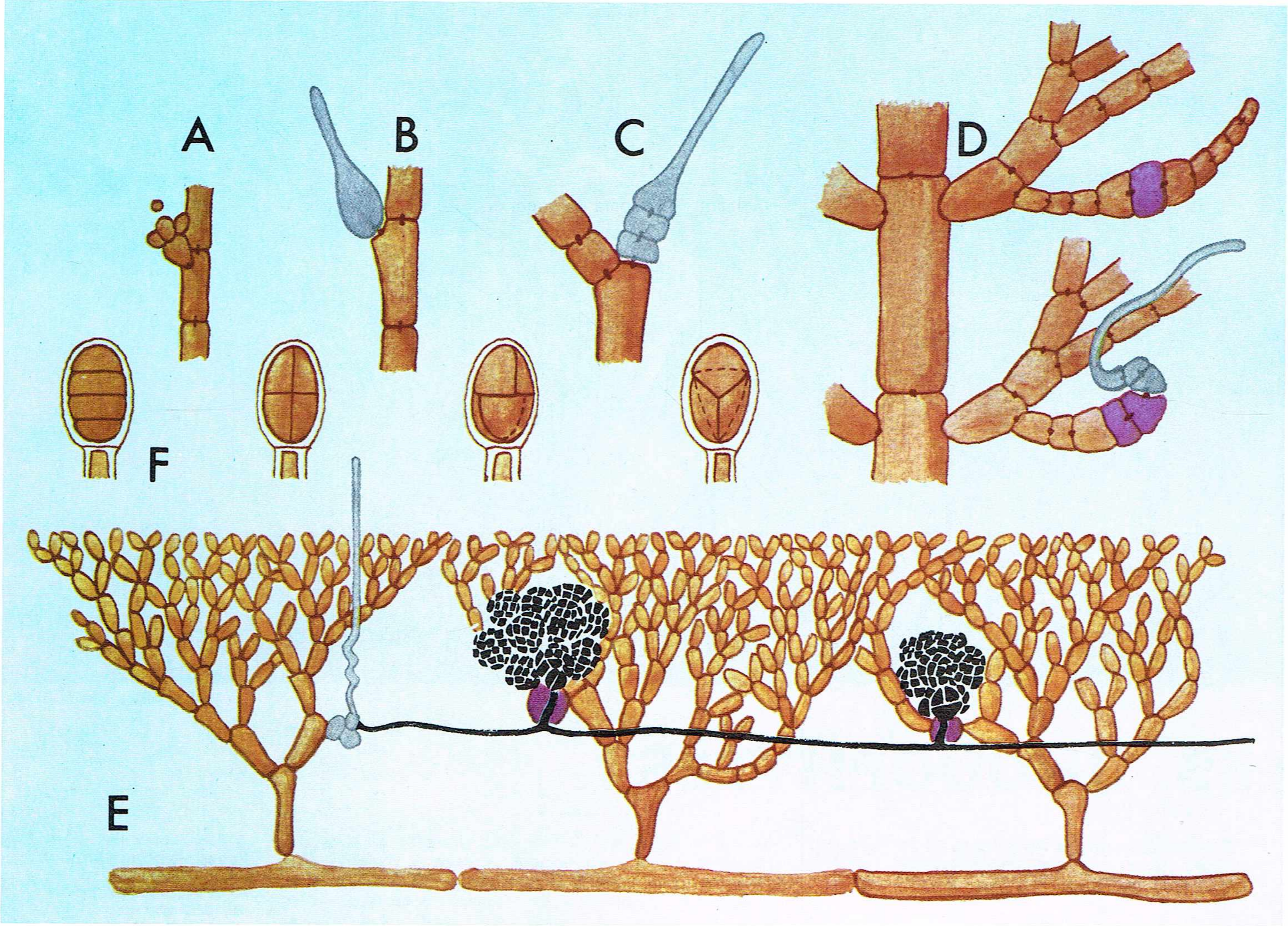

▲ *A - Spermatocystes dont l'un a libéré une spermatie* (Acrochaetium).
B - Carpogone sans rameau carpogonial (Acrochaetium).
C - Rameau carpogonial tricellulaire (Nemalion).
D - Rameau carpogonial porté par un gonophore carpogonial (en bas); gonophore auxiliaire (en haut); ces deux figures illustrent le genre Dudresnaya.
E - Carposporophyte (en noir) développé à partir d'un carpogone fécondé (Platoma).
D'après Kuckuck.
F - Tétrasporocystes des Floridées : type zoné, crucié, crucié-décussé, tétraédrique.
En gris : carpogone et rameau carpogonial; en violet : cellules auxiliaires.

cytoplasme, et non contenus à l'intérieur des plastes comme chez les Algues vertes et les plantes supérieures. En outre, elles élaborent des hétérosides particuliers résultant de l'union de galactose et de glycérol (floridoside) ou de mannose et d'acide glycérique (mannoglycérate de sodium). Ces hétérosides, qui s'accumulent dans les vacuoles, sont d'ailleurs diversement répartis selon les ordres.

Reproduction et multiplication

La multiplication se fait le plus souvent par reproduction sexuée au cours d'un cycle fondamentalement trigénétique, mais aussi par voies asexuée et végétative.

1) *Reproduction sexuée*. Un des caractères essentiels des Rhodophycées est l'absence de cellules reproductrices flagellées.

La reproduction sexuée se réalise par l'union, ou gamie, d'un gamète mâle et d'un gamète femelle, inertes l'un et l'autre, et de taille inégale. Ces deux sortes de gamètes peuvent se rencontrer soit sur un même thalle (espèces monoïques), soit, le plus souvent, sur des thalles distincts (espèces dioïques). Les thalles producteurs de gamètes sont des gamétophytes. Gamétophytes et gamètes présentent des noyaux à n chromosomes : ils sont haploïdes. Les gamètes se forment dans des gamétocystes résultant du développement d'une cellule mère végétative uninucléée. Chez les Bangiophycidées, les gamètes mâles, ou spermaties, proviennent des cloisonnements successifs et perpendiculaires entre eux d'une cellule végétative. Chez les Floridéophycidées, chaque spermatie est constituée par le contenu entier du gamétocyste mâle, ou spermatocyste ; les spermatocystes sont souvent groupés en bouquet. Dans tous les cas, les gamètes mâles, nus, dépourvus de flagelles et le plus souvent de plastes colorés, sont libérés et flottent dans la mer. Chaque gamète femelle, ou oosphère, jamais libéré, est constitué par le contenu immobile et uninucléé du gamétocyste femelle, le carpogone.

La rencontre d'un gamète mâle, transporté passivement par les mouvements de l'eau, avec un gamète femelle est due au hasard ; elle est toutefois facilitée par la structure du carpogone qui se prolonge par une petite papille *(Porphyra)* ou par un long poil, le trichogyne (chez les Floridéophycidées) ; la spermatie adhère à ce prolongement et, déversant son contenu dans le carpogone, réalise la fécondation de l'oosphère qui devient un zygote à 2 n chromosomes.

Le carpogone ainsi fécondé demeure fixé sur le gamétophyte. Chez les Floridéophycidées, il se développe en un petit édifice cellulaire diploïde plus ou moins complexe qui aboutira à la production de carpospores à 2 n chromosomes, issues de la transformation et de la libération du contenu de carposporocystes ; cet ensemble représente une génération distincte : le carposporophyte. Chez les Bangiophycidées, le contenu du carpogone fécondé se divise entièrement et directement en de nombreuses carpospores diploïdes qui sont ensuite libérées.

Les carpospores, ainsi émises dans le milieu extérieur, germent et donnent naissance à des thalles qui sont, le plus souvent, identiques par leur morphologie au gamétophyte, mais qui en diffèrent par le fait que leurs noyaux sont à 2 n chromosomes. A maturité, ces thalles diploïdes portent des sporocystes dont le contenu se transforme, après réduction chromatique, ou méiose, en quatre spores à n chromosomes, d'où le nom de tétrasporocystes donné à ces sporocystes, et de tétrasporophytes aux thalles qui les portent. Les tétraspores peuvent avoir une disposition cruciée, zonée ou tétraédrique. Libérées

dans le milieu extérieur, les tétraspores germent et se développent chacune en un gamétophyte haploïde.

Le cycle de reproduction comprend donc trois générations successives : le gamétophyte, le carposporophyte et le tétrasporophyte; il est trigénétique. Si le gamétophyte et le tétrasporophyte sont morphologiquement identiques, ce qui est le cas de la plupart des espèces, on dit que le cycle est isomorphe *(Polysiphonia)*; par contre, s'ils sont morphologiquement différents, on dit que le cycle est hétéromorphe *(Porphyra)*.

Ce cycle peut présenter des modifications plus ou moins importantes dont nous donnerons quelques exemples.

Chez certaines espèces, le gamétophyte et le sporophyte sont si dissemblables, par leur taille, leur morphologie et certains caractères anatomiques, qu'ils ont été longtemps considérés comme des espèces différentes, alors qu'ils constituent les deux phases complémentaires du cycle d'une même espèce, ce qui a pu être démontré par l'étude du développement de ces Algues en culture au laboratoire. C'est le cas par exemple de l'*Asparagopsis armata* dont le tétrasporophyte, à structure beaucoup plus simple et de taille plus petite que le gamétophyte, avait été désigné sous le nom de *Falkenbergia rufolanosa*. Le gamétophyte du *Porphyra umbilicalis* est représenté par des lames membraneuses pouvant atteindre 30 à 40 cm de longueur, tandis que son sporophyte, longtemps considéré comme une Algue autonome *(Conchocelis)*, est extrêmement réduit et constitué de filaments rampants ramifiés qui se développent à l'intérieur de coquilles vides en dissolvant le calcaire; de plus, dans ce cas, la méiose s'effectue sans individualisation de tétrasporocystes.

Chez d'autres espèces, le gamétophyte paraissait seul représenté dans la nature (ex. : *Liagora farinosa* et *Nemalion multifidum*), et ce n'est que par des cultures en laboratoire qu'on a pu découvrir leur tétrasporophyte nain.

Dans d'autres cas, le cycle est encore plus profondément modifié. Chez certaines Phyllophoracées, le carpogone fécondé se développe non pas en un carposporophyte mais en un petit tétrasporophyte parasite constitué de filaments serrés les uns contre les autres et dont chaque cellule devient un tétrasporocyste; on admet que la méiose a lieu à la formation des tétraspores. Enfin, chez certaines Némalionales *(Helminthocladia agardhiana)*, il n'existe pas de tétrasporophyte connu; le noyau diploïde des carposporocystes se divise directement en donnant, après méiose, quatre spores, appelées carpotétraspores, qui, libérées, engendrent de nouveaux gamétophytes.

2) *Reproduction asexuée*. Chez certaines espèces existe, indépendamment du cycle sexué, la possibilité de se reproduire par des monospores mitotiques non nageuses, portées par des gamétophytes ou des tétrasporophytes, mais qui, dans tous les cas, redonnent en germant une génération identique à celle qui les a produites.

3) *Multiplication végétative*. Certaines espèces se multiplient par fragmentation du thalle.

CLASSIFICATION

Les Rhodophycées présentent une très grande diversité. Elles ont été réparties en deux sous-classes : les Bangiophycidées et les Floridéophycidées, ou Floridées.

● *Bangiophycidées*

Les Algues de cette sous-classe ont un appareil végétatif peu évolué, à croissance le plus souvent non localisée. Il n'y a généralement pas de synapses entre les cellules. Les organes sexuels sont peu différenciés (carpogone sans trichogyne). Le zygote se divise directement en carpospores et il ne constitue pas de véritable carposporophyte, comme chez les Floridées.

Trois ordres composent cette sous-classe : les Porphyridiales, les Bangiales et les Compsopogonales.

Porphyridiales

Ce sont des Algues formées de cellules isolées ou groupées en colonies gélatineuses ou filamenteuses qui se multiplient uniquement par bipartition ou par dissémination de cellules végétatives. Certaines sont marines *(Rhodosorus marinus)*, d'autres, comme le *Porphyridium cruentum*, constituent des plaques d'un rouge vineux sur la terre humide ou au bas des murs arrosés d'urine ou d'embruns.

F. Ardré - M.F. Magne

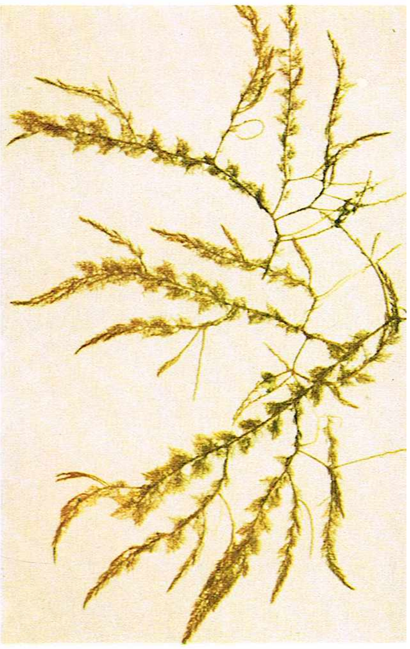

F. Ardré - M.F. Magne

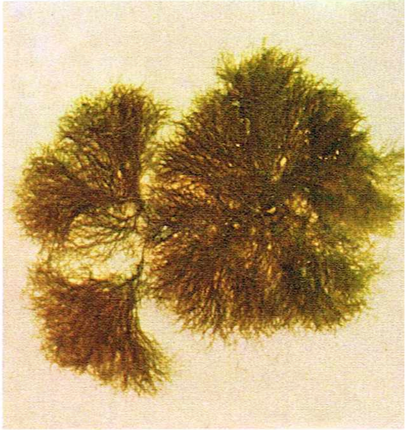

▲ *Le gamétophyte d'*Asparagopsis armata *(en haut) est morphologiquement très différent du tétrasporophyte (en bas) qui fut longtemps considéré comme appartenant à un autre genre et reçut le nom de* Falkenbergia.

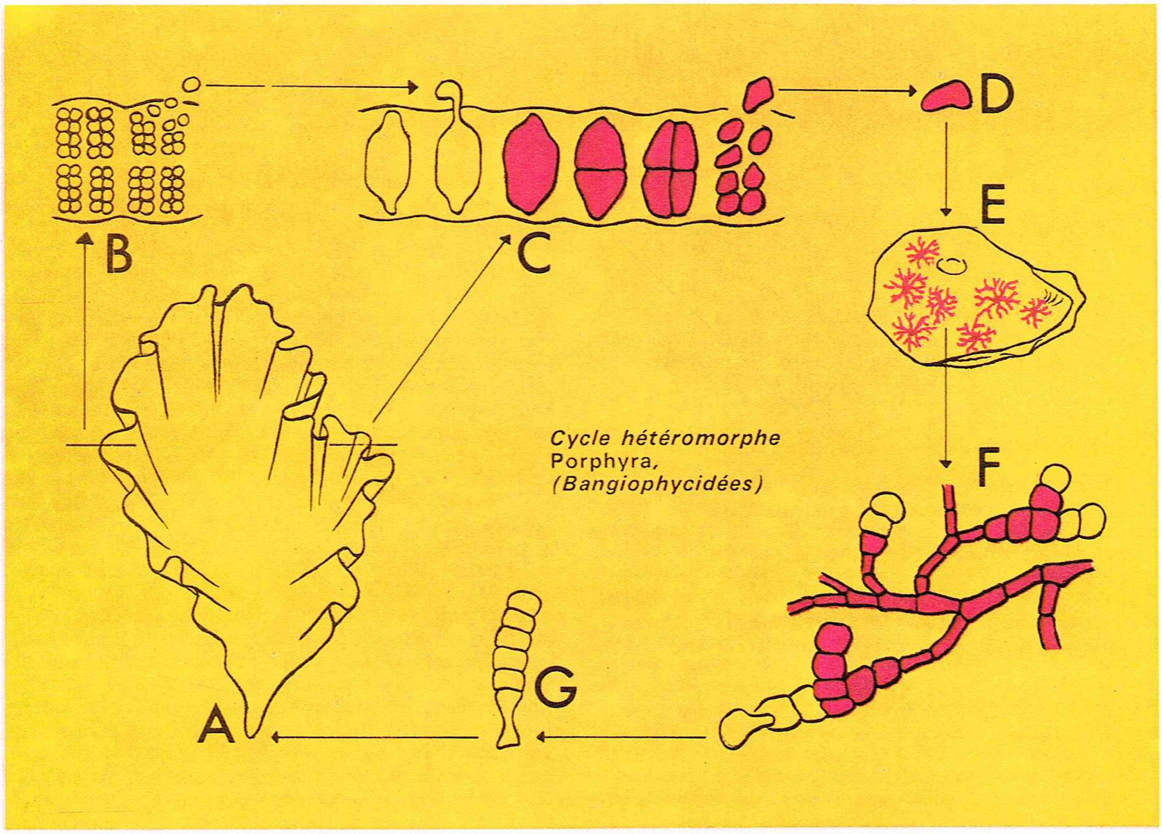

◀ *A - Thalle bisexué (gamétophyte). B et C - Coupes de la marge fertile, en B : cellules produisant des spermaties, en C : le carpogone après copulation devient un zygote qui se divise en carpospores. D - Une carpospore. E - Dans une coquille, filaments rampants ramifiés* (conchocelis = *sporophyte*)*, engendrés par les carpospores. F - Détail d'un sporophyte produisant, après méiose, des spores ou conchospores. G - Jeune thalle engendré par une conchospore. En rouge : 2 n chromosomes.*

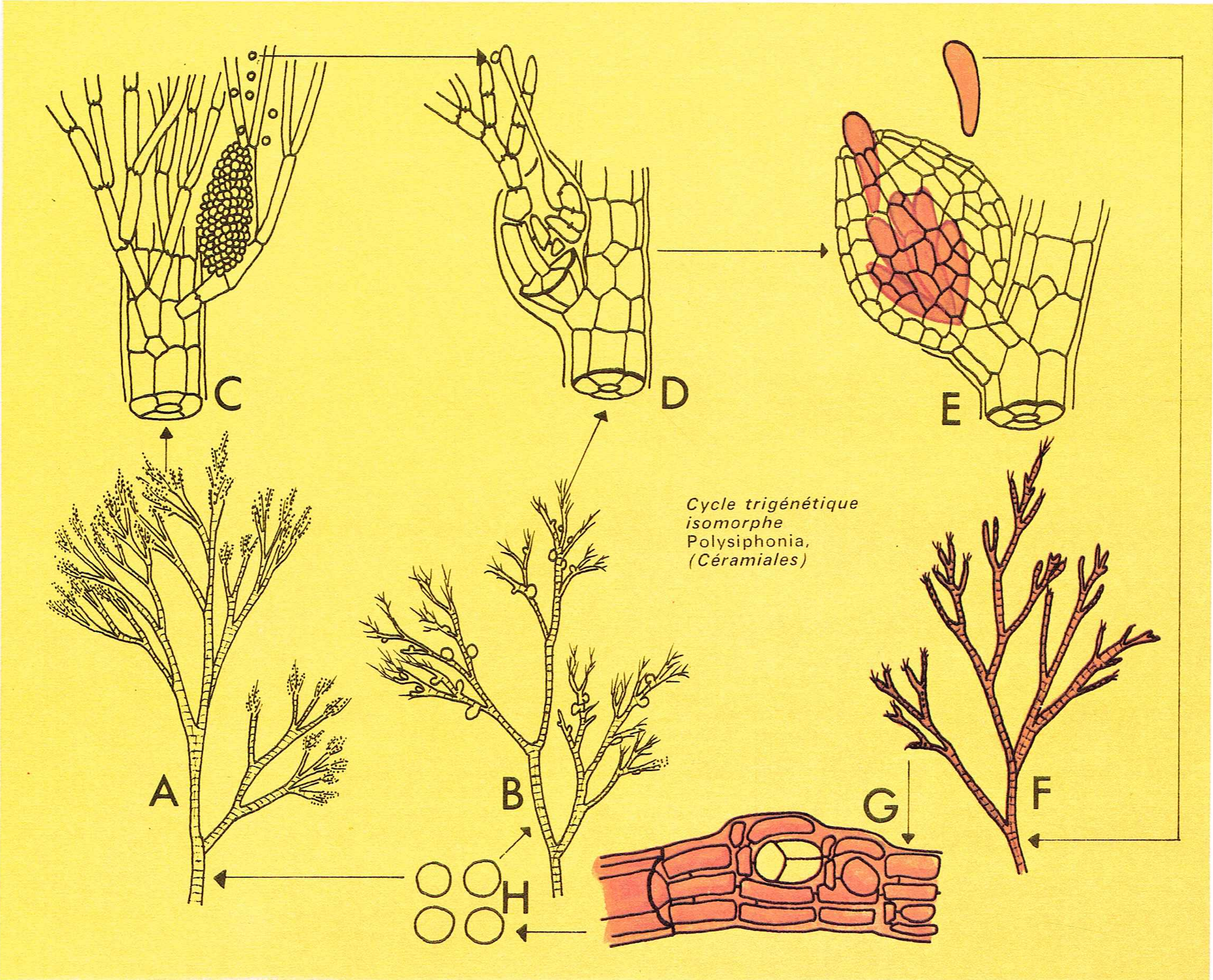

▲ *A - Gamétophyte mâle. B - Gamétophyte femelle. C - Détail d'un gamétophyte mâle montrant deux trichoblastes, dont l'un, fertile, porte des spermatocystes qui libèrent des spermaties. D - Détail d'un gamétophyte femelle montrant un trichoblaste fertile qui porte un gamétocyste femelle comprenant un rameau carpogonial avec carpogone et trichogyne. E - Après la copulation se développe, en parasite sur le gamétophyte femelle, un carposporophyte, contenu dans une enveloppe protectrice; l'ensemble constitue un cystocarpe; le carposporophyte produit des carpospores. F - Tétrasporophyte. G - Détail d'un tétrasporophyte montrant la formation des tétrasporocystes, dont le contenu se divise en quatre tétraspores. H - Tétraspores. En rouge : 2* n *chromosomes.*

Bangiales

Leur thalle est filamenteux *(Erythrotrichia)* ou en cordon tubuleux *(Bangia)*, ou encore en lame mince *(Porphyra)*. Rappelons que les grandes lames membraneuses, abondantes sur les rochers, représentent le gamétophyte du *Porphyra*, tandis que le tétrasporophyte submicroscopique se développe dans le calcaire, en particulier dans les coquilles vides. Plusieurs espèces de *Porphyra* font l'objet d'une véritable culture au Japon.

Compsopogonales

Cet ordre est représenté par le seul genre *Compsopogon*. Le thalle, dont la couleur va du vert-bleu au violacé, est assez complexe et s'accroît par une cellule apicale. La reproduction, uniquement asexuée, se fait par des monospores.

Ces Algues vivent dans les eaux douces tropicales, mais on en a trouvé aussi dans le sud-ouest de la France, au cours d'années chaudes.

● Floridéophycidées ou Floridées

Cette sous-classe renferme la grande majorité des Algues rouges. La structure souvent complexe de leur thalle, la différenciation accentuée des organes sexuels et des carposporophytes, la présence constante de synapses entre les cellules sont leurs principales caractéristiques.

Les Floridéophycidées, ou plus simplement Floridées, se répartissent en huit ordres : Acrochætiales, Némalionales, Gélidiales, Gigartinales, Rhodyméniales, Cryptonémiales, Bonnemaisoniales et Céramiales. Leur distinction reposant essentiellement sur la situation du carpogone et sur le développement du carposporophyte, il convient de donner quelques indications à leur sujet.

Le carpogone peut résulter de la transformation d'une cellule végétative quelconque (Acrochætiales). Ou bien il est la cellule terminale d'un rameau adventif particulier, formé de quelques cellules le plus souvent non pigmentées, le rameau carpogonial (chez la plupart des Floridées). Enfin le rameau carpogonial peut être lui-même porté par un rameau adventif particulier, le gonophore carpogonial (chez les Cryptonémiales et Bonnemaisoniales).

Le carpogone fécondé, devenu zygote, demeure fixé sur le gamétophyte où il se développe en un petit carposporophyte diploïde qui produira des carpospores à 2 *n* chromosomes. La structure du carposporophyte et ses rapports avec le gamétophyte sur lequel il vit sont plus ou moins complexes.

Les Floridées les plus simples (Acrochætiales et Némalionales) ont un carposporophyte peu différencié : le carpogone fécondé se développe directement en un bouquet de courts filaments dont les cellules terminales

produisent les carpospores. Chez les Acrochætiales, le carposporophyte est constitué de cellules pigmentées, et, par conséquent, il présente une certaine autonomie par rapport au gamétophyte. Chez les Némalionales, les cellules du rameau carpogonial fusionnent entre elles, par disparition des cloisons transversales, et alimentent le jeune carposporophyte par migration de leurs réserves vers celui-ci : le carposporophyte est donc parasite du gamétophyte.

Chez les Floridées plus évoluées, le jeune carposporophyte dépourvu de pigments est un parasite obligatoire : sa nutrition et son développement sont assurés par le gamétophyte dont certaines cellules spécialisées jouent un rôle plus ou moins complexe.

Dans certains cas, le développement du carposporophyte s'effectue grâce à des cellules nourricières situées au voisinage du carpogone vers lequel migrent leurs riches réserves nutritives. Ces cellules nourricières se forment avant la maturation du carpogone (Bonnemaisoniales) ou ne se différencient qu'après sa maturation (Gélidiales).

Dans d'autres cas (Gigartinales, Rhodyméniales, Cryptonémiales et Céramiales), c'est le noyau du zygote, ou un de ses descendants, qui migre dans une autre cellule, la cellule auxiliaire. Le carpogone fécondé bourgeonne, produisant alors des filaments plus ou moins longs qui rampent entre les tissus du gamétophyte et vont à la rencontre de cellules auxiliaires; par l'intermédiaire d'un de ces filaments, dits de jonction, chaque cellule auxiliaire reçoit un noyau diploïde, et c'est à partir de cette jonction que s'édifie ensuite un groupe de carpospores. Chaque filament de jonction peut ainsi fusionner successivement avec plusieurs cellules auxiliaires; à partir d'un seul carpogone fécondé, il peut donc y avoir plusieurs groupes de carpospores. Si les cellules auxiliaires sont très proches du rameau carpogonial, les filaments de jonction sont très courts : on nomme alors procarpe cet ensemble rameau carpogonial et cellules auxiliaires associées. Le développement parasite du carposporophyte diploïde provoque fréquemment une réaction des tissus haploïdes du gamétophyte qui, dès ce moment, élabore une enveloppe protectrice; l'ensemble carposporophyte-enveloppe protectrice constitue un cystocarpe, comparable au fruit des plantes à fleurs *(Polysiphonia)*.

Acrochætiales

Ces Algues de petite taille, souvent épiphytes, ont des thalles filamenteux, simples ou ramifiés. Il n'y a pas de rameau carpogonial différencié. Le carposporophyte, constitué de cellules à plastes pigmentés, n'est pas totalement parasite *(Acrochaetium)* ou ne paraît même être nullement parasite *(Rhodochorton purpureum)* sur le gamétophyte.

Le cycle de reproduction de nombreuses espèces n'est pas encore élucidé.

Némalionales

Cet ordre comprend des espèces marines et des espèces d'eau douce. Les gamétophytes, relativement grands (jusquà 30 cm pour les *Nemalion*, les *Helminthora)*, sont constitués de cladomes uniaxiaux ou multiaxiaux, tandis que les tétrasporophytes, de taille si réduite que nombre de ceux-ci, inconnus dans la nature, n'ont été découverts que par des cultures en laboratoire (chez les *Nemalion, Liagora, Helminthora, Scinaia, Lemanea*), sont formés de thalles filamenteux comparables aux thalles des Acrochætiales.

Le carpogone est porté par un rameau carpogonial dont les cellules ont pour fonction de nourrir le jeune carposporophyte.

Les gamétophytes des espèces marines ont une structure multiaxiale. Le *Nemalion helminthoides*, formé de cordons cylindriques, élastiques, de consistance gélatineuse mais ferme, vit sur les rochers battus du littoral. Les *Liagora*, aux thalles incrustés de calcaire, abondent dans les mers chaudes.

Les espèces d'eau douce *(Batrachospermum, Lemanea)*, à structure uniaxiale, se rencontrent fréquemment dans les eaux pures.

Claude Rives - Cedri

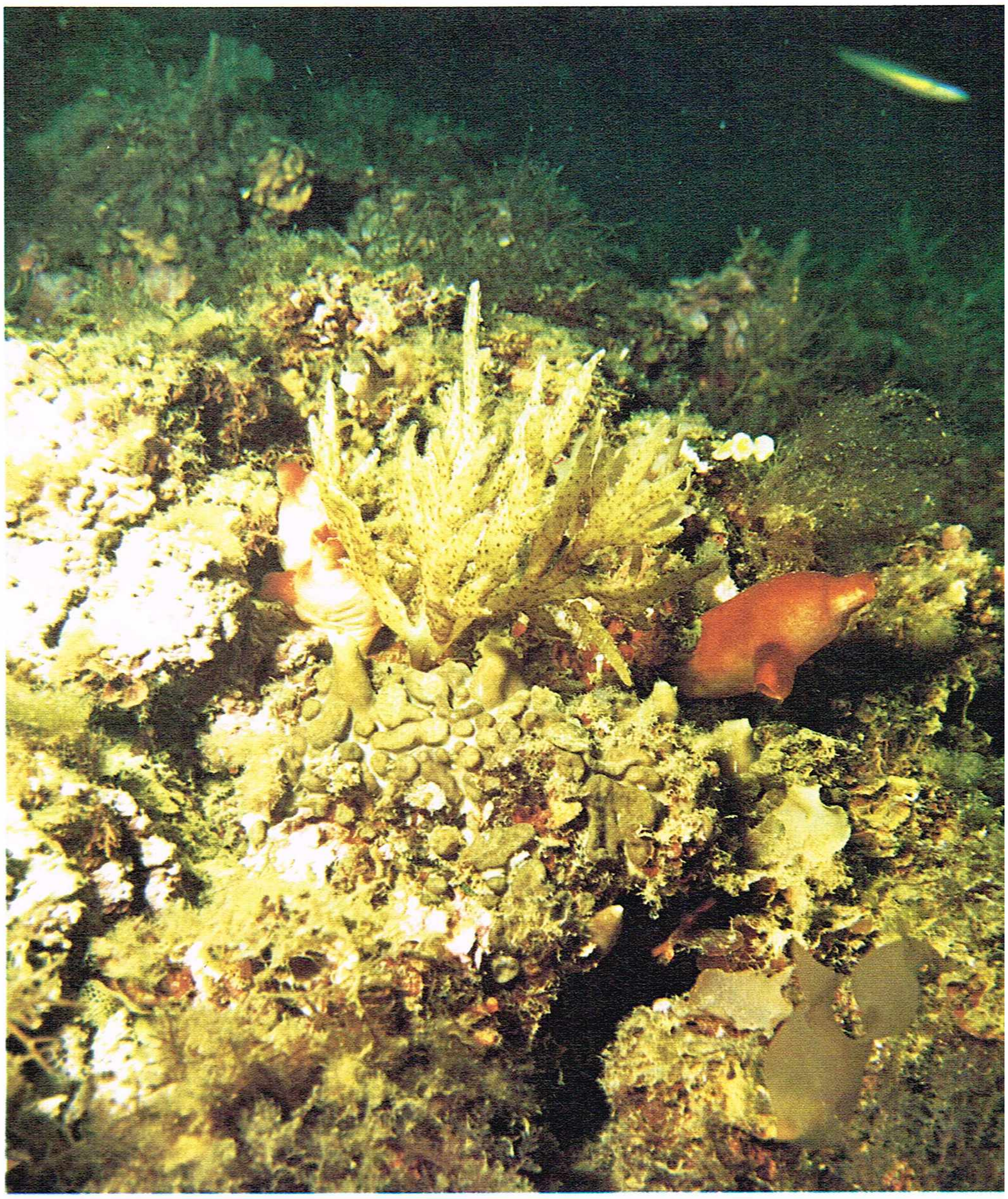

▲ **Chrysymenia ventricosa**, ***Algue annuelle qui apparaît en janvier pour disparaître en automne. Cette espèce est fréquente en Méditerranée.***

Gélidiales

Leur fronde, à structure cladomienne uniaxiale, à ramifications pennées, est de consistance cornée ou cartilagineuse. Les rameaux carpogoniaux sont réduits aux carpogones; un tissu nourricier abondant permet le développement des carposporophytes. Le cycle est trigénétique isomorphe. Cet ordre ne comprend qu'une seule famille.

Les espèces des genres *Gelidium* et *Pterocladia*, particulièrement répandues dans les mers tempérées et chaudes, constituent la principale matière première pour la préparation de l'agar-agar, ou gélose.

Gigartinales

C'est un vaste groupe (plus de vingt familles) d'Algues marines d'aspects très variés, à structure cladomienne uni- ou multiaxiale. Les groupes de carpospores se développent à partir de cellules auxiliaires qui sont des cellules végétatives intercalaires quelconques appartenant à des rameaux courts ordinaires, non différenciés. Les cellules auxiliaires peuvent être nombreuses, plus ou moins éloignées du carpogone fécondé auquel elles sont unies par des filaments de jonction; à partir d'un seul carpogone fécondé, chaque cellule auxiliaire peut être à l'origine d'un bouquet de carpospores *(Platoma, Calosiphonia)*. Dans les formes plus évoluées, il n'y a plus qu'une cellule auxiliaire située à proximité du rameau carpogonial;

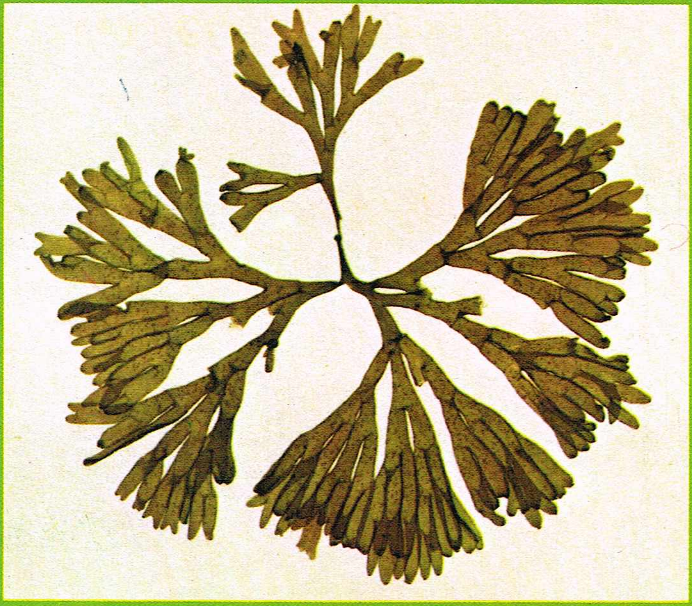

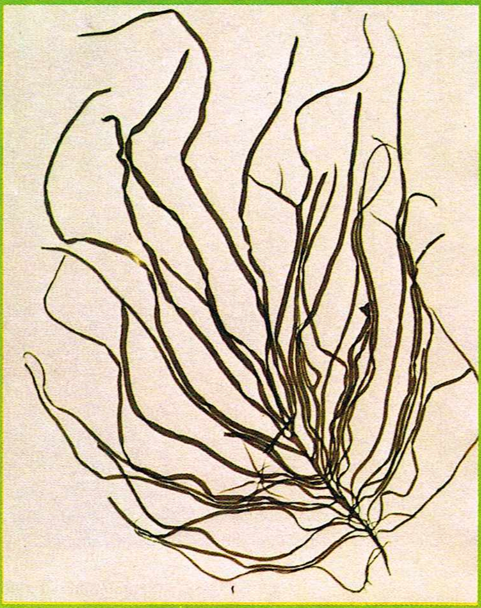

Clichés F. Ardré - M.F. Magne

De gauche à droite et de haut en bas :
Scinaia furcellata *(Némaloniales)*,
Gastroclonium ovatum *(Rhodyméniales)*,
Dumontia filiformis, Dilsea carnosa
***(Cryptonémiales)*, Polysiphonia elongata,**
Apoglossum ruscifolium *(Céramiales)*.
Rhodophycées récoltées à Roscoff.

ainsi cet ensemble, rameau carpogonial et cellule auxiliaire, forme un procarpe qui, après la fécondation, ne produira qu'un seul bouquet de carpospores *(Gracilaria, Plocamium, Sphaerococcus)*.

La plupart des espèces ont un cycle trigénétique isomorphe. Signalons cependant qu'il a fallu cultiver certaines Algues en laboratoire pour montrer que des espèces considérées comme autonomes du fait de leur morphologie et de leur structure très différentes constituent en réalité deux phases d'une même espèce. C'est le cas de l'*Halarachnion ligulatum* dont le gamétophyte est une lame gélatineuse profondément incisée, longue d'une vingtaine de centimètres, tandis que son tétrasporophyte (désigné auparavant sous le nom de *Cruoria rosea*) forme une croûte discoïde de quelques millimètres de diamètre, appliquée sur les rochers ou les coquilles mortes. De même, chez des espèces des genres *Neurocolon, Turnerella, Gigartina,* les gamétophytes sont dressés et de taille relativement grande, alors que les tétrasporophytes sont de petites croûtes rampantes. Rappelons aussi que chez certains *Gymnogongrus,* le zygote donne naissance à un petit tétrasporophyte parasite du gamétophyte.

Les espèces du genre *Gracilaria* (Gracilariacées), qui peuvent atteindre une cinquantaine de centimètres de longueur, ont des thalles à structure cladomienne uniaxiale soit arrondis, soit aplatis. Le *Plocamium coccineum* (Plocamiacées) et le *Sphaerococcus coronopifolius* (Sphærococcacées), à structure uniaxiale, forment des touffes rouge vif, finement ramifiées. Le *Furcellaria fastigiata* (Furcellariacées), à consistance cartilagineuse, est formé de cladomes multiaxiaux cylindriques à ramifications pseudo-dichotomes. La famille des Gigartinacées renferme des espèces à cladomes multiaxiaux, à consistance souvent cartilagineuse, élastique *(Chondrus crispus, Gigartina stellata)*.

Plusieurs produits industriels, comme l'agar-agar et la carragahénine, dérivés de diverses Gigartinales *(Gracilaria, Eucheuma, Hypnea, Chondrus, Gigartina)*, ont de nombreuses applications.

Rhodyméniales

Ce groupe restreint (deux familles) et relativement homogène diffère des Gigartinales, dont il est assez voisin, par la situation des cellules auxiliaires qui sont terminales et non intercalaires. Le cycle est trigénétique isomorphe; il reste cependant à élucider chez certaines espèces. Les thalles sont formés de cladomes multiaxiaux.

Dans la famille des Rhodyméniacées, le *Rhodymenia palmata,* abondant dans le nord de l'Atlantique, est une espèce très polymorphe qui peut atteindre une quarantaine de centimètres de longueur. Le *Fauchea repens* rampe sur les concrétions coralligènes par 20 à 30 m de fond dans la Méditerranée et dans la région de Gibraltar. Les Champiacées ont des thalles cylindriques, ramifiés, plus ou moins creux, avec souvent des constrictions régulières *(Lomentaria, Champia, Chylocladia, Gastroclonium)*.

Cryptonémiales

Cet ordre, qui renferme une douzaine de familles, rassemble des Algues d'aspects très divers, formées de cladomes uni- ou multiaxiaux, dressés ou en croûtes rampantes, incrustés ou non de calcaire. Toutes ces Algues sont caractérisées par la présence de gonophores carpogoniaux et de cellules auxiliaires. Chez certaines espèces (des genres *Thuretella, Gloiosiphonia, Schimmelmannia*), il n'existe qu'un seul type de gonophore, à la fois carpogonial et auxiliaire : après la fécondation, les filaments de jonction fusionnent directement avec les cellules du gonophore pour donner un amas de carpospores. Chez d'autres espèces *(Dudresnaya, Dumontia)*, on observe, en plus des gonophores carpogoniaux, d'autres gonophores qui ne portent pas de carpogone mais qui se terminent par une file plus ou moins longue de cellules végétatives : ce sont les gonophores auxiliaires; par l'intermédiaire des filaments de jonction, les cellules auxiliaires de ces gonophores, plus ou moins distants des gonophores carpogoniaux, donneront naissance à des bouquets de carpospores.

F. Magne

▲ ***Lames minces en éventail du* Peyssonelia rubra, *fréquent en Méditerranée.***

On a longtemps considéré que toutes les Cryptonémiales avaient un cycle trigénétique de type isomorphe, mais des cultures en laboratoire ont montré que certaines d'entre elles présentaient un dimorphisme marqué entre un gamétophyte bien développé et dressé, et un tétrasporophyte nain à structure peu différenciée. C'est le cas d'espèces des genres *Thuretellopsis, Pikea, Gloiosiphonia,* dont les tétrasporophytes sont des croûtes rampantes plus ou moins étendues, et d'espèces des genres *Acrosymphyton, Schimmelmannia* et *Halymenia,* à tétrasporophytes submacroscopiques, formés de filaments rampants.

Quelques exemples donneront un aperçu de la diversité des Algues de ce groupe.

Le *Dudresnaya verticillata,* qui vit en été à très basse mer ou plus profondément, est une Algue d'un beau rose, très gélatineuse, formée de cladomes uniaxiaux ramifiés portant des verticilles de pleuridies.

D'autres espèces sont en forme de lames plus ou moins larges à structure uniaxiale *(Kallymenia)* ou multiaxiale *(Dilsea)*.

Des thalles rampants, en éventail plus ou moins lobé, dont la structure résulte de la soudure latérale des filaments axiaux, caractérisent la famille des Peyssonneliacées.

Une famille particulièrement remarquable, celle des Corallinacées, comprend des espèces calcifiées, à structure cladomienne multiaxiale plus ou moins évoluée. Leur thalle se présente sous divers aspects, soit fortement calcifié en lames minces ou en croûtes épaisses mamelonnées et même branchues *(Lithophyllum, Lithothamnium)*, soit en frondes dressées et ramifiées, formées d'articles à tissus fortement calcifiés, unis entre eux par des portions non calcifiées *(Corallina, Jania)*. Les organes reproducteurs sont logés dans des conceptacles qui communiquent avec l'extérieur par un ou plusieurs pores. Ces Algues sont répandues dans toutes les mers du globe. Dans les mers tropicales, elles participent à la formation des récifs coralliens. De plus, elles sont d'un grand intérêt pour les géologues.

Bonnemaisoniales

Cet ordre ne renferme qu'un petit nombre de genres répartis en deux familles (Bonnemaisoniacées et Naccariacées). Le gonophore carpogonial se termine par un bouquet de cellules nourricières, et porte latéralement le rameau carpogonial souvent réduit au carpogone. Leur thalle, à structure cladomienne uniaxiale très évoluée, se rapproche de celui des Céramiales.

Ces Algues sont caractérisées par la présence de cellules sécrétrices particulières, les ioduques, qui libèrent de l'iode. En outre, cet ordre renferme des espèces dont le cycle trigénétique comporte des tétrasporophytes si différents des gamétophytes qu'ils n'étaient pas classés dans les mêmes genres que ces derniers. Tel est le cas de l'*Asparagopsis armata*, d'origine australienne et apparu sur les côtes européennes en 1925, dont le gamétophyte possède une morphologie et une anatomie très différenciées, et dont le tétrasporophyte, de structure beaucoup plus simple, fut longtemps rattaché à un autre genre et nommé *Falkenbergia rufolanosa*.

▼ **Gelidium sesquipedale :** ***cette espèce et celles qui appartiennent au même groupe sont utilisées dans la préparation de l'agar-agar.***

F. Ardré - M.F. Magne

Claude Rives - Marina - Cedri

Céramiales

Les Céramiales sont les plus évoluées des Floridées. Bien que cet ordre ne comprenne que quatre familles (Céramiacées, Delessériacées, Dasyacées, Rhodomélacées), il renferme à lui seul les 2/5 des genres des Floridées. Les Céramiales ont des procarpes dont la cellule auxiliaire ne se forme qu'après la fécondation. Leur cycle est trigénétique isomorphe.

Toutes les Céramiales ont une structure cladomienne uniaxiale; pourtant elles ont des aspects très divers.

Chez les Céramiacées, où des cellules sécrétrices réfringentes à contenu protidique sont fréquentes, les frondes sont filamenteuses et formées d'axes très ramifiés portant de courts rameaux latéraux, ou pleuridies. Ces pleuridies peuvent être disposées en verticilles ou opposées *(Antithamnion)*. Chez les *Ceramium,* aux extrémités souvent recourbées en tenailles, les pleuridies forment un cortex en anneaux. Les pleuridies peuvent être absentes, comme chez les *Griffithsia* aux grosses cellules vésiculeuses ou chez les fins *Callithamnion*.

Les frondes des Rhodomélacées *(Polysiphonia, Chondria, Laurencia),* abondamment ramifiées, généralement cylindriques, mais parfois aplaties, ont un type de structure très complexe. Leurs axes sont entourés par un manchon continu de pleuridies verticillées, souvent représentées par leurs seules cellules basales; de plus, certains axes secondaires, à croissance limitée, sont réduits à des poils ramifiés, les trichoblastes, en général dépourvus de plastes pigmentés; ce sont des trichoblastes modifiés qui portent les organes sexués.

Dans la famille des Delessériacées, les frondes sont en lames minces, foliacées, plus ou moins découpées, prenant parfois l'aspect de feuilles de Dicotylédones. Chez le très beau *Delesseria sanguinea,* par exemple, qui peut atteindre 15 à 30 cm de longueur, les « nervures » contiennent les axes des cladomes, tandis que les pleuridies latérales, développées dans un plan et coalescentes, forment le « limbe ». Chez d'autres espèces plus petites *(Apoglossum ruscifolium, Hypoglossum woordwardii),* chaque fronde est parcourue par une « nervure » médiane qui porte des frondes plus petites. Le *Polyneura hilliae* forme une grande lame membraneuse, orbiculaire, qui peut atteindre 30 cm de diamètre; ce thalle est constitué d'une seule couche de cellules dans les parties jeunes, et de plusieurs couches dans les parties âgées. La fronde très mince et délicate du *Nitophyllum punctatum* est presque entièrement composée d'une seule couche de cellules; elle peut être parsemée de taches sombres (d'où son nom spécifique) formées par les tétrasporocystes groupés en sores.

Biologie et écologie

Les Rhodophycées sont presque toutes marines; cependant quelques-unes vivent en eau douce (les *Batrachospermum* et les *Lemanea,* certains *Bangia* et *Hildenbrandtia*) ou sur la terre et les murs humides *(Porphyridium)*. Elles se rencontrent dans toutes les mers du globe et sous toutes les latitudes. Si de nombreux genres sont cosmopolites, d'autres sont restreints à certaines régions.

La plupart vivent fixées sur les rochers, les coquilles ou sur d'autres Algues, depuis le niveau de la haute mer jusqu'à des profondeurs d'autant plus grandes que les eaux sont plus transparentes; dans la Méditerranée, on peut en rencontrer jusqu'à — 130 m, tandis que dans les eaux plus troubles de la Manche elles ne croissent pas au-delà d'une quarantaine de mètres de profondeur. La présence de leurs pigments surnuméraires (en particulier la phycoérythrine) leur permet de capter l'énergie des radiations vertes qui seules pénètrent le plus profondément dans la mer.

Les Corallinacées, fortement incrustées de calcaire, concourent avec les Madréporaires, les coquilles et les squelettes de divers Invertébrés à la formation des bancs coralliaires, des récifs et des atolls. Ces Algues forment une protection efficace contre la houle, et elles cimentent entre elles les différentes parties hétérogènes des récifs. Sur le littoral de la Méditerranée occidentale, le *Lithophyllum tortuosum* constitue sur les rochers battus par la houle une corniche épaisse appelée « le trottoir »,

dont la partie supérieure est presque horizontale. Certaines espèces de ce groupe *(Lithothamnium calcareum* et *L. corallioides)*, non fixées, s'accumulent en assez grande quantité à faible profondeur; elles constituent le « maërl » exploité en Bretagne.

Certaines Rhodophycées, qu'on peut à peine qualifier de semi-parasites, sont bien pigmentées et photosynthétiques, mais elles vivent sur d'autres Algues en enfonçant dans leurs tissus des rhizoïdes ou des filaments *(Polysiphonia lanosa* épiphyte sur *Ascophyllum nodosum)*. D'autres espèces sont des parasites obligatoires; généralement de petite taille et presque totalement dépourvues de pigments, elles parasitent des espèces bien déterminées; certaines même, comme le *Janczewskia verrucaeformis* qui forme de petites tumeurs sur le *Laurencia obtusa,* sont étroitement apparentées à leur hôte, présentant des organes reproducteurs quasi identiques et des particularités cytologiques communes.

Utilisation

Au Japon, les *Porphyra* jouent un rôle particulièrement important dans l'alimentation. Les thalles, séchés ou torréfiés après récolte, sont vendus sous le nom de « nori »; ils constituent la base de nombreux plats nationaux. Les cultures, très développées et largement répandues le long du littoral japonais, sont pratiquées depuis très longtemps, probablement dès le début du XVIII^{e} siècle. Cette exploitation n'a cessé de progresser au cours des dernières décennies, occupant actuellement plus d'un demi-million de travailleurs, avec un chiffre d'affaires qui dépasse largement celui de la culture des huîtres perlières. Il est à noter à ce propos que la productivité a considérablement augmenté à la suite de la découverte du cycle du *Porphyra;* c'est un excellent exemple des conséquences bénéfiques imprévisibles d'une découverte effectuée dans un domaine, celui du cycle des Algues, apparemment dépourvu d'intérêt pratique. L'utilisation des Algues marines comme nourriture pour l'homme est faible en dehors des pays d'Extrême-Orient; citons cependant le *Rhodymenia palmata,* qui, frais ou séché, est consommé en Islande, en Irlande, en Écosse et au Canada; cette Algue est aussi utilisée pour l'alimentation du bétail.

Il existe une thérapeutique à base de certaines Rhodophycées. L'*Alsidium helminthochorton,* vendu en pharmacie sous le nom de « mousse de Corse », est un vermifuge efficace contre les oxyures. Le *Rhodymenia palmata,* utilisé en décoction, provoque une forte sudation. Le *Delesseria sanguinea* possède une puissante action anticoagulante, supérieure même à celle de l'héparine.

Les parois cellulaires des Algues rouges renferment des composés pectiques complexes dont les dérivés sont à la base de nombreuses applications. L'extraction de ces colloïdes ressort d'un principe de fabrication simple mais elle exige des moyens importants et une technologie élaborée. Les principaux hydrocolloïdes fournis par les Algues rouges sont l'agar-agar et la carragahénine.

Producteur essentiel de l'agar-agar jusqu'à la Seconde Guerre mondiale, le Japon a été imité par de nombreux pays. Ce sont essentiellement des Gélidiales *(Gelidium, Pterocladia)*, qui sont utilisées en Europe, aux États-Unis et au Japon, et aussi des Gigartinales *(Gracilaria, Eucheuma, Hypnea)*, communes dans certaines régions (Californie, Amérique du Sud, Afrique du Sud, Australie, Japon). Les Algues sont récoltées à marée basse sur les rochers qui se découvrent, ou bien elles sont cueillies en profondeur, en plongée.

Dans le commerce, l'agar, ou gélose, se présente sous forme de poudre blanche, translucide, sans goût et sans saveur. C'est essentiellement un polysaccharide constitué de molécules de galactose unies en 1-3, et estérifiées en 4 par l'acide sulfurique. Insoluble dans l'eau froide mais soluble dans l'eau bouillante, la gélose donne par refroidissement des gels consistants; cette propriété la rend d'un emploi classique dans les laboratoires pour la culture des Bactéries et des Champignons. Outre cet usage et des applications d'ordre pharmaceutique (excipient), odontologique (pâtes employées pour les empreintes) et médical (régulation de l'intestin), l'industrie moderne a développé dans divers domaines des applications multiples dont nous ne citerons que quelques exemples : l'agar remplace les empois et les gommes pour encoller les papiers, pour apprêter et imperméabiliser les tissus, pour donner du vernis et de la rigidité aux cuirs; il peut entrer dans la fabrication des linoléums, des soies et des cuirs artificiels, et des isolants contre le son et la chaleur; dans l'industrie photographique, il tend à remplacer la gélatine car il permet de fabriquer des films huit fois moins épais que les films ordinaires, et qui, de plus, résistent aux températures tropicales. L'agar est aussi employé dans l'alimentation comme épaississant.

R. Doumic - Atlas photo

▲ *La culture des* **Porphyra** *est largement répandue au Japon.*

◀ *Page ci-contre : Les frondes dressées du* **Corallina officinalis**, *aux articles fortement calcifiés, sont fréquentes sur les rochers battus.*

C'est à partir du *Gigartina stellata* et surtout du *Chondrus crispus* qu'on extrait la carragahénine. Le *Chondrus crispus,* encore appelé « mousse d'Irlande » ou « carragheen », est récolté dans le nord de la France et de la péninsule Ibérique, et dans divers pays comme l'Irlande, la Grande-Bretagne, le Canada et les États-Unis. On cueille les thalles sur les rochers, à marée basse, ou, comme ils poussent à de faibles profondeurs, on les arrache à l'aide de sortes de grands râteaux, à partir de petites barques.

La carragahénine est, comme l'agar, un polygalactose sulfurique; elle fournit des gels, moins consistants que la gélose, qui exercent une action épaississante, gélifiante ou stabilisante. Les grands secteurs d'utilisation de ces composés sont l'industrie pharmaceutique, l'industrie des cosmétiques, mais surtout l'industrie alimentaire où ils sont incorporés dans des produits sucrés ou salés, mais essentiellement lactés (boissons, glaces, fromages, flans, puddings, crèmes, etc.).

Le « maërl », nom donné aux accumulations de certaines Algues calcaires *(Lithothamnium calcareum* et *L. corallioides)*, fait l'objet d'une exploitation intensive au large des côtes bretonnes. Il constitue un amendement calco-magnésien très apprécié pour les sols acides; dans l'alimentation animale (chevaux, porcs, volailles, bovins), il apporte, en plus du calcium et des sels minéraux, divers oligo-éléments nécessaires au métabolisme.

Signalons enfin le rôle des Corallinacées pour la datation des terrains. La plupart des genres actuels existaient déjà à l'ère tertiaire. Ces Algues à thalles incrustés de calcaire sont en effet admirablement conservées dans les terrains sédimentaires, même très anciens, et constituent des documents paléontologiques précieux. Pour les étudier, on effectue des plaques très minces, translucides et, par là même, observables au microscope. Ainsi, on peut étudier l'anatomie de ces Algues fossiles et, par comparaison avec les données relatives aux Algues actuelles, reconstituer leur distribution et même apprécier les conditions écologiques dans lesquelles elles vivaient à ces époques lointaines (profondeur, température et salinité de la mer).

▼ *L'accumulation de certaines Algues calcaires* **(Lithothamnium)** *donne le maërl. Celui-ci fait l'objet, au large des côtes bretonnes, d'une exploitation intensive qui pourrait conduire à un épuisement des gisements.*

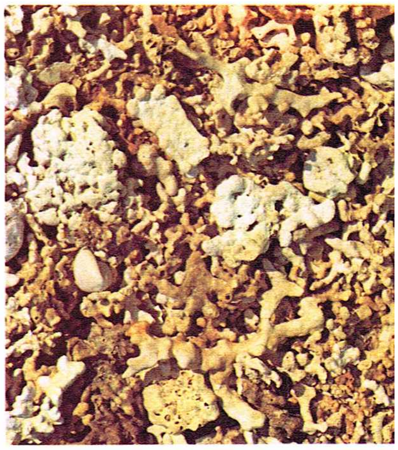

Claude Rives - Marina - Cedri

Photo J. Lecomte - C.N.R.S. Laboratoire Arago - Banyuls-sur-Mer

LES PYRRHOPHYTES

Photo J. Lecomte - C.N.R.S. Laboratoire Arago - Banyuls-sur-Mer

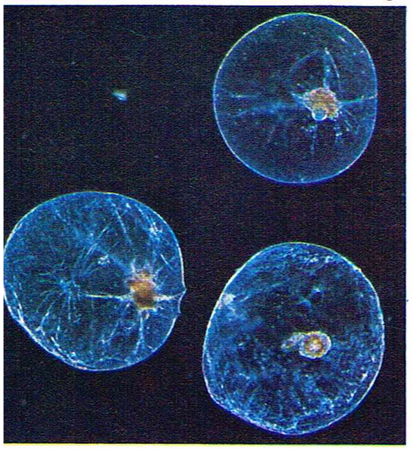

▲ *Phénomène des eaux rouges (en haut) dû à la prolifération de Péridiniens,* **Noctiluca miliaris** *(en bas).*

Nous rangerons dans cet embranchement des Algues unicellulaires et presque toujours mobiles et biflagellées. Leurs plastes renferment de la chlorophylle a et de la chlorophylle c et parfois des biliprotéines bleue et rouge très voisines de celles des Cyanophycées et des Rhodophycées. On y trouve du carotène, des xanthophylles variées donnant aux plastes une teinte brune, qui vire au rouge ou au bleu si les biliprotéines sont abondantes. Les réserves sont constituées par de l'amidon qui est toujours dans le cytoplasme et non dans les plastes comme chez les Chlorophytes *(amidon extraplastidial)*. L'embranchement des Pyrrhophytes comprend :

1° *Les Cryptophycées :* cellules ayant deux flagelles à insertion ventrale, sortant d'une dépression profonde : le cytopharynx.

2° *Les Dinophycées :* également à deux flagelles, l'un transversal entourant la cellule, l'autre longitudinal ; la cellule est pourvue d'un gros noyau à chromosomes bien visibles.

CRYPTOPHYCÉES

Ce petit groupe d'Algues flagellées, unicellulaires, libres et mobiles comprend une vingtaine de genres et une centaine d'espèces dulçaquicoles, marines ou saumâtres. Les cellules nageuses toujours de très petite taille sont comprimées latéralement en forme de haricot et montrent, vers l'apex, un sillon qui se termine en une invagination en doigt de gant : le *cytopharynx* ou *vestibule*. Ce cytopharynx est entouré, le plus souvent, par de petits grains, les trichocystes, qui peuvent sous des actions diverses (colorants chimiques, chaleur, pression) se détendre en un long filament. Du sommet du cytopharynx sortent latéralement deux flagelles presque de même longueur et revêtus de poils très fins (les mastigonèmes). Le flagelle le plus long a des mastigonèmes en deux séries latérales, tandis que le plus court n'en possède que sur un côté.

La cellule a une membrane mince, mais ferme, dont l'examen au microscope électronique révèle qu'elle est formée de pièces rectangulaires ou hexagonales. Elle présente un plaste brun, bleu ou rouge, enveloppant, pariétal, parfois divisé en deux et possédant chez certaines espèces un pyrénoïde (organite protéique globuleux). L'amidon souvent abondant entoure le pyrénoïde et se dépose à la surface du plaste. Les Cryptophycées sont partagées en deux ordres : les *Tétragonidiales* et les *Cryptomonadales*.

Tétragonidiales

Cet ordre renferme un seul genre dulçaquicole, *Tetragonidium,* avec la seule espèce *T. verrucatum*. Celle-ci a un thalle unicellulaire coccoïde, à paroi cellulosique ; elle est immobile, de forme grossièrement tétraédrique (d'où le nom du genre), et longue de 12 à 18 μ. Cette cellule se transforme en sporocyste, donnant des zoospores biflagellées ressemblant à un *Chroomonas*. On rencontre l'espèce dans les mares tourbeuses.

Cryptomonadales

Les espèces constituant cet ordre sont unicellulaires, libres et mobiles ; le thalle se multiplie par bipartition longitudinale ; les formes libres flagellées peuvent devenir palmelloïdes et s'enkyster ; il existe plusieurs genres, marins et dulçaquicoles. La reproduction sexuée par isogamie a été observée.

Le genre *Cryptomonas* groupe une cinquantaine d'espèces d'eau douce et marines, dont la cellule présente un cytopharynx bien développé avec une gaine de trichocystes. Les *Chroomonas* ont un cytopharynx réduit et un petit nombre de trichocystes alignés. Le plaste est brun, rouge ou bleu.

Le genre *Chilomonas* comprend des espèces dépourvues de chlorophylle, qui mènent une vie saprophyte ; elles sont communes dans les eaux douces riches en matières organiques.

DINOPHYCÉES

Cette classe est la plus riche en formes et la plus variée que comptent les Pyrrhophytes. Elle renferme des Algues unicellulaires, le plus souvent planctoniques ; la plupart des espèces sont mobiles, mais certaines sont fixées sur des Algues microscopiques. Les cellules nageuses possèdent trois sillons : le *sulcus* longitudinal, d'où part le flagelle postérieur rigide, le *cingulum*, sillon transversal où ondule le fouet antérieur, et le *présulcus*, moins bien développé. Le flagelle longitudinal est pourvu de deux séries de petits mastigonèmes de 0,5 μ de longueur ; le flagelle transversal est aplati en forme de ruban ondulé et possède des mastigonèmes de 2 μ disposés en une seule série. Les *pusules*, non contractiles, au nombre d'une ou de deux, sont des sacs vacuolaires souvent lobés ou ramifiés qui débouchent à l'extérieur par un fin canal au voisinage des cratères flagellaires. Il semble que l'appareil pusulaire ait une fonction d'excrétion. Le noyau de très grande taille également nommé *dinocaryon* montre des filaments chromosomiques irrégulièrement enchevêtrés.

Les plastes, bruns ou plus rarement bleus ou rouges, ont des lamelles formées par trois thylacoïdes. Ils contiennent des chlorophylles a et c, du β carotène et des xanthophylles nombreuses et variées, et parfois des biliprotéines ; ils portent souvent des pyrénoïdes. Les matériaux de réserve sont des lipides et de l'amidon extraplastidial. Certaines espèces sont pourvues d'un stigma rouge placé dans la région sulcale, stigma indépendant des plastes.

La multiplication se fait par division végétative longitudinalement ou obliquement. La reproduction sexuée est connue chez quelques espèces. Il s'agit d'isogamie ou d'hétérogamie. La méiose se produira lors de la germination du zygote formé par la fusion des gamètes mâle et femelle.

La classe des Dinophycées peut se diviser en deux sous-classes : les *Adinophycidées*, qui groupent les organismes dépourvus des sillons flagellaires et dont les deux fouets sont à insertion apicale, et les *Dinophycidées*, à cellules possédant les deux sillons flagellaires longitudinal et transversal.

● *Adinophycidées*

Dans les Adinophycidées, nous retiendrons trois ordres, celui des *Desmocapsales*, celui des *Prorocentrales* et celui des *Desmomastigales*. Le premier renferme des cellules à membrane mince et groupées dans une gelée, cellules qui donneront des zoïdes comparables aux *Desmomastigales*. Ces dernières se caractérisent par des cellules solitaires également à membrane mince et mobiles grâce à deux flagelles apicaux (genre marin *Desmomastix*). Les *Prorocentrales* ont en revanche une épaisse membrane cellulosique bivalve souvent percée de pores (genre *Exuviella*). Dans les trois ordres, les sillons font défaut mais il y a deux flagelles apicaux, l'un dirigé suivant l'axe longitudinal, l'autre ondulant autour du premier dans un plan perpendiculaire. Ainsi ces flagelles ont-ils des mouvements identiques à ceux des Dinophycidées. Le plus souvent, les Adinophycidées, organismes marins, renferment deux plastes se faisant face avec chacun un pyrénoïde. Les cellules ont un gros noyau, du type du dinocaryon, et parfois, mais pas toujours, une pusule.

● *Dinophycidées*

Cette sous-classe groupe toutes les Dinophycées qui montrent à un stade quelconque de leur vie des cellules flagellées possédant un fouet transversal et un fouet longitudinal logés chacun dans un sillon. Nous la diviserons en cinq ordres : les *Dinotrichales* : formes filamenteuses à zoospores du type indiqué ci-dessus ; les *Dinococcales* : formes immobiles, unicellulaires, à membrane ferme et zoospores biflagellées ; les *Dinophysiales*, formes unicellulaires biflagellées à membrane épaissie

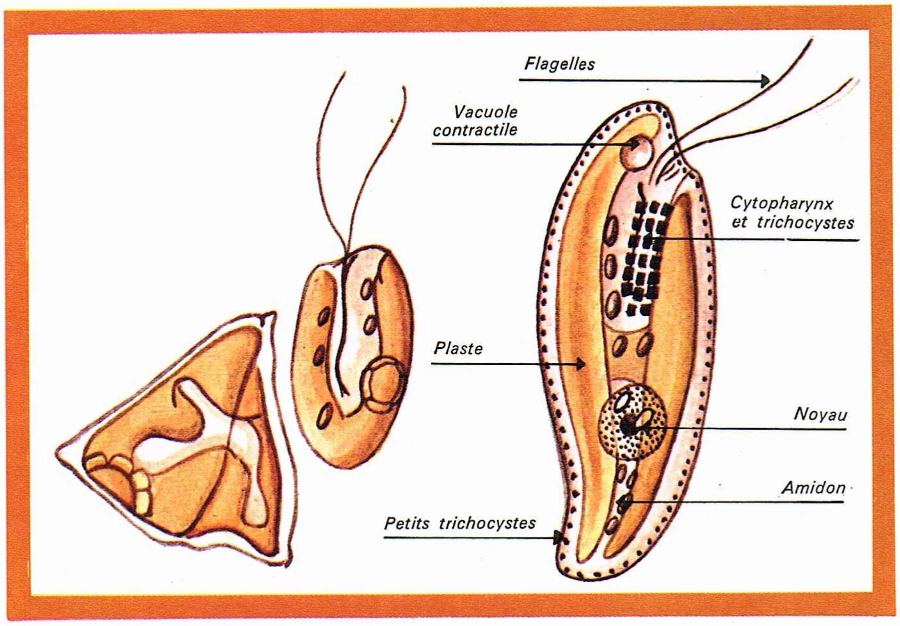

▲ **Tetragonidium verrucatum**, *d'après Pascher (× 1 500). A gauche, cellule végétative avec pyrénoïde ; à droite, une zoospore.* **Cryptomonas**, *figure schématisée montrant la cytologie.*

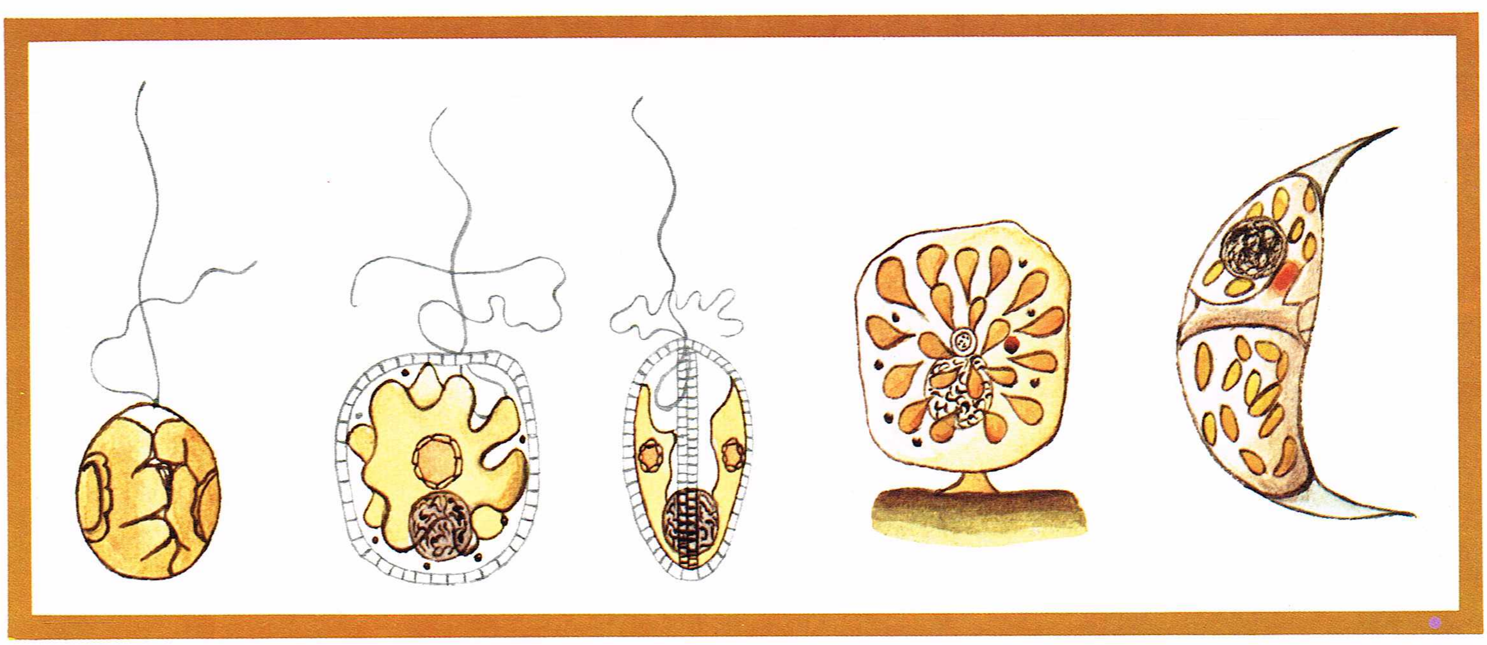

▼ *De gauche à droite :* **Desmomastix globosa** *schématisé d'après Pascher (× 1 650), cellules à deux plastes pariétaux avec pyrénoïdes.* **Exuviella mariae-lebouriae**, *schématisé d'après M. Parke (× 1 640) ; à gauche, cellule de face, à droite, vue de profil.* **Dinococcus africanus** *(× 1 940), cellule végétative fixée.* **Cystodinium steinii** *(× 840), cellule végétative se transformant en spore du type* **Gymnodinium.**

M. Ricard

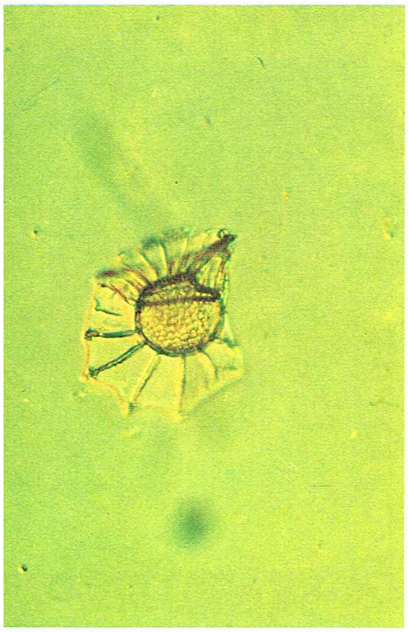

▲ **Ornithocercus quadratus** *(Dinophysiale).*

en coque (ou thèque) bivalve; les *Péridiniales,* formes unicellulaires biflagellées à membrane ou à thèque entière ou formée d'un nombre constant de plaques juxtaposées, et les *Ébriales,* formes unicellulaires flagellées à squelette siliceux interne.

Dinotrichales

Dans cet ordre sont placées les Dinophycées ayant une organisation filamenteuse ramifiée. Ces Algues sont constituées par un protothalle très simple, microscopique, dont les cellules se transforment en sporocystes; les zoospores sont biflagellées avec un flagelle transversal et un autre longitudinal. Il en existe deux genres, marins, *Dinothrix* et *Dinoclonium.*

Dinococcales

Cet ordre comprend des espèces constituées par un thalle unicellulaire immobile à parois de cellulose, donnant un sporocyste à zoospores nageuses toujours biflagellées du type de *Gymnodinium.* Les Dinococcales sont marines ou dulçaquicoles. Nous citerons le genre *Pyrocystis,* marin, et les genres *Dinococcus* et *Cystodinium,* d'eau douce.

Les *Zooxanthelles* sont des Dinococcales qui vivent en symbiose dans les tissus des Animaux marins. Elles sont particulièrement abondantes dans les grands Mollusques du Pacifique, bénitier ou tridacne. Ce sont des cellules arrondies avec une membrane sans sillon, des plastes bruns, un gros noyau, qui peuvent donner des zoospores biflagellées du type dinophycéen.

Les *Blastodiniales* renferment un grand nombre d'espèces parasites d'organismes marins. On y trouve des parasites de Diatomées, de Ciliés, de Radiolaires, de Mollusques, de Vers, de Crustacés, de Tuniciers, de Poissons et même de Péridiniens. Les cellules végétatives sont immobiles et sans flagelle, et, lors de la multiplication, elles donnent un très grand nombre de petites zoospores ayant l'aspect de minuscules Dinophycées ressemblant suivant les cas à des *Gymnodinium,* des *Gyrodinium* ou des *Cochlodinium* (voir les travaux de Chatton).

Dinophysiales

Ces organismes unicellulaires mobiles appartiennent tous au phytoplancton marin. La cellule est entourée d'une thèque cellulosique bivalve avec une suture longitudinale située dans le plan de symétrie. Le sillon transversal avec un flagelle partage la thèque en deux parties; l'une, supérieure, assez réduite : l'*épithèque,* l'autre, inférieure, de plus grande taille, l'*hypothèque.* Le flagelle longitudinal est situé sur la suture réunissant les deux

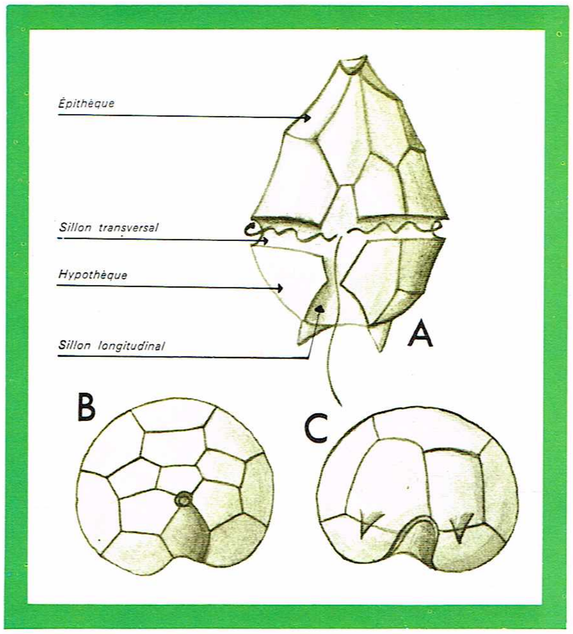

valves de l'hypothèque. Dans cet ordre, nous trouverons les genres *Dinophysis* et *Ornithocercus* (où le sillon transversal est entouré de deux ailes très élégantes).

Péridiniales

Les organismes de cet ordre sont toujours unicellulaires, mobiles avec deux flagelles, l'un transversal, l'autre longitudinal. La membrane est soit mince et nue, soit épaisse et divisée en un nombre constant de plaques polygonales. Cet ordre est très riche en genres et en espèces, surtout marines, et est partagé en une vingtaine de familles. Parmi les genres à membrane nue, sans plaque, citons les *Gymnodinium* à sillon transversal médian, les *Gyrodinium* et les *Cochlodinium* à sillon transversal tordu en hélice. Deux genres marins de ce groupe sont vraiment extraordinaires : *Erythropsis* et *Polykrikos.* Le premier possède une ocelle, sorte de stigma complexe qui rappelle un œil primitif. Le second est formé d'une chaîne de *Gymnodinium* sans cloison transversale et groupant par exemple quatre noyaux, huit sillons transversaux et leurs flagelles, et huit flagelles longitudinaux.

Les Noctiluques sont proches des *Gymnodinium,* mais elles sont globuleuses, dépourvues de plaste et ont des

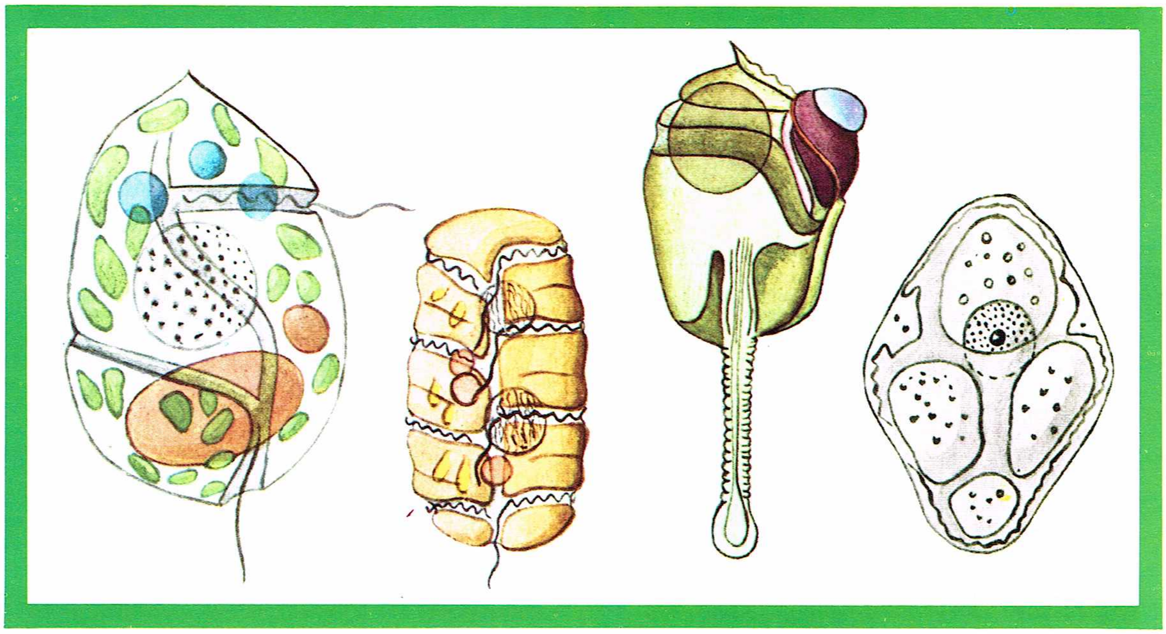

▶ *De gauche à droite :* **Gyrodinium melo** *d'après Kofoid et Swezy (× 960), avec plastes verts de forme irrégulière; espèce marine.* **Polykrikos schwartzii** *d'après Kofoid et Swezy (× 490), forme à deux noyaux, quatre sillons transversaux et huit flagelles.* **Erythropsis pavillardii** *(× 480), d'après Kofoid et Swezy; gros noyau à gauche, à droite, ocelle, en bas, tentacule rétractile.* **Ebria tripartita,** *d'après Hovasse (× 1 640). Les deux flagelles n'ont pas été représentés, le cytoplasme est incolore avec des inclusions huileuses, l'endosquelette est siliceux.*

flagelles très réduits. Elles peuvent, en plus de la division végétative, produire de très nombreux gamètes flagellés du type du *Gymnodinium*, mais avec un seul fouet longitudinal et un sillon transversal réduit. Parfois les Noctiluques se multiplient de façon prodigieuse et colorent l'eau de la mer en jaune-rouge (phénomène comparable à celui des eaux rouges des mers tropicales causé par des *Gonyaulax*) : l'eau a alors l'aspect gélatineux granuleux d'une soupe de tapioca (côtes bretonnes en 1972).

Les genres à thèques avec plaques polygonales sont très nombreux. Nous citerons les trois genres les plus abondants dans le plancton marin : a) le genre *Peridinium* avec plus de cinq cents espèces où l'hypothèque est toujours formée de sept plaques tandis que l'épithèque en possède treize ou quatorze; b) le genre *Gonyaulax* avec une hypothèque de huit plaques et une épithèque de neuf à quatorze plaques; c) le genre *Ceratium* qui présente une grande corne médiane à l'épithèque et deux ou trois cornes à l'hypothèque.

Ébriales

Cet ordre renferme un petit nombre d'organismes unicellulaires, marins, planctoniques, qui nagent en suivant une piste sinueuse, capricieuse, rappelant la démarche d'un homme pris de boisson (du latin *ebrius* = ivre). Les deux genres actuels : *Ebria* et *Hermesinum* ont un squelette siliceux interne formant une sorte de cage bâtie autour d'une baguette axiale à trois ou quatre branches disposées en trépied. Les cellules, dépourvues de plaste, ont un gros noyau et deux flagelles. Cet ordre se rattache aux Dinophycées par l'aspect du noyau et se rapproche beaucoup des *Gymnaster* qui sont des *Gymnodinium* incolores avec les sillons caractéristiques et qui possèdent eux aussi deux étoiles siliceuses à cinq branches qui entourent le noyau. Les Ébriales renferment de nombreux genres fossiles connus depuis la base du Tertiaire.

Écologie et biologie des Dinophycées planctoniques

Comme nous l'avons dit, la plupart des Dinophycées sont des organismes unicellulaires phytoplanctoniques. Le phytoplancton est constitué par un ensemble d'organismes microscopiques qui flottent dans l'eau au gré des courants. Il comprend également d'autres groupes d'Algues, comme certaines Chlorophycées, des Cyanophycées et surtout des Diatomées. L'étude du phytoplancton marin et dulçaquicole est riche d'enseignements, aussi bien du point de vue biologique que du point de vue écologique; nous allons donc en parler plus en détail, tout en nous référant en particulier aux Dinophycées, abondantes surtout dans les mers chaudes (environ trois cent cinquante espèces en Méditerranée).

Comme les plantes terrestes, le phytoplancton est soumis à des variations saisonnières cycliques, en ce qui concerne tant la présence des espèces que la quantité des individus d'une espèce donnée; on connaît maintenant les *cycles annuels* en de nombreux points de pleine mer et le long des côtes. L'étude de ces cycles a permis d'observer une succession de phénomènes qui se répète assez régulièrement; c'est surtout pendant la période chaude estivale que l'on rencontre des Péridiniens, alors que durant les mois froids d'hiver prédominent les Diatomées. Cette variation est essentiellement quantitative, car, du point de vue qualitatif, c'est entre décembre et février qu'on observe la plus grande diversité d'espèces de Péridiniens. Toutefois certaines d'entre elles sont observables toute l'année, alors que d'autres sont uniquement estivales ou hivernales. Pour donner une idée de ces variations périodiques, nous citerons les travaux de Marchesoni, qui a étudié cet intéressant phénomène dans la lagune de Venise et dans la mer Adriatique. Cet auteur a récolté, pendant un cycle annuel complet, cinquante-deux espèces de Dinophycées, dont vingt du genre *Peridinium*, dix-sept du genre *Ceratium*, cinq du genre *Gonyaulax*, etc. Pour chacune de ces espèces il a étudié la courbe quantitative annuelle, et a montré que les Péridiniens prédominent en juillet et août; durant ces maximums saisonniers, il a compté de quatre cents à cinq cents individus par litre d'eau, alors que certaines espèces de Diatomées pullulaient à raison de cinquante-cinq mille à soixante mille individus dans le même volume d'eau. Pour quelques *Ceratium*, dont les *C. furca*, *C. fusus* et *C. pulchellum*, on observe deux maximums saisonniers, l'un en décembre-janvier, et l'autre en juillet-août. On a également constaté que le milieu lagunaire est tributaire, en ce qui concerne la vie du phytoplancton, de la zone marine et que le phytoplancton pénètre dans les lagunes, surtout sous l'action des marées.

On voit donc que la quantité de Péridiniens est très modeste par rapport à celle des Diatomées, mais qu'elle représente cependant une importante part de la biomasse marine et qu'elle a un rôle non négligeable du point de vue alimentaire pour le zooplancton (Protozoaires, Copépodes, etc.), ainsi que pour les représentants de la zone pélagique comme les gros Crustacés, les Poissons, etc.

La périodicité du cycle annuel des Péridiniens existe aussi dans les eaux douces, c'est-à-dire dans les lacs, où on a pu l'étudier avec soin. Dans ce milieu également, les Péridiniens se trouvent généralement en moindre quantité — en ce qui concerne les espèces et les individus — que les Diatomées. Dans le lac du Bourget, on dénombre six espèces de Péridiniens; il y en a cinq dans le lac d'Annecy et sept dans celui de Zurich. Le lac Léman renferme onze espèces mais c'est le lac Balaton (Hongrie) qui atteint le record de quinze espèces de Dinophycées. Un grand nombre de ces espèces lacustres sont cosmopolites : cependant quelques-unes, dont *Peridinium wisconsinense* ou *P. limbatum*, sont particulières à l'Amérique du Nord.

Les causes provoquant la périodicité du cycle du phytoplancton sont nombreuses et complexes, et dépendent autant des variations des caractéristiques du milieu (température, oxygène dissous, azote, phosphore) que des relations existant entre les divers composants du phytoplancton et du zooplancton.

Certaines espèces de Péridiniens des mers tropicales des genres *Gonyaulax*, *Amphidinium*, etc., par leur reproduction active, donnent lieu au phénomène des « eaux rouges » : apparition brutale en un lieu donné d'une quantité prodigieuse d'organismes appartenant le plus souvent à une seule espèce. Ce phénomène, comparable aux « fleurs d'eau » des eaux douces, est fort dangereux pour les populations de Poissons, et ce pour diverses raisons : consommation énorme d'oxygène, engorgement mécanique des branchies et aussi intoxication par des substances du type alcaloïde produites par ces Péridiniens. La consommation des Poissons ainsi intoxiqués est très dangereuse pour l'homme. Et ceci nous incite à mettre en garde le lecteur contre l'utilisation alimentaire du phytoplancton marin. Signalons enfin que certaines Dinophycées marines sont la principale cause de la phosphorescence des mers.

◀ *Page ci-contre :* **Peridinium bipes** *(× 1 200). Détail des plaques cellulosiques.* *A - Cellule de face.* *B - L'épithèque vue par-dessus avec le pore central et les quatorze plaques.* *C - Hypothèque vue par le dessous avec les sept plaques.*

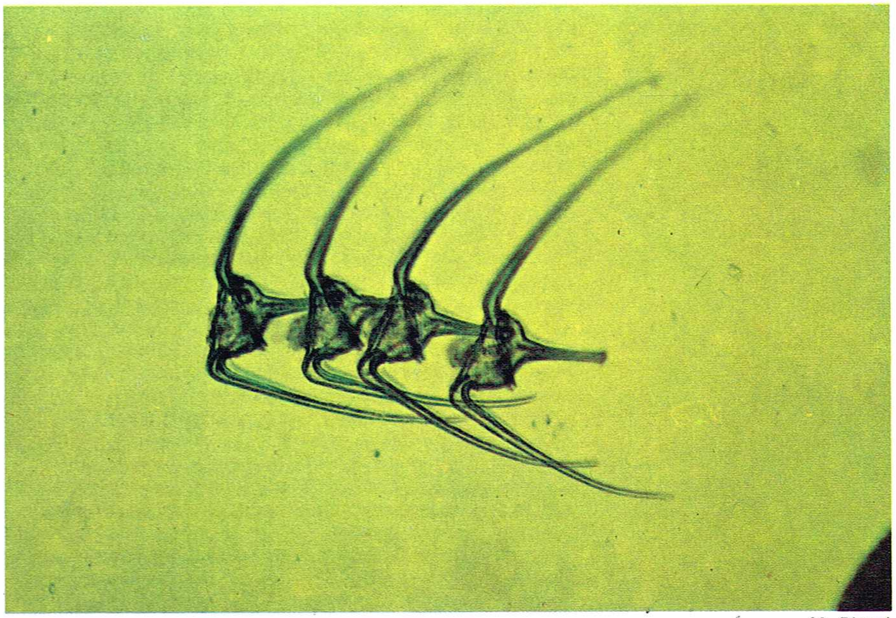

▼ **Ceratium vultur** *var.* **sumatranum.** *Formation coloniale.*

M. Ricard

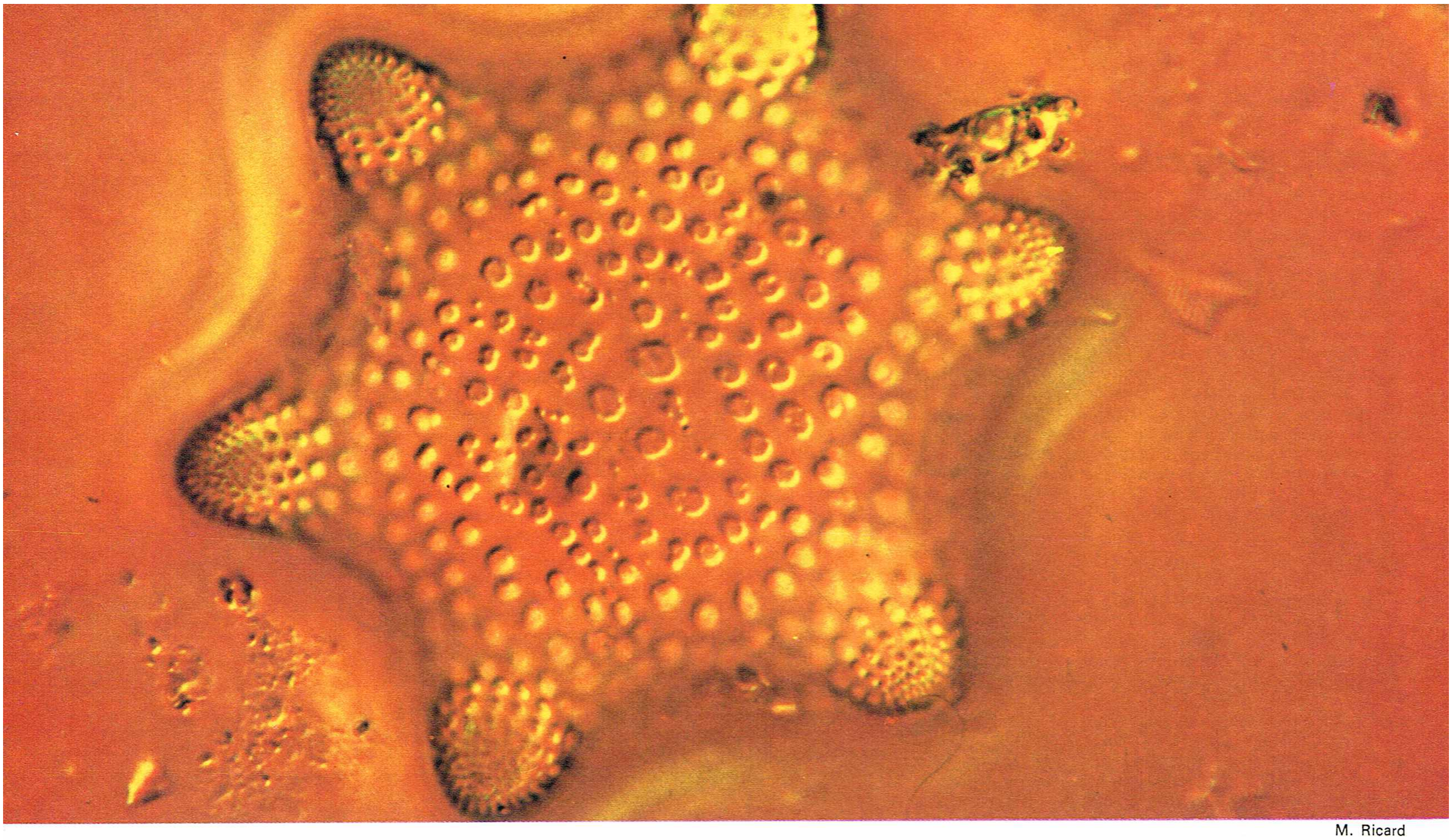

M. Ricard

LES CHROMOPHYTES

▲ **Triceratium reticulum *f.* hexagonalis.** *Diatomée centrique abondante dans le plancton marin.*

Dans ce grand groupe, nous trouverons, à côté de formes simples, unicellulaires et souvent microscopiques, des Algues à structure plus complexe et de grande taille comme les Fucus et les Laminaires de nos côtes.

Toutes ces Algues ont en commun les caractères suivants : présence de chlorophylles a et c portées sur des plastes à lamelles formés de trois thylacoïdes ; absence de chlorophylle b ; abondance de xanthophylles et de caroténoïdes ; β carotène, fucoxanthine, lutéine ; absence de biliprotéines ; spores nageuses (zoospores ou gamètes), le plus souvent à deux flagelles inégaux, l'un lisse, l'autre avec mastigonèmes ; réserves de polysaccharides (laminarine des Phéophycées, chrysolaminarine des Chrysophycées et Diatomées) contenues dans des vacuoles, et absence d'amidon.

Nous distinguerons cinq classes dans cet embranchement : Chrysophycées, Diatomophycées, Phéophycées, Xanthophycées et Raphidophycées. Les trois premières ont des plastes bruns ou jaunes, les deux dernières des plastes verts parfois un peu jaunâtres.

Les *Diatomophycées* unicellulaires ou coloniales se reconnaissent facilement à la logette siliceuse bivalve enveloppant toujours la cellule.

Les *Phéophycées* ne sont jamais unicellulaires mais ont toujours un thalle à structure complexe, et on y rencontre deux types de zoosporocystes, produisant zoospores ou gamètes : des sporocystes uniloculaires (sac non cloisonné) et des sporocystes pluriloculaires (sac cloisonné en logettes).

Les *Chrysophycées,* le plus souvent unicellulaires, plus rarement thalloïdes, ne possèdent pas ces deux types de sporocystes : leurs sporocystes ressemblent à des cellules ordinaires un peu plus renflées. Elles forment de plus des kystes de résistance (ou statospores) globuleux et siliceux, percés d'un pore fermé par un bouchon.

Les *Xanthophycées* ont des plastes verts ou vert jaunâtre, des sporocystes simples comme chez les Chrysophycées, et, comme ces dernières, elles peuvent donner des kystes siliceux. Ces derniers, globuleux, sont bivalves : lors de leur germination, ils se partagent en deux par une ligne équatoriale.

Les *Raphidophycées,* toujours unicellulaires et mobiles par deux fouets inégaux, ont des plastes verts ; sporocystes et kystes y sont inconnus.

CHRYSOPHYCÉES

Cette classe est constituée par des Algues unicellulaires ou pluricellulaires, qui dérivent peut-être de la même souche que les Pyrrhophytes. Le caractère fondamental qui permet de la distinguer des autres groupes est la présence de plastes chlorophylliens de couleur jaune verdâtre ou brun jaune doré, par suite de la présence de β carotène et de diverses xanthophylles, pigments qui masquent le vert de la chlorophylle a (accompagnée de chlorophylle c).

Le nom de Chrysophycées vient des mots χρυσός, or, et φυτόν, plante, en raison justement de la couleur présentée très généralement par ces Algues. Comme nous l'avons déjà dit pour d'autres groupes d'Algues, certaines espèces sont en marche vers l'animalité car elles sont douées de la faculté d'effectuer des mouvements amiboïdes et de se nourrir par phagocytose — alors que d'autres, ne possédant pas de plastes, ont une nutrition hétérotrophe et sont le plus souvent saprophytes.

Chez les cellules nageuses, les sillons vestibulaires ont disparu plus ou moins totalement, et les fouets sont hétérocontes, l'antérieur est onduleux, pleuronématé et pourvu de deux rangées de mastigonèmes, et le postérieur est raide et nu.

Lorsqu'il existe une paroi cellulaire, celle-ci est généralement cellulosique ou pecto-cellulosique. Quant aux substances de réserve, ce sont des lipides et de la chrysolaminarine (polysaccharide voisin de la laminarine des Phéophycées), mais il n'y a jamais d'amidon.

La reproduction des Chrysophycées est en général asexuée. On connaît cependant des cas de reproduction sexuée, avec des zoogamètes isogames. Il se forme souvent à l'intérieur de la cellule des endokystes silicifiés de forme sphérique, percés d'un pore obstrué par un

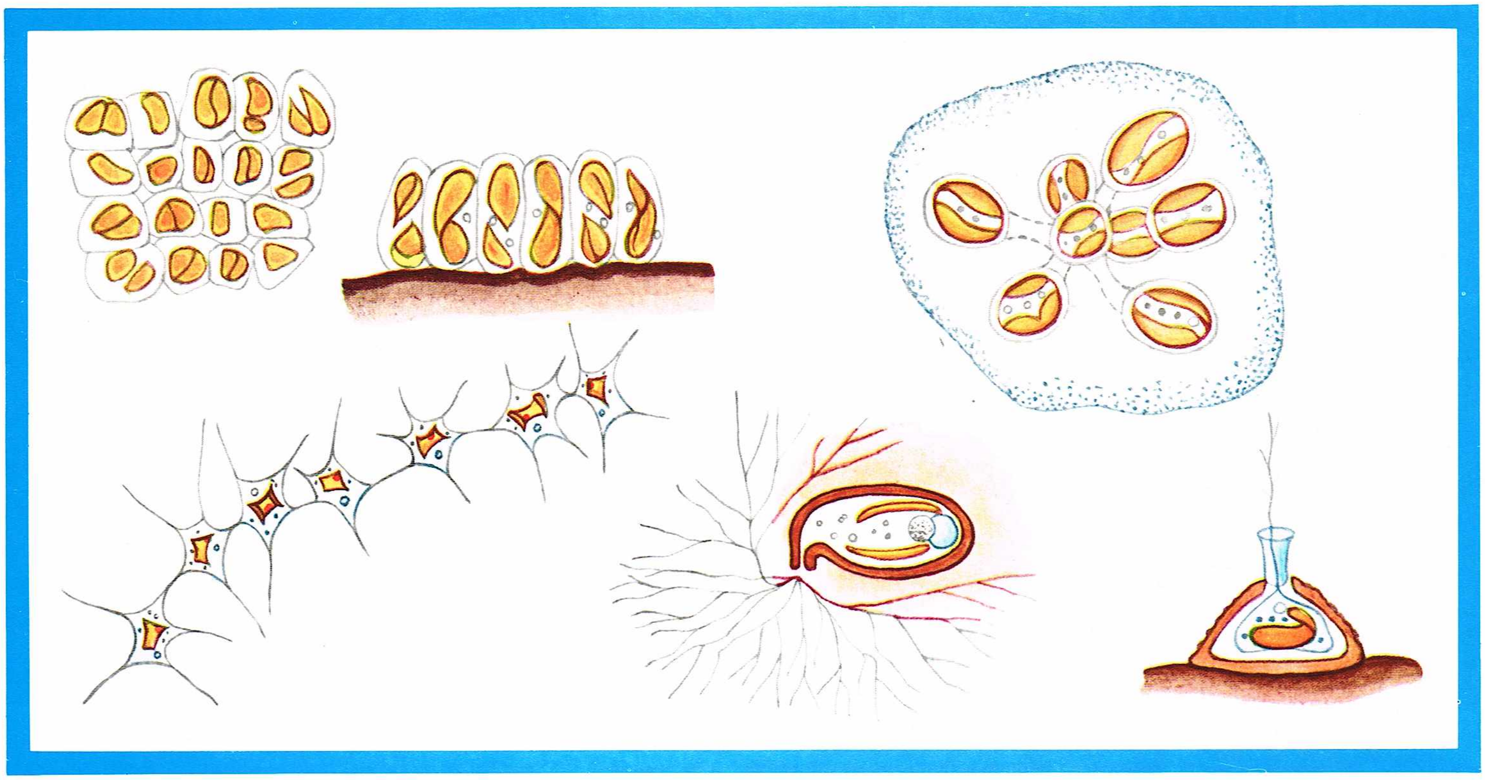

bouchon, qui permettent à l'espèce de survivre quand les conditions extérieures sont défavorables. Dans ce cas, le cytoplasme se rassemble au centre de la cellule, et tout autour de lui est sécrétée une membrane résistante siliceuse. Quand le milieu le permet de nouveau, l'endokyste (ou statospore) germe, le bouchon — moins silicifié que le kyste — est gélifié ou tombe, et il y a émission d'une ou de plusieurs zoospores qui peuvent avoir un, deux ou trois flagelles. Les formes uniflagellées du type *Chromulina* ont un fouet pourvu de deux rangées latérales de mastigonèmes disposés comme les barbes d'une plume.

Ces mastigonèmes sont tubuleux et atteignent 1 μ de longueur. Ils sont eux-mêmes recouverts de cinq à six rangées de poils très courts (0,03 à 0,04 μ) et très denses, entremêlés d'un petit nombre de poils plus longs (0,2 μ). Enfin au sommet du mastigonème se trouve un bouquet de poils longs (0,2 μ).

Les formes biflagellées possèdent soit deux fouets égaux et nus (type *Isochrysis*), soit deux fouets inégaux : le long avec mastigonèmes (comme chez *Chromulina*), le court nu et lisse : c'est le type *Ochromonas*. Enfin il existe des formes à trois flagelles : deux flagelles égaux et lisses encadrant un troisième appendice, l'*haptonema*, souvent enroulé comme un ressort à boudin. Cet haptonema (type *Chrysochromulina*), en coupe transversale, ne montre pas la structure classique d'une paire centrale de tubules entourée de neuf paires périphériques, et il y a simplement une triple membrane entourant six à sept fibrilles périphériques.

La reproduction asexuée se fait : par bipartition longitudinale, par fragmentation ou bien par zoospores nues et mobiles identiques à celles qui se forment dans les endokystes.

Cette classe comprend de nombreuses formes dulçaquicoles et marines; en particulier, beaucoup de ces Algues ont une prédilection pour les eaux froides et sont donc abondantes dans les torrents de montagne. Elles constituent parfois une importante part du plancton lacustre printanier. On en connaît près de deux cents genres et environ neuf cents espèces.

Suivant le type des zoospores, nous pouvons diviser la classe des Chrysophycées en trois sous-classes :

les *Acontochrysophycidées* dépourvues de zoospores ou à zoospores amiboïdes sans flagelle;

les *Hétérochrysophycidées* à zoospores du type *Chromulina* à un flagelle ou du type *Ochromonas* à deux flagelles inégaux;

les *Isochrysophycidées* à zoospores à deux flagelles égaux ou à trois flagelles (deux flagelles et un haptonema). Enfin nous pouvons ajouter à cet ensemble les *Craspédomonadophycidées* qui groupent les formes possédant un flagelle axial entouré par une collerette cytoplasmique qui n'est pas sans évoquer les choanocystes des Éponges.

● *Acontochrysophycidées*

Cette sous-classe est fondée principalement sur un caractère négatif, l'absence de zoospores flagellées, toutefois dans bien des cas, on peut supposer qu'il s'agit simplement d'un manque d'informations. On la subdivise en quatre ordres :

Les *Phæoplacales* où se rangent des formes à thalles simples, filamenteux, unisériés *(Stichochrysis)* ou ramifiés *(Sphaeridiothrix)* ou en pseudo-parenchyme *(Phaeoplaca)*. Dans ce dernier genre épiphyte qui constitue de petits coussinets sur les Algues d'eau douce, les zoospores sont amiboïdes, dépourvues de flagelles.

Les *Stichoglœales* sont solitaires ou coloniales, avec des cellules tuniquées (à membrane bien définie). La multiplication se fait par autosporulation : le contenu cellulaire se partage en deux ou quatre dans la membrane de la cellule maternelle, et les autospores ainsi formées prennent l'aspect de la cellule mère avant d'être libérées par rupture ou gélification de la membrane. *Stichogloea* qui forme de petites colonies dans les eaux des tourbières à sphaignes est un bon exemple de cet ordre.

Les *Chrysosaccales* ont des cellules nues souvent groupées par quatre et réunies dans une gelée commune (*Chrysosaccus* par exemple).

Les *Rhizochrysidales* ont l'aspect de petites amibes solitaires ou coloniales, nues ou contenues dans une logette. Ces amibes ont des plastes bruns et parfois forment des kystes siliceux qui, en germant, redonneront des amibes.

Le genre *Chrysidiastrum* forme des chapelets de petites amibes vivant sur le film de surface de l'eau.

Le genre marin *Chrysothylakion* a une coque brune terminée par un petit col recourbé; une amibe avec deux plastes jaunes occupe cette logette et fait sortir du col un réseau de pseudopodes ramifiés qui capturent des proies minuscules (Algues et Bactéries). En eau douce, les *Lagynion* ont des logettes en forme de vase souvent fixées par leur base : à l'intérieur, l'amibe, avec son plaste, émet un pseudopode plus ou moins ramifié : la multiplication se fait par zoospores amiboïdes.

▲ **Chrysophycées.** ***De gauche à droite et de haut en bas :*** **Phaeoplaca thallosa** ***(× 1 190), espèce d'eau douce.*** **Stichogloea doederleinii** ***(× 1 150); petite colonie des eaux acides.*** **Chrysidiastrum ocellatum,** ***d'après Pascher (× 835); chaîne de sept cellules amiboïdes avec plaste et stigma.*** **Chrysothylakion vorax,** ***d'après Pascher (× 1 600). Cellule en coupe optique contenue dans une logette fixée par son flanc sur les Algues marines, avec un grand développement de pseudopodes.*** **Lagynion janei,** ***espèce d'eau douce avec logette brune et un seul pseudopode (× 1 400).***

M. Ricard

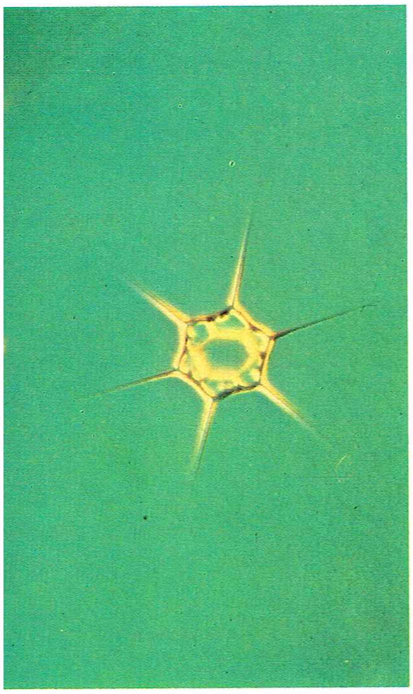

▲ Dictyocha speculum. *Endosquelette siliceux. Les Dictyochales étaient autrefois groupées avec les Ébriales sous le terme de Silicoflagellés.*

● *Hétérochrysophycidées*

Nous trouvons dans cette sous-classe fort riche en genres et en espèces (plus de six cents espèces et près de cent genres) des Algues thalloïdes (filamenteuses ou pseudo-parenchymateuses) microscopiques, des formes coccoïdes, solitaires ou coloniales, immmobiles et à membrane définie, enfin des formes flagellées, palmelloïdes ou amiboïdes. Mais, quel que soit leur type d'organisation, ces Chrysophycées donneront à un moment quelconque de leur vie des zoospores flagellées du type *Ochromonas* (à deux fouets inégaux) ou *Chromulina* (à un seul fouet).

Remarquons à ce sujet que, fréquemment, les zoospores uniflagellées et à double rangée de mastigonèmes possèdent aussi un embryon de deuxième fouet souvent dissimulé dans un repli cellulaire et visible seulement en microscopie électronique. Ce deuxième fouet, situé parfois près du stigma, semble jouer un rôle dans la perception de la lumière. Nous pourrons grâce au type de la zoospore reconnaître trois ordres : *Chromulinales* et *Dictyochales* à zoospores à un seul flagelle et *Ochromonadales* à zoospores à deux flagelles inégaux.

Chromulinales

Les formes thalloïdes sont représentées par *Thallochrysis* vivant dans les eaux saumâtres et *Phaeodermatium* dans les eaux douces des torrents de montagnes. L'un et l'autre constituent des filaments rampants accolés en un pseudo-parenchyme et se multiplient par zoospores.

Les formes immobiles, solitaires, à membrane bien définie (type coccoïde), sont peu nombreuses : *Chrysosphaera* à cellules sphériques se multipliant à la fois par autospores et par zoospores uniflagellées en est un bon exemple.

Les formes flagellées, solitaires, libres ou fixées, sont très nombreuses : citons le genre *Chromulina* abondant dans les eaux douces au printemps, plus rare dans les mares littorales. Les cellules à membrane fine sont mobiles grâce à leur flagelle : elles possèdent un ou deux plastes pariétaux et souvent un stigma, et se multiplient par division longitudinale. Parfois elles forment des kystes de repos, siliceux à pore et bouchon, qui redonneront une ou deux zoospores identiques à la cellule végétative. Les *Chrysococcus* sont des chromulines enfermées dans une thèque sphérique, à incrustation calcaire. La thèque est percée d'un petit pore par où sort le flagelle. Souvent, comme chez *Chromulina,* un deuxième flagelle rudimentaire est visible dans un repli cellulaire près du premier flagelle. Les *Hydrurus,* qui constituent sur les rochers immergés des torrents montagnards des colonies gélatineuses de grande taille (jusqu'à 30 cm), de couleur jaune-brun à odeur de poisson, sont aussi des Chromulinales. Les cellules groupées dans la partie centrale du thalle gélatineux forment de véritables filaments à croissance apicale. Ces cellules peuvent donner des zoospores uniflagellées et des kystes siliceux.

Citons enfin le curieux genre *Pedinella* et ses espèces microscopiques des eaux douces et saumâtres. La cellule libre a un grand flagelle entouré de courts tentacules et présente six plastes disposés suivant une symétrie radiale. Cette cellule peut se fixer par un filament cytoplasmique postérieur et se diviser à ce stade, faisant ainsi un petit arbuscule irrégulièrement ramifié dont les branches portent les cellules flagellées, cellules qui peuvent se détacher, nager librement et redonner une nouvelle colonie. Cette organisation particulière d'un flagelle entouré de tentacules susceptibles de capturer les proies préfigure la collerette cytoplasmique caractéristique des Craspédomonadophycidées.

Ochromonadales

Nous retrouverons dans cet ordre la même diversité de types structuraux signalée chez les Chromulinales, mais ici avec des zoospores à deux flagelles : l'un très long, l'autre plus court. Citons simplement, parmi les formes filamenteuses ramifiées, les *Phaeothamnium* d'eau douce et le *Chrysonephos* des mers chaudes (Floride, Océanie) qui ont des zoospores du type *Ochromonas.* Les genres marins *Nematochrysopsis* à filaments non ramifiés et *Giraudyopsis* à massif cellulaire rampant et filaments dressés ont aussi des zoospores à deux flagelles inégaux. Parmi les formes flagellées coloniales : les *Uroglena* sont abondantes dans le plancton printanier des lacs. Les *Synura* ont un revêtement d'écailles siliceuses à ornementation délicate et forment des colonies mobiles qui donnent une odeur de concombre aux eaux douces lorsqu'elles se développent en quantité. Les *Mallomonas* d'eau douce (près de cent espèces) ne diffèrent des *Synura* que par leur vie solitaire et la réduction extrême du flagelle lisse. Les *Dinobryon* ont leur cellule protégée par un délicat cornet cellulosique : leurs formes coloniales en arbuscule mobile sont fréquentes dans le plancton des grands lacs. Dans le nannoplancton vivent les nombreuses espèces de *Pseudokephyrion :* minuscule cellule à deux flagelles protégée par une logette à large ouverture. Dans ce genre, la reproduction

▶ Thallocrysis pascheri, *d'après Conrad (× 960); espèce marine, un jeune thalle et sa zoospore.* Chromulina pascheri *(× 1 500), espèce d'eau douce; après coloration vitale au bleu de crésyle, la chrysolaminarine à la base de la cellule se colore en pourpre et les corps mucifères en bleu.* Hydrurus foetidus : *apex de thalle (× 1 220) avec noyau basal et plaste apical avec pyrénoïde; à droite, fragment du thalle (× 1) et zoospore (× 1 600).*

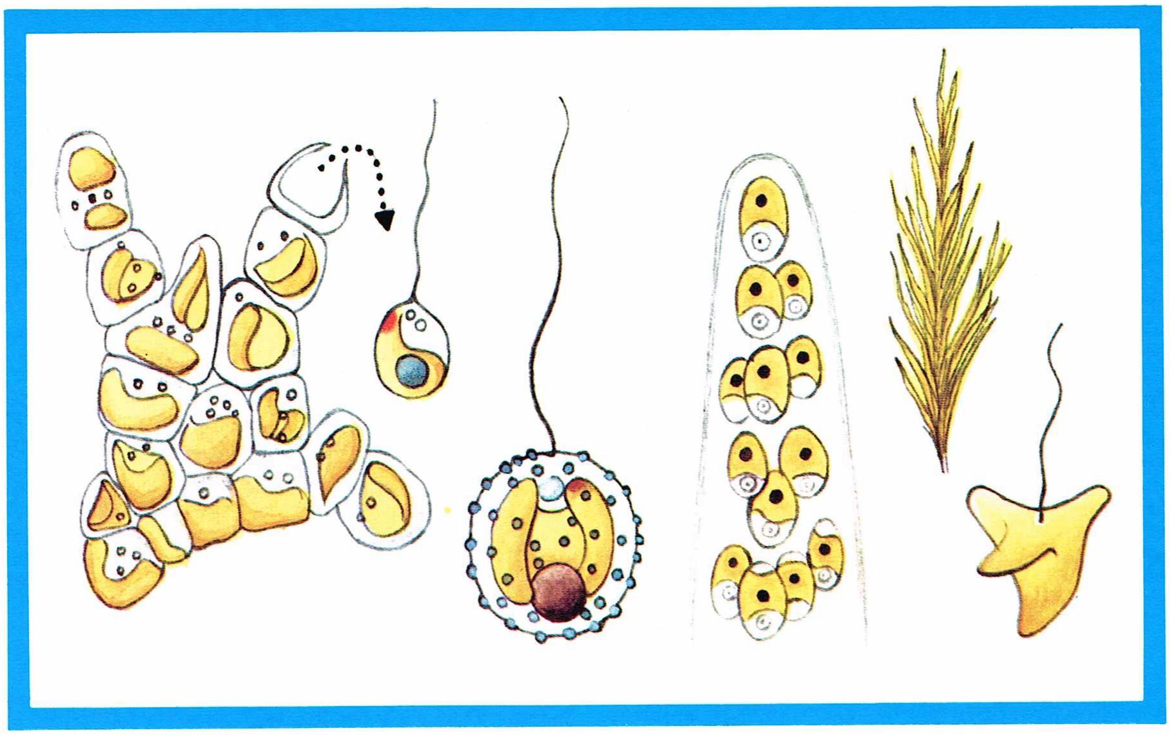

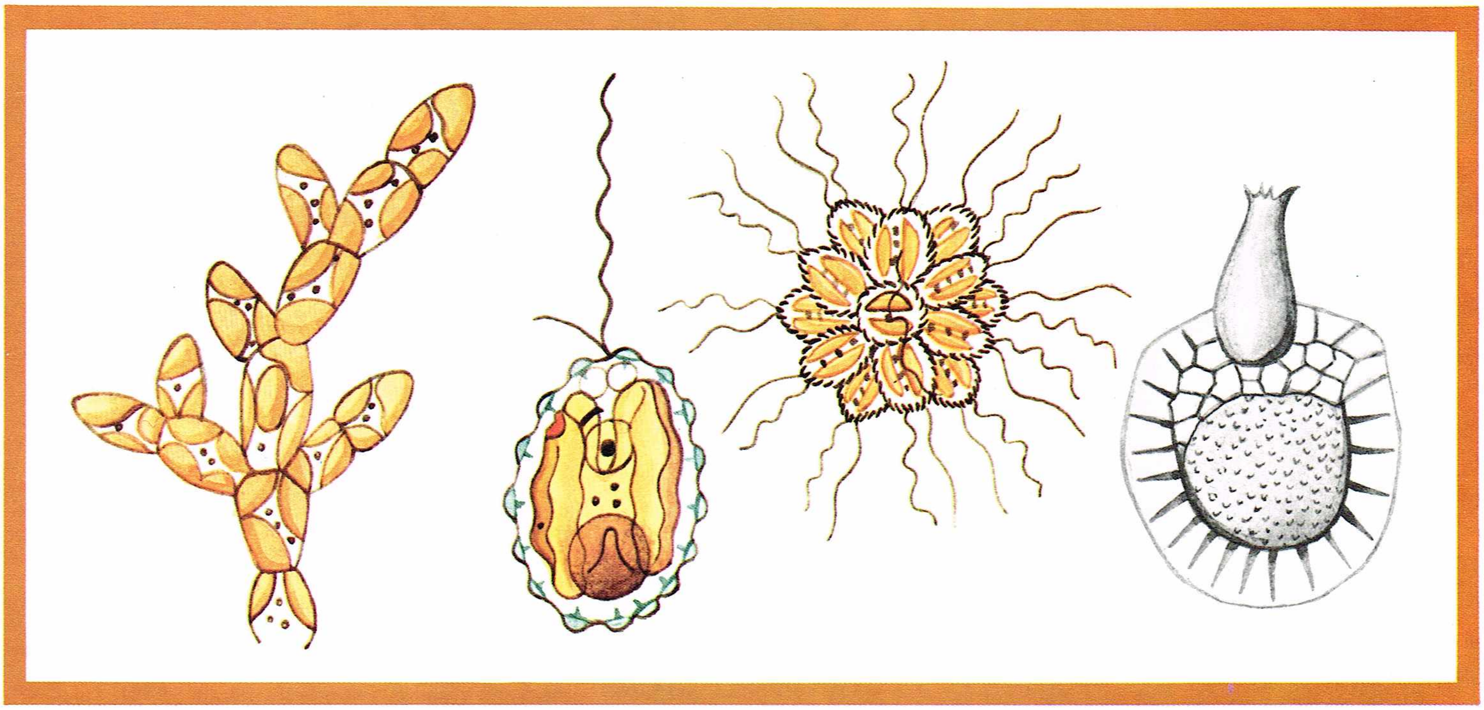

sexuée par isogamie a été souvent observée. Les *Ochromonas* n'ont pas de logettes et sont solitaires, libres : une cinquantaine d'espèces environ croissent dans les eaux douces.

Dictyochales

Dans cet ordre sont placés les Silicoflagellés, organismes marins microscopiques planctoniques. Il s'agit d'unicellulaires à cytoplasme renfermant un squelette siliceux tubuleux, de nombreux plastes jaunes avec pyrénoïde et un flagelle unique. Le squelette est de forme très variée mais, très souvent, a l'aspect d'une cage en tronc de pyramide dont la base est hexagonale (genre *Dictyocha*).

Les anciens auteurs groupaient sous le terme de Silicoflagellés à la fois les Dictyochales (Chrysophycées) et les Ébriales (Dinophycées).

● *Isochrysophycidées*

Dans cette sous-classe, les zoospores ont deux flagelles lisses de même longueur, sans mastigonèmes, et parfois un troisième appendice flagelliforme, l'haptonema. Souvent, d'ailleurs, cet haptonema est très réduit et prend la forme d'un simple petit bouton.

Certains auteurs donnent le nom d'Haptophycées à ces organismes. Nous y trouverons des formes solitaires, mobiles, unicellulaires et d'autres palmelloïdes, gélatineuses, coloniales. Parmi les formes unicellulaires, nous citerons *Prymnesium* et *Chrysochromulina,* flagellés surtout abondants en mer et en eau saumâtre. Chez *Prymnesium,* l'haptonema est de petite taille et atteint 2 à 4 µ de longueur. Cette Algue de moins de 10 µ de longueur a deux plastes jaunes ; elle est parfois très abondante dans les eaux saumâtres et contient une toxine hémolytique dangereuse pour les Poissons. On a observé dans les établissements piscicoles d'Israël de véritables hécatombes de Poissons à la suite d'une production extrême de *Prymnesium.* L'adjonction à l'eau des bassins d'une faible dose de sulfate d'ammonium suffit à les débarrasser de ce flagellé.

Chrysochromulina diffère de *Prymnesium* par son haptonema très long, beaucoup plus long que les deux flagelles et souvent enroulé en ressort à boudin. Comme chez *Prymnesium,* il y a deux plastes jaunes et le corps de la cellule est recouvert de minuscules écailles organiques (peut-être cellulosiques) à ornementation variée. On connaît plus de vingt espèces de *Chrysochromulina* dans le nannoplancton marin (Norvège et mer du Nord surtout) alors qu'il n'en existe qu'une seule en eau douce.

La grande famille des *Coccolithophoracées* groupe l'ensemble des flagellés unicellulaires à deux fouets lisses et à membrane ornée de petits corpuscules calcaires de forme définie appelés *coccolithes.* Plus de deux cents espèces de Coccolithophoracées vivent dans les mers tempérées ou chaudes où elles occupent une grande place dans le phytoplancton. F. Bernard a noté à l'embouchure du Sénégal une densité de trente millions de cellules par litre.

Les cellules flagellées libres de Coccolithophoracées sont sphériques ou ellipsoïdales avec deux flagelles lisses et souvent un très court haptonema en forme de petit bouton. Le corps cellulaire est recouvert d'une membrane plus ou moins gélatineuse portant de petites écailles structurées (cellulosiques) qui servent de base à un anneau ou un disque calcaire de forme variée (coccolithe). La cellule présente en outre deux plastes pariétaux

▲ ***De gauche à droite :*** **Phaeothamnion polychloris** ***(× 1 230) ;*** **Ochromonas hovassei** ***(× 1 400) ;*** **Synura uvella :** ***une colonie, plancton d'eau douce (× 670) ; détail d'une écaille siliceuse (× 9 000).***

▼ ***De gauche à droite :*** **Mallomonas tonsurata,** ***espèce d'eau douce (× 1 200) ;*** **Dinobryon sertularia,** ***espèce coloniale dulçaquicole (× 750) ;*** **Pseudokephyrion latum,** ***espèce du nannoplancton (× 2 400).***

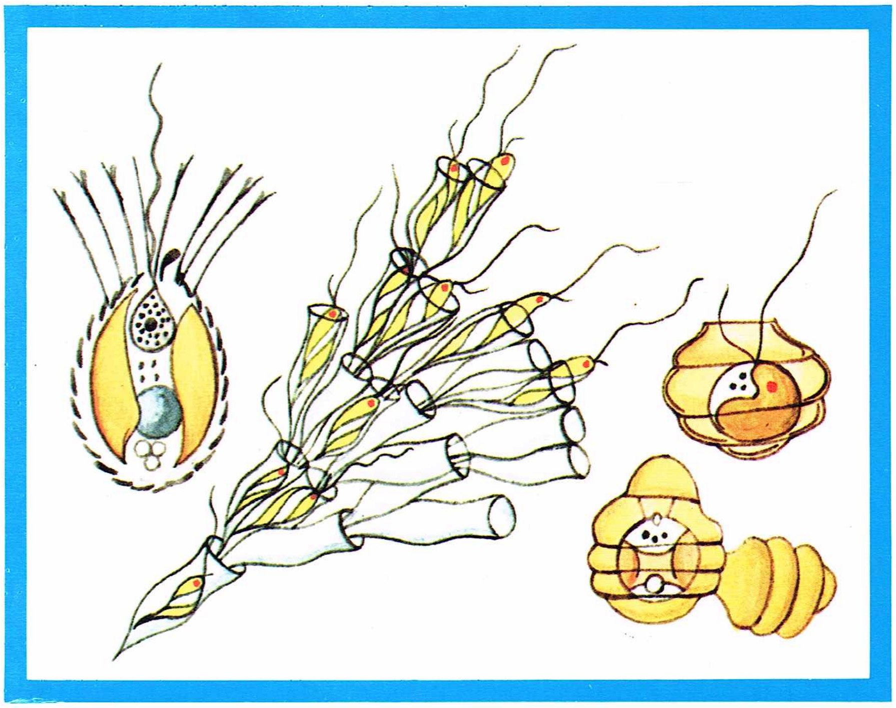

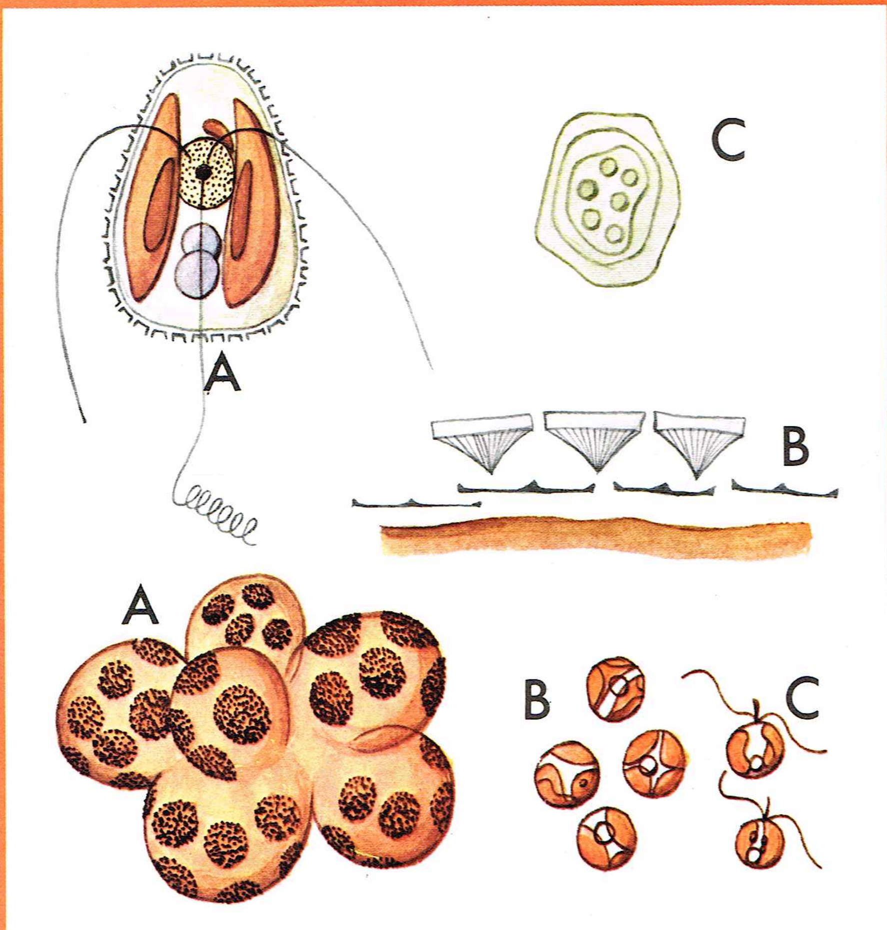

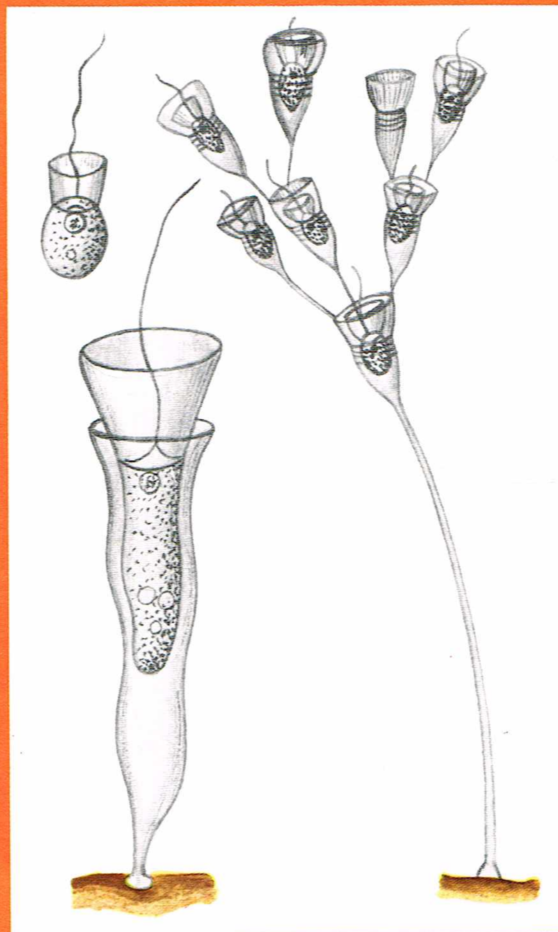

▲ *Ci-dessus,* Chrysochromulina strobilus, *espèce marine. A - Cellule avec deux plastes munis de pyrénoïde, deux flagelles égaux et un très long haptonema (× 4 300). B - Coupe de la paroi de la cellule (× 70 000). C - Coupe transversale de l'haptonema (× 100 000). [D'après M. Parke et I. Manton.] En bas,* Phaeocystis pouchetii, *forme coloniale immobile du plancton marin nordique. A - Colonie gélatineuse (× 255). B - Détail grossi montrant quatre cellules. C - Zoospores avec deux flagelles et un haptonema très court (× 1 050). [D'après Lagerheim et Kornmann.]*

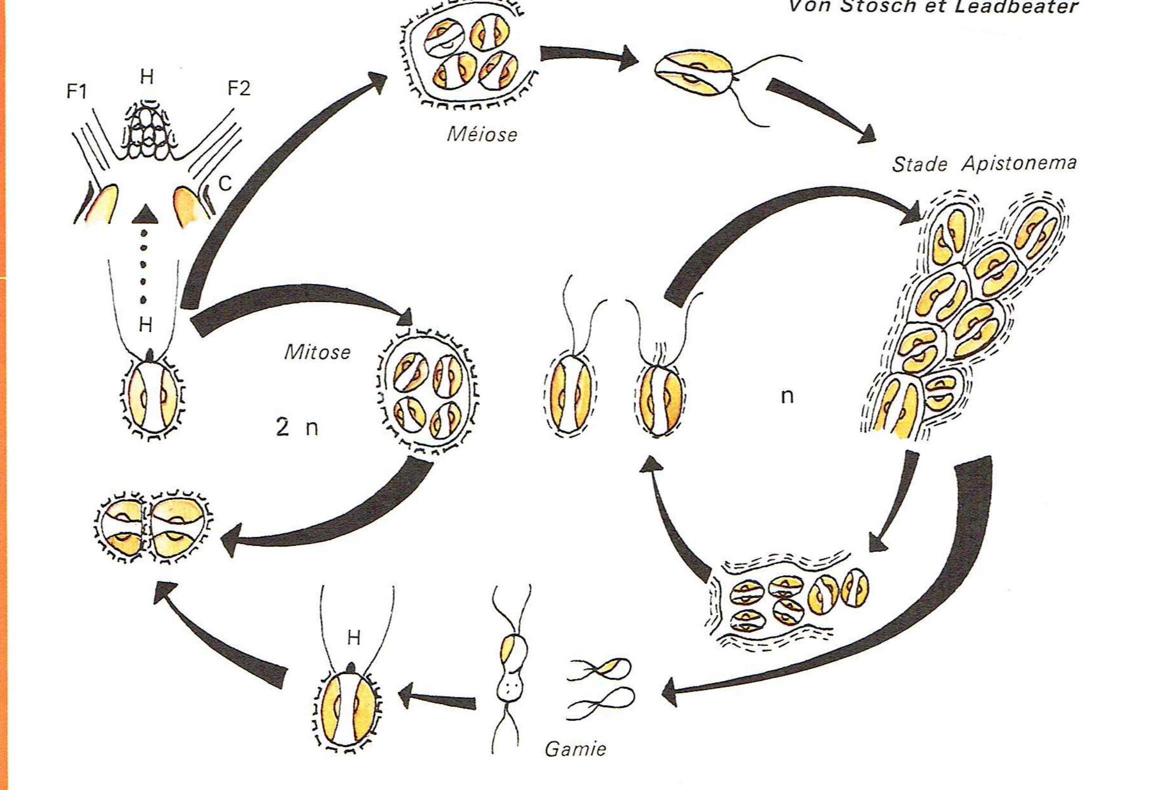

*Cycle d'*Hymenomonas carterae, *d'après Von Stosch et Leadbeater*

▶ *En haut à gauche, détail plus grossi de l'apex du stade flagellé libre, montrant l'haptonema très réduit (H) recouvert de petites écailles organiques ; coccolithes calcaires (C) ; flagelles (F 1, F 2).*

bruns avec chacun un pyrénoïde. Souvent un gros globule de chrysolaminarine est placé sous le noyau. L'appareil de Golgi est bien visible en microscopie électronique; c'est lui qui, dans ses saccules, construit les coccolithes et leurs écailles. Dans une espèce, *Hymenomonas* (ou *Syracosphaera*) *carterae,* nous avons une alternance entre une phase immobile, à filaments rampants ramifiés haploïdes (à *n* chromosomes, c'est le stade *Apistonema*), et une phase mobile, unicellulaire à deux fouets et haptonema réduit et des coccolithes (phase *Hymenomonas* diploïde à 2 *n* chromosomes). Les *Apistonema* ont une membrane formée de plusieurs couches d'écailles organiques analogues à celles qui servent de base aux coccolithes. Ces filaments donnent des zoospores asexuées et des gamètes avec ou sans haptonema et toujours des écailles sans coccolithes. Chez *Coccolithus pelagicus,* la phase mobile a de minuscules cristaux carrés de calcite, deux fouets et un haptonema : c'est un *Crystallolithus,* et la phase immobile a encore des coccolithes, mais de forme bien différente, en double disque percé au centre (placolithe).

Les nombreuses espèces de Coccolithophoracées se reconnaissent à la forme de leurs coccolithes et à leur disposition sur la cellule. Les coccolithes des cellules mortes tombent au fond des mers et, si le calcaire n'est pas dissous, s'accumulent dans les vases. Les géologues savent depuis longtemps que les craies sont en majeure partie formées par des coccolithes du nannoplancton des mers secondaires.

Le genre marin *Phaeocystis* abondant dans le plancton de la Manche, de la mer du Nord et des mers froides forme des thalles gélatineux sphériques ou irréguliers atteignant 2 à 3 millimètres. A la périphérie de la gelée sont disposées de petites cellules arrondies à un ou deux plastes jaunes. Ces grosses colonies donnent des zoospores du type *Prymnesium* avec petit haptonema et revêtement de fines écailles.

● *Craspédomonadophycidées*

Cette sous-classe, très homogène, renferme surtout des formes incolores, sans plastes, à nutrition phagotrophique. Il s'agit toujours d'organismes unicellulaires, solitaires ou coloniaux, libres ou fixés. Ces organismes, appelés aussi Craspédomonadines ou Choanoflagellés, sont caractérisés par la présence d'une collerette cytoplasmique tronconique qui surmonte l'apex de la cellule et entoure un très long flagelle axial. Ce dernier est lisse, dépourvu de mastigonème. En microscopie électronique, on voit que la collerette est formée de tentacules allongés, avec chacun quelques microfibrilles longitudinales; des ponts cytoplasmiques réunissent les tentacules entre eux, formant une sorte de cage. Le noyau est antérieur et surmonté d'un appareil de Golgi. Ce type de cytologie rappelle vivement celui des choanocystes des Éponges : même genre de flagelle, même structure de la collerette, même position de l'appareil de Golgi. Les différences sont minimes : chez les Éponges, le noyau est médian ou basal et les petites mitochondries sont dispersées dans le cytoplasme et non accolées au noyau; le mode de nutrition est également différent. Chez les Craspédomonadines, les proies, Bactéries ou petites Algues, sont entraînées par le mouvement flagellaire et collées sur la collerette, puis sont « léchées » par une langue pseudopodiale qui se forme à la base de la collerette, et enfin sont incluses dans une vacuole digestive.

Quels sont les arguments qui permettent de placer ces organismes incolores parmi les Chrysophycées? Il existe un genre marin avec une seule espèce, *Stylochromonas minuta,* qui est une véritable Craspédomonadine fixée par sa base, mais qui possède deux plastes pariétaux jaune-brun. Les genres *Microsportella* et *Pseudomicrosportella* renferment aussi des plastes. Ces genres sont malheureusement incomplètement connus, mais ils présentent, semble-t-il des caractères à la fois communs avec les Chrysophycées et typiques des Craspédomonadines.

Les Choanoflagellés véritables ont aussi une certaine ressemblance avec le genre *Pedinella* où la collerette est remplacée par une couronne de tentacules. Enfin, chez les Craspédomonadines, nous trouvons toute une série de structures coloniales qui n'existent que chez les Chrysophycées : arbuscule des *Codonosiga,* logettes emboîtées des *Polyoeca* (rappelant les *Dinobryon*), colonies gélatineuses à cellules réunies par des cordons gélatineux des *Sphaeroeca* (rappelant les *Uroglena*).

La sous-classe des Craspédomonadophycidées ne renferme qu'un seul ordre, celui des *Monosigales,* avec environ vingt-cinq genres et cent cinquante espèces, tant marins que dulçaquicoles.

Citons quelques genres : *Monosiga,* à cellule solitaire, libre; *Desmarella,* à colonie libre linéaire, de quatre ou huit individus; *Sphaeroeca,* à colonie gélatineuse libre. Tous ces genres sont dépourvus de logette et nagent dans le plancton, mais un grand nombre d'autres genres sont protégés par une thèque, parfois à structure très complexe. Citons les *Salpingoeca,* solitaires fixées sur les Algues, les *Stephanoeca,* les *Pleurosiga* du nannoplancton marin, à logettes ressemblant à des cages. Les *Polyoeca* sont aussi fort curieux avec leurs logettes pédonculées, disposées en arbuscule et fixées par leur base sur des Algues marines.

Le grand intérêt des Craspédomonadines tient à leur ressemblance, d'un côté avec les cellules des Éponges, de l'autre avec les Chrysophycées; il est donc plausible de supposer que les Spongiaires, par l'intermédiaire des Craspédomonadophycidées, ont des ancêtres communs avec les Chrysophycées et les Chromophytes, et tirent donc leur origine du règne végétal.

◀ ***Ci-contre à droite :*** **Monosiga brevicolis,** ***espèce solitaire marine (× 2 000), montrant le flagelle entouré de sa collerette, le noyau médian surmonté d'un parabasal (corps de Golgi) et la vésicule contractile basale.*** **Salpingoeca lefevrei** ***(× 1 500), forme à logette, fixée sur les Algues d'eau douce.*** **Polyoeca dichotoma** ***(× 1 400), forme coloniale marine fixée. (D'après Boucaud-Camou.)***

DIATOMOPHYCÉES

Les Diatomées sont des Algues unicellulaires solitaires ou coloniales qui possèdent comme tous les Chromophytes des plastes bruns renfermant de la chlorophylle a et de la chlorophylle c, du β carotène et des xanthophylles abondantes et variées, fucoxanthine, diadinoxanthine et diatoxanthine. Leurs réserves sont constituées surtout par des matières grasses et de la chrysolaminarine, polysaccharide appelé aussi chrysose ou leucosine.

Par ces caractères, les Diatomées forment avec les Phéophycées, les Chrysophycées et les Xanthophycées un ensemble très cohérent. Cependant elles se distinguent des autres classes par leur membrane bivalve imprégnée de silice (ou mieux d'opale, silice hydratée). Cette logette bivalve est appelée *frustule.* Ce frustule forme une boîte minuscule coiffée d'un couvercle débordant.

Structure du frustule

Le frustule bivalve présente deux types fondamentaux : il peut avoir l'aspect d'une boîte cylindrique très aplatie évoquant le plus souvent un poudrier *(Diatomées centriques),* ou bien être de forme allongée, rappelant une boîte à chaussures, mais à contour elliptique ou lancéolé et non rectangulaire *(Diatomées pennées).*

Les deux valves, fond et couvercle de la boîte, sont agrémentées de délicates sculptures, pores, stries, aiguillons, épines. Cette ornementation très fine, très régulière, confère aux Diatomées une singulière beauté. Elle n'est bien visible que chez les frustules « préparés », c'est-à-dire traités par les acides (ou par grillage) qui, débarrassant la valve de toute la matière organique, laissent apparaître les détails de l'ornementation.

Chaque valve présente une *plaque valvaire.* Celle-ci est constituée le plus souvent par deux fines lamelles parallèles, réunies entre elles par de petits piliers ou de petites cloisons qui divisent ainsi l'espace libre en minuscules chambres ou alvéoles. Les alvéoles sont ouverts vers l'extérieur par un pore qui perce la lamelle supérieure et, vers la base, par une zone criblée qui la sépare de l'intérieur de la cellule. Ces fins détails de structure ne sont en général visibles qu'en microscopie électronique. En microscopie optique, on ne distingue que des ponctuations, des côtes assez larges ou de fines stries. Ces ornements, en microscopie électronique, se révèlent comme des alvéoles ou des pores alignés ou groupés.

Ces deux valves, supérieure et inférieure, sont raccordées l'une à l'autre par des bandelettes ou ceintures qui forment l'épaisseur de la boîte. Il y a toujours au moins une ceinture par valve, mais souvent il s'y ajoute des ceintures secondaires imbriquées. L'ensemble de ces ceintures forme le *connectif.* Chez certaines espèces, la plaque valvaire est doublée par des cloisons perforées

▶ *Coupe schématique transversale du frustule de* Navicula, *Diatomée pennée biraphidée : C 1, C 2, ceintures intercalaires ou bandes connectives; R 1, R 2, raphés des valves supérieure et inférieure; N 1, N 2, nodules médians; NP, nodule polaire de la valve supérieure; V 1, V 2, plaques valvaires supérieure et inférieure avec stries.*

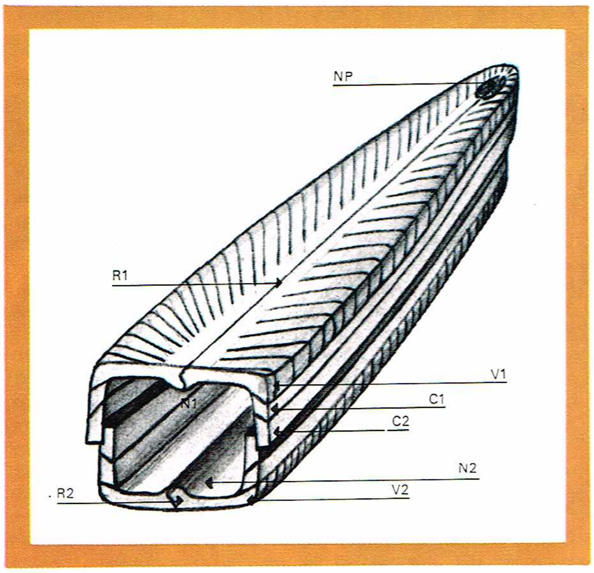

parallèles. Enfin d'autres espèces ont des crêtes saillantes qui renforcent la face interne de la plaque.

Chez les Diatomées centriques, le frustule a un contour circulaire ou polygonal avec une ornementation de stries ou de ponctuations ordonnées suivant un système rayonnant. Chez les pennées à frustule allongé, l'axe médian est marqué par un *raphé* ou un *pseudo-raphé,* et l'ornementation est bilatérale symétrique par rapport à cet axe. Le raphé est une fente longitudinale axiale qui n'existe que chez les Diatomées pennées. On y observe trois *nodules,* petits renflements globuleux internes de la valve : un nodule médian ou central, deux nodules terminaux ou polaires; le nodule central est percé d'un petit canal qui fait communiquer les deux branches du raphé. Ce type de raphé, qui caractérise la famille des Naviculacées, se trouvera modifié chez certaines Diatomées pennées. Dans le genre *Denticula,* le raphé reste axial mais il se transforme en tube creux fendu sur toute la longueur vers l'extérieur, tandis qu'il communique avec l'intérieur de la cellule par une série régulière de gros pores : c'est alors un *« canal-raphé »* ou mieux un *canal raphéen*. Chez *Epithemia,* les deux branches du canal sont déviées latéralement vers le bord de la valve et prennent ainsi l'aspect d'un V très ouvert. Chez les *Nitzschia,* ce canal raphéen sera tout entier situé sur un des bords de la valve. Enfin, chez les *Surirella* et *Campylodiscus,* le canal raphéen fera le tour complet de la valve et sera entièrement marginal.

Cytologie

Les Diatomées ont un noyau central entouré de dictyosomes (corps de Golgi), de mitochondries, de vacuoles, de corps physoïdes, d'inclusions huileuses et de plastes. En général, chez les Diatomées centriques, les plastes sont nombreux, pariétaux, discoïdes. Chez les pennées, le plus souvent, il y a un ou deux plastes, plus ou moins lobés avec des pyrénoïdes sur la face interne. Les plastes, en microscopie électronique, sont du même type que ceux des Chrysophycées et formés de lamelles à trois thylacoïdes.

Le raphé met le cytoplasme en contact avec l'extérieur; par cette fente sort une traînée muqueuse qui permet d'abord l'adhésion de la cellule sur le substrat puis son déplacement grâce à l'action de fibrilles longitudinales situées près du raphé et ayant les mêmes propriétés que les fibres contractiles des muscles lisses (hypothèse de Drum et Hopkins, 1966). Une chose est sûre : seules les Diatomées pennées à raphé ou canal raphéen peuvent se déplacer. Ainsi les Diatomées à raphé droit avancent ou reculent en ligne droite ou brisée, tandis que les *Cylindrotheca,* à canal raphéen tordu en hélice, se meuvent en tournant comme une vis dans le sens de l'hélice du raphé. Un des spectacles les plus curieux, au microscope, est donné par le déplacement des colonies de *Bacillaria :* les cellules pressées les unes contre les autres se déplacent individuellement en glissant le long de leurs voisines, mais restent cependant en contact par leurs extrémités; ainsi la colonie se meut en se déployant ou en se refermant de façon imprévisible.

Reproduction

Les Diatomées se reproduisent par voie sexuée ou asexuée. La reproduction asexuée, végétative, se fait par bipartition de la cellule. Le noyau se divise et chaque noyau fils emporte avec une partie du cytoplasme une des valves de la cellule maternelle; cette valve régénère dans sa partie *intérieure* une nouvelle valve. Ainsi, à chaque division, une des cellules filles diminuera de taille. Lorsque la diminution des dimensions des cellules atteindra une valeur limite, la reproduction sexuée se déclenchera. Les cellules deviendront des gamétocystes et donneront des gamètes. Leur fusion produira un zygote de grande taille qui prendra le nom d'*auxospore* après sécrétion d'un frustule, et ainsi sera rétablie la taille

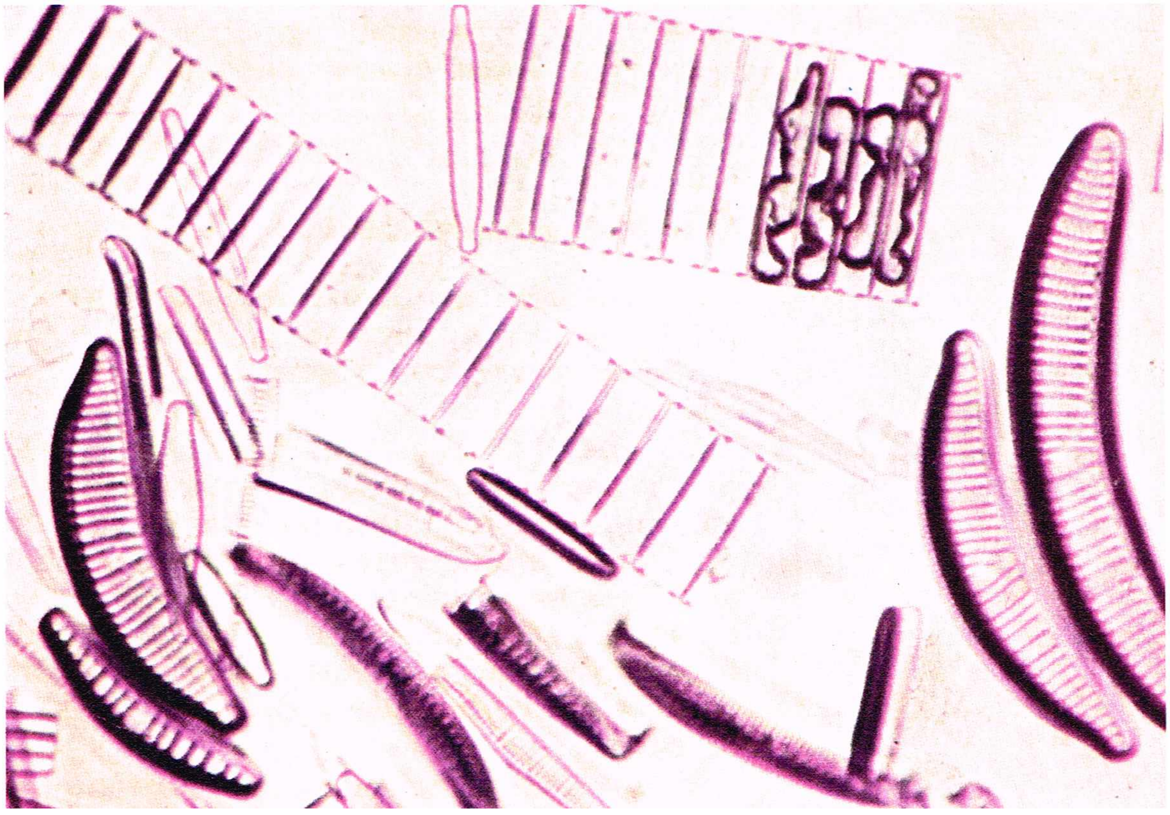

Archives I.G.D.A.

▶ *Frustules de Diatomées du phytoplancton d'eau douce.*

normale de l'espèce. Remarquons cependant que, chez de nombreuses Diatomées, les frustules des cellules filles sont susceptibles d'élongation et rattrapent à chaque division la dimension primitive.

La reproduction sexuée est différente chez les Diatomées centriques et chez les Diatomées pennées.

Chez les centriques, il y a oogamie; les cellules femelles, après réduction chromatique (passage de 2 *n* chromosomes à *n* chromosomes), donnent une ou deux oosphères. Les cellules mâles, après méiose (réduction chromatique), produisent quatre gamètes uniflagellés. Leur flagelle est pourvu de mastigonèmes mais a une structure particulière : sa coupe transversale montre qu'il possède bien les neuf couples de fibrilles périphériques, mais les deux fibrilles centrales font défaut.

La fusion du gamète mâle et de l'oosphère produit un zygote qui grossit, s'entoure d'un frustule et se transforme en auxospore.

Chez les pennées, les cellules se transforment en gamétocystes après réduction chromatique, chaque cellule donne un ou deux gamètes à *n* chromosomes, gamètes amiboïdes sans flagelles, et par fusion isogamique ou anisogamique se formeront un ou deux zygotes qui produiront des auxospores de grande taille.

La classe des Diatomées renferme plus de cent cinquante genres et huit à dix mille espèces dont les deux tiers vivent dans les eaux marines. Nous diviserons la classe en deux sous-classes : les Centrophycidées avec les Diatomées centriques et les Pennatophycidées avec les Diatomées pennées.

● *Centrophycidées*

Les valves de ces Diatomées sont circulaires, polygonales ou elliptiques, avec une ornementation radiale. Les Centrophycidées sont pour la plus grande partie des Diatomées marines; on peut y distinguer trois ordres : les *Coscinodiscales,* Diatomées circulaires, en disque plat ou en cylindre court, sans corne ni protubérance; les *Rhizosoléniales,* Diatomées en cylindre allongé avec de nombreuses ceintures; les *Biddulphiales,* Diatomées à valve elliptique ou polygonale portant à chaque pôle ou chaque angle une protubérance ou un long aiguillon.

Coscinodiscales

Cet ordre groupe cinq ou six familles avec de nombreuses espèces. Citons simplement quelques genres : *Melosira* (marin et eau douce) où les cellules en courts cylindres forment des chaînes par superposition des frustules, valve contre valve; *Coscinodiscus* (avec près de cinq cents espèces marines) à cellules discoïdes isolées à ornementation très régulière d'aréoles disposées en séries radiales. Les *Cyclotella* sont des formes du plancton lacustre avec une valve à striation régulière sur le bord tandis que la partie centrale a une ornementation différente.

Planktoniella sol est une belle espèce planctonique marine qui a des valves circulaires comme les *Coscinodiscus* mais qui sont entourées d'une large couronne, expansion siliceuse servant sans doute à la flottaison. Chez *Actinoptychus,* la surface de la valve est gaufrée; elle est partagée par des rayons en secteurs réguliers, alternativement saillants et creux. *Asteromphalus,* à valve circulaire, présente une symétrie bilatérale : la surface aréolée est découpée en un petit nombre de secteurs égaux par des rayons saillants et épais; toutefois l'un de ces rayons est nettement plus étroit et détermine un axe de symétrie.

Le genre marin *Aulacodiscus* possède sur la surface valvaire arrondie des mamelons saillants disposés à la périphérie. *Arachnoidiscus* est une des plus belles Diatomées centriques par la régularité et la beauté de son ornementation qui rappelle celle des rosaces des cathédrales. Avec *Hemidiscus,* nous avons des Diatomées en forme de croissant ou de demi-cercle mais dont l'ornementation reste rayonnante.

Rhizosoléniales

Cet ordre, avec trois familles, renferme surtout des formes planctoniques marines. Le genre *Rhizosolenia* a

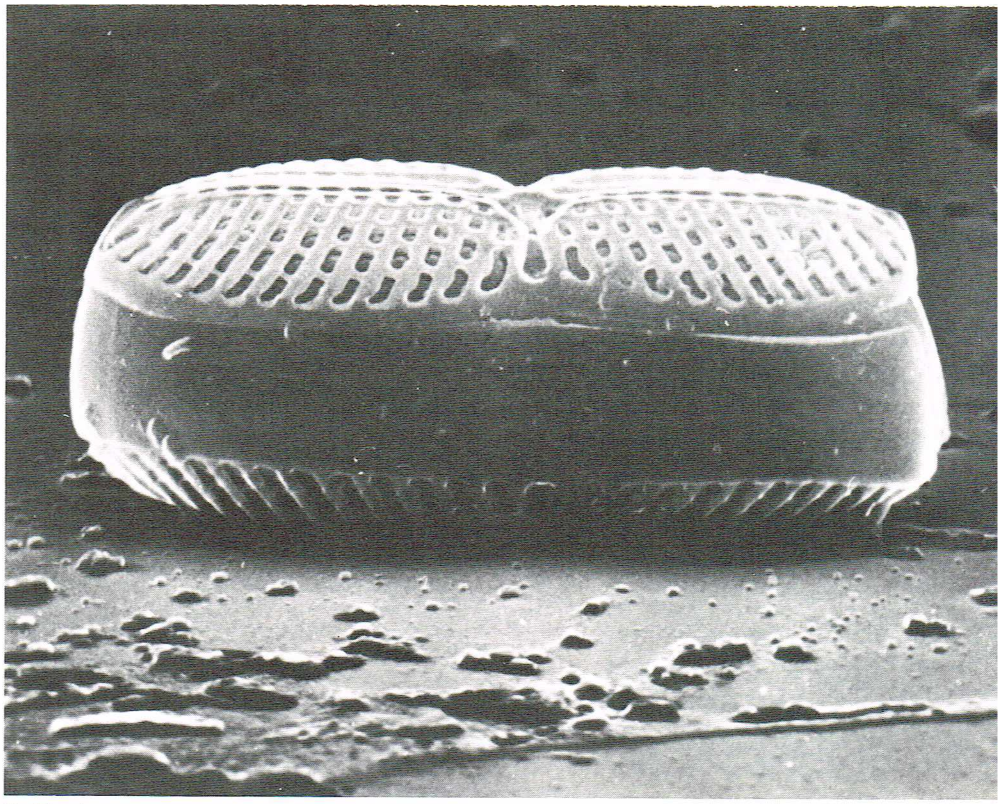

M. Ricard

▲ **Diploneis bombus.** ***Cliché pris au microscope électronique à balayage (environ × 5 000). Alors que le microscope électronique à transmission permet d'effectuer des observations sur des coupes ultra-fines, le microscope à balayage permet d'étudier les contours externes des objets.***

des cellules très allongées en cylindre terminé à chaque extrémité par une pointe, tout comme une ampoule pharmaceutique. La partie cylindrique est constituée par de nombreuses ceintures disposées en écaille. Chez certaines espèces, les cellules s'unissent par leur partie apicale conique et forment des colonies en courte chaîne.

Le genre *Chaetoceros* (avec plus de cent espèces marines) est aussi un élément fondamental du phytoplancton marin : les frustules sont elliptiques en vue valvaire, et chaque valve est prolongée par deux soies polaires fines et très longues. Les cellules se groupent en chaîne mais restent à une certaine distance l'une de l'autre, la liaison se faisant par les soies qui s'entrecroisent : ainsi la colonie prend l'aspect d'un minuscule mille-pattes.

Biddulphiales

Dans cet ordre se trouvent des organismes dont les frustules ont des valves polygonales (triangulaires, carrées, pentagonales, hexagonales) ou elliptiques mais toujours munies de protubérances ou d'appendices à leurs pôles. Parmi les trois familles de cet ensemble, nous citerons simplement les genres *Biddulphia* et *Triceratium* qui abondent dans le plancton marin. Les *Biddulphia* (cent espèces marines) ont des valves elliptiques dont les deux pôles se prolongent en corne; la vue de profil simule un bonnet de police. Les cellules sont solitaires ou en chaîne linéaire. Les *Triceratium* (trois cents espèces marines), comme l'indique leur nom, ont des valves triangulaires dont les angles se redressent en petites cornes. Mais, à côté de ces formes classiques, il y a des *Triceratium* à quatre, cinq, six, huit côtés. Ces deux genres sont solitaires ou coloniaux.

● *Pennatophycidées*

La sous-classe des Diatomées pennées groupe les espèces à valves allongées, elliptiques ou lancéolées, à symétrie bilatérale suivant un axe longitudinal indiqué le plus souvent par un raphé ou un pseudo-raphé (le pseudo-raphé n'est pas une fente mais une ligne qui interrompt simplement l'ornementation de la valve). Les Diatomées pennées sont très abondantes dans les eaux douces mais se rencontrent aussi en mer. Cette sous-classe sera divisée en quatre ordres suivant la structure du raphé : les *Diatomales* ou *Araphidées,* dont les deux valves sont dépourvues de raphé et présentent un pseudo-raphé; les *Eunotiales* ou *Brachyraphidées* (c'est-à-dire à raphé court), qui ont un raphé minuscule en forme de petite virgule placé aux extrémités de chacune des valves; les *Achnanthales* ou *Monoraphidées,* qui ont les deux valves différentes (la valve supérieure est sans raphé et a un pseudo-raphé tandis que la valve inférieure possède un véritable raphé); les *Naviculales*

▶ *A gauche :* **Asteromphalus hookeri.** *A droite :* **Surirella fastuosa.**

M. Ricard

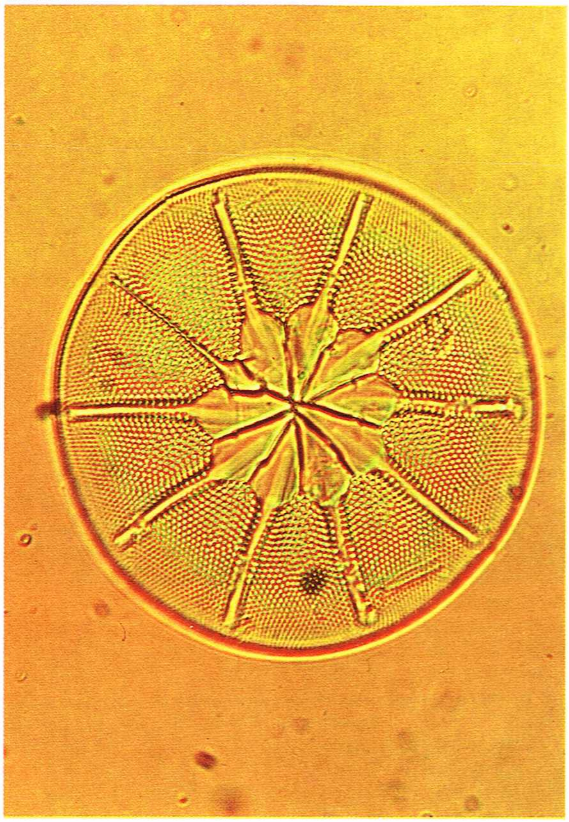

M. Ricard

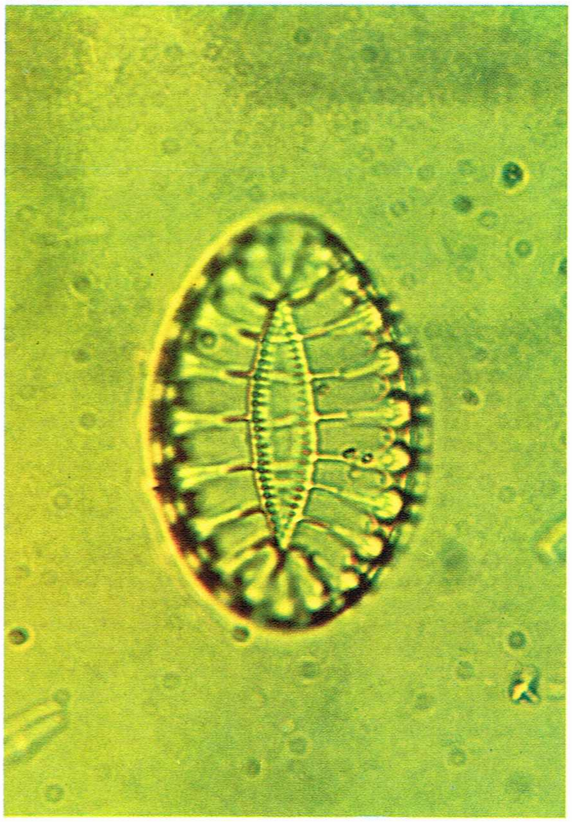

ou *Biraphidées,* dont les deux valves supérieure et inférieure sont identiques et pourvues chacune d'un raphé ou d'un canal raphéen.

Diatomales

Dans cet ordre, les formes sont allongées en navettes ou en aiguilles avec de fines stries coupées par un pseudoraphé axial. Ces Diatomées sont soit solitaires comme les *Synedra,* soit groupées en étoile comme les *Asterionnella* et *Thalassiothrix.* A côté de ces formes planctoniques lacustres ou marines, on trouve dans les eaux des ruisseaux les *Diatoma* dont les valves présentent des crêtes de renforcement et les *Fragilaria* en colonie rubannée (les cellules sont côte à côte, adhérant par leur surface valvaire). L'étude quantitative de *Fragilaria oceanica* dans le plancton marin s'est montrée utile pour prévoir l'abondance de certains Poissons. Une sardine, *Sardinella longiceps,* est liée à cette Diatomée coloniale et les pêches fructueuses de ce Poisson coïncident périodiquement, tous les trois ou quatre ans, avec une prolifération intense de *Fragilaria.* Les *Rhabdonema* marins ont des colonies du même type, fixées sur les grandes Algues. De plus, les valves ont un nombre important de ceintures et de fausses cloisons perforées parallèles aux plaques valvaires. Dans les lacs et les tourbières, les *Tabellaria* ont une structure analogue mais avec très peu de fausses cloisons; elles constituent des colonies en zigzag. Les *Grammatophora* marines ont le même type de groupement et deux fausses cloisons ondulées. Les *Licmophora* marins ont des cellules en massues groupées en éventail porté par un pied gélatineux. Ce pédoncule est souvent ramifié et forme ainsi un arbuscule dont chaque branche se termine par un éventail composé de dix à vingt cellules.

Eunotiales

Cet ordre ne renferme qu'un petit nombre d'espèces d'eau douce, solitaires ou en colonies rubannées (plus rarement en lignes brisées). Les cellules ont deux valves identiques toujours plus ou moins recourbées en banane ou en croissant. A chaque extrémité, un petit nodule est visible, et de lui part un raphé très court en forme de virgule. La surface de la valve est striée comme chez les Diatomales; les raphés sont difficilement distinguables en vue valvaire, mais bien visibles en vue de profil. Le genre *Eunotia* rassemble une centaine d'espèces.

Achnanthales

Cet ordre, comme le précédent, ne comporte qu'une seule famille. Il s'agit d'espèces fixées, souvent solitaires, marines ou dulçaquicoles. Ce sont des monoraphidées; la valve supérieure n'a pas de raphé, et seul un pseudoraphé marque l'axe longitudinal; la valve inférieure présente un raphé médian avec un nodule central bien marqué et des nodules polaires. Citons deux genres : les *Cocconeis* (cinquante espèces) à contour elliptique qui vivent fixés sur les grandes Algues et ressemblent à de minuscules cochenilles, et les *Achnanthes* (cent espèces) à valves lancéolées, portées par un pédoncule. Dans ces deux genres, les valves ne sont pas planes mais recourbées. Les deux valves sont très dissemblables aussi bien par la présence ou l'absence de raphé que par la diversité de l'ornementation.

Naviculales

Ces Diatomées biraphidées, dont les cellules ont deux valves identiques, rassemblent de nombreux genres et de très nombreuses espèces vivant dans les eaux douces, saumâtres ou marines. La structure du raphé permet de diviser l'ordre en deux sous-ordres : les *Naviculinées,* à raphé médian de type normal, et les *Surirellinées,* à canal raphéen communiquant avec l'extérieur par une fente et avec l'intérieur par des pores ou *points carinaux.* Parmi les genres les plus représentatifs des Naviculinées, citons tout d'abord le genre *Navicula* avec plus de mille espèces soit solitaires, soit en colonie dans des tubes gélatineux simples ou ramifiés. Les valves sont lancéolées, régulières avec un raphé médian et une fine ornementation de stries ou de points. Le même raphé rectiligne se retrouve chez les *Pinnularia* (deux cents espèces) particuliers à l'eau douce, à ornementation puissante à larges stries et à valves elliptiques allongées. Les *Stauroneis* présentent une zone transversale sans sculpture qui forme avec le raphé un dessin cruciforme. Les *Mastogloia* (cent cinquante espèces), abondants dans les eaux saumâtres et marines, ressemblent aux *Navicula* mais les

côtés de la valve ont de petites chambres caractéristiques. Le genre *Amphipleura* montre un raphé qui, aux deux extrémités, est encadré par un double bourrelet lui donnant l'aspect d'une minuscule fourche à deux dents; l'ornementation est particulièrement fine (quarante stries pour 10 μ) et constitue un excellent test pour vérifier la qualité et le pouvoir de définition des objectifs microscopiques à immersion. Chez les *Diploneis*, dont les valves ont souvent la forme d'un huit avec une constriction médiane très marquée, le raphé tout entier est encadré de deux bourrelets saillants. Nous trouvons ensuite des formes naviculoïdes où raphé et valve sont contournés en S : ce sont les genres *Gyrosigma* et *Pleurosigma*. Chez ces derniers, marins et saumâtres, les valves sont ornées de stries disposées suivant trois séries se coupant à 60° : ce sont d'excellents tests car seuls les bons objectifs microscopiques à sec, de grossissement × 40 à 6), permettent de distinguer ces stries. Les *Cymbella* et les *Amphora* (plus de deux cents espèces surtout marines) présentent des valves en croissant et un raphé recourbé en C. Chez les derniers, la valve est très bombée et les parties connectives fort larges.

Les *Gomphonema* (une centaine d'espèces d'eau douce) sont des formes solitaires fixées par un pédoncule gélatineux ramifié. Le raphé est médian mais la valve est hétéropolaire : le pôle antérieur est large, et le pôle postérieur, pôle de fixation, est étroit : l'aspect est celui d'un minuscule sarcophage égyptien. La vue de profil (vue connective) montre aussi un aspect hétéropolaire.

Les *Amphiprora* (surtout marins) ont une cellule fusiforme à valves bombées parcourues par une carène saillante en forme de S qui porte le raphé. La vue de profil a la forme d'un huit. Ce type de raphé rappelle le canal raphéen des Surirellinées mais il n'y a pas de pores carinaux. Les Surirellinées présentent divers types de structures du canal raphéen. Ainsi, chez les *Denticula*, la cellule fusiforme porte un canal raphéen médian. Chez les *Epithemia*, la valve est en croissant et le canal raphéen prendra la forme d'un V ouvert, dont la pointe est dans la partie médiane de la valve et les sommets aux deux pôles. Les *Rhopalodia* (eau douce et eau saumâtre) ont aussi des valves en croissant mais avec le canal raphéen rejeté sur le bord convexe.

Les *Nitzschia*, avec plus de cinq cents espèces marines ou dulçaquicoles, sont des Diatomées solitaires, de formes très variées mais ayant toujours un canal raphéen placé sur la marge de la valve. Les *Bacillaria*, dont nous avons décrit le mode curieux de déplacement, sont des *Nitzschia* en colonies rubannées.

Les *Cylindrotheca* (marins et saumâtres) ont des canaux raphéens tordus en hélice.

Chez les *Surirella* (plus de deux cents espèces surtout marines) le canal raphéen, porté sur une sorte d'aile, fait le tour complet de la valve elliptique tout comme chez les *Cymatopleura*. Chez ces derniers, la surface de la valve n'est pas plate, mais ondulée.

Les *Campylodiscus* (plus de cent espèces marines) rappellent les *Surirella* par leur canal raphéen entourant la valve, mais les frustules sont presques circulaires et tordus en forme de selle. L'ornementation est rayonnante mais avec une symétrie bilatérale.

Habitat et écologie

Les Diatomées sont presque aussi nombreuses dans les eaux douces que dans les mers. Celles qui sont dulçaquicoles peuvent même subsister dans des habitats où l'eau à l'état libre est en quantité très limitée, par exemple entre les feuilles des Mousses, dans les endroits humides, sur les écorces d'arbres, dans le sol, etc.

Les Diatomées constituent 90 % du phytoplancton marin. Elles sont en outre très abondantes sur la vase et sur les plages. Bien qu'elles soient microscopiques, on reconnaît leurs peuplements par l'enduit jaune-brun qu'elles forment sur les substrats. A côté des Diatomées planctoniques végètent des formes benthiques que l'on trouve dans la zone des marées (zone intertidale) et dans les eaux littorales peu profondes (étage infralittoral).

Que les Diatomées soient dévorées par les Animaux mangeurs de plancton ou qu'elles meurent de mort naturelle, les frustules siliceux des espèces benthiques ou planctoniques persistent et s'accumulent dans les fonds marins.

Ainsi les Diatomées jouent encore un rôle très important après leur mort. En effet, l'accumulation de leurs frustules a formé et forme toujours de puissantes couches de sédiments siliceux, dont la surface représente parfois des kilomètres carrés, et dont l'épaisseur peut atteindre plusieurs dizaines de mètres. Beaucoup de ces dépôts, qui remontent à des époques géologiques éloignées, joints à du sable, des marnes et d'autres substances organiques ou inorganiques, constituent un matériau léger et poreux que l'on nomme farine fossile, terre de Diatomées, tripoli, diatomite, kieselgühr, randannite, etc. La diatomite a de nombreuses applications industrielles par suite de sa résistance aux hautes températures, de son inertie vis-à-vis des acides et des bases, et de sa capacité d'absorber et de retenir cinq fois son propre poids de liquide. On s'en sert donc comme matériau réfractaire, isolant, abrasif, comme produit d'emballage, comme poudre absorbante en pharmacologie, comme excipient de poudres insecticides, comme substance filtrante, etc. L'un des usages les plus originaux est le renforcement, par de la farine fossile, des couleurs des panneaux de signalisation routière. On l'emploie également comme abrasif, pour le polissage notamment de l'argenterie. Comme matière inerte, on l'incorpore à la nitroglycérine pour fabriquer de la dynamite (on tend actuellement, pour ce dernier usage, à remplacer le kieselgühr par de la sciure de bois).

Les principaux gisements de terre à Diatomées se trouvent en France, dans l'Ardèche, la Haute-Loire, le Cantal, le Puy-de-Dôme et le Bassin parisien; il en existe également en Italie, en Sicile, puis en Allemagne, au Danemark, en Irlande, en Tunisie et en Californie (dans la zone de Santa-Maria en couches épaisses d'environ 1 000 m et à Lompoc avec des couches de 200 à 250 m pour des superficies de plusieurs km²).

Mais l'importance des Diatomées est surtout biologique. Ces Algues sont un élément fondamental du phytoplancton marin et servent de nourriture aux planctonophages. La richesse en vitamines A et B des huiles de foie de Poissons provient des réserves de lipides et de vitamines des Algues planctoniques. On a essayé, mais en vain pour l'instant, d'extraire directement ces vitamines des Diatomées.

Pour terminer, signalons que, selon certains auteurs, les Diatomées auraient contribué par leur accumulation dans les mers des temps géologiques à la naissance de gisements pétroliers.

M. Ricard

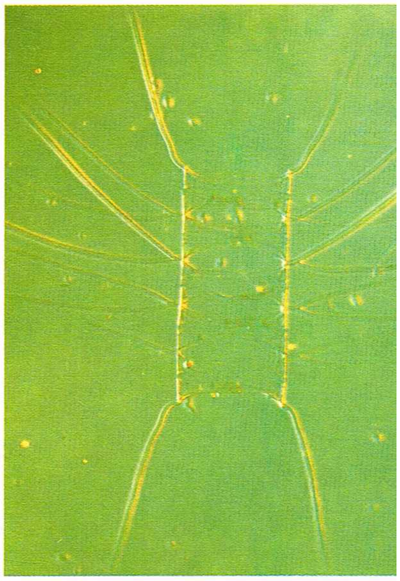

▲ **Chaetoceros decipiens.**

▼ ***Frustules de Diatomées centriques du phytoplancton de Port Townsend (États-Unis).***

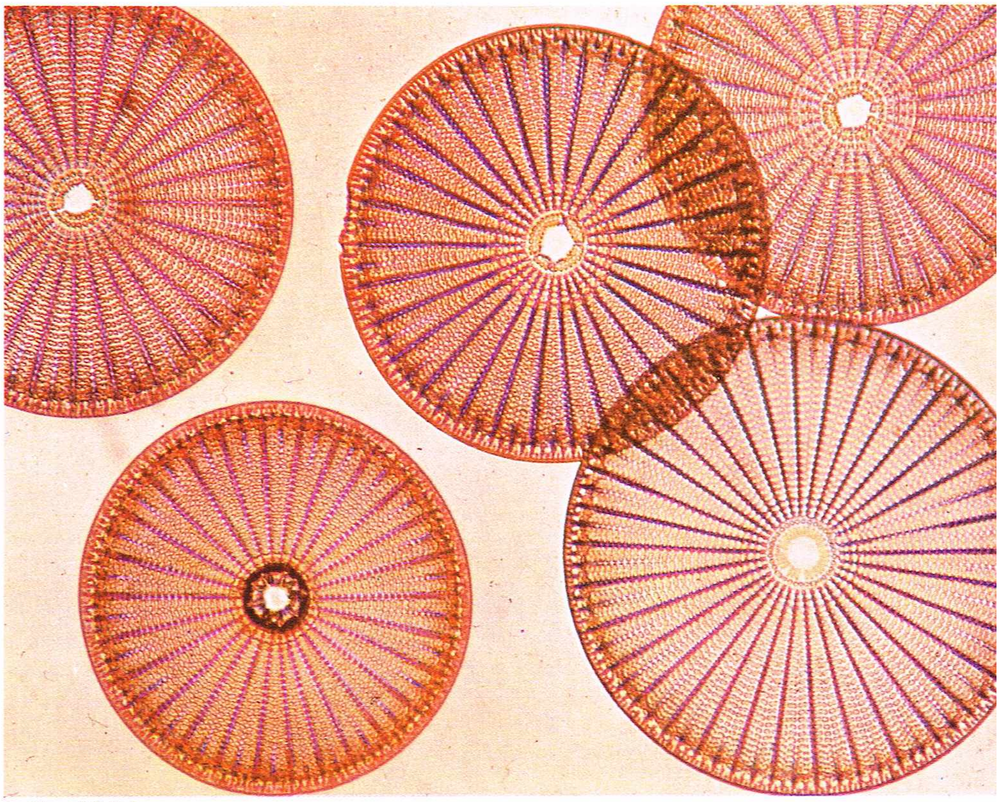

Archives I.G.D.A.

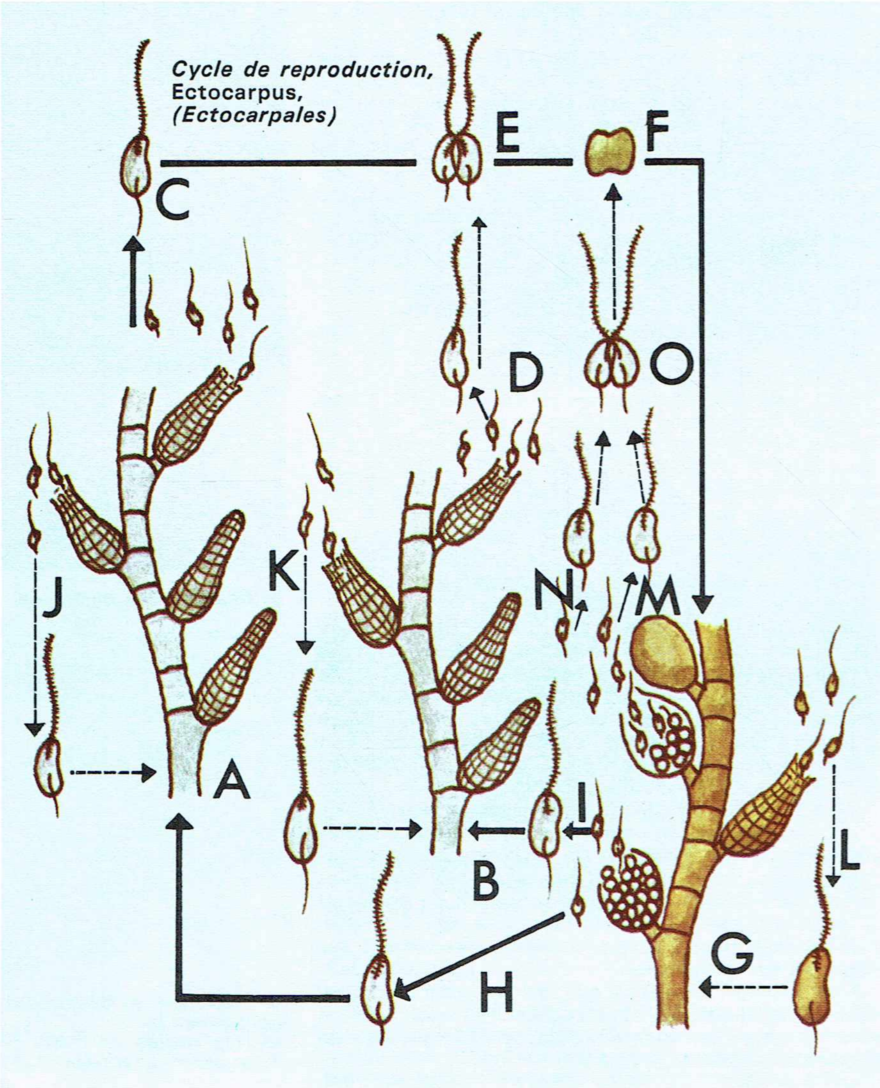

▲ A et B - Gamétophytes de sexes différents. C et D - Zoïdes équationnels se comportant comme des gamètes. E - Copulation. F - Zygote. G - Sporophyte. H et I - Zoïdes réductionnels se comportant comme des spores. J, K et L - Zoïdes équationnels se comportant comme des spores. M et N - Zoïdes réductionnels se comportant comme des gamètes. O - Copulation. Flèches simples : cycle digénétique normal; flèches en trait interrompu : modifications plus ou moins fréquentes de ce cycle. En brun : 2 n *chromosomes.*

PHÉOPHYCÉES

A l'exception de six genres, les Phéophycées, ou Algues brunes, sont marines. Si leur diversité est moins grande que celle des Algues rouges, puisqu'elles ne comprennent qu'environ 1 500 espèces, leur masse est considérable, notamment dans les mers froides et tempérées où certaines espèces atteignent plusieurs mètres de longueur.

Morphologie

Les Phéophycées ne sont jamais unicellulaires. Les formes les plus simples, et généralement les plus petites, consistent en des filaments ramifiés, composés d'une file unique de cellules *(Ectocarpus)*. Les formes plus évoluées sont constituées de cladomes formés d'un filament axial (structure uniaxiale) ou d'un faisceau d'axes (structure multiaxiale), à croissance illimitée, portant des rameaux courts latéraux, ou pleuridies; les thalles peuvent avoir une grande diversité de formes et atteindre des tailles importantes *(Desmarestia, Laminaria, Fucus)*. Quand les cellules du filament axial ne subissent que des divisions transversales, on dit que la structure est *haplostique,* tandis que lorsque des cloisons longitudinales s'ajoutent aux cloisons transversales, la structure est appelée *polystique*.

La croissance du thalle peut s'effectuer selon différents processus. Dans certains cas, quelques cellules localisées à différents niveaux du filament se divisent activement par des cloisonnements transversaux qui engendrent dans les deux directions opposées de nouvelles cellules : cette croissance est dite intercalaire (chez certaines Ectocarpales). Dans d'autres cas, les cellules qui se cloisonnent sont localisées à un seul niveau; les cellules engendrées vers le bas constituent le filament axial avec ses pleuridies et ses axes secondaires, tandis que, vers le haut, les cellules plus étroites forment un poil peu coloré dont l'extrémité distale se détruit progressivement : c'est là le type de croissance trichothallique (certaines Chordariales). Quand la croissance du thalle est assurée par les cloisonnements successifs d'une seule cellule apicale, on dit que la croissance est terminale (Dictyotales, Sphacélariales, Fucales). Chez certaines Phéophycées, la croissance est marginale; les thalles, étalés en éventail, sont constitués de filaments à structure polystique, soudés latéralement, dont la croissance simultanée peut être trichothallique (gamétophyte des *Cutleria*) ou terminale *(Padina,* sporophyte des *Cutleria)*. Enfin, la croissance peut être due à l'activité d'un méristème intercalaire (Laminariales).

Cytologie

Les parois cellulaires, pauvres en cellulose, sont riches en composés pectiques; parmi ceux-ci, l'algine, ou acide alginique, leur constituant essentiel, est extrait des Laminariales.

Les cellules, généralement uninucléées, sont pourvues de plastes de formes et de tailles diverses; des pyrénoïdes, de structure homogène, en forme de poire et suspendus aux plastes, sont présents chez plusieurs espèces généralement considérées comme peu évoluées (Ectocarpales, Chordariales, Dictyosiphonales). Les plastes sont formés de thylacoïdes groupés par trois. La coloration brune de ces Algues est due à la présence de divers caroténoïdes, la fucoxanthine en particulier; ceux-ci masquent les pigments verts constitués par les chlorophylles a et c.

Les produits du métabolisme sont essentiellement formés par un polyholoside, la laminarine, et par un polyalcool, le mannitol. Il n'y a jamais de glucides sous forme de grains figurés, mais parfois des lipides en gouttelettes huileuses. Le cytoplasme renferme, surtout au voisinage du noyau, de petits globules réfringents colorables, comme les vacuoles, par les colorants vitaux : ce sont des physodes, riches en substances diphénoliques.

Reproduction

Les cellules reproductrices des Phéophycées sont, en principe, des cellules nageuses, ou zoïdes; ceux-ci possèdent deux flagelles d'inégale longueur, insérés latéralement, dont seul l'antérieur est pourvu de mastigonèmes.

Les zoïdes sont produits dans des cystes de deux types différents : les uns, pluriloculaires, cloisonnés en petites logettes qui émettent ensuite chacune un zoïde équationnel; les autres, uniloculaires, dont le contenu divisé après méiose et sans formation de parois cellulaires produit des zoïdes réductionnels, donc, en principe, à n chromosomes.

Dans la mesure où l'on connaît le comportement de ces zoïdes, on les nomme gamètes s'ils copulent, ou spores s'ils germent sans copulation; les cystes qui les produisent sont alors respectivement des gamétocystes ou des sporocystes.

A l'exception des Fucales, toutes les Phéophycées, que l'on qualifie de Phéosporophycidées, ont, en principe, un cycle digénétique. Les individus haploïdes portent des gamétocystes pluriloculaires générateurs de gamètes équationnels *(n* chromosomes*)* qui copulent entre eux et donnent des zygotes (2 n chromosomes). Chaque zygote se développe en un individu diploïde portant des sporocystes uniloculaires, générateurs de spores réductionnelles (n chromosomes) qui se développent en de nouveaux individus haploïdes.

Ce cycle digénétique simple où les individus haploïdes sont des gamétophytes, et les individus diploïdes des sporophytes, peut présenter diverses complications qui ont été révélées par des cultures en laboratoire, et dont nous ne donnerons que quelques exemples : chez de nombreuses espèces, les deux sortes d'individus (gamétophytes et sporophytes) portent, outre les cystes qui les caractérisent (gamétocystes ou sporocystes), des

sporocystes pluriloculaires dont les spores équationnelles redonnent des individus identiques à ceux qui les ont produits ; il arrive aussi que les zoïdes méiotiques issus des cystes uniloculaires, au lieu d'engendrer des individus haploïdes, se comportent comme des gamètes : ils copulent entre eux et donnent naissance à de nouveaux sporophytes diploïdes. On rencontre de telles déviations, qui compliquent singulièrement le cycle digénétique, chez de nombreuses espèces et surtout chez les Ectocarpales, les Chordariales et les Dictyosiphonales ; cependant certaines d'entre elles ne semblent se manifester que dans des conditions particulières de l'environnement.

Les gamètes, de potentialités différentes, peuvent être morphologiquement semblables ou non entre eux. Chez les *Ectocarpus,* ils proviennent de gamétocystes pluriloculaires dont les logettes sont de même taille : les gamètes sont isogames. Chez d'autres Ectocarpales *(Giffordia secunda),* les gamètes sont de tailles différentes ; les gamètes mâles proviennent de gamétocystes pluriloculaires à petites logettes, et les gamètes femelles de gamétocystes pluriloculaires à grandes logettes, si bien qu'on peut distinguer des gamétocystes mâles et des gamétocystes femelles : dans ce cas, il y a anisogamie. Cette anisogamie peut être plus prononcée : chez les Cutlériales, les gamétocystes mâles sont divisés en de nombreuses petites logettes produisant chacune un petit gamète mâle, et les gamétocystes femelles comportent des logettes beaucoup plus grandes et peu nombreuses. Chez les Dictyotales, les gamétocystes mâles, cloisonnés en de très nombreuses petites logettes, émettent des gamètes mâles à un seul flagelle, tandis que chaque gamétocyste femelle ne renferme qu'un volumineux gamète sans flagelle, ou oosphère, incapable de se mouvoir activement : dans ce cas, il y a oogamie.

Dans les sporocystes uniloculaires, il peut y avoir aussi réduction du nombre des spores (Cutlériales, Dictyotales).

Les gamétophytes produisent généralement soit des gamètes mâles, soit des gamètes femelles (espèces dioïques) ; les gamétophytes mâles et femelles, parfois de formes non identiques (Laminariales), sont le plus souvent indistincts morphologiquement.

Bien que le schéma de l'alternance stricte d'un gamétophyte et d'un sporophyte présente parfois, comme nous l'avons vu, certaines modifications, on peut dire que les Phéosporophycidées ont un cycle digénétique. Si chez

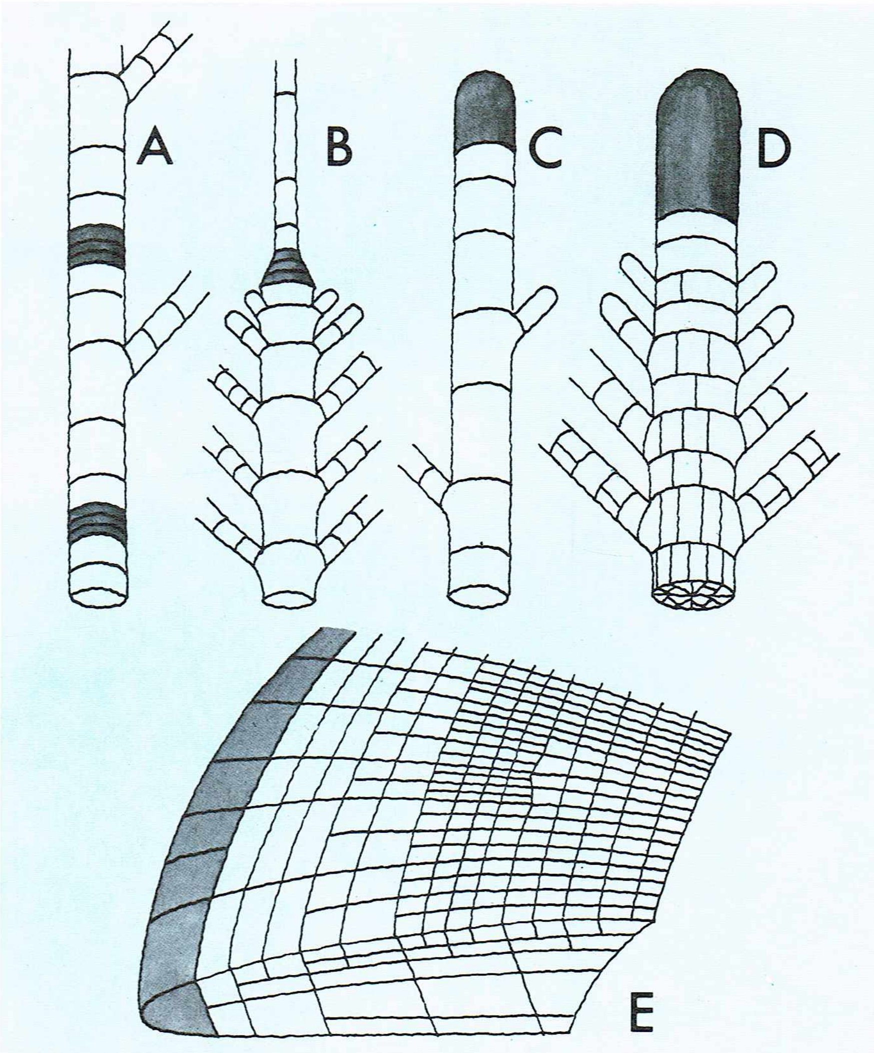

▲ *Type de croissance et structure du thalle des Phéophycées. A à C - Structure haplostique. A : croissance intercalaire. B : croissance trichothallique. C : croissance terminale. D et E - Structure polystique. D : croissance terminale. E : croissance marginale. En gris : cellules en voie de division.*

Ph. G. Trouillet - Jacana

◀ **Fucus vesiculosus,** *Phéophycée particulièrement abondante dans la zone des marées.*

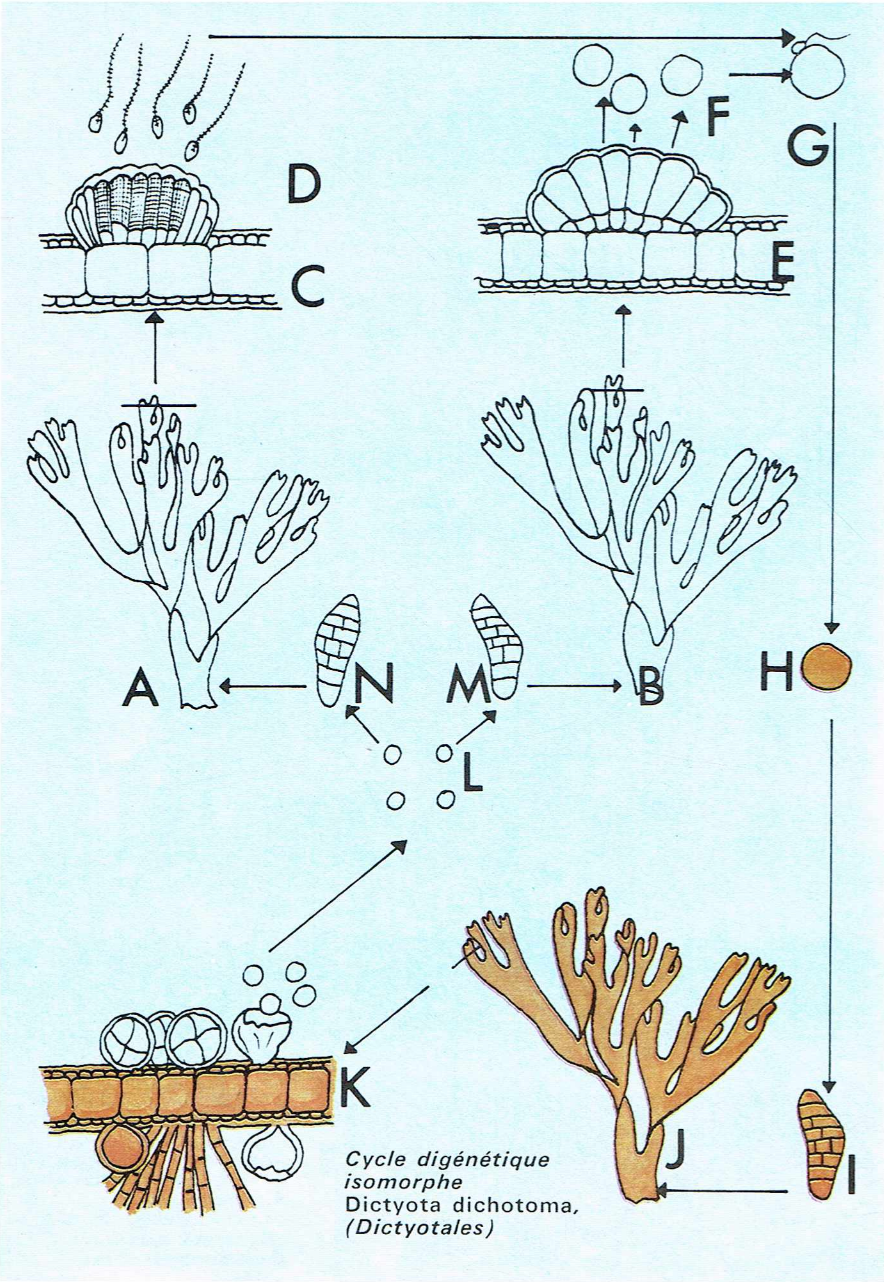

Cycle digénétique isomorphe
Dictyota dichotoma, (Dictyotales)

▲ *A - Gamétophyte mâle. B - Gamétophyte femelle. C - Coupe transversale dans le gamétophyte mâle montrant un groupe de gamétocystes cloisonnés en nombreuses logettes. D - Gamètes mâles. E - Coupe transversale dans le gamétophyte femelle montrant un groupe de gamétocystes renfermant chacun un seul gamète femelle (oosphère). F - Oosphères. G - Copulation. H - Zygote. I et J - Sporophyte, jeune et adulte. K - Coupe transversale dans le sporophyte montrant des sporocystes dont le contenu se divise, après méiose, en quatre spores. L - Spores. M et N - Jeunes gamétophytes mâle et femelle. En brun : 2 n chromosomes. (D'après Thuret.)*

certaines d'entre elles gamétophyte et sporophyte sont morphologiquement identiques (cycle isomorphe; *Dictyota*), chez d'autres les deux générations sont nettement dissemblables, l'une des phases (très généralement le gamétophyte) pouvant être microscopique et passant donc inaperçue dans la nature (cycle hétéromorphe; Laminariales).

Contrairement aux Phéosporophycidées, le cycle des Fucales ne comprend qu'une seule génération. Leur thalle, toujours de structure évoluée, est diploïde et porte des gamétocystes dans lesquels les gamètes se forment après méiose. La copulation des gamètes mâle et femelle, par oogamie, produit un zygote à 2 *n* chromosomes qui donne naissance directement à un nouvel individu diploïde. Un tel cycle, que l'on peut rapprocher de celui des Animaux, est monogénétique. Il caractérise les Fucales qui sont des Cyclosporophycidées.

CLASSIFICATION

La classe des Phéophycées est divisée en deux sous-classes : les Phéosporophycidées, à cycle, en principe, digénétique, et les Cyclosporophycidées (avec l'unique ordre des Fucales), à cycle monogénétique.

● *Phéosporophycidées*

Elles groupent onze ordres qui se distinguent par la structure et le mode de croissance de l'appareil végétatif, par la nature de l'alternance de générations (iso- ou hétéromorphe) et enfin par le type de la reproduction sexuée (par planogamie iso- ou anisogame, ou par oogamie).

Ectocarpales

Cet ordre renferme des Algues peu différenciées, composées de filaments unisériés, ramifiés, à croissance intercalaire.

Les gamétophytes et les sporophytes sont morphologiquement semblables. Il y a isogamie *(Ectocarpus)* ou anisogamie *(Giffordia)*. Le cycle digénétique peut présenter diverses complications.

La famille des Ectocarpacées comprend de nombreux genres (*Pylaiella, Ectocarpus, Giffordia, Feldmannia,* etc.) bien représentés sur nos côtes atlantiques et méditerranéennes. Généralement épiphytes sur de grandes Algues, elles forment de fines touffes, brunâtres ou jaunâtres, fixées par des filaments qui rampent ou pénètrent à l'intérieur du substrat; quelques espèces, comme l'*Ectocarpus siliculosus,* peuvent atteindre une trentaine de centimètres de longueur. Parmi les très rares Phéophycées d'eau douce, signalons le genre *Bodanella,* connu seulement de quelques stations dans les lacs alpins, et le genre *Pleurocladia,* assez bien représenté dans les lacs d'Europe, et qui forme des coussinets bruns de 1 mm de diamètre, épiphytes sur les tiges des plantes aquatiques.

Bien différentes d'aspect sont les Ralfsiacées, constituées de courts filaments dressés, plus ou moins coalescents latéralement, et qui s'étalent en croûtes discoïdes, brunes, étroitement appliquées sur les rochers. Comme les Ralfsiacées marines, l'*Heribaudiella* forme des croûtes minces sur les cailloux des torrents des Pyrénées et du Massif central.

Tiloptéridales

Ce petit groupe d'Algues, à l'aspect d'*Ectocarpus,* mais dont la fronde à croissance trichothallique peut devenir polystique à la base, n'est représenté que par une seule espèce sur les côtes françaises, *Tilopteris mertensii.* Le cycle de reproduction est mal connu.

Sphacélariales

Leurs thalles, très généralement à structure polystique, sont remarquables par leurs cellules apicales très distinctes, bourrées de physodes.

Chez la plupart des espèces, les frondes dressées sont des cladomes uniaxiaux à axe polystique portant des rameaux courts. Les thalles des *Sphacelaria,* de taille réduite, présentent des rameaux disposés de façon irrégulière *(Sph. fusca)* ou régulière *(Sph. plumula).* Les *Halopteris,* aux rameaux pennés et alternes, atteignent plusieurs centimètres de longueur. Chez les *Cladostephus,* parfois longs de 20 à 30 cm, l'axe cortiqué est garni, à intervalles réguliers, de verticilles de courts rameaux.

Gamétophytes et sporophytes sont morphologiquement semblables. La plupart des Sphacélariales sont isogames; seuls les *Halopteris* sont oogames. En outre, la plupart des *Sphacelaria* peuvent se multiplier végétativement par l'intermédiaire de sortes de boutures, nommées propagules, de formes diverses selon les espèces, qui se détachent du thalle et se développent ensuite en un nouvel individu.

Cutlériales

Ce petit ordre n'est représenté sur nos côtes que par deux genres : *Zanardinia* et *Cutleria*. Les thalles sont formés par la coalescence latérale de filaments à structure polystique, à croissance trichothallique.

Les gamétocystes mâles et femelles produisent des gamètes fortement anisogames.

Tandis que, chez les *Zanardinia,* l'alternance de générations est de type isomorphe, chez les *Cutleria,* les sporophytes, macroscopiques mais de forme et de structure

différentes de celles des gamétophytes, avaient été rapportés à un autre genre *(Aglaozonia)*. Le gamétophyte du *Cutleria multifida*, par exemple, est constitué de lames dressées, d'une vingtaine de centimètres environ, très ramifiées et à croissance trichothallique, alors que le sporophyte (dénommé *Aglaozonia parvula*) est un thalle de 3 à 4 cm, entièrement rampant, découpé et lobé, dont la croissance marginale s'effectue par une bordure de cellules initiales. L'alternance entre gamétophyte et sporophyte n'est pas toujours régulière : les gamètes femelles du *C. multifida* peuvent, par parthénogenèse, engendrer de nouveaux gamétophytes; d'autre part, les spores du sporophyte *(Agl. parvula)* peuvent se former sans méiose, donnant de nouveaux sporophytes.

Dictyotales

Bien qu'il comprenne une seule famille, cet ordre renferme des Algues de formes diverses. Chez les *Dictyota* et les *Dilophus*, la croissance du thalle s'effectue grâce à une cellule terminale unique donnant naissance à une fronde rubannée, ramifiée dichotomiquement; elle comporte une couche de grandes cellules internes enveloppées par une couche de petites cellules assimilatrices. Chez d'autres genres *(Padina, Zonaria)*, les thalles, constitués par la coalescence latérale de filaments à structure polystique, s'accroissent par le bord de la fronde étalée en éventail.

Les gamétocystes mâles ou femelles sont groupés en sores. Les gamétocystes mâles sont pluriloculaires et produisent de nombreux gamètes uniflagellés; les gamétocystes femelles sont uniloculaires, et chacun d'eux libère une unique oosphère immobile. Les zygotes sont formés par oogamie. Sur les sporophytes, les sporocystes uniloculaires, où s'effectue la méiose, ne produisent que quatre spores (tétraspores) dépourvues de flagelles. Gamétophytes et sporophytes sont identiques. L'alternance régulière de ces deux générations ne doit pas être toujours réalisée : dans la Manche, par exemple, le nombre de sporophytes du *Padina pavonia* est nettement supérieur à celui des gamétophytes; il est possible que les cellules mères des tétraspores donnent, par apoméiose, des tétraspores à 2 n chromosomes qui engendrent une nouvelle génération diploïde, ce processus pouvant se renouveler successivement plusieurs fois.

Scytosiphonales

Les Algues de cet ordre ont des frondes, à croissance d'abord trichothallique puis intercalaire, foliacées *(Petalonia)* ou cylindriques et tubuleuses *(Scytosiphon)*, ou encore vésiculeuses *(Colpomenia)*. Leurs cellules ne renferment qu'un seul plaste pariétal.

Les zygotes se forment par planogamie, iso- ou anisogame.

Des cultures en laboratoire ont montré que le cycle des Scytosiphonales, demeuré longtemps inconnu, présente des sporophytes morphologiquement différents des gamétophytes. Les sporophytes, plus réduits que les gamétophytes mais toutefois macroscopiques, sont constitués par des thalles rampants dont l'aspect, filamenteux ou en croûte, serait peut-être déterminé par les conditions du milieu (lumière, température, composition chimique, etc.). Le cycle nucléaire n'est pas encore élucidé.

Vraisemblablement en provenance du détroit de Behring, le *Colpomenia peregrina*, espèce voisine du *C. sinuosa* connu depuis toujours en Méditerranée, est apparu subitement vers 1905 sur nos côtes atlantiques (Vendée, Bretagne, Normandie) où il a provoqué des dégâts inattendus dans les huîtrières. Les thalles du *Colpomenia*, globuleux et creux, emprisonnent de l'air et forment ainsi des sortes de ballons atteignant jusqu'à 35 cm de diamètre. Ils peuvent se développer sur différents substrats (rochers, Algues fixées) mais aussi sur des supports non fixés comme les huîtres : constituant de véritables petits flotteurs, ils les entraînent vers le large. Cette apparition de la « voleuse d'huîtres » a provoqué une abondante littérature au début du siècle.

Chordariales

Cet ordre réunit plusieurs familles qui renferment des Algues d'aspects très divers. Les plus simples, de petite taille et presque toujours épiphytes, sont filamenteuses; leur appareil végétatif forme de petits disques rampants *(Myrionema)*, des coussinets hémisphériques *(Elachista, Myriactula)* ou des tubercules mamelonnés *(Leathesia)*. Les plus complexes, qui peuvent atteindre plusieurs décimètres de longueur, sont constituées de cladomes à axe haplostique unique *(Mesogloia, Liebmannia)* ou multiple *(Chordaria, Sauvageaugloia)* avec une garniture de pleuridies. Selon les genres, la croissance est trichothallique ou terminale.

Les gamètes copulent par planogamie isogame. Le cycle de reproduction des Chordariales est caractérisé par le fait que, contrairement au sporophyte qui est macroscopique, le gamétophyte est réduit à des filaments microscopiques (ou microthalles) qui passent inaperçus dans la nature : le cycle est donc digénétique, hétéromorphe. Ce cycle présente de nombreuses complications chez diverses espèces. La génération macroscopique ne s'observe dans la nature que durant quelques mois (généralement en été); pendant le reste de l'année, l'espèce subsiste à l'état microscopique en produisant plusieurs générations successives de microthalles avant que réapparaisse la génération macroscopique.

Sporochnales

Les Algues de ce petit groupe sont constituées de cladomes multiaxiaux. La croissance est assurée par une couche de cellules dont les divisions donnent au-dessous d'elles un faisceau d'axes haplostiques coalescents, entourés de pleuridies corticantes, et au-dessus une touffe de filaments simples pigmentés; tous les apex portent ces sortes de touffes de poils caractéristiques.

Les Sporochnales sont oogames. Leur cycle digénétique hétéromorphe comporte un gamétophyte microscopique,

F. Ardré - M.F. Magne

▲ **Pylaiella littoralis** ***(Ectocarpales, Roscoff).***

▼ **Padina pavonia,** ***Dictyotale abondante en Méditerranée.***

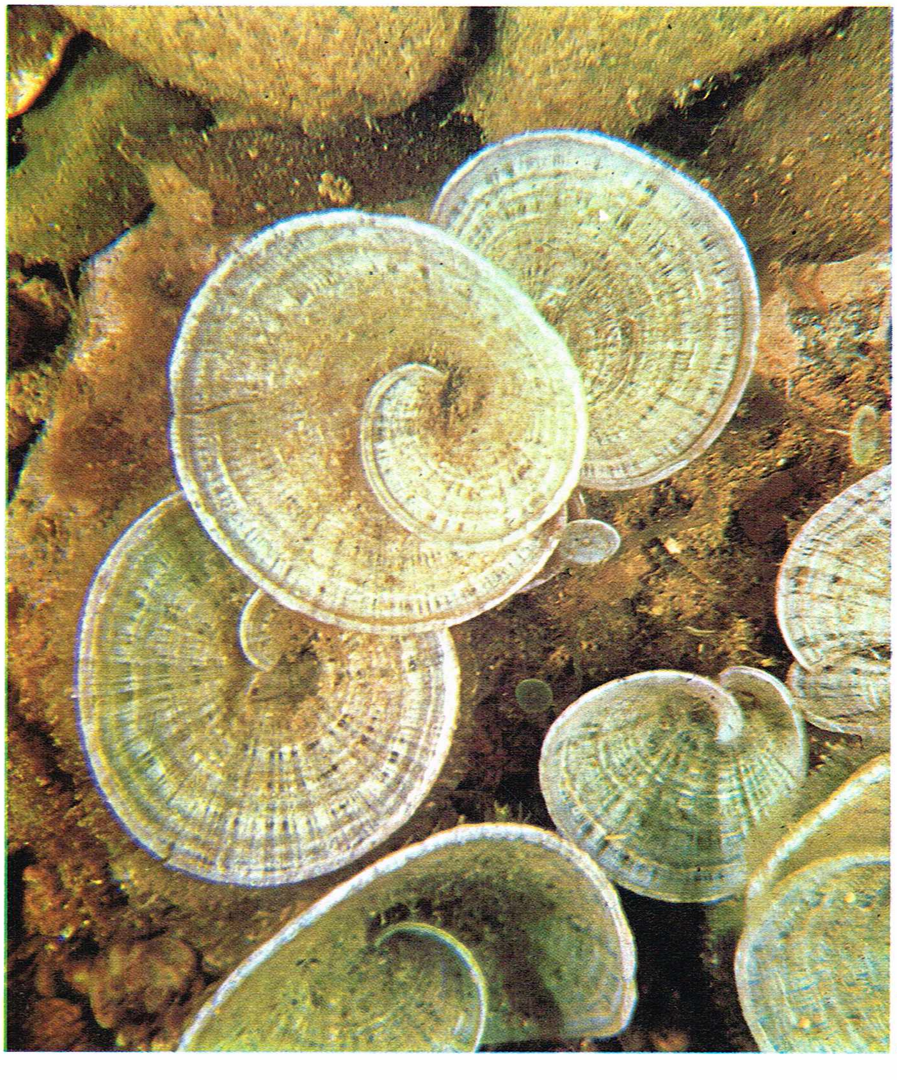

Fotosub

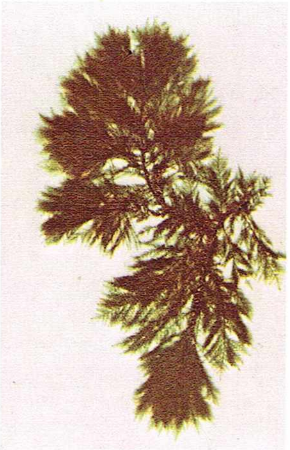

F. Ardré - M.F. Magne

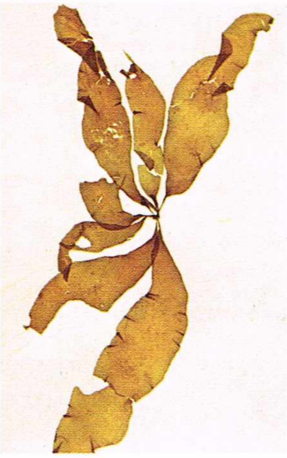

F. Ardré - M.F. Magne

▲ *Sphacélariales :* **Halopteris filicina** *(en haut). Scytosiphonales :* **Petalonia fascia** *(en bas).*

par conséquent invisible dans la nature, et un sporophyte pouvant atteindre plusieurs décimètres de longueur *(Carpomitra, Sporochnus, Nereia)*. Les Sporochnales, surtout répandues dans l'hémisphère Sud, vivent généralement en profondeur.

Desmarestiales

Ce sont des Algues de grande taille. Leur fronde est constituée d'un cladome uniaxial haplostique à croissance subterminale. L'axe, avec ses pleuridies, est enrobé dans un cortex complexe ; le filament, engendré au-dessus de la zone de croissance, se garnit lui aussi de pleuridies, donnant au thalle pendant l'hiver un aspect plumeux ; en été, lorsque la croissance a cessé, ce poil tombe.

Les frondes sont cylindriques, comme chez les *Arthrocladia,* ou plus ou moins aplaties, comme chez les *Desmarestia* dont certaines espèces atteignent 2 à 3 m de longueur. Ces grands individus représentent la génération sporophytique diploïde ; certaines cellules corticales se transforment en sporocystes uniloculaires qui, après méiose, libèrent des spores nageuses à n chromosomes. Ces spores germent directement en filaments microscopiques qui représentent la génération gamétophytique haploïde. Les gamètes mâles nageurs et les gamètes femelles immobiles, ou oosphères, sont produits sur les mêmes individus ou sur des individus différents ; l'oosphère restant souvent partiellement incluse dans son gamétocyste, la copulation par oogamie produit un sporophyte diploïde qui reste fixé sur le gamétophyte durant son développement. Ce cycle est donc digénétique, hétéromorphe.

Ces Algues, qui croissent à très basse mer ou en profondeur, sont largement distribuées dans les deux hémisphères et surtout dans les mers froides et tempérées.

Les *Desmarestia,* appelés « oseilles de mer », sont remarquables par leur extrême acidité (pH 1,8 à 0,78) ; ces acides sont contenus dans de grosses vacuoles spécialisées ; cette acidité serait due essentiellement à de l'acide sulfurique, et non pas à un mélange d'acide malique et citrique comme on l'avait supposé.

Dictyosiphonales

Cet ordre rassemble de nombreuses Algues réparties en plusieurs familles.

Les thalles sont caractérisés par une structure polystique et une croissance tout d'abord trichothallique qui devient rapidement intercalaire. La fronde adulte, qui peut atteindre plusieurs décimètres de longueur, présente divers aspects : elle peut être en cordon plein non ramifié *(Litosiphon),* en lame mince *(Punctaria),* en tube non ramifié *(Asperococcus)* ou ramifié *(Stictyosiphon, Striaria)*.

Il y a isogamie ou anisogamie. Le cycle digénétique de ces Algues comporte l'alternance de sporophytes macroscopiques diploïdes et de gamétophytes microscopiques haploïdes. Il présente souvent de nombreuses complications : plusieurs générations microscopiques peuvent se succéder avant que réapparaisse la génération macroscopique.

Laminariales

Les Laminariales sont remarquables par leurs formes si spéciales, leur abondance et leur taille qui, généralement, dépasse de beaucoup celle de toutes les autres Algues. Nombre d'entre elles font l'objet d'une exploitation industrielle.

Cet ordre, qui comprend cinq familles, est cependant très homogène. Toutes les Algues qui le composent sont caractérisées par leur organisation morphologique et anatomique complexe, leur reproduction sexuée par oogamie, leur alternance de générations entre un sporophyte diploïde atteignant souvent plusieurs mètres de longueur, et un gamétophyte haploïde microscopique.

A l'exception du genre *Chorda* qui représente à lui seul une famille (Chordacées), les Laminariales ont toutes un thalle massif, coriace, de forme caractéristique pour chaque espèce, mais dans lequel on peut schématiquement reconnaître un stipe plus ou moins long, fixé par sa base aux rochers grâce à des crampons et portant au sommet une lame, simple ou découpée en lanières.

Boubat - Top Réalités

▶ *Après une période de gros temps, quantité d'Algues sont arrachées des fonds rocheux et entraînées vers le littoral où elles sont ramassées.*

Les Laminariales présentent une structure anatomique complexe et des tissus différenciés. Chez plusieurs espèces, on peut distinguer un tissu cortical de petites cellules dont les plus externes sont pigmentées, tissu qui présente parfois des canaux remplis de mucilage, et un tissu médullaire formé de filaments longitudinaux de longues cellules dont, chez certaines espèces, les cloisons transversales sont percées de nombreuses perforations ; ces cellules, qui rappellent les tubes criblés du liber des plantes vasculaires, jouent sans doute, comme eux, un rôle dans la circulation des substances nutritives. L'accroissement en épaisseur se fait grâce à la division active des cellules corticales externes photosynthétiques. Durant toute la vie de l'Algue, la croissance en longueur, d'un type très particulier, est assurée par une zone méristématique localisée au point de jonction du stipe et de la lame (zone stipo-frondale), ce qui permet vers le bas l'allongement du stipe, et vers le haut l'accroissement de la lame.

Ces Algues de très grande taille constituent la génération sporophytique diploïde. Les sporophytes produisent uniquement des sporocystes uniloculaires ; ceux-ci, entremêlés de cellules protectrices stériles, sont groupés perpendiculairement sur la surface des thalles, formant des sores étendus, de couleur plus sombre que celle du reste du thalle. Les sores peuvent former un revêtement continu sur tout le thalle *(Chorda)*, mais ils sont en général localisés sur la lame *(Laminaria)* ou parfois sur de petites expansions latérales foliacées *(Alaria)*. Après méiose, les sporocystes uniloculaires libèrent des spores biflagellées (16 à 128 par sporocyste, selon les espèces) qui, après avoir nagé un certain temps, se fixent sur le substrat et germent en de courts filaments rampants plus ou moins ramifiés. Ces thalles microscopiques représentent la génération gamétophytique haploïde. Les spores d'un même sporocyste produisent un pourcentage égal de gamétophytes mâles et femelles, le sexe étant déterminé lors de la méiose. Les gamétophytes mâles portent de petits gamétocystes dont chacun émet un seul gamète nageur ; sur les gamétophytes femelles, parfois réduits à une seule cellule *(Saccorhiza)*, les

Claude Rives - Marina Cedri

▲ *Peuplement de* **Laminariales** *photographié en profondeur (Atlantique).*

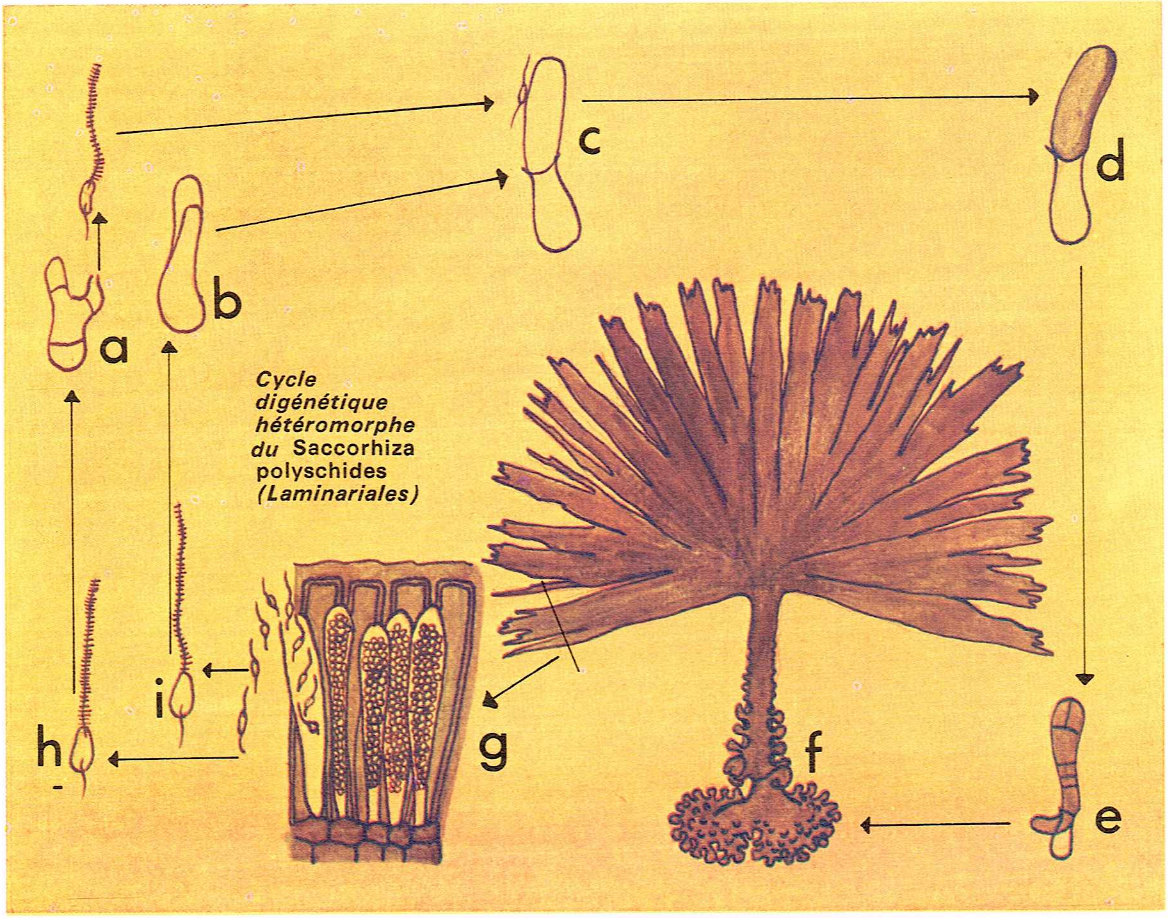

◀ *a. - Gamétophyte mâle (microscopique) avec deux gamétocystes dont l'un a libéré un gamète. b. - Gamétophyte femelle réduit à une seule cellule, le gamétocyste, qui contient le gamète femelle (oosphère). c. - Copulation, l'oosphère demeurant fixée à l'ouverture du gamétocyste femelle. d. - Zygote. e. - Germination du sporophyte. f. - Sporophyte (jusqu'à 5 m de longueur). g. - Coupe transversale dans le sporophyte montrant, entremêlés à des cellules protectrices stériles, des sporocystes uniloculaires dont le contenu se divise, après méiose, en de nombreuses spores, ensuite libérées. h et i. - Spores donnant l'une un gamétophyte mâle, l'autre un gamétophyte femelle. (En partie d'après des dessins de Sauvageau.) En brun : 2 n chromosomes.*

F. Magne

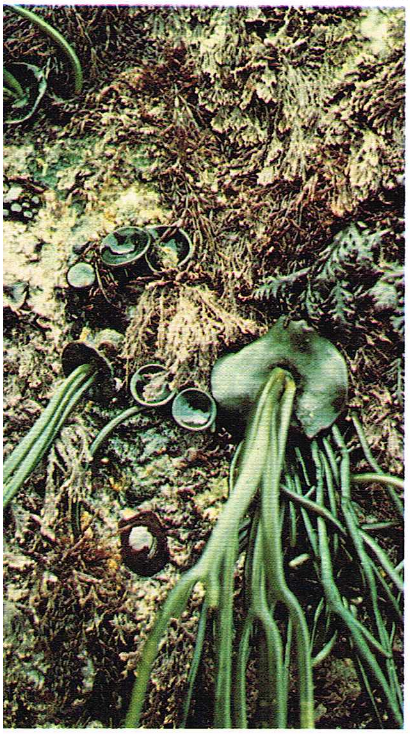

▲ Himanthalia. *Cette Fucale est particulièrement remarquable par son appareil végétatif réduit à une petite coupe, et ses réceptacles qui forment de longues lanières pouvant atteindre plusieurs mètres de longueur.*

Page ci-contre :
▶ *a. - Gamétophyte mâle. b. - Coupe transversale d'un réceptacle montrant la disposition des conceptacles mâles. c. - Détail d'un rameau portant des gamétocystes mâles qui libèrent des gamètes méiotiques. d. - Gamètes mâles. e. - Gamétophyte femelle. f. - Coupe d'un réceptacle montrant la disposition des conceptacles femelles. g. - Détail de quelques rameaux portant des gamétocystes femelles dont l'un contient huit gamètes méiotiques, ou oosphères. h. - Oosphères. i, j, k. - Copulation, zygote et germination d'un gamétophyte mâle. l, m, n. - Copulation, zygote et germination d'un gamétophyte femelle. En brun : 2 n chromosomes. (En partie d'après des dessins de Thuret.)*

gamétocystes contiennent chacun une seule oosphère; celle-ci ne sort pas totalement de sa logette et demeure fixée sur son ouverture. C'est là qu'un gamète mâle vient la féconder et que le zygote se développe immédiatement pour donner un nouveau sporophyte diploïde.

● Cyclosporophycidées

L'ordre des Fucales, à cycle monogénétique, constitue à lui seul la sous-classe des Cyclosporophycidées.

Fucales

Ce sont des Algues très généralement vivaces, de grande dimension, les plus grandes de nos côtes atlantiques après les Laminariales. Elles sont caractérisées par leur différenciation morphologique accentuée, l'absence d'une génération haploïde et la localisation de leurs organes reproducteurs dans de petites cavités, ou conceptacles.

Les thalles, constitués de tissus compacts et fermes, croissent aux dépens d'une cellule initiale unique située dans le fond d'une dépression apicale. Cette cellule a la forme d'un tronc de pyramide à trois côtés *(Himanthalia, Cystoseira, Sargassum)* ou à quatre côtés *(Fucus)*; par le cloisonnement de sa face inférieure, cette initiale engendre un tissu médullaire, tandis que les cloisonnements des faces latérales donnent des cellules qui forment un tissu cortical dont les assises les plus externes sont pigmentées. Les ramifications proviennent de la division longitudinale de la cellule initiale. Chez certaines Fucales *(Fucus, Cystoseira, Sargassum)* le tissu superficiel se creuse de nombreuses cryptes, d'où sortent des poils incolores. Chez certaines espèces, les thalles présentent des vésicules pleines de gaz *(Fucus vesiculosus, Ascophyllum, Sargassum)*.

La morphologie des Fucales peut être très complexe et même évoquer celle de plantes supérieures.

Les Fucales se reproduisent uniquement à l'aide d'organes sexués. Les organes reproducteurs des Fucales ont une structure très homogène. Ils sont logés dans de petites cavités plus ou moins sphériques, qui ressemblent beaucoup aux cryptes pilifères et qui, comme elles, sont creusées dans le tissu cortical, et communiquent avec l'extérieur par un orifice : ce sont les conceptacles. Ceux-ci sont généralement groupés dans des parties spécialisées du thalle que l'on nomme réceptacles. Dans certains genres, comme *Fucus* et *Pelvetia,* ce sont les extrémités des ramifications qui se différencient en réceptacles fertiles, renflés et remplis de mucilage, alors que, chez les *Sargassum* et l'*Himanthalia,* par exemple, les réceptacles produits durant la période de fructification s'individualisent beaucoup plus nettement du reste du thalle végétatif; ainsi les réceptacles de l'*Himanthalia,* en forme de lanières longues de 1 à 3 m, issues de l'appareil végétatif réduit à une petite coupe, sont particulièrement remarquables.

Selon les espèces, les thalles sont unisexués, comme chez les *F. vesiculosus, F. serratus, Ascophyllum, Himanthalia* (espèces dioïques), ou hermaphrodites, comme chez les *F. spiralis, Pelvetia canaliculata* (espèces monoïques), chaque conceptacle renfermant à la fois des gamétocystes mâles et femelles. La paroi des conceptacles est tapissée de filaments sur certains desquels naissent les gamétocystes. La cellule mère du gamétocyste mâle ne renferme qu'un seul noyau à 2 *n* chromosomes; après une méiose et quatre mitoses supplémentaires, soixante-quatre gamètes mâles biflagellés à *n* chromosomes sont produits. La cellule mère du gamétocyste femelle, elle aussi, est uninucléée et à 2 *n* chromosomes; après une méiose suivie d'une division mitotique, huit noyaux à *n* chromosomes sont ainsi formés; chacun de ces huit noyaux peut devenir celui d'un gamète femelle immobile et fonctionnel, l'oosphère; c'est le cas des *Fucus* où chaque gamétocyste femelle mûr contient huit oosphères; dans les autres genres de Fucales, il y a avortement d'une partie des huit noyaux haploïdes, de sorte que le nombre d'oosphères viables est inférieur à huit : quatre chez les *Ascophyllum,* deux chez les *Pelvetia,* et un seul chez les *Himanthalia* et *Cystoseira*.

La fécondation s'effectue après la sortie des gamètes mâles et des oosphères par les pores des conceptacles. Les gamètes mâles, très petits par rapport aux oosphères, sont attirés vers elles par leurs sécrétions. Chaque oosphère est ainsi entourée par une masse de gamètes mâles qui, par leurs mouvements flagellaires, la font lentement tournoyer sur elle-même, jusqu'au moment où l'un des gamètes mâles pénètre dans le cytoplasme de l'oosphère; son noyau vient ensuite fusionner avec le noyau de celle-ci. Le zygote à 2 *n* chromosomes ainsi formé par oogamie germe immédiatement en un nouvel individu diploïde.

Ainsi se trouve bouclé le cycle qui ne comporte qu'une génération diploïde : il est donc monogénétique diploïde, comme chez les Métazoaires.

Distribution et écologie

Les Phéophycées sont presque exclusivement marines. Parmi celles-ci, les Laminariales et les Fucales, seuls ordres dont il sera question ici, par la masse considérable qu'elles représentent, jouent un rôle particulièrement important; leurs thalles servent à abriter une faune nombreuse et variée et sont pour elle une source de nourriture.

Les Laminariales se rencontrent dans les mers froides et tempérées, mais, à la faveur des courants froids, elles peuvent s'étendre jusqu'à des régions subtropicales et même tropicales. Bien des genres sont caractéristiques de l'un ou l'autre des hémisphères. Si les *Laminaria* sont présents dans les deux hémisphères, ils ont essentiellement une distribution nordique et sont typiques, avec les genres *Agarum* et *Alaria,* de l'hémisphère Nord. Le Pacifique Nord est riche en genres qui lui sont propres : le genre *Undaria* paraît confiné à l'Asie, et de nombreux

F. Magne

▶ *Trois espèces de* Cystoseira. *A gauche :* C. granulata. *Au centre :* C. baccata. *A droite :* C. tamariscifolia. *(Roscoff.)*

genres comme *Postelsia, Nereocystis, Pelagophycus, Egregia* sont typiques de l'Amérique du Nord. Les Laminariales caractéristiques de l'hémisphère Sud appartiennent aux genres *Lessonia, Ecklonia* et *Macrocystis;* le genre *Ecklonia* est cependant connu dans l'hémisphère Nord, en Asie; les *Macrocystis,* abondants dans les eaux froides de l'hémisphère Sud, s'étendent, grâce au courant froid de Humboldt, le long de la côte Ouest de l'Amérique du Sud jusqu'à environ 10° de latitude sud, puis réapparaissent depuis la Californie jusqu'à l'Alaska; parmi les Laminariales, le *Macrocystis pyrifera* est l'espèce qui a la répartition la plus étendue, et, parmi les Algues, celle qui atteint les dimensions les plus grandes (jusqu'à 50 m).

Les Fucales sont largement répandues dans toutes les mers mais elles sont plus abondantes, en genres et en espèces, dans l'hémisphère Sud. Les *Fucus* ne sont localisés que dans l'hémisphère Nord, ne s'étendant pas, vers le sud, au-delà du Maroc, tandis que d'autres genres comme *Hormosira* (Australie, Nouvelle-Zélande, Tasmanie) et *Durvillea* (région subantarctique) sont propres à l'hémisphère Sud. Les *Turbinaria* et les *Sargassum* sont typiques des régions tropicales et subtropicales. Grâce à leurs vésicules pleines de gaz, certaines espèces de *Sargassum* flottent à la surface de l'eau, loin des côtes, dans l'Atlantique Nord (mer des Sargasses); elles ont perdu toute aptitude à se reproduire sexuellement mais se multiplient végétativement par fragmentation des thalles; cette masse flottante abrite une faune variée.

Loin d'être uniforme, le milieu marin présente une grande diversité qui se réfléchit sur la flore. Les facteurs physico-chimiques varient dans l'espace (dans le sens vertical et horizontal) et conditionnent la répartition de chaque espèce (qu'elle appartienne aux Algues rouges, brunes ou vertes).

Les Laminariales et les Fucales prédominent sur les côtes rocheuses. Dans le sens vertical, les conditions du milieu (telles que durée et fréquence de l'émersion, lumière [quantité et qualité], température de l'eau et de l'air, turbulence, salinité, teneur en oxygène) changent; les exigences physiologiques étant différentes selon les espèces, il en résulte une répartition verticale plus ou moins nette de celles-ci. Cet étagement des espèces peut se reconnaître jusqu'à la limite où elles pénètrent en profondeur, limite qui dépend de la transparence de l'eau, mais il est particulièrement évident dans la zone de balancement des marées où les conditions physico-chimiques changent rapidement, souvent même sur de faibles distances. Dans la Manche, par exemple, on rencontre successivement, depuis les niveaux des hautes mers, les peuplements des espèces suivantes : *Pelvetia canaliculata, Fucus spiralis, Fucus vesiculosus, Fucus serratus, Laminaria digitata, Laminaria hyperborea, Laminaria ochroleuca;* les Fucales sont soumises à des périodes d'émersion plus ou moins longues selon le niveau qu'elles occupent, le *Pelvetia* pouvant rester émergé durant plusieurs jours consécutifs, tandis que le *Fucus serratus* ne l'est que peu de temps, toutes les douze heures environ; les Laminariales sont essentiellement localisées en profondeur, la partie supérieure de leurs peuplements n'émergeant que lors des marées de vive-eau pendant un temps très court.

Les variations des facteurs physico-chimiques dues à diverses causes telles que la latitude ou des particularités locales déterminent la répartition horizontale de chaque espèce. L'aire de répartition du *Laminaria hyperborea,* par exemple, s'étend depuis l'Arctique jusqu'au Portugal, mais cette espèce disparaît dans le fond du golfe de Gascogne où l'insolation et les températures sont relativement élevées, pour ne réapparaître que plus à l'ouest où les remontées d'eau froide sont fréquentes le long du littoral. Signalons enfin que la répartition horizontale des espèces n'est pas immuable dans le temps mais qu'elle est susceptible de présenter des variations plus ou moins grandes.

Utilisation

Les grandes Algues brunes ont une importance directe pour l'homme dans divers domaines.

Dans l'alimentation humaine, ce sont surtout les Laminariales qui sont employées. Au Japon, après le nori qui est largement consommé, le kombu, préparé à partir de diverses espèces de *Laminaria (L. japonica, L. religiosa, L. angustata, L. ochotensis)* et d'*Undaria,* constitue

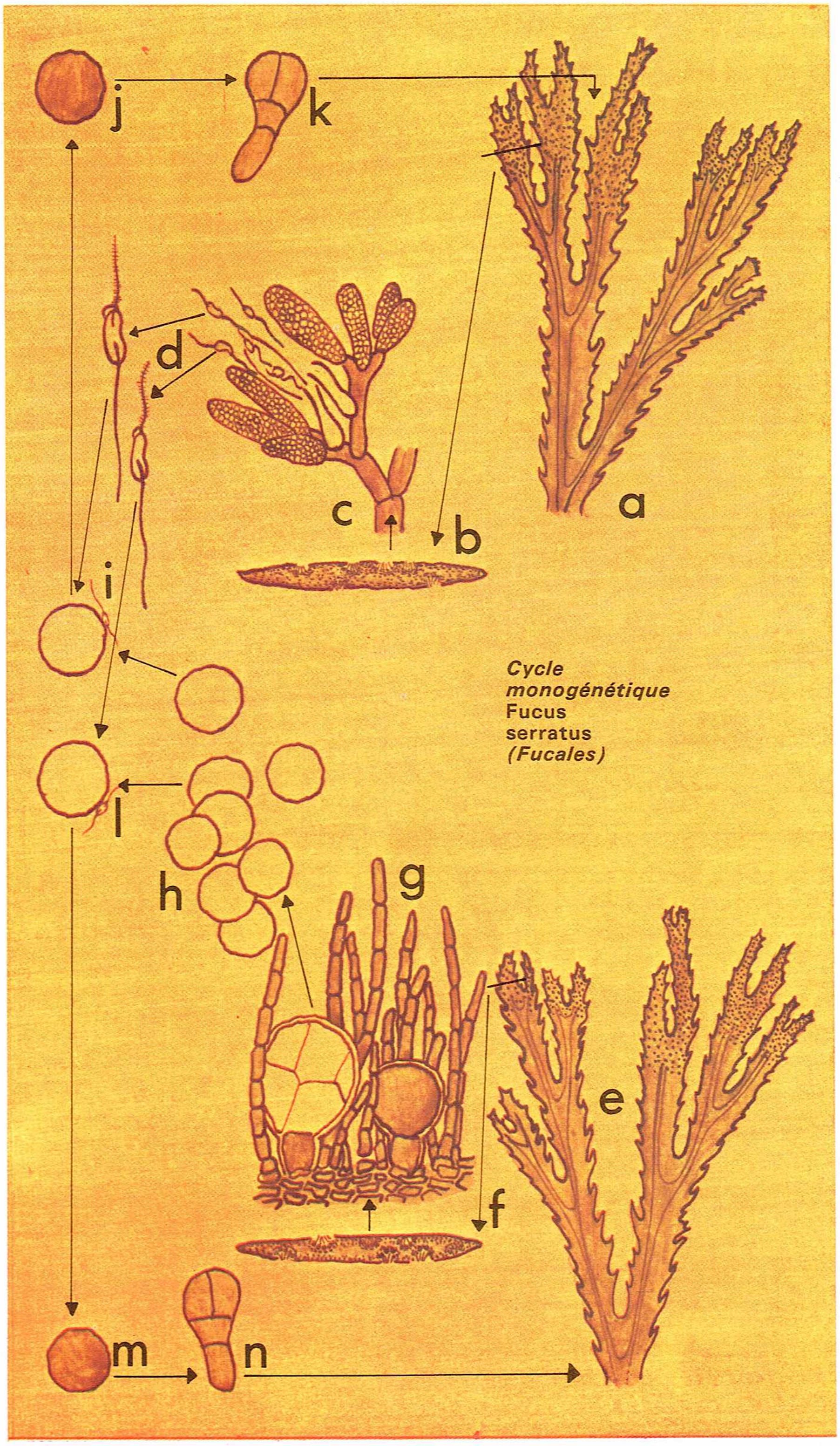

Cycle monogénétique* Fucus serratus *(Fucales)

aussi la base de divers plats nationaux. Non seulement récoltées dans leurs gisements naturels, ces Laminariales sont cultivées depuis longtemps par les Japonais, et plus récemment par les Chinois. Dans les endroits particulièrement favorables, les thalles peuvent atteindre 3 à 4 m de longueur et 20 à 30 cm de largeur en moins d'une année.

Employées à l'état frais ou séchées puis broyées pour en faire des farines, les Phéophycées, Laminariales et Fucales essentiellement, entrent dans l'alimentation des Animaux domestiques (volailles, porcs, bovins, moutons, chevaux) dans de nombreux pays d'Europe septentrionale, mais aussi en Amérique du Nord et bien entendu en Extrême-Orient.

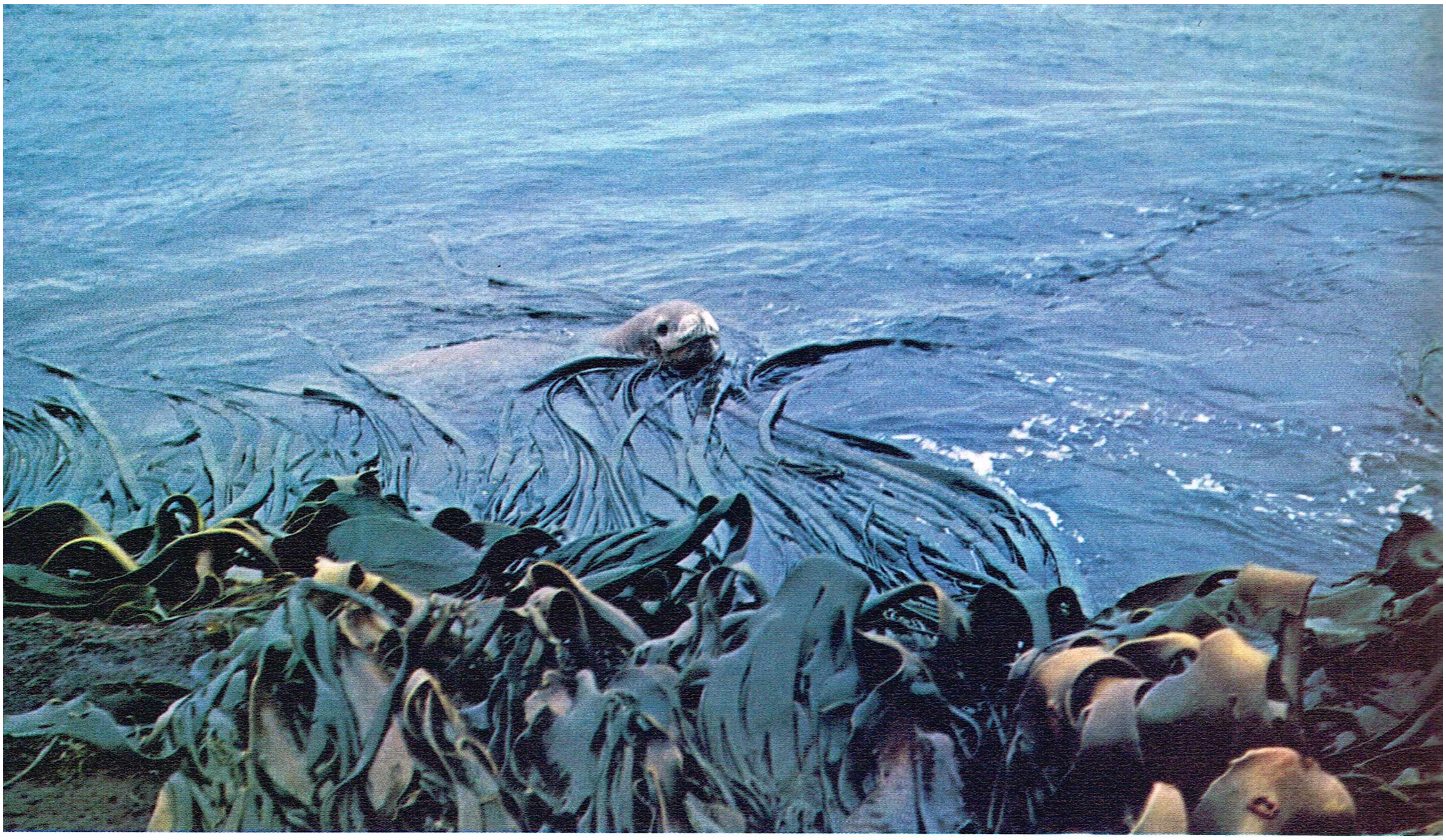

Benoît Tollu - Jacana

▲ *Cette Fucale* (Durvillea antarctica), *dont l'aspect pourrait rappeler celui des* Laminaria, *est particulièrement répandue dans les eaux froides de l'hémisphère Sud.*

D'autres applications prennent une extension croissante : les engrais biologiques, à base de farines d'Algues, permettent non seulement de revaloriser les sols mais aussi de lutter contre certaines maladies des plantes; la thalassothérapie, pratiquée depuis une dizaine d'années, est prescrite dans des affections musculaires et osseuses diverses.

Mais c'est dans le domaine industriel que les utilisations des Phéophycées, essentiellement les Laminariales, sont les plus vastes.

Elles ont joué un rôle de premier plan dans l'industrie de la soude et de la potasse dès le début du XVII[e] siècle, puis plus tard dans celle de l'iode, substances contenues dans leurs cendres dans des proportions relativement importantes. Mais la fabrication du carbonate de soude à partir du sel marin, puis l'extraction du chlorure de potassium des gisements de potasse de Strassfurt, et de l'iode des nitrates du Chili, amenèrent le déclin de cette industrie; elle se maintient seulement dans quelques pays, au Japon et aux États-Unis en particulier où, par carbonisation des thalles, on obtient une production relativement importante de sels d'iode et de brome, ainsi qu'un résidu charbonneux à grand pouvoir d'absorption.

Autrefois considérées comme des sous-produits de moindre valeur, ce sont actuellement des substances organiques, l'acide alginique et ses dérivés en particulier, que l'on extrait essentiellement des Laminariales. Les Algues traitées diffèrent selon les pays qui utilisent naturellement les espèces les plus appropriées qui dominent le long de leurs côtes. Les méthodes de récoltes doivent aussi s'adapter à la morphologie des thalles et à la configuration des fonds sous-marins; c'est ainsi que les immenses *Macrocystis, Nereocystis* sont facilement coupés par des bateaux faucardeurs; les *Laminaria,* longtemps ramassés à pied sec lors des grandes marées, sont de plus en plus récoltés mécaniquement à l'aide de longues perches qui permettent d'enrouler, d'arracher et de décharger les thalles dans les bateaux. Aux États-Unis, sur la côte Pacifique, les *Macrocystis* et à un moindre degré les *Nereocystis* et *Pelagophycus* constituent le matériel essentiel, tandis que, sur la côte est, on emploie les *Laminaria;* au Japon, diverses espèces de *Laminaria, Eiseinia, Ecklonia* sont traitées; en Grande-Bretagne et en France, les industries d'alginates utilisent également les *Laminaria*.

L'acide alginique est le principal constituant des parois cellulaires des Algues brunes, et il est particulièrement abondant chez les Laminariales. Sa teneur, qui varie considérablement selon les espèces, l'âge des thalles, la localisation de l'Algue, les saisons, peut atteindre 40 % du poids sec. L'acide alginique, de formule générale $(C_6H_{10}O_7)_n$, est une chaîne plus ou moins longue, suivant le degré de polymérisation, d'acide d-mannuronique, les groupes étant reliés par des liaisons glucosidiques. L'extraction comporte plusieurs phases : après déminéralisation par l'acide sulfurique dilué, les Algues, traitées par une solution de carbonate de sodium, donnent un liquide visqueux; après filtration et centrifugation de ce liquide, l'alginate de sodium (soluble) est récupéré par décantation, puis acidifié afin de permettre la précipitation de l'acide alginique (insoluble). L'acide alginique peut donner des sels avec les divers cations (alcalins, métalliques, organiques).

Les alginates alcalins (potassium, sodium, ammonium, etc.) ainsi que l'alginate de magnésium sont solubles dans l'eau. L'alginate de sodium est l'un des plus puissants colloïdes connus; il se dissout dans l'eau froide et donne des solutions dont la viscosité augmente rapidement avec la concentration; il peut produire, à des doses faibles, des solutions à haute viscosité, épaississantes, gélifiantes, émulsionnantes, stabilisantes de suspensions et de dispersions. De ces propriétés remarquables découlent des utilisations qui ne cessent de se multiplier; se mélangeant à de nombreux composés, il peut compléter ou améliorer leurs propriétés. L'alginate d'ammonium, qui a des propriétés voisines de celles de l'alginate de sodium, est employé dans le crémage du latex. L'alginate de potassium sert comme adjuvant dans certains détersifs.

D'autres alginates insolubles dans l'eau forment à l'état sec une matière d'une extrême dureté; humidifiés, ils reprennent leur plasticité. Ces alginates sont utilisés dans des domaines aussi variés que l'alimentation, l'industrie textile, les peintures, également l'odontologie, la chirurgie. Une des propriétés de ces alginates, leur solubilité dans la soude ou le carbonate, est à la base, dans l'industrie textile d'applications ingénieuses dont nous donnerons un exemple : des fils fins d'alginate de calcium sont torsadés avec des fils de laine; le tissage terminé, un lavage alcalin provoque l'élimination des fils d'alginate, laissant un tissu de laine extrêmement léger.

Les alginates mixtes, qui font l'objet de nombreuses recherches, amèneront sans doute d'autres applications.

XANTHOPHYCÉES

Les Xanthophycées sont appelées parfois Hétérocontes pour mettre l'accent sur les cellules flagellées dont les deux flagelles sont inégaux en taille et en structure, le plus long étant pleuronématé, c'est-à-dire pourvu d'une double rangée de mastigonèmes, et le court lisse et nu.

Ces Algues Chromophytes offrent deux caractères fondamentaux. Elles ont des plastes à lamelles à trois thylacoïdes et de couleur vert-jaune qui renferment de la chlorophylle a, souvent de la chlorophylle c, trois xanthophylles : anthéraxanthine, lutéine-époxide, trollixanthine, et du β carotène.

La fucoxanthine, abondante chez les autres chromophytes, manque dans les Xanthophycées. Par ailleurs, leurs réserves, assez mal connues, sont surtout des matières grasses et un polysaccharide : la chrysolaminarine. L'amidon fait toujours défaut.

Les Xanthophycées sont donc par leurs pigments et leurs réserves très voisines des Chrysophycées, mais elles en diffèrent par leurs kystes endogènes siliceux (statospores). Ces statospores globuleuses ont deux valves de même taille ou légèrement inégales ayant la forme d'une boîte coiffée d'un couvercle. Ces kystes caractéristiques donneront à leur germination des zoïdes flagellés ou amiboïdes. La reproduction asexuée se fait par bipartition où par spores flagellées (zoospores) ou non flagellées (autospores). Les zoospores possèdent deux flagelles inégaux, ou plus rarement un seul qui, dans ce cas, est pleuronématé. La reproduction sexuée a été signalée chez quelques Xanthophycées : isogamie chez *Tribonema* et *Botrydium* avec gamètes biflagellés, oogamie chez les *Vaucheria*.

La classe des Xanthophycées groupe près de cent genres et près de six cents espèces, en grande partie dulçaquicoles. On peut la diviser en six ordres d'après la structure du thalle : les *Chloramœbales,* formes flagellées, mobiles, solitaires; les *Rhizochloridales,* formes rhizopodiques amiboïdes; les *Hétérogloéales,* formes avec vacuoles contractiles et souvent avec une gelée, organismes coloniaux ou organismes solitaires unicellulaires avec un pédoncule gélatineux; les *Mischococcales,* formes coccoïdes, unicellulaires ou coloniales, immobiles, à membrane bien définie; les *Tribonématales,* formes filamenteuses, simples ou ramifiées à filaments cloisonnés; les *Vaucheriales,* formes siphonées sans cloison, soit filamenteuses, soit vésiculeuses.

Parmi ces six ordres, les *Mischococcales* sont les plus nombreuses avec plus de soixantes genres et plus de trois cents espèces.

Chloramœbales (ou Hétérochloridales)

Cet ordre, avec une seule famille et un petit nombre d'espèces, groupe des organismes solitaires, mobiles à un ou le plus souvent deux flagelles inégaux. La membrane est mince et déformable; les cellules ont un ou deux plastes (rarement trois ou quatre) vert jaunâtre. Citons les *Phacomonas* et *Chloromeson* du plancton marin, *Nephrochloris* des eaux douces et saumâtres.

Rhizochloridales

Les cellules sont de petites amibes présentant des plastes vert jaunâtre. Ces organismes sont solitaires et se multiplient par simple division : genre *Rhizochloris* (marin et dulçaquicole). Parfois ils se groupent en réseau par leurs pseudopodes et forment ainsi une colonie : *Chlorarachnion* (genre marin). Dans d'autres genres : *Stipitococcus* dulçaquicole et *Rhizolekane* marin, l'amibe est contenue dans une logette en forme d'urne dont l'ouverture laisse sortir de fins pseudopodes. La reproduction se fait alors par zoospores biflagellées.

Les *Myxochloris* et les *Chlamydomyxa* des eaux tourbeuses forment de grosses Amibes avec de nombreux plastes et de nombreux noyaux qui sont de véritables plasmodes. Chez *Myxochloris* qui vit dans les cellules aquifères des sphaignes, on a observé des zoospores biflagellées à un seul noyau et des kystes siliceux endogènes bivalves. Ces kystes peuvent donner soit des zoospores, soit directement de petites amibes uninucléées.

Hétérogloéales (ou Hétérocapsales)

Les genres *Heterogloea* et *Gloeochloris* ont des thalles ellipsoïdaux gélatineux libres ou fixés sur les plantes aquatiques. Dans la gelée sont dispersées de nombreuses cellules avec un ou plusieurs plastes et une ou deux vésicules contractiles. La multiplication se fait par zoïdes à un ou deux flagelles inégaux. Le genre marin *Helminthogloea* a la même structure cellulaire, mais le thalle est en forme de petit arbuscule fixé à sa base.

Chez les *Malleodendron* dulçaquicoles ou saumâtres, la cellule est fixée par un style gélatineux épais et stratifié. Elle se divise longitudinalement et forme ainsi des arbuscules dont chaque branche se termine par une cellule portant deux vésicules contractiles basales. La multiplication peut se faire aussi par zoïdes biflagellés.

Mischococcales (ou Hétérococcales)

Cet ordre est numériquement le plus important parmi les Xanthophycées. Les cellules sont solitaires ou coloniales, libres ou fixées, mais toujours immobiles et pourvues d'une membrane ferme. La multiplication se fait par zoospores flagellées ou par spores sans flagelle qui prennent dans la membrane maternelle la configuration de la cellule mère (autospores).

Parmi les formes solitaires libres, citons : *Botryodiopsis,* genre des eaux douces à cellule de 10 à 80 μ et à nombreux plastes, et dont la multiplication se fait soit par zoospores uni- ou biflagellées, soit par autospores immobiles. Dans ce groupe d'Algues solitaires, nous trouverons les formes les plus variées : tétraédriques, polyédriques, hémisphériques; souvent, même, la membrane est ornée d'épines ou de verrues, ou de petites fossettes (scrobiculations) ordonnées régulièrement suivant trois axes se coupant à 60° (*Goniochloris* par exemple). Citons encore les *Meringosphaera* et les *Schilleriella* du plancton marin qui possèdent de longs aiguillons.

Les *Characiopsis* sont des Algues unicellulaires en forme de croissant ou de fuseau fixées par une de leurs extrémités qui s'allonge en pédoncule plus ou moins long. La multiplication se fait uniquement par zoïdes biflagellés. Comme exemple de formes coloniales libres, donnons *Chlorobotrys* dont les cellules sphériques à un ou plusieurs plastes sont groupées par quatre, huit ou seize en paquets réguliers entourés d'une gelée stratifiée. La multiplication ne s'effectue que par autosporulation.

Les *Chloropedia* forment des groupements plats d'une seule couche de quatre à seize cellules et se reproduisent par autospores et par zoospores. Les *Mischococcus* ont des cellules sphériques, portées aux extrémités de tubes gélatineux hyalins groupés en arbuscule ramifié et fixé à la base. La multiplication se fait par zoospores et par autospores. Les *Ophiocytium* sont des cylindres allongés avec de nombreux plastes pariétaux. Ils sont solitaires ou groupés en colonies libres ou fixées. Dans le cas de colonies fixées, la cellule mère, lors de la zoosporulation, s'ouvre à son sommet et laisse échapper quatre à huit zoïdes biflagellés qui se fixent immédiatement à l'embouchure du zoosporocyste, perdent leurs flagelles et s'allongent en produisant ainsi une colonie à l'aspect d'ombelle. Ces cellules filles peuvent zoosporuler à leur tour et donner ainsi une ombelle composée.

Les Mischococcales par leur forme et leur grande diversité structurale ressemblent beaucoup aux Chlorophycées-Chlorococcales, mais elles s'en distinguent aisément par leurs pigments et leur absence d'amidon.

Tribonématales (ou Hétérotrichales)

Cet ordre est constitué par les Xanthophycées filamenteuses. Les cellules toujours uninucléées à un ou plusieurs plastes pariétaux se multiplient par simple division transversale et par zoïdes à un ou deux flagelles inégaux. L'isogamie a été signalée, mais fort rarement. Nous trouverons dans cet ordre les *Tribonema* à filaments simples, unisériés et non ramifiés. Leurs membranes cellulaires sont formées par deux demi-cylindres emboîtés. Chaque demi-cylindre adhère par sa base, qui forme la cloison, au demi-cylindre de la cellule voisine. Ainsi

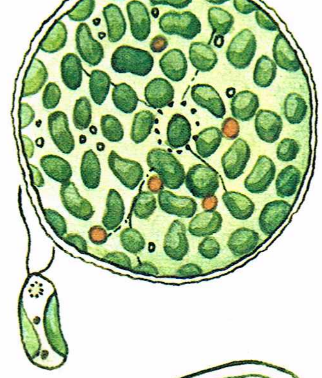

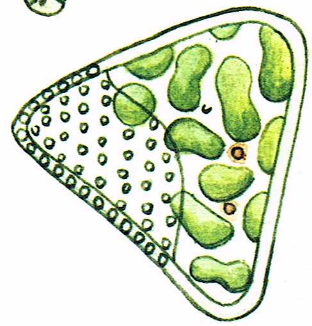

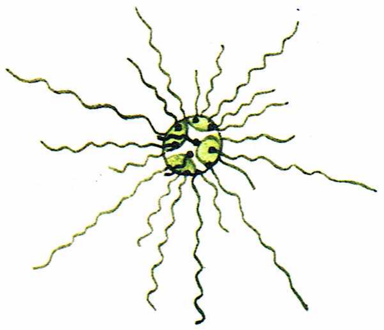

▲ *De haut en bas :* **Botryodiopsis arrhiza** *(× 760) avec une zoospore.* **Goniochloris pseudogigas** *(× 1 240).* **Meringosphaera mediterranea** *(× 940), d'après Schiller.*

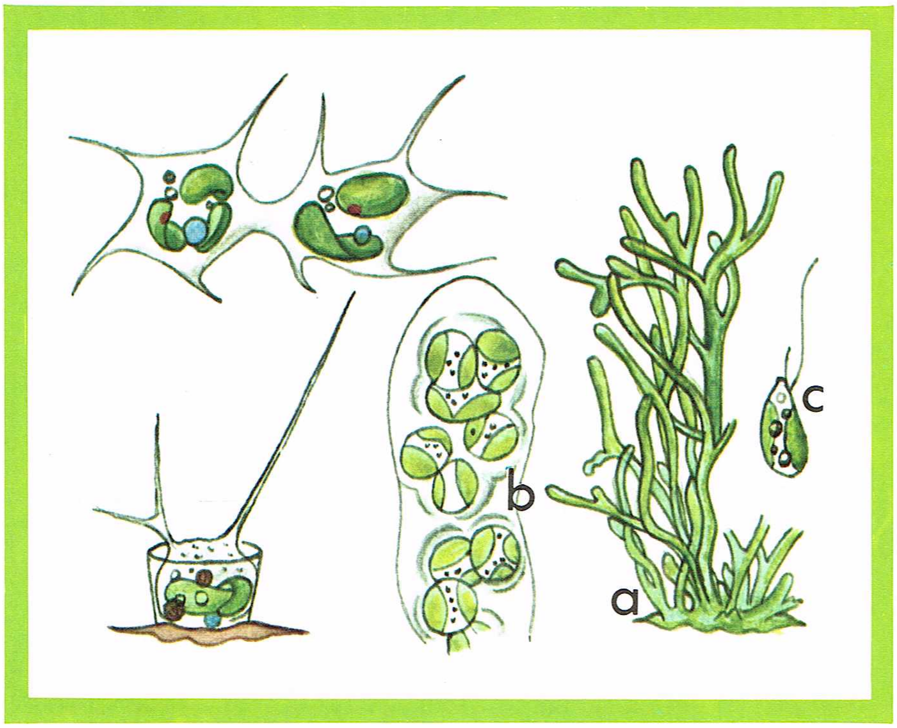

▲ *De gauche à droite :* **Rhizochloris stigmata** *d'après Ettl (× 1 400). Au-dessous,* **Rhizolekane sessilis,** *d'après Pascher (× 1 300).* **Helmintogloea ramosa,** *d'après Pascher, espèce marine fixée. a. - Fraction du thalle. b. - Détail grossi du sommet d'une branche du thalle. c. - Une zoospore.*

la membrane peut se désarticuler en cylindre ouvert aux deux bouts et portant la cloison intercellulaire en son milieu. Ces articles, en coupe optique, ont la forme d'un H majuscule : d'où le nom de membrane en H qui leur est donné. Nous retrouverons ce caractère chez les Chlorophycées du genre *Microspora* et parfois chez *Ulothrix*. Les *Tribonema* sont des Algues d'eau douce, cependant une espèce vit dans les tissus des Éponges marines. Les *Heterococcus* fréquents dans les sols humides ont des filaments unisériés ou plurisériés rampants ou dressés. Les *Heteropedia,* beaucoup plus rares, forment des thalles plats et rampants de filaments rayonnant d'une partie centrale à cellules coalescentes en pseudoparenchyme.

Vaucheriales

Il s'agit de Xanthophycées siphonées dont le thalle est soit une vésicule globuleuse, soit un tube ramifié mais sans cloison. Le cytoplasme renferme de nombreux plastes discoïdaux pariétaux et de nombreux noyaux. *Botrydium* est une Algue terrestre vivant dans le sol humide. La partie visible est une vésicule globuleuse d'un vert bleuâtre, de 2 à 3 mm de diamètre, qui se termine par de nombreux filaments ramifiés et incolores qui sont enfoncés dans le sol (ce sont les rhizoïdes). Il n'y a de cloison ni dans la vésicule, ni dans les rhizoïdes. La partie aérienne se compose d'une couche de cytoplasme renfermant de nombreux noyaux et de nombreux plastes à pyrénoïdes ; les rhizoïdes, eux, ont des noyaux mais pas de plaste. La multiplication se fait par aplanospores à un ou plusieurs noyaux qui se forment en général dans la partie souterraine après migration du cytoplasme de la vésicule. Les aplanospores germent directement en un nouveau thalle ; parfois, cependant, les aplanospores plurinucléées donnent naissance à des zoospores végétatives. La reproduction sexuée se fait par isogamie ou anisogamie : la vésicule se transforme en un énorme gamétocyste donnant des gamètes biflagellés à un seul noyau et un ou deux plastes. Après la gamie, les gamètes qui n'ont pu copuler peuvent se développer directement en un nouveau thalle.

Les *Vaucheria* marines et surtout dulçaquicoles et terrestres ont des filaments cylindriques ramifiés, sans cloison, fixés par des rhizoïdes incolores. Leur cytoplasme renferme de nombreux plastes pariétaux discoïdaux avec ou sans pyrénoïdes et de nombreux noyaux. Les cloisons apparaîtront seulement lors de la reproduction végétative ou sexuée. La première se fait grâce à de grosses zoospores sphériques présentant de nombreux plastes et de nombreux noyaux. A chaque noyau correspond une paire de flagelles légèrement inégaux en taille mais dépourvus de mastigonèmes. La seconde est une oogamie. La plupart des espèces sont monoïques et les anthéridies mâles sont au voisinage des oogones. Une cloison sépare anthéridie et oogone du filament siphoné qui les porte. Les anthéridies ont des formes fort variables suivant les espèces : droites, contournées, ovoïdes ou fusiformes. Elles donnent un grand nombre de gamètes mâles à deux fouets inégaux : le fouet antérieur court pourvu de mastigonèmes, et le fouet postérieur plus long et lisse. L'oogone est sphérique de grande taille. Après la gamie, le zygote s'entoure d'une épaisse membrane. Il germera directement après méiose en un nouveau thalle siphoné. Le genre *Vaucheria* groupe une soixantaine d'espèces dont une dizaine sont marines ou d'eau saumâtre. Le genre *Phyllosiphon* renferme des Algues parasites des feuilles des plantes de la famille des Aracées. Les siphons ont des plastes vert-jaune et de nombreux noyaux. La multiplication se fait uniquement par aplanospores de petite taille à un seul noyau et un seul plaste. Les *Phyllosiphon* font des taches jaunâtres arrondies sur les feuilles de l'*Arisarum vulgare,* petite plante commune sur la Côte d'Azur.

Nous nous devons de signaler qu'en 1970-1972, Hibberd et Leedale ont étudié en microscopie électronique la cytologie des zoospores de quinze espèces de Xanthophycées. Ils ont montré que, chez un petit nombre de Mischococcales, la zoospore a une structure un peu particulière, ainsi elle ne possède qu'un seul flagelle, et le stigma est indépendant du plaste. Sur ces différences structurales, ils ont scindé en deux la classe des Xanthophycées en séparant les Xanthophycées véritables à stigma porté sur le plaste des *Eustigmatophycées* où le stigma est indépendant. La création de cette nouvelle classe fondée sur des différences mineures ne nous semble pas justifiée pour l'instant.

RHAPHIDOPHYCÉES

Cette classe, avec le seul ordre des *Vacuolariales,* renferme une douzaine de genres et une vingtaine d'espèces ; c'est la classe la plus pauvre et la moins bien connue de l'embranchement des Chromophytes.

Il s'agit d'Algues unicellulaires libres, piriformes, un peu aplaties qui possèdent deux flagelles de taille inégale, l'antérieur avec des mastigonèmes, le postérieur étant lisse. La cellule présente un sillon longitudinal qui part de la dépression flagellaire où s'insèrent les fouets et où débouche une grosse vésicule contractile triangulaire. Les plastes discoïdaux sont pariétaux et d'une couleur vert jaunâtre. De très nombreux corps mucifères sont situés entre les plastes ; ils sont éjectés très facilement, sous forme de fins filaments. Le noyau est de grande taille et surmonté d'un coussinet constitué par une couronne de dictyosomes (appareil de Golgi).

Les plastes à lamelles de trois thylacoïdes renferment uniquement de la chlorophylle a, du β carotène et trois xanthophylles comme chez les Xanthophycées. Les seules réserves connues sont des gouttelettes huileuses. La reproduction se fait par bipartition longitudinale. Comme on le voit, les Rhaphidophycées sont très voisines des Xanthophycées et ne s'en distinguent que par la grande taille du noyau, l'importance de l'appareil de Golgi, l'abondance des corps mucifères et le développement des vacuoles contractiles. Peut-être serait-il justifié d'en faire simplement une sous-classe des Xanthophycées.

Les genres *Vacuolaria* à corps mucifères sphériques et *Gonyostomum* (anciennement appelé *Rhaphidomonas*) vivent dans les mares acides des tourbières à sphaignes.

Le genre *Chattonella* (= *Hornellia*) habite les eaux saumâtres et marines : il se multiplie parfois en grande quantité et cause des « eaux rouges » sans doute toxiques pour les Poissons. Chez ce genre, on a observé une reproduction sexuée isogamique par fusion de gamètes ayant l'aspect de cellules végétatives. On peut ranger dans les Vacuolariales certains flagellés incolores à deux fouets inégaux, gros noyau, sillon longitudinal, corps mucifères et ensemble vacuolaire apical complexe, tels que *Colponema* et *Thaumatomastix.*

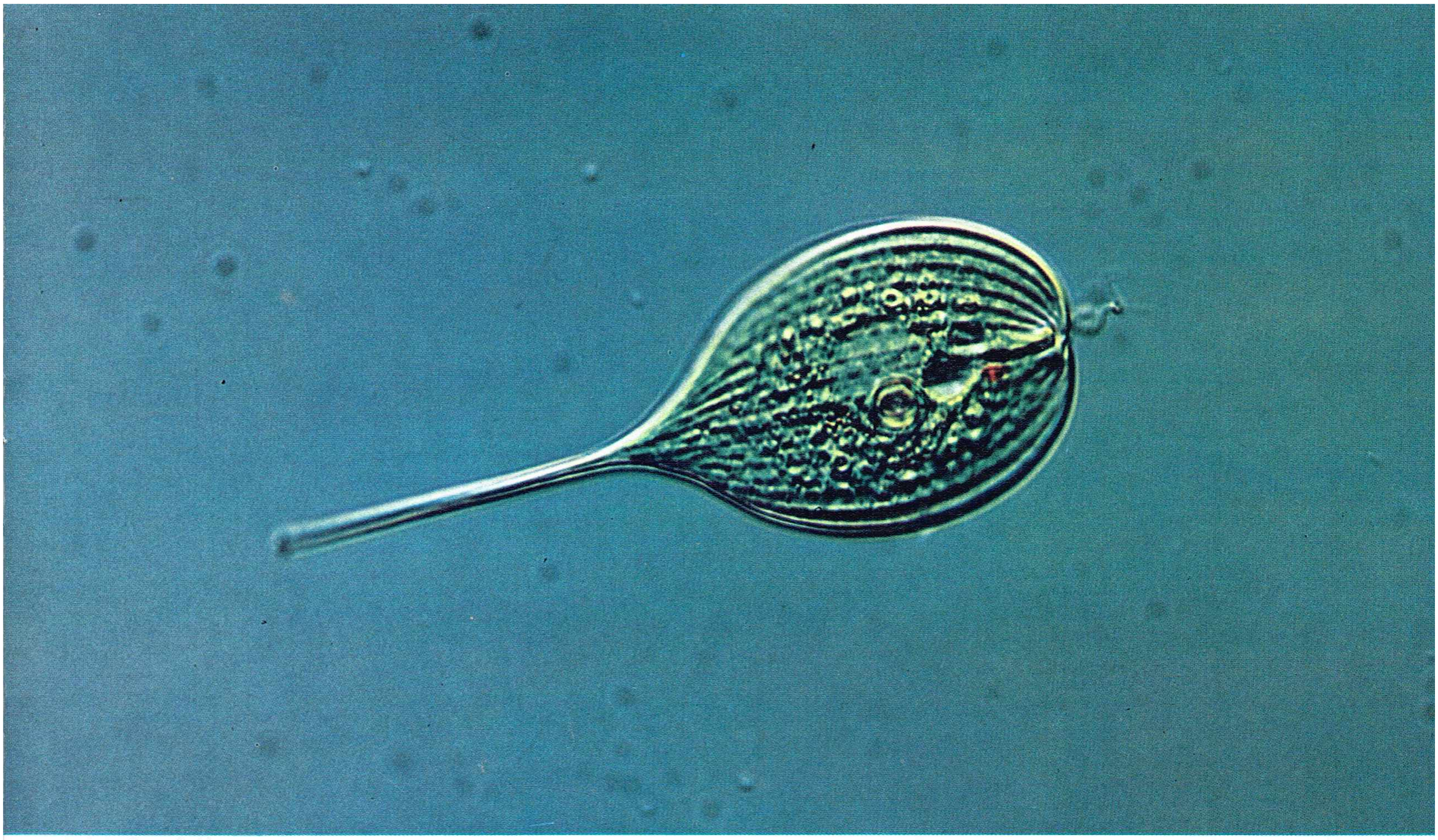

Crumeyrolles - Cedri

EUGLÉNOPHYTES

Cet embranchement ne comporte qu'une seule classe, celle des Euglénophycées. Libres, mobiles grâce à leurs flagelles, ces Algues sont plus rarement fixées en colonies arbusculaires. Elles croissent le plus souvent dans les eaux polluées riches en matières organiques; les formes incolores y sont nombreuses. Les formes à chlorophylle ont des plastes verts constitués de lamelles à trois thylacoïdes, plastes renfermant comme ceux des Chlorophytes de la chlorophylle a et de la chlorophylle b accompagnées de β carotène et de xanthophylles. Les réserves sont constituées par des grains de *paramylon,* polysaccharide très voisin de la *laminarine* et qui présente en lumière polarisée le phénomène de la croix noire tout comme l'amidon véritable; cependant ce paramylon ne donne pas de coloration bleue avec la solution iodo-iodurée de Lugol.

Certaines espèces d'*Euglena* ont une teinte rouge due à de l'hématochrome (astaxanthine) qui masque les chlorophylles vertes. Très souvent les plastes portent des pyrénoïdes recouverts par une ou deux calottes de paramylon. Les Euglénophycées ont deux flagelles, rarement plus. Ces flagelles sortent d'une profonde dépression apicale ou subapicale appelée *cytopharynx,* fosse vestibulaire ou réservoir. Ce cytopharynx s'ouvre vers l'extérieur par un pore qui se prolonge en un sillon longitudinal plus ou moins long. Les vésicules contractiles se déversent dans le cytopharynx. Dans de nombreux genres, un seul fouet sort du vestibule, le second étant réduit à un court filament accolé à la base du premier et donnant ainsi l'illusion d'un flagelle à base fourchue. Les deux flagelles toujours inégaux en taille et en diamètre sont cependant tous deux pleuronématés, avec de fins et longs mastigonèmes disposés en séries hélicoïdales. De nombreuses espèces possèdent un *stigma* rouge, indépendant des plastes et qui est accolé sur les flancs du réservoir; très souvent un petit globule réfringent incolore est accroché à un flagelle, dans le réservoir, faisant face au stigma; c'est le photocepteur. Stigma et photocepteur sont liés aux phototactisme des Euglénophycées. Chez de nombreuses Euglénophycées incolores de l'ordre des Péranématales, au voisinage du cytopharynx se trouvent des baguettes en forme de clou ou un tube conique : ce sont les *baguettes pharyngiennes* ou appareil *paravestibulaire* qui délimitent une zone de cytoplasme vésiculeux. Cet appareil semble en relation avec la capture et l'ingestion des proies chez ces espèces phagotrophes. Les cellules ont une cuticule mince ou épaisse présentant des stries hélicoïdales ou mieux des bandes séparées par des sillons. Ces bandes en nombre fixe, nombre variant suivant les espèces de cinq à cinquante-deux, sont soutenues par des fibres sous-cuticulaires. Lors de la division végétative longitudinale, chaque bande se partage en deux. La cuticule est plus ou moins rigide : souvent même elle est très souple et permet des déformations importantes de la cellule qui peut rapidement passer de la forme fuselée à la forme sphérique : cette plasticité prend le nom de *métabolie*. Les corps mucifères sont de petites inclusions sous-cuticulaires qui se colorent fort bien avec les colorants vitaux rouge neutre ou bleu de crésyle. Ils peuvent être éjectés et contribuent, semble-t-il, à la formation du mucus entourant les cellules à la phase immobile. La cellule, comme toute cellule végétale, renferme dans son cytoplasme des vacuoles, des mitochondries, des dictyosomes (appareil de Golgi), un noyau, etc. Ce noyau, bien visible, à nucléole très net, se divise par une mitose d'un type particulier avec persistance et division du nucléole, absence de fuseau et de centrosome. Le nombre des chromosomes, très longs, varie de quinze *(Menoidium)* à cent soixante-dix-sept *(Peranema)*. La division végétative se fait à l'état flagellé ou, au contraire, en phase de repos dans une gaine muqueuse.

La reproduction sexuée isogamique à gamète flagellé ayant l'aspect d'une cellule normale n'est connue avec certitude que dans le genre *Scytomonas*.

Les Euglénophycées groupent quarante-cinq genres et près de mille espèces vivant surtout dans les eaux douces; un petit nombre d'espèces sont marines ou peuplent les eaux saumâtres. On peut reconnaître trois ordres dans la classe des Euglénophycées : les *Euglénales* groupent toutes les formes flagellées vertes et quelques-unes incolores à noyau axial à flagelles souples et toujours dépourvues d'appareil paravestibulaire; les *Péranématales* avec uniquement des formes incolores, à

▲ **Phacus longicauda,** ***euglénien du phytoplancton d'eau douce.***

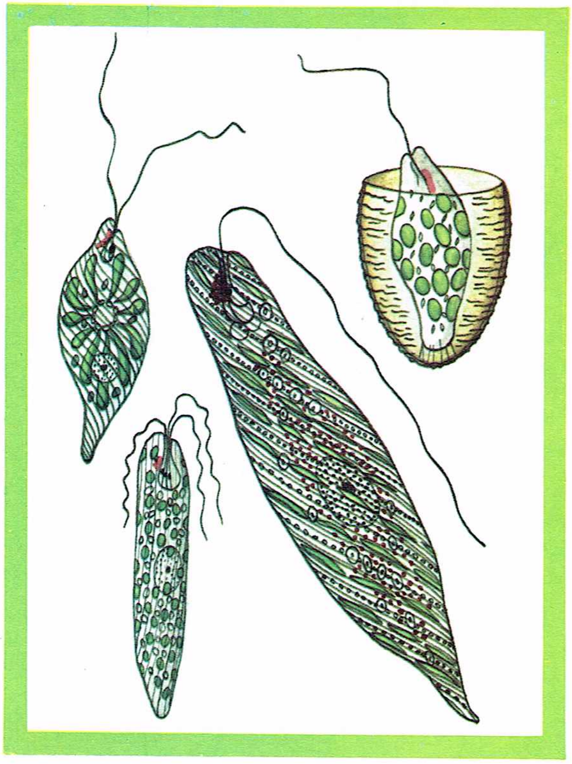

▶ *De gauche à droite :* Eutreptia viridis *(× 600), espèce libre d'eau douce à deux flagelles et plastes en étoile avec pyrénoïde central entouré de grains de paramylon.* Euglenamorpha hegneri *(× 850), d'après Wenrich, espèce à trois flagelles.* Euglena sanguinea *(× 600), espèce dulçaquicole formant des fleurs d'eau rouges.* Klebsiella alligata, *d'après Pascher (× 950), espèce de la mer du Nord.*

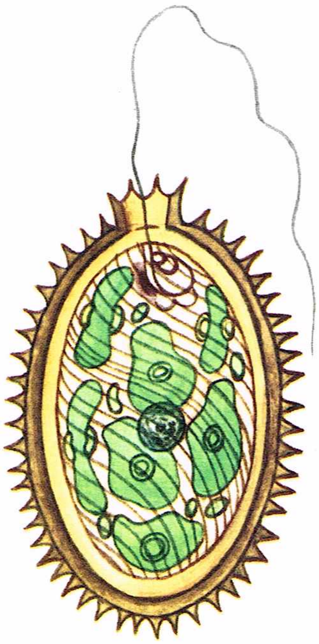

▲ Trachelomonas hispida *(× 1 530).*

cellule presque toujours asymétrique et noyau latéral, à flagelle antérieur raide et appareil paravestibulaire (baguettes pharyngiennes) plus ou moins développé; les *Colaciales* à cellules vertes sans flagelle et portées par un arbuscule fixé à la base.

Euglénales

Parmi les Euglénales, nous trouverons des formes vertes à deux flagelles bien développés du genre *Eutreptia* qui vivent surtout dans les eaux marines. Les *Euglenamorpha* à trois flagelles vivent dans l'intestin des têtards de grenouilles américaines. Les *Euglena* sont abondants en eau douce mais se rencontrent en très petit nombre dans le milieu marin.

Ils possèdent un grand fouet et leur deuxième flagelle ne sort pas du cytopharynx. Ce genre est très riche en espèces (plus d'une centaine) et certaines font des fleurs d'eau vertes ou rouges *(Euglena sanguinea)*. En culture, *Euglena gracilis* peut perdre définitivement ses plastes sous l'action de la chaleur, des rayons X, des ultra-violets ou de la streptomycine et ressembler alors aux *Astasia*. Les *Phacus* sont des Euglènes aplaties à contour elliptique; ils sont nombreux dans les eaux douces (cent cinquante espèces). Les *Trachelomonas* ayant comme *Phacus* et *Euglena* un seul fouet visible sont entourés d'une coque brune, souvent ornée de pores ou d'épines et percée d'un pore d'où sort le flagelle locomoteur (près de trois cents espèces connues). Les formes incolores dépourvues de plaste et aussi le plus souvent de stigma sont nombreuses chez les Euglénales : citons les *Astasia* qui ressemblent à des euglènes très métaboliques et les *Menoidium* à cellules aplaties et recourbées en faucille, et toujours avec un seul flagelle visible. Chez *Distigma,* le deuxième fouet, très court, s'observe facilement. Le genre *Hegneria* possède six à sept fouets égaux; c'est une forme incolore qui vit dans le tube digestif des têtards de Batraciens du Brésil.

▶ *A gauche : colonie fixée de quatre cellules de* Colacium mucronatum *(× 800). A droite :* Urceolus cyclostomus *(× 900), forme incolore à noyau latéral.*

Péranématales

Dans ces Euglénophytes incolores, le fouet antérieur est toujours raide pendant la nage, relativement épais et vibrant seulement dans la région de son sommet; le second flagelle, s'il existe, est tourné vers l'arrière et ondule doucement. De plus, la base de ces fouets incluse dans le cytopharynx est épaissie. Ces organismes sont dépourvus de stigma et de plaste mais ont très souvent un appareil paravestibulaire.

Nous signalerons les genres *Petalomonas* à cellule aplatie ornée de côtes et de sillon (une cinquantaine d'espèces dulçaquicoles) avec un seul fouet apparent et un appareil paravestibulaire visible seulement au microscope électronique, *Notosolenus* très aplati aussi et *Tropidoscyphus* à côtes hélicoïdales, tous deux présentant un deuxième flagelle court; *Peranema* et *Urceolus* sont très métaboliques et ont un appareil paravestibulaire bien net avec deux baguettes allongées surmontées d'une troisième en forme de croissant. *Peranema* a deux flagelles inégaux et *Urceolus* un seul visible sortant d'un cytopharynx élargi en entonnoir. Chez l'*Entosiphon,* à deux fouets lui aussi, l'antérieur assez court et le postérieur plus long, on observe un appareil parabasal en tube conique. La cuticule est ferme et côtelée tout comme chez *Anisonema,* à baguettes pharyngiennes très discrètes mais à flagelle postérieur puissant et recourbé en crosse.

Les *Scytomonas* (ou *Copromonas,* ainsi nommés car ils vivent dans les eaux très polluées) ressemblent à *Petalomonas,* mais ils ne possèdent qu'un seul flagelle, le second ayant disparu sans laisser de trace, même dans le vestibule. C'est, de tous les Euglénophytes connus, le seul qui soit vraiment uniflagellé. C'est également le seul chez qui l'on peut observer une reproduction sexuée isogamique.

Colaciales

Ce petit ordre comprend le seul genre *Colacium.* Il s'agit de petites euglènes vertes à stigma et à flagelles dont un seul est visible. Elles nagent puis se fixent par leur pôle vestibulaire sur un Animal du zooplancton, en général Crustacé d'eau douce, *Cyclops* ou daphnie. Elles perdent leur fouet, sécrètent un coussinet ou pédoncule gélatineux de fixation et se multiplient sur place par division longitudinale, formant ainsi de petits arbuscules dont les branches se terminent par une cellule verte. A ce stade, une cellule peut se détacher et reprendre la vie libre après avoir reformé un flagelle.

La physiologie et la biologie des Euglénophycées ont fait l'objet de nombreux travaux. Une centaine d'espèces incolores appartenant aux Euglénales ou aux Péranématales sont des parasites du zooplancton d'eau douce (parasite des œufs ou des larves de Copépodes le plus souvent). Les formes vertes sont photo-autotrophes comme toutes les Algues mais ont besoin de vitamines; les formes incolores, elles, sont hétérotrophes et un apport de matières organiques leur est indispensable. De ce fait, l'abondance des Euglénophycées dans une eau sera toujours l'indice d'une pollution par des matières organiques d'origine végétale ou animale.

J.-N. Reichel - « Réalités »

CHLOROPHYTES

Les Chlorophytes ou Algues vertes diffèrent beaucoup des groupes précédemment étudiés par les composants de leur appareil plastidial.

Elles contiennent de la chlorophylle a et de la chlorophylle b associées au β carotène ainsi que des xanthophylles (lutéine, violaxanthine, néoxanthine, zéoxanthine, astaxanthine) identiques à celles des plantes supérieures. Certaines Chlorophytes (ordres des Derbésiales et des Caulerpales) ont des xanthophylles spéciales : Siphonéine et Siphonoxanthine. Les biliprotéides sont toujours absents. Les réserves fondamentales des Chlorophytes sont formées par des grains d'amidon, colorables en bleu par la solution iodo-iodurée de Lugol, et élaborés au sein des plastes (amidon intraplastidial) et autour des pyrénoïdes.

Les cellules nageuses, zoospores et gamètes, possèdent en général deux ou quatre flagelles identiques en taille et en structure.

Les lamelles des plastes sont constituées par de nombreux thylacoïdes, formant souvent par place des empilements comparables aux grana des plantes supérieures.

En résumé, les trois caractères fondamentaux des Chlorophytes sont : la présence des chlorophylles a et b, d'amidon intraplastidial et l'absence de biliprotéides.

Les Chlorophytes groupent environ six cents genres et plus de huit mille espèces d'Algues vivant dans les mers et les eaux douces. Parmi ces espèces, les quatre cinquièmes environ sont dulçaquicoles ou subaériennes.

SYSTÉMATIQUE

On peut partager ce grand embranchement en trois classes : les *Prasinophycées* ayant des cellules nageuses à flagelles pourvus de mastigonèmes et sortant d'une dépression apicale ou cratère flagellaire ; les *Chlorophycées* à cellules nageuses à flagelles nus, sans cratère flagellaire mais possédant souvent une papille flagellaire ; les *Zygophycées* dépourvues de cellules nageuses flagellées et à conjugaison de gamètes amiboïdes (cystogamie). Les *Charophycées* à thalle à structure très complexe et gamètes mâles rappelant les spermatozoïdes ou anthérozoïdes des mousses seront placées dans un embranchement particulier : les Charophytes.

PRASINOPHYCÉES

Cette classe d'Algues vertes a des cellules nageuses végétatives ou des zoospores dont les flagelles, à mastigonèmes fins et courts, sortent d'une dépression apicale, puits ou cratère flagellaire. De plus, très souvent, les flagelles et les cellules sont recouverts de minuscules écailles organiques structurées, visibles seulement en microscopie électronique. La multiplication se fait par division longitudinale ; la sexualité est inconnue.

Les Prasinophycées sont sans doute les plus anciennes des Chlorophytes : le cratère flagellaire, les écailles organiques, la présence de mastigonèmes sont des caractères primitifs qui permettent un rapprochement avec les Chrysophytes. Cette classe, avec une vingtaine de genres et moins de cent espèces, renferme des formes marines et dulçaquicoles, presque toujours unicellulaires et mobiles. On peut y distinguer quatre ordres : les *Pyramimonadales* pour les formes libres unicellulaires à deux ou quatre flagelles égaux ; les *Pédinomonadales* pour les formes unicellulaires à un seul flagelle ou deux flagelles inégaux ; les *Halosphærales* pour les formes coccoïdes, unicellulaires, immobiles à zoospores à quatre flagelles égaux ; les *Prasinocladales* pour les formes immobiles, arbusculaires à zoospores à quatre flagelles égaux.

Pyramimonadales

Cet ordre renferme des espèces flagellées, solitaires, surtout abondantes dans les mares salées supralittorales et les eaux saumâtres. Les fouets, égaux le plus souvent, sont recouverts de fines écailles et garnis de poils courts.

Le genre *Pyramimonas* a des cellules en forme de pyramide carrée renversée dont la base présente une profonde invagination, le cratère flagellaire, d'où sortent quatre

▲ Bien que les quatre cinquièmes des Chlorophytes soient dulçaquicoles ou subaériennes, les Algues vertes sont fréquentes le long du littoral marin dans les flaques et sur les rochers.

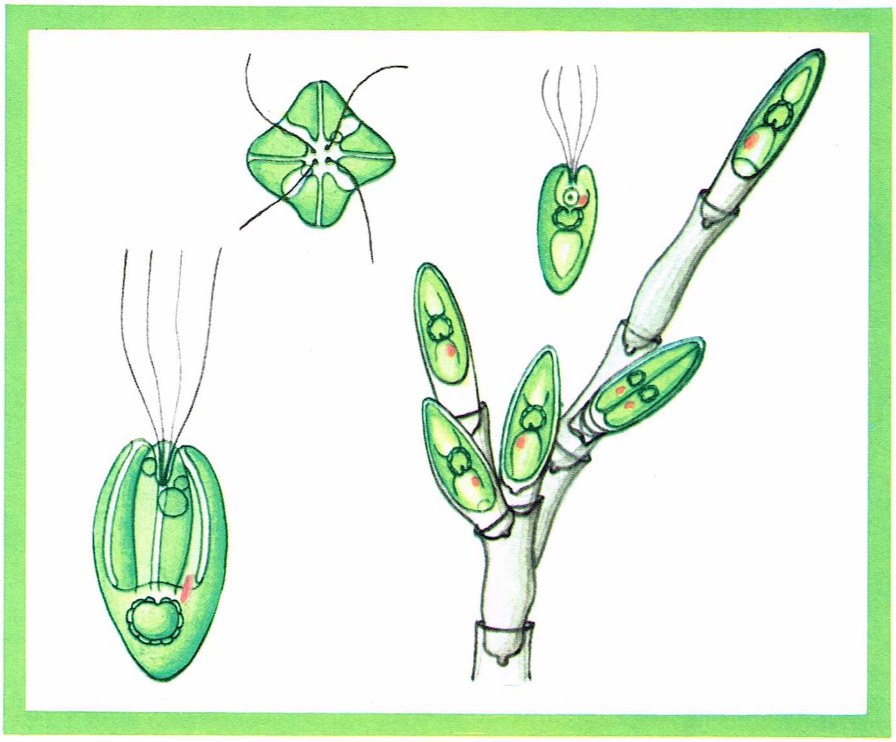

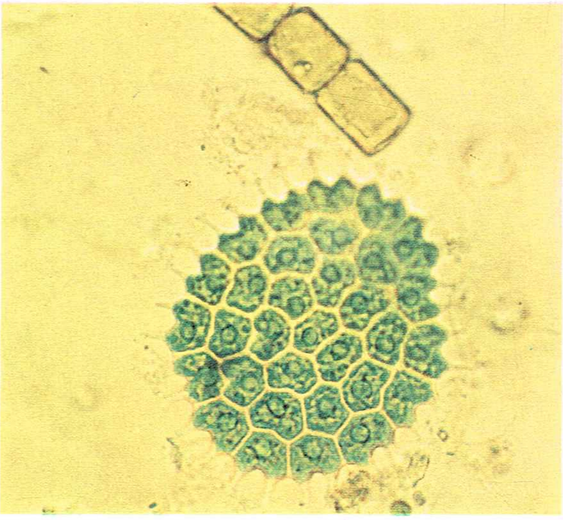

M. Ricard

▲ *Ci-dessus :* Pyramimonas tetrarhynchus *(× 1 070) et* Chlorodendron subsalsus *(× 1 560).*

▶ Pediastrum boryanum ; *au dessus, une Diatomée centrique,* Melosira varians.

▼ *De gauche à droite : A.* - Chlamydomonas debaryana *(× 1 300). B.* - Brachiomonas submarina *(× 1 300). C.* - Phacotus lenticularis *(× 1 250).*

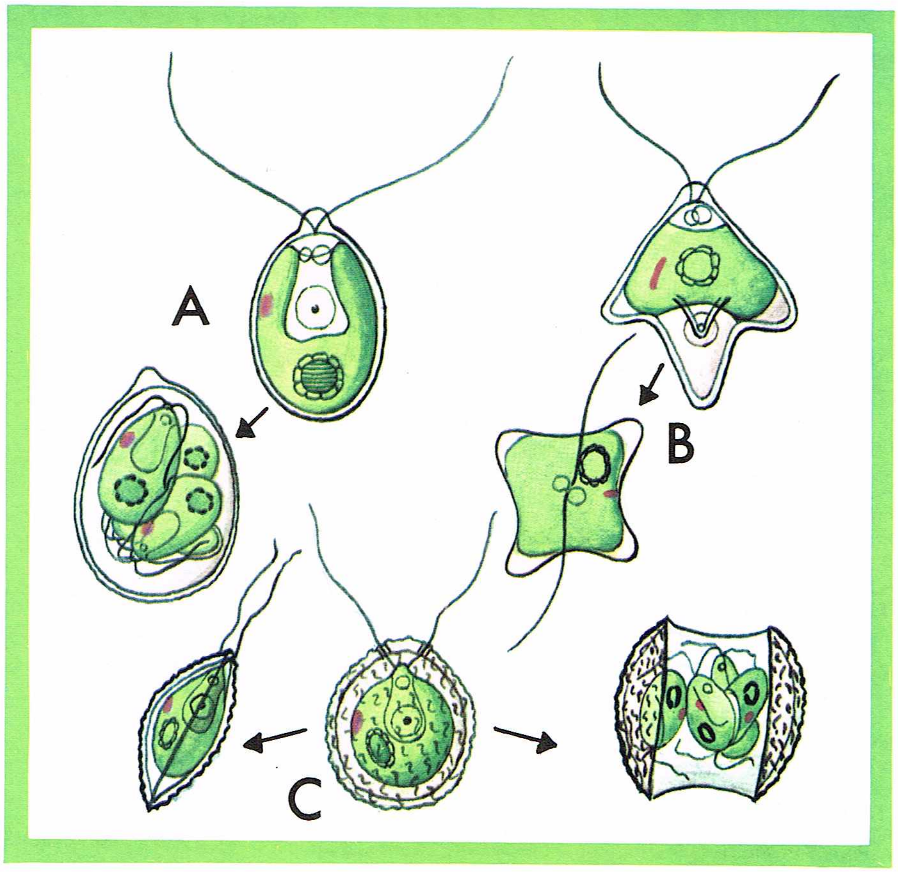

flagelles égaux. Le plaste vert a la forme d'une coupe dont le fond porte le plus souvent un gros pyrénoïde ; les bords du plaste sont découpés en quatre lobes. Stigma, vacuoles contractiles sont présents, suivant les espèces. La membrane est très mince, non individualisée, et la multiplication se fait par division longitudinale à l'état mobile.

Les *Tetraselmis* (ou *Platymonas*) à quatre flagelles ont une membrane bien définie ; lors de la division, les deux ou quatre cellules filles formées restent enfermées dans la membrane maternelle dilatée, puis sont libérées par rupture ou gélification de cette dernière. Une espèce de *Tetraselmis* est symbiotique dans les tissus de *Convoluta roscoffensis,* ver Turbellarié. Les *Prasinochlamydomonas* ont une fossette flagellaire d'où sortent deux flagelles.

Claude Rives - Marina Cedri

Pédinomonadales

Les cellules, de très petite taille (moins de 10 μ en général), sont libres et mobiles grâce à un seul flagelle ou à deux flagelles inégaux. Les cellules sont nues, à membrane très mince, à division longitudinale. *Pedinomonas,* genre marin et dulçaquicole, a des cellules discoïdales aplaties qui se meuvent grâce à un seul flagelle à poils courts mais sans écailles. Le plaste en urne possède stigma et pyrénoïde. *Nephroselmis* (ou *Heteromastix*) présente deux fouets, un court dirigé vers l'avant, un long traînant vers l'arrière ; ils sont toujours revêtus de poils et d'écailles. Le plaste possède un pyrénoïde à deux coques d'amidon.

Monomastix a un seul flagelle mais dépourvu de mastigonèmes ; il montre deux plastes avec pyrénoïde et présente à l'arrière un stigma et trois ou quatre gros corps mucifères ; la cellule est tapissée de fines écailles. Tous ces organismes, dont le cratère flagellaire est très réduit, vivent dans le nannoplacton des eaux douces ou marines.

Halosphærales

Ce sont des formes coccoïdes, solitaires, immobiles à membrane ferme, qui se multiplient par des zoospores végétatives de type *Pyramimonas* à cratères flagellaires d'où sortent quatre flagelles velus recouverts d'écailles organiques. Le genre marin *Halosphaera* forme à l'état végétatif de petites sphères vertes immobiles de 800 μ de diamètre avec de nombreux plastes à pyrénoïde. Les zoospores, à un ou deux pyrénoïdes suivant l'espèce, ont une structure et une cytologie identiques à celles des *Pyramimonas*. Les *Pachysphaera* à membrane épaisse et ponctuée, les *Pterosperma* à crêtes plus ou moins saillantes, sont comme *Halosphaera* des éléments du plancton marin.

Prasinocladales

Les genres *Prasinocladus* et *Chlorodendron* s'observent fréquemment sous forme de petits arbuscules fixés sur les parois des aquariums marins.

Les branches de cet organisme se terminent par des cellules ellipsoïdales avec un plaste vert et un pyrénoïde. Ces cellules peuvent se transformer en zoospores végétatives quadriflagellées ressemblant à *Pyramimonas*.

CHLOROPHYCÉES

Cette classe est la plus importante des classes de Chlorophytes, tant par le nombre des genres et des espèces que par sa diversité structurale. Nous y trouverons des formes microscopiques unicellulaires et aussi des Algues vertes marines de grande taille à structure plus élaborée. Leurs zoospores et leurs gamètes sont toujours à deux ou quatre flagelles lisses sans mastigonèmes. Ces cellules nageuses n'ont pas de cratère flagellaire, ni de revêtement d'écailles organiques. Deux ordres de Chlorophycées, Derbésiales et Œdogoniales, ont des gamètes et zoospores avec une couronne de flagelles lisses (disposition stéphanocontée). La reproduction est asexuée ou sexuée (avec isogamie, anisogamie ou oogamie), et le cycle est digénétique ou monogénétique haploïde ou diploïde.

Les Chlorophycées sont dulçaquicoles ou marines. Certaines vivent sur la terre humide, les écorces ou les feuilles d'arbres (Trentépohliales en particulier). D'autres croissent sur les glaciers et les névés et forment des neiges vertes ou orangées *(Chlamydomonas, Scotiella)*. D'autres encore prospèrent dans les tissus des animaux (*Zoochlorelles* des Ciliés, des Éponges et des Hydres d'eau douce). Enfin des Chlorococcales, des genres *Chlorococcum* et *Trebouxia*, et des Trentépohliales participent comme gonidies en association avec des Champignons pour former des Lichens.

Les Trentépohliales du genre *Cephaleuros* sont des parasites dangereux des feuilles de plantes cultivées des régions chaudes : thé et café. Les Chlorophycées sont aussi un élément important du plancton estival des eaux douces et sont surtout abondantes dans les eaux eutrophes.

Les espèces marines (Ulvales, Cladophorales) sont nombreuses dans les niveaux supérieurs des rivages, mais certaines, Codiales, Caulerpales, se retrouvent en eau profonde.

Les formes dulçaquicoles sont le plus souvent cosmopolites, cependant les Trentépohliales subaériennes sont plus abondantes dans les zones tropicales et subtropicales. Les Chlorophycées marines, Codiales, Ulvales, Cladophorales, ont aussi une large répartition tandis que les Acrosiphonales se localisent dans les mers froides, et les Dasycladales, Caulerpales et Siphonocladales abondent dans les régions chaudes de l'Atlantique, du Pacifique et de la Méditerranée.

SYSTÉMATIQUE

La morphologie du thalle permet de diviser la classe des Chlorophycées en quatre sous-classes : les *Chlorophycidées* pour les formes unicellulaires ou coloniales non filamenteuses ; les *Ulothricophycidées* pour les formes filamenteuses ou à thalles en tubes ou en lames à cellules à un seul noyau et à zoospores ou gamètes à deux ou quatre flagelles égaux ; les *Œdogoniophycidées* pour les formes filamenteuses à cellules uninucléées et à zoospores et gamètes stéphanocontés (à couronne de flagelles égaux et lisses) ; les *Bryopsidophycidées* à thalle souvent complexe en filaments, en lame, en vésicule à articles ayant de nombreux noyaux ou à siphon plurinucléé sans cloison.

● *Chlorophycidées*

Dans cette sous-classe d'organismes unicellulaires ou coloniaux, nous pouvons distinguer trois ordres : les *Volvocales*, formes flagellées libres à deux ou quatre flagelles ; les *Tétrasporales*, formes immobiles au stade végétatif, souvent en colonies gélatineuses, à cellules conservant des vésicules contractiles et ayant des zoospores à deux ou quatre flagelles ; les *Chlorococcales*, formes immobiles, solitaires ou coloniales, à membrane cellulosique bien définie, mais ne possédant pas de vésicules contractiles.

▲ **Ulva**, ***communément appelé laitue de mer (Manche).***

▼ **Gonium pectorale**, ***colonie dont six cellules ont formé des colonies filles.***

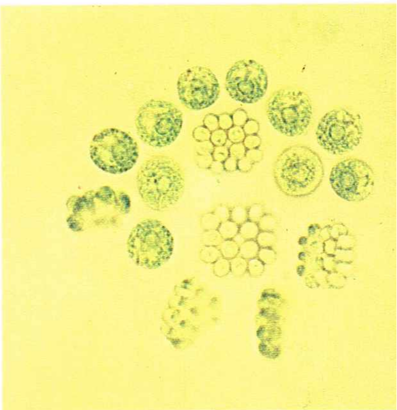

M. Ricard

M. Ricard

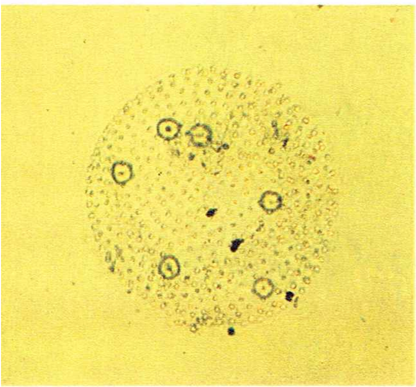

M. Ricard

M. Ricard

▲ ***De haut en bas :***
Volvox tertius.
Détail de la même Algue après coloration au bleu de méthylène.
Eudorina elegans.

Volvocales

Le genre *Chlamydomonas*, avec plus de cinq cents espèces surtout dulçaquicoles, est un bon exemple à choisir pour l'étude de cet ordre. Les cellules de petite taille sont à contour elliptique, à section circulaire. La membrane bien distincte enveloppe la cellule et s'épaissit à l'apex en une petite papille saillante. De chaque côté de cette papille sortent deux flagelles lisses qui présentent à leur base deux vésicules contractiles. Le plaste, chez de nombreuses espèces, est en forme d'urne dont la partie basale épaissie présente un gros pyrénoïde, tandis que le bord supérieur porte un stigma rouge. Le noyau est médian.

La multiplication végétative se fait par division dans la membrane maternelle élargie; ainsi se forment deux ou quatre cellules filles identiques à la cellule mère. La membrane se fend ou se gélifie et laisse s'échapper ces cellules filles mobiles.

La reproduction sexuée est isogamique ou anisogamique. Les cellules se transforment en gamétocystes donnant des gamètes semblables aux cellules végétatives, mais de plus petite taille. Après conjugaison des gamètes, l'œuf d'abord mobile à quatre flagelles (les deux flagelles de chaque gamète) s'arrondit, épaissit sa membrane et perd ses flagelles. Après une période de repos, l'œuf germe, subit la méiose et redonne quatre à huit cellules végétatives haploïdes. Certains *Chlamydomonas* sont oogames. Parfois les *Chlamydomonas* perdent leurs flagelles, s'entourent d'une gelée amorphe ou zonée, prennent l'état palmelloïde et se multiplient, faisant ainsi des masses gélatineuses renfermant un grand nombre de cellules qui reprendront la vie libre, mobile, solitaire, lorsque les conditions du milieu seront favorables.

La forme du plaste est fort variée suivant les espèces; à côté des *Chlamydomonas* à plaste en urne et à pyrénoïde, nous trouverons d'autres espèces sans pyrénoïde *(Chloromonas)* ou à pyrénoïde latéral, ou à nombreux pyrénoïdes. Parfois le pyrénoïde est médian et placé sur une lame équatoriale (plaste en H), d'autres fois cet organite est central et le plaste découpé en rayons (plaste étoilé); enfin il n'est pas rare que le plaste se divise en disques pariétaux. Les *Chlorogonium* sont des *Chlamydomonas* à cellules fusiformes, tandis que les *Carteria* à cellules ellipsoïdales possèdent quatre flagelles égaux.

Les *Polytoma* sont des *Chlamydomonas* ayant perdu leur plaste et leur couleur verte; ils mènent une vie hétérotrophe, mais ils possèdent bien souvent un stigma et accumulent dans leur cytoplasme de nombreux grains d'amidon.

Les *Dunaliella*, qui, souvent, abondent dans les eaux des marais salants et les colorent en rouge, ressemblent aux *Chlamydomonas* par leur plaste et leurs deux flagelles. Cependant ils ne possèdent qu'une membrane fort mince et se multiplient par bipartition longitudinale. Ils produisent de l'amidon et surtout du carotène qui leur donne une teinte rouge-orangé.

Les *Vitreochlamys* (ou *Sphaerellopsis*) ont la cytologie des *Chlamydomonas*, mais leur membrane est très ample, et le cytoplasme ne la remplit pas entièrement. La même structure se retrouve chez les *Haematococcus* qui colorent en rouge, grâce à leur carotène, les eaux pluviales des gouttières ou des bassins. Le cytoplasme est relié à la membrane par de fins prolongements. Citons aussi *Brachiomonas* des cuvettes marines supralittorales qu'il teinte souvent en vert : il a des cellules en forme de pyramide carrée, dont le sommet porte deux flagelles tandis que la base se prolonge par quatre cornes et une queue médiane.

Phacotus, abondant dans le plancton des lacs, est un *Chlamydomonas* à membrane bivalve, épaissie et calcifiée. *Pteromonas* (genre dulçaquicole de quarante espèces) a aussi une membrane bivalve, biconvexe en vue de profil, mais hyaline sans incrustation calcaire.

A côté de ces Volvocales unicellulaires se trouvent, toujours en eau douce, toute une série de formes coloniales où chaque cellule de la colonie pourra par reproduction asexuée redonner une colonie fille. Le genre *Gonium* se présente en colonies carrées et plates de quatre à trente-deux cellules. Ces cellules ressemblent à des *Chlamydomonas* dont les deux flagelles sont tous orientés dans le même sens. Une gelée assure la cohésion de la colonie. A côté de la reproduction asexuée, on observe une reproduction sexuée. Chez *Gonium pectorale*, chaque cellule de la colonie donne un gamète biflagellé nu. Il y a isogamie et il est impossible de reconnaître les gamètes mâles des gamètes femelles, cependant les gamètes copulants proviennent de deux colonies différentes (colonie + et colonie —) : il y a donc *hétérothallie*. Il se forme, après conjugaison, des œufs mobiles à quatre flagelles (planozygote). Après perte des fouets et méiose, le zygote produit une petite colonie flagellée à quatre cellules. Chaque cellule de cette colonie donnera naissance à une colonie végétative à seize cellules : sur quatre colonies ainsi formées, deux seront des colonies + et deux des colonies —; chez d'autres espèces du même genre, il y a *homothallie*, les gamètes + et — provenant de la même colonie. Le genre *Pandorina*, très commun, comme le genre précédent, dans les eaux douces du monde entier, a des colonies globuleuses, de seize cellules serrées les unes contre les autres comme dans un fruit de mûre (d'où le nom de *Pandorina morum*). *Eudorina* a des colonies ellipsoïdales de trente-deux à soixante-quatre cellules disposées en couronnes parallèles non contiguës. Les cellules sont identiques, mais celles de la partie apicale antérieure possèdent un gros stigma, tandis que celles du pôle postérieur ont un stigma minuscule. Dans ce genre, les gamètes mâles sont fusiformes, et les gamètes femelles, biflagellés eux aussi, ne sont pas libérés; il y a donc une anisogamie extrême qui est presque une oogamie.

Chez *Volvox*, les colonies sphériques sont de grande taille (0,5 mm à 1,5 mm de diamètre) et possèdent un nombre énorme de cellules biflagellées (cinq cents à plusieurs milliers) situées en une couche périphérique. Souvent ces cellules sont reliées les unes aux autres par de fins prolongements cytoplasmiques. Lors de la division végétative, certaines cellules grossissent et deviennent des gonidies qui subissent un grand nombre de divisions pour former une sorte de sphère creuse présentant un gros pore tourné vers l'extérieur. Dans cette très jeune colonie, les pôles flagellaires sont tournés vers le centre; puis la colonie subit une inversion et se retourne comme un doigt de gant; les pôles flagellaires prennent alors leur position normale, tournée vers l'extérieur. Les colonies filles sont libérées par dissociation de la colonie mère.

La reproduction sexuée est une oogamie hétéro- ou homothallique. Les gamètes mâles sont fusiformes et de petite taille. Le zygote, de couleur orangée, a une membrane épaisse, parfois échinulée ou réticulée. Après méiose, le zygote donne une zoospore biflagellée, qui redonne par divisions successives une colonie fille après inversion. Chez les *Volvox* dioïques, les milieux de cultures de colonies mâles contiennent une substance active qui est indispensable pour induire la formation des oogones dans les cultures de colonies femelles.

Dans le genre *Uva* (ou *Chlamydobotrys*), les cellules piriformes biflagellées, au nombre de huit ou seize, sont groupées en grappe ou mieux en régime de bananes, les apex tournés tous dans le même sens; les cellules ont un plaste en urne dépourvu de pyrénoïde. La reproduction sexuée est isogamique homothallique.

Tétrasporales

Le genre *Tetraspora* forme des colonies immobiles, libres ou fixées, de grande taille (souvent plus de 10 cm), très gélatineuses, sans forme bien définie, en vésicules lobées ou en sacs allongés, d'un beau vert pâle; elles sont abondantes dans les eaux douces froides et bien oxygénées. Le microscope permet de reconnaître des cellules arrondies, groupées par quatre. Chaque cellule a un plaste en urne avec un gros pyrénoïde et à l'apex deux vésicules contractiles et deux longs filaments immobiles ressemblant à des fouets : les *pseudo-flagelles*. Le microscope électronique montre que ces pseudo-flagelles possèdent bien les neuf paires de tubules périphériques des flagelles mais que la paire centrale y fait défaut. La multiplication est obtenue par division végétative à l'état immobile et aussi par zoospores biflagellées. La reproduction sexuée liée à la température de l'eau est une isogamie.

Chez *Schizochlamys*, les cellules immobiles, groupées en paquets microscopiques, possèdent jusqu'à seize pseudo-flagelles et les zoospores végétatives sont quadriflagellées. Dans le genre *Pseudosphaerocystis* (ou *Gemellicystis*) qui vit dans le plancton des lacs, les colonies sont de petite taille, gélatineuses, flottantes sans flagelles ni

Page ci-contre :
▶ **Enteromorpha :**
Algue verte marine.

Claude Rives - Marina Cedri

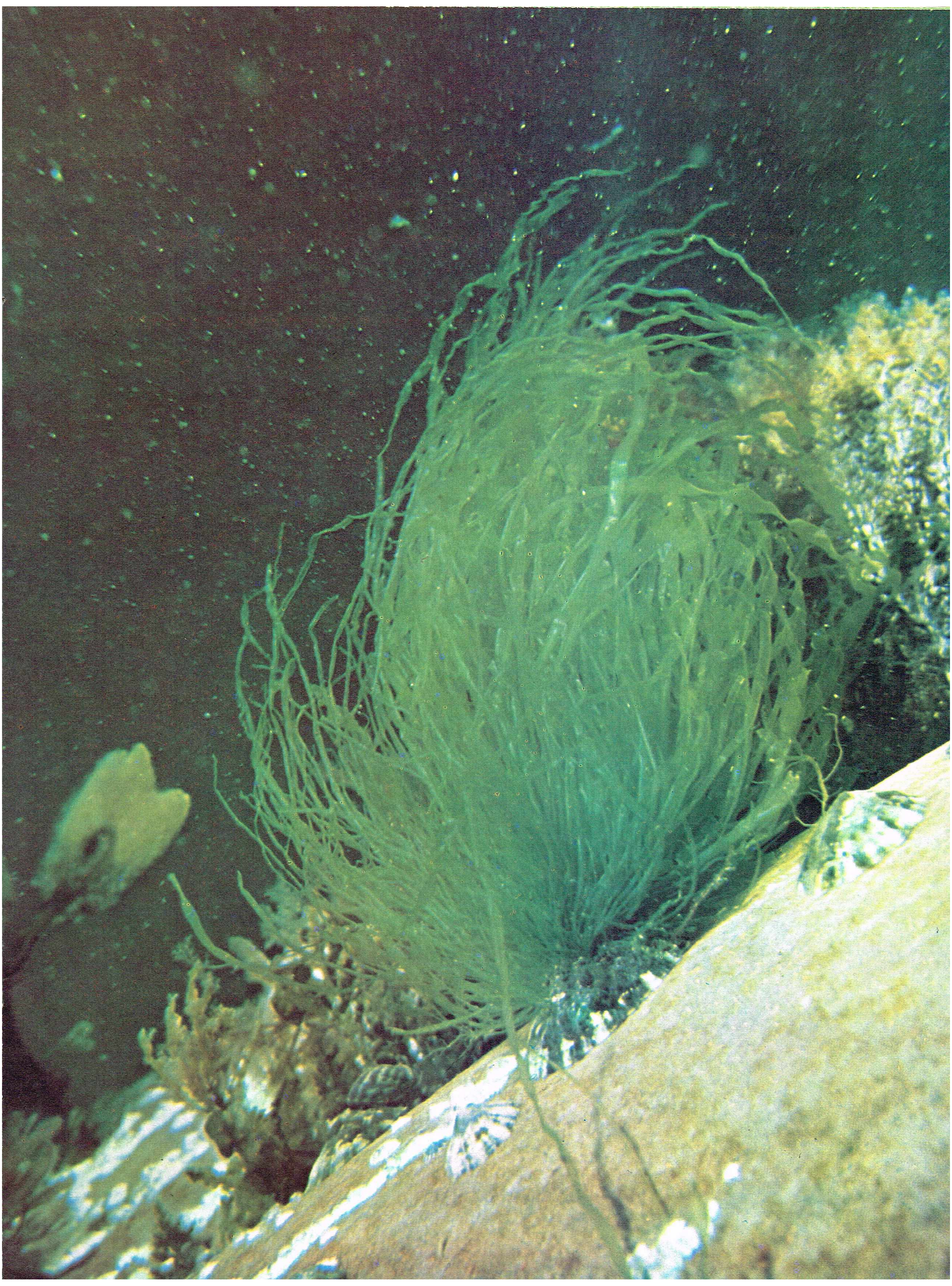

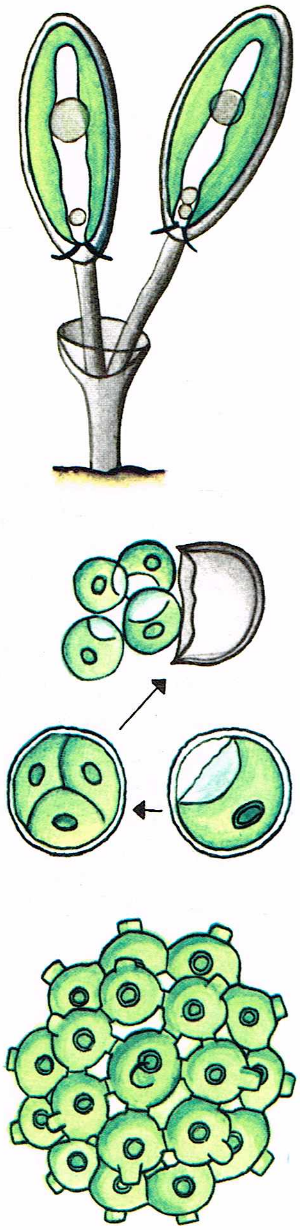

▲ *De haut en bas :* **Chlorangellia pygmaea** *(× 1 740),* **Chlorella vulgaris** *(× 2 050),* **Coelastrum cambricum** *(× 900). Ces trois espèces sont dulçaquicoles.*

pseudo-flagelles mais avec des cellules toujours pourvues de vacuoles contractiles; les zoospores végétatives sont biflagellées.

Dans la famille des *Chlorangiellacées*, nous trouverons des genres unicellulaires, fixés par un pédoncule gélatineux. Les cellules piriformes à plaste en urne possèdent toujours des vésicules contractiles et ont des zoospores végétatives du type *Chlamydomonas; Chlorangiella*, qui vit fixé sur les petits animaux du plancton des eaux douces, est un bon exemple de cette famille.

Comme on le voit, les Tétrasporales sont très voisines des Volvocales, et il est souvent difficile de distinguer un *Chlamydomonas* (Volvocales) à l'état palmelloïde immobile de certaines Tétrasporales.

Chlorococcales

Cet ordre regroupe presque uniquement des formes dulçaquicoles réparties en près de deux cents genres avec un millier d'espèces. Ce sont des Algues unicellulaires solitaires ou coloniales immobiles à membrane cellulosique bien définie. Leur multiplication se fait par spores : spores immobiles ressemblant à la cellule maternelle ou autospores, ou spores mobiles à deux ou quatre flagelles égaux et lisses (zoospores). La reproduction sexuée, connue chez quelques espèces seulement, est le plus souvent isogamique, plus rarement oogamique. Parmi les Chlorococcales à autospores, citons les *Chlorella*, minuscules cellules solitaires, sphériques, de 8 à 10 µ de diamètre, avec un plaste en urne et un pyrénoïde, et les *Monoraphidium* en forme de petites aiguilles vertes, droites ou recourbées. Les *Kirchneriella*, en croissant, les *Oocystis*, ovoïdes comme l'indique leur nom, sont aussi des formes autosporées, mais coloniales. Chez les *Scenedesmus* (deux cents espèces d'eau douce), les colonies (ou cénobes) sont formées de deux, quatre ou huit cellules disposées côte à côte en ruban court. La première et la dernière cellule de la chaîne portent souvent des épines cellulosiques. Chaque cellule de la colonie peut donner une colonie fille de quatre ou huit cellules par autosporulation. Les *Quadrigula* et les *Ankistrodesmus* ont des cellules fusiformes groupées en faisceau comme une botte d'asperges. Chez les *Crucigenia*, les colonies sont plates, formées de quatre cellules disposées en croix, tandis que les cénobes de *Coelastrum* sont constitués par huit, seize, trente-deux cellules sphériques groupées en sphère creuse. *Botryococcus* est une Algue planctonique des eaux douces ou saumâtres du monde entier. Les colonies à cellules, en grains de raisin réunis par des gaines gélatineuses, atteignent une taille visible à l'œil nu (1/2 mm). Elles sont parfois si abondantes qu'elles forment des fleurs d'eau de couleur verte ou rouge (cette coloration est donnée par une huile chargée de carotène).

La multiplication se produit uniquement par autospores. Dans tous ces genres, le seul mode de reproduction connu est l'autosporulation. Toute une série de *Chlorococcales* se multiplient par zoospores végétatives biflagellées : ainsi les *Chlorococcum* à cellule sphérique isolée et plaste en coupe avec pyrénoïde ou les *Trebouxia* à plaste central à courts lobes radiaux. Ces deux genres d'Algues subaériennes (où une reproduction isogamique est connue) participent avec des Champignons à la formation de Lichens; les *Characium* sont fusiformes ou recourbés et fixés par leur base étirée en pédoncule : ils sont épiphytes sur les Algues et se multiplient par zoospores à deux flagelles. Les *Tetraedron*, libres solitaires (une quarantaine d'espèces dulçaquicoles), sont en forme de coussinets triangulaires, tétraédriques ou polyédriques; ils se propagent par autospores et plus rarement par zoospores biflagellées.

Les *Sphaerocystis* sont des Algues du plancton des lacs. Les colonies sphériques, gélatineuses, de petite taille sont immobiles et groupent dans la région centrale huit, seize, trente-deux cellules arrondies à pyrénoïde. Leur multiplication se fait elle aussi par autospores et zoospores. Chez *Palmella*, les colonies n'ont pas de contour bien défini et forment des masses gélatineuses de grande taille (grosseur d'une noix) fixées sur les plantes aquatiques ou les rochers au bord des étangs. La multiplication est une bipartition cellulaire, mais on peut aussi observer la formation de zoospores végétatives biflagellées et une reproduction sexuée isogamique.

Eremosphaera, à cellule sphérique solitaire de grande taille (200 µ), vit dans les eaux acides; il possède un seul noyau et de nombreux plastes pariétaux polygonaux à pyrénoïde. La multiplication courante est l'autosporulation mais, en culture, on a mis en évidence une oogamie avec de petits gamètes mâles biflagellés, incolores, sans plaste ni stigma; le gamète femelle a l'aspect d'une cellule végétative normale. L'oogamie est connue aussi chez les *Chodatella* à cellules solitaires elliptiques ornées d'un petit nombre de soies épineuses et chez les *Golenkinia* à cellules rondes et soies très allongées. Signalons que, chez *Golenkinia*, les flagelles, cependant très épais, du gamète mâle ont bien les neuf paires de tubules périphériques mais une seule tubule centrale au lieu de deux. Dans la même famille, les *Micractinium*, espèces coloniales à soies rayonnantes, peuvent aussi se multiplier par autospores et par oogamie.

Les *Dictyosphaerium* forment des colonies planctoniques de petite taille où les cellules enrobées dans une gelée sont réunies par les fragments des membranes maternelles des cellules ayant donné des autospores. Là encore, l'oogamie a été observée. Le genre dulçaquicole *Hydrodictyon* se présente sous la forme d'un sac cylindrique atteignant 20 cm de longueur ou davantage. Ce sac est un assemblage de cellules cylindriques groupées trois par trois en un réseau hexagonal. Chaque cellule, d'abord à plaste pariétal à un pyrénoïde, s'allonge et multiplie le nombre de ses noyaux et de ses pyrénoïdes, et possède alors à l'état adulte un plaste en réseau irrégulier. La multiplication végétative se fait par zoospores biflagellées qui, dans la membrane maternelle, reforment une petite colonie réticulée. De la même façon, les cellules donnent des isogamètes biflagellés qui sont libérés et fusionnent deux par deux en zygotes sphériques. Le zygote subit la méiose et produit quatre zoospores qui perdent leurs flagelles et se transforment en une cellule polyédrique. C'est ce polyèdre qui redonnera de très nombreuses zoospores biflagellées qui se grouperont en une nouvelle colonie réticulée.

Les *Pediastrum* du plancton des lacs et des étangs ont des colonies circulaires en disque plat de quatre à soixante-quatre cellules disposées très régulièrement en une seule couche. Les cellules périphériques ont un, deux, trois ou quatre cornes tandis que les autres sont polygonales. Chaque cellule produit quatre, huit, seize... soixante-quatre zoospores végétatives biflagellées qui, en nageant, se groupent en une nouvelle colonie plate puis perdent leurs flagelles. La reproduction sexuée est identique à celle d'*Hydrodictyon*, mais le zygote, après la méiose, donne un grand nombre de zoospores (et non quatre) qui se transforment en polyèdre.

Toutes ces Chlorococcales sont des éléments importants du plancton et du benthos dulçaquicoles et constituent, surtout pendant la période estivale, la nourriture principale du zooplancton.

Les *Chlorella* et les *Scenedesmus* se cultivent aisément en milieu naturel ou enrichi (par du gaz carbonique et des sels minéraux) : ces Algues produisent en grande quantité des protéines, des graisses et des vitamines dont manque actuellement une partie de l'humanité. Aussi, depuis quelques années, dans divers pays ont été créées des usines pilotes, et déjà ces Chlorococcales sont utilisées soit pour l'alimentation humaine, soit pour celle des Animaux domestiques.

● Ulothricophycidées

Dans cette sous-classe, nous étudierons des Algues pluricellulaires, filamenteuses, simples ou ramifiées, en thalles tubulaires ou foliacés. Les cellules y sont toujours uninucléées, elles renferment des plastes simples, pariétaux, souvent avec pyrénoïdes, et des zoospores et des gamètes à deux ou quatre flagelles égaux et lisses. La multiplication asexuée est assurée par division transversale des cellules et par zoospores végétatives. La reproduction sexuée existe dans de nombreux genres : c'est une isogamie ou une anisogamie, beaucoup plus rarement une oogamie. Le cycle est digénétique ou monogénétique. On rencontre dans cette sous-classe beaucoup d'Algues d'eau douce mais aussi un nombre important d'espèces marines. Nous diviserons la sous-classe en cinq ordres : les *Ulothricales*, formes filamenteuses non ramifiées; les *Chætophorales*, formes filamenteuses ramifiées ou thalles

en disques à filaments rayonnants, toujours de couleur verte ; les *Chlorosarcinales*, thalles de cellules en amas ou en paquets cubiques ; les *Trentépohliales*, formes filamenteuses ou en disques toujours colorés en rouge-orangé par des caroténoïdes ; les *Ulvales*, thalles foliacés ou tubuleux.

Ulothricales

Le genre *Ulothrix* (marin et dulçaquicole) forme de longs filaments verts, fixés à la base dans le jeune âge puis librement flottants. Ces filaments sont des files unisériées de cellules avec noyau central et plaste pariétal en manchon ouvert avec un ou plusieurs pyrénoïdes. La multiplication se fait par division transversale des cellules et par émission de zoospores végétatives à quatre flagelles. La reproduction sexuée est une isogamie ou une anisogamie avec gamètes biflagellés. Le cycle est complexe, et, chez les espèces marines, il diffère suivant les espèces et les conditions du milieu. Ainsi, chez *Ulothrix flacca*, les formes de haut niveau ont un cycle monoïque, isogame digénétique, isomorphe. Les formes de bas niveau sont dioïques anisogames, digénétiques et hétéromorphes. Le zygote se fixe par un court pédoncule, prend un aspect piriforme (stade *Codiolum*) et divise son contenu en aplanospores sans flagelles qui germeront en filaments gamétophytiques mâle ou femelle. Un cycle analogue semble exister chez *U. zonata*, espèce commune des ruisseaux et eaux courantes. Les *Chlorhormidium* (appelés aussi *Hormidium* ou *Klebshormidium*) sont des Algues d'eau douce qui vivent aussi sur les sols humides, les troncs d'arbres, les vieilles murailles. Ils se distinguent des *Ulothrix* par deux caractères : plaste pariétal de petite taille non enveloppant et à un seul pyrénoïde, zoospores végétatives à deux flagelles. L'isogamie a été observée, mais fort rarement. Les filaments de *Chlorhormidium* se dissocient facilement en fragments d'une ou deux cellules.

Ce processus se retrouvera chez un autre genre subaérien, *Stichococcus*. Les cellules cylindriques à pôles arrondis sont de très petite taille avec un plaste pariétal sans pyrénoïde. Elles sont solitaires (et ressemblent alors à des Chlorococcales) ou par chaîne de deux à quatre. La multiplication se fait uniquement par division transversale ; zoospore et sexualité sont inconnues. Chez les *Raphidonema* des neiges vertes, le filament est formé aussi d'un petit nombre de cellules (moins de trente-deux) sans pyrénoïde, mais il y a une nette polarité, les deux cellules terminales sont pointues tandis que les médianes sont cylindriques. Dans ce genre, le seul mode de reproduction connu est la division transversale.

Les *Geminella* d'eau douce ont des cellules à contour elliptique portant un pyrénoïde et disposées en un filament entouré d'une gaine mucilagineuse ; chez certaines espèces, les cellules ne sont pas contiguës ; sexualité et zoosporulation ne sont pas connues.

Le genre *Microspora* forme une famille caractérisée par le plaste pariétal en manchon enveloppant, perforé ou réticulé et sans pyrénoïde. La membrane est épaisse et formée de deux pièces emboîtées dans la région médiane de la cellule, pièces qui, en coupe optique, ont une forme de H. Nous avons déjà signalé cette structure dans le genre *Tribonema* (Xanthophycée). La multiplication se fait par division transversale et par zoospores, à deux ou quatre flagelles. La sexualité est mal connue.

Chez le genre *Cylindrocapsa*, les cellules ont un plaste central étoilé avec un pyrénoïde. Les zoospores végétatives sont à deux flagelles. La reproduction sexuée est une oogamie typique. La cellule femelle grossit et s'arrondit ; un gamète mâle fusiforme à deux flagelles vient la féconder grâce à un pore de la paroi de l'oogone. Le cycle n'est pas entièrement connu.

Chætophorales

Cet ordre est fort important car il groupe plus de cent genres et plus de trois cents espèces tant marines que dulçaquicoles. Nous y trouverons des formes hétérotriches, c'est-à-dire à partie rampante et à partie dressée, mais aussi des formes où l'une de ces parties aura disparu. Les thalles y sont toujours filamenteux, mais, dans le cas de thalles en disques, seule la disposition rayonnante des cellules permettra de reconnaître des filaments.

J.-N. Reichel - « Réalités »

▲ *Algues vertes couvrant les galets d'Étretat.*

A côté des divisions végétatives et des zoospores, nous aurons très souvent une reproduction sexuée, iso- ou anisogamique, plus rarement oogamique.

Dans la vaste famille des *Chætophoracées*, nous trouvons des Algues filamenteuses ramifiées dont les rameaux s'effilent souvent en poils pluricellulaires ; la reproduction est isogamique ou anisogamique. Le genre *Stigeoclonium* (eau douce) est hétérotriche, mais chez certaines espèces seule subsiste la partie dressée, fixée à la base, prenant la forme d'un arbuscule à cellules à plaste pariétal portant un ou deux pyrénoïdes. Les branches terminales de l'arbuscule s'effilent en poils plus ou moins longs. Toutes les cellules peuvent donner des zoospores végétatives à quatre flagelles. La reproduction sexuée est une isogamie à gamètes à deux ou quatre flagelles. Le zygote, d'abord mobile à quatre ou huit fouets, donne quatre zoospores quadriflagellées après méiose, zoospores germant en une nouvelle Algue. Les *Chaetophora* sont des *Stigeoclonium* à croissance radiale formant des thalles macroscopiques gélatineux, fixés, de forme définie (sphériques, mamelonnés, digités, etc.). Chez *Draparnaldia*, des eaux courantes et pures, le filament fixé à la base par des rhizoïdes a une structure cladomienne. L'axe très long (8 à 10 cm), ramifié, est formé de grosses cellules en tonnelets à plaste très réduit. Il porte des bouquets de pleuridies très ramifiées à plaste bien développé, et terminées en poils incolores. Les pleuridies assument à la fois les fonctions assimilatrices et reproductrices. Elles donnent des zoospores végétatives à quatre flagelles ou des gamètes isogames, quadriflagellés eux aussi. Le genre *Microthamnion* a une organisation plus simple et prend, comme certains *Stigeoclonium*, l'aspect d'un thalle dressé sans partie basale rampante, mais les branches sont dépourvues de poils et les cellules ont un plaste pariétal sans pyrénoïde.

Ce genre dulçaquicole produit des zoospores végétatives biflagellées. Signalons que, chez cette Algue, on a découvert la présence de siphonoxanthine, xanthophylle abondante chez les Derbesiales et Caulerpales ; remarquons à ce sujet que cette substance a été aussi rencontrée chez quelques Prasinophycées *(Pyramimonas, Nephroselmis)*.

▼ **Hydrodictyon reticulatum** *(fragment de colonie).*

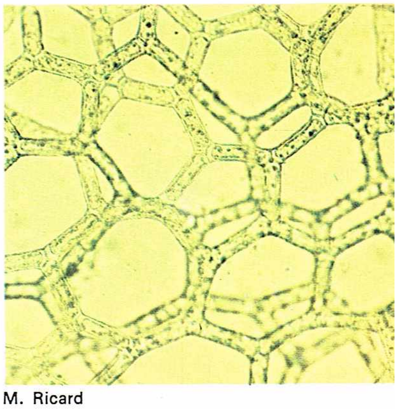

M. Ricard

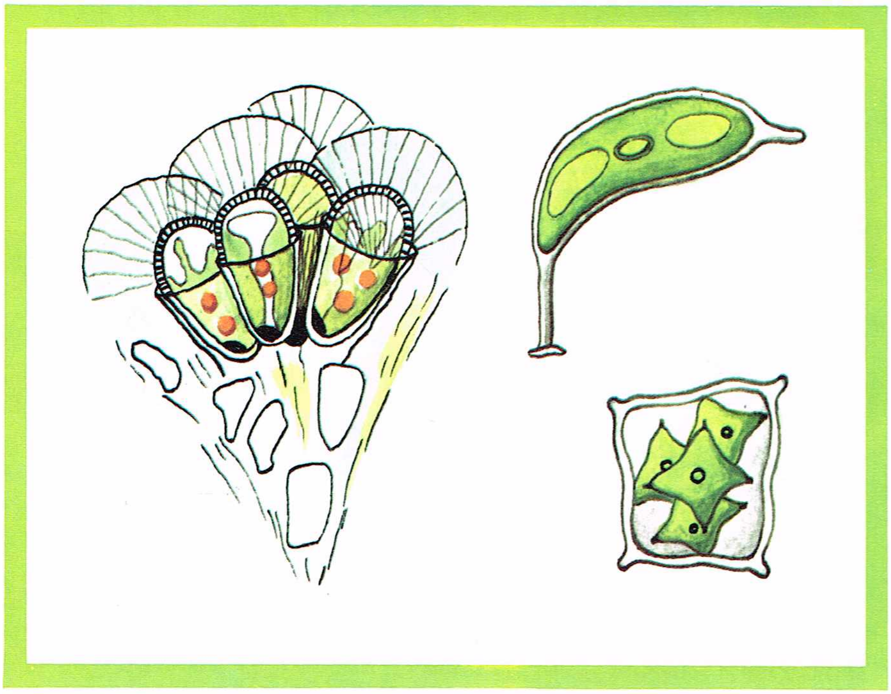

▲ *De gauche à droite : détail d'une colonie* **de Botryococcus braunii** *(× 1 800).* **Characium ornithocephalus,** *une cellule fixée (× 1 900).* **Tetraedron minimum,** *formation des autospores (× 1 850).*

Le genre dulçaquicole et marin *Gongrosira* est hétérotriche, et la partie dressée à cellules arrondies, sans poil, porte des sporocystes globuleux donnant des zoospores végétatives biflagellées. Les *Trichophilus* sont réduits à un thalle rampant irrégulièrement ramifié et qui vit sur et dans les poils du bradype (paresseux) d'Amérique du Sud, auquel ces Végétaux donnent une teinte verdâtre. Les cellules à membrane épaisse ont un plaste pariétal avec un pyrénoïde peu visible. Les cellules peuvent émettre des zoospores végétatives à quatre flagelles. Les *Tellamia* marines croissent dans les coquilles de Mollusques.

Les *Pleurococcus* (ou *Protococcus*) des anciens auteurs vivent sur les troncs d'arbres, les murs humides qu'ils recouvrent d'une poussière verte. Ce sont des Algues formant des paquets cubiques de cellules à plaste pariétal lobé, sans pyrénoïde, et plus rarement de courts filaments (genre *Apatococcus*, se multipliant par zoospores biflagellées).

Les *Desmococcus* ont le même aspect et le même habitat, mais les cellules ont un plaste avec pyrénoïde et ne forment pas de zoospores mais uniquement des aplanospores sans flagelle. *Fritschiella* est une Chætophoracée qui croît sur les sols humides des régions chaudes (Inde, Afrique, Japon, etc.). La partie aérienne forme des bouquets de filaments unisériés ramifiés, elle est assimilatrice et saisonnière, et disparaît avec la sécheresse ; elle est reliée par l'intermédiaire d'un axe court à une partie rampante souterraine qui s'accroche au sol grâce à des rhizoïdes incolores. Cette dernière est pérenne et reproductrice ; les rhizoïdes sont fixateurs et assimilateurs. Les zoospores végétatives sont de trois types : macro- et microzoospores à quatre flagelles, microzoospores à deux flagelles. Enfin il existe des isogamètes biflagellés. Il y a alternance régulière de générations isomorphes, haploïde et diploïde. Le zygote germe en donnant à un pôle un rhizoïde cloisonné, à l'autre l'axe et les parties aériennes. La méiose se produit lors de la formation des zoospores qui sont haploïdes et produisent des gamétophytes.

Quelques genres sont caractérisés par la présence de poils unicellulaires. *Ochlochaete* forme des thalles discoïdes épiphytes sur les Algues marines ; ceux-ci montrent des filaments ramifiés vers le bord, tandis que la partie centrale est constituée par deux ou trois couches de cellules globuleuses. Les cellules à plaste pariétal et pyrénoïde portent un long poil.

Les *Phaeophila* épiphytes sur les Algues marines ont des filaments rampants ramifiés dont les cellules s'ornent de longs poils minces souvent sinueux tandis que les *Bulbocoleon*, marins aussi, sont caractérisés par leurs poils à base bulbeuse portés par de petites cellules.

Les *Ectochaete*, marins et dulçaquicoles, vivent en endophytes sous la cuticule d'autres Algues et possèdent aussi de longs poils non cloisonnés.

Aphanochaete croît sur les *Cladophora* d'eau douce ; son thalle est un court filament rampant ramifié portant des poils renflés à leur base et distincts des cellules. La multiplication végétative se fait par zoospores quadriflagellées, et la reproduction sexuée est presque une oogamie. Le gamète femelle, quadriflagellé, est de grande taille et perd rapidement ses fouets : il est alors fécondé par un petit gamète mâle à quatre flagelles.

Nous rencontrons aussi dans les Chætophorales marines des genres qui donnent des thalles discoïdaux à structure radiale et formés d'une seule assise de cellules *(Pringsheimia)* ou à partie centrale à plusieurs couches cellulaires *(Ulvella)*. Dans le genre dulçaquicole, *Coleochaete*, nous aurons un ensemble de caractères originaux : cellules portant des poils filiformes et ayant une gaine basale bien distincte, et surtout une oogamie d'un type assez particulier. Suivant les espèces, le thalle est soit filamenteux ramifié, avec filaments rampants dressés ; soit en coussinets de filaments libres ; soit discoïdal par coalescence de filaments réunis au centre et libres à la périphérie ; soit enfin circulaire à une seule couche cellulaire par union parfaite des filaments radiaux. Les zoospores végétatives sont biflagellées.

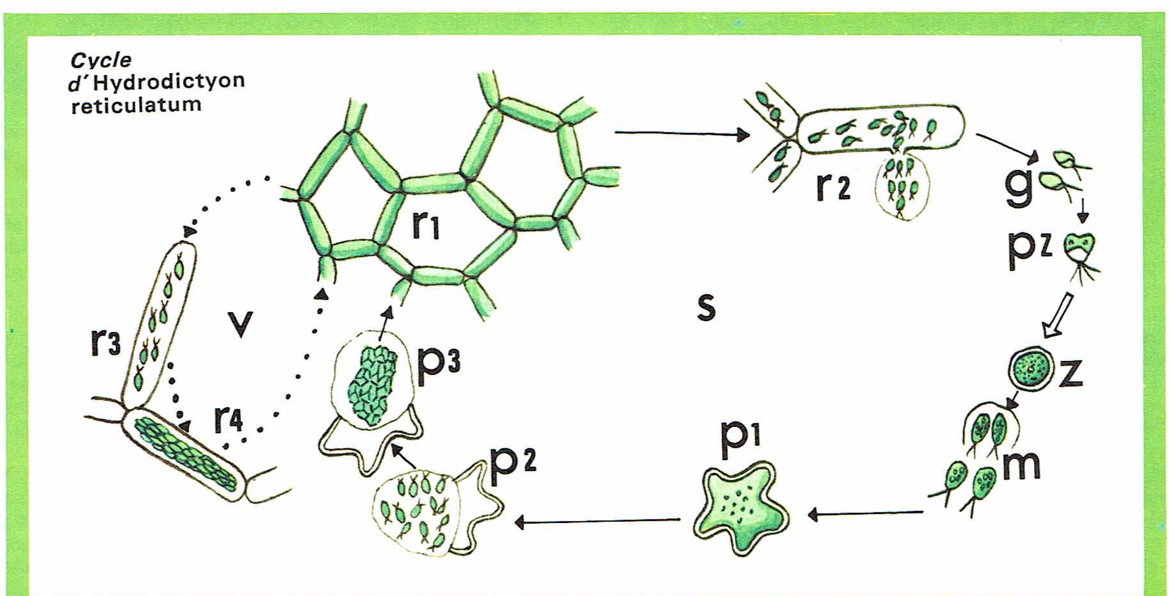

▶ *g : gamètes ; m : méiose et production de quatre zoospores ; p_1 : polyèdre ; p_2 : germination du polyèdre ; p_3 : formation du jeune réseau ; pz : isogamie ; r_1 : réseau adulte ; r_2 : émission de gamètes ; r_3 : zoospores végétatives dans une cellule adulte ; r_4 : formation d'un jeune réseau dans une cellule adulte ; s : cycle sexué ; v : cycle végétatif ; z : zygote. Les flèches simples indiquent la phase haploïde du cycle, les flèches doubles, la phase diploïde.*

La reproduction sexuée est une oogamie avec une oogone renflée surmontée d'un col incolore et des gamètes mâles à deux flagelles, souvent sans plastes. Après fécondation, les cellules voisines de l'oogone s'accroissent et entourent l'œuf d'un cortex. Après une période de repos, l'œuf subit la méiose et produit des zoospores biflagellées qui redonneront de nouveaux thalles végétatifs.

Chlorosarcinales

Ce petit groupe d'Algues microscopiques croissant surtout dans les sols humides est caractérisé par des thalles en paquets cubiques ou en tétrades cellulaires et par l'absence totale de filaments. C'est un groupe primitif qui est sans doute l'ancêtre des Chætophorales. La multiplication se fait par division végétative des cellules et par zoospores à deux ou quatre flagelles. La sexualité, rarement signalée, est isogamique ; les plastes sont le plus souvent en coupe creuse avec un pyrénoïde, mais certains genres en sont dépourvus *(Chlorosarcina)* ou possèdent un plaste central étoilé *(Borodinella)*. Le thalle a, suivant les genres, des formes variées : cubique chez *Chlorosarcina* et *Chlorosarcinopsis*, en paquet tétraédrique chez *Borodinella*, en colonie plate d'une couche de cellules chez *Chloroplana* (zoospore à deux flagelles) et *Planophila* (zoospores à quatre flagelles) ou enfin en paquets irréguliers *(Pseudendocloniopsis)*. Chez ce dernier genre les spores ont un stigma mais pas de flagelles.

Trentépohliales

Ces Algues strictement subaériennes vivent sur les sols, les rochers, les écorces d'arbre, les feuilles qu'elles recouvrent d'un fin velours de filaments de couleur rouge-orangé ou de thalles arrondis visibles à l'œil nu. L'abondance de gouttelettes d'huile riche en caroténoïdes leur donne cette couleur rouge si caractéristique (et aussi parfois une odeur de violette).

Le genre *Trentepohlia*, avec une quarantaine d'espèces surtout abondantes dans les régions tropicales humides, a des thalles filamenteux hétérotriches avec des filaments simples ramifiés, unisériés et des filaments dressés atteignant quelques millimètres de longueur. Les cellules cylindriques ont des plastes pariétaux rubanés irréguliers de couleur vert pâle et le cytoplasme est bourré de gouttes d'huile orangée. L'amidon très peu abondant a été décelé grâce au microscope électronique. Les filaments portent à leur base des gamétocystes sessiles sphériques qui donnent des isogamètes biflagellés tandis que les filaments dressés ont des sporocystes pédicellés ou en crochet, soit solitaires, soit en bouquets de quatre ou huit. Ces sporocystes se détachent et sont dispersés par le vent. Lorsqu'ils tombent dans un lieu humide, ils émettent des zoospores quadriflagellées qui donnent naissance à un thalle.

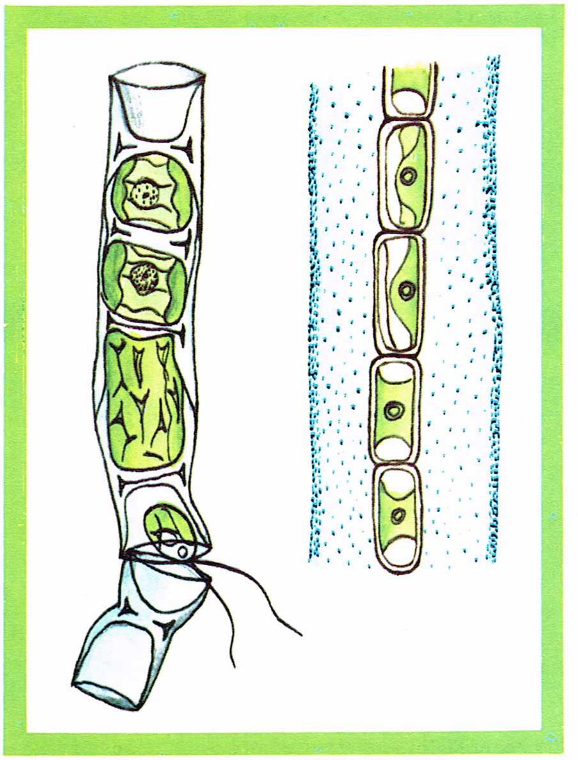

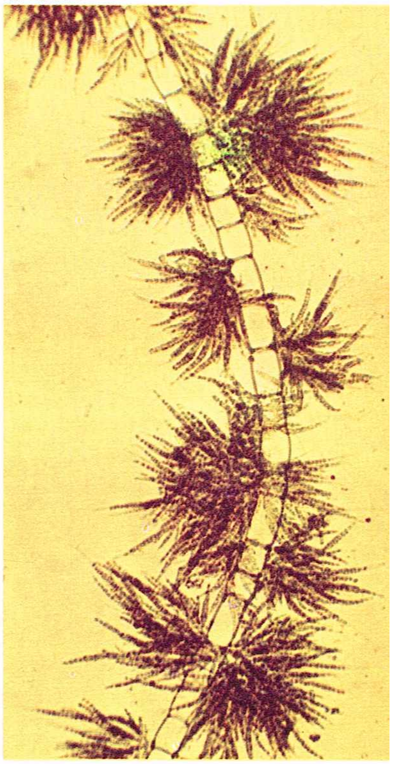

M. Ricard

▲ *Fragment de* **Draparnaldia glomerata.**

◀ *De gauche à droite.* **Microspora loefgrenii,** *fragment de filament et émission de zoospore (× 710).* **Geminella minor,** *plancton d'eau douce, fragment de filament (× 1 050).*

Le genre *Phycopeltis* montre la même structure cellulaire mais les filaments dressés sont absents et les filaments rampants forment des thalles arrondis d'une seule couche de cellules, thalles fixés, sans rhizoïde, sur les feuilles et les écorces d'arbres.

Chez *Cephaleuros*, nous retrouvons la même organisation mais le thalle est parasite des feuilles ; il est sous-cuticulaire avec plusieurs assises de cellules, et souvent des rhizoïdes s'enfoncent dans les tissus de l'hôte. Les sporocystes pédicellés se dressent à la surface de la feuille parasitée. Le cycle de *Cephaleuros* est connu : des gamétocystes sessiles produisent des isogamètes biflagellés qui forment des zygotes. Ces derniers germent aussitôt en un sporocyste nain de quelques cellules avec une cellule basale fixatrice. Ce sporocyste émet quatre microzoospores quadriflagellées qui redonnent un thalle. Le lieu de la méiose n'a pas été précisé ; le cycle est digénétique, hétéromorphe. Ces *Cephaleuros* sont des parasites dangereux pour les plantes tropicales cultivées, comme le caféier et le théier.

▼ *Rochers en Bretagne recouverts d'Algues vertes.*

Lemanchec - Explorer

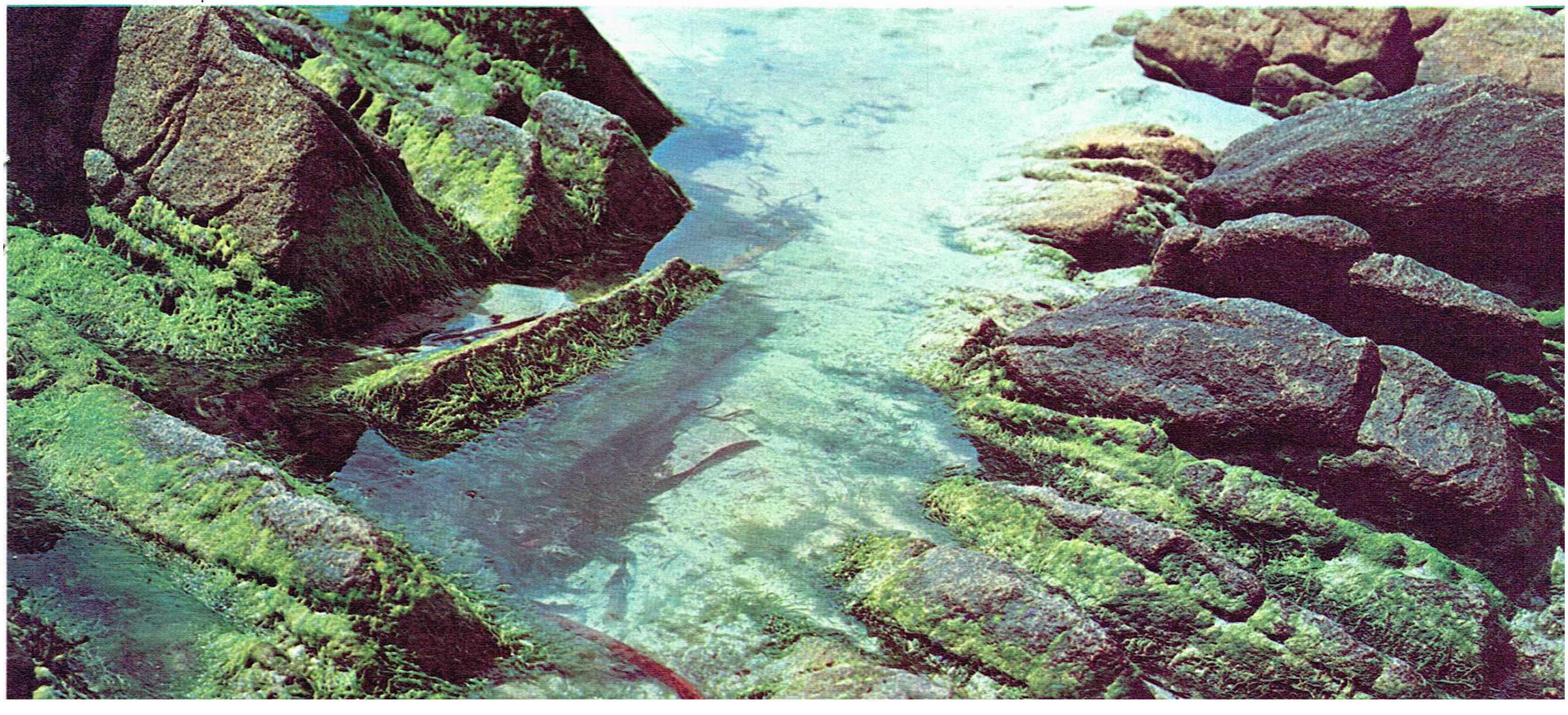

Claude Rives - Marina Cedri

▲ *Le genre* **Enteromorpha** *(Ulvales) abonde dans la zone des marées.*

Ulvales

Cet ordre renferme des Algues macroscopiques particulièrement fréquentes dans les niveaux côtiers supérieurs et les flaques supra-littorales; elles ont des thalles fixés en lames vertes ou en tubes simples ou ramifiés.

Les *Monostroma* d'abord vésiculeux ont ensuite un thalle lobé, déchiqueté, à une seule couche de cellules groupées par quatre et enrobées dans un mucilage. Ces cellules ont des plastes en coupe à un pyrénoïde. Les thalles sont des gamétophytes haploïdes dioïques à gamètes biflagellés qui, par isogamie, donnent des zygotes qui subissent la méiose avant d'émettre des zoospores quadriflagellées produisant des thalles gamétophytes *(M. bullosum)*. Le cycle est donc monogénétique haploïde. Chez une autre espèce, *M. oxycoccum*, il y a perte de la sexualité, et seules les zoospores biflagellées végétatives sont connues.

Chez les *Ulva* à grandes lames vertes, fermes et brillantes, le thalle est formé de deux couches de cellules pressées les unes contre les autres. Les *Enteromorpha* en tubes creux avec une seule couche de cellules à un ou plusieurs pyrénoïdes ont aussi une alternance régulière de sporophytes diploïdes et de gamétophytes haploïdes. Le cycle est digénétique, isomorphe comme chez les *Ulva*.

On peut placer dans l'ordre des Ulvales la famille des *Prasiolacées* dont de nombreux auteurs font un ordre particulier des Prasiolales. Ces Algues marines, dulçaquicoles (eau courante) et subaériennes forment des thalles foliacés fixés par un court pédoncule. Ces thalles ont une assise de cellules groupées très régulièrement suivant deux axes perpendiculaires. Les cellules ont un plaste central étoilé (caractère qui se retrouve chez les *Blidingia*, Algues très proches des *Enteromorpha*). Les thalles sont diploïdes et se multiplient végétativement par spores non flagellées (aplanospores). Ces thalles peuvent donner des gamètes.

Chez *Prasiola stipitata*, espèce marine, la partie supérieure du thalle subit la méiose et émettra dans des secteurs voisins, en mosaïque, des gamètes mâles biflagellés et des gamètes femelles sans flagelles. Les zygotes issus de cette union seront mobiles un certain temps grâce à un des flagelles du gamète mâle (l'autre étant résorbé) puis germeront en un nouveau thalle diploïde : le cycle est donc monogénétique.

● Œdogoniophycidées

Cette sous-classe ne renferme que l'ordre unique des Œdogoniales et la seule famille des Œdogoniacées avec trois genres et plus de cinq cents espèces filamenteuses des eaux douces. Ces filaments extrêmement minces, unisériés, simples ou ramifiés sont fixés par leur base et forment sur les cailloux et les plantes aquatiques un tapis chevelu d'un joli vert qui parfois peut atteindre 5 ou 10 cm d'épaisseur.

La sous-classe présente trois caractères distinctifs : les zoospores végétatives et les gamètes mâles sont pourvus d'une couronne de flagelles égaux (disposition stéphanocontée) ; la reproduction sexuée est une oogamie ; les cellules, lors de leur division, présentent à leur sommet une série de calottes emboîtées et montrent un phénomène d'élongation tout à fait remarquable.

Les cellules des Œdogoniales sont uninucléées et possèdent un plaste, en manchon pariétal perforé ou réticulé avec de nombreux pyrénoïdes. Chez les *Oedogonium* monoïques que nous prendrons comme exemple, le filament est simple, unisérié, fixé à la base. Certaines cellules se renflent pour donner les oogones à oosphères immobiles ; d'autres cellules, après divisions répétées, se transforment en anthéridies de courte longueur et émettent un ou deux gamètes mâles avec une couronne de flagelles. Un gamète mâle libéré va féconder une oosphère grâce à un pore ou une fente de l'oogone, et le zygote formé s'entoure d'une épaisse membrane triple, souvent ornée de fossettes, d'épines, de verrues, de côtes. Après un temps de latence, le zygote se divise, après méiose, en quatre zoospores stéphanocontées qui germeront en quatre nouveaux individus. Le cycle est donc haploïde, monogénétique. La reproduction asexuée est assurée

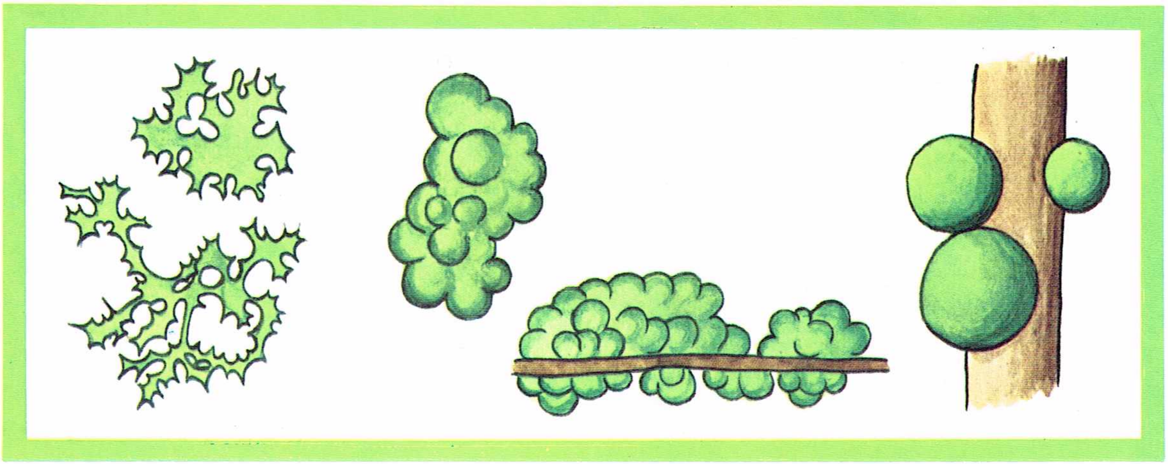

▶ *De gauche à droite :* **Chaetophora incrassata** *: deux thalles (eau douce).* **Chaetophora tuberculosa** *: thalle libre et thalles fixés (eau douce).* **Chaetophora elegans** *: trois thalles fixés (eau douce).*

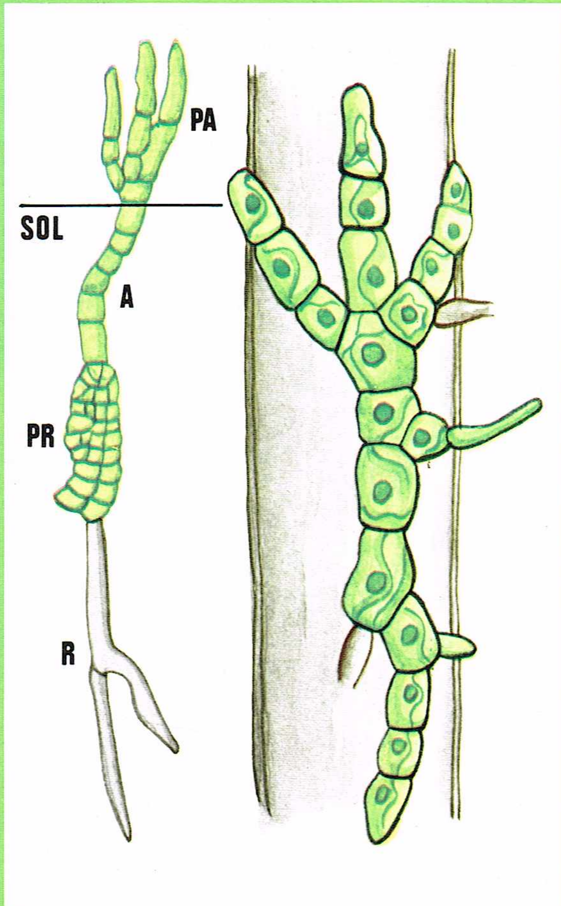

▲ **Fritschiella tuberosa** *(à gauche), d'après R. N. Singh. PA : partie aérienne dressée; A : axe; PR : partie rampante reproductrice; R : rhizoïdes (× 590).* **Aphanochaete repens** *(à droite), épiphyte sur* **Cladophora** *d'eau douce montrant la base de poils bulbeux (× 1 630).*

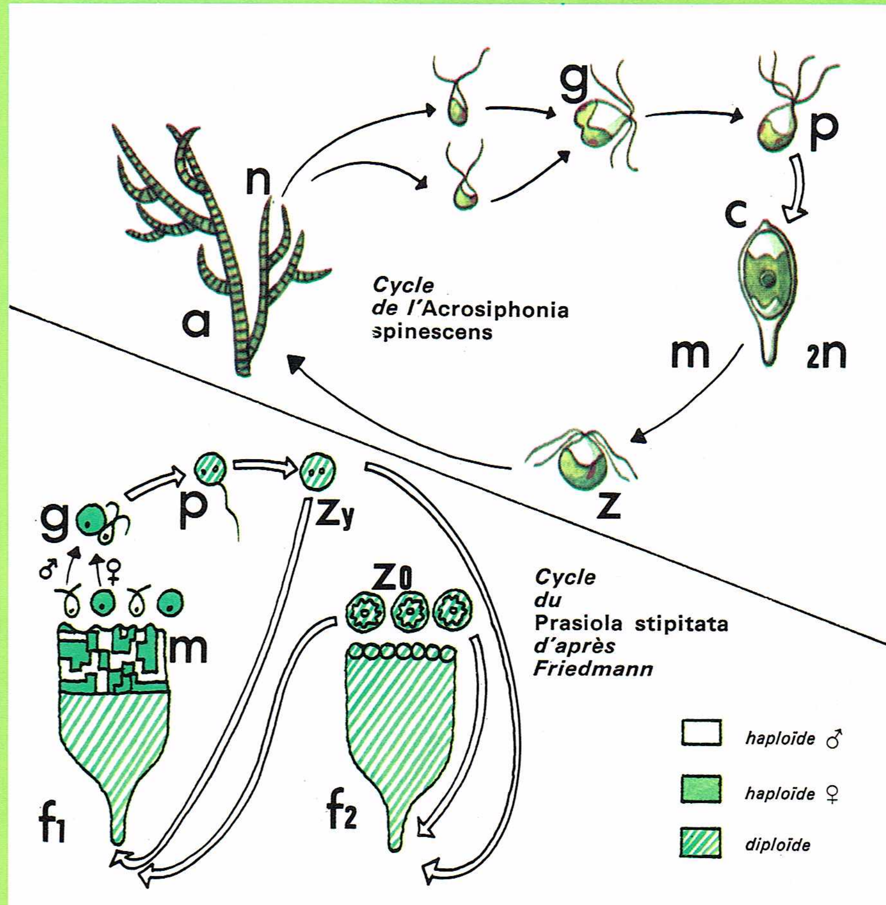

▲ *Deux cycles de Chlorophycées. m : méiose; g : gamie; p : planozygote; a : phase gamétophytique* **Acrosiphonia** *(n); c :* **Codiolum** *(2 n); z : zoospores végétatives; f_1 : fronde sexuée; f_2 : fronde à reproduction végétative; zy : zygote; zo : spores non flagellées. Les doubles flèches indiquent la phase diploïde, les simples la phase haploïde.*

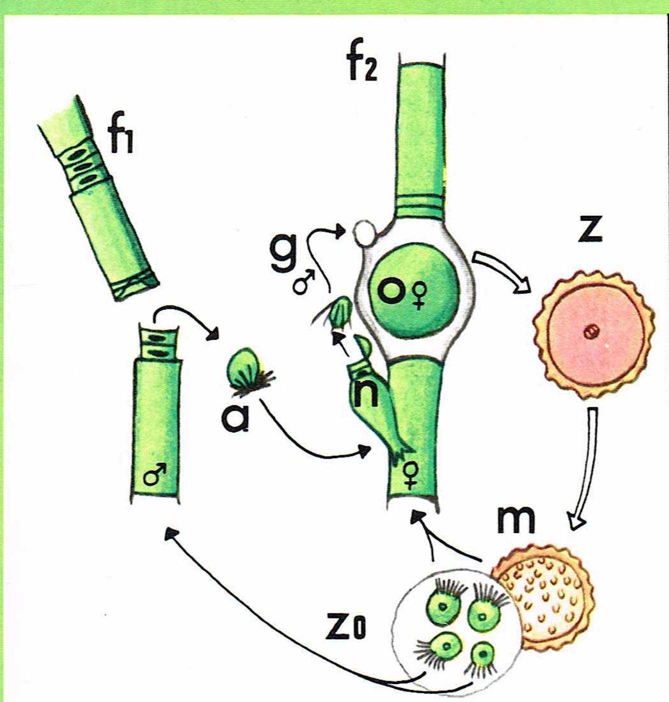

Cycle d'un **Oedogonium** *dioïque à mâle nain*

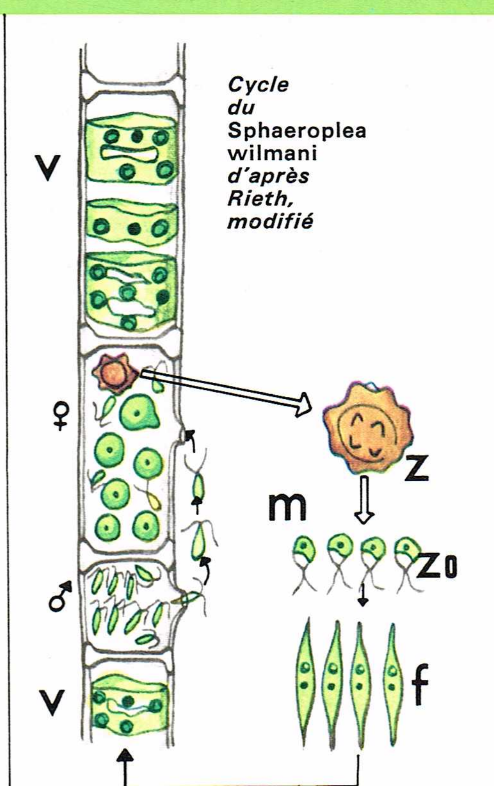

◀ *f_1 : filament mâle; a : androspore; n : mâle nain; g ♂ : gamète mâle, o ♀ : gamète femelle; z : zygote; zo : zoospore; m : méiose. Doubles flèches : phase diploïde; flèches simples : phase haploïde. (Schéma de gauche). v : article végétatif; ♀ : article femelle avec oogone et un zygote (après gamie); ♂ : article mâle à gamètes biflagellés; z : zygote; m : méiose; zo : zoospores végétatives; f : filaments à un noyau et un pyrénoïde; v : filaments végétatifs. (Schéma de droite).*

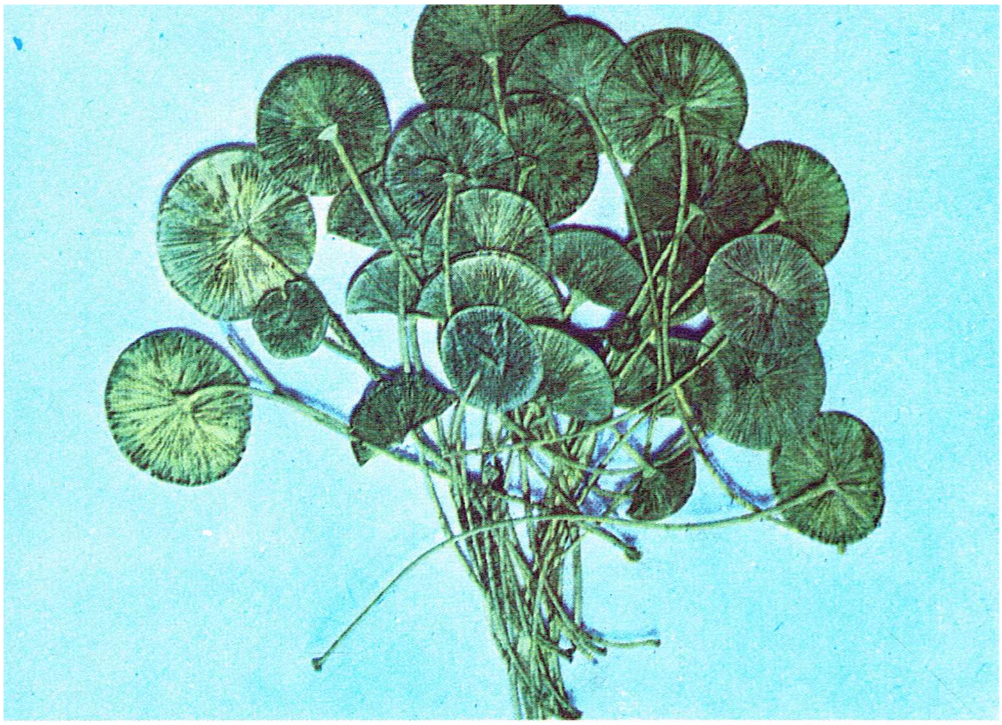

M. Bavestrelli, C. Bevilacqua, S. Prato

▲ Acetabularia mediterranea *(Dasycladales).*

par des zoospores stéphanocontées libérées par rupture du filament. Il existe des *Oedogonium* dioïques et des formes à mâle nain (nannandriques). Chez ces derniers, l'androspore, de même taille qu'une zoospore végétative, ne va pas féconder directement l'oosphère; elle se fixe au voisinage de l'oogone et germe en un court filament à cellule support surmontée d'une ou deux cellules fertiles qui produisent chacune deux gamètes mâles, stéphanocontés, de petite taille. Un de ces gamètes va féconder l'oosphère. Les espèces nannandriques peuvent être monoïques ou dioïques.

Les *Bulbochaete* sont des Œdogoniales ramifiées et portant des poils latéraux à base bulbeuse. Les *Oedocladium* qui se développent souvent sur les sols humides des régions chaudes sont des *Oedogonium* ramifiés et dépourvus de poils.

● Bryopsidophycidées (ou Siphonophycidées)

Cette sous-classe groupe un grand nombre d'Algues marines caractérisées soit par des siphons sans cloisons, soit par des articles plurinucléées. Le caroténoïde dominant est non le β carotène mais l'α carotène. Quelques-unes de ces Algues renferment des xanthophylles particulières : siphonoxanthine et siphonéine.

Les thalles y sont de structure fort variée, filaments segmentés non ramifiés des Sphæropléales, filaments ramifiés, divisés en articles des Cladophoracées et Acrosiphoniales, siphons enchevêtrés en thalle vésiculeux ou arbusculaires chez les Codiales, siphons ramifiés des Dichotomosiphonales, thalle complexe des Dasycladales et des Caulerpales.

Nous trouvons donc là une grande diversité qui justifie la division de cette classe en sept ordres que nous étudierons brièvement.

Sphæropléales

Cet ordre ne renferme qu'une seule famille avec un seul genre et sept espèces vivant dans les eaux douces des mares, des fossés et des étangs. Il s'agit de longs filaments librement flottants, fort minces mais atteignant plusieurs centimètres de longueur. Ils sont unisériés, formés d'articles cylindriques séparés par des cloisons parfois incomplètes. Chaque article présente une série de plastes superposés en manchons pariétaux avec plusieurs pyrénoïdes. A chaque plaste correspond un noyau. Nous avons donc une structure fort voisine de celle des *Ulothrix*. La reproduction sexuée est oogamique à cycle monogénétique haploïde, soit dioïque, soit monoïque. Dans un article, les noyaux se divisent sans que soit modifiée la forme du filament, et il se produit des centaines de gamètes mâles biflagellés, fusiformes, de petite taille. Les articles du filament femelle donnent de la même façon des oosphères sphériques. Les articles des filaments mâles et femelles sont percés d'un pore médian qui permettra la sortie des gamètes mâles et la fécondation des oosphères. Les zygotes s'entoureront alors d'une épaisse membrane ornée de crêtes, d'épines, de verrues, et leur cytoplasme se colorera en rouge. Ils seront libérés par destruction de la paroi du filament et, après un temps de repos parfois fort long, germeront, après méiose, en donnant chacun quatre zoospores biflagellées. Ces zoospores perdent leurs flagelles et produisent un filament fusiforme, à un noyau et un pyrénoïde, puis par multiplication rapide de ces derniers se reforme un filament végétatif flottant.

Acrosiphoniales

Ce sont des Algues marines filamenteuses simples ou ramifiées à cellules uninucléées ou articles plurinucléés possédant un plaste pariétal réticulé avec de nombreux pyrénoïdes. Leur cycle digénétique hétéromorphe les distingue des Cladophoracées.

Acrosiphonia est une Algue ramifiée avec des articles plurinucléés et des rameaux recourbés en crochet. Ce gamétophyte donne des gamètes biflagellés. Après isogamie, les zygotes germent en un sporophyte pédicellé unicellulaire et uninucléé, le stade *Codiolum* qui croît dans les thalles d'une Algue rouge encroûtante, *Petrocelis*. Ce *Codiolum* émet, après méiose, des zoospores à quatre flagelles qui redonnent un *Acrosiphonia*.

Urospora à filament non ramifié fixé à la base a le même cycle et le même stade *Codiolum*.

Chez *Spongomorpha* à cellules uninucléées et thalle ramifié, le sporophyte, toujours unicellulaire, n'est pas pédicellé, c'est un *Chlorochytrium*.

Siphonocladales

Le thalle est formé d'articles plurinucléés (famille des Cladophoracées) ou de siphons qui peuvent donner des kystes ségrégatifs simulant des ramifications (familles des *Siphonocladacées* et *Valoniacées*). Les plastes sont toujours réticulés, pariétaux avec de nombreux pyrénoïdes. Les zoospores végétatives sont à quatre flagelles et les gamètes biflagellés.

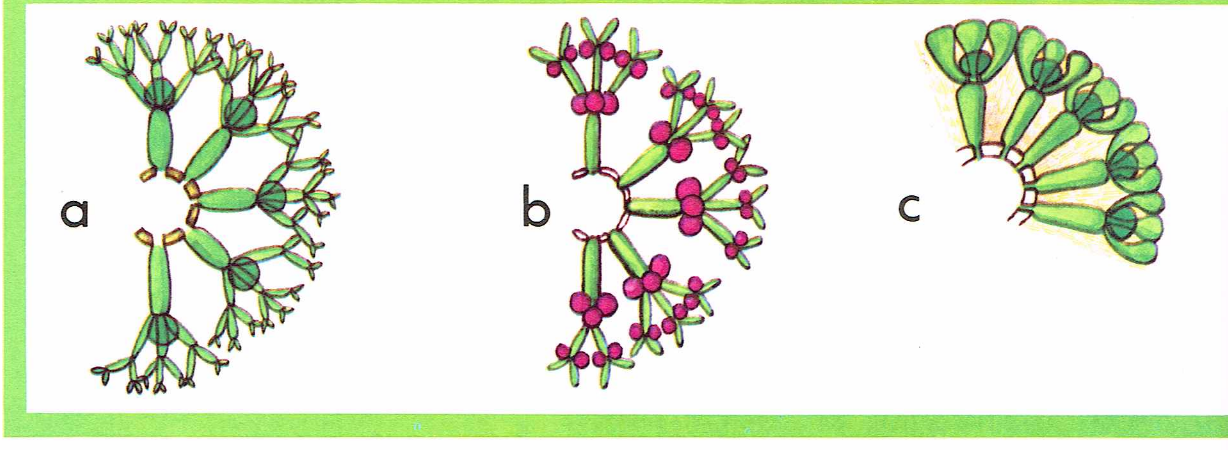

▶ *Disposition schématique des organes reproducteurs chez les Dasycladales. En vert : ampoules donnant directement des gamètes; en rouge : ampoules avec kystes, le plus souvent operculés, qui donnent les gamètes. En brun : les parties calcifiées. Verticilles fertiles de a. -* Dasycladus *(d'après Oltmanns). b. -* Batophora *(d'après Harvey). c. -* Cymopolia *(d'après Solms). d. -* Neomeris *(d'après Cramer). e. -* Bornetella *(d'après Solms et Cramer). f. - Coupe d'une ombrelle d'*Acetabularia mediterranea *(d'après Oltmanns). V_1 : cicatrice d'un verticille stérile, caduc; V_2 : verticille fertile portant à la base les logettes en ampoules (A) qui renferment les kystes, dont l'un est représenté à droite (K) en train d'émettre des gamètes.*

◀ **Codium bursa** *(Codiales).*

Chez les *Cladophora* marins (plus de cent espèces), le sporophyte diploïde alterne avec un gamétophyte haploïde de même aspect. Le sporophyte filamenteux et ramifié à articles plurinucléés, après méiose, donne des zoospores à quatre flagelles qui germent en gamétophytes. Le zygote formé par isogamie de gamètes biflagellés sera l'origine du nouveau sporophyte. Ce cycle digénétique isomorphe est modifié chez *Cladophora glomerata*, espèce courante en eau douce : le cycle est monogénétique diploïde. Le thalle est un sporophyte diploïde qui émet, après méiose, des isogamètes biflagellés qui fusionneront en un zygote, souche du nouveau sporophyte.

Rhizoclonium (à articles ne contenant que deux ou quatre noyaux) et *Chaetomorpha* (à très nombreux noyaux), surtout abondants en mer, sont des formes filamenteuses isogamiques non ramifiées ayant le cycle des *Cladophora* digénétiques.

Le *Siphonocladus pusillus* de Méditerranée est un bon exemple pour la famille des Siphonocladacées. Il s'agit d'une petite vésicule de quelques centimètres de longueur fixée par des rhizoïdes ramifiés. Le thalle a une mince couche de cytoplasme avec un plaste réticulé, de nombreux pyrénoïdes et de nombreux noyaux : une énorme vacuole occupe la partie centrale de la vésicule. Le cytoplasme se fragmente en éléments plurinucléés qui s'entourent d'une membrane ; cette division ségrégative sera l'origine d'articles et de ramifications latérales. Les kystes formés suivant le même procédé donnent des zoospores végétatives biflagellées sans méiose, ou des gamètes après méiose.

Les *Microdictyon* et les *Anadyomene* des mers chaudes ont un aspect très élégant : siphons réunis en réseau chez les premiers, ou en lame en éventail chez les seconds, et cela grâce à la division ségrégative.

Les *Valonia* (Méditerranée et mers chaudes) de la famille des Valoniacées ont un thalle en vésicule de grande taille (jusqu'à la grosseur d'un œuf de pigeon) à nombreux noyaux et plaste réticulé. Cet énorme siphon fixé par des rhizoïdes peut par division ségrégative et bourgonnement donner naissance à des siphons secondaires vésiculeux ; les zoospores végétatives sont à quatre fouets, et les gamètes, émis après méiose, sont biflagellés. Le cycle semble monogénétique diploïde comme chez *Cladophora glomerata*.

A l'exception de la famille des Cladophoracées, les Siphonocladales sont surtout des hôtes des mers chaudes ou tropicales. Le genre *Protosiphon* qui croît sur la terre humide au bord des mares a l'aspect d'un minuscule

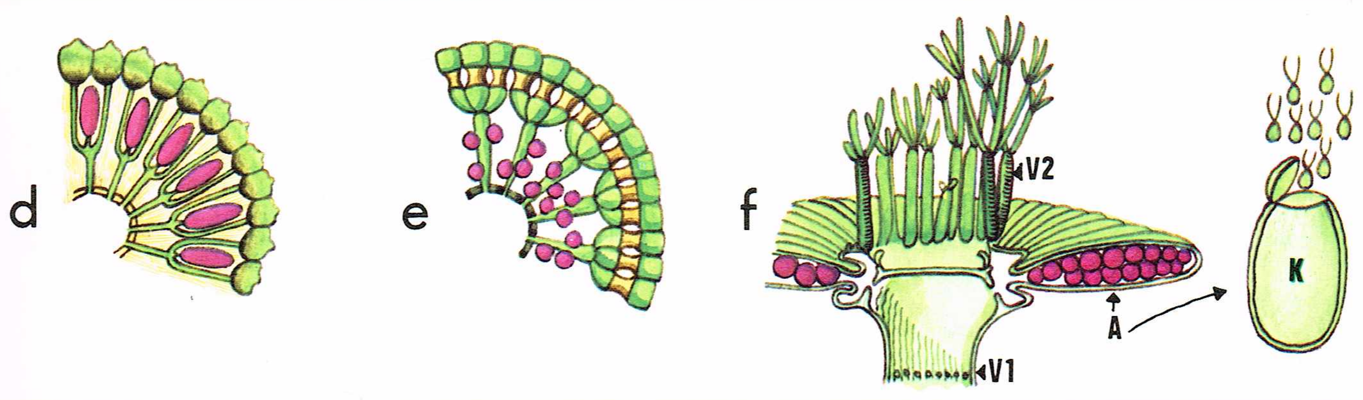

▲ *En haut :* Dasycladus clavaeformis *(× 1). En bas :* Batophora oerstedti *(× 1). Deux thalles; celui de gauche porte des kystes dans la partie supérieure.*

▼ Cymopolia barbata *(×1).*

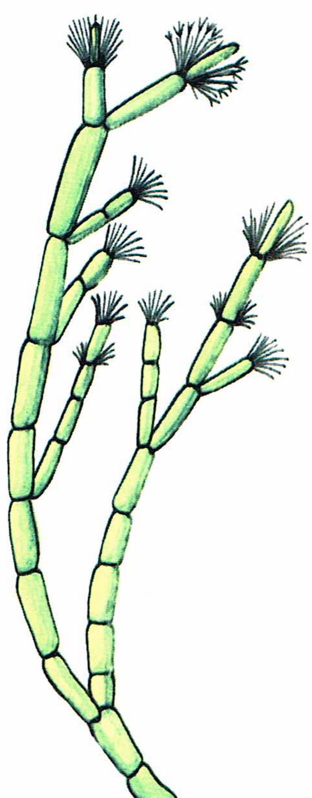

Valonia d'un demi-millimètre de diamètre. Son plaste pariétal réticulé renferme de nombreux pyrénoïdes. Comme *Valonia*, il est plurinucléé et peut, par division ségrégative, bourgeonner en donnant de jeunes thalles. On connaît des zoospores végétatives à deux flagelles et des gamètes isogames biflagellés. La méiose se fait lors de la germination du zygote polyédrique. Le cycle est monogénétique, haploïde. Les genres *Chlorochytrium* et *Phyllobium* sont des Algues endophytes dans les plantes aquatiques (lentilles d'eau, sphaignes) ; elles sont placées souvent parmi les Chlorococcales. Certains auteurs les rangent dans un ordre spécial des Chlorochytriales au voisinage des Siphonocladales.

Chez un *Chlorochytrium* d'eau douce, le thalle microscopique est logé dans les tissus de lentille d'eau : il a un plaste pariétal entier à nombreux pyrénoïdes et nombreux noyaux. Il se transforme en un gamétocyste produisant des isogamètes biflagellés. Chez *Phyllobium*, le thalle est filamenteux et porte des vésicules à plastes nombreux disposés radialement. Ces vésicules se transforment en gamétocystes. Le cycle est sans doute monogénétique, diploïde.

Dasycladales

Cet ordre renferme uniquement des Algues marines des mers chaudes : celles-ci souvent calcifiées sont bien conservées à l'état fossile. Elles apparaissent à l'Ordovicien, base du Silurien (400 millions d'années environ). On dénombre une soixantaine de genres fossiles, mais actuellement n'en subsistent qu'une dizaine.

Le thalle, le plus souvent uninucléé, a une structure cladomienne à pleuridies avec un axe dressé à ramifications verticillées de rameaux communiquant avec l'axe. La membrane renferme à la place de la cellulose du mannane. Les plastes sont pariétaux, isolés, sans pyrénoïde. L'amidon est remplacé par des fructosanes (inuline chez les *Acetabularia*). Le cycle est monogénétique diploïde, la méiose se plaçant lors de la formation des gamètes biflagellés. *Acetabularia mediterranea* est un bon exemple de Dasycladales. Cette Algue de 4 à 6 cm de hauteur a un axe calcifié fixé qui présente un très gros et unique noyau à sa base. Au sommet se développe un premier verticille de filaments très fins régulièrement ramifiés. Ce verticille fugace est remplacé par un nouveau verticille à filaments contigus donnant à l'Algue l'aspect d'une petite ombrelle. Le noyau se fragmente en petits noyaux qui émigrent dans les rayons de l'ombrelle et y forment des kystes uninucléés. Dans ces kystes, les noyaux se multiplient et donnent naissance soit directement à des zoospores biflagellées végétatives, soit après méiose à des gamètes anisogames. Par destruction de l'ombrelle maternelle, les kystes sont libérés, ils s'ouvriront par un opercule et émettront des zoospores ou des gamètes. Après fusion anisogamique, les zygotes formés redonneront de nouveaux thalles.

Chez *Dasycladus*, les thalles de 7 à 10 cm sont des cylindres dressés avec un axe et de très nombreux verticilles serrés les uns contre les autres en forme de goupillons. Les zoosporocystes ou gamétocystes placés à la première ramification du verticille donnent directement zoospores ou gamètes sans former de kystes.

Chez *Batophora*, les verticilles d'une dizaine de rayons sont très nettement séparés et possèdent à chacune de leurs ramifications des kystes composés comme chez *Acetabularia*. *Neomeris* et *Bornetella* sont en forme de massues calcifiées et montrent des verticilles serrés les uns contre les autres. Le premier genre a un seul kyste par ampoule fertile; le second libère des kystes composés à opercule.

Cymopolia est formé d'un filament épais, articulé, de 4 à 20 cm, à ramification dichotomique : chaque article est formé par un axe avec ses verticilles coalescents portant des kystes simples.

Codiales et Derbésiales

Dans cet ordre, nous placerons des Algues siphonées à nombreux noyaux et plastes pariétaux, discoïdes et séparés avec ou sans pyrénoïde. Ces Algues, toutes marines, n'ont jamais de division ségrégative. Nous étudierons les trois genres *Derbesia, Bryopsis* et *Codium*.

Derbesia a un thalle filamenteux siphoné diploïde plus ou moins ramifié qui porte des sporocystes globuleux. Après méiose, les sporocystes émettent des zoospores à couronne de flagelles (stéphanocontées). Ces zoospores germent en un gamétophyte haploïde en vésicule ovoïde de la grosseur d'un pois (dénommé *Halicystis*). Cet *Halicystis* produit des gamètes biflagellés; ceux-ci, par fusion isogamique, engendrent un zygote, origine du *Derbesia* filamenteux. Le cycle est donc digénétique hétéromorphe.

Les *Bryopsis* ont des thalles siphonés de 10 à 15 cm à ramification pennée dont les petits rameaux (pinnules) produisent des gamètes biflagellés. Chez *B. hypnoides* de Hollande, espèce monoïque, le thalle haploïde donne des gamètes biflagellés mâles et femelles dans le même gamétocyste. Après anisogamie, le zygote germe en un petit protonéma siphoné ramifié avec un gros noyau, protonéma qui reproduit le gamétophyte.

A Brest et à Banyuls, la même espèce a un comportement différent : le protonéma donne après méiose des zoospores stéphanocontées à un noyau qui germent en un gamétophyte haploïde. *Bryopsis plumosa*, espèce dioïque, a le même cycle que *B. hypnoides* de Hollande. Enfin, chez *B. halymeniae*, le zygote donne non un protonéma mais un macrothalle sporophyte diploïde ayant l'aspect d'un *Derbesia* et produisant des zoospores stéphanocontées après méiose.

Chez ces espèces, la phase haploïde a des membranes avec xylane tandis que la phase diploïde possède du mannane (les *Derbesia* et la phase *Halicystis* ont aussi des membranes à mannane). Ainsi le cycle du *Bryopsis* digénétique hétéromorphe est très comparable à celui des représentants du genre *Derbesia;* il n'y a donc désormais aucune utilité à conserver pour ces derniers un ordre spécial des *Derbesiales*.

Les *Codium* abondants sur nos côtes sont des Algues siphonées à cladomes multiaxiaux en cordons parfois ramifiés (*C. tomentosum* de plusieurs décimètres de long) ou en massue (*C. bursa* jusqu'à 30 cm de diamètre). Les filaments axiaux constituent une moelle incolore, et les pleuridies un cortex vert avec de nombreux plastes sans pyrénoïdes. Les filaments se terminent par des utricules qui portent à leur base des gamétocystes isolés par une cloison, et où se forment, après méiose, des gamètes biflagellés anisogames. La germination du zygote donne directement un nouveau *Codium*. Le cycle est monogénétique diploïde.

Caulerpales

Ces Algues siphonées strictement marines vivent uniquement dans les mers chaudes, surtout dans les régions tropicales. Elles sont caractérisées par le dimorphisme des plastes : à côté des plastes verts classiques se rencontrent des plastes incolores (leucoplastes ou amyloplastes) contenant un très gros grain d'amidon. De plus, les gamètes biflagellés ne se forment pas dans des gamétocystes spécialisés, mais l'Algue tout entière devient un gamétocyste, tout son protoplasme se transforme en gamètes (holocarpie), et, après leur émission, l'Algue n'est plus qu'un sac vide et mort. Le cycle est monogénétique diploïde, et, après fusion de gamètes iso- ou anisogames, le zygote à quatre flagelles redonne un thalle adulte.

Les *Caulerpa* ont des cladomes uniaxiaux avec une partie rampante fixée par des rhizoïdes ramifiés et une partie dressée de formes très variées : foliacée, pennée, vésiculeuse, en grappe, etc. Leur aspect rappelle parfois celui des plantes supérieures, d'où des noms d'espèces évocateurs : *cupressoides* (en forme de cyprès), *cactoides* (en forme de cactus), *sedoides* (en forme de sedum), etc. Les espèces sont monoïques ou dioïques. Les *Udotea* et les *Flabellaria* sont formés par des siphons dressés, ramifiés, groupés en lame pédonculée en forme d'éventail.

Les *Halimeda* très calcifiés ont un aspect de cactus à raquette *(Opuntia);* leur structure dérive des cladomes multiaxiaux. Certaines plages tropicales où ils abondent sont recouvertes par les articles du thalle, ronds et plats, ayant jusqu'à 2 cm de diamètre.

Dichotomosiphonales

Ce petit ordre ne renferme que l'unique genre *Dichotomosiphon* vivant dans les eaux douces du monde entier, où il reste cependant toujours fort rare. Le thalle est formé de longs siphons cylindriques (plusieurs centimètres)

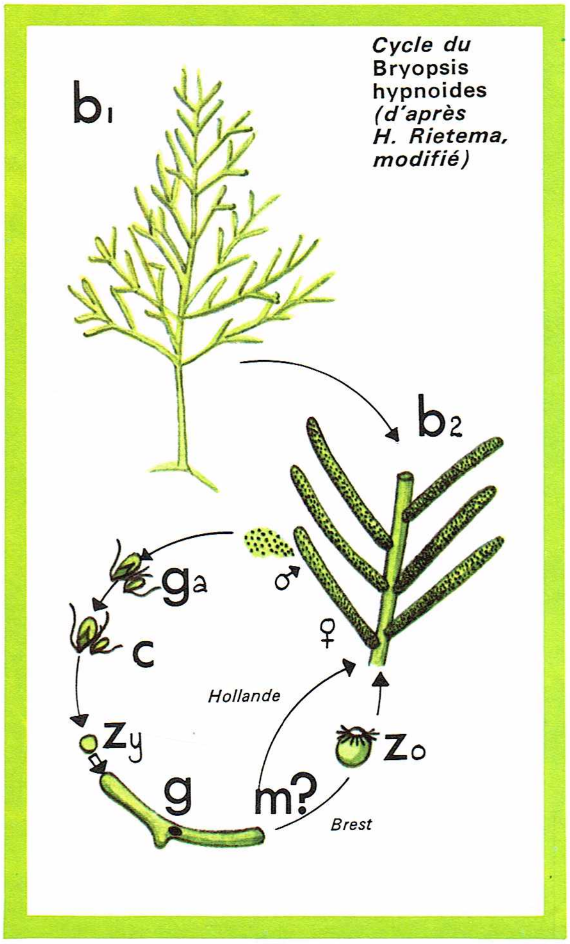

Photo J. Lecomte - C.N.R.S. - Laboratoire Arago - Banyuls-s.-Mer

▲ **Halimeda tuna** *(Caulerpales).*

◀ ***b_1 : thalle ; b_2 : thalle plus grossi ; ga : gamètes ; c : hétérogamie ; zy : zygote ; g : filament à noyau unique ; m? : méiose ; zo : zoospore.***

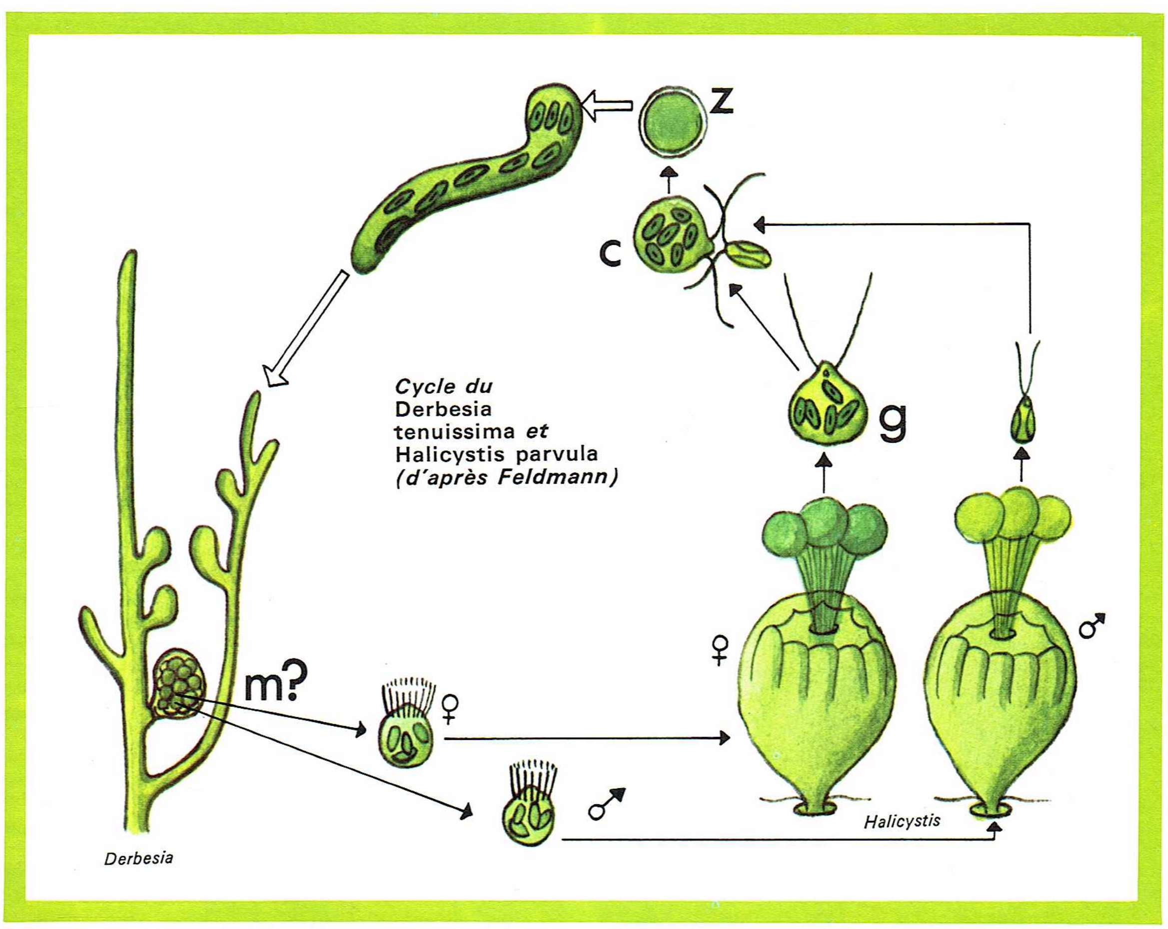

◀ ***g : gamètes ; c : gamie ; z : zygote ; m? : méiose.***

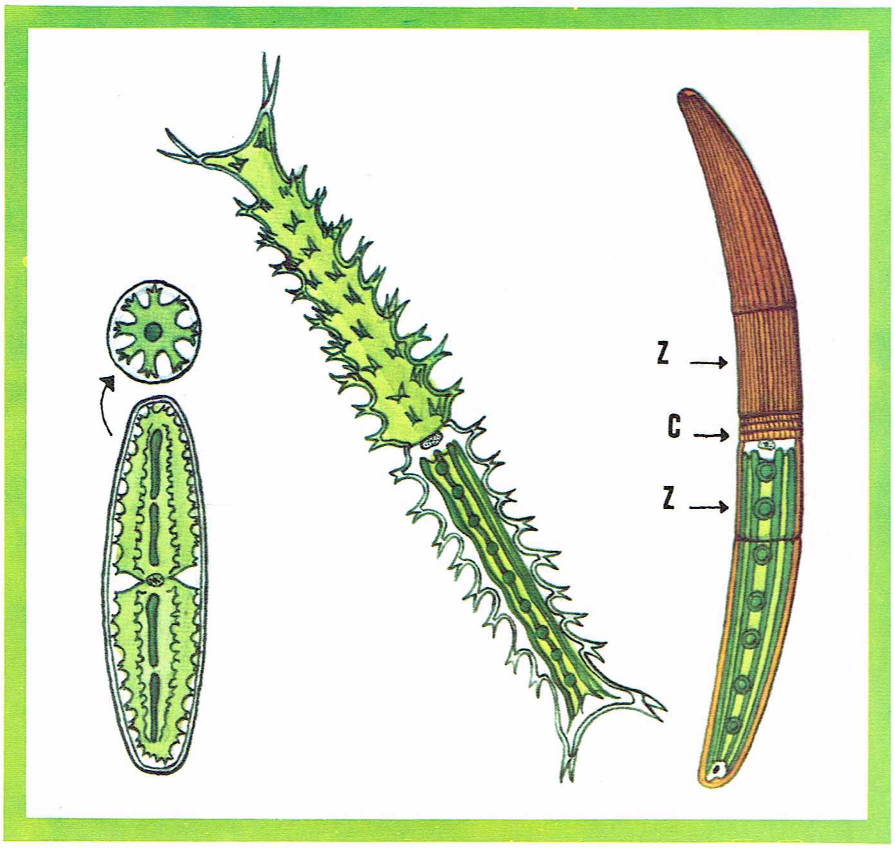

M. Ricard

▲ *A gauche :* Netrium digitus *(espèce des eaux acides); en haut, section transversale de la cellule montrant le plaste creusé de sillons longitudinaux (× 300). A droite :* Closterium intermedium *(× 300), espèce des eaux acides à membrane jaune, striée, pourvue de ceintures (c) et de zones d'élongation (z). Au centre :* Triploceras gracilis *var.* bidentatum, *espèce des eaux douces d'Afrique (× 560).*

▶ Dichotomosiphon tuberosum *avec oospore.*

régulièrement ramifiés et fixés par des rhizoïdes incolores non cloisonnés. La membrane riche en xylane présente des constrictions aux endroits des ramifications. Les plastes montrent le même dimorphisme (hétéroplastie) que ceux des Caulerpales. La reproduction est oogamique. Ces Algues sont monoïques ; après cloisonnement du siphon, un apex se recourbe en crochet et se transforme en gamétocyste mâle producteur de petits gamètes mâles biflagellés ; dans le voisinage, un autre apex se gonfle, s'arrondit en sphère avec un bec saillant : c'est l'oogone dont l'oosphère sera fécondée par un gamète mâle. La place de la méiose est inconnue ainsi que le processus de germination du zygote. Comme on le voit par cette courte description, le mode de reproduction sexuée de *Dichotomosiphon* rappelle beaucoup celui des Xanthophycées du genre *Vaucheria*.

ZYGOPHYCÉES

Les Zygophycées ou Conjuguées sont des Algues vertes dulçaquicoles filamenteuses ou unicellulaires toujours dépourvues de cellules flagellées et caractérisées par la conjugaison de gamètes amiboïdes.

Les cellules toujours uninucléées sont haploïdes (cycle monogénétique). Lors de la reproduction sexuée, deux cellules se transforment en gamétocystes et donnent chacune un gamète sans flagelle (avec parfois des vésicules contractiles) ; ces gamètes mâles et femelles, isomorphes, fusionnent soit dans un des gamétocystes, soit dans le tube de copulation reliant les gamétocystes de sexe opposé, soit simplement entre les deux gamétocystes dans une enveloppe gélatineuse. Le zygote ainsi formé s'entoure d'une membrane épaisse, ornementée et le plus souvent à trois feuillets ; il germe après méiose, pour donner quatre spores haploïdes puis quatre thalles végétatifs. Il peut y avoir, suivant les genres, avortement de deux ou trois des noyaux formés lors de la germination du zygote et ainsi production seulement de deux ou d'un seul thalle. Les formes de résistance végétative, ou akinètes, sont connues chez certains genres. Les plastes verts, toujours avec pyrénoïde (sauf chez les rarissimes *Mougeotiopsis*), ont des formes très variées qui seront étudiées plus loin. La division végétative est du type normal chez les Zygnématales, mais, chez les Desmidiales à membrane bivalve, chaque cellule fille emporte une moitié de la membrane maternelle et reforme une nouvelle moitié.

Chez les Zygophycées, la structure de la membrane pecto-cellulosique permet la division de la classe en deux ordres :

1) *Zygnématales* à membrane sans pores ni ornementation ni suture médiane ;

2) *Desmidiales* à membrane percée de pores souvent ornementée de façon variée et à suture médiane.

La classe des Zygophycées avec ses cinquante genres et ses cinq mille espèces est la plus importante numériquement de toutes les classes de Chlorophytes.

Zygnématales

Deux séries se partagent cet ordre : des formes filamenteuses (famille des Zygnématacées) et des formes unicellulaires (famille des Mésotæniacées).

Dans les Zygnématacées, la structure du plaste permet de reconnaître divers genres. Les *Spirogyra* sont à plaste rubanné tordu en hélice et portant des pyrénoïdes. Suivant les espèces (trois cents environ), il y a un ou plusieurs plastes (jusqu'à seize) par cellule. La reproduction sexuée se fait par conjugaison, les zygotes se formant dans le gamétocyste femelle ou entre les deux gamétocystes : elle est *scalariforme* si elle se produit entre cellules de deux filaments différents (espèces dioïques), ou *latérale* (espèces monoïques) si deux cellules voisines du même filament fusionnent.

Les *Zygnema* (cent espèces) ont par cellule deux plastes étoilés séparés par le noyau. Le zygote après conjugaison scalariforme se forme soit dans le gamétocyste femelle, soit dans le canal de conjugaison.

Les *Mougeotia* (plus de cent espèces) ont un seul plaste en ruban plat avec nombreux pyrénoïdes s'étendant sur toute la longueur de la cellule et portant le noyau en son milieu. La conjugaison est identique à celle des *Zygnema*.

Dans les Zygnématacées, le zygote, après méiose et avortement de trois noyaux, germera en un seul thalle.

Chez les Mésotæniacées unicellulaires, en général, les quatre noyaux persisteront et le zygote donnera quatre

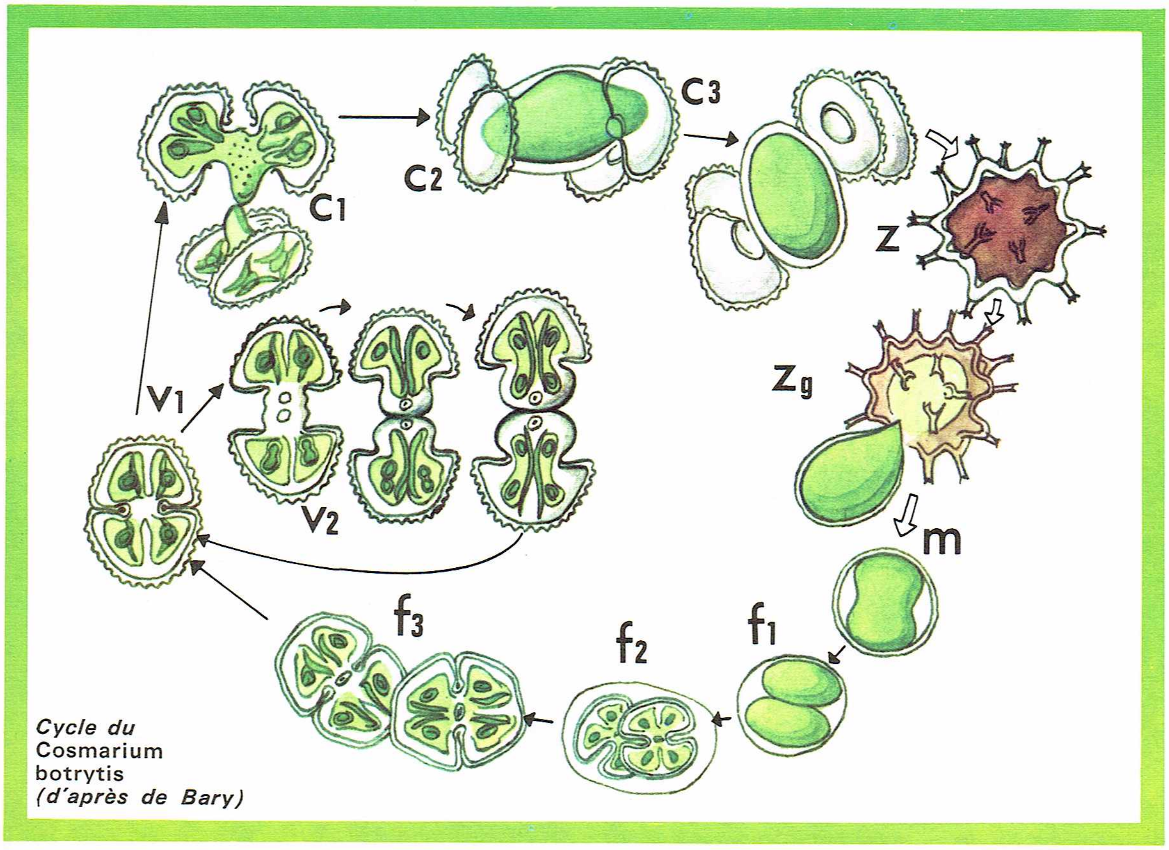

Cycle du Cosmarium botrytis (d'après de Bary)

◀ ***V_1 : cellule adulte et sa division végétative (V_2); C_1 : début de la conjugaison, déboîtement des hémisomates des deux cellules copulantes et émission de gamètes; C_2, C_3 : formation du zygote; Z : zygote; Zg : germination du zygote et méiose (m); f_1, f_2 : première division; f_3 : formation des nouvelles cellules.***

cellules végétatives. Nous citerons pour cette famille le genre *Mesotaenium* à petites cellules ellipsoïdales et plaste à un ou deux pyrénoïdes en lame plate, *Spirotaenia* à plaste hélicoïdal rappelant celui des *Spirogyra*. Chez *Cylindrocystis* et *Netrium*, nous aurons des cellules cylindriques ou fusiformes renflées avec deux plastes séparés par le noyau médian. Ces plastes sont des cylindres dont l'axe est occupé par un chapelet de pyrénoïdes et dont la surface est creusée de sillons longitudinaux (de six à dix). Les crêtes saillantes de ce plaste massif sont elles-mêmes découpées. Ainsi, en section transversale, le plaste apparaît étoilé.

Les Zygnématales croissent dans les eaux douces, ruisseaux et eaux stagnantes, mares, lacs et étangs. Certaines préfèrent les eaux acides des tourbières à sphaignes *(Netrium, Cylindrocystis)*.

Les *Mesotaenium* ont une vie subaérienne sur les rochers humides. Les *Zygnema*, du groupe *Zygogonium*, vivent sur les sols tourbeux ou les berges des marais acides qu'elles colorent en rouge violacé car leur suc vacuolaire est de teinte pourpre.

Desmidiales

Ces Algues unicellulaires ou réunies en chaîne coloniale sont caractérisées par leur membrane poreuse en deux pièces ou deux valves égales. La ligne de jonction (ou d'agrafage) des deux valves est bien visible et forme une suture ou isthme partageant la cellule en deux parties égales : les *hémisomates*. Le noyau est toujours placé dans l'isthme. Lors de la division végétative, les deux valves se séparent. Le noyau se divise, et chaque hémisomate produit un nouvel hémisomate avec une nouvelle valve membranaire. Ainsi, dans chaque cellule, les deux hémisomates sont d'âge différent et appartiennent à deux générations. Lors de la reproduction sexuée, deux cellules se rapprochent, s'entourent parfois d'une enveloppe mucilagineuse, puis les valves de la membrane s'écartent et libèrent le contenu qui se transforme en gamète amiboïde : les gamètes fusionnent et le zygote se revêt d'une membrane épaisse souvent ornée; les quatre valves membranaires des cellules copulantes coiffent le zygote en adhérant à l'enveloppe mucilagineuse. A la germination, le zygote donnera le plus souvent deux nouvelles cellules après méiose et avortement de deux noyaux.

▼ **Micrasterias fimbriata *(Desmidiacées)*.**

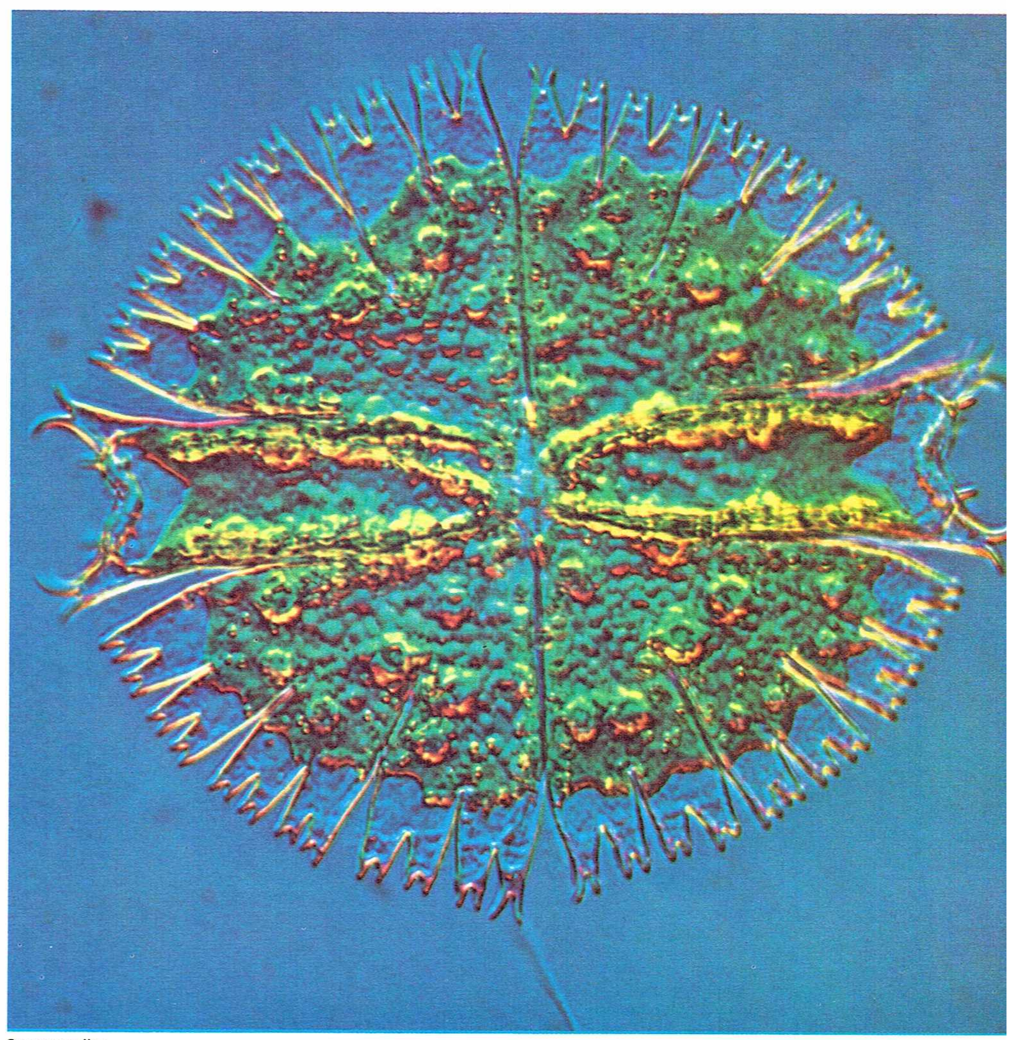

Crumeyrolles

▶ *De haut en bas :*
a. - Cosmarium binum, *espèce d'eau douce. Vue de face : un hémisomate avec son ornementation, l'autre avec les plastes ; vue par le dessus montrant la structure des plastes (× 880).*
b. - Staurastrum sebaldi *var.* ornatum, *espèce d'eau douce, vue de face et vue par le dessus (× 395).*
c. - Desmidium baileyi, *espèce d'eau douce ; trois cellules d'un filament, surmontées d'une cellule vue par le dessus ; à gauche : formation du zygote (× 600).*
d. - Hyalotheca mucosa, *espèce d'eau douce. Fragment du filament avec trois cellules, et, à droite, vue par le dessus montrant la forme du plaste (× 1 000).*

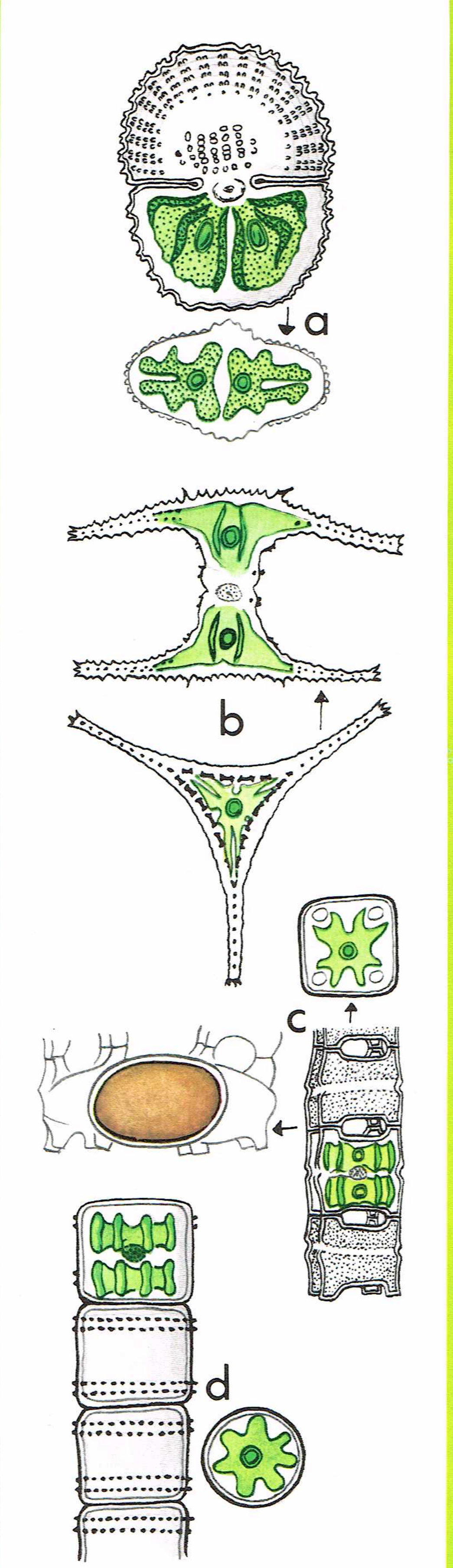

Les *Desmidiales*, avec une trentaine de genres et quatre mille espèces, peuvent être divisées en deux familles : Les *Clostériacées* à cellules dont les valves membranaires ne sont pas agrafées l'une à l'autre et peuvent subir des phénomènes d'élongation ; les *Desmidiacées* où les deux valves sont agrafées par leurs extrémités recourbées et qui ne subissent pas d'élongation.

Dans les *Clostériacées,* nous citerons les *Closterium* en forme de croissants plus ou moins recourbés et à plaste central massif en cylindre à crêtes longitudinales et série axiale de pyrénoïdes. L'apex cellulaire se termine par une vacuole où s'agitent, sur le vivant, de petits cristaux de gypse. La membrane, souvent de couleur jaune par incrustation de sels de fer, est lisse ou striée longitudinalement et porte de nombreux pores.

Les *Gonatozygon* sont en bâtonnets cylindriques à pôles un peu dilatés. Leur membrane ne montre que difficilement la suture médiane et les zones d'élongation. Elle est ornée de granules ou d'épines. Le plaste est une lame irrégulièrement tordue.

Dans la famille des *Desmidiacées,* nous trouvons une grande variété de formes cellulaires.

Les *Pleurotaenium* et les *Triploceras* sont des longs bâtonnets cylindriques avec un sillon transversal médian qui sépare bien nettement les deux hémisomates. Le premier genre a souvent une couronne de perles ou d'épines courtes à ses deux pôles. Les plastes sont des rubans pariétaux longitudinaux avec pyrénoïde. Chez *Triploceras,* toute la cellule est ornée de verticilles réguliers de courtes épines, et le plaste est central.

Chez les *Cosmarium,* la cellule est fort resserrée en son milieu par le rétrécissement isthmal séparant les deux hémisomates. Le contour général est arrondi et la cellule plus ou moins aplatie en vue apicale. La forme du plaste et le nombre des pyrénoïdes varient avec l'espèce. Souvent les espèces ayant un pyrénoïde par hémisomate ont un plaste en lame double. Ce genre très nombreux (mille cinq cents espèces) offre une grande variété de formes et d'ornementation.

Les *Euastrum* sont des *Cosmarium* à fente apicale et tumeurs renflées disposés régulièrement. Les *Xanthidium* ont des hémisomates à contour polygonal, à ornementation centrale et pourvus de longues épines marginales.

Les *Micrasterias* sont les Desmidiacées les plus décoratives avec leurs grandes cellules (jusqu'à 200 μ de diamètre) arrondies en disques plats, très régulièrement découpées et parfois ornées de lignes d'épines.

Les *Staurastrum* (plus de mille deux cents espèces) ont les hémisomates plus ou moins pyramidaux, à base triangulaire ou polygonale ; l'isthme réunissant les hémisomates est bien marqué. Souvent les angles de la base de la pyramide s'allongent en bras denticulés ou épineux. Dans les cas les plus simples, le plaste de l'hémisomate, centré sur un pyrénoïde, envoie une double lame dans chacun des bras. Nous trouverons dans ce genre des cellules de taille, de forme et d'ornementation très variées.

Parmi les Desmidiacées coloniales, nous citerons les *Spondylosium,* chaîne de petits *Cosmarium* disposés en série linéaire, *Bambusina* dont les cellules légèrement renflées dans la partie isthmale ressemblent à des nœuds de bambou, *Desmidium* à cellule à section elliptique, triangulaire ou carrée et à isthme indiqué par une petite encoche médiane, *Hyalotheca* où parfois le rétrécissement isthmal disparaît presque entièrement.

Signalons les *Cosmocladium* dont les colonies gélatineuses ressemblent à de petits *Cosmarium* réunis par des cordons gélatineux à disposition ramifiée arbusculaire.

Les *Oocardium,* à minuscules cellules ovoïdes de moins de 20 μ de longueur et logées dans des tubes gélatineux imprégnés de calcaire, constituent dans les ruisseaux de montagne des colonies en coussinet de 1 à 2 mm de diamètre. Celles-ci, confluentes, arrivent à construire des tufs épais de plusieurs centimètres.

Les Desmidiales sont surtout des Algues des eaux acides des tourbières et ont une grande importance écologique et biogéographique. Tout comme les Diatomées, leur présence donne des renseignements précis sur les caractères biochimiques des eaux où elles croissent. Certaines espèces, certains genres même (*Triploceras* par exemple) ont des aires géographiques restreintes et bien connues. On a pu ainsi distinguer des Desmidiacées alpines ou arcticoalpines, des formes tropicales du Nouveau et de l'Ancien Monde, bien différentes des espèces

cosmopolites. Les populations de Desmidiales sont liées à un milieu précis, et, dans des biotopes identiques, on retrouve souvent les mêmes groupements (ou associations) d'Algues; elles font partie, avec les *Cosmarium* et surtout les *Staurastrum*, du phytoplancton de lacs oligotrophes et dystrophes et sont fort sensibles à l'eutrophisation ou à la pollution de ces eaux.

Elles se cultivent assez bien en laboratoire, mais ne présentent pas l'intérêt alimentaire des Chlorococcales *(Chlorella)*. Cependant les cultures ont permis de mettre en évidence l'influence de la lumière (intensité, couleur, durée de l'illumination) sur le déclenchement de la conjugaison. Ainsi *Closterium moniliforme* a besoin de dix-huit heures de lumière blanche journalière pour former ses gamètes. Dans la nature, les conjugaisons de Desmidiales sont toujours rares. Les zygotes s'observent beaucoup plus souvent chez les Zygnématacées, surtout à la fin de l'été, c'est-à-dire en jours longs, et semblent favorisés par la dessiccation progressive des mares.

CHAROPHYTES

Les Charophytes, avec la classe unique des Charophycées, sont des Algues vertes d'eau douce ou d'eau saumâtre; elles sont de grande taille (parfois 50 cm à 1 m), faciles à reconnaître par leur aspect particulier, axe et verticelles, rappelant le port des Prêles ou des Cératophylles.

L'Algue a une organisation cladomienne typique avec axe, parfois cortiqué, et pleuridies.

L'axe a une croissance apicale : la cellule initiale donne par division, alternativement, une cellule nodale et une cellule internodale. Cette dernière s'allonge et se cloisonne perpendiculairement à l'axe, tandis que la nodale se divise parallèlement à l'axe. Ainsi la « tige » ou axe à croissance indéfinie est formée d'entre-nœuds allongés, séparés par des nœuds à cellules courtes avec des cellules centrales entourées de six à dix cellules péricentrales qui engendrent six à dix pleuridies à croissance limitée. Les cellules internodales subissent des mitoses répétées, mais sans cloisonnement, et donnent ainsi les entre-nœuds siphonés très longs (jusqu'à 20 cm).

Le cortex qui entoure l'entre-nœud est formé par de longs filaments longitudinaux provenant des cellules nodales des nœuds supérieur et inférieur. Ces filaments sont tordus en hélice.

Les cellules ont des plastes pariétaux, discoïdaux, sans pyrénoïde.

Reproduction sexuée

Les gamétocystes mâles, anthéridies ou *globules*, et les gamétocystes femelles ou *nucules* croissent sur les nœuds des verticilles. Ils sont de grande taille et atteignent presque le millimètre.

Le *globule* de couleur orangée ou rouge est une petite sphère limitée par huit valves triangulaires à bords dentelés ou *écussons*. Le pédicelle qui fixe le globule au rameau pénètre jusqu'au centre de la sphère et porte huit piliers rayonnants ou *manubriums* qui atteignent chacun le centre d'un écusson. Chaque manubrium, dans sa partie centrale, est coiffé par une cellule, le *capitulum*, qui produit six bouquets de quatre filaments anthéridiens, très fins, très longs et enchevêtrés, ayant environ deux cents petites logettes qui donnent chacune un anthérozoïde.

Le *nucule* est formé par une oosphère entourée d'un cortex de cinq cellules tordues en hélice. A leur sommet par une ou deux divisions, ces cellules donnent la *coronule* à cinq cellules *(Chara)* ou cinq paires de cellules *(Nitella)*. A maturité sexuelle, le globule se dissocie, les écussons se séparent et les anthérozoïdes tordus en hélice et animés par deux longs flagelles sont libérés. Ces gamètes mâles ressemblent beaucoup à ceux des Mousses; le microscope électronique a permis de déceler sur ces gamètes et sur leurs flagelles de petites écailles organiques rappelant celles qui recouvrent les *Prasinophycées* ou certaines Chrysophycées à haptonema.

Après fécondation l'œuf passe à l'état de repos et germe. Le noyau, après méiose, donne quatre noyaux haploïdes dont un seul est fertile. Un cloisonnement se produit, séparant une petite cellule supérieure à noyau fertile d'une grosse cellule basale, nourricière à trois noyaux. Cette cellule apicale va se diviser en deux, et naîtront deux tubes : un rhizoïde incolore et un protonema vert. Sur le premier nœud du protonema apparaîtra un axe dressé et des rhizoïdes secondaires. Le cycle monogénétique haploïde sera bouclé.

Les Charophycées renferment six genres et un grand nombre d'espèces et de variétés (près de quatre cents unités systématiques). Les *Chara* vivent dans les eaux alcalines : leur membrane est incrustée de calcaire; leur oogone porte une coronule de cinq cellules, et, en général, les axes sont cortiqués. Chez les *Nitella* des eaux acides, le cortex n'existe pas, il n'y a pas d'incrustation calcaire, et la couronne de l'oogone est à dix cellules.

Les Charophytes forment souvent de véritables prairies sur le fond des étangs ou des mares; certains lacs alpins ont en bordure une ceinture submergée de *Chara*.

Signalons que quelques espèces de *Chara* et de *Nitella* rejettent dans l'eau des produits de leur métabolisme qui sont toxiques pour les larves de moustiques et d'anophèles. Les Charophytes sont des Végétaux très anciens dont les œufs se fossilisent aisément : il n'est pas rare d'en trouver dans les meulières d'eau douce du Bassin parisien. Les formes connues les plus anciennes remontent au Dévonien inférieur (plus de trois cents millions d'années). Comme on le voit par cette courte étude, le groupe des Charophytes est très évolué, et la structure complexe de leur thalle et surtout de leurs organes sexuels en fait des organismes bien différents des Chlorophytes et qui annoncent déjà les Cormophytes.

Crumeyrolles

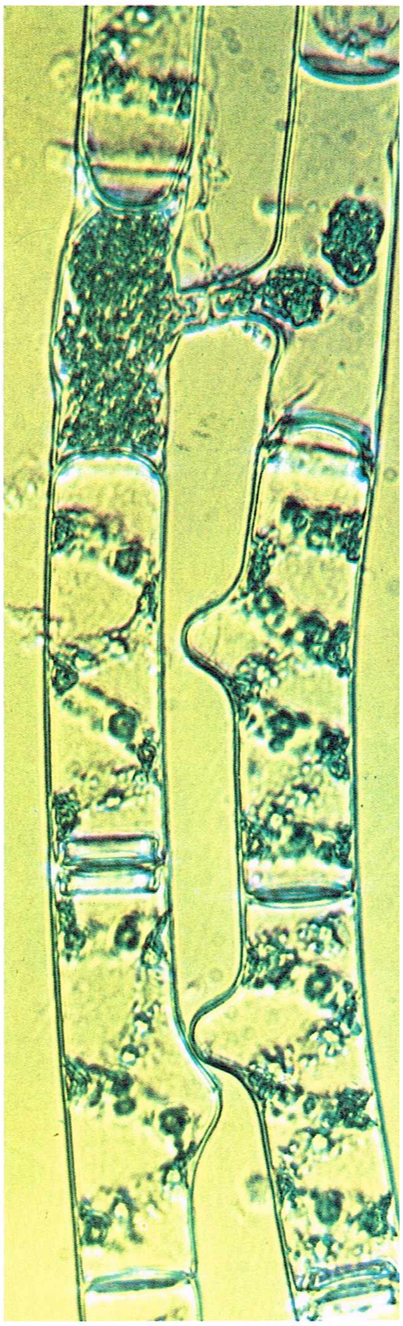

▲ Spirogyra *(Zygnématales) en voie de conjugaison.*

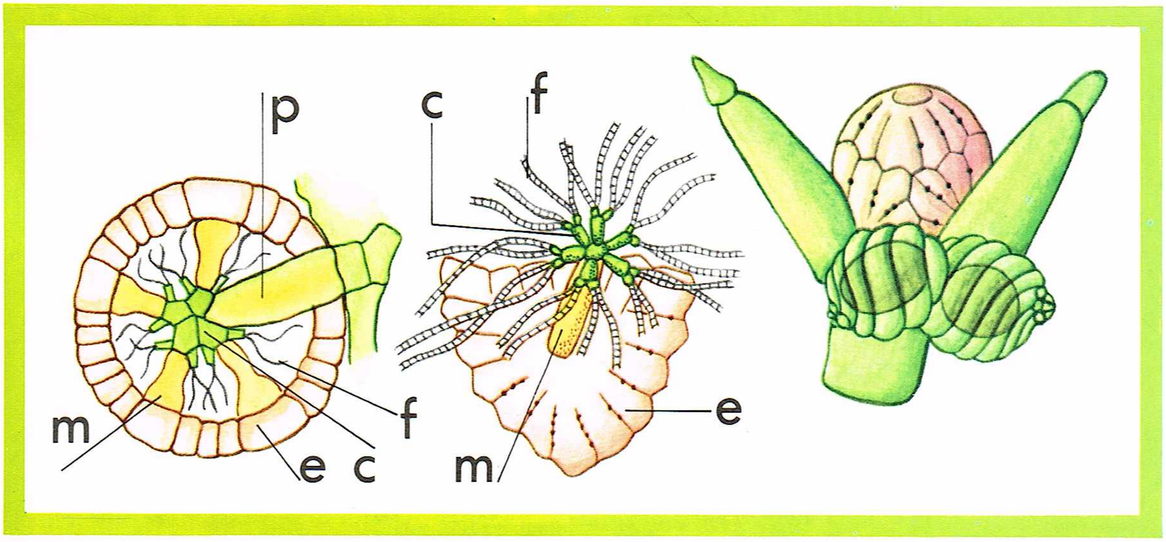

◄ *De gauche à droite :* Chara vulgaris *(× 130), anthéridie d'après Smith. p : pédicelle;* m : manubrium; c : capitulum; *f : filament à anthérozoïdes incomplètement développés; e : écusson.* Chara vulgaris, *un écusson détaché du globule mâle (d'après Bourrelly)* [× *160*]. Nitella translucens *(× 690), une anthéridie et deux oogones.*

C. Raimond Dityvan - Viva

▲ *Récolte du goémon en Bretagne. Les populations côtières ont, de tous temps, su exploiter les richesses de la mer.*

BIBLIOGRAPHIE

BOURRELLY P., *Recherches sur les Chrysophycées,* Rev. Algolog. Mém. Hors Série, 1, 1957, Bibl. Phycol., 12, 1971 ; *Les Algues d'eau douce,* t. I, II, III, Paris, 1966, 1968, 1970. - BUTCHER R. W., *An Introductory Account of the Smaller Algæ of British Coastal Waters,* Part I, IV, VIII, Fisher. Invest., ser. IV, London, 1959, 1967, 1961 (Chlorophyceæ, Euglenophyceæ, Cryptophyceæ). - CHADEFAUD M., *Traité de botanique,* t. I, « Les Végétaux non vasculaires », Paris, 1960. - CHAPMAN V. J., *Seaweeds and their Uses,* Londres, 1961, rééd. 1970. - CHRISTENSEN T., *« Alger »,* in T. BOCHER, M. LANGE et T. SŒRENSEN, *Botanik,* vol. II, fasc. II, Copenhague, 1962. - CORILLION R., *Les Charophycées de France et d'Europe occidentale,* Rennes, 1957. - FELDMANN J., « Les Algues », in *Précis de botanique,* Paris, 1963. - FELDMANN J. (Dir.), « Colloque sur les cycles sexuels et l'alternance de générations chez les Algues », in *Mém. Soc. bot. France,* 1972. - FOTT B., *Algenkunde,* Iena, 1971 ; *Das Phytoplankton des Süsswassers,* 6, Die Binnengewässer, 16, Leipzig, 1972. - FRITSCH F. E., *The Structure and Reproduction of the Algæ,* 2 vol., Cambridge, 1935-1945. - GAUTHIER-LIEVRE L., *Œdogoniacées africaines,* Weinheim, 1963-64. - GAYRAL P., *Les Algues des côtes françaises (Manche et Atlantique). Notions fondamentales sur l'écologie, la biologie et la systématique des Algues marines,* Paris, 1966. - GEMEINHARDT K., *Œdogoniales in Rabenhorst's Kryptogamen-Flora,* 12, Leipzig, 1939. - HAMEL G., *Phéophycées de France,* Paris, 1931-1939. - HENDEY N. I., *An Introductory Account of the Smaller Algæ of British Coastal Waters,* Part V, Fisher. Invest., ser. IV, London, 1964 (Bacillariophyceæ). - HUBER-PESTALOZZI G., *Das Phytoplankton des Süsswassers,* 1, 2, 3, 4, 5, Die Binnengewässer, Bd. XVI, Stuttgart, 1938-1961. - HUSTEDT F., *Die Kieselalgen in Rabenhorst's Kryptogamen-Flora,* 7, t. I, II, III, Leipzig, 1930-1966. - JONSSON S., *Recherches sur les Cladophoracées marines,* Ann. sc. nat. Bot., 12° sér., 3, 1962. - KRIEGER W., *Die Desmidiaceen in Rabenhorst's Kryptogamen-Flora,* 13, 1, 2, Leipzig, 1937-39. - KYLIN H., *Die Gattungen der Rhodophyceen,* Lund, 1956. - LEEDALE, G. F., *Euglenoid Flagellates,* Englewood Cliffs, N. J., USA, 1967. - LEWIN R. A. (Ed.), *Physiology and Biochemistry of Algæ,* New York, Londres, 1962. - MAGNE F., « Recherches caryologiques sur les Floridées (Rhodophycées) » in *Cah. Biol. mar.,* t. V, 1965. - MANTON I., *Observations on the Biology and Micro-anatomy of Chrysochromulina Megacylindra Leadb.,* Brit. phycol. J., 7, 1972. - MIGNOT J. P., *Structure et ultrastructure de quelques Euglénomonadines,* Protistologica, 2, 3, 1966. - OLTMANNS F., *Morphologie und biologie der Algen,* 3 vol., Iena, 1922-23. - PARKE M., *Three Species of Halosphæra,* J. mar. biol. Ass. U. K., 45, 1965 ; *The Production of Calcareous Elements by Benthic Algæ Belonging to the Class Haptophyceæ (Chrysophyta),* Proceed. II plankt. conf. Roma, 1970. - PASCHER A., *Heterokonten in Rabenhorst's Kryptogamen-Flora,* 11, Leipzig, 1937-1939. - PERAGALLO H. et M., *Diatomées marines de France,* 2 vol., Grez s/Loing, 1897-1908. - PRINTZ H., *Chlorophyceæ in Engler Pflanzenfamilien,* 3, Leipzig, 1927 ; *Die Chætophoralen der Binnengewässer,* Hydrobiologia, 24, 1964. - ROUND F. E., *The Taxonomy of the Chlorophyta,* II. Br. phycol. J. 6, 2, 1971. - SCAGEL R. F., « The Pheophyceæ in Perspective », in *Oceanogr. and mar. biol.,* Rev. n° 4, 1966. - SCAGEL R. F. et coll., *An Evolutionary Survey of the Plant Kingdom,* Belmont, California, 1967. - SCHILLER J., *Dinoflagellatæ (Peridineæ) in Rabenhorst's Kryptogamen-Flora,* 10, 3, 2 vol., 1933-37, Leipzig. - TRANSEAU E. N., *The Zygnemataceæ,* Columbus, 1951. - TREGOUBOFF G. et ROSE M., *Manuel de planctonologie méditerranéenne,* 2 vol., C.N.R.S., Paris, 1957. - WOOD R. D. et IMAHORI K., *A Revision of the Characeæ,* 2 vol., Weinheim, 1964-65. - SMITH G. M., *Cryptogamic Botany,* 2e éd., vol. I, « Algæ and Fungi », New York, 1955.

T. Poggio

▲ *Les coprins micacés* (Coprinus micaceus), *qui poussent généralement en touffes denses au printemps et jusqu'en automne, appartiennent au groupe des Champignons dits « supérieurs ». Ces derniers ne sont qu'une partie d'un vaste ensemble dans lequel entrent les mildious, les rouilles, les charbons, les moisissures et un grand nombre d'organismes microscopiques.*

LES CHAMPIGNONS

Le terme de *Champignon* évoque des productions végétales de formes et d'aspects divers, mais le plus souvent constituées d'un pied surmonté d'un chapeau abritant des lamelles ou des tubes, et recherchées pour leurs qualités gustatives ou redoutées pour leur caractère toxique ou vénéneux. C'est aussi la signification originelle du vocable latin *fungus* (pluriel *fungi*) que certains auteurs rapprochent du grec σπόγγος, éponge, par allusion à la consistance de la plupart des Champignons, alors que d'autres suggèrent l'étymologie *funus*, funérailles, et *ago*, je conduis, traduisant la crainte du Champignon mortel, l'amanite phalloïde, responsable, dit-on, de la mort de l'empereur Claude. On ne reconnaissait alors, et jusqu'au XVII[e] siècle, que deux classes de Champignons : *Fungi esculenti* et *Fungi perniciosi*, les comestibles et les dangereux. Avec l'apparition de techniques d'observation plus fines et les progrès de l'esprit scientifique, la notion de Champignon s'est peu à peu précisée, et l'on a reconnu les affinités profondes entre des organismes aussi dissemblables que les mildious, rouilles et charbons des Végétaux, les moisissures et de multiples formations microscopiques, et les Champignons dits « supérieurs », eux-mêmes très variés : agarics, bolets, polypores, hydnes et clavaires, pézizes et morilles, truffes, etc. Actuellement, le domaine des Champignons recouvre un vaste ensemble d'organismes de structures et de caractères biologiques extrêmement diversifiés, probablement plus important en nombre d'individus et peut-être d'espèces que celui des plantes à fleurs. En langage scientifique, on les désigne sous le nom de *Mycètes* ou *Mycophytes*, du grec μύκης, Champignon ; la discipline qui traite des Champignons est la *mycologie*, et les spécialistes qui se consacrent à leur étude sont des mycologues. La racine grecque se retrouve dans les termes de mycose et de mycétome, appliqués à des maladies de l'homme ou des Animaux provoquées par des Champignons, et dans la plupart des noms composés du vocabulaire mycologique, tandis que le radical latin a fourni les adjectifs fongique, fongicole, etc., et sert à désigner les substances nocives utilisées pour détruire les Champignons, ou *fongicides*.

Définition et limites du groupe

Considérés classiquement comme des Végétaux, les Champignons sont des plantes non vasculaires, dépourvues de système différencié pour la circulation de l'eau et des substances nutritives. Leur appareil végétatif les apparente aux Algues ; c'est un *thalle*, unicellulaire chez les formes les plus simples, ou organisé en structures plus ou moins complexes, spécialisées selon leurs fonctions, mais dont tous les éléments sont potentiellement équivalents : ainsi chaque cellule du thalle végétatif peut éventuellement fonctionner comme élément reproducteur. Ce sont des organismes *eucaryotes*, possédant un noyau organisé et des organelles séparés du cytoplasme par des membranes propres ; ils s'opposent ainsi aux Bactéries et aux Cyanophycées procaryotes dont la substance nucléaire n'est pas distribuée en chromosomes, ni délimitée par une membrane. Les Actinomycètes, dont le thalle est morphologiquement comparable à celui des Champignons, et qui partagent souvent leur habitat, ont été fréquemment traités comme tels ; dans l'état actuel de nos connaissances, ce sont pourtant des Procaryotes, rapportés maintenant aux Schizophytes, à côté des Bactéries. A la différence des Algues, les Champignons sont dépourvus de chlorophylle ou de tout autre pigment assimilateur permettant l'élaboration de composés organiques à partir de gaz carbonique et d'eau, à la lumière solaire, par photosynthèse. En conséquence, ce sont des organismes *hétérotrophes ;* ils empruntent au milieu extérieur les substances organiques oxydables qui sont pour eux à la fois sources d'énergie et pourvoyeurs de carbone. Ils sont appelés saprophytes s'ils se nourrissent de

Tableau comparatif des systèmes actuels de classification des Champignons

Dictionary of Fungi (1971)	*Heim (1953)*	*Chadefaud (1960)*	*Gäumann (1964)*
MYXOMYCOTA			
1. Acrasiomycètes *2. Hydromyxomycètes* *3. Myxomycètes* *4. Plasmodiophoromycètes*	*Myxomycètes*		
EUMYCOTA			
Mastigomycétinés		**Champignons à zoïdes :**	*Archimycètes (4,5 p.p.)*
5. Chytridiomycètes *6. Hyphochytridiomycètes*	*Archimycètes (5-6)*	*Phycomycètes (5-6)* *Myxomycètes (1-4)*	*Phycomycètes (5 p.p., 6-8)*
7. Oomycètes	*Oomycètes*	*Trichomycètes (9)*	
Zygomycotinés		**sans zoïdes :**	
8. Zygomycètes *9. Trichomycètes*	*Zygomycètes (8)*	*Zygomycètes (8)*	
Ascomycotinés	*Ascomycètes*	*Ascomycètes*	*Ascomycètes*
10. Hemiascomycètes *11. Plectomycètes* *12. Pyrénomycètes* *13. Discomycètes* *14. Laboulbeniomycètes* *15. Loculoascomycètes*	*Hémiascomycètes* *Euascomycètes :* *Plectomycètes* *Pyrénomycètes (12, 15)* *Discomycètes*	*Hémiascomycètes* *périsporiés et plectascés (11)* *Pyrénomycètes :* *ascohyméniaux (12)* *ascoloculaires (15)* *Discomycètes* *Laboulbéniomycètes*	***sous-classes :*** *Prototuniqués (10 p.p., 11 p.p., 14)* *Eutuniqués* *sous-groupes :* *unituniqués (10 p.p., 11 p.p., 12, 13)* *bituniqués (15)*
Basidiomycotinés	*Basidiomycètes*	*Basidiomycètes*	*Basidiomycètes*
16. Téliomycètes *17. Hyménomycètes* *a) Phragmobasidiomycétidés*	*Hétérobasidiés (16, 17a)*	*Archéobasidiés (16)* *Néobasidiés :* *hétérobasidiés (17a)*	***sous-classes :*** *Phragmobasidiomycètes (16, 17a)*
b) Holobasidiomycétidés *18. Gastéromycètes*	*Homobasidiés (17b, 18)*	*homobasidiés (17b, 18)*	*Holobasidiomycètes (17b, 18)*
Deutéromycotinés	*Adélomycètes*		*Fungi imperfecti*
19. Blastomycètes *20. Hyphomycètes* *21. Cœlomycètes*			

Les suffixes ***mycota, mycotinés, mycètes, mycétidés*** *désignent respectivement, dans le Dictionnaire, les divisions, subdivisions, classes et sous-classes.*

Page ci-contre :* ▶ Oreille de Judas (Auricularia auricula-Judae).** ***Le Champignon se présente sous la forme de coupes irrégulières qui peuvent mesurer jusqu'à 10 cm de largeur. **▼ Clavaria aurea,** ***espèce assez répandue dans nos bois en été et en automne.***

Hervé Chaumeton - Jacana

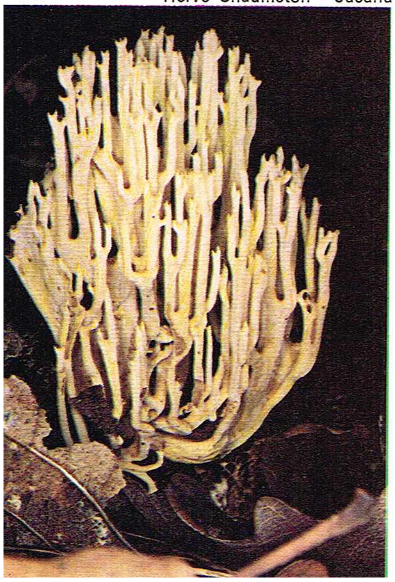

substances inertes : organismes morts, débris animaux ou végétaux, déchets divers, produits alimentaires ou industriels; les parasites, au contraire, subsistent aux dépens d'hôtes vivants, certains en parasites stricts, d'autres capables, suivant les circonstances, de végéter en parasites ou en saprophytes; enfin, certains Champignons établissent avec leurs hôtes des associations symbiotiques, à bénéfices réciproques.

A la limite du monde animal et du monde végétal, les Myxomycètes se nourrissent par phagocytose, en ingérant des particules alimentaires comme le font les Protozoaires. Outre ces critères fondamentaux qui les définissent comme des Thallophytes eucaryotes hétérotrophes, les Champignons possèdent peu de caractères absolument constants dans tout ce vaste groupe. La paroi des cellules, lorsqu'elle existe, est de nature principalement chitinoïde, mais parfois cellulosique (Oomycètes). Comme tous les Thallophytes, les Champignons se reproduisent par des *spores*, uni- ou pluricellulaires, fondamentalement différentes de la graine embryonnée des plantes supérieures; elles apparaissent au cours d'un cycle végétatif qui peut être simple ou complexe, impliquant ou non des phénomènes sexuels; elles se forment à partir d'éléments non spécialisés du thalle, ou sur des *sporophores*, ou dans des *sporocarpes* microscopiques ou macroscopiques plus ou moins différenciés. Il est essentiel de souligner qu'à la différence des Végétaux aussi bien que des Animaux, les Champignons, même dans leurs structures les plus complexes, n'édifient jamais de véritables tissus. C'est un des arguments sur lesquels se fondent les systématiciens modernes pour considérer que ces organismes n'appartiennent ni au règne végétal, ni au règne animal, mais doivent être élevés au rang d'un troisième règne, aussi important et aussi original que les deux divisions classiques du monde vivant.

A l'intérieur du groupe ainsi défini, des différences fondamentales affectant la morphologie, la structure cellulaire, le mode de nutrition imposent une coupure en deux divisions : les *Myxomycota* (Myxobiontes, Myxomycètes au sens large) et les *Eumycota* (Eumycètes, Champignons proprement dits).

Les Myxomycota, autrefois appelés Mycétozoaires (Champignons-Animaux), d'affinité incertaine, peut-être apparentés aux Protozoaires, sont caractérisés par une phase végétative dépourvue de membrane : plasmode plurinucléé chez les Myxomycètes proprement dits, cellule amiboïde ou agrégat de cellules (pseudo-plasmode) chez les formes dites « cellulaires »; la plupart sont capables d'ingérer des particules alimentaires solides, par phagocytose. Les Eumycota, d'autre part, sont soit cellulaires, soit, le plus souvent, de structure filamenteuse, presque toujours pourvus d'une paroi rigide pendant tout le déroulement de leur cycle vital; ils se nourrissent par absorption, grâce à la sécrétion d'exoenzymes qui digèrent les substances nutritives fournies par le substrat. Nous préciserons ces caractères distinctifs en étudiant séparément chacune de ces divisions. Déjà il apparaît douteux que les Myxomycota et les Eumycota soient étroitement apparentés, bien que certaines formes (Plasmodiophorales) aient été classées, selon les auteurs, près des Myxomycètes ou parmi les Champignons à zoospores.

A. E. Mc. R. Pearce

Claude Nardin - Jacana

MYXOMYCOTA

▲ **Lycogala epidendrum** *(Myxomycètes), espèce très commune : les sporocarpes apparaissent au printemps à la base des troncs ou sur le bois pourri, en forêt.*

Comme le suggère l'étymologie (du grec μύξα, mucosité, et μύκης, Champignon), la division des Myxomycota groupe des Champignons de consistance muqueuse ou glaireuse, ce qui signifie que leur forme végétative est un protoplasme nu, déformable, dépourvu de membrane rigide.

Selon les estimations les plus récentes, elle compte environ quatre-vingt-dix genres (et autant de synonymes) et un peu moins de cinq cents espèces. C'est donc un groupe important d'organismes, dont les plus répandus et les mieux connus sont les Myxomycètes, saprophytes communs des bois en décomposition, de la terre humide, des déchets organiques ; mais il comprend aussi un bon nombre d'autres espèces d'organisation plus ou moins complexe et d'habitat différent. Selon ces critères, on divise actuellement les Myxomycota en quatre classes.

Les *Acrasiomycètes* dont la phase végétative est formée de cellules amiboïdes libres, qui s'unissent en un pseudoplasmode avant la reproduction, comportent le seul ordre des Acrasiales.

Les *Hydromyxomycètes* dont la phase végétative est une amibe, un pseudo-plasmode ou un plasmode réticulé (organismes aquatiques, saprophytes ou parasites), englobent deux ordres, les Hydromyxales et les Labyrinthulales.

Les *Myxomycètes* dont la phase végétative est un plasmode plurinucléé (saprophytes communs terrestres), comprennent deux sous-classes, celle des Cératiomyxomycétidés (spores exogènes) avec l'ordre des Cératiomyxales et celle des Myxogastromycétidés (spores endogènes) qui regroupe cinq ordres, les Licéales, les Trichiales, les Échinostéliales, les Stémonitales et enfin les Physarales.

Les *Plasmodiophoromycètes* (le plasmode plurinucléé vit en parasite endocellulaire de Végétaux supérieurs) comptent l'ordre des Plasmodiophorales.

ACRASIOMYCÈTES

L'unique ordre des Acrasiales comporte une dizaine de genres qui végètent sous forme de cellules libres, uninucléées (et sans doute haploïdes), dépourvues de paroi rigide, ressemblant à des amibes ; on les nomme quelquefois « Myxomycètes cellulaires ». Ils sont surtout répandus dans les substrats forestiers, riches en matières organiques, et sont parfois coprophiles ; ils se nourrissent de Bactéries qu'ils ingèrent par phagocytose ; les résidus non digérés sont collectés, puis expulsés par des vacuoles digestives ; il est probable qu'ils absorbent également de l'eau et diverses substances en solution. A ce stade végétatif, ils ne diffèrent pas des amibes du sol (Protozoaires).

Les Acrasiales se maintiennent aisément en cultures artificielles, à condition qu'on leur fournisse les Bactéries de leur choix (de rares espèces ont pu être cultivées sur des milieux définis, en l'absence de Bactéries). On peut ainsi observer tout leur cycle de développement, qui comporte une phase reproductive où les myxamibes se groupent en colonies ou pseudo-plasmodes, produisant des spores en amas gluants, agglomérés par un mucus mais non limités par une membrane, pédicellés ou sessiles. L'espèce la mieux étudiée est le *Dictyostelium discoideum*, qui fournit l'exemple du cycle le plus complexe. Dans des conditions favorables, les myxamibes se déplacent indépendamment sur le substrat, se nourrissent et se multi-

plient activement par bipartition. Lorsque la nourriture est épuisée, l'humidité insuffisante ou la population trop dense, les myxamibes entrent en phase de repos, puis se regroupent en convergeant vers un point où elles s'accumulent en un tas surmonté d'une papille; c'est la phase d'agrégation, qu'on interprète comme une réponse chimiotactique à la sécrétion d'hormones spécifiques ou *acrasines*. Le pseudo-plasmode ainsi formé s'allonge en « limace » et rampe lentement en direction de la lumière (phototaxie). Au terme de cette migration de durée variable suivant les conditions ambiantes, les myxamibes s'organisent pour former, les unes un pédicelle rigide ou *sorophore*, constitué de cellules dégénérées à paroi cellulosique, les autres des spores dont la masse sphérique ou sore coiffe le sorophore; l'ensemble constitue le *sorocarpe*. Chaque spore résulte de l'enkystement, dans une membrane rigide, d'une cellule amiboïde; en germant, elle reproduit une seule myxamibe qui est à l'origine d'un nouveau cycle. L'observation de la reproduction sexuelle par la fusion de deux myxamibes, rapportée chez *Dictyostelium discoideum*, est contestée par certains auteurs. Chez la plupart des divers représentants du groupe, la phase de migration du pseudo-plasmode fait défaut, et le cycle est moins complexe. Dans aucun cas, il ne comporte de phase à cellules flagellées, ni de véritable plasmode. Les genres se distinguent principalement par l'organisation du sorocarpe. Le sorophore des *Acrasis* est constitué de mucus solidifié; chez les *Guttulina*, le pédicelle est court, se dilatant progressivement pour porter le sore; les myxamibes sont pourvues de gros pseudopodes arrondis; les *Polysphondylium*, qui se développent sur les fumiers *(P. violaceum)*, ont au contraire un sorophore bien développé (1 cm de haut), ramifié, portant plusieurs masses de spores; les *Copromyxa*, également fimicoles, produisent des fructifications blanc jaunâtre, allongées en fuseau *(C. protea)*.

HYDROMYXOMYCÈTES

La classe se subdivise en deux ordres : les Hydromyxales et les Labyrinthulales.

Hydromyxales

Chez ces organismes saprophytes des eaux douces, les myxamibes pourvues de fins pseudopodes se rassemblent en une masse gluante d'aspect homogène (pseudo-plasmode) fixée sur des Algues vertes filamenteuses *(Vampyrella*, sur spirogyres, *Plakopus*, sur *Oedogonium)* ou sur des Cyanophycées.

Labyrinthulales

La phase végétative de ces organismes parasites intra- ou intercellulaires d'Algues et d'Angiospermes marins consiste en myxamibes uninucléées, fusoïdes, pourvues ou non de pseudopodes ramifiés à leurs extrémités, et généralement associées en réseau. Les cellules des *Labyrinthula* sécrètent une gaine muqueuse ou callosique; à l'intérieur de ce réseau de tubules, les myxamibes glissent librement et se multiplient par des bipartitions transversales; l'ensemble constitue un *filoplasmode*. Chez *L. macrocystis*, parasite sévère des zostères, les cellules fusoïdes peuvent se regrouper en un amas globuleux recouvert d'un péridium, à l'intérieur duquel se différencient des spores; chacune donnera naissance à une seule myxamibe. La reproduction par zoospores biflagellées a été observée chez *L. algeriensis;* la présence d'un *stigma* à la base des flagelles fournit un argument aux auteurs qui excluent les Labyrinthulales des Myxomycophytes pour les classer auprès des Algues Chrysophycinées.

MYXOMYCÈTES

D'abord classés dans le règne animal sous le nom de *Mycetozoa*, ces organismes sont caractérisés dans leur phase végétative par une masse de protoplasme nue, plurinucléée, mobile, jamais divisée en cellules; leur phase de reproduction est représentée par des sporocarpes délimités par une membrane, sessiles ou pédi-

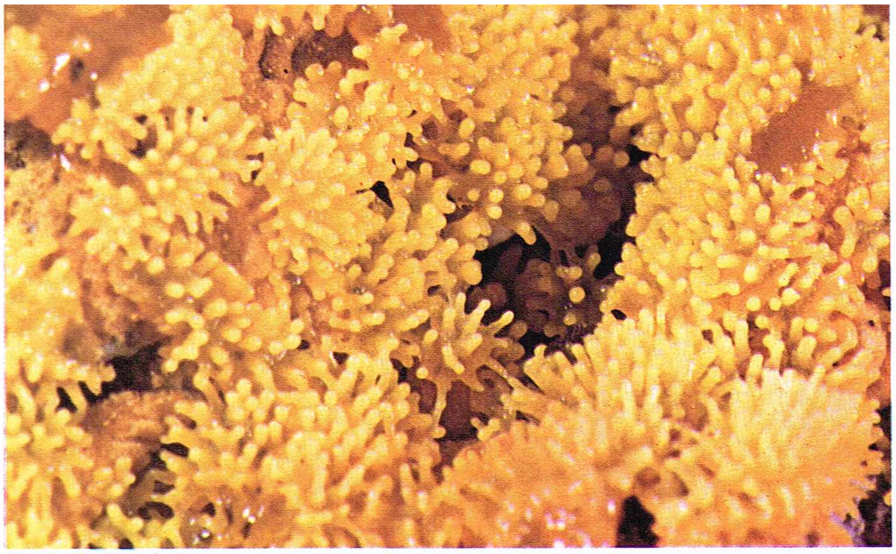

Claude Nardin - Jacana

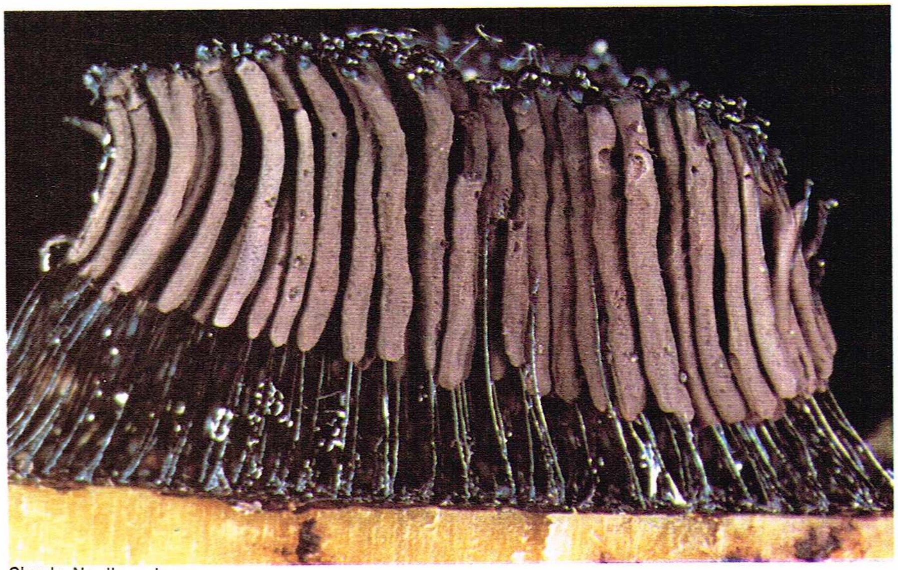

Claude Nardin - Jacana

▲ ***En haut :*** **Ceratiomyxa fruticulosa,** ***Myxomycète à fructifications buissonnantes et spores exogènes.***
En bas :
Stemonitis fusca ***(Stémonitales) sur souche de Conifère pourrie.***

cellés, qui produisent des spores tuniquées. L'une ou l'autre forme s'observe dans la nature, les deux stades coexistant rarement chez un même individu. Les Myxomycètes vivent sur des substrats humides, particulièrement sur l'écorce des bois morts, les feuilles et les débris végétaux en décomposition; quelques espèces sont associées aux Mousses; un certain nombre sont occasionnellement ou exclusivement coprophiles, et *Fuligo septica* fructifie même sur le sol nu. Leur répartition géographique est très large.

Cycle de développement des Myxomycètes

La *spore* unicellulaire, sphérique, est analogue à celle des Champignons supérieurs; sa paroi, qui contient sans doute de la cellulose, est marquée d'ornementations diverses et contient souvent des pigments sombres, si bien que les spores en masse apparaissent pourpres, brunes, rouille, etc. Leur durée de vie est parfois très longue; certaines peuvent encore germer plusieurs dizaines d'années après leur émission. A la germination, chaque spore libère un ou deux protoplastes nus, qui sont non flagellés *(myxamibes)* et se déplacent par des mouvements amiboïdes, ou pourvus de deux flagelles antérieurs inégaux (*myxoflagellés*, nageurs). Myxamibes ou myxoflagellés se nourrissent en ingérant des Bactéries et en absorbant des substances dissoutes, et se multiplient par bipartition; si les conditions sont défavorables, ils s'enkystent (microcystes). Les myxamibes et les myxoflagellés, toujours haploïdes, fonctionnent comme des gamètes et fusionnent par paires (syngamie); l'hétérothallie est la règle la plus générale chez les Myxomycètes. Le développement du zygote diploïde conduit à la différenciation en *plasmode* plurinucléé qui se déplace lentement, par mouvements amiboïdes, à la surface du substrat et s'alimente à la fois par phagocytose et par absorption. Selon les groupes, le plasmode reste de petite taille *(protoplasmode)* ou s'étire en minces filaments translucides, ramifiés et anastomosés *(aphanoplasmode)* ou, sous sa forme la plus typique ou *phanéroplasmode*, se

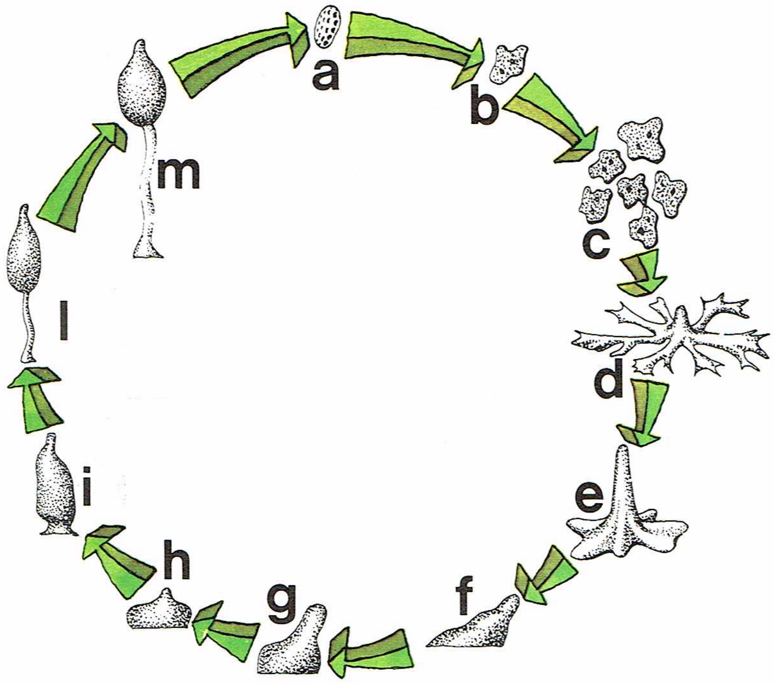

Cycle de développement des Acrasiales

▲ ***a : spore; b : myxamibe; c : développement et multiplication de la myxamibe; d : fusion; e : pseudo-plasmode; f-l : transformation du pseudo-plasmode en sporocarpe; m : sporocarpe à maturité. D'après B. E. Wright.***

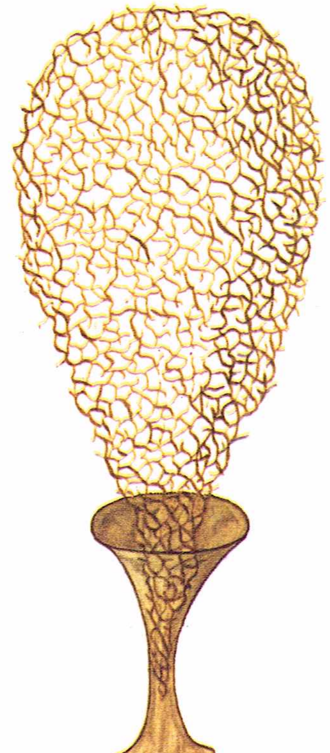

▶ **Hemitrichia clavata :** ***le sporocarpe et son capillitium.***

I.G.D.A.

développe en un large réseau en éventail, parcouru de mouvements protoplasmiques rythmiques, limité par un front massif de protoplasme plus ou moins lobé, parfois vivement coloré. Si les conditions sont défavorables (dessiccation, basses températures), le protoplasme s'organise en masses globuleuses plurinucléées, tuniquées, ou *macrocystes*, dont l'ensemble forme un *sclérote* qui peut rester viable deux ou trois ans. Le déterminisme de la sporulation du plasmode est encore mal connu. Sauf chez les Cératiomyxales où ces éléments sont exogènes, les spores se forment dans des *sporocarpes* d'aspect caractéristique, qui résultent de la condensation du plasmode en une ou plusieurs masses érigées. Sous sa forme la plus classique, le *sporange* comporte un pied formé de cellules à parois épaisses, coiffé d'un *sporocyste* délimité par une paroi rigide ou *péridium*, dans lequel le pied se prolonge par une *columelle ;* entre la columelle et le péridium peuvent se différencier des filaments libres ou en réseau, constituant un *capillitium*. Le protoplasme du sporocyste se divise en masses uninucléées qui deviennent des spores à paroi rigide. La nature chimique des parois du sporocarpe, du capillitium et des spores est encore mal connue ; on pense qu'elles sont formées de chitine et de cellulose, auxquelles peuvent s'ajouter de la kératine, des pigments mélaniques, et parfois des cristaux calcaires. Les spores mûres sont haploïdes, mais on ne sait pas avec certitude si la méiose se produit avant le clivage du protoplasme dans le sporocyste, ou seulement dans la jeune spore. Selon les groupes, le sporocarpe affecte diverses structures : sporange dépourvu de capillitium, sporange sessile, sporange sessile apprimé et réticulé, ou *plasmodiocarpe*, masse non organisée protégée par un péridium, ou *æthélie*, amas compact de sporanges coalescents ou *pseudo-æthélie*. La fructification exosporée consiste en une masse spongieuse, ramifiée ou morchelloïde, dressée sur un hypothalle portant les spores à l'extrémité de minces pédicelles.

La *classification* des Myxomycètes est basée essentiellement sur les caractères de la fructification et la couleur des spores. On reconnaît actuellement deux sous-classes comprenant six ordres et environ quinze familles.

● *Cératiomyxomycétidés*

Les spores sont exogènes. Ils sont représentés par un seul ordre, les *Cératiomyxales*, réduit aux deux espèces actuellement connues du genre *Ceratiomyxa*. Leur plasmode blanchâtre donne naissance à un sporophore dressé, d'aspect gluant, qui se ramifie dichotomiquement en buisson massif chez *C. fruticulosa*, fréquent sur le bois pourri des vieux Conifères. Chaque spore, en germant, donne naissance à huit myxoflagellés qui fonctionnent comme gamètes.

● *Myxogastromycétidés*

Les spores sont produites dans un sporocarpe. Les cinq ordres peuvent être classés de la façon suivante :

1° spores claires ou de teinte vive :
spores pâles ou incolores ; pas de capillitium : Licéales ;
spores de couleur vive ; pas de columelle ; péridium persistant : Trichiales ;
spores blanches ou rose pâle ; columelle présente, péridium fugace : Échinostéliales ;

2° spores sombres :
péridium et capillitium non calcaires : Stémonitales ;
péridium ou capillitium calcaire : Physarales.

Licéales

L'ordre comprend une trentaine d'espèces réparties en treize genres. La plus commune est sans doute *Lycogala epidendrum*, dont les sporocarpes sont du type æthélie. A l'état jeune, ce sont de petites masses globuleuses (5 à 10 mm de diamètre), rouges et muqueuses, qui deviennent gris brun, avec un péridium sec, de consistance membraneuse ; ils ressemblent alors à de petits Gastéromycètes ; aux spores finement réticulées sont entremêlés des lambeaux de filaments qui constituent un pseudo-capillitium ; les sporocarpes de *L. epidendrum* apparaissent dès le printemps à la base du tronc des arbres ou sur le bois pourri, en forêt. *L. flavofuscum*, moins commun, atteint 5 à 7 cm de diamètre ; on a signalé récemment que des spores de cette espèce auraient

germé après soixante-huit ans de vie latente. Les sporanges des *Tubifera* se présentent comme de petits tubes dressés ouverts à la partie supérieure, constituant une pseudo-æthélie ; *T. ferruginea*, sur bois pourri, est cosmopolite, alors que *T. bombarda* est strictement tropical. Les *Licea*, à sporanges sessiles, et les *Cribraria*, pédicellés et parfois vivement colorés *(C. rufa, C. aurantiaca)*, sont totalement dépourvus de capillitium ; le péridium des *Cribraria* et des *Dictydium (D. cancellatum)* est constitué d'un réseau de veinules rigides soutenant une membrane fragile qui disparaît à maturité. On trouve chez les *Licea* des espèces strictement coprophiles *(L. fimicola)*, alors que les *Cribraria* et *Dictydium* sont inféodés au bois des Conifères.

Trichiales

Les espèces de cet ordre (onze genres) sont dépourvues de columelle, mais leur péridium est persistant, leurs spores en masse de teinte jaunâtre ou rose accompagnées d'un capillitium de structure caractéristique. Les sporocarpes sont de formes variées, sessiles, globuleux et de très petite taille chez *Trichia favoginea*, longuement pédicellés et de forme cylindrique chez les *Arcyria*. Les sporanges des *Hemitrichia* et des *Arcyria* à péridium jaune, orange ou rouge sont parmi les plus vivement colorées des fructifications de Myxomycètes ; les filaments du capillitium des *Hemitrichia* sont marqués de bandes spiralées alors que ceux des *Arcyria* forment un réseau hérissé de dents ou d'épines. Dans le genre *Trichia*, les filaments du capillitium sont libres à l'extrémité, hygroscopiques, et contribuent à la dissémination des spores, comme des élatères.

Échinostéliales

Ce petit ordre comprend seulement cinq espèces du genre *Echinostelium*, caractérisé par des sporocarpes traversés par une columelle et limités par un péridium réduit à une délicate membrane protoplasmique, fugace, qui atteint rarement la maturité du sporange ; le capillitium, quand il existe, est formé de filaments rigides issus du sommet de la columelle ; à peine ramifiés chez *E. minutum*, espèce souvent coprophile, cosmopolite, ils forment un réseau ouvert chez *E. cribrarioides*.

Stémonitales

Les Stémonitales comprennent dix-huit genres, quatre-vingt-dix espèces. Le stade végétatif caractéristique de cet ordre est un *aphanoplasmode* étroitement appliqué sur le substrat ligneux, translucide et difficilement visible à l'œil nu. Il est constitué de minces cordons protoplasmiques de diamètre irrégulier qui se ramifient et s'anastomosent en réseau à mailles plus ou moins larges, mal délimité. Sur le point de sporuler, les cordons du plasmode s'épaississent et se condensent en masses coralloïdes. Les sporocarpes sont des sporanges typiques, tels ceux de *Stemonitis fusca* qui se présentent en groupes serrés, de 1 cm de haut, sur le bois pourrissant ; ils comportent un pédicelle fibreux sécrété par le protoplasme, prolongé par une columelle d'où se détachent les filaments du capillitium ; celui-ci varie, de quelques filaments simples chez *Macbrideola*, à un réseau complexe, chitinoïde, chez les *Stemonitis*, ou une masse serrée de filaments chez les *Lamproderma*. Le péridium, d'épaisseur variable suivant les genres, n'est jamais incrusté de carbonate de calcium ; la columelle et les spores sont de teinte sombre, brun sale ou violacées. Comme espèces remarquables, on peut citer, outre le banal *Stemonitis fusca* : *Lamproderma violacea*, à sporanges brièvement stipités, vivant surtout sur le bois de Conifères (pin sylvestre) ; *Comatricha caespitosa*, associé aux Bryophytes ; *C. mirabilis*, strictement fimicole ; les *Diachea*, qui fructifient surtout sur les feuilles et les débris végétaux.

Physarales

Avec cent soixante-dix espèces (dix-sept genres), c'est le groupe de Myxomycètes le mieux représenté. On y trouve des espèces de grande taille, hautement différenciées ; leur thalle est un phanéroplasmode bien développé ; les fructifications (æthélie, plasmodiocarpe ou sporange) sont pourvues d'un capillitium incrusté de concrétions calcaires dans la famille des Physaracées

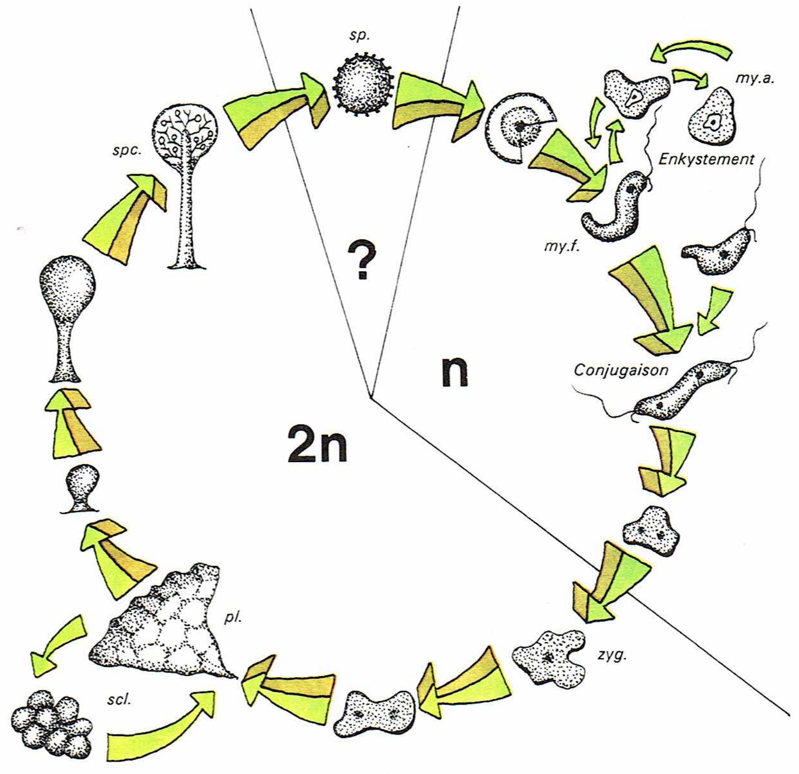

Cycle de développement des Myxomycètes endosporés

▲ **sp : spore ; zyg. : zygote ; pl. : plasmode ; scl. : sclérote ; my. a. : myxamibe ; my. f. : myxoflagellé ; spc. : sporocarpe. Adapté de W. D. Gray et C. J. Alexopoulos. — Biology of the Myxomycetes. New York, 1968.**

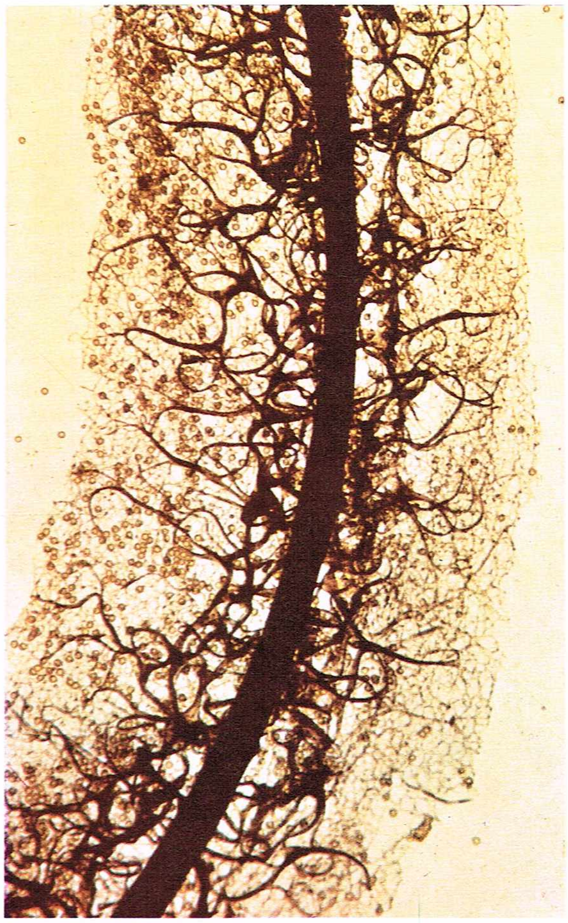

Bavestrelli, Bevilacqua, Prato

◀ **Stemonitis fusca :** ***portion du capillitium avec émission de spores (microphotographie).***

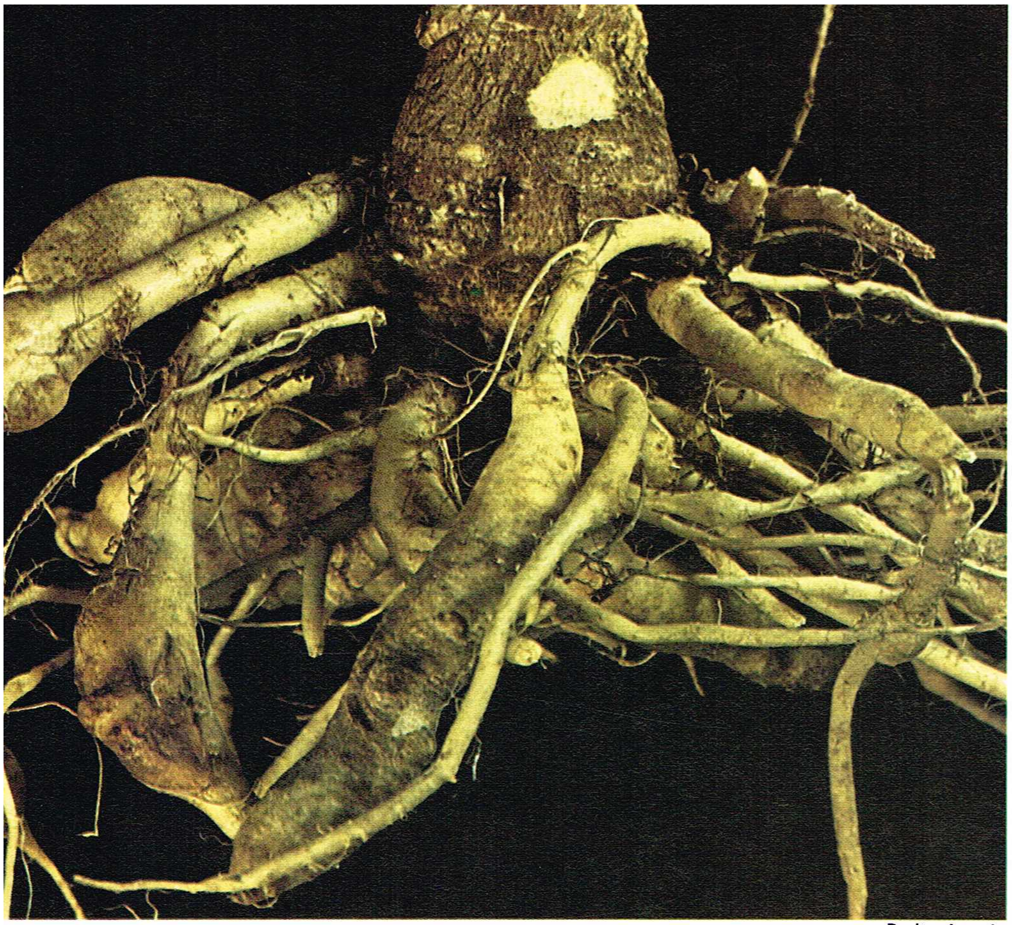

Droits réservés

▲ *Aspect macroscopique de la hernie des Crucifères provoquée par* **Plasmodiophora brassicae.**

▼ *Cellules parasitées par* **Plasmodiophora brassicae.**

(*Physarum, Fuligo*) ou dépourvues de ces formations chez les Didymiacées (*Didymium, Mucilago*) ; les spores sont brunes ou violettes ; le péridium également coloré et incrusté.

Physarum polycephalum vit normalement sur les débris végétaux en décomposition ; son plasmode d'abord blanchâtre, puis jaune vif, en forme d'éventail parcouru de veines saillantes s'anastomosant en réseau, enserre sur son passage des rameaux de plantes encore vivantes. C'est la seule espèce qu'on ait pu cultiver en laboratoire sur un milieu chimiquement défini, sans Bactéries ; dans ces conditions, le plasmode prend la forme d'un disque compact, régulier. Dans la nature, le plasmode mûr se transforme très rapidement en un groupe confluent de sporanges pédicellés (1 mm de haut), à tête sphérique gris cendré, incrustée de granules jaunes. Les spores violacées, épineuses (10 µ environ de diamètre), germent en produisant un gamète myxoflagellé. Le jeune plasmode résultant de la conjugaison sexuelle tend à s'accroître, non seulement par son activité propre, mais en englobant d'autres plasmodes et des myxamibes. Une espèce affine, *P. pusillum,* produit des sporanges semblables à de minuscules Champignons à chapeau ; la fructification de *P. bivalve* est un plasmodiocarpe sessile, alvéolé. *Fuligo septica,* la « fleur du tan », forme des plasmodes mucilagineux jaune vif, de grande taille (jusqu'à 30 cm, épais de 1 à 3 cm), sur les feuilles et les débris végétaux, en particulier sur l'écorce du chêne (déchets de tanneries) ; ce plasmode peut se transformer en boules enkystées (sclérotes) et passer à l'état de vie ralentie, pour régénérer le plasmode quand les conditions redeviennent favorables. Le sporocarpe est du type æthélie, en dôme étendu, à péridium rougeâtre incrusté de calcaire ; les spores lisses, brun violacé, sont entremêlées de filaments blanchâtres (capillitium), également calcarifiés.

Droits réservés

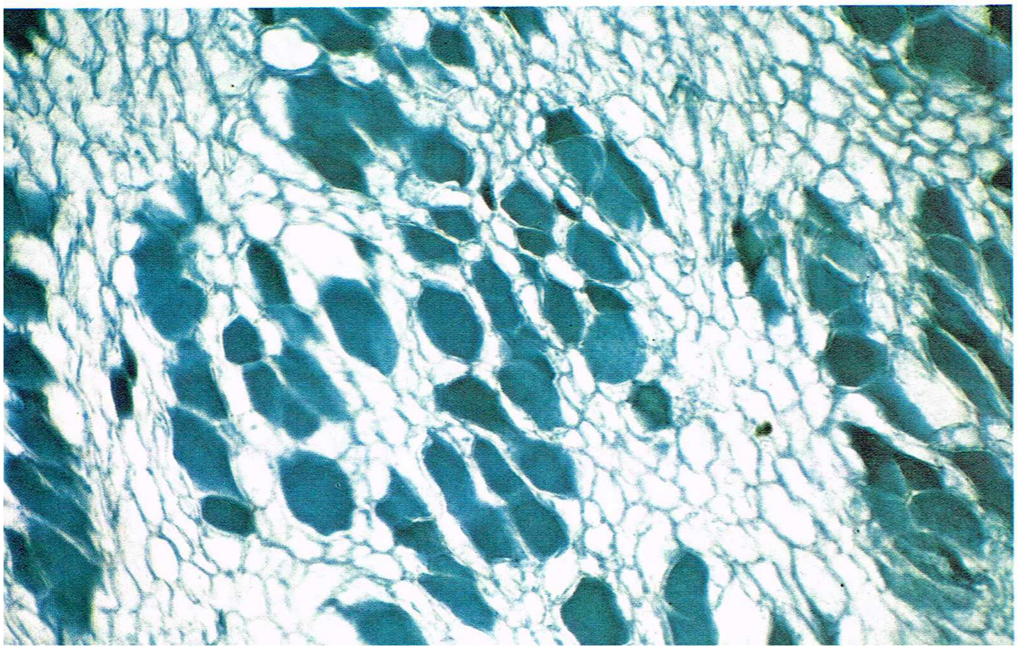

Parmi les espèces à capillitium non calcaire, citons le *Didymium difforme,* commun en Europe sur les excréments humides des herbivores, qui produit des sporanges isolés ; *D. squamulosum,* dont les sporanges sphériques sont revêtus de cristaux étoilés de carbonate de calcium, d'un blanc pur. La plupart des *Didymium* ainsi que *Badhamia ovalispora* sont également fimicoles. *Mucilago spongiosa (= Spumaria alba)* possède un plasmode blanc qui se transforme en æthélie gris cendré, fragile, devenant pulvérulente et réduite à une masse de spores violacées ; il est à peu près indifférent au substrat et vit aussi bien sur le sol humide qu'à la base des tiges de Graminées ou de petits rameaux qu'il enrobe d'une sorte de gaine.

Aux cinq ordres de la classe des Myxogastromycétidés, on ajoute parfois les *Protostélidales,* récemment décrites (Olive, 1967) comme des Protozoaires (Protostélidés), caractérisées par des protoplastes amiboïdes uni- ou plurinucléés et, dans l'un des genres, *Cavostelium,* par des cellules à flagelles antérieurs. Ces organismes pourraient représenter une forme ancestrale des Acrasiales et des Myxomycètes.

PLASMODIOPHORO-MYCÈTES

Les Plasmodiophorales constituent l'unique ordre de cette classe. Toutes ses espèces (une dizaine de genres) sont des endoparasites obligatoires des Végétaux, provoquant fréquemment une hypertrophie des cellules infectées. Certaines sont responsables de maladies des plantes cultivées, d'importance économique non négligeable : *Plasmodiophora brassicae,* agent de la hernie du chou et d'autres Crucifères, *Spongospora subterranea,* cause de la gale poudreuse de la pomme de terre, et sa variété *nasturtii,* qui s'attaque aux racines du cresson. D'autres parasitent les racines de Végétaux non cultivés, surtout aquatiques, des Algues (*Woronina* dans les Vauchéries, *Sorodiscus* dans les *Chara*) et des Champignons (*Woronina polycystis* et *Octomyxa brevilegniae,* parasites de Saprolégniales). Les détails du cycle de développement des Plasmodiophorales sont assez mal connus. Chez *Plasmodiophora brassicae,* les racines de l'hôte sont parasitées par des zoospores biflagellées qui s'appliquent à un poil absorbant, perdent leurs flagelles et pénètrent dans les cellules où elles se développent en plasmodes plurinucléés ; l'infection progresse vers les tissus internes, les plasmodes traversant les parois cellulaires. Quand la croissance est achevée, le contenu du plasmode se transforme en spores inertes à paroi chitinoïde. Il semble probable que la sporulation est précédée d'une conjugaison des noyaux par paires, sans production de gamètes (autogamie), suivie de méioses qui rétablissent la condition haploïde dans les noyaux sporaux. Les spores inertes libérées dans le sol par la décomposition de la galle germent en donnant une nouvelle zoospore flagellée. Selon certains auteurs, le cycle des Plasmodiophorales comprendrait deux phases plasmodiales distinctes : l'une produisant des zoosporanges à parois minces, libérant des zoospores uninucléées qui fonctionneraient peut-être comme gamètes, l'autre produisant des spores inertes.

Les affinités des Plasmodiophorales ne sont pas évidentes. Comme les Myxomycètes, elles végètent sous forme de plasmode plurinucléé, et leurs zoospores sont des myxoflagellés à deux fouets inégaux analogues à ceux des autres Myxomycophytes. Mais, compte tenu des contraintes imposées par le parasitisme, il est aussi possible de les considérer comme des formes régressées de Champignons plus élevés en organisation, et nombre d'auteurs les classent parmi les Eumycètes mastigomycotinés. D'autres émettent l'opinion contraire et considèrent que les Plasmodiophorales sont plus proches des Protozoaires que de tout autre groupe de Champignons.

Tomsich

EUMYCOTA

▲ ***Lépiote en bouclier*** **(Lepiota clypeolaria).** ***Chez la plupart des Basidiomycètes (Eumycota), le carpophore est constitué par un chapeau, un pied, et une surface hyménifère placée sous le chapeau.***

A la différence des Myxomycota, les Eumycota (Eumycètes, Champignons proprement dits) possèdent un thalle cellulaire ou filamenteux, toujours délimité par une paroi propre ; ils se nourrissent exclusivement par absorption, à travers cette paroi, des substances organiques rendues assimilables par les exoenzymes sécrétées par le Champignon. Certains présentent une coloration verte (l'amanite phalloïde, la russule verdoyante, la plupart des *Penicillium,* certains *Aspergillus,* etc.) ; mais ces pigments, sans analogie chimique avec la chlorophylle, ne sont aucunement liés à une activité photosynthétique.

Structure du thalle

Fondamentalement, l'appareil végétatif des Champignons est constitué par des filaments mycéliens ou *hyphes,* grêles, ramifiés et parfois anastomosés, dont l'ensemble constitue le *mycélium* Le filament germinatif né d'une spore fongique s'allonge progressivement par une croissance apicale linéaire potentiellement illimitée, et produit en même temps des rameaux latéraux ; la ramification dichotomique ne s'observe guère que dans des structures spécialisées assurant la reproduction. Chez les Champignons dits inférieurs (Mastigomycotinés, Zygomycotinés), la structure est *siphonée* ou *cœnocytique :* les filaments mycéliens ou *siphons* ne sont, en principe, pas cloisonnés ; l'ensemble du thalle est ainsi constitué d'une masse continue de cytoplasme plurinucléé, canalisée dans des parois tubulaires. Le thalle des formes les plus simples, souvent parasites (Chytridiales), est réduit à un *centre* globuleux, pourvu ou non de rhizoïdes assimilateurs. Le mycélium des Champignons supérieurs (Asco et Basidiomycètes) est constitué d'hyphes septées transversalement ; les cloisons délimitant des segments uni- ou plurinucléés (improprement qualifiés de cellules) sont en réalité des diaphragmes percés d'un pore qui assure la continuité cytoplasmique, assez large pour permettre le passage des noyaux et des mitochondries. Les filaments du thalle des Champignons supérieurs sont fréquemment anastomosés et peuvent s'associer pour constituer des structures plus ou moins complexes (mais jamais de véritables tissus homologues de ceux des plantes supérieures) : cordons et rhizomorphes, palmettes, massifs plus ou moins compacts ou *stromas,* tubercules, *sclérotes* pourvus d'une enveloppe protectrice, etc. ; les corps fructifères des Macromycètes, apothécie des Discomycètes, carpophore des Champignons « à chapeau » ou des polypores, les périthèces pseudoparenchymateux des Ascomycètes sphériacés sont constitués des mêmes hyphes fondamentales que les autres structures moins différenciées. Le thalle levuroïde caractéristique des Saccharomycétacées est, par contre, réduit à des cellules bourgeonnantes libres ou qui restent alignées en pseudo-mycélium. Les Laboulbéniomycètes ont un type d'organisation plus complexe, analogue au cladome des Algues Floridées les plus évoluées.

Caractères cytologiques

Les *parois* des Champignons filamenteux sont constituées fondamentalement par une armature de microfibrilles de *chitine*, auxquelles s'ajoutent divers composés : sucres aminés, protides (kératine), mannose, glucose ; elles peuvent également contenir des pigments (mélanine) et des enzymes de surface. L'élaboration des matériaux de la paroi est sans doute liée à la présence d'organelles vésiculeux, les *lomasomes*, accolés à la membrane cytoplasmique. Certains Champignons inférieurs (Péronosporales, Saprolégniales) sont dépourvus de chitine ; leurs parois contiennent essentiellement des polysaccharides, et plus particulièrement de la *cellulose ;* chez d'autres (Blastocladiales, Chytridiales), elles sont soit purement chitineuses, soit chitino-cellulosiques. Les parois des Levures possèdent très peu de chitine et sont surtout riches en mannane.

Les *noyaux* des Champignons sont semblables à ceux des organismes supérieurs, avec une membrane nucléaire, généralement un seul nucléole, et une substance chromatique répartie à la mitose en un petit nombre de chromosomes (n = 4 à 8 chez les Ascomycètes). Ils se multiplient, en principe, par des mitoses typiques, avec ou sans centrosome aux pôles du fuseau ; toutefois, les modalités précises de la caryocinèse font encore l'objet d'interprétations diverses selon les auteurs. Au cours du

▶ *Type d'anastomose des filaments mycéliens (hyphes).*

I.G.D.A.

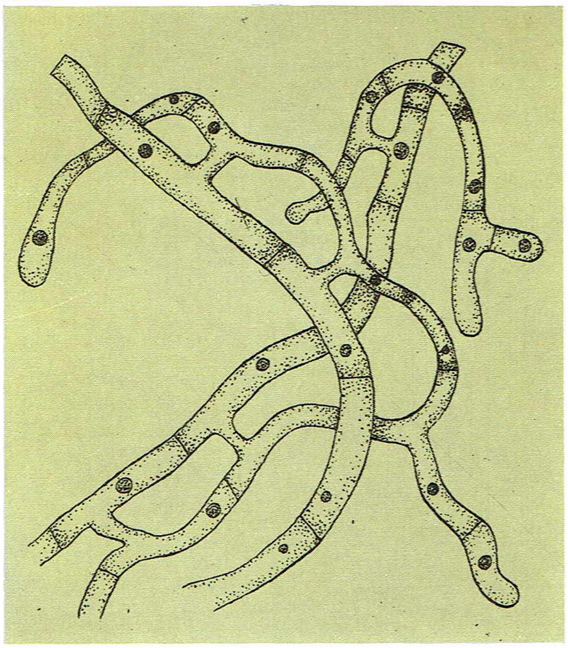

développement se succèdent généralement une phase haploïde (*n* chromosomes) et une phase diploïde (2 *n* chromosomes) ; chez les Asco- et Basidiomycètes, la caryogamie est retardée et la phase diploïde est précédée d'un stade à *dicaryons*, où chaque cellule contient deux noyaux haploïdes conjugués qui se divisent simultanément. Le thalle des Asco- et Basidiomycètes et des *Fungi imperfecti* est fréquemment *hétérocaryotique :* les noyaux contenus dans une cellule ou un segment de l'hyphe végétative ne sont pas génétiquement identiques; ce phénomène, qui peut être la conséquence de mutations ou résulter de l'anastomose entre filaments mycéliens de génotypes différents, explique en partie la variabilité des caractères morphologiques et physiologiques et la capacité d'adaptation de ces Champignons.

Tous les Eumycètes possèdent un *chondriome* typique; chez certaines espèces de coloration vive, une partie des mitochondries évolue en chromoplastes chargés de pigments caroténoïdes. Le cytoplasme des Champignons contient également des *vacuoles*, souvent riches en volutine (réserve phosphorée), parfois colorées par des pigments, et des *globules lipidiques*. Dans les parties âgées du thalle, les vacuoles et les inclusions lipidiques augmentent de volume et repoussent vers la paroi le cytoplasme qui finit par disparaître. D'autres inclusions cytoplasmiques se manifestent seulement chez certains groupes de Champignons : *glycogène* chez les Asco- et Basidiomycètes, *celluline* chez les Leptomitales (Oomycètes), etc.

Nutrition et métabolisme

Les Champignons sont capables de métaboliser des substances variées qu'ils assimilent, grâce aux enzymes localisées à la surface du thalle ou sécrétées dans le milieu ambiant; les produits de la digestion sont absorbés à travers la paroi et utilisés par l'hyphe. Les parasites obligatoires (Péronosporales, Érysiphales, Urédinales) ont des exigences alimentaires très strictes et ne peuvent accomplir leur cycle complet de développement qu'aux dépens d'un hôte déterminé. Mais un grand nombre d'espèces sont susceptibles de végéter sur des milieux synthétiques; les cultures expérimentales ont permis de définir avec précision les éléments indispensables à la croissance des Champignons : carbone, hydrogène, oxygène, azote, potassium, phosphore, magnésium, soufre; le fer, le zinc, le cuivre et peut-être d'autres oligo-éléments doivent être fournis en très petites quantités; le calcium, requis par les plantes supérieures, est indispensable aux Levures, mais agit seulement comme stimulant de la croissance dans les autres groupes. En outre, des « substances de croissance » complexes sont parfois nécessaires; ainsi la croissance des Levures est favorisée par l'addition au milieu de culture d'un mélange d'aneurine (vitamine B_1), de biotine et d'autres substances (« bios ») ; l'aneurine ou l'un de ses précurseurs paraît indispensable au développement de la plupart des Champignons.

Dépourvus de chlorophylle, les Champignons sont incapables d'assimiler le gaz carbonique atmosphérique par photosynthèse, aussi bien que par voie chimiosynthétique. En conséquence, ils sont tous *hétérotrophes pour le carbone*, qu'ils empruntent obligatoirement à des aliments organiques complexes. En général, les composés aliphatiques, et particulièrement les hydrates de carbone, sont plus facilement assimilés que les composés aromatiques. Le glucose et le lévulose, puis le saccharose, sont les sucres le plus aisément utilisés par la plupart des espèces saprophytes; les lignivores dégradent le pentose et le glucose. Les Champignons parasites ou saprophytes d'Insectes ou d'autres Arthropodes utilisent la chitine, tandis que les phytoparasites assimilent la pectine. Un certain nombre d'espèces végètent à partir d'acides organiques : malique, citrique, lactique, tartrique, à l'exclusion des acides formique et oxalique. D'autres, en présence de sucres, sont susceptibles d'utiliser également les graisses. A défaut d'hydrates de carbone, les protides et les acides aminés, plus rarement la kératine (cheveux, ongles, corne), peuvent être dégradés; par contre, les espèces capables d'assimiler les alcools et la paraffine sont en nombre très limité.

La *nutrition azotée* est, pour la plupart des Champignons saprophytes et parasites, assurée par des composés minéraux, nitrates ou dérivés ammoniacaux. Les Levures et les Mucorales, qui ne possèdent pas l'équipement enzyma-

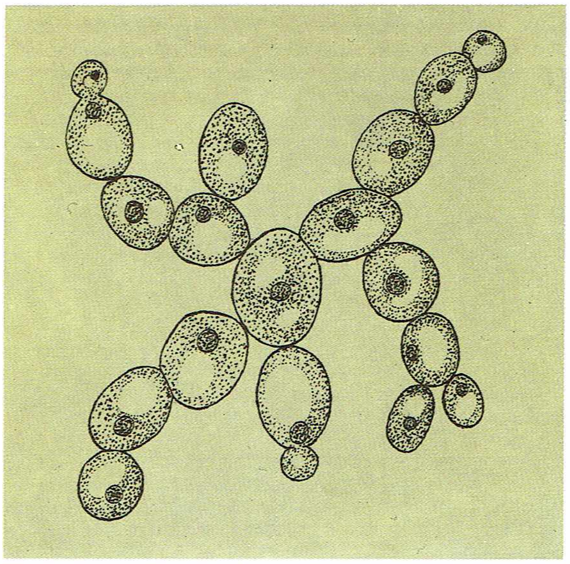

Bavestrelli, Bevilacqua, Prato

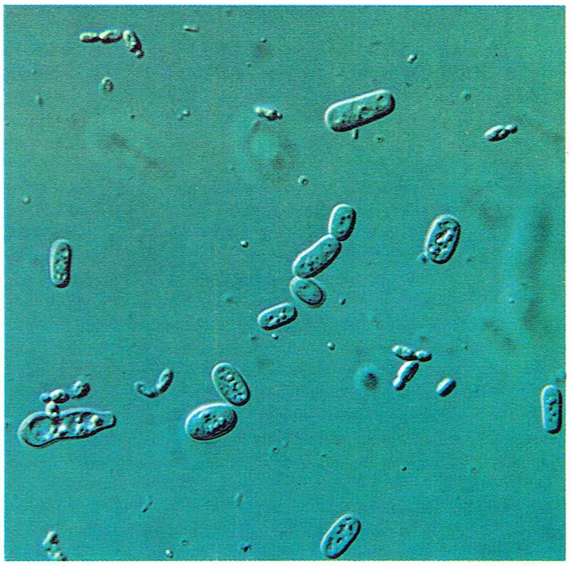

Atlas Photo

▶ *A gauche : schéma montrant l'aspect microscopique d'une petite colonie de* **Saccharomyces cerevisiae** *(Ascomycètes). A droite : photographie effectuée au microscope (en contraste de phase.)*

tique indispensable à la réduction de l'acide nitrique en ammoniac, sont capables d'assimiler seulement l'azote ammoniacal. Certains Champignons inférieurs (Saprolégniales), hétérotrophes pour l'azote comme pour le carbone, exigent des aliments azotés organiques tels que des acides aminés. Les nitrites sont toxiques pour les Champignons comme pour bon nombre d'organismes supérieurs; toutefois, l'*Aspergillus niger* est capable de les transformer en hydroxylamine, ce qui pourrait représenter un premier stade vers la synthèse des protides. On pense enfin que des Champignons de position systématique mal définie *(Frankia)*, qui vivent en symbiose avec les racines de l'aulne, assimileraient l'azote atmosphérique à la manière des *Rhizobium*.

Les autres éléments essentiels sont généralement introduits dans les milieux de culture sous forme de sels minéraux à forte teneur en oxygène : phosphates de potassium et sulfate de magnésium; les Saprolégniales, incapables de réduire l'acide sulfurique, exigent toutefois des sulfures. L'activité métabolique des Champignons est toujours extrêmement complexe et conduit à l'élaboration de multiples produits, indispensables à leur vie et à leur développement, ou simples déchets; beaucoup (acides organiques, enzymes, vitamines, antibiotiques, etc.) sont exploités industriellement.

Les dépendances nutritives de certains Micromycètes sont appliquées à divers tests biologiques, telle la détection de traces d'arsenic par *Scopulariopsis brevicaulis;* la teneur du sol en cuivre est appréciée par l'intensité de la pigmentation des spores d'*Aspergillus niger; Phycomyces blakesleanus* et *Nematospora gossypii* servent au dosage de la thiamine (vitamine B_1).

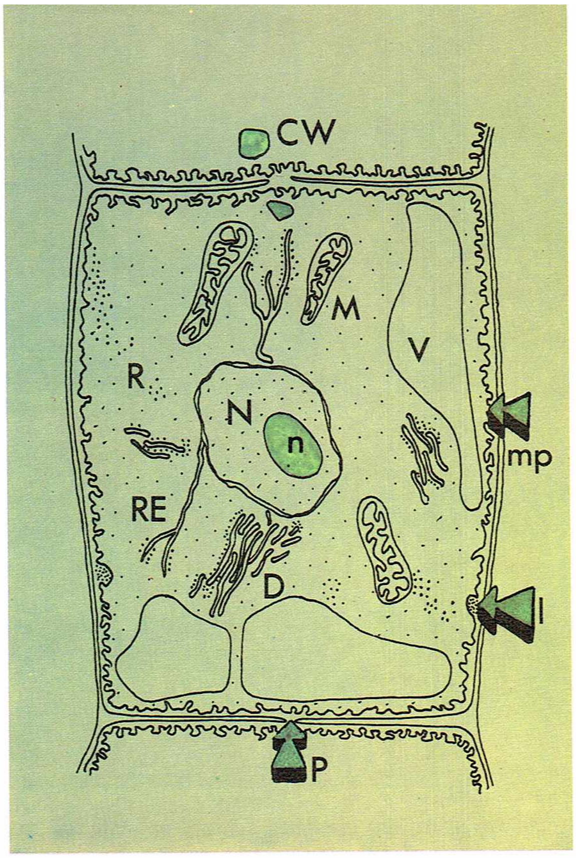

◀ ***Schéma de la structure d'une cellule fongique.***
N : noyau; n : nucléole; R : ribosomes; V : vacuoles; mp : membrane plasmatique; P : pore; RE : réticulum endoplasmique; CW : corps de Woronine; D : dictyosomes; I : lomasomes; M : mitochondries.

Biologie

Les hétérotrophies des Champignons leur imposent un mode de vie en relation étroite avec des milieux organiques déjà élaborés; il se traduit par le saprophytisme, le parasitisme ou la symbiose.

Les Champignons saprophytes, ainsi que nous l'avons dit, exploitent essentiellement des substances organiques inertes, des débris végétaux ou animaux. La plupart des espèces saprophytes sont polyphages; certaines cependant sont plus étroitement inféodées à un type particulier de substrat; on peut ainsi recenser des microflores fimicoles ou coprophiles, des lignicoles, des fongicoles (sur les Champignons pourrissants), des kératinophiles (sur la corne, les plumes et les poils, sur la laine), des Micromycètes des sols arides ou cultivés, ou des sables littoraux, des Champignons des eaux douces ou marines, vivant sur les feuilles, le bois ou d'autres débris organiques immergés. Beaucoup d'autres espèces microscopiques, qualifiées de moisissures, sont des agents d'altération biologique des produits alimentaires, de matériaux et de produits manufacturés, des textiles, papiers, cuirs, etc., y compris le verre et les matières plastiques. Dans le sol, les mycéliums des Champignons supérieurs et les moisissures saprophytes qui y végètent en grande abondance constituent, avec les Bactéries et la microfaune, un élément important de l'équilibre biologique. En décomposant la matière organique morte, ils contribuent à réintroduire dans le cycle vital les éléments simples utilisés par les autres êtres vivants; plus directement, ils enrichissent le sol en substances assimilables par les racines des plantes supérieures, et assurent ainsi sa fertilité. Un autre aspect non négligeable de l'activité des Champignons saprophytes du sol est le rôle antagoniste qu'ils peuvent jouer, par la sécrétion de toxines ou de substances inhibitrices, vis-à-vis d'espèces pathogènes des plantes cultivées; on a pu envisager, par exemple, l'exploitation systématique de ces propriétés pour la lutte biologique contre les *Pythium*, agents redoutables du flétrissement des plantules.

Les Champignons parasites sont obligatoirement inféodés à des organismes vivants, animaux ou végétaux, auxquels ils empruntent les substances organiques indispensables à leur développement. Leur activité se traduit chez leurs hôtes par des maladies souvent graves, parfois mortelles; on les qualifie alors de *pathogènes*.

L'étude des maladies cryptogamiques des plantes cultivées, d'une importance économique considérable, constitue le chapitre le plus important de la *phytopathologie*. Les pathogènes des Végétaux se rencontrent dans tous les groupes principaux de Champignons : Oomycètes

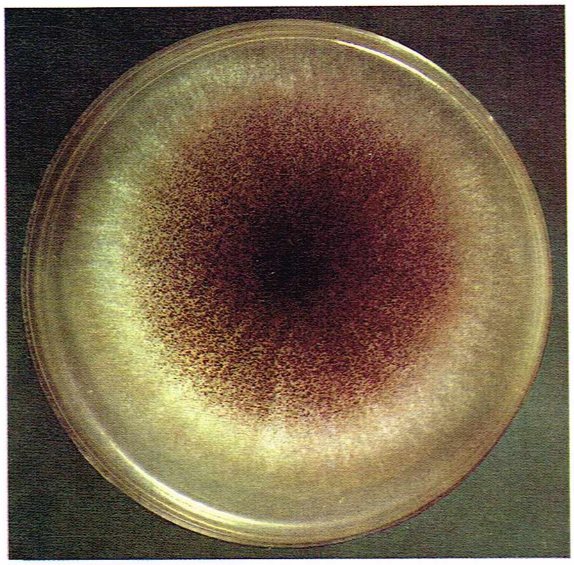

Carlo Bevilacqua

Carlo Bevilacqua

◀ ***Cultures sur agar-agar d'*****Aspergillus niger** ***(à gauche) et de*** **Candida lipolytica** ***(à droite).***

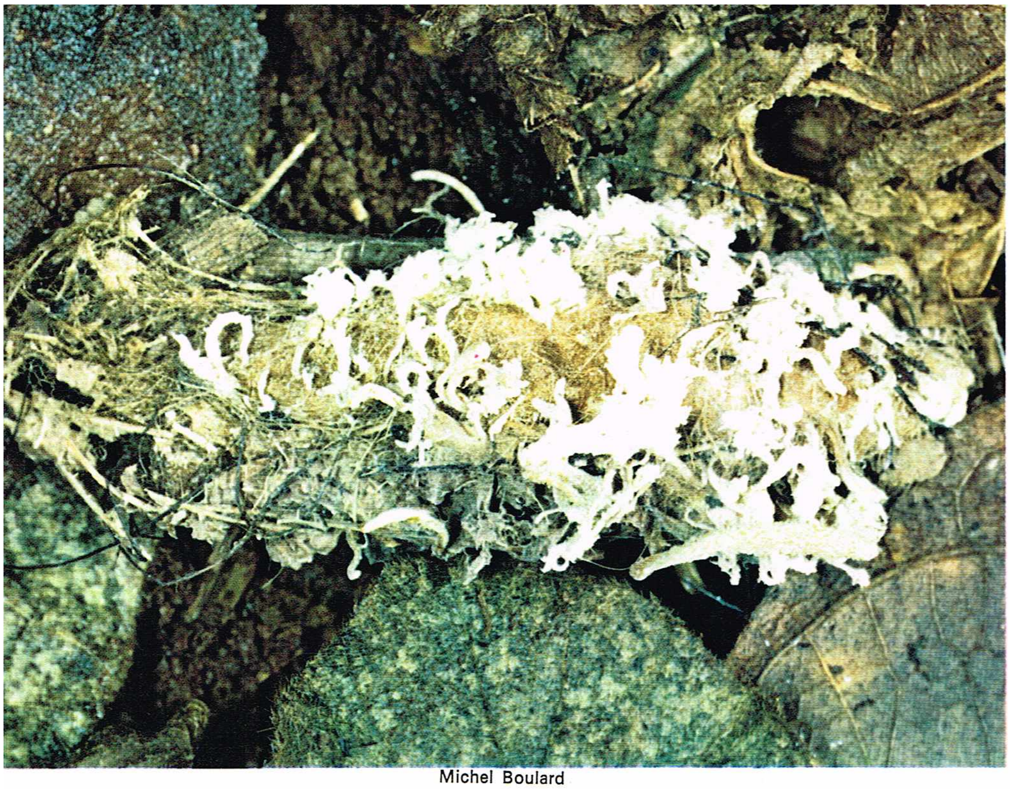

Michel Boulard

▲ *Chenille parasitée par un Champignon* (Isaria).

(mildious et rouilles blanches, flétrissures et fontes des semis), Ascomycètes (Érysiphales, agents des oïdiums, *Claviceps* responsables de l'ergot des céréales, etc.), Basidiomycètes (rouilles, charbons et caries), de nombreux *Fungi imperfecti ;* beaucoup de polypores attaquent les arbres vivants dans les vergers, les forêts et les plantations, et des agarics (armillaire) sont cause du « pourridié » des racines. Un nombre relativement limité de ces Champignons se comportent en parasites obligatoires ; beaucoup (parasites facultatifs) ont, au cours de leur cycle de développement, une phase saprophyte dans le sol ou sur les débris de l'hôte, après la mort de celui-ci ; des parasites secondaires s'installent sur des Végétaux sénescents, ou affaiblis par l'action d'un agent pathogène primaire ou à la suite d'un traumatisme ; enfin, à la limite du parasitisme et du saprophytisme, bon nombre d'espèces végètent sur ou dans des fruits mûrs, des tubercules, des graines, déjà infectés avant la récolte (moisissures « du champ ») ou contaminés au cours du stockage. Si certains parasites sont étroitement spécifiques, d'autres se développent indifféremment sur un large éventail d'hôtes appartenant à des groupes botaniques très divers ; des espèces polyphages donnent naissance, par mutation ou sélection, à des races biologiques morphologiquement et physiologiquement différenciées, inféodées à un hôte déterminé ; on dénombre ainsi une soixantaine de « formes spéciales » du *Fusarium oxysporum*, agent banal et cosmopolite de trachéomycoses. Le déroulement de l'infection et les mécanismes de l'action parasitaire sont également diversifiés. Le parasite attaque généralement son hôte aux points de moindre résistance : stomates des feuilles, lenticelles jeunes racines et poils absorbants, blessures ou lésions primaires ; l'infection peut rester localisée ou affecter électivement un organe déterminé (ovaires ou inflorescences, dans le cas des Graminées atteintes par le charbon), ou se généraliser progressivement et altérer toute la plante. Le mycélium du Champignon chemine dans les vaisseaux conducteurs (trachéomycoses), pénètre dans les cellules (parasites intracellulaires) ou s'insinue entre leurs parois (parasites intercellulaires) ; fréquemment, il s'applique aux cellules et les pénètre au moyen de suçoirs ou *haustories*. L'activité du Champignon parasite se traduit chez son hôte par des symptômes caractéristiques : nécrose ou pourriture des tissus atteints, perte de turgescence de la plante sous l'effet de toxines sécrétées par l'agent pathogène, ou par obturation mécanique des vaisseaux conducteurs envahis par le mycélium (trachéomycoses), chlorose, rabougrissement ou au contraire réaction hyperplasique conduisant à la formation de galles (mycocécidies), de chancres ou de balais de sorcières. La gravité de la maladie est fonction de multiples facteurs, externes et internes, qu'il convient d'analyser avec précision pour se prémunir contre son développement et lutter efficacement contre ses méfaits. Il est souvent possible de sélectionner des variétés d'une plante cultivée naturellement résistantes à un pathogène donné ; mais l'immunisation active, telle qu'on la réalise par la vaccination chez l'homme et les Animaux, ne semble pas d'un grand recours en phytopathologie.

Les Champignons sont eux-mêmes sujets aux attaques d'autres Champignons (mycoparasitisme), de Bactéries ou de Virus ; ils sont consommés par des Insectes (particulièrement leurs larves) et d'autres Arthropodes, des Protozoaires et des Mollusques ; on constate fréquemment que des espèces vénéneuses, y compris l'amanite mortelle, la phalloïde, sont mangées par des limaces. L'expérience semble prouver que la toxicité des Champignons est nettement moindre pour les Animaux que pour l'homme.

Dans le règne animal, l'action parasitaire des Champignons se manifeste aussi largement. En milieu aquatique, de nombreux Champignons inférieurs vivent en parasites d'Animaux microscopiques et de larves ; ceux qui s'attaquent aux Mollusques (huîtres, moules) et aux Poissons intéressent tout particulièrement l'économie humaine. Dans le sol, la microfaune (amibes, rhizopodes) peut être parasitée, ainsi que les Vers ; des Champignons prédateurs, du groupe des *Fungi imperfecti*, s'attaquent aux Nématodes qu'ils paralysent, puis digèrent au moyen de curieux dispositifs : hyphes adhésives, lacets ou garrots. La pathologie des Insectes est un domaine où les

▶ **Monilia fructigena,** ***agent vecteur de la moniliose des poires et des pommes (forme conidienne de*** **Sclerotinia fructigena).**

Carlo Bevilacqua

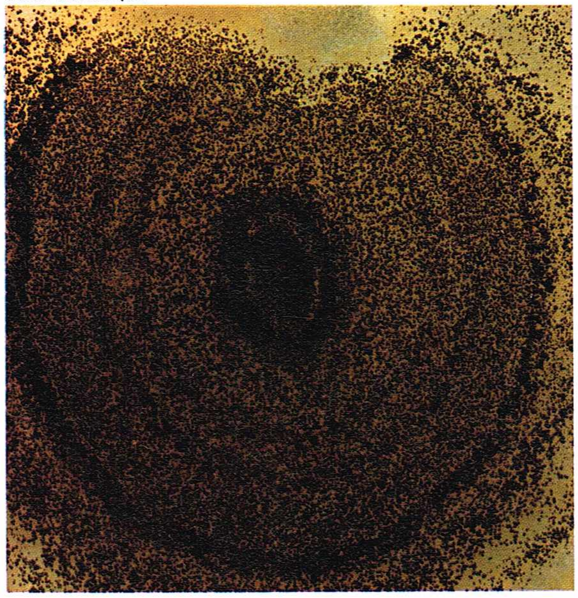

Carlo Bevilacqua

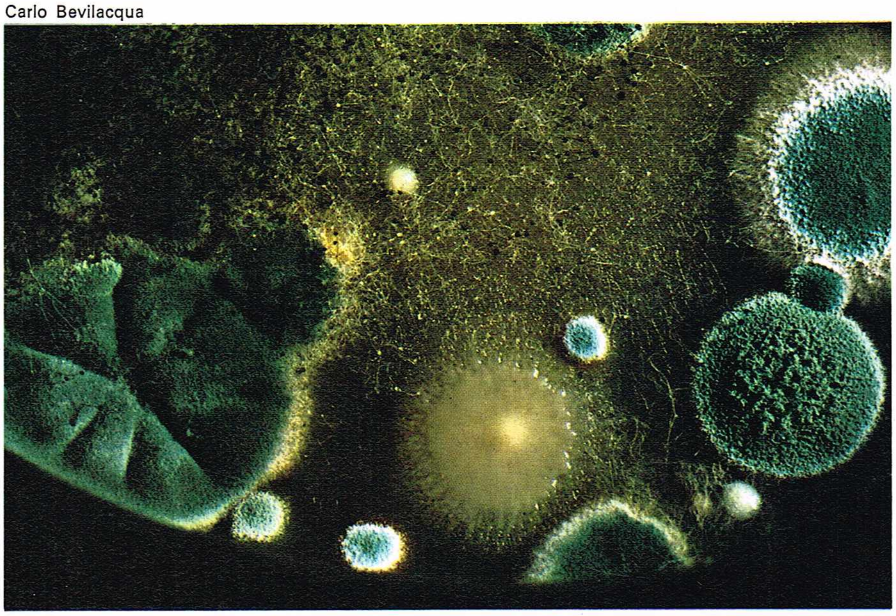

Champignons se révèlent particulièrement actifs. Certains groupes (surtout les Laboulbéniales) sont des ectoparasites, végétant sur la chitine des téguments, sans causer de grands dommages à l'hôte; beaucoup plus nombreux sont les entomophages; ce sont des Zygomycètes (*Entomophthora muscae*, qui tue les mouches par milliers en automne), des Ascomycètes, actifs surtout dans les régions tropicales, ou des *Fungi imperfecti (Beauveria, Metarrhizium, Aegerita)*. Si *Beauveria bassiana*, agent de la *muscardine*, est un pathogène redoutable du ver à soie, d'autres entomophages, en détruisant vers blancs, criquets et autres Insectes nuisibles, se comportent en auxiliaires de l'agriculture; on a pu ainsi protéger certaines cultures tropicales contre les attaques des cochenilles en pulvérisant des spores d'*Aschersonia*.

Quoique moins importants que les Bactéries et les Virus, les Champignons sont les agents d'un certain nombre de maladies sérieuses de l'homme et des Animaux supérieurs.

La symbiose est largement pratiquée par les Champignons. Comme dans les cas de saprophytisme ou de parasitisme, l'association symbiotique est réalisée à des degrés divers, qui vont du simple commensalisme au parasitisme réciproque. Les exemples les plus caractéristiques sont fournis par la symbiose de Champignons avec des Insectes, avec des Algues (Lichens) ou avec les racines de plantes supérieures (mycorrhizes).

Les relations entre *Insectes et Champignons* sont souvent complexes. Les femelles des Coléoptères xylophages (scolytes) ensemencent leurs galeries de ponte avec des conidies de moisissures (Champignons *Ambrosia*) qui contaminent le bois et y prolifèrent; les larves se nourrissent ensuite du Champignon ou du bois rendu assimilable par son activité diastasique. Termites et fourmis font également des « cultures » de Champignons qui les aident à digérer les substances ligneuses dont ils se nourrissent. Les Champignons myrmécophiles, qu'on trouve associés à des fourmilières (Macromycètes des genres *Pluteus* et *Lepiota* ou Micromycètes imparfaits), y trouvent un habitat favorable, tandis que l'Insecte se nourrit du mycélium; ce type d'association est encore plus étroitement réalisé chez les *Septobasidium*, Basidiomycètes crustacés corticoles d'Amérique, qui hébergent dans leur trame des cochenilles symbiotes. L'adaptation à la symbiose se traduit, chez certains pucerons, cochenilles et de nombreux Homoptères hématophages, par la formation d'organes internes spécialisés, ou *mycétomes*, formés de cellules destinées à l'hébergement de micro-organismes symbiotiques, en particulier des Levures; ces organismes, transmis d'une génération d'Insectes à l'autre, leur fourniraient les vitamines qui font défaut dans le sang dont ils se nourrissent; cette hypothèse a pu être confirmée expérimentalement chez des punaises *(Rhodnius)* où le symbionte, un Actinomycète, n'est pas inclus dans un mycétome, mais vit librement dans la cavité du tube digestif. Au bénéfice des Champignons, notons encore que la transmission de leurs spores (quand elles sont gluantes), des pycniospores et autres éléments fécondants est fréquemment effectuée par les Insectes. L'association symbiotique *de Champignons microscopiques et de Bactéries* est fréquente dans la nature. L'exemple le plus populaire est fourni par le « Champignon du thé » ou *hongo* qu'on cultive sur une infusion de thé pour la transformer en une boisson hygiénique, riche en vitamines; la « mère » associe une Levure ou un *Aspergillus (A. oryzae)* au *Bacterium xylinum*, qui concourent mutuellement à leur nutrition.

Les mycorrhizes résultent de l'association étroite entre le mycélium de Champignons et les racines des plantes. Toutes les plantes supérieures non chlorophylliennes saprophytes forment des mycorrhizes, ainsi que beaucoup d'arbres forestiers, Conifères et feuillus, des plantes arbustives (bruyères), des herbacées vivaces, mono- et dicotylédones (Graminées, Orchidacées, Solanacées), des Fougères et autres Ptéridophytes, quelques Bryophytes. Contrairement aux Lichens, les Champignons des mycorrhizes sont le plus souvent des Basidiomycètes : rhizoctone des orchidées, myceliums des bolets, russules, lactaires, cortinaires, associés aux racines des arbres des forêts. Plus rarement, ce sont des Ascomycètes, telle la truffe en relation avec les « chênes truffiers », ou des Zygomycètes (*Endogone* associé au fraisier). Chez les arbres forestiers, la mycorrhize est généralement *ectotrophe* : le mycélium externe forme autour de la

▲ ***Quelques contaminants banals en culture mixte sur agar-agar : une colonie crémeuse, claire, de Levures; divers* Penicillium *verts, veloutés ou granuleux; le mycélium diffus et les sporocystes noirs de* Rhizopus stolonifer.**

◄ ***Culture sur agar-agar* d'Aspergillus niger *montrant un développement rythmique, concentrique.***

▼ ***Mycose à* Mucor *de la larve de* Bombyx mori *(ver à soie).***

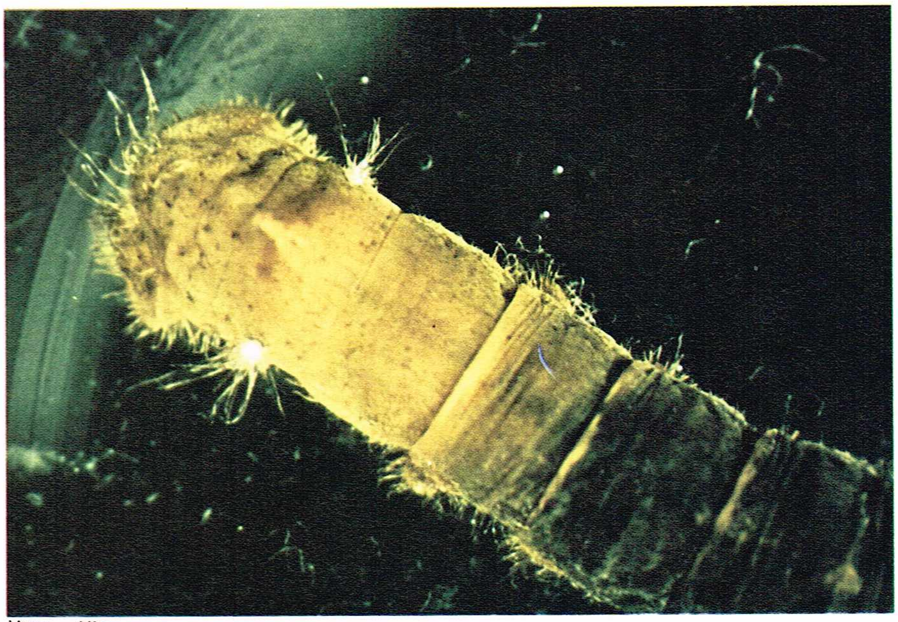

Vago - Alès

Droits réservés

▲ **Fusarium roseum** *sur graines de blé. (Technique de contrôle des semences sur milieu gélosé.)*

Droits réservés

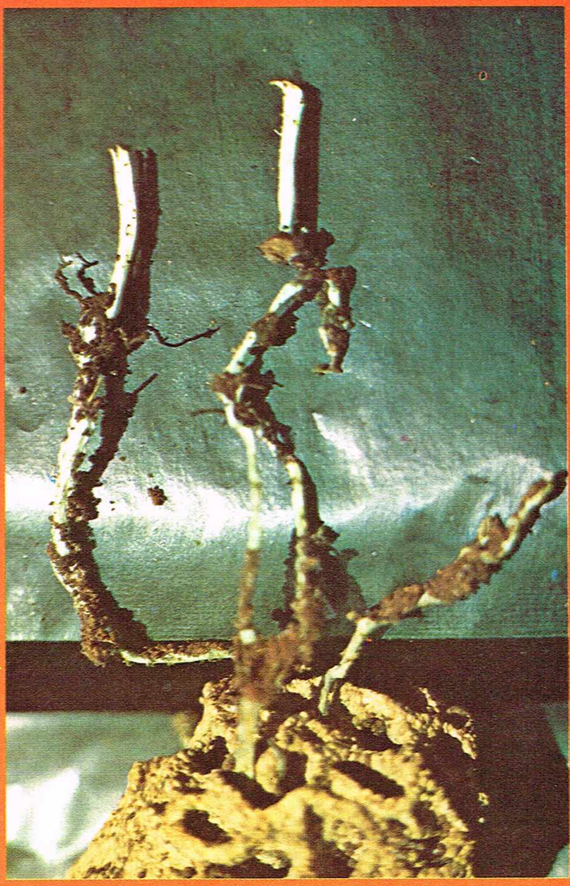

Muséum national d'histoire naturelle. Laboratoire de cryptogamie

▶ *Rouille causée par* **Puccinia arenariae** *sur œillet (à gauche).*

▶ *Le genre* **Xylaria** *se manifeste, entre autres, sur les meules de termites (à droite).*

racine un réseau serré. Chez les orchidées, les Éricacées, elle est *endotrophe :* le mycélium est logé dans les cellules des racines, où il peut former des pelotons, des ramifications en arbuscules ou même des vésicules (Fougères) ; dans le type *ecto-endotrophe*, représenté par l'association du bouleau blanc avec une russule, le mycélium forme un manchon autour de la racine, et de fins cordons qui pénètrent à l'intérieur. La croissance de certaines plantes est entièrement dépendante de leur symbionte : c'est le cas des orchidées dont la graine ne peut normalement germer qu'en présence du Champignon spécifique ; inversement, beaucoup de Champignons des mycorrhizes ne peuvent vivre qu'en symbiose avec des racines, ce qui explique que le plus grand nombre des agarics et bolets ne se trouve qu'en forêts. Mais l'association peut être moins exclusive, la présence du Champignon favorisant seulement la croissance de l'hôte ; certains Champignons mycorrhiziques *(Boletus subtomentosus)* vivent aussi bien à l'état autonome dans l'humus qu'associés aux arbres. Chez les orchidées, l'association est étroitement spécifique, mais, bien souvent, les racines des arbres forment des mycorrhizes avec un certain nombre de Champignons différents. Dans tous les cas, il y a un équilibre plus ou moins stable entre les deux termes de l'association, que l'on interprète, classiquement, comme une symbiose à bénéfices réciproques ; toutefois, actuellement, on tend plutôt à la présenter comme un exemple de parasitisme limité, dépourvu d'intérêt fondamental pour les constituants.

Modes de reproduction

La reproduction des Champignons peut s'effectuer par voie purement végétative, c'est-à-dire au moyen d'éléments spécialisés du thalle, plus ou moins différenciés, ou par divers procédés impliquant des phénomènes de type sexuel. Chez certains Champignons *(Fungi imperfecti)*, le seul mode de reproduction connu est asexué ; d'autres sont parthénogénétiques, mais la plupart sont sexués. Un tiers environ des Champignons présentent, au cours de leur développement, plusieurs modes de reproduction, généralement en deux phases distinctes : forme sexuée ou parfaite et forme asexuée ou imparfaite, qui ont parfois reçu des noms différents.

La reproduction asexuée est assurée, chez les Champignons inférieurs, siphonés, par des spores endogènes, résultant de la fragmentation du protoplasme à l'intérieur d'une cellule spécialisée, généralement plurinucléée, le *sporocyste* (= sporange, selon les auteurs) ; les Mastigomycotinés (Phycomycètes) produisent des *zoospores* mobiles, se déplaçant librement au moyen d'un ou deux flagelles ; les sporangiospores des Zygomycètes (Mucorales, par exemple) sont des *aplanospores* dépourvues de flagelles ; elles sont dispersées passivement par le vent, à moins que le sporange tout entier ne soit projeté par un effet mécanique.

Pour un grand nombre d'Ascomycètes et, moins fréquemment, pour les Basidiomycètes, la reproduction asexuée est assurée, comme chez les *Fungi imperfecti*, par des *conidies* exogènes, plus ou moins différenciées. Les plus simples résultent de la fragmentation du mycélium végétatif en segments uni- ou pluricellulaires (arthrospores) ou de son bourgeonnement (blastospores). Le plus souvent, les conidies diffèrent nettement des autres éléments du thalle végétatif par leur forme, la pigmentation et l'ornementation de leur paroi, leur septation, et elles sont produites par des *cellules conidiogènes* portées par des filaments distincts ou *conidiophores*, l'ensemble constituant l'appareil conidien ; les conidiophores peuvent être diversement ramifiés, groupés en faisceaux (*corémies* ou *synnémas* des Stilbacées), portés par de petits stromas (tubercules ou *sporodochies*) ou sur une strate pseudo-parenchymateuse (*acervule* des Mélanconiales), ou, comme chez les Sphæropsidales, inclus dans des conceptacles ou *pycnides*. La morphologie et le mode de développement de ces spores sont encore les seuls critères taxonomiques qui permettent de définir les genres et les espèces de Champignons dépourvus de forme sexuée.

Reproduction sexuée. Chez les Champignons, le processus fondamental qui caractérise ce mode de reproduction, à savoir la fusion de deux noyaux haploïdes en un *zygote* diploïde qui subit ensuite une division réductionnelle ou *méiose*, est assuré par des mécanismes très diversifiés. Comme chez la plupart des Algues et les Bryophytes, le stade végétatif du Champignon est généralement un *gamétophyte* haploïde, l'exception la plus remarquable étant fournie par le mycélium secondaire des Basidiomycètes, dicaryotique ; le plus souvent, la fusion nucléaire prend place juste avant la méiose et la formation des spores sexuelles, si bien que la phase diploïde se trouve des plus réduites. La reproduction sexuée n'implique pas nécessairement l'existence d'organes sexuels

J.-N. Reichel - Top

▲ Récolte des truffes en Périgord. Ces Champignons (en bas) viennent en association mycorrhizique avec les racines des chênes.

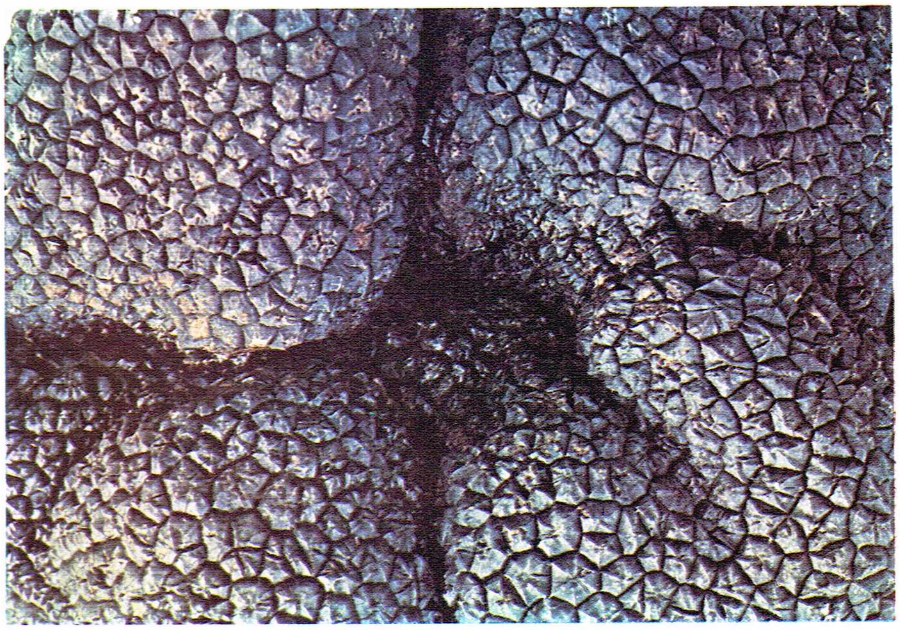

J.-N. Reichel - Top

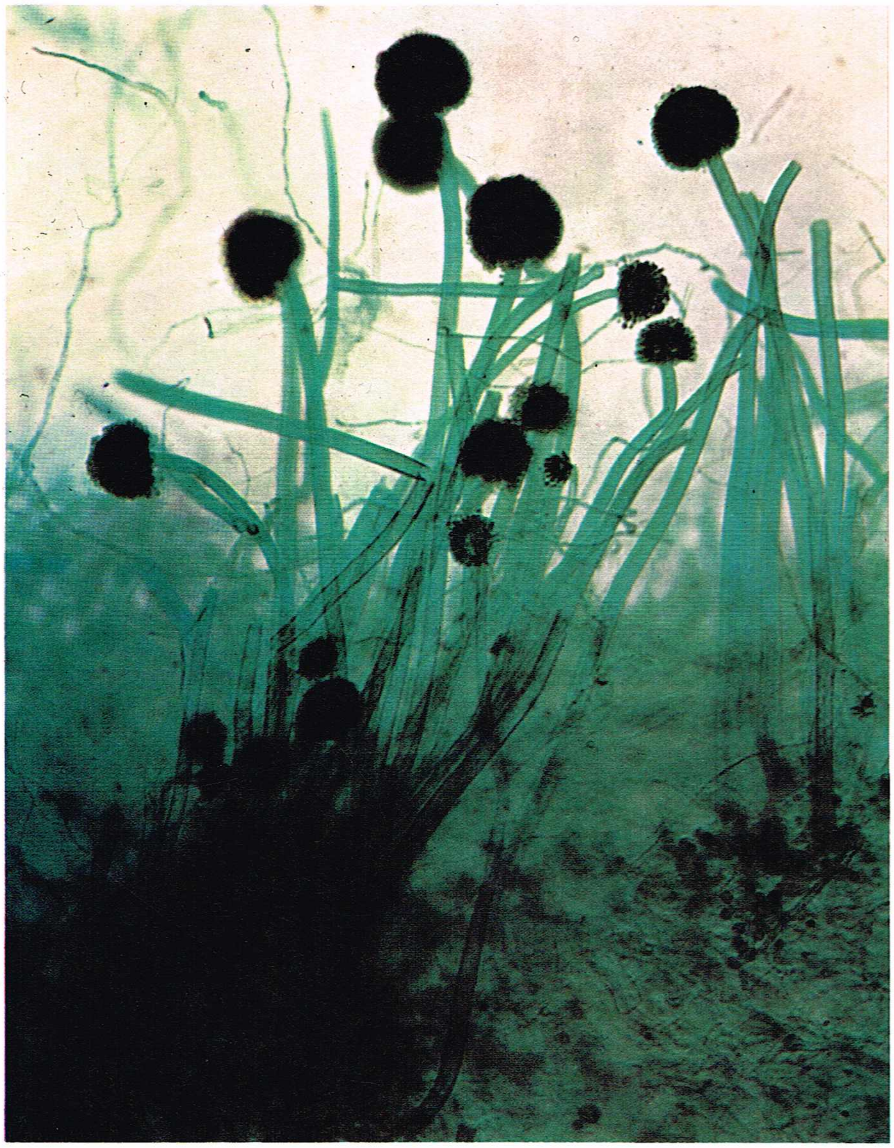
Bavestrelli, Bevilacqua, Prato

différenciés, ni la formation de gamètes; ainsi dans les groupes les plus évolués (Asco- et Basidiomycètes), la conjugaison peut se produire entre noyaux appartenant à des éléments indifférenciés du thalle. Chez les Champignons inférieurs, on suit une évolution, de la conjugaison classique entre gamètes individualisés (gamétogamie) à la fusion de rameaux spécialisés du thalle (gamétangie). Chez les *Olpidiopsis*, les gamètes ne sont autres que des individus unicellulaires. Chez la plupart des Mastigomycétinés, ce sont des cellules flagellées *(zoogamètes* ou *planogamètes)*, identiques chez certaines Chytridiales (isogamie), ou de taille différente, le gamète femelle, plus volumineux, se déplaçant moins activement que le gamète mâle (anisogamie); les Monoblépharidales sont les seuls Champignons qui aient des gamètes femelles fixés et des gamètes mâles plus petits, mobiles (oogamie). Chez les Oomycètes et les Zygomycètes, la gamétangie est de règle. Dans le premier groupe, on observe une nette disparité entre la taille du gamétange mâle *(anthéridie)* et celle du gamétange femelle *(oogone)*; celui-ci contient une ou plusieurs cellules œufs ou *oosphères* qui, après fertilisation, deviennent des *oospores* à paroi épaisse. Chez les Zygomycètes, enfin, il y a conjugaison entre deux gamétanges identiques, aboutissant à la formation de la *zygospore*.

La réduction des organes sexuels est encore plus accusée chez les Champignons supérieurs. Parmi les Ascomycètes, certaines Endomycétacées produisent des gamétanges uni- ou plurinucléés, et chez les Levures, à thalle unicellulaire, la fusion se produit entre deux individus ou parfois deux ascospores. Chez certains des Ascomycètes à ascocarpe différencié, on peut reconnaître, à l'origine de la fructification sexuée, un *archicarpe* femelle surmonté d'un filament récepteur, le *trichogyne*, et un gamétange mâle; mais souvent celui-ci n'est plus fonctionnel. Parfois cependant la spermatisation s'effectue, comme chez les *Sclerotinia*, par le transfert sur une hyphe réceptrice d'une microconidie ou *spermatie;* plus fréquemment, le début du processus sexuel est marqué par l'appariement de noyaux (dicaryophase) appartenant à un même filament ou à des hyphes quelconques, sans structures sexuelles différenciées. La fusion nucléaire se produit dans une *hyphe ascogène;* elle est immédiatement suivie de la méiose et le plus souvent d'une mitose supplémentaire, de sorte qu'il se forme huit noyaux haploïdes, autour desquels s'organisent, à l'intérieur de l'*asque*, huit *ascospores*. Chez les Basidiomycètes, la dicaryophase résulte exceptionnellement de la spermatisation d'un filament récepteur; c'est le cas des Urédinales (rouilles des Végétaux); chez les Hyméno-

▲ *Conidiophores et têtes conidiennes d'*Aspergillus niger *(coloration de contraste).*

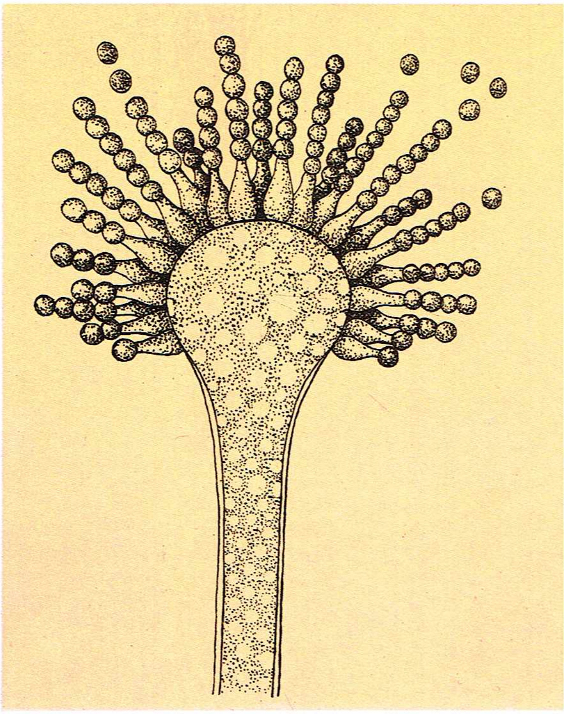
I.G.D.A.

▶ *Schéma du sommet d'un conidiophore d'*Aspergillus *portant les phialides dont chacune produit un chapelet de conidies.*

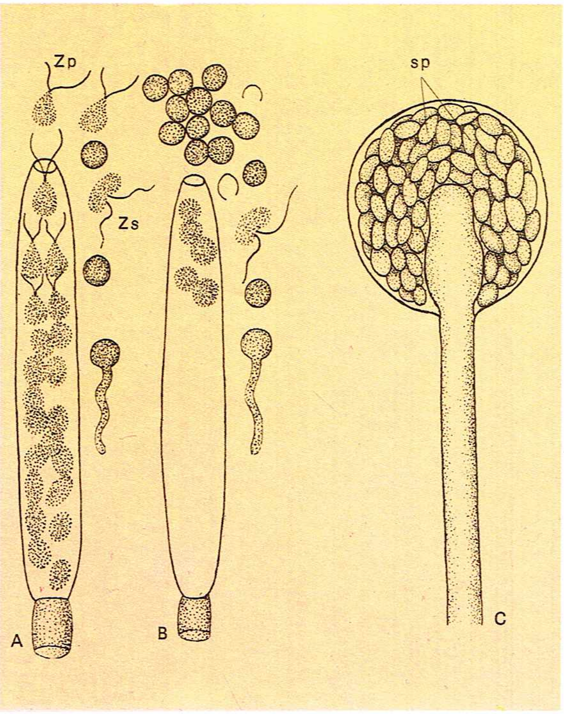

I.G.D.A.

▶ *Sporocystes et production de zoospores chez les Saprolégniales : genres* Saprolegnia *(A), caractérisé par le diplanétisme des zoospores (Zp et Zs), et* Achyla *(B). Sporocyste d'un* Mucor *(Zygomycètes) (C) rempli de spores inertes (sp).*

mycètes, où elle peut être de longue durée et caractérise alors le mycélium secondaire, elle est assurée par des *oïdies*, ou simplement par la fusion de deux hyphes haploïdes. La caryogamie se produit à l'intérieur d'une cellule spécialisée, la *baside*, se prolongeant par quatre stérigmates où s'insinuent les quatre noyaux provenant de la méiose; chacun d'eux est à l'origine d'une *basidiospore* exogène.

Chez de nombreux Champignons, le thalle résultant de la germination d'une seule spore est susceptible de produire des fructifications sexuées; de telles espèces sont dites *homothalliques*. Chez d'autres, *hétérothalliques*, la reproduction sexuée implique la confrontation de deux thalles d'origine distincte. Les mycéliums hétérothalliques peuvent être plus ou moins différents (dimorphisme sexuel); le plus souvent, ils sont morphologiquement indiscernables et les « sexes » ne peuvent être déterminés que par des méthodes chimiques; on les désigne communément par les signes + et —. L'hétérothallisme est conditionné par des gènes mendéliens; dans le cas le plus simple et le plus fréquent, il est sous la dépendance de deux facteurs (deux types mycéliens), et donc *bipolaire;* il est *tétrapolaire* chez certains Hyménomycètes *(Schizophyllum commune)* qui présentent quatre types de mycéliums génétiquement différents, quoique morphologiquement identiques.

Bien que les Deutéromycètes *(Fungi imperfecti)* soient, par définition, inaptes à la reproduction sexuée, la recombinaison de l'équipement génétique, chez la plupart d'entre eux, n'est pas exclue; elle est assurée par des mécanismes différents, tels que la *parasexualité* qui comporte une fusion de noyaux, mais non suivie d'une méiose typique.

Origine et phylogénie

L'apparition des organismes eucaryotes et de la sexualité, qui marque une étape essentielle dans l'évolution de la vie, date probablement de 1 milliard 1/2 d'années ou plus. Ces Eucaryotes primitifs furent, semble-t-il, des Algues flagellées; on commence à recenser des structures comparables aux structures reproductrices des Champignons (Eumycophytes) il y a environ 1 milliard d'années. Toutefois les documents fossiles permettant de dater l'origine des Thallophytes et, plus précisément, celle des Champignons, sont rares et peu lisibles, du fait même de la nature du thalle et de l'absence de squelette interne ou externe. Les formes fossiles incontestables de Champignons sont liées à un support moins fragile, en l'occurence des Végétaux vasculaires; elles consistent en sporocarpes, le plus souvent d'ailleurs dépourvus de spores, qu'on trouve sur ou dans des feuilles ou des tiges. On constate ainsi qu'au Dévonien (400 millions d'années) et même plus tôt, il existait une flore variée et déjà évoluée de Champignons parasites et saprophytes.

Les conceptions des mycologues concernant l'évolution des Champignons et les relations des différents groupes sont fondées sur la morphologie comparée, la cytologie, les aptitudes métaboliques, la sérologie, et sur les quelques types fossiles; elles restent encore en grande partie hypothétiques. Toutes soulignent la convergence des caractères morphologiques et des modalités de la reproduction entre Champignons et Algues; les Champignons à spores flagellées (Phycomycètes = Champignons-Algues) s'apparentent aux Algues brunes ou jaunes (Phéo-, Chryso- et Xanthophycées), tandis que les Ascomycètes montrent une analogie remarquable avec les Algues rouges (Floridées). La théorie polyphylétique, qui suppose une filiation directe entre Algues et Champignons, les Saprolégniales, par exemple, provenant des Vauchériales, les Urédinales des Floridées, etc., tend à s'effacer devant l'hypothèse d'une origine monophylétique des Eumycètes, à partir d'Algues vertes ou de Siphonales selon les auteurs, ou plus vraisemblablement à partir de Protistes flagellés incolores apparentés aux Flagellés pigmentés d'où dérivent les Algues. On reconnaît que les principaux groupes actuels de Champignons présentent plus d'analogies entre eux qu'avec n'importe quel groupe d'Algues, et on peut imaginer un tronc ancestral commun indifférencié d'où se seraient détachées précocement les deux lignées divergentes. En ce qui concerne les Champignons, on peut suivre la lignée évolutive privilégiée qui, des formes flagellées à l'oogone puis à l'asque et à la baside, conduit aux structures complexes des Champignons supérieurs. Au cours d'une longue évolution, le phylum originel a manifesté une remarquable souplesse d'adaptation, colonisant les substrats les plus variés, dans toutes les régions du globe; par le jeu des mutations et des contraintes imposées par le mode de vie et les particularités de l'habitat, les groupes de Champignons se sont largement diversifiés. Si bien que, dans la « coupe » actuelle qu'il nous est donné d'observer, les affinités naturelles ne sont pas toujours évidentes.

CLASSIFICATION

Pour délimiter les groupes fondamentaux, les mycologues systématiciens tiennent compte, traditionnellement, de la structure du thalle et des modalités de la reproduction sexuée. S'il est aisé, parmi les Champignons à mycélium cloisonné, de distinguer les *Ascomycètes*, qui forment

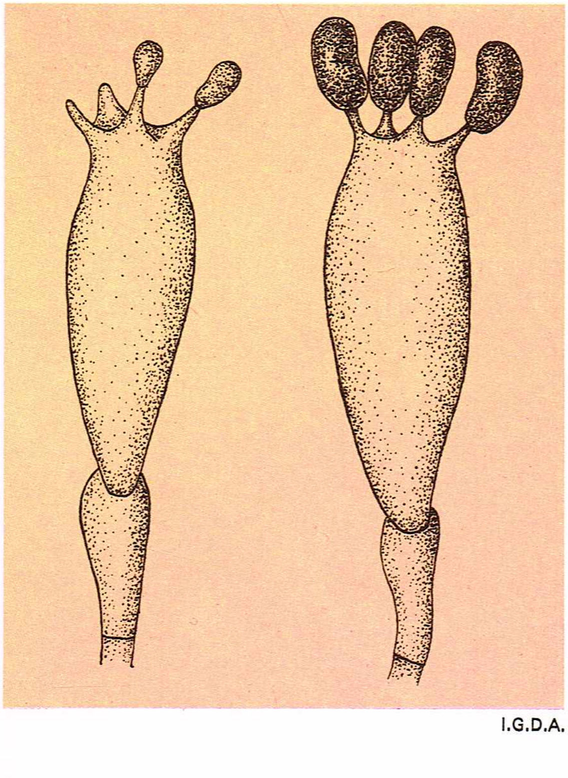

I.G.D.A.

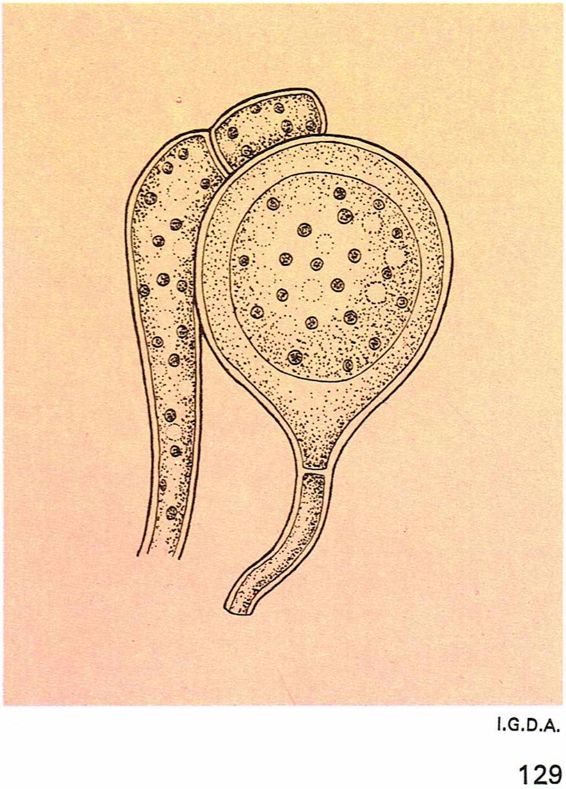

I.G.D.A.

◀ ***A gauche : schéma de baside montrant la formation des quatre stérigmates et les basidiospores.***

◀ ***A droite : mode de fécondation oogame (Albugo sp., Péronosporales) ; l'anthéridie entre en contact avec l'oogone.***

J. Six

leurs spores à l'intérieur des asques, et les *Basidiomycètes*, qui produisent des spores exogènes sur des basides, les coupures sont plus difficiles à établir sans ambiguïté parmi les formes dites inférieures, à thalle siphoné ou réduit.

R. Heim (1957) et E. Gaümann (1964) distinguent, sous le nom d'*Archimycètes*, les formes à phase végétative unicellulaire ou plasmodiale, généralement parasites, et qui portent des sporanges à zoospores mobiles. Les Champignons à mycélium non septé (*Siphomycètes* selon Heim, *Phycomycètes* pour Gaümann) se répartissent en *Oomycètes*, produisant des gamètes dans des gamétanges distincts, puis des oospores, et en *Zygomycètes*, unissant des gamétanges pour donner la zygospore. M. Chadefaud (1960), à la suite de F. Moreau (1953), attribue une importance fondamentale au critère de motilité des spores asexuées ou des gamètes, qui traduit la parenté des Champignons et des Algues, et conditionne la biologie et l'écologie de certains groupes. Il réserve le nom de *Phycomycètes* aux Champignons à zoïdes (spores ou gamètes mobiles) flagellés, auprès desquels il classe les *Myxomycètes*, à thalle plasmodial, et le petit groupe des *Trichomycètes* pourvu de zoïdes amiboïdes, non flagellés. Les *Zygomycètes* rejoignent les *Eumycètes (Asco-* et *Basidiomycètes)* parmi les formes dépourvues de zoïdes.

Cette coupure essentielle est retenue par les auteurs anglo-saxons (*Dictionary of Fungi*, 6e éd., 1971) qui attribuent le rang de sous-division aux *Mastigomycotinés*, définis par leurs spores flagellées, et réduits aux Phycomycètes; les Myxomycètes (Myxomycota), comme nous l'avons vu, sont exclus des Champignons proprement dits (Eumycota); quant aux Trichomycètes, ils s'apparenteraient aux Zygomycètes.

Le groupe des *Fungi imperfecti* (*Adélomycètes* sec. Heim, *Deutéromycètes* auct.), caractérisés par leur seule reproduction asexuée, n'apparaît pas chez tous les auteurs qui les considèrent, non sans raison, comme un stade particulier dans le cycle de développement de Champignons sexués. Le nombre et la diversité de leurs formes, leurs caractères biologiques, comme le fait que nombre d'espèces végètent en toute autonomie, autorisent toutefois à les traiter comme un groupe indépendant; on leur attribue conventionnellement la valeur d'une sous-division sous le nom de *Deutéromycotinés*.

Nous suivrons ici, jusqu'au rang de l'ordre, le schéma de classification adopté dans les plus récentes publications du Commonwealth Mycological Institute de Kew (cf. *Dictionary of Fungi*, 1971). Le tableau que nous reproduisons établit la correspondance des termes proposés antérieurement par les auteurs français et par le Suisse Gaümann, dont les ouvrages font autorité en Europe.

J. Six

MASTIGOMYCOTINÉS

La sous-division des Mastigomycotinés regroupe tous les Champignons à *zoospores* (= zoïdes). On les qualifie aussi de Phycomycètes *(sensu stricto)* ou Champignons-Algues ; comme les Algues, en effet, ils présentent au cours de leur développement au moins un stade mobile à cellules flagellées, qui peuvent être des zoospores asexuées ou des zoogamètes. Trois types de zoïdes ont été décrits chez les Eumycètes ; ils caractérisent chacune des trois classes de Mastigomycotinés :

chez les *Chytridiomycètes,* les zoospores possèdent un seul flagelle *postérieur* lisse, en fouet ;

chez les *Hyphochytridiomycètes,* le flagelle unique est inséré à la partie *antérieure* de la zoospore et pourvu d'appendices latéraux ou *mastigonèmes,* disposés sur deux rangs (flagelle plumeux) ;

chez les *Oomycètes,* la zoospore est *biflagellée ;* les deux flagelles, insérés en position latérale ou subapicale, sont différents : un flagelle antérieur plumeux et un fouet postérieur, lisse, généralement plus long.

Les flagelles ont la structure typique qui se rencontre chez presque tous les êtres vivants, Végétaux et Animaux ; ils sont constitués de onze fibrilles longitudinales, deux au centre du fouet, les neuf autres, plus grosses, à la périphérie, et pourvus à leur base d'un granule (blépharoplaste ou *mastigosome*) relié au noyau par un *rhizoplaste.*

Le thalle végétatif des Mastigomycotinés est de structure relativement simple, toujours cœnocytique. Il peut être réduit à une cellule uninucléée, simple ou pourvue de rhizoïdes, ou constituer un mycélium siphoné, portant un appareil reproducteur différencié.

La possession de zoospores implique la présence d'eau pour assurer leur dispersion, et la plupart des Mastigomycotinés vivent dans les eaux douces ou marines ; cependant les formes les plus évoluées se sont libérées de l'habitat aquatique, et un certain nombre d'Oomycètes vivent dans le sol. On rencontre chez les Phycomycètes de nombreuses formes parasites d'Animaux ou de Végétaux, mais aussi des saprophytes et des organismes symbiotiques.

En raison des types différents de zoospores rencontrés chez les Mastigomycotinés, on peut penser que l'origine du groupe est polyphylétique, chacune des classes ayant sans doute évolué séparément à partir d'organismes ancestraux sans relations évidentes.

Cette sous-division, avec cent quatre-vingt-dix genres et plus de mille espèces, est un assemblage d'organismes qui présentent certains caractères communs, dont la reproduction par zoospores ; elle n'en constitue pas pour autant un groupe naturel.

CHYTRIDIOMYCÈTES

Les Chytridiomycètes sont essentiellement caractérisés par la morphologie de leurs zoospores, pourvues d'un seul flagelle postérieur, lisse. Quant à leur biologie et à la structure de leur thalle, les Champignons de ce groupe sont extrêmement diversifiés. Ce sont des organismes aquatiques, microscopiques, généralement parasites d'Algues d'eau douce ou d'animalcules ; certains sont hyperparasites ; d'autres végètent en saprophytes sur les débris organiques ; un petit nombre d'entre eux enfin sont marins.

Leur thalle est cœnocytique, à paroi chitinoïde comme celle des Champignons supérieurs. L'élément fondamental est une cellule uni- ou plurinucléée, ou « centre », qui peut se transformer entièrement en sporocyste (formes *holocarpiques*) ou porter des fructifications distinctes (formes *eucarpiques*). Chez les espèces les moins différenciées, le centre est simplement fixé au substrat par des rhizoïdes assimilateurs ; chez les organismes les plus complexes, le centre émet à sa base un système de siphons mycéliens qui peuvent produire des centres secondaires, et porte à sa partie supérieure des filaments dressés garnis de sporocystes ou de gamétocystes. L'espèce est dite *monocentrique* si elle comporte un seul centre de croissance et de développement, *polycentrique* s'il y a plusieurs centres végétatifs et plusieurs organes reproducteurs. La classe est divisée en trois ordres dont nous allons énumérer les principaux caractères.

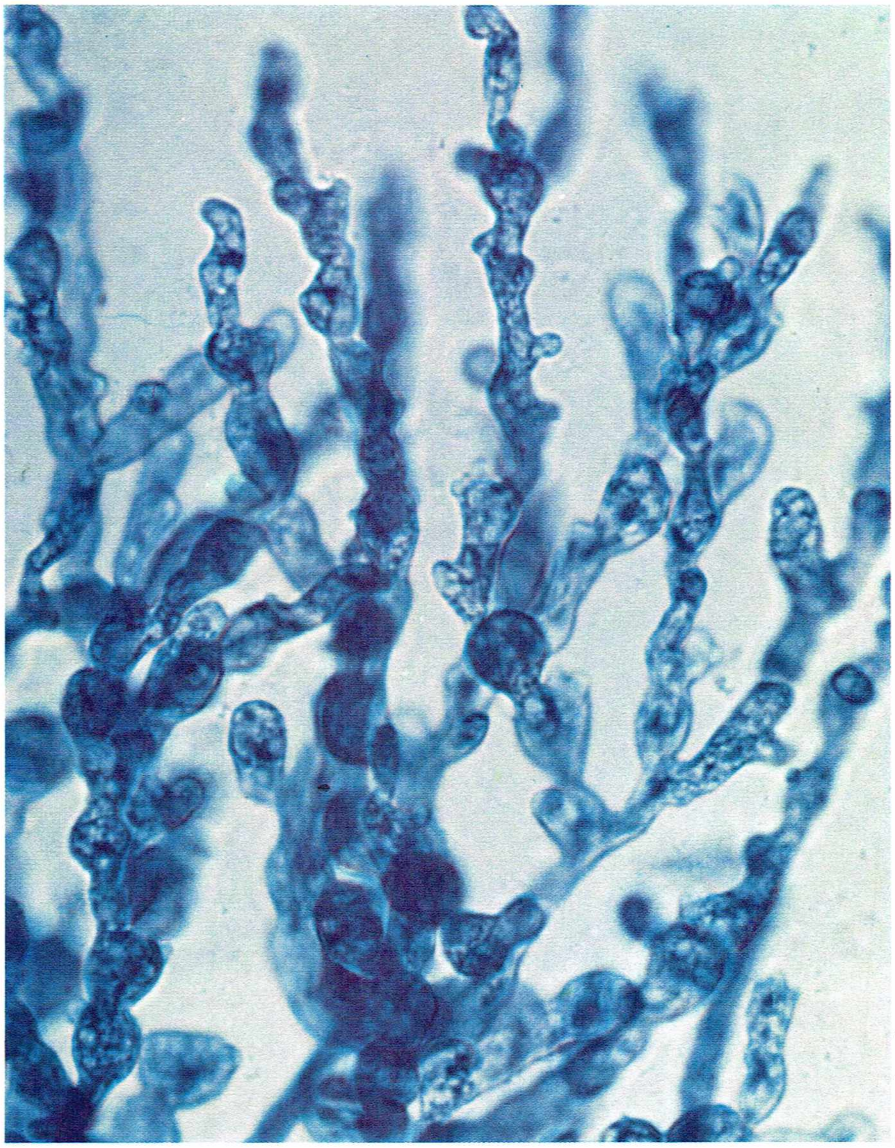

▲ ***Mycélium non cloisonné de* Phytophthora sp. *(culture* in vitro).**

Les *Chytridiales* ont un thalle réduit, soit holocarpique, soit eucarpique avec un système de rhizoïdes et un ou plusieurs éléments reproducteurs distincts. La zoospore contient généralement un seul globule lipidique volumineux ; sa germination est unipolaire. Les représentants des deux autres ordres sont presque toujours polycentriques, avec un système végétatif bien développé. La zoospore est dépourvue de globule lipidique et sa germination est bipolaire.

Les *Blastocladiales* ont un thalle typique, qui comporte une cellule basale ancrée dans le substrat par un système de rhizoïdes ; leur reproduction sexuée est assurée par des gamètes mâles et femelles flagellés, égaux ou inégaux.

Les *Monoblépharidales* n'ont plus de centre bien défini, mais un appareil végétatif entièrement filamenteux, constitué de siphons abondamment ramifiés. Leur reproduction sexuée est oogame : le spermatozoïde flagellé féconde une cellule femelle inerte, fixée au thalle.

Chytridiales

Avec quatre cent soixante espèces réparties en plus de quatre-vingt-dix genres, soit neuf ou dix familles, c'est le groupe le plus important des Chytridiomycètes. La plupart sont aquatiques, vivant en saprophytes ou en parasites, mais un certain nombre végètent dans le sol sur des débris animaux ou végétaux, et quelques-uns s'attaquent aux organes souterrains de Végétaux supérieurs, tel *Synchytrium endobioticum*, agent de la gale verruqueuse de la pomme de terre, parfois responsable de dégâts importants dans les cultures. Certains saprophytes du sol, qui sont capables de décomposer la cellulose, la chitine ou la

Page ci-contre :
▲ Amanitopsis vaginata *variété* fulva *(Basidiomycètes).*

◀ Peziza aurantia *(Ascomycètes).*

kératine, peuvent être capturés par des « pièges » de cette nature, et cultivés en milieu synthétique. On leur reconnaît ainsi des caractères physiologiques considérés comme primitifs : ils sont capables de réduire les sulfates, utilisent à la fois les nitrates et les sels ammoniacaux, et certains synthétisent eux-mêmes les vitamines indispensables à leur croissance.

Le thalle, toujours rudimentaire, est constitué chez les formes les plus simples *(Olpidium* et *Synchytrium)* par un sac sphérique ou cylindrique délimité par une paroi. Chez la plupart des Chytridiales, cette cellule, génératrice de spores, est accompagnée d'un système de rhizoïdes spécialisés dans les fonctions d'assimilation ; la différenciation la plus poussée s'observe chez les *Cladochytrium* où le système rhizoïdal constitue un *rhizomycélium* ramifié dont les branches latérales se renflent à leur extrémité pour former les sporocystes.

L'organe de reproduction asexuée est le zoosporange (sporocyste), cellule plurinucléée dont le contenu se fragmente en un nombre variable de zoospores, enrobées dans une matrice spongieuse ; il est pourvu d'un ou plusieurs tubes de décharge ou papilles. A maturité, la matière inerte du sporange absorbe de l'eau, se gonfle, et la pression interne expulse les zoospores. Chez les Chytridiales *inoperculées*, les plus nombreuses (*Olpidium, Cladochytrium,* etc.), un pore s'ouvre à l'extrémité de la papille par dissolution de sa paroi ; chez les *operculées (Chytridium, Nowakowskiella),* le sommet du tube de décharge se découpe en couvercle ou en clapet. La zoospore se déplace librement dans l'eau en nageant activement par des mouvements rythmiques ou saccadés de son flagelle, ou rampe par des mouvements amiboïdes. Après une période de mobilité, elle s'enkyste au contact d'un hôte ou d'un substrat approprié ; le flagelle se rétracte ou disparaît. Le corps de la zoospore reproduit un nouveau thalle, soit que son contenu pénètre dans la cellule de l'hôte où il se transforme directement en sporange (espèces holocarpiques), soit qu'il émette des rhizoïdes et s'accroisse ensuite pour former le sporocyste ; dans certains cas, celui-ci est précédé par un stade à prosporange dépourvu de rhizoïdes ; chez les espèces polycentriques, la zoospore en germant donne un rhizomycélium limité, portant une cellule renflée ; ce centre primaire émet à son tour de nouvelles branches du rhizomycélium, génératrices de sporanges.

La reproduction sexuée n'a été observée que chez un petit nombre d'espèces de Chytridiales, et ses modalités font l'objet d'interprétations diverses. Elle peut résulter de la fusion de deux gamètes flagellés identiques entre eux et indiscernables des zoospores ; ou bien la conjugaison se produit entre les protoplastes de deux thalles adjacents. Le zygote se transforme en une spore résistante ou un sporange où a lieu la méiose ; en général, la germination de ces formes de résistance libère des zoospores qui sont à l'origine d'une nouvelle phase végétative.

Les formes de Chytridiales holocarpiques, endobiotiques, appartiennent aux familles des *Olpidiacées* et des *Synchytriacées*. Les *Olpidium* végètent pour la plupart dans des Végétaux aquatiques microscopiques ; certains parasitent le protonema des Mousses, et d'autres vivent dans les feuilles ou les racines des plantes supérieures, sans causer de dégâts très importants. *O. brassicae* est commun dans les racines des choux, surtout en terrain humide, mais on le trouve également sur d'autres hôtes. Une cellule épidermique ou corticale de la racine infectée contient un ou plusieurs thalles sphériques ou cylindriques, dépourvus de rhizoïdes, qui s'y transforment en zoosporanges ; les zoospores libérées infectent de nouvelles racines et le cycle végétatif continue. Dans certaines racines infectées, on trouve également des spores durables à paroi épaisse, binucléées, qui résultent sans doute de la fusion, à l'extérieur de l'hôte, de deux zoospores fonctionnant comme gamètes ; cette conjugaison a été démontrée chez *O. viciae* et *O. trifolii*. L'*Olpidium* de la laitue est souvent associé à une chlorose des feuilles, et il y a tout lieu de penser que les zoospores du Champignon servent de vecteurs à des Virus. *Asterocystis radicis*, parasite intracellulaire des poils absorbants des racines du lin, peut provoquer la mort de la plante.

Le cycle de *Synchytrium endobioticum*, agent de la gale verruqueuse noire de la pomme de terre, maladie répandue dans toutes les régions de production, est plus complexe que celui des Olpidiacées. Le thalle intracellulaire se transforme, non pas directement en sporange,

▶ *Cycle biologique d'*Olpidium viciae *:* *1 : zoospore ; 2 : zoospore pénétrant dans l'hôte ; 3 : forme végétative à l'intérieur d'une cellule ; 4 : zoosporange libérant des zoospores ; 5 : fusion de deux zoospores fonctionnant comme gamètes ; 6 : plasmozygote binucléé ; 7 : spore durable uninucléée ; 8 : spore durable en germination.*

▼ *Coupe histologique effectuée dans une racine parasitée par* Olpidium brassicae.

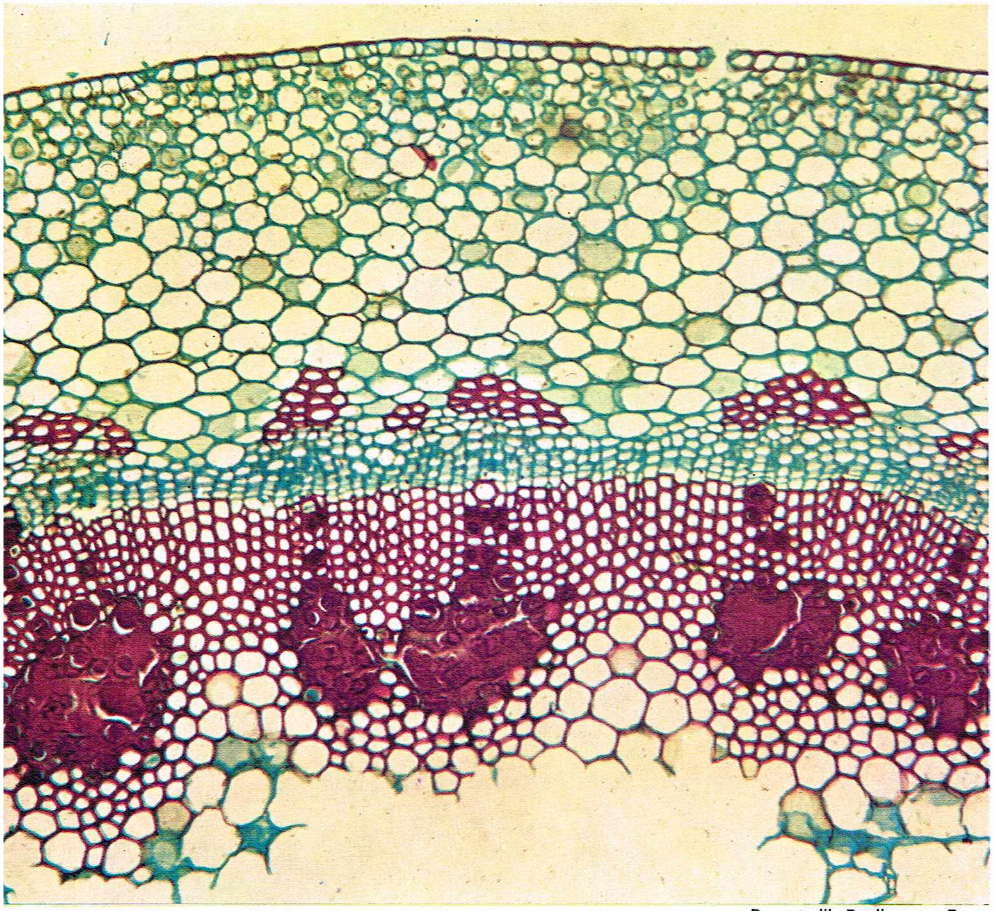

Bavestrelli, Bevilacqua, Prato

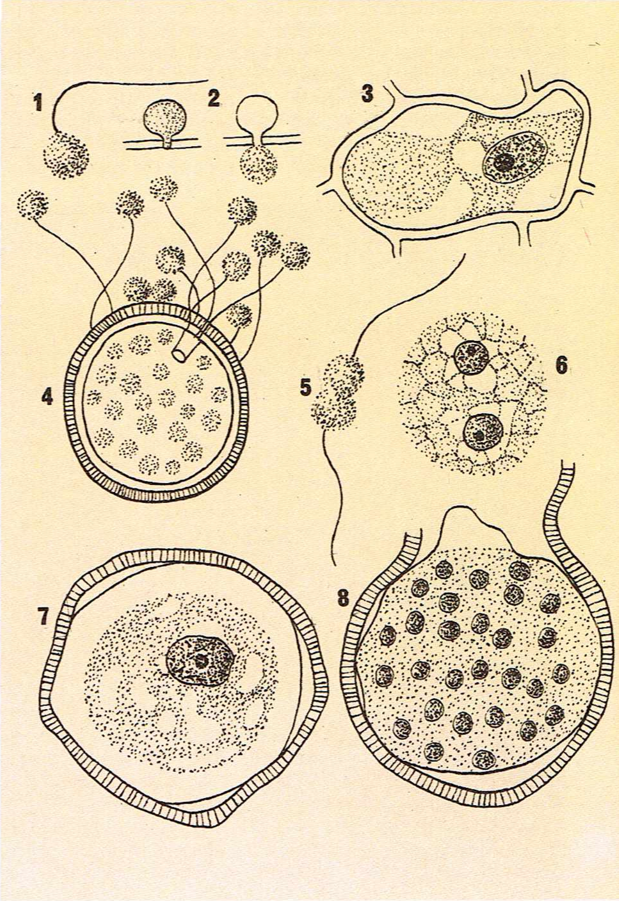

I.G.D.A.

mais en un *prosore*, à paroi chitineuse (spore d'été), qui donne naissance à un groupe de sporanges (quatre à neuf) ou *sore*. La reproduction sexuée résulte de la conjugaison de deux zoogamètes identiques donnant naissance à un zygote mobile, biflagellé, et conduit à la formation de *spores durables* à paroi épaisse, verruqueuse, qui, libérées par la mort des tissus infectés, peuvent persister dans le sol pendant plusieurs années. La spore durable fonctionne comme un prosporange qui donne, en germant, un sporange unique. L'infection des organes souterrains jeunes de la pomme de terre est assurée soit par les zoospores, soit par les zygotes. Les excroissances brun-noir, « en chou-fleur », qui caractérisent les tubercules malades résultent de l'hypertrophie et de la multiplication accélérée des cellules de l'hôte en réaction contre la présence du parasite.

Le type de thalle eucarpique, monocentrique, est illustré par *Rhizophidium pollinis,* qui parasite le pollen des pins tombé dans l'eau, et les autres espèces du genre, vivant aux dépens d'Algues vertes filamenteuses; leur thalle, unicellulaire, est fixé au substrat par des rhizoïdes qui pénètrent seuls dans les cellules parasitées. *Polyphagus euglenae* forme des rhizoïdes assez longs pour parasiter à la fois plusieurs euglènes. *Rhizophlyctis rosea*, qui tient sa couleur rose vif de sa richesse en pigments caroténoïdes, est un saprophyte vivant dans le sol sur des substrats riches en cellulose; il joue certainement un rôle important dans la dégradation des déchets cellulosiques.

Les *Chytridium* (quarante espèces), caractérisés par leurs sporanges operculés, sont pour la plupart parasites épibiotiques d'Algues, d'autres Champignons ou de Protozoaires; *C. olla* parasite électivement les oogones et les oospores des *Oedogonium;* des spores durables se forment sur le trajet des rhizoïdes, à l'intérieur des cellules de l'hôte. Les *Entophlyctis* (*E. vaucheriae* dans les Vauchériales, *E. helioformis* dans les nitelles) sont endobiotiques : leur thalle est tout entier situé dans les cellules parasitées.

Le thalle polycentrique se rencontre chez les *Cladochytrium*, pour la plupart saprophytes sur des débris végétaux aquatiques *(C. replicatum)*, et les *Urophlyctis*, qui provoquent des galles sur les racines et les tiges de

Photo Bourgeois

▲ **Synchytrium endobioticum,** ***agent de la galle verruqueuse de la pomme de terre.***

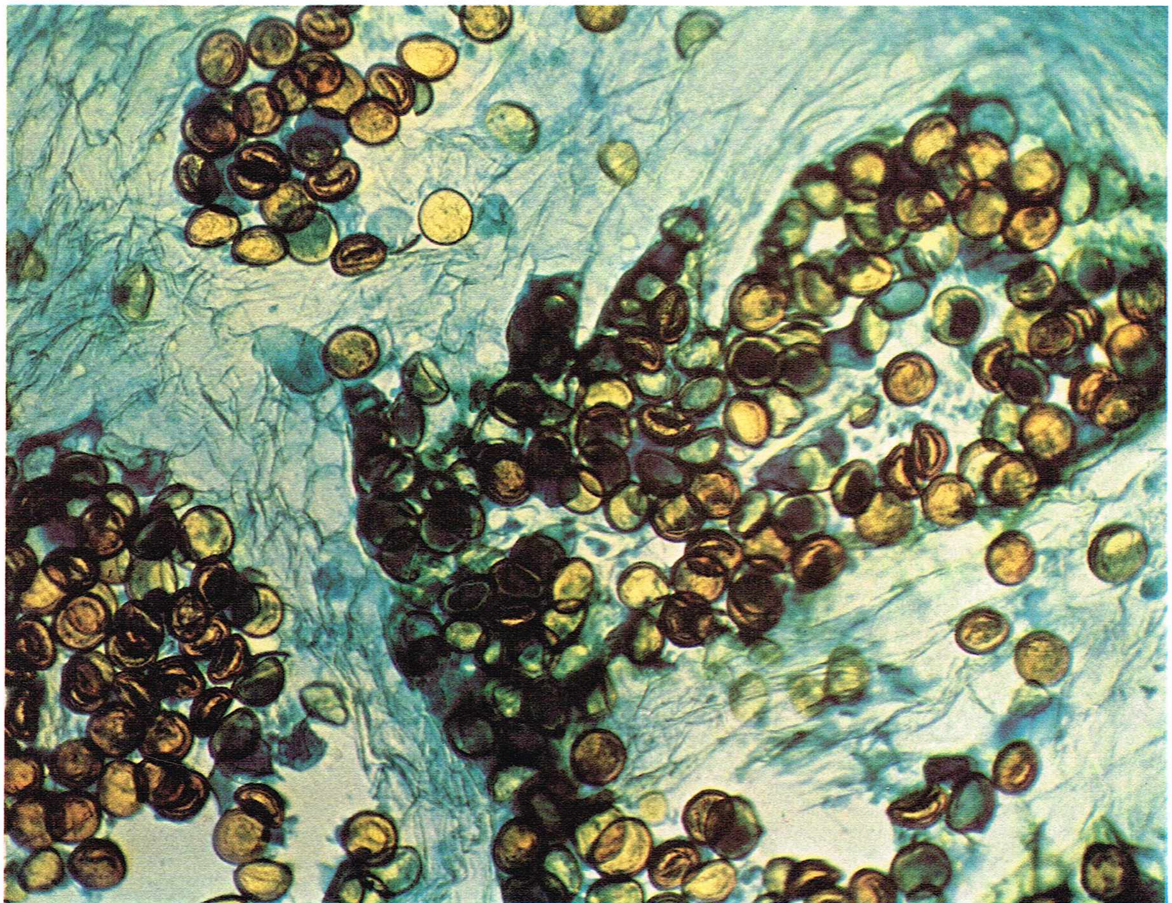

◀ ***Spores durables d'*****Urophlyctis** ***sur tige de vesce*** **(Vicia sepium).**

Muséum national d'histoire naturelle. Laboratoire de cryptogamie

Faculté des sciences. Laboratoire de botanique

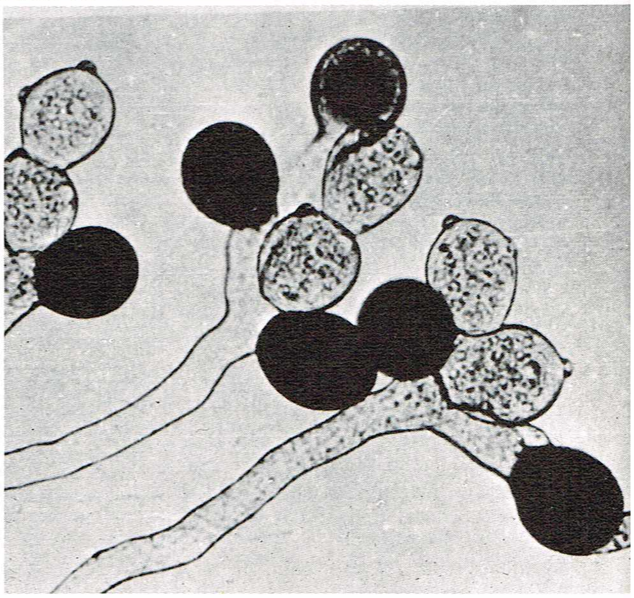

▲ ***Grappe de raisins et feuille de vigne parasitée par* Plasmopara viticola *(agent du mildiou; cette maladie prend le nom de rot brun quand elle atteint les grappes déjà âgées).***

▶ **Allomyces.** ***Sporocystes et kystes.***

plantes supérieures : ainsi *U. maydis* est l'agent de la maladie des taches brunes du maïs, et *U. alfafae* provoque des tumeurs à la base des pieds de luzerne. Chez tous ces organismes, le rhizomycélium, bien développé, porte de multiples sporanges qui se développent successivement à partir du centre primaire né de la zoospore. Le genre *Nowakowskiella* réunit presque toutes les Chytridiales polycentriques à sporanges operculés; ce sont des saprophytes du sol et des débris végétaux.

Blastocladiales

Les Blastocladiales (huit genres, soixante espèces) sont des Champignons du sol, de l'eau ou des débris animaux et végétaux, pour la plupart saprophytes, à l'exception des espèces du genre *Coelomomyces,* parasites obligatoires d'Insectes (en particulier des larves de moustiques), dont le thalle est réduit à un plasmode nu, dépourvu de rhizoïdes. Les autres Blastocladiales sont eucarpiques, depuis les formes les plus simples *(Blastocladiella),* monocentriques, jusqu'aux organismes polycentriques les plus complexes, tels les *Allomyces* des sols tropicaux; leur appareil végétatif comporte un stipe dressé, pourvu de rhizoïdes à la base, se ramifiant en branches dichotomiques ou en sympodes au pôle opposé; les sporanges de divers types sont portés à l'extrémité de ces rameaux. Un caractère remarquable du stade végétatif des Blastocladiales est la production de sporanges durables à paroi brune, mélanisée, ornée de ponctuations; à la différence des Chytridiales, ces cellules résistantes ne sont pas le produit immédiat d'une conjugaison. Les Blastocladiales se distinguent encore des Chytridiales par le mode de germination bipolaire de leurs zoospores : après avoir perdu son flagelle, le kyste produit à sa base un filament qui se ramifie en rhizoïdes et, au pôle opposé, un tube germinatif plus long générateur du stipe portant les sporanges.

La reproduction sexuée est assurée par la conjugaison de gamètes mobiles égaux ou inégaux; mais le cycle de reproduction n'est pas constant à travers tout le groupe. Chez certaines espèces *(Allomyces anomalus),* la forme asexuée est seule connue; chez d'autres *(A. cystogenes),* le thalle végétatif est diploïde; la méiose se produit dans un kyste durable, et la phase haploïde libre est réduite aux gamètes; dans les cas les plus complexes *(A. arbuscula),* il y a alternance d'un gamétophyte haploïde et d'un sporophyte diploïde isomorphes; un tel type de cycle est exceptionnel chez les Champignons filamenteux.

L'ordre des Blastocladiales comprend trois familles : *Cœlomomycétacées* (réduites au seul genre *Coelomomyces*); *Caténariacées* (les *Catenaria*, parasites de Nématodes, d'Anguillules ou d'autres Champignons, y compris les *Allomyces*; les *Catenomyces*); *Blastocladiacées.* Ce dernier groupe est le plus important et le mieux connu; certaines espèces *(Allomyces, Blastocladiella)* s'isolent aisément en cultures pures, et l'on possède des informations précises sur leur nutrition et leur physiologie. Les *Allomyces* (six espèces réparties en trois sous-genres selon la complexité de leur cycle) sont surtout fréquents dans la boue ou le sol en régions tropicales ou subtropicales; mais on les cultive facilement au laboratoire, où leurs cycles de développement ont été reconstitués; les espèces de ce genre et leurs hybrides ont fait l'objet de multiples travaux de cytologie et de génétique. Les *Blastocladia* sont aquatiques; certains, qui supportent de fortes teneurs en CO_2 et une faible oxygénation, se rencontrent dans les eaux polluées. Les *Blastocladiella* ont un thalle de petite taille, portant un seul sporange globuleux, à paroi mince et souvent vivement coloré en orange par des pigments caroténoïdes, ou à paroi brune, épaisse; chez *B. emersonii*, la formation des spores résistantes est stimulée par CO_2 ou par le bicarbonate.

Monoblépharidales

Ce petit ordre de Champignons aquatiques est remarquable par son mode de reproduction sexuée, qui est une oogamie typique; ce sont les seuls Champignons qui aient à la fois des gamètes femelles non mobiles et des gamètes mâles mobiles, plus petits. Il comprend la seule famille des *Monoblépharidacées* dont les trois genres sont saprophytes sur les substrats organiques submergés et dans les eaux stagnantes riches en détritus.

Leur thalle est eucarpique, filamenteux; des sporocystes allongés s'individualisent par une cloison à l'extrémité des hyphes; ils produisent des zoospores à flagelle postérieur, qui assurent la reproduction végétative.

Chez les *Monoblepharis,* où la reproduction sexuée a été particulièrement observée, les organes sexués, disposés en sympode terminal, se forment généralement sur les mêmes individus que les sporocystes ; l'anthéridie est un segment étroit où se forment des spermatozoïdes ; l'oogone qui lui est adjacent est renflé et contient une seule oosphère sphérique uninucléée. A maturité, une papille s'ouvre dans la paroi de l'oogone, par où pénètre un zoogamète mâle qui se conjugue à l'oosphère ; selon les espèces, l'œuf fécondé reste dans l'oogone ou rampe à l'extérieur de la papille. L'oospore, entourée d'une membrane brune lisse ou verruqueuse, constitue une forme de résistance qui entre en repos hivernal ; elle germe quand les circonstances sont favorables en produisant un mycélium végétatif. A la différence des *Monoblepharis,* le spermatozoïde des *Monoblepharella* et *Gonapodya* conserve son flagelle après la fécondation, de sorte que le zygote est flagellé et sort librement de l'oogone avant de s'enkyster.

HYPHOCHYTRIDIOMYCÈTES

Cette classe ne comporte qu'une quinzaine d'espèces (un seul ordre, Hyphochytriales), qui ont la même organisation et la même biologie que les Chytridiales. Ils en diffèrent par la position antérieure du flagelle de la zoospore, qui est de type plumeux (pleuronématé). Le thalle est réduit, holocarpique, dans la famille des *Anisolpidiacées,* parasites d'Algues brunes *(Anisolpidium ectocarpii).* Il est eucarpique, monocentrique chez les *Rhizidiomycétacées,* comparables aux Chytridiales Rhizidiacées ; *Rhizidiomyces apophysatus* parasite les oogones de Saprolégniales. Enfin, les Hyphochytriacées, habituellement saprophytes, ont un mycélium relativement développé et sont polycentriques ; *Hyphochytrium catenoides* se développe sur le maïs pourri.

OOMYCÈTES

Parmi les Mastigomycétinés, les Oomycètes se distinguent par leurs zoospores pourvues de deux flagelles insérés au voisinage l'un de l'autre ; l'un de type plumeux, dirigé vers l'avant, l'autre en fouet traînant vers l'arrière ; ces zoospores biflagellées pourraient représenter un type archaïque de zoïde, la disposition uniflagellée de celles des Chytridiomycètes marquant au contraire une évolution régressive.

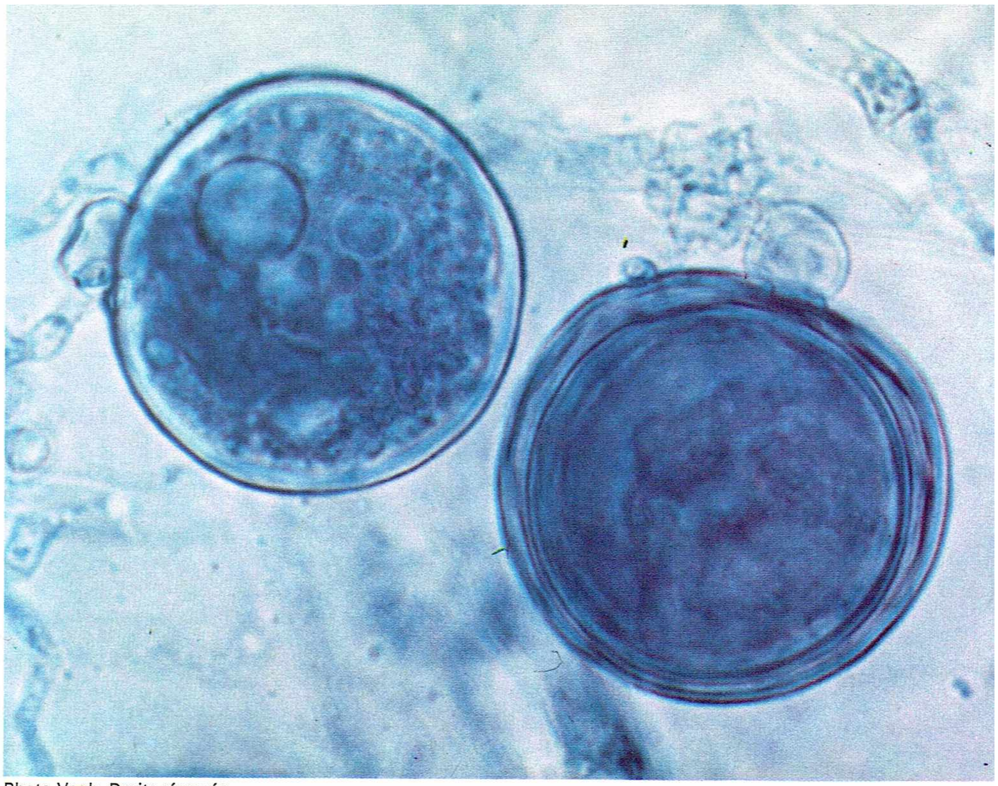

Photo Vegh. Droits réservés

▲ ***Organes sexués de*** **Phytophthora megasperma** ***(culture*** **in vitro*****).***

Les Oomycètes sont, en principe, des Champignons aquatiques, quoique certaines Saprolégniales et Péronosporales poussent dans les sols humides. Parmi les Péronosporales, un petit nombre de parasites obligatoires de plantes supérieures ne produisent plus de zoospores : les sporanges qui sont détachés de leur support et dispersés par le vent se comportent en effet comme des conidies.

Le thalle est unicellulaire, holocarpique chez les formes les moins élaborées, aquatiques et parasites ; le plus souvent il est eucarpique, avec un mycélium cœnocytique bien différencié. A la différence des autres Champignons, le thalle des Oomycètes a des parois dépourvues de chitine ; elles sont constituées principalement de glucanes, dont une certaine proportion de cellulose.

La reproduction sexuée est oogame, et conduit à la formation d'une *oospore* durable, à paroi épaisse. La conjugaison ne se fait plus entre gamètes mobiles, mais entre deux thalles (chez les formes holocarpiques) ou, le plus souvent, entre un oogone contenant une ou plusieurs oosphères et des filaments anthéridiens jouant le rôle de gamètes mâles.

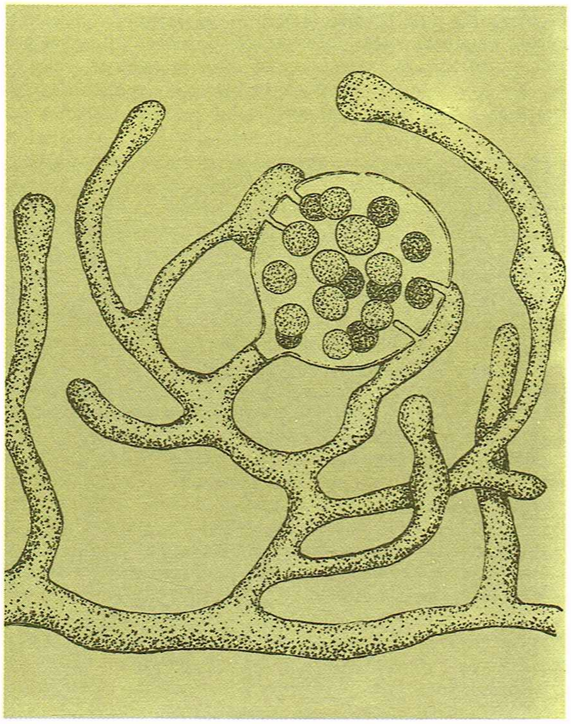

I.G.D.A.

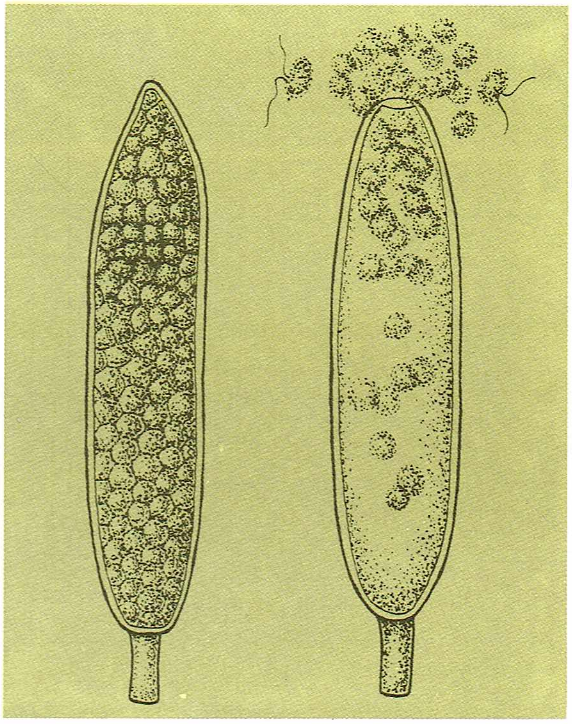

I.G.D.A.

◀ ***Fécondation d'un oogone de Saprolégniale (à gauche).***

◀ ***Sporocyste et production de zoospores chez*** **Achyla lignicola** ***(Saprolégniales) [à droite].***

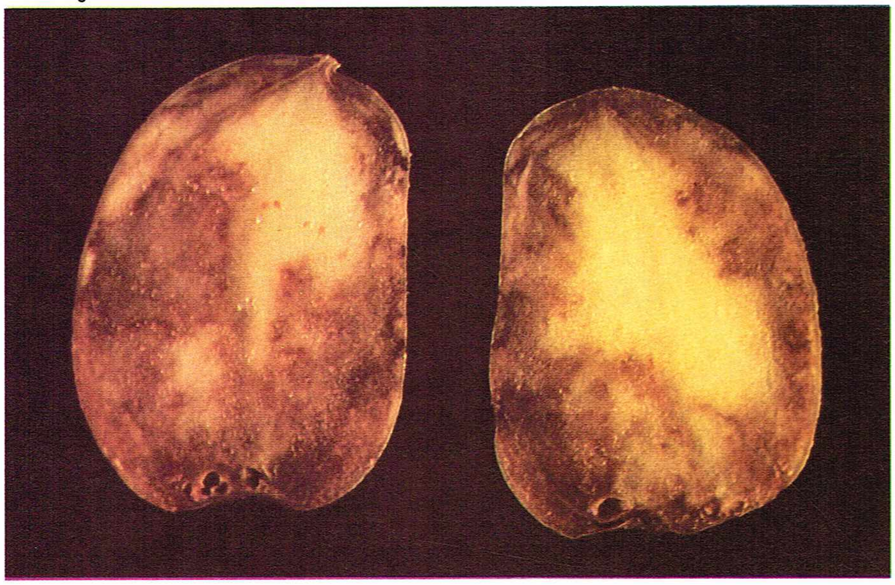

▲ *Mildiou sur tubercule de pomme de terre* (Phytophthora infestans).

La classe des Oomycètes, qui contient soixante-dix genres et plus de cinq cents espèces, est divisée en quatre ordres : Lagénidiales, Saprolégniales, Leptomitales, Péronosporales, montrant une différenciation croissante du thalle et le passage de la vie aquatique à la vie aérienne.

Lagénidiales

L'ordre groupe des formes aquatiques, généralement parasites d'Algues filamenteuses, d'autres Champignons ou d'animalcules aquatiques ; une espèce nord-américaine, *Lagenocystis radicola,* vit toutefois dans les racines de certaines Graminées. L'organisation de ces Champignons est toujours simple, le plus souvent unicellulaire. C'est le cas de *Lagenocystis,* des *Olpidiopsis* (parasites de Saprolégniales), des *Myzocytium* dont une espèce, *M. vermicolum,* parasite les anguillules, et des *Sirolpidium* (*S. zoophthorum,* qui s'attaque aux Mollusques marins, en particulier aux jeunes huîtres). Chez ces organismes holocarpiques, la reproduction sexuée, quand elle est connue, s'effectue par la conjugaison de deux thalles de taille différente. Les *Lagenidium,* représentés par plus de vingt espèces, sont filamenteux ; *L. giganteum* est commun sur les larves de moustiques et de petits Crustacés ; *L. callinectes* détruit les œufs du « crabe bleu » (consommé en Amérique du Nord).

Saprolégniales

Souvent appelées « moisissures aquatiques », les Saprolégniales vivent presque exclusivement dans les eaux douces ou dans les mers, en saprophytes sur les déchets organiques, ou en parasites d'Algues, d'Invertébrés marins ou de Poissons ; connues dans le monde entier elles sont surtout fréquentes dans les zones tempérées de l'hémisphère Nord. Elles sont caractérisées par le diplanétisme de leurs zoospores, au moins dans les cycles les plus complexes illustrés par *Saprolegnia* ou *Achlya.* Les Ectrogellacées, endoparasites d'Algues brunes et rouges, et les Haliphthoracées, parasites de Diatomées et d'Invertébrés marins, sont des organismes holocarpiques ; les Thraustochytridiacées, saprophytes sur les Algues marines, ont un thalle eucarpique ressemblant aux *Chytridium.* Les espèces les plus nombreuses et les mieux connues appartiennent à la famille des Saprolégniacées (dix-neuf genres), d'organisation plus complexe. Elles possèdent un mycélium cœnocytique bien développé, à paroi cellulosique. Les sporocystes cylindriques, à peine plus larges que les filaments végétatifs, s'individualisent par une cloison à l'extrémité des hyphes ; ils produisent, par clivage du protoplasme plurinucléé, des *zoospores primaires* à deux flagelles insérés au pôle apical. Chez les *Saprolegnia,* elles s'échappent par un pore à l'extrémité du sporocyste et, après une période de motilité, perdent leurs flagelles et s'enkystent. Chez *Achlya,* elles s'immobilisent dès la sortie du sporocyste et s'accumulent au voisinage du pore ; chez les *Dictyuchus,* souvent terrestres, l'enkystement se produit à l'intérieur même du sporocyste. Chez les trois genres, la germination de ces kystes produit des *zoospores* secondaires réniformes, à flagelles latéraux, qui s'enkystent à leur tour. Les zoospores secondaires germent en donnant soit une zoospore identique, soit un nouveau thalle filamenteux. Chez les *Aplanes,* tout stade flagellé a disparu ; les nouveaux thalles sont produits par les spores primaires, à l'intérieur du sporocyste.

La reproduction sexuée des Saprolégniales est *oogame,* avec des organes mâles et femelles, mais sans formation de gamètes flagellés. L'oogone globuleux, formé sur une courte branche latérale de l'hyphe, contient plusieurs *oosphères* uninucléées (gamètes femelles) ; chacune peut être fécondée par une *anthéridie,* rameau mince, aplati, issu du même filament que l'oogone (espèces homothalliques) ou d'un thalle différent (*Achlya sexualis, A. ambisexualis,* hétérothalliques). Le noyau de l'anthéridie passe dans l'oosphère par l'intermédiaire d'un siphon copulateur. Chaque zygote acquiert une paroi épaisse et devient une *oospore* qui entre en phase de repos ; en germant, elle produit, selon les conditions de nutrition, un mycélium végétatif ou un court filament terminé par un sporocyste.

Les phénomènes nucléaires sont encore mal connus chez les Saprolégniales ; il est possible que la méiose ne se produise qu'à la différenciation des gamètes, et que la phase végétative soit entièrement diploïde. On est mieux renseigné sur les mécanismes physiologiques mis en jeu au cours de la reproduction sexuée ; l'analyse expérimentale a mis en évidence des facteurs hormonaux qui

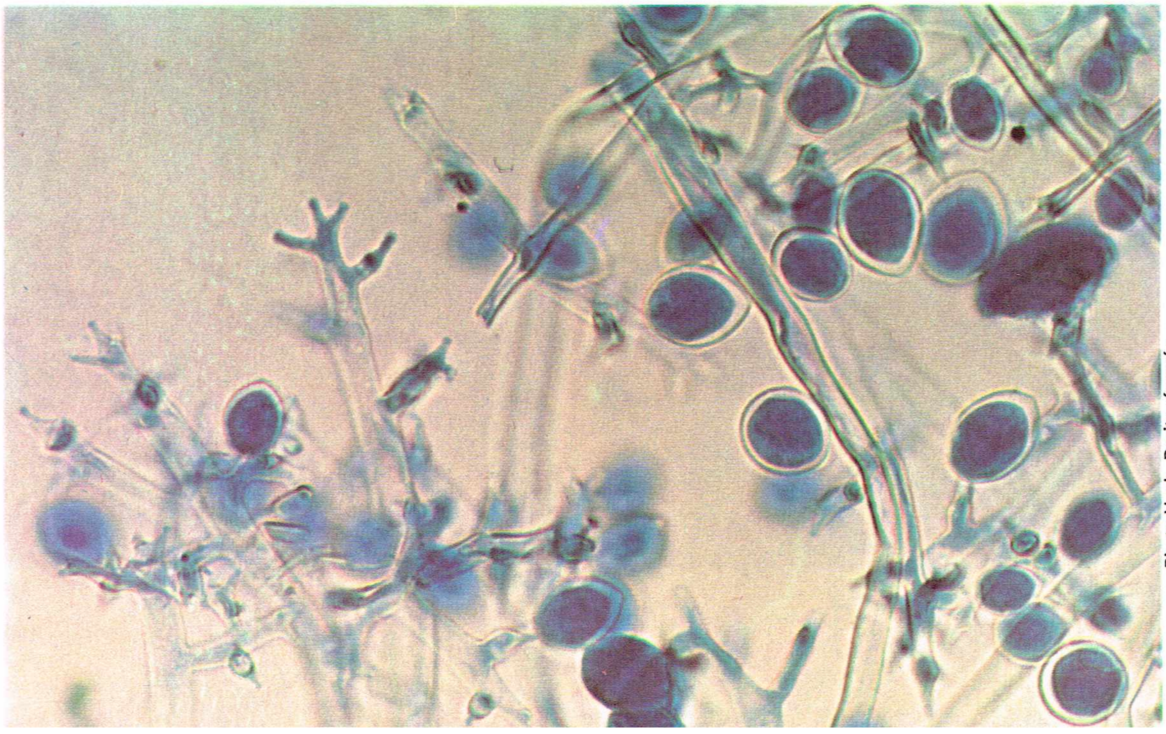

▶ Plasmopara viticola : *conidiophores et conidies.*

règlent les diverses phases successives de la reproduction. Certaines des Saprolégniacées ont une importance économique non négligeable ; ainsi *Saprolegnia parasitica* peut causer des épidémies dans les élevages de Poissons.

Leptomitales

Ces Champignons, saprophytes des eaux douces (une vingtaine d'espèces), rappellent les Saprolégniales par leur structure et leur mode de vie. Ils en diffèrent surtout par la morphologie de leur thalle dressé, qui présente à intervalles réguliers des étranglements caractéristiques, souvent obturés par des grains de *celluline,* sécrétés par le cytoplasme. En outre, chaque oogone renferme une seule oosphère. *Leptomitus lacteus* est fréquent dans les eaux polluées ; ses filaments sont capables de boucher les filtres dans les stations d'épuration des eaux usées.

Péronosporales

Cet ordre d'Oomycètes est important par le nombre des espèces (environ trois cents, en seize genres), et surtout par leurs implications économiques. En effet, si un certain nombre de Péronosporales sont saprophytes, la plupart sont phytopathogènes et quelques-unes sont parmi les agents les plus redoutables de maladies des Végétaux cultivés (mildious et rouilles blanches).

Le mycélium des Péronosporales est cœnocytique, fragile, à paroi dépourvue de chitine ; chez les parasites obligatoires des Végétaux, il forme souvent à l'intérieur des cellules de l'hôte des suçoirs ou des haustories. Comme chez tous les Oomycètes, leur cycle de reproduction asexuée comporte en principe des sporocystes producteurs de zoospores à deux flagelles, qui sont insérés latéralement comme chez les zoospores secondaires des Saprolégniales. Mais la forme et la disposition des sporocystes sont très variables, en relation avec une adaptation plus ou moins complète à l'habitat terrestre. Ils peuvent être portés par des sporangiophores différenciés, simples ou ramifiés, et se forment parfois en chaînes. Chez les espèces aquatiques ou terrestres, les sporocystes produisent normalement des zoospores ; chez les parasites foliaires, ils sont dispersés par le vent, à la manière des conidies, et libèrent leurs zoospores au contact de gouttes d'eau ; quelques espèces de Péronosporacées sont totalement libérées de la condition aquatique : leurs sporocystes ne produisent plus de zoospores, mais germent comme une conidie, par un tube mycélien qui reproduit directement le thalle. La reproduction sexuée est oogame et comparable à celle des Saprolégniales, mais chaque oogone ne produit qu'une seule oospore, enrobée dans un cytoplasme résiduel ou périplasme. L'oospore germe en produisant soit un tube germinatif, soit des zoospores. La méiose aurait lieu seulement au moment de la formation des gamétanges, de sorte que le soma serait diploïde ; la plupart des Péronosporales sont homothalliques, mais il existe des espèces hétérothalliques ou ambisexuées. On reconnaît actuellement trois familles :

Les *Pythiacées* sont les moins différenciées ; leurs sporangiophores ne diffèrent pratiquement pas des hyphes assimilatrices. Elles sont soit saprophytes sur débris organiques, dans l'eau ou dans le sol, soit parasites d'Animaux (*Zoophagus,* sur Rotifères) ou de Végétaux ; dans ce cas, le mycélium est généralement intracellulaire et dépourvu de suçoirs. Deux genres sont économiquement importants. Les *Pythium* végètent en saprophytes dans l'eau et dans le sol et leurs oospores, protégées par une double paroi et pourvues de réserves nutritives, peuvent résister plusieurs années à la dessiccation ; ils sont plus fréquents dans les terrains cultivés que dans les sols naturels et, dans des conditions défavorables, ils attaquent les jeunes pousses ; *P.* de *Baryanum* est un agent commun de la fonte des semis. Le genre *Phytophthora* comprend des phytopathogènes redoutables, tel *P. infestans,* inféodé aux Solanacées ; il attaque les feuilles de la pomme de terre qui se dessèchent et meurent, et parfois les tubercules qui pourrissent en cours de stockage ; le mildiou de la pomme de terre peut ainsi causer de graves pertes ; il a été responsable, au siècle dernier, d'une famine mémorable en Irlande. D'autres espèces sont aussi redoutables : *P. cambivora,* agent de l'encre du châtaignier, *P. parasitica,* qui provoque la gommose des agrumes, *P. palmivora,* le chancre du cacaoyer, etc.

▲ ***Déformations induites par*** **Cystopus candidus** ***sur*** **Capsella bursa-pastoris.**

Les *Péronosporacées* sont des parasites obligatoires des plantes supérieures, agents des mildious. Leur mycélium, intercellulaire, envoie à l'intérieur des cellules des haustories de formes variées ; les sporocystes se forment isolément ou en groupes aux extrémités de sporangiophores bien différenciés qui sortent de l'hôte par les stomates ; ils sont dispersés par le vent et se comportent le plus souvent comme des conidies. Un certain nombre de maladies économiquement importantes ont pour agent des *Peronospora : P. destructor* sur oignons et échalotes, *P. farinosa* sur betteraves et épinards ; *P. parasitica* attaque de nombreuses Crucifères ; il est fréquent sur la bourse-à-pasteur, mais peut exercer des dégâts dans les cultures maraîchères. *Bremia lactucae* provoque le mildiou de la laitue. *Plasmopara viticola* est l'agent du mildiou de la vigne ; endémique en Amérique, il a été importé au XIXe siècle en France, où il se comporte comme un ennemi redoutable des vignobles.

Les *Albuginacées* diffèrent des Péronosporacées par leurs sporangiophores courts, en massue, groupés en sores compacts à la face inférieure des feuilles de l'hôte, et leurs sporanges disposés en chaînes. Ces sporocystes libérés par la rupture de l'épiderme de la feuille sont dispersés par le vent et germent dans l'eau en produisant

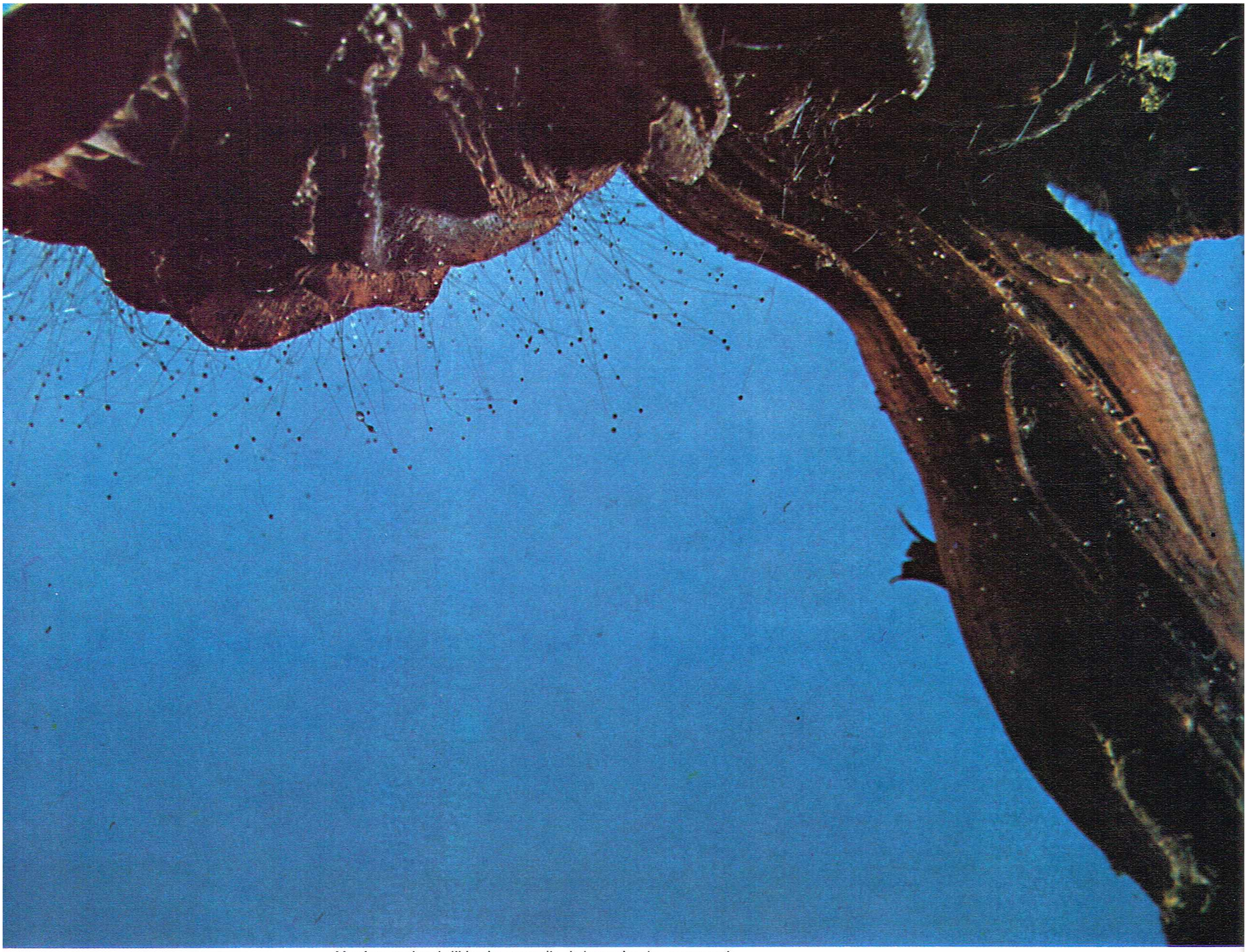

Muséum national d'histoire naturelle. Laboratoire de cryptogamie

▲ **Spinellus fusiger** ***(Mucorales), parasite des chapeaux de*** **Collybia fusipes.**

des zoospores biflagellées. Les oospores se forment dans les espaces intercellulaires des tiges et des feuilles. La famille comprend un seul genre, *Albugo,* parasite obligatoire de Phanérogames. *A. candida (= Cystopus candidus),* agent de la « rouille blanche » des Crucifères (navets, choux, etc.), est très commun sur *Capsella bursa-pastoris,* où on le trouve associé à *Peronospora parasitica.*

ZYGOMYCOTINÉS

Les Champignons de ce groupe se reproduisent végétativement par des *aplanospores,* non mobiles, contenues dans des sporocystes, qui sont dispersées passivement par le vent, la pluie ou les Insectes ; ou bien le sporocyste lui-même (pseudo-conidie) est projeté mécaniquement. La reproduction sexuée résulte de la conjugaison de deux *gamétanges,* en principe identiques, conduisant à la *zygospore.* Longtemps classés avec les Chytridiomycètes et les Oomycètes en raison de leur mycélium cœnocytique (mais à paroi toujours chitinoïde), ils se distinguent en fait des groupes précédents par l'absence de tout élément flagellé dans leur cycle de développement.

La classe des *Zygomycètes* est représentative de cette sous-division ; elle comprend deux ordres : les *Mucorales,* pour la plupart saprophytes banales du sol, du fumier ou des débris végétaux, quelques-unes parasites de Végétaux ou d'Animaux, et les *Entomophthorales,* inféodées aux Insectes.

La seconde classe, celle des *Trichomycètes,* est un groupe hétérogène d'organismes d'affinités incertaines, qui vivent en commensaux dans le tube digestif des Arthropodes, en particulier les larves d'Insectes.

ZYGOMYCÈTES

La classe est remarquablement homogène quant au mode de reproduction sexuée. La division en ordres et en familles est fondée sur la biologie et sur les mécanismes de la reproduction végétative, beaucoup plus diversifiés.

Mucorales

Elles sont très largement répandues dans le sol et généralement saprophytes ; elles constituent pour une part les « moisissures » banales. Incapables d'assimiler la cellulose, elles utilisent aisément les sucres et parfois l'amidon ; c'est ainsi qu'on les rencontre fréquemment comme agents d'altération des produits alimentaires, parfois faiblement parasites sur les fruits ; certaines sont exploitées pour la production de l'alcool par fermentation des produits amylacés. Un petit nombre d'espèces sont parasites d'autres Champignons, ou même de l'homme et des Animaux chez lesquels elles provoquent des mucormycoses.

Le thalle des Mucorales, généralement hyalin, est constitué de siphons robustes, abondamment ramifiés, pourvus exceptionnellement de cloisons, soit à la base des sporocystes, soit sur le mycélium âgé, pour délimiter les parties encore actives du thalle ; certaines espèces portent, sur le trajet des filaments, des chlamydospores unicellulaires.

Les sporocystes, le plus souvent globuleux ou piriformes, sont portés par des sporangiophores différenciés, parfois colorés en brun ou en gris-noir, simples ou diversement ramifiés ; la paroi du sporange peut aussi être

pigmentée et incrustée de cristaux en aiguilles. La columelle, caractéristique de plusieurs groupes, est une invagination du sommet du sporangiophore dans la cavité du sporocyste. Le nombre de sporangiospores délimitées à l'intérieur du sporocyste est généralement élevé; toutefois les sporangioles, de petite taille, n'en contiennent que quelques-unes, et certaines Mucorales se reproduisent par des sporanges monospores qui fonctionnent comme des conidies. Chez beaucoup d'espèces, la paroi du sporange est fugace; les spores mises à nu absorbent de l'eau et forment une masse gluante transportée par la pluie ou les Insectes; chez d'autres, les spores sont sèches et dispersées par le vent, comme le sont généralement les sporangioles; chez *Pilobolus* et *Pilaira*, des mécanismes complexes assurent la libération ou l'expulsion violente du sporange entier. Le processus de reproduction sexuée met en jeu, non des gamètes individualisés, mais des couples de gamétocystes plurinucléés. Deux branches mycéliennes ou *progamétanges* appartenant soit à un même thalle (espèces homothalliques), soit à deux souches compatibles provenant de sporangiospores distinctes (espèces hétérothalliques) entrent en contact par leurs extrémités; une cloison délimite sur chaque branche un *gamétange* et, à sa base, un *suspenseur* pourvu, dans certains genres, de fulcres simples ou ramifiés. La cloison disparaît entre les deux gamétanges, dont les contenus s'associent pour former la jeune zygospore, qui augmente de volume et acquiert une paroi externe brune et verruqueuse; la zygospore mûre passe à l'état de vie ralentie et se comporte comme un organe de résistance. En germant, elle produit généralement un sporange de germination ou, directement, un nouveau mycélium végétatif. La zygospore est le siège de la caryogamie, puis de la méiose qui rétablit la condition haploïde du thalle, mais la succession des phénomènes caryologiques diffère quelque peu selon les genres.

L'ordre est divisé en huit ou neuf familles; la plus caractéristique est celle des *Mucoracées*, à sporocystes tous semblables, multisporés et pourvus d'une columelle. On y trouve les genres saprophytes les plus communs : *Mucor, Rhizopus* (*R. stolonifer*, fréquent sur les fruits trop mûrs, parfois faiblement parasite), *Phycomyces, Sporodinia* (*S. grandis*, sur agarics et bolets pourrissants); parmi les *Absidia*, on rencontre des espèces *(A. ramosa, A. corymbifera)*, pathogènes occasionnels de l'homme et des Animaux. Les *Pilobolus* et les *Pilaira*, qui se développent sur les crottes d'herbivores, ont des sporanges de structure complexe, séparés de la columelle par une zone mucilagineuse par laquelle ils se collent aux brins d'herbe; les spores sont libérées dans l'intestin des Animaux qui s'en nourrissent. Les *Choanophoracées* et les *Thamnidiacées* portent à la fois des sporanges et des sporangioles; on en sépare parfois les *Cunninghamella*, propres aux sols tropicaux, qui n'ont pas de véritables sporanges, mais des propagules unicellulaires qu'on peut interpréter comme des conidies. Plusieurs familles sont caractérisées par des sporocystes cylindriques (mérosporanges) où les spores sont disposées en file; *Syncephalastrum racemosum* est un saprophyte assez commun du sol et du fumier, alors que *Syncephalis* et *Piptocephalis* sont parasites obligatoires de Champignons, en particulier d'autres Mucorales. Les *Mortierellacées* ont des sporanges globuleux pluriseptés, mais dépourvus de columelle; leurs zygospores s'entourent d'un peloton mycélien qui semble une ébauche de sporocarpe. Chez les *Endogonacées*, les zygospores, groupées dans un feutrage serré d'hyphes à parois épaisses, forment de véritables corps fructifères, ressemblant à de minuscules truffes; les *Endogone* sont hypogés, et forment avec les racines de plantes supérieures des mycorrhizes endotrophes.

Entomophthorales

La plupart des Champignons de cet ordre sont des parasites d'Insectes ou d'autres Animaux. Comme chez les Mucorales, la reproduction sexuée résulte de la conjugaison de deux gamétanges égaux ou inégaux, et conduit à la formation d'une zygospore. La reproduction asexuée est assurée soit par des conidies (chez les Zoopagacées), soit par des propagules assimilables à des sporocystes réduits qui sont projetés par l'éclatement du sommet du sporophore (chez les Basidiobolacées et les Entomophthoracées).

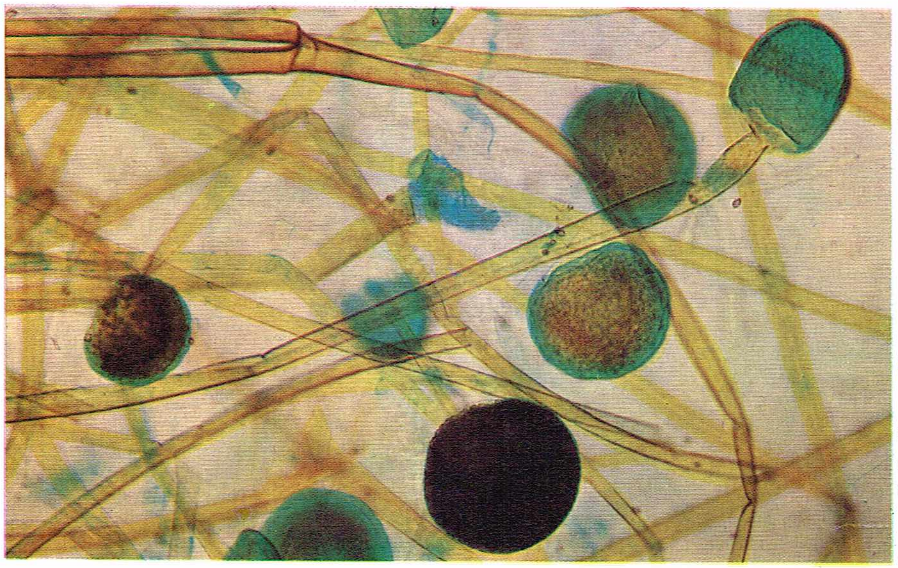

Bavestrelli, Bevilacqua, Prato

▲ **Rhizopus sp.** ***Sporangiospores et sporocystes pourvus d'une columelle.***

Les *Zoopagacées* comprennent une soixantaine d'espèces, pour la plupart parasites endozoïques de Protozoaires du sol ou prédateurs de Nématodes; leurs conidies, formées isolément ou en chaînes, sont dispersées passivement.

Les *Basidiobolacées* comprennent le seul genre *Basidiobolus*, caractérisé par un mycélium cloisonné en cellules uninucléées et des gamétanges inégaux; elles sont saprophytes sur les excréments ou dans l'humus, rarement parasites de Mammifères (*B. meristosporus*, pathogène occasionnel de l'homme). *B. ranarum* végète à l'état de cellules isolées dans l'intestin des grenouilles et fructifie sur ses déjections. La conidie, projetée violemment par la turgescence d'une vésicule qui la sépare du sporophore, germe en produisant un mycélium septé ou des conidies secondaires; ingérées par des Insectes, elles sont introduites dans l'intestin des grenouilles qui s'en nourrissent. La formation des zygospores a été observée en cultures.

Les *Entomophthoracées* (une dizaine de genres) sont exceptionnellement saprophytes, le plus souvent parasites d'Insectes; elles diffèrent des *Basidiobolus* par leur mycélium à segments plurinucléés, et par la gamétangie isogame. *Entomophthora coronata*, parasite de pucerons et de termites, est aussi un saprophyte commun sur débris végétaux et se cultive aisément sur des milieux synthétiques. *E. muscae* est un parasite interne de la mouche domestique; on peut trouver à l'automne des mouches fixées aux vitres des fenêtres, entourées d'un halo de spores blanches; celles-ci ont été éjectées par les conidiophores élastiques qui sortent entre les segments

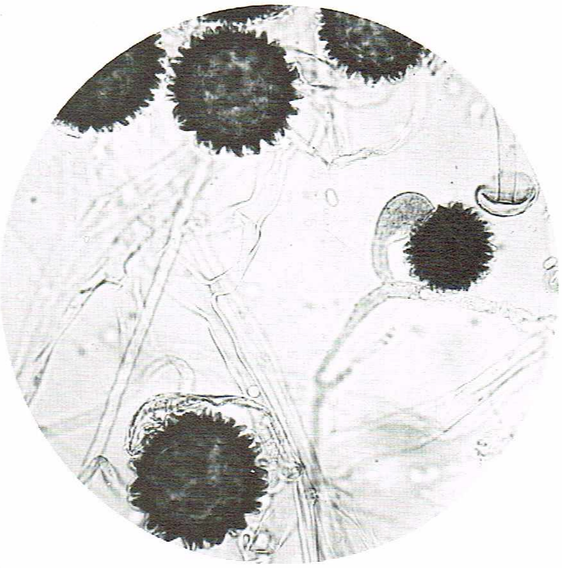

Muséum national d'histoire naturelle. Laboratoire de cryptogamie

◄ **Zygorhynchus moelleri.** ***Zygospores à parois épineuses.***

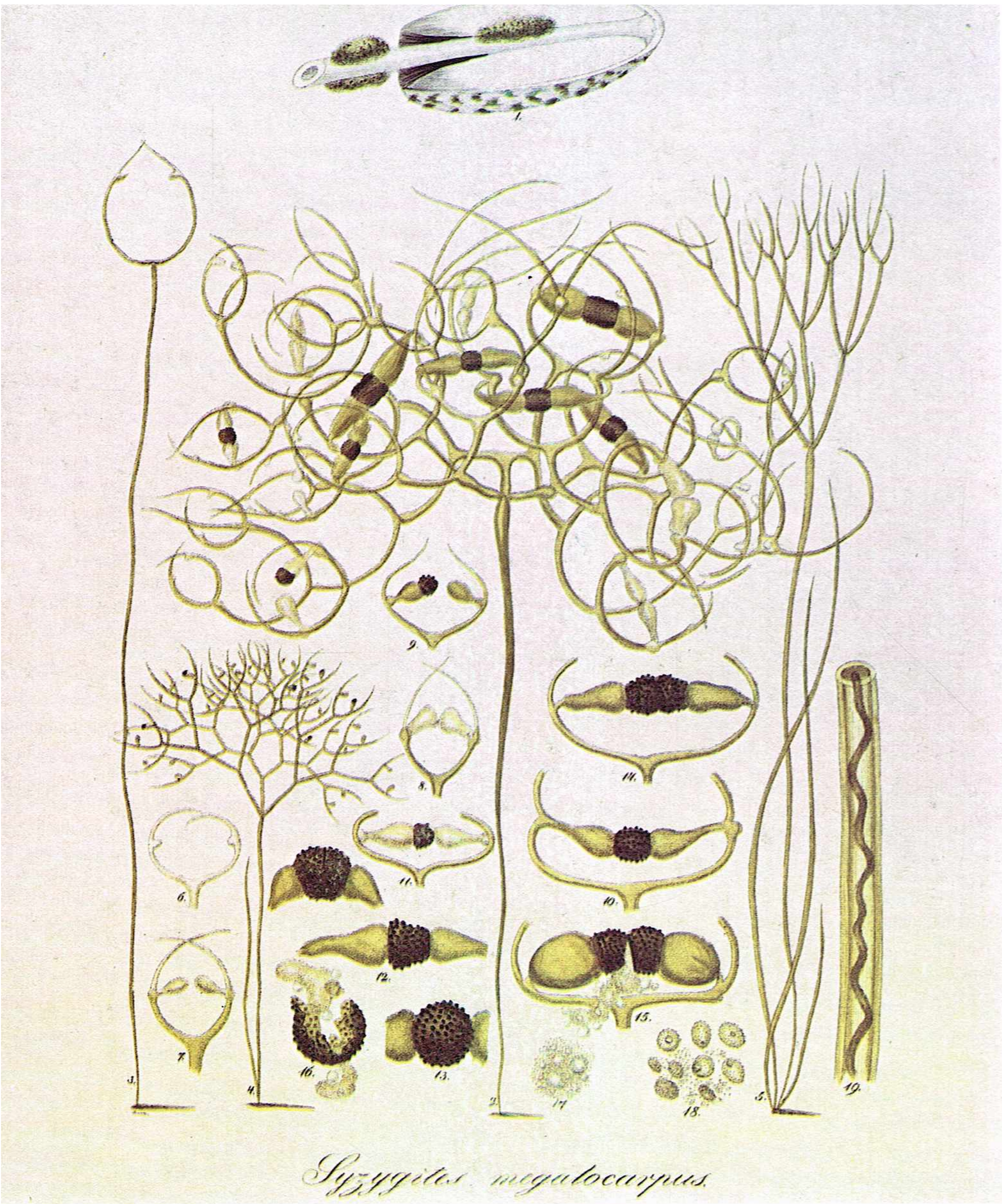

Muséum national d'histoire naturelle. Laboratoire de cryptogamie

▲ *Détail de la formation des zygospores chez* Syzygites megalocarpus, *d'après Corda (1840) ; cette Mucorale, plus connue sous le nom de* Sporodinia grandis, *parasite certains agarics (ici, le coprin pie).* ▼ Rhizopus nigricans *sur feuille de chou.*

Claude Nuridsany - Atlas Photo

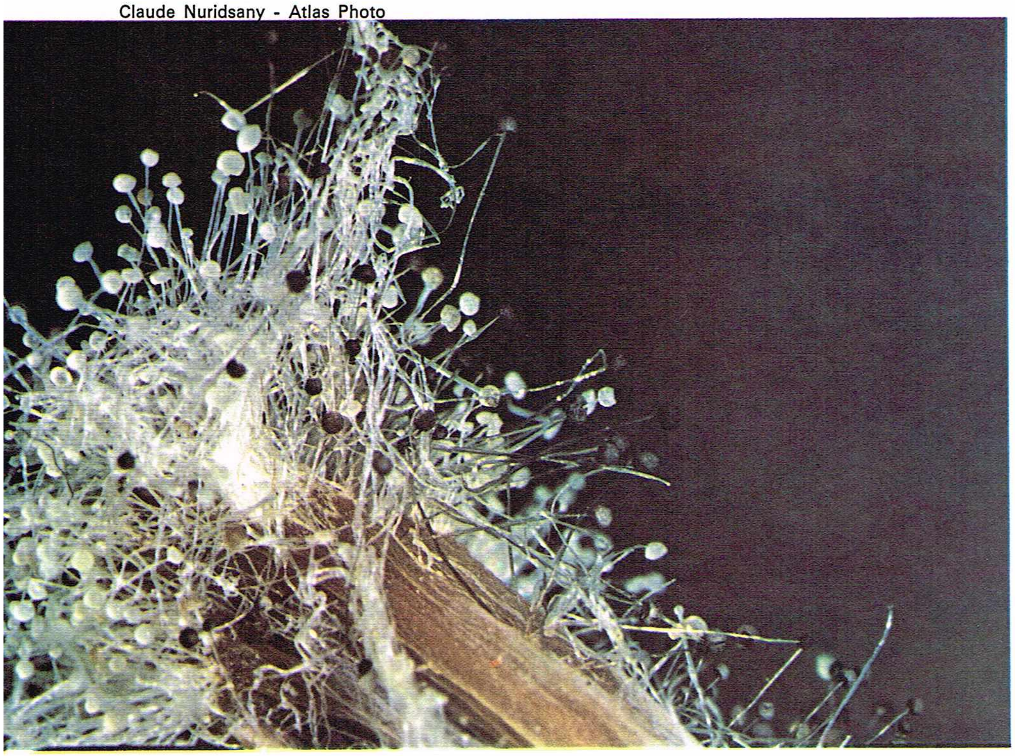

de l'exosquelette. On a pu envisager la culture des *Entomophthora* en vue de la lutte biologique contre certaines espèces d'Insectes nuisibles.

TRICHOMYCÈTES

Les Trichomycètes, actuellement rapprochés des Zygomycètes, sont des organismes filamenteux simples ou ramifiés, cœnocytiques ou peu septés, toujours fixés à la paroi de l'intestin postérieur ou à la cuticule d'Arthropodes par une substance adhésive. Ils semblent exiger un support chitineux vivant, mais sans causer de dommages sensibles à leur hôte ; ils se comportent plutôt en commensaux.
La classe est hétérogène et probablement polyphylétique ; les coupures systématiques sont fondées essentiellement sur les caractères morphologiques et traduisent les convergences imposées par l'écologie particulière de ces Champignons. On y reconnaît actuellement quatre ordres :

Amœbidiales

Leur thalle est un siphon microscopique non ramifié, multinucléé, fixé à la paroi de l'hôte par un pavillon adhésif callosique. Leur reproduction végétative s'effectue selon deux modes, soit par transformation de tout le thalle en sporocyste, soit par l'intermédiaire d'un stade à myxamibes libres, qui s'enkystent et produisent à leur tour des cystospores. La reproduction sexuée est inconnue chez les deux genres que comporte l'ordre : les *Amoebidium,* fixés soit sur un hôte vivant (*A. parasiticum,* commun dans les eaux douces sur le tégument des daphnies), soit sur de petits Crustacés ou des Insectes morts ou sur leurs mues ; les *Paramoebidium,* qui vivent dans l'intestin de larves sur le point de muer.

Eccrinales

Ce sont aussi des filaments cœnocytiques simples, mais de plus grande taille que les précédents (jusqu'à 1 cm) ; ils vivent fixés par un pavillon adhésif sur la cuticule de l'intestin postérieur de Crustacés, de Myriapodes ou d'Insectes. Ils se multiplient soit sur place par des spores à développement immédiat, issues de segments individualisés du thalle, soit par des spores de dissémination à paroi résistante, formées en file à l'intérieur du mycélium ; rejetées avec la mue, elles infestent d'autres Animaux qui les ont ingérées. L'ordre ne comprend pas moins de treize genres, dont le plus riche en espèces est *Enterobryus,* hôte de Myriapodes diplopodes ou de Coléoptères. *Eccrinidus flexilis,* à thalle spiralé de 3 ou 4 mm, se développe dans l'intestin postérieur des *Glomeris.*

Asellariales

L'ordre (seulement trois genres) est caractérisé par un thalle abondamment ramifié, plus ou moins cloisonné, issu d'un cœnocyte basal globuleux ou cylindrique qui sécrète une substance adhésive ; leur reproduction est essentiellement assurée par des arthrospores uninucléées.

Harpellales

Les deux familles de cet ordre diffèrent par la complexité de leur thalle : filament simple, fixé par un pavillon chez les *Harpellacées* qui vivent au niveau de l'intestin moyen des larves de Diptères ; thalle ramifié et cloisonné, attaché par un pavillon ou par un cœnocyte adhésif à la cuticule rectale des larves aquatiques de Diptères ou d'éphémères chez les *Génistellacées* (*Smittium culicis,* fréquent dans les larves de moustiques dans toute la région méditerranéenne). La reproduction, identique dans les deux familles, offre deux modalités : *multiplication végétative* par le bourgeonnement latéral de spores uninucléées, pourvues de prolongements filiformes *(trichospores) ; reproduction sexuée* par une cystogamie analogue à celle des Entomophthorales (les zygospores résultent de la conjugaison de deux filaments homothalles ou hétérothalles). Ce mode de reproduction, qui justifie le classement des Harpellales et, par analogie, des autres Trichomycètes, parmi les Zygomycotinés, est encore inconnu chez plusieurs genres de cet ordre.

H. Chaumeton - Jacana

▲ **Aleuria badia** ***est une pezize commune qui applique à même le sol ses réceptables en forme de coupe charnue, brun clair.***

ASCOMYCOTINÉS

Avec près de deux mille genres représentés par environ quinze mille espèces, ce groupe est le plus vaste parmi les Champignons. Il offre une grande diversité de structures et de modes de vie, le caractère diagnostique essentiel étant l'*asque*. Cette structure peut être définie comme une cellule en forme de sac, qui apparaît dans le cycle de reproduction sexuée du Champignon, et dans laquelle se forment des *ascospores,* en nombre limité (théoriquement huit). Les systèmes de classification des Champignons ascosporés tiennent compte de la complexité croissante des structures du thalle et des fructifications, depuis les formes levuroïdes unicellulaires jusqu'aux organismes filamenteux, toujours septés, produisant des ascocarpes massifs, de grande taille. Depuis peu, on prend en considération les caractères propres de l'asque, suivant que sa paroi comporte une ou deux membranes séparables, et ceux des formations cytoplasmiques différenciées à son apex.

En principe, la *reproduction sexuée* des Ascomycètes est de type *oogame*, et le mode de fécondation est une *trichogamie*. L'organe femelle ou *ascogone* est une cellule plurinucléée, généralement enroulée sur elle-même et surmontée d'un filament récepteur, le *trichogyne;* l'organe mâle fécondant est constitué soit par un rameau mycélien grêle, l'*anthéridie*, soit par des éléments unicellulaires de petite taille, non flagellés, *spermaties* ou *microconidies*. Les Ascomycètes peuvent être *homothalliques* ou *hétérothalliques*, ce caractère étant sous la dépendance d'un seul gène; chez certaines espèces *(Neurospora crassa)*, les types sexuels sont morphologiquement indiscernables et les souches bisexuées : chacune produit à la fois des organes femelles (ascogones) et des éléments mâles (microconidies), mais ceux-ci sont inaptes à féconder les ascogones d'un même mycélium; l'hétérothallisme est *physiologique*.

Toutefois, bon nombre d'Ascomycètes sont dépourvus d'organes sexuels différenciés, et la conjugaison se produit entre des éléments quelconques du thalle, qu'il soit filamenteux, comme c'est le cas le plus général, ou cellulaire comme chez les Levures.

Le schéma fondamental du *développement de l'asque* comporte une *hyphe ascogène* plurinucléée dicaryotique, issue de l'ascogone; son extrémité est recourbée en crochet; deux cloisons délimitent la cellule distale (l'avant-dernière) pourvue de deux noyaux, qui va devenir l'asque. Sous la cellule ascogène, la cellule terminale du crochet fusionne avec le filament, qui peut alors produire un nouveau crochet; les proliférations répétées du sommet de l'hyphe ascogène donnent ainsi naissance à un bouquet d'asques. L'évolution ultérieure de l'asque est marquée par la fusion des deux noyaux conjugués, suivie immédiatement de la méiose; il apparaît ainsi quatre noyaux fils haploïdes, qui se divisent une nouvelle fois par une mitose. Dans l'asque qui augmente de volume, le plus souvent par un allongement parallèle à l'axe des divisions nucléaires, le cytoplasme se fragmente et s'organise autour de chacun des noyaux, pour former huit ascospores pourvues d'une paroi propre.

La forme de l'asque mûr est très variable : globuleuse, claviforme ou, le plus souvent, cylindrique. Dans ce cas, les ascospores sont expulsées brutalement par l'effet de la turgescence du cytoplasme résiduel de l'asque, ou *épiplasme;* elles sortent généralement par un *pore* apical ou, chez une partie des Discomycètes, grâce à un *opercule* découpé au sommet de l'asque. Par des colorations appropriées, il est possible de mettre en évidence dans la région sommitale de l'asque de beaucoup d'Ascomycètes des structures cytoplasmiques différenciées en *anneau* ou en *nasse;* les caractères de cet *appareil apical* sont considérés comme un critère important pour la classification. Ainsi le type nassascé, caractéristique des Loculoascomycètes, est lié à des asques pourvus de deux parois nettement distinctes (asques bituniqués), et la décharge des ascospores s'effectue par un mécanisme original (Jack-in-a-box). Les Ascomycètes à asques plus ou moins globuleux n'ont pas de structure apicale différenciée, et les ascospores sont libérées à l'intérieur même de l'ascocarpe par déchirure ou dissolution de la paroi de l'asque; les ascospores des Ascomycètes hypogés (Tubérales) sont dispersées par les Rongeurs qui se nourrissent de leurs fructifications.

Chez les Levures et les groupes affines, les asques se développent librement sur le thalle, mais chez la plupart

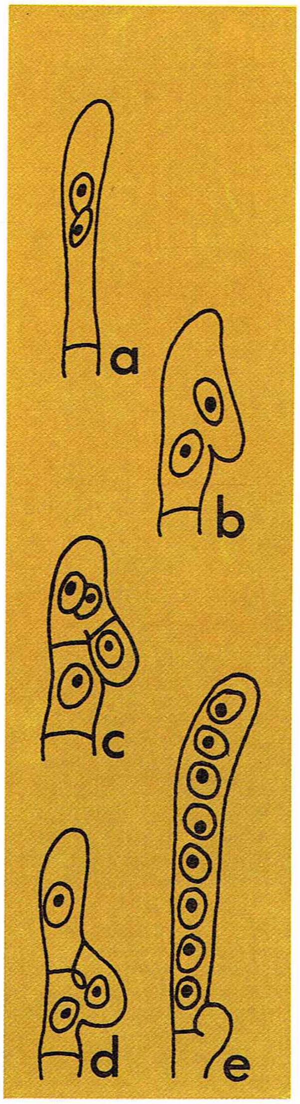

▲ *Schéma du développement de l'asque et des ascospores à l'extrémité d'un filament ascogène.*

des Ascomycètes, ils sont portés par une fructification différenciée, l'*ascocarpe*. Celui-ci peut être réduit à un réseau lâche d'hyphes peu ou pas différenciées (Gymnoascacées), ou constituer une enveloppe globuleuse, entièrement close, ou *cléistothèce* (cléistocarpe). Chez les Discomycètes, l'ascocarpe est une *apothécie* en forme de coupe largement ouverte à maturité, alors que le *périthèce* des Pyrénomycètes est un conceptacle en forme de bouteille, s'ouvrant par un ostiole; la paroi du périthèce tire son origine des hyphes stériles issues du pied de l'ascogone et qui l'entourent au cours de son développement. La *pyrénosphère* (pseudothèce) de certains Loculoascomycètes, morphologiquement comparable au périthèce, en diffère en réalité par son origine et son mode de développement. Les ascocarpes des Pyrénomycètes sont fréquemment inclus dans une masse stromatique de forme caractéristique, ou groupés à la surface d'un stroma charnu ou carbonacé. Outre le mode fondamental de reproduction sexuée par ascospores, bon nombre d'Ascomycètes se multiplient végétativement au moyen de *conidies* de formes et de dispositions variées, qui assurent une reproduction rapide et la colonisation accélérée de nouveaux hôtes.

On ne possède pas encore toutes les précisions souhaitables sur la structure, le mode de développement, le cycle de reproduction de beaucoup de ces organismes, si bien que la définition et les limites des groupes systématiques ne peuvent être considérées comme définitives. On s'accorde cependant à reconnaître plusieurs types d'organisations caractéristiques, qui fondent la division des Ascomycotinés en six classes :

Hémiascomycètes : ils sont dépourvus d'ascocarpes (principaux ordres : Endomycétales, Taphrinales);

Plectomycètes : l'ascocarpe rudimentaire est un *cléistothèce* (Érysiphales, Eurotiales);

Pyrénomycètes : l'ascocarpe est un *périthèce* typique (Hypocréales, Sphæriales);

Discomycètes : l'ascocarpe est une *apothécie*, généralement de grande taille; le mode de déhiscence des asques différencie deux groupes importants : asques inoperculés (Hélotiales, Phacidiales), asques operculés (Pezizales); les formes hypogées constituent l'ordre des Tubérales;

Loculoascomycètes : l'ascocarpe est un *ascostroma* ou une *pyrénosphère;* les asques sont bituniqués et nassascés (Pléosporales);

Laboulbéniomycètes : ectoparasites d'Arthropodes (Laboulbéniales).

HÉMIASCOMYCÈTES

Les Hémiascomycètes se distinguent de tous les autres Ascomycètes (qualifiés globalement d'*Euascomycètes*) par l'absence d'ascocarpe; les asques se forment isolément, sans différenciation préalable d'hyphes ascogènes, et sans revêtement mycélien protecteur. Leur thalle est constitué de cellules bourgeonnantes ou d'un mycélium septé, généralement peu développé.

Protomycétales

Parasites de Végétaux supérieurs (genre *Protomyces, Protomycopsis*, sur Composées et autres plantes herbacées), elles produisent leurs ascospores dans un *synasque*, qu'on interprète comme un groupe d'asques coalescents.

Endomycétales

Ces Champignons représentent le groupe le plus important par le nombre (environ deux cents espèces et cinquante genres) et par ses implications économiques; on y trouve en effet la plupart des Levures, agents des fermentations industrielles, ainsi que des formes mycéliennes, généralement saprophytes. Ces dernières appartiennent à trois familles : les *Ascoïdéacées* ont des asques multisporés qui résultent de la conjugaison de deux cellules voisines du thalle; elles sont représentées par les genres *Dipodascus* et *Ascoidea*. Les *Spermophthoracées* peuvent être considérées comme les Ascomycètes les plus primitifs. Elles sont pourvues d'un mycélium abondant où se différencient des gamétanges plurinucléés produisant de nombreux gamètes non mobiles; ces gamètes se conjuguent par paires, d'où résultent des zygotes qui donnent des asques portés sur de courts filaments. Les Spermophthoracées sont des parasites de fruits, transmis par les piqûres d'Insectes, et surtout fréquents dans les régions tropicales; *Nematospora gossypii* est l'agent de la stigmatomycose qui altère les capsules de cotonnier. Chez les *Endomycétacées*, saprophytes à mycélium assez bien développé, les gamétanges sont uninucléés et ne se divisent pas en gamètes. Les *Endomyces* (*E. magnusii*, dans les exsudats du chêne, *E. decipiens*, sur divers agarics) se reproduisent également par fragmentation du thalle en *arthrospores;* le Champignon imparfait *Geotrichum candidum*, fréquent sur les fromages et les produits laitiers, commensal ou parasite

▶ *Représentation schématique de l'hyménium d'un Ascomycète; aux asques cylindriques, octosporés, sont entremêlées des paraphyses.* [*A gauche.*] *Coupe schématique dans un périthèce d'une Sordariacée (Pyrénomycètes).* [*A droite.*]

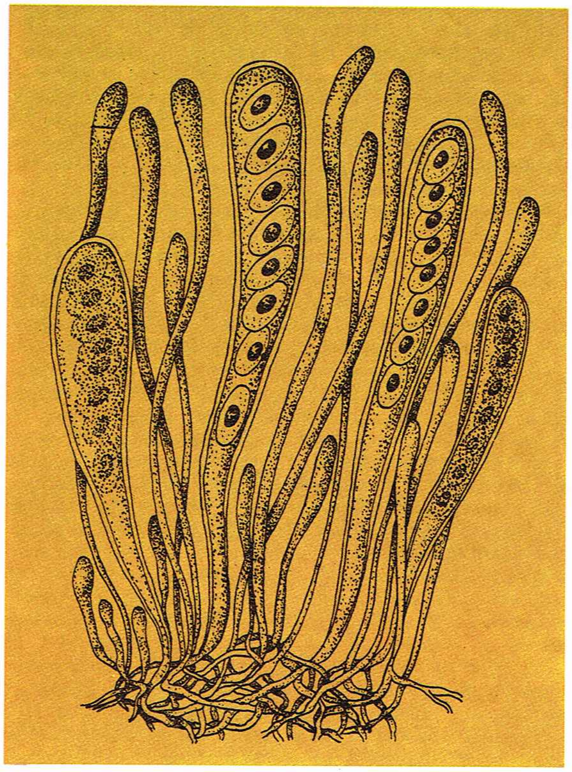

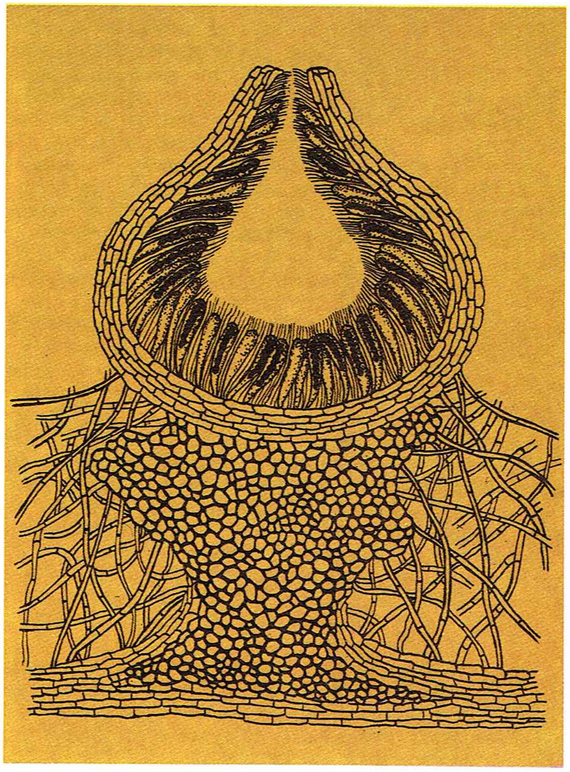

occasionnel de l'homme et des Animaux, leur serait sans doute apparenté. Les *Eremascus* sont associés à des substrats fortement sucrés, comme la confiture ; on rattache *E. ashbyi* à ce genre, producteur de riboflavine.

Les *Saccharomycétacées*, ou Levures ascosporées, caractérisées par un thalle unicellulaire bourgeonnant, ne comportent pas moins de cent soixante espèces (une vingtaine de genres), dont certaines ont reçu des applications industrielles importantes ou sont un matériel favorable aux travaux de génétique et de biochimie.

L'élément fondamental de la levure de bière, *Saccharomyces cerevisiae*, est une cellule ellipsoïde ou subglobuleuse de petite taille, hyaline, à paroi mince, qui contient un seul noyau, une grande vacuole riche en grains de volutine (polymétaphosphate), des mitochondries et des réserves de lipides et de glycogène. Elle se multiplie par un *bourgeonnement* multipolaire : en un point quelconque de sa surface se forme une petite vésicule qui augmente progressivement de volume ; le noyau s'étire pour pénétrer dans le bourgeon et se divise par constriction ; selon les conditions de culture, la jeune Levure se sépare de la cellule mère en laissant une cicatrice, ou bien le bourgeonnement répété donne naissance à de petites colonies. Chez certaines Levures, en particulier chez les formes imparfaites du genre *Candida*, les cellules filles successives s'alignent pour donner un *pseudo-mycélium* ; plus rarement, le bourgeon s'allonge en un véritable mycélium à croissance apicale, produisant des blastospores (genre *Endomycopsis*). Chez les *Schizosaccharomyces*, la reproduction végétative s'effectue par simple bipartition. Les Levures apiculées *(Nadsonia, Hanseniaspora, Kloekera)* sont caractérisées par un bourgeonnement bipolaire itératif : chaque extrémité axiale de la cellule présente une minuscule protubérance tabulaire formée par les cicatrices superposées.

Les mécanismes de la reproduction sexuée des Saccharomycétacées sont extrêmement simplifiés. A la suite d'une caryogamie qui établit la diplophase, une cellule se transforme directement en asque ; son noyau subit une méiose et quatre ascospores s'organisent autour des quatre noyaux fils ; ce nombre peut être réduit à deux ou trois, ou au contraire s'élever à huit par une mitose complémentaire. Les ascospores sont libérées par rupture de la paroi de l'asque et produisent un nouveau thalle bourgeonnant. Toutefois, on peut distinguer trois types principaux de cycles de reproduction, qui diffèrent par l'importance relative des générations haploïde et diploïde. Dans le type illustré par *Schizosaccharomyces octosporus,* toutes les cellules végétatives sont haploïdes ; la formation de l'asque est immédiatement précédée par la conjugaison de deux cellules du thalle (somatogamie) ; la phase diploïde est ainsi réduite au zygote. Chez *Saccharomycodes ludwigii*, au contraire, les ascospores se conjuguent par paires, parfois à l'intérieur même de l'asque, et la phase végétative est entièrement diploïde. Chez *Saccharomyces cerevisiae*, enfin, les zygotes diploïdes se reproduisent par bourgeonnement, comme les cellules haploïdes, avant de se transformer en asques ; les deux générations sont de même importance ; la plupart des souches de *S. cerevisiae* sont hétérothalliques. Cette espèce a fait l'objet d'études génétiques poussées ; par hybridation et sélection, on a ainsi obtenu de multiples souches dotées de propriétés appréciées en boulangerie, en brasserie ou pour d'autres types de fermentations.

A l'état naturel, les Levures se trouvent en abondance sur les substrats sucrés ; certaines vivent en symbiose avec des Insectes, qui interviennent dans leur dissémination sur les fruits. Elles végètent également sur des produits de transformation : laitages, confitures, mélasses ; les *Debaryomyces* se trouvent surtout sur des produits animaux : fromage, saucisson, colle forte ; des Levures « sauvages » : *Pichia*, *Hansenula*, contaminent les boissons alcoolisées ; les *Lipomyces* sont des Levures du sol.

Les Levures sont des anaérobies facultatifs, et beaucoup sont douées de pouvoir fermentaire. De tous temps,

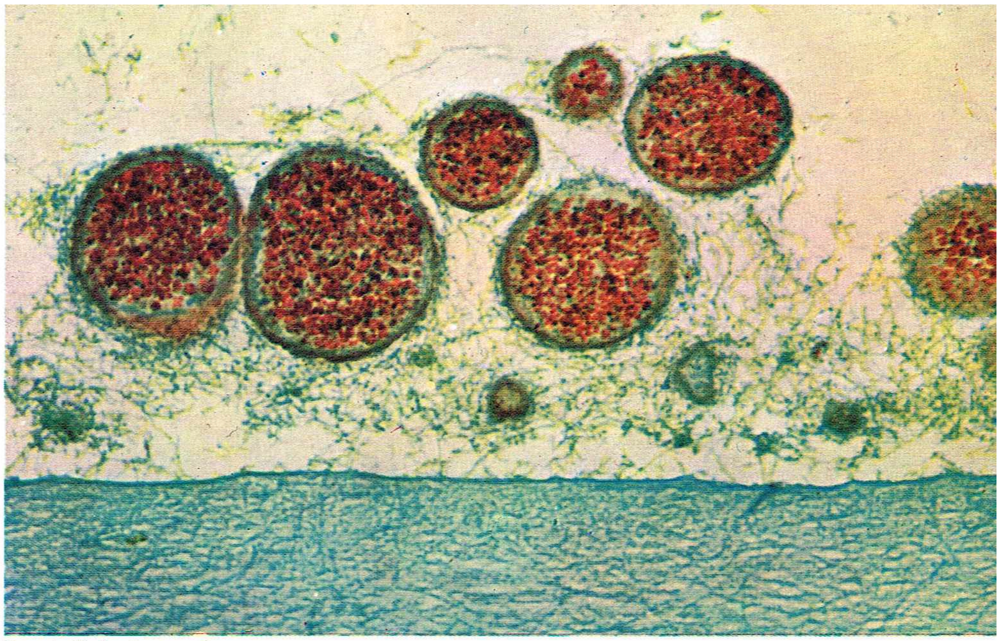

Bavestrelli, Bevilacqua, Prato

▲ *Les Eurotiales (ici, un* **Penicillium**) *ont pour fructification des ascocarpes globuleux de petite taille, complètement clos, ou cléistothèces.*

◀ *Les morilles, au chapeau contourné porté par un pied robuste, s'apparentent aux pezizes. La morille blonde,* **Morchella rotunda**, *est un comestible délicat, qui vient au printemps à la lisière des bois, au voisinage des ormes et des frênes.*

▼ *Les périthèces de* **Cucurbitaria laburni** *(Sphæriale) sont groupés en petits amas arrondis, noirs, sous l'écorce du rameau de cytise ; à maturité, ils déchirent l'épiderme et sont mis à nu.*

Severino Viola

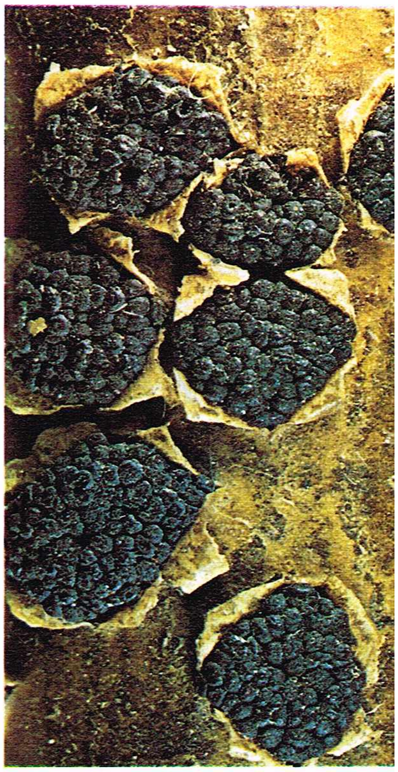

C. Nardin - Jacana

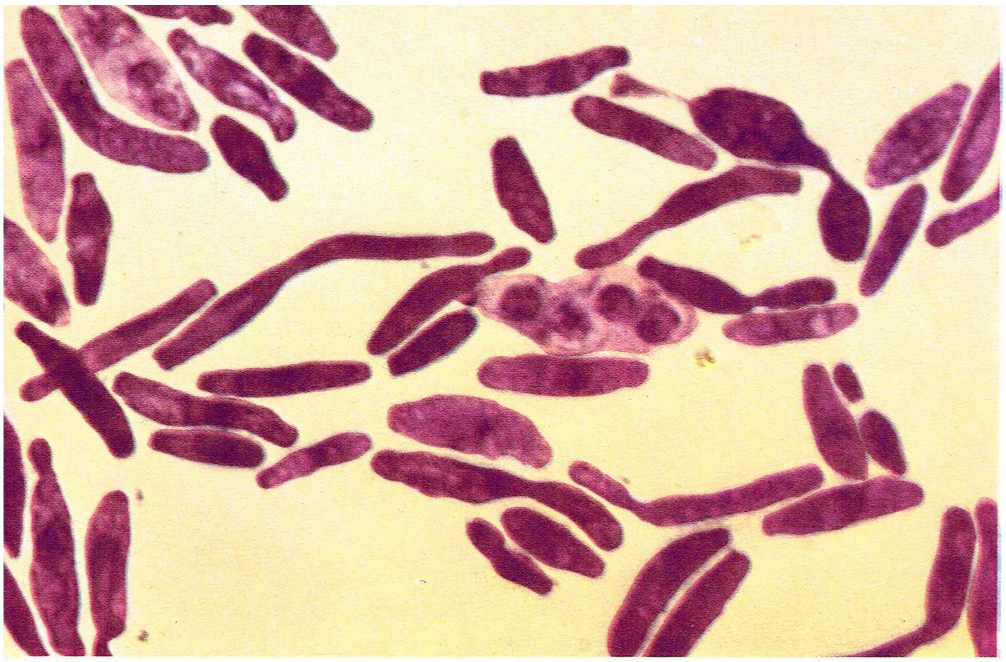

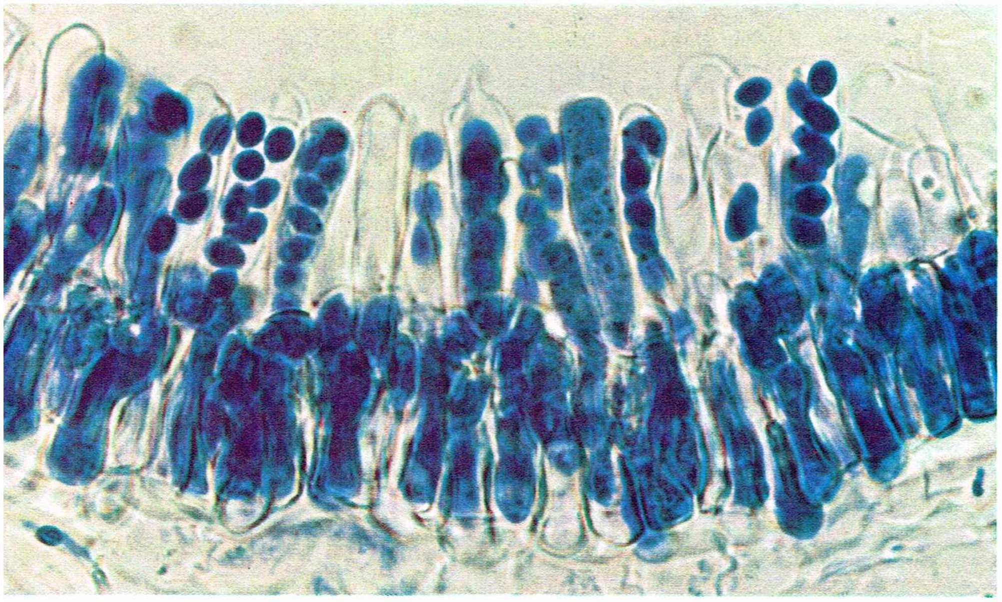

▲ *Microphotographie d'une préparation colorée de Levure* (Saccharomycodes ludwigii) *; parmi les formes végétatives bourgeonnantes, on remarque des cellules transformées en asques et contenant quatre ascospores (en haut).*

Coupe dans une feuille de cerisier parasitée par Taphrina cerasi *; les asques, issus du mycélium intercellulaire, sont disposés en palissade à la face inférieure de la feuille.*

▼ Taphrina aurea, *parasite du peuplier, forme des « cloques » rondes, dorées, à la surface des feuilles.*

l'homme a exploité empiriquement cette propriété pour la panification et l'obtention de boissons fermentées. Les espèces en cause sont surtout des *Saccharomyces : S. cerevisiae* pour la bière et le pain, *S. ellipsoideus* pour le vin, *S. apiculatus* pour le cidre, *S. fragilis* et *Zygosaccharomyces lactis* pour les produits laitiers, etc. ; actuellement, les industries alimentaires utilisent des souches sélectionnées qui permettent d'obtenir une gamme variée de produits bien définis. Les Levures fournissent également à l'économie humaine de la glycérine *(S. ellipsoideus)*, des lipides *(Endomyces vernalis)*, des vitamines. La richesse des Levures en vitamines a reçu des applications thérapeutiques dans les avitaminoses et les dermatoses ; on les prescrit aussi pour régulariser la flore intestinale perturbée par les antibiotiques. Grâce à leur culture aisée sur des milieux très variés, sous-produits de l'industrie, elles sont devenues une source de protéines largement utilisée dans l'alimentation du bétail et même en diététique humaine.

C'est aussi parmi les Levures anascosporées, qu'il convient plutôt de classer parmi les Champignons imparfaits ou Deutéromycètes, qu'on trouve des espèces pathogènes de l'homme et des Animaux : *Candida albicans* et *tropicalis*, *Cryptococcus*, *Trichosporon*.

Taphrinales

Ces Champignons, avec pour principal représentant le genre *Taphrina* (syn. *Exoascus*), sont des parasites des Végétaux supérieurs (surtout des Rosacées et des Amentifères), responsables de distorsions et d'hypertrophies des tissus attaqués ; on en connaît une centaine d'espèces. *Taphrina deformans*, agent de la cloque du pêcher, végète dans les feuilles sous forme d'un mycélium septé, intercellulaire, qui se termine dans l'épiderme en chlamydospores binucléées. La caryogamie a lieu dans cette cellule, suivie d'une mitose ; la partie supérieure de la chlamydospore s'allonge pour former un asque où se différencient huit ascospores, capables de bourgeonner avant leur libération ; les asques, qui forment à la surface de la feuille une couche palissadique, s'ouvrent à maturité par une fente. Les ascospores ainsi libérées peuvent continuer à bourgeonner et à végéter en saprophytes, sous forme levuroïde, avant de provoquer l'infection sur de nouvelles feuilles.

La cloque s'observe également sur les feuilles du poirier *(T. bullata)* et du peuplier, où elle est accompagnée de chlorose *(T. populina)*. D'autres espèces de *Taphrina* s'attaquent aux rameaux qui se ramifient exagérément en touffes denses ou « balais de sorcières » (*T. betulina*, sur le bouleau ; *T. institiae*, sur les pruniers) ; *T. cerasi* peut infecter à la fois les branches (balais de sorcières) et les feuilles (cloque) du cerisier. Un autre type d'infection intéresse les fruits qui sont déformés, comme dans le cas de la « pochette » des prunes causée par *T. pruni*.

PLECTOMYCÈTES

Les Plectomycètes sont des Ascomycètes typiques, pourvus d'un mycélium végétatif cloisonné, à segments uni- ou plurinucléés, et dont les asques se développent à partir d'hyphes ascogènes dicaryotiques issues d'un ascogone. L'ascocarpe, caractéristique des Euascomycètes, est ici rudimentaire, réduit à un lacis de filaments, ou représenté par un cléistothèce clos ; les asques, à paroi mince, sans appareil apical apparent, sont généralement globuleux ou ovoïdes. On y classe les *Érysiphales*, parasites obligatoires d'Angiospermes, dont les cléistocarpes contiennent un petit nombre d'asques claviformes ou ovoïdes, et les *Eurotiales*, pour la plupart saprophytes, qui produisent des asques globuleux de petite taille dans des ascocarpes plus ou moins différenciés. Les *Microascales*, proches des Eurotiales, s'en distinguent par la forme du cléistocarpe, pourvu d'un col et souvent ostiolé. On place aussi parmi les Plectomycètes les *Méliolales*, parasites obligatoires des Végétaux, fréquentes dans les régions tropicales, dont le mycélium est sombre et les ascospores brunes et pluriseptées.

La classe des Plectomycètes n'est sans doute pas un groupe naturel ; elle rassemble en effet des formes convergentes, primitives ou régressives, apparentées à diverses

séries d'Ascomycètes, et dont le caractère commun est l'ascocarpe clos.

Érysiphales

Les *Érysiphales* sont les agents des *oïdiums* ou « blancs » de nombreuses plantes sauvages ou cultivées. Leur mycélium hyalin, généralement superficiel, envoie dans les cellules de l'épiderme des suçoirs ou *haustories*. Les conidies blanches, en courtes chaînes dressées (genre *Acrosporium = Oidium*), forment à la surface des organes un revêtement poudreux caractéristique; elles sont dispersées par le vent et, en saison humide, propagent rapidement la maladie; l'attaque des organes verts altère la fonction chlorophyllienne et diminue la vitalité de la plante. Les cléistothèces bruns, souvent ornés d'appendices rayonnants, apparaissent tardivement et hivernent sur les débris de l'hôte. Les genres se distinguent par le nombre des asques formés dans l'ascocarpe (un seul chez *Podosphaera* et *Sphaerotheca*) et par les caractères des fulcres : simples et droits *(Erysiphe, Phyllactinia)*, enroulés à l'extrémité *(Uncinula)* ou ramifiés dichotomiquement *(Microsphaera, Podosphaera)*. Parmi la centaine d'espèces connues, certaines se comportent en pathogènes graves de Végétaux cultivés. *Erysiphe graminis* présente diverses races spécialisées qui infectent électivement les Céréales : blé, orge, etc. *E. polygoni* se développe au contraire sur de multiples hôtes, surtout des Légumineuses. *Podosphaera leucotricha* est parasite du pommier et autres Pomacées; *Sphaerotheca pannosa* est très commun sur les rosiers. L'oïdium de la vigne *(Uncinula necator)*, maladie redoutable introduite d'Amérique au XIX^e siècle, s'est longtemps manifesté en France sous sa seule forme conidienne *Oidium tuckeri;* il est efficacement combattu par les fongicides soufrés.

Eurotiales

Les Eurotiales, ou *Plectascales* ou *Aspergillales*, constituent un vaste groupe de Champignons microscopiques (quatre-vingts genres), bien connus par leurs formes conidiennes, qui sont parmi les agents les plus fréquents d'altérations biologiques des produits de consommation; on y trouve également des espèces pathogènes de l'homme et des Animaux domestiques, responsables de dermatomycoses. On y inclut, selon les auteurs, de trois à cinq familles caractérisées par des asques globuleux à paroi mince, répartis sans ordre dans un conceptacle le plus souvent rudimentaire, ou dépourvu d'ostiole. On trouve à l'origine de la fructification ascosporée un filament ascogonial, généralement enroulé sur lui-même, et parfois accompagné d'une anthéridie sans doute non fonctionnelle; les hyphes ascogènes dicaryotiques issues de l'ascogone produisent des asques isolés, ou en bouquets, ou en chaînes, à la suite de caryogamies qui ont lieu dans des rameaux indifférenciés, ou à l'extrémité de « crochets dangeardiens » typiques.

Dans la famille des *Gymnoascacées*, les asques sont parfois nus, comme chez *Byssochlamys fulva*, fréquent dans le sol des vergers; ses ascospores résistent remarquablement à la chaleur et aux antiseptiques, de sorte qu'on le retrouve parfois dans les conserves de fruits où il peut causer de sérieux dégâts. Le plus souvent, le groupe serré des asques est entouré d'un lacis de filaments ramifiés enroulés ou ornés d'épines, qui constituent un ascocarpe rudimentaire. Beaucoup de Gymnoascacées fructifient sur des substrats d'origine animale : poils et plumes, laine, mues d'Insectes, os, ainsi que sur le cuir ou le papier. Certaines espèces kératinophiles végètent dans la peau, les ongles, les cheveux ou les poils des Animaux ou de l'homme; ce sont les *dermatophytes* (genres *Trichophyton, Epidermophyton, Microsporon,* formes conidiennes de Gymnoascacées), agents de mycoses superficielles tenaces : teignes, pied d'athlète, onychomycoses.

Les *Eurotiacées* comprennent une cinquantaine de genres, dont les plus communs sont les formes ascosporées de *Penicillium* et d'*Aspergillus*, Champignons imparfaits extrêmement répandus dans la nature. Ces deux genres comportent des espèces strictement conidiennes, et d'autres susceptibles de produire, dans la nature ou en culture, des ascocarpes clos, à paroi plectenchymateuse ou pseudo-parenchymateuse, rapportés à plusieurs

▲ *Sphaerotheca pannosa, très commun sur les rosiers, revêt les feuilles d'une poudre blanche de conidies; c'est l'aspect caractéristique des « oïdiums ».*

▼ *Aspect microscopique d'un ascocarpe d'Uncinula necator, agent de l'oïdium de la vigne; la paroi éclatée du cléistothèce laisse sortir deux asques volumineux contenant les ascospores.*

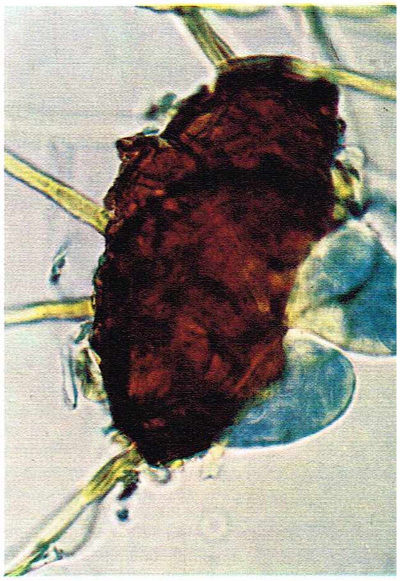

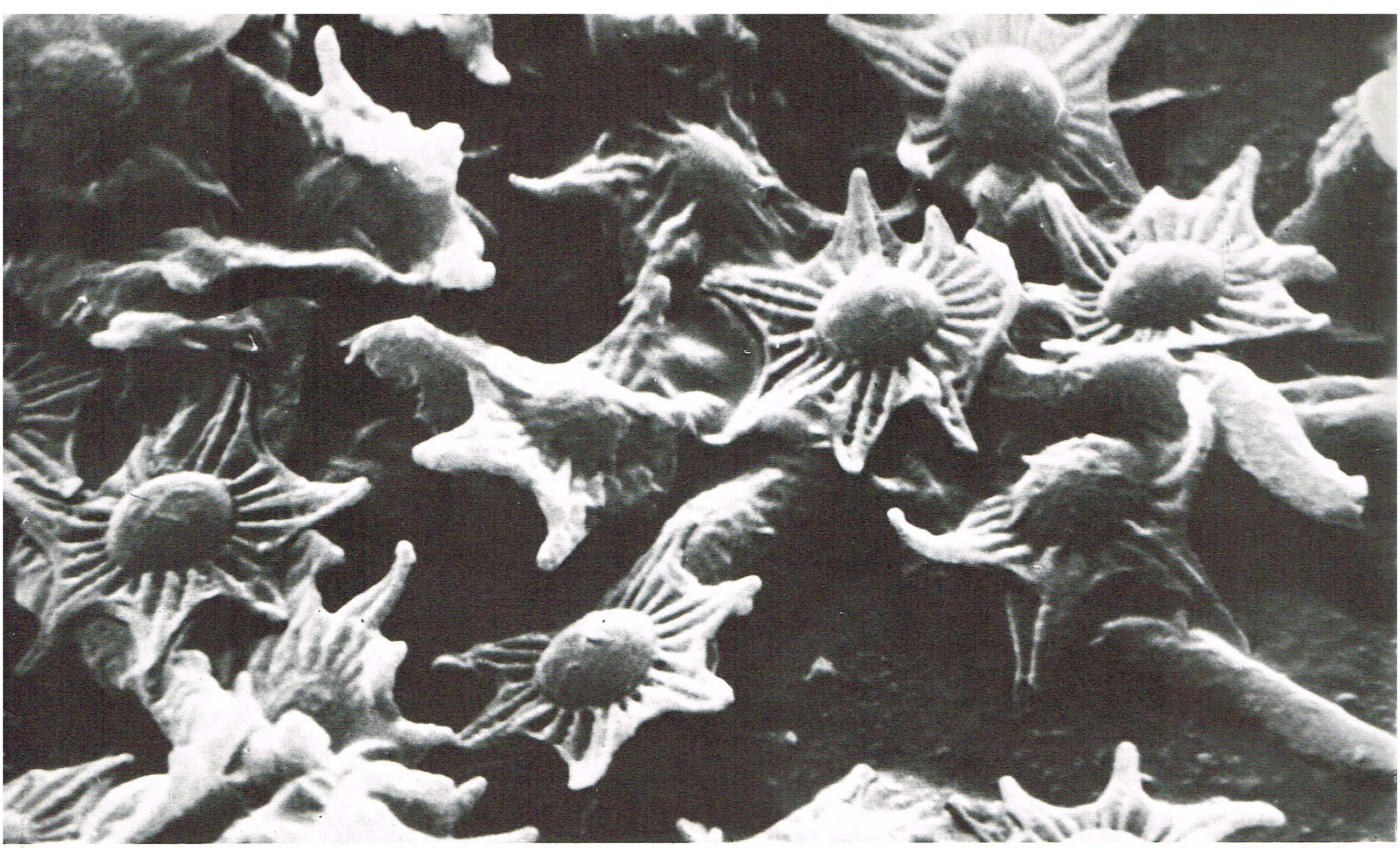

Laboratoire de géologie

▲ *Photographies, au microscope électronique à balayage, des ascospores d'*Aspergillus variaecolor *(en haut) et d'*A. nidulans *(en bas, à gauche) considérablement agrandies.*

genres plectascés : *Eurotium, Emericella (Aspergillus), Carpenteles, Hamigera, Talaromyces (Penicillium).* Les *Aspergillus* sont fréquents dans le sol et contaminent les produits alimentaires, les fourrages, les textiles, etc. Les formes ascosporées *Eurotium* des *Aspergillus* du groupe *glaucus* apparaissent sur les substrats secs ou riches en sucres, comme les confitures et les fruits secs. Certaines souches d'*A. glaucus* et des espèces affines se développant sur les graines (maïs, arachide) produisent une substance carcinogène, l'aflatoxine ; *A. fumigatus*, thermophile, est responsable d'affections pulmonaires de l'homme et des Animaux. Par contre, des *Aspergillus* sont exploités industriellement pour la production d'acide citrique *(A. niger)* ou de diastases *(A. oryzae)*. Les *Penicillium*, dont certaines espèces produisent des cléistothèces, s'accommodent de substrats nutritifs très variés, même les plus pauvres, et sont présents partout dans le sol, dans l'air et sur toutes sortes de résidus. Certains sont spécifiques d'une pourriture des fruits en stock *(P. expansum* sur pommes, *P. digitatum* et *P. italicum* sur agrumes) ou des Champignons supérieurs *(P. paxilli)*. *P. camemberti* et *P. roqueforti* interviennent dans l'industrie fromagère. De nombreuses espèces de *Penicillium* sécrètent des substances antibiotiques dont quelques-unes ont reçu des

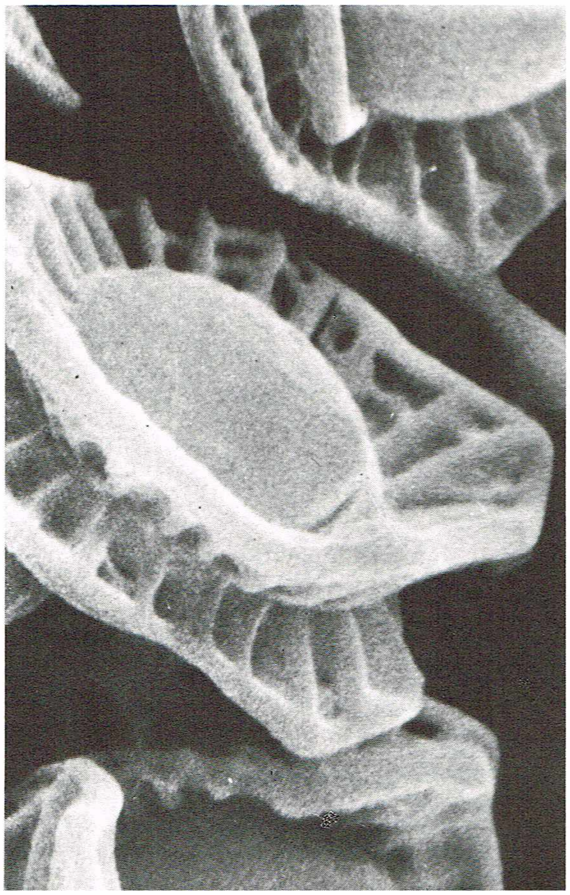

Laboratoire de géologie

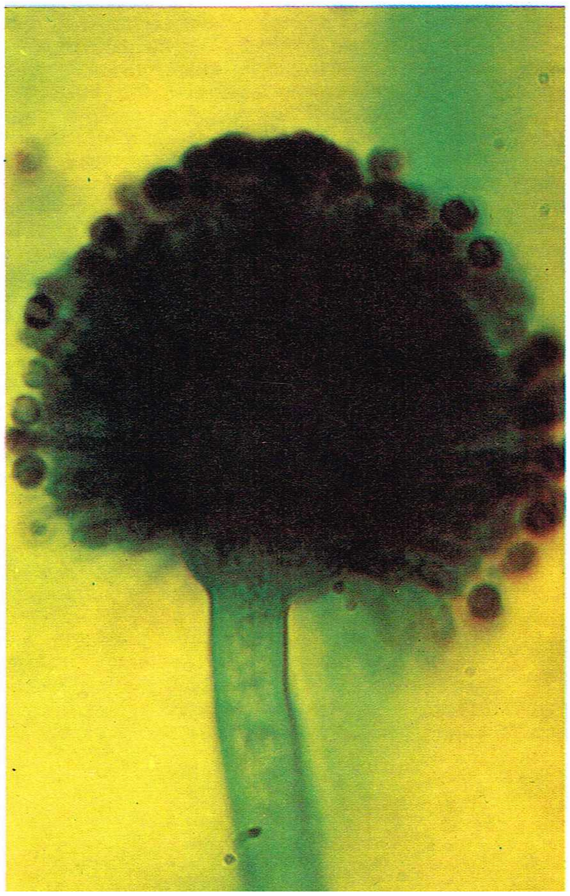

Bavestrelli, Bevilacqua, Prato

▶ *L'aspect « en goupillon » de la tête conidienne d'*Aspergillus niger *est tout à fait caractéristique du genre* Aspergillus *(microphotographie, à droite).*

applications thérapeutiques importantes : pénicilline (*P. notatum* et *P. chrysogenum*), griséofulvine (*P. griseofulvum*), alors que d'autres produisent des toxines dangereuses lorsqu'elles se développent sur des produits alimentaires (*P. islandicum* sur le riz).

Aux Eurotiacées appartiennent encore les *Monascus*, qui sécrètent des pigments rouges ou violacés dans les ensilages contaminés ou sur le riz qui est alors utilisé comme condiment en Extrême-Orient. Les *Thielavia*, qui appartiennent à la flore du sol, ont des ascospores noires; *T. basicola* parasite les racines des Végétaux : tabac, Légumineuses.

Les *Onygénacées*, qui se développent surtout sur la corne, les os ou les plumes, sont remarquables par leurs ascocarpes complexes, pédicellés; *Onygena equina* se récolte sur les carcasses (les cornes et les sabots) des herbivores.

Les *Ophiostomatacées*, rattachées selon les auteurs aux Eurotiales ou à l'ordre voisin des Microascales, sont des Plectomycètes à ascocarpe pourvu d'un col s'ouvrant par un ostiole. Les *Ceratocystis*, avec plus de quarante espèces, sont particulièrement importants par leur pouvoir pathogène (*C. ulmi* est responsable de la « maladie hollandaise » qui décime les ormes), ou comme agents de bleuissement des bois et des pâtes à papier (*C. coerulescens, C. piceae*).

PYRÉNOMYCÈTES

Selon les conceptions modernes, cette dénomination est réservée aux Ascomycètes dont l'ascocarpe est un *périthèce* vrai, contenant des asques unituniqués inoperculés, inclus ou non dans un stroma. Le périthèce (ou *ascothécie*) est un conceptacle subglobuleux ou en forme de bouteille, dont la paroi, généralement mince, interrompue au sommet par un ostiole, s'édifie en même temps que se développe l'ascogone, à partir d'éléments recouvrants issus du pied de cet organe ou du mycélium proche; à maturité, les asques plus ou moins claviformes, entremêlés de filaments stériles ou *paraphyses*, sont groupés en hyménium au fond de la cavité. Cette disposition fondamentale, de type *ascohyménial*, s'édifie selon divers processus, et conduit à des organes fructifères plus ou moins complexes, selon que les périthèces sont portés directement par le mycélium superficiel (*Sordaria, Chaetomium*), inclus dans les tissus de l'hôte (*Gnomonia*), groupés dans des stromas massifs (*Valsa, Diatrype*), portés par des formations stromatiques pédicellées (*Xylaria, Cordyceps, Claviceps*) ou contenus chacun dans une petite sphère stromatique ou *pyrénosphère* (*Rosellinia*).

Ainsi délimitée, la classe des Pyrénomycètes constitue encore le groupe le plus vaste d'Ascomycètes, avec environ six mille espèces réparties en six cent quarante genres. On y reconnaît conventionnellement deux ordres principaux : les *Hypocréales*, à périthèces charnus ou de consistance molle, de teinte claire ou vivement colorés, et les *Sphæriales* à périthèces sombres, pourvus d'une paroi rigide ou carbonacée. Les *Clavicipitales*, avec les genres *Claviceps, Cordyceps, Ephichloe*, détachés des Hypocréales, sont parfois élevées au rang d'ordre, de même que les *Coronophorales* et les *Corynéliales*, d'affinités incertaines. Dans le groupe très vaste des Sphæriales, on est amené à introduire de nombreuses coupures qui délimitent une quinzaine de familles (suffixe *acées*), dont plusieurs sont traitées fréquemment comme des ordres (suffixe *ales*) ; c'est le cas en particulier des *Diaporthacées (Diaporthales)* et des *Xylariacées (Xylariales)* qui illustrent des types originaux d'organogenèse du périthèce.

Beaucoup de Pyrénomycètes possèdent, outre leurs fructifications ascosporées, une ou plusieurs formes conidiennes assurant leur reproduction végétative; un tiers environ des espèces connues de Champignons imparfaits (Deutéromycotinés), dans tous les groupes principaux de leur classification, ont été ainsi rattachés au cycle de développement d'Ascomycètes, et particulièrement de Sphæriales et d'Hypocréales.

Sphæriales

La plupart des cinq mille espèces du groupe sont des Champignons microscopiques qui végètent et fructifient sur des substrats ligneux : bois pourrissants, tiges sèches ou feuilles mortes, où ils se comportent en saprophytes; d'autres sont faiblement parasites ou, exceptionnellement, pathogènes de Végétaux cultivés; un certain nombre appartiennent à la flore du sol ou sont coprophiles; des espèces cellulolytiques (*Chaetomium*) sont des agents d'altération des papiers et cartons humides et des textiles.

La classification des Sphæriales est traditionnellement fondée sur l'absence ou la présence d'un stroma autour des périthèces, la forme, la couleur et la septation des ascospores et d'autres caractères morphologiques; on s'attache actuellement à préciser le mode de développement du périthèce, qui, dans la plupart des cas, se rapporte à l'un ou l'autre des deux principaux types illustrés par les *Xylariales* et les *Diaporthales*. Dans le type *Xylaria*, les

C. Nardin - Jacana

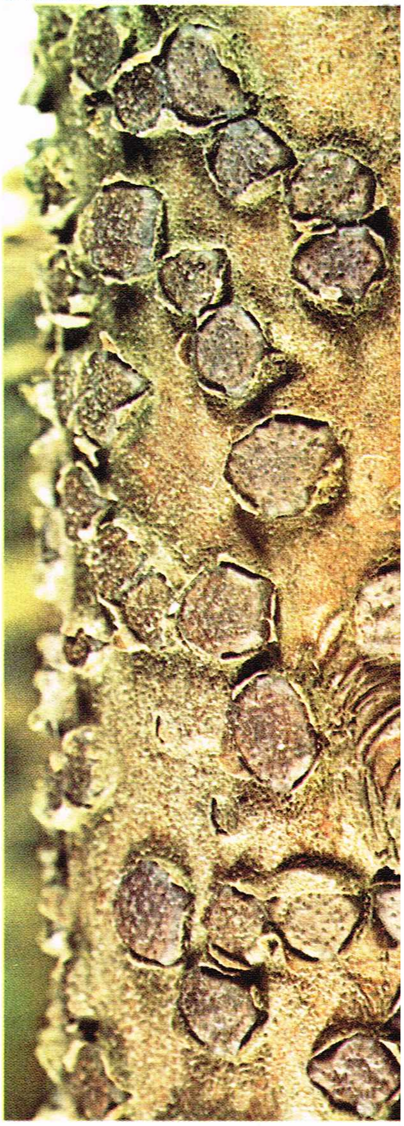

▲ ***Chez* Diatrype disciformis *(sur écorce de hêtre), les périthèces sont inclus dans de petits stromas aplatis, érumpents.***

H. Chaumeton - Jacana

◀ ***Les stromas fertiles de* Xylaria polymorpha *sont des masses noires, dressées en massues, en groupes sur le bois mort.***

H. Chaumeton - Jacana

filaments recouvrants issus de la base de l'ascogone s'organisent autour de celui-ci pour former une paroi, tapissée intérieurement par des filaments libres à leur extrémité, dressés à partir de la base et rayonnants sur les faces latérales, qui constituent les *paraphyses;* le sommet s'étire en un col tapissé de *périphyses,* et s'ouvre plus ou moins tardivement par un *ostiole.* Le tissu ascogène, qui résulte de l'évolution de l'ascogone, occupe la partie inférieure de la cavité du périthèce, et les asques s'allongent entre les paraphyses pour former un hyménium concave continu. Chez certaines formes, les paraphyses sont fugaces, et les hyphes ascogènes sont pelotonnées à la base du périthèce; à maturité, les asques sont groupés en massif rayonnant dépourvu de paraphyses. Dans le type *Diaporthe,* les filaments recouvrants constituent un massif pseudo-parenchymateux dont la partie centrale, jouant le rôle de tissu nourricier, se désorganise au fur et à mesure de la croissance des asques et des paraphyses, mais celles-ci se gélifient avant la maturité des asques; les ascospores sont fréquemment libérées à l'intérieur même du périthèce et en sont expulsées au travers de l'ostiole dans une sorte de gelée.

Les exemples les plus caractéristiques et les plus communs de Sphæriales sont empruntés aux Sordariacées, aux Mélanosporacées (= Chætomiacées) et aux Xylariacées. Les *Sordariacées* (ou *Sordariales*) sont pour la plupart des saprophytes fimicoles ou humicoles, caractérisés par des périthèces libres, de couleur sombre ou semi-transparents, pourvus ou non d'un col; les ascospores noires, généralement unicellulaires, germent au niveau d'un pore germinatif. Les espèces coprophiles, fréquentes sur les excréments d'herbivores, ont leurs spores entourées d'une gaine mucilagineuse (genre *Sordaria*) ou pourvues d'appendices *(Podospora)* qui les fixent solidement aux feuilles des Graminées; elles sont ingérées par les herbivores et ne peuvent germer qu'après passage dans le tractus digestif de ces Animaux; les périthèces mûrissent sur les déjections, et les ascospores sont projetées violemment dans l'air à travers le col de la fructification. *Sordaria fimicola* et *Podospora anserina,* entre autres, ont fait l'objet de multiples expérimentations relatives à la nutrition, au déterminisme de la fructification, au mécanisme de la libération des spores. Les travaux de génétique ont utilisé également les espèces hétérothalliques du genre *Neurospora (N. crassa, N. sitophila). Neurospora sitophila* est bien connu par sa forme conidienne *Monilia sitophila,* qui se développe et sporule abondamment en milieu chaud et humide; dans les boulangeries, il peut contaminer le pain qui se couvre rapidement d'une moisissure orangée.

La petite famille des *Mélanosporacées* (ou *Chætomiacées,* ou *Chætomiales*) est caractérisée par des périthèces isolés, généralement superficiels, subglobuleux et surmontés d'un col plus ou moins long *(Melanospora),* ou dépourvus de col et garnis de longues soies simples, ondulées ou spiralées, ou diversement ramifiées *(Chaetomium);* les asques claviformes ou cylindriques ont une paroi mince, fugace, et les ascospores sortent par l'ostiole en amas ou en long cordon. Certaines espèces de *Melanospora* sont symbiotiques ou parasites d'autres Champignons (*M. parasitica* sur divers Champignons imparfaits), mais les *Chaetomium* et les genres affines *(Ascotricha)* sont saprophytes sur des substrats riches en cellulose; ils sécrètent une cellulase active, capable de dégrader leur support. *Chaetomium globosum* est une des moisissures responsables de l'altération des documents graphiques conservés dans des locaux humides.

Les *Xylariacées* ont des fructifications complexes comportant un stroma de teinte sombre, massif *(Daldinia, Hypoxylon, Rosellinia)* ou dressé, simple ou ramifié *(Xypoxylon);* les périthèces sont enfouis dans la partie superficielle du stroma; les ascospores unicellulaires, noires, sont souvent pourvues d'une fente germinative. Les périthèces sont généralement précédés par une forme conidienne de type *Nodulisporium* ou *Geniculisporium. Daldinia concentrica,* à fructifications brunes, hémisphériques, est parasite du frêne, mais il peut continuer à fructifier sur le tronc et les branches mortes. Les *Hypoxylon* (cent vingt espèces) forment des coussinets hémisphériques ou aplatis, noirs, bruns ou rougeâtres à la surface du bois ou de l'écorce de nombreuses essences. Certaines espèces de *Rosellinia* sont des parasites sévères des racines : *R. necatrix* (forme conidienne *Dematophora*)

s'attaque à la vigne et au pommier, *R. quercina* au chêne. Les *Xylaria*, fréquents dans le monde entier (une centaine d'espèces) et de formes variées, se développent surtout sur le bois mort ou dans l'humus. On reconnaît les stromas cylindriques du *Xylaria hypoxylon*, divisés à l'extrémité en multiples rameaux, sur les souches et les branches mortes des feuillus; le sommet des branches stromatiques se couvre d'une poudre blanche de conidies, les périthèces apparaissent plus tardivement à la base du stroma; *X. hypoxylon* se comporte occasionnellement en parasite (pourriture noire des racines du pommier).

On rapporte également aux Sphæriales *(Diaporthacées)* des genres, tel *Ophiobolus* (à longues ascospores vermiformes, commun sur les vieilles tiges de Graminées), qui comportent des espèces pathogènes de Végétaux cultivés. *O. graminis* est l'agent du « piétin » des céréales. Le genre voisin *Cochliobolus* a pour formes conidiennes des *Bipolaris*, plus connus sous la dénomination d'*Helminthosporium graminicoles*, qu'on trouve à l'origine d'affections du maïs *(C. heterostrophus)*, du riz *(C. miyabeanus)*, et de diverses céréales *(C. victoriae)*.

Hypocréales

Les familles de l'ordre des Hypocréales (ou Nectriales) sont parfois traitées avec les Sphæriales, dont elles diffèrent surtout par la nature charnue et la teinte claire du stroma et de la paroi des périthèces. Toutefois, chez les *Nectria* et quelques autres genres, le développement des périthèces présente des modalités particulières; les paraphyses sont ici d'origine apicale et à développement descendant *(pseudo-paraphyses)*; l'extrémité libre de ces filaments vient s'insinuer entre les jeunes asques qui se développent sur le plancher du périthèce, et se fixent secondairement à la base de la paroi. Les *Nectria* et genres voisins (famille des *Hypocréacées*) ont des formes conidiennes de type phialosporé, appartenant à des genres caractéristiques de Champignons imparfaits *(Cephalosporium, Verticillium, Fusarium, Cylindrocarpon)*, parmi lesquels on trouve des parasites graves de Végétaux cultivés. *Nectria cinnabarina*, commun sur les branches fraîchement coupées d'arbres et d'arbustes variés, forme de petits stromas roses érumpents, d'abord tapissés de filaments conidiens (forme *Tubercularia vulgaris*), qui se garnissent ensuite de périthèces rouge vif. *N. galligena* provoque la formation de chancres sur les branches des pommiers, et *N. ditissima* sur le hêtre. Plusieurs espèces de *Nectria* contribuent à la pourriture des tubercules de pommes de terre, en particulier *Nectria inventa* et sa forme conidienne *Verticillium cinnabarinum*; d'autres *(N. episphaeria)* fructifient sur les vieux stromas de Sphæriales ou sur les polypores *(N. polyporina)*. Le genre voisin *Gibberella*, à périthèces bleus, fournit à l'horticulture une substance de croissance, la *gibberelline*, extraite de *G. fujikuroi* (forme conidienne *Fusarium moniliforme*), agent de la maladie du gigantisme du riz. Les *Hypocrea*, à spores bicellulaires, forment des stromas vivement colorés sur le bois mort ou sur les vieux polypores; leurs formes conidiennes sont des *Gliocladium*, ou le plus souvent des *Trichoderma (T. viride* est le stade imparfait d'*Hypocrea rufa)*; les *Trichoderma* jouent un rôle important dans le sol, comme antagonistes d'autres espèces, y compris des pathogènes. Les *Hypomyces*, à ascospores apiculées, sont surtout des parasites de Champignons supérieurs. Les *Clavicipitacées* (ou *Clavicipitales*) sont caractérisées par des asques cylindriques pourvus d'un gros bouchon apical, et des ascospores vermiformes se divisant parfois en courts segments. La plupart sont parasites de Graminées *(Claviceps, Epichloe)*, d'Insectes ou d'autres Champignons *(Cordyceps)*. *Claviceps purpurea*, agent de l'ergot des céréales (en particulier le seigle), apparaît à la fin de l'été sur diverses Graminées dont les grains infectés sont remplacés par un sclérote fusoïde rougeâtre; l'ergot hiverne sur le sol et germe au printemps suivant en produisant un ou plusieurs stromas pédicellés dont la tête sphérique est bordée de périthèces; les ascospores filiformes, libérées dans l'air, infectent les ovaires des Graminées en cours de développement. Les jeunes sclérotes produisent plusieurs générations de conidies unicellulaires (forme *Sphacelia*) enrobées dans un nectar qui attire les Insectes; ceux-ci les transportent sur d'autres fleurs. Les sclérotes des *Claviceps* contiennent un certain nombre d'alcaloïdes toxiques qui, s'ils sont ingérés par l'homme ou le bétail, peuvent produire de graves désordres vasculaires nerveux et parfois la mort.

Les alcaloïdes de l'ergot de seigle ont toutefois reçu des applications thérapeutiques, dans le traitement des migraines, en obstétrique et en psychiatrie; aux cultures commerciales sur le seigle fait maintenant place une préparation semi-synthétique à partir de l'acide lysergique produit par les cultures de *C. paspali*. Les *Cordyceps* produisent des stromas charnus, pédicellés, de structure semblable à celle des *Claviceps*. La plupart sont parasites d'Insectes ou d'araignées, dont le corps momifié supporte les stromas fructifères; on trouve ainsi les massues orangées de *C. militaris* sur les chrysalides de divers Lépidoptères et Hyménoptères. Quelques espèces de *Cordyceps* sont fongicoles, infectant les fructifications hypogées des *Elaphomyces*.

DISCOMYCÈTES

Les Discomycètes sont caractérisés par leurs fructifications ou *apothécies*, en forme de coupe ou de disque, sessiles ou pédicellées, en principe largement ouvertes et tapissées à la face supérieure par un hyménium palissadique où les asques sont entremêlés de paraphyses. Le groupe comporte environ trois mille espèces (quatre cent vingt-cinq genres), de biologie et d'habitats variés. Beaucoup sont microscopiques, mais un nombre appréciable sont d'assez grande taille, et certaines, comestibles.

Fondamentalement, l'organisation de l'apothécie est de type *ascohyménial*, comparable à celle du périthèce *sensu stricto* des Pyrénomycètes. Elle est constituée par un plexus basal formé d'hyphes entremêlées qui abritent un peloton fertile comprenant un ou plusieurs ascogones pourvus ou non d'un trichogyne. Les hyphes végétatives produisent une couche de paraphyses dressées et les ascogones engendrent, selon le schéma classique, l'appareil sporophytique ascogène. Les asques issus des filaments ascogènes se développent entre les paraphyses, l'ensemble constituant l'hyménium superficiel. La morphologie de l'ascocarpe mûr est très variable, suivant l'origine et le degré de différenciation des tissus qui accompagnent ou protègent l'hyménium.

En général, les bords et la face inférieure du *subiculum* engendrent autour du disque fertile une marge protectrice plus ou moins filamenteuse, ou *parathécium*, parfois doublée par un tissu d'origine stromatique. Dans les formes les moins différenciées, l'hyménium s'organise, sans parathécium, à l'intérieur d'un stroma persistant, dans des logettes qui s'ouvrent largement à maturité. Enfin, l'aspect le plus caractéristique de l'apothécie est celui d'un *discopode* de consistance membraneuse ou charnue, engendré directement par le mycélium ou érigé sur un stroma : le disque fertile est contenu dans une cupule à paroi *(excipulum)* plus ou moins épaisse, sessile ou pourvue d'un pied ou stipe; la cupule peut être renversée et le sommet fertile renflé en tête, et cette structure peut se compliquer de plis et d'alvéoles, ou encore s'invaginer en un organe clos.

Ces caractères servent à définir les différents ordres de Discomycètes, qu'on s'accorde à regrouper, selon le mode de déhiscence de l'asque mûr, en Discomycètes inoperculés et operculés. Chez les *Discomycètes inoperculés*, les ascospores sortent de l'asque par un pore apical délimité par un sphincter (anneau apical); à ce groupe appartiennent des espèces, généralement de petite taille, représentant les *Hélotiales*, *Phacidiales*, *Ostropales*. Chez les *Discomycètes operculés*, il y a formation, au sommet de l'asque (dépourvu d'anneau), d'un opercule délimité par une fente en fer à cheval; ce sont essentiellement les *Pezizales*, qui comprennent les espèces de grande taille les plus remarquables : pezizes, morilles, helvelles. Les *Tubérales*, dont les apothécies sont transformées en tubercules souterrains, sont sans doute apparentées à certains Discomycètes operculés.

Phacidiales

Les Phacidiales, les plus simples des Discomycètes inoperculés, constituent un ordre d'affinités incertaines, parfois confondu avec les Hélotiales. L'exemple le plus

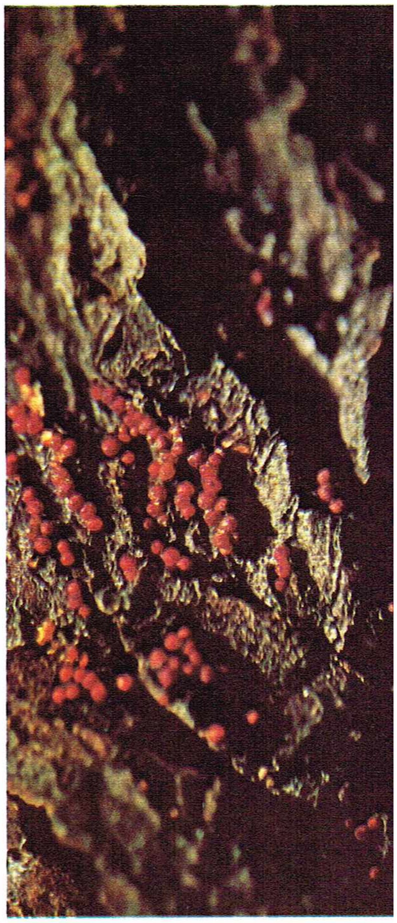

▲ Les Hypocréales ont des périthèces charnus de couleur vive.* Nectria galligena, *agent du chancre du pommier, se manifeste sur l'écorce par de petits conceptacles sphériques rouge vif.

Page ci-contre : ◄* Xylaria hypoxylon *est très fréquent sur les souches et les branches tombées. Les stromas dressés, découpés, sont couverts d'une poussière blanche de conidies; les périthèces apparaissent plus tard à la base des fructifications.

H. Chaumeton - Jacana

Droits réservés

▲ ***La plupart des* Cordyceps, *Hypocréales à stromas fertiles pédicellés, sont des parasites d'Insectes; cependant celui-ci,* C. capitata, *parasite la truffe des cerfs,* Elaphomyces variegatus.**

▶ ***Les stromas ascogènes de* Claviceps purpurea *naissent d'un sclérote enfoui sous terre, qui s'est formé au cours de l'été parmi les grains d'un épi de seigle; c'est l'ergot, maladie bien connue des céréales.***

connu est *Rhytisma acerinum,* qui forme sur la face supérieure des feuilles de sycomore des taches noires, à l'aspect de goudron, constituées par un stroma intraépidermique. En été, le centre de la tache d'injection se garnit de spermogonies pourvues d'un ostiole, qui émettent des spermaties ; l'hiver, dans les feuilles tombées, le stroma se troue de petites cavités aplaties, dont le fond est tapissé d'un hyménium dépourvu de marge. Après l'hiver, les asques mûrs sont mis à nu par la déchirure du toit de la loge stromatique ; les ascospores filiformes, hyalines, à paroi mucilagineuse, sont libérées à travers le pore apical ; elles contaminent alors les jeunes feuilles des érables en pénétrant par les stomates. Les aiguilles des pins sont pareillement parasitées par des *Hypoderma*, analogues aux *Rhytisma*, mais à stromas uniloculaires, et par le *Lophodermium pinastri*, parasite sévère qui provoque la chute massive des aiguilles. Les Conifères sont aussi susceptibles d'être attaqués par des *Phacidium* et *Rhabdocline* à structure plus simple, dépourvus de stroma. Les stromas charnus, gélatineux des Cryptomycétacées se développent sous l'écorce des plantes ligneuses (*Cryptomyces maximus*, sur les saules, *Potebniamyces discolor*, sur le pommier), où ils provoquent la formation de chancres.

Hélotiales

Les Hélotiales sont les Discomycètes inoperculés les plus caractéristiques, produisant des apothécies typiques, généralement de petite taille, et des ascospores non filamenteuses. L'ordre comprend plus de deux cents genres, pour la plupart saprophytes, et la taxonomie du groupe est encore confuse ; on y reconnaît environ huit familles, mais certains genres sont seulement rapportés à l'ordre. Les formes les plus élémentaires sont les *Ascocorticium*, qui n'édifient pas d'apothécies ; l'hyménium indéfini forme des taches veloutées sur les vieilles écorces. Les autres familles produisent des ascocarpes définis, en forme de coupe sessile ou stipitée, sauf chez les *Géoglossacées,* où ils sont en massue plus ou moins aplatie. Les *Orbiliacées*, saprophytes, ont des apothécies de petite taille, de consistance cireuse ; les petites cupules de l'*Orbilia xanthostigma* (1 mm de diamètre) apparaissent en troupes serrées, orange vif, sur les bois pourrissants. Les *Dermatéacées* produisent sous l'écorce des Végétaux des stromas limités qui produisent au centre des conidies, dans des pycnides (Sphæropsidales) ou sur des acervules (Mélanconiales), et ensuite, sur la marge, de très petites apothécies sessiles, d'abord immergées dans l'hôte, puis superficielles. Les *Mollisia* forment des réceptacles minuscules, grisâtres, sur les tiges et les bois pourris ; *Calloria fusarioides*, rouge-orangé, n'est pas rare sur les tiges d'orties. Mais bon nombre de Dermatéacées sont, sous leur forme ascosporée ou plus fréquemment au stade conidien, des parasites de Végétaux supérieurs, agents de chancres ou d'anthracnoses. Les *Diplocarpon* ont pour formes conidiennes des Mélanconiales qui se manifestent sur le rosier *(Actinonema rosae)*, sur le fraisier *(Marssonina fragariae)*, sur le châtaignier *(M. ochroleuca)*. *Cryptosporiopsis malicorticis (= Gloeosporium perennans)* et *C. corticola,* parasites du pommier, sont des formes imparfaites de *Pezicula*. On trouve chez les *Hyaloscyphacées*, à apothécies velues, des parasites de Conifères, mais la plupart sont des saprophytes peu remarquables. Par contre, les *Sclérotiniacées* groupent un nombre important de pathogènes des plantes cultivées, tels les *Sclerotinia* et genres voisins. Leurs apothécies longuement pédicellées se forment sur de petits tubercules noirs ou des sclérotes différenciés dans les tissus de l'hôte. *Sclerotinia curreyana* est parasite des joncs ; *S. tuberosa* vient sur les rhizomes de l'anémone Sylvie et provoque sur les anémones cultivées la pourriture des racines. *Sclerotinia sclerotiorum* est responsable de la pourriture, en cave ou en silo, des tubercules et des racines d'un grand nombre de plantes : carottes, betteraves, pommes de terre, et des tiges de haricots ou de pois. D'autres *Sclerotinia*, *Botryotinia*, *Stromatinia*, se manifestent par une forme conidienne bien différenciée, qui peut suppléer la forme ascosporée ; la production d'apothécies est exceptionnelle. *Sclerotinia fructigena* provoque une pourriture brune puis la momification des pommes et des poires ; la maladie, très fréquente, est transmise par les conidies de type *Monilia (M. fructigena)* qui pénètrent dans le fruit en formation à la faveur de piqûres d'Insectes ou de lésions accidentelles. Une *moniliose* analogue est produite sur les fruits à noyaux (prunes, pêches, cerises, abricots) par *Sclerotinia laxa*, forme conidienne *Monilia cinerea*. Alors que les apothécies de *S. fuckeliana* sont rarement observées, sa forme conidienne *Botrytis cinerea* est abondante sur toutes sortes de Végétaux sénescents ; elle s'attaque également aux tissus jeunes et provoque la « fonte » des semis. *Botrytis cinerea* est responsable de la pourriture grise des fruits (fraises, framboises, tomates) ; sur les raisins très mûrs,

la « pourriture noble » favorise la concentration du jus et le développement du bouquet des sauternes. D'autres *Botrytis* parasitent les bulbes d'oignons, de glaïeuls, etc. On range également parmi les Sclérotiniacées le *Gloeotinia temulenta*, parasite des graines de nombreuses Graminées ; sa forme conidienne *Endoconidium temulentum* confère aux grains infectés des propriétés enivrantes. Les *Hélotiacées* diffèrent des Sclérotiniacées par l'absence de sclérotes à l'origine des discopodes. Parmi les multiples genres et espèces, généralement saprophytes, on remarque, outre les *Helotium (= Cudoniella)*, communs sur les brindilles et les herbes sèches, le *Bulgaria inquinans*, dont les réceptacles en forme de toupies noires, élastiques, croissent sur les troncs de chênes abattus, et le *Coryne sarcoides*, rouge violacé, gélatineux, venant sur le bois mort; *Chlorosplenium aeruginosum* produit de petites cupules membraneuses bleu-vert sur le bois mort, intensément coloré en vert par le pigment (xylindéine) sécrété par son mycélium ; ce bois est parfois utilisé pour sa valeur ornementale en ébénisterie.

Les *Géoglossacées* regroupent les formes clavulées et spatulées de Discomycètes inoperculés, de taille appréciable, toutes saprophytes géophiles. Le chapeau en massue plus ou moins comprimée est en continuité avec le pied chez le *Trichoglossum hirsutum* et le *Geoglossum ophioglossoides*, entièrement noirs, qui peuvent atteindre 8 ou 9 cm de haut et croissent dans les pelouses et les friches ; *Microglossum viride*, plus petit, pousse sur la terre, parmi les mousses et les feuilles mortes. Chez les *Spathularia* (*S. flavida*, sous les sapins en montagne) et les *Mitrula* (*M. paludosa*, au bord des fossés et des marécages), la massue formant le chapeau, de couleur claire, est séparée du pied par un sillon.

Très proches des Hélotiales sont les *Ostropales* (ou Ostropacées), à ascospores filamenteuses, septées, se divisant en segments; les espèces du genre *Vibrissea* sont aquatiques ou semi-aquatiques.

C. Nardin - Jacana

▲ **Melastiza chatteri** *est une minuscule pezize aux apothécies rouge-orangé appliquées sur le sol.*

Pezizales

Les Pezizales sont le seul ordre de *Discomycètes operculés*. Leurs fructifications sont de même type que celles des Hélotiales, mais généralement de plus grande taille et de structure plus complexe. La différence essentielle réside dans le mode de déhiscence des asques, qui s'ouvrent au sommet par un clapet ou un opercule. Les ascospores sont ovoïdes ou globuleuses, et leur paroi souvent rugueuse ou ponctuée. On en connaît environ six cents espèces, toutes saprophytes, terricoles, coprophiles ou lignicoles. Les formes les plus simples sont géophiles, généralement associées aux places brûlées. *Rhizina inflata*, qui vient sur la terre des pinèdes incendiées, offre des réceptacles irréguliers, bosselés, étalés sur le sol où ils sont fixés par des sortes de crampons. Les *Pyronema (P. confluens* et *P. domesticum)* produisent des apothécies sessiles de très petite taille (1 à 2 mm de diamètre), rouge-orangé, en colonies serrées sur les charbonnières récentes, la terre stérilisée par la vapeur et, parfois, le plâtre dans les maisons. On les cultive aisément au laboratoire, et le développement de leurs ascocarpes a fait l'objet de nombreux travaux ; le mode de conjugaison des organes sexuels (ascogone surmonté d'un trichogyne et anthéridie), la différenciation de l'asque au sommet d'un crochet dangeardien, les phénomènes cytologiques qui accompagnent la caryogamie et la méiose, puis l'individualisation des ascospores, ont fourni le schéma type de reproduction des Ascomycètes. Les *Thélébolacées* et les *Ascobolacées* comportent de nombreux genres minuscules et pour la plupart fimicoles, fréquents sur les bouses de vaches desséchées. Les apothécies de *Thelebolus stercoreus* ne produisent qu'un seul asque, mais qui peut contenir un très grand nombre d'ascospores. Les *Ascobolus* forment de petites apothécies lenticulaires aux asques larges, aux spores fortement colorées, pourpre ou violacées, de taille relativement grande ; à maturité, le sommet des asques fait saillie au dessus de l'hyménium, et les ascospores sont vivement projetées jusqu'à 30 cm de distance. Les différentes espèces d'*Ascobolus* sont soit homothalliques, soit hétérothalliques ; celles-ci ont fourni un excellent matériel d'étude pour la mise en évidence du déterminisme hormonal de la fertilisation *(A. furfuraceus)* ou l'interprétation de la structure des gènes *(A. immersus)*. *Coprobia granulata*, également abondant sur les bouses de vaches où il se manifeste par des apothécies orange (3 mm de diamètre), est hétérothallique, mais dépourvu d'organes sexuels différenciés ; la conjugaison est assurée par la fusion de mycéliums de types sexuels opposés. Les *Humariacées*, proches des Ascobolacées, réunissent des genres à apothécies fréquemment garnies de poils ou de soies raides, et qui poussent de préférence sur le sol nu : *Humaria* et *Lamprospora*, de couleurs vives, *Ciliaria*, dont la marge est couverte de poils bruns, *Anthracobia* ocre ou rougeâtres, qui croissent toujours sur les places à charbon, *Geopyxis carbonaria*, qu'on trouve en grand nombre dans les forêts de Conifères incendiées. Le genre *Aleuria* comporte de nombreuses espèces reconnaissables à leurs conceptacles de taille notable (jusqu'à 10 cm), en forme de coupe plus ou moins étalée, presque toujours sessile ; le plus commun, *A. vesiculosa*, brun clair, vient sur les terres riches en matières organiques. Les *Sarcoscypha* et *Sarcosoma* ont des apothécies pédicellées, de consistance ferme, et sont plus particulièrement lignicoles.

Le genre *Peziza*, avec une cinquantaine d'espèces de belle taille, aux apothécies en coupe sessile ou brièvement stipitée, à paroi mince, fragile, caractérise la famille des *Pezizacées*. On consomme, à l'état cru, *Peziza aurantia*.

Les *Helvellacées* et les *Morchellacées* sont caractérisées par leurs ascocarpes pourvus d'un pied bien distinct du chapeau et le plus souvent creux. Chez les helvelles, le chapeau est en forme de coupe dressée ou retournée en selle, souvent lobée, veinée ou plissée. L'oreille de chat, *Helvella crispa*, et l'helvelle lacuneuse sont comestibles, mais de qualité médiocre ; insuffisamment cuites, elles peuvent provoquer des troubles gastro-intestinaux graves, comme les gyromitres ou fausses morilles *(Gyromitra esculenta)* dont on a isolé une toxine thermolabile, la gyromitrine. Les morilles ont un chapeau massif, composé d'alvéoles tapissés par l'hyménium fertile, séparés par des crêtes stériles minces, alignés ou irrégulièrement contournés ; les bords du chapeau adhèrent au sommet du pied dans les morilles vraies, alors qu'ils sont libres chez le morillon, *Mitrophora semilibera ;* le chapeau de *Verpa digitiformis*, à peine ridé, coiffe le pied comme un doigt de gant. Une quinzaine d'espèces ont été décrites dans le genre *Morchella*, apprécié pour ses qualités gustatives ; certaines viennent obligatoirement sous les Conifères *(M. conica) ;* la morille blonde, *M. rotunda*, excellent comestible, se rencontre près des ormes et des frênes ; *M. hortensis* et d'autres formes très estimées

Ruffier Lance - Jacana

▲ ***Les feuilles de sycomore attaquées par* Rhytisma acerinum *sont maculées de taches noires, compactes, constituées par les stromas fertiles du Champignon.***

▼ **Helotium citrinum** ***est un petit Discomycète à cupules jaune d'œuf qu'on trouve sur le bois mort.***

H. Chaumeton - Jacana

recherchent les débris organiques ; leur culture a été tentée avec un succès partiel.

Tubérales

Les Ascomycètes souterrains à fructifications charnues plus ou moins globuleuses constituent l'ordre des Tubérales. Leurs ascocarpes complètement clos ou marqués d'une dépression à la base ou au sommet sont creusés d'une ou de plusieurs cavités, simples ou le plus souvent complexes, tapissées par l'hyménium fertile. Les formes les plus simples (genre *Genea, Pseudobalsamia*) ont un hyménium typique de pezizes, à asques octosporés accompagnés de paraphyses. Les *Tubéracées* (genre principal *Tuber*) sont encore apparentées aux Pezizales, mais leurs fructifications sont profondément modifiées par la biologie souterraine. La truffe est un tubercule charnu délimité par un *péridium* verruqueux, aspérulé ou lisse ; la chair ou *gléba*, odorante, est marbrée de veines les unes stériles, les autres fertiles contenant, en ordre dispersé, des asques ovoïdes, indéhiscents ; ils produisent une à cinq grosses spores noires, ellipsoïdes ou sphériques, à paroi ornée d'épines, de verrues ou de crêtes en réseau. La truffe la plus appréciée pour ses propriétés gastronomiques est la truffe du Périgord, *Tuber melanosporum,* qui vient dans les sols calcaires bien drainés, en association mycorrhizique avec les racines des chênes. On consomme d'autres truffes noires : *Tuber aestivum* (truffe de la Saint-Jean), *T. uncinatum* (truffe de Bourgogne), *T. brumale* (truffe du Piémont) et la truffe blanche, *T. magnatum*, aux fructifications volumineuses, ocracées ; la truffe jaune *(T. rufum)* est inconsommable. *Choeromyces meandriformis,* non comestible, ressemble à une truffe blanche de grande taille ; ses asques contiennent toujours huit spores. Les espèces du genre *Terfezia*, à chair dépourvue de veines fertiles et asques octosporés, sont propres aux régions méditerranéennes, où elles sont associées aux cistes et aux hélianthèmes. On a rapproché des Tubérales les *Elaphomyces* (truffes de cerf) ; il semble qu'elles soient plutôt apparentées aux Eurotiales.

LOCULOASCOMYCÈTES

Dans ce groupe de Champignons (plus de cinq cents genres) autrefois confondus avec les Pyrénomycètes, les asques se forment dans des locules dépourvues de paroi propre (pseudothécies), creusées dans un stroma préexistant. A ce caractère fondamental est associé celui des asques, à paroi fréquemment épaisse, en principe bituniqués et nassascés ; les ascospores sont généralement septées. L'organisation de l'ascocarpe est toutefois très diversifiée. Le type le plus simple comporte un stroma massif, en forme de coussin, percé de cavités qui contiennent chacune un seul asque. Il caractérise l'ordre des *Myriangiales,* Champignons fréquents dans les régions tropicales, parasites de plantes supérieures ou, plus rarement, d'Insectes. Les asques globuleux sont irrégulièrement répartis dans les logettes de l'ascostroma qui est compact chez les *Elsinoe* et les *Myriangium*, gélatineux chez les *Atichia*, qui végètent en saprophytes, sous forme levuroïde, dans les produits sucrés sécrétés par les Insectes vivant sur les feuilles.

Des types d'organisations plus complexes sont illustrés par le genre *Dothidea*, où les asques sont groupés en bouquet sur le plancher de la logette stromatique, et surtout par les *Pleospora*, où à l'intérieur de la locule se différencient des formations stromatiques secondaires : un *ménisque basal*, qui supporte l'appareil ascogène et les asques, et une *cloche apicale* où s'ouvrira un ostiole ; cette dernière engendre des filaments descendants qui viennent se fixer au ménisque ; à maturité, ces filaments stériles, ou *pseudo-paraphyses*, sont détachés et entremêlés aux asques à la base du conceptacle, comme les paraphyses d'un hyménium typique.

La physionomie des ascocarpes est finalement liée au développement et à la morphologie du stroma. Celui-ci peut engendrer des sphères stromatiques superficielles, englobant chacune une logette fertile *(Mycosphaerella, Cucurbitaria) ;* il peut être réduit à ces sphères stromatiques, à paroi peu épaisse, portées directement sur le mycélium *(Pleospora, Leptosphaeria, Venturia) ;* la pseudothécie ascoloculaire ressemble alors au périthèce typique des Ascohyméniaux. Des ascocarpes plats et allongés, s'ouvrant par une fente longitudinale, caractérisent l'ordre des *Hystériales*, représentées par le genre *Hysterium*, commun sur le bois mort, et ses alliés *Lophium* et *Glonium*. Les stromas des *Microthyriales*, foliicoles surtout tropicales, ont un développement « inversé » : les asques sont abrités sous un bouclier stromatique superficiel, à structure radiaire *(Microthyrium, Asterina)*.

La plupart des Loculoascomycètes de nos régions appartiennent aux Dothidéales et aux Pléosporales.

Dothidéales

Les Dothidéales (ou *Pseudosphæriales* ou *Dothiorales*) ont des ascocarpes à développement souvent limité, pluri- ou uniloculaires et fréquemment périthécioïdes, sans formation de pseudo-paraphyses. Les *Dothidea*, aux ascospores brunes, bicellulaires, sont assez communs sur le bois mort des sureaux et autres arbustes. Les *Mycosphaerella* (plus de cinq cents espèces) sont des parasites de feuilles, caractérisés par des sphères stromatiques très petites et très nombreuses groupées sur un stroma qui se développe sous l'épiderme ; certaines sont mâles, produisant des spermaties, les autres femelles, contenant des ascogones pourvus d'un trichogyne ; à maturité, elles possèdent un bouquet d'asques à spores hyalines bicellulaires. Plusieurs espèces de *Mycosphaerella* sont inféodées aux feuilles des chênes et des châtaigniers, d'autres attaquent les feuilles ou les fruits de plantes cultivées (*M. fragariae*, sur le fraisier) ; leurs formes conidiennes sont des Hyphomycétales (*Cladosporium, Ramularia, Cercospora,* etc.) ou des Sphæropsidales *(Phyllosticta, Ascochyta, Septoria)*. *Ascochyta pisi*, forme pycnidienne de *Mycosphaerella* (= *Didymella*) *pinodes*, est l'agent d'une affection sévère des pois (pourriture du collet, anthracnose des gousses).

Pléosporales

Les Pléosporales possèdent des ascocarpes de structure plus complexe, généralement pourvus de pseudo-paraphyses ; ce sont soit des stromas pluriloculaires, soit des sphères stromatiques périthécioïdes ; ils sont inclus dans le substrat, érumpents ou tout à fait superficiels. A cet ordre appartiennent de nombreuses espèces phytophages, saprophytes banaux ou parasites faibles de plantes herbacées (genre *Pleospora, Leptosphaeria*), des agents pathogènes se manifestant sur les fruits *(Venturia, Guignardia)*, et un nombre important de Champignons coprophiles groupés dans la famille des *Sporormiacées*. On connaît plus de cent espèces de *Pleospora*, qui fructifient pour la plupart sur des tiges sénescentes ; leurs ascocarpes sont des pseudothécies formées directement sur le mycélium, et leurs ascospores brunes sont septées transversalement et longitudinalement ;

H. Chaumeton - Jacana

M.-C. Robert - Jacana

▲ *Les réceptacles de* Mitrula paludosa, *en massue jaune-orangé portée par un pied grêle, d'un blanc brillant, se trouvent au printemps sur les feuilles submergées, dans les mares et les fossés.*

◀ Chlorosplenium aeruginosum *forme parfois ses petites apothécies membraneuses bleu-vert sur le « bois vert » coloré par le pigment de son mycélium.*

C. Nardin - Jacana

◀ Sarcoscypha coccinea, *la pezize écarlate, vient en hiver sur les ramilles des arbustes de nos haies.*

H. Chaumeton - Jacana

J.-N. Reichel - Top - Réalités

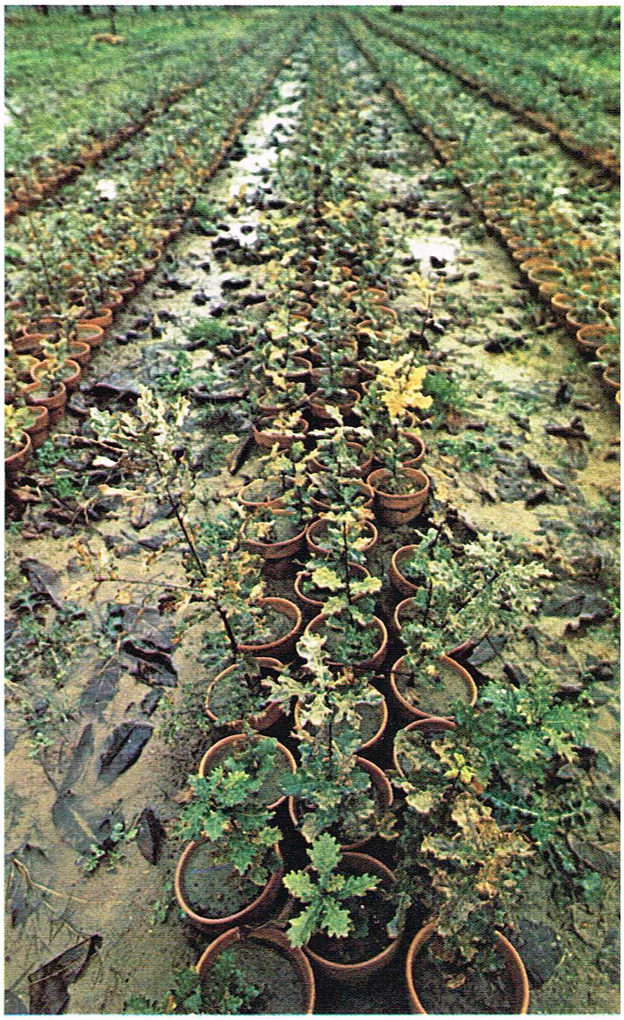

▲ *L'oreille-de-lièvre,* **Otidea onotica**, *est bien reconnaissable à son réceptacle de couleur ocre, fendu comme une oreille.*

▶ *Pour obtenir des truffes, il est indispensable de cultiver en même temps les chênes, dont les racines leur sont étroitement associées en mycorrhizes. On voit ici une jeune pépinière de chênes truffiers en Dordogne.*

leurs formes conidiennes *Stemphylium* et *Alternaria* sont également dictyosporées. *Pleospora herbarum* (f. conid. *Stemphylium botryosum*) est plurivore; il attaque un certain nombre de plantes cultivées et se manifeste par une nécrose des feuilles (trèfle, luzerne), une pourriture noire des fruits, ou l'altération des semences; on le rencontre parfois sur des produits manufacturés cellulosiques : textiles, papiers. *P. betae* est responsable de la « jambe noire » de la betterave. On trouve aussi parmi les *Leptosphaeria*, à ascospores septées transversalement (environ deux cents espèces), des Champignons saprophytes ou faiblement parasites sur les feuilles et les tiges moribondes de nombreux Végétaux herbacés et quelques parasites des Végétaux cultivés : *L. avenaria* s'attaque à l'avoine et *L. coniothyrium* aux Rosacées (chancre de la tige du rosier). *L. maculans,* sous sa forme pycnidienne *Phoma* (=*Plenodomus*) *lingam*, est responsable de sérieux dégâts dans les cultures de colza et d'autres Crucifères. *Venturia inaequalis* (f. conid. *Spilocea dendritica*) et *V. pirina (Fusicladium virescens)* sont les agents des « tavelures » des pommes et des poires. Le « black-rot » de la vigne est provoqué par la Pléosporale *Guignardia bidwellii.*

Les Sporormiacées (genres *Sporormia, Delitschia, Trichodelitschia*) constituent un groupe biologique homogène, inféodé aux excréments et particulièrement aux déjections d'herbivores, comme le sont les Sordariacées parmi les Sphæriales. *Sporormia intermedia*, à ascospores noires quadricellulaires, est l'espèce la plus commune.

Les stades ascosporés des *Fumagines*, qui forment à la surface des feuilles, surtout dans les régions tropicales et subtropicales, un revêtement pruineux d'un noir de suie, ont pour la plupart une structure comparable à celle des *Dothidea* ou des *Pseudosphaeria;* ils sont groupés dans l'ordre des *Capnodiales*. Ces Champignons se comportent le plus souvent en saprophytes, végétant dans le miellat des Insectes (cochenilles, coccides)

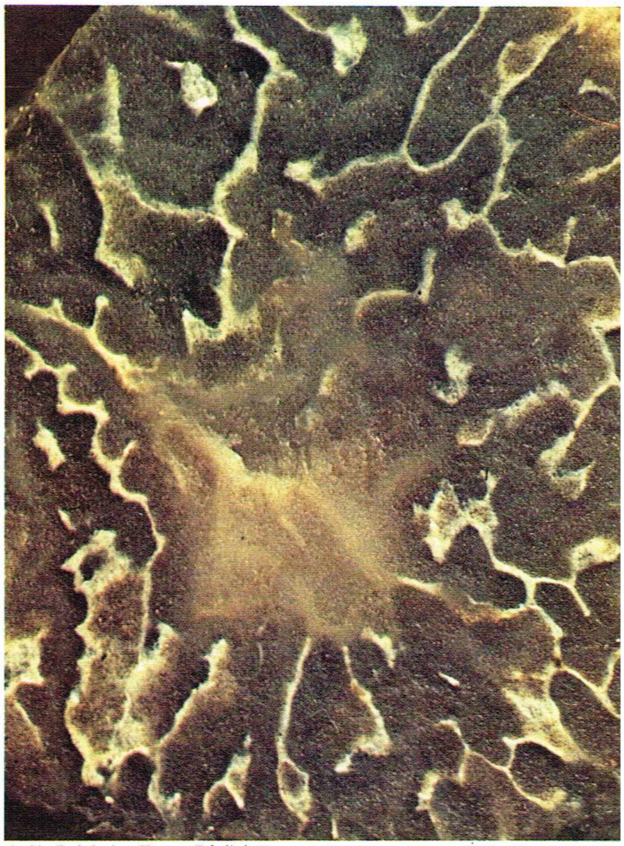

J.-N. Reichel - Top - Réalités

▶ *Coupe dans une truffe du Périgord,* **Tuber melanosporum**; *on remarque les veines blanches qui partagent la glèbe fertile, noir violacé.*

auxquels ils sont associés sur l'hôte ; certains sont hyperparasites ; d'autres (genres tropicaux *Englerula*, *Schiffnerula*) sont parasites superficiels des feuilles qu'ils pénètrent par des haustories. Parmi les espèces présentes dans la zone méditerranéenne citons la fumagine de l'olivier, *Capnodium elaeophilum,* et celle des agrumes, *Limacina citri.*

LABOULBÉNIOMYCÈTES

L'ordre des *Laboulbéniales* groupe des Champignons sans affinités évidentes avec les autres types d'Ascomycètes, et qu'on traite actuellement comme une classe distincte. De très petite taille (1 à 10 mm), généralement brun foncé, ils vivent attachés au corps d'Arthropodes, et en particulier d'Insectes, sans apparemment leur causer de préjudice. Leurs relations avec l'hôte relèvent du commensalisme plutôt que du parasitisme ; on les a qualifiés de « parasites ornementaux ». L'organisation des Laboulbéniales est comparable à celle des Algues Floridées les plus évoluées. C'est un thalle cladomien qui comporte, en principe, un axe segmenté garni de rameaux latéraux (pleuridies) qui portent les organes sexuels. Il est fixé au tégument de l'hôte par un réceptacle basal, parfois pourvu de rhizoïdes. Chez certaines espèces, tel *Stichomyces capensis,* l'axe, relativement long, porte une paire d'appendices par segment ; le rameau inférieur est femelle, les suivants mâles, les derniers stériles ; les formes les plus simples, tel *Stigmatomyces baeri,* qui vit sur la mouche domestique, ont un thalle réduit à deux cellules, l'une fixée à l'hôte, l'autre portant un rameau femelle et un rameau mâle.

L'organe femelle, renflé, contient un ascogone généralement surmonté d'un trichogyne ; les organes mâles sont des rameaux septés transversalement, simples ou fourchus, garnis, au niveau des cloisons, de phialides qui jouent le rôle d'anthéridies et produisent des spermaties (gamètes mâles). L'ascogone est fertilisé par les spermaties que capte le trichogyne ; il émet une hyphe ascogène dicaryotique terminée en crochet dangeardien où s'accomplissent, selon le schéma classique, la caryogamie, puis la méiose, conduisant à la formation de huit ascospores fusoïdes (quatre ascospores bicelullaires chez

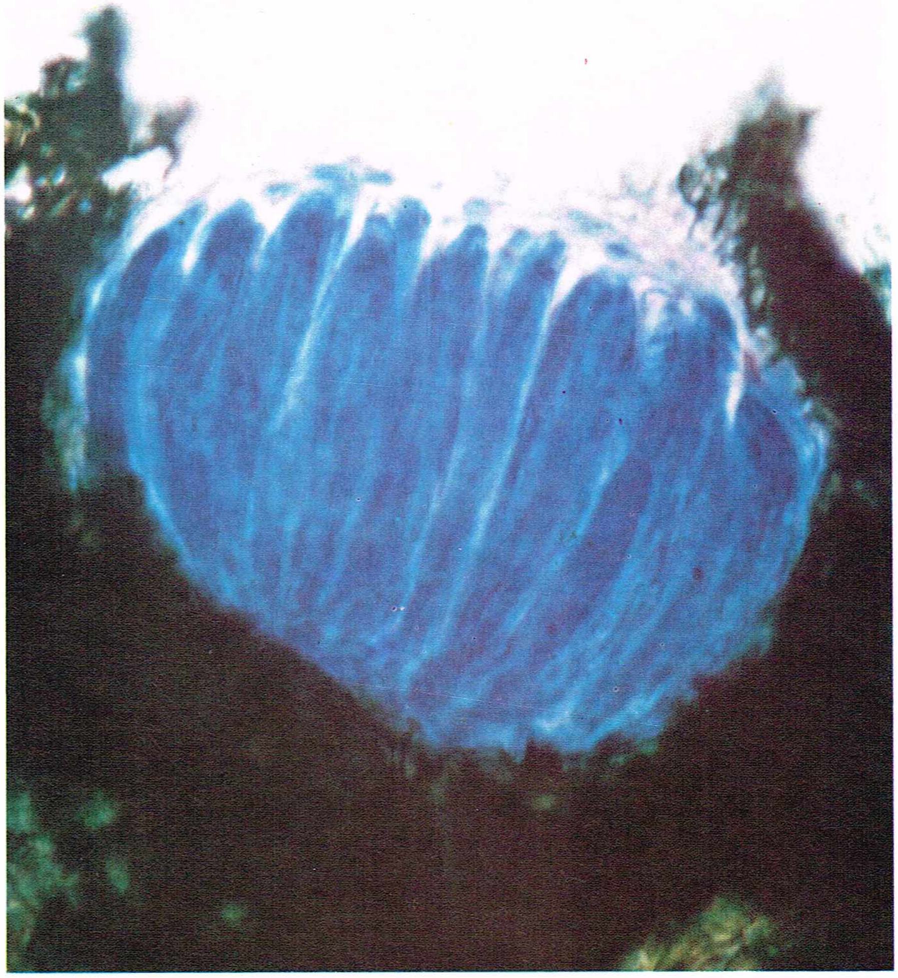

▲ *Coupe dans une feuille de poirier parasitée par* Mycosphaerella pyri *; la fructification du Champignon est une sphère stromatique contenant un bouquet d'asques.*

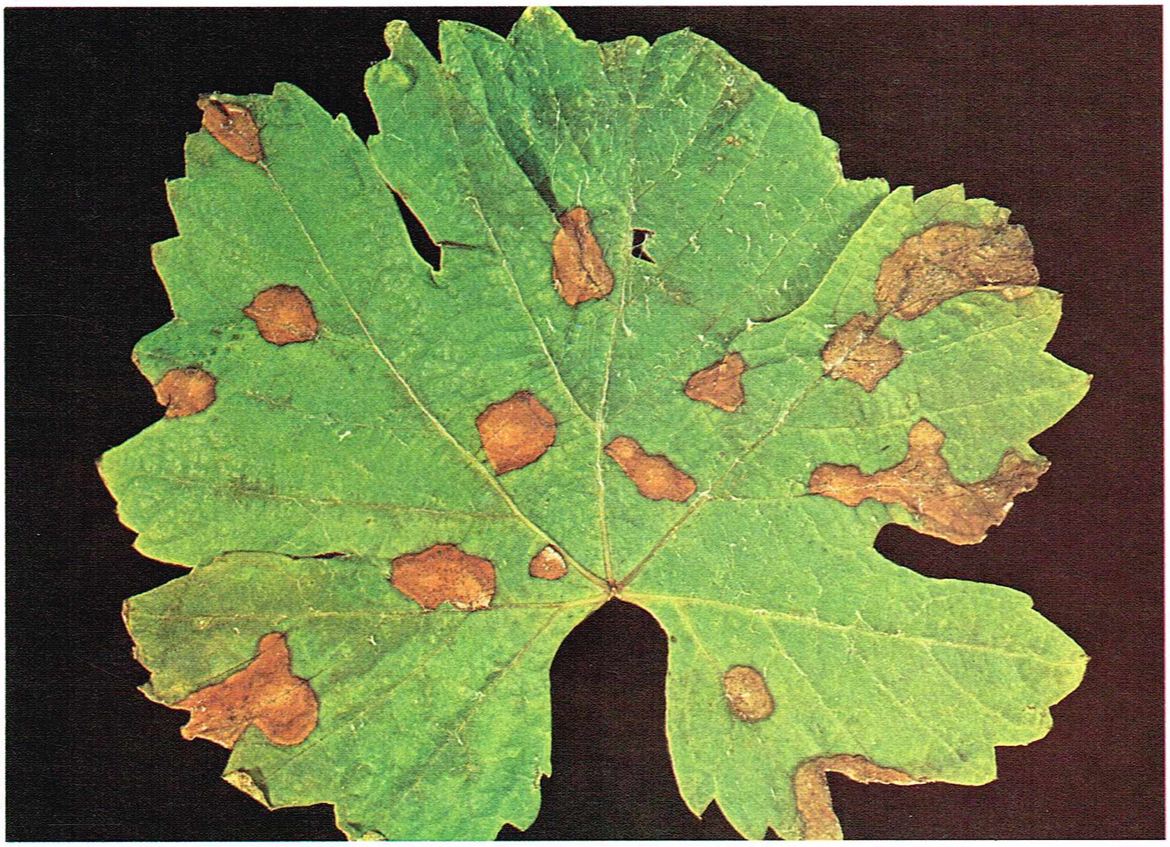

◀ Guignardia bidwelli *(Pléosporale) est un parasite redoutable de la vigne, responsable du « black-rot ».*

▲ ***Taches de tavelure* à Venturia inaequalis *sur une pomme.***

▼ ***Les taches d'anthracnose, fréquentes sur les gousses de pois, sont dues au Champignon parasite* Ascochyta pisi.**

Stigmatomyces baeri). L'ascocarpe fixé au thalle, toujours très réduit, contient selon les cas un seul asque ou un bouquet d'asques porté par un petit massif de cellules. Beaucoup de Laboulbéniomycètes sont ainsi monoïques, mais certains genres produisent leurs organes mâles et femelles sur des individus distincts. Comme dans les autres groupes d'Ascomycètes, les anthéridies peuvent faire défaut ou produire des spermaties non fonctionnelles. Enfin certaines espèces *(Amorphomyces)* sont sans doute hétérothalliques.

Les Laboulbéniales sont représentées par environ cent vingt-cinq genres (mille cinq cents espèces) répartis en trois familles. Les *Cératomycétacées* vivent surtout sur des Coléoptères aquatiques; le genre *Ceratomyces* est presque exclusivement américain. Les *Laboulbéniacées* sont représentées par des genres cosmopolites et très vastes : *Laboulbenia* (quatre cents espèces), *Stigmatomyces* (une centaine d'espèces) et d'autres de répartition plus restreinte (*Rhizomyces,* africain). Les *Peyritschiellacées* comportent de nombreux genres *(Rickia, Stichomyces...)*, pour la plupart tropicaux.

Le mode de vie particulier des Laboulbéniales, stric tement inféodées aux téguments des Arthropodes, met en jeu des mécanismes d'adaptation originaux, qui se traduisent en particulier par une localisation très limitée du Champignon sur l'Insecte qui le véhicule. Ainsi, le *Stigmatomyces baeri* qui se manifeste par un revêtement grisâtre sur la mouche domestique est implanté sur la partie antérieure, tête et thorax, des individus femelles, mais sur les pattes s'il s'agit de mouches mâles; cette disposition est favorable à la transmission du Champignon d'Insecte à Insecte lors de l'accouplement.

BASIDIOMYCOTINÉS

Le groupe des Basidiomycètes *sensu lato* renferme à peu près tous les organismes que l'on désigne communément sous le nom de « Champignons », et plus particulièrement les Champignons à chapeau, agarics et bolets, parmi lesquels les amateurs recherchent les espèces comestibles; mais aussi les clavaires, les chanterelles, les vesses-de-loup et les Champignons des arbres et du bois, ou polypores; au moins six mille espèces, pour la plupart de taille appréciable, qui offrent une grande diversité de formes, de couleurs et de structures. Beaucoup sont des saprophytes, qui concourent activement à la décomposition des déchets organiques : feuilles, bois, fumier; leur mycélium entre fréquemment en association symbiotique (mycorrhizes) avec les racines de multiples Végétaux; plus rarement, il se comporte en parasite sévère, comme c'est le cas pour l'armillaire. Certains sont les principaux agents de la destruction des arbres sur pied ou des bois d'œuvre (mérule). A ces Champignons macroscopiques, il faut joindre un nombre presque aussi important d'espèces microscopiques appartenant à deux groupes de pathogènes des Végétaux supérieurs, les rouilles et les charbons.

Tous ces organismes ont en commun la présence d'une *baside* émettant des *basidiospores* exogènes, au terme de la reproduction sexuée. A la différence des Ascomycètes typiques, les Basidiomycètes sont dépourvus d'organes sexuels différenciés. L'appariement des noyaux sexuels résulte soit de la fertilisation d'un filament mycélien par une cellule libre, spermatie ou oïdie, soit de la simple conjugaison de deux cellules indifférenciées appartenant à deux thalles compatibles ou à un même mycélium. Comme chez les Ascomycètes, la fusion nucléaire ne suit pas immédiatement la plasmogamie; elle est précédée par un stade à *dicaryons* où les deux noyaux complémentaires continuent à se diviser simultanément en restant appariés. Alors que, dans les formes ascosporées, le stade dicaryotique est limité à l'hyphe ascogène, il édifie chez les Basidiomycètes un *mycélium secondaire* dont la vie végétative peut se prolonger pendant un temps appréciable avant la production des carpophores; fréquemment, le mycélium secondaire est pourvu, au niveau des cloisons, de *boucles,* ou anses d'anastomose, qui assurent la répartition des noyaux par paires conjuguées dans chaque cellule du thalle. Le mycélium secondaire, comme le mycélium primaire, est susceptible de se reproduire végétativement au moyen de conidies mais, sauf chez les rouilles et certains charbons, ces formes imparfaites ne sont pas fréquentes ni vraiment caractéristiques.

Quatre-vingt-dix pour cent environ des Basidiomycètes sont hétérothalliques. Chez des espèces telles que *Coprinus comatus* ou *Piptoporus betulinus,* les myceliums sont de deux types sexuels seulement; l'hétérothallisme est alors *bipolaire.* Dans d'autres cas *(Coprinus cinereus, Schizophyllum commune),* il est *tétrapolaire;* il existe quatre sortes de mycéliums (AB, Ab, aB, ab), et la conjugaison n'est possible qu'entre éléments ayant des formules complémentaires : (AB) et (ab), (aB) et (Ab); ainsi, selon les lois de Mendel, un quart seulement des croisements entre mycéliums d'origine monospore provenant d'un même basidiocarpe sont fertiles.

Le *développement de la baside* s'effectue selon le même processus que celui de l'asque, à partir d'une cellule à dicaryon. La jeune baside, d'abord pourvue de deux noyaux haploïdes complémentaires, est le siège de la caryogamie, puis de la méiose; en principe, il n'y a pas de mitose supplémentaire, et la baside engendre seulement quatre basidiospores : chaque noyau migre dans un petit prolongement de la cellule mère, dont l'extrémité se renfle en vésicule. Les basidiospores mûres sont ainsi portées à l'extérieur de la baside par un stérigmate plus ou moins long, conique ou filiforme, droit ou courbé.

La baside typique, ou eubaside, ou *homobaside,* caractéristique des *Homobasidiomycètes* (qui groupent les principaux ordres de Basidiomycètes macroscopiques), est une cellule non septée, cylindrique ou en massue, qui porte les quatre basidiospores groupées à son sommet sur des stérigmates généralement courts. Les *Hétérobasidiomycètes* produisent des basides dont la disposition s'écarte plus ou moins nettement de ce schéma fondamental. Ainsi les *Dacrymyces* et les calocères ont des basides longues et étroites, bifides au sommet; elles ne portent que deux basidiospores sur de longs stérigmates. Chez les trémelles, la baside mûre est divisée longitudinalement par deux cloisons en croix, et comporte donc quatre cellules pourvues chacune d'une basidiospore; chez les auriculaires, la septation est transversale.

Dans tous ces types de basides, la structure définitive, qu'elle soit uni- ou pluricellulaire, provient directement de l'évolution de la cellule mère, qui passe successivement par les stades de la *probaside* (où les deux noyaux fusionnent) et de la *métabaside* (où se produit la méiose). Chez les Urédinales (rouilles) et les Ustilaginales (charbons), la probaside est une cellule dormante à paroi épaisse (téliospore ou spore charbonneuse), qui germe en produisant un filament mycélien, ou *promycélium* simple, ou le plus souvent septé transversalement, où s'effectue la méiose; le promycélium (qui fonctionne donc comme métabaside) porte ensuite les basidiospores, sessiles ou sur des stérigmates.

H. Chaumeton - Jacana

Les caractères de la baside fondent la division classique des Basidiomycètes en Hétérobasidiés et Homobasidiés. Les Hétérobasidiomycètes comprennent à la fois des formes à probaside et métabaside dissociées (Ustilaginales et Urédinales), des formes à baside cloisonnée ou phragmobaside (Auriculariales et Trémellales), et des formes à hétérobaside non septée (Tulasnellales et Dacrymycétales, rassemblées parfois sous le nom de Protoclavariales). Les Homobasidiomycètes constituent un groupe homogène quant à la nature de la baside; mais une coupure fondamentale est introduite par le mode de développement et la disposition du carpophore. Chez les *Hyménomycètes,* celui-ci est largement ouvert, au moins au terme de son développement (qui est gymnocarpique ou semi-angiocarpique), exposant librement les basides stratifiées en hyménium (Agaricales, Astérosporales, Bolétales, Aphyllophorales); à maturité, les basidiospores sont projetées violemment, fonctionnant comme des *ballistospores.* Chez les *Gastéromycètes*, le développement est angiocarpique; l'hyménium reste enfermé dans le basidiocarpe, et les spores sont dispersées passivement (Gastérales, Phallales).

Ce schéma de classification reste actuellement valable dans son principe, et les spécialistes s'accordent sur la délimitation des ordres les plus caractéristiques. Mais certains auteurs proposent une hiérarchie des critères un peu différente. Les Urédinales et les Ustilaginales, par les caractères originaux de l'élément sporogène et par l'absence de basidiocarpe proprement dit, comme par les particularités de leur cycle biologique, méritent d'être groupées dans une classe autonome, celle des *Hémibasidiomycètes* (ou Téliomycètes). De même, par analogie avec les bases de la classification des Ascomycotinés (où la nature du sporocarpe délimite les classes), les Gastéromycètes (Gastérales, Phallales et ordres affines), à hyménium enfermé dans un conceptacle, sont élevés au rang de classe. Les Hyménomycètes, de conception large, accueillent toutes les formes à hyménium libre; il faut alors y distinguer deux sous-classes, selon que les basides sont cloisonnées (phragmobasides) ou entières (holobasides). Aux *Phragmobasidiomycétidés* appartiennent les Trémellales et les Auriculariales; quant aux Dacrymycétales et Tulasnellales, à basides hétérotypiques, mais entières, elles rejoignent les Hyménomycètes *sensu stricto,* homobasidiés, dans la sous-classe des *Holobasidiomycétidés.*

HÉMIBASIDIOMYCÈTES

On groupe sous cette dénomination deux ordres de Champignons parasites des Végétaux, les *Urédinales* (rouilles) et les *Ustilaginales* (charbons), dont un bon

▲ *Un Basidiomycète « à lamelles », l'armillaire couleur de miel* **(Armillariella mellea)**, *qui pousse en touffes denses sur les souches.*

▼ *Les Basidiomycètes à hyménium tubulé sont illustrés ici par le bolet* **Boletus aereus** *var.* **pinicola.**

Archives I.G.D.A.

Atlas photo

nombre sont des agents pathogènes redoutables pour les plantes de grande culture. Ils diffèrent des autres Basidiomycètes par l'absence de sporocarpe organisé; les basides sont produites à la manière d'un tube germinatif *(promycélium)* par une cellule spécialisée, à parois épaisses, qualifiée de *téleutospore* (ou téliospore) chez les rouilles, de *chlamydospore* (ou spore charbonneuse, ou ustilagospore) chez les charbons. Chez les Urédinales, la baside, septée transversalement, porte des basides typiques (généralement deux ou quatre) sur des stérigmates. Chez les Ustilaginales, la baside, entière ou septée, produit des spores sessiles (sporidies) en nombre indéterminé, parfois bourgeonnantes.

Les rouilles et les charbons diffèrent dans le déroulement de leurs cycles biologiques, et il n'est pas certain que les deux ordres soient étroitement apparentés.

Urédinales

On recense environ cinq mille espèces de rouilles (cent vingt-cinq genres), inféodées aux Phanérogames et Fougères. Ce sont des parasites stricts (quoique l'on ait récemment obtenu en laboratoire le développement de *Puccinia graminis* et de *Gymnosporangium juniperi-virginiana*) ; ils sont généralement localisés aux parties aériennes de la plante hôte ; leur mycélium chemine entre les cellules où il envoie des suçoirs ou haustories. Certaines rouilles sont étroitement spécifiques, alors que d'autres parasitent une large gamme de Végétaux. Le cycle de développement des rouilles est complexe ; il comporte en principe cinq stades successifs (conventionnellement numérotés de 0 à IV) et cinq sortes de spores. Le cycle complet caractérise les rouilles *macrocycliques ;* si un stade fait constamment défaut, ou plusieurs, l'espèce est dite *microcyclique*. Une autre particularité biologique des Urédinales est que l'accomplissement de leur cycle peut nécessiter la présence de deux hôtes différents, généralement sans affinités systématiques; l'un accueille les stades 0 et I, gamétophytiques, l'autre les stades suivants, sporophytiques. A ces rouilles *hétéroïques* (ou hétéroxènes) on oppose les espèces *autoïques* (ou autoxènes) qui ne connaissent qu'un seul hôte.

Le cycle complet des rouilles macrocycliques hétéroïques est illustré par *Puccinia graminis,* agent de la rouille noire des tiges de Graminées, en particulier le blé, dont l'hôte alternatif est l'épine-vinette *(Berberis) ;* cette espèce est, en outre, hétérothallique.

La germination d'une basidiospore (provenant du blé) se manifeste au printemps à la surface d'une feuille de *Berberis* par une tache d'infection produite par le mycélium haploïde qui envahit l'épiderme. Il y forme des conceptacles (*pycnies* ou spermogonies) comparables aux fructifications des Sphæropsidales et produisant des *pycniospores* ou spermaties ; c'est le *stade 0*. Les spermogonies sont accompagnées d'hyphes flexueuses, ou filaments récepteurs, en relation avec un massif de cellules logé dans le mésophylle, ou *proécie*. Les filaments récepteurs d'une spermogonie captent les spermaties d'un thalle de sexualité complémentaire, qui cheminent jusqu'à la proécie où les noyaux s'apparient en dicaryons.

Le *stade I*, à dicaryons, est caractérisé par les *écidies* groupées à la face inférieure de la feuille d'épine-vinette. Elles ont l'aspect de petites coupes limitées par un péridium fibreux, blanchâtre, et contiennent des files dressées de spores jaune-orangé; les *écіospores* unicellulaires, libérées à maturité, fonctionnent comme des conidiospores dicaryotiques. Incapables de germer sur l'épine-vinette, elles induisent sur les feuilles ou les tiges du blé le *stade II* à *urédies* et *urédiospores*. Comme chez l'épine-vinette, le mycélium parasite végète entre les cellules de l'hôte, qu'il pénètre au moyen de suçoirs. L'infection se manifeste sur le blé encore vert par des pustules allongées, érumpentes, tapissées de spores pédicellées, jaune d'or, unicellulaires et pourvues de pores germinatifs. Les urédiospores, toujours dicaryotiques, sont des spores de répétition qui, entraînées par le vent, propagent la maladie ; en germant, elles engendrent en effet un mycélium binucléé et une nouvelle génération d'urédies. C'est une seconde forme conidienne, assurant la reproduction végétative du mycélium à dicaryons.

Le *stade III* apparaît vers la fin de l'été ; aux urédies de teinte vive (rouille orangée) se substituent progressi-

vement des *télies* à *téliospores* (ou *téleutospores*) brunes (« rouille noire »). Les téleutospores de la rouille du blé sont pédicellées, bicellulaires, à parois épaisses et fortement pigmentées. Chaque cellule est d'abord pourvue de deux noyaux qui, au terme du développement, fusionnent pour former un noyau diploïde ; elle se comporte donc comme une *probaside*.

Grâce à sa paroi résistante, la téliospore hiverne sur les chaumes, et ne germe qu'au printemps suivant *(stade IV)*. Chaque cellule de la spore émet un filament mycélien où le noyau diploïde subit la méiose ; ce *promycélium* (qui correspond à la métabaside) se divise par des cloisons transversales en quatre cellules uninucléées haploïdes. Chacune produit, sur un court stérigmate, une *basidiospore* qui, éjectée brutalement (« ballistospore »), peut rencontrer une feuille de *Berberis* où elle induit un nouveau cycle.

Le cycle réduit des Urédinales microcycliques offre de multiples combinaisons. Chez les *Gymnosporangium* (hétéroïques) ou chez *Xenodocus carbonarius* (autoïque, sur la pimprenelle), les urédiospores font défaut. Les *Endophyllum* ne produisent ni urédiospores, ni téliospores ; la fusion des noyaux accompagne la germination des éciospores binucléées, suivie de l'émission d'un promycélium générateur de quatre basidiospores. Les espèces homothalliques sont souvent dépourvues de pycnies ; les noyaux appariés de la dicaryophase appartiennent à deux cellules quelconques d'un même thalle haploïde. Chez *Puccinia malvacearum*, qui parasite les mauves et les roses trémières, le cycle est réduit à l'extrême ; on ne connaît dans ce cas ni éciospores, ni urédiospores ; aussitôt après la dicaryotisation, le mycélium produit des télies et des téliospores.

La classification des Urédinales en familles et la distinction des genres sont surtout fondées sur les caractères des télies et des téliospores, qui sont extrêmement diversifiés. Les *Pucciniacées* ont des téleutospores pédicellées. Elles sont bicellulaires dans le vaste genre *Puccinia*, qui comporte plusieurs milliers d'espèces hétéroïques ou autoïques, macro- ou microcycliques, parasites de multiples Angiospermes. Certaines provoquent chez les Céréales des affections souvent graves : rouille de l'orge (*P. hordei*, écies sur l'ornithogale), rouille couronnée de l'avoine (*P. coronata*, écies sur la bourdaine), rouille noire du blé *(P. graminis)*, etc. Les *Uromyces* ne s'en distinguent que par les téleutospores unicellulaires ; *U. dactylidis*, parasite de Graminées fourragères, produit ses éciospores sur les renoncules. On rencontre sur les Rosacées des *Triphragmium* (*T. ulmariae*, écies « urédinoïdes », à spores de répétition, sur la reine-des-prés) et des *Phragmidium*, à téliospores pluriseptées ; *P. violaceum* se manifeste sur les feuilles des ronces et des framboisiers par des macules pourpres. Les téliospores bicellulaires, à longs pédicelles, des *Gymnosporangium* sont produites dans des télies gélatineuses, dressées, qui ressemblent à de petites clavaires ; elles affectent les rameaux des genévriers, qui réagissent à la présence du parasite par une hypertrophie de leurs tissus ; les écies de type *Roestelia* (en cornes à paroi dilacérée) caractérisent les « rouilles grillagées » des Pomacées, tels les poiriers *(Gymnosporangium sabinae)*, les sorbiers *(G. juniperinum)*, etc.

Chez les *Mélampsoracées*, les téliospores unicellulaires sessiles, serrées les unes contre les autres, forment une croûte sous-épidermique ; les écies dépourvues de péridium, de type *Caeoma*, sont fréquemment parasites de Conifères. *Melampsora pinitorqua* est l'agent de la « rouille tordeuse » des pins ; *Melampsorella caryophyllacearum* (télies sur les céraistes et stellaires) provoque chez le sapin la formation de « balais de sorcières ».

Les *Coléosporiacées*, proches des précédentes, sont maintenant rapportées à une seule espèce, *Coleosporium senecionis*, qui est remarquable par l'absence de téliospores ; leurs télies, fréquentes sur les feuilles de tussilage et les séneçons, engendrent directement des phragmobasides : les écies, de type *Peridermium*, parasitent les aiguilles des pins.

Ustilaginales

Les Ustilaginales (une cinquantaine de genres, huit cent cinquante espèces) sont, comme les Urédinales, des endophytes parasites de plantes à fleurs, à l'exception

Bourgeois

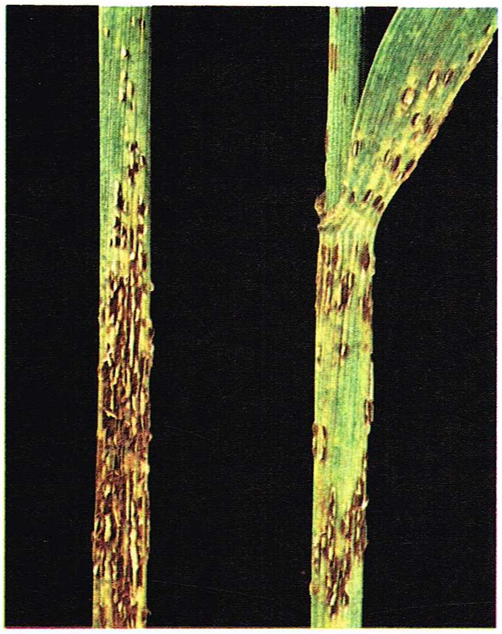

Droits réservés

P. Starosta - Atlas photo

◀ *Page ci-contre :* Coriolus versicolor, *qui étale ses chapeaux en éventails délicatement zonés sur un tronc moussu, appartient au groupe des polypores.* ▲ Aecidium berberidis. *Ces petites taches jaune d'or sur les feuilles d'épine-vinette sont les écidies (stade I) de la rouille du blé,* Puccinia graminis *(en haut). Le stade II (urédies) de* Puccinia graminis *se développe au début de l'été en stries orangées sur les tiges de blé. Un aspect caractéristique du « charbon » du maïs. L'épi est entièrement transformé en une masse noire irrégulière de spores d'*Ustilago maydis. ▼ *Schéma de développement d'une baside avec ses quatre basidiospores, sur le mycélium secondaire dicaryotique d'un Basidiomycète.*

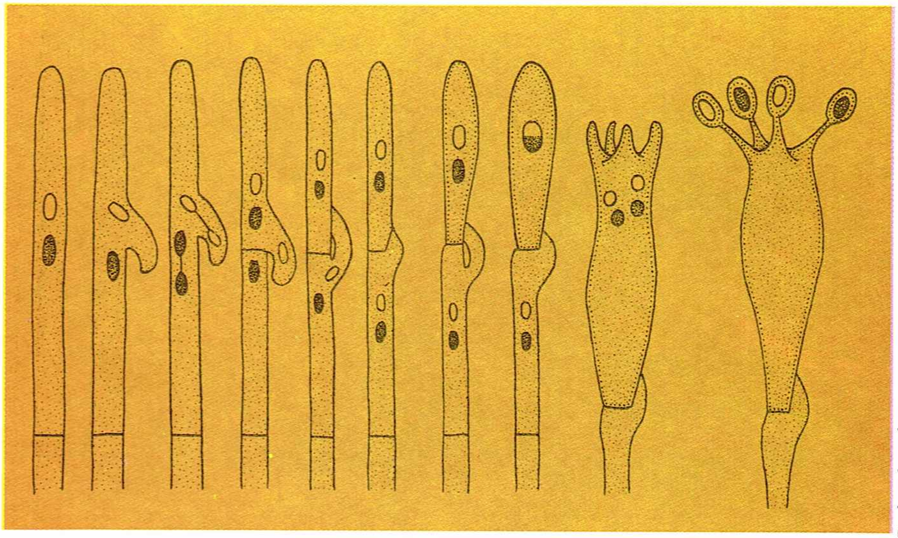

Droits réservés

Bourgeois

Droits réservés

▲ *Les* Cronartium *sont des rouilles hétéroïques dont les écidies sont inféodées aux pins; ici,* C. flaccidum *parasite le pin sylvestre.*

▶ *Les télies de* Gymnosporangium clavariaeforme, *qu'on observe sur les rameaux de genévrier, ressemblent à de petites clavaires rose saumon.*

Page ci-contre : ▶ *La trémelle mésentérique,* Tremella mesenterica, *commune sur les branches mortes, est remarquable par ses réceptacles gélatineux, contournés, d'un beau jaune-orangé.*

de deux espèces de *Melanotaenium,* sur sélaginelles. Les Cypéracées et surtout les Graminées semblent leurs hôtes préférentiels, et c'est comme parasites des céréales qu'ils sont surtout importants. Le mycélium hyalin intercellulaire (ou intracellulaire, chez *Ustilago maydis*), à segments uni- ou plurinucléés, peut envahir tout l'hôte ou rester localisé au voisinage des points d'infection; mais les symptômes de la maladie se manifestent particulièrement au niveau des inflorescences (ovaires et anthères), plus rarement des feuilles (genre *Entyloma*) ou des tiges de l'hôte; seules les espèces du genre *Entorrhiza* parasitent les racines des joncs et des carex. Les organes atteints sont envahis, à maturité, par des amas pulvérulents de « spores charbonneuses », noires.

Le *cycle de développement* des Ustilaginales est moins complexe que celui des Urédinales. La spore charbonneuse, homologue de la téliospore, unicellulaire, possède à maturité un noyau diploïde et germe en produisant un *promycélium.* Chez les *Ustilaginacées* (genres *Ustilago, Sorosporium, Sphacelotheca*), le promycélium se cloisonne transversalement en quatre cellules à noyau haploïde, comme chez les Urédinales; chacune produit, en principe, une basidiospore sessile ou *sporidie.* Mais le plus souvent, par le jeu de mitoses successives, chaque cellule du promycélium forme de nombreuses spores qui, elles-mêmes, sont capables de bourgeonner; elles engendrent ainsi un thalle levuroïde, haploïde, qui végète à la surface de la plante hôte. C'est sous cette forme saprophytique que l'on peut cultiver les Ustilaginacées sur milieu artificiel, au laboratoire. Par contre, les spores ou le mycélium haploïdes sont inaptes à la vie parasitaire; l'infection d'un nouvel hôte est précédée par la conjugaison de deux sporidies, ou d'une sporidie et d'une cellule du promycélium, ou de deux cellules d'un même promycélium, ou plus rarement de deux promycéliums différents. C'est le mycélium dicaryotique résultant de cette conjugaison qui pénètre dans un nouvel hôte et induit la phase parasitaire. On notera que ce cycle de développement est comparable à celui des Taphrinales.

Chez les *Tilletiacées (Tilletia, Urocystis, Entyloma),* le mode de germination de la spore charbonneuse est sensiblement différent. Les spores haploïdes *(sporidies primaires)* sont produites en couronne à l'extrémité d'un promycélium non septé (ou unisepté), au nombre de huit ou de seize. Elles se conjuguent deux à deux, le noyau de l'une passant dans l'autre au moyen d'un court tube de conjugaison; chaque paire de sporidies primaires émet alors un seul stérigmate latéral portant une *sporidie secondaire,* binucléée, qui est projetée violemment à la manière d'une ballistospore. On interprète cette sporidie secondaire comme la basidiospore (quoique dicaryotique) et les sporidies primaires comme des stérigmates hautement différenciés.

A l'intérieur de ces deux familles, les genres d'Ustilaginales se distinguent par l'ornementation et le mode de groupement des spores charbonneuses : spores séparées, dans un amas poudreux ou *sore (Ustilago, Tilletia),* ou associées par paires (*Schroeteria,* sur les véroniques), ou en plus grand nombre (*Thecaphora,* sur Légumineuses, *Polyposporium,* sur le maïs et le sorgho, *Sorosporium*), ou entourées d'une couche de cellules stériles *(Urocystis);* chez les *Cintractia,* le sore tout entier forme une masse solide à la base des inflorescences de Joncacées et de Cypéracées.

Les genres *Ustilago* (trois cents espèces) et *Tilletia* sont très importants comme agents des charbons et caries des céréales. *Ustilago maydis* attaque les divers organes du maïs, tiges ou épis, et se manifeste par de grosses tumeurs remplies de spores charbonneuses. La plupart des espèces propres aux Graminées attaquent électivement les ovaires des fleurs et, dans l'épi mûr, les grains sont remplacés par la masse des spores. Dans les « charbons nus », provoqués chez l'orge et le blé par *U. nuda* (= *U. tritici*) et chez l'avoine par *U. avenae,* l'ensemble des tissus est détruit et les spores librement exposées sont transportées par le vent sur d'autres fleurs. Chez ces mêmes céréales, *U. hordei* et *U. levis* respectent les enveloppes des grains; la maladie est qualifiée de « charbon couvert ». Enfin, dans la « carie » du blé causée par *Tilletia caries,* les spores charbonneuses restent enfermées dans le péricarpe du grain, apparemment peu altéré, et ne sont libérées que lorsque le grain est écrasé; dans ce cas, l'infection apparaît précocement dans les jeunes pousses issues de semences souillées, et le Champignon accompagne la plante hôte dans tout son développement pour se manifester seulement à l'épiaison.

U. violacea a, sur les Caryophyllacées qu'il parasite, des effets biologiques remarquables. Ce charbon est

normalement localisé aux étamines ; lorsqu'il infecte les fleurs femelles d'espèces dioïques *(Lychnis dioica, Silena alba)*, leurs pistils avortent plus ou moins complètement (castration parasitaire) ; en outre, elles produisent des anthères où le Champignon fructifie. Ce phénomène d'hermaphrodisme induit n'a pas encore reçu d'explication satisfaisante.

HYMÉNOMYCÈTES

Cette classe extrêmement vaste inclut tous les Champignons porteurs de basides, à l'exception des deux ordres parasites déjà traités (Hémibasidiomycètes), où la baside est portée par une cellule libre qui est à la fois un élément sporogène (probaside) et une spore de conservation et de dissémination, et certains Gastéromycètes à sporocarpe clos.

Le seul caractère commun à tous ces Champignons est la disposition des basides en une strate palissadique constituant l'*hyménium*, librement exposé au moins au terme de son développement. Chez les formes les moins élaborées (tomentelles), l'hyménium est porté directement par le mycélium végétatif ; plus souvent, il tapisse tout ou partie d'un basidiocarpe plus ou moins différencié : simple lame gélatineuse des trémelles, ou carpophore complexe, à pied et chapeau garni de lamelles ou de tubes, des agarics et des bolets.

Très diversifié quant à la morphologie de la fructification, cet ensemble l'est aussi en ce qui concerne la structure de l'élément fondamental, la baside. On a coutume de réduire le terme d'Hyménomycètes aux formes homobasidiées, à baside typique, s'opposant aux hétérobasidiées, à baside atypique. Une coupure plus récemment proposée répartit en deux sous-classes les formes à basides cloisonnées (Phragmobasidiomycétidés) et les formes à baside entière, qu'elles soient typiques ou non (Holobasidiomycétidés).

Quant à nous, nous envisagerons pour plus de précisions successivement les principaux ordres d'Hyménomycètes phragmobasidiés, puis les holobasidiés à hétérobaside et les holobasidiés à homobaside, ou Hyménomycètes proprement dits.

HYMÉNOMYCÈTES PHRAGMOBASIDIÉS

Ce groupe est défini par l'existence de cloisons primaires qui divisent la baside, transversalement chez les *Auriculariales*, longitudinalement chez les *Trémellales*. Leurs basidiospores germent le plus souvent par répétition (en produisant une deuxième spore, ou ballistospore, projetée brusquement) ou par bourgeonnement ; ce caractère leur est commun avec les autres groupes d'hétérobasidiés, les Ustilaginales, d'une part, et les holobasidiés les moins évolués *(Dacrymycétales)*, d'autre part. Enfin, leurs fructifications sont généralement de consistance gélatineuse (auriculaires, trémelles), ou à peine distinctes du thalle végétatif *(Septobasidium)*.

Auriculariales

Comme chez les Urédinales, on trouve chez les auriculaires une basidiospore cylindrique septée transversalement, à quatre segments égaux pourvus chacun d'un long stérigmate portant une baside réniforme ; dans des conditions favorables d'humidité, ces spores bourgeonnent, donnant de petites conidies falciformes. Les basides sont disposées en strate palissadique au revers d'un réceptacle de consistance gélatineuse (coriace à l'état sec), en forme de coupe lobée et plissée, à surface velue, fixée au support (bois morts ou âgés) par un pied très court. *Auricularia auricula-Judae* (l'oreille de Judas), qui pousse de préférence sur les vieux sureaux, et *A. mesenterica* (= *A. tremelloides*) sont les deux espèces européennes du genre *Auricularia*. En Extrême-Orient, on cultive sur des piquets de chêne *A. polytrica* ; en mélange avec l'oreille de Judas et d'autres espèces asiatiques, elle entre dans la composition de la cuisine chinoise sous le nom de « Champignon noir ».

Atlas photo

M.-C. Robert - Jacana

H. Chaumeton - Jacana

Phleogena faginea est une espèce de très petite taille qu'on pourrait confondre avec un Myxomycète par son carpophore en forme de petite sphère pédicellée renfermant un « capillitium » ; mais celui-ci est constitué de filaments basidiogènes, comparables aux basides des auriculaires.

On rattache également aux Auriculariales le genre *Helicobasidium*, dont le basidiocarpe est réduit à un stroma plectenchymateux ; la forme imparfaite d'*H. purpureum* est le *Rhizoctonia crocorum*, qui provoque la pourriture violette des racines de nombreuses plantes tropicales et des tubercules de pomme de terre.

Septobasidiales

Parfois rapportées aux Auriculariales (famille des *Septobasidiacées*), elles en diffèrent par leurs basidiocarpes non gélatineux et par les relations complexes qu'elles établissent avec des Insectes (coccides). Les *Septobasidium*, surtout répandus dans la zone intertropicale, forment sur les rameaux de divers arbres et arbustes des thalles crustacés, de structure filamenteuse, creusés de galeries où vivent des cochenilles. Les filaments du Champignon parasitent les Insectes, qui, en revanche, y trouvent un abri, de sorte que s'établit un équilibre, à la limite du parasitisme et de la symbiose. L'hyménium des *Septobasidium*, superficiel et mêlé aux filaments végétatifs, comporte des basides cylindriques cloisonnées, issues directement du mycélium, ou d'une probaside à paroi plus ou moins épaissie. Chez les *Uredinella*, la probaside est constante et on peut la comparer à la téleutospore des Urédinales.

Trémellales

Les trémelles et genres affines (deux cents espèces) sont des Champignons saprophytes, lignicoles ou humicoles, qui présentent des basidiocarpes le plus souvent gélatineux, blancs ou de teinte vive, à surface hyméniale fréquemment plissée, veinée ou hérissée d'aiguillons. La baside subglobuleuse est divisée en croix par des cloisons longitudinales. Chacune des quatre cellules est prolongée par un stérigmate dressé, parfois très long (épibaside) ; les basidiospores peuvent germer par répétition, par bourgeonnement ou par un tube germinatif. Dans le genre *Tremella* (une quarantaine d'espèces), les fructifi-

▲ *Sur les vieux troncs de sureaux, on peut récolter l'oreille de Judas (en haut),* **Auricularia auricula-Judae** *; c'est un comestible, surtout apprécié dans la cuisine chinoise.* **Tremellodon gelatinosum** *(en bas) ressemble à un hydne de consistance molle ; c'est pourtant un Hétérobasidié, proche de l'auriculaire.*

Atlas photo

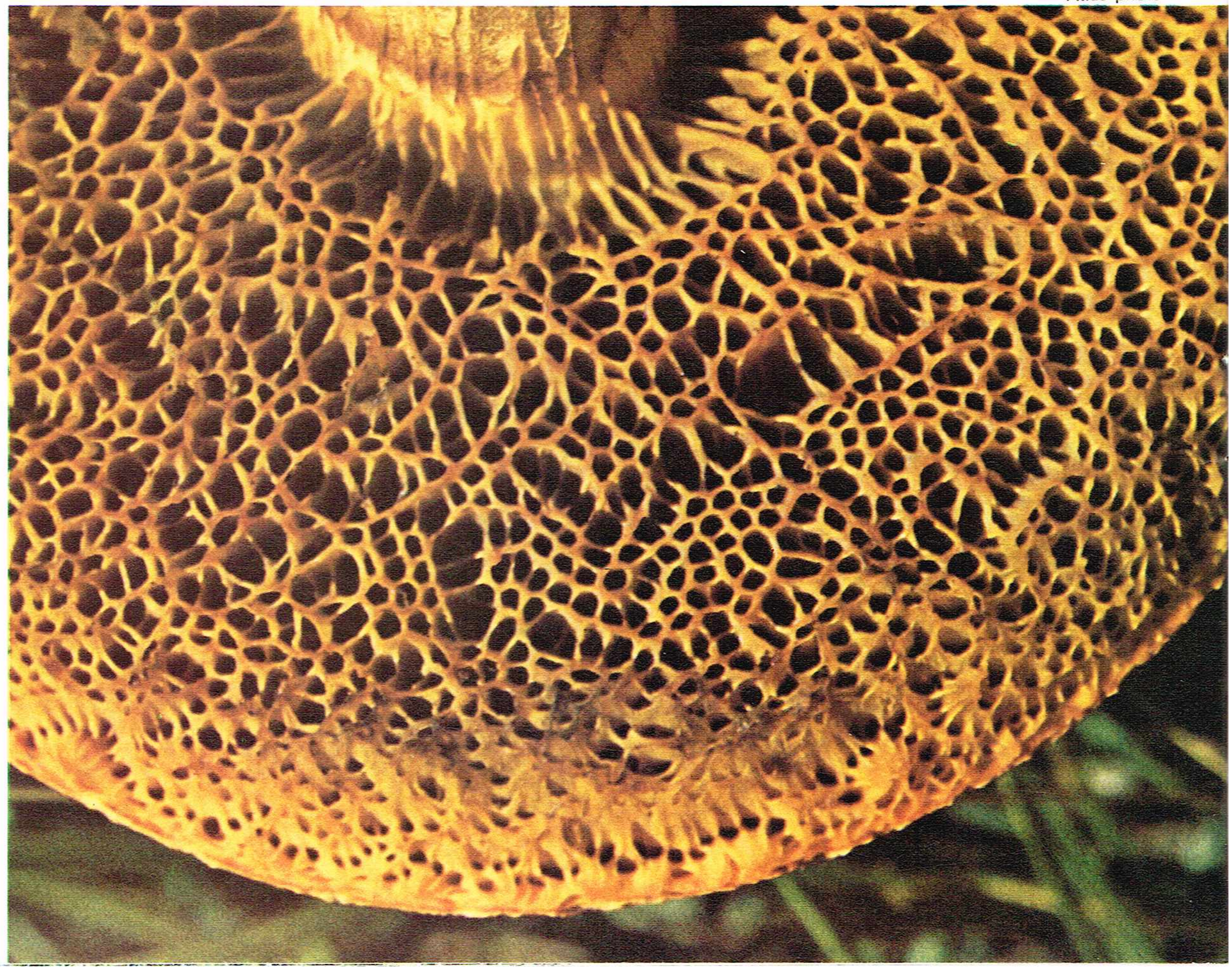

▶ *Le bolet à pied creux,* **Boletus cavipes**, *est une espèce montagnarde liée aux mélèzes. Vu par-dessous, le chapeau montre bien la structure tubulée de l'hyménium.*

cations molles, gélatineuses, plissées, contournées ou plus rarement foliacées *(T. foliacea)*, toujours riches en pigments, portent l'hyménium sur leurs deux faces. Capables de résister à la dessiccation et à des températures très basses, elles s'accommodent de tous les climats. On rencontre *T. mesenterica*, à réceptacles jaune d'or ou orangés, cérébriformes, sur les bois morts de diverses essences; *T. frondosa*, rose chair ou brunâtre, est inféodée au hêtre et au chêne. *Pseudohydnum (= Tremellodon) gelatinosum* forme sur les vieilles souches de Conifères, où il est très commun, des réceptacles gélatineux blanc sale, portés sur un pied court, excentrique; l'hyménium est localisé à la face inférieure, hérissée de courts aiguillons. *Excidia glandulosa* applique sur les branches mortes du tilleul et d'autres arbres de petites masses subglobuleuses noirâtres, irrégulières ou en boutons, de consistance élastique. Les thalles minces, céracés ou plus ou moins coriaces de *Sebacinia incrustans* enrobent étroitement les brins d'herbe ou les ramilles, sur le sol. Par contre, *Guepinia helvelloides (= G. rufa)*, commun en montagne sous les Conifères, a des fructifications bien développées. On consomme en salade la guépinie, également nommée gyrocéphale roux, ainsi que le trémellodon gélatineux *(Tremellodon gelatinosum)*, en dépit de sa saveur résineuse.

HYMÉNOMYCÈTES HOLO-HÉTÉROBASIDIÉS

Les Champignons de ce groupe (Protoclavariales *sensu* Heim) montrent des affinités à la fois avec les Trémellales phragmobasidiées et avec les Aphyllophorales homobasidiées, en particulier les clavaires. A l'exception des *Dacrymyces* et des *Calocera*, ces espèces nous sont peu familières; leur intérêt théorique n'est pourtant pas négligeable. Selon les auteurs, on y distingue plusieurs ordres, ou seulement des familles regroupées en Protoclavariales, ou confondues avec les Tulasnellales.

Dacrymycétales

Les Dacrymycétales (ou *Dacrymycétacées*) ont le même habitat et présentent le même faciès que les Trémellales; leurs basidiocarpes sont gélatineux, vivement colorés, lisses ou ridés, apprimés ou érigés. Mais leur baside est entière, profondément échancrée en forme de diapason; la base mince, cylindrique, se prolonge par deux « bras » dressés, s'effilant en stérigmates. Les basidiospores sont divisées à maturité par une ou plusieurs cloisons; chacune de leurs cellules est capable de germer en produisant un tube mycélien ou de petites conidies globuleuses. *Dacrymyces deliquescens* forme sur le bois pourri des coussinets gélatineux orangés, dont certains sont seulement conidiens (le mycélium se découpant en arthrospores), et les autres basidiogènes. Les *Calocera* ressemblent à de petites clavaires jaune vif, mais de consistance gélatineuse; deux espèces sont communes dans nos régions : *C. viscosa*, ramifiée au sommet, sur souches de Conifères, et *C. cornea*, plus petite et simple, propre aux feuillus.

Tulasnellales

Les Tulasnellales (ou *Tulasnellacées*) sont un petit groupe d'espèces à basidiocarpes résupinés, secs ou gélatineux, lignicoles ou parfois fongicoles, remarquables par les caractères de la baside; celle-ci porte en effet à son sommet quatre renflements vésiculeux, prolongés par les stérigmates, et susceptibles de se détacher de la base; la signification de ces organes a fait l'objet de multiples interprétations.

Exobasidiales

Le petit ordre des Exobasidiales est intéressant par ses conditions de vie parasitaire; le Champignon végète surtout dans les feuilles qui réagissent par la formation de galles rouges; il ne produit pas de carpophore, mais seulement une strate de basides à quatre basidiospores, à la surface des feuilles. Les *Exobasidium* parasitent essentiellement les Éricacées.

HYMÉNOMYCÈTES HOMOBASIDIÉS

C'est de beaucoup le groupe le plus important de Basidiomycètes macroscopiques, où se trouvent classées toutes les formes qui répondent à la notion courante de Champignons : Champignons « à chapeau », les plus nombreux : agarics et bolets; Champignons « en console », les polypores vivant sur le bois. Cette distinction du langage familier correspond à peu près à la coupure systématique majeure qui, parmi les Basidiomycètes homobasidiés, distingue les *Aphyllophorales* (polypores, hydnes, clavaires) de toutes les autres formes. Selon les auteurs, celles-ci constituent un seul ordre, les *Agaricales*, avec de nombreuses familles, ou plusieurs ordres groupant d'une part les espèces pourvues de « tubes », les *Bolétales*, d'autre part les espèces à « lamelles », les *Agaricales*, dont il y a lieu de détacher les lactaires et les russules, qui constituent alors l'ordre des *Astérosporales*.

Ces multiples formes ont un caractère commun : la production de basides typiques ou *homobasides*, entières, non munies de prolongements importants, et disposées en strate régulière constituant un *hyménium;* les basidiospores, généralement produites au nombre de quatre par baside, ne sont pas des spores passives, mais des *ballistospores*.

L'organe végétatif des Basidiomycètes supérieurs est toujours constitué par le mycélium dicaryotique, qui se développe dans le substrat nutritif, sol, bois pourri, ou dans les tissus d'un hôte vivant; il forme souvent avec les racines des arbres des associations symbiotiques (mycorrhizes) et peut s'organiser, dans l'humus, entre les feuilles ou sur un support rigide en cordons (rhizomorphes), palmettes ou sclérotes. La plupart des Hyménomycètes édifient des fructifications parfois très élaborées, à partir de *primordiums* constitués par un peloton serré d'hyphes à dicaryons. Cette masse d'abord indifférenciée évolue en produisant un support stérile, le carpophore, et une couche hyméniale sporogène. Chez les *Agaricales* au sens large, le carpophore est constitué d'hyphes à parois minces, et sa consistance est charnue. Celui des *Aphyllophorales* est souvent plus complexe; les hyphes génératives minces sont soutenues par un squelette de filaments épais, simples ou abondamment ramifiés; la consistance du carpophore peut être très ferme, compacte, fibreuse ou subéreuse. En outre, chez un certain nombre d'Agaricales, le développement du primordium s'effectue à l'intérieur d'une ou plusieurs membranes qui peuvent persister jusqu'à la maturité de l'hyménium; le carpophore des Aphyllophorales, au contraire, n'est jamais entouré de voiles; l'hyménium, à croissance indéfinie, est libre dès le début de son développement.

Aphyllophorales

Défini par opposition aux Agaricales, plus nettement différenciées, l'ordre des Aphyllophorales n'est pas homogène; il groupe des espèces aussi différentes par leur aspect, leur forme, leur consistance, que les clavaires, les hydnes, les chanterelles, la mérule, les polypores charnus ou ligneux. Les classifications actuelles tiennent compte, non seulement des caractères macroscopiques du carpophore et de la disposition de l'hyménium, mais aussi de détails microscopiques de structure et de réactions biochimiques. Pratiquement, on peut tenter de les regrouper autour de quelques grands types d'organisations.

Les espèces les moins différenciées d'Aphyllophorales sont les *tomentelles*, formes frustes, d'aspect floconneux ou membraneux, sans réceptacle défini, à l'hyménium disjoint en touffes de basides; elles ne sont pas rares dans le sol, sur le bois décomposé, entourant les brindilles ou les pierres, et sont souvent remarquables par la coloration soutenue de leur mycélium : jaune, rose, violacé, bleu, etc. Les *Corticium* forment sur le bois des revêtements texturés minces, étroitement appliqués sur le support, de consistance membraneuse (tel le *Corticium coeruleum*, d'un beau bleu foncé) ou céracée, ou crustacée (*C. serum*, blanc crayeux). *C. quercinum*, très commun et de teinte gris rosé, est plus correctement rapporté au genre *Peniophora*, en raison de la présence de cellules stériles, les *cystides*, mêlées aux basides dans la couche hyméniale; chez cette espèce, les bords du réceptacle commencent à

H. Chaumeton - Jacana

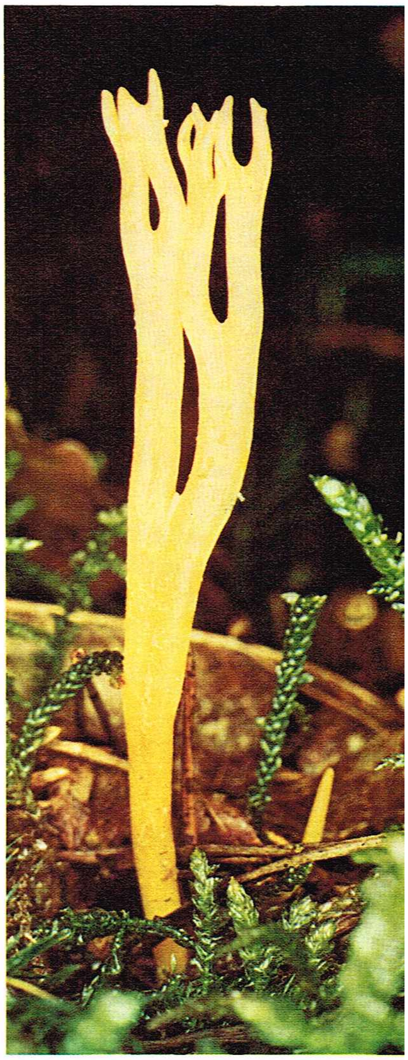

▲ ***Les réceptacles dressés, ramifiés, d'un beau jaune vif, de* Calocera viscosa *(Dacrymycétales) ressemblent à de petites clavaires.***

H. Chaumeton - Jacana

se libérer du support. Les *Aleurodiscus* ont la marge nettement relevée, et les cyphelles ont des réceptacles membraneux, en coupe ou en entonnoir, parfois pédicellés, mais de petite taille.

Avec les *Stereum*, le réceptacle s'organise et se détache du support ; il prend la forme de lames coriaces, planes ou ondulées, souvent imbriquées, portant sur une de leurs faces un hyménium toujours lisse. *Stereum hirsutum*, un des Champignons les plus communs, à chapeaux velus blanc sale ou jaunâtre, est un lignivore qui attaque les bois de chêne en chantier ; il produit une altération grave appelée grisette. D'autres espèces sont des parasites des bois sur pied : *S. sanguinolentum*, qui produit le « cœur rouge » des sapins ; *S. frustulosum*, responsable de la pourriture alvéolaire du cœur du chêne. *Schizophyllum commune* forme sur les substrats ligneux de petits chapeaux coriaces en éventail, à surface finement veloutée ; au revers, il est garni de plis radiaires, fendus sur l'arête, qu'on a pu assimiler aux lamelles des agarics. Sa position réelle est auprès des *Stereum*, et les plis de la face inférieure, susceptibles de se replier sur eux-mêmes en protégeant l'hyménium, correspondent à une remarquable adaptation à la sécheresse.

Avec les *théléphores* commence à se manifester la grande lignée des Aphyllophorales à hyménium ridé ou plissé, conduisant aux formes porées (polypores proprement dits). Les théléphores édifient, comme les *Stereum*, des réceptacles fibreux, coriaces (souvent d'ailleurs découpés en lanières), mais leur strate hyméniale est toujours ridée ou granulée. *Thelephora terrestris* forme des entonnoirs irréguliers, enroulés, fixés sur les troncs d'arbres et les brindilles.

Le groupe des *mérules* diffère des théléphores par la consistance plus molle, membraneuse ou céracée des fructifications plus ou moins étroitement appliquées au substrat ; la face hyméniale est ici marquée de crêtes fertiles associées en lames sinueuses, en plis rayonnants ou anastomosés, ou en réseau simulant des pores plus ou moins fermés. A ce groupe appartiennent des genres lignicoles à spores claires *(Merulius, Phlebia)* et d'autres à spores jaune vif ou rouille *(Coniophora, Gyrophana)* parmi lesquels se rencontrent d'actifs lignivores, les plus graves ennemis des bois d'œuvre et d'autres substrats cellulosiques dans les habitations. *Gyrophana (= Serpula) lacrymans*, la mérule pleureuse, est le plus redoutable des « Champignons des maisons ». Sa température optimale de développement, qui est seulement de 23 °C, et ses exigences hydriques (le bois doit contenir 30 à 35 % d'humidité) expliquent qu'elle ne se développe qu'à l'intérieur des habitations mal ventilées, dans les régions tempérées, et à la faveur de fuites d'eau ou du contact de maçonneries mal isolées.

Les *hydnes*, au sens large, constituent un groupe hétérogène caractérisé essentiellement par l'hyménium hérissé de pointes ou d'aiguillons. L'hydne coralloïde *(Dryodon* [*= Hericium*] *coralloides)* et l'espèce voisine *H. erinaceus* sont des formes charnues, très divisées et de grande taille, venant sur le bois. Les *Sarcodon*, terrestres, ont un carpophore charnu, massif, dressé sur un pied central ou excentrique ; *S. (= Hydnum) repandum*, le plus commun, et *S. rufescens* sont les pieds-de-mouton, agréables comestibles malgré l'amertume de leur chair avant cuisson. Les *Calodon*, également terrestres et stipités *(C. ferrugineum)*, se rapprochent des théléphores par leur chair rigide et subéreuse. L'hydne cure-oreilles, *Hydnum auriscalpium* (ou mieux *Auriscalpium vulgare*) à chapeau velu garni d'aiguillons fins, porté latéralement par un pied grêle sur les cônes de pin enfouis dans l'humus, a, en dépit de sa petite taille, une structure plus complexe que les autres hydnes et qui l'apparente aux groupes supérieurs d'Aphyllophorales.

Les *polypores* sont caractérisés par la strate hyméniale constituée de tubes soudés les uns aux autres et s'ouvrant à l'extérieur par des pores. Cette définition recouvre une grande diversité de formes, de dimensions et de structures. Les tubes eux-mêmes peuvent être cylindriques et étroitement juxtaposés, mais aussi de forme irrégulière, ovales, anguleux, ou allongés, et d'aspect lamelloïde. En général, le carpophore a la forme d'un éventail ou d'une console sessile, fixé largement au support par sa partie latérale, mais quelques espèces *(Polyporus squamosus)* sont pourvues d'un pied court, excentrique, ou plus rarement central *(Polyporus brumalis)*. Un petit nombre d'espèces

(Fomes) ont des fructifications pérennantes, qui peuvent atteindre une taille considérable; en général, c'est le mycélium qui persiste et fournit chaque année une nouvelle génération de basidiocarpes. Des différences notables se manifestent dans la consistance du chapeau, qui peut être tendre et charnu, mais le plus souvent devient coriace, fibreux, spongieux ou dur et compact; dans le cas le plus fréquent, la structure de la chair est complexe; aux hyphes génératrices grêles, actives, qui édifient progressivement l'hyménium, sont associées dans la trame des hyphes squelettiques rigides, à parois épaisses, et des hyphes intermédiaires et conjonctives, contournées et ramifiées. Remarquable par le nombre et la diversité de ses formes (un millier d'espèces environ), le groupe des polypores n'est pas moins important sur le plan biologique. La plupart sont des lignicoles, qui jouent un rôle majeur dans la destruction des bois abattus et des débris ligneux, mais aussi comme agents d'altération des bois de scierie, soit qu'ils détruisent seulement la cellulose (pourritures brunes), soit qu'ils attaquent également la lignine (pourritures blanches). Certains se comportent en pathogènes sévères des arbres sur pied, Conifères et feuillus.

La flore commune de nos forêts fournit de multiples exemples de ce groupe. Le genre *Polyporus,* qui désigne les polypores à chair tendre, tout au moins au début de leur développement, recouvre des formes diversifiées, dont certaines ont reçu des dénominations propres. Les *Caloporus,* terricoles, et les *Leucoporus (L. brumalis),* lignicoles, sont des espèces de taille modeste, pourvues d'un pied (noir chez les *Melanopus*). Tous les autres polypores sont lignicoles. Le polypore écailleux *(P. squamosus),* très commun, souvent parasite des feuillus, porte un chapeau de grande taille sur un pied excentrique, court et trapu. Les polypores rameux, à chapeaux en touffes, superposés ou imbriqués, sont parfois spectaculaires : ainsi le polypore en ombelle *(P. umbellatus)* et le *P. frondosus,* comestibles à l'état jeune, qu'on récolte sur les souches de chêne; le polypore en acanthe *(P. giganteus)* peut atteindre des dimensions considérables, jusqu'à 30 cm. Le soufré, *Polyporus* (ou *Laetiporus,* ou *Griphola*) *sulfureus,* est remarquable par sa chair jaune rosé ou orangé et ses pores jaune vif; c'est un grave ennemi à la fois des Conifères et des feuillus (pourriture brun-rouge du cœur). Les *Spongipellis,* de consistance molle, et les *Lectoporus* sont, à la différence des *Polyporus,* largement implantés sur l'arbre; les formes conidiennes des *Leptoporus* du groupe *albidus,* propres aux Conifères, s'étalent sur le bois en masses irrégulières, molles, appelées *Ptychogaster.* Les *Phaeolus* (*P. schweinitzii,* agent d'une pourriture rouge des pins et des sapins) sont des Champignons épais à chapeau fauve, en toupie, qui deviennent fermes et subéreux avec l'âge.

Aux polypores à chair peu coriace s'oppose la série des *Fomes* au sens large, dont la consistance est, dès l'abord, subéreuse. Les *tramètes* n'ont pas de véritable strate hyméniale, mais des tubes hyméniens creusés dans la trame. C'est le cas de *Coriolus versicolor,* à chapeaux imbriqués minces et cassants, élégamment zonés de couleurs diverses, un des polypores les plus communs, mais aussi les plus activement lignivores de la flore française. Chez les genres *Trametes* et *Lenzites,* plus épais, les tubes larges, irréguliers, ont souvent l'aspect de lames anastomosées. Chez les *Phellinus* et les *Xanthochrous,* les tubes forment une couche distincte de la trame, et la chair est toujours colorée.

Les carpophores les plus différenciés sont ceux des *ungulines* et des *ganodermes,* qui sont revêtus d'une croûte rigide, souvent résinoïde et luisante. A ce groupe appartient l'amadouvier, *Ungulina fomentaria,* à chair colorée, parasite de nombreuses espèces d'arbres. Les ganodermes, surtout tropicaux, n'ont en Europe que quelques représentants, dont *Ganoderma lucidum.*

Les *fistulines* occupent une position particulière parmi les Aphyllophorales, par leur strate hyméniale constituée de tubes indépendants. La chair épaisse, un peu visqueuse, d'un rouge vineux, de la langue de bœuf, *Fistulina hepatica,* est riche en laticifères. C'est un lignivore très actif, que l'on consomme volontiers, cuit ou cru, malgré la saveur acidulée de sa chair.

Les *Clavaria* constituent un groupe hétérogène d'Aphyllophorales (environ cinq cents espèces, saprophytes terrestres ou lignicoles), caractérisé par le réceptacle dressé, simple ou ramifié, tapissé par un hyménium généralement lisse et souvent continu. Les clavaires, auxquelles on associe les *Sparassis* à rameaux aplatis, foliacés, issus d'un tronc commun massif *(S. crispa),* sont toujours de consistance charnue et généralement putrescibles. Le groupe est maintenant divisé en plusieurs genres et sous-genres qui tiennent compte de la couleur des spores et de la structure de la trame.

Chez les *Clavaria,* à spores blanches, l'hyménium continu recouvre entièrement le réceptacle, sauf à sa base. Le basidiocarpe est simple et de petite taille chez *Clavaria (Clavella) vermicularis* qui pousse en petites touffes blanches, fragiles, dans les prés, ou *C. argillacea,* propre aux bruyères. La clavaire pilon *(Clavariadelphus pistillaris)* et la tronquée *(C. truncata)* sont des espèces massives, rugueuses, qui croissent dans les bois. Les *Clavulina,* pour la plupart terrestres, sont plus ou moins abondamment ramifiées. Les grandes clavaires lignicoles à spores ocracées sont maintenant rapportées au genre *Ramaria.*

Les *chanterelles* occupent une position limite entre les Aphyllophorales et les Agaricales; leurs carpophores tendent vers la symétrie axiale, et la surface hyménifère est marquée de rides ou de plis radiaux. Si les craterelles (*Craterellus cornucopiae,* la trompette des morts) ont un hyménium presque lisse ou à plis espacés, les chanterelles et les *Gomphus* ont un chapeau à chair ferme garni en dessous de plis longuement décurrents, qui tendent vers la disposition lamellée des agarics. Tous ces Champignons sont comestibles; la vraie chanterelle, ou girole, *Cantharellus cibarius,* est particulièrement recherchée.

Agaricales

Les Agaricales, qui désignent la grande majorité des Hyménomycètes « à chapeau », se définissent comme des Champignons charnus, putrescibles, dont le sporophore est de structure pseudo-parenchymateuse. Tous ses éléments sont en effet constitués par un agrégat d'hyphes dicaryotiques dont la paroi reste mince; ces filaments peu différenciés s'organisent cependant selon des dispositions particulières (dans le stipe, à la surface du chapeau ou dans les lamelles) ou produisent des éléments spécialisés tels que les *hyphes laticifères* des lactaires ou les *sphérocystes,* cellules globuleuses qui confèrent à la

H. Chaumeton - Jacana

▲ ***Les hydnes sont le type des Basidiomycètes « à aiguillons »; le pied-de-mouton,*** **Hydnum repandum,** ***est un comestible de qualité s'il est récolté jeune.***

Page ci-contre :
◀ **Stereum hirsutum** ***est un polypore à chapeaux minces, jaune sale, veloutés par-dessus; il est fréquent sur toute sorte de bois mort; c'est un lignivore très actif.***

Atlas photo

▲ *Comme toutes les espèces de ce genre, le coprin noir et blanc,* Coprinus picaceus, *est un Champignon fragile ; ses lamelles se liquéfient à maturité.*
▼ Hypholoma sublateritium, *à chapeaux fauve rougeâtre, est très voisin de l'hypholome en touffes,* Hypholoma fasciculare ; *tous deux sont communs sur les vieilles souches et les racines mortes.*

R. Longo

chair des lactaires et des russules une structure grenue. Les extrémités des hyphes stériles peuvent se renfler en massues, *cystidioles* et *cystides* à la surface du chapeau ou du stipe, ou le plus souvent dans l'hyménium où elles sont entremêlées aux basides ; la présence de ces cystides et leur morphologie sont des caractères diagnostiques importants.

Les Agaricales sont également caractérisées par un hyménium organisé, à croissance définie et, à quelques exceptions près (pleurotes), par une symétrie axiale. Leur fructification est généralement composée d'un pied central coiffé d'un chapeau qui porte à sa face inférieure l'hyménium ; celui-ci tapisse la surface de lamelles rayonnantes (agarics) ou l'intérieur de tubes s'ouvrant par des pores (bolets).

Enfin, chez nombre d'Agaricales, le développement de l'hyménium s'effectue à l'intérieur d'une ou plusieurs membranes ou voiles. Sur ce point, on enregistre diverses modalités se rapportant à trois types. Chez beaucoup de bolets et chez quelques agarics *(Russula emetica, Clitocybe clavipes),* l'hyménium apparaît à la surface du carpophore sans être jamais revêtu d'un voile continu ; son développement est *gymnocarpique,* comme celui des aphyllophores. Dans le type *hémiangiocarpique,* l'hyménium naît dans une cavité annulaire (chambre hyméniale) délimitée par un *voile partiel* qui se rompt plus ou moins tardivement, en abandonnant parfois un anneau ou une collerette fixée au pied. Enfin l'hyménium est de croissance *angiocarpique* quand il apparaît et se développe à l'intérieur d'une cavité qui ne s'ouvre qu'à maturité. On qualifie de *voile général* la tunique membraneuse qui enveloppe tout le jeune Champignon et se rompt quand celui-ci croît ; il peut persister sous la forme d'écailles ou de pustules sur le chapeau et d'une volve entourant le pied. Le *voile universel* est un revêtement fragile qui entoure complètement le jeune primordium et disparaît précocement ; on en trouve la trace dans la cortine fibrilleuse des cortinaires.

Bien que les classifications modernes réduisent à un seul ordre l'ensemble considérable (plus de trois mille espèces) des Basidiomycètes offrant ces particularités, il y a lieu d'y distinguer trois groupes principaux : les *bolets,* à hyménium tubulé, les *agarics,* à lamelles, où les auteurs reconnaissent un nombre plus ou moins élevé de familles, et les *Lactariorussulés,* séparant des autres agarics le groupe homogène et hautement différencié des russules et des lactaires.

Les *bolets (Bolétales* ou *Bolétacées),* caractérisés par l'hyménium tubulé qui se sépare aisément du chapeau (c'est le « foin » des cèpes), vivent pour la plupart en association mycorrhizique avec les arbres ; c'est pourquoi on trouve certaines espèces de bolets en relation exclusive avec une essence déterminée : *Boletus scaber* est lié aux racines du bouleau, *B. bovinus* aux pins, *B. elegans* au mélèze. D'autres espèces communes, cependant, sont moins exclusives, comme le *B. chrysenteron ; B. parasiticus,* qui en est proche, est remarquable par son habitat parasite sur les sclérodermes. Le développement des bolets est toujours *gymnocarpique ;* quelques espèces, cependant, possèdent un anneau membraneux (la nonette voilée, *B. luteus*) ; mais celui-ci est d'origine faussement hémiangiocarpique : il résulte d'une soudure tardive entre le bord du chapeau et le pied.

L'exemple classique de bolet est fourni par le cèpe de Bordeaux *(B. edulis),* comestible réputé. Toutefois on accorde la même dénomination de « bolets » à de multiples espèces, comestibles ou non, qui, en fait, ne constituent pas un ensemble homogène. Aux limites du groupe, il faut distinguer les « faux-bolets », dont certains sont très proches des polypores (*Gyrodon lividus,* associé aux aulnes), et d'autres à développement angiocarpique qui se rapprochent des Gastéromycètes ; ce sont les *Strobilomyces,* représentés en Europe par le bolet pomme de pin, *S. strobilaceus,* à chapeau écailleux et pied muni d'un anneau plus ou moins persistant, qu'on rencontre en forêt, sous les hêtres.

Les bolets vrais sont à présent rapportés à une dizaine de genres et sous-genres qui tiennent compte des caractères anatomiques : couleur des spores, revêtement du chapeau, forme des pores. Les nonettes *(B. granulatus, B. luteus),* le bolet des bouviers *(B. bovinus)* et le cèpe moucheté *(B. variegatus),* tous associés aux Conifères, ont un revêtement visqueux, qui se pèle aisément, et une

chair molle (sous-genre *Suillus* = *Ixocomus)*. Le cèpe de Bordeaux est le type des *Tubiporus,* où se retrouvent d'autres bons comestibles, le tête de nègre *(B. aereus)*, propre aux chênes, et le cèpe des pins *(B. pinicola)*, ainsi que toute une série de cèpes de belle taille, à chair bleuissante et pores jaunes *(B. calopus)* ou rouges *(B. erythropus, B. luridus)*, ainsi que le bolet Satan *(B. satanas)* dont on redoute les propriétés fortement indigestes. Les *Xerocomus* se groupent autour du bolet subtomenteux *(B. subtomentosus)* et du cèpe à pied rouge *(B. chrysenteron)*, espèce commune à chapeau velouté et bords irréguliers ; on en rapproche un excellent comestible, le cèpe bai *(B. badius)*, qui croît sous les résineux aussi bien que sous les feuillus. Les cèpes rudes, du groupe *scaber* (s.-g. *Leccinum* = *Krombholzia*), sont caractérisés par un pied dur et fibreux, aisément séparable du chapeau. Le bolet amer *(B. felleus)*, qu'il faut se garder de confondre avec des *Tubiporus* comestibles *(B. reticulatus)*, est reconnaissable à ses pores roses, caractéristiques du sous-genre *Tylopilus*. Le genre *Gyroporus*, représenté par l'indigotier *(G. cyanescens)* et le cèpe châtain *(G. castaneus)*, tous deux bons comestibles, est sans doute le type le plus évolué de bolet ; ses spores sont blanchâtres (et non colorées comme chez les *Boletus*), sa chair friable et ses tubes de petite taille et non alignés en files rayonnantes.

On doit rapprocher des bolets deux genres à hyménium nettement lamellé, les *paxilles* et les *gomphides*. Les lames fines et serrées du paxille enroulé *(Paxillus involutus)*, espèce terrestre très commune sous les pins et surtout les bouleaux, se détachent aisément de la chair du chapeau, comme les tubes des bolets. Les gomphides *(Gomphidius viscidus* et *G. glutinosus)*, qu'on récolte sous les Conifères, ont des lamelles larges et écartées, décurrentes sur le pied.

Les *lactaires* (cent vingt espèces) et les *russules* (près de trois cents espèces) sont bien différents des autres agarics à lamelles, par leur chair grenue et cassante, formée de cellules sphériques, les sphérocystes, groupées en rosettes autour d'hyphes laticifères, et par leurs spores ornées de ponctuations, de verrues ou de crêtes qui se colorent intensément en bleu-violet par l'iode ; ces ornementations confèrent à la spore un contour irrégulier, d'où le nom d'*Astérosporales*. Le pied de ces Champignons est toujours dépourvu de volve ou d'anneau.

Le genre *Lactarius* se reconnaît pratiquement à la présence d'un latex blanc ou coloré qui s'écoule lorsqu'on brise la chair. Leur couleur est généralement claire ou terne et leurs lames fréquemment décurrentes. A de rares exceptions près, les lactaires sont sans intérêt pour le mycophage ; aucun n'est vénéneux, mais certains ont un lait particulièrement âcre et pourraient causer des troubles digestifs ; on consomme cependant, cuit sur le gril ou en condiment, le lactaire poivré. Aux lactaires à lait rouge, venant sous les Conifères, appartiennent les seules espèces vraiment comestibles : le vineux *(Lactarius sanguifluus)* commun dans les régions méridionales, et le sanguin ou délicieux *(L. deliciosus)* plus largement répandu mais moins apprécié. Une série d'espèces de couleur terne, dans les gris ou les bruns, ont un lait d'abord blanc qui, à l'air, devient rougeâtre (*L. acris,* sous les hêtres, *L. fuliginosus,* sous les chênes) ou violacé (*L. uvidus,* fréquent sous les bouleaux), ou grisonnant (*L. blennius,* très commun, à lait particulièrement âcre). Parmi les lactaires à lait jaune, on reconnaît aisément le *L. chrysorrheus* à chapeau jaune et zoné, et le lactaire trompeur *(L. decipiens)*, commun dans les bois secs, au petit chapeau roux mamelonné et au lait peu abondant, à odeur de géranium. Chez beaucoup d'espèces, le lait reste blanc. C'est le cas des grands lactaires à chapeau blanc : le poivré *(L. piperatus)* et le velouté *(L. vellereus)*, ou le plombé *(L. plumbeus* = *L. turpis)*, de grande taille, mais gris olivâtre. La vachette *(L. volemus)* est remarquable par sa couleur orangée et son lait doux, très abondant. Le lactaire à toison, *L. torminosus,* qui vient sous les bouleaux, est au contraire très âcre ; on le reconnaît à son chapeau zoné de couleur chair, garni de longs poils feutrés vers la marge.

Les *russules* ne laissent pas exsuder de latex à la cassure, et leur chapeau est souvent vivement coloré ; en outre, leurs lamelles sont rarement décurrentes ; fait exception *Russula delica,* blanche et au chapeau retourné comme celui d'un lactaire.

La multiplicité des espèces rend la détermination des russules particulièrement difficile ; on se fonde sur la coloration du chapeau, qui offre tous les tons de rouge, de violacé, de jaune et même de vert, et des lamelles, qui peuvent être tout à fait blanches, ou teintées de rose ou de crème, ou jaunes dès le début, ou noircissantes ; on tient compte également de la consistance de la chair, de sa saveur, de l'odeur et, finalement, de réactions chimiques colorées et des caractères microscopiques. Malgré ces difficultés, les russules intéressent l'amateur non spécialisé, car on y trouve quelques bons comestibles ; la charbonnière, *Russula cyanoxantha,* à chapeau de teinte changeante, violacée, devenant verdâtre avec l'âge, est commune en été et en automne dans les bois sous les feuillus ; contrairement aux autres russules, ses lamelles (blanches) ne sont pas cassantes, mais de consistance lardacée et élastique. Au même groupe appartiennent *R. vesca,* brun ocracé, qui apparaît dès le mois de mai, et le palomet, *R. virescens,* à chapeau vert de gris pommelé, qu'on peut considérer comme l'un des Champignons les plus succulents.

Aucune russule n'est vénéneuse, et les espèces douces peuvent être consommées. On se méfiera cependant des espèces à saveur âcre, en particulier l'émétique, à beau chapeau rouge vermillon, commune sous toutes les essences, qui peut provoquer des intoxications bénignes.

Les *agarics* proprement dits (Agaricacées) sont tous les Champignons à lamelles autres que les russules et les lactaires, à chair non grenue, dépourvue de laticifères et de sphérocystes. Leur développement est souvent angiocarpique ou hémiangiocarpique, et le Champignon mûr peut garder les vestiges de la membrane ou des membranes qui entouraient le primordium. C'est ainsi que certains agarics sont pourvus d'une volve (genres *Volvaria, Amanitopsis*), d'une volve et d'un anneau (amanites), d'un anneau seul (lépiotes, armillaires, pholiotes, psalliotes, strophaires) ou d'une cortine (cortinaires) ; mais un grand nombre ne montrent aucun de ces caractères.

La classification des agarics tient compte de ces particularités, et aussi de la couleur de leurs spores en masse : roses, blanches, ocre, brun pourpre ou noires ; interviennent également le mode d'insertion des lames sur le pied, la présence de cystides de diverses formes ou de soies parmi les basides, etc. Le nombre des espèces est considérable et l'ensemble extrêmement diversifié ; de nombreux ouvrages ont été consacrés à leur détermination pratique, et l'on n'en trouvera ici que quelques exemples caractéristiques.

Les *hygrophores* ont des lames épaisses, espacées, de consistance cireuse, en continuité avec la chair et souvent largement décurrentes ; ils rappellent les chanterelles par leurs longues basides cylindriques. Surtout fréquentes dans les prés, les très nombreuses espèces d'hygrophores se parent souvent de couleurs vives *(H. coccineus, H. psittacinus)* et d'un revêtement visqueux ; d'autres au contraire sont d'un blanc pur *(H. niveus, H. eburneus)*.

La famille des *Tricholomatacées* est un vaste ensemble de Champignons à spores blanches ou roses, de consistance charnue ; leur pied, dépourvu de volve et d'anneau, ne se sépare pas sans déchirure du chapeau. A côté des tricholomes, à port robuste et lamelles échancrées au voisinage du pied, et des rhodopaxilles (tricholomes à spores roses), on y classe les collybies, caractérisées par leur pied fibreux ou cartilagineux, les marasmes à chair coriace qui se dessèchent sans pourrir, les mycènes et les omphales, de petite taille, à chapeau mince et pied élancé, les clitocybes en entonnoir, à lamelles largement décurrentes et chapeau souvent déprimé, et les armillaires. A ce groupe appartiennent d'excellents comestibles, le tricholome de la Saint-Georges *(Tricholoma georgii)* et le pied-bleu *(Rhodopaxillus nudus)*. L'armillaire *(Armillariella mellea)* est un clitocybe lignicole au pied muni d'un anneau, qui vient en touffes sur les souches, mais aussi à la base des arbres vivants où elle se comporte en parasite très actif, agent de *pourridiés ;* elle progresse d'arbre en arbre grâce à des cordonnets mycéliens ou rhizomorphes.

Pleurotes et *lentins* se classent auprès des tricholomes dont ils se distinguent par les lames décurrentes, le pied court, excentrique, et l'habitat lignicole. Le clitocybe de l'olivier *(Pleurotus olearius)*, orangé, est une espèce toxique qu'il ne faut pas confondre avec la chanterelle. Le meunier, *Clitopilus prunulus,* excellent comestible, est une petite espèce terricole à port de pleurote et spores roses.

Aux rhodophylles, agarics à spores roses anguleuses, appartient l'entolome livide, espèce très toxique bien que non mortelle.

R. Longo

▲ *Le clitocybe laqué,* **Laccaria laccata,** *est un Champignon qui offre de nombreuses variations. La variété* **amethystina** *est d'un beau violet foncé, pâlissant avec l'âge.*

▼ *Un des Champignons les plus spectaculaires : l'amanite tue-mouches,* **Amanita muscaria,** *à chapeau rouge couvert de verrues blanches. C'est une espèce toxique, qu'on trouve sous les bouleaux et les Conifères.*

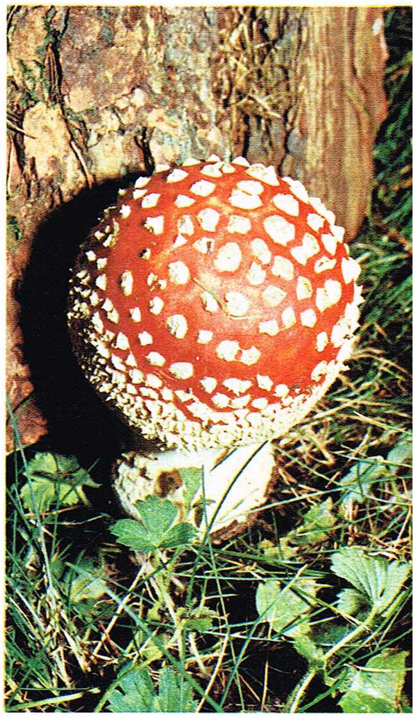

I.G.D.A. P 2

▶ *Le pied-bleu, Rhodopaxillus nudus, est un Champignon à chair parfumée, comestible apprécié qu'on récolte à l'approche de l'hiver dans l'humus des bois.*

H. Chaumeton - Jacana

▼ *Lamelles blanches, anneau ample, volve membraneuse caractérisent le Champignon le plus meurtrier : l'amanite phalloïde ; la couleur du chapeau, finement rayé de fibrilles soyeuses, peut varier du jaune verdâtre à l'ocracé ou au vert olive.*

Les *cortinaires* sont un groupe considérable (quatre cents espèces) et difficile de Champignons terrestres, souvent mycorrhiziques ; le genre se reconnaît aux lames couleur d'argile, à spores brun rouille, et à la cortine fibrilleuse qui persiste sur le pied.

Les *amanites* sont sans doute les mieux connus des Champignons à lamelles, car on a largement diffusé le signalement des espèces mortelles, surtout la phalloïde, *Amanita phalloides*, très commune dans les bois de feuillus : lames et spores blanches, pied pourvu d'un anneau et d'une volve membraneuse, chapeau olivâtre à fibrilles rayonnantes. La citrine *(A. citrina)* et la tue-mouches *(A. muscaria)*, celle-ci propre aux Conifères et aux bouleaux, sont tout aussi familières. A côté de ces espèces toxiques, auxquelles il faut joindre l'amanite panthère, le genre comporte d'excellents comestibles : l'oronge vraie *(A. cesarea)*, espèce surtout méridionale à lames jaunes, l'oronge blanche *(A. ovoidea)*, la golmotte *(A. rubescens)* qu'on trouve sous les chênes et les résineux.

L'amanite à étui *(Amanitopsis vaginata)* est une petite espèce comestible à volve membraneuse, mais sans anneau décelable. On retrouve ces caractères chez les *volvaires* à spores roses, à chapeau de taille appréciable, visqueux ou soyeux, qui viennent sur le fumier et les débris très azotés.

Archives I.G.D.A. P 2

Les *lépiotes* et les *psalliotes* n'ont jamais de volve, mais leur pied porte la trace d'un voile partiel, sous forme d'anneau membraneux ou de fibrilles annulaires ; leurs lames sont toujours libres et le pied (comme chez les amanites) se sépare aisément du chapeau.

Les lépiotes (et le genre voisin *Cystoderma*) ont des spores généralement blanches, parfois gris rose ou vertes. La coulemelle *(Lepiota [Leucocoprinus] procera)* et la lépiote déguenillée *(L. rhacodes)*, appréciées comme comestibles, sont deux espèces remarquables par leur port élevé, leur chapeau écailleux et la double bague mobile qui coulisse autour du pied fibreux.

Les psalliotes ou *pratelles* sont des Champignons à spores brun pourpre et à chair tendre, à anneau simple ou double, auxquels est maintenant réservé le nom d'*Agaricus (= Psalliota)*. Deux espèces au moins sont extrêmement familières : le rosé des prés, *Agaricus campestris*, et le champignon de couche ou champignon de Paris, *A. bisporus* (ou *A. hortensis*), qui fait l'objet d'une culture intensive. D'autres espèces sauvages sont également comestibles : *A. silvicola*, à fine odeur anisée, très commun dans les bois, *A. arvensis* ou boule de neige, qui vient dans les prairies et les jardins ; la psalliote jaunissante *(A. xanthodermus)* est au contraire très indigeste.

Les *pholiotes* et les *flammules* réunissent des espèces lignicoles à anneau membraneux et spores ocracées. *Pholiota squarrosa*, jaune brun, très écailleuse, et *P. adiposa*, visqueuse, sont d'actifs lignivores qui poussent en touffes denses au pied des arbres morts.

Les *strophaires, nématolomes, psilocybes*, sont caractérisés par leur sporée sombre, brun pourpre à noir. *Stropharia semiglobata* est un coprophile très commun, alors que *S. aeruginosa*, d'un bleu-vert remarquable, pousse dans l'herbe, sur le sol. *Nematoloma (Hypholoma) fasciculare* et *N. sublateritium* sont fréquents sur les vieilles souches. Les *Psilocybe* retiennent surtout l'intérêt par les propriétés hallucinogènes reconnues à certaines espèces exotiques (comme aussi à des strophaires et des panéoles) ; *P. semilanceata*, qui croît en touffes dans les prairies humides et les gazons, est pratiquement inactif.

Enfin les *coprins* sont des Champignons souvent éphémères, à lamelles et cystides déliquescentes ; elles se résorbent par autodigestion, de la périphérie au centre, aussitôt après la décharge des spores ; celles-ci sont d'un noir d'encre, et pourvues d'un large pore germinatif. Les coprins sont adaptés à des habitats très variés, riches en matières azotées ; ainsi beaucoup sont fimicoles ou coprophiles ; certains poussent sur les substrats végétaux décomposés ou sur les souches pourries, tel *C. micaceus*, très commun en forêt et dans les jardins. Le coprin chevelu *(C. comatus)*, espèce terricole de grande taille, est un des Champignons les plus appréciés des gourmets ; le coprin noir d'encre *(C. atramentarius)*, par contre, n'est comestible que si l'on évite de le consommer avec des boissons alcoolisées, car ses effets sont analogues à ceux de l'antabus, parfois utilisé pour « désintoxiquer » les alcooliques.

GASTÉROMYCÈTES

Cette dernière classe de Basidiomycètes est définie par un caractère négatif : contrairement aux ballistospores des Hyménomycètes, leurs basidiospores ne sont pas, à maturité, détachées brusquement de la baside. Le développement des Gastéromycètes est *angiocarpe*, et, en général, les basides mûrissent à l'intérieur d'une fructification qui reste close (sclérodermes et formes souterraines) ou s'ouvre par un ostiole (lycoperdons) ou par une déchirure *(Calvatia)* ; toutefois, chez les formes très évoluées telles que les *Phallus*, les spores se trouvent exposées en une masse gluante à la surface d'un chapeau souvent porté par un pied.

La fructification des Gastéromycètes revêt des formes et des structures extrêmement variées, où l'on définit toutefois des termes communs. L'enveloppe générale ou *péridium*, assimilable à la volve des amanites, comporte généralement deux couches distinctes : l'*exopéridium*, qui peut se fragmenter ou disparaître, et l'*endopéridium*, s'ouvrant ou non au sommet par un ostiole, et qui enferme la *gléba* ; on désigne ainsi l'hyménium, qui peut ébaucher une disposition en lamelles rayonnantes, ou tapisser de petites cavités, ou être simplement un lacis de filaments formant le *capillitium*.

Les Gastéromycètes constituent en réalité un groupe hétérogène, où se retrouvent des formes convergentes dérivées de divers types d'Hyménomycètes, agarics et bolets, sans doute par une adaptation à la vie souterraine ou xérophytique. Tous sont saprophytes dans le sol, sur le bois pourri et d'autres débris végétaux, sur les déjections animales. Les *Rhizopogon*, souterrains, et les sclérodermes peuvent former des mycorrhizes avec les arbres des forêts.

On reconnaît actuellement cinq ou six ordres de Gastéromycètes.

Les *Hyménogastrales* sont pour la plupart souterraines, et leurs fructifications restent closes à maturité. En réalité, ce ne sont pas de vrais Gastéromycètes, mais plutôt des formes hypogées apparentées soit aux bolets *(Rhizopogon)*, soit aux agarics : Astérosporales *(Arcangeliella, Hydnangium)*, coprins *(Montagnites, Secotium)* ou rhodophylles.

Les vrais Gastéromycètes mûrissent généralement au-dessus du sol (ou du substrat), et leurs fructifications s'ouvrent d'une manière ou d'une autre à maturité.

Chez les *Nidulariales* et les *Sphærobolales*, les fructifications sont globuleuses ou cupuliformes, et le tissu fertile s'organise en une ou plusieurs masses glébales sphériques ou lenticulaires, les *péridioles*, contenant les basidiospores. A maturité, les basidiocarpes de *Cyathus hirsutus* ou de *Crucibulum vulgare*, que l'on trouve sur le sol ou sur les brindilles, ou de *Cyathus stercoreus*, sur bouses desséchées, ressemblent à des nids minuscules contenant des œufs ; ce sont les péridioles, qui seront dispersés par l'impact des gouttes de pluie. La masse glébale unique, visqueuse, de *Sphaerobolus stellatus* est projetée en l'air par suite du retournement de l'exopéridium découpé en étoile.

Chez les *Sclérodermatales* et les *Lycoperdales*, un tel mécanisme de dispersion n'existe pas ; les basidiospores forment à maturité un amas poudreux, brun noir, libéré par l'ouverture ou la rupture du péridium, et sont dispersées par le vent. Le fruit des sclérodermes *(Scleroderma aurantium* et *S. verrucosum)* est délimité par une seule paroi épaisse, qui enferme une masse inorganisée de spores ; elles sont dispersées passivement par des fractures irrégulières de l'enveloppe. Les sclérodermes poussent surtout sur les sols acides, en association mycorrhizique avec les pins, les hêtres ou les bouleaux. Les lycoperdons et autres vesses-de-loup *(Bovista, Calvatia)* ainsi que les géasters ont une organisation plus complexe, avec un péridium à deux couches et une gléba spongieuse supportée par une columelle stérile. Les fructifications des *Lycoperdon (L. pyriforme, L. gemmatum)* ont un ostiole défini ; la partie supérieure de l'endopéridium est élastique, et, lorsqu'elle est heurtée par une goutte d'eau ou un Insecte, elle rebondit en projetant une bouffée de basidiospores. Les *Calvatia*, dont les fruits globuleux peuvent atteindre la taille d'un ballon *(C. gigantea)*, n'ont pas d'ostiole défini ; la masse énorme des spores est seulement mise à nu lorsque le péridium se rompt irrégulièrement et se désagrège.

H. Chaumeton - Jacana

▲ ***La vesse-de-loup à pierreries,*** **Lycoperdon gemmatum,** ***est très commune dans les bois en automne.***

Les géasters *(Geastrum fimbriatum, G. triplex)* s'ouvrent par le découpage en lobes étoilés de l'exopéridium plus ou moins charnu, découvrant l'endopéridium pourvu d'un ostiole. Les *Phallus* et genres voisins *(Phallales)* sont des Gastéromycètes hautement différenciés, à carpophore comportant un chapeau et un pied, à gléba déliquescente. La jeune fructification (l'« œuf » de *Phallus impudicus*) est totalement enveloppée par un exopéridium membraneux

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ ***La paroi externe des géasters s'ouvre en étoile. Par temps humide, les « bras » s'étalent largement sur le sol ; ils se rétractent par temps sec.***

▶ *Il y a près de deux siècles, Bulliard illustrait déjà de façon remarquable ce rare mais spectaculaire Gastéromycète,* **Clathrus cancellatus.**

Muséum national d'histoire naturelle

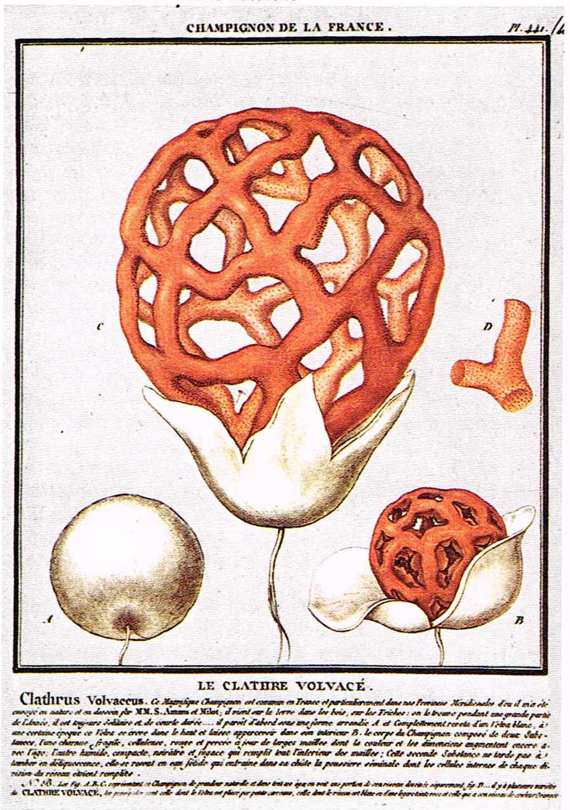

ferme mais élastique, et fixée au substrat ligneux enfoui dans le sol par des rhizomorphes ; l'endopéridium forme un coussin épais, gélatineux, enrobant la gléba. L'hyménium est porté par des lamelles fertiles plissées et anastomosées constituant une gléba charnue creusée de logettes. Chez les *Phallus,* la partie centrale de l'œuf est occupée par un réceptacle creux, cylindrique. A maturité, le péridium se rompt, et la base du réceptacle s'accroît rapidement, formant un pied entouré à la base de la volve, et coiffé par la gléba qui se désagrège ; les basidiospores mûres, vert foncé, sont engluées dans une gelée sucrée, d'odeur fétide, qui attire les Insectes coprophages. *Mutinus caninus* ressemble à un *Phallus* de petite taille, mais la partie supérieure du pied est lisse et de couleur orangée. *Anthurus archeri* (= *A. aseroeformis*) est une forme exotique, importée depuis une cinquantaine d'années en France où elle s'est largement répandue. Le pied est rudimentaire et le chapeau s'étale à la surface du sol ; il s'ouvre à maturité en bras étoilés, rouges, charnus, tachés de noir par les spores. *Clathrus cancellatus,* qu'on rencontre plus rarement, est une espèce tout à fait spectaculaire. Elle est à peu près dépourvue de pied, et le tissu fertile est découpé en réseau ; il forme à maturité une grosse boule rouge grillagée, tapissée intérieurement par la gléba.

DEUTÉROMYCOTINÉS

La sous-division des Deutéromycotinés est établie sur des bases artificielles pour des raisons de convenance, qui ne sont pas admises par tous les auteurs. Elle groupe en effet, par définition, les Champignons dépourvus de forme de reproduction sexuée, tout au moins dans les conditions de l'observation, à l'exclusion des Champignons inférieurs à zoospores, des formes conidioïdes d'Oomycètes (Péronosporales) et du vaste groupe des Mucorales asexuées, dont l'organe de reproduction est un sporocyste à spores endogènes. Pratiquement, ce sont tous des Eumycètes à mycélium septé, qui se multiplient végétativement par des propagules appelées *conidies* ou sont réduits à un mycélium stérile s'organisant en bulbilles ou en sclérotes. Par leur mode de végétation, la plupart d'entre eux s'apparentent aux Ascomycètes, et beaucoup ne sont autres qu'un stade asexué dans le cycle biologique d'un Ascomycète déterminé. Les formes qu'on peut rattacher aux Basidiomycètes sont moins nombreuses, d'autant qu'on en exclut les stades de multiplication végétative des rouilles et des charbons ; certaines s'identifient par la présence de boucles au niveau des cloisons, caractéristiques du mycélium secondaire des Basidiomycètes. Il reste que deux tiers environ des Deutéromycotinés ne sont représentés que par une ou plusieurs formes asexuées (dites aussi imparfaites, d'où la dénomination *Fungi imperfecti*). Pour certains, la fructification asco- ou basidiosporée est seulement méconnue, et l'on peut espérer que les progrès de l'information mycologique réduiront leur nombre ; d'autres sont peut-être des haplontes de Champignons hétérothalliques qui n'ont pas rencontré leur partenaire. Mais il est vraisemblable qu'un nombre appréciable d'espèces ont, au cours de l'évolution, perdu définitivement toute aptitude à la reproduction sexuée ; il restera nécessaire de leur attribuer un rang et un statut dans la nomenclature des Champignons. Par ailleurs, il est commode de traiter comme telles certaines formes imparfaites, bien qu'on puisse les rattacher à des espèces sexuées, parce qu'elles sont beaucoup plus largement répandues dans la nature que le stade parfait correspondant, ou parce qu'elles présentent un intérêt propre, soit comme moisissures banales *(Penicillium, Aspergillus),* soit comme agents pathogènes de Végétaux cultivés (*Fusarium, Gloeosporium, Drechslera,* etc.), ou de l'homme et des Animaux domestiques (dermatophytes).

Ainsi délimitée, la sous-division des Deutéromycotinés comprend près de deux mille genres et quelque quinze mille espèces, le tiers environ des Champignons actuellement décrits. En l'absence du critère naturel de classification qu'offre, aux autres groupes, la fructification sexuée, on les répartit en ensembles taxonomiques sur la base des caractères physionomiques et morphologiques des spores asexuées et des structures plus ou

▼ *Le satyre puant,* **Phallus impudicus,** *dresse sur un pied blanc son chapeau conique, englué dans la masse vert sombre des spores.*

H. Chaumeton - Jacana

▲ **Penicillium pansum** *est la moisissure la plus fréquente sur les pommes entreposées.*

◀ *Sous le nom de* **Coremium vulgare** *(le genre* **Coremium** *désignant plus particulièrement les* **Penicillium** *stilbacés), Corda (1840) analyse finement « ces belles formations souvent fantastiques des Mucédinées ».*

moins élaborées qui les portent. Jusqu'à présent, seul le système de Saccardo (1884-1886) couvre l'ensemble des *Fungi imperfecti* (considérés comme une classe des Eumycètes). Quoique sujet à critique, il reste valable au niveau des coupures fondamentales, qui déterminent quatre ordres : *Sphæropsidales* (les conidies sont formées à l'intérieur d'un conceptacle ou *pycnide* qui s'ouvre à maturité par un ostiole, par une fente ou par une déchirure de la paroi) ; *Mélanconiales* (le plus souvent inféodées aux Végétaux, elles produisent leurs spores sur des stromas aplatis, ou *acervules*, sous-cuticulaires, découverts par la rupture de l'épiderme de l'hôte) ; *Hyphomycétales* (les spores se forment librement sur les filaments mycéliens épars ou agrégés) ; *Mycelia sterilia* (dépourvus d'organes de multiplication spécialisés).

Actuellement, on sépare des autres Champignons imparfaits les formes unicellulaires bourgeonnantes (Levures imparfaites) ou *Blastomycètes*, et l'on regroupe les Champignons à sporocarpes *(Sphæropsidales* et *Mélanconiales)* dans la classe des *Cœlomycètes*, opposés aux *Hyphomycètes* à thalle entièrement mycélien.

BLASTOMYCÈTES

Les Levures imparfaites sont pour la plupart *(Cryptococcales = Pseudosaccharomycétacées)* indiscernables de la forme végétative des Saccharomycétacées ; elles se multiplient par bourgeonnement, et peuvent former un pseudo-mycélium (genre *Candida*) ou un mycélium typique produisant des blastospores *(Trichosporon)* ; toutefois les affinités des *Cryptococcus* seraient auprès des Trémellales, et certains *Rhodotorula* sont des formes imparfaites de *Rhodosporidium*, Levures saprophytes dont le cycle biologique est analogue à celui des Ustilaginales. Aux *Cryptococcales* appartiennent bon nombre de Levures saprophytes, dont le *Torulopsis utilis*, cultivé industriellement comme Levure alimentaire, mais aussi des espèces pathogènes de l'homme et des Animaux : *Candida albicans*, agent du « muguet » et d'autres formes de candidose, l'une des affections fongiques les plus fréquentes ; *Cryptococcus neoformans*, agent d'une blastomycose qui peut être mortelle.

Les *Sporobolomycétales*, ou Levures-miroirs, saprophytes, souvent riches en pigments caroténoïdes, se reproduisent par bourgeonnement, et aussi par l'émission de *ballistospores* qui les apparentent aux Basidiomycètes, et plus précisément aux Trémellales.

HYPHOMYCÈTES

C'est de beaucoup le groupe le plus vaste (un millier de genres) et le plus diversifié de Champignons imparfaits. On y classe à présent les *Mycelia sterilia (Agonomycétales)*, dépourvus de spores, qui peuvent être des formes mycéliennes d'Asco- ou de Basidiomycètes, ou d'autres Champignons imparfaits ; ce sont surtout des Champignons du sol, dont la pérennité est assurée par des chlamydospores, des bulbilles (genre *Papulospora*) ou des sclérotes. Certaines espèces de *Rhizoctonia* et de *Sclerotium* sont des pathogènes sévères de plantes cultivées.

La plupart des Hyphomycètes produisent des conidies qui sont soit des éléments préexistants du thalle qui se segmente et se différencie *(arthrospores = arthroconidies)*, soit des éléments néo-formés *(conidies vraies)*. Ces spores sont de formes et de dimensions variées, uni- ou pluricellulaires, portées directement par le mycélium végétatif (micronémés) ou sur des hyphes spécialisées *(conidiophores)* supportant des *cellules sporogènes*, l'ensemble constituant un *appareil conidien* (macronémés). Chez les *Hyphomycétales*, les appareils conidiens sont librement répartis sur le mycélium, alors que, chez les *Stilbellales*, les conidiophores sont dressés en faisceaux plus ou moins serrés *(synnémas* ou *corémies)* ; chez les *Tuberculariales*, la base des conidiophores est condensée en coussinets pseudo-stromatiques ou *sporodochies*. Dans les trois ordres (ou familles, selon les auteurs), la coupure classique en Moniliacées, de teinte claire ou vivement colorées, et en Dématiacées, à mycélium et — ou spores mélanisées, est maintenue, mais on tient surtout compte à présent, pour délimiter les genres, du mode de développement des conidiophores et du fonctionnement de la cellule sporogène. La nature de la paroi sporale permet d'introduire une coupure entre les formes à conidies sèches *(Xérosporées)* et les formes à spores muqueuses ou gluantes *(Gloïosporées)* ; cette distinction ne conduit pas à un système de classification cohérent, mais sa signification biologique est importante : les spores sèches sont dispersées par le vent, alors que les

Photo Vegh

▲ *Sur cette micro-photographie d'une préparation de* Coryneum beijerincki *(Hyphomycétales), parasite de l'abricot, on observe les conidies brunes dispersées sur le mycélium.*

▶ *Une Stilbellale exotique,* Stilbothamnium nudipes, *dont les longues corémies jaune d'or émergent des fruits pourrissant sur le sol, en forêt tropicale.*

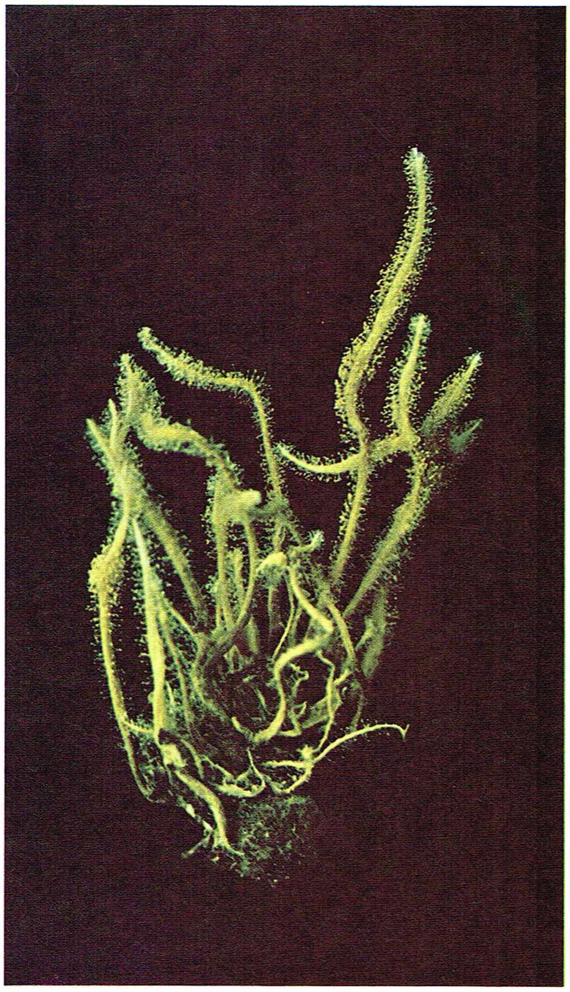

Muséum national d'histoire naturelle - Laboratoire de géologie

Page ci-contre :
▶ *Coupe dans un chancre du poirier montrant les pycnides érumpentes de la Sphæropsidale parasite* Phacidiopycnis furfuracea. *(en bas, à gauche).*

spores gluantes sont véhiculées par les Insectes ou projetées par les gouttes de pluie ; cela intéresse aussi bien l'épidémiologie des maladies parasitaires que la contamination par les moisissures.

Les conidies sont, en règle générale, des éléments reproducteurs, des moyens de dispersion ou de conservation. Cependant, certains Ascomycètes produisent sur des appareils conidiens de type normal des *microconidies,* qui jouent le rôle d'éléments fécondants, et les *oïdies* des Basidiomycètes assurent de la même façon la dicaryotisation du mycélium primaire.

CŒLOMYCÈTES

Ces Deutéromycètes produisent des conidies par des mécanismes analogues à ceux des Hyphomycètes, mais sur ou dans des organes de fructification différenciés. Les deux types fondamentaux d'ascocarpes (périthèce des Pyrénomycètes, apothécie des Discomycètes) ont leurs homologues dans les sporocarpes des *Fungi imperfecti : pycnides* des Sphæropsidales, *acervules* des Mélanconiales. Les pycnides offrent une même diversité morphologique que les ascothécies : conceptacles à paroi dure et sombre, ou charnue et de teinte claire ; déhiscence ostiolaire, ou par une fente ou une déchirure de la paroi. Bon nombre d'Ascomycètes produisent, avant leurs fructifications ascosporées et parfois dans le même stroma, une fructification imparfaite de type *Sphæropsidale : Ascochyta* ou *Septoria* dans le cycle des *Mycosphaerella, Phoma lingam,* forme conidienne de *Leptosphaeria maculans, Polystigmina,* forme conidienne des *Polystigma,* etc. Toutefois, on peut observer des conceptacles analogues à des pycnides qui produisent des spores de très petite taille, incapables de germer ; il s'agit alors de spermogonies contenant des gamètes mâles ou spermaties.

Les *Mélanconiales,* dont les acervules sont, en principe, sous-cuticulaires ou sous-épidermiques, sont fréquemment parasites des Végétaux qui les supportent ; elles aussi représentent souvent des formes imparfaites d'Ascomycètes : les *Colletotrichum* appartiennent au cycle des *Glomerella, Melanconium* est lié aux *Melanconis, Cryptosporiopsis malicorticis (= Gloeosporium perennans),* agent de chancre du pommier, a pour forme parfaite un *Pezicula,* etc.

Les Champignons imparfaits jouent un rôle important dans la nature et dans l'économie humaine. Beaucoup de parasites des plantes cultivées sont des *Sphæropsidales* (divers *Septoria,* des *Phoma, Coniothyrium diplodiella,* agent du rot blanc de la vigne), des *Mélanconiales* (*Colletotrichum* et *Gloeosporium,* responsables des anthracnoses et de pourritures sèches) ; de multiples affections plus ou moins sévères, ou des atteintes secondaires d'organes affaiblis ou malades, sont dues à des Hyphomycètes : *Fusarium, Cercospora, Alternaria, Drechslera, Cladosporium,* etc. ; les Ascomycètes parasites ont souvent une phase conidienne qui assure activement la dissémination de la maladie pendant la période de végétation.

L'homme et les Animaux sont également sujets à des maladies d'origine fongique dont les agents sont des Deutéromycètes : *Trichophyton* et autres dermatophytes liés aux teignes, *Aspergillus fumigatus,* responsable de graves affections pulmonaires ; les spores de moisissures, présentes dans l'atmosphère, sont parfois la cause de réactions allergiques. Beaucoup de Champignons parasites ont une phase saprophytique asexuée, qui assure la pérennité de l'espèce en l'absence momentanée de l'hôte électif ; ils végètent sur les débris végétaux ou animaux, et surtout dans le sol, réservoir inépuisable de Champignons imparfaits. Ce qui a été dit de l'activité biologique des Champignons du sol et de leur rôle fondamental dans l'équilibre des milieux naturels s'applique tout particulièrement aux Deutéromycètes.

Un grand nombre de Micromycètes imparfaits peuvent être cultivés sur des milieux artificiels. L'expérimentation au laboratoire permet, non seulement de préciser les connaissances théoriques sur ces micro-organismes, mais aussi d'exploiter industriellement leurs aptitudes métaboliques, qui sont considérables, pour l'obtention de produits utiles, voire indispensables, des fromages aux acides organiques et aux antibiotiques.

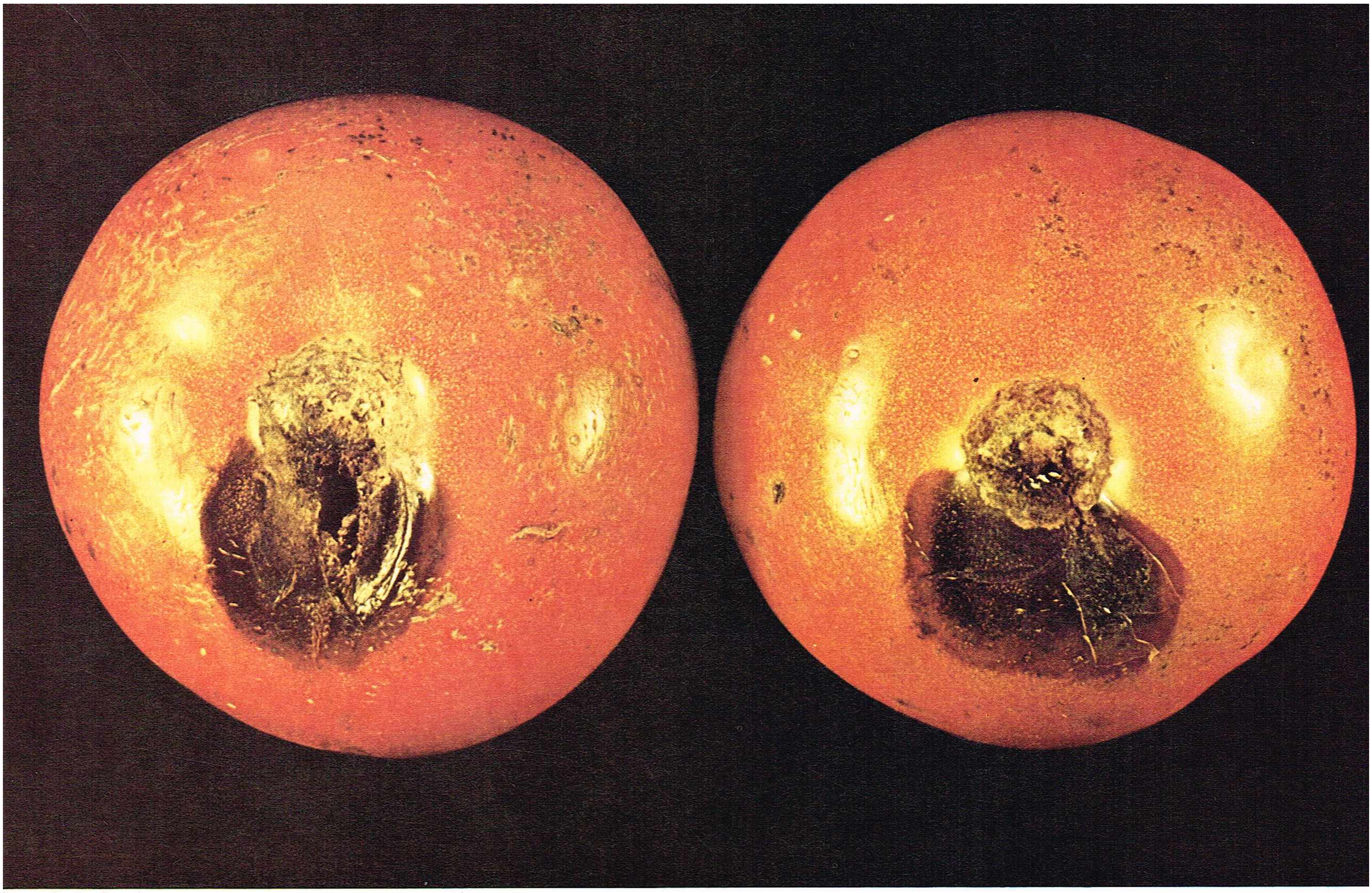

BIBLIOGRAPHIE

AINSWORTH G. C., *Dictionary of the Fungi*, 6e éd., Kew, 1971. - BARNETT, H. L., *Illustrated Genera of Imperfect Fungi*, 3e éd., Minneapolis, 1972. - CHADEFAUD M., *les Végétaux non vasculaires*, in CHADEFAUD M. & EMBERGER L., *Traité de botanique, t. I*, Paris, 1960; *Champignons*, in GRASSE P. P., *Précis de sciences biologiques. Botanique*, Paris, 1963. - DENNIS R. W. G., *British Ascomycetes*, Lehre, 1968. - HEIM R., *Champignons d'Europe*, 2e éd., Paris, 1969. - LANGERON M., *Précis de mycologie*, Paris, 1945. - MARTIN G. W. & ALEXOPOULOS C. J., *The Myxomycetes*, Iowa, 1969. - MOREAU F., *les Champignons*, Paris, 1952. - SMITH G., *An Introduction to Industrial Mycology*, 6e éd., Londres, 1969. - SPARROW F. K., *Aquatic Phycomycetes*, 2e éd., Ann Arbor, 1960. - WEBSTER J., *Introduction to Fungi*, Cambridge, 1970. - ZYCHA H., SIEPMANN R. & LINNEMANN G., *Mucorales*, Lehre, 1969.

▲ Alternaria solani *(Hyphomycétales) est une moisissure d'un noir velouté qui attaque fréquemment les tomates.*

▼ *Une tête conidienne isolée de* Stilbothamnium nudipes *(ressemblant à un* Aspergillus*), photographiée au microscope électronique à balayage.*

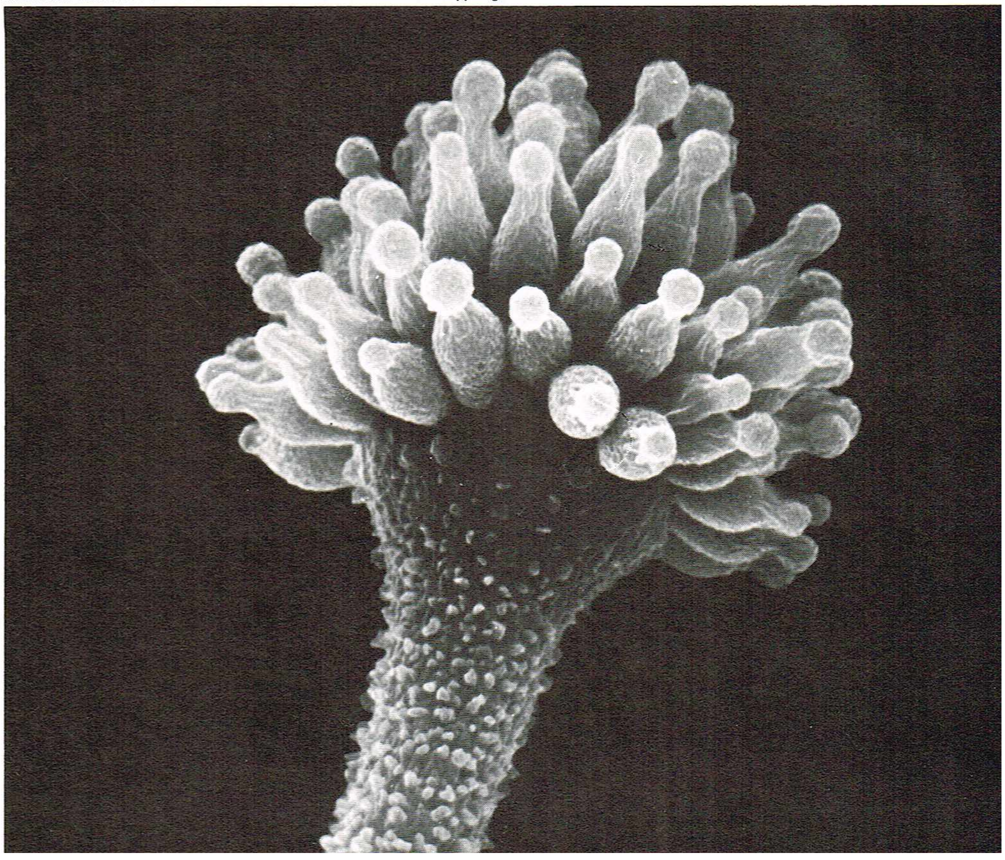

Atlas Photo

LES LICHENS

▲ *Remarquables réussites biologiques, les Lichens — associations de Champignons et d'Algues — ont pu conquérir les milieux les plus variés. Ici, thalle d'*Evernia prunastri *sur une haie.*

Les Lichens sont très répandus dans la nature. Ayant des besoins modestes, ils colonisent des milieux particulièrement inhospitaliers, roches, écorces, terre nue, et se présentent sous forme de taches ou de croûtes, de lames foliacées, de lanières ou de filaments dressés ou pendants.

Les Lichens ne constituent pas un groupe systématique, comparable à celui des Algues ou des Mousses, mais un groupe biologique où sont réunis des Champignons qui offrent la particularité de former avec des Algues microscopiques, terrestres ou épiphytes, des associations symbiotiques spécifiques, stables, reproductibles et apparemment obligatoires qui aboutissent à la formation de thalles bien visibles. Ceux-ci, formés pour l'essentiel par les hyphes du Champignon, entre lesquelles sont logées les cellules de l'Algue, résultent de la croissance synchrone et équilibrée des deux constituants. Souvent complexes, ils diffèrent morphologiquement du mycélium apparemment non structuré des Champignons non lichénisants.

En pratique, le terme de Lichens désigne les associations lichéniques elles-mêmes et les thalles qu'elles forment. L'élément fongique est alors appelé le mycosymbiote ou mycobionte, l'élément algal, phycosymbiote ou phycobionte.

Découverte de la nature des Lichens

Linné (1753) classe les Lichens, dotés d'un thalle, parmi les Algues, avec les Hépatiques. Acharius (1798) les en sépare en soulignant la ressemblance de leurs organes reproducteurs avec ceux des Ascomycètes. Toutefois, à cause de leur thalle, il fait des Lichens un groupe particulier de Cryptogames, intermédiaire entre les Algues et les Champignons. Wallroth (1827) découvre que les thalles des Lichens sont constitués d'hyphes incolores et de cellules vertes. Il identifie celles-ci avec des Algues aériennes, Chlorophycées et Cyanophycées, mais, ayant remarqué qu'elles sont attachées aux hyphes, il en conclut qu'elles sont engendrées par celles-ci. Il les interprète comme des cellules reproductrices, capables de donner selon les circonstances soit des thalles parfaits, soit des colonies algales. Il les baptise gonidies, nom toujours en usage. En 1866, De Bary suggère que certains « Lichens » pourraient n'être que des Algues envahies par des hyphes de Champignons parasites. Selon lui, l'*Ephebe lanata*, aux très fines ramifications, serait ainsi un *Stigonema*, Cyanophycée filamenteuse, parasité par un Ascomycète; les *Collema* seraient de même des *Nostoc* et les *Graphis* des croûtes de *Trentepohlia*, envahis par des Discomycètes parasites. Toutefois, c'est au Suisse Schwendener (1869) que revient le mérite, après des observations minutieuses, d'étendre, en les reformulant, les vues de De Bary à l'ensemble des Lichens qu'il définit comme étant des Champignons parasites d'Algues. Reinke (1896) critique le terme de parasite qui, selon lui, ne rend pas compte du remarquable équilibre et des particularités des associations lichéniques. A la notion de parasitisme, il propose de substituer celle de symbiose.

Grands groupes de Lichens. Les Lichens ont toujours pour élément fongique soit un Ascomycète (ce sont les Ascolichens), soit un Basidiomycète (ce sont les Basidiolichens), soit un Hyphomycète (ce sont les Hypholichens) : on ne connaît à l'état lichénisé ni Zygomycète ni Phycomycète, ni Myxomycète, ni Trichomycète.

ASCOLICHENS

Très nombreux, ils comptent près de vingt mille espèces, dont les plus communes. Ils représentent près de la moitié de l'ensemble des Ascomycètes, de sorte qu'on peut s'étonner du peu d'intérêt que leur portent généralement les mycologues.

Nous étudierons tour à tour : a) les Ascomycètes lichénisants et leurs rapports avec les Ascomycètes non lichénisants; b) les Algues lichénisantes; c) l'association lichénique et, notamment : sa spécificité, les rapports des constituants entre eux et les essais de synthèse; le

thalle, sa structure, son mode de développement, sa reproduction ; le chimisme et la biologie des Ascolichens ; leur classification.

Ascomycètes lichénisants

Les Ascomycètes lichénisants sont toujours des Euascomycètes dont les asques, typiques, sont produits dans des formations spéciales, les ascocarpes. Ils sont surtout connus par leur étude directe dans le thalle, notamment en ce qui concerne l'appareil reproducteur ; toutefois, un petit nombre d'entre eux ont été isolés à partir de spores ou de fragments d'hyphes et obtenus en culture pure, ce qui a fourni d'autres indications, notamment d'ordre biologique.

Cycle de reproduction

Il n'existe pas de différences fondamentales entre les Ascomycètes lichénisants et les autres Ascomycètes. En particulier, le cycle de reproduction est le même.

L'appareil végétatif appartient au gamétophyte : il porte l'appareil reproducteur femelle et des filaments conidiogènes qui sont peut-être les appareils reproducteurs mâles.

L'appareil femelle ou appareil ascogonial n'engendre pas de gamètes libres : ce sont certains de ses éléments, les cellules ascogoniales, qui en tiennent lieu.

Ces cellules engendrent sur place un prosporophyte réduit, resté longtemps inaperçu, qui donne à son tour naissance à un ascosporophyte dicaryotique, c'est-à-dire à noyaux haploïdes accouplés. Il se développe lui aussi sur place, en parasite sur le gamétophyte, dans les ascocarpes produits par celui-ci. L'ascosporophyte engendre les asques diploïdes qui sont des tétrasporocystes, où, après méiose, se forment les ascospores. Haploïdes, celles-ci donnent naissance, en germant, à de nouveaux gamétophytes. La diplophase est réduite à l'asque.

Appareil végétatif. A l'état lichénisé, l'appareil végétatif est constitué par les hyphes du thalle. Caractéristique de l'association lichénique, il ne s'édifie totalement qu'en présence d'Algues et sera étudié plus loin.

En culture pure, le mycosymbiote forme de petites colonies compactes, épaisses, à croissance très lente. D'abord floconneuses, elles se structurent ensuite et sont dès lors formées d'une couche corticale garnie ou non d'hyphes aériennes, d'une couche lacuneuse et d'une couche médullaire. Elles s'enfoncent dans le milieu ou s'étalent sur celui-ci ; plus rarement, elles tendent à se redresser. Elles présentent de nombreuses variantes sans doute spécifiques (Werner, 1932).

Cytologie. Les hyphes ont une paroi épaisse, formée d'osides divers dont certains se retrouvent chez les Ascomycètes non lichénisants, par exemple le mannose, la callose et la chitine auxquels il convient d'ajouter deux osides particuliers : la lichénine et l'isolichénine.

Les hyphes peuvent s'unir pour former différents types de plectenchyme. Dans les thalles, et notamment dans les hyphes en contact avec les gonidies, s'observent en microscopie électronique des *corps ellipsoïdaux* de nature et de fonction encore non élucidées.

Appareil conidiogène et appareil mâle. En culture pure, le mycosymbiote engendre des conidies produites par des hyphes aériennes et des arthroconidies formées par désarticulation d'hyphes mycéliennes. De plus, le *Cladonia cristatella* engendre des microspores produites dans des pycnides semblables à celles des thalles. Hale (1957) a identifié les conidies brunes du mycosymbiote du *Buellia stillingiana* avec celles de l'Ascomycète imparfait : *Sporidesmium folliculatum.*

Dans les thalles, les Ascomycètes lichénisants engendrent parfois des conidies (*Peltigera, Gyalecta,* Caliciacées), mais plus généralement des microconidies de forme variée. Chez les Caliciacées, il s'agit d'arthroconidies ; chez quelques rares Collémacées, de spores naissant isolément sur les hyphes. Dans tous les autres cas, elles se forment à l'intérieur de *pycnides,* petites formations creuses, s'ouvrant par un ostiole étroit : chez les Lichens, mucédies, acervules et sporodochies à face externe conidiogènes sont en effet inconnues.

Les filaments conidiogènes peuvent être libres, simples ou ramifiés, ou encore anastomosés en réseau. Les cellules sporogènes sont tantôt latérales et allongées (c'est le type exobasidié), tantôt intercalaires et non différenciées (c'est le type endobasidié). Les conidies, toujours exogènes, sont sessiles ou pourvues d'un style : elles ne se forment jamais au fond d'un goulot ou d'une collerette, comme c'est souvent le cas chez les Ascomycètes non lichénisants.

Certains auteurs considèrent les conidies et les microconidies comme des spores asexuelles. D'autres pensent qu'elles pourraient être des gamètes mâles, fonctionnels ou non. *Il n'y a pas chez les Lichens de filaments parascogoniaux* (appareil mâle qui n'engendre pas de gamètes, mais tient lieu lui-même d'élément fécondant).

Appareil ascogonial (= appareil femelle). Chez les Lichens, les filaments ascogoniaux sont toujours du type filamenteux, c'est-à-dire constitués par un très grand

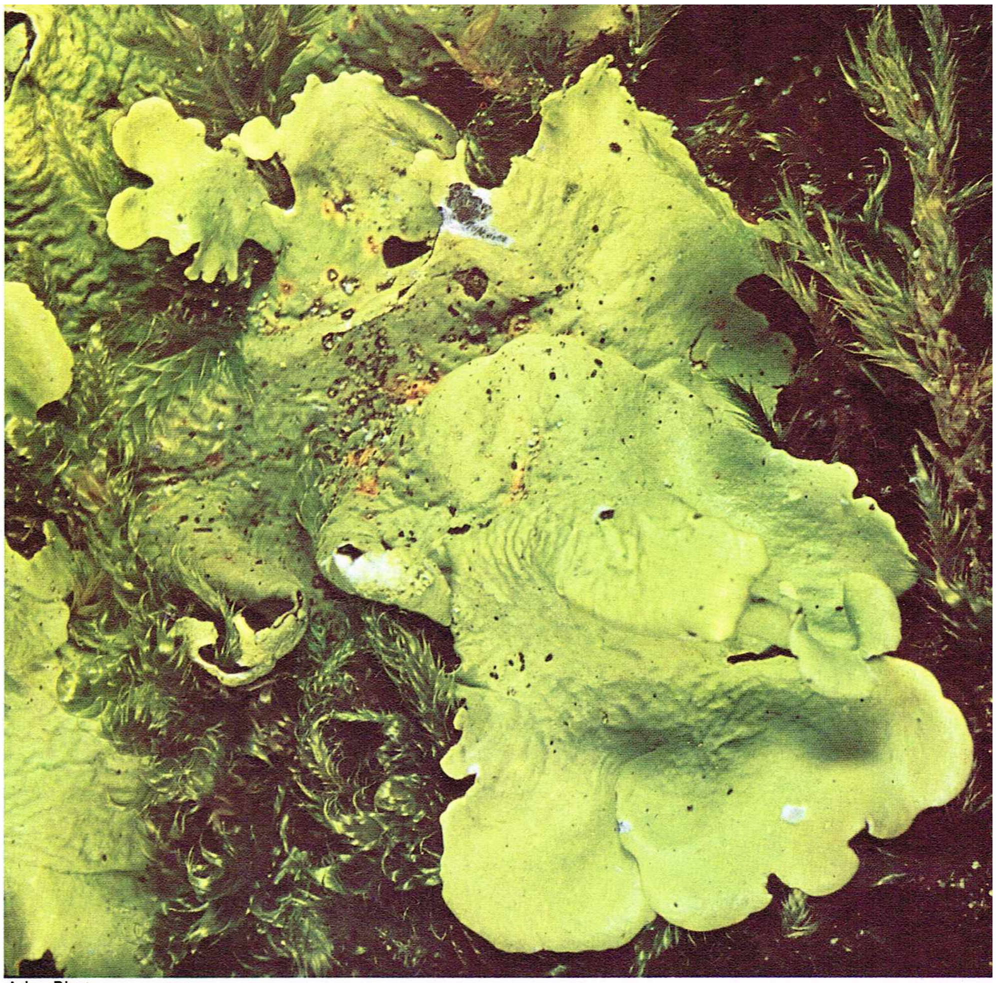

Atlas Photo

▲ L'association lichénique aboutit à la formation de thalles qui diffèrent morphologiquement des myceliums des Champignons non lichénisants.

▼ La plupart des Lichens sont constitués par des Euascomycètes dont les asques sont produits dans des ascocarpes (en rouge et noir sur ce cliché).

M. Zigliara - Atlas Photo

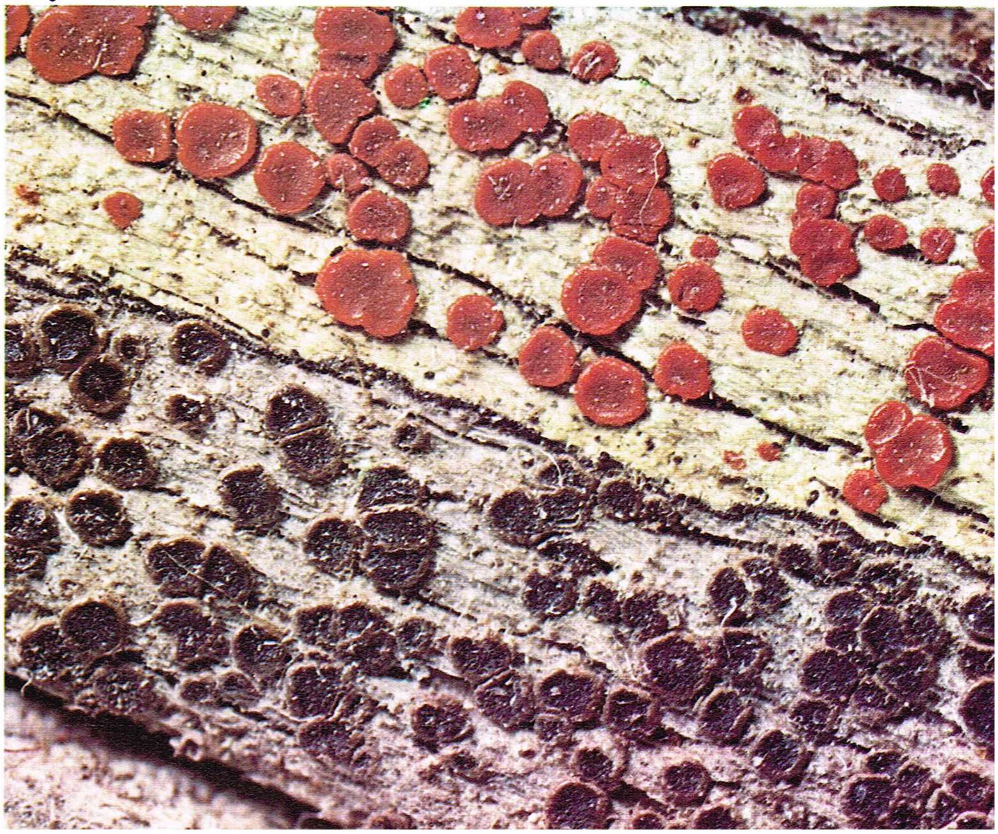

J. Vasserot - Jacana

▲ *Il n'y a pas de différence fondamentale entre les cycles de reproduction des Ascomycètes lichénisants et non lichénisants. Chez les Lichens, ici* Peltigera canina, *le thalle représente l'appareil végétatif.*

nombre de cellules, en général uninucléées et isodiamétriques, plus rarement *(Peltigera)* gonflées et plurinucléées. Ils sont souvent ramifiés et groupés en appareils ascogoniaux complexes.

Stromas. Chez les Ascomycètes non lichénisants, les filaments ascogoniaux s'édifient tantôt directement sur le mycélium, tantôt dans des stromas. Chez les Lichens, ils se forment dans le thalle, parfois dans une portion à peine différenciée de celui-ci : le primordium. Chez quelques Pyrénolichens (Trypéthéliacées), les ascocarpes adultes sont réunis à plusieurs dans des formations particulières à aspect de stromas. Celles-ci toutefois se développent secondairement, autour des ascocarpes déjà formés, et ne sont donc pas homologues aux stromas des Ascomycètes non lichénisants (Johnson, 1940). Il n'y aurait donc pas chez les Lichens de stromas *stricto sensu*, le thalle ou le primordium en tiendrait lieu.

L'appareil sporophytique. Le *prosporophyte* est réduit mais généralement reconnaissable. L'*ascosporophyte* est souvent pourvu d'une partie primaire formée de cellules uninucléées et sans doute apogame, et d'une partie secondaire dicaryotique.

Les asques. La forme des asques, la structure de leur paroi et des différenciations apicales de celle-ci, leur mode de déhiscence sont des caractères largement utilisés en systématique.

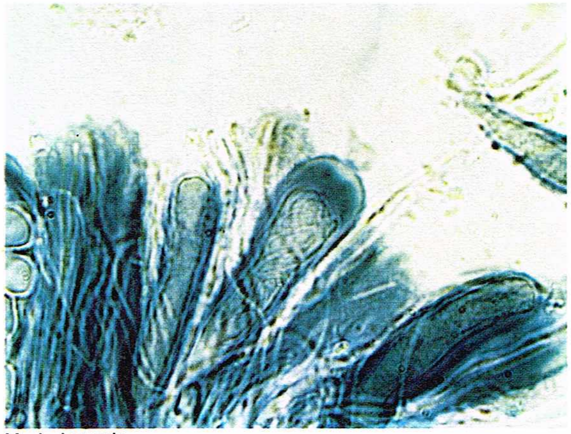

M. A. Letrouit

▶ *Les Ascomycètes lichénisants sont en majorité des archæascés dont les asques ont une paroi épaisse et sont colorables en bleu par l'iode.*

Chez les Ascolichens, les asques sont généralement claviformes, mais parfois ils ont une forme plus particulière : asques globuleux (Arthoniacées), asques cylindriques (Caliciacées et Bæomycétacées), asques en bouteille (Thélocarpacées). Leur paroi ne diffère pas fondamentalement de celle des autres Ascomycètes. Elle est formée en principe d'une couche externe mince *(l'exoascus)* et d'une couche interne *(l'endoascus)* dont l'épaisseur varie selon les groupes. Il peut s'y ajouter un film interne transitoire. Au sommet de l'asque, ces couches se modifient et forment l'*appareil apical* dont la structure, variable, est utilisée en systématique. Les pièces essentielles en sont le *dôme apical* dérivé de l'endoascus et dans lequel peuvent se différencier des anneaux amyloïdes ou chitinoïdes, et la *nasse apicale*, formée de bâtonnets anastomosés, en relation avec l'épiplasme et logée dans une cavité creusée à la base du dôme apical.

A de rares exceptions près (Caliciacées, Thélocarpacées), les asques des Lichens ont un endoascus épais. Ils appartiennent à deux types principaux : le type bituniqué et le type archæascé. Le *type bituniqué* s'observe chez les Pyrénolichens et les Graphidales à paraphysoïdes. Il caractérise aussi les Pyrénomycètes ascoloculaires et quelques Discomycètes de la famille des Patellariacées. Dans ce type, la paroi de l'asque a un endoascus épais qui forme un dôme apical lamelleux ni amyloïde, ni chitinoïde. Il est creusé d'une chambre oculaire où est logée une nasse. Lors de la déhiscence, très caractéristique, l'exoascus se rompt et l'endoascus en jaillit, entraînant le contenu ascal. Le *type archæascé* (Chadefaud et Galinou, 1953) caractérise les Lichens de l'ordre des Lécanorales : chez les Ascomycètes non lichénisants, il n'est connu que chez quelques rares Patellariacées *(Karshia)*. Dans ce type, l'exoascus est recouvert d'un gélin amyloïde ; l'endoascus est épais et double ; de sa couche interne dérive le dôme apical. Celui-ci, lamelleux et amyloïde, peut contenir des différenciations plus ou moins fortement colorées dont la forme varie avec les familles. Il peut y avoir une nasse apicale. La déhiscence est rarement du type bituniqué. Plus souvent, elle est bivalve (l'exoascus se fend longitudinalement, l'endoascus n'en jaillit pas) ou en rostre (seul le dôme s'allonge hors de l'exoascus ; il n'entraîne pas le contenu ascal). Le type archæascé rappelle à la fois le type bituniqué, à cause de son endoascus épais, et le type annellascé, à cause des différenciations souvent complexes du dôme. C'est pourquoi on peut penser qu'il est peut-être archaïque. A côté de ces types principaux, on en trouve quelques autres plus rares : asques à paroi évanescente des Caliciales, asques à gros bouchon apical légèrement chitinoïde des Graphidales à paraphyses, et semblables à ceux des Discomycètes hélotiales, asques à paroi mince et bouchon apical réduit des *Baeomyces* rappelant, sauf l'absence d'entonnoir membraneux, ceux des *Leotia*.

On remarquera que, chez les Ascolichens, on n'a observé à ce jour *ni asques operculés*, comparables à ceux des Pezizales, *ni asques annellascés stricto sensu* (asques à paroi mince, à dôme réduit, jamais amyloïde, mais contenant un anneau très net).

Les ascospores. Les asques contiennent généralement huit spores, mais il peut y en avoir une seule ou plusieurs centaines (Acarosporales). Leur taille varie de quelques microns à plus de 300 μ (*Pertusaria* sp.). Les ascospores sont parfois bicellulaires (Caloplacales, etc.), ce qui serait, selon Chadefaud (1960), le cas fondamental ; le plus souvent, elles sont unicellulaires, et alors ellipsoïdales ou septées avec un plus ou moins grand nombre de cloisons transversales ; elles sont parfois muriformes.

La paroi des ascospores est hyaline ou brune, souvent mince, parfois épaisse et complexe (*Pertusaria*, *Buellia*, etc.). Chez les Graphidacées *stricto sensu* et les Pyrénulacées, les cloisons transversales sont épaisses et biconcaves. Chez les Caloplacacées, à spores hyalines binucléées, la cloison transversale est épaisse mais incomplète : un canal unit les logettes polaires (spores polariculaires). Les spores ornementées sont exceptionnelles *(Solorina)*. Enfin on ne connaît pas de spores à sillon germinatif.

Les ascocarpes. Ce sont les formations gamétophytiques dans lesquelles naissent les asques. Ils sont composés de trois parties : l'*hyménium*, formé par les asques auxquels se mêlent ou non des filaments stériles (fila-

ments interascaux ou paraphyses *lato sensu*) ; le *sous-hyménium* où est localisé l'appareil sporophytique; l'*excipulum* constitué uniquement d'hyphes gamétophytiques stériles.

Selon leur mode de développement, on distingue trois types de filaments interascaux : les *paraphyses vraies* qui, libres entre elles, naissent du sous-hyménium et poussent vers le haut; les *pseudo-paraphyses* qui naissent au-dessus des asques aux dépens d'une cloche sus-hyméniale et s'allongent vers le bas : elles sont exceptionnelles chez les Lichens; les *filaments paraphysoïdes,* attachés à leurs deux extrémités et qui dérivent du réseau paraphysoïde carpocentral, comme nous le verrons plus loin. Chez les Caliciales, lichénisantes ou non, l'hyménium est réduit à une masse pulvérulente. Chez les *Umbilicaria* du groupe *Gyrophora*, il est localisé sur des rides contournées de la face supérieure de l'ascocarpe.

Chez les Lichens, l'excipulum peut avoir un aspect thallin : il est alors dit *lécanorin.* Dans les autres cas, il est dit *lécidéin.*

D'après leur forme, on distingue chez les Lichens comme chez les Ascomycètes non lichénisants deux types d'ascocarpes : les *périthèces,* petites formations creuses à l'intérieur desquelles se forment les asques et qui s'ouvrent par un pore étroit, l'ostiole; les *apothécies*, généralement circulaires, dont la face supérieure porte les asques. Les *lirelles* sont des apothécies particulières, allongées ou ramifiées. Les périthèces caractérisent les Pyrénolichens, les apothécies, les Discolichens.

L'ontogénie des ascocarpes. Les ascocarpes, même s'ils sont du même type morphologique, ne se développent pas tous de la même façon, et on attache maintenant une grande importance à ces différences. Chez les Lichens, le développement des ascocarpes suit les mêmes étapes que chez les espèces non lichénisantes et on y retrouve les mêmes formations fondamentales. Il débute par la mise en place d'un *primordium* qui, chez les Lichens, est presque toujours plexiforme. De ce primordium dérive une *ébauche primaire* formée d'une *enveloppe* et d'un *carpocentre*. Ce dernier est divisé en : un *ménisque sous-hyménial* qui peut engendrer des paraphyses vraies; une *cloche sus-hyméniale* d'où naissent les pseudo-paraphyses, interascales ou non; un *réseau paraphysoïde* unissant les deux, d'où dérivent, s'il persiste, les filaments paraphysoïdes interascaux. A ces formations primaires s'ajoutent des formations secondaires, les unes *préparathéciales* et dérivées selon le cas du stroma, du thalle ou de l'ébauche primaire, les autres *parathéciales* et issues de la ramification et de l'allongement d'hyphes divariquées, ce qui leur donne un aspect cladomoïde (structure en jet d'eau).

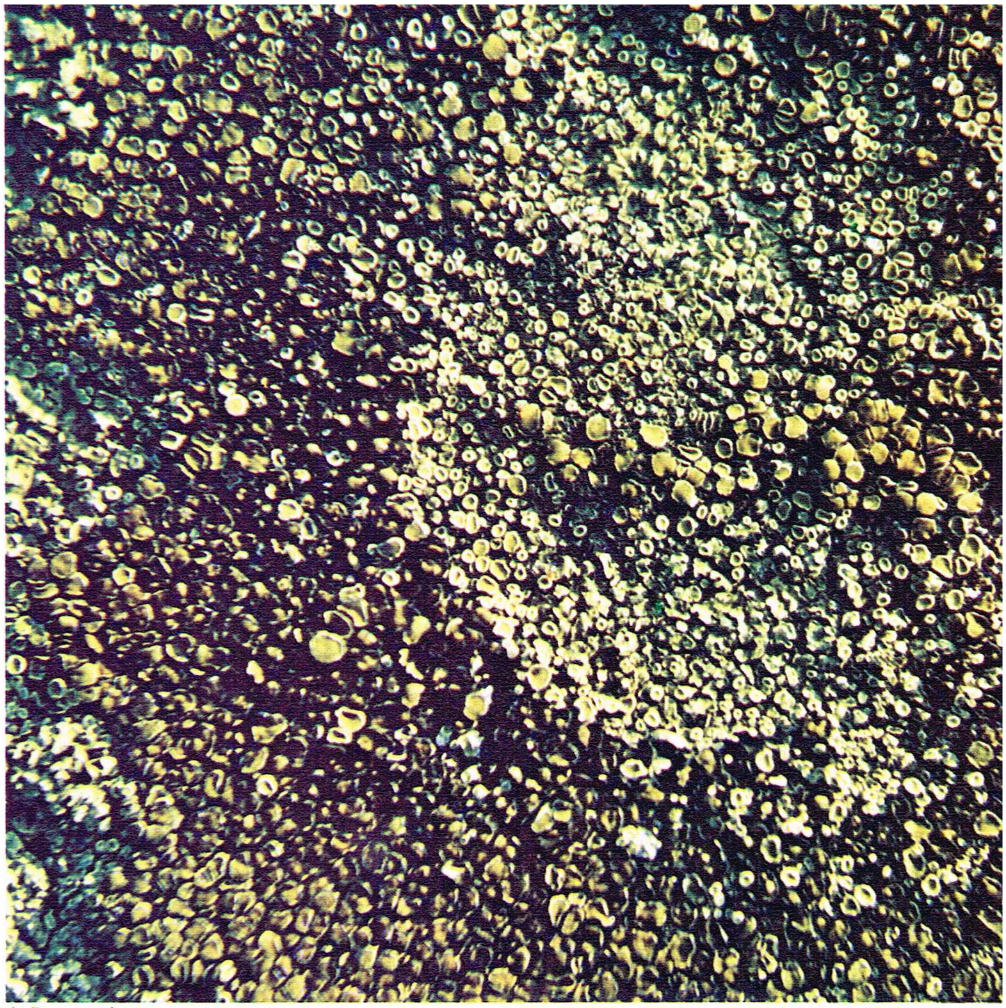

A. Ducrot - Jacana

▲ ***Les apothécies sont des ascocarpes en forme de coupes qui portent les asques à leur face supérieure. Chez les*** **Lecanora,** ***elles sont limitées par une marge thalline de même nature que le thalle (apothécie lécanorine).***

En réalité, on note de nombreuses variantes qui permettent de définir des types ontogéniques et qui tiennent à ce que toutes ces formations n'apparaissent pas toujours, que certaines peuvent n'être que transitoires et que leur structure varie. Chez les Lichens, le développement des ascocarpes est encore très imparfaitement connu, de sorte qu'on ne peut avoir qu'une vue très fragmentaire de leurs différents types ontogéniques.

Chez les Pyrénolichens, trois types ont été décrits (Janex-Favre, 1970) : *un type ascoloculaire à primordium stromatoïde et longues pseudo-paraphyses interascales,* connu chez deux *Arthopyrenia* seulement et qui diffère du type *Pleospora* des Pyrénomycètes non lichénisants par la structure du carpocentre, non formé de

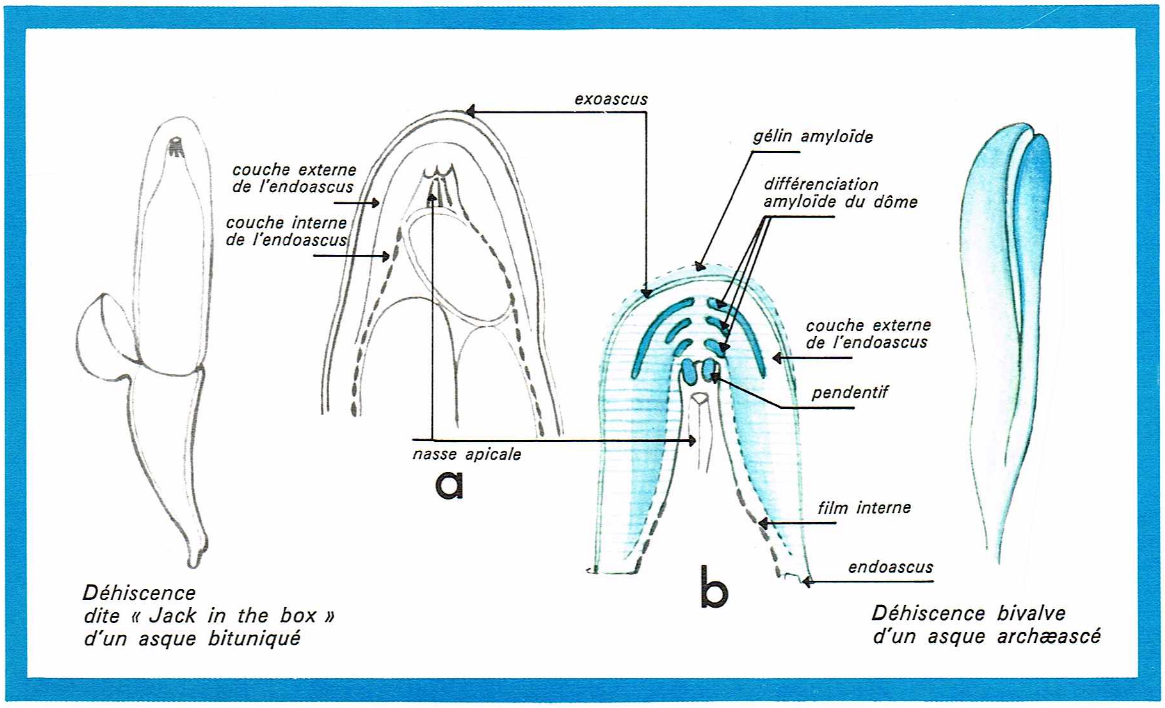

◀ ***Deux grands types d'asques des Ascomycètes lichénisants :***
a : type bituniqué nassascé;
b : type archæascé.

cellules nourricières; *un type ascoloculaire à pseudo-paraphyses courtes* à allure de périphyses (diverses Verrucariacées) qui n'a pas d'équivalent chez les Ascomycètes non lichénisants et qui se caractérise, entre autres choses, par son primordium plexiforme; *un type ascohyménial,* lui aussi connu exclusivement chez les Lichens (Pyrénulacées sp.), *à primordium plexiforme, à paraphyses vraies et enveloppes secondaires non parathéciales.* D'autres types sont sans doute à découvrir.

Chez les Discolichens, deux types principaux sont connus (Letrouit-Galinou, 1966). Dans le type *graphidien* (celui des Graphidales *lato sensu*), le primordium, plexiforme, s'accroît par sa marge tandis que sa partie centrale se différencie en une ébauche primaire qui tient lieu d'apothécie adulte. Les filaments interascaux sont tantôt des paraphysoïdes, tantôt des paraphyses vraies. Dans certains cas, la zone de croissance est localisée en un, deux ou quelques points de sorte que l'apothécie se transforme en une lirelle allongée ou étoilée. Le type *lécanorien* est celui des Lécanorales. Il est caractérisé par la mise en place d'un appareil parathécial et montre de nombreuses variantes qui tiennent au développement plus ou moins grand des formations primaires et des formations secondaires préparathéciales. Dans certains cas *(Cladonia, Parmelia)*, l'ébauche primaire est très réduite et des carpocentres secondaires peuvent être mis en place. A côté de ces types principaux, on trouve des types plus particuliers, en général préparathéciens, c'est-à-dire à formations secondaires préparathéciales mais dépourvus d'appareil parathécial *stricto sensu* (cf., par exemple, *Pertusaria, Thelotrema, Lichina, Baeomyces*). Le type graphidien rappelle d'assez près le type *discostromien lenticulaire* décrit par Bellemère (1967) chez les Discomycètes non lichénisants, sauf que, dans ce dernier cas, les apothécies se forment dans des formations stromatiques. Le type lécanorien, mal représenté chez les Discomycètes non lichénisants, est celui de l'ensemble des Lécanorales dont les asques sont, d'autre part, du type archæascé. Le type *discopodien*, si fréquent chez les Discomycètes non lichénisants et caractérisé par la présence d'un discopode dressé au sommet duquel se forme l'appareil parathécial, n'a pas été décrit jusqu'ici chez les Lichens.

Les podétions. Chez divers Lichens, anciennement groupés dans la famille des Cladoniacées, l'hyménium se forme au sommet de digitations d'aspect thallin appelées podétions. Ceux-ci sont de nature diverse. Chez les *Stereocaulon*, ils sont dus à l'allongement de granules thallins; chez les *Baeomyces*, à l'épaississement du plancher de l'ascocarpe.

Les podétions des *Cladonia,* très complexes, appartiennent aussi à l'ascocarpe mais ils se développent différemment.

La germination des spores. Les spores sont expulsées lors du dessèchement lent des asques, après une période d'imbibition. Elles sont projetées avec force jusqu'à une vingtaine de centimètres de hauteur. Chez la plupart des espèces, elles sont émises tout au long de l'année, par contre, leur pouvoir germinatif et surtout leur capacité à donner des thalles viables seraient limités dans le temps. Les spores du *Peltigera praetextata* ne germent qu'en présence de substances excrétées par le *Nostoc* symbiote.

Si la biologie et la physiologie des thalles lichéniques ont fait l'objet d'un certain nombre de recherches, celles des Champignons eux-mêmes sont moins connues.

La capacité de se lichéniser est sans aucun doute le trait dominant de ces Ascomycètes. L'association lichénique paraît en effet obligatoire pour la quasi-totalité d'entre eux, et cela paraît vrai même dans les genres où coexistent espèces lichénisantes et non lichénisantes. Toutefois, on cite un cas *(Buellia stillingiana)* où l'Ascolichen aurait une forme imparfaite non lichénisante *(Sporidesmium folliculatum)*.

La physiologie du Champignon dans le thalle est très mal connue. Cependant, on remarque : son aptitude à la reviviscence après passage à l'état de vie ralentie; la vitesse d'absorption de l'eau soit à l'état liquide, soit à celui d'humidité atmosphérique, il s'agit là d'un phénomène passif lié à la structure et à la composition chimique

▼ Le développement des ascocarpes varie d'une famille de Lichens à l'autre, mais on y trouve toujours les mêmes séquences fondamentales, qui figurent sur ce schéma.

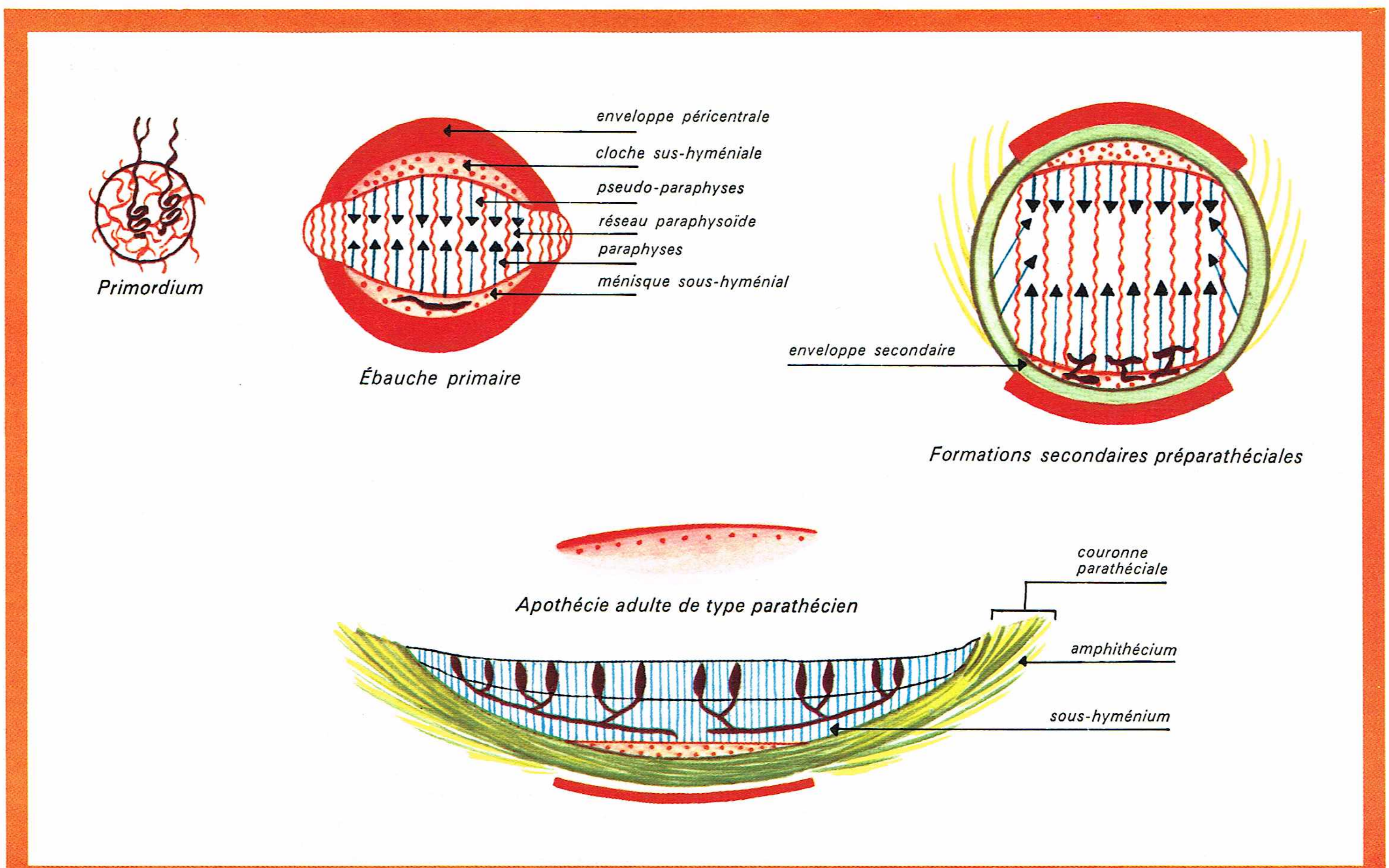

des parois (hémicelluloses) ; enfin, on constate la vitesse d'absorption des sels dissous, phénomène vivant cette fois. A l'état de vie ralentie, les Ascomycètes lichénisants résistent remarquablement bien au froid, à la chaleur et à la sécheresse, mieux généralement que l'Algue qui leur est associée.

En culture, les Champignons lichénisants croissent lentement. Relativement tolérants quant à la nature des sources carbonées et azotées, ils auraient, quant au pH, des exigences assez strictes, variables avec les espèces. Certains d'entre eux auraient besoin pour se développer de vitamines, notamment de biotine et de thiamine. Ils excrètent diverses substances. Le mycobionte de *Xanthoria parietina* peut synthétiser la pariétine, celui de *Cladonia cristatella*, l'acide rhodocladonique. Par contre, ni depside ni depsidone, si communs dans les thalles, n'ont été observés dans les cultures du Champignon seul, mais on y a identifié, toutefois, certains précurseurs de ces substances.

Place des Ascomycètes lichénisants

Situer les Ascolichens dans l'ensemble des Ascomycètes est difficile, d'une part parce qu'ils ont longtemps été étudiés séparément, à partir de critères différents, et d'autre part à cause du renouvellement actuel de la systématique des Ascomycètes. Nous ne ferons donc que quelques remarques.

Il existe un très petit nombre de genres ou de familles où se mêlent espèces lichénisantes et non lichénisantes. C'est le cas notamment des Caliciacées où les genres *Roesleria* et *Cyphelium* devraient sans doute être confondus. Cette famille très particulière, de position systématique incertaine, peut-être très évoluée, est caractérisée par ses asques à paroi déliquescente et son hyménium transformé en une masse poussiéreuse. De la même façon, Célidiacées non lichénisantes et Arthoniacées lichénisantes semblent devoir être réunies : il s'agit de Discomycètes lirelliformes à paraphysoïdes et à asques globuleux du type bituniqué. Nannfeldt (1932), enfin, a réuni dans l'ordre des Lécanorales la petite famille non lichénisante des Patellariacées à ascocarpes pérennants, cornés et de type parathécien, à asques bituniqués ou archæascés aux nombreuses familles de Discolichens du même type. Dans cet ordre, les genres *Karschia* et *Buellia*, à spores biloculaires brunes, paraissent très proches. Certaines ressemblances existent aussi, quant au développement des ascocarpes et à la structure des asques, entre les Bæomycétacées et les Léotiales, les Thélotrémacées et les Hélotiales, les Graphidales et les Hypodermales, mais les relations entre ces groupes, plus lointaines, seraient à préciser.

Cependant, compte tenu du grand nombre des Ascomycètes, les cas précédents sont plutôt exceptionnels : le plus souvent, Lichens et Ascomycètes non lichénisants appartiennent à des ordres ou des familles différents. Cela paraît particulièrement net, dans la limite de nos connaissances, chez les Pyrénolichens. En effet, le type ascoloculaire des *Verrucaria* n'a pas d'équivalent chez les Pyrénomycètes *stricto sensu* et, à l'inverse, on ne connaît aucune Dothidéale ou Pléosporale ou Nectriale lichénisante. De même, le type ascohyménial des *Pyrenula*, à primordium et carpocentre plexiforme et à asques bituniqués, n'a jamais été observé chez les Ascomycètes non lichénisants, tandis que les types des Sordariales, Xylariales, Coronophorales sont inconnus chez les Lichens (Parguey-Leduc, 1966). Chez les Discolichens, les choses sont un peu moins nettes du fait des ressemblances déjà signalées entre certains groupes lichénisés ou non.

Toutefois, on remarquera que le plus grand nombre des Discolichens sont des Lécanorales, à asques archæascés et ascocarpes du type lécanorien, groupe mal représenté chez les Discomycètes non lichénisants. Par contre, on ne connaît jusqu'ici aucun Discomycète operculé (Pézizales), ni aucun inoperculé discopodien lichénisant. De plus, à l'exception peut-être des Caliciacées, il ne semble pas y avoir de Lichens à asque typiquement unituniqué.

Les groupes d'Ascomycètes lichénisés, à l'exception peut-être des Caliciacées, présentent un certain nombre de caractères communs, sans doute archaïques, par exemple l'existence d'un carpocentre plexiforme, d'ascocarpes non discopodiens, d'asques à paroi épaisse, de type archæascé ou proche de celui-ci. Ils constituent un ensemble de petits phylums, proches les uns des autres et dont certains sont peut-être apparentés avec de petits groupes d'Ascomycètes non lichénisants. Par suite, on peut supposer que les Ascolichens ont une origine polyphylétique, mais cela reste à établir. Parmi les phylums d'Ascolichens, celui des Lécanorales est le plus important. L'existence de variantes, du point de vue de la structure des ascocarpes et des asques, montre qu'il a été l'objet d'une évolution interne notable, et qui est encore mal connue.

C. Nuridsany - Atlas Photo

▲ ***Trois genres d'Algues entrent dans la constitution des Lichens :*** **Nostoc** ***(Cyanophycées), comme dans ce*** **Peltigera, Trebouxia** ***et*** **Trentepohlia.**

Algues lichénisantes

La lichénisation modifiant la forme des Algues et altérant les cycles de reproduction, il est nécessaire, pour les étudier et les déterminer, de les isoler et de les cultiver sur des milieux adéquats, techniques mises au point par Chodat (1913) et par Waren (1918).

Systématique. Les Algues de Lichens sont les unes des Cyanophycées, les autres des Chlorophycées. Une seule, rare, l'*Heterococcus coespitosus*, isolée de deux *Verrucaria* saxicoles, est une Xanthophycée. Seul un petit nombre d'Algues participe à la symbiose lichénique (moins de cent espèces réparties en vingt-trois genres). Trois d'entre eux, les genres *Trebouxia, Nostoc* et *Trentepohlia*, fournissent à eux seuls les gonidies de 90 % des Lichens. Nous n'étudierons ici que les genres les plus communs.

Cyanophycées. Les cellules des *Nostoc* donnent aux filaments un aspect perlé. Ils s'allongent sous la gaine tout en se contournant, mais sans jamais se scinder (pas de fausses ramifications). Dans la nature, ils forment des colonies gélatineuses. Les *Nostoc* sont des gonidies très communes, celles, entre autres, des Collémacées, des Pannariacées, de diverses Peltigéracées et Stictacées. Chez les Lichens gélatineux (Collémacées), ils conservent leur gaine ; celle-ci manque ou se réduit dans les autres cas. Plusieurs espèces, toutes connues à l'état

P. Starosta - Atlas Photo

▲ *Ce* Xanthoria parietina *a pour Algue un* Trebouxia *(Chlorophycées).*

libre, ont été identifiées dans les thalles. Les *Nostoc* sont présents dans de nombreuses céphalodies (voir plus loin).

Chlorophycées. Les Chlorophycées lichénisantes (= gonidies vertes) sont presque exclusivement des Chlorococcales, Algues unicellulaires, non motiles à l'état végétatif, des Chætophorales, à thalles filamenteux et cellules dépourvues de carotène extraplastidial, et des Trentépohliales, à thalles filamenteux ou en disque, à cellules riches en carotène extraplastidial.

Les *Trebouxia*, Chlorococcales, sont les gonidies les plus répandues. Ce sont notamment celles des Lécanorales lichénisantes. Ce sont des Algues unicellulaires, à cellules arrondies. Le plaste est central, volumineux avec une surface bosselée. Il contient un pyrénoïde central net. Il existe de nombreuses espèces lichénisantes distinctes des quelques rares espèces libres, décrites. En culture, elles forment des colonies vertes, plissées, et engendrent des zoospores et des aplanospores. Seules ces dernières se forment dans les thalles. Les *Trebouxia* lichénisants sont divisés en deux groupes. Ceux du premier groupe (gonidies des *Cladonia* notamment) ont de grandes cellules allongées; lors de la sporogenèse, la fragmentation du cytoplasme n'a lieu que lorsque toutes les divisions du plaste et du noyau sont terminées; les spores, petites et ellipsoïdales, sont très nombreuses. Dans le second groupe, les cellules sont rondes; le cytoplasme se fragmente au fur et à mesure des divisions du noyau et du plaste, délimitant par une paroi plasmique des spores peu nombreuses de contours polygonaux. La paroi cellulosique est déposée plus tardivement.

Contrairement à ce qu'avaient soutenu certains auteurs, il n'existe pas une race particulière de *Trebouxia* adaptée à chaque Lichen.

Les cellules des *Coccomyxa* ont un plaste pariétal urcéolé. Nettement ellipsoïdales en culture, elles sont sphériques dans les thalles. Il existe des espèces libres, toutes à paroi gélatineuse, et des espèces lichénisantes à paroi non gélifiée. Il n'y a pas de zoospores. Les *Coccomyxa* sont présents chez quelques Peltigéracées à gonidies vertes, chez les *Baeomyces* et aussi chez divers Basidiolichens.

Les *Trentepohlia,* Trentépohliales, qui forment à l'état libre des croûtes jaunes ou orangées sur les rocs et les troncs, sont des gonidies très communes, notamment dans les régions tropicales. Ils sont présents dans de nombreux Pyrénolichens, chez les Graphidales et quelques petites familles sans doute apparentées à ce groupe. A l'état libre ou en culture, les *Trentepohlia* forment des filaments unisériés et ramifiés, les uns prostrés, les autres dressés. Le carotène est abondant. Dans les thalles, les filaments se fragmentent, et il y a beaucoup moins de carotène. Dans les cellules âgées, le plaste, d'abord pariétal et rubanné, prend un aspect perlé et se morcelle. Sept espèces, toutes connues à l'état libre, ont été identifiées à l'état lichénisé.

Biologie et physiologie. En culture, les Algues lichénisantes se remarquent par la lenteur de leur croissance, la rapidité d'absorption du carbone, la nocivité d'une trop forte illumination, un point de compensation bas (luminosité pour laquelle la quantité de carbone utilisée lors de la photosynthèse égale celle qui est rejetée par la respiration), une photosynthèse maximale pour une faible illumination. On remarque, en outre, la capacité des *Nostoc* à fixer l'azote atmosphérique et à rejeter spontanément des substances azotées et des vitamines, et la possibilité, pour les Chlorococcales, de vivre en saprophytes en utilisant des sources organiques de carbone.

▶ *Les* Trebouxia *sont des Chlorophycées unicellulaires à gros plaste central.*

M. A. Letrouit

Dans les thalles, les gonidies sont le siège d'une photosynthèse active, comme l'ont prouvé l'utilisation de carbone radioactif et l'étude du bilan des échanges gazeux. La photosynthèse débute pour une faible illumination et équilibre très vite la respiration du Lichen entier. Une partie des sucres synthétisés sont excrétés sous forme de glucose *(Nostoc)*, de sorbitol *(Lobococcus)* ou de ribitol *(Trebouxia)*. Dans les thalles, les *Nostoc* continuent de fixer l'azote atmosphérique et d'excréter des substances azotées. Comme les Champignons lichénisants, les gonidies peuvent passer à l'état de vie ralentie et résister sous cette forme au froid, à la chaleur (70 °C) et à la sécheresse. Toutefois, leur résistance est moindre que celle du Champignon qui leur est associé.

L'association lichénique

Généralités. Nous avons vu plus haut que, sauf cas exceptionnels (Champignons des Peltigéracées), la culture des symbiotes est relativement facile et ne nécessite que des milieux de culture classiques, minéral pour les Algues, organique pour les Champignons. De plus, nous verrons plus loin que, mis en présence l'un de l'autre, l'Algue et le Champignon ne s'associent pas spontanément. Pour que leur union s'amorce, il faut des conditions particulières encore mal connues et surtout un milieu défavorable à l'un et à l'autre, qui les contraigne à ce qu'on a appelé un « mariage de raison ». La lichénisation n'exprimerait donc pas une nécessité constitutionnelle. Ce serait une réponse des symbiotes adaptée à des conditions particulières d'environnement. Mais la lichénisation est plus qu'un moyen de survie ou un pis-aller. Elle crée un biotope nouveau où chaque constituant atteint un nouvel équilibre. C'est aussi un moyen remarquablement adapté à la conquête de milieux peu favorables à la vie, où les Lichens rencontreront peu de concurrents.

Plusieurs théories s'opposent pour expliquer la nature des relations des partenaires dans un thalle de Lichen : celle du parasitisme — le Champignon est le seul bénéficiaire de l'association, il vit aux dépens de l'Algue sans que celle-ci en tire un quelconque avantage; celle de l'hélotisme — il s'agit d'une sorte de parasitisme atténué où l'Algue est à la fois exploitée et ménagée; celle de la symbiose — l'Algue comme le Champignon ont intérêt à l'association. La symbiose est dite mutualiste quand on pense que les avantages sont égaux pour les deux partenaires, elle est dite antagoniste quand on pense que le Champignon tend à dominer l'Algue qui doit se défendre.

Les essais de synthèse en laboratoire et les conditions de la lichénisation. Quand on fait l'historique des tentatives de synthèse *in vitro* de Lichens, on est frappé par le fait que les auteurs anciens semblent y être parvenus sans trop de difficultés alors que les chercheurs modernes, opérant dans des conditions plus contrôlées, n'ont obtenu d'abord que des résultats médiocres, ce qui jeta un voile de suspicion sur les premiers résultats. En fait, comme nous le verrons, les conditions d'expérimentation n'étaient pas les mêmes, les premiers auteurs cherchant à reconstituer d'une manière empirique le milieu naturel et non à analyser les conditions de la lichénisation.

Stahl, dès 1877, obtint en six mois des thalles fertiles d'*Endocarpon pusillum*, en ensemençant sur de la terre stérilisée les spores qui, dans cette espèce, sont toujours émises accompagnées de gonidies (gonidies hyméniales).

Bonnier (1886-1889), lui, ensemençait spores et gonidies obtenues séparément sur des substrats naturels stérilisés et les plaçait ensuite dans d'ingénieux dispositifs, soumis aux conditions naturelles de température et assurant le renouvellement de l'air et le maintien d'une humidité modérée. De cette façon, il aurait obtenu la lichénisation imparfaite de plusieurs espèces et celle, complète, avec formation d'ascocarpes, du *Xantoria parietina* et du *Physcia stellaris*. En fait, divers aspects de l'expérimentation furent critiqués et les résultats souvent laissés de côté comme sujets à caution.

Les recherches suivantes furent pour la plupart négatives. Seul, Thomas (1939) obtint sur agar la formation

de sorédies à partir de différents symbiotes et un thalle assez chétif de *Cladonia pyxidata*.

Ahmadjian entreprit alors, à partir de 1958, toute une série de recherches afin de préciser les conditions nécessaires à la synthèse lichénique et d'expliquer les échecs de si nombreux auteurs. Il obtint ainsi, au cours d'essais successifs chez l'*Acarospora fuscata*, les premiers stades de lichénisation : réalisation de contacts entre les hyphes et les gonidies, formation d'une enveloppe fongique autour de celles-ci, entrée en division de l'Algue et établissement d'une structure comparable à celle du thalle naturel (cortex, couche gonidiale, médulle) ; chez le *Cladonia cristatella*, la formation de sorédies et de squamules sorédiés. Ces essais montrèrent que les premiers stades de la lichénisation exigent des conditions défavorables à l'un et à l'autre symbiote, notamment un substrat très pauvre en éléments nutritifs et une illumination forte, nocive à l'Algue.

L'obtention d'une structure thalline de type plus complexe exige d'autres conditions, et en particulier un substrat naturel et le dessèchement lent, ou mieux périodique, du substrat. Chez le *Cladonia*, ce dessèchement provoque en outre la formation de pycnides et de podétions. Ces conditions sont celles mêmes qu'on trouve réunies dans les milieux naturels et que les premiers chercheurs avaient essayé de reproduire dans leurs essais de synthèse. Bertsch et Butin (1967), dans le même temps, reprenaient avec succès l'expérience de Stahl. Ahmadjian et Heikkila l'amélioraient en 1970 en prenant pour point de départ, non plus les spores et les gonidies hyméniales, mais des suspensions de gonidies et de fragments d'hyphes obtenues aux dépens de cultures pures des symbiotes préalablement isolés.

Malgré ces succès, le phénomène de la lichénisation demeure incomplètement compris, et beaucoup reste à faire. D'ailleurs, la lichénisation est un état instable, qui se défait dès que les conditions extérieures, notamment ombre et humidité, permettent la croissance séparée des deux symbiotes. C'est ce qui explique pourquoi jusqu'à ces dernières années le maintien en culture des thalles de Lichens paraissait si difficile. L'utilisation des chambres de culture et des phytotrons ouvre de nouvelles possibilités (Dibben, 1971 ; Galun, 1972).

Spécificité de l'association lichénique. D'une façon générale, une association lichénique comprend seulement deux partenaires : une Algue et un Champignon (cf. *infra* « Céphalodies » et « Parasymbiose »).

Les Champignons lichénisants d'une famille donnée s'associent presque toujours au même type d'Algue : la plupart des Cyclocarpales à des Chlorococcales, les Graphidales à des *Trentepohlia*, mais, dans le détail, il y a de nombreuses exceptions. Les Caliciacées par exemple s'unissent, selon les espèces, les unes à des *Stichococcus*, les autres à des *Trebouxia* ou des *Trentepohlia*. Par suite, la nature de la gonidie ne permet pas à elle seule de définir une famille de Lichens.

Au niveau de l'espèce, une certaine souplesse existe dans le choix du partenaire. Celle-ci est évidente de la part des Algues, spécifiquement peu nombreuses et qui peuvent s'associer à des Champignons très différents (par exemple le *Trebouxia cladoniae* est le phycosymbiote du *Cladonia furcata* [Cladoniacée] et du *Chaenotheca melanophaea* [Caliciacée]. Elle est plus réduite de la part du Champignon mais réelle.

Ainsi le mycobionte du *Xanthoria parietina* peut s'associer à quatre *Trebouxia* mais qui sont tous du second groupe, donc voisins.

Céphalodies. Chez certains Lichens à Chlorophycées existe toujours, à côté de l'Algue principale, une Algue secondaire, Cyanophycée, confinée dans des portions ou des appendices particuliers du thalle : les céphalodies. Celles-ci sont tantôt internes, tantôt externes et, dans ce cas, généralement globuleuses, rarement arbusculaires. On ne les trouve que dans certaines familles et chez certaines espèces, mais là où elles existent, elles sont constantes. Moreau (1928), qui a étudié leur développement, les considère comme des formations pathologiques, comparables à des galles (cécidies). D'autres auteurs pensent au contraire qu'il s'agit d'éléments normaux du thalle des espèces qui les produisent, contribuant à l'équilibre de l'association : les Cyanophycées qu'elles contiennent pourraient constituer pour le thalle une source d'azote.

B. Mallet - Jacana

B. Mallet - Jacana

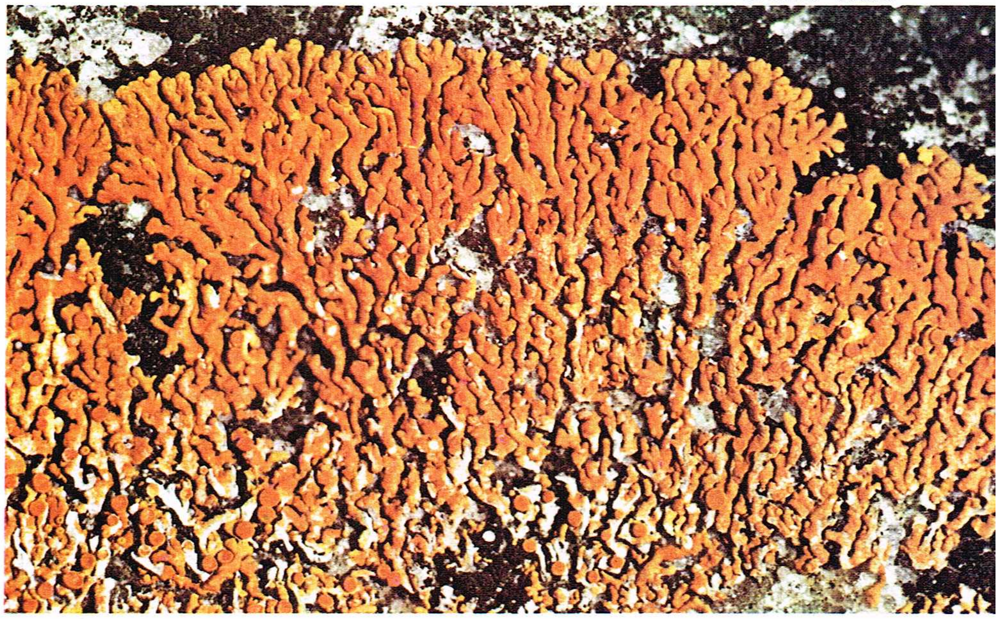

▲ *Les* Trebouxia, *rares à l'état libre, sont les gonidies les plus fréquentes. Ils entrent dans la constitution de Lichens très différents tels que* Cladonia alpestris *(en haut) et* Xanthoria elegans *(en bas).*
▼ *Les* Trentepohlia *caractérisent certains groupes de Lichens, notamment ceux des régions tropicales. Tous sont connus à l'état libre où ils forment des croûtes orangées ou jaunes.*

M. Chapuis - Atlas Photo

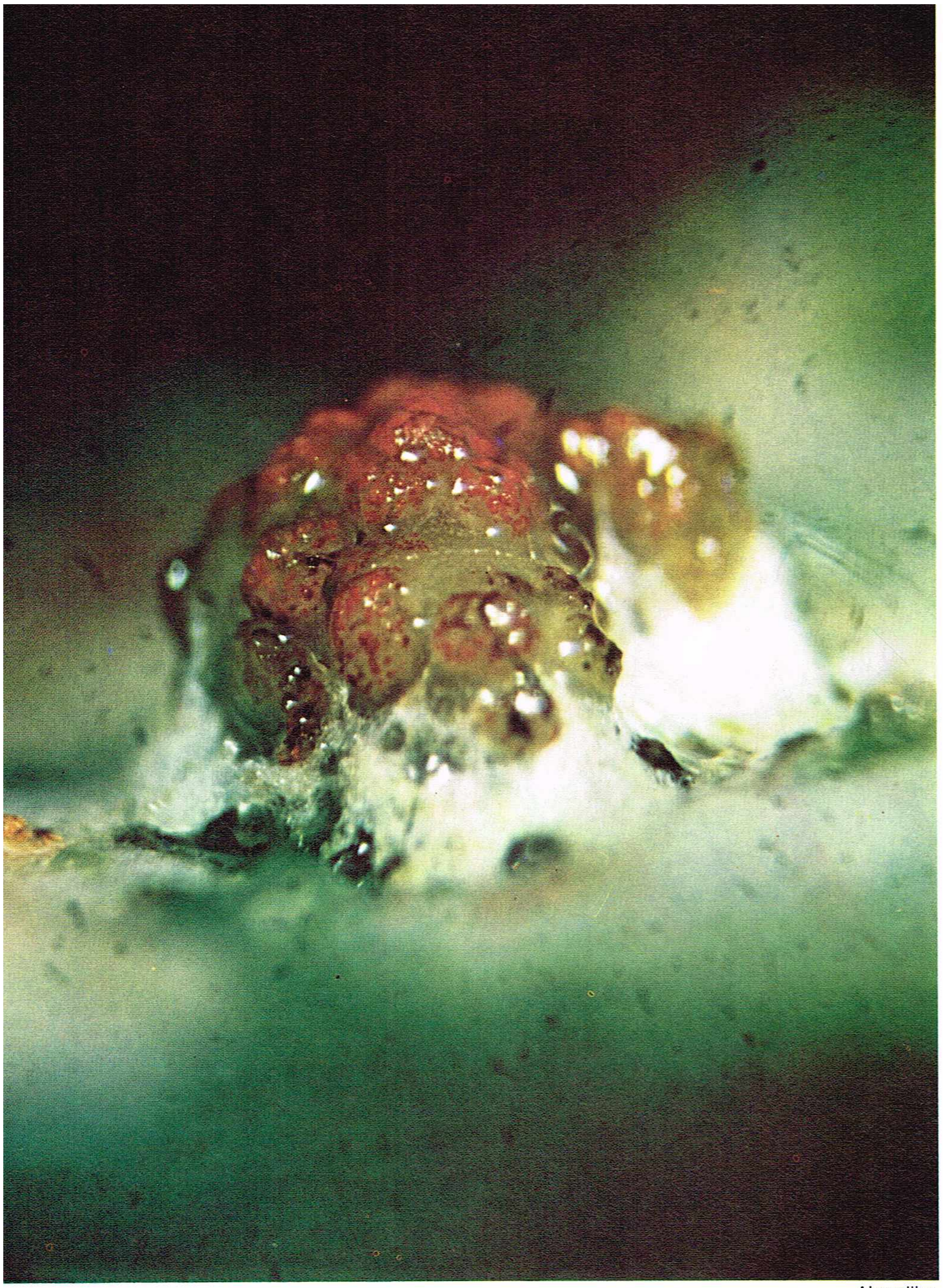

Ahmadjian

Parasymbiose. Les Lichens peuvent être parasités par des Champignons ou d'autres Lichens. Dans un certain nombre de cas, ces organismes se nourrissent uniquement aux dépens de l'Algue, et sans la détruire donc comme le mycosymbiote lui-même. Ce phénomène, distinct du parasitisme *stricto sensu*, est appelé parasymbiose.

Les relations morphologiques entre les constituants. Les rapports anatomiques entre les hyphes des Champignons et les cellules des Algues présentent des degrés qui ne dépendent pas de la nature de la gonidie mais plutôt de la position systématique du Champignon ou de l'organisation du thalle.

Dans certains cas *(Collema)*, les hyphes circulent entre les trichomes ou dans la gelée qui les entoure sans entrer plus étroitement en contact avec les cellules.

D'autres fois, les hyphes s'accolent directement aux Algues sans y pénétrer : il y a contact de paroi à paroi; chez les Graphidales, ce contact se fait par l'intermédiaire de ramifications spéciales, renflées à l'extrémité : les *appressoria*.

Mais très souvent se forment de véritables *haustoria* qui pénètrent dans la cellule de l'Algue. Certains restent inclus dans la paroi qu'ils ne percent que partiellement; ils sont dits intramembranaires. D'autres pénètrent dans le cytoplasme; dans certains cas, ils restent entourés d'un mince fourreau formé par la paroi de l'Algue (certains *Lecanora*); dans d'autres cas, la paroi algale est percée totalement et ce fourreau n'existe pas (haustoria intracellulaires *stricto sensu* de divers *Lecidea*). Le plasmalemme des cellules âgées est repoussé passivement par l'haustorium; celui des cellules jeunes se rétracte activement devant lui. L'haustorium ne le franchit jamais. L'envahissement d'une cellule algale par les haustoria n'entraîne pas obligatoirement sa mort; souvent, il stimule sa sporulation. Dans ce cas, les haustoria restent attachés à la paroi de la cellule mère et sont éliminés avec elle : ils ne contaminent pas directement les cellules filles.

La production des haustoria est parfois saisonnière et dépendrait des conditions de l'environnement (sécheresse).

Rapports physiologiques et biologiques entre l'Algue et le Champignon. En dehors de ce que nous allons dire de la nutrition carbonée, on sait encore très peu de chose des échanges qui peuvent exister entre les deux partenaires.

a) *Passage des glucides, de l'Algue vers le Champignon*. Tout d'abord, l'étude du bilan gazeux (Lange, 1953) a montré l'existence dans les thalles d'une photosynthèse active en dépit de la faible quantité de lumière parvenant aux Algues et de la brièveté des périodes d'activité métabolique. Mais ce sont surtout les belles et délicates expériences de Smith et de ses élèves à

▲ ***Podétion de* Cladonia cristatella *obtenu dans une culture pure du mycosymbiote isolé. Des travaux de ce type ont permis de préciser certaines des conditions nécessaires à l'établissement et au maintien de l'association lichénique.***

A. Sella

▶ ***Il existe une grande variété de formes de thalles lichéniques. Ici, thalles foliacés de deux* Parmelia.**

partir de 1960, d'abord sur le *Peltigera polydactyla*, puis sur d'autres espèces, le *Xanthoria parietina*, le *Lobaria laetevirens*, etc., qui ont fourni des données précises dans un domaine où régnait la spéculation. Pour ces expériences, des disques, de poids et de surface connus, sont découpés dans les thalles et mis à flotter un temps déterminé sur un milieu enrichi de substances marquées, du bicarbonate C_{14} dans les expériences sur la photosynthèse. Puis ces disques sont ou non disséqués pour séparer la couche gonidiale de la couche médullaire purement fongique, et leur contenu est analysé. Ces expériences ont apporté une foule de renseignements en divers domaines. Sur le point qui nous intéresse, elles ont montré que le C_{14} est d'abord fixé dans la couche gonidiale, puis qu'il est rapidement transféré aux hyphes médullaires (quinze minutes) où on le retrouve chez le *Peltigera polydactyla* principalement sous forme de mannitol. Poursuivant ses recherches, la même équipe a montré que les Algues fraîchement isolées des thalles excrètent dans le milieu des sucres qui sont du glucose, pour les *Nostoc*, du ribitol pour les *Trebouxia* et les *Lobococcus*, du sorbitol pour les *Stichococcus*. Comme les Algues provenant de vieilles cultures ne le font pas, on peut penser que cette excrétion est induite par le Champignon, et que c'est bien sous la forme de ces divers sucres que le carbone passe de l'Algue au Champignon.

b) *Autres échanges entre symbiotes.* Scott (1955) puis Smith (1960) ont montré que les *Nostoc* lichénisés restaient capables de fixer l'azote atmosphérique et de l'excréter ensuite dans le milieu où il pourrait être repris par le Champignon. De même, il est établi que ces Algues libèrent certaines vitamines telles que la thiamine, mais leur utilisation par le Champignon n'est pas prouvée. En ce qui concerne le passage éventuel de substances du Champignon vers l'Algue, rien n'a été démontré bien que certains aient émis l'hypothèse que le Champignon pourrait excréter dans le milieu de la vitamine C et des substances organiques azotées que l'Algue utiliserait plus volontiers que l'azote minéral. Par contre, il est établi que la présence des hyphes et d'un cortex souvent coloré diminue la quantité de lumière qui parvient aux Algues qui, pour la plupart, craignent justement les fortes intensités lumineuses. De même, la respiration des hyphes augmente la quantité de gaz carbonique au voisinage des Algues, ce qui est favorable à la photosynthèse. Enfin le Champignon régulariserait l'approvisionnement en eau et sels minéraux des Algues et les protégerait de concurrents éventuels grâce à la production d'antibiotiques.

Modifications des symbiotes. La lichénisation modifie les symbiotes. Chez les Algues, les cellules s'arrondissent, le plaste gonfle, les enveloppes gélatineuses disparaissent souvent, les cycles de reproduction sont altérés, les *Trebouxia* et les *Lobococcus* ne forment plus de zoospores, le métabolisme enfin s'intensifie. Le Champignon, quant à lui, développe des appressoria et des haustoria, des corps ellipsoïdaux (UM) apparaissent dans le cytoplasme, et, surtout, il devient capable d'édifier un thalle et d'élaborer éventuellement depsides et depsidones.

Le thalle des Lichens. Le thalle des Lichens est formé par les hyphes du Champignon entre lesquelles sont logées les cellules de l'Algue. Par son organisation souvent complexe, il diffère du mycélium des Ascomycètes non lichénisants et rappelle plutôt certains de leurs stromas ou sclérotes. Sauf dans quelques rares espèces (*Coenogonium, Racodium*), le Champignon joue le rôle dominant et détermine notamment la forme du thalle.

Morphologie des thalles. Le thalle est dit *crustacé* quand il fait corps avec le substrat, qu'il se développe dans celui-ci, ou sur lui. Si rien ne gêne leur développement, les thalles crustacés ont généralement des contours arrondis ou ellipsoïdaux. Ils sont dits *figurés* quand leur marge est bien visible, saillante ou colorée. Les thalles sont dits *foliacés* quand ils ont la forme de lames, de lanières ou de feuilles étalées sur le substratum auquel ils n'adhèrent que faiblement; ils peuvent être arrondis ou faiblement lobés, souvent aussi profondément divisés et laciniés. Les thalles squamuleux sont des thalles foliacés, formés par de nombreuses petites squamules qui naissent sur un hypothalle mycélien souvent peu visible. Les thalles *fruticuleux* ont la forme de filaments ou de lanières étroites, dressés ou pendants, généralement très ramifiés et rattachés au support par une base étroite. Chez les Cladoniacées *lato sensu*, le thalle, crustacé ou

D. Pichon - Atlas Photo

▲ *Les podétions des* Cladonia, *très ramifiés, se développent sur un thalle primaire, foliacé ou crustacé, parfois transitoire.*
▼ *Thalle crustacé, épilithique, de* Rhizocarpon geographicum, *Lichen calcifuge.*

J. Ph. Varin - Jacana

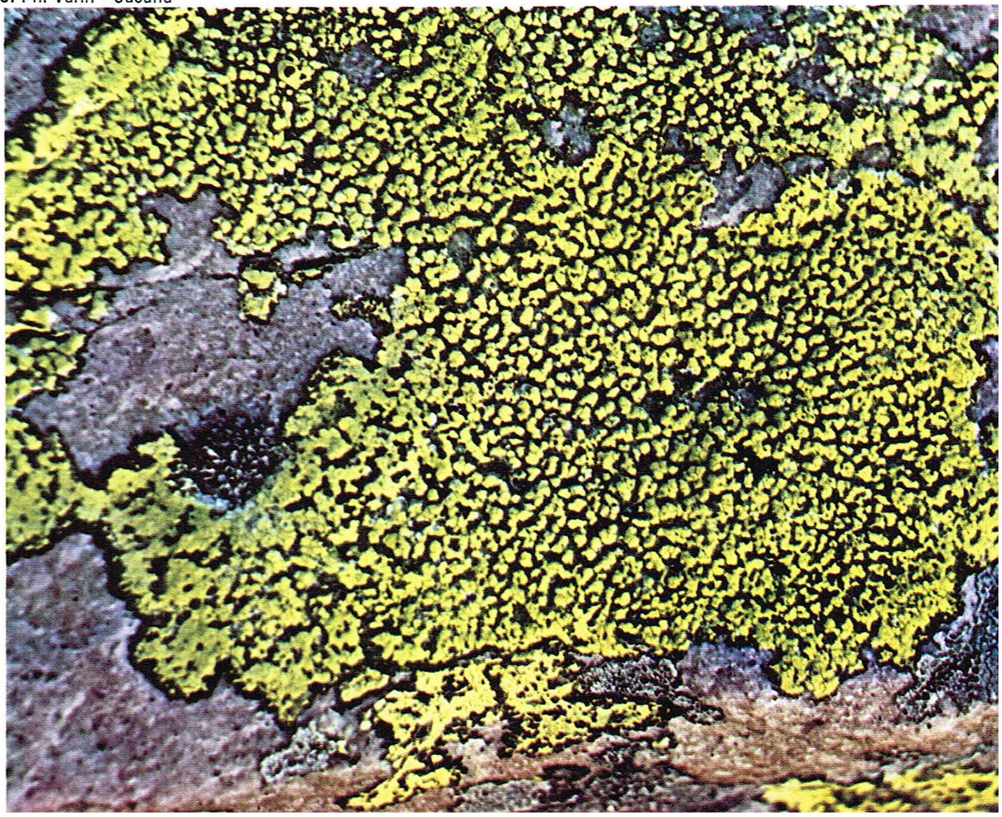

A. Aldebert - Jacana

▲ *Thalle fruticuleux, pendant, d'Usnéacées. Ces Lichens tirent l'eau et les éléments minéraux de l'atmosphère, les gonidies fournissant les substances carbonées. Le substrat joue le rôle de support.*

▼ *Les extrémités pulvérulentes de* Parmelia physodes *sont constituées par des sorédies : celles-ci, amas d'Algues et d'hyphes, sont de véritables boutures servant à la reproduction directe du thalle.*

C. de Klemm - Jacana

foliacé, porte des éléments dressés fruticuleux, les podétions, mais qui sont généralement une dépendance des ascocarpes.

La taille des thalles adultes varie de quelques millimètres (Lichinacées) à plusieurs décimètres (divers *Peltigera, Usnea, Parmelia*, etc.). Le thalle des Collémales est gélatineux dans de nombreuses familles.

Anatomie du thalle. Parfois, on ne peut distinguer dans le thalle de couches différenciées : il est dit alors homéomère (ex. : *Collema*) ; dans le cas contraire, le plus fréquent, il est hétéromère. Les couches dont il est alors formé sont, en partant de la face externe ou supérieure : le cortex, composé d'hyphes coalescentes à paroi souvent épaissie ; la couche gonidiale, continue ou interrompue, où sont localisées les Algues ; la médulle, purement fongique et formée tantôt d'hyphes lâchement entremêlées, tantôt en partie coalescentes (axe des Usnées, médulle chondroïde des *Cladonia*) ; il peut s'y ajouter un cortex inférieur. Lorsque ces couches sont concentriques, la structure est dite radiée : il s'agit surtout d'espèces fruticuleuses, parfois à rameaux aplatis. Si les couches sont superposées, la structure est dite stratifiée (Lichens crustacés, foliacés et certains Lichens fruticuleux).

Appendices thallins, soralies, isidies. Outre les organes de reproduction du mycosymbiote, pycnides et ascocarpes étudiés plus haut, les thalles lichéniques portent des appendices qui leur sont propres. Il s'agit des rhizines, mèches de filaments agglomérés qui, issus de la face inférieure, fixent certains thalles foliacés à leur support, des rhizoïdes, courts filaments unisériés ayant peut-être le même rôle, des poils et fibrilles, de forme et de texture variées, qui garnissent la marge de divers *Parmelia, Cetraria, Physcia, Usnea*, etc. Toutefois, les formations les plus intéressantes sont les soralies et les isidies. Les soralies sont des plages farineuses du thalle, dépourvues de cortex. Elles sont constituées par un amoncellement de sorédies, minuscules groupes d'Algues qu'entoure une gaine mycélienne. Dispersées par le vent et la pluie, elles jouent le rôle de boutures. Les isidies sont de très courtes digitations fruticuleuses de la face supérieure du thalle ; fragiles, elles se brisent facilement. Isidies et sorédies sont très fréquentes dans certains groupes de Lichens tels que les Pertusariacées, les Parméliacées, les Umbilicariacées.

Reproduction des thalles. La reproduction directe des thalles, à partir de boutures mixtes réunissant dès le départ Algue et Champignon (fragments de thalle, isidies, sorédies, spores associées à des gonidies hyméniales), est un phénomène à la fois commun et efficace. Cependant, la synthèse naturelle d'un nouveau thalle à partir d'une spore et d'Algues libres est le mode de reproduction obligatoire de nombreux Lichens, crustacés notamment. C'est un phénomène moins aléatoire qu'il ne paraît, les spores étant émises en abondance par les ascocarpes pérennants et les Algues étant des espèces soit communes à l'état libre *(Nostoc, Trentepohlia)*, soit abondamment fournies par les sorédies d'autres Lichens *(Trebouxia)*. Dans ce cas (Werner, 1931), l'ascospore émet en germant une nappe de fins filaments qui emprisonnent les cellules de *Trebouxia* qu'ils rencontrent (protothalle). Puis les hyphes se multiplient et forment un thalle primaire à peu près isodiamétrique et constitué d'un cortex et d'une couche gonidiale lacuneuse. Ensuite, la médulle se constitue, et la croissance se polarise dans le sens horizontal *(Xanthoria parietina)* ou vertical *(Ramalina)*.

Croissance des thalles. Les thalles fruticuleux s'accroissent par le sommet de leurs rameaux, les thalles foliacés et crustacés par leur marge. Chez certains *(Parmelia)*, la partie centrale, plus âgée, meurt et disparaît, et le thalle se trouve réduit à sa partie périphérique, annulaire.

La croissance des thalles est due chez de nombreuses espèces (Letrouit-Galinou, 1969) à l'allongement et à la ramification d'hyphes axiales d'où se détachent des rameaux latéraux à croissance définie. Ces rameaux sont bien visibles près de la marge. Chez certaines espèces *(Verrucaria sp, Parmelia conspersa)*, ils sont les uns dorsaux, les autres ventraux ; chez d'autres espèces *(Lobaria laetevirens)*, ils sont tous dorsaux. Plus loin du bord, ils s'allongent, se ramifient et s'entremêlent, et c'est à leurs dépens que s'organisent les différentes couches du thalle et divers types de faux tissus.

La croissance est lente, 1 à 2 mm par an (4 à 5 mm chez certains *Cladonia*). Elle varie avec les conditions météorologiques saisonnières ou annuelles. Des courbes de croissance ont été établies pour divers Lichens crustacés, et elles ont été utilisées pour tenter de dater les roches sur lesquelles ils étaient installés.

Rôle de l'Algue dans la morphogenèse du thalle. Isolé en culture, un Ascomycète lichénisant ne reconstruit pas de thalle semblable à celui dont il est issu ; par suite, tous les auteurs reconnaissent un rôle morphogénétique à l'Algue, mais on ignore comment elle intervient. Moreau (1928) a comparé l'Algue a un agent cécidogène et le thalle à une galle produite par le Champignon pour s'en isoler. Werner (1968) pense au contraire qu'il s'agit là d'une potentialité essentielle de l'Ascolichen, mais qui a besoin pour se concrétiser de quelque chose fournie par l'Algue (hormone, ou autre produit complexe ?).

Produits de synthèse et substances lichéniques. La plupart des substances chimiques qu'on trouve dans les thalles sont identiques à celles d'autres Végétaux ;

de même, la teneur en cendres est tout à fait comparable. Cependant, on note : une proportion d'eau et de protides plus faible que chez les autres Champignons, peut-être à cause de l'importance des parois ; la présence, déjà signalée, de deux glucides particuliers, polymères du glucose (la lichénine et l'isolichénine) ; surtout, l'excrétion de substances organiques particulières, les substances lichéniques. Insolubles dans l'eau, elles sont surtout localisées dans la médulle. Plus de trois cents ont été inventoriées (Culberson, 1969) qui appartiennent les unes à la série grasse, les autres à la série aromatique. Parmi ces dernières, les depsides et les depsidones, dérivés de l'orcine et de la β orcine, sont connus des seuls thalles lichénisés. En particulier, les cultures de Champignon isolé n'en contiennent pas malgré la présence de certains de leurs précurseurs. Par suite, on admet que l'Algue est nécessaire à leur synthèse, mais on ne sait pas si son action est directe ou indirecte. Malgré cela, on pense que leur production dépend du génome du Champignon, et c'est pourquoi la présence ou l'absence de ces substances sont très largement utilisées en systématique pour différencier certaines espèces, proches morphologiquement (divers *Cladonia*, *Pertusaria*, *Parmelia*, *Usnea*, etc.). L'identification de ces substances se fait à l'aide de réactifs chimiques (potasse, eau de javel, paraphénylène diamine, acide nitrique), par leurs cristaux, formés dans divers milieux, par l'étude chromatographique. Parmi ces substances, citons : l'acide rhodocladonique qui colore en rouge l'hyménium de certains *Cladonia ;* la pariétine orangée des thalles de *Xanthoria* et de *Caloplaca,* qui vire au violet sous l'action de la potasse ; l'acide vulpinique, toxique, des *Letharia* à thalle jaune ; l'acide usnique, qui a des propriétés antibiotiques, constitue jusqu'à 10 % du poids de divers *Cladonia* et *Usnea* et est responsable de certaines allergies (dermatose des forestiers) ; l'acide fumarprotocétrarique, responsable du goût amer de nombreux Lichens *(Cladonia rangiferina)*, et colorable en rouge vif par la paraphénylène diamine.

Physiologie des thalles. Le thalle des Lichens se caractérise par des besoins alimentaires réduits, assortis d'une croissance faible. L'aptitude au dessèchement et à la reviviscence s'accompagne, en état de vie ralentie, d'une résistance remarquable aux extrêmes de température.

L'eau. La teneur en eau des thalles varie beaucoup. Ils peuvent absorber leur propre poids d'eau, parfois même deux ou trois fois *(Umbilicaria pustulata*, divers *Collema) ;* desséchés naturellement, ils n'en contiennent que 2 à 10 %. L'eau est rarement fournie par le substrat, plus souvent par les précipitations (pluies) et la condensation atmosphérique (rosée et brouillard), exceptionnellement par la vapeur contenue dans l'air.

L'eau est souvent absorbée en quelques minutes et s'accumule dans les méats et les parois des hyphes. Chez certaines espèces, l'absorption est plus lente, notamment chez celles à thalle sorédié ou pulvérulent, l'air contenu entre les granules s'opposant à la pénétration de l'eau. La vapeur d'eau est aussi absorbée, mais c'est un phénomène beaucoup plus lent (plusieurs jours en atmosphère saturée) et moins efficace (30 % du poids sec environ). Par contre, une forte humidité atmosphérique freine le dessèchement des thalles. En plein soleil, celui-ci est au contraire rapide (trente minutes pour un Lichen saxicole). Le dessèchement diminue la quantité de lumière qui parvient aux Algues, ce qui est un avantage et augmente la résistance aux fortes températures. Par contre, il suspend l'assimilation chlorophyllienne. C'est peut-être pour cela que les faces ouest et nord des rochers, plus longtemps ombragées, portent une végétation lichénique plus abondante, même lorsque les vents de pluie viennent d'ailleurs.

La photosynthèse. L'intensité de la photosynthèse (Ried, 1960 ; Lange *et al.*, 1970) est calculée en fonction de la quantité de gaz carbonique absorbée en un temps donné, par une surface ou un volume connus de thalle. Trois facteurs principaux interviennent : la teneur en eau du thalle, l'intensité lumineuse et la température.

La teneur en eau. La photosynthèse est maximale pour une teneur en eau de 65 à 90 % de la teneur maximale, chez la plupart des Lichens, mais de 100 % chez les espèces aquatiques. Elle diminue moins vite que la respiration au fur et à mesure que le thalle se dessèche, mais elle s'arrête complètement si la teneur en eau s'abaisse en dessous de 30 %.

R. Decottignies - Jacana

L'intensité lumineuse. Les besoins en lumière varient avec la température et l'humidité, donc avec les saisons, les thalles étant plus exigeants en lumière au printemps et en été. A la température optimale, le maximum de photosynthèse est atteint selon les espèces pour un éclairage de 400 à 2 300 ft-c, et le point de compensation pour 15 à 350 ft-c. Ce sont des valeurs extrêmement faibles, surtout si l'on considère que seuls 80 à 40 % parviennent aux gonidies.

La température. Les températures optimales pour la photosynthèse varient beaucoup selon les espèces et leur habitat habituel. Toutefois, elles sont toujours relativement basses (10 à 20 °C), ce qui permet une photosynthèse active tôt le matin, avant que les thalles se soient desséchés. D'ailleurs, à basse température, le bilan des échanges gazeux est favorable à l'assimilation chlorophyllienne, la respiration décroissant alors plus vite.

L'activité photosynthétique est plus faible que chez les autres Végétaux, mais le bilan est positif. C'est pour la plupart des Lichens la principale source de substances carbonées, sinon la seule. Toutefois, il est possible que certaines espèces humicoles puissent utiliser aussi des substances organiques (saprophytisme).

Respiration. Le maximum de respiration est atteint pour une température optimale de 20 à 30 °C, c'est-à-dire plus élevée que pour la photosynthèse, et une humidité relative de 90 %. Si la teneur en eau s'abaisse au-dessous de 60 %, la respiration décroît rapidement, mais ne s'arrête jamais complètement.

Nutrition azotée. Pour de nombreux Lichens, notamment les Lichens fruticuleux et épiphytes, la seule source de sels minéraux est constituée par les poussières et les sels dissous par l'eau de pluie. Ils sont plus abondants autour des habitations (Lichens rudéraux) qu'en forêt. Les Lichens saxicoles ou terrestres peuvent aussi tirer une partie de leurs ressources minérales du substratum : l'acide carbonique de la respiration attaque la roche et les substances lichéniques sont des agents chélateurs. Enfin, de nombreux Lichens dégradent grâce à leurs diastases (uréase, uricase, etc.) les substances azotées animales.

L'absorption des sels est rapide. C'est un phénomène vivant lié au cytoplasme. Les Lichens peuvent concentrer dans leur thalle certains sels qui n'existent dans le sol qu'à l'état de traces (Zn, Pb, B, Cd, Sn) et notamment des substances radioactives naturelles (Pb_{210}, Po_{210}) ou non (Sr).

Les besoins en sels minéraux et la tolérance vis-à-vis d'eux sont très variables selon les espèces ; ils interviennent largement pour régler leur distribution.

Substratum. Les exigences des Lichens quant au substrat sont largement spécifiques et concernent sa

▲ ***De nombreux Lichens synthétisent des substances particulières dont il est tenu compte en systématique, notamment pour les Usnéacées, les Parméliacées et les Cladoniacées (ces dernières étant représentées ici par*** **Cladonia fimbriata*).***

▼ ***L'acide vulpinique, toxique, utilisé autrefois pour empoisonner les loups, colore en jaune le thalle des*** **Letharia** ***(Usnéacées).***

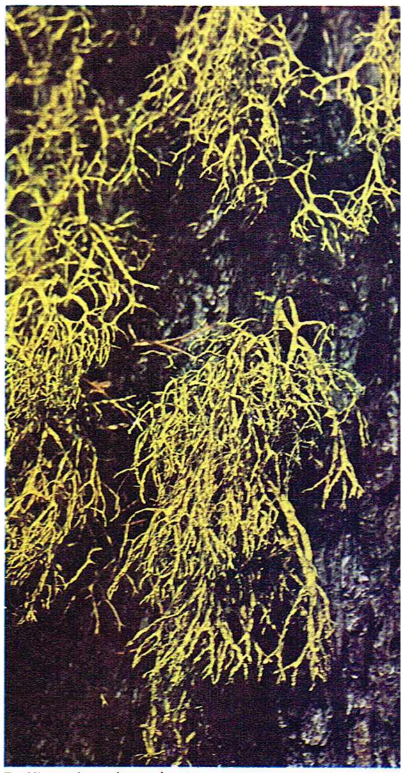

Ruffier - Lanche - Jacana

P. Starosta - Atlas Photo

G. Aymonin

▲ *L'acide rhodocladonique des* Cladonia *à apothécies rouges vire au violet sous l'action de la potasse (en haut). Selon les milieux, les Lichens forment des groupements caractéristiques. Ici, coussins de* Cladonia alpestris *en région montagneuse (en bas).*
▼ *Deux associations maritimes. La première, orangé vif, à* Xanthoria parietina, *supporte d'être aspergée par les vagues; la seconde, gris-vert, à* Ramalina cuspidata, *est exposée aux seuls embruns.*

D. Mercier - Jacana

composition chimique (roches calcicoles ou siliceuses), son pH (écorces ou sols acides ou alcalins), sa texture (lisse ou rugueuse).

Résistance aux conditions extrêmes. Les thalles ne peuvent survivre plus de trois mois à un dessèchement naturel (herbier), exceptionnellement six. En fait, même pour les périodes plus courtes (douze jours), le phycosymbiote est lésé, ce qui se traduit par une détérioration de l'assimilation chlorophyllienne qui ne se rétablit que lentement (plusieurs jours ou même plusieurs semaines). En fait, dans la nature, de telles périodes de dessèchement sont exceptionnelles, la condensation nocturne permettant, même dans les déserts, une réhydratation et une reprise quotidienne du métabolisme.

Des Lichens plongés dans l'azote liquide et même dans l'hydrogène liquide ont survécu. Même en état hydraté, les Lichens résistent à des froids de 0 °C ou, pour les Lichens arctiques, de — 10 à — 30 °C. A l'état sec, ils supportent bien la chaleur sans altération métabolique : jusqu'à 100 °C pour les Lichens saxicoles poussant sur des faces ensoleillées, moins pour des épiphytes forestiers (70 °C pour *Evernia prunastri*). A l'état hydraté, leur résistance est moindre (40 à 50 °C).

Écologie

Les Lichens sont universellement répandus : on les trouve sous toutes les latitudes, à toutes les altitudes. Ils recouvrent parfois entièrement écorces et roches dont ils masquent surface et couleur. Malgré cela, à cause de leur faible capacité métabolique, ils ne jouent qu'un rôle modeste dans les cycles biologiques et dans la production de matière de la biosphère. Pour la même raison, leur rôle dans la formation des sols est réduit.

Leurs besoins alimentaires modestes, leur aptitude au dessèchement et à la reviviscence, leur remarquable résistance aux conditions extrêmes expliquent qu'ils colonisent des milieux particulièrement inhospitaliers, rochers, écorces, toundras arctiques. Lange *et al.* (1970) ont bien montré le rôle de tous ces facteurs dans la remarquable adaptation des Lichens du désert. Toutefois, comme nous l'avons signalé, il existe une grande diversité dans les besoins des espèces ou leur capacité d'adaptation, ce qui joue un rôle sur leur distribution géographique ou écologique.

Les Lichens ont souvent des aires de répartition géographique très vastes, réglées essentiellement par les facteurs climatiques. Les endémiques sont rares. On distingue ainsi : une flore nordique et arctique (pays tempérés et nordiques de l'hémisphère Nord) relativement homogène et abondante; une flore méditerranéenne avec de nombreuses espèces gélatineuses et squamuleuses; une flore tropicale encore mal connue, riche en espèces à *Trentepohlia;* une flore des pays tempérés de l'hémisphère Sud, avec prédominance des Stictacées; une flore antarctique originale avec un endémisme marqué.

Sur les milieux qu'ils colonisent, les Lichens forment des peuplements denses, souvent presque purs, et parmi lesquels il est possible de distinguer des associations et des alliances qui sont étudiées avec les méthodes classiques de la phytosociologie. Ont ainsi été décrites (Abbayes, 1934; Klement, 1955; Barkman, 1958; Nowak, 1960) : une végétation lichénique terricole et humicole; une végétation lichénique saxicole avec des groupements littoraux, des groupements acidophiles, et leurs associations souvent de teinte sombre à *Lecidea*, des groupements calcicoles souvent de teinte claire et riches en *Verrucaria*, sans oublier pour chacun ses variantes sciaphiles ou nitrophiles; une végétation épiphyte avec les différentes associations des arbres résineux (alliance du *Cetrarion pinastri*), des arbres isolés (alliance du *Xanthorion parietinae*) ainsi que les différentes alliances des forêts d'arbres caducifoliés et dominées respectivement par les Lichens fruticuleux (Usnéacées), les Lichens foliacés (Stictacées) et les Lichens crustacés.

Les rapports étroits qui existent entre la végétation lichénique d'une station donnée et les caractères climatiques et édaphiques font des Lichens d'excellents indicateurs de milieu, parfois discernables de loin à cause de la teinte générale des associations formées (teinte claire des associations calcicoles, sombre des silicicoles). Ainsi sur les falaises maritimes s'échelonnent de bas en haut : à la limite supérieure de l'étage hydrohalin, *Lichina pygmaea,*

Frédéric - Jacana

▲ *Dans les pays arctiques, les Lichens constituent de véritables pâturages. Paradoxalement, le lichen des rennes* (Cladonia rangiferina), *amer, est dédaigné par les herbivores.*

qui forme des coussinets noirs dispersés ; la bande noire continue formée par *Verrucaria maura* et *Lichina confinis ;* la zone jaune et grise où dominent *Caloplaca marina* et *Lecanora helicopis ;* l'association orangé vif, seulement aspergée par les vagues, à *Xanthoria parietina ;* plus haut, enfin, dans la zone des embruns, une association grisâtre formée par divers Lichens fruticuleux *(Ramalina cuspidata, Roccella fuciformis)*.

Lichens et pollution

Nylander (1899) attira le premier l'attention sur l'appauvrissement voire la disparition au cours de la seconde moitié du XIX^e^ siècle de la flore lichénique du cœur des villes. L'étude de nombreuses cités (Oslo, Vienne, Bonn, Londres, Montréal, etc.) l'a confirmé, et des ceintures de végétation ont été décrites avec, au centre, le « désert épiphytique » où ne pénètrent jamais plus d'une à trois espèces, puis la « zone de combat » et son « front extérieur » où les espèces deviennent progressivement plus nombreuses, enfin la végétation normale.

Deux causes furent avancées pour expliquer la disparition des Lichens des villes : la pollution, notamment par le SO_2, et le microclimat « semi-aride » qui les caractérise. Mais les études récentes montrent que c'est bien la pollution atmosphérique qui en est la raison principale. En effet, on a constaté que : les ceintures d'appauvrissement de la végétation se dilatent autour des villes des régions humides et se contractent dans les régions sèches, ce qui s'explique parfaitement bien si l'on sait que les Lichens à l'état hydraté sont plus sensibles aux polluants qu'à l'état sec ; ces ceintures sont elliptiques, allongées dans le sens des vents dominants qui transportent poussières et poisons ; en dehors de tout microclimat aride, en pleine campagne, les Lichens disparaissent autour des usines, notamment celles qui émettent des fumées riches en SO_2 et F.

Les raisons pour lesquelles les Lichens sont plus sensibles à la pollution que les plantes supérieures, par exemple, sont mal connues. Les auteurs soulignent que : les Lichens accumulant les sels toxiques peuvent s'empoisonner ; ils utilisent directement l'eau de pluie, qui n'a pu se débarrasser de ses polluants dans le sol ; leurs périodes d'activité métabolique maximales correspondent à celles des pluies et brouillards, celles où la teneur en polluants est le plus élevée.

L'étude de la végétation lichénique permet de dresser des cartes très fiables de la pollution atmosphérique urbaine. Trois méthodes sont actuellement utilisées qui conduisent à des résultats très comparables (Barkman, 1969 ; Leblanc, 1971). Ce sont : l'estimation du nombre d'espèces présentes dans une aire déterminée et sur un choix précis de substrats ; l'étude de la répartition d'un nombre limité d'espèces indicatrices ; plus ce nombre est élevé (trente-cinq pour Delzenne, 1973), plus les résultats sont précis ; le calcul de l'indice de pureté de l'air (Sloover, 1971) déterminé en chaque point par le nombre d'espèces présentes sur des substrats bien définis, leur degré de vitalité et de recouvrement, et leur indice de toxiphobie. Comparées aux techniques classiques d'étude de la pollution, par des analyses d'air ambiant, par exemple, ces méthodes présentent deux grands avantages : leur rapidité (quelques semaines au lieu de plusieurs années) et leur faible prix de revient

D. Pichon - Atlas Photo

(pas d'appareillage coûteux et pour la seconde méthode possibilité de former rapidement le personnel requis). Elles méritent donc d'être développées.

Utilisation

L'emploi des Lichens en teinturerie (orseille) est aujourd'hui abandonné. Par contre, ils sont encore utilisés pour la fabrication de pâtes pectorales et en parfumerie, soit comme stabilisateur, soit comme base de parfum. Dans le Grand Nord, ils sont pâturés par les grands herbivores (caribous, rennes), ce qui représente un certain danger pour les populations autochtones. En effet, les Lichens accumulent des substances radioactives polluant la chaîne alimentaire jusqu'à l'homme.

CLASSIFICATION

Les Ascolichens devraient être inclus purement et simplement dans la classification des Ascomycètes, et on peut citer quelques tentatives dans ce sens (Fink, 1915 ; Nannfeldt, 1932 ; Ainsworth, 1971). En fait, on est encore loin d'une telle situation idéale, et, malgré le besoin qui s'en fait sentir, il paraît peu probable qu'elle se réalise bientôt. En effet, il faut tenir compte : de la longue tradition, encore vivante, qui fait des Lichens et des Champignons deux domaines totalement distincts ; de la connaissance encore imparfaite, chez de nombreux Lichens et chez certains Discomycètes, de la structure des asques et de l'ontogénie des ascocarpes, critères fondamentaux de la classification des Ascomycètes ; de la difficulté de situer pour cette raison les phylums d'Ascolichens et d'Ascomycètes non lichénisants les uns par rapport aux autres ; enfin, des études anatomiques ou systématiques en cours qui remettent en cause, à l'intérieur même des classifications purement lichénologiques, la définition de genres et de familles apparemment bien établis (Cladoniacées, Usnéacées, *Lecidea*, etc.). C'est pourquoi nous adopterons la position prudente d'Ozenda et Clauzade (1970), et nous nous bornerons à exposer ici les grandes lignes de la classification de Zahlbruckner (1907). Cette classification est fondée essentiellement sur la morphologie des ascocarpes et les caractères des spores. Cependant, un rôle important est réservé, comme critères accessoires, à la nature de la gonidie et à la structure du thalle.

BASIDIOLICHENS

Contrairement aux Ascolichens, les Basidiolichens sont peu nombreux : sept genres, vingt espèces. Les uns sont des espèces tropicales, connues depuis longtemps, les autres sont des espèces européennes découvertes récemment. Tous sont des Basidiomycètes supérieurs néo-basidiés (à basides typiques). La plupart sont des Polyporales *lato sensu*, à hyménium à croissance continue. Trois seulement sont des Agaricales du genre *Omphalina*. Les gonidies sont tantôt des Cyanophycées appartenant au genre *Scytonema*, tantôt des *Coccomyxa* à enveloppe gélatineuse.

Basidiolichens tropicaux

Ils sont connus depuis le siècle dernier. Ils comptent une dizaine d'espèces, réparties en trois genres voisins (*Cora*, *Corella*, *Dictyonema*) à placer au voisinage des Thélophoracées mais inconnus, semble-t-il, à l'état libre.

Dans le genre *Cora*, ce qui est décrit sous le nom de thalle est le carpophore formé d'auvents arrondis, simples ou multiples et zonés en dessus. Ils sont constitués d'un cortex supérieur, d'une couche gonidiale et d'une médulle épaisse. La face inférieure est garnie de papilles où est localisé l'hyménium. Dans le genre *Corella*, le cortex supérieur fait défaut.

Basidiolichens européens

Diverses espèces ont été décrites depuis 1950 : trois *Omphalina* (Agaricales), deux Clavariacées, un *Corticium* et un *Stereum*.

Dans tous les cas cités, l'Algue est un *Coccomyxa* à enveloppe gélatineuse. Le thalle est formé par le mycélium; il peut être de deux types décrits depuis longtemps comme Lichens imparfaits. Dans le type *Botrydina*, le thalle est crustacé, vert vif et un peu gélatineux à l'état humide. Dans le type *Coriscium*, celui d'*Omphalina luteolilacina*, il est squamuleux, formé d'écailles arrondies vert vif en dessus, blanches en dessous. Les carpophores naissent sur ce thalle. Ceux des *Omphalina* et des Clavariacées ne sont pas lichénisés.

HYPHOLICHENS

On groupe dans les Hypholichens un petit nombre d'espèces toujours stériles et donc difficiles à déterminer. Il s'agit notamment des *Lepraria*, se présentant comme des croûtes pulvérulentes, à contours plus ou moins nets, et formés d'un mélange d'Algues et d'hyphes. Le *Lepraria aeruginosa*, un peu bleuté, est commun sur les sols siliceux.

BIBLIOGRAPHIE

ABBAYES H. des, Traité de lichénologie, *Encycl. biol.* 41, Lechevalier, Paris, 1951; les Lichens *in Botanique*, pp. 405-439, 1963; *Précis des sciences biologiques*, Masson, Paris. - AHMADJIAN V., *The Lichen Symbiosis*, Blaisdell, Toronto, 1967. - AHMADJIAN V., HALE M. E., *Lichens*, Academic Press, New York, 1973. - ALVIN K. L. et KERSHAW K. A., *The Observer's Book of Lichens*, Warne, London, 1963. - BARKMAN J. J., *Phytosociology and Ecology of Cryptogamic Epiphytes*, Van Gorcum, Pays-Bas, 1958. - BOISTEL A., *Nouvelle Flore des Lichens*, Librairie générale de l'enseignement, Paris, 1900. - CHADEFAUD M., les Végétaux non vasculaires (cryptogamie) *in* CHADEFAUD et EMBERGER, *Traité de botanique systématique*, t. 1, Masson, Paris, 1960; les Asques et la systématique des Ascomycètes, *Bull. soc. myc. Fr.*, 99, pp. 127-170, 1973. - CHADEFAUD M., LETROUIT-GALINOU M. A., JANEX-FAVRE M. C., Sur l'origine phylogénétique et l'évolution des Ascomycètes des Lichens *in Colloque sur les Lichens* (1967), *Mémoires Soc. bot. Fr.*, 1968. - CULBERSON Ch. F., *Chemical and Botanical Guide to Lichen Products*, Univ. North Carolina Press, Chapell Hill, 1969. - FREY E., *Lichens, Petits Atlas Payot* n° 62, Payot, Lausanne, 1970. - GALLOE O., *Natural History of the Danish Lichens*, 9 vol., Copenhague, 1927 à 1954. - HALE M. E., *Lichen Handbook*, Washington Smithsonian Institution, Washington, 1961; *The Biology of Lichens*, Arnold, Londres, 1967. - HENSSEN A., JAHNS M., *Lichenes*, Thieme, Germany, 1973. - JANEX-FAVRE M. C., Recherches sur l'ontogénie, l'organisation et les asques de quelques Pyrénolichens, *Rev. bryol. lichénol.*, 37, pp. 421-650, 1970. - KLEMENT O., Prodromus der Mitteleuropaischen Flechtengesellschaften, *Feddes Repert.*, beih. 135, pp. 5-194, 1955. - LANGE O., SCHULZE E. D., KOCH W., Experimentellökologische Untersuchungen an Flechten der Negew Wüste III, *Flora*, 159, pp. 525-528, 1970. - LEBLANC F., Possibilities and Methods for Air Pollution on the Basis of Lichen Sensivity, *Mitt. forstl. Bundes Versuch. Wien*, 92, pp. 103-126, 1971. - LETROUIT-GALINOU M. A., The Apothecia of the Discolichens, *Bryologist*, 71, pp. 297-327, 1968; les Algues des Lichens *in Colloque sur les Lichens*, 1967, *Mémoires soc. bot. Fr.*, 1968, pp. 35-77; les Asques des Lichens et le type archæascé, *Bryologist*, 76, pp. 30-47, 1973. - OZENDA P., Lichens *in Handbuch der Pflanzenanatomie*, bd 6, t. 9, Bornträger Berlin, 1963. - OZENDA P., CLAUZADE G., *les Lichens, étude biologique et flore illustrée*, Masson, Paris, 1970. - POELT J., *Bestimmungschlüssel europaischen Flechten*, Cramer, Lehre, 1969. - SMITH D. C., The Biology of Lichen Thalli, *Biol. Rev. (G. B.)*, 37, pp. 537-570, 1962; The Movement of Carbohydrates from Alga to Fungus in Lichens *in Colloque sur les Lichens (1967), Mémoires soc. bot. Fr.*, pp. 126-133, 1968. - SOUCHON C., *les Lichens*, coll. Que sais-je?, P.U.F., Paris, 1971. - ZAHLBRUCKNER A., Specieller teil *in Engler-Prantl, Die Naturlichen Pflanzenfamilien It. I abt. Lichenes*, Engelman, Leipzig, 1907.

D. Pichon - Atlas Photo

B. Mallet - Jacana

▲ ***Evernia prunastri**, ou mousse des chênes, est utilisé pour la fabrication de certains parfums.*

◀ ***Thamnolia vermicularis**, dont les apothécies n'ont jamais été observées, est classé dans les Hypholichens.*

Page ci-contre : ◀ Certains Lichens sont particulièrement sensibles à la pollution atmosphérique; leur présence ou leur absence atteste la plus ou moins grande pureté de l'air.

C. Nardin - Jacana

LES BRYOPHYTES

▲ ***Peuplement de Bryophytes en coussinets avec prédominance de* Polytrichum *dans un bas-fond tourbeux.***

Le nom Bryophytes (du grec βρύον = Mousse et φυτόν = plante) est attribué à un groupe de plantes chlorophylliennes comprenant près de trente mille espèces. Ces Végétaux, connus aussi sous le nom de Muscinées, mesurent de 1 mm à quelques centimètres et jusqu'à 25 cm, exceptionnellement 50-70 cm. Ils forment des touffes ou des gazons sur le sol, dans les fentes des rochers, sur les murs, sur les écorces, sur les feuilles des Végétaux supérieurs.

Une Muscinée comprend deux parties : le *gamétophyte* dont les cellules sont à *n* chromosomes, qui constitue la phase dominante de la plante et sur lequel naissent les gamètes ; le *sporophyte,* dont les cellules ont 2 *n* chromosomes, de dimensions plus réduites et qui porte les spores. Ces deux parties n'ont pas un développement concomitant : l'une précède l'autre. On dit qu'il y a « alternance de générations » ou « alternance de phases ».

Morphologie. Développement

Voyons la composition et le développement de ces deux phases :

Le gamétophyte

La spore. Origine de toute la plante, la spore, élément libre, presque toujours unicellulaire, sphérique ou tétraédrique, mesure souvent 8 à 20 μ, parfois 60 à 120 μ, exceptionnellement 250 μ. Jaune, brune, rougeâtre ou noire, elle reste lisse ou s'orne de papilles, de tubercules, d'aiguillons, d'alvéoles. Son contenu (cytoplasme, noyau, chloroplastes, gouttes huileuses) est entouré d'une enveloppe mince, l'intine, protégée par une exine souvent plus épaisse et ornée.

Le protonéma. En milieu humide, la spore germe : sa paroi se déchire, laisse sortir un tube germinatif qui s'allonge, se divise, formant un protonéma soit filamenteux, et alors simple ou ramifié, soit en forme de lame.

La tige feuillée. Le thalle. Sur ce protonéma s'individualise une cellule initiale, généralement tétraédrique, à trois faces actives, qui produira soit une tige feuillée, soit un thalle.

La tige, nommée aussi caule ou caulidium, est simple ou ramifiée et se fixe au substrat par des rhizoïdes, filaments très ténus. Elle présente parfois une structure complexe et possède des hydroïdes, cellules longues à parois minces, dépourvues de cytoplasme et qui jouent le rôle de conducteurs d'eau, des leptoïdes, cellules allongées à cytoplasme réduit, contenant un noyau, ayant, sur les parois latérales, des plages criblées et qui conduisent les substances nutritives. Ces éléments correspondent à un xylème et à un phloème primitifs. Ils diffèrent de ceux des Végétaux supérieurs par l'absence de lignine.

Sur la tige, les feuilles (ou phyllidies) se disposent soit latéralement, soit le long d'une spire. Chez certaines Hépatiques, on trouve, outre les deux rangées de feuilles latérales, un rang de feuilles ventrales, de forme particulière, nommées amphigastres.

Les feuilles, toujours dépourvues de stomates, sont généralement unistrates, marginées ou non, entières ou dentées et, chez un grand nombre de Mousses, pourvues d'une ou de deux nervures.

Le thalle est une lame verte, simple ou ramifiée, plus ou moins épaisse, à symétrie dorsiventrale, à structure peu différenciée ou plus complexe.

Les organes reproducteurs. Les tiges et les rameaux portent, latéralement ou à leur sommet, des inflorescences mâles ou des inflorescences femelles, ou bien, à la fois, des inflorescences mâles et des femelles. Anthéridies et archégones sont protégés par des bractées. Chez les Hépatiques à thalle, ils sont enfoncés dans le thalle ou portés par des carpophores.

Les anthéridies se présentent souvent comme de petites sphères pédonculées et, parfois, comme des bouteilles à col large. Elles contiennent les anthérozoïdes biciliés, gamètes mâles qui, libérés, se déplacent dans des gouttelettes d'eau.

Les archégones, en forme de bouteilles à col long et étroit, contiennent chacun une oosphère, gamète femelle qui n'est jamais libéré hors du ventre de l'archégone.

L'ensemble des organes que nous venons de décrire constitue le gamétophyte dont chaque cellule possède

I.G.D.A.

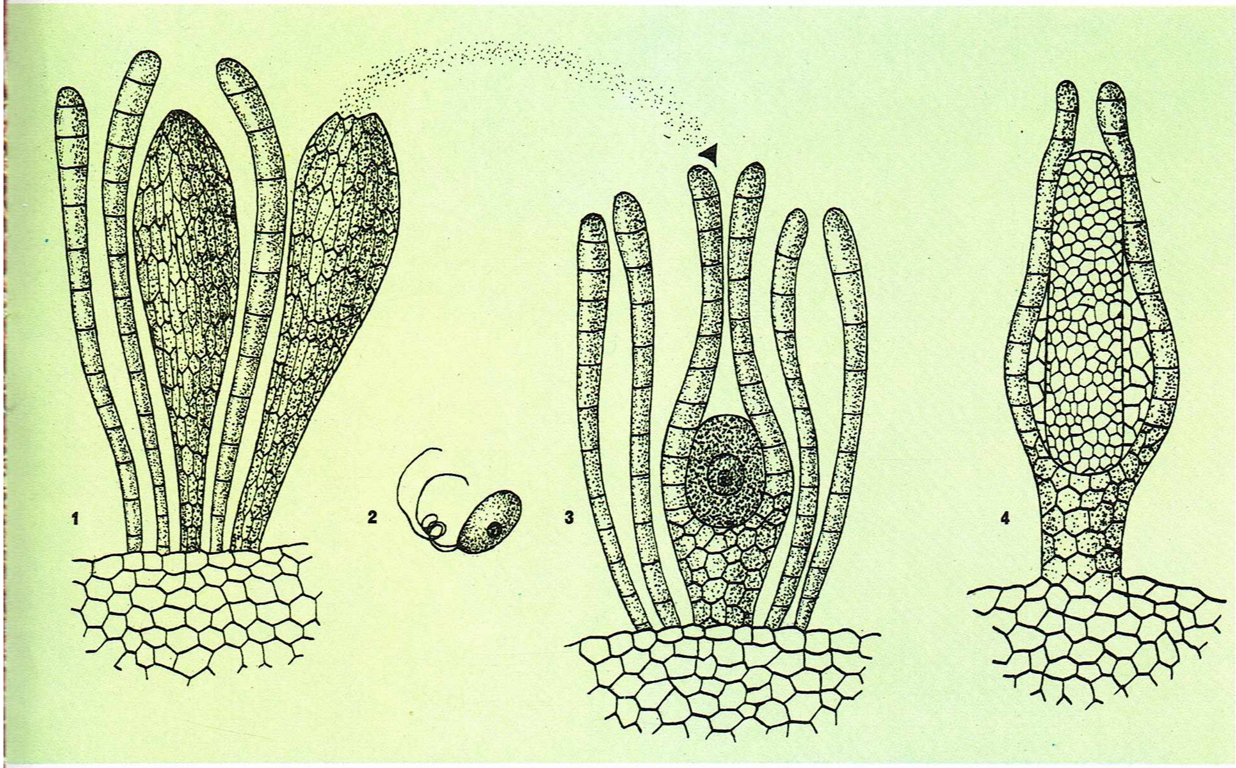

▲ *Représentation schématique des organes reproducteurs de Bryophytes.*
1 - Anthéridies mêlées de paraphyses (filaments stériles).
2 - Anthérozoïde bicilié.
3 - Archégone avec oosphère.
4 - Archégone après fécondation renfermant l'embryon.

un nombre haploïde de chromosomes qui est égal au minimum à quatre.

Le sporophyte

Lorsqu'un anthérozoïde arrive au contact d'un archégone, il pénètre dans le col, atteint l'oosphère qu'il féconde et qui devient un œuf ou zygote à 2 *n* chromosomes. Dès ce moment, la phase sporophytique est commencée.

Le zygote, unicellulaire, se divise en deux cellules. La cellule inférieure va produire un pédicelle (ou soie ou séta) et, à la base du pédicelle, un pied, ou suçoir, qui implante le sporophyte dans le gamétophyte où il puise certains éléments nutritifs. La cellule supérieure, quant à elle, produira la capsule.

A l'intérieur de la capsule, une assise sporogène, l'archésporium, donne les cellules mères des spores à 2 *n* chromosomes. Chaque cellule mère subit la méiose (réduction chromatique) et devient une tétrade, ensemble de quatre spores qui, bientôt, se séparent les unes des autres. Dans certaines capsules, des élatères accompagnent les spores. Ce sont des cellules souvent très allongées, qui meurent rapidement et dont la paroi porte un ou plusieurs épaississements spiralés. Par temps sec, elles s'agitent et projettent les spores hors de la capsule.

Beaucoup de Bryophytes se propagent par multiplication végétative. Aucun sporophyte ne se forme puisqu'il n'y a pas de fécondation. La plante se trouve réduite au gamétophyte; toutes ses cellules restent à *n* chromosomes.

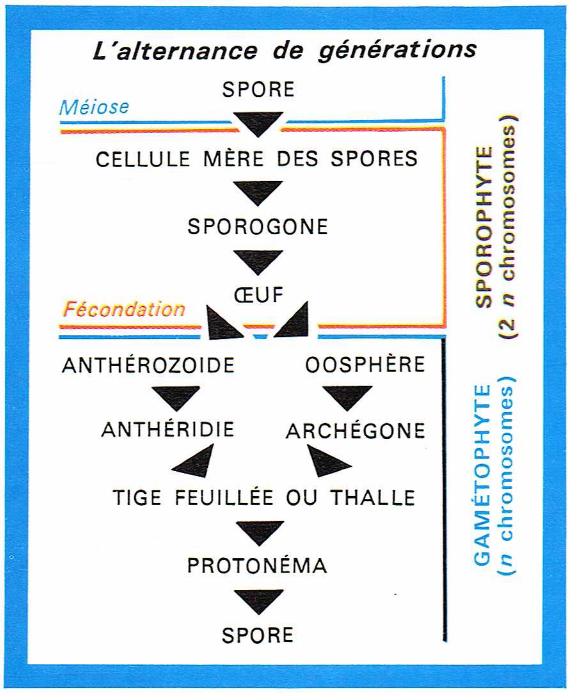

▼ *Section longitudinale d'une inflorescence mâle de* Mnium *vue au microscope, montrant les anthéridies mêlées aux paraphyses.*

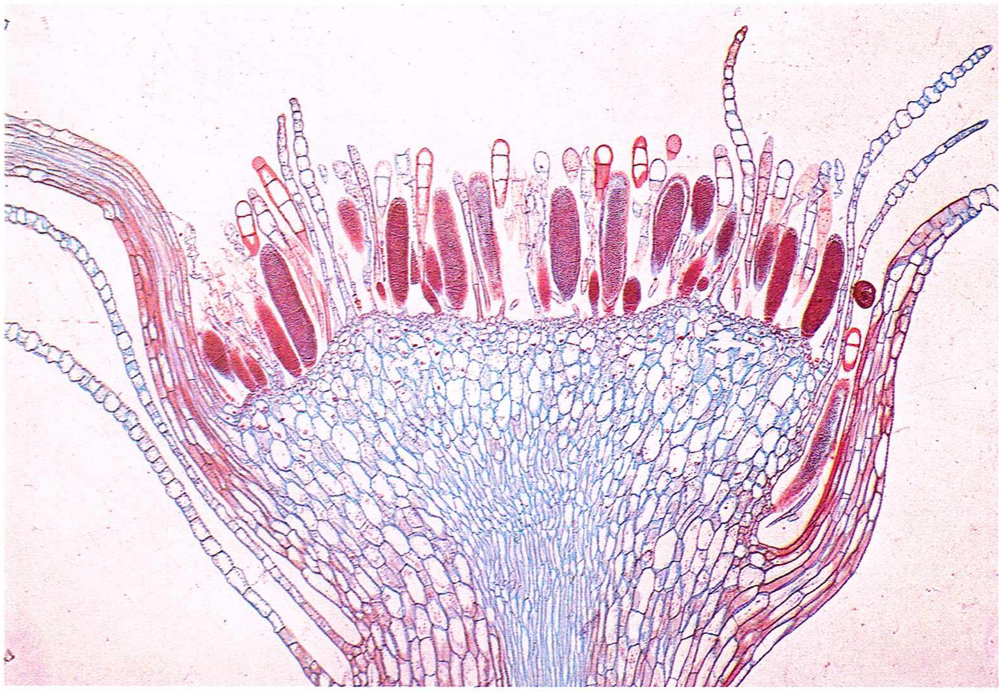

Bavestrelli, Bevilacqua, Prato

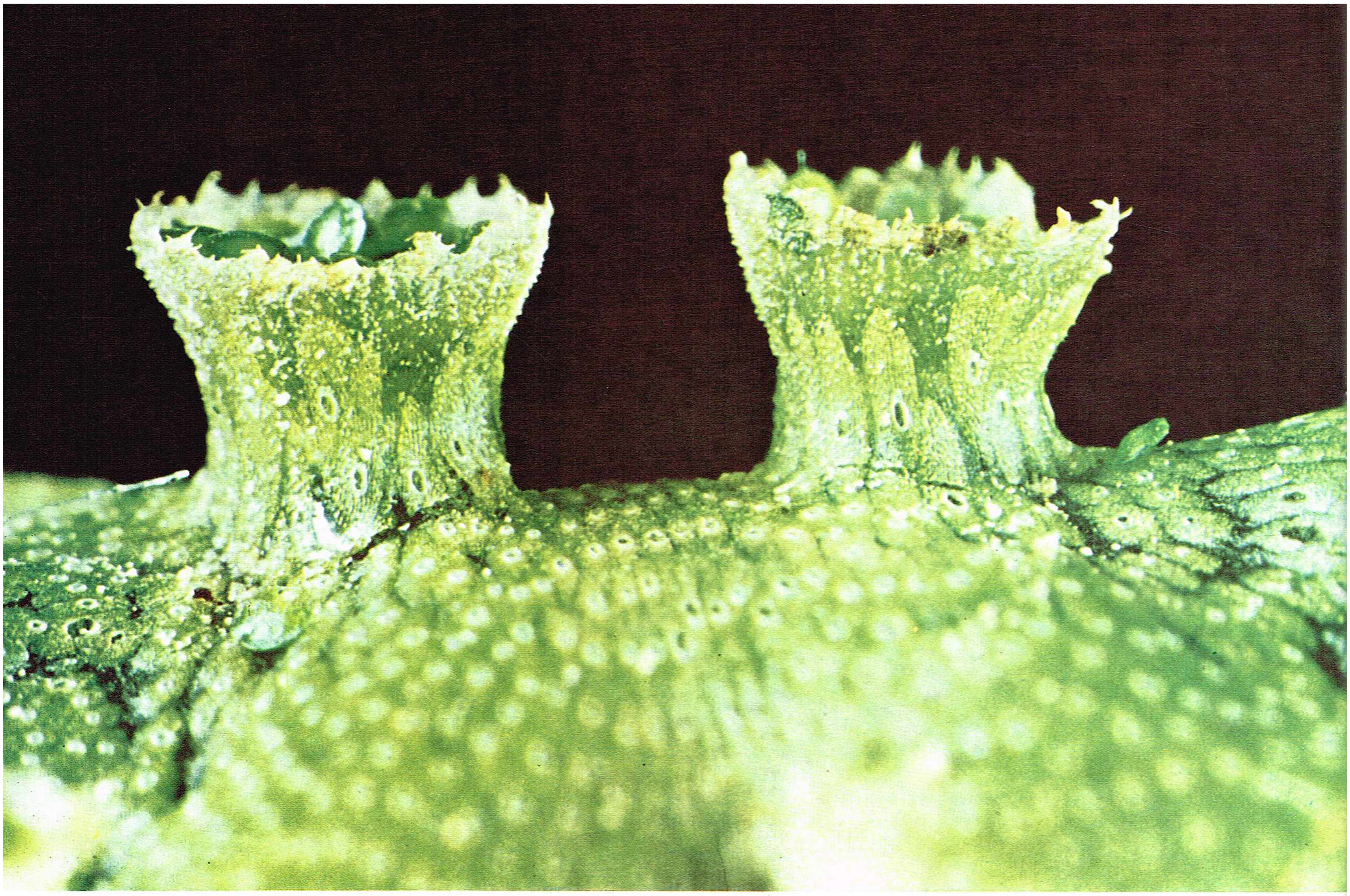

▲ Marchantia polymorpha : *coupes à propagules vues latéralement.*

C. Nardin - Jacana

Bryophytes

1) Hepaticopsida
Ordre des Marchantiales
Ordre des Jungermanniales
Sous-ordre des Anacrogynes
Sous-ordre des Acrogynes
Ordre des Sphærocarpales
Ordre des Takakiales

2) Anthoceropsida

3) Sphagnopsida
Ordre des Protosphagnales (fossiles)
Ordre des Sphagnales

4) Andreaeopsida

5) Bryopsida

HEPATICOPSIDA

Le nom « Hépatique » suggère une ressemblance entre l'aspect des thalles de *Marchantia polymorpha* et celui des lobes d'un foie. Il pourrait aussi rappeler que certaines espèces ont été utilisées pour le traitement des maladies de foie. Chez les auteurs grecs et latins, on avait attribué le nom « Lichen » au *Marchantia* et ce nom lui a été conservé jusqu'au XVI^{e} siècle.

On compte environ dix mille espèces d'Hépatiques réparties en près de trois cents genres groupés en quatre ordres : Marchantiales, Jungermanniales, Sphærocarpales, Takakiales.

Marchantiales

Elles forment un ordre comprenant environ vingt-cinq genres et trois cents espèces. Les unes ont un gamétophyte et un sporophyte complexes : ce sont les Marchantiacées ; les autres ont une organisation plus simple : ce sont les Ricciacées.

Le gamétophyte des Marchantiacées est un thalle à symétrie dorsiventrale, atteignant jusqu'à 10 cm de longueur, toujours pluristrate, ayant une partie médiane plus épaisse. Dans le tissu du thalle, on distingue : un épiderme supérieur percé de pores ; au-dessous, un tissu lacuneux à nombreuses chambres aérifères, très chlorophyllien, puis un tissu compact parenchymateux moins riche en chlorophylle ; enfin, un épiderme inférieur portant des écailles de forme particulière à chaque espèce et des rhizoïdes servant à l'ancrage et à l'absorption de l'eau et des substances minérales, les uns lisses, les autres à paroi interne couverte de tubercules. Le tissu parenchymateux contient de l'amidon et des oléocorps en grosses gouttes réfringentes. Les pores présentent une organisation complexe : les cellules qui les bordent ont un nombre et une disposition constants dans une espèce donnée.

Le thalle s'accroît par la division d'une rangée de cellules apicales et non par une seule initiale. La multipli-

cation végétative se produit lorsque l'une des divisions du thalle se trouve isolée de la plante mère. Chez les *Marchantia* et la lunulaire, le thalle porte des coupes qui contiennent des propagules : il s'agit de petits disques épais de plusieurs assises de cellules, formés à partir d'une cellule du fond de la coupe, libérés et dispersés hors de la coupe et germant pour redonner une plante nouvelle.

Les organes mâles sont portés par des anthéridiophores, rameaux nés du thalle, minces, dressés, se terminant par un plateau lobé. A la partie supérieure de ce plateau naissent des anthéridies globuleuses, enfoncées dans des cavités et fixées au fond par un court pédoncule. Les anthérocystes sortent de l'anthéridie par sa partie supérieure et libèrent alors les anthérozoïdes biciliés.

Les organes femelles sont portés par des archégoniophores ayant la même origine que les anthéridiophores mais terminés par un disque profondément découpé en neuf lobes étroits (rayons) portant, en surface, des archégones. L'oosphère est fécondée par des anthérozoïdes entraînés dans une goutte d'eau. Les rayons se retournent alors et les archégones se trouvent disposés sous les rayons, le col dirigé vers le bas.

Dans le ventre de l'archégone, le zygote devient un embryon de deux cellules qui produiront le sporophyte : pied, séta et capsule. Le ventre s'épaissit en une calyptra qui enveloppe le jeune sporogone et est, elle-même, entourée par un périgyne ; enfin, l'involucre, production foliacée, protège l'ensemble.

Dans la capsule, à partir de l'archésporium, se forment spores et élatères. La séta, en s'allongeant, pousse la capsule hors de ses trois enveloppes. La capsule s'ouvre en plusieurs lobes. Les spores sont souvent petites et très nombreuses (trois cent mille par capsule chez *Marchantia polymorpha*) ou plus grosses et beaucoup moins abondantes. Les spores sphériques ont une déhiscence irrégulière ; les autres, tétraédriques, se déchirent suivant la marque triradiée. De chaque spore sort un protonéma constitué d'un tube germinatif, d'un rhizoïde germinatif, d'un quadrant (groupe de quatre cellules) qui donne un plateau à partir duquel naîtra le thalle.

Le gamétophyte des Ricciacées est un thalle de taille très inférieure à celui des Marchantiacées, en rosette de quelques millimètres de diamètre, de structure très simple. Il se compose d'un épiderme supérieur ayant de minuscules perforations (sans organisation comparable à celle des pores des Marchantiacées), d'un tissu palissadique ou lacuneux, d'un tissu ventral compact et d'un épiderme inférieur portant des rhizoïdes et des écailles. On ne trouve pas d'oléocorps dans les cellules, sauf chez les *Ricciocarpus*. Le nombre de chromosomes est généralement égal à huit ou à un multiple de huit (neuf chez les Marchantiacées). La croissance du thalle se fait par quelques cellules initiales situées à l'apex du thalle.

Anthéridies et archégones sont enfoncés dans le thalle et non munis d'enveloppes spécialisées.

La capsule reste incluse dans le thalle. Elle contient des spores mais aucune élatère.

Les spores, relativement grosses (40 à 130 μ), tétraédriques, ornées d'alvéoles limités par des murets portant des tubercules, germent par la face distale.

La multiplication végétative s'effectue par isolement de fragments de thalle et, dans quelques espèces, par des tubercules formés à la face inférieure du thalle qui perpétuent la plante pendant la saison sèche.

Jungermanniales

Dans l'ordre des Jungermanniales, le plus riche en genres et en espèces, l'axe est généralement produit, à partir du protonéma, par une cellule apicale tétraédrique à face supérieure convexe et à trois faces latérales actives, ce qui explique la symétrie triradiée de la plante. Chez certaines espèces, l'apicale, lenticulaire, donne seulement deux segments latéraux, d'où la constitution d'un axe à symétrie dorsiventrale. La cellule apicale engendre donc soit une tige, soit un thalle.

Le thalle est une lame ramifiée, épaisse d'une ou plusieurs assises de cellules, à structure très simple. Chez *Pallavicinia* et *Symphyogyna*, cette structure devient plus complexe, un ou deux faisceaux de tissu conducteur étant inclus dans la partie médiane du thalle.

La tige se compose de cellules médullaires entourées d'une écorce. Parfois les cellules corticales forment une

C. Nuridsany - Atlas Photo

H. Bischler

▲ **Marchantia polymorpha** *(en haut)* **et Metzgeria** *(en bas) appartenant respectivement à l'ordre des Marchantiales et au groupe des Jungermanniales Anacrogynes.*

S. Jovet

◄ *Thalles en rosette de* **Riccia lamellosa.**

H. Chaumeton - Jacana

▲ *Tiges feuillées de* Madotheca, *Jungermanniale Acrogyne.*
▼ *Thalle de* Fossombronia *portant des pédicelles hyalins et des capsules sphériques sombres.*

H. Bischler

enveloppe hyaline importante retenant l'eau. Sur la tige, à partir de segments venus de la cellule apicale, se développent les rameaux et les feuilles qui, comme celles des Phanérogames, ont une fonction photosynthétique. Deux rangées de feuilles se forment de part et d'autre de la tige. Souvent, une troisième rangée apparaît sur la face ventrale de la tige, donc entre les deux rangées latérales : ce sont les amphigastres dont la forme diffère de celle des feuilles latérales.

Le long de la tige, mais seulement sur la face ventrale, naissent des rhizoïdes, longs tubes unicellulaires, hyalins ou teintés de brun clair, parfois de violet par la présence d'anthocyanes. Ils fixent la plante à son support et ont sans doute aussi un rôle d'absorption.

Les cellules du gamétophyte contiennent des oléocorps, petites masses réfringentes mesurant quelques microns, de composition très complexe (huiles essentielles), homogènes ou formées par la coalescence de plusieurs gouttelettes. Leur forme, leur nombre, leur grandeur, leur disposition dans certaines cellules sont propres à chaque espèce. Ils n'existent pas dans les cellules des Mousses.

Sur les divers éléments du gamétophyte apparaissent très souvent des propagules qui multiplient la plante végétativement : rameaux détachés de la plante mère, petits disques unistrates et pluricellulaires nés d'une cellule foliaire, fragments de feuilles *(Radula)*, périanthes caducs, petits corps unicellulés ou bicellulés venant de la marge de la feuille *(Cephaloziella)* ou se développant au sommet d'une tige *(Calypogeia)*. Chez les *Blasia*, la surface du thalle produit de petites masses étoilées qui se libèrent. Chez les *Riccardia*, les propagules naissent à l'intérieur des cellules épidermiques. Certains *Fossombronia* et *Petalophyllum* forment des tubercules au sommet de l'axe qui restent vivants lorsque la plante meurt et reproduiront un nouvel individu à la saison des pluies suivante.

Les anthéridies des Jungermanniales sont sphériques ou ovoïdes et plus ou moins longuement pédicellées, logées, chez les espèces à tige feuillée, dans l'axe de feuilles modifiées que l'on nomme bractées ou feuilles périgoniales.

Les archégones apparaissent à l'apex de la tige, groupés par cinq à vingt. Ils sont, en général, protégés par des feuilles modifiées soudées en un périanthe cylindrique, orné de crêtes, de plis, parfois couvert de tubercules, lui-même entouré de bractées ou feuilles périchétiales. Un seul archégone est fécondé, rarement deux. La protection de l'archégone peut se réduire à une simple écaille *(Fossombronia)* ou à des papilles ou des lamelles *(Riccardia)*. Parfois elle devient très complexe. Ainsi, dans les *Calypogeia*, le petit rameau qui porte l'archégone s'allonge de façon à envelopper complètement le jeune sporophyte, formant un marsupium souterrain duquel sortira la capsule mûre.

L'oosphère fécondée devient un zygote dont les divisions successives forment le sporophyte qui est composé d'un pied qui pénètre plus ou moins dans la tige et joue le rôle d'organe de fixation et d'absorption ; d'une séta d'abord très courte et qui s'allonge seulement à la maturité de la capsule, transparente, très délicate, turgescente ; d'une capsule brun sombre, sphérique ou ovoïde, presque toujours déhiscente par quatre valves, sauf dans les *Fossombronia* où elle se déchire à maturité. La paroi capsulaire possède une à dix épaisseurs de cellules présentant sur leurs parois minces des épaississements annulaires ou noduleux qui jouent un rôle dans l'ouverture de la capsule.

La capsule contient des spores et des élatères. Les spores, sphériques, sont petites (6 à 20 μ) et très nombreuses ou plus grandes (50 à 60 μ), et alors beaucoup moins nombreuses dans chaque capsule. La paroi sporale est mince et peu ornée, cependant, parfois, l'exine se couvre d'aiguillons ou d'épaississements en tablettes *(Fossombronia)*. Chez les *Pellia* et certaines Lejeunéacées, les spores commencent à germer dans la capsule, de sorte que c'est déjà un jeune protonéma et non une spore qui sort de la capsule.

Le mode de germination et la phase protonémique montrent des variations importantes correspondant à un certain nombre de types reconnus, basés sur l'aspect filamenteux, cylindrique ou globuleux du protonéma, sur le nombre de faces actives de l'initiale, sur la forme des feuilles primaires et des feuilles juvéniles.

L'ordre des Jungermanniales a été divisé en deux sous-ordres :

1) Les Jungermanniales Anacrogynes comprennent les espèces à gamétophyte thalliforme donc à symétrie dorsiventrale dont l'initiale, lenticulaire, produit seulement des segments latéraux qui développent soit des lobes incomplètement divisés rappelant des feuilles *(Fossombronia, Blasia)*, soit de véritables lames unistrates ou pluristrates *(Metzgeria, Riccardia)*. Sur ce thalle, les archégones naissent latéralement.

2) Les Jungermanniales Acrogynes comprennent les espèces à tige feuillée, donc à symétrie bilatérale, dont l'initiale a trois faces actives. L'archégone naît à l'extrémité de la tige, arrêtant ainsi la croissance de celle-ci.

Sphærocarpales

Ce sont de petites plantes formées d'un thalle mesurant environ 1 cm de diamètre, sans pores, mince, verdâtre, fixé au sol, à cellules dépourvues d'oléocorps. Sur ce thalle apparaissent de petits involucres en forme de bouteille ouverte au sommet. Un involucre entoure les archégones puis le sporophyte formé d'une capsule à pédicelle court, contenant des spores ornées et des cellules nourricières qui, contrairement aux élatères, ne portent jamais d'épaississements spiralés.
Chez les *Riella*, le thalle est une lame hélicoïdale dressée au fond des lacs peu profonds ou dans les étangs saumâtres.

Takakiales

Cet ordre découvert récemment (1958), composé seulement de quelques espèces, présente une organisation fort différente de celle des autres Hépatiques.
Le gamétophyte comprend une tige cylindrique dépourvue de rhizoïdes et des feuilles bi- ou trifides jusqu'à la base, à segments cylindriques ayant chacun une ou plusieurs rangées de cellules internes entourées d'une couronne de cellules épidermiques. L'archégone est nu (donc, il n'est jamais entouré d'un périanthe) et placé dans l'axe des feuilles. Les cellules possèdent seulement quatre chromosomes comme chez certaines Algues vertes; c'est le nombre le plus bas chez les Bryophytes.
Les Takakiales, séparées des autres Bryophytes par tous ces caractères, semblent correspondre à un groupe de type ancestral.

ANTHOCEROPSIDA

Ce petit groupe de plantes comprend moins de trois cents espèces mais son importance est grande pour l'étude de l'évolution des Bryophytes.
Le gamétophyte est un thalle dorsiventral à croissance apicale, vert sombre, lobé, épais de plusieurs assises de cellules, retenu au sol par des rhizoïdes à parois lisses. Sur la face ventrale, quelques cavités remplies de mucilage s'ouvrent par des pores; elles sont souvent envahies par des nostocs qui entrent par les pores. Dans l'intérieur du thalle passent parfois des cavités tubulaires mucilagineuses.
Les cellules du thalle ont, contrairement à celles de tous les autres Bryophytes, un seul chloroplaste (parfois deux et jusqu'à douze) contenant un pyrénoïde. Le noyau possède cinq chromosomes.
La multiplication végétative s'effectue par des propagules ou par des tubercules formés sur la face ventrale et qui restent vivants lorsque le thalle meurt.
Les anthéridies naissent sur la face dorsale du thalle par groupes de deux à quatre dans une même chambre anthéridiale. Les archégones apparaissent près des points de croissance, dans de petites dépressions.
Le sporogone, à maturité, comprend un pied bulbeux et une très longue et mince capsule (jusqu'à 15 cm de longueur) qui se dresse sur le thalle. Il n'y a pas de séta entre le pied et la capsule. Celle-ci est formée de deux valves accolées, d'une columelle centrale et d'un cylindre de tissu sporogène situé entre la columelle et les valves. Ce dernier donne les spores et les élatères. A l'extérieur de la capsule se trouvent des stomates. La partie méristématique, celle qui forme les spores et les élatères, se localise à la base de la capsule, de sorte que les spores les plus âgées se trouvent au sommet de celle-ci, les très jeunes à la base. La déhiscence de la capsule se produit au niveau des spores mûres. Les deux valves se séparent donc à partir du sommet (en fait, un peu au-dessous du sommet, celui-ci étant stérile), et la déhiscence progresse peu à peu vers la base de la capsule. Pendant ce temps, les élatères, formées de quelques cellules dont les parois sont localement épaissies, poussent les spores au-dehors.
Les spores sont tétraédriques, mesurent environ 30 à 50 μ. De fins tubercules ornent leur exine. Le tube germinatif sort par la face triradiée de la spore, forme un quadrant puis un thalle qui se développe à partir d'une cellule apicale.

▼ Bouquets de rameaux feuillés terminant des tiges de Sphaignes. Le gamétophyte croît continuellement par le sommet tandis que la base se détruit.

H. Chaumeton - Jacana

G. Jovet

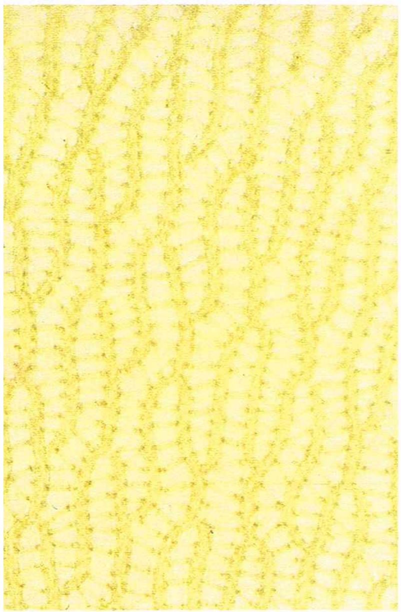

▲ *Tissu de Sphaigne (chlorocystes et hyalocystes) vu en plan au microscope.*

SPHAGNOPSIDA

Les Sphaignes actuelles appartiennent toutes au genre *Sphagnum* qui constitue à lui seul l'ordre des Sphagnales. Elles existent sous toutes les latitudes, en plaine et en montagne, toujours dans des lieux mouillés ou humides, dans les eaux acides, au bord des lacs, des ruisseaux, dans les fossés inondés, dans les tourbières du nord de l'Europe, dans les placettes tourbeuses.

Le gamétophyte des Sphaignes croît continuellement par son sommet, et sa base se détruit en même temps. Les débris, mêlés à ceux des Phanérogames vivant dans la tourbière, s'accumulent et sont comprimés sous le poids de la couche nouvelle en formation. Ainsi se constitue la tourbe. En dilacérant des fragments de tourbe, on y reconnaît des brins de tissu de Sphaignes.

La tige, longue de quelques centimètres à 50 ou 60 cm, possède, seulement à l'état jeune, des rhizoïdes cloisonnés et porte des feuilles caulinaires et des rameaux couverts de feuilles raméales. La plante entière est teintée de vert pâle, de jaunâtre, de rose ou de violacé. La croissance de la tige s'effectue grâce à une cellule apicale tétraédrique à trois faces actives.

La tige comprend : un tissu central de cellules à parois minces ; un anneau de cellules petites, à parois épaisses et souvent fortement teintées ; extérieurement, une ou plusieurs assises de cellules de grande taille, hyalines, à parois minces, dépourvues de cytoplasme, munies parfois de pores et d'épaississements spiralés et qui permettent la circulation de l'eau ; enfin chez certaines espèces, à l'extérieur de la tige, des cellules lagéniformes, c'est-à-dire en forme de bouteilles dont le col est retourné sur l'extérieur et ouvert.

Les feuilles se disposent en spirale avec une divergence de 2/5. Chaque feuille, dans sa jeunesse, croît par le fonctionnement d'une cellule apicale puis la croissance devient basale. Son tissu comprend : les chlorocystes, cellules longues et étroites, sinueuses, chlorophylliennes ; les hyalocystes, cellules longues et larges, losangiques, hyalines, mortes, gonflées d'eau, à parois munies de fibres et percées de pores. Ainsi, la structure particulière de la tige et des feuilles permet l'absorption de l'eau chez ces plantes qui, à l'état adulte, sont dépourvues de rhizoïdes.

La multiplication végétative s'effectue par la chute de certains rameaux qui, libérés, vivent indépendamment, ou de petits bourgeons formés sur la tige et les feuilles. Les inflorescences mâles constituent des rameaux situés près du sommet de la tige, à feuilles très rapprochées les unes des autres. Dans l'axe de chaque feuille se trouve une anthéridie presque sphérique portée par un long pédoncule et d'où s'échappent les anthérozoïdes biciliés.

Les archégones, solitaires ou groupés par deux à cinq, naissent sur de courts rameaux. Un périchétium, ensemble de feuilles assez larges, les protège. Généralement, un seul archégone est fécondé. La division du zygote donne une capsule sphérique portée par un pied bulbeux. La séta, ici extrêmement réduite, correspond seulement à un rétrécissement entre le pied et la capsule.

La capsule, sphérique, se ferme par un opercule bombé. Sa paroi comprend quatre à six assises de cellules et porte des stomates que l'on dit non fonctionnels. A l'intérieur, dans la partie centrale, se trouve une columelle. Un sac sporifère se dispose en dôme au-dessus d'elle. La capsule s'insère dans la partie supérieure et renflée d'un pseudopode qui n'appartient pas au sporophyte mais au gamétophyte et qui correspond au prolongement de l'axe du rameau porteur de l'ancien archégone. A maturité, par la sécheresse, elle se comprime latéralement et devient cylindrique. L'opercule est poussé violemment et un nuage de spores se trouve chassé au-dehors.

Les spores, petites, tétraédriques, germent par la face proximale qui se déchire suivant la marque triradiée. Un tube germinatif sort, donne un filament de deux à quatre cellules dont la cellule terminale agit comme une initiale à deux faces actives qui constituera un plateau très mince, le protonéma primaire attaché au substrat par des rhizoïdes. Plusieurs cellules marginales de ce protonéma donnent naissance, chacune, à un filament qui forme le protonéma secondaire. Vers la base de ce dernier apparaît un bourgeon dont une cellule tétraédrique devient la cellule apicale de la jeune tige.

Nous voyons que les Sphagnales présentent des caractères qui n'existent pas chez les autres Bryophytes. Cependant, des études détaillées ont montré certains points communs avec les autres classes de Muscinées.

L'ordre des Protosphagnales est connu seulement à l'état fossile, dans le Permien de l'Angaride (U.R.S.S.), par des rameaux feuillés parfaitement conservés. Leurs feuilles, comme celles de nombreuses Mousses, présentent une nervure médiane. Parfois existent aussi des nervures latérales : ce caractère manque dans toutes les Muscinées actuelles. Le tissu des feuilles est semblable à celui des Sphaignes.

Cette très courte description suffit à montrer l'intérêt considérable de cet ordre pour la compréhension de la phylogénie des Bryophytes.

C. Nardin - Jacana

▶ **Sphagnum,** *sommet d'une tige. L'accumulation des Sphaignes en milieu acide, à l'abri de l'air, donne naissance à la tourbe.*

ANDREAEOPSIDA

Les Andreaeopsida, peu nombreuses, se répartissent dans le monde entier mais surtout dans les régions arctique, antarctique, tempérée froide et en haute montagne. Leur gamétophyte ressemble à celui des Bryales. La tige, couchée sur les rochers, est dépourvue de vaisseaux conducteurs. Les feuilles possèdent une nervure ou en sont démunies.

Anthéridies et archégones forment des groupes à l'extrémité des rameaux; les unes sont entourées de feuilles périgoniales, les autres de feuilles périchétiales. Des filaments stériles nommés paraphyses accompagnent les organes sexuels.

Le sporogone comprend un pied épais fixé dans le gamétophyte, un col très court qui correspond à une très courte séta et, au-dessus, la capsule ovoïde. Au centre de la capsule se trouve une grosse masse de tissu stérile, la columelle. Le sac sporifère forme un dôme au-dessus d'elle. Il ne contient que des spores. Quand la capsule est mûre, l'axe qui portait l'archégone (donc appartenant au gamétophyte) s'allonge en un pseudopode comme chez les Sphaignes, et pousse la capsule au-dessus des feuilles périchétiales. La coiffe, venant également du gamétophyte, se rompt et sa partie supérieure reste au sommet de la capsule. La capsule s'ouvre par quatre valves qui s'écartent ou se rapprochent selon l'état hygrométrique de l'air mais restent soudées aux deux extrémités. Les spores peuvent alors sortir.

Les spores, lisses ou rugueuses, mesurent 15 à 40 μ. La germination commence à s'effectuer à l'intérieur de la spore. Il se forme donc une masse pluricellulaire enveloppée par l'exine. L'exine se déchire ensuite. Un filament apparaît. Il se ramifie, donnant des rameaux rampant sur le substrat, jouant le rôle de rhizoïdes et pénétrant dans les fentes des rochers; d'autres rameaux se dressent et deviennent chlorophylliens : ils correspondent à un protonéma sur lequel naissent des bourgeons dont une cellule devient une initiale à trois faces actives, origine de la tige et des feuilles.

M. Zigliara - Atlas Photo

▲ **Racomitrium lanuginosum.** ***Tiges feuillées. Les feuilles se terminent par une large pointe hyaline.***

BRYOPSIDA

A cette classe appartiennent la plupart des Mousses. On les trouve dans toutes les régions, en plaine et en montagne, sur la terre, sur les écorces, dans les eaux douces.

Le jeune gamétophyte est constitué par un protonéma filamenteux comprenant d'abord un chloronéma, court filament vert issu de la spore, dont les cellules ont des cloisons perpendiculaires au filament, puis un caulonéma brun, ramifié, à cloisons cellulaires obliques, portant des rhizoïdes.

Sur ce caulonéma à croissance apicale, un ou plusieurs bourgeons apparaissent, portant à l'apex une cellule tétraédrique à trois faces actives qui donnera naissance à la tige feuillée. Quand la tige se forme, le protonéma disparaît; il est donc éphémère. Chez quelques espèces, il persiste même lorsque la tige a atteint son complet développement (*Pogonatum, Schistostega osmundacea* que l'on nomme la Mousse lumineuse car les parois bombées des cellules du protonéma réfléchissent la lumière, *Buxbaumia* dont la partie feuillée reste très réduite).

La tige, parfois très courte (quelques millimètres chez *Phascum, Archidium*), le plus souvent de taille moyenne (1 à 10 cm), peut atteindre 50 à 70 cm chez les *Dawsonia*. Certaines Mousses qui vivent dans l'eau comme les Fontinales et celles qui pendent des branches dans les régions tropicales mesurent aussi plusieurs décimètres de longueur.

La base de la tige porte des rhizoïdes longs, minces, ramifiés, pluricellulaires, à cloisons cellulaires obliques, généralement bruns ou rougeâtres.

La structure de la tige est assez souvent simple et comprend alors un cylindre central formé de longues cellules à parois minces et dépourvues de cytoplasme, une écorce qui entoure le cylindre central, un épiderme. Elle devient parfois beaucoup plus complexe, par exemple chez les Polytrichales, et présente un péricycle rudimentaire, des leptoïdes et des hydroïdes, donc un système conducteur primitif mais efficace. Dans les parties souterraines des tiges existent tous ces éléments, et leur disposition est encore plus complexe que dans la partie aérienne.

Les rameaux naissent d'une cellule corticale de la tige située au-dessous d'une feuille. Ils s'allongent par le jeu d'une cellule apicale tétraédrique.

Les feuilles se constituent grâce à une cellule à deux faces actives. Bientôt, cette cellule cesse son activité et l'allongement s'effectue par le jeu d'une cellule apicale. Entières ou dentées, marginées ou non, obtuses à l'apex ou aiguës et même parfois munies d'un long poil hyalin, elles présentent des formes extrêmement variées. Elles ont une disposition spiralée avec une divergence de 1/3, 2/3, 3/8, rarement 1/2 *(Fissidens, Schistostega)*. Elles possèdent souvent une ou deux nervures mais peuvent en être dépourvues. Leurs cellules présentent des formes diverses : hexagonales *(Mnium, Bryum)*, carrées ou rectangulaires *(Grimmia, Pottia)*, très allongées et étroites *(Brachythecium, Hypnum)*. Chez les Polytrichacées, sur la face ventrale de la feuille, des lamelles minces mais hautes de plusieurs cellules suivent le limbe du sommet jusqu'à la base. Les cellules de ces lamelles, riches en chlorophylle, semblent avoir un rôle assimilateur important; d'autre part, elles retiennent ou laissent passer l'eau par les espaces capillaires situés entre elles.

La multiplication végétative s'effectue de plusieurs façons : chute du sommet des rameaux ou de rameaux entiers détachés des touffes, production de rhizoïdes à la base des feuilles, formation des bulbilles *(Pohlia)* ou de lamelles pluricellulaires détachées des feuilles *(Orthotrichum lyellii)*. Chez *Tetraphis pellucida* ou *Aulacomnium androgynum*, les propagules naissent dans un réceptacle terminal ou en touffe au sommet des rameaux. Chez quelques *Bryum*, les propagules se forment sur les rhizoïdes et, bien colorés en rouge vif, ils rappellent une minuscule framboise.

Les anthéridies se forment en groupe au sommet des rameaux mâles (dans les espèces dioïques ou autoïques),

chacune à partir d'une cellule de l'apex qui devient une initiale de l'anthéridie. Des paraphyses, filaments stériles, se mêlent à elles. Le rôle de ces éléments reste inconnu mais on peut supposer qu'ils maintiennent autour des anthéridies une certaine humidité. L'ensemble anthéridies et paraphyses est entouré de feuilles périchétiales différentes, par leur forme, des feuilles végétatives.

Une anthéridie comprend un pied court et massif et le corps même de l'anthéridie, plus ou moins ovoïde, dont la paroi épaisse d'une seule assise de cellules entoure complètement la masse des anthérocytes qui deviendront les anthérozoïdes.

Chez les *Polytrichum*, cette inflorescence mâle forme une sorte de coupe au sommet des rameaux mâles. Comme les anthéridies ne naissent pas de la cellule apicale de l'axe, celle-ci continue à se diviser et produit un nouvel axe feuillé, au-dessus et à partir du centre de la coupe à anthéridies. Si ce rameau nouveau donne à son tour une coupe à anthéridies, on obtient deux coupes mâles superposées, à quelque distance l'une de l'autre.

Les archégones apparaissent à l'apex des rameaux femelles. Ils s'accompagnent aussi de paraphyses. Des feuilles périgoniales entourent ce groupe d'éléments. La cellule apicale du rameau femelle participe à la formation d'un archégone, la croissance du rameau se trouve donc arrêtée.

Les organes mâles et femelles peuvent être rassemblés sur la même plante (espèces monoïques), soit séparés sur des inflorescences différentes (espèces autoïques), soit mêlés dans la même inflorescence (espèces synoïques).

Un anthérozoïde ayant atteint l'archégone puis fécondé l'oosphère, le zygote se forme. Il se divise en deux cellules qui vont produire les trois parties du sporophyte. Le pied, court, conique, reste fixé à l'apex du rameau. La séta, longue et mince, bien développée avant la maturité de la capsule, comprend un cylindre axial conducteur d'eau entouré d'une écorce et d'un épiderme. Elle porte la capsule.

La capsule, cylindrique, pyriforme ou sphérique, comprend : à la base, une région stérile, extension de la séta, spongieuse mais traversée en son milieu par le prolongement du tissu axial de la séta et dont l'épiderme porte des stomates, nommée apophyse ; une urne, partie fertile de la capsule ; un opercule ; un péristome.

L'urne se compose de plusieurs éléments : au centre, une columelle de tissu stérile, reliée au tissu conducteur qui traverse l'apophyse ; autour de la columelle, un sac sporifère ; à l'extérieur du sac, la paroi capsulaire composée de quelques assises de cellules ; enfin, un épiderme pouvant porter des stomates.

Le sommet de l'urne est très complexe. Un anneau de cellules individualisées le borde. Cet anneau casse à la maturité des spores, libérant l'opercule. Le péristome se trouve fixé au bord de l'ouverture de l'urne. Il peut comprendre un ou deux rangs de dents (un endostome et un exostome) triangulaires, membraneuses, teintées de brun-rouge, portant des papilles et des épaississements transverses. Les dents, au nombre de huit, seize, trente-deux ou soixante-quatre, se réduisent parfois et deviennent très courtes ou disparaissent complètement. Chez *Funaria hygrometrica*, elles se disposent en spirale ; chez les *Barbula*, filiformes et très longues, elles constituent une mèche qui s'enroule sur elle-même.

Un opercule à bec court ou long et mince ferme l'urne. La coiffe couvre partiellement ou totalement la capsule.

Chez les Polytrichacées, l'urne n'a pas d'anneau. Elle est fermée par un épiphragme, disque sur lequel viennent se rabattre les soixante-quatre courtes dents à sommet arrondi du péristome.

A la maturité des spores, la capsule se dessèche ; l'anneau se rompt, l'opercule tombe, le péristome devient visible. Ses mouvements hygroscopiques ouvrent et ferment la capsule. Il laisse alors sortir les spores ou les retient. La séta, également hygroscopique, tourne sur elle-même, entraînant et secouant la capsule. Ces mouvements et ceux du péristome contribuent à la dispersion des spores dans le voisinage de la plante. Les capsules qui s'ouvrent ainsi sont dites stégocarpes. Dans certaines espèces, elles n'ont pas de système d'ouverture spécialisé : elles se déchirent irrégulièrement ; ce sont des capsules cléistocarpes.

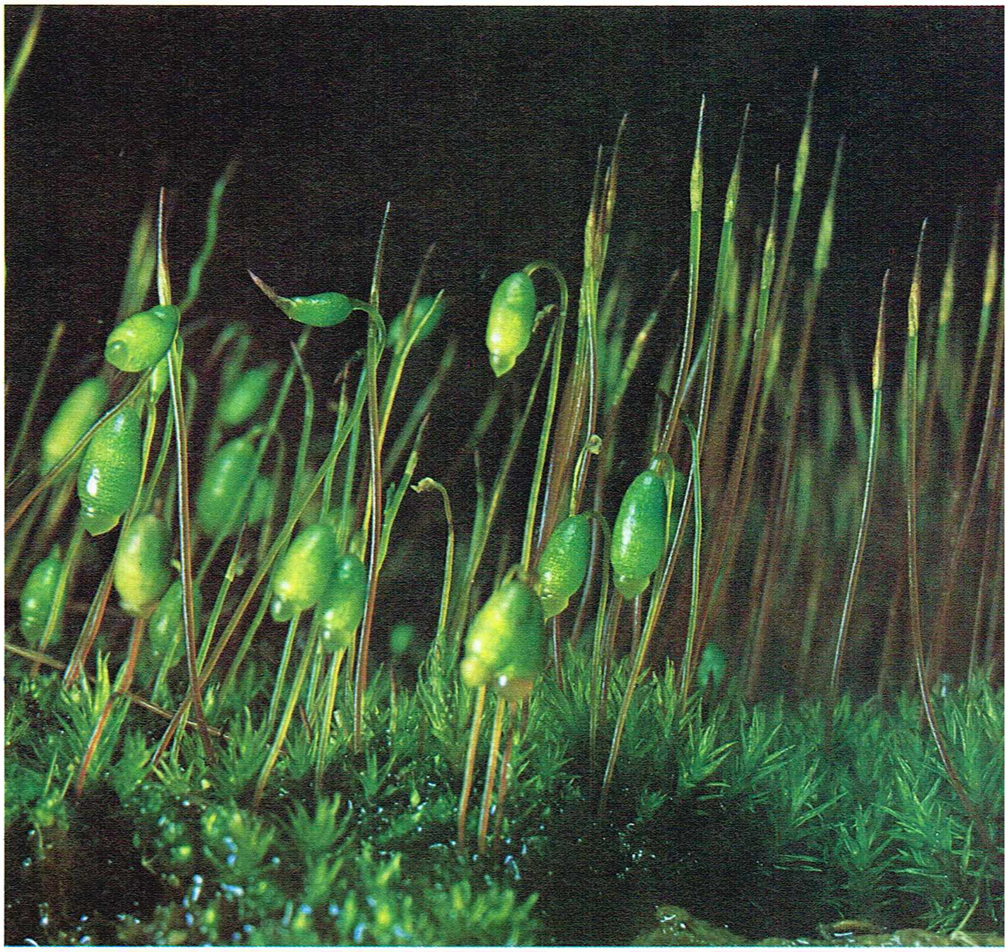

Atlas Photo

▲ *Coussin de Mousse du genre* Bryum, *formé par les tiges feuillées et dominé par les sporophytes à capsules pendantes.*

Les spores des Mousses, souvent très petites (8 à 20 μ), sphériques, à surface lisse ou plus ou moins verruqueuse, à paroi mince, sont unicellulaires, très rarement pluricellulaires. En présence d'humidité, elles germent en un ou plusieurs points, donnant un protonéma filamenteux.

Écologie

Parmi les facteurs climatiques qui règlent l'installation des Muscinées dans des lieux nouveaux ou leur persistance sur place, la pluie et l'humidité atmosphérique comptent certainement comme les plus importants. Dans les régions tropicales où l'air est saturé d'humidité, beaucoup de petites Hépatiques épiphylles (des Lejeunéacées surtout) ou épixyles, très fragiles, ne supportent pas la moindre période sèche. Par contre, dans les régions semi-arides, les Muscinées tolèrent plusieurs mois de sécheresse. Cette résistance à la dessiccation devient très grande chez les espèces reviviscentes, qui, à la moindre pluie, reprennent leur développement.

La lumière est indispensable à toutes les Muscinées, particulièrement aux espèces héliophiles qui vivent dans les endroits découverts. Certaines espèces, cependant, préfèrent l'ombre des forêts ou s'installent dans des stations qui ne reçoivent jamais le soleil et même à l'entrée des grottes. Les températures très élevées ou très basses, les grands écarts thermiques entre les saisons n'éliminent pas toutes les espèces. Ainsi, des Bryophytes vivent à — 20° ou — 40° dans l'Arctique, d'autres à +40° ou + 50° dans les déserts d'Afrique du Nord. On cite des *Tortella* et des *Thuidium* qui, en basse Engadine, passent de — 40° en hiver à + 48° en été. Des expériences de résistance au froid ont prouvé une possibilité de survie après sept jours de maintien à la température de l'azote liquide, soit — 190°.

L'altitude conditionne aussi l'existence des Muscinées. Certaines espèces se répandent depuis la plaine jusqu'à l'étage subalpin, mais d'autres se maintiennent seulement sur les rochers des hautes montagnes.

Page ci-contre :
◀ Tetraplodon mnioides. *Gamétophytes (tiges feuillées) terminés par les sporophytes, longs pédicelles portant des capsules cylindriques. Au sommet de l'urne, dents du péristome renversées à l'état sec.*

M. Zigliara

K. Ross - Jacana

M. Desjardins - Top Réalités

▲ **Funaria hygrometrica.** *Mousse fréquente sur les places à charbon dans les forêts. Pédicelles courbés au sommet, portant les capsules piriformes fermées par un opercule convexe et partiellement couverts par une coiffe.*

▶ *Coussinets de Mousses portant une multitude de capsules (Écosse. Loch Alich).*

▼ **Polytrichum,** *capsule anguleuse, munie à sa base d'une apophyse et couverte au sommet d'une coiffe formée de longs poils pendants.*

C. Nardin - Jacana

Les facteurs édaphiques, structure et nature du substrat, jouent un très grand rôle dans la vie des Bryophytes. Ces Végétaux s'installent sur la terre argileuse ou plus ou moins sableuse et humifère, d'autres sur le sable (psammophiles) ou dans les fentes de rochers (rupicoles), sur les écorces (corticoles) ou sur les feuilles (épiphylles). Des espèces vivent dans les eaux douces, comme les Fontinales qui s'enracinent par leur base et laissent onduler leurs tiges feuillées dans les eaux courantes. *Thamnium lemani* a été trouvé à 54 m de profondeur dans le lac Léman. *Riccia fluitans* et *Ricciocarpus natans* flottent librement à la surface des eaux tranquilles. Les Sphaignes préfèrent les tourbières. Les *Riella* tolèrent l'eau saumâtre. Aucune espèce ne vit dans la mer, cependant *Grimmia maritima,* fixé aux rochers, supporte les embruns et le contact momentané des vagues.

Les Muscinées peuvent être indifférentes au pH du substrat mais certaines sont nettement acidophiles ou basophiles, ou neutrophiles. Dans les eaux très riches en carbonate de calcium, le calcaire se dépose sur les tiges feuillées des *Eucladium verticillatum* et *Cratoneuron commutatum,* qui, peu à peu, deviennent complètement encroûtées : ainsi se forment les tufs calcaires. Sur les roches riches en métaux comme le cuivre vivent certaines espèces que l'on peut considérer comme des indicatrices de la présence de ce métal *(Mielichhoferia, Merceya).* On trouve aussi des Bryophytes supportant bien les substrats gypseux, comme *Dicranella cerviculata* et *Cephalozia bicuspidata.*

Distribution géographique

Distribution dans le temps. Les Bryophytes sont des Végétaux très anciens. Quelques restes fossiles ont été découverts dans le Dévonien. Certains groupes actuels (Marchantiales, Jungermanniales Anacrogynes) existaient déjà au Primaire et ne semblent pas avoir beaucoup évolué au cours des temps. Au Permien vivaient des Végétaux très remarquables dont le port rappelle celui des Mousses et dont le tissu ressemble à celui des Sphaignes actuelles (Protosphagnales). Du Lias, on connaît les *Naiadita,* Végétaux qui se classent parmi les Hépatiques et dont on peut trouver, de nos jours, des groupes voisins ; ils ont probablement disparu très vite. Au cours du Tertiaire, à l'Oligocène et au Miocène, la plupart des espèces actuelles étaient déjà constituées.

On n'a jamais trouvé d'espèce que l'on puisse considérer comme l'ancêtre de tous les Bryophytes. On ne peut donc affirmer que les divers groupes connus de nos jours ont une origine commune. En outre, à part les Protosphagnales, il n'existe pas, parmi les fossiles, d'espèces pouvant faire la liaison entre les groupes actuels.

Distribution dans l'espace. La distribution des Bryophytes dépend de l'ancienneté des différents groupes qui leur appartiennent, de l'histoire des continents, de l'écologie passée et présente et des possibilités de variations génétiques de chacune d'elles.

Parmi les Bryophytes, nous distinguons des espèces cosmopolites *(Bryum argenteum, Marchantia polymorpha),* des holarctiques, des arctiques, des antarctiques, des pantropicales, des paléotropicales ou néotropicales, etc. Mais leur distribution est souvent beaucoup plus restreinte et on doit alors les qualifier d'atlantiques *(Marchesinia mackayi),* amphiatlantiques, méditerranéennes *(Riccia canescens),* etc. Les endémiques ne vivent que sur une étendue assez restreinte : on distinguera, par exemple, des espèces particulières à une vaste région (endémiques nord-africaines) ou à un pays ou à une île (genre *Rutenbergia,* endémique malgache), ou même à une seule localité.

Utilité

De tous temps, les Bryophytes ont été utilisées par l'homme. On trouve des preuves de leur emploi dès la préhistoire. On a découvert, en Angleterre, une lame mésolithique dont la gaine de préhension était formée d'*Hylocomium brevirostre.* On cite un bateau trouvé dans le Lincolnshire dont le calfatage comprenait vingt-

R. Ruffier - Lanche - Jacana

▲ *Touffes de Mousses couvrant partiellement une souche d'arolle.*

trois espèces de Mousses. Les Sphaignes et les Mousses servaient à remplir les fentes de constructions en bois. A l'âge du fer et du bronze, des touffes de *Neckera complanata* bouchaient les trous des pirogues ; des liens étaient faits de *Polytrichum commune*. Les Mousses servaient encore au calfatage des bateaux il y a quelques siècles. Les Lapons faisaient des sortes de « lits de Mousses » avec des *Polytrichum*, et, dans certains pays, plusieurs espèces entraient dans la composition des matelas. Les formes de grande taille *(Hylocomium splendens, Rhytidiadelphus triquetrus, Pseudoscleropodium purum)* ont, pendant longtemps, servi pour les emballages, car elles sont souples et élastiques. Les fleuristes les utilisent pour couvrir la terre des pots de fleurs.

Les Sphaignes participent à la formation de la tourbe. On connaît bien l'emploi de la tourbe comme combustible, en horticulture et comme isolant thermique et acoustique. La structure des tiges et des feuilles en fait un absorbant remarquable, c'est pourquoi on a pu, à diverses reprises, notamment pendant la Première Guerre mondiale, employer les Sphaignes dans les pansements comme substituts du coton. Leurs propriétés antibiotiques ne sont, d'ailleurs, pas négligeables.

Si, au point de vue économique, les Muscinées ont un intérêt très faible, elles jouent un grand rôle dans la nature. Elles aident à la formation d'humus sur le sol des forêts, dans les creux et les fentes des rochers, et comptent parmi les premiers colonisateurs des terrains dénudés. Dans les régions semi-désertiques, elles protègent le sol contre le vent car les thalles et les courtes tiges feuillées constituent, par leur abondance, une croûte superficielle fortement fixée au sol par les rhizoïdes. Cette croûte sert d'abri aux petites graines des Végétaux supérieurs, surtout aux semences de Graminées qui peuvent germer sans être soufflées par le vent.

Beaucoup d'Animaux, surtout dans les régions arctiques, consomment des *Dicranum*, des *Polytrichum*, des *Bryum*. Rappelons que le mammouth trouvé dans la glace et transmis au Muséum national d'histoire naturelle de Paris avait conservé dans son estomac des débris de Muscinées qui ont pu être identifiés *(Polytrichum sexangulare, Hypnum revolvens* et *Hypnum stellatum)*.

Le rôle le plus important des Bryophytes est d'ordre biologique. Par leur facilité et leur rapidité de croissance, par leur originalité morphologique et physiologique, elles constituent pour les chercheurs un matériel d'expérimentation très précieux. C'est chez un *Sphaerocarpus* qu'Allen découvrit les chromosomes sexuels. Entre 1923 et 1940, Fr. von Wettstein réalisa les premiers croisements intergénériques chez les Mousses, obtint des polyploïdes par aposporie. Les frères Marchal réalisèrent des polyploïdes de Bryophytes expérimentalement. A notre époque, les Muscinées continuent à être utilisées comme matériel de recherche par de nombreux spécialistes.

BIBLIOGRAPHIE

AMANN J., *Flore des Mousses de la Suisse,* Genève, 1912-1918. - AUGIER J., *Flore des Bryophytes,* Encyclopédie biologique, LXIV, Lechevalier, Paris, 1966. - BOULAY Abbé, *Muscinées de la France,* Paris, 1884. - BOWER F. O., *Primitive Land Plants also Known as the Archegoniatae,* London, 1935. - BRUCH Ph., SCHIMPER W., GUMBEL Th., *Bryologia Europaea,* Stuttgart, 1837-1866. - DISMIER G., *Flore des Sphaignes de France,* Archives de botanique, t. 1, Mém. nº 1, 1927. - DIXON H. N., *The Student's Handbook of British Mosses,* London, 1924. - DOUIN M., *Nouvelle Flore des Mousses et des Hépatiques,* Paris, 1892. - HERZOG Th., *Geographie der Moose,* Iena, 1926. - HUSNOT T., *Muscologia gallica,* Cahan (Orne) et Paris, 1922. - HUSNOT T., *Hepaticologia gallica,* Cahan (Orne), 1922. - JOVET-AST S., *Muscinées. Cryptogamia,* SEDES, Paris, 1952. - MACVICAR S. M., *The Student's Handbook of British Hepatics,* London, 1926. - MÜLLER K., *Die Lebermoose europas,* 1951-1958. - PARIHAR N. S., *Bryophyta,* Allahabad, 4e éd., 1961. - SMITH L., *Cryptogamic Botany,* II, New York, 1938. - VERDOORN Fr., *Manual of Bryology,* The Hague, 1932.

C. de Klemm - Jacana

▲ *Certaines forêts tropicales abritent de nombreuses Fougères arborescentes dont le tronc peut atteindre 10 à 15 m.*

LES PTÉRIDOPHYTES

Les systèmes de classification du règne végétal sont extrêmement variés et, dans ces différents systèmes, la place des Ptéridophytes est, elle-même, différente.

Nous adopterons tout au long de ce chapitre une des plus récentes conceptions, celle de Pichi-Sermolli, le ptéridologue bien connu.

L'ensemble des Ptéridophytes ou Cryptogames vasculaires est une « division » au sens taxonomique du terme ; les unités systématiques étant, par ordre croissant de grandeur, l'espèce, le genre, la famille, l'ordre, la division. Voici, d'après Pichi-Sermolli, la classification générale des Cormophytes ou Cormobiontes, Végétaux opposés aux Thallophytes ou plantes à thalle.

Les Cormobiontes sont donc des plantes qui possèdent un « cormus » ou axe feuillé, permettant la vie aérienne ou subaérienne (rarement aquatique). Elles englobent les Bryophytes (qui ne possèdent pas de véritables racines), les Ptéridophytes, et les Spermatophytes, qui sont les trois unités fondamentales. Les Bryophytes n'ont pas de vaisseaux conducteurs de la sève ou système vasculaire, par opposition aux Cryptogames vasculaires et aux Phanérogames (Gymnospermes et Angiospermes). Les Ptéridophytes sont donc les Cryptogames les plus différenciés. Elles possèdent en commun avec les Bryophytes un cycle de développement caractérisé par l'alternance de générations et la présence d'organes femelles appelés archégones, ensemble de cellules accompagnant l'oosphère ou gamète femelle ; c'est pourquoi Bryophytes et Ptéridophytes étaient réunies autrefois pour former les Archégoniates.

Le fait de posséder un véritable système vasculaire rapproche, d'autre part, les Ptéridophytes et les Spermatophytes en un groupe, les Stélophytontes, appellation qui peut donc être appliquée à toutes les plantes vasculaires, par opposition aux Bryophytontes non vascularisées.

La difficulté de situer les Ptéridophytes n'est du reste pas actuellement totalement surmontée, surtout en ce qui concerne les genres éteints. Les rapports phylogénétiques restent encore, dans de nombreux cas, assez hypothétiques.

La présence d'un appareil vasculaire a marqué un échelon décisif dans l'évolution du règne végétal ; il est probable que les Phanérogames descendent d'ancêtres Ptéridophytes qui, dans des temps très reculés, furent représentés par des formes très variées, dont un grand nombre étaient arborescentes, dominant des paysages végétaux très différents.

Caractères généraux

Le cycle de développement des Fougères, nous venons de le dire, est caractérisé par l'alternance de générations, c'est-à-dire par deux phases successives :

1° Une phase sexuée pendant laquelle sont produits les organes reproducteurs ou gamètes sur le *gamétophyte* ou prothalle. C'est une phase pendant laquelle le noyau contient un nombre réduit de chromosomes *(n)*. Elle s'achève à la fécondation qui redonne des cellules à nombre double de chromosomes (2 *n*).

2° Une phase qui commence à la fécondation et finit à la réduction chromatique au moment de la production des spores. C'est la phase sporophytique, les spores naissant sur la plante feuillée ou *sporophyte*.

Chez les Ptéridophytes, les deux tronçons vivent une vie indépendante, le gamétophyte, petite lame verte, d'aspect thalloïde, très réduit dans sa taille et sa durée, passant souvent inaperçu à un œil non informé, le sporophyte, au contraire, plante feuillée atteignant parfois de grandes dimensions, différenciée en tige, racine, et feuille, étant ce que l'on considère généralement comme une Fougère. Nous étudierons successivement le sporophyte et le gamétophyte.

Le sporophyte

La plante feuillée adulte porte sur ses feuilles fertiles des spores situées généralement à la face inférieure des feuilles ou frondes.

Les frondes fertiles peuvent être identiques ou différentes des frondes stériles, parfois les spores sont portées par des rameaux différenciés qui rappellent les inflorescences des Spermatophytes. Les spores sont contenues dans des sporanges groupés en sores.

P. Starosta

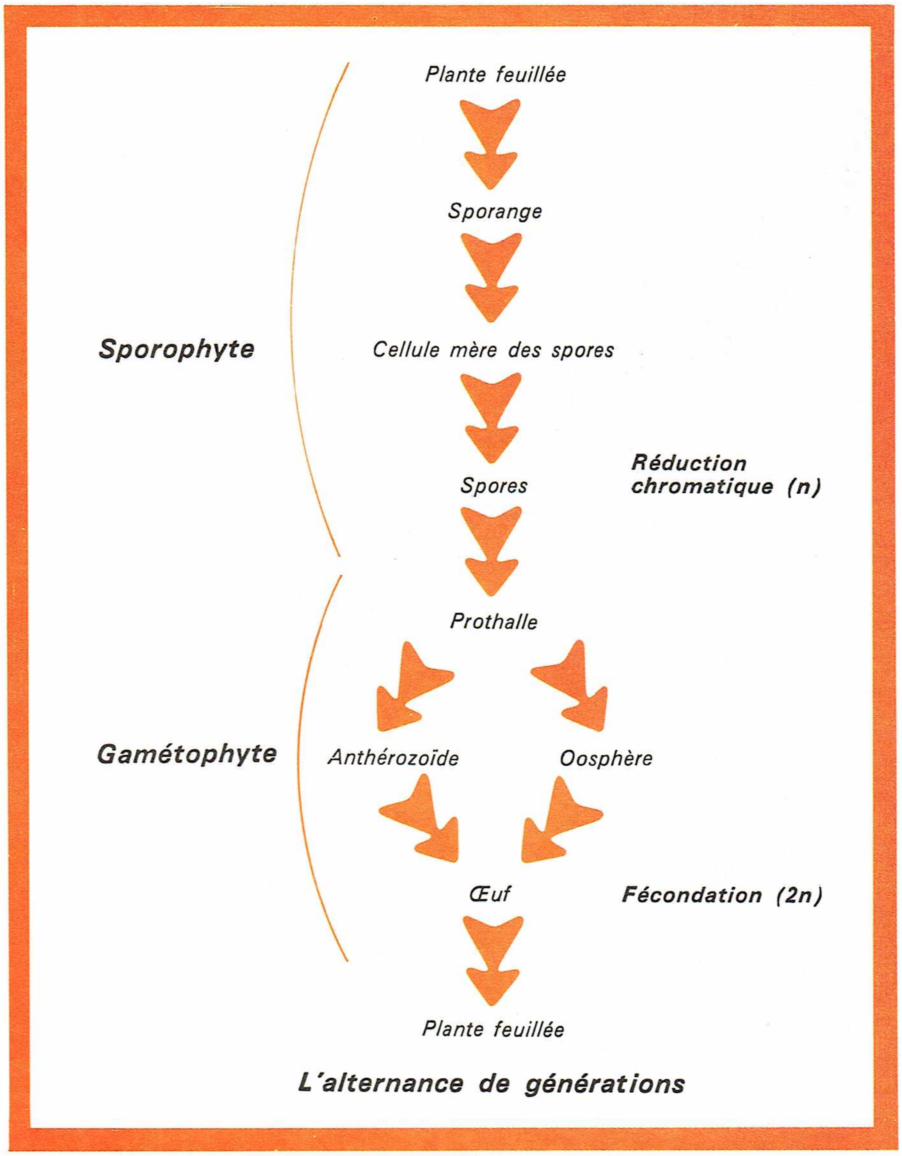

▲ *Alternance de générations chez les Ptéridophytes.*

◀ *Fragment de fronde d'Asplenium trichomanes, face inférieure montrant les sores.*

Les sores sont nus ou recouverts par une indusie, petite lame très mince, parfois caduque. Ils sont situés généralement à la face inférieure des frondes, terminaux ou dorsaux sur une nervure; ils peuvent être arrondis ou réniformes, ou linéaires, parfois fusionnés ou même recouvrant toute la face inférieure du limbe à maturité.

Les sporanges ont généralement une forme de massue, avec un pédicelle et une partie renflée contenant les spores.

Les spores proviennent des cellules du tissu sporogène contenu dans le sporange.

C'est à partir de ce tissu que sont engendrées les cellules mères des spores, qui produisent chacune une tétrade de quatre spores, ayant chacune un nombre réduit de chromosomes. Entre la paroi du sporange et le tissu sporogène se trouve un tissu nourricier, le tapis. Les spores sont enveloppées d'une double membrane, l'une, externe, l'exine, l'autre, interne, ou intine; de plus, chez les Fougères, il existe parfois une membrane entière ou fractionnée située à l'extérieur de l'exine et que l'on appelle la périne. Les membranes des spores présentent le plus fréquemment les reliefs ou sculptures caractéristiques qu'étudient les palynologues, et qui peuvent servir à la détermination des Fougères vivantes ou même fossiles.

Arrivées à maturation, les spores sortent par déhiscence du sporange qui les contient, elles tombent sur le sol et, si elles trouvent un milieu favorable, humide, elles germent et engendrent le prothalle.

Le gamétophyte

Le prothalle est un gamétophyte à nombre de chromosomes réduit ou haploïde, comme la spore qui l'a engendré. Ses dimensions sont faibles, au maximum quelques centimètres, en général quelques millimètres. Il mène généralement une vie indépendante; chez les Hydroptéridées, il est réduit à une seule cellule qui germe à l'intérieur de la spore. Il a l'aspect d'une Hépatique et reste fixé au sol au moyen de rhizoïdes. Chez les Lycopodiales et les Ophioglossales, il a une forme de cylindre. D'autres fois, il est réduit à des filaments. Il peut être vert par suite de la présence de chlorophylle qui exerce sa fonction photosynthétique, il est alors autotrophe. Il peut être aussi dépourvu de chlorophylle, souterrain, et vivant alors en symbiose avec un Champignon.

Il se forme rapidement sur le prothalle des organes reproducteurs, soit mâles (anthéridies), soit femelles (archégones). Les anthéridies qui sont enfoncées dans le prothalle ou seulement légèrement en saillie contiennent de nombreux anthérozoïdes ciliés; les archégones ont une forme de bouteille avec un ventre situé dans le prothalle et un col; ils contiennent le gamète femelle ou oosphère.

Outre ces prothalles qui possèdent à la fois des organes mâles et femelles (monoïques), il est des cas où les prothalles sont dioïques, c'est-à-dire qu'ils présentent seulement des anthéridies ou des archégones. Ils proviennent alors de deux types de spores : les mégaspores, qui se trouvent dans de gros sporanges ou mégasporanges, et les microspores, qui se trouvent dans des microsporanges. Les mégaspores donnent des prothalles femelles, et les microspores des prothalles mâles. Le groupe des Ptéridophytes ayant des spores toutes égales est qualifié d'homosporé, les autres étant hétérosporés.

Le prothalle meurt lorsque se développe la plante feuillée, Fougère, prêle, sélaginelle ou lycopode. Le prothalle est rarement pérennant, il s'agit dans ce cas d'un prothalle souterrain, saprophyte vivant en symbiose.

Un certain nombre de Fougères se multiplient par propagation végétative : soit simplement par croissance continue et division du rhizome, comme chez la fougère-aigle, soit par bourgeonnement comme chez certains *Asplenium, Dryopteris*. Les bourgeons naissent le plus souvent sur les feuilles, sont caducs et s'enracinent dans le sol en donnant une nouvelle plante. Il s'agit donc d'une reproduction de la phase sporophytique asexuée, mais qui sera suivie plus ou moins tard par une nouvelle phase sexuée. Tous les Cryptogames vasculaires sont vivaces, sauf de rares exceptions.

Archives P 2

▲ *Cyathéacée, îles Fidji.*

Historique des travaux de ptéridologie

Il faut attendre le XVIe siècle et Césalpin pour trouver une classification du règne végétal fondée sur les caractères des organes reproducteurs.

Les Fougères, *Equisetum* et *Lycopodium* étaient groupés comme plantes « sans graines ». Au XVIIe siècle, Tournefort plaçait les *Equisetum* avec les plantes à fleurs, et les *Lycopodium* avec les Mousses. Linné, par contre, donne une vue d'ensemble des genres de Ptéridophytes (classe XXIV des « Cryptogames ») et reconnaît dix-sept genres et deux cent treize espèces, d'après l'arrangement des sporanges et les caractères des sores.

Après les travaux de Tournefort, Linné, de Candolle, sur l'ensemble du règne végétal, il faut attendre le début du XIXe siècle pour avoir une étude détaillée des Fougères. O. Swartz (*Synopsis Filicum,* 1806), C. B. Presl (*Tentamen pteridographiae,* 1836), puis les auteurs qui adoptèrent le système linnéen, comme C. L. Willdenow (*Caroli Linnaei species plantarum,* 4e éd., 1810) et C. Sprengel (*Caroli Linnaei systema vegetabilium,* 16e éd., 1827), firent sensiblement progresser les recherches sur les Ptéridophytes.

L'œuvre de S. Endlicher, *Genera plantarum secundum ordines naturales disposita* (1836-1841), où les Ptéridophytes sont divisées en Equiseta, Filices, Hydropterides et Sélagines (ces dernières comprenant aussi les lycopodes), est également importante.

Un peu plus tard, nous trouvons divers ouvrages comme ceux d'A. L. A. Fée (*Genera Filicum,* 1852), J. Smith (*Historia Filicum,* 1875), les divers livres de W. J. Hooker couronnés par son *Synopsis Filicum* (1874, publication par les soins de J. G. Baker, après la mort de Hooker, survenue en 1865). Dans ce dernier ouvrage, deux mille deux cents espèces sont décrites, réunies en soixante-quinze grands genres. Quant à J. Sachs, dans son *Lehrbuch der Botanik* (1868), suivant de près Endlicher, il situe dans le quatrième type de son schéma, parmi les Cryptogames vasculaires, les Fougères, les Prêles, les Ophioglossées (en tant qu'isosporées), puis les Rhizocarpées et les Lycopodiacées (en tant qu'hétérosporées).

P. Van Tieghem, dans son *Traité de botanique* (1881-1884), distinguait les Filicinées, Équisétinées et Lycopodinées, et, dans ces deux dernières, les Isosporées et les Hétérosporées.

On arrive au grand ouvrage d'A. Engler et K. Prantl (*Die natürlichen Pflanzenfamilien,* t. I, Abteilung 4, 1898-1900).

I.G.D.A.

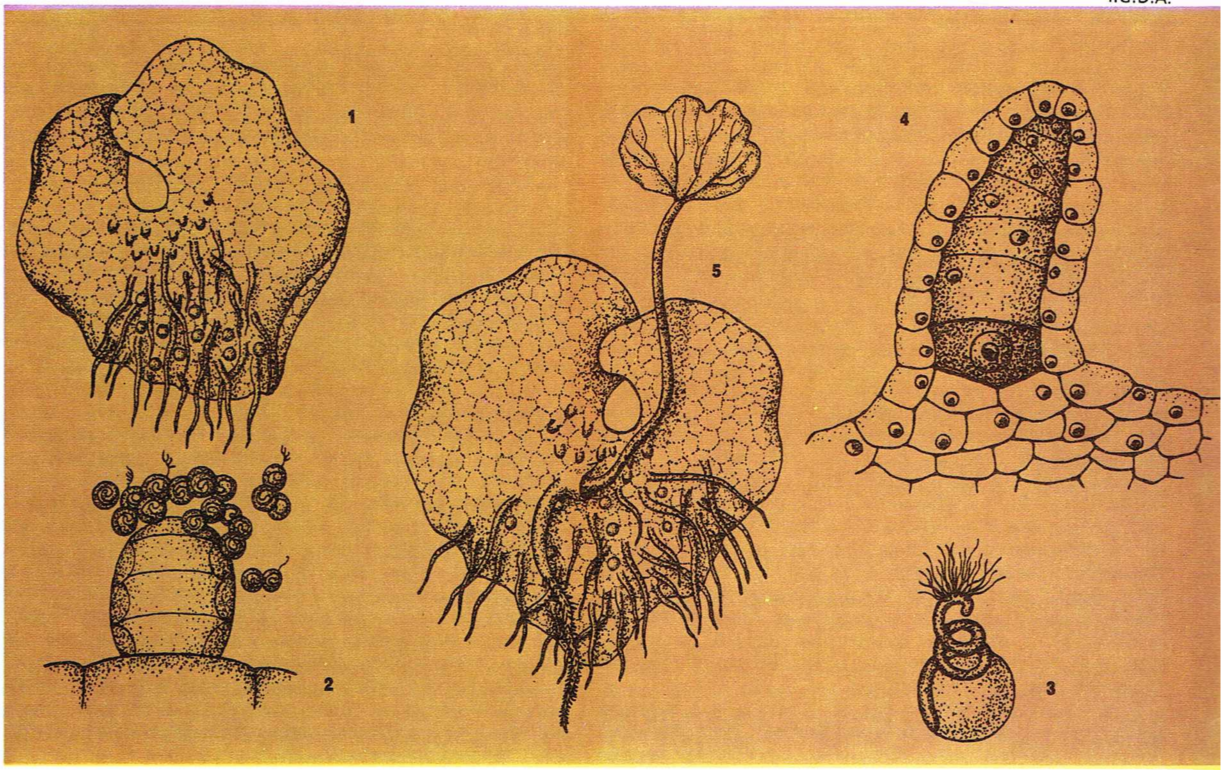

▶ *Schémas des organes de reproduction d'une Fougère : 1 : gamétophyte ou prothalle ; 2 : anthéridies mûres, montrant les spermatozoïdes ; 3 : un spermatozoïde ; 4 : archégone mûr, montrant l'ovule ; 5 : prothalle fécondé avec le jeune sporophyte.*

où, suivant le système proposé par Engler en 1892, les Ptéridophytes étaient classées parmi les *Embryophyta asiphonogama*, avec les quatre classes des *Filicales, Sphénophyllales, Équisétales* et *Lycopodiales*, et, en annexe, les *Cycadofilices*.

Peu après, C. Christensen commençait la publication de son *Index Filicum*, 1905-1906, suivi de plusieurs *Suppléments*, le dernier étant de 1934. Puis parut le *Manual of Pteridology* de F. Verdoorn (1938), où l'on commençait à utiliser les résultats des études caryologiques, dont les plus importantes sont dues à L. Manton (*Problems of Cytology and Evolution in the Pteridophyta*, 1950). Nous ne manquerons pas de citer le livre d'E. B. Copeland, *Genera Filicum* (1947), où sont pris en considération tous les genres des Filicopsidées actuelles, et encore la douzième édition de Engler's, *Syllabus der Pflanzenfamilien* de H. Melchior et E. Werdemann (1954), les Ptéridophytes y ayant été étudiées par H. Reimers.

Une des classifications récentes des Ptéridophytes est celle de R. E. G. Pichi-Sermolli, *The Higher Taxa of the Pteridophyta and their Classification* (1958), et *Pteridophyta* (1959).

En 1965, parut le *Supplementum quartum* de l'*Index Filicum*, résultat des efforts groupés des plus éminents ptéridologues.

Systématique et phylogenèse

Si nous groupons dans une même classification les Ptéridophytes vivantes et fossiles, nous avons six classes principales : Lycopsides, Sphénopsides, Noeggérathiopsides, Psilotopsides, Psilophytopsides, Filicopsides.

Avant de passer à l'exposé systématique nous essayerons de donner quelques brèves notions sur la phylogenèse des Ptéridophytes, bien que de nombreux points soient encore controversés et obscurs.

Les espèces à petites feuilles *(microphylles)*, c'est-à-dire du type des Lycopsides *(lycofeuilles)*, celles qui ont des feuilles bien développées *(macrophylles)*, comme les Fougères en général *(filicofeuilles)* et les autres du type Sphénopsides, ne semblent pas du tout dériver les unes des autres; elles auraient au contraire suivi trois voies évolutives indépendantes. Les caractéristiques des trois types que nous venons de distinguer semblent cependant se fondre, chez les Psilophytopsides qui seraient probablement les plus anciennes et les premières des Ptéridophytes, en même temps que les premières plantes vasculaires apparues sur Terre. Nous avons dit « seraient »

Lauros - Giraudon

▲ ***Vision très fantaisiste de « Fougère à fleurs jaunes ». Au XIXe siècle, ce genre d'images était montré au public par les colporteurs.***

parce que, dans les recherches phylogénétiques — complexes — on en est encore au stade des hypothèses. En effet, il n'est pas à exclure que les Psilophytopsides, au lieu d'être le point de rencontre des trois séries dont nous avons parlé plus particulièrement en ce qui concerne les caractéristiques foliaires, représentent au contraire une lignée en soi, ce qui conduirait à admettre l'évolution séparée des quatre divisions suivantes : Lycopsides, Filicopsides, Sphénopsides et Psilophytopsides. Quoi qu'il en soit, on trouve à partir du Silurien des Psilophytopsides, qui vécurent pendant plusieurs dizaines de millions d'années, mais qui disparurent en grande majorité avant le Carbonifère. Au Silurien, mais encore plus au Dévonien, ce furent des Lycopsides qui apparurent, et les *Lepidodendron* — appartenant à cette classe — eurent une immense diffusion au Carbonifère. A peu près pendant tout le Paléozoïque, les Fougères arborescentes dominèrent à leur tour. Puis ce furent les Sphénopsides, et, au Carbonifère, d'immenses prêles en même temps que des *Lepidodendron*. Enfin, au Mésozoïque, disparurent beaucoup de types paléozoïques tandis que les Fougères

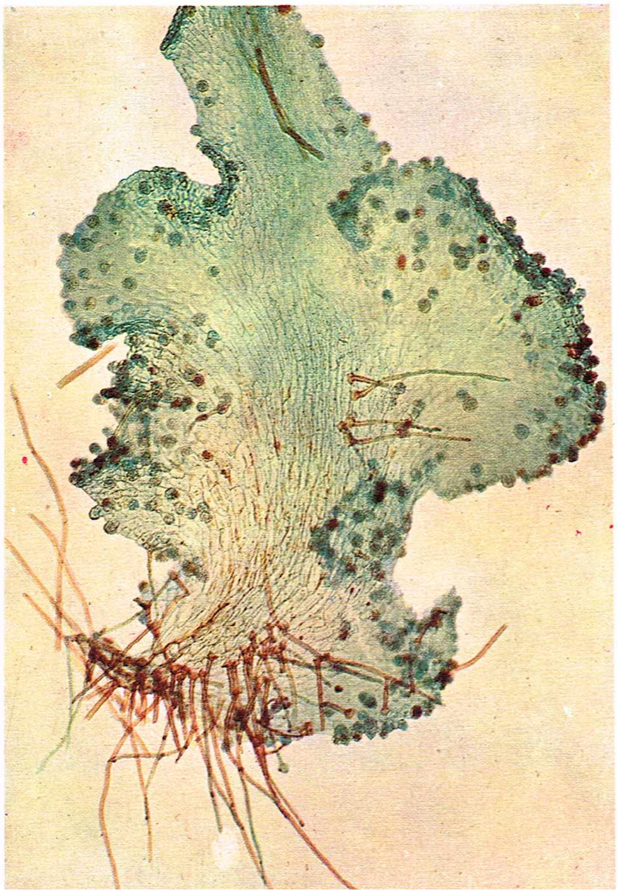

◀ ***Prothalle à un fort grossissement avec anthéridies et archégones.***

D. Pichon - Atlas Photo

▲ *Fronde stérile de* **Pteridium aquilinum,** *fougère-aigle, espèce cosmopolite formant des races géographiques, plus ou moins bien définies.*

proprement dites firent leur apparition ; plantes qui sont maintenant représentées par un grand nombre d'espèces actuelles.

Mais ce schéma n'est qu'ébauché, et il reste bien des choses à tirer au clair. Il faut d'autres preuves pour confirmer les affinités devinées. De nombreux problèmes relatifs à l'évolution des groupes inférieurs demeurent obscurs. C'est ce qui explique que l'on attribue certaines familles soit à un ordre, soit à un autre, les positions adoptées variant suivant les systématiciens.

Enfin, il convient d'observer qu'en ce qui concerne l'hypothèse de l'origine possible des Ptéridophytes à partir des Bryophytes (hypothèse qui semblerait légitime à certains points de vue), il existe des objections très graves, dont la première se fonde sur le fait qu'il ne semble pas avoir existé de Bryophytes avant l'apparition des premières Ptéridophytes. Les plus anciens restes fossiles pouvant être considérés comme des Bryophytes, en effet, ne sont pas contemporains, mais postérieurs, à l'apparition des Ptéridophytes.

LYCOPSIDES

On a récemment découvert en Sibérie des restes fossiles de Lycopodiales remontant, tout au moins à première vue, au Cambrien moyen. Si ce fait se trouve confirmé, leur origine serait certainement antérieure au Silurien, la diffusion des Lycopsides ayant été particulièrement importante au Dévonien et au Carbonifère. Il s'agit de plantes qui présentent déjà des racines ou des pseudo-racines (pas encore nettement différenciées), alors que les tiges, qui n'ont pas de nœuds ni d'entre-nœuds distincts et qui ne s'accroissent pas en épaisseur, se ramifient dichotomiquement. Les feuilles sont nombreuses, soit disposées en spirale sur les tiges, soit opposées ou verticillées ; elles sont fréquemment petites (surtout chez les espèces vivantes), en forme d'alêne, avec une ou deux nervures, mais en général avec une seule nervure non ramifiée. Les sporophylles (qui ne diffèrent pas des feuilles stériles) sont souvent groupées en épis terminaux. Normalement, elles sont précédées d'une portion de tige plus pauvre en feuilles, mais ce caractère n'est pas toujours bien net. Les sporanges sont axillaires et sessiles, plus rarement pédicellés ou épiphylles. Ils sont parfois homosporés ou isosporés, et d'autres fois hétérosporés. La tendance du sporange à être enveloppé par la sporophylle, qui existe aussi dans certains groupes fossiles, fait penser à une ébauche d'ovule. Les prothalles sont généralement macroscopiques, et les anthérozoïdes sont pourvus de deux cils et même davantage.

Les Lycopsides, qui eurent une grande diffusion dans les temps géologiques, ne comptent plus maintenant que quelques genres, avec seulement des espèces herbacées. Cette classe est divisée en quatre sous-classes, huit ordres, et dix-neuf familles.

● *Protolépidodendridées*

Ce sont les Lycopsides les plus simples et considérées comme les plus anciennes, tant qu'il ne sera pas prouvé que d'autres remontent à des époques antérieures au Dévonien, période pendant laquelle elles sont nées et se sont éteintes.

Il s'agissait de plantes de taille moyenne, environ 20 à 30 cm, à tige d'abord rampante, puis dressée. Leur aspect ne différait guère de celui de certaines Mousses ou des Lyocopodes actuels. Les feuilles, sans ligule, distantes, étaient en aiguille, à sommet bifurqué, et recouvraient densément la partie prostrée et la partie dressée des tiges. Une fraction des ramifications de ces tiges portait les sporophylles, avec un sporange situé non pas à l'aisselle, mais sur la face supérieure de la feuille. Les spores étaient toutes égales (homospores). La sous-classe comprend deux ordres : les Drépanophycales et les Protolépidodendrales.

Drépanophycales

Cet ordre est constitué par la seule famille des *Drépanophycacées.* Nous citerons deux genres, les *Drepanophycus* et les *Baragwanathia,* avec quelques espèces connues jusqu'à présent. Les représentants du premier genre (ex. : *D. spinaeformis*) remontent au Dévonien inférieur et moyen, de l'hémisphère boréal et d'Australie ; ceux du second genre (ex. : *B. longifolia*) sont encore plus anciens, leurs restes datant du Silurien supérieur d'Australie. Ils étaient isosporés, à axe dressé, divisé dichotomiquement, à feuilles non ligulées, disposées en spirale ou irrégulièrement, et à sporophylles non différenciées des autres feuilles ; les sporanges étaient épiphylles, parfois insérés sur l'axe. C'étaient probablement des lycopodes herbacés géants.

Protolépidodendrales

Les familles de cet ordre sont au nombre de sept : Éleuthérophyllacées, Protolépidodendracées, Colpodexylacées, Sublépidodendracées, Leptophlœacées, Archæosigillariacées, Lépidosigillariacées. Il en existe peu d'espèces et de genres.

La famille des *Éleuthérophyllacées* comprend le seul genre des *Eleutherophyllum,* avec très peu d'espèces. *E. mirabile* était, semble-t-il, une plante herbacée à axes minces, à feuilles sans ligule, étroites et espacées, dichotomes ou simples ; on a trouvé des restes de fossiles dans le Dévonien supérieur et le Carbonifère inférieur.

Dans la famille des *Protolépidodendracées,* nous citerons le genre *Protolepidodendron,* avec *P. sharianum,* du Dévonien moyen.

Chez les *Colpodexylacées,* l'unique genre connu jusqu'à présent, *Colpodexylon,* semble remonter au Dévonien.

Les *Sublépidodendracées* comprennent aussi un seul genre, *Sublepidodendron,* du Dévonien supérieur au Carbonifère.

Chez les *Leptophlœacées,* les rares espèces de cette famille remontent à l'époque où vivaient aussi les représentants de la famille précédente ; les unes et les autres rappellent beaucoup l'aspect des Lépidodendracées.

Quant aux *Archæosigillariacées,* leur nom dérive de leur ressemblance frappante avec les sigillaires. C'étaient des plantes de petite taille, mais ligneuses, arborescentes, à tronc peu ramifié, avec des feuilles ligulées, en spires

S. Prato

◀ ▼ ***Les sous-bois des forêts humides subtropicales renferment de nombreuses espèces de Fougères épiphytes.***

serrées; ces feuilles, après leur chute, laissaient sur l'écorce des cicatrices qui rappelaient beaucoup celles des sigillaires et des *Lepidodendron*. La famille comprend le seul genre des *Archaeosigillaria*, avec *A. primeva*, trouvé dans le Dévonien supérieur de l'Amérique du Nord, qui semble avoir mesuré 5 m de hauteur et avoir eu une tige renflée à la base, ainsi que de petites feuilles, peut-être persistantes.

Les *Lépidosigillariacées* comptaient peu de représentants, qui — comme leur nom l'indique — ressemblaient aux *Lepidodendron* et aux sigillaires à la fois.

C'étaient des arbres à feuilles disposées en spirale, qui vécurent au Dévonien supérieur. L'unique genre de la famille actuellement connu est constitué par les *Lepidosigillaria*.

● *Lycopodiidées*

Nous considérons ici (selon la classification de Pichi-Sermolli) un seul ordre et une seule famille, l'ordre des Lycopodiales avec la famille des *Lycopodiacées*.

Une seule famille, en effet, est actuellement vivante : les Lycopodiacées. Elles sont homosporées, à gamétophyte libre, embryon endoscopique.

Le gamétophyte, ou prothalle, de la plupart des *Lycopodium* vit en symbiose avec les hyphes d'un Champignon, ce qui lui permet de subsister très longtemps, parfois pendant plusieurs années, fait rare chez les Ptéridophytes. Le prothalle est soit massif, dressé, lobé, foliacé, soit en cône, souterrain, trapu, saprophyte, se développant en surface. Il porte des anthéridies à anthérozoïdes biciliés et des archégones à long col. La fécondation ayant eu lieu, l'oosphère donne naissance à un embryon, porté par un *suspenseur*, lequel est constitué par une série de cellules. L'embryon ne s'accroît pas aux dépens d'une cellule apicale, mais par divisions successives d'un groupe de cellules, qui donnent à leur tour naissance au pied, du côté du suspenseur, et, du côté épibasal, à la première racine, l'axe et la première feuille. L'appareil végétatif, ou sporophyte, est caractérisé par sa dichotomie. La tige peut prendre deux aspects : elle peut se diviser à son sommet en deux branches divergentes (elle porte elle-même des racines dichotomes) [*L. selago*], ou elle peut être rampante, à branches dressées, et porter des racines adventives sur tout sa longueur *(L. clavatum)*. Les feuilles sont entières, étroites, généralement de petite taille, groupées en verticilles, plusieurs au même niveau, ou attachées en spirale; elles n'ont pas de ligule. Sur les sporophylles les sporanges, relativement gros, généralement réniformes, s'ouvrent par une fente transversale. Le sporange peut être axillaire (sessile ou pédonculé) ou nettement épiphylle *(L. cernuum)*. Il y a souvent une multiplication végétative qui s'effectue par la chute de bulbilles ou propagules (par exemple, chez *Lycopodium selago*).

Les Lycopodiacées existantes sont surtout des espèces tropicales, souvent épiphytes; elles comprennent seulement deux genres, les *Phylloglossum* et les *Lycopodium*. Le genre *Phylloglossum* consiste en l'unique espèce *P. drummondii :* c'est une petite plante annuelle, à petits tubercules à la base, qui, enfoncés dans le sol, permettent à la plantule de résister à la sécheresse. Il porte une rosette basale de six à neuf feuilles; l'épi sporifère montre une vingtaine de sporanges sous-tendus par une bractée. L'espèce vit en Australie, en Tasmanie et en Nouvelle-Zélande.

Le genre *Lycopodium* est très riche en espèces : environ deux cents selon certains auteurs, et même trois cents ou plus selon d'autres. Les espèces européennes sont en tout une dizaine. Le genre a été démembré par certains en plusieurs genres : *Huperzia (L. selago), Lepidotis* (avec *L. cernuum* et *L. inundatum*), *Diphasium* (avec *L. complanatum* et *L. alpinum*) et *Lycopodium sensu stricto (L. annotinum)*.

Parmi les Lycopodiacées les mieux connues, nous parlerons avant tout du *Lycopodium clavatum*, notre lycopode commun (soufre végétal ou patte-de-loup), cosmopolite, espèce des landes, bruyères et bois de montagnes fraîches ainsi que des pâturages élevés. Les feuilles stériles sont verticillées ou spiralées, alors qu'elles sont disposées en quatre rangées chez *Lycopodium complanatum*. Ces deux espèces ont des feuilles fertiles groupées en épis ou strobiles.

F. Quilici

Keraudren - Aymonin

▲ **Selaginella selaginelloides** *et* **Lycopodium alpinum,** *des pelouses et rochers humides de montagnes.*

L. selago, commun dans nos régions, a des sporanges distribués tout le long de la tige, à l'aisselle de feuilles sporifères non différenciées. Les tiges sont divisées dichotomiquement.

Parmi les autres espèces françaises, citons les *L. annotinum, inundatum, alpinum, tristachyum* et *issleri.*

Ces espèces, ou tout au moins la plupart d'entre elles, peuvent être cultivées en même temps que certaines espèces exotiques, comme *L. dendroides* d'Amérique du Nord — d'aspect très gracieux, semblable à un petit sapin — *L. hookeri* des Indes orientales — à tige divisée dès la base, avec une masse de trois à cinq épis fructifères à l'aisselle de chaque division — et *L. uliginosum* d'Australie — à tiges courtes (environ 25 cm), avec de petites feuilles très rapprochées, vert brillant foncé.

Les spores de *L. clavatum,* d'une belle couleur jaune, fournissent ce qu'on nomme la « poudre de lycopode », utilisée autrefois pour l'enrobage de pilules ou comme poudre absorbante contre les irritations des peaux délicates, notamment chez les enfants. Elle était employée aussi pour les feux d'artifice et les éclairs artificiels au théâtre. On attribue des propriétés laxatives et diurétiques au *L. clavatum,* vomitives et drastiques au *L. selago,* etc. ; on utilisait la plante entière en médecine.

● *Sélaginellidées*

Un seul ordre (Sélaginellales), comprenant la seule famille des *Sélaginellacées* avec le genre *Selaginella,* avec huit cents espèces. Elles sont connues depuis le Carbonifère inférieur sous des formes identiques aux actuelles.

Sporophyte : les feuilles petites, l-nerviées, en alène, sont pourvues, à la base de leur face supérieure, d'une expansion membraneuse ou *ligule.* Les spores sont de deux sortes (il s'agit donc d'une sous-classe d'espèces hétérosporées) et donnent naissance à des prothalles dioïques, microscopiques, qui restent dans les spores elles-mêmes. Plantes herbacées, rampantes, souvent gazonnantes ou dressées, ou même grimpantes. Les sporanges sont groupés en épis : chaque sporophylle porte un sporange, et l'on trouve parfois, sur le même pied, des mégasporanges, avec des mégaspores, et des microsporanges, avec des microspores ; parfois les épis sont unisexués. Les mégasporanges sont généralement situés à la partie basale des épis dressés, et les microsporanges à la partie apicale ; quand les épis sont horizontaux, les microsporanges se trouvent dessus, et les mégasporanges dessous. Les sporanges s'ouvrent selon une ligne bien définie et laissent échapper, à maturité, les spores, qui s'ouvrent à leur tour selon leurs trois arêtes.

Gamétophyte : le prothalle, resté dans la mégaspore, présente trois touffes de rhizoïdes et quelques archégones. Les microspores engendrent aussi un prothalle inclus dans la spore : il y a une seule anthéridie, contenant des spermatozoïdes en forme de massue, légèrement incurvés, avec deux longs cils. La première division de l'oosphère donne la cellule initiale du suspenseur et la cellule mère de l'embryon. Ces plantes présentent parfois, dans les espèces dressées, un organe spécial ou rhizophore qui serait un axe arrêté dans son évolution vers l'état de racine.

Certains auteurs ont fractionné les *Selaginella* en trois genres : *Lycopodioides, Didiclis,* et *Selaginella sensu stricto.* Ce sont des plantes qui remontent à un lointain passé géologique, car on trouve leurs fossiles dès le Carbonifère avec des formes semblables à celles d'aujourd'hui, qui ont été réunies dans le genre *Selaginellites.* La grande majorité des sélaginelles actuelles vit sous les climats chauds et humides des tropiques, quelques espèces sous les climats tempérés et même froids. Certaines sont xérophiles et peuplent les roches et terrains sablonneux, secs.

Nous citerons parmi ces dernières *S. lepidophylla,* du Mexique, qui peut résister à la sécheresse pendant plusieurs mois, au cours desquels les rameaux s'incurvent et convergent jusqu'à former une sorte de balle, qui s'ouvre dès que l'atmosphère redevient humide ou que le coussinet est immergé.

Les sélaginelles exotiques sont très nombreuses et se prêtent bien à la culture. Parmi elles, *S. kraussiana,* qui vit à Madère, des îles Açores, de l'Afrique méridionale et de la région du Kilimandjaro. Il existe, de plus, une trentaine d'espèces qui, cultivées en serre chaude ou tempérée-froide, à l'ombre et dans une humidité constante, sont importantes du point de vue ornemental. Les plus communes parmi elles sont : *S. albonitens* des Indes occidentales, à tiges minces et rampantes ; *S. caulescens,* de Chine et du Japon, à tiges dressées et à feuilles inférieures très rapprochées, falciformes, ciliées ; *S. delicatissima,* des

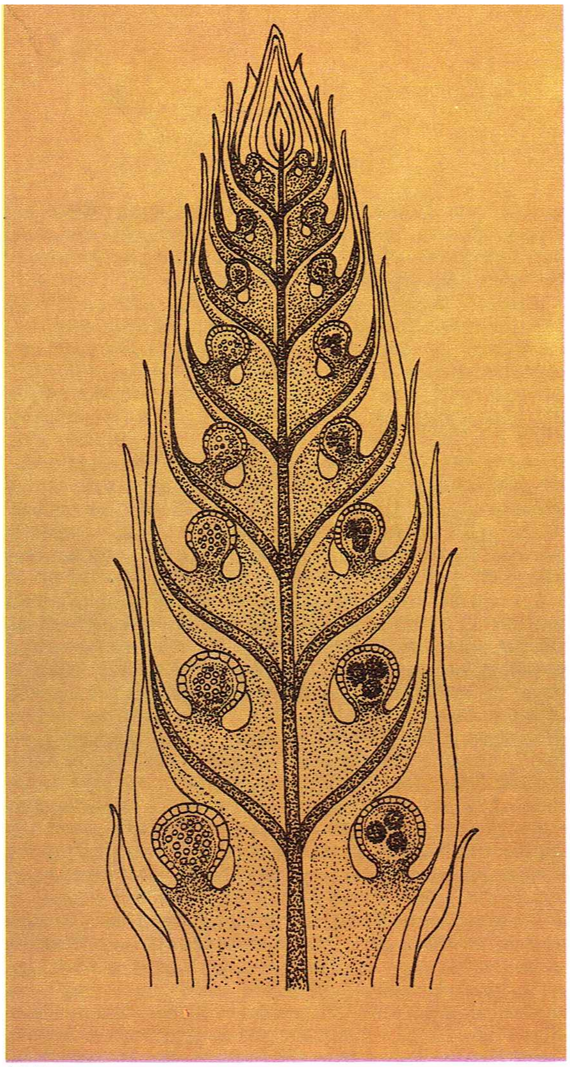

I.G.D.A.

Andes, à tige fine, de couleur jaune clair, et feuilles inférieures arrondies, ciliées à la base ; *S. haematodes*, espèce également andine, à tiges rouges, prostrées ; enfin, le minuscule *S. apus*, très répandu, et *S. martensii*, du Mexique, l'une des espèces les plus cultivées.

● *Lépidodendridées*

Cette sous-classe n'a plus de représentants actuels. Ses espèces, parmi lesquelles figurent des arbres de taille élevée, eurent une grande importance et une vaste diffusion dans la végétation du Paléozoïque, depuis le Dévonien jusqu'au Carbonifère et au Permien. Leurs restes fossiles sont assez nombreux et ont permis une étude exhaustive des Lépidodendridées. Ces plantes ont contribué à l'aspect particulier des paysages végétaux pendant une période d'au moins cent millions d'années. Elles atteignirent 20 m et même jusqu'à 40 m de hauteur ; leur tronc avait des diamètres de plus de 1 à 2 m. D'importants gisements de houille sont formés de souches de *Stigmaria*.

Leurs feuilles, généralement étroites, longues parfois de 18 à 20 cm, dotées d'une nervure sur les côtés de laquelle se trouvaient les stomates, ne possédaient pas encore de parenchyme palissadique, mais seulement un faisceau vasculaire simple. Ces feuilles, en tombant, laissaient à la surface des tiges une cicatrice (coussinet foliaire) caractéristique. Un autre de leurs caractères est l'importance prise dans leur tige par l'activité d'un méristème secondaire (phellogène), pouvant former une large écorce de structure assez complexe. Le cylindre central, de petite taille, est pourvu ou non d'une moelle ; l'écorce pouvait atteindre, en coupe, jusqu'à 80 % ou même 90 % du diamètre. C'est pour cela que l'on a parfois nommé ces Végétaux des « arbres à écorce ». Les feuilles, disposées en spirales denses, étaient dotées d'une ligule insérée dans une crypte et qui survivait à la chute des feuilles elles-mêmes, continuant à pourvoir en eau les plantes. Ces feuilles présentaient une section triangulaire à la base et losangique vers le haut ; la cicatrice foliaire se compose d'un faisceau vasculaire, flanqué de deux cordons de tissu parenchymateux (le *parichnos*), qui était peut-être destiné à absorber l'air puis à l'envoyer dans les différentes parties de la plante. L'appareil souterrain puissant, étalé, dichotome, naissait à la base de la tige et portait des appendices pseudo-radiculaires étudiés sous le nom de *Stigmaria* ou *Stigmariopsis*.

Les sporophylles formaient des épis ou cônes pendants, rappelant le cône des Conifères, unisexuées ou bisexuées, à l'extrémité des rameaux ou sur les côtés de la tige ; elles n'étaient guère différentes des autres feuilles, seulement

◀ ***Schéma de la section longitudinale d'une sporophylle de sélaginelle.***

◀ ***Aspect de la fronde stérile de* Selaginella helvetica *et S.* denticulata.**

▼ ***Une fronde stérile de sélaginelle de Madagascar.***

I.G.D.A.

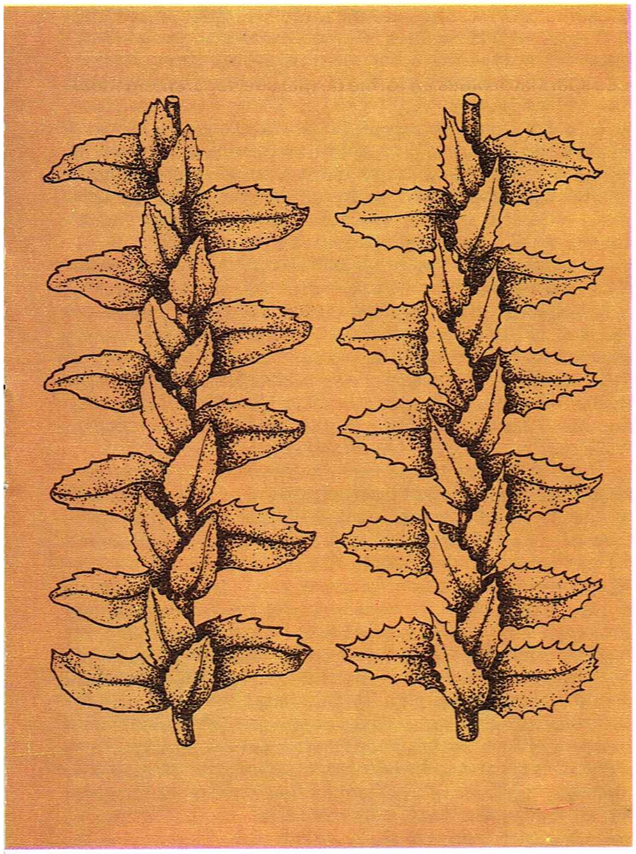

M. Keraudren - Aymonin

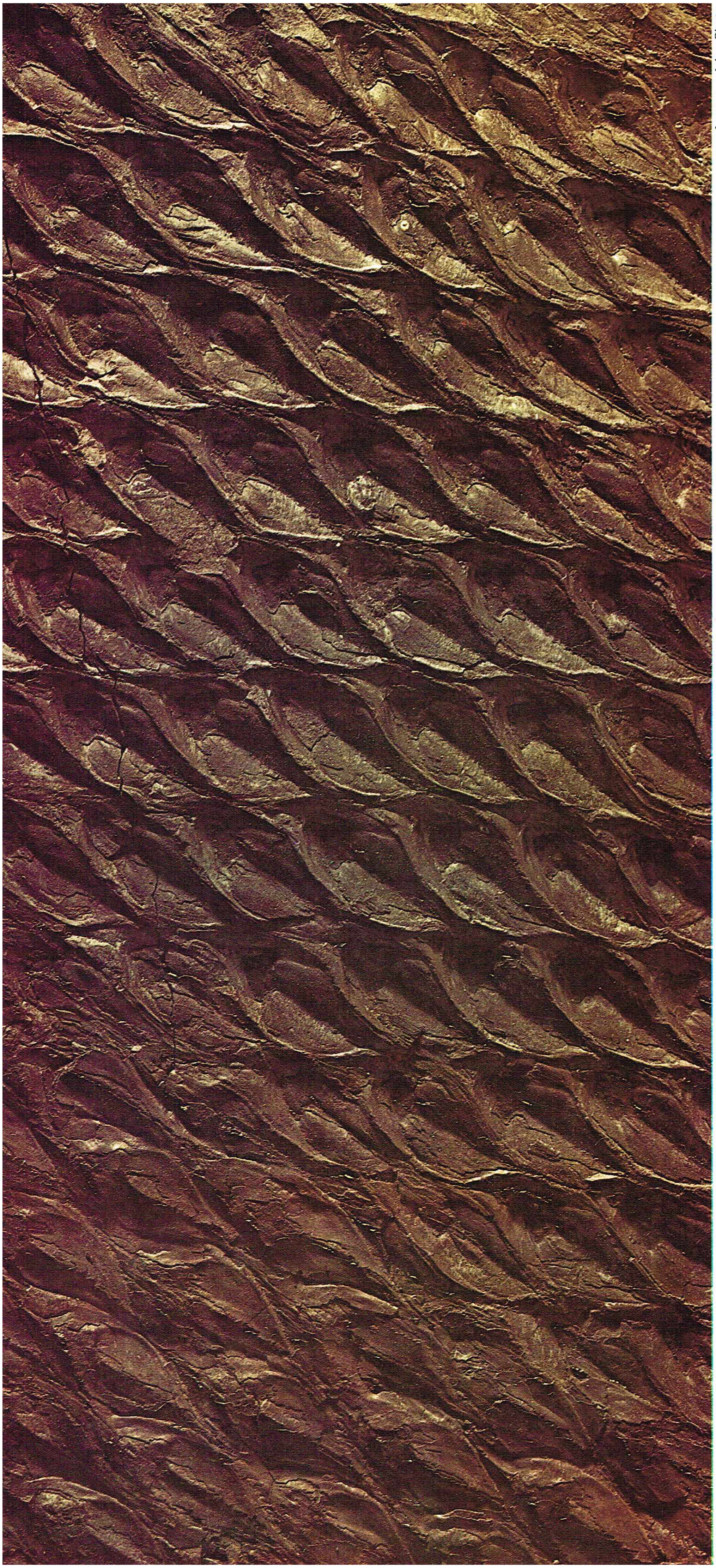

Lauros - Atlas Photo

un peu plus larges et plus courtes, et portaient sur leur face supérieure un sporange avec des mégaspores et des microspores. Le développement des prothalles se faisait à l'intérieur des spores.

Dans la classification adoptée ici, la sous-classe des Lépidodendridées est divisée en quatre ordres : *Lépidodendrales, Lépidocarpales, Isoétales, Miadesmiales,* qui comprennent dans leur ensemble neuf familles.

Lépidodendrales

Les familles qui composent cet ordre sont au nombre de quatre : Lépidodendracées, Bothrodendracées, Cyclostigmatacées et Sigillariacées.

Les *Lépidodendracées* sont des lycopodes géants qui ont régné pendant tout le Carbonifère et jusqu'au Trias inférieur.

Ces arbres, formés d'un tronc et d'une couronne de branches à ramification dichotome, atteignaient 30 m; leurs feuilles mesuraient plusieurs décimètres et laissaient des cicatrices caractéristiques, disposées en spirale sur les tiges, ce qui permet de déterminer aisément les genres et les espèces fossiles. On les a comparés à des écailles de Poissons, d'où dérive le nom donné à ces plantes (λεπίς, écaille, et δένδρον, arbre). Les sporophylles étaient groupées en épis ou cônes, habituellement fixés au bout des jeunes rameaux. Elles étaient hétérosporées, les cônes eux-mêmes étant hétérosporés.

Les Lépidodendracées étaient généralement des arbres des marécages anthracolitiques de l'hémisphère Nord.

Les principaux genres sont les *Lepidodendron, Lepidophloios,* et *Ulodendron*. La plupart des espèces connues actuellement appartenaient au genre *Lepidodendron,* qui en comptait plus de cent, parmi lesquelles *L. veltheimii* et *L. rhodeanum* du Carbonifère inférieur. *L. aculeatum* devait être largement répandu ; ses cicatrices étaient de forme losangique, étroites et allongées. *L. obovatum* avait des cicatrices plus courtes, alors que, chez *L. dichotomum,* les cicatrices étaient en forme de larges losanges. Des épis isolés de *Lepidodendron* ont été pris autrefois pour un genre spécial, *Lepidostrobus*.

On a placé dans le genre *Lepidophloios* des espèces à cicatrices foliaires étroitement serrées. Le genre *Ulodendron,* du Carbonifère supérieur, comprenait des Lépidodendracées de grande taille, à ramification plus dense et à feuilles plus courtes et moins rigides ; leurs troncs présentaient parfois des cicatrices plus grandes que les cicatrices foliaires, situées sur des rangées opposées, ce qui pourrait représenter l'emplacement de branches tombées (ex. : *U. minus* et *U. ophiurus*).

Chez les *Bothrodendracées,* les cicatrices foliaires sont plus petites et très espacées, les feuilles étaient caduques, le tronc et les branches principales présentaient de fines rayures dues aux cicatrices des cônes attachés sur le bois. Nous citerons comme exemple *Bothrodendron minutifolium,* du Carbonifère supérieur.

La famille des *Cyclostigmatacées* comprend le genre *Cyclostigma* du Dévonien islandais *(C. kiltorkense)*.

Il s'agissait d'arbres d'au moins 10 m de hauteur, à feuilles larges d'une dizaine de centimètres, et très proches des *Lepidodendron*.

La famille des *Sigillariacées* comprenait les *Sigillaria* ou sigillaires, grands arbres mesurant parfois plus de 30 m de hauteur, avec de très gros troncs, d'un diamètre atteignant 1 à 2 m.

Chez les Sigillariacées, les cicatrices foliaires étaient disposées en files longitudinales et avaient une forme plus ou moins hexagonale. Les feuilles étaient allongées, pointues et de section hexagonale ; elles mesuraient parfois 1 m, mais, en général, elles n'étaient longues que de 50 à 60 cm, leur largeur ne dépassant pas 1 cm. Les tiges ne portaient pas de branches, étaient rarement bifurquées ou trifurquées et étaient ornées à leur sommet d'une couronne de feuilles. Les coussinets foliaires étaient généralement hexagonaux ou arrondis. L'appareil sporifère formé de cônes pendants, parfois de grande taille, en couronne autour de la tige, était supporté par des pédoncules couverts d'écailles. Les sporophylles étaient probablement unisexuées. La famille comprend le seul genre *Sigillaria,* avec une centaine d'espèces du Carbonifère au Permien. Parmi les espèces les plus connues, nous citerons les *S. elegans, S. elongata, S. reniformis, S. spinulosa,* etc.

Lépidocarpales

Cet ordre, connu aussi sous le nom de Lépidospermales, comprend des formes fossiles, que l'on a parfois mises dans les Lépidodendrales. Elles en diffèrent cependant, par leurs macrosporanges, se rapprochant des ovules des Spermatophytes et rappelant des graines proprement dites. C'est ce qui leur a fait donner le nom de Lépidospermales. Les cônes sont unisexués. Chaque mégasporange possède une seule mégaspore et est inclus à maturité dans une sorte d'enveloppe ou de tégument constitué par la sporophylle, enveloppe ouverte au sommet par une fente ou micropyle, réalisant presque un ovule. Les sporophylles portant la mégaspore (ou mégasporophylles) formaient des sortes de cônes, qui rappellent beaucoup ceux des Gymnospermes. On comprend aussi parfois dans cet ordre la famille des Miadesmiacées, que nous mettons à part. Une seule famille de Lépidocarpacées, avec deux genres, *Lepidocarpon (L. glabrum* et *L. lomaxi)* et *Illiniocarpon*. Ces Végétaux étaient des arbres du Carbonifère d'Angleterre et d'Amérique du Nord, avec des sporophylles semblables à ceux des *Lepidodendron.*

Isoétales

Les espèces appartenant à cet ordre vivent soit complètement, soit partiellement, immergées ou sur les sols très humides, marécageux, ou les mares temporaires. Les espèces terrestres se trouvent dans les pelouses sèches. L'axe est court, souterrain, vivace, bulbeux, 2-5 lobé, plus ou moins en plateau, pourvu de racines simples ou dichotomes. Les feuilles en rosette, étroites, entières, en forme d'alène, présentant en coupe trois angles plus ou moins nets, sont pourvues d'une ligule et ont une seule nervure, avec, sur les côtés, des *canaux à mucilage* et quatre *canaux aérifères* cloisonnés. Elles s'élargissent vers la base et y présentent, sur la face supérieure, une fossette allongée, la *fovea,* recouverte par le *velum* qui joue le rôle d'indusie. Certaines de ces feuilles sont des sporophylles mâles ou femelles qui portent à la partie basilaire de leur face supérieure, juste sous la ligule, dans la *fovea,* des sporanges de grandes dimensions. Les sporanges sont pourvus d'un tissu qui donne lieu à la formation de septums dans la cavité sporangiale elle-même, qui divisent celle-ci en plusieurs parties. Il existe des mégasporanges sur les feuilles externes, et des microsporanges sur les feuilles les plus internes. Les spores, qui sont libérées quand les parois des sporanges se décomposent, donnent naissance (qu'il s'agisse de mégaspores ou de microspores [les Isoétacées sont toutes hétérosporées]) à un prothalle microscopique; celui-ci, mâle ou femelle, reste inclus dans la spore. Les anthérozoïdes, qui proviennent, au nombre de quatre, d'une seule anthéridie, ont un bouquet antérieur de cils. Les archégones des prothalles femelles sont le plus souvent uniques. L'embryon n'a pas de suspenseur.

Les Isoétacées vivantes sont de petite taille et ressemblent un peu aux touffes des feuilles de Graminées ou de Joncacées. Les formes fossiles atteignaient plusieurs mètres de hauteur. Les Isoétacées constituent un groupe isolé de Cryptogames vasculaires, et il semble que l'on puisse les rapprocher des Sigillariacées. Le système radiculaire rappelle celui des Lépidodendracées, et les canaux à mucilage des feuilles rappellent le parichnos de ces dernières.

Une seule famille actuelle, les *Isoétacées,* avec deux genres seulement : les *Isoetes* et les *Stylites* (qui comprennent une unique espèce, des Andes péruviennes). Nous y ajoutons deux familles fossiles : les *Pleuroméiacées* et les *Nathorstianacées.*

Les Pleuroméiacées, représentées seulement par des espèces fossiles, dont les mieux connues sont attribuées au genre *Pleuromeia,* révèlent des affinités avec les Lépidodendrales. La tige n'est pas aussi courte que chez les Isoétacées, elle atteignait près de 2 m; quant aux feuilles stériles, elles pouvaient avoir jusqu'à 10 cm et étaient situées vers le sommet des tiges. Ces feuilles, au moment de leur chute, laissaient des cicatrices sur les tiges, disposées en spirale.

Les strobiles, groupés au sommet de l'axe, étaient constitués par des sporophylles à écailles imbriquées, portant des sporanges. A la différence des Isoétacées proprement dites, la position du sporange, chez les Pleuroméiacées, semble avoir été sur la face inférieure des sporophylles; on observera en outre que les mégasporophylles et les microsporophylles se trouvaient sur des pieds différents.

Ces plantes auraient seulement vécu au Trias moyen d'Allemagne. L'espèce la mieux connue — et assez bien reconstituée par les paléontologues — est *Pleuromeia sternbergii.*

La famille des Nathorstianacées comprend le genre *Nathorstiana,* avec l'espèce *N. arborea,* encore assez mal connue par suite de la mauvaise conservation des fossiles trouvés, dans le Crétacé d'Allemagne. C'était, à ce qu'il semble, une plante guère plus haute que 20 cm, à tige renflée à la base, et peut-être intermédiaire entre les genres *Pleuromeia* et *Isoetes.*

Les Isoétacées actuelles, outre le genre *Stylites,* monospécifique, comprennent le genre *Isoetes.*

Douze espèces européennes, dont neuf seulement se trouvent en France, peuvent être réparties en deux groupes : les aquatiques et les amphibies, submergées la plupart du temps, et les terrestres (ou submergées très peu de temps en hiver). Dans le premier groupe, *I. lacustris* et *I. setacea,* des lacs et étangs de montagne, se distinguent par leurs macrospores et par la taille et l'aspect de leurs feuilles. *I. velata* est vivace, amphibie, à bulbe trilobé; la base des feuilles largement membraneuse persiste, formant des sortes d'écailles papyracées : c'est une plante des bords d'étangs des régions méditerranéennes.

Parmi les espèces terrestres, *I. hystrix* et *I. durieui* ont les bases des feuilles noires, persistantes chez *I. hystrix* sous forme d'écailles luisantes, noires, ayant deux lobes latéraux.

Le genre est particulièrement répandu aussi en Amérique du Nord, avec une vingtaine d'espèces rien que pour les États-Unis. Les espèces fossiles ont été réunies dans le genre *Isoetites,* qui a existé du Crétacé au Miocène. Il est douteux que l'on puisse attribuer aussi à la famille le genre *Lycostrobus* du Rhétien.

Miadesmiales

Ce petit ordre comprend la seule famille des *Miadesmiacées* avec le genre *Miadesmia* qui, selon certains auteurs, devrait être placé parmi les Lépidocarpales. *M. membranacea* se trouve dans le Carbonifère supérieur d'Angleterre. Il est voisin des *Selaginella,* par ses sporophylles réunis en strobiles; il était hétérosporé, mais on ne sait pas si les deux sexes se trouvaient dans un même cône; le mégasporange était presque entièrement recouvert par la macrosporophylle et contenait une seule mégaspore qui se développait à l'intérieur de la sporophylle elle-même. La fécondation se faisait par une ouverture munie de longs poils, peut-être destinés à retenir les microspores. La microsporophylle portait un microsporange contenant de nombreuses microspores.

SPHÉNOPSIDES

Presque tout le monde connaît ces petites plantes qui ont reçu différents noms, tels que « queue de cheval », « queue de renard », etc. Il s'agit des prêles, surtout fréquentes dans les lieux humides. Elles sont constituées par une tige herbacée, droite, qui, chez les espèces les plus communes, porte des séries superposées de rameaux verticillés très fins, plus courts vers le sommet de la tige, qui prend donc le plus souvent la forme conique d'un petit cyprès.

La tige des Équisétales, qui est toujours munie de côtes parallèles longitudinales, est articulée et se présente comme une succession de nœuds et d'entre-nœuds; chaque nœud porte un verticille de feuilles réduites, parfois sous forme de dents. Les ramifications, quand il y en a, apparaissent entre deux feuilles et sont, elles aussi, verticillées : rameaux et feuilles alternent donc. Les organes de reproduction sont groupés en un épi terminal ou strobile.

Les Sphénopsides, appelées aussi Articulées, du fait que les tiges et les rameaux sont divisés en « articles », qui se réduisent aujourd'hui à des plantes de petite taille, eurent autrefois beaucoup d'importance, par suite de leur abondance et des proportions qu'elles atteignaient. Apparues au milieu du Dévonien, elles se développèrent de façon importante au Carbonifère, avec des arbres de taille

Aymonin

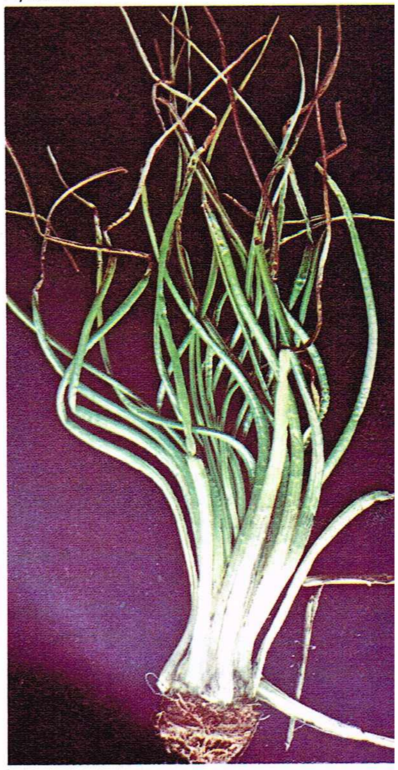

▲ *Les isoètes sont des Fougères immergées ou semi-immergées.*

Page ci-contre : ◀ *Lepidodendron, lycopode fossile du Westphalien.*

C. Nardin - Jacana

▲ **Equisetum sylvaticum** *des bois humides et des berges ombragées. Les tiges stériles vertes sont retombantes, les tiges fertiles sont blanchâtres.*

identique à celle de nos sapins; puis le nombre des espèces décrut depuis la fin du Paléozoïque et encore plus au Mésozoïque — quand il ne resta alors que les Équisétidées pour représenter la classe. Les espèces actuelles sont toutes réunies dans l'unique genre *Equisetum*.

Les Sphénopsides comprennent donc quatre sous-classes, dont trois sont représentées par des espèces disparues, les Équisétidées seules subsistant de nos jours.

● *Hyéniidées*

L'ordre unique de cette sous-classe, les Hyéniales, comprend deux familles, les Calamophytacées et les Hyéniacées, avec quelques formes fossiles du Dévonien moyen. Le caractère distinctif des tiges articulées est encore peu apparent chez ces plantes.

Il s'agissait d'arbustes rhizomateux, à ramification dichotomique, à feuilles plusieurs fois dichotomes. Les sporophylles étaient disposées en un épi lâche à l'extrémité des rameaux dont les ramifications irrégulières portaient des sporanges pendants. On peut les considérer comme des ancêtres des Articulées proprement dites.

La famille des *Hyéniacées* comprend le seul genre *Hyenia,* avec deux espèces. Les premiers fossiles en ont été trouvés en 1926 dans des terrains du Dévonien moyen de la Prusse rhénane, puis d'autres ont été découverts en Norvège. *H. elegans* avait des feuilles verticillées par quatre, laciniées seulement à la partie distale des rameaux, et les sporanges pendaient aux extrémités des sporophylles bifurquées.

Les *Calamophytacées* comprennent le seul genre *Calamophyton,* qui a été trouvé dans les mêmes couches du Dévonien que le précédent. La tige de *C. primoevum* (qui était probablement un arbuste) était ramifiée plus ou moins dichotomiquement, avec des branches robustes, peut-être articulées (bien que peu distinctement), au moins dans les parties basses des branches. Dans les endroits que l'on peut considérer comme des nœuds s'inséraient de petites feuilles spatulées d'environ 1 cm de longueur, divisées en lanières par division dichotomique distale. Les sporophylles portaient, à l'extrémité des dernières bifurcations, des sporanges ovoïdes. Les rameaux fertiles étaient homologues des stériles.

● *Pseudoborniidées*

A cette sous-classe appartient un ordre unique avec une famille unique *(Pseudoborniacées)* et un seul genre, *Pseudobornia :* c'est *P. ursina* du Dévonien supérieur. Sur les tiges de cette plante, à intervalles réguliers, de petits rameaux étaient insérés, munis de feuilles longues et étroites, tétraverticillées, laciniées, en pinceau. On a découvert cette espèce dans les îles Svalbard, dans l'océan Arctique. Les feuilles des rameaux fertiles étaient plus réduites, et l'un de leurs lobes portait des sporanges. La forme générale de la plante était peut-être celle d'une grande prêle.

● *Sphénophyllidées*

Les espèces appartenant à cette sous-classe, toutes fossiles, proviennent de terrains du Paléozoïque ancien, plus spécialement du Dévonien supérieur, mais ont été retrouvées jusqu'au Trias inférieur. Cette sous-classe comprend un seul ordre : les Sphénophyllales.

Cet ordre est constitué par trois familles, avec un genre unique chacune : les Sphénophyllacées, les Cheirostrobacées et les Tristachyacées.

Les *Sphénophyllacées* vécurent du Dévonien supérieur au Trias inférieur. Parmi les nombreuses espèces de *Sphenophyllum,* citons *S. cuneifolium, S. dawsoni, S. emarginatum, S. fertile, S. insigne, S. majus, S. myrophyllum, S. trichomatosum* et *S. verticillatum* qui étaient, à ce qu'il semble, des lianes rampantes, atteignant 1 m de longueur, à tiges pleines, très flexibles, de faible diamètre (moins de 1 cm) et à côtes peu nombreuses. Les feuilles étaient disposées généralement par verticilles de trois ou de multiples de trois (neuf à douze et même dix-huit).

Ces dispositions donnaient peut-être aux plantes le port de certaines Rubiacées, par exemple *Galium aparine*. Les feuilles étaient, au moins en partie, divisées en fines lanières, ce qui fait penser qu'elles ont appartenu à

des parties immergées. D'autres espèces avaient par contre des feuilles cunéiformes, souvent dentées. Certaines espèces sont hétérophylles. Les épis fructifères étaient situés à l'extrémité des branches, ils étaient étroits, très allongés, et formés de verticilles de sporophylles composés d'une bractée inférieure foliacée et d'une partie supérieure fertile; chaque ramification est terminée par un sporange, les sporanges contenaient des spores d'un seul type. La forme de strobile prise par l'ensemble des sporophylles rappelle les appareils florifères et fructifères des Spermatophytes. Certains de ces strobiles atteignaient une longueur de plusieurs centimètres et un diamètre d'environ 2 cm.

La famille des *Cheirostrobacées* était constituée par le genre *Cheirostrobus,* du Carbonifère inférieur d'Écosse, genre encore mal connu et seulement par le cône de *C. pettycurensis.* Les sporangiophores sont soudés à la bractée, tous les deux étaient trifides, et chaque branche était munie de quatre sporanges. Verticilles fertiles et stériles alternaient.

Dans la famille des *Tristachyacées,* avec le genre *Tristachya (T. raciborskii)* du Carbonifère polonais, il semble que la plante portait des feuilles larges au sommet mais étroites à la base, disposées par verticilles de six; les épis sessiles et courts étaient formés de dix-huit-vingt-quatre sporangiophores peltés et insérés légèrement au-dessus des feuilles.

● *Équisétidées*

Cette sous-classe comprend, outre les prêles actuelles, les grandes prêles arborescentes fossiles qui formaient des forêts d'arbres gigantesques. Les Équisétidées dominèrent au Paléozoïque, en particulier au Carbonifère. Les *Calamites,* qui sont les mieux connus, pouvaient atteindre des hauteurs d'une dizaine de mètres, avec des troncs de 1 m de diamètre. Sur les troncs, généralement creux, et à moelle centrale volumineuse, caduque, couverts d'une écorce bien différenciée, on peut encore voir les nœuds et les entre-nœuds (ceux-ci pourvus de côtes), propres aux Articulées, ainsi que la disposition verticillée des ramifications.

Certaines espèces possédaient des feuilles divisées et fourchues; d'autres étaient munies de feuilles lancéolées, elles aussi disposées en verticilles; leur longueur pouvait atteindre plusieurs centimètres, et elles étaient souvent réunies ensemble à la base, en une espèce de gaine, comme chez les *Equisetum* actuels. Beaucoup d'espèces sont hétérophylles. Les sporophylles groupées en épis solitaires ou verticillés étaient très semblables aux épis des prêles; elles étaient situées sur des rameaux spéciaux et constituées par des feuilles fertiles, 4- sporangiées; toutes les feuilles étaient fertiles, ou les fertiles alternaient avec les stériles. Certaines espèces étaient isosporées, les autres étaient hétérosporées.

L'unique ordre des Équisétales est divisé en trois familles : Astérocalamitacées, Calamitacées et Équisétacées.

I.G.D.A.

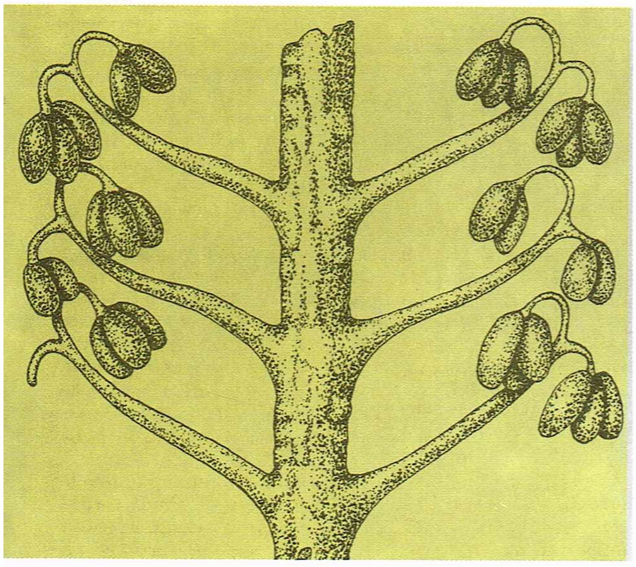

Chez les *Astérocalamitacées,* la forme générale de grande prêle est très nette pour les espèces appartenant aux deux genres *Asterocalamites* et *Asterocalamitopsis.* Elles possédaient un système radiculaire à divisions dichotomiques et des feuilles à segments linéaires, en verticilles, superposés, non alternés. L'appareil sporangifère était formé de sporophylles verticillées, en forme d'écusson, à sporangiophores munis de quatre sporanges isosporés, avec quelquefois quelques verticilles intercalés de feuilles stériles. Il ne semble pas que toutes les espèces attribuées aux genres cités fussent arborescentes : il devait en être de buissonnantes. Les *Asterocalamites* ont vécu du Dévonien moyen au Carbonifère supérieur.

La famille des *Calamitacées* comprend un grand nombre d'espèces fossiles bien connues, appartenant principalement au genre *Calamites,* si riche qu'il a d'abord été divisé en plusieurs sous-genres. Leur tige présentait à l'état adulte une moelle centrale, pleine à la hauteur des nœuds, creuse entre les nœuds. Les faisceaux de bois primaire, avec leurs lacunes centrales, faisaient fonction de canaux aérifères; il existait un bois secondaire, un liber, et enfin une écorce très épaisse, recouverte par un épiderme.

Ces troncs majestueux s'élevaient jusqu'à plus de 10 m, et, étant donné leur possibilité d'un fort accroissement secondaire, atteignaient ou dépassaient 1 m de diamètre. Ils étaient soit simples, soit ramifiés, par verticilles espacés, soit régulièrement ramifiés en verticilles à chaque entre-nœud. Ils différaient nettement des troncs des arbres actuels, surtout par la présence des nœuds, propres à la famille des Articulées. L'appareil végétatif ressemblait à celui de nos prêles actuelles : il consistait en un rhizome hypogé, qui donnait naissance à des bourgeons aériens; les rhizomes avaient des nœuds d'où partaient des racines adventives, disposées en verticilles; d'autres racines adventives se trouvaient sur les nœuds inférieurs de la tige. Cette dernière caractéristique indique que la partie basse du tronc restait aussi immergée dans la terre fangeuse ou dans l'eau. Les feuilles étaient pourvues de stomates aérifères et aquifères qui sont une preuve de l'importante humidité qui régnait alors dans leur milieu. Les feuilles étaient dimorphes, linéaires et libres sur les tiges de premier ordre, équisétiformes ou à limbe sur les rameaux. Leur disposition était en verticilles, comme celle des branches, lesquelles pouvaient exister seulement au sommet de l'axe ou bien au niveau de certains nœuds mais non de tous.

Nous avons déjà parlé des nombreuses ressemblances avec les espèces actuelles, ressemblances qui s'étendaient à l'appareil reproducteur, constitué par des épis assez longs, solitaires ou en verticilles, où les verticilles fertiles alternaient avec des verticilles de bractées plus ou moins peltées, stériles.

Il n'y a peut-être eu à aucun moment de l'histoire du monde une végétation d'une telle exubérance, ni une telle densité des forêts qu'à cette époque, et les gisements de houille exploités actuellement sont en partie formés de ce type de Végétaux.

Les côtes des entre-nœuds de la tige alternaient d'un nœud à l'autre; chaque côte se terminait par un renflement, avec une cicatrice punctiforme à la base. *Calamites cisti* possédait des côtes fines et étroites, et les nœuds étaient allongés verticalement; les feuilles étaient dressées et pointues. *C. suckowii* semble avoir été de grande taille, avec de larges rhizomes. *C. cruciatus* est reconnaissable aux grosses cicatrices laissées par les branches qui s'inséraient sur le tronc : elles sont circulaires et ombiliquées. *C. goepperti* se caractérise par des verticilles de cicatrices foliaires à chaque nœud, ainsi que des verticilles de grosses cicatrices de branches. *C. gigas,* du Permien, avait un tronc particulièrement robuste et des côtes larges.

Parmi les autres « genres » qui n'ont été bien souvent que des parties isolées de *Calamites,* nous mentionnerons les *Annularia,* avec des feuilles en verticilles, soudées à la base, allongées en spatule à leur extrémité, formant des verticilles au nombre de seize à trente-deux chez *A. stellata,* ou lancéolées, au nombre de huit à douze par verticille chez *A. radiata,* ou enfin assez larges, en spatule, mais étroites à la base, disposées en verticilles ou en rosettes très caractéristiques, au nombre de douze à dix-huit chez *A. sphenophylloides.*

Les fossiles réunis dans le genre *Asterophyllites* présentaient des feuilles verticillées très pointues et formant une

J. Marguerier

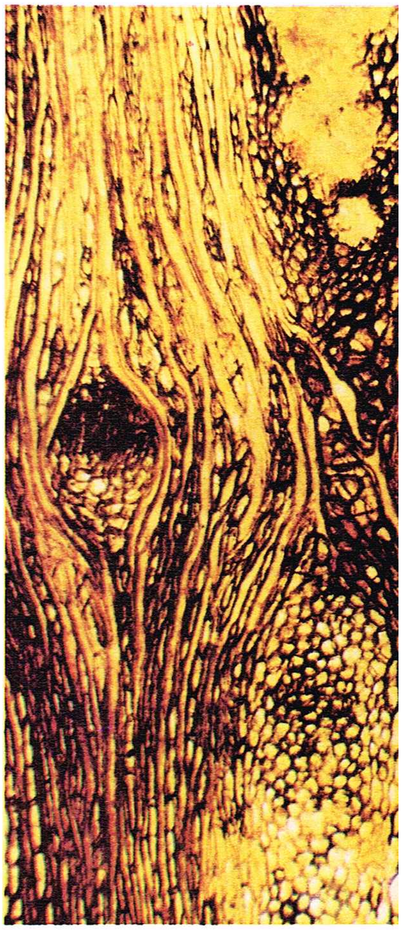

▲ **Arthropitys bistriata.** ***Coupe tangentielle de la tige montrant l'anatomie : grands rayons, alternance des faisceaux.***

◀ ***Portion de fronde fertile de*** **Sphenophyllum.**

coupe dressée, avec une seule nervure visible. Il s'agissait encore d'espèces évidemment très semblables, par l'aspect, à nos prêles.

Chez les *Calamostachys,* et par exemple *C. tuberculata,* les épis se composaient de verticilles fertiles alternant avec d'autres stériles, consistant en douze à seize écailles de protection soudées à la base, alors que des verticilles fertiles étaient formés de dix-huit sporangiophores à quatre sporanges chacun à leur extrémité (mégasporanges ou microsporanges). Chez *C. germanica,* les verticilles fertiles étaient courts, avec un seul sporange, et chez *C. americana,* les strobiles avaient environ 12 cm. Les *Calamostachys* sont homosporés ou hétérosporés.

Dans le genre *Palaeostachya,* l'épi ou strobile portait les sporangiophores 4-sporangiés à l'aisselle des bractées réunies en une sorte d'inflorescence *(P. pedunculata)*. Le genre *Macrostachya* (avec l'espèce *M. caudata*) se distinguait par son épi, dense et épais, formé de nombreux verticilles serrés.

Les racines des *Astromyelon* étaient spongieuses, tout au moins partiellement, ce qui semble indiquer que les plantes croissaient dans la vase des marais. Les restes fossiles réunis dans le genre *Cingularia* (qui semble aberrant), avec l'espèce *C. typica,* rappellent les *Calamites,* mais leurs feuilles n'alternaient pas de l'un à l'autre des nœuds successifs, et les verticilles des épis fructifères étaient soudés sur la moitié de leur longueur, les sporangiophores étant fixés à la face dorsale ou externe de ces verticilles.

Les espèces du genre *Calamitina (C. sachsei)* devaient présenter un aspect particulier, à cause de la longueur de leurs entre-nœuds et de la présence de branches sur certains des nœuds seulement. Par contre, de véritables touffes de rameaux peuvent être observées chez les *Eucalamites (E. carinatus* et *E. multiramis)*, chez lesquels seule la partie inférieure du tronc, qui possédait à la base de gros rhizomes, restait nue.

Enfin, le genre *Stylocalamites (S. schulzi)* portait de grosses ramifications primaires, droites, possédant seulement vers leur sommet des ramifications secondaires; celles-ci étaient assez courtes, et la plante avait l'aspect d'un énorme candélabre.

Parmi les *Équisétacées,* le genre *Equisetum* est le seul qui, avec une trentaine d'espèces, ait survécu pour représenter cette famille, dont l'origine remonte au Carbonifère supérieur. Ces espèces se distinguent des *Calamites* par leur petite taille.

Les *Equisetum* actuels habitent les marécages et les lieux inondés, ou les champs et les bois ombragés, plus rarement les sols secs.

Les racines du sporophyte sont insérées aux nœuds du rhizome et peu nombreuses; le rhizome est souterrain, longuement horizontal, vivace, ramifié, articulé. Il donne des tiges aériennes. Les tiges sont articulées, formées d'articles séparés par un diaphragme. Elles peuvent être vivaces ou annuelles.

Les entre-nœuds présentent toujours des côtes longitudinales; dans les vallécules situées entre les côtes, on observe des stomates. Les feuilles sont petites, verticillées et soudées à chaque nœud formant une gaine. C'est dans la gaine formée par les feuilles, et c'est toujours à l'endroit des nœuds, que naissent les rameaux (quand il y en a), eux aussi disposés en verticilles, non pas placés à l'aisselle des feuilles, mais alternant avec elles. Les tiges et les rameaux ont une surface silicifiée, rugueuse; c'est par les tiges et les rameaux que s'exerce l'assimilation chlorophyllienne, et non par les petites feuilles décolorées, qui jouent un rôle peu important.

On observe dans la section de la tige, en dessous de l'épiderme, un tissu mécanique, un tissu assimilateur et un anneau de faisceaux fibro-vasculaires. Une couronne de canaux aérifères corticaux se trouve sous les vallécules, alors qu'un autre petit canal aérifère est adjacent à chacun des faisceaux vasculaires, provenant du protoxylène résorbé (canal carinal); une grande lacune centrale rend la tige creuse. Normalement, il n'y a pas de croissance secondaire en épaisseur, sauf chez *E. maximum* (= *E. telmateia*). Selon les espèces, les axes sont tous fertiles, ou il y a des frondes fertiles et des stériles.

Les tiges stériles et fertiles peuvent être semblables, chlorophylliennes, ou différentes, les tiges fertiles étant alors blanchâtres ou rosées, précoces, et disparaissant après la chute des spores. L'appareil sporangifère est en forme d'épi ou strobile, pédicellé ou non, porté par le sommet de la tige ou des rameaux. Au-dessous de l'épi existe une collerette dentée. Le strobile est formé de sporangiophores, en forme d'écussons hexagonaux et abritant à leur face inférieure un nombre variable (généralement cinq à dix) de sporanges marginaux. Les sporangiophores sont d'abord serrés les uns contre les autres, protégeant les sporanges jeunes, puis s'écartent à maturation, les sporanges s'ouvrant par une fente latérale pour libérer les spores.

Les spores de couleur verte sont dotées d'une endospore, d'une exospore et d'une épispore, qui se fend en quatre pour donner quatre rubans allongés, les *élatères;* celles-ci font fonction d'ailes et, sous l'action du vent, favorisent la dissémination de la spore; en outre, très sensibles à l'état hygrométrique de l'atmosphère, elles rassemblent souvent plusieurs spores, ce qui favorise leur germination. Le prothalle est vert, de 1 à 2 cm de largeur au maximum, et se présente comme une petite lame laciniée ou lobée. Il y a des prothalles mâles et des prothalles femelles, la différenciation a lieu (bien que les spores

Bavestrelli, Bevilacqua, Prato

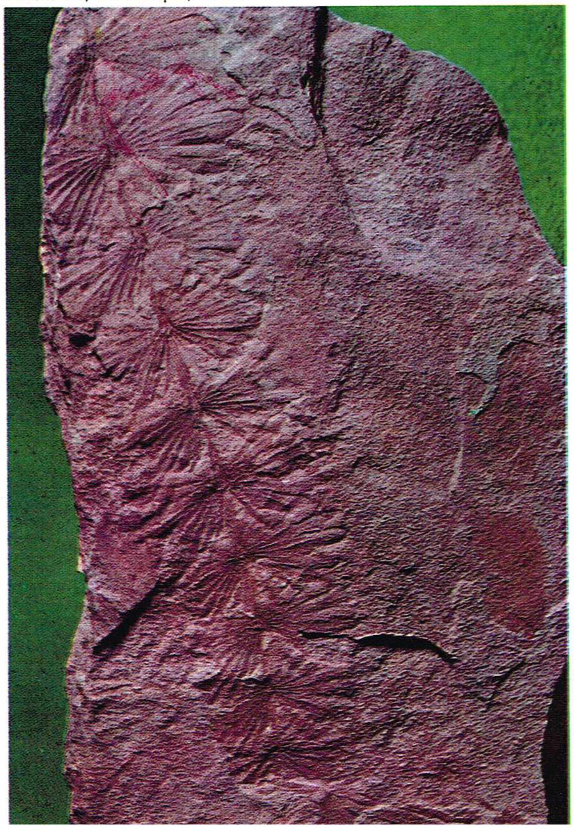

▶ ***Empreinte fossile d'une fronde d'*Annularia.**

I.G.D.A.

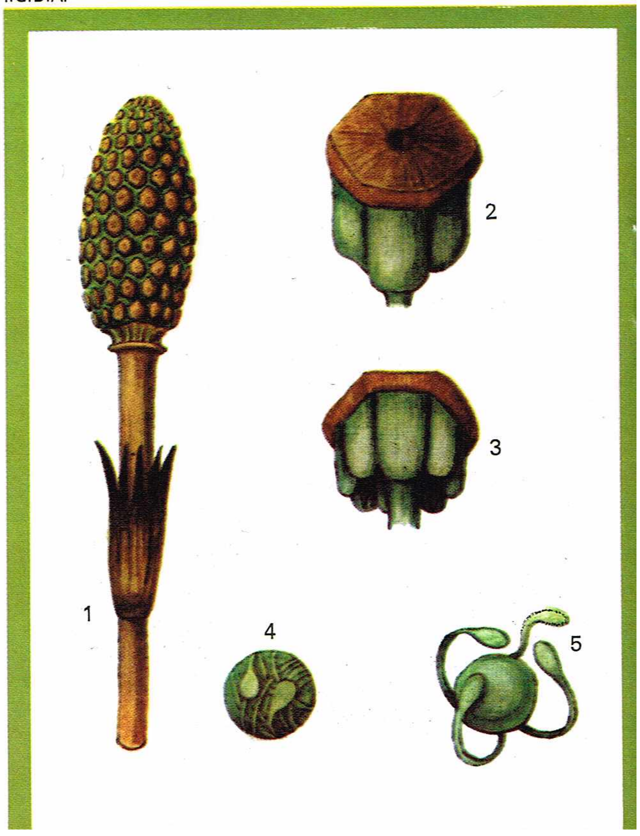

▶ ***1 : partie terminale de la fronde fertile.* Equisetum. *2 : partie supérieure de la sporophylle. 3 : partie inférieure montrant les sporanges. 4 et 5 : spores avec élatères repliées et déployées.***

paraissent toutes égales) suivant les conditions du milieu où tombe la spore : quand ces conditions ne sont pas très bonnes, il y a prédominance de prothalles mâles (avec anthéridies), les prothalles femelles étant alors naturellement rares. Dans certains cas, les prothalles peuvent aussi être hermaphrodites. L'oosphère fécondée, contenue dans l'archégone, produit l'embryon qui ne possède pas de suspenseur. La cellule épibasale donne l'axe et les feuilles, la cellule hypobasale le pied et la racine.

La plupart des *Equisetum* perdent leur partie épigée pendant la mauvaise saison; seuls restent vivants de petits tubercules hivernants, naissant sur des rameaux hypogés, qui forment parfois des systèmes rhizomateux très ramifiés, pouvant pénétrer dans le sol à une grande profondeur. Les rhizomes possèdent eux aussi des nœuds et des entre-nœuds, avec des écailles aux nœuds, et des rameaux qui peuvent donner lieu (mais non toujours) à la formation des tiges aériennes ou rester souterrains.

On connaît en France neuf espèces d'*Equisetum* se répartissant en deux sous-genres :

1° Les espèces à tiges fertiles et stériles semblables, persistantes, cônes apiculés *(Hippochaete)*. Parmi les principales, citons *E. hyemale* ou prêle d'hiver : les dents de la gaine foliaire sont caduques, laissant après leur chute de petites saillies noires; la tige est simple, gris verdâtre, persistante, robuste, de 30 à 100 cm. *E. ramosissimum* a des tiges rameuses, surtout vers le milieu, huit à vingt côtes convexes; la lacune centrale a environ 1/2 à 2/3 du diamètre de la tige. Chez *E. variegatum,* la lacune centrale est petite, la tige ne présente que cinq à dix lobes, et les dents de la gaine sont cerclées de noir.

2° Les espèces à tige fertile et stérile différentes, non persistantes, cônes obtus *(Equisetum)*. *Equisetum arvense* croît dans les champs humides, de préférence argileux, les tiges fertiles roussâtres paraissent et se fanent rapidement avant que naissent les stériles. Les branches sont dressées, tétragones; les gaines, lâches, présentent six à douze dents. *E. telmateia (E. maximum),* ou grande prêle, dont les tiges stériles, épaisses, lisses, d'un blanc d'ivoire, atteignent jusqu'à 2 m de hauteur, a aussi des tiges fertiles de printemps, de 20 à 40 cm, d'un blanc rougeâtre, à gaines foliaires foncées, munies de vingt à trente dents pointues. C'est une plante des lieux très humides et argileux.

E. pratense, plante grêle de 10 à 60 cm de hauteur, printanière, dont les tiges de deux sortes paraissent en même temps, a des rameaux abondants, verticillés, étalés ou recourbés, se développant après la fructification; les gaines sont munies de dix à douze dents, blanches, scarieuses au bord et portant une ligne brune sur le dos. Chez *E. sylvaticum,* les nombreux rameaux des tiges stériles vertes sont retombants, les tiges fertiles, blanchâtres, ont des rameaux qui se développent aussi après la fructification; les gaines sont fendues en trois ou quatre lobes.

Enfin, *E. palustre* et *E. fluviatile (E. limosum)* à tiges lisses, rameaux denses se desséchant en automne, se distinguent par leur tige : chez *E. fluviatile,* elle est creuse sur environ 4/5 de son diamètre, et les dents de la gaine, noires, n'ont pas de côtes, chez *E. palustre,* le diamètre de la lacune centrale est moins de 1/2 de celui de la tige; les dents de la gaine ont une côte et une marge scarieuse.

Parmi les espèces non européennes, nous mentionnerons *E. schaffneri* ou prêle de Schaffner, à axes très gros, et *E. giganteum* ou prêle géante, liane qui peut atteindre une hauteur de plus de 5 et même 10 m. Ces deux dernières espèces vivent respectivement au Mexique et en Amérique du Sud. Toutes deux se prêtent bien à la culture en serre, de même qu'*E. robustum*, d'Amérique centrale, et *E. scirpoides*, des régions nordiques et arctiques. *E. telmateia* et *E. variegatum* peuvent, dans certains cas, être utilisés dans le même dessein. *E. arvense* est non seulement diurétique, mais aussi hémostatique. Il servait dans les affections rénales et arrête les hémorragies, il a en outre des propriétés mineures, en décoction (maux de gorge, ophtalmies, etc.).

E. palustre contient des alcaloïdes toxiques, l'équisétine et la palustrine, qui les rendent dangereux, surtout pour le bétail.

P. Starosta

▲ ***Détail très grossi d'un épi sporifère d'*Equisetum *montrant les écussons vus de face avec les spores en dessous.***

P. Starosta

◀ ***Détail de la tige stérile d'*Equisetum telmateia *montrant le détail de la gaine foliaire lâche.***

P. Starosta

Les Équisétacées fossiles sont bien représentées du Carbonifère au Crétacé inférieur : parmi les genres les mieux connus, nous citerons surtout les *Equisetites,* avec plusieurs espèces, dont *E. arenaceus,* qui serait la plus grande prêle connue jusqu'à présent, et de nombreuses autres (*E. muensteri, E. oblongum, E. veronense,* etc.). Ce genre est très semblable aux *Equisetum,* et il semble qu'on pourrait les réunir. Il n'en diffère que par la taille, plus grande chez les fossiles, et l'absence d'élatères chez les spores. Le genre *Equisetum* proprement dit possède des représentants fossiles à partir du Crétacé ; nous citerons pour le Crétacé supérieur *E. zeilleri.*

Le genre *Neocalamites,* du Trias, montrait des verticilles de feuilles allongées, non soudées pour former une gaine comme chez les *Equisetum* actuels.

Les espèces réunies dans le genre *Schizoneura* avaient un port différent. Elles possédaient des entre-nœuds superposés et de larges feuilles aplaties aux nœuds. On trouve au Carbonifère, au Permien, au Trias et au Jurassique les *S. gondwanensis, S. paradoxa* et *S. africana,* qui rappellent les Calamitacées : elles sont également considérées comme des éléments caractéristiques de la flore à *Glossopteris,* genre qui a été attribué jadis aux Fougères, et qui est maintenant classé parmi les Ptéridospermes, peuplant le continent de Gondwana.

Le genre *Phyllotheca* (ex. : *P. brongniartiana*), qui vécut du Carbonifère supérieur au Crétacé, présente aussi un port d'*Equisetum.*

NOEGGÉRATHIOPSIDES

Les plantes fossiles qui ont été réunies dans cette classe sont considérées par certains auteurs comme des *Filicopsides.* Leurs feuilles semblent pouvoir être assimilées aux frondes des Fougères, mais on sait encore trop peu de chose sur elles pour se prononcer sur leurs affinités.

De toute façon, c'est une classe difficile à situer, que l'on s'accorde aujourd'hui à placer parmi les Ptéridophytes, mais qui, jadis, a été rangée, tantôt avec les Palmacées, tantôt avec les Cycadacées, et même avec les Conifères, c'est-à-dire parmi les Spermaphytes.

I.G.D.A.

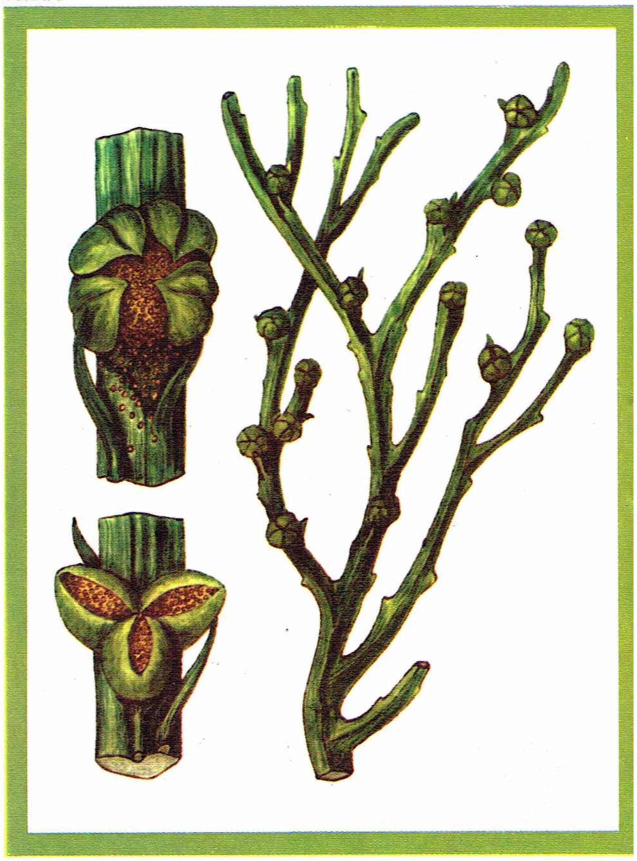

Cette classe est divisée en deux sous-classes, les *Noeggérathiidées* et les *Tingiidées*.

● *Noeggérathiidées*

Cette sous-classe comprend deux ordres, les Noeggérathiales et les Plagiozamitales, avec une famille chacun, les Noeggérathiacées et les Plagiozamitacées.

Chez les *Noeggérathiacées,* le genre *Noeggerathia* date du Carbonifère européen. L'espèce *N. foliosa* portait des deux côtés de l'axe une série de feuilles à peu près opposées, élargies en haut, et à plusieurs nervures presque parallèles. On a découvert le cône fertile des *Noeggerathia* dans des gisements récemment mis à jour, qui avaient été inclus dans le genre *Noeggerathiostrobus* (avec l'espèce *N. bohemicus*). L'autre genre connu est constitué par les *Noeggerathiopsis,* découverts dans des sédiments de l'Inde.

Les *Plagiozamitacées* forment une petite famille, qui, avec le genre *Plagiozamites,* semble un terme de passage entre les Noeggérathiidées et les Tingiidées.

● *Tingiidées*

Cette sous-classe est constituée par l'unique ordre des Tingiales comprenant la seule famille des *Tingiacées* avec le genre *Tingia,* qui présentait des feuilles allongées, découpées et laciniées au sommet, disposées sur les tiges selon quatre séries. Les sporophylles, disposées par quatre, en croix, étaient allongées et portaient, du côté supérieur, chacune quatre sporanges sessiles. Les fossiles proviennent du Permien et du Trias de l'Asie orientale.

PSILOTOPSIDES

La présente classe est constituée par l'unique sous-classe des Psilotidées actuelles. Celles-ci comprennent le seul ordre des Psilotales, de position taxonomique encore incertaine, avec deux familles, les *Psilotacées* et les *Tmesiptéridacées,* qui ne montrent pas d'affinités étroites avec les autres groupes de Ptéridophytes.

Il s'agit de formes actuelles, qui sont apparues seulement tardivement au Quaternaire, mais les quelques espèces existantes (*Psilotum,* pantropical [quatre espèces], *Tmesipteris,* d'Australie et d'îles voisines [une espèce]), de structures archaïques, se rapprochent des *Psilophytopsides* fossiles. Le prothalle de ces espèces est hypogé et formé de courts éléments cylindriques vascularisés, avec d'abondants rhizoïdes, vivant en symbiose avec des Champignons Phycomycètes. Sur chaque prothalle naissent des anthéridies et des archégones. L'embryon est exoscopique, sans suspenseur. Le sporophyte a un rhizome souterrain, dépourvu de chlorophylle et vivant en symbiose mycorrhizique comme le prothalle.

La sporophylle des *Psilotum,* épiphyte ou humicole, dressée, dichotome, n'a pas de vraies feuilles, mais plutôt de petites bractées alternes, ovales, dépourvues de nervures et de stomates. Les sporanges, portant des spores toutes semblables (homospores), sont disposés par trois, à l'aisselle de ces bractées, vers l'extrémité des rameaux. *P. triquetrum* et *P. complanatum,* ce dernier épiphyte et à rameaux pendants, vivent dans les pays tropicaux et subtropicaux (Afrique, Australie, Amérique, Japon) ; ils sont épiphytes ou croissent sur des sols très riches en humus.

Les Tmésiptéridacées comprennent un seul genre, *Tmesipteris,* avec l'unique espèce *T. tannensis,* à axes pendants et à petit nombre de rameaux. La plante est dépourvue de racines, et les axes portent, à la partie inférieure, des écailles, puis, plus haut, des feuilles alternes, lancéolées, à limbe développé, pourvues de nervures et de stomates. Les feuilles fertiles sont bifides et portent les sporanges isosporés. Ceux-ci sont situés par deux à l'aisselle des feuilles bifides et s'ouvrent par une fente longitudinale. Les prothalles sont analogues à ceux des *Psilotum;* ils portent des anthéridies et des archégones; l'embryon donne d'abord une jeune sporophylle sans feuilles, laquelle produit ensuite la plante, épiphyte des forêts chaudes et humides de l'Australie, de la Nouvelle-Zélande, des Philippines, de la Polynésie et de la Mélanésie.

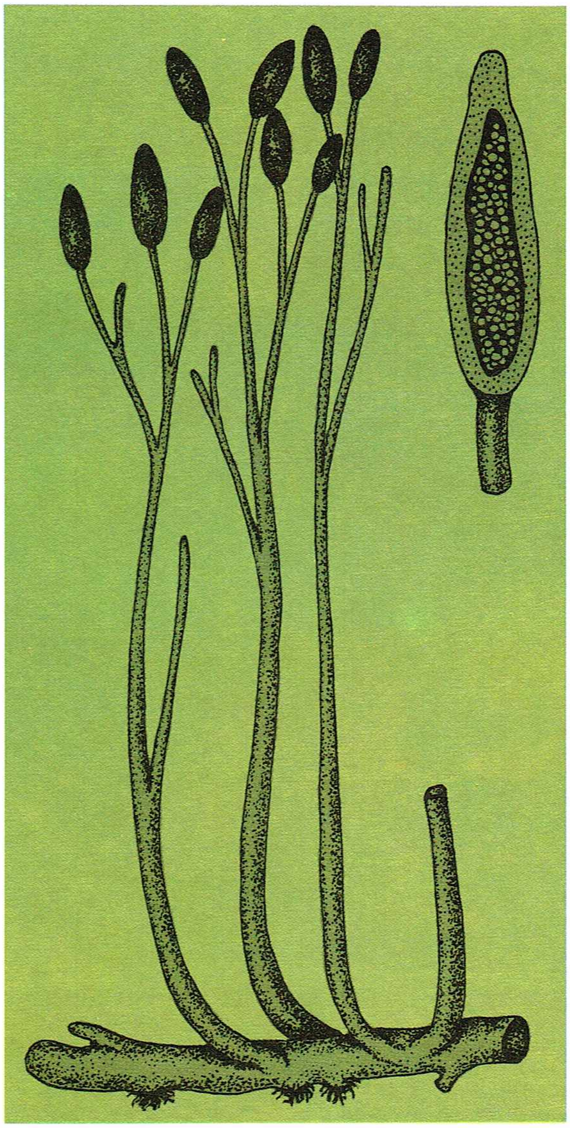

I.G.D.A.

◄ *Reconstitution d'un fragment de* Rhynia major *avec coupe longitudinale du sporange.*

PSILOPHYTOPSIDES

Cette classe comprend les Ptéridophytes primitifs connus depuis le Silurien supérieur, mais bien représentés surtout au Dévonien inférieur et moyen. Ce sont les premières plantes vasculaires apparues sur Terre. Leur rôle est extrêmement important car il semble que les autres Cryptogames vasculaires et les plantes à ovules en sont issus; cette opinion est cependant assez controversée. Les espèces fossiles qui ont été attribuées à cette classe sont toutefois encore mal connues, et il est probable que leur position systématique devra être révisée. Pour l'instant, nous distinguerons dans cette classe cinq sous-classes : Rhyniidées, Zostérophyllidées, Psilophytidées, Astéroxylidées et Pseudosporochnidées. Chacune comprend, comme nous le verrons, un seul ordre.

● *Rhyniidées*

On attribue à cette sous-classe l'ordre des Rhyniales. Elles avaient l'aspect d'une Algue dressée, fixée par un rhizome servant de crampon. Elles ne possédaient pas de feuilles ni de racines, mais, par contre, elles présentaient des faisceaux vasculaires à l'intérieur de leurs tiges, lesquelles étaient couvertes par un épiderme pourvu de stomates et présentaient une division dichotomique (se terminant au sommet par des sporanges cylindriques assez gros). On observe, seulement à la base des tiges, des protubérances, qui font penser à des poils ou à des ébauches de feuilles. On ne peut encore parler chez ces plantes d'un système radiculaire, mais il y avait

Page ci-contre :
◄ *Sommet de la tige d'*Equisetum *avec épi sporifère (à gauche).*

◄ *Fragment de tige de* Psilotum triquetrum *et sporanges ouverts (à droite).*

A. Teurtroy - Jacana

▲ **Pteridium aquilinum** *en lisière de la forêt.*

toutefois des rhizoïdes, qui prenaient l'aspect de petits bulbes. Ces Végétaux étaient hauts d'environ 0,50 m et vivaient au Silurien et au Dévonien, il y a donc trois cents à trois cent cinquante millions d'années ; ils avaient déjà disparu au Carbonifère.

L'ordre englobe deux familles, les Rhyniacées et les Hornéacées.

Les *Rhyniacées* comprennent le genre *Rhynia,* avec deux espèces *(R. maior* et *R. gwinnevaughani),* lesquelles possédaient des rhizomes à rhizoïdes, alors que les tiges étaient dépourvues de feuilles. Les sporanges, sans colonne centrale de tissu stérile, étaient terminaux et de forme allongée. Les fossiles des *Rhynia* ont été découverts dans le Dévonien écossais, près de la localité de Rhynie, d'où dérive le nom donné au genre.

Les *Hornéacées* sont constituées par le genre *Hornea* ou *Horneophyton,* à sporanges pourvus (à la différence des *Rhynia*) d'une colonne centrale de tissu stérile (columelle) et à appareils rhizomateux gonflés et sphéroïdaux comme des tubercules, à la base des tiges. *Horneophyton lignieri* provient des mêmes gisements que les *Rhynia,* qui ont une grande importance par la richesse et la bonne conservation des fossiles (remontant à environ trois cents millions d'années), de structure très primitive. Étant donné leur abondance, on a parlé d'une « flore à *Rhynia* », qui aurait beaucoup de similitudes avec une flore d'Algues (pour préciser, des Algues marines supérieures évoluant vers des plantes amphibies, puis tout à fait continentales). D'autre part, la forme des sporanges des Rhyniales les rapproche des Bryophytes ; ceci est particulièrement évident chez les *Hornea,* qui sont pourvus d'une columelle.

● Zostérophyllidées

La sous-classe des *Zostérophyllidées* comprend l'unique ordre des Zostérophyllales, avec la seule famille des *Zostérophyllacées.* Les espèces de cette famille vécurent aussi à des époques très reculées (Silurien, Dévonien). Il s'agit de plantes croissant en touffes, dont les tiges ont un aspect thalloïde, par suite de leur important aplatissement, qui rappellent les zostères, Phanérogames marins, d'où le nom du genre *Zosterophyllum.* Ce dernier genre comprend des espèces à tiges et à ramifications formant des touffes ou des rosettes ; les sporanges, petits et nombreux, étaient groupés à l'extrémité des derniers rameaux, évoquant les lycopodes. Parmi les espèces les mieux connues, nous citerons *Z. myretonianum* et *Z. rhenanum,* qui semblent avoir vécu immergés, laissant seulement à l'air libre les rameaux portant des sporanges. Ils proviennent du Dévonien inférieur du pays de Galles, mais certains des fossiles remontent au Silurien inférieur d'Australie. Les affinités avec les Psilophytales sont évidentes.

● Psilophytidées

Il s'agit d'une petite sous-classe, qui ne comprend plus que l'ordre des Psilophytales, avec l'unique famille des *Psilophytacées.* Les fossiles étaient des plantes sans feuilles, à tiges et rameaux pourvus de protubérances indiquant des poils ou des épines caduques. Ces Végétaux sont du Dévonien et peut-être du Silurien moyen ; ils étaient de taille moyenne, et à port rappelant quelque peu celui des *Psilotum* actuels.

Chez le genre *Psilophyton, P. princeps* semble avoir atteint une hauteur de 50 cm environ ; ses tiges aphylles, dépourvues de racines, étaient dotées, par contre, de longs rhizomes rampants, et les ramifications étaient enroulées en crosse à leur extrémité. Certains rameaux portaient des sporanges par paires, indéhiscents, à spores toutes semblables.

● Astéroxylidées

Cette sous-classe comprend également un seul ordre, celui des Astéroxylales, avec l'unique famille des *Astéroxylacées.* Il s'agit d'espèces fossiles toujours très anciennes, remontant au Dévonien, avec des rhizomes ramifiés, où l'on commence à entrevoir des racines. Chez le genre

Asteroxylon, la hauteur de la plante était d'environ 1 m, alors que le diamètre des axes ne semble pas avoir dépassé 1 cm. La souche était un rhizome rampant, donnant des pseudo-racines et des tiges. Les espèces de cette famille rappelaient les *Lycopodium* actuels, avec des parties terminales nues portant les sporanges terminaux, dans lesquels on peut observer l'ébauche d'un système de déhiscence apical dû à une assise mécanique, qui serait un caractère plus évolué que chez les ordres voisins. Les tiges, nues à la base, présentaient plus haut de petites saillies, puis des feuilles courtes (lycofeuilles), pourvues de stomates. On connaît peu d'espèces ; nous citerons *A. mackiei,* d'Écosse, et *A. elberfeldense,* d'Allemagne.

● *Pseudosporochnidées*

La sous-classe comprend le seul ordre des Pseudosporochnales, à affinités douteuses, avec la famille des *Pseudosporochnacées.* Chez les espèces fossiles, du Dévonien inférieur et moyen, l'aspect commence à être quelque peu arborescent, mais la hauteur ne dépasse pas 2 à 3 m. Les troncs de ces arbrisseaux étaient légèrement dilatés à la base et avaient une couronne de rameaux dichotomes au sommet. Les ramifications étaient aplaties, surtout les ultimes, ce qui pourrait correspondre à des appareils foliaires primitifs. Certaines ramifications paraissent avoir été différenciées en sporanges en forme de massue situés à l'extrémité des rameaux. Le *Pseudosporochnus kreicii* est connu du Dévonien de Bohême.

FILICOPSIDES

Cette classe est la plus vaste de toutes les classes de Ptéridophytes. Elle comprend les Fougères proprement dites (Ptéropsidées, *Pteropsida, Filices, Filicinae*), selon les différents auteurs, qui sont bien connues de tous par l'élégance et la variété de leurs formes, soit qu'on les trouve à l'état spontané dans nos forêts, en particulier en montagne, soit qu'on les utilise comme plantes ornementales. Les Fougères sont pourvues de racines, d'une tige et de feuilles (appelées aussi frondes) ; par l'aspect et le port, elles se rapprochent beaucoup des Spermatophytes. Elles peuvent être terrestres ou épiphytes. Les Fougères terrestres ont souvent un axe dressé ou rampant et de grandes frondes, souvent dimorphes, les fertiles étant contractées, ce qui facilite la dispersion des spores. Les Fougères arborescentes, souvent confinées dans les pays tropicaux, le long des rivières, présentent un véritable tronc pourvu de feuilles terminales. Les plus petites, les Hyménophyllacées, sont au contraire de texture mince. Les épiphytes peuvent vivre soit sur les troncs, dans de bonnes conditions d'humidité et d'ombre, souvent mélangées aux Bryophytes, soit sur les branches des plus grands arbres des forêts tropicales et doivent supporter la sécheresse et l'insolation auxquelles elles s'adaptent par des formes variées *(Asplenium nidus, Drynaria, Platycerium)* ou par leur texture épaisse, coriace *(Elaphoglossum, Cyclophorus).*

Les Fougères sont parfois lianiformes, certaines lianes étant enracinées dans la terre, semblables aux formes terrestres, d'autres, très spécialisées, grimpant sur les troncs de grands arbres, ont parfois deux sortes de feuilles, correspondant à des conditions de vie différentes ; quelques Fougères sont aquatiques, nageant librement, ou enracinées et développant dans l'eau la plus grande partie de leur appareil végétatif. Les *Acrostichum* sont caractéristiques de la mangrove des pays chauds ; ils supportent l'immersion par les marées, formant d'épais buissons. Les frondes des Fougères sont généralement bien développées, pourvues de nombreuses nervures, et d'un pétiole, se prolongeant en *rachis.* Elles peuvent atteindre des tailles exceptionnelles ; par exemple, chez les *Lygodium,* elles mesurent jusqu'à 10 m de longueur. Elles peuvent être entières, mais, le plus souvent, elles sont une ou plusieurs fois divisées, prenant les formes les plus diverses, palmées ou pennées, avec des divisions extrêmement variées.

Les frondes jeunes sont enroulées en crosse au sommet, elles ont une *préfoliaison circinée ;* mais il existe aussi des espèces à préfoliaison droite. Parfois, elles portent sur les faces du limbe, ainsi que sur les pétioles et les axes, de nombreuses petites écailles. Lorsque le limbe est divisé, la première division donne des *pennes,* qui peuvent, à leur tour, être partagées en segments (pinnules) divers. Pennes et segments — ou seulement les premières quand les seconds manquent — présentent des formes variées, sont rétrécis ou non à la base, ont des nervures, distinctes ou non, et diversement disposées. La chlorophylle est toujours présente dans l'épiderme des Filicopsides.

Les sporophylles sont soit entièrement semblables aux autres frondes, soit différentes ; dans le second cas, on peut parler de frondes transformées par leur rôle particulier de supports des appareils sporifères. Les sporanges contenant les spores sont généralement réunis en *sores,* mais restent parfois isolés. Quand ils sont situés sur des sporophylles identiques aux autres feuilles, ils se trouvent à la face inférieure, ou encore sur la marge des frondes. Les sores ont une forme arrondie ou réniforme, ou bien ovale, ou plus ou moins allongée, jusqu'à être linéaire ; ils peuvent être nus ou recouverts par une sorte de voile, qui est l'*indusie.* Dans certains cas, les sporanges sont fusionnés en *synanges.*

Les Filicopsides peuvent être eusporangiées (toutes les Filicopsides d'origine ancienne : Marattiales, Ophioglossales). Les sporanges sont alors massifs, à paroi formée de plusieurs rangées de cellules. Ils se développent simultanément dans un sore qui ne possède généralement pas d'indusie. Le nombre de spores est très élevé ; ces spores n'ont pas de périspore.

Les Osmondacées et les Schizæacées sont intermédiaires entre ce groupe et les Leptosporangiées. Chez les Leptosporangiées, qui comprennent la plupart des espèces actuelles, les sporanges (chacun d'entre eux dérivant d'une seule cellule) sont grêles, généralement pédicellés, et ne se développent pas tous en même temps. Le sore est, le plus souvent, mais pas toujours, recouvert d'une indusie. Le nombre des spores est peu élevé (généralement trente-deux, soixante-quatre) ; ces spores présentent ou non une périspore. Leur ornementation extrêmement variée (papilles, épines, pointes,

B. Barbey - Magnum

▲ *En forêt nuageuse (forêt tropicale de montagne), les épiphytes sont dans des conditions écologiques différentes selon qu'ils se développent à la base ou au sommet des arbres. Ici, Fougère épiphyte de la base du tronc.*

Bavestrelli, Bevilacqua, Prato

Bavestrelli, Bevilacqua, Prato

▲ *Disposition marginale des sores chez* Adiantum (capillus-Veneris).

▶ *Sores circulaires, munis d'une indusie, de* Cyrtomium falcatum.

verrues, côtes) sert à la détermination des espèces. Dans leur majorité, les Fougères actuelles sont isosporées, sauf les Marsiléacées et les Salviniacées.

Le gamétophyte, ou prothalle, des Filicopsides est petit, ayant au maximum un diamètre de 5 cm, mais, en général, il ne dépasse pas quelques millimètres; il est lobé, souvent cordiforme, et chlorophyllien (mais il en existe aussi de cylindriques, non chlorophylliens, associés à des mycorrhizes). A la face inférieure, les rhizoïdes dont il est pourvu le fixent au sol. Il est généralement délicat et meurt rapidement.

Provenant le plus souvent d'isospores, le prothalle porte à la face inférieure les anthéridies et les archégones lorsqu'il est en forme de lame; ceux-ci se trouvent en revanche sur les ramifications épaisses dans les prothalles massifs.

Chez les Fougères hétérosporées, les microspores donnent naissance à un petit prothalle mâle, et les mégaspores à un prothalle femelle plus développé. Dans certains cas, la formation du thalle est précédée d'un stade filamenteux du prothalle; celui-ci peut être ensuite pourvu de poils.

Les anthéridies et les archégones sont, selon les genres, plus ou moins enfoncés dans le prothalle, saillants chez les Leptosporangiées, plus ou moins enfouis chez les Eusporangiées. L'embryon des Leptosporangiées n'a pas de suspenseur; chez les Eusporangiées, il est endoscopique et présente parfois un suspenseur.

Les Filicopsides fossiles sont apparues au Dévonien moyen, et se sont diversifiées pendant l'Anthracolitique. Bien que certains types aient disparu à la fin du Paléozoïque, il subsiste encore de nombreuses espèces. Il est difficile de faire une évaluation quantitative puisque l'on en décrit tous les jours de nouvelles, rapportées surtout par les explorateurs des contrées tropicales ou intertropicales.

Les espèces de Filicopsides existant actuellement (environ douze mille) présentent une polyploïdie généralement accentuée. Elles sont communes dans tous les pays, mais prédominent dans les régions tropicales.

Les Fougères les plus primitives de ce groupe, ou Primofilicidées, datent du Dévonien moyen; il existait certains genres qui ont des représentants parmi les espèces actuelles. *Matonia pectinata,* par exemple, était déjà présent au Crétacé supérieur. Ajoutons que la grande majorité des groupes vivants a des représentants fossiles et qu'il existe peu de plantes dont le passé puisse être aussi longuement suivi. Certains groupes sont mieux illustrés dans le passé qu'actuellement, d'autres, comme les Polypodiacées, offrent au contraire une extraordinaire richesse d'espèces contemporaines.

Les formes ancestrales des Filicopsides sont peut-être les *Stauroptéridacées,* qui montrent des affinités nettes avec les Rhyniales, famille des Psilophytopsides.

Les Filicopsides, dans la classification que nous avons adoptée, comprennent sept sous-classes : *Primofilicidées, Ophioglossidées, Marattiidées, Osmondidées, Filicidées, Marsiléidées, Salviniidées,* et cinquante-cinq familles.

● Primofilicidées

Dans cette sous-classe, également connue sous le nom de Cœnoptéridées, Paléofilicinidées, etc., il existe de nombreuses formes de Fougères fossiles, pourvues de frondes souvent assez réduites. Certaines d'entre elles ont des structures très proches de celles des *Psilophytopsides,* et il n'y a pas de critère absolument déterminant pour les attribuer à l'une ou à l'autre de ces deux sous-classes. Généralement, ce sont des espèces du Paléozoïque, avec des sporanges situés à l'extrémité de feuilles divisées à leur partie distale. Ces sporanges libèrent les spores, soit par un pore qui se trouve à la partie terminale, soit par une fente longitudinale.

Les Primofilicidées comprennent cinq ordres : Iridoptéridales, Zygoptéridales, Bothrioptéridales, Anachoroptéridales et Stauroptéridales.

Iridoptéridales

Cet ordre est représenté par des formes assez primitives remontant au Dévonien, qui ont vécu cependant jusqu'au Carbonifère et même jusqu'au Permien. Les restes fossiles trouvés jusqu'à présent sont attribués à deux familles : les *Arachnoxylacées* avec le genre *Arachnoxylon,* du Dévonien moyen et supérieur, encore mal connu; les *Iridoptéridacées* avec le genre *Iridopteris,* qui date à peu près de la même époque que le précédent et est, comme lui, peu connu.

Bavestrelli, Bevilacqua, Prato

Keraudren - Aymonin

◀ *Sores allongés, sans indusie, de* **Phyllitis scolopendrium.**

▲ **Marsilea quadrifolia,** *Fougère aquatique, flottante, à quatre folioles.*

Zygoptéridales

Les espèces qui ont été réunies dans cet ordre ont des frondes insérées par deux sur la tige, et chaque ramification est située de manière à être perpendiculaire à la précédente. Cette organisation rappelle le port de nombreuses Fougères actuelles. L'ordre présente dans son ensemble des caractères assez primitifs. Les espèces qui lui appartiennent étaient en partie prostrées et rampantes. On peut le diviser en deux familles : les Clepsydropsidacées et les Zygoptéridacées.

Les *Clepsydropsidacées* sont des fossiles dont les plus anciens datent du Carbonifère moyen, mais qu'on trouve jusqu'au Permien inférieur; c'étaient des épiphytes à port de lianes; parmi les genres découverts jusqu'à présent, nous citerons les *Anchyropteris (A. gravi), Clepsidropsis,* et *Asterochloena (A. laxa).* Il n'est pas impossible que des fossiles inclus dans ces genres aient été des parties de plantes qui ont été considérées comme appartenant à des familles ou à des ordres proches.

Les espèces de la famille des *Zygoptéridacées* semblent être encore plus anciennes que celles de la famille précédente, car on en a trouvé dès le Carbonifère inférieur. Elles ne paraissent pas avoir possédé un véritable limbe foliaire. Parmi les genres que l'on attribue à cette famille, nous citerons : les *Zygopteris (Z. primaria)* et les *Metaclepsydropsis* qui possédaient des rhizomes dichotomes d'où s'élevaient des frondes ramifiées jusqu'au troisième degré, mais, là aussi, les limbes foliaires étaient probablement absents ou, tout au plus, ébauchés sur les dernières ramifications *(M. paradoxa). Diplolabis* (avec l'espèce *D. roemeri*) montre une morphologie semblable à celle du genre précédent, on n'y trouve pas non plus de trace de limbes foliaires. Les sporanges étaient réunis en sores, au nombre de trois à six. Enfin, le genre *Etapteris (E. lacattei)* présentait un système de ramifications assez complexe, mais les ramifications ultimes portaient un limbe.

Bothryoptéridales

Cet ordre est constitué par deux familles : les *Bothryoptéridacées* et les *Tubicaulidacées.* La première est représentée par l'unique genre *Bothryopteris,* avec environ une demi-douzaine d'espèces, dont nous ne citerons que *B. antiqua, B. forensis, B. globosa, B. hirsuta.* Ces Fougères étaient, au moins en partie, des épiphytes et des lianes, qui vécurent du Carbonifère au Permien. Leurs rhizomes étaient fixés aux troncs des arbres. Les feuilles étaient pluripennées ou simples, ou parfois réduites au seul rachis, muni de stomates. Les sporanges (avec des isospores) se trouvaient généralement par petits groupes, sur les dernières ramifications des rachis; il y avait cependant des différences assez notables entre les espèces : les Bothryoptéridacées pourraient représenter un terme de passage entre les Ptéridophytes à lycofeuilles et les autres.

La seconde famille, les *Tubicaulidacées,* comporte des représentants fossiles datant des mêmes ères géologiques que ceux de la famille précédente. On connaît actuellement le seul genre *Tubicaulis,* avec l'espèce *T. solenitis,* qui ressemble par son port aux Osmondacées.

Anachoroptéridales

L'ordre ne renferme qu'une seule famille, les *Anachoroptéridacées,* avec des espèces à feuilles pennées. On connaît mal la structure de leur tige. Ces Fougères vécurent au Carbonifère et aux époques immédiatement suivantes. Elles étaient, pour la plupart, des plantes épiphytes, chez lesquelles les feuilles pennées avaient des folioles planes portant des sporanges groupés en synanges vers l'extrémité des lobes. Les sporanges contenaient un grand nombre de spores et étaient réunis par quatre pour former les synanges, protégés par une sorte d'indusie. Les Anachoroptéridacées semblent donc représenter un type assez évolué chez les Primofilicidées. On connaît comme genres *Grammatopteris,* avec des espèces du Permien d'Allemagne, et *Anachoropteris,* également du Permien.

Stauroptéridales

L'ordre est constitué d'une seule famille qui comprend des Fougères archaïques remontant au Carbonifère, les *Stauroptéridacées.* Le seul genre *Stauropteris* est constitué par quelques espèces, à frondes assez petites, ou peut-être absentes, ou réduites au rachis, comme *S. americana. S. oldhamia* était de petite taille, avec des rhizomes très développés, pouvant vivre sur des

CLASSES	SOUS-CLASSES	ORDRES
Lycopsides	*Protolépidodendridées*	*Drépanophycales*
		Protolépidodendrales
	Lycopodiidées	*Lycopodiales*
	Sélaginellidées	*Sélaginellales*
	Lépidodendridées	*Lépidodendrales*
		Lépidocarpales
		Isoétales
		Miadesmiales
Sphénopsides	*Hyéniidées*	*Hyéniales*
	Pseudoborniidées	*Pseudoborniales*
	Sphénophyllidées	*Sphénophyllales*
	Equisétidées	*Equisétales*
Noeggérathiopsides	*Noeggérathiidées*	*Noeggérathiales*
		Plagiozamitales
	Tingiidées	*Tingiales*
Psilotopsides	*Psilotidées*	*Psilotales*
Psilophytopsides	*Rhyniidées*	*Rhyniales*
	Zostérophyllidées	*Zostérophyllales*
	Psilophytidées	*Psilophytales*
	Astéroxylidées	*Astéroxylales*
	Pseudosporochnidées	*Pseudosporochnales*
Filicopsides	*Primofilicidées*	*Iridoptéridales*
		Zygoptéridales
		Bothryoptéridales
		Anachoroptéridales
		Stauroptéridales
	Ophioglossidées	*Ophioglossales*
	Marattiidées	*Marattiales*
	Osmondidées	*Osmondales*
	Filicidées	*Schizaeales*
		Ptéridales
		Dicksoniales
		Davalliaes
		Hyménophyllales
		Loxsomales
		Gleichéniales
		Cyathéales
		Aspidiales
		Blechnales
		Matoniales
		Polypodiales
		Plagiogyriales
		Hyménophyllopsidales
	Marsiléidées	*Marsiléales*
	Salviniidées	*Salviniales*

sols très riches en humus. Les rameaux opposés étaient disposés par paires prenant une disposition en croix. Les ramifications secondaires montraient une organisation identique et les dernières ramifications, assez fines, portaient à leur cime des sporanges; ceux-ci, très petits, contenaient des isospores sphéroïdales. Les sporanges de *S. burntislandica* étaient allongés et hétérosporés, contenant quatre mégaspores. Selon certains auteurs, on se trouve ici en présence d'un genre chez lequel on assiste au passage du thalle à la fronde; selon d'autres, cet ordre est très proche des Psilophytopsidées.

● *Ophioglossidées*

Nous arrivons ici à une sous-classe qui comprend aussi des espèces actuelles. Son nom dérive des mots grecs ὄφις, serpent, et γλῶσσα, langue, par allusion à la forme des feuilles. Ce sont des espèces herbacées, parfois épiphytes, dont la plupart habitent les pays tempérés et chauds. Le rhizome des Ophioglossidées porte normalement quelques feuilles ou seulement une seule. Le limbe de celles-ci est constitué de deux parties : l'une, stérile *(trophophylle)* [soit divisée (palmée ou pennée), soit entière et simple], et l'autre, fertile *(sporophylle)* [ressemblant à un rameau, à son tour simple ou ramifié]. Cette dernière, en forme d'épi, porte les sporanges qui contiennent les spores (isospores) en nombre assez élevé. La déhiscence se fait par une fente transversale.

Les prothalles, hypogés, qui peuvent être pluriannuels, sont cylindriques ou ovoïdes ou encore plus ou moins aplatis, parfois ramifiés; ils sont dépourvus de chlorophylle, et leur nutrition se fait par symbiose avec une mycorrhize. Les gamétanges, c'est-à-dire les anthéridies et les archégones, se développent soit à la face supérieure seulement, soit sur les deux faces, et sont généralement situés dans les tissus du prothalle, surtout en ce qui concerne les anthéridies. Après la fécondation, il naît un embryon souterrain, qui, en certains cas, mène une vie hypogée pendant un certain temps. L'embryon est à suspenseur et endoscopique ou sans suspenseur et exoscopique. Les feuilles ont une préfoliaison droite. On observe une polyploïdie très accentuée, avec parfois un nombre de chromosomes $2\ n = 1\ 260$.

Bien que les représentants de la sous-classe semblent, par comparaison avec les autres Fougères actuelles, plus anciens, on a toutefois trouvé fort peu de fossiles appartenant aux Ophioglossidées; il semble qu'il s'agisse de formes assez primitives, du reste, mal connues. La sous-classe ne comprend qu'un ordre.

Ophioglossales

Cet ordre n'est constitué que par la seule famille des *Ophioglossacées*. Il peut être considéré comme une relique de la flore paléozoïque, le genre *Ophioglossites* étant connu à l'état de fossile. Les Ophioglossacées sont aujourd'hui isolées dans le monde. Les genres *Helminthostachys* et *Botrychium* sont généralement considérés comme les plus primitifs et le genre *Ophioglossum* comme le plus évolué (nervation réticulée).

Ce sont des plantes eusporangiées, le plus souvent terrestres, vivaces, à axes dressés ou rampants, à ramifications dichotomiques. L'axe ne porte généralement qu'une seule ou un petit nombre de frondes; les fertiles sont composées d'une partie fertile et d'une partie stérile. La partie stérile protégée au début par une gaine est variable suivant les genres, simple ou divisée, ou pennée, à nervation pennée ou en réseau. L'épi fertile, qui prend naissance du côté adaxial de la feuille, peut être simple, avec des sporanges marginaux, enfoncés, à paroi épaisse, sessiles, fusionnés latéralement, s'ouvrant par une fente transversale *(Ophioglossum)*, ou plus ou moins ramifié. Le nombre de spores est très élevé. Le prothalle est souterrain, saprophyte, à mycorrhizes, aplati *(Botrychium)* ou cylindrique. La multiplication asexuée par bourgeons sur les racines est très fréquente; de larges colonies peuvent ainsi prendre naissance.

Le genre *Botrychium* a un limbe 1-4 penné, rarement simple, à nervation dichotome, à épis fertiles composés; la fronde stérile est pennée ou plusieurs fois divisée. Il compte environ trente-cinq espèces, surtout des zones

arctiques et tempérées septentrionales. En Europe on dénombre sept espèces, cinq en France.

B. simplex, des lieux humides et tourbeux, a un limbe stérile, pétiolé, simple, trilobé ou tripenné. *B. lunaria* (lunaire), à limbe sessile, est penné, à pennes semi-circulaires ou arrondies. *B. matricariifolium,* des pâturages et des bois, est bipenné. Certains *Botrychium* sont ornementaux (*B. daucifolium* de l'Inde, *B. virginianum* d'Amérique du Nord).

Le genre *Ophioglossum,* qui présente une cinquantaine d'espèces, terrestres pour la plupart, possède une feuille à partie stérile simple, linéaire à ovale, à nervation réticulée. L'épi fertile est linéaire, à deux rangées de sporanges enfoncés et coalescents, marginaux. Les spores (jusqu'à quinze mille par sporange) sont tétraédriques. Trois espèces en Europe, deux en France : *O. lusitanicum* et *O. vulgatum.*

Beaucoup d'*Ophioglossum* peuvent être cultivés pour l'ornementation. Nous rappellerons *O. palmatum* d'Amérique tropicale (dont les frondes stériles sont lobées), *O. pendulum* d'Asie et d'Australie (à frondes pendantes, longues d'une quarantaine de centimètres, larges de 5 cm et d'un beau vert brillant), *O. crotalophoroides* (très petit, avec des frondes à lobes charnus) propre à l'Amérique du Nord, et *O. reticulatum,* des Moluques et de l'Amérique tropicale (avec des frondes à nervures en relief). Si l'on excepte l'usage alimentaire que font de ces plantes certaines populations indigènes, les *Ophioglossum* n'ont guère de propriétés ni d'emplois.

Le dernier genre de la famille, *Helminthostachys,* présente une unique espèce, *H. zeylanica,* propre à l'Indo-Malaisie et à l'Australie, dont les frondes sont divisées, palmées, subdigitées, et dont la partie fertile a un aspect spiciforme. C'est probablement le genre le plus ancien.

● *Marattiidées*

Cette sous-classe ne comporte qu'un seul ordre : les *Marattiales.* Ce sont des plantes terrestres à tige courte, massive, dressée, ou à rhizome horizontal. Les feuilles entourant la tige sont articulées au rhizome, élargies en stipule à la base du pétiole, généralement pennées et rarement palmées. Les sporanges, nés en même temps à la face inférieure des feuilles, forment des sores linéaires ou circulaires, ou groupés en synanges, sans indusie, s'ouvrant par une fente verticale, sans anneau ou à anneau rudimentaire. Le prothalle vert, aplati, peut persister plusieurs années; les organes reproducteurs sont enfoncés (les archégones existent seulement sur la face inférieure).

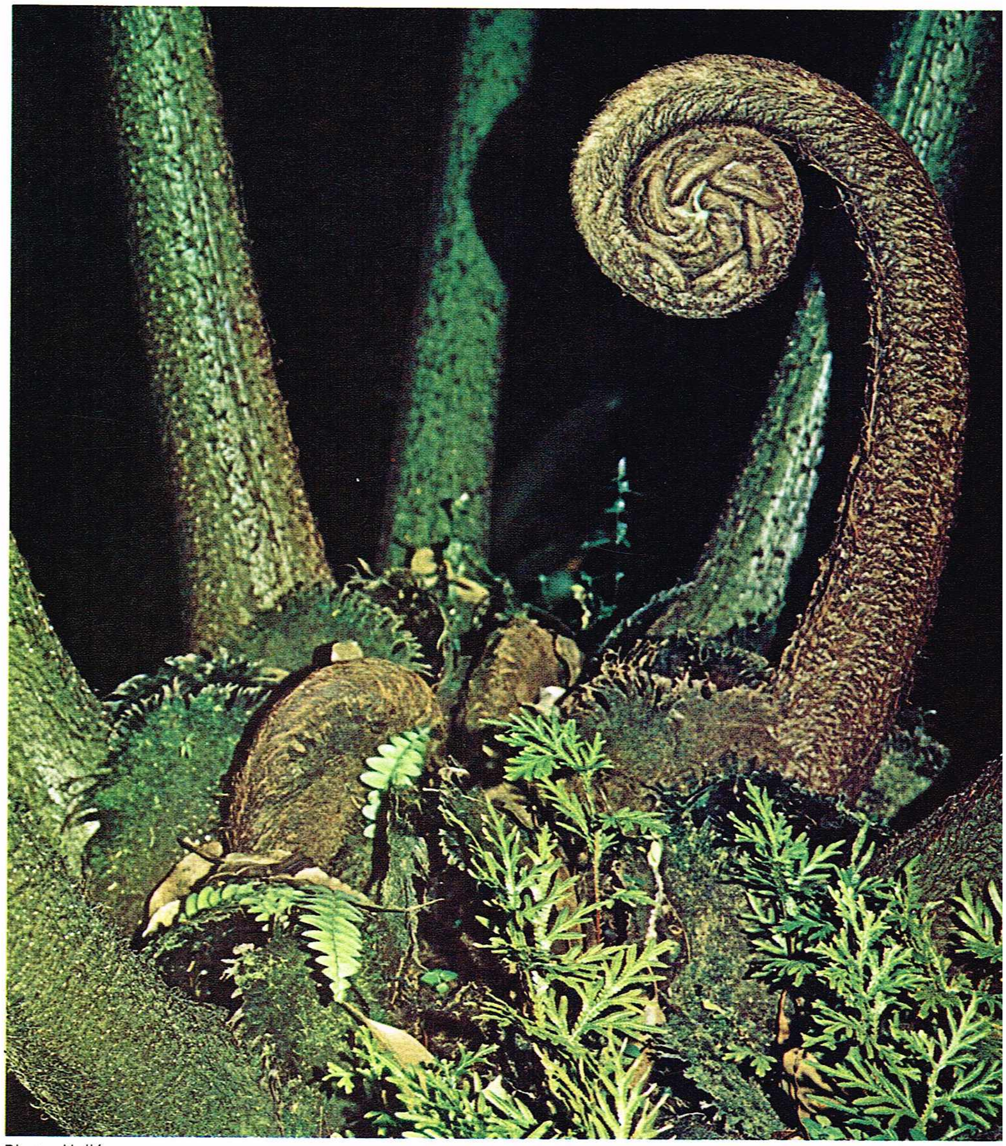

Photo Hallé

Keraudren - Aymonin

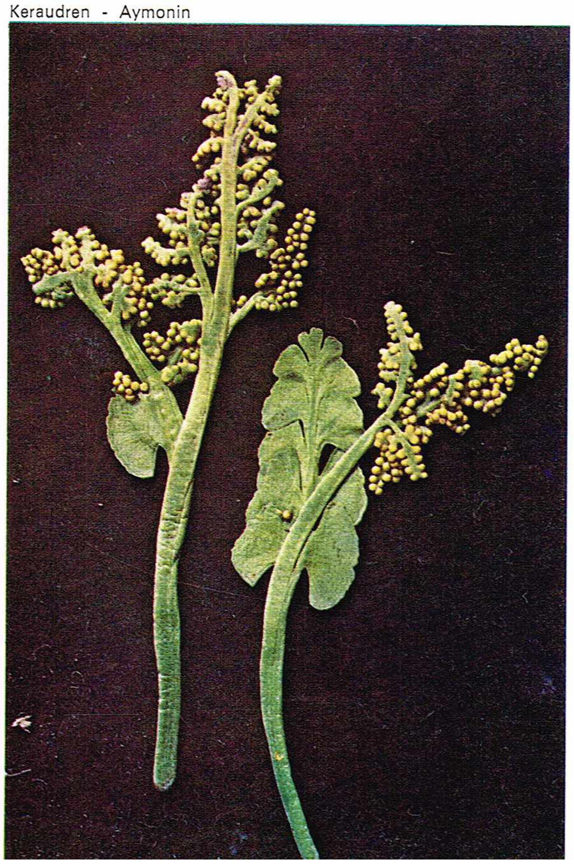

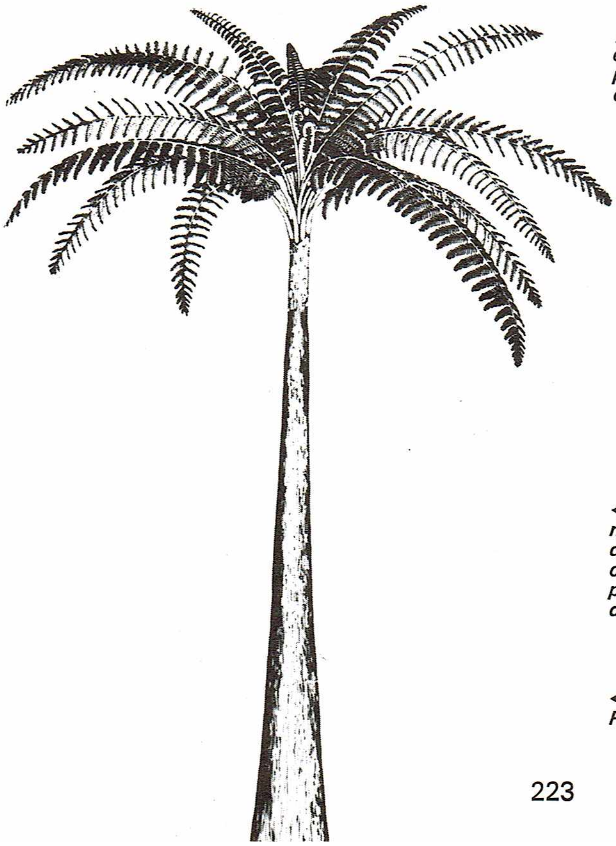

▲ *Jeune fronde, enroulée, et base du pétiole portant des écailles molles d'Angiopteris evecta.*

◀ Botrychium lunaria, *montrant les deux sortes de frondes. Espèce commune dans les pelouses montagnardes d'Europe (à gauche).*

◀ *Reconstitution d'une Psaroniacée (à droite).*

S. Prato

▲ ***Dans les régions tropicales humides, la végétation est particulièrement exubérante. Les Fougères sont très développées, et souvent arborescentes.***

Le groupe est connu depuis le Carbonifère inférieur mais les espèces fossiles sont encore mal déterminées car leurs restes sont morcelés. Le genre *Asterotheca (A. esnostensis)* date du Carbonifère. Au Permien, on trouve d'autres espèces comme *A. arborescens,* pour arriver enfin aux Marattiacées proprement dites du Mésozoïque, lesquelles se rapprochent beaucoup des espèces de la flore actuelle.

Dans la classification que nous avons adoptée, l'ordre comprend cinq familles, à savoir : les Psaroniacées, Angioptéridacées, Marattiacées, Danaéacées et Kaulfussiacées. Les espèces vivant actuellement sont comprises dans les quatre dernières familles, la première étant constituée par des plantes fossiles.

Les *Psaroniacées* sont des Fougères arborescentes, qui vécurent surtout au Carbonifère, mais aussi au Permien, en Europe, en Amérique et dans d'autres régions du monde. Leur tronc, en forme de cône allongé, haut d'environ 10 m, entouré comme les palmiers d'un manchon de pétioles, possédait une grande touffe de feuilles pennées en dessous desquelles persistaient sur l'axe les cicatrices de celles qui étaient tombées précédemment. Leur partie basale était renforcée par un revêtement de racines adventives, favorisant l'aération si — comme cela est probable — ces Végétaux croissaient dans les marais. Parmi les espèces les mieux connues, nous citerons *Psaronius blickei* et *P. brasiliensis* du Permo-Carbonifère. Il existe aussi des *Psaronius* fossiles en France, dans le bassin de la Loire.

Les *Angioptéridacées* sont constituées par les genres *Angiopteris* qui comprend plus de cent espèces, *Archangiopteris* et *Macroglossum*. Les sporanges sont séparés, contigus, en deux rangées, entourés d'écailles (fausse indusie) et situés à la face inférieure des frondes ; celles-ci sont très grandes, pennées ou bipennées, stipulées. Environ cent espèces connues, de Madagascar à travers l'Asie tropicale jusqu'au Japon et à la Polynésie.

Angiopteris evecta peut être cultivé en serre tempérée chaude. Ses belles feuilles sont bipennées, d'un vert vif, atteignant 3 m de longueur. D'autres espèces voisines sont aussi ornementales : *A. annamensis* et *A. cochinchinensis*. Quant à *A. pruinosa,* de Java, il présente la particularité d'abaisser ses frondes au moment où il va pleuvoir.

Les *Marattiacées* comprennent le genre *Marattia*. Les sores sont fusionnés en synanges situés près de la marge, linéaires ou ovales. Les quelque soixante espèces sont caractérisées par une tige dressée, courte, qui se réduit parfois à sa base renflée. Les frondes, diversement divisées, de pennées à tripennées, forment une large touffe. Les feuilles sont caduques, alors que les stipules sont persistantes. Les Marattiacées habitent les tropiques des deux hémisphères ; elles préfèrent les marécages. On cultive *M. fraxinea,* espèce indigène d'Australie, d'Afrique et d'Asie, dont les feuilles vertes et brillantes atteignent 2 à 5 m de longueur. Parmi les autres espèces, nous citerons encore *M. cicutifolia* du Brésil, à frondes plus petites, vert foncé, longues de 1 à 2 m, ainsi que *M. laxa* du Mexique, à frondes très longues, vert foncé, avec des folioles profondément dentelées ; enfin *M. alata,* propre à l'Amérique tropicale, a des frondes longues de plus de 1 m et tripinnatifides.

La famille des *Danaéacées* comprend le genre *Danaea* auquel sont attribuées une trentaine d'espèces, communes en Amérique tropicale. Les sporanges sont réunis en sores linéaires, qui peuvent arriver à couvrir toute la face inférieure des frondes fertiles ; les frondes sont subdimorphes, simplement pennées, parfois entières, un peu charnues, alors que les rhizomes, obliques ou horizontaux, ont une consistance ligneuse. Ce sont des plantes qui préfèrent les milieux très humides, chauds, ombragés. Leurs exigences écologiques en rendent difficile la culture bien que leur aspect soit très ornemental. On peut citer, par exemple, *D. alata,* à frondes longues de 50 cm environ, et à segments arrondis à la base, ainsi que *D. nodosa,* à feuilles stériles longues de plus de 1 mètre.

Chez les *Kaulfussiacées,* le genre *Kaulfussia* (= *Christensenia*) s'étend de Java en Assam et à Luzon. On a décrit cinq espèces, qui ne sont peut-être que des variétés de la même ; les synanges sont circulaires, distribués sur toute la face inférieure des frondes fertiles. L'espèce principale, *K. aesculifolia* (= *Christensenia aesculifolia*), a des feuilles palmées, à nervures réticulées.

• *Osmondidées*

Les représentants de cette sous-classe (qui comprend un seul ordre), appelés aussi Protoleptosporangiées, ont une position intermédiaire unique entre les Leptosporangiées et les Eusporangiées.

Des sporanges ressemblant à ceux des Osmondacées actuelles ont été décrits qui dateraient du Carbonifère supérieur et du Permien supérieur. En tout cas, des fossiles attribués aux genres *Osmunda* et *Todea* remontent au Jurassique et sont abondants au Mésozoïque, sauf au Trias. Des douzaines de genres ont été reconnus à l'état fossile. Trois survivent seulement, formant l'ordre des *Osmondales*.

Cet ordre ne comprend que la famille des *Osmondacées*. Ce sont des Fougères terrestres à rhizome massif, dressé, couvert d'un manchon formé par les bases persistantes des pétioles. Les frondes uniformes à dimorphes sont diversement pennées, avec des expansions stipulaires à la base. Les sporanges sont soit marginaux sur des feuilles fertiles réduites, soit à la face inférieure du limbe fertile, lorsqu'il n'est pas réduit, isolés ou groupés, mais sans indusie et ne formant pas de sores nets. Ces sporanges, à une seule rangée de cellules, sont globuleux ou piriformes, très courtement pédonculés, massifs, sans anneau caractérisé; ils se développent tous en même temps et fournissent un assez grand nombre de spores.

Le gamétophyte (ou prothalle) des Osmondacées est pérennant, grand, généralement cordiforme (mais aussi lobé, aplati) et de consistance charnue, épaissi au centre en une sorte de « nervure » sur les deux côtés de laquelle se trouvent les archégones; les anthéridies sont placées sur les bords, et les anthérozoïdes — qui sont nombreux, étant donné que chaque anthéridie en contient une centaine et même plus — sont spiralés et possèdent de nombreux cils.

Les espèces actuelles qui appartiennent à la famille sont groupées en trois genres, à savoir : *Osmunda, Todea* et *Leptopteris*. L'unique espèce qui vit dans nos régions est l'osmonde royale *(Osmunda regalis)*. Le beau port de cette plante et ses dimensions justifient aussi bien son nom générique que son nom spécifique : *Osmunda* rappelle une divinité scandinave; une autre étymologie semble plus improbable, faisant dériver le nom des mots latins *os*, bouche, et *mundare*, purifier, du fait que cette plante servait dans les affections buccales (elle apparaît dans la médecine par les simples dès 1500). Les frondes sont majestueuses, bipennées, normalement hautes de 1 m à 1,50 m, et peuvent même atteindre 1,80 m et plus. Ces frondes, partant d'un gros rhizome, sont glabres et subcoriaces; elles sont supportées par un robuste pétiole et sont pennées, à segments à peu près opposés, entiers ou finement dentelés et plus ou moins obtus. Les frondes fertiles, les plus internes de la touffe, portent à leur sommet des segments pratiquement réduits au seul rachis, complètement couverts par les sores sur toute leur surface. Les parties fertiles ont l'aspect d'une sorte d'inflorescence terminale.

Espèce des bois marécageux, des terrains tourbeux et humides, c'est l'unique représentant de cette classe vivant en Europe. Il en existe plusieurs sous-espèces, reconnaissables soit aux segments plus étroits, soit à la réduction exceptionnelle de leurs dimensions.

Le genre *Osmunda* comprend une douzaine d'espèces répandues dans les régions tempérées et tropicales. Nous citerons notamment *O. cinnamomea* d'Amérique boréale et d'Asie, que les Amérindiens font cuire et mangent, et *O. claytoniana*, d'Asie du Sud-Est et d'Amérique du Nord; ces deux espèces sont cultivées et sont assez rustiques. Par contre, *O. javanica*, des îles de la Sonde, doit être cultivé en serre froide.

O. regalis était autrefois utilisé comme diurétique et astringent, mais son emploi est abandonné. Son rhizome sert parfois de substratum pour la culture des orchidées.

Les autres genres comprennent peu d'espèces. Les *Todea* vivent en Afrique du Sud, en Nouvelle-Zélande

▼ La « fougère-aigle » forme souvent d'immenses peuplements denses occupant les défriches forestières, les landes, les pâtures abandonnées, généralement sur sol siliceux.

R. Auvin - Top Réalités

M. Keraudren - Aymonin

▲ *L'osmonde royale est un des éléments des aulnaies où elle peut atteindre plus de 2 m. Les frondes sont portées au sommet d'un rhizome dressé, massif, formant une sorte de tronc.*

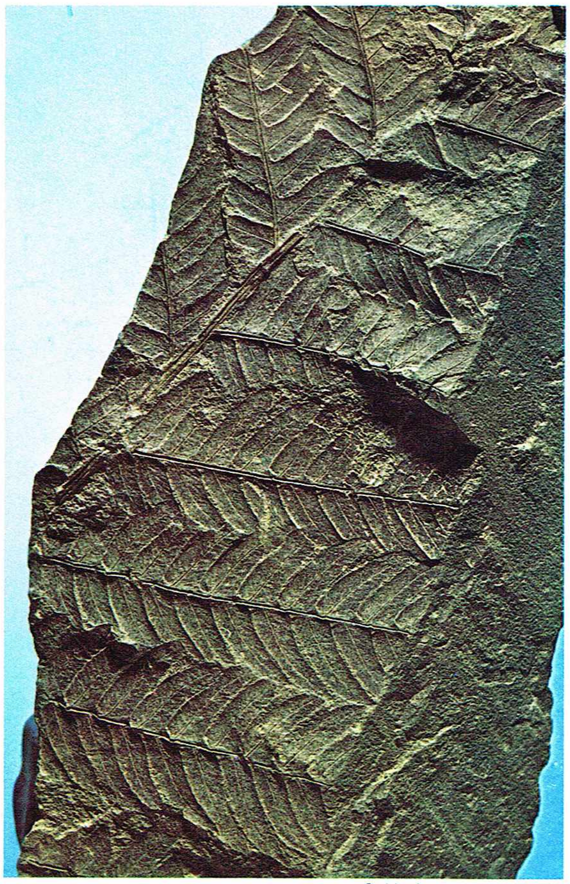

C. Vacheret - Marguerier

▶ **Cladophlebis**, *genre fossile, représenté au Jurassique par des empreintes de feuilles, appartenant probablement aux Osmondacées.*

et en Australie. L'une des espèces, *T. barbara*, qui est cultivée, a de grandes frondes atteignant 1,50 m de longueur et larges de 30 cm.

Le genre *Leptopteris* comprend une demi-douzaine d'espèces d'Australie, de Nouvelle-Zélande et de Mélanésie. *L. hymenophylloides*, de Nouvelle-Zélande, qui possède des feuilles triangulaires, d'un beau vert, longues de 0,50 m, ainsi que *L. superba*, également de Nouvelle-Zélande, avec des frondes tripennées mesurant jusqu'à 1,20 m et portées par une tige haute d'environ 40 cm, sont cultivés. Les sporanges sont portés par des frondes non différenciées.

Les genres fossiles des Osmondacées sont mal connus. *Thamnopteris* appartient au Permien. *Dactylotheca*, avec l'espèce *D. plumosa*, avait des sporanges isolés, réunis selon une disposition digitée sur la face inférieure des segments foliaires; il date du Carbonifère et du Permien. Après une lacune triasique, les fossiles attribués au genre *Todites* remonteraient au Jurassique : *T. williamsoni* provient du Jurassique de Sardaigne. Les espèces du genre *Cladophlebis* ont été trouvées jusque dans des gisements du Tertiaire. *C. denticulata* est désormais attribué aux *Todites*. Le genre *Osmunda* a des origines très anciennes, et, étant arrivé jusqu'à nous, il témoigne de ce que le groupe des Osmondidées a conservé ses caractères généraux pendant une très longue période, jusqu'à maintenant. Rappelant ce que nous avons dit plus haut, et en particulier au sujet de la position intermédiaire entre les Leptosporangiées et les Eusporangiées, on peut affirmer que cette sous-classe a, dans les Fougères, une situation particulière, faute d'affinités étroites avec les autres groupes.

• *Filicidées*

Nous en arrivons, avec cette sous-classe, aux Fougères proprement dites, les plus facilement reconnaissables par le profane.

Ce sont des plantes vivaces, rarement annuelles, à axes dressés ou rampants plus ou moins souterrains. Chez les Fougères arborescentes, il existe un véritable tronc. La croissance peut être indéfinie chez certaines espèces qui s'enroulent sur leur support à la façon des lianes. Les frondes, toujours dépourvues de stipules, sont bien développées en pétiole et limbe dans la plupart des cas; elles sont divisées et même subdivisées, et soit pennées, soit palmées, mais rarement entières. Leur nervation est intéressante à plus d'un titre. Les feuilles, toujours enroulées en crosse dans le bourgeon, possèdent des appendices (poils, écailles) qui donnent de bons caractères spécifiques. Certaines feuilles peuvent être adaptées à un certain rôle physiologique et prendre un aspect différent des autres (frondes collectrices d'humus des *Drynaria* ou *Platycerium*). Les espèces arborescentes, toutes tropicales, ont des racines adventives qui les fixent au sol.

Les axes des Filicidées n'ont pas de croissance secondaire ou diamétrale; ils présentent une grande variété dans l'émission des faisceaux se rendant aux frondes. Les éléments conducteurs de la tige forment le cylindre central ou stèle. Ils sont compacts et distincts, soit en anneau, soit en cordon. Il y a de plus, parfois, une vascularisation à l'intérieur de la vascularisation normale.

Les sporanges, qui proviennent d'une seule cellule de l'épiderme, et qui sont donc de type leptosporangié, sont isolés ou réunis en sores de forme variée, fixés soit sur les bords de la fronde, à l'extrémité des nervures, soit le long de ces dernières, à la face inférieure du limbe. Les frondes portant les sporanges peuvent être identiques aux autres — ou bien peuvent en différer.

Le sporange des Filicidées a généralement une forme de massue, avec un pédicelle et une partie renflée contenant les spores; son ouverture se fait grâce à la présence de cellules inégalement épaissies en U, présentant généralement une disposition annulaire. Leur face externe, restée mince, se déprime sous l'influence de la dessiccation et fait éclater le sporange. Les spores naissent par division de leurs cellules mères et, à la première division, le nombre des chromosomes est réduit de moitié.

Le gamétophyte est généralement aplati et cordiforme; le prothalle filamenteux est rare. Sa taille maximale est de quelques centimètres; il est coloré en vert par suite de la présence de chlorophylle; la vie du prothalle est

Photo Hallé

M. Bailleau - Jacana

◀▲ *Les* **Platycerium** *sont des épiphytes qui possèdent deux sortes de frondes : les unes, assimilatrices d'humus, sont papyracées, le plus souvent brunes, en bouclier et appliquées sur le tronc ; les autres, chlorophylliennes, fertiles, sont dressées ou pendantes, divisées dichotomiquement.*

généralement brève, ce dernier est rarement unisexué. A la face inférieure des prothalles foliacés, à l'abri de la lumière, on trouve les organes sexuels et les rhizoïdes.

Les anthéridies sont plus ou moins saillantes, et les anthérozoïdes sont pourvus d'une dizaine de flagelles. Les archégones se trouvent sur la partie la plus épaisse du prothalle, à demi enfoncés, et à col en saillie. L'embryon forme un pied, organe transitoire, qui sert à la nutrition de la jeune plantule, puis apparaissent les ébauches de la tige, des feuilles et de la racine proprement dite. Il y a, chez certaines espèces de Fougères, *apogamie,* c'est-à-dire qu'une nouvelle plantule naît directement à partir du tissu prothallien, sans l'intervention des organes sexuels; il peut arriver également que le prothalle naisse directement de la feuille, sans formation préalable de spores, c'est-à-dire par *aposporie*. Il existe aussi quelquefois une production de bourgeons *adventifs*.

L'énorme bloc des Filicidées a été diversement scindé par les ptéridologues actuels. Christensen, Copeland, Ching, Holttum et, plus récemment, Pichi-Sermolli ont imposé des limites différentes aux familles dont la description même est parfois difficile. Dans la classification proposée par Pichi-Sermolli, que nous avons suivie ici depuis le début bien qu'elle ne corresponde pas toujours à nos conceptions, cette sous-classe est divisée en quatorze ordres : Schizaeales, Ptéridales, Dicksoniales, Davalliales, Hyménophyllales, Gleichéniales, Cyathéales, Loxsomales, Aspidiales, Blechnales, Matoniales, Polypodiales, Plagiogyriales, Hyménophyllopsidales. On compte environ quatre-vingt-quinze familles.

Schizaeales

Cet ordre date, par ses représentants fossiles, du Carbonifère inférieur. Il s'agit de Fougères terrestres à rhizome rampant ou ascendant, à frondes souvent volubiles. Les sporanges, sans indusie, sont généralement isolés, sessiles ou presque, et ont un anneau apical et une déhiscence verticale. Ils sont localisés parfois sur des pennes spécialisées. On dénombre cinq familles, qui, à l'exception des Schizaeacées, ne sont représentées que par des espèces fossiles.

Les *Senftenbergiacées* sont constituées par les genres *Senftenbergia,* avec plusieurs espèces *(S. ophiodermatica, S. plumosa* et *S. sturi)* d'assez grande taille. Cette famille existait dès le Carbonifère et le Permien. On peut suivre chez ces espèces le développement de l'anneau sporangial qui, mal différencié chez *S. sturi,* est mieux conformé chez *S. ophiodermatica* et chez *S. plumosa*.

Chez les *Klukiacées,* nous citerons le genre *Klukia* (avec l'espèce *K. exilis* du Jurassique) dont les affinités sont évidentes avec la famille précédente. Les sporanges possèdent un anneau assez net.

Les *Tempskyacées* et *Acrostichoptéridacées*, de peu d'importance, comprennent seulement des espèces fossiles, que l'on peut considérer comme un terme de passage vers la famille suivante.

Les *Schizaeacées* renferment actuellement environ cent soixante espèces et quatre genres : *Schizaea, Lygodium, Anemia, Mohria,* des régions intertropicales et tropicales. Elles présentent un développement simultané des sporanges, qui contiennent des spores en nombre assez élevé, et qui sont protégés par la marge foliaire.

Le genre *Schizaea* comprend une trentaine d'espèces, chez lesquelles le prothalle est filamenteux, ramifié, alors que les feuilles rappellent celles des joncs et des Graminées. A la partie apicale des frondes sont situés les sporanges sur deux ou quatre rangées. Leurs exigences écologiques ne sont pas toutes uniformes, et certaines espèces vivent en milieu sec. Plusieurs formes sont cultivées comme plantes ornementales, dont nous citerons : *S. pusilla,* originaire d'Amérique du Nord, qui possède des frondes fertiles, minces, effilées, et longues d'environ 10 cm, alors que les frondes stériles sont plus courtes et contournées ; *S. bifida* qui a des feuilles très raides, junciformes, simples ou fourchues ; *S. dichotoma*

Photo Hallé

▲ *Les* Schizaea, *Fougères terrestres et xérophiles, habitent surtout l'hémisphère* Sud. *Leur répartition actuelle, à aires très espacées, indique une grande ancienneté. Les frondes sont généralement digitées.*

des Indes occidentales, dont les feuilles sont en forme d'éventail et ont un diamètre d'environ 15 à 20 cm. La répartition géographique des *Schizaea* est très curieuse car ils présentent actuellement des aires très isolées qui dénotent une origine antarctique ancienne.

Les sporanges des *Lygodium*, pourvus d'un court pédicelle, sont bisériés, et sont protégés par un repli de la marge foliaire; ils forment des épis terminaux. Les *Lygodium* ont un port de lianes dû à une croissance continue de la tige, pouvant atteindre 30 m de longueur et formant des buissons. Les organes fructifères se trouvent soit sur des frondes normales, soit sur des pennes spécialisées. On en connaît une quarantaine d'espèces, dont nous citerons : *L. japonicum,* habitant le Japon, la Chine, l'Australie tropicale — dont les feuilles sont lobées, longues et larges de 15 à 20 cm; *L. circinatum,* d'Asie tropicale — dont les frondes sont dichotomes et d'une belle couleur vert brillant; enfin *L. flexuosum,* de Chine, de la Malaisie et des Philippines — dont les feuilles sont pennatifides et ont des lobes auriculés. Toutes ces espèces peuvent être cultivées. Dans certaines régions tropicales, les *Lygodium* sont si nombreux qu'ils peuvent nuire aux cultures; l'entrelacs de leur végétation, favorisé par la longueur des feuilles, rend difficile leur arrachage. Les indigènes fabriquent parfois des chapeaux, des paniers, etc., avec les *Lygodium*.

Le genre *Anemia* contient environ une centaine d'espèces répandues en Asie, en Afrique et en Amérique tropicale. Leurs frondes ont généralement les pennes inférieures fertiles, presque sans parenchyme. La fronde est rarement complètement dimorphe. Parmi les nombreuses espèces pouvant être cultivées pour leur port décoratif, nous citerons : *A. rotundifolia,* du Brésil — dont les frondes ont des lobes arrondis; *A. mandioccana,* également du Brésil — avec des frondes stériles oblongues et pennées, et des frondes fertiles semblables à des épis; *A. tomentosa,* des zones tropicales d'Amérique du Sud — dont les frondes sont pubescentes et coriaces; enfin *A. phyllitidis,* également d'Amérique du Sud tropicale — à frondes stériles imparipennées, avec des segments vert foncé et vert clair dessous, les frondes fertiles étant dressées et velues.

Le genre *Mohria* est caractérisé par le fait que son rhizome et ses frondes sont couverts d'écailles. Ses frondes ne sont pas dimorphes. Les *Mohria* vivent en Afrique du Sud et occidentale et à Madagascar. Nous citerons : *M. caffrorum,* qui a des frondes d'environ 50 cm, larges de 5 à 10 cm, tripennées, à lobes à leur tour profondément divisés. Les indigènes utilisent certaines espèces du genre *Mohria* dans le traitement des brûlures.

On connaît différents fossiles du genre *Anemia,* par exemple *A. fremonti* du Crétacé. Leur port n'était guère différent de celui des espèces d'aujourd'hui.

Ptéridales

Cet ordre rassemble environ mille espèces, distribuées dans toutes les parties du monde, mais surtout dans les régions tropicales et subtropicales. Les Ptéridales ont des rhizomes pourvus de poils dans les genres primitifs, ou recouverts d'écailles. Les frondes, non articulées, sont rarement simples, généralement plusieurs fois pennées; les sores souvent fusionnés, marginaux, allongés, sont protégés par une indusie s'ouvrant vers la marge, ou par la marge réfléchie. Les sporanges peuvent recouvrir la face inférieure du limbe ou être plus ou moins distincts.

La division de cet ordre en familles varie beaucoup suivant les auteurs; dans la classification adoptée ici, il comprend huit familles : Ptéridacées, Négriptéridacées, Sinoptéridacées, Cryptogrammacées, Parkériacées, Gymnogrammacées, Adiantacées et Vittariacées.

Ptéridacées : cette famille est très riche en espèces et comprend deux cent quatre-vingts représentants du genre *Pteris.* Celui-ci est cosmopolite, mais répandu surtout sous les tropiques.

Les frondes des *Pteris* sont plus ou moins pennées, les rhizomes parfois pourvus de poils, ou écailleux; les nervures sont libres ou forment des aréoles. Sores continus le long de la marge réfléchie, scarieuse. Le port des différentes espèces est très varié.

Les espèces naturalisées en France sont au nombre de deux, *Pteris cretica* et *Pteris vittata;* la première a des feuilles ovales, avec au plus sept paires de folioles, les inférieures étant pour la plupart bipartites ou tripartites, longues de 10 à 20 cm; la seconde de ces espèces, originaire de Chine, a, par contre, dix (ou plus) paires

Page ci-contre, en bas, à gauche : ▶ Parkeria, *d'après* Hooker *et* Greville. *Le nom actuel est* Ceratopteris, *genre isolé de Fougères aquatiques à frondes dimorphes, les stériles flottantes, les fertiles dressées, réduites et à sporanges solitaires sur les nervures.*

Photo Hallé

◄ *Les* **Lygodium** *forment des fourrés dans la végétation secondaire. Les sporanges prennent naissance seulement dans les parties exposées au soleil. Environ quarante espèces, des régions tropicales et subtropicales.*

▼ **Schizaea trilateralis,** *d'après Hooker et Greville (il s'agit de* **S. pennula,** *plante d'Amérique tropicale).*

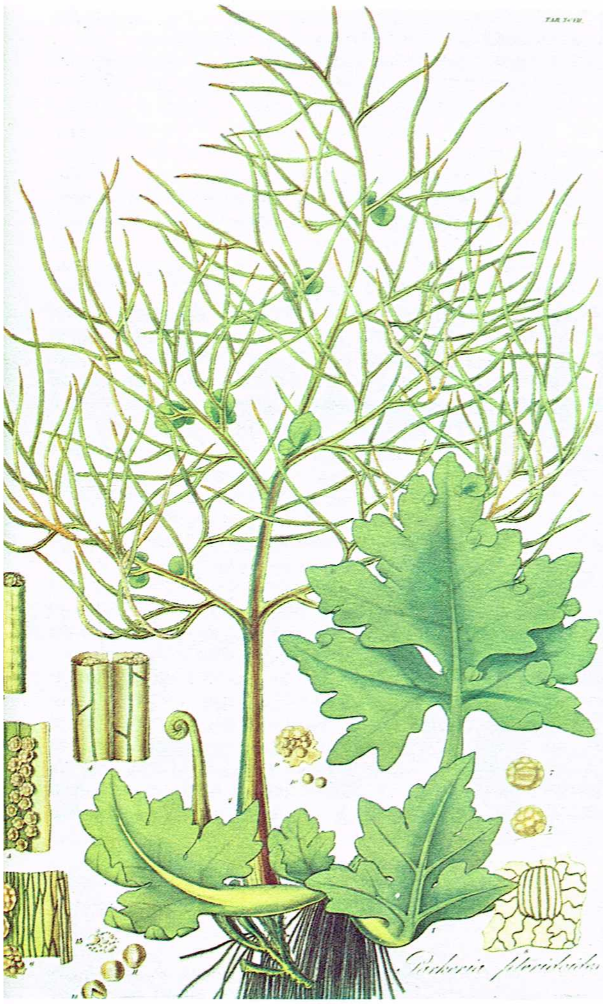

Droits réservés

de pennes (rarement moins), toutes simples; le limbe est lancéolé, aucun n'est bifide.

Pteris cretica est presque pantropical; c'est une des Fougères les plus fréquemment cultivées; il existe une forme possédant une ligne blanche le long des nervures.

P. multifida (qui rappelle beaucoup *P. cretica*) est souvent cultivé comme plante ornementale; il est parfois subspontané (surtout sur les murs des jardins botaniques). Outre les espèces ci-dessus, on a introduit comme plantes ornementales de nombreuses autres espèces de *Pteris,* parmi lesquelles *P. argyracea,* originaire des Indes orientales et caractérisé par une bande blanc argenté sur chaque segment des frondes, et *P. tremula,* d'Australie et de Nouvelle-Zélande, à feuilles longues de plus de 1 m, divisées trois ou quatre fois et d'un beau vert brillant.

La famille des *Négriptéridacées* comprend peu d'espèces, deux pour le genre *Negripteris : N. schioana,* d'Éthiopie, et une autre espèce du Tibesti. Ce sont des plantes à gros sporanges à peu près sessiles, réunis en sores protégés par le bord du limbe foliaire qui fait fonction d'indusie.

Dans la famille des *Sinoptéridacées,* nous citerons en premier lieu le genre *Notholaena,* maintenant réuni aux *Cheilanthes,* caractérisé par ses sporanges nus, disposés le long du bord des feuilles, de manière continue ou discontinue, et recouverts par la marge elle-même plus ou moins repliée; ces sporanges sont à peu près cachés entre les appendices squamopileux qui couvrent la face inférieure de la feuille.

Il existe environ soixante-dix espèces, xérophiles, à aire disjointe (région méditerranéenne, Afrique du Sud, Amérique). En France, on trouve deux espèces, *N. vellea (Cheilanthes catanensis)* et *N. marantae (Cheilanthes marantae).* Leurs folioles sont planes; chez *N. vellea, la* face supérieure du limbe est couverte d'écailles filiformes, chez *N. marantae* elle est glabre.

Certaines espèces exotiques ont été introduites à titre de plantes ornementales. Tels sont *N. distans,* d'Australie, à frondes longues de 15 à 20 cm, bipennées, avec des folioles à segments oblongs dont la face inférieure est écailleuse. *N. sulphurea,* originaire de Californie et du Chili, qui possède des frondes larges et longues de 5 à 8 cm, pennées, avec des segments en partie simples

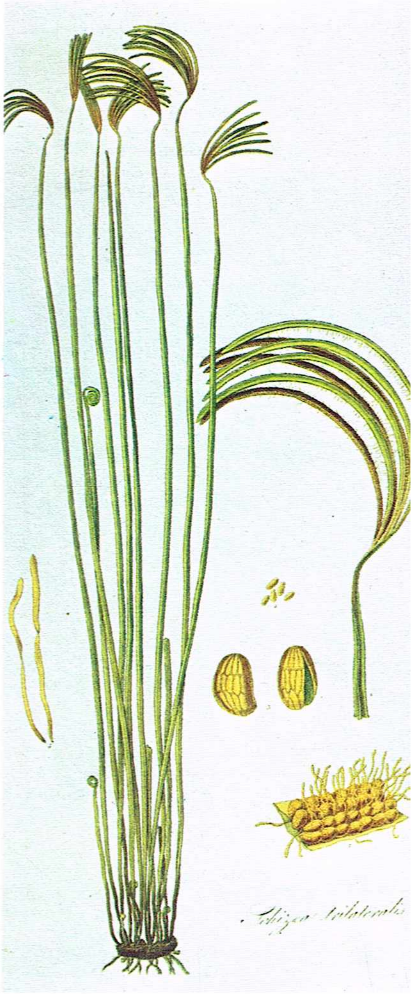

Droits réservés

M. Keraudren - Aymonin

▲ **Cheilanthes fragrans** *et* **Cheilanthes catanensis.** *Les* **Cheilanthes** *habitent les biotopes chauds et secs. Ils comptent parmi les plus xérophiles des Ptéridophytes. Ici, dans un site exceptionnel du bassin méditerranéen, les deux espèces habitent ensemble.* (**C. fragrans** *à petites frondes, à droite et à gauche,* **C. catanensis** *au centre, à petites frondes velues.*)

et en partie divisés, à face inférieure recouverte d'une sorte de poussière blanche ou jaune. *N. trichomanoides,* originaire des Indes occidentales et du Mexique, a des frondes longues de 15 à 30 cm, larges de 2 à 4 cm, pennées, vert foncé dessus, blanches dessous, et avec des poils laineux et ferrugineux.

Le genre *Cheilanthes* au sens strict comprend environ cent cinquante espèces xérophiles cosmopolites mais répandues spécialement en Afrique australe et en Amérique tropicale. Une espèce en France, *C. fragrans.* Les sores sont protégés par le bord du limbe; la face inférieure de celui-ci est glabre et dégage une odeur de coumarine. Il pousse sur les rochers siliceux secs du Midi, dans le sud de l'Europe, en Afrique du Nord et en Asie occidentale.

Plusieurs espèces, généralement caractérisées par des folioles arrondies, peuvent être cultivées pour l'ornementation. Ainsi, *C. hirta,* originaire des endroits secs d'Afrique australe, a des frondes assez larges, vert brillant dessus et brunâtres dessous; *C. farinosa,* de Chine, du Japon et de l'Amérique tropicale, est l'une des plus élégantes avec ses folioles délicatement pruineuses à la face inférieure. Ces deux espèces sont xérophiles.

Le genre *Pellaea* est répandu dans les pays tropicaux, avec environ quatre-vingts espèces, la plupart d'Afrique du Sud et d'Amérique du Sud. Il comprend des Fougères à rachis généralement de couleur foncée, brillant, à fronde pennée, coriace, à sores formant une ligne continue au bord des feuilles, qui les recouvre. En général, ce sont des plantes de faible taille, qui sont facilement cultivables en serre, y servant à cacher les rochers. Parmi celles qui se prêtent le mieux à cet usage ornemental, nous citerons : *P. atropurpurea,* d'Amérique du Nord, qui possède des feuilles longues de 20 à 30 cm et des pétioles à duvet brun; *P. rotundifolia,* originaire de Nouvelle-Zélande, avec des frondes de 15 à 30 cm, larges de 2 à 4 cm, pennées, à folioles de forme oblongue à arrondie. *P. cordata,* du Pérou et du Mexique, a des segments oblongs ou ovales, et des pétioles d'une belle couleur jaune paille; nous citerons enfin *P. calomelanos,* qui possède des frondes longues de 10 à 20 cm, avec des folioles qui rappellent quelque peu les feuilles du lierre : c'est une espèce africaine qui vit aussi sur les roches siliceuses du nord de l'Espagne.

La famille des *Cryptogrammacées* comprend le genre *Cryptogramma ;* une espèce, en France, *C. crispa* (= *Allosorus crispus*), pourvue de frondes dimorphes, a deux à quatre pennes longuement pétiolées, dont les plus courtes sont les stériles; les frondes fertiles ont des sores submarginaux, linéaires, cachés sous le bord replié du limbe. Elle habite les rochers des montagnes siliceuses et forme parfois des peuplements denses. Une autre espèce européenne est *C. stelleri,* de l'Oural, qui existe aussi dans le nord et le centre de l'Asie et en Amérique. De nombreux *Cryptogramma* se prêtent très bien à l'ornementation : nous citerons par exemple *C. acrostichoides,* originaire de l'Oregon, de petite taille, avec des frondes très élégamment découpées.

La famille des *Parkériacées* comprend le seul genre *Ceratopteris,* intertropical, sans affinités bien nettes avec d'autres Fougères. Les espèces qui lui sont attribuées sont annuelles, aquatiques, flottantes ou subaquatiques, à frondes dimorphes, les fertiles dressées, divisées plusieurs fois en segments étroits, alors que les frondes stériles, plus ou moins nageantes, sont larges et lobées. Les sporanges sessiles, sériés le long des nervures, sont abondants jusqu'à recouvrir complètement la face inférieure du limbe, dont la marge les protège. L'anneau est vertical, et le nombre de spores est assez peu élevé. Souvent la reproduction se fait par des bourgeons adventifs qui se forment au bord des feuilles. Parmi les espèces, nous citerons *C. pteridoides,* d'Afrique du Sud, qui, dans sa région d'origine, est consommé comme salade; d'autres espèces peuvent être cultivées à des fins ornementales, comme *C. thalictroides* des tropiques, haut de 30 à 40 cm, avec des frondes charnues et gemmifères.

Chez les *Gymnogrammacées, Anogramma leptophylla (Gymnogramma leptophylla)* est la seule espèce française, mais on la trouve également en Afrique australe, en Inde, en Australie, en Nouvelle-Zélande méridionale et dans le reste de l'Europe; c'est une Fougère annuelle, à prothalle pérennant. Elle se présente comme une petite plante à port délicat, avec des frondes qui mesurent 15 cm environ ou, au maximum, 20 cm. Les frondes sont de deux sortes, minces et membraneuses, 2-3 pennées : les externes, généralement stériles, ont un pétiole court et un contour ovale, alors que les folioles sont cunéiformes; les frondes fertiles ont un pétiole relativement plus long et un limbe plus allongé. Les sporanges sont disposés le long des nervures des folioles et finissent par recouvrir toute la face inférieure de celles-ci à maturité.

Les *Adiantacées* sont surtout représentées par le genre *Adiantum* qui comprend plus de deux cents espèces largement répandues, mais plutôt en Amérique du Sud : une seule l'étant dans le sud et l'ouest de l'Europe, *A. capillus Veneris* ou capillaire de Montpellier. Les *Adiantum* sont des Fougères terrestres, à pétiole et rachis noir brillant, à frondes 1-5 pennées, ou pédalées;

les segments ultimes sont trapéziformes ou cunéiformes, plus ou moins herbacés, souvent articulés, à nervures libres, rarement aréolées. Les pennes fertiles, semblables aux stériles, portent les sporanges groupés en une sorte de « sore » près de la marge, le long de l'extrémité des nervures (et parfois aussi entre elles), à la face interne et réfléchie du limbe qui sert d'indusie.

Le capillaire de Montpellier est bien connu de tous, car il peuple les stations rupestres humides, et les parois intérieures des puits et des grottes; il a d'élégantes frondes, supportées par des pétioles d'un beau noir brillant. Cette espèce est répandue non seulement en Europe, mais aussi en Afrique, en Asie et en Amérique.

Beaucoup d'*Adiantum* peuvent être cultivés dans un dessein ornemental. Nous citerons parmi eux : *A. gracillimum,* d'Amérique tropicale, à feuilles très divisées, vert olive à jaune clair; *A. lunulatum,* originaire d'Afrique tropicale, de Madagascar, de la région de l'Himalaya, de Chine et d'Australie, dont les frondes sont longues, retombantes, et pourvues de bourgeons sommitaux qui donnent naissance à une nouvelle plante dès qu'ils atteignent le sol. *A. pedatum,* du Canada et des pays asiatiques, est une espèce rustique à frondes atteignant quelque 0,50 m. *A. cuneatum,* d'Amérique tropicale, ressemble au capillaire de Montpellier, mais est de plus petite taille, avec des feuilles juvéniles rosées. D'autres espèces voisines sont *A. rubellum,* vivant en Bolivie, qui a un port majestueux avec des frondes d'un beau vert, très légères et nombreuses, ainsi qu'*A. farleyense,* des Antilles.

Adiantum pedatum (capillaire du Canada) et *Adiantum capillus Veneris* ont des propriétés médicinales : ils sont utilisés comme expectorants dans les affections catharrales des enfants.

Dans la famille des *Vittariacées,* les sores sont superficiels ou enfoncés et situés le long des nervures, souvent plus ou moins parallèles à la nervure médiane; l'indusie manque souvent. La fronde est presque toujours simple, non articulée. Famille très homogène dont le genre principal est constitué par les *Vittaria,* qui comprennent des espèces à feuilles rappelant celles des Graminées. Il en existe environ quatre-vingts espèces. *V. lineata,* subtropical, possède des frondes longues de 30 à 50 cm, larges d'environ 2 mm, à bords très repliés.

Certains *Vittaria* sont cultivés : nous citerons *V. lineata* et *V. angustifolia,* originaire de Cuba et du Brésil, à feuilles un peu plus larges, ainsi que *V. scolopendrina,* dont les feuilles possèdent une nervure médiane noirâtre.

Dicksoniales

Tel qu'il est compris dans la classification de Pichi-Sermolli, cet ordre, un peu hétéroclite, réunit trois familles : les Dicksoniacées, les Dennstaedtiacées, les Lindsaeacées, que d'autres auteurs séparent généralement. On a trouvé des fossiles de plantes de cet ordre au Jurassique, fossiles qui ont été classés dans les genres *Eboracia,* voisin des *Dicksonia,* et *Coniopteris,* voisin des *Thyrsopteris* actuels.

La famille des *Dicksoniacées* comprend une bonne proportion de Fougères arborescentes qui ressemblent à première vue à des palmiers. Leurs troncs sont couverts de longs poils et se terminent par une grande touffe de feuilles. Les frondes en couronne, de dimensions importantes, sont divisées. Les sores, terminaux, marginaux, sont protégés par une indusie bivalve. Le sporange possède un anneau oblique. Cette famille est surtout tropicale, avec une trentaine d'espèces. Le genre *Cibotium* compte une douzaine d'espèces, toutes tropicales; les *Cibotium* possèdent de grandes frondes pluripennées et retombantes, formant un gros plumeau à la cime du tronc, qui est couvert de longs poils, employés comme hémostatique.

De nombreuses espèces sont cultivées dans un dessein ornemental; nous citerons *C. barometz,* originaire d'Asie tropicale, de la Chine méridionale et de Formose, dont les frondes atteignant 2,50 m sont très divisées; *C. schiedei,* du Mexique, très gracieux, dont la hauteur est de 3 à 4 m et dont les frondes sont semblables, presque triangulaires et longues d'environ 3 m, larges de 1 m, avec des pétioles densément couverts de poils roussâtres. *C. regale* vient aussi du Mexique; on

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ **Dicksonia,** ***genre de Fougères arborescentes voisin de*** **Cyathea,** ***portant des poils et non des écailles, à sores protégés par une indusie bilabiée en forme de coupe.*** ▼ **Adiantum capillus Veneris** ***ou « capillaire de Montpellier », à pétiole noir, brillant et lisse, vit dans les grottes humides et sur les tufs.***

C. et M.C. Nuridsany - Atlas Photo

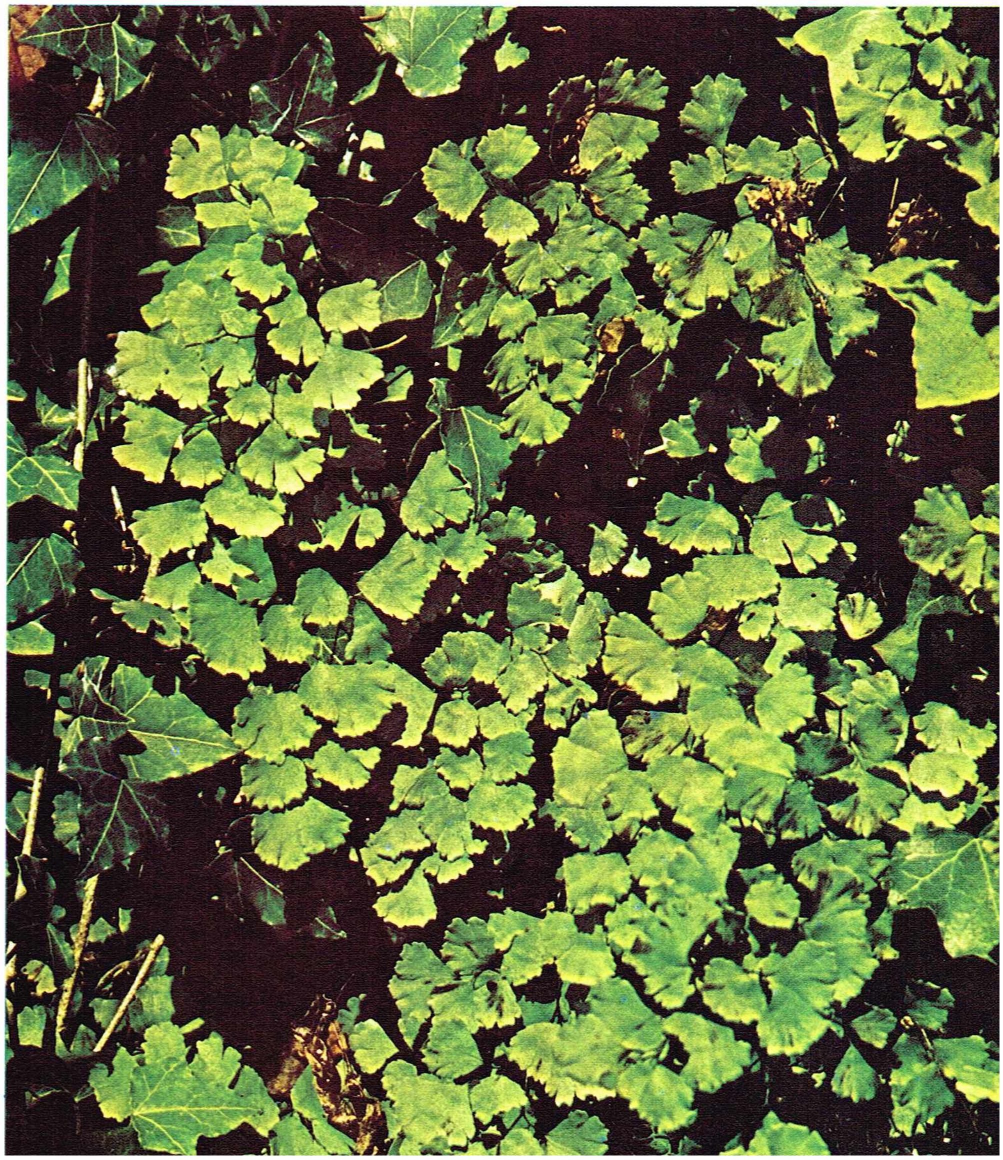

G. Aymonin

▲ *Lande à* Pteridium aquilinum.

M. Keraudren - Aymonin

▶ **Sphenomeris melleri,** *espèce de la forêt ombrophile de Madagascar, à fronde finement découpée, à sores marginaux et terminaux sur les nervures.*

Page ci-contre :
▶ **Lonchitis** *de Madagascar, espèce de grandes dimensions, atteignant 2 à 6 m, à croissance indéfinie et formant des fourrés.*

le considère comme une variété de l'espèce précédente, ses frondes sont très longues, ont des folioles quelque peu acuminées. *C. glaucum,* à frondes tripennatiséquées, est originaire des îles Hawaï.

Le genre *Dicksonia* a des frondes partiellement dimorphes. *D. antartica,* d'Australie, de Tasmanie et de Nouvelle-Zélande, qui possède un tronc pouvant atteindre une hauteur de 15 m et plus, couvert de fibres noirâtres à pointe verte, est cultivé; les frondes d'une longueur de 2 m sont divisées trois fois. *D. arborescens,* de l'île de Sainte-Hélène, a des frondes de consistance coriace et de couleur vert brillant.

Cette famille renferme également le genre *Culcita,* placé parfois dans les Dennstaedtiacées, avec *C. macrocarpa,* unique représentant de l'ordre des Dicksoniales vivant en Europe. Ses frondes mesurent de 30 à 90 cm, sont triangulaires, aussi larges que longues, à folioles obtuses ou légèrement acuminées et à indusie ciliée. On le trouve en Europe, dans le nord du Portugal, dans le sud de l'Espagne, à Madère et à Ténériffe.

Les *Dennstaedtiacées.* Les limites de cette famille varient grandement suivant les auteurs. Il est difficile d'en donner une définition précise. Ce sont des Fougères rhizomateuses, bien développées mais herbacées. Certains auteurs classent dans cette famille les dix espèces (environ) du genre *Culcita* dont nous avons parlé plus haut. On doit aussi considérer comme provisoire le classement dans cette famille du genre *Pteridium,* que l'on peut rapprocher des *Pteris,* avec la fameuse fougère-aigle, *P. aquilinum,* bien connue dans nos régions; cette espèce cosmopolite forme des peuplements denses dans les formations secondaires. Son rhizome est largement rampant, elle peut atteindre 2 m et plus de hauteur, son contour est triangulaire-deltoïde, son limbe est divisé deux à trois fois. Les pétioles ne portent pas d'écailles. Lorsqu'on coupe le pétiole, la section obtenue représente un dessin qui rappelle un aigle à deux têtes, d'où le nom d'espèce *aquilinum.* Les

sores situés à la face inférieure des lobes et sur leur bord sont couverts par celui-ci qui est replié et par l'indusie blanche, membraneuse et ciliée. Ses frondes desséchées servent à faire des litières pour le bétail, et les rhizomes sont occasionnellement utilisés pour falsifier ceux de la fougère-mâle, dont ils n'ont pas du tout les propriétés. Dans certains pays, les frondes jeunes, encore en crosse, servent de nourriture. A part ces deux genres, les Dennstaedtiacées, groupe indubitablement primitif, comprennent surtout des Fougères des régions intertropicales. Ce sont des plantes à rhizome couvert de poils ou d'écailles, à sores généralement marginaux protégés par une indusie le plus souvent double, rarement simple *(Hypolepis)*.

Dans la famille des *Lindsaeacées,* le genre le plus important, le genre *Lindsaea,* intertropical ou tropical, comprend plus de cent cinquante espèces. Le rhizome est couvert de très étroites écailles, presque semblables à des poils; les frondes, habituellement pennées, de taille moyenne, sont caractérisées par leurs pinnules trapéziformes ou semi-lunaires. Les sores, souvent réunis en cœnosores, se trouvent sur une commissure unissant les nervures près de la marge foliaire, qui les recouvre comme une indusie; l'indusie interne est fixée à la base seulement. Les espèces de ce genre sont assez décoratives, mais ne sont pas faciles à cultiver. Nous citerons *L. scandens,* de Malaisie, à tige rampante, et *L. falcata,* de Guyane, à frondes longues de 30 à 45 cm et larges de 5 à 10 cm, à folioles lancéolées, falciformes, les supérieures étant larges et auriculées à la base, et les inférieures étant courtes et obtuses. *L. stricta,* de Trinidad et de Tobago, l'une des plus grandes espèces, possède des frondes un peu plus longues, pennées, bi- ou tripennées, à folioles recourbées et vert brillant.

Davalliales

Les Fougères de cet ordre sont presque toutes des épiphytes des régions tropicales, intertropicales ou tempérées chaudes. Elles ont des rhizomes pourvus d'écailles larges et peltées. Les frondes sont généralement articulées au rhizome; le limbe, penné à plusieurs fois penné, a des nervures libres. Les sores non fusionnés sont généralement terminaux sur les nervures, rarement dorsaux *(Oleandra)*. L'indusie est en cornet ou squamiforme. Les spores ne possèdent pas de périspore. L'ordre comprend quelque deux cent cinquante espèces, réunies en dix ou douze genres, qui font à leur tour partie de deux familles : *Davalliacées, Oléandracées*.

Chez les *Davalliacées,* le genre *Davallia* est constitué par une quarantaine d'espèces, surtout d'Asie et d'Océanie; une seule est européenne, *D. canariensis,* qui habite l'ouest de la péninsule Ibérique, les îles Canaries, Madère, les îles du Cap-Vert et le littoral de l'Afrique du Nord; elle vit sur les rochers, mais se comporte aussi en épiphyte sur différents arbres. Ses frondes sont triangulaires-ovales, glabres, coriaces, bipennées ou tripennées, longues de quelque 50 cm; les sores terminaux sont protégés par une indusie cupuliforme, fixée par la base et les côtés; les sporanges sont portés par de longs pédicelles. Cette espèce est souvent cultivée, ainsi que diverses autres du genre *Davallia*. Nous citerons par exemple, parmi les plus belles, à feuilles profondément divisées, *D. divaricata,* originaire d'Asie tropicale, dont les frondes sont longues de plus de 1 m, tripennatifides, de couleur pourprée à l'état jeune, puis vert brillant à l'âge adulte; *D. bullata,* du Japon, de Chine et d'Asie tropicale en général, ressemble quelque peu à *D. canariensis* avec des frondes quadripennées, longues de 30 cm, à longs rhizomes.

Quant au genre *Humata,* il regroupe une cinquantaine d'espèces, communes en Malaisie et en Polynésie, mais s'étendant du Japon à l'Himalaya et à Madagascar. Les frondes, très coriaces, sont parfois dimorphes, les sores sont arrondis ou réniformes, fixés par la base seulement. Ce sont généralement de petites plantes épiphytes, dont certaines ont été introduites à des fins ornementales. Parmi elles, *H. heterophylla* — originaire de Malaisie — a des frondes stériles simples et oblongues, et des frondes fertiles étroites et pennatifides. *H. repens* — d'Asie tropicale et d'Australie — a des frondes vert sombre.

Le genre *Nephrolepis,* surtout tropical, sans doute un des plus anciens de ce groupe, est caractérisé par ses

M. Keraudren - Aymonin

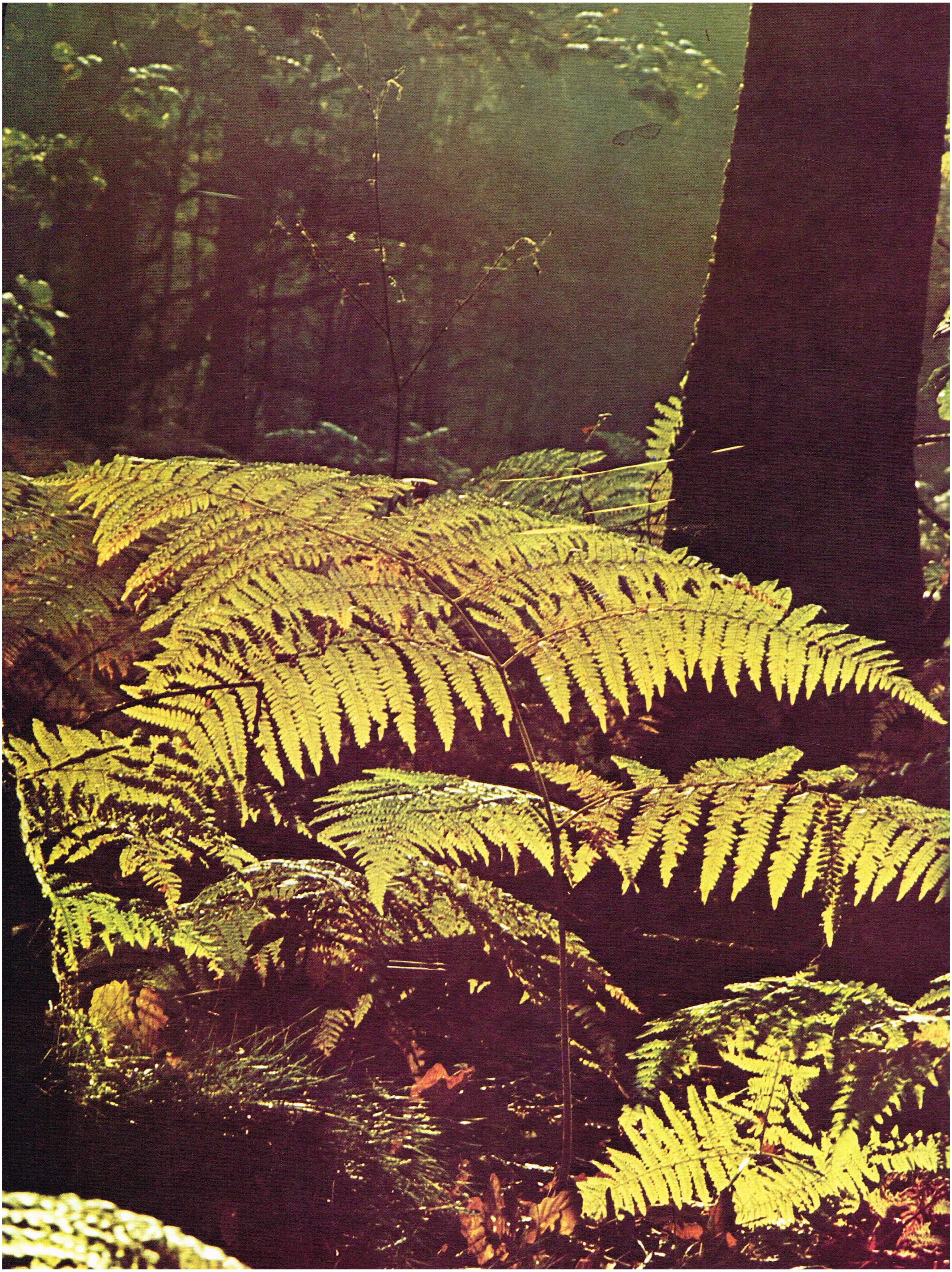

pennes articulées, dimidiées, à nervures libres. Le rhizome est dressé ou longuement rampant, aphylle, ramifié. Les sores sont arrondis ou allongés.

Le genre *Nephrolepis* est constitué par une trentaine d'espèces, parmi lesquelles nous citerons : *N. cordifolia* du Japon et de Nouvelle-Zélande, qui a des stolons allongés, portant çà et là des tubercules (seule espèce), et des frondes longues au plus de 60 cm, larges de 4 à 5 cm, à folioles rapprochées ou même imbriquées ; cette espèce est souvent, sinon toujours, épiphyte. Quant à *N. exaltata*, la plus commune des Fougères de serres, probablement originaire d'Amérique tropicale, ses frondes sont longues de 30 à 60 cm, larges de 8 à 15 cm, avec des folioles assez rapprochées, atténuées au sommet, et plus ou moins dentelées. Ces espèces sont parmi les plus souvent cultivées. Il existe une centaine de « cultivars » des *N. exaltata*.

Les *Oléandracées* doivent leur nom au genre *Oleandra*, riche d'environ trente-cinq espèces tropicales. Ce sont souvent des plantes épiphytes ; elles ont des frondes simples, entières, à nervures libres, articulées au rhizome (rampant ou dressé) qui se termine par un bourgeon. Les sores sont situés à la face inférieure des frondes fertiles, ils sont superficiels, arrondis, situés souvent près de la nervure médiane, à indusie réniforme. On a introduit dans nos pays plusieurs espèces ornementales, par exemple : *O. articulata*, originaire des Antilles, du Guatemala et des Guyanes, dont les frondes sont longues de 15 à 30 cm, larges de 4 à 5 cm, lancéolées-linéaires, entières et vert brillant ; *O. neriiformis*, originaire de Malaisie et de Polynésie, dont les frondes ressemblent à celles du laurier-rose. Certaines espèces possèdent des racines aériennes.

Hyménophyllales

Ce groupe bien défini est adopté par tous les botanistes ; la délimitation des genres est, en revanche, très discutée. C'est un groupe spécialisé, isolé depuis des temps reculés. On lui attribue des fossiles (genre *Hymenophyllites*), mais sans certitude. Les espèces vivantes de ces Fougères ont généralement une petite taille et une structure délicate ; elles sont presque toujours épiphytes et prospèrent dans les lieux humides. Elles sont surtout répandues dans les pays tropicaux ; seules quelques espèces peuvent vivre en des endroits plus secs. Les frondes, uniformes, rarement dimorphes, sont formées d'une seule rangée de cellules et sont dépourvues de stomates. Elles sont de petite taille, extrêmement fines, tantôt entières, tantôt divisées, et même finement subdivisées, jusqu'à se réduire à la nervure médiane. Les rhizomes, longuement rampants ou dressés, ne possèdent pas d'écailles. Aux extrémités des nervures se trouvent les réceptacles filiformes portant les sporanges pourvus d'une indusie campanulée ou cylindrique ou bilobée. Les sporanges, sessiles, ont un anneau complet et oblique ; les spores sont dépourvues de périspore. La forme des prothalles est filamenteuse, ressemblant à une Algue verte. Certaines espèces peuvent se dessécher en l'absence d'humidité, puis reprendre vie au retour des pluies comme cela a lieu chez les Mousses.

L'ordre comprend environ sept cents espèces, dont la plupart habitent l'hémisphère austral et sont réunies dans l'unique famille des *Hyménophyllacées*.

L'ancien genre *Hymenophyllum*, qui est maintenant divisé en plusieurs autres, compte environ trois cents espèces, la plupart tropicales ; en France, on en a recensé deux, dont *H. tunbridgense*, espèce des rochers siliceux et des localités humides et ombragées de l'Ouest ; on la retrouve en Afrique méridionale, en Amérique, en Australie, en Nouvelle-Zélande. C'est une Fougère petite, grêle, avec des frondes de 3 à 7 cm (et plus rarement une dizaine de centimètres), à pétiole brunâtre, légèrement ailé à la partie supérieure, et à limbe de contour ovale ou ovale-lancéolé, vert bleuâtre, divisé deux fois, avec des divisions principales qui présentent des lobes allongés et dentés. Une autre espèce, qui vit en Afrique du Sud, aux Açores, au Chili, en Tasmanie et même en Europe nord-orientale, *H. wilsoni* (= *H. unilaterale* ou *H. peltatum*), ressemble fort à la précédente, mais ses frondes sont beaucoup plus rigides et vert olive.

Plusieurs espèces du genre *Hymenophyllum* peuvent être cultivées, par exemple *H. demissum*, de Nouvelle-Zélande, dont les frondes tripennatifides ou quadripennatifides, à contour ovale-triangulaire, sont de couleur vert vif, à l'état jeune, pour devenir ensuite foncées ; *H. hirsutum*, des Indes occidentales, de petite taille, a des frondes linéaires-oblongues, pennatifides, délicates, et souvent retombantes. Nous citerons enfin, parmi de nombreuses autres espèces, *H. cruentum*, du Chili, à feuilles entières à peu près triangulaires, pourvues de belles nervures.

Le genre *Trichomanes*, qui comprend quelque trois cent cinquante espèces, présente des frondes translucides, souvent pluripennées, à sores situés à l'extrémité des nervures ; l'indusie est infundibuliforme, non bilobée, le réceptacle exsert. Parfois, les frondes fertiles diffèrent des frondes stériles. Le genre *Trichomanes* comprend des espèces au port assez varié réparties dans les régions tropicales ou subtropicales.

T. speciosum (= *T. radicans*) est l'unique espèce européenne ; elle est généralement rare et localisée près des cascades ou à l'entrée de cavernes, depuis les Açores jusqu'à l'Irlande, l'Espagne, les Pyrénées atlantiques en France, et le Portugal. Ses frondes, vert foncé, longues de 20 à 40 cm à peu près, sont tripennatiséquées ou quadripennatiséquées, et ses sporanges ont une forme cylindrique. *T. capillaceum*, originaire de l'ouest des

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Fragment de fronde de* Davallia, *finement découpée.*

Page ci-contre :
◀ *Fronde de* Pteridium aquilinum. *Le rhizome est rampant, les frondes espacées, à pennes inférieures opposées, pétiolées, portant un tomentum rougeâtre ; sous les tropiques, le* Pteridium *peut former de véritables fourrés résistant aux feux.*

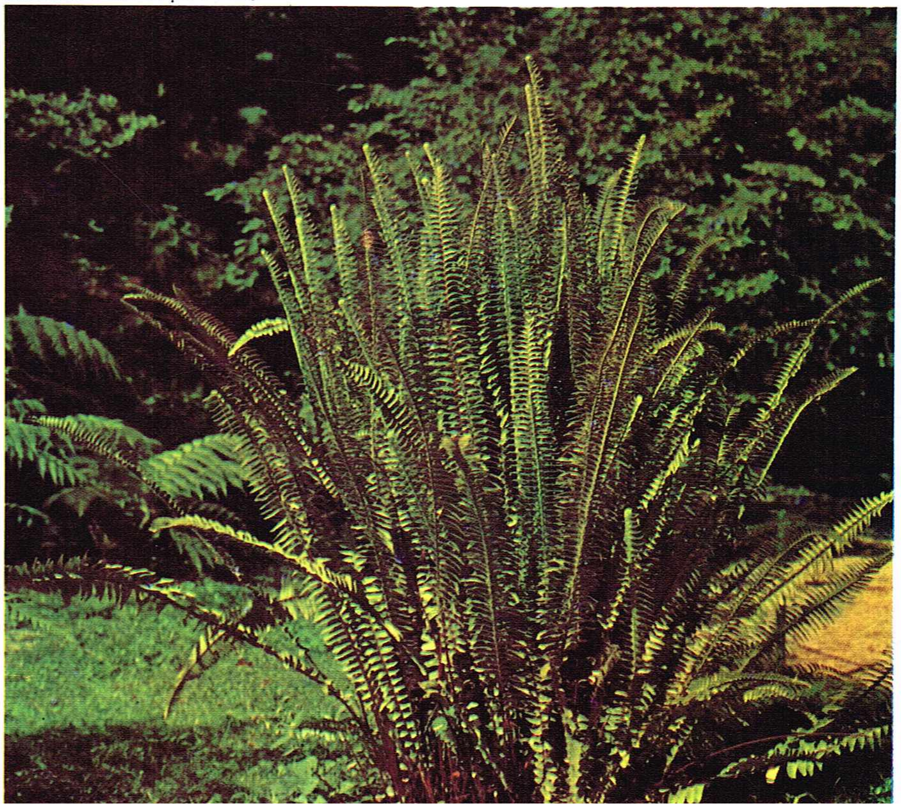

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▼ *Les* Nephrolepis *sont souvent cultivés comme plantes ornementales. Ils possèdent des frondes pennées et des sores situés le long de la marge. Il en existe une trentaine d'espèces tropicales.*

Claude Rives - Cedri

M. Keraudren - Aymonin

▲ **Hymenophyllum tunbridgense,** ***espèce européenne vivant parmi les Mousses et sur les rochers humides. Un artifice a permis ici de montrer, en milieu naturel, ces frondes très fines, presque transparentes. Les Hyménophyllacées sont surtout tropicales, formant des taches sur les troncs des arbres exotiques et dans les lieux à atmosphère saturée d'humidité.***

▼ **Gleichenia (Dicranopteris) linearis,** ***extrémité de la fronde montrant le type de division caractéristique de cette famille. Cette espèce est très commune sous les tropiques, dans les formations héliophiles.***

M. Keraudren - Aymonin

Indes, a des frondes divisées à l'extrême, laciniées et filiformes. *T. spicatum,* de l'Amérique tropicale, a des frondes stériles pennées et des frondes fertiles très réduites. *T. reniforme,* de Nouvelle-Zélande, a (comme son nom spécifique l'indique) des frondes réniformes ou à peu près rondes, portées par un long pétiole. Le prothalle du genre *Trichomanes* est filamenteux, ce caractère le distinguant de celui des *Hymenophyllum,* qui est aplati.

Cardiomanes et *Serpyllopsis* sont des genres monospécifiques, le premier habitant la Nouvelle-Zélande, et le second l'Amérique du Sud.

Gleichéniales

Les Fougères qui appartiennent à cet ordre sont terrestres, répandues dans les stations sèches des régions tropicales et intertropicales, où elles peuvent former des peuplements denses, buissonnants, enchevêtrés. Elles ont généralement des rhizomes rampants, superficiels, pourvus d'écailles ou de poils allongés. Les frondes, à croissance indéfinie, présentent parfois une division apparemment dichotomique, due à l'avortement végétatif de l'axe qui porte les pennes et qui se termine par un bourgeon dormant, couvert de poils ou d'écailles, bourgeon situé au-dessus de l'insertion de la première paire de pennes : chaque branche est pennée, ou plusieurs fois divisée, à nervures libres. Les sores sessiles, situés en une rangée des deux côtés de la nervure médiane, contiennent peu de sporanges; ils sont dépourvus d'indusie; tous ceux d'une même fronde se développent simultanément. L'anneau est transversal, oblique ou vertical. Les spores sont généralement tétraédriques (pas toujours), très nombreuses et dépourvues de périspore. Il peut y en avoir de différentes tailles sur la même plante, mais il ne s'agit pas d'une hétérosporie proprement dite. Le prothalle est aplati, avec une nervure médiane et des proliférations marginales pouvant évoluer elles aussi en prothalles.

L'ordre, qui existait déjà au Carbonifère supérieur, a gardé des caractères archaïques; le développement simultané des sporanges, le manque d'indusie, le nombre élevé de spores, le prothalle à nervure médiane sont des caractères primitifs.

Le genre *Oligocarpia* (ex. : *O. mixta*) date du Carbonifère, le genre *Gleichenites* du Trias.

G. rostafinskii et *G. fremonti* étaient des espèces très répandues jusqu'au Grand Nord, d'où elles furent obligées d'émigrer sous de plus basses latitudes, à la suite des modifications du climat.

Cet ordre comprend deux familles : les *Oligocarpiacées* exclusivement fossiles (Carbonifère supérieur); les *Gleichéniacées*, une famille naturelle comprenant environ cent trente espèces, communes dans les régions tropicales et australes. Le genre principal est le genre *Gleichenia*. Parmi les espèces cultivées de ce genre, nous rappellerons *Gleichenia dicarpa,* originaire de Tasmanie, dont les frondes sont pennatifides, parfois avec des folioles très longues et fines. *G. circinata,* d'Australie, dont il existe une belle variété, la face inférieure des feuilles étant très claire, et la face supérieure, vert foncé. Chez *G. linearis,* d'Asie tropicale, les frondes sont divisées plusieurs fois dichotomiquement, et chez *G. flabellata,* d'Australie, les frondes sont flabellées en forme d'éventail, les folioles étant linéaires et très étroites. La plus récente classification, celle d'Holttum, adopte trois genres : *Stromatopteris, Gleichenia, Dicranopteris.*

Les *Platyzoma* sont représentés par l'unique espèce *P. microphylla,* d'Australie et de Nouvelle-Zélande.

Le genre *Stromatopteris* est également monospécifique et habite la Nouvelle-Calédonie.

Cyathéales

Les Cyathéales sont pour la plupart des espèces arborescentes ou de grandes plantes cespiteuses presque uniquement intertropicales et tropicales, la plupart assez localisées, mais pouvant constituer des peuplements purs, denses surtout dans les montagnes, et le long des cours d'eau. Les paysages végétaux riches en Cyathéacées étaient jadis très répandus, on en a aujourd'hui encore quelques exemples, dans les forêts du Brésil et de Ceylan en particulier. Les formes arborescentes ont un

Photo Hallé

▲ *Cyathéacées, à Java.*

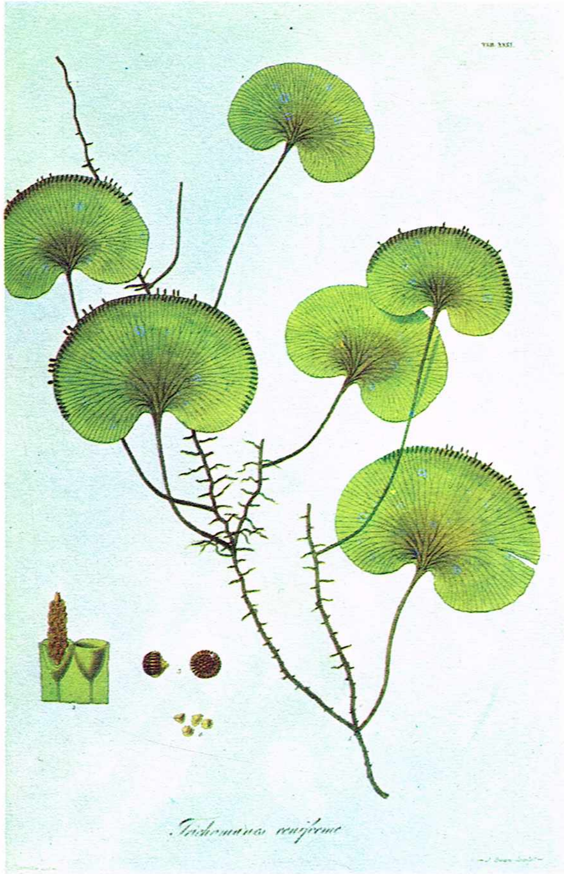

Droits réservés

◀ *Gravure de Hooker représentant une forme assez inhabituelle de* **Trichomanes** : **T. reniforme**, *espèce de Nouvelle-Zélande.*

tronc pourvu d'écailles ou de poils, qui peut atteindre une hauteur de plus de 5 à 15 m, couvert à la base de racines adventives. Leur partie terminale porte une touffe de feuilles très larges, atteignant parfois une longueur de plusieurs mètres, pennées ou pluripennées. Elles peuvent être dimorphes, et elles possèdent de plus quelquefois, à la base du pétiole ou du limbe, des « aphlébies » qui ont l'aspect de frondes plus ou moins avortées, chlorophylliennes ou non. Les sores, superficiels et dorsaux, sont situés plus ou moins près de la nervure médiane. L'indusie est caliciforme ou squamiforme, mais elle peut aussi manquer ou encore être réduite à une ébauche. Les sporanges possèdent un anneau complet, oblique, et la déhiscence se fait par une fente latérale. Les spores sont dépourvues de périspore. Le prothalle est généralement cordiforme, doté de poils et d'écailles.

Selon certains auteurs, les Cyathéacées ne sont pas connues avec certitude à l'état fossile; le genre *Alsophilites,* du Jurassique, est peut-être l'ancêtre des *Alsophila*.

L'ordre, qui comprend environ huit cents espèces, est constitué par deux familles.

Les *Lophosoriacées* ou *Protocyathéacées* comptent deux genres, monospécifiques : les *Lophosoria* d'Amérique tropicale, et les *Metaxya* d'Amérique du Sud. Ce sont des plantes à axe court et rampant, sans écailles, mais couvert de poils. Les sores, exindusiés, sont formés de sporanges dont le développement est simultané.

Les *Cyathéacées,* au contraire des précédentes, sont une grande famille de sept cents à huit cents espèces environ. La délimitation des genres est difficile. Les *Cyathea* comptent plusieurs centaines d'espèces. Celles-ci sont de très belles Fougères arborescentes, propres aux régions tropicales humides; certaines ont un port qui rappelle beaucoup celui des palmiers, avec des troncs parfois velus et pourvus de nombreuses racines adventives. Leur indusie est nettement cupuliforme. Les sores sont situés à la face inférieure des frondes, près de la bifurcation des nervures.

Nous citerons surtout *C. dealbata,* de Nouvelle-Zélande, qui atteint plus de 10 m de hauteur, avec ses grandes feuilles lancéolées, divisées deux ou trois fois, longues de 3 à 5 m, blanc argenté en dessous, et à pétiole parfois épineux à la base; *C. arborea* — du Brésil et des Antilles — qui présente une tige haute d'environ 1 m, et des frondes longues de 1,50 m, lancéolées et bipennées. Ce sont des espèces introduites comme plantes d'ornement, en même temps que *C. medullaris* — originaire de la Nouvelle-Zélande, du sud de l'Australie et de Tasmanie — qui peut atteindre, dans les pays d'origine, jusqu'à 25 m de hauteur. *C. sinuata* — de Ceylan — possède de longues frondes retombantes, simples, pointues, à bords ondulés, et de couleur vert brillant.

L'ancien genre *Alsophila* est maintenant réuni aux *Cyathea.* Il comprenait aussi des Fougères arborescentes de grande taille. *Cyathea (Alsophila) australis* — originaire d'Australie et de Tasmanie — a des frondes longues d'au moins 1 m, divisées deux ou trois fois, à nervures velues. La plante peut être utilisée, quand elle est jeune, comme espèce ornementale d'appartement; dans son pays d'origine, elle atteint 20 m de hauteur, et ses frondes ont plusieurs mètres de longueur.

Les anciens auteurs séparaient le genre *Hemitelia* dont l'indusie ne forme pas une coupe complète, mais se réduit presque à une écaille. Différentes espèces de ce genre (une centaine environ) sont maintenant réunies aux *Cyathea : Cyathea (Hemitelia) capensis,* originaire d'Afrique du Sud, du Brésil et de Java, a des troncs hauts de 4 à 5 m, avec des écailles à la base et de grandes frondes bi- ou tripennatiséquées, avec des folioles divisées en lobes linéaires-oblongs, dentelés.

Certaines espèces du genre *Cyathea* fournissent aux indigènes de Nouvelle-Guinée et de Nouvelle-Zélande leur nourriture (sommet des tiges et les jeunes feuilles); d'autres sont tænifuges; les écailles, les poils et les spores auraient des propriétés hémostatiques.

Loxsomales

Ce petit ordre, qui comprend quelques espèces réunies en une seule famille, a des représentants qui ressemblent quelque peu aux *Trichomanes* par leur sore, et aux Dennstaedtiacées par leur appareil végétatif. Les sores sont marginaux, situés à l'extrémité des nervures, pourvus d'une indusie en forme de coupe et d'un réceptacle allongé, portant les sores sur tous les côtés. Les sporanges subsessiles sont piriformes, à anneau complet ou non, à déhiscence longitudinale ou transversale; les spores sont dépourvues de périspore. Le prothalle est cordiforme, avec des poils simples multicellulaires. La position systématique de l'ordre semble assez incertaine (Pichi le rapproche des Cyathéales), et ses caractères, ainsi que sa répartition géographique, amènent à le considérer comme assez primitif. Il semble qu'on puisse inclure dans cet ordre le genre fossile *Stachypteris,* avec son unique espèce, *S. hallei,* du Jurassique.

Les *Loxsomacées* sont l'unique famille de l'ordre cité. Elles comprennent deux genres et quelques espèces — vivant en Amérique tropicale et en Nouvelle-Zélande. Le genre *Loxsoma* se prête bien à la culture en serre comme plante ornementale, avec ses belles frondes triangulaires, tripennées, coriaces, vert brillant.

Aspidiales

Nous venons de voir de nombreuses familles qui n'ont pas de représentants indigènes dans nos régions. Nous voici arrivés à un ordre qui est constitué, par contre, par des espèces dont certaines habitent l'Europe et appartiennent aux genres *Asplenium, Athyrium, Polystichum,* etc.

Les Aspidiales sont très nombreuses et à peu près cosmopolites, avec plus de trois milles espèces. Presque toutes sont des plantes terrestres; certaines espèces cependant sont des lianes ou sont épiphytes. Les rhizomes, rampants ou dressés, se présentent sous différentes formes, et sont pourvus d'écailles. Le pétiole n'est en général pas articulé au rhizome. Les frondes rarement entières, souvent pennées à pluripennées, sont uniformes, parfois dimorphes. Les sores sont généralement arrondis, quelquefois allongés, dorsaux, rarement marginaux; ils arrivent parfois à couvrir la totalité de la face inférieure des feuilles. L'indusie fixée sous le sore est réniforme ou arrondie, ou allongée, ou bien cupuliforme; elle manque parfois. L'anneau est longitudinal, interrompu par le pédicelle. Le prothalle peut être pourvu de poils; il est laminaire, cordiforme et annuel. La garniture chromosomique, très variable, va généralement de $n = 31$ à $n = 42$: les nombres les plus faibles sont propres aux Thélyptéridacées, et les plus élevés aux Athyriacées et Aspidiacées.

L'ordre des Aspidiales, qui est l'un des plus évolués des Fougères, comprend dans la classification adoptée ici les cinq familles suivantes : Thélyptéridacées, Aspléniacées, Athyriacées, Aspidiacées, Lomariopsidacées.

Thélyptéridacées : Holttum a récemment décrit dans cette famille vingt-cinq genres de l'Ancien Monde. Ils ont une tige dressée ou rampante, écailleuse, les écailles portant souvent des poils aciculaires. La fronde est pennée ou pluripennée, réduite ou non à la base, les nervures libres, la face supérieure du rachis et du costa porte toujours des poils aciculaires unicellulaires. L'indusie manque parfois. Les sores, orbiculaires, peuvent couvrir toute la face inférieure du limbe fertile. Le sporange porte toujours des poils près de l'anneau.

Le genre *Thelypteris* présente en France trois espèces : *T. limbosperma, T. palustris, T. phegopteris.*

T. limbosperma a un gros rhizome, court, et des frondes en touffes, à petit pétiole pourvu d'écailles, des pennes inférieures non défléchies; l'indusie est caduque. Cette espèce vit aussi en Asie et en Amérique boréale. *T. palustris* a un rhizome long et fin, à frondes espacées, des pétioles courts et généralement glabres; ces deux espèces ont des frondes pennatiséquées, avec des segments pennatipartites à lobes entiers ou à peine dentelés, et avec des glandes jaunâtres sur la face inférieure des frondes jeunes.

T. phegopteris, outre son absence d'indusie, se distingue aussi par ses feuilles solitaires, pennées, triangulaires, qui sont longuement acuminées, pourvues de poils sur les deux faces, et à segments inférieurs défléchis. Cette espèce vit dans les régions tempérées et froides de l'hémisphère boréal, en Europe, en Asie, en Amérique.

T. palustris préfère les endroits marécageux, il est à peu près cosmopolite. L'on trouve aussi en Europe *T. pozoi,* qui croît dans la péninsule Ibérique et aux Açores.

Outre les trois espèces déjà citées, d'autres *Thelypteris* peuvent très bien être cultivés. *T. decursivepennata* (de Chine et du Japon) à frondes vert pâle, lancéolées, pennées vers le bas, pennatifides vers le haut, par exemple, ou bien *T. exanoptera* (originaire d'Amérique du Nord) dont les frondes sont longues et larges de 20 à 30 cm, avec des lobes larges et veloutés.

L'ancien genre *Cyclosorus* (réuni maintenant aux *Thelypteris*) est représenté en Europe seulement par *C. dentatus,* qui est une Fougère à feuilles pennées, avec des folioles pennatifides, hautes de 30 cm à 1 m, à nervures libres, sauf la première paire de chaque segment, à sores orbiculaires, munis d'une indusie réniforme et très velue. Cette espèce croît dans les endroits humides des Açores, de Madère, et on la trouve également en Afrique et en Amérique tropicale. On la cultive, de même que *C. arcuatus,* originaire d'Amérique du Sud tropicale, dont les feuilles sont ovales, divisées une fois. et de couleur jaunâtre, avec des folioles longues d'environ 8 cm.

Aspléniacées : les Fougères qui font partie de la famille des Aspléniacées ont des rhizomes rampants ou dressés, pourvus d'écailles peltées à la base. Les frondes, très rarement dimorphes, sont entières ou diversement pennées, à nervures généralement libres. Les sores situés le long des nervures, simples ou par deux, ont une indusie s'ouvrant vers la nervure médiane. Les sporanges ont un pédicelle mince, constitué par une seule série de cellules. Le gamétophyte présente différentes formes suivant les genres.

Le principal genre est *Asplenium,* genre bien défini, comprenant plus de sept cent trente espèces cosmopolites, d'origine antarctique. Les sores sont droits, allongés, indusiés, situés d'un seul côté de la nervure. Fronde simple ou plusieurs fois divisée.

Le genre *Asplenium* compte en France seize espèces, mais ces espèces, toujours polymorphes, regroupent

Rapho

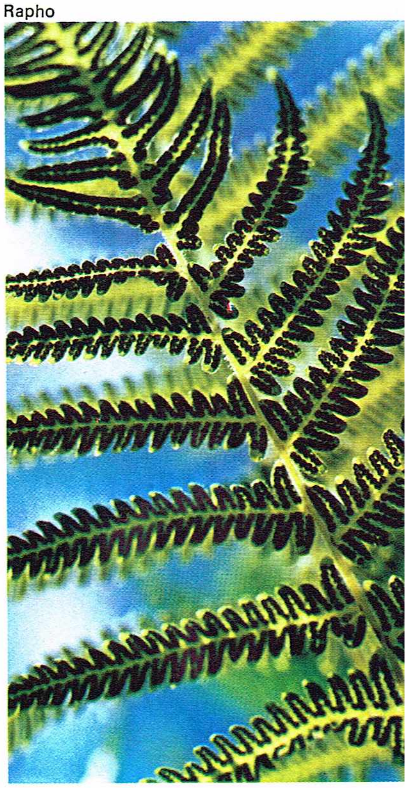

▲ **Cyclosorus,** ***face inférieure de la fronde, montrant les sores.***

Page ci-contre :
◀ ***Cyathéacées des îles Hawaii. Les Cyathéacées sont fréquentes dans les lieux ensoleillés, dans les clairières ou le long des cours d'eau. Elles forment parfois des peuplements purs, d'espèces différentes de celles des sous-bois.***

S. Prato

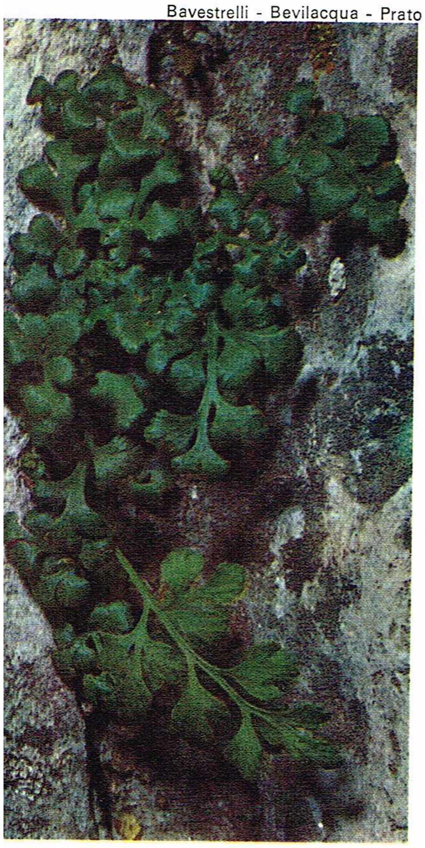

▲ **Asplenium ruta muraria, *ou « rue de muraille », est une petite Fougère des rochers et des murs surtout calcaires qui pousse dans toute la France.***

▼ **Asplenium dregeanum *est un petit* Asplenium *habitant les rochers ruisselants à Madagascar; il possède à son sommet un bourgeon qui peut s'enraciner et donner une nouvelle plante.***

M. Keraudren - Aymonin

encore elles-mêmes un grand nombre de sous-espèces ou de formes bien définies. L'hybridation est très fréquente; certains de ces hybrides ont d'abord été regardés comme des espèces indépendantes.

De plus, des anomalies et des variations individuelles ont été décrites qui ne présentent souvent pas de valeur systématique.

Les espèces *A. ruta muraria* et *A. trichomanes* sont parmi les plus fréquentes. Elles habitent les vieux murs et les fentes des rochers. *A. adiantum nigrum* aime les lieux ombragés et frais, les sous-bois et les haies; ces trois Fougères ont une très large répartition géographique s'étendant en Europe, en Asie, en Afrique. *A. marinum* se rencontre surtout sur les rochers des bords de la Manche et de l'Océan. *A. viride* peut atteindre dans les Alpes l'altitude de 2 700 m; cette plante est rare en plaine et existe dans les massifs montagneux de toute l'Europe, dans l'Atlas, l'Asie occidentale et septentrionale, l'Amérique du Nord.

On trouve en Europe cinq autres espèces, à savoir : *A. monanthes,* des Açores, d'Afrique et d'Amérique centrale; *A. adulterinum* qui vit sur les rochers à quartzites d'Europe centre-orientale; *A. hemionitis,* du Portugal et des Açores; *A. csikii,* d'Albanie; *A. seelosii,* des Alpes orientales et centrales.

Les espèces d'*Asplenium* pouvant être cultivées sont fort nombreuses. Nous citerons, entre autres, *A. alatum,* originaire d'Amérique tropicale, qui possède de longues frondes prolifères, vert brillant, à pétiole noir, bordé d'une aile blanchâtre; *A. dimorphum* — originaire de l'île de Norfolk — dont les feuilles fertiles sont réduites à de simples nervures ailées, éloignées les unes des autres. *A. nidus* — un des épiphytes les plus fréquents en Asie, Polynésie, Australie tropicale, Afrique occidentale — a des frondes entières, longues d'environ 1 m et larges de 20 cm, dressées, en touffes, accumulant l'humus en leur centre. Ses sores sont linéaires et parallèles aux nervures. *A. viviparum* — des îles Maurice et Bourbon — a un port très élégant, avec ses frondes longues de 0,50 m, lancéolées et joliment découpées. *A. serratum,* néo-tropical, a des feuilles entières.

Nous rappellerons, à titre de curiosité, qu'en Nouvelle-Zélande, les prêtres indigènes agitent les cimes feuillées d'*A. lucidum* au-dessus des personnes malades, afin de les guérir. Certaines espèces possèdent des propriétés médicinales : on emploie contre les affections broncho-pulmonaires, comme émollients, expectorants et sudorifiques légers, *A. trichomanes, A. adiantum nigrum* et *A. ruta muraria.* Ces propriétés semblent plus accentuées chez un *Adiantum* — d'Amérique du Nord, du Japon et de l'Himalaya — et chez *A. tenerum* — du Mexique et des Antilles. On utilisait autrefois *A. trichomanes* contre les maladies de la rate.

Le genre *Ceterach* comprend *C. officinarum,* très commun, qui colonise les vieux murs et les rochers ensoleillés; il est facile à reconnaître avec ses frondes longues de près de 15 cm, lancéolées, pennatifides, à grands lobes arrondis, coriaces, persistants, de couleur vert foncé et recouverts, sur la face inférieure, de grosses écailles ocracé roussâtre, serrées, qui cachent les sores situés le long des nervures secondaires. C'est une plante commune dans la quasi-totalité de l'Ancien Monde. Le genre comprend deux autres espèces, *C. aureum,* originaire des îles Canaries et de Madère, et *C. cordatum,* d'Afrique du Sud. *C. officinarum* aurait des propriétés diurétiques et astringentes.

Le genre *Phyllitis* compte notamment deux espèces spontanées en France. La plus commune est la langue de cerf ou scolopendre, *P. scolopendrium (Scolopendrium vulgare),* qui possède un gros rhizome. Les frondes en touffes, à court pétiole, et à limbe entier, linguiforme, allongé, cordé à la base, atteignent de 0,30 à 0,50 m et au-delà. Elles portent, à la face inférieure, les sores, étroits et longs (jusqu'à 20 mm), disposés obliquement par rapport à la nervure centrale, en deux séries sur les côtés de celle-ci. La plante croît sur les rochers et les murs humides, sur les parois des cavernes et des puits, en de nombreux pays d'Europe, en Asie, en Afrique du Nord et en Amérique.

P. sagittata (= *P. hemionitis* = *Scolopendrium hemionitis*) a des frondes un peu plus courtes, auriculées et cordées à la base, à auricule plus ou moins lobée. Il préfère les endroits très ombreux, par exemple les entrées des cavernes, et on le trouve en Europe méditerranéenne. On rencontre aussi en Europe, et en particulier en Yougoslavie, *P. hybrida,* à frondes irrégulièrement pennatifides. *P. scolopendrium,* la langue de cerf, qui présente de nombreuses variétés, est cultivé (var. *dedaleum, crispum, erosum*). Dans le genre *Camptosorus,* très voisin, *C. rhizophyllus,* originaire d'Amérique du Nord atlantique, est utilisé dans l'ornementation; ses frondes, entières, portent normalement à leur sommet des bourgeons à partir desquels la plante peut se reproduire.

Le genre *Pleurosorus* a un représentant en Europe; *P. hispanicus* (= *Ceterach hispanicum* ou cétérach d'Espagne) habite les rochers et les lieux ombreux d'Espagne du Nord-Ouest et du Sud et jusqu'en Afrique du Nord.

La famille des *Athyriacées* comprend plusieurs espèces de nos régions. Il s'agit généralement de Fougères à frondes pennées, les fertiles pouvant être semblables aux stériles; les sores ne sont jamais recouverts par la marge foliaire, et l'indusie peut être présente ou non. Les *Athyrium* sont le genre type, représenté notamment chez nous par la fougère-femelle *(A. filix-femina),* qui a été

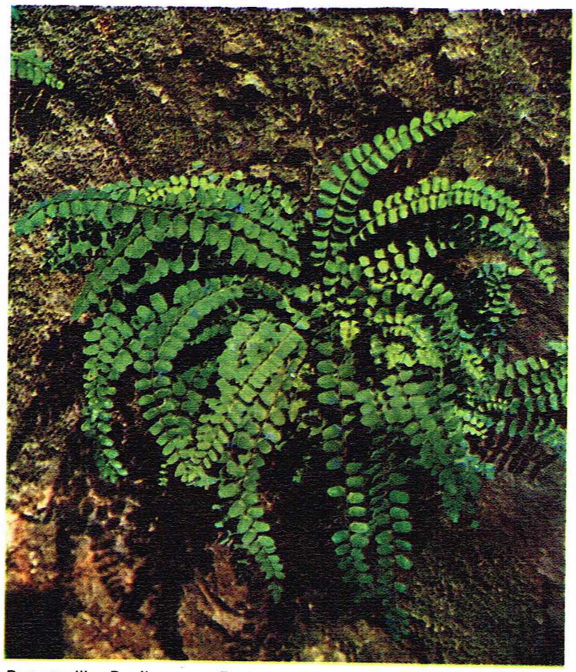

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

R. Tixador - Top - Réalités

attribuée jadis à d'autres genres (*Asplenium filix-femina, Aspidium filix-femina*, etc.). Elle peut atteindre de 40 cm à 1,50 m; ses frondes, qui partent d'un gros rhizome, ont une forme lancéolée et sont divisées deux ou trois fois, avec des segments pennatiséqués ou pennatilobés, à lobes plus ou moins profondément dentés, et à lobes secondaires également dentés. Les sores sont ovales-oblongs, recourbés, à cheval sur la nervure, disposés en deux rangées près de la nervure médiane des dernières divisions foliaires. Les frondes forment de grandes touffes, les rhizomes sont couverts d'écailles brun foncé. La fougère-femelle est cosmopolite, elle aime les lieux frais et ombreux.

A. distentifolium (= *A. alpestre*), des bois et rochers humides des hautes montagnes, a des sores arrondis, situés près de la marge, à indusie rudimentaire et fugace; cette plante croît çà et là en Europe, en Asie mineure et en Amérique boréale. Les deux espèces que nous avons citées servent comme plantes ornementales; la fougère-femelle a donné de nombreuses variétés. *A. umbrosum* — originaire d'Australie, de Nouvelle-Zélande, d'Afrique, des îles de l'océan Atlantique et de l'Asie méridionale — est très décoratif; il possède de grandes frondes vert foncé, longues de 1 m, avec de larges folioles.

Le genre *Cystopteris* compte une quinzaine d'espèces de petite taille, délicates, qui sont voisines des *Athyrium :* on en connaît trois dans nos régions, dont la plus répandue est *C. fragilis.* Elle atteint au maximum 0,50 m de hauteur, mais est généralement plus petite; son rhizome

▲ **Athyrium filix-femina.**

◀ **Ceterach officinarum** *à frondes en touffes, couvertes d'écailles, est une Fougère des vieux murs et des rochers ensoleillés.*

Page ci-contre, en bas, à droite :
◀ **Asplenium trichomanes**, *très commun, cosmopolite, habite les rochers ombragés, les puits, les vieux murs.*

R. Tixador - Top - Réalités

◀ **Athyrium filix-femina** *ou « fougère-femelle » est l'une des espèces les plus répandues dans les bois, les lieux humides et ombragés. Il en existe de nombreuses variétés.*

Photo Hallé

▲ **Diplazium proliferum,** *Fougère des raphiales et des marécages des tropiques de l'Ancien Monde, et particulièrement d'Afrique.*

▶ **Woodsia ilvensis,** *photographié ici en Engadine. Les Woodsia sont des Fougères surtout arctiques. Elles ne se trouvent que dans les hautes montagnes dans les régions moins boréales.*

▼ *Face inférieure d'un fragment de fronde, montrant les sores en fer à cheval d'Athyrium* **filix-femina.**

Bavestrelli, Bevilacqua, Prato

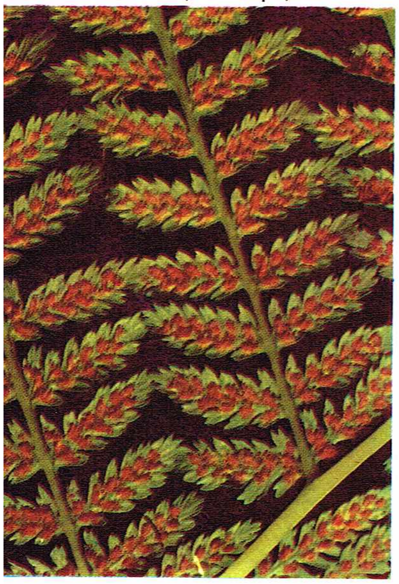

est assez gros, court, écailleux, roussâtre, ses frondes sont délicates, oblongues-lancéolées, bipennatiséquées ou tripennatiséquées, plus longues que larges, à pétiole plus court que le limbe. *C. dickieana* forme, avec *C. fragilis,* un complexe dans lequel il est difficile de distinguer les deux espèces (spores). *C. montana* a un rhizome mince, rampant, à frondes espacées, à peu près triangulaires et aussi longues que larges, tripennées, et à pétiole plus long que le limbe. La première de ces deux espèces est très répandue dans les régions tempérées et tropicales de tout le globe, on la trouve chez nous dans tous les endroits frais et ombragés. *C. montana,* dont l'aire de distribution couvre une partie de l'Europe centrale boréale et de l'Amérique boréale, habite les bois et les rochers des hautes montagnes.

On rencontre aussi en Europe *C. sudetica,* qui croît en divers endroits des Carpathes, dans les monts des Sudètes, en Allemagne du Sud, en Norvège et dans le nord de la Russie. Il se rapproche de *C. montana,* mais ses frondes vert jaunâtre sont ovales (et non plus triangulaires), la paire inférieure de pinnules n'étant pas plus longue que les suivantes, comme cela a lieu au contraire chez *C. montana.* Outre les deux espèces précédentes, nous citerons comme plante ornementale *C. bulbifera* — d'Amérique du Nord atlantique — qui possède des frondes longues de 1 m, au sommet desquelles se forme habituellement un bulbille qui, tombant sur le sol, donne une nouvelle plante.

Le genre *Diplazium,* qui possède plus de trois cents espèces tropicales, n'a pas de représentants en France; il est très voisin du genre *Athyrium,* mais le sore le plus voisin de la nervure médiane de chaque groupe est double, les indusies s'ouvrant en sens inverse. On en trouve en Europe deux espèces, *D. caudatum,* des Açores, et *D. sibiricum,* d'Europe nord-orientale et de Norvège.

Les autres genres d'Athyriacées sont des *Woodsia, Matteucia* et *Onoclea.* Les *Woodsia* comprennent une quarantaine d'espèces à sores orbiculaires (indusie réduite à des écailles entourant la base du sore). On les a parfois rapprochés des *Cyathea. W. alpina* a un pétiole foncé; ses pennes, plus longues, portent un à quatre lobes de chaque côté. *W. ilvensis* a des pennes pourvues de quatre à huit lobes de chaque côté, et le rachis et la face inférieure du limbe sont couverts de poils et d'écailles. *W. ilvensis* se rencontre sporadiquement dans les Alpes. Il s'agit là de deux espèces rares, et mêmes rarissimes selon les endroits. On trouve aussi en Europe deux espèces souvent confondues, *W. glabella,* des régions arctiques et subarctiques, qui diffère de *W. pulchella,* des Alpes, par la forme de ses frondes.

Il existe plusieurs espèces de *Woodsia,* qui vivent hors d'Europe mais qui ont été introduites chez nous comme plantes ornementales. Parmi celles-ci, nous citerons *W. obtusa,* originaire d'Amérique boréale et habitant aux Andes et au Pérou, qui est l'une des plus grandes, à frondes d'environ 30 cm de longueur et à pétiole rouge jaunâtre. *W. mollis,* du Mexique et du Guatemala, a des frondes lancéolées, pennées, et recouvertes de poils courts, spécialement à la face inférieure. Enfin, *W. polystichoides* a des frondes lancéolées et pennées, avec des folioles aiguës et veloutées; il est originaire du Japon, et mesure 20 cm de hauteur.

Le genre *Matteucia* comprend une espèce européenne, *M. struthiopteris* (= *Onoclea struthiopteris*). Il offre comme caractéristique le dimorphisme de ses frondes : les stériles sont longues de plus de 1 m, bipennatiséquées alors que les fertiles sont plus courtes, plus étroites, brunâtres, à long pétiole. Les sores sont contigus, recouverts par la marge enroulée du limbe. *M. struthiopteris* est une plante des lieux humides d'Europe centrale et boréale, d'Asie tempérée et d'Amérique boréale atlantique. Elle est cultivée et parfois naturalisée. *M. orientalis,* originaire de Chine et du Japon, et *M. pensylvatica,* d'Amérique du Nord, sont aussi ornementaux.

Dans le genre *Onoclea,* aucune espèce n'est spontanée, et une seule a été naturalisée dans le nord-ouest de l'Europe, en Grande-Bretagne, Belgique et Hollande, mais elle est d'origine américaine. Il s'agit d'*O. sensibilis,* dont les frondes sont dimorphes, hautes de 50 cm, profondément pennatifides et à rachis ailé; les frondes

M. Keraudren - Aymonin

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◄ *Fragment de fronde et sores de* **Dryopteris filix-mas.**

fertiles sont lancéolées et raides, sans limbe, et deviennent noires en vieillissant. Les lobes recourbés sont refermés sur un groupe de sores.

Dans la famille des *Aspidiacées,* les rhizomes sont recouverts d'écailles, et les frondes fertiles ne diffèrent pas des frondes stériles. Leur limbe est plusieurs fois divisé, à nervures libres. Le rachis est canaliculé, et ce sillon s'interrompt à la jonction de ceux des nervures principales. L'indusie peut être présente, peltée ou réniforme, ou bien absente. Les sores sont superficiels, orbiculaires.

Le genre le plus important, *Dryopteris,* est diversement limité par les différents auteurs et comprend quelque cent cinquante espèces cosmopolites, mais d'origine australe. Les quatre principales espèces européennes présentent des caractères distinctifs tout à fait particuliers. *D. filix-mas,* ou fougère-mâle, et *D. cristata,* ou dryoptère à crêtes, ont des frondes bipennées, le premier avec des lobes à dents mutiques, et le second des lobes à dents mucronées; les autres espèces ont des frondes tripennées, au moins à la partie basale des segments inférieurs, mais, chez *D. villarii* ou *Polystichum rigidum,* les frondes sont plus rigides, oblongues-lancéolées, avec des lobes dentés-mucronés, mais non aristés comme cela a lieu chez *D. carthusiana (Dryopteris spinulosa)* dont les frondes sont assez molles. Toutes ces espèces ont une indusie réniforme, et la mieux connue est la fougère-mâle, déjà citée *(D. filix-mas = Polystichum* ou *Polypodium* ou *Nephrodium filix-mas),* qui possède un gros rhizome densément recouvert d'écailles, d'où partent, en touffe, les grandes frondes, hautes de plus de 1 m, pennatiséquées, à pétiole relativement court recouvert de nombreuses écailles, ne dépassant pas la moitié ou le quart de la longueur du limbe. La fougère-mâle, commune dans les bois et autres lieux ombreux, habite l'Eurasie, l'Afrique et l'Amérique. Les autres espèces proches sont *D. borreri* et *D. abbreviata* (= *Polystichum filix-mas subsp. abbreviatum*), qui diffèrent, la première, par ses frondes très développées densément écailleuses et velues le long du rachis et à la face inférieure, la seconde, par ses frondes plus petites, longues de 10 à 30 cm, avec des lobes moins nombreux, plus larges et obtus (portés par des segments courts). *D. borreri* vit également dans des stations moins ombragées et est plus répandu dans les régions méridionales et occidentales. *D. carthusiana (D. spinulosa)* porte des frondes de 30 à 90 cm, tripennées, à lobes étroits et non confluents à la base, aristés, de couleur claire; les pétioles sont presque aussi longs que le limbe, avec des écailles brun pâle. Une autre espèce commune dans les bois frais sur sols siliceux et proche de la précédente, *D. dilatata,* a des frondes plus larges et moins fermes, à pétioles à moitié aussi longs que le limbe, avec des écailles bicolores, plus foncées au centre et plus claires au bord. *D. villarii (Polystichum rigidum)* a des frondes rigides, à contour oblong-lancéolé, tripennées, à lobes dentés, mucronés, étroits à la base et non confluents; les pétioles et les rachis sont recouverts de nombreuses écailles brunâtres, et la face inférieure des feuilles est parsemée de petites glandes qui rendent la plante odorante à l'état frais. L'espèce croît dans les montagnes de nos régions, sur les éboulis calcaires, où elle constitue parfois d'importants peuplements. On la trouve en Europe, en Afrique, en Amérique boréale.

D'autres espèces habitent encore l'Europe : en Finlande et dans l'Oural, *D. fragrans* ou polystic odorant; dans les montagnes de Suisse, de Scandinavie, d'Allemagne, etc., *D. assimilis.*

Plusieurs *Dryopteris* déjà cités sont cultivés comme plantes ornementales, de même que d'autres espèces exotiques : *D. erythrosora* — du Japon, de Corée et de Chine — qui a des frondes lancéolées-ovales, à folioles obtuses et dentées, ou parfois épineuses, portant des sores d'une belle couleur rouge à l'état jeune; *D. goldeiana,* d'Amérique du Nord — qui ressemble à la fougère-mâle mais qui est de plus grande taille, avec des frondes ovales-triangulaires, à longs pétioles, de couleur vert clair. Les frondes élégantes, oblongues, distinguent *D. marginalis,* d'Amérique du Nord (Atlantique), alors que *D. sieboldii,* du Japon, présente des frondes larges, coriaces, possédant quelques folioles oblongues, falciformes et irrégulièrement dentées.

▼ *Cette figure de* **Lastrea spinulosa (Dryopteris carthusiana)** *a été exécutée, pour le livre de Moore sur les Fougères de Grande-Bretagne, par un remarquable procédé utilisant l'impression par la plante elle-même.*

J.-Ph. Charbonnier - Top-Réalités

▲ **Gymnocarpium dryopteris (Dryopteris linneana),** *Fougère des bois et rochers humides, surtout en terrain siliceux. Cette espèce pousse dans une grande partie de la France, mais elle est rare dans la région méditerranéenne.*

▶ *Dessin de Hooker représentant* **Acrostichum (Elaphoglossum) crinitum.** *Les* **Elaphoglossum** *sont surtout différenciés par leurs écailles de formes infiniment variées.*

Les propriétés anthelminthiques de l'extrait éthéré du rhizome de la fougère-mâle sont bien connues. Il est ou était employé surtout contre le tænia. Comme ce rhizome est recherché, il est parfois falsifié avec des rhizomes d'autres Fougères comme la fougère-femelle. La fougère-mâle est, en outre, indiquée, grâce à son action sédative, dans les coliques et les affections rhumatismales; elle est toxique à dose élevée. Les rhizomes de *D. carthusiana* et de *D. dilatata* auraient aussi des propriétés tænifuges. Certaines espèces exotiques ont dans leurs pays d'origine les mêmes usages. Les jeunes feuilles sont parfois consommées comme des asperges.

Le genre *Polystichum* compte environ deux cent cinquante espèces dans le monde entier (dont quatre en France); l'indusie est, chez les *Polystichum,* orbiculaire, peltée, fixée en son centre. Les pinnules sont aristées, auriculées à la partie supérieure. Les feuilles sont coriaces. *Polystichum lonchitis* possède des frondes simplement pennées. Il habite les rochers et éboulis de montagne, d'Europe, d'Asie boréale et centrale jusqu'à l'Himalaya. C'est une espèce très variable. *P. aculeatum (P. lobatum)* est bipenné, à frondes rigides, restant vertes l'hiver, atténuées à la base, à pinnules sessiles ou subsessiles, décurrentes, glabres à la face supérieure. *P. setiferum (P. angulare)* a des frondes plus molles, non persistantes, à pinnules pétiolées. *P. braunii,* des bois et ravins de montagne, a des frondes molles, bipennatiséquées, portant des poils à la face supérieure; le rachis est très écailleux. Il est spécialement répandu en Europe centrale. Les *Polystichum* cités ici sont souvent cultivés; *P. aculeatum* l'est en rocailles et à l'ombre; *P. setiferum,* ou fougère des fleuristes, est souvent utilisé pour l'ornementation des jardins. Les hybrides sont nombreux et la variabilité est extrêmement grande.

Parmi les espèces des autres pays, citons : *P. acrostichoides,* d'Amérique boréale, qui a des frondes longues d'environ 50 cm et larges de 10 cm, dressées, rigides, de couleur vert brillant et à folioles dentées et épineuses; *P. auriculatum,* de l'Inde et de Ceylan, qui possède des feuilles longues de 30 cm environ, avec des folioles étroites et dentées régulièrement; enfin, *P. munitum,* originaire de Californie et d'Alaska, dont les frondes mesurent jusqu'à 60 cm, avec des folioles plus serrées et plus larges que celles de *P. acrostichoides,* et par ailleurs plus acuminées.

Le genre *Gymnocarpium* n'a pas toujours été reconnu comme indépendant; il est caractérisé par son manque d'indusie. Deux espèces européennes se trouvent en France : *G. dryopteris (Phegopteris dryopteris, Dryopteris linneana)* et *G. robertianum (Dryopteris robertiana);* la première possède des frondes glabres, sans glandes, et d'un vert brillant, la seconde a des pétioles et frondes portant des poils glanduleux, et de couleur vert foncé. Ce sont des Fougères à feuilles plus ou moins deltoïdes, et à pétioles nettement plus longs que le limbe; elles mesurent moins de 1 m de hauteur et ont des frondes tripennées. Elles vivent dans les forêts et les endroits ombragés de montagne.

Parmi les autres genres appartenant aux Aspidiacées, nous citerons encore les *Tectaria,* qui comprennent plus de deux cents espèces tropicales. La fronde est deltoïde, souvent pubescente, le pétiole souvent noir, la nervation réticulée, avec ou sans nervures incluses, les sores arrondis. Certains spécimens ont été introduits en culture. *T. cicutaria,* très commun sous les tropiques, possède des frondes triangulaires, divisées trois fois. *T. decurrens,* des Indes et de Polynésie, est épiphyte, et ses frondes longues de 1,30 m sont pourvues d'un pétiole ailé. *T. incisa,* enfin, d'Amérique tropicale, possède des frondes, longues de 1 m, larges de 40 cm, divisées jusqu'à la base, portant des sores cordiformes en deux séries sur les côtés des nervures.

Les représentants de la famille des *Lomariopsidacées* sont dotés d'un rhizome rampant ou grimpant, de frondes pétiolées, simples, pennées ou bipennées, les fertiles différant souvent des stériles. Les premières, réduites, sont couvertes de sporanges.

Le genre *Elaphoglossum,* à fronde entière, comprend plus de quatre cents espèces, dont un bon nombre dans les Andes. *Elaphoglossum hirtum,* que l'on peut trouver aux Açores et à Madère, est largement réparti en Amérique du Sud. De nombreuses espèces sont épiphytes, sur les grands arbres; elles sont pour la plupart adaptées à supporter les climats à précipitations abondantes, où la chaleur favorise cependant une évaporation importante, qu'elles combattent grâce à leur dense revêtement de poils ou d'écailles. En général, les frondes fertiles sont plus petites que les autres et couvertes d'écailles et de sporanges mêlés.

E. crinitum, d'Amérique tropicale (Mexique, Antilles), a des frondes coriaces, les stériles étant oblongues-lancéolées et mesurant 40 cm sur 20 cm, et les fertiles étant plus petites de moitié; cette Fougère a un revête-

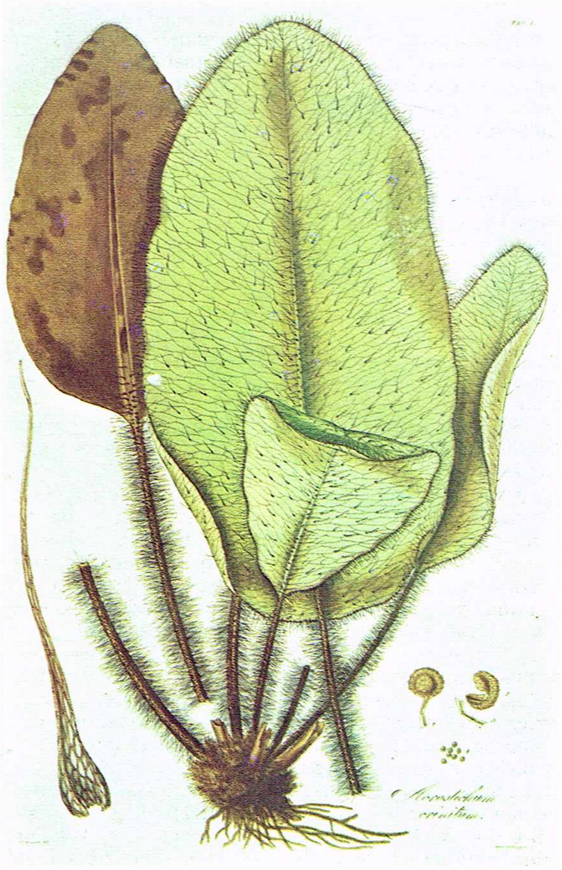

Droits réservés

D. Pichon - Atlas photo

▲ **Blechnum spicant,** *répandu dans la zone atlantique européenne. Les* **Blechnum** *possèdent de nombreuses espèces tropicales et subtropicales. Ils sont caractérisés par leurs frondes de deux sortes, les fertiles étant beaucoup plus étroites.*

ment velu, pourpre foncé. *E. latifolium* est une espèce variable, à fronde vert brillant, généralement longue de 50 cm et large de 10 cm. *E. villosum*, originaire d'Amérique tropicale, est caractérisé par ses frondes plus petites, entièrement recouvertes de longs poils rouge foncé et brillantes. Ces espèces ont été introduites pour l'ornementation ; d'autres, appartenant aux genres *Bolbitis*, des zones tropicales, surtout de la région indo-malaise, et *Lomariopsis*, d'Amérique tropicale, d'Afrique et de la région indo-malaise, sont également cultivées dans les jardins.

Blechnales

Cet ordre est constitué par l'unique famille des *Blechnacées*, comprenant cinq à huit genres (selon les auteurs) et environ deux cents espèces. Il s'agit généralement de plantes terrestres, herbacées, mais il en est aussi de subarborescentes ou de lianiformes. Leur rhizome est pourvu d'écailles, généralement dressé, épais ; les frondes sont coriaces, pennées ou bipennées, et souvent dimorphes, à nervures libres, ou ayant quelques anastomoses. Les sores sont courts ou longs, réunis en groupes ou cœnosores, en nombre variable, disposés parallèlement à la nervure en une ou en plusieurs rangées. L'indusie est marginale si la penne est très étroite, ou superficielle, membraneuse, et s'ouvrant vers la nervure médiane. Le sporange porte un anneau longitudinal. Ce sont des espèces d'origine antarctique, largement répandues dans les pays tropicaux, ainsi que dans les régions tempérées, surtout australes. On peut rattacher aux Blechnacées des espèces fossiles de l'Éocène *(Blechnum)* ou du Miocène et de l'Oligocène *(Woodwardia)*.

Le genre *Blechnum*, le plus important, comprend plus de deux cents espèces. Son seul représentant européen est *B. spicant*, une plante calcifuge, habitant les lieux ombragés et frais ; outre l'Europe, on le trouve en Asie septentrionale et mineure, en Afrique du Nord et en Amérique du Nord occidentale. Ses frondes peuvent atteindre une hauteur de 70 à 80 cm, mais elles sont généralement plus courtes (de 15 à 50 cm) et présentent un dimorphisme net. Toutes sont oblongues, pennatipartites, mais les stériles, moins nombreuses et plus courtes que les fertiles, ont des divisions assez élargies et rapprochées, alors que ces dernières, dressées, ont des divisions étroites et plus distantes.

Beaucoup d'espèces de *Blechnum* ont été introduites dans nos régions à des fins ornementales. *B. brasiliense*, du Brésil et du Pérou, est subarborescent, avec une tige haute d'environ 50 cm, d'où partent les frondes coriaces, lancéolées, pennées, de 1 m sur 30 cm. *B. gibbum* est originaire de Nouvelle-Calédonie ; il possède des frondes d'un beau vert, longues de 1 m et larges de 20 cm environ, divisées en segments allongés. *B. occidentale*, originaire d'Amérique tropicale, possède des frondes ovales, longues de 50 cm et larges de 10 cm, à folioles falciformes. Nous citerons enfin *B. penna-marina*, des régions antarctiques, tempérées australes et rappelant par son port *B. spicant* d'Europe.

Le genre *Woodwardia* est seulement représenté, en Europe, par *W. radicans*, qui habite les lieux ombreux et humides, du sud-ouest de l'Europe jusqu'en Italie, aux Açores, en Asie, aux Philippines, à Java et — avec sa variété *americana* — en Amérique et au Japon. C'est une très grande plante, portant des frondes qui peuvent dépasser 1,50 m de longueur ; le gros rhizome est écailleux et le limbe, ovale-oblong, porte souvent des bulbilles au sommet qui assurent la reproduction végétative. Les segments sont lancéolés-aigus, avec des lobes triangulaires à petites dents. Les sores sont situés en deux rangées discontinues, plus ou moins enfoncés, parallèles à la nervure médiane ; l'indusie est coriace, s'ouvrant vers la nervure. Cette espèce est ornementale, ainsi qu'une dizaine d'autres plus ou moins distinctes, parmi lesquelles *W. areolata*, originaire des forêts humides et marécageuses de la partie atlantique de l'Amérique du Nord ; ses frondes sont stériles, longues de 30 cm, larges d'environ 15 cm, à folioles ovales-lancéolées. *W. virginica*, d'Amérique du Nord, croît dans les zones marécageuses et ressemble beaucoup à l'espèce précédente.

Le genre *Doodia* comprendrait onze espèces, d'Australie (Juan Fernandez), d'Hawaï et de Nouvelle-Zélande, utilisées à des fins ornementales. Nous citerons *D. aspera* d'Australie tempérée, portant des frondes longues de 20 cm, avec des folioles linéaires à dents épineuses, *D. caudata*, d'Australie et de Nouvelle-Zélande, élégante petite Fougère, à frondes longues de 25 cm, larges de 2 à 5 cm, avec des folioles linéaires, très allongées. Enfin, *D. media*, habitant l'Australie et la Nouvelle-Zélande, porte des frondes dressées, rigides, pennées, longues de 50 cm, larges de 10 cm, et à folioles ovales-obtuses ou oblongues-obtuses.

Matoniales

Il s'agit d'un petit ordre, comprenant une seule famille : les *Matoniacées*. Leur rhizome est dichotome. Leurs frondes sont dichotomes ou pseudo-dichotomes, flabellées en apparence. Les folioles restent toutefois toujours pennées. Le développement des sporanges se fait

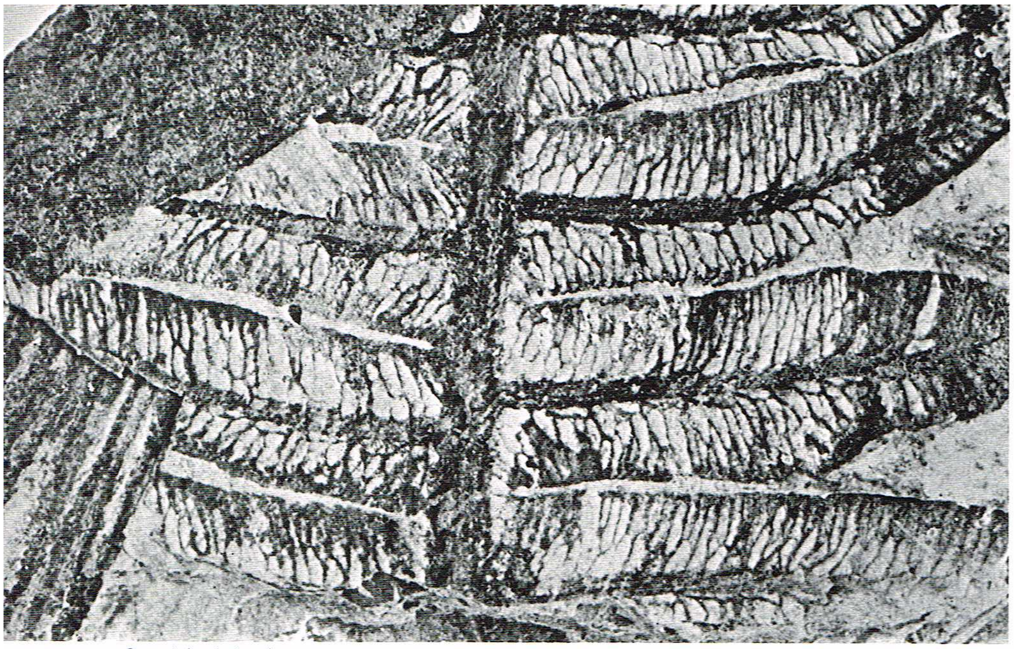

Copyright J. Loreh

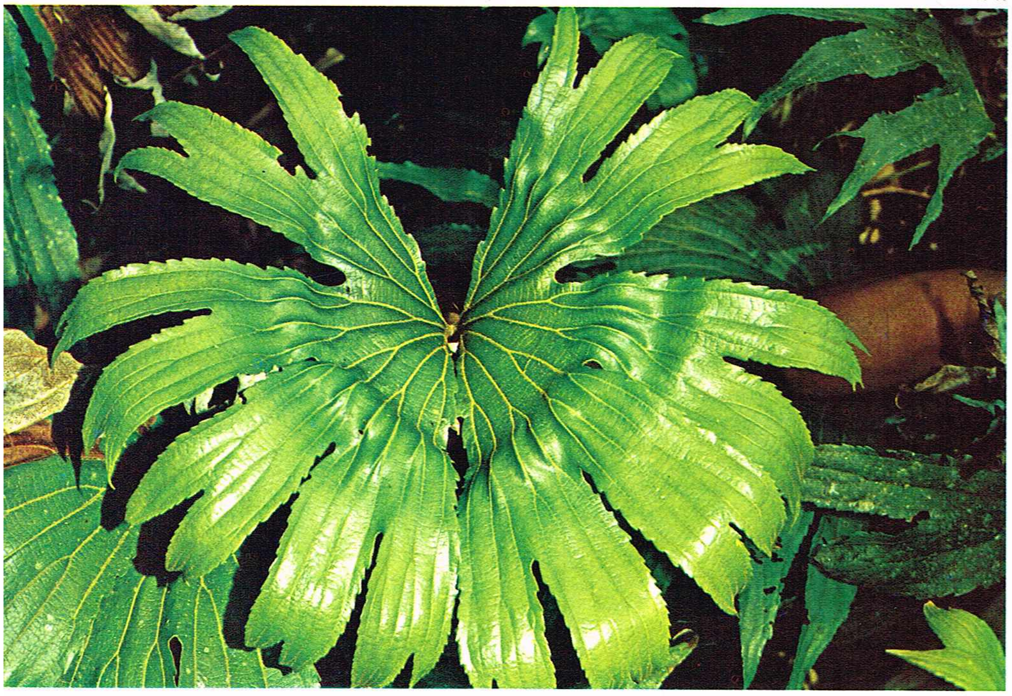

Photo Hallé

P. Starosta

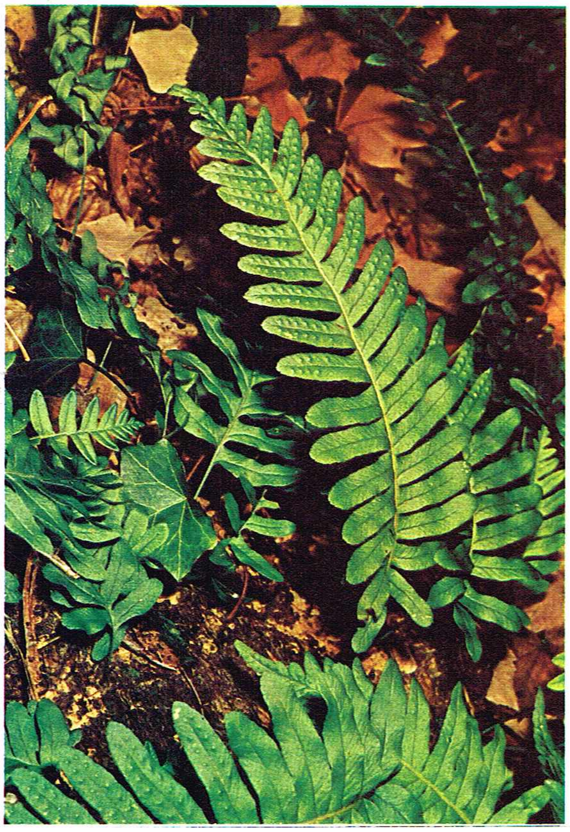

▲ Phlebopteris polypodioides, *Matoniacée fossile, d'après Loreh. (En haut.)* Dipteris conjugata, *de Java. Les* Dipteris *forment un genre primitif à ramification et nervation dichotomes; un grand nombre de fossiles mésozoïques ont été attribués aux Diptéridacées. (En bas.)*

▶ *Le* Polypodium vulgare, *qui forme un « complexe » subcosmopolite, habite les rochers, les murs et la base des troncs; on le trouve sur le sol dans les lieux ombragés.*

simultanément, et les sores, contenant peu de sporanges, sont disposés à la face inférieure des lobes foliaires, des deux côtés de la nervure médiane. Dans les formes actuelles, l'anneau est oblique et complet, et l'indusie est peltée, coriace. On ne sait que fort peu de chose sur les prothalles. Ce sont des Fougères qui, par suite de l'allongement des frondes, prennent parfois l'aspect de lianes.

Cet ordre, bien que ne possédant pas d'affinités très étroites avec d'autres, se rapproche des Gleichéniales. Ces Fougères ont occupé une grande place au Mésozoïque, à partir du Trias, pour atteindre leur apogée au Crétacé et décliner ensuite. Le genre *Matonidium,* du Lias d'Europe, paraît assez semblable aux *Matonia* actuels, et *Matonidium goeppertii* serait presque identique à *Matonia pectinata*. Ces *Matonidium*, portant des frondes en éventail comme les *Matonia*, ont vécu au Jurassique et au Crétacé. Nous citerons encore parmi les formes fossiles les *Phlebopteris, Matoniella* et *Selenocarpus*.

Les Matoniacées, comme nous l'avons dit, sont l'unique famille de l'ordre, avec les deux seuls genres vivants, *Matonia* et *Phanerosorus*, dont on trouve les représentants à Malacca, Bornéo, Sumatra et Sarawak. A Bornéo vit *M. pectinata,* déjà cité, à grandes frondes en éventail, dures, coriaces, longues de 50 à 60 cm, avec des folioles pennatifides. Le genre *Phanerosorus* pousse en Nouvelle-Guinée et à Bornéo; il comprend aussi deux espèces, *P. major* et *P. sarmentosus,* pourvues de rhizomes pouvant se fixer aux rochers et aux troncs, alors que les feuilles sont pendantes.

Polypodiales

Il s'agit là d'un vaste ordre, dont font partie quelque soixante-dix genres, plus de mille deux cents espèces, répandues dans le monde entier, surtout les pays tropicaux et subtropicaux. C'est la famille de Ptéridophytes qui présente la plus grande variété de formes. Dans les pays chauds et humides, ce sont souvent des plantes épiphytes. Les rhizomes sont habituellement pourvus d'écailles, larges, rarement piliformes; les frondes sont articulées, généralement simples à pennées, ou dichotomes, parfois dimorphes, de texture coriace, écailleuses ou hirsutes, ou glabres. Les nervures sont libres ou diversement réticulées. Les sores sont en général nus, arrondis, plus rarement allongés le long des nervures, mais parfois les sporanges sont disséminés sur toute la face inférieure du limbe. L'anneau des sporanges est vertical, à déhiscence oblique, avec un pédicelle formé de trois rangées de cellules. Cet ordre est relativement récent, il est surtout bien représenté depuis le Tertiaire; le genre *Dipteris* est le plus primitif.

On réunissait naguère, sous la dénomination de Polypodiales ou Polypodiacées, de nombreux genres de Fougères, qui sont aujourd'hui attribués à des familles d'autres ordres. Dans la classification adoptée ici, les Polypodiales sont divisées en quatre familles : Diptéridacées, Cheiropleuracées, Polypodiacées et Grammitidacées.

Les *Diptéridacées* sont une petite famille, à laquelle appartient l'unique genre *Dipteris,* avec huit espèces, localisé en Malaisie et en Polynésie. Le rhizome et les frondes sont dichotomes, les nervures principales également; les deux parties de la fronde sont assez larges, à marge plus ou moins profondément incisée-flabellée, prenant parfois l'aspect de larges éventails coriaces. Les rhizomes sont couverts d'écailles noires. Les sporanges ne forment pas de véritables sores, et leur anneau est vertical ou oblique, sans ouverture bien définie. L'indusie manque, et les spores sont peu nombreuses.

Quelques espèces pourraient se prêter à la culture, par exemple *D. wallichi* de l'Inde du Nord, qui a des frondes lobées vert foncé, assez semblables à celles de *D. conjugata* de Polynésie, dont les frondes sont glauques à la partie inférieure; il y a aussi *D. lobbiana,* de Bornéo.

La famille présente des caractères primitifs à côté d'autres plus récents; elle semble remonter, avec les Matoniales, à des ancêtres assimilables aux Gleichéniales. Les représentants fossiles sont nombreux, provenant du Mésozoïque, et ont donné naissance à plusieurs genres comme les *Camptopteris, Clathropteris, Dictyophyllum, Hausmannia, Thaumatopteris, Goepper-*

tella, etc. Le genre fossile *Podolomia* appartiendrait aussi à cette famille, et son espèce *P. polypodioides* ressemble assez aux Fougères actuelles du genre *Dipteris,* auxquelles sont également semblables les *Hausmannia,* les plus importants, ayant persisté jusqu'au Crétacé. Mais la plus grande diffusion des Diptéridacées fossiles date du Trias et du Lias; les restes en ont été découverts au Japon et en Scandinavie (de la Suède au Groenland), ce qui témoigne de la douceur du climat en ces régions durant le Mésozoïque.

La famille des *Cheiropleuracées* possède également des caractères primitifs; elle est très proche de la précédente : il faut sans doute chercher dans cette dernière son origine phylogénétique. Elle comprend le seul genre *Cheiropleura,* avec l'unique espèce asiatique *C. bicuspis,* qui présente des frondes de deux sortes : les stériles sont larges et constituées par deux lobes largement unis à la base, alors que les fertiles sont très linéaires, couvertes de sporanges.

La famille des *Polypodiacées (stricto sensu)* a des frondes simples et entières, ou lobées, ou, au plus, pennées. Les nervures sont généralement réticulées, avec nervilles incluses, ou libres.

Le nombre des genres reconnus dans cette famille varie suivant les auteurs, qui ne sont pas encore arrivés à une classification définitive.

Le genre *Polypodium* proprement dit comprend environ soixante-quinze espèces, souvent épiphytes, dont la plupart sont tropicales ou subtropicales. Il est représenté en Europe par le « complexe polyploïde » de *Polypodium vulgare,* largement répandu dans la zone tempérée nord, en Eurasie, Afrique australe, Amérique du Nord.

On trouve à l'état spontané, dans nos régions, les *P. vulgare, P. australe* et *P. interjectum;* la deuxième et la troisième espèce ont été considérées par certains comme des sous-espèces ou des variétés de *P. vulgare.* Ce dernier est facilement reconnaissable à son rhizome long et rampant, cylindroïde et charnu, couvert d'écailles membraneuses, brunes, de 5 à 11 mm. Les frondes persistantes, dépourvues de poils et d'écailles, dotées d'un long pétiole, ont un limbe assez coriace et présentent un contour lancéolé ou lancéolé-linéaire; elles atteignent de 30 à 40 cm de hauteur, sont profondément pennatifides, et à lobes obtus. Les sores sont ronds et disposés en deux rangées parallèles à la nervure médiane de chaque lobe, sur la face inférieure. La plante préfère les lieux ombreux et humides, et elle croît sur les roches et les murs, ou bien sur les souches.

L'espèce (ou sous-espèce de la précédente) *P. australe* (= *P. serratum*) est très proche de *P. vulgare,* mais ses frondes sont plus grandes (elles peuvent atteindre plus de 60 cm de longueur) et montrent un contour plutôt ovale-triangulaire; les lobes sont grossièrement dentelés. En outre, alors que les sores de *P. vulgare* sont dépourvus de paraphyses et que les écailles du rhizome ne dépassent pas une longueur de 6 mm, les sores de *P. australe* sont munis de paraphyses, et les écailles sont longues de 5 à 11 mm.

P. interjectum diffère de *P. vulgare* (dont les sores sont orbiculaires) par ses sores elliptiques et par l'anneau des sporanges formé de six à dix cellules seulement, alors que ce nombre est de dix à quinze chez *P. vulgare.* Cette espèce (ou sous-espèce) est particulièrement répandue en Europe occidentale.

Nombreux sont les polypodes épiphytes qui vivent dans les pays tropicaux et subtropicaux; ils ont apporté un important tribut aux plantes ornementales. Par suite de l'élégance de ses frondes, on cultive dans ce dessein *P. angustifolium,* épiphyte originaire d'Amérique tropicale, à frondes longues de 40 à 50 cm, étroites, aiguës, entières et rubaniformes. *P. aureum* provient aussi d'Amérique tropicale. Ses frondes sont assez coriaces, profondément pennatifides, glauques, aussi longues que chez l'espèce précédente, et à lobes très ondulés sur les bords; c'est une Fougère qui donne différentes variétés.

Le frondes pennatifides de *P. coronans (Aglaomorpha)* sont énormes (cette espèce est originaire de l'Inde et de Formose), puisqu'elles atteignent plus de 1 m de longueur et 30 à 45 cm de largeur. Les frondes de *P. crassifolium* — d'Amérique tropicale et des Antilles — sont aussi grandes, mais entières, simples, et pointillées de blanc à la face supérieure. On trouve des frondes encore plus grandes chez *P. heracleum (Drynariopsis)* de Java, de Nouvelle-Guinée et des Philippines; elles dépassent 2 m de longueur sur 80 cm de largeur; elles ont seulement la partie supérieure divisée en lobes aigus et sont vert brillant. *P. meyenianum* — des îles Philippines — a des frondes de 90 cm sur 30 cm, divisées en lobes linéaires, oblongs à la partie inférieure, et en folioles rapprochées à la partie supérieure, qui est fertile. Enfin, *P. subauriculatum* — de l'Inde septentrionale, de Malaisie et du nord de l'Australie — porte des frondes très longues (jusqu'à 2 m), larges de 25 à 35 cm, pennées, avec des folioles étroites, dentées et munies d'une oreillette à la base.

Le rhizome de *Polypodium vulgare* possède des propriétés médicinales : il est expectorant, cholagogue, légèrement laxatif. Il peut aussi servir d'anthelminthique. Diverses autres espèces exotiques possèdent les mêmes propriétés. *P. plebeium, P. fimbriatum, P. lanceolatum* et *P. aureum,* d'Amérique du Sud, du Mexique et des Antilles, sont expectorants et diurétiques.

Le genre *Platycerium* comprend une dizaine d'espèces tropicales (surtout en Malaisie) épiphytes, à frondes nettement dimorphes : les basales membraneuses, collectrices d'humus, sont collées contre les troncs; les autres, dressées ou pendantes, divisées une ou plusieurs fois, présentent çà et là des poils stellés. Les frondes fertiles portent les sporanges sur des segments spécialisés ou sur toute la face inférieure de la fronde. Plusieurs espèces du genre ont été introduites dans nos régions pour leur caractère décoratif. La plus remarquable est *P. alcicorne,* qui montre de grandes frondes basales stériles, disposées en coupe, d'où partent les frondes fertiles, dichotomes et pendantes; cette Fougère atteint 1 m de hauteur. *P. angolense,* d'Afrique, possède d'amples frondes fertiles en forme d'oreille d'éléphant, larges d'environ 40 cm. Chez *P. grande,* de Malaisie et d'Australie, les frondes stériles basales forment un grand bouclier d'une cinquantaine de centimètres et les frondes fertiles sont dressées à la base, pendantes ensuite (elles mesurent environ 2 m). *P. wilhelminae-reginae,* que l'on peut considérer comme une variété de l'espèce précédente, a des frondes stériles larges et hautes de 1 m, et des frondes fertiles pendantes, longues de 2 m, fourchues et veloutées. *P. willinckii,* de Java,

Thieffry - Fotogram

▼ *Le* **Scolopendrium officinale** ***est une espèce familière dans les puits, sur les murs ou dans les chemins creux.***

Photo Hallé

présente des frondes fertiles divisées et des frondes stériles découpées et arrondies.

Le genre *Pyrrosia* (= *Nipholobus*), riche d'une centaine d'espèces, est, lui aussi, constitué par des formes épiphytes mais à frondes généralement entières, souvent dimorphes. Les sores sont arrondis, quelquefois confluents, pourvus de paraphyses stellées. Ce sont en général des Fougères très velues, les poils servant à protéger la plante contre les déperditions excessives d'eau par transpiration : elles peuvent donc vivre dans un milieu assez sec. Plusieurs espèces sont cultivées.

La mieux connue est *P. lingua* — originaire du Japon et de Chine — qui a un long rhizome à écailles brunes et des frondes entières, arrondies à la base, longues de 10 à 20 cm, larges de 2 à 10 cm, et couvertes en dessous de poils serrés. *P. hastata* — lui aussi du Japon et de Chine — porte des frondes à segments lancéolés, avec de petits sores disposés en trois ou quatre rangées. *P. lanceolata* — d'Asie tropicale et d'Afrique tropicale — est une Fougère épiphyte, à frondes portées par des pétioles courts, les fertiles étant longues de 20 cm, glabres dessus et couvertes de poils serrés et blanchâtres dessous, les stériles étant obtuses et longues de 10 cm. Certaines de ces Fougères, *P. lingua* et *P. lanceolata*, qui seraient expectorantes, anthelminthiques et antidiarrhéiques, servent de plantes médicinales.

Le genre *Pleopeltis* comprend des épiphytes de petite taille, à rhizome couvert d'écailles, à frondes coriaces portant des écailles peltées; les sores sont munis, au moins chez le jeune, de paraphyses peltées.

Les *Drynaria* ont des frondes dimorphes, les stériles, brunes, sessiles, collectrices d'humus, et les fertiles, pennatifides ou pennées. *Drynaria quercifolia* — habitant l'Inde, l'Australie et la Polynésie — a été introduit dans nos régions comme plante ornementale; il a reçu le nom spécifique de *quercifolia* (= à feuilles de chêne) en raison de l'aspect de ses frondes stériles ovales-oblongues, cordiformes à la base, découpées comme des feuilles de chêne, longues de 30 cm et larges de 10 cm; quant aux frondes fertiles, elles mesurent jusqu'à 1 m sur 30 cm. *D. rigidula* possède des frondes fertiles lobées, de 1 m sur 30 cm, et des frondes stériles également lobées, très larges, ou disposées en coupe à la base; cette Fougère habite la région malaise.

Le genre *Lecanopteris* — qui comprend une quinzaine d'espèces de Malaisie et de Nouvelle-Guinée — présente des rhizomes charnus, renflés, riches en tissus aquifères, accrochés aux branches des arbres : leurs cavités sont habitées par les fourmis; les frondes simples ou pennées sont également charnues.

La famille des *Polypodiacées* comprend aussi les genres exotiques *Selliguea* et *Crypsinus*.

La famille des *Grammitidacées*, pantropicale, est très proche de celle des Polypodiacées et renferme plus de deux cent cinquante espèces, surtout épiphytes. Les principaux genres sont *Ctenopteris, Calymnodon, Cryptosorus, Grammitis, Prosaptia* et *Xiphopteris*. Les espèces de ces genres étaient naguère classées dans les Polypodiacées et même dans le seul genre *Polypodium;* elles en diffèrent par leurs écailles, leurs poils, leur nervation, leur anatomie.

Plagiogyriales

Cet ordre comprend l'unique famille des *Plagiogyriacées*. Les trente espèces environ qui appartiennent à cette famille, toutes réunies dans l'unique genre *Plagiogyria*, habitent l'Asie tropicale et l'Amérique. Il s'agit de Fougères terrestres à grosse tige dressée, courte et nue, qui rappellent par leur port notre osmonde royale et notre *Blechnum*. La base du pétiole est pourvue d'une double rangée de protubérances qui servent de pneumatophores; elle est renflée et aplatie; les frondes sont dimorphes, disposées en rosette et sont mucilagineuses chez le jeune. Les segments des frondes fertiles sont contractés, à nervures furquées; les sporanges portés par les nervures et protégés par le bord replié des pennes ont un anneau oblique, non interrompu par le pédicelle, s'ouvrant latéralement. La position systématique des Plagiogyriacées, par suite du manque d'affinités avec d'autres groupes de Fougères, est incertaine; on les a rapprochées des Cyathéacées et des Osmondacées. Le genre *Plagiogyria* est un genre primitif.

Hyménophyllopsidales

Cet ordre possède des caractères primitifs, son origine est probablement très ancienne et sa position systématique difficile à définir, bien que l'aspect de certaines Fougères rappelle celui de quelques *Hymenophyllum*. L'ordre comprend une seule famille, les *Hyménophyllopsidacées,* avec le seul genre *Hymenophyllopsis,* auquel appartiennent seulement deux espèces indigènes du Venezuela et des Guyanes; leurs frondes délicates, découpées, ne possèdent pas de stomates. Leurs sores sont terminaux ou subterminaux sur les nervures. Ces Fougères possèdent des sores qui rappellent ceux des Davalliacées; l'anneau du sporange est oblique et ininterrompu, les spores globuleuses.

Les Fougères possédant deux sortes de spores, ou Fougères *hétérosporées,* ont été diversement groupées. Nous distinguerons deux sous-classes (qui ont parfois été envisagées comme des classes).

● *Marsiléidées*

Cette sous-classe, avec celle des Salviniidées dont nous parlerons plus loin, constitue le groupe des Hydroptéridales ou Hydroptéridées, qui n'est pas un groupe homogène et dont la position systématique n'apparaît pas encore bien nettement. Il est probable, du reste, que chacune de ces deux sous-classes a son ascendance propre et très ancienne, et qu'elles ne sont pas très voisines bien qu'elles aient en commun d'être plus ou moins aquatiques et d'être hétérosporées, caractère qui semble rare, même chez les Fougères fossiles. Le corps végétatif est différent de celui de toutes les autres Fougères, les sporanges sont sans anneau, plus ou moins groupés en sores ou complètement enveloppés par une indusie. Les prothalles sont très réduits ainsi que les organes reproducteurs.

Marsiléales

Cet ordre, le seul de la sous-classe, comprend une seule famille, les *Marsiléacées,* trois genres *(Pilularia, Marsilea, Regnellidium)* et environ soixante-quinze espèces.
Ces Fougères ont été rapprochées des Schizaeacées. Ce sont des plantes aquatiques, semi-aquatiques ou terrestres, elles supportent l'assèchement temporaire du sol. Leur rhizome est radicant. Les frondes diffèrent beaucoup de celles des autres Filicopsides.
Chez les *Marsilea,* les frondes portent deux paires de pennes disposées en croix, ayant l'aspect d'un trèfle à quatre feuilles; chez certaines espèces, les frondes se présentent sous une forme différente selon qu'elles sont immergées ou émergées, c'est-à-dire selon la hauteur de l'eau. Les sores sont enveloppés chacun par une indusie, et l'ensemble fortement épaissi et sclérifié forme le sporocarpe, organe arrondi ou réniforme. Ils sont attachés isolément ou par groupes à la base du pétiole de la fronde et s'ouvrent par des fentes; leur surface externe représente la face inférieure de la fronde très modifiée, refermée sur les sores. Le sporocarpe est l'équivalent de l'ovule des Spermatophytes dont il est la préfiguration. A maturité, les sporocarpes, dont les parois sont assez résistantes, s'ouvrent dès qu'ils sont humidifiés, ce qui provoque le gonflement du tissu gélatineux, lequel s'étire peu à peu jusqu'à une longueur de quinze à vingt fois celle du sporocarpe, portant sur ses côtés deux rangées de sores en nombre variable. Chaque sore contient un mégasporange au sommet et des microsporanges à la base. L'indusie se rompt, et les spores sont libérées. L'ouverture du sporocarpe peut aussi avoir lieu non pas annuellement, mais à des intervalles beaucoup plus longs, toujours après que l'eau a exercé son action sur les parois. Cela n'a aucune influence sur les possibilités de germination des spores, puisqu'elles restent vivantes pendant très longtemps (jusqu'à vingt ou trente ans). Les prothalles mâles, très petits, ne sortent pas de la membrane de la microspore; ils donnent lieu, au bout de plusieurs heures, pourvu que les conditions du milieu soient favorables, à la formation des anthéridies, d'où naîtront les anthérozoïdes, spiralés et polyciliés. Le prothalle femelle est peu en saillie par rapport à la mégaspore

I.G.D.A.

▲ **Marsilea quadrifolia,** ***Fougère aquatique hétérosporée, en forme de « trèfle à quatre feuilles ». Les sores sont enfermés dans des sporocarpes à parois épaisses qui les protègent.***

dans laquelle il s'est développé; après un temps un peu plus long que celui qui est nécessaire pour les organes mâles, se forme l'archégone qui, en totalité, reste enveloppé dans une couche gélatineuse. Il suffit alors que l'un des anthérozoïdes atteigne le col de l'archégone pour qu'il arrive jusqu'à l'oosphère et la féconde.
Les espèces européennes de *Marsilea* sont au nombre de trois. La mieux connue est *M. quadrifolia* (marsilée ou marsilia à quatre feuilles, quatre-feuilles des marais, ou trèfle des marais). Les frondes, longuement pétiolées, ont des folioles rétrécies à la base, glabres, arrondies et entières au sommet. Les sporanges sont glabres, soit isolés, soit plus souvent par groupes de deux ou quatre sur des pédicelles d'environ 1 cm, situés à la base du pétiole avec lequel ils sont soudés. Les rhizomes sont longs, rampants, et de 60 à 80 cm, ayant des entrenœuds allongés; c'est une plante des étangs du centre, de l'ouest et de l'est de la France, d'Europe, d'Asie tempérée, d'Amérique boréale.
M. strigosa (= *M. pubescens*) se distingue facilement de l'espèce précédente par ses sporocarpes pubescents, aplatis, très rapprochés, sessiles, appliqués contre le rhizome. Cette Fougère est rare; on la trouve au Portugal, dans le midi de la France, le sud de l'U.R.S.S. et en Afrique du Nord. On rencontre aussi en Europe (Moldavie, delta de la Volga) *M. aegyptiaca*. Certaines espèces exotiques peuvent, de même que *M. quadrifolia,* se prêter à la culture. Nous citerons parmi elles *M. drummondi,* d'Australie, aux frondes dentelées, et

Page ci-contre :
◀ **Platycerium stemmaria,** ***Fougère épiphyte appartenant à l'ordre des Polypodiales.***

I.G.D.A.

▲ Salvinia natans, *Fougère aquatique hétérosporée flottant à la surface des eaux. Le genre* Salvinia *est actuellement représenté dans la flore vivante des régions tempérées, tropicales et subtropicales. Les feuilles et les rameaux ainsi que les microspores et les mégaspores sont connus à l'état fossile.*

Page ci-contre : ▶ *Il semble que l'on puisse rapprocher, du point de vue phylogénétique, les Salviniales des Dicksoniales, représentées ici par des Fougères arborescentes appartenant à l'espèce* Dicksonia antartica.

I.G.D.A. Archives B

M. hirsuta, dont les frondes sont velues. *M. drummondi* et encore mieux *M. nardu* (toujours d'Australie) fournissent le « nardou », produit tiré des sporocarpes, aliment riche en amidon dont se nourrissent les indigènes.

Le genre *Pilularia* a des frondes filiformes, gramminiformes. Les sporocarpes de *Pilularia* sont très brièvement pédonculés, attachés du côté adaxial de la base de la feuille, globuleux et contenant de deux à quatre sores avec des microsporanges et des mégasporanges; ils sont biloculaires ou tétraloculaires, et la déhiscence se fait par deux ou quatre valves, par gélification du tissu interne. Les microsporanges, disposés sur les flancs du sporocarpe, très nombreux, contiennent chacun environ soixante microspores; les macrosporanges, en nombre plus restreint, contiennent une seule mégaspore. On observe un anneau vestigial. Le prothalle mâle est très réduit, et le prothalle femelle possède un seul archégone. Les frondes sont filiformes, ressemblant à celles de jeunes Graminées. Les espèces de nos régions sont le poivre des marais ou *Pilularia globulifera* et *Pilula minuta*. La première atteint une hauteur d'environ 10 cm, a des frondes vert vif et possède des sporocarpes sphériques, de 3 à 4 mm, légèrement velus, sessiles ou subsessiles, à quatre loges et situés à la base des feuilles. *P. minuta* se distingue par ses petits sporocarpes d'un diamètre de 1 mm, glabres, à deux loges, pédonculés, à pédoncule recourbé, et par ses frondes très petites, qui ne dépassent généralement pas une longueur de 4 cm. On le trouve seulement autour de la Méditerranée occidentale. Quant au poivre des marais, on le trouve du Portugal et de l'île de Corfou à l'Europe centrale, toujours dans les marais, les étangs, les rizières, les bruyères humides, généralement parmi les joncs et les scirpes, avec lesquels il est assez facile de le confondre.

Le genre *Pilularia* comprend six espèces; outre celles déjà nommées, d'autres vivent en Australie, Nouvelle-Zélande et Amérique, notamment *P. americana*, de Californie et de l'Oregon.

Le genre *Regnellidium* occupe une position intermédiaire entre les *Marsilea* et les *Pilularia;* il se distingue par ses frondes à deux folioles charnues (au lieu de quatre chez les *Marsilea*). On en connaît une seule espèce, *R. diphyllum*, originaire du Brésil méridional.

On possède peu de renseignements sur les Marsiléacées fossiles; on a cependant découvert, dans les terrains tertiaires de l'Inde, un sporocarpe qu'on attribue à un *Regnellidium*, décrit sous le nom de *Rodeites dakshini*.

● *Salviniidées*

Cette sous-classe comprend aussi des plantes aquatiques flottantes très spécialisées, caractérisées par des sporocarpes qui consistent en un simple sore, renfermé dans une enveloppe assimilable à une indusie; chez les *Salvinia*, chaque sporocarpe contient seulement soit des mégasporanges, soit des microsporanges. Chez les *Azolla*, les sporocarpes contiennent au début des méga- et des microsporanges mais l'un des deux types avorte, et le sporocarpe adulte ne contient que des méga- ou des microsporanges. Les frondes ont une préfloraison non circinée. Le prothalle mâle est extrêmement réduit, constitué par quelques cellules seulement, et avec une ou deux anthéridies; le prothalle femelle, plus développé, porte un ou plusieurs archégones. La sous-classe comprend le seul ordre des *Salviniales*.

Salviniales

Cet ordre regroupe deux familles, les Salviniacées et les Azollacées. Les *Salviniacées*, plantes flottantes, sans racines, présentent des feuilles qui semblent à première vue au nombre de deux et opposées, nageantes, plus ou moins sessiles, vertes, horizontales, mais qui sont en réalité trois et verticillées, la troisième étant finement disséquée, pendante dans l'eau, verticale, avec des ramifications qui ressemblent à des racines couvertes de poils absorbants. Les sporocarpes sont insérés par groupes à la base des pseudo-racines, différenciés en mégasporocarpes et en microsporocarpes à paroi dure, basifixe homologue d'une indusie. Les microsporocarpes contiennent de nombreux microsporanges à soixante-quatre microspores. Les mégasporocarpes contiennent des mégasporanges à une seule mégaspore. Les sporanges sont sans anneau. Prothalle mâle, gamétophyte mâle, à deux anthéridies contenant six à huit anthérozoïdes. Prothalle femelle portant trois ou quatre archégones.

L'unique genre de la famille est le genre *Salvinia*, avec un seul représentant dans nos régions, la lentille d'eau *(Salvinia natans)*. Les feuilles de cette plante aquatique sont pourvues d'un minuscule pétiole; elles sont longues d'environ 1 cm, elliptiques, et sont disposées comme des feuilles opposées. Elles présentent des soies à la face inférieure et à la face supérieure, des protubérances portant chacune trois ou quatre poils libres, pluricellulaires, finalement brunâtres. Les sporocarpes sont sphéroïdaux, velus, groupés par trois à huit et ont un diamètre d'environ 2,5 mm. C'est une espèce annuelle, répandue en Eurasie; elle a été importée en Amérique du Nord.

On trouve aussi en Europe *S. rotundifolia*, originaire d'Amérique centrale et méridionale, et naturalisé en Espagne. Il possède des feuilles plus grandes et plus arrondies que la lentille d'eau, avec des papilles de 2 à 3 mm. Ces plantes recouvrent souvent totalement l'eau des fossés, des étangs et des petits lacs qu'elles peuplent. Le genre *Salvinia* contient une dizaine d'espèces, dont certaines sont propagées à des fins ornementales à la surface des aquariums, des bassins, etc. On utilise aussi dans ce dessein *S. minima* d'Amérique centrale et méridionale, à feuilles d'un diamètre de 1 cm et à papilles hautes de 3 mm.

Des restes fossiles pouvant être attribués aux Salviniales datent de l'Éocène et du Miocène. Leur parenté phylogénétique est encore mal définie; elles sembleraient, par divers caractères, se rapprocher des Dicksoniales et des Hyménophyllales.

Les *Azollacées* sont de minuscules plantes très ramifiées, qui rappellent un peu, par certains de leurs caractères, les Bryophytes. Leurs racines sont longues, fines, non ramifiées, leurs tiges sont grêles. Les feuilles sont bilobées jusqu'à la base, disposées en deux rangées et imbriquées; les lobes sont dimorphes, le lobe supérieur,

épais, aérien, vert, possède une cavité qui est toujours occupée par des colonies d'Algues bleues microscopiques *(Anabaena),* avec lesquelles la plante vit en symbiose, ainsi que par des Bactéries qui fixent l'azote de l'air au profit de la Fougère ; le lobe inférieur est pâle, scarieux, flottant.

Les sporocarpes sont fixés par deux ou quatre sur le lobe inférieur de la première feuille de chaque rameau, enveloppés par une indusie ; ils sont unisexués ou bisexués. Le microsporocarpe, plus grand, contient plusieurs microsporanges à soixante-quatre microspores. Chaque microsporange contient trois à huit corps arrondis ou massules qui portent à leur surface de petits organes en crochets (les glochidies) ; ceux-ci servent à fixer les massules aux mégaspores, quand le sporange s'ouvre. Les mégasporanges, plus petits, finissent par contenir une seule mégaspore, qui se développe aux dépens des autres, et ces mégaspores, non développées et non fonctionnelles, restent toutefois unies, en fournissant à la mégaspore développée des corps remplis d'air pour en favoriser la flottaison ; la mégaspore produit un gamétophyte très réduit. La multiplication végétative par fragmentation est rapide chez ces plantes, et permet aux *Azolla* de se répandre à la surface des eaux, où les peuplements, qui forment un véritable tapis, pourraient être confondus avec ceux des *Lemna ;* mais les *Lemna* sont vert vif, alors que les *Azolla* tendent au vert brunâtre. On observe deux espèces dans nos régions, *Azolla caroliniana* et *A. filiculoides,* mais elles ne sont pas indigènes : ce sont des espèces américaines naturalisées. Les feuilles d'*A. caroliniana* sont longues de presque 1 mm, aiguës, et étroitement membraneuses au bord, très ponctuées, alors que, chez *A. filiculoides,* elles sont un peu plus grandes (environ 1 mm et plus), à ponctuation peu marquée, à lobe supérieur arrondi, obtus, largement membraneux. Ces petites plantes, qui, lorsqu'elles couvrent complètement la surface de l'eau, semblent faire obstacle au développement des moustiques, peuvent être utilisées dans les petits bassins et les aquariums ; on se sert aussi dans le même dessein d'*A. pinnata* — originaire d'Australie, du Japon et d'Afrique du Sud — qui a ses massules dépourvues de glochidies, à la différence des deux autres espèces décrites.

BIBLIOGRAPHIE

BAKER J. C., *Handbook of the Ferns Allies London*, 1887. - BOUREAU Éd., *Traité de paléobotanique*, Masson, vol. II, 1967 ; vol. III, 1964 ; vol. IV, 1970. - BOWER F. O., *The Ferns*, 3 vol., Cambridge, 1923, 1926, 1928. - CHING R. C., *On Natural Classification of the Family Polypodiaceae, in Sunyatsenia* 5 (4), 201-268, 1940. - COSTE H., *Flore de France*, 3, 1906. - CHRIST H., *Die Farnkräuter der Erde*, Iéna, 1897. - CHRISTENSEN C., *Index filicum*, 1905-1906, et *Supplements*, 1913, 1917, 1934 ; *Filicinae, in Verdoorn, Manual of Pteridology*, La Hague, 1938. - COPELAND E. B., *Genera filicum*, Waltham, 1947. - EAMES A. J., *Morphology of Vascular Plants, Lower Groups*, New York et Londres, 1944. - EMBERGER L., *les Plantes fossiles dans leurs rapports avec les Végétaux vivants*, Paris, Masson, 1944 ; *les Végétaux vasculaires, in* CHADEFAUD M. et EMBERGER L., *Traité de botanique*, 2, Paris, 1960. - ENGLER A. et PRANTL K., *Die naturlichen Pflanzenfamilien* 1 (4), Leipzig, 1898-1900. - HOLTTUM R. E., *A Revised Classification of Leptosporangiate Ferns, in* J. Linn. Soc. (Bot.) 53, 123-158, 1947 ; *The Classification of Ferns,* Biol. Rev. 24, 267-296, 194. - HOOKER W. J. *Species filicum*, 5 vol., Londres, 1844-64. - HOOKER W. J. et GREVILLE R. K., *Icones filicum*, 1827-32. - MANTON I., *Problems of Cytology and Evolution in the Pteridophyta*, Cambridge, 1950. - MELCHIOR H. et WERDERMANN E., *in Engler's Syllabus der Pflanzenfamilien*, éd. 12, 1, Berlin 1954 ; *Pteridophytes par* Reimers, 269-311. - MOORE T. et LINDLEY J., *The Ferns of Great Britain and Ireland*, Londres, 1855. - NESSEL H., *Die Bärlappgewäsche (Lycopodiaceae)*, Iéna, 1939. - PICHI-SERMOLLI R. E. G., *The Higher Taxa of Pteridophyta and Their Classification, in « Systematics of to-day »*, éd. Hedberg, Uppsala Univ. Arsskrift, 70-90, 1958 ; *Pteridophyta in Vistas in Botany*, éd. Turill, Bicentenary vol. Roy. Gard. Kew, 421-493, 1959. - REY PAIHADE C. de, *les Fougères de France*. - ROTHMALER W., *Die Abteilungen und Klasse des Pflanzen in* Feddes, Repert. Sp. nov. 54, 256-66, 1951. - ROUY G., *Flore de France*, 14, 1913. - TARDIEU-BLOT M. L., Ptéridophytes, 104 pp., Paris, 1954. - TUTIN T. G., HEYWOOD V. H., *all., Flora europea. Pteridophytes*, 1, 1-25, 1964.

Photo Hallé

▶ *Les* **Drynaria** *sont des grandes Fougères épiphytes qui possèdent comme les* **Platycerium** *des frondes hétéromorphes : les unes sont persistantes, sessiles, recouvrant les racines et accumulant l'humus, les autres sont chlorophylliennes, pétiolées, stériles ou fertiles.*

J. Muench

LES GYMNOSPERMES

Les Gymnospermes (des mots grecs γυμνός, nu, et σπέρμα, graine) sont une importante division des Spermaphytes, plantes à graines, qui eurent leur période de prospérité lors des ères passées ; elles sont représentées aujourd'hui par environ sept cents espèces.

Beaucoup de celles-ci sont des plantes sociales, constituant des forêts étendues, parfois monospécifiques, aussi l'importance des Gymnospermes est-elle bien supérieure à ce que l'on pourrait penser en voyant le nombre de leurs espèces, somme toute assez modeste, tout au moins par rapport aux Angiospermes.

Au Mésozoïque, elles constituèrent la végétation dominante, précédant les Angiospermes, qui sont, en revanche, les plus répandues actuellement. On connaît d'innombrables fossiles de Gymnospermes, et des ordres entiers qui leur appartiennent sont aujourd'hui éteints. Qu'il s'agisse des espèces disparues ou vivantes, ce sont des formes ligneuses, souvent à tronc élevé (très rarement des lianes), et en général de grande longévité. Ce groupe est intermédiaire entre les Ptéridophytes et les Angiospermes ; en effet, les plus primitives ont encore, comme les premières, une fécondation zoïdogame (gamètes nageurs des Cycadales, des Ginkyoales), alors que les plus spécialisées (Gnétales) se rapprochent, tout au moins morphologiquement, des secondes.

La graine et la reproduction

Les ovules nus des Gymnospermes sont situés soit sur des feuilles fertiles ou mégasporophylles (Ptéridospermales, Cycadales), soit sur des écailles séminales de nature complexe (Coniférales), soit même sur des axes spécialisés (Bennettitales, Taxales). Ils sont à l'origine de graines elles-mêmes nues. A la différence des Angiospermes, il n'existe pas d'ovaire, et partant pas de fruit véritable, mais divers mécanismes de protection peuvent éventuellement en tenir lieu : écailles interséminales, écailles séminales développées au cours de la maturation, arilles.

L'ovule abrite un gamétophyte femelle porteur d'archégones comme chez les Ptéridophytes, mais qui, plus réduit que chez ces dernières, demeure entièrement dépendant de la plante mère, et se transformera dans la graine en un tissu de réserve, l'endosperme. Chez les Angiospermes, ce prothalle est par contre extrêmement réduit et a disparu dans la graine, qui édifie ses réserves par d'autres procédés.

Chez les Gymnospermes les plus primitives le développement du prothalle et l'accumulation des réserves se font bien avant la fécondation et indépendamment de celle-ci. L'ovule non fécondé a l'aspect d'une graine. Chez les formes les plus évoluées, la fécondation est le préalable nécessaire à ces phénomènes. Certains auteurs se sont fondés sur ce caractère pour introduire chez les Gymnospermes une coupure systématique importante opposant les Préspermaphytes ou Préphanérogames aux Spermaphytes vrais. Il s'agit d'un niveau d'évolution de même nature que celui qui oppose, chez les Vertébrés, les ovipares aux vivipares.

Les grains de pollen, pluricellulaires, contiennent à maturité, c'est-à-dire immédiatement avant la fusion des gamètes, plusieurs noyaux prothalliques primitifs, sujets à une dégénérescence ultérieure, et les noyaux spermatiques qui président à la fécondation.

Le grain de pollen donne toujours une cellule végétative à noyau (noyau du tube pollinique) ; cette dernière cellule produit justement le tube pollinique, qui, dans certaines classes, à gamètes mobiles et ciliés, a encore des fonctions principalement de suspenseur, reste de l'appareil végétatif bien plus développé chez les Fougères. En revanche, chez les Conifères, le tube pollinique, comme chez les Angiospermes, correspond à une structure conductrice des noyaux spermatiques immobiles, jusqu'à l'oosphère.

L'appareil reproducteur

Les chatons et les strobiles formés de pièces mâles (les étamines) ou femelles (écailles séminales) en nombre indéfini représentent les « fleurs » des Gymnospermes actuelles. Ils sont normalement unisexués, avec, si l'on excepte la classe éteinte des Bennettitinées, quelques exemples de bisexualité chez les Gnétinées. Dans les

▲ ***Mary Lake, en Colombie britannique (Canada), est cerné par une forêt de Conifères qui s'étend aux contreforts des montagnes voisines jusqu'à l'étage des pelouses dépourvues d'arbres.***

Nuridsany - Reichert

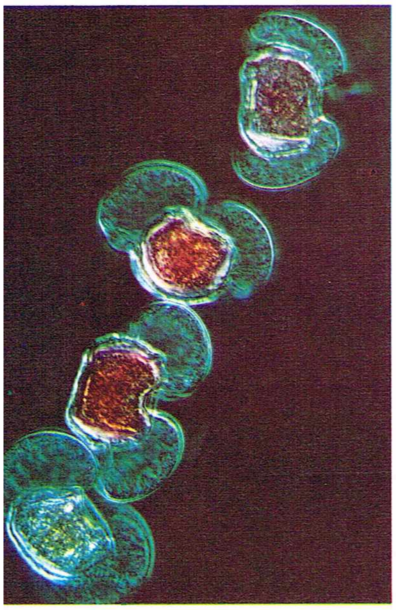

▲ ***Grains de pollen de pins, pourvus de sacs aérifères, vus au microscope.***

chatons mâles, qui sont terminaux (Cupressacées) ou axillaires (Abiétacées), les étamines sont disposées en hélice ou sont verticillées sur l'axe, lequel porte souvent à la base des cataphylles. Les sacs polliniques (deux ou plusieurs) s'ouvrent par un dispositif situé dans l'exothécium (couche externe de la paroi) et non dans l'endothécium (couche interne) comme chez les Angiospermes.

Les dispositifs femelles des Gymnospermes sont variés et caractérisent chaque classe. Les Conifères en particulier possèdent des strobiles femelles, habituellement axillaires. On y voit des écailles séminales insérées à l'aisselle d'une bractée plus ou moins saillante (très visible chez le mélèze, le sapin) : la structure est donc plus celle d'une inflorescence que celle d'une fleur. Le strobile est souvent ligneux. Bractée et écaille peuvent se souder en complexe séminal (Taxodiacées, Cupressacées), et même devenir charnues (genévrier).

La pollinisation est normalement anémophile. Après la fécondation, l'embryon peut attendre, sauf chez les classes les plus primitives, à l'état de vie latente, le moment favorable pour la germination. Les graines, généralement nues, ont un tégument résistant et souvent ailé chez les Abiétacées et les Cupressacées; elles sont rarement entourées par un arille charnu *(Taxus, Torreya)*; elles constituent de faux fruits drupacés chez les Cycadales et les Ginkyoales.

La tige et les feuilles

Les tiges sont à structure eustélique, avec des formations secondaires abondantes chez les groupes phylogénétiquement les plus évolués, et il n'y a pas de vaisseaux ligneux (sauf chez les Gnétales), mais des trachéides; le phloème est constitué seulement par des vaisseaux criblés, les cellules annexes manquant; les faisceaux conducteurs sont collatéraux et ouverts. La présence de tissus sécréteurs est commune. La croissance en diamètre se fait par un cambium, selon des anneaux annuels réguliers.

La caractéristique du genre *Gnetum* et de certaines Cycadales est l'apparition de cambiums secondaires extra-fasciculaires, qui entrent en fonctionnement quand le cambium primaire cesse son activité. Les rameaux, habituellement disposés de façon régulière, prennent naissance à l'aisselle de certaines feuilles. Mais la plupart de ces dernières, dépourvues de bourgeon axillaire, sont dites à aisselle vide. Les feuilles durent habituellement pendant plus d'un cycle végétatif et ont une forme variable; en général, elles sont disposées en spirale, et rarement verticillées ou opposées. Leurs nervures ne sont pas ramifiées ou bien ont des ramifications dichotomes (elles sont réticulées seulement chez les *Gnetum*).

SYSTÉMATIQUE

Selon les conceptions les plus récentes, bien qu'elles ne soient pas encore acceptées par tous, les Gymnospermes s'insèrent, dans l'embranchement des Pteropsida, entre la division des Ptéridophytes et celle des Angiospermes. On y reconnaît trois phylums distincts, dont deux sont bien individualisés, tandis que le troisième, beaucoup plus hétérogène, est en fait très artificiel.

Cycadophytes, avec les ordres des Ptéridospermales, Cycadales, Pentoxylales, Caytoniales, Bennettitales : port arborescent, peu élevé et peu ramifié, grandes feuilles, structures femelles simples.

Coniférophytes, avec les ordres des Cordaïtales, Ginkyoales, Coniférales, Taxales : grands arbres ramifiés, petites feuilles, structures femelles complexes.

Gnétophytes, avec les Éphédrales, Gnétales et Welwitschiales : buissons ou lianes, bois hétéroxylé, ovule protégé par une enveloppe (chlamyde).

La fécondation est le fait de noyaux inertes, sauf chez les Ptéridospermales, Cycadales, Cordaïtales et Ginkyoales que d'autre part les caractères primitifs de la graine font considérer par certains auteurs comme un groupe intermédiaire entre les Cryptogames et les Phanérogames, le groupe des Préphanérogames, ou Préspermaphytes.

Dans le présent ouvrage, nous suivrons cependant l'ordre systématique classique, qui comprend sept classes : Cycadofilicinées ou Ptéridospermes, Cycadinées, Bennettitinées, Cordaïtinées ou Cordaïtes, Ginkyoinées, Conifères, Gnétinées.

I.G.D.A.

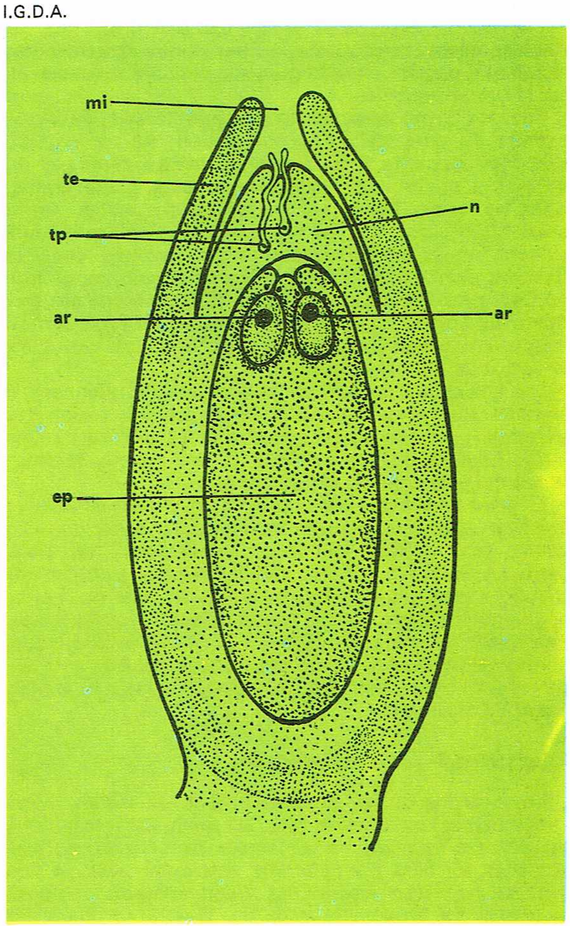

▶ ***Coupe longitudinale schématique d'un ovule de Conifère en cours de fécondation. mi = microphyle; te = tégument; tp = tube pollinique; ar = archégone; ep = endosperme; n = nucelle.***

GYMNOSPERMES

Phylums	Classes	Ordres
CYCADOPHYTES	*Ptéridospermes*	*Ptéridospermales*
		Caytoniales
	Cycadinées	*Cycadales*
	Bennettitinées	*Bennettitales*
		Pentoxylales place incertaine
CONIFÉROPHYTES	*Cordaïtes*	*Cordaïtales*
	Ginkyoinées	*Ginkyoales*
	Conifères	*Coniférales*
GNÉTOPHYTES = CHLAMYDOSPERMES	*Gnétinées*	*Éphédrales*
		Welwitschiales
		Gnétales

CYCADOFILICINÉES PTÉRIDOSPERMALES

Cette classe de plantes à forme de Fougères, connue seulement à l'état fossile, est la plus primitive parmi les Végétaux pouvant former de véritables graines. Les individus qui la composent diffèrent des Fougères, isosporées, par une hétérosporie poussée jusqu'à l'apparition d'un ovule et de grains de pollen. Par suite de ces caractères, de nombreux auteurs les considèrent comme un terme de passage entre les Fougères et les Angiospermes; selon d'autres, on ne pourrait cependant pas mettre en évidence des liens de dérivation directe entre les Ptéridospermes et les Fougères, mais seulement chercher des ancêtres communs possibles chez les Psilophytes, ensemble fort complexe.

La classification de ce groupe est artificielle, les fossiles étant souvent incomplets; il existe même quatre classifications différentes, dont chacune est fondée, respectivement, sur les caractères de la tige, des feuilles stériles, des inflorescences et de la graine. Ces classifications, en outre, ne peuvent pas toujours coïncider, étant donné qu'on a découvert, par exemple, pour une même espèce, selon les époques, divers organes.

Généralement de petite taille, à port de liane ou semblable à celui des Fougères arborescentes, les Ptéridospermes ont été répandues, au Paléozoïque puis au Mésozoïque, dans les deux hémisphères. Elles sont ainsi représentées du Dévonien moyen jusqu'au Crétacé, avec un apogée au Carbonifère et un déclin graduel au cours du Permien, parallèlement à une évolution du climat vers la sécheresse.

La tige des Ptéridospermes a une structure primaire stélique (protostèle ou polystèle) à laquelle s'ajoute une structure secondaire ressemblant peu à du bois secondaire; les amples frondes à préfoliaison circinée et à ramification complexe présentent une parenté morphologique avec celles des Fougères. Les types les plus anciens possèdent des segments très divisés; les pinnules deviennent ensuite concrescentes, pour aboutir au genre *Gigantopteris* à feuilles lobées, et enfin aux espèces du genre *Glossopteris*, caractéristiques du Carbonifère de l'hémisphère austral, dont les feuilles montrent une nervation réticulée. Il est démontré que la cuticule foliaire devait être résistante, comme celle des Gymnospermes et à la différence de celle des Fougères.

On peut observer dans la tige des canaux sécréteurs et des poches sécrétrices constants. La ramification est dichotome ou, plus rarement, pseudo-dichotome. Plantes unisexuées, probablement dioïques, les Ptéridospermes portent des microsporophylles réunies en inflorescences très diverses mais ne formant, de toute façon, jamais de strobiles. Les microsporanges sont biloculaires, rarement uniloculaires, et groupés en synanges. Les grosses microspores (grains de pollen) germaient en donnant lieu, sans doute, à un prothalle produisant des anthéridies à anthérozoïdes. Le mégasporange, portant une seule mégaspore, est semblable à l'ovule des autres Gymnospermes. Dans un type ancien, mais bien connu, *Lyginopteris oldhami*, les ovules sont insérés en position sommitale sur les axes dépourvus de frondes, caractère qui — selon certains auteurs — serait un « souvenir » des rameaux sporangifères des Psilophytes; chez des types plus récents, les ovules sont portés par des pennes à lame élargie, d'abord au sommet, puis aux bords de celles-ci; chez les espèces permiennes, on les trouve insérés sur le rachis ou sur la lame. La pollinisation était sans doute anémophile.

Chez l'espèce citée ci-dessus, les tiges, faibles et épineuses, peut-être en forme de lianes, avaient une moelle épaisse et étaient entourées par un anneau de bois assez peu développé, renforcé par un système de fibres de sclérenchyme en réseau.

La graine, chez de nombreuses Ptéridospermes, était produite dans une cupule dont la nature est inconnue.

Par rapport aux autres groupes de Végétaux, les Ptéridospermes sont proches des Filicinées eusporangiées quant à la structure des frondes stériles et des appareils reproducteurs mâles; elles se rapprochent des Cycadinées par leurs graines, par leurs appareils reproducteurs femelles, et par la croissance secondaire de leur tige.

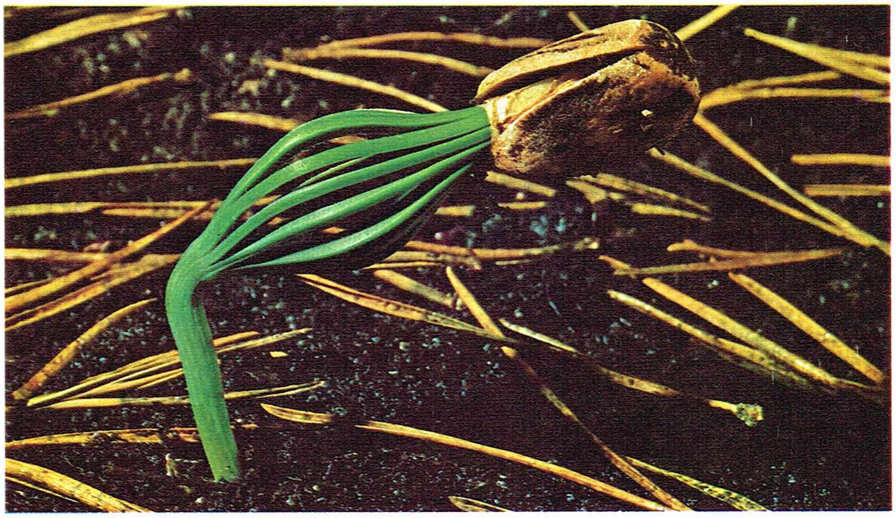

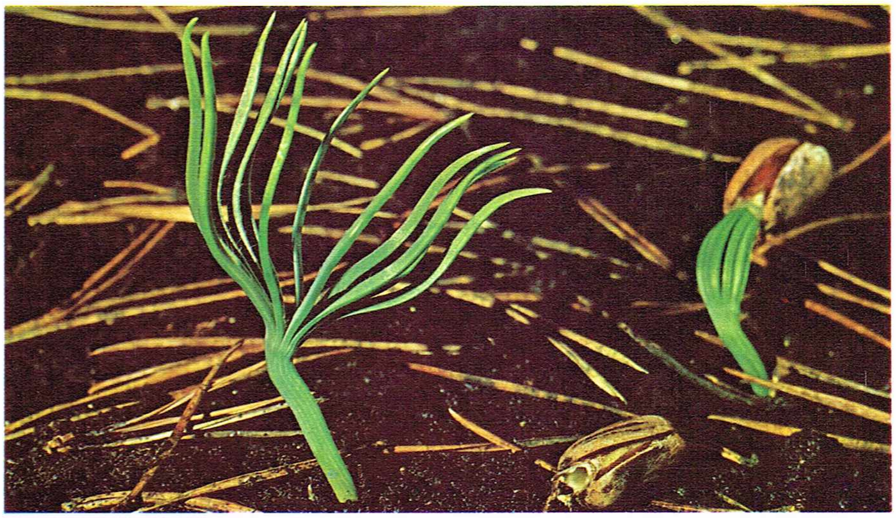

Clichés C. et M.C. Nuridsany - Atlas Photo

Phases successives de la germination de la graine du pin pignon, ou pin parasol* (Pinus pinea)*. Les cotylédons, fanés, sont encore visibles chez le jeune plant d'un an qui figure sur le dernier cliché.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Coupe transversale d'un strobile de* Pinus *(à gauche). Les graines sont soutenues par des écailles séminales qui s'écarteront à maturité (à droite).*

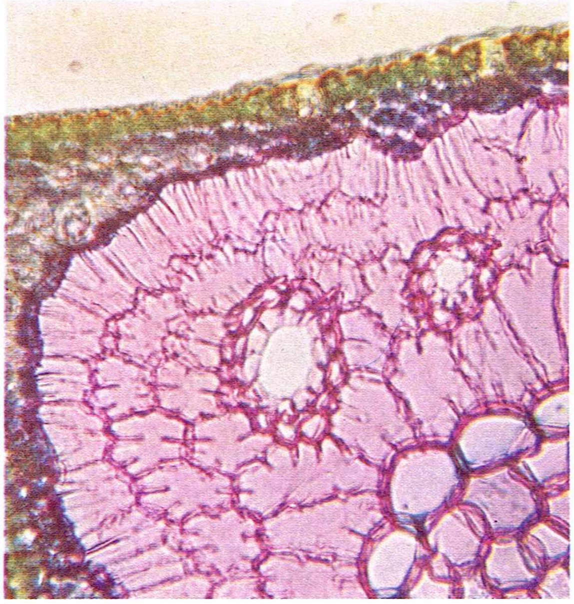

K. Ross - Jacana

Coupes, vues au microscope, d'une aiguille de pin, montrant nettement trois canaux sécréteurs, de section circulaire (à droite), et structure générale de l'aiguille (en bas).

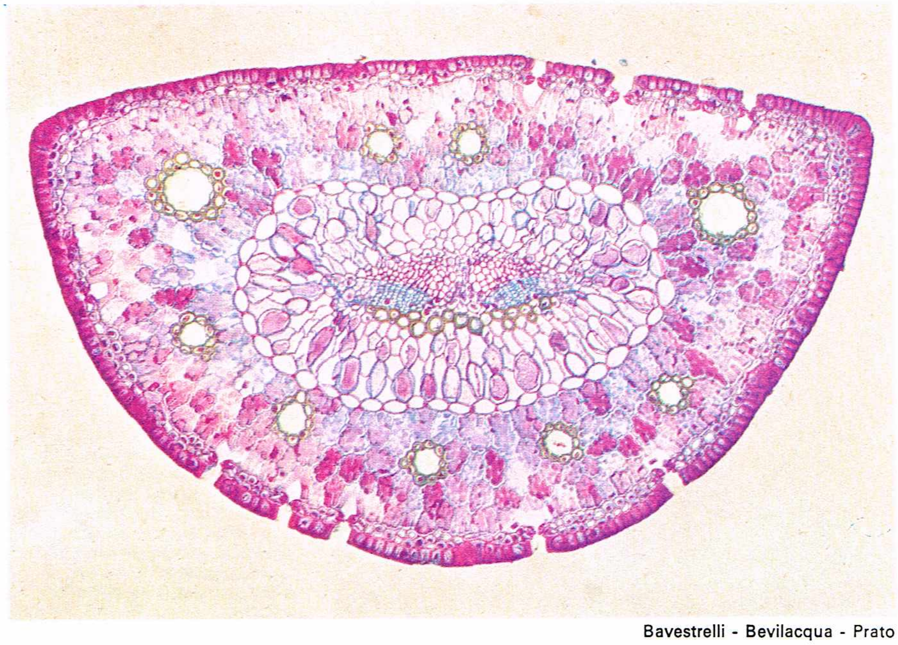

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Au début du Mésozoïque, les Ptéridospermes se prolongent par de petites familles à caractères évolués. En particulier, les Caytoniales possédaient un feuillage composé à quatre folioles, semblable à celui des Dicotylédones, et des ovules petits, protégés dans une structure close en utricule, faisant songer à un gynécée. Aussi a-t-on pu y voir un stade pro-angiosperme, dont auraient pu dériver certaines plantes supérieures.

CYCADINÉES CYCADALES

Les représentants actuels de cette classe, uniquement tropicaux, constituent ce qui reste d'un groupe à diffusion ancienne bien plus vaste, témoignée par des fossiles datant du Mésozoïque, avec des prolongements au Jurassique et au Crétacé, époque de leur prospérité. Les Cycadales ont été ensuite présentes à l'ère tertiaire (Cénozoïque), y compris en Europe. Les espèces qui leur appartiennent ont l'aspect de palmiers et présentent aujourd'hui des aires très discontinues ; ce fait, qui indique l'ancienneté de leur origine, de même que leur organisation, les fait considérer comme des fossiles vivants.

La tige est typiquement non ramifiée, monopodique ou sympodique, couverte ou non par la base des feuilles, et en général assez peu élevée (dans certains cas, il s'agit cependant de troncs dépassant 20 m de hauteur) ; elle est parfois tubériforme et surtout souterraine *(Zamia) ;* sa croissance est lente et sa longévité importante.

Les feuilles, qui sont persistantes plusieurs années, sont grandes, pennées ou bipennées *(Bowenia),* et à préfoliaison circinée ; elles forment une touffe au sommet du tronc, où elles sont disposées en spirales très serrées. Les bourgeons et les ébauches de feuilles sont protégés par des feuilles écailleuses et laineuses.

Les appareils radicaux sont caractéristiques ; les radicelles secondaires, plusieurs fois divisées, donnent à l'ensemble un aspect coralloïde et abritent dans leur parenchyme cortical des colonies d'Algues bleues *(Nostoc, Anabaena)* et des Bactéries, en une symbiose que l'on pense liée à la fixation de l'azote atmosphérique.

La tige, qui, comme toutes les parties de la plante, est parcourue par des canaux mucifères, présente une structure secondaire et un important parenchyme médullaire souvent riche en amidon, entouré par un anneau de faisceaux conducteurs collatéraux séparés par des rayons médullaires qui arrivent jusqu'à l'écorce ; un cambium, qui peut durer toute la vie de la plante, préside à la croissance en diamètre ; lorsqu'il dégénère, il est remplacé par d'autres zones de cambium qui prennent naissance de l'écorce.

Chez les *Cycas* femelles, le sommet florifère de la tige a une croissance indéfinie, ce qui fait qu'après la floraison, il assure le développement en hauteur de la plante.

Les feuilles sont caractérisées par deux faisceaux vasculaires collatéraux ou concentriques, chaque penne étant parcourue par un seul faisceau.

Les Cycadinées sont des plantes dioïques, avec des microsporophylles et des mégasporophylles disposées diversement, mais toujours dépourvues de périanthe. Les premières constituent dans leur ensemble un strobile ; elles portent des sacs polliniques en nombre variable, épars, ou réunis en formant des sores. Les secondes sont également réunies en strobiles chez les formes les plus évoluées, alors qu'elles sont constituées par des feuilles pennées, réduites et non vertes, avec des ovules marginaux, chez les formes archaïques, comme le genre *Cycas*. Les sporophylles pennatifides, la préfoliaison circinée des feuilles, la grosseur de la moelle, la présence d'anthérozoïdes ciliés sont des caractères archaïques qui ont fait penser à une dérivation des Cycadinées (et des Bennettitinées) à partir des Ptéridospermes ; l'éloignement évolutif aurait eu lieu au Carbonifère ou au Permien.

L'ovule, chez ces plantes, est constitué par un tégument différencié en trois couches, avec un nucelle pourvu au sommet d'une chambre pollinique. Il convient de suivre dans certains détails le phénomène qui accompagne la fécondation, étant donné l'intérêt que ces Gymnospermes à organisation assez primitive revêtent pour la phylogenèse. Les grains de pollen, emportés par le vent,

◄ **Cycas revoluta,** ***originaire du sud du Japon et de la Chine. Chez les individus femelles du genre*** **Cycas,** ***le sommet de la tige assure la croissance de la plante après la floraison.***

arrivent dans la chambre pollinique, où ils sont retenus par la sécrétion d'une gouttelette de liquide; là, ils germent en donnant un tube pollinique, lequel se fixe aux cellules voisines pour en tirer des substances nutritives en faveur du microprothalle (comme cela a lieu chez le genre *Ginkyo*); ce tube pollinique diffère dans ses fonctions de celui des Angiospermes qui sert uniquement au transfert des noyaux mâles vers l'oosphère. La cellule anthéridiale du grain de pollen donne naissance à deux anthérozoïdes ciliés (qui, par leur diamètre pouvant atteindre 0,3 mm, sont les plus gros des règnes animal et végétal), lesquels, après la dégénérescence du tube pollinique, atteignent l'oosphère en nageant dans la chambre pollinique. La fécondation se fait plusieurs mois après la pollinisation, alors que la graine est encore sur la plante mère, ou même après que la graine est tombée. Cette dernière ressemble souvent à une fausse drupe, car la partie moyenne du tégument devient ligneuse, pendant que la partie externe se fait charnue et souvent vivement colorée. L'embryon se développe avec deux cotylédons et germe presque immédiatement; la période de repos est négligeable.

Les Cycadinées vivantes comprennent neuf genres des régions tropicales des deux hémisphères, avec environ quatre-vingt-quinze espèces. *Cycas revoluta* ou sagou du Japon est originaire du Japon méridional et de la Chine du Sud-Est; *Cycas circinalis* ou sagou de la Nouvelle-Hollande se rencontre aux Philippines et en Indonésie; il fournit un aliment amylacé; les *Zamia* et les *Ceratozamia* se caractérisent par la croissance définie de leurs tiges, les *Encephalartos,* à feuilles coriaces et épineuses, par des formes dont la pollinisation est opérée par l'intermédiaire d'Insectes; *Stangeria paradoxa,* habitant le Natal, est l'unique représentant d'un genre à caractères archaïques; *Macrozamia* et *Bowenia* sont des genres australiens; *Dioon edule,* du Mexique, a de grosses graines amylacées comestibles; enfin, *Microcycas* est un genre monospécifique de Cuba.

De nombreuses espèces comme *Encephalartos horridus* (qui donne le « pain des caffres »), *Cycas revoluta,* déjà cité, et divers *Zamia, Macrozamia,* etc., sont cultivées pour l'ornementation.

BENNETTITINÉES BENNETTITALES

Cette classe, complètement disparue mais bien connue à l'état fossile, a eu une grande diffusion au Mésozoïque, dans l'hémisphère boréal, avec des milliers d'espèces. Apparue à la fin du Permien, elle représente le groupe végétal le plus important, avec les Cycadinées primitives, pendant le Trias et le Jurassique; elle s'est éteinte au Crétacé.

Il s'agissait de plantes hautes de quelques centimètres ou, le plus souvent, d'arbres de quelques mètres, qui avaient comme caractère important et nouveau, par rapport aux classes voisines des Ptéridospermes (dioïques?) et des Cycadinées dioïques, la possession de véritables fleurs hermaphrodites; aussi de nombreux auteurs les considèrent comme des ancêtres des Angiospermes.

▲ *Deux représentants de la classe des Cycadinées :* Dioon edule *(à gauche) et* Encephalartos horridus *(à droite, vue partielle d'une fronde).*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Leur tige était le plus souvent simple et en forme de tonneau, mais parfois élancée et bifurquée ; elle pouvait être couverte par les parties basales des feuilles mortes et présenter des entre-nœuds raccourcis, avec une couronne apicale de très grandes feuilles pennées ; dans d'autres cas, les feuilles étaient entières, petites, à nervation réticulée.

En ce qui concerne la structure interne de la tige, eustèle à xylème endarche, on a observé un abondant parenchyme médullaire, pourvu de canaux mucifères, de grandes trachéides normalement scalariformes (spiralées dans le protoxylème), peu de bois secondaire et l'absence d'anneaux de croissance, à de rares exceptions près.

Les fleurs étaient portées en grand nombre sur les parties les plus anciennes de la tige (cauliflorie), dans la couronne foliaire, ou à l'aisselle de ramifications dichotomiques ; elles avaient parfois une taille de plusieurs centimètres, étaient sessiles ou pédonculées, bisexuées ou unisexuées, et monoïques ou dioïques. Chez de nombreuses plantes, la monocarpie devait être la règle, c'est-à-dire que les individus devaient fleurir une seule fois dans leur vie pour mourir ensuite. La fleur, hermaphrodite, particulièrement spécialisée chez le genre *Cycadeoidea,* présentait, en partant de l'extérieur : un périanthe évolué formé par plusieurs feuilles liguliformes, disposées en spirale, souvent tomenteuses ; des étamines pennées (comme chez les Ptéridospermes) en nombre élevé, enroulées vers l'intérieur dans la phase précoce (comme les jeunes frondes des Fougères) et munies chacune de nombreux synanges de microsporanges. Le gynécée se trouvait au centre de la fleur : il avait un axe court et gros, couvert de nombreux ovules longuement pédonculés, entremêlés d'écailles interséminales stériles, qui avaient pour rôle important de protéger, comme des carpelles, les ovules eux-mêmes, puis plus tard les graines ; ces dernières étaient dicotylédones. Les étamines de certaines formes unisexuées (comme les *Williamsonia*) présentaient peu de divisions, ou même aucune, et portaient un nombre moins important de sporanges. Il y avait protérandrie, les étamines arrivant à maturité quand les appareils reproducteurs femelles étaient encore juvéniles. La fécondation se faisait probablement au moyen de gamètes mâles ciliés.

CORDAITINÉES CORDAITALES

Ces Végétaux constituent un groupe fossile d'arbres sociaux qui formèrent des forêts étendues au Paléozoïque, au Dévonien supérieur et surtout à la fin du Carbonifère inférieur. La famille des Cordaïtacées *(Cordaitaceae)* eut une grande importance dans la constitution de la flore des deux hémisphères terrestres, où elle fut caractéristique des associations continentales.

Les Cordaïtes ont également fait partie de la flore du continent de Gondwana, au Permo-Carbonifère, surtout dans l'hémisphère austral ; elles subsistaient encore au Mésozoïque.

Les représentants de cette classe, qui pourrait avoir dérivé en même temps que les Cycadinées, mais indépendamment d'elles, des Psilophytes (les Ptéridophytes les plus primitives), ont été les premières plantes à fleurs qui soient apparues sur terre, et les premières formes

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ *Les Cycadinées présentent l'aspect de palmiers, comme l'atteste ce* Cycas revoluta, *aux feuilles pennées.*

ligneuses à bois secondaire par suite de croissance diamétrale.

Il s'agissait d'arbres mesurant jusqu'à 30 à 40 m de hauteur, et 1 à 2 m de diamètre *(Callixylon)*. La tige était ramifiée, avec des branches couvertes de feuilles coriaces, simples, parallélinerves, disposées en spirale, longues parfois de 1 m et de forme variable (lancéolées, rubaniformes, gramminiformes, acutiformes, à sommet spatulé ou aigu). La structure interne du tronc consistait en une eustèle ectophloïque, avec une grosse moelle et peu de bois, et avec des faisceaux à structure collatérale. Le bois secondaire était très développé, à peu près comme chez les Conifères d'aujourd'hui, dans la famille des Cordaïtacées. Les ponctuations des trachéides ressemblaient à celles qu'on observe actuellement dans le genre *Araucaria* des Conifères. Il n'y avait pas d'anneaux annuels : le climat était à l'époque uniformément chaud. On a observé également des tissus sécréteurs.

Le bois, même primaire, était, chez les *Cordaites,* entièrement centrifuge, comme chez les Phanérogames. La structure foliaire interne laisse supposer qu'il s'agissait de plantes à adaptation xérophile, car elles avaient des cellules épidermiques à parois assez épaisses, de même que celles de l'hypoderme, sur les deux faces de la feuille. Le caractère le plus évolué de leur histologie est la différenciation d'un tissu assimilateur à la face adaxiale, d'un tissu plus lâche à la face opposée, séparé par un tissu intermédiaire pour la conduction des produits de la photosynthèse.

Les inflorescences, alternant avec les feuilles sur la tige, étaient amentiformes, mais, en réalité, le rameau fertile était constitué par des strobiles monoïques, staminifères ou ovulifères, situés sur des rameaux séparés. La présence du cône (strobile) distingue nettement les Cordaïtes des Ptéridospermes les plus archaïques, lesquelles sont caractérisées, comme les Fougères, par la phyllosporie.

Les ovules, pédonculés ou non, aplatis, présentaient des expansions alaires plus ou moins grandes, ce qui prouve la dissémination anémochore des graines. Les grains de pollen, observés dans les chambres polliniques des ovules, contenaient encore de nombreuses cellules correspondant au prothalle ou à une anthéridie (comme chez les Ptéridospermes). Le pollen était doté de sacs aérifères, comme chez les Conifères. Étant donné qu'on n'a pas observé de tubes polliniques, alors qu'il y a une chambre pollinique dans les ovules, on a été amené à penser que la fécondation se faisait par des anthérozoïdes mobiles.

Comme les Ptéridospermes, bien qu'elles soient plus évoluées que ces dernières, les Cordaïtes ont de nombreux caractères archaïques et se situent au niveau évolutif des Préphanérogames, mais elles appartiennent au même phylum que les Conifères, avec lesquels elles ont beaucoup plus d'affinités.

On les divise en trois familles : Poroxylacées *(Poroxylaceae)* du Permo-Carbonifère de la France centrale; Pityacées *(Pityaceae)*, avec *Pitys withami,* dont on connaît un tronc de 15 m de hauteur et de 3,60 m de diamètre; Cordaïtacées *(Cordaitaceae)*, avec le genre *Cordaites*.

GINKYOINÉES GINKYOALES

L'unique représentant vivant de cette classe, *Ginkyo biloba* (nous préférons cette orthographe à celle de *Ginkgo,* qui correspond à une mauvaise traduction des idéogrammes chinois), est parvenu probablement jusqu'à nous sans changements appréciables, depuis des époques très anciennes, surtout grâce à la protection que lui a accordée l'homme. Bien qu'il en existe des forêts apparemment naturelles dans une petite zone de Chine (Tchékiang), l'espèce s'est perpétuée surtout sous forme de plantes cultivées, dans les jardins des anciens palais, monastères et lieux sacrés du bouddhisme, au Japon, en Chine et en Corée, où il semble qu'il en existe des spécimens millénaires.

C'est un arbre ramifié, mesurant jusqu'à 30 m de haut, avec un diamètre de 1,50 à 2 m au moins; les branches sont dimorphes : les unes (mésoblastes) sont brèves, den-

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ **Voltzia heterophylla,** ***Conifère fossile du Permien et du Trias (Kupferschiefer d'Allemagne)*** **[*Muséum d'histoire naturelle de Vérone*].**

sément feuillées, car leur croissance est lente, et portent des appareils reproducteurs; les autres (auxiblastes) ont un allongement plus rapide, leurs feuilles sont plus espacées.

Les feuilles, en forme d'éventail (flabelliformes), sont variables quant aux incisions du bord et ont une nervation dichotome; la cuticule est peu épaisse.

La tige, eustélique, présente dans sa section une écorce assez mince, un cylindre de bois secondaire épais et compact produit par un cambium persistant, et une petite moelle; le bois primaire est endarche. Il existe des canaux résinifères dans les tissus parenchymateux. Les feuilles, ressemblant pour leur structure interne à celles des Cycadinées, ont un tissu palissadique rudimentaire, non distinct dans les branches courtes.

Ginkyo biloba est une plante dioïque, à maturité sexuelle assez tardive, les appareils reproducteurs ne devenant matures qu'après trente ans. Sur les rameaux courts, au printemps, apparaissent des chatons longs de quelques centimètres, avec des étamines à filet court et deux à sept sacs polliniques. La pollinisation est anémophile. Les pédoncules ovulifères forment des bouquets sur les mésoblastes. Les ovules ont un bourrelet basal et sont disposés par deux à l'extrémité du pédoncule commun.

Comme chez les Cycadinées, il existe chez *Ginkyo biloba* des anthérozoïdes mobiles au moyen de cils; le processus de fécondation est, à peu de chose près, identique à celui que nous avons décrit pour la classe susdite. Ici aussi, la véritable fécondation est tardive, s'accomplissant sur des graines déjà tombées, matures et apparemment complètes. On observera que les réserves de la graine sont déjà toutes contenues dans l'ovule mûr, et que la fécondation n'apporte aucun changement : le zygote se développe donc totalement aux dépens de réserves accumulées par la seule plante mère.

La graine est un pseudo-fruit drupacé, à tégument externe charnu et jaunâtre *(sarcotesta)*, malodorant, à couche moyenne durcie *(sclerotesta)* et à couche interne *(endotesta)* très fine. L'embryon a deux cotylédons

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

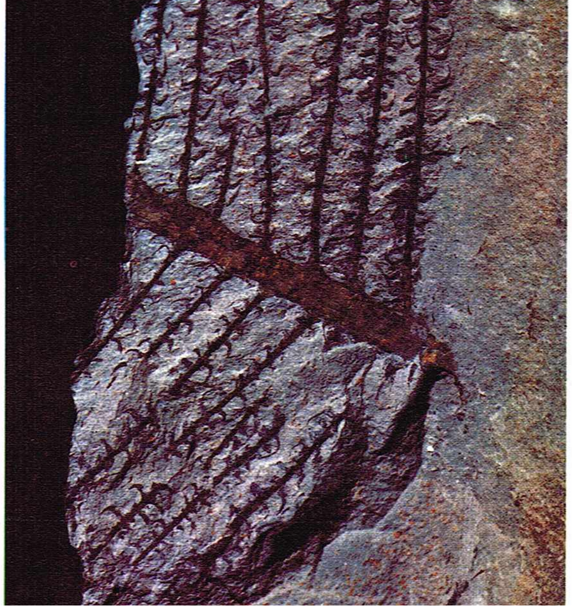

◀ **Walchia filiciformis,** ***Conifère fossile (fragment découvert en Allemagne)*** **[*Muséum d'histoire naturelle de Milan*].**

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

et un endosperme amylacé ; il manque une véritable période de quiescence de la graine.

L'étude des Ginkyoinées fossiles a abouti à la description de dix-sept genres ; de nombreuses espèces appartiennent au Mésozoïque (surtout au Jurassique) et au Cénozoïque. Les genres sont distingués en fonction des caractéristiques des feuilles, bien que l'on connaisse des organes reproducteurs mâles et femelles considérés comme des phyllites (empreintes fossiles de feuilles et d'autres parties de Végétaux).

Une telle classification est naturellement artificielle. De toute façon, les affinités communes de ces formes avec *Ginkyo* ont été prouvées par l'étude des cuticules foliaires. Parmi les plus répandus, nous citerons les genres *Ginkyo* et *Ginkyoites,* avec des feuilles plus ou moins profondément dentées ; *Baiera,* avec des divisions plus profondes ; *Czekanowska,* avec des segments filiformes.

Le genre *Baiera,* déjà connu au Permien, existe dans toutes les grandes flores du Trias et du Jurassique, avec de beaux exemplaires en Australie ainsi qu'en Afrique du Sud.

Chez *Czekanowska,* tous les segments foliaires possèdent une seule nervure, et les feuilles sont portées par des rameaux nains (brachyblastes) écailleux, par groupes d'une dizaine environ ; les cellules épidermiques sont plus étroites que chez le genre précédent. De récentes découvertes, relatives aux fructifications des *Czekanowska,* qui auraient possédé des capsules bivales, pourraient aboutir — si elles étaient confirmées — à l'exclusion du genre de cette classe.

Ginkyo est un genre de l'hémisphère boréal commun au Rhétique et au Jurassique, mais on en a trouvé dans

D. Lecourt - Jacana

La classe des Ginkyoinées ne compte qu'une espèce actuelle :* Ginkyo biloba, *représentée ici. Spécimen jeune (en haut) et bicentenaire (en bas).

la flore d'Angara et sans doute au Permien. Les *Phoenicopsis,* du début du Jurassique, ont des feuilles rubaniformes. La première Ginkyoinée d'identification certaine est *Trichopitys heteromorpha* du Permien français ; ses feuilles, longues et étroites, sont divisées dichotomiquement, et il existe à l'aisselle de certaines d'entre elles de brefs rameaux à nombreux ovules, ce qu'on peut également trouver du point de vue tératologique chez *Ginkyo*.

Il existe un *Ginkyo* dans la flore du Crétacé groënlandais, en même temps que des plantes de climat chaud (*Eucalyptus, Cinnamomum, Artocarpus,* etc.) et tempéré (*Sequoia, Cornus,* etc.) ; dans le Cénozoïque de l'Alaska, ce genre accompagne une flore de type tempéré.

Les Ginkyoinées présentent un ensemble de caractères assez archaïques, depuis les nervures ouvertes et dichotomes des feuilles comme chez certaines Fougères primitives, jusqu'aux ovules (ou macrosporanges) portés par couples à l'extrémité d'un axe, ce qui en fait presque des sporanges terminaux, comme on peut en observer chez des formes très primitives, telles les *Rhyniales* et les *Cœnoptéridales ;* le type primitif de fécondation en milieu liquide est commun avec celui des Cycadinées.

Le caractère du macrosporange pédonculé, la forme des feuilles et la fécondation par des anthérozoïdes ciliés font rapprocher les Ginkyoinées des Cordaïtinées, dont elles dériveraient. Cette différenciation aurait eu lieu il y a très longtemps, probablement au Permien, période lors de laquelle on trouve les premières Ginkyoinées.

D. Lecourt - Jacana

◀ ***Les feuilles de* Ginkyo biloba, *à cuticule mince et nervation dichotome, présentent généralement sur le bord des incisions d'importance variable.***

CONIFÈRES

Il s'agit de plantes ligneuses, buissonnantes ou arborescentes, communément appelées résineux, à aiguilles ou acutifoliées, sempervirentes, sauf quelques genres, et souvent d'une grande longévité. Le tronc est habituellement unique et droit, à ramification normalement monopodiale, plus ou moins verticillé ou même à branches éparses. La cime est généralement pyramidale, mais, chez les vieux spécimens, elle tend à devenir moins régulière et à s'aplatir par le haut, par suite des faibles accroissements en longueur de l'axe principal.

Les feuilles, toujours indivises, sont en aiguilles, en écailles, en alènes ou, rarement, à large lame ; elles sont, la plupart du temps, différentes chez les formes juvéniles et adultes. Leur disposition est normalement en spirale, mais, par suite de torsion de la base, elles peuvent avoir un aspect distique ou en manchon autour du rameau sur lequel elles sont insérées ; les feuilles sont plus rarement verticillées par deux, trois ou quatre. Quand ils existent, les canaux résinifères qui traversent le mésophylle constituent des caractères spécifiques, car leur nombre et leur position sont fixes.

Les Conifères sont pour la plupart monoïques. Les étamines (microsporophylles) ont deux ou plusieurs sacs polliniques et sont groupées en chatons, isolés ou euxmêmes disposés en inflorescences diverses. Les ovules (un à une vingtaine) sont portés par des écailles séminales à l'aisselle de bractées, en un strobile à pièces nombreuses.

Les noyaux spermatiques, inertes, sont dirigés jusqu'au col de l'archégone grâce au tube pollinique, qui perd une bonne partie des fonctions végétatives qu'il présentait chez les Ginkyoinées et les Cycadinées, acquérant des fonctions conductrices des gamètes mâles.

L'infrutescence est une « pomme » ou « pigne » (le « strobile » ou « cône », d'où le nom de Conifères) plus ou moins lignifiée ; elle devient parfois pulpeuse et prend alors l'apparence d'une baie ; chez quelques genres, il apparaît un arille charnu qui enveloppe la graine. Celle-ci est constituée par un embryon doté de deux à quinze cotylédons, entourés par un abondant endosperme ; le tégument séminal, ligneux ou cartilagineux, est épaissi et souvent muni d'une aile membraneuse facilitant la dissémination, qui, comme la pollinisation, est effectuée grâce au vent.

Le bois est homoxylé (dépourvu de vaisseaux) ; seules existent les trachéides ; celles-ci sont pourvues de ponctuations aréolées, disposées en files simples ou par paires (type abiétoïde), ou bien en files alternes étroitement serrées (type araucarioïde, considéré comme plus archaïque). Les anneaux annuels sont bien évidents, et l'on peut facilement distinguer le bois d'automne

▼ ***Les graines de* Ginkyo biloba, *par leur* sarcotesta, *ressemblent à des drupes.***

D. Lecourt - Jacana

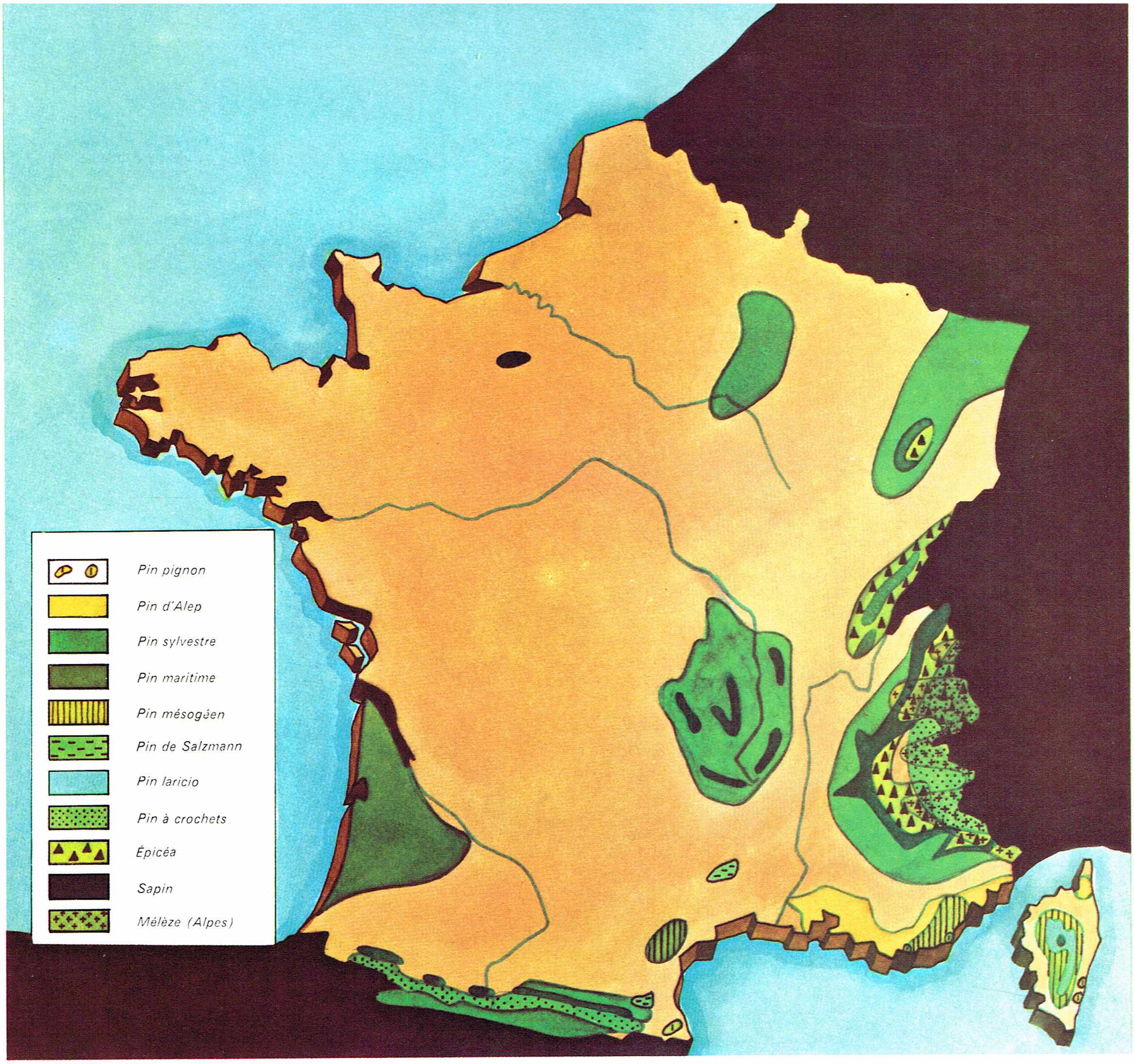

▲ ***Répartition des Conifères forestiers spontanés en France. Dans le détail, la présence des diverses essences est soumise à l'altitude, à l'exposition, à l'orientation des vallées, etc.***

et le bois d'été chez les espèces propres aux régions tempérées ; les rayons médullaires, par contre, ne sont jamais visibles à l'œil nu ; les canaux résinifères, quand ils existent, sont grands et bien évidents, même sous faible grossissement.

Écologie

Les Conifères sont aussi bien répandus dans l'hémisphère septentrional que dans l'hémisphère austral (avec des genres et mêmes des familles particuliers aux deux zones) ; ils peuplent les milieux les plus divers. Ils sont généralement plus abondants sous les climats tempérés et froids, mais un certain nombre d'espèces sont propres aux climats subtropicaux ou même tropicaux, où, toutefois, elles ne prédominent que dans les zones montagneuses.

Il existe des espèces de la forêt boréale (comme l'épinette blanche du Canada, le pin de Sibérie et le mélèze de Sibérie) qui résistent à des froids très intenses et accomplissent leur cycle vital annuel en des temps très brefs (parfois seulement soixante à quatre-vingt-dix jours) ; d'autres, des pays chauds, n'ont au contraire pas de période d'inactivité végétative. Certaines espèces sont typiques des zones substeppiques, avec une pluviosité annuelle très faible, une insolation élevée et de forts écarts de températures (genre *Juniperus* ou genévriers, en partie).

L'épicéa de Sitka est le prototype des espèces océaniques propres aux régions à faibles variations annuelles

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ ***Inflorescences de Pinus radiata.***

D. Lecourt - Jacana

◀ *Cône de pin parasol* (**Pinus pinea**).

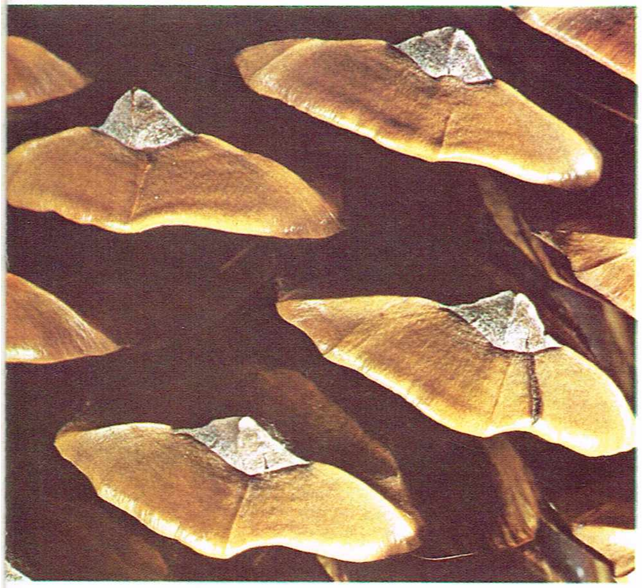

Fotogram

◀ *Gros plan des écailles d'un cône à maturité.*

de température, à pluviosité élevée et à forte humidité atmosphérique. Le pin d'Alep, le pin maritime, le pin pignon du bassin méditerranéen et différents Conifères de Californie sont adaptés au climat dit justement méditerranéen, avec des hivers doux et pluvieux et des étés chauds et secs. Différents Conifères de l'Himalaya sont, en revanche, soumis à un climat de moussons.

De nombreuses espèces tropicales ou subtropicales, comme l'araucaria à feuilles étroites, le pin d'Elliott et le pin à l'encens, croissent dans des régions où les pluies sont bien réparties durant toute l'année ou sont surtout estivales. C'est le cas de l'araucaria de Cunningham, de *Cunninghamia lanceolata,* de *Pinus caribea,* de *Pinus insularis,* de *Pinus patula*.

Le record d'altitude atteinte par une plante ligneuse dans les Alpes est détenu par un Conifère arbustif : le genévrier nain, à port prostré, qui atteint sur le mont Lyskamm 3 570 m. Le mélèze d'Europe croît jusqu'à 2 200 m (avec un record de 2 660 m) et *Larix potaninii,* de Chine occidentale, monte jusqu'à 4 200 m, dans une zone qui est beaucoup plus proche de l'équateur.

En France se rencontrent une dizaine de pins, cinq genévriers, un cyprès, l'if, le sapin pectiné, l'épicéa commun et le mélèze.

Les pins sont des essences héliophiles aimant les terrains secs. Le pin d'Alep, le pin mésogéen et, dans une aire plus limitée, le pin pignon caractérisent les plaines méditerranéennes où l'on rencontre aussi le genévrier oxycèdre, celui de Phénicie et le cyprès toujours vert.

Les plaines atlantiques possèdent le pin maritime, largement répandu à partir de son aire d'origine, le Languedoc.

Le pin sylvestre des plaines de l'Europe centrale et septentrionale forme en Europe occidentale des peuplements sur les massifs montagneux, mais il a été largement introduit dans les plaines occidentales. Du groupe des pins noirs, on rencontre localement le pin laricio en Corse et le pin de Salzmann dans quelques stations des Cévennes et des Pyrénées orientales.

En altitude leur succèdent, dans l'étage montagnard et subalpin, le pin à crochets et, dans les Alpes, l'arolle ou pin cembro.

Le sapin pectiné est une essence d'ombre exigeant une assez forte pluviosité. Il occupe l'étage montagnard humide, mêlé à la limite inférieure au hêtre et, dans les Alpes, à l'épicéa qui domine vers l'étage subalpin.

On trouve enfin le mélèze dans les Alpes, au niveau de l'étage montagnard supérieur et de l'étage subalpin, où il peut se mêler à l'arolle et au pin à crochets.

Conifères fossiles

L'étude des fossiles des Conifères a fait conclure que ces plantes, outre qu'elles sont très anciennes (il en existe qu'on peut sûrement dater du Carbonifère supérieur), traversent aujourd'hui une période de grande décadence, avec ségrégation et isolement des genres monospécifiques (environ vingt) et des restants endémiques. En effet, on oppose aux quatre cents à six cents espèces actuelles (nombre variable selon les auteurs) les vingt mille espèces environ du Jurassique, période où se situe leur apogée. A cette lointaine époque, les Abiétacées étaient répandues dans tout le monde, depuis le Spitzberg dans l'hémisphère boréal jusqu'à l'Argentine et à l'Australie dans les régions australes.

Il semble que les différentes familles de Conifères aient suivi des lignes phylogénétiques indépendantes et parallèles, si l'on entend par phylogenèse la spécialisation graduelle et la diversification à partir d'une souche commune, avec ségrégation de certaines caractéristiques dans plusieurs lignées évolutives.

Les plus anciennes de ces plantes, les *Lebachiacées,* possédaient de nombreux traits archaïques les rapprochant des Cordaïtes.

L'origine directe des *Abiétacées* et des *Araucariacées* semble devoir être recherchée dans la famille éteinte des *Voltziacées,* qui possédaient des caractères très proches de ceux de ces deux groupes.

Il nous reste du Trias des Conifères fossiles silicifiés *(Araucarioxylon)* trouvés dans la « Petrified Forest » de l'Arizona, où les caractères du bois sont restés intacts et peuvent être étudiés en section mince. On possède de la

▼ *Baies d'oxycèdre* (**Juniperus oxycedrus**).

P. Starosta

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Les prés et pâturages de montagnes alternent, dans les Alpes, avec des forêts de Conifères.*

même période les genres *Proaraucaria* et *Pararaucaria* (araucarias primitifs) des forêts pétrifiées de la Patagonie.

Au début du Cénozoïque, on assiste à une expansion des Conifères, suivie d'une régression à la fin de l'ère. A l'Éocène et même au Miocène, on observe des phénomènes de cosmopolitisation, phase suivie par des récessions à cause de la surrection de montagnes et de la formation de déserts dans l'Amérique du Nord et du Sud, en Asie et en Afrique, et par suite des glaciations pléistocènes. Ainsi, les araucarias, qui existèrent à l'Éocène en Europe, se déplacèrent graduellement vers le sud, pour finir par se localiser dans le seul hémisphère austral. Les séquoias *(Sequoia)* étaient cosmopolites au Miocène : aujourd'hui, le genre, considéré au sens large, est réduit à deux espèces seulement, endémiques, en Californie.

Lorsque survinrent les grands changements climatiques, les Conifères disparurent sur de vastes superficies et ne subsistèrent, en tant qu'endémiques, que dans des zones particulières. De nombreux genres américains ou asiatiques ont ainsi disparu d'Europe à la suite des glaciations quaternaires *(Pseudotsuga, Sequoia)* ; cela eut sans doute lieu parce que, du fait de son ancienneté et partant de son manque de souplesse, le groupe ne put s'adapter aux nouvelles conditions du milieu.

Utilisation des Conifères

Dans l'industrie moderne, les Conifères prennent une importance de plus en plus grande, par rapport aux espèces décidues à bois dur. Mais, au sein même de la classe, certaines espèces ou « essences » ont un bois plus tendre et plus léger, d'autres en ont un plus dur et plus lourd, les utilisations variant naturellement selon les caractéristiques technologiques désirées. C'est surtout chez les spécimens résineux à bois dur que se différencie plus ou moins nettement l'aubier du duramen.

On tient compte, pour l'emploi des bois, des propriétés suivantes : poids spécifique, retrait lors du séchage, gonflement à l'humidité — ces deux dernières qualités influant beaucoup sur le vieillissement en ce qui concerne, entre autres phénomènes, le fendillement et le gauchissement éventuels après le traitement.

Parmi les caractéristiques de résistance mécanique (aux efforts), on s'intéresse surtout aux résistances à la traction, à la flexion, à la compression, à l'usure, à la rupture, aux frottements, etc. ; la dureté joue aussi un grand rôle.

Pour exploiter le bois, on considère non seulement ces qualités, mais aussi les possibilités économiques d'accès aux forêts, celles d'approvisionnement en quantité suffisante et, dans certaines limites, l'existence de troncs de grandes dimensions. Le bois le plus apprécié de l'Amérique du Nord pour ses utilisations très variées est le « Douglas fir », qui provient de *Pseudotsuga menziesii* ou *douglasii viridis*, et qui est largement exporté.

Pinus ponderosa ainsi que, dans le groupe des « soft pines » (pins à bois tendre), *P. strobus* (ou pin Weymouth) et ses congénères *P. monticola* et *P. lambertiana* ont d'importantes utilisations. Les « southern yellow pines » sont par contre des espèces à bois dur ; nous citerons parmi elles le véritable « pitchpin » ou « pitch pine » (dénomination commerciale européenne), bois très

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

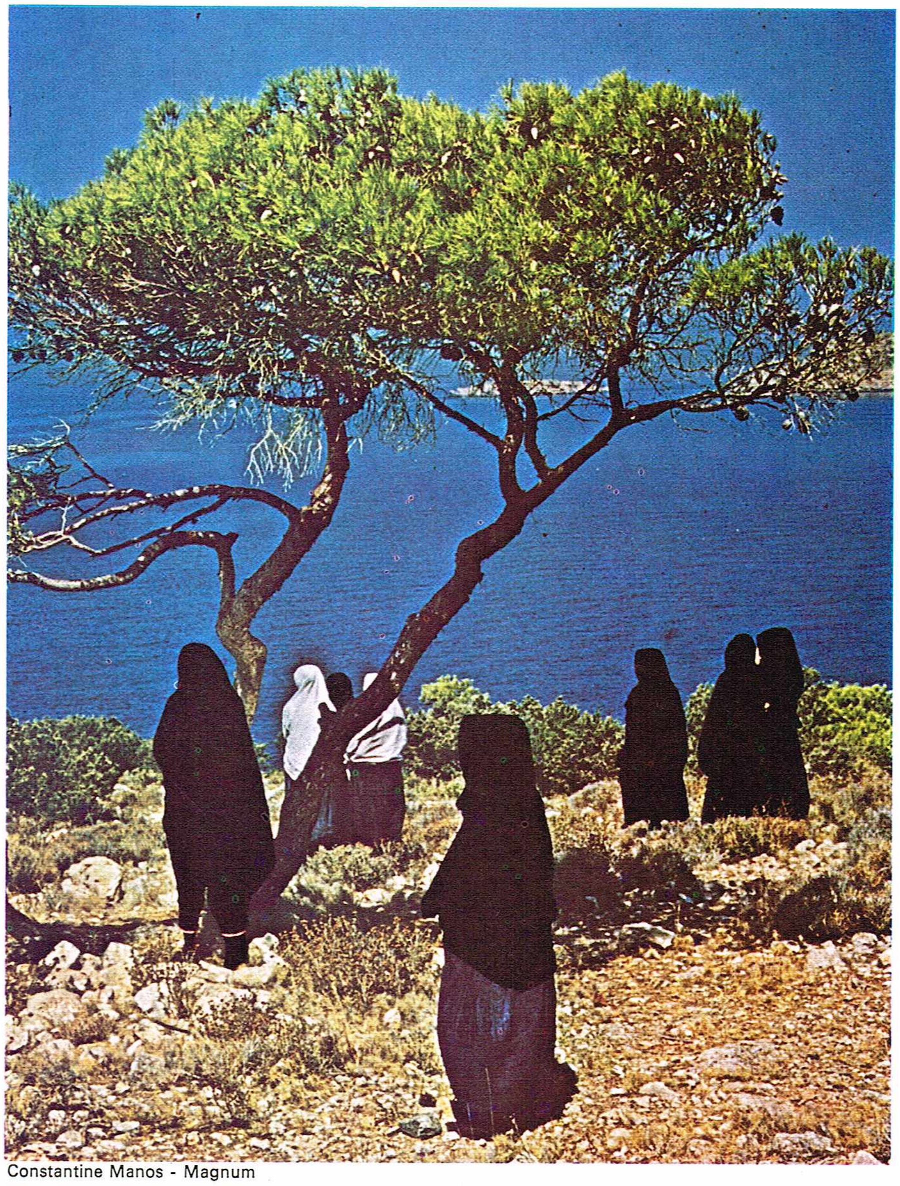

Constantine Manos - Magnum

▲ ***Les Conifères peuplent les milieux offrant des conditions de vie très variées. Ainsi, les formes du bassin méditerranéen (à droite) sont adaptées au climat alternativement chaud et sec, doux et pluvieux qui règne dans ces régions, alors que*** **Sequoia sempervirens** ***(à gauche) pousse dans les zones à brouillards fréquents de la côte pacifique de l'Amérique du Nord.***

apprécié provenant de *Pinus palustris,* et qui ne correspond pas à la même dénomination américaine, laquelle se réfère à *P. rigida,* qui est de mauvaise qualité.

En Europe centro-septentrionale, les Conifères les plus employés sont en premier lieu l'épicéa commun et le pin sylvestre, suivis de près par le sapin pectiné ou argenté *(Abies alba)* et le mélèze d'Europe. L'Asie possède l'immense réserve de la taïga sibérienne, encore à peu près intacte à cause de son accès difficile, alors que les Conifères de l'Himalaya, de la Chine et des régions voisines sont seulement utilisés localement. Les Conifères tropicaux et subtropicaux, sauf ceux du Mexique, ont une importance mineure à l'état naturel, car ils sont plus disséminés.

Les emplois du bois des Conifères sont innombrables. On s'en sert pour la construction d'édifices, d'embarcations, de ponts et de réservoirs ; on en fait des pilotis et des palissades de divers genres, des boisages de tunnels et de mines, des traverses de chemins de fer, des meubles, des planchers et des pavements, des incrustations, des revêtements intérieurs et extérieurs, des agglomérés, des panneaux de fibre, des allumettes, des caisses, des articles de menuiserie en général, des objets d'ébénisterie, etc.

Le bois des Conifères est en outre de plus en plus utilisé pour la fabrication de la pâte à papier et de la cellulose. On exploite particulièrement des essences de la forêt boréale et septentrionale, comme *Abies balsamea, Picea glauca, Picea rubens, Picea mariana, Larix laricina, Pinus banksiana* au Canada et dans le nord des États-Unis, *Picea sitchensis* et *Tsuga heterophylla* en Alaska, et *Pinus silvestris* et *Picea excelsa* en Europe centro-méridionale ; ces quatre dernières espèces donnent aussi d'importantes quantités de bois d'œuvre.

On emploie encore pour des usages spéciaux certains bois (*Picea sitchensis, Picea excelsa, Pinus lumholtzii,* etc.) ayant poussé dans des conditions particulières, par exemple pour la fabrication des instruments de musique (bois de caisses de résonance). Par ailleurs, certains bois ont un faible retrait après vieillissement et séchage ; ils peuvent alors être utilisés, comme c'est le cas pour *Pinus cembra* et *Pinus strobus,* en vue de la préparation de moules.

Les résines et oléorésines sont d'importants dérivés des Conifères ; ce sont des produits complexes, de formule chimique mal définie, qui servent pour l'extraction de la térébenthine, laquelle est employée dans l'industrie des vernis, le résidu obtenu étant la colophane.

La résine est récoltée en pratiquant des incisions sur le tronc des arbres sur pied, ou par distillation du bois (en particulier des souches). Citons l'importante production des Landes, en France, pour le pin maritime. En Espagne, on exploite beaucoup le pin d'Alep, entre autres. Aux États-Unis, on se sert de différents résineux nommés « southern pines » (*Pinus palustris, P. elliottii,* etc.), et au Mexique, de *P. oocarpa, P. tenuifolia* et *P. michoacana.* Dans la région de l'Himalaya, on tire de la résine de *P. roxburghii ;* en Asie du Sud-Est, on utilise pour cela *P. khasya* et *P. merkusii.*

On prélève des résines très appréciées et de types particuliers, appelées dans le commerce « résine de Dammara », « gomme Dammar », « kauri-copal », chez certaines

A. Perceval

▲ *L'exploitation des forêts de Conifères permet de fournir à l'industrie des bois qui sont utilisés à des fins fort diverses.*

▶ *Récolte de la résine dans les Landes par incision des troncs.*

espèces d'*Agathis* (ou *Dammara*) de la région indo-malaise.

Une autre résine, également utilisée dans l'industrie des vernis, est la sandaraque, qui exsude du tronc de *Tetraclinis (= Thuya) articulata*. L'ambre de l'Europe septentrionale est une résine fossile provenant de *Pinus succinifer*. Le baume du Canada, utilisé pour faire des préparations microscopiques et en médecine, est la résine d'*Abies balsamea*, contenue dans les vésicules de l'écorce des spécimens juvéniles.

On obtient également, par la distillation à sec des Conifères, des goudrons de bois, de l'acide acétique, des solvants organiques et de l'alcool méthylique (esprit de bois ou alcool de bois). Différentes espèces donnent des huiles essentielles utilisées en médecine, comme *Pinus mugo*, ou pin mugo, et *Pinus pumilio*, qui fournissent des terpènes, des terpinéols, etc., balsamiques. *Juniperus communis* (genévrier commun) et *Juniperus sabina* (genévrier sabine ou sabine) possèdent des baies à propriétés diurétiques; le bois de *Juniperus oxycedrus* (cade ou oxycèdre) produit l'huile de cade, servant contre certaines maladies de la peau.

On consomme, localement, les graines de Conifères, celles, notamment, de *Pinus pinea* (pin pignon), de la région méditerranéenne, de *Pinus sibirica*, des régions sibériennes, de *Pinus cembroides*, des régions substeppiques du sud des États-Unis et du Mexique septentrional, de *Pinus gerardiana*, de l'Inde, et d'*Araucaria sp. pl.*, en Australie. On emploie enfin les baies aromatiques ou galbules du genévrier commun pour fabriquer du gin et parfumer la choucroute.

Désormais, on ne tire plus de tannin des écorces de *Pinus halepensis*, *Picea excelsa*, et *Larix decidua*, qui en contiennent des quantités variant de 7 à 15 %.

Reboisement

Les Conifères sont, comme on le sait, largement utilisés pour le reboisement, en vue notamment de lutter contre l'érosion, c'est-à-dire afin de retenir la terre arable sur les pentes et de régulariser l'écoulement des eaux de ruissellement dans les endroits déclives.

Garbison - Fotogram

Page ci-contre :
▶ *Transport des grumes par flottage au Canada.*

Dans les pays pauvres en ressources forestières, les efforts de reboisement avec des essences résineuses ont porté sur de grandes étendues. Il convient toutefois de déplorer que, dans bien des cas, les critères économiques aient prévalu sur ceux de la protection de la nature. Les arbres, en général des espèces exotiques à croissance rapide, sont le plus souvent destinés à alimenter les industries du bois et du papier. Dans la plupart des pays, les cultures sont effectuées cependant de façon rationnelle (labourages préliminaires, assolements, fumure éventuelle, désherbage et fréquents éclaircissements). En tête de cette sylviculture, on trouve la République sud-africaine, la Nouvelle-Zélande, l'Australie et le Chili, et, dans une moindre mesure, l'Espagne.

Dans les pays à climat tempéré, les espèces exotiques susceptibles d'être acclimatées ont rarement une croissance rapide ; mais, les besoins en bois se faisant impérieux et les terres abandonnées par l'agriculture étant de plus en plus étendues dans certaines régions (comme l'Auvergne), les cultures de résineux deviennent pratiques courantes.

Dans les contrées méditerranéennes, les essences résineuses indigènes sont la proie facile des incendies qui ravagent les forêts. Aussi tend-on à introduire désormais des feuillus plus résistants (eucalyptus).

Le cèdre de l'Atlas *(C. atlantica)* a donné de bons résultats dans les Cévennes. *Abies concolor* est utilisable dans les montagnes arides.

Sur les montagnes moyennes et dans la plaine, de nombreuses essences, principalement nord-américaines, sont introduites avec succès : douglas vert surtout *(Pseudotsuga menziesii)* à croissance rapide, épicéa de Sitka *(Picea sitchensis)*, *Tsuga heterophylla*, *Abies grandis*, cyprès de Lawson *(Chamaecyparis lawsoniana)*. Dans les régions côtières, on utilise souvent *Cupressus macrocarpa* et *Pinus insignis (radiata)*.

SYSTÉMATIQUE

Les Conifères ont été divisés en sept familles : Abiétacées (= Pinacées), Taxodiacées, Cupressacées, Taxacées, Céphalotaxacées, Araucariacées, Podocarpacées (auxquelles il faut ajouter au moins trois familles fossiles : Lebachiacées, Voltziacées et Palyssiacées).

Les plus importantes en sont, à la fois pour la diffusion et l'économie, la première et la troisième. Certains auteurs mettent à part la famille des Taxacées *(Taxaceae)* en un ordre propre.

Abiétacées (Abietaceae). Cette famille comprend dix genres d'arbres dont deux seulement — *Larix* et *Pseudolarix* (les mélèzes) — possèdent des feuilles caduques ; tous habitent l'hémisphère boréal. Les ramifications latérales de ces arbres sont disposées en pseudoverticilles, ou réparties en verticilles et, à la fois, de façon éparse, ou encore situées de manière anarchique sur le tronc. Les rameaux sont de trois sortes : longs (auxiblastes), courts (mésoblastes) et nains (brachyblastes). Les cônes, ligneux à maturité, possèdent des bractées et des écailles séparées ; ces dernières portent chacune deux ovules. La maturation des graines se fait en un, deux ou trois ans. Les genres sont les suivants : *Abies* (sapins), *Keteleeria, Cathaya, Tsuga* (tsugas), *Pseudotsuga* (douglas), *Picea* (épicéas), *Larix* et *Pseudolarix* (mélèzes), *Cedrus* (cèdres) et *Pinus* (pins).

Le genre *Abies* regroupe des arbres, souvent de grande taille, répandus en plaine au nord, et sur les montagnes à climat humide et frais dans les régions méridionales. Les arbres juvéniles ont un port pyramidal, avec des branches plus ou moins régulièrement verticillées. Les feuilles peuvent être « pectinées » (subdistiques) des deux côtés des rameaux, en brosse (la partie inférieure des rameaux est alors dénudée), ou en écouvillon (tout autour des rameaux). Elles sont parcourues par deux canaux résinifères ; elles sont acutiformes, planes, à sommet obtus et tronqué ou aigu, et présentent généralement sur la face inférieure une teinte plus claire du fait de la présence de deux rangées de stomates ; elles persistent sur les branches pendant plusieurs années et y laissent, lors de leur chute, une cicatrice circulaire.

Les fleurs mâles et femelles poussent au printemps ; elles sont séparées mais sur le même pied (espèces

Édouard - Explorer

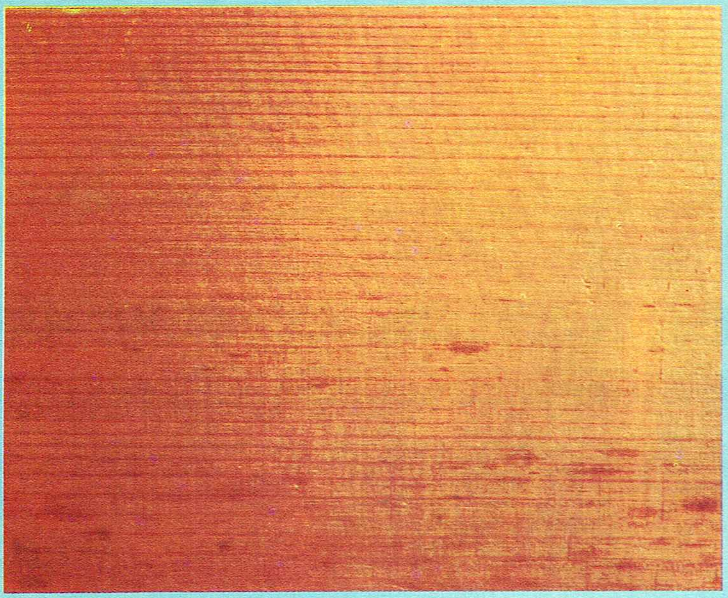

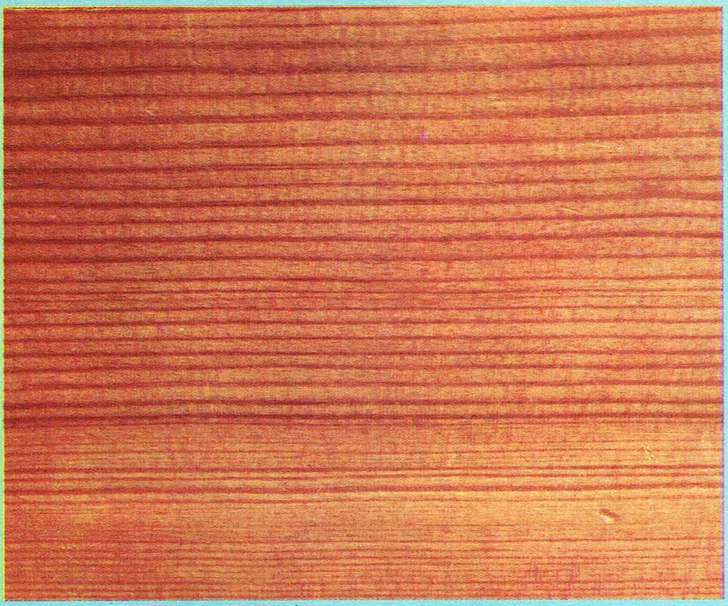
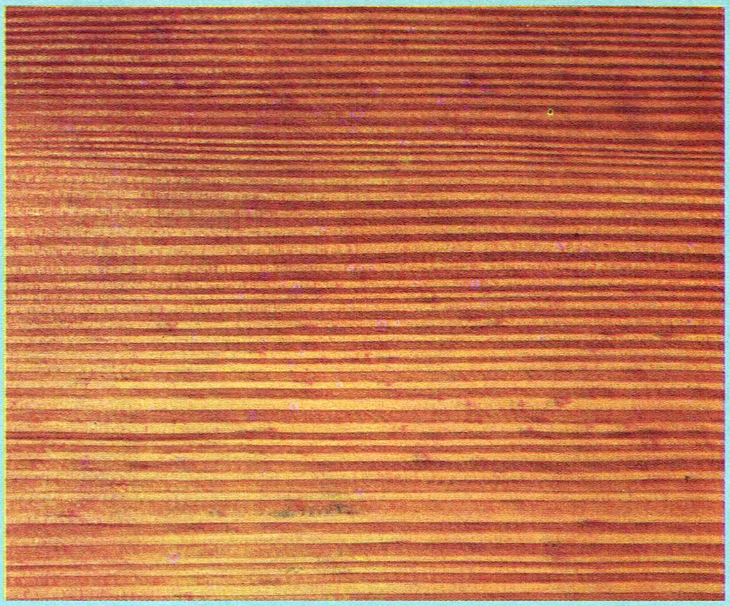
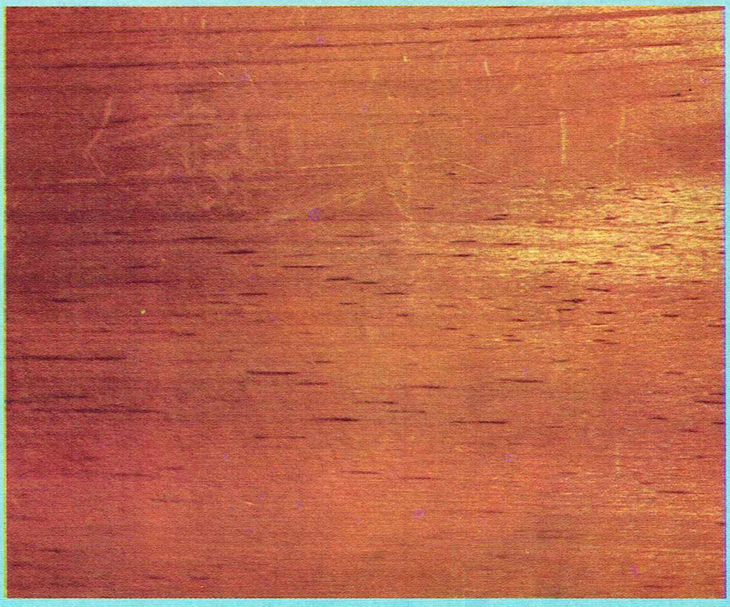

De gauche à droite et de haut en bas : coupes longitudinales du bois de l'épicéa commun, du sapin pectiné, du mélèze, du pin sylvestre et du pin cembro. En fonction de ses qualités technologiques, le bois de ces diverses essences trouve son usage en menuiserie et en charpenterie, ou pour la production de cellulose, de pâte à papier, d'agglomérés, etc.

monoïques). Les cônes, avec des bractées plus longues que les écailles ou cachées par elles, sont dressés et, à maturité (la première année), se désarticulent en dispersant des graines triangulaires à aile très développée. Le bois ne possède pas de canaux résinifères ; ces derniers sont, en revanche, présents dans l'écorce.

Les sapins d'Europe comprennent différentes espèces de distribution circumméditerranéenne, qui dériveraient, pense-t-on, d'un ancêtre commun ; toutes ces essences montrent des affinités indubitables, et d'ailleurs les cas d'hybridation sont fréquents dans la nature.

Le sapin pectiné ou argenté *(Abies alba = pectinata)* est un grand arbre atteignant 45 m de hauteur et 2 m de diamètre, à port élancé et conique, à ramification le plus souvent régulière et verticillée, la ramification de dernier ordre étant habituellement distique. L'écorce, gris clair, reste longtemps lisse. Ce sapin a, dans sa jeunesse, une racine pivotante, qui s'atrophie ensuite au profit de racines secondaires. Ses feuilles sont obtuses, un peu émarginées au sommet (elles sont acuminées seulement sur les rameaux d'allongement), vert foncé, glauques en dessous, à disposition pectinée sur les rameaux. Le bois, blanc jaunâtre et tendre, sert en construction (surtout hydraulique), pour la pâte à papier et la cellulose, en menuiserie ordinaire, pour les emballages, les allumettes, les panneaux d'agglomérés, la fibre de bois, etc. Cette espèce de Conifère forme des forêts pures ou bien mêlées de hêtres, ou encore d'épicéas communs dans les zones montagneuses à climat subocéanique de l'Europe centro-méridionale, entre 700 m et 1 800 m d'altitude. On rencontre cet arbre dans les Pyrénées, les Alpes (surtout orientales), le Jura, le Massif central, le nord de la France, la Forêt-Noire, les monts de Bohême, les monts Tatras, les Carpathes, les Alpes Dinariques, les monts Rhodope et l'Apennin. En plaine, il existe de petites aires relictes en France (Normandie) et en Pologne, témoignant d'une répartition autrefois plus importante.

Le sapin pectiné est indifférent au substratum, qui doit être cependant bien drainé ; il aime une bonne humidité atmosphérique, des précipitations assez abondantes et un climat à amplitude thermique non excessive (il souffre des gelées tardives). Ce sapin est une essence d'ombre : de petits plants, dominés par de plus grands individus, peuvent reprendre leur croissance normale, même après une longue période d'étiolement.

Certains sapins sont endémiques de zones montagneuses méditerranéennes. L'espèce *Abies cephalonica* a une hauteur généralement inférieure au sapin pectiné dont elle se distingue facilement par ses feuilles à sommet aigu, piquantes, disposées en écouvillon ou en brosse. Ce sapin croît entre 700 m et 1 700 m dans les montagnes de la Grèce méridionale. On l'utilise avec de bons résultats pour le reboisement, sur sols calcaires, dans les régions méditerranéennes.

Le sapin du roi Boris *(Abies borisii-regis)*, vivant dans le nord de la Grèce et au sud de la Bulgarie, est probablement un hybride fixé des deux espèces précédentes, car il présente des caractères intermédiaires.

Le sapin de Nordmann *(Abies nordmanniana)* est une forme très grande, qui peut atteindre de 50 m à 60 m de hauteur. Ses feuilles sont pectinées ou en brosse, selon la position des rameaux, à sommet tronqué et émarginé, et à face inférieure blanche. Il forme des forêts très productives, sur les montagnes humides du Caucase occidental et les monts Pontiques (Turquie du Nord-Est), où il croît jusqu'à 2 000 m d'altitude. Sa diffusion était naguère beaucoup plus vaste, et sa disparition de l'Europe centrale remonte aux glaciations. Il est souvent utilisé dans les parcs à titre ornemental. En sont proches *Abies bornmulleriana* et *Abies equitrojani* (qui aurait servi à fabriquer le cheval de Troie), qui habitent le nord-ouest de la Turquie.

Le sapin de Cilicie *(Abies cilicica)* est le sapin de la Turquie méridionale (Taurus et Anti-Taurus) et de la Syrie septentrionale (Liban), dans les zones à pluviosité plus réduite et à hivers froids, entre 1 200 m et 2 000 m d'altitude. Ses feuilles sont longues et larges, disposées en brosse ou pectinées. Le sapin de Numidie *(Abies numidica)* est endémique dans une petite aire d'Algérie et appartient à la région montagneuse généralement humide sauf en été ; ses feuilles sont courtes, larges, épaisses et à sommet arrondi. Le sapin du Maroc *(Abies marocana)* est endémique dans le Rif (Maroc septentrional), comme le sapin d'Andalousie ou sapin pinsapo *(Abies pinsapo)* l'est dans certaines zones montagneuses du sud de l'Espagne. Ce dernier possède des feuilles disposées de façon caractéristique en rosettes denses, feuilles subtétragones, rigides, courtes, droites ou légèrement recourbées, un peu pointues et de couleur glauque.

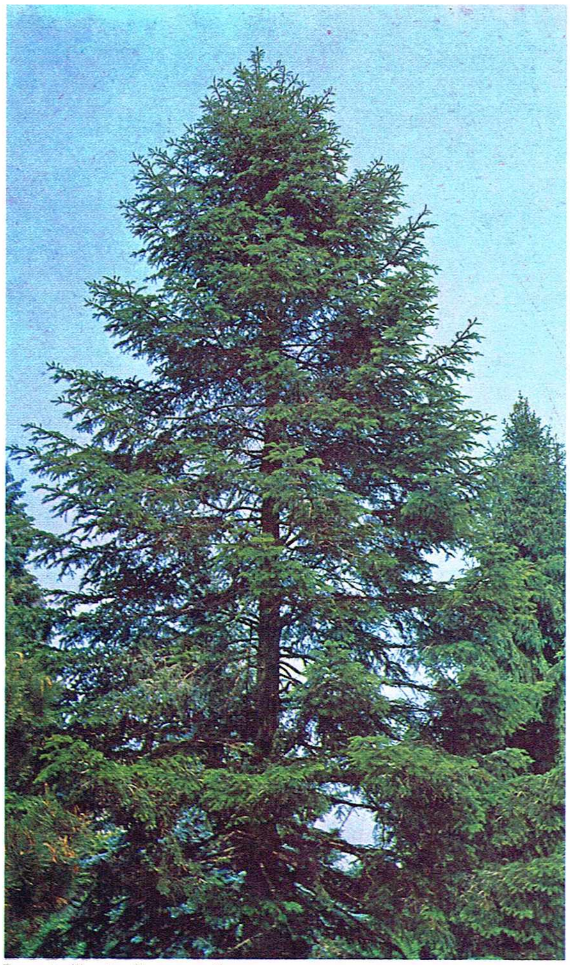

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ ***Les sapins pectinés* (Abies alba) *constituent, seuls ou en association avec les hêtres, de grandes forêts dans les Pyrénées et les Alpes.***

Abies nebrodensis, devenu rarissime, est propre au nord de la Sicile et est en voie d'extinction à cause des destructions qu'ont provoquées les incendies et le pacage.

On trouve sur les pentes himalayennes humides *Abies spectabilis*, à distribution surtout orientale, et *Abies pindrow* uniquement occidental. Le premier atteint des altitudes de 3 500 m à 4 200 m, et le second de 2 000 m à 3 000 m. Quand ils sont cultivés, ils sont sensibles aux gelées printanières, aux froids secs hivernaux et à la sécheresse estivale.

Le sapin de Sibérie *(Abies sibirica)* est typique de la taïga russe et sibérienne, jusqu'au lac Baïkal, en climat continental. Ses feuilles sont linéaires, molles, vert clair, forment des brosses sur les rameaux, et sont tournées vers le sommet de ceux-ci. *Abies nephrolepis* est proche du précédent mais a une distribution plus orientale (Mandchourie et Corée) comme *Abies holophylla*. Le sapin de l'île de Sakhaline *(Abies sakhalinensis)* habite les provinces maritimes de la Sibérie orientale, l'île de Sakhaline, les îles Kouriles et le nord du Japon. *Abies koreana* est un petit arbre de Corée. On trouve enfin au Japon quatre espèces de sapins : *Abies firma, A. homolepis, A. mariesii, A. veitchii* ; le premier et le dernier sont les plus notables fournisseurs de cellulose.

Les montagnes de la Chine occidentale possèdent plusieurs sapins, dont la taxonomie n'est pas encore bien fixée. On trouve, dans la zone tempérée froide de ce pays, *Abies ernestii, A. chensiensis* et *A. recurvata* ; la zone subalpine possède *A. squamata* et *A. delavayi*, ce dernier ayant une certaine importance puisqu'il est à l'origine de plusieurs sous-espèces. L'unique sapin présent à Formose est *Abies kawakami*, à l'état endémique.

En Amérique du Nord, nombreux sont les sapins spontanés qui, géographiquement, sont distribués ainsi : une espèce dans la forêt septentrionale voire boréale, une autre dans les Appalaches, et huit dans les chaînes de montagnes occidentales, plus quelques espèces mexicaines.

Abies balsamea ou baumier du Canada (sapin baumier, « balsam fir ») est le type continental américain, caractéristique de la forêt boréale canadienne, où il est mêlé à *Picea alba, Picea mariana, Picea rubens, Larix laricina, Populus tremuloides* et à divers bouleaux. Il est répandu

D. Lecourt - Jacana

D. Lecourt - Jacana

▲ *Dans le genre* Abies, *représenté en haut par* Abies nordmanniana *et en bas par* Abies pinsapo, *les cônes sont dressés.* ▼ *A maturité, les cônes d'*Abies *se désarticulent, seul subsiste leur axe central.*

C. Lemoine

de Terre-Neuve et du Labrador jusqu'au Canada occidental, avec des bois épars au nord des États-Unis. Il supporte des températures hivernales très basses et de longues périodes de gel (cent quatre-vingts à deux cent soixante-dix jours par an). Cette espèce a une faible longévité et croît sur des sols très arides du type des podzols. Ses feuilles, semblables à celles du sapin pectiné, sont grisâtres en dessous et fragiles.

Le sapin de Fraser *(Abies fraseri)* est un petit arbre endémique des Appalaches (est des États-Unis). Le sapin concolore *(Abies concolor)* croît particulièrement dans la sierra Nevada (Californie), où il peut former des forêts pures climaciques, ou s'associer à *Pinus ponderosa* et à *Pinus lambertiana,* à des altitudes variables selon la latitude; ses feuilles, glauques sur les deux faces, en font un arbre ornemental, assez fréquemment cultivé dans les parcs. *Abies lowiana* peut atteindre 75 m de hauteur; il est proche du précédent et distribué, outre la sierra Nevada, dans les chaînes côtières, à moindre altitude; ses feuilles sont subdistiques, courbées vers le haut et à extrémité arrondie et un peu émarginée.

Le sapin de Vancouver *(Abies grandis)* est l'espèce qui atteint la plus grande taille (jusqu'à 90 m) lorsqu'il habite les zones humides de l'Oregon et de l'État de Washington; il a une taille plus réduite dans les stations relativement sèches de l'Idaho. Ses feuilles, à sommet un peu arrondi et émarginé, sont pectinées. Sa croissance est rapide, ce qui le fait servir en Europe au reboisement des sols fertiles, sous le climat océanique. C'est l'un des sapins les moins tolérants à l'ombre.

Abies amabilis (dépassant 70 m de hauteur), est disséminé dans les forêts de Conifères de la région côtière de l'océan Pacifique, depuis la partie septentrionale jusqu'à l'Oregon. *Abies lasiocarpa* est un arbre de taille moyenne des montagnes Rocheuses, à vaste aire de dispersion (de l'Alaska jusqu'au Nouveau-Mexique et à l'Arizona). Il croît sous les climats froids et humides, à pluviosité variable, jusqu'en haute montagne. Sa croissance est lente. *Abies bracteata,* des chaînes côtières de la Californie centrale, a une répartition restreinte; il est caractérisé par ses longues feuilles rigides et pointues, et par ses bractées allongées, qui donnent un aspect frisé à ses cônes.

Abies magnifica, à cime étroite et à branches très courtes, atteint 60 m de hauteur et est assez polymorphe. On le rencontre dans l'Oregon et en Californie, de 1 800 m à 3 000 m; son bois est très apprécié. Il supporte mal l'ombre et constitue des forêts pures ou bien apparaît dans l'étage dominant s'il est mêlé à d'autres essences. Ses feuilles sont en brosse, tétragones et de couleur vert bleuté; ses cônes sont de grande taille. Le sapin noble ou bleu, ou encore sapin de l'Oregon *(Abies procera = nobilis),* qui habite les chaînes côtières des États de Washington et de l'Oregon, en moyenne altitude, a des feuilles longues, glauques et de grands cônes; son bois est d'un haut intérêt technologique et l'arbre lui-même est utilisé à des fins ornementales. En Europe, il a été introduit pour reboiser certaines régions.

Le principal et le mieux connu des sapins du Mexique est *Abies religiosa,* typique des montagnes humides du pays, entre 2 600 m et 3 000 m d'altitude, dans un climat plutôt froid l'hiver; son écorce s'écaille vite, comme celle des épicéas, et ses feuilles sont subdistiques et aiguës. Le sapin du Guatemala *(Abies guatemalensis),* qui croît à plus de 3 000 m au Mexique, au Guatemala et au Honduras, a une aire plus vaste. D'autres espèces du Mexique sont endémiques dans des zones beaucoup plus restreintes.

Le genre *Keteleeria,* proche du genre *Abies,* habite les régions tempérées et chaudes de la Chine centrale et méridionale; l'une des espèces est endémique dans la zone tropicale indochinoise. Les différences par rapport aux sapins sont les suivantes : les bourgeons ont de nombreuses écailles, qui restent, sous forme de gaines, à la base des rameaux; les cicatrices foliaires sont également circulaires, mais un peu en saillie; les cônes ne s'ouvrent pas à maturité. L'espèce la plus importante et en même temps la plus grande est *Keteleeria davidiana,* qui est mêlé à des feuillus toujours verts et décidus. Des auteurs chinois ont déterminé récemment un nouveau genre pour deux Conifères découverts il y a quelques années seulement : il s'agit de *Cathaya argyrophylla* et de *Cathaya nanchuanensis* (cathaya à feuilles argentées

et du Nanchuan, respectivement), de la Chine occidentale, arbres de taille moyenne, à feuilles aciculaires, ciliées au bord, et avec des cônes qui ne se désarticulent pas à maturité.

Le genre *Pseudotsuga*, distribué en Amérique du Nord et en Asie, comprend des espèces à port semblable à celui des sapins, dont elles se distinguent par leurs cônes ovoïdaux pendants et caducs et par leurs bractées longues, trifides, et toujours en saillie par rapport aux écailles; leurs feuilles sont insérées sur des coussinets légèrement en saillie.

Parmi les espèces du genre *Pseudotsuga*, la plus répandue et celle qui présente le plus d'intérêt sur le plan de la sylviculture est le douglas vert *(Pseudotsuga douglasii viridis* ou *Pseudotsuga menziesii)* ou sapin de Douglas. Elle est divisée en deux types géographiques, avec un troisième intermédiaire dans la zone de contact entre les deux, à savoir : la variété *menziesii*, la variété *glauca* et la variété *caesia;* certains auteurs considèrent ces types comme de véritables espèces, car ils couvrent des aires différentes et ont des exigences écologiques également différentes. La variété *menziesii* est un très grand arbre — seuls les séquoias le dépassent en hauteur — puisqu'il peut atteindre plus de 100 m (le record est de 115 m, avec un diamètre de 4,50 m à hauteur d'homme). Cette essence, propre aux zones côtières humides du Pacifique, de la Colombie britannique (Canada) à la Californie (États-Unis), trouve les conditions climatiques les plus favorables au nord, dans le « fog belt », où l'hygrométrie est très élevée et où les amplitudes thermiques annuelles sont faibles; là se situent les plus importants peuplements. Cette forme a une grande longévité (elle peut atteindre cinq cents à mille ans), mais est exigeante : il lui faut une pluviosité annuelle de 1 000 mm à 2 000 mm habituellement et un substrat acide profond, fertile et surtout bien drainé; au stade juvénile, ce douglas est favorisé par l'ombre, puis il devient héliophile. Au nord, on le trouve au niveau de la mer jusqu'à 700 m au maximum; en Californie, il croît entre 1 000 m et 1 800 m et se limite aux cañons et aux expositions septentrionales. On le considère comme un type subclimax, associé ou non à *Picea sitchensis, Tsuga heterophylla* et *Tsuga mertensiana*, plus ombrophiles. Au sud, on le rencontre avec *Pinus ponderosa, Pinus lambertiana, Chamaecyparis lawsoniana, Heyderia decurrens* et divers chênes. Ses principaux caractères sont : un tronc étroit, colonnaire, et une cime conique; une écorce assez épaisse, presque liégeuse, ridée longitudinalement ou formant des plaques; des branches en partie verticillées, et en partie éparses le long de l'axe; des bourgeons pointus; des feuilles droites, linéaires, à peu près distiques sur les branches stériles, à odeur de citron quand on les froisse; des vésicules de résine — dont le parfum est identique à celui des feuilles — abondantes sur l'écorce des exemplaires juvéniles; de petits cônes, à écailles fines et à bractées aussi longues ou plus longues que ces dernières, appliquées contre elles. Le bois a un aubier blanchâtre et un duramen brun-rose, une texture fine et des fibres droites; son retrait est faible, il se conserve longtemps, il est lourd et facile à travailler. Étant une espèce à croissance rapide, ce Conifère sert largement au reboisement dans les régions à climat océanique d'Europe.

La variété *glauca* est typique des montagnes Rocheuses. Elle est moins exigeante en fait d'humidité (pluviosité annuelle de 600 mm à 1 100 mm), plus résistante au froid et aux écarts de température, et peut s'adapter à des terrains pauvres et rocheux; sa croissance est assez lente. On la trouve jusqu'à 1 800 m d'altitude, de la Colombie britannique à l'Arizona et au Nouveau-Mexique, mêlée à *Larix occidentalis, Abies sp. pl., Pinus ponderosa, Picea engelmanni*, etc. Sa longévité est bien moindre que celle de la variété précédente, et elle ne dépasse pas 45 m de hauteur. Ses feuilles glauques, au moins la première année, sont disposées en brosse; ses cônes sont plus petits que ceux de la forme côtière.

Pseudotsuga macrocarpa ou douglas à grands cônes, de petite ou de moyenne taille, est une espèce vivant sous le climat sec — de type méditerranéen — qui règne au sud de la Californie; il est caractérisé par des cônes grands et allongés. Enfin, dans les forêts de pins du Mexique septentrional croissent çà et là quatre espèces de douglas, dont les aires ne sont pas encore bien connues; il s'agit de *Pseudotsuga macrolepis, P. flahaulti, P. guinieri* et *P. rehderi*.

Les espèces asiatiques du genre sont moins importantes du point de vue forestier. Nous citerons : pour la Chine, le douglas de Chine *(Pseudotsuga sinensis)*, des régions montagneuses du Sud-Ouest, et le douglas de Forrest *(P. forrestii)*, de la vallée du Mékong; pour le Japon, à faible altitude, le douglas du Japon *(P. japonica);* enfin, à Formose, le douglas de Wilson *(P. wilsoniana)*, endémique.

Le genre *Tsuga* comprend des espèces de moyenne et de grande taille, à cime pyramidale, à branches non verticillées, horizontales ou pendantes, et à rameaux principaux fins et inclinés. Les aiguilles, persistantes, sont pétiolées, aplaties, distiques ou en écouvillon, flexibles et le plus souvent arrondies au sommet. Les cônes sont petits, pendants au bout des rameaux, et mûrissent en un an; leurs écailles, fines, de consistance de cuir, sont arrondies et cachent des bractées plus courtes; les graines sont longuement ailées. La distribution de ce genre se situe en Amérique du Nord et en Asie du Sud-Ouest.

Le tsuga hétérophylle ou sapin pleureur, tsuga de l'Ouest, « hemlock », « western hemlock », « hemlock spruce » *(Tsuga heterophylla)*, est une espèce des régions pluvieuses des climats océaniques, depuis l'Alaska méridional jusqu'à la Californie septentrionale, et depuis le niveau de la mer jusqu'à 600 m d'altitude; dans les montagnes Rocheuses, il monte jusqu'à 1 800 m (record, 2 400 m). Il est le plus souvent mêlé à l'épicéa de Sitka et au douglas vert; mais il constitue aussi, surtout le long

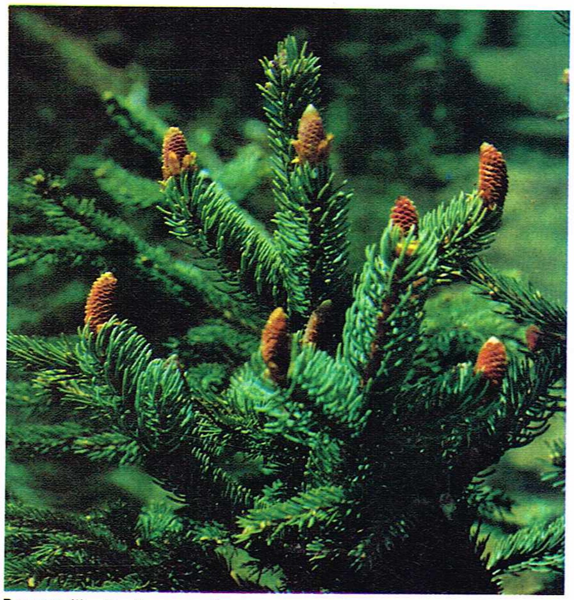

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ ***Jeunes cônes (à gauche) et chatons mâles (à droite) d'épicéa commun*** **(Picea excelsa).**

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Chez l'épicéa commun, les cônes ne sont pas dressés, mais pendants.*

▼ *Aspect de l'écorce de l'épicéa commun.*

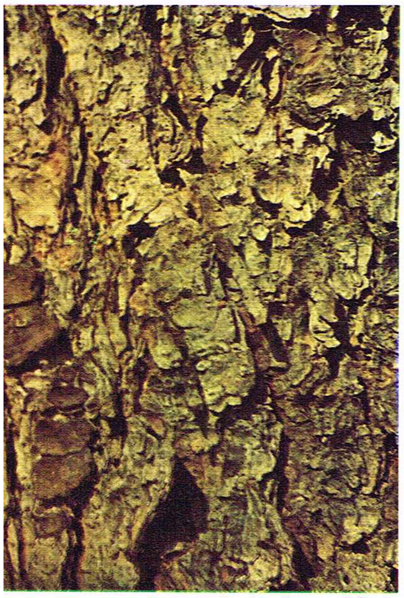

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

de la côte, des forêts monospécifiques très denses qui sont considérées comme des climax. Il atteint une hauteur assez importante (de 50 m à 65 m), avec un diamètre relativement faible (dépassant de peu 1 m). On le reconnaît à sa flèche penchée, à son écorce brun foncé, à ses rides longitudinales, à ses feuilles courtes, droites, obtuses, blanchâtres en dessous, sillonnées à la face supérieure et disposées en écouvillons. C'est l'espèce américaine du genre *Tsuga* qui a le plus d'importance du point de vue forestier.

Tsuga mertensiana (« mountain hemlock ») croît généralement à plus grande altitude, depuis la région subalpine, dans les zones humides à hivers froids de longue durée, avec d'importantes précipitations (surtout sous forme de neige). Sa distribution va de l'Alaska, où on le rencontre au niveau de la mer, jusqu'à l'Idaho et à la sierra Nevada, où il vit de 1 800 m à 3 300 m; il atteint toujours la limite de la végétation arborescente, aussi bien au nord qu'au sud. Sa distribution coïncide nettement avec les lignes de maximum de pluviosité (en Colombie britannique, de 2 000 mm à 4 200 mm par an). C'est une essence climax, sauf dans les zones où elle est associée à *Abies amabilis;* habituellement, ce tsuga est mêlé à d'autres Conifères et supporte très bien l'ombre. Il diffère de l'espèce précédente par sa taille bien moindre (normalement, de 15 m à 30 m), son rhytidome brun rougeâtre, ses aiguilles plus longues, ses feuilles en écouvillon ou en brosse, et ses cônes plus grands.

Le tsuga du Canada *(Tsuga canadensis)* ou « eastern hemlock » représente le genre dans la partie orientale de l'Amérique du Nord; il est distribué de la Nouvelle-Écosse et de l'aval du Saint-Laurent à la Nouvelle-Angleterre, aux Appalaches et à la région des Grands Lacs, où il constitue des forêts denses, à microclimat interne uniforme, quelle que soit la latitude de la station. Il croît dans des zones beaucoup moins pluvieuses que les précédentes espèces, mais a besoin de précipitations plus abondantes durant la période végétative. Comme les espèces déjà citées, il produit un humus très acide et croît sur des podzols. Mêlé à *Fagus americana* et *Acer saccharum* (hêtre d'Amérique et érable à sucre), il représente le climax de sa zone, tout au moins au nord, mais il est aussi aux côtés de *Pinus strobus, Betula alleghanensis, Liriodendron tulipifera*, etc. Ce tsuga, de grande longévité (on connaît un spécimen de près de mille ans), peut atteindre un diamètre de 2 m et une hauteur de plus de 45 m. Comme ses congénères, il résiste très bien à l'ombre et a une croissance lente. Ses feuilles sont subdistiques, mais celles de la partie supérieure des rameaux sont plus courtes et appliquées vers l'avant. Le tsuga de la Caroline *(Tsuga caroliniana)*, répandu de la Virginie à la Géorgie, est une espèce de taille moindre.

Les espèces asiatiques du genre sont les suivantes : tsuga de Chine *(Tsuga sinensis)* et tsuga du Yunnan *(T. yunnanensis)*, des montagnes de la Chine occidentale et du Sud-Ouest; *T. diversifolia* et *T. sieboldii* du Japon; tsuga de Formose *(T. formosana)*, de l'île de Formose comme son nom l'indique; *T. dumosa*, de l'Himalaya central et oriental.

Le genre *Picea* est l'un des plus importants que comprennent les Abiétacées, puisqu'il compte environ quarante espèces, largement distribuées dans l'hémisphère Nord. Leur port est pyramidal et leur cime pointue. Leur tronc est droit et graduellement rétréci; leur écorce, habituellement mince, devient vite écailleuse; leurs branches sont à la fois verticillées et disposées irrégulièrement sur le tronc; les rameaux, souvent pendants, ont une surface rugueuse, par suite de l'existence de coussinets foliaires en saillie. Leurs feuilles, courtes et acutiformes, sont le plus souvent quadrangulaires et pointues; elles persistent plusieurs années sur les rameaux; leur disposition peut être en brosse, avec les aiguilles tournées vers l'extérieur, en éventail, avec la partie inférieure des rameaux dénudée, ou en rosette.

Les cônes, à la différence du genre *Abies*, sont pendants et tombent à maturité. Les écailles sont fines, rigides ou flexibles, à marges entières ou dentelées; les bractées sont petites. Le bois est tendre, à longues fibres et à grain variable, le plus souvent blanc, peu résineux, avec une différenciation minime entre le duramen et l'aubier. Le genre est commun en plaine au nord, et dans les zones subalpines et montagneuses des régions situées plus au sud.

L'épicéa commun *(Picea excelsa)* est le plus répandu et le plus apprécié des Conifères européens. Il atteint une hauteur de 50 m. Son aire s'étend du Jura, des Alpes, de l'Europe centrale et de la Scandinavie aux Carpathes, aux Balkans, au sud de l'U.R.S.S. (on observe là des formes de transition vers *Picea obovata*). Il n'est pas spontané dans le Massif central ni dans les Pyrénées, où il a été largement planté. Son écorce brun rougeâtre se desquame en lamelles polygonales. Les rameaux sont de couleur rousse ou orangée. La cime, pyramidale et élancée, est constituée de branches légèrement inclinées vers le bas, portant des rameaux souvent pendants; les formes colonnaires, étroites, sont généralement propres aux altitudes les plus élevées. Le tronc, peu conique, est droit. L'appareil radiculaire n'est guère important, il est en outre superficiel. Les feuilles sont légèrement recourbées, vertes, brillantes, de section rhomboïdale, pointues sans être piquantes, et couvrent les rameaux en brosse ou en éventail. Les cônes, cylindriques ou ovoïdaux, bruns, sont faits d'écailles luisantes et flexibles, souvent rhomboïdales, tronquées ou denticulées au sommet. Cette espèce, en Europe centro-méridionale, est l'un des éléments principaux des forêts de montagne, de 800 m à 1 800 m d'altitude, où la pluviosité est suffisante et où le climat est continental; elle a donc une distribution généralement différente de celle du sapin pectiné, car elle atteint des altitudes supérieures, étant donné qu'elle résiste mieux au froid et est moins exigeante en ce qui concerne l'humidité atmosphérique; elle pousse sur différents sols, même humides, mais préfère ceux qui sont acides et meubles. On rencontre cet épicéa à l'état pur ou mêlé aux mélèzes, au sapin pectiné, ou encore au hêtre et au pin cembro. En Europe septentrionale, et surtout en Scandinavie, il alterne à basse altitude avec le pin sylvestre, mais il se montre plus exigeant que ce dernier quant au climat et à la nature du sol. L'épicéa commun ne tolère pas l'ombre, car il est héliophile. Son bois, non différencié, résineux, blanchâtre, légèrement veiné, a un poids spécifique variable; il est très apprécié en construction, en menuiserie, pour la fabrication de

meubles et pour la production de cellulose et de pâte à papier. C'est une très importante essence de reboisement, mais on l'emploie largement aussi à des fins ornementales; c'est en outre l'espèce la plus utilisée comme arbre de Noël.

Le remplaçant oriental de *Picea excelsa* est *Picea obovata* (Laponie, Russie orientale et méridionale, Sibérie, Kamtchatka, Mandchourie), des climats fortement continentaux; c'est l'une des principales essences de la taïga. *Picea omorica* est un intéressant héritage du Tertiaire, endémique dans la vallée de la Drina (Yougoslavie); il est caractérisé par sa cime peu fournie et colonnaire; on le trouve sur sols calcaires, de 600 m à 1 400 m, même dans les zones rupestres, et dans l'aire de *Picea excelsa*.

Picea orientalis est répandu en Turquie (monts Pontiques de l'Est et Taurus) et dans le Caucase occidental, en compagnie d'*Abies nordmanniana* (sapin de Nordmann), dans des zones humides, entre 700 m et 2 100 m d'altitude. Cet arbre élevé, à ramification très régulière et à cime serrée, à courts rameaux, les plus bas arrivant jusqu'à terre, est une excellente essence ornementale, cultivée dans nos parcs.

On trouve de grandes forêts de *Picea schrenkiana* ou épicéa de Schrenk, répandu jusqu'à 3 000 m d'altitude, en Asie centrale. Les espèces himalayennes sont au nombre de deux : *Picea smithiana (= P. morinda)* et *P. spinulosa*, de grande taille; la première a une distribution occidentale, de 2 000 m à 4 000 m d'altitude, la seconde est orientale et croît de 2 600 m à 3 000 m. Il existe en Chine occidentale de nombreuses formes de *Picea* (plus de vingt), que nous ne citerons pas ici, surtout du fait de l'incertitude de leur taxonomie. *Picea jezoensis* est une importante espèce forestière japonaise, qui a été récemment divisée en quatre espèces, de distribution différente (de la Sibérie orientale au centre du Japon). Nous citerons encore au Japon *Picea bicolor* et *P. koyamai;* on trouve, en Corée et en Mandchourie, *P. koraiensis*.

Les espèces nord-américaines ont généralement de vastes aires de distribution et sont d'un grand intérêt économique. *Picea rubens* (épinette rouge, « red spruce ») est un représentant de la forêt septentrionale; il est répandu dans le sud du Canada et en Nouvelle-Angleterre; on le trouve plus rarement sur les Appalaches; il croît dans des zones humides à pluies estivales, à climat tempéré froid, et à podzol même peu épais et rocheux, jusqu'à 1 400 m d'altitude, au nord, et plus, au sud. Il est associé à *Betula lutea, Betula papyrifera, Tsuga canadensis, Acer saccharina* ou *saccharum, Fagus americana*, etc. C'est un arbre conique, à cime dense, de hauteur moyenne, et à feuilles courtes, rares et vert jaunâtre; ses cônes sont petits.

C. Lemoine

▲ ***L'épicéa commun, quoiqu'il pousse sur des sols bien différents, préfère néanmoins les milieux acides et meubles.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

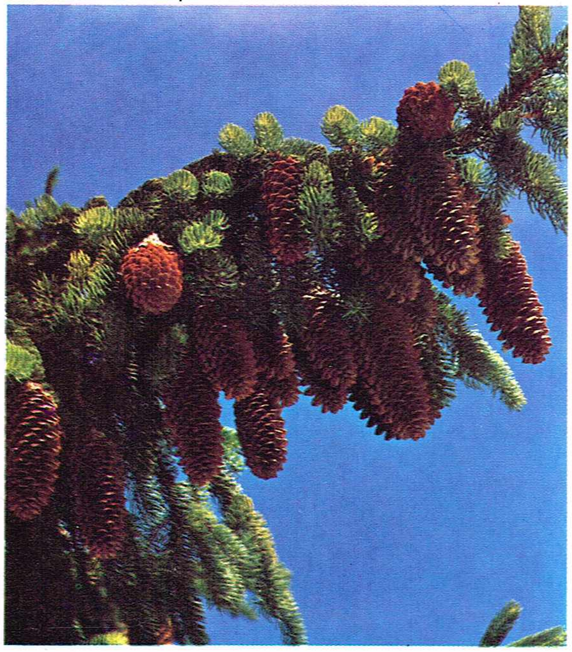

◀ ***Cônes à écailles luisantes d'épicéa commun.***

L'épinette blanche du Canada (*Picea alba* ou *canadensis* ou encore *glauca*, « white spruce ») est distribuée presque d'une côte à l'autre. Cet arbre est caractéristique de la forêt boréale, depuis l'Alaska jusqu'à l'Atlantique et aux Grands Lacs. Espèce continentale, il supporte des températures hivernales très basses, a des périodes végétatives très brèves, et croît dans des zones semi-arides sur sols podzoliques, acides ou même légèrement alcalins, mal drainés à l'occasion, au nord de la zone du permafrost (sol gelé perpétuellement à une certaine profondeur). Son altitude maximale est, dans les montagnes Rocheuses, de 1 500 m. On le trouve souvent seul, mais il s'associe aussi à différents bouleaux et à *Populus tremuloides, Abies balsamea, Picea mariana, Larix laricina*. Son écorce a de petites écailles cendrées; ses branches inférieures sont pendantes, alors que les autres sont relevées; ses feuilles sont courtes, vert glauque, d'odeur fétide et en rosettes; ses cônes sont petits, obtus, et possèdent peu d'écailles.

L'aire de l'épinette noire ou « black spruce » *(Picea mariana)* coïncide plus ou moins avec celle de l'espèce précédente. Moins exigeant que l'épinette blanche, ce Conifère s'adapte à des sols anormaux, très chargés en matières organiques et tourbeux, ainsi qu'à des zones paludéennes, où son port est cependant dégénéré et où sa croissance est très lente; au nord et à l'ouest, il vit également dans des zones rocheuses. Ses sols sont des podzols souvent très imbibés et acides (pH 3,5 à 4,5) ou neutres. L'épinette noire est associée aux espèces

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Rameaux débourrants chez* Picea pungens, *variété* moerheimii. *Les écailles des bourgeons se sont écartées avant de tomber.*

de la forêt septentrionale et boréale (y compris au pin de Banks) ; on la rencontre rarement au-delà de 800 m à 1 000 m d'altitude. Elle peut atteindre 30 m de hauteur, mais sa taille est habituellement inférieure, et son diamètre est faible. Ses branches, brèves, forment une cime étroite. Ses feuilles, quadrangulaires, assez courtes, aiguës, vert bleuâtre, sont disposées en brosse ; ses cônes, petits, persistent longtemps sur les branches et sont formés d'écailles rigides, largement ovales.

La plus importante espèce du genre *Picea* des montagnes Rocheuses est l'épicéa d'Engelmann *(Picea engelmanni)*, élément continental de montagne, à aire continue au Canada, plus fragmentée aux États-Unis, avec des pointes jusqu'aux régions méridionales. Cet épicéa croît sous un climat froid et humide, jusqu'à la limite de la végétation arborescente ; au nord, il atteint de 300 m à 1 200 m d'altitude, et, au sud, de 2 400 m à 3 600 m (record, 4 000 m) ; il forme des forêts avec *Abies lasiocarpa* et avec de nombreux autres Conifères. De croissance lente, il a une grande longévité (on connaît des exemplaires de plus de cinq cents ans) et atteint une taille importante (jusqu'à 45 m). Sa cime est restreinte. Ses feuilles sont vert grisâtre ou vert bleuâtre, flexibles, d'odeur fétide quand on les froisse et disposées en brosse ; les cônes sont petits.

L'épicéa piquant ou du Colorado, ou encore épicéa bleu *(Picea pungens)* est une espèce plus xérophile. Il est distribué dans les montagnes, du Wyoming au Nouveau-Mexique, à l'Utah et à l'Arizona (de 1 800 m à 3 300 m d'altitude). Il est caractérisé par ses feuilles épaisses, rigides, courbées, piquantes, de couleur vert clair à vert glauque. On en a sélectionné plusieurs variétés ornementales. *Picea chihuahuana*, des forêts mixtes de pins du Mexique septentrional, est l'espèce américaine dont l'aire est le plus méridionale.

L'épicéa de Sitka ou « Sitka spruce » *(Picea sitchensis)* est le plus grand (il atteint jusqu'à 85 m de hauteur) et aussi le plus important du point de vue forestier. Sa distribution est nettement côtière, de l'Alaska du Nord — où il peut avoir un port quelque peu buissonnant — jusqu'à la Californie du Nord, en passant par son habitat optimal (côtes de la Colombie britannique et de l'État de Washington). Au sud, cette espèce est limitée aux sols alluvionnaires plus frais. Dans sa zone de végétation optimale, le climat est strictement océanique, très humide (précipitations et nébulosité élevées), à faibles amplitudes thermiques saisonnières et à gelées courtes.

Cette essence est soit exclusive, soit associée au tsuga hétérophylle ; ombrophile, elle est remplacée dans les zones plus sèches par le douglas vert. *Picea sitchensis* croît sur sols acides, bien drainés, à épaisse couverture d'humus, du niveau de la mer à 500-900 m d'altitude. C'est un arbre majestueux, à base développée, et à écorce brun rougeâtre à écailles relevées aux bords ; ses feuilles sont rigides, fines, vertes, piquantes, disposées en brosse ou en éventail ; ses cônes sont cylindriques, avec des écailles rhomboïdales, papyracées, à bords tronqués, denticulées. Par suite de sa croissance rapide, on l'emploie beaucoup pour le reboisement des régions à climat océanique d'Europe (Bretagne, Grande-Bretagne).

L'épicéa de Brewer *(Picea breweriana)* est une espèce rare des monts Siskiyou de la Californie et de l'Oregon.

Le genre *Larix*, ou mélèze, est le plus important et le plus répandu des Conifères à feuilles caduques ; il est largement représenté dans les zones tempérées et tempérées froides d'Europe, d'Asie et d'Amérique du Nord par une dizaine d'espèces. Sa silhouette est peu fournie ; sa ramification est horizontale, disposée irrégulièrement sur un gros tronc droit, qui devient conique en vieillissant. L'écorce est d'abord écailleuse, puis épaisse et fissurée chez les spécimens âgés. Les rameaux d'allongement sont cannelés, par suite de la présence des bases foliaires après la chute des feuilles. Sur les mésoblastes, les aiguilles, disposées en spirale comme sur les auxiblastes,

D. Lecourt - Jacana

▶ *Diverses variétés d'épicéa du Colorado, ou épicéa bleu* (Picea pungens), *sont utilisées pour leur valeur ornementale.*

sont si rapprochées qu'elles semblent insérées en rosettes ou en touffes. Les feuilles, courtes, sont fines, carénées seulement à la face inférieure ou sur les deux faces, molles, vertes, mais d'un jaune doré avant la chute automnale. Les inflorescences mâles et femelles naissent avant la sortie des feuilles, au printemps, sur le même arbre; les femelles ont des bractées souvent vivement colorées. Les cônes sont généralement de petite taille, mûrissent la première année, mais persistent indéfiniment sur les branches. Le bois est dur et lourd, avec un duramen rougeâtre ou brun, et un aubier peu développé et jaunâtre. Les mélèzes sont tous colonisateurs et héliophiles.

Le mélèze d'Europe *(Larix decidua = europaea)* peut atteindre 40 m de hauteur pour 2 m de diamètre, au maximum. Ses ramifications primaires sont grosses, et les secondaires fines, flexibles et pendantes, ce qui constitue dans l'ensemble une silhouette légère, conique, puis pyramidale. Le rhytidome, crêpelé, grisâtre en surface et rougeâtre dans ses fissures, devient avec le temps épais et presque subéreux. Les aiguilles, de consistance herbacée, sont rhomboïdales sur les mésoblastes et plus aplaties sur les auxiblastes. Le mélèze atteint normalement dans les Alpes la limite de la végétation arborescente; il s'agit alors d'arbres isolés, avec un axe trapu, irrégulièrement ramifié, tronqué, à cause des mauvaises conditions ambiantes; sur les pentes raides, le tronc est souvent incurvé en sabre à la base, sous l'effet de la neige. Les inflorescences femelles sont de couleur carminée et donnent des cônes ligneux ovoïdaux, à écailles assez fines, ovales, à bords arrondis ou anguleux. Le système radiculaire, à la différence de celui de l'épicéa commun, est robuste et foisonnant, ce qui permet à l'espèce de s'installer sur les rocailles et les terrains d'éboulis et découverts. Le mélèze est indifférent à la nature du substratum, mais il faut que le sol soit bien drainé. Par suite, et du fait de son peu d'exigence quant à l'humidité et la température, il est répandu de préférence dans des stations à climat continental sec; il abonde avec le pin cembro et même avec le pin à crochets à l'étage subalpin, et avec l'épicéa commun ou le pin sylvestre, plus bas, dans les Alpes. Il existe quatre grands centres de végétation du mélèze d'Europe : les Alpes, les monts des Sudètes (var. *sudetica*), les Carpathes (var. *carpatica*) et la Pologne (var. *polonica*).

Le bois du mélèze de haute montagne, de qualité semblable au pitchpin, est lourd, compact, homogène, à veines marquées, très résineux, à fibres droites; son duramen est bien développé, de couleur rose ou pourprée, et son aubier est jaunâtre. Ses qualités de résistance aux efforts et à l'usure ainsi que sa bonne conservation le recommandent pour les constructions lourdes, ponts, travaux maritimes, fondations, huisseries, meubles et palissades. Les planches en mélèze se distinguent aisément de celles du pin : chez les premières, les nœuds des branches sont épars sur la surface, alors que, chez les secondes, ils sont disposés régulièrement.

Le mélèze de Sibérie *(Larix sibirica)* est proche du mélèze d'Europe (il s'en est peut-être différencié après la récession des glaciers quaternaires), mais ses feuilles sont plus fines et les écailles des cônes quadrangulaires. On le rencontre en Russie nord-orientale et en Sibérie occidentale, dans des régions aux hivers longs, aux étés chauds et aux saisons intermédiaires très courtes. En Sibérie orientale, cette essence est remplacée par *Larix gmelini (= L. dahurica)*, encore plus résistant aux grands froids, qui est dans cette zone le principal composant des forêts de résineux de la taïga; avec trois sous-espèces dont les aires sont différentes, il occupe également le Kamtchatka, l'île de Sakhaline, les îles Kouriles et la Mandchourie.

L'unique mélèze himalayen (Himalaya central et oriental) est *Larix griffithii* ou mélèze de Griffith, à grands cônes allongés, avec des bractées très saillantes et recourbées. Il peuple les pâturages et les moraines, mêlé à *Pinus*

▼ *Aspect général (à gauche) et vue détaillée (à droite) de l'espèce* Larix decidua = europaea, *ou mélèze d'Europe.*

P. Starosta

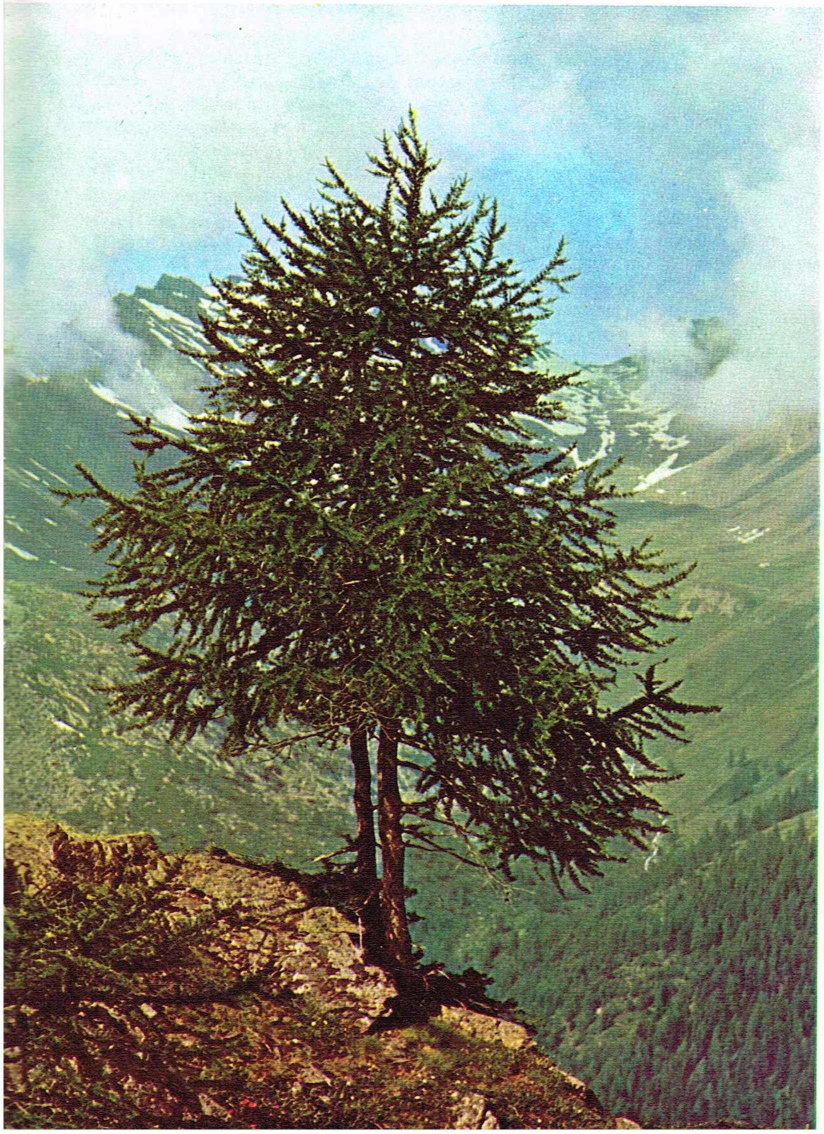

Ruffier-Lanche - Jacana

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Dans les Alpes, les mélèzes atteignent la limite du peuplement arborescent. Ce sont des Conifères à feuilles caduques.***

griffithii, ou bien se trouve par groupes parmi les rhododendrons. En Chine occidentale, on trouve *Larix potaninii,* espèce subalpine, avec l'espèce proche *Larix mastersiana.*

Malgré son aire d'origine restreinte, le plus important mélèze exotique est le mélèze du Japon *(Larix leptolepis)* ; il est très exploité dans son pays d'origine et dans les régions océaniques d'Europe pour le reboisement, par suite de sa rapide croissance les premières années. Cet arbre a besoin de pluies abondantes, d'une bonne humidité atmosphérique et de sols légers. Il diffère de l'espèce européenne par ses branches plus longues et plus grosses, et ses jeunes rameaux rosés et non jaunâtres ; par ailleurs, ses cônes sont en forme de rose, avec des écailles émarginées, retournées en dehors à l'extrémité ; ses feuilles, enfin, sont glauques. Dans sa région d'origine (île de Hondo), il croît entre 1 200 m et 2 400 m d'altitude, seul ou mêlé à *Abies homolepis, Abies veitchii, Picea hondoensis* et *Tsuga diversifolia.* Avec le mélèze d'Europe, il a donné un hybride *(Larix eurolepis)* très employé.

Les espèces nord-américaines sont au nombre de trois, dont la plus répandue est *Larix laricina,* ayant une aire semblable à celle de *Picea mariana* et de *Picea glauca,* auxquels elle est associée. Ce Conifère a une faible longévité, il est de taille moyenne et croît rapidement au début. Sa silhouette est colonnaire. Son écorce brun rougeâtre reste longtemps écailleuse. Ses branches sont fines et courtes, ses feuilles vert jaunâtre. Ses cônes enfin sont petits, oblongs, avec un nombre restreint d'écailles arrondies et émarginées. *Larix laricina* pousse sur des terrains rocheux, dans les tourbières et les marécages à sphaignes, surtout au sud, où il réussit à bien s'implanter. En outre, il résiste sans dommages à de brèves inondations. Il ne dépasse pas 500 m à 1 200 m d'altitude, selon les zones.

Larix occidentalis, de haute taille (jusqu'à 60 m), habite les montagnes Rocheuses, le Canada, ainsi que les États de Washington, de l'Oregon, de l'Idaho et du Montana, entre 600 m et 2 200 m. C'est un arbre de grande longévité (il vit de sept cents à neuf cents ans), avec des aiguilles de section trigone, linéaires, assez éparses. Son rhytidome est gris-brun, puis de couleur cannelle chez les vieux individus. Ses cônes ont de nombreuses écailles entières ou denticulées, qui s'élargissent à maturité, et des bractées saillantes. Il croît sur les podzols, sous climat tempéré froid et sec. Colonisateur après les incendies forestiers, il forme des forêts stables, seul ou mêlé à *Pseudotsuga menziesii, Abies grandis, Pinus monticola,* etc. Quant à *Larix lyallii,* dont l'aire se limite aux Cascade Mountains et aux montagnes Rocheuses, il est proche du *L. potaninii* asiatique.

Le genre *Pseudolarix* est représenté par *Pseudolarix kaempferi (= amabilis)* ou mélèze doré de la Chine, originaire du nord-est de la Chine, qui possède des feuilles caduques, larges et longues, glauques en dessous ; cet arbre est proche des *Larix,* mais ses cônes se désarticulent à maturité ; c'est une espèce de climat humide et à hiver tempéré.

Les cèdres, appartenant au genre *Cedrus,* sont des arbres de moyenne et de grande taille, à gros tronc conique, et à cime élargie, pyramidale, globuleuse ou tabulaire. Les feuilles, persistantes, sont disposées comme chez les *Larix.* La floraison est automnale ; les cônes, de forme cylindrique, se désarticulent à maturité, deux à trois ans après la floraison. Les *Cedrus,* très répandus au Tertiaire, ont actuellement une distribution méditerranéo-himalayenne. Le bois de ces essences est moyennement lourd, parfumé, coloré, facile à travailler.

Le cèdre de l'Atlas *(Cedrus atlantica)* est une espèce nord-africaine à silhouette pyramidale fournie. Il est souvent de couleur générale glauque. Sa cime est dressée. Ses aiguilles, rigides, sont de longueur moyenne. Il est largement répandu dans le Rif, le Moyen Atlas et le Grand Atlas, entre 1 400 m et 2 200 m d'altitude, sous un climat humide ou semi-aride ; il succède en altitude au chêne vert et est mêlé localement à *Juniperus phoenicea* et *J. thurifera.* On l'utilise pour le reboisement dans les régions méditerranéennes ; il est recherché pour l'ornementation des parcs, surtout sous sa variété *glauca.*

Le cèdre du Liban *(Cedrus libani)* est celui qui est cité dans la Bible. Il a aujourd'hui presque disparu de la chaîne du Liban ; il est répandu en Anatolie méridionale (Taurus et Anti-Taurus), entre 1 250 m et 2 000 m d'altitude, où il habite en compagnie d'*Abies cilicica* (à l'ouest) ou de *Pinus nigra pallasiana* et de divers genévriers au-dessus de la zone de végétation arborescente. Il

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ **Cèdres du Liban** (Cedrus libani). ***Chez les spécimens âgés, la cime devient souvent tabulaire.***

▼ ***Rameaux fleuris de cèdre du Liban.***

est adapté au climat de type méditerranéen à hivers froids et à précipitations faibles. Cette essence, moins haute que la précédente, a un port dense ; elle est vert foncé et a une cime souvent typiquement tabulaire chez les spécimens adultes. Ses feuilles sont rigides et assez courtes. Cette espèce est utilisée à des fins ornementales. *Cedrus brevifolia*, ou cèdre à feuilles courtes, endémique de Chypre, en est proche.

Cedrus deodara est un très grand arbre (jusqu'à 70 m), avec des pousses secondaires et terminales pendantes et recourbées, des aiguilles assez longues, molles, vert clair, et de grands cônes arrondis. Il a une large distribution (entre 1 700 m et 3 000 m, avec pour record 3 600 m) dans l'Himalaya occidental et central ; dans cet espace vaste en latitude et en altitude, il croît sous des climats divers : à l'ouest, les hivers sont froids et les précipitations sont concentrées pendant cette période ; plus à l'est, les pluies, estivales et plus importantes, obéissent au régime des moussons, avec en outre de fortes chutes de neige hivernales (mais le froid n'est jamais intense). Selon l'altitude, ce cèdre est mêlé à différentes espèces : en moyenne altitude, à *Pinus griffithii* ; en haute altitude, à *Abies pindrow* et à *Picea smithiana* ; plus bas, à faible altitude, on le trouve aussi seul. Il est cultivé pour agrémenter les parcs et les jardins dans des régions où les hivers sont peu froids et assez humides.

Les pins *(Pinus)* sont le genre d'Abiétacées le plus riche en espèces, celles-ci sont au nombre d'environ cent vingt. On y compte des arbres à développement et à port très variés, mais tous sont caractérisés par des brachyblastes se scindant en aiguilles, courtes ou longues, isolées ou en groupes de deux-trois-quatre-cinq. Dans le groupe des pins haplostélés, les graines sont scarieuses, membraneuses et semi-transparentes, entourant à la base les faisceaux d'aiguilles, et caduques. Chez les pins diplostélés, au contraire, ces gaines sont plus ou moins persistantes. Les premiers possèdent un faisceau libéro-ligneux (sous-genre *Strobus* ou *Haploxylon*), et les seconds en possèdent deux (sous-genre *Pinus* ou *Diploxylon*).

Les pins sont monoïques ; leurs cônes mûrissent en deux ans (rarement trois) et, après leur ouverture, tombent (cônes déhiscents et caducs), ou encore restent

C. Nuridsany

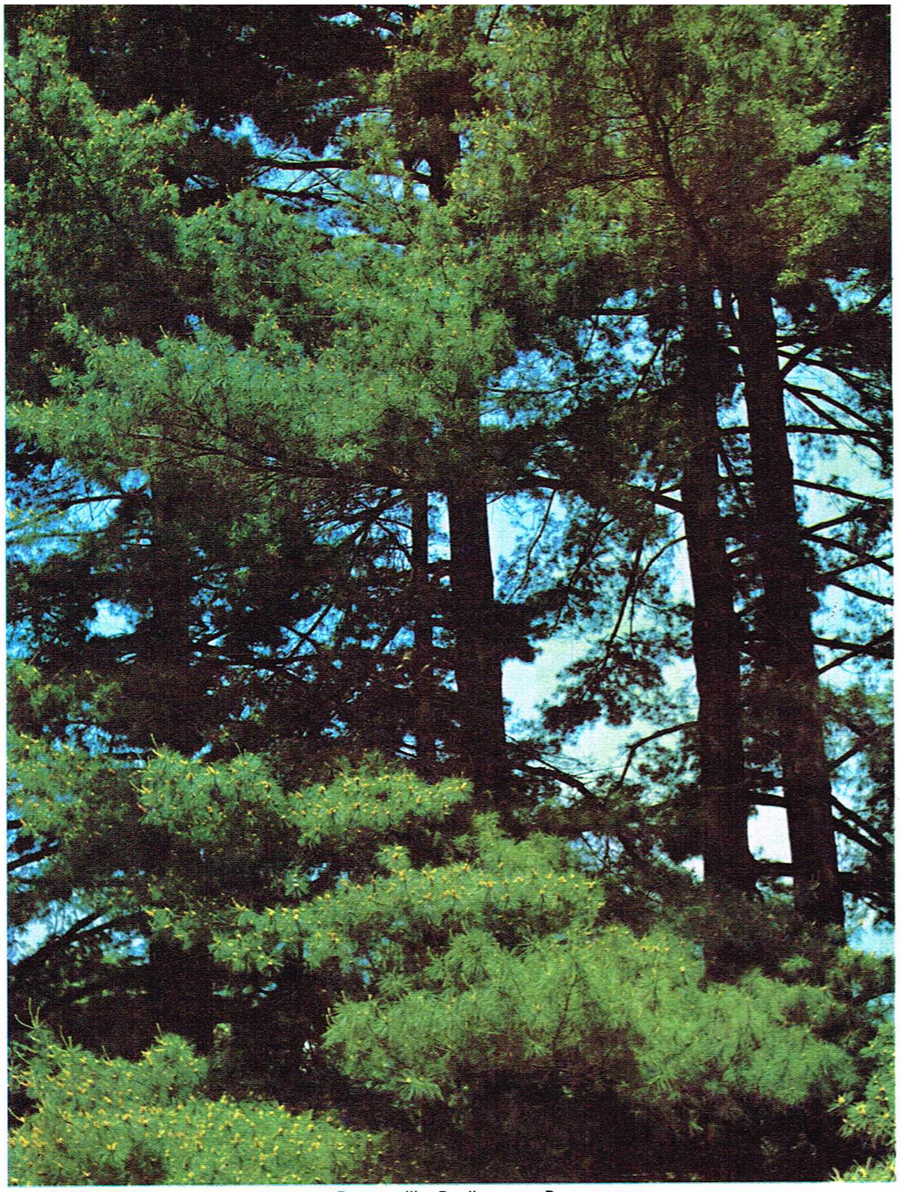

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Aspect des branches du pin sylvestre* (Pinus silvestris).

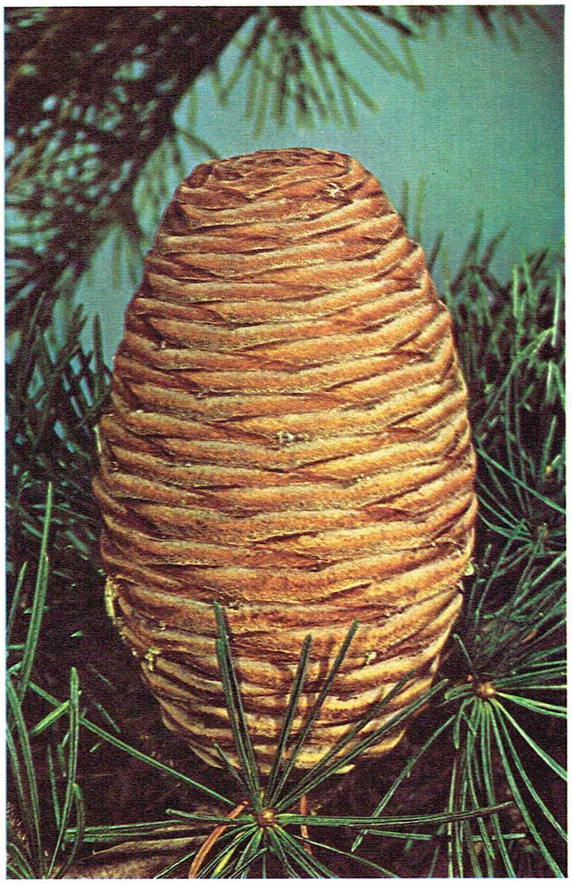

P. Starosta

▶ *Cône dressé de cèdre du Liban.*

Page ci-contre : ▶ *Pinède dans les Landes aux abords du lac d'Hossegor.*

sur l'arbre (cônes déhiscents et persistants) ; quand les cônes ne s'ouvrent que longtemps après la maturation, on parle de cônes indéhiscents ; les graines sont le plus souvent ailées.

Ce genre est très largement répandu dans l'hémisphère boréal, mais plusieurs espèces arrivent à proximité de l'équateur et l'une d'elles vit sous celui-ci.

Le sous-genre *Strobus* est caractérisé, en plus des caractères déjà cités, par son bois tendre et clair. Il est divisé en sections : *Cembra* et *Parryana*, celle-là avec des feuilles groupées par cinq et l'ombilic de l'écaille séminale en position terminale, et celle-ci avec des aiguilles isolées ou en faisceaux de deux à cinq et un ombilic dorsal. La section *Cembra* comprend à son tour trois sous-sections : *Strobi, Cembrae* et *Flexiles*. La sous-section *Strobi* est constituée par *Pinus peuce, P. strobus, P. monticola, P. lambertiana, P. ayacahuite, P. griffithii.* Dans la sous-section *Strobi*, de nombreuses possibilités d'hybridation existent, ce qui prouve l'affinité entre les espèces. Cela implique que la différenciation des espèces se soit faite plus par isolement géographique que par suite de variations génétiques.

Pinus peuce, arbre de taille moyenne, a une silhouette conique, rétrécie, et un tronc d'abord lisse, avec des vésicules de résine, puis écailleux. Ses feuilles sont fines, presque droites, aiguës et vert clair. Ses cônes sont ovoïdaux, allongés, et présentent des écailles épaisses et convexes. L'aire de distribution se répartit entre l'ancien Monténégro, l'Albanie, la Macédoine et la Bulgarie ; l'altitude atteinte est de 2 200 m, en mélange avec l'épicéa commun (mais il est seul vers les plus hautes altitudes). C'est une relicte de l'époque tertiaire, cantonnée dans les zones non atteintes par les glaciations.

Le pin Weymouth ou pin du lord *(Pinus strobus)*, ou « eastern white pine », est le représentant oriental de la sous-section *Strobi* en Amérique, dans la zone des Grands Lacs, en Nouvelle-Angleterre et, de façon disséminée, dans les Appalaches. C'est un bel arbre à tronc droit. Son écorce est grise, longtemps lisse puis ridée. Les branches, fines, horizontales, verticillées régulièrement, constituent dans leur ensemble une silhouette en boule ou pyramidale. Les aiguilles sont assez longues, fines, molles, aiguës et de couleur vert légèrement glauque. Les cônes sont subterminaux sur les rameaux, cylindriques, souvent courbés, résineux, et possèdent des écailles fines et lisses à sommet arrondi. Ce pin croît sur divers sols, à condition qu'ils soient acides ; il préfère cependant les sols sablonneux alluvionnaires ou moraîniques, sur lesquels s'est formé un podzol ; il vit sous les climats continentaux à pluviosité moyenne (mais parfois élevée au sud). Dans les forêts subclimaciques, il est associé à *Tsuga canadensis*, puis il se forme un climax, constitué selon les zones par cette dernière espèce à l'état pur ou par la forêt mixte décidue. Le pin Weymouth se mêle en outre à *Quercus sp. pl., Fraxinus americana, Acer sp. pl.*, à divers peupliers et bouleaux, à *Pinus rigida, P. resinosa, P. banksiana, Abies balsamea*. Il croît dans les plaines et l'étage collinéen, et sur les Appalaches monte jusqu'à 1 100 m. On trouve très peu d'exemplaires de plus de quatre cent cinquante ans, d'un diamètre dépassant 1,50 m et d'une hauteur de 45 m : cette rareté est due aux importantes coupes qui furent effectuées naguère. C'est une espèce à croissance juvénile rapide, et on l'utilise donc pour le reboisement ; il est malheureusement très sensible à la rouille vésiculeuse.

Une forme proche de *Pinus strobus*, la variété *chiapensis*, que l'on considère parfois comme une espèce distincte, a un grand intérêt phytogéographique. Son aire est limitée au Mexique méridional et au Guatemala, avec peu de différences morphologiques par rapport au type ; c'est cependant une espèce nettement tropicale et subtropicale (vivant sous des températures moyennes de 15 °C à 20 °C), croissant dans des zones assez pluvieuses. Le bois du pin Weymouth et de ses congénères américains est assez clair, tendre, léger, facile à travailler, homogène et de faible retrait, ce qui le fait employer pour de nombreux travaux où l'on ne recherche pas une grande résistance aux contraintes mécaniques.

Pinus monticola (« western white pine ») est le substitut occidental du pin Weymouth dans les régions des Cascade Ranges, de la sierra Nevada, de la Colombie britannique et de l'Idaho, où il croît du niveau de la mer à 1 300 m d'altitude au nord, et de 1 800 m à plus de 2 200 m

G. Ehrmann - Top Réalités

C. Nardin - Jacana

▲ *Pin pleureur de l'Himalaya* (Pinus griffithii = P. excelsa) *aux longues aiguilles molles.*

d'altitude en Californie. Il diffère du précédent par ses aiguilles plus resserrées, de couleur vert foncé tendant au bleu, plus courtes, moins molles et à sommet obtus; en outre, ses cônes sont plus fins, avec des écailles inférieures recourbées; sa silhouette est nettement pyramidale. Il croît dans des zones à pluviosité essentiellement hivernale, avec éventuellement de fortes chutes de neige; il préfère les expositions au nord et les vallées froides sur sols acides ou neutres. Il ne forme pas de forêts pures, mais constitue des subclimax avec différents autres Conifères. Il a une bonne longévité; il atteint 65 m de hauteur et plus de 2 m de diamètre; il pousse plus lentement que le pin Weymouth.

Pinus lambertiana (« sugar pine ») est, aux États-Unis (sierra Nevada et Cascade Ranges), le plus apprécié et le plus grand pin des régions occidentales : il mesure jusqu'à 70 m et son diamètre dépasse 2 m. Son écorce est irrégulièrement écailleuse chez les vieux exemplaires. Ses aiguilles sont rigides, tordues et finement dentelées sur les bords. Ses cônes sont longs, cylindriques et avec de larges écailles à sommet épais. C'est une espèce héliophile de climat humide, mais avec des étés secs, peu exigeante en ce qui concerne le sol. Au nord, il croît entre 500 m et 600 m, et, dans l'extrême sud de son aire, on le trouve à 3 000 m. Il domine *Pinus ponderosa* et *Abies sp. pl.,* car il ne tolère pas l'ombre, bien qu'il ne pousse jamais seul.

Pinus ayacahuite ou pin blanc est une espèce polymorphe du Mexique; il y est représenté par plusieurs formes géographiques d'écologie différente. Au nord existe la sous-espèce *brachyptera,* avec des graines dont l'aile est courte et rudimentaire, qui supporte les pluies hivernales et les gelées fréquentes. La variété *veitchii* a une distribution limitée à la région centrale du pays. Le type a une diffusion méridionale qui s'étend jusqu'au Guatemala, il croît entre 2 400 m et 3 000 m, dans des vallées froides, sous un climat à pluviosité suffisante et sans gelées.

Dans l'Himalaya, le nord de la Birmanie et le Yunnan (Chine méridionale) se rencontre le *Pinus griffithii (= P. excelsa)* ou pin pleureur de l'Himalaya, arbre pouvant atteindre 50 m de hauteur, à silhouette cylindrique peu fournie et à branches horizontales; ses aiguilles sont longues, molles, pendantes et vert glauque. Ses cônes sont assez grands, très résineux et ont des écailles épaisses à l'extrémité. Il croît de 1 600 m à 4 000 m, est héliophile et donne dans ses régions d'origine un bois très employé. On le cultive dans les parcs des pays tempérés.

Toujours dans le domaine du sous-genre *Strobus,* la sous-section *Cembrae* comprend les espèces suivantes : *Pinus cembra, P. sibirica, P. pumila, P. koraiensis, P. parviflora, P. albicaulis,* toutes caractérisées par une graine dépourvue d'ailes et un cône indéhiscent.

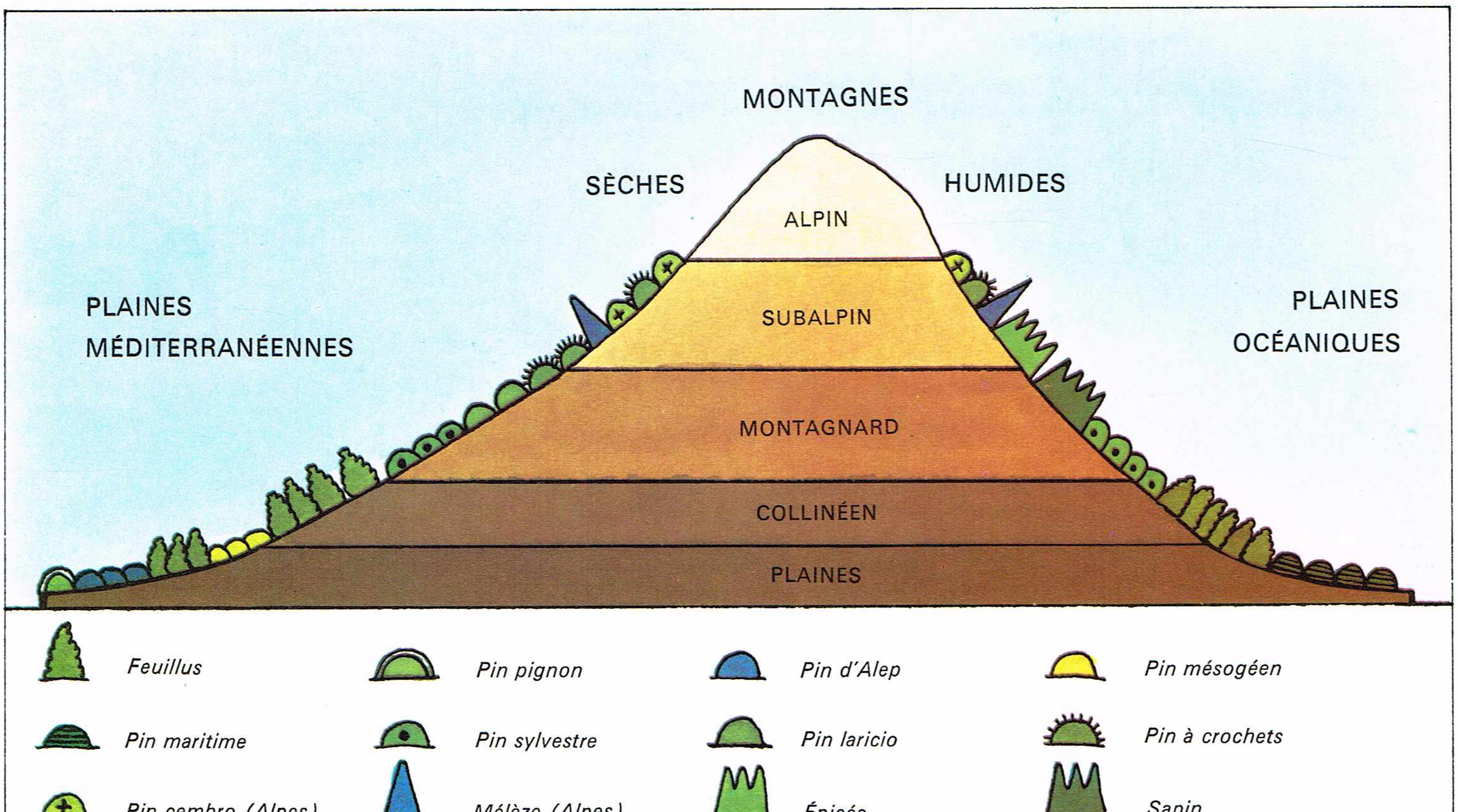

Succession des principales séries naturelles de végétation en fonction de l'altitude en France. La limite des étages est, dans les montagnes méridionales, plus élevée que dans les montagnes situées plus au Nord. Le pin laricio se trouve en Corse; le pin cembro dans les Alpes, l'épicéa dans les Alpes, le Jura et les Vosges.

C. et M.C. Nuridsany

▲ ***Le pin parasol* (Pinus pinea) *est répandu tout autour du bassin méditerranéen où il peut former de vastes pinèdes. Il est cependant difficile de distinguer ses peuplements spontanés de ceux qui sont artificiels, car il est cultivé depuis l'Antiquité.***

Le pin cembrot ou cembro *(Pinus cembra)* est une espèce des Alpes et des Carpathes ; on le trouve de 1 200-1 500 m à 2 200-2 600 m. Il forme rarement des forêts pures et se trouve le plus souvent mêlé à *Larix decidua* ou à *Picea excelsa* et à *Pinus uncinata*. Il peut atteindre une hauteur de 25 m, mais en général sa taille est plus réduite. Il a un port caractéristique, cylindrique, à cime resserrée et plus arrondie chez les vieux individus. Le tronc, conique chez les exemplaires âgés, est d'abord couvert d'une écorce grise et lisse, laquelle se transforme ensuite en un rhytidome écailleux mince. Les cônes sont ovoïdes à écailles à peine mucronées, striées ; ils contiennent de grosses graines à tégument dur, comestibles. L'appareil radiculaire est très robuste et s'ancre bien dans les fentes des roches. Les aiguilles sont fines, droites, vert foncé, avec des lignes glauques en dessous, dues aux stomates. Lorsque l'homme n'intervient pas, cette essence semble former un climax dans l'étage subalpin des versants des Alpes continentales ; actuellement, elle y est supplantée par le mélèze, d'une croissance plus rapide. Le bois du pin cembro est léger, clair, compact et peut être facilement travaillé, ce qui le fait beaucoup utiliser pour les huisseries et les modèles de fonderie. Tout laisse supposer que, pendant les périodes glaciaires, son aire de répartition — désormais restreinte — était en contact avec celle de son congénère d'Asie du Nord, *Pinus sibirica* (naguère considéré comme l'une de ses variétés), qui occupe la taïga sibérienne entre les monts Oural et le lac Baïkal. Ce pin, qui habite les plaines à climat continental froid, a une taille supérieure au pin cembro (il atteint 40 m de hauteur) et possède des cônes plus grands, avec des graines à enveloppe fragile, comestibles.

La zone allant de la Sibérie orientale au Kamtchatka, à l'île de Sakhaline, aux îles Kouriles et à la Mandchourie, sans compter les hautes montagnes du Japon septentrional et central, est peuplée par *Pinus pumila*, espèce proche de la précédente, à port buissonnant et ascendant, et à feuilles très courtes.

Pinus korayensis ou pin de Corée est un arbre qui peut également s'élever jusqu'à 40 m. Il est répandu en Mandchourie, en Corée et dans le Shantung (Chine), dans les zones collinéennes et de basse montagne. Sous le climat plus chaud du Japon, il devient nettement montagnard, arrivant jusqu'à 2 600 m d'altitude. Son écorce, d'abord lisse, se transforme par la suite en un rhytidome écailleux gris rougeâtre. Ses aiguilles sont fines, légèrement tordues et ondulées ; ses cônes, de taille moyenne, sont composés d'écailles coriaces, convexes et obtuses.

Pinus parviflora est une espèce des montagnes du Japon (île de Hondo), à silhouette arrondie ; ses aiguilles sont rayées de bandes blanches, dues aux stomates, à la face inférieure ; les cônes, persistants, sont formés par un petit nombre d'écailles. Il existe deux espèces proches à Formose, en Chine méridionale et en Indochine.

Pinus albicaulis (« white-bark pine ») est l'unique représentant américain de la sous-section *Cembrae ;* sa diffusion est très vaste, de la Colombie britannique à la Californie (sierra Nevada). C'est un pin des zones subalpines (de 1 500 m à 3 600 m d'altitude), où il peut atteindre les dimensions d'un petit arbre, à tronc tordu, mais est le plus souvent à port prostré. L'écorce, blanchâtre, reste longtemps lisse et, même chez les vieux spécimens, est fine et forme de petites plaques. Les aiguilles sont rigides et un peu recourbées. *P. albicaulis* est habituellement mêlé à *P. monticola, P. contorta, Tsuga mertensiana* et *Picea engelmanni*.

La sous-section *Flexiles* (à graines ailées et cônes déhiscents) comprend seulement deux espèces : *Pinus armandi* et *P. flexilis*.

Pinus armandi est un arbre de petite ou de moyenne taille, à écorce lisse, fine et gris verdâtre chez les juvéniles, avec des vésicules de résine ; plus tard, il se forme sur le tronc un rhytidome ridé constituant des plaques régulières. Les aiguilles sont longues et pendantes, vert clair. Les cônes sont cylindriques, avec des écailles rigides, très épaisses, résineuses et triangulaires. Cet arbre est répandu dans les zones rocheuses, rarement seul, en Chine centrale et occidentale ainsi qu'à Formose ; il a une vaste distribution en altitude (de 1 200 m à 3 200 m), en fonction du climat de la région où il habite.

▶ *Le pin parasol acquiert précocement son port caractéristique, car il se ramifie vite en longues branches subhorizontales. Il peut atteindre 25 m de hauteur.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▼ *Aspect de l'écorce du pin parasol* (Pinus pinea).

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ *A gauche : pin mugo* (Pinus mughus), *spécimen à port droit. A droite : une branche de pin mugo portant des cônes mûrs.*

G.P. Mondino

G.P. Mondino

Pinus flexilis (« limber pine ») est subalpin; il est largement répandu dans les montagnes Rocheuses, depuis l'Alberta et la Colombie britannique jusqu'au nord du Mexique, de 1 200 m à 3 000 m d'altitude au nord, et de 2 000 m à 4 000 m au sud. Cet arbre, de petite taille, a un tronc court, avec des verticilles de branches insérés à angle aigu et des rameaux fins et pendants, flexibles à l'état jeune. Les aiguilles, courbes, aiguës, longuement persistantes (elles tombent seulement au bout de cinq à six ans), sont rigides et recouvrent, de façon serrée, les branches. Les cônes cylindrico-ovoïdaux, assez grands, portent des écailles épaisses, horizontales à maturité et à bords épais et recourbés.

Toujours dans le sous-genre *Strobus,* nous citerons les pins de la section *Parryana,* laquelle groupe des formes ayant déjà certains caractères du sous-genre *Pinus. Pinus cembroides, P. monophylla, P. quadrifolia, P. pinceana* et *P. nelsoni* appartiennent au groupe des « nut pines » ou « piñoneros », car tous possèdent de grosses graines, non ailées et comestibles. La deuxième et la troisième espèce sont considérées par certains comme des variétés de *P. cembroides*. Ces Conifères habitent des régions de climat steppique ou substeppique à tendance chaude et ont différentes distributions dans la partie sud-occidentale de l'Amérique du Nord.

Pinus cembroides est un arbre de petite taille, mais d'une grande longévité (de cinq cents à mille ans), à tronc court et à cime serrée, en parasol. On le trouve dans les zones arides du Colorado, de l'Arizona, du Nouveau-Mexique et de l'Utah. Le climat sous lequel il vit est continental, avec de brèves périodes de gel et de forts écarts journaliers de température; les étés y sont torrides, l'humidité y est relativement faible, tandis que l'insolation et l'évaporation y sont intenses. L'eau des pluies est partiellement dispersée par suite du ruissellement, au cours des orages qui sont violents. Les sols sont peu épais, rocheux, poreux, alcalins, très pauvres et de faible résistance à l'érosion. Les formations de ce pin, mêlé de façon caractéristique à divers genévriers, sont très peu fournies à cause du manque d'humidité; elles sont accompagnées de buissons et de Graminées xérophiles. La diffusion de l'espèce de 1 350 m à 2 250 m d'altitude se situe en dessous des forêts de *Pinus ponderosa*. Les aiguilles de cette essence sont réunies par trois, courtes et courbes. La sous-espèce *edulis* croît dans des zones généralement un peu plus élevées du Wyoming, du Colorado, du Texas et du Mexique septentrional.

Pinus monophylla (dont les aiguilles sont solitaires) se trouve dans des régions plus basses de l'Idaho, de l'Utah, du Nevada, de la Californie et de la Basse-Californie. *Pinus pinceana* et *Pinus nelsoni* sont propres au Mexique septentrional; ils ont des aiguilles fasciculées par trois (le second possède des faisceaux en partie cohérents) et ont l'aspect de petits arbres. *Pinus quadrifolia* (dont les aiguilles sont réunies par groupes de quatre) est limité à la Californie méridionale et à la Basse-Californie.

Pinus balfouriana est une espèce subalpine de montagne, de petite taille, qui vit en Californie, de 1 500 m à 3 500 m d'altitude. Sa forme est conique. Son écorce est mince et lisse dans son jeune âge. Il possède des aiguilles courtes, réunies par cinq, longuement persistantes sur les rameaux (dix à douze ans), recourbées, rigides, formant un manchon (d'où le nom local de « foxtail pine », ou « pin en queue de renard »). *Pinus aristata* est un petit arbre à tronc court, à croissance extrêmement lente, et limité au sud des montagnes Rocheuses, au-dessus de 2 400 m; on connaît des exemplaires vivants de cette espèce, qui ont quatre mille six cents ans; ce sont peut-être les arbres les plus anciens du monde.

Pinus bungeana et *P. gerardiana* sont les représentants asiatiques de la section *Parryana;* tous deux ont une écorce mince, qui se desquame par plaques irrégulières comme celle du platane. La première espèce, de taille moyenne, habite les sols calcaires dans les zones tempérées chaudes de Chine centrale; elle possède des aiguilles en faisceaux de trois. *P. gerardiana,* dont l'aire de dispersion va du Béloutchistan à l'Afghanistan et au Cachemire, croît dans des zones arides de 1 500 m à 3 000 m d'altitude, avec *Juniperus macropoda*. Les feuilles sont réunies par trois; les graines sont comestibles.

Nous avons déjà parlé des caractères botaniques du sous-genre *Pinus* ou *Diploxylon;* nous ajouterons que le bois est coloré et dur. Ce sous-genre regroupe les sections suivantes : *Silvestris, Ponderosa-Banksiana, Leiophylla, Halepensis, Longifolia* et *Pinea*.

C. Nuridsany

▲ ***Rameau de pin parasol* (Pinus pinea). *On distingue nettement les aiguilles géminées, assez longues, molles et falciformes.***

A la section *Silvestris (= Lariciones)* appartiennent des pins à rameaux annuels simples, à cônes déhiscents et rapidement caducs et à aiguilles généralement réunies par deux.

Le pin sylvestre *(Pinus silvestris)* est l'une des essences résineuses d'Europe les plus importantes, à large diffusion et à forme très variable, surtout en ce qui concerne la taille et le port. La valeur technologique de son bois est très diverse. Ce pin peut atteindre une hauteur de 20 m à 40 m; son écorce, lorsqu'il est jeune, est de couleur saumon ou rouge brique, puis se transforme en un rhytidome écailleux plus épais et crêpelé dans le vieil âge, de couleur grisâtre. Les aiguilles, réunies par deux, ont une longueur variable (mais elles sont toujours courtes); elles sont rigides, tordues, de couleur glauque, persistantes pendant trois à quatre ans.

Les cônes sont petits, ovoïdes, symétriques, brun jaunâtre, avec des écailles en écusson de formes différentes (l'écusson est la partie visible de l'écaille quand le cône est fermé).

L'aire européenne de l'espèce est très subdivisée : cette distribution serait un reliquat des conditions climatiques post-glaciaires. On rencontre cet arbre dans la sierra Nevada et dans la sierra Guadarama, les Pyrénées, le Massif central, les Vosges, les Alpes, les Carpathes, les monts Rhodope, l'Écosse, la Scandinavie (surtout dans les zones les plus continentales). En Asie, il habite le Caucase, la Turquie, la Sibérie, allant jusqu'à la Mandchourie. C'est une espèce indifférente au pH du substrat, nettement colonisatrice. Dans les zones les plus basses et les plus chaudes, ce pin a généralement un port un peu dégénéré; par contre, certaines variétés ou races d'Europe centrale et septentrionale possèdent un tronc rectiligne, des branches fines et une silhouette légère (races « nobles » des Vosges, de la Lorraine, de la région de Riga, etc.).

En Scandinavie, le pin sylvestre est mêlé à *Picea excelsa, Betula verrucosa, Betula pubescens* et *Populus tremula;* il prédomine sur *Picea excelsa* dans l'intérieur de la Suède

R. Dulhoste - Jacana

et en Finlande. Le bois a des qualités différentes selon la provenance; alors que les formes septentrionales et certaines races alpines fournissent un excellent bois, de nombreuses races européennes donnent un produit grossier, noueux et de peu de valeur.

Le pin noir *(Pinus nigra)* est une espèce collective très polymorphe. On le trouve tout autour de la Méditerranée, où il se répartit en plusieurs variétés locales que certains auteurs considèrent cependant comme des espèces différentes. Quoi qu'il en soit, ces arbres ont en commun : un tronc droit, à écorce primitivement écailleuse puis ridée et formant de grandes plaques grisâtres; des aiguilles de longueur moyenne réunies par deux; des cônes ovoïdo-coniques, petits et pourvus d'écussons brun clair brillants.

On a décrit quatre sous-espèces : *clusiana*, *laricio*, *nigricans* et *pallasiana*.

La sous-espèce *clusiana (= P. salzmanni)* est la forme occidentale; elle se rencontre dans les Cévennes, l'est des Pyrénées, l'Espagne, l'Algérie et le Maroc. Elle a parfois un port défectueux et atteint une hauteur modeste. La forme cévenole possède de jeunes rameaux brun-orangé et luisants; ses aiguilles sont molles, peu aiguës et vert clair; ses cônes sont généralement symétriques et portés par un court pédoncule.

La sous-espèce *laricio* est la plus intéressante du point de vue forestier, car elle comprend les formes atteignant la plus grande hauteur (jusqu'à 50 m), avec des branches plus fines et des entre-nœuds allongés. Elle constitue des futaies serrées en Corse (variété *corsicana)*, où son aire se situe entre 900 m et 1 200 m (record 1 600 m), limitée dans sa partie inférieure par des forêts de pins maritimes et dans sa partie supérieure par des bois de sapin pectiné. La variété *calabrica* (pin de Calabre) est par contre limitée à la Sila et à l'Aspromonte en Calabre, et à l'Etna en Sicile; en Calabre, elle croît généralement entre 1 000 m et 1 500 à 1 700 m (c'est-à-dire dans la zone du hêtre, dont elle occupe en général les endroits les plus secs, en formant une forêt de type permanent). En Sicile, dans la forêt de Linguaglossa, elle atteint 2 000 m d'altitude. On a tout récemment découvert le pin laricio dans certaines stations relictes, au nord de la Sardaigne. Bien que les représentants de la sous-espèce croissent principalement sur les sols acides, certaines formes s'adaptent bien à un pH supérieur à 7. Les caractères distinctifs du pin laricio sont les suivants : branches brun ochracé légèrement brillantes, aiguilles le plus souvent souples, molles, non piquantes, vert clair tendant au bleuâtre, et cônes à peu près sessiles.

La sous-espèce *nigricans* (= *Pinus austriaca*, pin noir ou pin noir d'Autriche) comprend les formes autrichiennes ainsi que d'autres à distribution variable, décrites parfois comme des sous-espèces distinctes : *illyrica* et *dalmatica* en Yougoslavie, *pindica* en Grèce, et *italica* dans une zone restreinte des Abruzzes. Il s'agit généralement de formes adaptées à la vie sur sol calcaire, rustiques, propres à la zone de végétation péri-méditerranéenne; on s'en sert donc largement dans cette zone climatique pour le reboisement sur sols pauvres. On reconnaît la sous-espèce *nigricans* aux caractères suivants : hauteur variable (maximum 40 m), branches juvéniles gris jaunâtre opaques, principales ramifications grosses, aiguilles rigides, droites ou peu recourbées, piquantes, presque perpendiculaires à la branche, de couleur sombre, cônes sessiles.

La sous-espèce *pallasiana* possède des aiguilles molles, non aiguës; elle comprend les pins noirs de Crimée (variétés *pontica* et *taurica*) et d'Asie Mineure (variétés *caramanica* et *fenzlii*).

Le bois du pin noir a un aubier blanchâtre et un duramen brun, assez résineux; ce bois, à fibres grossières, sert pour les palissades, la menuiserie ordinaire, les constructions et les emballages. Le bois du pin laricio est fortement résineux, plus lourd en général que celui du précédent. On l'utilise donc pour des réalisations exigeant de grandes qualités technologiques, notamment les constructions navales. Il sert aussi à la fabrication de planches, de poteaux et de traverses de chemins de fer; il est enfin largement employé dans l'industrie de la pâte à papier.

Pinus uncinata ou *Pinus montana subsp. uncinata* (pin à crochets) est un arbre de petite ou de moyenne taille, des régions subalpines d'Europe occidentale (Pyrénées, Vosges, Massif central, Alpes). Il préfère les climats continentaux. Il est plus diffus sur le versant français du

Briançonnais que sur le versant italien correspondant (ses peuplements les plus importants se trouvant dans le val d'Aoste et dans le val di Susa). Il est complètement indifférent à la nature des terrains, et il remplace le mélèze sur les sols les plus secs et les moins profonds. Dans les Pyrénées, il forme d'importantes collectivités sylvestres, entre 1 600 m et 2 200 m d'altitude : il a à peu près la même distribution en altitude dans les Alpes occidentales.

P. uncinata, espèce à croissance lente, a un tronc très droit, recouvert d'un rhytidome écailleux peu épais ; ses aiguilles vont par deux, sont droites ou peu recourbées, rigides et vert foncé ; ses cônes sont ovoïdo-coniques, dissymétriques, presque sessiles, et petits ; l'écusson des écailles est gonflé et courbé comme un crochet vers la base du cône (d'où le nom spécifique latin, et le nom de pin à crochets). Dans les zones détritiques, il existe aussi des formes à port buissonnant ascendant.

Pinus mugo ou *mughus*, ou pour certains auteurs *Pinus montana subsp. mughus* (pin mugo), est une espèce proche. On le rencontre de préférence dans les Alpes centrales et orientales, les Carpathes et les monts Rhodope. On l'a signalé çà et là dans l'Apennin (variété *pumilio*) ; cette dernière variété existe aussi dans les Alpes centro-occidentales. Le pin mugo possède un tronc prostré ascendant qui s'associe à de nombreux autres, et mesure de 1 à 4 m de hauteur ; les cônes sont globuleux, dépourvus de crochets, et sont symétriques. Certaines formes de ce pin sont adaptées aux sols acides, mais les peuplements les plus répandus vivent sur les calcaires et les dolomies ; là, dans des éboulis situés entre 1 500 m et 2 500 m d'altitude, ils donnent des broussailles naines étendues, en association avec les basiphiles *Rhododendron hirsutum* et *Erica carnea* ; le tout constitue souvent un rempart efficace contre les avalanches et l'érosion.

Pinus leucodermis est une espèce des montagnes méditerranéennes sèches ; son aire est fragmentée ; on le rencontre sur sols calcaires dans la chaîne des Balkans, en Yougoslavie, en Grèce et en certains endroits d'Italie. Cet arbre peut atteindre une hauteur de 30 m ; son port est dense, pyramidal, mais assez irrégulier et rameux chez les vieux individus à la limite de la végétation arborescente ; l'écorce, lisse pendant longtemps, se ride ensuite en formant des écailles luisantes « en peau de serpent » ; les aiguilles sont longtemps persistantes (de cinq à sept ans), droites ou peu recourbées, rigides, courtes, vert foncé, aiguës, et densément disposées sur les rameaux ; les cônes, ovoïdo-coniques, possèdent des écailles à ombilic déprimé et à bref mucron recourbé. Ce pin descend, en Calabre, jusqu'à l'horizon du hêtre dans les endroits rocheux, surmontant celui-ci au-dessus de 1 800 m à 1 900 m d'altitude. *Pinus heldreichii*, des Balkans, est une espèce très proche.

Pinus densiflora, *P. massoniana*, *P. thumbergii*, *P. tabulaeformis*, *P. merkusii*, *P. khasia* et quelques formes proches, d'aire asiatique, appartiennent aussi à la section *Silvestris*.

Pinus densiflora est un arbre de taille moyenne, à port souvent sinueux ; son écorce est brun rougeâtre, d'abord écailleuse, puis ridée ; ses aiguilles sont fines, molles, tordues, aiguës et vert brillant ; ses cônes sont petits, ovoïdaux et pourvus d'écailles oblongues à écusson plat. C'est l'une des principales essences forestières du Japon, à vaste distribution en altitude (du niveau de la mer à 2 100 m) ; on la rencontre aussi en Corée, en Mandchourie et en Chine (Shantung). C'est une espèce colonisatrice, envahissante après les incendies de forêts et héliophile. *P. taiwanensis* et *P. brevispica* sont des formes voisines, endémiques à Formose ; *P. massoniana*, proche de *P. densiflora* également, est propre aux régions chinoises de climat tempéré chaud, au Vietnam du Nord et à Formose.

Pinus thumbergii a une écologie très spécialisée. En effet, il habite surtout les dunes littorales du Japon, de la Corée du Sud et de Formose, et monte jusqu'à 700 m d'altitude. Il peut atteindre une hauteur de 35 m, mais sa silhouette est rameuse et irrégulière. On l'utilise dans les jardins pour obtenir des formes naines ornementales. *P. tabulaeformis* est une importante essence forestière de Chine, où on le rencontre dans le centre, dans le nord et dans l'ouest avec de nombreuses formes géographiques. *P. yunnanensis* est proche du précédent ; il possède des aiguilles par groupes de trois. *P. merkusii* est tropical ; il est colonisateur et a une vaste diffusion (Birmanie,

C. Nuridsany

▲ ***Cône femelle de pin maritime* (Pinus pinaster) *au moment de la pollinisation.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ ***Cône immature de pin sylvestre.***

Page ci-contre :
◀ ***Bourgeon de pin sylvestre* (Pinus silvestris).**

Ruffier - Lanche - Jacana

Thaïlande, Indochine, Indonésie et enfin Philippines) ; c'est l'unique espèce du genre qui dépasse l'équateur, à Sumatra. Il croît des plaines à basse altitude jusqu'à 1 000 m, sur sols bien drainés, caillouteux, et seul ou mêlé à des arbres à feuilles caduques. Il est pyramidal à l'origine, puis a une silhouette arrondie ; son écorce est grise ou brune, profondément fissurée ; ses aiguilles géminées, se terminant brusquement en pointe, sont moyennement longues et sont dentelées ; ses cônes sont cylindriques, de faible diamètre et souvent courbés.

Une autre espèce tropicale, mais à feuilles en faisceaux de trois, est *Pinus khasia* de l'Assam, de la Birmanie septentrionale, de l'Indochine, des Philippines et des Moluques, où on le rencontre entre 750 m et 2 100 m d'altitude. Sa hauteur, variable, peut atteindre 45 m. Son écorce est épaisse et profondément fissurée. Ses aiguilles sont très fines, aiguës et dentelées. *P. insularis*, endémique aux Philippines, est considéré par certains comme une sous-espèce.

Les pins américains de la section *Silvestris* sont au nombre de deux : *Pinus resinosa* et *P. tropicalis*. Le premier (« red pine ») est une espèce nord-américaine à distribution orientale (plaines et zones collinéennes de la Nouvelle-Écosse, de la Nouvelle-Angleterre, de la vallée du Saint-Laurent et de la région des Grands Lacs). C'est un arbre qui atteint 30 m de hauteur, à tronc rectiligne, à silhouette conique et à branches allongées ascendantes. L'écorce, brun rougeâtre, est d'abord écailleuse, puis forme de grandes plaques irrégulières. Les aiguilles sont de moyenne longueur, à peu près droites et flexibles. Les cônes, petits, ovoïdo-coniques, ont des écailles à écusson peu saillant et un ombilic obtus. Cette espèce croît dans des terrains sableux, d'origine glaciaire, acides et bien drainés, du type des podzols, chargés de matières organiques ou entièrement rocheux. Ses exigences en ce qui concerne le sol sont intermédiaires entre celles de *P. strobus*, plus exigeant, et de *P. banksiana*, avec lesquels il cohabite entre 200 m et 500 m d'altitude (parfois 700 m). Le climat, dans son aire, est continental, avec des hivers froids et neigeux et une pluviosité variable mais surtout estivale. *P. tropicalis* habite à basse altitude, à Cuba (région occidentale) ; sa silhouette est arrondie et peu fournie. Ses aiguilles sont longues et dressées. Comme l'indique son nom spécifique, il vit sous des climats nettement tropicaux.

La section *Ponderosa-Banksiana* comprend des pins qui possèdent dans leur bois des trachéides transversales, avec des dents ou des crêtes marquées sur les parois horizontales. A la sous-section *Ponderosa* (à tronc habituellement simple) appartiennent *Pinus ponderosa* et les espèces proches *P. jeffreyi*, *P. torreyana*, ainsi que les pins mexicains des groupes *montezumae*, *pseudostrobus* et *teocote*. A la sous-section *Banksiana* se rattachent de nombreuses espèces américaines, et l'espèce européenne *P. pinaster* ou *maritima* (pin maritime).

Pinus ponderosa est la plus importante essence forestière des États-Unis après *Pseudotsuga menziesii ;* c'est aussi la plus répandue en Amérique du Nord ; on trouve en effet ce pin dans les montagnes Rocheuses, de la Colombie britannique au sud des États-Unis, avec une pointe à l'ouest jusqu'à la sierra Nevada et aux Cascade Ranges. C'est une espèce de climat froid subdésertique, avec de faibles pluies estivales ; il habite toutes sortes de sols, aussi bien acides que fortement alcalins, mais le plus souvent neutres à tendance acide, provenant des roches originelles les plus variées, mais habituellement légères. Dans les zones les plus sèches, il forme des forêts probablement climaciques, auxquelles font suite en altitude des biocœnoses steppiques. Dans la sierra Nevada, il cohabite avec *Abies concolor*, *Heyderia decurrens* et *Pinus lambertiana ;* dans les montagnes Rocheuses, il est mêlé à *Larix occidentalis*, *Pseudotsuga menziesii*, *Pinus lambertiana* et divers *Abies*. Au nord, on le trouve à partir du niveau de la mer, et il monte jusqu'à 2 700 m d'altitude dans la partie méridionale de son aire. C'est une espèce héliophile et ne supportant pas la concurrence. Il vit très longtemps (de trois cents à six cents et même sept cents ans), et on en trouve encore aujourd'hui des exemplaires de grande taille, normalement de 25 m à 50 m de hauteur (avec des records de 70 m), pour des diamètres compris entre 0,90 m et 1,50 m. Son tronc est droit, avec un rhytidome brun rougeâtre qui forme ensuite des plaques irrégulières. Ses branches, grosses et épaisses, sont

Fratelli Montacchini

souvent horizontales en bas, puis ascendantes à l'extrémité. Sa racine est pivotante et très longue, surtout chez les jeunes exemplaires. Ses aiguilles sont groupées par trois, longues, rigides, droites ou légèrement falciformes, détachées des rameaux, disposées en touffes aux extrémités de ceux-ci. Les cônes sont ovoïdo-coniques, assez grands, avec des écailles à écusson terminal et ombilic fortement mucroné; ces cônes, en tombant, laissent quelques écailles attachées aux rameaux. Le bois, à large aubier jaunâtre et à duramen brun rosé, de conservation et de résistance moyennes, est employé pour faire des planches, des huisseries, des meubles, etc.

Pinus arizonica est proche de *P. ponderosa*, dont il est, pour certains, une variété; il est limité à la partie méridionale de l'Arizona et du Nouveau-Mexique, ainsi qu'à la partie septentrionale du Mexique, de 2 300 m à 2 800 m d'altitude. C'est une espèce continentale, qui résiste à de faibles températures hivernales et à des vents secs; les pluies sont estivales dans cette zone, et la neige y est assez abondante. *Pinus engelmanni* est fort proche de *P. ponderosa;* ses aiguilles sont très longues; il est associé à l'espèce précédente, toujours dans le nord du Mexique, à des altitudes généralement du même ordre.

Pinus jeffreyi, d'abord considéré comme une sous-espèce de *P. ponderosa*, auquel il ressemble par l'aspect et l'habitat, en diffère cependant profondément. Ce dernier est récent et variable, alors que *P. jeffreyi*, d'origine ancienne, présente des caractères stables. On le trouve dans le sud de l'Oregon, en Californie, en Basse-Californie et quelque peu au Nevada. Il croît jusqu'à 1 500 m d'altitude, associé à *P. ponderosa* et à des buissons xérophiles, et, au sud, à *P. coulteri* et à des chênes toujours verts; au nord, il est mêlé à *Pseudotsuga menziesii* et à *Heyderia decurrens;* au centre, il cohabite avec *Abies amabilis*, *Pinus lambertiana* et divers genévriers. On peut observer communément des spécimens âgés de quatre cents à cinq cents ans, hauts de 60 m. Il est héliophile, et forme, dans les zones les plus sèches, un climax, seul ou avec *P. ponderosa;* dans les aires plus fraîches, il est le sous-climax d'*Abies amabilis*. Il croît sur des sols pauvres, rocheux, sous des climats à hivers froids et étés secs, avec une pluviosité variable mais très abondante. Il diffère de *P. ponderosa* par son écorce de couleur cannelle, ses feuilles plus claires et dégageant une odeur d'orange quand on les froisse, et ses cônes plus gros. *P. torreyana* est un petit arbre, endémique dans une zone très restreinte de la côte méridionale de la Californie (autour de San Diego).

C'est toujours à la sous-section *Ponderosa* qu'appartient la majeure partie des pins mexicains, dont la systématique n'est pas encore bien définie, car certains groupes sont encore en pleine évolution et sont donc très variables.

Pinus montezumae a une écologie très diverse, avec des formes climatico-géographiques et morphologiques nombreuses. Ses aiguilles forment de petits faisceaux de cinq, sont molles et ont une longueur moyenne. On classait dans cette espèce, en tant que variétés, les cinq espèces suivantes :

— *Pinus michoacana*, habitant sous un climat tempéré chaud ou subtropical, et sur des sols fertiles, répandu dans la partie centro-méridionale du pays, ainsi que dans le nord, avec sa variété *cornuta*, moins exigeante en ce qui concerne la température. Ses aiguilles sont grosses, rigides et très longues.

— *Pinus rudis* et *P. hartwegii*, formes rustiques de haute montagne, constituant souvent la limite de la végétation arborescente (entre 3 800 m et 4 000 m) sous climat tempéré froid; le premier est commun dans tout le Mexique et jusqu'au Guatemala, et le second seulement dans le Sud mexicain.

— *Pinus cooperi*, qui habite uniquement l'État mexicain de Durango.

— *Pinus durangensis*, de distribution semblable, et d'abord considéré comme proche de *P. ponderosa*, mais actuellement distingué de *P. montezumae* lui-même, auquel il ressemble fort.

Pinus pseudostrobus habite l'Arizona, le Nouveau-Mexique, le Texas, presque tout le Mexique et l'Amérique centrale jusqu'au Nicaragua. Il a une large diffusion non seulement en surface, mais aussi en altitude; il supporte aussi bien les climats subtropicaux que tempérés froids et se diversifie en de nombreuses variétés; l'une de celles-ci, la variété *oaxacana*, a été récemment élevée au rang

▲ ***Le pin maritime*** **(Pinus pinaster)** ***est abondant en Europe sur la côte atlantique. Il en existe toutefois une sous-espèce méditerranéenne*** **(mesogeensis).**

Page ci-contre :
◀ ***Le pin laricio*** **(Pinus nigra subsp. laricio)** ***forme des futaies très serrées en Corse entre 900 et 1 200 m. Il peut atteindre jusqu'à 50 m de hauteur.***

d'espèce distincte. *P. douglasiana* et *P. tenuifolia*, proches parents de *P. pseudostrobus*, ont une importance moindre.

Pinus teocote est assez largement réparti et est caractérisé, comme *P. herrerai* et *P. lawsoni,* qui lui sont proches, par de petits cônes caducs.

Pinus pinaster ou *maritima,* le pin maritime, a une distribution qui couvre les côtes de l'Atlantique — dans nos régions — et le rivage occidental de la Méditerranée. Cet arbre, de forme élancée, atteint une hauteur de 30 à 40 m, avec une cime plus ou moins arrondie ou une silhouette cylindrique, assez clairsemée. Son rhytidome est épais, brun-rouge, et fissuré irrégulièrement et profondément. Ses aiguilles, géminées, sont vert foncé, grosses, rigides, recourbées, légèrement piquantes et plus longues que celles des autres pins circumméditerranéens. Ses cônes sont ovoïdo-coniques, plus ou moins persistants, à écusson pyramidal avec des carènes transversales très marquées. Ce pin est très répandu dans les zones du littoral atlantique du sud de la France (surtout dans les Landes, où on en a fait d'importantes plantations artificielles), de l'Espagne et du Portugal, avec une variété à tronc légèrement sinueux, à ramification latérale élargie et redressée ; la race méditerranéenne (*mesogeensis*, d'Espagne — même continentale — du Maroc septentrional, des côtes de l'Algérie, du midi de la France, de la Corse et du littoral de la mer Tyrrhénienne en Italie) a un tronc plus droit et des ramifications horizontales ; dans ce secteur, ce pin habite même les sols calcaires. Cette forme peut dépasser l'altitude de 1 000 m en Corse et en Ligurie, et elle atteint 1 500 m en Espagne ; au Maroc, c'est une espèce montagnarde (de 1 000 m à 2 000 m). Le bois du pin maritime a un duramen brun rougeâtre et un aubier blanchâtre ; il est très résineux et de grain grossier ; on s'en sert pour faire des poteaux de mine, des poutrages, de la menuiserie ordinaire et des caisses.

Le pin de Banks ou *Pinus banksiana* (jack pine) est une espèce typiquement colonisatrice, héliophile, ne supportant pas la concurrence, de longévité faible, et de petite ou de moyenne taille ; il s'adapte très bien aux sols pauvres et minéraux, et produit beaucoup de graines. C'est le pin américain qui va le plus au nord, où il atteint même la zone du permafrost, par petites colonies éparses et d'aspect buissonnant. Il croît au Canada, depuis les montagnes Rocheuses, jusqu'au Labrador méridional, à la Nouvelle-Écosse et au Brunswick, descendant jusqu'au nord de la région des Grands Lacs. Il habite les régions basses, soit au niveau de la mer, soit plutôt entre 300 m et 750 m d'altitude, colonisant les sols acides du type des podzols, les sols sablonneux, ou les éboulis et les rocailles. Le climat de son aire de distribution est continental et froid, avec des hivers longs et neigeux, et des précipitations généralement bien distribuées, mais habituellement rares. Il forme de grandes et épaisses forêts, soit seul, soit mêlé à *Betula papyrifera*, *Populus grandidentata*, *Populus tremuloides*, *Picea mariana*, *Pinus resinosa*, etc. Il constitue aussi un climax dans les endroits les plus déshérités ; ailleurs, c'est une espèce transitoire, remplacée d'abord par *Pinus resinosa*, puis par *P. strobus* (dans le sud de l'aire, ce dernier est remplacé par la forêt mixte décidue, et, dans le nord, par *Abies balsamea* ainsi que par diverses espèces de *Picea*). Durant ses vingt premières années, sa croissance est rapide, seul le dépasse alors le *Larix laricina*, de la même zone climatique, mais il s'arrête de grandir entre soixante et quatre-vingts ans et commence à dégénérer. Les plantes matures sont généralement hautes de 15 m à 20 m, pour un diamètre faible (25 cm à 30 cm). Les branches sont fastigiées, chez les jeunes individus, puis grosses chez les vieux spécimens, prenant un aspect ovale et léger. L'écorce est brun rougeâtre, écailleuse, pour être ensuite profondément et densément fissurée. La racine est généralement pivotante. Les aiguilles sont géminées, très courtes, rigides, denticulées et de couleur vert olivâtre. Les cônes sont latéraux, petits, ovoïdo-coniques, courbés, asymétriques, tardifs et longuement persistants ; leurs écailles ont un écusson plat et un ombilic à mucron mutique.

Pinus contorta (pin vrillé ou pin des dunes) est une espèce sociale d'Amérique du Nord, subdivisée en différentes sous-espèces géographiques et morphologiques. Il a un port et une hauteur très variables, et une silhouette diffuse. Son écorce est gris foncé, écailleuse, puis irrégulièrement crêpelée. Ses aiguilles sont géminées, droites ou légèrement courbées, tordues, courtes, de couleur et de longueur variables, et longuement persistantes (de quatre à six ans et plus). Les cônes sont petits, asymétriques, tardifs et persistants, avec des écailles fines à écusson luisant, à ombilic convexe et à mucron souvent saillant. La sous-espèce *contorta* est le type côtier, habitant du sud-est de l'Alaska au nord de la Californie ; elle est propre aux zones littorales paludéennes, jusqu'à 600 m d'altitude, sous climat froid, humide et uniforme ; elle peut être buissonnante ou avoir le port d'un arbrisseau

▼ *Il n'est pas rare de rencontrer des pins aux formes tourmentées. Il s'agit le plus souvent d'individus blessés par la foudre ou qui subissent une agression permanente du vent.*

C. Bevilacqua

à tronc sinueux; elle n'a pas d'importance du point de vue forestier, sinon pour la protection, car elle fixe les dunes marines et résiste aux bourrasques de vent.

La sous-espèce *bolanderi* est endémique dans la région du cap Mendocino (Californie). La sous-espèce *murrayana* est la race géographique méridionale; elle est surtout montagnarde, dans les Cascade Ranges et la sierra Nevada, où on la rencontre mêlée à *Pinus flexilis* et *Abies magnifica*, ou encore seule sur sols argileux mal drainés, où elle remplace *P. ponderosa*.

La sous-espèce *latifolia* (« lodgepole pine ») est la plus importante du point de vue économique. Elle se distingue par son beau port et par sa taille moyenne ou élevée (de 20 m à 60 m) selon les zones; ses aiguilles sont plus longues, et ses cônes sont plus gros. Son aire est vaste : elle s'étend en effet du Yukon et de l'Alaska au Colorado, le long des montagnes Rocheuses, avec, selon la latitude, des limites en altitude croissantes. En ce qui concerne le sol, cette sous-espèce a besoin d'un bon drainage et de peu d'acidité, mais elle se contente de substrats de différentes origines, même rocheux. Le climat est caractérisé, dans son aire, par de longs hivers très neigeux, et par des étés courts et frais, avec de faibles précipitations. Elle forme des forêts denses, où dominent parfois *Pinus monticola* ou *P. ponderosa*, auxquels elle s'associe; mais elle peut être également mêlée à d'autres Conifères, en formant des forêts transitoires ou des sous-climax. Elle vit jusqu'à l'âge de cinq cents à six cents ans.

Pinus rigida (« pitch pine ») est une espèce colonisatrice, distribuée çà et là sur les sols les plus pauvres de l'est des États-Unis, de la Nouvelle-Angleterre à la Géorgie du Nord, à travers les Appalaches. C'est un arbre à port parfois déficient et haut de 25 m au maximum. Son rhytidome est d'abord écailleux, brun-rouge foncé, puis divisé en larges plaques brun jaunâtre. Ses aiguilles sont disposées par trois, de longueur moyenne, presque rectilignes, de couleur vert vif, un peu tordues, piquantes et rigides. Ses cônes sont ovoïdo-coniques, assez petits, généralement droits, presque sessiles, et possèdent des écailles à mucron piquant et recourbé. Des bourgeons adventifs le long du tronc peuvent donner naissance à des touffes de feuilles et émettre des drageons quand la souche est coupée, comme une espèce à feuilles caduques. Ce pin habite les podzols acides ou très acides, et les sols de faible épaisseur, sablonneux ou caillouteux; mais il est indifférent à l'humidité, car on le trouve également dans les marais. Il habite du niveau de la mer jusqu'à 1 350 m d'altitude dans les régions de climat tempéré humide, à pluviosité peu abondante mais bien distribuée. Il constitue des forêts, seul ou mêlé à *Pinus resinosa*, *P. strobus*, *P. virginiana*, *P. echinata*, ainsi qu'à divers chênes à feuilles caduques. Les incendies favorisent sa diffusion, car il envahit facilement les zones brûlées, et il est plus résistant que les espèces qui lui sont associées vis-à-vis du feu; ce dernier, toutefois, est souvent responsable de sa forme défectueuse. En forêt, ce Conifère atteint rarement 25 m de hauteur, pour un diamètre de 60 cm; son âge maximum est de deux cents ans; sa croissance est très limitée.

Pinus palustris (« long-leaf pine ») est une espèce du sud des États-Unis; on le rencontre dans les plaines côtières de la Virginie méridionale au centre de la Floride, et à l'est du Texas. C'est un arbre de 25 m à 35 m de hauteur, à silhouette clairsemée et irrégulière, et à branches robustes et noueuses. Son écorce, brun rougeâtre, est fissurée, se desquamant en fines écailles. Ses aiguilles, par groupes de trois, sont longues, fines, flexibles et rassemblées à l'extrémité des rameaux. Ses cônes sont oblongs et coniques, avec un ombilic à mucron recourbé. Il croît sur des sols sablonneux acides, même paludéens, sous un climat subtropical humide, caractérisé par des pluies bien distribuées, de longs étés chauds et des hivers doux. Il s'associe à *P. elliottii* et *P. toeda*.

Pinus elliottii (« slash pine ») a une aire et des exigences climatiques semblables et croît sur des sols sablonneux à horizons durcis à faible profondeur; il envahit facilement les champs abandonnés. C'est une espèce à croissance très rapide : on a observé de jeunes arbrisseaux de cinq ans qui avaient atteint 6 m de hauteur; il culmine très vite, vers vingt ans dans les stations les plus favorables. Ce pin est plus élevé que le précédent, ses branches sont grandes et longues, son écorce est épaisse, rougeâtre, profondément fissurée, et forme de grandes écailles fines.

Ruffier-Lanche - Jacan

▲ *Les aiguilles du pin d'Alep* (Pinus halepensis) *sont fines et courtes; les cônes, pendants, sont nombreux.* ▼ *Les écailles des cônes de* Pinus uncinata *sont pourvues d'un écusson recourbé en crochet, d'où le nom de pin à crochets donné à ce Conifère.*

C. Lemoine

Ruffier Lanche - Jacana

▲ *Extrémités des rameaux de* Pinus montezumae, *espèce américaine.*

Ses aiguilles sont rigides et un peu plus courtes que celles de *Pinus palustris*. *P. caribaea* en est proche, son bois est plus lourd, et il a une grosse racine ; on le trouve sous différentes formes géographiques, aux îles Bahamas, à Cuba, aux Honduras et au Guatemala.

Pinus toeda ou pin à l'encens (« loblolly pine ») est le plus important des « southern pines » américains, par suite de sa vaste distribution, de son existence solitaire en forêts pures et de ses nombreuses utilisations. De croissance rapide, héliophile, il est précurseur d'un climax composé de différentes espèces décidues des genres *Quercus* et *Carya*. On le trouve dans les plaines côtières sur les piedmonts, du Delaware à la Floride, et à l'est du Texas ; il pénètre assez avant dans l'intérieur des terres. Il croît, comme les espèces précédentes, sous un climat chaud, mais supporte des gelées plus fortes dans la partie septentrionale de son aire, où l'on trouve des formes rustiques. Il préfère les sols lourds et argileux, mal drainés, où il croît à l'aise ; dans les régions encore plus humides, on le rencontre seul ou mêlé à *P. palustris ;* quand le drainage est meilleur, il cohabite avec *P. echinata*. Son rhytidome est brun rougeâtre et profondément ridé. Ses aiguilles assez longues, fines, vert clair, forment des faisceaux de trois. Ses cônes, petits ou moyens, ont un écusson plat et possèdent un ombilic mucroné.

Pinus echinata (« short-leaf pine ») est le « southern pine » dont l'aire est la plus étendue, puisqu'on le rencontre des États de New York, de l'Ohio et du Kentucky jusqu'aux parties orientales de l'Oklahoma et du Texas, ainsi qu'au nord de la Floride. C'est aussi le moins exigeant en fait de température et d'humidité, puisqu'il croît sur des sols secs. Il résiste aux incendies, car, lorsqu'il est jeune, il donne des rejets de souche. Il a une cime élargie et des branches souvent pendantes. Son écorce, foncée, est irrégulièrement écailleuse. Ses aiguilles, par deux ou trois, sont courtes et flexibles. Ses cônes, ovales, ont des écailles fines, carénées transversalement, avec un bref mucron souvent caduc.

Dans l'ensemble, les « southern yellow pines » ont un bois fortement résineux, avec une nette différenciation en aubier clair et en duramen coloré, et un poids spécifique assez élevé ; ce bois est facile à travailler et se conserve bien, même à l'extérieur ; on l'emploie pour fabriquer des maisons, des ponts, des ouvrages maritimes, des fondations, ainsi que pour des poutrages, des poteaux, des revêtements, des huisseries, des planchers et des caisses.

Pinus virginiana ou pin de Virginie est un petit arbre à port déficient, propre aux sols les plus pauvres de l'est des États-Unis, depuis l'État de New York jusqu'aux Carolines.

P. pungens est également un petit arbre colonisateur des Appalaches. *P. serotina*, propre aux marais côtiers, habite de l'Alabama à la Virginie. *P. patula*, du Mexique central à climat tempéré chaud (entre 1 500 m et 3 000 m d'altitude), est un arbre de taille petite ou moyenne ; ses aiguilles sont ternées, molles et longues ; ses cônes sont ovoïdo-coniques, courbes, tardifs, et persistent par groupes ; cette espèce, avec *P. elliottii*, *P. toeda*, *P. caribaea* et *P. palustris*, est largement utilisée pour le reboisement dans les pays à climat tropical ou subtropical.

Pinus oocarpa, du Mexique et du Guatemala, a les mêmes exigences climatiques. Ses cônes sont reconnaissables à leur long pédoncule. Ses aiguilles, grandes, sont implantées en nombre variable (de trois à cinq). *P. gregii* est un petit pin des climats tempérés chauds du Mexique septentrional. *P. occidentalis* est propre à la région tropicale de Cuba et d'Haïti, à faible altitude. *P. attenuata*, de taille modeste, a une silhouette dense et de grosses branches et possède des aiguilles molles, réunies par trois ; il constitue à lui seul des peuplements sur les côtes de Californie et de Basse-Californie, surtout sur sols paludéens. *P. muricata* a une aire semblable, mais fragmentaire ; il habite les rivages rocheux battus par de forts vents et ne présente pas d'intérêt du point de vue forestier.

Pinus radiata ou *insignis* (« Monterey pine ») est devenu l'une des principales essences résineuses cultivées dans les pays à climat subtropical, du fait de sa croissance rapide à l'état juvénile, bien que son aire de dispersion spontanée soit très restreinte. A l'état naturel, c'est un endémique qui couvre seulement 4 000 ha de forêts, du niveau de la mer à 400 m d'altitude, dans une petite région de Californie centrale (baie de Monterey et îlots voisins). Il croît sur sols acides, légers, bien secs, sous un climat de type méditerranéen, à hivers et étés secs, mais nuageux et par conséquent à humidité atmosphérique élevée ; les gelées sont rares, et la neige est inconnue en hiver. Il s'adapte également aux climats océaniques à pluviosité uniforme comme ceux de la Nouvelle-Zélande, du nord de l'Espagne, de la Bretagne, et il résiste aux forts vents chargés d'embruns. Dans son aire, il constitue généralement des forêts pures, avec un sous-bois à fourrés d'espèces toujours vertes *(chaparral)*. Même dans son pays d'origine, il a une faible longévité et arrive vite à sa maturité (quarante à quatre-vingts ans). Ce pin est un arbre qui atteint une hauteur de 30 m à 45 m, et un peu plus à l'état cultivé. Son écorce est épaisse, brun foncé et profondément fissurée. Ses aiguilles sont groupées par trois, rassemblées, fines, de longueur moyenne et verf vif. Ses cônes sont solitaires ou groupés, assez grands, ovoïdes, tardifs et non déhiscents ; leurs écailles sont larges, épaisses et arrondies, avec un écusson gonflé. Chaque année, la tige principale émet de un à cinq pseudoverticilles de branches avec le même nombre d'entrenœuds, ce qui produit des flèches d'accroissement de dimension importante.

Pinus coulteri est un pin de taille moyenne, endémique dans les montagnes de Californie et de Basse-Californie, de 800 m à 2 000 m d'altitude ; vers le bas, il est associé aux chênes toujours verts et, vers le haut, à *Pseudotsuga macrocarpa*, *Pinus ponderosa*, *P. lambertiana* et *Heyderia decurrens ;* le climat régnant est de type méditerranéen. Cet arbre est caractérisé par ses feuilles ternées, ainsi que par ses cônes, plus grands que chez les autres pins : ils mesurent en effet jusqu'à 35 cm et pèsent parfois 2 kg ; ils sont à écailles épaisses et à écussons fortement recourbés en crochet vers le bas (arbre aux veuves).

Pinus sabiniana est également originaire de la Californie (chaînes côtières et sierra Nevada, jusqu'à 1 500 m au maximum). Ses cônes sont caractéristiques, grands, ovoïdes, et possèdent des écailles à écussons très proéminents et à pointe fortement recourbée.

C. Bevilacqua

▲ *Les pins d'Alep confèrent aux régions circumméditerranéennes un paysage de forêts toujours vertes.*

A la section *Leiophylla* appartiennent trois pins mexicains *(P. leiophylla, P. chihuahuana* et *P. lumholtzii)* à gaine foliaire caduque et à euphylles décurrentes sur les rameaux.

Pinus leiophylla est de taille moyenne, de silhouette légère. Son écorce est foncée; ses aiguilles, constituant des faisceaux de cinq, sont assez courtes et très fines. On le rencontre dans le centre et le nord du Mexique, sous des climats fort différents; il est colonisateur. *P. chihuahuana*, considéré par certains auteurs comme une variété de l'espèce précédente, a des aiguilles ternées plus épaisses et rigides; il a une distribution plus septentrionale, de l'Arizona au Nouveau-Mexique et au Mexique centro-septentrional, sous des climats froids et neigeux l'hiver, mais relativement secs. Comme le pin précédent, il a une croissance assez lente. *P. lumholtzii* est un arbre de taille moyenne, à silhouette assez aérée, à rameaux un peu pendants, et à feuillage court et pleureur (les aiguilles sont réunies par trois) : c'est pourquoi on lui a donné au Mexique le nom de « pin triste ». On le trouve dans la partie centro-septentrionale du Mexique, disséminé dans les forêts de Conifères, sur sols très pauvres et rocheux (espèce colonisatrice).

Le plus xérophile et le plus thermophile des pins méditerranéens est le pin d'Alep *(Pinus halepensis)*, représentant, comme *P. brutia*, de la section *Halepensis*. Il vit sur les côtes de France, d'Italie et de Grèce, et il pénètre dans les terres en Espagne, en Algérie, en Tunisie et au Maroc; en Afrique du Nord, il croît dans les régions subdésertiques, en compagnie de *Quercus ilex, Q. suber, Tetraclinis articulata, Juniperus thurifera* et *J. phoenica*. C'est un arbre généralement peu élevé, souvent rameux et tortueux, même quand il a un fort diamètre; son port n'est guère élancé; son tronc est conique et sa silhouette est légère. Étant donné sa rusticité, il est en général limité aux sols les plus superficiels et aux zones balayées par de forts vents, ce qui ajoute à son port délabré. Il est colonisateur et favorisé en ce sens par les incendies. Il pousse bien également sur sols calcaires. Il possède un rhytidome écailleux, gris puis brun, fissuré. Ses aiguilles sont fines, molles, et beaucoup plus courtes que celles de *Pinus pinaster*, vert clair, insérées presque parallèlement aux rameaux et condensées à l'extrémité de ceux-ci. Ses cônes sont nombreux, fixés de façon désordonnée, oblongs et coniques, pendants, indéhiscents, persistants, solitaires ou plus souvent géminés, et ont des écussons plats, carénés transversalement, et à ombilic peu saillant. Son bois, à duramen bien différencié, est lourd, très résineux, avec des fibres grossières; on s'en sert pour faire des poteaux de mine, des pilotis et des ouvrages maritimes.

Pinus brutia est le remplaçant du pin d'Alep dans le bassin méditerranéen oriental (Grèce orientale, Crète, Chypre, Turquie sur les pentes donnant vers la mer Egée, la Méditerranée et la mer de Marmara, Syrie, et Jordanie); il diffère du précédent par la possession de rameaux jeunes brun rougeâtre et non verts ou jaunâtres; en outre, ses aiguilles sont plus longues et un peu plus grosses, ses cônes sont sessiles et groupés par trois ou quatre, ou même plus, sa silhouette est plus dense, et son port est meilleur. Cette espèce est nettement basiphile et plus résistante au froid. Ce pin est remplacé, du côté de la mer Noire, par *P. pithyusa*, en Crimée, par *P. stanckwiczii*, en Géorgie, et, en Iran, par *P. eldarica*.

La section *Longifolia* comprend deux pins subtropicaux : *P. canariensis* et *P. roxburghii*, qui possèdent des aiguilles réunies par trois, très longues, ainsi que des cônes persistants.

Pinus canariensis ou pin des Canaries, endémique dans les îles indiquées par son nom spécifique, a un tronc droit. Ses branches ont des rameaux pendants sur des supports étalés. Son écorce, épaisse et rougeâtre, est irrégulièrement écailleuse. Ses aiguilles sont vertes (glauques chez les jeunes individus), serrées, flexibles, pendantes et fines. Ses cônes sont grands, ovoïdo-coniques, avec des écussons plats et un ombilic saillant non mucroné. Cette

espèce habite les montagnes, même dans les zones rocheuses, de 900 m à 2 000 m d'altitude, sous les climats à saison sèche. On cultive ce pin dans les parcs le long des côtes méditerranéennes, et on l'a également utilisé pour le reboisement, par suite de sa croissance rapide et pour son bois qui est très résineux et de bonne conservation.

Pinus roxburghii, à tronc d'abord écailleux et grisâtre, puis profondément ridé, mesure jusqu'à 40 m de haut. Ses feuilles sont pendantes. Ses cônes sont de taille moyenne, avec des écailles épaisses à écusson proéminent, ceux de la base étant légèrement recourbés. C'est une importante espèce de basse altitude dans l'Himalaya, de l'Afghanistan au nord de la Birmanie (jusqu'à 750 m), répandue dans les endroits rocheux et sur les sols bien drainés.

Le pin méditerranéen, que tout le monde connaît bien, est le pin parasol ou pin pignon, ou encore pin pinier *(Pinus pinea)*, unique représentant de la section *Pinea*, qui se distingue par ses cônes à maturation triennale, ses graines dures à aile courte et ses euphylles décurrentes. Sa distribution est circumméditerranéenne, mais il est cultivé depuis l'Antiquité, en sorte qu'il est désormais difficile de distinguer ses peuplements spontanés de ceux qui sont artificiels. On le reconnaît facilement à son classique port en parasol, aspect qu'il prend précocement car il se ramifie rapidement en tiges secondaires, toutes à peu près de la même vigueur. Il peut atteindre 25 m de hauteur et a une silhouette dense. Son rhytidome est écailleux, puis se fissure pour donner de grandes plaques grises, séparées par des espaces de couleur brique. Son appareil radiculaire est robuste, et longuement pivotant au début. Ses aiguilles sont géminées, assez longues, molles, falciformes et vert légèrement glauque. Ses cônes sont gros, ovoïdes, lourds, avec des écussons gonflés dont l'ombilic est peu prononcé ; ses graines sont protégées par une coque ligneuse dure (fine chez la variété *fragilis*) qui renferme l'amande, comestible et riche en huile. Ce pin forme de vastes pinèdes. C'est une espèce héliophile, xérophile, assez résistante au froid hivernal quand elle est cultivée à des fins ornementales en dehors de son aire, peu exigeante en ce qui concerne le sol, mais avec une préférence pour les sols sablonneux non arides, et venant mal en terrains compacts, argileux ou trop calcaires. Son bois, très résineux, a des fibres grossières et sert à faire des poteaux de mine, de la menuiserie commune et des emballages.

La famille des Taxodiacées *(Taxodiaceae)* comprend des genres assez différents, qui sont réunis par les caractères des tissus ligneux (en particulier bois sans canaux résinifères) et des cônes, dont les pièces proviennent de la fusion des bractées et des écailles concrescentes. Souvent, les rameaux courts et les feuilles sont caducs. La famille a des représentants essentiellement dans l'hémisphère Nord : seul le genre *Athrotaxis* est méridional.

Photos Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Taxodiacées :*** **Sciadopitys verticillata.**

▶ ***Rameaux de*** **Sciadopitys verticillata** ***(à gauche) et de*** **Cryptomeria japonica** ***(à droite).***

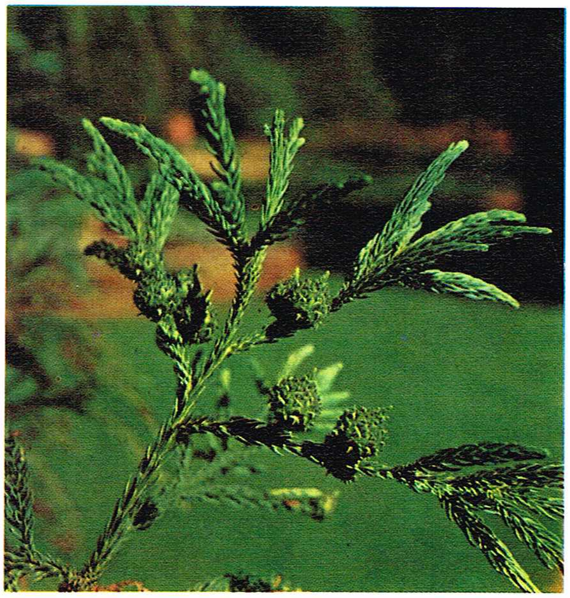

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Marka

◀ **Sequoiadendron giganteum** *est le "big tree" ou "mammouth tree" des Américains : certains spécimens atteignent près de 100 m de hauteur. La longévité de l'espèce est en outre très grande puisque certains arbres sont vieux de trois mille ans et même plus.*

Les dix genres sont monospécifiques ou tout au plus bispécifiques. Les aires souvent très réduites témoignent de l'ancienneté de la famille.

Sciadopitys verticillata, endémique dans le centre du Japon, a un accroissement très lent. Les feuilles sont réduites à des écailles disposées en spirale. Elles sont à aisselle vide et espacées à la base de chaque pousse annuelle, plus resserrées à l'extrémité, et axillent des brachyblastes plats, aiguilles laminaires longues et étroites, vertes, canaliculées à la face supérieure, simulant un feuillage à allure verticillée.

Les cônes, ovoïdaux, renferment des graines bi-ailées. Dans son pays d'origine, l'arbre croît de 200 m à 1 700 m d'altitude ; on le cultive aussi en Europe comme plante ornementale, aux endroits où les hivers ne sont cependant pas trop rigoureux.

Metasequoia glyptostroboides n'a été découvert qu'en 1941 et n'a été décrit du point de vue botanique qu'en 1948. Cette espèce est d'autant plus intéressante que le genre était déjà connu auparavant à l'état fossile. C'est un grand arbre de Chine (Se-Tchouan occidental), haut d'environ 50 m, à feuilles et ramifications opposées ; ses feuilles sont pectinées, planes, aciculaires, glauques dessus, vert jaunâtre dessous et caduques comme certains rameaux courts. Ses cônes sont à peu près sphériques, petits, longuement pédonculés, et ont des pièces opposées ; les graines possèdent deux ailes. Cette espèce semble rare dans sa région d'origine, qui est caractérisée par une bonne pluviosité et des hivers doux ; on l'a assez largement introduite en Europe, où elle a une croissance très rapide.

Cunninghamia lanceolata est également une espèce chinoise, qui forme de grandes forêts dans la partie centrale et méridionale du pays, sur sols meubles, entre 750 m et 1 200 m d'altitude, mêlée à *Pinus massoniana* et à certains chênes, sous un climat tempéré chaud à pluies estivales. Cet arbre peut atteindre 30 m de hauteur, a des branches étalées à extrémité pendante et possède des feuilles persistantes du type de celles des araucarias, disposées en spirale, lancéolées, pointues, recourbées vers le bas et décurrentes. Les rameaux, même longs de 1 à 2 m, sont caducs. Les cônes sont ovoïdes ou sphériques, avec des pièces fines, triangulaires et rétrécies en une longue épine. Ce Conifère croît bien en climat océanique ; de beaux exemplaires existent en Bretagne. Deux formes sont propres à l'île de Formose.

Taiwania est un autre genre monospécifique, avec *T. cryptomerioides* de Formose, dont le port est semblable à celui de *Cryptomeria japonica ;* ses feuilles en alènes sont triangulaires et élargies à la base.

Le genre *Athrotaxis* est limité à la Tasmanie. Il comprend deux espèces toujours vertes, à écorce fibreuse et rameaux

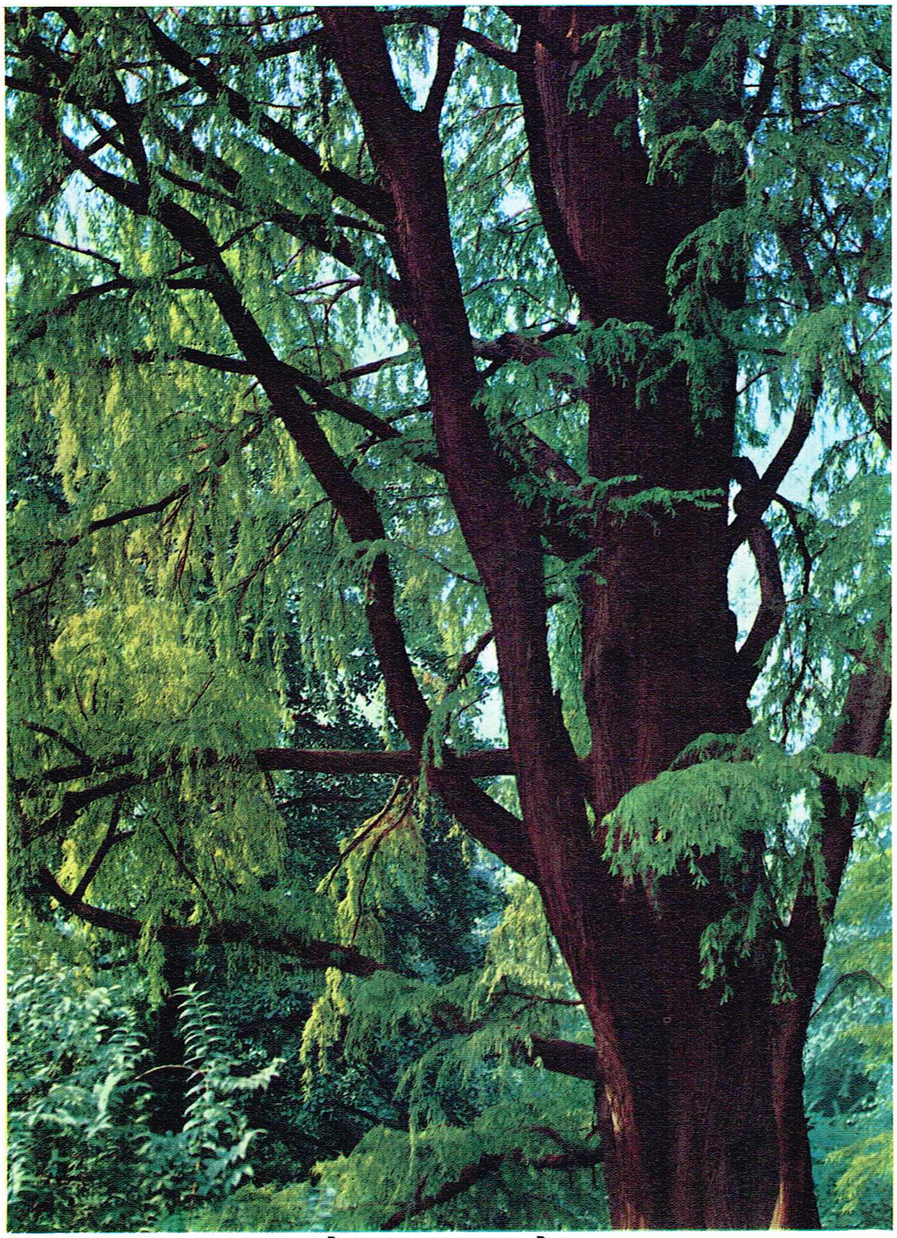

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Le genre* Taxodium *est représenté par deux espèces américaines subtropicales.*

▶ *Ramules fleuris de* Sequoia sempervirens.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

caducs. Les branches sont couvertes de petites feuilles, squamiformes chez *A. cupressoides* et lésiniformes chez *A. selaginoides,* qui est l'espèce la plus élevée, la première étant seulement un arbrisseau.

Cryptomeria japonica est une importante essence forestière d'Asie orientale, à large diffusion. Cet arbre peut atteindre une hauteur de 60 m, avec un tronc très droit, conique, à contreforts basaux et recouvert d'une écorce fibreuse brun rougeâtre. Les branches, verticillées, horizontales ou pendantes, forment une silhouette conique et rétrécie; les rameaux courts sont caducs. Les feuilles, lésiniformes, petites et persistantes, sont vert clair. Les cônes brunâtres, de taille modeste, globuleux, solitaires, sont formés de nombreuses écailles portant chacune de quatre à six pointes foliacées. En Chine centrale, on rencontre la variété *sinensis*, sous climat tempéré chaud, alors que le type est propre au Japon où ce Conifère est le plus répandu et le plus utilisé pour le reboisement. Il en existe de nombreuses formes horticoles, avec notamment la variété *elegans*, fréquente dans les parcs d'Europe, à silhouette très serrée et à feuilles fines, longues et rouge bronzé pendant la mauvaise saison. L'arbre croît au Japon sur des sols de différents types, dans la zone des forêts décidues mixtes avec les genres *Castanea, Fagus, Quercus* et *Magnolia* (jusqu'à 1 600 m d'altitude à Hondo), et éventuellement d'autres Conifères; mais il descend également dans la zone chaude des feuillus toujours verts, où l'on trouve en particulier le camphrier. On connaît des exemplaires âgés de six cent cinquante ans. Le bois est léger, se conserve bien et se travaille facilement; on s'en sert en menuiserie et pour la construction.

Le séquoia toujours vert (*Sequoia sempervirens;* « red wood ») compte parmi les arbres les plus hauts (jusqu'à plus de 100 m). Son rhytidome est épais, fibreux, profondément fissuré, et ligneux. Ses rameaux courts sont caducs. Ses feuilles persistantes sont de trois types : squamiformes, appliquées et longuement décurrentes sur les rameaux longs; aciculaires, brèves, aplaties, subdistiques et décurrentes sur les rameaux courts; squamiformes et très brèves, à la base des rameaux courts et des rameaux fertiles. Ses cônes sont petits, ovoïdes, persistants, avec des écailles ligneuses, peltées, et à écussons arrondis; ils mûrissent en un an. Cette espèce, comme la précédente, donne des rejets de souche et peut, sur les sols à apport alluvionnaire, former de nouvelles racines à un niveau supérieur, le long du tronc. C'est une espèce côtière de la Californie septentrionale et centrale, sous climat tempéré à humidité atmosphérique élevée et à pluies surtout hivernales, sur sols acides, jusqu'à 700 m ou 800 m d'altitude. Habituellement, ce séquoia forme des bois mixtes touffus, dominant sur le *Pseudotsuga menziesii* et d'autres Conifères, ou bien c'est une espèce climax dans des forêts monospécifiques, avec une Éricacée arbustive, *Arbutus menziesii,* et *Lithocarpus densiflorus.* Sa croissance juvénile est rapide, et il vit très longtemps (jusqu'à deux mille deux cents ans).

Sequoiadendron giganteum (= Wellingtonia gigantea), le « big tree » ou « mammouth tree » des Américains, est le géant des géants. Le « General Sherman » — l'un des célèbres spécimens connus — a une circonférence de plus de 30 m et une hauteur dépassant 80 m; cependant, d'autres individus atteignent 100 m. La longévité de l'espèce est également très grande : de nombreux exemplaires, en forêt, ont de deux mille à trois mille ans, et certains sont encore plus vieux. Les troncs de certains spécimens ont été creusés à la base pour laisser passer une route carrossable. L'espèce croît dans quelques stations, disséminées sur environ 400 km², dans les contreforts de la sierra Nevada, dans le centre de la Californie, entre 1 500 m et 2 400 m d'altitude; habituellement, elle est associée à des groupes de *Pinus ponderosa, Pinus lambertiana, Heyderia decurrens, Abies lowiana* et *Abies magnifica.* C'est un arbre majestueux, à tronc élargi à la base, et à branches principales inclinées vers le bas. Son rhytidome est très épais, fibreux, profondément fissuré, de consistance quasi-subéreuse et rouge-brun. Ses feuilles, lésiniformes, à base élargie, et décurrentes, sont rigides et portées par des rameaux courts. Ses cônes, ovoïdes, sont un peu plus grands que chez l'espèce précédente; leur maturation est biennale; ils possèdent des écailles imbriquées, à écussons rugueux portant une pointe

C. et M.C. Nuridsany

◀ ***Fleurs de cyprès*** **(Cupressus sempervirens).**

caduque au fond d'une dépression transversale. Un caractère négatif du cycle biologique de cette espèce est la production tardive de graines, qui peut se faire attendre cent cinquante ou deux cents ans. Le climat de la zone de diffusion est tempéré et caractérisé par des hivers très neigeux. Cet arbre croît sur sol bien drainé et un peu acide. Comme l'espèce précédente, on le plante dans les parcs, mais il résiste mieux aux rigueurs hivernales.

Le genre *Taxodium* est représenté par deux espèces américaines, dont la plus importante est *T. distichum,* forme hygrophile des climats tempérés chauds et subtropicaux du sud des États-Unis (du Delaware à la Floride et au Texas), où elle constitue des forêts dans les marais à substratum acide ou alcalin, dans des zones toutes proches des côtes. Sur cette essence robuste, pourvue de contreforts basaux et de pneumatophores, on voit croître des Fougères, des lianes et d'autres plantes épiphytes, essentiellement des Lichens longuement pendants. Elle atteint une hauteur de 40 à 45 m, et un âge de cinq cents à mille trois cents ans. Cet arbre a d'abord une forme pyramidale, avec un rhytidome, épais, fibreux et écailleux. Ses branches courtes sont distiques, alternes et caduques. Ses feuilles, acutiformes, sont subdistiques, molles et vert clair. Ses cônes, petits, globuleux, ont des pièces à apophyse mucronée. La sous-espèce *nutans* est la plus petite et possède une aire de dispersion plus restreinte.

Taxodium mucronatum est une espèce subtropicale mexicaine, à feuilles semi-persistantes, répandue jusqu'à 2 500 m d'altitude. Près d'Oaxaca, à Santa Maria Del Tula, il en existe un énorme exemplaire, peut-être le plus gros arbre du monde, qui provient sans doute de la concrescence de plusieurs troncs, et dont le diamètre atteint 33 m.

Glyptostrobus pensilis diffère des *Taxodium* par ses cônes piriformes, longuement pédonculés, à écailles obovales et à graines à petite aile. C'est l'unique représentant du genre, qui est répandu dans les marais de la Chine méridionale.

Les Cupressacées *(Cupressaceae)* comprennent des arbres et des arbrisseaux à ramification diffuse, et à feuilles opposées ou par trois. Les bractées et les écailles sont concrescentes, opposées ou verticillées. Les cônes mûrissent en un ou deux ans et sont secs ou bacciformes (charnus). Il existe un dimorphisme entre les feuilles des individus juvéniles et des vieux spécimens. La forme juvénile de diverses espèces est souvent cultivée sous la dénomination *Retinospora.* La famille comprend les deux sous-familles suivantes : *Cupressoideae* (cônes à écailles imbriquées, de l'hémisphère Nord) et *Callitroideae* (cônes à écailles non imbriquées, de l'hémisphère Sud). La sous-famille des *Cupressoideae* comprend les genres *Cupressus, Chamaecyparis, Fokienia, Thuya, Thuyopsis, Heyderia (= Calocedrus)* et *Juniperus.*

Le genre *Cupressus,* avec plus de vingt espèces, est représenté le plus souvent par des arbres à branches horizontales ou ascendantes et à feuilles squamiformes, petites, recouvrant en quatre rangées les dernières parties des branches. Le cône est ligneux, globuleux ou ellipsoïdal, avec des écailles en forme d'écusson et pourvues chacune de plusieurs ovules.

Le cyprès toujours vert *(Cupressus sempervirens),* classique dans les régions méditerranéennes, est cultivé à des fins ornementales, pour le reboisement, et pour constituer des coupe-vent le long des côtes circumméditerranéennes; il est originaire de l'Iran septentrional, de la Syrie, de Chypre, d'Asie Mineure, de Crète et de Grèce. C'est une espèce rustique, xérophile, d'une grande longévité (pouvant vivre de cinq cents à mille ans). Il comporte de nombreuses formes géographiques et horticoles. Haut de 45 m au maximum, cet arbre possède une écorce fine, gris foncé et fibreuse. Ses rameaux sont quadrangulaires, avec des feuilles allongées, obtuses, déprimées et imbriquées, de couleur vert foncé. Ses cônes lignifiés sont subglobuleux ou ovoïdes, brun grisâtre et formés de huit à quatorze écailles possédant une pointe ou un léger relief central. L'espèce croît sur des sols pauvres, rocheux, argileux ou calcaires. Son bois contient une oléo-résine parfumée, qui lui confère une

▼ ***Rameau avec strobiles de cyprès*** **(Cupressus sempervirens).**

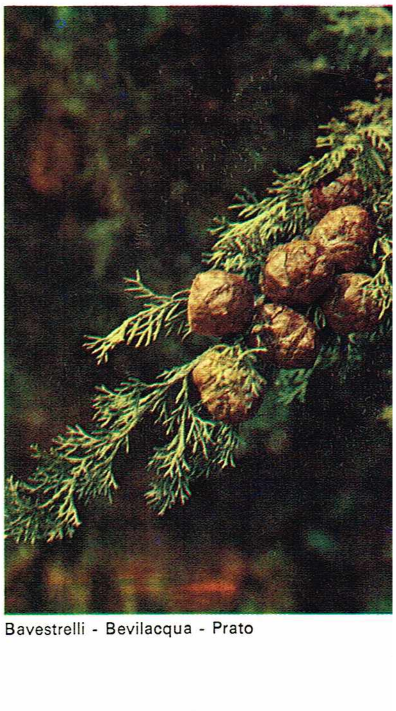

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Bois de cyprès, aux alentours de Vérone (Italie).*

très longue conservation et le rend très résistant aux altérations et aux attaques des Insectes. Par suite de sa facilité de travail, on l'emploie pour des poutrages, des huisseries, la menuiserie fine et le mobilier. *Cupressus dupreziana*, proche du point de vue systématique du précédent, est endémique dans le Tassili (Sahara) ; il a été découvert en 1925 ; il est devenu rare et est en voie d'extinction, à cause de la totale transformation en désert de la région et des déprédations de l'homme.

Cupressus cashmeriana est un petit arbre du nord de l'Inde, cultivé dans la région méditerranéenne pour sa couleur glauque et ses rameaux longuement pendants. *Cupressus funebris*, de Chine centro-méridionale, présente un feuillage vert bleuâtre et des branches déprimées et retombantes. *Cupressus torulosa* est un grand arbre, disséminé de l'Himalaya à la Chine occidentale, dans les montagnes. *Cupressus duclouxiana* a un aspect semblable à la variété *horizontalis* du cyprès toujours vert, mais avec des rameaux faibles et glauques ; il est propre aux forêts tempérées du sud-ouest de la Chine.

Cupressus arizonica forme des peuplements purs, clairsemés, dans les régions montagneuses sèches de l'Arizona, du Texas et du Nouveau-Mexique, de 1 000 m à 1 500 m d'altitude, et du Mexique septentrional, où il monte jusqu'à 2 200 m. De couleur grisâtre ou glauque, il atteint 20 m de hauteur, avec une silhouette dense. Ses branches sont remontantes, et son écorce est d'abord papyracée puis fibreuse. Ses feuilles ont une odeur désagréable et sont ovales, pointues, très serrées sur les rameaux, lesquels sont quadrangulaires. Ses cônes, globuleux, constituent souvent des groupes nombreux. Étant donné qu'il s'adapte bien aux sols calcaires, on s'en sert pour le reboisement des terrains de ce genre dans les zones proches de la Méditerranée, où les hivers ne sont pas trop rudes.

Une espèce souvent discutée est *Cupressus lusitanica* ou cyprès du Portugal, dont l'origine, malgré son nom qui rappelle le pays où il fut introduit il y a longtemps, doit être plutôt recherchée au Mexique, au Guatemala et au Costa Rica. Son écorce est brun rougeâtre, épaisse, fibreuse. Ses branches sont largement étalées, et ses rameaux sont pendants et quadrangulaires. Ses feuilles sont vertes, ovales et aiguës, à longue pointe. Ses cônes ont des écailles à sommet proéminent ou recourbé. C'est une plante de climat tempéré humide. On trouve au Mexique *C. benthami* et *C. montana*. *C. glabra* est limité à l'Arizona central. Il existe aussi des cyprès californiens, endémiques dans des zones très restreintes le plus souvent, et d'un grand intérêt phytogéographique. Le plus important est *C. macrocarpa*, originaire de la baie de Monterey, utilisé également pour le reboisement dans les régions méditerranéennes et dans les zones côtières atlantiques où il résiste au vent. Il peut atteindre une hauteur de 25 m, avec des branches ascendantes et une silhouette conique fournie, mais aplatie chez les vieux individus. Ses feuilles sont triangulaires et vert jaunâtre. Il renferme plusieurs formes horticoles. Les autres espèces du groupe (qui en comprend, pour certains auteurs, onze) sont les suivantes : *C. goveniana*, *C. abramsiana*, *C. bakeri*, *C. forbesii*, *C. guadalupensis*, *C. macnabiana*, *C. nevadensis*, *C. pygmaea*, *C. sargentii*, et *C. stephensonii*.

Le genre *Chamaecyparis* est proche de *Cupressus*. Il regroupe des arbres et des arbrisseaux toujours verts, avec six espèces américaines et asiatiques. Il diffère du précédent par ses branches aplaties, ses cônes petits et mûrs la première année, et son nombre limité de graines pour chaque écaille (de deux à cinq). Les individus ont un port pyramidal, avec une tige principale inclinée, et leur silhouette est dense. Les feuilles sont opposées, squamiformes et disposées en quatre rangées, avec la paire latérale carénée, et les couples supérieur et inférieur aplatis. Chez les jeunes individus, les feuilles sont lésiniformes.

Chamaecyparis lawsoniana ou cyprès de Lawson présente une grande importance forestière dans son aire d'origine (côtes de l'Oregon et de la Californie septentrionale, aux États-Unis) ; c'est l'une des espèces les mieux représentées dans les parcs, avec de nombreuses formes horticoles (on en connaît plus de soixante-dix). Sa silhouette est conique, et ses branches sont pendantes. Son écorce, épaisse chez les vieux spécimens, est brun rougeâtre et profondément crevassée. Son feuillage est, dans la nature, vert foncé, mais, chez les formes cultivées,

Teurtroy - Jacana

▲ *Fleurs mâles du cyprès de Lawson* (Chamaecyparis lawsoniana).

▼ Chamaecyparis pisifera *a donné lieu à de nombreuses variétés ornementales.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *A gauche : thuya d'Orient* (Biota orientalis). *A droite : thuya d'Occident* (Thuya occidentalis *var.* pyramidalis).

il peut être argenté, doré, jaune clair, glauque ou de différentes teintes vertes. Cet arbre croît sous des climats à hivers humides et à étés secs mais nuageux, avec de fortes précipitations annuelles, sur sol très variable, des côtes jusqu'à 1 500 m d'altitude. Il vit, seul ou par groupes, mêlé à *Picea sitchensis, Pseudotsuga menziesii, Pinus ponderosa, Pinus lambertiana, Pinus monticola, Pinus contorta* et quelques chênes. Il supporte bien l'ombre, mais alors sa croissance est lente. Il peut atteindre une hauteur de 60 m, avec un diamètre de 1,20 m à 1,80 m. On s'en sert pour le reboisement, en Europe. Le bois est parfumé, avec un aubier jaunâtre et peu développé, et un duramen brun ; il est apprécié pour sa longue conservation et sa facilité à être travaillé, ce qui le fait employer pour des huisseries et pour le mobilier.

Chamaecyparis nootkatensis (« Alaska cedar ») a une aire plus étendue et plus septentrionale : il habite les côtes de l'océan Pacifique, de l'Alaska jusqu'à Vancouver, ainsi que les Cascade Ranges, sous climat humide et froid avec fort enneigement. Sa période végétative est brève. Il vit dans les tourbières, les marais, les sols rocheux et envahit les zones brûlées, précédant les forêts de *Picea sitchensis* et de *Tsuga mertensiana*, auxquels il s'associe en même temps que *Thuya plicata*. Ses stations isolées le long des côtes de l'Alaska correspondent aux aires de refuge de la végétation arborescente, restées libres de glaces durant les dernières grandes glaciations. Il a une silhouette conique mesurant jusqu'à 30 m de hauteur, avec des branches pendantes, et une écorce écailleuse. Ses ramules sont plus épais que ceux de l'espèce précédente, vert foncé dessus et vert clair dessous. Au nord, il ne dépasse pas 900 m d'altitude, et, au sud, il croît de 800 m à plus de 2 200 m. *Chamaecyparis thuyoides* est un petit arbre des marais et tourbières de la côte atlantique, depuis la Nouvelle-Angleterre jusqu'au delta du Mississippi, essentiellement en forêts pures.

Chamaecyparis obtusa est une espèce de taille moyenne formant des forêts mixtes au Japon central et méridional, de 600 m à 2 000 m d'altitude, avec de nombreuses formes ornementales. On le reconnaît à ses branches horizontales et aux marques en X que fait une substance cireuse à la face inférieure des feuilles. *Chamaecyparis pisifera (= Cupressus pisifera)* est associé à l'espèce précédente, mais monte un peu plus haut en altitude. Ses feuilles sont ovales, à sommets aigus et à marques blanches à la partie inférieure. On en connaît de nombreuses variétés ornementales normales et diverses rétinospores, dont *Retinospora squarrosa*, à feuilles lésiniformes quand elles sont jeunes. *Chamaecyparis formosensis* est un arbre de grande taille, qui habite les montagnes de Formose, de 2 000 m à 3 000 m d'altitude. Cette espèce a une grande longévité, puisqu'elle vit de mille deux cents à mille cinq cents ans.

Fokienia hodginsii est l'unique espèce de son genre ; il présente des affinités avec *Chamaecyparis*. Il forme des forêts denses en Chine (Fou-kien) et en Indochine.

Le genre *Thuya* comprend des espèces semblables à celles de *Chamaecyparis*, pyramidales, à silhouette serrée et à branches horizontales ou ascendantes, mais avec une cime dressée et de petits cônes allongés. Il en existe deux espèces américaines, intéressantes du point de vue forestier, et quatre espèces asiatiques.

Thuya plicata ou *gigantea* (thuya géant, « western red cedar ») est un arbre immense, atteignant 60 m de hauteur et 4,80 m de diamètre. Sa longévité est également très grande. Son rhytidome est fin, crevassé longitudinalement, brun grisâtre. Ses ramifications sont distiques, dans un même plan, et constituent des frondes aplaties. Ses feuilles sont écailleuses, disposées en quatre rangées, très aromatiques, plates pour celles du couple dorso-ventral et repliées pour les deux autres, ce qui forme des dessins en X, blanchâtres en dessous. Les écailles des cônes sont aplaties, légèrement bilobées et mucronées vers le sommet. L'aire de cette espèce s'étend des côtes de l'Alaska méridional à celles de la Californie septentrionale, ainsi que dans les montagnes Rocheuses, dans l'État de Colombie, dans l'Idaho et dans le Montana. Elle atteint son plus grand développement dans les zones côtières, à étés frais et à hivers doux, avec des précipitations moyennes et fortes ; au sud, on rencontre ce thuya dans les régions nuageuses en été. A l'intérieur de son aire de végétation, le climat est plus sec et

plus froid, avec de forts enneigements et des précipitations surtout équinoxiales. Cet arbre est exigeant quant à l'humidité, et donc, il se développe de préférence dans les vallées et les expositions septentrionales. On le considère comme un climax en association avec *Tsuga heterophylla* vers le sud, et avec *Picea sitchensis* dans l'Alaska. Il croît en général sur sols profonds, acides ou neutres. Il tolère très bien l'ombre. Il existe des races côtières et continentales qui présentent, selon leur habitat, des différences de résistance au gel. Le bois, parfumé, à aubier clair et à duramen brun rougeâtre, est léger, à fibres droites, de bonne conservation et facile à travailler; on l'utilise pour faire des tuiles, des huisseries, des embarcations, des pieux, des palissades, des revêtements et des caisses.

Thuya occidentalis ou thuya d'Occident (« white cedar ») est une espèce de petite ou de moyenne taille, à distribution orientale (région des Grands Lacs, zone nord de la Nouvelle-Angleterre jusqu'à l'extrémité méridionale de la baie d'Hudson, ainsi qu'isolément, sur les Appalaches). Sa silhouette est conique. Son rhytidome, brun rougeâtre, est fissuré longitudinalement et faiblement écailleux. Ses feuilles constituent quatre rangées formant des X, comme chez l'espèce précédente, mais ici, elles sont vert jaunâtre en dessous, avec une glande résineuse près de la pointe de la paroi dorso-ventrale. Les écailles des cônes sont arrondies et mucronées. L'espèce a donné lieu à d'innombrables formes horticoles. Elle vit seule ou associée à *Abies balsamea* et *Picea glauca* dans les forêts boréales au nord, avec des feuillus au sud, sous un climat relativement humide, avec des étés frais et des hivers longs, de préférence sur sols neutres ou alcalins, souvent dans les marais. Le bois est très semblable à celui de l'espèce précédente.

Les espèces asiatiques sont *Thuya standishii* du Japon, *Thuya koraiensis* de la Corée du nord et *Thuya setchuensis* de la Chine occidentale (Se-Tchouan). Le genre *Biota,* très proche de *Thuya,* en diffère par ses graines non ailées. *Biota orientalis* (thuya d'Orient) a une aire très vaste, de l'Iran à la Corée. Grâce à son port serré, avec des rameaux typiquement disposées en plans verticaux, on a pu s'en servir comme coupe-vent dans les régions méditerranéennes, et, sous différentes formes horticoles, comme plante ornementale.

Thuyopsis dolobrata, du Japon, est également une plante ornementale de nos parcs. On le reconnaît facilement à ses rameaux très aplatis, à ses feuilles blanchâtres en dessous et à son rhytidome s'effeuillant par longues bandes.

Le genre ancien *Libocedrus* a été récemment scindé en un genre boréal *(Heyderia = Calocedrus)* et en genres austraux formant la tribu des Austrolibocédrées : *Papuacedrus* (Nouvelle-Guinée), *Pilgerodendron* (sud du Chili), *Austrocedrus* (Chili) et *Libocedrus sensu stricto* (Nouvelle-Calédonie, Nouvelle-Zélande).

Heyderia decurrens (= Calocedrus = Libocedrus) est un grand arbre atteignant 45 m de hauteur et un diamètre de plus de 2 m, avec un tronc très conique, à contreforts basilaires et à écorce fibreuse de couleur cannelle; ses feuilles recouvrent les rameaux en quatre rangées et sont étroites, allongées, pressées, sauf au sommet, et décurrentes. Ses cônes sont petits et possèdent six écailles. Chez les vieux individus, le port est caractéristique, avec une silhouette colonnaire, raréfiée et subdivisée en touffes. Dans la nature, l'espèce habite les chaînes côtières et la sierra Nevada, de l'Oregon à la Basse-Californie, et des basses altitudes jusqu'à 1 500 à 2 000 m, sur sols acides ou neutres; elle jouit d'une pluviosité très variable mais faible en été. On rencontre rarement cet arbre seul; il est habituellement associé à différents Conifères et à divers chênes. Sa croissance est lente, et il a une assez grande longévité. Son bois léger et parfumé sert à fabriquer des crayons, des huisseries, des constructions, des traverses de chemins de fer et des palissades; l'une de ses qualités réside dans le fait qu'il se corrompt très lentement.

Heyderia macrolepis (du Yunnan) et *H. formosana* sont les représentants du genre en Asie.

L'important genre *Juniperus* comprend environ une centaine d'espèces d'arbres de taille moyenne et d'arbustes buissonnants, habituellement dioïques, largement répandus dans l'hémisphère boréal. Chez les individus adultes, les feuilles sont acutiformes, piquantes, ternées (sous-

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Variété à fronde jaune doré de* **Biota orientalis.**

▼ *Rameaux avec cônes de* **Biota orientalis.**

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

P. Starosta

▲ *Oxycèdre*
(Juniperus oxycedrus).

genres : *Caryocedrus* et *Oxycedrus*) ou bien squamiformes, pressées contre les rameaux, petites, le plus souvent opposées (sous-genre : *Sabina*) ; les inflorescences femelles sont constituées de trois à huit écailles opposées ou ternées, concrescentes à maturité en un pseudo-fruit globuleux et charnu, le galbule, renfermant de une à dix graines ou plus. L'écorce se détache habituellement par bandes longitudinales, et elle est rarement écailleuse.

Le sous-genre *Caryocedrus* ne renferme que *Juniperus (= Caryocedrus) drupacea,* des montagnes de Grèce, d'Asie Mineure et de Syrie, qui atteint 1 700 m d'altitude. C'est un arbrisseau à port fastigié et à feuilles disposées par verticilles de trois. C'est une espèce ornementale à gros galbule à noyau osseux. Le sous-genre *Oxycedrus* groupe des espèces surtout asiatiques et européennes.

Juniperus communis ou genévrier commun est le Conifère qui a la plus vaste distribution géographique. C'est en effet une espèce circumboréale (Amérique du Nord, Asie septentrionale, Europe, outre l'Afrique du Nord). En général, c'est un arbrisseau buissonnant haut de 1 m à 1,50 m, de forme plus ou moins cylindrico-conique, à branches très serrées et à feuilles acutiformes, dures, piquantes, verticillées par trois, marquées de blanc en dessous. Les « fruits » mûrissent en deux ou trois ans et se présentent sous la forme de baies noires à reflets bleuâtres, sphéroïdales, couvertes d'un revêtement cireux bleuâtre. Il existe de nombreuses formes géographiques et horticoles, du niveau de la mer à l'altitude de 1 200 m à 1 500 m, autour de la Méditerranée. *Juniperus nana* habite les hautes altitudes des Alpes ; il est prostré, typique dans les zones découvertes, au-delà de la limite de la végétation arborescente, et est parfois confondu avec *J. communis* var. *nana,* dont il diffère par sa pointe foliaire plus nette.

Juniperus oxycedrus ou oxycèdre est circumméditerranéen. Il mesure plusieurs mètres de hauteur, parfois, mais c'est le plus souvent un arbuste buissonnant, toujours à feuilles épineuses et à galbules brun rougeâtre. *Juniperus macrocarpa* est proche du précédent, mais a des feuilles plus longues et plus larges, ainsi que des fruits plus gros ; c'est l'espèce typique de fixation des dunes marines. Le groupe comprend encore *J. cedrus*, des Canaries, *J. rigida* et *J. conferta* (ornemental), du Japon, *J. formosana*, de Formose et de Chine, *J. squamata*, d'Afghanistan, *J. recurva*, de l'Himalaya, et *J. procumbens*, prostré, ornemental, du Japon.

Le sous-genre *Sabina* renferme de nombreuses espèces à feuilles squamiformes à l'état adulte, parfois mêlées de feuilles aciculaires. On les a regroupées en six sections, certaines eurasiatiques *(Phoenicioides, Excelsoides, Chi-*

Ruffier Lanche - Jacana

▶ Juniperus nana *se rencontre dans les zones découvertes au-delà de la limite de la végétation arborescente.*

nensoides), certaines américaines *(Pachyphloeoides, Occidentales, Virginioides).*

Juniperus sabina ou genévrier sabine est un arbrisseau basiphile des régions continentales d'Europe centrale et méridionale, du Caucase (espèce proche en Amérique du Nord : *J. horizontalis*), où on le rencontre dans les zones rocheuses. Il a une odeur désagréable et des propriétés vénéneuses. Son port est ascendant, avec des feuilles squamiformes vert foncé en quatre rangées, et des fruits brunâtres couverts d'une cire ; il est ornemental.

Juniperus phoenica a une distribution circumméditerranéenne (à l'exclusion de l'Asie Mineure). On le rencontre des dunes marines aux montagnes moyennes jusqu'à plus de 2 000 m d'altitude (en Algérie et au Maroc). Il est associé à d'autres plantes à feuilles persistantes, pour constituer des maquis hauts (comme en Cyrénaïque et dans certaines zones de la Sardaigne). Ses feuilles sont squamiformes, opposées ou en verticilles de trois, et de contour ovale, ses fruits sont jaunâtres ou brun rougeâtre. C'est un buisson ou un arbrisseau pouvant atteindre 8 m de hauteur, avec une silhouette dense et conique.

Juniperus thurifera est une espèce xérophile tolérant les froids hivernaux de l'Algérie et du Maroc. Sur l'Atlas, il monte jusqu'à 3 000 m d'altitude, à la limite de la végétation arborescente. Il vit dans quelques stations des Alpes, des Pyrénées et d'Espagne. Il peut atteindre une hauteur de 10 m à 20 m. Ses feuilles sont normalement squamiformes, par paires opposées, et très odorantes, mais souvent mêlées à des jeunes feuilles aciculaires. Ses fruits sont à peu près sphériques, noirs et glauques. *Juniperus excelsa* est un genévrier de taille élevée (jusqu'à 20 m de hauteur) des Balkans, de Grèce, d'Asie Mineure, et du Caucase. *J. foetidissima* et *J. polycarpos* sont limités à l'Asie Mineure. *J. procera* est l'espèce la plus élevée du genre : c'est un arbre à tronc droit, parfois haut de plus de 30 m ; il a des rameaux irrégulièrement pennés, avec les dernières divisions quadrangulaires. Les feuilles sont lancéolées, aiguës ; les fruits sont petits, globuleux et à revêtement cireux glauque. Cet arbre habite les forêts sèches de l'Afrique orientale (Katanga, Tanganyika, Kenya, Éthiopie), de 1 200 m à 3 000 m d'altitude.

Les genévriers d'Amérique du Nord, et jusqu'au Mexique septentrional, typiques des régions arides, sont fort nombreux. Les plus importants et les plus communs sont *J. scopulorum* et *J. occidentalis*. On peut citer aussi *J. pachyphloea, J. utahensis, J. deppeana, J. flaccida*. Le premier de ceux-ci peut atteindre la taille d'un arbrisseau (il a rarement une hauteur de 15 m), avec un rhytidome écailleux, un tronc très conique, des feuilles squamiformes à grosse dépression glanduleuse et des infrutescences piriformes bleu noirâtre et pruineuses. Il habite les montagnes Rocheuses, du Canada à la frontière mexicaine, sous des climats arides à hivers froids et faible enneigement, et à étés tempérés ou chauds avec des précipitations faibles, sur sols alcalins, pauvres, caillouteux, jusqu'à 2 700 m d'altitude. Au nord, il forme des bosquets purs ou mêlés de divers Conifères ; au sud, il s'associe de façon caractéristique avec *Pinus cembroides*, en des endroits moins secs.

Juniperus occidentalis est un arbrisseau à distribution limitée à la partie occidentale du continent américain (zones arides de l'Oregon et de la Californie). Là aussi, les étés sont secs et les hivers sont froids, mais l'enneigement est plus important, et la pluviosité est encore inférieure. Cette essence habite les rochers, des basses altitudes jusqu'à plus de 3 000 m, parmi une végétation steppique. Comme l'espèce précédente, elle a une grande longévité (jusqu'à huit cents ans).

Juniperus virginiana (« eastern red cedar ») est un arbre de petite ou de moyenne taille (15 à 30 m de hauteur), des régions centrales et occidentales des États-Unis. Dans cette vaste aire, il est soumis à des climats et à des régimes de pluviosité très variables ; c'est en effet une espèce rustique qui résiste à des extrêmes de chaleur, de froid et de sécherresse, et qui peut vivre sur différents types de sols (acides ou alcalins). C'est aussi une espèce pionnière, qui est associée à *Pinus virginiana* et à *Pinus echinata*, ou avec divers feuillus des forêts climaciques. Son bois a une texture fine et uniforme ; il est léger, assez tendre, peu rétractable, avec un duramen très solide. On l'emploie pour les huisseries, les planchers, les crayons et les petites embarcations.

L'Asie possède également une vingtaine d'espèces, en général des montagnes, où elles montent vers 3 000 m ou 4 000 m (*J. convallium, mekongensis, saltuaria, tibetica, centrasiatica,* etc.). *Juniperus chinensis* a une large répartition en Chine, en Mongolie, en Corée. C'est un arbre atteignant 25 m, de croissance lente. Il a donné plusieurs formes horticoles ornementales.

La sous-famille des *Callitroideae* comprend les genres : *Actinostrobus, Callitris, Fitzroya, Neocallitropsis, Widdringtonia, Diselma, Pilgerodendron, Papuacedrus, Austrocedrus, Libocedrus,* et *Tetraclinis.*

Actinostrobus acuminatus et *A. pyramidalis* sont deux espèces arbustives toujours vertes, à feuilles squamiformes, d'Australie occidentale. Le genre *Callitris* comprend de nombreux arbres et arbustes d'Australie, plus quelques-uns en Tasmanie et en Nouvelle-Calédonie (vingt-deux espèces en tout). Il s'agit de plantes à écorce crevassée

▼ **Juniperus oxycedrus** : ***les galbules présentent l'aspect d'une baie (à gauche). Rameau montrant la disposition des galbules (à droite).***

P. Starosta

Ruffier Lanche - Jacana

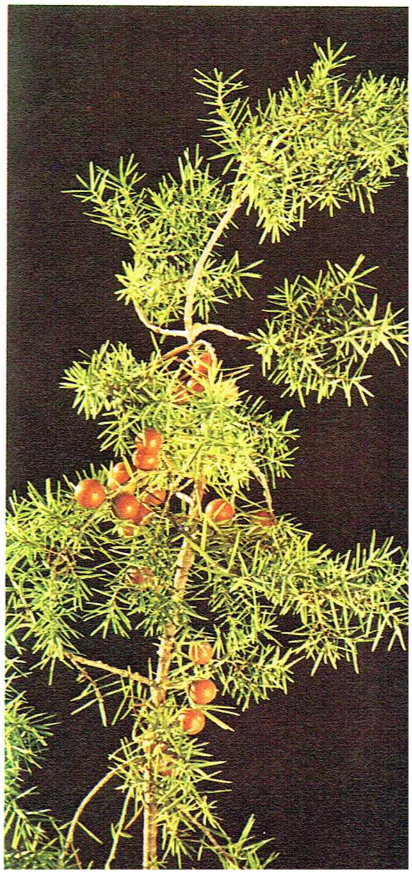

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

ou fibreuse, à branches courtes et à rameaux cassants portant la marque des bases foliaires en forme de gaines; les feuilles de l'adulte sont squamiformes et verticillées par trois; ce sont des plantes monoïques, à cônes de formes variées et à graines possédant deux ou trois ailes. Croissant en général en lieux arides, elles s'adaptent bien au climat méditerranéen. La plus grande, *Callitris glauca (=hugelii)*, a une vaste distribution en Australie et présente de l'intérêt du point de vue forestier, puisqu'elle atteint 30 m de hauteur.

Fitzroya cupressoides est un arbre important (50 m de hauteur et plus de 3 m de diamètre), d'une grande longévité (jusqu'à trois mille ans), et à croissance très lente. Il caractérise les forêts subantarctiques à pluviosité élevée, on le rencontre sur les pentes septentrionales des Andes, entre 500 m et 900 m d'altitude, au Chili et en Argentine. Il est associé à *Saxegothaea conspicua*, sur des sols humides et paludéens; il est également très exigeant quant aux précipitations et à l'humidité atmosphérique. Il a une écorce rougeâtre qui se desquame par longues bandes, des rameaux fins et pendants, des feuilles lancéolées à petite pointe recourbée et à lignes blanches de stomates sur les deux faces; il possède des cônes ligneux formés de neuf écailles.

Neocallitropsis araucarioides est l'unique représentant du genre (Nouvelle-Calédonie). Les *Widdringtonia* sont un genre endémique des forêts des montagnes humides de l'Afrique du Sud, avec quatre espèces dont le port est arbustif ou arborescent. *Diselma archeri* est une espèce tasmanienne sans intérêt pratique. *Pilgerodendron uviferum* (qui était jadis réuni au genre *Libocedrus*) est un arbre de moyenne grandeur, des bois subantarctiques du Chili et de l'Argentine, jusqu'à la Terre de Feu.

Tetraclinis articulata (= Callitris quadrivalvis) est l'unique forme de callitroïdée de l'hémisphère boréal; c'est un petit arbre pyramidal, à silhouette clairsemée, des zones semi-désertiques d'Afrique du Nord, avec deux stations de reliquat en Espagne et à Malte; il est souvent associé à *Pinus halepensis*. Il possède des feuilles squamiformes, opposées, des branches dressées, des cônes à quatre valves, et des graines ailées.

Les Taxacées *(Taxaceae)* sont une famille d'arbres et d'arbrisseaux ou arbustes, à feuilles aciculaires décurrentes sur la branche, à rhytidome formant assez peu d'écailles ou de bandes. La famille est caractérisée par la présence d'un arille : il s'agit d'une formation bacciforme qui entoure la graine; par ailleurs, le bois est dépourvu de trachées. Il existe cinq genres : *Taxus, Torreya, Amentotaxus, Austrotaxus, Nothotaxus*.

Le genre *Taxus* comprend huit espèces, qui occupent des aires géographiques bien distinctes, ce qui fait qu'on peut les différencier; selon certains auteurs, on devrait les considérer comme des sous-espèces d'une espèce collective, *Taxus baccata*.

▲ *If à baies* (Taxus baccata). *Un exemplaire de la variété* fastigiata.

▼ *Fleurs mâles (à gauche), arille charnu contenant les graines (à droite).*

C. Nardin - Jacana

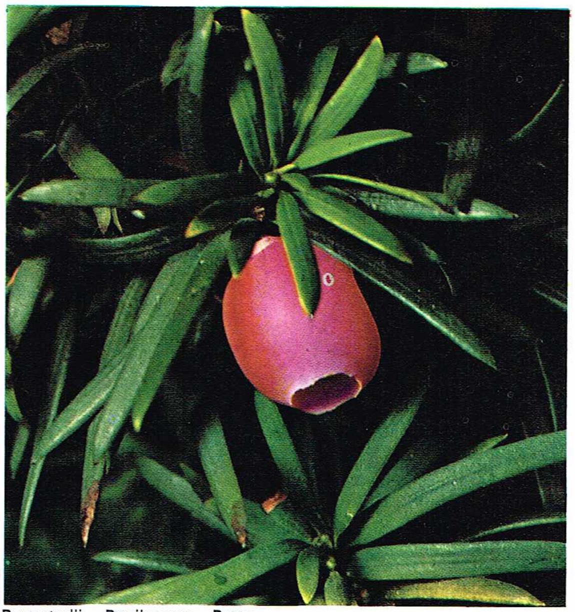

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ **Cephalotaxus drupacea,** ***Conifère produisant des graines qui rappellent les drupes du prunier.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

L'if à baies *(Taxus baccata)* est un arbre d'ornement bien connu. Il est dioïque, densément rameux, souvent polycormique (à plusieurs troncs) ou à tronc court et gros, souvent cannelé. Il est très résistant à l'ombre. Les feuilles sont en réalité disposées en spirale, mais semblent pectinées sur les côtés des rameaux, par suite de la torsion de la base; elles sont vert foncé dessus et plus claires dessous. Les graines sont presque complètement enfermées dans un arille charnu, globuleux, rouge, unique partie de la plante qui ne soit pas vénéneuse (les substances toxiques sont des alcaloïdes, comme la taxine). Cet arbre a une grande longévité (plus de mille ans) et croît très lentement. Il préfère les zones fraîches et ombreuses, même sur sols calcaires, et le plus souvent dans des forêts mixtes. A l'état naturel, il a fortement régressé. Son aire de diffusion, très fragmentée, comprend l'Europe centrale, l'Afrique du Nord et l'Asie Mineure. *Taxus wallichiana* est l'espèce montagnarde subalpine de l'Himalaya; *T. chinensis* habite la Chine occidentale; *T. cuspidata* croît au Japon, en Corée et en Mandchourie. *T. brevifolia* a une large diffusion sur le versant pacifique de l'Amérique du Nord; il est remplacé dans la partie nord-orientale du continent par *T. canadensis*; *T. floridana* est endémique en Floride, et *T. globosa* se rencontre dans le sud du Mexique.

Le genre *Torreya* renferme de petits arbres toujours verts d'Amérique du Nord et d'Asie orientale, caractérisés par une écorce peu épaisse et fibreuse, et des branches opposées ou verticillées. Leurs feuilles sont subdistiques, souvent pointues, linéaires, et glauques en dessous. Les *Torreya* sont des plantes dioïques, à graines entièrement entourées par un arille semblable à une olive ou à une prune. *Torreya grandis* peut être un buisson ou un arbre de moyenne taille, à feuilles de couleur vert jaunâtre. Cette espèce vit en Chine méridionale et occidentale. *T. nucifera* du Japon a un port semblable, mais ses feuilles ont une odeur poivrée quand on les casse. *T. taxifolia* a une aire restreinte à la Floride et à la Géorgie, où on le rencontre sur sols calcaires et dans les marais. Il ressemble à l'espèce précédente mais a des feuilles beaucoup plus courtes. *T. californica* est présent le long des torrents de montagne de la région côtière californienne et sur les versants occidentaux de la sierra Nevada; ses feuilles sont aromatiques, longues, son arille est peu épais.

Le genre *Amentotaxus* est monospécifique, avec la seule espèce *A. argotaenia* de Formose et de Chine méridionale et occidentale. Cette plante possède des chatons mâles ramifiés et un ovule solitaire. Elle forme un buisson très ornemental, ses feuilles présentent en dessous des bandes alternantes, glauques et vertes.

Le genre *Austrotaxus* n'a également qu'une espèce, *A. spicata*, arbre toujours vert à silhouette dense, à feuilles linéaires, légèrement pointues, et à graines arillées; il est indigène en Nouvelle-Calédonie.

Nothotaxus est également monospécifique, avec *N. chienii*, découvert seulement en 1948 dans le Chékiang (Chine orientale).

Les Céphalotaxacées *(Cephalotaxaceae)* sont une famille représentée par le seul genre *Cephalotaxus*, comprenant certaines espèces d'arbres et d'arbustes toujours verts d'Asie. Elles possèdent des branches opposées ou verticillées, les juvéniles étant cannelées; de fines lignes stomatiques blanches strient la face inférieure des feuilles, qui sont distiques, linéaires, flexibles et pointues. Les graines ont un arille charnu. Parmi les plus répandues dans les parcs, nous citerons *Cephalotaxus fortunei* de Chine centrale et occidentale, et *C. drupacea* de Chine et du Japon.

La famille des Araucariacées *(Araucariaceae)* habite uniquement l'hémisphère austral. Elle est très ancienne. Elle possède aujourd'hui deux genres importants, *Araucaria* et *Agathis*. Le premier possède des feuilles acutiformes ou lésiniformes, et le second, d'aspect très différent, a de larges feuilles. Les cônes volumineux sont dressés, à écailles ligneuses, avec des graines étroitement soudées chez le premier genre, et libres chez le second. Les feuilles présentent un dimorphisme, les juvéniles étant souvent différentes par leur forme et leur distribution.

Le genre *Araucaria* comprend vingt-trois espèces de grands arbres qui, vieillis, ont souvent un tronc longuement dépourvu de branches et une cime aplatie, avec une écorce résineuse, épaisse et marquée de cicatrices foliaires ou se desquamant en écailles fines. Les branches sont habituellement verticillées. Les feuilles sont disposées en spirale, très persistantes et recouvrent les branches en deux ou plusieurs rangées par torsion de la base. Elles sont en outre plates, lancéolées, coriaces, ou bien lésiniformes et triangulaires, ou encore tétragones et petites. Habituellement, les *Araucaria* sont dioïques, avec des cônes à écailles densément imbriquées qui se désarticulent à maturité.

Araucaria araucana (= A. imbricata) peut atteindre 50 m de hauteur; c'est l'espèce la moins thermophile, étant donné sa distribution (Chili méridional, Patagonie et Terre de Feu), à une altitude de 800 m à 1 600 m. Cet arbre est mêlé à des feuillus ou forme des forêts pures. Sa ramification est très régulière, avec des branches horizontales puis ascendantes, et des branches latérales qui sont horizontales ou pendantes, densément recouvertes comme d'un manchon par des feuilles triangulaires, dures, imbriquées, pointues; celles-ci restent vertes pendant dix à quinze ans, et persistent encore par la suite sous forme d'écailles brunes. Les cônes sont grands et globuleux. La silhouette des vieux individus prend une forme en parasol. Dans la nature, l'espèce peut atteindre l'âge de mille ans. Elle préfère les zones humides battues par les vents du Pacifique, sous climat tempéré. On la cultive comme plante ornementale, dans les régions fraîches, à température assez douce en hiver (Bretagne).

Araucaria angustifolia, de forme typique en candélabre, avec des feuilles lancéolées, ovalaires, décurrentes, subdistiques, coriaces et réunies en touffes à l'extrémité des

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ Araucaria excelsa. *Les ramifications sont horizontales.*

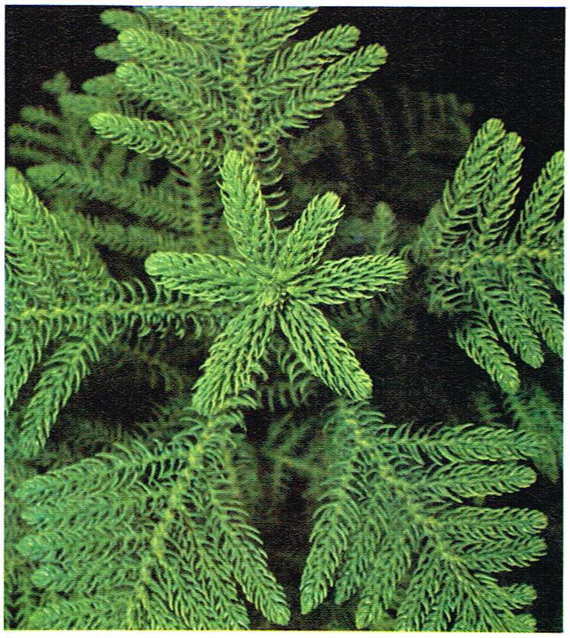

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ *Les ramifications d'Araucaria excelsa montrent une disposition ordonnée selon une symétrie rayonnante. Ici l'arbre est photographié par le dessus.*

branches, est une espèce de climat subtropical à pluviosité uniforme. Cet arbre habite les forêts à plus de 800 m d'altitude au Brésil méridional, et dans le territoire des Misiones (Argentine), sur des sols de type latéritique. C'est une espèce à croissance rapide, atteignant de 40 m à 50 m de hauteur, mais à vie relativement brève (au maximum trois cents ans).

Araucaria cunninghamii est une intéressante espèce forestière de Nouvelle-Guinée (forêts de podocarpes de la zone des nuages, de 600 m à 1 800 m d'altitude) ainsi que des côtes du Queensland et de Nouvelles-Galles du Sud (du niveau de la mer à 750 m), sous climat tropical humide (de 2 000 mm à 4 000 mm par an, avec une pluviosité essentiellement estivale). Il peut dépasser 50 m de hauteur; on le reconnaît à ses feuilles lésiniformes disposées en manchon autour de la branche, à sa silhouette pyramidale et à son rhytidome qui se desquame par bandes horizontales. *A. bidwillii* (haut de 40 m), limité aux zones côtières du Queensland, a une écologie du même type et présente un rhytidome pourvu de protubérances, se détachant horizontalement en petites écailles enroulées au bord, et des feuilles lancéolées, pointues, coriaces, acutiformes; les cônes sont très gros (30 cm de diamètre).

Araucaria excelsa (= A. heterophylla), endémique dans l'île de Norfolk (Océanie), est une plante ornementale d'appartement, ou de parc dans la région méditerranéenne (notamment sur les côtes de Provence). Sa silhouette est clairsemée avec des branches implantées très régulièrement. Cette espèce atteint une hauteur de 50 m à 60 m, et un diamètre de plus de 2 m. Les formes en pot ont des feuilles juvéniles lésiniformes, et des feuilles adultes courtes et subtrigones. *A. columnaris* est proche, du point de vue systématique, du précédent; il habite les zones littorales de la Nouvelle-Calédonie; il doit son nom spécifique à la forme de sa silhouette. Il existe encore d'autres espèces d'*Araucaria*, de peu d'importance pratique, dont huit sont confinées à la Nouvelle-Calédonie, et deux à la Nouvelle-Guinée. Le bois des représentants du genre *Araucaria* est tendre et léger.

Les *Agathis* sont typiques pour leur sécrétion : lorsqu'on entaille leur écorce, il en coule une résine qui se présente sous forme d'un liquide laiteux, dense, se solidifiant à l'air en incrustations ou en masses. Il s'agit d'arbres de haute taille, à branches horizontales, souvent verticillées chez les individus juvéniles, irrégulièrement disposées chez les vieux, caduques et laissant des cicatrices arrondies. Les feuilles persistent quinze à vingt ans sur l'axe principal, où elles sont disposées en spirale, et d'abord roses ou rougeâtres, puis vertes, ayant la consistance du cuir; habituellement larges et planes, avec des nervures parallèles, elles varient en forme et en taille éventuellement sur le même arbre, et laissent après leur chute des coussinets en relief sur les branches. Les cônes ont des écailles à bord épais; les graines, solitaires, ont toujours une aile bien développée. La taxonomie de ce genre n'est pas encore bien définie.

Agathis robusta (= A. brownii) habite les côtes à climat tropical humide du Queensland méridional. Il atteint 50 m de hauteur, avec un tronc dépourvu de branches sur sa plus grande hauteur, et possède des feuilles ovales, arrondies ou pointues. *A. palmerstoni* est peut-être une race géographique de la précédente et habite le Queensland septentrional, où il est accompagné d'*A. microstachya*; ces deux dernières espèces atteignent une taille élevée.

Agathis australis (= Dammara australis), vulgairement appelé kauri (« kauri pine »), a été une importante essence forestière de Nouvelle-Zélande, mais on est aujourd'hui obligé de le protéger, car il a été soumis dans le passé à des coupes excessives. Il habite la partie septentrionale de l'île du Nord et peut avoir une hauteur de 25 m à 45 m, avec un fort diamètre de 2,40 m à 3,60 m (le record est de 7,20 m). Ses branches sont horizontales et ses feuilles sont plus petites et plus étroites que chez *A. robusta*. L'espèce vit sous un climat à peu près sans gelées ni précipitations neigeuses, de type subtropical humide, sur différents sols, souvent des podzols. On rencontre en Nouvelle-Calédonie *A. ovata*, *A. moorei* et *A. lanceolata*; *A. obtusa* est propre aux Nouvelles-Hébrides; *A. alba*, avec une silhouette pyramidale et des branches légèrement pendantes, forme d'importantes populations en Asie (Indonésie et Philippines); ses feuilles sont largement lancéolées ou ovales. *A. beccarii* croît à Bornéo, *A. hami* aux Célèbes, et *A. loranthifolia* dans les Moluques.

G. Faucheux - Atlas photo

▲ **Araucaria imbricata :** ***cette espèce sud-américaine est cultivée en Europe à des fins ornementales.***

D. Lecourt - Jacana

◄ ***Les feuilles d'*****Araucaria imbricata** ***restent vertes pendant dix à quinze ans et persistent ensuite sous forme d'écailles brunes.***

Les espèces du genre *Agathis* donnent des résines du groupe des copals (gomme dammar, kauri, etc.) ; on en tire également des bois très résistants et de longue conservation.

Les Podocarpacées *(Podocarpaceae)* sont une importante famille de l'hémisphère Sud. Elles comptent des arbres et des arbrisseaux à feuilles persistantes, squamiformes, aciculaires ou à limbe élargi, et remplacées chez le genre *Phyllocladus* par des phyllodes ou des cladodes (ayant valeur de brachyblastes spécialisés). Les inflorescences femelles sont formées par des écailles qui enveloppent en se soudant à lui un unique ovule. L'ensemble devient généralement charnu à maturité et forme autour de la graine une structure dite épimatium. La famille comprend sept genres, avec une centaine d'espèces : *Pherosphaera, Microcachrys, Acmopyle, Saxegothaea, Phyllocladus, Dacrydium* et *Podocarpus.*

Le genre *Pherosphaera* comprend deux espèces buissonnantes, hygrophiles, à feuilles squamiformes, *P. fitzgeraldi,* des Nouvelles-Galles du Sud (Australie), et *P. hookeriana,* de Tasmanie. *Microcachrys tetragona,* unique représentant de son genre, est caractérisé par ses longs et faibles rameaux, prostrés, quadrangulaires, à feuilles squamiformes, ainsi que par ses pseudo-fruits charnus et translucides, ressemblant à des prunes ; il habite la Tasmanie. *Acmopyle pancheri* vit en Nouvelle-Calédonie. *Saxegothaea conspicua* est un arbre de taille moyenne,

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ **Podocarpus totara,** ***espèce néo-zélandaise.***

propre aux forêts subantarctiques les plus humides du Chili et de l'Argentine méridionaux ; il possède des feuilles acutiformes, petites, subdistiques, droites ou légèrement falciformes, ainsi que des cônes à écailles charnues avec des pointes aiguës et recourbées.

Le genre *Phyllocladus* comprend des espèces de l'Océanie et de l'Indonésie, avec des feuilles définitives réduites, à l'aisselle desquelles les brachyblastes (rameaux courts) sont transformés en phyllodes, souvent vivement colorés à l'état juvénile ; les feuilles terminales sont fréquemment lobées ou pennées. La graine est unique et située dans une écaille charnue solitaire ; dans certains cas, plusieurs écailles forment un cône.

Phyllocladus alpinus est une espèce montagnarde de Nouvelle-Zélande, qui se présente sous forme d'un buisson ou d'un arbuste ; les cladodes sont épais et ont des bords de forme très irrégulière. *P. trichomanoides* possède des cladodes qui rappellent par leur forme les frondes des Fougères, et qui sont brun rougeâtre à l'état juvénile ; on le rencontre dans des zones restreintes de Nouvelle-Zélande, à basse altitude. *P. glaucus* est un arbrisseau de certaines zones de l'île du Nord, en Nouvelle-Zélande. *P. asplenifolius* est endémique en Tasmanie, *P. major* en Nouvelle-Guinée, et *P. protracta* est répandu en Nouvelle-Guinée, aux Moluques, en Malaisie et aux Philippines. *P. hypophyllus* est une espèce montagnarde des Philippines et de Bornéo (2 500 m à 3 600 m d'altitude), avec des cladodes verticillés, glauques et très variables.

Dacrydium est un genre surtout répandu en Nouvelle-Zélande, mais avec quelques espèces également en Indonésie, en Océanie, en Australie et au Chili. Les feuilles sont linéaires chez les plantes juvéniles, mais elles sont petites chez les adultes, le plus souvent squamiformes, et étroitement superposées. Les graines sont en général ovoïdes, nuciformes. Les représentants du genre *Dacrydium* sont des arbrisseaux ou des arbres peu élevés. En Nouvelle-Calédonie, nous citerons *D. balansae*, *D. lycopodioides*, *D. taxoides* et *D. araucarioides ;* à Bornéo, *D. beccarii ;* aux Philippines et à Bornéo, *D. falciforme ;* en Malaisie, à Bornéo, aux Philippines, aux îles Fidji, *D. elatum ;* au Chili, *D. fonckii ;* en Nouvelle-Guinée, *D. guineense ;* enfin, en Tasmanie, *D. franklinii*. Parmi les espèces néo-zélandaises, mis à part *D. laxifolium* et *D. bidwillii*, espèces buissonnantes, qui freinent l'érosion des sols, surtout la seconde dont les branches sont basses et radicantes, certaines fournissent un bois intéressant, notamment *D. biforme*, *D. colensoi* et *D. cupressinum*.

Le genre *Podocarpus* comprend des arbres et des arbrisseaux toujours verts, habitant les forêts de montagne des régions tropicales, subtropicales et même tempérées de l'hémisphère austral. Ce sont des Végétaux à branches verticillées ou insérées irrégulièrement. Leurs feuilles sont très variables : elles sont rassemblées ou clairsemées sur les rameaux, où elles sont disposées en spirale, ou bien elles peuvent être (mais plus rarement) pectinées, ou encore superposées ; elles sont par ailleurs aciculaires, ou squamiformes, ou larges (elles ont de 20 cm à 30 cm de longueur) ; elles sont soit fines et tendres, soit épaisses et de la consistance du cuir. Il s'agit d'espèces habituellement dioïques, avec des chatons mâles, denses et fins, cylindriques, et des chatons femelles formés par deux à quatre écailles, dont une seule est fertile, avec un ou deux ovules, dont l'un seulement devient mature.

Les écailles stériles fusionnent souvent avec la partie supérieure du pétiole, en donnant un réceptacle charnu, parfois vivement coloré, qui supporte la graine ; quelquefois, l'infrutescence est ligneuse. Certaines espèces présentent un intérêt pratique : leur bois, généralement jaunâtre, mais aussi brun ou rougeâtre, sans distinction nette entre l'aubier et le duramen, est uniforme, de bonne conservation, facile à travailler, et d'un beau poli.

Les *Podocarpus* néo-zélandais sont les plus importants, et surtout *Podocarpus totara*, qui peut atteindre une hauteur de plus de 30 m, avec un diamètre de 1,50 m à 2,50 m ; son bois est très apprécié pour la fabrication des contre-plaqués (utilisés pour la construction des bateaux et le mobilier), ainsi que pour la menuiserie et les ouvrages maritimes. Ses feuilles sont petites, acutiformes et aiguës. Pour des travaux plus ordinaires, on emploie *P. spicatus*, *P. ferrugineus* et *P. dacrydioides*, ce dernier atteignant 60 m de hauteur et possédant une écorce fine, des rameaux graciles et pendants, et des feuilles squamiformes, superposées et disposées en spirale.

Les quelques espèces australiennes, que l'on retrouve parfois jusqu'en Indonésie, ont peu d'importance du point de vue économique. La Tasmanie en possède une, les îles Fidji deux, et la Nouvelle-Calédonie cinq. En Nouvelle-Guinée, diverses espèces atteignent de hautes altitudes dans les forêts de montagne supérieures, en même temps que des *Nothofagus*, des *Papuacedrus* et des *Dacrydium ;* plus bas, elles sont associées à *Lithocarpus*, *Phyllocladus* et *Araucaria cunninghamii*. Nombreuses sont les espèces asiatiques, plus importantes dans les montagnes d'Indonésie, que l'on trouve en forêts mixtes mêlées aux genres *Phyllocladus, Dacrydium, Agathis,* etc. ; certaines vont jusqu'au Japon au nord, et à l'Himalaya à l'ouest ; dans cette chaîne, nous citerons *P. neriifolius*, qui peut atteindre 40 m de hauteur.

En Afrique, le genre *Podocarpus* a pour aire la partie orientale montagneuse. Dans les forêts pluviales d'Afrique du Sud, on en rencontre quatre espèces ; d'autres croissent au nord, en Tanzanie, au Kenya et en Éthiopie. *P. dawei*, *P. milanjianus* et *P. gracilior* ont un bois intéressant. En Amérique, la distribution des nombreuses espèces commence aux Antilles et au sud du Mexique, pour suivre les Andes jusqu'à leur extrémité méridionale ; il en existe des espèces tropicales, subtropicales et de climats tempérés et tempérés chauds. *P. montanus* et *P. macrostachys*, de Colombie et du Pérou, atteignent 3 000 m d'altitude ; deux espèces sont propres au Brésil, dont l'une, *P. lambertii*, est associée à *Araucaria angustifolia*, à un niveau plus chaud. *P. parlatorei* est propre aux forêts tempérées chaudes du sud de la Bolivie et du nord de l'Argentine ; deux espèces seulement vivent sous un climat tempéré en Argentine et au Chili : *P. andinus* et *P. nubigenus*.

◀ **Welwitschia mirabilis** ***habite les steppes subdésertiques du Sud-Ouest africain. Cette curieuse espèce est désormais protégée, car elle est en voie de disparition.***

J. Provansal - Jacana

GNÉTINÉES

Les Gnétinées (Chlamydospermes, ou Gnétophytes) constituent la classe la plus évoluée des Gymnospermes, avec des caractères intermédiaires entre celles-ci et les Angiospermes. Mais il ne semble pas qu'on puisse les considérer comme étant à l'origine de ces dernières, car les fossiles découverts, peu anciens, demeurent d'attribution incertaine; elles remontent à une période à laquelle les Angiospermes étaient déjà apparues depuis longtemps, c'est-à-dire à la fin du Mésozoïque. On peut donc supposer qu'il s'agit d'un groupe de Gymnospermes à spécialisation tardive, avec une évolution parallèle à celle des Angiospermes. Elles comprennent trois familles si diverses que chacune constitue un ordre à elle seule; elles représenteraient des phases évolutives indépendantes de phylums proches.

L'unique caractère propre aux Gymnospermes que l'on retrouve chez les Gnétinées est l'ovule non enfermé dans un ovaire. En revanche, d'autres caractères évoquent ceux des Angiospermes; parmi ces traits nous pouvons citer : la présence d'une enveloppe autour des inflorescences, tout au moins dans les fleurs mâles, formée par des bractées partiellement soudées (amphigone), et qui cependant, selon certains auteurs, ne peut pas être comparée à un véritable périanthe; un bois secondaire hétéroxylé, avec des vaisseaux primitifs pourvus de trachéides; l'absence de canaux résinifères; des sporophylles réunies en inflorescences, parfois bisexuelles; des téguments ovulaires formant en s'allongeant un tube micropylaire, et constituant une première ébauche d'appareil stigmatique; un gamétophyte mâle réduit; une microsporophylle ayant l'aspect d'une véritable étamine chez *Ephedra;* des feuilles larges et réticulées chez *Gnetum*; chez *Ephedra* et *Gnetum*, l'existence de systèmes particuliers, qui ferment le canal tégumentaire après la fécondation, pour protéger l'embryon, grâce à un mécanisme qui reste imparfait par rapport à celui qui existe chez les Angiospermes.

Les gamétophytes femelles et la reproduction ont, chez *Welwitschia* et chez *Gnetum,* des caractères très aberrants, indices d'une évolution poussée jusqu'à la sénilité : ainsi il n'y a plus d'archégones.

Le cambium primaire, actif pendant un temps relativement bref, est remplacé par des cambiums secondaires extra-fasciculaires de l'écorce, qui donnent le bois secondaire. Les inflorescences mâles sont plus ou moins fusionnées en complexes staminaux; les feuilles sont opposées ou verticillées. Trois genres seulement correspondent aux trois familles, ils sont très différents les uns des autres et distribués sur des aires disjointes.

La famille des Welwitschiacées *(Welwitschiaceae)* comprend un unique représentant, *Welwitschia mirabilis.* C'est une plante dioïque, des régions steppiques et subdésertiques de l'Angola méridional et du Sud-Ouest africain, présente de la côte de l'océan Atlantique jusqu'à une centaine de kilomètres à l'intérieur, où elle semble liée à un régime particulier de pluies. La grosse tige tubéreuse, très raccourcie et bilobée, d'un diamètre pouvant atteindre 1 m, est pourvue seulement de deux longues feuilles coriaces et rubaniformes, persistant pendant toute la vie de la plante, et s'accroissant indéfiniment à la base grâce à un méristème; ces feuilles se divisent en segments, le long des nervures parallèles, et se détruisent graduellement à l'extrémité. La racine est robuste et longuement pivotante. Les inflorescences sont des grappes de strobiles situées à l'aisselle des feuilles; chacun des strobiles est composé d'écailles, avec à l'aisselle une fleur formée par un périanthe de deux bractées et par un synandre chez les

▼ **Welwitschia mirabilis :** ***strobiles disposés en grappes à l'aisselle des feuilles.***

P. Jamain - Jacana

C. Nardin - Jacana

▲ *Les* Ephedra *sont des plantes à port de prêles apparemment dépourvues de feuilles et aux fructifications vivement colorées. Elles présentent une adaptation xérophile prononcée.*

mâles, et au centre une fleur femelle avortée; chez les fleurs femelles, les strobiles sont formés par le périanthe et un seul ovule.

Le mode de pollinisation est l'entomophilie : les Insectes sont attirés par la formation d'une goutte de liquide sur l'ovule. Lors de la fécondation, des tubes prothalliens femelles vont à travers le nucelle, à la rencontre des tubes polliniques, phénomène unique chez les Spermaphytes. Les graines, discoïdales, sont sèches et pourvues d'une aile, et sont enfermées dans le strobile femelle qui a l'aspect d'un cône de Conifère.

Les Éphédracées *(Ephedraceae)* sont une famille de plantes à adaptation xérophile prononcée, avec quarante espèces, largement distribuées dans les régions steppiques ou désertiques, de l'Asie centrale à la Méditerranée, en Amérique du Nord et sur les Andes. Ce sont des plantes équisétiformes ou genistiformes, généralement de petite taille, à tiges fines et très ramifiées, parfois retombantes, avec des rameaux articulés et des feuilles réduites et squamiformes, situées aux nœuds. Les fleurs sont unisexuées, monoïques ou dioïques, à l'exception de celles d'*Ephedra campylotropa*, dont les inflorescences sont bisexuées; les fleurs sont vivement colorées et attirent les Insectes, la pollinisation étant entomogame. Dans l'appareil sexuel femelle, contrairement à ce qui a lieu chez *Welwitschia* et chez *Gnetum*, les archégones sont encore présents. Les graines sont habituellement entourées par une enveloppe dérivant des bractées, qui peut devenir une fausse baie si elle prend une consistance charnue; dans d'autres cas, il y a des graines sèches, ailées ou non. On tire de certaines éphèdres et en particulier d'*Ephedra sinica* et d'*E. shennungiana*, qui habitent la Chine, de l'éphédrine, qui a une action mydriatique semblable à celle de l'adrénaline. *E. distachya* est une espèce des régions méditerranéennes, remontant sur le littoral atlantique jusque sur la côte Sud de la Bretagne.

Chez la famille des Gnétacées *(Gnetaceae)*, on trouve des lianes, des arbres ou des arbrisseaux (genre *Gnetum*), souvent dioïques et habitant les forêts pluviales d'Asie tropicale, d'Afrique occidentale, d'Amazonie et du Queensland, avec une quinzaine d'espèces. Les feuilles sont assez grandes, opposées, pétiolées, planes, à nervures pennées et à consistance de cuir. Les inflorescences, en grappes, consistent en épis de fleurs verticillées unisexuées; les fleurs mâles ont un périanthe à deux feuilles concrescentes, les femelles possédant un seul ovule, avec un tube micropylaire et un double tégument. Lors de la fécondation, des noyaux libres du sommet du nucelle jouent le rôle d'oosphère.

BIBLIOGRAPHIE

World Geography of Forest Resources (Géographie mondiale des ressources forestières), The Ronald Press Company, New York, 1956. - CAPPELLETTI C., *Trattato di Botanica (Traité de botanique), UTET,* Turin, 1967. - CHADEFAUD M. et EMBERGER L., *Traité de botanique,* t. II, *les Végétaux vasculaires,* Masson, 1960. - CORE E., *Plant Taxonomy (Taxonomie végétale),* Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1955. - DARRAH W., *Principles of Paleobotany (Principes de paléobotanique),* The Ronald Press Company, New York, 1960. - GAUSSEN H., *les Gymnospermes actuelles et fossiles. Abiétacées,* fasc. 6, 1960, - fasc. 7, 1964, - fasc. 8, 1966. *Taxodiacées,* fasc. 9, 1967. *Cupressacées,* fasc. 10, 1968. *Araucariacées, Céphalotaxacées,* fasc. 11, 1970. *Podocarpines,* fasc. 12, 1973, Faculté des sciences, Toulouse. - KRÜSSMANN G., *Handbuch der Nadelgehölze,* P. Parey, Berlin, Hambourg, 1972. - MARTENS P., *les Gnétophytes,* Gebrüder Barntraeger, Berlin, Stuttgart, 1971. - PARDÉ L., *les Conifères,* La Maison rustique, Paris, 1955. - PLAISANCE G., *Guide des forêts de France,* Nef de Paris, éd., 1961, Paris. - STRASBURGER E. et ses coll., *Trattato di Botanica (Traité de botanique),* SEL, Milan, 1951. - VEDEL H., LANGE J., LUZU G., *Arbres et arbustes de nos forêts et de nos jardins* (traduit du Danois), F. Nathan, imprimé en Hollande sans date.

ENCYCLOPÉDIE DES SCIENCES

BOTANIQUE

II

GRANGE BATELIÈRE

GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

LES VÉGÉTAUX II

GRANGE BATELIÈRE, PARIS - ÉDITIONS KISTER, GENÈVE - ÉRASME, BRUXELLES-ANVERS

Publiée sous le haut patronage de :
Messieurs les professeurs :
Jean DORST, membre de l'Institut,
Charles FEHRENBACH, membre de l'Institut,
Roger HEIM, membre de l'Institut,
Monsieur l'amiral André JUBELIN,
Messieurs les professeurs :
Pierre LÉPINE, membre de l'Institut,
Louis LEPRINCE-RINGUET, de l'Académie française,
Jean-François LEROY, professeur au Muséum national d'histoire naturelle,
Henri NORMANT, membre de l'Institut,
Monsieur Jacques PICCARD, docteur ès sciences h.c.

Réalisation	IDÉES ET ÉDITIONS 16, avenue de Friedland, 75008 Paris
Comité de direction	Cristobal de ACEVEDO, Simone DEVAUX, Uberto TOSCO.
Rédacteurs en chef	Michelle TALANDIER, pour la partie des Sciences naturelles, géologiques et biologiques Patrick PHLIPONEAU, pour la partie des Sciences techniques.
Assistante	Françoise MENU.
Recherche de l'illustration	Mathilde RIEUSSEC.
Mise en pages	Tito TOPIN et Serge BROCHE.
Illustrations techniques	Richard COLIN.
Coordinateur des dessins	Mario LOGLI.
Fabrication	Émile REGNAULT - Martine TOTIN.
Directeur de la publication	J.P. BRÉVOST.

ont collaboré aux volumes
consacrés aux Végétaux

J.P. LARPENT, pour les Bactéries.
P. BOURRELLY, pour les Cyanophycées et les Algues.
F. ARDRÉ, pour les Rhodophytes et les Phéophycées.
J. NICOT, pour les Champignons.
M.A. LETROUIT, pour les Lichens.
S. JOVET, pour les Bryophytes.
M.L. TARDIEU-BLOT, pour les Ptéridophytes.
C. LEMOINE-SEBASTIAN, pour les Gymnospermes.
M. GUÉDÈS, pour les Angiospermes.

Pavlovsky-Rapho

LES ANGIOSPERMES

Les Angiospermes (des mots grecs ἀγγεῖον, vase, et σπέρμα, graine) sont les plantes à fleurs et à graines (Phanérogames) qui, par opposition aux Gymnospermes, à ovules nus, possèdent des ovules contenus dans un *ovaire* bien différencié.

Les Angiospermes constituent la plus importante division des Spermaphytes, et représentent en même temps le point culminant d'une des lignées des Végétaux. Elles regroupent par ailleurs la majeure partie des plantes (plus de deux cent cinquante mille espèces).

Dans l'ovaire qui les distingue, on peut trouver un ou plusieurs *ovules,* dont le nombre, au-delà d'une certaine limite, est très variable, même chez une espèce donnée, ainsi chez les orchidées, les pétunias, les pavots ou le pourpier. Il s'agit alors généralement d'ovules très petits, qui donnent des graines également de taille réduite.

L'ovaire est surmonté par le *style,* qui peut être plus ou moins développé, parfois presque inexistant ; ce dernier porte au sommet le *stigmate,* organe servant à recevoir les grains de pollen et à en permettre la germination.

L'ovaire, le style et le stigmate constituent le *pistil,* qui, en tant qu'organe femelle de la fleur, est appelé *gynécée*. Le pistil est simple ou composé ; il est en effet formé d'une ou de plusieurs *feuilles carpellaires*. Ce sont les plus centrales de la fleur, et chacune forme un *carpelle,* qui peut être constitué de différentes façons, selon sa forme, sa grandeur, et son type de reploiement ou d'enroulement.

Structure de la fleur

La fleur des Angiospermes, qu'elle soit bien visible ou à peine perceptible, présente généralement une *corolle,* formée d'un ou de plusieurs *pétales* libres, c'est-à-dire séparés jusqu'à la base (corolle *dialypétale,* comme chez les roses, les renoncules, les magnolias), ou soudés, c'est-à-dire fusionnés plus ou moins complètement par leurs marges à partir de leur base (corolle *sympétale* ou *gamopétale* des Convolvulacées, par exemple).

La corolle forme le plus souvent un seul verticille, mais il peut y avoir des pétales nombreux disposés en une spirale ou en deux ou trois verticilles.

▲ ***Les Angiospermes constituent, dans le règne végétal, le groupe le plus important, notamment par le nombre, car elles comptent quelque deux cent cinquante mille espèces.***

Bavestrelli-Bevilacqua-Prato

◀ ***Une anthère mûre libérant le pollen.***

I.G.D.A.-Archives P2

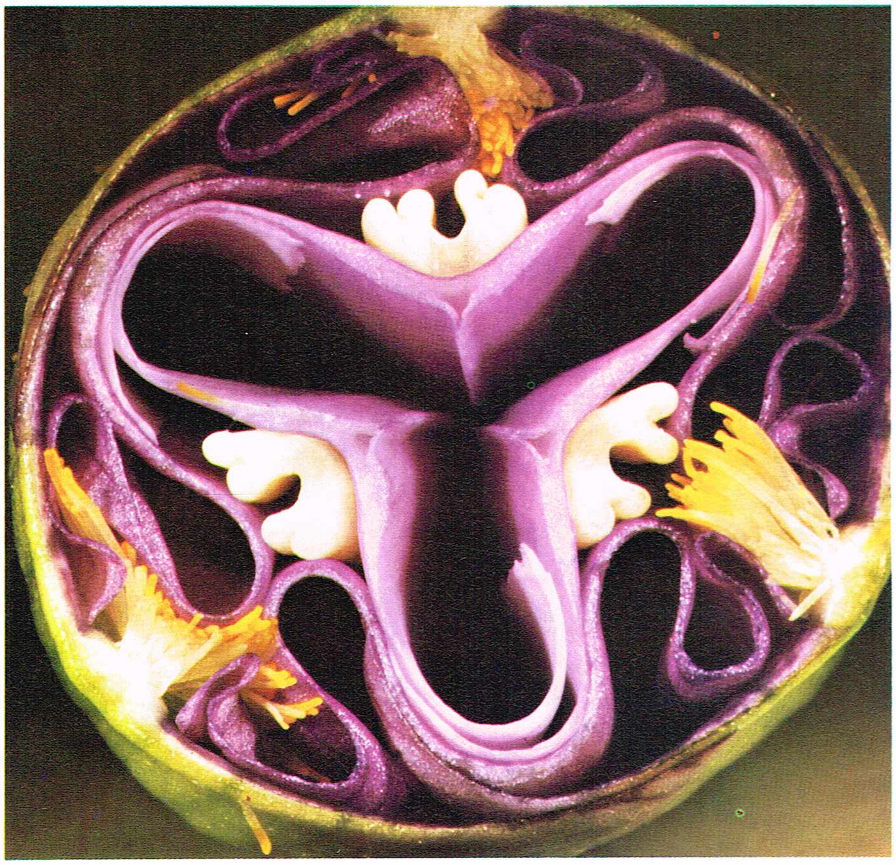

▲ ***Section transversale d'une fleur d'*****Iris germanica.**

▶ ***Coupe longitudinale d'une fleur d'Angiosperme. pe : pédoncule floral; re : réceptacle; se : sépale; pt : pétale; et : étamine; an : anthère; ov : ovaire; pi : pistil; sl : style; st : stigmate.***

▼ ***Hétérostylie chez une primevère; à gauche : fleur brévistylée; à droite : fleur longistylée.***

Les fleurs complètes des Angiospermes possèdent encore extérieurement un *calice* dont les éléments ou *sépales* alternent avec ceux de la corolle et avec eux constituent le périanthe. Les sépales peuvent être libres (calice *dialysépale*) ou soudés (calice *gamosépale*). Les premiers forment parfois un verticille, mais sont le plus souvent disposés le long d'une spirale surbaissée. Le calice comme la corolle peuvent être absents; dans ce cas, les fleurs sont dites nues ou *achlamydées*. Elles sont *haplochlamydées* quand manque seulement un verticille (fleurs à *périanthe simple*), et *diplochlamydées* quand les deux sont présents (fleurs à *périanthe double*).

Dans de nombreux cas, comme chez la plupart des Monocotylédones (tulipe, lis), les pétales et les sépales peuvent être semblables les uns aux autres, sinon exactement identiques *(sépales pétaloïdes* et *pétales sépaloïdes) :* on parle alors souvent de *périgone,* non plus de périanthe, et ses pièces sont les *tépales.*

Outre le calice et la corolle qui peuvent être *réguliers* (à symétrie rayonnante, la fleur est *actinomorphe*) ou *irréguliers* (à symétrie bilatérale, elle est *zygomorphe*), les fleurs possèdent un troisième ensemble d'éléments, plus intérieur : les étamines, qui constituent l'*androcée,* c'est-à-dire les organes sexuels mâles de la fleur, eux aussi à symétrie rayonnante ou bilatérale.

Chaque étamine consiste habituellement en un filet, plus ou moins long, qui porte une *anthère,* dans laquelle ont lieu la formation et la maturation du *pollen,* lequel est ensuite libéré.

L'androcée est composé de plusieurs étamines, rarement d'une seule. Celles-ci sont souvent en nombre égal ou double de celui des sépales et pétales. Dans le premier cas, elles peuvent être opposées aux pétales ou alterner avec eux; dans le second, elles forment deux verticilles dont l'un alterne avec les pétales, l'autre, plus interne, leur étant opposé. L'inverse se rencontre pourtant : il y a alors obdiplostémonie. Les étamines peuvent aussi être très nombreuses et disposées suivant une spirale (renoncules), ou bien se diviser intensément en faisceaux staminaux (millepertuis), ce qui, contrairement à l'organisation précédente, probablement primitive, serait plutôt un signe de complication évolutive.

Une fleur complète est donc composée de cinq verticilles de *feuilles florales* ou *anthophylles :* ceux du calice (sépales) et de la corolle (pétales), les deux verticilles de

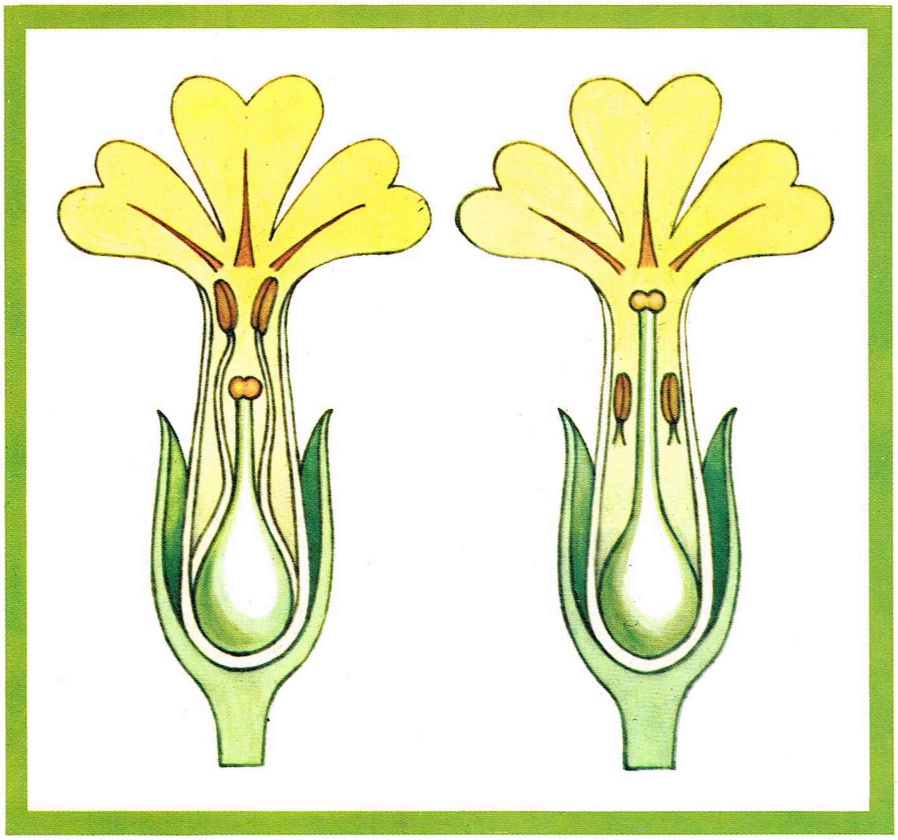

I.G.D.A.

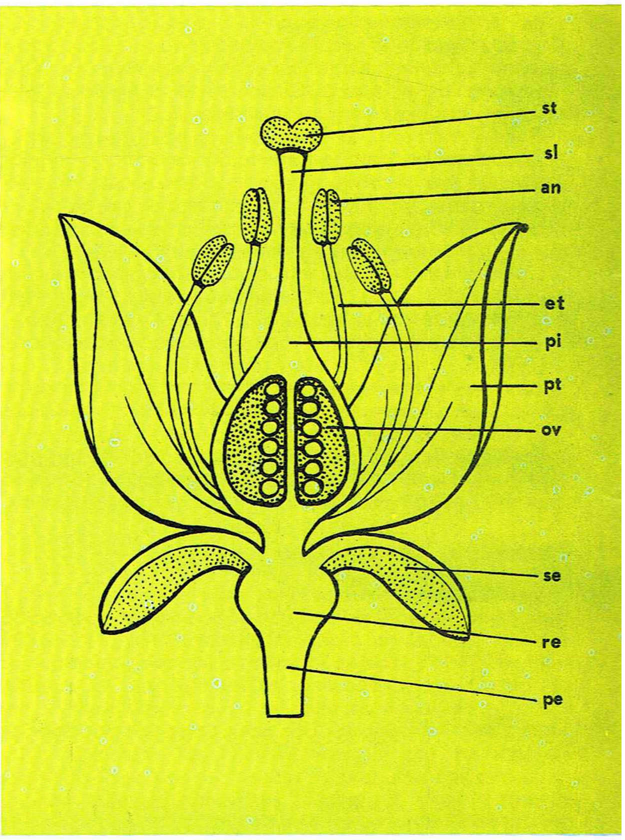

I.G.D.A.

I.G.D.A.

◀ ***Diagrammes d'une fleur régulière (à gauche), et d'une fleur zygomorphe (à droite).***

l'androcée (étamines), et celui du gynécée (carpelles) ; ces verticilles sont insérés sur un *réceptacle* ou *thalamus,* plus ou moins élargi, qui est le prolongement du *pédoncule floral.*

Le *gynécée,* du point de vue anatomique, correspond à un ensemble de carpelles homologues de feuilles repliées de manière à constituer des sortes de gouttières, c'est-à-dire ménageant chacune une concavité dont les bords se sont plus ou moins intimement soudés *(suture),* et qui peuvent souvent se fendre et s'ouvrir quand les graines contenues sont mûres, afin d'en permettre la dissémination *(déhiscence)* comme cela a lieu pour les follicules et les légumes ou gousses.

Bien des fleurs présentent d'autres particularités, tel, chez les Malvacées, chez quelques Rosacées ou chez les œillets, le *calicule,* constitué par de petites feuilles situées immédiatement sous le calice (œillet) ou par des stipules des sépales (Rosacées). Le calicule a, comme le calice, une fonction protectrice.

Dans d'autres cas, les fleurs, petites et rassemblées en *capitules,* c'est-à-dire en inflorescences tout à fait particulières et simulant une fleur, présentent une enveloppe commune, qui est constituée par une ou plusieurs séries de bractées vertes ou colorées, herbacées ou scarieuses, qui entourent inférieurement la totalité du thalamus de l'inflorescence. C'est le cas des Composées ou Astéracées.

Structure du pistil

Les bords de la feuille carpellaire forment un tissu appelé *placenta ;* sur celui-ci s'insèrent les ovules, soutenus chacun par un *funicule,* qui les relie à des faisceaux libéro-ligneux longitudinaux et marginaux.

Un *tissu conducteur,* d'origine superficielle, et présent dans le style et l'ovaire, guide le tube pollinique et le nourrit pendant sa progression du stigmate à l'ovule, après qu'il a commencé à germer sur le *tissu récepteur* du stigmate.

La partie dorsale des feuilles carpellaires est parcourue dans le sens de la longueur par un faisceau vasculaire qui présente, comme dans les feuilles ou mieux dans leur nervure principale, le liber vers l'extérieur et le bois vers l'intérieur ; dans les deux faisceaux irriguant les ovules, le bois est externe et le liber interne, ce qui conduit à penser que les carpelles correspondent à des feuilles repliées et à bords rapprochés.

Le style présente habituellement une structure dont la symétrie est semblable à celle de l'ovaire ; il est le plus souvent dépourvu de cavité mais présente en son centre un tissu conducteur. Dans le stigmate, ce tissu conducteur s'étale à la surface, qui est constituée de cellules non plus isodiamétriques comme celles du style, mais allongées, en forme de papilles, qui sécrètent une substance visqueuse et sucrée. C'est grâce à cette dernière que les grains de pollen sont retenus, comme englués, sur le stigmate, et qu'ils sont aussi amenés à germer.

Le grain de pollen, en se développant, se transforme en un *tube pollinique,* qui s'accroît en longueur et s'engage dans le style puis l'ovaire jusqu'à l'ovule.

Les carpelles, quand ils sont nombreux, sont soit rapprochés, et semblent réunis, soit vraiment concrescents, de manière à former un corps unique. Il n'est pas rare qu'ils ne soient soudés qu'à la base ou que tout au moins les stigmates soient libres. Dans d'autres cas, le pistil est composé d'un certain nombre de carpelles libres, insérés sur le réceptacle et formant un verticille, ou bien constituant une spirale, comme chez de nombreuses Renonculacées. Lorsque les carpelles fusionnent en un tout unique, on parle de *gynécée gamocarpellé* ou *syncarpe,* et chacune des cavités carpellaires où sont contenus les ovules est appelée *loge ;* il peut y avoir des ovaires à deux, trois, quatre, cinq ou à nombreuses loges (biloculaires, triloculaires, tétraloculaires, pentaloculaires, multiloculaires). Tous ces ovaires sont pluriloculaires. Mais plusieurs carpelles peuvent s'unir en gardant leurs sutures ouvertes : le gynécée est gamocarpellé mais il est uniloculaire. Enfin, l'ovaire peut être directement surmonté par le stigmate, sans présence d'un style, comme chez le pavot dont le stigmate est sessile et rayonnant.

La disposition des ovules à l'intérieur de l'ovaire *(placentation)* est variable ; il en existe trois types essentiels.

La placentation est *axile* quand les carpelles sont repliés et fermés, puis soudés entre eux de manière que les placentas et les ovules se trouvent au centre de l'ovaire, les seconds occupant les loges ménagées par les carpelles. Les carpelles sont unis les uns aux autres suivant les surfaces des parois des loges.

La placentation est *centrale* lorsque les placentas sont réunis au centre de l'ovaire en une colonne axiale, sans liaison avec les parois du pistil, sauf tout à fait à la base, comme on peut l'observer chez les primevères. Il est évident que ce type d'ovaire a beaucoup d'affinités avec celui dont la placentation est axile, mais les cloisons y sont disparues dans leur plus grande partie.

Enfin, le troisième type est celui de l'ovaire à placentation *pariétale,* où les carpelles demeurés ouverts sont réunis par leurs bords seulement. Ceux-ci forment une unique cavité et les ovules sont donc portés par des placentas qui se trouvent sur les parois de l'ovaire.

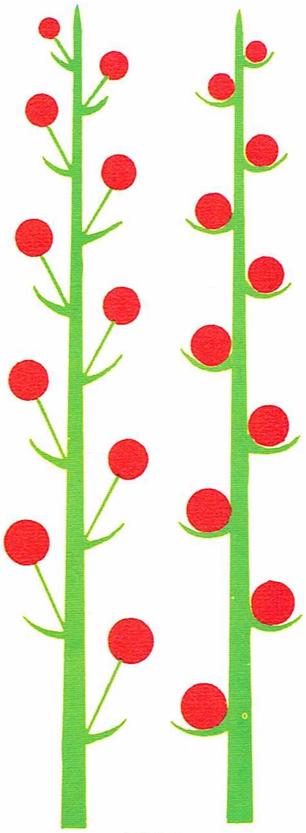

I.G.D.A.

▲ ***Deux types d'inflorescences : racème simple ou grappe (à gauche), épi (à droite).***

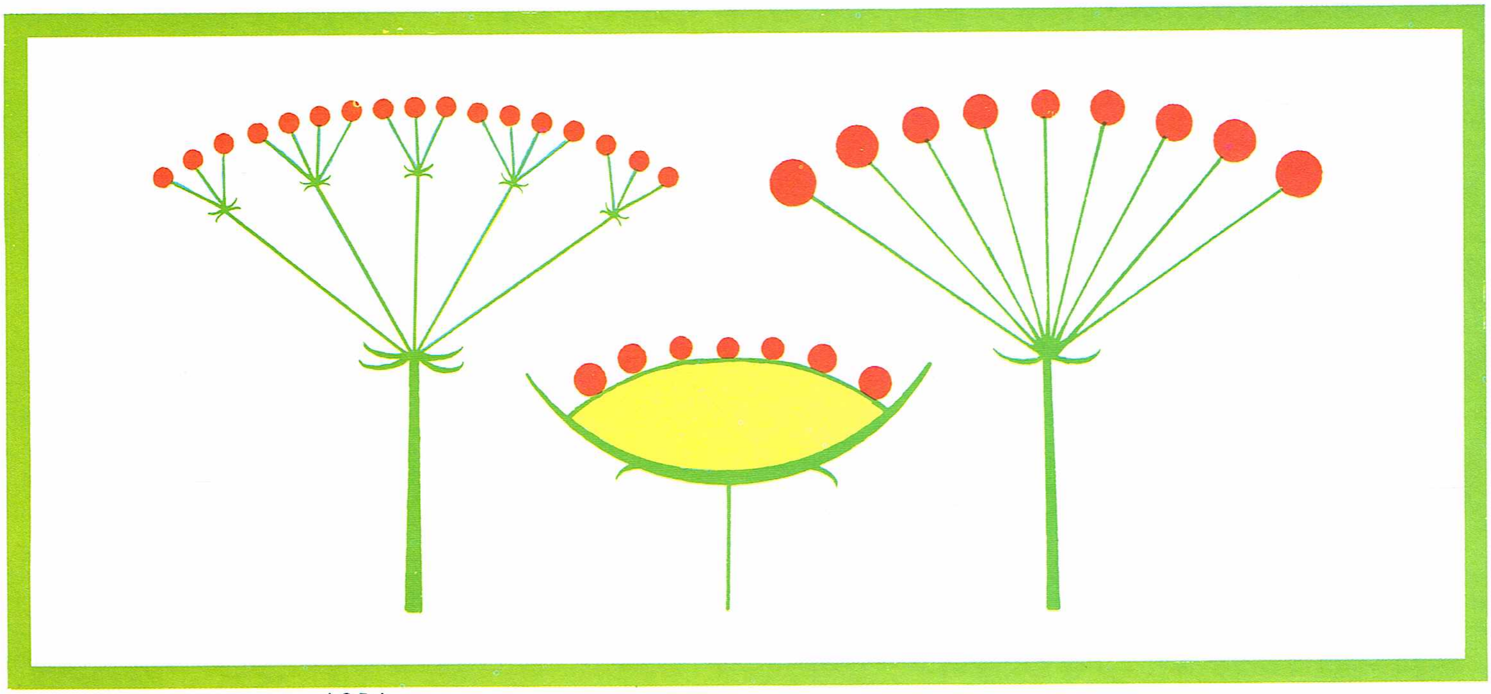

I.G.D.A.

▲ *Les ombelles simples et composées (respectivement à droite et à gauche) et les capitules (au centre) sont des inflorescences de type centripète.*

Cette placentation est typique chez l'ordre des Pariétales, ces plantes tirant leur nom de cette disposition; c'est le cas du pistil des violettes, des cistes et des passiflores. La plupart du temps, la partie supérieure des gynécées à placentation axile est à placentation pariétale, et la partie inférieure des gynécées à placentation pariétale est à placentation axile. Mais ces zones complémentaires sont plus ou moins favorisées suivant le type de gynécée. On comprend qu'on puisse définir ainsi un type général de gynécée syncarpe.

Il n'est pas rare qu'on trouve dans certains ovaires particuliers des fausses cloisons, c'est-à-dire des cloisons non pas formées par la paroi carpellaire normale, mais dérivant de protubérances surnuméraires de celle-ci. Chaque carpelle peut alors être divisé en deux cavités, comme chez les astragales. Chez les Crucifères ou Brassicacées, une fausse cloison divise en deux loges un ovaire fondamentalement uniloculaire. D'après Guédès, elle résulte de l'union de quatre protubérances carpellaires.

Variations de la structure florale

La structure en verticilles est la règle chez les Angiospermes, mais tous les étages de la fleur peuvent exister à l'état de spirale.

Il peut y avoir des fleurs dépourvues d'androcée, c'est-à-dire seulement femelles ou *pistillifères,* et d'autres sans gynécée, donc seulement mâles ou *staminifères;* celles qui possèdent les deux sexes sont naturellement hermaphrodites.

Il convient aussi d'indiquer qu'il existe des *fleurs stériles :* elles sont privées d'étamines et de pistil, et ont fréquemment une corolle de belle apparence. Cela a lieu généralement dans de grandes inflorescences, où, aux fleurs fertiles, centrales, peu apparentes, sont associées des fleurs stériles, dont les corolles ont un rôle attracteur vis-à-vis des Insectes pollinisateurs, comme chez certaines Saxifragacées, Ombellifères ou Composées.

En tout état de cause, les verticilles formés par les feuilles florales peuvent être libres — indépendants les uns des autres — ou adhérents les uns aux autres de différentes façons, totalement ou partiellement. Il y a ainsi des étamines insérées sur le réceptacle ou bien, en apparence, sur les pétales.

La position prise par le calice, la corolle et les étamines par rapport au pistil est également variable.

On distingue en effet des fleurs *hypogynes* (supérovariées), *périgynes* et *épigynes* (inférovariées).

Dans le premier cas, le calice, la corolle et les étamines sont libres et s'insèrent sur le réceptacle autour de la base de l'ovaire, lequel sera donc *supère.* Dans la fleur périgyne, les deux verticilles du périanthe (calice et corolle) peuvent être plus ou moins soudés, et souvent aussi les étamines sont unies inférieurement à la corolle en laissant au moins, cependant, les anthères libres; dans ce type de structure, le pistil apparaît libre au fond d'une coupe formée par les trois autres verticilles floraux soudés, du moins dans l'interprétation qui en est le plus souvent donnée. La fleur épigyne est encore différente, l'ovaire étant concrescent avec les autres verticilles floraux, qui, souvent, adhèrent totalement aux parois du pistil, seul restant libre le style et parfois même seulement le stigmate *(ovaire infère).*

Dans des cas particuliers, comme chez les orchidées ou les Aristolochiacées, les verticilles floraux sont soudés de manière plus profonde encore : l'ovaire est infère et soudé aux filets staminaux, et le stigmate est uni aux anthères pour former le *gynostème.*

Les inflorescences

Les inflorescences, c'est-à-dire les groupements de fleurs séparés de la portion végétative de la plante, ont été classées en différents types assez bien définis, qui se répètent avec constance dans chaque espèce ou groupe d'espèces; mais on soulignera qu'ils ne sont qu'une répétition des types de ramification de la tige, dont l'inflorescence n'est que l'état sexualisé.

Généralement, les fleurs qui constituent les inflorescences sont situées à l'aisselle de *bractées,* appelées quelquefois *hypsophylles,* plus ou moins évidentes, parfois foliacées et très amples, parfois scarieuses et presque nulles, ou encore totalement avortées.

Les inflorescences, suivant que leur axe croît indéfiniment et forme des fleurs ou groupes de fleurs latéralement, ou bien se termine par une fleur après en avoir formé d'autres en dessous, également latéralement, sont dites *indéfinies* et *définies.*

Une autre distinction possible concerne l'ordre de succession dans l'ouverture des fleurs; sont donc dites *acropètes* ou *centripètes* celles chez qui les fleurs les plus inférieures ou les plus périphériques sont les premières à s'épanouir; on nomme par contre *basipètes* ou *centrifuges* celles qui, au contraire, commencent à fleurir à partir de la cime de l'axe ou du centre de l'inflorescence.

Parmi les inflorescences les plus communes, nous citerons :

1° L'*épi,* à axe allongé, indéfini, portant de nombreuses fleurs sessiles, souvent rapprochées, comme chez le plantain.

2° Le *spadice,* qui consiste en un épi de fleurs mâles et femelles en deux segments distincts superposés, prolongés par une portion distale stérile. L'ensemble est

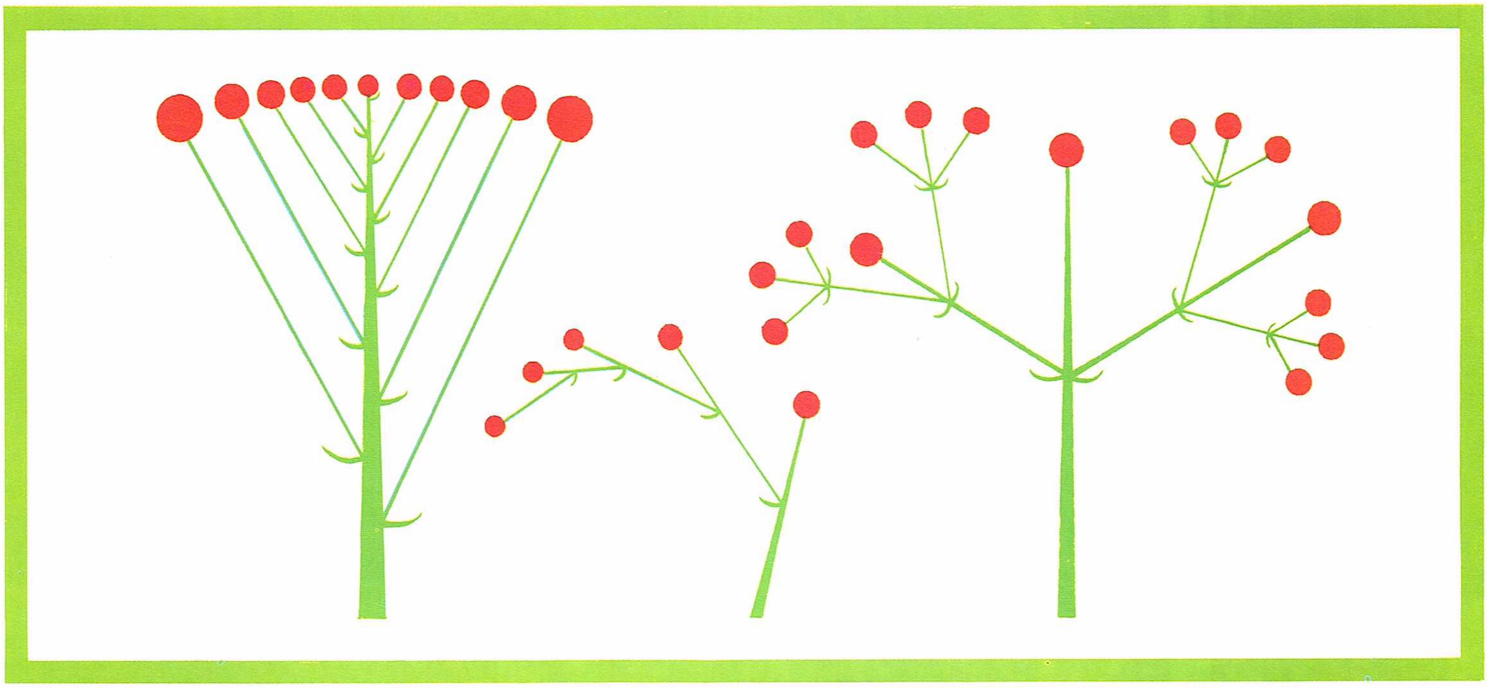

I.G.D.A.

accompagné par une bractée *(spathe)* inférieure portée par le même axe commun et enveloppant d'abord les fleurs. C'est le cas des arums.

3° Le *chaton,* simple épi dense souvent unisexué (noisetier, noyer, châtaignier, saule).

4° Le *capitule,* qui consiste habituellement en un réceptacle plan ou convexe, sur lequel sont insérées, en nombre plus ou moins grand, de petites fleurs en tube ou en forme de languettes, soit que l'on trouve seulement les unes ou les autres, soit que les premières forment un *disque* central et les secondes des *rayons.* Un involucre de bractées à allure de calice entoure l'ensemble. C'est un épi encore plus condensé et à axe évasé (matricaire, tournesol, chardons).

5° L'*ombelle,* dont les fleurs ont de longs pédoncules qui prennent leur origine très près les uns des autres et du sommet de l'axe. L'ensemble forme une inflorescence convexe ou à peu près plane, et discoïdale (carotte, céleri). L'ombelle peut être *simple,* quand les pédoncules se terminent chacun par une fleur, ou être *composée* (il

▲ *Corymbe simple (à gauche), cyme unipare scorpioïde (au centre), cyme bipare (à droite).*

▼ *Corymbe composé (à gauche), panicule (à droite).*

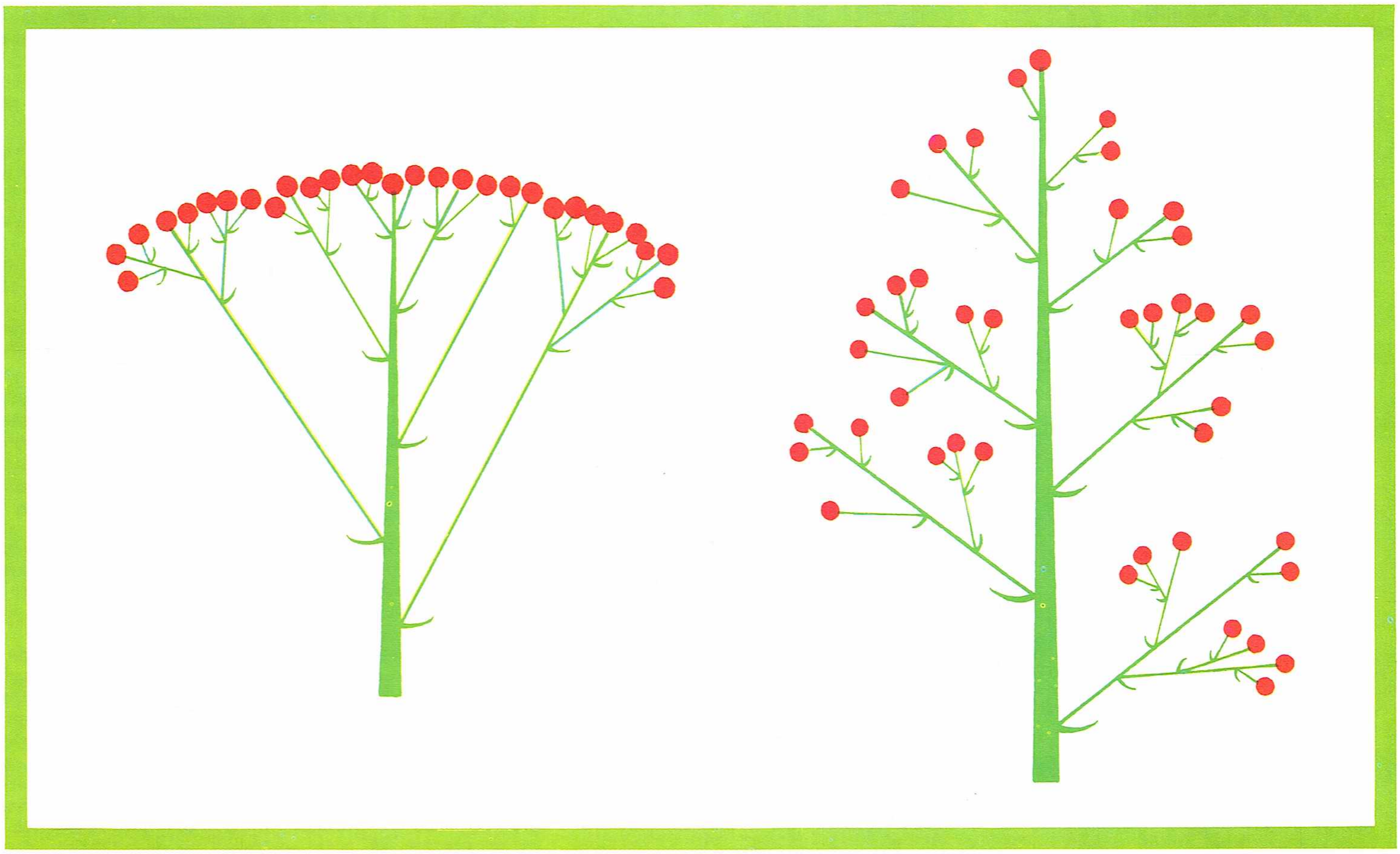

I.G.D.A.

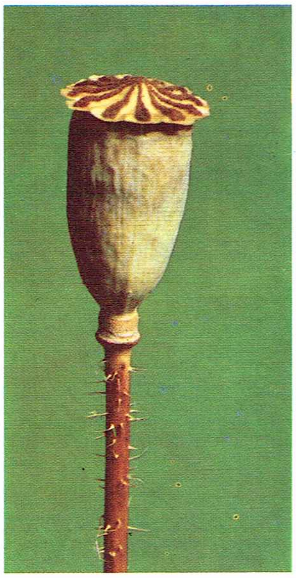

Bavestrelli-Bevilacqua-Prato

Bavestrelli-Bevilacqua-Prato

Bavestrelli-Bevilacqua-Prato

▲ ***De gauche à droite : capsule poricide du pavot, gland du chêne à cupule écailleuse lignifiée, et châtaignes entourées d'une bogue à longues épines. Ces deux derniers types de fruits peuvent être rattachés aux akènes.***

▼ ***A - Schéma d'une fleur théorique primitive montrant l'insertion des divers éléments le long d'un axe qui deviendra le réceptacle. B - Coupe d'une fleur de Dicotylédone dialypétale. re : réceptacle; se : sépale; pt : pétale; et : étamine; an : anthère; ca : carpelle; sl : style; st : stigmate; ci : cicatrices laissées par un sépale, deux pétales et une étamine. (D'après Gibbs et Cappelletti.)***

s'agit alors d'une *ombelle d'ombellules*) si chaque pédoncule se ramifie en plusieurs autres, pour former des ombelles plus petites *(ombellules)*. L'ombelle est indéfinie (le pédoncule le plus central n'est pas exactement axial), ou définie (il existe alors un pédoncule en position exactement centrale, qui prolonge celui de l'ombelle elle-même).

6° La *grappe* ou *racème simple,* qui provient d'un axe principal le long duquel, à la différence de l'ombelle, les pédoncules s'insèrent à hauteur variable, bien qu'étant tous à peu près de la même longueur, comme chez le muscari. C'est un épi à fleurs pédonculées. La grappe est quelquefois définie : son axe s'épuise en formant une fleur.

7° Le *corymbe,* comparable à la grappe, mais avec des pédoncules de différentes longueurs, et de plus en plus longs au fur et à mesure qu'on s'éloigne du sommet. De la sorte, les fleurs sont toutes disposées à la même hauteur, comme dans l'ombelle, malgré leurs niveaux d'insertion différents (poirier).

8° Les inflorescences en *cymes* sont très fréquentes : elles sont définies et centrifuges; chez elles, l'axe principal se termine en formant une fleur et se ramifie en dessous une ou deux fois. Ces formations montrent diverses variantes; chez le *monochasium* ou *cyme unipare,* l'axe principal porte un rameau, qui peut à son tour se ramifier, et ainsi de suite, chaque rameau se terminant par une fleur. Deux types particuliers se rencontrent dans ce cas, la *cyme unipare hélicoïde,* qui présente des rameaux souvent très brefs et alternant des deux côtés, et la *cyme unipare scorpioïde,* avec des rameaux toujours tournés du même côté (myosotis). Chez le *dichasium* ou *cyme bipare,* l'axe principal terminé par une fleur possède au-dessous deux rameaux latéraux qui peuvent se ramifier de la même manière (gypsophiles).

9° Les inflorescences *thyrsoïdes* sont : la *cyme ombelliforme* ou *pléiochasium,* qui dérive du dichasium, mais où l'axe principal défini présente au moins trois rameaux verticillés sous sa fleur, ramifiés à leur tour (euphorbes) ; le *thyrse* ou panicule, qui possède un axe défini ou indéfini le long duquel s'insèrent de nombreux rameaux, ramifiés eux aussi en cymes, de sorte que l'extrémité des rameaux latéraux n'atteigne pas le niveau du sommet, et qu'il se constitue une inflorescence conique (dressée comme chez le lilas ou pendante comme chez la vigne) qui est une grappe d'inflorescences cymeuses; le *corymbe-thyrse,* dont le schéma est à peu près celui du thyrse, les rameaux, à leur tour ramifiés, portant leurs fleurs au même niveau; l'*anthèle,* semblable au thyrse, mais avec des rameaux latéraux qui dépassent le sommet de l'axe principal, comme chez beaucoup de joncs.

10° La *grappe d'épis* ou l'épi composé (épi d'épis), comme chez le blé, où il y a un épi d'*épillets,* qui sont eux-mêmes non des fleurs simples, mais de petits épis de fleurs.

11° Le *cyathium,* qui est typique des euphorbes; sous l'apparence d'une seule fleur, il groupe dans un involucre de cinq bractées une fleur femelle centrale et terminale et plusieurs fleurs mâles en cinq cymes unipares hélicoïdes latérales, chacune des fleurs mâles ayant une seule étamine. Les cyathiums sont eux-mêmes groupés en pléiochasiums.

12° Le *sycone* est caractéristique du figuier. Les fleurs, de petite taille, sont contenues en grand nombre dans un réceptacle creux qui constitue après la fécondation un pseudo-fruit.

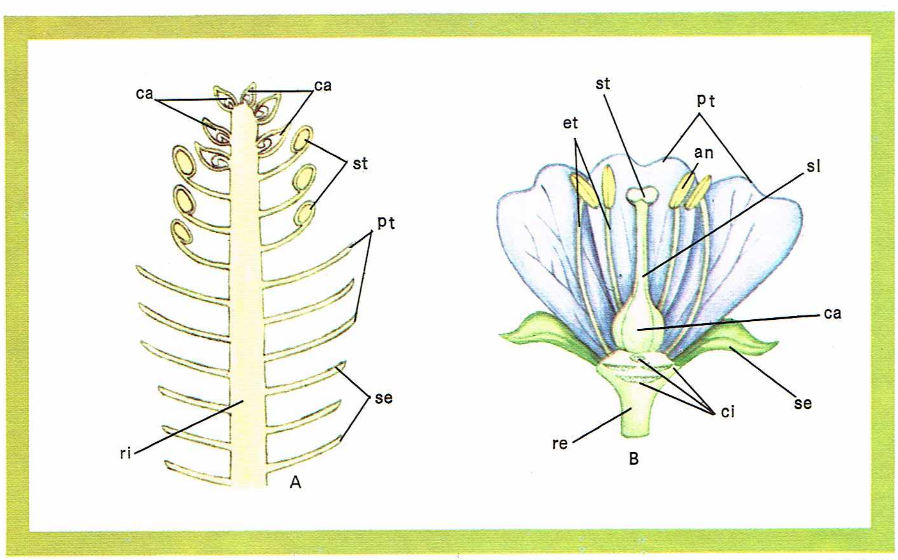

I.G.D.A.

Structure du fruit

Le fruit dérive de l'accroissement, par suite de la fécondation des ovules, des tissus des carpelles, mais d'autres parties de la fleur concourent parfois à sa formation, en particulier le calice *(calice accrescent)* et le réceptacle.

Nous rappellerons toutefois que le fruit, sous sa forme la plus typique, c'est-à-dire le *péricarpe,* est constitué seulement par les parois de l'ovaire et contient des *graines* plus ou moins nombreuses; celles-ci peuvent même manquer *(fruits apyrènes)* sans que l'aspect s'en trouve modifié : cela a lieu chez les fruits de plantes cultivées (certaines oranges, quelques kakis, raisins de Corinthe) qui ont perdu leur principal rôle, qui est de protéger les graines. Dans ces fruits apyrènes, il se produit généralement, comme chez les autres, une fécondation des

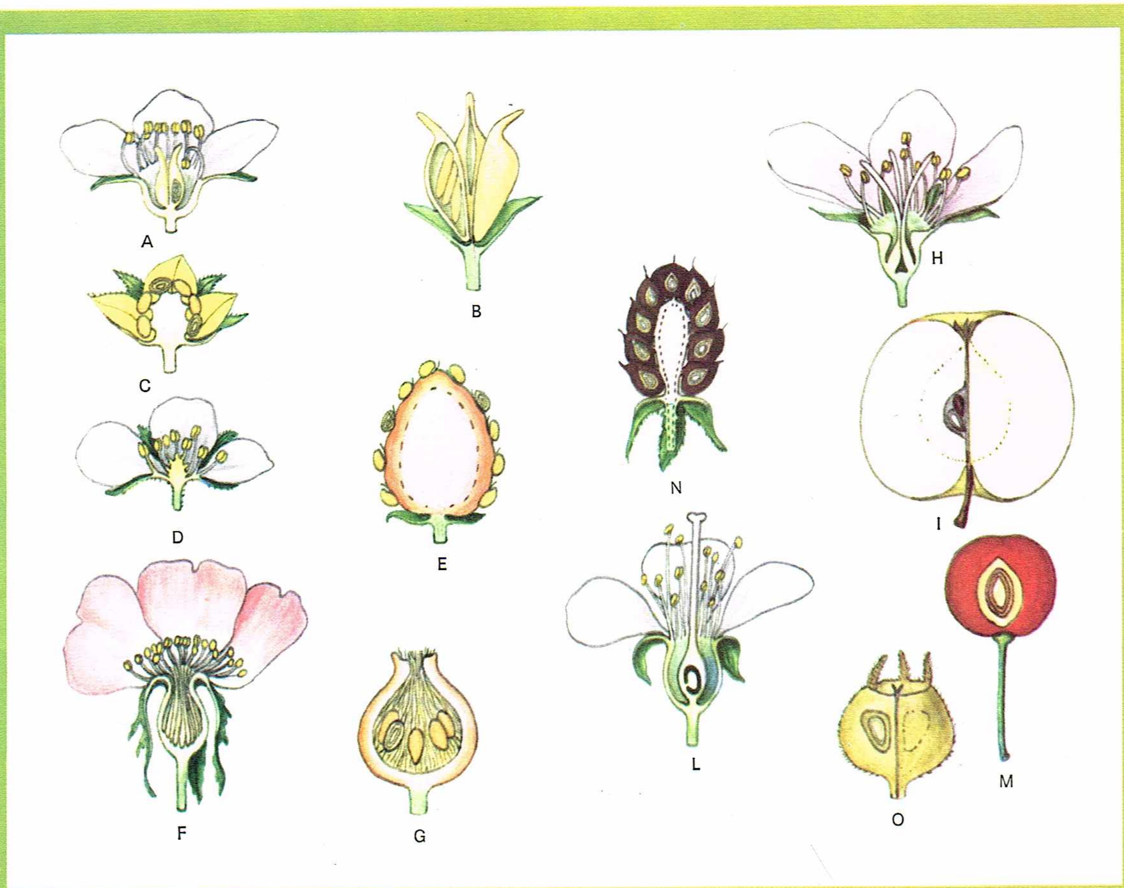

I.G.D.A.

◀ *Coupes longitudinales de fleurs, fruits et pseudo-fruits de diverses Rosacées. A et B : fleur et fruit de* **Spiraea sp.**; *C : fleur de* **Potentilla sp.**; *D et E : fleur et faux-fruit de* **Fragaria vesca**; *F et G : fleur et cynorrhodon de* **Rosa canina**; *H et I : fleur et fruit de* **Pyrus malus**; *L et M : fleur et drupe de* **Prunus avium**; *N : infrutescence de* **Rubus fruticosus**; *O : fruit de* **Mespilus germanica**. *(D'après Baillon, Firbas et Cappelletti.)*

ovules, avec segmentation de l'oosphère, mais il y a ensuite dégénérescence de l'embryon.

La paroi du fruit, sous sa forme la plus complète, est constituée par trois couches souvent bien distinctes l'une de l'autre, et qui sont, à partir de l'extérieur : l'*épicarpe,* parfois très fin; le *mésocarpe,* qui peut être fort épais et charnu; l'*endocarpe,* le plus interne, assez souvent lignifié, qui entoure la graine.

Ces trois couches peuvent varier beaucoup en épaisseur et en structure, et leur séparation est peu évidente chez certains fruits; quelques-unes de ces parties peuvent devenir particulièrement complexes, comme chez les *hespérides,* qui sont les fruits des agrumes. Leur individualité est encore plus problématique quand, lors du développement du fruit, il y a accroissement ou concrescence d'autres composants de la fleur.

On peut classer les fruits selon différents points de vue, le nombre des graines qu'ils contiennent, leur forme, etc., mais on les divise essentiellement en deux grands groupes, les *fruits secs* et les *fruits charnus.*

Tous les fruits secs ne sont pas secs au sens strict, comme le sont les noisettes mûres. On applique en effet cette dénomination à tous ceux qui, ayant atteint leur maturité, présentent un péricarpe coriace, membraneux ou lignifié, et qui ne contiennent de l'eau qu'en faible proportion.

Sont par contre des fruits charnus ceux dont une grande partie du corps ou certaines couches sont particulièrement riches en eau, c'est-à-dire ceux qui sont pulpeux ou juteux, et constituent souvent des tissus épais et succulents.

Étant donné que les fruits contiennent des graines et que ces dernières doivent être disséminées pour pouvoir germer, afin que la plante qui les a produites puisse se perpétuer et se propager, les fruits, soit spontanément, soit sous l'effet de différents agents, doivent libérer leur contenu.

Ceux qui s'ouvrent spontanément pour laisser sortir les graines sont dits déhiscents, et il s'agit dans la plupart des cas de fruits secs; ces derniers restent en place sur la plante mère et leurs graines sont dispersées. Les autres sont indéhiscents, et, pour que la libération et la germination des graines puissent avoir lieu, ils doivent subir diverses attaques physiques ou chimiques. Dans ce cas, ce sont les fruits eux-mêmes qui sont disséminés.

Les graines de ces fruits peuvent survivre à l'état de vie latente, beaucoup plus longtemps que celles des fruits déhiscents.

Nous parlerons brièvement des *fruits secs déhiscents* les plus répandus, en commençant par le type le plus polymorphe : la *capsule.* Il s'agit d'un fruit formé par le développement de plusieurs carpelles soudés. La capsule peut être *loculicide,* quand la déhiscence se fait par des fentes longitudinales et dorsales, à raison d'une par loge comme chez les violettes et les lis; une capsule est par contre *septicide* lorsque les ouvertures de déhiscence correspondent aux lignes d'union des carpelles.

Certaines capsules sont *poricides.* Leurs graines sortent par des pores situés juste sous la base du stigmate (cas du pavot) ou latéralement sur la paroi ovarienne et protégés chacun par un opercule (campanules) ou par des orifices latéraux ou apicaux (gueule-de-loup).

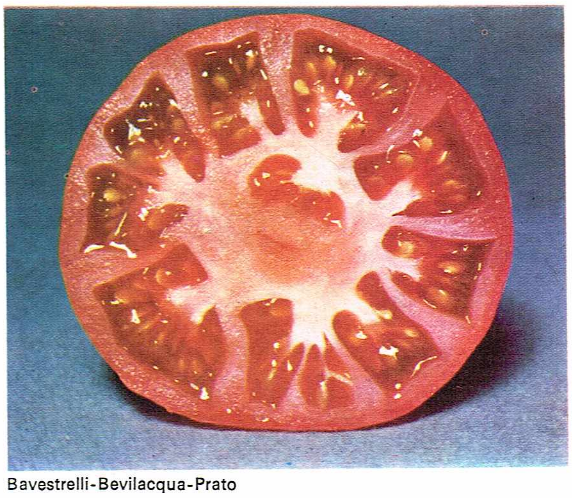

Bavestrelli-Bevilacqua-Prato

◀ *Coupe transversale d'une baie de tomate, montrant notamment les nombreuses loges carpellaires pluriséminées.*

Bavestrelli-Bevilacqua-Prato

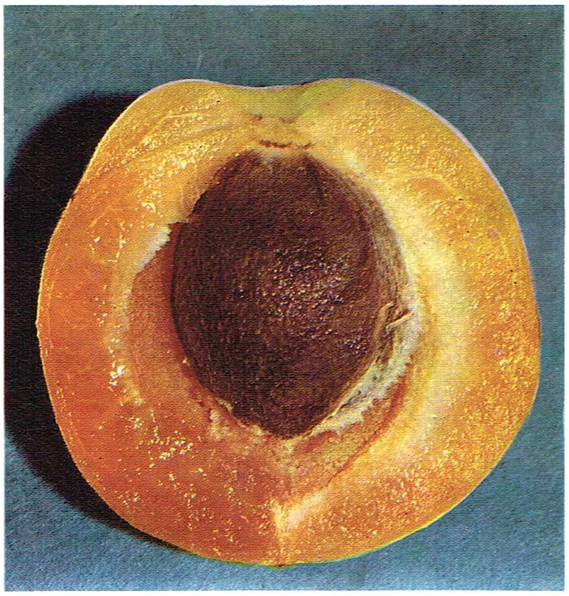

Bavestrelli-Bevilacqua-Prato

▶ *A gauche : coupe longitudinale d'une drupe d'abricotier. A droite : cynorrhodon de* Rosa nipponensis.

Bavestrelli-Bevilacqua-Prato

Infrutescence de platane ▲ *et de framboisier.* ▼

I.G.D.A.-Archives P2

Il est d'autres cas où la capsule, nommée alors *pyxide,* s'ouvre par une fente circulaire qui sépare un couvercle unique *(opercule)* de la partie basale *(urne)*, rappelant en cela les sporogones des Mousses; c'est le cas du mouron rouge et du pourpier.

Parmi les autres fruits secs déhiscents, nous citerons le *follicule,* le *légume* ou *gousse,* et la *silique.* Le premier est constitué par une seule feuille carpellaire pluriovulée, et s'ouvre à maturité par une ouverture située selon la suture ventrale ou interne, comme chez de nombreuses Renonculacées (aconit, hellébores), chez qui, par ailleurs, il y a plusieurs follicules rapprochés au centre de la fleur. Le légume ou gousse est caractéristique des Légumineuses; il est aussi issu d'un seul carpelle pluriovulé et s'ouvre à maturité selon deux lignes longitudinales : la suture proprement dite, et la nervure médiane (déhiscence suturale et loculicide). La forme des légumes est très variée : elle est tantôt oblongue, comme chez le haricot et la fève, tantôt gonflée et presque globuleuse avec quelques graines (pois chiche), ou encore spiralée et aplatie (luzerne) ; la cavité de la gousse peut être continue ou comporter de légères constrictions entre une graine et la suivante (haricot), ou être constituée d'une série linéaire de loges closes avec une seule graine chacune *(gousses lomentacées).* Dans le dernier cas, la gousse se sépare transversalement en articles au lieu de s'ouvrir. Elle est indéhiscente et chaque article se comporte comme un akène (voir plus loin).

Le fruit des *Magnolia,* à deux graines, s'ouvre dorsalement et ventralement, on peut le rapprocher des légumes.

La *silique* provient, à l'origine, de deux carpelles latéraux soudés entre eux et séparés par une fine fausse cloison. Deux valves, au moment de la déhiscence, se détachent à partir du bas et laissent attaché au pédoncule floral un *replum* dont les deux montants antéro-postérieurs portent les graines et sont reliés par la fausse cloison. La déhiscence est dite *paraplacentaire* puisqu'elle se fait suivant les lignes parallèles aux placentas. La *silicule* est une silique moins allongée, soit presque triangulaire, comme chez la bourse-à-pasteur, soit presque arrondie et aplatie (lunaire), soit encore globuleuse. La silique et la silicule caractérisent les Crucifères et certaines Papavéracées (chélidoines) ; chez ces dernières, il n'y a pas de fausse cloison. On dit que la silique est *lomentacée* quand elle se sépare transversalement en segments. Comme la gousse, elle est alors devenue indéhiscente, ce qui advient aussi à certaines silicules.

Les principaux *fruits secs indéhiscents* sont le *caryopse,* l'*akène,* la *noix* ou *nucule,* et la *samare.*

Le *caryopse* est particulier aux Graminées. Il s'agit d'un fruit à une seule graine dont les minces parois sont totalement et intimement unies à celle-ci, ce qui s'accompagne souvent de la disparition presque totale des téguments de l'ovule durant la maturation.

L'*akène* est un fruit, généralement de petite taille, dont le péricarpe n'adhère pas à la graine; les akènes dérivent chacun d'un carpelle ou de sa plus grande partie et peuvent être uniques, géminés *(diakène)*, par groupes de quatre *(tétrakène)*, ou encore plus nombreux *(polyakène).* Le diakène est caractéristique des Ombellifères (comme par exemple la carotte) et provient d'un ovaire infère constitué par deux carpelles symétriques et soudés. Leurs portions distales qui entourent les deux graines se séparent quand ils sont mûrs en respectant la région centrale continue avec le pédoncule floral, ou carpophore, à laquelle ils restent unis par leur extrémité supérieure, et qui ne tarde pas à se cliver longitudinalement en deux filets à partir du haut. Le tétrakène est propre aux Borraginacées et aux Labiées; c'est un fruit bicarpellé qui, à maturité, se divise en quatre corpuscules ou *nucules* disposés en carré. Chaque nucule correspond à un renflement latéro-dorsal d'un demi-carpelle. Mais dans ces cas où les akènes ne sont que des portions de carpelles, il vaut mieux parler de *méricarpes* et le fruit issu de l'ovaire entier devient un *schizocarpe.* Il arrive d'ailleurs que les méricarpes soient déhiscents. Enfin, le polyakène est fréquent chez les Renonculacées, où le gynécée est fait de nombreux carpelles, qui deviennent autant d'akènes. Il s'agit bien alors d'akènes vrais. En règle générale, on peut préférer au terme d'akènes celui de *méricarpes,* lorsqu'il s'agit de portions d'un fruit *(schizocarpe)* dont une partie reste en place.

On peut aussi considérer comme des akènes : les noisettes, où le fruit proprement dit est entouré par une *cupule* membraneuse, lobée et laciniée; les *glands* des chênes, eux aussi entourés d'une cupule représentée par une production lignifiée concave, garnie extérieurement de nombreuses écailles bractéales, et dérivant du pédoncule; le fruit du châtaignier encore du même type, et dont la cupule, épaisse, coriace et hérissée de longues épines *(bogue),* entoure complètement le fruit. Ces fruits ont été aussi nommés *nucules,* mais le terme s'applique plutôt aux éléments des tétrakènes dont il a déjà été question précédemment.

La *samare* possède un péricarpe pourvu d'une ou deux expansions membraneuses plus ou moins développées, l'entourant comme une fine aile (orme), de forme allongée (frêne) ou étalée latéralement (érables) ; on comprend facilement que ce type de fruit soit facilement transporté par le vent (dissémination *anémochore*).

Les *fruits charnus* sont, comme nous l'avons dit, très généralement indéhiscents; les plus fréquents sont la *baie,* l'*hespéride,* le *péponide* et la *drupe.*

La *baie* possède un péricarpe complètement charnu, et peut contenir une ou plusieurs graines; celles-ci sont parfois très nombreuses, comme chez la tomate.

L'*hespéride* est caractéristique des agrumes et représente une baie pluricarpellaire, où l'épicarpe est assez fin, riche en glandes à essence, et le plus souvent coloré en jaune ou en orangé *(flavedo) ;* le mésocarpe est plus ou moins épais, blanc et spongieux *(albedo) ;* l'endocarpe est septé, et constitue des quartiers dérivant des loculas,

loges de l'ovaire ; ces quartiers sont eux-mêmes pleins d'une substance juteuse répartie dans des utricules qui dérivent de productions piliformes de la surface interne de l'endocarpe. Il y a une ou plusieurs graines par loge. Elles manquent dans les fruits apyrènes (oranges « sans pépins »).

Le *péponide* est une baie issue d'un ovaire infère qui atteint souvent une grande taille, comme chez les courges. Il ne se rencontre que chez les Cucurbitacées. Les carpelles sont au nombre de trois ou cinq, parfois réduits à un seul et soudés de manière à former un fruit à une seule loge. Les parois de ce fruit sont épaisses et consistantes, le mésocarpe et l'épicarpe sont intimement unis, l'endocarpe est pulpeux, et, au fur et à mesure qu'il mûrit, il peut devenir déliquescent, mucilagineux, lacuneux ou spongieux, ou bien il peut former une trame fibreuse ; les graines sont généralement très nombreuses et sont éparses dans la pulpe. La *balauste* du grenadier, quant à elle, présente des cloisons transversales, délimitant deux étages de loges. La pulpe provient dans ce cas des téguments des graines.

La *drupe* est le fruit charnu à noyau (cerise, prune, pêche) ; l'épicarpe y est mince, réduit à une pellicule entourant le mésocarpe, et pigmenté ; le mésocarpe est épais et pulpeux, et l'endocarpe est lignifié et très dur, par suite de la présence de sclérites.

Les fruits de l'amandier, qui est une espèce de prunier, sont aussi des drupes ; le mésocarpe y est épais, membraneux et non comestible. La noix de coco est aussi une grosse drupe, dont le mésocarpe est fibreux. Elle ne contient qu'une graine étroitement unie au péricarpe.

La *noix* dérive d'un gynécée à deux carpelles, mais qui ne possède qu'un seule ovule. Elle présente un endocarpe ligneux et un mésocarpe prompt à se décomposer pour donner le *brou*. C'est donc une drupe.

Parmi les *fruits charnus déhiscents*, on peut citer ceux d'*Ecballium elaterium* ou concombre sauvage (« cornichon à réaction »), oblongs, verts, à épines externes molles, et remplis de liquide dans lequel sont plongées les graines, par suite de la gélification de l'endocarpe ; la pression interne de ces fruits augmente graduellement jusqu'à ce qu'elle cause leur détachement brusque du pédoncule au moindre choc ; il se produit alors une petite explosion, et le liquide est lancé avec les graines à quelques mètres de distance *(dissémination bolochore)*.

Les fruits de l'impatiente *(Impatiens noli-tangere)* sont également des fruits charnus explosifs, qui, quand ils sont mûrs et surtout s'ils sont heurtés, même légèrement, s'ouvrent en formant des valves ; celles-ci se tordent subitement en lançant au loin les graines. On les considère généralement comme des capsules, du fait de leur mode de déhiscence.

▼ ***Infrutescence, très grossie, de pissenlit*** **(Taraxacum officinale).** ***Les akènes à aigrette sont facilement transportés par le vent.***

Bavestrelli-Bevilacqua-Prato

Bavestrelli-Bevilacqua-Prato

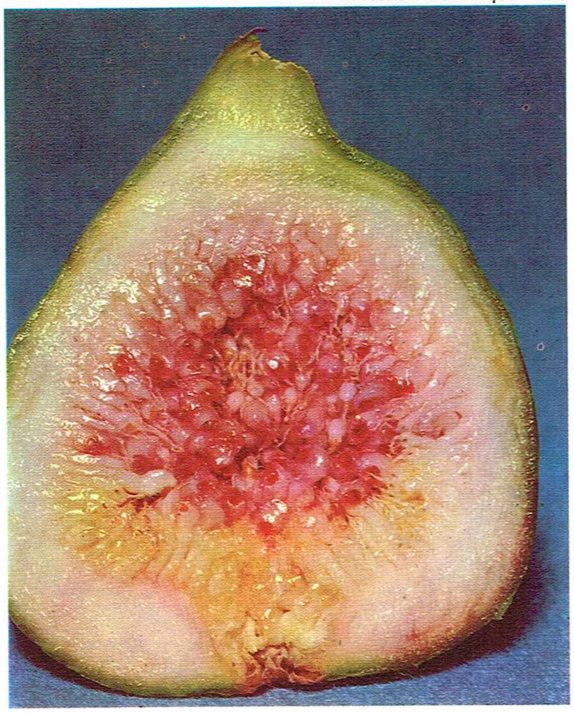

▶ *Coupe de sycone de figuier montrant les akènes contenus dans le réceptacle charnu.*

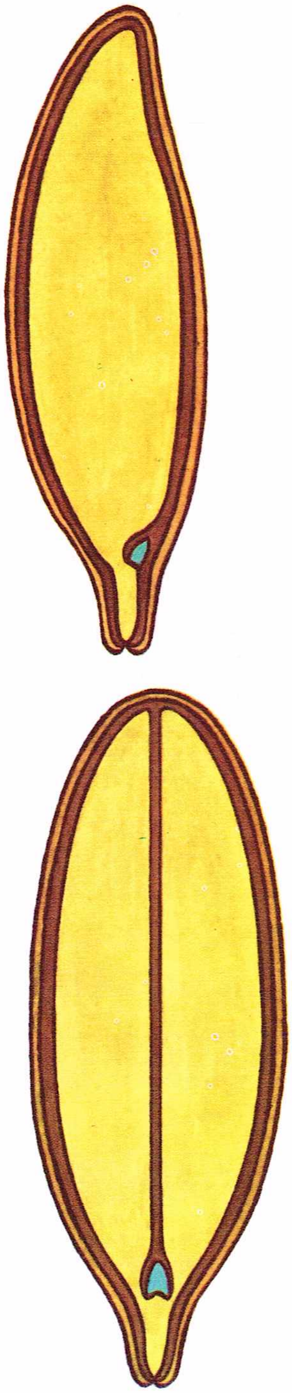

I.G.D.A.

▲ *Coupe longitudinale schématique d'une graine de Monocotylédone (en haut) et de Dicotylédone (en bas).*

Les pseudo-fruits

Outre les fruits au sens propre issus du seul pistil, et spécialement de l'ovaire, il existe des pseudo-fruits qui sont dus à la concrescence avec l'ovaire d'autres parties de la fleur, ou bien au rapprochement des fruits de plusieurs fleurs. Nous avons cité le cas du calice accrescent : celui-ci existe par exemple dans les minuscules fruits de l'épinard ou dans la fructification de l'amour-en-cage *(Physalis alkekengi)*, chez lequel il forme autour du fruit proprement dit une grande enveloppe membraneuse et papyracée, jaune ou rouge, réduite finalement à ses nervures réticulées. En fait, dans tout fruit dérivé d'un ovaire infère, une grande partie du péricarpe n'est pas d'origine ovarienne; pourtant on assimile ce fruit à un fruit vrai.

Dans la mûre du mûrier, ou *sorose*, les petites baies à une graine correspondant à autant de fleurs constituent une infrutescence. Dans les mûres de la ronce, en revanche, de petites drupes provenant de la transformation des carpelles d'une même fleur sont réunies sur le réceptacle de celle-ci. On a affaire à un vrai fruit, qui est une sorte de « polydrupe ».

La fraise est un pseudo-fruit, mais issu d'une seule fleur : dans ce cas, le réceptacle se développe à l'extrême et devient charnu; on observe sur sa surface extérieure de nombreux petits akènes provenant de la transformation des carpelles de la fleur.

La rose nous offre avec son *cynorrhodon* un autre exemple de pseudo-fruit dérivant du réceptacle d'une seule fleur, qui contient des akènes en plus ou moins grand nombre.

Le *sycone* du figuier est encore un pseudo-fruit; nous en avons déjà parlé à propos des inflorescences : c'est un réceptacle creux et charnu où sont contenus de minuscules akènes.

Dans la pomme cajou, fruit de l'*Anacardium occidentale*, le pédoncule croît fortement et devient charnu et plus gros que le fruit qu'il porte. Dans l'ananas, les fruits sont concrescents en une masse en forme de pomme de pin, qui est une infrutescence, comme chez celle du mûrier.

On pourrait rapprocher des akènes le pseudo-fruit des *Carex* (laîches) qui est formé d'une bractée accrescente, l'utricule, enfermant l'ovaire mûr.

Origine des Angiospermes

Les Angiospermes, appelées aussi par Strasburger les Métaspermes *(Metaspermae)*, afin de marquer leur supériorité évolutive par rapport aux Gymnospermes, peuvent être des herbes, des arbrisseaux, des arbustes ou des

Division : ANGIOSPERMES

Classe : DICOTYLÉDONOPSIDÉES ou DICOTYLÉDONES

Sous-classe : Archichlamydées (Monochlamydées ou Apétales et Dialypétales ou Choripétales)

1) *MONOCHLAMYDÉES (Monochlamydae)*

Ordres : Casuarinales ou Verticillées
Fagales
Myricales
Leitnériales
Juglandales
Salicales
Batidales
Balanopsidales
Urticales
Pipérales
Protéales
Santalales
Polygonales
Centrospermales
Euphorbiales ou Tricoques
Hamamélidales

2) *DIALYPÉTALES*

Ordres : Ranales ou Polycarpiques et Aristolochiales
Sarracéniales
Rhoeadales
Pariétales
Guttiférales ou Guttifères
Rosales
Myrtales
Malvales ou Columnifères
Géraniales ou Gruinales
Térébinthales
Pandales
Célastrales
Rhamnales
Ombelliférales ou Ombelliflores
Garryales

Sous-classe : Métachlamydées ou Monopétales

1) *PENTACYCLIQUES*

Ordres : Éricales ou Bicornes
Plumbaginales
Primulales
Ébénales ou Diospyrales

2) *TÉTRACYCLIQUES*

Ordres : Ligustrales
Gentianales ou Contortées
Rubiales
Tubiflorales ou Tubiflores
Cucurbitales
Astérales ou Synandrées

Classe : MONOCOTYLÉDONOPSIDÉES ou MONOCOTYLÉDONES

Ordres : Hélobiales ou Hélobiées y compris les Triuridales
Liliales ou Liliflores
Énantioblastées
Cypérales
Glumiflorales ou Glumiflores
Scitaminales ou Scitaminées
Orchidales ou Gynandrées
Arales ou Spadiciflores
Pandanales

S. Prato

◀ *On trouve parmi les Angiospermes des Végétaux étranges, tels les* Sarracenia *dont les feuilles, transformées en ascidies, retiennent un liquide capable de digérer les petits Insectes qui y tombent.*

arbres, et dans ce dernier cas, assez souvent de grande taille ; le plus grand arbre connu est un eucalyptus.

Une même famille peut comprendre des espèces ligneuses et herbacées ; le pommier et le fraisier sont des Rosacées. Certaines familles sont constituées tout entières d'espèces herbacées (Campanulacées) ou ligneuses (Fagacées). Dans l'ensemble, les espèces herbacées, chez les Angiospermes, sont plus nombreuses que les ligneuses.

Il subsiste des doutes sur la priorité phylogénétique de l'un ou l'autre groupe, mais il semble vraisemblable que les Végétaux ligneux aient précédé les herbacés, et que les espèces lianoïdes soient les plus jeunes.

La présence de tubercules, de rhizomes et de bulbes, très fréquente chez les Angiospermes, ne se retrouve pas chez les Gymnospermes, plus anciennes, où l'appareil aérien assure la pérennité de la plante. Cela peut laisser penser que, chez les Angiospermes, les espèces pérennantes ont précédé les espèces vivaces par leur appareil souterrain, bisannuelles et annuelles.

De toute façon, on n'a pu encore établir en toute certitude quelles sont les origines des Angiospermes. Les difficultés résident surtout en la détermination des caractères à considérer comme primitifs et évolués. Tout cela est d'autant plus problématique que les restes paléontologiques dont nous disposons sont très peu nombreux, fragmentaires et peu distincts des types actuels.

Aussi les spécialistes sont-ils très divisés. Certains (Eichler, Wettstein, etc.) regardent comme un indice de primitivité la possession de fleurs apétales, unisexuées et cycliques, alors que d'autres auteurs (Bessey, Hutchinson, etc.) considèrent comme plus primitives les plantes à fleurs bisexuées, surtout si elles sont acycliques. Cette seconde thèse est la plus généralement admise par les auteurs anglo-saxons.

D'ailleurs, les verticilles de feuilles et d'anthophylles peuvent être interprétés comme des spirales surbaissées : cela semble appuyer l'hypothèse de la plus grande ancienneté des plantes à phyllotaxie spiralée, ou acyclique, tant à l'état végétatif que floral.

Malgré tout, on pourrait penser que certaines fleurs achlamydées et anémophiles représentent un type plus ancien, remontant à une époque où il n'existait pas d'Insectes fécondateurs.

Il est en fait fort possible que les Angiospermes soient issues en partie d'ancêtres unisexués achlamydés et en partie d'ancêtres à fleurs périanthées, bisexuées et acycliques.

De toute façon, les Angiospermes semblent être apparues au Jurassique, mais ont prospéré surtout à partir du Crétacé supérieur. Leur origine est parfois cherchée parmi les Ptéridospermes : il s'agit de Gymnospermes primitives à feuilles pennées, semblables à celles des Fougères, à mégasporophylles non réunies en strobiles, mais en groupements paniculés, à microsporophylles riches en pollen, et qui possédaient des ovules.

D'autres théories tendent à faire dériver des Ptéridospermes les Cycadinées, et de ces dernières les Angiospermes, par l'intermédiaire d'un groupe hypothétique des Hémiangiospermes. D'autres encore proposent un groupe de Proangiospermes, où se seraient différenciées les Gnétales et les Angiospermes.

SYSTÉMATIQUE

On comprend aisément qu'un groupe aussi riche réclame une classification rigoureuse et la plus naturelle possible ; l'établir est difficile, car les données paléontologiques et par conséquent phylétiques sont rares.

Comme on l'a vu dans l'introduction de cet ouvrage, on s'est vite rendu compte que les éléments de la fleur fournissaient les caractères les plus solides pour une classification naturelle.

Bien qu'il soit assez facile d'établir des familles naturelles, il est très délicat de les réunir en groupes plus vastes.

La séparation des Angiospermes en Monocotylédones, à plantules ayant un cotylédon, et Dicotylédones, est classique encore que sujette à critique. Il est classique aussi de se fonder sur la présence ou l'absence de la corolle et la séparation ou l'union des pétales, pour la distinction des Apétales ou Monochlamydées, Polypétales ou Dialypétales (à pétales libres), et Gamopétales ou Sympétales (à pétales soudés), mais il est certain que ces groupes ne sont pas absolument naturels.

La classification en ordres est difficile aussi. Il est souvent malcommode de trouver des caractères constants à des ordres composés plus ou moins intuitivement.

Nous parlerons à l'occasion de chaque groupe de ces caractères. Nous donnerons préalablement le tableau synoptique de la classification des Angiospermes adoptée ici, ce qui nous permettra en outre d'avoir une vue générale de ce vaste groupe, ainsi que de définir les principaux traits qui servent à sa classification.

▶ ***Les fleurs du gui*** **(Viscum album)*****, de petite taille et verdâtres, sont peu apparentes.***

Bavestrelli-Bevilacqua-Prato

DICOTYLÉDONOPSIDÉES OU DICOTYLÉDONES

Les Dicotylédones (des mots grecs δίς, deux fois, et κοτυληδών, cotylédon) sont toutes des plantes dont l'embryon et la plantule sont pourvus de deux *cotylédons ;* ceux-ci sont rarement plus nombreux *(polycotylie)* ou réduits à un seul par atrophie secondaire de l'autre ou par fusion des deux (syncotylie).

La présence de deux cotylédons (deux feuilles embryonnaires) est liée à d'importantes différences dans le développement de l'embryon et de la plantule par rapport aux Monocotylédones.

L'appareil radiculaire possède des poils absorbants, qui dérivent de cellules spéciales de l'assise pilifère ; la radicule est généralement persistante. Les racines manquent chez certaines plantes parasites, qui possèdent à la place des *suçoirs* se fixant à l'hôte. Il existe des racines adventives presque uniquement sur des tiges rampantes comme celles du lierre et sur des rhizomes.

La structure anatomique de la racine et de la tige présente une *phase primaire,* à laquelle fait suite une *phase de croissance secondaire,* qui, comme nous le verrons, manque chez les Monocotylédones ; cela est rendu possible parce qu'il existe chez les Dicotylédones un tissu méristématique ou *cambium* situé entre le bois et le liber, qui assure la croissance en diamètre.

Quand elles sont herbacées, les Dicotylédones peuvent être annuelles, bisannuelles ou vivaces. Dans ce dernier cas, elles perdent chaque hiver la plus grande partie de leur appareil végétatif aérien.

Les bulbes constitués d'une tige tubéreuse courte garnie de nombreuses feuilles écailleuses souvent très charnues sont peu fréquents, alors qu'ils caractérisent des groupes entiers de Monocotylédones ; en revanche, on observe assez souvent des tubercules, correspondant au développement de l'hypocotyle (avec ou sans une portion épicotylaire) ou de la racine, et il existe d'innombrables espèces rhizomateuses ou pourvues de stolons.

Les tiges aériennes sont de types très variés, dressées et rigides, prostrées ou volubiles.

La majorité des Dicotylédones possède des feuilles ; celles-ci sont très réduites chez certains groupes de plantes xérophiles, où, afin de réduire la transpiration, elles sont transformées en épines au profit de tiges vertes et de cladodes (tiges aplaties), qui peuvent assurer la fonction chlorophyllienne. Quelques espèces parasites sont dépourvues de feuilles ou à peu près. Les feuilles, comme nous le verrons, sont le plus souvent parallélinerves ou curvinerves chez les Monocotylédones, alors qu'elles sont angulinerves et à nervation réticulée chez les Dicotylédones ; elles peuvent être basales ou caulinaires ; il y en a, dans certains cas, un petit nombre, mais dans d'autres, elles sont nombreuses, comme sur les arbres. Leur disposition est variée, mais le plus fréquemment en spirale ou opposée-décussée.

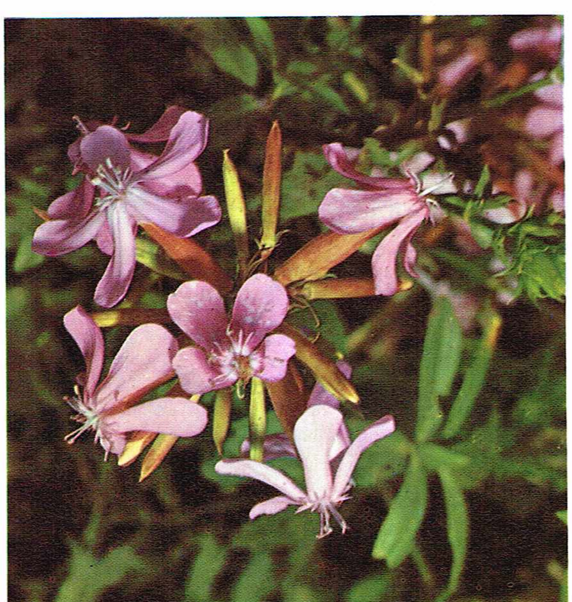

Bavestrelli-Bevilacqua-Prato

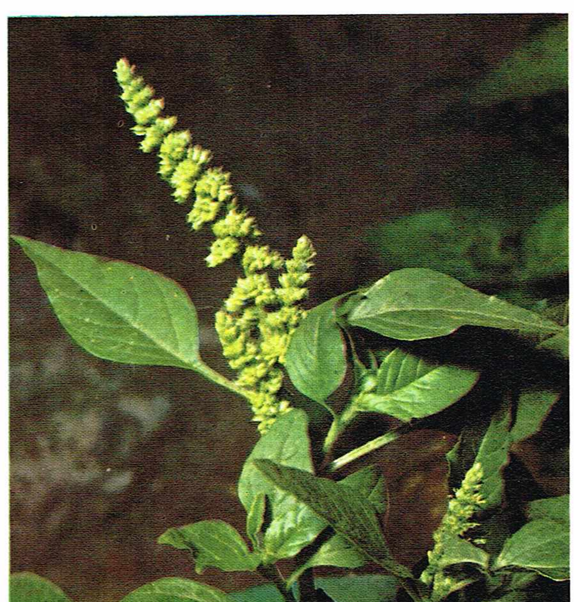

Bavestrelli-Bevilacqua-Prato

▶ ***Saponaire*** **(Saponaria officinalis)*****, Caryophyllacée (à gauche), et*** **Amaranthus retroflexus*****, Amaranthacée (à droite) dont les inflorescences sont composées de glomérules de fleurs minuscules.***

I.G.D.A. - Archives P2

▲ *Jeunes plantules de Dicotylédones (haricot) peu après la germination des graines.*

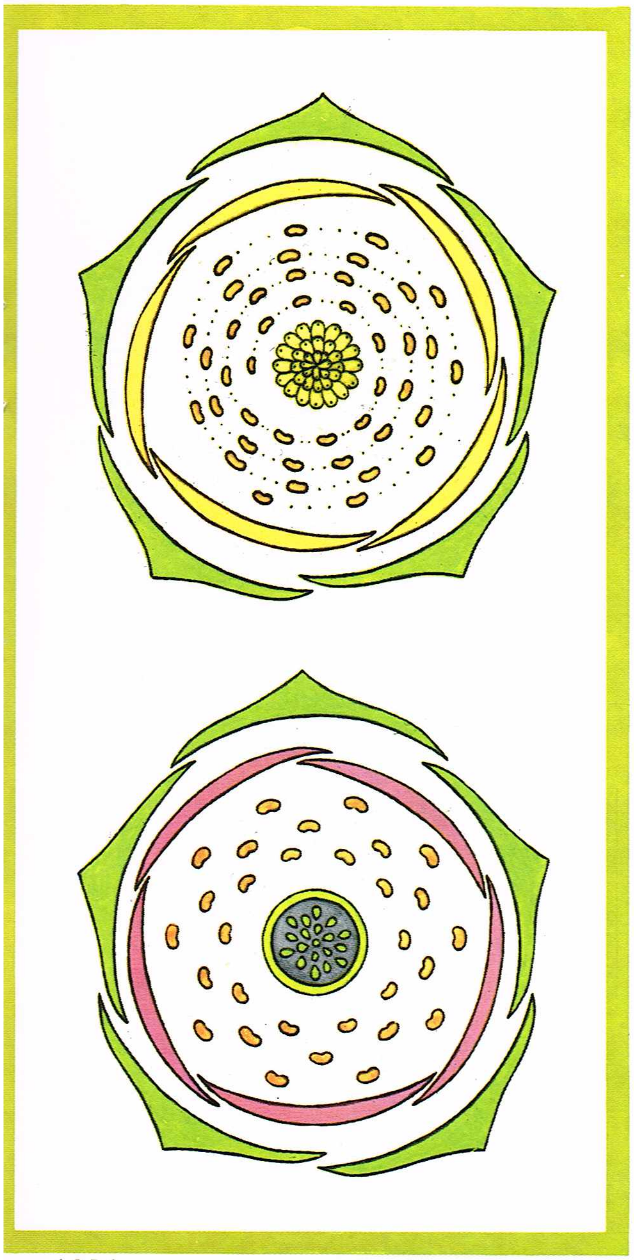

I.G.D.A.

◀ *Diagramme floral de deux Dicotylédones :* **Ranunculus acer** *(en haut) et* **Rosa canina** *(en bas).*

Les fleurs, solitaires, géminées, ou réunies en toutes sortes d'inflorescences, possèdent deux préfeuilles et les verticilles du périanthe et des étamines sont constitués le plus souvent de quatre ou surtout cinq éléments. Les corolles sont dialypétales ou gamopétales, régulières (actinomorphes) ou irrégulières (zygomorphes). La réunion et le nombre des étamines sont des caractères typiques chez la plupart des familles. Il existe des fleurs asépales ou apétales, voire apérianthées.

La pollinisation, si elle est croisée, est anémophile, entomophile et rarement ornithophile ; selon les cas, la dissémination des graines se fait par divers agents (vent, animaux, etc.).

Les fleurs sont unisexuées ou bisexuées, c'est-à-dire hermaphrodites. Dans le premier cas, celles des deux sexes peuvent être portées par le même individu, et l'espèce est alors monoïque, ou par des individus différents, et la plante est dioïque, comme la grande ortie, *Urtica dioica ;* il existe aussi des fleurs asexuées, stériles, qui ont en général pour fonction d'attirer les Insectes pollinisateurs.

Le gynécée est formé soit d'un seul carpelle, soit de plusieurs, libres ou unis, le nombre en étant souvent constant et caractéristique de chaque famille ; le nombre des ovules est fréquemment typique d'une famille ou d'une tribu donnée : il y a ainsi un ou deux ovules ou plus par loge carpellaire ou par ovaire entier.

Le pollen a presque toujours une forme granulaire (sphéroïdale ou oblongue), avec une exine ornementée et montrant dans la majorité des cas plus d'une aperture (habituellement trois) par l'une desquelles germera le grain. La tétrade pollinique se forme par cloisonnements simultanés, c'est-à-dire que les cloisons séparant les grains apparaissent ensemble après les deux divisions nucléaires accompagnées de méiose qui ont fourni les noyaux à partir de celui d'une cellule mère, mais il y a des exceptions.

Les rapports entre les Dicotylédones et les Monocotylédones sont toujours l'objet de controverses ; nous en reparlerons en étudiant les secondes. Pour certains auteurs, les premières sont plus évoluées et les secondes plus récentes ; pour d'autres, c'est le contraire. Il existe de toute façon des familles, placées dans l'une ou l'autre classe, qui sont assez proches en ce qui concerne la structure de la fleur qui est trimère, et spécialement du gynécée, ainsi que les caractères des tissus vasculaires (absence de vaisseaux de bois).

Il semble de toute façon probable que les deux grands types d'Angiospermes aient eu, à une époque géologique lointaine, des ancêtres communs, qui se seraient développés et auraient évolué simultanément dans deux directions ; c'est de ces formes plus anciennes que dériveraient toutes les familles actuellement vivantes, selon des lignées évolutives buissonnantes, du fait notamment d'isolements géographiques et génétiques ; il est communément admis que, parmi les familles de Dicotylédones, c'est celle des Composées qui est la plus évoluée.

Distribution des Dicotylédones

Répandues dans le monde entier, ces plantes représentent cependant une couverture végétale réduite par rapport aux Monocotylédones dans les steppes alpines et subdésertiques ; les espèces aquatiques marines sont totalement inexistantes. Il y a assez peu de taxons qui constituent des formations végétales monospécifiques, phénomène qui est au contraire assez fréquent chez les Monocotylédones ; on observe généralement chez les Dicotylédones une plus grande tendance à se réunir en nombre important d'espèces, dans des phytocœnoses herbacées ou arborescentes.

● Archichlamydées

Il s'agit d'Angiospermes dont les fleurs sont ou bien nues ou achlamydées, c'est-à-dire dépourvues de calice et de corolle comme chez les saules, ou bien munies d'un périanthe simple, sépaloïde le plus souvent, et ce sont alors des fleurs *haplochlamydées,* telles les Chénopodiacées ; ou bien elles ont un périanthe double (fleurs

▶ ***Chaton mâle de* Salix. *Ce genre est rattaché à l'ordre des Salicales dont les fleurs sont caractérisées par la réduction du périanthe.***

Teurtroy-Jacana

diplochlamydées) dont la corolle est alors *dialypétale*, c'est-à-dire à pétales libres jusqu'à la base.

En nous fondant sur un système inspiré de Wettstein, nous distinguerons les ordres selon quelques caractères essentiels.

— *Monochlamydées* ou *Apétales* : fleurs dépourvues de périanthe ou à périanthe simple et souvent sépaloïde, vert, blanc ou brun, plus rarement de couleur vive.

a) Plantes ligneuses à port rappelant celui de prêles géantes, avec des rameaux longs et fins, presque filiformes, verts, et de petites feuilles verticillées; fleurs nues, souvent accompagnées par des bractées : *Casuarinales* ou *Verticillées*.

b) Arbres ou arbrisseaux à feuilles simples; fleurs à périanthe sépaloïde; deux, trois ou six carpelles soudés; ovaire infère pluriloculaire, avec des loges biovulées; les fruits sont des akènes : *Fagales*.

c) Plantes ligneuses; fleurs en épis simples ou composés; périanthe nul; ovaire supère, bicarpellé et uniloculaire, avec un seul ovule orthotrope à un seul tégument; fruits drupacés : *Myricales*.

d) Plantes ligneuses dioïques; fleurs à ovaire monocarpellé avec un seul ovule bitegminé : *Leitnériales*.

e) Arbres à feuilles composées; périanthe nul ou rudimentaire; deux carpelles; ovaire infère avec un seul ovule orthotrope; les fruits sont des drupes ou des fruits secs indéhiscents : *Juglandales*.

f) Arbres, arbustes ou arbrisseaux; fleurs à périanthe nul ou rudimentaire; deux carpelles, ovaire uniloculaire supère, avec de nombreux ovules anatropes; les fruits sont des capsules : *Salicales*.

g) Plantes buissonnantes ligneuses à feuilles charnues; fleurs nues; ovaire supère, tétraloculaire, avec un ovule anatrope par loge; les fruits sont des sortes de drupes unies les unes aux autres : *Batidales*.

h) Plantes ligneuses; fleurs achlamydées unisexuées; ovaire biloculaire, avec deux ovules possédant un seul tégument; fruits drupacés : *Balanopsidales*.

i) Arbres, arbrisseaux ou herbes à feuilles rugueuses ou urticantes; fleurs petites, à périanthe simple, sans distinction entre le calice et la corolle, unisexuées ou bisexuées; un ou deux carpelles uniovulés; ovaire supère; les fruits sont des akènes ou des drupes éventuellement groupées en pseudo-fruits : *Urticales*.

j) Plantes ligneuses ou herbacées, souvent rampantes; fleurs nues, hermaphrodites, en épis; ovaire tricarpellé, avec un ovule orthotrope; les fruits sont en général des baies : *Pipérales*.

k) Arbres ou arbustes; fleurs à périanthe simple, souvent groupées en capitules; ovaire monocarpellé; les fruits sont des follicules, des akènes ou des drupes; les graines sont dépourvues d'albumen : *Protéales*.

l) Plantes parasites; fleurs le plus souvent unisexuées avec périanthe simple; ovaire dégradé à ovules dépourvus de téguments ou même réduits à leurs sacs embryonnaires : *Santalales*.

m) Plantes herbacées, parfois rampantes, mais jamais parasites; fleurs hermaphrodites, à périanthe simple; ovaire bi- ou tricarpellé, uniloculaire, avec un seul ovule orthotrope; les fruits sont des akènes, et les graines sont pourvues d'un albumen farineux : *Polygonales*.

n) Plantes herbacées ou peu lignifiées; fleurs à périanthe simple ou double, alors différencié en calice et corolle; ovaire pluricarpellé, uniloculaire, avec des ovules amphitropes; embryon courbe (Curvembryées) : *Centrospermales*.

o) Plantes herbacées, ligneuses ou succulentes, souvent à laticifères; fleurs à périanthe fréquemment double, presque toujours unisexuées, avec ovaire supère, trilo-

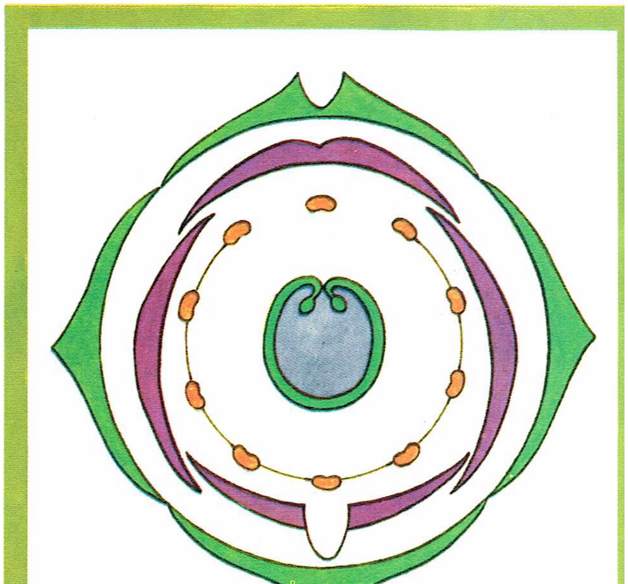

▶ ***Diagramme floral d'une Papilionacée, Rosale à fleur irrégulière (zygomorphe), présentant une symétrie bilatérale.***

I.G.D.A.

culaire et tricarpellé; embryon droit : *Euphorbiales* ou *Tricoques*.

p) Plantes ligneuses; fleurs hermaphrodites ou unisexuées; ovaire infère ou semi-infère, rarement supère, bicarpellé et biloculaire : *Hamamélidales*.

— *Dialypétales :* fleurs à périanthe double (calice et corolle); le verticille externe est généralement calicinial, et le verticille interne corollin, coloré ou blanc.

a) Plantes ligneuses ou herbacées, avec un ou plusieurs carpelles le plus souvent indépendants les uns des autres; éléments floraux souvent en spirale au moins partiellement, étamines nombreuses : *Ranales* ou *Polycarpiques*. Annexe : *Aristolochiales*.

b) Plantes insectivores herbacées ou arbustives, à feuilles ascidiées; périanthe différencié ou non en calice et corolle; étamines parfois nombreuses, cycliques, parfois soudées; gynécée à trois à cinq carpelles soudés; ovules généralement nombreux : *Sarracéniales*.

c) Plantes herbacées à fleurs hermaphrodites régulières (quatre pétales) ou irrégulières; deux ou trois carpelles soudés; ovaire uniloculaire : *Rhœadales*.

d) Plantes herbacées ou ligneuses, à fleurs régulières, le plus souvent hermaphrodites; ovaire fréquemment tricarpellé, uniloculaire, à placentation pariétale : *Pariétales*.

e) Plantes herbacées ou ligneuses, à appareil sécréteur, à fleurs régulières; étamines nombreuses par multiplication secondaire; ovaire supère, pluriloculaire : *Guttiférales* ou *Guttifères*.

f) Plantes ligneuses ou herbacées; feuilles simples ou composées; fleurs régulières ou irrégulières; quatre ou cinq pétales, parfois plus, ou pas de pétales; ovaire supère, semi-infère ou infère; pistil uni- ou pluricarpellé; carpelles souvent plus ou moins indépendants : *Rosales*.

g) Plantes généralement ligneuses; beaucoup sont aromatiques; feuilles entières et non stipulées; fleurs hermaphrodites avec périanthe double (rarement simple); carpelles soudés; ovaire infère; étamines en nombre égal à celui des pétales, ou bien nombreuses par multiplication secondaire : *Myrtales*.

h) Plantes herbacées ou ligneuses; fleurs pentamères; souvent un calicule en dessous du calice; cas fréquents d'ovaires pluricarpellés et pluriloculaires; étamines nombreuses par multiplication secondaire, souvent disposées en une colonne : *Malvales* ou *Columnifères*.

i) Plantes herbacées; feuilles simples bien que fréquemment découpées profondément; fleurs généralement régulières, pentamères, avec étamines en nombre double de celui des sépales; ovules pendants : *Géraniales*.

j) Plantes ligneuses, aromatiques; fleurs hermaphrodites, rarement unisexuées, pentamères; étamines généralement en nombre double de celui des pétales; au moins cinq carpelles; fruits parfois volumineux (hespérides) : *Térébinthales*.

k) Plantes ligneuses; ovaire pluriloculaire à trois ou quatre carpelles uniovulés; ovules orthotropes pendants : *Pandales*.

l) Plantes le plus souvent ligneuses; feuilles simples; pas d'appareil sécréteur; fleurs régulières à étamines insérées en face des sépales; deux à cinq carpelles : *Célastrales*.

m) Plantes le plus souvent ligneuses; fleurs régulières, avec un seul verticille d'étamines épipétales : *Rhamnales*.

n) Plantes herbacées ou ligneuses; inflorescences en têtes ou ombelles variées ou cymeuses; fleurs régulières et hermaphrodites; ovaire infère; cinq pétales; cinq étamines alternant avec les pétales; deux à cinq carpelles formant un ovaire avec deux à cinq loges uniovulées : *Ombellifèrales*.

o) Arbrisseaux toujours verts; feuilles entières; inflorescences en chatons; fleurs mâles à périanthe tétramère; fleurs femelles bicarpellées à ovaire uniloculaire; les fruits sont des baies : *Garryales*.

Casuarinales ou Verticillées

Cet ordre est constitué par la seule famille des Casuarinacées *(Casuarinaceae)*, avec le seul genre *Casuarina* ou filao, qui comprend selon les auteurs quarante à cinquante espèces de l'hémisphère austral, toujours vertes. Il s'agit de plantes ligneuses, monoïques ou dioïques, à port arbustif ou arborescent, caractérisées par de jeunes rameaux fins, équisétiformes, articulés, noueux, verts, et à stries longitudinales, avec des stomates situés au fond de dépressions ou vallécules. C'est là une adaptation xérophile, avec transfert de la fonction chlorophyllienne des feuilles aux rameaux; les feuilles verticillées sont en effet réduites à des écailles, et se fusionnent à la base autour des nœuds, formant des gaines.

Les fleurs sont unisexuées; les fleurs mâles sont réduites à une seule étamine entourée de quatre écailles, et verticillées le long d'une inflorescence en épi; les fleurs femelles, accompagnées par deux écailles et réunies en un capitule, possèdent un ovaire biloculaire, dont une seule loge est fertile, avec deux ovules; les fruits, petits, indéhiscents et ailés, qui en résultent contiennent chacun une seule graine; les nombreux akènes d'un capitule sont regroupés en un fruit multiple, chaque akène étant entouré de deux écailles persistantes.

Le bois des *Casuarina* est enveloppé par un tissu de transfusion, un peu comme chez les Gymnospermes. Alors que divers auteurs considèrent l'ordre comme le plus primitif des Dicotylédones, d'autres l'interprètent comme un groupe évolué, dérivant des Hamamélidacées, par réduction de l'appareil végétatif.

L'espèce la plus importante et la mieux connue est le filao à feuilles de prêle *(Casuarina equisetifolia)*, dont l'aire s'étend de l'Australie à Tahiti, à l'Inde et à Madagascar; elle colonise les dunes marines. On la cultive souvent en Europe (en France, sur la Côte d'Azur), pour son port léger ornemental. C'est un arbre d'une trentaine de mètres de hauteur, avec un diamètre de 1 m, à silhouette serrée; les rameaux sont en partie caducs, et les branches sont pleureuses et de couleur vert vif. Sa croissance est rapide, il pousse de préférence sur les sols secs, salés et alcalins. Le bois de *C. equisetifolia* est très dur, lourd, et se conserve bien, même immergé dans l'eau; on s'en sert comme bois d'industrie et comme combustible; c'est l'un des « bois de fer ». Celui de *C. rumphiana* et *C. sumatrana* (Philippines et Indonésie) a les mêmes caractéristiques. L'écorce des *Casuarina* est riche en tanin. Toutes ces espèces sont des plantes des climats tropicaux, à saison sèche, et se rencontrent en forêts semi-décidues. En Nouvelle-Guinée, certaines essences atteignent une altitude de 3 000 à 3 500 m, tandis que *C. nodiflora* est typique des savanes à eucalyptus (1 000 à 1 500 m). Les racines de *Casuarina* possèdent des nodosités abritant une Bactérie symbiotique fixatrice d'azote; elles ont donc sur le sol une action comparable à celles des Légumineuses.

Fagales

Cet ordre regroupe des plantes ligneuses à fleurs habituellement unisexuées, monoïques, à pollinisation anémogame. Leurs inflorescences sont des chatons, grappes de petites cymes triflores dont la fleur terminale ou les fleurs latérales peuvent manquer. Le périanthe est nul ou sépaloïde. Dans les fleurs mâles, les pièces de ce périanthe sont opposées aux étamines, en nombre égal ou supérieur à celles-ci; les fleurs femelles sont protégées par une bractée et éventuellement par des bractéoles, avec parfois un périanthe rudimentaire, et présentent des ovaires infères à deux ou trois (et même six) carpelles, comportant autant de styles et de loges, chacune de celles-ci contenant un ou deux ovules. La fécondation peut être retardée car, au moment de la pollinisation, l'ovule n'est pas toujours complètement différencié.

Les fruits sont des akènes et ils possèdent une seule graine dépourvue d'albumen. Les feuilles sont alternes, entières ou non, et munies de stipules caduques. On a souvent considéré ces plantes comme des formes primitives. Actuellement la plupart des auteurs admettent qu'elles sont fort évoluées. Certains envisagent une dérivation à partir d'ancêtres communs avec les Hamamélidacées, et considèrent les Fagales, en particulier d'après leur anatomie, comme plus avancées.

Bavestrelli-Bevilacqua-Prato

▲ ***Hêtraie en Angleterre.***

L'ordre comprend deux familles : les *Bétulacées* et les *Fagacées,* qui comptent les plus importantes essences de feuillus de la zone tempérée de l'hémisphère Nord.

La famille des *Bétulacées (Betulaceae)* a des fleurs monoïques, réunies en inflorescences composées, unisexuées, souvent en chatons, les mâles étant pendantes et les femelles dressées ou pendantes. Les fleurs mâles possèdent de deux à six étamines, à anthères fendues longitudinalement ou non. Elles sont concrescentes avec leur bractée, et ont un périanthe rudimentaire lorsqu'elles n'en sont pas totalement dépourvues; les fleurs femelles sont constituées par un ovaire bicarpellé à deux styles, avec ou sans périanthe. Les fruits secs, indéhiscents, monospermes, sont situés (charme) à l'aisselle d'une écaille lobée dérivant de la concrescence de la bractée avec les bractéoles, ou bien (noisetier) sont entourés par une « cupule » qui n'est pas homologue de celle des chênes et correspond au reploiement en tube d'une écaille triple.

Cette famille comprend les genres *Betula* (bouleaux), *Alnus* (aunes), *Corylus* (coudriers), *Ostryopsis, Carpinus* (charmes) et *Ostrya*.

Le genre *Betula* est constitué par une quarantaine d'espèces habitant l'hémisphère Nord. Il s'agit d'arbres, d'arbrisseaux ou d'arbustes, dont l'écorce, d'abord lisse, se desquame souvent en bandes horizontales de consistance papyracée; cette écorce se fissure tardivement. Les fleurs forment des chatons, le plus souvent monoïques, les mâles ayant des étamines à anthères divisées en deux. Les fruits, secs et indéhiscents, sont très petits, habituellement ailés (samares), ou sans ailes (akènes); ils sont situés à l'aisselle d'écailles membraneuses et réunis en des sortes de cônes qui se désarticulent à maturité.

Le bouleau pendant *(Betula pendula)* est un arbre d'une hauteur d'environ 25 m. Ses branches principales sont ascendantes, ce qui donne à sa silhouette plus ou moins globuleuse un aspect léger et décoratif. L'écorce est fine, blanche, avec des bandes horizontales plus foncées; les jeunes rameaux, pendants, sont de couleur brune, glabres et rudes au toucher parce qu'ils sont couverts de glandes sécrétant une résine qui durcit et forme des granules (d'où le nom de *verrucosa* qui a été attribué à ce bouleau et ne doit pas être utilisé). Les feuilles sont petites, triangulaires, rhomboïdales, acuminées, longuement pétiolées, doublement dentées, glabres, vert clair, et de couleur jaune doré en automne. Les chatons mâles sont fins, cylindriques et pendants; les chatons femelles sont plus courts et ont des écailles recourbées à lobes latéraux. Les fruits sont des akènes munis sur les côtés de deux ailes membraneuses plus larges qu'eux. Ce bouleau a une aire de distribution très vaste qui s'étend de la Sibérie, la Russie septentrionale et la Scandinavie (où il forme des forêts très étendues à l'état pur, alors qu'ailleurs, il est associé à d'autres arbres) jusqu'à la Sicile et à l'Espagne septentrionale. Cette espèce ne dépasse pas cent vingt à cent trente ans; elle est envahissante, grâce à son héliophilie, à son abondante production de graines et à sa résistance aux variations de température et d'humidité. Son bois est homogène, de couleur blanchâtre uniforme, moyennement lourd, élastique, mais se conserve mal; on s'en sert beaucoup dans les pays nordiques pour la préparation de pâte à papier et d'agglomérés, ainsi que pour la production de petits objets tournés. L'écorce est utilisée en U.R.S.S. pour l'extraction du tanin. On prépare à partir de la sève, riche en sucre, une boisson alcoolisée, le « vin de bouleau ».

Le bouleau pubescent *(Betula pubescens)* était naguère réuni avec le précédent dans l'espèce linnéenne *Betula alba* ou bouleau blanc; il en diffère par sa taille moindre, ses jeunes rameaux dressés et pubescents au lieu d'être verruqueux, ses feuilles ovales-aiguës, cordées à la base, et duveteuses au moins en dessous. Il a une aire plus nordique, puisqu'il dépasse le cercle polaire Arctique. Il préfère les sols tourbeux ou marécageux et a besoin d'un climat humide. Son bois est plus tendre que celui du bouleau pendant.

Le bouleau nain ou *Betula humilis* est un arbuste qui atteint rarement plus de 2 m de hauteur, à très petites feuilles ovales, et à rameaux glabres ou pubérulents, présentant des exsudats de résine jaunâtre. Il habite les sols tourbeux d'Europe centrale, le nord des Alpes, la Galicie et les régions baltiques.

Le groupe des bouleaux asiatiques comprend de nombreuses espèces mais a une importance très limitée dans nos régions. Nous le négligerons ici.

Le bouleau à papier (« paper birch ») ou *Betula papyrifera* est une espèce nord-américaine dont l'aire s'étend de l'Alaska et du Labrador aux Grands Lacs et à la Nouvelle-Angleterre. Il forme de vastes étendues de forêts permanentes au nord, avec *Picea glauca* et *Abies balsamea ;* en Alaska central, on le trouve en peuplements purs ; dans le sud de son aire, il est également associé avec les espèces précédentes, ainsi que *Pinus strobus, Fagus americana,* divers érables, et le bouleau jaune ou *Betula lutea*. Après les incendies, il recolonise le sol, en même temps que *Populus tremuloides* et *Prunus pennsylvanica*. Il habite en général sur des podzols ou des sols de différents types, caillouteux et de peu d'épaisseur, ou humides et marécageux, acides ou basiques. C'est un arbre à vie courte, dépassant rarement cent cinquante ans. Il ne tolère pas la concurrence, et, en général, après la première génération, il est remplacé par d'autres arbres plus compétitifs. Il présente de nombreuses variétés. Sa hauteur est de 15 à 20 m. Son écorce s'exfolie comme du papier, d'où son nom. Ses feuilles sont ovales-aiguës. Jadis, l'écorce était utilisée par les Indiens pour fabriquer des canoës et comme support pour tracer des idéogrammes.

Le bouleau à feuilles de peuplier (*Betula populifolia),* comme l'indique son nom, possède des feuilles triangulaires-arrondies, semblables à celles de certains peupliers, longuement acuminées et grossièrement dentées. Son écorce est blanc grisâtre et lisse. C'est le plus petit bouleau d'Amérique nord-orientale ; on le trouve de Terre-Neuve à la vallée du Saint-Laurent, et, au sud, à la Nouvelle-Angleterre et à la Pennsylvanie, où il croît sur sols pauvres et secs, habituellement en association avec le *Pinus rigida*. Cette espèce est également pionnière et envahissante après les incendies ; dans ce cas, elle peut précéder l'installation de *Pinus strobus*.

Le bouleau à écorce de cerisier (*Betula lenta,* « cherry birch ») habite la partie nord-orientale du continent américain, de la Nouvelle-Angleterre à la vallée du Saint-Laurent et à la partie orientale de la région des Grands Lacs, ainsi que sur les Appalaches, jusqu'à la Géorgie, au sud. Il mesure de 15 à 25 m de hauteur. Son écorce presque noire, d'abord lisse, devient fissurée, rappelant un peu celle des cerisiers ; les feuilles sont également caractéristiques, grandes, ovales, cordiformes à la base, dentées, et ressemblant un peu à celles du charme. En outre, feuilles et rameaux ont une odeur parfumée due à une huile essentielle que l'on obtient par distillation *(wintergreen oil)*. Cet arbre croît sur les sols humides ou frais bien drainés, et même sur les podzols.

Le bouleau noir *(Betula nigra)* est une espèce américaine orientale, qui habite le bassin du Mississippi, les côtes de l'Atlantique jusqu'à la Nouvelle-Angleterre, et presque toutes les côtes du golfe du Mexique. Il a des feuilles ovales-losangiques, profondément et doublement dentées ; son écorce a des écailles fines, enroulées au bord, et varie du brun au rougeâtre et au gris. On le trouve habituellement le long des rives des fleuves.

Le bois des bouleaux américains est bien différencié, avec un aubier blanc jaunâtre et un cœur brun rougeâtre, facile à travailler, mais de peu de durée ; on s'en sert pour faire des agglomérés, des meubles, des traverses de chemins de fer (après imprégnation), des objets tournés, etc. Il est moyennement lourd, sauf chez *Betula lenta,* où sa densité est plus élevée.

Le genre *Alnus* (aunes ou aulnes) est représenté par une trentaine d'espèces d'arbres et d'arbrisseaux de l'hémisphère boréal ; certaines franchissent cependant l'équateur par les Andes, jusqu'au Chili et en Argentine. A la différence du genre *Betula,* les quatre étamines ne sont pas divisées au niveau de l'anthère. Les infrutescences constituent bien des chatons en forme de cônes, mais avec des écailles ligneuses et non membraneuses, qui ne se désarticulent pas à maturité quand elles libèrent de petites samares ou des akènes. Pour la plupart, les aunes sont des plantes hygrophiles de climat frais, qui enrichissent le sol par la présence de tubercules radicaux hébergeant des Bactéries fixatrices d'azote.

L'aune glutineux ou aune proprement dit *(Alnus glutinosa)* est un bel arbre du bord des eaux, d'une hauteur de 25 m, que l'on trouve souvent aussi en taillis. Il a une silhouette ovoïde ou oblongue, pointue et serrée. Son tronc est brun foncé, avec un rhytidome en plaques. Ses feuilles sont vert foncé, luisantes, obovales ou à peu près rondes, obtuses, émarginées au sommet, irrégulièrement dentées, très visqueuses quand elles sont jeunes, d'où le nom spécifique. Il croît le long des rivières et des torrents, ou dans les stations marécageuses. C'est une

Bavestrelli-Bevilacqua-Prato

▲ *Bouleaux pendants, aux troncs blancs et élancés.*

Bavestrelli-Bevilacqua-Prato

Bavestrelli-Bevilacqua-Prato

▼ *A droite : tronc d'un bouleau jeune. A gauche : d'abord lisse, l'écorce du bouleau se desquame et présente un aspect papyracé.*

Bavestrelli-Bevilacqua-Prato

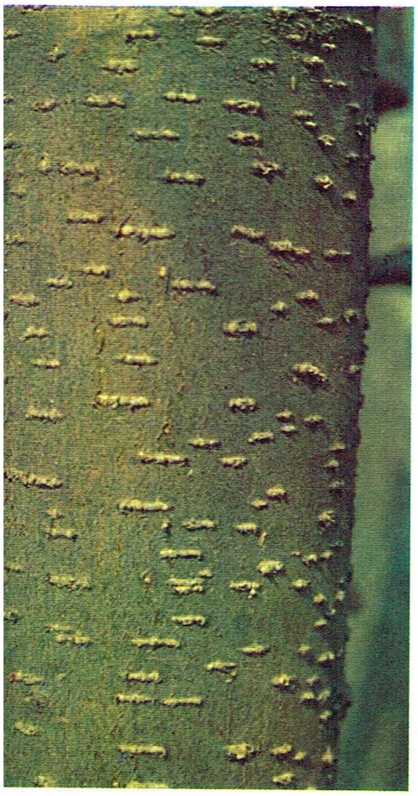

▲ *Aspect du tronc d'un jeune aune glutineux* (Alnus glutinosa) *avec des bandes saillantes de lenticelles juxtaposées.*

▶ *Le noisetier* (Corylus avellana) *est cultivé pour ses fruits, que l'on voit ici entourés de leur cupule membraneuse.*

▼ *Fronde d'un jeune spécimen d'aune glutineux.*

plante de climat tempéré, et largement distribuée. Son aire de répartition comprend la Grande-Bretagne, le sud de la Scandinavie, la Russie centro-méridionale, une partie de la Sibérie, l'Europe continentale centro-méridionale et occidentale et les régions septentrionales de l'Asie Mineure.

L'aune blanc ou aune de montagne *(Alnus incana)* a une taille généralement inférieure à celle du précédent. Ses feuilles sont ovales-rhomboïdales, avec de grosses dents à leur tour dentelées, de couleur vert grisâtre et opaques dessus, blanchâtres et pubescentes dessous. L'écorce est lisse et gris clair. L'aire de cet arbre est disjointe et comprend toute la Scandinavie et les montagnes d'Europe centrale (avec des stations isolées intermédiaires), la Sibérie orientale (avec la variété *sibirica*), ainsi que la partie septentrionale de l'Amérique du Nord (avec la sous-espèce *rugosa* dont les poils des feuilles sont rouges-bruns). L'aune blanc est indifférent au pH du sol, lequel doit être bien drainé mais assez humide.

L'aune vert *(Alnus viridis)* est un arbrisseau grégaire. Ses branches sont prostrées puis ascendantes. Il envahit les pentes d'éboulis humides ou fraîches, en les couvrant de buissons parfois impénétrables. Cette espèce a des exigences thermiques moindres que les précédentes; on la trouve sur les Alpes, généralement à une altitude de 1 500 m à 2 300 m, et même au-delà de la végétation arborescente, de préférence sur sols siliceux. Elle a une aire fragmentée en Europe, et se limite aux montagnes (Alpes, Carpathes, Balkans, montagnes de Corse); on trouve dans les plaines asiatiques septentrionales et au nord du Japon un arbuste voisin, qui a peut-être émigré en Europe au cours des périodes glaciaires et s'y serait transformé en aune vert. Dans les zones froides de l'Alaska, du Canada et des États-Unis croissent *A. crispa* et *A. sinuata* qui sont également voisins. *A. crispa* existe aussi au sud du Groenland. La forme sibérienne, d'abord considérée comme une variété de l'aune vert, est aujourd'hui élevée au rang d'espèce ou de sous-espèce, sous le nom d'*Alnus fruticosa* ou d'*A. viridis subsp. fruticosa*. Les feuilles de l'aune vert sont petites, ovales, aiguës et dentées, en coin ou arrondies à la base (elles sont un peu cordées chez *A. crispa* et *fruticosa*, et lobulées chez *A. sinuata*). Ses tiges sont fines et flexibles. Il est généralement haut de 1 m à 4 m. A cet arbre s'associent de façon caractéristique *Aconitum sp. pl., Adenostyles alliariae, Mulgedium alpinum, Achillea macrophylla,* etc. Son port lui permet de supporter des enneigements importants et prolongés; il est moins exigeant que les autres aunes en ce qui concerne l'humidité du substrat, mais faute de celle-ci, il lui faut en compensation une humidité atmosphérique élevée.

L'aune à feuilles cordiformes *(Alnus cordata)* est une espèce endémique corse et italienne (Apennins de la Campanie, de la Lucanie et de la Calabre). Il est souvent planté dans les parcs, et dans les sols secs de Champagne. Son hygrophilie est moins prononcée que celle des espèces précédentes. Il est spontané entre 800 m et 1 300 m d'altitude; on le rencontre, épars, dans les bois de châtaigniers, de chênes verts, de hêtres et de pins noirs, où il occupe facilement les espaces libres, car il est envahissant. C'est un arbre haut de 15 m à 25 m, avec une silhouette le plus souvent pyramidale. Son tronc a une écorce gris foncé à l'âge adulte, et crispée longitudinalement. Ses feuilles sont caractéristiques, cordiformes, ressemblant à celles des tilleuls, avec des touffes de poils en dessous aux aisselles des nervures. Il lui faut des sols fertiles, frais, acides et bien drainés.

Il y a de nombreuses espèces asiatiques d'aunes. Parmi les espèces uniquement américaines, outre *A. crispa* et *A. sinuata*, nous citerons *Alnus rubra* qui vit du sud de l'Alaska à la Californie et atteint une hauteur de 20 m, *Alnus torulosa* et *A. jorullensis* que l'on rencontre dans les montagnes d'Amérique centrale et les Andes, du Mexique au Chili et à l'Argentine.

Le genre *Corylus* (coudriers) comprend quinze espèces d'arbrisseaux et arbustes, plus rarement d'arbres, de l'hémisphère boréal, monoïques et caducifoliés. Les feuilles sont simples, le plus souvent ovales et dentées. Les chatons mâles sont pendants. Les fleurs femelles sont petites, ont une floraison précoce, et sont réunies en capitules écailleux d'où émergent les stigmates rouges. Les fruits sont secs, indéhiscents, sphéroïdaux ou allongés. Ce sont des akènes ou nucules appelés communément noisettes, avec une paroi ligneuse (péricarpe) et une unique graine à cotylédons charnus; ces fruits sont en outre entourés par une enveloppe foliacée (cupule ou involucre), à bords laciniés.

Le coudrier noisetier ou noisetier *(Corylus avellana)* est un arbuste haut de 3 m à 5 m. Ses feuilles sont suborbiculaires, obovales, velues sur les nervures en dessous, et se terminent brusquement en pointe. Les rameaux jeunes sont glanduleux, et la tige est lisse. Cet arbre est répandu dans toutes les régions tempérées d'Europe, dans les sous-bois ombreux des forêts mixtes de feuillus et dans les hêtraies; il est pionnier et colonise les sols découverts, peu profonds et frais, siliceux ou calcaires, jusqu'à 1 200 m et même 1-500 m d'altitude. Normalement, son port est buissonnant, car chaque pousse se ramifie l'année suivante à sa base sans croître beaucoup ensuite, ce qui fait que ses tiges ne peuvent donner que des perchis de petite taille; son charbon de bois est utilisé comme « fusain » pour le dessin. C'est une plante largement cultivée pour ses fruits; les plus importants producteurs sont l'Espagne, l'Italie et divers pays méditerranéens.

Corylus maxima (C. tubulosa) est plus élevé et a des cupules tubuleuses. Il croît dans le sud-est de l'Europe et en Asie occidentale; on le cultive en Turquie pour ses fruits (ce pays est le premier producteur du monde de noisettes). Sa variété *purpurea* est ornementale, par suite de la belle couleur de ses feuilles. *C. colurna* (coudrier

Bavestrelli-Bevilacqua-Prato

G. P. Mondino

de Byzance) a la même distribution ; c'est un arbre de 20 m à 25 m de hauteur, à port pyramidal, et à écorce se desquamant en minces écailles recourbées. La plus grande espèce est *C. chinensis*, ou coudrier de Chine, qui atteint 40 m de hauteur et habite la Chine centrale et occidentale ; il a une silhouette ovoïde et des branches étalées. Il existe également, dans les mêmes régions, *C. heterophylla*, à port buissonnant. Sont également arbustifs *C. sieboldiana* du Japon et *C. ferox* de l'Himalaya, qui possèdent des cupules épineuses. Les espèces nord-américaines, *C. cornuta* à l'est, *C. californica* à l'ouest, et *C. americana* à vaste aire orientale sont de petits buissons.

Le genre *Ostryopsis* est proche de *Corylus* mais ses étamines ne sont pas divisées. Il habite la Chine et comprend deux espèces buissonnantes à feuilles caduques. *Ostryopsis davidiana* ressemble à un noisetier à petites feuilles.

Le genre *Carpinus* (charmes) regroupe des arbres de petite ou moyenne taille, parfois des arbustes, à fleurs monoïques et à feuilles simples, ovales, obovales ou oblongues, caduques, alternes, régulièrement dentées. Leur écorce est grise et lisse ou écailleuse. Les chatons mâles sont solitaires et latéraux, et les femelles terminent des rameaux. Les infrutescences se présentent comme des grappes de petites cymes pendantes, composées d'involucres de nature triple (une bractée et deux bractéoles), ouverts, foliacés, lobés ou dentés, avec à leur aisselle un petit fruit côtelé indéhiscent. Ces involucres correspondent à ceux des noisettes. Le genre comprend environ vingt-cinq espèces des pays tempérés et tempérés chauds d'Europe, d'Asie occidentale et orientale, de l'Himalaya, et de l'Amérique du Nord et centrale.

Le charme proprement dit *(Carpinus betulus)* ou charme commun est un arbre haut de 20 à 25 m, à tronc formant des contreforts longitudinaux vers le bas, à écorce fine et lisse, grise. Ses feuilles sont subdistiques, ovales, doublement dentées, jaune doré en automne. L'enveloppe fructifère est grande et trilobée. Il ne dépasse guère cent cinquante ans. Il résiste au froid et à l'ombre, sous climat tempéré, et accepte différents types de substrats, mais préfère une certaine fraîcheur, du sol comme de l'atmosphère. Il est typique des chênaies à *Quercus robur (Q. pedunculata)* ; il monte dans les Alpes jusqu'en bas de la zone du hêtre, vers 900 m d'altitude. Il est répandu en Europe centro-méridionale et rare en Espagne. Son bois, à fibres entrecroisées, est lourd et dur, homogène, mais s'altère facilement; on s'en sert pour faire des manches d'outils, des pièces de machines, etc ; c'est un excellent combustible.

Le charme d'Orient *(Carpinus orientalis)* est une espèce du sud-est de l'Europe, d'Asie Mineure et du Caucase. Il forme de petits bois sur sols pauvres, rocheux et calcaires. Il est beaucoup plus xérophile que le précédent, et atteint à peine 10 m. On le reconnaît à ses feuilles plus petites, toujours à double dentelure. Sa limite occidentale est l'Italie.

Diverses espèces de charmes habitent la Chine. Nous citerons *Carpinus turczaninovii*, ressemblant à *C. orientalis*, mais plus petit, *C. tschonoskii*, à bractées très pubescentes, et *C. cordata*, à écorce écailleuse et feuilles à nombreuses nervures (plus de quinze paires). *C. japonica* habite le Japon, il est voisin du précédent, et ses feuilles ont plus de vingt paires de nervures.

Le charme d'Amérique *(Carpinus caroliniana)* a une taille inférieure à celle du charme commun, dont il diffère par l'enveloppe de ses fruits qui est plus courte, à lobes latéraux moins développés et manquant souvent d'un côté, ainsi que par ses akènes et ses bourgeons plus petits et ses chatons femelles moins longs. Il croît du Canada méridional à la Floride et aux plaines du centre de l'Amérique du Nord ; il est plus commun vers le sud, sous la variété *virginiana*, où il atteint en outre sa plus grande taille, sans dépasser 12 m ; il habite le bord des cours d'eau et les sols frais et humides. Son feuillage prend une belle couleur écarlate et orangée en automne. Son bois est semblable à celui du charme commun.

Le genre *Ostrya* est proche du genre *Carpinus*. Les feuilles sont très comparables. L'écorce est rugueuse et écailleuse. Le tronc ne possède pas de côtes. Les fruits sont abrités par des écailles imbriquées, formant des infrutescences semblables à des strobiles pendants, d'où le nom de charme-houblon donné à *Ostrya carpinifolia*.

G. Mazza

▲ *Le charme-houblon* (Ostrya carpinifolia), *Fagale particulièrement résistante à la sécheresse, présente des infrutescences pendantes, dont une vue détaillée figure en bas, à droite.*

◀ *On trouve fréquemment le charme commun* (Carpinus betulus), *aux feuilles ovales et dentées, dans les forêts mixtes de la zone tempérée.*

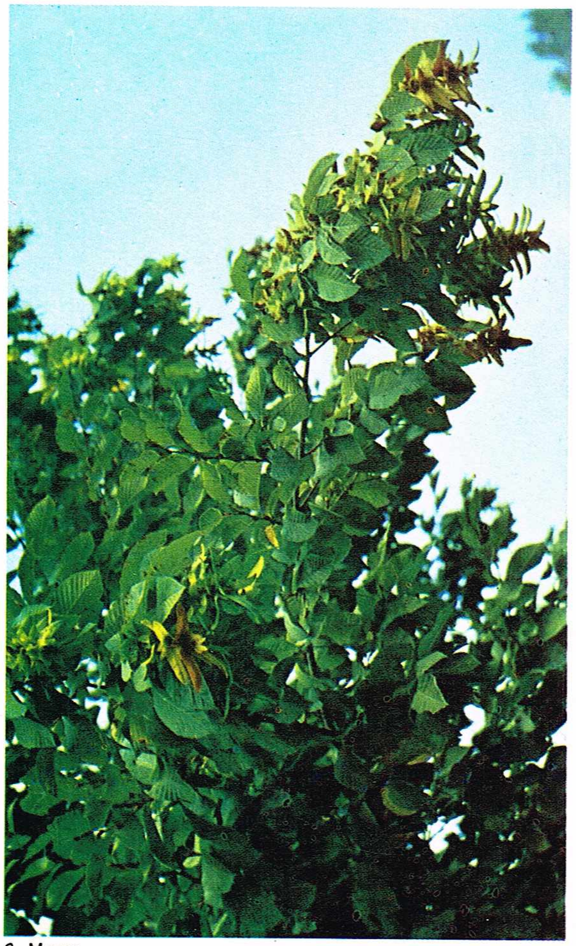

G. Mazza

G. P. Mondino

S.E.F.

▶ *Le chêne rouvre ou pédonculé est un arbre à silhouette souvent globuleuse;* ▼ *il présente une cime touffue à branches robustes.*

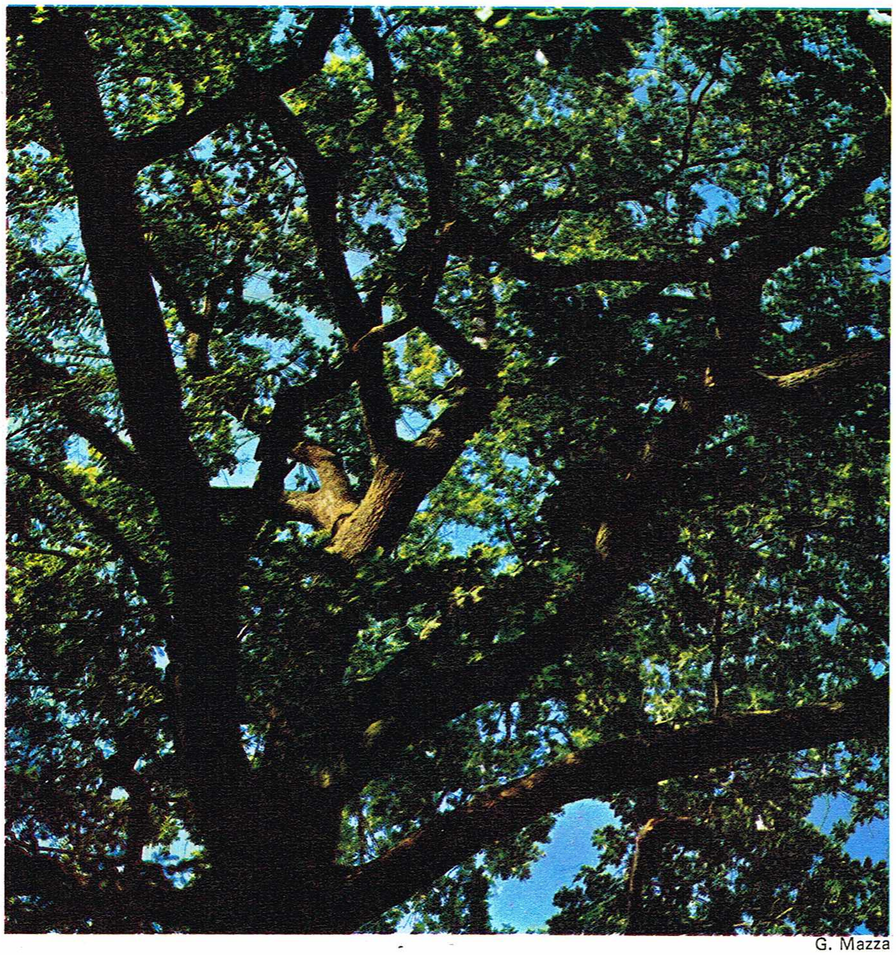

G. Mazza

Ce genre compte cinq espèces de taille petite ou moyenne, croissant en Europe, en Asie occidentale et orientale, ainsi qu'en Amérique du Nord et centrale.

Ostrya carpinifolia est un arbre social haut de 20 m, pionnier sur sols calcaires dans la zone subméditerranéenne; il est commun du Caucase et de l'Asie Mineure à l'Europe sud-orientale; les stations situées le plus à l'ouest se trouvent dans les Basses-Alpes et les Alpes-Maritimes, avec pourtant une localité en Espagne (Aragon). Cette espèce diffère du charme commun non seulement par les caractères de ses fruits et de son tronc, mais aussi par ses feuilles plus planes avec des nervures bifurquées. C'est un arbre très rustique qui résiste remarquablement bien à la sécheresse; il vit jusqu'à cent ans et est très utile comme couverture des pentes abruptes, rocheuses ou d'éboulis, de même que sur les sols marneux. Son bois a des emplois analogues à ceux du charme commun.

Ostrya japonica est proche du précédent et habite le Japon. Parmi les espèces américaines, la plus importante est *Ostrya virginiana,* dont l'aire s'étend sur toute la partie centro-orientale du continent, à partir de la vallée du Saint-Laurent et de la région des Grands Lacs, et jusqu'au Texas et à la Floride septentrionale. C'est un arbre d'environ 25 m de hauteur, à grandes feuilles, et à tronc à contreforts basaux; l'écorce est très écailleuse. Il croît à l'ombre dans les forêts mixtes de feuillus, sur sols caillouteux bien drainés, aussi bien plats qu'en pente. Son bois lourd, très dur, compact, est utilisé pour fabriquer des manches d'outils et comme combustible. Une espèce d'*Ostrya* habite les forêts mixtes de feuillus et de Conifères du Mexique, sous climat subtropical humide.

La famille des *Fagacées (Fagaceae)* comprend des arbres toujours verts ou à feuilles caduques. Ce sont rarement des espèces buissonnantes; ils possèdent des feuilles alternes, simples, pétiolées, penninervées, entières ou diversement dentées ou lobées, stipulées. Les fleurs sont monoïques, avec un périanthe à quatre à sept lobes, les mâles formant des chatons, dont chacun a un nombre d'étamines égal ou supérieur à celui des pièces du

périanthe; les fleurs femelles forment également des chatons ou de courts glomérules, elles sont solitaires ou réunies par deux ou trois, et ont un ovaire infère à trois styles. Les fruits sont indéhiscents, renfermés partiellement ou complètement dans une cupule qui n'a pas toujours la même valeur et qui faisait donner à cette famille le nom de Cupulifères. La famille comprend huit genres, avec plus de six cents espèces, souvent d'un grand intérêt forestier : chênes ou *Quercus, Lithocarpus, Castanopsis,* châtaigniers ou *Castanea,* hêtres ou *Fagus,* et hêtres austraux ou *Nothofagus*. Le genre *Pasania* est très proche des *Lithocarpus,* et nous négligerons le genre monospécifique *Trigonobalanus*.

Le genre *Quercus* (chênes) est le plus vaste de la famille, puisqu'il englobe à lui seul six cents espèces environ; aux espèces proprement dites, parfois difficiles à délimiter, s'ajoutent des hybrides, d'interprétation encore plus délicate. Ce sont des arbres à tronc élevé, rarement buissonnants, qui possèdent des feuilles caduques, persistantes ou semi-persistantes. Ils sont répandus dans l'hémisphère boréal, surtout dans les régions tempérées et tempérées chaudes, mais certains peuplent les montagnes tropicales, jusqu'en Colombie, en Indonésie et en Nouvelle-Guinée. Les chatons mâles sont pendants; les fleurs femelles sont solitaires ou réunies en inflorescences pauciflores. Les fruits sont des akènes nommés *glands* et sont sphéroïdaux, ovoïdes ou presque cylindriques; leur maturation se fait en un ou deux ans; ils sont entourés à la base ou presque complètement renfermés par la cupule, d'origine axiale, qui a l'aspect d'une coupe recouverte de nombreuses petites écailles bractéales de forme variée. Les feuilles sont rarement entières, mais sont le plus souvent dentées, lobées ou pennatifides.

L'espèce linnéenne *Quercus robur* ou chêne rouvre a été subdivisée en trois espèces : *Q. robur* ou chêne rouvre proprement dit, appelé jadis *Q. pedunculata,* car ses inflorescences femelles sont pédonculées, *Q. petraea*, à fleurs femelles sessiles, qui était nommé *Q. sessiliflora*, et *Q. pubescens* ou chêne pubescent.

Le chêne rouvre proprement dit *(Quercus robur)* ou chêne pédonculé est le plus grand, atteignant 30 m à 50 m, avec un diamètre de 1 m à 2 m, et celui qui vit le plus longtemps, jusqu'à cinq cents à mille ans; mais c'est aussi le plus exigeant. Son tronc se divise à une certaine hauteur, pour donner les grosses branches à abondante ramification secondaire formant une silhouette ample, souvent plus ou moins globuleuse. L'écorce, lisse et grise chez les individus jeunes, se transforme plus tard en un rhytidome brun très crevassé longitudinalement. Le système radiculaire, pivotant et largement ramifié, est très robuste. Les feuilles, caduques à la fin de l'automne, sont obovales-oblongues, munies de trois à sept paires de lobes, élargies en haut, rétrécies vers le pétiole, qui n'atteint pas 1 cm de long, souvent auriculées en bas; elles sont de consistance relativement tendre; les stipules sont rapidement caduques, comme chez les deux espèces qui suivent. Les fleurs apparaissent en même temps que les feuilles. Les fleurs mâles constituent des chatons, qui en portent une douzaine. Les étamines sont en nombre variable (de quatre à douze), plus courtes que le périanthe; les fleurs femelles forment aussi, au nombre de deux à cinq, des chatons à long pédoncule fin et pendant. Les glands, ovoïdes, sont striés longitudinalement; ils sont portés par le pédoncule inflorescentiel et mûrissent la première année; ils sont recouverts à la base par une cupule hémisphérique à grosses écailles apprimées et imbriquées.

Le bois, lourd et facile à travailler, a un aubier clair et un cœur volumineux jaune-brun très résistant; sa qualité varie selon la saison et les régions. On s'en sert comme bois d'œuvre et d'industrie. C'est par ailleurs un excellent combustible. Le chêne pédonculé est le plus répandu en Europe (de l'Angleterre et de la Scandinavie méridionale à l'Oural et au Caucase, à la Grèce, à l'Italie, au nord de l'Espagne). Il croît dans les zones tempérées, associé à d'autres feuillus mésophiles *(Tilia sp. pl., Acer sp. pl., Carpinus betulus, Fraxinus excelsior)* ou hygrophiles *(Alnus glutinosa)*; dans la zone méditerranéenne, sur les côtes de la mer Tyrrhénienne, il habite avec *Fraxinus oxyphylla* les zones humides où ne peuvent croître le

G. Mazza

◀ ***Bois (perchis) de chênes et de charmes.***

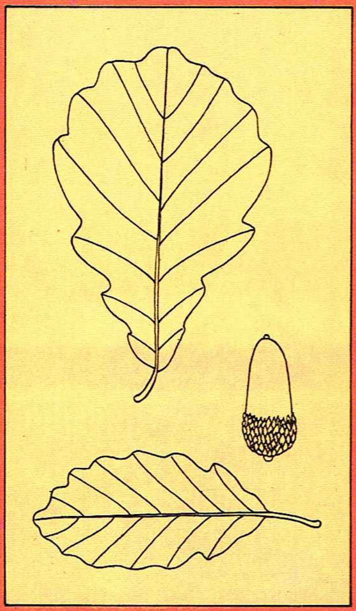
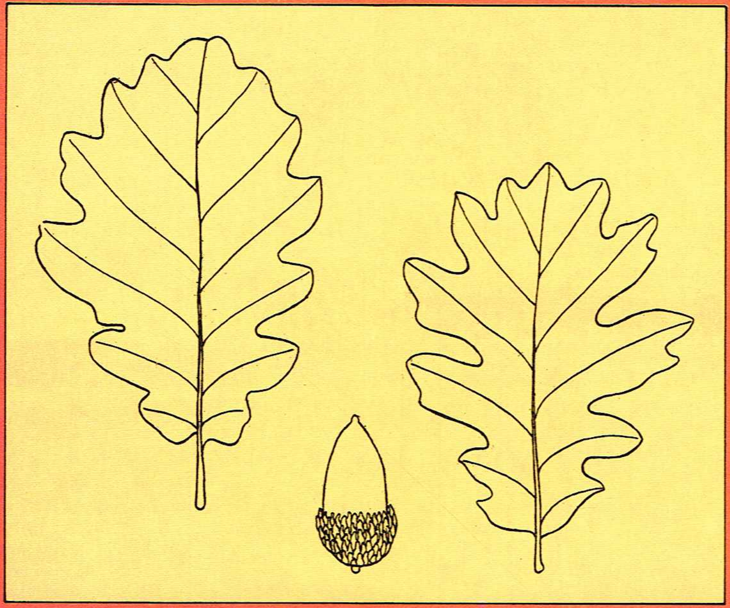
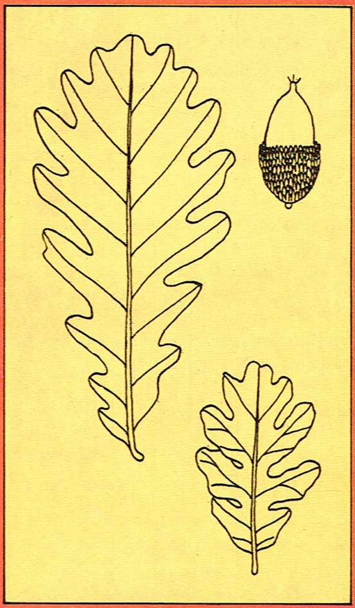
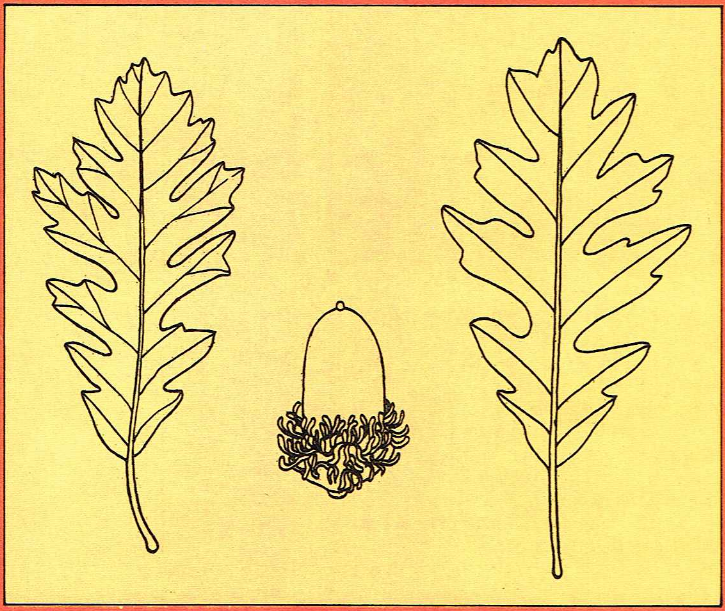
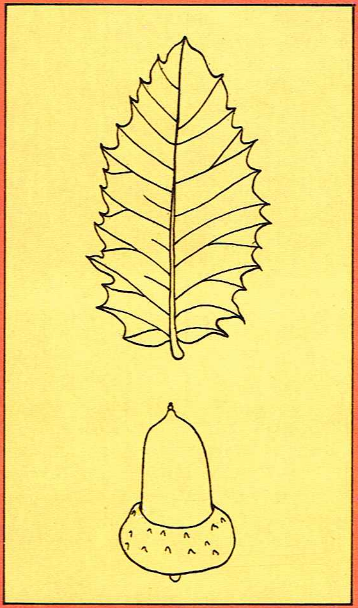
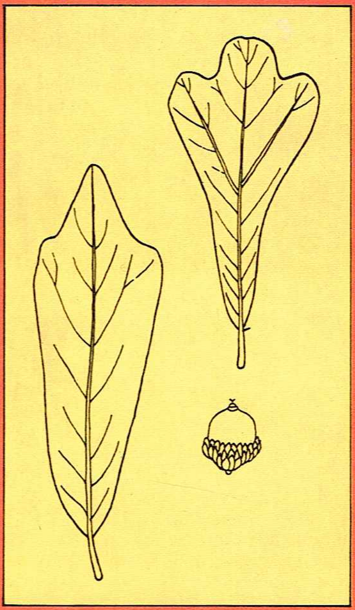
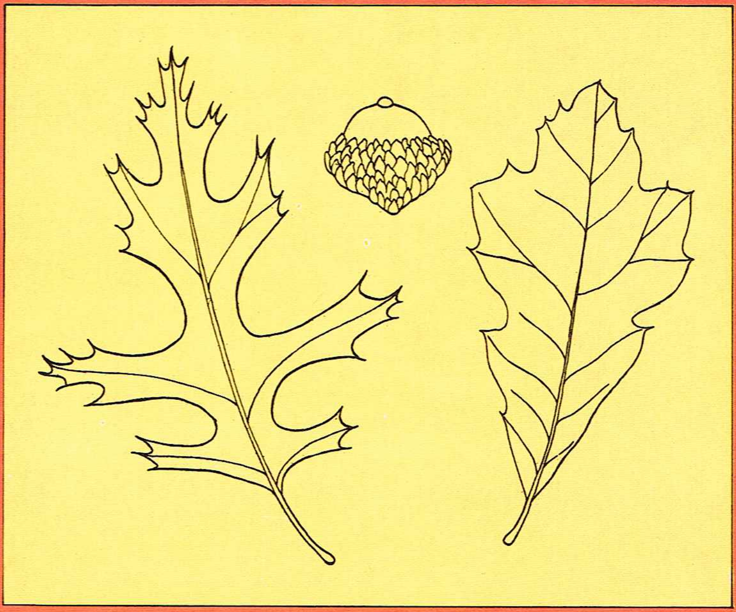

Aspect des feuilles et des glands (akènes à cupule présentant des écailles bractéales de formes diverses) de différentes espèces de chênes, selon Camus. De gauche à droite et de haut en bas : Quercus petraea ; Q. pubescens ; Q. frainetto ; Q. cerris ; Q. chrysolepis ; Q. nigra *et* Q. coccinea.

pin parasol et le chêne vert, caractéristiques de la végétation de cette région. C'est une espèce essentiellement continentale, qui résiste au froid, et qui, en montagne, atteint dans la partie orientale de son aire la zone des Conifères ; elle supporte bien les inondations périodiques, comme dans les majestueuses futaies de Slavonie. Les individus juvéniles sont héliophiles, mais ils s'adaptent ensuite pour constituer des forêts serrées. Comme les deux espèces suivantes, ce chêne rejette vigoureusement de souche.

Le chêne rouvre des forestiers *(Quercus petraea)* ou chêne sessile diffère de l'espèce précédente par sa taille moins élevée et par sa longévité moindre. Son tronc principal reste mieux distinct jusqu'au sommet, avec des branches plus nombreuses et une silhouette plus large. Ses feuilles sont plus consistantes, de forme plus ou moins ovale, habituellement moins profondément lobées et avec des lobes plus nombreux (cinq à neuf paires), non auriculées à la base, à pétiole assez allongé (1 à 2 cm). A peu près sans poils, elles tombent tardivement. L'écorce est crevassée et forme de petites plaques. Les glands, gros et courts, sont sessiles. Ils mûrissent en un an. En Europe, ce chêne a une distribution centro-occidentale, et il est moins répandu que le précédent à l'est et au nord ; il habite les hauts plateaux et les zones collinéennes en France et en Allemagne, souvent associé aux hêtres pour former de splendides futaies. Cette distribution est l'indice de ses exigences écologiques : par rapport au chêne pédonculé, il lui faut moins d'humidité atmosphérique et édaphique, mais il supporte mal les gelées tardives, qui sont plus fréquentes dans les basses plaines humides que dans les zones élevées. Son bois est semblable à celui du chêne pédonculé, mais il est un peu plus grossier et un peu plus lourd. Il a les mêmes usages.

Le chêne pubescent *(Quercus pubescens)* est l'espèce la moins élevée et celle qui a la moindre longévité dans le groupe du chêne rouvre. Il forme des forêts climaciques dans les zones proches de la Méditerranée, en France, en Italie, dans les Balkans et en Asie Mineure, avec quelques stations dans le nord de la France, en Allemagne et en Hongrie, où il est limité à des aires de climat assez chaud où il a pu survivre après avoir colonisé les régions correspondantes lors des périodes interglaciaires plus chaudes et sèches qu'actuellement. On a parfois confondu ce chêne avec le précédent, car il existe des formes de passage probablement hybrides. Il en diffère typiquement par ses jeunes rameaux tomenteux et gris ou jaunâtres, comme le sont aussi les cupules des glands et la face inférieure des feuilles. Celles-ci sont plus coriaces, ont des lobes généralement lobulés, sont assez longuement pétiolées et souvent cordiformes à la base ; elles ne tombent qu'au printemps de l'année suivant leur apparition. Les glands mûrissent en un an.

Le tronc est assez tortueux, court, très ramifié ; la silhouette est déprimée et irrégulière. L'écorce est noirâtre, crevassée de façon serrée, en formant des plaquettes quadrangulaires et rhomboïdales. Ce chêne est nettement héliophile, xérophile et thermophile, mais résiste assez bien aux froids hivernaux, en sorte qu'il atteint 1 000 m d'altitude dans les régions extérieures des Alpes, en des endroits bien exposés. Il est indifférent au substrat bien qu'il préfère les sols calcaires, même pauvres et peu profonds, où il forme des futaies clairsemées, malheureusement souvent dégradées par des coupes faites sans discernement, par les incendies et par l'élevage. Dans les forêts, il se mêle à diverses essences (*Quercus cerris, Q. frainetto, Ostrya carpinifolia, Fraxinus ornus, Acer opalus, A. campestre, A. monspessulanum,* etc.). Il descend souvent en pleine zone méditerranéenne, où il peut remplacer le chêne vert, qui en est plus typique, par suite de l'intervention de l'homme. A la différence des deux chênes déjà décrits, il produit des glands dès son jeune âge (dix ans). Son bois, dur et lourd, est d'assez mauvaise qualité ; il sert surtout de bois de chauffage et pour préparer du charbon ; on en fait également des traverses de chemin de fer. Son écorce contient du tanin ; on la récoltait naguère pour l'extraction de ce produit. Les glands de ce chêne, comme ceux des autres espèces, servent à la nourriture des porcs. On trouve sur ses racines, dans le sol, des truffes noires qui sont très appréciées.

Le chêne tauzin *(Quercus pyrenaica = Q. toza)* est voisin du chêne pubescent, mais ses feuilles sont pubescentes sur les deux faces, et les jeunes pousses sont argentées et plus ou moins lavées de pourpre. C'est un arbre atlantique qui se rencontre depuis le sud de la Bretagne jusqu'au Portugal, et vers l'intérieur jusqu'en Sologne. Il recherche la lumière et surtout l'humidité, et ne s'accommode pas des sols calcaires. Il est très exposé aux attaques de l'oïdium. Son bois n'est pas meilleur que celui du chêne pubescent.

Le chêne chevelu *(Quercus cerris)* est un arbre nettement distinct des précédents par ses caractères végétatifs. Il mesure de 20 à 35 m de hauteur. Son tronc est élancé et sa silhouette est dense. Il peut vivre plus de deux cents ans. Son écorce, épaisse et grossière, a des sillons longitudinaux profonds et espacés, et est un peu subéreuse. Ses feuilles ont une forme variable ; à peine lobées, ou bien profondément et irrégulièrement pennatifides, elles sont vert foncé au-dessus et rugueuses au toucher, assez velues en dessous, et elles possèdent des stipules

Bavestrelli-Bevilacqua-Prato

▲ Spécimens de chêne vert* (Quercus ilex). *Cette espèce est typique des régions méditerranéennes.

Bavestrelli-Bevilacqua-Prato

◄ Jeune gland de chêne vert.

▼ Aspect de l'écorce d'un chêne vert adulte.

Bavestrelli-Bevilacqua-Prato

persistantes. Les glands atteignent 5 cm de long et mûrissent en deux ans; ils ont une cupule à longues écailles minces, tomenteuses, libres et recourbées vers l'extérieur. Ce chêne a une aire européenne, avec un centre de dispersion oriental dans la péninsule balkanique et en Italie centro-méridionale; on le rencontre sporadiquement en Turquie, en France (Doubs, Alpes-Maritimes) et en Espagne. Là où il est présent, il domine, avec le châtaignier, la zone proche de la Méditerranée dans sa partie supérieure.

Les terrains calcaires lui sont peu favorables, alors qu'il se développe très bien sur ceux de nature volcanique. Son bois, brun rougeâtre, lourd, de mauvaise conservation, se brise facilement; on s'en sert surtout pour faire des traverses de chemin de fer, des tonneaux, des poteaux de mine, etc. Il brûle très bien et donne un excellent charbon de bois.

Le chêne velani *(Quercus macrolepis)* est un arbre atteignant 25 m, à port semblable à celui du chêne rouvre. Ses feuilles sont semi-persistantes, ovalaires, à consistance de cuir, à poils courts à la face supérieure, et d'aspect cotonneux et jaunâtre en dessous, entières ou grossièrement dentées ou lobées. La cupule recouvre la moitié au plus du gland sessile et a des écailles recourbées. Le fruit mûrit en deux ans. Cet arbre est spontané en Europe orientale (Albanie, Grèce, Turquie); une sous-espèce se trouve en Israël. C'est une essence thermophile, xérophile et s'adaptant à des sols variés. Au nord de son aire, il s'associe au chêne chevelu, et au sud au *Quercus calliprinos*. Son bois sert en construction navale. Les cupules, qui contiennent beaucoup de tanin (de 25 à 50 %), servaient naguère pour tanner les peaux. Les glands de certaines variétés sont doux et comestibles.

Le chêne de Macédoine *(Quercus trojana)* a lui aussi une aire située en Europe orientale (Albanie, Grèce, Yougoslavie, Bulgarie, Turquie). Il atteint également le sud de l'Italie. Il est relativement plus mésophile que le chêne pubescent, mais il est aussi plus exigeant, car il préfère les terrains frais, un peu acides ou neutres. C'est un arbre généralement de taille modeste (10 m). Ses feuilles sont coriaces, vert foncé, glabres, et leur forme rappelle, bien qu'elles soient plus petites, celles du châtaignier. Ses glands sont munis de cupules couvertes d'écailles recourbées. Ils mûrissent en un an. Le bois brûle très bien et donne un excellent charbon; les grands troncs servent à faire des charpentes d'embarcations, des tonneaux, des traverses de chemin de fer, etc.

Le chêne vert *(Quercus ilex)* est l'espèce typique de la région méditerranéenne. Il atteint 25 m de hauteur et peut dépasser l'âge de mille ans; cependant, c'est souvent un arbrisseau buissonnant. Le tronc des exemplaires arborescents est robuste et recouvert d'un rhytidome foncé finement divisé en petites plaques; il se ramifie vite et présente une couronne serrée, plus ou moins globuleuse. Les feuilles, qui persistent pendant trois à quatre ans, sont ovales-oblongues; elles sont vert foncé et brillantes en dessus, grises ou tomenteuses et blanchâtres en dessous, ont des bords à peu près entiers et un peu recourbés, ou bien dentés, ondulés et épineux. L'appareil radical est constitué par une longue et robuste racine pivotante, avec des racines latérales horizontales. Les glands mûrissent en un an. Ils sont oblongs et pointus, à demi inclus dans la cupule à écailles serrées et tomenteuses. Dans la partie orientale du bassin méditerranéen, cet arbre est rare ou sporadique; à l'ouest, il va jusque sur les côtes atlantiques de la France (au sud de la Bretagne), de la péninsule Ibérique et du Maroc. Dans le dernier cas, c'est un arbre montagnard qui croît de 500 m à 2 000 m et même 2 900 m d'altitude. Le régime climatique de sa zone de végétation est principalement méditerranéen, c'est-à-dire chaud l'été et doux l'hiver, avec des pluies surtout hivernales dont l'importance varie beaucoup selon les zones (de 400 mm à 1 000 mm et même 1 500 mm par an). Il s'accommode des sols les plus divers, sauf des terrains argileux et compacts. Il peut former des peuplements monospécifiques s'il n'est pas coupé. Ce serait le climax de la région méditerranéenne si celle-ci n'avait pas été en grande partie dégradée; aussi le trouve-t-on aujourd'hui avec d'autres éléments toujours verts du maquis ou de la garrigue, qui est bien moins dense. Son bois est dur, compact, lourd, difficile à travailler, nerveux, et sujet à se tordre. Comme il peut prendre un beau poli, il est pourtant utilisé en ébénisterie. Toutefois, on l'emploie surtout comme bois à brûler ou pour fabriquer du charbon. Les glands constituent une excellente nourriture pour les porcs. L'écorce est riche en tanin.

▶ ***Rameaux de chêne vert portant des glands.***

G. P. Mondino

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Plantation de chênes-lièges. On remarquera la couleur rougeâtre des troncs récemment écorcés.***

Le chêne-liège *(Quercus suber)* est une espèce toujours verte de la Méditerranée occidentale, qui croît des côtes de la péninsule Ibérique et du Maroc, sur l'Atlantique, jusqu'au littoral catalan et provençal, à la Sardaigne, la Sicile, la Corse, la Toscane, le Latium, la Calabre et l'Afrique du Nord. C'est un arbre atteignant 20 m, caractérisé par une écorce typiquement subéreuse, épaisse, profondément crevassée, rougeâtre sur les parties du tronc qui ont été récemment écorcées. Les feuilles, persistantes et de la consistance du cuir, sont ovales ou lancéolées, aiguës, vert foncé et glabres au-dessus, blanches et tomenteuses en dessous, avec des dents mucronées ou épineuses. Les glands, qui mûrissent en un an en général, ont une cupule qui peut recouvrir la moitié du fruit, avec des écailles supérieures en lanières. Cette espèce est acidophile et mésophile, elle croît dans les zones où la pluviosité annuelle est de plus de 1 000 mm. La forêt de chênes-lièges, normalement clairsemée, est propagée artificiellement par l'homme, notamment au Portugal, en Espagne et en Algérie. Pour récolter rationnellement l'écorce, il faut attendre de neuf à douze ans, et opérer à la fin du printemps et en été sur des arbres bien développés, d'une quarantaine de centimètres de circonférence. Le produit obtenu la première fois *(liège mâle)* n'est pas de bonne qualité car il est dur et très poreux ; par la suite, une nouvelle assise génératrice reforme du liège, et, tous les dix à quatorze ans, on peut enlever du *liège femelle* que l'on utilise pour fabriquer les bouchons, pour lesquels il faut des qualités particulières d'élasticité, d'homogénéité et de résistance. C'est le *démasclage*. Comme l'arbre vit plusieurs siècles, il peut être ainsi démasclé dix à quinze fois. Le bois lui-même n'a qu'une importance secondaire. On s'en sert comme combustible et pour faire du charbon, mais aussi pour la menuiserie. La variété *occidentalis*, fréquente dans les Landes, produit également du liège et diffère du type par ses feuilles semi-persistantes et ses glands mûrissant en deux ans.

Le chêne kermès *(Quercus coccifera)* est un arbuste ou un arbrisseau de 0,50 m à 3 m, d'une grande longévité, et intéressant pour la couverture végétale des sols dégradés. Il a un tronc et des ramifications tortueux ; sa croissance est très lente. Ses feuilles sont petites, coriaces et toujours vertes, glabres, semblables en plus petit à celles du houx, à bords ondulés et épineux. Les glands oblongs mûrissent en deux ans et sont inclus plus qu'à demi dans une cupule à écailles spinescentes. C'est un élément méditerranéen occidental, qui remplace souvent le chêne vert dans les garrigues, formes de dégradation de la végétation qui couvrent de vastes étendues en France et en Afrique du Nord, sur tous les sols, dans des zones pauvres et sèches et surtout calcaires. C'est sur ce chêne que vit une cochenille *(Kermes ilicis)* dont les femelles adultes, grosses comme des petits pois (« graine d'écarlate »), servaient, séchées et pulvérisées, à la préparation d'une teinture de couleur rouge.

Dans le bassin méditerranéen oriental, ce chêne est remplacé par *Quercus calliprinos*, dont le port est plus fréquemment arborescent, et qui en diffère essentiellement par ses glands à peu près globuleux et à demi enclos dans une cupule à écailles plus longues. Son aire comprend la Turquie, la Syrie et Israël.

Le chêne du Portugal *(Quercus lusitanica = Q. fruticosa)* habite des régions intérieures de la péninsule Ibérique, sous climat méditerranéen, et on ne le trouve pas dans les régions septentrionales soumises aux influences atlantiques. C'est un arbre de taille moyenne, à feuilles semi-persistantes, ovales, avec de grosses dents triangulaires et brièvement tomenteuses en dessous. Les jeunes rameaux et les cupules sont également tomenteux ; les écailles de ces dernières, effilées, sont libres à leur extrémité.

Quercus infectoria est une espèce voisine, de l'Asie Mineure et de Chypre. Un *Cynips* pond dans ses jeunes bourgeons et les transforme ainsi en galles (galles d'Alep) desquelles on extrait le tanin officinal, astringent et hémostatique. *Quercus canariensis (Q. mirbeckii)*, jadis considéré comme une variété du chêne du Portugal, est un arbre plus élevé, avec des feuilles qui finissent par devenir glabres et qui sont grossièrement dentées ou

I.G.D.A. - Archives P2

▲ ***La récolte du liège s'effectue tous les dix à quatorze ans. Un arbre fournit en moyenne 7 à 8 kg de liège brut et peut être démasclé dix à quinze fois au cours de son existence.***

lobées; son aire comprend l'Afrique du Nord et le sud de l'Espagne et du Portugal. Il est particulièrement répandu en Algérie, où il vit sur des sols fertiles et profonds; son bois, dur et lourd, est utilisé comme bois d'industrie.

Quercus castaneaefolia est un arbre du Caucase et de l'Iran qui atteint 25 m; ses feuilles, avec de grosses dents mucronées, et velues en dessous, conservent leurs stipules et sont semi-persistantes; les glands mûrissent la première année et sont à demi recouverts par une cupule à écailles tomenteuses en lanières recourbées. La variété *incana* a un port pyramidal et des feuilles larges; elle habite l'est de l'Algérie et a reçu également le nom de *Quercus afares*.

Le chêne du Liban *(Quercus libani)* est un petit arbre de 10 à 12 m, à feuilles caduques, oblongues et lancéolées, petites, aiguës, dentelées, pubescentes ou non en dessous, où elles sont plus claires. Les glands, qui mûrissent en deux ans, sont enfermés pour les deux tiers dans une grosse cupule à écailles peu serrées. Cette espèce croît en Turquie et en Syrie.

Quercus pontica est un arbrisseau ou un petit arbre à feuilles elliptiques ou oblongues, aiguës, fortement dentées, glauques en dessous, et à nervure principale et pétiole jaunes. Ce chêne se rencontre dans les parties du Caucase et de l'Arménie tournées vers la mer Noire, et à pluviosité élevée. Il est considéré comme étant de type primitif. Il est très proche de *Quercus groenlandica*, que l'on trouve dans les terrains tertiaires du Groenland et du Spitzberg.

Quercus acutissima (Q. serrata) est un arbre de taille moyenne qui habite la Corée, le Japon, l'ouest de la Chine, le nord de l'Indochine et l'Himalaya. Il a une écorce fine mais subéreuse, grise et fissurée. Ses feuilles ressemblent à celles du châtaignier, et sont luisantes et glabres au-dessus, plus claires en dessous. Ses glands, qui sont mûrs la seconde année, sont recouverts pour les deux tiers par la cupule, à écailles tomenteuses (les supérieures très longues et linéaires). On utilise le bois de cet arbre pour la construction.

Quercus variabilis, propre à la Chine septentrionale, à la Corée et au Japon, habite sous climat tempéré chaud. Ses feuilles sont blanches et tomenteuses en dessous et munies de neuf à seize paires de dents dont les pointes sont prolongées en soies. La couche de liège qu'il forme est exploitée dans les pays d'origine. *Quercus glandulifera* possède des feuilles vert clair dessus, grisâtres à la face inférieure, restant longtemps vertes en automne et munies de sept à douze paires de dents aiguës surmontées chacune par une glande.

Quercus mongolica habite sous des climats tempérés et tempérés froids en Sibérie orientale, dans le nord de la Chine, en Corée et dans le nord du Japon. Il atteint une hauteur de 35 m. Ses feuilles sont à peu près sessiles, caduques, glabres, groupées à l'extrémité des rameaux, obovales, obtuses, et grossièrement sinuées et dentées. Le bois est de bonne qualité. *Quercus dentata* a une aire comparable, à l'exclusion de la Sibérie, mais s'étend plus au sud et croît sous des climats moins froids; il possède des feuilles souvent très grandes (jusqu'à 30 cm de longueur), avec des lobes arrondis, et pubescentes en dessous; son bois est peu apprécié.

Le genre *Quercus* se retrouve avec différentes espèces toujours vertes jusqu'en Indonésie et en Nouvelle-Guinée. Ainsi, à Java, il en existe quelques-unes en forêt tropicale. Aux Philippines et en Malaisie, ce sont d'importants éléments de la forêt pluviale submontagnarde à plantes épiphytes, avec des espèces du genre *Neolitsea*. En Malaisie, de nombreux chênes se retrouvent jusque dans la forêt montagnarde (altitude de 1 500 m à 1 800 m), avec des *Lithocarpus,* qui sont toujours verts.

Les chênes indonésiens donnent des bois lourds, à fibres droites et grosses, mais qui ne se conservent pas bien et sont utilisés pour des constructions et des meubles. En Nouvelle-Guinée, on trouve des chênes dans les forêts de piedmont mais aussi jusqu'à 1 650 m d'altitude. D'autres espèces montent jusqu'à plus de 2 200 m dans les forêts de moyenne altitude à climat très humide, avec divers araucarias.

Les chênes ont une grande diffusion en Amérique du Nord, avec de nombreux représentants aux États-Unis et au Mexique; dans ce dernier pays, il s'agit en partie d'arbres toujours verts ou à feuilles semi-persistantes. Les espèces des États-Unis sont plus abondantes dans la moitié orientale : on en rencontre, en effet, plus de trente-cinq dans l'Est contre une dizaine dans la région des montagnes Rocheuses et autant dans la bande littorale de l'océan Pacifique.

Les chênes des États-Unis appartiennent à deux grands groupes dans leur sens large : les chênes blancs ou *white oaks* et les chênes rouges (ou noirs) ou *red (black) oaks*. On peut avec Williams (1939) placer dans le second tous les chênes *semper virens*, essentiellement en fonction des caractères du bois.

Le premier de ces deux groupes comprend des plantes dont les feuilles présentent des lobes ou des dents non aigus, dont les fruits, doux, mûrissent en une saison, et dont les vaisseaux du bois d'été sont anguleux, petits et à paroi mince. Le second groupe est en revanche caractérisé par des feuilles à lobes aigus, ou entières mais avec des nervures mucronées, et par des fruits qui sont habituellement amers et mûrissent généralement en deux ans; les vaisseaux du bois sont arrondis, grands, et à paroi épaisse.

Du point de vue commercial, le bois des chênes blancs est considéré comme supérieur à celui des chênes rouges,

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

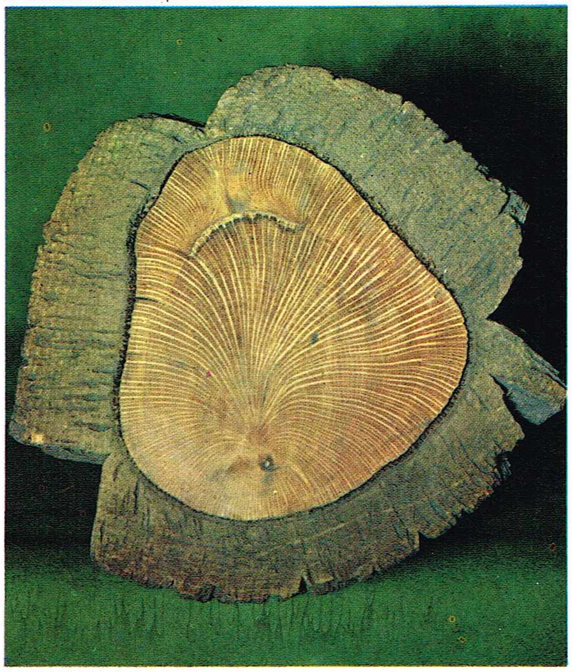

▶ ***Section transversale d'un tronc de* Quercus suber *(chêne-liège).***

car il est plus durable et généralement un peu plus lourd ; la résistance mécanique est toutefois identique. Parmi les chênes blancs, nous examinerons une dizaine d'espèces intéressantes à divers titres.

Quercus alba (« white oak ») est l'un des feuillus les plus utiles aux États-Unis. Il atteint une hauteur de 35 m et un diamètre de 1,20 m à 1,50 m. Il peut vivre six cents ans. C'est lui qui donne les trois quarts du bois vendu commercialement sous le nom de chêne blanc. En forêt, sa silhouette est étroite, son tronc haut et droit. Cette espèce doit son nom à la couleur gris clair de l'écorce, qui, chez les individus juvéniles, est écailleuse en surface. Ses feuilles sont caduques, cordées à la base, à cinq à neuf lobes ou profondément pennatifides, oblongues, à peu près ovales, et glabres. Les fruits sont sessiles ou pédonculés, engagés au quart dans une cupule un peu aplatie, pourvue d'écailles basales épaisses et tomenteuses. C'est l'un des chênes les plus répandus de l'est des États-Unis (bassin du Mississippi et États de la côte atlantique), sous des climats très variables, généralement à faible altitude, et surtout sur des sols profonds et frais ; on le rencontre aussi dans des terres moins riches, sauf sur celles qui sont trop peu épaisses ou trop humides. Cet arbre vit en association avec d'autres chênes et des représentants des genres *Carya* (« hickory »), *Magnolia* ou *Liriodendron*. Sa croissance est assez lente. Son bois, lourd et résistant, est utilisé pour les constructions navales, la menuiserie, comme bois d'industrie et comme combustible.

Quercus macrocarpa (« burr oak ») a une aire qui va du sud du Canada jusqu'à la Pennsylvanie, et vers l'ouest jusqu'au Montana et au Texas. Il a été abondant, mais s'est maintenant raréfié. Les plus beaux exemplaires atteignent 50 m de haut pour un diamètre de 2 m. Les feuilles sont caduques, obovales ou oblongues, à bords en général plus ou moins profondément lobés, à sommet arrondi ; elles sont vert foncé et brillantes au-dessus, plus claires et pubescentes au-dessous. Les glands, longuement ovoïdes, sont à demi enveloppés dans une cupule tomenteuse, avec des écailles dont les supérieures se prolongent en appendices qui forment un bord frangé, tandis que les inférieures sont très épaisses. C'est un arbre exigeant dans la partie méridionale de son aire (zones fertiles et humides) ; au nord, on le rencontre sur des sols calcaires et pauvres, car il résiste très bien à la sécheresse. Dans les endroits frais, il est associé à différents chênes, érables, ormes, etc. Son bois a les mêmes usages que celui de l'espèce précédente.

Quercus lyrata (« overcup oak ») est principalement un arbre du sud-est des États-Unis, mais il atteint le New Jersey et le Missouri au nord. Il est haut de 25 à 30 m. Il est habituellement peu abondant, sauf sur le cours inférieur du Mississippi et de ses affluents, sur des sols inondés la plus grande partie de l'année, en compagnie d'autres chênes recherchant l'humidité. Les glands, de forme déprimée, sont presque entièrement enfermés dans la cupule qui est pourvue d'épaisses écailles à la base, les supérieures étant fines et aiguës. Les feuilles, étroites et allongées, ont six à huit lobes plus ou moins triangulaires et obtus ; elles sont vert foncé au-dessus, blanchâtres en dessous. Le bois, plus lourd que celui de l'espèce précédente, dur et résistant, se conserve très bien même au contact du sol.

Quercus stellata (« post oak »), qui a une aire comparable au précédent, est aussi un arbre de taille moyenne (15 à 20 m). Il doit son nom à la disposition étoilée de ses grandes feuilles au sommet des rameaux ; ces feuilles ont un aspect à peu près cruciforme, avec quatre à six lobes dont les médians, de part et d'autre, sont bien plus grands ; elles sont caduques, épaisses, vert foncé et brillantes à la face supérieure, avec, lorsqu'elles sont jeunes, des poils grisâtres ou jaunâtres en dessous. Les fruits sont petits et enfermés pour un tiers ou un demi dans une cupule à écailles lâches, fines et tomenteuses. Contrairement aux espèces précédentes, celle-ci est spécialement répandue sur des sols sablonneux ou rocheux, et même calcaires, surtout au nord, où l'arbre peut avoir un aspect buissonnant. Ce chêne résiste bien aux alternances d'humidité et de sécheresse (la variété *mississipiensis* croît dans les lieux humides). Dans les endroits à sols pauvres, il peut former des forêts climaciques ; il s'associe habituellement avec *Quercus velutina*, *Quercus marylandica* et divers hickories. Son bois, toujours lourd, a des caractères et des usages semblables à ceux des chênes blancs précédents.

Quercus garryana (« Oregon oak ») a une distribution occidentale, de la Colombie britannique aux montagnes de la Californie centrale ; il est généralement absent de la côte. Il se rencontre sur des sols souvent pauvres et secs, jusqu'à 1 200 m d'altitude environ. Il est habituellement associé au sapin de Douglas, qui, croissant plus rapidement, finit par l'éliminer du fait du caractère très héliophile de ce chêne. Il atteint 30 m. Son tronc est en général court. Son écorce est gris clair et forme des plaquettes. Sa silhouette est arrondie. Ses feuilles sont caduques, épaisses et rigides, obovales, avec six à dix lobes assez profonds, vert foncé et brillantes au-dessus, vert clair avec des poils orangés en dessous. Les glands ont une petite cupule à écailles pubescentes ou tomenteuses, avec de fines extrémités libres. Le bois a les mêmes emplois que celui des autres chênes blancs.

Quercus lobata atteint 30 m de haut et est limité à la Californie (sierra Nevada et Coast Ranges à basse altitude) où il forme des forêts clairsemées, souvent pures, dans le fond de vallées alluvionnaires où la nappe phréatique est élevée. Sa couronne est ample et hémisphérique ou déprimée. Ses feuilles sont profondément lobées (sept à onze lobes) et pubescentes sur les deux faces. L'écorce est grise, profondément fissurée, et forme de petites plaques. A un âge avancé (plus de cent ans), les rameaux sont longs et pendants. Le bois est lourd et dur, mais fragile et peu résistant ; on ne peut guère l'employer. Les glands, de saveur douce, étaient jadis utilisés dans l'alimentation. C'est un arbre à croissance assez rapide, et qui atteint, mais rarement, l'âge de trois cents ans.

G. Valerio

▼ ***Le chêne pubescent* (Quercus pubescens) *occupe souvent dans les régions méditerranéennes la place du chêne vert.***

G. Mazza

▲ **Quercus coccinea,** ***espèce américaine souvent cultivée à des fins ornementales, en raison de la couleur écarlate de son feuillage en automne.***

Toujours dans le groupe des chênes blancs, on compte quatre espèces qui forment aux États-Unis le sous-groupe des « chestnut oaks », aux feuilles ressemblant un peu à celles du châtaignier. *Quercus prinus (Q. michauxii)* [« swamp chestnut oak », « basket oak »], espèce thermophile du sud-est des États-Unis, a une aire qui s'étend de la côte atlantique à la basse vallée du Mississippi et au golfe du Mexique, sous un climat caractérisé par des hivers brefs et doux, et des étés chauds sans périodes sèches (il y a une moyenne de 1 500 mm à 1 800 mm de pluie pendant la période végétative, qui va d'avril à septembre). On le rencontre sur des sols bien drainés, surtout dans les fonds de vallées, où les inondations sont de courte durée, en association avec d'autres chênes, des ormes et des frênes. Les feuilles de cet arbre sont caduques, larges, obovales, grossièrement dentées, à face supérieure vert foncé et brillante, et à face inférieure pubescente et blanc argenté. Les glands sont très brillants et enfermés au tiers environ dans une mince cupule à écailles tomenteuses terminée en bordure raide. L'arbre peut atteindre une hauteur de 30 m. Son bois, très lourd et se conservant bien, est largement utilisé.

Quercus montana (« chestnut oak ») a une distribution assez limitée, des côtes de la Nouvelle-Angleterre aux régions centro-orientales sur les deux versants des Appalaches, jusqu'à 1 300 m d'altitude, dans des zones sèches et sur des sols même sableux et caillouteux du type des podzols. On le trouve surtout associé au pin Weymouth ou à d'autres chênes et divers feuillus, selon l'altitude, avec un sous-bois où dominent les Éricacées, seul ou par petits peuplements et uniquement dans les endroits les plus pauvres. Il ne dépasse pas 25 m, et a une silhouette large et irrégulière. Son écorce a de profondes fissures longitudinales. Ses feuilles sont grandes, caduques, oblongues, lancéolées ou obovales, aiguës ou acuminées, grossièrement crénelées, glabres, vert foncé au-dessus, plus pâles et couvertes de poils au début en dessous. Les glands sont à moitié enfermés dans une cupule pubescente et tuberculée. Le bois sert habituellement de combustible. L'écorce contient du tanin. Cet arbre peut vivre de huit cents à mille ans.

Quercus bicolor (« swamp white oak ») vit dans les plaines du sud des Grands Lacs, avec une distribution plus limitée sur les côtes atlantiques. De taille moyenne, il a une silhouette irrégulière et un tronc très rameux, couvert d'un rhytidome brun foncé, profondément fissuré ; l'écorce des branches se desquame en écailles papyracées. Les feuilles, caduques, obovales, ont une base cordiforme et sont grossièrement sinuées-dentées avec des dents triangulaires ; elles sont vert sombre au-dessus, et plus claires et tomenteuses en dessous. La cupule du gland, qui l'enclôt au tiers, a des bords un peu frangés. On trouve cette espèce avec d'autres feuillus hygrophiles le long des fleuves et dans les marais, sur sols peu aérés et soumis à des inondations. Le bois est de qualité médiocre.

Quercus muhlenbergii (« yellow chestnut oak ») atteint le Texas et le Nouveau-Mexique, à partir de la région des Grands Lacs, mais en évitant les zones côtières. C'est une espèce peu importante du point de vue forestier, généralement limitée aux terrains pauvres et rocheux, en particulier les sols calcaires des Appalaches. Ce chêne a besoin de substrats bien drainés, neutres ou alcalins, où il se mêle à différents autres chênes. C'est l'espèce dont les feuilles, avec leurs huit à treize paires de dents aiguës, ressemblent le plus à celles du châtaignier. Le bois de cette essence, très lourd, a les mêmes usages que celui des autres chênes blancs.

Dans le groupe des chênes rouges, nous étudierons une quinzaine d'espèces importantes.

Quercus borealis (*Q. rubra*, « red oak ») est l'un des chênes les plus communs aux États-Unis. Il atteint 30 m de hauteur et 1,20 m de diamètre. Il s'étend de la côte atlantique centro-septentrionale à la vallée du Saint-Laurent et aux Grands Lacs jusqu'au golfe du Mexique. Il occupe des sols variés, de préférence fertiles et frais, bien drainés, généralement associé à des pins, des frênes, des chênes, des tilleuls et de nombreux autres feuillus, en formant des forêts climaciques ou paraclimaciques. Dans son aire, il est soumis à des conditions climatiques assez diverses, tempérées froides à tempérées chaudes, la période sans gelées étant de cent à deux cent vingt jours par an. C'est l'un des chênes les plus tolérants à l'ombre. Il peut vivre de deux cents à trois cents ans. On l'a assez largement planté en Europe, soit dans les parcs à cause de la belle coloration rouge de ses feuilles en automne, soit dans les endroits à reboiser. En forêt, il a un tronc droit et colonnaire, avec une vaste couronne arrondie, surtout chez les sujets isolés. Les feuilles, largement oblongues ou obovales, ont sept à onze grands lobes triangulaires à dents pointues. Leur face supérieure est verte, leur face inférieure un peu plus claire. Les glands sont à peu près sphéroïdaux et ont une cupule aplatie, épaisse et un peu poilue qui les enveloppe au tiers. L'écorce, brune ou presque noire, est sillonnée de fines crevasses longitudinales. Le bois, assez lourd et assez dur, a une bonne résistance mécanique mais il n'est pas de longue durée ; il a un aubier blanc et un cœur brun-rouge ; il sert de bois d'industrie et est utilisé en menuiserie.

Quercus falcata (« Spanish oak ») a une aire qui couvre la côte atlantique centro-méridionale et les plaines centrales des États-Unis, jusqu'au Texas et au golfe du Mexique. Il occupe les sols les plus secs et les plus pauvres, aussi bien argileux que sablonneux, en général au-delà de 600 m d'altitude, et dans les expositions les plus chaudes. Il atteint 25 m et a généralement un tronc court et une silhouette dominée par de grosses branches, même en forêt. Il présente un système radiculaire profond. Ses feuilles sont typiquement pendantes ; elles peuvent être trilobées ou pennatifides, avec trois à sept lobes étroits et aigus ; elles sont vert foncé et brillantes en dessus, et grises ou fauves et poilues au-dessous. L'écorce est épaisse, très foncée, avec de profondes et fines fissures. Les glands sont recouverts pour un tiers ou moins par une fine cupule à écailles obtuses et étroitement apprimées. Cette essence s'associe souvent à certains pins. Son bois, dur, résistant et assez lourd, a les mêmes usages que celui des autres chênes rouges.

Quercus pagodaefolia, considéré par certains comme une variété de l'espèce précédente, atteint 40 m et est plus thermophile. Son aire s'étend moins au nord que celle de

Q. falcata et ne dépasse pas la Virginie. Ses feuilles sont plus régulièrement et moins profondément lobées. Ses glands sont plus sphéroïdaux. Son bois, considéré comme l'un des meilleurs du groupe, est presque d'aussi bonne qualité que celui des chênes blancs. Il lui faut un sol humide, de sorte qu'il habite aussi les zones temporairement inondées, si elles sont ensuite bien drainées.

Quercus coccinea (« scarlet oak ») a une aire semblable à celle de *Q. montana*, mais atteint la Floride du Sud ; il doit son nom à la couleur écarlate de son feuillage en automne ; il est, pour ses teintes, cultivé à des fins ornementales. C'est un arbre de hauteur moyenne, à tronc recouvert d'une écorce brun foncé, fissurée superficiellement. Les feuilles, caduques, sont ovales, tronquées ou en coin à la base, avec de larges lobes dentés. Les glands, hémisphériques et pointus, sont à moitié recouverts par la cupule, qui a des écailles apprimées, glabres, brun brillant. Cet arbre croît sur sols sablonneux secs ; il est très abondant à l'est des Appalaches, où il forme des forêts climaciques, le plus souvent à l'état pur. Son bois est utilisé comme celui des autres chênes rouges.

Quercus palustris (« pin oak ») est un arbre des lieux humides mal drainés ; il vit dans les régions tempérées du centre des États-Unis et sur une partie du littoral de l'Atlantique. C'est un arbre de taille moyenne, à écorce longtemps lisse. Ses feuilles, rouges en automne, ont une forme semblable à celles de l'espèce précédente (cinq à sept lobes). Sa silhouette est oblongue et irrégulière. Les branches principales, fines, sont dressées ou étalées, les secondaires, pendantes, arrivant parfois jusqu'à terre. On cultive souvent ce chêne pour son port et la coloration de son feuillage.

Quercus shumardii est répandu dans la vallée du Mississippi, dans l'est du Texas, et sur les côtes atlantiques méridionales, sous climat chaud, à longue période végétative et bonne pluviosité, sur sols frais bien drainés : il se limite donc au bord des eaux. Il est de grande taille, atteignant 30 à 35 m, pour un diamètre de 1,20 à 1,50 m. Son tronc, symétrique, a des contreforts basaux. Sa couronne est élargie et ouverte. Son écorce est très épaisse, grisâtre ou brunâtre, avec des sillons foncés. Ses feuilles sont caduques ; elles ont une forme ovale, avec de gros lobes lobulés à leur tour, et munis de nombreuses pointes ; elles sont vert foncé brillant sur le dessus, plus claires et glabres à la face inférieure, mais avec des touffes de poils aux aisselles des nervures. Les glands sont ovoïdes-oblongs, à peine enclos dans une cupule épaisse et aplatie. On ne rencontre pas cette espèce en forêts pures, mais isolément dans les bois de feuillus.

Quercus velutina (« black oak ») a une aire qui s'étend du sud des Grands Lacs à la Nouvelle-Angleterre et à la côte atlantique vers l'est, à la limite de la Prairie et au Texas vers l'ouest et à la Floride vers le sud. Il peut atteindre 50 m, mais, en général, ne dépasse guère 30 m. C'est l'un des chênes les plus communs dans les régions d'altitude, où on le trouve le plus fréquemment en peuplements purs sur les terrains sablonneux ou argileux d'origine glaciaire (jusqu'à 1 200 m sur les Appalaches) ; on le rencontre aussi isolé sur des sols fertiles et frais. Il s'associe, dans les endroits secs, à *Q. stellata, Q. alba*, etc., et à divers pins. Ses feuilles sont grandes, lobées ou pennatifides, vert foncé et brillantes au-dessus, brunes et pubescentes en dessous. Les glands sont apiculés, courts, enveloppés à demi de cupules recouvertes de grosses écailles obtuses.

Quercus marilandica (« blackjack oak ») est de petite ou de moyenne taille. On le reconnaît à ses grandes feuilles cordées-flabellées, de 20 cm de long et parfois presque aussi larges au sommet, où elles ont un petit nombre de lobes, à peine marqués ; elles sont vert foncé au-dessus, vert jaunâtre en dessous ; à l'état juvénile, elles sont tomenteuses en dessous et réunies par touffes à l'extrémité des rameaux. Sa silhouette est ovoïde, étroite, souvent irrégulière, avec de grosses branches, les inférieures pendantes. Ce chêne est caractéristique des zones maigres, sèches, sablonneuses ; il est plus répandu vers le sud, avec d'autres arbres comme *Q. stellata, Q. velutina, Q. falcata* et *Juniperus virginiana*. Son bois sert uniquement de combustible.

Quercus phellos (« willow oak ») doit son nom vernaculaire à ses feuilles qui ressemblent à celles d'un saule ; elles sont ovales-lancéolées, de 5 à 10 cm de long, aiguës, cordées à la base, presque sessiles, à bords entiers, mais un peu ondulés et révolutés ; elles sont caduques, vert clair brillant sur le dessus, glabres et plus claires en dessous. Le gland, petit, est presque noir et très peu enclos dans sa cupule. Cet arbre, qui atteint 30 m, est répandu dans les plaines donnant sur l'océan Atlantique et dans le sud du bassin du Mississippi, sous climat humide et chaud, surtout sur sols alluvionnaires, même peu drainés. Son bois est un bon combustible.

Quercus nigra (« water oak ») a une distribution méridionale, de l'est du Texas au golfe du Mexique et à la basse vallée du Mississippi, ainsi que dans les plaines atlantiques. Cet arbre, de taille moyenne, à silhouette conique avec une cime arrondie, croît, comme l'indique son nom américain, le long des cours d'eau, mais non dans les marais, car il réclame des sols bien drainés ; il vit souvent seul, ou bien avec d'autres chênes hygrophiles. Ses feuilles ont une forme très variable ; elles peuvent être entières, à base cordée et sommet arrondi ou légèrement trilobé, ou bien lobées, avec trois à sept lobes triangulaires ; elles sont vert foncé et glabres sur le dessus, plus claires en dessous, avec des touffes de poils aux aisselles des nervures ; caduques, elles ne se fanent sur l'arbre qu'en hiver, ce qui se produit d'ailleurs aussi chez les chênes européens à feuilles caduques (feuilles marcescentes). Ses glands, sphéroïdaux ou hémisphériques, sont recouverts au tiers ou au quart par une cupule aplatie à petites et fines écailles à poils clairs. Cette espèce a une croissance rapide et elle est adulte entre cinquante et soixante-dix ans. Son bois, dur et lourd, peut seulement servir à faire du charbon de bois ou du bois à brûler.

Quercus imbricaria (« shingle oak ») est une espèce dont l'aire s'étend de la Pennsylvanie à la Géorgie, au Nebraska et à l'Arkansas. Il doit son nom américain au fait que les pionniers utilisaient son bois pour faire des tuiles. Il est caractérisé par ses feuilles grandes, coriaces, oblongues, obtuses ou aiguës, entières, à bord épaissi ondulé et révoluté, vert foncé au-dessus, plus claires et pubescentes en dessous. Ses glands, hémisphériques, sont recouverts presque à demi par une cupule aplatie, à écailles imbriquées et poilues. Cet arbre, de taille moyenne, croît sur sols fertiles le long des fleuves et sur les collines, associé à divers hickories, ormes et chênes.

Quercus laurifolia (« laurel oak ») est l'un des arbres les plus caractéristiques des basses terres au voisinage des côtes de la Floride et du Texas centro-septentrional. Il atteint de 20 à 25 m ; ses branches sont exceptionnellement développées, formant une vaste couronne déprimée, portant souvent des colonies d'une Broméliacée épiphyte, *Tillandsia usneoides*. Son gros tronc est souvent divisé près du sol. Ses feuilles sont semi-persistantes, épaisses et coriaces, entières ou peu lobées, obovales ou oblongues, vert foncé et luisantes à la face supérieure, glauques par suite de la présence de poils à la face inférieure ; elles tombent au printemps de l'année suivant leur formation, un peu avant la sortie des nouvelles feuilles. Les fruits sont petits, luisants, brun foncé, avec une cupule pubescente à écailles apprimées. Son bois, très lourd et difficile à travailler, était naguère utilisé pour les constructions navales. Il trouve aujourd'hui peu d'emplois.

Quercus kelloggii (« Californian black oak ») est le représentant le plus important des chênes rouges des régions occidentales des États-Unis (Oregon et Californie, de 450 à 2 700 m d'altitude). Il atteint 30 m de hauteur ; son tronc est court et noirâtre, sa silhouette globuleuse. Ses feuilles, caduques et luisantes au-dessus, ont cinq à sept lobes dentés. Il habite les versants rocheux et secs, ou bien le fond des vallées sablonneuses des cañons ; vers le bas des pentes, on le trouve associé à *Pseudotsuga menziesii, Pinus ponderosa, Quercus chrysolepis*, etc. ; au-dessus de 1 200 m d'altitude, aux *Sequoiadendron giganteum, Pinus lambertiana, Calocedrus decurrens*, etc.

Des chênes toujours verts se rencontrent dans les régions donnant sur l'océan Pacifique, sous climat de type méditerranéen, avec des hivers doux et des étés secs ; ils sont sans intérêt du point de vue forestier, par suite de la lenteur de leur croissance, de la dureté de leur bois et de leur faible taille. Nous citerons *Quercus chrysolepis, Q. wislizenii, Q. agrifolia, Q. emoryi, Q. arizonica ; Quercus reticulata*, qui s'étend du Mexique au sud des États-Unis, appartient au même groupe.

Les chênes mexicains, toujours verts ou à feuilles assez longtemps vertes, sont nombreux. Leurs peuplements occupent les mêmes biotopes que les pins, sous climats

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Les châtaigniers ont une aire de distribution très vaste, essentiellement circumméditerranéenne, qui s'échelonne du niveau de la mer jusqu'à 1 200 m d'altitude environ.*

tempérés chauds et tempérés, dans les sierras, où ils forment vraisemblablement des forêts climaciques le plus souvent de faible extension par rapport aux pinèdes, cela en raison du système agricole pratiqué en montagne, où l'on cultive la terre après avoir incendié les bois ; lorsque le sol est épuisé, il est abandonné, et la nouvelle colonisation se fait par des Conifères. Nous citerons *Quercus obtusata*, arbre de grande taille, à feuilles semi-persistantes, irrégulièrement sinuées, dentées, glabres, glauques

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ *Branches et rameaux d'un châtaignier. La couleur et la qualité de l'écorce montrent qu'il s'agit d'un spécimen âgé (plus de vingt ans).*

et réticulées en dessous, et restant marcescentes sur l'arbre jusqu'au printemps suivant. *Q. crassipes* possède des feuilles toujours vertes, coriaces, entières et tomenteuses en dessous. *Q. polymorpha* est parfois cultivé en Europe dans les zones méditerranéennes ; il possède de grandes feuilles, un peu lobées, et qui ont la consistance du cuir.

Le genre *Lithocarpus*, auquel on peut joindre les *Pasania*, est important ; il compte environ cent espèces en Asie tropicale et en Indo-Malaisie et une espèce en Amérique du Nord. Ces formes sont plus ou moins intermédiaires entre les chênes et les châtaigniers. Il s'agit de plantes toujours vertes, à feuilles coriaces, dentées ou entières. Leurs fleurs mâles forment des épis dressés simples ou ramifiés, avec un ovaire avorté ; les fleurs femelles sont réunies à la base des épis précédents ou en chatons séparés, et ont un ovaire triloculaire à trois stigmates. Leurs fruits, qui mûrissent en deux ans, sont des akènes généralement enfermés de façon partielle dans une cupule à écailles distinctes et imbriquées ou connées en cercles concentriques.

Lithocarpus glaber, de Chine et du Japon, est un petit arbre à grandes feuilles glabres entières. *L. cuspidatus* habite la Chine, la Corée, le Japon et Formose ; il est plus élevé ; ses feuilles sont longuement acuminées et pubescentes en dessous à l'état juvénile. *L. bennetii* est une espèce propre à la forêt dense malaise.

L'espèce américaine *Lithocarpus densiflorus* (« tanbark oak ») est un arbre haut de 20 à 25 m, avec un tronc massif et une silhouette pyramidale, à branches ascendantes, en forêt, mais presque globuleuse chez les individus isolés. Ses feuilles sont oblongues, dentées ou entières, vert clair sur le dessus, brunes et laineuses puis glauques et glabrescentes en dessous. Ses fruits sont des glands amers à cupules aux écailles recourbées. Cette espèce vit dans les zones côtières du sud de l'Oregon et de la Californie et dans la sierra Nevada, sous climat méditerranéen et sur sols variés. Elle tolère l'ombre et s'étage du niveau de la mer jusqu'à 1 500 m d'altitude, associée à *Sequoia sempervirens, Castanopsis chrysophylla, Pseudotsuga menziesii, Pinus lambertiana, P. ponderosa, Arbutus menziesii*, etc.

Le genre *Castanopsis* comprend des arbres toujours verts, parfois à port buissonnant. Il en existe environ cent espèces d'Indo-Malaisie et de Chine et deux nord-américaines. Les feuilles distiques sont entières ou dentées et coriaces. Les fleurs mâles sont en épis dressés, les femelles en cymules, séparées en général et entourées d'une cupule. Les fruits, indéhiscents, sont enfermés, au nombre d'un à trois, dans une cupule dissymétrique, épineuse ou tuberculée, déhiscente ou non.

Le genre *Castanea* comprend surtout des arbres, rarement des arbustes, à feuilles caduques, et à écorce lisse dans le jeune âge. Le rhytidome est ensuite fissuré. Les feuilles sont alternes, dentées, à nombreuses nervures pennées. Les fleurs mâles sont petites et nombreuses, groupées en chatons dressés et allongés, qui sont des grappes de cymes ; chacune a un calice à six divisions et de dix à vingt étamines. Des fleurs femelles se trouvent en dessous des fleurs mâles (généralement en une cymule de trois, avec un calice de cinq à huit pièces et un ovaire de trois à six carpelles), entourées d'une cupule spinescente qui donne, à maturité, la *bogue* contenant les châtaignes, qui sont des akènes ou nucules.

Le châtaignier cultivé *(Castanea sativa)* est une essence dont l'aire est surtout circumméditerranéenne ; il est particulièrement commun en Italie, en France, en Espagne, au Portugal, en Yougoslavie, en Grèce, et de l'Allemagne au sud de la Suède, ainsi qu'en certaines stations isolées de Turquie. Cette vaste distribution est due en grande partie à l'homme. C'était en effet une espèce importante sur le plan alimentaire. On connaît des châtaigneraies de haute futaie (jusqu'à 20 à 30 m de hauteur) souvent plusieurs fois séculaires, dans les Alpes et l'Apennin par exemple, depuis le niveau de la mer et surtout à partir de 400 m jusqu'à 1 200 m (même 1 600 m sur l'Etna) ; on rencontre aussi le châtaignier sous forme de taillis lorsqu'il est soumis à des coupes fréquentes. C'est un arbre qui a besoin de sols meubles, frais et bien drainés, assez fertiles, à pH acide ou neutre ; il a une tolérance limitée pour le calcaire. Dans les futaies clairsemées,

M. Pedone

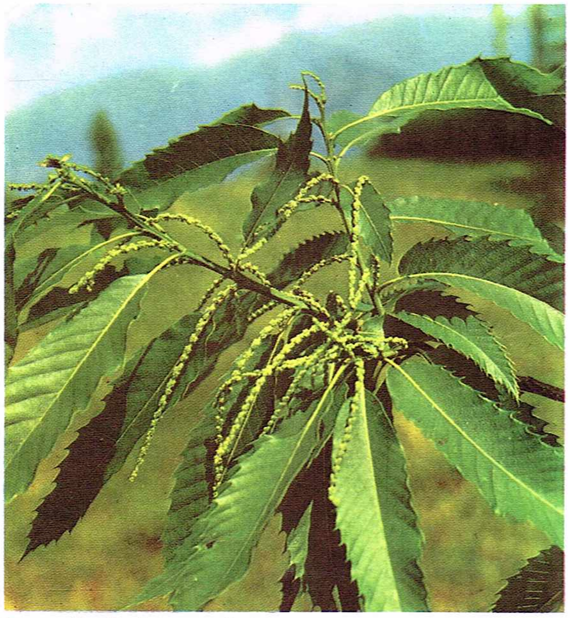

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

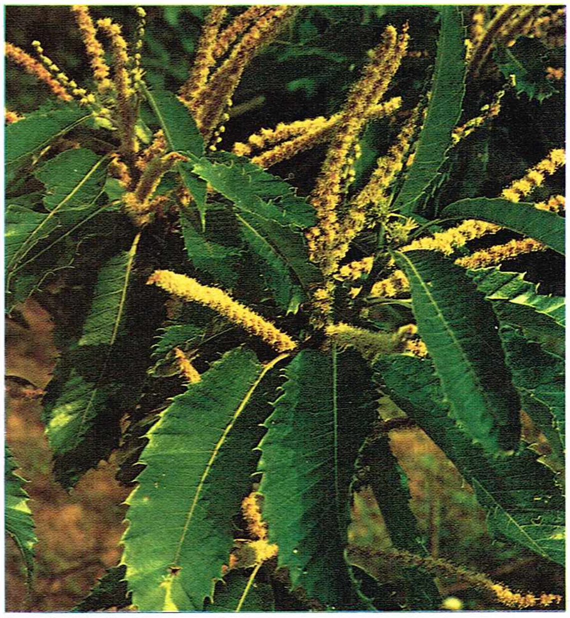

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Bois de jeunes châtaigniers (Toscane).*

◀ ***A gauche : branches de châtaignier** (Castanea sativa) **avec de jeunes chatons mâles. A droite : chatons mâles au moment de la pollinisation.***

▶ *Le châtaignier cultivé* (Castanea sativa) *est à l'heure actuelle en voie de régression. Il est en effet victime de deux maladies fongiques. Son remplacement par des hybrides n'a donné à ce jour que des résultats médiocres.*

I.G.D.A. - Archives P2

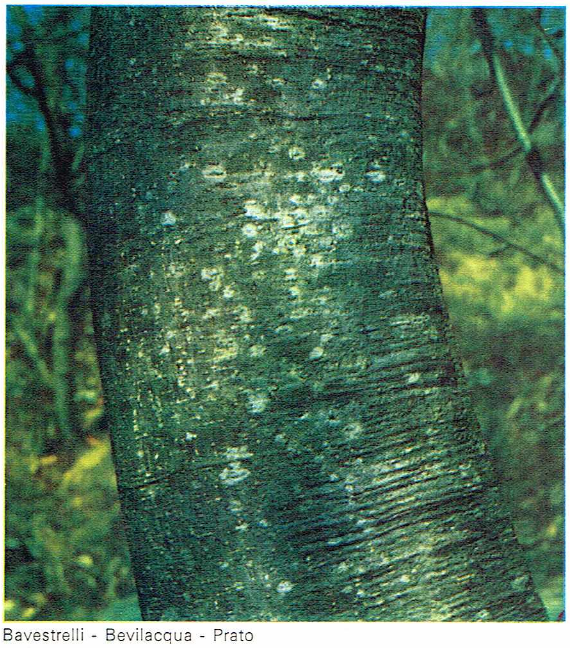

▶ *Écorce de châtaignier. L'arbre est encore jeune.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

son tronc, généralement robuste et court, peut dépasser 2 m de diamètre ; il est souvent divisé, à faible hauteur du sol, en de grosses ramifications qui lui confèrent une silhouette large, globuleuse et assez dense. L'écorce, argentée et lisse chez les jeunes individus, devient en une vingtaine d'années un rhytidome brun foncé, à sillons longitudinaux étroits et assez écartés les uns des autres, mais plus ou moins spiralés par rapport à l'axe du tronc. Les feuilles, disposées sur un seul plan par torsion des courts pétioles, sont ovales-lancéolées, à bord dentelé-crénelé, à base arrondie-cordée et sommet acuminé, et à nervures saillantes ; leur consistance est assez coriace ; elles sont de couleur verte un peu luisante sur le dessus, et terne et plus pâle ou vert jaunâtre au-dessous, où elles sont vite glabres. La bogue s'ouvre en automne et laisse tomber de une à trois châtaignes, de forme plus ou moins hémisphérique, à épicarpe luisant et plus ou moins strié, à consistance de cuir, avec les résidus des styles formant un petit pinceau au sommet, et à la base une cicatrice claire et opaque. Les cotylédons sont blanchâtres, riches en amidon, de saveur douce, et entourés par le tégument séminal formé d'une pellicule membraneuse, de nature astringente.

A l'heure actuelle, l'aire du châtaignier producteur de fruits se rétrécit de plus en plus, à cause de la diminution de l'importance alimentaire des châtaignes, et à cause de deux maladies fongiques : la *maladie de l'encre* (due à *Phythophtora cambivora*) et le *cancer de l'écorce* (dû

à *Endothia parasitica*). La seconde de ces maladies, signalée pour la première fois en Europe peu avant la dernière guerre, frappe maintenant toutes nos châtaigneraies, mais sans la virulence atteinte en Amérique sur *Castanea dentata*. Le remplacement du châtaignier européen par *Castanea crenata*, du Japon, ou par des hybrides de *C. sativa* × *C. mollissima*, a donné des résultats variables, et la pente est longue à remonter.

Le bois de châtaignier, à aubier clair et à large cœur brun, est lourd mais non dur, à texture grossière et rectiligne et n'est pas de très bonne qualité. On l'utilise pourtant pour la confection d'huisseries, de meubles, de planchers, de poutres, ou de tonneaux; les arbres à bois défectueux sont utilisés pour en extraire du tanin, et les résidus servent à fabriquer des agglomérés. Les châtaigniers de taillis sont employés pour faire des perches et des échalas, lesquels sont d'ailleurs très appréciés, ainsi que pour la vannerie.

Castanea mollissima est une espèce de Chine orientale et de Corée. Il atteint une hauteur de 15 à 20 m. Ses feuilles sont larges, grossièrement et irrégulièrement dentées, blanchâtres ou grises tomenteuses en dessous. Les bogues contiennent chacune deux ou trois châtaignes à petite cicatrice basale, et ont des épines pubescentes.

C. crenata, du Japon et de Corée, est un buisson ou un arbuste; ses feuilles sont crénelées-dentées, elliptiques ou ovales-lancéolées, habituellement tomenteuses en dessous ou presque glabres. Les fruits ont une grande cicatrice qui s'étend sur toute la base. *C. seguinii* et *C. henryi* sont deux autres espèces de Chine. Le second n'a qu'une châtaigne par bogue.

Le plus grand châtaignier est *Castanea dentata* (= *C. americana*, « American chestnut »). Son aire va de la Nouvelle-Angleterre et de l'Ontario, au nord, jusqu'à l'Alabama, au sud, sur les deux versants des Appalaches. Cette espèce est actuellement parasitée très gravement, dans toute sa zone de distribution, par le cancer de l'écorce. Cette maladie vient probablement d'Asie orientale, et est arrivée en Amérique vers la fin du XIXe siècle, y trouvant un hôte particulièrement réceptif. On peut même craindre la disparition totale de l'espèce. L'arbre atteint 30 m en forêt, où il est associé à d'autres feuillus. Son tronc est gros, couvert par une écorce grise puis brun foncé à larges lenticelles blanchâtres irrégulières, et sa cime est large. Ses feuilles ressemblent beaucoup à celles de l'espèce européenne. Ses grosses bogues épineuses contiennent généralement deux ou trois châtaignes, parfois cinq, dont la cicatrice occupe toute la base. Les fruits étaient naguère récoltés pour l'alimentation.

Le genre *Fagus* (hêtres) comprend des arbres à feuilles caduques et à écorce lisse. Les feuilles sont alternes, dentées ou entières. Les fleurs mâles sont nombreuses et constituent des capitules complexes, pédonculés, pendants. Elles sont pourvues d'un périanthe plurilobé, et de huit à seize étamines. Les fleurs femelles sont portées par le même arbre, entourées de nombreuses bractées et réunies par deux dans un involucre quadripartite qui évolue à maturité en une cupule pourvue extérieurement d'appendices spinescents ou squamiformes, qui renferme un ou deux akènes ovoïdes-triangulaires. Il existe dix espèces, toutes réparties dans les régions tempérées de l'hémisphère Nord.

Le hêtre commun *(Fagus sylvatica)* est un arbre éminemment social des zones montagneuses fraîches d'Europe; il se trouve du sud de la Scandinavie aux Carpathes, au sud-ouest de la Russie, à la Grèce, à la Yougoslavie, à la Sicile, à l'Italie, à la Corse, aux Pyrénées et au sud de la Grande-Bretagne. Il se rencontre aussi dans le centre de l'Espagne.

Le hêtre forme de majestueuses futaies denses, où les troncs sont droits et colonnaires, longuement dépouillés de branches et à écorce lisse et gris cendré jusqu'à un âge avancé. La silhouette est serrée, ovoïde en forêt, avec une couronne aplatie de façon caractéristique; chez les exemplaires isolés, la silhouette est large et déprimée, en partie parce que la ramification commence plus bas. Cet arbre est souvent réduit à l'état de taillis, à cause des coupes fréquentes, car on s'en sert comme bois à brûler. Les feuilles sont ovales-elliptiques, aiguës

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ ***Les châtaignes, qui sont des akènes ou nucules, sont au nombre de une à trois dans une cupule spinescente : la bogue.***

Fratelli Montacchini

◀ ***Le tronc des châtaigniers, généralement robuste et court, peut parfois dépasser 2 m de diamètre.***

G. Mazza

ou un peu acuminées, à bord entier légèrement ondulé et cilié chez les jeunes feuilles. Elles sont vert foncé sur la face supérieure, plus claires et glabres en dessous. Les fruits (faînes) sont trigones, riches en matière amylacée et en huile, renfermés chacun dans une cupule quadrivalve à appendices recourbés non piquants.

Le hêtre est un arbre exigeant en fait d'humidité atmosphérique, ce qui fait qu'il est particulièrement répandu dans les zones à climat subocéanique, dont la pluviosité est élevée (1 000 mm par an par exemple) et bien distribuée, ainsi que sur les versants montagneux souvent baignés par les nuages. C'est une essence de plaine en Europe centro-septentrionale. Il atteint 800 à 1 500-1 700 m et jusqu'à 2 000 m en Sicile.

Lors de la période ayant fait suite à la dernière grande glaciation, le hêtre s'étendit plus à l'est qu'actuellement, comme le montrent les pollens datant de cette époque qui ont été analysés.

Le hêtre constitue des forêts pures ou est souvent associé, dans les zones plus froides, à *Abies alba* ou à d'autres feuillus. Il tolère assez bien l'ombre, supporte les gelées tardives, mais dépasse rarement l'âge de deux cents ans. Son bois, blanc devenant plus ou moins saumon, surtout sur terrain siliceux et argileux, non différencié en cœur et en aubier, est lourd, de texture fine et rectiligne, compact et facile à travailler mais sujet à la vermoulure et peu utilisable pour la charpente ; on en fait des meubles, des traverses de chemins de fer, du contre-plaqué, et on en extrait de la cellulose pour la préparation de textiles artificiels. Les petits troncs, qui servaient jadis à obtenir du charbon de bois, font actuellement un excellent bois de chauffage.

Fagus grandifolia (= *Fagus americana*, « American beech ») est la plus importante des deux espèces américaines de hêtres (son proche parent, *F. mexicana*,

▲ ***Ramifications du hêtre sylvestre* (Fagus sylvatica).**

S.E.F.

▶ ***Le hêtre est un des feuillus les plus caractéristiques de la flore de montagne d'Europe.***

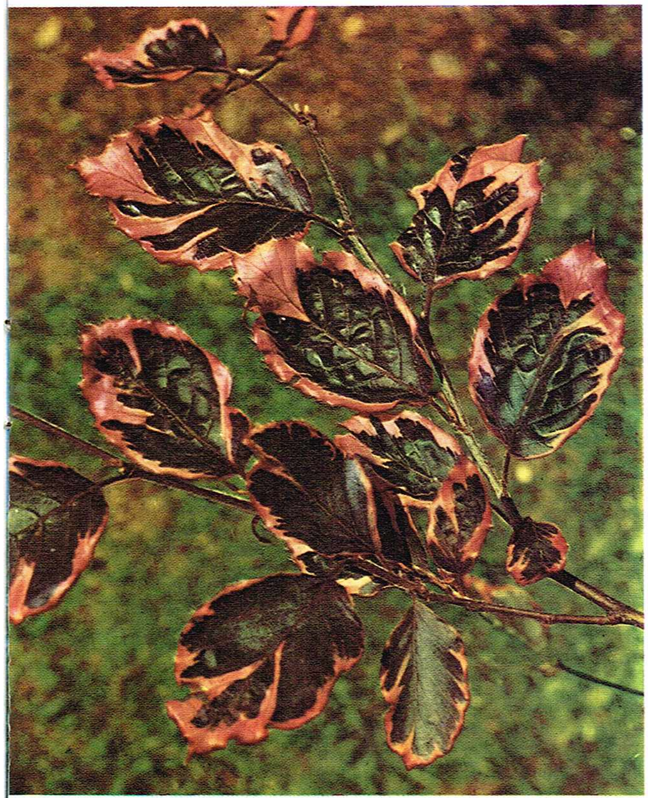

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

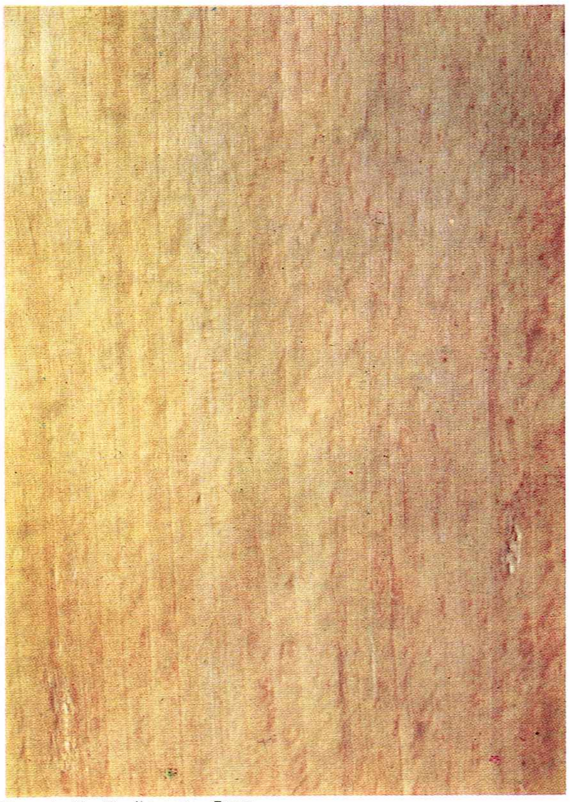

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ *A gauche* : **Fagus sylvatica** *var.* **roseomarginata** *reconnaissable à ses feuilles vert foncé bordées de rose. A droite : coupe longitudinale de bois de hêtre.*

▼ *Une variété cultivée* **(atropunicea)** *de* **Fagus sylvatica.**

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

croît sur les montagnes du Mexique). On le rencontre dans toute la moitié orientale des États-Unis, du Canada méridional au Texas oriental. Il est soumis à toutes sortes de climats, mais il lui faut des étés peu chauds ainsi qu'une bonne humidité (il consomme deux fois plus d'eau que les chênes xérophiles). Son aire s'étend au nord sur des sols bruns, au sud sur des latérites, et rarement sur les sols calcaires; il préfère les terrains bien drainés et de compacité moyenne. On le trouve en plaine, au nord, et jusqu'à 1 800 m d'altitude, dans le sud des Appalaches; il est le plus souvent limité aux vallées fraîches et aux expositions septentrionales. Sa hauteur atteint 30 et même 40 m. Son tronc, droit et colonnaire, avec un diamètre de 0,90 m à 1,20 m, est recouvert d'une écorce gris bleuâtre clair. Ses feuilles, caduques, sont oblongues, avec un sommet aigu et des bords grossièrement dentés. Les fruits sont semblables à ceux du hêtre d'Europe, mais plus arrondis. Son bois, moyennement lourd, sert de bois d'œuvre, d'industrie et de chauffage.

Le genre *Nothofagus* comprend dix-sept espèces, toutes de l'hémisphère austral. Ce sont des arbres et des arbustes à feuilles persistantes ou caduques, alternes, simples, brièvement pétiolées, dentées ou entières, et normalement petites. Les fleurs, monoïques, ont un périanthe comptant quatre à six lobes. Les fruits trigones sont souvent réunis par trois dans un involucre à deux à quatre lobes, pourvu extérieurement de lamelles transversales entières, dentées ou lobées, avec ou sans appendices glanduleux.

Au Chili et en Argentine, les espèces de *Nothofagus* croissent dans le Sud, sur une mince bande montagneuse le long des Andes, jusqu'à la Terre de Feu, où elles forment, avec quelques Conifères (*Fitzroya cupressoides, Araucaria araucana, Podocarpus sp. pl., Pilgerodendron uviferum,* etc.), des forêts subantarctiques sous climat froid et tempéré (température moyenne annuelle de + 5 °C à + 13 °C), le plus souvent humide, avec de forts enneigements hivernaux et une pluviosité annuelle de 500 mm à 1 500 mm (au maximum 2 000 mm).

Toute la partie la plus élevée de cette zone (entre 1 000 m et 1 700 m d'altitude) est occupée par de vastes groupements purs de *Nothofagus pumilio*, formant des maquis impénétrables; plus bas, la plante a un port arborescent (jusqu'à 35 m de hauteur). Son écorce est rugueuse; ses feuilles sont caduques, oblongues, dentées et obtuses.

▶ Fagus sylvatica. *Chez les exemplaires isolés, la silhouette est plus large du fait que les ramifications commencent plus bas.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▼ *Rameau de hêtre. On peut encore voir les protections des bourgeons foliaires.*

G. Mazza

N. dombeyi forme des forêts pures au nord, dans les zones fraîches de piedmont. Il a des feuilles persistantes, lancéolées, brillantes et dentées. Il atteint l'âge de cinq cents ans. *N. betuloides* est une espèce méridionale qui accompagne *N. pumilio* ; il est toujours vert et mésophile. *N. nervosa* est un arbre élevé à feuilles caduques, qui vit sur sols humides. *N. obliqua* possède aussi des feuilles caduques, ovales, doublement dentées avec dans chaque cupule un fruit plat et deux triangulaires. *N. procera* est proche de l'espèce précédente.

Un autre centre de dispersion de ce genre est la Nouvelle-Zélande, où l'on rencontre abondamment *N. fusca*, à feuilles toujours vertes, ovales et grossièrement dentées, ainsi que *N. cliffortioides, N. menziesii* en montagne et *N. solandri* en plaine. *N. cunninghamii* croît en Tasmanie. *N. cliffortioides* a des feuilles entières, les autres espèces les ont dentées ou crénelées.

Myricales

Cet ordre est formé par trois genres et cinquante-six espèces groupées dans l'unique famille des *Myricacées (Myricaceae)*, plantes ligneuses dont la pollinisation est anémogame. Leurs fleurs sont monoïques et réunies en chatons simples ou composés. Elles sont achlamydées. Les mâles ont de quatre à huit étamines en général, les femelles un gynécée bicarpellé uniovulé. Les fruits sont drupacés, et leur épicarpe sécrète une sorte de cire. Les feuilles, toujours vertes ou caduques, sont aromatiques. Cette famille comprend les genres *Myrica, Comptonia* et *Canacomyrica*.

Le piment royal *(Myrica gale)* est l'espèce dont l'aire est la plus vaste (Amérique du Nord, Asie septentrionale, Europe occidentale et centrale). C'est un buisson très aromatique pouvant atteindre une hauteur de 2 m, avec des feuilles caduques, dressées, vert foncé, lancéolées, dentées vers le sommet et habituellement pubescentes. Cette plante est dioïque, mais peut changer de sexe d'une année à l'autre. Elle habite de préférence les marais ; on s'en servait jadis pour en extraire du tanin. Ses racines forment des nodosités fixatrices d'azote atmosphérique qui abrite l'Actinomycète *Frankia brunchorstii*.

Leitnériales

Cet ordre isolé comprend la seule famille des *Leitnériacées (Leitneriaceae)* avec l'unique espèce *Leitneria floridana*, petit arbre ou buisson pouvant atteindre une hauteur de 6 m, et habitant les marais de certaines zones méridionales des États-Unis. Ses feuilles sont caduques, alternes, lancéolées, vert foncé, soyeuses en dessous. Il est dioïque, et ses fleurs mâles sont dépourvues de périanthe, munies de une à quatre étamines et réunies en chatons axillaires composés de cymules. Les femelles sont

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

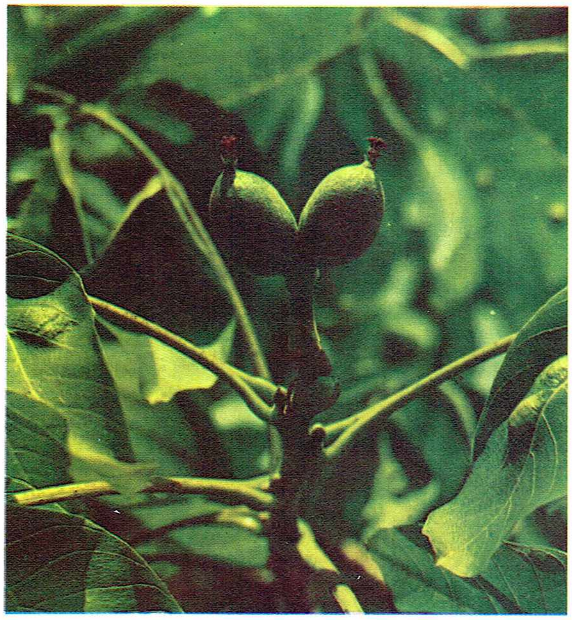

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Les fruits du noyer ou noix sont des drupes. L'endocarpe ligneux est ce que l'on nomme communément la coque; la graine, constituée de deux cotylédons, représente la partie comestible. Le mésocarpe charnu et coriace est le brou.***

en chatons simples et formées d'un ovaire bicarpellaire uniovulé entouré d'un périanthe de quatre pièces. Les fruits sont des drupes sèches. Cette espèce possède un bois homogène très léger (masse spécifique 0,21, c'est-à-dire inférieure à celle du liège).

Juglandales

Toutes les Juglandales appartiennent à la famille des *Juglandacées (Juglandaceae)*, qui compte huit genres et cinquante-huit espèces. Il s'agit de plantes ligneuses monoïques, habituellement des arbres, dont la pollinisation est de type anémogame et dont les inflorescences sont axillaires, en chatons; les mâles, pendants, ont des fleurs munies de deux à quarante étamines entourées d'un périanthe, le plus souvent de quatre pièces; les femelles, dressés ou pendants, sont souvent réduits à des fleurs achlamydées ou à périanthe sépaloïde en général de quatre pièces. Chez ces dernières, en outre, l'ovaire est infère, bicarpellé, uniloculaire, et possède un ovule orthotrope unique. Les fruits sont des akènes ou des drupes à mésocarpe d'abord charnu puis coriace *(brou)*, et à endocarpe dur (coque de la noix), avec une graine dépourvue d'albumen; les cotylédons sont habituellement lobés, charnus, cérébriformes et très riches en huile chez le noyer où ils forment la masse principale de l'amande.

Les feuilles sont caduques, alternes, composées-imparipennées et aromatiques. Les affinités des Juglandales font encore l'objet de discussions; elles ne semblent proches ni des Fagales ni des Salicales : il y a peut-être des rapports avec les Anacardiacées et partiellement avec les Myricales. Les principaux genres sont : *Juglans, Carya, Platycarya, Pterocarya* et *Engelhardia*.

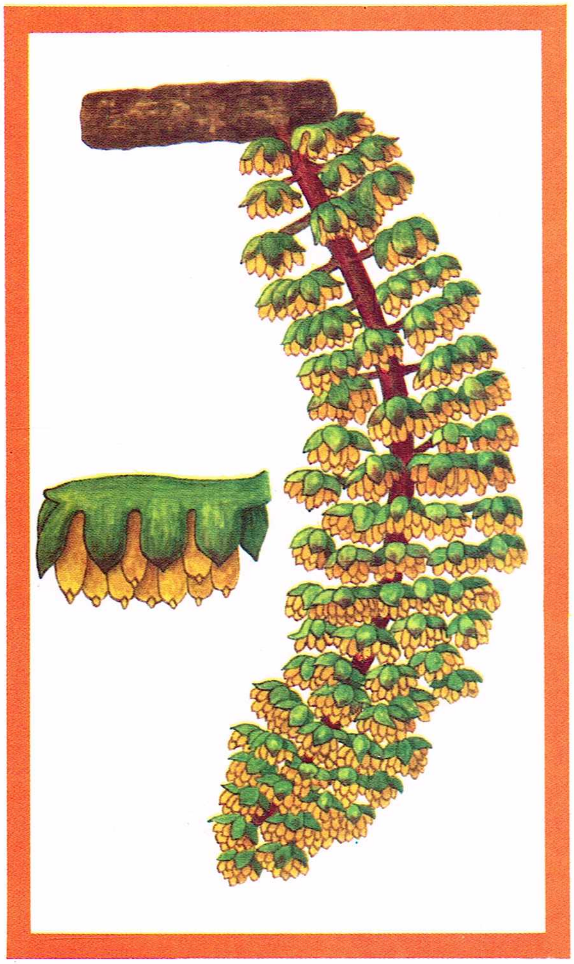

I.G.D.A.

◀ ***Chatons mâles de*** **Juglans regia*, noyer commun.***

Le genre *Juglans* (noyers) a des branches à moelle fistuleuse et lamelleuse; les fruits mûrissent dans l'année et possèdent un brou indéhiscent. Les espèces, qui sont au nombre d'une quarantaine, sont répandues en Asie et en Amérique du Nord; en Europe, il en existe surtout en culture, cause de la dissémination du noyer.

Le noyer commun *(Juglans regia)* existe en de nombreuses variétés européennes et asiatiques (Turquie, Himalaya, Chine, etc.). Son centre d'origine doit se trouver dans la péninsule balkanique. L'arbre a une vaste couronne arrondie, assez clairsemée, et un tronc généralement court, avec une écorce claire qui reste longtemps lisse. Les feuilles ont des folioles sessiles, ovales et entières, la terminale étant plus grande.

C'est une espèce de climat tempéré, exigeant des sols fertiles et frais, même calcaires; elle souffre des gelées tardives. Elle est héliophile et l'on doit donc la planter de façon clairsemée. Le bois, dont l'aubier est blanchâtre et le cœur brun, parfois marbré, est facile à travailler et à polir; sa conservation est moyenne, car il est attaqué par des larves de Coléoptères (« vrillettes ») en particulier. On s'en sert surtout pour la fabrication des meubles. On tire du brou de noix une liqueur et un colorant brun, mais le noyer est avant tout cultivé pour ses graines.

Le noyer noir d'Amérique *(Juglans nigra)* est un important arbre forestier aux États-Unis et a été exploité dès le XVII[e] siècle. Son aire occupe presque toute la moitié orientale des États-Unis, où on le trouve isolément dans les forêts mixtes formées par différents chênes, des hickories, des tilleuls, des frênes, des hêtres américains, etc. Ses exigences sont semblables à celles du précédent. On le voit le plus souvent dans la strate dominante, car il atteint 40 à 50 m à l'âge adulte. Son écorce est brun

▼ ***Écorce d'un jeune noyer.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Le bois d'hickory provient de certaines espèces du genre* Carya. *Il offre de remarquables qualités de résistance mécanique. On l'utilise notamment pour fabriquer des skis.*

foncé et profondément fissurée dans le sens longitudinal. Ses feuilles sont grandes et allongées, composées d'une vingtaine de folioles ovales-aiguës, brièvement pétiolées, dentées et pubescentes en dessous. La noix de cet arbre est à peu près sphérique, sa coque, épaisse et très dure, est assez finement ridée, et sa graine a peu de valeur. Son bois est semblable à celui du noyer européen et a les mêmes emplois.

Le genre *Carya* possède des branches à moelle pleine, et des fruits à maturation annuelle, avec un péricarpe épais et finalement ligneux, déhiscent en quatre valves. Les espèces (près d'une trentaine) sont nord-américaines, mais on a découvert récemment trois espèces asiatiques. Comme les noyers, ce genre existait aussi en Europe avant les grandes glaciations. Le bois de ces arbres est lourd et possède un aubier blanc et un cœur brun ou rougeâtre ; sa texture rectiligne est moyenne ou grossière ; il est facile à travailler, d'une résistance mécanique élevée, mais rapidement attaqué par les Insectes, ce qui le fait utiliser pour la confection de manches d'outils et autres objets. Les noix de certaines espèces, surtout *C. pecan*, sont comestibles.

Le genre est divisé en deux sous-genres : *Carya* (ou hickories), dont les feuilles possèdent de trois à neuf folioles et dont le péricarpe n'est pas ailé, et *Apocarya*, à feuilles présentant de cinq à dix-sept folioles et dont le péricarpe est ailé.

Carya ovata (« shagbark hickory ») a une aire qui comprend presque la totalité de l'est des États-Unis. On le reconnaît facilement à son écorce grise, se desquamant en longues bandes longitudinales recourbées vers l'extérieur et attachées vers le milieu. Cet arbre, qui est assez ombrophile, a une croissance lente, une longévité moyenne (jusqu'à trois cents ans), et peut atteindre 30 à 40 m de hauteur. Ses feuilles sont épaisses et constituées de cinq folioles ovales-aiguës, les trois supérieures plus grandes. Au nord, il croît dans des lieux secs ; plus au sud, il préfère les sols frais alluvionnaires.

Carya laciniosa a une écorce comparable mais avec des bandes pendantes non recourbées ; c'est une espèce hygrophile. Il ne dépasse pas le Tennessee et l'Oklahoma vers le sud. *Carya tomentosa* a une distribution semblable à celle de la première espèce, mais est commun seulement dans les régions les plus chaudes, surtout sur les collines, avec différents chênes ; il a des feuilles semblables à celles du frêne, mais luisantes au-dessus et tomenteuses en dessous et sur le pétiole et le rachis. L'écorce est écailleuse, la noix carénée à graine douce.

Carya glabra (C. porcina), bien que répandu dans tout l'est des États-Unis (à l'exclusion des côtes), est plus fréquent au nord, dans des zones sèches, en association avec différents chênes. *Carya ovalis* est proche du précédent et commun dans le nord des États-Unis. *Carya aquatica* est un petit arbre répandu spécialement le long des côtes marécageuses ; il donne du bois à brûler et des noix amères. *Carya myristicaeformis* est une espèce méridionale hygrophile à aire fragmentée. *Carya cathayensis*, de Chine orientale, est proche du précédent. Enfin, *Carya mexicana* habite les montagnes du Mexique.

Le sous-genre *Apocarya* ou pécans comprend surtout le pacanier *(Carya pecan)* et *Carya cordiformis*.

Carya pecan est la plus grande espèce du genre, puisqu'elle atteint 55 m de hauteur, pour un diamètre de 1,80 m. Cet arbre habite de la moyenne et de la basse vallée du Mississippi et de ses affluents jusqu'au Texas et au Mexique ; il est isolé sur les rivages, avec des peupliers, des chênes, des ormes américains, etc. Il possède une écorce irrégulièrement fissurée, des folioles ovales-lancéolées, aiguës, et des noix ovoïdes, apiculées, à coque lisse, à graines comestibles et très appréciées.

Carya cordiformis est l'une des espèces les plus largement distribuées du genre dans l'est des États-Unis, sans être très abondant ; au nord, il croît sur différents sols, et au sud dans les lieux humides. Cet arbre atteint une hauteur de 30 m. Son écorce est écailleuse. Les feuilles possèdent cinq à neuf folioles ovales ou lancéolées, dentées, pubescentes en dessous. Les noix sont sphéroïdales, un peu comprimées, presque lisses, à coque mince et à graine de saveur amère.

Platycarya strobilacea est l'unique espèce du genre et habite la Chine. C'est un petit arbre à moelle pleine et à écorce fissurée. Les fruits sont de petites noix ailées, qui forment un strobile dressé. L'aile est la bractée de la fleur femelle. Les feuilles, caduques, possèdent de nombreuses folioles imparipennées, ovales-lancéolées, acuminées, et doublement dentées.

Le genre *Pterocarya* est constitué d'une douzaine d'arbres asiatiques à feuilles caduques et toujours composées-imparipennées avec de nombreuses folioles, et à branches fistuleuses à moelle lamellaire. Les fleurs sont monoïques. Les fruits sont petits et ont un péricarpe ailé non charnu.

Pterocarya fraxinifolia est répandu de l'Iran septentrional à l'Arménie et au Caucase, dans des zones tempérées, sur des sols frais ou humides. C'est une espèce héliophile qui atteint une hauteur de 25 à 30 m, avec un tronc fréquemment divisé dès la base. L'écorce est profondément fissurée. La couronne est vaste. Les feuilles sont

I.G.D.A.

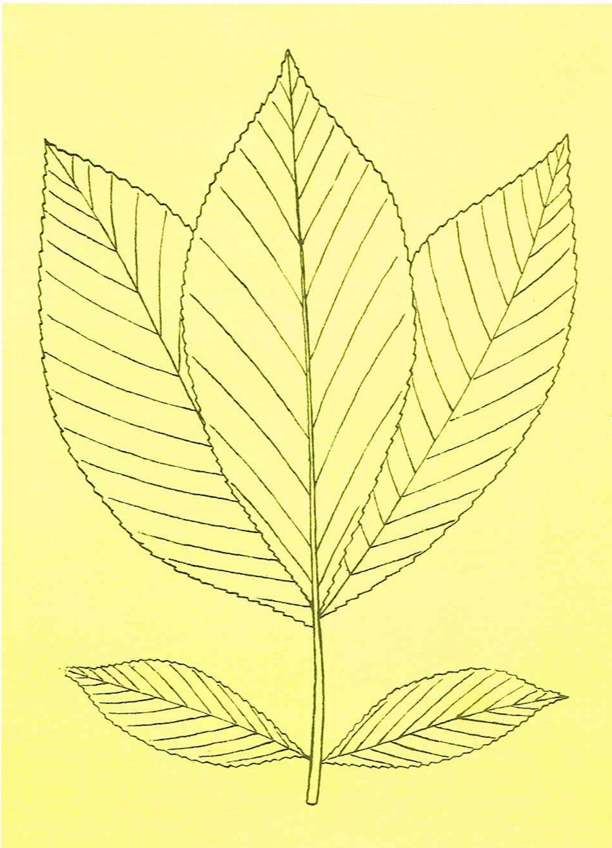

▶ *Feuilles de* Carya ovata *(shagbark hickory).*

formées de onze à vingt et une folioles ovales ou lancéolées, obtuses, dentées et glabres. Les fruits ont une aile semi-circulaire et sont groupés en longues grappes pendantes. Cette espèce a une croissance assez rapide et est cultivée pour l'ornement. Son bois, assez léger, sert en menuiserie et pour faire des caisses. D'autres espèces habitent la Chine et le Japon.

Salicales

Il s'agit de plantes ligneuses, le plus souvent dioïques, à pollinisation anémogame ou entomogame, avec des inflorescences en chatons. La floraison a lieu avant, pendant ou après la sortie des feuilles. Cet ordre comprend les genres *Salix* (saules) et *Populus* (peupliers) qui forment la famille des *Salicacées (Salicaceae)*. Ces plantes habitent les zones tempérées et subpolaires des deux hémisphères. Peu d'entre elles sont tropicales. Saules et peupliers se trouvent dans l'hémisphère Nord, quelques saules habitent aussi l'hémisphère Sud (Andes, Argentine, Afrique du Sud, Madagascar et Indonésie).

Les fleurs, pourvues d'un disque cupuloïde ou bien d'une ou deux glandes (nectaires), ont un périanthe rudimentaire ou n'en possèdent pas; les fleurs mâles sont dotées de deux étamines latérales ou plus, à filets libres ou unis à la base; les femelles ont un ovaire supère à deux carpelles latéraux, uniloculaire et à style unique pourvu de deux stigmates bifides.

Les fruits sont des capsules qui contiennent de nombreuses petites graines munies de touffes de poils qui en facilitent la dissémination anémochore.

Du point de vue phylogénétique, cet ordre est isolé. On lui a trouvé des affinités avec les Pariétales (par l'intermédiaire des Tamaricacées) où les Hamamélidales, voire les Centrospermales. Il s'agit de plantes des sols alluvionnaires, humides, ou des toundras, très envahissantes et héliophiles.

Chez le genre *Salix*, on trouve des chatons dressés avec des bractées entières, une ou deux glandes nectarifères et des bourgeons couverts par une seule écaille en forme de capuchon. Les feuilles, simples et alternes, sont penninerves; elles ont un pétiole court et le plus souvent une face inférieure de couleur différente de celle de la face supérieure; il y a des stipules, souvent persistantes. C'est un genre très important qui compte environ trois cents espèces ainsi qu'un grand nombre d'hybrides naturels.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Saule blanc*** **(Salix alba)*****, très commun le long des cours d'eau.***

I.G.D.A.

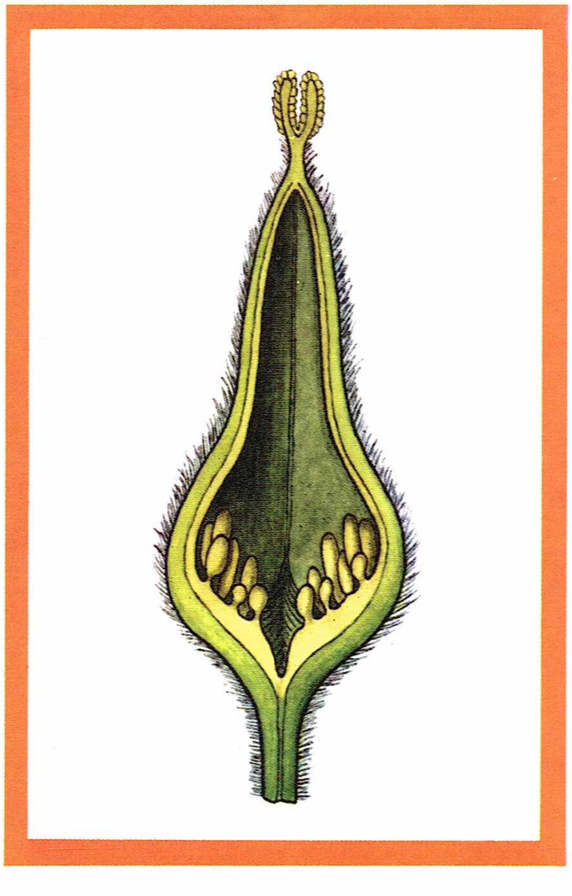

◀ ***Coupe de l'ovaire de*** **Salix caprea** ***très agrandie. (D'après Hempel et Wilhelm.)***

Le saule blanc *(Salix alba)* est répandu sur les rives des cours d'eau, en Europe, en Afrique du Nord, et en Asie centro-occidentale. Il atteint une hauteur de 20 à 25 m. Il est commun dans les plaines et les vallées, à basse altitude, où il est aussi cultivé. On le reconnaît à son tronc dont l'écorce est grossièrement fissurée longitudinalement, et à ses feuilles lancéolées, acuminées, finement dentées, soyeuses surtout à la face inférieure même quand elles sont adultes. Les rameaux sont flexibles et tenaces. Les fleurs mâles possèdent deux étamines, et la floraison est précoce. On cultive ce saule en lui donnant une forme en boule, en vue de la production de l'osier. Le bois, léger, tendre, à aubier blanc et cœur rougeâtre, sert à fabriquer des harnais, des socles, à préparer du charbon de bois, etc. On l'utilise aussi pour la fabrication d'allumettes.

Le saule fragile *(Salix fragilis)* est de taille inférieure à celle du précédent, mais il lui ressemble. Cependant, ses branches se séparent très facilement du rameau qui les porte; ses feuilles sont glabres en dessous. Il habite l'Europe et l'Asie occidentale. Il s'hybride avec *Salix babylonica*. Le saule à trois étamines ou saule amandier *(Salix triandra)* est un buisson ou un arbuste; il possède des stipules réniformes, une écorce formant des plaques, et des fleurs mâles à trois étamines. Il habite les zones basses d'Europe et du sud de la Sibérie jusqu'au Japon. Il fournit un excellent osier.

L'osier commun *(Salix viminalis)* surtout est cultivé pour ses rameaux flexibles. On le reconnaît à ses feuilles étroitement lancéolées ou linéaires, à bord entier ou légèrement crénelé et révoluté, à face inférieure soyeuse. Cet arbre vit en Europe et en Asie tempérée.

Le saule pourpre *(Salix purpurea)* est le plus souvent buissonnant. Ses branches sont rouge pourpré, d'où son nom. Ses feuilles sont petites, lancéolées et glauques à la face inférieure. Ses filets staminaux sont soudés sur toute leur longueur. On le rencontre fréquemment le long des cours d'eau, en Europe, en Afrique du Nord, et en Asie occidentale et centrale.

Salix pentandra possède des fleurs mâles à cinq étamines. Ses feuilles sont ovales-lancéolées, finement dentées, très luisantes, et parfumées quand on les froisse.

▼ ***Chaton mâle de*** **Salix caprea.**

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ *Le saule pleureur* (**Salix babylonica**) *est originaire d'Asie. La plupart des formes cultivées appartiennent toutefois à des croisements avec d'autres espèces.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▼ *Le saule pourpre* (**Salix purpurea**) *est le plus souvent buissonnant.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Cette espèce habite l'Europe et le sud de la Sibérie jusqu'à la Corée, mais non le Japon ; elle se rencontre en montagne dans nos régions.

Le saule rampant *(Salix repens)* est un petit arbuste ne dépassant pas 1 m, sans stipules et à fruit glabre. On ne le rencontre qu'en Europe ; il est typique dans les lieux humides et marécageux, surtout calcaires.

Le saule marsault *(Salix caprea)* est l'un des saules les plus répandus en Europe. Il se trouve aussi dans le sud de la Sibérie jusqu'au Japon. Il est moins exigeant que les précédents pour l'humidité et la lumière, et il fait partie des forêts jusqu'à l'étage du hêtre. C'est un arbuste ou un petit arbre pouvant atteindre 10 à 12 m de hauteur. Ses feuilles sont largement elliptiques ou ovales-aiguës, dentées ou presque entières, pubescentes et réticulées en dessous, plus ou moins glabres au-dessus, et à stipules caduques. Il possède de gros chatons précoces. Nous citerons, parmi les espèces proches de celle-ci : *Salix appendiculata*, des montagnes d'Europe centrale, petit arbuste assez rare ; le saule cendré *(Salix cinerea)*, que l'on trouve en forêts humides ; le saule à oreillettes *(Salix aurita)*, arbustif, qui habite les forêts fraîches en montagne, avec une aire semblable à celle du saule marsault.

Le groupe des saules alpins, qui sont des buissons de petite taille bordant les torrents et les sources au-delà de la limite supérieure de la végétation arborescente, n'a pas d'importance pratique, sauf pour stabiliser les pentes. Certains spécimens ont un grand intérêt phytogéographique, car il s'agit d'espèces dont l'aire est disjointe. Ils occupent les zones arctiques et les montagnes d'Europe, sur lesquelles ils se sont maintenus après être venus du nord pendant les grandes glaciations.

Les saules nains forment d'importants ensembles dans les vallées enneigées des hautes montagnes ; ils ont une très courte période végétative (de trois à quatre mois).

Le saule herbacé *(Salix herbacea)*, qui a été appelé par Linné le plus petit arbre de la terre, croît dans les régions arctiques et les montagnes d'Europe, dans l'est du Canada et au Groenland ; il se trouve essentiellement sur les sols humifères acides et frais ; on le rencontre dans les Alpes de 1 600 à 3 400 m d'altitude. Ses chatons sont pauciflores, et ses petites feuilles sont arrondies, brillantes, glabres et vert clair sur les deux faces, à bords dentés et à nervation réticulée. Ce minuscule arbrisseau dépasse à peine le sol sur lequel il est prostré (hauteur de 1 à 8 cm).

Le saule réticulé *(Salix reticulata)* a une distribution circumpolaire étendue car il occupe tout le nord du Canada et la Sibérie (mais pas le Groenland). C'est une espèce des sols calcaires, qui vit dans les Alpes de 1 800 m à 3 400 m d'altitude. Ses rameaux rampent à la surface du sol et sur les roches, où ils adhèrent grâce à des racines adventives. Ses feuilles sont assez grandes, elliptiques, entières, rugueuses, vert foncé et à peu près glabres à la face supérieure, veloutées et grisâtres en dessous.

Une espèce asiatique, importante par ses hybrides, le saule pleureur *(Salix babylonica)*, originaire d'Asie (sans doute de Chine), mérite une place à part. C'est un petit arbre qui peut atteindre 10 m de hauteur, et qui possède de longs rameaux pendants d'un bel effet décoratif ; ses feuilles sont étroitement lancéolées, dentées et glauques en dessous. Actuellement les saules pleureurs les plus cultivés appartiennent à l'hybride de *S. babylonica* et *S. fragilis*, ou *S.* × *blanda*, dont les chatons sont généralement hermaphrodites. D'autres hybrides de *S. babylonica* sont aussi utilisés. Ce dernier est rarement planté, parce qu'il est peu rustique.

Le saule noir *(Salix nigra)* a une aire très vaste en Amérique du Nord, de la région des Grands Lacs aux côtes atlantiques, jusqu'au golfe du Mexique, au Mexique septentrional et à la Californie. Il n'atteint guère que 12 m, mais c'est le plus haut des saules américains. Il croît au bord des cours d'eau et des lacs. Ses feuilles sont lancéolées, finement dentées, longuement atténuées, vert clair, et le plus souvent glabres. Son bois, léger et tendre, sert de combustible ; son écorce est riche en tanin.

Il existe peu d'espèces sud-américaines de saules. La plus importante est le saule de Humboldt *(Salix humboldtiana)*, qui habite du nord de l'Argentine à la Patagonie. Il atteint une vingtaine de mètres pour un diamètre maximal de 1,40 m. Ses feuilles sont lancéolées, linéaires, acuminées, dentées, vert foncé au-dessus, plus claires en dessous.

Outre cette espèce spontanée et *S. alba* var. *calva*, on trouve de plus en plus en Amérique du Sud des saules hybrides résistant à la défoliation estivale due à des Champignons *(Marssonina)*. Il s'agit de produits de croisements naturels entre *S. humboldtiana* (individus mâles) et *S. babylonica* (individus femelles). D'autres espèces entrent peut-être en jeu. Tous ces hybrides sont nommés *Salix* × *argentinensis*. Ils sont propagés végétativement. Leur bois sert surtout à fabriquer des caisses et à préparer de la pâte à papier.

Le genre *Populus* (peupliers) est très important à divers points de vue. Il est bien difficile d'en établir une classification, car il existe de nombreux hybrides, et les auteurs y distinguent de vingt à cent espèces. Ce sont des plantes ligneuses, caractérisées par un grand polymorphisme foliaire, qui croissent des régions subarctiques aux régions tempérées chaudes de l'hémisphère Nord. Les caractères qui les distinguent des saules sont leurs feuilles palminerves à pétiole allongé, leurs chatons longs, pendants, à bractées non entières, et leurs bourgeons enveloppés de plusieurs écailles. On peut diviser les peupliers en cinq sections : *Turanga, Leuce, Aegeiros, Tacamahaca* et *Leucoides*.

Section *Turanga*. Il s'agit souvent d'arbrisseaux à feuilles coriaces, de forme variable sur un même arbre, entières ou grossièrement dentées, et à écorce fibreuse. Ils aiment la chaleur et habitent l'Afrique du Nord ainsi que l'Asie tempérée jusqu'en Mongolie. Nous citerons *Populus euphratica* du Moyen-Orient.

Section *Leuce*. Ce sont les peupliers blancs, arbres ou arbustes, à tronc longtemps lisse et clair. Les feuilles sont tomenteuses au début, au moins sur les pousses longues. Les bourgeons sont souvent tomenteux. Le

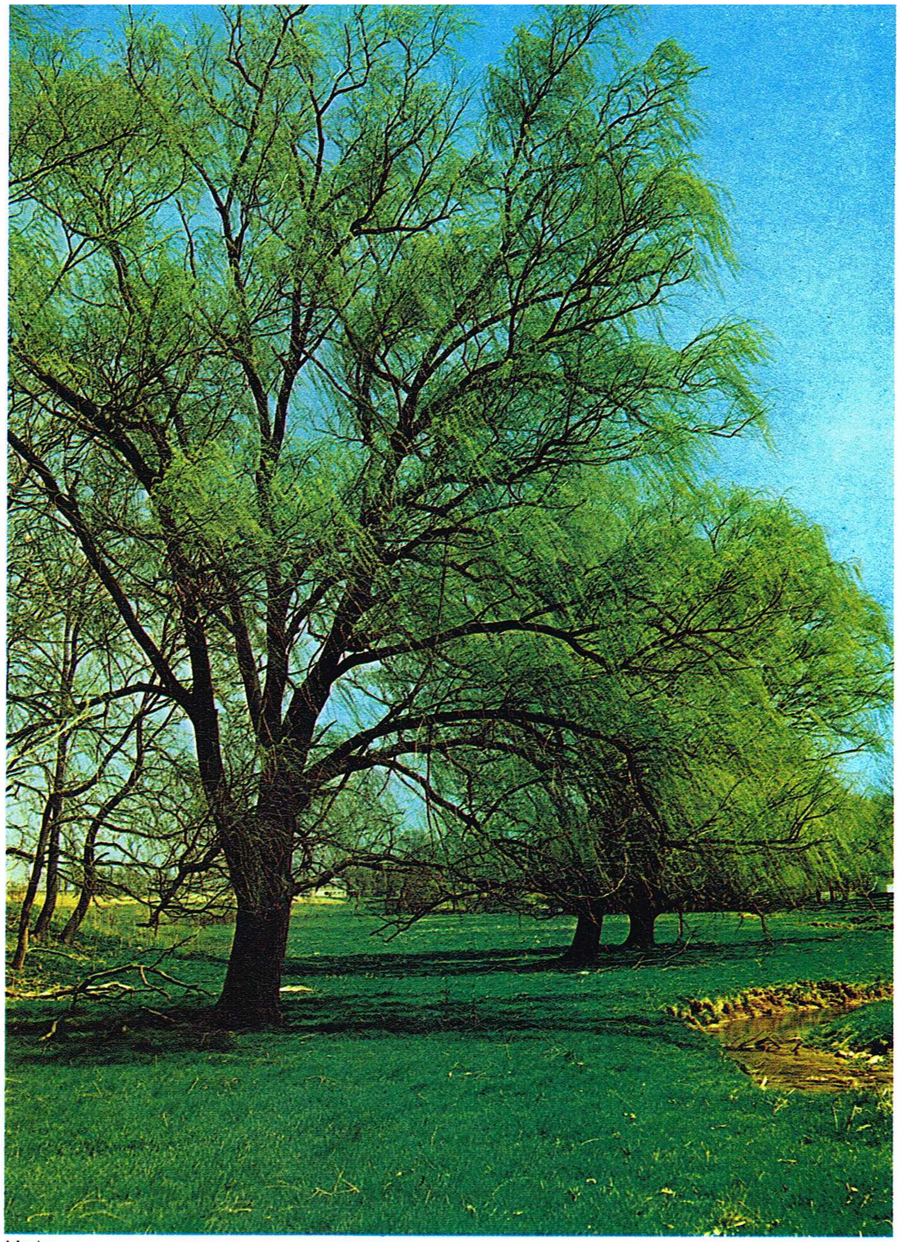

Marka

▲ ***Les rameaux flexibles et tenaces caractérisent le genre* Salix. *Certaines espèces sont cultivées pour la production de l'osier.***

peuplier blanc ou ypréau *(Populus alba)* habite l'Europe centrale, occidentale et méridionale, l'Afrique du Nord, le centre et l'ouest de l'Asie. On le reconnaît facilement à ses feuilles ovales, à trois à cinq lobes grossièrement dentés, vertes sur le dessus, blanches et tomenteuses en dessous. Son écorce est lisse et blanchâtre, et parcourue par des stries horizontales foncées. Son bois sert à fabriquer des planches et des agglomérés.

Le tremble *(Populus tremula)* est ainsi appelé parce que ses feuilles sont sans cesse en mouvement sur leurs longs pétioles, au moindre souffle de vent. C'est un arbre pouvant atteindre 25 à 30 m. Son tronc est le plus souvent droit, élancé, avec une cime arrondie et une écorce longtemps lisse, de couleur gris verdâtre ou blanchâtre. Ses feuilles sont presque orbiculaires, simplement crénelées et dentées, vert clair et habituellement glabres à l'état adulte. Il habite l'Europe à partir du nord de la Scandinavie, l'Asie septentrionale, centrale et occidentale, la Chine, ainsi que, localement, l'Afrique du Nord. C'est une espèce résistant au froid, héliophile, isolée dans les bois, ou envahissant par groupes les pâturages abandonnés ; il lui faut un sol frais et léger, mais elle est indifférente au pH ; elle vit rarement au-delà de cent vingt ans. Son bois est peu différencié en cœur et aubier, il est tendre et léger ; dans les pays scandinaves, on s'en sert largement pour fabriquer des allumettes et de la pâte à papier. Le grisard *(Populus canescens)* présente des caractères intermédiaires entre les deux précédents, et il est généralement considéré comme leur hybride. Il a des pousses longues à feuilles seulement crénelées comme *P. tremula*, mais tomenteuses en dessous comme *P. alba*. *Populus sieboldii*, du Japon, à feuilles ovales plus épaisses et plus grandes que chez nos peupliers, et *Populus adenopoda*, de Chine, à feuilles ovales ou arrondies munies de deux grosses glandes en bas du limbe, sont des trembles asiatiques.

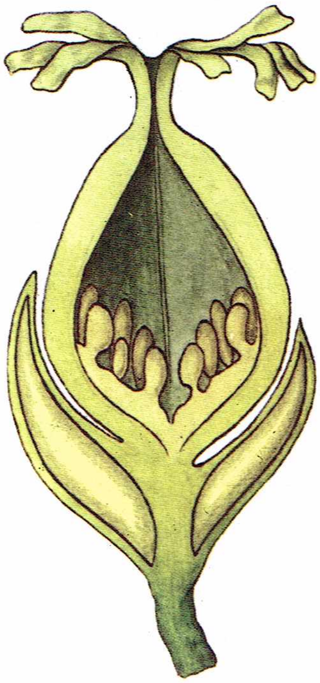

I.G.D.A.

▲ *Coupe longitudinale de l'ovaire de* Populus tremula, *agrandi. (D'après Hempel et Wilhelm.)*

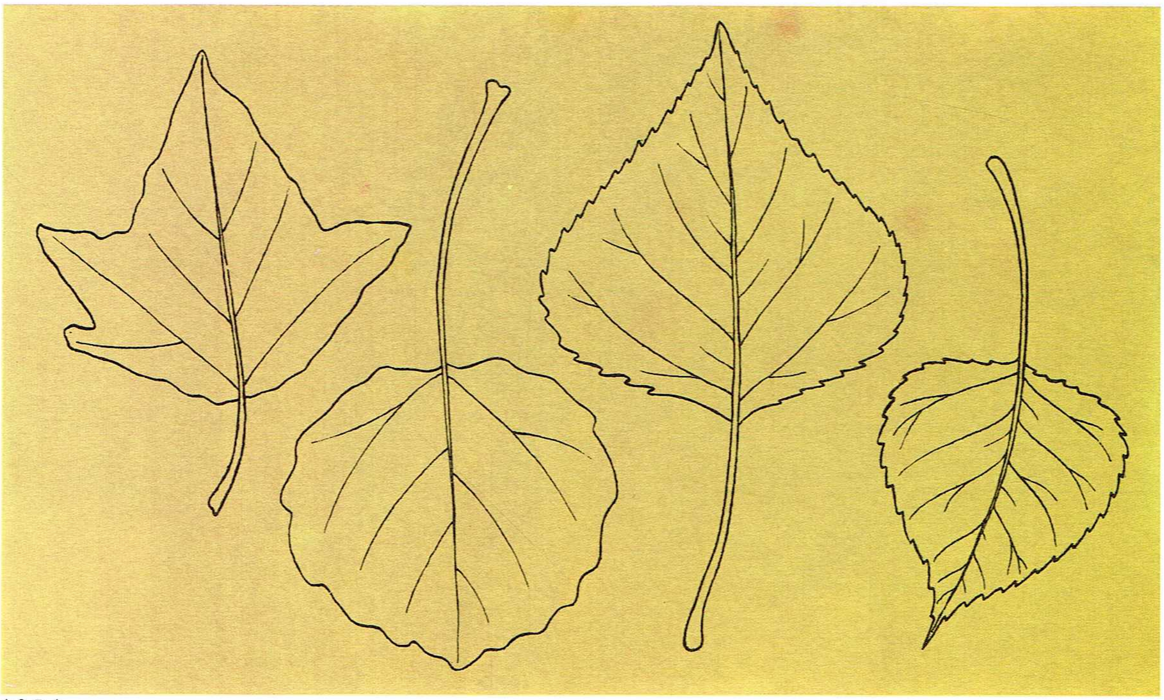

I.G.D.A.

▶ *De gauche à droite, feuilles de : peuplier blanc ; tremble ; peuplier noir ; peuplier noir var.* italica.

Populus tremuloides (« quaking aspen ») occupe en Amérique du Nord une aire continue transcontinentale, de l'Alaska au sud du Labrador, à la région des Grands Lacs, à la Nouvelle-Angleterre et à la Pennsylvanie, surtout en plaine dans le Nord, avec des stations plus disséminées le long des montagnes Rocheuses (de 2 000 m à 3 000 m dans celles-ci), et jusqu'au centre du Mexique. Cette espèce a une croissance rapide, elle est héliophile et colonisatrice dans les endroits où les forêts ont été coupées ou dévastées par les incendies, car elle croît également sur sol peu humifère. Elle forme ainsi des bosquets avec d'autres feuillus, comme certains bouleaux et peupliers, qui précèdent les espèces plus exigeantes et plus résistantes à l'ombrage. Cet arbre fait partie des forêts les plus septentrionales avec certains pins, sapins et épicéas. *Populus tremuloides* croît sous différents climats, tempérés ou froids, à pluviosité assez faible, à forts enneigements avec une courte période de végétation. Bien qu'il s'adapte à différents sols, il pousse mieux sur des terrains humifères et meubles ; au nord, il croît aussi dans la zone du permafrost. Étant donné la grande étendue de son aire, il en existe des formes adaptées à divers climats ou écotypes, mais qui n'ont pas une morphologie bien distincte. Son bois sert surtout à préparer de la pâte à papier.

Section *Aegeiros*. Ce sont les peupliers noirs, à vaste distribution. Leur écorce est épaisse et rugueuse. Leurs feuilles triangulaires ou losangiques sont vertes et glabres, à bord cartilagineux translucide, et à pétioles aplatis latéralement. Leurs bourgeons sont résineux, visqueux et peu odorants.

Le peuplier noir ou liard *(Populus nigra)* est un arbre de 20 à 30 m, à gros tronc un peu tortueux, à couronne pyramidale élargie, à branches robustes, et à écorce fissurée dans le sens longitudinal. Ses feuilles sont luisantes, rhomboïdales, acuminées, dentées mais pas à la base, non ciliées, sans glandes au sommet du pétiole. Cette espèce est sporadique à l'état spontané le long des cours d'eau et des torrents, sur des sols sablonneux et caillouteux, mais suffisamment humides. On rencontre le liard en Europe centro-méridionale, en Afrique du Nord et en Asie centro-occidentale. Son bois a peu d'importance pratique. Le peuplier noir a une variété *italica*, qu'on a plantée dans le monde entier. Il s'agit probablement d'un cas de mutation. Tous les exemplaires sont de sexe mâle, et la plante est reproduite de façon asexuelle par bouture. Ce peuplier a un port fastigié ; sa silhouette est haute et fournie ; ses branches sont serrées et ascendantes ; son tronc est côtelé et possède des contreforts basaux ; son écorce est rugueuse ; il atteint 30 m. Selon certains auteurs, il serait venu d'Italie du Nord, à une époque inconnue ; selon d'autres, il vient de l'Afghanistan, ou bien de l'Afrique du Nord, ou encore du Moyen-Orient, mais là il n'existe que des individus femelles. De toute manière, il était déjà connu au milieu du XVIII[e] siècle.

Populus deltoides est un arbre nord-américain extrêmement polymorphe. Il est très souvent cultivé, si bien que l'aire naturelle de ses diverses formes n'est pas toujours claire. Il ressemble à *P. nigra*, mais ses feuilles sont plutôt triangulaires, et le pétiole porte deux ou trois glandes au sommet.

Le type (var. *deltoides* = var. *monilifera*) possède des rameaux de petite taille, le plus souvent ronds, brunâtres puis gris. Ses feuilles sont vert clair et soit largement ovales, soit à peu près triangulaires et finement crénelées. On pense que ce peuplier (« northern cottonwood » ou peuplier de Virginie) vient du sud du Canada et du nord-est des États-Unis. *Populus deltoides* var. *angulata* (« southern cottonwood » ou peuplier de Caroline) habite principalement aux États-Unis la vallée du Mississippi, les États du Sud et de la côte atlantique, et le pourtour du golfe du Mexique ; cet arbre a des rameaux anguleux brun verdâtre puis gris-brun et des feuilles ovales-triangulaires de couleur vert foncé et luisantes, plus grossièrement crénelées. Il est plus cultivé que le type. Pour certains ce serait d'ailleurs le type et, si on le considère comme une

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ *Écorce de peuplier noir* (Populus nigra) *; spécimen adulte.*

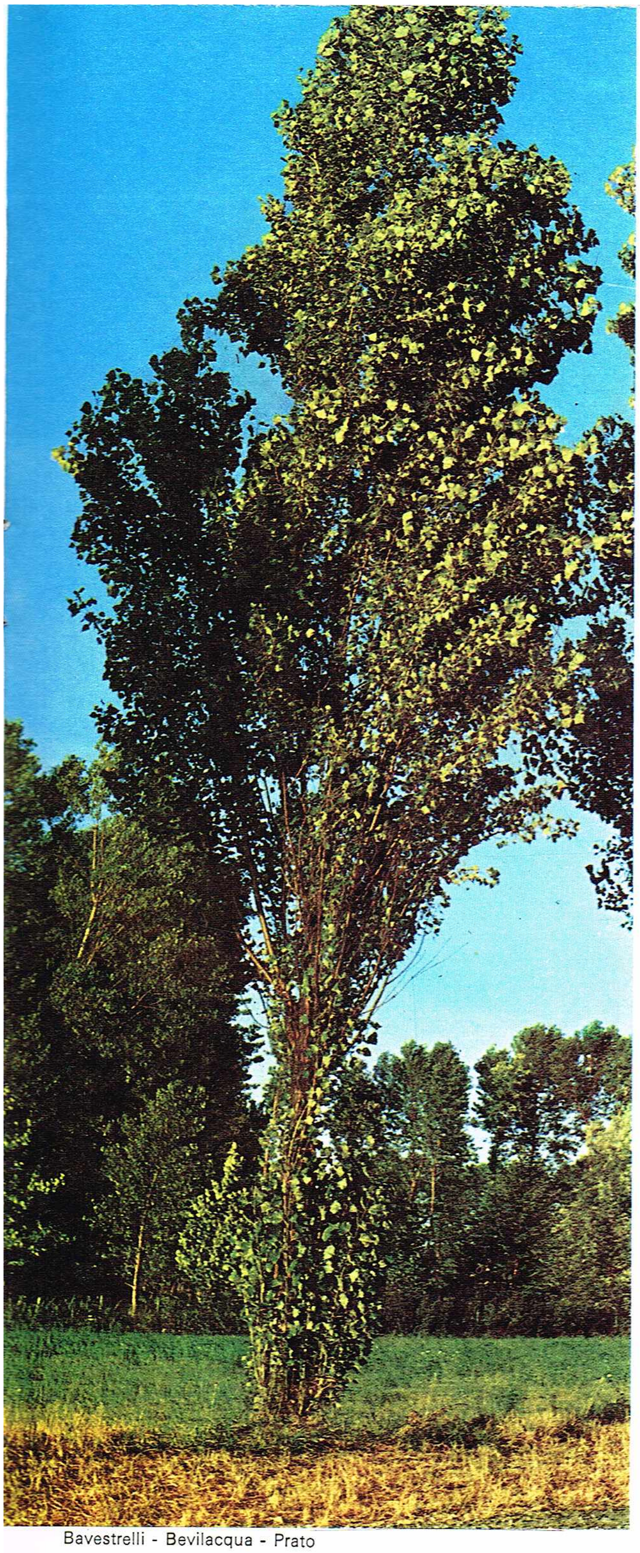

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

espèce, ce serait à lui de prendre le nom de *P. deltoides*. *Populus sargentii* ou *P. deltoides* var. *occidentalis* proviendrait des zones orientales inférieures des montagnes Rocheuses, à basse altitude, jusqu'à la vallée du Missouri et à l'ouest du Texas; il possède des branches dont la couleur tend vers le jaune; ses feuilles sont fréquemment plus larges que longues, acuminées et assez grossièrement dentées; cet arbre est plus petit que les précédents. On peut trouver des termes de passage entre ces formes de *P. deltoides*. Il s'agit en général d'arbres atteignant 30 m, avec des branches robustes et élargies, ainsi qu'une couronne ample et ouverte. Ces peupliers habitent le long des cours d'eau et ont besoin de nappes d'eau souterraines, mais sans que les racines soient inondées. Ils sont par conséquent indifférents à la pluviosité qui peut être réduite. Ils croissent surtout sur des sols meubles et bien drainés; ils dépassent rarement cent à deux cents ans et ont une croissance très rapide (jusqu'à 2,40 m par an); ils sont héliophiles, et, par conséquent, ils s'associent en général avec des arbres de taille inférieure ou à croissance plus lente, notamment avec certains chênes, saules, ormes, platanes, etc. Leur bois sert à préparer de la pâte à papier, à fabriquer des caisses et comme combustible. Ces peupliers noirs américains sont importants parce que, par croisements spontanés avec le peuplier noir d'Europe, et par des croisements de retour successifs, ils ont donné un nombre très important d'hybrides, répandus en Europe par multiplication végétative à partir du XVIII[e] siècle; on ne peut d'ailleurs plus reconstituer la généalogie de la plupart d'entre eux.

Nous citerons enfin, parmi les peupliers noirs d'Amérique, *Populus fremontii* qui vit de la Californie à l'Arizona, et *Populus wislizenii*, du Texas occidental, du Nouveau-Mexique et du Mexique; c'est le peuplier commun de la vallée du Rio Grande.

Section *Tacamahaca*. Il s'agit de peupliers balsamiques, arbres ou arbustes d'Asie centro-orientale et d'Amérique du Nord. Leur écorce est profondément sillonnée. Leurs feuilles sont épaisses et allongées, avec une face inférieure plus ou moins blanchâtre et une marge translucide. Le pétiole est arrondi ou quadrangulaire, sillonné sur le dessus. Les bourgeons sont parfumés et très visqueux.

Parmi les espèces asiatiques de la section, nous citerons seulement : *Populus laurifolia*, d'Asie centrale et de Sibérie, *P. koreana* et *P. maximowiczii*, du Japon et de la Corée, *P. simonii*, *P. yunnanensis* et *P. szechuanica*,

▲ ***Plantation de peupliers.***

◀ ***Le peuplier d'Italie* (Populus nigra *var.* italica)*, à la silhouette haute et fournie, est cultivé dans le monde entier.***

de Chine, les deux derniers remarquables par leurs grandes feuilles, atteignant 20 cm de long chez *P. szechuanica*.

On trouve en Amérique du Nord *Populus tacamahaca*, du Canada et du nord des États-Unis, élément dominant de la végétation du Grand Nord, *Populus angustifolia*, des montagnes Rocheuses, à feuilles lancéolées, et d'autres encore. *P. tacamahaca (P. balsamifera)* est un arbre atteignant 30 m, à feuilles largement ovales et acuminées, arrondies-cordées à la base, finement dentées. Il est typique des bas-fonds bordant les rivières, où il forme des groupements purs ou mélangés de saules, d'aunes, de bouleaux et d'épicéas; au sud, il existe çà et là, en tant que relique des périodes glaciaires, lorsque l'espèce avait une diffusion plus vaste.

Section *Leucoides*. Ces arbres habitent l'Extrême-Orient et l'Amérique du Nord. Ils ont une écorce écailleuse. Leurs feuilles sont très grandes, jusqu'à 30 cm chez *P. lasiocarpa*, et possèdent un pétiole arrondi, sauf tout à fait au sommet; ils ne se multiplient pas bien par boutures. Cette section comprend certaines espèces chinoises, comme *Populus lasiocarpa*, *Populus wilsonii* et *Populus violascens*, et aussi l'espèce américaine *Populus heterophylla*. Cette dernière vit aux États-Unis dans les marais, de la vallée du Mississippi aux côtes de l'Atlantique. C'est un arbre atteignant 30 m, à feuilles largement ovales, un peu cordiformes.

Batidales

Cet ordre, dont la position systématique est incertaine, comprend la seule famille des *Batidacées (Batidaceae)*, avec deux espèces, *Batis maritima* et *B. argillicola*. Ce sont des plantes ligneuses buissonnantes, dioïques. Leurs feuilles sont succulentes, glabres, souvent prostrées, simples, charnues, opposées-décussées avec un prolongement (éperon) inférieur. Les fleurs très petites sont réunies en épis : les femelles, groupées par quatre à douze, ne possèdent pas de périanthe; leurs ovaires sont bicarpellés, mais divisés en quatre loges uniovulées par des fausses cloisons; les mâles ont quatre étamines alternant avec des staminodes, que certains auteurs considèrent comme des pétales, et sont entourées d'un périanthe membraneux.

Les fruits d'un même épi femelle, qui sont des baies, s'unissent en formant une infrutescence. Ces plantes, dont l'importance économique est nulle, ont par contre beaucoup d'intérêt du point de vue de la systématique. On les a rapprochées des Centrospermales, mais leur structure florale a fait aussi penser aux Rhœadales. *B. maritima* croît sur les côtes atlantiques et pacifiques de l'Amérique tropicale et subtropicale, *B. argillicola* sur la côte Sud de la Nouvelle-Guinée.

I.G.D.A.

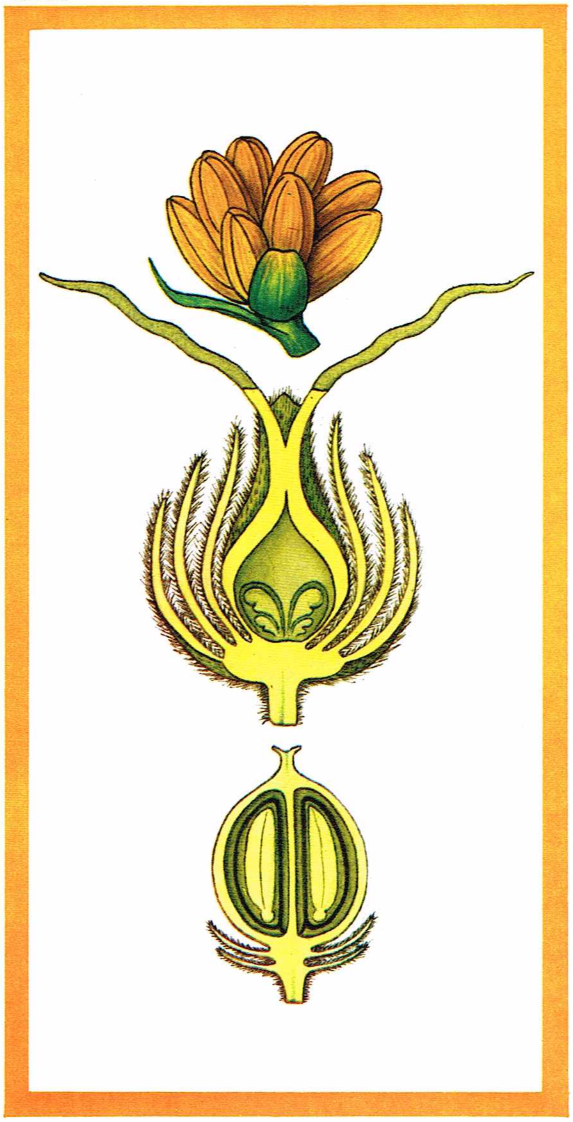

▶ ***Balanopsidales* :** **Balanops vieillardii** ; *de haut en bas : fleur mâle, fleur femelle (coupe longitudinale), fruit (coupe longitudinale), agrandis (d'après Baillon).*

Balanopsidales

Cet ordre comprend l'unique famille des *Balanopsidacées (Balanopsidaceae)* qui est représentée par un ou deux genres et une dizaine d'espèces. Il s'agit de plantes arborescentes ou arbustives, dioïques, à feuilles alternes, entières et à consistance de cuir. Les fleurs femelles sont solitaires, apérianthées et entourées de bractées; les mâles sont réunies en chatons. Chaque fleur mâle se trouve à l'aisselle d'une bractée et est constituée par un nombre variable d'étamines (de une à douze); les fleurs femelles possèdent un ovaire imparfaitement divisé en deux loges biovulées et surmonté de deux ou trois styles. Les fruits sont des drupes à plusieurs graines. Les Balanopsidacées habitent les îles de Polynésie, la Nouvelle-Calédonie et le Queensland; leur place dans la classification (près des Juglandales? des Fagales?) pose d'intéressants problèmes, mais elles n'ont aucune importance économique.

Urticales

Cet ordre a une grande importance du point de vue économique. Il comprend en effet le chanvre, la ramie, le houblon, le mûrier, le figuier et l'orme. Ce sont des plantes ligneuses ou herbacées; elles ont des fleurs peu apparentes, isolées ou réunies en inflorescences. Ces fleurs sont souvent unisexuées et les plantes peuvent être monoïques ou dioïques. Les fleurs peuvent posséder quatre à six pièces périanthaires réunies en un ou deux verticilles d'aspect sépaloïde. En face de chaque tépale s'insère une étamine. L'ovaire, presque toujours constitué par deux carpelles dont un seul est fertile, est supère, uniloculaire, et renferme une unique graine, à deux téguments en général. La pollinisation se fait essentiellement par le vent, plus rarement par les Insectes, et, dans ce cas, les fleurs ne produisent pas non plus de nectar. Les fruits sont des drupes ou des akènes. Il peut exister des pseudo-fruits, comme chez le figuier et le mûrier. Les feuilles sont pourvues de stipules (qui manquent pourtant chez la pariétaire). Il existe souvent des formations morphologiques caractéristiques, poils sécréteurs, poils urticants, poils glandulaires, ou laticifères comme chez les mûriers; en outre, l'épiderme produit très souvent des sécrétions minérales sous forme de cystolithes.

L'importance économique des Urticales est essentiellement liée à la production de fibres textiles, de fruits comestibles, de médicaments et de bois. Nous en donnerons quelques exemples.

Famille des Moracées (Moraceae). De nombreux Végétaux utiles à l'homme appartiennent à cette famille qui comporte environ soixante genres et plus de mille cinq cents espèces. Ce sont des plantes arborescentes ou arbustives, monoïques ou dioïques, et pourvues de laticifères non articulés.

Les feuilles alternes, simples, sont entières ou plus ou moins lobées, avec des stipules caduques. Les fleurs femelles forment des glomérules ou sont situées sur des réceptacles étalés ou fermés; le périanthe est généralement à quatre pièces, et l'ovaire uniloculaire avec

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

I.G.D.A. - Archives P2

▲ ***Sycones de figuier. Dans les formes cultivées, les figues d'été comme celles d'automne sont comestibles.***

◀ ***Branche avec soroses de mûrier blanc* (Morus alba).**

un ou deux stigmates et un seul ovule. Les fleurs mâles forment des chatons ou sont situées à la périphérie du réceptacle femelle ; elles ont le plus souvent quatre tépales et autant d'étamines insérées à la base de ceux-ci.

Les fruits peuvent être des drupes, formant des infrutescences particulières, ou des akènes insérés sur des réceptacles charnus. Il peut donc y avoir des pseudo-fruits formés par la croissance d'autres parties de la fleur que l'ovaire.

Les Moracées sont entomophiles. Ce sont des plantes des régions tropicales, et connues parfois depuis des époques très lointaines (Crétacé supérieur), comme le figuier et le mûrier.

Parmi les divers genres de la famille citons tout d'abord celui qui lui a donné son nom, le genre *Morus*, avec une douzaine d'espèces, dont le mûrier blanc et le mûrier noir *(M. alba* et *M. nigra)*. Le premier est lié à l'histoire du ver à soie, qui se nourrit à peu près exclusivement de ses feuilles. Le mûrier noir est rarement utilisé à ce point de vue. Ces deux mûriers sont des arbres de 10 à 18 m de hauteur, produisant un latex. Leurs feuilles sont alternes, simples, diversement lobées ou dentées, et souvent de forme et de taille variables sur le même pied. Les fleurs, vertes ou jaunâtres, sont réunies en chatons unisexués pendants, cylindriques ou globuleux, situés en général sur le même pied : les mâles apparaissent avec les feuilles et tombent vite ; les femelles donnent un pseudo-fruit appelé sorose ou mûre, de couleur blanchâtre, rouge ou noir violacé, de saveur douce. Les soroses sont le résultat de l'agglomération de nombreuses petites fausses drupes, constituées par le vrai fruit qui est un akène entouré du périgone succulent de la fleur.

Le mûrier blanc a des feuilles dont la face supérieure est vert clair et lisse, et la face inférieure pubescente sur les nervures ; les feuilles peuvent être de forme ovale, sans lobes ou avoir des lobes irréguliers ; elles sont dentées. Les soroses sont blancs, mais il existe des variétés à soroses roses, rouges ou presque noirs. L'origine du mûrier blanc est discutée. On considère souvent qu'il provient de Chine où il est connu depuis des milliers d'années. De là, on l'aurait introduit dans le Turkestan et dans le nord de l'Inde, où on l'a retrouvé naturalisé. En tout cas, le mûrier a été importé en même temps que le ver à soie, au VI^e siècle, à Constantinople et, de là, a été répandu en Europe ; son apparition en France ne date que de la fin du XV^e siècle.

Le mûrier noir, pour sa part, a des feuilles vert foncé, pubescentes-rudes au-dessus et pubescentes sur toute la face inférieure, de forme cordée et ovale, et à bords dentelés. Ses soroses sont gros, noirs, brillants, acidulés et très juteux. Il semble qu'il soit originaire d'Iran et qu'il ait été cultivé pour ses fruits depuis des temps très reculés dans le bassin méditerranéen.

Nous citerons encore le mûrier rouge *(Morus rubra)*, arbre haut d'environ 20 m, à grandes feuilles, le plus souvent ovales, scabres au-dessus et pubescentes à la face inférieure ; il a des fruits pourprés. Il est spontané dans la moitié est des États-Unis.

Le genre *Ficus* (figuiers) appartient aussi à la famille des Moracées. Il comprend environ un millier d'espèces, qui vivent sous les climats chauds, tropicaux et subtropicaux, en Amérique, en Asie et en Malaisie essentiellement. Les figuiers produisent un latex souvent caustique.

Le figuier commun *(Ficus carica)* est connu depuis l'Antiquité la plus lointaine. On en parle dans la Genèse, puisqu'il y est dit qu'Adam et Ève se cachèrent à son ombre après avoir commis leur péché ; on en trouve aussi des citations chez les écrivains grecs et romains. Probablement originaire d'Asie Mineure, il a été répandu jadis tout autour de la Méditerranée, où il a été cultivé par les Égyptiens et les Grecs. Il a été également importé en Amérique et en Extrême-Orient. En France, il peut croître jusqu'aux environs de Paris. En ce qui concerne les caractères morphologiques, la plante spontanée

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ ***Branche de figuier portant deux jeunes sycones.***

▶ *Deux plantes ornementales d'appartement :* Ficus elastica *var.* doescheri, *appelée communément caoutchouc (à gauche) ;* Ficus lyrica *(à droite).*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▼ Ficus bengalensis, *ou banyan. Les racines adventives forment des sortes de piliers de soutien.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

(erinosyce) est différente de celle qui est cultivée. La première, en effet, est un arbuste ou un arbre, à écorce lisse et grisâtre, et riche partout en latex. Ses feuilles possèdent généralement trois à cinq lobes dentés, elles sont veloutées en dessous et rugueuses au-dessus. Les fleurs sont petites et renfermées dans un réceptacle charnu creux (sycone) ; il y a deux types de fleurs : les mâles se trouvent près de l'ouverture et possèdent trois tépales et trois ou quatre étamines ; les femelles sont internes et possèdent trois ou quatre tépales et un ovaire muni d'un seul ovule. La pollinisation se fait grâce à un Hyménoptère, le blastophage *(Blastophaga psenes)*, qui accomplit sa métamorphose dans les fleurs femelles, mais d'autres Insectes peuvent intervenir. Quand l'Insecte parfait en sort, à partir du printemps, il a le corps parsemé de pollen ; en pénétrant dans un autre sycone, formé durant l'été, pour y pondre ses œufs, il effectue la pollinisation des figues d'été alors formées, sans pouvoir y pondre, car le style des fleurs femelles est trop long. Après la fécondation, le réceptacle mûrit, devient mou, et renferme à l'intérieur les fruits, qui sont de minuscules akènes, noyés dans une pulpe constituée par le réceptacle. Ce dernier est comestible et a une couleur blanchâtre ou violette. L'Insecte peut pondre dans des figues produites à l'automne et munies de fleurs femelles à style court. Ces figues ne sont pas comestibles.

Les formes cultivées diffèrent de la précédente parce qu'elles sont généralement arborescentes sans toutefois dépasser 10 m ; leurs feuilles sont très rugueuses dessus, à poils raides dessous, parfois peu lobées ; chez le caprifiguier, toutes les fleurs femelles sont à style court, si bien qu'aucun sycone n'est comestible. Dans les autres formes, les inflorescences renferment le plus souvent uniquement des fleurs femelles et celles d'automne sont à long style comme celles d'été, de sorte que le blastophage ne peut y pondre. Les deux types de sycones sont donc comestibles. La formation des fruits se fait parfois sans fécondation (figue adriatique). Dans les autres cas, le blastophage doit apporter du pollen de caprifiguier ou d'erinosyce. Le figuier croît bien sur des sols meubles, mais il peut vivre aussi dans des régions rocheuses.

Il résiste à la sécheresse et même à des températures de 8 à 10 °C en dessous de zéro. Si la partie aérienne meurt, les racines donnent souvent des rejets au printemps. La multiplication des variétés cultivées se fait par bouturage ou marcottage. La récolte des figues d'été et d'automne a lieu pendant deux ou trois mois sans discontinuer. La production des fruits se fait habituellement à partir de la cinquième année et s'accroît jusqu'à la trentième année environ; puis elle diminue jusqu'à ce que l'arbre atteigne environ soixante ans, âge auquel il meurt généralement. Les figues ont une grande valeur alimentaire, car elles contiennent des sucres (60 à 70 %), des protéines et des matières grasses. Elles sont consommées fraîches ou séchées. On peut aussi leur faire subir la fermentation alcoolique puis recueillir l'alcool.

Plusieurs espèces de *Ficus* font partie des plantes ornementales de jardins et d'appartements. La plus importante est *Ficus elastica,* qu'on nomme vulgairement caoutchouc; il est originaire des forêts humides de l'Inde orientale, où il atteint une hauteur de 30 m et au-delà. Ses feuilles sont coriaces, brillantes, de forme elliptique, et possèdent une grosse nervure centrale d'où partent à angle droit de fines nervures parallèles. On l'a cultivé pendant un certain temps pour préparer un caoutchouc que l'on tirait de son latex, mais il a été remplacé par les hévéas.

D'autres espèces de *Ficus* ont des troncs qui émettent des racines adventives qui vont jusqu'au sol en formant des sortes de piliers de soutien. Ainsi, un même arbre peut arriver à avoir avec ses racines extérieures une circonférence de sept cents mètres. Le meilleur exemple en est le banyan *(Ficus bengalensis),* qui habite aussi l'Inde orientale, et *Ficus aoa,* des îles Samoa, le plus volumineux du groupe.

Le genre *Artocarpus* appartient également à la famille des Moracées. Il s'agit d'arbres d'une hauteur de 10 à 15 m, qui sont originaires d'Indo-Malaisie; ils se sont répandus, par culture, dans le Sud-Est asiatique, ainsi qu'en Afrique et en Amérique tropicales. Ils ont de grandes feuilles alternes à cinq à sept lobes, qui ressemblent à celles des figuiers. Ils sont monoïques; les fleurs forment des inflorescences mâles en épis et femelles en capitules. Toute l'inflorescence femelle, y compris l'axe qui la soutient, devient charnue après la fécondation, enferme les akènes provenant des fleurs femelles et forme une masse qui ressemble à un seul fruit.

L'arbre à pain *(Artocarpus communis)* est cultivé dans la plupart des pays chauds. Il lui faut beaucoup de pluie, et il peut donner jusqu'à trois récoltes par an.

Il existe un autre arbre à pain, le jacquier ou *Artocarpus heterophylla,* qui a des feuilles plus petites et souvent entières, et des pseudo-fruits qui peuvent atteindre 50 cm de long et peser 40 kg. Lui aussi est originaire d'Indo-Malaisie et répandu dans presque toutes les régions chaudes. Les fruits des arbres à pain sont consommés frais ou séchés, ou bien conservés dans du sirop. La pulpe, bouillie dans le lait, donne une crème de couleur orangée, qui a le goût du melon. Réduite en poudre après dessiccation, cette pulpe donne une sorte de farine. L'*Artocarpus communis* est le plus apprécié pour l'alimentation. Le bois est utilisé en Indochine pour la sculpture.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ ***Racines aériennes rampantes de* Ficus macrophylla.**

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Fruits de l'arbre à pain*** **(Artocarpus communis).**

La famille des Moracées comprend aussi le genre *Brosimum*, qui est représenté par des plantes arborescentes, parfois arbustives, à fleurs unisexuées réunies en chatons, et à fruits charnus recouverts d'écailles persistantes. *Brosimum alicastrum* est un arbre d'Amérique tropicale, cultivé dans différents pays de climat équatorial pour ses graines qui, cuites au four ou bouillies, ont la saveur de nos châtaignes. Les feuilles servent de fourrage, et le latex donne du caoutchouc. *Brosimum galactodendron* (arbre à la vache), du Venezuela, fournit un latex comestible.

On introduisit en France, en 1751, le premier exemplaire femelle d'un autre genre de Moracée, provenant de l'Asie orientale, et L'Héritier donna à ce genre le nom de *Broussonetia* du nom du botaniste Auguste Broussonet. Il y en a sept espèces, dont la plus importante, *Broussonetia papyrifera*, d'Extrême-Orient, est un arbre haut de 10 à 15 m, avec une large cime, et des feuilles vert grisâtre et pubescentes diversement lobées ou non sur le même pied. Les fleurs, qui apparaissent en même temps que les feuilles, forment des chatons si elles sont mâles, et des capitules si elles sont femelles. Les fruits sont assez semblables aux mûres des mûriers, de couleur rougeâtre et comestibles. Cette plante n'est guère exigeante. Ayant une cime large, et fournie en feuilles, on la plante en bordure des avenues des villes et dans les parcs ; il en existe plusieurs variétés cultivées à fruit blanc, à feuilles disséquées ou panachées. On tire de l'écorce des jeunes rameaux des fibres, qui, soumises à macération, servent ensuite à fabriquer le papier du Japon, comme celles qui proviennent de *Broussonetia kazinokii*, du Japon.

▼ ***Deux types de feuilles de*** **Broussonetia papyrifera.**

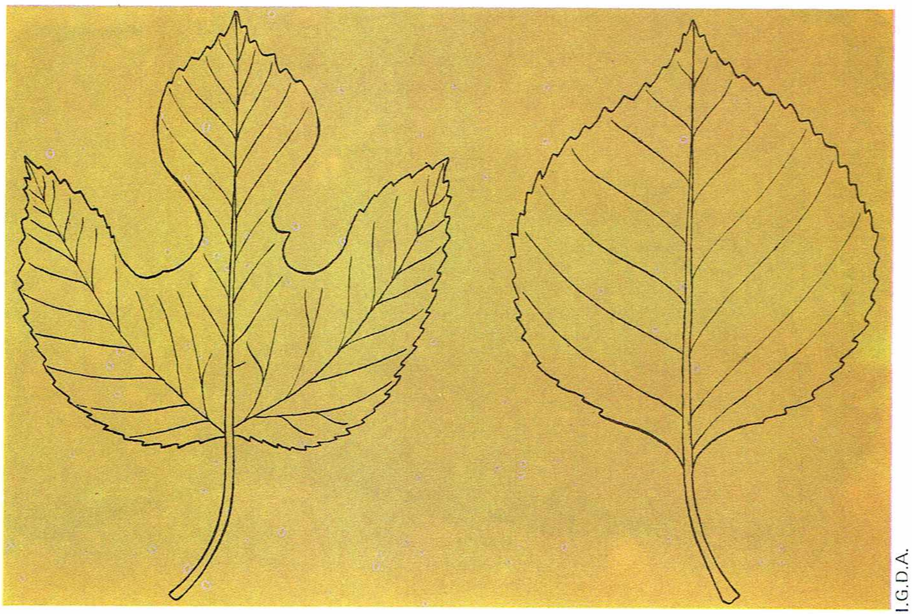

I.G.D.A.

Parmi les Moracées fournissant du caoutchouc, nous citerons l'une des dix-sept espèces du genre *Castilloa*, *Castilloa elastica*. Cette plante, mexicaine à l'origine, a dû être la première productrice de caoutchouc qu'aient connue les Européens. On en parle dans la chronique du deuxième voyage de Christophe Colomb, qui assista dans l'île de Haïti à un jeu rituel effectué avec des balles élastiques faites d'une gomme d'arbre qui pourrait être *Castilloa elastica*. Il s'agit d'un arbre à croissance rapide, haut de 20 à 25 m ; ses feuilles sont toujours vertes, larges et pubescentes. Ses fleurs, mâles et femelles, sont réunies en capitules distincts environnés de nombreuses bractées. Ses fruits sont des drupes adnées au périanthe et contiennent une unique graine. Cette plante est cultivée en Amérique centrale et du Sud et dans d'autres régions tropicales. On la rencontre dans les plus basses terres. Pour sa culture, l'humidité n'a pas besoin d'être constante, alors que les hévéas ont besoin d'une humidité ininterrompue. L'exploitation de cet arbre n'a plus guère d'importance actuellement.

Le genre *Chlorophora* comprend deux espèces d'arbres tropicaux. *Chlorophora excelsa* est haut de 30 à 40 m, avec une écorce grisâtre d'où exsude un latex brun. Ses feuilles sont grandes, entières, brillantes à la face supérieure, où se détache la nervure médiane jaune. C'est une espèce africaine abondante en Côte-d'Ivoire, au Cameroun et au Gabon. Elle donne un bois jaune, veiné de brun, dur et résistant, utilisé comme bois d'œuvre et d'industrie. L'autre espèce, *Chlorophora tinctoria*, a une taille moindre et est très polymorphe. Originaire d'Amérique tropicale, cet arbre est connu depuis au moins deux siècles comme fournisseur de bois jaune (dit bois de Cuba), à usage tinctorial.

Dans un territoire couvrant le Texas, l'Arkansas et l'Oklahoma, on rencontre une Moracée, *Maclura pomifera (M. aurantiaca)*, dont le nom rappelle celui du géologue américain Wm. Maclure. C'est un arbre épineux, mais il en existe une variété inerme. Il a été importé en Europe vers 1820. Il eut une certaine importance, car il put remplacer pour quelque temps le mûrier pour élever le ver à soie, à une époque où, justement, ce mûrier était frappé d'une maladie. *Maclura* a des feuilles ovales, glabres, de couleur vert clair ; les arbres femelles possèdent des infrutescences typiques qui ressemblent, par la taille, à une orange (orange des osages) et sont constituées par de nombreuses petites drupes globuleuses. Elles sont comestibles.

Nous signalerons encore dans la famille des Moracées les quatre espèces du genre *Antiaris*, qui habitent l'Afrique et l'Asie tropicales, Madagascar et l'Indo-Malaisie. Le latex très vénéneux d'*A. toxicaria* est utilisé par les indigènes des îles de la Sonde pour empoisonner leur flèches. Les soixante-dix espèces du genre *Cecropia* sont répandues en Amérique tropicale. Quelques-unes vivent en association avec des fourmis, qui entrent dans des cavités de la tige par des ouvertures existant près des nœuds et se nourrissent de touffes de poils qui sont situées à la base des pétioles foliaires (myrmécophilie). En compensation, ces fourmis défendent la plante contre d'autres fourmis mangeuses de feuilles. On utilise certaines espèces de *Cecropia* pour en tirer des fibres corticales, qui servent aux indigènes à fabriquer des voiles ; d'autres ont un tronc avec lequel on fait des conduites d'eau ; enfin on exploitait encore le caoutchouc de quelques variétés.

Toujours en Amérique tropicale, on rencontre le genre *Coussapoa* dont certaines espèces sont cultivées en serre pour la valeur ornementale des feuilles. D'autres sont épiphytes et leur tige, en l'enserrant, arrive à étouffer l'arbre leur servant d'hôte, comme cela se produit dans nos régions avec les chèvrefeuilles.

Le genre *Cudrania*, enfin, répandu de l'Extrême-Orient à l'Australie, comprend quelques espèces à fruits comestibles alors que d'autres peuvent être utilisées pour en tirer des substances colorantes vertes ou jaunes. Il existe

environ cent vingt espèces de *Dorstenia* en Amérique du Sud et en Afrique, dont certaines ont des propriétés médicinales. Le rhizome de *Dorstenia brasiliensis*, par exemple, a une action stimulante et diurétique; celui de *Dorstenia contrayerva*, séché, sert à aromatiser les cigarettes et à préparer une infusion fébrifuge et antiseptique.

Famille des Cannabacées ou *Cannabinacées (Cannabaceae)*. Parfois rattachée aux Moracées, elle comprend des plantes herbacées, dressées ou rampantes, à feuilles alternes ou opposées et pourvues de stipules. Il n'y a pas de latex. Les fleurs mâles, formant des panicules, ont cinq tépales qui se fusionnent à la base, et cinq étamines qui leur sont opposées. Les fleurs femelles sont réunies par groupes de deux à six, à l'aisselle de bractées, formant de court épis. Leur calice, membraneux et entier, entoure étroitement l'ovaire qui est uniloculaire et contient un seul ovule anatrope pendant. Les fruits sont des akènes, et les graines ont un albumen charnu.

Dans cette famille, deux genres ont été depuis longtemps exploités : *Cannabis*, auquel appartient le chanvre, et *Humulus*, qui comprend le houblon, cultivé en Allemagne, depuis le VIII[e] siècle peut-être. Le houblon appartient à la flore spontanée des pays à climat tempéré froid de l'hémisphère boréal. Le chanvre est originaire d'Iran central mais a été introduit dans beaucoup d'autres régions. Ainsi, il est cité dans un document chinois très ancien, ce qui indiquerait qu'il était connu en Chine il y a plusieurs milliers d'années. Il se serait propagé en Inde, puis il aurait atteint le cours inférieur du Danube et l'Europe centrale, grâce aux Perses et aux Mèdes. On l'utilise depuis longtemps comme plante textile et pour préparer des tisanes; sa culture a pris de l'importance à l'époque où se sont formées les communes en Europe.

C'est une plante herbacée, annuelle et dioïque, avec une longue racine pivotante, et une tige rugueuse atteignant 2 m, simple quand l'espèce croît en peuplements, et ramifiée chez les individus isolés. Les feuilles sont opposées, pétiolées, composées-palmées, avec cinq, sept ou neuf folioles lancéolées et dentées. Les plants femelles ont des fleurs en panicule terminale, à périanthe cupulaire et ovaire bicarpellé uniovulé, abritées chacune par une bractée formant gaine, et groupées en cymules particulières à l'aisselle des bractées de l'inflorescence principale. Les fleurs mâles sont réunies en panicules terminales peu fournies, sur des pieds qu'on appelle parfois « femelles », car la panicule mâle a un aspect plus frêle que l'inflorescence femelle. Les akènes, globuleux et durs, entourés par le périanthe, contiennent une graine riche en huile. Les parties vertes de la plante dégagent une odeur désagréable, surtout quand on les froisse.

Selon la plupart des auteurs, le genre *Cannabis* ne comporte qu'une espèce, *C. sativa*. Quelques autres en distinguent plusieurs dont les plus importantes seraient *Cannabis sativa*, des pays à climat tempéré froid, et qui produit une fibre textile, et *Cannabis indica* ou chanvre indien, cultivé sous climat chaud et sec, et dont les inflorescences possèdent des poils glanduleux qui sécrètent une résine hallucinogène, constituant actif du haschich. *Cannabis sinensis*, qui atteint 5 m de haut, *Cannabis pedemontana* donnent aussi des fibres textiles. *Cannabis macrosperma* fournit ses akènes *(chènevis)*. Toutes ces formes sont très voisines par leurs caractères essentiels et sont à rapporter à la seule espèce *C. sativa*. Pourtant, le chanvre présente une grande diversité morphologique et physiologique avec des formes précoces et tardives, qui diffèrent par l'aspect des feuilles, la grosseur des akènes, la production des substances hallucinogènes, etc. La culture du chanvre réclame un climat tempéré, avec peu de vent, sans gelées printanières, et une température de 20 °C pour la floraison, et 13 °C pour la maturation; il faut encore des sols meubles, profonds, perméables et bien amendés. En dehors de l'Eurasie, les plus importants producteurs de chanvre textile sont les États-Unis et le Chili.

Le chanvre peut être cultivé en assolement, ou bien sur le même sol pendant plusieurs années consécutives. Au bout de cent jours environ, on peut recueillir d'abord les plants mâles, puis, après un mois, les individus femelles, lorsque les graines sont complètement mûres. Les semailles sont faites en mars et les récoltes en juillet-août. Puis les plantes sont séchées, dépouillées de leurs feuilles et réunies en bottes que l'on soumet au rouissage. Cette opération a pour but de séparer les fibres libériennes du parenchyme cortical et des tissus ligneux, grâce à la solubilisation des matières pectiques qui les tiennent réunis. Ce rouissage se fait de différentes façons : soit en exposant les bottes à l'humidité, soit en les laissant immergées une quinzaine de jours dans des ruisseaux ou en les plongeant dans des mares ou des étangs. Dans un premier temps, l'eau devient jaunâtre, puis il se dégage des gaz d'odeur désagréable. Les processus de décomposition se font sous l'action de Bactéries, aérobies et anaérobies, dont la principale est *Clostridium (Bacillus) felsineum*. Lorsque l'écorce se détache, on arrête la macération, on lave le produit et on le fait sécher. Puis, grâce à des opérations manuelles ou mécaniques, on sépare les fibres textiles du reste et l'on peigne les fibres. On tire en moyenne, par hectare, de cinquante à soixante-dix quintaux de tiges sèches, qui donnent à leur tour de dix à douze quintaux de fibres. Les chanvres les plus fins sont destinés à la production textile, et les plus grossiers servent à faire des cordes; les déchets (étoupe) servent au calfatage et à fabriquer des papiers très résistants.

Quand on cultive le chanvre pour ses « graines », la récolte a lieu au début de la maturation. Les « graines », ou mieux les akènes, ou chènevis, donnent une huile siccative fluide (huile de chènevis), qui sert comme huile combustible et pour fabriquer des savons mous, des vernis et des couleurs. Le rendement en huile, par pression, est de 25 %, et par extraction avec des solvants, de 30 à 32 %. Le chènevis est aussi utilisé pour la nourriture des Oiseaux et comme amorce de pêche.

Le genre *Humulus* comprend trois espèces, dont *Humulus lupulus* ou houblon, qui sert à aromatiser la bière, et *Humulus scandens*, plante volubile ornementale.

Le houblon est une plante herbacée vivace, dioïque, à rhizome ramifié d'où partent chaque année des tiges volubiles qui atteignent rapidement de 7 à 10 m de hauteur; ces tiges vues du côté radical s'enroulent dans le sens des aiguilles d'une montre; elles sont un peu anguleuses, creuses, recouvertes de poils rigides et pourvues de fibres

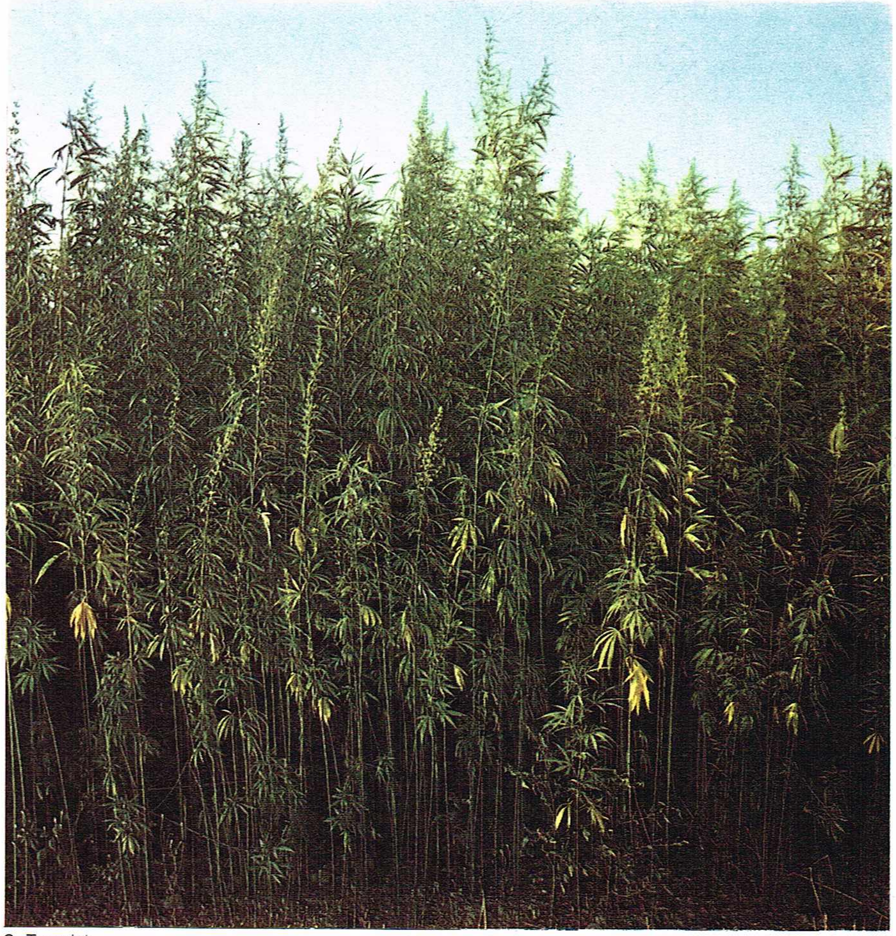

G. Tomsich

▲ ***Champ de chanvre cultivé*** **(Cannabis sativa).**

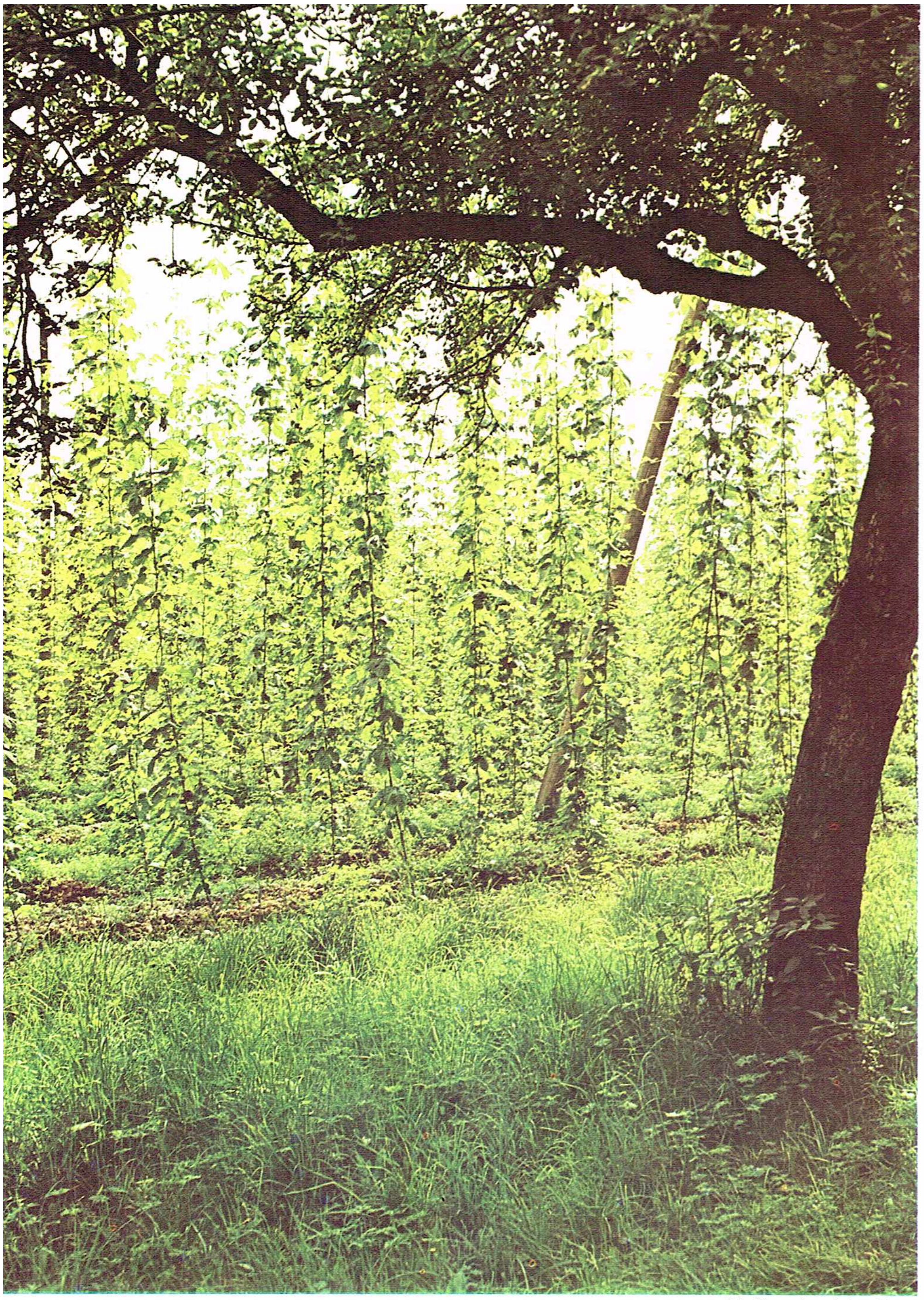

M. Chapuis - Atlas Photo

▲ *Plantation de houblon (Humulus lupulus).*

libériennes qui ressemblent à celles du chanvre. Les feuilles sont pétiolées, opposées, cordiformes avec trois à cinq lobes dentés, rugueuses à la face supérieure, et résineuses en dessous. Les fleurs mâles sont réunies en panicules axillaires pendantes. Les inflorescences femelles sont des chatons globuleux axillaires. Les fleurs femelles, entourées chacune d'une bractée (préfeuille) propre, sont géminées dans les aisselles des « bractées » de l'inflorescence qui sont en fait les stipules des vraies bractées le plus souvent non développées. Comme deux stipules correspondent à une bractée, il y a quatre fleurs, en cyme très condensée, par aisselle bractéale proprement dite. L'ovaire possède deux stigmates allongés, velus et pourprés. Lorsque les graines mûrissent et lorsque les « bractées » et les préfeuilles florales s'accroissent, après la fécondation, l'infrutescence femelle prend l'aspect d'un cône d'un volume triple de celui qu'avait l'inflorescence. Les bractées et l'ovaire sont parsemés de glandes qui produisent une substance amère et résineuse, d'odeur forte, le lupulin. Les fruits sont des akènes avec une graine non albuminée.

La plante fleurit en juin, juillet et août, et les inflorescences sont mûres et peuvent être récoltées en septembre et octobre.

Le houblon est spontané dans les haies, en Eurasie, ainsi qu'en Amérique du Nord. On le cultive aussi en Europe centrale, car il en faut de grandes quantités pour l'industrie de la bière. Cette plante aime les sols frais et meubles, de préférence calcaires, avec une proportion d'argile pouvant atteindre 50 %. Elle croît à des altitudes de 250 à 800 m, en des zones où l'air est frais mais non venteux, et où le climat n'est pas trop humide. Les champs de houblon peuvent persister de quinze à vingt ans. La récolte se fait quand les tiges commencent à jaunir; après avoir coupé celles-ci, on presse les inflorescences femelles qui, séchées, sont expédiées dans les brasseries. Chaque pied donne en moyenne de 1 kg à 1,5 kg de cônes frais. Le lupulin, substance produite, comme nous l'avons dit, par les glandes jaunes des inflorescences femelles, contient notamment une huile essentielle constituée de terpènes et une résine qui renferme des principes amers. Le houblon est ajouté à la décoction de malt avec laquelle on prépare la bière, avant de procéder à la fermentation alcoolique de celui-ci, dans la proportion de 400 g à 500 g par hectolitre. Cette addition a plusieurs buts : communiquer à la bière son arôme particulier; en provoquer la clarification, ce qui a lieu par précipitation des substances albumineuses du malt; assurer pour une bonne part la conservation, en empêchant la fermentation acétique, car les principes amers sont antibactériens. Les sous-produits de la culture du houblon sont les tiges, qui servent comme litières et pour l'extraction de la cellulose, les feuilles qui constituent un excellent fourrage frais pour le bétail, et les jeunes bourgeons souterrains qui sont mangés cuits comme les asperges ou les épinards.

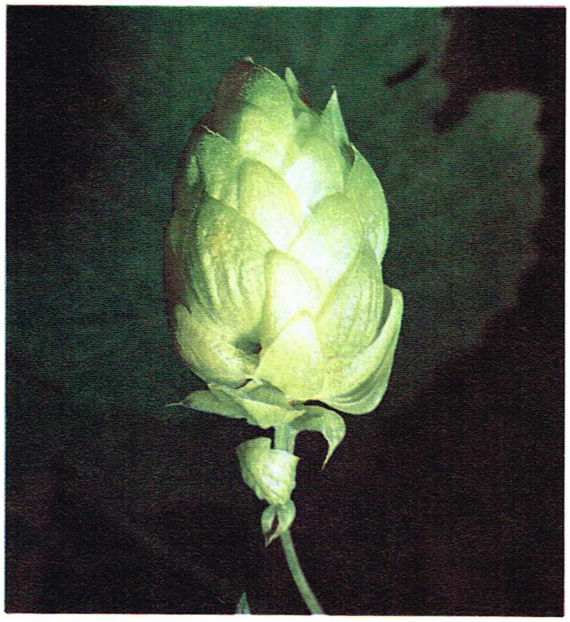

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

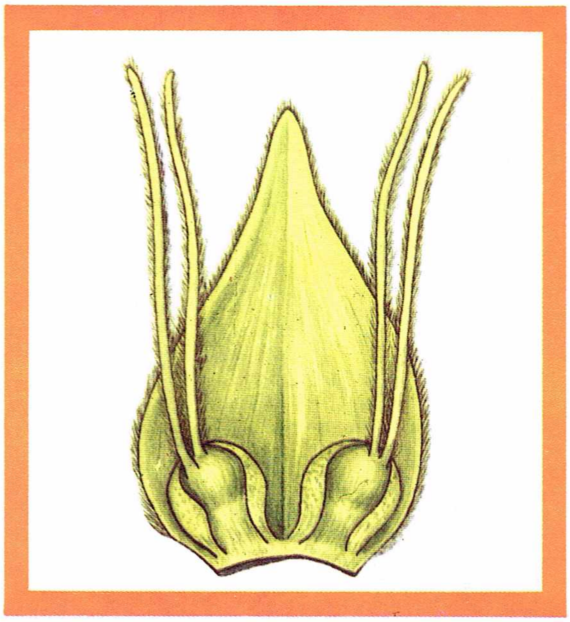

I.G.D.A.

▶ *A gauche : inflorescence femelle de houblon. A droite : bractée pistilifère (d'après Ceruti).*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Orme champêtre* (Ulmus minor).**

Humulus scandens (H. japonicus) est une espèce semblable à la précédente. Elle est annuelle. Ses feuilles sont plus découpées et ont au moins cinq lobes. Ses inflorescences femelles ne sont pas glanduleuses. C'est uniquement une plante ornementale car elle n'a pas de glandes à lupulin. Elle a été introduite en Europe en 1886, importée du Japon et de Mandchourie.

Famille des Ulmacées (Ulmaceae). Elle est constituée par une quinzaine de genres, avec environ cent cinquante espèces, distribuées dans les zones tropicales, d'Amérique et d'Asie en particulier, et secondairement dans les régions tempérées de l'hémisphère boréal. Il s'agit de plantes ligneuses, arbustives ou le plus souvent arborescentes. Leurs feuilles sont simples, généralement alternes, et pourvues de stipules. Les fleurs sont hermaphrodites, ou bien pour partie hermaphrodites et pour partie unisexuées sur le même pied (polygamie) ; elles sont généralement réunies en inflorescences, mais les femelles peuvent aussi être solitaires. Le périanthe est campanulé et constitué le plus souvent par quatre ou cinq segments qui se fusionnent à la base. Les étamines sont attachées à la base des pièces du périanthe et en même nombre qu'elles. L'ovaire, supère et uniloculaire par réduction d'un de ses deux carpelles, a deux stigmates et un seul ovule. Il s'agit de plantes anémophiles. Les fruits peuvent être des akènes entourés d'une aile membraneuse (samares) et facilement transportés par le vent, ou des drupes. On utilise le bois de ces plantes, qui est particulièrement dur chez certaines espèces, et qui donne parfois des tanins ; beaucoup de formes sont ornementales.

La famille doit son nom à celui du genre *Ulmus*, exploité dès l'Antiquité pour son bois dur et résistant, ainsi que pour son emploi comme support de la vigne. Le nombre des espèces du genre (une vingtaine) ne peut être déterminé exactement, car on ne sait s'il faut considérer comme des espèces les produits de la grande variabilité morphologique de ces plantes et des croisements naturels.

L'orme champêtre *(Ulmus minor)* est un arbre parfois gros, à écorce subéreuse, foncée et finement crêpelée. Ses feuilles, caduques, disposées en deux rangées sur les branches, sont brièvement pétiolées, mais sans que le pétiole soit caché par l'oreillette de la base du limbe, de taille moyenne (2 à 10 cm), ovales-aiguës, foncées, dissymétriques à la base, toujours dentées, et glabres à la face inférieure. Ses fleurs sont le plus souvent hermaphrodites, petites, vertes, et apparaissent au printemps en faisceaux latéraux à l'aisselle de cicatrices foliaires de l'année précédente et avant l'apparition des nouvelles feuilles. Les fruits sont des samares longues de 7 à 20 mm et à échancrure apicale atteignant presque l'akène. Cette espèce, ayant subi une importante différenciation morphologique et physiologique, a donné de nombreuses variétés,

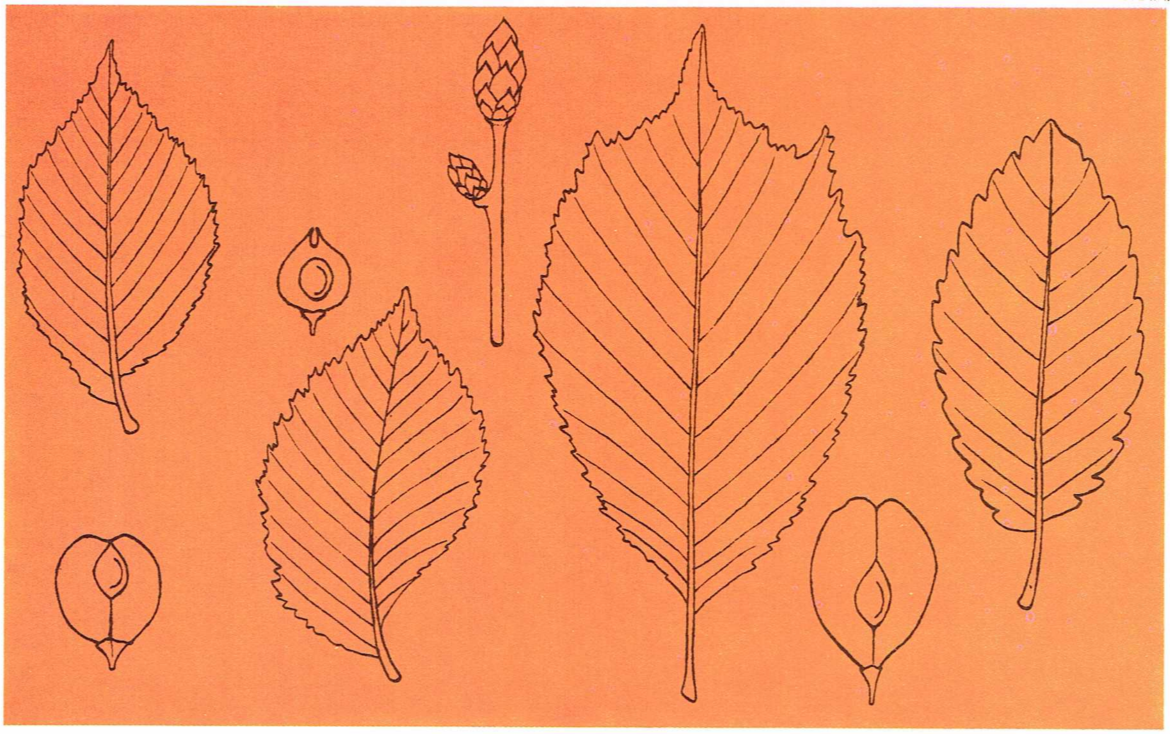

I.G.D.A.

▶ *Ulmacées. De gauche à droite, forme des feuilles de :* Ulmus carpinifolia *(et samare) ;* U. laevis *(et samare) ;* U. glabra *(samare et bourgeon) ;* Zelkova crenata = Z. carpinifolia.

▼ *Deux aspects du bois d'orme. La couleur varie sensiblement selon qu'il s'agit du duramen ou de l'aubier.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

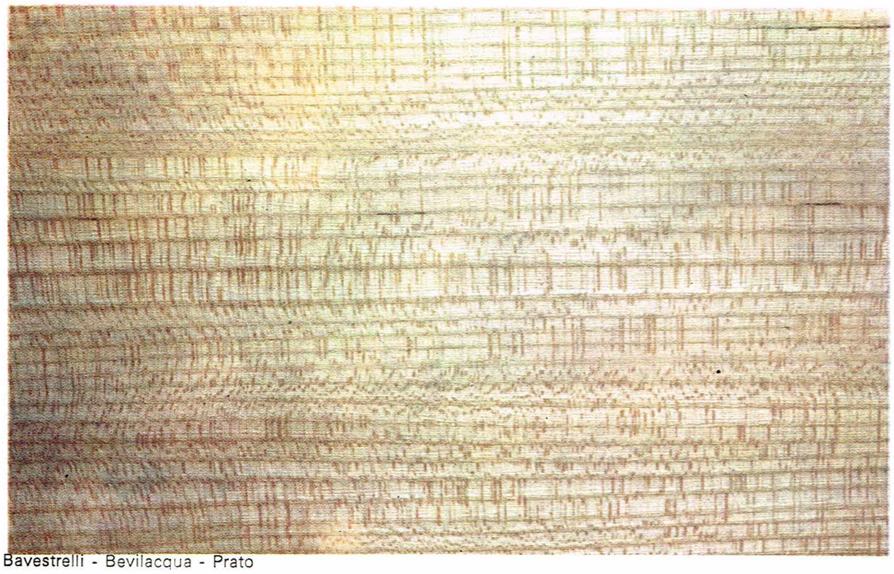

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

souvent considérées maintenant comme des espèces, dont l'ensemble était placé auparavant dans l'espèce linnéenne *Ulmus campestris*. L'une de celles-ci est parfois nommée variété *suberosa*. Elle est basse, buissonnante, avec des rameaux riches en liège qui leur confère un aspect déformé et côtelé longitudinalement. Elle sert à faire des haies. C'est *U. hollandica*, qui est peut-être l'hybride *U. minor* × *U. glabra*.

L'orme est répandu en Europe centro-méridionale et quelque peu dans les régions occidentales d'Asie. En Afrique du Nord, cet arbre se serait naturalisé après avoir été introduit, probablement par les Romains. Il croît bien sur les sols frais et fertiles, profonds. Il est exigeant à ce point de vue et demande aussi de la lumière. Il atteint 45 m et vit plusieurs siècles. On utilise son bois, qui est particulièrement résistant à la rupture, pour les constructions navales, celles de wagons de chemin de fer ainsi qu'en ébénisterie ; on apprécie particulièrement ses veines bien marquées. Le liber donne des fibres textiles avec lesquelles on fabrique des cordages et des ficelles. L'orme est malheureusement très exposé aux attaques d'un Champignon, *Ceratostomella (Ophiostoma) ulmi*.

L'orme de montagne *(Ulmus glabra = U. montana)* habite les bois montagneux de la majeure partie de l'Europe. Il a de grandes feuilles (de 9 à 15 cm), très rugueuses au-dessus et dont le pétiole court est caché par le lobe de la base du limbe, des samares longues de 15 à 20 mm, avec une échancrure apicale qui n'atteint pas l'akène, et une hauteur ainsi qu'une longévité faibles. Il diffère aussi de l'espèce précédente par son écorce, lisse et grisâtre, qui se fissure superficiellement seulement à un âge avancé. En outre, son bois est plus tendre, et la plante est plus exigeante. Le feuillage peut servir à l'alimentation du bétail, comme celui de l'orme champêtre. Un cultivar « pleureur » (var. *pendula*) est souvent planté pour l'ornement.

L'orme américain *(Ulmus americana)* est spontané dans la moitié est des États-Unis. Il est haut de 30 à 40 m et a de grandes feuilles. Ses fleurs sont longuement pédonculées. On s'en sert en Europe pour border les avenues. Il en existe des espèces proches, de même provenance et sujettes aux mêmes utilisations : *Ulmus thomasii* et *alata* à fruits pédicellés et pubescents, le second à rameaux ailés de liège, et *Ulmus serotina*, aussi à ailes de liège, mais dont les fleurs paraissent en automne. Parmi les espèces asiatiques, on peut citer *Ulmus laciniata*, de Chine et du Japon, haut d'environ 10 m, à feuilles trilobées au sommet, et *Ulmus parvifolia*, petit arbre à feuilles toujours vertes du nord de la Chine, du Japon et de la Corée, dont les fleurs paraissent en automne.

I.G.D.A. - Archives P2

▲ *Micocoulier* (Celtis australis).

L'orme de Sibérie *(Ulmus pumila)* est originaire des régions orientales de la Sibérie, du nord de la Chine et du Turkestan et a été introduit dans nos régions parce qu'il résiste à certaines maladies dont est victime l'orme champêtre. C'est un arbre assez peu élevé (25 m), à branches pubescentes, et à feuilles ovales-elliptiques ou elliptiques, lancéolées, brièvement pétiolées, presque symétriques à la base du limbe, vertes et un peu veloutées à la face inférieure quand elles sont jeunes. Les fleurs ont quatre ou cinq étamines et des anthères violettes.

La famille des Ulmacées comprend aussi le genre *Celtis,* qui compte environ soixante-dix espèces, propres aux régions tempérées et tropicales de l'hémisphère boréal, et répandues spécialement en Asie, mais aussi, bien qu'en moindre nombre, en Amérique et en Europe. Il s'agit d'arbres à feuilles simples, alternes, rugueuses, persistantes ou non, et présentant des stipules caduques. Les fleurs peuvent être hermaphrodites ou mâles. Dans ce dernier cas, elles forment des grappes à la partie inférieure des pousses de l'année, ont un calice caduc, sont dépourvues de pétales, et possèdent quatre ou cinq étamines. Les fleurs bisexuées, situées à l'aisselle des feuilles en haut des pousses, ont, en plus des étamines, un ovaire uniloculaire, avec deux styles bifides et un seul ovule. Les fruits sont des drupes, dont les Oiseaux, qui en sont friands, assurent la dissémination, alors que la pollinisation se fait par le vent.

On rencontre le micocoulier *(Celtis australis)* autour de la Méditerranée, et jusqu'à l'ouest de l'Himalaya. La forme d'Asie centrale est toutefois peut-être distincte *(C. caucasica)*. Le micocoulier est un arbre haut de 20 à 25 m, et d'une grande longévité puisqu'il peut atteindre trois cents ans. Son tronc est cannelé, et sa silhouette est ample. Ses feuilles sont aiguës, dentées, en coin et asymétriques à la base, longuement acuminées, pubescentes et grisâtres à la face inférieure, vert foncé et rugueuses sur le dessus. L'écorce est gris cendré, un peu luisante. C'est au printemps qu'apparaissent, en même temps que les feuilles, les petites fleurs vertes. Le fruit mûr est noir pourpré, avec une pulpe molle et douçâtre. Cette espèce recherche le soleil et les sols sablonneux, fertiles et frais, mais elle peut s'adapter à tous les terrains. Le micocoulier, connu depuis l'Antiquité à l'état spontané, fut assez rapidement cultivé. Son bois, gris ou verdâtre, solide et flexible, sert à fabriquer des traverses de chemin de fer, des manches d'outils, des instruments de musique, etc. Les graines donnent une huile semblable à celle des amandes douces. Les feuilles servent de fourrage. L'écorce et les racines fournissent une substance jaune qui est utilisée pour teindre la soie. Les fruits sont comestibles.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Orties dioïques* (Urtica dioica).

L'espèce *Celtis occidentalis* habite le nord-est des États-Unis. Elle a des feuilles glabres et un fruit de couleur rouge-orangé.

Le genre *Trema* doit son nom au noyau criblé de trous de ses fruits (du grec τρῆμα, trou). Il comprend environ quarante espèces arborescentes ou arbustives, à feuilles alternes, persistantes, et toujours stipulées. Ces plantes font partie de la flore tropicale et subtropicale américaine, asiatique et africaine. Certaines d'entre elles sont utilisées pour l'ornement; d'autres donnent un bois tendre et clair employé en menuiserie.

Le genre *Zelkova* compte quatre espèces habitant l'Asie et la Crète; ce sont des plantes semblables aux ormes d'Europe mais à fruit drupacé. Il s'agit d'arbres atteignant 30 m, avec des feuilles alternes, dentées et rigides; on les cultive, surtout au Japon, dans les jardins et les parcs. L'espèce la plus élevée, *Zelkova serrata*, ou orme de Sibérie, en fait d'origine japonaise, fournit un bois considéré au Japon comme le meilleur pour la construction. *Zelkova carpinifolia (Z. crenata)*, du Caucase, est également planté en Europe; on peut le greffer sur l'orme champêtre.

Nous citerons encore, parmi les Ulmacées, les genres *Aphananthe,* d'Asie orientale et d'Australie, *Planera,* d'Amérique du Nord, et *Pteroceltis*, de Chine. Le genre *Aphananthe* comprend quatre espèces arborescentes ou arbustives, dont *Aphananthe aspera,* d'Extrême-Orient, cultivé parfois pour l'ornement, à feuilles ressemblant un peu à celles du micocoulier, mais symétriques, et à fruit drupacé. On le greffe sur des *Celtis* pour en améliorer la résistance au froid. L'unique espèce de *Planera* est *Planera aquatica*, ou orme d'eau. Haut de 10 à 12 m, il a des feuilles ovales de 6 cm de long; son fruit est sec mais porte des côtes charnues. Il vit sur sols marécageux, notamment en Louisiane et dans l'Arkansas.

Pteroceltis tatarinowii, seule espèce du genre *Pteroceltis,* est un arbrisseau semblable par l'aspect général et les fleurs au micocoulier, mais à feuilles symétriques et à fruit ailé rappelant celui des ormes. Il résiste bien aux climats froids.

La famille des Urticacées *(Urticaceae)* comprend une quarantaine de genres, avec plus de sept cents espèces, dont seulement huit en France. Ce sont des plantes répandues dans les régions intertropicales, mais il n'en manque pas dans les zones tempérées et tempérées froides. Elles sont herbacées, rarement ligneuses, et doivent leur nom à celui des orties *(Urtica)*, qui possèdent, sur les tiges et les feuilles, des poils qui sécrètent des substances irritantes.

Les Urticacées sont pourvues de feuilles le plus souvent alternes et portent des fleurs de petite taille, unisexuées, vertes, réunies en inflorescences de différents types. Elles sont monoïques ou dioïques. Mis à part les espèces du genre *Parietaria,* elles possèdent des stipules caduques semblables à des écailles. Les fleurs mâles ont fréquemment quatre à cinq tépales et quatre à cinq étamines opposées aux tépales; le pollen est souvent projeté, par extension brusque des filets des étamines. La richesse en pollen de certaines Urticacées, en particulier dans la flore européenne, des genres *Parietaria* et *Urtica,* permet de comprendre que ces plantes puissent provoquer des phénomènes d'allergie asthmatique, oculaire ou nasale. Les fleurs femelles ont de trois à cinq pétales, généralement soudés à la base, et, à l'intérieur de l'ovaire, l'ovule est unique, basal et orthotrope. Les fruits sont des akènes ou de petites drupes.

Le genre le plus important par son nombre d'espèces est le genre *Pilea,* qui en comprend environ deux cents. Son nom rappelle que les tépales des fleurs ressemblent au *pileus,* qui était un bonnet porté par les Romains (le dieu Mercure est représenté avec ce bonnet). Son aire de répartition englobe toutes les régions tropicales, à l'exception de l'Australie. On cultive dans les serres et les jardins européens, à titre de curiosité, *Pilea muscosa,* importé d'Amérique en 1793 : c'est une plante herbacée haute de 15 à 30 cm, succulente, avec de nombreuses folioles elliptiques et des fleurs verdâtres; elle est très polymorphe. Elle projette obliquement vers le haut des nuages de pollen. Ce phénomène a lieu à l'aube, alors que se produit peut-être dans les fleurs une dessiccation de certains tissus. Le filet des anthères, replié d'abord en spirale, s'allonge subitement en même temps que les

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

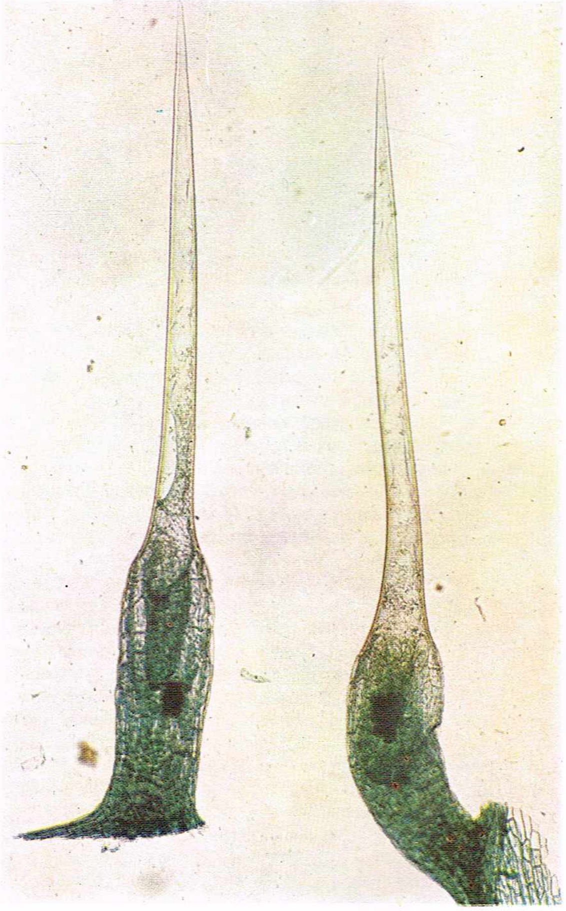

▶ *Poils urticants d'ortie vus au microscope.*

anthères éclatent. Cela peut avoir lieu plusieurs fois, pour une plante donnée, à de courts intervalles.

Le genre *Urtica,* dont le nom provient du latin *urere,* brûler, comprend environ trente-cinq espèces, distribuées, dans les zones tempérées boréales et australes, surtout à proximité des maisons, le long des chemins, sur les murs et dans les haies. La structure des poils, rigides et transparents, qui se trouvent sur la tige et sur les feuilles, est caractéristique. Ce sont des ampoules unicellulaires à col allongé, avec une pointe crochue terminale, portées chacune par un massif de petites cellules. La partie inférieure de l'ampoule sert de réservoir pour le liquide urticant, elle est dure et résistante parce qu'elle est calcifiée; la partie supérieure est par contre silicifiée et fragile, et elle est prête à se rompre au moindre choc, en pénétrant comme une aiguille à injection dans l'épiderme, où elle déverse le contenu de l'ampoule, poussé par les cellules basales. La substance qui détermine l'irritation, et qui peut faire sentir son action pendant longtemps, parfois pendant une journée, et à dose minime, est encore mal connue; elle contient de toute façon de l'acide formique, ainsi que, peut-être, un corps agissant comme l'histamine et un autre se rapprochant par son action de l'acétylcholine.

Les orties sont le plus souvent des plantes herbacées, à tige dressée, quadrangulaire, et à feuilles opposées, aiguës et dentées. Les fleurs, petites, vertes, unisexuées, sont réunies en épis pendants situés à l'aisselle des feuilles. Les fleurs mâles libèrent leur pollen par détente du filament staminal et rupture simultanée des anthères, comme on vient de le voir pour *Pilea*. Le phénomène est moins frappant mais a aussi lieu le matin. Les fruits sont de petits akènes, renfermés dans le calice persistant.

L'espèce la plus connue dans nos régions est l'ortie dioïque *(Urtica dioica),* qui est envahissante et difficile à supprimer. Elle est vivace, atteint 1 m, a des feuilles allongées, acuminées, et des fleurs en longues grappes étalées ou pendantes. En période de pénurie, on en a tiré une fibre qui peut être filée et tissée. Les bourgeons se mangent cuits comme les épinards. La médecine populaire utilise parfois des extraits d'orties, qui sont antianémiques, hémostatiques et antidiabétiques (hypoglycémiants). Certaines de ces propriétés proviennent de la chlorophylle dont l'ortie est très riche (jusqu'à 7,5 ‰ du poids sec). On l'utilise pour l'extraction de celle-ci.

Urtica urens et *atrovirens* sont monoïques. *U. urens* est petit, annuel, et a des feuilles plus arrondies à bords profondément incisés, *U. atrovirens,* d'Italie et de Corse, a des feuilles comparables, mais est vivace et de la taille d'*U. dioica*. Certaines espèces, comme *Urtica urentissima,* de l'Inde, et surtout *Urtica ferox*, de Nouvelle-Zélande, sont connues à cause des graves phénomènes d'irritation qu'elles produisent.

Les espèces du genre *Urera* donnent des sensations semblables à une secousse électrique, et qui peuvent durer des heures. Il s'agit de plantes arborescentes ou arbustives pantropicales. *U. sandwicensis,* d'Hawaii, fournit une fibre textile.

Le genre *Parietaria* a déjà été cité dans l'Antiquité par Pline, qui fut sans doute frappé par la propriété de ces plantes d'enfoncer leurs racines dans les vieux murs, en dissolvant le ciment calcaire. On les a appelées pour cela « perce-murailles » ou « casse-pierres ». Ce sont des plantes annuelles ou vivaces des régions tempérées, sans poils urticants. Dans nos régions, on connaît surtout *Parietaria officinalis* (qui renferme en fait deux espèces), dont les racines sont longues et tenaces, et la tige courte, lignifiée, plus ou moins ramifiée et qui constitue alors une sorte de petit buisson dense, prostré ou dressé. Les feuilles, plus ou moins velues, sont pétiolées, ont un limbe ovale allongé et ne possèdent pas de stipules. Les fleurs forment en général des glomérules à l'aisselle des feuilles. L'ancienne variété *erecta* est le vrai *P. officinalis* de Linné; elle atteint 1 m et n'est guère ramifiée, alors que la variété *judaica,* qui doit être nommée *P. diffusa,* est plus petite, ne dépassant pas 40 cm, et très ramifiée; ces deux espèces ont un pollen qui provoque des allergies. La pariétaire a été utilisée depuis très longtemps pour faire des décoctions et des infusions émollientes et diurétiques car les feuilles sont riches en nitrate de potassium et en flavonoïdes.

Le genre *Boehmeria,* dédié au botaniste allemand G. R. Boehmer (1723-1803), comprend environ soixante espèces principalement tropicales et n'est pas représenté

I.G.D.A.

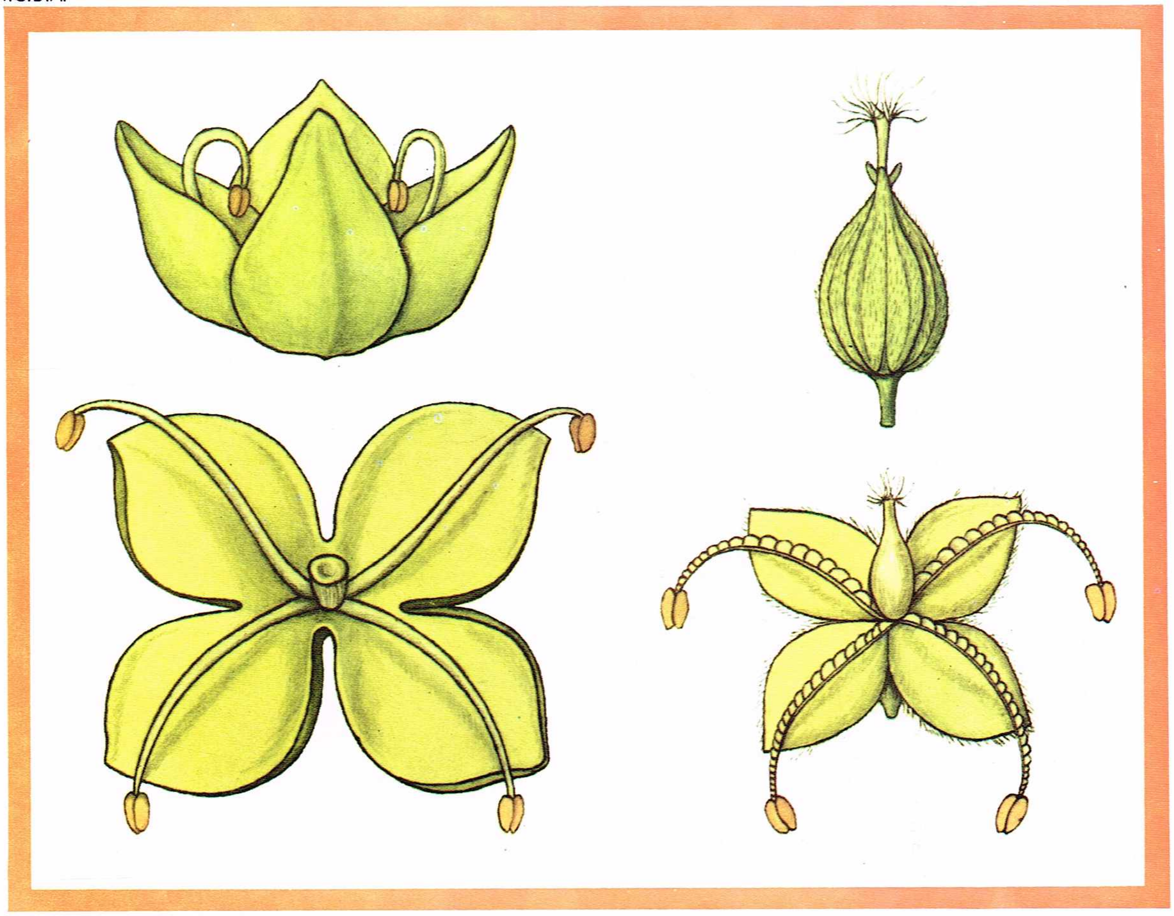

◀ *A gauche : représentation schématique très agrandie de la fleur mâle d'***Urtica***; à droite : représentation schématique montrant la fleur femelle (en haut) et la fleur mâle (en bas) de* **Parietaria officinalis.**

dans la flore spontanée d'Europe. Ce sont des plantes ligneuses, arbrisseaux ou arbustes, voire presque des arbres *(B. rugulosa)*. Elles peuvent avoir des feuilles alternes ou opposées. Les fleurs, unisexuées, sont réunies en grappes ou en épis et les plantes sont monoïques ou dioïques. Elles possèdent sur la tige et les feuilles des poils piquants mécaniquement mais non urticants.

Boehmeria argentea est un arbre ornemental. Mais les espèces les plus importantes au point de vue économique sont des arbustes d'Asie tempérée et tropicale, *Boehmeria nivea* et *B. viridis,* ou ramie. Ils sont largement cultivés en Afrique et en Amérique pour la production de fibres textiles : on les a introduits en Europe au début du XVIII^e^ siècle. Toutes les formes cultivées sont hautes de 3 à 4 m, avec une grosse racine pérennante et des tiges tomenteuses et annuelles chez *B. nivea,* verdâtres et pérennantes chez *B. viridis*. On trouve sur chaque plante des inflorescences mâles à l'aisselle des feuilles inférieures et des inflorescences femelles à l'aisselle des supérieures. La ramie, sans doute originaire de l'Inde, sous climat tropical, s'est acclimatée aussi en d'autres lieux, surtout en Chine. Elle a besoin de chaleur, et la température hivernale ne doit pas descendre en dessous de + 5 °C à + 10 °C ; mais elle demande surtout des pluies bien distribuées. Sous les climats chauds et humides de l'Asie méridionale, les produits sont meilleurs et les fibres sont plus longues (20 cm), souples et brillantes comme la soie ; le produit commercial est justement appelé « soie de Chine », « soie végétale », etc. La récolte commence deux ans après le semis. La plante, dans les cas favorables, donne pendant au moins quinze ans cinq récoltes par an. La fibre est obtenue à partir des rameaux effeuillés, séchés au soleil, décortiqués et parfois soumis au rouissage. Grâce à divers travaux, dont un dégommage, on obtient les fibres cellulosiques très fines, cylindriques et à pointes arrondies. Elles servent à faire des fils et des tissus très légers et peuvent être mercerisées, c'est-à-dire rendues lisses et luisantes. On les utilise aussi, mélangées à d'autres fibres, pour la fabrication de papiers spéciaux. On en fait également des câbles et des filets, leur coefficient de résistance étant trois fois plus élevé que celui de la fibre du chanvre.

Les Urticacées comprennent aussi le genre *Debregeasia,* surtout asiatique. On a là des arbustes de hauteur moyenne. Leurs feuilles sont dentées sur les bords et présentent souvent un contraste de couleur entre la face supérieure et la face inférieure. Les fleurs forment des grappes globuleuses. Les fruits sont constitués, comme les mûres du mûrier, par de nombreuses petites drupes. Ceux de *Debregeasia edulis* sont consommés au Japon, et la plante fournit aussi une fibre textile comparable à celle de la ramie.

Les *Laportea,* au nombre de quarante-cinq, vivent dans les régions chaudes. Ce sont des herbes ou des arbrisseaux, mais *L. gigas,* d'Australie, atteint 30 m de haut. On les cultive pour leur beau feuillage diversement coloré et pour l'aspect décoratif de leurs fruits. En Amérique du Nord et en Australie, on tire de leur écorce une fibre qui sert à faire des cordages et des filets.

Le genre *Pellionia* est maintenant fondu avec le genre *Elatostema,* et c'est ce dernier nom qui doit être utilisé. Ce genre comprend des plantes herbacées vivaces, prostrées ou rampantes, avec des feuilles d'aspect variable. Originaires des pays tropicaux de l'Ancien Monde, elles ont été importées au XIX^e^ siècle dans les serres, où l'on peut rencontrer notamment *Elatostema repens* sous deux formes principales : *« Pellionia daveauana »,* avec des feuilles vertes plus ou moins losangiques, parsemées de violet ou de rouge ou marquées par une bande médiane jaune, et qui est l'*E. repens,* et *« Pellionia pulchra »,* à feuilles plus ovales, noirâtres au-dessus et pourprées au-dessous, qui en est une variété ou peut-être une espèce distincte *(E. pulchrum)*. D'autres formes cultivées ont des feuilles marbrées de différentes façons.

La petite famille des *Eucommiacées (Eucommiaceae)* devrait être placée selon certains auteurs chez les Hamamélidales ou les Rosales. Elle s'éloigne notamment des Urticales par ses ovules à un seul tégument et son volumineux albumen. Elle comprend l'unique espèce *Eucommia ulmoides,* semblable par l'aspect général à un orme, et que la structure de son bois rapproche aussi des Ulmacées. Originaire des montagnes de Chine centrale, elle fournit par toutes ses parties végétatives une substance du type des gutta-perchas, mais on s'en sert surtout en Europe à des fins ornementales.

La famille des Rhoïptéléacées *(Rhoipteleaceae)* a une position systématique sujette à discussion. On l'a rapprochée des Juglandales, spécialement des *Alfaroa*. Elle comprend seulement *Rhoiptelea chiliantha* qui habite le sud-ouest de la Chine et le Tonkin et n'a aucune importance économique. C'est une plante ligneuse à feuilles composées pennées, avec de grandes inflorescences

R. Longo

▶ **Piper celtidifolium,** ***espèce proche de*** **Piper nigrum** ***qui produit le poivre.***

composées de petits glomérules triflores à une fleur femelle et deux fleurs mâles. Cette espèce diffère ainsi des vraies Urticales.

Pipérales

L'ordre des Pipérales, dont la position systématique est discutée, comprend trois familles : les Pipéracées *(Piperaceae)*, les Saururacées *(Saururaceae)* et les Chloranthacées *(Chloranthaceae)*, auxquelles il faut peut-être ajouter les Lactoridacées *(Lactoridaceae)*.

Les Pipérales sont caractérisées par des feuilles simples, et des fleurs dépourvues de périanthe ou munies d'un périanthe monocyclique, unisexuées ou hermaphrodites, et formant des inflorescences en épis ou en grappes. Les fleurs ont de une à dix étamines; leur ovaire est généralement uniloculaire et formé de un à quatre carpelles libres ou soudés; il contient un seul ou de nombreux ovules. Les fruits sont des drupes, des baies, ou des follicules. La plus importante des trois familles pour la richesse des espèces et pour l'intérêt économique est celle des Pipéracées, à laquelle appartiennent le poivrier et diverses plantes ornementales.

La famille des *Pipéracées*, répandue surtout dans les régions tropicales, comprend environ mille quatre cents espèces, groupées en une douzaine de genres, dont deux, *Piper* et *Peperomia*, sont très vastes; elle comprend des plantes herbacées ou arbustives, dressées, rampantes ou grimpantes, et plus rarement des arbres, qui sont d'ailleurs toujours verts. Les feuilles sont entières, fréquemment charnues, le plus souvent larges et à longs pétioles, et généralement alternes et stipulées. Les fleurs sont petites et nues, unisexuées ou hermaphrodites, et se trouvent à l'aisselle d'une bractée en parapluie (hypopeltée). Elles sont réunies en général en épis denses; les étamines existent en nombre variable, avec de longs filets habituellement libres; le pistil est formé par un ovaire uni- ou pluricarpellé (un à cinq carpelles) portant un ou plusieurs stigmates, uniloculaire avec un seul ovule orthotrope basal. Les fruits sont des drupes. La graine présente un abondant périsperme issu du nucelle de l'ovule et un petit albumen. La structure anatomique de la tige est particulière car des faisceaux libéro-ligneux médullaires surnuméraires se trouvent à l'intérieur de la stèle.

L'importance des Pipéracées est liée à celle du genre *Piper*, qui comporte plus de sept cents espèces, dont certaines fournissent des condiments qu'on a aussi beaucoup utilisés jadis en pharmacie. Ce sont généralement des lianes, plus rarement de grandes herbes ou des arbustes. Leurs fleurs ont de une à quatre étamines, et souvent trois stigmates (gynécée tricarpellé). L'espèce la plus connue est *Piper nigrum*, ou poivrier, originaire de la côte de Malabar et cultivée dans divers pays tropicaux surtout asiatiques, et en particulier en Indochine et en Indonésie. C'est une liane pérennante, subligneuse, et fixée à des supports (en général des arbres) par des racines adventives; elle a des feuilles ovales-aiguës ou à peu près orbiculaires, persistantes, et des fleurs unisexuées ou hermaphrodites, blanches, en épis amentacés opposés aux feuilles (la ramification est sympodiale). Il semble que les caractères sexuels des espèces ne soient pas constants et puissent être influencés temporairement par les facteurs climatiques ou internes. Mais les formes spontanées auraient des fleurs généralement unisexuées et seraient dioïques.

Les fruits, qui sont de petites drupes uniséminées de couleur rouge à maturité, réunies en épis longs de 7 à 10 cm, constituent l'épice bien connue, en fournissant deux sortes de produits : le *poivre noir*, obtenu à partir des fruits non mûrs entiers, qui, séchés au soleil ou dans les étuves, deviennent foncés et rugueux, et le *poivre blanc*, constitué des fruits mûrs dépourvus de leur péricarpe après macération dans l'eau, puis séchés. La saveur aromatique et piquante du poivre est due à la présence, dans des cellules spécialisées du fruit et du périsperme de la graine, d'une résine âcre contenant des alcaloïdes dérivés de la pipéridine, surtout la pipérine (à propriétés stomachiques et fébrifuges), la pipérettine et la chavicine, et d'une huile essentielle formée de terpènes. Le poivre blanc est moins aromatique que le poivre noir mais plus âcre, par suite de sa plus grande abondance en pipérine. Le poivre a été l'une des premières épices connues de

G. Mazza

▲ **Peperomia caperata**, *Pipéracée ornementale.*

l'homme, et la seconde, après la cannelle, à être importée en Europe, où elle était déjà utilisée par les riches Romains à l'époque impériale. Étant donné son prix alors élevé, le poivre a servi de monnaie dans l'Antiquité. Le commerce de ce produit resta le monopole des Portugais jusqu'au XVIIIe siècle. Le centre de distribution essentiel est actuellement Singapour, mais le premier producteur est l'Inde, sur la côte de Malabar.

Parmi les autres espèces de poivriers, on peut citer *Piper longum*, arbrisseau d'Indo-Malaisie, qui fournit le poivre long, utilisé localement comme condiment et formé non des fruits séparés, mais de l'épi entier où les petits fruits sont étroitement rapprochés. *Piper cubeba* ou cubèbe est un buisson rampant des îles de la Sonde, cultivé dans toute l'Asie tropicale et aux Antilles, et possédant des fruits qui contiennent des terpènes et de la cubébine, qui n'est pas azotée. On se sert de ces fruits comme épices, sous le nom de poivre cubèbe; on les utilisait beaucoup jadis en médecine, comme antiblennorragique en particulier.

Piper angustifolium, qui croît au Pérou et au Brésil, a des feuilles à action hémostatique et antiblennorragique. *Piper betle*, ou bétel, est une liane d'Indonésie, largement cultivée en Asie et en Amérique tropicales; on en fait un masticatoire qui teint la salive en rouge et dont l'usage est très ancien et très répandu chez les indigènes; cette drogue consiste en une feuille de bétel traitée avec du lait de chaux, et qui enveloppe un petit morceau de noix d'arec ainsi que divers condiments. On obtient de cette façon une petite boule qui est mastiquée mais non avalée, et qui produit à la fois un effet tonique et une légère sensation d'ivresse, à cause de la présence d'alcaloïdes libérés par la chaux.

Un autre genre important de Pipéracées est représenté par les *Peperomia*, qui comprennent environ six cents espèces, le plus souvent herbacées, annuelles ou vivaces, répandues dans les forêts tropicales, surtout en Amérique, et jusqu'en Floride. Elles ont pour caractéristique des feuilles généralement charnues, qui peuvent être panachées ou de couleur vive; elles peuvent être radicales ou bien caulinaires, et alternes, opposées ou verticillées. Les fleurs, hermaphrodites et minuscules, formant de fins épis, sont sessiles, et possèdent deux étamines et un unique stigmate, le gynécée étant unicarpellé. Différentes espèces sont cultivées, pour la beauté de leur

▶ *Les Protéacées sont des plantes exotiques cultivées en Europe pour leurs inflorescences très décoratives.*

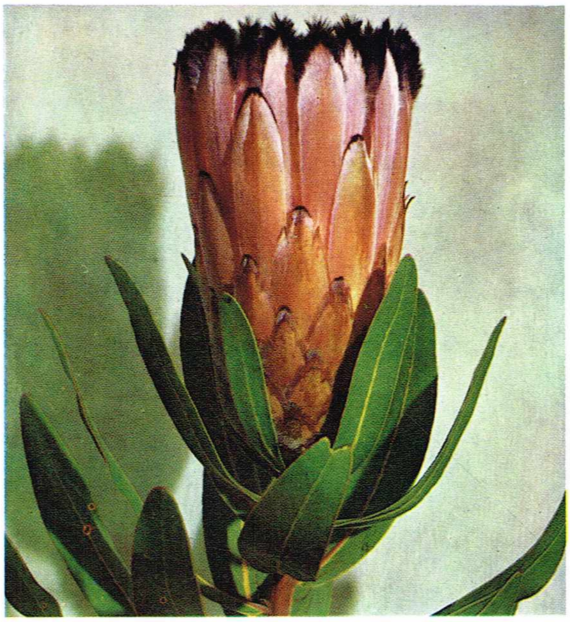

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

feuillage, comme plantes d'appartement. Les plus belles proviennent du Brésil *(P. argyreia, P. hederifolia)*.

Les deux autres familles de Pipérales, les *Saururacées* et les *Chloranthacées*, ont peu d'importance.

Les Saururacées, qui comprennent trois genres et quelques espèces d'Asie orientale et d'Amérique du Nord, vivent dans des stations très humides ou aquatiques. Ce sont des herbes vivaces. Les fleurs nues sont hermaphrodites, à trois ou quatre carpelles libres ou presque. Nous citerons *Saururus cernuus,* herbe aquatique de l'est des États-Unis, qui a été cultivée dans le midi de l'Europe, et qui s'est naturalisée en certains endroits; elle atteint 1 m, a des feuilles ovales-cordiformes et des fleurs blanches en épis terminaux.

Les Chloranthacées comprennent cinq genres avec soixante-dix espèces, dont la plupart sont aromatiques; il s'agit d'herbes, d'arbustes ou d'arbres toujours verts, qui habitent en Asie orientale et dans les îles de l'océan Pacifique, en Amérique tropicale et à Madagascar. Le genre le plus connu est le genre *Chloranthus :* il est constitué d'herbes ou d'arbustes à fleurs verdâtres disposées en épis fins et à feuilles opposées, lancéolées, et de couleur vert brillant. Un *Chloranthus* sert en Chine à parfumer le thé. Le genre *Sarcandra* n'a pas de vaisseaux dans son bois. Ce caractère primitif d'un de ses genres et la morphologie « monocotylédonoïde » du pollen rapproche la famille des Chloranthacées des Magnoliales.

▶ **Leucadendron argenteum,** *arbrisseau d'Afrique du Sud.*

S. Prato

▶ *Page ci-contre :* **Protea laurifolia.** *Les fleurs des* **Protea** *sont des capitules entourés de bractées.*

Protéales

Cet ordre comprend environ soixante genres et mille quatre cents espèces. Il compte des plantes le plus souvent ligneuses, à feuilles simples ou composées, et à fleurs hermaphrodites, avec un périgone de quatre tépales pétaloïdes. Les étamines, au nombre de quatre, sont insérées sur les tépales. L'ovaire est supère, monocarpellé, et renferme un, deux ou de nombreux ovules. Ces plantes sont typiques de l'hémisphère austral, en particulier de l'Afrique du Sud et de l'Australie, et leur importance économique est liée à la culture ornementale de nombreuses espèces.

La famille des *Protéacées (Proteaceae)* constitue à elle seule l'ordre des Protéales. Elle groupe des plantes arborescentes ou arbustives, parfois herbacées, à feuilles généralement alternes, simples ou composées-pennées et épaisses. Les fleurs peuvent être isolées ou surtout réunies en inflorescences de différents types, principalement en capitules entourés de bractées colorées; leur périgone a quatre sépales pétaloïdes, vivement colorés. Les quatre étamines adhèrent aux tépales auxquels elles sont opposées, et l'ovaire est accompagné d'écailles basales ou est entouré d'un disque. Ces deux formations sécrètent du nectar. Les fruits sont des follicules, des akènes ou des drupes.

Le genre *Protea* comprend plus de cent espèces. Son nom évoque les multiples aspects sous lesquels il se présente. Les plantes de ce genre sont arbustives, rarement herbacées, à feuilles alternes, coriaces, entières et de forme variée. Les fleurs sont réunies en capitules denses, solitaires et globuleux, entourés de bractées noirâtres ou colorées, disposées un peu comme celles de l'artichaut. A l'état spontané, ces plantes se rencontrent en Afrique depuis l'Éthiopie, la Guinée et le Congo jusqu'au Cap. Les filets des étamines sont presque entièrement soudés aux tépales. Toutes les anthères sont fertiles. Le fruit est indéhiscent.

La culture des *Protea,* qui a connu un grand succès au siècle dernier, ne concerne plus guère qu'une demi-douzaine d'espèces. Elle ne présente pas de grandes difficultés : ces Végétaux réclament beaucoup de lumière, beaucoup d'air, une température supérieure à 16 °C, et des arrosages réguliers. Parmi les espèces le plus souvent cultivées et originaires de la région du Cap, nous citerons *Protea cynaroides,* à feuilles rondes et à fleurs violacées, riches en nectar, entourées de bractées verdâtres, mais pourprées au sommet, *Protea cordata,* à capitules pourpres, et *Protea nana (P. mellifera)* à feuilles elliptiques, et dont l'inflorescence globuleuse met un an à se former. Lorsqu'elle s'est ouverte, il en coule un nectar sucré très recherché par les abeilles, et parfois utilisé en médecine populaire contre la toux et les affections pulmonaires.

Le genre *Leucadendron* habite aussi la province du Cap et comporte soixante-quinze espèces; *Leucadendron argenteum* est cultivé en Europe depuis 1693. C'est un arbrisseau à feuilles persistantes, coriaces, argentées, soyeuses, qui fleurit en août, mais dont les fleurs jaunes sont en fait assez peu décoratives. Cette plante caractéristique des environs du Cap est cultivée aujourd'hui surtout à titre de curiosité.

Le genre *Grevillea,* qui compte cent soixante-dix espèces, vit sur la côte du sud-ouest de l'Australie, en Tasmanie, en Nouvelle-Calédonie et en Mélanésie. On en a importé des spécimens en Europe au début du XIXe siècle. Il est aujourd'hui largement cultivé dans les régions méditerranéennes. Il comprend des plantes arbustives ou arborescentes, à feuilles entières ou profondément bipennées, et à fleurs de couleur rouge, jaune ou blanche. Le style est d'abord courbé, logé dans une poche formée par les tépales, puis il se libère et se redresse. Le fruit est un follicule à deux graines. L'espèce la plus rustique est *Grevillea alpestris,* à feuilles lancéolées et ovales, et à fleurs rouges ou jaunes; on cultive aussi *Grevillea rosmarinifolia* à feuilles piquantes et à fleurs rouges. Quant à *Grevillea robusta*, c'est un arbre à croissance rapide, qui peut atteindre 30 à 40 m de hauteur, et qui fait concurrence, en Australie, aux Conifères, tels les araucarias. Il est rustique sur la Côte d'Azur et en Afrique du Nord. Il est très utilisé pour l'ornement, mais fournit aussi un bois clair, dur, facile à

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ **Thesium linophyllum,** *plante semi-parasite assez répandue dans nos régions.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

travailler et employé en ébénisterie; il pourrait être propagé pour cela en Afrique du Nord comme il l'a été sous les tropiques.

Les *Hakea* sont un genre de cent quinze espèces d'arbrisseaux ou d'élégants arbustes d'Australie et de Tasmanie, à feuilles souvent simples et entières. L'un des plus appréciés est *Hakea laurina,* qui rappelle les *Eucalyptus* par son port et ses feuilles lancéolées. Ses fleurs cramoisies forment des capitules, auxquels de nombreux styles jaune d'or rayonnants donnent l'aspect d'une pelote d'épingles. *Hakea saligna* a des feuilles rappelant celles d'un saule comme l'osier, et *Hakea acicularis* les a très étroites, épineuses et canaliculées en dessous. Il s'agit de plantes cultivées dans la région de l'olivier et qui résistent à la sécheresse.

On cultive aussi pour leur gracieux feuillage des espèces de *Lomatia,* genre qui comporte treize espèces d'arbustes d'Australie, de Tasmanie, de Nouvelle-Calédonie, de Tahiti et du versant pacifique de l'Amérique du Sud. Certaines espèces arborescentes donnent un bois de bonne qualité; le suc de leur écorce sert à teindre les tissus. Le follicule possède ici de nombreuses graines.

Parmi les Protéacées des serres européennes, nous citerons encore le genre *Banksia,* avec cinquante espèces d'arbustes à feuilles coriaces et à fleurs formant des inflorescences jaunes ou orangées, qui sont spontanés en Australie, en Tasmanie et en Nouvelle-Guinée. Comme chez les *Dryandra* qui vont suivre, les bractées des fleurs se lignifient et persistent lors de la fructification.

Les *Dryandra,* arbustes de l'ouest de l'Australie cultivés en serre froide dans nos régions, possèdent des inflorescences denses, de couleur jaune ou orangée, et entourées de bractées. Il y en a cinquante espèces.

Les Protéacées comprennent enfin d'autres plantes ornementales moins importantes dont les *Leucospermum,* semblables aux *Protea,* d'Afrique du Sud, de l'écorce desquels on tire du tanin. Les *Roupala* sont des arbres d'Amérique, du Mexique à l'Argentine, voisins des *Grevillea* et *Hakea,* dont le bois peut être utilisé comme bois d'industrie, et dont l'écorce donne du tanin; le genre *Telopea,* quant à lui, rassemble quatre beaux arbres, de l'est de l'Australie et de la Tasmanie, hauts de 10 à 12 m, portant des fleurs abondantes, réunies en capitules globuleux et le plus souvent rouges.

Le genre *Gevuina* comprend trois espèces arborescentes d'Australie, de Nouvelle-Guinée, du Chili et d'Argentine. *Gevuina avellana* donne la noisette du Chili, qui contient une graine oléagineuse consommée par les indigènes. Ce genre est voisin des *Grevillea*.

Santalales

Cet ordre est intéressant du point de vue biologique, parce qu'il comprend de nombreuses plantes parasites et surtout hémiparasites, c'est-à-dire des parasites qui, étant chlorophylliens, vivent seulement partiellement aux dépens de leurs hôtes. Elles sont distribuées principalement dans les régions tropicales. Elles sont presque toujours ligneuses, avec des feuilles coriaces et des fleurs bisexuées ou unisexuées réunies en épis ou en glomérules. Le périanthe est constitué par trois à douze éléments disposés en un ou deux verticilles, qui ont l'aspect d'un calice ou d'une corolle, ou montrent une différenciation en calice et corolle; les étamines adhèrent parfois à ces éléments, et l'ovaire est généralement infère, à deux ou trois carpelles avec autant d'ovules basaux. Ces ovules et le placenta qui les porte peuvent être indifférenciés, seuls subsistant les sacs embryonnaires.

La famille des *Santalacées (Santalaceae)* est la plus caractéristique de l'ordre, avec une distribution prédominante dans les zones chaudes et tempérées. Elle comporte trente-cinq genres et quatre cents espèces, dont vingt et une sont européennes et appartiennent surtout au genre *Thesium*. Il s'agit de plantes arborescentes, arbustives ou herbacées, pourvues de chlorophylle mais vivant le plus souvent aux dépens d'autres plantes vertes, des racines desquelles elles tirent leur nourriture à l'aide de suçoirs. Il y a aussi des parasites vrais. Leurs feuilles sont simples, parfois réduites à des écailles. Leurs fleurs sont unisexuées ou hermaphrodites, avec trois à six éléments sépaloïdes ou pétaloïdes. Les plantes sont souvent dioïques. L'ovaire est infère ou supère. Les ovules sont distincts, mais ils n'ont pas de téguments, et la graine en manque aussi. Le fruit est une drupe. L'espèce arborescente la plus importante est le santal blanc *(Santalum album),* des îles de la Sonde, cultivé en Inde et en Malaisie en association avec des plantes hôtes (cotonnier, *Albizzia,* etc.) et qui fournit un bois odorant, dur et compact, employé pour fabriquer des meubles de valeur, et dont on extrait une essence riche en alcools terpéniques, utilisée en parfumerie. Il y a dix-huit autres espèces de *Santalum;* certaines, et peut-être parfois *S. album,* vivent isolées.

On consomme les fruits d'*Acanthosyris falcata,* d'Amérique du Sud, et de *Leptomeria acida,* de Tasmanie, et on en fait des liqueurs. *Arjona tuberosa,* plante herbacée de Patagonie, donne des tubercules dont se nourrissent les indigènes. On cultive aussi, mais très rarement, *Buckleya distichophylla* et *Pyrularia pubera* du sud-est des États-Unis. Le premier doit être installé sur des racines de *Tsuga,* le second sur celles de *Calycanthus, Kalmia* et d'autres arbustes.

La famille des *Olacacées (Olacaceae)* se distingue des autres familles de Santalales, car elle comporte de nombreuses plantes libres, quoique beaucoup soient hémiparasites. Les fleurs possèdent un calice et une corolle. L'ovaire est supère et à ovules différenciés et souvent tégumentés. Le groupe, distribué dans les régions

tropicales, rassemble environ deux cent quarante espèces en vingt-neuf genres. Ce sont des plantes arborescentes, arbustives ou lianoïdes, à feuilles simples et à fleurs en inflorescences thyrsoïdes ou cymeuses. Le genre *Schoepfia* a de belles grappes de fleurs blanches et parfumées sans calice. Les *Anacolosa* sont un genre tropical asiatique et malgache de buissons à feuilles coriaces opposées.

Sont également tropicales et à ovules tégumentés les espèces de *Ximenia,* parfois cultivées en serre. *X. americana* est un arbre parasite haut d'environ 7 m, qui donne des fruits drupiformes, comestibles, à graines dont on extrait une huile non siccative, très utilisée en Inde, et un bois qui peut remplacer avantageusement le santal.

Le genre *Heisteria* a aussi des ovules tégumentés. Il est originaire d'Amérique centrale et du Sud mais compte aussi trois espèces en Afrique tropicale. Sa distribution est l'une de celles qui s'expliquent bien par la dérive des continents.

Le genre *Olax* compte cinquante espèces, comprenant des lianes *(O. imbricata, O. scandens),* des plantes buissonnantes *(O. stricta)* ou des arbres d'origine tropicale mais cultivés en serre dans nos régions. A Ceylan, les feuilles d'*O. zeylanica* sont consommées comme légume. Les ovules sont nus.

Par la possession éventuelle d'un calice et d'une corolle la famille des Olacacées fait figure d'exception parmi les Monochlamydées. Elle montre que certaines de celles-ci peuvent provenir d'ancêtres plus complexes.

La famille des *Myzodendracées (Myzodendraceae)* comprend le seul genre *Myzodendron*, représenté par des arbustes semi-parasites, presque toujours de *Nothofagus*, habitant les Andes. Ils sont dioïques ; les fleurs sont nues, comme les ovules. Les fruits sont des akènes ; ils possèdent des formations velues qui en permettent la diffusion par le vent.

La famille des *Loranthacées (Loranthaceae)* groupe quarante genres et mille quatre cents espèces de plantes herbacées ou arbustives, très généralement hémiparasites, à l'exception de *Phygilanthus aphyllus*, qui n'a pas de feuilles et de chlorophylle et se comporte en parasite vrai. En règle générale, les Loranthacées sont dépourvues d'appareil radical fixé dans le sol, et elles s'attachent sur leurs hôtes à l'aide de robustes racines modifiées en suçoirs. Elles ont des feuilles coriaces ou charnues, le plus souvent opposées ou verticillées ; leurs fleurs, solitaires ou en inflorescences, peuvent être unisexuées ou hermaphrodites. Le périgone est formé de deux verticilles de deux ou trois éléments. Il existe le même nombre d'étamines, éventuellement unies aux pièces du périgone. L'ovaire est infère, ne possède pas de véritables placentas, et les ovules ne sont pas bien différenciés. Les fruits sont des baies ou des drupes ; ils sont souvent visqueux et contiennent de une à trois graines, le plus souvent riches en albumen, et dont l'embryon a parfois trois à six cotylédons. Ce sont des plantes des régions tropicales, mais dont on connaît quelques espèces dans les zones tempérées.

Le genre *Loranthus,* dont le nom a été choisi pour rappeler la forme des pétales (du latin *lorum,* courroie), est riche de plus de cinq cents espèces et en possède une *(L. europaeus)* dans le sud-est de l'Europe, jusqu'en Italie et en Allemagne, mais non en France. Elle parasite les chênes et les châtaigniers essentiellement (à la différence du gui, qui est très rare sur le chêne). Cette plante forme des sortes de buissons avec un gros renflement au point d'insertion sur l'hôte. Ses baies et son écorce fournissent une substance visqueuse, molle et élastique, la glu, dont on se servait jadis pour chasser les petits Oiseaux. C'est une espèce peu ornementale, bien que ses fleurs et ses fruits jaunâtres soient groupés en gracieux capitules. Les espèces tropicales du genre, africaines et asiatiques, ont de belles fleurs pourprées ou orangées, et peuvent être cultivées en serre chaude. Elles sont peut-être à répartir en plusieurs genres.

Au Chili, les *Loranthus buxifolius* et *tetrandrus,* qui doivent probablement être rapportés à un autre genre, ont été trouvés croissant ensemble sur le même hôte et peuvent éventuellement se parasiter l'un l'autre (il s'agit alors d'hyperparasitisme).

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Le gui*** **(Viscum album)** ***vit en parasite sur de nombreuses espèces ligneuses européennes. Ses baies sont vénéneuses pour l'homme.***

Le genre *Viscum* n'a pas sous le périgone le petit « calicule » d'origine axiale que montrent les *Loranthus*. Les espèces, au nombre de soixante-cinq, sont largement distribuées, surtout dans les régions tropicales d'Afrique. La seule présente en France est le gui *(Viscum album)*. C'est une petite plante buissonnante, dioïque, qui possède des feuilles coriaces et opposées. Ses fleurs, en glomérules terminaux, sont vert jaunâtre ; les étamines sont presque entièrement soudées aux tépales ; les fruits sont des baies blanches, un peu semblables à des perles, avec une pulpe gélatineuse où se trouve une grosse graine verte et plate. Les graines sont disséminées par les Oiseaux, qui sont friands des baies, et qui les déposent en frottant leur bec contre l'écorce des arbres, ou bien par leurs excréments, car elles résistent très bien à leur passage dans l'appareil digestif. Les fruits sont vénéneux pour l'homme. Le gui comporte trois sous-espèces et est parasite de différents arbres, pins (le gui est alors à baies jaunes), sapins, pommiers, peupliers, robiniers, etc. Il est très rare sur le chêne et manque sur le mélèze d'Europe. Les feuilles et les rameaux renferment surtout une substance peptidique (viscotoxine) à action vasodilatatrice, tonicardiaque et diurétique. On lui a trouvé également des propriétés antitumorales encore à l'étude.

Il existe aussi en Espagne un gui à baies rouges, *Viscum cruciatum*. On rencontre *Arceuthobium oxycedri* sur les genévriers, dans la région méditerranéenne et jusqu'en Himalaya. Il a des feuilles écailleuses et un

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Le poivre d'eau* (Polygonum hydropiper) *est une herbe commune le long des cours d'eau.*
▼ *La renouée des Oiseaux* (Polygonum aviculare) *s'adapte très bien à toutes sortes de sols. On la rencontre fréquemment sur les sables et les décombres.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

fruit sec déhiscent projetant sa graine unique visqueuse. Le genre *Phoradendron* est américain et compte trois cents espèces; on tire de ses baies une substance semblable à la glu; *P. flavescens* est le gui utilisé en Amérique du Nord à l'occasion du Nouvel An.

Chez les *Phthirusa, P. theobromae,* et, chez les *Struthanthus, S. syringifolius* ont été considérés comme pouvant fournir un caoutchouc. *S. syringifolius* est nuisible aux plantations de café d'Amérique du Sud. Les feuilles et les fleurs des *Psittacanthus* sont utilisées localement en décoction pour guérir les plaies; distillées, elles donnent une lotion de beauté. Ces genres sont voisins de *Loranthus* et possèdent un calicule. Ils croissent tous en Amérique tropicale.

La famille des *Balanophoracées (Balanophoraceae)* comprend dix-huit genres et une centaine d'espèces de plantes dépourvues de chlorophylle, qui parasitent les racines de Végétaux supérieurs par l'intermédiaire de tubercules radicaux. Elles ont hors de terre de grosses inflorescences, souvent écailleuses à la base et constituées par des fleurs généralement unisexuées. Les ovules sont nus et le plus souvent réduits aux sacs embryonnaires. En général, seules les fleurs mâles ont un périanthe. La pollinisation se fait par le vent ou grâce aux Insectes. Les *Balanophora* sont au nombre de soixante-dix. On extrait de certains d'entre eux, ainsi que de *Langsdorffia hypogaea,* seule espèce du genre, des substances utilisées au Mexique pour faire des chandelles et une sorte de cire. Les Balanophoracées vivent surtout en Amérique tropicale mais aussi en Afrique, en Australie et en Nouvelle-Zélande. On peut en faire un ordre spécial des Balanophorales.

Polygonales

Cet ordre est constitué par l'unique famille des *Polygonacées (Polygonaceae),* qui comprend des herbes largement distribuées, mais parfois aussi des arbustes, des arbres ou des lianes ligneuses, que l'on rencontre surtout alors en Amérique tropicale. Elle comporte quarante genres et huit cents espèces. On trouve en France une quarantaine d'espèces appartenant à trois genres.

Les feuilles de ces plantes, en général alternes, simples et entières, sont insérées au niveau de nœuds bien marqués; d'où le nom du genre *Polygonum;* elles sont en apparence dépourvues de stipules mais possèdent le plus souvent une *ochréa,* qui embrasse la tige et dérive de la concrescence des deux stipules et d'une ligule ventrale. Les fleurs, réunies en inflorescences qui peuvent être des épis, des grappes ou des thyrses, sont petites, régulières, généralement hermaphrodites et possèdent un périgone vert ou pétaloïde, formé de trois à six tépales, en un ou deux verticilles, éventuellement unis à la base. Les étamines sont au nombre de trois à neuf. L'ovaire est uniloculaire, avec un seul ovule, orthotrope le plus souvent et à placentation basale. Il y a deux ou trois styles qui se terminent par des stigmates aplatis chez les espèces entomogames, et plumeux chez les espèces anémogames. Il y a donc deux ou trois carpelles. Les fruits, à une seule graine, sont des akènes aplatis ou trigones, souvent enveloppés des verticilles accrescents du périanthe, spécialement l'interne, qui forment des appendices aidant à la dissémination. Les fleurs des Polygonacées peuvent être réparties, en ce qui concerne leur périanthe et leur androcée, en deux groupes. Au premier groupe appartiennent les fleurs de type cyclique. Ce sont principalement les genres suivants : *Pterostegia,* avec six sépales disposés en deux verticilles trimères, un androcée formé de six étamines, elles aussi en deux verticilles trimères, et un gynécée de trois carpelles; *Rheum,* chez qui les trois étamines du verticille extérieur se trouvent dédoublées; enfin, *Rumex,* où elles le sont encore, tandis que les trois étamines du verticille interne ont disparu. Le second groupe, qui comprend des fleurs à structure spiralée, est considéré comme dérivant du type précédent par soudure de deux tépales et perte d'une ou plusieurs étamines, les étamines restantes du cycle externe pouvant être encore dédoublées. Cette dérivation semble prouvée par la disposition asymétrique des étamines restantes, par rapport aux éléments du périgone. Il y a aussi des fleurs dimères, totalement ou partiellement.

La structure trimère de la fleur rapproche les Polygonacées des Monocotylédones ou de certaines Renonculacées, et leur gynécée tricarpellaire et uniloculaire, avec un seul ovule orthotrope, rappelle celui des Pipérales, mais les fruits sont différents; il n'y a pas de périsperme tandis qu'il est plus volumineux que l'albumen chez les Pipéracées et les Saururacées. Par suite de la placentation basale, les Polygonacées se rapprochent des Chénopodiacées, mais en diffèrent par l'absence de périsperme et parce que l'ovule est unique et généralement orthotrope, et que les feuilles possèdent une ochréa. Les modalités de la placentation des Centrospermales permettent toutefois de comprendre la signification de l'ovule basal unique, qui peut se rencontrer chez elles également.

La structure anatomique des tiges des *Rumex* et des *Rheum* présente des anomalies dans la disposition de l'appareil conducteur. Dans la moelle des tiges, il y a en effet des faisceaux munis de bois vers l'extérieur et de liber vers l'intérieur. Ils deviennent finalement concentriques avec bois périphérique. Les diverses espèces de cette famille présentent en outre des adaptations aussi bien aux milieux aquatiques que désertiques.

Les Polygonacées comprennent des plantes, qui, pour diverses raisons, peuvent avoir une certaine importance pratique. Ainsi, le sarrasin *(Polygonum fagopyrum = Fagopyrum esculentum)* et le sarrasin de Tartarie *(Polygonum [Fagopyrum] tataricum)* sont cultivés dans les régions de montagne pour la nourriture du bétail; ils ont aussi une importance (actuellement décroissante) dans l'alimentation humaine. Les rhizomes des différents *Rheum* constituent ce qu'on nomme la racine de rhubarbe, qui possède des propriétés laxatives et purgatives. La bistorte *(Polygonum bistorta)* et l'oseille *(Rumex acetosa)* sont utilisées en pharmacie et surtout en cuisine. D'autres espèces, essentiellement des *Polygonum,* sont cultivées pour l'ornement.

Chez le genre *Polygonum,* le périgone présente trois ou le plus souvent deux ou cinq pièces égales entre elles, colorées ou d'aspect semi-herbacé. Il est généralement persistant. Les styles sont retombants. Les quelque deux cents espèces de ce genre sont cosmopolites.

La bistorte *(Polygonum bistorta)* a une tige simple, dressée, d'une hauteur de 20 à 80 cm. Les feuilles inférieures, ovales-allongées, cordiformes à la base, ont un limbe décurrent sur le pétiole. Les feuilles supérieures sont sessiles; l'ochréa est très longue et de couleur ferrugineuse. Les fleurs sont roses, avec six à huit étamines, et trois styles libres qui se terminent par un petit stigmate capité; elles sont réunies en un épi terminal dense et allongé. Les fruits sont des akènes trigones entourés par le périgone persistant. C'est une plante vivace, que l'on trouve dans les prés et pâturages de montagne surtout, où elle fleurit de juin à août. Elle est commune en Europe, en Afrique occidentale et du Nord, au Japon et en Amérique du Nord. On la nomme vulgairement bistorte car elle a un gros rhizome contourné, sorte de long tubercule, qui est utilisé en médecine. On le récolte après la floraison de la plante. Il contient d'importantes quantités de tanins qui lui confèrent des propriétés astringentes.

Le sarrasin *(Polygonum fagopyrum)* est une plante annuelle à tige dressée, haute de 30 à 80 cm, et de couleur souvent rouge. Le pétiole des feuilles inférieures est bien développé, alors que celui des feuilles supérieures est très réduit ou absent; le limbe est triangulaire-cordiforme, avec des oreillettes sagittées ou arrondies. Les fleurs, d'un diamètre de 3 à 4 mm, ont un périgone blanc ou rose, vert à la base, constitué de cinq tépales; elles possèdent en outre huit étamines et un ovaire à trois styles libres avec des stigmates capités; elles constituent des grappes axillaires et terminales. Les fruits sont des akènes lisses longs de 5 mm, de couleur châtain, trigones, et à angles aigus. Cette plante, originaire d'Asie centrale et orientale, fleurit de juillet à septembre et est cultivée pour l'alimentation. Elle remplace les céréales, étant peu exigeante et ayant une croissance rapide; elle craint cependant le gel. La plante entière ou les akènes seulement servent pour l'alimentation du bétail. On moud aussi les akènes pour obtenir une farine de couleur foncée, avec laquelle on prépare des galettes et une sorte de bouillie. L'amidon des graines est parfois utilisé pour falsifier le poivre. L'intérêt pharmaceutique essentiel de la plante réside dans la richesse de ses feuilles en rutoside (3 - rhamnoglucoside du quercétol), médicament très utilisé pour lutter contre la fragilité des capillaires, qu'on peut extraire du sarrasin, mais dont la source principale est *Sophora* (Papilionacées).

Polygonum tataricum (sarrasin de Tartarie) est une plante annuelle très semblable à la précédente, mais qui en diffère par ses grappes plus longues, sur lesquelles les fleurs verdâtres ou jaunâtres sont disposées en groupes assez écartés les uns des autres, et par ses akènes rugueux ou tuberculeux dont les angles sont sinués et ondulés. Cette espèce est originaire de Sibérie et d'Asie centrale. On la cultive jusqu'à 3 000 m d'altitude aux mêmes fins que le sarrasin. Elle fleurit de juillet à septembre.

La renouée à feuilles de patience *(Polygonum lapathifolium),* très commune, est une plante annuelle, à tiges dressées et ramifiées, hautes de 20 à 80 cm. Les feuilles, ovales ou lancéolées, glanduleuses en dessous, ont souvent une tache noire au centre du limbe, leurs ochréas ne sont pas ou peu ciliées. Les fleurs, réunies en épis denses, sont blanchâtres ou roses; leur périgone a quatre ou cinq divisions glanduleuses; elles possèdent cinq ou six étamines, et leur ovaire est bicarpellé, en général, et surmonté de deux styles soudés sur leur moitié inférieure. Les fruits sont des akènes lenticulaires luisants. Cette espèce fleurit en été et croît dans toutes les régions tempérées. La persicaire *(P. persicaria)* en est voisine, mais les ochréas sont ciliées, les pédicelles et les périgones ne sont pas glanduleux, les fleurs sont roses, et les akènes sont trigones ou lenticulaires. Elle croît aussi dans toutes les régions tempérées, et est moins inféodée aux endroits humides. Elle est volontiers rudérale.

La renouée amphibie *(Polygonum amphibium)* croît souvent dans les lieux humides le long des fossés, et les feuilles sont alors étroites, arrondies à la base, à pétiole court et pubescentes; elle peut également vivre dans l'eau et dans ce cas les feuilles sont plus larges, cordées à la base, glabres, à long pétiole et flottantes. Les fleurs sont roses, avec cinq tépales, cinq étamines et un ovaire uniloculaire bicarpellé surmonté de deux styles soudés à la partie inférieure; elles sont réunies en épis cylindriques denses, qui, dans la forme aquatique, se dressent au-dessus du niveau de l'eau. Les fruits sont des akènes biconvexes luisants. Cette renouée fleurit en été; elle est répandue dans tout l'hémisphère Nord et atteint les altitudes subalpines.

Le poivre d'eau *(Polygonum hydropiper)* a une tige le plus souvent dressée et haute de 20 à 80 cm. Il est annuel. Ses feuilles sont oblongues et lancéolées. Elles possèdent des ponctuations dues aux glandes qu'elles portent en abondance; à cause de celles-ci, ces feuilles, mastiquées, ont une saveur, due à des aldéhydes terpéniques, qui rappelle celle du poivre; elles présentent en outre une tache rouge foncé ou noire. Les petites fleurs, réunies en épis très lâches, un peu pendants, ont un périgone blanc verdâtre à quatre ou cinq tépales parfois bordés de rose et couverts de glandes brunâtres. Les étamines sont habituellement au nombre de six, rarement de huit; l'ovaire, à deux ou trois carpelles, est surmonté de deux ou trois styles qui sont soudés entre eux dans leur moitié inférieure; les stigmates sont capités. Les fruits sont des akènes comprimés ou trigones suivant qu'ils proviennent d'un gynécée bi- ou tricarpellé. On rencontre communément cette plante au bord des eaux dans presque toutes les régions tempérées du globe.

Polygonum viviparum est une plante vivace, à rhizome tordu et à tige dressée haute de 10 à 30 cm. Ses feuilles sont elliptiques-lancéolées. Ses fleurs, réunies en un épi terminal, sont blanches, et souvent entremêlées de bulbilles susceptibles de se séparer et de reproduire asexuellement la plante. Les fruits, en conséquence, se forment rarement. On rencontre cette espèce dans les prés et les pâturages des hautes montagnes d'Europe, d'Asie septentrionale, d'Amérique du Nord et de toutes les régions arctiques.

La renouée des Oiseaux ou traînasse *(Polygonum aviculare)* est une plante herbacée annuelle, parfois vivace. Ses tiges, à nœuds bien évidents, sont le plus souvent prostrées ou ascendantes, rarement dressées. Ses feuilles sont ovales-lancéolées ou linéaires, et ont des nervures latérales bien nettes à la face inférieure. L'ochréa, rouge-brun inférieurement, est vite lacérée. Les fleurs sont très petites, solitaires ou réunies par groupes de cinq

▶ *La rhubarbe des moines* (Rumex alpinus).

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

au maximum à l'aisselle de feuilles pratiquement semblables aux autres. Le périgone, qui est blanc ou rose, et verdâtre extérieurement, est à cinq tépales. Les étamines sont au nombre de huit. Les trois styles sont très courts. Les fruits sont trigones, ternes et striés. Il s'agit en fait d'un groupe d'espèces voisines, trois pour le moins. Les tépales sont soudés à la base sur une très faible longueur chez le véritable *P. aviculare,* tandis que le tube qu'ils forment est aussi long que les parties libres chez *P. arenastrum. P. rurivagum,* par ailleurs, diffère de *P. aviculare* parce que ses tépales ne se recouvrent pas les uns les autres et que ses feuilles ne dépassent pas 4 mm de large. Ces plantes fleurissent de mai à novembre; elles sont présentes du niveau de la mer aux zones de haute montagne; elles sont répandues dans toutes les régions tempérées et ne manquent guère qu'en Australie, mais la distribution précise des espèces signalées ci-dessus est mal connue.

La renouée liseron ou vrillée sauvage *(Polygonum convolvulus)* est une plante annuelle très commune. Ses tiges ramifiées sont prostrées ou volubiles, un peu rugueuses et longues de 20 cm à 1 m. Les feuilles, dont les limbes sont triangulaires-acuminés, rappellent un peu celles du liseron. Les petites fleurs blanchâtres sont réunies en épis à l'aisselle des feuilles. Les fruits ternes sont enveloppés par le périgone à tépales externes carénés. Cette espèce croît dans les lieux cultivés, le long des haies, et fleurit à partir de juin et pendant tout l'été. Elle vit en Europe, en Asie tempérée, en Afrique du Nord et en Amérique du Nord.

La grande vrillée *(Polygonum dumetorum)* est annuelle, volubile et atteint 2 m; sa tige est lisse, ses limbes sont aussi triangulaires et son fruit, luisant, est enveloppé par le périanthe largement ailé. Elle vit en Europe, en Asie occidentale et en Sibérie.

Polygonum aubertii, souvent appelé à tort *P. baldschuanicum,* a une tige ligneuse, fine, volubile, atteignant 10 à 25 m, et très ramifiée. Ses feuilles, longues de 3 à 10 cm, ont un limbe hasté-cordiforme, à bords légèrement ondulés, et sont de couleur vert intense à la face supérieure et plus pâle à la face inférieure; leur pétiole est souvent courbe. Les fleurs, très nombreuses, sont petites, blanches et réunies en grandes panicules axillaires et terminales, souvent pendantes, à rameaux rugueux; les tépales sont au nombre de cinq, les étamines de cinq à huit, et l'ovaire est trigone. Les fruits sont des akènes entourés du périanthe, à trois ailes, d'abord blanc rosé, puis de couleur brune. Cette espèce, originaire du Tibet et de Chine occidentale, est cultivée pour l'ornement; elle est d'un très bel effet pendant toute la floraison, qui a lieu de juillet à septembre et même après, quand elle est chargée de ses nombreux petits fruits blanc rosé; elle s'adapte à tous les sols, mais préfère les endroits peu ensoleillés.

On a proposé de placer les *Polygonum convolvulus, dumetorum* et *aubertii* dans le genre *Bilderdykia,* caractérisé par les trois tépales externes plus ou moins ailés au moment de la fructification.

Le genre *Rumex* comprend des plantes herbacées à fleurs hermaphrodites, polygames ou dioïques. Les tépales sont verdâtres et au nombre de six, les extérieurs étant le plus souvent moins développés, et les intérieurs, ou valves, restant généralement adhérents aux akènes trigones. Les caractères tirés des valves, qui sont très importants pour la classification, sont bien évidents seulement dans les fruits, et, par conséquent, il convient de recueillir ceux-ci pour une détermination sûre. Les étamines sont au nombre de six. L'ovaire est uniloculaire, et les trois styles se terminent chacun par un stigmate en pinceau. Ce genre renferme deux cents espèces environ, présentes dans toutes les régions tempérées, mais surtout nombreuses dans l'hémisphère Nord.

La rhubarbe des moines *(Rumex alpinus)* a une tige droite, haute de 20 cm à 1 m. Les feuilles inférieures ont des limbes ovales, avec une base cordiforme et un pétiole cannelé. Les fleurs, dont le pédicelle est plus long que le périgone, sont réunies en grappes ou épis de cymes qui forment une panicule ici presque totalement dépourvue de feuilles. Les valves sont entières au bord. C'est une espèce vivace, qui fleurit de juillet à septembre, et qui croît dans les lieux humides, de basse et de moyenne altitude, dans les Alpes, les Pyrénées, les Vosges, le Massif central, en Europe centrale et méridionale, dans le Caucase et en Asie Mineure. Elle a des propriétés laxatives.

L'oseille *(Rumex acetosa)* ne doit pas être confondue avec d'autres espèces voisines. C'est une plante vivace, dioïque, à tiges dressées hautes de 30 à 90 cm. Ses limbes sont ovales, oblongs, hastés à la base; les feuilles inférieures sont pétiolées, mais non les supérieures. Les fleurs sont réunies en panicule. Les fruits sont entourés par des valves suborbiculaires à bord entier. La plante est commune dans les lieux herbeux de l'Ancien Monde, où elle fleurit de mai à septembre. Elle est riche en oxalate acide de potassium, ou sel d'oseille, qui lui confère sa saveur acidulée. Elle est astringente et communément utilisée en cuisine, faisant pour cela l'objet d'une culture. Sa richesse en oxalate la rend irritante pour les reins.

La petite oseille *(Rumex acetosella)* est dioïque, vivace et haute de 10 à 40 cm. Ses feuilles sont lancéolées, à limbe hasté-trilobé, et pétiolées. Les lobes inférieurs du limbe sont déjetés latéralement. Ses fleurs roses sont réunies en panicule lâche dépourvue de feuilles, et les valves sont petites, ovales et entières. Elles se séparent facilement du fruit. On rencontre la plante dans les endroits cultivés et les lieux incultes secs de toutes les régions tempérées, où elle fleurit d'avril à septembre.

La parelle *(Rumex crispus)* est aussi une plante vivace à tiges dressées, hautes de 40 cm à 1 m, ou plus. Ses feuilles inférieures ont un pétiole aplati en haut, un limbe lancéolé à sommet pointu ou obtus, à bord ondulé ou crêpelé, et à base tronquée. Les fleurs, dont les pédicelles sont plus longs que les tépales, sont réunies en grappes de cymules qui forment une panicule à peu près dépourvue de feuilles. Les trois valves du fruit sont membraneuses, entières, munies chacune d'un granule dorsal dont l'un est plus gros ou seul existant. Cette espèce est commune dans les lieux incultes de toutes les régions tempérées, et fleurit de juillet à septembre.

Rumex sanguineus est également vivace, de couleur rougeâtre et haut de 0,50 m à 1 m. Les feuilles, dont les nervures sont rougeâtres, sont assez allongées, les inférieures pétiolées à limbe cordiforme à la base, les supérieures sessiles et lancéolées. Les fleurs, formant sur la panicule des faux verticilles dépourvus de feuilles, ou à peu près, ont un pédoncule bien plus long que le périgone. Les valves des fruits ont un bord entier, et une seule est munie d'un granule dorsal. Cette espèce croît abondamment dans les forêts et les lieux incultes et humides de la plupart des régions tempérées. *R. conglomeratus* en est voisin mais les trois valves ont un granule dorsal.

Rumex obtusifolius est encore une plante vivace. Sa tige, dressée, est haute de 0,50 m à 1 m; ses feuilles

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Inflorescence de*** **Rheum palmatum** ***(détail).***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ ***Détail de l'infrutescence de*** **Rumex obtusifolius.**

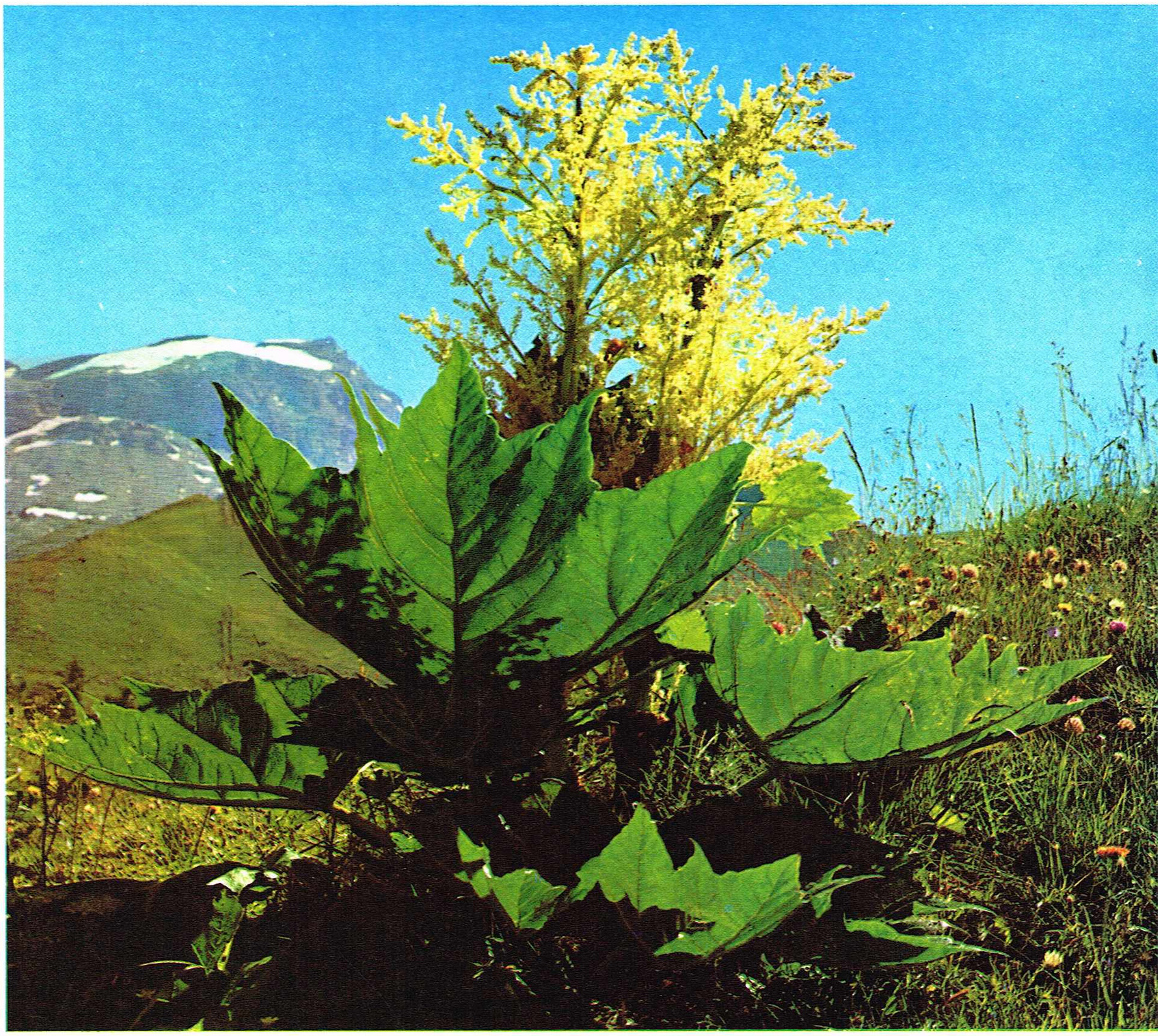

▶ **Rheum palmatum.** *Les rhizomes de cette espèce fournissent la rhubarbe de Chine utilisée en pharmacie.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

inférieures sont ovales, à limbe cordé à la base, et obtuses ou presque aiguës. Ses fleurs ont un pédicelle plus long que le périgone, et elles sont réunies en grappes de cymules qui forment une panicule avec des faux verticilles plus condensés à la partie supérieure. Les valves des fruits sont pourvues de deux à quatre grandes dents de chaque côté. Ce *Rumex* croît le long des fossés, et en général dans les lieux humides de presque toutes les régions tempérées. Il fleurit de juin à septembre.

Le genre *Oxyria* comprend trois espèces, dont *O. digyna*. C'est une petite plante vivace, à tiges généralement aphylles, hautes de 8 à 20 cm. Les feuilles basales ont un pétiole très long, un limbe réniforme ou rond, et une base cordiforme. Les fleurs ont un périgone formé de quatre tépales qui restent sur le fruit, mais, alors que les deux intérieurs adhèrent à celui-ci, les deux extérieurs sont recourbés vers le bas. En outre, les fleurs possèdent six étamines et un ovaire aplati, surmonté de deux stigmates en pinceau et presque sessiles; elles sont réunies en faux verticilles qui constituent des sortes d'épis. Le fruit est un akène entouré d'une vaste aile de couleur pourprée. Cette espèce vit dans les lieux caillouteux des régions arctiques et les éboulis siliceux de haute montagne, où elle fleurit en juillet-août; on la rencontre dans les Pyrénées, les Alpes, la Corse et les régions subarctiques d'Eurasie et d'Amérique du Nord.

Muehlenbeckia platyclados, de la même famille, est originaire des îles Salomon. C'est un arbuste buissonnant, à branches atteignant 5 m, aplaties et vertes, avec des feuilles réduites de courte durée. Ses fleurs sont petites, blanches et nombreuses, et elles apparaissent du mois d'août au mois de septembre. Ses fruits sont petits et nombreux, d'abord rouges puis noirs.

Parmi les espèces les plus importantes du genre *Rheum*, nous citerons *R. palmatum*, sa variété *tanguticum*, et *R. officinale*, toutes originaires de Chine occidentale et du Tibet oriental. Les rhizomes de ces plantes fournissent la rhubarbe de Chine, utilisée en pharmacie.

R. palmatum a une tige courte, de couleur brun foncé tendant au noir. Les feuilles sont presque toutes radicales, de contour à peu près orbiculaire, d'un diamètre de 70 cm à 1 m, et lobées profondément. Les lobes foliaires sont dentés irrégulièrement et le long pétiole est rougeâtre vers la base. La surface du limbe est rugueuse et blanchâtre. Les tiges florales atteignent 2 m. Les fleurs à six tépales, neuf étamines et ovaire trigone, sont petites, blanchâtres, et réunies en épis de cymes à allure de verticilles denses qui forment à leur tour une vaste panicule. L'espèce fleurit en été.

Sa variété *tanguticum* a aussi des feuilles larges pouvant atteindre 75 cm, mais palmatiséquées, avec des lobes pennatiséqués. La tige florifère peut atteindre une hauteur de 3,50 m et montre de petites taches rouges. Les fleurs sont jaunes ou rouges, elles possèdent aussi six tépales et un ovaire trigone et sont également réunies en une panicule très ramifiée. Les fruits sont de petits akènes trigones avec de larges ailes.

R. officinale, enfin, possède des feuilles vertes et brillantes, presque toutes radicales, atteignant 50 cm de large, à limbe lobé, mais moins profondément que chez *R. palmatum,* à base cordiforme, et non rugueux. Le pétiole est rougeâtre. Les fleurs sont blanchâtres, avec un périgone formé de six pièces, neuf étamines et un ovaire trigone à trois styles; elles sont réunies en une panicule haute de 1 à 2 m. Les rhizomes de ces plantes contiennent des composés anthraquinoniques, surtout sous forme d'hétérosides, dont l'action est laxative

à dose suffisante; sinon elle est tonique astringente car ils renferment aussi des tanins. On utilise les rhizomes en poudre et en extrait. Les feuilles sont toxiques du fait de leur richesse en oxalates.

Le rhapontic *(R. rhaponticum)* est cultivé assez largement dans les jardins d'Europe. Il est originaire d'Asie centrale et occidentale, jusqu'à la Bulgarie. La tige porte plusieurs feuilles orbiculaires à marges ondulées. Ses propriétés thérapeutiques sont moins nettes que celles de la rhubarbe de Chine, et il est plutôt tonique que laxatif; on s'en sert parfois pour falsifier la rhubarbe de Chine, falsification difficile à déceler.

On peut indiquer aussi que les pétioles de *R. rhabarbarum,* de Mongolie et de régions voisines, sont comestibles et consommés en confitures, comme ceux de l'espèce précédente, dont il ne faut pas abuser à cause de leur richesse en oxalate de potassium.

Centrospermales

Cet ordre comprend des plantes presque toujours herbacées, à feuilles non stipulées. Leurs fleurs possèdent un périanthe à un ou deux verticilles. L'ovaire est le plus souvent supère, et contient un nombre variable d'ovules sur une colonne placentaire centrale du fait de la disparition des cloisons ovariennes. Cette disposition des ovules dans l'ovaire, et par conséquent des graines dans le fruit, a justement suggéré à Eichler le nom de Centrospermées, mais il y incluait les Polygonacées. Les ovules possèdent en outre deux téguments et un nucelle, puis un embryon, courbes. La graine comporte un périsperme, alors que l'albumen est très réduit.

Il s'agit de plantes très communes ou assez communes dans notre flore spontanée. Certaines sont utilisées en horticulture, d'autres pour l'alimentation.

La famille des *Chénopodiacées (Chenopodiaceae)* comprend des plantes annuelles ou vivaces, le plus souvent herbacées, avec une tige anguleuse, par suite de la décurrence des pétioles. Les feuilles sont simples, sans stipules, et sont souvent réduites pour diminuer la transpiration. Les fleurs sont petites, uni- ou bisexuées, et réunies en cymes denses elles-mêmes groupées en thyrses d'aspect divers. Elles n'ont pas de calice ni de corolle distincts, mais possèdent presque toujours deux à cinq tépales herbacés plus ou moins soudés à la base. Les étamines sont en nombre égal à celui des tépales et opposées à chacun d'eux. L'ovaire, unique, en général bicarpellaire, supère ou semi-infère, contient un ovule basal à nucelle souvent courbe (amphitropie). Le fruit est entouré des tépales persistants; c'est un akène ou une capsule *(Beta)* s'ouvrant par un couvercle (pyxide). Les graines contiennent un embryon courbe ou spiralé. La pollinisation se fait en général grâce au vent ou aux Insectes; l'auto-fécondation se rencontre quelquefois.

Cette famille comprend une centaine de genres cosmopolites; ces plantes vivent de préférence sur des sols riches en sel ou en nitrates; elles sont fréquentes sur les plages et dans les déserts salés (espèces halophiles) ou sur les terrains incultes proches des maisons, dans les ruines et le long des routes (plantes rudérales). Il en est qui sont importantes pour l'alimentation, soit comme légumes (épinard), soit pour la production de sucre (betterave).

Les *Chenopodium* (plus de deux cents espèces) forment le genre typique et le plus répandu de la famille. Ce nom, qui signifie patte d'oie, rappelle la forme caractéristique des feuilles de beaucoup d'espèces, dont le limbe est hasté ou spatulé. D'aspect variable, ces plantes peuvent avoir une odeur aromatique *(Ch. anthelminthicum)* ou fétide *(Ch. vulvaria)*. Elles ont des fleurs hermaphrodites.

Le chénopode bon-Henri ou épinard sauvage *(Chenopodium bonus-henricus)* se trouve en Europe occidentale et centrale. Dans les régions de montagne, il atteint la limite des Conifères, sur des sols nitreux. Ses feuilles à limbe hasté-sagitté constituaient un légume très apprécié avant qu'on ait cultivé l'épinard. La culture a facilité sa dissémination, jusqu'en Amérique du Nord. *Ch. album,* assez proche du précédent, a souvent un aspect blanc farineux. Il est extrêmement polymorphe. C'est l'une des plantes rudérales les plus répandues.

La quinoa *(Chenopodium quinoa)* est cultivée dans les Andes jusqu'à 3 000 m d'altitude. Cette espèce a été importée en Europe au siècle dernier. Ses graines sont riches en glucides et en protides. Elles fournissent une farine.

Les arroches *(Atriplex)* sont un genre de cent cinquante Végétaux herbacés, élevés, à feuilles à limbe hasté et souvent denté; les fleurs sont unisexuées monoïques. Nous citerons *A. littoralis,* qui habite les sables des côtes, de l'Europe occidentale et de la Méditerranée, ainsi que l'Asie centrale et la Chine, *A. hastata,* espèce rudérale très commune dans l'hémisphère Nord, *A. halimus,* à feuilles ovoïdes tout argentées, plante très

▼ **Beta vulgaris.** ***Plant (à gauche) et racine (à droite) de betterave rouge.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

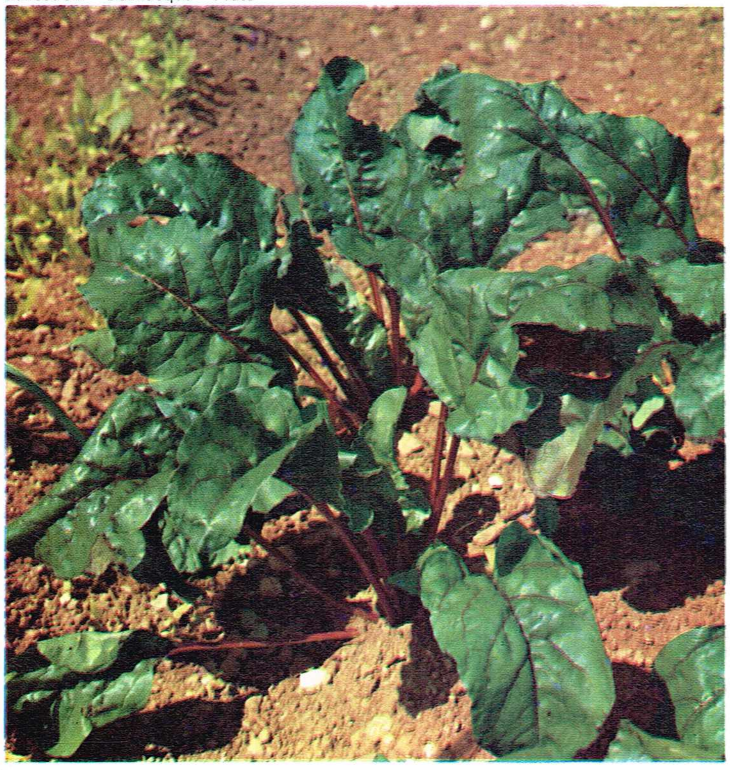

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

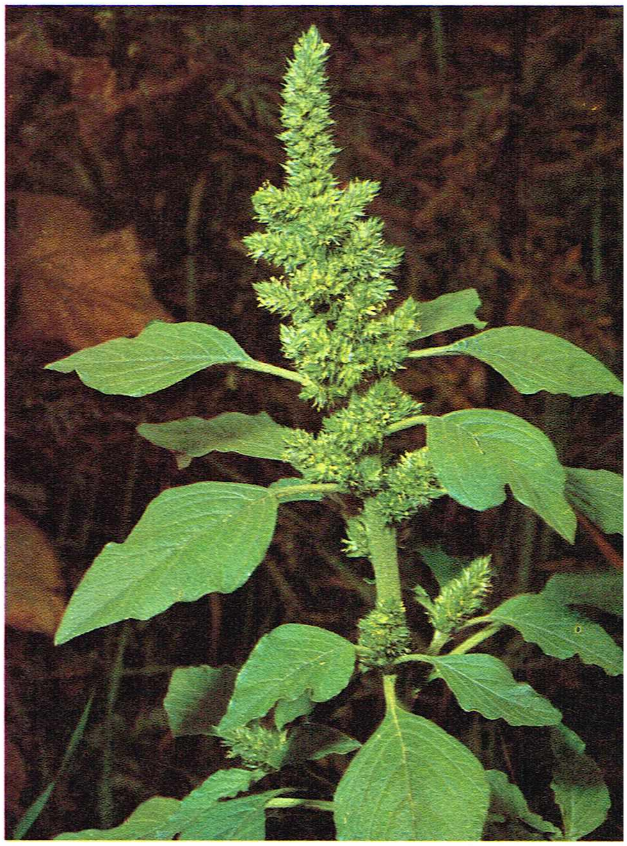

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *A gauche : infrutescences mûres de* Beta vulgaris *var.* vulgaris. *A droite :* Amaranthus retroflexus, *herbe infestante des lieux incultes.*

rameuse et utilisée pour former des buissons ou haies décoratifs, et *A. hortensis,* originaire d'Asie centrale et souvent cultivé pour ses feuilles pourpres.

Les espèces du genre *Beta* ont aussi les caractères de la flore halophile. *B. vulgaris subsp. vulgaris* est la betterave, cultivée et connue de tous, dont la racine est pivotante et parcourue par deux sillons longitudinaux, le long desquels sont insérées les radicelles. Il naît du collet des feuilles qui meurent à la fin de la première année; chez les formes bisannuelles, d'autres feuilles se forment la seconde année, quand commencent à pousser les tiges, rameuses, atteignant 1 m à 1,50 m, anguleuses et glabres, et portant de fins épis de cymules de fleurs vertes, puis de fruits un peu ligneux. La betterave est cultivée pour l'extraction du sucre, comme fourrage et comme légume. C'est la variété *altissima* qui est destinée aux sucreries. La betterave rouge est la variété *conditiva*. Les feuilles de la variété *crassa* servent de fourrage; enfin la variété *vulgaris* constitue la bette dont les feuilles charnues ont un pétiole très large avec

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ *Plants de bettes à cardes ou poirée* (Beta vulgaris *var.* vulgaris).

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

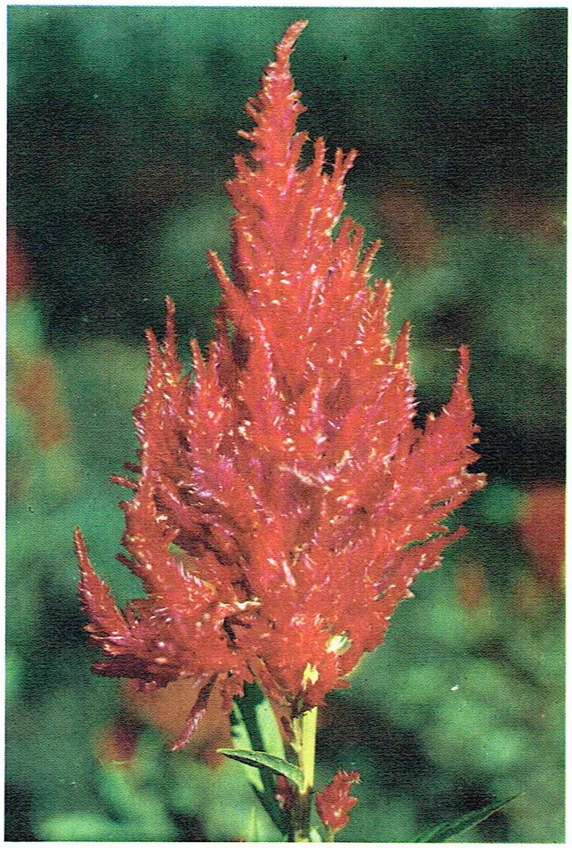

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ *Amaranthacées :* **Celosia argentea** *var.* **plumosa.** *Cette forme horticole présente des inflorescences jaunes ou rouges.*

des nervures (cardes) en relief et sont consommées comme légume. La forme sauvage est *B. vulgaris subsp. maritima*, des côtes du sud et de l'ouest de l'Europe.

L'épinard *(Spinacia oleracea)* est une plante annuelle, le plus souvent dioïque, haute de 30 cm à 1 m. Les feuilles constituent un excellent légume. Il en existe de différentes formes, mais elles sont le plus souvent triangulaires. Cette plante prospère sur les sols meubles et sous les climats frais et humides. On l'utilise beaucoup en Europe où elle a été introduite au XVI[e] siècle. Elle provient sans doute d'Asie centrale et occidentale (Caucase, Afganistan, Iran, Turkestan).

Nous évoquerons brièvement le genre *Salsola* (soudes), qui renferme des plantes des côtes et des déserts d'Europe, d'Asie occidentale et d'Afrique du Nord, ainsi nommées parce qu'on en tirait de la soude en vue de la fabrication du verre.

Les salicornes *(Salicornia)* vivent sur le littoral européen, en Asie centrale, dans l'est de la Sibérie et sur les côtes du Japon et de l'est des États-Unis. Ce sont des plantes succulentes, possédant des inflorescences articulées et des feuilles qui constituent de simples bourrelets autour des nœuds. La salicorne d'Europe *(Salicornia europaea)* a de jeunes tiges et rameaux qui sont parfois consommés comme légume. La salicorne arbustive *(Salicornia fruticosa)*, ou corail de mer, peut être utilisée comme fourrage.

La famille des *Amaranthacées (Amaranthaceae)* comprend des plantes le plus souvent herbacées, nitrophiles et xérophiles, à feuilles simples, entières sans stipules et à fleurs unisexuées ou hermaphrodites, avec un à cinq tépales; les étamines opposées aux tépales sont aussi nombreuses ou moins nombreuses qu'eux, les filets sont souvent soudés à la base et stipulés; l'ovaire, supère, bi- ou tricarpellé, contient un ovule basal, parfois plusieurs. Les fleurs peuvent être réunies en épis ou en grappes complexes munis de bractées colorées. Les fruits sont des akènes ou des capsules s'ouvrant par déchirure ou par un couvercle (pyxide), parfois des baies. On compte une soixantaine de genres et neuf cents espèces, qui manquent seulement dans les régions froides. Ce sont souvent de mauvaises herbes, mais certaines Amaranthacées sont utilisées en horticulture, parmi lesquelles *Celosia argentea* var. *plumosa,* à inflorescence rouge ou jaune; une variété fasciée de la même espèce (var. *cristata*), la crête de coq; la queue de renard *(Amaranthus caudatus),* plante tropicale qui possède de longues inflorescences rouges pendantes; les *Iresine,* à feuillage pourpre, et les *Alternanthera,* à feuilles panachées. Les deux derniers genres croissent dans les régions chaudes de l'Amérique.

La famille des *Nyctaginacées (Nyctaginaceae)* comprend surtout des arbres et des arbustes, parfois des

▼ **Celosia argentea** *var.* **cristata** *(crête de coq).*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

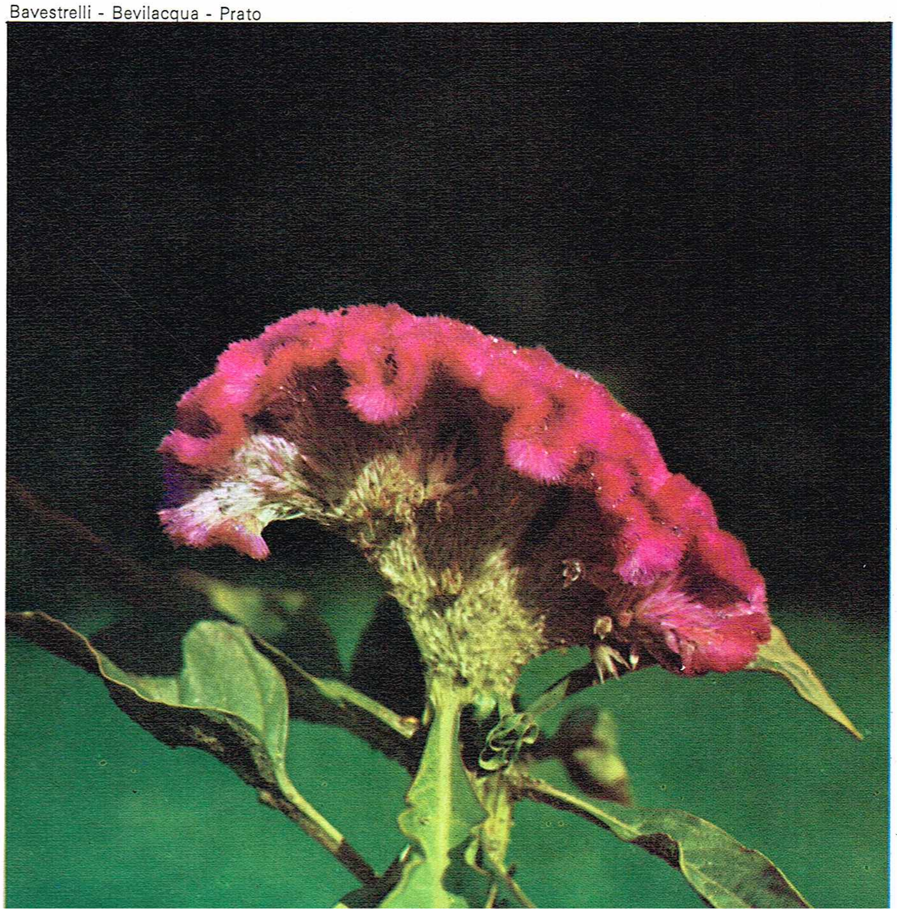

T. Sacco

▲ ***Importées d'Amérique du Sud, les bougainvillées se sont très bien adaptées dans les régions méditerranéennes.***

plantes herbacées, à feuilles opposées-décussées, simples, sans stipules et à fleurs à périgone de cinq tépales colorés concrescents à la base, parfois accompagnés de bractée sépaloïde. Les étamines sont en nombre variable. Le pistil est constitué généralement par un seul carpelle muni d'un ovule basal. Les fruits sont des akènes.

La famille comprend trente genres avec trois cents espèces répandues dans les régions tropicales et subtropicales. Elles sont souvent ornementales ; on en utilisait les racines et les feuilles en médecine.

Mirabilis jalapa, importé d'Amérique tropicale dès le XVI^e^ siècle, est une plante herbacée avec des fleurs à périgone tubulaire blanc, jaune ou écarlate, réunies en cymes entourées par un involucre foliacé et qui éclosent la nuit, d'où son nom de belle-de-nuit. Ses racines ont une action purgative, et servent comme succédané du jalap.

Les bougainvillées *(Bougainvillea)* sont d'origine sud-américaine. Ce sont des arbustes hauts de 6 à 10 m, à feuilles entières et à petites fleurs réunies par groupes de trois au sommet des branches et entourées par un nombre égal de grandes bractées axillantes, ovales-aiguës dont la couleur va du rose lilas au rouge-orangé. Nous citerons les *Bougainvillea glabra* et *spectabilis,* du Brésil. Le premier, à bractées aiguës, est souvent cultivé en pot.

La famille des *Phytolaccacées (Phytolaccaceae)* groupe dix-sept genres et plus de cent vingt espèces de plantes herbacées, arbustives ou arborescentes, des régions tropicales principalement américaines, et exceptionnellement extratropicales. Elles ont des feuilles entières et sans vraies stipules et des fleurs munies d'un périgone de quatre à cinq tépales verdâtres. Il y a par ailleurs un nombre variable d'étamines et un gynécée à un seul verticille de carpelles soudés au nombre de cinq au moins, souvent bien plus, et contenant en général chacun un ovule basal. Les fruits sont des baies, des akènes ou des capsules.

Le genre *Phytolacca,* le plus connu, est surtout américain, mais aussi asiatique et africain. Nous citerons *Phytolacca americana (P. decandra),* grande herbe vivace à grappes de fleurs blanchâtres ou roses, et à baies presque noires qui contiennent un suc rouge, lequel est utilisé parfois pour colorer le vin. Cette espèce provient de Floride ; elle est naturalisée dans la région méditerranéenne.

La famille des *Théligonacées (Theligonaceae)* ne renferme que les trois espèces du genre *Theligonum,* herbes méditerranéennes et asiatiques à feuilles stipulées, à périanthe d'un seul verticille et ovaire infère unicarpellé uniovulé, que l'on peut aussi rapprocher des Myrtales, spécialement des Haloragacées.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

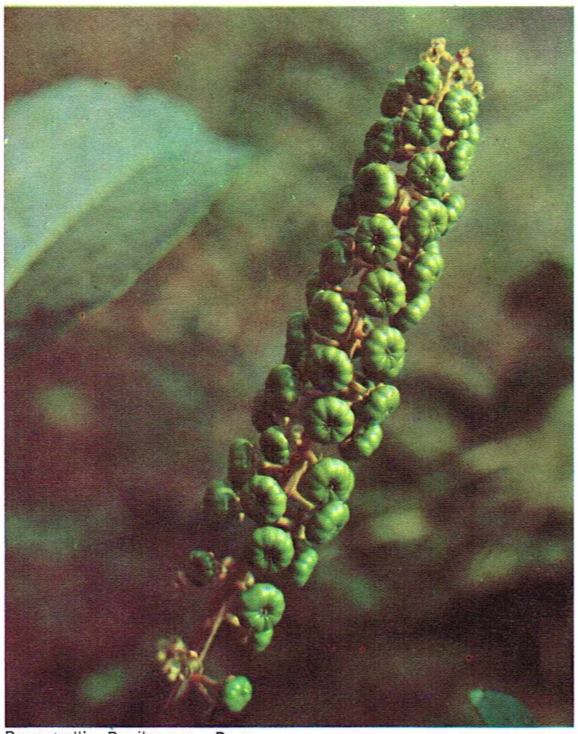

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Les *Aïzoacées (Aizoaceae)* ou *Mésembryanthémacées* sont des herbes annuelles ou vivaces, rarement des arbustes, à feuilles simples, entières, souvent charnues et opposées-décussées. Les fleurs, solitaires ou en inflorescences cymeuses, hermaphrodites en général, ont un périgone de cinq à huit lobes, auquel s'ajoutent souvent de nombreux pétales en un à six verticilles. Le périgone devient donc un calice et les fleurs acquièrent un périanthe différencié, comme nous le verrons dans d'autres familles de cet ordre. Les étamines sont souvent nombreuses et présentent des intermédiaires avec les pétales qui proviennent peut-être d'étamines transformées. L'ovaire, supère ou le plus souvent infère, est formé d'un nombre variable de carpelles délimitant autant de loges, dont chacune est en général pluriovulée. Les fruits sont fréquemment des capsules. Ce sont deux mille cinq cents espèces de plantes xérophiles d'Afrique du Sud et d'Australie, secondairement des régions tropicales, subtropicales et méditerranéennes.

On rencontre dans le midi de l'Europe *Aizoon hispanicum,* de taille très réduite, verdâtre, à ovaire supère, et dont les feuilles donnent par combustion des sels alcalins. *Tetragonia tetragonioides (T. expansa)* est la tétragone ou épinard d'hiver, que l'on cultive en Europe comme légume. Il n'a pas de pétales, et les carpelles sont uniovulés. Originaire des côtes de Nouvelle-Zélande, d'Australie, du Japon et des îles du Pacifique, c'est une plante herbacée ou un sous-arbrisseau à feuilles charnues. On le consomme comme les épinards.

Les mésembryanthèmes *(Mesembryanthemum)* sont des plantes succulentes, propres à l'Afrique du Sud, mais qui sont devenues subspontanées en Europe, avec des formes herbacées et arbustives. Les nombreuses espèces ont été réparties en cent vingt genres différents qui se placent en fait dans plusieurs sous-familles et tribus. L'ovaire est infère ou semi-infère. Les fleurs éclosent la nuit. Ce sont des plantes ornementales.

Mesembryanthemum crystallinum est une espèce couverte de papilles épidermiques gorgées d'eau, à aspect de cristaux de glace, qui est naturalisée en Europe méridionale. Il possède de belles fleurs blanches et fixe le sol avec ses racines. Ses feuilles fournissent un légume et, lorsqu'elles sont brûlées, des sels alcalins.

On trouve encore dans nos régions le figuier des Hottentots *(Mesembryanthemum edulis* ou *Carpobrotus edulis),* dont les fruits charnus (caractère du genre *Carpobrotus)* sont consommés par les populations d'Afrique du Nord. C'est une plante vivace, à tiges épaisses, charnues et prostrées, atteignant plusieurs mètres, qui habite les falaises et les rocailles du littoral. Ses feuilles, vert foncé, sont trigones et succulentes, avec une pointe qui rougit en automne. Ses fleurs, d'un diamètre de 8 à 12 cm, sont pourpres ou jaunes. Elle est originaire du Cap, mais s'est naturalisée sur les côtes d'Europe méridionale et occidentale, jusqu'en Irlande.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

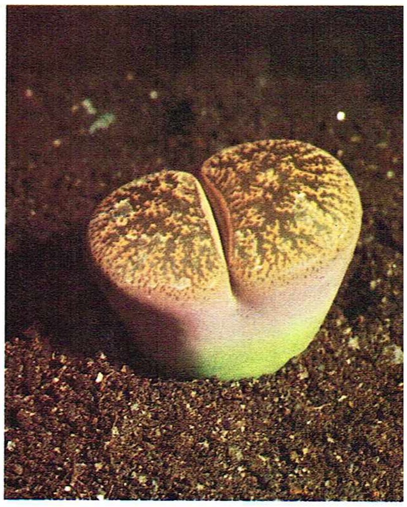

▲ ***Une Aïzoacée très simple :*** **Lithops lesliei.**

◀ **Phytolacca decandra,** ***inflorescence (en haut) et infrutescence non encore mûre (en bas).***

▼ ***Les fleurs de*** **Mesembryanthemum (= Carpobrotus) acinaniforme** ***rappellent les capitules des Composées.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

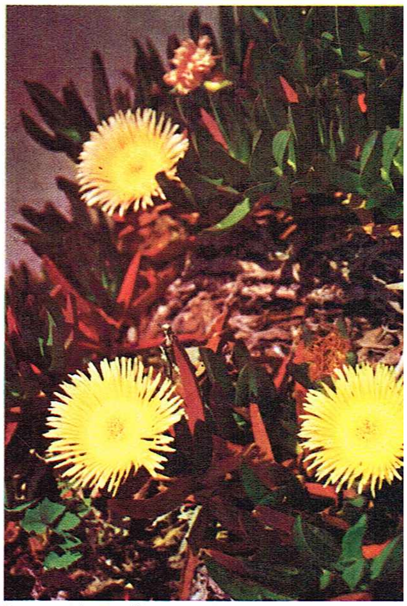

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ ***Figuier d'Inde*** **(Opuntia ficus-indica).**

▶▼ ***Groupe de Cactées communément appelées cierges (genre :*** **Cereus).**

C. Bevilacqua

▼ ***Fruits de deux espèces*** ***d'*****Opuntia.**

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

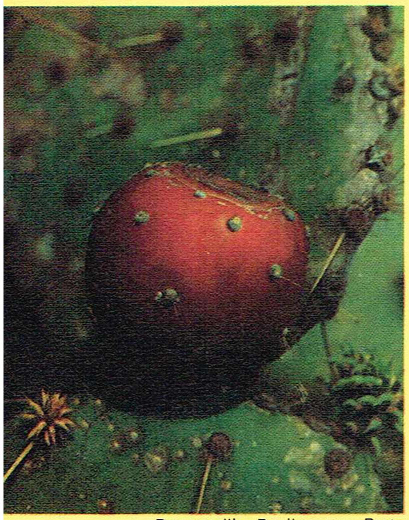

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

La famille des *Cactacées (Cactaceae)* ou *Cactées* groupe des plantes dites habituellement « grasses » à cause de leurs tiges d'aspect succulent; leur épiderme à cuticule épaissie et la réduction de leurs feuilles sont autant d'adaptations aux climats désertiques. Elles sont parfois épiphytes. Elles ont une tige de forme variable, sur laquelle se trouvent des zones particulières, les aréoles, épineuses et velues, qui sont des bourgeons très réduits dont les épines sont les feuilles. Elles portent les fleurs ou se développent en rameaux. Les feuilles peuvent être planes, cylindriques, squamiformes, mais elles sont le plus souvent transformées en épines ou manquent totalement. Les aréoles sont à leurs aisselles. Les fleurs, solitaires, très voyantes, et parfois parfumées, peuvent être de très courte durée, et s'ouvrent fréquemment la nuit. Elles possèdent un périgone constitué par de nombreux éléments libres disposés en spirale. Ceux-ci sont tous colorés, mais les externes peuvent l'être différemment et mériter le nom de sépales. Il y a de nombreuses étamines. L'ovaire est infère et uniloculaire, et il contient de nombreux ovules; sa paroi porte des aréoles à l'aisselle de feuilles réduites, comme les rameaux végétatifs. Les fruits, charnus, sont de forme variable. Les graines sont en général munies de périsperme, et leur embryon est courbe. Spontanées dans les déserts d'Amérique, du Canada à la Patagonie, avec le seul genre *Rhipsalis* en Afrique, à Madagascar et à Ceylan, les Cactées se sont naturalisées dans d'autres régions, en particulier sur le pourtour de la Méditerranée, arrêtées seulement par l'humidité, qu'elles supportent rarement bien, et les basses températures. Leur aspect curieux et ornemental les fait largement utiliser en horticulture. Leur classification est très délicate. Elles comportent au moins deux mille espèces en un nombre de genres très diversement apprécié, deux cents environ. Les caractères des graines et de l'embryon les rapprochent des Centrospermales, de même que la possession de pigments azotés (bêtacyanines). Des aréoles s'observent d'ailleurs chez des Phytolaccacées. La disposition spiralée des tépales est en revanche originale.

On cultive dans nos régions certaines des deux cents espèces du genre *Opuntia,* dont les tiges et les rameaux sont ronds *(Cylindropuntia)* et terminés par un bouquet de feuilles cylindriques, ou formés d'articles (« raquettes ») aplatis *(Platyopuntia)* ou intermédiaires, et munis dans les deux cas de petites feuilles charnues, rapidement caduques, à leur extrémité. Les aréoles sont souvent pourvues de sortes de soies barbelées ou glochides. Les fleurs ont un beau périanthe blanc, jaune ou rouge.

Le figuier d'Inde *(Opuntia ficus-indica)* possède des raquettes vertes, glauques et plus ou moins épineuses, et des fleurs jaunes. Il est naturalisé en Europe méditerranéenne depuis environ quatre cents ans, et donne des fruits comestibles de couleur orangée, ombiliqués à l'extrémité, à écorce coriace, parsemés d'aréoles. La pulpe est douce, aromatique et contient de nombreuses graines. On utilise cette plante pour mettre en culture des terrains vierges comme des coulées volcaniques. Elle peut donner deux récoltes de fruits par an. Leur consommation entraîne une coloration rouge de l'urine.

Le figuier de Barbarie *(Opuntia compressa = O. vulgaris),* originaire du nord-ouest de l'Amérique du Nord, a été introduit en Espagne, en Afrique du Nord, en Asie, dans le midi de l'Europe et jusqu'au sud de la Suisse. Cette espèce est plus petite et plus prostrée que la précédente. Elle possède des fleurs jaunes et des fruits rouges, qui sont eux aussi comestibles. On cultive également en Europe méridionale *Nopalea cochinellifera,* voisin des *Opuntia,* et qui est parasité par une cochenille *(Coccus cacti);* le tissu adipeux de la femelle et ses œufs renferment une matière colorante *(carmin de cochenille).* La plante est cultivée en Espagne et aux îles Canaries pour l'obtention de ce produit utilisé encore en peinture et pour certaines colorations histologiques (cellulose, chromosomes). *Opuntia tomentosa,* aussi naturalisé en Europe méditerranéenne, a servi également à l'élevage de cette cochenille.

Les *Cereus* sont un genre cultivé en Europe depuis le XVII[e] siècle. Ces plantes ont une tige dont la forme rappelle effectivement une série de cierges, avec des rameaux latéraux, sillonnés de côtes pourvues d'aréoles superposées. Les fleurs, nocturnes, ont des couleurs brillantes. Les baies peuvent être comestibles. Nous citerons notamment *C. peruvianus,* du Brésil et de l'Uruguay, de grande taille (15 m), très épineux, à fleurs blanches intérieurement et roses au dehors, le cierge bleu *(C. azureus),* d'Argentine et du Brésil, à tige fine, fortes épines noires et fleurs jaunâtres, et le cierge jamacaru *(C. jamacaru),* du Brésil, à grandes fleurs blanches, très prospère sur la Côte d'Azur. Les aiguilles des plantes âgées atteignent chez ce dernier 20 cm de long.

La reine des nuits *(Selenicereus grandiflorus),* des Antilles, a une tige en forme de liane et possède des fleurs blanches nocturnes à tépales externes saumon. Elle a en outre des épines jaunes entourées de poils blancs et renferme des alcaloïdes cardiotoniques.

Les *Echinocereus,* d'Amérique du Nord, sont le plus souvent de forme globuleuse. Ces plantes rustiques,

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ **Echinocactus grusonii,** ***espèce à tige globuleuse.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

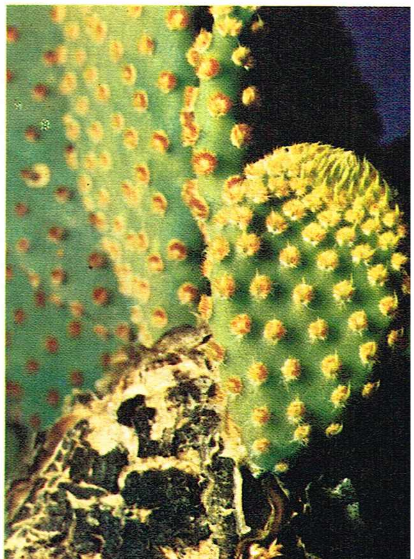

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▼ ***A gauche :*** **Mamillaria gracilis** ***var.*** **pulchella,** ***à épines blanches. A droite : raquette d'*****Opuntia.** ***On observera que cette espèce est dépourvue d'épines.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *A gauche :* Echinocactus palmeri, *en fleurs. A droite : fleurs d'*Echinocactus grusonii *cultivar* hildmanni.

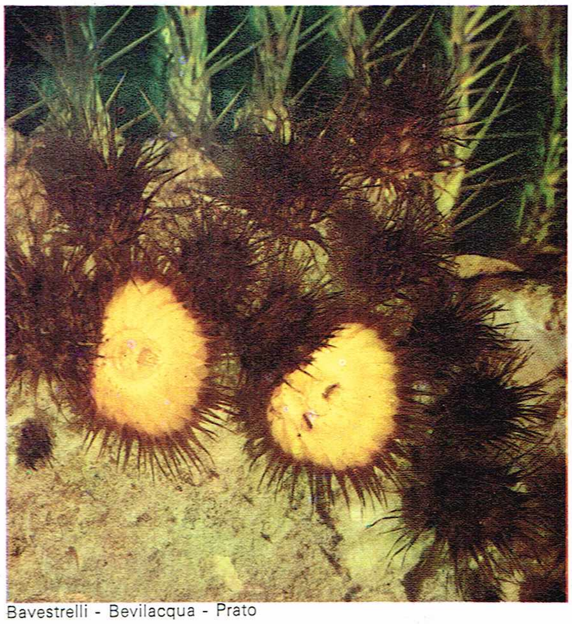

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

que l'on cultive beaucoup, ont de belles fleurs jaunâtres ou pourprées, grandes, de longue durée, et épineuses sur l'ovaire. Parfois, leurs aréoles sont couvertes de longues soies ou encore épineuses. Elles sont très ramifiées dès la base et certains buissons ainsi formés comportent deux ou trois cents rameaux, comme chez *E. stramineus*.

Le genre *Echinocactus* groupe des espèces à tige également globuleuse, déprimée au sommet, où éclosent pendant une courte période les fleurs, jaunes, entourées par une sorte de bourre et par des écailles. Nous citerons en particulier *E. grusonii,* à épines jaune soufre, qui a l'aspect d'une grosse balle dorée.

▶ *Les fleurs des Cactacées sont parmi les plus belles de la flore tropicale.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

M. Pasotti

▶ *A gauche : détail d'un* Ferocactus *(sous-genre d'*Echinocactus*). A droite : quelques spécimens de* Mamillaria magnimamma.

D'autres espèces ont aussi une forme globuleuse et une tige à côtes verticales aréolées. Du sommet, très velu, les fleurs émergent et forment un *céphalium. Melocactus communis,* de la Jamaïque, à fleurs rouges, est appelé aux Antilles « tête de Turc ».

Chez les *Mamillaria,* qui sont environ trois cents, la tige, basse, est hémisphérique ou cylindrique et courte, avec des tubercules mammiformes qui ne sont que des côtes divisées transversalement. Elles portent à leur sommet des aréoles à épines rayonnantes, de teintes variées. Les fleurs sont petites et colorées en jaune, rouge ou blanc, et naissent à l'aisselle ou au sommet des aréoles. Les fruits sont des baies qui prennent un an pour mûrir, ce qui fait qu'on peut avoir sur une même plante des fleurs et des fruits rouges. Dans la nature, la prolifération est intense, et une centaine d'individus et plus se trouvent parfois réunis en colonie.

On cultive par exemple, sur un mélange de terreau, de morceaux de calcaire et de brique pilée, *Mamillaria elongata,* dont les épines sont rayonnantes, *M. spinosissima,* à épines rigides, et *M. elegans,* à épines blanches, qui, comme tout un ensemble d'espèces de ce genre, donne un latex.

Les *Gymnocalycium,* à tige globuleuse et côtelée, les côtes étant découpées vers le haut en tubercules superposés, sont cultivés pour leurs longues fleurs blanc rosé, qui durent longtemps. La tige hémisphérique sans épines de *Lophophora williamsii,* ou peyotl, du sud des États-unis et du Mexique, contient un alcaloïde hallucinogène, la mescaline, qui n'est pas indolique, à la différence des autres drogues de ce type. Le peyotl est découpé en tranches et mastiqué par les Indiens ; les visions colorées sont typiques des hallucinations qu'il provoque, et Rouhier, vers 1920, l'appelait « la plante qui fait les yeux émerveillés ».

Le genre *Carnegia* comporte une seule espèce, *C. gigantea,* de l'Arizona et du nord du Mexique, nommé en l'honneur de l'industriel Carnegie, et qui dépasse 15 m. Il caractérise les déserts de l'Arizona. Le tronc est cannelé, épineux, ramifié comme un candélabre. Les fleurs, de couleur crème et éphémères, émergent au sommet de la tige. Les fruits, jaunes et à pulpe rouge, sont excellents et connus sous le nom de pithaya ; on en fait des sirops, et on en tire par fermentation une boisson excitante.

Les *Echinopsis* ont une tige globuleuse, cannelée et épineuse ; les fleurs, qui ne sont pas rassemblées au sommet en un céphalium, à la différence des *Melocactus* par exemple, éclosent la nuit et durent peu.

On cultive aussi largement les *Zygocactus* ou « épiphyllums », à tiges étalées, rameuses, articulées, aplaties et sans épines, et à fleurs rouges. Ces espèces vivent au Brésil en épiphytes sur les arbres tropicaux. La forme la plus utilisée est l'hybride *Zygocactus* × *Rueckerianus,* qui fleurit l'hiver. Les deux espèces de *Nopalxochia,* du Mexique, et leurs hybrides sont les « phyllocactus », dressés, à grandes fleurs jaunes ou rouges. Les *Pereskia,* de Floride et de l'Amérique du Sud, sont exceptionnels, car ils ont des feuilles charnues de forme normale laminaire, avec pourtant des aréoles axillaires. *Pereskia aculeata* est cultivé en Amérique pour ses fruits comestibles. Les *Pereskiopsis,* du Mexique et du Guatemala, ont aussi des feuilles aplaties, mais possèdent des glochides. Ils semblent intermédiaires entre les *Pereskia* et les *Opuntia.*

La famille des *Portulacacées (Portulacaceae)* comprend dix-neuf genres et mille cinq cents espèces de plantes herbacées ou rarement arbustives, à feuilles généralement simples et charnues. Les fleurs sont le plus souvent petites et n'ont fondamentalement qu'un périgone fait de quatre à cinq tépales. Rarement solitaires, elles sont généralement réunies en inflorescences cymeuses. Deux bractées situées en dessous de la fleur simulent un calice. Tépales et bractées sont libres ou plus ou moins soudés à la base. Les étamines sont en nombre égal ou multiple de celui des tépales. L'ovaire est supère ou semi-infère, avec deux à huit carpelles et stigmates ; d'abord pluriloculaire, il devient uniloculaire avec un placenta central par destruction des cloisons. Les fruits sont le plus souvent des capsules contenant de nombreuses graines. L'embryon est courbe et entoure un périsperme. La plupart des espèces se trouvent dans les îles du Pacifique et les Andes. De là, l'expansion s'est faite dans les régions sèches tropicales et subtropicales. Seul *Montia* est hygrophile. Le nom de la famille est tiré de celui du genre *Portulaca,* qui comprend cent espèces au moins, dans les régions chaudes des deux hémisphères.

Portulaca oleracea (pourpier potager) est une plante herbacée assez succulente, à tige couchée et à rameaux ascendants, avec des fleurs jaune doré et des feuilles charnues opposées ou alternes et ovales-oblongues. Il est

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Le pourpier potager*** *(Portulaca oleracea)* ***est une plante herbacée fréquente dans les lieux secs et dans les champs. On peut la consommer en salade.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ **Portulaca grandiflora :** ***cette espèce, originaire d'Amérique du Sud, est cultivée pour la beauté de ses fleurs dans nos régions. Celles-ci présentent des teintes variées et parfois des formes doubles.***

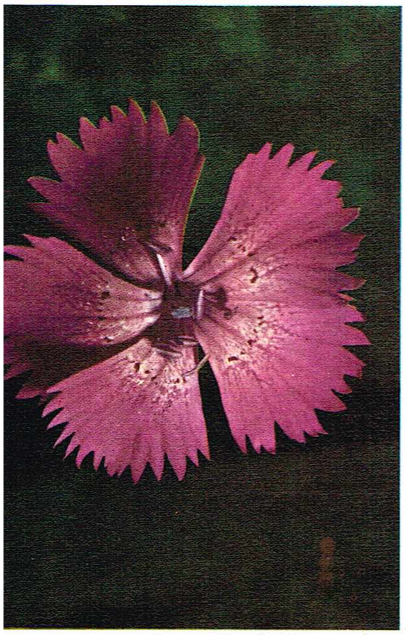

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

originaire d'Eurasie. On le consomme parfois encore en salade. *P. grandiflora*, d'Amérique du Sud, est souvent cultivé sous des formes à fleurs doubles de couleur rose, pourprée, orangée ou violette. Il est parfois subspontané près des habitations.

Le genre *Montia* comporte cinquante espèces, surtout américaines, dont deux sont présentes en France. *M. minor* est annuel, a une tige et des feuilles charnues, et de petites fleurs solitaires blanches, opposées aux feuilles (ramification sympodiale). Il vit dans les lieux humides; *M. fontana (M. rivularis)*, ou mouron des fontaines, est plus rare, vivace et souvent flottant dans les ruisseaux de montagne. Ses fleurs sont en petites cymes axillaires au niveau de chaque nœud à deux feuilles. Ces espèces sont parfois mangées en salade.

La famille des *Basellacées (Basellaceae)* comprend une vingtaine d'espèces tropicales, parfois cultivées dans d'autres régions à des fins alimentaires. Ce sont des plantes herbacées rampantes, à feuilles charnues, souvent à rhizome ou à tubercule; leurs fleurs, pourvues de bractées, sont réunies en épis, en grappes ou en panicules. Par ces fleurs, elles sont voisines des Portulacacées, mais l'ovaire est uniloculaire et à un seul ovule basal. Parmi les cinq *Basella*, africains et asiatiques, on cultive *Basella alba,* ou épinard de Malabar, pour ses feuilles comestibles.

Nous ne manquerons pas de citer, représentant deux petits genres, *Boussingaultia cordifolia* et *Ullucus tuberosus*, dont on utilise les tubercules comme des pommes de terre au Pérou.

L'importante famille des *Caryophyllacées (Caryophyllaceae)* comprend quatre-vingts genres et deux mille espèces de plantes herbacées, rarement arbustives, avec des nœuds bien évidents, et des feuilles généralement opposées, souvent unies vers le bas, entières, stipulées ou non. Leurs fleurs, rarement solitaires, le plus souvent en inflorescences variées constituées essentiellement de dichasiums, ont, dans leur ensemble, un calice et une corolle bien différenciés et formés en général de cinq éléments chacun. Elles sont donc exceptionnelles parmi les fleurs des Monachlamydées. Les sépales sont fréquemment réunis à la base, et les pétales sont libres. Les étamines sont généralement en nombre double de celui des pétales, et sont alors disposées en deux verticilles, dont le premier, qui est en fait le deuxième déplacé secondairement, se trouve opposé à celui des pétales (obdiplostémonie). Il peut n'y avoir qu'un seul verticille staminal épipétale, ou moins d'étamines que de pétales. L'ovaire, supère, possède des ovules nombreux en placentation axile, qui paraissent portés par une colonne centrale dans le fruit, du fait de la disparition des cloisons. Il y a deux à cinq carpelles. La pollinisation se fait par les Insectes. Les fruits sont le plus souvent des capsules, avec des graines à périsperme dont l'embryon est courbé autour de l'albumen amylacé. Cette famille regroupe de nombreuses espèces de plantes présentes surtout dans les régions tempérées de l'hémisphère Nord. Elles s'éloignent des représentants de l'ordre des Centrospermales par la possession d'une corolle et l'absence de pigments azotés (bêtacyanines). Elles s'en rapprochent par leur graine et leur embryon.

L'œillet des Chartreux **(Dianthus carthusianorum)** *croît, en Europe, dans les pelouses et les bois.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Les plus belles Caryophyllacées appartiennent à la sous-famille des *Silénoïdées*, qui ont les sépales unis en tube. Le genre *Dianthus* (œillets) compte trois cents espèces d'Eurasie et des montagnes de l'Afrique, mais particulièrement de la région méditerranéenne. Ses espèces sont cespiteuses, à feuilles linéaires, planes ou canaliculées supérieurement, et à tiges articulées et noueuses. Les fleurs possèdent un « calicule » de bractées sous le calice tubuleux à cinq dents, cinq pétales triangulaires et pourvus d'un onglet étroit et un gynécée à deux carpelles. La structure de la fleur des œillets ne permet que l'entrée de la trompe des papillons, les autres Insectes ne pouvant atteindre le nectar au fond du calice long et étroit. Ce sont des plantes typiquement xérophiles.

L'œillet de poète *(Dianthus barbatus)*, qui est spontané dans les forêts des montagnes d'Europe méridionale, a des fleurs rouges tachetées de blanc et réunies en tête cymeuse. Il est souvent cultivé. On trouve dans les prairies d'Europe centrale et surtout septentrionale l'œillet des Chartreux *(Dianthus carthusianorum)*, dont les fleurs rouges sont également agglomérées en tête.

L'œillet des fleuristes *(Dianthus caryophyllus)* habite spontanément, avec des formes parfumées ou non, sur les rochers et les murs du sud de l'Europe et d'Afrique du Nord, du niveau de la mer jusqu'à 2 300 m d'altitude. Ses feuilles sont glauques, canaliculées, et ses fleurs, de couleur rose violacé, éclosent de mai à octobre. C'est de cette espèce que semblent dériver les œillets cultivés sous des variétés diverses, et dont le commerce a pris une ampleur spéciale au milieu du siècle dernier, quand on a sélectionné des races qui pouvaient fleurir plusieurs fois dans la même saison. On cultive des formes à pétales dentés le plus souvent, entiers seulement chez les œillets flamands, diversement colorés et panachés. On utilise les œillets pour faire des bordures dans les jardins. Pour le commerce des fleurs coupées, ils occupent des milliers d'hectares dans le sud de l'Europe, et particulièrement dans le midi de la France et en Italie. Ils ont besoin d'un sol argilo-siliceux bien amendé. Ils sont reproduits par boutures, qu'on obtient à partir des bourgeons axillaires.

On trouve, de l'Italie aux Tatras, *Dianthus plumarius*, à fleurs odorantes blanc rosé. On le cultive souvent, surtout sous forme d'hybrides.

Les *Gypsophila* ont deux carpelles comme les œillets mais pas de calicule. Il s'agit de cent vingt-six espèces répandues de la région méditerranéenne à l'Asie centrale, surtout en montagne. Certaines préfèrent les terrains gypseux. Ce sont des plantes herbacées, à tige noueuse, avec des inflorescences en panicule cymeuse, parfois très grandes, et des fleurs de couleur blanche, rose ou rouge. La gypsophile rampante *(Gypsophila repens)* se rencontre dans les Alpes, les Pyrénées et le Jura, elle a des fleurs blanches ou roses; on la cultive dans les jardins, avec *Gypsophila elegans*, originaire du Caucase, et *G. paniculata*, d'Europe méridionale. Leur grande et fine inflorescence a fait donner le nom de « brouillards » à ces deux dernières espèces.

Nous citerons aussi les genres *Saponaria* et *Tunica*. Ce dernier, avec le petit *T. saxifraga* et *T. prolifera*, plus haut, peuple les endroits arides. Les *Tunica* sont voisins des œillets, mais leur calicule est scarieux, et leur calice anguleux. Les saponaires ont aussi deux carpelles et des pétales à deux languettes longitudinales sur l'onglet. L'inflorescence est souvent en tête. *S. officinalis*, à fleurs rose clair, est commun; sa racine, riche en saponines,

Rapho

◀ *L'œillet des fleuristes* (Dianthus caryophyllus) *est cultivé dans le midi de la France pour le commerce des fleurs coupées.*

▼ *A gauche : une variété panachée de* Dianthus caryophyllus. *A droite : gypsophile rampante* (Gypsophila repens), *plante fréquente dans les endroits sablonneux de haute montagne.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *A gauche : inflorescences de* Lychnis flos-Jovis. *A droite : le silène du Valais* (Silene vallesia).

▼ *Le compagnon blanc* (Silene alba = Lychnis dioica).

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

peut servir au nettoyage. Il est souvent cultivé dans les jardins et a parfois des fleurs doubles.

On rencontre communément dans nos régions, en plaine comme en montagne, toute une série de *Lychnis*, qui sont des plantes herbacées, annuelles, bisannuelles ou vivaces. Leurs fleurs sont souvent parfumées, avec un calice tubuleux et une corolle à cinq pétales. Ces derniers possèdent à la limite de l'onglet et du limbe deux ou quatre petites languettes transversales. Des nectaires basaux, autour de l'ovaire, ne sont accessibles qu'aux Insectes à longue trompe. Il y a cinq carpelles et par conséquent un nombre égal de styles ; le fruit s'ouvre par cinq valves en forme de dents, en haut de la capsule. Ces plantes portent parfois des poils glanduleux qui produisent des substances visqueuses.

Nous citerons la fleur de coucou *(Lychnis flos-cuculi)*, à fleurs roses à pétales déchiquetés. Elle habite communément les prairies marécageuses de toute l'Europe. *Lychnis coronaria*, ou coquelourde, d'Europe méridionale et d'Asie occidentale, est gris cendré, laineux, à fleurs rouge intense ; il est souvent cultivé. *L. viscaria*, du centre et du nord de l'Europe et de l'Asie, est entièrement visqueux dans sa partie supérieure.

Nous passerons aux silènes *(Silene)*, qui sont voisins des *Lychnis* mais ont trois carpelles et trois styles, plus rarement cinq carpelles et cinq styles. Leur fruit s'ouvre par six ou dix dents. Le compagnon rouge *(Silene dioica = Lychnis diurna)* et le compagnon blanc *(Silene alba = Lychnis dioica)* sont de belles plantes vivaces, poilues, hautes de 30 à 60 cm et à feuilles ovales-aiguës. Les feuilles inférieures sont rétrécies en un pétiole ailé. Les fleurs sont grandes, rouges dans le premier, blanches dans le second. Tous deux sont dioïques, ce qui est exceptionnel parmi les Caryophyllacées. Les fruits possèdent dix dents qui sont enroulées vers l'arrière à la maturité. Le premier préfère les terrains humides, le second les lieux incultes et secs.

Le silène enflé *(Silene vulgaris = S. inflata)* est vivace et très commun, jusqu'en montagne. Il possède des fleurs blanches, parfois rosées, dont les calices ont des nervures réticulées, sont renflés en vessie et pourprés ou jaunâtres. Les cinq pétales sont profondément bifides. Les styles sont au nombre de trois. Le silène acaule *(Silene acaulis)* a des fleurs le plus souvent rouges, dépassant du gazon dense formé par les tiges très courtes. Il est répandu dans les Pyrénées, les Alpes, la zone arctique de l'Europe et de l'Amérique et les montagnes Rocheuses. Cette distribution géographique s'explique aisément grâce à la dérive des continents et à l'existence des périodes glaciaires.

Sont également montagnards le silène des Alpes, le silène des rochers et le silène du Valais *(Silene alpestris, S. rupestris, S. vallesia)*. Le premier a de belles inflorescences glanduleuses de fleurs blanches, et n'existe pas en France, mais en Italie et dans les Balkans ; le deuxième a des fleurs couleur chair et se trouve dans les montagnes d'Europe centro-occidentale et en Scandinavie, le troisième possède des fleurs à pétales roses au-dessus et rougeâtres en dessous, et est essentiellement alpin. Le silène penché *(S. nutans)* est très répandu en Europe, en Asie centro-septentrionale et au Japon ; il doit son nom spécifique au fait que ses inflorescences roses sont légèrement pendantes d'un même côté.

Étant donné que les silènes sont très abondants dans les prés aussi bien en plaine qu'en montagne, on peut les utiliser comme un fourrage pour le bétail. Ils sont aussi souvent cultivés, surtout *S. pendula*, d'Italie et de Crète, qui se naturalise fréquemment. Il est velu, ses tiges sont couchées et ses fleurs roses sont isolées aux aisselles des feuilles.

La nielle des blés *(Agrostemma githago)* est en France l'unique représentant du genre *Agrostemma*. C'est une plante herbacée à tige et à feuilles revêtues de poils mous et blanchâtres. Ses fleurs rouges ont un calice à dents dépassant les pétales. Ceux-ci ont sur leur onglet des languettes longitudinales comme les œillets. Cette espèce infestait les champs, surtout ceux de céréales, mais elle est en voie de disparition comme beaucoup de messicoles (plantes des moissons). Il faut éviter que ses graines ne passent dans la farine, car elles pourraient provoquer des intoxications à cause des saponines qu'elles contiennent. On s'en débarrasse en utilisant des herbicides sélectifs (qui respectent les Graminées).

C'est au milieu où il vit, les terrains sablonneux et arides des régions froides et tempérées, en particulier ceux des montagnes, que le genre *Arenaria* doit son nom. Avec lui nous entrons dans le groupe des Caryophyllacées à sépales libres (sous-famille des *Alsinoïdées*). Ce genre comprend de petites plantes herbacées formant des ensembles cespiteux et intriqués, à fleurs blanches, aussi bien sur sols siliceux *(Arenaria balearica)* que sur sols calcaires *(Arenaria grandiflora)*. Ce sont des plantes cultivées dans les jardins de rocailles.

Les *Sagina* sont voisins des *Arenaria* mais ont quatre à cinq styles au lieu de trois, et des feuilles en alêne. Certains sont tétramères. On trouve surtout *S. procumbens*, tétramère, dans toute l'Europe et sur la côte ouest du Canada. *S. pilifera* et surtout *S. subulata* sont cultivés dans les jardins alpins où ils forment des tapis herbeux. Le premier est endémique de Corse et de Sardaigne, le

second est au contraire très répandu dans l'ouest et le centre de l'Europe ainsi qu'en Amérique du Nord. *S. apetala* est tétramère et peut être apétale. Il est aussi très commun en Europe et dans le nord de l'Asie. Les sagines servent souvent aussi dans les jardins à remplir les intervalles entre des dalles.

Les *Cerastium* sont des plantes à croissance rapide, fréquemment cultivées dans les jardins. Elles sont herbacées et fleurissent d'avril à août. Elles possèdent souvent de belles fleurs blanches. Leurs petites tiges sont parfois argentées et cotonneuses, leur feuillage est de petite taille. Tel est *Cerastium tomentosum* des Apennins et de Sicile, que l'on trouve dans les bois de Conifères et dans les hêtraies. Il est souvent cultivé et parfois naturalisé. On trouve en revanche dans les endroits pierreux d'Europe, du Maroc, d'Asie tempérée et d'Amérique du Nord la céraiste des champs *(C. arvense)*, l'espèce la plus haute, qui atteint 30 à 40 cm. On rencontre encore dans les champs *C. glomeratum* à fleurs en cymes serrées. La grande rapidité de croissance des céraistes les rend précieuses dans les jardins pour obtenir une végétation en tapis, mais elles sont envahissantes.

Les stellaires *(Stellaria)* ont un développement rapide et forment des coussinets denses dans les zones boisées. Leurs fleurs ont un calice dialysépale et cinq pétales bifides un peu aplatis, qui confèrent à l'ensemble l'aspect étoilé qui a suggéré leur nom. On trouve, surtout le long des cours d'eau, *S. uliginosa*. Dans les lieux humides des montagnes, *S. nemorum*. *S. palustris* se voit dans les marécages. *S. holostea* est l'une des espèces les plus communes, glabre inférieurement, à tiges et feuilles cassantes, à grands pétales; elle se trouve dans les bois de toute l'Europe, sauf au nord de la Scandinavie. *S. graminea* est voisin mais a les pétales courts. Une autre espèce, *S. media*, ou mouron des Oiseaux, est une des plantes les plus répandues du globe. Elle possède de petites tiges tendres, retombantes, parcourues d'une rangée de poils alternant d'un nœud à l'autre. Les Oiseaux consomment ses graines.

On cultive dans nos jardins, surtout sur les sols siliceux et jusque dans l'étage montagnard pour l'une d'elles, deux espèces communes du genre *Spergula*, avec lesquelles nous arrivons à la sous-famille des *Paronychioïdées*, dont les feuilles possèdent des stipules. Les *S. arvensis* et *pentandra* ont des feuilles longues et étroites. Comme celles des rameaux axillaires se développent sans que ces rameaux s'allongent, il se forme des faisceaux de feuilles à chaque nœud. Les stipules sont scarieuses. Le nom du genre dérive du latin *spargere*, semer, ce qui fait allusion à la facilité avec laquelle ses représentants disséminent leurs graines. La première espèce est une plante fourragère dans les régions sablonneuses pauvres, particulièrement dans les pays nordiques.

Les *Spergularia* sont proches des *Spergula*, mais n'ont pas de vrais fascicules de feuilles et sont pourvus de trois carpelles au lieu de cinq. Ils habitent souvent les lieux salés et le littoral.

Les espèces du genre *Paronychia* sont herbacées, cespiteuses, et pourvues de masses de petites fleurs blanches entourées d'assez grandes bractées scarieuses et argentées. Comme plusieurs autres genres voisins, elles ont des akènes et non des capsules. Certaines espèces sont utilisées dans les jardins de rocailles et les jardins du littoral.

Euphorbiales ou Tricoques

Wettstein et Rendler ont réuni dans l'ordre des Tricoques les familles des *Euphorbiacées, Daphniphyllacées, Dichapétalacées, Buxacées* et *Callitrichacées*. Nous suivrons cette conception de l'ordre, sans oublier que les avis diffèrent sur sa constitution car des caractères qui unissent les familles que nous venons de citer à celles d'autres ordres amènent certains auteurs à les placer ailleurs. Les Euphorbiacées sont ainsi rapprochées des Géraniales, ou même des Malvales.

Les Tricoques regroupent des plantes herbacées ou ligneuses. Les fleurs, généralement unisexuées, sont dépourvues de périanthe ou ont un périanthe simple et sépaloïde; elles présentent rarement un périanthe double, et, dans ce cas, la corolle est dialypétale. L'ovaire est généralement tricarpellé, syncarpe, et possède un ou deux ovules pendants dans chaque loge.

La famille des *Euphorbiacées (Euphorbiaceae)* comprend deux cent quatre-vingt-dix genres, avec environ sept mille cinq cents espèces. On rencontre en France environ soixante espèces groupées en trois genres. Ce sont des plantes à peu près cosmopolites, mais que l'on trouve surtout en Amérique et en Afrique tropicales; elles manquent dans les régions arctiques. Les espèces européennes sont herbacées, mais la plupart des Euphorbiacées sont des arbres ou des arbustes; il existe cependant quelques lianes.

Les feuilles sont le plus souvent alternes et ont des stipules qui peuvent être transformées en glandes et peut-être en épines. Les fleurs, unisexuées, sont réunies en

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Les* Cerastium *se reconnaissent à leurs petites fleurs blanches à cinq pétales.***

▼ ***A gauche : inflorescences d'euphorbe petit-cyprès* (Euphorbia cyparissias). *A droite : groupe d'inflorescences d'*Euphorbia dendroides.**

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

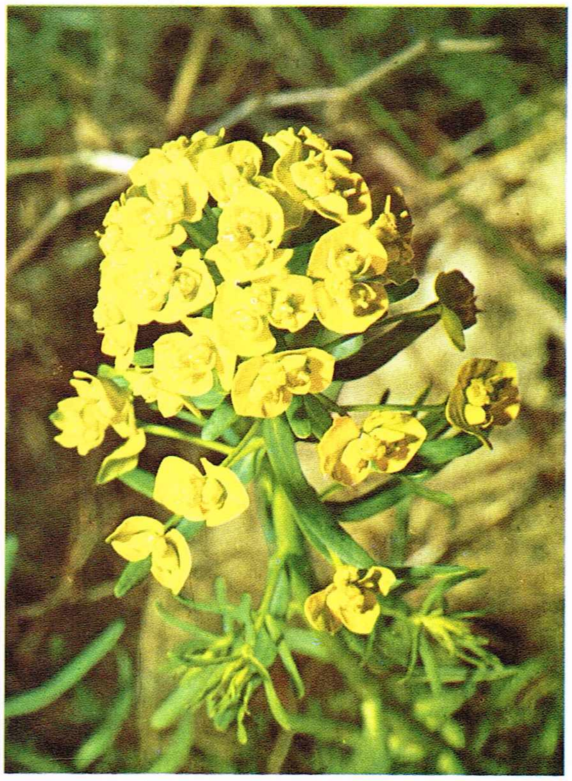

G.P. Mondino

épis, en grappes ou en cyathiums, ces derniers étant des inflorescences dont nous parlerons plus en détail à l'occasion des euphorbes proprement dites. Il y a un calice, et la corolle manque souvent. L'ovaire est supère, et le plus souvent tricarpellé, syncarpe et triloculaire; il y a, dans chaque loge, en placentation axile, un ou deux ovules anatropes à micropyle dirigé vers le haut et à raphé central; dans la région du micropyle, se trouve souvent un petit relief qui forme ensuite un coussinet charnu sur la graine, la caroncule; les styles sont généralement au nombre de trois, un par carpelle.

Les fruits sont des capsules ou mieux des schizocarpes tricoques, c'est-à-dire des fruits secs qui se divisent en trois méricarpes ou coques à maturité, en laissant une colonne centrale. Chaque coque s'ouvre alors en deux valves. Cette disposition rappelle ce qui se passe chez les Géraniacées.

Certaines Euphorbiacées sécrètent du latex (euphorbes, hévéas) dans des laticifères. Ceux-ci sont composés de cellules très allongées, ramifiées, multinucléées, qui s'étendent dans toute la plante, comme chez *Euphorbia,* ou dérivent de la fusion de nombreuses cellules qui, dans leur ensemble, forment des canaux ou laticifères articulés, avec des restes des membranes transversales. L'appareil sécréteur peut encore être constitué d'une suite de cellules à latex *(Micrandra)*.

Le latex contient des carbures terpéniques susceptibles d'être polymérisés et peut avoir des applications pratiques (caoutchouc naturel). Il montre des grains d'amidon de forme caractéristique, qui peuvent se présenter comme des bâtonnets allongés, à extrémités renflées, ce qui leur donne donc l'aspect d'os long (grains « en tibia »). Il n'y a pas de sécrétion de latex chez les Euphorbiacées à deux ovules par loge.

Il existe des espèces xérophiles qui ont un aspect éricoïde (en Australie) ou cactiforme (en Afrique). D'autres enfin, comme les *Phyllanthus,* possèdent des phylloclades, c'est-à-dire des rameaux à aspect de feuilles composées. Les genres qui comprennent le plus grand nombre d'espèces sont *Euphorbia, Acalypha, Croton* et *Phyllanthus*.

Ce dernier genre a deux ovules par loge; il est le plus important, avec quatre cent quatre-vingts espèces, de la sous-famille des *Phyllanthoïdées*. Les autres genres dont nous allons nous occuper n'ont qu'un ovule par loge et appartiennent à la sous-famille des *Euphorbioïdées*.

Les euphorbes *(Euphorbia)* doivent leur nom à Euphorbe, médecin du roi Juba de Mauritanie, qui les introduisit, dit-on, en médecine. Il en existe mille six cents espèces environ, dont une cinquantaine dans nos régions. Le genre est à peu près cosmopolite, mais beaucoup d'espèces ont un aire restreinte (endémiques). Ce sont des plantes herbacées, des arbustes ou des arbres. Elles ont des feuilles alternes ou opposées, de taille variable, parfois très réduites ou nulles, souvent avec des stipules auxquelles peuvent correspondre des épines. Il existe aussi des espèces aphylles et succulentes, semblables aux Cactacées, surtout en Afrique. Comme les huit autres genres de la tribu des Euphorbiées, les euphorbes ont un seul ovule par loge carpellaire, et leur inflorescence élémentaire est le *cyathium*. Au centre de celui-ci se trouve une fleur femelle réduite à un ovaire, pendant; en dessous de l'ovaire se voit parfois un disque glandulaire que l'on considère comme le périgone; cette fleur femelle est entourée de nombreuses étamines, dont chacune n'est autre qu'une fleur mâle unistaminée. Le filet de l'étamine est articulé, avec souvent un reste de périgone à l'endroit de l'articulation, et l'article inférieur est considéré comme le pédicelle de la fleur mâle. Ces fleurs mâles sont réunies en cinq petites cymes unipares, situées à l'aisselle de cinq bractées soudées ensemble qui entourent le cyathium. Les bractées portent au bord de la coupe qu'elles forment de grosses glandes parfois colorées résultant de l'union des deux stipules adjacentes de deux bractées. Ces glandes peuvent être très développées et simuler des pétales, mais elles peuvent ne pas être toutes présentes. Cette inflorescence fonctionne comme une unique fleur hermaphrodite; on peut parler de *pseudanthium* (fausse-fleur).

Les cyathiums sont eux-mêmes réunis en cymes et en ombelles cymeuses; la morphologie des bractées de ces cymes et ombelles est utile pour la distinction des espèces.

L'euphorbe petit-cyprès *(Euphorbia cyparissias)* est vivace et stolonifère. Elle a des tiges dressées, hautes de 15 à 40 cm, des feuilles linéaires alternes, condensées surtout sur des rameaux axillaires stériles, et des bractées ovales, cordiformes à la base. Les cyathiums sont réunis en ombelles à rayons deux fois ramifiés; leurs glandes en croissant sont jaunes. Les graines sont brun clair et possèdent une caroncule. On rencontre cette espèce dans les prairies sèches et sur les talus, du niveau de la mer à l'étage alpin, dans toute l'Eurasie. Elle fleurit d'avril à septembre. L'usage que l'on fait parfois des racines et des graines comme purgatif est à déconseiller, car il peut conduire à des empoisonnements.

Euphorbia peplus est une mauvaise herbe cosmopolite originaire d'Eurasie. Elle est annuelle, haute de 10 à 40 cm, à racine pivotante, à tige dressée rameuse, à feuilles vert clair, à ombelles à trois rayons principaux. Les glandes des cyathiums sont munies de deux longs prolongements externes. Les graines sont gris perle, hexagonales, avec trois ou quatre fossettes superposées sur chaque face. La plante fleurit presque toute l'année.

Ruffier-Lanche - Jacana

▶ **Euphorbia pulcherrima (= Poinsettia pulcherrima)** ***est cultivé à des fins ornementales.***

C. Bevilacqua

▲ **Euphorbia canariensis.** ***Certaines euphorbes ressemblent à des Cactées, et plus particulièrement dans les zones où ces dernières sont absentes.***

L'euphorbe réveil-matin *(Euphorbia helioscopia)* est annuelle et haute de 10 à 50 cm. Elle a des tiges dressées ou ascendantes. Ses feuilles alternes sont obovales, arrondies au sommet, denticulées et glabres. Les bractées sont vert jaunâtre. Les cinq rayons de l'ombelle sont trifurqués. Les glandes du cyathium sont entières et jaunes. Les graines, brunes, présentent une surface réticulée et alvéolée. Cette plante fleurit d'avril à novembre, dans les prés et les lieux cultivés, du niveau de la mer à l'étage montagnard, en Europe, en Asie tempérée et au Japon. Elle a été introduite en Amérique du Nord. On utilise le suc de la plante comme caustique pour détruire les verrues. La racine sert comme purgatif en médecine populaire, mais son usage est dangereux.

L'euphorbe douce *(E. dulcis)* est une petite plante vivace à rhizome horizontal. Ses tiges sont dressées ou ascendantes, hautes de 20 à 60 cm. Ses feuilles sont lancéolées mais larges, avec ou sans pétiole, et à bord entier ou légèrement denté. Les ombelles ont cinq rayons. Les bractées sont ovales-triangulaires. Les glandes du cyathium sont arrondies, d'abord jaunâtres, puis pourpre foncé. Les fruits sont garnis de verrues. Les graines sont lisses, foncées et caronculées. On rencontre cette euphorbe dans les bois de toute l'Europe centrale, occidentale et orientale. Elle fleurit d'avril à juillet.

L'euphorbe arborescente *(E. dendroides)* est un arbuste ou un arbrisseau généralement haut de 50 cm à 2 m, avec des rameaux pseudo-dichotomes. Ses feuilles sont alternes, linéaires, lancéolées, à bord entier et rassemblées surtout à la partie supérieure des rameaux. Les ombelles possèdent de cinq à huit rayons pseudo-dichotomes. Les bractées sont arrondies et jaunes, les glandes des cyathiums sont en croissant. Les coques sont déprimées latéralement. Les graines sont foncées, lisses, ovoïdes, déprimées, et possèdent une caroncule. On rencontre cette plante dans les endroits rocheux calcaires de la région méditerranéenne.

E. pulcherrima (Poinsettia pulcherrima) est un arbrisseau originaire du Mexique, où il atteint 8 m de hauteur. On le cultive en plein air dans les parties les plus chaudes de la région méditerranéenne où il ne dépasse guère 4 m, et où il se naturalise parfois. Il possède des tiges succulentes, glabres, peu ramifiées. Ses feuilles sont alternes, avec un pétiole rougeâtre, et ovales-acuminées avec souvent trois à sept lobes aigus. Les inflorescences sont jaunâtres, peu apparentes, mais entourées par un involucre de douze à vingt grandes bractées foliacées, irrégulièrement lancéolées, dentées, de couleur rouge vif ; le tout forme une sorte de grande pseudo-fleur écarlate d'un diamètre de 30 à 40 cm qui paraît en hiver. Les cyathiums n'ont qu'une seule glande. Cette espèce fleurit de décembre à mars.

Le genre *Mercurialis* (Mercuriales) comprend des plantes apétales le plus souvent dioïques, à feuilles opposées, stipulées, à périgone à trois ou quatre pièces ; les fleurs mâles, comprenant de huit à douze étamines, sont réunies en glomérules qui forment des épis situés à l'aisselle des feuilles. Les fleurs femelles sont axillaires et solitaires ou fasciculées ; l'ovaire est généralement biloculaire, et muni de deux styles ; il y a un à trois staminodes stériles. Les fruits sont le plus souvent bicoques, à quatre valves, et les graines sont caronculées. Ce genre comprend huit espèces, habitant le pourtour de la Méditerranée et l'Eurasie.

C. Bevilacqua

▲ **Codiaeum variegatum,** *variété contorta à feuilles spiralées.*

Les espèces du genre *Acalypha* sont au nombre d'environ quatre cent trente. Ce sont des herbes et des arbrisseaux des régions tropicales et subtropicales; il en existe aussi des représentants dans les régions tempérées, surtout en Amérique. *A. hispida,* à longues inflorescences rouges et pendantes, est souvent cultivé en serre.

Le genre *Croton* comprend des plantes herbacées, des arbrisseaux et des arbres, qui appartiennent à environ sept cents espèces des régions chaudes, surtout en Amérique. Ces formes, recouvertes de poils étoilés ou écailleux, ont des feuilles entières, dentées ou lobées. Leurs fleurs sont monoïques ou dioïques, et réunies en épis terminaux ou axillaires. Les étamines sont enroulées dans le bouton. Les fruits forment des coques bivalves. Les graines sont lisses, avec une petite caroncule.

Les crotons sont souvent confondus à tort avec les *Codiaeum,* d'Indo-Malaisie et des îles du Pacifique, à étamines droites dans le bouton. *Codiaeum variegatum,* à feuilles glabres, luisantes, diversement lobées et colorées, est très cultivé en serre sous d'innombrables formes.

Le genre *Ricinus* (ricin) ne comporte qu'une seule espèce, *Ricinus communis.* C'est un arbuste ou même un arbre haut de 8 à 10 m. Dans les régions tempérées, c'est une plante annuelle et herbacée, haute de 1 à 3 m. Originaire de l'Inde, il est naturalisé dans le centre et le sud de l'Europe, en particulier en France. Sa racine est pivotante et très ramifiée. Ses feuilles sont alternes, longuement pétiolées, peltées-palmées, et présentent de sept à onze lobes dentés. Les fleurs constituent des glomérules qui forment des grappes terminales ou opposées aux feuilles. Dans chaque grappe, les glomérules supérieurs sont formés par des fleurs mâles, et les glomérules inférieurs le sont par des fleurs femelles; ceux du milieu sont mixtes. Les fleurs mâles et femelles, apétales, ont un périanthe à trois ou cinq pièces; les premières ont de nombreuses étamines ramifiées, et les secondes possèdent un ovaire pourvu d'un style divisé en trois branches bifides. Les fruits sont tricoques, avec une graine par loge; celle-ci est ovoïde, lisse et caronculée. L'espèce fleurit de mai à octobre. Il existe de nombreuses variétés de cette plante, certaines à tige, feuilles et capsules de couleur rouge sang.

On cultive le ricin pour la beauté de ses feuilles, mais surtout pour l'huile qu'on tire de ses graines. Cette huile est un purgatif doux; elle est cependant parfois mal tolérée car elle contient aussi un alcaloïde un peu toxique et une glucoprotéine allergisante. Quelques graines peuvent être mortelles chez le jeune enfant. Le ricinoléate de méthyle, qu'on prépare à partir de l'huile de ricin, fournit par cracking l'acide undécylénique qui, aminé et polymérisé, devient le Rilsan, matière plastique très employée. C'est le plus important usage actuel de l'huile de ricin.

Le genre *Hevea* comprend environ vingt espèces, représentées par des plantes ligneuses originaires d'Amérique tropicale, qui produisent toutes plus ou moins un latex contenant du caoutchouc.

L'hévéa du Brésil *(Hevea brasiliensis)* fournit à lui seul 90 % du caoutchouc naturel du monde. A l'état spontané, il atteint 20 à 30 m de hauteur, mais on le maintient à une hauteur moindre en culture. Il possède une racine pivotante très ramifiée, une tige colonnaire, lisse et grise, avec une silhouette en forme de pyramide renversée et peu dense. Les feuilles ont un long pétiole, possèdent trois folioles digitées et sont coriaces. C'est une plante monoïque, à petites fleurs jaunes, réunies en panicules

▼ *A gauche : feuilles de ricin* **(Ricinus communis)***; à droite : inflorescences.*

R. Longo

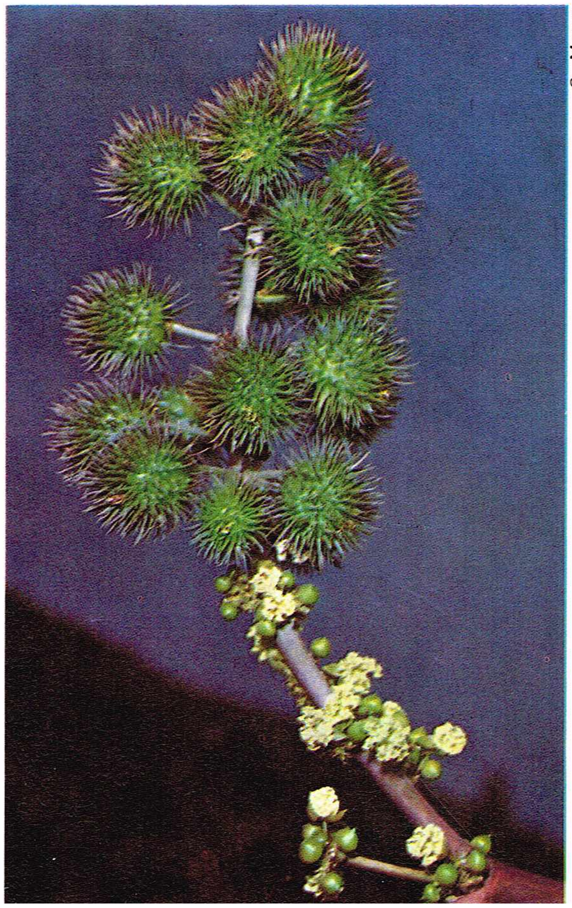
G. Mazza

T. Poggio

axillaires de cymules, dont chacune possède une fleur femelle au milieu et des fleurs mâles à la périphérie. Les fruits déhiscents sont des capsules dont les trois loges contiennent chacune une graine brune et tachetée de foncé. Cet hévéa est spontané dans le bassin de l'Amazone et dans celui de l'Orénoque; mais on le cultive en Asie orientale, où est produite la plus grande quantité de latex, et dans beaucoup d'autres régions tropicales. C'est à partir de 1876 que les cultures ont été commencées par les Anglais dans le sud-est de l'Asie. Toute la plante est parcourue par des laticifères, plus abondants au niveau du liber. Ils forment des couches concentriques dont le nombre augmente graduellement jusque vers l'âge de dix ans. A partir de la cinquième ou septième année, on pratique des incisions dans le tronc, d'où sort du latex.

Le genre *Manihot* comprend seize espèces d'Amérique tropicale. *Manihot esculenta (M. utilissima)* provient peut-être du Brésil oriental, mais est maintenant très cultivé dans tous les pays tropicaux d'Amérique, d'Asie, et surtout d'Afrique; il fournit le *manioc amer* et le *manioc doux*. C'est un arbrisseau haut de 4 à 5 m à l'état spontané, et de 2 à 3 m quand il est cultivé, avec des feuilles palmatilobées, et des fleurs jaunâtres, apétales, monoïques, réunies en inflorescences axillaires ou terminales. Les fruits sont tricoques. De nombreuses populations locales utilisent les racines tuberculeuses de ces plantes pour s'en nourrir. C'est également de cette plante que l'on obtient le tapioca.

La famille des Buxacées *(Buxaceae)* est constituée de plantes herbacées ou ligneuses, réunies en six genres et soixante espèces, des pays tropicaux et subtropicaux surtout. Elles se rencontrent en Europe, en Asie, en Afrique et plus accessoirement en Amérique. Les Buxacées ont des fleurs unisexuées et apétales, à quatre sépales et souvent un nombre égal d'étamines épisépales. Les fruits sont des capsules ou des drupes. Aucune espèce ne produit de latex. On rapproche volontiers ces plantes des Hamamélidales ou des Célastrales.

Le genre *Buxus* a des inflorescences entourées de bractées, en glomérules axillaires formés de fleurs toutes mâles ou avec une fleur femelle centrale; le périanthe a trois ou quatre pièces. Les fleurs mâles possèdent quatre étamines; les fleurs femelles ont trois ou quatre sépales et un ovaire triloculaire avec deux ovules par loge et trois styles. Les fruits sont des capsules loculicides. Le genre comporte quarante espèces répandues des Antilles au Japon en passant par l'Europe et l'Asie.

Le buis *(Buxus sempervirens)* est un arbuste toujours vert atteignant 5 m de hauteur. Il possède des feuilles opposées, ovales, coriaces, à bord entier, petites, vert foncé, luisantes à la face supérieure et vert jaunâtre à la face inférieure, un peu velues à leur insertion. Les fleurs sont jaune verdâtre. Hôte des lieux rocheux, surtout calcaires, le buis fleurit en mars et avril. On le cultive largement sous de nombreuses variétés pour border les allées et former des haies. Son bois de couleur jaune clair, à grain fin, très compact et très dur, a un poids spécifique souvent supérieur à l'unité (1,16 à l'état sec); il est très recherché et utilisé pour la gravure sur bois, le tournage, la fabrication d'instruments de musique, de manches d'outils, etc.

Le buis des Baléares *(Buxus balearica)* est haut de 3 à 4 m. Il diffère de l'espèce précédente par ses feuilles plus coriaces, tout à fait glabres, moins luisantes, d'un vert moins foncé et à bord clair. Ses fleurs mâles sont pédicellées et ses fleurs femelles sont sessiles, alors que, chez le buis ordinaire, les deux sortes de fleurs sont sessiles. Cette espèce fleurit en mars et en avril. On la rencontre en Sardaigne, aux îles Baléares et rarement en Espagne.

La famille des *Callitrichacées (Callitrichaceae)*, avec le seul genre *Callitriche*, comprend des herbes aquatiques ou rampantes dans la vase, hormis quelques espèces terrestres, à peu près cosmopolites (elles manquent seulement en Afrique du Sud). Elle compte de vingt-cinq à quarante-cinq espèces selon les auteurs. Il s'agit de plantes à tige très gracile, dotées de fleurs unisexuées axillaires, dépourvues de calice et de corolle, souvent avec deux préfeuilles latérales. Les fleurs mâles sont réduites à une seule étamine à long filet; les fleurs femelles ont un ovaire bicarpellaire, à deux styles, qui, grâce à deux fausses cloisons, forme quatre loges, munies chacune d'un ovule anatrope, unitegminé, à micropyle dirigé en haut. Les fruits sont formés de quatre coques ou méricarpes plus ou moins ailés. Cette famille est encore souvent classée dans l'ordre des Tricoques, mais sa position systématique est incertaine. On l'a rapprochée des Haloragacées, mais aussi, du fait de son embryologie et de l'existence d'un seul tégument à l'ovule, des Verbénacées. A vrai dire, la morphologie de l'ovaire évoquerait plutôt les Boraginacées.

Hamamélidales

L'ordre des Hamamélidales présente des affinités avec les Rosales et les Polycarpiques, et n'est pas reconnu par tous les auteurs. Engler l'incorporait aux Rosales qu'il concevait très largement. Wettstein, par contre, dont nous suivons ici la classification, en admettait l'existence,

▲ ***Plantation d'hévéas* (Hevea brasiliensis).**

▼ ***Rameau fleuri de buis* (Buxus sempervirens).**

G.P. Mondino

F. Quilici

comme le font de nombreux botanistes modernes. Cinq familles peuvent être rapportées à cet ordre : les Hamamélidacées, les Platanacées, les Cercidiphyllacées, les Eupteléacées et les Myrothamnacées. C'est un petit ordre, regroupant un peu plus d'une centaine d'espèces, mais assez important du point de vue économique, car il renferme des arbres forestiers et ornementaux et des plantes productrices de résines et de drogues à usage médical.

Il s'agit d'espèces ligneuses, à feuilles stipulées et à fleurs unisexuées ou hermaphrodites, dont le périanthe est simple, double ou absent. Comme chez les Caryophyllacées, nous voyons donc apparaître ici un périanthe différencié en calice et corolle bien que nous soyons encore parmi les Monochlamydées. Les étamines sont en nombre variable, quatre ou cinq en général; l'ovaire supère, semi-infère, voire infère, comprend généralement deux carpelles soudés ou libres, qui contiennent un ou deux ovules bitegminés par loge mais parfois davantage. Les fruits sont le plus souvent des capsules. Les espèces les plus intéressantes appartiennent aux Hamamélidacées et aux Platanacées.

La famille des *Hamamélidacées (Hamamelidaceae)*, la plus grande de l'ordre, groupe vingt-six genres et environ cent espèces, arbustives et arborescentes, propres aux régions chaudes et tempérées, surtout asiatiques; il y en a très peu en Amérique du Nord, en Afrique et en Australie. Elles ont des feuilles généralement alternes, stipulées, entières ou lobées; leurs inflorescences sont normalement des épis ou des capitules, souvent munis de bractées colorées; les fleurs sont unisexuées ou hermaphrodites, rarement nues, avec communément quatre ou cinq sépales, quatre ou cinq pétales parfois absents, quatre ou cinq étamines et souvent autant de staminodes; les styles sont au nombre de deux; l'ovaire est infère ou semi-infère, bicarpellé et biloculaire. Les fruits sont des capsules généralement loculicides et septicides, avec des graines parfois ailées, au nombre d'une par loge le plus souvent.

Cette famille est connue surtout par le genre *Hamamelis*, qui compte huit espèces asiatiques et américaines et auquel appartient l'*Hamamelis virginiana* ou hamamélis de Virginie, plante d'Amérique du Nord introduite en médecine vers la fin du siècle dernier. Les *Hamamelis* sont caractérisés par des feuilles ovales-oblongues, sinuées ou dentées sur les bords; ils ont des fleurs hermaphrodites généralement tétramères, pourvues d'un calice et d'une corolle, et réunies en glomérules de deux ou trois. L'importance d'*Hamamelis virginiana*, arbrisseau haut de 3 à 4 m, à fleurs jaunes, est due à ses propriétés décongestionnantes, vaso-constrictrices et astringentes, du fait de la présence dans les feuilles et dans l'écorce d'un tanin (hamamélitanin).

Le genre *Liquidambar* comprend des Hamamélidacées également originaires d'Asie et d'Amérique du Nord, mais cultivées depuis longtemps en Europe à des fins ornementales. Il s'agit de cinq espèces arborescentes. Leurs feuilles sont palmatilobées; leurs fleurs sont habituellement unisexuées, monoïques, à un seul verticille périanthaire ou totalement nues, en capitules globuleux dont les mâles sont réunis en grappes; dans ceux-ci, les étamines sont nombreuses, mêlées de bractées, et les fleurs individuelles ne sont pas reconnaissables. Les infrutescences sont sphéroïdales, longuement pédonculées, et formées de nombreuses capsules à une ou deux graines et à piquants provenant des deux styles persistants et rigides de l'ovaire infère, dont chaque loge comporte de nombreux ovules. Les *Liquidambar*, très décoratifs en automne avec les teintes rouges de leurs feuilles lobées qui ressemblent à celles des érables, sont également connus pour la sécrétion résineuse (styrax), de couleur ambrée, qu'on tire de l'écorce (d'où le nom de ce genre, qui signifie ambre liquide).

Les *Platanacées (Platanaceae)* sont une famille constituée du seul genre *Platanus*, avec six ou sept espèces. Originaires du bassin méditerranéen oriental et de l'Asie occidentale jusqu'à l'Himalaya, ainsi que de l'Amérique du Nord, les platanes sont remarquables par leur rhytidome (« écorce ») qui se détache en larges fragments polygonaux et leurs grandes feuilles à lobes aigus. Ils sont monoïques et portent des inflorescences unisexuées, sphéroïdales et pendantes, formées de minuscules fleurs. Les sépales,

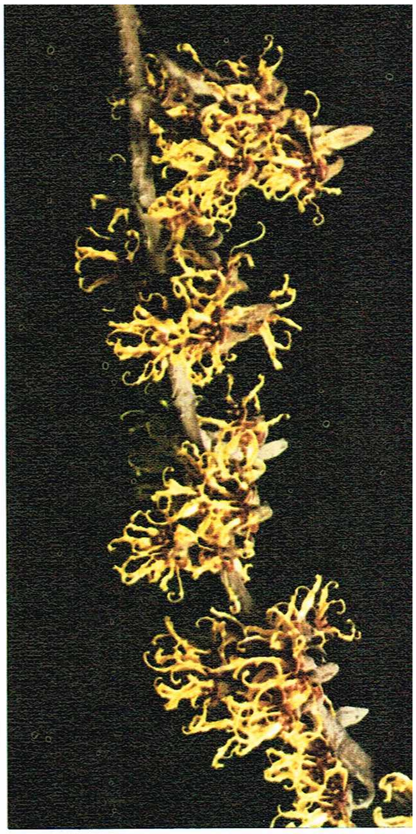

R. Longo

▲ *A gauche : feuillage d'un* **Liquidambar.**
A droite : **Hamamelis mollis,** *espèce à floraison hivernale.*

pétales et étamines des fleurs mâles sont au nombre de trois à cinq ; les étamines alternent avec les pétales et leur connectif est prolongé et dilaté supérieurement en appendice stérile ; les fleurs femelles n'ont généralement pas de pétales et possèdent cinq à neuf carpelles libres à ovule unique, orthotrope, pendant. Les infrutescences globuleuses sont caractéristiques et composées de nombreux akènes monospermes, entourés de longs poils. Ces fruits, de même que les poils des jeunes feuilles, se répandant par myriades, peuvent être facilement inhalés et sont susceptibles de provoquer des phénomènes allergiques.

Le platane d'Orient *(Platanus orientalis),* est assez communément planté en France. Il atteint plus de 30 m, et possède des feuilles à cinq ou sept lobes très profonds, dont les échancrures dépassent le milieu du limbe. Le lobe médian est bien plus long qu'il n'est large à la base. Les infrutescences sont groupées par trois à six. Spontané de l'est de la région méditerranéenne jusqu'à l'Himalaya, ce platane aurait été introduit en Italie à l'époque romaine ; mais certains auteurs le considèrent aujourd'hui comme étant peut-être indigène également en Sicile, dans le sud de l'Italie et en tout cas en Crète.

Le platane d'Occident *(Platanus occidentalis)* croît dans l'est des États-Unis. Il est haut de 50 m et plus, et se distingue du précédent par les lobes des feuilles qui sont au nombre de trois et moins marqués, les échancrures n'atteignant pas le milieu du limbe, par ses infrutescences solitaires ou géminées, et par l' « écorce » qui tombe en petits fragments. Il est très rarement cultivé, contrairement à *Platanus hybrida (P. acerifolia)* qui est intermédiaire entre les deux précédents, et que la plupart des botanistes considèrent comme leur hybride. Il ressemble à *P. orientalis,* mais les échancrures des lobes ne dépassent pas le milieu du limbe, le lobe médian n'est guère plus long qu'il n'est large à la base, et les infrutescences sont groupées par deux. C'est le platane usuel.

Nous ne ferons que citer les familles des *Cercidiphyllacées,* des *Eupteléacées* et des *Myrothamnacées,* les deux premières avec chacune un genre de deux espèces, de Chine et du Japon, et la troisième également monogénérique, avec deux espèces, d'Afrique du Sud et de Madagascar. De nombreux auteurs rangent les Cercidiphyllacées et les Eupteléacées dans les Polycarpiques.

Magnoliales (Ranales ou Polycarpiques) et Aristolochiales

Cet ordre, qui est considéré comme l'un des plus primitifs parmi les Angiospermes actuelles, comprend des plantes de type herbacé ou arborescent. Il semble pour beaucoup constitué des descendants du groupe d'où sont dérivées la plupart des Angiospermes actuelles. Les fleurs, le plus souvent hermaphrodites, sont toujours de taille plus ou moins importante et ont très souvent un réceptacle allongé ou conique. Chez certaines espèces, la fleur ne possède ni calice ni corolle, mais montre un certain nombre de tépales et peut-être de bractées plus ou moins sépaloïdes ; chez d'autres, il y a un calice et une corolle distincts. Il peut y avoir entre la corolle et l'androcée des pièces pollinifères et pétaloïdes, ce qui laisse penser que les pétales et les étamines ne formaient jadis peut-être qu'une seule catégorie d'appendices de morphologie intermédiaire. Les éléments du périanthe sont disposés soit en spirale, soit en verticilles. Les étamines sont nombreuses, comme en général les carpelles, qui sont presque toujours libres et forment alors autant de fruits, caractéristique à laquelle fait allusion l'un des noms de l'ordre. Il existe cependant des ovaires pluricarpellés à carpelles soudés et parfois des ovaires infères. La pollinisation est entomogame, mais met en cause des Insectes primitifs (Coléoptères).

La famille des *Magnoliacées (Magnoliaceae)* est constituée par dix genres et plus de deux cents espèces.

◀ *Page ci-contre :* **Manihot esculenta,** *arbrisseau à feuilles palmatilobées, dont les racines fournissent le manioc.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ *Les platanes sont des arbres particulièrement robustes et dotés d'une grande longévité.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ **Platanus orientalis.**

▶ ***Ci-contre : fleur épanouie (en haut) et bouton floral (en bas) de*** **Magnolia obovata.**

▼ ***Les infrutescences de platane sont constituées de nombreux akènes monospermes entourés de longs poils.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

C'est l'une des familles les plus anciennes des Polycarpiques et des Angiospermes. Elle existait déjà au Crétacé et peut-être même au Jurassique moyen. Il s'agit d'arbres à feuilles persistantes ou caduques, alternes, souvent coriaces, entières ou lobées. Chaque feuille a généralement de longues stipules unies qui recouvrent les feuilles plus jeunes dans le bourgeon. En tombant, elles laissent une cicatrice entourant la tige du côté opposé au pétiole.

Les fleurs sont habituellement grandes, décoratives, et souvent très parfumées. Elles possèdent la plupart du temps deux ou trois pièces sépaloïdes, libres, parfois colorées, et de trois à neuf pétales (ou plus) distribués en deux verticilles ou suivant une spirale. Les étamines et les carpelles, disposés en spirales, sont libres et abondants. Les carpelles peuvent toutefois être en nombre réduit. Chacun de ces derniers donne un fruit sec déhiscent ou un akène. Il se forme parfois un pseudo-fruit (syncarpe) par fusion des fruits en une masse charnue.

Les grains de pollen ont un seul sillon, comme chez les Monocotylédones.

Les Magnoliacées sont surtout répandues en Indo-Malaisie, puis dans le Sud-Est asiatique et en Amérique du Nord et du Sud, du côté atlantique, dans les zones tempérées et chaudes. Étant donné leur ancienneté, elles présentent un grand intérêt scientifique; elles sont, en outre, intéressantes sur le plan économique.

On les cultive largement pour leurs belles fleurs blanches, roses ou pourprées, en particulier les *Magnolia*. Ce genre regroupe soixante-quinze espèces d'arbres à feuilles entières et à fleurs terminales et solitaires, à calice et corolle généralement différenciés (sauf chez *M. stellata* à nombreux tépales pétaloïdes), souvent très parfumés. Les fruits formés par chaque fleur constituent un ensemble de nombreux follicules à deux graines à aspect de pomme de pin; la déhiscence est dorsale et suturale et les graines restent suspendues pendant un certain temps au placenta au moyen des éléments ligneux déroulés des faisceaux vasculaires des funicules. Les magnolias sont spontanés dans deux régions : l'Himalaya, l'Asie orientale et l'Indo-Malaisie d'une part, l'Amérique tempérée et chaude sur le versant atlantique de l'autre. Le genre a donc une distribution disjointe.

Nous citerons avant tout, parmi les magnolias *semper virens*, *Magnolia grandiflora*, à feuilles luisantes et vert foncé en dessus, feutrées et de couleur rouille en dessous, et à grandes fleurs blanches. C'est une plante importée du sud-est des États-Unis en 1737, très cultivée, et qui a donné diverses variétés, dont une à feuilles ondulées. *Magnolia delavayi* à feuilles duveteuses et glauques en dessous est plus petit et bien plus rarement cultivé, de même que *Magnolia virginiana* de l'est des États-Unis, à feuilles glauques et glabres en dessous.

Parmi les espèces à feuilles caduques, nous mentionnerons *Magnolia liliflora*, arbuste chinois à grandes fleurs allongées, odorantes, pourpres à l'extérieur, blanches à l'intérieur, *Magnolia acuminata*, grand arbre de l'est des États-Unis, à grandes feuilles acuminées et à fleurs jaune verdâtre, assez petites et inodores. Les *Magnolia obovata*, du Japon, *fraseri*, du sud-est des États-Unis, et *sinensis*, de Chine (Seu-Tchouan), ont des fleurs blanches, apparaissant après les feuilles ou en même temps qu'elles. La floraison a lieu en revanche avant l'apparition des feuilles chez les *Magnolia salicifolia yulan* et *stellata* du Japon, *denudata* et *officinalis* de Chine, qui ont aussi des fleurs blanches (plus ou moins rosées chez *M. stellata*).

Le genre *Michelia* comprend cinquante-cinq espèces d'arbres et d'arbustes d'Asie orientale et d'Indo-Malaisie. Très semblables aux magnolias, mais à gynécée stipité, ils sont cultivés dans la région méditerranéenne, en particulier *M. champaca*, de l'Inde, dont les fleurs rappellent des narcisses doubles, et sont parfumées le jour, mais malodorantes la nuit. Dans leur pays d'origine, ces plantes donnent un excellent bois d'ébénisterie, des écorces amères à propriétés stimulantes et toniques, des fruits comestibles et une essence extraite des fleurs; en outre, les feuilles ont des propriétés astringentes et servent de nourriture à un ver à soie.

Le genre *Liriodendron* est typique de la bordure atlantique de l'Amérique du Nord, avec *Liriodendron tulipifera*, tandis que la seule autre espèce vit en Chine centrale. Le *L. tulipifera*, ou tulipier, atteint 40 m et, par son port,

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

rappelle un peuplier; il possède des feuilles alternes, caduques, avec un long pétiole et un limbe à trois lobes, celui du centre tronqué et émarginé. Les fleurs, parfumées et rappelant un peu les tulipes, sont peu visibles, car elles sont verdâtres, marquées de jaune-orangé. Les étamines sont extrorses. Les fruits sont des samares dont l'aile est formée par le style de chaque carpelle, aplati dorsi-ventralement. L'arbre est souvent planté dans les parcs. En outre, son bois jaunâtre, résistant et facile à polir, sert en ébénisterie. Il est très résistant aux larves d'Insectes.

Le genre *Illicium* est le seul de la famille des *Illiciacées (Illiciaceae)*. Son nom (du latin *illicere,* séduire) rappelle la bonne odeur qui émane des fruits de son espèce la plus connue, le badianier ou anis étoilé *(I. verum)*. Ceux-ci sont constitués d'une douzaine de carpelles formant une étoile et contenant chacun une seule graine. Cette espèce est arbustive ou arborescente et a des feuilles ovales-lancéolées; ses graines contiennent une huile éthérée riche en anéthol et autres composés à action stomachique, sédative et anti-spasmodique. On s'en sert pour fabriquer, notamment, l'anisette et le pastis. Il est spontané, dans le sud de la Chine et en Indochine, et souvent cultivé. Il existe des *Illicium* dans le sud-est des États-Unis, aux Antilles, et dans l'est du Mexique.

Le genre *Drimys* est le plus connu de la famille des *Wintéracées (Winteraceae)*, qui en compte cinq autres totalisant quatre-vingt-quinze espèces.

Ce sont des arbres ou des arbustes à feuilles alternes, sans stipules et à belles fleurs blanches, jaunes ou roses. Les sépales, pétales, étamines et carpelles ont tendance à former des verticilles. Il peut n'y avoir qu'un seul carpelle. Les grains de pollen ont un pore. Ces plantes semblent un peu plus évoluées que les Magnoliacées.

La famille des *Trochodendracées (Trochodendraceae)* a une position systématique discutée et comprend seulement le genre *Trochodendron,* avec la seule espèce *T. aralioides.* Celui-ci est un arbre toujours vert du Japon et de Formose, utilisé pour l'ornement. Les fleurs sont assez évoluées et verticillées, à nombreuses pièces; les carpelles sont unis en un gynécée syncarpe pluriloculaire. Il n'y a pas de vaisseaux de bois, mais seulement des trachéides, comme chez les Gymnospermes, ce qui semble un caractère très primitif.

La famille des *Anonacées (Anonaceae)* groupe cent vingt genres et deux mille espèces de plantes intéressantes soit du point de vue économique (production de fruits, d'essences et d'épices), soit du point de vue scientifique, par suite de leurs caractères primitifs et de leurs affinités avec les Monocotylédones. Il s'agit d'arbres, d'arbustes ou de lianes, à feuilles distiques, entières, sans stipules et aromatiques. Les fleurs, qui ont une seule

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Un magnolia en fleur :*** **Magnolia obovata.**

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ ***A gauche : boutons floraux et bourgeons foliaires d'un*** **Magnolia.** ***A droite : fleur et bourgeons foliaires de*** **Magnolia soulangeana.**

I.G.D.A.

▲ *Muscadier* **(Myristica fragrans) :** ***fruit et graine (à droite : en coupe).***

▼ **Liriodendron tulipifera :** ***fleur et feuilles.***

S. Viola

préfeuille, comme celles des Monocotylédones, montrent un calice à deux sépales, et une corolle de trois à douze pétales, six le plus souvent, organisés de différentes façons; leurs étamines sont en général nombreuses, à disposition spiralée, à anthères extrorses dans la plupart des cas; il y a de nombreux carpelles, mais parfois peu, ou un seul. Ces derniers sont le plus souvent libres, spiralés ou verticillés. Les fruits peuvent être des baies ou des syncarpes résultant de la concrescence des carpelles et de l'axe de la fleur. Les graines ont parfois un arille, et leur albumen est ruminé, c'est-à-dire parcouru de sillons. Les grains de pollen ont un seul sillon de germination, de type monocotylédonoïde, ou bien aucune aperture.

Le genre *Anona* d'Afrique et d'Amérique tropicale, à carpelles spiralés, est le plus intéressant. Les anones sont cultivées non seulement comme plantes ornementales, mais aussi pour leurs fruits ou corossols, syncarpes charnus, jaunes ou rouge-brun, hérissés de piquants. Lorsqu'on en a ôté la partie externe, on peut en consommer la pulpe blanche, quand elle est bien mûre; on en fait aussi des boissons et des confitures.

Les indigènes des îles Samoa tressent des guirlandes parfumées avec les fleurs des *Cananga*. *C. odorata,* d'Indo-Malaisie, est cultivé pour l'extraction à partir de ses feuilles de l'ylang-ylang, essence utilisée en parfumerie, ainsi que pour son bois qui sert à la sculpture. Les *Xylopia,* arbustes d'Afrique, d'Asie et d'Amérique tropicale, fournissent diverses épices.

La famille des *Myristicacées (Myristicaceae)* comprend des arbres ou des arbustes toujours verts, à bois et à feuilles aromatiques. Ces dernières sont alternes, simples et coriaces. Les fleurs, unisexuées et groupées en inflorescences, ont un périanthe de deux à cinq tépales, généralement trois, sans calice et corolle différenciés; les femelles ont un carpelle unique, supère, avec un seul ovule, et les mâles ont de nombreuses étamines extrorses, dont les filets sont réunis en une colonne. Les fruits sont charnus et ligneux, mais s'ouvrent par deux fentes. La graine a souvent un albumen ruminé. Les grains de pollen sont à un seul sillon.

Cette famille comporte quinze genres et plus de deux cent cinquante espèces, mais doit sa notoriété au muscadier *(Myristica fragrans),* producteur de la noix muscade. C'est un arbre dioïque, originaire des Moluques, dont le fruit piriforme s'ouvre à maturité en deux valves qui laissent apparaître un arille écarlate entourant une graine. L'amande de celle-ci est la noix muscade, sillonnée en surface. Elle est utilisée comme condiment.

La famille des *Canellacées (Canellaceae)* comprend une vingtaine d'espèces de plantes tropicales, absentes en Asie. Ce sont des arbres riches en huiles aromatiques, à feuilles entières et alternes, et à fleurs verticillées possédant trois sépales, quatre à douze pétales, autant d'étamines et un ovaire supère uniloculaire à placentation pariétale. Les fruits sont des baies avec des graines à albumen ruminé oléagineux. Le genre *Canella* a un certain intérêt à cause de *C. alba,* produisant la fausse cannelle ou cannelle blanche.

Les *Calycanthacées (Calycanthaceae)* sont une petite famille de deux genres et neuf espèces, peut-être proche des Monimiacées (voir ci-dessous), qui comprend des arbustes à écorce aromatique et à feuilles entières et opposées, sans stipules. Les éléments des fleurs solitaires, nombreux et spiralés, ne peuvent être distingués en un calice et une corolle; le nombre des étamines et des carpelles libres, spiralés aussi, peut être élevé. Les akènes uniséminés sont entourés par le réceptacle, creux, d'abord mou, puis dur. Le genre *Calycanthus,* des régions méridionales d'Amérique du Nord et de l'est de l'Australie, a été importé en Europe en 1726, pour l'ornement. *C. floridus,* l'arbre aux anémones, a en effet des fleurs rouge-brun qui éclosent après la sortie des feuilles. *Chimonanthus praecox,* de Chine, a des fleurs jaunes très odorantes qui éclosent en janvier, avant l'apparition des feuilles. Il est souvent cultivé pour cette particularité.

La famille des *Monimiacées (Monimiaceae)* groupe quatre cent cinquante plantes tropicales, surtout de l'hémisphère austral (Malaisie, Madagascar, Amérique du Sud). Il s'agit de plantes arborescentes ou arbustives, à feuilles simples, opposées, sans stipules, de type aromatique. Les fleurs ont un périanthe verticillé, généralement non différencié en calice et corolle et qui peut manquer. Les étamines et les carpelles libres, souvent nombreux, sont portés par des fleurs distinctes. Le réceptacle est déprimé et parfois de forme très particulière. Les fruits sont des akènes ou des drupes, enveloppés en partie par le réceptacle accrescent. Nous citerons comme espèce la plus importante le boldo *(Peumus boldus),* arbre du Chili.

La famille des *Lauracées (Lauraceae)* comprend des arbres et des arbrisseaux toujours verts, à feuilles coriaces, simples, sans stipules et riches en huiles essentielles. Les inflorescences, axillaires en général, sont constituées de fleurs jaunes ou verdâtres, le plus souvent hermaphrodites, qui possèdent quatre ou six tépales disposés en deux verticilles. L'androcée est constitué généralement de quatre verticilles, chacun avec trois étamines; le verticille interne au moins est stérile (staminodes). Les étamines fertiles s'ouvrent par deux ou quatre clapets. Il y a un unique ovaire supère tricarpellé, avec un seul ovule. Les fruits peuvent être des drupes ou des baies et sont généralement entourés par le réceptacle dilaté en forme de coupe. Ce sont trente et un genres et plus de deux mille deux cents espèces de plantes bien représentées dans les zones tropicales et spécialement en Amérique et en Malaisie. Quelques espèces atteignent la région méditerranéenne.

Le genre le plus connu est naturellement constitué par les *Laurus,* avec deux espèces seulement, *L. nobilis,* ou laurier-sauce, de la région méditerranéenne, et *L. azorica (L. canariensis),* ou laurier des Canaries, originaire des Canaries et de Madère.

Le laurier-sauce, ou laurier d'Apollon, a été depuis l'Antiquité le symbole de la gloire. C'est un arbre dioïque d'une hauteur d'environ 7 m, à feuilles persistantes, coriaces, lancéolées, aiguës, plus ou moins ondulées au bord. Les inflorescences sont en fausses ombelles. Les fleurs sont petites, jaunes, à quatre tépales et huit à douze étamines, qui s'ouvrent par deux valves. Les fruits sont ovoïdes, noirâtres à maturité et de saveur aromatique. Le laurier forme, aux endroits où le climat est chaud et

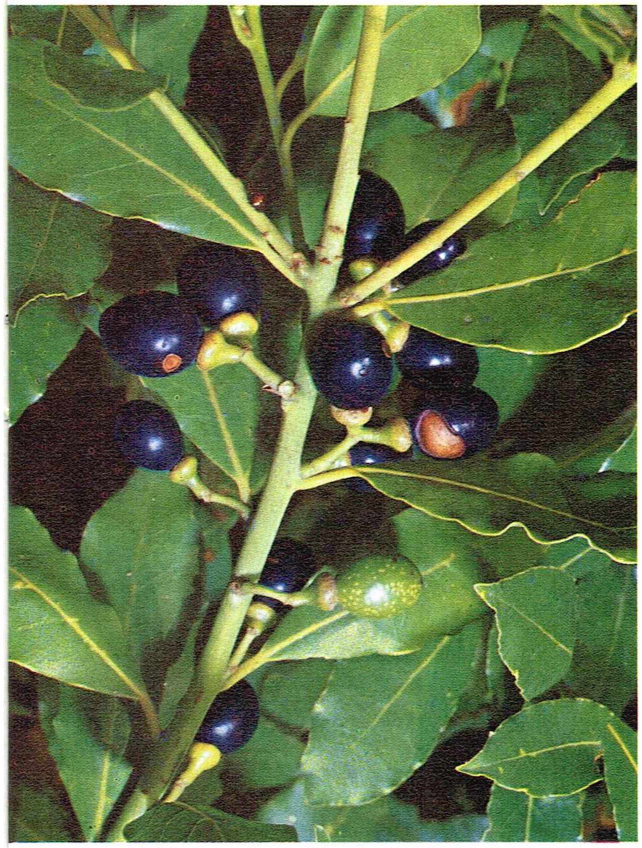

S. Prato

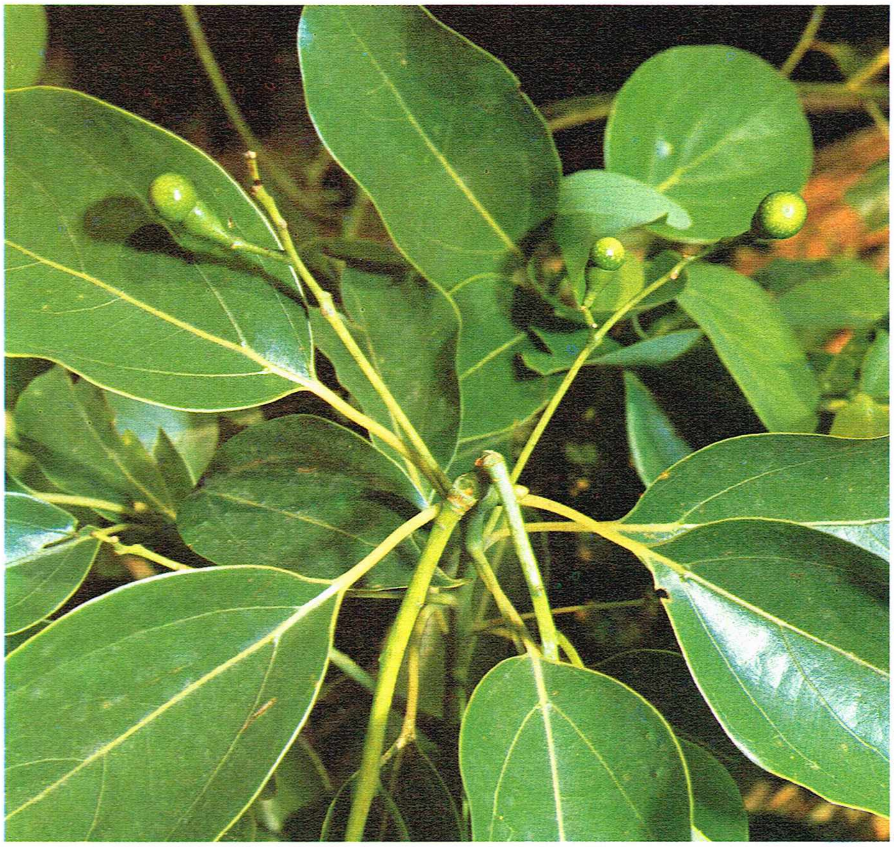

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

humide, des forêts très ombreuses, où il s'associe à d'autres espèces arborescentes. On le cultive comme plante ornementale ainsi que pour ses feuilles et son fruit qui servent en cuisine et en pharmacie.

Les espèces du genre *Lindera*, ou *Benzoin*, d'Amérique du Nord et d'Asie tempérée et tropicale, sont également des arbres et des arbrisseaux aromatiques. Plusieurs d'entre elles donnent pour la parfumerie une huile qu'on ne confondra pas avec le benjoin, résine balsamique produite par une plante de la famille des Styracacées. On cultive parfois dans les jardins *L. benzoin (L. aestivale)*.

Les espèces du genre *Cinnamomum* sont spontanées dans les pays chauds d'Asie, en Mélanésie et en Australie ; ce sont des arbres à feuilles coriaces, qui sont importants pour la production du camphre et de la cannelle.

Le camphre est tiré du camphrier *(Cinnamomum camphora)*, grand arbre du sud-est de l'Asie, mais qu'on peut cultiver en région méditerranéenne. On obtient en distillant le bois des vieux arbres une essence, ou huile de camphre, qui laisse déposer un produit brut par refroidissement. Sublimé, celui-ci donne le camphre, qui est utilisé comme analeptique cardiaque et comme antiseptique (dans les affections des bronches en particulier) ; il diminue aussi le péristaltisme intestinal. On prépare également du Celluloïd avec le produit impur. L'huile de camphre est employée dans les pays d'origine comme combustible, ou bien comme solvant des vernis. On cultive le camphrier au Japon et à Formose.

L'écorce du cannelier de Ceylan *(Cinnamomum zeylanicum)*, originaire de Ceylan, fournit la cannelle vraie, qui sert à aromatiser des liqueurs et les confiseries ; elle a également des propriétés stimulantes et eupeptiques. L'écorce de *C. aromaticum (C. cassia)*, du sud de la Chine, fournit la cannelle de Chine, utilisée aussi dans l'alimentation.

Les *Persea* sont un genre de cent trente-cinq espèces. L'avocatier *(P. gratissima)*, spontané dans les forêts, le long des fleuves et près de la mer, en Amérique centrale et dans le nord de l'Amérique du Sud, fournit un fruit très nourrissant ; c'est une baie ovale ou piriforme, de couleur verte, violacée ou brune, à exocarpe d'épaisseur variable, et à mésocarpe mou et de saveur douce, qui contient une seule graine renfermant un latex rougissant à l'air, et à partir duquel on a préparé de l'encre. Cette espèce existe sous diverses formes géographiques.

Le genre *Sassafras*, qui ne comporte que deux espèces, habite l'Amérique du Nord et Formose. Il s'agit d'arbres très aromatiques. On extrait de l'écorce de leur racine une huile qui contient du safrol utilisé en parfumerie.

La famille des *Ménispermacées (Menispermaceae)* groupe soixante-sept genres et quatre cent vingt-cinq espèces tropicales de lianes, rarement d'arbustes, à racines contenant des principes amers, toniques et eupeptiques (surtout le colombo, extrait de *Jatheoriza palmata*). Elles ont souvent une tige en ruban, comme beaucoup de lianes. Leurs feuilles, alternes et simples, sont parfois peltées. Leurs fleurs, unisexuées et formant des inflorescences en grappes ou en panicules, sont cycliques ou ont un calice spiralé et une corolle cyclique, souvent en deux verticilles trimères. Parfois calice et corolle sont indifférenciés.

Le nombre des sépales, des pétales et des étamines est en fait variable ; les étamines forment fréquemment aussi deux verticilles trimères. L'ovaire est supère à trois à six carpelles libres ; ces derniers sont quelquefois bien plus nombreux et en plusieurs verticilles. Les fruits ou pseudo-fruits composés sont constitués de drupes issues de chaque carpelle.

Les *Chondodendron*, d'Amérique centrale et du Sud, fournissent une écorce dont on extrait les curares en tubes, qui servent localement à empoisonner les pointes de flèches, ainsi que des extraits de plusieurs autres Ménispermacées. Le principe actif (d-tubocurarine) est employé comme adjuvant des anesthésiques pour permettre un meilleur relâchement musculaire, dans les opérations chirurgicales abdominales. Il inhibe en effet le passage de l'influx nerveux vers le muscle. D'autres curares proviennent des *Strychnos* (Loganiacées).

La famille des *Lardizabalacées (Lardizabalaceae)* constitue un petit groupe de trente plantes de l'Asie et du Chili. Ce sont des lianes ou des arbustes à feuilles alternes et composées-palmées, et à fleurs en général unisexuées, avec un calice de trois ou six éléments en un ou deux verticilles, souvent une corolle de deux verticilles de trois nectaires, des étamines aussi en deux verticilles trimères, et un ovaire supère formé normalement de trois carpelles libres. Les fruits sont des baies ou des follicules charnus à nombreuses graines riches en albumen.

▲ ***A gauche : les fruits du laurier-sauce*** **(Laurus nobilis)** ***sont de petites baies noires contenant une seule graine. A droite : rameau de camphrier*** **(Cinnamomum camphora).**

▼ ***Fleur d'un calycanthe*** **(Calycanthus).**

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***A gauche : la renoncule des Pyrénées*** **(Ranunculus pyrenaeus),** ***espèce montagnarde répandue dans les pâturages et sur les rochers calcaires. A droite : la ficaire*** **(Ficaria verna = F. ranunculoides),** ***fréquente dans les prés et les bois au début du printemps.***

▼ **Clematis × jackmanii,** ***variété horticole obtenue par croisement de*** **C. lanuginosa** ***et*** **C. viticella.**

G. Tomsich

L'importante famille des *Renonculacées (Ranunculaceae)* groupe environ deux mille plantes herbacées annuelles, bisannuelles ou vivaces, rarement arbustives ou lianoïdes, parfois aquatiques. Ces plantes ont des racines fusiformes, qui sont parfois tuberculeuses, ou encore des rhizomes, voire des bulbes. Les feuilles, le plus souvent palminervès, sont généralement composées ; chez les formes aquatiques, elles peuvent prendre sur la même plante un aspect lacinié quand elles sont immergées, et réniforme ou lobé quand elles sont flottantes. Les fleurs, actinomorphes ou zygomorphes, peuvent être solitaires ou former des inflorescences, et elles possèdent parfois des bractées étroitement sous-jacentes au périanthe et simulant un calice. Un calice vrai, cyclique, peut exister et est souvent constitué par cinq sépales. La corolle, cyclique aussi quand elle existe, est souvent formée de deux, quatre ou cinq pétales fréquemment pourvus de nectaires, ou transformés en nectaires. Fréquemment aussi, le périanthe est indifférencié et comporte un nombre variable de tépales en verticilles ou en spirale. Les étamines, insérées en spirale sur le réceptacle, sont en nombre indéfini. Les carpelles, généralement nombreux, parfois réduits à un ou deux, sont pluriovulés ou uniovulés, libres, ou bien unis les uns aux autres en un gynécée syncarpe. Les fruits sont des akènes, des follicules, des capsules, des baies, voire des drupes. Ces plantes existent partout, mais abondent spécialement sous les climats froids ou tempérés, et sur les sols acides. Elles atteignent 5 700 m dans l'Himalaya. Elles ont, par la variabilité de leurs caractères morphologiques, qui s'enchaînent les uns aux autres, un grand intérêt scientifique, mis en lumière par le célèbre mémoire d'A.-L. de Jussieu en 1773.

Les *Ranunculus* (boutons d'or et grenouillettes) comportent plus de quatre cents espèces, à feuilles simples ou composées. Les fleurs possèdent un calice de cinq sépales, une corolle de cinq pétales jaunes ou blancs, rarement rougeâtres, munis d'une écaille ventrale nectarifère, de nombreuses étamines et de nombreux carpelles uniovulés disposés en spirale. Certaines renoncules contiennent des substances toxiques ; *R. sceleratus,* des fossés et des prés humides, est spécialement dangereux. On trouve fréquemment dans les champs et les bois la ficaire *(R. ficaria),* qui fleurit au début du printemps, et possède des fleurs jaunes ayant exceptionnellement trois sépales et une corolle de huit à douze pétales un peu allongés. Elle est souvent pour cela considérée comme un genre spécial *(Ficaria verna = F. ranunculoides).* Une sous-espèce tétraploïde *(subsp. bulbifer)* forme de plus des bulbilles aux aisselles des feuilles. La renoncule âcre *(Ranunculus acris)* est envahissante et vénéneuse ; elle a des fleurs jaunes et habite les prairies de plaines et des vallées d'Europe et d'Asie centrale. La renoncule bulbeuse *(R. bulbosus)* possède, comme son nom l'indique, un bulbe formé par la base de la tige. La renoncule laineuse *(R. lanuginosus)* a des feuilles et des tiges velues. Elle croît dans le Jura et les Alpes, au-dessus de l'étage des feuillus. La renoncule rampante *(R. repens)* se trouve dans les lieux frais et a des feuilles découpées tandis que la grande douve *(R. lingua)* a des feuilles entières ou presque et lancéolées-acuminées, et croît au bord des eaux. La renoncule aquatique *(R. aquatilis)* a des fleurs blanches et possède des feuilles immergées laciniées, réduites aux régions des nervures, et des feuilles flottantes munies d'un limbe à trois à cinq lobes (hétérophyllie). Les *R. fluitans, trichophyllus* et *divaricatus,* qui sont entièrement immergés à l'exception des fleurs blanches, n'ont que des feuilles réduites aux régions des nervures, très longues chez *R. fluitans.* Ces renoncules aquatiques à fleurs blanches appartiennent au sous-genre *Batrachium* (grenouillettes).

La renoncule d'Asie *(Ranunculus asiaticus)* est cultivée sous de nombreuses variétés à fleurs de diverses couleurs, sur la Côte d'Azur et la Riviera, pour la production de fleurs coupées à nombreux pétales qui dérivent de la transformation des étamines.

Les champs de blé, d'avoine et de maïs sont souvent infestés par des plantes vénéneuses qui habitent l'Eurasie, et qui constituent le genre *Adonis.* Ce sont des Végétaux herbacés à feuilles laciniées, semblables à celles de la camomille ; leurs fleurs possèdent cinq sépales, de trois à vingt pétales rouges ou jaunes, sans nectaire, des étamines à anthères noir violacé ou jaunes, et de nombreux carpelles uniovulés disposés en spirale. On trouve dans les zones arides des Causses, des Cévennes et d'Alsace *Adonis vernalis,* à fleurs jaunes, surtout commun en Europe centrale et Asie centro-occidentale ; *A. aestivalis* et *A. autumnalis,* à fleurs rouges, sont bien plus répandus en France.

La flore de nos régions compte une dizaine d'espèces des genres *Pulsatilla* et *Anemone* (pulsatilles et anémones). Celles-ci ont un rhizome irrégulier d'où naissent une ou plusieurs tiges annuelles à feuilles radicales, lobées, divisées et même laciniées. La fleur possède cinq à quinze tépales, accompagnés éventuellement de bractées plus ou moins comparables à un calice, alors que les tépales sont bleus, pourprés, rouges ou blancs. Les plus extérieurs de ceux-ci d'ailleurs peuvent aussi former une sorte de calice, comme chez la ficaire. Les étamines, nombreuses, contrastent par la couleur avec les tépales.

On rencontre, dans presque toute la France, l'anémone pulsatille *(Pulsatilla vulgaris = Anemone pulsatilla),* qui est couverte de poils argentés, y compris le dos des tépales. Les styles s'allongent beaucoup après la fructification et par leurs longs poils servent d'appareil de dissémination aux akènes. Il y a de nombreuses espèces endémiques de pulsatilles (une trentaine, dont six en France).

L'anémone des bois ou sylvie *(Anemone nemorosa),* à fleur solitaire blanche ou rose, est répandue dans toute l'Europe. Elle fleurit au printemps. *A. coronaria,* à fleurs semblables à celles des pavots et de couleur variée (bleue, rouge, blanche), s'épanouit dès le mois de février. Les fleurs blanches d'*A. vernalis,* des pâturages de montagne, sont également précoces. L'anémone hépatique *(A. hepatica)* possède des feuilles lobées et triangulaires, rougeâtres au-dessous, et des fleurs blanches, rouges ou bleutées. Les anémones sont souvent cultivées dans les jardins. Elles comptent plus de cent vingt espèces.

Les pigamons, du genre *Thalictrum,* comprennent cent vingt espèces de plantes herbacées des régions tempérées et froides de l'hémisphère boréal. Elles ont des feuilles très ramifiées, engainantes à la base, munies parfois d'appendices stipellaires à l'endroit des ramifications de leur rachis. Les petites fleurs sont jaunes, pourprées ou blanc verdâtre, à quatre ou cinq tépales, à étamines munies de grandes anthères portées par de longs filets. Il y a quelques carpelles uniovulés devenant des akènes côtelés ou ailés. On trouve dans les bois des montagnes, jusqu'à 2 300 m d'altitude, le pigamon à feuilles d'ancolie *(Th. aquilegifolium),* qui a des grappes dressées de fleurs à étamines blanches, roses ou violacées. Certaines espèces exotiques ou de nos régions sont cultivées dans les jardins de rocailles ; elles sont vénéneuses par suite de la présence d'alcaloïdes (berbéridine, magnoflorine), surtout dans les parties souterraines.

Les clématites (genre *Clematis*) sont le plus souvent volubiles, vivaces et plus ou moins ligneuses. Il y en a plus de trois cents espèces. Elles ont des feuilles opposées et composées-pennées. Elles forment un grand nombre de fleurs, solitaires ou réunies en inflorescences,

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

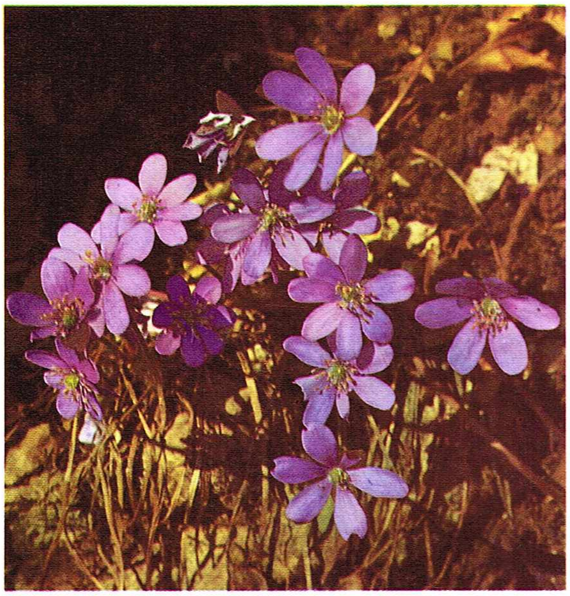

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***De gauche à droite : anémone hépatique*** **(Anemone hepatica) ;** ***anémone printanière*** **(Anemone vernalis) ; Pulsatilla alpina subsp. apiifolia.**

qui présentent quatre grands tépales ou plus, de nombreuses étamines et des carpelles uniovulés devenant des akènes à long style plumeux servant à la dissémination. Leurs pétioles et les rachis de leurs feuilles leur servent de vrilles.

On trouve dans les forêts et les haies, jusqu'à 2 100 m d'altitude, la vigne blanche *(Clematis vitalba)*, qui peut atteindre une longueur de 5 m ; elle possède des feuilles composées de trois à sept folioles, des fleurs blanches ou jaunâtres et des akènes plumeux. *C. flammula*, commun dans la région méditerranéenne, est caractérisé par ses feuilles composées-bipennées, à folioles étroites. Quant à *C. integrifolia*, c'est une espèce non grimpante du centre et du sud-est de l'Europe, qui possède des feuilles simples et des fleurs violettes ou bleues. On cultive souvent les clématites dans les jardins ; on peut consommer les jeunes pousses de la vigne blanche comme des asperges et utiliser ses tiges flexibles pour les travaux de vannerie.

Les plantes étudiées jusqu'à maintenant, à carpelles uniovulés devenant des akènes, forment la sous-famille des *Ranunculoïdées*. Celle des *Helléboroïdées* dont nous allons maintenant étudier les principales espèces, est caractérisée par des carpelles pluriovulés qui deviennent des baies ou, le plus souvent, des follicules.

Le raisin-de-loup *(Actea spicata)* fait partie d'un genre de sept espèces, comprenant des herbes vivaces à courtes grappes de fleurs blanches. Il y a quatre sépales, quatre pétales très petits, de nombreuses étamines et un seul carpelle. Le fruit est une baie pluriovulée. La plante croît dans les montagnes d'Europe ; des espèces voisines existent en Asie tempérée.

Le genre *Cimicifuga* est proche du précédent, mais possède deux à huit follicules secs. Il habite les régions tempérées de l'hémisphère Nord. *C. racemosa* a des feuilles très découpées et de belles fleurs blanches, ce qui le fait utiliser dans les jardins malgré son odeur fétide. *C. foetida* est présent en Europe orientale.

L'hellébore d'hiver *(Eranthis hyemalis)* est une herbe des lieux humides des montagnes de l'Europe centrale. Il fleurit dès le mois de février, d'où son nom. Il possède des fleurs à cinq à huit sépales jaunes entourés par une bractée et cinq à huit pétales tubuleux laciniés. Il y a cinq à huit follicules. On le cultive dans les jardins pour sa rusticité et sa floraison précoce.

Les hellébores proprement dits *(Helleborus)* fleurissent souvent en plein hiver, ce qui les fait appeler roses de Noël. Ce sont des plantes herbacées vivaces, à feuilles pédalées ; leurs fleurs possèdent cinq sépales colorés, des pétales tubuleux nectarifères réduits et des étamines nombreuses et colorées. L'hellébore fétide *(H. foetidus)*, d'Europe occidentale et méridionale, présente des feuilles inférieures pourvues de sept à onze folioles lancéolées, dentées, et une inflorescence bien fournie. L'hellébore vert *(H. viridis)* a des fleurs vertes, groupées par deux à quatre en inflorescences pédonculées. L'hellébore noir *(H. niger)*, à folioles larges et à grandes fleurs solitaires ou géminées, est la véritable rose de Noël. Les deux dernières espèces citées sont souvent cultivées.

Le genre *Aquilegia* (ancolies) comprend soixante-dix espèces herbacées à feuilles composées, et à fleurs possédant cinq sépales, cinq pétales caractéristiques, dilatés dorsalement en éperons nectarifères, de nombreuses étamines superposées en rangées verticales et des carpelles à peu près libres. Il y a des staminodes entre les étamines et les carpelles. Dans les prairies et les bois d'Europe centrale et occidentale, d'Italie et d'Afrique du Nord, on rencontre l'ancolie commune *(A. vulgaris)*, à fleurs bleues. Dans les pâturages et les forêts des Alpes et du nord des Apennins croît *A. alpina*.

Les nigelles (genre *Nigella*) sont surtout méditerranéennes, comme la nigelle de Damas *(N. damascena)* et la nigelle des champs *(N. arvensis)*, qu'on trouve dans le bassin méditerranéen, en Europe centrale et occidentale

▼ ***Clématites (variété horticole).***

Ingegnoli

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***De gauche à droite : nigelle*** **(Nigella damascena) ;** ***ancolies*** **(genre Aquilegia),** ***espèces cultivées à fleurs blanches et à fleurs jaunes.***

et en Asie Mineure. Ce sont des plantes herbacées, à feuilles très découpées en segments linéaires et à fleurs à cinq sépales bleus ou jaunâtres, parfois entourées d'un involucre de feuilles ; les pétales sont petits, tubuleux et bilabiés. Les étamines sont nombreuses ; les carpelles, pluriovulés, au nombre de cinq, sont unis au moins partiellement en un gynécée syncarpe.

Le populage *(Caltha palustris)* est une plante herbacée âcre et corrosive, qui possède des feuilles palmées et de belles fleurs à cinq sépales jaunes et brillants, ainsi que de nombreuses étamines. Son aire immense englobe presque toute l'Europe, le Nord de l'Asie, une partie de la Chine et du Japon, la plus grande partie du Canada et le nord des États-Unis (elle est donc holarctique). On s'en sert souvent pour orner les plans d'eau des jardins.

Le trolle d'Europe ou boule d'or *(Trollius europaeus)* appartient à un genre d'une vingtaine d'espèces de l'hémisphère Nord. Il possède des fleurs solitaires présentant cinq à quinze sépales jaune clair, qui donnent à l'ensemble un aspect globuleux, alors que les pétales, au moins au nombre de cinq, sont réduits à des languettes nectarifères. Il a de nombreux carpelles libres pluriovulés en plusieurs verticilles, qui deviennent autant de follicules. Le trolle se trouve dans les pâturages humides des montagnes, et dans le nord de l'Europe, mais il est aussi souvent cultivé.

Dans les mythologies des peuples méditerranéens et nordiques, on parle souvent, comme symbole du maléfice et de la vengeance, des espèces du genre *Aconitum,* ou aconits. Ce sont des plantes herbacées vivaces, à sou-

M. et S. Prato

M. et S. Prato

▶ ***A gauche : aconit*** **(Aconitum napellus).** ***Cette espèce compte parmi les plantes les plus toxiques d'Europe. A droite : trolle ou boule d'or*** **(Trollius europaeus).**

che tubéreuse. Leurs fleurs sont zygomorphes, en épis ou en panicules terminaux, avec cinq sépales pétaloïdes, dont le supérieur a la forme d'un casque ou d'un capuchon. Les pétales, au nombre de deux à dix, sont petits, en massue, blanchâtres, et leurs limbes forment des éperons nectarifères qui ressemblent à des bonnets phrygiens. Les feuilles sont alternes et composées, palmées ou pédalées.

Les deux cent soixante-quinze espèces d'aconits répandues dans les régions tempérées et froides de notre hémisphère sont en Europe les plantes les plus vénéneuses. Beaucoup contiennent, notamment dans les tubercules, de l'aconitine, qu'on utilise en médecine comme analgésique et sédatif de la toux. L'espèce la plus commune de nos forêts et de nos pâturages est l'aconit napel *(A. napellus)* appelé aussi casque de Jupiter ou char de Vénus, à belles fleurs bleu foncé. Il est plus fréquent en montagne et c'est là qu'on le récolte pour les usages pharmaceutiques. *A. vulparia (A. lycoctonum)* a des feuilles à larges segments et des fleurs jaunes ; il contient des substances voisines de l'aconitine, mais plus toxiques, ce qui en empêche l'emploi. *A. anthora,* à fleurs jaunes et à feuilles laciniées, est beaucoup moins toxique que l'aconit napel.

Le genre *Delphinium* est proche du précédent. Ce sont des plantes herbacées à feuilles alternes, lobées ou laciniées. Les fleurs zygomorphes forment de belles panicules ou des grappes et ont cinq sépales pétaloïdes ; le sépale postérieur forme un éperon, alors que les quatre pétales sont réduits. Il y a de nombreuses étamines et trois à cinq carpelles libres.

Chez les *Consolida,* il n'y a que deux pétales soudés en un nectaire, et un seul carpelle. Le pied-d'alouette ou *C. regalis (Delphinium consolida),* à tige velue et à fleurs bleues, est commun dans les terrains calcaires de l'Europe, sauf en Espagne et en Grande-Bretagne.

Delphinium et *Consolida,* souvent cultivés pour l'ornement, sont toxiques comme les aconits.

On utilise en pharmacie l'une des deux espèces du genre *Hydrastis,* l'hydrastis du Canada *(H. canadensis),* qui habite la face atlantique de l'Amérique du Nord. Ce genre se place dans la sous-famille des *Hydrastoïdées.* Le fruit est composé de petites baies issues de chacun des cinq à douze carpelles biovulés. On extrait des rhizomes et des racines de ces plantes divers alcaloïdes dont l'hydrastine, à noyau isoquinoléine, qui a une action hémostatique, antihémorroïdaire et ocytocique.

Les pivoines *(Paeonia)* jouissent d'une grande faveur comme plantes ornementales. Considérées jadis comme des Renonculacées, elles doivent en fait être placées dans une famille séparée des *Péoniacées (Paeoniaceae).* Ce sont trente-trois espèces d'herbes ou d'arbustes vénéneux habitant l'Eurasie tempérée, la région méditerranéenne, et, pour deux d'entre elles, le versant pacifique de l'Amérique du Nord. Elles ont de grandes feuilles très divisées ; les fleurs, généralement à cinq sépales, cinq à huit

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *A gauche : pivoine* **(Paeonia),** *variété horticole.*
A droite :
Delphinium cachemirianum.

▼ *A gauche :*
Aquilegia bernardi ;
à droite :
Mahonia aquifolium.

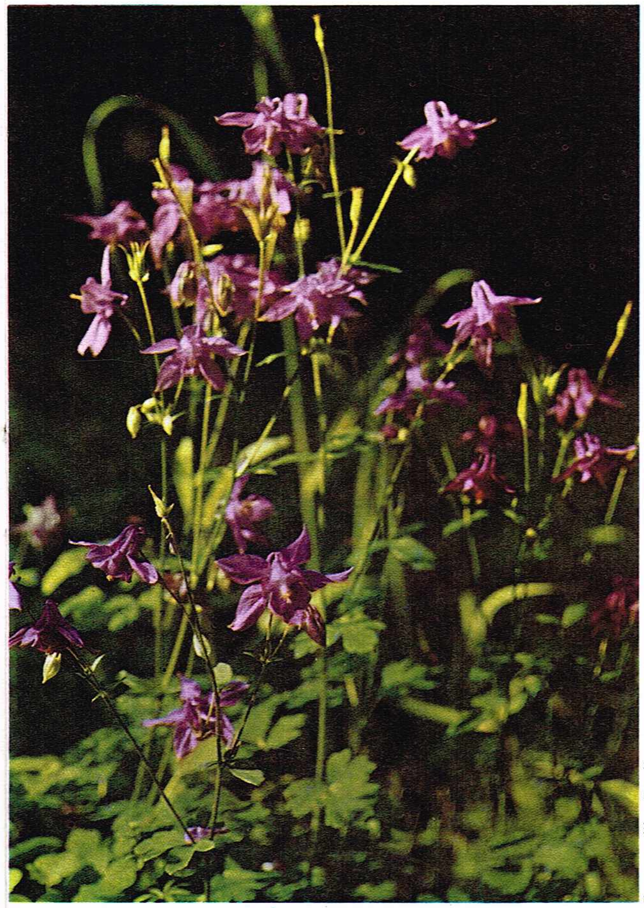

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Nymphéa blanc (Nymphaea alba), spontané dans les étangs et les eaux à cours lent.*

pétales roses ou rouges, rarement blancs, ont de nombreuses étamines, qui correspondent en fait à la division de cinq étamines primitives (polyandrie secondaire) et naissent de façon centrifuge, et deux à cinq carpelles libres, pluriovulés, entourés d'un disque. On rencontre dans les montagnes du Midi *Paeonia peregrina,* du sud de l'Europe, et dans les bois de la France centrale la pivoine coralline *(P. mascula, = P. corallina),* de distribution comparable. Cette dernière est cultivée, comme *P. officinalis,* du sud et du centre de l'Europe, présent dans le sud de la France, et *P. suffruticosa (P. montana),* de Chine. Il se peut que les Péoniacées se placent en fait parmi les Guttiférales, qui ont comme elles un androcée pseudopolyandrique, et spécialement au voisinage des Dilléniacées.

La famille des *Berbéridacées (Berberidaceae)* comprend quatorze genres et six cent cinquante espèces d'arbustes et d'herbes vivaces, à feuilles alternes, simples ou plus souvent composées, et à fleurs régulières, hermaphrodites, cycliques, di- ou trimères, fréquemment pourvues de huit ou douze tépales en quatre cycles, les deux cycles internes étant nectarifères.

Les étamines, à anthères s'ouvrant par deux clapets, forment aussi deux cycles. L'ovaire supère, probablement unicarpellé, a une seule cavité avec plusieurs ovules. Les fruits sont le plus souvent des baies ou des follicules. Ces plantes ont une vaste distribution géographique dans l'hémisphère Nord ; elles préfèrent les climats tempérés ou tempérés froids. *Berberis* et *Mahonia* sont présents dans l'hémisphère Sud.

Le genre *Berberis* comporte cinq cents espèces. L'épine-vinette *(B. vulgaris)* se rencontre dans presque toute la France. C'est un arbuste atteignant 3 m, à feuilles ovales, dentées et ciliées et réunies en faisceaux sur de très courts rameaux axillaires de feuilles transformées en épines ramifiées. Au printemps apparaissent les inflorescences pendantes, qui forment de petites baies rouges, oblongues, agréablement amères, et employées pour faire des gelées. L'épine-vinette donne aussi un beau bois pour le tournage. Son écorce sert à teindre en jaune les cuirs et les tissus, et elle contient des alcaloïdes, surtout la berbérine, utiles pour la préparation de toniques et d'antipyrétiques. Malheureusement, c'est une plante nuisible, car elle est l'hôte écidien de la rouille du blé, aussi a-t-on cherché à la détruire en bien des endroits.

Les *Mahonia,* asiatiques et américains, sont très cultivés dans les parcs. Ce sont des arbustes toujours verts, voisins des *Berberis*. Leurs feuilles sont composées imparipennées et souvent épineuses, leurs fleurs jaune vif, et leurs baies bleutées. *M. aquifolium,* de l'ouest de l'Amérique du Nord, est le plus répandu.

Les *Podophyllum* de l'Est asiatique et de l'est de l'Amérique du Nord appartiennent à la sous-famille des *Podophylloïdées,* qui n'a pas de pétales nectarifères, mais dont les tépales externes sont transformés en vrai calice, et dont les feuilles sont peltées. *P. peltatum,* de l'est de l'Amérique du Nord, contient de la podophyllotoxine et ses dérivés, laxatifs et purgatifs, mais surtout antimitotiques et par conséquent antitumoraux.

La famille des *Nymphéacées (Nymphaeaceae)* est très spécialisée du fait de son adaptation à la vie dans les eaux douces du monde entier. Elle compte huit genres et soixante-dix espèces à vastes feuilles peltées ou cordiformes, à grandes fleurs portées par un long pédoncule et à ovules disposés sur les parois des carpelles soudés (placentation laminale). Par ailleurs, les fleurs possèdent un périanthe généralement spiralé, au moins en partie, formé de nombreuses pièces différenciées ou non en calice et corolle. Il peut y avoir des pétales nectarifères *(Nuphar)*. Les étamines sont le plus souvent en nombre indéfini, et montrent parfois des intermédiaires avec les tépales. Les carpelles sont libres ou soudés et l'ovaire formé dans le second cas peut être infère. Les fruits sont des akènes ou des sortes de baies très particulières.

Les *Nuphar* ont un périanthe de quatre à six sépales pétaloïdes et de nombreux pétales nectarifères passant aux étamines. L'ovaire est supère. Le nénuphar jaune *(Nuphar luteum)* possède des feuilles cordiformes dont certaines sont fines et immergées, les autres flottantes, et des fleurs jaunes ou pourprées à odeur alcoolique. Les fruits sont en forme d'ampoules.

Le nom de la famille est emprunté à celui du genre *Nymphaea,* qui compte une quarantaine de plantes des marais qui enfoncent leurs racines au fond des pièces d'eau et peuvent supporter un abaissement important du niveau. Leur tige est riche en tissus aérifères. Leurs feuilles, cordiformes, plates et flottant sur l'eau, ont la face supérieure protégée par une couche cireuse et riche en stomates ; la face inférieure est rougeâtre. Les fleurs peuvent être blanches, jaunes, bleues, roses ou rouges selon les espèces. Elles ont quatre sépales distincts, de nombreux pétales et un ovaire semi-infère. Les nymphéas se rencontrent fréquemment dans les jardins et les serres. *Nymphaea alba* est le nénuphar blanc d'Europe, très rare en Afrique du Nord et Asie Mineure. Le terme lotus d'Égypte recouvre les espèces *N. lotus,* des tropiques et régions subtropicales de l'Ancien Monde, et *N. caerulea* (lotus bleu), du bassin du Nil.

Les plantes les plus célèbres des grands fleuves de l'Amérique tropicale sont les deux espèces du genre *Victoria* qui n'est connu que depuis 1801.

Victoria regia, de l'Amazonie, a des feuilles atteignant 2 m de diamètre, orbiculaires, a bords relevés ; la face inférieure de ces feuilles a de grosses nervures portant des épines aiguës, ce qui est exceptionnel pour une plante aquatique ; les fleurs blanches, d'un diamètre de 30 à 40 cm, commencent à sortir à la fin de l'après-midi, et ont une odeur d'ananas ; la nuit et le jour suivant, elles s'ouvrent complètement et deviennent roses ou rouges ; pendant la floraison, leur température s'élève d'environ 15 °C. Les sépales et les pétales sont différenciés, l'ovaire est supère. Cette espèce, avec *V. cruziana,* du Paraguay, est souvent cultivée dans les serres. Les graines grillées sont comestibles.

Le lotus de l'Inde *(Nelumbo nucifera),* originaire d'Asie centrale et orientale, du Japon et du nord de l'Australie, est l'une des deux espèces de *Nelumbo,* l'autre *(N. lutea)* étant américaine. Ce genre forme une sous-famille et peut-être une famille distincte. Les limbes des feuilles peltées émergent de l'eau. Les fleurs solitaires, odorantes, roses, les dépassent. Le réceptacle est massif et creusé d'alvéoles abritant les carpelles uni- ou biovulés. Le rhizome et les akènes sont comestibles.

Nous dirons un mot des *Cératophyllacées,* plantes flottantes et immergées dans les eaux à courant lent, qui ne possèdent pas de racines ni de stomates et ont des feuilles verticillées, laciniées et denticulées, ainsi que des fleurs unisexuées submergées, verdâtres, à nombreux tépales et étamines, mais à un seul carpelle uniovulé. Elles ne comprennent que le genre *Ceratophyllum* (cornifle) avec quatre à six espèces. *C. demersum* est commun partout.

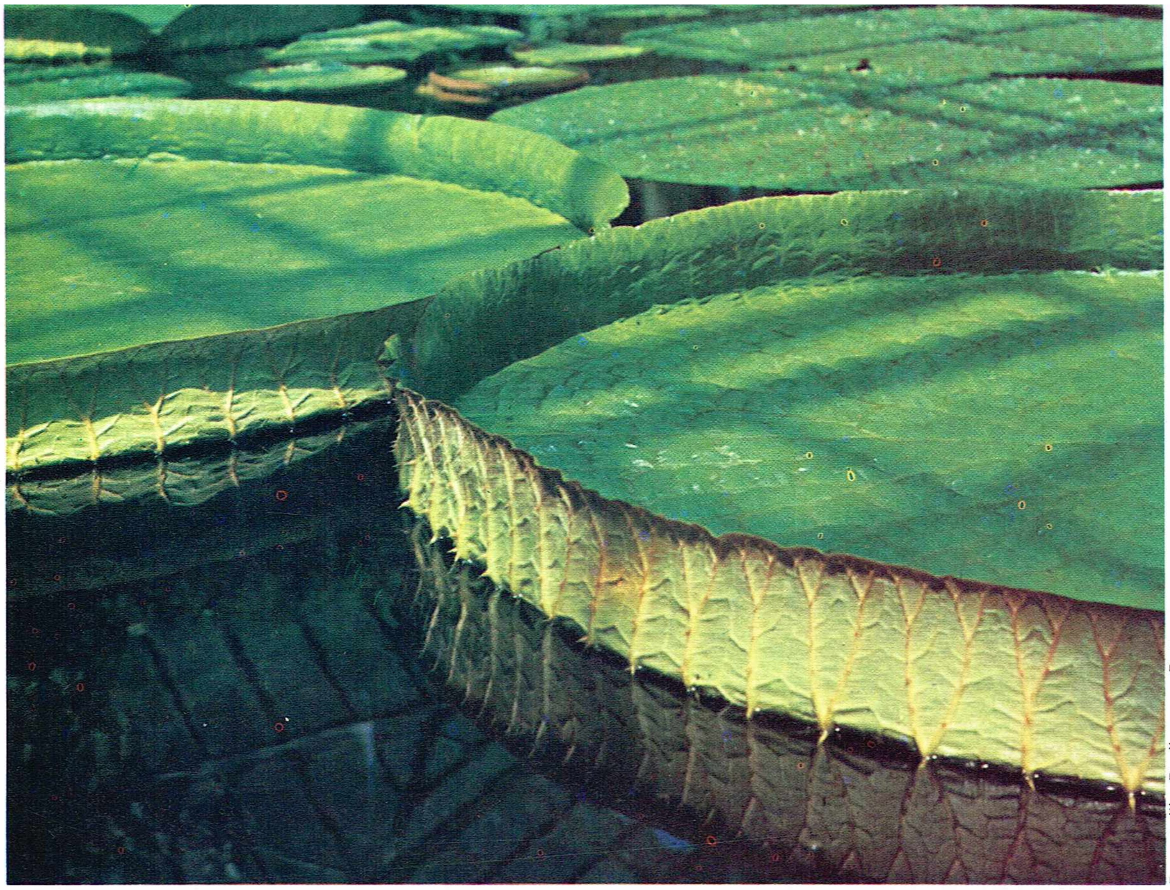

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ **Victoria regia,** ***Nymphéacée des grands fleuves d'Amérique tropicale, est cultivé en serre, en Europe, à titre de curiosité.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ ***Fleur de lotus*** **(Nelumbo).**

La famille des *Aristolochiacées (Aristolochiaceae)* comprend des plantes herbacées vivaces ou des arbrisseaux. On les rapproche des Magnoliales ; le genre *Saruma* a en effet les carpelles presque libres. Mais les autres genres sont très spécialisés et justifient la création d'un ordre des *Aristolochiales,* qu'on ajoute ici aux Magnoliales. Leurs feuilles sont grandes, alternes, simples, volubiles, sans stipule et riches en huiles. Les fleurs ont chez les *Aristolochia* une structure qui favorise la pollinisation par les mouches. Lorsque ces Insectes ont pénétré dans le périanthe, ils y sont retenus par des poils tournés vers le bas et ne peuvent en sortir qu'au flétrissement du périanthe. Ils sont alors chargés de pollen et vont féconder de la même façon l'ovaire d'une autre fleur. Les étamines extrorses, formant un verticille de six, sont insérées sur l'ovaire qui est infère et soudées au style en un gynostème. L'ovaire est fécondable avant la maturité des étamines (protérogynie). En général, au moment de la floraison, ces plantes émettent une odeur désagréable de viande en putréfaction qui attire les mouches, mais nuit à l'utilisation des aristoloches pour l'ornement. Les fruits sont des capsules. Les autres Aristolochiacées ont trois sépales, éventuellement trois pétales, un nombre variable d'étamines libres ou unies entre elles et au style, et un ovaire généralement infère avec quatre à six carpelles

▼ ***A gauche : gynécée de*** **Nelumbo** ***vu par le dessus, montrant les orifices des loges creusées dans le réceptacle floral et contenant les carpelles. A droite : feuille de*** **Nelumbo nucifera.**

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

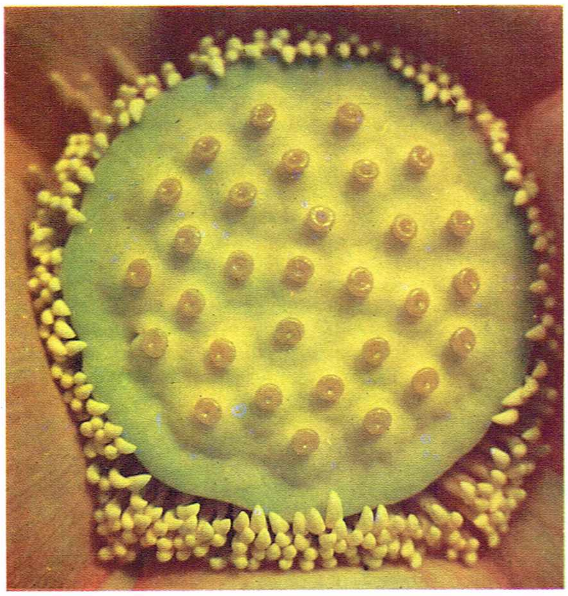

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

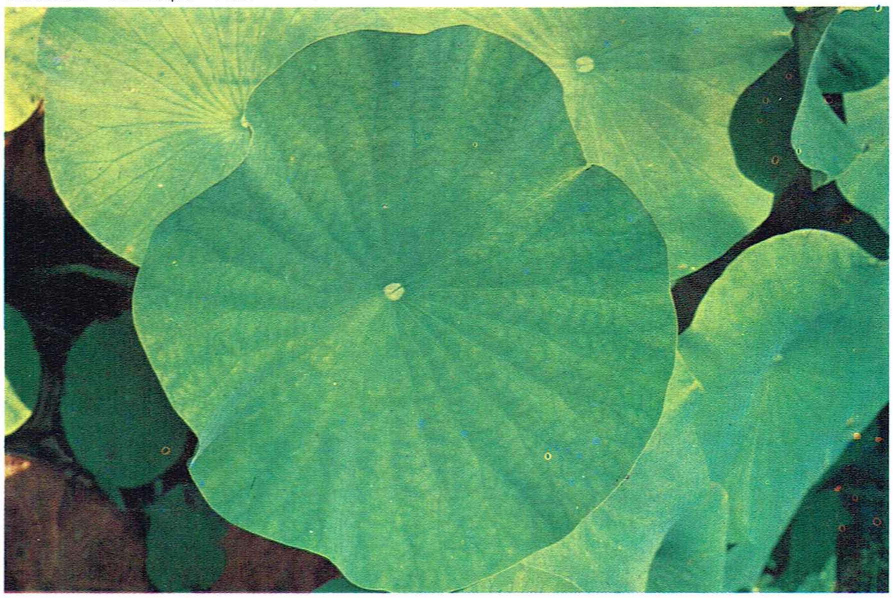

▶ **Brugmannsia zipellii,**
Rafflésiacée parasite de Bornéo et de Java.

I.G.D.A.

▼ **Cytinus hypocistis** *sur l'appareil radical d'un* **Cistus.**

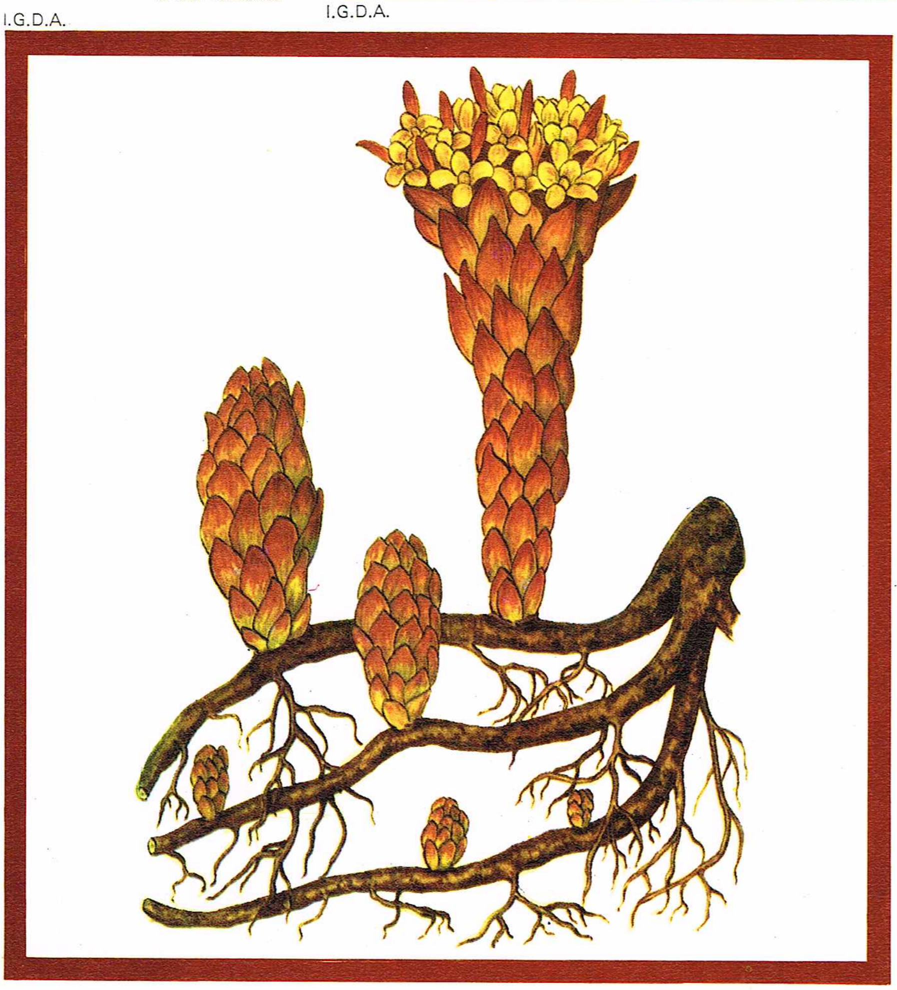

I.G.D.A.

pluriovulés. Les sept genres comptent six cents espèces environ, dont cinq cents aristoloches.

L'aristoloche clématite *(Aristolochia clematitis)* a des faisceaux axillaires de fleurs jaunâtres, avec, comme chez les autres espèces du genre, un périanthe recourbé, gonflé en utricule au niveau de l'androcée, et rétréci en tube vers le haut, avant de s'épanouir en pavillon. Les autres espèces qui croissent en Europe méridionale et dans les régions méditerranéennes ont des fleurs solitaires ; il s'agit par exemple d'*A. rotunda,* à feuilles sessiles et grosse racine tuberculeuse de même qu'*A. longa* à feuilles pétiolées, et d'*A. pistolochia,* à racines tuberculeuses fasciculées et feuilles à bordure cartilagineuse.

On trouve dans l'hémisphère Nord le genre *Asarum,* avec une centaine d'espèces, surtout dans le Sud-Est asiatique. Le périanthe est trimère, et il y a douze étamines en deux verticilles. *Asarum europaeum,* appelé cabaret ou oreille-d'homme, vit dans les lieux ombragés du nord, de l'est et du centre de la France, ainsi qu'en Europe centrale et dans le nord de l'Asie.

La famille des *Rafflésiacées (Rafflesiaceae)* comprend environ neuf genres et cinquante-cinq espèces de plantes dépourvues de chlorophylle, et qui sont par conséquent parasites d'autres plantes. Elles ont un corps végétatif, que l'on ne peut appeler vraiment une tige, massif, charnu, dépourvu le plus souvent de feuilles, et toujours de racines, fixé à l'hôte qu'il envahit de filaments cellulaires ressemblant à un mycélium de Champignon. Les fleurs peuvent être très grandes ; elles sont généralement unisexuées et ont un périanthe de quatre à dix tépales souvent pétaloïdes : les mâles ont de nombreuses étamines extrorses, le plus souvent unies en colonne, et les femelles ont un ovaire supère ou infère, en général à nombreux carpelles. Les ovules sont très nombreux, uni- ou bitegminés. Les fruits sont des baies charnues riches en graines. Les Rafflésiacées habitent les contrées tropicales, et il en existe deux espèces, européennes, dans la région méditerranéenne, appartenant au genre *Cytinus.*

Cytinus hypocistis vit en parasite sur des cistes, et produit un épi dense de fleurs jaune rougeâtre. Ses jeunes pousses sont parfois consommées comme des asperges.

Les douze espèces de *Rafflesia,* extraordinaires plantes des forêts d'Indo-Malaisie, sont parasites sur les racines de liane du genre *Cissus* (Vitacées) surtout. Il s'agit en particulier de *R. arnoldii,* de Sumatra, dont la fleur (la plus grande de la terre), d'un diamètre d'environ un mètre et d'un poids de plus de 10 kg, est située au ras du sol.

Sarracéniales

Il s'agit de Végétaux qui se rapprochent des Ranales, des Rhœadales et des Guttiférales. Les fleurs sont spiralées en partie et verticillées. Il y a un périanthe parfois non différencié en calice et corolle. Les étamines peuvent être nombreuses, le gynécée est supère, formé de trois à cinq carpelles soudés, avec un nombre variable d'ovules. Ces plantes présentent la particularité d'être carnivores.

Les *Népenthacées (Nepenthaceae)* sont une petite famille réduite aux soixante-dix-neuf espèces du genre *Nepenthes,* dont les feuilles, pétiolées et pourvues d'une partie élargie, se terminent par une ascidie : il s'agit d'une petite urne munie généralement d'un couvercle, et qui sert à capturer et à digérer des proies de taille modeste. Au fond de l'ascidie se trouve un liquide à odeur nauséabonde qui attire les Insectes; ceux-ci glissent le long de la paroi de l'ascidie garnie de sécrétion cireuse et tombent au fond de l'urne. Là, ils sont digérés par des enzymes. Les *Nepenthes* sont des plantes buissonnantes souvent épiphytes et grimpantes grâce aux pétioles des feuilles. Les fleurs sont unisexuées, avec trois ou quatre tépales libres et nectarifères. Les fleurs femelles ont un ovaire à trois ou quatre carpelles avec plusieurs ovules en placentation plus ou moins laminale; les fleurs mâles ont souvent de nombreuses étamines en plusieurs verticilles. Les fruits sont des capsules loculicides, d'où sortent de très petites graines ailées. Les *Nepenthes* sont répandus en Indo-Malaisie, particulièrement à Bornéo et à Sumatra. On les cultive souvent en serre chaude.

La famille des *Sarracéniacées (Sarraceniaceae)* comporte trois genres et seize espèces de plantes herbacées américaines vivant dans les marécages, avec une rosette de feuilles repliées en tube élargi, ressemblant à une pipe ou à une trompette, dans lequel se trouvent des replis et des poils, alors qu'il y a au sommet une partie élargie formant un opercule immobile. Il y a des glandes nectarifères à la surface interne, dans la région supérieure. En dessous, cette surface est glissante et possède des appendices dirigés vers le bas qui entraînent les Insectes qui s'y risquent. Il y a encore en dessous une zone en nasse avec des poils qui retiennent les proies, et des glandes sécrétant des enzymes. L'absorption des Insectes digérés a lieu au fond de la feuille. Les fleurs hermaphrodites, solitaires ou en grappes, ont un périanthe différencié en trois à six sépales et cinq pétales, qui peuvent manquer. Les étamines sont nombreuses. L'ovaire supère est formé de trois à cinq carpelles soudés. Le stigmate est dilaté en parapluie ou en étoile. Les fruits sont des capsules.
Les *Sarracenia* possèdent des ascidies blanchâtres ou pourprées et habitent l'est de l'Amérique du Nord; *S. purpurea* s'est naturalisé dans l'ouest de la Suisse. *Darlingtonia californica,* seule espèce du genre, vit en Californie et en Oregon.

Rhœadales

Cet ordre renferme des plantes herbacées, à fleurs pourvues d'un calice et d'une corolle, dimères ou tétramères, rarement pentamères. Les étamines sont en nombre égal ou supérieur à celui des pétales. L'ovaire est supère et formé de deux ou trois carpelles soudés. La placentation est le plus souvent pariétale ou en est dérivée. Les familles appartenant à cet ordre sont au nombre de cinq ou six. On admet assez souvent aujourd'hui que les Papavéracées forment un ordre spécial (Papavérales), plus proche des Ranales, qui, comme elles, possèdent des alcaloïdes à noyau benzylisoquinoléine, telle la morphine.

Les *Papavéracées (Papaveraceae)* sont une famille de quarante-sept genres et sept cents espèces de plantes herbacées annuelles ou vivaces; ce sont rarement des arbustes ou des arbrisseaux, et encore plus rarement des arbres *(Bocconia).* Elles sont répandues surtout dans les zones tempérées et subtropicales de l'hémisphère Nord, alors qu'elles sont plus rares dans les régions tropicales et dans l'hémisphère austral. Elles produisent le plus souvent du latex dans des laticifères articulés. Leurs feuilles sont alternes, simples ou composées. Leurs fleurs, hermaphrodites, ont un calice formé de deux sépales caducs et une corolle le plus souvent constituée par quatre pétales; les étamines sont au nombre de quatre, les deux latérales pouvant être divisées chacune en trois, ou bien elles sont beaucoup plus nombreuses par division congénitale intense des quatre étamines primitives (polyandrie secondaire); l'ovaire est uniloculaire, à placentation pariétale. Les fruits sont des capsules ou des siliques, parfois des akènes; les graines ont un petit embryon et sont riches en albumen.
Certains auteurs ne font pas entrer les fumeterres *(Fumaria)* dans la famille des Papavéracées, mais en font une famille à part, celle des *Fumariacées (Fumariaceae).* De toute manière, elles forment au moins une sous-famille, les *Fumarioïdées,* à fleurs zygomorphes transversalement, avec deux sépales médians caducs, quatre pétales en deux cycles, l'extérieur latéral, ayant au moins une de ses pièces éperonnée, et l'intérieur médian. L'éperon du cycle latéral de pétales devient supérieur par torsion du pédoncule floral. Il est parfois très court et massif. Les étamines sont réparties en deux groupes latéraux dont chacun est formé par trois étamines soudées entre elles par leur filet. L'anthère de l'étamine médiane est biloculaire, celle des étamines latérales est uniloculaire. L'ovaire est bicarpellé et uniloculaire. Dans le genre *Fumaria* (fumeterres), il possède un style caduc, ainsi qu'un stigmate divisé en deux lobes, et les fruits, à peu près globuleux ou comprimés, sont indéhiscents, avec une seule graine. Les fumeterres sont communes surtout dans la région méditerranéenne, mais aussi en Europe centrale et en Asie centrale et occidentale. On en trouve treize espèces en France.
La fumeterre officinale *(Fumaria officinalis)* atteint 50 à 60 cm. Elle possède des tiges dressées ou diffuses, des feuilles glauques, plusieurs fois pennatiséquées, avec un long pétiole et les segments du limbe linéaires-oblongs. Les fleurs sont longues de 7 à 9 mm, avec des sépales blanchâtres, moins larges que la corolle; celle-ci est blanc rosé ou pourprée, et colorée plus intensément au sommet. Le fruit est tronqué à l'apex. On trouve la plante dans les lieux cultivés; elle fleurit d'avril à septembre. Elle se rencontre dans presque toute l'Europe, l'Asie Mineure et l'Afrique du Nord, jusqu'à 1 700 m d'altitude.
Fumaria capreolata est haut de 20 cm à 1 m. Ses tiges sont fréquemment rampantes. Ses feuilles sont glauques, plusieurs fois pennatiséquées, à segments ovales-oblongs. Les fleurs sont longues de 9 à 14 mm, et possèdent des sépales blanchâtres plus larges que la corolle; les pétales sont blancs ou rosés, ou même jaunâtres, avec un sommet

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

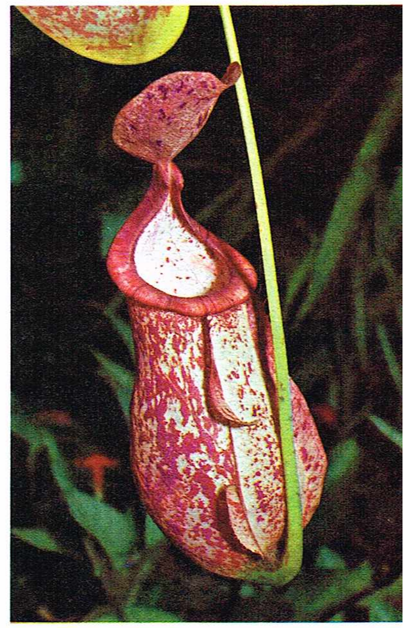

▲ ***Ascidie de*** **Nepenthes intermedia.**

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ ***Feuilles formant des ascidies chez*** **Sarracenia purpurea.**

▼ ***Fleur de*** **Sarracenia purpurea.** ***Noter le stigmate en parapluie.***

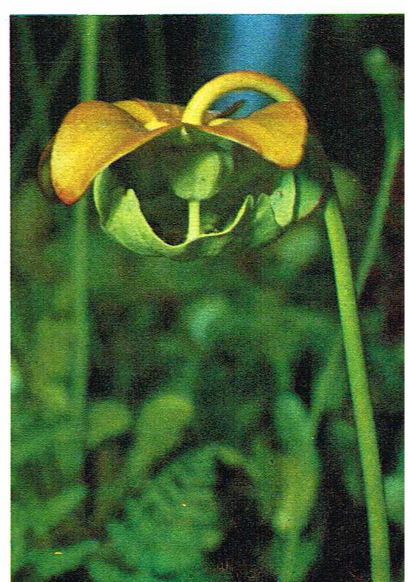

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ **Darlingtonia californica,** *plante des marais du sud des États-Unis.*

S. Prato

▼ *Fleurs d'une Fumariacée,* **Dicentra spectabilis (Dielyctra spectabilis),** *appelée communément cœur-de-Marie.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

souvent plus foncé, de couleur pourprée. Les fruits sont globuleux ou légèrement comprimés. On rencontre cette espèce dans les lieux cultivés et les haies, dans la région méditerranéenne, l'ouest et le centre de la France. Elle est presque aussi répandue que la précédente, mais ne s'élève pas dans les montagnes. Elle fleurit d'avril à juin.

Les corydales *(Corydalis)* comprennent, en Amérique du Nord et Eurasie tempérée, deux cent quatre-vingts espèces de plantes herbacées vivaces, bisannuelles ou annuelles, à suc aqueux. Comme les fumeterres, ils ont une corolle munie d'un éperon latéral qui paraît supérieur, et six étamines diadelphes. Mais le style est filiforme et persistant et les fruits sont des siliques à deux ou plusieurs graines noires et luisantes. Certaines espèces sont tuberculeuses.

Parmi les Papavéracées proprement dites, la sous-famille des *Papavéroïdées* comporte des plantes à pétales sans éperon et à étamines nombreuses, munies de laticifères.

Le genre *Chelidonium* ne comprend que la chélidoine, ou grande-éclaire, ou herbe-aux-verrues *(Ch. majus)*. Elle est bisannuelle ou vivace, haute de 20 à 80 cm, à racine pivotante. Ses feuilles sont pétiolées, vertes à la face supérieure, glauques en dessous, pennatiséquées, et avec cinq à onze grands segments à bord découpé et crénelé. Les fleurs forment des ombelles simples, opposées aux feuilles (ramification sympodiale) ou terminales; elles possèdent deux sépales libres, quatre pétales jaune vif et des étamines nombreuses. L'ovaire est bicarpellé, uniloculaire, avec de nombreux ovules sur deux placentas pariétaux, les stigmates alternant avec ceux-ci. Le fruit est une silique dont la déhiscence se fait par deux valves qui s'ouvrent de bas en haut, en laissant en place un *replum* où les graines restent fixées avant d'être disséminées. Ces graines sont brunes, et ont une caroncule (strophiole) blanche. On trouve l'espèce dans les haies et les décombres de l'Europe et du centre est de l'Asie. Elle fleurit au printemps et en été. Elle contient dans toutes ses parties un latex jaune-orangé, âcre et amer, qui renferme divers alcaloïdes qui lui confèrent une action hypnotique faible. La chélidonine qu'elle renferme est de plus anti-

spasmodique. En médecine populaire, on utilise le suc frais pour brûler les verrues.

Parmi les vingt et une espèces du genre *Glaucium* (glaucières), nous citerons le pavot cornu *(Glaucium flavum)*, bisannuel ou vivace, buissonnant, ramifié, haut de 20 à 90 cm, glabre ou hérissé à la base. La plante croît surtout dans les lieux sablonneux des plages, en Europe tempérée, en Asie occidentale et en Afrique du Nord. Elle est cultivée dans les jardins, surtout près de la mer, car elle résiste bien au sel. Elle peut se naturaliser dans les ruines.

Les pavots *(Papaver)* sont des plantes herbacées donnant un latex blanc. Leurs fleurs sont terminales et portées par de longs pédoncules ; elles ont deux sépales caducs, quatre grands pétales chiffonnés dans le bourgeon et de nombreuses étamines. L'ovaire est allongé, constitué par de nombreux carpelles, uniloculaire mais avec quatre à dix-huit cloisons placentaires incomplètes portant de nombreux ovules ; il est muni d'un stigmate sessile, discoïdal, à bord lobé, pourvu au-dessus de rayons papilleux disposés en étoile pour la réception du pollen. Les fruits sont des capsules déhiscentes par des pores dorsaux supérieurs des carpelles, dont chacun est situé entre deux lobes successifs du stigmate qui persiste sur ce fruit. Les graines sont réniformes et ont une surface réticulée et alvéolée.

Les pavots sont répandus surtout dans les zones tempérées de l'hémisphère Nord. On rencontre une espèce *(P. aculeatum)* en Afrique du Sud et dans le Sud-Est australien. Il en existe huit espèces en France, sur les cent que comporte le genre.

Le coquelicot *(Papaver rhoeas)* est annuel, haut de 30 à 60 cm, velu et ramifié. Il possède des feuilles une ou deux fois pennées ; le segment terminal est plus grand que les latéraux. Les fleurs ont des sépales soyeux à l'extérieur. La corolle, d'un diamètre de 6 à 9 cm, est le plus souvent de couleur rouge vif quand elle est ouverte, avec une tache noire à la base de chaque pétale. La capsule est largement ovoïde, arrondie à la base et glabre. L'espèce croît dans les champs, sur les murs, de la proximité de la mer jusqu'à 1 700 m d'altitude dans les montagnes, en Europe tempérée, en Asie occidentale et en Afrique du Nord. Toute la plante, et surtout le latex, contient des alcaloïdes peu actifs. Les pétales, qui sont récoltés, les contiennent aussi, de même que du mucilage ; leur infusion à petite dose est sédative et béchique. Ils renferment par ailleurs des anthocyanosides qui sont utilisées comme colorants.

Papaver hybridum est annuel, haut de 10 à 50 cm, velu et ramifié. Ses feuilles sont deux fois pennatiséquées, avec des segments linéaires-lancéolés terminés par une soie. La corolle des fleurs a un diamètre de 2,5 à 5 cm quand elle est ouverte ; elle est de couleur rouge violacé, et a aussi une tache foncée à la base de chaque pétale. La capsule est ovoïde, côtelée et munie de soies. On trouve cette espèce dans les prés, sur les murs, etc., du niveau de la mer au pied des montagnes en Europe centrale et méridionale, en Asie occidentale et en Afrique du Nord.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Les coquelicots* (Papaver rhoeas) *poussent fréquemment dans les champs de plantes cultivées.***

Le pavot somnifère *(Papaver somniferum)* est annuel, haut de 25 cm à 1,50 m, et peu ramifié. Il est glauque et glabre inférieurement, sauf dans la sous-espèce *setigerum*, à soies raides. Ses feuilles sont oblongues, à bords sinués-dentés. Les fleurs ont des pétales blancs, roses, rouges, violacés, et le plus souvent avec une tache foncée à la base. Le fruit est une grosse capsule. Cette espèce a été répandue par la culture en Europe méridionale, en Afrique du Nord, en Asie, en Amérique du Nord et centrale mais son origine est douteuse, probablement méditerranéenne orientale. En Europe centrale, on cultive le pavot pour ses graines, dont on extrait une huile comestible et siccative (huile d'œillette). On l'utilise aussi comme solvant de médicaments et, iodée, comme opacifiant radiologique. En Turquie, en Égypte, en Iran, en Inde et en Chine, la culture en est effectuée pour la production de l'opium, latex de la capsule. L'opium renferme des alcaloïdes, très précieux en médecine (morphine, codéine, papavérine, etc.), mais également très dangereux, car il s'agit de stupéfiants, du moins les deux premiers.

Le pavot des Alpes *(Papaver alpinum)* est vivace et gazonnant car il possède un rhizome. On rencontre ce pavot dans les endroits caillouteux et calcaires des montagnes européennes et des régions arctiques.

▼ ***Trois représentants du genre* Papaver. *De gauche à droite : pavot d'Islande* (Papaver nudicaule), *coquelicot* (Papaver rhoeas) *et pavot somnifère* (Papaver somniferum).**

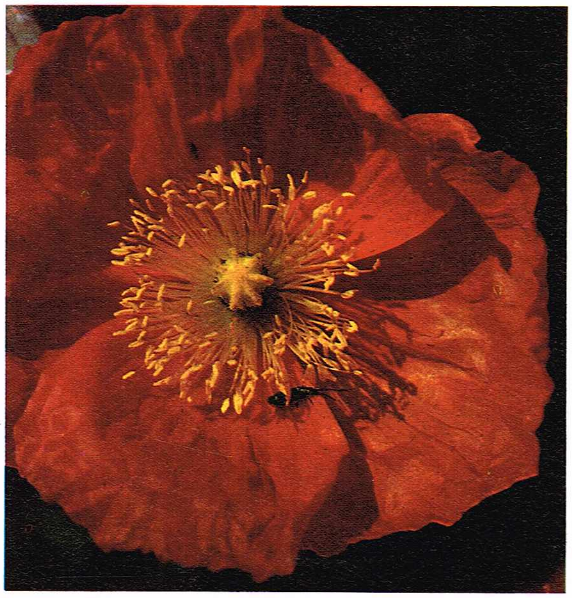

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

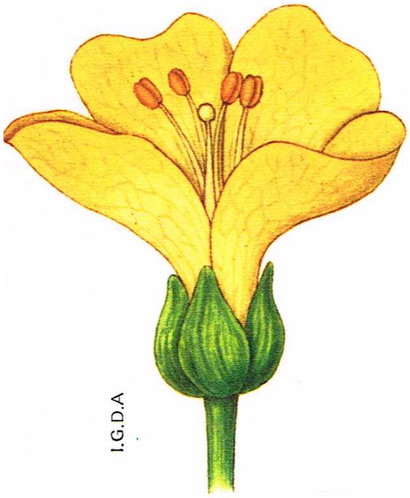

I.G.D.A

▲ *Schéma de la fleur type des Crucifères.*

▶ *Schémas représentant : une silique à déhiscence longitudinale, une silique lomentacée, une silicule ouverte (en bas) et fermée (en haut).*

▼ **Cleome spinosa.** *Cette espèce, originaire d'Amérique tropicale, peut être cultivée en été dans les régions tempérées.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Les *Capparidacées (Capparidaceae)* sont une famille qui comprend essentiellement des plantes herbacées et des arbustes, et rarement des arbres ou des lianes. Elles ne donnent pas de latex. Leurs feuilles sont généralement alternes, simples ou composées-palmées, à bord entier, et souvent avec des stipules transformées en piquants parfois caducs. Les fleurs sont zygomorphes, avec le plus souvent quatre sépales, autant de pétales et d'étamines ou, par multiplication secondaire, de nombreuses étamines à longs filets. L'ovaire bicarpellé, parfois pluricarpellé, se trouve au sommet d'une portion d'axe appelée gynophore. Les fruits sont des baies, des drupes, des capsules ou des siliques munies d'un replum mais sans septum ; les graines sont réniformes et ne possèdent pas d'albumen. Il y a des hétérosides à sénevol et des cellules à myrosinase comme chez les Crucifères. La famille comprend quarante-six genres avec environ huit cents espèces, surtout des régions tropicales et subtropicales chaudes et sèches des deux hémisphères.

Les *Capparis,* qui ont donné leur nom à la sous-famille des *Capparoïdées,* sont un genre de trois cent cinquante espèces dont une seule, le câprier *(C. spinosa),* est spontanée en France. C'est un arbrisseau à odeur caractéristique, à tiges vertes et souples, couchées-ascendantes, dépassant 1 m de long. Ses feuilles sont alternes, ovales, presque rondes, à bord entier, pétiolées avec deux stipules transformées en épines qui sont caduques chez la variété *inermis* (fréquemment cultivée). Les fleurs sont solitaires, axillaires, avec quatre sépales en deux verticilles dimères, l'inférieur médian, le supérieur latéral et blanchâtre, et quatre pétales d'un blanc rosé disposés en diagonale : les deux ventraux ont, près de la base, leur bord antérieur prolongé en une sorte d'oreillette accolée à une dépression du sépale inférieur, et, en ce point, le réceptacle présente une saillie glandulaire. Les étamines sont nombreuses et ont des filets rouge violacé. L'ovaire est au sommet d'un long gynophore. Les fruits sont des baies, d'abord vertes, puis rouge foncé. Le câprier croît sur les murs et dans les fentes des rochers, dans la région méditerranéenne et jusqu'au Caucase. Il fleurit du mois d'avril à la fin de l'été. Les boutons floraux sont consommés comme condiments.

Le genre *Cleome,* de la sous-famille des *Cléomoïdées,* comprend deux cents herbes ou sous-arbrisseaux généralement épineux et glanduleux. Leurs feuilles sont le plus

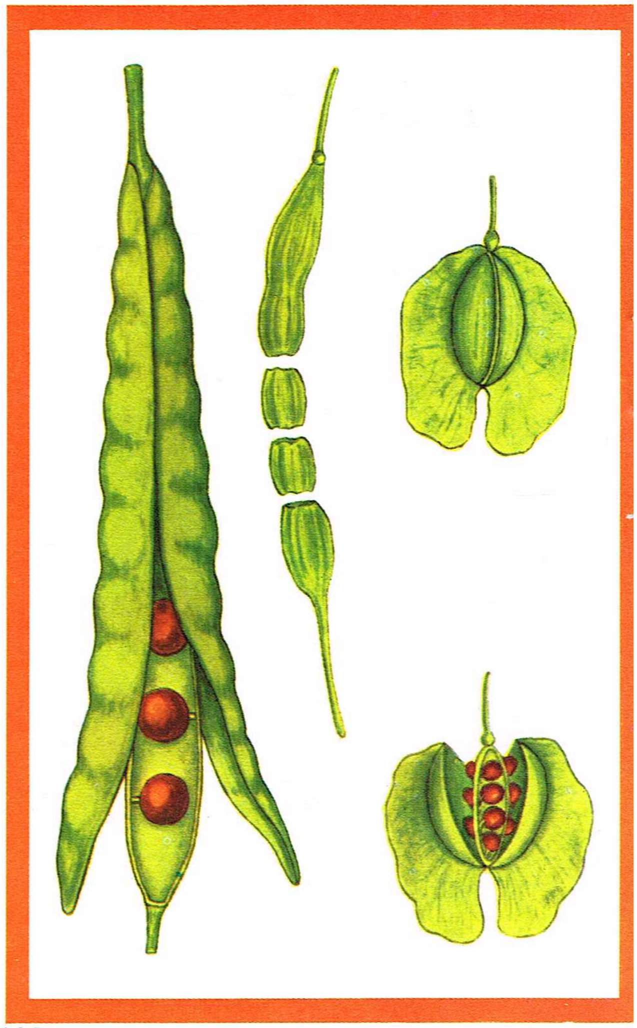

I.G.D.A.

souvent composées de trois à sept folioles. Leurs fleurs ont quatre sépales souvent caducs, quatre pétales blancs, jaunes, roses ou rouges, à onglet marqué, et souvent inégaux ; les étamines sont le plus souvent au nombre de six ; il y a un gynophore qui peut atteindre 30 cm. Les fruits sont des siliques à nombreuses graines. Ce sont des plantes des régions chaudes et tropicales des deux hémisphères.

La famille des *Crucifères* ou *Brassicacées (Cruciferae, Brassicaceae)* comprend des plantes herbacées, très rarement des arbrisseaux ou des arbustes, à feuilles généralement alternes et sans stipules, ou à stipules minuscules. Les fleurs possèdent quatre sépales, quatre pétales en croix (d'où le nom de la famille) et disposés en diagonale par rapport aux sépales ; il y a six étamines tétradynames, c'est-à-dire quatre longues et en dessous deux latérales plus courtes. L'ovaire est supère, formé de deux carpelles latéraux, uniloculaire mais apparemment biloculaire par suite de la présence d'une fausse cloison médiane *(septum) ;* le stigmate est parfois bilobé. Les fruits sont des siliques ou des silicules, parfois modifiées en akènes ou nucules ; les graines ont peu d'albumen ou n'en possèdent pas. La pollinisation est le plus souvent entomogame, mais, chez certaines espèces, il y a autopollinisation. Le mode de reploiement de l'embryon et la disposition des nectaires que possède le réceptacle de la fleur ont de l'importance pour la classification. Les caractères floraux que nous venons d'exposer souffrent certaines exceptions : il y a des fleurs zygomorphes chez les *Iberis* en particulier, moins de six étamines chez certaines cardamines, plus de six étamines chez *Megacarpea,* parfois pas de corolle. Il y a des hétérosides à sénevol et des cellules à myrosinase qui libèrent des aglycones. Ces plantes sont répandues dans le monde entier, et surtout dans l'hémisphère boréal ; il en existe trois cent cinquante genres et trois mille espèces.

Matthiola incana est habituellement une plante de couleur argentée, vivace ou bisannuelle, haute de 30 à 60 cm. Ses feuilles sont oblongues, lancéolées ou parfois étroites *(subsp. rupestris)*, toujours tomenteuses. Ses fleurs parfumées forment des grappes terminales, avec des pétales blancs, rouges ou violacés. Les fruits sont des siliques. L'espèce croît en Europe dans les lieux rocheux et sablonneux du littoral méditerranéen, et des côtes atlantiques au sud de la Charente maritime. C'est une « giroflée » des jardins.

Cinq espèces du genre *Malcomia* vivent en France. Il en existe une vingtaine d'autres en région méditerranéenne. Leur stigmate est fendu en deux lames conniventes. *M. littorea*, vivace, haut de 10 à 40 cm, est recouvert de poils blanchâtres. Ses feuilles inférieures sont oblongues et ont un bord sinué-denté, les supérieures sont linéaires et plus courtes. Les deux sépales latéraux se prolongent inférieurement en formant une sorte de bosse. Les pétales sont pourprés. Les fruits sont des siliques à peu près cylindriques, dont le style est caduc. On trouve cette plante sur les côtes sableuses de l'ouest de la Méditerranée. Elle fleurit de mai à septembre et est quelquefois cultivée.

La julienne des dames *(Hesperis matronalis)* est bisannuelle ou vivace, haute de 40 à 80 cm, velue et rude. Ses feuilles sont ovales-oblongues ou lancéolées, dentées, les inférieures pétiolées, et les supérieures presque sessiles. Les fleurs sont le plus souvent roses ou violettes, parfumées, formant des grappes lâches. Les fruits sont des siliques cylindriques plus ou moins flexueuses. La julienne croît dans les endroits rocheux, les forêts et les haies des montagnes, sans atteindre l'étage subalpin, en Europe centrale et méridionale et en Asie occidentale; elle fleurit de mai à juillet.

Le genre *Cheiranthus* comprend une dizaine d'espèces, pour la plupart des régions méditerranéennes, mais atteignant la Chine et présentes dans la zone pacifique de l'Amérique du Nord. On ne trouve en France que la giroflée des murs ou violier *(C. cheiri)*. C'est une plante vivace à poils appliqués, haute de 20 à 80 cm. Ses feuilles sont lancéolées, entières, sauf les inférieures qui ont une ou deux dents de chaque côté. Ses fleurs odorantes forment des grappes spiciformes, leurs pétales sont jaunes avec des veines ou des taches brunes. Les fruits sont des siliques tétragones et comprimées. Originaire de Grèce, cette plante est naturalisée depuis longtemps dans nos régions, de la mer au pied des montagnes; elle fleurit de mars à mai.

Le genre *Erysimum* (vélars) est très voisin du genre *Cheiranthus* et comprend quatre-vingts espèces de plantes annuelles, bisannuelles ou vivaces, à poils ramifiés. Elles ont des feuilles simples, souvent oblongues-linéaires, et à bord entier ou denté. Les fleurs sont généralement jaunes, parfois pourpres, et forment des grappes terminales. Les fruits sont des siliques tétragones. La principale espèce de nos régions est *Erysimum cheiranthoides*, ou vélar fausse-giroflée.

Le genre *Arabis* (arabettes) comprend environ cent espèces, répandues dans l'hémisphère Nord, spécialement dans les montagnes. *A. turrita* est bisannuel et haut de 20 à 80 cm. Ses feuilles sont dentées, les inférieures à long pétiole et ovales, les autres cordées et oblongues. Les fleurs sont blanc jaunâtre. Les siliques sont déjetées d'un côté. On trouve cette arabette dans les lieux rocheux, sur les murs et dans les terrains calcaires, du niveau de la mer à 1 800 m d'altitude, en Europe centrale et méridionale, en Asie Mineure et en Afrique du Nord.

A. alpina est une plante vivace, tomenteuse ou pubescente, haute de 10 à 40 cm. Ses feuilles sont ovales-oblongues, les caulinaires sessiles et embrassant la tige. Ses fleurs blanches forment des grappes ombelliformes. Ses fruits sont des siliques étalées-ascendantes et très comprimées. Elle croît dans les lieux rocheux de montagne, jusqu'à plus de 3 000 m et dans les régions arctiques. Elle occupe l'Europe, l'Asie occidentale et centrale, l'Afrique du Nord, l'Éthiopie, l'est de l'Amérique du Nord et le Groenland; elle fleurit d'avril à juin. Elle est fréquemment cultivée dans les jardins, parfois sous une forme panachée. Elle est fort polymorphe.

Le genre *Sisymbrium* (sisymbres) comprend environ quatre-vingts espèces, répandues surtout en Europe et en Asie du Nord et de l'Ouest; il n'en existe que quelques-unes en Amérique du Nord, et moins encore dans l'hémisphère austral. Un peu plus d'une douzaine se trouvent dans nos régions.

L'herbe-aux-chantres *(S. officinale)* est une plante annuelle, haute de 20 à 90 cm, et à rameaux rigides et dressés. Les feuilles inférieures sont pennatiséquées, avec les segments latéraux dentés et le segment terminal plus grand, hasté et denté; les feuilles supérieures sont subentières et hastées. Les petites fleurs sont jaune pâle. Les siliques sont appliquées contre l'axe de l'inflorescence. Cette espèce est très commune dans les lieux incultes, de la mer au bas des montagnes; elle est plus rare en altitude. Elle se rencontre en Eurasie et en Afrique du Nord et fleurit de mai à septembre.

I.G.D.A. - Archives P2

▲ **Cheiranthus cheiri**, ***appelée communément giroflée. (On donne également ce nom à*** **Matthiola incana**, ***une autre Crucifère.)***

M. Pedone

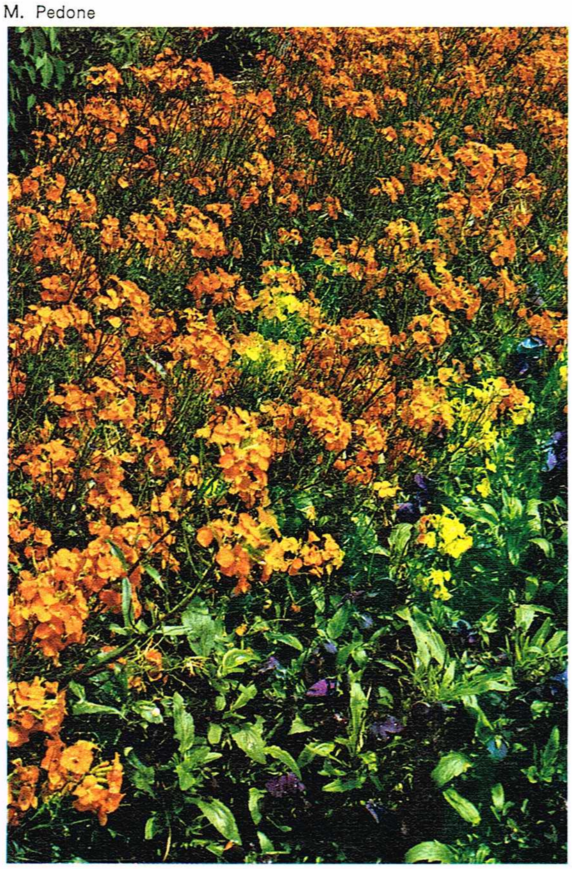

M. et S. Prato

◀ ***A gauche :*** **Cheiranthus allioni (Erysimum allioni).** ***A droite :*** **Arabis alpina**, ***espèce montagnarde, utilisée pour agrémenter les jardins de rocaille.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Jeune plant de chou cabus* (Brassica oleracea *var.* capitata). *A maturité, cette espèce est un chou pommé à feuilles presque lisses.***
▼ ***Chou de Milan* (Brassica oleracea *var.* sabauda) *; il s'agit également d'un chou pommé, mais à feuilles cloquées.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Le genre *Alliaria* comprend deux espèces en Europe, en Asie occidentale et en Afrique du Nord. La seule que l'on trouve dans nos régions est l'alliaire *(A. petiolata = A. officinalis)*. Celle-ci est haute de 40 cm à 1,20 m. Elle a des feuilles cordiformes et ovales, grossièrement dentées, avec un pétiole assez long pour les inférieures, plus court pour les autres. Les fleurs sont blanches, en grappe terminale. Les siliques sont plus ou moins dressées. On rencontre très fréquemment cette espèce dans les lieux frais du niveau de la mer jusque vers 800 m d'altitude ; elle fleurit d'avril à juin. Ses feuilles froissées dégagent une forte odeur d'ail, d'où le nom donné à la plante.

Le genre *Barbarea* comprend une douzaine d'espèces, répandues dans les zones tempérées de l'hémisphère Nord. L'espèce la plus commune chez nous est *B. vulgaris*, ou herbe de la Sainte-Barbe. Elle est bisannuelle ou vivace et haute de 20 cm à 1 m. Ses feuilles inférieures sont pennatiséquées, les supérieures simples et grossièrement dentées. Ses fleurs sont jaunes et constituent une panicule. Les siliques sont dressées ou étalées, elles sont appliquées contre l'axe chez *B. stricta*. On rencontre *B. vulgaris* dans les lieux humides, du niveau de la mer à 2 000 m d'altitude, dans toute l'aire de distribution du genre ; elle fleurit de mai à juillet. On consommait parfois ses feuilles en salade.

Le genre *Nasturtium* (cressons) comprend environ cinquante espèces dans le monde entier. Le cresson de fontaine *(N. officinale)* est une plante vivace, haute de 10 à 60 cm, à tige rarement dressée, le plus souvent prostrée et formant des racines aux nœuds inférieurs. Les feuilles sont pennatiséquées, avec des segments de forme ovale ou orbiculaire, à bord entier ou denté et à base souvent cordiforme. Les fleurs sont blanches et réunies en grappe. Les fruits sont des siliques courtes, arquées et bosselées par les graines qu'elles contiennent. Le cresson est très commun dans les eaux stagnantes ou à cours lent, de la mer jusqu'à la zone subalpine ; il fleurit de mars à juillet. Il est actuellement largement cultivé pour être consommé en salade.

Le raifort *(Armoracia rusticana = Cochlearia armoracia)* est une plante vivace, à souche ramifiée munie de grosses racines atteignant 1 m pour un diamètre de 3 ou 4 cm. La tige est haute de 50 cm à 1 m. Les feuilles radicales ont un long pétiole et sont ovales-oblongues, et crénelées ou dentées ; les feuilles caulinaires sont sessiles, les inférieures étant le plus souvent oblongues et pennatiséquées, les supérieures lancéolées et à bord entier ou fortement denté. Les fleurs blanches sont disposées en panicule. Les fruits sont des silicules ellipsoïdes. Le raifort est originaire de Russie et cultivé parfois dans nos régions ; il fleurit de mai à juillet.

Le genre *Cardamine*, auquel on joint maintenant les *Dentaria*, comprend cent trente espèces répandues dans les zones tempérées et froides du monde entier. La cressonnette *(C. pratensis)* est vivace, glabre et haute de 18 à 40 cm. Elle possède des feuilles imparipennées ; les radicales ont des folioles ovales ou à peu près rondes, à bord entier ou denté ; les caulinaires ont des folioles oblongues ou linéaires, à bord entier ou denté au sommet. Elles portent souvent des bourgeons adventifs, et parfois des bulbilles axillaires. Les fleurs, réunies en grappes simples ou composées, possèdent des pétales roses, lilas ou blancs. Les fruits sont des siliques. On rencontre cette espèce dans les lieux herbeux et humides, du niveau de la mer à une altitude de 1 500 m environ, dans le nord de l'Europe, en Asie et en Amérique du Nord ; elle fleurit de mars à juin. La cressonnette contient un hétéroside à sénevol. Les feuilles et les jeunes pousses peuvent être mangées en salade et ont des propriétés stimulantes et antiscorbutiques.

C. hirsuta est annuel et haut de 7 à 30 cm. Ses feuilles radicales ont des segments à peu près ronds et entiers ou presque trilobés ; ses feuilles caulinaires sont aussi grandes que les radicales ou plus petites, et au nombre de deux à quatre. Les fleurs sont blanches et n'ont en général que quatre étamines. Les fruits sont des siliques. Cette espèce est très commune dans les lieux incultes, herbeux ou ombragés, jusqu'à 1 000 m d'altitude. Originaire de l'Europe de l'Ouest et de la région méditerranéenne, elle est maintenant répandue dans le monde entier. L'herbe du diable *(C. impatiens)* est annuelle ou bisannuelle, glabre et haute de 25 à 60 cm. Elle possède des feuilles à segments lancéolés ou ovales, lobés ou

dentés. Ses fleurs sont blanches, parfois sans pétales. On la rencontre dans les lieux ombragés, jusqu'à 1 500 m d'altitude, en Europe, en Asie du Nord et au Japon.

Les cardamines du sous-genre *Dentaria*, ou dentaires, doivent leur nom au fait que le rhizome possède des écailles charnues et blanches qui ressemblent à des dents. On en compte une quinzaine d'espèces en Europe, en Asie septentrionale et en Amérique du Nord.

Le genre *Eruca* (roquettes) comprend cinq espèces répandues dans les régions méditerranéennes. La seule qu'on connaisse en France est *E. sativa*. C'est une plante annuelle, haute de 20 à 60 cm. Ses feuilles sont pennatiséquées, avec des lobes dentés. Ses fleurs forment des grappes spiciformes; les pétales sont jaunes, avec des veines violettes ou pourpres. Les siliques sont dressées, subulées et munies d'un bec en sabre égalant la moitié de leur longueur. On trouve cette plante dans les champs comme dans les lieux incultes, de la mer au bas des montagnes, en Europe centrale et méridionale, en Afrique du Nord et en Asie occidentale; elle fleurit d'avril à juin. Ses feuilles sont mangées localement en salade.

Le genre *Sinapis* (moutardes) comprend dix espèces répandues en Europe centrale et dans la région méditerranéenne. La moutarde blanche *(S. alba)* est une plante annuelle, hérissée le plus souvent, haute de 30 à 80 cm. Ses feuilles sont pennatiséquées ou pennatifides, avec un lobe terminal trilobé ou triséqué et plus grand que les lobes latéraux. Les fleurs sont jaunes. Les fruits sont des siliques horizontales, couvertes de soies blanches, prolongées en un bec comprimé plus long que les valves, et contenant de quatre à huit graines sphéroïdales, de couleur cendrée ou fauve. On rencontre l'espèce le long des murs, dans les haies, les champs et les lieux incultes, du niveau de la mer au bas des montagnes. Originaire de l'est de la région méditerranéenne, elle a été répandue en Europe centrale et méridionale, en Afrique du Nord et en Asie occidentale; elle fleurit de mars à juin. On la cultive pour ses graines.

Les graines servent à confectionner la moutarde de table. On en tire aussi une huile qu'on employait naguère pour l'éclairage. La moutarde blanche est parfois cultivée comme fourrage.

Le genre *Brassica* (choux) comprend cinquante espèces d'herbes, en général annuelles ou bisannuelles, parfois vivaces. Elles ont des racines fusiformes et une tige dressée ou ascendante, souvent ramifiée. Les feuilles sont plus ou moins profondément découpées. Les fleurs jaunes, parfois blanches, constituent des grappes. Les siliques ont des valves munies d'une seule nervure alors qu'on en compte trois au moins chez les *Sinapis*.

La moutarde noire, qui est en fait un chou *(B. nigra)*, est annuelle et haute de 50 cm à 1,20 m. Elle a une courte racine blanche. Ses feuilles sont pétiolées, les inférieures étant pennatiséquées, avec des segments ovales-oblongs et dentés, et les supérieures oblongues-lancéolées, avec un bord denté ou entier. Les fleurs, jaunes, forment des inflorescences racémeuses. Les siliques sont linéaires, appliquées contre l'axe de la grappe, comprimées et subtétragones; elles sont surmontées d'un bec quatre ou cinq fois plus court que les valves; les graines y sont nombreuses, ovoïdes et brunes. On rencontre cette espèce dans les champs, les fossés et les jachères, jusqu'au pied des montagnes, en Europe occidentale, centrale et méridionale, en Asie occidentale et en Afrique du Nord; elle s'est naturalisée en Amérique. Elle fleurit de juin à septembre.

On tire de ses graines une farine qui, mélangée le plus souvent à celle du lin, sert à faire des cataplasmes; son action révulsive est atténuée par le mucilage. La farine de moutarde noire entre aussi dans la composition de la moutarde de table. L'huile que l'on en extrait a servi naguère pour l'éclairage.

Le chou potager *(B. oleracea)* est bisannuel ou vivace, haut de 50 cm à 1 m, glabre et glauque. Sa racine est pivotante. Ses feuilles sont pennatilobées, ondulées, avec un court pétiole et des nervures médianes et secondaires très évidentes. Les fleurs sont jaunes et disposées en grappes. Les siliques sont dressées-étalées, cylindriques, à bec très court et à valves munies d'une seule nervure.

A l'état sauvage, le chou croît près de la mer, sur les rochers des côtes d'Angleterre, de l'ouest de la France et du nord de l'Espagne; il fleurit d'avril à juillet. Une forme à feuilles basales plus découpées croît sur les côtes

I.G.D.A.-Archives B

▲ **Brassica oleracea** ***var.* gemmifera.**
La partie comestible de cette plante est constituée par les bourgeons (choux de Bruxelles) qui prennent naissance à l'aisselle des feuilles.

méditerranéennes de l'Espagne, de la France et de l'Italie. Ce chou sauvage est dépourvu d'intérêt alimentaire. Il a permis toutefois la sélection de nombreuses variétés qui servent largement dans l'alimentation humaine et animale.

La variété *sabauda*, ou chou de Milan, est une plante rustique à grandes feuilles cloquées, tendres et comestibles quand elles sont jeunes, c'est-à-dire quand elles forment encore un bourgeon terminal de grandes dimensions où les feuilles extérieures sont récurvées et les intérieures étroitement serrées les unes contre les autres en un cœur blanc ou jaunâtre à l'intérieur. C'est donc un « chou pommé ». Cette variété existe sous de nombreuses races, qui se prêtent à la consommation à toutes les époques de l'année.

La variété *capitata* (chou cabus) est encore un chou pommé, mais ses feuilles sont à peu près lisses, plus claires, presque blanches pour les plus internes, qui ne voient pas la lumière. Les formes en sont nombreuses; on trouve le plus souvent des feuilles de couleur vert pâle ou jaunâtre. Suivant les cas, elles sont consommables du printemps à l'hiver. Le chou rouge, que l'on cultive surtout en Allemagne et en Hollande, est la forme *rubra* de cette variété, colorée par la rubrobrassicine présente dans les vacuoles des cellules épidermiques. On le mange en salade, mais certains cultivars peuvent être utilisés pour l'ornement.

Le chou-fleur est la variété *botrytis (cauliflora)*. Il a de vastes feuilles bulleuses, de couleur vert cendré, pruineuses et avec de grandes côtes médianes; au centre de la jeune plante se forme dès la première année une grosse inflorescence, ou « pomme », dont les fleurs sont en grande partie stériles et les pédoncules hypertrophiés. On la consomme à l'état jeune, quand elle est encore formée par de nombreux et courts rameaux portant chacun un groupe de boutons floraux serrés qui constituent dans leur ensemble une masse charnue de forme plus ou moins globuleuse et de couleur claire.

Le brocoli, très voisin du chou-fleur, qui en est probablement dérivé, est la variété *botrytis* sous-var. *cymosa*. Il forme sa pomme inflorescentielle la seconde année seulement. Ses feuilles sont plus nombreuses, plus raides et plus étroites que celles du chou-fleur, de couleur glauque, avec un pétiole ailé, et disposées en rosette. La pomme est généralement de plus petite taille que celle du chou-fleur. Les fleurs sont à peu près toutes fertiles. Il en existe de nombreuses formes, qui diffèrent par la morphologie, la couleur des inflorescences et des feuilles, qui sont parfois violacées, et une plus ou moins grande précocité (de décembre à mai).

Le chou-rave est la variété *gongylodes*. Il est cultivé pour sa tige, qui, à sa partie inférieure, est très tubérisée et a l'aspect d'une grosse rave de couleur vert pâle ou violacée extérieurement, blanche intérieurement, et qui porte les cicatrices dilatées des feuilles basales. Ces feuilles sont

▼ ***Section d'un « chou de Bruxelles ». La structure du bourgeon apparaît nettement.***

I.G.D.A.-Archives B

C. Bevilacqua

▲ ***Champ de navette* (Brassica rapa *var.* oleifera). *Cette plante peut être cultivée pour l'obtention de fourrage, mais elle l'est surtout pour ses graines qui contiennent 30 à 35 % d'huile.***

▼ ***Plant de navet* (Brassica napus *var.* napobrassica).**

C. Bevilacqua

pennatiséquées, lobées en bas et irrégulièrement dentées au sommet, de couleur vert pâle, un peu glauque, ou violacée, avec une grosse nervure médiane blanchâtre ou violette. Les fleurs sont jaunes. Le chou-rave présente un assez petit nombre de formes, qui diffèrent par la couleur et la précocité. Il est surtout consommé en hiver, ce qui fait rechercher les formes tardives, qu'on récolte en octobre.

Le rutabaga est la variété *rapifera*, dont la racine et l'hypocotyle sont tubérisés. La chair est jaune. Si elle est blanche, on a le chou-navet, qui appartient à la même variété. Chez le chou-rave, le chou-navet et le rutabaga, la tubérisation est due à l'hypertrophie de la moelle.

Le chou de Bruxelles, qui est la variété *gemmifera*, a une tige haute de 1 m environ. Ses feuilles sont semblables à celles des autres choux, un peu bulleuses, et ont à leur aisselle des bourgeons sessiles, gros comme une noix ou comme un œuf et qui ressemblent à de nombreux petits choux couvrant la tige. La culture de ce chou est répandue dans nos régions et surtout en Belgique et en Hollande.

Les choux verts appartiennent à la variété *acephala*. Ils ont une tige épaisse, élevée, des feuilles à très grand lobe terminal, souvent extrêmement déchiquetées et crispées au bord (choux frisés). Les feuilles servent pour l'alimentation, mais des formes frisées, panachées (surtout après les gelées) de rouge, de violet ou de blanc, sont aussi très ornementales.

La rave ou *Brassica rapa*, originaire de la région méditerranéenne, est annuelle ou bisannuelle, à feuilles inférieures hérissées de poils raides et à feuilles supérieures glabres, sessiles et embrassantes. Ses fleurs sont jaune d'or. Ses siliques ont un long bec. Elle a une portion hypocotylée tubérisée atteignant un poids de 4 à 5 kg. Celle-ci, vue latéralement, est ronde, ovale-elliptique ou à peu près conique et de couleur blanche, mais violette autour du collet. Elle possède une pulpe blanche, douce et de saveur un peu piquante. Dans les formes à tubercule aplati, l'hypocotyle est seul tubérisé ; dans les autres, la racine l'est également dans sa partie supérieure. Dans les deux cas, c'est le parenchyme ligneux qui s'hypertrophie, comme chez le navet et le radis. La floraison se fait au printemps de la seconde année, mais la rave se récolte la première année, sept ou huit semaines après le semis, de septembre à novembre. Elle est cultivée dans différentes parties de l'Europe, notamment en Grande-Bretagne, en France, en Allemagne et en Italie.

Brassica napus var. *oleifera* est le colza. C'est une herbe annuelle ou bisannuelle, haute de 1 m à 1,50 m, avec des feuilles glauques et pruineuses, toutes glabres, les inférieures étant pennatiséquées et les supérieures oblongues, plus ou moins entières et amplexicaules. Les fleurs sont jaune d'or. Les siliques possèdent un bec quatre à cinq fois plus court que les valves, intermédiaire entre ceux du chou potager et de la rave. Les graines sont sphéroïdales, rougeâtres ou noires. On cultive le colza dans toute l'Europe, en Chine et en Inde. Il sert de fourrage, mais surtout fournit de l'huile que l'on extrait de ses graines où elle se trouve à raison de 30 à 45 % ; cette huile est utilisée dans l'industrie et pour l'alimentation. Dans ce dernier cas, elle doit être extraite par pression à froid de graines de variétés convenables, puis épurée. Elle est recherchée pour son goût particulier dû surtout à l'acide érucique, acide gras insaturé. Les tourteaux sont consommés par le bétail (leur emploi est cependant limité à cause de la présence de sénevol) et sont utilisés comme engrais.

La variété *napobrassica* de *B. napus* est le navet. Celui-ci est bisannuel, avec des feuilles glauques, toutes en rosette la première année. La seconde année, la tige se développe, peut se ramifier, et porte des feuilles cordées-amplexicaules. Les fleurs et les siliques sont identiques à celles de la variété précédente. Le navet correspond à la tubérisation du bois de l'hypocotyle et de la région supérieure de la racine. Il est cultivé surtout en Europe centrale. On utilise aussi bien les tubercules que les feuilles pour nourrir le bétail.

Le genre *Diplotaxis* comporte trente-cinq espèces en Europe centrale et dans les régions méditerranéennes. *D. tenuifolia* est vivace, haut de 20 à 60 cm, glauque et d'odeur fétide. Ses feuilles inférieures sont pennatiséquées ou pennatifides, avec des segments lancéolés entiers ; les feuilles supérieures sont peu divisées ou même entières. Les fleurs sont jaunes. Les siliques sont dressées sur des pédoncules étalés et se terminent par un bec court.

Les graines sont sur deux rangs dans chaque loge. On trouve cette espèce dans les lieux incultes, dans les décombres et terrains vagues, du niveau de la mer au bas des montagnes, exceptionnellement jusqu'à 1 000 m d'altitude, en Europe centrale et occidentale, en Italie, en Turquie et, d'une façon sporadique, en Scandinavie, en Espagne et en Afrique du Nord. Elle est originaire du nord de la région méditerranéenne et de la zone atlantique.

Le genre *Raphanus* comprend huit espèces répandues en Europe et dans les régions méditerranéennes. Les fruits sont des siliques indéhiscentes, à long bec, se fragmentant souvent en articles uniséminés (siliques lomentacées). Une sorte de pied stérile existe aussi entre la partie fertile et le pédoncule.

La ravenelle *(R. raphanistrum)* est haute de 50 cm à 1,50 m; elle est annuelle, bisannuelle ou vivace. Elle a une racine grêle, mais gonflée chez la variété *maritimus*, qui est vivace. Ses feuilles sont pennatiséquées, avec des segments latéraux ovales ou oblongs et un segment terminal ovale ou arrondi et beaucoup plus grand que les autres; les feuilles supérieures sont ovales ou lancéolées, à bord denté, et courtement pétiolées. Les fleurs sont jaune clair, parfois violacées, blanchâtres ou veinées de violet. Les fruits, ligneux, peuvent être courts, mais sont le plus souvent allongés et divisés en deux où plusieurs segments uniséminés. On trouve l'espèce dans les champs et les lieux incultes, du niveau de la mer à plus de 1 500 m d'altitude, en Europe, en Asie occidentale et en Afrique du Nord, ainsi qu'en Amérique du Nord, où elle est naturalisée. Les graines peuvent être accidentellement moulues en même temps que celles du blé, ce qui risque ensuite de donner lieu à des intoxications. Le radis cultivé *(R. sativus)* est annuel ou bisannuel et haut de 60 cm à 1 m. La partie supérieure de sa racine et son hypocotyle sont tuberculeux par hypertrophie du parenchyme ligneux. L'ensemble est globuleux, ovoïde ou allongé, extérieurement rouge carmin, ou rouge seulement dans sa moitié supérieure et blanc en dessous, parfois encore complètement blanc. L'intérieur est blanc. Les feuilles sont comparables à celles de l'espèce précédente, les fleurs sont blanches, violacées ou veinées de violet; les fruits sont spongieux, oblongs et divisés à l'intérieur en loges uniséminées superposées, qui ne se séparent pas à maturité. Cette espèce ne se trouve pas à l'état spontané, mais est cultivée, sous de nombreuses variétés, dans maints endroits du monde, et surtout en Europe. Elle provient de *R. raphanistrum*, et certaines formes sont intermédiaires entre les deux. On utilise pour l'alimentation la racine, à saveur un peu piquante, qui est mangée crue.

Le genre *Isatis* comprend environ trente espèces, répandues dans la région méditerranéenne, en Europe centrale et jusqu'en Asie centrale. La principale est le pastel des teinturiers, ou guède *(I. tinctoria)*. Cette plante est bisannuelle ou rarement vivace, et haute de 40 cm à 1,40 m. Ses feuilles inférieures sont oblongues-lancéolées et ont un pétiole; les feuilles caulinaires sont sagittées et sessiles. Les fleurs sont petites, très nombreuses, à pétales jaunes avec des veines violettes ou brunes, et réunies en grappes composées. Les fruits sont des silicules pendantes, indéhiscentes, ailées, presque noires, sans fausse cloison et contenant une seule graine; la plante reste cependant rattachée au groupe des Crucifères à siliques. La guède est commune dans les lieux incultes, jusqu'à plus de 1 000 m d'altitude, en Europe, en Asie occidentale et en Afrique du Nord; elle fleurit d'avril à juillet. Les feuilles servaient à nourrir les chèvres et les moutons pendant l'hiver, mais surtout on en tirait un indigo, substance colorante bleue, utilisé pour teindre les étoffes.

Nous en arrivons aux Crucifères formant des silicules. Un premier groupe renferme des genres où la silicule est généralement aplatie parallèlement à la fausse cloison.

Le genre *Alyssum* comprend une centaine d'espèces d'herbes annuelles ou vivaces, ou d'arbrisseaux souvent buissonnants. Les feuilles sont petites, à bord entier ou parfois denté. Les fleurs sont jaunes, blanches ou violettes, petites et réunies en grappes terminales; le plus souvent, les étamines courtes présentent une dent sur leurs filets, tandis que ces derniers, chez les étamines longues, sont dilatés en aile. Les silicules sont normalement déhiscentes, sphéroïdales ou oblongues, avec deux loges. On trouve les alyssums en Europe, en Asie occidentale et centrale, et dans la région méditerranéenne. *A. montanum* est vivace, haut de 10 à 25 cm, tomenteux et blanchâtre ou cendré. Ses feuilles sont ovales-oblongues et à bord entier. Ses fleurs sont jaunes. Les fruits sont des silicules arrondies et comprimées, à deux graines par loge. On rencontre l'espèce dans les lieux rocheux ou sablonneux de l'est et du centre de la France, en Europe centrale et méridionale et en Afrique du Nord. On la cultive pour l'ornement.

Le genre *Lunaria* (lunaires) comprend trois espèces. La monnaie du pape, ou *L. annua*, est, malgré son nom latin, bisannuelle. Le nom de *L. biennis*, plus juste, doit pourtant être rejeté, car il fut donné par Moench alors que le premier, dû à Linné, était déjà publié. La plante atteint 1 m de haut. Ses feuilles sont ovales-lancéolées, cordées, à bord grossièrement denté, et pétiolées; les supérieures sont presque sessiles. Les fleurs sont violettes, inodores, en panicule terminale. Les fruits sont de grandes silicules ovales-orbiculaires atteignant 7 cm de long. On trouve cette plante à l'état spontané, dans les haies et les forêts, du niveau de la mer à 1 500 m d'altitude, dans le sud-est de l'Europe et peut-être en Italie; elle fleurit

Etrusko

▲ ***Alyssum saxatile,** cultivar « Corbeille d'or ».*

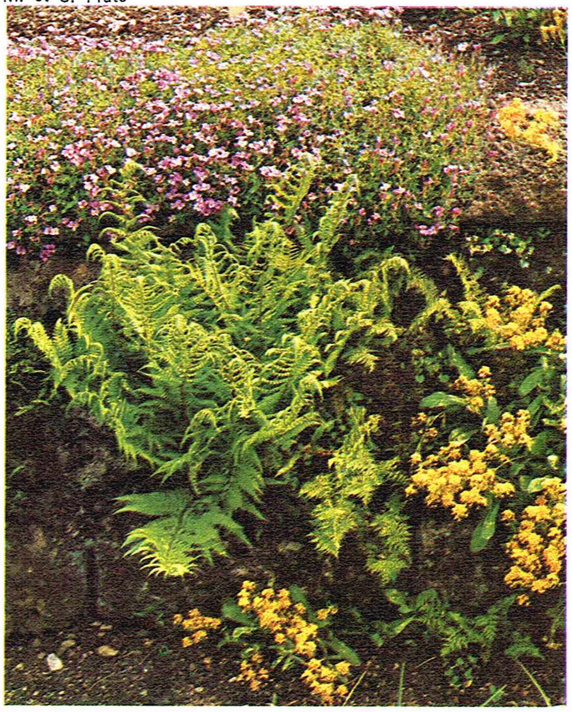

M. et S. Prato

◀ ***Composition florale formée d'Alyssum saxatile (jaune), d'Aubrietia (rose) et d'une Fougère.***

▲ ***La monnaie du pape* (Lunaria annua), *fleurs et fruits. Ces derniers sont de grandes silicules ovoïdes.***

d'avril à juin. On la cultive aussi beaucoup dans les jardins, et elle est naturalisée dans de nombreux pays, dont la France. On conserve les infrutescences séchées, où les silicules sont réduites à leur replum porteur de la fausse cloison, pour la préparation de « bouquets perpétuels ».

Le genre *Draba* compte deux cent soixante-dix espèces, répandues dans les montagnes du monde entier, mais surtout dans l'hémisphère boréal et dans les régions arctiques. *D. aizoides* est vivace et haut de 5 à 15 cm. Ses feuilles sont coriaces, linéaires, à bord entier, pectinées et toutes réunies en rosette à la base de la tige. Ses fleurs sont jaunes et forment des grappes composées. Les fruits sont des silicules ovales se terminant par un style. Cette espèce existe sous de nombreuses formes et variétés, dans les lieux caillouteux et les éboulis en montagne et parfois en plaine, en Europe centrale et méridionale, ainsi qu'en Asie Mineure; elle fleurit de mars à juin.

Les *Erophila* sont voisins des *Draba*, mais annuels. Il y en a huit espèces. *E. verna (Draba v.)* est haut de 3 à 15 cm. Ses feuilles sont de forme variée, ovales ou spatulées, à bord entier ou denté au sommet, et sont toutes réunies en une rosette à la base de la tige, qui est aphylle. Les fleurs sont blanches. Les fruits sont des silicules qui peuvent être rondes ou lancéolées. Cette espèce croît, sous de nombreuses formes, dans les lieux secs et sablonneux, jusqu'à 1 600 m d'altitude, en Europe, en Asie occidentale, en Afrique du Nord et en Amérique du Nord; elle fleurit de février à juin.

Dans le second groupe (ou Lépidiées) des Crucifères formant des silicules, ces dernières sont aplaties perpendiculairement à la fausse cloison.

Le genre *Cochlearia* (cransons) comprend vingt-cinq espèces. Le cranson officinal *(C. officinalis)* est bisannuel ou vivace et haut de 10 à 25 cm. Les feuilles radicales sont arrondies en cœur, à bord entier et long pétiole; les feuilles caulinaires sont cordées-ovales et plus ou moins grossièrement dentées, avec un pétiole de plus en plus court, manquant au sommet. Les fleurs sont blanches et odorantes. Les fruits sont des silicules ovoïdes, ventrues. Cette espèce se rencontre sur les côtes du nord-ouest de l'Europe, de la Sibérie, du nord-est de l'Asie, du Canada et du Groenland. A l'époque de la floraison, qui a lieu au printemps, la plante émet une odeur irritante. Elle contient en effet un hétéroside libérant du sénevol butylique.

La plus connue des dix espèces du genre *Camelina* est *C. sativa*. C'est une plante annuelle haute de 30 à 80 cm. Sa racine est pivotante. Ses feuilles caulinaires sont sessiles, à peu près glabres, longuement triangulaires, à bord entier ou denté et à base hastée. Ses fleurs sont jaunes et disposés en grappes. Ses fruits sont des silicules obovales-oblongues, ventrues, à plusieurs petites graines jaunes ou rouge foncé par loge. On rencontre cette espèce souvent naturalisée dans les champs cultivés, spécialement dans les champs de lin, jusqu'à 1 200 m d'altitude, dans une grande partie de l'Europe; elle fleurit en juin-juillet.

Le genre *Coronopus* possède huit espèces des deux hémisphères, dont deux en Europe. *C. squamatus (Senebiera coronopus)*, ou pied-de-corneille, est annuel. Ses tiges sont raides et couchées, et longues de 10 à 30 cm. Ses feuilles sont pennatipartites. Ses fleurs sont blanches et constituent des grappes opposées aux feuilles (ramification sympodiale). Les fruits sont des silicules réniformes, avec des crêtes et des tubercules à la surface. On trouve le pied-de-corneille dans les lieux incultes de l'Europe, de l'Asie Mineure, de l'Afrique du Nord, et à l'état naturalisé en Afrique du Sud ainsi qu'en Amérique du Nord et du Sud. Il fleurit de mai à septembre. *C. didymus*, probablement originaire d'Amérique du Sud et répandu dans de nombreuses régions, dont la France, est voisin, mais ses feuilles sont plus régulièrement pennatipartites et ses silicules sont simplement ridées-rugueuses.

Les espèces du genre *Lepidium*, ou passerages, sont au nombre d'environ cent trente et habitent le monde entier. La passerage proprement dite *(L. campestre)* est annuelle ou bisannuelle, haute de 20 à 50 cm, pubescente et vert grisâtre. Ses feuilles inférieures sont pétiolées, entières ou sinuées; les supérieures sont lancéolées, amplexicaules, à base sagittée et à bord sinué supérieurement. Les fruits sont des silicules ovoïdes, à aile large. Cette espèce croît dans les lieux incultes et herbeux, jusqu'à près de 2 500 m d'altitude, en Europe et en Turquie; elle fleurit de mai à juillet.

Le genre *Capsella* est représenté par cinq espèces. La bourse-à-pasteur *(C. bursa-pastoris)* est annuelle et haute de 10 à 50 cm. Elle possède des feuilles radicales en rosette, pétiolées et de différentes formes, entières, dentées, pennatifides ou pennatiséquées; les feuilles caulinaires, sessiles et amplexicaules, sont oblongues-lancéolées, à base sagittée et à bord un peu denticulé. Les petites fleurs blanches sont réunies en grappes. Les fruits sont des silicules triangulaires du fait de leur aile, comprimées, qui rappellent une ancienne bourse de pasteur. Cette espèce est très commune dans les lieux cultivés ou incultes, jusqu'à plus de 2 000 m d'altitude, et elle est à peu près cosmopolite; elle fleurit de mars à décembre. Dans certaines régions, on la mange cuite à l'état jeune. Elle a une action hémostatique et vaso-constrictrice marquée. Elle contient de la tyramine et des alcaloïdes encore à l'étude. *C. rubella* est plus petit, ses fleurs sont rougeâtres et ses silicules ont des marges latérales concaves. Cette plante se rencontre en France et en Europe méridionale.

Le genre *Aethionema* comprend environ quarante espèces habitant principalement le pourtour de la Méditerranée; on en trouve quelques-unes sur les Alpes et les Pyrénées. *A. saxatile* est vivace, à tiges ligneuses ascendantes et haut de 10 à 30 cm. Ses feuilles sont coriaces, les inférieures obovales, les supérieures lancéolées. Ses fleurs, assez grandes, sont rouge carmin. Les fruits sont des silicules largement ailées, à plusieurs ovules par loge, en grappe lâche. On rencontre cette espèce dans les endroits rocheux calcaires, en Europe centrale et surtout méridionale, en Algérie et en Turquie; elle fleurit de février à juillet.

Les tabourets, ou *Thlaspi*, comprennent environ soixante espèces de l'hémisphère Nord et d'Amérique du Sud. La monnoyère (herbe aux écus, *T. arvense*) est annuelle, glabre et haute de 10 à 40 cm. Elle possède des feuilles radicales obovales, anguleuses-dentées; ses feuilles caulinaires sont oblongues, sagittées à la base, amplexicaules et grossièrement dentées. Ses petites fleurs blanches forment des grappes. Les fruits sont de grandes silicules arrondies, très largement ailées, qui atteignent 18 mm de diamètre et ressemblent à des pièces de monnaie. On rencontre la plante dans les lieux incultes et cultivés, du niveau de la mer au bas des montagnes en Europe, en Asie centrale et, à l'état naturalisé, en Amérique du Nord. Quand on la froisse, elle dégage une forte odeur d'ail.

Le genre *Iberis* (« thlaspis » des horticulteurs) comprend une trentaine d'espèces d'Europe centrale et méridionale et de Turquie; toutes sont caractérisées par des fleurs à pétales inégaux, les externes étant les plus grands. *I. amara* est annuel ou bisannuel et haut de 10 à 40 cm. Ses feuilles sont alternes, spatulées, et possèdent de

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

deux à quatre dents profondes de chaque côté. Les fleurs, blanches ou roses, sont réunies en ombelles qui s'allongent ensuite pour former une grappe fructifère. Les silicules sont suborbiculaires, ailées en deux pointes au sommet. On rencontre la plante dans les lieux herbeux et les éboulis, en Europe surtout occidentale; elle fleurit de mai à octobre.

Le genre *Biscutella* (lunetières) comprend environ sept espèces qui vivent aux îles Canaries et en Europe centrale et méridionale. *B. laevigata* est vivace et haut de 20 à 60 cm. C'est une plante herbacée glabre, velue ou tomenteuse, avec un rhizome ligneux. Ses feuilles sont obovales, oblongues ou lancéolées-linéaires, à bord à peu près entier, denté ou sinué. Ses fleurs sont jaunes. Les fruits sont, comme dans tout le genre, des silicules à long style persistant, dont les deux moitiés à peu près rondes se séparent en restant unies au replum en dessus, ce qui donne au fruit mûr l'aspect d'un lorgnon, d'où le nom de lunetière. La plante croît dans les lieux arides, surtout de montagne, en France et en Europe centrale et méridionale. Elle est polymorphe, et diploïde ou tétraploïde.

La famille des *Résédacées (Resedaceae)* est constituée de six genres et soixante-dix espèces d'herbes ou d'arbrisseaux, surtout répandues dans la région méditerranéenne, l'Afrique orientale et l'Asie occidentale, mais aussi en Californie et en Afrique du Sud. Les fleurs sont zygomorphes, sans préfeuilles, avec un ovaire uniloculaire et ouvert en haut, parfois à carpelles libres *(Sesamoides)*. Les fruits sont des capsules, des follicules ou des baies. L'androcée et le gynécée sont portés par un prolongement de l'axe (androgynophore) qui produit une protubérance unilatérale. Il y a comme chez les Crucifères des cellules à myrosinase, qui, par action sur un hétéroside, libèrent ici du sénevol phényléthylique.

Le genre *Reseda* est le plus important. Ses fleurs sont munies de cinq sépales, parfois quatre, six ou huit, et de pétales en nombre égal aux sépales. Ces pétales sont diplophylles : leur onglet porte du côté dorsal une lame fréquemment découpée en lanières, qui est le limbe principal, et du côté ventral une languette continue, ou lame ventrale. Les fleurs possèdent de dix à vingt-cinq étamines libres; l'ovaire, uniloculaire, est formé par trois ou quatre carpelles non soudés supérieurement et se terminant chacun par un appendice stylaire. Les fruits sont des urnes ouvertes en haut, le bord de l'ouverture est garni des trois ou quatre lobes stylaires. Les résédas sont au nombre d'une cinquantaine. Le réséda des teinturiers, ou gaude *(R. luteola)*, est bisannuel et haut de 50 cm à 1,30 m. Ses feuilles sont oblongues-lancéolées et entières. Ses fleurs sont réunies en longues grappes denses et possèdent quatre sépales et trois ou quatre pétales jaune verdâtre. Le pétale supérieur est le plus grand et présente quatre à huit segments; les autres sont moins divisés, surtout l'inférieur. Il y a trois carpelles, et les fruits sont des urnes à trois dents. La gaude habite les murs et les lieux incultes, en Europe centrale et occidentale, dans toute la zone méditerranéenne, en Asie occidentale et centrale. Elle a été introduite dans d'autres régions. Elle fleurit de mai à septembre. On en extrayait jadis une substance colorante jaune, la lutéoline, flavone qui servait beaucoup en teinturerie. La plante fut largement cultivée en France et en Angleterre, mais est abandonnée depuis l'introduction des couleurs d'aniline.

La famille des *Moringacées (Moringaceae)* comprend des plantes ligneuses à feuilles deux ou trois fois pennées, à fleurs zygomorphes et pentamères, dont l'axe creusé en coupe porte sur les bords de celle-ci cinq sépales, et autant de pétales et de staminodes. Le gynécée, tricarpellé, syncarpe, à placentation pariétale, est porté par un court gynophore. Les ovules sont nombreux. Les fruits sont des capsules loculicides. Les graines ont souvent trois ailes. Il existe une dizaine d'espèces en Afrique tropicale, à Madagascar et en Inde. Elles appartiennent à l'unique genre *Moringa*. Nous citerons parmi celles-ci *M. oleifera* de l'Inde, cultivé pour l'ornement sous les tropiques et dont les graines fournissent une huile, appelée huile de Ben, qui rancit très lentement et est utilisée en parfumerie, ainsi d'ailleurs qu'en horlogerie.

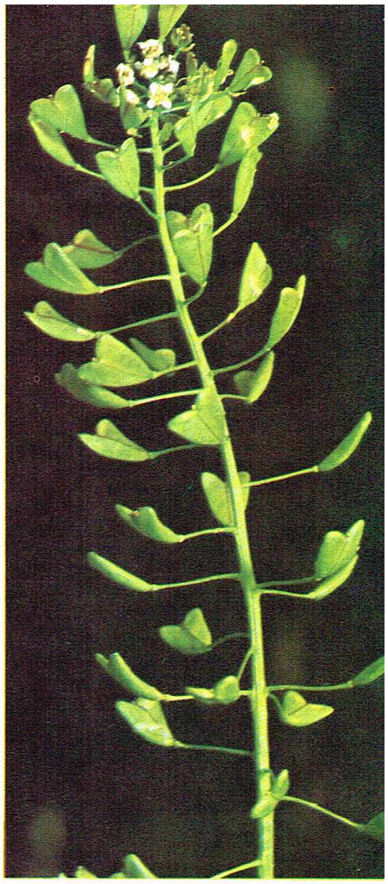

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *La bourse-à-pasteur* **(Capsella bursa-pastoris)** *est une « mauvaise » herbe répandue dans le monde entier. Elle est souvent parasitée par un Champignon :* **Cystopus candidus.**

◀ *La monnoyère ou herbe aux écus* **(Thlaspi arvense).**

▼ *A gauche :* **Reseda lutea,** *fréquent dans les champs en friche et les lieux pierreux. A droite : silicules de* **Biscutella laevigata.**

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Etrusko

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Pariétales. A gauche :*** ***parterre de*** **Begonia semperflorens.** ***A droite :*** **Viola reichenbachiana.**

Pariétales

Cet ordre comprend des plantes ligneuses ou herbacées, à feuilles opposées ou alternes, presque toujours stipulées, croissant dans le monde entier. Les fleurs, actinomorphes ou zygomorphes, parfois en partie spiralées, sont le plus souvent hermaphrodites et ont un calice et une corolle comportant fréquemment chacun cinq éléments; les étamines sont également au nombre de cinq ou d'un multiple de cinq.

L'ovaire, supère ou parfois infère, formé de un à cinq carpelles ou plus, très souvent de trois, est syncarpe et uniloculaire, parfois pluriloculaire. La placentation est pariétale ou presque basale ; elle peut cependant être axile. En général, les graines sont nombreuses et albuminées. Cet ordre est très important. Il comprend des plantes intéressantes à plus d'un titre. Certaines d'entre elles sont médicinales, d'autres ornementales, d'autres, enfin, présentent des particularités biologiques remarquables.

La division en familles et l'étendue de l'ordre sont encore l'objet de discussions. Il est mieux de le restreindre en en séparant les Guttiférales. Il est alors parfois nommé ordre des Violales ou Bixales.

La famille des *Cistacées (Cistaceae)* comprend huit genres et environ cent soixante-quinze espèces. Les fleurs, hermaphrodites, solitaires ou réunies en inflorescences cymeuses, possèdent de trois à cinq sépales. Dans le dernier cas, les deux externes sont souvent petits par rapport aux sépales internes, qui sont disposés en préfloraison tordue. Les pétales sont également au nombre de trois à cinq et sont de texture délicate. Ils présentent aussi une préfloraison tordue, mais en sens contraire des sépales. Les étamines sont en général nombreuses et libres; elles se développent en ordre centrifuge et leur abondance est due à une multiplication secondaire. L'ovaire est supère, uni- ou parfois pluriloculaire; il comporte de trois à cinq carpelles. Les fruits sont des capsules dont chaque petite graine possède un embryon courbe ou spiralé et un albumen amylacé. Il s'agit d'herbes ou d'arbrisseaux munis de poils étoilés et de poils glanduleux; les feuilles sont généralement opposées, simples et stipulées ou non.

Cette famille habite les régions chaudes de l'hémisphère boréal, et plus particulièrement le bassin méditerranéen. Trois espèces pourtant se trouvent en Amérique du Sud.

Le genre *Cistus* (cistes), déjà nommé κίστος en grec, peut-être par comparaison de son fruit avec une κίστη (panier, corbeille), est constitué de dix-sept espèces de plantes ligneuses de 40 cm à 2 m de hauteur, recouvertes d'un tomentum glanduleux et aromatique. Les feuilles ne possèdent pas de stipules et sont persistantes. Les fleurs forment des cymes terminales et sont blanches ou rouges, tachetées inférieurement de jaune, avec cinq sépales (parfois trois), cinq pétales et de nombreuses étamines. L'ovaire a cinq ou dix carpelles et la capsule s'ouvre par autant de valves. Les cistes vivent dans les lieux secs et rocheux, siliceux ou calcaires, et font partie notamment du maquis et de la garrigue méditerranéens. Au moment de la floraison, c'est-à-dire à la fin du printemps, le maquis à cistes se présente comme un champ de fleurs blanches, appartenant surtout aux *C. monspeliensis* et *salvifolius*. Certaines espèces sont utilisées en parfumerie. *C. ladanifer* habite dans les lieux secs d'Espagne, du Portugal, de l'Italie, et du midi de la France. Des poils sécréteurs fournissent une substance résineuse, le ladanum, qu'on obtient en faisant bouillir le sommet des plantes et en recueillant la résine à l'aide d'une écumoire. Ce produit, utilisé jadis en médecine comme émollient, sert actuellement dans la parfumerie, qui emploie aussi l'essence obtenue avec un faible rendement par la distillation des rameaux du ciste.

Le genre *Helianthemum* (hélianthèmes, du grec ἥλιος, soleil, et ἄνθος, fleur) est ainsi nommé par allusion à la courte durée de la floraison pendant une seule journée ensoleillée. Il s'agit de quatre-vingts espèces de plantes herbacées ou ligneuses, à feuilles toujours vertes, opposées, petites et entières, et avec ou sans stipules. Les pétales sont le plus souvent jaunes — présentant parfois un onglet blanc — ou tachetés, ou roses. Les hélianthèmes diffèrent des cistes par leur port plus bas, leurs fleurs plus modestes, avec deux sépales extérieurs petits ou absents, et par leurs fruits, qui sont des capsules à trois valves. Ils croissent dans la région méditerranéenne, en Asie occidentale et dans les îles atlantiques. Quelques-uns atteignent le centre et même le nord de l'Europe, deux se rencontrent en Californie. *H. guttatum* est parfois placé dans un genre particulier *(Tuberaria)* en raison de la présence d'une rosette de feuilles et de l'absence de style. Il croît en Europe centro-occidentale et dans la région méditerranéenne. *H. apenninum (H. pulverulentum)* est plus grand que le précédent et possède des fleurs à sépales tomenteux et dont les pétales ont des onglets jaunes. Il atteint au nord la Belgique et le sud de l'Angleterre. *H. nummularium (H. vulgare)* est très commun dans les lieux arides; il a des fleurs jaunes, parfois blanches ou roses, à sépales glabrescents et des stipules lancéolées. Son aire s'étend à l'Europe, sauf tout au nord, et à l'Asie occidentale.

S. Prato

La famille des *Droséracées (Droseraceae)* est constituée de quatre genres et quatre-vingt-treize espèces de plantes herbacées, vivaces, à feuilles généralement enroulées vers l'intérieur dans le bourgeon. Elles sont carnivores. On trouve en effet sur leurs feuilles, réunies en rosettes radicales, des formations glandulaires permettant la capture et la digestion de petites proies, principalement des Insectes. Les fleurs ont en général un calice de quatre ou cinq sépales, une corolle constituée d'autant de pétales et des étamines en nombre égal ou double de celui des pétales, parfois soudées à la base. L'ovaire est supère ; il a de trois à cinq carpelles, à placentation pariétale ou basale, avec des ovules généralement nombreux. Ces plantes vivent le plus souvent dans les milieux humides ou marécageux ; certaines sont aquatiques et flottantes. Elles n'ont aucun intérêt économique, mais sont souvent cultivées comme curiosités dans les jardins et les serres. On place aussi parfois les Droséracées parmi les Sarracéniales. Le genre *Drosera,* le plus connu, est constitué par quatre-vingt-dix espèces, présentes surtout dans l'hémisphère Sud et en Amérique du Nord (trois d'entre elles se rencontrent en Europe). La rosée du soleil, ou rossolis *(D. rotundifolia),* croît dans les endroits les plus humides des marais tourbeux acides, au milieu des sphaignes. Elle est peu répandue mais abondante *in situ.* On la trouve dans toute l'Europe, dans le nord de l'Asie et en Amérique du Nord. C'est une petite plante grêle de 6 à 20 cm, avec des feuilles basilaires à limbe arrondi, longuement pétiolées, appliquées contre le sol et couvertes de poils glanduleux en forme de tentacules capités à tête rouge, qui servent à capturer les Insectes et réfléchissent la lumière comme des gouttes d'eau, d'où les noms de la plante. Les deux autres rossolis sont moins répandus et habitent les mêmes biotopes.

D. anglica (D. longifolia) a des feuilles linéaires-oblongues et dressées se continuant insensiblement en pétiole. La hampe florale est droite. *D. intermedia* a des feuilles ovales dressées et longuement pétiolées ; la hampe florale est genouillée à la base. Le premier, qui tolère le calcaire, se trouve en Europe centrale, occidentale et septentrionale, et dans le nord de l'Asie, le second dans les mêmes régions d'Europe, et en Asie Mineure.

Le genre *Dionaea* est constitué par une seule espèce : *D. muscipula (Venus flytrap).* Celle-ci vit aux États-Unis, dans les marais des deux Carolines. Elle possède des feuilles en rosette, à pétiole triangulaire et à limbe orbiculaire, divisé en deux lobes latéraux mobiles le long de la nervure médiane. Les bords du limbe présentent de douze à vingt longues dents redressées. Non loin de la nervure et sur la surface ventrale des lobes du limbe se trouvent de chaque côté trois soies. Le limbe foliaire possède des glandes de couleur pourprée. Quand un animal effleure les soies ventrales, les deux lobes de la feuille se referment assez rapidement (de 10 à 30 s). Les dents marginales s'engrènent les unes dans les autres et la proie est emprisonnée. Les glandes produisent

▲ ***Les feuilles de* Drosera *sont couvertes de poils glanduleux qui servent à capturer les Insectes.***

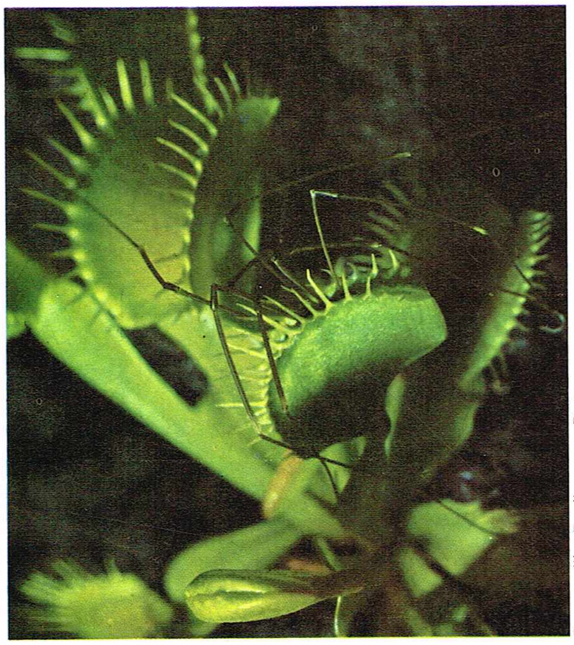

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Les dionées attrape-mouches*** (Dionaea muscipula) ***sont munies d'appendices foliaires à larges lobes bordés de piquants, qui se referment sur les Insectes.***

alors un liquide visqueux et acide, riche en enzymes protéolytiques, et l'Animal est lentement digéré. Il se passe de neuf à trente-cinq jours entre la fermeture des valves et leur réouverture. Si l'on excite les soies ou si l'on dépose sur elles une substance non organique, la feuille se ferme, mais se rouvre au bout de peu de temps.

La famille comprend aussi le genre *Aldrovanda,* nommé en hommage à Ulysse Aldrovandi, naturaliste italien du XVI[e] siècle. Il se rencontre en Europe, en particulier centrale et orientale, en Asie centrale, orientale et méridionale, ainsi que dans la vallée du Nil et dans le Queensland en Australie. Il est irrégulièrement distribué dans ces régions, peut-être par suite d'introductions accidentelles. Son aire originelle est sans doute en Afrique orientale et du Sud, où il est le plus répandu. L'unique espèce est *A. vesiculosa ;* flottante ou immergée dans l'eau, elle ne possède pas de racines. Elle a de 10 à 25 cm de long, ses feuilles sont verticillées par six à neuf. Leur limbe est comparable à celui de la dionée et fonctionne comme celui-ci, mais leur pétiole porte de quatre à six dents « stipulaires » étroites juste en dessous du limbe. La plante se rencontre très rarement en France (Gironde, Bouches-du-Rhône) et y fleurit plus rarement encore. Ses fleurs sont solitaires et axillaires.

Nous citerons aussi *Drosophyllum lusitanicum,* qui croît dans les endroits secs en Espagne, au Portugal et au Maroc. Il est presque arbustif, mais gracile. Ses fleurs, jaunes, ont de dix à vingt étamines et la placentation de l'ovaire est basale ; les feuilles sont très étroitement linéaires, toutes couvertes de poils glanduleux à tête rouge, à fonction prédatrice et digestive.

Les *Violacées (Violaceae),* auxquelles appartiennent les violettes *(Viola),* sont une famille de seize genres et huit cent cinquante espèces de plantes le plus souvent vivaces et herbacées, mais qui peuvent être aussi des arbustes ou des arbres. Elles ont des feuilles alternes, entières ou plus ou moins lobées, et munies de stipules foliacées. Le type floral nous sera fourni par le genre *Viola,* seul présent en France. Les fleurs sont hermaphrodites et zygomorphes, avec cinq sépales verts, pourvus extérieurement, un peu au-dessus de leur insertion, d'une petite écaille membraneuse (sépales hypopeltés), et cinq pétales colorés dont les deux postérieurs sont plats de même que les deux latéraux, tandis que l'antérieur est éperonné, l'éperon servant à recueillir le nectar élaboré par des étamines. L'androcée comporte cinq étamines alternipétales dont les anthères sont pressées les unes contre les autres. Les filets des deux étamines antérieures se prolongent vers le bas en formant chacun un appendice nectarifère, qui s'engage dans l'éperon du pétale antérieur. Le gynécée est composé de trois carpelles soudés qui constituent un ovaire uniloculaire à placentation pariétale. Les fruits sont des capsules à déhiscence loculicide ; les graines sont arillées, et l'arille (élaïosome) est consommé par les fourmis qui facilitent la dispersion de celles-ci. La pollinisation est entomophile. Il y a donc fécondation croisée. De nombreuses violettes possèdent pourtant, outre les fleurs visibles ayant la structure décrite ci-dessus, d'autres fleurs, dites cléistogames, petites, ne s'ouvrant pas, dépourvues de pétales ou à pétales très réduits, mais fertiles, et chez lesquelles la pollinisation s'effectue entre le pollen et les ovules de la même fleur (autofécondation). De nombreuses espèces sont pourvues de stolons.

Les violettes sont représentées en France par une vingtaine d'espèces spontanées, mais elles comportent environ quatre cent cinquante espèces, répandues dans le monde entier, de la Terre de Feu au nord de la Sibérie. L'hybridation naturelle est facile dans un groupe d'espèces communes.

Chez les violettes proprement dites, les deux pétales supérieurs sont dressés, les trois autres dirigés vers le bas. C'est de mars à mai que fleurit la violette folle *(V. hirta),* dans les prés et les bois, sur sols meubles basiques, en Europe, en Asie septentrionale et en Asie Mineure. La violette odorante *(V. odorata)* se rencontre en Europe, en Asie occidentale et en Afrique du Nord. On peut utiliser la décoction de la souche comme purgatif et vomitif, et celle des feuilles comme diurétique. Certaines variétés sont cultivées pour l'extraction de leur essence, qui sert en parfumerie ; mais la majeure partie de ce qu'on nomme

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ ***A gauche : la violette blanche*** (Viola alba) ***est une espèce printanière à floraison précoce. A droite : fleur de violette odorante*** (Viola odorata).

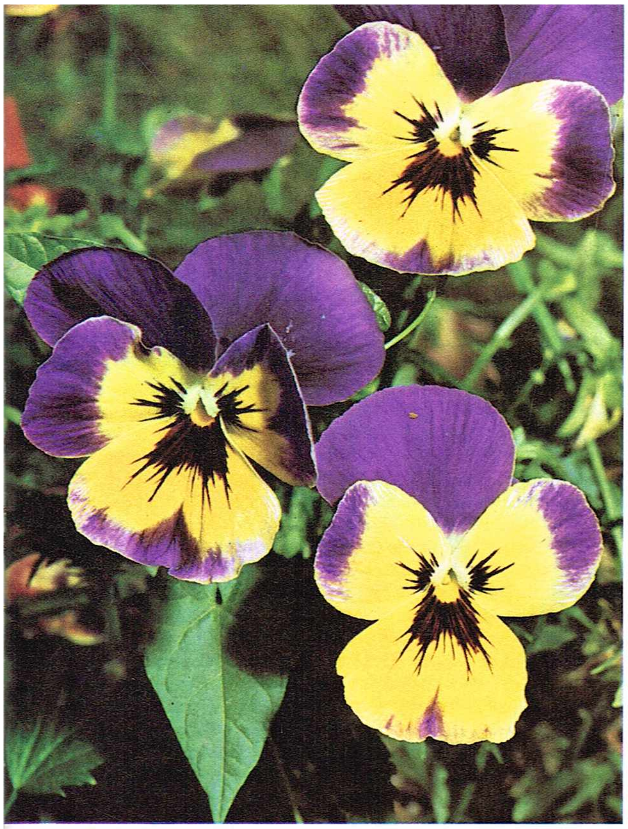

I.G.D.A. - Archives P2

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Papayer* **(Carica papaya)** *chargé de ses fruits, appelés papayes, qui peuvent peser 1 kg en moyenne.*

◀ *Ces pensées, comme toutes celles qui sont cultivées, sont peut-être des descendantes de* **Viola tricolor,** *mais aussi de* **V. altaica,** *de* **V. lutea** *et de leurs hybrides.*

l'essence de violette est obtenue par synthèse et à partir du rhizome d'iris qui contient la même substance aromatique (irone). Cette espèce est très cultivée dans les jardins. La violette de Parme est une sous-espèce de *V. odorata*. *V. reichenbachiana (V. silvestris)* est glabrescent, ne possède pas de stolons et a des fleurs violet clair et inodores. Il forme des tiges feuillées au-dessus d'une rosette de feuilles. On le trouve dans les bois au printemps, en Europe, en Asie, en Afrique du Nord et en Amérique du Nord. La violette de chien *(V. canina)*, vivace aussi, diffère des précédentes par l'absence de rosette de feuilles. Les tiges portent des feuilles à limbe cordiforme et aigu au sommet. Les stipules sont linéaires et frangées. Les fleurs violacées ou bleuâtres ont des pétales larges et un éperon jaunâtre ; elles sont inodores. On trouve cette espèce sur les landes et les bois en Europe, en Asie septentrionale et en Amérique du Nord ; elle fleurit d'avril à juin.

Les pensées, qui ne forment pas de fleurs cléistogames, ont leurs quatre pétales supérieurs recourbés vers le haut, et seul le pétale éperonné est dirigé vers le bas. La pensée sauvage *(V. tricolor)* est commune dans les champs, les prairies maigres et les lieux sablonneux. Elle est annuelle ou bisannuelle, rarement pluriannuelle, haute de 5 à 40 cm et n'a pas de rhizome. Ses feuilles sont pétiolées, les inférieures cordiformes, les supérieures lancéolées. Les stipules, libres, ont un lobe terminal très important. Ses fleurs sont jaunes, violettes ou panachées. Elle fleurit d'avril à octobre, et se rencontre dans une grande partie de l'hémisphère Nord. Cette pensée est cultivée sous de nombreuses variétés depuis des temps fort anciens ; sa culture se pratiquait en Europe avant 1550.

C'est en juillet-août que fleurit *V. calcarata*, dans les pelouses et les pâturages maigres des montagnes d'Europe centrale et méridionale, en particulier dans le Jura et les Alpes, au-dessus de 1 500 m. Il est haut de 4 à 10 cm ; de sa souche pérennante s'élèvent, à intervalles réguliers, de petites tiges nues inférieurement, portant quelques feuilles ovales et ramassées à la base et de grandes fleurs odorantes, violettes ou jaunes, munies d'un long éperon auquel l'espèce doit son nom. *V. cenisia* est vivace et gazonnant. Ses feuilles ovales, de 1 cm de long, sont entières et munies de stipules qui leur ressemblent beaucoup. Les fleurs, violettes et à long éperon, se voient en juillet sur les pentes calcaires du sud-ouest et du centre des Alpes, où l'espèce est endémique. *V. cornuta* est une plante vivace, glabrescente, qui se trouve en France, dans les Pyrénées et les Alpes, en Italie et en Espagne. Elle semble endémique des Pyrénées et seulement naturalisée ailleurs. Elle est cultivée sous plusieurs variétés depuis 1776. Elle possède des tiges ascendantes de 30 cm, sans rosette ; les feuilles sont munies d'un limbe assez large,

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

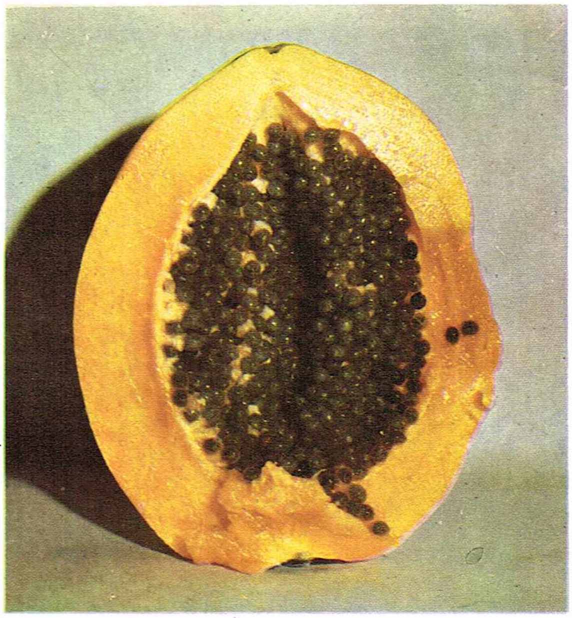

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ *A gauche : fleurs bleuâtres de la violette de chien* **(Viola canina).** *A droite : coupe longitudinale de papaye.*

P. Martini

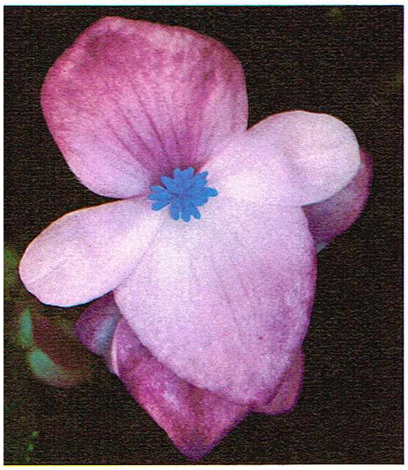

C. Bevilacqua

C. Bevilacqua

Les bégonias comptent de nombreuses espèces très décoratives par leurs fleurs (ci-dessus) ou par leurs feuilles souvent tachetées (à droite).

crénelées et accompagnées de stipules dentées. Les fleurs, inodores, ont des pétales bleu lilas. L'éperon est encore plus long que chez *V. cenisia*. Il en existe dans les jardins une variété à fleurs blanches.

La famille des *Caricacées (Caricaceae)* comprend surtout des arbres et des arbustes à tronc peu ramifié et, chez le papayer, à touffe terminale de feuilles alternes, qui donnent à ces plantes l'aspect de sortes de palmiers. Ce sont rarement des herbes. Les fleurs peuvent être unisexuées, cas le plus général, la plante étant alors dioïque, ou hermaphrodites ; elles sont en outre souvent réunies en grappes et ont un calice court à cinq sépales unis en tube et une corolle gamopétale à cinq ou dix étamines. Il arrive que les pétales soient opposés aux sépales. Il y a cinq carpelles réunis en un ovaire uniloculaire ou pentaloculaire du fait de fausses cloisons. Toutes les Caricacées contiennent un latex provenant de laticifères articulés. Elles regroupent quatre genres et quarante-cinq espèces appartenant à la végétation tropicale et subtropicale d'Amérique et d'Afrique.

Le genre américain *Carica* renferme le papayer *(C. papaya)*, espèce toujours verte, inconnue à l'état spontané (peut-être est-ce un hybride fixé) et qui est cultivée partout sous les tropiques. C'est un arbre flexible de 3 à 10 m. Ses feuilles sont grandes, semblables à celles du ricin, divisées en sept lobes profondément dentés et réunies en parapluie au sommet du tronc. Les fleurs, jaunâtres, apparaissent pendant toute l'année ou presque. Elles sont, suivant les individus, mâles, femelles ou hermaphrodites et leur sexe est déterminé génétiquement. Les fruits (papayes) sont de grosses baies apiculées d'un poids moyen de 1 kg. Elles ont une écorce jaunâtre et possèdent une cavité centrale remplie de graines noires, entourées par une pulpe un peu gélatineuse. Celle-ci peut être consommée comme dessert, frite, ou sous forme de confiture. Toutes les parties de la plante produisent un latex qui contient de la papaïne, mélange d'enzymes protéolytiques. Ainsi, si l'on désire attendrir un morceau de viande, il suffit de l'envelopper dans une feuille de papayer. La période de grande production de papayes dure seulement de trois à cinq ans pour un arbre donné. Pendant ce temps, elle est presque ininterrompue.

La famille des *Bégoniacées (Begoniaceae)* tire son nom de celui des bégonias *(Begonia)*, qui ont beaucoup d'importance en horticulture. Elle compte cinq genres et huit cent vingt espèces. Ce sont des plantes herbacées ou suffrutescentes, souvent tubéreuses dans le premier cas. Les feuilles, alternes et simples, sont fréquemment lobées, parfois digitées, et ont un limbe dissymétrique ; elles sont pourvues de stipules caduques. On trouve des poils épars sur leur face supérieure et condensés sur les nervures les plus proéminentes de leur face inférieure ; il peut aussi y avoir des formations laminaires, voire de petits cornets sur la feuille. Il arrive que celle-ci soit ornée de taches de formes et de couleurs variables, qui la rendent très décorative. Les fleurs sont unisexuées et disposées en cymes. Elles n'ont pas toujours un calice et une corolle différenciés. Il y a donc de deux à cinq tépales *(Begonia)* ou de deux à cinq sépales et de un à cinq pétales (ces derniers peuvent aussi manquer). Les fleurs mâles ont de nombreuses étamines, souvent à filets soudés à la base ; les femelles possèdent un ovaire tricarpellé en général, toujours infère et de section le plus souvent triangulaire, muni fréquemment, comme chez *Begonia*, de trois ailes dorsales et de trois stigmates bifides à branches spiralées. Les fruits sont des capsules loculicides *(Begonia)*, rarement des baies, à graines nombreuses.

Le genre *Begonia* se rencontre dans les régions chaudes et comporte huit cents espèces. On a attribué à quelques-unes d'entre elles des propriétés médicinales ; les feuilles sont riches en acide oxalique et servent localement en cuisine, mais l'intérêt essentiel des bégonias est horticole. La première espèce cultivée dans les jardins européens *(B. nitida)* a été importée en France en 1777, en provenance de la Jamaïque ; cette plante eut beaucoup de succès, et les recherches menées dans l'île de la Jamaïque aboutirent trois ans plus tard à l'importation du *B. macrophylla*. Ensuite eurent lieu des importations de Chine, de l'Assam et du Pérou ; enfin, Pearce découvrit vers 1865, dans les Andes du Pérou et de Bolivie, diverses espèces tubéreuses dont *B. veitchii*, *B. boliviensis* et *B. rosaeflora*. Ces plantes menèrent, par hybridation, à l'obtention d'une quantité extraordinaire de formes et de coloris.

Parmi les autres espèces les plus répandues, nous citerons *B. socotrana*, originaire de l'île de Socotora, annuel, à feuilles vert foncé, arrondies, et à fleurs rosées. Il forme à la base de sa tige des bulbilles servant à la reproduction végétative. Fleurissant de novembre à février, il a été, par croisement avec *B. dregei*, vivace et tubéreux, et avec d'autres espèces, à l'origine d'une série d'hybrides horticoles. *B. rex*, de l'Assam, est une espèce vivace et rhizomateuse, à feuilles cloquées, velues, zonées, de couleur bronzée et argentée, très dissymétriques ; les fleurs ne sont pas décoratives. Il doit passer l'hiver en serre, mais peut être installé en plein air l'été. *B. semperflorens*, qui est annuel, est très riche en variétés. Il est originaire du Brésil et possède des feuilles luisantes d'un vert vif et des fleurs blanches, roses ou même pourprées. Il est souvent utilisé en bordure. *B. fuchsioides* a des fleurs qui rappellent celles des fuchsias, car elles sont écarlates, pendantes et à demi ouvertes ; c'est une espèce de Colombie, vivace et suffrutescente, atteignant 50 cm, et à feuilles dentées, vertes et bordées de rouge foncé. Il n'est pas vraiment rustique sous nos climats.

La famille des *Passifloracées (Passifloraceae)* comprend douze genres et six cents espèces, dont le genre *Passiflora*, les fleurs de la Passion, ainsi nommées parce que certains de leurs appendices rayonnants (couronne) ont été comparés à la couronne d'épines du Christ, les

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

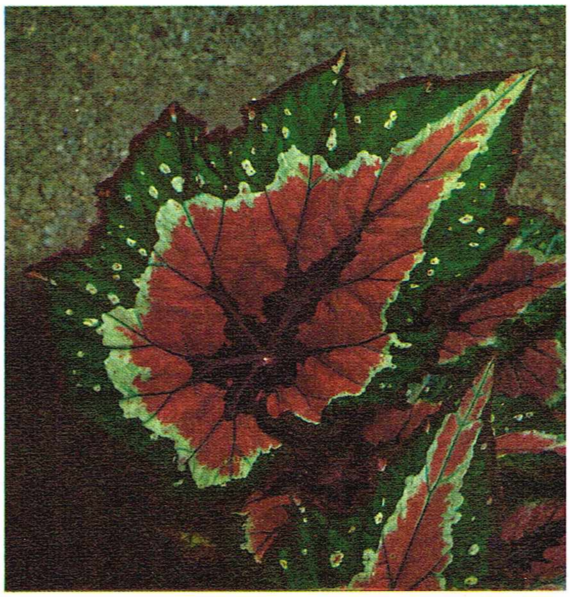

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

étamines évoquant l'éponge et les stigmates cunéiformes les clous de la Crucifixion. Les Passifloracées sont des herbes ou arbustes grimpants (elles ont des vrilles qui correspondent à des inflorescences). Leurs feuilles sont alternes, à limbe entier, digité, voire penné, et à stipules souvent herbacées. Les fleurs sont hermaphrodites ou parfois unisexuées, et solitaires ou réunies en inflorescences racémeuses ou cymeuses. Il y a sous le calice un involucre de trois bractées, la bractée axillante et deux préfeuilles plus courtes que les sépales. Le calice a quatre ou cinq sépales, parfois plus ou moins soudés et souvent aussi apiculés. Les pétales peuvent être au nombre de quatre ou cinq et sont fréquemment vivement colorés. Il y a intérieurement à la corolle une couronne simple ou multiple de signification problématique. Elle est formée de filets, d'écailles et de membranes disposés concentriquement. Les étamines sont généralement au nombre de cinq, insérées soit au sommet d'un prolongement axial (androgynophore) qui supporte aussi le pistil *(Passiflora)*, soit sur l'axe directement à l'intérieur de la couronne, soit encore sur la collerette la plus interne de celle-ci. Le gynécée, porté par un gynophore lorsqu'il n'y a pas d'androgynophore, a en général trois carpelles; la placentation est pariétale et les ovules nombreux. Les fruits sont des capsules ou des baies, comestibles chez certaines espèces, à graines arillées munies d'un albumen charnu.

Les passiflores *(Passiflora)* comprennent environ quatre cents espèces des climats chauds ou tempérés chauds, surtout en Amérique, mais aussi en Asie tropicale et jusqu'en Australie et en Polynésie. Importées en Europe au XVII^e siècle, elles se sont vite répandues dans les serres et les jardins. *P. coerulea*, d'Amérique du Sud, est rustique jusque dans le centre de la France; il s'est naturalisé aux Açores. *P. edulis* et d'autres espèces sont cultivés sous les tropiques pour leurs fruits à pulpe gélatineuse et juteuse, qui est comestible. Ces fruits, ou grenadilles, entrent dans la préparation de pâtisseries, de gelées et de boissons. *P. incarnata*, du sud des États-Unis, sert à fabriquer une décoction à propriétés sédatives et antispasmodiques.

La famille des *Tamaricacées (Tamaricaceae)* comprend notamment les tamaris *(Tamarix)* qui sont bien connus sur les zones côtières méditerranéennes et atlantiques, et la myricaire *(Myricaria germanica)* qui se développe le long des cours d'eau et des torrents de l'Est et du Midi. Elle regroupe quatre genres et cent espèces d'arbustes ou de petits arbres halophiles ou xérophiles, excrétant souvent du sel, aux branches plus ou moins souples et à petites feuilles apprimées et squamiformes. Certaines espèces de tamaris, *T. tetrandra* en particulier, et de myricaires sont cultivées dans les jardins. Les fleurs, petites, hermaphrodites, souvent en épis, ont quatre ou cinq sépales et pétales, de quatre à dix étamines, et un ovaire supère formé de deux à cinq carpelles soudés. La placentation est pariétale et subbasale. Le fruit est une capsule à nombreuses graines velues.

T. canariensis est utilisé pour arrêter les dunes. Il croît sur les côtes du Portugal et de l'ouest de la Méditerranée, ainsi que sur celles du Maroc et des Canaries. Il est naturalisé aux États-Unis. Son écorce et les galles qu'elle forme par suite de la piqûre d'Ériophyidés sont riches en tanin. *T. gallica* en est voisin, mais est papilleux, tandis que le précédent est glabre. La manne, mucilage sucré que consommaient les Hébreux dans le désert, est produite par *T. nilotica* var. *mannifera* à la suite de piqûres de cochenilles.

La famille des *Flacourtiacées (Flacourtiaceae)* comprend environ mille trois cents espèces en quatre-vingt-six genres. Elle occupe une aire pantropicale, avec quelques représentants subtropicaux. Elle est constituée de plantes arborescentes ou arbustives, à feuilles alternes, simples et coriaces, toujours vertes. Les fleurs hermaphrodites, souvent en partie spiralées, possèdent de trois à six sépales, de trois à huit pétales, de nombreuses étamines et un disque souvent grand et de forme variable, situé entre les étamines et le pistil ou en dehors des étamines et constituant une sorte de couronne. Il y a de deux à dix carpelles unis en un ovaire supère à placentation pariétale et parfois axile. Les fruits sont des capsules ou des baies. Ceux de quelques *Flacourtia* et *Dovyalis* d'Afrique et d'Asie sont consommés à l'état frais ou sous forme de confiture dans de nombreux pays tropicaux. Les graines de *Pangium edule*, de Malaisie, torréfiées pour en éliminer l'acide cyanhydrique, sont comestibles et fournissent une huile alimentaire après suppression du même acide par action de l'eau. Les graines de plusieurs espèces d'*Hydnocarpus*, *Caloncoba*, etc., fournissent des huiles connues sous le nom d'huile de chaulmoogra, qu'on utilise pour soigner la lèpre.

L'ordre des Pariétales comprend enfin quelques autres familles, dont nous citerons ici les principales espèces utiles.

La famille des *Loasacées (Loasaceae)* qui semble affine des Bégoniacées, regroupe quinze genres et deux cent cinquante espèces de plantes herbacées ou ligneuses, souvent volubiles, fréquemment couvertes de poils siliceux barbelés, et souvent aussi de poils urticants. Ce sont des Végétaux d'Amérique centrale et d'Amérique du Sud tempérée, qui remontent jusqu'aux États-Unis, avec un genre en Afrique. Ils sont cultivés parfois dans les serres et les jardins européens pour leurs belles fleurs

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Les tamaris ont des frondes légères et des feuilles de petite taille.*** **Tamarix pentandra *(ici, spécimen en fleur) est un arbuste ornemental.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ **Passiflora coerulea *est appelé fleur de la Passion car certains appendices rayonnants évoquent la couronne d'épines du Christ.***

jaunes ou rouge brique et d'aspect curieux. Ces fleurs ont cinq pétales égaux, larges, souvent en forme de capuchon, cinq staminodes alternant avec les pétales et portant éventuellement les appendices, tandis que les étamines du second verticille se sont généralement multipliées (polyandrie secondaire). L'ovaire, formé de trois à cinq carpelles, est infère et la placentation fondamentalement pariétale.

Les Datiscacées *(Datiscaceae),* comptant quatre espèces, semblent aussi voisines des Bégoniacées. Elles sont généralement dioïques. *Datisca cannabina,* plante herbacée vivace à feuilles composées ressemblant à celles du chanvre et haute de 1 à 2 m, souvent cultivée dans les jardins, habite l'Asie occidentale jusqu'à l'Inde.

Guttiférales

Parfois réunies aux Pariétales (Engler), les Guttiférales méritent d'en être séparées. Il s'agit de plantes généralement ligneuses, à fleurs parfois partiellement spiralées. Les étamines sont souvent nombreuses, mais par multiplication secondaire. L'ovaire est presque toujours supère, fréquemment pluricarpellé et syncarpe avec une placentation axile dans la plupart des cas, mais parfois pariétale. L'albumen, quand il est présent, est dépourvu de substances amylacées et contient seulement des protéines et des matières grasses. Il existe souvent des poches et des canaux sécréteurs.

La famille des *Dilléniacées (Dilleniaceae)* comprend dix genres et trois cent cinquante espèces. Ce sont des arbres, des arbrisseaux, des arbustes ou des lianes, rarement des herbes, à feuilles alternes, simples, sans stipules, répandus dans les régions tropicales et subtropicales, très abondants en Australie; seules quelques formes habitent l'Afrique. Les fleurs, hermaphrodites, ont des sépales souvent spiralés passant progressivement aux bractées du pédoncule. Il y a de deux à cinq pétales. Dans la majorité des cas, les étamines sont nombreuses et à développement centrifuge. Les carpelles sont séparés ou un peu soudés au centre. Ils deviennent des légumes ou des akènes. Les ovules donnent des graines peu nombreuses, arillées et renfermant un petit embryon droit dans un albumen abondant. Les cellules épidermiques sont souvent silicifiées, et, chez plusieurs lianes, tels les *Doliocarpus,* la tige présente des cambiums surnuméraires. Dans le genre *Dillenia,* les carpelles, nombreux, sont soudés et les graines n'ont pas d'arille. *D. indica* donne des « fruits » juteux et comestibles; la partie que l'on consomme correspond en fait aux sépales accrescents. *Curatella americana* est typique des « catingas » en Amérique du Sud. Ses feuilles à épiderme très silicifié lui ont fait donner le nom de *sand-paper tree* (arbre à papier de verre). Le genre *Hibbertia,* d'Australie, de Nouvelle-Calédonie et de Madagascar, comprend certaines espèces ornementales, dont *H. volubilis,* plante ligneuse, volubile ou rampante, haute de 60 cm à 1,20 m. Elle possède des rameaux roses, avec des feuilles ovales-lancéolées; ses fleurs sont jaunes et parfois d'odeur désagréable. Originaire du Queensland et de Nouvelle-Galles du Sud, elle peut être cultivée en pleine terre sur la Côte d'Azur et la Riviera, ou en serre dans les zones plus froides; elle fleurit en mai et juin.

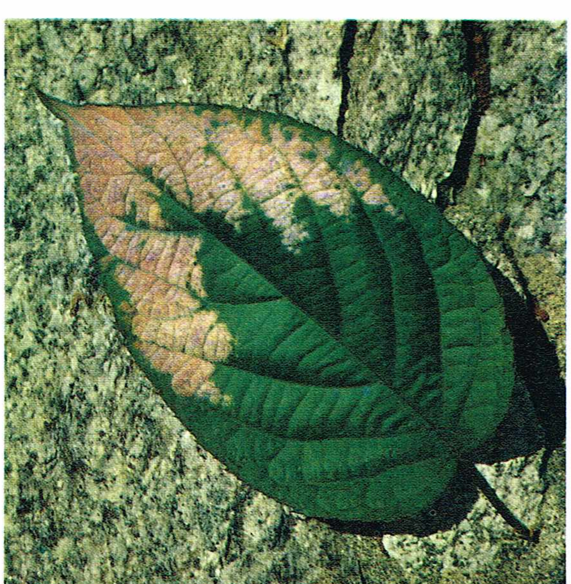

▶ **Actinidia kolomitka** *est une plante grimpante aux feuilles marbrées, dont les fleurs rappellent celles des cerisiers.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

La famille des *Actinidiacées (Actinidiaceae)* comprend trois genres et plus de trois cents espèces. Ce sont des arbres, des arbrisseaux, des arbustes ou des lianes, répandus dans les régions tropicales d'Amérique, d'Asie et d'Indonésie, ainsi que dans les régions tempérées d'Asie centrale et de l'Himalaya. Elles ressemblent par de nombreux caractères aux espèces de la famille précédente : les carpelles sont soudés au moins en partie, l'ovaire est pluriloculaire et la placentation est axile. Les fruits sont des baies ou des capsules et les graines arillées ont un gros embryon dans un albumen abondant.

Nous citerons le genre *Actinidia*, d'Asie et d'Indonésie, qui a donné son nom à la famille et dont les carpelles sont soudés latéralement, mais parfois libres intérieurement. *A. kolomitka,* grimpant, à feuilles marbrées de blanc et de carmin à l'état jeune, rappelle les cerisiers par ses fleurs; ses fruits, petits et noirs, sont doux et comestibles. *A. arguta* et *A. chinensis,* grimpants aussi, sont cultivés pour leurs feuilles, leurs fleurs et leurs fruits. Les *Actinidia* sont dioïques ou polygames et habitent l'Indonésie, l'Inde, l'Himalaya et l'Extrême-Orient. Certaines espèces du genre *Clematoclethra,* originaire de Chine et du Tibet, sont également utilisées pour l'ornementation. Nous citerons enfin le curieux *Saurauia cauliflora* qui appartient au plus grand genre de la famille (deux cent quatre-vingts espèces), dont les fleurs apparaissent sur la tige ligneuse âgée (cauliflorie), comme chez beaucoup d'autres représentants du genre. Les carpelles sont unis, mais les styles sont libres.

La famille des *Marcgraviacées (Marcgraviaceae)* comprend cinq genres et cent vingt espèces ligneuses, généralement grimpantes, de l'Amérique tropicale. Les principaux genres sont les *Marcgravia* à pétales unis en capuchon et les *Norantea*, à étamines nombreuses. Chez les premiers, certains rameaux possèdent des racines adventives, avec lesquelles ils s'attachent à leurs supports comme le fait le lierre. Leurs feuilles, sans stipules, alternes, sont appliquées au substratum et réparties en deux rangées. D'autres rameaux sont ascendants et les feuilles sont disposées tout autour et conformées différemment. Ils se terminent par des inflorescences en ombelles ou en épis pendants. Les bractées des fleurs terminales avortées sont transformées en nectaires en forme de sacs qui accumulent du nectar; les colibris, en consommant ce dernier, assurent la pollinisation des fleurs fertiles.

La famille des *Théacées* ou *Ternstrœmiacées (Theaceae* ou *Ternstroemiaceae)* comprend environ trente-cinq genres et six cents espèces, essentiellement des régions tropicales et subtropicales, en particulier des forêts de montagnes. Ce sont des arbres et des arbustes à feuilles alternes, persistantes, sans stipules, et dont les fleurs en général hermaphrodites ont les éléments du périanthe souvent disposés en spirale. Les pétales sont au nombre de cinq, parfois plus. Les étamines sont abondantes, en plusieurs verticilles, et parfois réunies en cinq faisceaux soudés à la base des sépales, ce qui montre que leur multiplication est là aussi secondaire. Le gynécée comporte des carpelles unis en un ovaire pluriloculaire. Les fruits sont des capsules, des drupes ou des baies; les graines ont peu d'albumen.

Le genre monospécifique *Gordonia* ne comprend que *G. lasianthus* (loblolly bay), de l'est des États-Unis, qui est un arbre à feuilles toujours vertes. Les fleurs sont grandes avec cinq sépales, autant de pétales et de nombreuses étamines à anthères médifixes; l'ovaire, composé de cinq loges, est supère. Les fruits sont des capsules loculicides. Les graines sont ailées.

Le genre *Camellia* compte quatre-vingt-deux espèces, dont une très connue, *C. japonica*, ou camélia. Dans nos régions, il revêt l'aspect d'un arbuste, alors qu'à l'état spontané, en Extrême-Orient, c'est un arbre atteignant 12 m. Son tronc et ses vieilles branches sont gris, les jeunes rameaux sont rougeâtres ou jaunâtres. Il a des

feuilles coriaces, alternes, pétiolées, à limbe ovale, pointu, à bord crénelé, brillant au-dessus, terne au-dessous. Les fleurs possèdent des sépales verts, coriaces, entourés de bractées, et peu distincts de celles-ci. On peut admettre pourtant qu'il y a cinq ou six sépales. Ils passent avec des intermédiaires à la corolle de cinq à huit pétales épais. Les étamines sont nombreuses et à anthères médifixes, l'ovaire est supère, syncarpe, à style court. Chaque loge ne contient que quatre ovules. Les fruits sont des capsules à cinq loges dont chacune renferme une graine. La plante fleurit de novembre à mai. On connaît de nombreuses variétés horticoles de cette espèce, qui sont souvent des hybrides obtenus par croisements avec des *Camellia* voisins. Elles diffèrent par leurs fleurs, fréquemment doubles et à pétales blancs, roses, rouges, de tonalité très diverse ou parfois marbrés ou striés. La culture se fait en pot. Elle peut être effectuée en pleine terre dans la région méditerranéenne.

Le genre *Thea*, qui doit en fait être réuni aux *Camellia*, comporte la seule espèce *Thea (Camellia) sinensis*. On utilise ses feuilles pour préparer le thé. C'est un arbuste ou un arbre qui, à l'état spontané, peut atteindre 12 à 15 m, mais qui, en culture, par suite des tailles continuelles, ne dépasse pas 1 à 2 m. Il a des feuilles alternes, coriaces, vert foncé, brillantes, ovales-lancéolées, dentées ou crénelées. Les fleurs sont solitaires, axillaires (parfois en cymes de trois à cinq dans la variété *sinensis bohea*), odorantes, entourées de bractées et formées de cinq sépales et autant de pétales blancs ainsi que de nombreuses étamines jaunes. Il y a trois carpelles soudés et les fruits sont des capsules à trois valves renfermant une ou deux graines. Dans la var. *assamica*, les feuilles sont plus grandes et dentées seulement au sommet. Originaire des régions s'étendant du sud de la Chine au nord de l'Inde (Assam), le thé est cultivé maintenant dans de nombreux pays tropicaux. Le thé de Chine (var. *sinensis*) croît de préférence dans les zones tropicales montagneuses, et le thé de l'Assam (var. *assamica*) dans les plaines basses à climat chaud et humide. Des hybrides des deux sont les plus cultivés. Les feuilles sont cueillies à l'état jeune pour obtenir le meilleur thé. Il existe des thés verts, qui sont préparés en laissant simplement sécher les feuilles, et des thés noirs, qui sont obtenus en soumettant ces feuilles à un processus de fermentation partiel, afin d'en améliorer l'arôme. Les feuilles contiennent notamment des polyphénols, de la caféine (1 à 5 %), de la théophylline, du tanin (8 à 26 %) et des enzymes (« théase »), qui, lors de la fermentation du thé noir, libèrent probablement de la caféine et de la théophylline de combinaisons où elles étaient engagées (comme cela se produit pour le café), qui oxydent et polymérisent les catéchols et produisent des substances colorées. Les fleurs en bouton, séchées, sont utilisées comme les jeunes feuilles. Chez les *Ternstroemia* et d'autres genres répandus dans les tropiques hors d'Afrique, les étamines sont basifixes.

R. Longo

▲ ***Rameau fleuri de thé de Chine*** **(Thea sinensis)** ***; les feuilles de cette espèce sont utilisées pour préparer le thé.***

La famille des *Clusiacées (Clusiaceae)* ou *Guttifères (Guttifereae)* regroupe en quarante-neuf genres et neuf cents espèces des arbres ou des arbustes, rarement des herbes, le plus souvent des régions tropicales et subtropicales. Ces plantes possèdent des feuilles simples, généralement opposées ou verticillées. Les fleurs sont souvent polygames ou unisexuées. Les éléments de leur périanthe sont en nombre variable, de deux à quatorze ; les étamines souvent nombreuses sont alors rapprochées en faisceaux ou en anneaux, voire en synandres et unies profondément. Les ovaires, pluricarpellés le plus souvent, possèdent deux loges ou plus, mais parfois aussi une seule ; les styles sont présents ou absents et les lobes stigmatiques ont une forme très variable. Les fruits sont des capsules septicides, des baies ou des drupes. Cette famille se caractérise par la présence de glandes oléifères et de canaux résinifères très abondants.

Le genre *Clusia* comprend deux cents espèces et est constitué d'arbres et de plantes épiphytes et volubiles riches en résines purgatives, à feuilles épaisses et coriaces. Les graines de *Pentadesma butyraceum*, de Guinée, fournissent une substance comparable à du beurre (beurre de Lamy). Les fruits de *Mammea americana*, ou abricots de Saint-Domingue, sont comestibles et la plante est souvent cultivée. Le genre *Garcinia*, d'Asie et d'Afrique tropicales, compte deux cent vingt espèces. Les étamines sont en faisceaux. On tire de l'écorce de *G. hanbury* et de quelques espèces voisines la gomme-gutte, avec laquelle on prépare des vernis à l'alcool et des

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ ***Il existe de nombreuses variétés horticoles du camélia :*** **Camellia japonica** ***var.*** **incarnata** ***(à gauche),*** **C. japonica** ***var.*** **alba** ***(à droite).***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Le millepertuis* **(Hypericum perforatum)** *est une herbe vivace ne dépassant pas 80 cm.*

▼ *Chez les millepertuis, les fleurs sont pourvues d'étamines nombreuses.* **Hypericum densiflorum** *(à gauche),* **H. olympicum** *(à droite).*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

purgatifs énergiques. *G. mangostana,* de Malacca, est cultivé sous les tropiques pour ses fruits comestibles dont on fait des confitures et des sirops.

Le genre *Hypericum* rassemble des arbustes ou des plantes herbacées, souvent riches en résines et en huiles essentielles, en quelque trois cent cinquante espèces, du monde entier, mais surtout de la région méditerranéenne et des zones subtropicales. Le millepertuis *(H. perforatum),* herbe vivace haute de 20 à 80 cm, est le plus commun en France. Ses feuilles sont opposées, sessiles, ovales-oblongues et possèdent des points noirs sur la face inférieure près du bord, ainsi que des points translucides (poches sécrétrices) sur tout le limbe (d'où le nom vulgaire de la plante). Les fleurs forment des corymbes composés avec des fleurs à cinq sépales ponctués de noir, cinq pétales jaunes et de nombreuses étamines groupées en trois faisceaux ; l'ovaire est tricarpellé, triloculaire et possède trois styles. Les fruits sont des capsules rouge foncé. On le rencontre dans les lieux incultes jusque vers 1 800 m d'altitude, en Europe, en Asie occidentale et en Afrique du Nord ; il fleurit de juin à septembre. Ses sommités fleuries contiennent une huile essentielle, du tanin et des flavonoïdes ; une substance rouge, l'hypericine, provient des glandes noires des feuilles et du périanthe. Cette drogue donnait un produit utilisé comme astringent, antiseptique et cicatrisant. *H. pulchrum,* plante à feuilles sessiles en cœur à la base, *H. tetrapterum* dont la tige a quatre angles ailés, et *H. humifusum,* grêle et rampant, à fleurs souvent solitaires, sont quelques autres représentants indigènes du genre.

Citons, encore, dans le centre et l'est de la région méditerranéenne, *H. hircinum,* d'aspect buissonnant, haut de 60 à 90 cm, dont les feuilles ont une odeur de bouc et dont les fleurs sont jaunes. *H. calycinum,* de l'est de la région méditerranéenne et d'Asie Mineure, est très souvent cultivé et parfois naturalisé. Ses fleurs sont grandes, à étamines très longues munies d'anthères rouges. Les tiges sont couchées. Chez *H. « hidcote »* au contraire, les étamines sont trois fois plus courtes que les pétales, et la plante est un buisson ligneux. Il s'agit là d'un hybride stérile apparu il y a une cinquantaine d'années, d'origine problématique, et de plus en plus cultivé.

Rosales

C'est l'un des ordres les plus importants de Dicotylédones. Il comprend des espèces herbacées, arborescentes ou arbustives, et parfois des lianes. Les feuilles peuvent être simples ou composées, avec ou sans stipules. Les fleurs sont hermaphrodites et cycliques ; elles ont un calice et une corolle le plus souvent à cinq éléments, à symétrie rayonnante, très rarement zygomorphes. Les étamines sont en nombre égal à celui des pétales ou double de celui-ci, mais elles peuvent être très nombreuses par multiplication secondaire, ou réduites à une seule. En général, il y a autant de carpelles, diversement réunis entre eux, que de pétales ; il peut également y en avoir moins et même un seul. Le réceptacle est plat, élargi en formant un disque concave, de sorte que la zone d'insertion des sépales, des pétales et des étamines peut être plus ou moins périgyne, ou bien creusé en coupe adhérente aux carpelles, et la fleur est épigyne. Les fruits sont de tous les types. L'ensemble constitue un bel exemple de groupe par enchaînement : les types extrêmes sont très différents, mais il y a entre eux de nombreux intermédiaires.

Les Hamamélidales sont souvent incluses dans les Rosales, qui sont éventuellement scindées en plusieurs ordres. La circonscription de plusieurs familles fait aussi l'objet de discussions. Nous considérons les familles essentielles comme elles sont généralement comprises.

La famille des *Crassulacées (Crassulaceae)* englobe environ trente genres et mille quatre cents espèces de plantes annuelles ou vivaces, herbacées ou arbustives, et presque toujours succulentes, croissant dans le monde entier, mais surtout en Afrique, au Mexique et dans la région méditerranéenne. Leur adaptation à la sécheresse leur permet de vivre sur les roches, les vieux murs ou les terrains sablonneux ensoleillés. Les feuilles, opposées, verticillées ou alternes, souvent persistantes, sont capables en effet d'emmagasiner de l'eau ; elles transpirent peu, car elles ont un épiderme pauvre en stomates, et sont souvent étroitement appliquées les unes contre les autres. Les fleurs sont, dans la plupart des cas, réunies en inflorescences. Les pétales et les sépales, qui sont disposés en deux verticilles, sont en général au nombre de quatre ou cinq, mais ce nombre peut s'élever jusqu'à trente-deux environ. Il y a deux fois plus d'étamines que de sépales, et l'androcée est obdiplostémone. Il y a quatre ou cinq carpelles ou plus, autant que de sépales libres. Ils portent une écaille nectarifère dorsale à leur base. Les ovules sont presque toujours nombreux. Les fruits sont des follicules, quelquefois des capsules, qui contiennent des petites graines pourvues d'albumen. La richesse des Crassulacées en acides organiques et en tanins contribue probablement à éloigner d'elles les herbivores. Étant donné leur structure florale et leur richesse en nectar, la pollinisation se fait par les Insectes. Cinq genres de cette famille appartiennent à la flore française. Beaucoup d'autres sont faciles à cultiver comme plantes

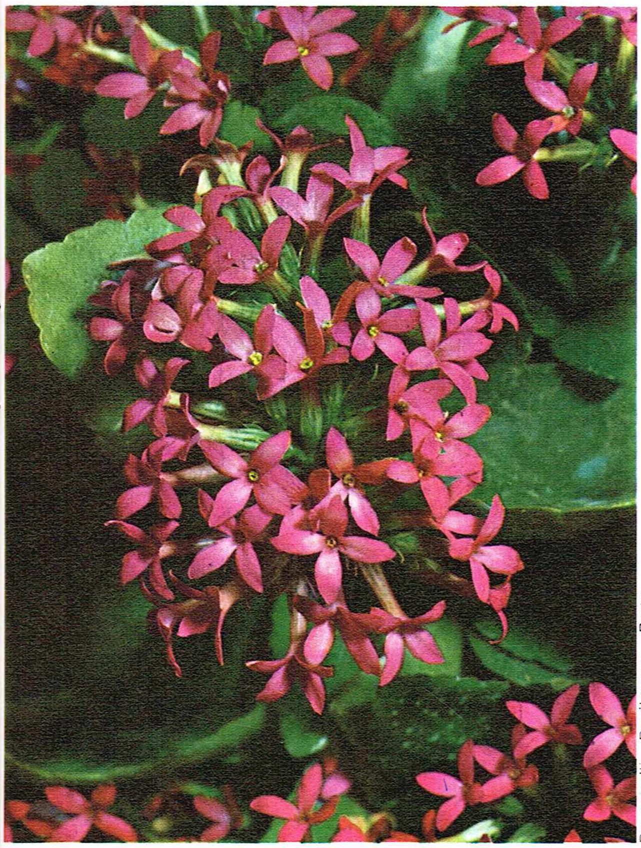

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ **Kalanchoe blosfeldiana,** ***Crassulacée tropicale qui est cultivée pour l'ornementation (à gauche).*** **Sedum album** ***sous son aspect hivernal (à droite).***

▼ ***Un autre représentant du genre*** **Sedum : S. rupestre.**

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

ornementales, aussi bien dans les jardins de rocaille qu'en pot, et quelques espèces rustiques sont naturalisées dans la région méditerranéenne. On les multiplie par boutures, même de simples feuilles ; il leur faut un terrain sablonneux, sans engrais, beaucoup de lumière et très peu d'eau afin d'éviter qu'elles ne pourrissent. Il est souvent bon de les étêter, ce qui les oblige à se ramifier et à prendre une forme buissonnante, plus ornementale.

Les *Crassula* doivent leur nom à l'aspect de leurs feuilles opposées (latin *crassus*, gras). Ils forment un grand genre surtout sud-africain, qui comporte trois cents espèces. Ils se distinguent des *Rochea* par leurs pétales libres sur toute leur longueur, mais tous n'ont qu'un seul cycle d'étamines. Les crassules cultivées sont suffrutescentes, à tige simple et feuillée. Les feuilles sont arquées et les fleurs rouges chez *C. falcata*. Les feuilles sont ovales et glauques, ponctuées supérieurement et souvent bordées de rouge, et les fleurs sont blanches puis roses chez *C. arborescens*. Certaines crassules sont velues *(C. interrupta)*. Ces plantes ont été importées en Europe à partir du XVIII[e] siècle et sont actuellement largement cultivées.

Une section de ce genre comporte des plantes annuelles presque aquatiques, placées jadis dans le genre *Tillaea*. *C. tillaea (Tillaea muscosa),* d'Europe et d'Afrique du Nord, n'est pas rare en France. Il forme des gazons à allure de tapis de mousses dans les lieux sablonneux.

Le genre *Rochea*, déjà cité, comprend quatre espèces d'Afrique du Sud, utilisées aussi dans les jardins de rocaille méditerranéens et en pot. *R. coccinea* est pollinisé par les colibris.

Le genre *Cotyledon* est aussi cultivé. Il a des fleurs pentamères, un androcée obdiplostémone et des pétales soudés en tube. Il comprend quarante-quatre espèces d'Afrique du Sud et d'Éthiopie.

Dans nos régions, le nombril de Vénus *(Umbilicus rupestris = U. pendulinus)* est le représentant du genre *Umbilicus* qui compte seize espèces en région méditerranéenne et en Asie Mineure. C'est une plante herbacée vivace, haute de 10 à 50 cm, qui possède des inflorescences cymeuses de fleurs blanc jaunâtre, riches en nectar, à corolle tubuleuse. Son nom vulgaire est dû à la forme en coupe ombiliquée de ses feuilles peltées.

Les *Bryophyllum*, qu'on doit sans doute joindre aux *Kalanchoe*, ont aussi des pétales soudés. Ce sont une vingtaine de plantes de Madagascar qui ont la curieuse

faculté d'émettre, la plupart du temps sur les bords de leurs feuilles, entre des denticulations, des bourgeons adventifs munis de racines qui tombent sur le sol et multiplient la plante. Les bourgeons peuvent ne se développer qu'après séparation de la feuille *(B. crenatum)* ou bien apparaissent sur les feuilles en place. Ce sont des arbrisseaux cultivés dans les jardins, tels *B. pinnatum (B. calycinum)*, à inflorescence rougeâtre, *B. crenatum*, à corymbes jaune rougeâtre, *B. tubiflorum*, à feuilles étroites, et *B. daigremontianum*, à larges feuilles marbrées inférieurement. Les *Bryophyllum* et les *Kalanchoe* ont des fleurs tétramères à pétales plus ou moins soudés et androcée obdiplostémone. Ces derniers, qui sont environ deux cents, sont africano-malgaches, mais l'un d'eux est brésilien et quelques autres sont asiatiques.

Les *Sedum*, ou orpins, ont des pétales libres, cinq en général. Ils sont au nombre d'environ cinq cents, habitant surtout les régions tempérées de l'hémisphère Nord et particulièrement nombreux dans l'Himalaya, en Extrême-Orient et au Mexique. Ils croissent partout où le vent accumule un peu de terre et permet à leurs graines de germer, jusqu'en haute montagne. Nous citerons d'abord des espèces indigènes vivaces à feuilles plus ou moins cylindriques, comme l'orpin blanc *(S. album)*, à feuilles cylindriques, et qui forme de juin à août de petites fleurs blanches en inflorescences fournies; *S. dasyphyllum*, qui croît sur les murs et les rochers sans dépasser 15 cm, avec des fleurs blanc rosé et des feuilles obovoïdes épaisses; l'orpin a six angles *(S. sexangulare)*, d'une dizaine de centimètres de haut, à feuilles cylindrées et fleurs jaune clair; *S. acre*, à fleurs jaunes et feuilles triangulaires épaissies, imbriquées. *S. reflexum*, à fleurs jaune vif, a des feuilles cylindriques pointues. *S. anopetalum* a des feuilles comparables à celles du précédent, mais ses fleurs sont jaune très clair et ses pétales ne s'étalent pas. Parmi les espèces vivaces à feuilles plates opposées ou alternes, et à fleurs blanches ou roses, nous citerons *S. telephium*, dont les fleurs sont pourprées à l'état sauvage et dont les feuilles sont dentées, les supérieures tronquées et cordées à la base; *S. maximum*, semblable au précédent, mais à feuilles subentières et larges, et à fleurs blanc jaunâtre; le rhodiole *(S. rosea)*, calcifuge et vivant au-dessus de 1 400 m d'altitude, à fleurs tétramères et à feuilles plates profondément dentées serrées les unes contre les autres; enfin, *S. sieboldii*, du Japon, souvent cultivé, à feuilles triangulaires, verticillées par trois, et denticulées supérieurement.

Les *Sempervivum* ou joubarbes sont assez semblables aux *Sedum* et occupent comme eux les rochers, les toits et les murs. Ils se trouvent surtout dans les Alpes et dans les montagnes méditerranéennes et d'Asie Mineure. Les fleurs sont blanches, roses ou pourprées. Elles sont le plus souvent polymères et ont jusqu'à trente-deux pièces par verticille. Les feuilles sont disposées en rosettes ressemblant à des petits choux. La joubarbe des toits *(S. tectorum)*, qui peut vivre encore à 3 400 m d'altitude, a des feuilles à pointe aiguë rougeâtre. La rosette s'allonge en hampe de fleurs rosées, mais produit aussi de nouvelles rosettes axillaires basales, qui fleuriront à leur tour. *S. arachnoideum*, qui vit entre 400 m et 3 000 m d'altitude, est pourvu de poils longs et blancs joignant les feuilles et ressemblant à une fine toile d'araignée. Il est souvent cultivé. Citons parmi les espèces exclusivement montagnardes *S. montanum*, à fleurs roses et à feuilles couvertes de poils glanduleux, et *S. grandiflorum*, aux fleurs jaunes. *S. hirtum* n'a que six pétales et sépales et son périanthe est dressé. On le place maintenant dans le genre *Jovibarba*. C'est une joubarbe montagnarde à fleurs jaunes.

Le genre *Echeveria*, à feuilles souvent en rosette, est un peu comparable aux joubarbes, mais ses fleurs sont pentamères. Les pétales peuvent être soudés inférieurement. Parmi les cent espèces d'Amérique centrale et du Sud, beaucoup sont cultivées, la plus fréquente étant peut-être *E. elegans*, à rosettes glauques et fleurs rouge brique bordées de jaune.

La famille des *Saxifragacées (Saxifragaceae)* est constituée par des herbes ou des arbustes, rarement des arbres, à feuilles simples ou composées, dentées, caduques et le plus souvent sans stipules. Les fleurs, réunies généralement en grappes ou en panicules lâches, ont un calice et une corolle à quatre ou cinq éléments (parfois six à dix); les étamines, libres, sont au nombre de cinq, dix ou plus; il y a de deux à cinq carpelles, parfois plus; l'ovaire pluriovulé est généralement à placentation axile. Les fruits sont des capsules ou plus rarement des baies, des follicules ou des akènes; les graines sont petites, mais riches en albumen. Les Saxifragacées comprennent quatre-vingts genres et mille deux cents espèces; elles sont à peu près cosmopolites, mais habitent plutôt les zones tempérées. Les saxifrages *(Saxifraga)* sont presque toutes vivaces, à souche rameuse, et à feuilles souvent en rosette comme celles des joubarbes. Les feuilles ont fréquemment sur leur bord des stomates aquifères, accompagnés d'une petite accumulation de calcaire. Elles sont simples, mais souvent lobées profondément. Les fleurs sont de couleur variée : blanc, jaune, rose, violet, ou sont bicolores, à ovaire souvent semi-infère, et groupées en cymes ou en panicules. Ces plantes (trois cent cinquante espèces) se rencontrent surtout dans l'hémisphère Nord et les régions arctiques, mais quelques-unes sont andines. *S. caesia* habite les roches calcaires et forme des coussinets adhérant au substratum; *S. paniculata (S. aizoon)* constitue des gazons lâches et ses feuilles basales sont incrustées de calcaire sur leurs dents. Ces plantes sont subalpines et alpines. Plus bas en altitude, surtout dans les forêts de Conifères, on rencontre *S. cuneifolia*, parfois à points rouges sur les pétales blancs. Le désespoir du peintre *(S. umbrosa)* est une plante pyrénéenne souvent cultivée et naturalisée. Elle ressemble beaucoup à *S. cuneifolia*, mais ses pétales sont jaunes à la base et toujours ponctués.

▼ ***Joubarbes :*** **Sempervivum arachnoideum,** ***qui vit sur les rochers entre 400 et 3 000 m d'altitude (à gauche), et*** **Sempervivum tectorum,** ***la joubarbe des toits (au milieu).*** **Saxifraga aizoon,** ***caractéristique des rochers alpins (à droite).***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

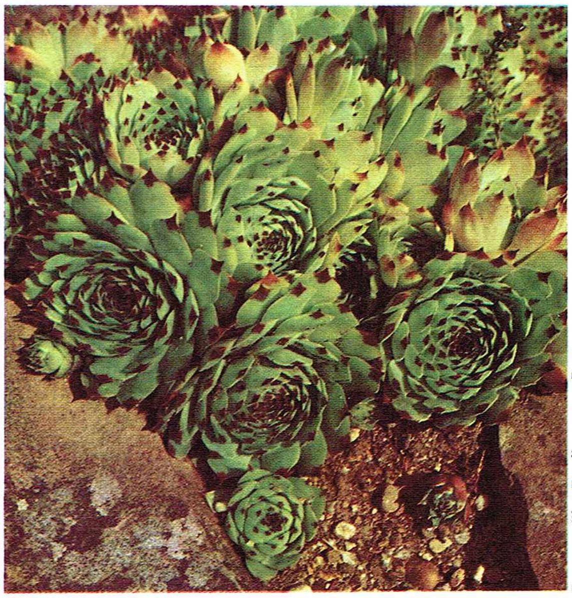

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

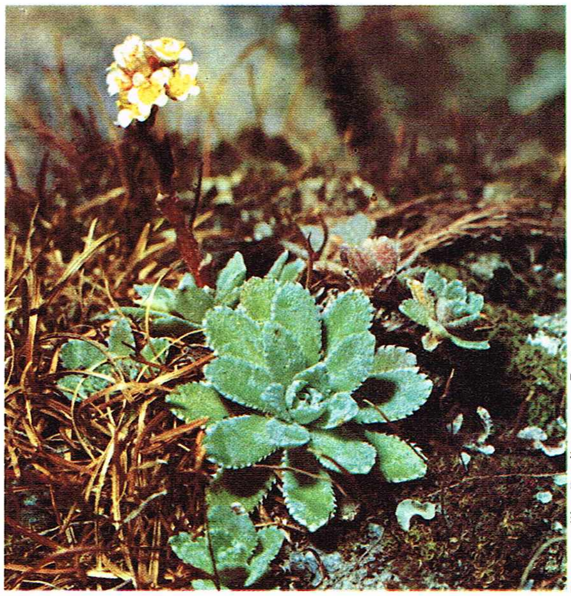

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

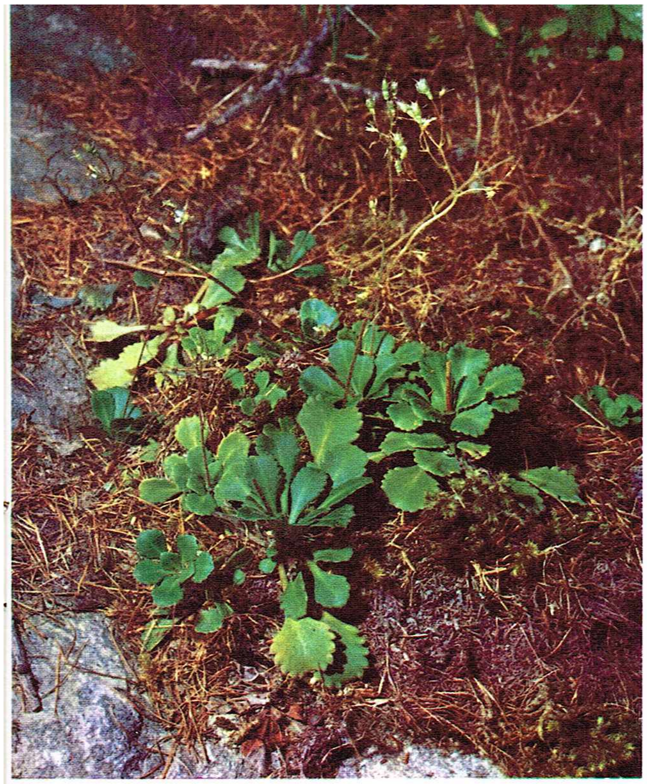

M. et S. Prato

▲ *Deux espèces de saxifrages :* Saxifraga cuneifolia *qui pousse en montagne sous les Conifères (à gauche).* Saxifraga aizoides *qui vit au bord des ruisseaux alpins (à droite).*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ *Détail de* Saxifraga aizoides.

Les rochers siliceux des montagnes d'Europe du Sud sont peuplés par *S. aspera*, *S. exarata*, et, près des ruisseaux, par *S. stellaris*, à sépales étalés puis récurvés, et pétales blancs elliptiques parfois inégaux, marqués de jaune à la base. *S. aizoides* à fleurs jaune-orangé éclôt en automne. *S. oppositifolia*, rampant, à fleurs solitaires violacées terminant les courtes tiges, habite les régions arctiques et les rochers de l'étage alpin des montagnes de l'hémisphère Nord. Parmi les endémiques des Alpes, on citera *S. biflora (S. macropetala)*, qui a de grands pétales blanc sale ou rougeâtres, *S. diapensioides* (dans l'ouest) et *S. florulenta*. Ce dernier a des fleurs de couleur chair en panicule serrée; les feuilles inférieures des rosettes persistent vers le bas de la tige en un cylindre compact et noirâtre. La plante est limitée aux Alpes maritimes siliceuses, en France et en Italie, et semble en voie de raréfaction. De nombreuses saxifrages de montagne sont cultivées dans les jardins de rocaille.

En plaine, on rencontre fréquemment sur les murs et dans les lieux sablonneux *S. tridactylites*, petite plante rougeâtre visqueuse à feuilles trilobées, et dans les prés et les bois *S. granulata*, atteignant 50 cm, à feuilles orbiculaires lobées, longuement pétiolées, qui forme de nombreuses bulbilles à la base de la tige.

On observe, dans les zones marécageuses tempérées et froides d'Asie et d'Europe, *Parnassia palustris*, que l'on place souvent dans une famille des *Parnassiacées*. Cette plante est fréquemment associée dans les montagnes aux *S. paniculata* et *aizoides*. Elle a des feuilles basales longuement pétiolées, à limbe en cœur, et des fleurs solitaires blanches terminant une hampe nue de 10 à 30 cm. Les cinq pétales veinés ont un appendice nectarifère ailé, basal du côté interne. Il y a cinq étamines et un ovaire à quatre carpelles. Il existe plus de cinquante autres espèces de *Parnassia*, surtout en Extrême-Orient.

Certains incluent le genre *Ribes* dans la famille des *Grossulariacées,* d'autres le considèrent comme une sous-famille *(Ribésioïdées)* des Saxifragacées. Les *Ribes*, ou groseilliers, sont des arbustes souvent épineux, à feuilles lobées dentées, à nervures en éventail. Les fleurs ont cinq sépales et autant de pétales et d'étamines et un ovaire bicarpellé, infère, à placentation pariétale. Les fruits sont des baies globuleuses, ombiliquées, et couronnées par le calice persistant. La pollinisation se fait par les Insectes, mais il peut y avoir aussi autofécondation. Il y a cent cinquante espèces de groseilliers, dans l'hémisphère Nord et dans les Andes.

Le groseillier rouge *(R. rubrum)* mesure de 1 m à 1,50 m de hauteur. Ses feuilles, caduques, ont trois ou cinq lobes et des dents aiguës. Ses fleurs sont petites, vert jaunâtre, bordées de pourpre, et forment des grappes pendantes et lâches. Les fruits sont rouges (il en existe une variété à fruits blancs), sphériques et de saveur acide. L'espèce habite les pâturages et les bois frais, de la plaine à l'étage montagnard, dans le nord-ouest de l'Europe. Souvent, on le cultive dans les jardins, dans toutes les régions

▼ *A gauche : fruits de* Ribes rubrum *ou groseillier rouge. A droite : la parnassie des marais* (Parnassia palustris).

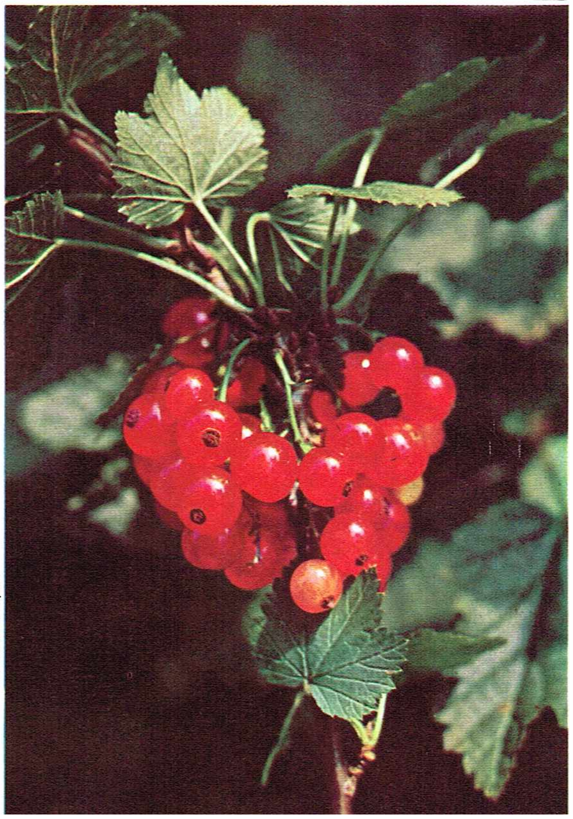

C. Bevilacqua

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

G.P. Mondino

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Forme horticole d'*****Hydrangea macrophylla, *****l'hortensia.***

▶ ***Les seringas* (Philadelphus coronarius) *aux belles fleurs blanches sont souvent cultivés dans les jardins.***

tempérées. Les fruits (groseilles) sont consommés tels quels et servent à faire des gelées. Le cassis *(R. nigrum)* a des feuilles d'odeur aromatique, un peu plus grandes que dans l'espèce précédente, à trois ou cinq lobes, à dents plus fines, glanduleuses en dessous. Il donne des baies globuleuses noires, glanduleuses aussi, les cassis, dont on fait une liqueur et une gelée. Le cassis se rencontre en Europe et dans le nord-est de l'Asie. Le groseillier à maquereau *(R. uva-crispa)* est de même taille, mais très rameux et épineux. Ses feuilles sont plus petites et plus profondément lobées, à lobes dentés. Ses fleurs sont dressées, solitaires ou par deux. Ses fruits sont des baies sphéroïdales, verdâtres, jaunâtres ou rougeâtres, velues puis glabres à maturité, atteignant 12 mm de diamètre et qu'on nomme des maquereaux. On les consomme crus ou on en fait des confitures et des compotes. Toutes les espèces de groseilliers s'hybrident facilement, mais les produits sont souvent stériles. Certains groseilliers sont dioïques.

Les hortensias *(Hydrangea)* sont un genre d'arbustes asiatiques et américains, rustiques, faciles à cultiver. Ils appartiennent à une autre sous-famille, à ovaire infère ou semi-infère. Le premier à avoir été introduit, dès 1736, est *H. arborescens*, originaire de Chine, du Japon et d'Amérique boréale, à fleurs blanches. On a ensuite importé de Chine, en 1786, l'hortensia des fleuristes *(H. macrophylla)*, arbrisseau à fleurs blanches ou roses qui deviennent bleutées particulièrement quand on introduit des fragments d'ardoise dans le sol. Ses feuilles sont simples, pétiolées, dentées ou rarement lobées. Ses fleurs forment des corymbes et des grappes : les extérieures, stériles, ont quatre pétales et autant de sépales très hypertrophiés et pétaloïdes, qui sont la partie la plus visible de l'inflorescence. Dans la plante sauvage, les fleurs centrales sont petites, fertiles, à huit étamines. Mais elles sont stériles et à calice pétaloïde dans les formes horticoles.

Le genre *Philadelphus*, qui appartient à la même sous-famille, est surtout répandu en Extrême-Orient et en Amérique centrale et du Nord, mais il atteint le Caucase et le centre de l'Europe (Italie, Autriche, Roumanie). La seule espèce européenne est le seringa *(P. coronarius)*, à feuilles opposées, ovales, acuminées, dentées, légèrement pubescentes en dessous. Ses fleurs blanches en grappes ont vingt-cinq étamines environ par multiplication secondaire et forment des fruits capsulaires. On le cultive très souvent.

Les *Deutzia* sont voisins. Ces arbustes vivent dans l'est de l'Asie et au Mexique. Ils ont été importés à partir de 1830. Leurs fleurs sont blanches ou roses, souvent doubles. Ils sont faciles à cultiver et très répandus. *D. scabra*, à feuilles opposées rugueuses, est peut-être le plus commun. *D. gracilis* est aussi utilisé et il existe divers hybrides.

La famille des *Pittosporacées (Pittosporaceae)* réunit neuf genres et deux cent quarante espèces de plantes arbustives, parfois arborescentes, représentées dans les zones à climat chaud d'Australie, où se trouvent tous les genres (sauf trois, d'Afrique, de Madagascar, d'Asie et d'Océanie, avec deux espèces européennes). Leurs feuilles sont simples, coriaces et sans stipules. Leurs fleurs, hermaphrodites en général, sont solitaires ou en inflorescences et possèdent cinq sépales, un nombre égal de pétales et d'étamines, un ovaire supère généralement bicarpellé et à placentation pariétale. Les fruits sont le plus souvent des baies ou des capsules, avec de nombreuses graines, qui produisent une résine dans le genre *Pittosporum*, à aire très vaste, recouvrant celle de la famille. Plusieurs représentants de ce grand genre (deux cents espèces) ornementent les jardins des régions méditerranéennes, par suite de la beauté de leur feuillage et de leurs fleurs pourpres, blanches, jaunes ou verdâtres. La première espèce à être introduite, *P. coriaceum*, a été importée de Madère en 1783 ; d'autres, surtout en provenance d'Australie, furent introduites ensuite, comme *P. tobira* (1804), désormais le plus cultivé. Il est rustique en région méditerranéenne.

La famille des *Bruniacées (Bruniaceae)* groupe des arbustes généralement éricoïdes (ressemblant aux bruyères), mais se rapprochant des Saxifragacées. Ce sont soixante-quinze espèces endémiques de la province du Cap. On cultive parfois dans les serres les genres *Brunia, Berzelia* et l'unique espèce du genre *Audouinia (A. capitata)*. Les fleurs sont petites, parfois en inflorescences denses entourées de bractées, comme un capitule de Composée.

Les *Podostémonacées (Podostemonaceae)* constitueraient, selon certains auteurs, l'unique famille de l'ordre des Podostémonales. Il s'agit de deux cents espèces de plantes étranges, qui peuvent vivre sur les rochers des cascades et des rapides des grands fleuves tropicaux. Leur morphologie est très modifiée : elles forment une sorte de thalle appliqué au support et qui semble correspondre à leurs racines. Des inflorescences dressées partent

▲ **Spiraea cantoniensis,** ***utilisé très souvent pour faire des haies.***

◀ **Aruncus silvester,** ***qui habite les forêts fraîches de montagne (en haut).*** **Spiraea ulmaria,** ***la reine des prés (en bas).***

de ce pseudo-thalle et portent des feuilles réduites. Il peut y avoir une seule étamine.

La famille des *Hydrostachyacées (Hydrostachyaceae)* est constituée par des plantes dioïques ou parfois monoïques, à pétioles recouverts de formations écailleuses. Elles vivent immergées dans l'eau. La famille ne compte que le genre *Hydrostachys*, d'Afrique du Sud et de Madagascar, qui possède dix-huit espèces endémiques. Les petites fleurs sont en épis denses, les mâles réduites à une seule étamine, les femelles à un ovaire bicarpellé pluriovulé. Les bractées sont écailleuses sur le dos.

Nous en venons maintenant à la très importante famille des *Rosacées (Rosaceae)*, qui existe peut-être depuis le Crétacé et groupe actuellement trois mille espèces en une centaine de genres. Ce sont des herbes annuelles ou vivaces, des arbustes ou des arbres. Leurs rameaux peuvent se transformer en épines au sommet. Les feuilles sont généralement alternes, simples ou composées, le plus souvent dentées, et dotées dans la majorité des cas de deux stipules persistantes. Les fleurs sont cycliques, actinomorphes, hermaphrodites et réunies en inflorescences. Elles ont un réceptacle très polymorphe et présentent parfois sous le calice un calicule qui est formé des stipules des sépales unies deux à deux. Le calice a le plus souvent cinq sépales, parfois quatre. Pétales et étamines peuvent sembler insérés sur lui, mais le tube floral ou « calicinal » est sans doute plutôt axial. La corolle est généralement formée par cinq (rarement quatre) pétales, libres, entiers, qui manquent rarement. Les étamines sont en nombre égal ou double de celui des pétales, ou nombreuses par multiplication secondaire. Parfois il n'y en a qu'une seule. L'ovaire, supère ou infère, est formé par un, deux, cinq carpelles ou plus, distincts ou unis, renfermant chacun un nombre variable d'ovules. Les fruits sont de type varié, parfois très spécial (cynorrhodons des rosiers). Quand les carpelles sont libres, ils forment autant de fruits partiels, et le réceptacle peut alors être accrescent. Les graines sont petites et pauvres en albumen. La pollinisation se fait par les Insectes, qui sont attirés par les nectaires présents à la surface interne du tube floral ou disposés autour du réceptacle, au-dessus des étamines.

Divers genres ont un mode de reproduction asexué (*Rubus, Rosa, Alchemilla, Sorbus, Crataegus*, etc.) ; de ce fait, les génotypes se conservent intacts dans la descendance des mutants et il en résulte un polymorphisme considérable.

Les Rosacées sont principalement des plantes des zones à climat tempéré, surtout dans l'hémisphère Nord, mais elles sont presque cosmopolites et ont une grande importance économique. Nous étudierons successivement les sous-familles des Spiréoïdées, Rosoïdées, Pomoïdées et Prunoïdées.

La sous-famille des *Spiréoïdées* présente des carpelles supères libres ou unis à la base et des fruits folliculaires ou capsulaires. Les feuilles sont assez souvent sans

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ *Le rosier de chien ou églantier* **(Rosa canina)** *est très commun dans les buissons.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ *Rameau de* **Rosa omeiensis;** *chez cette variété* **(pteracantha),** *les épines sont très développées.*

stipules. Ce sont généralement des espèces ligneuses, parfois des herbes vivaces.

Le genre *Aruncus*, qui compte trois espèces, est représenté en France par la barbe de bouc *(A. dioicus = A. silvester)*, plante eurasiatique suffrutescente, haute d'environ 1 m, qui habite les forêts humides des hautes montagnes. Ses fleurs blanc jaunâtre sont très petites et groupées en épis paniculés; elles sont polygames ou plus souvent dioïques. Les étamines dépassent les pétales. La floraison a lieu de juin à août. Les feuilles peuvent atteindre 30 cm de long et sont constituées par cinq à sept segments dentés, les inférieurs étant eux-mêmes divisés en folioles. Cette espèce est souvent cultivée dans les jardins, de même que *Sorbaria sorbifolia*, lui ressemblant un peu, mais à feuilles une seule fois divisées, et *Physocarpus opulifulius*, dont les petites feuilles ressemblent à celles de l'obier et dont les « follicules », s'ouvrant ventralement et dorsalement, sont en fait des gousses. Le premier provient du nord de l'Asie et le second d'Amérique du Nord.

Les *Spiraea*, qui comprennent une centaine d'espèces, sont des arbustes dont les fruits sont folliculaires. Un seul *(S. hypericifolia)* est indigène en France, mais beaucoup sont cultivés *(S. × billiardii, S. × vanhouttei, S. bumalda)*.

A la sous-famille des *Rosoïdées* appartiennent les filipendules. La reine des prés *(Filipendula ulmaria = Spiraea ulmaria)* est une herbe vivace à feuilles composées-imparipennées, avec de petites folioles alternant avec des grandes, dentées irrégulièrement, vertes sur le dessus et blanchâtres en dessous. Les fleurs sont blanches, à pétales rouges en dessous, et forment des grappes terminales d'épis assez serrés et inégaux. Il y a de cinq à neuf carpelles et les fruits sont des akènes tordus. L'espèce habite l'Eurasie et est naturalisée en Amérique du Nord. Les fleurs contiennent un hétéroside (monotropitoside) dont l'aglycone est le salicylate de méthyle, ce qui les rend antirhumatismales; elles sont aussi diurétiques à cause des dérivés flavoniques qu'elles contiennent. La reine des prés fleurit de juin à août.

La filipendule *(F. vulgaris)* est commune en Eurasie et en Afrique du Nord, dans les lieux humides. Elle est aussi naturalisée en Amérique. Elle possède de nombreux tubercules à l'extrémité des racines. C'est une herbe vivace et qui peut atteindre 60 cm. Ses feuilles sont imparipennées, avec de quinze à vingt-cinq paires de folioles, une paire de grandes folioles alternant avec une paire de petites. Les inflorescences sont plus lâches et les akènes ne sont pas tordus. Les tubercules radicaux, à saveur agréable et riches en amidon, ont été utilisés pour leurs propriétés astringentes et sont comestibles.

Les autres plantes de la sous-famille des Rosoïdées sont des arbustes ou des arbrisseaux à feuilles composées. Elles possèdent plusieurs carpelles libres insérés sur un réceptacle bombé ou au contraire creusé en coupe et uniovulés le plus souvent.

Les Rosées ne comprennent que le genre *Rosa*, avec cent à deux cents « bonnes » espèces. Les rosiers sont des arbustes buissonnants, dressés, rampants ou grimpants, pourvus d'aiguillons (épines) formés par l'écorce. Au niveau des rameaux, l'épiderme peut être glabre ou couvert de poils glanduleux, à essence. Les dents des feuilles peuvent être également glanduleuses. Ces feuilles, imparipennées, ont des folioles dentées et deux stipules membraneuses insérées en haut d'une base foliaire (gaine). Le calice est constitué par cinq sépales et la corolle par cinq pétales pourvus d'un court onglet, mais ces derniers sont souvent nombreux : les roses « doublent » facilement, et cette propriété a été exploitée en horticulture. Les étamines sont en nombre indéfini par multiplication secondaire. Le pédoncule floral se dilate supérieurement en bouteille et forme un réceptacle cratériforme étranglé à l'ouverture, extérieurement glabre, velu ou couvert de piquants et renfermant les nombreux carpelles uniovulés qui possèdent des styles libres ou soudés les uns aux autres. Les infrutescences sont appelées des cynorrhodons; les carpelles donnent des akènes et le réceptacle devient accrescent. Dans les formes cultivées, les couleurs des pétales sont extrêmement variées. Il existe aujourd'hui des milliers de cultivars de roses, nés en grande partie par hybridations, et qui sont l'objet d'un important commerce de fleurs coupées. Les feuilles de rosiers sont astringentes, car elles renferment du tanin. On extrait des pétales de *R. centifolia, R. × bifera (R. damascena)*, *R. × alba* et *R. moschata* de l'eau de rose et de l'essence de rose, utilisées en parfumerie. Le produit de la première « distillation » (entraînement par la vapeur d'eau) est l'eau de rose, et sur celui de la seconde distillation, qu'on laisse reposer, surnage l'essence. Cent mille roses donnent 10 g d'essence. On peut aussi utiliser des solvants organiques pour extraire celle-ci. La Bulgarie en est le plus important producteur. La France en produit aussi de grandes quantités dans la région de Grasse. On utilise les roses en confiserie, notamment en Orient pour préparer une confiture. Les fruits peuvent servir à faire une gelée astringente (confiture de Kina).

Le rosier de chien ou églantier *(R. canina)* est commun dans les haies et les buissons d'Eurasie, jusqu'à l'étage montagnard. C'est sur lui qu'on greffe souvent d'autres espèces. C'est un arbrisseau épineux atteignant 3 m, avec des fleurs régulières, roses ou blanches, comptant seulement cinq pétales. Les styles sont libres et les sépales réfléchis et caducs après la floraison, qui a lieu de mai à juillet. *R. rubiginosa* est répandu dans presque toute l'Europe, ses styles sont libres, ses sépales sont redressés et persistants. *R. villosa*, à feuilles soyeuses sur les deux faces et à fleurs rose vif, est montagnard. Le rosier des Alpes *(R. pendulina = R. alpina)*, à peu près dépourvu d'épines et à fleurs rouges, se rencontre dans les montagnes d'Europe centro-méridionale. *R. majalis (R. cinnamomea)*, également montagnard, est plus répandu mais

▶ *Page ci-contre : dans la famille des Rosacées, le genre* **Rosa**, *représenté ici par la rose « Super Star », constitue à lui seul le groupe des Rosées.*

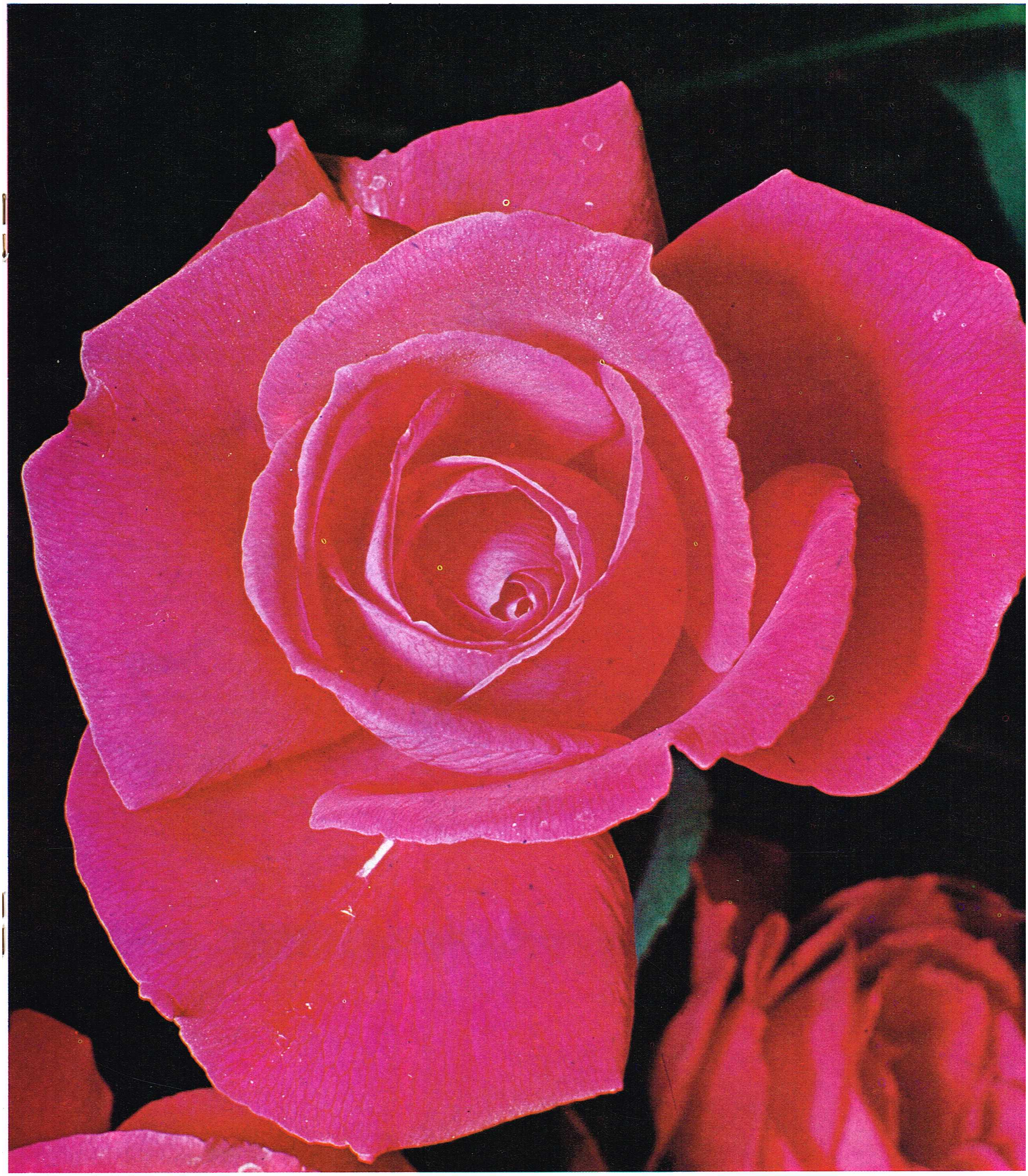

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

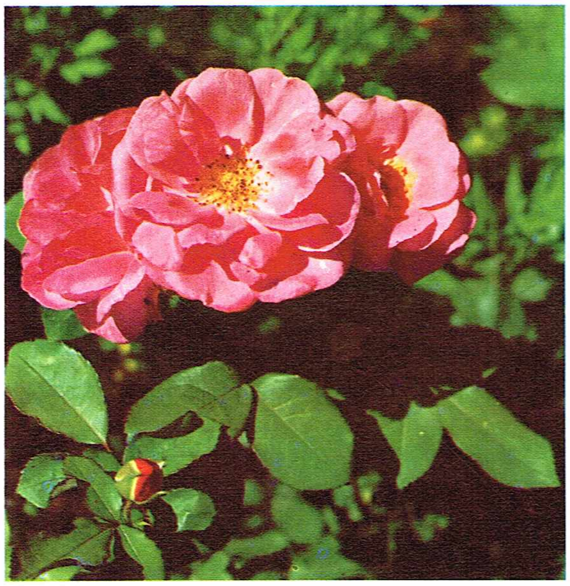

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

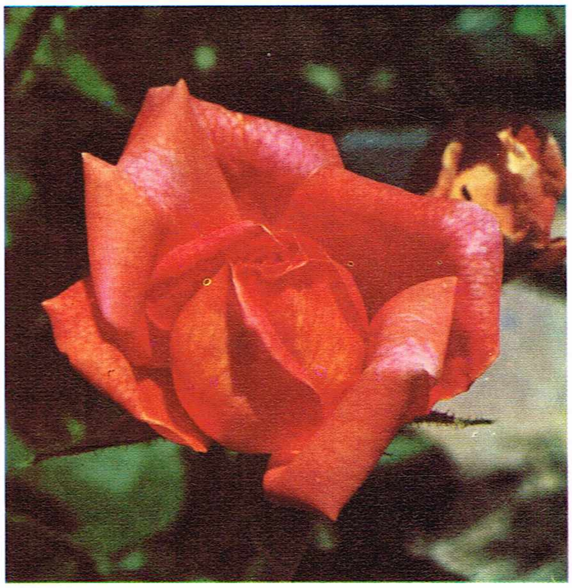

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Cynorrhodons de* **Rosa acicularis** *var.* **nipponiensis** *(à gauche). Deux exemples de roses cultivées : au milieu, la rose « Caprice »; à droite, un hybride de la rose thé* **(Rosa indica).**

ne va pas au-delà de la Savoie et du Jura à l'ouest. Ses épines sont inégales et ses pédoncules floraux très courts ne dépassent pas les stipules de la feuille axillante.

On a importé d'Extrême-Orient, en 1768 et 1810, *R. chinensis* (rose Bengale) et *R. odorata* (rose thé), qui sont à l'origine des « hybrides de thé » et des rosiers remontants. *R.* × *bifera* a servi à obtenir les roses « Polyantha », dont certaines sont des hybrides mettant en cause sept espèces. *R. foetida,* de Perse, croisé avec des hybrides de thé, a donné des roses « Lutea ». *R. multiflora* et *R. wichuriana*, d'Extrême-Orient, ont fourni des rosiers grimpants. Deux rosiers indigènes, *R. moschata*, à styles soudés et sépales réfléchis après la floraison, et *R. gallica*, à styles libres, aiguillons caducs sur les tiges de un an et feuilles vert clair, épaisses, gaufrées, pubescentes et glanduleuses, ont été très utilisés pour l'obtention des hybrides cultivés, de même que *R. chinensis*, qui n'est pas connu à l'état sauvage, et *R. foetida*, du sud-ouest de l'Asie. Ces espèces ont été croisées avec celles que l'on a indiquées ci-dessus.

La tribu des Dryadées comprend des plantes herbacées ou arbustives, avec des fleurs à réceptacle fortement conique qui devient sec à la maturité. Il y a le plus souvent un calicule. Les carpelles sont supères. On compte en général un seul ovule par carpelle et le style est terminal. Par exception, il n'y a pas de calicule dans le genre *Dryas*.

Le chenette *(Dryas octopetala)* est une herbe vivace de 5 à 15 cm, à feuilles simples profondément crénelées. Les fleurs, blanches, sont solitaires et ont de sept à neuf sépales et pétales. Les akènes ont un long style persistant plumeux. La plante vit dans les régions arctiques et dans les montagnes d'Europe, d'Asie Mineure et d'Amérique du Nord, qu'elle a pu atteindre à la faveur de l'extension des glaciers quaternaires. Dans nos régions, elle habite les étages subalpin et alpin.

Le genre *Geum* est surtout répandu dans toutes les régions à climat tempéré de l'hémisphère boréal, mais existe aussi dans l'hémisphère Sud. On trouve fréquemment la benoîte *(G. urbanum)* dans les bois et les haies. C'est une herbe vivace, ramifiée, à feuilles munies de cinq à sept folioles dentées à grandes stipules foliacées; elle fleurit de mai à septembre et ses fleurs jaunes ressemblent à celles du fraisier. Ses akènes ont des styles persistants et leur ensemble forme une tête hérissée. Son rhizome et ses racines sont astringents et aromatiques (odeur de girofle).

L'espèce *G. montanum* habite les sols acides de l'étage subalpin et alpin, dans les montagnes d'Europe centro-méridionale. Ses feuilles à nombreuses folioles ont un grand lobe terminal arrondi et ses akènes ont un long style plumeux rougeâtre. Il ne dépasse pas 25 cm et ses tiges n'ont qu'une seule fleur. *G. rivale*, d'Eurasie et d'Amérique du Nord, ressemble à la benoîte, mais a des fleurs rougeâtres et penchées. Il est surtout montagnard. *G. pyrenaicum* est endémique des Pyrénées. Il a de grandes fleurs jaunes inclinées, et seules les feuilles

▼ *A gauche : infrutescence de* **Duchesnea indica** *(non comestible). Au milieu et à droite : fleurs et fruits de fraisier des bois* **(Fragaria vesca).**

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

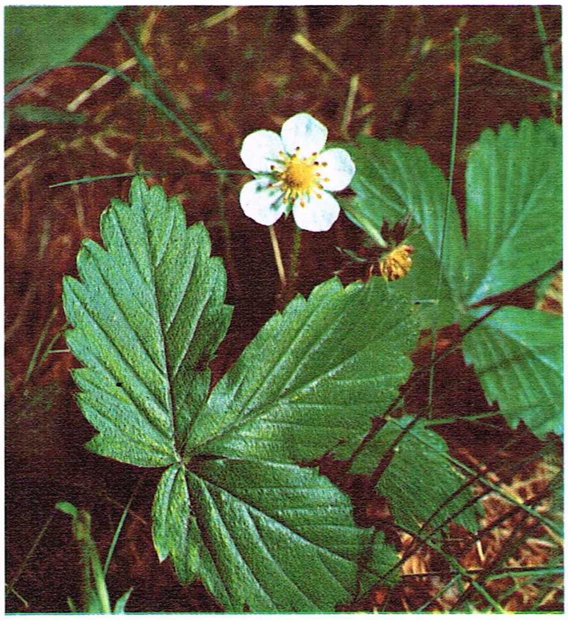

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

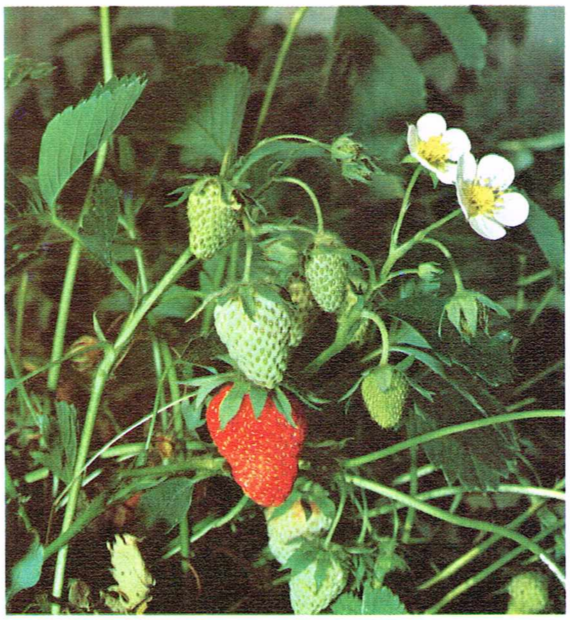

I.G.D.A. - Archives P2

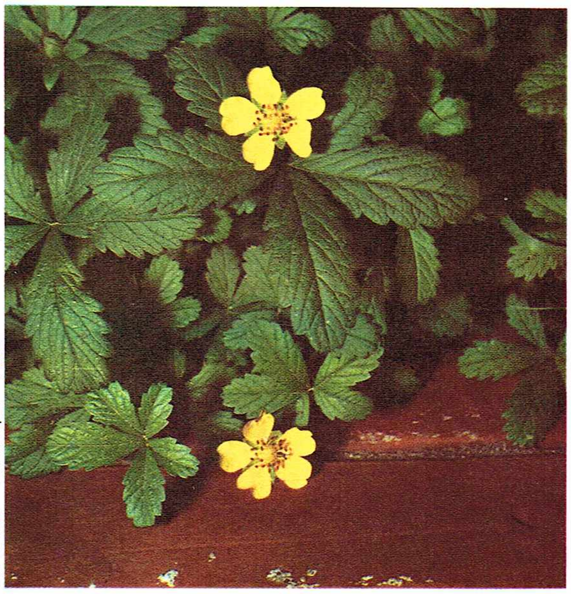

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

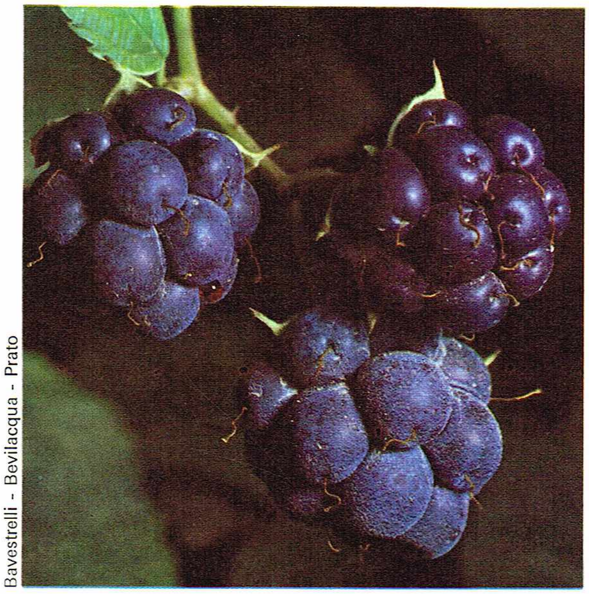

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***La quintefeuille* (Potentilla reptans) *est commune le long des rives humides (à gauche). Respectivement au milieu et à droite : infrutescence de ronce bleuâtre* (Rubus caesius) *et de framboisier.***

basales sont bien développées. On cultive aussi quelques benoîtes dans les jardins, en particulier *G. coccineum*, de la péninsule balkanique, à fleurs rouge carmin.

Chez les fraisiers *(Fragaria)*, le réceptacle accrescent forme un pseudo-fruit caractéristique. Ce sont des plantes herbacées vivaces des climats tempérés de l'hémisphère Nord et des Andes. Elles sont souvent pourvues, à l'aisselle des feuilles radicales, de stolons qui, en s'enracinant, donnent de nouvelles plantes, d'abord reliées à la plante mère, puis libres. Les feuilles ont trois folioles velues dentées; les fleurs sont blanches ou rosées, en inflorescences cymeuses peu fournies, et les fruits sont pendants à maturité.

Il y a environ vingt-cinq espèces de fraisiers. Le fraisier des bois *(F. vesca)*, à fleurs blanches et à petits fruits comestibles non rétrécis à la base, est bien connu. A part *F. vesca*, on a utilisé *F. moschata* et *F. elatior*, indigènes en France, pour l'obtention de fraises de consommation, mais les fraises cultivées actuellement sont surtout celles de *F. × ananassa*, qui est un hybride entre *F. virginiana*, de l'est de l'Amérique du Nord, et *F. chiloensis*, de la côte Pacifique de l'Amérique du Nord et du Sud (de l'Alaska à la Californie et du Pérou à la Patagonie). Des hybridations de retour ont sans doute eu lieu avec les parents. *F. vesca* a donné une variété très fructifère, la « fraise des quatre saisons ». Les racines des fraisiers sont astringentes : elles sont riches en tanin, et contiennent un hétéroside à eugénol, comme celles de la benoîte.

Duchesnea indica, à fleurs jaunes, à lobes du calicule tridentés au sommet et à fruits ressemblant un peu à des fraises mais non comestibles, est originaire d'Asie méridionale et orientale. Il est cultivé pour l'ornement et s'est naturalisé en Europe méridionale.

Les potentilles *(Potentilla)*, dont le réceptacle ne devient pas accrescent, comptent trois cents espèces habitant surtout les régions tempérées et froides de l'hémisphère Nord, accessoirement les montagnes des zones intertropicales. Elles sont le plus souvent herbacées. Elles ont des feuilles composées de folioles digitées ou pennées. Chez beaucoup, il y a création d'hybrides interspécifiques qui peuvent ensuite être fertiles, car la formation de graines se fait souvent sans fécondation. Dans une même espèce, on peut avoir des formes diploïdes où la reproduction est asexuée et des formes polyploïdes où il y a fécondation. Si le sujet est d'origine hybride, c'est par doublement du nombre de chromosomes qu'il devient fertile dans le second cas. La tormentille *(P. erecta = P. tormentilla)* habite surtout les sols siliceux jusqu'à l'étage subalpin en Europe et en Asie occidentale. Elle est dressée, à feuilles trifoliolées, subsessiles, à grandes stipules, et possède des fleurs jaunes. Sa souche est astringente. *Potentilla grandiflora* croît sur les pâturages et les éboulis, dans les Alpes et la moitié est des Pyrénées, à l'étage alpin et subalpin. Il a des feuilles à trois folioles et de grandes fleurs jaunes. *P. nitida* est cespiteux, soyeux, à tiges ne dépassant pas 5 cm de haut, et à fleurs roses ou blanches. Il habite le sud des Alpes et le nord des Apennins. *P. alba* possède des fleurs blanches; il est plus grand et répandu dans l'est de la France et l'Europe centrale. Les fleurs de la quintefeuille *(P. reptans)* sont de couleur jaune, et ses tiges rampantes atteignent 1 m de long; son calicule a des lobes deux fois plus longs que les sépales. Cette espèce est présente dans toute l'Europe et dans l'ouest de l'Asie, mais ne gagne guère l'étage alpin. *P. recta*, répandu en Europe centro-méridionale, est dressé, atteint 60 cm de haut et a des fleurs jaune citron. Tandis que les espèces citées jusqu'à maintenant ont des feuilles digitées, le pied-de-coq *(P. anserina)* a des feuilles pennées comportant de quinze à vingt-cinq folioles soyeuses en dessous. Ses fleurs jaunes sont solitaires et portées par des pédoncules insérés sur les tiges rampantes. Il est répandu en Europe, sauf au sud, en Asie septentrionale et dans le nord de l'Amérique du Nord. *P. rupestris*, également à feuilles pennées, mais dressé et à corymbes lâches de fleurs blanches même à l'état sec, se rencontre dans les montagnes de l'est de la France et en Europe centrale. *P. fruticosa*, arbuste à fleurs jaunes et à feuilles à cinq folioles pubescentes, originaire de l'Europe du Nord, est très souvent cultivé dans les jardins.

Le genre *Rubus* est connu depuis l'Antiquité pour ses fruits. Il comprend des plantes le plus souvent ligneuses, prostrées ou buissonnantes, à feuilles composées, pennées ou digitées, à fleurs pentamères, à étamines et carpelles nombreux, et à infrutescences constituées par de nombreuses petites drupes groupées en tête.

Le framboisier *(R. idaeus)* habite à l'état sauvage les bois de montagne en Europe, en Sibérie et dans le nord de l'Amérique du Nord. Ses tiges aériennes (turions) sont bisannuelles. Ses fruits (framboises) sont rouges, tandis que les autres *Rubus* indigènes ont des fruits noirs, sauf *R. saxatilis*, qui les a rougeâtres. Ils sont formés de drupes qui se détachent facilement du réceptacle. De nombreuses variétés cultivées ont été sélectionnées.

La ronce commune *(R. fruticosus)* est un buisson vivace épineux, à turions également bisannuels, à fleurs roses ou blanches; cette plante a des fruits noirâtres que l'on appelle improprement mûres, et dont les akènes adhèrent au réceptacle. La possibilité de reproduction asexuée permet à de très nombreuses formes de ronces communes de se conserver intactes, qu'elles soient issues de mutations ou d'hybridations. C'est ainsi qu'on a pu diviser l'espèce linnéenne *R. fruticosus* en plus de deux cents « espèces », et il s'en forme probablement encore à l'heure actuelle. Le framboisier n'est pas sujet à ce phénomène.

Les alchémilles *(Alchemilla)* vivent dans l'hémisphère Nord, les montagnes de l'est de l'Afrique, Madagascar, l'Inde et Java. Elles comptent environ deux cents espèces. Elles ont perdu leurs pétales et n'ont souvent plus qu'un seul carpelle. Leur réceptacle floral est creusé en coupe. L'alchémille des Alpes *(A. alpina)* habite les pâturages

▶ ***Cultivar de* Rubus fruticosus. *Les fleurs, les fruits immatures et les fruits mûrs cohabitent sur le même pied.***

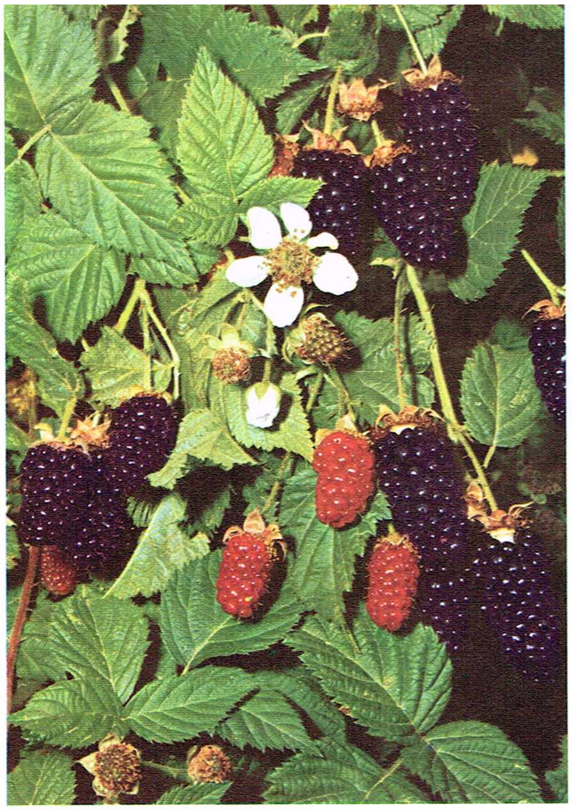

R. Paglietta

▼ ***L'alchémille vulgaire, ou pied de lion* (Alchemilla vulgaris), *est endémique à l'ouest et au centre de l'Europe (en haut). Certaines aubépines* (Crataegus) *sont très décoratives grâce à leurs baies de couleur vive (en bas).***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

alpins. Elle ne dépasse pas 20 cm de hauteur et a des feuilles digitées, laineuses en dessous. Ses fleurs relativement grandes sont disposées en glomérules superposés. Le pied de lion *(A. xanthochlora = A. vulgaris)* habite l'ouest et le centre de l'Europe, dont il est endémique. Ses feuilles sont orbiculaires et simplement lobées. En Amérique, du Chili à la Californie, on trouve le genre très voisin *Lachemilla* dont les feuilles ont parfois une morphologie très spéciale. Le genre *Aphanes* est cosmopolite. Il n'a plus qu'une seule étamine. *A. arvensis (Alchemilla arv.)* est répandu en Europe occidentale et en Afrique du Nord, dans les lieux sablonneux. Il ne dépasse pas 20 cm et ses feuilles orbiculaires sont profondément lobées.

La tribu des Sanguisorbées est constituée de plantes dont le réceptacle floral est plus ou moins concave et rétréci au sommet, dont les fleurs manquent souvent de pétales et dont les étamines sont en nombre réduit (parfois il n'y en a qu'une seule). L'ovaire est à un ou deux carpelles à style terminal. Le réceptacle entoure les akènes et développe des appendices aidant à la dissémination de l'ensemble. Les fleurs sont souvent unisexuées et certaines espèces sont anémogames.

Les pimprenelles *(Sanguisorba)*, qui sont une trentaine dans les régions tempérées de l'hémisphère Nord, sont apétales, mais ont de nombreuses étamines et deux carpelles. Leurs feuilles sont glabres (dans les espèces françaises), pennées, à nombreuses folioles dentées. Leurs fleurs sont réunies en glomérules denses terminant des pédoncules. *S. minor (S. dictyocarpa)* et *S. muricata* sont communs en Europe, surtout le premier. *S. officinalis*, qui est très répandu en Europe, en Asie du Nord et en Chine, n'a généralement que quatre étamines et un seul carpelle. Il ressemble aux précédents, mais atteint 1 m de haut et ses fleurs sont pourpres. *Poterium spinosum*, seule espèce du genre, est un arbuste épineux de la région méditerranéenne. Ses feuilles ressemblent à celles des pimprenelles, mais sont velues. Les fleurs ont de nombreuses étamines, deux carpelles, et leur réceptacle devient charnu à maturité.

Les aigremoines *(Agrimonia)* ont aussi deux carpelles, mais possèdent des pétales. Ce sont des herbes vivaces répandues surtout dans la zone tempérée de l'hémisphère Nord. *A. eupatoria* possède des feuilles imparipennées, avec alternance de grandes et petites folioles dentées, velues-hérissées. Ses fleurs jaunes sont groupées en épi. A la maturité, le réceptacle forme une couronne terminale d'épines. Par le tanin qu'elle contient, l'aigremoine est astringente.

La sous-famille des *Pomoïdées* est formée d'arbres ou d'arbustes à feuilles stipulées. L'ovaire de ces Végétaux possède de deux à cinq carpelles souvent libres au centre, et est infère ou semi-infère. Les fruits (poires, pommes) sont, comme toujours lorsque l'ovaire est infère, formés en partie par le réceptacle qui entoure des carpelles. Il n'y a en général que deux ovules par carpelle, qui donnent deux graines, mais il peut y en avoir plus.

Dans une première tribu (Cratégées), on trouve des endocarpes ligneux, sortes de noyaux, entourant chaque carpelle au sein de la « pomme ».

Le genre *Cotoneaster* a reçu son nom à cause de l'aspect cotonneux présenté souvent par le dessous des feuilles. Il compte quatre-vingt-quinze arbustes essentiellement d'Asie tempérée, mais aussi d'Europe et d'Afrique du Nord. On trouve notamment dans nos montagnes *C. tomentosa*, qui croît sur les rochers, dans les zones calcaires. Il est tortueux, haut de 1 m environ et a de petites feuilles ovales, entières, cotonneuses en dessous ; ses fleurs sont blanches ou roses, et ses fruits, gros comme des pois, sont dressés, rouges, à deux ou trois noyaux. Bien d'autres espèces asiatiques, surtout himalayennes, sont très cultivées dans les jardins, notamment *C. horizontalis*, à feuilles très petites et à ramules distiques, qui s'étale sur le sol, *C. franchetii*, à feuilles ovales, vert clair, tomenteuses en dessous, *C. salicifolia*, à feuilles allongées, aiguës, vert foncé, luisantes au-dessus et à nervures marquées, et *C. henryana*, qui ressemble au précédent, mais dont les feuilles ne sont pas luisantes.

Les *Pyracantha* sont voisins, mais épineux. Leur fruit contient cinq noyaux. *P. coccinea*, du sud de l'Europe et d'Asie Mineure, est souvent cultivé. *P. crenato-serrata* et *P. atalantoides*, de Chine, sont aussi très utilisés pour l'ornement. Quoique les fruits de ces espèces soient géné-

ralement rouges à l'état sauvage, on utilise plutôt des cultivars à fruits jaunes ou orangés.

Le néflier *(Mespilus germanica)* est un arbuste ou un petit arbre tortueux et à branches épineuses, sauf dans certaines formes cultivées. Il possède des feuilles entières à court pétiole, vert foncé sur le dessus, velues et blanchâtres en dessous. Les fleurs, solitaires, grandes et blanches, apparaissent en mai. Les fruits (nèfles), velus et bruns, sont de la taille d'une grosse noix et sont couronnés en haut par les grands sépales persistants; ils contiennent cinq noyaux plats; on peut les consommer après une période de fermentation ou quand ils ont subi les premières gelées. Le néflier est la seule espèce du genre. Indigène dans le sud-est de l'Europe et l'Asie Mineure ainsi qu'en Sicile et en Sardaigne, il est cultivé et naturalisé dans le monde entier.

Les aubépines *(Crataegus)* comportent environ deux cents espèces des régions tempérées de l'hémisphère Nord. Elles sont polymorphes, et, si l'on conçoit l'espèce plus étroitement, on peut en trouver au moins mille. Ce sont des arbustes ou de petits arbres épineux à feuilles simples, dentées et le plus souvent lobées, munies de grandes stipules persistantes. Les fleurs, disposées en corymbes, sont blanches, mais souvent roses dans les formes cultivées. Il y a de un à cinq carpelles et de un à cinq noyaux. Les fruits sont rouges, jaunes ou noirs.

Crataegus monogyna a des feuilles de trois à sept lobes profondément marqués et dentés seulement au sommet. Les stipules sont entières. Les fleurs, nectarifères, ont un parfum d'amande. Il y a un seul carpelle, et un noyau dans le fruit noir ou rouge. C'est une plante d'Europe et d'Asie occidentale. *C. laevigata (C. oxyacantha)* a des feuilles assez coriaces à lobes peu marqués, larges et obtus, dentés tout autour. Les stipules sont également dentées. Il y a deux ou trois carpelles et deux ou trois noyaux dans le fruit qui est rouge intense. La plante est limitée à l'Europe. *C. calycina*, à fruit pourvu d'un seul noyau, est intermédiaire entre les deux précédents en ce qui concerne les feuilles. La teinture de fleurs d'aubépine et l'extrait sont des tonicardiaques d'entretien, moins actifs que la digitaline, mais non toxiques. Ce sont aussi des sédatifs et des antispasmodiques. *C. azarolus*, de Crète, d'Asie Mineure et d'Iran, est cultivé dans les régions méditerranéennes. Ses feuilles sont profondément lobées et pubescentes au-dessous. Ses fleurs sont en corymbes denses et tomenteux; elles ont des pétales blancs ou rosés et donnent des fruits de 12 mm de diamètre environ, renfermant un ou deux noyaux. Ceux-ci, à saveur de pomme, sont comestibles et on en fait des confitures. De nombreux *Crataegus* sont cultivés pour l'ornement.

Dans la tribu des Malées, l'endocarpe est corné ou parcheminé. Les fruits à pépins se placent ici. Les pommiers *(Malus)* ont des styles soudés à la base et la chair de leur fruit est dépourvue de cellules scléreuses. Le pommier commun *(M. sylvestris)* a une grande importance économique. On en connaît deux sous-espèces, l'une, le pommier sauvage, ou *subsp. sylvestris (= M. acerba)*, d'Europe et d'Asie Mineure, épineux et à feuilles glabres, a donné naissance à certaines variétés comme le pommier à cidre. L'autre *(subsp. mitis)*, peu épineuse et à feuilles pubescentes, est spontanée dans les Balkans et l'Asie occidentale et a donné la variété *domestica*, d'où dérivent nos formes cultivées. Certains pensent qu'une hybridation avec d'autres espèces à feuilles pubescentes est en fait intervenue dans la formation de cette sous-espèce, qu'on peut considérer comme une espèce. Le pommier est cultivé depuis l'Antiquité la plus reculée. C'est aujourd'hui l'arbre fruitier le plus répandu des régions tempérées froides, jusque vers 66° de latitude. Les principaux pays producteurs de pommes sont les États-Unis, la France, l'Allemagne, la Grande-Bretagne, la Suisse et l'Italie. Le pommier, peu élevé à l'état sauvage, peut atteindre en culture 10 m de hauteur. Son écorce est grise; lisse chez les jeunes arbres, elle se détache ensuite en écailles. Les feuilles sont ovales, dentées et velues en dessous. Les fleurs, réunies en corymbes, ont des pédoncules tomenteux, ainsi que le tube réceptaculaire; les sépales ne sont tomenteux qu'à l'intérieur. Les pétales sont blancs à l'intérieur, roses à l'extérieur; les fleurs paraissent en avril-mai. La forme des fruits, qui mûrissent selon les variétés d'août à juin, est diverse : presque sphérique chez la « Rome beauty », ovale-cylindrique chez la « Golden delicious », elle est

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Pommier en fleur.***

▼ ***La pomme « Stark delicious », originaire d'Amérique, a été récemment introduite en Europe (à gauche). Très jeune pomme (à droite).***

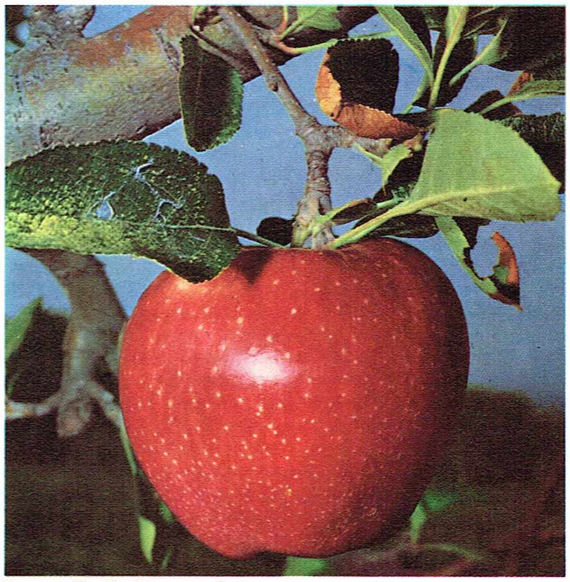

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

E.P.S.

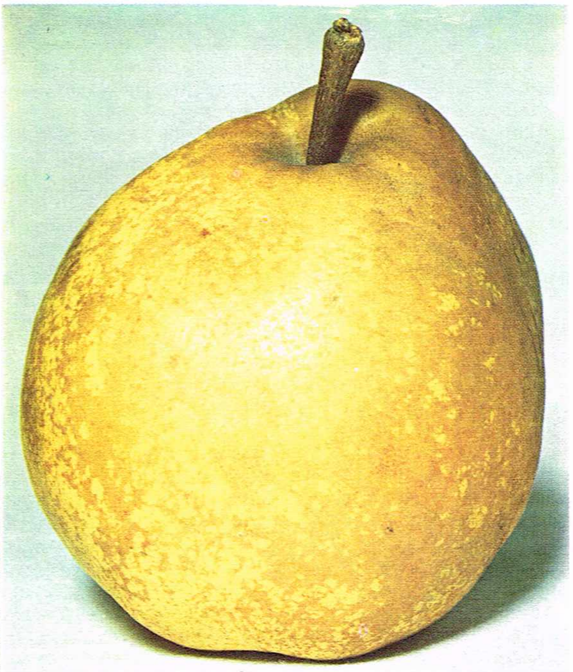

I.G.D.A. - Archives « B »

I.G.D.A. - Archives P2

▲ *Poirier en fleur.*

▶ *Poire du cultivar « Passe-Crassane ». Elle a une grande productivité et une maturation hivernale.*

▶ *Fruits du sorbier des oiseleurs* **(Sorbus aucuparia).**

tronconique et mamelonnée au sommet chez la « Delicious », côtelée et mamelonnée au sommet chez la « Calville blanche », etc. Les cultivars sont obtenus par greffe sur des plants, car ils ne se conservent pas par semis et ne peuvent être bouturés.

Plusieurs espèces du genre (qui en compte environ vingt-cinq) sont cultivées pour l'ornement, comme *M. spectabilis*, d'origine chinoise, à fruit jaunâtre, ressemblant à une petite poire, *M. prunifolia*, à feuilles profondément dentées, et *M. baccata (M. cerasifera)*, toutes deux du nord-est de l'Asie, dont les pommes pourpres, parfois jaunes, pédonculées, ressemblent à des cerises.

Les poiriers *(Pyrus)*, au nombre de vingt-cinq environ, ont des styles libres, et la chair de leurs fruits renferme des cellules scléreuses. Le poirier commun *(P. communis)* existe en Europe depuis très longtemps, et son origine n'est pas claire. Il semble résulter de l'hybridation d'au moins cinq espèces. Il peut atteindre 20 m de hauteur. Il diffère du pommier par son écorce brun grisâtre à fentes longitudinales, par ses feuilles plus arrondies et finement dentées, glabres et coriaces à maturité, vertes sur le dessus, claires en dessous et pourvues d'un long pétiole. Ses fleurs sont blanches ou roses, avec des anthères rouges, et paraissent avant celles du pommier. Le poirier résiste moins bien au froid que ce dernier; il préfère les sols légèrement argileux et les climats tempérés humides. Comme pour le pommier, les cultivars sont propagés par greffe sur des poiriers de semis qui sont souvent des *P. nivalis;* toutefois, on utilise beaucoup les cognassiers. On peut enfin greffer le poirier sur l'aubépine. Les cultivars sont au nombre d'au moins un millier. Parmi les meilleurs, nous citerons la « Williams », qui mûrit dès la fin d'août et en septembre, la « Beurré Hardy », de septembre à octobre, la « Duchesse d'Angoulême », en octobre-novembre, etc. Parmi les variétés hivernales, on mentionnera la « Poire de Curé », la « Passe-Crassane », etc.

On trouve dans le centre et l'ouest de la Chine *P. pyrifolia*, à feuilles longuement acuminées et dentées, pectinées, dont une variété (var. *culta*) produit des fruits atteignant 15 cm de diamètre. *P. ussuriensis* et *P. bretschneiderii*, du nord de la Chine, en sont voisins. *P. colleryana*, de Chine, n'a que deux carpelles. Tous ces poiriers résistent bien au froid, ainsi que *P. nivalis*, à feuilles entières, qui est endémique d'Europe centro-méridionale et utilisé comme porte-greffe.

Les sorbiers *(Sorbus)* sont très proches des poiriers. Ils ne sont pas épineux, et possèdent des corymbes composés d'une centaine de fleurs le plus souvent blanches. Cent « grandes espèces » environ croissent dans l'hémisphère Nord, et certaines sont cultivées depuis la plus haute antiquité.

L'alisier *(S. torminalis)* est un arbre atteignant 25 m, à feuilles glabres, dentées, divisées en lobes aigus (de six à huit), et porteur de corymbes de fleurs blanches. Il est répandu en Europe centro-occidentale, au nord de l'Asie Mineure et en Afrique du Nord. Ses fruits ou alises, ovoïdes et bruns, sont acidulés, éventuellement comestibles. Le sorbier des oiseleurs *(S. aucuparia)*, qui ne dépasse guère 15 m, diffère du précédent par ses feuilles composées de onze à dix-sept folioles et par ses fruits de couleur rouge. Ceux de la var. *edulis* sont utilisables pour faire des confitures. L'arbre est cultivé pour l'ornement, en général sous des formes à fruits orangés (var. *xanthocarpa*). Il est résistant et atteint l'étage subalpin. Il occupe l'Europe et l'Asie nord-occidentale. L'allier *(S. aria)* a des feuilles ovales, dentées et blanches-tomenteuses. Ses fruits sont rouge-orangé et un peu acides. Il vit en Europe centro-méridionale et occidentale et en Afrique du Nord. Le cormier *(S. domestica)* ressemble au sorbier des oiseleurs, mais a cinq styles et non trois. Il vit en France et en Europe centro-méridionale. Ses fruits, les sorbes, sont en forme de petites pommes ou de petites poires, rouge verdâtre ou brunâtre, de 30 mm de long, comestibles après une légère fermentation et utilisés pour préparer une sorte de poiré.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

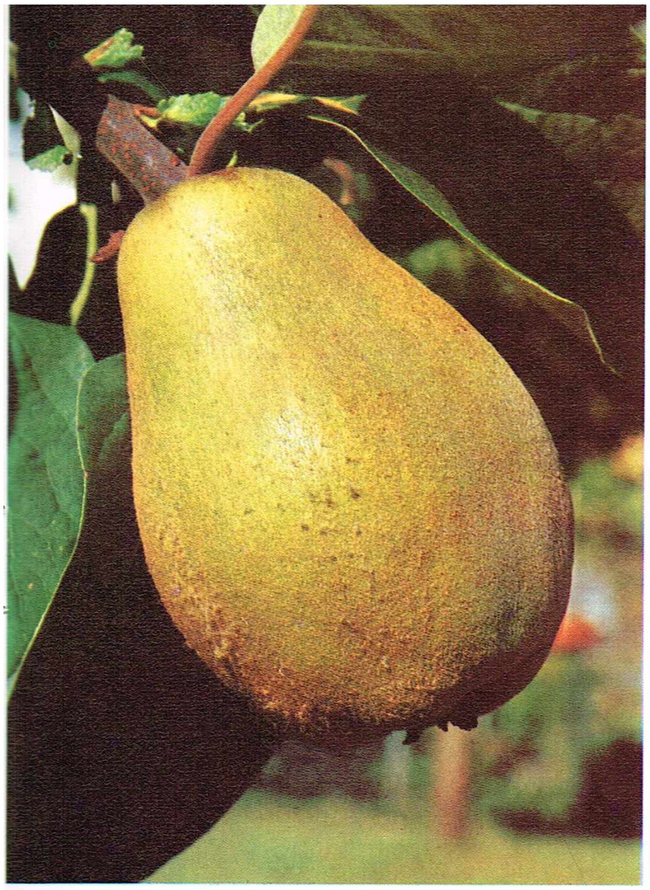

I.G.D.A. - Archives P2

Le cognassier *(Cydonia oblonga = C. vulgaris)* est apprécié pour son fruit, le coing, très odorant, riche en tanin, et par conséquent fort astringent, non comestible quand il est cru, mais excellent confit ou en gelée. C'est un arbre ou un arbuste tortueux, à feuilles ovales, entières, blanchâtres-tomenteuses en dessous. Ses fleurs sont blanc rosé, solitaires et subsessiles. L'ovaire est à cinq carpelles renfermant de nombreux ovules. Originaire du sud-ouest de l'Asie, le cognassier est cultivé dans les mêmes régions que le pommier et le poirier et s'est naturalisé surtout dans le sud de l'Europe. C'est la seule espèce du genre.

Chaenomeles japonica, du Japon, est voisin, mais ses feuilles glabres ont de grandes stipules et ses fleurs sont d'un rouge intense et à styles soudés à la base. C'est le cognassier ou pommier du Japon, souvent cultivé pour l'ornement et l'une des trois espèces de ce genre d'Extrême-Orient.

Le genre *Amelanchier* comporte de vingt à vingt-cinq espèces, surtout répandues en Amérique du Nord. Pourtant *A. ovalis (= A. vulgaris)* se rencontre en Europe centro-méridionale, en Asie Mineure et en Afrique du Nord. Il se trouve dans les montagnes de la moitié est de la France. Il a de petites feuilles ovales et dentées. Ses fleurs sont blanches, en grappes simples, à pétales sans onglet. Ses fruits globuleux, noir bleuâtre, surmontés par les cinq dents du calice, sont comestibles. Les cinq carpelles biovulés sont divisés par de fausses cloisons de sorte que le fruit a dix loges uniovulées.

Le genre *Eriobotrya* comprend de vingt-cinq à trente espèces d'Asie centrale, méridionale et orientale, de Malaisie et des Philippines. Ce sont des plantes à feuilles persistantes. *E. japonica*, du centre de la Chine, à feuilles entières luisantes au-dessus, tomenteuses brunes en dessous et à inflorescences très tomenteuses, est souvent cultivé. Il donne des petites « poires » jaunes de 3 à 4 cm de long.

La sous-famille des *Prunoïdées* comprend des arbres ou arbustes à feuilles simples, souvent munies de glandes à la base du limbe et à stipules fréquemment caduques. Il y a généralement un seul carpelle libre au fond d'un réceptacle creusé en coupe, parfois plat. Les fruits sont des drupes dont le mésocarpe peut être coriace.

Le genre *Prunus* au sens large est riche d'environ deux cents espèces des zones tempérées de l'hémisphère boréal, surtout en Asie orientale, avec quelques représentants dans les Andes et en Indonésie.

Dans le sous-genre *Prunus*, les feuilles sont caduques. La ramification des pousses végétatives est sympodiale. Les fleurs sont sessiles ou brièvement pédonculées. Les bourgeons à fleurs ne sont pas accompagnés de feuilles, ou bien sont situés de part et d'autre d'un bourgeon à feuilles. Le fruit est glabre, souvent pruineux, et son mésocarpe est charnu.

Le prunier *(Prunus domestica)* atteint 10 m de hauteur; il a des feuilles ovales, dentelées et rugueuses, pubescentes ou non en dessous. Les fleurs, blanches, géminées ou par trois, paraissent en même temps que les feuilles. Les fruits (prunes), qui mûrissent généralement de juillet à septembre selon les variétés, sont de forme sphéroïdale ou ovoïdale, de couleur violette, rouge, jaune ou verte, et sont pruineux. Le noyau est dur, comprimé, un peu rugueux, et renferme une graine plus ou moins amère. Le prunier est cultivé dans une grande partie de l'Europe, sauf au nord et au nord-est. Il est probablement un hybride fixé de *P. cerasifera* et *P. spinosa*. La sous-espèce *domestica*, non épineuse, à pétales un peu verdâtres et à grands fruits à endocarpe caréné, fournit les prunes comestibles. Parmi les cultivars, nous citerons : la « Quetsche », pourpre-violet, la « Sainte-Catherine », jaune granité de rose, et la « Prune d'Agen ».

La sous-espèce *insititia* est épineuse, a des pétales blanc pur et des fruits plus petits à endocarpe adhérent au mésocarpe, peu comprimé et peu caréné. C'est le prunier « sauvage », naturalisé un peu partout en France. La reine-claude et la mirabelle sont les fruits de deux de ses cultivars.

Le prunellier ou épine noire *(P. spinosa)* est commun dans les haies. C'est un arbrisseau très épineux, qui fleurit en mars-avril en donnant de gracieuses fleurs blanches solitaires, que suivent de petits fruits de 6 à 12 mm, globuleux, violets, noirâtres, âpres, à noyaux subglobuleux, les prunelles, que l'on peut consommer blettes et qui servent à fabriquer une liqueur alcoolique très appréciée. Il est commun dans toute l'Europe sauf au nord, et en Asie occidentale; c'est sans doute un des parents du prunier. *P. cerasifera* ne vit que dans les Balkans et en Crimée et a de jeunes rameaux luisants et glabres, et un fruit assez grand (de 2 à 3 cm) à endocarpe caréné. Sa variété *pissardii*, à feuillage pourpre et à fleurs roses, est très souvent cultivée pour l'ornement.

L'abricotier *(P. armeniaca)* est un petit arbre à feuilles largement ovales, acuminées, glabres et dentelées. Les fleurs, solitaires ou géminées, subsessiles, blanches ou un peu rosées, paraissent avant les feuilles. Les fruits (abricots) sont veloutés et de couleur jaune-orangé; ils possèdent un noyau comprimé, avec trois côtes d'un côté. Parmi les cultivars, le « Liabaud », le « Royal », le « Luizet », l' « Abricot de Nancy » mûrissent plus ou moins précocement, en juillet et en août. Originaire de Chine et d'Asie centrale, l'abricotier croît bien sur tous les sols et sous des climats tempérés chauds. Il peut être cultivé en espalier. Les cultivars sont greffés sur des abricotiers obtenus de graines, sur le prunier ou parfois sur le pêcher.

▲ ***Rameau de prunier en fleur* (Prunus domestica).**

◀ ***Le coing, fruit du cognassier* (Cydonia oblonga), *est surtout consommé confit ou en gelée.***

▼ ***Fruits de prunier* (Prunus domestica).**

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

R. Paglietta

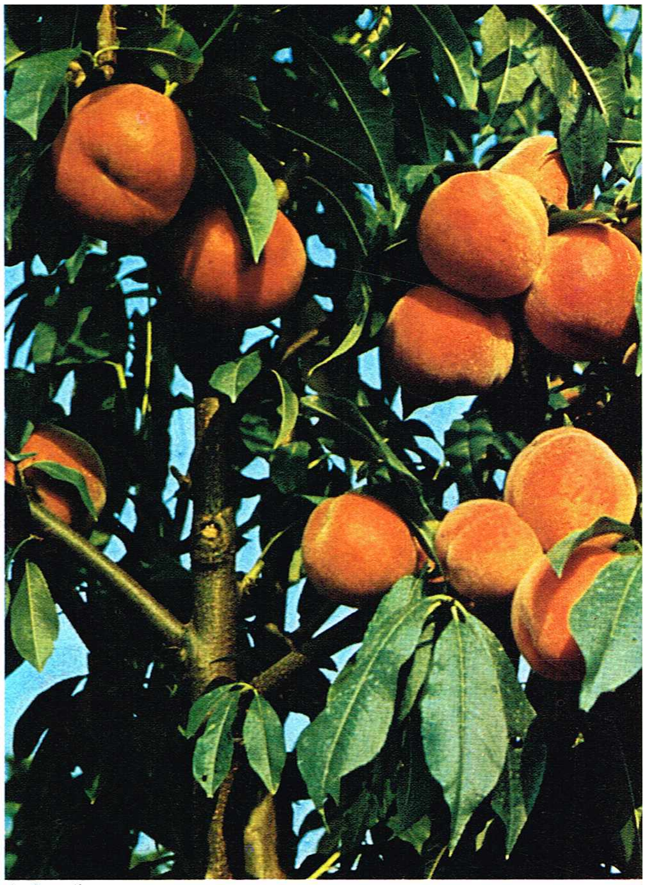

A. Quaglino

▲ *A gauche : fruits de l'abricotier* **(Prunus armeniaca** *cultivar « Hâtif colomer »)* ; *à droite : fruits du pêcher* **(Prunus persica).**

Les abricots sont difficiles à conserver ; on les consomme frais ou en confiture. On peut également les faire sécher.

Dans le sous-genre *Amygdalus*, les feuilles sont caduques. La ramification des pousses végétatives est monopodiale. Les fleurs, subsessiles, paraissent avant les feuilles et terminent de courts rameaux qui portent deux bourgeons végétatifs se développant immédiatement. Le fruit est pubescent et à endocarpe sillonné ou criblé.

L'amandier *(P. dulcis = Amygdalus communis)* est un petit arbre atteignant 8 m. Ses feuilles sont lancéolées, dentelées et glabres. Ses fleurs, roses, sont disposées par paires. Les fruits sont ovoïdes, comprimés et ont un mésocarpe coriace qui se divise en deux valves pour laisser apparaître un noyau oblong, caréné, aplati et criblé-poreux, contenant une ou parfois deux amandes. L'amande est recouverte par un tégument rugueux, de couleur noisette extérieurement et blanche intérieurement, à cause de l'albumen qui y adhère. Deux variétés cultivées sont importantes. La var. *amara* donne les amandes amères, qui contiennent 2 à 3 % d'un hétéroside cyanogénétique *(amygdaloside)* renfermant du nitrile phénylglycolique et susceptible de produire de l'acide cyanhydrique sous l'influence de trois enzymes de la graine (« émulsine ») en présence d'eau. La var. *sativa* produit les amandes douces, qui ne contiennent pas d'amygdaloside. Les amandes amères ne doivent être utilisées qu'avec précaution comme aromatisant, du fait de la genèse d'acide cyanhydrique : une vingtaine d'amandes entraînent des troubles respiratoires et de l'hypothermie chez l'homme adulte et quelques-unes peuvent être mortelles pour le jeune enfant. Les amandes douces, entières ou en pâte, sont très utilisées en confiserie et en pâtisserie. En pharmacie, l'huile d'amande douce est un purgatif doux. Elle entre aussi dans la composition de préparations cosmétiques. L'amandier croît bien sur les sols rocheux et arides. Il est souvent naturalisé dans la région méditerranéenne. A l'état spontané, il se rencontre dans le sud-ouest et le centre de l'Asie. Il existe des variétés ornementales à fleurs doubles, à feuilles panachées, etc.

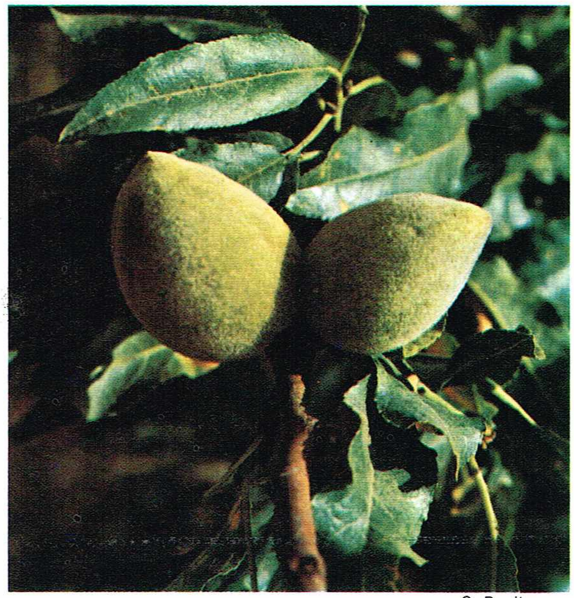

C. Bevilacqua

▶ *L'amandier* **(Prunus dulcis = Amygdalus communis)** *porte des fruits verts et charnus renfermant une graine blanchâtre : l'amande.*

Le pêcher *(P. persica)* est très semblable à l'amandier, et on a pensé qu'il en provenait. C'est un petit arbre atteignant 6 m de haut, à feuilles oblongues lancéolées, acuminées et glabrescentes, à fleurs rose vif, le plus souvent solitaires. Les fruits sont de grosses drupes sphéroïdales, avec la plupart du temps un sillon méridien unilatéral, à épicarpe velouté (pêches communes) ou glabre (brugnon, donné par le brugnonier, *P. persica* var. *laevis*), parfois de forme aplatie (var. *compressa*). La pulpe, blanche ou jaune, sucrée et juteuse, entoure un noyau ovoïdal, sillonné et adhérent ou non à la pulpe elle-même. La pêche pavie, à pulpe adhérente, n'est guère recherchée. Le brugnon a l'aspect extérieur d'une prune à forme de pêche, et sa chair, intermédiaire entre celle des deux fruits, adhère au noyau. Les nectarines (var. *nectarina*) sont des brugnons à chair non adhérente, qui sont les plus estimés. Le pêcher est très exigeant, il lui faut des sols meubles, perméables, profonds, et un climat doux, avec un temps limité de température inférieure à 7 °C. Il en existe actuellement un millier de variétés, souvent classées en fonction de l'époque de leur maturation, qui, suivant les cas, a lieu de la fin du mois de juin au mois d'octobre. Les cultivars sont greffés sur pêcher de graine ou sur divers pruniers, mais de nombreuses variétés peuvent être reproduites de graines. Originaire de Chine, le pêcher est exploité depuis l'époque romaine en Europe, et depuis le XVIIe siècle en Amérique ; sa culture dans les autres régions du globe est plus récente.

Dans le sous-genre *Cerasus*, les feuilles sont encore caduques. La ramification est monopodiale. Les fleurs sont le plus souvent en ombelles, et longuement pédonculées. Elles terminent de petits rameaux formés par des bourgeons spéciaux. Le fruit est glabre et non pruineux. Son endocarpe est lisse ou un peu sillonné.

I.G.D.A. - Archives P2

I.G.D.A. - Archives P2

▲ ***Pêcher*** **(Prunus persica)** ***: détail de fleurs, et rameau portant des fruits.***

◀ ***Fleur de merisier*** **(Prunus avium).**

▼ ***A gauche :*** **Prunus cerasus** ***(le griottier) donne des fruits colorés mais à saveur aigre : les griottes. A droite : rameau portant des bigarreaux « Napoléon ».***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

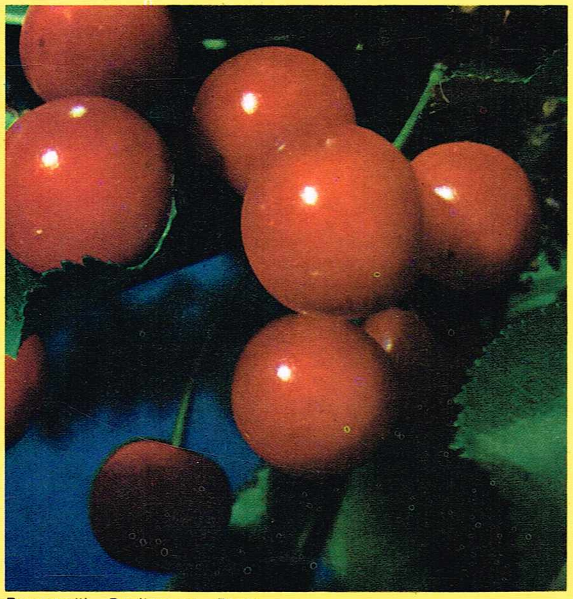

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

E.P.S.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Inflorescence de laurier-cerise*** **(Prunus laurocerasus).**

Les cerisiers sont des arbres atteignant 20 à 30 m. Ils possèdent des inflorescences blanches qui paraissent avant ou lors de la sortie des feuilles. Celles-ci sont ovales-acuminées, dentées doublement et régulièrement. Les fruits (cerises) sont globuleux, glabres, de couleur jaune ou rouge, parfois tigrée, et ont un endocarpe globuleux et lisse. Le merisier *(P. avium)* est le cerisier sauvage des forêts européennes; il a des feuilles pubescentes en dessous, avec deux glandes en bas du limbe. C'est lui qui donne, sous ses différentes formes cultivées, les cerises douces connues sous le nom de guignes (var. *juliana*), si elles sont rouge noirâtre à chair molle, ou de bigarreaux (var. *duracina*), si elles sont jaunes ou rouge pâle, à chair ferme, presque croquante. Son bois est aussi très recherché. Il habite l'Europe occidentale et centrale et les rivages de la mer Noire. Le griottier *(P. cerasus)* donne pour sa part des fruits acides, les griottes ou cerises aigres. Il a des feuilles glabrescentes en dessous et sans glandes en bas du limbe. Ses ombelles de fleurs sont entourées d'écailles munies d'un petit limbe. Il est originaire du sud-ouest de l'Asie, dans la région de la mer Caspienne. Ces deux arbres sont très cultivés sous climat tempéré froid, dans les régions où les températures minimales ne sont cependant pas inférieures à — 10 °C. Les fruits de la forme sauvage de merisier servent à la préparation du kirsch, et on a développé divers cultivars sélectionnés dans ce sens. *P. serrulata*, de Chine, Corée et Japon, à feuilles glabres profondément dentées avec des dents aristées, et à fleurs en grappes, blanches ou roses, a fourni des cultivars à fleurs roses et doubles très appréciés pour l'ornement (cerisiers du Japon).

Le sous-genre *Padus* ne diffère guère du sous-genre *Cerasus*, mais les inflorescences sont des grappes allongées qui terminent de petits rameaux végétatifs à la base.

En avril-mai, dans les lieux humides et siliceux du centre, de l'est et des montagnes de France, fleurit le bois-puant *(P. padus)*. Ses grappes sont pendantes et apparaissent avant les feuilles ovales et acuminées. Ses fruits sont globuleux et de la grosseur d'un pois. On les utilise parfois pour parfumer le whisky. Il est répandu en Europe et dans le sud de la Sibérie, au Japon et au Kamtchatka.

Dans le sous-genre *Laurocerasus*, les feuilles sont persistantes et glabres et les fleurs sont disposées en grappes axillaires à pédoncule nu. La ramification est sympodiale.

Le laurier-cerise *(P. laurocerasus)*, spontané en Europe méridionale et orientale et en Asie Mineure, est très cultivé sous de nombreuses formes pour l'ornement. C'est un arbuste ou un arbre, souvent taillé en haie. Ses feuilles sont larges et lancéolées, un peu dentées, et ses petites fleurs blanches sont réunies en grappes dressées, un peu plus courtes que la feuille axillante. Ses fruits, pointus, d'environ 13 mm, sont noirâtres à maturité et ne sont pas comestibles. On tire des feuilles du laurier-cerise une eau distillée, à propriétés antispasmodiques et stimulantes de la respiration.

La famille des *Chrysobalanacées (Chrysobalanaceae)* comprend douze genres et trois cents espèces d'arbres et d'arbustes des zones tropicales et particulièrement d'Amazonie, où ils peuvent former par endroits l'élément dominant de la végétation. Les feuilles sont alternes et stipulées. Il y a un réceptacle comparable à celui des *Prunus*, cinq sépales et pétales, souvent de nombreuses étamines à filets parfois soudés, fertiles éventuellement d'un seul côté de la fleur, qui est alors zygomorphe. Le gynécée comporte au début deux ou trois carpelles, mais un seul se développe. Il est déplacé latéralement sur le réceptacle et son style est basal. Il y a deux ovules. Le fruit est une drupe à une seule graine. Il est possible que cette famille ne doive pas en fait être placée parmi les Rosales.

Nous arrivons à la série des Légumineuses, à feuilles presque toujours composées et à carpelles libres, souvent à carpelle unique.

La famille des *Connaracées (Connaraceae)* comprend vingt-quatre genres et trois ou quatre cents espèces de plantes ligneuses ou de lianes tropicales. Elles ont des feuilles pennées, sans stipules. Les fleurs sont actinomorphes, pentamères ou tétramères. Il y a cinq carpelles ou un seul, avec deux ovules par carpelle. Les fruits sont des follicules dont les graines sont comestibles chez *Cnestis platantha*, de Malaisie.

Les trois familles suivantes peuvent être considérées comme appartenant à la famille unique des *Légumineuses* ou *Fabacées (Fabaceae)*, à fleurs hypogynes ou périgynes, et à carpelle unique à style apical devenant en principe un légume, à déhiscence dorsale et suturale. Groupant six cents genres et treize mille espèces, c'est avec les Orchidées et les Composées une des trois plus grandes familles des Angiospermes.

La famille des *Mimosacées (Mimosaceae)* est aussi considérée par beaucoup comme une sous-famille des *Mimosoïdées* dans la famille des Fabacées. Elle regroupe quarante genres et deux mille espèces d'arbres et d'arbustes, rarement d'arbrisseaux ou d'herbes, parfois épineux. Leurs feuilles sont doublement composées en général et possèdent des stipules. Elles sont souvent réduites à leurs pétioles transformés en phyllodes. Leurs fleurs actinomorphes forment des épis ou des têtes denses; le calice et la corolle, pentamères le plus souvent, sont plus ou moins tubuleux à la base; les étamines sont abondantes ou en nombre double de celui des pétales, généralement libres et colorées, à long filet, et ont une fonction attractive sur les Insectes pollinisateurs; l'ovaire est supère et unicarpellé. Parfois il y a plus d'un carpelle *(Affonsea, Archidendron)*, ce qui semble être un caractère primitif parmi les Légumineuses. Les fruits sont le plus souvent des légumes. Ces plantes vivent dans les zones tropicales et subtropicales. Elles s'adaptent aux climats tempérés chauds, et certaines ont été introduites dans la région méditerranéenne. On les utilise en culture orne-

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

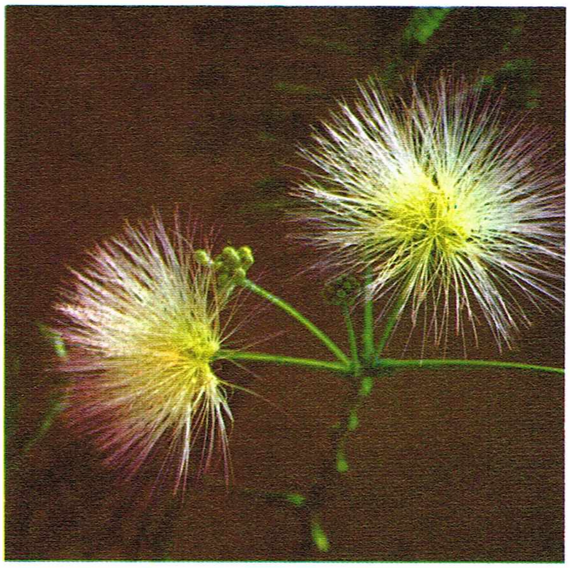

G. Tomsich

▶ ***A gauche : inflorescence d'*****Acacia nodosa.** ***A droite : fleurs d'*****Albizzia julibrissin.**

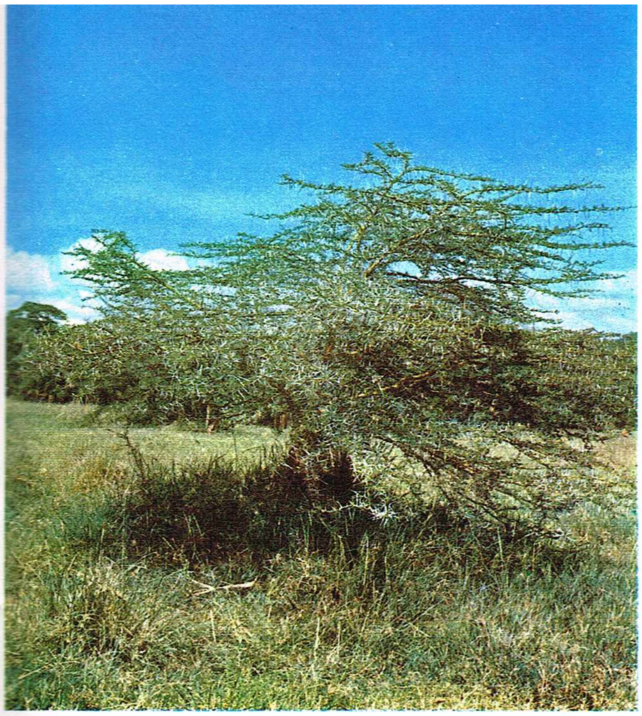

T. Sacco

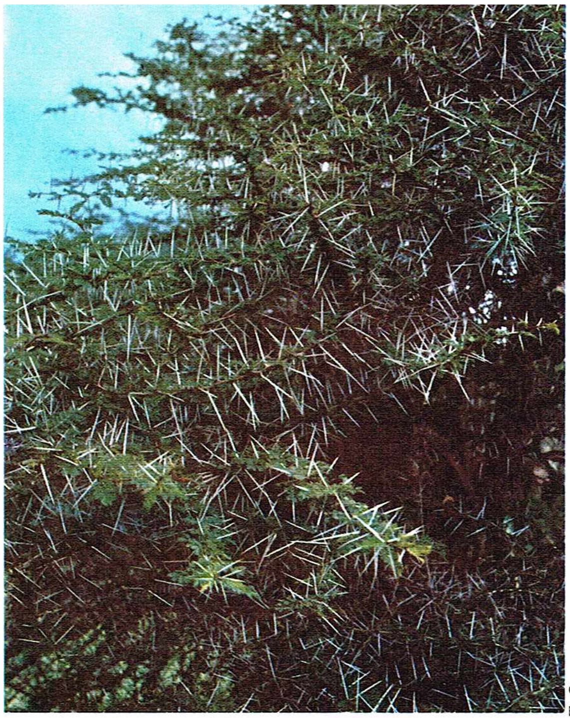

T. Sacco

◀ *En Afrique orientale, l'acacia est un des composants de la steppe arbustive. Il est bien adapté à la vie en milieu aride : ses feuilles sont partiellement transformées en épines pour réduire la transpiration.*

mentale et pour la production de bois, de tanin, de gommes, etc.

Dans un premier groupe, les sépales sont à préfloraison valvaire et il y a autant d'étamines que de pétales ou deux fois plus.

Le genre *Mimosa*, qui a donné son nom à la famille, est constitué de quatre à cinq cents espèces de plantes herbacées ou arbustives, parfois épineuses, dont beaucoup croissent en Amérique tropicale. Leurs feuilles sont bipennées, à nombreuses folioles oblongues; à la base de chaque foliole, des pétiolules et du pétiole se trouvent des cellules formant les coussinets moteurs, ou *pulvinus*, comme dans la plupart des Légumineuses. Leurs fleurs, réunies en capitules ou en épis cylindriques, sont pentamères ou tétramères et possèdent de quatre à dix très longues étamines. Le nom de *Mimosa* dérive du latin *mimus*, mime, par allusion aux changements d'aspect de ces Végétaux. En plus des mouvements de veille et de sommeil effectués à l'aide des *pulvinus* comme chez de nombreuses autres plantes, quelques mimosas présentent des réactions « séismonastiques », c'est-à-dire répondant à une excitation mécanique. Leurs folioles opposées se rapprochent deux à deux, les pétiolules se replient et les pétioles s'affaissent. Le phénomène se propage d'une feuille à l'autre, de proche en proche. Les mouvements se font sous l'action de chocs, de la chaleur, de décharges électriques, etc.

Le mécanisme de ces tropismes est la variation de la turgescence des coussinets moteurs. La propagation des stimuli met en cause des phénomènes de dépolarisation des cellules, mais aussi des réactions chimiques qui peuvent impliquer la présence d'un récepteur photosensible. Ces phénomènes sont très marqués chez la sensitive *(Mimosa pudica)*.

Dans un second groupe, les sépales sont encore à préfloraison valvaire, mais il y a beaucoup d'étamines.

Les espèces du genre *Acacia* sont appelées souvent à tort « mimosas » tandis que l'arbre nommé « acacia » est le robinier, qui n'appartient pas aux Mimosacées. Elles sont communes dans les régions tropicales et subtropicales, mais plus de la moitié des six cents à huit cents représentants de ce genre se trouvent en Australie. Les acacias sont répandus aussi dans les savanes d'Afrique. Ce sont des arbres, arbustes ou arbrisseaux épineux ou non; les épines dérivent des stipules foliaires. Chez les acacias polynésiens et australiens, de la section *Phyllodineae*, le limbe foliaire est réduit; le pétiole s'aplatit alors et prend une forme laminaire (phyllode). Les feuilles sont alternes et bipennées, et portent d'innombrables folioles. Ces plantes sont parfois myrmécophiles, car leurs stipules épineuses grossissent et abritent dans des cavités qui les parcourent des fourmis, auxquelles elles fournissent la subsistance sous forme de corpuscules protéiques spécialisés sécrétés au sommet des jeunes feuilles. Les fleurs, aux étamines longues, libres et nombreuses, forment des épis ou des capitules.

Les espèces d'acacias les plus importantes pour l'industrie sont *A. nilotica*, *A. senegal* et *A. catechu*. La première, appelée vulgairement *sount* en Égypte, est originaire d'Afrique tropicale et d'Inde, où elle est nommée *babul*. C'est un arbre de 5 à 15 m. Il y a de dix à vingt paires de foliolules par foliole et cinq ou six paires de folioles par feuille. Les fleurs sont jaune soufre en têtes sessiles. *A. nilotica* compte parmi les producteurs essentiels de la gomme arabique, substance glucidique qui s'accumule dans des poches libériennes et corticales de la plante et s'écoule par des blessures ou à la suite d'un écorçage artificiel. Elle est utilisée parfois comme apprêt dans l'industrie textile, plus souvent comme colle, et pour la préparation de certains sirops et de diverses pâtes médicinales. Le bois de cette espèce sert en ébénisterie; c'est en outre un bon combustible. *A. senegal* est le verek; acacia à gomme par excellence, il fournit le meilleur produit. Il est originaire des régions voisines du sud du Sahara et y est cultivé. C'est un buisson ne dépassant pas 8 m. Les feuilles ont de trois à six paires de folioles avec des glandes (de une à trois) au niveau de leur insertion sur le rachis. Chaque foliole possède une dizaine de paires de foliolules. *A. catechu*, l'acacia à cachou, est originaire de l'Inde, de la Birmanie, de Ceylan, d'Afrique tropicale et orientale. C'est un arbre d'environ 12 m de haut, à fleurs blanches en épis. De son bois de cœur on extrait le cachou, utilisé pour ses propriétés astringentes et antiseptiques dues à la catéchine et à des tanins catéchiques. Il sert aussi au tanage de certaines peaux.

Les acacias sont aussi des plantes ornementales de pleine terre ou de serre. Comme ils sont spontanés dans les milieux désertiques, ils se sont bien adaptés dans la zone de l'oranger, de préférence sur des sols non calcaires. On les cultive sur la Côte d'Azur et la Riviera pour la production de fleurs coupées. *A. dealbata*, le plus répandu, y est rustique. C'est l'un des mimosas des fleuristes.

On confond souvent les acacias avec les *Albizzia*, qui en diffèrent par les étamines soudées en tube. Nous citerons, parmi plus d'une centaine d'espèces, tropicales pour la plupart, *A. julibrissin*, spontané de l'Asie Mineure à l'Himalaya : c'est l'acacia de Constantinople qui atteint 12 m; ses feuilles sont bipennées avec une vingtaine de folioles à quarante à soixante foliolules, et ses fleurs sont en capitules rose clair, auxquels les longues étamines donnent un aspect plumeux. Il est cultivé pour l'ornement et est rustique dans une partie de la France.

La famille des *Légumineuses (Leguminosae)* ou *Fabacées (Fabaceae)* compte environ cinq cent cinquante genres et onze mille espèces. Ces plantes ont en commun une structure florale zygomorphe avec pétales imbriqués, et leurs fruits sont des gousses. Ce sont des plantes herbacées, arbustives, arborescentes, ou lianoïdes, souvent aussi grimpantes par des vrilles, avec des feuilles fréquemment composées, pennées ou palmées, et presque toujours pourvues de stipules. De nombreuses espèces ont les rachis foliaires ou les stipules, quelquefois aussi des rameaux, transformés en épines. Les fleurs ont très généralement cinq sépales concrescents ou non inférieurement et cinq pétales (quelquefois moins, parfois pas). Il y a dix étamines, rarement plus ou moins. Ces fleurs sont très généralement réunies en inflorescences racémeuses terminales ou latérales.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

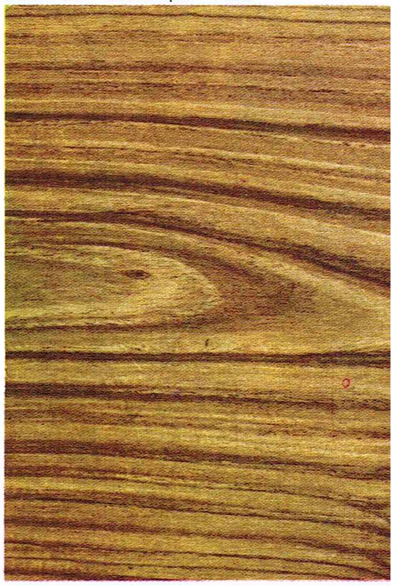

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

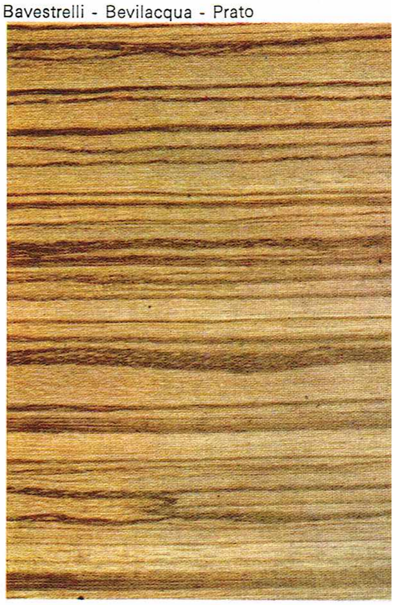

▲ **Coupes de bois de deux Mimosacées tropicales : Acacia homalophylla *(en haut)*; Microberlinia brazzavillensis *(en bas)*.**

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

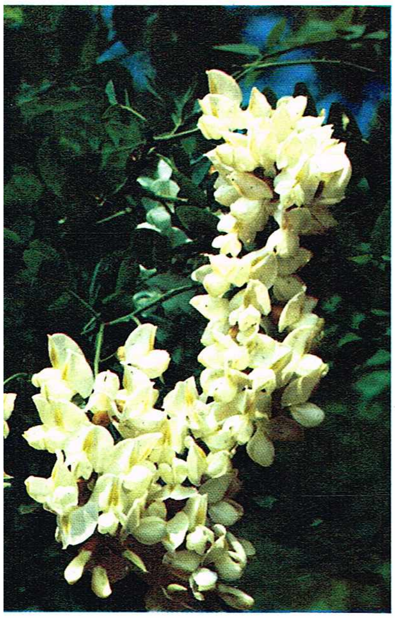

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

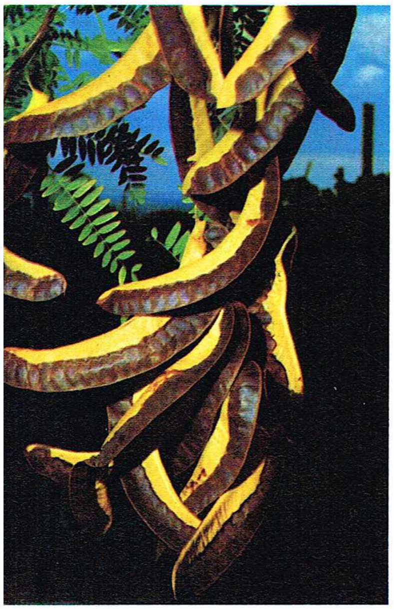

▲ ***En haut : inflorescence de robinier*** **(Robinia pseudacacia).** ***En bas : fruit mûr d'une variété décorative de*** **Gleditschia triacanthos.**

▶ ***Région apicale de l'inflorescence du lupin*** **(Lupinus).**

La corolle est plus souvent zygomorphe et papilionacée dans la sous-famille des Faboïdées. Comme son qualificatif l'indique, elle rappelle par sa forme un papillon. On y distingue un étendard, pétale dorsal (du côté de l'axe inflorescentiel) très développé, qui recouvre les bords supérieurs des deux ailes, dont les bords inférieurs recouvrent à leur tour les bords supérieurs de la carène formée par la soudure des deux pétales inférieurs au niveau de leur partie inférieure (préfloraison papilionacée). Il arrive que la corolle soit réduite à l'étendard *(Amorpha)* ou manque. Chez les Césalpinioïdées, les fleurs sont encore zygomorphes, mais les pétales antérieurs ne sont pas unis en carène et l'étendard est remplacé par un pétale dont les bords sont recouverts par les bords supérieurs des pétales latéraux : la fleur n'est plus papilionacée. Les étamines, au nombre de dix, peuvent être libres ou toutes soudées en tube; il est fréquent que neuf d'entre elles seulement soient soudées, la supérieure étant libre ou manquant. Certaines peuvent être staminodiales. L'ovaire est constitué par un seul carpelle dont la suture est dirigée du côté dorsal; il possède donc fondamentalement une seule loge, mais peut être divisé par une fausse cloison *(Astragalus)*. Les graines sont fixées aux marges de la suture.

Les fruits sont les légumes ou gousses, qui peuvent ne pas s'ouvrir à maturité; dans ce cas, les gousses sont souvent divisées transversalement en autant de loges qu'il y a de graines (gousses lomentacées), et ces loges se désarticulent le moment venu. La pollinisation se fait par les Insectes, assez souvent par les Oiseaux (colibris); les modes de dissémination sont très variés. Les graines ont des cotylédons très riches en protéines et en amidon (les grains de ce dernier, vus au microscope, ont une forme ovoïdale, avec un hile central ramifié). Un caractère important des Légumineuses est la présence de nodosités radicales, constituées par suite de la présence d'une Bactérie symbiotique *(Rhizobium leguminosarum)* dont il existe de nombreuses souches. Les Légumineuses sont donc souvent cultivées en alternance avec d'autres cultures herbacées, afin d'enrichir le sol en azote.

On divise les Légumineuses en deux sous-familles : les Faboïdées *(Faboideae)* et les Césalpinioïdées *(Caesalpinioideae)*, qui peuvent être considérées comme familles (Fabacées *stricto sensu* et Césalpiniacées).

Dans la sous-famille des *Faboïdées*, la fleur a très généralement un étendard et une carène. Ce groupe est le plus important et renferme environ quatre cents genres et neuf mille espèces.

Dans un premier ensemble, les étamines sont libres et la corolle n'est pratiquement pas zygomorphe, ou bien elle est déjà papilionacée.

La tribu des Sophorées comprend des arbustes et des arbres des régions tempérées chaudes et tropicales, à feuilles généralement imparipennées et dont souvent le fruit ne s'ouvre pas. Le genre *Sophora* renferme des arbres des régions tempérées et tropicales. *S. japonica*, de Chine et de Corée, est cultivé en Europe depuis le XVIII[e] siècle. Il atteint 25 m et montre des panicules pendantes de fleurs plus ou moins papilionacées blanches, ou violettes dans la variété *violacea*.

Les deux ou trois espèces de *Myroxylon* ont des fleurs à peu près actinomorphes. Elles vivent en Amérique tropicale. *M. balsamum* et sa variété *pereirae* sont connus en pharmacie et en parfumerie depuis au moins quatre siècles. Le premier est un arbre qui possède des canaux sécréteurs producteurs d'une résine qui s'accumule dans des poches et qu'on recueille grâce à des incisions longitudinales. C'est un liquide qui se solidifie facilement, le « baume de Tolu », qui tire son nom du district de Tolu en Colombie, où la plante abonde.

La tribu des Podalyriées est remarquable à plusieurs égards : les fleurs y sont papilionacées, mais les feuilles sont en général simples ou digitées; souvent, elles n'ont pas de stipules et sont opposées ou verticillées.

Dans les autres tribus, les filets staminaux sont unis plus ou moins et les fleurs sont papilionacées.

La tribu des Génistées compte des plantes herbacées ou suffrutescentes, à feuilles simples ou le plus souvent à trois folioles entières ou à nombreuses folioles, et à fleurs avec des étamines très généralement en un seul faisceau. Cette tribu comprend notamment les deux cents espèces de lupins Lupinus), qui sont des plantes herbacées annuelles ou vivaces, parfois des arbustes

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

principalement américains, mais aussi méditerranéens et africains. Ils ont des feuilles composées de cinq à quinze folioles glabres ou velues, en disposition peltée. Le tube staminal est plus ou moins fendu. Réunies en inflorescences terminales, les fleurs sont parfois parfumées et bleues, pourprées, blanches, jaunes ou tachetées. Il en existe dix espèces environ en Europe. Il semble que les Égyptiens aient cultivé le lupin bleu *(L. angustifolius)*, commun dans toute la région méditerranéenne, à folioles étroites et fleurs bleu intense, car on en a retrouvé des graines dans les tombes. Les Romains ont cultivé le lupin blanc *(L. albus)*, à folioles ovoïdes et fleurs blanches, dont les graines étaient vendues dans les rues de Rome. Il est originaire du sud de la péninsule balkanique et de la région de la mer Égée. On l'exploite toujours; il est naturalisé en France (Provence, Roussillon) et dans d'autres pays. Le lupin jaune *(L. luteus)* occupe la région méditerranéenne occidentale, mais n'existe pas à l'état spontané en France (sauf en Corse). Il faut aux lupins un sol siliceux et fertile. Ils donnent des graines riches en protides (28 %) et en matières grasses (de 8 à 11 %), mais très pauvres en glucides. On peut les moudre en une farine qu'on mélange éventuellement avec celles d'autres Légumineuses et de céréales. La farine de lupin est particulière puisqu'elle est protéique et non glucidique; elle est précieuse pour préparer des pains de régime pour diabétiques. Les graines de lupin sont cependant amères à cause de la présence d'alcaloïdes (lupanine), qu'il faut éliminer par traitement à l'eau chaude avant l'emploi. Il existe des races sans alcaloïdes. Les lupins sont aussi utilisés comme engrais, du fait de leurs nodosités, et comme fourrage vert ou sec; les graines servent aussi à l'alimentation animale. Tous les lupins cités sont annuels. *L. luteus* et d'autres, annuels, sont cultivés pour l'ornement, mais les lupins vivaces *(L. polyphyllus, L. perennis)* sont plus répandus pour cet usage.

Dans les genres de cette même tribu que nous allons étudier maintenant, le tube staminal est fermé. Il n'y a que deux espèces de *Laburnum*, à calice à peine bilabié. Elles vivent dans la région méditerranéenne. *L. anagyroide (Cytisus laburnum)*, ou faux ébénier, habite l'Europe centrale, notamment les régions montagnardes, dans les forêts de feuillus. Il existe dans la moitié est de la France. C'est un arbuste à feuilles possédant trois

folioles à poils appliqués en dessous, qui se couvre au printemps de grappes pendantes de fleurs jaune d'or. Il est souvent cultivé pour l'ornement et il produit un bois apprécié, connu sous le nom de faux ébène. *L. alpinum* croît à peu près dans les mêmes régions et est très voisin, mais ses folioles sont glabres et ses fleurs plus petites. Son bois est aussi exploité. Les graines et les gousses de ces deux espèces sont très vénéneuses.

Les *Sarothamnus* sont maintenant souvent incorporés aux *Cytisus*, mais ils ont un style enroulé. *S. scoparius* est le genêt à balais, qui habite l'Europe de l'Ouest. Il atteint 2 m, ses tiges sont anguleuses et ses feuilles trifoliolées en bas, simples en haut. Ses fleurs sont solitaires ou par deux. Il contient de la spartéine, alcaloïde utilisé comme sédatif et adjuvant des anesthésiques du fait de ses propriétés ganglioplégiques. Les *Cytisus* ont un style droit ou arqué et comprennent une soixantaine d'arbrisseaux d'Europe centrale et d'Asie occidentale, de la région méditerranéenne et de la Macaronésie.

Les *Genista* sont les genêts proprement dits. Leur calice est bilabié et leur étendard est en général droit, non recourbé comme chez les cytises. Le genre regroupe quatre-vingt-dix arbustes d'Europe, d'Afrique du Nord et d'Asie occidentale. *G. tinctoria*, ou genêt des teinturiers, à feuilles simples, habite les forêts et les pâturages d'Europe et d'Asie occidentale. On extrayait de sa racine un colorant jaune ; ses fleurs ont des propriétés purgatives. *G. germanica* a des feuilles simples mais, à la différence du précédent, est velu et épineux. Il habite l'Europe centrale et une bonne partie de la France. *G. anglica* est aussi épineux et à feuilles simples, mais il est glabre et son étendard est redressé. Il habite la moitié ouest de l'Europe.

Enfin, le genre *Ulex* renferme les quinze espèces d'ajoncs de l'ouest et du sud-ouest de l'Europe ainsi que de l'ouest de l'Afrique du Nord, souvent naturalisés ailleurs. Ce sont des arbrisseaux très rameux et très épineux, à feuilles réduites à des écailles ou à des rachis épineux. Les épines sont essentiellement des rameaux courts. *U. nanus* a de petites fleurs jaunes de 7 à 8 mm de long, celles d'*U. europaeus* sont plus grandes (15 mm) et celles d'*U. gallii* le sont également (12-13 mm), mais sont orangées. Les deux premiers s'avancent jusque dans le centre de la France, alors que le troisième est exclusivement atlantique.

La tribu des Astragalées (Galégées) comprend des plantes dont neuf des filets staminaux sont souvent soudés en un tube ouvert, le dixième, opposé à l'étendard, restant libre. Les feuilles sont pennées, très généralement à folioles entières. Chez le robinier « acacia » *(Robinia pseudacacia)*, les inflorescences sont axillaires. Cet arbre appartient à un genre d'une vingtaine d'espèces répandues en Amérique du Nord et au Mexique. Il provient de la moitié est des États-Unis et a été introduit en France au début du XVII[e] siècle. Il est maintenant naturalisé partout en Europe occidentale et méridionale, moins abondamment en Europe de l'Est. La culture a permis d'en sélectionner une multitude de variétés. Les feuilles ont ordinairement de nombreuses folioles et des stipules transformées en épines ; les fleurs sont en grappes pendantes, blanches avec une tache jaune à la base de l'étendard, et odorantes. Le bois est utilisé en menuiserie. Cette espèce peut servir à fixer les sols sablonneux et les éboulis, qu'elle retient bien avec son puissant appareil radical et qu'elle enrichit en azote.

Le genre *Astragalus* comprend mille six cents espèces d'herbes annuelles ou vivaces ou d'arbrisseaux à feuilles imparipennées se terminant parfois en épines. Il n'y en a guère que vingt-cinq en France. Ce sont des plantes typiques des régions arides de toute la terre (sauf l'Australie et l'Afrique du Sud) ; elles sont spécialement abondantes en Asie occidentale et centrale. On les trouve aussi dans les contrées montagneuses froides et dans les zones arctiques. Nous citerons notamment l'astragale de Crète *(A. creticus)*, arbrisseau tomenteux qui habite le sud des Balkans et la Crète, et *A. gummifer*, de Syrie et d'Asie Mineure, arbrisseau de 40 à 60 cm qui, avec diverses autres espèces, fournit la gomme adragante. Il s'agit d'un mucilage constitué de polymères d'arabinose, d'acide galacturonique et d'autres sucres et contenant aussi des protéines. Il s'accumule dans des poches internes et on l'extrait en pratiquant des incisions. Cette gomme est utilisée notamment pour apprêter les tissus et comme émulsionnant. La réglisse sauvage *(A. glycyphyllos)* est herbacée et vivace. C'est une plante fourragère d'Europe centrale et d'Asie occidentale.

Le genre *Glycyrrhiza* comporte une quinzaine d'espèces dans les régions tempérées et subtropicales du monde entier. *G. glabra*, réglisse du sud de l'Europe, de la région méditerranéenne et de l'Asie occidentale et centrale, fournit des rhizomes et des racines douces qui servent à préparer un extrait (« suc de réglisse ») et des décoctions dont les propriétés édulcorantes, émollientes, expectorantes, diurétiques et antispasmodiques sont connues depuis longtemps. L'action antispasmodique et antiulcéreuse de la réglisse est due aux flavinoïdes qu'elle contient tandis que les autres propriétés s'expliquent par la présence d'un hétéroside contenant de l'acide glycyrrhétique, qui est un triterpène pentacyclique. La réglisse est également anti-inflammatoire et œstrogène et est utilisée dans les dysménorrhées. *G. glabra* est cultivé dans la région méditerranéenne, en Russie, en Extrême-Orient, aux États-Unis, etc. Vivace, il est haut de 50 cm à 1 m ; sa souche ligneuse traçante, jaune à l'intérieur, porte de longues racines adventives. Ses feuilles sont imparipennées, avec de neuf à dix-sept folioles, parfois visqueuses en dessous ou bien glabres. Les fleurs, bleuâtres ou violacées, constituent des grappes axillaires. Les fruits sont des gousses oblongues, comprimées et bosselées, qui renferment de trois à cinq graines lenticulaires et brunes. La plante ne fleurit guère en culture ; elles est propagée par boutures de rhizomes, mais les réglisses sauvages sont aussi très exploitées.

On trouve fréquemment, dans les bosquets ou sur les rochers d'Europe centro-méridionale et d'une grande partie de la France, le baguenaudier *(Colutea arborescens)* qui se rencontre aussi en région méditerranéenne et en Asie Mineure. Il existe une vingtaine d'espèces de *Colutea*, qui sont des arbustes à fleurs en grappes axillaires et à gousses très renflées dont les parois sont minces et parcheminées. Ces fruits sont indéhiscents ou ne s'ouvrent que près du sommet. On cultive souvent le baguenaudier pour l'ornement.

Les *Wisteria (Wistaria)* ou glycines sont des arbustes volubiles d'Extrême-Orient et d'Amérique du Nord, dont les inflorescences sont terminales. La glycine la plus commune est *W. sinensis* de Chine, à fleurs violacées paraissant en avril-mai et de nouveau à la fin de l'été. *W. floribunda*, du Japon, est plus décoratif encore ; ses inflorescences atteignent 1,50 m de long (var. *macrobotrys*). Il est plus rustique que l'espèce précédente et pourtant moins répandu.

Le genre *Indigofera*, qui comporte cinq cents espèces, appartient à un groupe d'Astragalées dont les connectifs des étamines sont apiculés. Il est pantropical, mais spécialement africain. *I. tinctoria* ou indigotier, sans doute originaire d'Afrique, *I. arrecta*, qui en provient aussi, et *I. suffruticosa (I. anil)*, d'Amérique tropicale, sont les principaux producteurs d'indigo, avec diverses autres Légumineuses et quelques autres plantes (*Isatis*, etc.). Ils sont cultivés dans les régions tropicales. L'indigo se

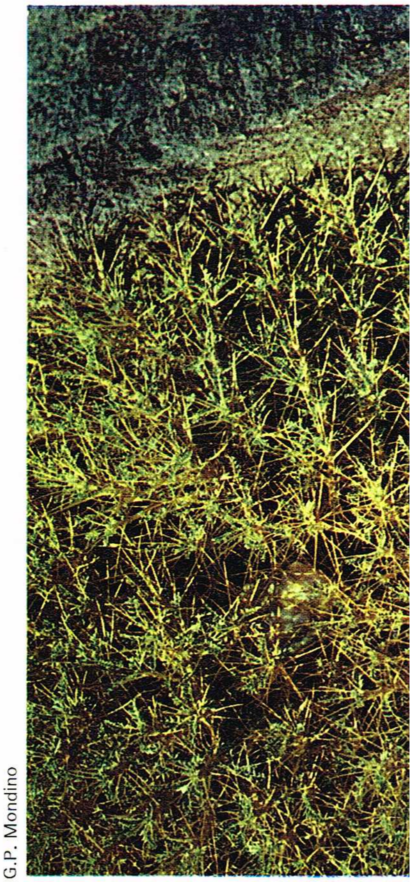

G.P. Mondino

▲ *Coussinet épineux d'*Astragalus tragacantha*, espèce qui vit en Europe méridionale.*

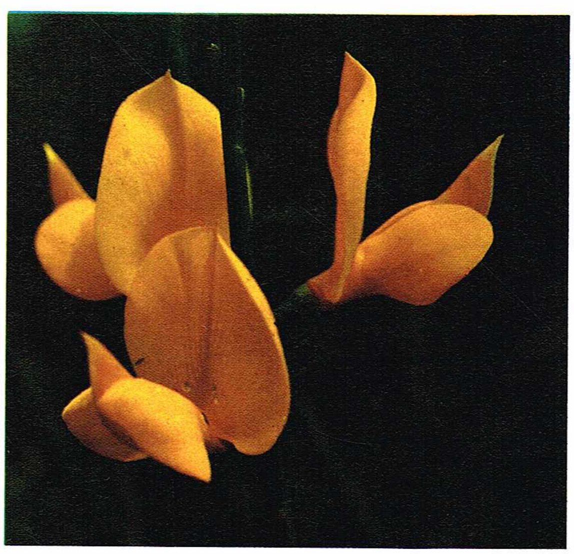

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◄ *Fleurs de genêt d'Espagne* (Spartium junceum).

▲ ***Grappes de fleurs et de gousses de glycine*** **(Wistaria sinensis).**

forme par fermentation des feuilles puis agitation au contact de l'air. Il provient de la décomposition d'un héréroside, l'indican, et de l'oxydation et de la dimérisation de son aglycone. L'industrie synthétise cette teinture et a beaucoup fait régresser la culture de l'indigotier. *I. tinctoria* est une herbe bisannuelle non ramifiée, atteignant 2 m. Les fleurs sont en inflorescences axillaires. D'autres espèces sont cultivées pour l'ornement, notamment *I. gerardiana*, qui est arbustif.

Les *Amorpha* sont des arbustes d'Amérique du Nord à feuilles imparipennées et à étamines apiculées, dont la fleur ne possède ni ailes ni carène. *A. fruticosa*, du sud-est des États-Unis, a été introduit en Europe en 1724 ; il possède des fleurs violettes et s'est fréquemment naturalisé.

La tribu des Lotées est constituée de plantes à feuilles imparipennées ou digitées dont les folioles sont entières ; les fleurs, en ombelles ou en capitules, ont un androcée le plus souvent diadelphe (étamines à filets soudés, la supérieure étant libre).

Le genre *Lotus* comprend cent cinquante plantes herbacées des régions tempérées, surtout d'Eurasie et de la région méditerranéenne. L'espèce la plus connue est le pied-de-poule *(Lotus corniculatus)*, d'Eurasie tempérée et du nord de l'Afrique jusqu'à l'Éthiopie, qui croît jusqu'à 2 500 m d'altitude dans les lieux arides et sablonneux. On le cultive comme fourrage. Ses feuilles sont trifoliolées en apparence, mais leurs deux grandes stipules sont en fait une paire de folioles (pseudo-stipules) et les vraies stipules sont minuscules et situées en dessous d'elles. Les fleurs, jaunes, sont groupées par trois à six en ombelles longuement pédonculées. Chez *L. uliginosus*, qui occupe les sols humides ou marécageux de la moitié ouest de l'Europe et de l'Afrique du Nord, elles sont en têtes fournies de six à douze.

Le genre *Anthyllis* comprend de cinquante à soixante-dix espèces herbacées ou suffrutescentes de la région méditerranéenne et d'Asie Mineure, avec une espèce en Éthiopie, et quelques-unes en Europe centrale, occidentale et même orientale. Les dix étamines peuvent avoir leurs filets unis en tube, ou bien celui de l'étamine supérieure est libre dans sa moitié supérieure. La vulnéraire *(A. vulneraria)* est une herbe annuelle ou vivace, diversement velue, qui atteint 60 cm de haut et a des fleurs jaunes, rougeâtres ou blanches, à calice velu et renflé, rassemblées en capitules pédonculés. Les feuilles sont imparipennées, à folioles très inégales, la terminale étant beaucoup plus grande et parfois la seule existante. Il s'agit en fait d'un groupe d'espèces voisines difficiles à distinguer. Comme leur nom l'indique, ces plantes servaient naguère à soigner les plaies. Résistantes à la sécheresse et au froid, elles sont cultivées comme fourrage. L'ensemble des espèces du groupe est répandu dans toute l'Europe.

La tribu des Coronillées (Hédysarées) est constituée de plantes à feuilles imparipennées, rarement paripennées, avec plus de trois folioles entières, et qui possèdent des gousses lomentacées. L'androcée est généralement diadelphe (neuf étamines unies et une libre).

Le genre *Arachis* comprend une douzaine d'espèces des régions tropicales d'Amérique du Sud. L'arachide *(A. hypogea)*, plante herbacée probablement brésilienne, a été répandue par la culture dans tous les pays tropicaux et subtropicaux, mais aussi en Europe méridionale. Elle est annuelle. Les feuilles ont deux paires de folioles. Les fleurs sont sessiles, en grappes axillaires et ont un long tube floral qui porte le périanthe et l'androcée. De plus, après la fécondation, la région inférieure de l'ovaire s'allonge et amène le fruit sous terre, où ce dernier mûrit (géocarpie). Les fruits (cacahuètes) ont une coque indéhiscente qui renferme de une à trois graines de couleur rose ou rouge, riches en huile. Ces graines sont consommées crues ou bien torréfiées, salées ou non ; on en tire par pression l'huile d'arachide.

Le sainfoin ou esparcette *(Onobrychis viciifolia = O. sativa)* est une plante fourragère qu'on reconnaît à ses fleurs roses striées de rouge disposées en épis à l'aisselle des feuilles imparipennées. Ses fruits sont de courtes gousses indéhiscentes à une à trois graines et à faces et sutures tuberculeuses. Son origine est assez douteuse. Il est probablement indigène dans le sud et l'est de l'Europe. Il y a en Eurasie et en Afrique du Nord environ cent soixante-dix espèces de sainfoins.

La tribu des Trifoliées comprend des plantes à feuilles trifoliolées et à marge des folioles dentée. L'androcée est diadelphe (neuf étamines unies et une libre). Le fruit est indéhiscent. Il s'agit le plus souvent d'herbes.

▶ ***Deux Légumineuses cultivées pour le fourrage : à gauche, le pied-de-poule*** **(Lotus corniculatus),** ***et, à droite, le sainfoin ou esparcette*** **(Onobrychis viciifolia).**

E.P.S.

▲ ***Arbre de Judée en fleur*** **(Cercis siliquastrum).**

Le genre *Medicago* comporte cent dix espèces, d'Afrique du Nord et du Sud et d'Asie occidentale. La luzerne cultivée *(M. sativa)* est une plante fourragère vivace très commune. Elle possède des feuilles composées de trois folioles ovales, linéaires et glabrescentes. Ses fleurs forment des grappes assez courtes et pédonculées ; elles sont bleuâtres ou violacées, à corolle caduque et éclosent de juin à septembre. Son fruit est une gousse non épineuse, spiralée (comme chez la plupart des luzernes), qui s'enroule ici selon deux ou trois tours de spire. C'est la plante fourragère la plus anciennement connue. Elle semble provenir du sud de la Russie et d'Asie centrale et est naturalisée partout. Elle s'hybride souvent avec *M. falcata,* qui a des gousses seulement courbées. La lupuline ou minette *(M. lupulina)* est annuelle; elle a des fleurs jaunes (de une à cinq sur de courts pédoncules). Ses gousses décrivent de trois à cinq tours de spire et sont épineuses. Elle fait aussi partie des plantes fourragères.

Toujours parmi ces dernières, on utilise occasionnellement au moins deux espèces de mélilots *(Melilotus)* : le mélilot officinal *(M. officinalis)* et le mélilot blanc *(M. alba)*, communs sous les climats tempérés. Le premier s'élève jusqu'à l'étage alpin. Il est bisannuel et possède des grappes de fleurs jaunes, longuement pédonculées et dépassant la feuille axillaire, parfumées à l'état sec, de même que toute la plante, à cause de la présence d'un hétéroside qui libère de la coumarine. Le second ne s'élève pas dans les montagnes ; il est annuel ou bisannuel et possède des fleurs blanches également en longues grappes pédonculées axillaires. Les fleurs des deux espèces sont riches en nectar et recherchées par les abeilles. Les fruits sont dans les deux cas des gousses indéhiscentes, très courtes, à une ou deux graines, côtelées transversalement dans le premier, réticulées dans le second. Ces deux espèces sont des plantes d'Eurasie, atteignant l'Inde ou la Chine vers l'est. L'entassement des mélilots mal séchés conduit à la production de dicoumarol, anticoagulant capable de provoquer des hémorragies graves chez le bétail. Ce phénomène a été à l'origine de la découverte de l'action anticoagulante des composés dicoumariniques, maintenant très utilisés.

On compte parmi les plantes fourragères les plus importantes de nombreuses espèces de trèfles ou *Trifolium*, dont le nom est dû à l'existence de feuilles composées de trois folioles. Les inflorescences des trèfles sont en épis courts ou en capitules et sont constituées par des fleurs étroitement serrées les unes contre les autres. Les pétales sont soudés en tube à la base et ce tube est lui-

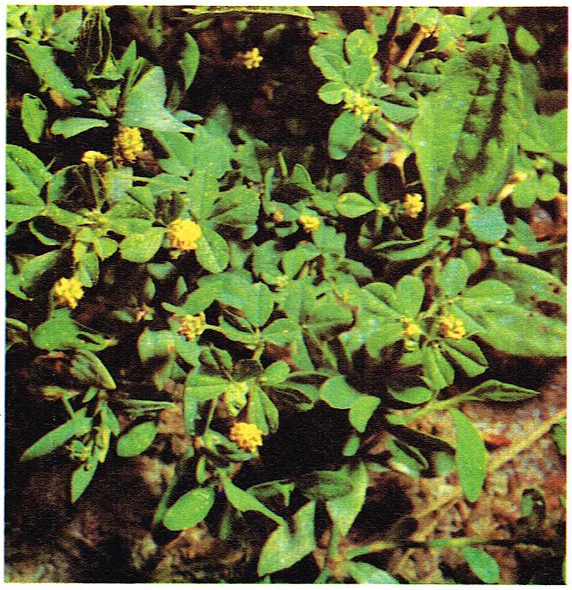

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▼ ***A gauche : la lupuline ou minette*** **(Medicago lupulina).** ***A droite : la luzerne cultivée*** **(Medicago sativa).**

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Capitule de fleurs de trèfles des prés* (Trifolium pratense), *à gauche, et de* Trifolium ochroleucum, *à droite.***

▼ ***Les gousses de fève* (Vicia faba) *peuvent atteindre 20 cm de longueur; les graines et éventuellement la gousse très jeune sont consommées.***

M. Pedone

même uni inférieurement à la base du tube staminal. La corolle persiste souvent au moment de la fructification en se flétrissant (corolle marcescente). La gousse est courte et contient de une à quatre graines. Elle est indéhiscente ou bien se fend ventralement (c'est en fait un follicule) ou s'ouvre par un couvercle (pyxide). On trouve ces plantes partout, de la plaine jusqu'à 3 000 m d'altitude, dans les lieux herbeux, boisés ou incultes, sur sols acides et basiques. Ce sont des plantes mellifères, visitées par les abeilles et les bourdons. Elles se rencontrent surtout dans les régions tempérées et subtropicales de l'hémisphère Nord. Il y a environ trois cents espèces de trèfles. Le trèfle des prés *(T. pratense)*, plante velue, a des fleurs de différentes teintes rouges réunies en capitule entouré de deux feuilles. C'est un excellent fourrage frais. *T. ochroleucum* lui ressemble beaucoup, mais ses fleurs sont jaunâtres. On cultive également le trèfle blanc *(T. repens)*, glabre et dont les fleurs blanc rosé sont groupées en capitules longuement pédonculés. On utilise encore le trèfle incarnat ou farouch *(T. incarnatum)*, dont les épis allongés sont rouge sang (la sous-espèce sauvage *molinerii* a des fleurs jaunâtres ou roses). Le trèfle jaune *(T. campestre)*, à petits capitules de fleurs jaune d'or, à étendard bombé et strié, est aussi une bonne pâture.

Dans la tribu des Ononidées, les dix étamines ont leur filet uni en tube, la gousse est déhiscente, les feuilles sont généralement à trois folioles, celles-ci à marges dentées ou doublement dentées. Il n'y a qu'un seul genre. Les *Ononis* (bugranes) se rencontrent dans les lieux secs, des îles Canaries à la Mongolie et de l'Europe centrale à l'Éthiopie. Ce sont des herbes ou des arbustes. Ils sont environ soixante-quinze. L'arrête-bœuf *(O. repens)* est un buisson un peu épineux, velu-glanduleux, atteignant 60 cm, à fleurs roses. *O. spinosa* est très proche du précédent, mais a une tige velue seulement sur deux lignes et est très épineux. La racine de l'arrête-bœuf a des propriétés diurétiques.

La tribu des Fabées (Viciées) est constituée d'herbes à feuilles paripennées avec une pointe, une cirre ou une vrille terminale. L'androcée est diadelphe. La tribu doit son nom au genre *Vicia* (vesces), qui groupe de cent cinquante à deux cents espèces des régions tempérées, surtout de l'hémisphère Nord. La fève *(V. faba)* est annuelle, glabrescente et glauque; elle atteint 80 cm et possède des feuilles qui ont de une à trois paires de folioles avec une pointe terminale au rachis. Ses fleurs axillaires, par groupes de deux à quatre, très brièvement pédonculées, sont blanches avec des taches noires sur les ailes. Les gousses, atteignant 20 cm et revêtues à l'intérieur d'une couche laineuse blanchâtre, sont noires à la maturité et contiennent de trois à huit grosses graines réniformes, verdâtres, qui sont consommées comme les haricots, dont elles ont la plupart des propriétés. La fève est inconnue à l'état sauvage et son origine est douteuse (Asie du Sud-Ouest, Afrique du Nord). La vesce *(V. sativa)* est cultivée comme fourrage pour les Animaux domestiques, et ses graines servent à la nourriture des Oiseaux sans qu'il faille en abuser. Des substances toxiques aminées se rencontrent en effet chez quelques vesces, comme chez les gesses.

Les espèces du genre *Lathyrus*, ou gesses, sont au nombre d'environ cent soixante et sont surtout des plantes de l'hémisphère Nord. Elles sont très comparables aux vesces, mais leurs folioles ont généralement des nervures parallèles et sont peu nombreuses; leur tige est souvent ailée et leur style est pubescent. La place de diverses espèces dans un genre ou l'autre n'est pas toujours évidente : on pourrait envisager des espèces de vesces à style pubescent, de la même façon qu'on admet des gesses à tiges non ailées et à folioles non parallélinerves. La gesse des prés *(L. pratensis)* est vivace, pubescente, à feuilles munies de deux folioles et à fleurs jaunes, avec un étendard veiné de violet, en grappes de quatre à dix. Elle fleurit de mai à août; c'est une bonne plante fourragère d'Europe, d'Afrique du Nord et d'Asie. La gesse *(L. sativus)*, à feuilles à deux folioles et fleurs solitaires, blanches, roses ou bleuâtres, donne des graines qui sont utilisées comme les petits pois; leur farine peut être mêlée à celle du blé, mais ces graines contiennent diverses substances aminées qui peuvent provoquer des phénomènes de paralysie (lathyrisme) fréquents en Inde. La gesse provient probablement d'Asie Mineure. *L. odoratus*, du sud de l'Italie et de Sicile, est le pois de senteur, cultivé sous de nombreuses variétés. *L. latifolius*, à larges folioles, tige très largement ailée et grandes fleurs rose vif en grappes de huit à quinze, est une grande gesse vivace cultivée dans les jardins.

Dans le genre *Lens*, à la différence des vesces, les dents du calice sont égales et au moins deux fois plus longues que son tube. Il n'y a que six espèces de la région méditerranéenne et d'Asie occidentale. La lentille *(L. culinaris)* est connue et cultivée depuis des millénaires. C'est une plante annuelle, pubescente, à feuilles se terminant en vrille simple ou bifide. Elle a de petites fleurs blanc bleuâtre. Ses légumes contiennent deux graines discoïdales. Son origine n'est pas connue. Une espèce voisine, *L. nigricans*, n'a pas de vrilles, mais un court mucron.

Le pois chiche *(Cicer arietinum)* est cultivé depuis l'Antiquité. C'est une plante annuelle atteignant 40 cm, velue-glanduleuse, à feuilles imparipennées et folioles dentées. Les vrilles terminales des *Vicia* sont ici remplacées par des folioles qui en sont les homologues. Les fleurs rougeâtres, bleuâtres ou blanches, sont solitaires et pédonculées. Les gousses, gonflées, ovoïdes, velues et pendantes, contiennent une ou deux graines ovoïdes-coniques et ridées. Il est peut-être originaire du sud-ouest de l'Asie et est cultivé aujourd'hui pour ses graines qui, cuites, sont un bon élément énergétique. Il existe une vingtaine d'espèces de *Cicer*.

Le genre *Pisum* comprend six ou sept espèces, dont le pois *(Pisum sativum)*, plante herbacée annuelle, dressée ou prostrée, à feuilles se terminant par des vrilles rameuses et à grandes stipules dentées inférieurement. Les fleurs, blanc bleuâtre avec des ailes pourpres, sont solitaires ou géminées et portées par des pédoncules axillaires de la longueur des stipules de la feuille axillante. Les gousses subcylindriques contiennent des graines globuleuses. La culture du pois peut se faire en alternance, par exemple après le blé. Les variétés peuvent être réparties en groupes (« convariétés »). La convar. *sativum* correspond aux pois à écosser à graines lisses, nains ou grimpants; la convar. *medullare* rassemble les variétés naines ou à rames, à écosser, mais à graines ridées; la convar. *axiphium* groupe les variétés « mange-tout », naines ou à rames, dont on consomme la totalité de la gousse, qui n'a pas de couche fibreuse interne; enfin, la convar. *speciosum* renferme des variétés à graines marbrées de brun, de forme anguleuse, plus ou moins cubique, qui ne sont guère utilisées que comme fourrage, mais représentent peut-être la souche des pois cultivés.

Les pois, riches en glucides (60 %) et en protéines (24 %), sont consommés frais avant la maturité ou séchés après celle-ci : ce sont alors les pois cassés.

La tribu des Phaséolées présente des feuilles généralement à trois folioles et presque toujours dotées de stipules et de stipelles, qui sont des stipules foliolaires. L'androcée est généralement diadelphe. Ce sont la plupart du temps

des plantes volubiles, herbacées ou arbustives. A cette tribu appartiennent les deux cents espèces de haricots *(Phaseolus)*, qui sont surtout américaines. Le haricot commun *(P. vulgaris)*, plante grimpante, a des fleurs blanches ou rougeâtres, réunies en grappes axillaires lâches, dont le pédoncule est noueux à la base. La carène, comme dans tout le genre, est prolongée en un bec spiralé. Les gousses contiennent des graines réniformes, blanches, jaunes, rougeâtres, violettes ou marbrées. Il existe une variété *nanus*, non grimpante. Originaire de l'ouest de l'Amérique du Sud et d'Amérique centrale, le haricot a été introduit en Europe au XVIe siècle. Les graines, riches en glucides (amidon) et en protéines, sont consommées cuites, fraîches ou après dessiccation. Il existe des haricots « mange-tout » dont la gousse non mûre est comestible (elle est peu fibreuse à l'intérieur). Récoltées longtemps avant la maturité, les gousses sont les « haricots verts ». Le haricot d'Espagne *(P. coccineus = P. multiflorus)* est bien moins apprécié que le précédent, mais ses gousses peuvent être consommées très jeunes. Il est vivace, a des fleurs écarlates en grappes fournies et est fréquemment cultivé pour l'ornement. Il provient sans doute d'Amérique centrale.

Nous citerons encore dans cette tribu la fève de Calabar *(Physostigma venenosum)*, de l'ouest de l'Afrique tropicale, liane dont les graines fournissent l'ésérine, alcaloïde anticholinestérasique utilisé surtout dans le traitement du glaucome.

La même tribu comprend aussi le genre *Glycine* dont les pédoncules inflorescentiels ne sont pas noueux. *G. hispida* est le soja. C'est une plante annuelle volubile, à tiges velues, à feuilles trifoliolées et à petites fleurs en grappes pauciflores, violacées ou jaunâtres. Les gousses contiennent de deux à cinq graines globuleuses, souvent séparées les unes des autres par des étranglements. Ces graines sont spécialement riches en protéines — dont une caséine proche de celle du lait de vache — en matières grasses et divers sels minéraux; on en tire par pression une huile utilisée en alimentation et dans l'industrie. Le soja est une plante d'adaptation facile. Il est cultivé jusqu'à 60° de latitude nord, parce qu'il enrichit le sol en azote, grâce aux nodosités de ses racines. Il n'a pu pourtant être acclimaté en France. On se sert des plantules comme légumes. On consomme les graines en nature. On recueille pour l'alimentation animale un tourteau riche en protéines après extraction de leur huile. En écrasant les graines dans l'eau, on obtient une sorte de lait, qui, en milieu salin, laisse coaguler les protéines (fromage de soja). Par fermentation en présence d'un Champignon, *Aspergillus orizae*, le lait donne de la sauce de soja, condiment très apprécié en Extrême-Orient. On fait aussi avec les graines une farine qui ressemble à celle du blé, mais est protéique et précieuse pour compléter les régimes déficients en protéines et confectionner des pains pour diabétiques, sans avoir les inconvénients de la farine de lupin. Originaire de Chine, de l'Inde et de la région du fleuve Amour, le soja a été répandu dans tous les pays chauds.

La tribu des Dalbergiées renferme des plantes dont les dix étamines sont généralement soudées et dont les fruits sont indéhiscents. Les feuilles sont imparipennées. Cette tribu comporte notamment les deux cents espèces du genre *Dalbergia*, pantropical, qui a des fruits ailés. Ce sont des arbres dont le bois est très recherché. *D. cochinchinensis* fournit ainsi un bois dur de la couleur de l'ébène. *D. latifolia*, de l'Inde et de Java, donne le palissandre de l'Inde, dont on fait des meubles, des instruments de musique, etc. *D. nigra*, du Brésil, fournit le palissandre du Brésil, de couleur variant du brun au violet, à parfum rappelant celui de la rose, et très apprécié. On utilise aussi, pour des objets de luxe, le bois de *D. retusa* ou *palo negro*, du Nicaragua, et celui de *D. melanoxylon*, ou ébène du Sénégal. En outre, un bois nommé santal rouge est fourni par le *Pterocarpus santalinus* de l'Inde. Un autre *Pterocarpus (P. ulei)*, du Brésil et du Pérou, est myrmécophile et les fourmis s'installent dans les axes évidés de ses inflorescences. Enfin, *Dipteryx odorata*, du Brésil, de la Guyane et du Venezuela, à fruit drupacé uniséminé, fournit ses graines (fèves Tonka) riches en coumarine. Cette dernière est utilisée notamment pour parfumer le tabac.

Dans la sous-famille des *Césalpinioïdées*, les fleurs n'ont pas d'étendard et le pétale correspondant est recouvert par les pétales voisins. Il n'y a pas formation de carène, et des avortements diminuent fréquemment le nombre d'étamines ou de pétales. Le réceptacle floral est souvent déformé.

Dans une première tribu (Césalpinées), les feuilles sont au moins deux fois pennées, et, le plus souvent, les fleurs sont complètes.

Des deux espèces d'*Haematoxylon*, des régions chaudes d'Amérique, *H. campechianum*, qui vit du sud du Mexique au nord de l'Amérique du Sud, donne le bois de campêche, qui fournit l'hématoxyline, colorant jaune très utilisé en histologie, pour la teinture des étoffes et la fabrication d'encres. Les *Haematoxylon* ont des feuilles simplement pennées, et leur fruit s'ouvre suivant des lignes longitudinales occupant le milieu des parois latérales de la gousse.

Chez les Cassiées, il y a souvent réduction des pétales et des étamines; de plus, celles-ci s'ouvrent en général par des pores apicaux.

Le genre *Ceratonia* ne comporte que *C. siliqua* ou caroubier, de l'est de la région méditerranéenne et de l'Arabie. C'est un arbre toujours vert, ayant une grande longévité et à branches de couleur brune, dont les feuilles simplement paripennées possèdent des folioles larges, échancrées au sommet et coriaces. Les fleurs sont apétales, à calice rouge, réunies en grappes axillaires dressées. Il n'y a que cinq étamines opposées aux sépales (verticille staminal externe). Les fruits sont des gousses épaisses et coriaces, indéhiscentes, pulpeuses, contenant de douze à seize graines ou carats, qui servaient jadis à peser l'or. Les fruits (caroubes) sont comestibles et sont utilisés pour l'alimentation des bestiaux. La pulpe fournit aussi un sirop, tandis que les graines contiennent un mucilage qui peut remplacer la gomme adragante. L'arbre, peu exigeant, est souvent cultivé dans la région méditerranéenne. Sa silhouette dense le fait utiliser pour l'ombrage des allées et des avenues.

Le genre *Cassia* comprend cinq cents espèces tropicales et subtropicales, surtout d'Amérique. *C. senna (C. acutifolia)* et *C. angustifolia*, africains et indiens, à fleurs jaunes, habitant les régions subdésertiques, donnent les gousses et les folioles de séné, à propriétés laxatives et purgatives dues à des hétérosides apparentés à ceux de la rhubarbe. Des substances voisines se trouvent dans la pulpe des grandes gousses indéhiscentes cloisonnées

S.E.F.

▲ ***Culture de haricots communs*** **(Phaseolus vulgaris).**

▼ ***Chez la fève*** **(Vicia faba),** ***les fleurs présentent des taches noires sur les ailes.***

M. Pedone

M. et S. Prato

transversalement de *C. fistula*, ou casses, qui atteignent 60 cm de long. Cette pulpe est un laxatif doux. *C. floribunda*, du Mexique, est un arbuste souvent cultivé pour l'ornement.

Chez les Bauhiniées, les feuilles sont simples ou bilobées, occasionnellement à deux folioles. L'androcée est souvent réduit. Le genre *Cercis* possède sept espèces dans la région méditerranéenne, l'Asie occidentale et l'Amérique du Nord. Il a encore dix étamines. *C. siliquastrum* ou arbre de Judée vit dans le nord-est de la région méditerranéenne et en Asie Mineure et occidentale. Il n'est pas indigène en France. C'est un petit arbre de 3 à 6 m, flexueux, à feuilles arrondies, en cœur à la base, qui porte au printemps des bouquets de fleurs roses sur le vieux bois (cauliflorie), par développement de bourgeons restés latents depuis la précédente floraison et qui fournissent ensuite des gousses très plates, brun rougeâtre, de 10 cm de long environ. Le genre *Bauhinia* comporte deux cent cinquante espèces tropicales, qui sont souvent des lianes. Dans ce cas, la tige est aplatie et éventuellement ondulée tranversalement d'une façon régulière, en « escaliers de singes » qui ont quelquefois 40 cm de large. Les feuilles sont simples ou bilobées; l'androcée est souvent réduit (parfois à une seule étamine).

Le genre *Krameria*, qui renferme vingt espèces ligneuses ou herbacées vivaces américaines, est considéré comme le seul représentant de la famille des *Kramériacées (Krameriaceae)*. Les fleurs sont zygomorphes et pentamères; sépales et pétales sont libres ou unis et les deux pétales antérieurs sont transformés en écailles glanduleuses massives. Il y a quatre étamines alternant avec les pétales postérieurs. Le carpelle unique biovulé donne un akène uniséminé. *K. triandra*, qui, par exception, n'a que trois étamines, est le ratanhia des Andes, du Pérou et de Bolivie. Il fournit sa racine riche en tanin et par conséquent astringente. Les Kramériacées ont été considérées comme des Légumineuses, mais rapprochées aussi des Polygalacées.

La salicaire (Lythrum salicaria) est très répandue dans les endroits humides : fossés, bords des cours d'eau. A droite : inflorescence de salicaire.

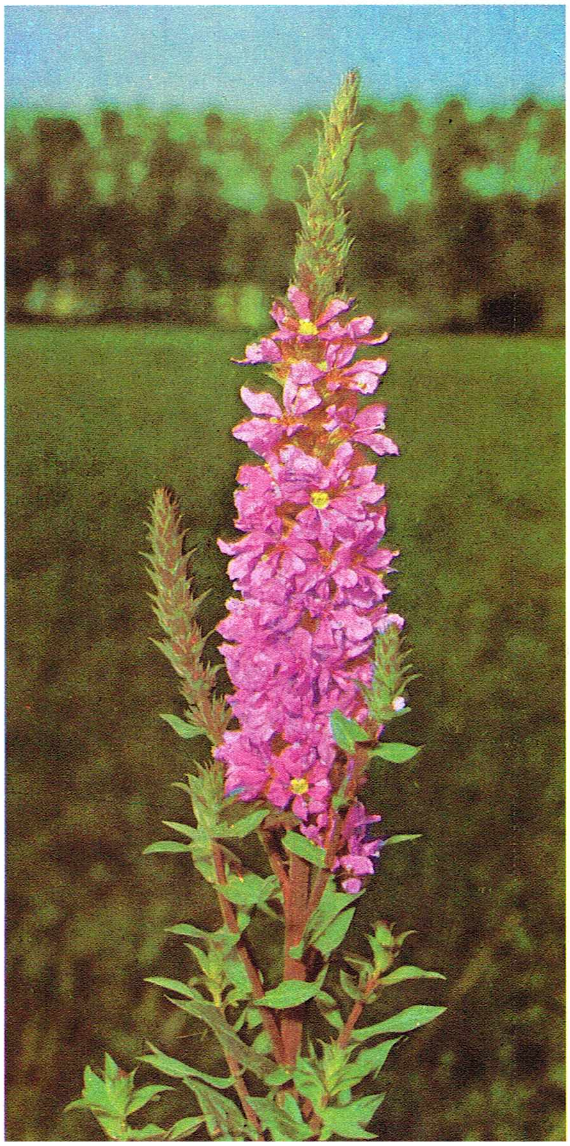

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Myrtales

Les Myrtales comprennent des plantes généralement ligneuses, souvent à liber interne, à fleurs actinomorphes, à calice et corolle, et qui sont hermaphrodites. Il y a rarement des fleurs zygomorphes, ou à périanthe simple, ou encore unisexuées. Le calice et la corolle sont généralement tétramères ou pentamères, parfois hexamères, heptamères ou octomères. Les étamines sont en nombre égal, double ou inférieur par rapport à celui des pétales, ou bien plus abondantes par multiplication secondaire. Les carpelles sont en nombre égal ou inférieur à celui des pétales. L'ovaire est syncarpe et très généralement infère avec de nombreux ovules, parfois supère, mais la fleur est alors périgyne et l'ovaire est libre au fond d'un tube floral. Il y a un seul style, avec un stigmate simple.

Cet ordre a indubitablement des affinités avec celui des Rosales, mais la syncarpie y est plus profonde (style simple) et plus générale, et le caractère infère de l'ovaire est plus répandu. Il est sûrement plus évolué. La position des Hippuridacées, placées ici en annexe, est douteuse. On peut en faire un ordre spécial (Hippuridales).

La famille des *Lythracées (Lythraceae)* groupe vingt-deux genres et cinq cents espèces de plantes cosmopolites, mais plus nombreuses en Amérique tropicale, où il existe des représentants qui sont des arbustes ou des arbrisseaux; dans les zones tempérées, ce sont essentiellement des herbes ou des sous-arbrisseaux. Les fleurs, dont les pétales manquent rarement, sont tétra-, hexa- ou octomères, actinomorphes ou zygomorphes. Il y a généralement un tube floral allongé portant sur son bord les sépales fréquemment stipulés et les pétales. Les étamines, souvent en deux cycles, parfois réduites ou multipliées secondairement, sont insérées sur la paroi interne du tube. L'ovaire syncarpe, supère, est constitué de deux carpelles, parfois plus; la placentation est axile et les ovules généralement nombreux (il y en a cependant quelquefois seulement deux par loge). Le fruit est une capsule qui peut être indéhiscente et contient des graines souvent ailées.

Les salicaires *(Lythrum)* appartiennent à la tribu des Lythrées, où la placentation devient pariétale en haut de l'ovaire : la région symplicquée de l'ovaire est bien déve-

loppée et fertile. Elles sont au nombre d'une trentaine, dont six en France dans les lieux humides ou inondés. La salicaire commune *(L. salicaria)* est vivace et haute de 50 cm à 1 m. Sa tige plus ou moins velue a de quatre à six angles. Ses feuilles sont ovales-lancéolées, aiguës, à base cordée, verticillées par trois ; les supérieures sont alternes. Les fleurs rouge-violet sont trimorphes (il en existe de longistyles, de mésostyles et de brévistyles) et réunies en faisceaux cymeux (« verticillastres ») formant dans l'ensemble une grappe spiciforme ; elles ont un calice à douze dents disposées en deux séries : les six sépales unissent leurs stipules deux par deux en six dents externes alternes avec eux (calicule) ; la corolle est formée de six pétales pourprés ; il y a douze étamines en deux cycles insérés au fond du tube, les externes étant en général plus longues. La longueur des deux cycles est en relation avec celle du style. L'ovaire est biloculaire et possède de nombreux ovules. Le style est terminé par un stigmate capité. Les fruits sont des capsules entourées du tube floral. On trouve cette espèce le long des cours d'eau, dans les lieux humides, du niveau de la mer au bas des montagnes ; elle fleurit de juin à septembre. Comme elle contient des tanins, on peut en utiliser l'extrait comme antidiarrhéique et cicatrisant. Ses feuilles peuvent être mangées cuites. La salicaire est répandue en Eurasie et en Afrique du Nord.

Les *Lagerstroemia* appartiennent à la tribu des Nesséées, dont l'ovaire n'a pas de région symplíquée bien développée et fertile : la placentation y est axile, même supérieurement. Ils comprennent trente espèces originaires d'Extrême-Orient, d'Indo-Malaisie et d'Australie. Chez eux, le verticille interne de l'androcée s'est multiplié secondairement. *Lagerstroemia indica*, d'Asie orientale et du nord-ouest de l'Australie, est un arbuste ou un arbre haut de 5 à 8 m, à feuilles elliptiques, vert foncé à la face supérieure, plus claires à la face inférieure ; les fleurs hexamères, de 3 à 4 cm de large, sont rose foncé, réunies en panicules terminales ou axillaires et paraissent en juillet et en août. C'est le lilas d'été, souvent planté.

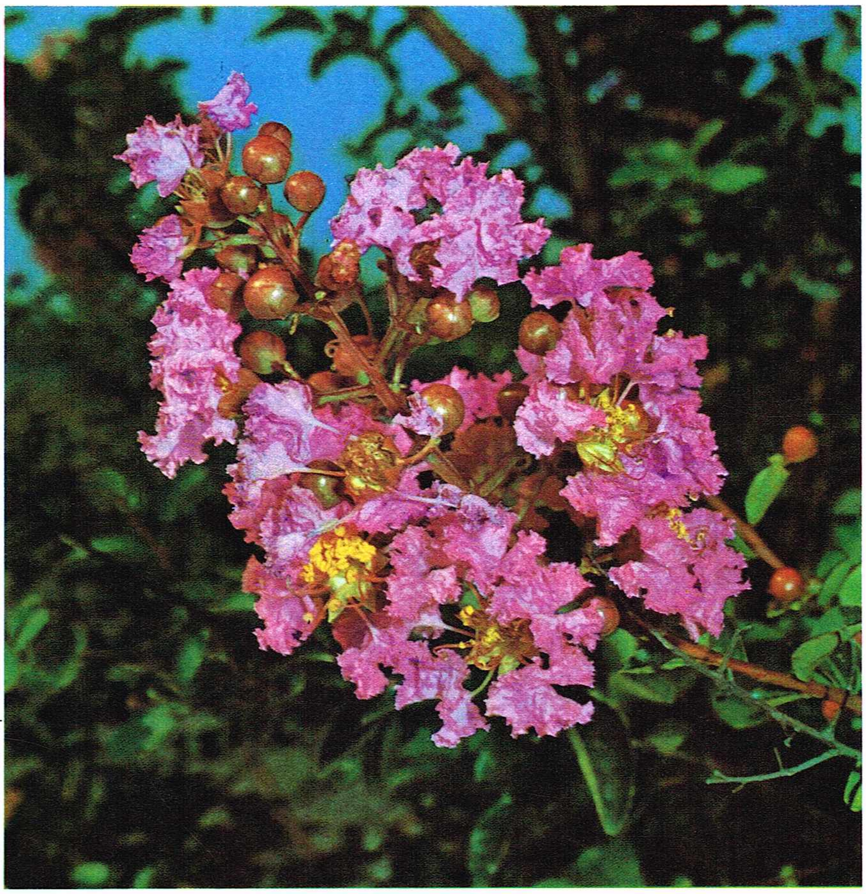

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Rameau fleuri de* Lagerstroemia indica.**

▼ ***Un aspect de la mangrove où l'on voit les racines laissées à découvert par la baisse du niveau des eaux.***

La famille des *Trapacées (Trapaceae)* ne comporte que le genre *Trapa*, rapporté aussi aux Onagracées. Il s'agit de plantes aquatiques annuelles dont la tige peut atteindre 3 m de long, ancrées dans la vase par leurs racines. La tige, qui se termine par une rosette de feuilles flottantes, porte des feuilles submergées caduques et lancéolées ; aux nœuds s'insèrent des racines adventives chlorophylliennes, régulièrement ramifiées de façon pennée. Les fleurs sont tétramères, à étamines insérées sur le réceptacle et alternes avec les pétales. L'ovaire est infère, à deux loges uniovulées. Le fruit est un volumineux akène (châtaigne d'eau). L'embryon a deux cotylédons inégaux. Le plus volumineux reste dans la graine, elle-même demeurée dans le fruit lors de la germination, mais son pétiole s'allonge beaucoup et permet la sortie de la plantule. Il y a trois espèces de *Trapa* ou peut-être plus ; la morphologie florale (insertion des étamines sur le réceptacle, ovaire supère) et l'embryologie les rapprochent des Lythracées plutôt que des Onagracées.

Les *Sonnératiacées (Sonneratiaceae)* comptent deux genres et sept espèces de plantes d'Afrique orientale, d'Indo-Malaisie et du nord-est de l'Australie. Les *Sonneratia* vivent dans les mangroves, couvrant les zones tropicales vaseuses le long des côtes et de l'embouchure des fleuves. Ils ont des pneumatophores, qui sont des racines à géotropisme négatif susceptibles de faciliter la respiration des autres racines plongées dans un sol souvent asphyxique. Les fruits de *S. caseolaris* et *S. alba* sont comestibles. Par leur ovaire à demi infère, les Sonnératiacées se rapprochent des Lythracées.

La famille des *Rhizophoracées (Rhizophoraceae)* comprend seize genres renfermant cent vingt espèces environ. L'ovaire est généralement infère, à placentation axile ou pariétale, avec deux à six carpelles. Les ovules souvent nombreux ont leurs téguments soudés en un seul. Un unique ovule par loge ou par fruit devient une graine, et le fruit est la plupart du temps une baie. Le genre *Rhizophora* comprend huit espèces de palétuviers, arbres que l'on trouve aussi dans les mangroves et qui possèdent des racines adventives puissantes servant à la consolidation de l'assise de la plante et à sa respiration.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Fruit appendiculé de la châtaigne d'eau* (Trapa natans).

▶ *Détail d'une inflorescence de Myrtacée :* Callistemon speciosus.

Des excroissances racinaires servent à la respiration chez les *Brugiera*. On observe dans ces deux genres et quelques autres le phénomène de viviparie par lequel la graine unique du fruit germe en place tandis que le fruit est encore attaché à la plante mère. L'hypocotyle très développé, long parfois de 1 m, fait protrusion ainsi que la radicule qui le termine. Il se sépare des cotylédons restés dans la graine et tombe, emportant la plumule. L'enracinement se fait ainsi plus facilement dans la vase. On utilise l'écorce de certaines Rhizophoracées pour sa richesse en tanin *(R. mucronata, R. apiculata)* ; le bois très durable d'autres espèces *(R. mangle)* est fort apprécié.

La famille des *Lécythidacées (Lecythidaceae)* comprend environ quatre cent cinquante espèces et vingt-quatre genres de plantes tropicales, surtout américaines. Ce sont des plantes ligneuses à grandes fleurs munies d'un tube floral en coupe couronné de sépales et généralement de pétales au nombre de quatre à six. L'androcée est très remarquable; les étamines, nombreuses, sont unies par leurs filets en un androphore zygomorphe ou actinomorphe dont une partie ventrale peut être très développée et stérile, terminée par des staminodes, ou bien partiellement fertile. Il peut y avoir aussi une pseudocorolle régulière d'origine staminodiale. L'ovaire est infère, avec deux à six carpelles. Les ovules, souvent nombreux, ont leurs deux téguments soudés en un seul. Le fruit, qui est souvent une pyxide, est parfois charnu.

L'unique espèce du genre *Bertholletia (B. excelsa)* appartient à une sous-famille où les fleurs sont généralement zygomorphes à androcée complexe. C'est un arbre imposant du nord de l'Amérique du Sud, pouvant atteindre 30 m. Ses feuilles sont alternes, oblongues, ondulées et entières. Ses fleurs sont très grandes, blanches et réunies en panicules terminales. Les fruits sont des pyxides de 10 à 13 cm de diamètre, brunes, très dures, contenant de douze à vingt-quatre graines (amandes du Para). Son bois est utilisé pour la construction.

Chez les *Napoléonoïdes*, il n'y a pas de pétales, mais une pseudocorolle de staminodes, et même trois chez les *Napoleona* d'Amérique tropicale.

Les *Combrétacées (Combretaceae)* comprennent dix-huit genres et environ cinq cents espèces d'arbres, arbustes et lianes tropicales et subtropicales. Elles ont des feuilles opposées ou verticillées; les fleurs, de couleurs vives, en épis ou en grappes, tétramères ou pentamères, ont généralement deux cycles d'étamines. L'ovaire est infère, uniloculaire, avec deux ovules pendants le plus souvent. Les fruits sont des drupes uniséminées, coriaces

▼ Callistemon speciosus *est un arbrisseau cultivé en Europe pour la beauté de son feuillage et de ses fleurs.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

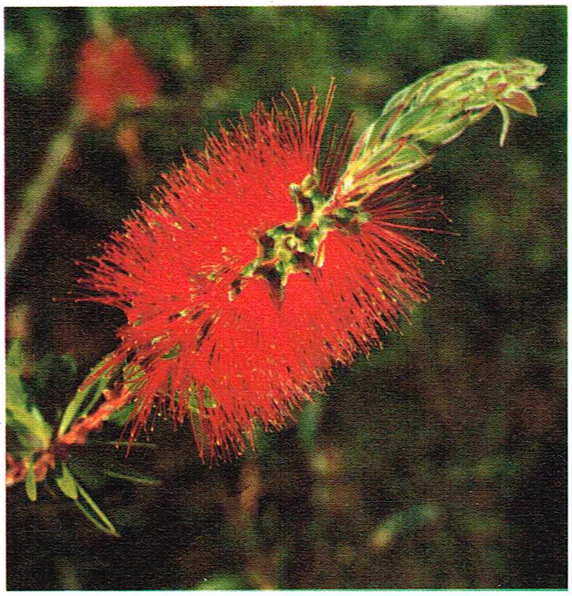

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

et souvent ailées. *Laguncularia racemosa* est l'espèce dominante des mangroves de l'Afrique occidentale et de l'Amérique tropicale. *Terminalia catappa*, qui appartient à un grand genre de deux cents espèces, a des rameaux remarquablement étagés.

La famille des *Myrtacées (Myrtaceae)* est très importante. Elle est constituée d'arbres et d'arbustes, la plupart tropicaux, avec deux centres de dispersion principaux : l'Amérique tropicale pour la sous-famille des Myrtoïdées et l'Australie pour celle des Leptospermoïdées. Une centaine de genres renferment environ trois mille espèces, dont quelques-unes atteignent les zones tempérées. Ces plantes ont des feuilles à stipules réduites, le plus souvent opposées, coriaces et entières. Les fleurs sont actinomorphes, hermaphrodites, avec un calice constitué de quatre ou cinq sépales, une corolle de quatre ou cinq pétales, et de nombreuses étamines, parfois en faisceaux opposés aux pétales; le connectif des anthères se termine souvent par une glande. L'ovaire est infère ou semi-infère, parfois libre au fond du tube floral; il y a deux ou trois carpelles, quelquefois plus; les ovules ont une placentation axile ou pariétale très variée, et le style est unique. Les fruits sont des drupes ou des baies chez les Myrtoïdées et des capsules ou des akènes chez les Leptospermoïdées; Les graines sont en petit nombre dans chaque loge et parfois ailées. On trouve du liber interne et des poches à essence lysigène (résultant de la destruction de cellules préexistantes) dans divers tissus.

Parmi les *Myrtoïdées*, le genre *Myrtus* dans son sens restreint ne comporte que quelques espèces, dont l'une, la myrte *(Myrtus communis)*, croît dans les maquis méditerranéens et en Asie Mineure. C'est un arbrisseau ou un arbuste pouvant atteindre 3 m. Son écorce est d'abord rougeâtre, puis grise et crevassée. Ses feuilles sont subsessiles, persistantes, luisantes, opposées, ovales-lancéolées, aiguës-entières et coriaces, avec de petits points foncés dus à la présence de glandes, qui les rendent fortement odorantes si on les froisse. Les fleurs sont très parfumées, solitaires et à long pédoncule, à l'aisselle des feuilles. Les fruits sont des baies de couleur bleu foncé ou noir bleuâtre, ovoïdes dans la *subsp. communis,* globuleuses dans la *subsp. tarentina.* Elles peuvent être blanches. Les graines, peu nombreuses, sont réniformes. La myrte fleurit de mai à juillet. On la cultive fréquemment; elle n'est pas rustique hors de la région méditerranéenne. Son bois, odorant, à grain fin et compact, sert pour les travaux au tour. Les feuilles renferment une huile essentielle contenant du myrténol, du pinène et du camphène; elles sont également riches en tanin et présentent des propriétés astringentes, vulnéraires et antiseptiques. L'essence sert en parfumerie.

Le genre *Pimenta* comporte quatorze espèces antillaises : la plus connue est *Pimenta dioica (P. officinalis)*, ou piment de la Jamaïque. C'est un arbre toujours vert, haut d'environ 10 m, à feuilles vert brillant. Les fruits

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

sont de petites baies uniséminées, grosses comme un pois, rugueuses et brun rougeâtre. Elles sont utilisées comme condiment et nommées « quatre-épices », car elles auraient à la fois, dit-on, la saveur de la cannelle, du clou de girofle, de la noix de muscade et du poivre!

Dans la même sous-famille, plusieurs tribus sont caractérisées par un gros embryon à germination hypogée. Il est indifférencié dans la tribu des Eugéniées. Le genre *Eugenia* comprend des arbres et des arbustes tropicaux à feuilles opposées et entières. Les espèces, diversement comprises, sont au nombre de cent à six cents. Les fleurs sont parfois solitaires, mais le plus souvent réunies en inflorescences, avec un calice à quatre ou cinq sépales et autant de pétales, et de nombreuses étamines jaunes ou crème. L'ovaire est divisé en deux ou trois loges. Les fruits sont des baies souvent comestibles. Certains *Eugenia* sont cultivés pour l'ornement dans le bassin méditerranéen *(E. uniflora)* et pour leurs fruits, dans leur pays d'origine, tel le précédent, d'Amérique tropicale.

Une autre tribu renferme des plantes à embryon muni de gros cotylédons charnus. Son genre le plus important est *Syzygium*, avec cent espèces, dont *S. aromaticum (Eugenia caryophyllata)* ou giroflier, arbuste originaire des îles Moluques, cultivé aujourd'hui dans de nombreux pays tropicaux. Il atteint 10 à 15 m et possède des feuilles à pétiole long de 5 à 12 cm, ovales-oblongues, aiguës,

◀ ***Fossile de feuilles*** **d'Eugenia italica :** ***cette Myrtacée présente des affinités avec le giroflier actuel*** **(E. caryophyllata).**

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ ***Les eucalyptus comprennent plus de six cents espèces : ici,*** **Eucalyptus globulus.**

F.A. Vala - Jacana

▲ ***Chez les eucalyptus, les pétales des boutons floraux sont soudés et forment un opercule qui tombe et laisse apparaître les étamines.***

coriaces, d'abord roses puis vert brillant et très aromatiques. Les fleurs sont réunies en cymes corymbiformes terminales et présentent un calice de quatre sépales rouges et des pétales caducs blanc rosé; l'ovaire est infère à deux loges. Un seul des nombreux ovules se transforme en graine, logée dans une baie (anthofle). Le bouton floral a l'aspect d'un clou dont la tête est la coupole de la corolle non épanouie : c'est le « clou de girofle ». La plante fleurit en été. Les clous de girofle sont cueillis lorsque les boutons commencent à rougir; séchés au soleil ou artificiellement, ils donnent un produit de couleur brune souvent utilisé comme épice (c'est un des nombreux constituants du curry). Les plus grands producteurs de clous de girofle sont Zanzibar et Pemba ainsi que le nord-est de Madagascar. On extrait du clou de girofle, par entraînement à la vapeur, l'essence de girofle, dont le principal composant est l'eugénol, dérivé allylique du gaïacol; cette essence est utilisée en parfumerie, en médecine comme antiseptique, mais spécialement en dentisterie pour la destruction de la pulpe dentaire (dévitalisation). En microscopie, elle était utilisée comme éclaircissant.

Dans la sous-famille des *Leptospermoïdées*, on trouve une douzaine de genres à ovaire uniloculaire, mais la plupart ont un ovaire à deux à cinq loges ou plus qui devient une capsule loculicide. Parmi ces derniers, le plus important est le genre *Eucalyptus*, qui comprend plus de six cents espèces et dont le nom dérive de deux mots grecs (εὖ, bien, et καλύπτω, je cache) parce que les fleurs en bouton ont des pétales soudés formant un opercule qui cache les étamines et tombe comme un couvercle. Ce sont des arbres originaires de Tasmanie, de Nouvelle-Guinée, de Malaisie et surtout d'Australie, où ils forment des forêts étendues. Ils sont cultivés dans tous les pays de climat tropical, subtropical ou tempéré chaud. Leur systématique est fort difficile : il se forme des hybrides interspécifiques et le milieu entraîne des variations importantes. De plus, certaines variétés ne diffèrent guère que par leur constitution chimique, et produisent des essences différentes. Il peut s'agir d'arbres majestueux, qui dépassent 100 m de hauteur et 4 à 5 m de diamètre, mais il existe aussi des espèces de moindres dimensions et de simples arbustes. Chez la jeune plante, la racine est pivotante, puis il apparaît des racines secondaires, d'abord assez superficielles et qui s'enfoncent profondément à la recherche d'eau si le terrain est sec. L'écorce peut être persistante ou se détacher en plaques ou en bandes; elle peut contenir de grandes quantités de tanins et de résines, ainsi que des sucres. Le cœur est coloré en jaune, rose ou rouge ou bien est blanc ou jaune clair. Les feuilles juvéniles sont différentes des feuilles adultes : les premières sont de forme variable, opposées, sessiles ou à long pétiole, parfois avec des glandes ou des poils glandulaires, parfois aussi à cuticule cireuse. Elles sont orientées de façon normale et ont du tissu palissadique à la face supérieure seulement. Les feuilles des rejets ont aussi ces caractères. Les feuilles adultes ont, chez toutes les espèces, un aspect falciforme; on y observe une nervure principale médiane réunie à deux autres situées près des bords par des nervures secondaires; ces feuilles sont le plus souvent coriaces, opposées ou alternes, de couleur verte très variable, mais généralement identique sur les deux faces. Elles sont orientées verticalement par torsion du pétiole et leurs deux faces possèdent du tissu palissadique. On comprend que le feuillage ne fasse guère d'ombre. Les fleurs, hermaphrodites, sont réunies en différents types d'inflorescences axillaires (ombelles, corymbes, panicules) ou sont rarement solitaires-axillaires. Elles sont blanches, jaunes, roses ou rouges, avec un tube floral marqué de quatre côtes sépalaires et surmonté dans le bourgeon par les quatre pétales soudés en opercule qui tombent lorsque la fleur s'ouvre. Les étamines, nombreuses, sont le plus souvent blanches, mais peuvent être aussi jaunes ou rouges. L'ovaire est infère, avec de trois à six loges et de nombreux ovules, un court style et un stigmate. Les fruits sont des capsules loculicides s'ouvrant au sommet par trois à six valves. Les graines sont nombreuses et le plus souvent minuscules et anguleuses. Chez *Eucalyptus amygdalina*, il y en a plus de mille par gramme; elles peuvent germer au bout de quatre ou cinq ans et plus.

La grande diffusion des eucalyptus est permise par la possibilité d'adaptation de diverses espèces à des climats

très variés. Ce sont des arbres à croissance rapide et qui ont de nombreux usages. Le bois des jeunes plantes sert de combustible, de bois d'industrie et est utilisé pour fabriquer du papier ou en extraire la cellulose. Le bois des arbres adultes peut servir comme bois d'œuvre, mais ses propriétés varient beaucoup selon l'espèce. Les feuilles donnent par distillation des huiles essentielles, de composition différente selon les espèces, mais que l'on peut classer en trois groupes : les huiles essentielles industrielles riches en pipéritone et en phellandrène, qui servent pour la flottation de minéraux, pour préparer le thymol et le menthol ou pour fabriquer des solvants; les huiles essentielles pour la parfumerie, qui contiennent du géraniol, du citronellal, etc., et qui servent à préparer des savons et des produits de beauté; les huiles essentielles médicinales, contenant de 70 à 80 % de cinéol ou eucalyptol ainsi que du pinène, des aldéhydes butyriques isovalérianiques et autres, et des alcools. L'essence d'eucalyptus est utilisée principalement comme antiseptique des voies respiratoires. *E. globulus, E. amygdalina* et certaines variétés d'*E. dives*, etc., sont spécialement utilisés pour son extraction. Les eucalyptus sont souvent cultivés aussi pour l'ornement. En outre, depuis la fin du XIXe siècle, on les a plantés dans les régions marécageuses, dans le cadre de la lutte contre le paludisme : la régression de cette maladie dans les endroits où on les plante est surtout due à l'assèchement qu'ils entraînent par leur grande consommation d'eau stagnante, ce qui empêche le développement des larves d'anophèles, moustiques vecteurs du parasite de cette maladie.

E. globulus est le plus répandu. C'est l'espèce officinale classique. Il habite le sud-est de l'Australie et la Tasmanie et est haut d'environ 60 m, avec un diamètre de 2 m. Son rhytidome est lisse et se détache par bandes longitudinales qui laissent à découvert la jeune écorce bleuâtre. Les feuilles juvéniles sont opposées, ovales et glauques; les feuilles adultes, alternes, sont falciformes et très odorantes. Les bourgeons floraux sont gros, rugueux et pruineux. Les fleurs sont solitaires et axillaires. On cultive cet eucalyptus autour de la Méditerranée, comme plante ornementale ainsi que pour son bois qui sert de combustible et dont on extrait de la cellulose. Ses feuilles fournissent leur huile essentielle, riche en eucalyptol, moins toutefois que d'autres espèces préférées maintenant pour l'extraction de l'essence.

E. rostrata est un arbre haut de 50 à 60 m. Son écorce est gris rougeâtre et se détache par plaques. Ses feuilles adultes sont plus petites, plus étroites, moins luisantes et moins parfumées que celles d'*E. globulus*. L'opercule des bourgeons floraux est prolongé par un rostre plus long que l'ovaire. Les petites fleurs blanches forment des ombelles axillaires; les capsules sont de taille réduite. Originaire d'Australie, c'est l'espèce la plus cultivée en Algérie; il s'adapte à différents sols, à des conditions climatiques défavorables, notamment à la sécheresse. Il a une croissance moins rapide que celle d'*E. globulus* mais il est plus rustique. C'est une plante ornementale, ainsi qu'un producteur de bois rouge, qui, quand il provient de jeunes plantes, sert de combustible et, quand il provient d'individus adultes, de bois d'industrie et de bois d'œuvre; son cœur rougeâtre rappelle l'acajou.

E. amygdalina est le plus élevé du genre, et le plus grand des arbres connus; dans son pays d'origine, le sud-est de l'Australie et la Tasmanie, il peut atteindre

C. Bevilacqua

▲ ***Les eucalyptus ont été très répandus; ils s'adaptent en effet à des climats variés et leur croissance est rapide.***

Summ - Jacana

◀ ***Détail de bouton floral et de fleur d'eucalyptus.***

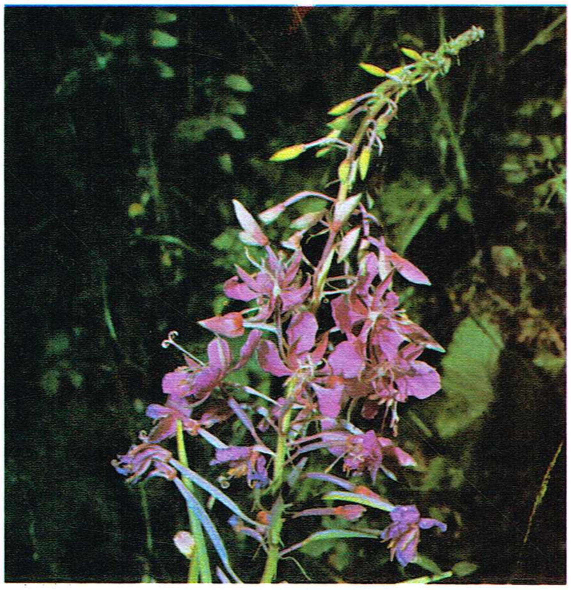

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ *Inflorescence de l'épilobe en épi ou laurier de saint Antoine* (**Epilobium angustifolium**).

une hauteur de 150 m avec un diamètre de 10 m. Cultivé autour de la Méditerranée, il ne dépasse pas 10 m. Son écorce est lisse. Ses feuilles sont brièvement pétiolées, lancéolées et un peu falciformes, étroites, plus larges dans la variété *regnans,* et de couleur vert foncé, avec des glandes peu nombreuses; il fleurit en juin-juillet.

La famille des *Punicacées (Punicaceae)* comprend un seul genre, avec deux espèces : *Punica granatum* ou grenadier, plante cultivée d'origine problématique, peut-être indigène dans le sud-ouest de l'Asie, et *P. protopunica*, de l'île de Socotora, mais actuellement répandu dans toutes les zones chaudes, dont le précédent est peut-être dérivé par sélection. La première espèce, naturalisée dans la région méditerranéenne à basse altitude, est un arbuste atteignant 5 m de haut, un peu épineux, à écorce grise et à branches juvéniles rougeâtres. Il possède des feuilles opposées oblongues-lancéolées, glabres, à bord entier ou légèrement ondulé, de couleur vert vif à la face supérieure, plus pâle à la face inférieure, et caduques. Les fleurs sont solitaires ou au nombre de deux ou trois à l'extrémité des rameaux. Le calice, rouge, a cinq à sept sépales coriaces et persistants sur le fruit. Les pétales sont aussi au nombre de cinq à sept, rouges, et précocement caducs. Les étamines sont nombreuses. L'ovaire est infère (il est semi-infère chez *P. protopanica*), avec neuf carpelles répartis en deux verticilles superposés, l'inférieur de six pièces, le supérieur de trois. Les fruits sont des baies tout à fait spéciales, nommées balaustes, à péricarpe coriace et à neuf loges encore disposées en deux verticilles; chaque loge contient des graines de forme irrégulière et anguleuse, avec un tégument extérieurement rouge et gélatineux, et intérieurement ligneux. Le grenadier fleurit en juin et juillet. Il existe une variété *albescens*, à calice jaunâtre et corolle blanche de même que la couche gélatineuse des graines. Les écorces de la racine et de la tige contiennent notamment un alcaloïde, la pelletiérine, et ses dérivés. Ce corps à noyau pipéridique est actif contre les ténias, quoiqu'un peu dangereux et difficile à manier. Les fruits sont comestibles.

La famille des *Mélastomatacées (Melastomataceae)* comprend environ deux cents genres, avec quatre mille espèces, répandues dans toutes les régions tropicales, et particulièrement nombreuses en Amérique, où elles se sont richement différenciées. Elles habitent aussi les Andes et les forêts sèches. Certaines font partie des mangroves, d'autres sont épiphytes. Quelques formes sont myrmécophiles. Ce sont des herbes, des arbustes ou des lianes à feuilles généralement opposées et pourvues de trois à neuf nervures principales convergeant au sommet. Il y a du liber interne. La pollinisation se fait parfois par l'intermédiaire des colibris ou des chauves-souris, mais dans la plupart des cas par les Insectes. Les fleurs sont le plus souvent actinomorphes, tri- à pentamères et munies d'un tube floral plus ou moins allongé. L'ovaire est supère ou infère. Les sépales peuvent être unis en opercule (calyptra). Il y a deux cycles d'étamines, dont le connectif possède des appendices de forme très variée, tandis que les anthères s'ouvrent par des pores. L'ovaire présente autant de loges pluriovulées qu'il y a de sépales. Le fruit est une capsule ou une baie.

La plupart des genres appartiennent à la sous-famille des *Mélastomatoïdées,* où la placentation est axile et le fruit pluriséminé. Un premier groupe de tribus forme des capsules, et l'ovaire y est infère. D'autres tribus ont encore des capsules, mais issues d'un ovaire supère ou à peu près. Le genre *Rhexia* est extratropical, et douze espèces habitent le sud-est des États-Unis; une est antillaise.

▼ *Les fruits du grenadier (ici* **Punica granatum**) *ont un péricarpe coriace, et leurs neuf loges contiennent des graines dont la partie externe du revêtement tégumentaire, rouge et gélatineuse, est comestible.*

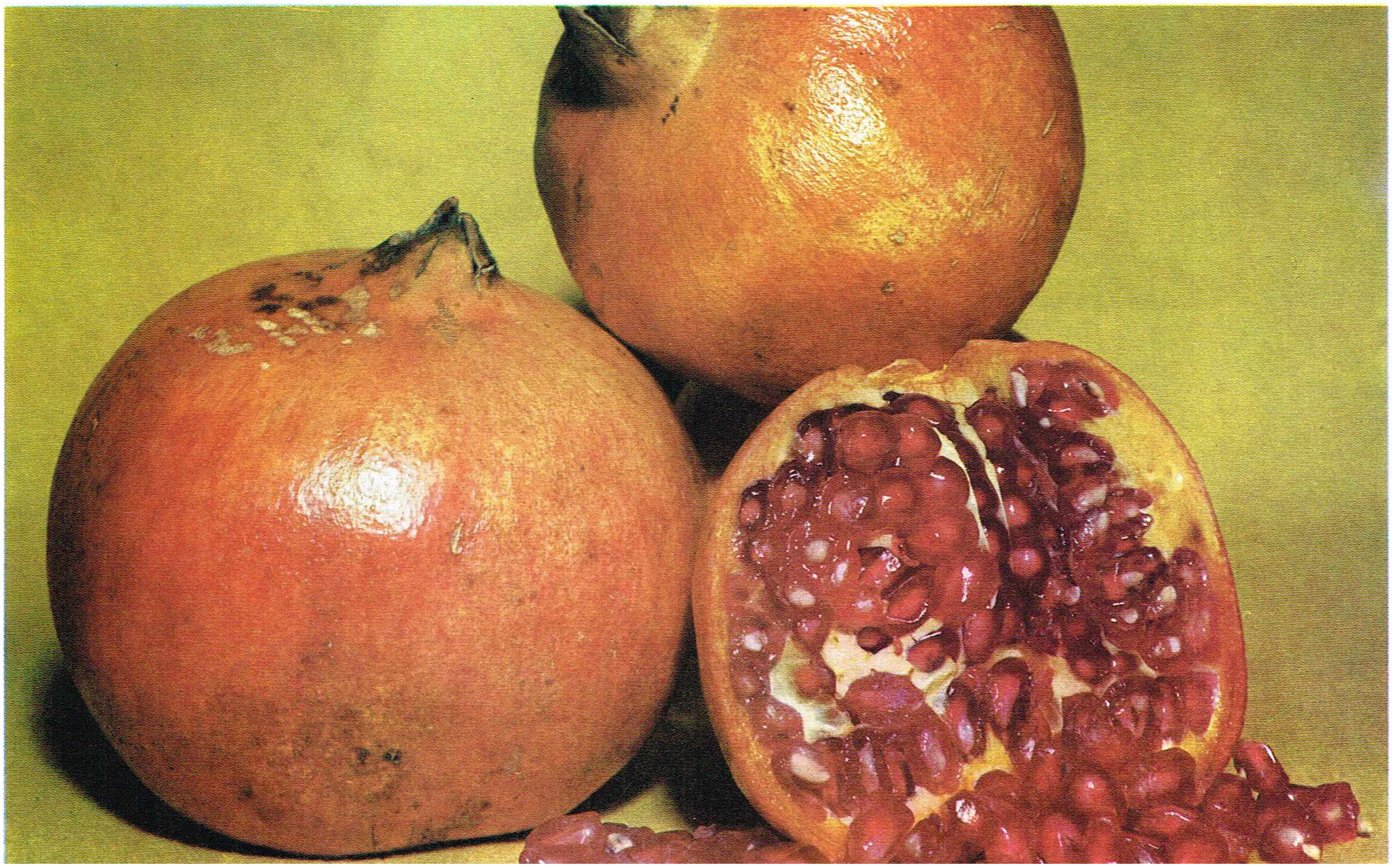

M. Bavestrelli

◀ *Chez* **Medinilla magnifica,** ***les fleurs sont groupées en panicules entourées de grandes bractées roses (à gauche). Les fleurs de l'herbe-aux-ânes*** **(Oenothera biennis)** ***sont réunies en grappe.***

D'autres tribus encore ont des baies issues d'un ovaire infère. Le très grand genre *Miconia* groupe neuf cents espèces. Nous prendrons comme exemple *M. magnifica (Cyanophyllum magnificum)*, originaire du Mexique, haut de 4 m et cultivé pour ses feuilles. Celles-ci, qui atteignent 1 m de long, sont persistantes, oblongues, acuminées, dentelées, de couleur vert foncé à la face supérieure et pourprée à la face inférieure; elles ont cinq nervures principales longitudinales convergentes au sommet, blanc d'ivoire (les trois centrales bordées de vert pâle), le tout relié par un quadrillage régulier de nervures secondaires blanches. Les fleurs forment des panicules terminales et sont de peu d'intérêt au point de vue horticole.

Le genre *Medinilla* comprend trois cents espèces, dont *M. magnifica*, arbrisseau de l'île de Luzon (Philippines), haut de 1 m à 1,50 m et ramifié pseudo-dichotomiquement. Sa tige est tétragone, à angles un peu ailés; ses feuilles sont coriaces, ovales-oblongues, avec cinq nervures longitudinales bien nettes. Ses fleurs sont rose vif, avec des anthères violacées, et sont réunies en grandes panicules pendantes, qui paraissent d'avril à juin. C'est une plante de serre très répandue.

Chez la famille des *Onagracées* ou *Œnothéracées (Onagraceae)*, les fleurs, réunies en grappes ou épis, sont munies de calice et de corolle et sont tétramères en général, parfois di-, tri- ou hexamères. Il y a un tube floral sur lequel s'insèrent le calice, la corolle et les étamines en nombre égal ou double de celui des pétales; l'ovaire est infère et tétracarpellé avec le plus souvent de nombreux ovules. Les fruits sont variés. La famille comprend environ vingt genres, avec plus de six cent cinquante espèces, répandues dans les régions tempérées et subtropicales, mais spécialement abondantes dans les zones tempérées occidentales d'Amérique.

Le genre *Ludwigia* appartient à une tribu (Jussieuées) dont les fruits sont des capsules loculicides ou septicides, et qui semble primitive par l'absence de tube floral. Il comprend trente espèces, pour la plupart tropicales. La seule espèce de nos régions est *L. palustris (Isnardia pal.)* dont l'aire recouvre l'Europe et l'ouest de l'Asie, l'Afrique du Nord et du Sud, et l'Amérique du Nord.

Dans d'autres tribus, le fruit est une capsule septicide et septifrage dont la déhiscence laisse en place une colonne ovarienne centrale. Le genre *Oenothera* (onagres) comprend deux cents espèces de plantes herbacées américaines, dont plusieurs sont naturalisées en Europe. Les feuilles sont alternes, les basales en rosette. Les fleurs sont de diverses couleurs, souvent parfumées et, parfois, restent ouvertes seulement quelques heures de jour ou de nuit; elles peuvent changer de couleur pendant leur développement; elles ont un long tube floral, quatre sépales réfléchis, quatre pétales et huit étamines en deux cycles; l'ovaire est allongé, divisé en quatre loges, à nombreux ovules, et possède un style terminé par quatre stigmates. Les fruits sont des capsules à nombreuses graines, dépourvues d'aigrette. L'herbe-aux-ânes *(Oenothera biennis)* est bisannuelle. Sa tige est dressée, robuste, simple, velue et haute de 50 cm à 1,20 m. Elle possède des feuilles ovales-lancéolées et denticulées, à nervures rougeâtres. Ses fleurs sont jaunes, parfumées et réunies en grappes. Les pétales ont environ 30 mm de long. Originaire de l'Amérique du Nord et introduite au début du XVII^e^ siècle, elle croît dans les terrains vagues. Elle ne s'élève guère en montagne. Elle fleurit de juin à septembre. On la cultivait pour ses racines charnues et sucrées qui étaient consommées crues ou cuites.

L'onagre de Lamarck *(O. erythrosepala, O. lamarckiana)* a des fleurs jaunes, dont les pétales atteignent 60 mm; sa tige et son ovaire sont munis de points rouges tandis que le calice est sillonné de rouge ou entièrement rouge. Il semble apparu en Europe, de parents américains, et s'y rencontre dans l'Ouest et le Centre. C'est son étude qui suggéra à De Vries la notion de mutation quoique De Vries n'ait pas observé de vraies mutations!

La cytologie des *Oenothera* est complexe. Des combinaisons chromosomiques une fois apparues chez un individu peuvent se conserver intactes dans sa descendance du fait de l'autofécondation et de l'existence de gènes létaux qui éliminent les combinaisons non parentales. Il se forme ainsi de nombreuses lignées auxquelles on a été tenté d'attribuer des noms spécifiques.

Le genre *Epilobium* (épilobes) comprend des herbes ou des sous-arbrisseaux à feuilles alternes ou opposées, ou plus rarement verticillées. Leurs fleurs sont généralement roses ou violettes, avec un tube floral absent ou très court, un calice tétramère, quatre pétales et huit étamines; l'ovaire, infère, a quatre loges avec de nombreux ovules, un style et un stigmate simple ou en croix. Les fruits sont des capsules avec des graines abondantes pourvues d'une aigrette chalazienne. Les épilobes, au nombre de deux cents, habitent toutes les régions froides et tempérées. *E. dodonaei (E. rosmarinifolium)* est vivace. Il a des feuilles linéaires, larges de 1 à 3 mm, où l'on distingue seulement la nervure principale. Ses fleurs sont rose lilas, en grappes feuillues. On le rencontre sur les graviers des cours d'eau et dans les lieux rocheux en Europe centrale et méridionale; il fleurit de juin à août. Le laurier de saint Antoine *(E. angustifolium = E. spicatum)* est vivace et atteint 2,50 m. Il possède des feuilles lancéolées, avec des nervures principales et secondaires bien évidentes. Ses grandes fleurs rouges sont réunies en grappes dépourvues de feuilles. Elles sont zygomorphes, comme celles du précédent, parce que l'androcée est déjeté vers le bas. Ses graines ont de longs poils blancs. On le rencontre surtout dans les forêts de montagne en Europe, en Asie et en Amérique du Nord; il fleurit de juin à septembre. Il est souvent cultivé pour l'ornement. L'épilobe hirsute *(E. hirsutum)* est vivace et stolonifère. Il est velu et possède des feuilles lancéolées, dentées, opposées, mais les supérieures alternes, sessiles et demi-

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ **Epilobium dodonaei** *se rencontre surtout dans les endroits rocheux.*

embrassantes. Les fleurs, rose pâle, sont axillaires, actinomorphes, à petite corolle et long ovaire. On le trouve très communément en Europe, en Asie occidentale et en Amérique du Nord, dans les lieux humides jusque dans l'étage montagnard ; il fleurit de juin à septembre et est parfois cultivé. *E. tetragonum* est vivace. Sa tige, comme le nom l'indique, est tétragone, et dressée ou ascendante, haute de 25 à 90 cm et souvent rameuse. Elle émet à la base des rosettes de feuilles qui se développeront l'année suivante. Les feuilles sont lancéolées, les inférieures opposées, les supérieures alternes. Les fleurs sont axillaires, à très petite corolle et long ovaire ; le stigmate est en massue. On trouve cette espèce dans les lieux humides de plaine, dans l'hémisphère Nord ; elle fleurit de juin à septembre.

Dans quelques tribus, le fruit est un akène à une ou deux graines. Le genre *Circaea* comprend sept espèces des régions froides et tempérées de l'hémisphère Nord. Les fleurs sont dimères. *C. lutetiana* est l'herbe aux sorcières. Il est vivace et possède des stolons souterrains. Sa tige est haute de 15 à 60 cm. Ses feuilles sont ovales, dentées, avec un pétiole canaliculé supérieurement. Les petites fleurs sont disposées en grappes terminales lâches. Le tube floral est court et soudé au style. Le calice a deux sépales réfléchis. Il y a deux pétales et deux étamines. L'ovaire a deux loges uniovulées ; le stigmate est bilobé. Les fruits sont des akènes à deux graines recouverts de soies crochues. On rencontre cette espèce dans les bois assez humides ou les lieux ombreux, jusque dans l'étage montagnard, en Europe, en Asie Mineure et centrale et en Amérique du Nord. Elle fleurit de juin à septembre.

Chez les Fuchsiées, le fruit est une baie. Le genre *Fuchsia*, dédié à Léonard Fuchs, médecin et botaniste allemand du XVI[e] siècle, comporte une centaine d'espèces d'arbustes, d'arbrisseaux montagnards d'Amérique centrale et du Sud, avec quelques espèces en Nouvelle-Zélande et à Tahiti. Les feuilles sont opposées, verticillées ou alternes. Les fleurs, souvent brillamment colorées, ont un long tube floral et sont solitaires-axillaires ou réunies en inflorescences. Les sépales et les pétales sont au nombre de quatre ; il peut y avoir réduction des pétales. Il y a huit étamines en deux cycles. Les fruits sont des baies à quatre loges. Dans les pays d'origine, ces plantes sont non seulement ornementales, mais aussi cultivées pour leurs fruits, dont on fait des confitures. Elles le sont pour l'ornement en Europe et ont donné naissance à de nombreux hybrides et variétés.

F. magellanica, originaire du Pérou et du Chili, est un arbuste buissonnant haut d'environ 1 m. Ses feuilles sont opposées ou verticillées, ovales, crénelées-dentées, avec un pétiole rougeâtre. Les fleurs pendantes sont axillaires ou forment parfois de petites grappes terminales ; leur calice est rouge pourpré ; il y a quatre pétales violet-pourpre et huit étamines rouges dépassant longuement les pétales. Le style est longuement exsert. Les baies sont presque noires. La floraison a lieu de juin à novembre. C'est de cette espèce que dérivent la plupart des variétés et hybrides cultivés de fuchsias, parmi lesquels *F. m.* var. *riccartonii* est très précieux à cause de sa rusticité. C'est le seul fuchsia dont les parties aériennes résistent à l'hiver dans le centre de la France. Ses fleurs, très nombreuses, sont entièrement rouges, à sépales étroitement triangulaires. *F. m.* var. *globosa* est aussi bien connu pour ses fleurs à calice et corolle globuleux. *F. speciosa (F. hybrida)* est un ensemble de formes cultivées, à tube assez long. Il s'agit d'hybrides entre le précédent et le suivant. Le calice et la corolle sont diversement colorés ; parfois la corolle est striée, elle peut aussi être double. *F. fulgens*, haut de 1 m, a une tige rougeâtre. Ses feuilles, dentées grossièrement, sont vertes avec des nervures rouges. Les fleurs sont groupées en inflorescences terminales pendantes. Leur tube floral est rouge, long et étroit. Les sépales, rouges mais verdâtres au sommet, sont triangulaires ; les pétales sont écarlates. Les étamines et le style sont peu exserts. Il est originaire du Mexique.

La famille des *Haloragacées (Haloragaceae)* comprend des plantes herbacées, le plus souvent aquatiques, généralement monoïques, et à fleurs le plus fréquemment unisexuées et anémogames. Chez les espèces terrestres, les feuilles sont très grandes ; chez les formes aquatiques, les feuilles immergées sont découpées en lanières pectinées. Les fleurs sont généralement tétramères, parfois tri- ou dimères. Les étamines sont au nombre de quatre ou huit, et l'ovaire est infère. Il y a deux ou quatre carpelles formant une à quatre loges uniovulées. Le fruit est un akène. Il existe huit genres avec environ cent soixante espèces des régions tempérées et subtropicales. Chez le genre *Myriophyllum*, les fleurs sont essentiellement unisexuées : les mâles ont un calice de quatre sépales, quatre pétales caducs ou manquants et quatre ou huit étamines ; les femelles ont un calice de quatre très petits sépales linéaires, quatre pétales caducs ou manquants et un ovaire infère à quatre loges contenant chacune un ovule, et quatre stigmates sessiles. Les fruits, un peu charnus, se divisent à maturité en quatre méricarpes uniséminés. *M. spicatum* est vivace, aquatique et immergé. La longueur de sa tige varie selon la profondeur

▼ *A gauche :* *forme horticole de* **Fuchsia.** *A droite :* **Epilobium angustifolium** *qui constitue souvent d'importants peuplements dans les forêts de montagne.*

C. Bevilacqua

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

de l'eau, mais atteint 3 m. Ses feuilles sont découpées en lanières pectinées et groupées en verticilles (de quatre le plus souvent), comme les fleurs situées à l'aisselle de bractées. Les femelles ont de petits pétales. Il y a quelques fleurs hermaphrodites entre les zones mâle et femelle de l'épi. Cette espèce habite toute l'Europe, la moitié nord de l'Asie, et le nord-ouest de l'Afrique; elle fleurit de juillet à septembre. *M. verticillatum* a des feuilles comparables à celles du précédent, généralement réunies en verticilles de cinq; les fleurs sont situées à l'aisselle de feuilles bien formées. Certaines fleurs intermédiaires sont hermaphrodites. Les femelles ont des pétales très réduits. L'espèce fleurit de juin à août et se rencontre dans les mêmes régions que la précédente, mais aussi au Canada.

Les *Gunnéracées (Gunneraceae)* sont une famille qu'Engler réunit à la précédente. Elles comprennent le genre *Gunnera*, avec trente-cinq espèces de grandes plantes herbacées vivaces à distribution très disjointe, puisqu'on les rencontre dans le sud de l'Amérique du Sud, en Amérique centrale, en Afrique du Sud, en Nouvelle-Zélande, en Tasmanie et en Malaisie. Chez elles, les faisceaux vasculaires de la tige sont nombreux et disposés en réseau (polystélie). Les feuilles sont radicales et portées par une tige rampante ou un rhizome (souvent de dimensions gigantesques), ovales ou orbiculaires et peltées ou cordées à la base du limbe, celui-ci étant à bord entier ou lobé. Elles possèdent en bas du pétiole une grande stipule médiane. Il se forme des racines adventives qui vivent en symbiose avec des nostocs. Les fleurs forment des épis ou des panicules; elles ont deux sépales; les pétales manquent ou sont au nombre de deux. Il y a autant d'étamines. L'ovaire infère est uniloculaire, mais à deux styles, il est donc bicarpellé; l'ovule est unique. Les fruits sont des drupes. Deux *Gunnera* sont cultivés pour l'ornement des berges et des pièces d'eau, à condition de disposer de beaucoup d'espace. *G. manicata*, originaire du Brésil méridional, possède des feuilles colossales, avec des pétioles épineux longs de 1,20 m à 2 m et un limbe orbiculaire, lobé, crénelé, et diversement canaliculé, d'un diamètre de 1,50 m à 3 m. L'ensemble de cette gigantesque rosette atteint 10 m de diamètre. Les fleurs sont vertes et forment des épis d'une hauteur atteignant 1,50 m et d'un diamètre de 30 cm. La floraison a lieu en été. *G. chilensis,* originaire du Chili, a des feuilles moins épineuses que le précédent; leur diamètre atteint encore 2 m. Ses fleurs, réunies en un épi composé qui ne dépasse guère 50 cm de longueur, sont rougeâtres comme les fruits. Dans les Andes, *G. magellanica*, qui est dioïque, vit jusqu'à plus de 3 000 m d'altitude.

Les familles des *Thyméléacées, Éléagnacées* et quelques autres ont été rapportées à l'ordre des Myrtales. Certains auteurs ont fait un ordre particulier des Thyméléales. Chez ces dernières, la corolle manque ou les pétales sont réduits à des écailles. Il y a un tube périanthaire, mais l'ovaire est libre au fond, comme cela se voit chez quelques Myrtales. Il y a fréquemment du liber interne (comme chez les Myrtales).

La famille des Thyméléacées *(Thymeleaceae)* comprend quarante-huit genres avec six cent cinquante espèces. Il s'agit surtout d'arbustes à feuilles entières, sans stipules, opposées ou alternes; les fleurs sont tétramères ou pentamères, hermaphrodites ou unisexuées, avec ou sans corolle, à pétales le plus souvent réduits à des écailles, implantées comme les sépales au sommet d'un tube floral, à étamines en général en nombre double de celui des sépales insérés sur le tube, et à ovaire supère, souvent bicarpellé et à un seul ovule en général pendant. Le fruit est une capsule loculicide, une baie ou un akène. Ce sont des plantes à peu près cosmopolites, mais elles sont mieux représentées dans certaines régions : bassin méditerranéen, Afrique du Sud, Australie et Asie centrale.

Nous ne nous intéresserons qu'au genre *Daphne*, de la sous-famille des *Thyméléoïdées,* qui possède dans la plupart des cas un tube floral, est pourvu ou non de pétales et chez lequel il y a le plus souvent deux cycles d'étamines et un seul carpelle développé, quoiqu'un autre soit à l'état réduit. Le carpelle fertile est uniovulé.

Le genre *Daphne* doit son nom au mot grec δάφνη, qui signifie laurier. Les daphnés sont des arbrisseaux à feuilles persistantes ou caduques. Leurs fleurs ont un calice à quatre lobes pétaloïdes (elles n'ont pas de corolle) et huit étamines à anthères presque sessiles disposées en deux verticilles superposés insérés sur un tube floral bien développé. L'ovaire possède comme d'habitude un seul ovule; le style est très court et le stigmate est renflé. Les fruits sont des drupes charnues ou coriaces. Le genre comprend environ cinquante espèces, dont sept croissent en France. Plusieurs sont cultivées pour leurs fleurs parfumées, mais elles sont un peu délaissées actuellement.

D. cneorum est un arbrisseau prostré, toujours vert, à rameaux longs et velus, pourvus au sommet de feuilles simples, glabres et coriaces, linéaires-spatulées, uninervées, vert brillant à la face supérieure. Ses fleurs sont rouges ou roses, très parfumées, au nombre de six à douze, en têtes terminales. Les fruits sont des drupes jaunes ou brunâtres qui restent longtemps incluses dans le tube floral. On rencontre cette espèce dans les lieux secs et les éboulis, en montagne, en Europe centrale et méridionale, jusqu'en Ukraine. Le bois-gentil *(D. mezereum)* est un arbuste haut de 25 cm à 2 m, dressé, à tiges souples. Ses feuilles simples sont ovales-lancéolées, brièvement pétiolées, caduques et sont rassemblées au

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ *Les feuilles de* **Gunnera chilensis** *peuvent atteindre 2 m de diamètre, il s'agit toutefois d'une plante herbacée.*

M. et S. Prato

▼ *Les myriophylles sont des plantes aquatiques à petites feuilles verticillées.*

▶ *Le bois-gentil* (Daphne mezereum) *est un arbuste dont les fleurs roses, dépourvues de corolle, ont un calice pétaloïde (à gauche). Les fruits sont des drupes rouge vif (à droite).*

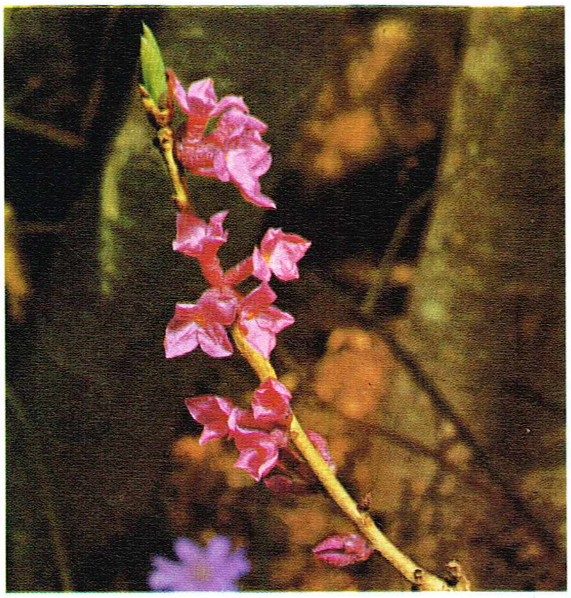

Bavestrelli - Belivacqua - Prato

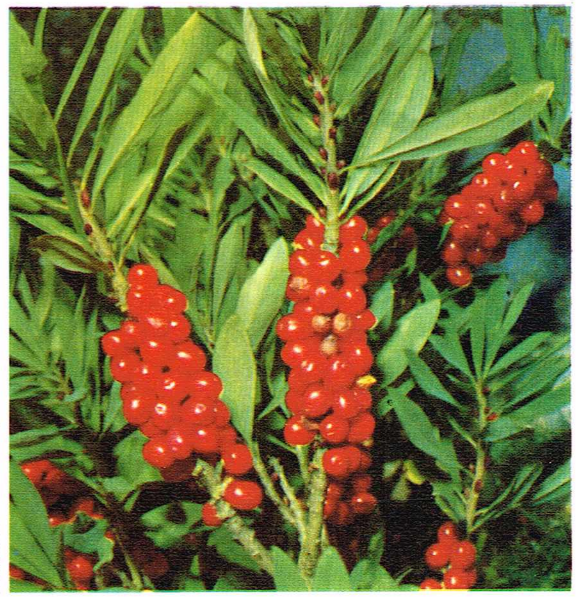

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

sommet des rameaux. Elles apparaissent après la floraison. Les fleurs sont roses ou rouges, très parfumées, sessiles et sont réunies en faisceaux de deux à quatre. Les fruits du bois-gentil sont des drupes juteuses, rouge vif, rapidement nues, car le tube floral est vite caduc. On trouve cette espèce dans les bois des collines et des montagnes et dans les pâturages subalpins, en Europe et dans le sud-ouest de l'Asie. Elle fleurit de février à mai. Son écorce et surtout ses fruits contiennent un hétéroside amer (daphnoside), dont l'aglycone est un dérivé de la coumarine, d'autres dérivés coumariniques, une résine âcre, vésicante, et enfin du tanin. L'écorce fraîche ou macérée dans l'eau ou le vinaigre a un pouvoir vésicatoire. La plupart de ces produits sont toxiques. *D. laureola* ou laurier des bois est un arbuste toujours vert, haut de 50 cm à 1 m, à rameaux souples dressés. Les feuilles, simples, sont lancéolées et glabres. Les fleurs sont jaune verdâtre et peu parfumées, en petites grappes. Les fruits sont des drupes, vite nues, d'abord vertes, puis noires. On trouve ce daphné dans les bois des collines et des montagnes ; il fleurit de février à mai. Cette espèce est répandue en Europe occidentale et méridionale ainsi qu'en Algérie. Elle est commune dans toute la France. C'est aussi une plante vénéneuse ; son écorce a les mêmes propriétés vésicatoires que celle du bois-gentil. On en tire, en outre, par traitement avec des sels de bismuth, une matière colorante jaune. Le daphné des Alpes *(D. alpina)* est un arbrisseau très ramifié, haut de 20 à 50 cm, à tiges noueuses et tortueuses. Ses feuilles sont caduques, obovales et velues-soyeuses à l'état jeune. Ses fleurs, blanches, odorantes et subsessiles, paraissent d'avril à juin et sont disposées en têtes terminales. Les fruits sont des drupes rouges, pubescentes, longtemps enfermées dans le tube floral. Cette plante est commune dans les terrains rocailleux des montagnes calcaires, jusqu'à l'étage subalpin, en Europe centrale et du Sud-Est et en Asie Mineure. Elle se rencontre dans les montagnes de France. Elle est vénéneuse comme les autres daphnés. Le garou *(D. gnidium)* est un arbuste toujours vert, haut de 40 cm à 2 m. Ses feuilles, glabres, sont subsessiles, linéaires-lancéolées, très nombreuses et disposées tout au long des rameaux. Ses fleurs sont blanches, parfumées et réunies en panicules terminales à pédoncules blancs tomenteux. Les fruits sont des drupes rouges et nues. Le garou croît tout autour de la Méditerranée, remontant jusqu'en Vendée ; il fleurit du printemps à l'automne.

La famille des *Éléagnacées (Elaeagnaceae)* est constituée de trois genres et soixante-cinq espèces d'arbustes, très rarement d'arbres, à feuilles alternes entières et sans stipules. Elle compte de nombreux représentants en Amérique du Nord, en Eurasie, en Malaisie et en Australie. Ces plantes sont abondamment recouvertes de poils peltés ou étoilés, argentés ou de couleur rouille. Elles n'ont pas de liber interne. Elles possèdent des nodules radicaux fixateurs d'azote et abritant un Actinomycète symbiotique *(Frankia)*. Leurs fleurs sont hermaphrodites ou unisexuées, la plante étant dioïque ou polygame. Elles sont anémophiles ou entomophiles, principalement tétramères, avec un calice pétaloïde, et sans corolle. L'androcée est à un ou deux cycles. La fleur possède le plus souvent un tube floral, qui porte les étamines, au fond duquel l'ovaire est supère et comporte un seul carpelle uniovulé à placentation basale. Le style est allongé, à stigmate capité. Les fruits sont toujours des akènes entourés par le tube floral, qui est accrescent et, au moins extérieurement, charnu, l'ensemble ayant l'aspect d'une drupe. On ne sait si les Éléagnacées ont perdu leurs pétales ou si elles sont réellement apétales. Dans la seconde hypothèse, on les a rapprochées des Protéacées. On leur a aussi trouvé des ressemblances avec les Rhamnacées.

Chez le genre *Elaeagnus* (chalefs), le plus important avec soixante espèces, les feuilles sont alternes, caduques ou persistantes. Les fleurs sont hermaphrodites. Le calice est tubuleux inférieurement avec quatre sépales. Il existe quatre étamines alternisépales à filets très courts. *E. angustifolia* ou olivier de Bohême est la seule espèce européenne. Il peut atteindre une hauteur de 7 m et est plus ou moins épineux. Ses feuilles sont ovales-lancéolées, caduques, argentées essentiellement à la face inférieure, comme les rameaux. Ses fleurs, jaunes au-dedans, argentées au-dehors, brièvement pédicellées, sont axillaires, solitaires ou en faisceaux de deux ou trois. Les fruits sont jaunâtres ou rougeâtres, de la grosseur d'une olive ; la plante fleurit de mai à juillet et se rencontre en région méditerranéenne, en Europe centrale et en Asie occidentale et centrale, mais n'est en fait que naturalisée en Europe. Elle est plantée dans les jardins ; en culture, on rencontre surtout *E. pungens*, plus petit, à feuilles persistantes souvent panachées de jaune (cultivar *maculata*). Le genre *Hippophae* ne renferme que deux ou trois espèces dioïques d'Eurasie. *H. rhamnoides* ou argousier est haut de 1 à 3 m et épineux. Ses feuilles sont linéaires-lancéolées, vertes à la face supérieure, argentées et munies d'écailles rousses à la face inférieure. Ses fleurs sont verdâtres, les mâles en courts chatons latéraux avec un calice dimère et quatre étamines, les femelles solitaires, également à calice dimère, et à style court terminé par un long stigmate en languettes. Les fruits sont jaune-orangé et comestibles. Cet arbuste habite les dunes et les rivages maritimes et le bord des cours d'eau. Il se rencontre en France sur le littoral de la Manche, dans les vallées du Rhin et du Rhône et dans le Sud-Est. Il fleurit de mars à mai. On le cultive pour fixer les dunes, corriger le cours des torrents et comme plante ornementale. Son bois est parfois utilisé pour le tournage.

Malvales ou Columnifères

Cet ordre comprend des plantes parfois herbacées, mais le plus souvent ligneuses et pouvant atteindre des dimensions colossales, comme le baobab. Elles possèdent souvent des poils pluricellulaires ramifiés et des canaux

ou des cellules productrices de mucilages. Le liber secondaire montre souvent des bandes tangentielles de fibres lignifiées. Les feuilles sont alternes et pourvues de stipules plus ou moins développées. Les fleurs, habituellement hermaphrodites, ont parfois un calicule ; leur calice a cinq sépales, leur corolle cinq pétales. Dans le bourgeon, le calice et la corolle ont le plus souvent respectivement une préfloraison valvaire et une préfloraison tordue. Les étamines sont disposées en deux verticilles ou sont plus nombreuses par multiplication secondaire du verticille interne. Leurs filets sont souvent concrescents et forment alors une colonne ou des faisceaux qui entourent l'ovaire : d'où le nom de Columnifères. L'ovaire possède deux ou plusieurs carpelles soudés; lorque ceux-ci sont très nombreux, ils sont généralement disposés en un seul cycle. Chez la plupart des espèces, l'ovaire est supère et la placentation est axile. Les fruits sont des capsules, des akènes ou des « coques », c'est-à-dire des méricarpes généralement indéhiscents provenant chacun de la partie ovulifère d'un carpelle d'un gynécée syncarpe.

Ces plantes habitent pour la plupart dans les zones tropicales ou subtropicales, mais on en trouve aussi dans les régions tempérées.

La famille des *Malvacées (Malvaceae)* comprend, réparties en environ quatre-vingt-cinq genres, quinze cents espèces herbacées, arbustives ou arborescentes, souvent recouvertes de poils étoilés et contenant toujours des mucilages. Les feuilles sont alternes, simples, entières ou lobées, et pourvues de stipules. Les fleurs, généralement grandes, solitaires ou en inflorescences cymeuses, sont pourvues d'un calice à cinq sépales, qui sont souvent unis ou connés à la base et fréquemment doublés à l'extérieur d'un calicule stipulaire, et de cinq pétales, parfois aussi soudés à la base. Les étamines sont généralement disposées en deux verticilles, dont l'externe est staminodial tandis que l'interne a subi une importante multiplication ; le tout forme une colonne porteuse de filets terminés par des anthères qui sont surtout des demi-anthères avec seulement deux sacs polliniques réniformes. L'ovaire est supère et syncarpe, à cinq carpelles ou beaucoup plus, multi- ou uniovulés. Les fruits sont en majorité secs et sont alors soit des capsules loculicides, soit des coques (méricarpes) ; mais ce sont aussi parfois des baies. Il s'agit de plantes cosmopolites, surtout tropicales.

Chez les Malvées, les carpelles nombreux sont disposés en un seul verticille muni d'un style libre supérieurement.

Les espèces du genre *Abutilon*, qui sont au nombre de cent cinquante, ont au moins deux ovules par carpelle. Leurs méricarpes sont déhiscents sur place. Leurs feuilles sont alternes, cordiformes à la base, avec un long pétiole. Les fleurs, dépourvues de calicule et à longs pédoncules, sont souvent pendantes. On les cultive parfois, surtout *A. theophrastii*, pour leur feuillage et leurs fleurs pourpres, jaunes ou violettes. *A. theophrastii* et *A. indicum* donnent des fibres grossières, appelées « jute chinois ».

Chez des Malvées d'un autre groupe, on ne trouve qu'un seul ovule par carpelle.

Le genre *Althaea* (guimauves) se rencontre dans les régions tempérées d'Eurasie et comporte vingt-cinq espèces. Les racines sont épaisses et pivotantes. Les feuilles sont alternes, plus ou moins lobées ou profondément divisées, velues et hirsutes. Les fleurs, grandes, ont un calicule de six à neuf pièces et une corolle un peu gamopétale de couleur blanche, rose, rouge, violacée ou jaune. Les méricarpes sont indéhiscents. La guimauve officinale *(A. officinalis)*, veloutée et blanchâtre, atteint 1,50 m. Elle croît dans les lieux humides et est récoltée en été et en automne. Elle est asiatique, ne dépasse guère le sud-est de l'Europe, mais elle est naturalisée en France et ailleurs, surtout près des côtes. Sa racine, ses feuilles et ses fleurs blanc rosé sont vendues sous différentes formes pour leurs propriétés émollientes et diurétiques. On fait un usage analogue de la racine de rose trémière ou passerose *(A. rosea)*, cultivée surtout pour ses fleurs, diversement colorées du blanc au rose et au violet, souvent doubles. Cette espèce est indigène en Asie Mineure, dans les Balkans, en Crète et en Asie. Ses fleurs sont parfois utilisées pour colorer les liqueurs. *A. cannabina*, à feuilles profondément découpées en lobes ou folioles palmées et fleurs roses, spontané dans les haies d'Europe méridionale et d'Asie occidentale, a été utilisé pour l'obtention d'une fibre textile.

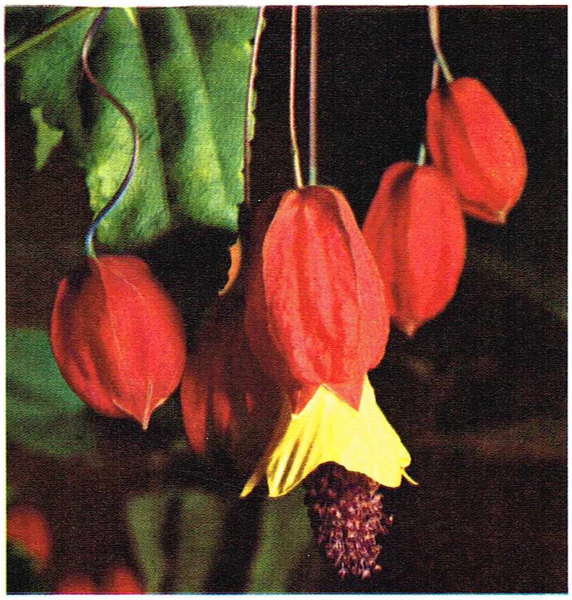

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ ***Les fleurs vivement colorées d'*****Abutilon megaponticum** ***sont pendantes à l'extrémité de longs pédoncules.***

Le genre *Malva* (mauves), qui compte trente espèces, diffère du précédent par son calicule constitué de trois pièces libres entre elles, parfois légèrement adhérentes au calice. Les méricarpes sont indéhiscents. Certaines mauves sont utilisées en médecine ou pour l'ornement. La petite mauve *(M. neglecta = M. rotundifolia)* est annuelle ou bisannuelle, à tiges couchées, feuilles peu profondément lobées et méricarpes lisses. Ses feuilles et ses sommités fleuries sont utilisées en infusions émollientes et pectorales à cause de leur mucilage. La grande mauve *(Malva sylvestris)* est également très commune ; cette espèce a les mêmes propriétés et est la plus exploitée.

Les *Lavatera* sont très voisins des *Malva*, mais, le plus souvent, les trois pièces du calicule sont soudées entre elles à la base. Il en existe en région méditerranéenne, en Asie centrale, en Australie et en Californie.

Chez les Malopées, il y a de nombreux carpelles uniovulés, rangés en plusieurs verticilles superposés. Comme ils sont aussi rassemblés en cinq zones opposées aux pétales, on peut penser qu'il s'agit du produit de la multiplication secondaire de cinq carpelles, comparable à celle qui a eu lieu dans l'androcée. Le genre *Malope*, avec trois espèces méditerranéennes, a un représentant en France.

▼ ***Roses trémières*** **(Althaea rosea)** ***à fleurs extra-doubles.***

C. Bevilacqua

M. Bavestrelli

Les Hibiscées ont des carpelles au nombre de trois à cinq, et leur ovaire devient une capsule loculicide. Le genre *Hibiscus*, qui est surtout représenté en Afrique et à Madagascar, compte deux cents espèces. Les jeunes capsules de *H. esculentus* sont consommées sous le nom de « gombo ». *H. cannabinus* est une plante à fibres textiles qui est cultivée parfois en Europe méridionale. *H. rosa-sinensis* est la rose de Chine, plante de serre et d'appartement très connue, et *H. syriacus* est un arbuste d'Extrême-Orient souvent cultivé dans les jardins.

Le genre *Gossypium* a une grande importance économique, puisqu'il renferme le coton. Les espèces de ce genre tropical sont diversement comprises et ont fait l'objet de nombreux travaux de taxonomie expérimentale. On peut en compter de quatre à quarante. Celles de l'Ancien Monde ont vingt-six chromosomes, celles du Nouveau Monde en ont vingt-six ou cinquante-deux. Toutes ont l'aspect d'arbustes ou d'arbrisseaux, avec des feuilles possédant trois, cinq ou sept lobes et cordées à la base ; leurs fleurs, solitaires et axillaires, sont semblables à celles de la mauve et ont une corolle jaune, pourprée ou tachée de rouge. Les fruits sont des capsules qui se divisent à maturité en trois à cinq valves et qui contiennent des graines globuleuses ou réniformes. Celles-ci sont recouvertes le plus souvent de poils unicellulaires épidermiques, qui, chez les plantes cultivées, atteignent 50 à 55 mm et ont une section aplatie. Ils sont entièrement cellulosiques, de couleur blanche et tordus sur eux-mêmes. Il peut exister des poils courts ne dépassant guère 20 mm, ou *linters*, qui forment un revêtement feutré sur la graine.

La culture du coton occupe dans le monde environ trente millions d'hectares, les principaux producteurs étant les États-Unis, l'Inde, la Chine et l'Égypte. En Inde, la culture est attestée depuis le III^e millénaire avant J.-C. ; aux États-Unis, elle ne date que du XVII^e s., et en Égypte du

▲ *La grande mauve (Malva sylvestris) est commune dans les prés et le long des routes ; ses fleurs et ses feuilles sont utilisées en infusions émollientes et pectorales.*

M. Bavestrelli

▶ *Fleurs d'Althaea rosea : la rose trémière ou passerose.*

XVIII[e] s. Les principales espèces cultivées sont *G. herbaceum*, asiatique, probablement pakistanais, cultivé dans le sud de l'Italie, haut de 1 à 1,50 m, à pétales jaunes à onglet rouge; *G. hirsutum*, américain, probablement péruvien, à pétales entièrement jaunes, également cultivé en Europe méridionale; *G. barbadense*, américain, à pétales jaunes ponctués de rouge; enfin, *G. arboreum*, arbuste sacré en Inde, est peut-être le plus anciennement utilisé. Les deux dernières espèces sont cultivées en Crète.

La famille des *Bombacacées (Bombacaceae)* comprend vingt-huit genres et deux cents espèces d'arbres dont le tronc est souvent très massif (arbres bouteilles). Les feuilles sont alternes, simples ou digitées, fréquemment recouvertes d'écailles ou de poils étoilés, et toujours pourvues de stipules caduques. Il y a souvent des canaux à mucilage. Les fleurs possèdent cinq sépales parfois doublés d'un calicule, et cinq pétales; les étamines sont au nombre de cinq ou plus; leurs anthères peuvent être cloisonnées et diversement contournées. Le pollen est lisse; l'ovaire, supère, possède de deux à cinq loges bi- ou pluriovulées. Les fruits sont le plus souvent des capsules loculicides, et les graines qu'ils contiennent se trouvent parfois enveloppées de poils internes laineux issus du péricarpe. Ces plantes ont une distribution intertropicale et sont spécialement nombreuses en Amérique. Elles comprennent des espèces exploitées pour leurs fibres ou pour leurs fruits comestibles. Parmi celles du genre *Ceiba, C. pentandra* atteint 40 à 50 m, avec un tronc anfractueux de 2 à 2,50 m de diamètre. Il porte, parfois à une trentaine de mètres du sol, des branches verticillées et horizontales. Les fruits capsulaires déhiscents contiennent des graines entourées de poils péricarpiens brillants, faits de cellulose lignifiée, qui constituent le kapok, utilisé pour le rembourrage des coussins, matelas, etc. Les graines fournissent en outre une huile industrielle utilisée en savonnerie, et le fruit, quand il est encore jeune, peut être consommé. En fait, le kapok que l'on trouve dans le commerce est obtenu surtout à partir des fruits d'une forme plus petite de *C. pentandra,* haute de 15 à 25 m, originaire sans doute d'Indo-Malaisie et cultivée dans les régions tropicales. Celle-ci est épineuse et forme des capsules généralement indéhiscentes.

Les soixante espèces du genre *Bombax*, surtout africaines, sont proches des précédentes. Leur tronc, excavé, sert à fabriquer des embarcations légères. C'est le cas en particulier de *B. malabaricum*, d'Inde, de Ceylan et d'Australie. Le genre *Adansonia* comporte quinze espèces de baobabs. Ce sont des arbres d'Afrique, de Madagascar et du nord de l'Australie. *A. digitata*, des savanes d'Afrique, à grandes fleurs pendantes blanc lilacé, a un tronc massif dont la circonférence atteint 30 m, mais sa hauteur ne dépasse guère 20 m. Les fleurs ont un androcée à étamines nombreuses dont les filets sont soudés inférieurement en tube. Les fruits sont des sortes de capsules ovoïdes indéhiscentes, longues d'environ 40 cm, à paroi ligneuse et de couleur noire; ils contiennent une pulpe fibreuse et farineuse comestible (pain de singe). Les jeunes pousses sont aussi comestibles. Le bois est très léger et l'écorce peut servir à fabriquer des cordages ou du papier.

On doit aussi citer le genre *Durio*, qui contient vingt-sept espèces du sud-est de l'Asie, dont les fleurs sont

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Cedri

▲ *En haut : champ de coton (Gossypium herbaceum); au-dessous : stockage du coton.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ *De gauche à droite : fleur, capsule fermée et capsule ouverte du cotonnier.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ *Fleur de* **Bombax ellipticum** *avec ses nombreuses étamines.*

pourvues d'un calicule et dont le fruit est garni d'écailles dures. *D. zibethinus* est cultivé pour ses fruits pulpeux indéhiscents, comestibles quoique malodorants.

La famille des *Tiliacées (Tiliaceae)* comprend quarante-cinq genres et quatre cents espèces de plantes le plus souvent arborescentes ou arbustives, dont les feuilles sont alternes et généralement pourvues de stipules caduques. Les fleurs, avec quatre ou cinq sépales libres ou unis et quatre ou cinq pétales qui peuvent manquer, sont réunies en inflorescences. Il y a parfois un calicule. Les étamines, nombreuses, sont libres ou réunies en faisceaux. Les anthères ont quatre sacs polliniques et le pollen est lisse. L'ovaire, supère, comporte deux carpelles ou plus; la placentation est généralement axile. Il y a souvent un seul ovule par carpelle, mais parfois bien plus. Les fruits sont des capsules ou des akènes. Il peut se former des méricarpes. Ce sont surtout des plantes tropicales, mais quelques genres, comme les tilleuls, sont pourtant répandus également dans les régions tempérées. Le genre *Tilia* appartient à la sous-famille des *Tilioïdées,* dont les sépales sont libres. Il doit son nom au mot grec πτίλον, plume, par référence à la bractée accompagnant les fruits (akènes globuleux à une à trois graines) et qui en facilite la dissémination par le vent. Il existe de dix-huit à soixante-cinq espèces de tilleuls, suivant la façon dont on les comprend, répandues dans les régions tempérées de l'hémisphère Nord. Les hybrides sont fréquents. *T. platyphyllos* et *T. cordata* se rencontrent en France ainsi que leur hybride *T.* × *vulgaris*. Ce sont des arbres atteignant 30 et même 40 m. Le premier a un fruit muni de côtes, qui manquent à peu près chez le deuxième. Les bourgeons du premier ont trois écailles apparentes, ceux du deuxième en ont deux. *T.* × *vulgaris* a des bourgeons et des fruits voisins de ceux de *T. cordata*, mais le fruit est un peu côtelé et les inflorescences sont pendantes, comme chez *T. platyphyllos*, alors qu'elles sont obliquement dressées chez *T. cordata*. Ces arbres sont souvent plantés dans les parcs. *T. tomentosa,* du sud-est de l'Europe et d'Asie Mineure, dont les feuilles sont blanches et tomenteuses en dessous et qui possède des staminodes, est aussi très cultivé.

Le genre *Corchorus* appartient à la même sous-famille et comporte quarante espèces herbacées ou suffrutescentes, qui peuvent atteindre 3 ou 4 m de hauteur. Leurs feuilles sont alternes, à long pétiole, à limbe triangulaire et dentées. Leurs petites fleurs jaunes, solitaires ou réunies en cymes, produisent des capsules pluriséminées, globuleuses ou plus souvent cylindriques, qui s'ouvrent par deux à cinq valves. *C. olitorius*, à fruit cylindrique, et *C. capsularis*, à fruit globuleux, tous deux du sud de l'Asie, sont utilisés pour l'extraction par rouissage d'une fibre textile robuste et grossière, le jute. On les cultive pour cela en Asie méridionale, en Afrique et en Amérique, sous des climats chauds et humides. Le jute sert à tisser des toiles d'emballage, des cordages, des tapis et parfois des objets de passementerie. On consomme aussi les jeunes pousses de ces *Corchorus* comme légumes.

La famille des *Sterculiacées (Sterculiaceae)* comprend des plantes herbacées ou arbustives. Elles ont des feuilles alternes, simples, lobées ou composées-pennées, munies de stipules caduques. Il y a des cellules ou des canaux à mucilage. Les fleurs, réunies en inflorescences complexes, comprennent en général un calice de cinq sépales unis à la base, une corolle à cinq pétales qui peuvent manquer, et deux verticilles d'étamines, plus ou moins soudées entre elles; le cycle externe est staminodial, l'interne souvent multiplié secondairement. Les anthères ont quatre sacs polliniques. L'ovaire, supère, est constitué le plus souvent de cinq carpelles soudés, mais ces pièces peuvent être libres, comme chez les *Sterculia*. Les fruits sont de type varié, et il se forme souvent des méricarpes. Les graines ont en principe un albumen volumineux. Les Sterculiacées rassemblent environ soixante-cinq genres et mille espèces surtout tropicales ou subtropicales. Cette famille comprend les cacaoyers et les colatiers.

Le genre *Theobroma*, du nord de l'Amérique du Sud, doit son importance à deux espèces mexicaines, *Th. cacao* (criollo) et *Th. leiocarpum* (forastero, calabacillo), qui sont les deux cacaoyers déjà exploités par les Aztèques. Il appartient à la tribu des Sterculiées, caractérisée par des fleurs unisexuées et dépourvues de pétales. Les cacaoyers sont des arbres de 10 à 15 m environ à l'état sauvage, maintenus à 5 ou 6 m en culture; le pétiole est accompagné de deux petites stipules caduques. Les fleurs, blanchâtres ou jaunâtres, tachées de rose, apparaissent sur le vieux bois, à l'aisselle de feuilles tombées, et peuvent être solitaires ou par groupes cymeux de deux ou trois. Les fruits (cabosses), issus de gynécées à cinq carpelles, sont des baies ovoïdes longues de 10 à 20 cm et d'un poids de 300 à 500 g, possédant une écorce lisse ou verruqueuse, parcourue par dix sillons longitudinaux, et de couleur le plus souvent jaune rougeâtre. Le péricarpe est formé par une couche externe, charnue, une couche médiane, fibreuse et dure, et une autre interne, limitant les loges. A maturation, les cloisons ovariennes se sont transformées en une pulpe dans laquelle les graines se trouvent immergées. Cette pulpe est blanchâtre, sucrée mais légèrement acidulée. Les graines sont ovoïdes ou aplaties (calabacillo), brunâtres et disposées en dix rangées longitudinales. Elles contiennent un gros embryon avec deux cotylédons charnus repliés sur eux-mêmes, et un albumen qui subsiste entre les replis des cotylédons. Ceux-ci sont riches en amidon, en aleurone, en matières grasses et en alcaloïdes (théobromine et caféine).

On torréfie les graines, ce qui fait apparaître leur arôme particulier, et les amandes, concassées ou moulues et débarrassées des germes et des téguments, donnent le cacao, aliment digestible et tonique utilisé pour la préparation du chocolat.

▶ *En bas, à droite : inflorescence de tilleul* **(Tilia microphylla)** *avec sa bractée.*

▼ *Fruit de* **Durio zibethinus** *(en haut), vu en coupe longitudinale (en bas).*

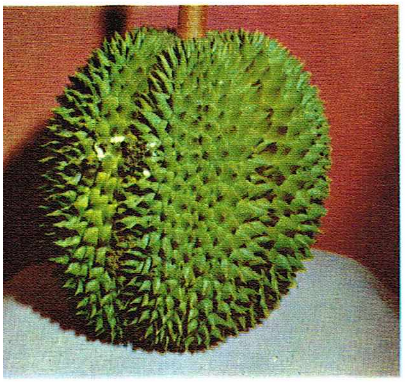

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

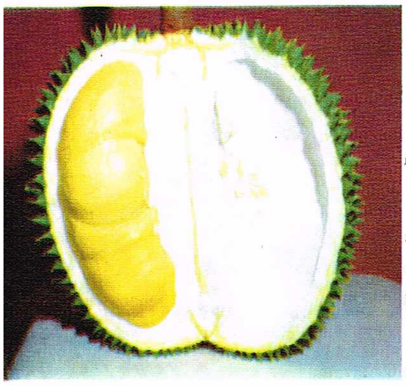

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

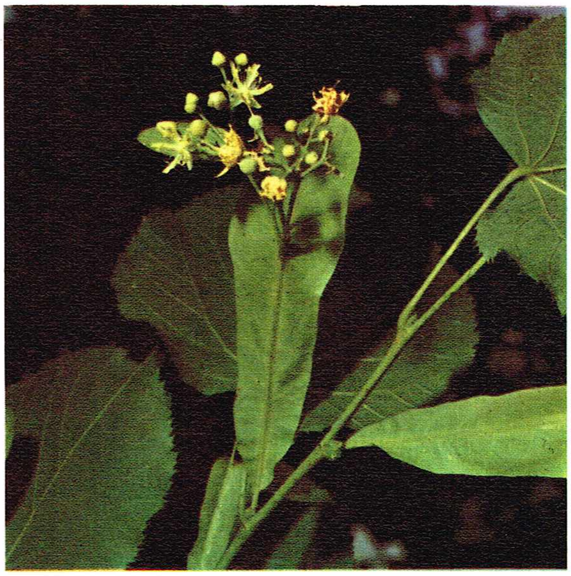

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

T. Sacco

◀ *Le cacaoyer (ici* **Theobroma sp.)** *est un arbre qui porte des fruits pesant de 300 à 500 g et contenant des graines brunâtres qui sont utilisées après torréfaction.*

Le genre *Cola* comporte une centaine d'espèces d'Afrique tropicale. Comme chez les *Sterculia*, les carpelles sont libres. Il s'agit d'arbres hauts de 10 à 15 m, à feuilles alternes, coriaces, ovales-acuminées. Les inflorescences sont portées par les rameaux âgés de plusieurs années. Les fleurs sont en général unisexuées, monoïques. Certains arbres portent des fleurs mâles et des fleurs hermaphrodites. Celles-ci ont cinq sépales soudés et ne possèdent pas de corolle. Elles ont un ovaire supère et des étamines soudées en une petite colonne. La floraison est continue; les fruits, de couleur jaune-brun, sont formés par deux à six follicules disposés en étoile autour du pédoncule floral. Chaque pièce ou cabosse contient de cinq à neuf graines, appelées dans le commerce noix de cola. *C. nitida* et *C. acuminata* sont les principaux colatiers utilisés pour la production de noix de cola. Celles-ci contiennent de la caféine, de la théobromine, du tanin, des sucres, de l'amidon, des huiles et des sels de potassium. Ces plantes sont cultivées dans les régions de climat chaud et humide, surtout en Afrique occidentale, aux Antilles et en Amérique du Sud.

Dans la même tribu des Sterculiées, nous citerons les *Brachychiton*, qui croissent en Australie et sont appelés arbres bouteilles par suite du curieux gonflement présenté par leur tronc.

Le genre *Dombeya* renferme deux cents espèces tropicales et de Madagascar. C'est le type de la tribu des Dombeyées, dont le pollen est épineux et les fleurs hermaphrodites. Les cinq espèces de *Fremontia*, d'Amérique nord-occidentale et du Mexique, n'ont pas de pétales, et leurs fleurs sont hermaphrodites. C'est le genre type de la tribu des Frémontiées.

Les *Éléocarpacées (Elaeocarpaceae)* sont une famille de dix genres et quatre cents espèces de plantes arborescentes ou arbustives des zones tropicales, dépourvues de cellules à mucilage. Il y a de nombreuses étamines libres, et le fruit est capsulaire. On leur a trouvé des rapports avec les Flacourtiacées. Le genre *Elaeocarpus* comporte deux cent cinquante espèces d'Indo-Malaisie, d'Extrême-Orient, de Polynésie, d'Australie et de Nouvelle-Zélande. Leurs anthères s'ouvrent transversalement au sommet en deux valves.

Nous ne ferons que citer les autres familles de l'ordre. Les *Sarcolénacées* (ou *Chlénacées*) groupent trente-trois espèces endémiques de Madagascar, qui ont souvent des cellules à mucilage, mais dont les sépales sont à préfloraison imbriquée, alors qu'ils sont valvaires dans les autres familles à cellules à mucilage. Les *Scytopétalacées*, où les cellules à mucilage manquent, ont des pétales

C. Bevilacqua

▲ ***Plant d'une Géraniacée cultivée, le géranium-lierre.***

▼ ***Culture de lin*** **(Linum sp.).**

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

valvaires, alors qu'ils sont tordus ou imbriqués dans les autres groupes (sauf chez les *Éléocarpacées*), et leurs sépales sont unis entièrement en coupe. Elles groupent trente-deux espèces d'Afrique équatoriale.

Géraniales ou Gruinales

Cet ordre comprend des plantes herbacées à feuilles simples ou composées; elles sont souvent pourvues de poils glanduleux ou de cavités sécrétrices lysigènes, mais ne produisent pas d'oléorésines. Les fleurs sont actinomorphes ou zygomorphes, hermaphrodites ou unisexuées et pentamères. Les étamines sont en nombre égal, parfois inférieur, à celui des pétales, mais le plus fréquemment en nombre double, et dans ce cas, il y a souvent obdiplostémonie (les étamines du cycle externe sont opposées aux pétales), ce qui est dû à une simple déformation secondaire du réceptacle et se rencontre dans divers autres cas (Caryophyllacées, Rutacées, Éricacées, etc.). L'ovaire, supère, est constitué généralement de deux à cinq carpelles soudés. Les fruits sont variés. Il se forme fréquemment des méricarpes. Pour cette raison, les Euphorbiacées sont souvent placées dans cet ordre. L'existence sporadique de corolle, celle d'un seul cycle d'étamines en général et de trois carpelles paraissent pourtant les séparer. Elles ont aussi été rapprochées des Malvales. Diverses Géraniales sont importantes du point de vue économique (lin) ou ornemental (pélargoniums, capucines).

La famille des *Linacées (Linaceae)* comprend vingt-cinq genres et cinq cents espèces de plantes herbacées, arbustives, arborescentes ou grimpantes, des zones chaudes et tempérées, à feuilles entières, généralement alternes et stipulées. Les fleurs ont un calice de quatre ou cinq sépales persistants et une corolle de quatre ou cinq pétales caducs, parfois ligulés. Il y a un ou deux cycles d'étamines. Dans le second cas, l'obdiplostémonie est légère. Il peut y avoir multiplication des étamines, qui sont réunies à la base en un anneau. L'ovaire est syncarpe, à quatre ou cinq carpelles en général, et la placentation est axile. Il y a un ou deux ovules par loge et souvent des fausses cloisons séparant les deux ovules d'un carpelle, comme chez le lin. Les fruits sont des capsules loculicides à cinq loges ou des schizocarpes à méricarpes uniséminés. Les graines ont assez souvent un tégument à épiderme mucilagineux.

Le genre présentant le plus d'intérêt est le genre *Linum*, chez lequel seules les étamines épisépales sont fertiles, les épipétales étant staminodiales. Parmi les deux cents espèces de lins, surtout méditerranéennes et du sud-ouest de l'Amérique du Nord, *L. usitatissimum*, inconnu à l'état sauvage, est la plus importante. C'est une plante annuelle atteignant 80 cm, à feuilles lancéolées, avec une à trois nervures longitudinales. Ses fleurs, bleu vif, sont disposées en corymbes pauciflores. Les pétales dépassent longuement les sépales. En culture, on distingue les variétés à longue tige, à fibres utilisées dans l'industrie textile, et les variétés productrices d'huile (extraite des graines). Ces dernières variétés ont des tiges courtes et ramifiées, portant ainsi de nombreuses fleurs.

Les *Oxalidacées (Oxalidaceae)* sont le plus souvent des plantes herbacées munies de rhizomes, de bulbes ou de tubercules. Parfois, ce sont des arbustes, voire des arbres. Les feuilles sont alternes et généralement composées, pennées ou palmées. Les folioles montrent des mouvements de sommeil; elles sont même sensibles aux excitations chez *Biophytum sensitivum*. Les fleurs sont régulières; il y a cinq sépales, cinq pétales parfois soudés tardivement, dix étamines dont les épipétales sont longues et externes, les épisépales courtes et internes (obdiplostémonie), et qui sont toutes soudées à la base; le gynécée est à cinq carpelles (parfois trois) à styles libres. Il y a souvent de nombreux ovules par loge, en placentation axile. Le fruit est dans la plupart des cas une capsule loculicide pluriséminée projetant ses graines de façon active. Ce sont des plantes communes dans les zones tempérées, mais surtout abondantes dans les régions tropicales et subtropicales, et particulièrement dans l'hémisphère Sud.

Il existe huit genres et neuf cent cinquante espèces, dont huit cent cinquante appartiennent au genre *Oxalis*.

Ces dernières renferment dans leurs feuilles de l'oxalate de potassium. Leurs fleurs, comme il est fréquent dans la famille, ont des styles et des étamines de trois longueurs différentes, et ce trimorphisme, comme chez la salicaire, facilite la fécondation croisée. Les folioles prennent une position de sommeil pendant la nuit, en devenant parallèles aux pétioles. On trouve jusque dans la zone subalpine, surtout en terrain siliceux, dans les endroits humides et ombragés, le pain de coucou *(O. acetosella)*, petite plante vivace de 5 à 8 cm de haut, velue, à feuilles composées-palmées à trois folioles cordiformes minces, toutes radicales. Cette espèce est rampante et forme des stolons souterrains munis d'écailles. Les fleurs sont groupées en cymes sur des pédoncules axillaires; elles ont des pétales blancs veinés de rose, parfois bleuâtres, et éclosent en avril-mai. La plante est répandue dans tout l'hémisphère Nord. On cultive de nombreuses espèces d'*Oxalis* dans les jardins, en particulier une variété à feuilles pourpres d'*O. corniculata* (var. *tropaeoloides*), *O. tetraphylla,* du Mexique, dont les feuilles ont quatre folioles, et *O. adenophylla,* du Chili, où elles en ont une vingtaine. *O. tuberosa,* des Andes, fournit des tubercules amylacés comestibles.

La famille des *Géraniacées (Geraniaceae)* comprend des plantes herbacées ou arbustives, à tige souvent noueuse; leurs feuilles ont une nervation palmée et sont généralement alternes. Les fleurs, régulières ou non, sont réunies couramment en cymes ou en fausses ombelles cymeuses; elles ont cinq sépales persistants, cinq pétales caducs et sont souvent pourvues de glandes nectarifères à la base des filets staminaux. Les étamines au nombre de dix, parfois cinq fertiles seulement *(Erodium)*, parfois quinze, sont obdiplostémones et soudées à la base. L'ovaire, supère, formé par trois à cinq carpelles, est divisé en autant de loges à un ou deux ovules ou plus, et a un style unique ou des styles libres. Les fruits sont quelquefois des capsules, mais, la plupart du temps, il se forme des méricarpes uniséminés indéhiscents, laissant en place une colonne centrale, et parfois pourvus supérieurement d'un long bec recourbé hygroscopique qui facilite leur dissémination et leur germination.

Cette famille comprend près de huit cents espèces réparties en onze genres, souvent xérophiles, qui habitent toutes les régions tempérées chaudes. Certaines sont très intéressantes du point de vue ornemental, d'autres fournissent des médicaments populaires astringents, d'autres encore des huiles essentielles très employées.

Les *Geranium* forment des méricarpes uniséminés à partir de chaque carpelle biovulé. Ces méricarpes sont prolongés par une languette du bec qui se courbe en hélice verticale et non en spirale comme chez les *Erodium*. Les « géraniums » des fleuristes sont en fait des pélargoniums. Il y a trois cent soixante-quinze espèces de géraniums dans les zones tempérées; parmi celles de nos régions, nous citerons l'herbe-à-Robert *(G. robertianum)*, à feuilles triangulaires-pentagonales et palmatiséquées dont les lobes sont profondément découpés. On la trouve partout dans les rocailles, sur les murs et dans les bois. Si on la froisse, cette plante dégage une odeur nauséabonde. Ses feuilles sont divisées en trois ou cinq segments souvent rougeâtres. Les fleurs sont réunies par deux sur de longs pédoncules. Elles ont des sépales dressés et des pétales roses, rouges, ou parfois blancs, avec un onglet bien marqué. L'herbe-à-Robert est répandue dans tout l'hémisphère Nord. *G. sanguineum,* qui atteint 40 cm, possède des feuilles très profondément palmatipartites à contour orbiculaire et de grandes fleurs solitaires, rouges, à sépales étalés et pétales veinés. Il se rencontre dans les bois secs, en Europe et dans le Caucase.

Le genre *Pelargonium* a des fleurs zygomorphes et éperonnées. Les deux pétales supérieurs sont en effet différents des autres par la forme, la taille et la couleur; il y a en outre, au niveau du sépale supérieur, un éperon soudé au pédoncule. L'androcée est plus développé en avant et les trois étamines épipétales de ce côté sont généralement stériles. Le genre compte deux cent cinquante espèces répandues surtout dans la région du Cap. Les espèces cultivées proviennent de cette région. *P. zonale,* à feuilles orbiculaires mates et velues et zonées de brun, peut atteindre une hauteur de 1 m, et a des ombelles denses de fleurs vivement colorées en rouge ou en rose. Son hybride avec *P. inquinans,* à feuilles plus ou moins maculées et visqueuses, est souvent cultivé *(P. × hybridum)*. *P. grandiflorum* a de grandes fleurs blanches ou roses veinées de pourpre ou de violet, par groupes de trois. Il est glabre et glauque, à feuilles lobées et dentées, mais ses hybrides velus et cendrés sont bien plus souvent cultivés. *P. peltatum* (géranium-lierre) a de petites feuilles peltées, charnues, glabres en général, vert intense, ressemblant à celles du lierre, et sa tige est décombante et ramifiée. Enfin le géranium rosat *(P. capitatum),* dont les feuilles lobées dégagent par froissement une odeur de rose, est cultivé pour l'extraction de son essence (« essence de rose »). A côté du géraniol et du citronellol, celle-ci contient de l'alcool phényléthylique qui lui confère son parfum.

La famille des *Tropéolacées (Tropaeolaceae)* comprend quatre-vingts espèces, en deux genres, de plantes herbacées, généralement grimpantes, répandues en Amérique du Sud, depuis les forêts tropicales jusqu'aux régions sèches et à la limite de l'étage nival dans les montagnes. Les feuilles sont le plus souvent alternes et simples ou composées-palmées. Les fleurs sont solitaires, axillaires et presque toujours longuement pédonculées. Elles sont zygomorphes et ont un calice à cinq sépales pâles distincts. Au niveau du sépale postérieur, le tube floral qui le porte forme un éperon sur lequel sont insérés les pétales postérieurs; il y a cinq pétales libres, les trois antérieurs peltés et fréquemment appendiculés, parfois manquants, les deux postérieurs épeltés, à onglet indistinct et sans appendice. Les étamines sont au nombre de huit; l'ovaire, tricarpellaire et triloculaire, est supère, avec un ovule par loge, en placentation axile. Le fruit est formé de trois méricarpes indéhiscents, uniséminés. Les Tropéolacées renferment des cellules à myrosinase et des hétérosides à sénevol. Les graines des Tropéolacées renferment de l'acide érucique. Enfin, ces plantes peuvent oxyder le glycolate et le glyoxylate en acide oxalique. Tous ces caractères les rapprochent des Crucifères. Peut-être ne s'agit-il que d'une remarquable convergence chimique, car la morphologie ne montre point de rapport entre les deux familles.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

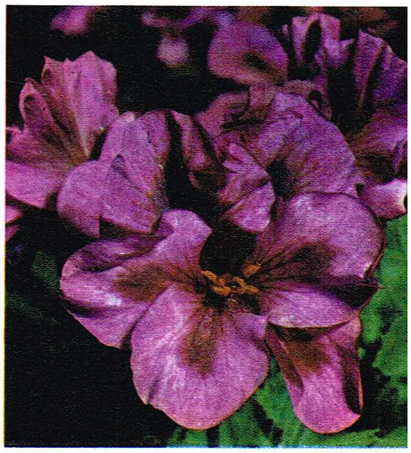
Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

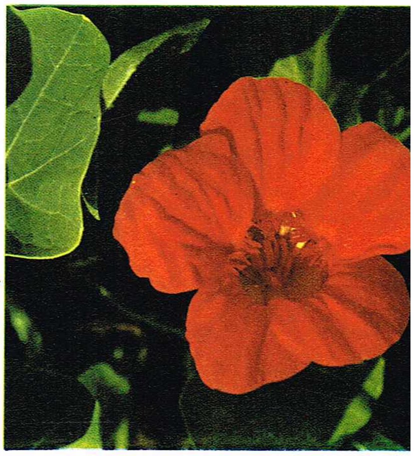
Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***De haut en bas : fleurs de deux hybrides dérivés de*** **Pelargonium grandiflorum** ***et fleur de capucine*** **(Tropaeolum majus).**

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

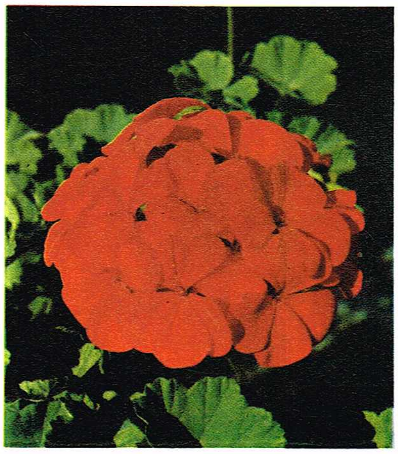
Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ ***De gauche à droite : fleurs de*** **Geranium silvaticum** ***et inflorescences de*** **Pelargonium peltatum** ***et de*** **P. × hybridum.**

Etrusko

▲ *La capucine* (Tropaeolum majus) *est une plante à feuilles peltées.*

▼ *Fleurs et fruit de* Tribulus terrestris.

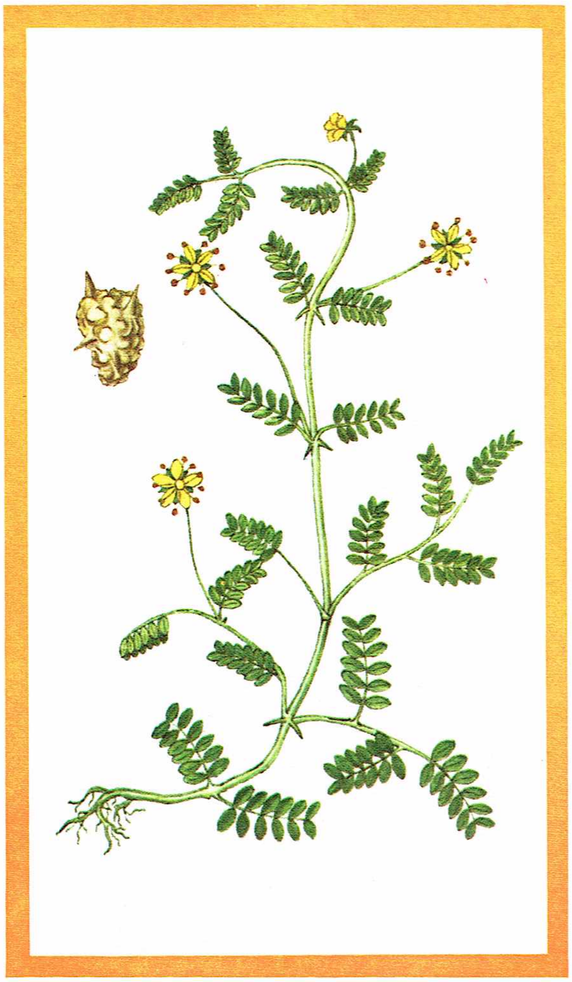

I.G.D.A.

Le genre *Tropaeolum* englobe toutes les espèces sauf une. Plusieurs sont cultivées, surtout *T. majus* à feuilles orbiculaires peltées, glauques et glabres, et ses hybrides avec *T. minus* et *T. peltophorum* (capucines).

La famille des *Érythroxylacées (Erythroxylaceae)* comprend quatre genres et deux cents espèces de plantes ligneuses toujours glabres à feuilles simples, à bord entier ou crénelé, le plus souvent alternes et pourvues de stipules axillaires (stipules médianes). Les fleurs, axillaires, solitaires ou réunies en inflorescences, ont un calice à cinq sépales et une corolle à cinq pétales, lesquels ont un onglet unifacial dont la portion ventrale se continue par des « appendices » de la base du limbe. Les étamines, en disposition obdiplostémone, sont au nombre de dix, avec des filets concrescents à la base. L'ovaire, bi- ou triloculaire, comporte le plus souvent une seule loge fertile uniovulée. Les fruits sont des drupes. Ces plantes sont largement répandues dans les régions tropicales et spécialement en Amérique. Elles se rapprochent des Linacées, mais leurs pétales et leurs fruits les en séparent.

Le genre *Erythroxylum* renferme deux cents espèces, surtout américaines. *E. coca*, du Pérou et de Bolivie, et *E. novo-granatense*, de Colombie, ont des feuilles qui contiennent principalement divers alcaloïdes, du tanin et une huile essentielle riche surtout en salicylate de méthyle. Les alcaloïdes contenus sont, d'une part, des corps dérivés du pseudotropanal, surtout la cocaïne, les deux truxillines isomères et la cynnamylcocaïne, et, d'autre part, des dérivés de la N-méthyl-pyrrolidine, l'hygrine et la cuscohygrine, et enfin de la nicotine en petite quantité. Les propriétés anesthésiques et stupéfiantes des feuilles sont surtout dues à la cocaïne. Les plantes de Bolivie sont les plus riches en cocaïne. Celle-ci en est extraite et utilisée comme anesthésique local; c'est un stimulant et un euphorisant, mais qui engendre une dépendance toxicomane (stupéfiant). L'extraction de la cocaïne, des truxillines et de la cinnamylcocaïne prive les feuilles de leur pouvoir stupéfiant, mais leur laisse leur arôme. Elles sont utilisées alors pour la préparation de boissons rafraîchissantes (Coca-cola). Il y a quelques cultures d'*Erythroxylum*, mais ce sont surtout les arbres spontanés qui sont exploités. Certains *Erythroxylum* fournissent un bois rouge très dur (« bois de fer » : *E. ermarginatum, E. ecarinatum*).

La famille des *Zygophyllacées (Zygophyllaceae)* rassemble deux cent cinquante espèces, en trente genres, de plantes ligneuses ou arbustives, rarement herbacées, répandues surtout dans les régions subtropicales arides, spécialement dans les déserts et sur les côtes. Certaines se rencontrent aussi dans les zones tropicales ou tempérées. Les fleurs, à calice et corolle constitués par quatre ou cinq pièces, ont huit ou dix étamines, parfois quinze, en disposition obdiplostémone, souvent pourvues d'expansions stipulaires. L'ovaire est généralement divisé en quatre ou cinq loges. La placentation est axile, le nombre d'ovules variable. Les fruits sont des capsules, des baies ou des méricarpes.

Chez les *Zygophylloïdées*, les feuilles sont presque toujours opposées et stipulées. Le genre *Zygophyllum* comporte quatre-vingt-dix espèces d'herbes des déserts, des côtes et des steppes de l'Ancien Monde. Les feuilles sont opposées et composées-pennées, parfois à deux folioles seulement. Le fruit est une capsule. *Z. fabago* habite le sud-est de l'Europe et l'Asie; il est naturalisé dans l'ouest de la région méditerranéenne, en particulier en France. Il est glabre et ses feuilles ont deux folioles.

Tribulus terrestris, à feuilles pennées et méricarpes étoilés et épineux, est commun dans les endroits sablonneux du midi et de l'ouest de la France.

Enfin, les *Limnanthacées (Limnanthaceae)* sont une petite famille de deux genres et huit espèces d'Amérique du Nord. Ce sont des plantes herbacées des marécages, à feuilles pennées et dont les fleurs ressemblent à celles des Géraniacées, mais leur gynécée est formé de trois ou cinq carpelles uniovulés, et le style est gynobasique (inséré profondément au centre des loges, dont les parois dorsales sont renflées). Le fruit est formé de trois ou cinq nucules (méricarpes) et évoque celui des Labiées. On a envisagé pour ces plantes des rapports avec les Tubiflores, les Sapindales ou les Célastrales.

Pandales

Ce petit ordre, de position systématique très douteuse, est constitué par la seule famille des *Pandacées (Pandaceae)*, elle-même formée d'un unique genre monospécifique. *Panda oleosa* est un arbre dioïque, du Gabon et du Cameroun, haut de 10 à 15 m, à feuilles simples, alternes, ovales-lancéolées, à consistance de cuir, stipulées et glanduleuses, ainsi que l'écorce. Les fleurs forment des grappes insérées sur le vieux bois (cauliflorie) ; elles ont un calice en cupule, cinq pétales, dix étamines en deux verticilles inégaux, et un ovaire à trois ou quatre carpelles tri- ou tétraloculaire, avec un ovule orthotrope pendant par loge. Les fruits sont de grosses drupes qui contiennent des graines oléagineuses, dont on tire une huile utilisée localement dans l'alimentation.

Térébinthales

Il s'agit de plantes ligneuses à feuilles composées, pourvues généralement de tissu sécréteur. Les fleurs sont habituellement hermaphrodites, pentamères, à calice et corolle différenciés, à ovaire supère formé de carpelles parfois libres, mais presque toujours soudés en un ovaire pluriloculaire, fréquemment à un ou deux ovules par loge. Un disque est souvent bien développé. L'ensemble des familles étudiées dans cet ordre peut être scindé en deux. Les *Rutales* comprennent alors les Rutacées et les familles suivantes jusqu'aux Vochysiacées. Les *Sapindales* groupent les autres familles. Les ovules sont dans l'ensemble épitropes chez les premières, apotropes chez les secondes, c'est-à-dire que le repliement de l'ovule anatrope se fait vers le haut dans le premier cas, vers le bas dans le second.

M. Bavestrelli

▲ ***Les fleurs de la rue* (Ruta graveolens) *sont groupées en thyrses corymbiformes.***

La famille des *Rutacées (Rutaceae)* habite les régions tempérées chaudes et tropicales des deux hémisphères, mais spécialement l'Afrique du Sud et l'Australie. Elle renferme cent cinquante genres et mille six cents espèces, essentiellement des plantes ligneuses; certaines ont une grande importance économique. Elles présentent des glandes à essence, lysigènes ou simplement schizogènes, qui apparaissent comme de petits points transparents. Les feuilles sont alternes et simples ou composées. Il y a parfois des épines qui sont de simples aiguillons comme celles des rosiers, ou bien correspondent à des feuilles. Les fleurs, habituellement hermaphrodites et régulières, possèdent de deux à cinq sépales et autant de pétales parfois soudés postgénitalement, avec des étamines obdiplostémones en nombre au moins double et souvent augmenté par multiplication secondaire. Il y a un disque suprastaminal à bord crénelé ou denté. Les carpelles sont la plupart du temps au nombre de quatre ou cinq, avec un ou deux ovules par loge, parfois plus. Ils peuvent être libres inférieurement, mais ils sont unis généralement en un gynécée pluriloculaire autour d'un prolongement de l'axe floral. Les fruits sont des capsules, des follicules, des drupes, des akènes, des baies ou des hespérides (oranges). Il y a quelquefois formation de méricarpes. La polyembryonie est fréquente.

Dans la sous-famille des *Rutoïdées,* on dénombre quatre ou cinq carpelles, souvent en partie libres. Les glandes sont lysigènes. Chez les *Zanthoxylum*, à fleurs polygames, on trouve des carpelles biovulés presque totalement libres, unis seulement au niveau des stigmates. Chez la rue *(Ruta graveolens)*, sous-arbrisseau glabre, glauque et d'odeur désagréable, les feuilles sont légèrement charnues et divisées profondément en segments ovales ou linéaires. Les fleurs, groupées en thyrses corymbiformes, sont petites et jaunes. Les latérales sont tétramères, mais les terminales sont pentamères. Les quatre ou cinq carpelles biovulés sont renflés au-dessus de l'insertion des styles. Les fruits sont des capsules tuberculeuses. On trouve cette espèce dans les lieux arides et caillouteux de la région méditerranéenne et d'Europe centrale et occidentale, mais elle est souvent seulement naturalisée. Elle est indigène dans les Balkans et en Crimée. Elle contient du rutoside, employé pour diminuer la fragilité des capillaires, mais qu'on extrait d'autres plantes, notamment de *Sophora*. L'essence de rue contient surtout de la méthylnonylcétone, rubéfiante et toxique. Il y a soixante espèces de rues dans la région méditerranéenne et en Asie jusqu'à l'est de la Sibérie.

La fraxinelle *(Dictamnus albus)* est un sous-arbrisseau portant de belles grappes de grandes fleurs blanches ou roses veinées de pourpre ; elles sont zygomorphes, les quatre pétales sont dressés, l'inférieur pendant, et les dix longues étamines sont dirigées vers le bas. Les feuilles sont imparipennées, dentées et parsemées de glandes qui émettent, surtout par temps chaud, des vapeurs d'huiles essentielles qu'on peut enflammer si elles sont abondantes. Cette plante vit sur sols calcaires, aux expositions chaudes, dans le sud de l'Europe et en Asie tempérée. Il n'y a que deux *Dictamnus*.

La sous-famille des *Citroïdées (Aurantioïdées)* comprend des arbres ou arbustes toujours verts, souvent épineux, de grande importance économique pour les fruits (agrumes) et les essences qu'ils produisent dans leurs glandes lysigènes. On les cultive dans les régions chaudes et tempérées chaudes des deux hémisphères. Le péricarpe (zeste) a une partie externe (exocarpe) vivement colorée, appelée flavédo, très riche en glandes contenant des essences, et une partie interne (mésocarpe) parenchymateuse, blanche et spongieuse, l'albédo. La pulpe est constituée par des cellules utriculaires, sortes de poils portés par l'endocarpe et remplis de suc aqueux, sucré et acidulé. Les graines sont renfermées dans des loges carpellaires. La pulpe de chaque carpelle forme un « quartier »; il y en a de cinq à douze. Le genre *Citrus* comporte soixante espèces d'Indo-Malaisie et de Chine. Ce sont des arbres à feuilles simples. *C. sinensis* est l'oranger commun ou oranger doux, arbuste parfois épineux, à feuilles coriaces, ovales-aiguës et luisantes, un peu crénelées, et portées par un pétiole à ailes étroites. Ses fleurs très parfumées, axillaires, ont cinq pétales charnus, blancs et des étamines nombreuses par multiplication secondaire, comme l'indique leur disposition en faisceaux. Ses fruits (oranges), sphéroïdaux ou ovoïdaux, ont une pulpe orangée ou de couleur vineuse selon les formes culturales et riche en vitamine C. Le bigaradier ou oranger amer, *C. aurantium (C. bigaradia),* souvent cultivé dans les régions chaudes au bord des avenues, diffère du précédent par la présence d'épines, par ses pétioles largement ailés (l'aile est large de 1 cm) et ses fruits plus rugueux (bigarades), avec une pulpe non comestible à l'état cru, de saveur acide et amère. On fait avec ce fruit des sirops et des confitures. Les fleurs, comme celles de l'oranger doux, fournissent à la parfumerie l'essence de néroli. Les feuilles contiennent des hétérosides amers et des amaroïdes et fournissent l'essence de petit grain. L'écorce du fruit, riche en hétérosides amers et en limonène, est utilisée comme

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

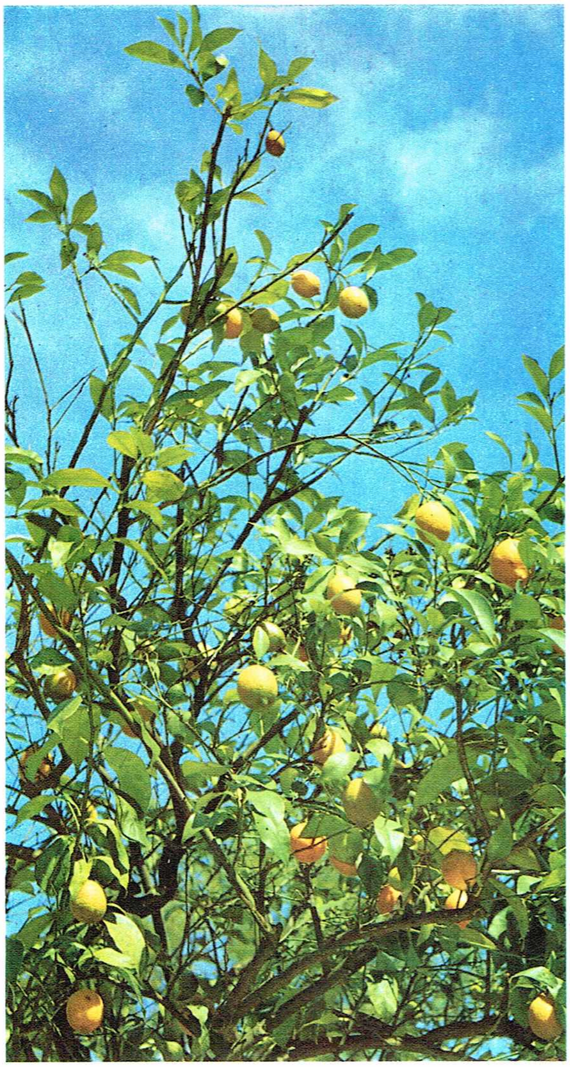

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

tonique et stomachique et surtout en distillerie pour la préparation du curaçao. *C. aurantium* var. *pumila (C. myrtifolia)* est le bigaradier chinois, qui possède des feuilles à pétiole peu ailé et produit des fruits orangés, à écorce aromatique, à pulpe acide et amère, non comestibles à l'état cru mais dont on fait des sirops et des confitures. *C. limon* ou citronnier est également épineux. Ses feuilles sont ovales-oblongues, aiguës, dentées et ont un pétiole dépourvu d'ailes. Ses fleurs, souvent unisexuées, sont blanches, pourprées extérieurement, de même que les bourgeons et les jeunes pousses. Ses fruits (citrons) sont ellipsoïdaux, avec un mamelon apical, une écorce jaune clair aromatique, et une pulpe acide mais non amère. A part leur usage alimentaire, ils servent à la préparation de boissons et à l'extraction d'acide citrique. *C. limetta* est voisin, mais à fleurs blanches et fruit non acide. *C. medica* ou cédratier est aussi voisin du citronnier. C'est un arbre assez élevé et épineux. Ses feuilles sont grandes, dentées et possèdent un pétiole non ailé. Ses fleurs sont blanches et pourprées à l'extérieur, de même que ses bourgeons. Ses fruits (cédrats) sont lisses ou bosselés, munis d'un mamelon, à albédo très épais, à pulpe acide mais non amère et peu abondante. Ils sont de couleur jaune à maturité et ont une écorce très aromatique. *C. reticulata (C. nobilis)* ou mandarinier a de petites feuilles lancéolées à pétiole ailé. Ses fruits (mandarines), assez petits, sont comprimés dans le sens vertical; ils ont des quartiers facilement détachables de l'écorce, qui est bosselée, et une pulpe juteuse et douce. Dans les graines, l'embryon est vert. *C. grandis (C. maxima)* ou pamplemoussier est un arbre épineux à bourgeons et jeunes pousses très velus, de même que la nervure médiane de ses feuilles, dont le pétiole est largement ailé. Il produit de gros fruits (pamplemousses) comprimés, lisses, jaune pâle, à pulpe jaune clair et parfois rosée, de saveur acidulée et un peu amère. On consomme les fruits des hybrides de cette espèce *(C. paradisi)*. Le limettier *(C. aurantiifolia)* produit des fruits appelés limettes. Ses pétioles sont largement ailés. Les limettes ressemblent à des citrons, mais sont sphéroïdales, à mamelon peu marqué surmonté du style persistant, à écorce jaunâtre et fine, un peu amère, et à pulpe jaune ou verte, fort acide. Elles servent à la préparation de boissons rafraîchissantes. Il existe aussi une variété douce, à pulpe dépourvue d'acide citrique. *C. bergamia* ou bergamotier présente des feuilles ovales, à pétiole largement ailé. Ses fruits, les bergamotes, sont globuleux ou légère-

▲ *De haut en bas : fruit et fleurs de l'oranger amer* (Citrus aurantium). *A droite : citronnier* (Citrus lemon) *chargé de ses fruits.*

T. Poggio

▶ *Port caractéristique d'un oranger commun* (Citrus sinensis).

ment piriformes, surmontés du style persistant, jaune clair, très parfumés et à pulpe acide non comestible. Du zeste on extrait l'essence de bergamote, qui entre notamment dans la composition de l'eau de Cologne.

Il est facile de produire des hybrides entre les différentes espèces d'agrumes. Ce phénomène a été utilisé pour obtenir des fruits à caractères intermédiaires. Les clémentines proviennent probablement de l'hybride entre le mandarinier et le bigaradier chinois. Elles ressemblent aux mandarines, mais ont des quartiers qui adhèrent à l'écorce. Elles sont précoces et très juteuses. Elles sont apparues spontanément vers 1900 en Algérie. Le mandarinier s'est sans doute aussi hybridé avec le bigaradier ou l'oranger doux pour produire *C. deliciosa*, dont les fruits sont les tangérines, mandarines volumineuses à fruit peu aplati. Il existerait encore un hybride du mandarinier avec le citronnier. *C. paradisi (C. decumana)* semble être un hybride du pamplemoussier et de l'oranger doux. Il a des bourgeons et des rameaux glabres ; il produit les fruits connus sous le nom de « grape-fruits ». Le pamplemoussier se serait aussi hybridé avec le citronnier. Le limettier s'est croisé, pense-t-on, avec *Fortunella margarita* pour donner des arbres (kumquats) bien résistants au froid, à fruits ovoïdes munis d'une pulpe plus abondante que ceux des *Fortunella*. A ces hybrides demeurés hypothétiques s'ajoutent ceux qui ont été obtenus artificiellement et sont indiscutables. Une quinzaine de combinaisons au moins ont été réussies, et certaines sont triples comme l'hybride entre le citronnier et l'hybride de *Poncirus* avec l'oranger.

Poncirus trifoliata, du nord de la Chine, est cultivé pour l'ornement. Il est parfaitement rustique en climat tempéré et ses fruits mûrissent très bien dans une grande partie de la France. C'est un petit arbre épineux à feuilles à trois folioles. Ses fruits sont de taille assez modeste, à écorce jaune et veloutée. Ils ne sont pas comestibles ; leur pulpe est amère. Au printemps, l'arbre se couvre d'abondantes fleurs blanches et parfumées qui paraissent avant les feuilles. Il sert de porte-greffe pour les agrumes. Il a été croisé avec des orangers, et il en est résulté des hybrides intergénériques fertiles dont les fruits (citranges) sont utilisables au moins en confiserie.

Les *Fortunella* sont un genre d'Asie orientale, dont certaines espèces arbustives produisent de petits fruits, les kumquats, ornementaux mais également comestibles, crus ou en confitures. C'est le péricarpe proprement dit, plutôt que la pulpe, qui est ici consommé.

La famille des *Simaroubacées (Simaroubaceae)* est voisine de celle des Rutacées et en diffère par ses fleurs généralement unisexuées, ainsi que par l'absence de glandes sécrétrices. Elle comprend vingt-quatre genres et cent espèces d'arbres et d'arbustes surtout tropicaux, à feuilles presque toujours alternes, souvent pennées, et amères, comme l'écorce. Leurs fleurs sont régulières, habituellement petites et groupées en panicules ou en épis axillaires. Elles sont tri- à heptamères, à étamines obdiplostémones libres, et munies de calice et de corolle. L'ovaire est supère et normalement entouré par un disque en saillie. Il y a en général quatre ou cinq carpelles soudés seulement par leur style ou leur stigmate et pourvus chacun de un ou deux ovules. Les fruits sont des drupes, rarement des samares ou des baies.

Une seule espèce est communément cultivée dans nos régions, l'ailante *(Ailanthus altissima = A. glandulosa)*, qui a été importé de Chine au XVIIIe siècle, pour nourrir de ses feuilles un ver à soie, le bombyx de l'ailante. C'est un arbre très ramifié, atteignant 20 m, à écorce presque lisse à rayures claires. Il appartient à la sous-famille des *Simarouboïdées*, dont les carpelles sont uniovulés. Ses feuilles caduques imparipennées, qui atteignent 60 cm de long, ont des glandes marginales à la base des folioles, et dégagent une odeur désagréable. Elles ont de treize à vingt-cinq folioles. Les fruits sont des samares ; chaque fleur en donne de une à six à partir d'autant de carpelles libres ; chacune est uniséminée. On utilise l'ailante pour fixer des berges risquant de s'ébouler. Il est très rustique et rejette abondamment de souche. On peut le considérer comme naturalisé dans une grande partie de l'Europe. Son odeur lui fait préférer comme arbre de bordure *Toona (Cedrela) sinensis* (Méliacées), qui a le même port, mais n'a pas de glandes et dont les folioles sont dentées au sommet.

Quassia amara, du Brésil, fournit un bois riche en un principe amer qui est utilisé comme eupeptique et insecticide (papier « tue-mouches »).

Les *Burséracées (Burseraceae)* comprennent vingt genres et six cents espèces ligneuses, qui vivent sous les tropiques. C'est une famille proche des deux précédentes par les caractères de ses fleurs, mais avec deux ou trois carpelles soudés en un ovaire pluriloculaire à deux ovules par loge. Le fruit est une drupe dont l'épicarpe s'ouvre parfois en valves. Il y a toujours des canaux résinifères schizogènes dans le liber. Chez les Bursérées, la drupe contient un seul noyau formé par l'ensemble des carpelles.

Le genre *Boswellia* renferme vingt-quatre espèces des zones sèches d'Afrique orientale et du sud de l'Asie. *B. carteri* donne l'un des encens les plus réputés (oliban). Il s'agit de la gomme-résine aromatique de cette plante. Quelques autres *Boswellia* produisent aussi de l'encens. Ce sont de petits arbres affectionnant les terrains calcaires des zones montagneuses arides entre 1 000 et 1 800 m d'altitude.

La famille des *Méliacées (Meliaceae)* est constituée par des plantes ligneuses, souvent de grands arbres, à feuilles généralement pennées, parfois bi- ou tripennées, sans stipules. Il y a des cellules sécrétrices. Les fleurs sont groupées en panicules, grappes ou ombelles. Elles sont pentamères, avec des filets staminaux plus ou moins soudés en tube. L'ovaire, supère, entouré d'un disque, comprend quatre ou cinq carpelles ; il est pluriloculaire avec un ou deux ovules par loge. Leurs fruits sont des drupes, des baies ou des capsules dont les graines sont généralement ailées. On en compte environ cinquante genres, avec quatorze cents espèces surtout tropicales.

Chez les *Mélioïdées*, il y a un tube staminal, le fruit est une baie ou une drupe et les graines ne sont pas ailées.

Melia azedarach, du nord-ouest de l'Inde, dans l'Himalaya, a des feuilles bipennées atteignant 80 cm de long. On le cultive pour l'ornement sous le nom de lilas des Indes, du fait de ses fleurs lilas en panicules de 10 à 20 cm de long.

Chez les *Swieténioïdées*, il y a aussi un tube staminal, mais le fruit est une capsule et les graines sont ailées. *Swietenia mahogani*, des Antilles, *S. bijuga*, d'Amérique centrale, et d'autres produisent l'acajou vrai, bois à aubier jaunâtre et à cœur brun rougeâtre, assez lourd, facile à travailler, se conservant bien et très utilisé comme bois

▼ **Fortunella margarita** ***donne des fruits de petite taille : les « kumquats », qui se consomment le plus souvent en confiture ou confits.***

R. Paglietta

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *A gauche : bois de la Méliacée* **Guarea cedrata.** *Au milieu : bois de* **Khaya sp.,** *un acajou d'Afrique. A droite :* **Rhus typhina** *var.* **laciniata** *est un arbuste cultivé à des fins ornementales.*

d'œuvre et d'industrie. Les acajous africains proviennent des genres voisins *Khaya* et *Entandophragma*. *E. cylindricum* donne l'acajou sapeli.

Chez les *Cédréloïdées,* les étamines sont libres, le fruit est une capsule et les graines sont ailées. Les bois parfumés du genre *Cedrela,* d'Amérique tropicale, sont appréciés. Le genre *Toona* se rencontre en Indo-Malaisie, en Chine et dans l'est de l'Australie. *T. (Cedrela) sinensis,* de Chine, a le port d'un ailante, mais une écorce plus ou moins lisse et des folioles inodores dentées au sommet.

La famille des *Trémandracées (Tremandraceae)* est constituée par des arbustes ou des arbrisseaux xérophiles, répartis en trois genres avec environ trente espèces australiennes, surtout dans l'Ouest. Leurs feuilles sont un peu éricoïdes. Leurs fleurs sont axillaires, solitaires, rouges ou violettes. Les étamines s'ouvrent au sommet par un clapet transversal. L'ovaire a deux carpelles soudés à deux loges uniovulées et devient une capsule.

Les *Polygalacées (Polygalaceae)* sont une famille de treize genres et environ huit cents espèces de plantes tropicales et des régions tempérées. Elles sont ligneuses ou herbacées, à feuilles simples, alternes, opposées ou verticillées. Les stipules sont rares, mais peuvent être épineuses. Il y a quelques parasites ou saprophytes sans chlorophylle. Les fleurs sont pentamères, mais zygomorphes, avec deux sépales latéraux développés en ailes pétaloïdes. Les pétales sont généralement réduits aux trois antérieurs et unis au tube formé par les étamines, qui sont au nombre de huit ou moins. Les anthères s'ouvrent par des pores. Il y a en général deux carpelles médians uniovulés formant un gynécée à deux loges.

Le genre cosmopolite *Polygala* est seul présent en Europe. C'est le plus important de la famille. Ce sont des herbes ou parfois des arbustes à fleurs en grappes ou en épis, à un ovule par loge et à fruit capsulaire ailé. *Polygala vulgaris* est une herbe vivace répandue en Europe, en Asie occidentale et en Amérique du Nord, à fleurs roses, bleues ou blanches. Les feuilles sont réparties le long de la tige. Il est très polymorphe.

Les Xanthophyllées ont des étamines libres et un ovaire uniloculaire. Elles ne comprennent que le genre *Xantophyllum*, petit arbre d'Indo-Malaisie et d'Australie. Cette tribu mérite peut-être le rang de famille indépendante.

Les *Malpighiacées* et les *Vochysiacées* ont des fleurs zygomorphes dont le plan de symétrie est oblique. Cela se manifeste au moins dans leur gynécée. L'appareil sécréteur manque.

Les *Malpighiacées (Malpighiaceae)* sont une famille de huit cents espèces en quatre-vingt-trois genres à laquelle appartiennent des plantes ligneuses qui sont le plus souvent des lianes, à feuilles entières, opposées et stipulées, pourvues de poils articulés appliqués et parfois de poils urticants. Les fleurs, à zygomorphie oblique au moins au niveau de leur gynécée, possèdent cinq sépales souvent pourvus de glandes, cinq pétales fréquemment inégaux, onguiculés et dentés ou frangés, et dix étamines obdiplostémones. Les fruits sont en général des schizocarpes provenant d'un ovaire tricarpellaire, triloculaire, à un ovule par loge. Les méricarpes sont indéhiscents ou à déhiscence loculicide. Ils sont souvent ailés. Le genre *Malpighia,* d'Amérique tropicale, forme, lui, des drupes. *M. coccigera*, appelé cerisier des Antilles, est un arbuste d'ornement des régions tropicales cultivé pour ses baies charnues, semblables aux cerises. Les drupes de *Byrsonima crassifolia*, de Costa Rica, sont d'ailleurs comestibles, comme celles de certains *Malpighia* (moureilles).

La famille des *Vochysiacées (Vochysiaceae)* comprend deux cents espèces en six genres, le plus souvent ligneuses. Les fleurs sont zygomorphes à symétrie oblique. L'ovaire peut être infère. Il y a un éperon latéro-dorsal formé par un pétale, et une seule étamine fertile. Le gynécée comporte trois carpelles, souvent à ovules nombreux. Le fruit est généralement une capsule septicide. Les Vochysiacées se trouvent surtout en Amérique tropicale, mais certaines en Afrique tropicale occidentale. Ce sont essentiellement des arbres ou arbustes à feuilles simples opposées ou verticillées. Elles produisent souvent des gommes et des résines et possèdent du liber interne.

Nous en arrivons à un deuxième groupe de Thérébinthales, dont on peut faire l'ordre des Sapindales.

Les *Anacardiacées (Anacardiaceae)* sont des arbres ou des arbustes, surtout des régions chaudes, répartis en soixante-dix-neuf genres et six cents espèces. Leurs feuilles sont caduques ou persistantes, simples ou composées, pennées ou palmées. Il y a des canaux résinifères schizolysigènes. Les fleurs, groupées en inflorescences, sont hermaphrodites ou unisexuées, actinomorphes et

pentamères. Il y a cinq ou dix étamines, parfois plus ou moins. L'ovaire peut être infère. Les carpelles, presque toujours au nombre de trois, sont uniovulés, soudés, parfois libres. Le fruit est drupacé, à mésocarpe résineux.

Chez les Rhoïdées, il y a bien trois carpelles formant trois loges, mais une seule est fertile. Le genre *Pistacia* n'a pas de corolle, est dioïque et comprend neuf espèces, dont trois sont très importantes dans la zone méditerranéenne : le lentisque *(Pistacia lentiscus)*, le térébinthe *(P. terebinthus)* et le pistachier *(P. vera)*, ce dernier cultivé pour ses fruits comestibles, les pistaches.

Le premier est typique du maquis méditerranéen. Il peut atteindre plusieurs mètres de hauteur, mais c'est en général un arbuste prostré, muni de petites feuilles paripennées coriaces, luisantes au-dessus, à rachis ailé, et formant des drupes rouges puis noires en automne. Ses fleurs sont réduites, rougeâtres, sans corolle et réunies en panicules axillaires. Le lentisque donne, par incision de son écorce, une résine triterpénique odorante qui servait, entre autres, de masticatoire (résine mastic). Le térébinthe est une espèce moins thermophile, qui pénètre donc plus profondément dans l'arrière-pays, et qui préfère les sols calcaires. Il est plus élevé que le précédent, sans dépasser 5 à 6 m. Ses feuilles sont beaucoup plus grandes, caduques, coriaces et luisantes au-dessus, imparipennées, à cinq à onze folioles ovales-oblongues, à rachis non ailé. Les fleurs sont disposées aussi en panicules axillaires. Les fruits sont des drupes ovales de la grosseur d'un pois, d'abord rouge vif, puis brunes. Le tronc du térébinthe, incisé, produit une oléorésine utilisée comme masticatoire, pour la fabrication d'une liqueur orientale (raki) et pour celle de vernis (térébenthine de Chio). Souvent les buissons de térébinthe portent sur leurs feuilles et sur leurs rameaux de grosses galles riches en tanin (caroubes de Judée) dues aux piqûres d'un Insecte, *Pemphigus corniculatus*, et qui servaient jadis pour le tannage. Le pistachier, originaire d'Asie tempérée, où il est largement cultivé pour ses fruits, est proche du térébinthe et on peut le greffer sur lui. Il atteint 10 à 12 m et ses feuilles n'ont que de trois à cinq folioles coriaces. Les fruits sont de la grosseur des noisettes, à endocarpe ligneux contenant une graine allongée recouverte d'un tégument brun-rose ; l'amande, de couleur verte, sert en pâtisserie pour la confection de crèmes et de glaces. On cultive le pistachier dans le sud de l'Europe, et il s'est souvent naturalisé.

Le genre *Rhus* (sumacs) comprend soixante espèces d'arbres et d'arbustes à feuilles imparipennées. Leurs fleurs sont polygames ou dioïques, formant des panicules terminales. Leurs fruits, qui proviennent d'un ovaire tricarpellaire uniovulé, sont des drupes à mésocarpe résineux. *R. typhina*, de l'est de l'Amérique du Nord, est un petit arbre cultivé à des fins ornementales ; ses feuilles de onze à treize folioles sont rouge-orangé en automne, et ses fruits rouges velus forment des panicules denses. On utilise souvent la variété *laciniata* à folioles laciniées.

Dans le genre *Cotinus*, dont les espèces ont été aussi considérées comme des *Rhus*, les feuilles sont simples et les pédoncules floraux s'allongent et se garnissent de poils lors de la fructification, formant une grande panicule plumeuse. Le fustet *(C. coggygria = Rhus cotinus)* est indigène dans le sud de l'Europe, en particulier en France, et en Asie jusqu'en Extrême-Orient. C'est l'« arbre à perruques » souvent cultivé sous une forme pourpre.

Les *Schinus* vivent en Amérique centrale et du Sud. *S. molle* est un arbre toujours vert qui peut atteindre 15 m, à feuilles imparipennées à nombreuses folioles, à rameaux pendants, et à fruits rouges. Il est appelé faux-poivrier en raison de la saveur poivrée de ses drupes.

Chez les Anacardiées, il y a un seul carpelle, ou bien cinq, et les feuilles sont toujours simples. *Mangifera indica*, d'origine indienne, donne les mangues, et *Anacardium occidentale*, d'Amérique tropicale, produit la pomme cajou. Ces plantes sont cultivées dans les régions chaudes. Les mangues sont oblongues, un peu pointues et dissymétriques, de différentes couleurs, à pulpe juteuse douce et acidulée, que l'on consomme à l'état frais ou en confiture. L'*Anacardium* est un arbre à feuilles coriaces, ovales-obtuses, riche en un latex qui se solidifie à demi et qui sert à tuer les termites. Il produit un pseudo-fruit très caractéristique, constitué par le pédoncule accrescent, piriforme, rouge ou jaune, de saveur aigre-douce, et comestible. Celui-ci porte à l'extrémité le vrai fruit, petit, cordiforme, à péricarpe dur renfermant une huile caustique qui noircit à l'air et sert à protéger le bois des Insectes. La graine (noix de cajou) est oléagineuse et comestible.

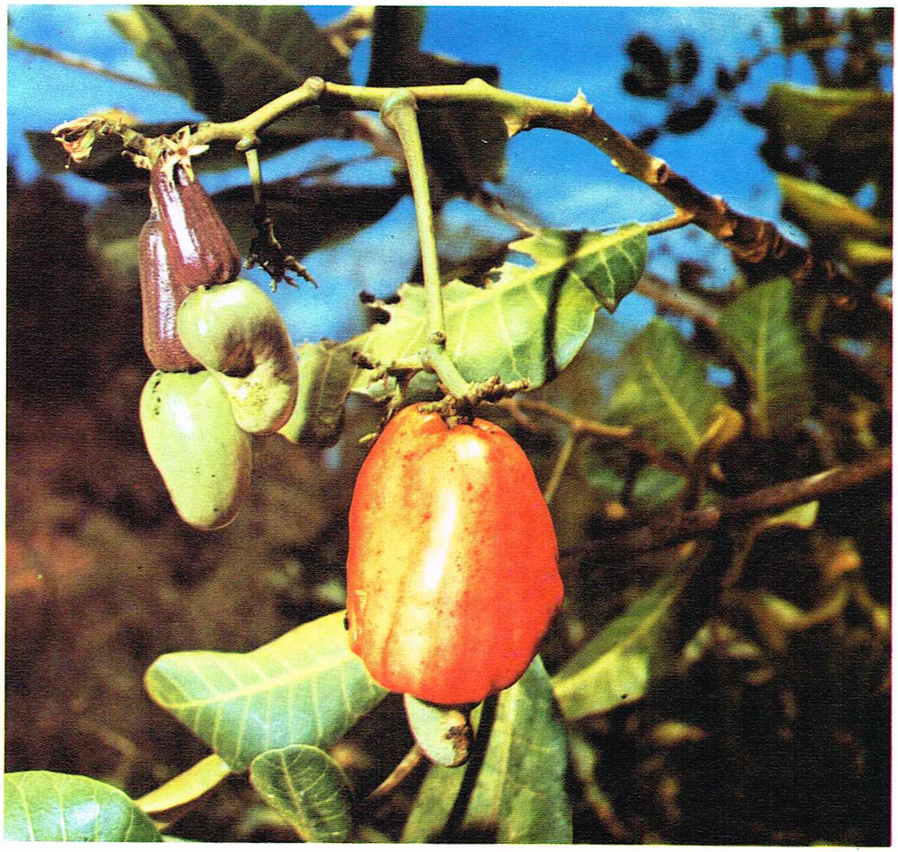

I.G.D.A. - Archives P2

▲ Le pseudo-fruit coloré d'Anacardium occidentale est un renflement du pédoncule floral; il porte le vrai fruit, cordiforme, et qui renferme la graine ou « noix de cajou ».

Les *Sapindacées (Sapindaceae)* sont une grande famille qui comprend environ quinze cents espèces, groupées en cent quarante genres surtout tropicaux. Elles sont le plus souvent ligneuses ; ce sont parfois des lianes ou des plantes à vrilles caulinaires. Les feuilles sont alternes, parfois opposées, paripennées, imparipennées ou entières, dans certains cas bipennées ou trifoliolées, munies de stipules seulement chez les espèces à vrilles. Les fleurs sont hermaphrodites ou monoïques, régulières ou surtout zygomorphes à plan de symétrie oblique comme

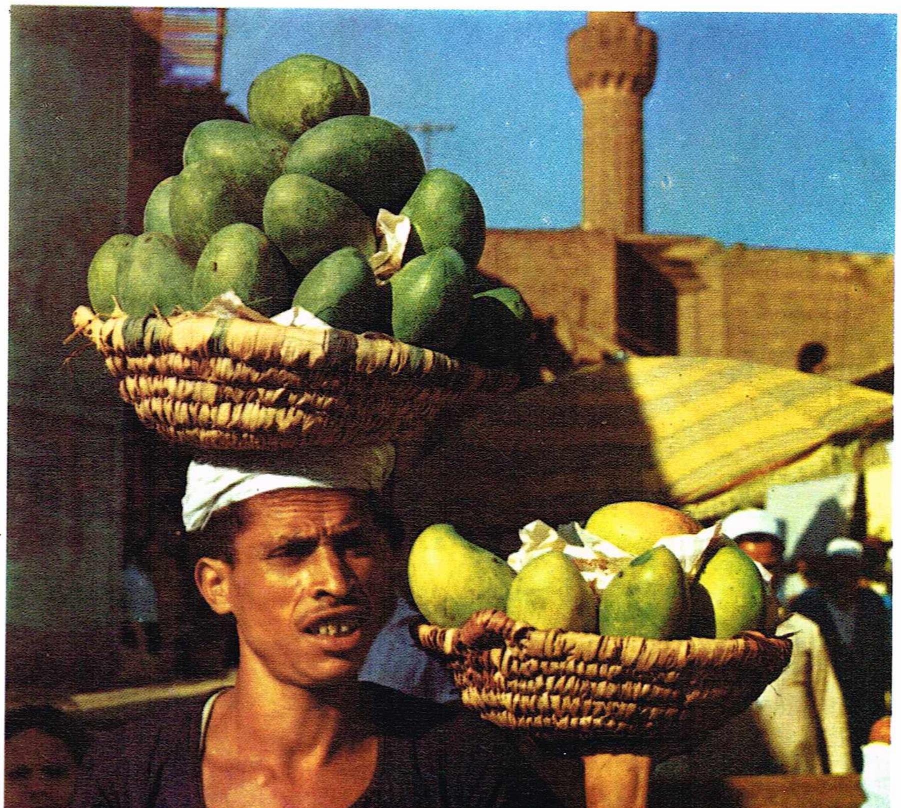

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▼ Vendeur de mangues, sur un marché oriental.

▶ *Feuille fossile d'une* Sapindacée *de l'Éocène moyen :* Euphoriopsis phaetontis.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▼ *Le sycomore* (Acer pseudoplatanus) *au tronc droit, à la cime arrondie, peut atteindre 30 m de hauteur (à gauche).* Rameau d'Acer pseudoplatanus *portant des feuilles et des fruits.*

chez les Vochysiacées, habituellement petites, et réunies en inflorescences. Il y a en général cinq sépales et cinq pétales, mais ces derniers peuvent manquer tous ou en partie ; ils ont un onglet unifacial et des appendices ventraux. Il existe fréquemment un disque nectarifère presque toujours unilatéral entre les pétales et les étamines, qui sont habituellement au nombre de huit ; l'ovaire est triloculaire avec le plus souvent un ovule par loge. Les fruits sont des akènes, des capsules ou des drupes. La tige des espèces lianoïdes présente parfois des anomalies structurales relativement complexes. Il existe dans la plupart des cas un appareil sécréteur de résines ou latex riches en saponines.

L'arbre à savon *(Sapindus saponaria)*, d'Amérique centrale et du Sud, possède des drupes riches en saponines. *S. drummondii* est l'une des espèces du genre qui s'avance le plus vers le nord et atteint le sud des États-Unis ; elle possède des fruits à propriétés analogues. *Litchi sinensis*, de Chine méridionale, est un arbre atteignant 15 m de hauteur. Ses graines ont un arille comestible qui leur donne la forme de prunes. *Blighia sapida*, d'Afrique tropicale, a aussi des arilles comestibles, et la graine contient deux substances à puissante activité hypoglycémiante. Les *Koelreuteria* sont des arbres à feuilles caduques imparipennées ou bipennées, composées de folioles profondément dentées, et à grandes panicules terminales de fleurs jaunes qui paraissent en été. L'ovaire possède deux ovules par loge et le fruit est une capsule renflée. *K. paniculata*, du nord de la Chine, est cultivé pour l'ornement.

Les *Ӕxtoxicacées (Aextoxicaceae)* comprennent une seule espèce chilienne, *Aextoxicon punctatum*, qu'on a rapprochée des Euphorbiacées et des Célastrales.

La famille des *Acéracées (Aceraceae)* comprend deux genres et cent cinquante espèces environ, appartenant presque toutes aux érables. Le genre chinois *Dipteronia* ne renferme que deux espèces. Les érables sont des arbres ou des arbustes, à feuilles opposées, pétiolées, habituellement palmatilobées ou parfois pennées et sans stipules. Il y a assez souvent des laticifères. Les fleurs sont polygames ou dioïques, formant des grappes, des panicules, des épis ou des ombelles terminales ou axillaires. Elles possèdent quatre ou cinq sépales et quatre ou cinq pétales, ces derniers pouvant aussi être absents. Il y a le plus souvent un disque extra- ou intrastaminal. On trouve en général huit étamines libres et deux carpelles antéro-postérieurs biovulés. Les fruits sont des disamares se séparant finalement en deux samares uniséminées pourvues chacune d'une longue aile membraneuse, qui favorise leur dissémination par le vent. Les érables habitent seulement l'hémisphère boréal, et surtout dans les régions tempérées. Ils atteignent 3 500 m d'altitude dans l'Himalaya.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

E. Boubat - Top-Réalités

▲ ***Les érables revêtent de magnifiques teintes automnales; ils sont très répandus au Canada où leur feuille est devenue l'emblème du pays.***

Le sycomore *(Acer pseudoplatanus)* habite l'Europe centro-méridionale et l'ouest de l'Asie. Ce n'est pas une espèce sociale, et les individus sont habituellement isolés ou par petits groupes. Il est indifférent à la nature du sol, mais demande un terrain assez meuble, fertile et recouvert d'un humus de bonne qualité. Il atteint 30 m de hauteur. Son écorce est lisse, grisâtre et se desquame sur le tard en petites plaques. Son tronc est droit, sa silhouette arrondie. Ses feuilles, longuement pétiolées, un peu en cœur à la base, sont vert foncé, mates et glabres en dessus, plus claires et pubescentes au-dessous, et divisées en cinq lobes irrégulièrement et grossièrement dentés séparés par de profonds sinus. Les fleurs, petites, à long pédoncule, jaune verdâtre, constituent des panicules pendantes. Les fruits sont des samares dont les ailes forment un V. Il n'y a pas de latex. Le sycomore est souvent planté dans les parcs et sur les avenues. Son bois est blanc ivoire, compact, homogène, à texture fine, peu élastique, mais n'a guère tendance à se fendre en séchant et se conserve bien. On l'utilise pour faire des meubles, des objets tournés, des instruments de musique. Il peut donner de beaux placages.

Le plane *(A. platanoides)* a une aire comparable à celle du précédent. Son écorce est grise, lisse puis finement et profondément fissurée longitudinalement. Ses feuilles ont de cinq à sept lobes aigus séparés par des sinus peu profonds, mais munis chacun de deux ou trois dents secondaires. Elles ressemblent à celles du platane, mais sont vert clair sur les deux faces. Les fleurs sont en corymbes dressés. Les ailes de la samare sont presque dans le prolongement l'une de l'autre. Il possède des laticifères. Son bois a les mêmes usages que celui du sycomore, mais est moins apprécié.

L'érable commun *(A. campestre)* est une espèce de plaine, assez sporadique en France. Elle atteint, au nord, l'Irlande, le nord de la Grande-Bretagne, le Jutland, le sud de la Suède et le sud de la Pologne, à l'est, le bassin de la Volga et la mer Caspienne, au sud, la sierra Nevada, l'Algérie, la Sicile, le Péloponnèse et le nord de l'Asie Mineure. C'est un petit arbre ne dépassant pas 20 m, à écorce finement gerçurée-écailleuse. Ses rameaux sont souvent couverts de façon caractéristique de crêtes subéreuses. Ses feuilles sont petites, assez fermes, vertes sur les deux faces, et munies de cinq lobes lobulés à sommets obtus. Les fleurs sont en corymbes dressés. Les ailes des samares sont tout à fait dans le prolongement l'une de l'autre. C'est une espèce calcicole, assez xérophile et thermophile, aimant la lumière. Son bois a des propriétés comparables à celui du sycomore et est recherché pour la confection de manches d'outils. Les érables sont nombreux en Extrême-Orient et en Amérique du Nord.

L'érable à sucre, « sugar maple » *(Acer saccharum)*, forme des érablières climaciques dans la vallée du Saint-

G.P. Mondino

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *A gauche, rameau d'*Acer pseudoplatanus*, le sycomore, garni de panicules. A droite, marronnier en pleine floraison.*

Laurent (Canada), où il est associé à *Fagus grandifolia, Tilia americana* et *Fraxinus americana,* ou bien à *Tsuga canadensis* ou à *Ulmus americana*. Il descend jusqu'à la Georgie, l'Alabama, le Mississippi et le Texas. Il atteint 40 m de hauteur. Son écorce est grise et crêpelée. Ses branches sont fines. Ses feuilles sont glabres, palmées, le plus souvent pentalobées, irrégulièrement dentées, avec des sinus étroits et profonds, de couleur vert clair en dessous. Ses fleurs n'ont pas de pétales. Ses samares ont des ailes peu divergentes. Il préfère les sols meubles, frais, drainés et fertiles. La longévité est grande (deux cents à trois cents ans). Dans la haute vallée du Mississippi jusqu'aux Appalaches, il est un élément de la forêt mixte, avec des tilleuls, d'autres érables, des chênes et des hickories. Des incisions pratiquées dans son tronc au printemps laissent s'écouler une sève riche en sucre (3 % de saccharose) qui, évaporée, devient un liquide sirupeux (sucre d'érable). C'est aussi un important producteur de bois d'œuvre.

A. negundo ou negondo (« boxelder ») comporte au moins quatre sous-espèces dont une est californienne et les autres couvrent une aire très vaste, de la Nouvelle-Angleterre au Texas et à la Floride, et du Saskatchewan (Canada) à l'Arizona et au Nouveau-Mexique. Il atteint 20 m ; ses feuilles, dentées, vert clair, plus pâles en dessous, ont de trois à cinq folioles, parfois sept ou neuf. Il est dioïque et à pollinisation anémophile. Il est extrêmement cultivé pour l'ornement.

Les *Hippocastanacées* ou mieux *Æsculacées (Aesculaceae)* sont une famille très proche des Sapindacées. Elles comprennent deux genres et quinze espèces d'arbres et d'arbustes à feuilles opposées, digitées-palmées, grandes et longuement pétiolées. Les fleurs sont zygomorphes, à plan de symétrie oblique, avec quatre ou cinq pétales, quatre ou cinq sépales unguiculés inégaux et de cinq à huit étamines à filets parfois courbés vers le bas. Les trois carpelles forment un ovaire triloculaire à deux ovules par loge, parfois orthotropes. Les fruits sont des capsules loculicides contenant une ou plusieurs grosses graines. Les Æsculacées habitent surtout l'hémisphère Nord, mais, en Amérique, elles franchissent l'équateur.

Le marronnier d'Inde *(Aesculus hippocastanum)* est largement cultivé le long des avenues, à cause de sa riche cime ombreuse et de ses belles fleurs printanières. C'est une espèce mésophile, spontanée en Albanie, en Macédoine, en Bulgarie jusqu'au Caucase, en Iran et même dans l'Himalaya. Il atteint 20 à 30 m. Son tronc est robuste, couvert d'une écorce écailleuse, lisse chez les jeunes individus, et porte de grosses branches. Sa silhouette est dense. Les feuilles, composées, ont de cinq à sept folioles obovales, en coin à la base, brusquement acuminées et

▶ *Le bois des racines d'*Acer pseudoplatanus* est utilisé en ébénisterie pour la confection de petits meubles (à gauche). Les fruits du marronnier d'Inde* (Aesculus hippocastanum) *sont des capsules épineuses contenant en général une seule graine : le marron.*

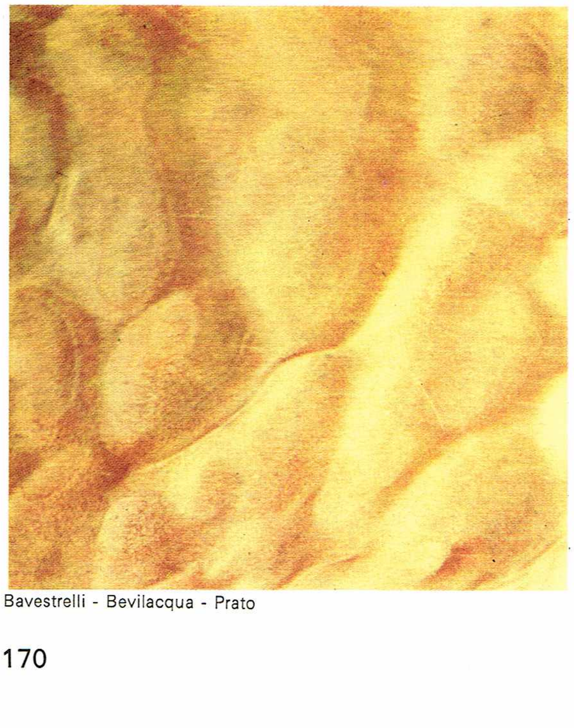

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

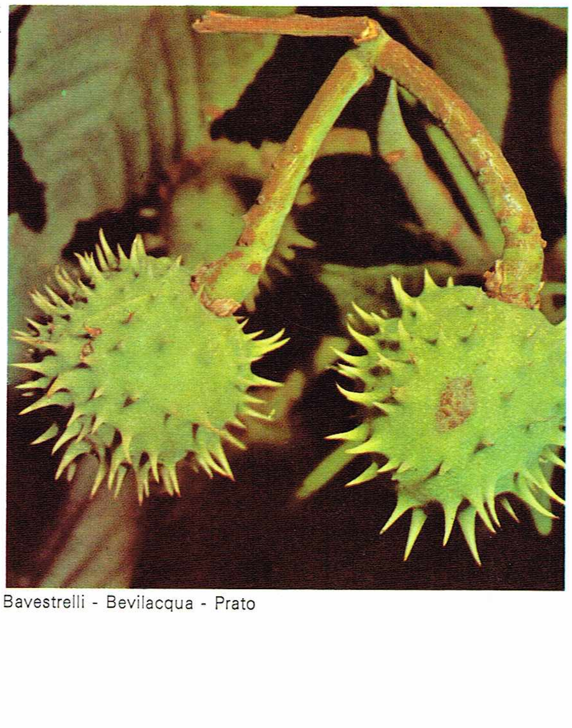

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

doublement dentées. Les fleurs sont zygomorphes, blanches tachées de rouge, et groupées en grandes panicules terminales dressées. Les fruits sont des capsules sphériques, épineuses, habituellement avec une seule graine brun brillant, montrant un large hile clair et opaque ; cette graine est riche en amidon, mais vénéneuse à cause de la présence d'hétérosides amers dont les aglycones sont des saponines triterpéniques liées à un dérivé de l'acide butyrique. On peut cependant faire consommer les fruits au bétail, après ébullition. Son écorce est riche en tanin et contient surtout de l'æsculoside et du fraxoside, hétérosides dont les aglycones sont des dérivés de la coumarine. Elle est utilisée en extraits dans les traitements des maladies du système circulatoire et pour lutter contre la fragilité capillaire. Les saponines de la graine ont d'ailleurs les mêmes indications. Des extraits de graines et d'écorce sont parfois mélangés.

Parmi les espèces américaines, nous citerons *A. pavia*, du sud-est des États-Unis, qui ne dépasse guère 10 m et est parfois cultivé, quoiqu'on emploie surtout son hybride avec le marronnier ou *A.* × *carnea*. *A. pavia* a des fleurs rouge vif, avec des pétales munis de glandes et de poils marginaux et à onglets plus longs que le calice. Son fruit est lisse. *A.* × *carnea* a le port du marronnier, mais des fleurs roses ou rouges et des pétales de la forme de ceux du marronnier, mais velus-glanduleux sur la marge. Les *Aesculus* ont des feuilles caduques. Le genre *Billia* est *semper virens*. Il habite du Mexique à la Colombie et comporte deux espèces.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Forme horticole à fleurs doubles d'*****Impatiens balsamina*****, la balsamine, à gauche. Fleur et jeunes capsules d'*****Impatiens mathildae*****, à droite.***

Les *Mélianthacées (Melianthaceae)* comprennent trois genres et trente-huit espèces à feuilles alternes généralement imparipennées et munies d'une grande stipule médiane (à la limite de la base et du pétiole unifacial). Les fleurs sont tétra- ou pentamères, avec un disque extrastaminal souvent unilatéral. Les fruits issus d'un ovaire pluriloculaire à quatre ou cinq carpelles sont des capsules à loges uniséminées. *Melianthus major* a des fleurs un peu zygomorphes visitées par les colibris.

Les *Coriariacées (Coriariaceae)* sont une petite famille qui comprend les dix espèces de l'unique genre *Coriaria*. Ce sont des arbustes et parfois des herbes des régions tempérées chaudes et subtropicales des deux hémisphères.

Coriaria myrtifolia habite la région méditerranéenne. C'est un buisson glabre, à branches tétragones et arquées. Ses feuilles sont opposées, ovales-aiguës, à trois nervures. Ses fleurs sont petites, verdâtres, polygames, rassemblées en grappes dressées, munies de cinq sépales et de cinq pétales, accrescents les uns comme les autres. Il y a dix étamines et cinq carpelles uniovulés soudés seulement au centre, à longs styles libres rougeâtres. Le fruit est une fausse drupe, les carpelles eux-mêmes deviennent ligneux. Les feuilles sont riches en tanin, d'où le nom du genre (provenant de son appellation vulgaire de corroyère) ; elles renferment une substance narcotique toxique. La position systématique de cette famille est douteuse et on en fait parfois l'ordre des Coriariales.

La famille des *Balsaminacées (Balsaminaceae)*, essentiellement tropicale et de l'Ancien Monde, est constituée par deux genres et environ quatre cent cinquante espèces d'herbes annuelles ou vivaces, glabres, plus ou moins succulentes, méso- ou hygrophiles et ombrophiles. Leurs feuilles sont simples, alternes, opposées ou verticillées. Les fleurs sont très zygomorphes, grandes et de diverses couleurs, à cinq sépales souvent réduits à trois, le postérieur étant éperonné, cinq pétales, les latéraux soudés par paires, cinq étamines à anthères soudées et un ovaire pentaloculaire supère, à plusieurs ovules par loge. Le fruit est une capsule loculicide à déhiscence élastique, parfois une baie. Le genre *Impatiens* renferme presque toutes les espèces, l'autre genre étant monospécifique. *I. noli tangere*, à feuilles opposées et fleurs jaunes, est la seule espèce spontanée en Europe et occupe aussi toute la Sibérie. Mais plusieurs autres se sont naturalisés : *I. parviflora*, à petites fleurs jaunes, *I. glandulifera*, visqueux et à éperon court, *I. balfouri*, à fleurs rouges à long éperon, et *I. balsamina* (balsamine), plus bas, à fleurs rouges ou blanches et à capsules ventrues et velues. Toutes ces espèces sont d'origine asiatique, annuelles et à feuilles alternes. On cultive aussi les

▼ ***Les fleurs du marronnier sont en grandes panicules dressées ; elles donnent des graines vénéneuses, les marrons (à gauche). Inflorescence d'*****Aesculus** × **carnea*****, un marronnier ornemental (au milieu) et d'*****Aesculus hippocastanum** ***(à droite).***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

G.P. Mondino

I. holstii et *sultanii*, d'Afrique tropicale, dont les pétales sont étalés, la corolle formant un plateau. Il existe de nombreux hybrides entre ces deux espèces. Les Balsaminacées ont été rapprochées des Géraniales et aussi des Célastrales.

Célastrales

La caractéristique de cet ordre est la possession très générale d'un androcée en un seul cycle épisépale, souvent accompagné d'un disque situé à l'intérieur ou à l'extérieur des étamines. Les fleurs sont tétramères ou pentamères, l'ovaire supère.

Les *Aquifoliacées (Aquifoliaceae)* sont une famille d'arbres et d'arbustes surtout tropicaux et subtropicaux à feuilles généralement persistantes. On les répartit en trois genres, dont le plus important est le genre *Ilex* avec quatre cent quarante espèces, les autres n'en renfermant qu'une dizaine. Les feuilles sont pétiolées et ont des stipules caduques. Les fleurs sont petites, tétramères en général, régulières, le plus souvent dioïques. Il y a quatre étamines. L'ovaire est supère, tétraloculaire, et chaque loge est uniovulée, avec un ovule anatrope pendant. Les fruits sont des drupes.

Le houx *(Ilex aquifolium)* est l'unique espèce française du genre. Elle est largement répandue en Europe occidentale et méridionale, en Afrique du Nord et en Asie, jusqu'en Iran, avec des races géographiques diverses. Ce peut être un petit arbre dioïque, atteignant 10 et même 20 m, mais dans la plupart des cas, c'est un buisson. Il croît lentement, mais vit longtemps, plus de trois siècles. Son écorce est lisse, grisâtre. Ses feuilles sont coriaces, vert foncé et brillantes au-dessus, ovales, entières et plates parfois, ou ondulées et épineuses au moins sur les bords, et même occasionnellement sur la surface supérieure (var. *ferox*). Ses fleurs, blanches ou roses, éclosent au printemps et sont disposées en petites grappes axillaires. Ses fruits mûrissent à la fin de l'automne : ce sont des drupes rondes et rouges de la grosseur d'un pois.

Le maté *(I. paraguariensis)*, spontané dans les forêts tropicales du Paraguay, du sud du Brésil et du nord de l'Argentine, surtout dans la zone de végétation d'*Araucaria angustifolia*, est un arbuste ou un arbre atteignant 20 m, toujours vert, à feuilles obovales ou oblongues et dentées. Il est cultivé pour ses feuilles, dont l'infusion ou la décoction constitue une boisson très consommée en Amérique du Sud : le maté.

La famille des *Célastracées (Celastraceae)* comprend des arbres ou des arbustes souvent grimpants ou épineux, ses feuilles, lorsqu'elles existent, sont alternes ou opposées et simples.

▲ ***Variété ornementale d'Ilex aquifolium, le houx, à feuilles marginées de jaune.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

M. Bavestrelli

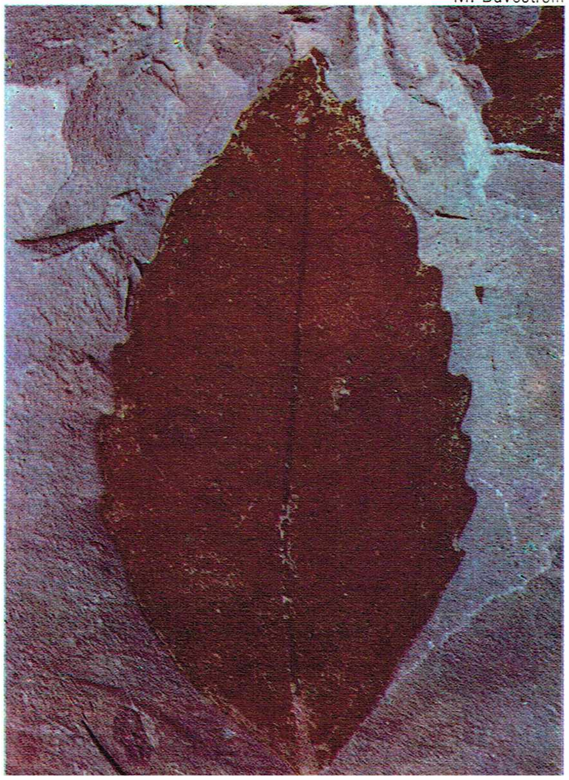

▶ ***A gauche, rameau de houx (Ilex aquifolium) portant des feuilles épineuses et des drupes rouge vif. Feuille fossilisée d'Ilex chiavoni, à droite.***

Evonymus japonicus, le fusain cultivé, est un arbuste de 5 à 8 m, planté pour son feuillage toujours vert et souvent taillé en haies. Il a des feuilles ovales-obtuses, crénelées, vert intense et luisantes. Il en existe des variétés panachées. Les fruits ne sont pas fréquents en culture; ils sont rouges et globuleux. Il y a deux cent vingt fusains, surtout dans le sud-est de l'Asie.

Chez les Célastrées, il y a moins de carpelles que de sépales, trois seulement dans le genre *Celastrus,* qui comporte trente-cinq espèces de plantes vivaces volubiles du sud-est de l'Asie, d'Australie, de Madagascar et d'Amérique.

Les *Staphyléacées (Staphyleaceae)* comportent sept genres et cinquante espèces ligneuses de l'hémisphère Nord, à fleurs unisexuées ou hermaphrodites, pentamères, avec cinq étamines à l'extérieur d'un disque. Il y a deux ou trois carpelles soudés, parfois seulement postgénitalement. Chaque loge de l'ovaire pluriloculaire a de six à douze ovules. Les fruits sont des follicules, des capsules ou des akènes. Le seul représentant européen est *Staphylea pinnata*, arbuste atteignant 5 m de hauteur, à feuilles opposées et caduques, composées de cinq à sept folioles, glabres, ovales-oblongues, acuminées et finement dentées. Les fleurs, blanc rosé, sont groupées en grappes pendantes. Les fruits sont de belles capsules vésiculeuses, à paroi membraneuse, vert clair, à deux ou trois loges uniséminées. La plante croît en Europe centrale et sud-orientale et en Asie occidentale jusque dans le Caucase et l'Arménie. Elle aime les bois frais sur sol calcaire. Elle se rencontre en Alsace et dans le nord du Jura et est parfois plantée, de même que *S. colchica*.

Les *Hippocratéacées (Hippocrateaceae)* rassemblent dix-huit genres et trois cents espèces ligneuses, souvent rampantes ou grimpantes, des zones tropicales. Il y a généralement cinq sépales et cinq pétales, mais seulement trois étamines insérées à l'intérieur d'un disque très développé. L'ovaire est constitué de trois carpelles soudés et possède de deux à quinze ovules par loge. Les fruits sont variés et il peut se former des méricarpes. Les fleurs sont groupées en inflorescences. Il y a souvent du latex. Ce dernier caractère comme le nombre et l'insertion des étamines les séparent des autres Célastrales.

Rhamnales

Cet ordre est constitué essentiellement de plantes ligneuses, à fleurs munies d'un disque à l'extérieur duquel sont des étamines épipétales. Par rapport aux Célastrales, c'est l'autre verticille staminal qui a subsisté ici. Les ancêtres communs des deux ordres faisaient peut-être partie des Térébinthales, qui ont aussi un disque et chez qui sont présents les deux verticilles. Il y a chez les Rhamnales de deux à huit carpelles munis chacun de un ou deux ovules et formant un ovaire uni- ou pluriloculaire.

La famille des *Rhamnacées (Rhamnaceae)* comprend plus de neuf cents espèces des régions tempérées et chaudes, réparties en une soixantaine de genres. Ce sont des plantes cosmopolites, mais surtout tropicales et subtropicales. Elles sont habituellement ligneuses, souvent grimpantes, parfois épineuses, à feuilles alternes ou opposées, simples, dans la plupart des cas à trois ou cinq nervures principales. Les petites fleurs, tétra- ou pentamères, sont actinomorphes, hermaphrodites en général et réunies en inflorescences. Les pétales manquent fréquemment. L'ovaire est souvent semi-infère ou bien la fleur est périgyne. Il y a presque toujours trois carpelles et le gynécée est uni- ou triloculaire. Les fruits sont des drupes, des samares ou des capsules. Il se forme quelquefois des méricarpes.

Chez les Rhamnées, le fruit est une baie, une drupe à plusieurs noyaux ou bien est constitué de méricarpes.

Le genre *Rhamnus* est parmi les plus riches en espèces (plus de cent cinquante). Il est à peu près cosmopolite, mais surtout répandu en Extrême-Orient. Ce sont des arbustes ou des arbres souvent épineux; les épines sont des apex de rameaux à feuilles caduques ou non, opposées ou alternes, simples, penninerves et dentées en général. Les bourgeons sont munis d'écailles. Les fleurs ont habituellement des pétales, mais sont unisexuées. Elles sont périgynes et réunies en inflorescences. Il y a de deux à quatre carpelles soudés à styles libres. Les fruits sont des drupes entourées de la coupe réceptaculaire.

Le nerprun *(Rhamnus catharticus)* est un arbuste de 2 à 4 m, très ramifié, répandu à basse altitude. Il se trouve en Europe et en Asie occidentale, septentrionale et centrale. Il est épineux, ses feuilles sont subopposées, crénelées, avec deux à quatre paires de nervures arquées et convergeant vers le sommet du limbe. Il est dioïque et ses fleurs tétramères sont petites, jaunâtres, en faisceaux axillaires denses. Ses fruits sont globuleux, un peu déprimés, noirs et de la grosseur d'un pois. Il préfère les bois peu fournis, sur sol caillouteux, calcaire, et s'accommode de sols mouillés. Ses fruits sont très purgatifs à cause de la présence d'hétérosides à aglycone anthracénique. On tire de son écorce une substance colorante verte qui est aussi un hétéroside à aglycone anthracénique.

La bourdaine avait été rapportée au genre *Rhamnus* et nommée *Rhamnus frangula*, mais ses bourgeons n'ont pas d'écailles externes, ses fleurs sont hermaphrodites et pentamères et ses styles sont soudés. On la place pour cela dans le genre *Frangula*, qui comprend une vingtaine d'espèces. Elle se nomme alors *Frangula alnus*. Elle habite l'Europe et l'Asie Mineure, occidentale et centrale. Elle croît dans les forêts fraîches, mais également dans les zones paludéennes et tourbeuses et dans les landes à sols acides. C'est un buisson inerme, pouvant atteindre une hauteur de 3 à 5 m, à feuilles et rameaux alternes. Ses feuilles sont caduques, entières, ovales, brièvement acuminées, vert foncé sur le dessus, et avec de sept à dix paires de nervures latérales. Ses fleurs sont verdâtres et groupées en faisceaux axillaires peu fournis. Les fruits sont de petites drupes rouges puis bleu foncé à deux ou trois noyaux. L'écorce de la bourdaine est purgative par suite de la présence d'hétérosides à aglycones anthracéniques. On la récolte pour en faire des laxatifs. Il faut d'ailleurs éviter que les enzymes de la plante ne clivent certains de ces hétérosides qui seraient alors moins actifs. On peut détruire ces enzymes par la chaleur.

La famille des *Vitacées (Vitaceae)* est constituée de douze genres et environ sept cents espèces ligneuses surtout tropicales et habituellement grimpantes ou lianoïdes. Leurs feuilles sont distiques, de phyllotaxie mal comprise, simples ou composées et stipulées. Il y a souvent des vrilles en face des feuilles. Elles correspondent à des inflorescences. Les fleurs sont petites, tétramères ou pentamères, hermaphrodites ou unisexuées, la plante pouvant être dioïque. Le calice est réduit et les pétales sont généralement unis en haut et tombent ensemble comme un capuchon. L'ovaire est bicarpellé, biloculaire, à deux ovules par loge et entouré étroitement par un disque qui lui est plus ou moins soudé. Les fruits sont des baies.

Le genre de loin le plus important du point de vue économique est constitué par les vignes *(Vitis)*, qui comprennent une cinquantaine d'espèces des zones tempérées chaudes de l'hémisphère Nord, et surtout de l'Amérique du Nord et d'Extrême-Orient. Les tiges, sarmenteuses, sont couvertes par une écorce qui se détache en bandes longitudinales; la moelle est brune, généralement interrompue aux nœuds par des diaphragmes. Les feuilles sont le plus souvent simples et lobées, parfois composées palmées. En bas d'une pousse, on ne trouve que des feuilles alternes-distiques abritant des bourgeons. Puis apparaissent des vrilles généralement en face de deux feuilles sur trois, la troisième feuille étant solitaire. Plus haut, des inflorescences remplacent les vrilles. Elles en sont homologues, et il existe parfois des intermédiaires entre les deux. Les inflorescences sont des panicules de fleurs jaune verdâtre, se terminant en dichasiums. Les fleurs sont dioïques, polygames ou hermaphrodites. La pollinisation se fait par des Insectes variés qui sont attirés par l'odeur, mais elle peut aussi être autogame, lorsqu'il existe des fleurs hermaphrodites, ce qui n'est pas général. Le vent intervient sans doute également. Si c'est le cas, il y a d'ailleurs fréquemment protérandrie, c'est-à-dire maturité plus précoce des étamines dans une fleur, ce qui facilite la fécondation croisée. Certaines plantes possèdent un pollen stérile et la fécondation ne peut avoir lieu qu'avec le pollen d'un autre individu. Il y a des phénomènes d'apogamie avec développement du

▼ **Evonymus japonicus** ***est un arbuste souvent utilisé pour faire des haies; ici, une variété à feuilles panachées (cultivar « Duc d'Anjou »).***

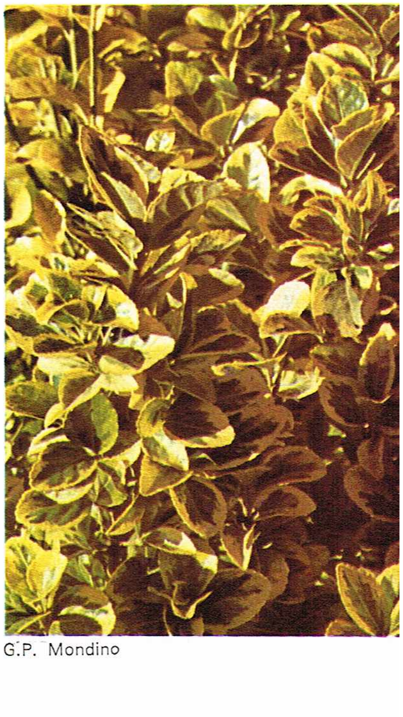

G.P. Mondino

J. Dieuzaide

▲ *Un excellent raisin de table : le chasselas doré.*

▼ *Panicule de fleurs de vigne* (Vitis vinifera).

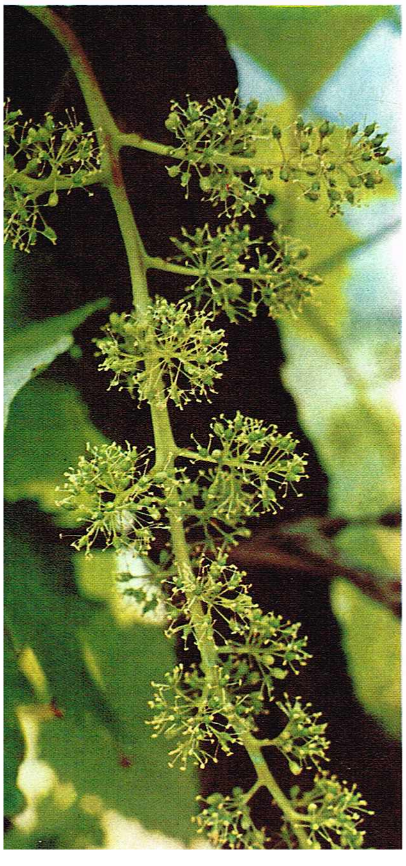
M. Pedone

fruit sans fécondation (parthénocarpie) : on obtient de la sorte des raisins sans graines (raisins de Corinthe), utilisés comme fruits secs. On a de nombreux témoignages de la vaste diffusion du genre *Vitis* dès le Crétacé supérieur, ce qui en fait une des plus anciennes Angiospermes connues. Il a été trouvé en Alaska dans des terrains de cette époque, et, au Tertiaire, il s'étendait encore, naturellement sous un climat beaucoup plus chaud qu'aujourd'hui, jusqu'en Islande.

Chez la vigne européenne *(Vitis vinifera)*, on distingue deux sous-espèces. La sous-espèce *sylvestris* est spontanée çà et là en Europe centro-méridionale, en Afrique du Nord et jusqu'en Asie centrale. Elle est dioïque et a des feuilles plus profondément lobées chez les pieds mâles. Le fruit, de 6 mm de diamètre, est noir bleuâtre, acide, peu juteux et a des graines courtes. La sous-espèce *vinifera (sativa)*, dérivée de la première et présentant d'innombrables formes cultivées obtenues par sélection, mais aussi, plus récemment, par hybridation artificielle avec des espèces d'Amérique du Nord, présente des fleurs hermaphrodites et parfois aussi mâles et des fruits doux dépassant 2 cm de diamètre, à graines prolongées en bec.

La sous-espèce *vinifera* semble originaire des côtes de la mer Noire, d'où elle se serait répandue vers l'ouest à une époque ancienne. Le climat sous lequel la vigne peut être cultivée doit être caractérisé par une longue période végétative, avec un automne chaud et sans trop d'humidité, peu de gelées tardives, et des températures hivernales modérément basses. Elle monte donc à des altitudes variant selon les zones : elle peut atteindre ainsi 700 m dans la Valteline et 1 250 m dans le Valais en Suisse. Les zones de production du raisin sont surtout méditerranéennes, au sens large, avec une pénétration jusqu'en Europe centrale, le long des vallées du Rhin et de la Moselle, autour du lac de Genève et en Hongrie. En France, la vigne ne dépasse que peu la vallée de la Loire à l'ouest, remonte au nord de Paris au centre, et plus au nord encore vers l'est. On a jadis tenté sa culture en Angleterre, mais ces tentatives sont tout à fait abandonnées. Hors d'Europe, on cultive la vigne en Afrique du Nord et en Afrique du Sud, en Californie, en Argentine, au Chili, au Brésil, dans le sud du Japon et en Australie méridionale.

Les vignes américaines, qui ne sont pas utilisables directement pour la fabrication du vin, ont acquis une grande importance au siècle dernier (1867), quand fut introduit accidentellement le phylloxéra *(Viteus vitifolii)*, puceron d'Amérique du Nord, qui, en Europe, se répandit d'abord en France, puis en Italie et dans les autres pays viticoles, détruisant un grand nombre de vignobles en s'attaquant aux racines des vignes.

Les racines des vignes américaines sont plus ou moins résistantes aux attaques de l'Insecte ; on en a donc importé de diverses espèces, grâce auxquelles on a opéré des hybridations et des sélections, spécialement en France, obtenant ainsi des hybrides résistants et des porte-greffes sur lesquels on pouvait greffer la vigne européenne ou ses hybrides. On étudiera donc une des espèces américaines parmi les plus utilisées. Elle se caractérise par le fait que tous ses nœuds sont munis d'une vrille ou d'une inflorescence.

V. labrusca ou lambrusque est une plante qui grimpe également sur les arbres. Ses feuilles sont grandes (plus de 16 cm de large), épaisses, veinées, à contour variable, souvent cordées-ovales ou presque trilobées, densément tomenteuses et blanchâtres puis rougeâtres en dessous. Ses fruits sont gros (jusqu'à 2 cm de diamètre), pourpre-noir, à peau épaisse et goût douceâtre. Cette espèce habite de la Nouvelle-Angleterre à la Georgie. Elle a donné la plupart des vignes américaines cultivées et a été particulièrement hybridée avec la vigne européenne.

La viticulture est pratiquée dans l'Est américain. Elle est orientée essentiellement vers la production de raisin de table et utilise des variétés de *V. labrusca* et de quelques autres espèces indigènes *(V. berlandieri, V. aestivalis* var. *bourquiniana)*.

En Californie, le raisin de table est produit aussi, mais plutôt à partir de vignes européennes, car il n'existe pas

M. Pedone

▲ *La culture de la vigne exige de nombreuses opérations ; ici, ligature des sarments.*

▼ *Les fruits de la vigne sont des baies ; les graines ou pépins peuvent manquer si le fruit a été obtenu par parthénocarpie.*

M. Pedone

de phylloxéra dans cette région ; on prépare d'ailleurs dans cette zone des vins de plus en plus appréciés. Les vins du Chili et d'Afrique du Sud concurrencent également de plus en plus les vins européens.

Les vignes d'Asie orientale sont nombreuses ; certaines ont été introduites pour l'ornement, car leur feuillage prend de belles colorations en automne.

Le genre *Cissus*, qui comporte plus de trois cent cinquante espèces tropicales, diffère des *Vitis* par ses fleurs tétramères, ses pétales libres et ses feuilles composées ternées plus ou moins charnues. Il existe des espèces succulentes à tiges massives atteignant 4 m de haut. *C. cactiformis*, d'Afrique tropicale, a l'aspect d'une Cactée. *C. gongylodes*, d'Amérique du Sud, à tiges ailées et racines aériennes pendantes, est une plante d'appartement fort répandue.

Parmi les Vitacées ornementales répandues dans les jardins sous le nom de vignes vierges, on compte les genres *Parthenocissus*, dont les vrilles ont des disques adhésifs terminaux, et accessoirement *Ampelopsis*, à vrille de type usuel. On utilise ces plantes pour l'ornement des murs et des pergolas. Les *Parthenocissus* collent simplement leurs disques adhésifs aux murs et n'en endommagent pas le revêtement comme le lierre, dont les racines adventives le pénètrent. Leur feuillage prend de belles colorations rouges en automne, et il existe des variétés à feuilles pourpres.

P. quinquefolia, de Chine et du Japon, est le plus répandu. Il a été introduit d'Amérique du Nord en 1628. Il est originaire de la moitié est des États-Unis et du Mexique. Ses feuilles sont alternes, à cinq folioles ovales-aiguës, dentées, vertes au-dessus, un peu glauques en dessous et écarlates en automne. Les fleurs forment des cymes groupées en panicules terminales. Les fruits sont de petites baies noires un peu pruineuses. *P. tricuspidata*, originaire de Chine et du Japon et parfois nommé à tort *Ampelopsis veitchii*, a des feuilles à dents aiguës, luisantes et glabres sur les deux faces, trilobées ou parfois trifoliolées. Il a des vrilles très ramifiées à disques adhésifs. Il n'a été introduit qu'en 1868.

I.G.D.A.

▲ *Chez les Ombellifèrales, comme leur nom l'indique, le type d'inflorescence qui domine est l'ombelle. Celles qui sont représentées ici sont composées d'ombellules; on peut y noter la présence simultanée de fleurs et de fruits.*

Page ci-contre : ▶ *une ombelle d'ombellules très caractéristique, celle de la berce (Heracleum sphondylium), ici en fruit.*

▶ *Le cerfeuil hirsute (Chaerophyllum hirsutum) est très fréquent dans les endroits herbeux de montagne, en lisière de forêts.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Ombelliférales ou Ombelliflores

Le nom d'Ombelliférales provient du type d'inflorescence dominant chez les plantes qui appartiennent à cet ordre. Il s'agit dans beaucoup de cas d'ombelles assez régulières, simples ou composées, condensées parfois en capitules. Quand il ne s'agit pas d'ombelles à proprement parler, les fleurs sont toutefois disposées en inflorescences cymeuses plus ou moins ombelliformes. En fait, ce rapprochement est certainement plus physionomique que vraiment naturel. Cet ordre comprend des plantes pour la plupart herbacées, mais il en est de ligneuses. Les premières englobent la quasi-totalité des espèces de la famille des Ombellifères, alors que les secondes font essentiellement partie des Cornacées et des Araliacées. Les stipules sont toujours fort réduites ou manquantes. Les fleurs sont généralement très petites, tétramères ou pentamères, ordinairement hermaphrodites et actinomorphes, plus rarement zygomorphes; elles possèdent un calice et une corolle, mais le premier est presque toujours de petite taille ou tout à fait rudimentaire. Il y a, sauf exception, un verticille d'étamines opposées aux sépales. L'ovaire est infère, bicarpellé ou pentacarpellé et divisé en autant de loges que de carpelles. Les carpelles de l'ovaire bicarpellé sont antéro-postérieurs.

La base du ou des styles est entourée d'un disque nectarifère qui semble porter ceux-ci et a été nommé stylopode. Il y a un ovule anatrope pendant pourvu d'un seul tégument par loge. Les graines possèdent un albumen abondant. L'ovule est le plus souvent apotrope, c'est-à-dire à raphé dorsal, chez les Cornacées, et épitrope (à raphé ventral) chez les Araliacées et les Ombellifères. Chez les deux familles d'ailleurs, dans chaque loge, deux ovules superposés sont initiés, mais un seul, l'inférieur, poursuit son développement.

L'ovaire infère et l'importante réduction du nombre et de la taille des pièces florales, particulièrement remarquable dans le calice et se manifestant aussi par l'existence d'un seul cycle d'étamines et d'un seul ovule pourvu d'un seul tégument par loge, indiquent le caractère évolué de cet ordre. Il est peut-être spécialement proche des Myrtales, mais les Cornacées ont aussi des rapports avec les Rubiacées et les Caprifoliacées, et, pour certains, méritent d'être classées dans un ordre spécial. Les Cornacées sont aussi très affines des Garryacées, placées ici dans un ordre particulier, mais que d'autres considèrent comme des Ombelliférales.

Si l'on néglige les Alangiacées, les Nyssacées et les Davidiacées qui à elles trois ne comptent que quatre genres et vingt-huit espèces, et sont plus primitives puisque leur androcée est souvent diplostémone et que leurs ovules ont deux téguments, les Ombelliflores comprennent trois familles essentielles : les Cornacées, les Araliacées et les Ombellifères, qui rassemblent près de quatre mille espèces. La deuxième et la troisième de ces familles sont particulièrement proches. Elles ont toutes les deux des ovules épitropes et leurs inflorescences sont des ombelles ou au moins des épis; toutefois, les Araliacées ont en général cinq carpelles. Les Cornacées sont plus distinctes par leur ovule et leurs inflorescences cymeuses.

La famille des *Cornacées (Cornaceae)* comprend une centaine d'espèces, distribuées en une douzaine de genres. Il s'agit de plantes ligneuses, arbustives ou arborescentes, parfois lianoïdes. Seules de rares espèces du genre *Cornus* sont des herbes vivaces. Les Cornacées se rencontrent dans les zones tropicales et tempérées, surtout en Amérique du Nord et en Asie tempérée. Elles ont des inflorescences en cymes plus ou moins ombelliformes ou corymbiformes, en capitules ou en ombelles simples et parfois entourées par un involucre de bractées colorées, qui simulent un périanthe. Chez les *Helwingia*, les inflorescences sont portées par la nervure médiane de la feuille axillante, par suite de la concrescence de la feuille et du pédoncule inflorescentiel. En principe, les feuilles sont opposées et simples, parfois persistantes, mais elles peuvent être alternes; elles ne sont presque jamais tout à fait glabres. Il n'y a pas de stipules, sauf chez *Helwingia*.

Les fleurs sont tétramères, parfois pentamères, voire trimères ou hexamères et hermaphrodites ou unisexuées; elles ont un calice très réduit ou nul, et parfois la corolle manque aussi. Les étamines sont en nombre égal à

G.P. Mondino

▲ **Aucuba japonica** *var.* **variegata** *est un arbuste toujours vert très employé pour les bordures de massifs.*

celui des pétales et alternent avec eux. L'ovaire, infère, possède de deux à cinq loges ou est uniloculaire; les styles sont soudés en général et entourés d'un stylopode à leur base. Dans chaque loge, on trouve un seul ovule, généralement apotrope-pendant, et pourvu d'un seul tégument. Le fruit est une drupe ou parfois une baie possédant de une à quatre loges et de une à quatre graines, et peut atteindre la grosseur d'une prune. La présence de canaux sécréteurs est exceptionnelle.

Par quelques caractères de leur bois, les Cornacées présentent des affinités avec certaines Saxifragacées, tels les *Philadelphus*, ce qui permet d'envisager pour elles un rapprochement avec les Rosales.

La famille est divisée en trois sous-familles : les *Mastixioïdées*, les *Curtisioïdées* et les *Cornoïdées*. Les deux premières n'ont qu'un seul genre chacune, *Mastixia* et *Curtisia*. Leur ovule est épitrope.

La grande majorité des Cornacées fait donc partie de la dernière sous-famille, caractérisée par des ovules apotropes et par un ovaire uniloculaire ou pluriloculaire. Dans la tribu des Cornées, les pétales sont à préfloraison valvaire, l'ovaire est uni- ou biloculaire et les inflorescences sont axillaires. Le genre le plus riche est représenté par les *Cornus*, avec environ quarante-cinq espèces, dont une quinzaine aux États-Unis et cinq seulement en Europe. En France, seuls existent le cornouiller sanguin *(C. sanguinea)*, et le cornouiller mâle *(C. mas)*. Ce genre a été parfois divisé en plusieurs autres en fonction de la forme biologique (espèces herbacées ou ligneuses) ou de la présence de bractées plus ou moins pétaloïdes accompagnant l'inflorescence. Nos deux cornouillers ont un calice à sépales très courts, un style unique, et des feuilles entières à nervures longitudinales convergeant vers le sommet. L'ovaire est biloculaire. Le fruit est une drupe à un seul noyau biloculaire.

Les *Aucuba*, qui appartiennent à la même tribu, comportent trois espèces dioïques de l'Himalaya et d'Asie centrale. *A. japonica* est l'un des arbustes les plus communément cultivés. Il atteint 5 m. Ses feuilles opposées sont épaisses, luisantes sur les deux faces et munies de quelques dents fortes. Il a des fleurs en ombelles cymeuses terminales. On en cultive surtout une forme à feuilles tachées de jaune (var. *variegata*) qui fut introduite en 1783, avant la forme verte. Les fruits, ovoïdes, mesurent 1,5 cm de long et sont rouges. La plante est très rustique et résistante, à la pollution de l'air en particulier.

▼ *Les feuilles de cornouiller ont leurs nervures principales qui convergent vers le sommet; chez le cornouiller mâle* (**Cornus mas**) *représenté ici, les drupes sont comestibles.*

M. Bavestrelli

Les *Araliacées (Araliaceae)* comptent environ sept cents espèces groupées en soixante-dix genres; seul le genre *Hedera* est représenté en Europe et seule l'espèce *H. helix,* qui est le lierre, se rencontre en France. Les Araliacées sont des plantes spécialement répandues dans les forêts tropicales, où l'on observe trois centres principaux de dispersion, l'Indo-Malaisie, qui compte environ cent cinquante espèces, l'Amérique tropicale, avec cent cinquante autres, et surtout la Polynésie et l'Australie, qui abritent environ trois cent cinquante espèces. En Extrême-Orient, on rencontre aussi bon nombre d'espèces tempérées. Les Araliacées sont le plus souvent arbustives ou arborescentes, rarement lianoïdes ou herbacées.

Leurs feuilles, souvent très grandes, sont fréquemment pourvues de poils, étoilés ou même écailleux. Elles sont alternes, simples et alors souvent lobées, ou bien composées. Elles sont parfois opposées ou verticillées et possèdent de petites stipules, occasionnellement unies ventralement en stipule médiane. La gaine des feuilles est bien développée. Bien que les inflorescences ombelliformes soient fréquentes, il n'en manque pas qui sont en grappes ou en épis qui rappellent quelquefois des chatons, ou encore en capitules à peu près toujours involucrés. Les fleurs sont petites, généralement tétra- ou pentamères, hermaphrodites, ou parfois unisexuées. Le calice est généralement petit à sépales rudimentaires, ou bien représenté par une membrane, ou encore nul. La corolle est généralement à préfloraison valvaire (les bords des pétales ne se recouvrent ni ne s'incurvent).

Le nombre des étamines est normalement égal à celui des pétales et celles-ci alternent avec eux. Il peut y avoir de nombreuses étamines. L'ovaire est infère, il est semi-infère chez *Pterotropia*. Il y a toujours un disque en forme de stylopode. Les carpelles, au nombre de deux à cinq, parfois d'un seul, ou bien de plus de cinq, possèdent chacun un ovule épitrope. Les styles des carpelles sont libres ou soudés.

Les fruits sont des drupes ou des baies. Il peut y avoir formation de méricarpes *(Myodocarpus)*. Les graines ont un albumen abondant. Il existe généralement un appareil sécréteur, formé de canaux schizogènes produisant des résines, des gommes, des saponosides, etc. Les Araliacées appartiennent aux familles les plus anciennement connues, elles existaient déjà au Crétacé supérieur.

Dans les deux plus importantes tribus, les pétales ont une insertion large sur le réceptacle, ce qui n'est pas commun chez les Angiospermes.

Le genre *Fatsia* ne comprend que l'espèce *F. japonica*, du Japon, très cultivée pour l'ornement, souvent sous le nom d'*Aralia sieboldii*. C'est un arbuste glabre qui atteint 5 m et porte de belles feuilles de 35 cm de large, coriaces, lisses, toujours vertes, plus claires en dessous, simples, à sept à neuf lobes digités et dentés. Les fleurs sont blanches, en ombelles groupées elles-mêmes en panicules terminales. Elles sont pentamères et le fruit est charnu et noir. La plante est rustique dans le centre, l'ouest et le midi de la France.

Bien qu'il ne lui ressemble guère, *Fatsia* a pu être hybridé avec le lierre. L'hybride stérile, × *Fatshedera lizei,* est très répandu maintenant et utilisé comme plante d'appartement. Il a le port du *Fatsia,* mais il ne dépasse pas 2,50 m de hauteur; ses feuilles n'ont que trois à cinq lobes, et sa tige est pubescente et de couleur rouille à l'état jeune. Comme l'espèce dont il est issu, il est également rustique.

Le genre *Hedera* comporte cinq ou six espèces, qui ne sont peut-être en grande partie que des sous-espèces ou des variétés. Le lierre *(H. helix)* croît en Europe, aux Canaries, en Afrique du Nord et en Asie. Il grimpe à l'aide de racines adventives et une seule plante peut atteindre une envergure de 50 m. Les tiges grimpantes ou rampantes ont des feuilles toujours vertes, distiques et à trois à cinq lobes; les tiges florifères, dressées, ont des feuilles alternes, ovales-losangiques et entières. Les ombelles de fleurs, jaune verdâtre, à pédoncules tomenteux blanchâtres, sont hémisphériques et groupées en grappes. L'ovaire a cinq carpelles. Il existe de nombreuses variétés de lierre différant tant par la couleur que par la lobation des feuilles. Les fruits sont des drupes noires à deux ou trois noyaux uniséminés, qui arrivent à maturité au printemps de l'année suivant celle de la floraison et sont très recherchées par différents Oiseaux. Le lierre vit longtemps, puisqu'on en connaît des pieds de plus de

quatre siècles, dont le tronc peut atteindre 3 m de circonférence. Les variétés panachées sont très décoratives, mais moins vigoureuses. Il existe une forme (var. *conglomerata*) dont les tiges sont épaisses et dressées tout en ayant des feuilles distiques et en restant stériles. Si l'on bouture une tige fertile de lierre ordinaire, on obtient un arbuste dressé, fertile à feuilles alternes ovales.

Les feuilles et surtout les fruits du lierre ont des propriétés émétiques. Les feuilles ont été utilisées comme emménagogue, topique, cicatrisant et anti-névralgique. Le bois est antispasmodique, par antagonisme de l'acétylcholine. Cette propriété, depuis longtemps connue empiriquement en ce qui concerne les spasmes des bronches, faisait employer des gobelets de bois de lierre pour l'alimentation des enfants coquelucheux. Certaines au moins des propriétés du lierre proviennent des saponosides qu'il contient.

La plus grande famille de l'ordre des Ombellifèrales est celle des *Ombellifères (Umbelliferae)*, qui compte environ trois mille espèces réunies en trois cents genres.

Ces plantes sont répandues dans les régions froides, tempérées surtout, et subtropicales des deux hémisphères, du rivage des mers jusque dans les hautes montagnes.

Dans leur majeure partie, les Ombellifères sont herbacées, bisannuelles ou vivaces, parfois de petite taille, et presque toujours hémicryptophytes, c'est-à-dire que leurs portions demeurant vivantes l'hiver sont au niveau du sol; elles sont rarement géophytes, c'est-à-dire à parties vivaces enfouies totalement dans le sol, comme chez les *Bunium*. Il existe de rares arbustes ou arbrisseaux, comme *Bupleurum fruticosum*. Même herbacées, les Ombellifères peuvent atteindre une hauteur de plusieurs mètres, en particulier celles des steppes de l'Asie centrale. Les lianes sont très rares *(Drusa)*.

En général, la tige est cannelée et noueuse. Les entrenœuds deviennent creux, car la moelle disparaît rapidement. Les feuilles sont alternes; le pétiole surmonte une gaine plus ou moins large, le limbe est divisé et subdivisé, rarement simple. Les feuilles ressemblent souvent à celles des *Thalictrum* (Renonculacées). Les stipules manquent presque toujours, mais elles sont présentes chez les hydrocotyles par exemple. Il y a des canaux oléifères dans tous les organes. Les huiles essentielles qui sont produites sont souvent aromatiques. Des gommes et des résines sont parfois aussi sécrétées. L'inflorescence est une ombelle une fois ramifiée (ombelles d'ombellules), rarement simple comme chez *Astrantia*. L'ombelle est définie, avec une fleur formée par l'axe du pédoncule, ou bien indéfinie, toutes les fleurs sont latérales sur cet axe qui n'est pas sexualisé. Les inflorescences peuvent avoir l'aspect de capitules si les pédoncules (rayons) constituant l'ombelle sont courts. Il arrive que les fleurs soient isolées ou disposées en inflorescences cymeuses ou en grappes définies très denses (Saniculoïdées). A la base de l'ombelle se trouve souvent un involucre de bractées plus ou moins développé; ce sont les bractées axillantes des rayons externes de l'ombelle. Lorsque chacun de ceux-ci se ramifie en ombellule, les bractées axillantes des rayons de cette dernière forment un *involucelle*. Les involucres sont parfois très développés et colorés, comme chez les *Bupleurum* et les *Astrantia*. La fleur la plus centrale de l'ombelle ou de l'ombellule centrale est souvent différente des autres par sa morphologie ou sa couleur. Elle est rouge chez la carotte. Les petites fleurs sont généralement actinomorphes mais il en est aussi de zygomorphes à la périphérie des ombelles. Ces dernières présentent en effet un plus grand développement des pétales dirigés vers l'extérieur et sont souvent alors mâles. Habituellement hermaphrodites, les fleurs peuvent être aussi unisexuées par avortement; il y a alors des espèces monoïques (les fleurs femelles sont au centre ou à la périphérie de l'ombelle) et d'autres dioïques.

Le calice, à cinq sépales, est généralement minuscule, ou même à peu près nul. La corolle est à cinq pétales. Ceux-ci ont souvent le sommet recourbé vers l'intérieur et soudé à la nervure médiane. Ils tombent précocement. L'androcée a cinq étamines alternant avec les pétales et dont les filets s'insèrent à l'extérieur d'un disque nectarifère ou stylopode. L'ovaire est infère, constitué de deux carpelles antéro-postérieurs et biloculaire. Chacune des loges contient un ovule épitrope pendant et unitegminé.

M. Bavestrelli

▲ **Hedera helix**, *le lierre, est une plante grimpante qui s'accroche grâce à ses racines adventives; ses fleurs jaune verdâtre sont réunies en grappes d'ombelles.*

▼ *Chez* **Daucus carota**, *la carotte, les rayons de l'ombelle se rapprochent les uns des autres après la floraison; on peut observer ici l'involucre et les involucelles de bractées.*

M. Bavestrelli

I.G.D.A.

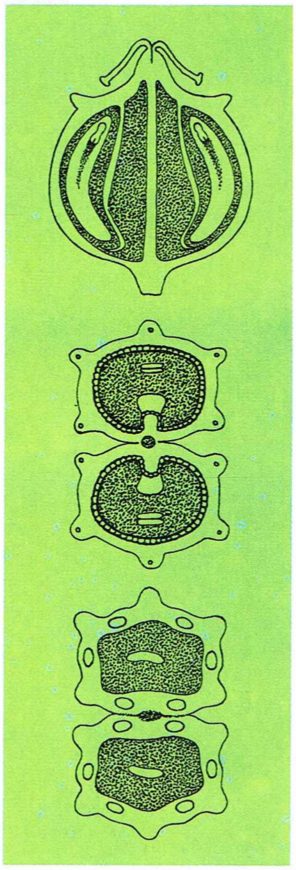

G.P. Mondino

I.G.D.A.

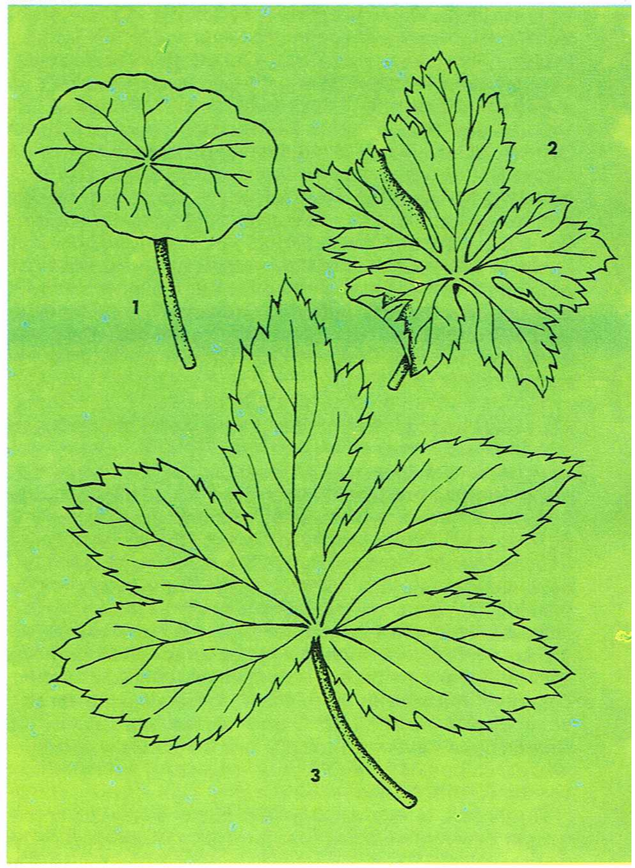

▲ *A gauche, coupes de fruits de quelques Ombellifères permettant de montrer l'ovaire à deux loges. Au centre,* Sanicula europaea. *A droite, trois types de feuilles d'Ombellifères :* 1 : Hydrocotyle vulgaris ; 2 : Sanicula europaea ; 3 : Astrantia major.

On peut généralement en observer un autre au-dessus, qui dégénère de bonne heure. Les deux styles sont libres. Les fruits peuvent être considérés comme des akènes doubles ou diakènes, mais en fait il s'agit de schizocarpes produisant deux méricarpes. Les deux parties en lesquelles se scinde l'ovaire possèdent chacune une seule graine et restent suspendues assez longtemps à une colonne centrale du gynécée, ou carpophore, qui se fend longitudinalement au-dessus et se continue avec le pédoncule au-dessous. Ces méricarpes ne représentent donc pas des carpelles entiers, au moins chez les Apioïdées, car il ne se forme généralement pas de carpophore chez les Hydrocotyloïdées et Saniculoïdées. Sur les méricarpes, on observe plusieurs côtes plus ou moins saillantes, parfois plus ou moins ailées ou dentées. Les côtes principales ou primaires sont au nombre de cinq par méricarpe (une dorsale, deux latérales, et les deux autres commissurales sur les bords commissuraux des deux méricarpes). Il existe entre ces côtes des sillons appelés vallécules, parfois pourvus de quatre côtes secondaires. On trouve, surtout à l'endroit des vallécules, des canaux oléifères ou bandelettes. L'embryon est petit, avec deux cotylédons qui sont parfois concrescents. La dissémination des méricarpes peut être favorisée par la présence d'ailes sur les côtes des fruits et par les piquants, parfois crochus, dont ces fruits peuvent être pourvus et grâce auxquels ils s'accrochent aux toisons des Animaux.

Les Ombellifères sont très homogènes et affines des Araliacées. On considère donc souvent un ordre des Ombellales qui ne comprend que les Araliacées et les Ombellifères. Il est possible aussi que ces dernières se rapprochent des Térébinthales et spécialement des familles dont on peut faire l'ordre des Sapindales. Certains auteurs ont envisagé un diphylétisme : les Hydrocotyloïdées formeraient une famille distincte des autres Ombellifères, mais cette conception n'a plus guère d'adeptes.

La systématique des Ombellifères présente beaucoup de difficultés ; elle est essentiellement fondée, comme on l'a vu, sur les caractères des fruits. Il faut cependant remarquer que ces derniers obligent parfois à séparer des genres qui, pour le reste, semblent morphologiquement très proches. De simples particularités adaptatives en rapport avec la dissémination, qui ne sont peut-être que des convergences, masquent alors les parentés réelles. Il est également très délicat d'attribuer certaines espèces à des genres donnés. Plusieurs ont été classées tantôt dans un genre, tantôt dans un autre et l'existence même de certains genres est discutable.

On divise la famille en trois sous-familles, les Hydrocotyloïdées, les Saniculoïdées et les Apioïdées. La première est caractérisée par l'endocarpe de son fruit, qui est de consistance ligneuse alors que, chez les deux autres, il est tendre et mou. Il n'y a pas de canaux sécréteurs dans les vallécules des méricarpes mûrs des Hydrocotyloïdées, mais il peut en exister dans les côtes. Le stylopode des Saniculoïdées est un anneau qui entoure la base du style ; celui des Apioïdées est conique ou en coussinet, et le style s'insère à son sommet. De plus, le fruit des Saniculoïdées est généralement couvert d'écailles ou de soies.

Les *Hydrocotyloïdées* sont surtout abondantes dans l'hémisphère Sud et comprennent trente-quatre genres. Dans une première tribu (Hydrocotylées), les méricarpes sont aplatis latéralement.

Les *Hydrocotyle* comptent près de quatre-vingts espèces, dont une seule est indigène en Europe. L'écuelle d'eau *(Hydrocotyle vulgaris)* est propre aux lieux humides et tourbeux. Ses tiges sont rampantes et s'enracinent aux nœuds, qui présentent des feuilles peltées à limbe arrondi, dont le pétiole ne dépasse pas 25 cm et présente parfois des poils étalés. Des nœuds naissent de fins pédoncules plus courts que les pétioles portant chacun de un à trois faux verticilles de petites fleurs blanches, qui sont des ombelles latérales condensées. L'espèce préfère les sols non calcaires ; on la trouve dans l'ouest, le centre et le sud de l'Europe, dans la région méditerranéenne et en Asie occidentale jusqu'en Iran, ainsi qu'en Amérique du Nord.

La sous-famille des Hydrocotyloïdées renferme aussi les *Azorella,* qui appartiennent à une seconde tribu, où les méricarpes sont aplatis dorso-ventralement. Il y a une centaine d'espèces d'*Azorella,* dont beaucoup sont propres aux Andes et aux régions antarctiques (îles Falkland, Kerguelen, Nouvelle-Zélande). Elles sont pérennantes et constituent des coussinets. Les feuilles sont simples et dentées, composées-palmées ou trifoliolées. Les fleurs forment des ombelles souvent sessiles.

A. selago est caractéristique de la végétation des îles Kerguelen. A la même tribu appartient le genre *Bowlesia,* d'Amérique du Sud, dont les feuilles supérieures sont opposées. *B. incana,* annuel, pubescent, à feuilles simples arrondies, s'est naturalisé en France dans l'Hérault.

La sous-famille des *Saniculoïdées* est représentée en Europe par six genres. L'herbe de Saint-Laurent *(Sanicula europaea)* appartient à un genre d'une quarantaine d'espèces, presque cosmopolite, quoiqu'il manque en Australie. Elle est fréquente dans les lieux herbeux frais et surtout sous les ombrages des forêts. C'est une plante herbacée vivace atteignant 60 cm. Ses feuilles sont luisantes, de contour arrondi; les basales sont divisées en segments palmés (de trois à cinq) et ont un long pétiole. Les caulinaires, au nombre de une ou deux, sont beaucoup plus modestes et subsessiles. Les fleurs, blanches ou rosées, sont réunies en petits capitules, disposés eux-mêmes en ombelles de trois à cinq rayons. Cette plante est répandue en Europe, en Asie occidentale et en Extrême-Orient, en Afrique du Nord et dans les montagnes d'Afrique tropicale.

Le genre *Astrantia* comporte neuf espèces munies d'involucres étoilés et pétaloïdes, abritant des ombelles simples. Il occupe une zone allant des Pyrénées au Caucase et à l'Asie Mineure. La grande radiaire *(A. major)* vit dans les lieux humides des montagnes de ces régions et notamment dans les Pyrénées, le Massif central, le Jura et les Alpes. Elle est vivace et atteint 1 m de haut. Ses feuilles radicales sont longuement pétiolées, à limbe palmatipartite de contour arrondi, d'un vert foncé au-dessus, à dents aristées. Les feuilles caulinaires sont peu nombreuses et subsessiles. Les fleurs, blanches ou roses, sont groupées en ombelles munies d'involucres de bractées de 2 cm de long, égalant ou dépassant les fleurs, blanchâtres au-dessous, roses vers l'extrémité et veinées en réseau. Le fruit, qui ne forme pas de carpophore, est couvert d'écailles blanches. La petite radiaire *(A. minor)* n'excède pas 40 cm, les bractées de son involucre ont une longueur d'environ 1 cm et ne sont pas veinées. Elle n'existe que dans les Pyrénées, le sud-ouest des Alpes, et le nord des Apennins.

Les *Eryngium* sont au nombre d'environ deux cent vingt, dont vingt-six en Europe. C'est un genre à peu près cosmopolite, bien représenté au Mexique et en Argentine. Les fleurs sont groupées en têtes dont le réceptacle est, au moins vers l'extérieur, muni de paillettes (bractées axillantes des fleurs) et entouré d'un involucre épineux. Les feuilles sont généralement divisées et très épineuses, mais elles peuvent avoir l'aspect de feuilles de Monocotylédones et être rubanées et parallélinerves, comme celles d'*E. bromeliaefolium*. Le chardon roulant, ou, par corruption, chardon Roland *(E. campestre),* est herbacé et vivace, très épineux, tout entier vert blanchâtre, à feuilles pennatipartites. Ses involucres comprennent de quatre à six lobes munis de quelques dents. Les fleurs sont blanches. Il est très répandu en France, et en général dans le centre et le sud de l'Europe ainsi qu'en Afrique du Nord et en Asie occidentale. Les touffes mortes, détachées, peuvent être emportées par le vent dans les lieux secs où il habite, d'où le nom de chardon roulant.

La sous-famille des *Apioïdées* comprend le plus grand nombre de genres et d'espèces d'Ombellifères. Sa classification est particulièrement difficile. Une centaine de genres se trouvent en Europe, sur un total de deux cent soixante, presque tous de l'hémisphère Nord, et des régions subtropicales à la zone subarctique. Il en existe pourtant quelques-uns dans les montagnes tropicales, en Amérique du Sud et en Australie.

Nous allons maintenant étudier un certain nombre d'entre eux.

Les anthrisques ou *Anthriscus* regroupent environ treize espèces. Les feuilles sont bi- ou tripennées. Les côtes n'existent que dans la partie supérieure du fruit, qui forme un bec généralement bien marqué. Cet appendice est relativement court chez le persil sauvage *(A. sylvestris),* qui, pour cette raison, a été placé aussi dans le genre voisin *Chaerophyllum*. Il a des involucelles à cinq bractées, mais pas d'involucre. Son fruit est lisse. Il habite les lieux herbeux frais. On cultive assez souvent le cerfeuil *(A. cerefolium),* qui est sans doute indigène en Europe orientale et méridionale ; il est utilisé comme condiment surtout dans les pays nordiques. Ses fruits noirs à maturité ont un long bec cylindrique de 3 mm, les méricarpes eux-mêmes ayant 6 mm. L'involucre est réduit (de une à trois pièces) ou manque ; les involucelles ont deux ou trois bractées.

M. Bavestrelli

▲ *La grande ciguë* (Conium maculatum) *est une plante très toxique pouvant atteindre 2,50 m de hauteur ; ses feuilles sont de deux à quatre fois pennées.*

Le peigne de Vénus *(Scandix pecten-veneris)* est annuel et commun dans les lieux cultivés et herbeux. Le fruit atteint 8 cm de long, le bec en représentant les trois quarts. Cette espèce se rencontre dans une grande partie de l'Europe, de l'Asie occidentale et de l'Afrique du Nord. Elle est répandue en France.

Le cerfeuil musqué *(Myrrhis odorata),* qui se trouve dans les Pyrénées, le Massif central, les Vosges, le Jura, les Alpes, les Apennins et l'ouest des Balkans, est velu et dégage une forte odeur d'anis. Il est vivace et atteint 2 m. Il n'y a pas d'involucre, mais des involucelles à grandes bractées réfléchies. Les fruits, noirs, sont allongés, mais sans bec, à côtes égales bien marquées. Il est cultivé parfois comme condiment et comme fourrage. C'est la seule espèce du genre. Elle croît de l'étage collinéen à l'étage subalpin.

Caucalis platycarpos (C. daucoides) est spontané en région méditerranéenne et en Asie occidentale. Il atteint 40 cm de haut et se reconnaît facilement à son fruit ovoïde, long de 1 cm environ et pourvu de nombreux

▼ *La grande ciguë se rencontre dans les haies, au bord des chemins et dans les décombres.*

R. Longo

I.G.D.A.

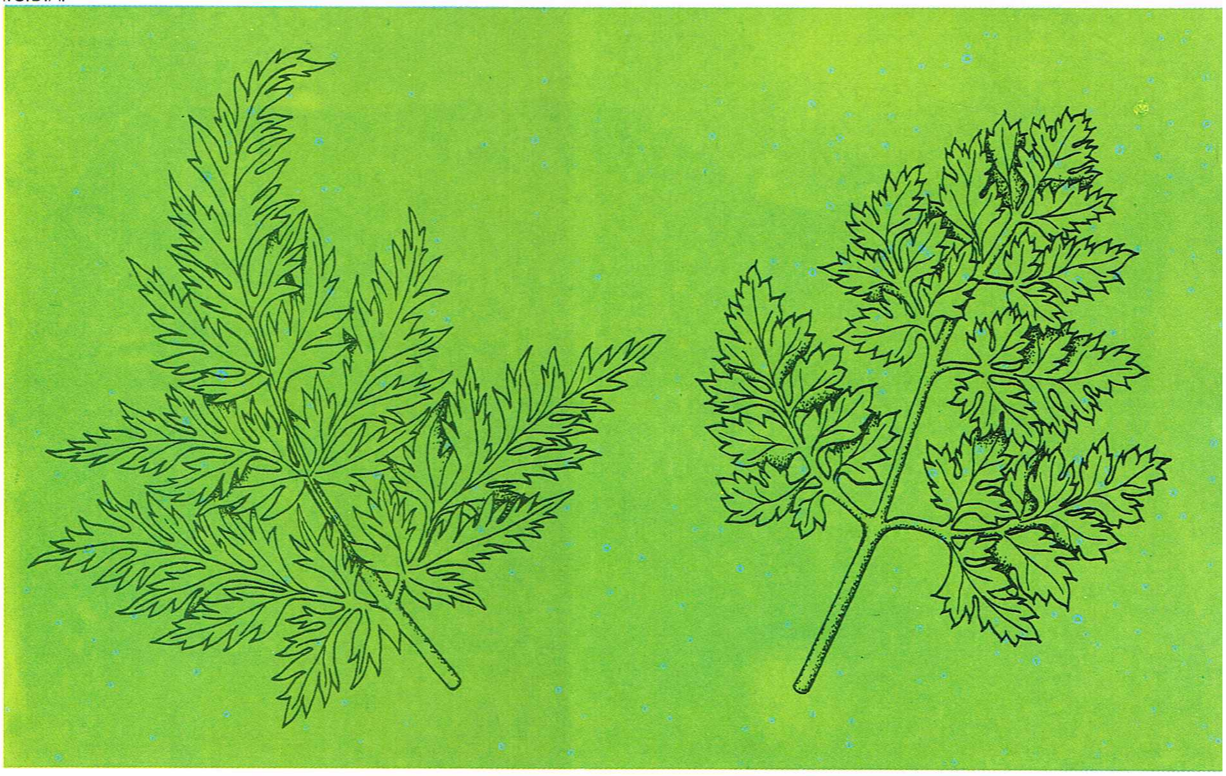

▶ *Feuilles très découpées de persil sauvage* (Anthriscus sylvestris) *et de cerfeuil* (Anthriscus cerefolium).

M. Pedone

▲ *Les gaines foliaires du fenouil* (Foeniculum vulgare) *sont extrêmement développées et utilisées dans l'alimentation; les feuilles vert foncé sont divisées en lanières étroites.*

piquants crochus sur les côtes. Sans qu'on puisse parler de côtes secondaires, il y a des rangées de petits aiguillons dans les vallécules. Les ombelles sont en général dépourvues d'involucre et les involucelles ont quelques bractées hérissées.

Le coriandre *(Coriandrum sativum)* est originaire de l'est de la région méditerranéenne et de l'Afrique du Nord. On le cultive, dans le sud de l'Europe notamment, pour ses fruits aromatiques à l'état sec. La plante fraîche a une odeur de punaise. Les fleurs sont roses, à pétales extérieurs plus grands. Le fruit est globuleux, à côtes primaires marquées et ondulées, et avec des ébauches de côtes secondaires. Ce fruit contient notamment du linalol et du pinène; il est utilisé comme condiment et pour la préparation de liqueurs (gin).

La grande ciguë *(Conium maculatum)*, poison qui fut donné à Socrate, renferme des alcaloïdes à noyau pipéridine, surtout la conine et la conicéine. 6 à 8 g de feuilles sont mortels pour l'homme. La plante fraîche et, surtout, le fruit non mûr sont les plus toxiques. Les alcaloïdes entraînent des vertiges, de la soif, un refroidissement, une baisse de la sensibilité et surtout une paralysie qui s'étend aux muscles respiratoires. Ils agiraient en partie comme le curare. On a proposé d'utiliser des extraits de fruits comme analgésiques, mais en usage externe (emplâtres), car leur toxicité empêche l'usage interne. La grande ciguë est à peu près glabre et atteint 2,50 m. Sa tige pruineuse est tachée de rouge et creuse. Les feuilles sont de deux à quatre fois pennées, de contour triangulaire. Les ombelles ont de dix à vingt rayons et sont munies d'un involucre de trois à cinq bractées, tandis que les involucelles ont trois bractées réfléchies du même côté. Le fruit est globuleux, glabre, et chaque méricarpe est muni de cinq côtes primaires saillantes obtuses, ondulées et crénelées. La plante vit dans les haies, au bord des chemins, dans les décombres, dans la plus grande partie de l'Europe, de l'Afrique du Nord, de l'Éthiopie et de l'Asie centrale et occidentale. Il existe une autre espèce de *Conium*.

Les *Bupleurum* (buplèvres) sont environ cent cinquante. Leurs feuilles sont entières, arrondies ou allongées, et leurs fleurs sont jaunes. Les pétales n'ont pas leur pointe recourbée et soudée ventralement au limbe. Les involucelles ont souvent des bractées très développées. L'oreille de lièvre *(B. rotundifolium)*, à feuilles orbiculaires-aiguës embrassant la tige (feuilles perfoliées), est commune dans les moissons. *B. ranunculoides*, à feuilles étroitement lancéolées, les supérieures étant acuminées, se trouve en montagne jusqu'à 2 700 m. *B. falcatum* est voisin, mais ses feuilles sont en forme de faux. Il est répandu dans les terrains calcaires. Ces plantes sont des herbes, mais *B. fruticosum* est un arbuste atteignant 2,50 m, à feuilles ovales-oblongues. Il habite la région méditerranéenne; il est planté pour l'ornement et parfois naturalisé. C'est l'une des rares Ombellifères arbustives.

Le cumin *(Cuminum cyminum)*, qui est originaire du Turkestan, est cultivé notamment en Sicile, à Malte, en Égypte, en Inde et en Amérique du Nord. Il a des feuilles à lobes filiformes et des fruits garnis de poils raides dans les vallécules. Ceux-ci contiennent une huile essentielle riche en aldéhyde cuminique et sont utilisés comme stimulant, carminatif, emménagogue, mais surtout comme condiment. Le céleri *(Apium graveolens)* est répandu dans les lieux salés du monde entier. Il est glabre et luisant. Sa tige est sillonnée. Les rayons des ombelles sont inégaux. Ses fruits sont un peu aplatis latéralement et munis de côtes primaires obtuses. Diverses variétés

▼ *L'angélique officinale* (Angelica archangelica) *est utilisée pour la confiserie et la fabrication de liqueur.*

M. Bavestrelli

sont exploitées pour la consommation de leurs pétioles charnus (céleri en branches, var. *dulce*) ou de leurs racines tubéreuses (céleri-rave, var. *rapaceum*). Le genre *Apium* compte une vingtaine d'espèces.

Le persil *(Petroselinum crispum = P. sativum)* semble originaire du sud-est de l'Europe et de l'Asie occidentale, mais est maintenant largement cultivé dans toutes les régions tempérées du globe. Il est glabre et luisant. Les feuilles ont les segments deltoïdes. Les rayons de l'ombelle sont subégaux. Le fruit a des styles allongés recourbés vers le bas, et des côtes primaires obtuses. Ses feuilles hachées entrent dans la préparation de nombreux plats. *P. segetum,* qui est endémique en Europe occidentale, a des feuilles allongées, pennatiséquées, à contour lancéolé, et des ombelles à rayons très inégaux. Le fruit a des styles droits très courts.

Sison amomum dépasse 1 m; il est glabre et vert sombre et ses feuilles sont pennatiséquées à lobes ovales-oblongs. Ses ombelles ont des rayons inégaux, l'involucre comporte de une à trois bractées, l'involucelle de une à cinq. Le fruit a des côtes primaires obtuses. Le sison est surtout méditerranéen, mais atteint la Grande-Bretagne et le Caucase. Il affectionne les lieux frais et ombreux. C'est la seule espèce du genre.

Les ciguës vraies sont au nombre de sept. Seule la ciguë aquatique *(Cicuta virosa)* se trouve en France, dans les fossés et les marécages de la moitié nord du pays et de l'Ouest. Elle atteint 1,20 m et présente une souche massive, creuse et septée qui est un rhizome vertical. Elle est glabre et a une odeur désagréable. Les feuilles sont bi- ou tripennatiséquées, à segments étroits et allongés. Les fleurs sont blanches. Le fruit, globuleux, est muni de côtes primaires très larges et très obtuses. La toxicité est très forte et due surtout à la cicutoxine, corps aliphatique non azoté et muni de trois doubles liaisons et de deux triples liaisons, ainsi que de deux fonctions alcool. L'intoxication se manifeste par des vomissements, de la diarrhée et des convulsions, donc de façon très différente de l'intoxication par la grande ciguë. La ciguë est répandue en Eurasie, mais elle tend à se raréfier en Europe occidentale, du fait de l'assèchement des marais.

Dans le genre *Ammi,* les ombelles sont très grandes et les bractées de l'involucre sont divisées, pennatifides ou trifides. *A. majus* et *A. visnaga* sont présents dans le Midi et l'Ouest. Ce sont essentiellement des plantes méditerranéennes, comme tout le genre. La première a des feuilles à segments lancéolés, la seconde à segments linéaires. Les fruits d'*A. majus* renferment des furocoumarines, où un noyau furane est fixé sur un noyau coumarinique. L'ingestion de ces fruits entraîne une photosensibilisation : la peau devient rouge, puis brunit à la lumière. On utilise donc l'extrait en dermatologie pour lutter contre le blanchiment de la peau (vitiligo) et on l'a proposé pour le brunissement « esthétique », ce qui n'est pas toujours sans danger. Le fruit d'*A. visnaga,* quant à lui, contient surtout de la khelline, qui est une furanochromone, et des corps voisins, ainsi que des coumarines. Ces substances sont antispasmodiques. C'est la khelline elle-même, extraite des fruits, et ses dérivés hydrosolubles qui sont surtout utilisés dans les coliques néphrétiques, l'asthme, etc., et comme coronarodilatateur (angine de poitrine).

Le genre *Bunium* compte une trentaine d'espèces, méditerranéennes et d'Asie occidentale. La noix-de-terre *(B. bulbocastanum),* du sud-ouest de l'Europe, est répandue en France sauf dans l'Ouest. Son rhizome tubéreux globuleux, de 1 à 2 cm de diamètre, est comestible et son goût rappelle celui des châtaignes. Les feuilles sont bi- ou tripennatiséquées à segments en lanières.

On compte environ cent cinquante espèces de *Pimpinella.* L'anis vert *(P. anisum),* probablement originaire d'Asie occidentale, est très cultivé pour ses fruits, de l'essence desquels on extrait de l'anéthol, aromatisant et stimulant du système nerveux, mais qui, à dose plus forte, devient un poison de celui-ci. Le fruit et l'essence servent à fabriquer l'anisette et sont utilisés en parfumerie. L'essence a des propriétés stomachiques, carminatives et antispasmodiques. L'anis vert est pubescent et ne dépasse pas 50 cm; les feuilles inférieures sont simples et réniformes, les supérieures pennées à segments ovales, puis linéaires-lancéolés. Les fruits globuleux ont des soies apprimées très courtes.

L'herbe aux goutteux *(Aegopodium podagraria)* est glabre, à tige creuse et cannelée. Elle a des feuilles inférieures biternées et des fleurs blanches en ombellules denses. Seule la fleur centrale est fertile, et les styles sont très longs et réfléchis. La plante se rencontre dans les lieux frais d'Europe et du nord de l'Asie. Elle est parfois cultivée dans les jardins, en particulier une variété panachée.

Les *Oenanthe,* au nombre de trente-cinq environ, se trouvent sur toute la terre. *O. phellandrium* habite les marais; ses feuilles aériennes sont découpées en lobes très petits, l'ensemble ayant un contour triangulaire. Il y a des feuilles aquatiques en lanières capillaires.

La petite ciguë *(Aethusa cynapium)* est annuelle. Les trois à cinq bractées de l'involucelle sont étroites, très longues et déjetées vers le bas et vers l'extérieur. Le fruit a des côtes très marquées et larges à la base mais obtuses. La plante est répandue en Europe et dans le Caucase. Elle est toxique à cause de substances (æthusine, æthusanols) voisines de la cicutoxine, mais sa toxicité est bien plus faible que celle de la ciguë aquatique.

Le fenouil *(Foeniculum vulgare)* vit dans les lieux arides de la région méditerranéenne et d'Asie occidentale. Il est cultivé et naturalisé ailleurs. Ses feuilles sont divisées en lanières très étroites vert foncé. Les fleurs sont jaunes en ombelles dépourvues d'involucre et d'involucelles. La plante est aromatique. Le fruit donne une essence très riche en anéthol. Dans la *subsp. piperitum,* il s'y ajoute une cétone, la fenchone, qui rend le fruit amer. Elle manque dans la *subsp. vulgare,* qui est plus riche en anéthol. Les fruits ont les propriétés de ceux de l'anis vert. Dans la var. *azoricum* de la *subsp. vulgare,* ils sont grands (1 cm) et la plante forme des sortes de bulbes qui sont les bases des tiges garnies de gaines foliaires charnues subdistiques et qu'on consomme comme légume. Le fruit et les feuilles de la var. *dulce* de la même sous-espèce, aussi à grands fruits, sont utilisés parfois comme condiment.

Le genre *Angelica* comprend environ cinquante espèces de l'hémisphère Nord, avec cependant quatre en Nouvelle-Zélande. Les côtes commissurales des méricarpes sont dilatées en ailes; les dorsales sont peu marquées. L'angélique sauvage *(A. sylvestris)* atteint 2 m; elle est glauque, à grandes feuilles bi- ou tripennées. Elle est indigène en Europe, en particulier en France, et dans le nord de l'Asie. L'angélique officinale *(A. archangelica)* est voisine; elle a une tige violacée sur fond grisâtre. Sa souche, ses racines et ses fruits sont aromatiques; ils contiennent, entre autres, du phellandrène. On utilise la souche pour la préparation de liqueurs; elle a aussi des propriétés stomachiques. Les pétioles, enrobés de sucre, servent en confiserie. L'angélique officinale est eurasiatique, mais n'est pas indigène en France, quoiqu'elle s'y soit naturalisée.

Les *Ferula* sont également de grandes plantes. Ils ont des fruits à côtes commissurales ailées apprimées et à côtes dorsales peu développées. Les pétales sont jaunes. Les feuilles ont des segments linéaires. Il n'y a pas d'involucre. *F. communis* est méditerranéen, atteint 2 m et a des feuilles molles. *F. assa-foetida,* d'Asie centrale, donne une gomme-résine, l'ase fétide, dont l'odeur alliacée répugnante est due à des produits sulfurés (mercaptans). Il était employé comme antispasmodique, anthelminthique et emménagogue.

Le genre *Ferulago* est voisin, mais possède un involucre. *F. campestris (Ferula ferulago)* est une plante méditerranéenne vert foncé, ne dépassant pas 60 cm, à bractées de l'involucre bordées de blanc et pendantes.

Chez les *Peucedanum* qui sont au nombre de cent vingt, les vallécules ont seulement de une à trois bandelettes, tandis que celles-ci sont plusieurs chez *Ferula* et *Ferulago.*

Le panais cultivé *(Pastinaca sativa)* appartient à un genre de quatorze espèces eurasiatiques. Il est vert jaunâtre. Il a des feuilles un peu pubescentes, à segments assez étroits, une tige anguleuse et tomenteuse, des ombelles à rayons inégaux, des fleurs jaunes et des fruits très aplatis à ailes commissurales apprimées. Il était cultivé pour sa racine alimentaire. Il en existe plusieurs sous-espèces sauvages.

Chez le genre *Heracleum,* qui comprend environ soixante espèces, les fleurs périphériques sont souvent mâles et ont des pétales hypertrophiés. Dans le fruit, les deux côtes commissurales de chaque côté forment

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

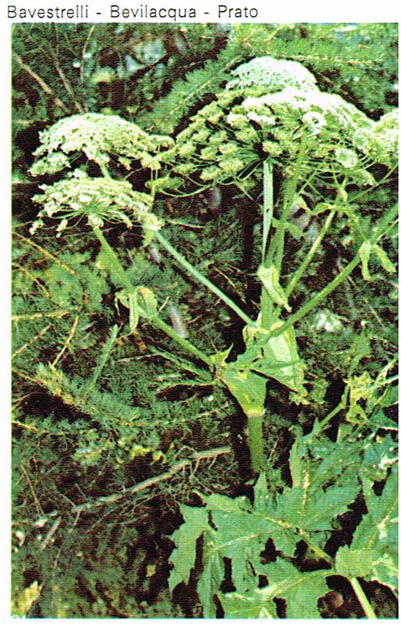

▲ ***En haut, le panais* (Pastinaca sativa), *cultivé autrefois pour sa racine alimentaire. En bas,* Heracleum mantegazzianum, *originaire du Caucase.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

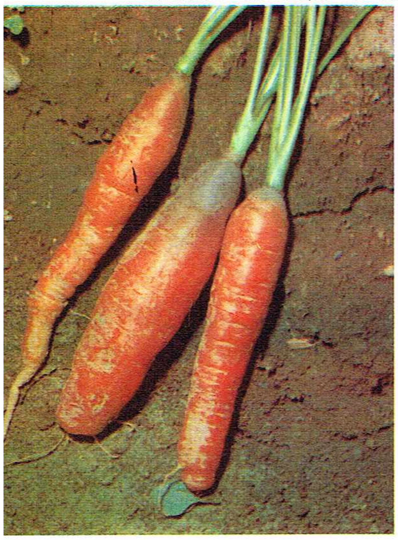

▲ *La carotte a donné lieu à des cultivars à racines tubéreuses très utilisées en alimentation humaine et animale.*

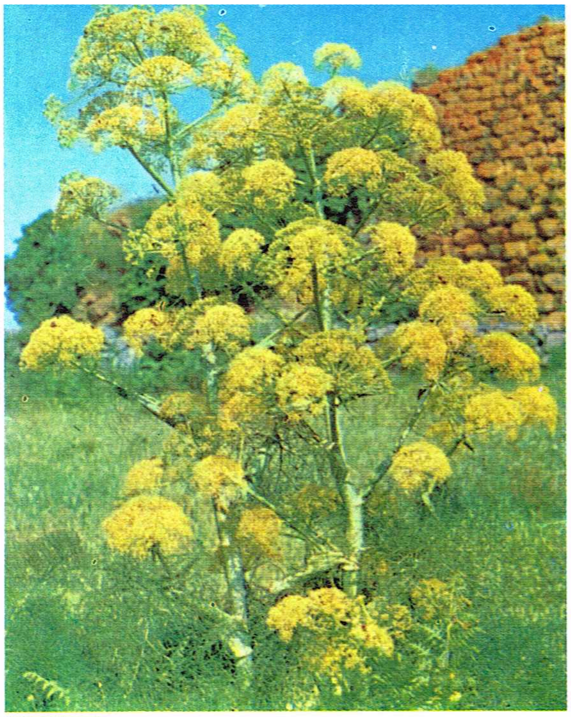

G.P. Mondino

▶ **Thapsia garganica** *est une Ombellifère d'Europe méridionale qui ne croît pas en France.*

une aile de section triangulaire. La berce *(Heracleum sphondylium)*, qui croît en Europe, dans les forêts et les lieux herbeux, dépasse 2 m, est velue et hérissée et a des feuilles basales très grandes. Les ombelles ont jusqu'à quarante-cinq rayons et leur diamètre atteint 25 cm. Elle est polymorphe.

Tordylium maximum est une plante annuelle et hirsute, atteignant 1,30 m, qui croît dans les lieux pierreux et les terrains vagues, sur sols calcaires. Les pétales externes des fleurs périphériques sont aussi hypertrophiés. Le fruit, garni de longs poils, plat et arrondi, est entouré d'une aile épaisse et large, obtuse et blanchâtre, résultant du rapprochement des côtes commissurales. Les quinze autres *Tordylium* habitent la région méditerranéenne et l'Asie du Centre-Ouest.

Au genre *Daucus* enfin appartient la carotte *(D. carota)*. Le fruit présente quatre séries d'aiguillons qui forment les côtes secondaires, tandis que les côtes primaires sont simplement signalées par de petites soies. Cette espèce est une des Ombellifères les plus communes. Ses feuilles sont très découpées et ses ombelles à rayons inégaux possèdent un involucre formé de bractées pennatifides. Les rayons de l'ombelle se rapprochent les uns des autres à la maturité. La fleur médiane de l'ombellule centrale est généralement rouge.

La carotte est extrêmement polymorphe. D'origine probablement méditerranéenne, elle est maintenant répandue sur toute la terre. La sous-espèce *sativus*, à grandes ombelles, est cultivée pour sa racine tubéreuse.

▼ *Touffe de carotte sauvage* (**Daucus carota**).

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Garryales

Ce petit ordre comprend l'unique famille des *Garryacées (Garryaceae)*, avec l'unique genre *Garrya*. Les quinze espèces qui appartiennent à celui-ci sont arbustives, parfois arborescentes, avec des rameaux d'abord quadrangulaires et des feuilles opposées toujours vertes, simples, entières, coriaces, ovales ou lancéolées, pétiolées et dépourvues de stipules. Ce sont des plantes dioïques. Leurs inflorescences sont des chatons soyeux, axillaires ou terminaux.

Les fleurs, solitaires ou en petites cymes, naissent à l'aisselle des bractées opposées et concrescentes. Les mâles ont un périanthe tétramère à quatre tépales, qui sont sans doute des pétales, car il semble y avoir un bourrelet calicinal à quatre dents à l'extérieur, et celui-ci pourrait même former de petits sépales. Il y a quatre étamines alternant avec les tépales. Les fleurs femelles sont en général apérianthées, mais, quelquefois, deux ou plusieurs écailles périanthaires surmontent l'ovaire, qui semble donc infère. Celui-ci est uniloculaire et possède deux carpelles latéraux; il y a deux ovules, un par placenta, et deux styles spatulés et divergents. Les ovules sont pendants et apotropes, avec un seul tégument. Les fruits sont des baies globuleuses ou ovoïdes, à péricarpe mince, avec une ou deux graines pourvues d'albumen.

Ces plantes ont des affinités assez manifestes avec les Ombellifèrales et particulièrement les Cornacées, ce que révèlent la réduction du calice, l'ovaire infère, les ovules apotropes, la présence de deux styles divergents, la possession d'albumen, la morphologie du pollen, l'histologie du bois, etc. Aussi peut-on les incorporer aux Ombellifèrales. Auparavant, elles avaient été placées près des Salicales, des Myricales ou des Hamamélidales. On leur avait également trouvé des affinités avec les Caprifoliacées.

Les *Garrya* sont répartis sur la côte ouest et dans le sud-ouest des États-Unis, au Mexique et jusqu'au Guatemala. Une espèce est antillaise. *G. elliptica*, qui habite de l'Oregon à la Californie, est un bel arbuste de 2,50 m avec des branches densément pubescentes à l'état jeune. Ses feuilles sont elliptiques-aiguës, longues de 4 à 8 cm, épaisses, révolutées et ondulées au bord, laineuses en dessous, vert foncé et glabres au-dessus à l'état adulte. Les fleurs, petites, sont blanc verdâtre ou jaunâtre; les chatons mâles sont denses et longs de 10 à 20 cm; les chatons femelles ne dépassent pas 1 cm. Les fruits, rouge foncé ou noirâtres, sont densément tomenteux et restent longtemps sur la plante, qui est parfois cultivée pour l'ornement.

● *Métachlamydées (Sympétales, Gamopétales ou Monopétales)*

Il s'agit de cinquante mille espèces environ, réparties en cinquante-six familles, dont les fleurs sont périanthées, avec calice et corolle, cette dernière formée de pétales congénitalement soudés, au moins à la base. Le calice peut être réduit; il est à sépales libres ou soudés. Les étamines sont en nombre égal, double ou inférieur à celui des sépales et pétales, exceptionnellement plus nombreuses. Elles sont ou non soudées par leurs filets à la corolle. L'ovaire supère ou infère est formé de un à cinq carpelles, souvent deux (Gamopétales bicarpellées). Les ovules ont dans la plupart des cas un seul tégument. Les fleurs sont actinomorphes ou zygomorphes et parfois très fortement (fleurs en masque ou personées).

On a souvent souligné avec vraisemblance que la gamopétalie ne doit sans doute pas être interprétée comme un indice d'origine monophylétique du groupe, mais que ces plantes constituent plutôt le dernier terme d'un processus évolutif où se sont engagés plusieurs phylums. D'ailleurs, nous avons eu l'occasion de signaler des cas de gamopétalie chez les Dialypétales (Crassulacées notamment), et il y a encore des genres dialypétales parmi les Gamopétales.

Malheureusement, les rapports des groupes de Gamopétales avec ceux des Dialypétales ne peuvent guère être précisés. D'un autre côté, bien des groupes de familles gamopétales sont indiscutablement naturels. Il est donc raisonnable de laisser pour le moment subsister cet ensemble. Le fait qu'il soit riche en espèces montre que son évolution a commencé il y a très longtemps, à

M. Bavestrelli

◀ *Gamopétale tétracyclique à ovaire infère :* **Helianthus annuus,** *le tournesol, Composée originaire du Pérou.*

partir de quelques ancêtres inconnus, qui se sont tous orientés vers la gamopétalie, sans qu'on aperçoive de cause adaptative à ce caractère. L'adoption de celui-ci peut en un sens être considérée comme une marque de parenté naturelle entre les ancêtres des différents groupes de Gamopétales, d'autant plus qu'elles partagent aussi quelques autres caractères communs, comme les ovules unitegminés. Robyns considère actuellement encore la sous-classe des Gamopétales comme un ensemble en grande partie naturel.

Nous donnerons d'abord les caractères essentiels des ordres de Gamopétales, en distinguant avec Wettstein celles qui ont deux cycles d'étamines et celles qui n'en ont qu'un seul, puis, parmi ces dernières, celles dont l'ovaire est supère et celles où il est infère.

— *Gamopétales pentacycliques.* Les fleurs ont cinq verticilles de pièces florales, dont deux d'étamines. Les étamines sont parfois indépendantes de la corolle. L'ovaire est habituellement supère, mais peut être plus ou moins infère. Les ovules, généralement nombreux, sont encore pourvus de deux téguments ou n'en ont qu'un, soit par fusion des deux, comme chez certaines Dialypétales, soit par disparition du tégument externe. Il existe exceptionnellement des espèces à corolle dialypétale.

a) Arbustes ou sous-arbrisseaux, plus rarement herbes; fleurs actinomorphes en général; pétales parfois libres; androcée obdiplostémone, parfois réduit, étamines généralement indépendantes de la corolle; gynécée de deux à cinq carpelles, pourvu d'un seul style, parfois ovaire

▼ *A gauche : Gamopétale tétracyclique à ovaire supère :* **Digitalis lutea.** *A droite, Gamopétale pentacyclique :* **Rhododendron ferrugineum.**

M. Bavestrelli

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

I.G.D.A.

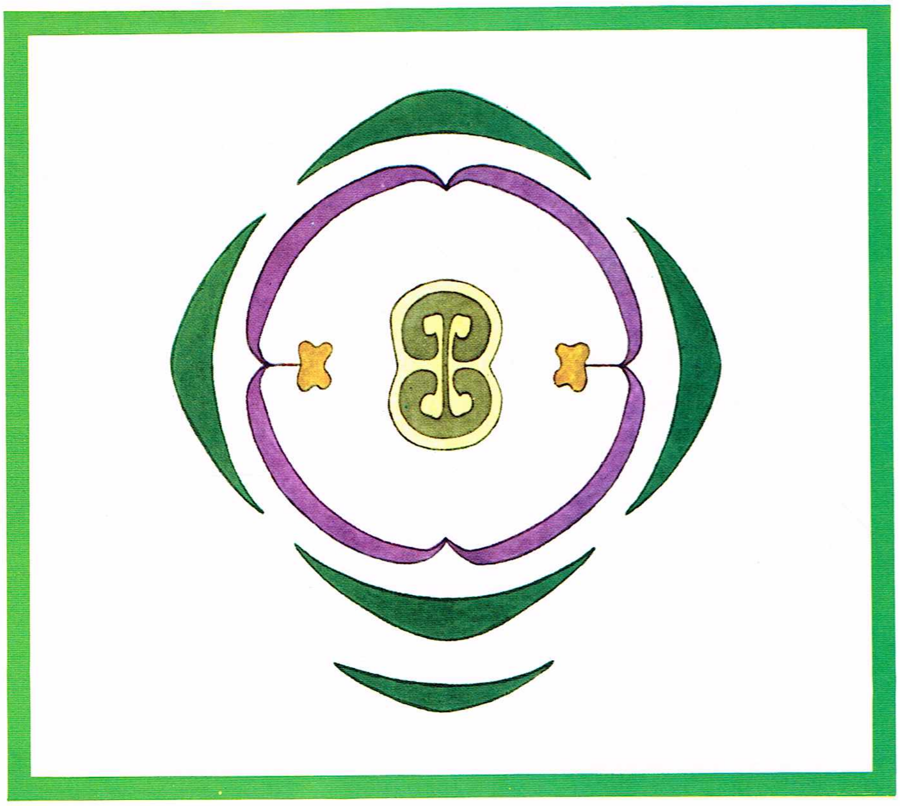

▲ *Diagramme floral d'une plante gamopétale (ici,* Syringa vulgaris)*; les pétales représentés en mauve sont soudés latéralement tandis que les sépales sont libres.*

infère, ovules à un seul tégument : *Éricales* ou *Bicornes,* les anthères possédant fréquemment deux appendices.

b) Plantes généralement herbacées, plus rarement arborescentes ou arbustives; fleurs actinomorphes le plus souvent; un seul cycle d'étamines fertiles épipétales, mais parfois encore staminodes épisépales, insérés comme les étamines sur la corolle gamopétale; gynécée pluricarpellé, un seul style, ovaire supère ou parfois semi-infère, placentation centrale; ovules nombreux à deux téguments ou un seul par soudure : *Primulales.*

c) Plantes ligneuses; fleurs actinomorphes; deux cycles d'étamines, parfois trois, insérés sur la corolle gamopétale, ou bien un seul cycle contenant deux fois plus d'étamines que de pétales ou bien multiplication secondaire des étamines; gynécée gamocarpellé, ovaire supère ou infère à placentation axile; ovules à un ou deux téguments : *Ébénales.*

▼ *Deux Pyrolacées : à gauche,* Pyrola secunda *avec son inflorescence unilatérale; à droite,* Pyrola uniflora, *sur lequel on peut observer l'ovaire supère.*

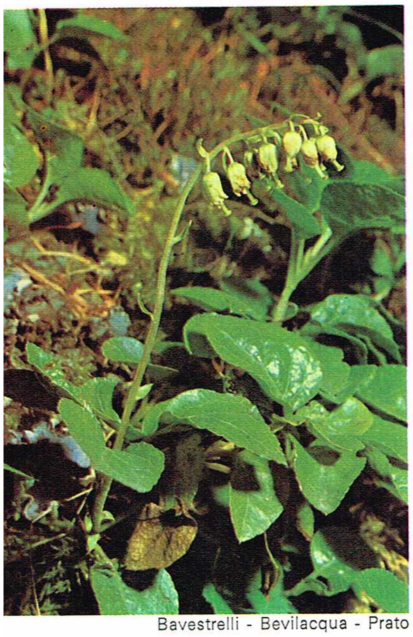

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

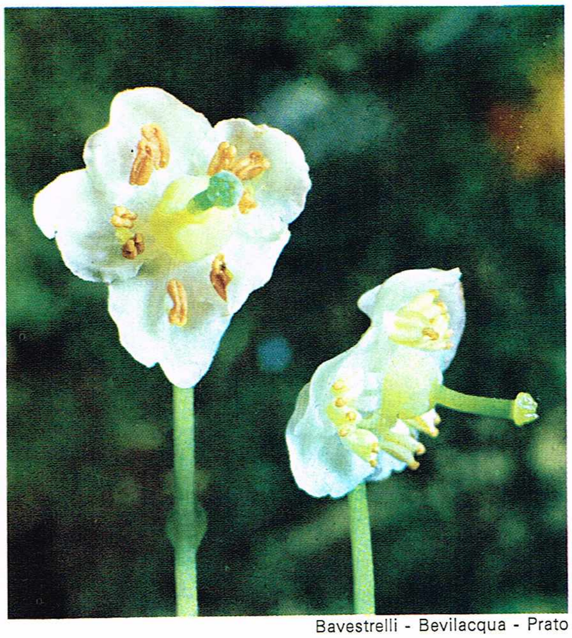

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

d) Plantes ligneuses ou surtout herbacées; fleurs actinomorphes; étamines épipétales (le verticille alternipétale aurait disparu); gynécée à cinq carpelles soudés et cinq styles libres, mais à un seul ovule basal; ovule à deux téguments : *Plumbaginales.*

— *Gamopétales tétracycliques :* Les fleurs ont quatre verticilles de pièces florales. On peut selon la position de l'ovaire distinguer deux groupes :

1) *Les Gamopétales tétracycliques à ovaire supère :*
a) Plantes ligneuses; fleurs actinomorphes, tétramères; corolle gamopétale, parfois pourtant dialypétale ou manquante; deux étamines latérales, insérées sur la corolle; gynécée bicarpellé en général, carpelles antéro-postérieurs; ovules à un tégument : *Oléales* ou *Ligustrales.*

b) Plantes ligneuses, lianes ou herbes; fleurs actinomorphes; corolle à préfloraison généralement tordue; cinq étamines épisépales insérées sur la corolle; deux carpelles antéro-postérieurs pluriovulés en général, parfois libres en partie; ovaire parfois semi-infère : *Gentianales* ou *Contortales.*

c) Arbres, arbustes, mais surtout herbes; fleurs actinomorphes ou zygomorphes, souvent pentamères; cinq étamines souvent réduites à quatre ou deux par avortement, insérées sur la corolle; gynécée souvent à deux carpelles antéro-postérieurs, parfois davantage; le plus souvent, placentation axile; fausses cloisons fréquentes; ovule à un tégument : *Solanales* ou *Tubiflores.*

2) *Les Gamopétales tétracycliques à ovaire infère :*
a) Plantes ligneuses ou herbacées; fleurs actinomorphes, tétramères ou pentamères; étamines épisépales, insérées sur la corolle, parfois réduites en nombre; gynécée tri- ou bicarpellé le plus souvent; certains carpelles sont stériles; placentation axile; ovules unitegminés : *Rubiales.*

b) Plantes le plus souvent herbacées, lianoïdes ou rampantes, rarement ligneuses; fleurs actinomorphes, pentamères; étamines insérées sur le réceptacle, et parfois étroitement unies entre elles, anthères plissées, réduites souvent à des demi-anthères; gynécée presque toujours à trois carpelles; placentation pariétale à placentas massifs; ovule à deux téguments : *Cucurbitales.*

c) Plantes herbacées ou parfois ligneuses; fleurs actinomorphes ou zygomorphes, pentamères, souvent rassemblées en capitules; étamines insérées sur la corolle et alternant avec ses pétales, à anthères plus ou moins soudées postgénitalement; gynécée de deux à cinq carpelles, bicarpellé et uniovulé chez les Composées; ovaire très exceptionnellement supère (Brunoniacées); ovules à un tégument : *Campanulales* ou *Astérales.*

Éricales

Les *Cléthracées (Clethraceae)* sont une petite famille des régions chaudes, réduite aux trente espèces du genre *Clethra.* Ce sont des arbres ou de grands arbustes à poils étoilés, à feuilles alternes, simples, dentées et sans stipules. Les fleurs, blanches ou roses, qui sont disposées en panicules ou grappes terminales, sont pentamères. Elles ont des pétales libres. L'androcée est obdiplostémone. Les anthères s'ouvrent par des pores apicaux. Il y a trois carpelles et l'ovaire est supère, à nombreux ovules en placentation axile. Le fruit est une capsule loculicide et septifrage. Le pollen est normal. On les considérait comme des Éricacées, mais les pétales libres, le pollen en grains libres, les trois carpelles, etc., justifient la création d'une famille spéciale, qui doit être une des plus primitives des Gamopétales, et en tout cas des Éricales.

Les *Pyrolacées (Pyrolaceae)* renferment seize genres et soixante-quinze espèces d'herbes qui habitent les sous-bois des forêts montagnardes de feuillus et de Conifères, dans l'hémisphère Nord. Quelques-uns vivent dans les toundras ou bien dans les montagnes tropicales. Les feuilles peuvent être normales et vertes ou bien réduites à des écailles; la plante est alors dépourvue de chlorophylle et saprophyte *(Monotropa).* Les fleurs sont tétra- ou pentamères. L'androcée est diplostémone. Le

gynécée comporte quatre ou cinq carpelles qui forment un ovaire supère à placentation axile ou pariétale avec de nombreux ovules. Le fruit est une capsule loculicide, parfois une baie. Les graines ont un tégument externe lâche en réseau. L'embryon très réduit n'a pas de cotylédons. Chez les *Pyroloïdées,* les anthères sont recourbées en arrière dans le bouton et s'ouvrent par deux pores. Le pollen est en tétrades et les pétales sont encore libres.

Le genre *Pyrola* comporte quarante espèces. *P. minor* ne dépasse guère 25 cm de haut et possède des feuilles basales suborbiculaires, dentées, pétiolées et des fleurs blanc rosé en grappes non unilatérales; les pétales sont recourbés vers l'intérieur. Les capsules sont penchées. La plante est répandue dans tout l'hémisphère Nord, surtout à l'étage subalpin. *P. secunda* a des feuilles plus étroites, ses fleurs blanc verdâtre sont réunies en inflorescences unilatérales et ses capsules sont penchées. Il est répandu de la même façon, mais se trouve aussi à l'étage montagnard même dans les montagnes du Sud.

Chez les *Monotropoïdées,* les anthères sont toujours dressées et s'ouvrent par des fentes longitudinales qui peuvent confluer en cercle ou en fer à cheval, parfois presque horizontalement. Les grains de pollen sont libres.

Le sucepin *(Monotropa hypopitys)* appartient à un genre de trois ou quatre espèces adaptées à la vie saprophyte et dépourvues de chlorophylle. Il habite sur l'humus des forêts ombreuses, surtout de Conifères, jusque dans l'étage subalpin, et vit en symbiose avec un Champignon qui colonise ses jeunes racines ou mycorhizes. Un autre Champignon s'installe aussi dans ses pétales. C'est une plante qui peut atteindre 40 cm, à feuilles réduites à des écailles, et munie d'un rhizome traçant. Ses inflorescences sont des grappes terminales, unilatérales, recourbées au sommet et composées de fleurs jaunâtres d'un parfum agréable. Les pétales sont libres, et forment chacun à sa base un éperon court qui reçoit le nectar de glandes adossées deux par deux aux carpelles. Les fleurs latérales sont tétramères, la terminale pentamère.

Les *Éricacées (Ericaceae)* sont une importante famille de quatre-vingt-deux genres et environ deux mille cinq cents espèces. Beaucoup sont sociales et dominent d'importantes formations végétales. Ce sont des sous-arbrisseaux, des arbrisseaux ou des arbustes. Leur croissance est lente. Elles ont souvent de petites feuilles persistantes, coriaces, entières, sans stipules, alternes, opposées ou verticillées. Leurs fleurs, tétra- à heptamères, sont gamopétales sauf exception, actinomorphes le plus souvent et l'androcée y est obdiplostémone. Les étamines sont insérées sur le réceptacle. Il y a un disque intrastaminal. Les anthères s'ouvrent en apparence par des pores apicaux, mais elles sont basculées sur le filet, de sorte que les pores sont en fait basaux. Il y a souvent deux appendices basaux (morphologiquement apicaux) sur les anthères: ce sont des prolongements du connectif. Le pollen est en tétrades. Il y a généralement quatre ou cinq carpelles unis en gynécée à placentation axile. L'ovaire est supère ou infère. Les fruits sont des capsules, des baies ou des drupes. Les graines ont un tégument externe distendu comme chez les Pyrolacées. Les Éricacées sont généralement des plantes adaptées à des sols fortement acides et habitent des milieux forestiers ou des landes parfois très humides dont elles sont des éléments caractéristiques; toutefois, la morphologie de ces espèces évoque le xérophytisme, car, du fait de l'acidité du terrain, elles ne peuvent que difficilement en utiliser l'eau. Certaines Éricacées sont franchement xérophiles. Il y a des mycorhizes, et le Champignon symbiotique aide à la germination des graines. On distingue quatre sous-familles.

Les *Éricoïdées* ont des pétales soudés et marcescents (persistants et desséchés) après la floraison; les anthères sont souvent appendiculées. L'ovaire est supère, les graines ne sont pas ailées. Il y a seize genres, européens, africains et malgaches.

La brande ou callune *(Calluna vulgaris)* est la seule espèce du genre. Elle atteint 1 m et a l'aspect d'une bruyère (nom qui lui est souvent donné à tort). Elle est ligneuse, rameuse et tortueuse, glabre, et possède des feuilles squamiformes apprimées, sessiles, opposées-décussées et imbriquées sur les rameaux stériles. Chacune est munie d'un sillon dorsal porteur de stomates et de deux longues oreillettes aiguës à la base. Les inflorescences constituent des grappes étroites terminales de petites fleurs roses, à grands sépales libres colorés, deux fois plus longs que la corolle et accompagnés à l'extérieur de petites bractées vertes formant un « calicule ». Les pétales de la corolle sont presque libres. Les fruits sont des capsules à quatre valves. Cette espèce n'est indigène qu'en Europe, mais est naturalisée en Amérique du Nord. Sous le climat atlantique à hivers modérés, la plante conserve son activité végétative pendant toute l'année. On la trouve du niveau de la mer à l'étage alpin et dans des sols acides gorgés d'eau ou plus ou moins secs. Elle forme des peuplements caractéristiques de certaines landes.

Le genre *Erica* comprend les bruyères proprement dites, au nombre d'environ six cents, remarquablement diversifiées en Afrique du Sud, et surtout dans la province du Cap. Seize espèces sont atlantiques et méditerranéennes et quelques-unes vivent dans les montagnes d'Afrique tropicale orientale. Seul *E. arborea* s'étend à la fois à l'Afrique et à l'Europe.

La bruyère *(E. cinerea)* est un buisson bas et lâche, ne dépassant pas 75 cm. Les feuilles de 4 à 5 mm de long, étalées, sont verticillées par trois et sans oreillettes. Elles sont glabres et toujours vertes. Les fleurs sont groupées en panicules étroites. Elles ont un calice vert de quatre sépales aigus, de moitié plus courts que la corolle gamopétale, qui est rouge-pourpre, en grelot, à quatre dents. Les étamines sont incluses. Cette plante croît

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Une bruyère ornementale du cultivar « Hélène ».***

▼ ***Chez les Éricacées, qui peuvent atteindre la taille d'un arbuste, les feuilles sont très petites et la floraison est abondante.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

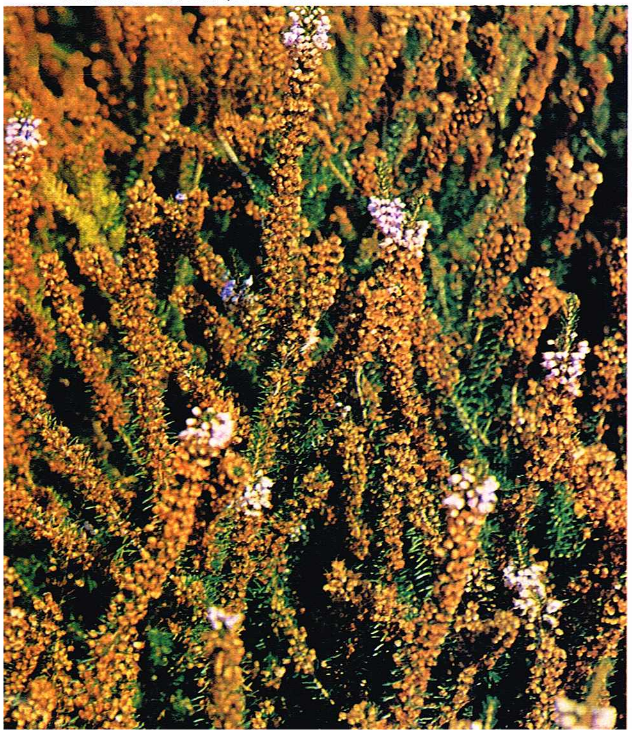

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

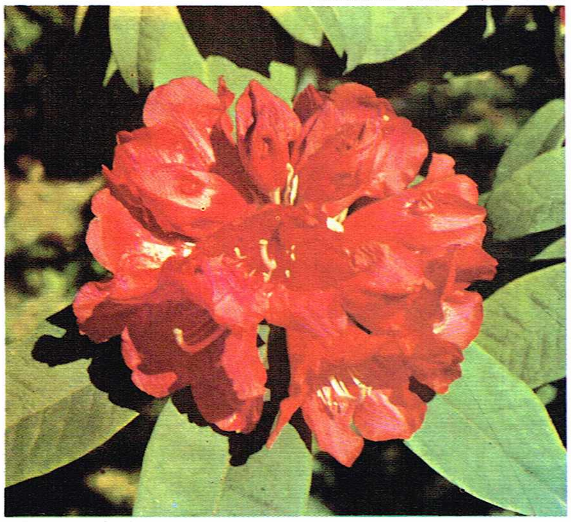

▲ *Fleurs d'azalée* **(Rhododendron indicum)** *du cultivar « Dame Mélanie », à gauche, et de rhododendron cultivé, à droite.*

▼ *Abondante floraison d'azalée* **(Rhododendron indicum)** *du cultivar « Julius Rhoers ».*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

sur les sols acides d'Europe occidentale. *E. tetralix,* dont l'aire se situe des Pyrénées à l'Allemagne du Nord, habite les landes tourbeuses et les sols acides inondés. C'est un sous-arbrisseau toujours vert, pubescent-glanduleux, atteignant 70 cm, à feuilles verticillées par quatre, blanchâtres en dessous et munies de cils raides. Les fleurs sont comparables à celles de la bruyère, mais le calice est cilié. La bruyère à balais *(E. scoparia)* dépasse 1 m, et même beaucoup plus parfois. Ses feuilles sont étroites et étalées. Ses fleurs sont verdâtres, à pétales unis jusqu'au milieu seulement et non recourbés. Les étamines sont à peine saillantes. La plante occupe l'ouest, le centre et le midi de la France et la partie occidentale de la zone méditerranéenne.

E. arborea atteint 4 et même 7 m. Ses fleurs forment de larges panicules et leur corolle est en cloche ouverte, à pétales à demi soudés et à pointes droites. Il se rencontre en France dans le Midi, et son bois sert à la fabrication de pipes. C'est une plante méditerranéenne et d'Asie occidentale. On cultive dans les jardins de rocaille les *Erica* cités et aussi *E. herbacea (E. carnea),* à corolle rouge en tube à dents droites, dépassé par les anthères.

Chez les *Rhododendroïdées,* il y a de trois à huit pétales libres ou soudés et caducs; les anthères sont souvent unies les unes aux autres et elles n'ont pas d'appendices. L'ovaire supère montre jusqu'à vingt carpelles. Les graines à tégument externe lâche sont souvent ailées. Aucun des seize genres n'est africain.

Le genre *Rhododendron* est immense, avec ses mille trois cents espèces. La corolle y est un peu zygomorphe, et les pétales soudés. *R. ferrugineum* est le rosage. Il habite l'étage subalpin des Pyrénées, des Alpes, du Jura et des montagnes de Yougoslavie. Il forme des peuplements caractéristiques de 1 450 à 2 500 m d'altitude. Il est modérément calcifuge. Ses feuilles toujours vertes, luisantes au-dessus, sont elliptiques, aiguës, ciliées, pubescentes et couleur de rouille en dessous, à marges révolutées. Elles ne dépassent pas 4 cm de long. Les fleurs, rouges, sont groupées en grappes terminales assez denses. Le calice est minuscule; la corolle, à pétales soudés jusqu'à la moitié et longs de 15 mm, est marquée de rouille à l'extérieur. La plante atteint environ 1 m. *R. hirsutum* est voisin du précédent, mais plus petit. Il a de petites feuilles (4 cm) persistantes longuement ciliées au bord et ses pédoncules sont hispides. Le calice a de longs sépales lancéolés et ciliés. La corolle est rouge. La plante se trouve dans le centre et l'est des Alpes, en particulier en Savoie, ainsi qu'en Yougoslavie. Elle est calcicole. *R. ponticum* a des feuilles persistantes atteignant 25 cm de long et une corolle violet-pourpre de 4 à 6 cm. Son aire disjointe est relictuelle; il se trouve dans l'est des Balkans, le nord de l'Asie Mineure et le Caucase d'une part, et, d'autre part, dans la péninsule Ibérique, sous forme d'une sous-espèce dont l'axe de l'inflorescence est pubescent. On le connaît à l'état fossile dans les Alpes et en Irlande. Il a donc dû avoir anciennement une aire bien plus vaste et continue. *R. lapponicum* est circumpolaire et présent en Scandinavie et en Amérique du Nord. *R. luteum,* à feuilles caduques et à fleurs jaunes de 50 mm de diamètre, est très rare en Europe, mais croît en Asie Mineure et dans le Caucase. Ses hybrides, avec deux autres espèces, ont donné les azalées de Gand, ou d'Amérique.

Le centre de dispersion des rhododendrons est l'Himalaya, l'Extrême-Orient et la Malaisie. Ils peuvent atteindre 10 m de haut dans ces régions. *R. indicum,* du Japon, introduit dès le XVII[e] siècle, est l'azalée à feuilles plus ou moins caduques. A côté des azalées vendues en pot mais qu'on peut conserver ensuite en pleine terre (en terre de bruyère et à une exposition ombragée), on cultive d'innombrables variétés et hybrides de rhododendrons comme arbustes à fleurs. Ils sont dérivés essentiellement de *R. ponticum,* croisé avec des espèces asiatiques, notamment *R. arboreum* de l'Himalaya, de l'Inde et de Ceylan. D'innombrables autres hybrides ont d'ailleurs été obtenus. Quant à *R. maximum,* il habite l'est des États-Unis, où il peut se présenter, toujours sur sols acides, sous forme arborescente — et il atteint alors une douzaine de mètres — ou bien en grands ensembles arbustifs. Ses fleurs sont nombreuses et en général blanches teintées de rose.

Dans les régions paludéennes et dans les tourbières à sphaignes des régions froides de l'hémisphère Nord, on rencontre en peuplements des arbustes toujours verts, odorants, à feuilles linéaires ou allongées et à fleurs en fausses ombelles dont les cinq pétales sont libres. Ce sont les *Ledum. L. palustre,* d'Eurasie septentrionale, a de sept à onze étamines, tandis que *L. groenlandicum,* qui habite le Groenland et le nord-est de l'Amérique du Nord, en a de cinq à huit, et ses feuilles sont tomenteuses et couleur de rouille en dessous. Le genre *Ledum* comporte trois autres espèces.

Dans la sous-famille des *Arbutoïdées,* l'ovaire supère devient une capsule loculicide, une drupe ou une baie. Les graines n'ont pas de tégument lâche.

Le genre *Andromeda* regroupe une dizaine d'espèces si l'on y inclut les *Pieris.* Il occupe l'hémisphère Nord. *A. polifolia* est un arbrisseau des marais tourbeux de montagne, à feuilles persistantes, elliptiques-mucronées, vertes et luisantes au-dessus, blanches et glauques au-dessous. Les fleurs, pentamères, urcéolées, blanc rosé, sont disposées en petits corymbes terminaux. Le fruit est une capsule à cinq valves. *A. (Pieris) japonica* est un arbuste de 3 m de haut, à fleurs urcéolées blanches en panicules pendantes, souvent cultivé dans les jardins. Il est originaire du Japon.

Le genre *Arbutus* comporte vingt espèces dans la région méditerranéenne, l'Amérique du Nord et l'Amérique cen-

trale. L'arbousier ou arbre aux fraises *(A. unedo)* est haut de quelques mètres habituellement et a une silhouette dense. Ses feuilles persistantes sont ovales-aiguës, luisantes et dentelées. Dans certaines stations cette espèce porte en même temps ses fleurs urcéolées, de couleur crème ou un peu rosées, vertes au sommet, et ses beaux fruits drupacés rouges et globuleux, ou arbouses, à surface verruqueuse et pulpe douce et jaune. On peut consommer ces derniers frais ou en confiture ; on en fait aussi une boisson alcoolisée. L'arbousier croît de préféfence sur les zones dégradées à sols siliceux acides, souvent avec des bruyères et des cistes ; il donne un excellent charbon de bois. Il est caractéristique du maquis méditerranéen, mais atteint l'Irlande et, en France, les Côtes-du-Nord.

Les *Arctostaphylos* sont répandus dans les régions tempérées et froides de l'hémisphère Nord, mais particulièrement dans l'ouest de l'Amérique du Nord. Il y en a environ trente-cinq. Le raisin d'ours *(A. uva-ursi)* est un arbrisseau toujours vert, circumpolaire et alpin. On le rencontre en France dans le Jura, le Massif central, les Alpes et les Pyrénées, de 600 à 2 500 m d'altitude, dans les zones sèches. Ses feuilles sont nombreuses, obovales, à bord entier, brillantes au-dessus, mates en dessous, finement veinées en réseau sur les deux faces. Ses fleurs, petites, globuleuses, blanches ou roses, forment des grappes. Ses fruits drupacés sont lisses, rouges et luisants, de la taille d'un pois, à pulpe farineuse. Ils servent à faire des confitures. Les feuilles contiennent de l'arbutoside, hétéroside formé de glucose et d'hydroquinone qui, libéré dans l'organisme puis éliminé par les reins, confère aux préparations de feuilles des propriétés antiseptiques urinaires. La plante est aussi riche en tanin et utilisée pour la préparation du « cuir de Russie ». On rencontre plus rarement *A. alpina,* plutôt calcicole, à feuilles caduques, ciliées et veinées en réseau sur les deux faces. Son aire est comparable, mais plus nordique, et, en France, il ne se trouve que dans les Pyrénées, les Alpes et, très rarement, le Jura. Diverses espèces d'*Arctostaphylos* habitent le chaparral, maquis bas toujours vert de la Californie et, jusqu'à plus de 2 000 à 3 000 m d'altitude, les forêts de Conifères du Mexique.

Chez les *Gaultheria,* au nombre de cent cinquante, surtout abondants dans l'hémisphère Sud, le calice est accrescent autour de la capsule ; le fruit est une fausse baie. Quelques gaulthérias sont cultivés pour l'ornement.

La sous-famille des *Vaccinioïdées* présente un ovaire plus ou moins infère. Le fruit y est généralement une baie.

Le genre *Vaccinium* comporte deux cents espèces de l'hémisphère Nord et des montagnes tropicales. L'airelle ou myrtille *(V. myrtillus)* est eurosibérienne, et très répandue dans toutes les forêts des étages montagnard et subalpin, sur sol acide, parfois parmi les rhododendrons, jusqu'à plus de 2 500 m d'altitude. C'est un arbrisseau de 20 à 50 cm, vert et très glabre, à rameaux anguleux et petites feuilles caduques, ovales-aiguës et dentées. Les fleurs, solitaires ou par paires, ont des corolles pendantes, verdâtres ou teintées de rouge et à gorge rétrécie. Les baies, de la grosseur d'un pois, noires mais couvertes par une couche pruineuse bleutée, ont des propriétés astringentes à cause du tanin qu'elles contiennent. Elles sont aussi riches en anthocyanosides que l'on extrait, car ils ont pour propriété d'augmenter la résistance des capillaires et sont donc antihémorragiques. On fait aussi avec ces fruits des confitures très appréciées et une boisson alcoolisée comparable au kirsch. Les feuilles ont des vertus antidiabétiques. La myrtille est répandue en France dans les régions montagneuses principalement, cependant elle fréquente aussi des zones plus basses dans le Bassin parisien, la Normandie et le Massif armoricain notamment. On trouve à des altitudes plus élevées, dans les étages subalpin et alpin, l'airelle bourbeuse *(V. gaultherioides = V. uliginosum),* à feuilles plus veinées, vert glauque et très entières et à fleurs solitaires. Elle s'associe à *Loiseleuria procumbens,* seule espèce de ce genre et qui est une Rhododendroïdée circumpolaire et alpine, à port d'arbrisseau et petites feuilles opposées, pour coloniser les éperons rocheux de l'étage alpin. Le véritable *V. uliginosum,* dont les fleurs sont par deux ou trois, ne se rencontre que sur les terrains très humides jusqu'à l'étage montagnard. *V. gaultherioides* et *uliginosum* sont des plantes arctiques des montagnes d'Europe et d'Asie occidentale et pour la seconde d'Amérique du

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

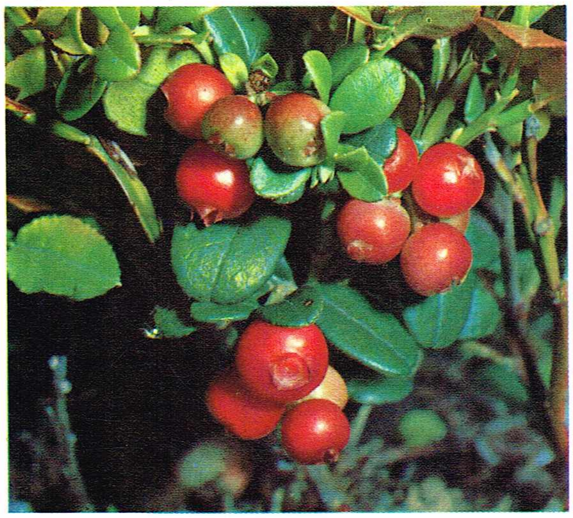

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Vaccinium vitis-idaea,*** *l'airelle rouge, est un sous-arbrisseau que l'on rencontre dans nos montagnes mais aussi jusqu'en Normandie et dans la région parisienne ; ses baies rouges et acides sont consommables après les gelées.*

Nord jusqu'en Californie et dans l'Utah. L'airelle rouge *(V. vitis-idaea)* habite toute la bande circumboréale, mais sans descendre au sud des Grands Lacs en Amérique du Nord.

La canneberge *(V. oxycoccos = Oxycoccos palustris),* également circumboréale, se rencontre dans les marais tourbeux d'une grande partie de la moitié nord de la France. Elle a des tiges filiformes, rampantes ou couchées, de 30 cm environ, avec de très petites feuilles persistantes, aiguës, blanches en dessous, et des fleurs terminales par une à trois, tétramères, rose vif, longuement pédonculées, à pétales lancéolés presque libres. Les fruits, rouges puis noirâtres, atteignent 1 cm de diamètre. La corolle à pétales presque libres et les fleurs longuement pédonculées peuvent faire placer cette plante dans un genre *Oxycoccos,* qui, ainsi caractérisé, comporte quelques autres espèces voisines. *O. macrocarpus (V. macrocarpum)* est l'airelle des États-Unis (cranberry), du nord-est des États-Unis et du sud-est du Canada, cultivée pour son fruit comestible utilisé comme celui de notre airelle.

Les *Épacridacées (Epacridaceae)* renferment trente genres et quatre cents espèces d'Australie, d'Hawaii,

▼ *Les formes horticoles de rhododendrons présentent une importante gamme de tailles et de couleurs.*

E.P.S.

M. Bavestrelli

▲ **Vaccinium myrtillus,** ***la myrtille, répandue en France, donne des baies bleutées très appréciées.***

d'Amérique du Sud, de Nouvelle-Zélande, de Nouvelle-Calédonie et d'Indo-Malaisie. Elles sont voisines des Éricacées, mais en diffèrent par leur haplostémonie et par leurs anthères qui s'ouvrent à l'aide d'une seule fente longitudinale pour les deux loges. Ce sont des arbustes à feuilles raides, entières, sessiles et sans stipules. Leur fruit est une capsule loculicide ou une baie. Quelques genres sont cultivés en serre.

La famille des *Empétracées (Empetraceae)* est composée de trois genres et neuf espèces seulement. Elle est intéressante par sa distribution. Les six représentants du genre *Empetrum* ont une aire disjointe dans les toundras et les forêts de la zone circumpolaire d'une part et les montagnes situées plus au sud d'autre part. Une espèce est propre au sud des Andes et aux zones subantarctiques de l'Amérique du Sud. C'est le seul témoin de la famille dans l'hémisphère austral. Le genre *Corema,* avec deux espèces, est présent dans les montagnes du Portugal et de l'Espagne ainsi que sur les rives opposées de l'océan Atlantique, avec des stations intermédiaires dans les Açores. Le genre *Ceratila,* avec une seule espèce, vit dans l'ouest de l'Amérique du Nord. Il s'agit de sous-arbrisseaux toujours verts, d'aspect éricoïde, à feuilles serrées, alternes, simples, dont les bords sont recourbés dorsalement. Les seuls représentants qu'on en connaisse en France sont les camarines *(E. nigrum* et *E. hermaphroditum)* qu'on rencontre dans les montagnes en zones subalpine et alpine jusqu'à 3 000 m d'altitude.

Plumbaginales

Cet ordre est modeste et comprend la seule famille des *Plumbaginacées (Plumbaginaceae).* Sa position systématique a été longtemps l'objet de discussions. Certains avaient proposé de l'inclure dans les Primulales. Mais si les fleurs des Plumbaginales sont pentamères comme celles des Primulales, la corolle étant souvent tubuleuse comme chez ces dernières, chez les Plumbaginales l'ovaire est uniloculaire avec un seul ovule inséré à peu près basalement tandis que les styles ou au moins les stigmates sont au nombre de cinq, indépendants ou légèrement concrescents. De plus, les fleurs ont deux préfeuilles, caractères très différents de ce que l'on rencontre chez les Primulales. Les affinités des Plumbaginales sont en fait à chercher plutôt parmi les Centrospermales, qui peuvent aussi avoir une placentation basale et de longs funicules spiralés, comme les Plumbaginales. L'anatomie et l'embryologie rapprochent aussi les deux ordres. Il n'y a pas toutefois de périsperme chez les Plumbaginales.

La famille des Plumbaginacées comprend environ trois cent cinquante espèces, réunies en une dizaine de genres. Elles ont une distribution à peu près cosmopolite, mais sont surtout abondantes en région méditerranéenne et en Asie, dans les zones sèches et les hautes montagnes. Ce sont des arbrisseaux ou des herbes vivaces à feuilles simples et entières, non stipulées, alternes ou toutes basales. Les fleurs, hermaphrodites et actinomorphes, pourvues de préfeuilles, sont groupées en inflorescences racémeuses ou cymeuses et alors souvent condensées en têtes. Le calice, parfois coloré ou velu et glanduleux, a des sépales soudés en un tube qui se termine par cinq dents. Il est membraneux au niveau du tube et plié longitudinalement entre les dents. La corolle possède cinq pétales parfois libres, mais généralement unis en bas et dont les parties libres sont tordues dans le bouton. Les cinq étamines, opposées aux pétales, à anthères introrses, sont insérées sur le réceptacle de la fleur comme chez les Éricales ou unies par leur filet à la corolle. L'ovaire est supère; il possède cinq carpelles soudés, comme le montrent l'existence de cinq styles et l'anatomie. Ces carpelles forment une unique loge dans laquelle se trouve un ovule solitaire en placentation subbasale. Les styles peuvent être séparés ou soudés, mais il y a toujours cinq stigmates. L'ovule anatrope a un long funicule courbe de sorte que son micropyle est dirigé vers le haut (ovule circinotrope). Les fruits, renfermés dans le tube du calice, sont indéhiscents ou ont une déhiscence irrégulière en pyxide ou basalement. Parfois plusieurs fruits sont disséminés ensemble avec l'axe infrutescentiel.

De nombreuses espèces de Plumbaginacées vivant dans des milieux hostiles (steppes, régions sablonneuses et rochers marins) présentent des feuilles sécrétant de l'eau, du calcaire, du sel ou du mucilage. Il y a souvent

▼ ***Les fleurs d'*****Armeria** ***sont réunies en capitules hémisphériques. A gauche,*** **Armeria juniperifolia;** ***à droite,*** **Armeria alpina.**

R. Longo

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

M. Bavestrelli

◀ *Chez les Primulacées, les fleurs sont gamopétales et actinomorphes, et les feuilles généralement groupées en rosette basale ; ici,* **Primula acaulis,** *la primevère.*

des faisceaux libéro-ligneux surnuméraires dans l'écorce et la moelle, et occasionnellement des formations secondaires anormales.

Chez les Plumbaginées, les inflorescences sont racémeuses et les étamines sont généralement libres. Les styles sont soudés. Le genre *Plumbago* comporte vingt espèces, surtout présentes dans les régions tropicales et subtropicales. Il existe une unique espèce méditerranéenne, *P. europaea,* qui atteint l'Iran.

Chez les Staticées, les inflorescences sont cymeuses et composées. Les étamines sont unies à la corolle, mais les styles sont libres au moins en grande partie. Il s'agit en général d'herbes vivaces. Les *Armeria* sont des plantes herbacées ou des buissons bas dont la tige est ligneuse inférieurement. Ils ont des feuilles basales en rosette, linéaires et entières. Leurs tiges florifères sont dépourvues de feuilles et leurs fleurs sont réunies au sommet en un capitule hémisphérique entouré de bractées. Elles sont roses, lilas, blanches ou pourpres et chacune possède une seule préfeuille scarieuse. L'une des espèces les plus fréquentes dans nos régions est le jonc marin *(A. maritima),* cespiteux et constituant des coussins à feuilles linéaires, charnues et molles à une seule nervure. Ses fleurs sont roses et forment au sommet de tiges pubescentes des capitules arrondis entourés à la base de petites bractées larges, d'un vert ferrugineux, les externes étant scarieuses sur les bords. Les dents du calice se prolongent en courtes arêtes (1 mm) qui peuvent manquer. Cette espèce habite les rochers et les pelouses côtières, et plus rarement les montagnes, en Europe et dans le nord de l'Asie. Elle est polymorphe et de nombreuses sous-espèces ont été distinguées. Elle est souvent cultivée dans les jardins de rocaille. *A. plantaginea* est répandu dans le sud-ouest de l'Europe. Ses feuilles ont de trois à sept nervures ; l'involucre du capitule a des bractées externes dépassant les fleurs, dont les lobes du calice forment une arête aussi longue qu'eux. Enfin on ne peut que mentionner les *Limonium (Statice),* au nombre de deux cents, à peu près cosmopolites, mais surtout méditerranéens et d'Asie occidentale.

Primulales

Cet ordre comprend des plantes à fleurs actinomorphes, généralement pentamères, quelquefois tétra- à octomères, avec une corolle gamopétale, très rarement à pétales libres. Les étamines sont en nombre égal à celui des pétales, opposées à eux et insérées le plus souvent sur la corolle, c'est-à-dire en fait unies à celle-ci par toute la partie inférieure de leurs filets ; parfois il y a aussi des staminodes épisépales, correspondant aux étamines, insérés également sur le tube de la corolle. L'ovaire est supère ou semi-infère, uniloculaire, avec un placenta central portant de nombreux ovules à deux téguments

M. et S. Prato

◀ *Hampes florales d'***Hottonia palustris** *; ses feuilles découpées en lanières sont entièrement immergées (les feuilles ovales appartiennent à* **Alisma plantago aquatica***).*

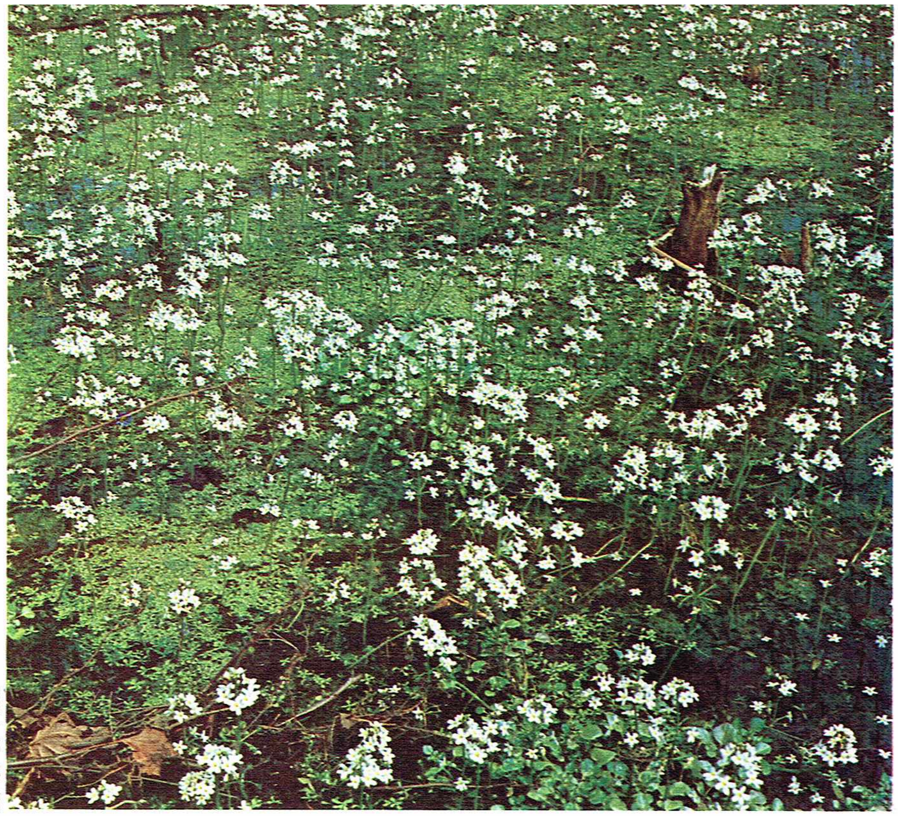

M. et S. Prato

▲ *Étang colonisé par* Hottonia palustris *en fleur.*

qui peuvent se souder. Des cas intermédiaires rapprochent cette disposition de la placentation axile : on voit quelquefois des loges ovariennes rudimentaires délimitées par des ébauches de cloisons en bas de l'ovaire, comme chez la Primulacée *Dodecatheon*. Le placenta central est formé par les parties fertiles des carpelles, qui sont unies entre elles, mais séparées des parois carpellaires, comme cela se produit tardivement chez les Caryophyllacées. De plus, l'axe floral se prolonge peut-être au centre du placenta, mais ce n'est pas lui qui porte les ovules. Le style et le stigmate sont simples. Les Primulales peuvent être rapprochées des Centrospermales, comme on vient de le voir à propos de l'ovaire. Pourtant, on leur a trouvé aussi des affinités avec les Guttiférales.

La famille des *Théophrastacées (Theophrastaceae)* comprend quatre genres et cent dix espèces d'arbres et arbustes d'Amérique tropicale et des îles Hawaii. Leur fleurs ont un androcée de deux verticilles, l'interne staminal, inséré en face des pétales, l'externe staminodial et à pièces épisépales. L'ovaire est à placentation centrale, parfois basale et possède de nombreux ovules qui peuvent n'avoir qu'un seul tégument, par soudure. Les fruits sont des baies à grosses graines jaunes ou orangées, parfois des akènes uniséminés. Nous citerons les genres *Theophrastea, Clavija* et *Jacquinia*.

La famille des *Primulacées (Primulaceae)* comprend des plantes herbacées, rarement des arbrisseaux, avec des feuilles le plus souvent simples et alternes, à bord entier, parfois aussi dentées ou lobées. Ces feuilles sont en général toutes réunies en une rosette basale. Il peut se former des bulbes. Les fleurs sont actinomorphes et en majorité pentamères, parfois de type quatre à neuf ou avec une corolle plus ou moins tubuleuse inférieurement, qui peut manquer *(Glaux)*. Les étamines sont opposées aux pétales et libres ou unies entre elles ou à la corolle. Il y a dans certains cas cinq staminodes épisépales. L'ovaire est uniloculaire, supère ou, très rarement, semi-infère *(Samolus)*, avec un style et un stigmate simples ; la placentation est centrale. Les fruits sont des capsules déhiscentes par cinq dents ou valves en général, et contiennent de nombreuses graines. On observe quelquefois le phénomène de l'hétérostylie.

Cette famille renferme vingt-huit genres et huit cents espèces environ, répandus partout, mais surtout dans les régions tempérées de l'hémisphère boréal.

Les Primulées ont une corolle longuement tubuleuse inférieurement et à préfloraison non tordue. Elles présentent un rhizome et forment souvent des rosettes.

Le genre *Hottonia* comprend deux espèces seulement, l'une, *H. inflata*, des régions atlantiques de l'Amérique du Nord, et l'autre répandue en Europe tempérée et en Asie Mineure, qui est *H. palustris* ou millefeuille aquatique, vivace, à rhizome traçant, à tiges obliques immergées émettant des hampes florales aériennes. Ses feuilles, également immergées, sont bipennatiséquées en lanières linéaires entières. Elles sont alternes, mais souvent rapprochées en pseudo-verticilles. A l'aisselle de ces feuilles peuvent se former les hampes florales dont les fleurs sont aussi disposées en faux verticilles. Celles-ci, blanches ou roses à gorge orangée, ont un calice à cinq sépales peu soudés et une corolle à tube court et cinq lobes étalés émarginés. Il y a cinq étamines insérées au sommet du tube corollin. L'ovaire est supère, le style filiforme et le stigmate discoïdal. Les fruits sont des capsules à nombreuses graines s'ouvrant par cinq fentes longitudinales. On rencontre cette espèce dans les lieux paludéens et dans les fossés où l'eau stagne, surtout sur sols acides, de l'Italie à la Bulgarie et dans le nord et l'ouest de la France. Elle fleurit en mai-juin.

Le genre *Primula* (primevères) comprend des plantes annuelles et surtout vivaces, à feuilles généralement simples, disposées en rosette basale et qui peuvent produire une sécrétion cireuse pulvérulente. Les fleurs sont de différentes couleurs, réunies en ombelles ou en verticilles superposés, parfois solitaires, avec un calice gamosépale pentamère ; le tube de la corolle est souvent plus long que les cinq lobes pétalaires, libres, plus ou moins étalés, à peu près cordiformes ou bifides. Il y a cinq étamines épipétales insérées sur le tube corollin. L'ovaire est supère. Dans la même espèce, le style est fréquemment plus long ou plus court que les étamines, suivant les individus (hétérostylie). Le stigmate est globuleux. Les fruits sont des capsules déhiscentes par cinq valves et contiennent d'innombrables petites graines. La fécondation croisée est déterminée par l'hétérostylie parce que, du fait notamment de sa taille et de celle des papilles

▼ *Trois représentants du genre* Primula *: de gauche à droite :* Primula vulgaris, *qui vit dans les lieux ombragés,* Primula officinalis, *le coucou, très répandu dans les prairies humides, et* Primula auricula, *que l'on rencontre dans les rochers des montagnes calcaires.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

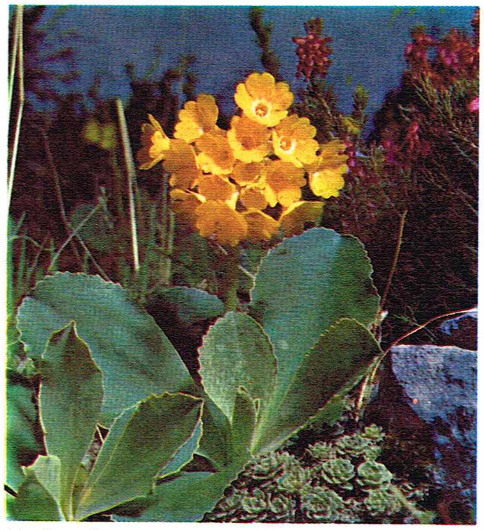

M. Pasotti

stigmatiques, le pollen des fleurs longistyles ne peut germer que sur le stigmate des fleurs brévistyles et réciproquement.

Il existe environ cinq cent cinquante espèces de primevères répandues dans les régions tempérées et froides des deux hémisphères, surtout dans les montagnes de l'hémisphère Nord et particulièrement dans celles d'Asie, où se rencontrent de nombreuses espèces à inflorescences « étagées » en faux verticilles superposés.

P. vulgaris (P. acaulis, P. grandiflora) est vivace. Il a une tige aérienne pratiquement nulle. Ses feuilles, groupées en rosette, sont allongées et obovales, à bord denté, velues et grisâtres à la face inférieure, glabres à la face supérieure. Les pédoncules floraux sont tout au plus aussi longs que les feuilles. Les fleurs ont les dents du calice lancéolées-acuminées et une corolle à lobes étalés et émarginés, jaune soufre ou plus rarement rougeâtre ou blanche. L'ovaire est subglobuleux et vert. Le style est blanchâtre, court et profondément inclus dans le tube corollin (fleurs brévistyles) ou long et presque saillant hors de ce tube (fleurs longistyles). Le stigmate est globuleux. Les fruits sont des capsules. Cette primevère croît dans les lieux herbeux, dans l'ouest et le sud de l'Europe, dans la région méditerranéenne, l'Asie Mineure et le Caucase. Elle fleurit de mars à juin. L'espèce est très cultivée sous des variétés de diverses couleurs, parfois doubles. Elle s'hybride avec *P. elatior* et *P. veris* pour former respectivement *P.* × *digenea* et *P.* × *variabilis*.

Le coucou *(P. veris = P. officinalis)* possède des fleurs en ombelles au sommet d'une hampe de 10 à 30 cm. La corolle est petite (1 cm) et ses lobes forment un ensemble concave, jaune vif avec cinq taches orangées à la gorge ; le calice est renflé et très ouvert en haut. Chez *P. elatior,* la corolle atteint 18 mm ; elle est presque plane, jaune soufre, plus foncée mais sans tache à la gorge. Le calice n'est pas renflé, mais appliqué contre le tube de la corolle. Cette espèce et la précédente (parfois confondues) sont répandues en Europe et très cultivées dans les jardins sous de nombreuses variétés de diverses couleurs *(P. hortensis). P. farinosa* est une petite plante vivace, à feuilles obovales ou un peu lancéolées, à bord crénelé-denté, atténuées à l'endroit du pétiole, glabres au-dessus, blanches-farineuses à la face inférieure. Un pédoncule de 5 à 20 cm, deux fois plus long que les feuilles, porte une ombelle de petites fleurs rose lilas de 1 cm de long, à corolle dont le tube dépasse d'une fois et demie le calice à lobes étalés presque cordiformes. Le style est caché dans le tube corollin. Les fruits sont des capsules de longueur égale ou supérieure à celle du calice. Cette primevère croît dans les prés humides des régions arctiques et des hautes montagnes de l'hémisphère boréal ; elle fleurit de mai à août. L'oreille d'ours *(P. auricula),* vivace, a des feuilles obovales, atténuées à l'endroit du pétiole, qui est large et court. Ces feuilles ont un bord entier ou à peine denté, muni de courts poils glanduleux. Elles sont vert clair, charnues, garnies ou non de poussière farineuse, et mesurent 8 à 10 cm. Une hampe de 5 à 20 cm porte une ombelle de nombreuses fleurs jaunes (parfois seulement deux) souvent odorantes. La corolle comporte des lobes à peu près cordiformes et disposés à plat ; elle est farineuse à la gorge. Cette espèce est endémique des montagnes d'Europe (Alpes, Jura, Forêt-Noire, Carpates, Apennins). Elle croît sur les rochers calcaires des étages subalpin et alpin. Elle est très cultivée et a été particulièrement en vogue au XVIII[e] siècle. Les variétés horticoles sont parfois des hybrides entre *P. auricula* et *P. hirsuta,* à fleurs pourpre clair, des Alpes et du centre des Pyrénées. Ces variétés sont parfois doubles ou du moins ont plus de cinq pétales (de sept à neuf par exemple ; polymérie de la fleur). Les pétales ont une tache à la gorge. L'ensemble des taches est l'*œil* de la fleur. Les spécimens simples ont le reste des pétales unicolore. Mais ceux-ci peuvent aussi montrer une zone périphérique plus claire ou colorée différemment. Ces formes « liégeoises » sont les plus communes et ne sont pas ou sont peu farineuses. Les « anglaises », farineuses, sont plus rares. Elles ont aussi une corolle polychrome, à cinq couleurs parfois, en zones concentriques. *P. obconica* est vivace. Il a des feuilles obovales-oblongues, à base cordiforme, à bord sinué denté, réunies en rosette. Les fleurs sont nombreuses, de couleur blanche devenant lilacée, et réunies en une ombelle portée par un pédoncule de 20 à 30 cm. Le calice est en forme de cône, très largement ouvert en haut et très caractéristique. Originaire de Chine, c'est l'une des espèces les plus cultivées en pot, et l'on en connaît de nombreuses variétés à fleurs parfois doubles, d'une couleur allant du blanc au rose, au rouge carmin

M. et S. Prato

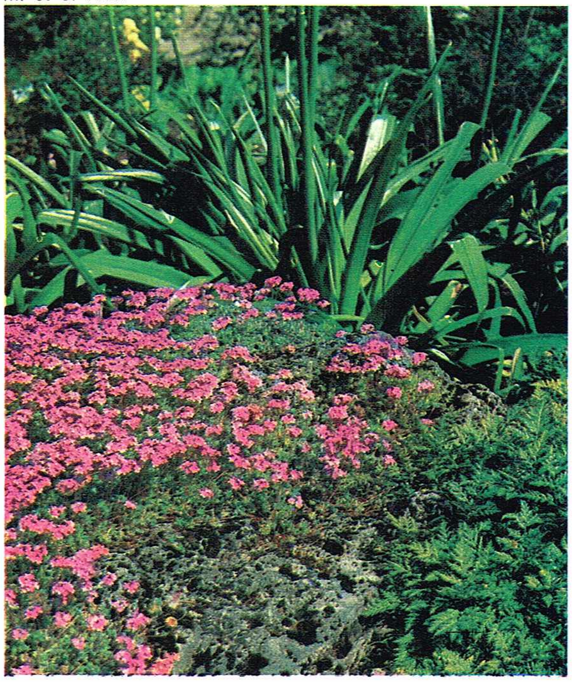

◀ **Androsace mollis** *est une petite Primulacée gazonnante utilisée pour les jardins de rocaille.*

▼ *Quelques types de primevères cultivées ; à gauche,* **Primula denticulata ;** *au milieu et à droite, deux cultivars de* **Primula vulgaris.**

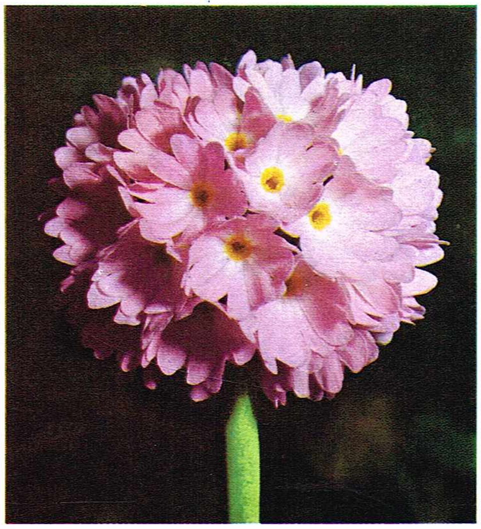

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

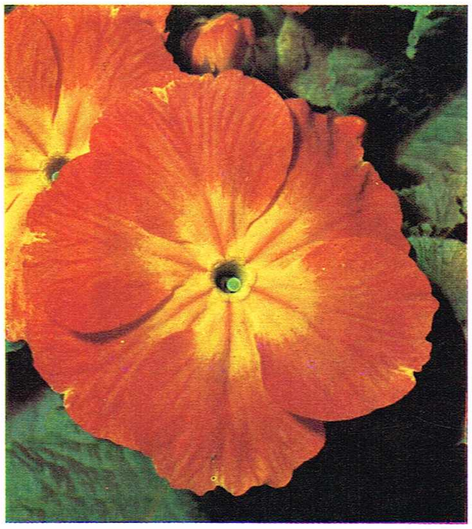

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

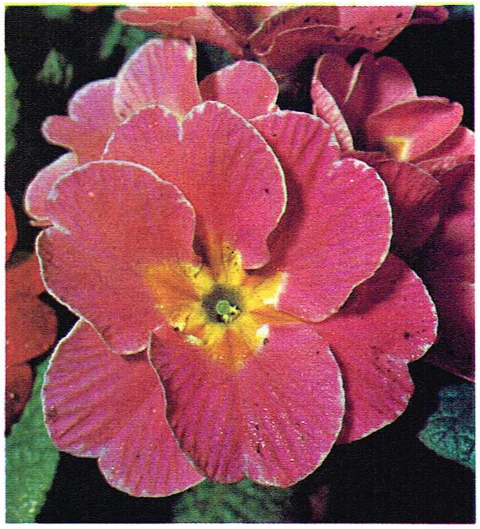

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

R. Zardini

▲ *La soldanelle* **(Soldanella alpina)** *pousse surtout dans les pelouses rocailleuses et humides et fleurit à la fonte des neiges (à droite).*

et au pourpre. La floraison, abondante et durable, a lieu d'octobre à juin. Les glandes de cette plante contiennent de la primine, qui peut déterminer des urticaires, des eczémas, etc. La substance en question est un dérivé de la benzoquinone. La primevère de Chine *(P. sinensis)* possède des feuilles en rosette velues et visqueuses. Le limbe a son bord ondulé et est irrégulièrement palmatilobé ; le pétiole est succulent, velu, visqueux et rougeâtre. Les fleurs sont roses, jaunes à la gorge, un peu parfumées, et réunies en un à trois faux verticilles portés par un pédoncule axillaire haut de 20 à 30 cm. Cette espèce vivace est originaire de Chine. On la cultive sous de nombreuses variétés différant par les feuilles, qui peuvent être plus ou moins découpées, voire crépues, et les fleurs, parfois doubles et à pétales frangés, roses, rouges, cuivrés, bleus, etc. La floraison, abondante, a lieu presque toute l'année. La culture de la plante semble pourtant en régression, au profit de celle de *P. obconica*.

Les androsaces *(Androsace)*, au nombre de cent vingt, sont de petites plantes annuelles ou vivaces, et, dans ce cas, elles forment souvent des gazons ou des coussinets. Les fleurs, solitaires ou en ombelles, ont un tube corollin court et resserré à la gorge, laquelle est fermée par des écailles. Les fruits sont des capsules à graines peu nombreuses en général. Elles croissent dans les régions tempérées et froides de l'hémisphère boréal, surtout en montagne. L'androsace des Alpes *(A. alpina)* est vivace. Ses tiges ne dépassent pas 6 cm et forment des tapis gazonnants. Ses feuilles garnies de poils ramifiés sont lancéolées ou spatulées, vert cendré, et ne persistent qu'à l'extrémité des rameaux, où elles constituent des groupes lâchement imbriqués. Ses fleurs sont roses ou blanches, à gorge jaune, solitaires-axillaires, situées au sommet des rameaux, à corolle munie de lobes étalés. Ses fruits sont des capsules dépassant un peu le calice. Cette espèce croît sur les éboulis et les paliers rocheux humides de l'étage alpin, de 1 900 à 4 000 m et plus, en France, en Suisse et en Italie, dans les Alpes dont elle est endémique. Elle fleurit de juillet à septembre.

Dans la même tribu des Primulées, les Soldanellinées ont une corolle laciniée et forment une pyxide. Elles ne comprennent que le genre *Soldanella,* qui renferme six espèces des montagnes d'Europe centrale et méridionale, dont *S. alpina* (soldanelle), vivace, à rhizome oblique avec d'abondantes racines adventives. Ses feuilles ont un limbe glabre, luisant, un peu coriace, réniforme, à bord entier ou à peine crénelé, atteignant 3,5 cm de diamètre. Elles sont longuement pétiolées. Une hampe haute de 5 à 12 cm porte au sommet une ombelle de deux à quatre fleurs pendantes dont les pédicelles sont de longueurs différentes. Leur calice a cinq lobes. Leur corolle est violacée ou lilas, parfois blanche, campanulée, en tube à la base et à cinq pétales laciniés longitudinalement jusqu'au milieu de leur partie libre ; à la gorge, qui présente cinq écailles interpétalaires, sont insérées cinq étamines courtes à anthères prolongées par un mucron

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

aigu. Le style est de longueur égale ou supérieure à celle de la corolle. Le stigmate forme un bouton. Les fruits sont des capsules dont le sommet se détache en opercule, et qui présentent alors de cinq à dix dents. Cette espèce croît dans les pelouses rocailleuses humides et souvent calcaires des zones subalpine et alpine, en Europe centrale et méridionale, y compris les Pyrénées ; elle fleurit après la fonte des neiges, de mai à août. Elle est parfois cultivée pour l'ornement.

Chez les Cyclaminées, la corolle est à préfloraison tordue, et ses lobes sont fortement recourbés vers le pédoncule tandis que le tube est court. Il s'agit de plantes à tubercules qui appartiennent toutes au genre *Cyclamen,* lequel renferme une vingtaine d'espèces. Leurs feuilles sont toutes radicales, charnues, à limbe simple souvent anguleux, à bord entier ou crénelé, avec un long pétiole. Les pédoncules floraux sont solitaires-axillaires et de

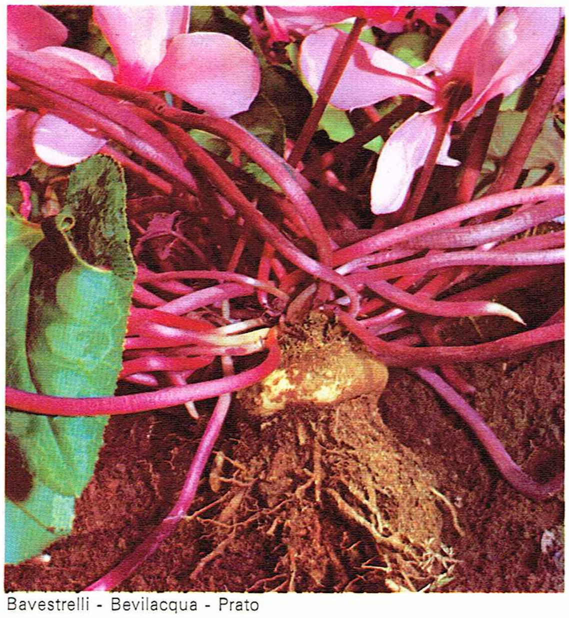

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

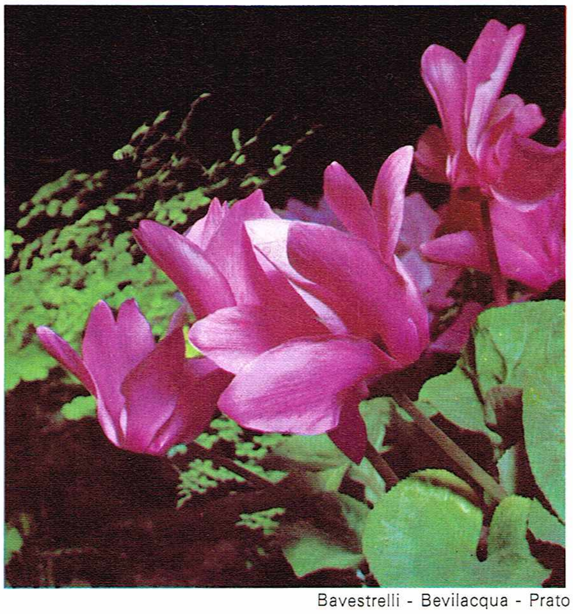

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ *Les cyclamens sont caractérisés par de gros tubercules surmontés de longs pédoncules terminés par une fleur solitaire ; à droite :* **Cyclamen persicum.**

longueur égale ou supérieure à celle des pétioles. Ils s'enroulent en spirale après la fécondation, de manière à amener les fruits au niveau du sol. Les fleurs sont solitaires et pendantes au sommet du pédoncule dressé et recourbé en crosse au-dessous de la fleur. Le calice est court, à cinq lobes bien distincts; la corolle a un tube court et possède cinq lobes réfléchis, donc dirigés vers le haut, entiers, beaucoup plus longs que le tube. Les étamines, à filet très court, insérées au fond du tube de la corolle, sont au nombre de cinq. Le style est filiforme, un peu plus long que les étamines, avec un stigmate pointu. Les fruits sont des capsules subglobuleuses, avec de nombreuses graines, s'ouvrant jusqu'en bas en cinq valves. Ces plantes habitent l'Europe centrale et méridionale, la région méditerranéenne et l'Asie occidentale jusqu'en Transcaucasie.

Le cyclamen d'Europe *(C. europaeum)* ou pain de pourceau a un tubercule plus ou moins globuleux et aplati, de 5 cm environ. Les feuilles, qui paraissent en même temps que les fleurs, ont un limbe orbiculaire-aigu, à base cordiforme, à bord entier ou crénelé, vert mat avec une bande périphérique anguleuse claire à la face supérieure, rouge lie-de-vin à la face inférieure. Les fleurs sont odorantes, avec une corolle pourpre ou rosée, parfois blanche, plus intensément colorée à la gorge. Les pétales n'ont pas d'oreillettes au niveau de leur ligne de flexion, comme c'est le cas chez *C. neapolitanum*. On rencontre cette espèce dans les régions forestières et montagneuses de France (Jura, Cévennes, Alpes) et d'Europe centrale et méridionale; elle croît à basse altitude et sur terrain calcaire et fleurit d'août à octobre. On la cultive pour l'ornement. Son tubercule contient un saponoside, la cyclamine, qui se scinde par hydrolyse en une saponine, la cyclamirétine, et en sucres : glucose, xylose et arabinose. On en fait une poudre qui sert de purgatif et de vermifuge. Ce principe est détruit par la chaleur, ce qui fait qu'on peut se servir du tubercule pour nourrir les porcs, qui le consomment à vrai dire aussi à l'état frais.

Le cyclamen de Perse *(C. persicum)* occupe le sud-ouest de l'Asie; en Europe, il ne se trouve que dans la région égéenne (mont Athos notamment), mais il est très cultivé et vendu comme plante d'appartement. Il a une floraison hivernale. Les fleurs sont de différentes couleurs, blanches, roses, saumon, rouge violacé ou parfois polychromes. Certaines variétés ont de grands pétales, d'autres ont des pétales finement fimbriés. Parfois les fleurs sont doubles, les pétales sont étalés au lieu d'être réfléchis.

Les Lysimaquiées forment sans doute la tribu la plus primitive des Primulacées. Le tube de la corolle y est court ou nul (pétales libres) et les pétales ont une préfloraison tordue. Il s'agit d'herbes ou d'arbrisseaux à tige feuillée et non plus à rosette de feuilles.

Le genre *Lysimachia* comprend au moins cent cinquante espèces de plantes herbacées vivaces, à fleurs solitaires ou réunies en grappes, épis ou panicules, à calice à cinq sépales et corolle à tube très court avec cinq lobes étalés ou dressés. Les étamines, au nombre de cinq, sont insérées au fond de la corolle, et leurs filets sont souvent soudés inférieurement les uns aux autres. Les fruits sont des capsules globuleuses à nombreuses graines et déhiscentes par cinq valves se séparant jusqu'en bas. Le genre occupe les régions tempérées des deux hémisphères, surtout l'Eurasie et spécialement l'Asie orientale. Un sous-genre arbustif se rencontre à Hawaii, avec huit espèces. L'Amérique du Nord possède un autre sous-genre *(Seleucia)*, dont les fleurs ont des staminodes épisépales.

La lysimaque *(L. vulgaris)* est vivace, stolonifère (stolons souterrains) et possède de nombreuses tiges, hautes de 30 à 120 cm. Ses feuilles ont un court pétiole ou sont sessiles. Elles sont ovales, lancéolées, opposées ou verticillées par trois ou quatre, de couleur vert pâle, ponctuées de rouge, et pubescentes à la face inférieure surtout. Ses fleurs sont jaune doré et constituent des panicules terminales. Les filets staminaux sont unis jusqu'au tiers. Elle croît dans les lieux humides, jusqu'à l'étage montagnard, en Europe, en Asie tempérée et en Afrique du Nord. Elle est naturalisée en Amérique du Nord. On la cultive parfois dans les jardins. Il en existe des formes à vingt-huit, cinquante-six ou quatre-vingt-quatre chromosomes, qu'il serait intéressant de comparer morphologiquement. De pareils cytotypes différents d'une même espèce sont un phénomène fréquent chez les plantes supérieures. L'herbe aux écus *(L. nummularia)* est vivace. Ses tiges quadrangulaires sont rampantes et longues de 30 à 60 cm, mais il n'y a pas de stolons. Ses feuilles sont opposées, petites, à peu près rondes, brièvement pétiolées. Les fleurs sont solitaires, axillaires, jaunes, à pédoncule plus court que la feuille. La plante croît dans les lieux humides, jusqu'à l'étage montagnard, voire subalpin, en Europe et jusqu'au Caucase. Elle est naturalisée d'ailleurs dans toutes les régions tempérées. Elle fleurit en juin et juillet. On la cultive parfois dans les jardins.

Le genre *Glaux* est constitué par une unique espèce, le glaux maritime *(G. maritimum)*, vivace, à tige de 3 à 25 cm, un peu charnue, glabre et glauque, prostrée-ascendante et rameuse. Ses feuilles sont ovales, lancéolées, sessiles, entières et opposées. Ses fleurs sont blanc rosé, petites, solitaires, axillaires et sessiles, avec un calice pétaloïde divisé en cinq lobes obtus, mais dépourvues de corolle. Les fruits sont des capsules déhiscentes par cinq valves contenant cinq graines en général. C'est une espèce halophile répandue sur les côtes et les terrains salés continentaux de l'hémisphère Nord.

Deux autres genres de Lysimaquiées forment des pyxides. Le genre *Anagallis* comprend quarante espèces de plantes herbacées annuelles, bisannuelles ou vivaces, à tige généralement anguleuse. Leurs feuilles sont alternes ou opposées. Leurs fleurs sont blanches, rouges, bleues, le plus souvent solitaires et axillaires. Leur calice a cinq sépales, parfois quatre. Leur corolle est rotacée ou infundibuliforme, avec un tube extrêmement court et cinq lobes, parfois quatre. Il existe cinq (ou quatre) étamines insérées à la base des lobes de la corolle, à filets parfois soudés. Le genre est à peu près cosmopolite; une douzaine d'espèces s'élèvent jusqu'à 4 000 m dans les montagnes d'Afrique. Le mouron rouge *(Anagallis arvensis)* est annuel ou bisannuel. Sa tige tétragone, prostrée ou ascendante, porte des feuilles opposées ou parfois verticillées, avec des points glanduleux sur les deux faces. Les lobes du calice sont lancéolés, ceux de la corolle arrondis, longs de 4 à 6 mm, souvent dentés ou crénelés et munis de poils glanduleux marginaux. La corolle est rotacée, de couleur rouge ou bleue. C'est une espèce qui est à peu près cosmopolite, mais sans doute d'origine méditerranéenne. Les plantes de cette région ont surtout des fleurs bleues; les formes à fleurs rouges sont plus communes au nord. La plante contient des saponines qui la rendent toxique, en particulier ses graines. Celles-ci sont donc nuisibles aux Oiseaux, à la différence de celles du mouron blanc ou mouron des Oiseaux (*Stellaria media*, Caryophyllacées).

Le genre *Centunculus* comprend trois plantes des régions tempérées et chaudes, souvent considérées d'ailleurs comme des *Anagallis*. La seule qu'on trouve dans nos régions est *C. minimus*, annuel, glabre, à tige haute de 2 à 8 cm, simple ou ramifié. Ses feuilles sont ovales-aiguës, avec un très court pétiole, la plupart

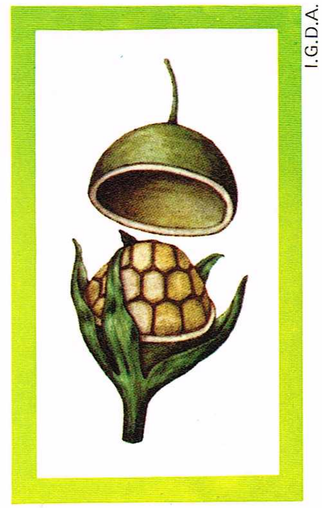

I.G.D.A.

▲ *Une pyxide est un fruit qui s'ouvre par une sorte de petit couvercle; ici, pyxide d'***Anagallis arvensis**, *le mouron rouge.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ **Lysimachia nummularia** *est une plante aux pédoncules floraux plus courts que les feuilles, qui pousse dans les endroits humides.*

▶ *Le bois d'ébène* (**Diospyros sp.**), *très sombre, est utilisé notamment en lutherie et pour la sculpture.*

C. Bevilacqua

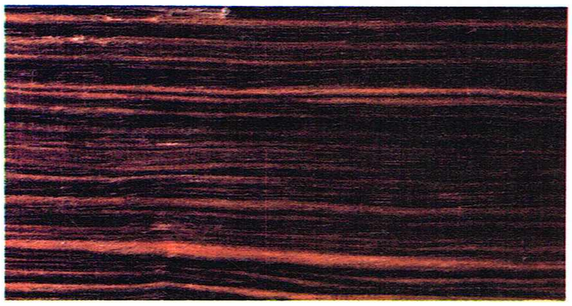

alternes. Ses fleurs sont petites, solitaires et axillaires. Le fruit est une pyxide. Cette espèce croît dans les champs et les lieux sablonneux humides, jusqu'à l'étage montagnard, en Europe et en Asie tempérée, jusqu'au lac Baïkal. Elle s'est naturalisée dans toutes les régions tempérées.

Chez les Coridées, la fleur est zygomorphe, les sépales sont épineux et le fruit est une capsule qui s'ouvre par des valves. Il se peut que cette tribu soit proche des Lythracées. Elle ne renferme que le genre *Coris,* qui n'a qu'une espèce ou deux.

Les Samolées enfin, qui ne comprennent que le genre *Samolus,* ont une corolle à préfloraison quinconciale, une capsule s'ouvrant aussi par des valves et des staminodes épisépales. Ce caractère les ferait croire primitives si elles n'avaient par ailleurs des fleurs périgynes ou un peu épigynes. Les *Samolus* sont au nombre de huit. L'un est à peu près cosmopolite, deux sont répandus en Australie, un quatrième habite le cap de Bonne-Espérance, et les autres vivent en Amérique.

La famille des *Myrsinacées (Myrsinaceae)* est constituée par des arbres et des arbustes des zones tropicales et subtropicales, au nord jusqu'au Japon, à la Floride et au Mexique, au sud jusqu'à l'Afrique du Sud et à la Nouvelle-Zélande. Il en existe trente-trois genres, avec environ mille espèces. La corolle est très généralement gamopétale et il y a cinq étamines épipétales. L'ovaire peut être semi-infère. Les ovules sont bitegminés. Le fruit est une drupe à une seule graine, quoique l'ovaire ait de nombreux ovules. Il y a des canaux sécréteurs de résine dans toute la plante, caractère original parmi les Primulales.

▼ *Les fruits du kaki* (**Diospyros kaki**) *sont de grosses baies orangées comestibles et souvent dépourvues de graines.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Le genre *Aegiceras* forme à lui seul une sous-famille dont les anthères sont divisées transversalement et où la graine est très allongée, dans une drupe sèche. Il compte deux espèces, dont l'une, *A. corniculatum,* fait partie des mangroves d'Indo-Malaisie, et, comme celles des palétuviers, ses graines sont vivipares, ce qui est un remarquable cas de convergence de plantes vivant dans le même milieu. *A. floridum* croît des côtes des Philippines à la Nouvelle-Guinée. Les autres genres, répartis en deux sous-familles, ont des anthères normales et forment des drupes proprement dites.

Ébénales ou Diospyrales

Cet ordre regroupe sept familles de plantes ligneuses, parfois de grande taille, essentiellement tropicales et subtropicales. Elles sont caractérisées par des fleurs hermaphrodites, en général tétra- ou pentamères, avec un calice, une corolle gamopétale et actinomorphe et un ovaire supère ou presque sauf chez une famille. Il y a deux ou trois cycles d'étamines, parfois plus, ou un seul cycle avec deux fois plus d'étamines que de pétales. Les fruits sont bacciens. L'ovaire est pluriloculaire, avec un seul ou quelques ovules par loge.

Les *Ébénacées* ou *Diospyracées (Ebenaceae)* comprennent quatre genres avec environ quatre cent cinquante espèces. Trois autres genres leur appartiennent peut-être. Les fleurs sont tri- à heptamères et dioïques le plus souvent. Il y a presque toujours deux cycles d'étamines. On trouve fréquemment un ovaire stérile dans les fleurs mâles et des staminodes dans les fleurs femelles (unisexualité par avortement). L'ovaire, à deux à huit loges, souvent avec de fausses cloisons, possède dans la plupart des cas un ovule anatrope bitegminé par loge. Le fruit est une baie et les graines ont habituellement un albumen ruminé.

Le genre le plus important numériquement et économiquement est constitué par les *Diospyros,* qui comprennent quatre cents espèces d'arbres dioïques à fleurs surtout tétramères, souvent exploités pour leur bois (ébène) : nous citerons notamment *D. ebenum* et *D. melanoxylon,* de grande taille, qui vivent dans les forêts d'Asie soumises aux moussons. D'autres espèces du genre, qui habitent Ceylan, la région indo-malaise et les Célèbes *(D. celebica)* ou l'Afrique tropicale occidentale *(D. crassiflora),* fournissent aussi différentes variétés d'ébène, bois caractérisé par un cœur dur et très lourd, très foncé et uniforme. Chez *D. celebica,* il est brun marbré de noir. On l'emploie en ébénisterie, en sculpture, en lutherie, etc. Le bois de *D. virginiana* (persimmon), de l'est des États-Unis, sert en particulier à fabriquer des clubs de golf. Ses fruits, de 2 à 3,5 cm de diamètre, jaunes ou orangés, sont comestibles.

Le kaki *(D. kaki)* est connu aussi pour ses fruits (kakis), répandus à partir de 1870 seulement, quoique la plante ait été introduite en Europe dès 1796. C'est un arbre atteignant 15 m, à grandes feuilles caduques, simples et entières, luisantes et vert foncé au-dessus, plus claires en dessous. Il produit de nombreux fruits orangés. Il est originaire de Chine et du Japon. Les kakis sont des baies plus ou moins globuleuses, de 3 à 7 cm de diamètre, à épicarpe mince, astringentes avant la maturité, mais sucrées ensuite. Les fleurs mâles, groupées par trois, ont de seize à vingt-quatre étamines ; les femelles sont plus grandes et solitaires.

La famille des *Symplocacées (Symplocaceae)* est constituée par le genre *Symplocos,* qui comprend environ trois à quatre cents espèces. Ce sont des plantes arborescentes ou arbustives, à feuilles alternes, caduques ou persistantes, souvent vert jaunâtre et luisantes, qui habitent essentiellement les montagnes subtropicales, en particulier en Indo-Malaisie. Elles sont totalement absentes en Afrique. Leurs fleurs, pentamères, sont habituellement hermaphrodites et réunies en inflorescences. Il y a parfois deux cycles de pétales, souvent presque libres ; les étamines sont en général nombreuses par multiplication secondaire et réunies en cinq faisceaux. L'ovaire est habituellement infère et comprend de deux à cinq loges munies de deux à quatre ovules unitegminés anatropes. Le fruit est dans la plupart des cas une drupe uniséminée.

I.G.D.A. - Archives P2

Les *Styracées (Styraceae)* sont une famille de cent cinquante espèces distribuées en onze genres, le plus important étant le genre *Styrax*, avec cent vingt espèces. A l'exception de *S. officinalis*, indigène dans l'est de la région méditerranéenne, il s'agit de plantes à diffusion extra-européenne, abondantes surtout en Amérique subtropicale et tropicale et en Asie orientale. Ce sont des arbustes ou des buissons, souvent pubescents, à feuilles simples, alternes, caduques ou persistantes, à inflorescences composées de fleurs hermaphrodites tétra- ou pentamères, gamopétales. Les étamines, en nombre double de celui des pétales, mais sur un seul cycle, ont leurs filets unis entre eux et, souvent aussi, à la corolle. L'ovaire est formé de trois à cinq carpelles; il peut être semi-infère. Il n'est cloisonné qu'en bas, dans la région fertile, qui porte un ou plusieurs ovules par loge. Ceux-ci ont deux téguments. Le fruit est une capsule ou un akène. Il n'y a pas d'appareil sécréteur organisé, mais certaines espèces fournissent pourtant des baumes en réponse aux conditions climatiques, aux parasites fongiques, etc.

La famille des *Sapotacées (Sapotaceae)* est importante du point de vue économique, comme d'ailleurs du point de vue numérique, avec cent cinquante genres et huit cents espèces environ. Elle est presque exclusivement répandue dans les régions tropicales et subtropicales. Elle regroupe des arbres et des arbustes contenant un latex produit par des laticifères articulés, où les cellules sont encore séparées. Les feuilles sont entières, coriaces, alternes. Les fleurs, hermaphrodites et actinomorphes, ont un calice de quatre à six sépales unis à la base et disposés en deux cycles, et une corolle gamopétale à autant ou parfois deux ou trois fois plus de pétales qu'il n'y a de sépales, et dans ce cas en plusieurs cycles. Il y a deux ou trois cycles de quatre ou cinq étamines unies par leurs filets à la corolle; les externes sont parfois staminodiales. Les carpelles, au nombre de quatre à douze, en un cycle, forment un ovaire supère pluriloculaire avec un ovule unitegminé par loge. Les fruits sont généralement des baies, parfois comestibles.

Chez les *Achradoïdées*, les sépales sont en deux cycles et en nombre égal à celui des pétales, étamines et staminodes. Un cycle de chaque type de ces pièces semble correspondre à deux cycles de sépales. Les pétales ont souvent deux appendices à l'extérieur. *Achras zapota* ou sapotillier produit des fruits un peu semblables par la saveur à ceux du kaki, mais son importance industrielle provient de son latex, ou gomme chicle, constitué de polyisoprène et d'une résine, et qui, sucré et aromatisé, sert à fabriquer le chewing-gum; mais depuis peu ce produit se trouve concurrencé par des polymères synthétiques. Cette plante d'Amérique centrale est cultivée en Amérique tropicale. C'est un arbre de petite taille des forêts sèches. On en tire le latex par incision du tronc; le produit, coagulé par ébullition, est exporté. Les *Achras* sont souvent inclus dans le genre *Manilkara*.

Les *Madhucoïdées* ont aussi deux cycles de sépales, mais les étamines sont deux fois plus nombreuses que les pétales et les sépales, ou davantage encore; elles sont en outre disposées en deux ou plusieurs verticilles (les staminodes du groupe précédent sont ici fertiles). Les pétales n'ont pas d'appendices.

Un produit jadis très important pour l'industrie, la gutta-percha, était utilisé comme isolant électrique ou comme imperméabilisant et pour fabriquer du mastic. Cette substance est maintenant fortement concurrencée

▲ ***L'olivier* (Olea europaea) *est un arbre au tronc et aux branches tordus et aux feuilles persistantes.***

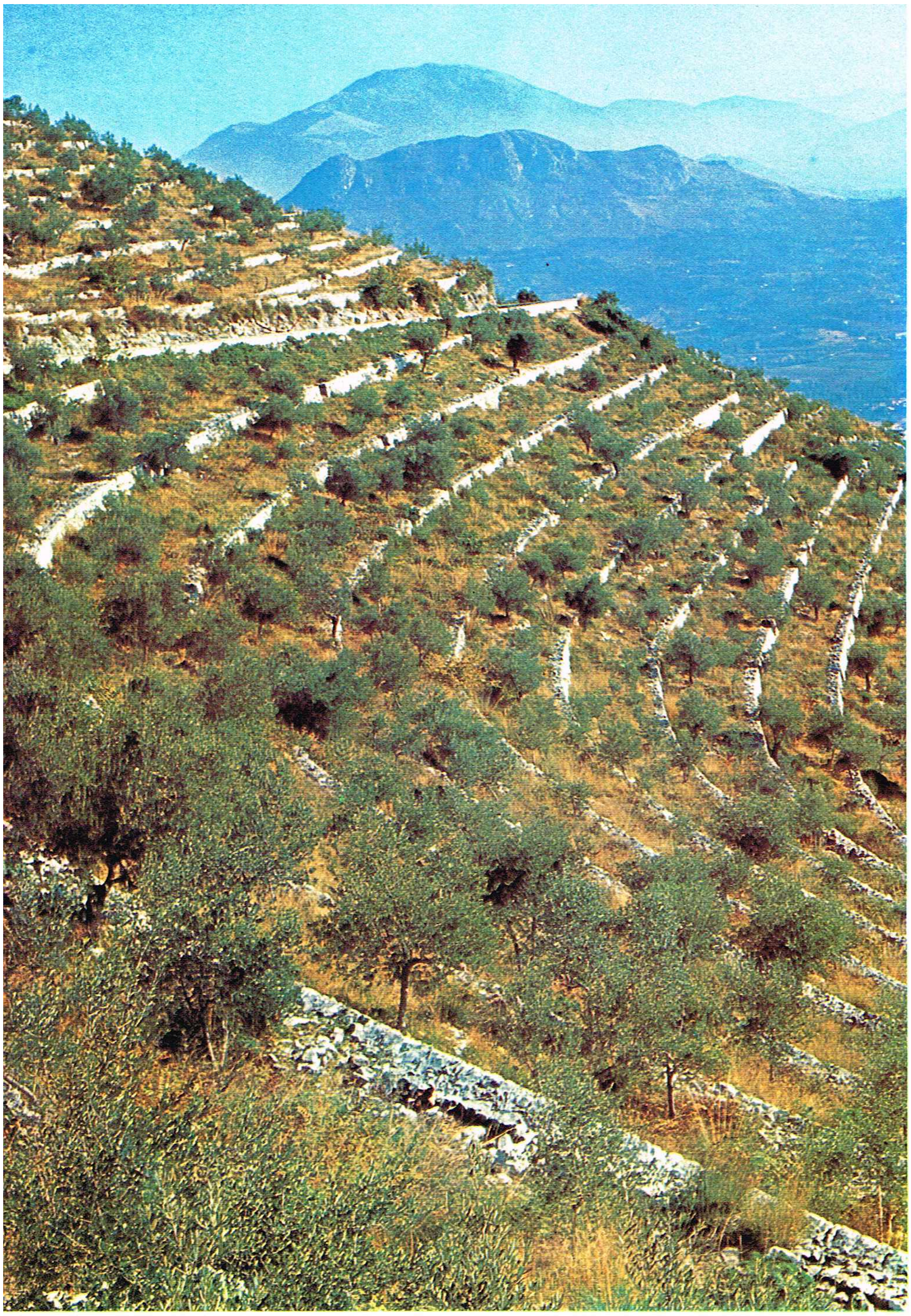

M. Pedone

▲ *Cultures en terrasses de jeunes oliviers.*

par les matières plastiques (polyéthylènes). Elle est récoltée par incision des troncs de différentes espèces de *Palaquium,* arbres des forêts humides d'Asie, et par broyage de leurs feuilles; sa constitution chimique est semblable à celle du caoutchouc. Elle contient aussi une résine. Ramollie dans l'eau chaude, elle garde, lorsqu'elle se refroidit, la forme qu'on lui a donnée alors. La principale espèce productrice est *P. gutta,* de Malacca, Sumatra et Bornéo, qui est cultivé. On utilise aussi pour cette extraction *P. obtusifolium, oblongifolium* et *borneense,* qui appartiennent probablement à la même espèce.

Nous signalerons enfin la sous-famille des *Sidéroxyloïdées,* où les sépales sont généralement en un seul cycle et au nombre de cinq à huit, les pétales parfois appendiculés, et les étamines épipétales en nombre égal; il existe des staminodes épisépales. *Argania spinosa* donne un « bois de fer », et l'huile de ses graines est exploitée. Cette espèce, la seule du genre, habite le Maroc. Plusieurs genres de ce groupe sont des arbres fruitiers tropicaux *(Chrysophyllum, Pouteria, Calocarpum).*

La présence chez les Sapotacées et chez les *Sarcospermatacées* (que nous n'étudions pas ici) d'un appareil sécréteur peut faire envisager certains rapports entre les Ébénales et les Guttiférales. La tendance à la multiplication secondaire des étamines est en faveur de cette conception. On ne voit guère par ailleurs d'affinités entre les Ébénales et les autres Gamopétales.

Ligustrales ou Oléales

Les Ligustrales sont fort isolées aussi parmi les Gamopétales. Elles se rapprochent peut-être des Célastrales et éventuellement des Gentianales, en y rattachant les Rubiales, comme on le verra. Il s'agit de plantes ligneuses à feuilles généralement opposées non stipulées. Il n'y a pas de liber interne, à la différence des Gentianales parmi lesquelles on les place parfois. Les fleurs ont quatre cycles et sont le plus souvent tétramères. La corolle est gamopétale, mais elle peut être choripétale et même apétale. Il y a deux étamines en général. L'ovaire supère est formé de deux carpelles médians unis. Les ovules anatropes sont unitegminés.

La famille des *Oléacées (Oleaceae),* la seule de l'ordre, englobe vingt-sept genres et six cents espèces d'arbustes et d'arbres qui s'élèvent parfois jusqu'à 40 m de hauteur. Les feuilles, sans stipules, sont simples ou composées et entières ou rarement dentées. Les fleurs actinomorphes sont habituellement hermaphrodites, mais il en existe d'unisexuées et de polygames. Elles sont disposées en grappes axillaires ou terminales, en panicules ou en inflorescences cymeuses (dichasiums). Le calice est généralement tétramère mais il peut être absent ou comporter jusqu'à quinze sépales. La corolle est gamopétale, quelquefois très peu, ou dialypétale; elle est le plus souvent tétramère, nulle chez certaines espèces,

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

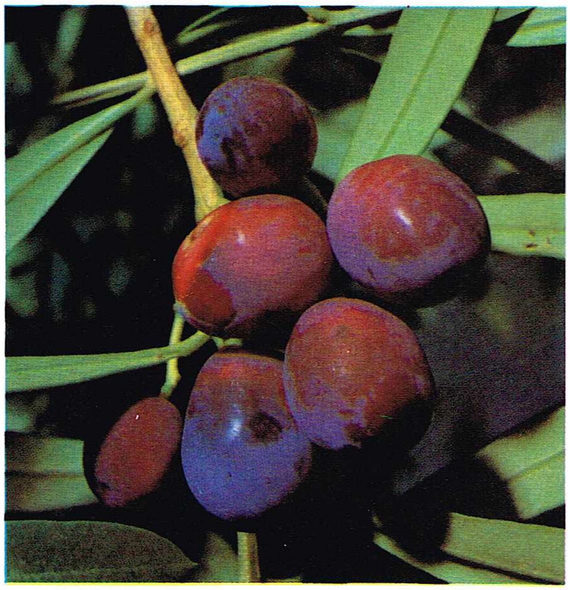

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ *Les fleurs de l'olivier* (Olea europaea) *sont blanchâtres et réunies en petites grappes (à gauche); elles donnent des drupes, les olives, dont le mésocarpe est riche en huile (à droite).*

G. P. Mondino

◀ *Le troène* (Ligustrum sp.) *est un arbuste à croissance rapide très utilisé dans nos régions pour constituer des haies.*

▼ *En haut, rameau de frêne* (Fraxinus excelsior) *portant les fruits ailés appelés samares. En bas, les fleurs de lilas* (Syringa vulgaris) *sont groupées en panicules denses.*

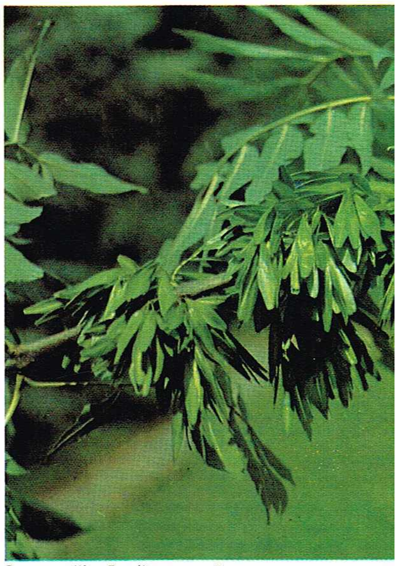

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

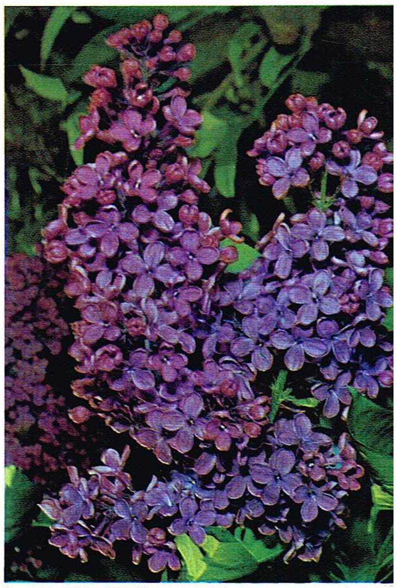

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

ou avec un maximum de douze pétales. Les étamines sont au nombre de deux (parfois quatre), insérées à la base de la corolle dans le plan latéral et pourvues d'anthères déhiscentes longitudinalement. L'ovaire, supère, est formé par la soudure de deux carpelles médians et est biloculaire; chaque loge contient un ou deux ovules (rarement quatre ou plus). Le style est simple et court, et le stigmate dont il est pourvu est presque toujours bifide. Les fruits sont des capsules loculicides, des akènes ailés (samares), des baies ou des drupes. Ils sont fréquemment uniséminés. Cette famille est connue sûrement à partir du Crétacé supérieur (frênes fossiles du Groenland). La plupart de ses représentants vivent dans les régions tempérées et chaudes, surtout en Asie orientale et en Amérique tropicale. Elle manque dans les terres du Pacifique.

Les *Oléoïdées* ont deux ovules par loge ovarienne. Le fruit est une baie ou une capsule. L'olivier *(Olea europaea)* est l'une des vingt espèces du genre *Olea,* qui occupe l'Ancien Monde jusqu'en Australie et en Nouvelle-Calédonie et qui appartient à une tribu (Oléées) où la corolle a un tube bien marqué et où le fruit est une drupe. L'olivier est, avec le chêne vert, la plus typique des plantes de la végétation méditerranéenne. Dans la région qu'il occupe, les températures hivernales minimales, même dans les zones les moins favorisées, ne sont pas inférieures à — 7 °C, et la sécheresse n'est pas excessive. Comme pour beaucoup de plantes cultivées, on ne connaît pas exactement le centre d'origine de l'olivier, mais on tend à admettre que celui-ci provient d'un territoire allant du sud du Caucase aux limites occidentales du haut plateau iranien, aux côtes de la Syrie et de la Palestine et au sud de l'Asie Mineure. Des trois dernières zones, auxquelles se limite peut-être son vrai foyer originel, il aurait été propagé en Égypte (où on ne le cultive plus guère), en Asie Mineure, en Afrique du Nord (avant la conquête arabe), en Grèce, puis vers l'Europe occidentale. Les Grecs ont certainement importé l'olivier en Grande-Grèce, particulièrement en Sicile et en Calabre, tandis que ce sont peut-être les Arabes qui l'ont introduit en Espagne.

L'aire actuelle de l'espèce atteint à peine, au nord, 45° de latitude. Cette limite n'est qu'exceptionnellement dépassée, et il s'agit alors d'îlots où les conditions climatiques sont très favorables, comme pour les stations extrêmes du chêne vert. C'est le cas des oliveraies des lacs de l'Italie du Nord, notamment du lac de Garde, où règne un climat qui rappelle beaucoup le climat méditerranéen.

L'olivier *(O. europaea)* se présente généralement sous la forme d'un arbre ou d'un arbuste de 2 à 15 m de hauteur, avec un tronc et des branches tordus. Ses feuilles sont opposées, persistantes, entières, assez coriaces, de 2 à 8 cm sur 0,5 à 1,5 cm, vert foncé au-dessus, argentées en dessous du fait de la présence de poils en écusson, et brièvement pétiolées; la nervure principale est particulièrement marquée. Les fleurs, blanchâtres, sont réunies en petites grappes axillaires. Leur calice possède quatre dents. Leur corolle, à tube court, caduque, comporte quatre lobes étalés; les deux étamines latérales, insérées sur la corolle au fond du tube, saillantes, ont des filets très courts. L'ovaire, supère, est biloculaire; le style est pourvu d'un stigmate bifide. Les fruits sont des drupes ellipsoïdales, noires, vert brunâtre, ou parfois ivoire, à mésocarpe charnu, huileux et à endocarpe (noyau) renfermant une ou deux graines. Dans la plante cultivée, elles atteignent environ 30 mm sur 20.

L'olivier sauvage ou oléastre est la var. *sylvestris.* Il a une taille plus modeste, une cime resserrée et surtout des rameaux épineux, des feuilles et des fruits plus petits. La plante cultivée est la var. *europaea* décrite ci-dessus.

Le genre *Phillyrea* comprend quatre espèces méditerranéennes et d'Asie Mineure. Deux sont caractéristiques du maquis méditerranéen. Ce sont des arbres ou des arbustes à feuilles toujours vertes, opposées et simples, à court pétiole, entières ou dentées. Ils sont dioïques. Les fleurs, petites et blanchâtres, sont en courtes grappes axillaires. Le calice est assez petit et a quatre divisions; la corolle, à quatre lobes étalés, forme un tube court. Il y a deux étamines et deux carpelles biovulés. Les fruits sont des drupes sphéroïdales, uniséminées, charnues, noires à maturité. On trouve en Europe méridionale *P. angustifolia* et *P. latifolia.* Le premier ne dépasse pas 2,50 m et se distingue par ses feuilles longues de 3 à 8 cm, luisantes au-dessus, elliptiques-lancéolées, atteignant 1,5 cm de large, entières ou parfois un peu dentées, surtout au sommet; ses fruits mesurent de 3 à 5 mm de diamètre et sont légèrement apiculés. Il est limité à l'ouest et au centre de la région méditerranéenne et, en France, il ne dépasse pas le sud des Charentes. Le second se reconnaît à ses dimensions (il atteint 7 à 15 m de hauteur) et à ses feuilles qui sont un peu cordiformes à la base sur la plante jeune, larges de 1 à 4 cm, ovales-lancéolées et dentées. Les feuilles de la plante âgée ne sont plus cordiformes à la base et sont peu dentées ou entières, et longues de 1 à 6 cm sur 0,42 cm de large. Cette forme adulte avait reçu le nom de *P. media.* Les fruits de la plante jeune ont de 7 à 10 mm de diamètre avec une légère dépression au sommet. Ils sont apiculés sur la plante adulte. *P. latifolia* occupe toute la région méditerranéenne et le Portugal. Il remonte en France jusqu'en Vendée.

Le genre *Ligustrum* (troènes) comprend plus de quarante espèces, la plupart originaires de Chine, d'Indo-Malaisie, du Japon et d'Australie.

I.G.D.A. - Archives P2

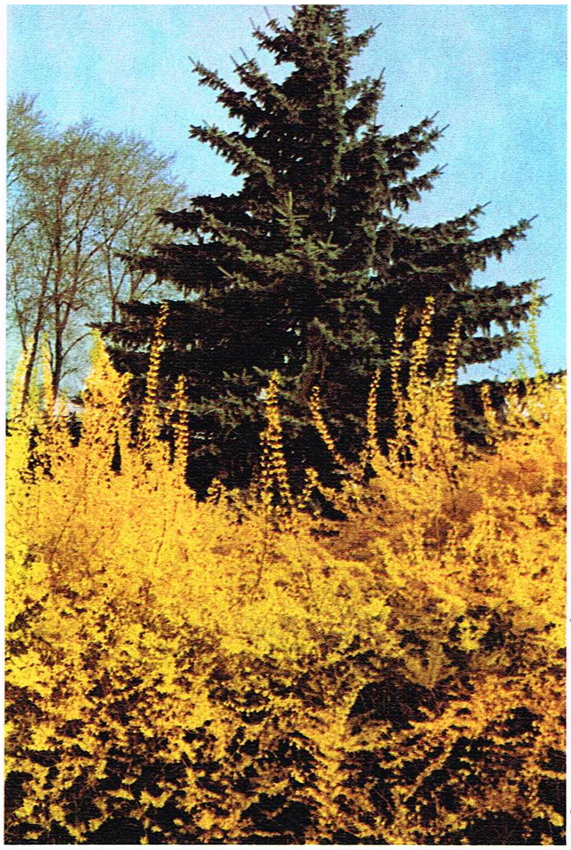

E.P.S.

▲ *Chez les* Forsythia, *la floraison très abondante a lieu en février-mars avant l'apparition des feuilles. Les fleurs actinomorphes ont une corolle d'un jaune éclatant (à gauche).*

▼ *Les fleurs blanches du jasmin* (Jasminum officinale) *sont regroupées en corymbes terminaux.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Pourtant, le troène ordinaire *(L. vulgare)* habite l'Europe méridionale et centro-occidentale et l'Asie occidentale. Il n'atteint guère l'étage montagnard et aime les sols calcaires bien exposés. C'est un arbuste de 2 à 3 m de hauteur, parfois plus, à jeunes rameaux légèrement pubescents. Ses feuilles, souvent semi-persistantes, sont glabres sur les deux faces, ovales et mesurent entre 5 et 6 cm de longueur. Les fleurs, hermaphrodites, forment des panicules terminales denses, assez petites, qui paraissent de mai à juillet. Leur calice possède quatre dents, et le tube de la corolle, qui dépasse le calice, est de la même taille que les lobes ovales et étalés. Les étamines, incluses, sont au nombre de deux; le style est unique et bifide. Les fruits sont des baies charnues de 6 à 8 mm de diamètre, noires à l'extérieur, rougeâtres à l'intérieur; ils demeurent sur la plante une partie de l'hiver et sont alors consommés par les Oiseaux. Plusieurs troènes sont cultivés pour l'ornement, mais le plus employé est *L. ovalifolium,* du Japon, dont la corolle a un tube trois fois plus long que les lobes. Les feuilles sont semi-persistantes et la plante se taille très aisément en haie. Des cultivars à feuilles panachées et bordées de jaune (cv. *aureo-marginatum*) ou de blanc (cv. *argenteo-marginatum*) sont souvent utilisés.

Syringa vulgaris est le lilas commun, qui est endémique d'une région allant de la Roumanie à l'Albanie et au nord-est de la Grèce. Ses fleurs odorantes, groupées en panicules terminales denses, blanches ou mauve rosé, de 10 à 20 cm de long et paraissant avant les feuilles ont un calice à quatre dents bien plus court que le tube de la corolle; celui-ci se termine par quatre lobes cuculés; les fruits sont des capsules dont les deux loges contiennent chacune deux graines ailées. C'est un arbuste atteignant 7 m, à feuilles largement ovales, cordées à la base, aiguës au sommet, entières, opposées, glabres, à pétiole de 1 à 3 cm. Le lilas s'adapte très bien sous toutes sortes de climats, pourvu que les températures ne soient pas trop extrêmes. Il est très cultivé. On le rencontre parfois à l'état subspontané dans les bosquets, en Europe occidentale et centrale. C'est surtout en France que les formes horticoles ont été obtenues.

Une autre espèce d'origine asiatique, *S. persica,* qui habite de l'Iran au nord-ouest de la Chine, est moins cultivée. Elle ne dépasse pas 2 m; ses feuilles sont en partie trilobées ou pennatifides et longues de 3 à 6 cm. Les fleurs lilas pâle forment des panicules lâches de 5 à 8 cm. Dans la var. *lacianata,* presque toutes les feuilles ont de trois à neuf lobes. C'est la forme la plus cultivée. Cette espèce a été hybridée avec *S. vulgaris.* On cultive encore plus rarement certaines autres espèces.

Les Fraxinées ont deux ou quatre pétales à peu près libres ou bien sont apétales. Le fruit est une samare. Il s'agit d'arbres généralement à feuilles composées imparipennées. La tribu est réduite au genre *Fraxinus,* et compte de cinquante à soixante espèces de l'hémisphère Nord.

Le frêne *(F. excelsior)* vit plus de cent cinquante ans. Il a un port majestueux, son tronc peut atteindre 30 et même 40 m de hauteur. Ses bourgeons sont noirs ou brun-noir. Ses feuilles caduques, opposées, sont imparipennées, avec quatre à six paires de folioles latérales assez grandes, presque sessiles, aiguës au sommet, larges de 1 à 4 cm, arrondies à la base, dentées et munies à la face inférieure de poils blancs et raides à proximité de l'insertion des folioles. Les fleurs, qui paraissent au printemps avant les feuilles, sont pendantes et réunies en grappes composées; elles ne possèdent ni calice ni corolle. Il y a deux étamines et un ovaire bicarpellé dans les fleurs hermaphrodites, mais en fait le frêne est souvent trioïque : il existe des arbres à fleurs hermaphrodites, d'autres à fleurs mâles, et d'autres encore à fleurs femelles. Il y a aussi des fleurs mâles ou femelles associées à des fleurs hermaphrodites (andro- ou gynomonœcie) ou des arbres hermaphrodites et des arbres femelles (gynodiœcie) en certaines localités. La pollinisation est anémophile. Les fruits sont des samares elliptiques. *F. angustifolia* est très voisin, et appartient peut-être à la même espèce. Ses bourgeons sont bruns, ses folioles plus étroites (0,6 à 2,5 cm) et en coin à la base. Ses inflorescences sont des grappes simples. Le frêne ne s'élève guère à l'étage montagnard. Il aime les sols calcaires, humides, mais aussi secs. On le trouve dans une grande partie de l'Europe. Il est seulement montagnard au sud. *F. angustifolia* serait limité au sud et au centre-est de l'Europe, et présent dans la moitié sud de la France. Le bois du frêne, blanc ou légèrement rosé, est très apprécié comme bois d'œuvre. Cette espèce est souvent cultivée pour l'ornement, parfois sous la var. *diversifolia (monophylla),* dont les feuilles n'ont qu'une seule foliole. On utilise aussi des cultivars « pleureurs » ou, quelquefois, à feuilles panachées ou disséquées.

Dans la sous-famille des *Jasminoïdées,* il y a en général un, quatre ou de nombreux ovules par loge. Le genre *Jasminum* (jasmins) compte deux cents espèces surtout tropicales et subtropicales en Afrique, en Asie et en Australie; son fruit est une baie. Ses feuilles sont imparipennées, à folioles entières. Les fleurs ont un nombre de pièces variable sur le même pied (quatre à neuf par cycle). Le tube de la corolle est bien marqué. Seul *J. fruticans,* à feuilles alternes trifoliolées et fleurs jaunes odorantes par une à quatre au sommet des rameaux, est indigène dans le sud de l'Europe et en région méditerranéenne. Il ne dépasse pas 3 m.

J. officinale est originaire du sud-ouest de l'Asie, mais est naturalisé dans le sud de l'Europe et jusque dans le centre et l'ouest de la France. C'est un arbuste atteignant 10 m. Ses feuilles ont de cinq à sept folioles lancéolées-aiguës, la terminale étant plus grande, et sont opposées. Ses fleurs sont blanches et très parfumées; elles paraissent en été et forment des corymbes terminaux.

Enfin, on cultive très souvent aussi deux *Forsythia,* originaires d'Asie orientale, qui fleurissent dès la fin de l'hiver et ont des fleurs d'un beau jaune brillant. *F. suspensa* a des rameaux pendants, creux et verruqueux, *F. viridissima* des rameaux à moelle lamellée, dressés et lisses. On utilise également beaucoup l'hybride des deux *(F. × intermedia).* Le genre comporte cinq espèces, dont une en Albanie et en Yougoslavie.

Gentianales ou Contortales

Cet ordre doit son second nom (Contortales) à la préfloraison des lobes de la corolle qui est le plus souvent tordue ou contortée; en effet, dans le bouton, chaque lobe recouvre l'un de ses voisins et est à son tour recouvert par l'autre. Les fleurs à quatre cycles sont habituellement régulières, en général pentamères. La corolle est gamopétale et son tube porte les étamines alternipétales. L'ovaire est souvent bicarpellaire. Il est supère ou au plus semi-infère dans l'acception classique de l'ordre, mais actuellement on place souvent les Rubiacées (à ovaire infère) parmi les Gentianales. Les ovules sont unitegminés. Les feuilles sont simples et entières, et dans la plupart des cas opposées, avec fréquemment des stipules et des ligules (prolifération de leur face ventrale). Il y a du liber interne

(qui manque toutefois chez les Ményanthacées et les Rubiacées). La présence d'alcaloïdes et de principes amers est fréquente.

Les *Loganiacées (Loganiaceae)* sont une famille surtout tropicale et subtropicale qui comprend dix-huit genres et cinq cents espèces environ, ligneuses ou herbacées, à feuilles opposées et stipulées, les stipules étant quelquefois unies en stipules interpétiolaires. Les fleurs sont actinomorphes, tétramères ou pentamères, avec des étamines isomères insérées sur la corolle, qui est en général à préfloraison tordue ou imbriquée. L'ovaire, le plus souvent supère, parfois semi-infère, est biloculaire à deux carpelles pluriovulés. Il peut y avoir des fausses cloisons. Les fruits sont surtout des capsules septicides ou des baies, mais aussi des drupes.

Les *Strychnos* appartiennent à une tribu dont la corolle est par exception à préfloraison valvaire. Il y en a cent cinquante espèces pantropicales. Le vomiquier *(S. nux-vomica)*, qui habite l'Inde et l'Indochine, forme des baies jaune-orangé de 3 à 6 cm dont les graines ou noix vomiques (de deux à cinq), aplaties comme des globules rouges, contiennent des alcaloïdes, principalement la brucine et la strychnine, qui sont des bases à sept cycles condensés, dont deux forment un noyau indole. La strychnine, très toxique (15 mg entraînent chez l'homme la mort par asphyxie), utilisée à faibles doses, sert, comme la poudre ou la teinture de noix vomique, à lutter contre les asthénies et la paralysie des sphincters. La fève de saint Ignace est la graine de *S. ignatii*, arbuste grimpant des Philippines. Elle est plus riche en strychnine que la noix vomique, mais n'est plus guère utilisée du fait de sa rareté. D'autres *Strychnos*, surtout *S. toxifera*, servent à préparer des curares (« curares de calebasses »). Ce sont des plantes des bassins de l'Amazone et de l'Orénoque. *S. toxifera* renferme plus de soixante alcaloïdes indoliques, en particulier la toxiférine I.

Les *Buddléiacées (Buddleajaceae)* ont été parfois réunies à la famille précédente, dont elles ne diffèrent que par des caractères secondaires (fleurs presque toujours tétramères, présence de poils glanduleux, absence d'alcaloïdes), et ont en commun le gynécée bicarpellé à placenta massif, avec probablement parfois des fausses cloisons. Il y a dix-neuf genres et cent soixante espèces tropicales et subtropicales. Le genre *Buddleja* en renferme cent vingt. *B. davidii (B. variabilis)*, de Chine, à fleurs violettes groupées en panicules ressemblant à celles du lilas, est très cultivé et souvent naturalisé; quelques autres espèces sont aussi utilisées. On rapproche ces plantes des Scrofulariacées (Tubiflores).

La famille des *Gentianacées (Gentianaceae)* comprend environ soixante-dix genres et onze cents espèces herbacées, rarement suffrutescentes, arbustives, parfois saprophytes (trois genres). Leurs feuilles sont presque toujours opposées, entières et glabres. Leurs fleurs sont hermaphrodites, actinomorphes, tétramères ou pentamères, isolées ou surtout en cymes, gamopétales, à corolle montrant une préfloraison tordue. Il y a deux carpelles médians généralement unis en un ovaire supère uniloculaire, mais parfois biloculaire. Les fruits sont des capsules septicides ou bien des baies. L'ovule peut, chez les espèces saprophytes, avoir un tégument soudé au nucelle, de sorte qu'il paraît nu. Quelques genres ont des grains de pollen restant groupés en tétrades. Les Gentianacées sont cosmopolites.

Les gentianes proprement dites *(Gentiana)* comprennent environ deux cents espèces. Ce sont des plantes à pollen simple finement rayé ou réticulé. Leur corolle montre des appendices stipulaires entre les lobes; ceux-ci, de même que la gorge de la corolle, ne sont pas ciliés. Il y a des nectaires à la base de l'ovaire. Les gentianes se trouvent dans toutes les régions tempérées, surtout montagneuses, mais particulièrement dans l'hémisphère Nord. La grande gentiane *(Gentiana lutea)* est une plante herbacée pouvant atteindre 1,20 m, à tige simple et creuse. Elle possède de grandes feuilles opposées, ovales, sessiles, les basales étant pétiolées et pédonculées. Ces feuilles sont glabres et glauques, marquées de cinq à sept fortes nervures longitudinales convergentes, reliées par de fines nervures transversales et obliques en réseau. Les fleurs, jaunes, estivales, forment des pseudo-verticilles axillaires ou terminaux. La corolle a de cinq à neuf pétales. Les anthères exsertes sont libres. Le rhizome et les racines contiennent des hétérosides amers, surtout du gentiopicroside, qui est présent chez toutes les Gentianacées étudiées et dont l'aglycone est une lactone à deux cycles (gentiogénine). Il y a aussi de l'amaragentioside, qui est la substance la plus amère connue, de structure encore obscure, et sans doute responsable en grande partie de la saveur de la gentiane. La gentiane sert à fabriquer des liqueurs. Elle augmente la sécrétion d'acide gastrique et la motilité de l'estomac. Elle est aussi cholagogue et cholérétique. C'est une plante des montagnes d'Europe centro-méridionale; elle croît aux étages montagnard et subalpin, surtout sur sol calcaire humide. *G. pneumonanthe*, de taille modeste (5 à 40 cm), est beaucoup plus répandu en Eurasie, mais ne s'élève pas en montagne. Ses feuilles sont lancéolées. Il fleurit en automne et a de grandes fleurs bleues solitaires à l'aisselle des feuilles supérieures. Les anthères sont soudées postgénitalement les unes aux autres autour du style. La croisette *(G. cruciata)*, haute de 10 à 50 cm, occupe la plaine et les montagnes jusqu'à l'étage subalpin, souvent sur sol calcaire. Ses fleurs bleues de taille moyenne naissent à l'aisselle de feuilles lancéolées comme chez la précédente, mais plus larges. Les anthères sont libres. C'est une plante européenne et d'Asie occidentale. *G. acaulis (G. kochiana)* est en fait caulescent. Sa tige n'a que de 2 à 8 cm; elle est dotée de deux paires de feuilles végétatives atteignant 10 cm de long, et se termine par une fleur unique, de 4 à 6 cm, à corolle en entonnoir, bleue, à gorge tachée. La plante vit dans les montagnes d'Europe centro-méridionale; elle est limitée à l'étage alpin, et plutôt calcifuge. Elle fleurit en juin-juillet. Plusieurs

Archives Carlo Erba - Nats'photo

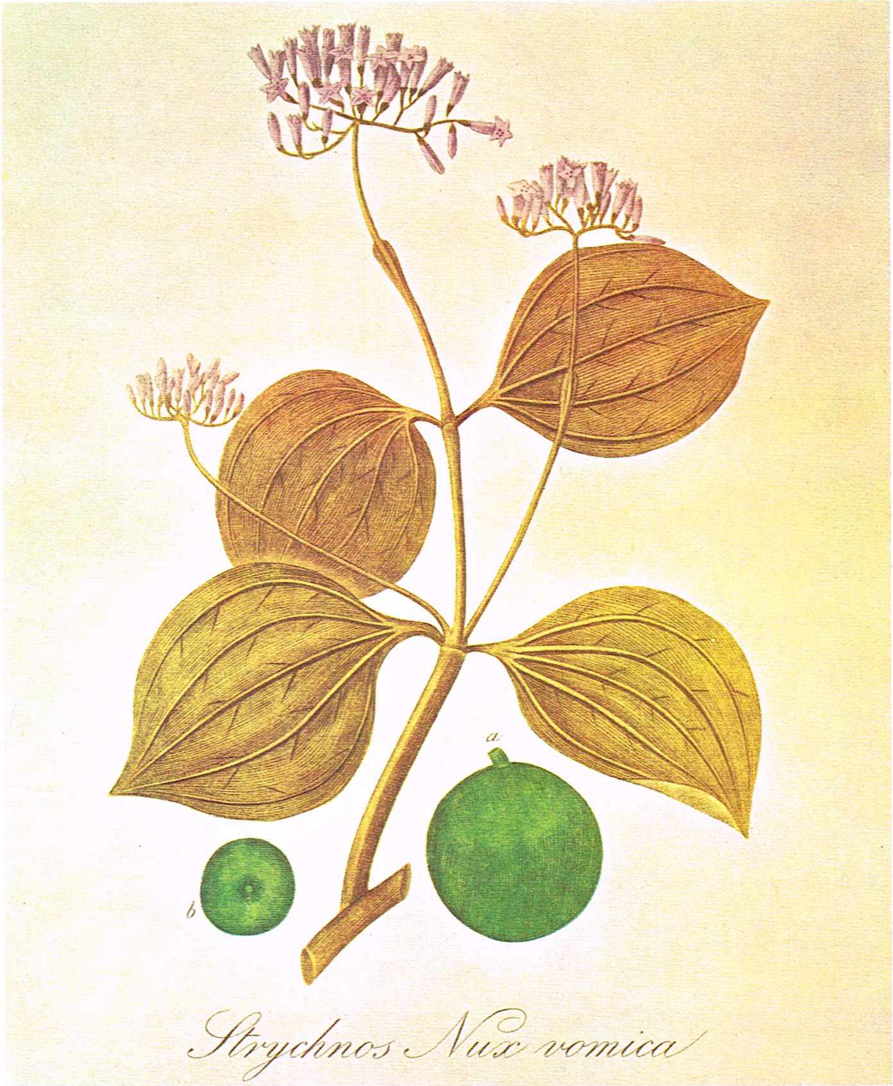

▲ ***Le vomiquier*** **(Strychnos nux-vomica);** ***(a) fruit, (b) graine.***

▼ ***Fleurs de gentiane pourpre*** **(Gentiana purpurea *var.* typica).**

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

M. Bavestrelli

▲ **Gentiana acaulis** *est une petite plante des régions montagneuses.*

espèces voisines sont uniflores. D'autres gentianes de petite taille sont à corolle en tube.

Les gentianelles *(Gentianella)* sont au nombre de deux cent cinquante. Ce sont des plantes dont la corolle n'a pas d'appendice entre les lobes ; ceux-ci et la gorge sont ciliés. Des nectaires se trouvent à la base de la corolle. Les gentianelles se rencontrent dans les montagnes tempérées et sont surtout abondantes dans les Andes. *G. campestris* est annuel et ne dépasse pas 25 cm. Sa tige dressée porte quelques feuilles ovales-lancéolées, opposées, mais la plupart des feuilles sont en rosette radicale. Les fleurs sont violet foncé, parfois jaunes ou blanches, solitaires, axillaires ; l'une d'elles est terminale. Elles sont tétramères et la gorge de la corolle est barbue. C'est une plante occupant une grande partie de l'Europe, à l'étage montagnard essentiellement ; elle est assez indifférente au sol. Il existe plusieurs espèces étroitement apparentées.

▼ **Gentiana asclepiadacea,** *comme de nombreuses autres gentianes, est utilisé dans l'industrie des liqueurs.*

M. et S. Prato

Les *Centaurium (Erythraea),* au nombre de quarante, appartiennent à la même tribu et croissent dans toutes les zones tempérées. Après la floraison, leurs anthères se tordent en spirale.

La petite centaurée *(Centaurium erythraea = Erythraea centaurium),* dont les sommités fleuries sont utilisées comme fébrifuge et tonique en médecine populaire, est une herbe annuelle, haute de 10 à 60 cm, à feuilles basales en rosette et à tiges fines, très ramifiées, portant des feuilles sessiles, opposées, ovales-lancéolées et obtuses. Les fleurs, roses, parfois blanches, sont groupées en cymes terminales denses. Elles sont pentamères, et le long tube de la corolle est resserré à la gorge.

La famille des *Ményanthacées (Menyanthaceae)* a été considérée comme une sous-famille des Gentianacées, mais en diffère surtout par l'absence de liber interne. Elle ne comprend que cinq genres et quarante espèces. Le trèfle d'eau *(Menianthes trifoliata),* holarctique, est répandu de la plaine à l'étage montagnard et même subalpin dans presque toute la France. C'est une herbe vivace et rampante, qui vit dans les marais et les lieux très humides. D'un rhizome horizontal pointe une touffe dressée de grandes feuilles à large gaine, long pétiole et trois folioles ovales digitées atteignant 10 cm, ainsi qu'une riche inflorescence en grappe axillaire spiciforme ; les petites fleurs blanches, rosées à l'extérieur, ont une corolle gamopétale à lobes étalés, barbus intérieurement, cinq étamines et un ovaire uniloculaire. Le fruit est une capsule s'ouvrant en deux valves. Les feuilles contiennent un principe amer, apéritif et tonique, mal défini mais différent du gentiopicroside.

La famille des *Apocynacées (Apocynaceae)* comprend deux cents genres et deux mille espèces ligneuses, essentiellement tropicales et subtropicales. Les feuilles sont en général opposées et entières, mais la ramification et la phyllotaxie de la plante florifère sont encore mal connues et paraissent parfois aberrantes. Il y a du liber interne et des laticifères vrais. Les hétérosides et alcaloïdes sont fréquents. Les fleurs sont pentamères. La corolle est gamopétale, avec souvent des appendices ligulaires à la gorge et la préfloraison est presque toujours tordue. Les cinq étamines ont des anthères qui sont souvent rapprochées les unes des autres ou unies à un plateau stigmatique. L'ovaire est entouré d'un disque dont le nectar attire des Insectes à longue trompe qui assurent la pollinisation croisée. Celle-ci se réalise grâce à des dispositifs stigmatiques assez complexes. Il y a deux carpelles médians, en général presque libres, unis, seulement de façon postgénitale, au sommet des styles et au niveau du stigmate massif, de sorte que le fruit est dans la plupart des cas un double follicule. Lorsque les carpelles sont unis, c'est une baie ou une drupe. Les graines sont fréquemment pourvues d'une touffe de poils. Le pollen peut se former par divisions successives, comme chez les Monocotylédones.

Dans la sous-famille des *Pluméroïdées,* les anthères ne sont pas unies au stigmate et le tube de la corolle ne possède généralement pas de ligules à la gorge. Les lobes de la corolle montrent une préfloraison tordue presque toujours à gauche.

La petite pervenche *(Vinca minor)* appartient à un genre de six espèces habitant l'Europe, la région méditerranéenne et l'Asie occidentale. C'est une plante prostrée, radicante aux nœuds. Ses feuilles toujours vertes, qui ne dépassent pas 5 cm de long, sont ovales-lancéolées, coriaces, brillantes et glabres. Ses fleurs, précoces, sont solitaires, axillaires (au moins en apparence), à corolle tubuleuse à la base, à cinq lobes dissymétriques un peu recourbés et tronqués, de couleur bleu violacé. Le fruit est formé de deux follicules et les graines sont nues, comme chez toutes les pervenches. C'est une espèce commune dans les haies et lieux ombreux des forêts, de la plaine juqu'à 1 000 m d'altitude environ. Elle occupe l'Europe et l'Asie occidentale. Dans la zone méditerranéenne, elle est remplacée par la grande pervenche *(V. major),* à tiges dressées, dont les feuilles sont plus larges et atteignent 10 cm de long, et les fleurs plus grandes (de 4 à 5 cm contre 2 à 3 cm). Les deux espèces sont cultivées pour l'ornement. Dans la majeure

partie de la France, en Europe centrale, etc., la grande pervenche n'est pas indigène; elle est naturalisée et se multiplie végétativement. Elle ne forme pas de fruits, car l'autofécondation est impossible et les Insectes pollinisateurs convenables manquent dans ces régions. Elle est spontanée dans l'ouest et le centre de la région méditerranéenne. Des feuilles de *V. minor,* on extrait la vincamine, alcaloïde hypotenseur à cinq cycles dont un noyau indole, utilisé en particulier pour lutter contre les effets de l'hypertension sur l'irrigation cérébrale.

Le genre *Catharanthus* est voisin du précédent et compte six espèces, dont une pantropicale, la pervenche de Madagascar, ou *C. roseus (Vinca rosea),* est intéressante depuis qu'on y a découvert des alcaloïdes dimères complexes dont chaque monomère présente aussi un noyau indolique (vincristine, vincaleucoblastine, etc.). Ces substances sont antimitotiques et servent dans le traitement d'affections néoplasiques hématologiques (leucémie aiguë, maladie de Hodgkin).

Les *Rauwolfia* ont des carpelles devenant chacun un fruit drupacé uniséminé et sont des arbustes ou des arbres pantropicaux. *R. serpentina,* d'Inde, d'Indochine et de Malaisie, et *R. vomitoria,* d'Afrique tropicale, fournissent leur racine riche en nombreux alcaloïdes indoliques, dont la réserpine, qui est hypotensive et tranquillisante, et l'ajmaline, sédatif du cœur et antifibrillant.

Les Landolphia sont des lianes d'Afrique et de Madagascar dont certaines produisent un caoutchouc. Des *Acokanthera,* d'Afrique orientale du Cap à l'Éthiopie, renferment dans leurs graines et leurs racines de l'ouabaïne, hétéroside tonicardiaque rapide. *A. ouabaio* et *A. schimperi* sont exploités à ce point de vue. Ces deux genres ont des carpelles unis formant des baies.

Chez les *Apocynoïdées,* les anthères sont soudées postgénitalement au stigmate massif par un rétinacle porté par leur face interne. Le tube de la corolle a souvent des écailles ligulaires en haut, et les lobes sont généralement tordus à droite. Les graines sont munies d'une aigrette de poils.

Le genre *Strophantus* comprend cinquante espèces surtout lianoïdes d'Afrique et d'Asie tropicales et de Malaisie. Leurs corolles ont presque toujours des lobes très longuement prolongés en « vrille »; ce caractère est absent chez *S. gratus,* dont les graines renferment un taux important d'ouabaïne.

Le laurier-rose *(Nerium oleander)* est une plante toujours verte de la région méditerranéenne. C'est un arbuste d'une hauteur de 2 à 5 m. Ses feuilles sont habituellement verticillées par trois, à court pétiole, lancéolées, aiguës, coriaces, et vert clair. Ses fleurs, roses ou blanches, sont parfumées; elles sont comparables à celles des pervenches, mais plus grandes et leur gorge est munie d'appendices. Les fruits sont des follicules à graines pourvues d'un pinceau de poils soyeux qui en facilitent la dissémination anémochore. Ces plantes sont très cultivées pour l'ornement, parfois sous des variétés à fleurs doubles. Elles sont vénéneuses et leurs feuilles contiennent un hétéroside cardiotonique, dont l'aglycone stéroïdique se retrouve dans les hétérosides des digitales.

La famille des *Asclépiadacées (Asclepiadaceae)* comprend environ deux mille espèces en deux cent cinquante genres. Ce sont des plantes surtout tropicales et principalement arbustives et volubiles, rarement arborescentes ou herbacées, pourvues de liber interne et de laticifères vrais, parfois succulentes et à feuilles réduites. Les feuilles sont le plus souvent entières et simples, opposées ou verticillées, mais la phyllotaxie et la ramification sont particulièrement mal comprises au niveau où se forment les inflorescences. Les fleurs sont pentamères, à sépales en grande partie libres et à corolle gamopétale. Une paracorolle complexe est souvent formée par des éperons de la corolle, de l'androcée ou des deux. Les étamines épisépales sont en général unies au stigmate massif en un gynostème. Les anthères n'ont la plupart du temps que deux loges. L'ovaire bicarpellé, supère ou à peu près, est apocarpe au niveau fertile. Des sécrétions de la région inférieure du stigmate forment des *translateurs* qui se chargent chacun des deux contenus des sacs polliniques voisins de deux anthères adjacentes, à grains de pollen accolés. Il se forme ainsi cinq paires de *pollinies* susceptibles de s'attacher par les translateurs gluants en un point médian à un Insecte pollinisateur. Les ovules et les graines sont nombreux. Les fruits sont des follicules au nombre de deux par fleur. Les graines ont une aigrette de poils.

Un *Asclepias* souvent cultivé *(A. syriaca = A. cornutii,* de l'est de l'Amérique du Nord) est appelé pour cela herbe-à-la-ouate. Les grains de pollen se forment par divisions successives comme souvent chez les Apocynacées. Les *Asclepias* comptent une centaine d'espèces dont beaucoup sont utilisées à des fins ornementales *(A. tuberosa, A. curassavica).*

Les caractères décrits ci-dessus ne s'appliquent pas à la sous-famille primitive des *Périplocoïdées,* où le pollen est simplement en tétrades, où les anthères ont quatre sacs polliniques, sont bien distinctes et sont portées par des filets libres. Il y a des translateurs interstaminaux en cuiller à partie adhésive basale.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

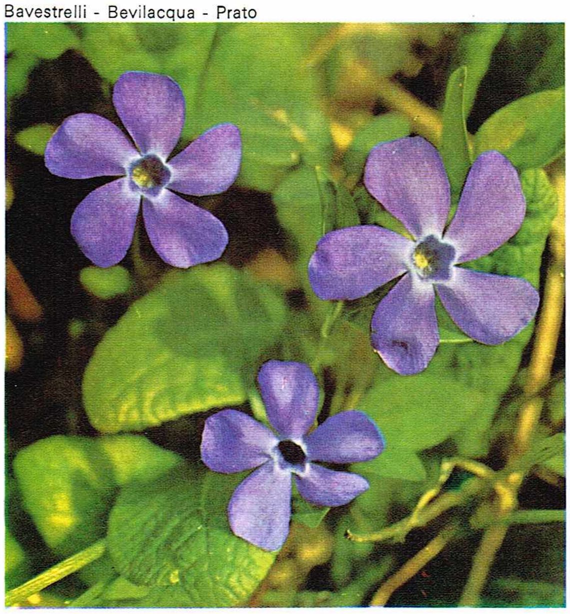

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *A gauche,* **Vinca minor,** ***la petite pervenche, commune dans les haies et sur les talus. A droite, une Asclépiadacée,*** **Hoya carnosa.**

▼ ***Le laurier-rose*** **(Nerium oleander),** ***arbuste aux fleurs odorantes.***

M. Bavestrelli

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

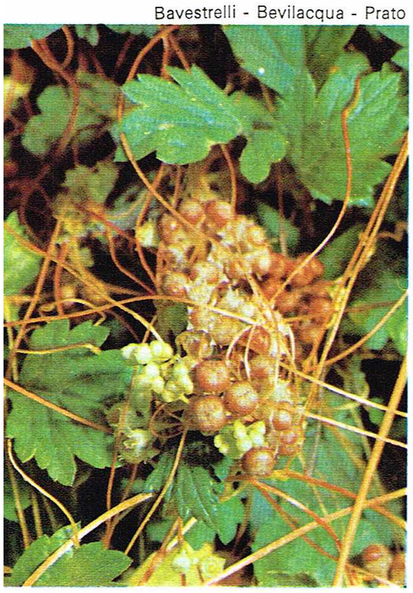

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *A gauche, une cuscute* (Cuscuta europaea) *parasitant une armoise* (Artemisia vulgaris); *on peut remarquer ses longues tiges jaunes qui s'enroulent autour de la plante hôte. A droite, le liseron des champs* (Convolvulus arvensis) *est une espèce vivace et volubile à fleurs à forme d'entonnoir.*

▼ *Follicules d'*Asclepias fruticosa.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Le genre *Periploca* comprend quinze espèces des régions chaudes de l'Ancien Monde. *P. graeca* est un arbuste volubile, de la péninsule balkanique essentiellement.

Le dompte-venin *(Vincetoxicum hirundinaria = V. officinale)* est une herbe vivace qui appartient à un genre de cent cinquante espèces. Ses feuilles sont opposées, coriaces, ovales-lancéolées. Ses fleurs, minuscules et jaunâtres, forment des cymes pédonculées axillaires (en première approximation). On trouve cette espèce dans les forêts sèches d'Eurasie et d'Afrique du Nord. Son nom lui vient du fait qu'on lui attribuait naguère des propriétés antivenimeuses.

Le genre *Stapelia* et quelques autres voisins ont par exception une corolle à préfloraison valvaire. Ils sont spécialement répandus dans les régions désertiques d'Afrique du Sud. Ce sont des plantes grasses à feuilles très réduites, et à grandes fleurs malodorantes, brunes, à corolle étalée. *Caralluna europaea* vit en Afrique du Nord et au sud de l'Espagne. Il appartient à un grand genre africain et asiatique voisin des *Stapelia*. C'est une plante grasse à tiges tétragones dont les côtes sont garnies de feuilles opposées écailleuses vite caduques. Ses fleurs sont en revanche longuement persistantes et groupées en ombelles au sommet de la tige; leur corolle, accompagnée d'une paracorolle de cinq lobes, est étalée en étoile; elle est plate et charnue, de couleur rouge foncé, avec des stries concentriques interrompues, à lobes ciliés. Les fleurs dégagent une odeur de chair en putréfaction, ce qui attire des Diptères qui y pondent leurs œufs et assurent la pollinisation croisée. Divers *Stapelia* et genres voisins sont très cultivés comme plantes grasses.

Les Rubiacées, comme on l'a vu, sont maintenant fréquemment classées parmi les Gentianales; cependant nous les placerons encore dans l'ordre des Rubiales, qui sera étudié avec les Gamopétales à ovaire infère.

Tubiflorales ou Tubiflores ou Solanales

Il s'agit d'un grand ordre de plantes dont les fleurs, très généralement pentamères et zygomorphes, ont une corolle fortement gamopétale. Il comprend environ vingt-cinq familles avec un nombre très élevé d'espèces (plus de vingt mille). Son nom lui est venu de l'existence d'un tube corollin souvent très bien développé par rapport aux lobes. Ce sont habituellement des plantes herbacées, mais parfois des arbustes ou des arbres. Les étamines sont épisépales, insérées sur la corolle et en nombre égal ou, en cas de zygomorphie, inférieur à celui des pétales. Le gynécée syncarpe est presque toujours bicarpellé à deux carpelles médians. L'ovaire est dans la plupart des cas supère; les ovules n'ont qu'un seul tégument et les fruits sont des capsules ou des baies. Ces plantes peuvent être hémi-parasites ou parasites. L'ordre comprend des Végétaux très connus comme les liserons, la pomme de terre, la tomate, l'aubergine, le tabac ou le thym.

La famille des *Convolvulacées (Convolvulaceae)* est surtout répandue dans les zones chaudes. Sur les mille six cents espèces environ que comprennent ses cinquante et un genres, quatre cents appartiennent au genre *Ipomoea* (volubilis) et deux cent cinquante au genre *Convolvulus* (liserons). Ce sont surtout des plantes herbacées, annuelles ou vivaces, souvent à tiges volubiles, et à fleurs solitaires ou en cymes bipares dont la corolle est actinomorphe et plus ou moins infundibuliforme. Il y a un disque autour de l'ovaire. Les carpelles sont au nombre de deux et chacun est biovulé. Parfois les parois carpellaires sont bombées dorsalement de sorte que le style semble inséré dans un puits (style gynobasique) comme chez les Labiées ou les Boraginacées. C'est le cas des *Dichondra* et des *Falkia*. La tribu des Convolvulées renferme les genres les plus importants, à style terminal et dont le fruit est une capsule à quatre valves ou à déhiscence irrégulière.

L'espèce de *Convolvulus* la plus commune chez nous est le liseron des champs ou vrillée *(C. arvensis)*. C'est une herbe vivace volubile ou souvent rampante, à feuilles entières, pétiolées, à limbe hasté. Ses fleurs sont solitaires axillaires, longuement pédonculées avec deux petites préfeuilles (bractéoles) au milieu du pédoncule. Elles ont une corolle infundibuliforme à cinq zones verticales roses marquant le dos des pétales et séparées par des régions plus claires. La capsule est sphérique et glabre. Cette espèce, sans doute originaire du sud de l'Europe et de l'Asie occidentale, est naturalisée dans le monde entier. Elle atteint l'étage montagnard et est très envahissante. La plupart des liserons vivent dans les régions chaudes.

Les *Calystegia* se différencient des *Convolvulus* par leur ovaire uniloculaire et leurs grains de pollen différemment sculptés. De plus, les espèces européennes ont deux grandes préfeuilles appliquées sous la fleur. *Calystegia (Convolvulus) sepium* est un liseron de taille relativement élevée qui croît très souvent dans les lieux frais et possède des fleurs à corolle infundibuliforme, blanche ou rose, de 30 à 70 mm de diamètre. Les préfeuilles ne dépassent pas 20 mm de long. Chez *C. silvatica*, la corolle est plus importante et les préfeuilles atteignent 35 mm et sont larges et concaves. Tandis que le premier occupe toute l'Europe, le second est confiné au sud, au moins à l'état spontané (en France, il est limité au sud-est). On trouve très souvent sur les côtes *C. soldanella*.

Divers *Ipomoea*, certains nommés aussi *Pharbitis* ou *Quamodit*, sont les volubilis cultivés pour leurs fleurs blanches, roses, bleues ou violettes, et pour leur aptitude à recouvrir rapidement les supports les plus divers. *Ipomoea purpurea*, d'Amérique tropicale, à fleurs pourprées ou diversement colorées, est particulièrement commun; il est parfois naturalisé. Le genre *Ipoema* renferme une espèce comestible, la patate douce *(I. batatas)*, probablement originaire d'Amérique centrale, mais plantée aujourd'hui partout dans les pays chauds, et même en Europe méridionale. Elle forme de gros tubercules riches en sucre et en amidon. On a découvert depuis une quinzaine d'années des alcaloïdes indoliques dérivés de l'acide lysergique, comme le L.S.D. synthétique, et à propriétés hallucinogènes dans les graines d'*Ipomoea violacea* et de *Rivea corymbosa*, d'Amérique centrale (Mexique); les effets de ces plantes étaient d'ailleurs connus par les indigènes depuis très longtemps. Les graines des *Ipomoea* cultivés pour l'ornement dans nos régions ne contiennent pas ces alcaloïdes.

Les *Cuscutacées (Cuscutaceae)* sont souvent rangées parmi les Convolvulacées. C'est une petite famille constituée par l'unique genre *Cuscuta*, avec cent soixante-dix espèces, remarquable par le parasitisme et l'absence presque totale de chlorophylle. Les cuscutes sont dépourvues de racines sauf dans la jeune plantule, et leurs feuilles sont réduites à des écailles. Ces Végétaux enroulent autour d'une plante hôte leurs tiges filiformes, ramifiées, jaunâtres et munies de suçoirs. Ces derniers sécrètent des enzymes (amylases, etc.) qui favorisent la nutrition. Les fleurs, tétramères ou pentamères, sont petites, globuleuses et réunies en glomérules. La corolle présente des appendices internes infrastaminaux qui sont sans doute des stipules des pétales. Il y a deux carpelles biovulés. Leurs graines, deux par carpelle, sont très légères. Elles ont un tégument mucilagineux qui facilite leur fixa-

Etrusko

▲ **Phlox paniculata,** ***de couleur rose vif, est l'élément dominant de ce massif de fleurs.***

tion aux plantes hôtes. Lorsqu'elles germent, elles émettent une petite tige filiforme presque dénuée de cotylédons qui, grâce à des mouvements de nutation, recherche l'hôte, s'allongeant par l'apex aux dépens de la partie proximale qui s'épuise peu à peu. Ayant trouvé un hôte convenable, elle développe des suçoirs et se nourrit à partir de lui. Les cuscutes les plus communes dans nos régions sont *C. epithymum,* à tige et fleurs rosées, qui parasite la callune, divers arbustes, des Labiées et surtout des Légumineuses, en particulier le trèfle, auquel elle est fort nocive, et *C. europaea,* à tige jaunâtre et fleurs rosées, qui s'attaque au houblon, aux orties, aux liserons, aux armoises et aux saules. Ces espèces sont eurasiatiques. *C. epilinum,* voisin du précédent, était très nuisible aux champs de lin. Les graines des cuscutes, du fait de leur mucilage, peuvent être séparées de celles des plantes cultivées en mélangeant à la masse de la limaille de fer ; celle-ci n'adhère qu'aux graines du parasite qui peuvent ensuite être éliminées à l'aide d'un aimant.

La famille des *Polémoniacées (Polemoniaceae),* proche aussi des Convolvulacées, en diffère par la structure de l'ovaire qui comprend trois carpelles soudés et possède souvent de nombreux ovules par loge, et parce que ses représentants sont dépourvus de tissus sécréteurs, quoiqu'il y ait souvent des poils glanduleux. Elle est particulièrement répandue en Amérique du Nord et dans l'ouest de l'Amérique du Sud. Sur les trois cent vingt espèces des dix-huit genres, cinq seulement se trouvent également en Eurasie. L'ovaire, comme dans les familles précédemment décrites, est entouré d'un disque. Chaque loge contient un ou de nombreux ovules. Le fruit est en général une capsule loculicide et les graines ont un tégument mucilagineux. Ce sont principalement des herbes, à feuilles opposées ou alternes, rarement des arbustes ou des arbres. Les fleurs sont presque toujours groupées en fausses ombelles, capitules, etc., et beaucoup d'espèces sont ornementales. Chez les *Polémoniées,* les graines ne sont pas ailées et l'albumen est abondant. Le genre *Polemonium* comporte vingt-trois espèces de l'hémisphère Nord, du Chili et de Patagonie. *P. coeruleum* est l'une des principales espèces eurasiatiques. Dans les montagnes françaises, on la rencontre aux étages montagnard et subalpin.

Le genre *Phlox* comprend soixante espèces ; il occupe essentiellement l'Amérique du Nord, mais *P. sibirica* se trouve en Sibérie orientale, ce qui indique sans doute une migration par le détroit de Behring. *P. paniculata* est une herbe vivace à tiges raides et simples, de 1 m. environ, terminées par une inflorescence condensée en tête de fleurs rouges ou roses à lobes de la corolle disposés à plat. Il est très cultivé ainsi que ses hybrides avec *P. pyramidalis* et *decussata,* qui lui ressemblent.

La famille des *Hydrophyllacées (Hydrophyllaceae)* compte vingt genres et deux cent soixante-dix espèces. Elle manque en Europe et en Australie, mais est bien représentée en revanche dans l'ouest de l'Amérique du Nord. Ce sont des herbes à poils raides. Les fleurs sont groupées en cymes unipares scorpioïdes. Le gynécée est bicarpellé et l'ovaire uniloculaire avec de deux à quatre

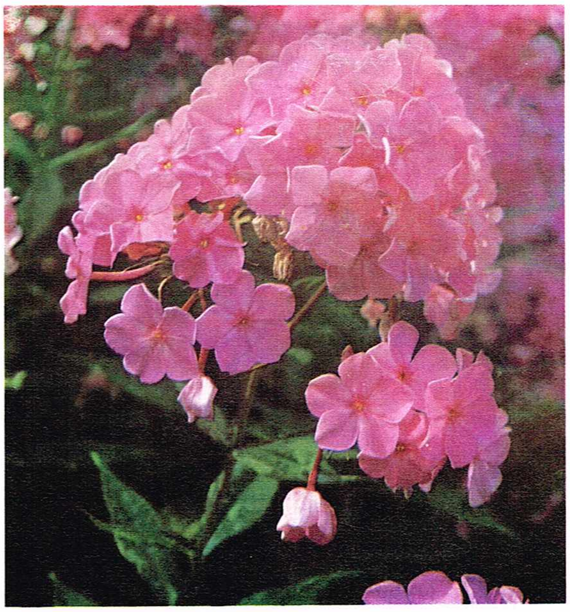

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ ***Un exemple de Tubiflore, le phlox, dont la corolle est soudée à la base en un long tube prolongé par cinq lobes.***

▶ *La consoude,* **Symphytum officinale,** *est une Boraginacée que l'on rencontre au bord des eaux; ses feuilles sont décurrentes le long de la tige.*

G. P. Mondino

ovules par placenta pariétal. *Nemophila* et *Phacelia* sont cultivés pour l'ornement, surtout *P. tanacetifolia,* qui est souvent naturalisé dans nos régions.

Les *Boraginacées (Boraginaceae)* sont une importante famille qui comprend cent genres et deux mille espèces, souvent herbacées, mais aussi lianoïdes, arbustives et même arborescentes. Les Boraginacées sont cosmopolites, mais surtout abondantes en région méditerranéenne et sur la côte Pacifique de l'Amérique du Nord. Elles sont velues et rudes, car elles sont garnies de poils calcifiés ou silicifiés parfois crochus. Il n'y a pas de liber interne. Les inflorescences, en cymes scorpioïdes, sont enroulées sur elles-mêmes au début et se déroulent peu à peu, au fur et à mesure de la floraison et de la fructification. Lorsque les pétales sont colorés par des anthocyanosides, ils sont souvent roses à l'éclosion et deviennent ensuite bleus ou violacés par suite de la variation du pH du suc vacuolaire. Les fleurs sont en général pentamères et actinomorphes. Les pétales sont soudés à la base, et, lorsque les lobes sont à préfloraison tordue, celle-ci se fait à droite; ils sont fréquemment pourvus d'appendices ventraux à la gorge, qui sont de petits doigts de gant s'ouvrant à l'extérieur au dos du pétale.

La fleur est zygomorphe chez les *Echium, Anchusa,* etc. Il y a cinq étamines et deux carpelles formant un ovaire biloculaire à deux ovules par loge. Les styles sont parfois libres, au moins en haut, ou très généralement soudés. Les ovules ont leur micropyle dirigé en haut. Souvent, chaque ovule est isolé par un reploiement de la paroi carpellaire qui se moule sur lui et le fruit est un schizocarpe dont chaque méricarpe ou nucule est uniséminé. Dans ce cas, le style est gynobasique (inséré entre les quatre nucules) ; en fait, il prolonge simplement la paroi carpellaire bombée tout autour au-dessus des quatre ovules. Dans les autres cas, le style est apical et le fruit est une drupe ou un akène avec une à quatre graines. Les fruits ou méricarpes sont souvent munis d'appendices facilitant leur dissémination ou bien d'un *élaïosome,* masse attirant les fourmis qui la consomment et assurent aussi la dispersion.

La sous-famille des *Héliotropioïdées* présente un épaississement subapical du style simple résultant de la fusion des styles des deux carpelles, épaississement qui n'est pas sans rappeler celui des Apocynacées ou Asclépiadacées. Il se forme deux ou quatre méricarpes.

Le genre *Heliotropium* comporte deux cent vingt espèces. *H. peruvianum,* d'Amérique du Sud, est un arbuste à fleurs violettes très répandu dans les jardins, mais qui n'est pas rustique dans la plus grande partie de la France. On peut cependant le cultiver comme plante annuelle, car il fleurit dès la première année. Ses fleurs bleu-violet dégagent une odeur de vanille. *H. europaeum,* plante grisâtre à petites fleurs blanches, est commun en France. C'est une mauvaise herbe fétide et une plante rudérale de la région méditerranéenne et de l'Asie occidentale. *H. supinum,* à feuilles tomenteuses en dessous, est limité au pourtour de la Méditerranée ainsi qu'à la moitié nord de l'Afrique.

Les *Ehrétioïdées* sont une sous-famille voisine, également à schizocarpe, mais où les styles des deux carpelles sont libres supérieurement en général. Dans le cas où le style est simple, il ne présente pas de renflement subapical.

Le genre *Cordia* compte deux cent cinquante espèces tropicales et subtropicales souvent arborescentes et dont le bois est exploité. Le fruit est une drupe parfois comestible. Les styles sont libres en partie. On place ces plantes ainsi que quelques autres dans la sous-famille des *Cordioïdées.*

La sous-famille des *Boraginoïdées* rassemble les autres espèces, dont le style est gynobasique. Il y a très généralement quatre méricarpes.

Les *Pulmonaria* sont au nombre d'une douzaine et habitent l'Eurasie tempérée. *P. officinalis* a des fleurs rougeâtres ou violettes, en cymes scorpioïdes condensées, à corolle infundibuliforme à cinq touffes de poils à la gorge. Ses grandes feuilles estivales ovales-aiguës sont tachetées de blanc, tandis que, chez *P. obscura,* elles sont entièrement vertes. Ces deux plantes européennes sont souvent confondues et leur distribution est par conséquent mal connue.

Les *Symphytum* sont voisins, mais la gorge de la corolle a cinq écailles bien formées. Il y en a une vingtaine d'espèces. *S. officinale* est la consoude, très commune au bord des eaux, dont les grandes feuilles sont longuement décurrentes sur la tige, les fleurs étant blanc jaunâtre ou

▼ *A gauche,* **Borago officinalis,** *la bourrache, est une plante velue, au toucher rude, et aux fleurs bleu violacé. Au milieu,* **Heliotropium peruvianum,** *l'héliotrope, est un arbuste aux fleurs violettes dégageant une odeur de vanille. A droite,* **Myosotis scorpioides** (= **M. palustris**) *peut atteindre 60 cm de hauteur et vit dans les lieux très humides.*

M. et S. Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

pourpre violacé. *S. asperum* a des tiges très rudes et des feuilles non décurrentes. Il a été introduit du Caucase comme plante fourragère pour les porcs et s'hybride avec le précédent pour donner *S.* × *uplandicum*.

Les bourraches ont aussi des écailles corollines; toutefois leur corolle est plate, à tube court et non infundibuliforme. *Borago officinalis*, à fleurs bleu violacé, est d'origine méditerranéenne et ouest-asiatique, mais désormais naturalisé un peu partout. Les feuilles et les sommités fleuries ont des propriétés émollientes. Il existe deux autres espèces de bourraches, dans la région méditerranéenne.

Les *Anchusa* (buglosses), au nombre de quarante, ont des fleurs à corolle plus ou moins infundibuliforme formant des nucules plissés et tuberculeux. Il y a aussi des écailles à la gorge. Le tube de la corolle est souvent courbe, en particulier chez certaines espèces que l'on attribuait au genre *Lycopsis*. *A. arvensis (= Lycopsis arvensis)*, qui ne dépasse pas 60 cm, a des feuilles sinuées-ondulées très rudes et une corolle courbée deux fois en sens inverse. C'est une plante asiatique tout à fait naturalisée en Europe.

Le genre *Echium* (vipérines) compte cinquante espèces européennes, méditerranéennes et d'Asie occidentale, généralement arbustives, à corolle nettement zygomorphe, voire bilabiée. *E. vulgare* est commun en Europe et en Asie occidentale, dans les lieux pierreux.

On tire de la racine d'orcanette *(Alkanna tinctoria)* une teinture rouge contenant des naphtoquinones et qui peut servir en histochimie pour la coloration des lipides. Les *Alkanna* sont une quarantaine d'espèces méditerranéennes.

Les *Lithospermum* regroupent une cinquantaine de plantes répandues dans l'hémisphère Nord et en Amérique du Sud. Les nucules sont très dures, d'où le nom du genre (λίθος, pierre; σπέρμα, graine). Le grémil ou herbe aux perles *(L. officinale)* ne dépasse pas 80 cm et a des feuilles sessiles lancéolées; ses petites fleurs jaunâtres sont solitaires, axillaires, et forment des méricarpes blancs et brillants. Il occupe l'Europe tempérée et la moitié ouest de l'Asie. *L. purpureo-coeruleum*, du sud de l'Europe et d'Asie occidentale, a des fleurs rougeâtres ou bleues à nucules lisses et blanc luisant, tandis que *L. arvense*, largement répandu en Eurasie, plus petit, a des fleurs jaunâtres, mais des nucules tuberculeuses brun jaunâtre. *L. officinale* et surtout *L. ruderale*, d'Amérique du Nord, contiennent un principe mal connu qui inhibe les hormones hypophysaires et en particulier détermine une stérilité temporaire par suspension de l'ovulation. Les extraits des racines de la dernière espèce étaient utilisés à cet effet par les Indiennes de certaines tribus.

Le genre *Myosotis*, répandu en Eurasie, en Afrique, en Australie et en Nouvelle-Guinée, compte quatre-vingts espèces. Les nucules sont lisses et aplaties, entourées d'un rebord. Les inflorescences sont de longues cymes unipares à allure de grappe. *M. sylvatica* atteint 40 cm et ses nucules sont pointues. Il est souvent cultivé. Il a des fleurs bleues à corolle de 5 mm et occupe une grande partie de l'Europe, dans les lieux humides.

M. alpestris, des montagnes européennes, est voisin et est plus souvent cultivé; ses nucules sont obtuses, à rebord élargi en haut. La corolle est bleu clair, à gorge jaune. Il est quelquefois difficile de distinguer ces deux espèces, surtout à l'état cultivé. *Myosotis arvensis (M. intermedia)* est voisin, mais plus grand, et ses fleurs sont plus petites, bleues ou roses, à corolle de 2 à 4 mm. Il est fréquent dans toute l'Europe et affectionne plutôt les lieux secs. Tandis que ces trois espèces ont des poils crochus sur le calice, *M. scorpioides (M. palustris)* n'a sur le sien que des poils appliqués. Il atteint 60 cm. Ses fleurs, bleues ou roses à gorge blanche, ou toutes blanches, ont une corolle de 8 mm. C'est une plante d'Europe et d'Asie du Nord, qui croît dans les lieux très humides. Il est également cultivé.

Les *Cynoglossum* sont environ soixante-dix espèces des zones tempérées et des montagnes tropicales. Les nucules sont volumineuses, aplaties dorso-ventralement et hérissées de crochets par lesquels elles s'attachent à la toison des Animaux. Ces crochets sont spécialement développés chez les *Lappula*, dont l'aire est comparable à celle des myosotis, et dont deux des cinquante espèces vivent en France.

La famille des *Nolanacées (Nolanaceae)* compte seulement deux genres, avec quatre-vingt-cinq espèces surtout herbacées et à feuilles alternes et charnues, qui occupent l'ouest de l'Amérique du Sud. Les fleurs gamopétales sont pentamères, à cinq étamines unies à la corolle, et l'ovaire est pentacarpellaire et pentaloculaire, à nombreux ovules en placentation axile. Il semble y avoir parfois deux cycles de carpelles. Il se forme des méricarpes à partir des carpelles. La position systématique de ces plantes est problématique.

La grande famille des *Solanacées (Solanaceae)* comprend de nombreuses plantes qui ont une grande importance économique, et d'autres qui sont toxiques ou médicinales. Les deux mille trois cents espèces appartiennent en grande partie (quinze cents) au genre *Solanum* et le reste est réparti en quatre-vingt-cinq genres environ. Les Solanacées sont répandues dans les zones tropicales et subtropicales. Peu de genres atteignent les régions tempérées. Ce sont des herbes et des arbustes, mais aussi des arbres ou des lianes. Il y a du liber interne. Leurs feuilles sont alternes, mais fréquemment leurs bractées sont en partie concrescentes avec la tige, ce qui détermine une phyllotaxie complexe au niveau inflorescentiel. Leurs inflorescences sont en général des cymes unipares scorpioïdes. Leurs fleurs, pentamères le plus souvent, ont un calice gamosépale fréquemment accrescent et une corolle rotacée ou tubuleuse, obliquement zygomorphe

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

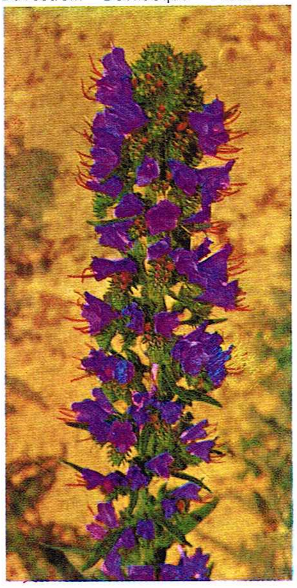

▲ ***Inflorescence d'*****Echium vulgare*****, la vipérine, très commune dans les lieux pierreux.***

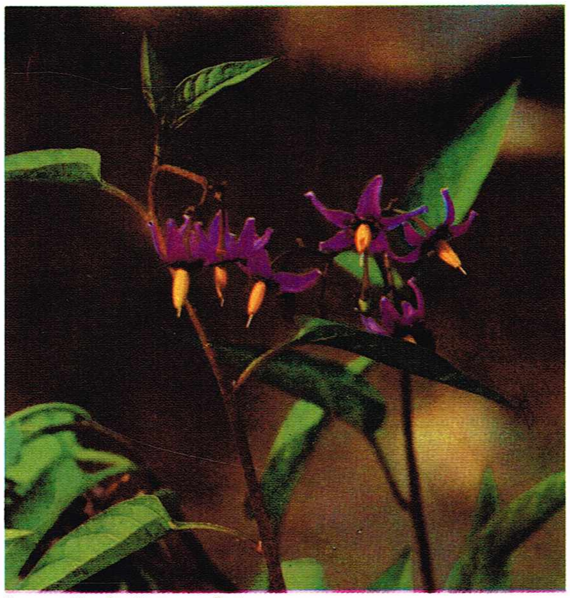

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ ***Le genre* Solanum *est représenté par un grand nombre d'espèces; à gauche,* Solanum dulcamara*, la douce-amère; à droite,* Solanum tuberosum*, la pomme de terre; sur les fleurs, on peut observer la corolle pentamère et les étamines jaunes entourant le style.***

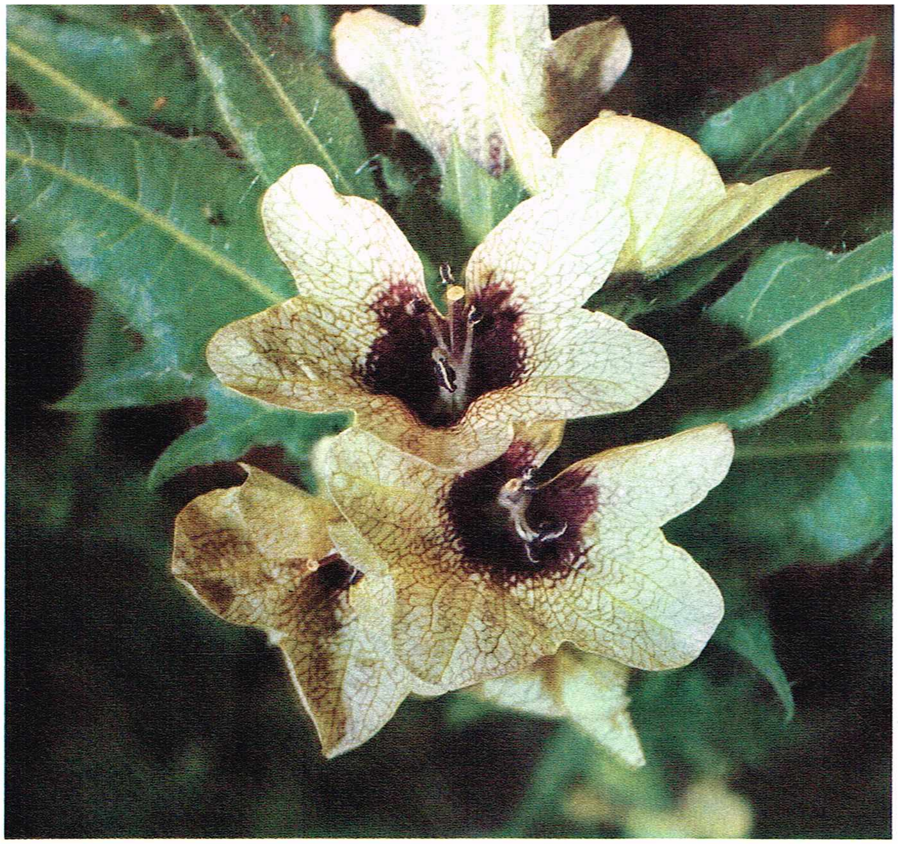

M. Bavestrelli

▲ *Les fleurs de la jusquiame noire* (Hyoscyamus niger) *sont sessiles et leur corolle jaunâtre est veinée de violet.*

parfois. Il y a cinq étamines attachées à la corolle ou encore deux ou quatre, avec des staminodes, dans les fleurs zygomorphes. Les anthères s'ouvrent quelquefois par des pores. L'ovaire, entouré d'un disque, est bicarpellé en général et biloculaire. Les deux carpelles sont médians ou disposés obliquement. Les ovules sont nombreux dans chaque loge. Il peut se former des fausses cloisons. Les fruits sont des baies ou des capsules septicides et éventuellement loculicides.

Chez les Solanées, l'ovaire est bicarpellé et n'il y a pas de fausses cloisons. Le coqueret *(Physalis alkekengi)*, d'Europe centro-méridionale et de la moitié ouest de l'Asie, est une herbe vivace à feuilles largement ovales, acuminées, à fleurs blanches munies d'une corolle en roue et d'un calice qui se gonfle et se ferme autour du fruit. Ce calice accrescent est d'abord une boîte polygonale rouge brique, tronquée en bas, mais son parenchyme se décompose et il ne reste autour du fruit mûr qu'une cage réticulée contenant la baie ronde et rouge, à nombreuses graines, qui est alors un « amour en cage ». Il y a dans les régions chaudes cent dix espèces de coquerets.

L'immense genre *Solanum* occupe les régions tropicales et subtropicales. Il compte de nombreuses espèces en Amérique du Sud, mais seulement trois indigènes en Europe. La corolle est rotacée. Les étamines ont des anthères exsertes appliquées et unies les unes aux autres et s'ouvrant au début par deux pores terminaux chacune.

La morelle noire *(S. nigrum)* est annuelle, à tiges étalées, rampantes et diffuses. Elle a des petites fleurs blanches. Ses fruits sont des baies sphériques noires et vénéneuses à cause de la présence de saponosides. C'est une mauvaise herbe devenue cosmopolite. *S. luteum (S. villosum)* est voisin, mais sa baie est allongée et jaune ou jaune rougeâtre, parfois franchement rouge *(subsp. alatum = S. miniatum)*. La douce-amère *(S. dulcamara)* a le port des espèces précédentes, mais elle est pérennante. Ses tiges sont ligneuses, ses feuilles souvent à deux folioles basales, ses fleurs violettes et sa baie rouge. C'est une plante d'Europe et de l'ouest de la Sibérie, naturalisée en Amérique du Nord. La pomme de terre *(S. tuberosum)* est une plante herbacée rameuse, annuelle, pourvue de grandes feuilles composées imparipennées avec de petites folioles intercalées entre les grandes. Ses tiges sont ailées. Des stolons souterrains (rameaux axillaires de feuilles écailleuses) se terminent en tubercules, qui trahissent leur origine caulinaire par la présence de bourgeons axillaires de feuilles écailleuses caduques (« yeux ») et d'où peuvent naître de nouveaux plants. La multiplication des pommes de terre, en culture, se fait toujours par voie végétative. Les fleurs, en cymes fournies, ont une corolle rotacée pentagonale à cinq lobes peu marqués, blanche, rose, rouge, bleue ou violette. Les anthères sont jaunes ou orangées. Les fruits sont des baies pourpres ou verdâtres divisées en deux loges à nombreuses graines. La « pelure » de la pomme de terre est constituée par du liège produit par une assise génératrice autour du tubercule. Elle couvre une écorce mince et blanche, jaune ou parfois rouge. La masse du tubercule est constituée par le tissu médullaire à cellules gorgées de grains d'amidon.

L'aubergine *(S. melongena)*, dont le fruit est utilisé comme légume, semble originaire de l'Inde. Ses feuilles sont feutrées à cause de la présence de poils étoilés. Ses fruits sont de volumineuses baies ovoïdes ou en massue, d'au moins 50 mm de long, de couleur violette, parfois blanche ou jaune. Leur pulpe, qui peut être amère à l'état frais, devient douce à la cuisson. L'aubergine est cultivée dans les régions chaudes, en particulier dans le sud de l'Europe.

Les *Lycopersicon* sont voisins des *Solanum*, mais leurs anthères s'ouvrent par des fentes longitudinales et la fleur est jaune. Ils sont au nombre d'une dizaine et occupent l'Amérique centrale et l'Amérique du Sud. La tomate *(Lycopersicon esculentum = Solanum lycopersicon)* est une plante d'Amérique du Sud et d'Amérique centrale et du Mexique. La plante est pubescente, glanduleuse et assez odorante. Les feuilles ressemblent à celles de la pomme de terre, avec de grandes et de petites folioles. Ses fleurs ont une corolle rotacée. Ses fruits sont des baies de 2 à 10 cm de diamètre, plus ou moins déprimées et lobées, d'abord pubescentes, puis lisses et luisantes et rouges, roses ou parfois jaunâtres. Dans les formes cultivées, il y a généralement d'assez nombreux carpelles. Les tomates sont assez riches en vitamines, mais leur valeur énergétique est faible. On peut tirer des graines une huile comestible après raffinage.

Les *Capsicum* occupent l'Amérique tropicale jusqu'à la Floride. Les anthères sont aussi déhiscentes par des fentes, mais les feuilles sont entières. Le piment des Solanacées ou paprika *(C. annuum)* a été introduit en Europe vers le milieu du XVIe siècle. C'est un Végétal pérennant en Amérique. Il forme des baies assez sèches, d'environ 10 cm de long. Dans nos régions, on le cultive comme plante annuelle. Les formes à fruits verts (poivrons) sont cultivées comme légume, les rouges comme condiment. Elles contiennent en effet de la capsaïcine, amide complexe extrêmement piquant. Les poivrons en renferment beaucoup moins. Le piment est spécialement cultivé en Hongrie. Il est riche également en vitamines C et A. *C. frutescens* est arbustif et a des fruits nettement petits (de 1 à 4 cm), mais beaucoup plus riches en capsaïcine que ceux du paprika, d'où son nom de « piment enragé ». C'est un condiment très puissant, utilisé notamment dans la préparation du curry. Il n'est cultivé que dans les régions tropicales et subtropicales.

Les *Atropa* sont cinq espèces d'Eurasie. La belladone *(A. belladonna)*, dont l'aire s'étend de l'Europe à l'Iran et qui se trouve aussi dans le nord-ouest de l'Afrique,

▼ *Chez les Solanacées, les fruits peuvent être des baies de taille assez importante et utilisables dans l'alimentation. A gauche, l'aubergine* (Solanum melongena). *A droite, la tomate* (Lycopersicon esculentum).

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

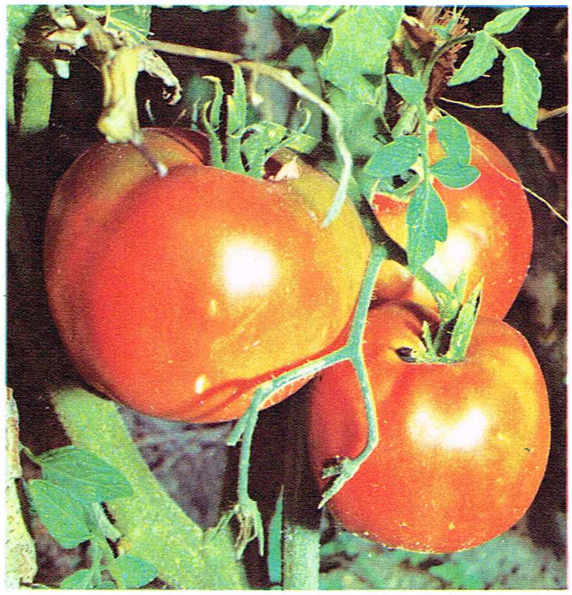

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

forme souvent des peuplements dans les chemins forestiers, les clairières et les ruines, surtout sur sol calcaire. C'est une herbe vivace, pubescente-glanduleuse, atteignant 1,50 m, à gros rhizome et à tige robuste et rameuse. Ses grandes feuilles sont ovales-aiguës et ses fleurs, à corolle longuement tubuleuse et lobes très petits, violet brunâtre, sont solitaires ou géminées et un peu pendantes. Les fruits sont des baies sphéroïdales, biloculaires, de la taille de petites cerises, noires et brillantes, accompagnées du calice un peu accrescent dont les sépales sont disposés en étoile. Toutes les parties de la plante renferment trois alcaloïdes très importants : l'hyoscyamine, l'atropine et accessoirement la scopolamine. On extrait ces substances des racines et surtout des feuilles et des sommités florifères. La belladone est très toxique et provoque des troubles vagolytiques graves pouvant aller jusqu'au coma et à la mort. Toutefois des doses convenables de diverses préparations de cette plante sont fort utilisées en thérapeutique (spasmes, hypersécrétions, asthme, etc.).

La jusquiame noire *(Hyoscyamus niger)* est une herbe bisannuelle, velue-visqueuse, haute de 40 à 80 cm, à feuilles grossièrement dentées, sessiles, disposées dans un seul plan. Ses fleurs sessiles ont une corolle étalée en roue, jaune sale veiné de violet. Elle croît en Europe, en Asie occidentale et centrale et en Afrique du Nord; elle préfère les terrains secs et pierreux et elle est volontiers rudérale. La jusquiame est moins riche en alcaloïdes que la belladone. Elle contient de l'hyoscyamine, de l'atropine, mais surtout de la scopolamine. Elle est également toxique. *H. muticus,* d'Afrique nord-orientale et d'Asie occidentale, est très riche en hyoscyamine et en atropine et sert à leur extraction. Il y a une quinzaine d'espèces de jusquiames.

Les Daturées ont un ovaire bicarpellé, mais qui est en fait tétraloculaire à cause de l'existence de fausses cloisons.

Le datura ou pomme épineuse *(Datura stramonium)* est une herbe annuelle originaire d'Amérique centrale et naturalisée un peu partout dans les zones chaudes et tempérées. Il possède de grandes feuilles grossièrement dentées. Ses fleurs ont un calice et une corolle longuement tubuleux, la seconde étant blanche, évasée au sommet en cinq lobes aigus et plissés. Ses fruits sont des capsules hérissées de piquants, mais il existe des individus inermes. Le datura contient les mêmes alcaloïdes que les plantes précédentes (moins toutefois que la belladone, bien plus que la jusquiame noire) et renferme une forte proportion de scopolamine qui lui confère des propriétés sédatives marquées. Il est aussi toxique que les espèces précédentes. *D. metel,* à port buissonnant, a des fleurs semblables à celles de *D. stramonium,* mais beaucoup plus grandes (plus de 10 cm au lieu de 5). Il est également originaire d'Amérique centrale et répandu dans les zones chaudes. Il sert à l'extraction de la scopolamine, mais est aussi cultivé pour l'ornement, comme *D. meteloides,* du Mexique, à grandes fleurs violettes, annuel, *D. arborea* et *cornigera,* arbustifs, mais non rustiques dans nos régions, souvent à fleurs doubles, et qui proviennent du Chili, du Pérou et du Mexique. Il y a une vingtaine de *Datura,* qui habitent les zones tropicales et tempérées.

Les *Nicotiana* sont une centaine d'espèces subtropicales, surtout américaines. Ce sont les tabacs, dont quelques-uns furent importés en Europe vers le milieu du XVI^e siècle. La culture en fut entreprise également dans nos régions à cette époque. Le tabac à fumer (et jadis à priser et à chiquer) provient de nos jours presque exclusivement de deux espèces, *N. tabacum* et *N. rustica.* Le premier doit sans doute être considéré comme un ensemble d'hybrides fixés entre *N. tomentosiformis* ou *tomentosa* et *N. sylvestris,* originaires d'Amérique du Sud. *N. tabacum,* bien qu'il puisse atteindre 2 à 3 m, est une plante herbacée annuelle. Ses feuilles délicates sont grandes, ovales ou lancéolées, sessiles et à fortes nervures. Les feuilles inférieures sont auriculées ou embrassantes. Les fleurs sont rouges, à corolle longuement tubuleuse, épanouie en cinq lobes au sommet et réunies en cymes. Les fruits sont des capsules à deux valves, à graines très nombreuses et très petites. Le tabac contient principalement un alcaloïde à deux cycles azotés, la nicotine, qui a une influence d'abord excitante, puis déprimante sur le système nerveux. Par curarisation, elle

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Parterre de* Petunia hybrida *du cultivar Satellite.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

I.G.D.A. - Archives P2

C. Bevilacqua

▼ *A gauche, les pétunias hybrides cultivés dérivent généralement de* Petunia integrifolia (= P. violacea) *et de* P. axillaris.
Au milieu, champ de Nicotiana tabacum *dont les grandes feuilles ovales servent après séchage à la fabrication du tabac.*
A droite, Atropa belladonna, *une Solanacée vivace et toxique.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *La fleur des calcéolaires, très curieuse, forme deux lèvres; celle qui est inférieure est très renflée.*

entraîne aussi une paralysie respiratoire et l'injection de 0,06 g de nicotine ou l'absorption de 20 g de feuilles de tabac sont mortelles pour l'homme; pourtant les Ruminants broutent les jeunes tabacs apparemment sans inconvénient. A doses modérées, le tabac ne semble pas avoir de graves inconvénients directs. Les grands fumeurs sont toutefois atteints de « tabagisme » avec toux, gingivite, douleurs gastriques, palpitations, insomnie, etc. Mais le grand danger provient du risque accru de cancer des bronches, dû aux produits cancérigènes formés lors de la combustion. Les plus importants producteurs mondiaux de tabac sont les États-Unis, suivis par la Chine, le Brésil, le Japon, la Rhodésie, la Turquie, la Bulgarie et le Pakistan.

Les *Petunia,* au nombre de quatorze, sont américains et atteignent au nord la Floride et l'Arizona. De nombreuses formes sont cultivées : ce sont des hybrides entre *P. integrifolia (P. violacea)* et *P. axillaris (P. nyctaginoflora),* nommés *P.* × *hybrida.* Il s'agit d'herbes annuelles, finement pubescentes-glanduleuses à feuilles largement ovales-aiguës et à fleurs solitaires à grande corolle infundibuliforme délicate, ressemblant à celle d'un liseron. Les couleurs sont variées (blanc, rouge, violet) ou diversement panachées. Certaines formes ont des fleurs doubles.

Les Salpiglossidées groupent les Solanacées à deux ou quatre étamines et souvent à fleurs à zygomorphie oblique, dont certaines sont horticoles *(Browallia, Schizanthus),* et où l'on trouve *Duboisia myoporoides,* de la côte est de l'Australie, qui est une source de scopolamine.

Signalons enfin la tribu des Nicandrées dont l'ovaire comporte de trois à cinq carpelles et devient une baie entourée du calice à lobes accrescents. Il n'y a qu'une espèce, *Nicandra physaloides,* du Pérou, herbe annuelle parfois cultivée et naturalisée.

La grande famille des *Scrofulariacées (Scrophulariaceae)* comprend environ deux cents genres avec près de trois mille espèces, répandues partout. Ce sont surtout des plantes herbacées, annuelles ou vivaces, moins souvent suffrutescentes, et rarement arborescentes ou lianoïdes, parfois saprophytes, hémi-parasites ou parasites. Les feuilles, alternes ou opposées, sont caduques, non stipulées sauf chez *Hebe.* Il n'y a pas de liber interne. Les fleurs, groupées en épis, grappes, etc., rarement solitaires, sont hermaphrodites, plus ou moins zygomorphes, pentamères et gamopétales. Dans sa partie supérieure, la corolle forme souvent deux lèvres (fleurs personées) et son tube est dilaté localement en un éperon. Les étamines sont généralement au nombre de quatre (deux étant plus grandes), rarement de deux ou cinq. L'ovaire est supère, à deux carpelles médians et soudés, biloculaire, à style et stigmate simples. Il y a souvent de nombreux ovules unitegminés par loge, parfois peu ou un ou deux. Les fruits sont le plus fréquemment des capsules.

Les *Pseudosolanoïdées* sont encore assez primitives; elles ont une corolle rotacée, à tube très court, à peu près régulière, non éperonnée et ont souvent cinq étamines, de longueur inégale toutefois, les deux inférieures étant plus longues. Il peut aussi n'y avoir que quatre étamines, parfois avec un staminode. Elles comprennent les *Verbascum* (molènes) avec trois cent vingt espèces des endroits rocailleux et incultes d'Europe, de l'ouest de l'Asie et d'Afrique du Nord.

Le bouillon blanc *(V. thapsus)* est bisannuel, atteint 2 m, et présente de grandes feuilles largement lancéolées, tomenteuses, en rosette, pétiolées à la base, celles de la tige étant décurrentes; il possède une inflorescence spiciforme compacte de fleurs jaunes à cinq étamines dont les filets sont velus. C'est une plante répandue en Europe et dans l'ouest de l'Asie.

Les *Antirrhinoïdées* ont des fleurs à corolle plus ou moins zygomorphe, de forme variable, avec deux ou quatre étamines. Les pétales supérieurs recouvrent les latéraux dans le bouton. Le genre *Calceolaria,* qui comprend environ deux cents espèces américaines, présente des fleurs à lèvre inférieure en sabot, souvent jaunes, éventuellement tachetées ou veinées de blanc, de rose, de rouge ou de brun dans les variétés horticoles. Diverses espèces annuelles *(C. arachnoidea, C. purpurea, C. corymbosa, C. crenatiflora),* mais surtout leurs hybrides *(C.* × *herbeohybrida),* sont en effet très cultivées.

Le genre *Linaria* (linaires) comprend cent cinquante espèces de l'hémisphère Nord et surtout de la région

▼ *Chez les Scrofulariacées, les étamines inférieures sont plus longues : on peut l'observer sur cette fleur de* Verbascum blattaria, *à gauche. Au milieu, inflorescence de gueule-de-loup :* Antirrhinum majus. *A droite,* Cymbalaria muralis, *la cymbalaire, pousse dans les interstices des vieux murs.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

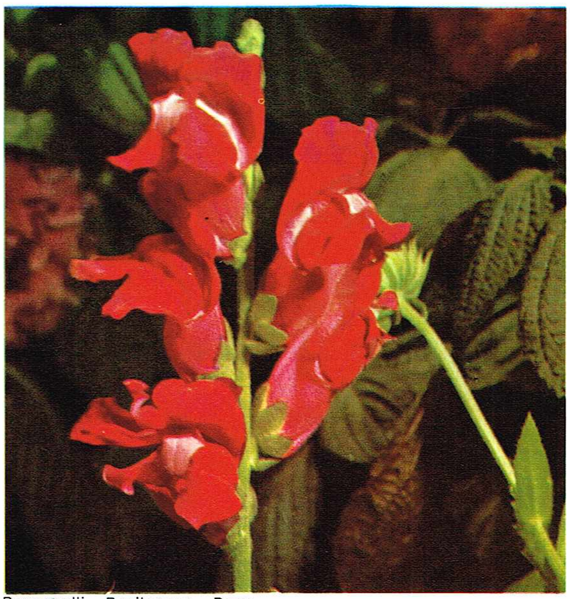

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

méditerranéenne. La corolle est personée et possède un éperon. *L. vulgaris* est une plante très commune dans les champs et les lieux pierreux d'Europe et d'Asie occidentale. Elle atteint 50 à 60 cm de haut. Ses feuilles sont lancéolées-aiguës et glauques. Ses fleurs forment des grappes apicales et sont jaune clair avec une gorge orangée à long éperon aigu. *L. alpina* se développe à l'étage alpin. Ses fleurs sont bleues ou violettes à gorge jaune-orangé ; il atteint à peine 10 cm.

La cymbalaire *(Cymbalaria muralis)* habite les vieux murs frais qu'elle habille de ses tiges rampantes radicantes à feuilles arrondies et lobées et de ses innombrables petites fleurs violet pâle à éperon court, solitaires aux aisselles des feuilles. Elle est vivace et sa capsule s'ouvre par deux pores tridentés. Elle est originaire du sud des Alpes, de l'Italie et de l'ouest de la Yougoslavie, mais elle a été répandue par la culture dans toute l'Europe, en Amérique du Nord, en Afrique du Nord et en Asie occidentale, et s'est naturalisée. Elle est du reste négligée maintenant en horticulture.

Le genre *Antirrhinum* comprend les gueules-de-loup, à corolles personées, mais seulement bossues à la base, et non éperonnées. Les deux loges de la capsule sont inégales, et celle-ci s'ouvre par trois pores terminaux. *A. majus* est la gueule-de-loup ordinaire, à grandes fleurs roses ou pourpres, parfois jaunes ou blanches. Elle provient du sud-ouest de l'Europe et est très cultivée dans les jardins. Elle affectionne les lieux secs et pierreux, en particulier les murs. Il y a une quarantaine d'*Antirrhinum,* tous dans l'hémisphère Nord.

Les *Scrophularia,* au nombre de cent cinquante, ont des feuilles opposées et de petites corolles urcéolées de couleur violette ou presque brune. Il y a quatre étamines, mais une cinquième est présente sous la forme d'un staminode en écuelle nectarifère. *S. vernalis* est une espèce des lieux frais et ombragés du sud de l'Europe (dont toute la France), en montagne surtout ; *S. nodosa* croît en Europe et dans le nord de l'Asie, dans les haies et les bois frais, et tire son nom de sa souche volumineuse et noueuse. *S. aquatica* vit dans les endroits humides et les fossés de l'Europe de l'Ouest et de la région méditerranéenne. On trouve environ cent trente-cinq scrofulaires en Eurasie tempérée et une douzaine en Amérique du Nord.

Les *Rhinanthoïdées* ont les deux pétales supérieurs recouverts sur un ou les deux côtés par des pétales latéraux.

Les véroniques ou *Veronica* constituent un grand genre de cent cinquante espèces. Leurs corolles sont rotacées, à tube très court et quatre lobes, dont le supérieur est bivalent. Le calice est à quatre sépales ou bien le cinquième est encore présent mais réduit. Il y a quatre étamines. Les fruits sont des capsules cordiformes souvent aplaties. Ces plantes sont communes dans les zones tempérées de l'hémisphère Nord, dans les montagnes tropicales, en Australie et en Nouvelle-Zélande. *V. persica* est devenu cosmopolite. Il provient sans doute d'Asie occidentale. C'est l'une des premières herbes à fleurir au printemps dans les prés, avec ses petites fleurs bleues, solitaires-axillaires, longuement pédonculées, à corolle rapidement caduque. Le thé d'Europe *(V. officinalis)* est une espèce plutôt acidiphile commune dans les forêts ; c'est une plante de 20 cm environ, pérennante, ligneuse, à tige rampante et ascendante, à fleurs en grappes axillaires. Elle se rencontre non seulement en Europe et en Sibérie, mais en Amérique du Nord. La véronique petit-chêne *(V. chamaedrys)* a deux lignes longitudinales de poils sur ses entre-nœuds ; ses fleurs sont assez grandes, bleues, et forment des grappes axillaires. Elle est commune dans toute l'Eurasie tempérée. Le cresson de cheval *(V. beccabunga),* herbe des lieux inondés, est charnu, glabre, vert clair, à petites fleurs bleues en grappes axillaires. Il croît en Europe, en Asie tempérée et en Afrique du Nord. La véronique des Alpes *(V. alpina)* habite les zones arctiques (en Europe, Groenland) et les montagnes d'Eurasie. C'est une petite plante vivace gazonnante à fleurs bleuâtres en tête terminale. *V. spicata,* à feuilles opposées, forme de longues grappes spiciformes compactes. Le tube de la corolle est assez long, la capsule renflée. Il est commun en Eurasie tempérée. Enfin, *V. longifolia,* d'Europe et d'Asie tempérée, est voisin des précédents, mais a des feuilles verticillées par trois ou quatre ; il atteint 1,20 m et est souvent cultivé.

Les *Hebe* sont cent quarante espèces d'arbustes et d'arbres voisins des véroniques et propres à l'Australie et à la Nouvelle-Zélande. Les fleurs sont en grappes axillaires, et la capsule, au lieu d'être aplatie perpendiculairement au septum comme chez les véroniques, l'est parallèlement. Plusieurs sont cultivés comme plante d'appartement, en particulier *H. speciosa,* dont divers cultivars sont sans doute hybrides. Les *Hebe* ne sont pas rustiques dans la plus grande partie de la France.

Les digitales ou *Digitalis* ont des fleurs à corolle tubuleuse, gonflées et campanulées, à cinq sépales et pétales et quatre étamines. Il y en a une vingtaine d'espèces : le gant de Notre-Dame *(D. purpurea),* bisannuel ou pluriannuel, est la plus commune dans nos régions. Il atteint 1 m. Son inflorescence est une grappe terminale dressée de fleurs pendantes, roses, tachées à l'intérieur. Il habite l'Europe centro-orientale et l'ouest de l'Asie. Il est souvent cultivé pour l'ornement, mais est spécialement important en médecine, car il est riche en hétérosides cardiotoniques à aglycone stéroïdique. Le plus important en est le digitoxoside, qui est le constituant essentiel de la digitaline extraite de la plante. A dose convenable, ces substances ralentissent, régularisent et tonifient le cœur. Toutefois la digitale est très toxique, car ses principes actifs (à la diférence de l'ouabaïne) le sont *per os :* 10 g de feuilles sèches sont mortels pour l'homme.

D. lanata, d'Europe sud-orientale, est aussi riche en hétérosides, mais les plus abondants ne sont pas les mêmes et la plante sert notamment à l'extraction du lanatoside C, du digoxoside et de l'acétyl-digitoxine, qui

M. et S. Prato

▲ ***Les inflorescences de*** **Veronica spicata** ***sont de longues grappes spiciformes compactes.***

▼ ***A gauche,*** **Digitalis purpurea,** ***le gant de Notre-Dame ; l'inflorescence est une grappe terminale dressée. Chez*** **Pinguicula vulgaris,** ***la grassette, la rosette des feuilles est visqueuse et permet la capture de petits insectes qui sont ensuite digérés par des enzymes (au milieu). Fleur de véronique petit-chêne,*** **Veronica chamaedrys,** ***à droite.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

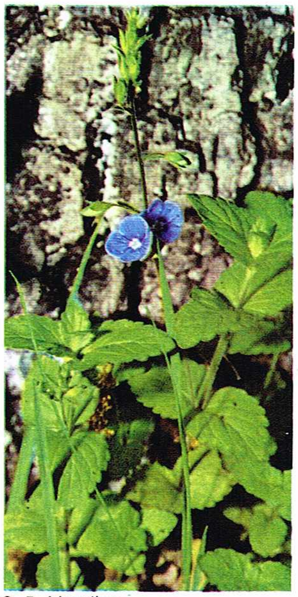

G. P. Mondino

ont les mêmes usages que la digitaline, mais sont plus rapides, le lanatoside C ayant de plus des indications spéciales dans certaines accélérations du rythme cardiaque.

Chez les Rhinanthées, le tube de la corolle est développé, il y a deux lèvres et la supérieure forme un casque qui recouvre en général les étamines. Ce sont très souvent des plantes hémi-parasites ou même parasites qui, la plupart du temps, noircissent en se desséchant.

Le genre *Melampyrum* comprend vingt-cinq espèces hémiparasites. Le blé de vache *(M. arvense)*, espèce d'Europe (sauf dans la région méditerranéenne) et d'Asie occidentale, affectionne les endroits calcaires secs. C'est une herbe annuelle à feuilles sessiles, lancéolées-aiguës, les supérieures étant laciniées, et à fleurs bilabiées, comprimées latéralement, jaunes ou pourpres à gorge jaune, abritées par des bractées souvent rouges. Il y a seulement une à quatre graines par capsule.

Les euphraises *(Euphrasia)* comptent de quatre-vingts à deux cents espèces d'herbes annuelles de petite taille. *E. officinalis (E. rostkoviana)* est une plante européenne. Il atteint 35 cm, est glanduleux et ses fleurs à corolle bilabiée sont en grappes terminales et latérales; les capsules ressemblent à celles des véroniques. Les *Odontites* sont voisins, mais à l'inverse de celle des euphraises, leur corolle a une lèvre supérieure plus longue

▼ *A gauche, fleurs de bignonia* (**Campsis × tagliabuana**). *A droite, chez* **Rhinanthus minor**, *la crête-de-coq, la lèvre supérieure de la corolle forme un casque, et le calice bien développé est comprimé latéralement.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

que l'inférieure; les étamines sont pourtant exsertes. Il y a une vingtaine d'espèces, surtout en région méditerranéenne.

Le genre *Rhinanthus* renferme une vingtaine d'espèces de plantes annuelles dont le calice gamosépale à quatre dents est comprimé latéralement, membraneux et veiné, et accrescent autour du fruit. *R. minor* ou crête-de-coq a un calice glabre et la lèvre supérieure de la corolle a des dents peu marquées. Il habite l'Europe tempérée, l'Asie occidentale et l'ouest de l'Amérique du Nord. Comme beaucoup de *Rhinanthus* et les *Melampyrum*, il montre plusieurs formes en rapport avec le milieu et la saison.

Les pédiculaires *(Pedicularis)* sont au nombre de six cents, toutes (sauf une andine) dans l'hémisphère Nord. Il s'agit de plantes vivaces à feuilles lancéolées très profondément divisées de façon pennée, et à fleur en épi dont le plan de symétrie est oblique. Elles habitent surtout les montagnes et particulièrement les terrains humides.

Les Rhinanthées citées jusqu'à maintenant sont chlorophylliennes et seulement hémi-parasites. Chez la clandestine *(Lathraea clandestina)* et dans tout ce genre eurasiatique de cinq espèces, il n'y a plus de chlorophylle et le parasitisme est total. La plante est constituée par de fortes tiges souterraines formant un rhizome écailleux, qui s'attache à l'aide de suçoirs aux racines de divers arbres. Ses inflorescences seules sortent de terre; ce sont des corymbes de grandes fleurs à corolle bilabiée pourpre-violet, situées à l'aisselle de grosses écailles bractéales, semblables à celles que porte l'inflorescence à la base. La plante occupe l'ouest et le sud de l'Europe. Les clandestines ont un ovaire uniloculaire avec deux placentas pariétaux et sont très proches des Orobanchacées, auxquelles on les a souvent rapportées.

▼ *Les étamines jaunes de* **Saintpaulia ionantha** *mettent une tache de couleur sur sa corolle violette.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Les *Lentibulariacées (Lentibulariaceae)* sont souvent des plantes carnivores. Elles comptent cinq genres et trois cents espèces à fleurs actinomorphes ou zygomorphes, à corolle généralement bilabiée et éperonnée. Seules les deux étamines inférieures sont fertiles. Elles sont réunies à la corolle par leur filet, et il peut y avoir deux staminodes. L'ovaire, à deux carpelles médians, est uniloculaire avec un placenta central libre, le plus souvent couvert de nombreux ovules. Le fruit est capsulaire à déhiscence souvent irrégulière. Ce sont des plantes de terrains humides ou aquatiques très spécialisées comme le montrent leurs adaptations nutritives et la réduction de l'androcée et des cloisons ovariennes.

Les grassettes *(Pinguicula)*, au nombre de trente-cinq, possèdent des feuilles toutes en rosette, visqueuses supérieurement et permettant la capture de petits Insectes; ceux-ci sont ensuite digérés par des enzymes protéolytiques que sécrètent ces mêmes feuilles, dont les bords sont de plus involutés, c'est-à-dire enroulés en dessus. Les fleurs, à corolle bilabiée, sont solitaires au sommet des longs pédoncules axillaires des feuilles de la rosette. *P. vulgaris* et *P. alpina* ont respectivement des fleurs violettes et blanches à taches jaunes sur la lèvre inférieure.

Les utriculaires *(Utricularia)* sont aquatiques, terrestres ou épiphytes et n'ont pas de racines. Il y en a deux cent cinquante dans les régions tropicales et tempérées. *U. vulgaris* est en grande partie subaquatique; il possède des feuilles immergées très divisées en lanières filiformes, certains segments étant transformés en ascidies. Les fleurs sont des grappes s'élevant de 15 à 30 cm au-dessus de l'eau. Elles ont un calice rouge-brun et une corolle jaune vif. Les ascidies des feuilles sont des vessies qui servent à capturer de petits Animaux planctoniques. Ceux-ci y sont attirés par le tourbillon de l'eau qui se précipite dans l'utricule lorsque, sous l'effet de l'excitation qu'ils opèrent, le couvercle de celui-ci s'ouvre et permet l'entrée de l'eau dans la cavité du piège, vide jusqu'alors. Les Animaux maintenus prisonniers grâce à un cercle de poils situé à l'intérieur sont digérés par les enzymes que sécrètent des glandes à quatre cellules rayonnantes portées par l'épiderme interne.

Les *Orobanchacées (Orobanchaceae)* comptent cent cinquante espèces et treize genres de plantes herbacées parasites, sans chlorophylle, quelque peu succulentes, à feuilles transformées en écailles. La racine est réduite à une sorte de bulbe pourvu de suçoirs grâce auxquels les orobanches se fixent sur la plante hôte. Leur tige, très souvent glanduleuse, ramifiée ou non, porte au sommet un épi de fleurs à corolle tubuleuse, courbée et bilabiée. Il y a quatre étamines et éventuellement une cinquième, la supérieure étant alors staminodiale. Deux carpelles médians forment un ovaire uniloculaire; de plus, chaque placenta a ses constituants (marges des carpelles voisins) séparés, si bien qu'on voit quatre placentas bien qu'il n'y ait que deux carpelles. Cet ovaire devient une capsule loculicide à nombreuses graines qui ne peuvent germer qu'en présence d'un hôte. Les *Orobanche* comptent cent espèces des zones tempérées et subtropicales surtout. Certains sont ramifiés. Ils parasitent plus ou moins spécifiquement une espèce (*O. lucorum* sur l'épine-vinette), un genre (*O. hederae* sur les lierres, *O. teucrii* sur les *Teucrium)*, une famille (*O. caryophyllacea* sur des Rubiacées), ou sont moins exigeants (*O. amethystea* sur *Daucus, Eryngium, Ballota* et des Composées, donc trois familles). Les fondements chimiques de ces spécificités restent à découvrir. Les deux espèces de *Phelypaea*, de Macédoine et d'Asie Mineure, ont des fleurs terminales solitaires.

Les *Gesnériacées (Gesneriaceae)* comptent mille huit cents espèces et cent quarante genres d'herbes, d'arbustes et souvent d'épiphytes des pays chauds. Les fleurs sont zygomorphes et souvent à corolle bilabiée. Les deux ou quatre (parfois cinq) étamines ont des anthères unies post-génitalement. Il y a des appendices nectarifères autour de l'ovaire bicarpellé, uniloculaire dans sa partie supérieure. Le fruit est une capsule ou une baie.

G. P. Mondino

C. Bevilacqua

▲ *Les orobanches, plantes herbacées parasites, sont dépourvues de chlorophylle ; ici* Orobanche teucrii, *à gauche.* Catalpa bignonioides *est un bel arbre cultivé à des fins ornementales, à droite.*

Sinningia speciosa est une plante du Brésil connue en horticulture sous le nom de *Gloxinia* et très cultivée en appartement pour ses grandes fleurs à corolle infundibuliforme à lobes étalés, généralement à plus de cinq pétales. *Saintpaulia ionantha* (violette du Cap) est bien plus facile à cultiver ; il possède de petites fleurs à deux étamines qui rappellent celles de la violette par la forme et la couleur. Certaines formes sont roses. Les *Streptocarpus* sont curieux, car chez certains d'entre eux il n'y a qu'une seule grande feuille, qui est l'un des cotylédons. C'est le cas de *S. polyanthus,* du Cap, souvent cultivé. Il y a bien d'autres genres horticoles *(Gesnera, Naegelia, Columnea),* plantes de serre et d'appartement, qui demandent une terre acide, une atmosphère humide et chaude, et doivent être abrités des rayons du soleil. Le genre *Ramonda* n'est pas ornemental, mais ses trois espèces se trouvent en Europe, et *R. pyrenaica* en France (Pyrénées). Il est voisin des *Saintpaulia,* mais a cinq étamines.

Les *Bignoniacées (Bignoniaceae)* comprennent environ huit cents espèces et cent vingt genres essentiellement tropicaux et subtropicaux, nombreux en Amérique du Sud, la plupart ligneux, souvent lianoïdes, à feuilles opposées, découpées ou composées. Les fleurs, en inflorescences botrytiques, sont zygomorphes et possèdent cinq étamines, la supérieure étant très généralement staminodiale. L'ovaire entouré d'un disque est supère, bicarpellé et biloculaire, mais les quatre placentas pluriovulés sont séparés et portés par la cloison (*Crescentia* a un ovaire uniloculaire à placentation semblable à celle des Orobanchacées). Cette disposition ressemble curieusement à celle des Crucifères, d'autant plus que la déhiscence peut se faire là aussi en respectant un replum. Les fruits sont généralement des capsules, ou parfois sont charnus. Ces plantes ont souvent divers appareils d'accrochage et des formations secondaires anormales. Il n'y a pas de liber interne.

Catalpa bignonioides est un arbre d'une quinzaine de mètres à feuilles simples, ovales, brusquement acuminées et atteignant 20 cm. Ses fleurs n'ont que deux étamines et produisent des grains de pollen en tétrades. Elles sont blanches et larges de 4 à 5 cm. Les capsules sont très longues et étroites, à déhiscence loculicide avec rupture de la cloison ovulifère. C'est une plante du sud-est des États-Unis, souvent cultivée. *C. speciosa,* du centre-est des États-Unis, a des feuilles longuement acuminées de 30 cm de long et des fleurs de 6 cm. Il est moins souvent cultivé. Il y a treize catalpas, surtout asiatiques.

On cultive beaucoup *Campsis radicans* (« bignonia »), qui s'attache aux supports par ses racines adventives, et dont les feuilles sont composées et les fleurs rouge brique à long tube corollin. C'est une plante du sud-est des États-Unis. *C. grandiflora,* à très grandes fleurs écarlates dont le tube de la corolle ne dépasse guère le calice, provient de Chine et est rare en culture. L'hybride des deux *(C. × tagliabuana)* se voit fréquemment. Parmi les Bignoniacées herbacées, on doit citer les *Incarvillea,* d'Asie centrale et orientale, dont plusieurs sont horticoles. Le genre *Paulownia* comprend cinq espèces en Asie orientale. *P. tomentosa,* du Japon, est très cultivé. C'est un arbre à grandes fleurs violet clair. On l'a souvent placé parmi les Scrofulariacées.

La famille des *Pédaliacées (Pedaliaceae)* ne compte que cinquante-cinq espèces en seize genres, mais est intéressante car elle renferme le sésame *(Sesamum indicum),* plante oléagineuse largement cultivée dans les régions tropicales, surtout en Inde, et qui l'est aussi quelque peu dans le sud de l'Europe. C'est une plante annuelle atteignant 1 m. Ses feuilles sont simples, les inférieures lobées. Ses fleurs, solitaires, axillaires, ont une corolle bilabiée blanche ou violacée et quatre étamines. L'ovaire est bicarpellé, mais il se forme des fausses cloisons qui le divisent en quatre loges et le fruit est une

▼ *Rameau de* Paulownia tomentosa *portant des fruits (capsules piriformes).*

R. Longo

C. Bevilacqua

▲ ***Les nervures soulignées de jaune des feuilles d'*****Aphelandra squarrosa** ***lui confèrent un caractère ornemental certain.***

capsule à nombreuses petites graines ovoïdes et aplaties, blanches, noires ou brunes, qui contiennent de 40 à 50 % d'une huile comestible et d'intérêt pharmaceutique. Les tourteaux obtenus après la presse servent à l'alimentation du bétail. Les Pédaliacées se distinguent des Scrofulariacées par leur ovaire et leur fruit ainsi que par les poils glanduleux dont elles sont pourvues.

Les *Acanthacées (Acanthaceae)* comprennent deux mille six cents espèces divisées en deux cent cinquante genres. Ce sont surtout des herbes ou des arbustes tropicaux à feuilles souvent opposées. Les fleurs ont fréquemment de grandes bractées panachées et sont réunies en inflorescences botrytiques. La corolle est bilabiée, il y a deux ou quatre étamines avec parfois des staminodes. Les deux moitiés des anthères sont souvent dissociées par un large connectif. L'ovaire biloculaire bicarpellé est entouré d'un disque et compte quatre ou plusieurs ovules en un ou deux rangs par carpelle, en placentation axile. Le fruit est une capsule; les graines sont entourées d'une excroissance funiculaire (jaculateur) qui détermine leur « catapultage ».

Le genre *Acanthus* compte trente espèces des steppes et déserts de l'Ancien Monde. *A. mollis* est commun dans le bassin méditerranéen. Il est souvent cultivé. Il atteint 1 m et occupe les lieux ombreux. Ses grandes feuilles pennatipartites en rosette ont des lobes glabres et aigus. Les fleurs, en forts épis apicaux, sont blanchâtres et veinées de pourpre. *A. spinosus*, du sud de l'Europe, plus grand, à feuilles et bractées épineuses, calice violacé et corolle blanchâtre, est plus souvent cultivé. Diverses Acanthacées sont des plantes de serre. La plus commune est sans doute *Aphelandra squarrosa*, à feuilles ovoïdes opposées vert foncé et veinées de blanc ivoire, malheureusement malaisé à conserver en appartement.

La famille des *Verbénacées (Verbenaceae)*, qui a la plus grande partie de ses représentants sous les tropiques, comprend une centaine de genres et deux mille six cents espèces herbacées, ligneuses, ou lianoïdes, à feuilles opposées ou verticillées. Les fleurs, en inflorescences cymeuses ou botrytiques, sont hermaphrodites, zygomorphes, à corolle tubuleuse, en général bilabiée, ou actinomorphe, à quatre ou cinq lobes et quatre étamines en général, avec un staminode, ou plusieurs s'il y a moins de quatre étamines. L'ovaire est supère, bicarpellé le plus souvent, bi- ou uniloculaire, fréquemment divisé par des fausses cloisons. Il y a deux ovules anatropes dressés (micropyle en bas) par carpelle. Le fruit peut être capsulaire, mais en général il se sépare en deux ou quatre méricarpes, ou bien il se forme une drupe à deux ou quatre noyaux.

La verveine *(Verbena officinalis)* est une herbe vivace des lieux incultes, à feuilles pennatifides, sessiles en haut et opposées. Les minuscules fleurs violet clair à corolle à tube étalé en cinq lobes constituent des panicules d'épis. Il se forme quatre méricarpes par fruit. La plante est originaire d'Europe, d'Asie occidentale et d'Afrique du Nord, mais naturalisée partout. Il y a près de deux cent cinquante *Verbena*. Certains sont cultivés dans les jardins, en particulier *V. hybrida*, qui provient sans doute d'hybridation artificielle entre trois espèces d'Amérique centro-méridionale. Il s'agit d'une plante herbacée, annuelle, buissonnante, à feuilles opposées, vert clair, rugueuses, ovales et sessiles, fortement dentées; ses inflorescences ombelliformes ont des fleurs régulières à pétales émarginés, rouges ou violettes en général, à gorge blanche. *Lantana camara*, du Brésil, est aussi souvent cultivé. Il y a plus de cent cinquante *Lantana*, surtout dans les zones chaudes d'Amérique.

Parmi les deux cents *Lippia* des régions tropicales, surtout américaines, *L. triphylla (L. citriodora)*, arbrisseau d'Amérique du Sud, a des feuilles verticillées par trois, qui renferment une essence riche en citral qui leur confère une odeur de citron au froissage et les fait utiliser en tisane. La plante est cultivée dans la région méditerranéenne : c'est la « verveine odorante ».

Les espèces toujours vertes du genre *Avicennia* font partie des mangroves. Il en existe onze. Les inflorescences sont cymeuses et le fruit s'ouvre par deux valves. Il y a des pneumatophores qui sont dans ce cas des excroissances racinaires. La viviparie se retrouve ici comme chez les palétuviers. La radicule longue et velue que développe l'embryon dans la graine encore en place lui permet une installation plus facile lorsque celle-ci tombe dans la vase. *A. marina* se rencontre en Afrique orientale, en Indo-Malaisie et en Polynésie; *A. germinans* et *A. schaueriana* sur la côte est de l'Amérique, du sud des États-Unis à l'Uruguay.

Le teck *(Tectona grandis)* est un arbre d'Indo-Malaisie, cultivé sous les tropiques. Il atteint 40 à 60 m, avec une silhouette globuleuse. Ses feuilles sont grandes, ovales-

▼ ***Deux représentants de la famille des Verbénacées : à gauche,*** **Verbena officinalis**, ***la verveine, herbe vivace des lieux incultes; au milieu,*** **Verbena hybrida**, ***cultivé dans les jardins; à droite,*** **Acanthus mollis**; ***on peut observer les fleurs à corolle bilabiée.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

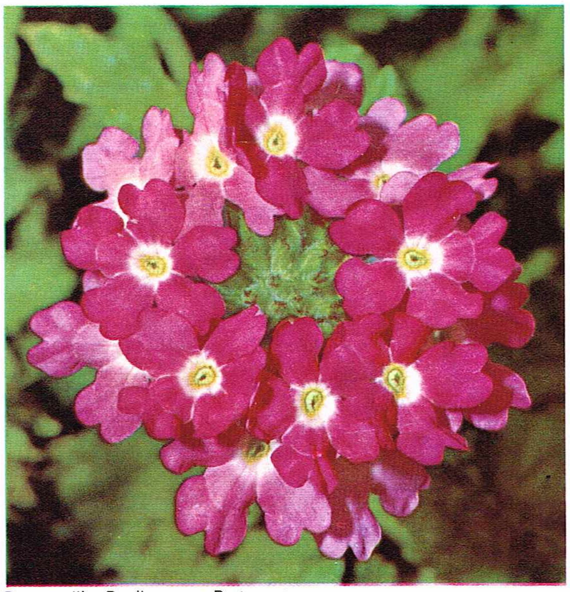

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

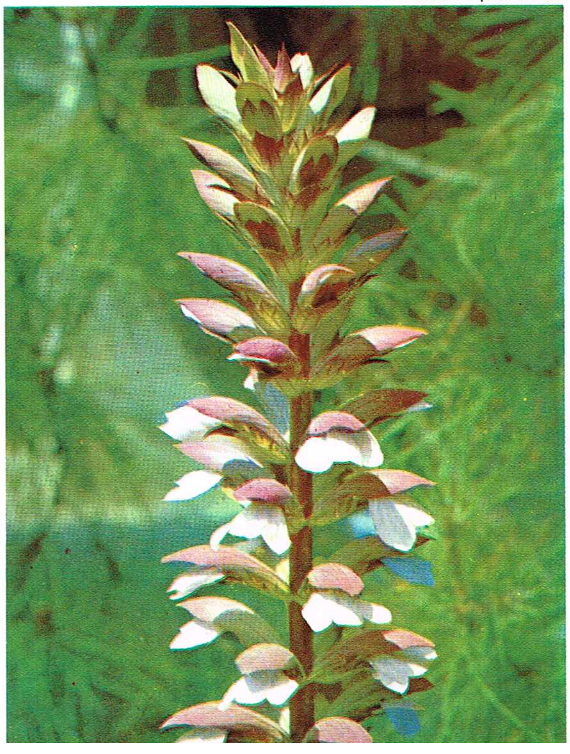

aiguës, normalement caduques dans les pays d'origine. Le bois de teck est dur, car il contient de la silice, et très apprécié pour les constructions navales, et de plus en plus en ébénisterie. Il est lourd et de couleur brun ochracé. Il n'y a que quatre *Tectona*.

Les *Vitex* (plus de deux cent cinquante) sont tropicaux, mais *V. agnus-castus* ou gattilier atteint la région méditerranéenne et l'Asie centrale. C'est un arbuste qui se rencontre en France. Ses feuilles sont composées-palmées et ont de cinq à sept folioles. Les fleurs, à corolle bilabiée, sont en épis de « verticillastres » cymeux. Le fruit est une drupe poivrée (« poivre sauvage »). Quant à son nom spécifique d'*agnus-castus* (« agneau chaste »), il lui vient d'un nom vernaculaire issu d'une vieille réputation d'anaphrodisiaque. Il est parfois cultivé pour l'ornement.

La famille des *Labiées* ou *Lamiacées (Labiatae, Lamiaceae)* est voisine des Verbénacées, et compte deux cents genres et trois mille deux cents espèces. On la rencontre dans le monde entier, mais surtout dans les régions tempérées et en particulier méditerranéennes. Ce sont des plantes herbacées et suffrutescentes, rarement des arbres *(Hyptis)*. Leurs feuilles sont presque toujours opposées, parfois verticillées, et leur tige annuelle est tétragone. Les fleurs sont en inflorescences cymeuses, affectant souvent l'aspect de verticilles axillaires (« verticillastres »), groupées en épis (« spicastres »). Elles sont pentamères quant au périanthe et, sauf exception, zygomorphes. Le calice gamosépale peut être bilabié; la corolle, en tube à la base, l'est très généralement avec deux pétales formant la lèvre supérieure, les trois autres formant la lèvre inférieure. Il peut y avoir une seule lèvre, inférieure, formée des parties libres des cinq pétales.

Chez les menthes, lavandes et lycopes, la corolle est presque actinomorphe, par union de deux lobes, comme chez les véroniques. Les étamines sont au nombre de quatre (dont deux sont habituellement plus longues : étamines didynames) ou de deux. Le gynécée, entouré d'un disque, est bicarpellé, biloculaire, avec par carpelle deux ovules anatropes dressés, donc à micropyle en bas. Il y a des fausses cloisons médianes, souvent de simples replis internes de la paroi carpellaire qui isolent les quatre ovules, tandis que la paroi ovarienne se moule en général supérieurement sur eux. Le style se trouve alors enfoncé entre eux : il est gynobasique. Le fruit est un schizocarpe qui forme quatre méricarpes uniséminés, ou nucules. Les Labiées sont des plantes aromatiques, car elles sont pourvues de poils glanduleux capités à tête uni- ou pluricellaire, qui sécrètent diverses essences.

Dans la sous-famille des *Ajugoïdées*, l'ovaire a un style à peu près normalement placé, non gynobasique. Il y a quatre étamines normales.

Les *Ajuga*, au nombre de quarante-cinq, sont cosmopolites. La bugle rampante *(A. reptans)* est une espèce des prés et des bois à floraison printanière. C'est une herbe vivace de 10 à 40 cm qui forme des stolons. Sa tige a deux faces velues sur quatre. Ses feuilles, sessiles, sont largement ovales, les supérieures plus ou moins violacées. Elle a des spicastres de fleurs bleues. La lèvre supérieure de la corolle est très réduite. La corolle est à une lèvre par avortement. Il y a quatre étamines. La plante occupe l'Europe et l'ouest de l'Asie. *A. chamaepitys*, du sud de l'Europe (jusqu'en Belgique), a des fleurs jaunes et des feuilles linéaires ou divisées en segments linéaires.

Chez les *Teucrium*, au nombre de cent, dont une quinzaine en France, les cinq lobes de la corolle sont unis en une lèvre inférieure unique, qui n'a donc pas la même valeur que celle des *Ajuga*.

Chez les *Rosmarinoïdées*, le style est toujours apical, mais il n'y a que deux étamines, à deux sacs polliniques seulement. Dans cette sous-famille on trouve le romarin *(Rosmarinus officinalis)*. C'est un arbrisseau de la région méditerranéenne. Il habite les garrigues, les maquis bas et les sous-bois des pinèdes, surtout sur sol calcaire. C'est un buisson atteignant 1,50 m à rameaux dressés, toujours vert. Ses feuilles sont lancéolées, vertes et chagrinées au-dessus, à bords révolutés, tomenteuses en dessous. Les fleurs, bleu pâle, paraissent toute l'année au sommet des rameaux. Le romarin se cultive très bien jusque dans le centre de la France, où il est rustique. Son essence est officinale et ses feuilles servent d'épice.

Chez les *Ocimoïdées*, le style est encore apical et la corolle a une lèvre supérieure de quatre lobes, tandis qu'un seul forme la lèvre inférieure, contre laquelle les étamines sont appliquées. Les *Ocimum* comptent soixante plantes tropicales. *O. basilicum* est le basilic, cultivé pour son utilisation comme épice et en parfumerie. Le genre *Coleus* regroupe deux cents espèces tropicales. Les filets staminaux y sont soudés à la base en un tube. *C. blumei* est très cultivé en serre et en appartement pour ses feuilles diversement zonées de rose, de jaune, de brun ou de violet, alors que les fleurs sont insignifiantes et sont éliminées par les horticulteurs.

Dans les sous-familles qui vont suivre, le style est gynobasique.

Chez les *Lavanduloïdées*, les étamines sont incluses dans le tube de la corolle et le disque forme des lobes situés en face de chaque méricarpe. Le genre *Lavandula*,

M. Bavestrelli

▲ ***Des sommités fleuries de la lavande* (Lavandula sp.) *est extraite l'essence utilisée en parfumerie.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

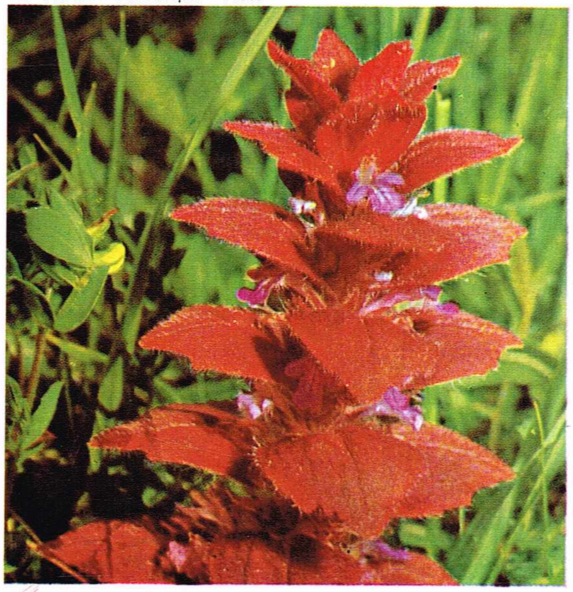

◀ ***Chez* Ajuga pyramidalis, *les bractées foliacées rougeâtres sont plus développées que les fleurs roses qu'elles abritent.***

▼ ***Inflorescence de basilic,* Ocimum basilicum, *plante aromatique cultivée.***

I.G.D.A. - Archives P2

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

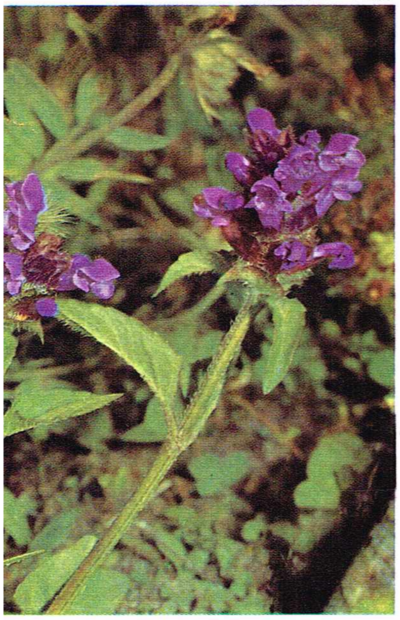

▲ *La brunelle* (**Prunella vulgaris**) *est une petite Labiée aux fleurs violacées.*

▼ *Inflorescence de bétoine* (**Stachys officinalis = Betonica officinalis**).

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

avec vingt-six espèces, est le seul de la sous-famille. On le trouve dans les endroits secs et ensoleillés de la région méditerranéenne, de l'Asie occidentale et des îles Canaries. *L. latifolia* est l'aspic. C'est un arbrisseau atteignant 1 m, tomenteux, à feuilles simples entières et lancéolées-subspatulées. Les fleurs, violettes, sont subsessiles en spicastres à l'aisselle de bractées étroites. Il se trouve dans la région méditerranéenne et au Portugal, jusqu'à 1 000 m. *L. angustifolia* est la lavande vraie, à feuilles peu velues et à larges bractées. Celle-ci croît dans les mêmes régions et atteint 1 800 m d'altitude. Ses sommités fleuries servent à l'extraction de l'essence, très utilisée en parfumerie. Elle est aussi cultivée pour l'ornement. *L. stoechas,* des zones siliceuses de la région méditerranéenne, est remarquable par l'existence d'une touffe de grandes bractées pétaloïdes violacées au sommet des spicastres.

Chez les *Stachyoïdées,* les étamines dépassent le tube et sont en général appliquées sous la lèvre supérieure de la corolle. Le lierre terrestre *(Glechoma hederacea)* fleurit au printemps, dans les haies et les bois et le long des fossés. Il possède des tiges rampantes sur lesquelles se développent des rameaux florifères dressés de 5 à 30 cm, à feuilles suborbiculaires crénelées et à fleurs lilas isolées ou géminées à l'aisselle des feuilles. Il y a une douzaine de *Glechoma,* eurasiatiques comme celui-ci. Avec l'espèce précédente, on rencontre fréquemment la brunelle *(Prunella vulgaris),* basse, à petites fleurs groupées en spicastres compacts de fleurs bleu violacé à larges bractées rougeâtres. Il existe cinq *Prunella (Brunella)* en Eurasie tempérée et en Afrique du Nord.

La mélitte *(Melittis melissophyllum)* a de grandes feuilles velues, vert clair, ovales, aiguës, à pétiole court et étroit, à l'aisselle desquelles apparaissent quelques grandes fleurs étalées ou pendantes, blanches ou roses, à taches violacées sur la lèvre inférieure. Elle occupe les sous-bois assez éclairés de l'Europe et c'est la seule espèce du genre. Les *Phlomis* comptent soixante-cinq espèces de la région méditerranéenne à la Chine. La lèvre supérieure forme un casque très bombé. Ce sont des plantes pérennantes, raides, à fleurs subsessiles en verticilles denses. On en trouve trois espèces en France.

Les genres *Galeopsis, Lamium, Leonurus* et *Ballota* appartiennent à la même tribu que les deux précédents et sont plus ou moins nitrophiles. On les trouve souvent dans les décombres, près des lieux de repos du bétail ou, pour les *Lamium,* sur l'humus des bois. *Galeopsis tetrahit* est une plante rameuse, hispide, à nœuds renflés et feuilles aiguës. Les fleurs ont des calices à dents longuement épineuses et des corolles blanc violacé à tube blanc. Chez les *Lamium,* au nombre de quarante en Europe, en Asie tempérée et en Afrique du Nord, les nucules sont tronquées au sommet. Le lamier pourpre ou ortie rouge *(L. purpureum)* et le lamier tacheté *(L. maculatum)* fleurissent au printemps. La première de ces deux espèces a des tiges courtes, à longs entre-nœuds inférieurs, tandis que les feuilles sont rapprochées vers le haut, en dessous de l'inflorescence compacte. La seconde, plus rare, est plus élevée; ses feuilles sont régulièrement espacées. Les fleurs des deux sont pourprées. Le lamier blanc ou ortie blanche *(L. album),* lui aussi printanier, est également élevé (50 cm) et a des fleurs blanches. Un lamier à fleurs jaunes a été placé dans le genre *Lamiastrum* : c'est *Lamiastrum galeobdolon* ou *Lamium galeobdolon.* Il croît dans les sous-bois d'Europe, sur les sols riches en humus. L'agripaume *(Leonurus cardiaca)* habite essentiellement les décombres; il possède des feuilles profondément trifides à lobes dentés et la lèvre supérieure de sa corolle est longuement velue. Il semble qu'il renferme des hétérosides comparables à ceux des digitales, ce qui justifierait son usage populaire contre les palpitations cardiaques. La ballote noire *(Ballota nigra = B. foetida)* est l'une des vingt-cinq espèces du genre. Elle est rudérale et se reconnaît à ses feuilles veinées et rugueuses, d'odeur désagréable. Le type d'Europe orientale *(subsp. nigra)* a de longues dents calicinales et ne se trouve probablement pas en France. La *subsp. foetida (B. alba),* à dents calicinales courtes et évasées et tube du calice plissé, est la plante commune dans nos régions.

Le genre *Stachys* (épiaires) renferme deux cents espèces, surtout des régions rempérées. *S. annua* et *S. arvensis* sont annuels, le premier à fleurs jaunes ou jaunâtres, le second à fleurs rosées. *S. sylvatica,* vivace, se trouve dans les haies et les bois d'Europe et de Sibérie occidentale. Ses fleurs sont pourpres et ses feuilles étroitement lancéolées; celles-ci sont largement ovales chez *S. palustris,* qui est voisin et habite l'Eurasie et l'Amérique du Nord. Dans les montagnes d'Europe, on trouve *S. alpina* à fleurs pourpre-brun. *S. lanata,* du Caucase, a des feuilles oblongues et épaisses, recouvertes d'un indument feutré, argenté, comme les bractées, parmi lesquelles se détachent les fleurs pourpres. Il est cultivé dans les jardins. *S. sieboldii,* du Japon, forme des tubercules comestibles (crosnes). La bétoine *(Stachys* ou *Betonica officinalis)* habite les bois clairs et les landes d'Europe occidentale et de la région méditerranéenne, de préférence sur sol acide. Ses feuilles sont régulièrement et profondément crénelées, les inférieures longuement pétiolées et groupées en rosette. Ses fleurs en spicastres denses et courts sont pourpres ou parfois blanches. La bétoine est polymorphe et on a pu la scinder en quatre espèces au moins.

Les Salviées n'ont que deux étamines fertiles sous une lèvre supérieure en casque; leur connectif est très allongé et porte seulement une demi-anthère fertile. Le genre *Salvia,* avec cinq cents espèces surtout tropicales et subtropicales, est le plus nombreux des Labiées. La sauge *(S. officinalis),* de la région méditerranéenne, était considérée jadis comme une panacée. Elle est maintenant surtout utilisée comme épice. C'est un sous-arbrisseau buissonnant, largement répandu dans les garrigues, à feuilles ovales, crénelées, grisâtres, veinées et réticulées en dessus, blanches et tomenteuses en dessous. Ses fleurs sont bleues, violacées, roses ou même blanches. Dans le centre de la France, on trouve *S. pratensis,* herbe vivace robuste à grandes feuilles inférieures à peine lobées et dont les fleurs bleues en grand spicastre ont toutes des bractées courtes, et *S. verbenaca,* à feuilles basales grossièrement lobées et à bractées inférieures dépassant les fleurs. Ces deux espèces, principalement méditerranéennes, ont des fleurs hermaphrodites et d'autres femelles, parfois aussi des fleurs cléistogames. Plusieurs sauges sont cultivées pour l'ornement, notamment *S. × superba,* hybride d'origine inconnue.

Dans la tribu des Saturéiées, la corolle à lobes plats est souvent presque actinomorphe; les quatre étamines sont égales ou didynames. Il y a cent trente *Satureja,* surtout méditerranéens, à corolle à deux lèvres. La sariette *(S. hortensis)* est une herbe aromatique annuelle à feuilles linéaires ou lancéolées et fleurs lilas, roses ou blanches, utilisée en cuisine et originaire de l'est de la région méditerranéenne et de l'Asie occidentale. La mélisse *(Melissa officinalis)* est aussi une herbe de l'est de la région méditerranéenne répandue par la culture. Ses tiges ne dépassent pas 90 cm et ses feuilles sont pétiolées, largement ovales et crénelées. Froissées, elles dégagent une forte odeur de citron, due à la présence de citral et de citronellal dans l'essence de cette plante, qui la fait utiliser comme stomachique, cholérétique et cicatrisant.

Les thyms *(Thymus)* sont vivaces et souvent pérennants et ligneux à la base. Le calice a deux lèvres, de même que la corolle. Les étamines sortent de celles-ci. Il y a une soixantaine d'espèces d'Eurasie et d'Afrique du Nord, difficiles à délimiter. *T. vulgaris* est un sous-arbrisseau grisâtre, haut de 10 à 35 cm, fortement aromatique, à feuilles petites, ovales-aiguës et révolutées au bord. Ses fleurs roses ou lilas sont réunies en spicastres denses avec un ou deux verticilles très séparés en bas. C'est une espèce thermoxérophile du sud de l'Europe qui atteint 1 200 m d'altitude et est fréquente dans le maquis. Le serpolet *(T. serpyllum)* se trouve dans les lieux secs et pierreux. Il s'agit en fait d'un groupe d'espèces. Le véritable *T. serpyllum* n'est présent que dans le nord-est de la France. A ce groupe appartiennent notamment les *T. praecox* et *T. polytrichus;* le premier est surtout une espèce de plaine (Europe centrale et orientale), le second se rencontre aux étages montagnard et alpin dans le centre et le sud de l'Europe.

Les origans *(Origanum)* sont au nombre de quarante. *O. vulgare* est répandu en Eurasie. Il atteint 50 cm et ses fleurs sont groupées en spicastres dont les bractées sont rouges (ou parfois vertes). La marjolaine *(O. majorana = Majorana hortensis)* lui ressemble et a des bractées vertes. Le calice est réduit à une seule lèvre à trois dents.

M. Bavestrelli

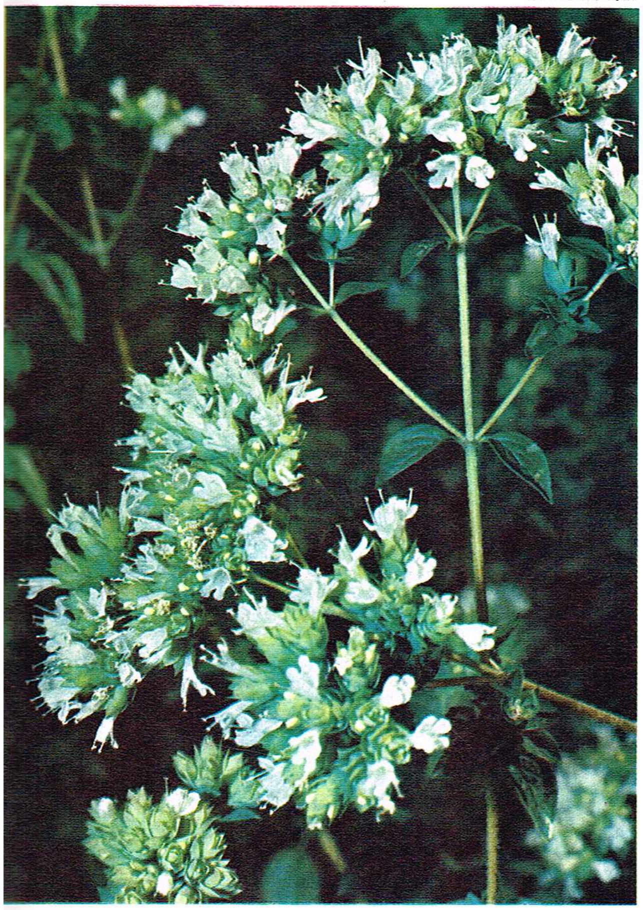

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

M. Bavestrelli

On place parfois cette espèce dans un genre spécial, mais en fait d'autres origans sont intermédiaires à ce point de vue entre les deux précédents, certains ayant deux lèvres. La marjolaine est originaire d'Afrique du Nord et d'Asie occidentale, mais a été naturalisée par la culture. Elle est utilisée comme épice et en parfumerie.

Avec les Menthinées, nous abordons des genres où la corolle est presque actinomorphe, mais celle-ci est très particulière, puisque l'un des quatre lobes est bivalent; il ne s'agit pas là d'un caractère primitif, plutôt d'un cas de surévolution, c'est-à-dire de retour seulement apparent à l'aspect primitif.

Le genre *Lycopus* comprend dix espèces de l'hémisphère Nord, dont deux en Europe. Le chanvre d'eau *(L. europaeus)*, seule espèce française, vit dans les lieux humides d'Eurasie. Il atteint 1 m, ses feuilles inférieures sont très profondément laciniées, les supérieures crénelées. Les verticilles de toutes petites fleurs blanches ponctuées de rouge sont groupés en verticillastres aux aisselles des feuilles supérieures, sans qu'il se forme de spicastre défini. Les fleurs n'ont que deux étamines, ce qui indique bien qu'elles sont évoluées et que leur actinomorphie est secondaire. Le *Lycopus* est polymorphe, parfois longuement velu.

Le genre *Mentha* comporte une quinzaine d'espèces de menthes de l'hémisphère Nord, de l'Australie et de la Nouvelle-Zélande. Chacune est polymorphe et les hybrides sont nombreux, quoiqu'ils soient stériles en général. Quatre étamines dépassent la corolle. *M. suaveolens (M. rotundifolia)* a des feuilles arrondies gaufrées entre les nervures. *M. longifolia* est densément pubescent et cendré; ses fleurs lilas ou blanches sont groupées en spicastres. Il vit en Europe, en Afrique du Nord et dans la moitié ouest de l'Asie. *M. aquatica* habite les lieux humides en Eurasie et en Afrique du Nord et du Sud, notamment les bords des ruisseaux. Il a des fleurs roses réunies en pseudo-capitules terminaux globuleux. Le pouliot *(M. pulegium)*, des mêmes lieux, a des fleurs en verticillastres denses, globuleux, superposés aux aisselles des feuilles supérieures. La menthe poivrée *(M. piperita)* est l'hybride de *M. aquatica* et de *M. spicata*. Elle est largement cultivée et on la propage par multiplication

▲ *A gauche,* **Origanum vulgare,** ***l'origan; à droite,*** **Thymus serpyllum,** ***le serpolet.***

◄ *Fleurs de* **Mentha viridis,** ***menthe douce.***

▼ *Grand plantain* **(Plantago major).**

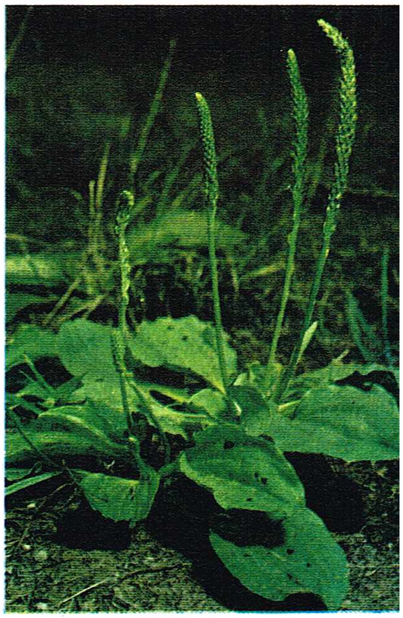

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

M. Bavestrelli

▲ *Chez les plantains, les étamines dépassent longuement la corolle; ici* Plantago intermedia *dont les filets staminaux sont roses.*

végétative. Son essence contient du menthol, en partie estérifié en acétate et valérate, qui participent à la genèse de l'arôme. C'est une plante célèbre en médecine populaire (tisane stomachique, cholérétique, etc.). Le menthol trouve de nombreux usages en pharmacie, en confiserie, en liquoristerie. La plante atteint 90 cm, est généralement glabre, à feuilles pétiolées ovales-lancéolées, aiguës, fortement dentées. Ses fleurs stériles forment un spicastre dense, interrompu en bas, rose lilas. La menthe douce ou *M. spicata (M. viridis),* sans doute un hybride fertile fixé, est voisine mais a des feuilles sessiles, glabres ou velues et des spicastres étroits. Elle fournit une essence riche en carvone et très utilisée comme aromatisant.

Le genre *Pogostemon* compte trente espèces en Indo-Malaisie. Il a aussi une corolle à quatre lobes, mais trois forment une lèvre supérieure et l'autre une lèvre inférieure. Le patchouly *(Pogostemon patchouli)* est cultivé pour son essence utilisée en parfumerie comme fixatif.

Dans la sous-famille des *Scutellarioïdées* enfin, le réceptacle floral est allongé en gynophore. Le genre *Scutellaria* compte deux cents espèces des régions chaudes surtout, dont certaines sont des lianes. Le calice est bilabié et sa lèvre supérieure forme une sorte de court doigt de gant vers l'extérieur. Il y a en France cinq espèces de ce genre.

Les *Globulariacées (Globulariaceae)* constituent une petite famille de deux genres et vingt-sept espèces occupant la région méditerranéenne, l'Europe tempérée, l'Asie Mineure, l'Afrique du Nord et la côte des Somalis. Le genre *Globularia* compte vingt-cinq espèces dans cette aire, tandis que le genre *Cockburnia* n'en renferme que deux à Socotora et en Somalie. Ce sont des plantes vivaces, à feuilles souvent en rosette à la base. Les fleurs forment des inflorescences en épis ou en capitules. Les fleurs zygomorphes sont pentamères, à corolle souvent bilabiée, la lèvre inférieure étant la plus développée. Les quatre étamines exsertes sont attachées à la corolle. Il y a deux carpelles soudés, l'un étant réduit et stérile, et l'ovaire est uniloculaire et uniovulé. Le fruit est un akène.

Les *Plantaginacées (Plantaginaceae)* comprennent seulement trois genres et environ deux cent soixante-cinq espèces, les *Plantago* à eux seuls étant au nombre de deux cent soixante. Ce sont des herbes annuelles ou vivaces, ou bien des arbrisseaux. Les feuilles sont souvent en rosette, à nervures parallèles. Les fleurs sont disposées en épis ou capitules denses. Elles sont petites, actinomorphes et le plus souvent tétramères. Les étamines ont leurs filets unis au tube de la corolle gamopétale. Les filets sont longs et dépassent la corolle. La pollinisation est anémophile. Le gynécée est bicarpellé, biloculaire avec un à quarante ovules par loge. Les fruits sont des pyxides ou des akènes. Les graines ont un épiderme mucilagineux.

Le grand plantain *(P. major)* est une herbe vivace, haute de 10 à 30 cm, devenue à peu près cosmopolite, très commune au bord des chemins. Ses feuilles sont toutes en rosette, largement ovales et redressées, marquées de cinq à neuf fortes nervures parallèles-convergentes. Les fleurs sont disposées en longs épis denses. *P. intermedia* est voisin, mais il est annuel et ses feuilles sont appliquées contre le sol. L'herbe à cinq côtes *(P. lanceolata)* a des feuilles étroites lancéolées, dressées, comportant trois à sept nervures et des inflorescences courtes mais sur des pédoncules bien plus longs qu'elles et dépassant de beaucoup les feuilles. Elle est commune en Europe et jusqu'en Asie centrale, au bord des chemins et dans les champs.

Un groupe de plantains a des tiges feuillées et des inflorescences courtes axillaires. *P. psyllium* et *P. indica (P. arenaria)* ont des feuilles étroitement lancéolées. Le second a des bractées inférieures très longuement acuminées; il occupe une grande partie de l'Europe et de l'ouest de l'Asie, tandis que le premier est limité à la région méditerranéenne. Tous deux fournissent leurs graines, mates chez le second, luisantes chez le premier. Elles sont enveloppées d'un mucilage à galactose, xylose et acide galacturonique à propriétés laxatives et émollientes.

Les *Littorella,* au nombre de trois, sont représentés en France par *L. uniflora (L. lacustris),* petite plante monoïque des sols sableux périodiquement inondés, à rosettes de feuilles étroitement lancéolées. Les fleurs mâles sont solitaires, pédonculées et à longs filets staminaux; les femelles sont groupées par deux ou trois à la base du pédoncule mâle. Le fruit est un akène.

Rubiales

Si on place les Rubiacées dans les Gentianales, comme il a été dit à propos de ces dernières, l'ordre devient celui des Dipsacales. Dans l'acception classique des Rubiales, ce sont des plantes herbacées ou ligneuses, à feuilles opposées entières ou découpées de façon pennée, stipulées ou non. Il n'y a pas de liber interne. Les fleurs, actinomorphes ou zygomorphes, sont tétramères ou pentamères, et sympétales. La corolle est à préfloraison tordue (Rubiacées) ou non. Les étamines sont en nombre égal ou inférieur à celui des pétales épisépales et insérées le plus souvent sur le tube de la corolle. L'ovaire est infère, à deux à cinq carpelles, une partie d'entre eux étant souvent stériles. Les ovules anatropes sont unitegminés.

La grande famille des *Rubiacées (Rubiaceae)* compte quatre cent cinquante à cinq cents genres et six à sept mille espèces, occupant le monde entier, mais surtout les régions tropicales. Il s'agit d'arbres, d'arbustes ou de plantes herbacées. Les feuilles sont opposées et stipulées; les stipules de deux feuilles sont souvent unies en stipules interpétiolaires. Elles peuvent aussi être foliacées et multipliées. L'ensemble des deux feuilles et de leurs stipules forme alors un pseudo-verticille. Les fleurs ou inflorescences cymeuses sont tétramères ou pentamères, hermaphrodites et actinomorphes. Leur calice est gamosépale, à dents très petites, mais parfois l'une d'elles est hypertrophiée et pétaloïde. La corolle est gamopétale, à préfloraison valvaire, imbriquée ou tordue à gauche. Il y a deux carpelles antéro-postérieurs unis en un ovaire infère biovulé, avec un ou plusieurs ovules par loge. Le style est fréquemment entouré d'un disque. Le fruit est une capsule, une baie, une drupe ou un schizocarpe.

Au début du XVII[e] siècle, la malaria semblait devoir faire mourir Ana Osorio, comtesse de Chinchon, épouse du vice-roi du Pérou. Un médecin indien, suivant un usage local, proposa comme remède une poudre préparée

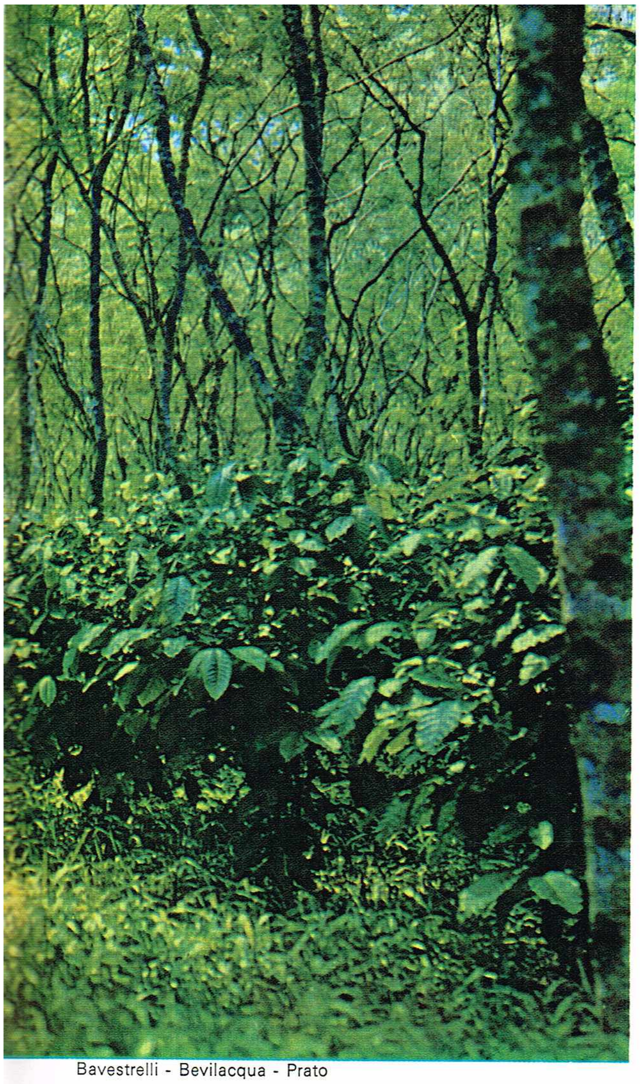

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

A. Margiocco

▲ ***Le caféier est un arbuste à feuilles toujours vertes; à gauche, plantation de caféiers; à droite, rameaux de* Coffea arabica.**

avec l'écorce d'une plante qui poussait sur les montagnes voisines. Les résultats furent surprenants, et la comtesse guérit totalement. Quand elle revint quelque temps après en Europe, elle loua les vertus de ce médicament merveilleux. Les jésuites, installés en Amérique latine, servirent d'intermédiaires pour l'importation de cette précieuse poudre qu'on appela la quinine.

Linné, ayant étudié cette plante, la nomma *Cinchona* en souvenir de la dame qu'elle avait guérie. Ce genre est maintenant le type de la sous-famille des *Cinchonoïdées,* dans laquelle les loges de l'ovaire renferment de nombreux ovules. Il y a une quinzaine d'espèces de *Cinchona,* avec plusieurs variétés, originaires du versant est des Andes, entre 1 600 et 2 400 m d'altitude, sur environ 10° de latitude de part et d'autre de l'équateur. Il faut à ces plantes des précipitations abondantes et bien réparties dans l'année, et une température de 10 à 30 °C. Aujourd'hui, les *Cinchona officinalis* et *C. pubescens,* dont on tire la quinine, sont largement cultivés à Java, en Inde, en Afrique tropicale, à Madagascar et dans le Caucase. Leur écorce est très riche (3-15 %) en divers alcaloïdes, les plus importants étant la quinine et la quinidine qui sont isomères, et comportent un noyau quinoléine et un noyau quinuclidine. *C. officinalis,* arbre haut de 20 m, à feuilles vert foncé luisantes au-dessus, claires en dessous et à fleurs roses, est relativement pauvre en quinine et sert à préparer des toniques amers et des apéritifs (les *Cinchona* contiennent un hétéroside amer ou quinovine). *C. pubescens* var. *dedgeriana,* le plus cultivé, est très riche en quinine qui en est extraite. Il est plus petit et ses fleurs sont blanc jaunâtre.

A côté de l'utilisation de la quinine dans le traitement du paludisme, la quinidine est employée maintenant en cardiologie dans le traitement des arythmies. Il se consomme dans le monde cinq cents tonnes de quinine par an, qui proviennent entièrement des plantes, quoique la substance ait été synthétisée dès 1944.

Les *Cinchona* ont des fruits capsulaires, ceux des Gardéniées sont des baies. Le genre *Gardenia* compte plus de cent espèces des tropiques de l'Ancien Monde. Ce sont des arbustes hauts d'environ 2 m. Leurs feuilles sont persistantes, ovales-lancéolées, opposées ou verticillées par trois, vert foncé et luisantes. Leurs fleurs, dont le diamètre peut atteindre 9 cm, et qui sont fréquemment pléiomères (plus de cinq pièces à chaque verticille périanthaire et staminal), sont axillaires ou terminales et presque toujours solitaires; elles sont fortement parfumées. Le calice égale le tube de la corolle blanche ou jaunâtre. On cultive souvent en serre et en appartement *G. jasminoides,* de Chine, dont on a obtenu des variétés à fleurs doubles qui rappellent celles des camélias.

Chez les *Mussaenda* qui sont plus de cent plantes des tropiques de l'Ancien Monde et servent de type à la tribu des Mussaendées, les fleurs ont un sépale à grand limbe pétaloïde; l'ensemble d'une inflorescence fonctionne comme une fleur dont les sépales seraient la corolle. Les vraies corolles ont une préfloraison valvaire et le fruit est une baie.

Dans la sous-famille des *Rubioïdées,* il n'y a qu'un ovule par loge. Le genre *Coffea* renferme cinquante à soixante espèces de caféiers des tropiques de l'Ancien Monde, surtout d'Afrique et de Madagascar. Dès le début du XVIIIe siècle, on entreprit de cultiver ces plantes aux Antilles, à Java, au Brésil, etc. Jusqu'au siècle dernier, on n'utilisait que *C. arabica,* mais des ravages occasionnés dans les plantations de Ceylan par un Champignon parasite conduisirent à chercher d'autres espèces, et *C. canephora (C. robusta)* fut alors introduit. Aujourd'hui, le plus grand des producteurs de café est le Brésil, suivi par la Colombie, le Mexique, le Guatemala et l'Indonésie, pour n'en citer que quelques-uns.

Les caféiers, dont l'aire s'étend de 35° de latitude nord à 35° de latitude sud, sont exploités du niveau de la mer à 1 500 m d'altitude (*C. arabica* préfère l'altitude, *C. canephora* la plaine). Il leur faut un climat dont la température oscille entre 14 et 28° C sans brusques variations. En outre, 1 500 à 1 800 mm de pluie par an sont nécessaires. L'espèce la plus répandue est *Coffea arabica,* arbuste de 8 à 10 m, maintenu à 2 m à l'état cultivé et qui semble originaire d'Afrique orientale et non d'Arabie. Les feuilles, toujours vertes, luisantes, ovales-acuminées, sont longues de 6 à 15 cm; elles ont un court pétiole et sont un peu coriaces. Les fleurs à pédoncules courts, blanches, à odeur de jasmin, sont réunies en cymes subsessiles de trois à sept, à l'aisselle des feuilles. Leur calice est réduit, et la corolle possède cinq lobes à

▼ ***Une Rubiacée très décorative : cultivar à fleurs doubles de* Gardenia jasminoides.**

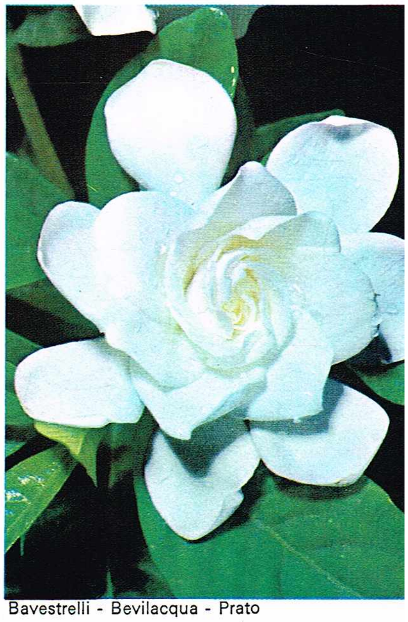

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***En haut, ces drupes, qui vont rougir à maturité, sont les fruits du caféier ; les deux noyaux contiennent chacun une graine qui sera utilisée après torréfaction. En bas, une petite Rubiacée,*** **Asperula odorata.**

▼ ***Le chèvrefeuille commun*** **(Lonicera caprifolium).**

préfloraison tordue. Les fruits sont des drupes (« cerises de café ») à deux noyaux, d'abord vertes, puis rouges. Chaque noyau contient une graine, c'est-à-dire un grain de café, dont la face dorsale est convexe, et dont la face ventrale est plane et sillonnée. Cette graine renferme notamment une base purique, la caféine, qui est un stimulant nerveux et cardiaque, mais qui peut déterminer de l'insomnie, des troubles digestifs et entraîne parfois un état de « manque » comme les stupéfiants.

Les *Cephaelis* sont voisins des caféiers mais, dans leur tribu, les pétales sont à préfloraison valvaire. Il y en a cent à deux cents, surtout en Amérique tropicale. Les ipécas *(C. ipecacuanha* et *C. acuminata)* sont exploités pour leurs racines qui renferment des alcaloïdes aux propriétés expectorantes et vomitives. L'un d'entre eux, l'émétine, est de plus utilisé dans le traitement de la dysenterie amibienne.

Chez les Rubiées, les feuilles ont des stipules foliacées, unies entre elles ou au contraire libres et multipliées, et le fruit est en général un schizocarpe qui forme deux méricarpes. Le genre *Rubia* compte une quarantaine d'espèces dont la garance, plante herbacée, vivace, à fin rhizome et tige tétragone, prostrée, ascendante et pourvue aux angles de piquants recourbés vers le bas. Ses feuilles, disposées en pseudo-verticilles de quatre à six éléments (les stipules sont ou non unies deux à deux), sont lancéolées et brièvement pétiolées. Elles sont pourvues de piquants recourbés vers le bas le long du bord de la nervure principale. Ses fleurs jaune verdâtre sont groupées en cymes axillaires des feuilles vraies, opposées, et ont un calice très réduit et une corolle à tube court et cinq lobes étalés. Le fruit est drupacé. Il ne se forme pas de méricarpes. La garance est originaire de l'est de la région méditerranéenne et d'Asie occidentale. Elle avait été propagée par la culture jusqu'au siècle dernier car on tirait de ses racines l'alizarine, qui servait à teindre les tissus. Mais avec l'obtention de colorants synthétiques, la culture de la garance fut abandonnée.

Le genre *Galium* (gaillets) comprend trois cents espèces et est cosmopolite. Il est voisin des *Rubia* mais les stipules peuvent être nombreuses, de sorte que les pseudo-verticilles peuvent avoir de quatre à douze éléments; de plus, les fleurs jaunes, rouges ou blanches ont une corolle et un androcée tétramères en général, et le fruit est un schizocarpe à deux méricarpes. *G. verum*, d'Europe et de Sibérie, a de petites tiges assez élevées et de faux verticilles de huit à douze « feuilles » très étroites à bords révolutés et le plus souvent glabres et luisantes au-dessus. Ses fleurs odorantes, jaune vif, sont réunies en cymes denses.

Les *Caprifoliacées (Caprifoliaceae)* renferment seulement quinze genres et quatre cents espèces. Ce sont des arbustes à feuilles opposées, à stipules nulles ou rudimentaires. Leurs fleurs sont disposées en inflorescences cymeuses qui peuvent prendre l'aspect de capitules. Parfois les deux fleurs latérales d'un dichasium existent seules et sont plus ou moins soudées l'une à l'autre. Elles sont généralement pentamères, actinomorphes ou zygomorphes. Les étamines sont insérées sur le tube de la corolle. Il y a deux à huit carpelles formant un ovaire infère pluriloculaire avec un à quatre ovules par loge. Souvent les carpelles sont inégalement développés et la placentation devient pariétale. Le fruit est une drupe, une baie ou une capsule.

Les *Lonicera* ou chèvrefeuilles occupent surtout l'hémisphère Nord mais quelques-uns sont andins. Ce sont environ cent quatre-vingts arbustes ou lianes à feuilles opposées, non stipulées, entières ou très rarement lobées. Leurs fleurs sont réunies en capitules cymeux terminaux ou groupées en dichasiums axillaires dont la fleur terminale manque souvent, les latérales étant alors plus ou moins unies. La corolle est actinomorphe ou bilabiée; dans ce cas, la lèvre supérieure comprend quatre pétales, l'inférieure un seul. Il y a cinq étamines et trois carpelles, et le fruit est une baie à deux ou trois loges renfermant des graines peu nombreuses. Le chèvrefeuille commun *(L. caprifolium)* est fréquent le long des haies et dans les forêts du sud-est de l'Europe. Il ne s'élève pas en montagne. Il a été répandu par la culture. C'est une liane de 4 à 5 m de longueur, dont les jeunes rameaux sont pubescents, et qui s'enroule souvent de façon serrée autour de ses hôtes. Les feuilles, caduques, ovales à suborbi-

culaires, un peu coriaces, glabres, sont brièvement pétiolées en bas des tiges puis sessiles; enfin, en haut, les deux feuilles d'une paire sont soudées entre elles en une lame continue que traverse la tige. Elles sont donc connées. Les fleurs, très parfumées, sont disposées en dichasiums de trois à l'aisselle des feuilles terminales. Le dernier couple foliaire en abrite six en capitule, l'axe ne se prolongeant pas entre les deux dichasiums. Ces fleurs sont jaunâtres à l'intérieur, et pourprées extérieurement. Les fruits sont des baies ovoïdes rouges. La plante est cultivée dans les jardins. Le chèvrefeuille des bois *(L. periclymenum)* a des feuilles ovales-aiguës dont les supérieures sont sessiles mais non connées; ses fleurs en tête terminale sont jaunâtres ou rougeâtres. Le camérisier *(L. xylosteum)* a également des feuilles ovales, aiguës, toutes pétiolées, et ses fleurs sont par deux à l'aisselle des feuilles; elles sont côte à côte sur leur pédicule commun (ce sont les fleurs latérales d'un dichasium) mais ne sont pas soudées. Le premier est limité à l'Europe de l'Ouest, le second répandu en Europe et jusqu'à l'ouest de la Sibérie. *L. periclymenum* est très souvent cultivé sous des formes à fleurs jaunâtres et rougeâtres. *L. nitida* (« *Chamaecerasus* ») à très petites feuilles ovales se taille en haies. Il provient de l'ouest de la Chine.

Les Linnées ont trois ou quatre carpelles, certains fertiles et uniovulés, d'autres stériles et pluriovulés. Outre *Linnaea borealis,* petite plante circumpolaire et alpine dédiée à Linné, on y trouve les *Symphoricarpus,* surtout d'Amérique du Nord. *S. racemosus* var. *laevigatus* est la symphorine, à baies blanches, souvent plantée et atteignant 2 m. *Kolkwitzia amabilis* est un arbuste de Chine à fleurs par deux à ovaires hérissés. Il est moins souvent planté.

Les Viburnées ont trois carpelles dont un seul est fertile et uniovulé. Le fruit est une drupe. Le genre *Viburnum* (viornes) regroupe cent vingt espèces d'arbustes et d'arbres de l'hémisphère Nord et des Andes. Les trois arbustes indigènes en France *(V. lantana, V. opulus, V. tinus)* sont cultivés. Le second (sureau d'eau) a toujours des fleurs stériles à grande corolle blanche à la périphérie de ses corymbes cymeux.

Chez les Sambucées, enfin, les feuilles sont composées pennées, chaque carpelle n'a qu'un ovule et le fruit est une drupe. Les anthères sont par ailleurs extrorses. Il n'y a dans cette tribu que le genre sureau *(Sambucus)* qui peuple les lieux incultes et pierreux, les forêts et les haies, et compte vingt-cinq espèces dans une bonne partie du monde. Ce sont des arbres, des arbustes ou des plantes herbacées, à feuilles composées avec deux à sept paires de folioles dentées. Les fleurs forment des corymbes cymeux et possèdent un calice à cinq courtes dents et une corolle régulière à cinq lobes pratiquement dépourvus de tube (pétales libres).

Le sureau *(S. nigra)* est le plus répandu dans nos régions, du niveau de la mer jusqu'à 1 000 m d'altitude. C'est un arbuste atteignant 7 m de hauteur. Son tronc et ses branches ont une écorce grisâtre verruqueuse et une abondante moelle blanche qui disparaît avec l'âge. Les fleurs forment des cymes corymbiformes atteignant 20 cm de diamètre. Les fruits sont de petites drupes noires à maturité. C'est une plante d'Europe, du Caucase et des côtes turques de la mer Noire. Le yèble *(S. ebulus)* est une herbe vivace, d'odeur fétide, à feuilles munies de sept à onze folioles. Les fleurs, blanches en dedans, sont rougeâtres au-dehors.

La famille des *Valérianacées (Valerianaceae)* est constituée de treize genres avec environ quatre cents espèces de l'hémisphère boréal et d'Amérique du Sud. Ce sont à peu près uniquement des plantes herbacées, rarement arbustives. Leurs feuilles, non stipulées, opposées, sont simples ou pennées. Leurs fleurs, qui forment souvent des corymbes cymeux, sont pentamères et irrégulières sans être zygomorphes : on ne peut leur définir de plan de symétrie. Elles possèdent un calice souvent très réduit, mais se développant après la fécondation, ainsi qu'une corolle gamopétale en général à cinq pétales, fréquemment pourvue d'un éperon. Le nombre des étamines, attachées au tube de la corolle et alternant avec ses lobes, varie de un à quatre. L'ovaire est infère, tricarpellaire et triloculaire, mais une seule loge est fertile et uniovulée (ovule anatrope pendant). Le fruit est un akène muni d'un appareil de dissémination constitué par le calice.

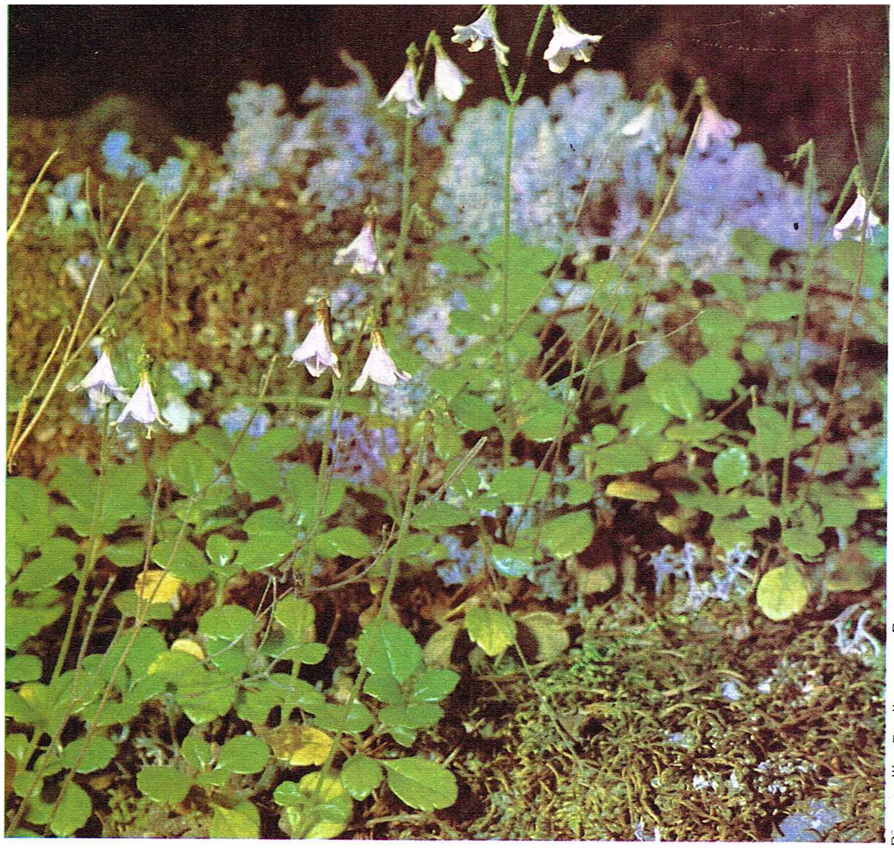

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ **Linnaea borealis** ***est une plante circumpolaire et alpine aux fleurs groupées par deux.***

Chez les Valérianées, les étamines sont souvent au nombre de trois, parfois moins.

Les valérianes *(Valeriana)* sont un genre répandu dans l'hémisphère Nord et l'Amérique du Sud, qui compte deux cent cinquante espèces environ. Ce sont des herbes vivaces grâce à un rhizome odorant. Les tiges ne se ramifient que pour constituer l'inflorescence. Le calice devient sur le fruit un pappus de soies plumeuses.

La valériane officinale *(V. officinalis)* atteint 1,50 m de hauteur; elle croît dans les lieux humides bien exposés. Elle ne dépasse pas l'étage montagnard. Elle a un court rhizome muni de racines fibreuses dégageant à l'état sec une odeur particulière d'acide isovalérique. Sa tige, qui est dressée, sillonnée à la surface, est glabre. Les feuilles

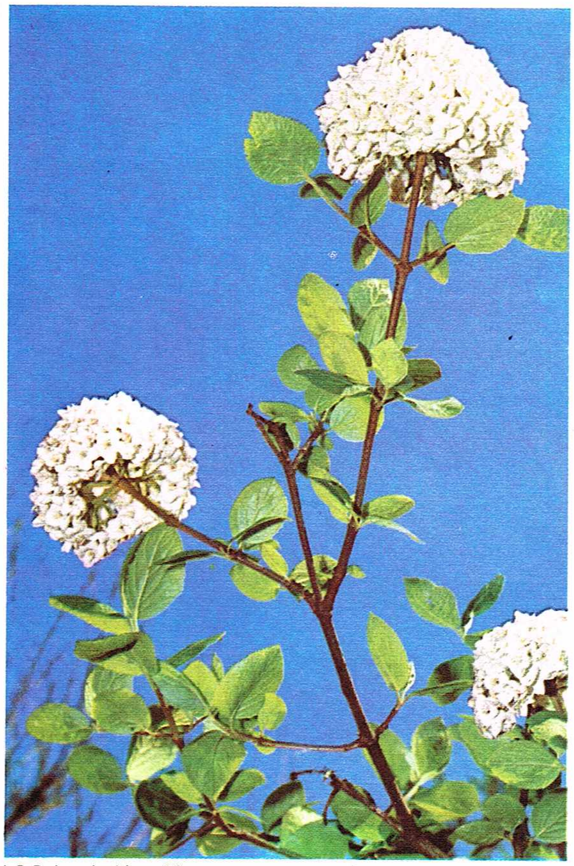

I.G.D.A. - Archives P2

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Inflorescences de sureau **(Sambucus nigra),** ***ci-dessus, et de viorne*** **(Viburnum sp.),** ***ci-contre.***

M. et S. Prato

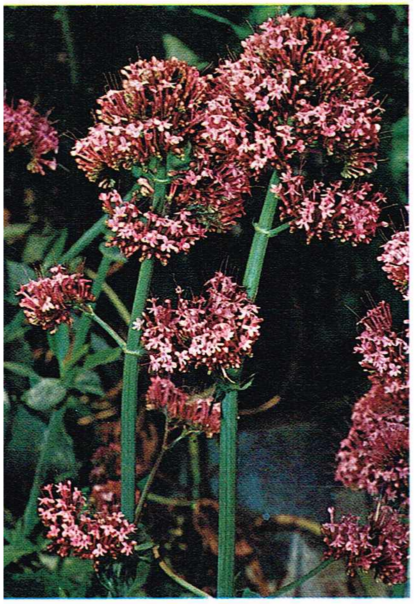

▲ **Kentranthus ruber** *est une plante indigène des régions méditerranéennes; elle est souvent cultivée et naturalisée dans des zones plus froides.*

▼ *Jeune capitule de* **Dipsacus fullonum subsp. fullonum (= D. silvester)** *entouré de son involucre de bractées inégales et dressées.*

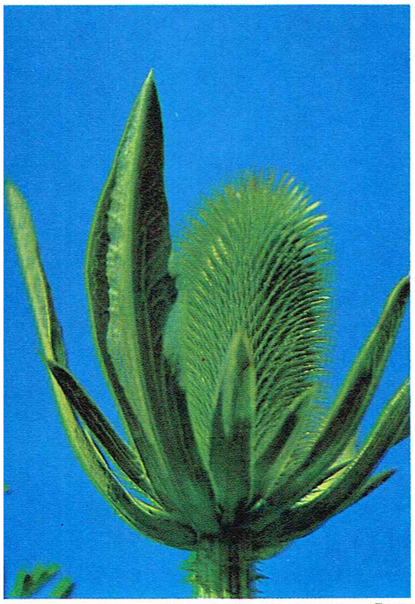

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

radicales et les caulinaires inférieures sont pétiolées, les supérieures sessiles. Toutes sont composées-imparipennées, avec de trois à treize paires de folioles entières ou dentées. Les fleurs, roses ou blanches, légèrement parfumées et paraissant de mai à juillet, forment des cymes corymbiformes assez denses; elles ont un calice très réduit, et pourvu de cinq petites dents enroulées qui, à maturité, forment un pappus de soies plumeuses surmontant l'akène unisséminé. La corolle a un tube assez court, souvent gibbeux à la base. Il y a en fait plusieurs sous-espèces ou espèces voisines dont certaines atteignent l'étage subalpin, émettent des stolons, ont une tige velue, des folioles toujours entières, etc. Les rhizomes et les racines de ces plantes renferment de très nombreuses substances, en particulier des esters complexes (valépotriates), des acides acétiques et isovalériques, et un trialcool cyclique. Ces substances, à vrai dire isolées de *V. wallichii*, de l'Inde, qui a les mêmes propriétés que *V. officinalis*, semblent rendre compte de l'action antispasmodique et sédative des poudres, teintures et extraits de ces plantes. Ces préparations, associées à d'autres drogues, sont extrêmement utilisées comme « tranquillisants » non toxiques, plus maniables que les tranquillisants de synthèse.

Les *Valerianella*, au nombre de soixante, dans l'hémisphère Nord et surtout la région méditerranéenne, sont des herbes annuelles à fruit garni des dents du calice accrescent et non d'un pappus. *V. locusta (V. olitoria)* est la mâche cultivée pour être consommée en salade, et originaire de l'ouest de la région méditerranéenne.

Parmi les dix *Kentranthus*, plantes méditerranéennes à une seule étamine et à corolle éperonnée, *K. ruber*, à feuilles entières, opposées et glauques, et fleurs rouges ou blanches, est souvent cultivé et naturalisé.

Les *Dipsacacées (Dipsacaceae)* sont une petite famille dont les deux cents espèces, constituant dix genres, occupent l'Ancien Monde et surtout la région méditerranéenne et l'Asie occidentale. Ce sont des plantes herbacées vivaces ou parfois suffrutescentes, à feuilles opposées et non stipulées. Les fleurs forment des capitules entourés par un involucre de bractées comme chez les Composées. Au-dessus, les fleurs sont à l'aisselle d'autres bractées. Une « involucelle », peut-être formée de leurs préfeuilles, accompagne extérieurement le calice de ces fleurs tétramères ou pentamères et généralement zygomorphes. Ce calice est formé de quatre ou cinq soies. La corolle est le plus souvent en entonnoir et son tube porte les quatre filets des étamines. Il y a deux carpelles, mais l'ovaire infère est uniloculaire et a un seul ovule anatrope pendant. Les fruits sont des akènes sur lesquels persistent l'involucelle et le calice, qui aident à leur dissémination. Le genre *Dipsacus* compte quinze à vingt espèces en région méditerranéenne, en Asie occidentale et en Afrique tropicale. Les feuilles inférieures sont généralement connées à la base et les capitules allongés ont des bractées florales longues et rigides.

Le cabaret-des-oiseaux *(Dipsacus fullonum subsp. fullonum = D. silvester)* est bisannuel. Sa tige, robuste et sillonnée longitudinalement, possède des piquants aux angles et dépasse 1 m. Les feuilles sont opposées; les radicales, ovales-lancéolées et formant une rosette, ont un court pétiole et sont dentées, les caulinaires, lancéolées, entières ou dentées, glabres, sont sessiles, connées par paire et constituent un récipient où s'accumule l'eau de pluie et la rosée. Les capitules floraux ont une longueur de 4 à 6 cm. Les bractées de l'involucre, étroites et raides, sont dressées, de taille inégale, les plus grandes dépassant le capitule. Les bractées florales, arquées, se terminent en épine droite. Les fleurs rose lilas sont tétramères. C'est une plante essentiellement méditerranéenne, mais qui, peut-être par naturalisation, atteint le sud de la Scandinavie vers le nord et l'Iran vers l'est.

Chez les *Succisa*, au nombre de trois, la fleur est encore tétramère mais la plante n'est pas épineuse non plus que les bractées florales; celles-ci manquent chez les *Knautia*, genre englobant soixante espèces.

Dans le genre *Scabiosa* (scabieuses) qui comprend environ quatre-vingts espèces, les fleurs sont pentamères et il y a des bractées florales. *Succisa pratensis*, haut de 1 m, à feuilles ovales-lancéolées entières et capitules de fleurs bleu violacé, a été souvent classé parmi les *Scabiosa*. C'est le mors-du-diable, des bois et des prés humides. *Knautia silvatica* atteint aussi 1 m, mais ses feuilles sont dentées irrégulièrement et ses capitules de fleurs violettes sont entourés d'un involucre de bractées étalées. Il est fréquent à mi-ombre sur les terrains assez humides des montagnes. *K. arvensis*, à feuilles pennatifides divisées en lobes lancéolés linéaires et fleurs rose lilas, est commun partout dans les prés et les champs. Ces plantes sont européennes, *S. pratensis* et *K. arvensis* s'étendant de plus en Sibérie occidentale.

Plusieurs scabieuses sont cultivées pour l'ornement *(S. atropurpurea, S. caucasica)*; les fleurs périphériques de leurs capitules sont hypertrophiées, comme celles des ombelles de certaines Ombellifères. Ce phénomène, moins marqué, se voit aussi chez nos scabieuses, comme *S. columbaria*.

Cucurbitales

Cet ordre est constitué par l'unique famille des *Cucurbitacées (Cucurbitaceae)* qui comprend des plantes comme les melons, les courges ou les concombres. Leur position systématique est douteuse; ces Végétaux n'ont guère de rapports avec les autres Gamopétales. On les rapproche maintenant souvent des Pariétales du fait de leur placentation.

Les Cucurbitacées sont le plus souvent annuelles et grimpantes, parfois rampantes ou arbustives. Les feuilles alternes n'ont pas de stipules. Il y a du liber interne au niveau de chaque faisceau libéro-ligneux. Des poils à paroi siliceuse sont fréquents. Les fleurs sont généralement unisexuées (plantes monoïques ou dioïques) et sont de type actinomorphe à périanthe pentamère. Il y a un tube floral diversement conformé; la corolle est le plus souvent campanulée ou rotacée, à lobes généralement nettement distincts mais rarement à pétales totalement libres; les étamines sont fondamentalement au nombre de cinq *(Fevillea)* mais des avortements et soudures modifient ce nombre; il y en a deux et demie en apparence dans beaucoup de cas. L'ensemble des étamines peut être uni en un synandre à anthère pentavalente horizontale *(Cyclanthera)*. La soudure est moins parfaite dans d'autres genres. L'ovaire infère est habituellement triloculaire. Fréquemment, les bords des carpelles s'avancent profondément et se replient vers l'extérieur dans la cavité unique de l'ovaire. Ils portent de nombreux ovules. Les fruits sont des péponides ou des baies proprement dites, quelquefois des capsules. Le péponide, souvent succulent et comestible, est une sorte de baie à épicarpe coriace et à mésocarpe épais, charnu, déliquescent ou fibreux à maturité, et contenant de nombreuses graines sans albumen, à embryon pourvu de gros cotylédons riches en huile.

Il existe environ une centaine de genres et huit cent cinquante espèces de ces plantes. Nous nous limiterons à examiner quelques Cucurbitées, dont les anthères ont des loges repliées et éventuellement ondulées. Quatre des cinq étamines y sont réduites à quatre moitiés, mais unies deux par deux, ce qui donne deux étamines mixtes à aspect normal. La cinquième, réduite aussi à une moitié, demeure libre.

Le concombre sauvage *(Ecballium elaterium)*, seule espèce du genre, est une plante rampante, des lieux incultes et des décombres, croissant dans les régions méditerranéennes. C'est une herbe vivace succulente, couchée, à poils durs, dépourvue de vrilles. Les feuilles ont des limbes triangulaires et sinués-dentés. Les fleurs sont monoïques et jaunâtres, en inflorescences axillaires. Les fruits ovoïdes et pédonculés subissent en mûrissant une autolyse de leur pulpe avec accumulation d'un liquide et augmentation de la pression interne. Un choc entraîne le détachement du pédoncule selon une zone d'abscission, et du trou ainsi ménagé sort violemment un jet de liquide qui entraîne les graines jusqu'à 1 ou 2 m, tandis que le fruit est projeté quelque peu en sens inverse. Le suc des fruits non mûrs contient un hétéroside dont l'aglycone est un terpène (cucurbitacine E) qui lui confère des propriétés purgatives si intenses que cette drogue dangereuse est maintenant abandonnée.

La bryone *(Bryonia dioica)* est une herbe vivace des haies d'Europe occidentale et centrale et d'Asie occidentale. Ses tiges annuelles sont fines, anguleuses et grimpantes par des vrilles simples. Elles partent d'une racine charnue massive. Ses feuilles sont polygonales et abritent à leur aisselle une inflorescence en grappe de

M. et S. Prato

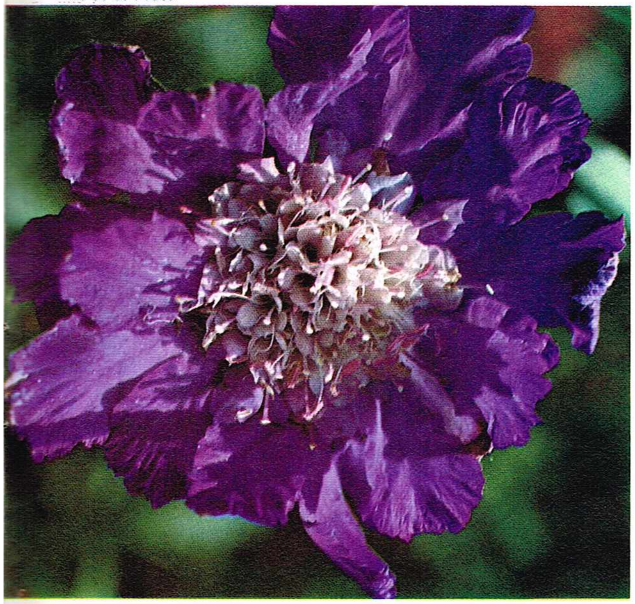

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ *Chez les Dipsacacées, les fleurs nombreuses sont réunies en capitules ; à gauche,* **Scabiosa caucasica,** *plante ornementale à fleurs périphériques hypertrophiées ; à droite,* **Knautia arvensis,** *commun dans les prés et dans les champs.*

petites fleurs blanc verdâtre et un bourgeon, tandis qu'une vrille latérale est extra-axillaire. Cette disposition est générale chez les Cucurbitacées. L'inflorescence est en fait portée par le bourgeon végétatif. Les pieds femelles de cette plante dioïque donnent des baies rouges grosses comme des pois, à quatre à six graines. La racine contient des cucurbitacines et des terpènes voisins qui en font un purgatif dangereux et abandonné maintenant. Les baies sont également toxiques. Il y a neuf autres bryones dont *B. alba,* monoïque et à fruits noirs, qui habite l'est de l'Europe jusqu'en Suisse.

La coloquinte vraie *(Citrullus colocynthis)* est une herbe annuelle et monoïque de la Macaronésie, de la région méditerranéenne et d'Asie jusqu'en Inde. Ses feuilles sont palmatilobées à segments lobulés obtus. Les fruits ont une écorce coriace jaunâtre et une pulpe spongieuse à nombreuses graines. Cette dernière contient un ou plusieurs hétérosides dont les aglycones sont des cucurbitacines, ce qui en fait un violent purgatif maintenant à peu près abandonné. *C. vulgaris,* d'origine africaine, est cultivé dans tous les pays chauds pour ses fruits ou pastèques.

La gourde *(Lagenaria vulgaris),* seule espèce du genre, est originaire des régions tropicales de l'Ancien Monde et donne des fruits dont l'épicarpe est utilisé comme récipient. La plante est courtement velue, soyeuse, et les feuilles ont deux petites glandes en bas du limbe. La forme ordinaire a un fruit à goulot renflé ; il existe des formes à fruit en cornue, en massue, à fruit aplati verticalement, etc. On peut parler de calebasses à propos de

▼ *A gauche,* **Valeriana officinalis,** *aux fleurs réunies en cymes corymbiformes ; à droite, fleur et fruits de concombre sauvage,* **Ecballium elaterium ;** *on peut observer les restes du périanthe à l'extrémité du fruit pendant.*

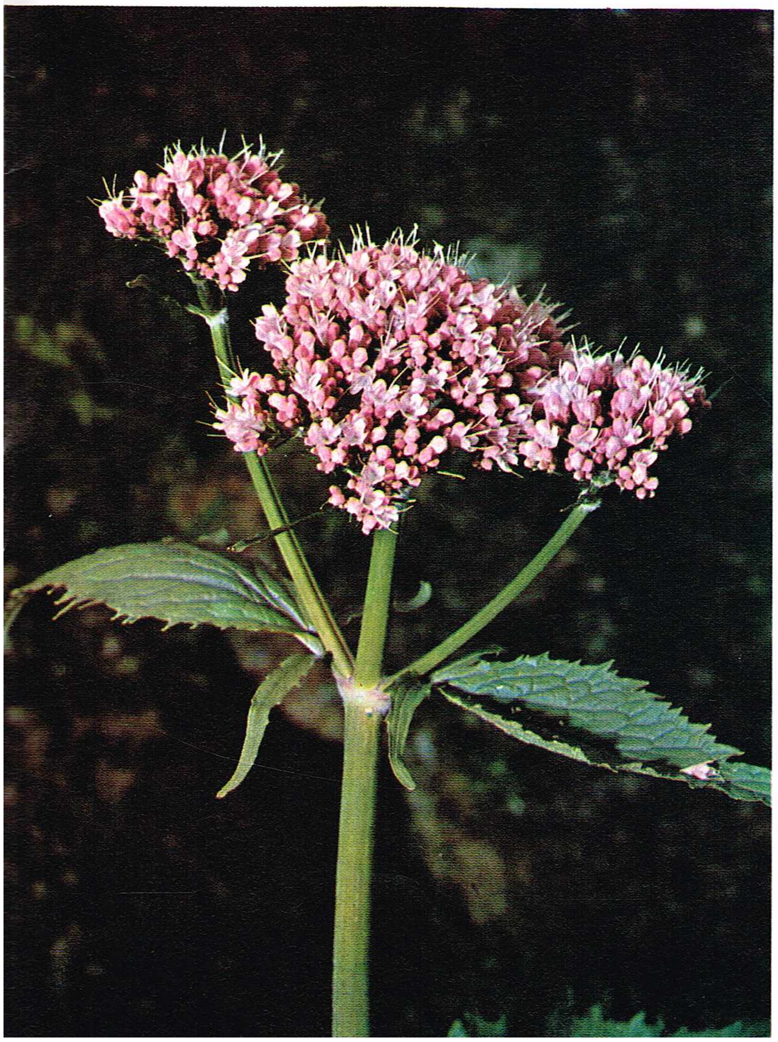

M. Bavestrelli

M. Bavestrelli

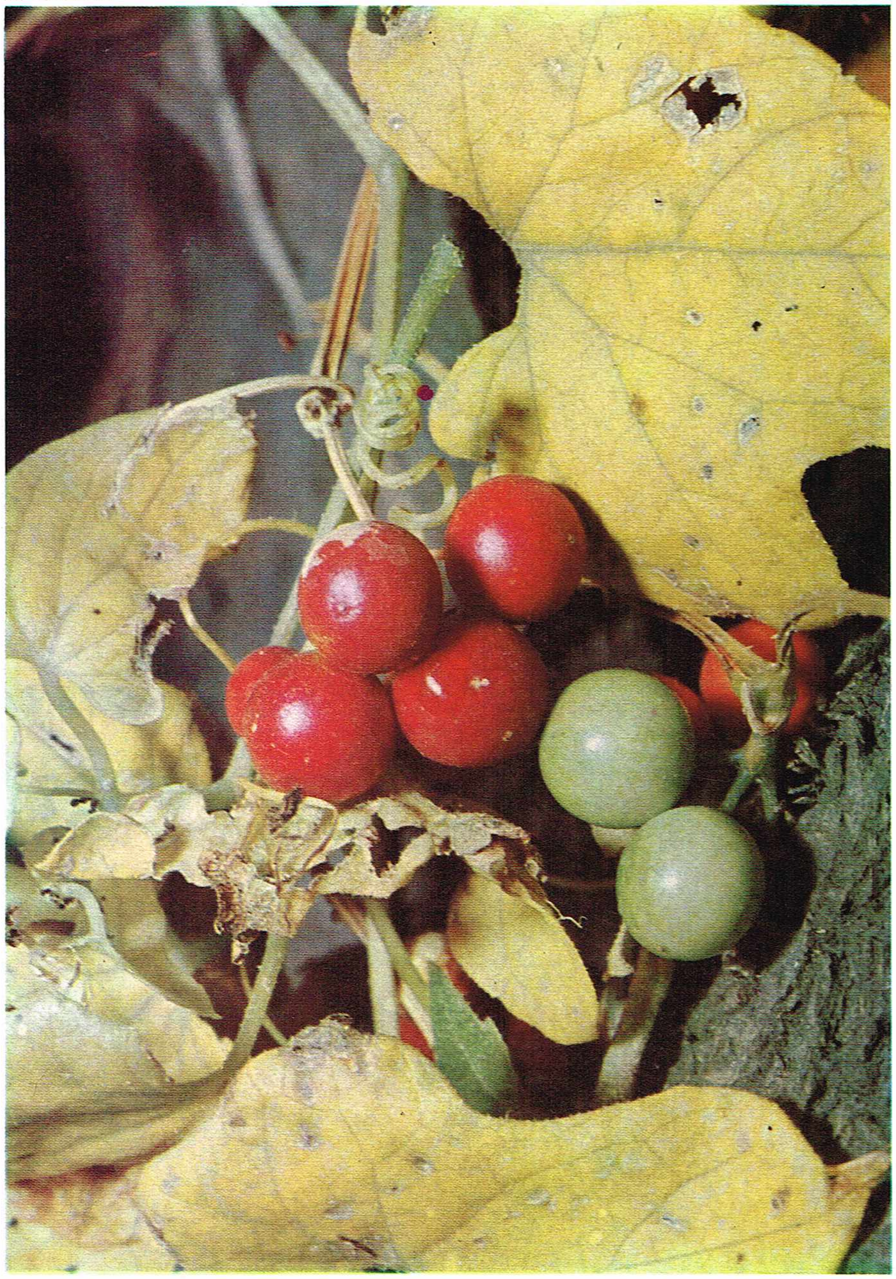

ces fruits mais les vraies calebasses proviennent de *Crescentia crujete*, qui est une Bignoniacée à ovaire uniloculaire d'Amérique tropicale.

Le concombre *(Cucumis sativus)* est connu depuis l'Antiquité. Il est originaire de l'Inde. Alors que le fruit allongé et tuberculé n'est pas encore mûr, on le mange cru, en salade. Les tout jeunes fruits sont les cornichons. Les feuilles ont des lobes triangulaires, et les fleurs, sessiles et axillaires, sont jaunes.

Le melon *(Cucumis melo)* est originaire d'Asie tropicale et d'Afrique orientale. Il est largement cultivé dans nos régions. Ses fruits ont une pulpe douce, le plus souvent jaune ou orangée, de saveur très agréable. Ils sont habituellement sphéroïdaux ou elliptiques, plus ou moins profondément côtelés, avec une écorce lisse ou parfois rugueuse, veinée ou réticulée. Les feuilles du melon sont arrondies, plus ou moins lobées; ses fleurs sont solitaires et variables. Il existe une quarantaine d'espèces de *Cucumis*, toutes (sauf une en Afrique) de la région méditerranéenne orientale et d'Indo-Malaisie.

Les vingt espèces de *Cucurbita* renferment les plus importantes Cucurbitacées cultivées pour leurs fruits ou citrouilles. Ce sont des plantes d'Amérique tropicale. La corolle est longuement gamopétale. Les fruits, dont le poids peut atteindre près de 100 kg, se développent à terre, la plante serpentant parfois sur une dizaine de mètres avec ses tiges herbacées, succulentes et cassantes, à poils rudes. Les feuilles, de contour polygonal et plus ou moins lobées, portent aussi des poils. Les fleurs, axillaires, sont solitaires, de grande taille et tantôt tubuleuses et rotacées au niveau des lobes, tantôt campanulées; elles sont accompagnées de vrilles ramifiées. *C. moschata* a un pédoncule floral à cinq côtes qui s'élargit à son insertion sur le fruit. Les feuilles ne sont pas lobées, elles sont tachées de blanc. L'espèce a donné des courges, à fruits peu ou pas côtelés et souvent allongés. *C. maxima,* originaire d'Amérique centrale, à feuilles peu lobées et à pédoncule floral arrondi épais, donne les potirons à gros fruits aplatis côtelés, des courges et les giraumons ou bonnets turcs, à fruit aplati formé de deux parties superposées d'inégal diamètre. *C. pepo,* originaire d'Amérique centrale et du Nord, est l'espèce la plus largement cultivée. Ses feuilles sont profondément lobées et les pédoncules floraux ont cinq côtes. Elle a donné des courges et les pâtissons, fruits aplatis munis d'un rebord lobé. Plusieurs variétés ne sont pas comestibles mais leurs fruits de petite taille sont verruqueux et panachés : on s'en sert pour la décoration à l'état sec, sous le nom de coloquintes. Les citrouilles ont une faible valeur nutritive mais sont riches en vitamine A. Des graines de *C. pepo* et *C. maxima,* on peut tirer jusqu'à 25 % d'huile comestible. Leur embryon renferme aussi de la cucurbitine, substance proche des aminoacides, qui paralyse les ténias. Ayant obtenu cette paralysie par ingestion de graines de *Cucurbita,* on se débarrasse ensuite des Vers par un purgatif.

▲ **Bryonia dioica** ***est une plante grimpante grâce à ses vrilles; les pieds femelles donnent des baies rouges toxiques.***

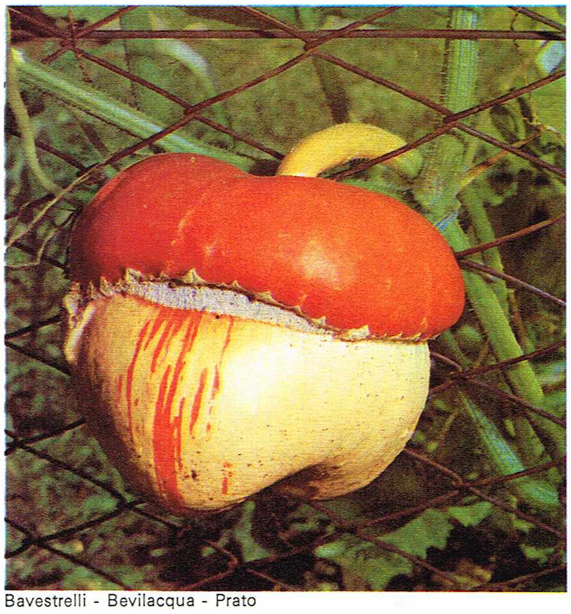

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

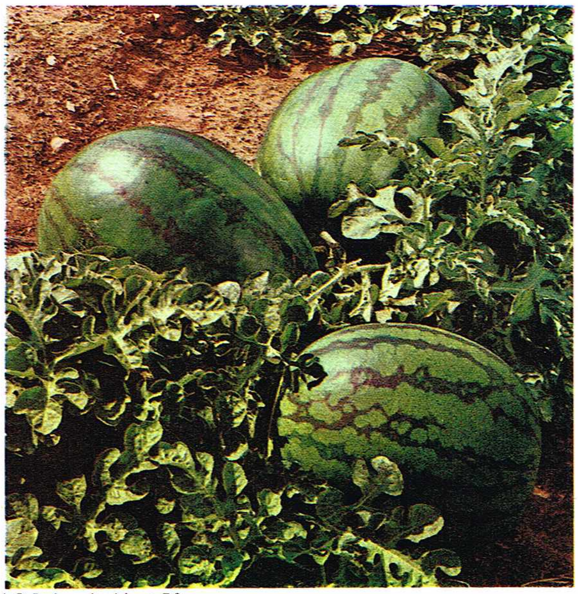

I.G.D.A. - Archives P2

▶ ***A gauche, un giraumon*** **(Cucurbita maxima)** ***; à droite, une culture de pastèques*** **(Citrullus vulgaris).**

J.-L. Riechmann - Jacana

▲ *Chez les campanules, la fleur actinomorphe à corolle lobée possède en général trois carpelles terminés par trois stigmates.*

Campanulales ou Synandrales

Le second nom de cet ordre vient de ce que les anthères sont rapprochées et souvent soudées postgénitalement, les filets staminaux restant indépendants. Ceux-ci sont insérés sur le tube d'une corolle gamopétale, et alternent avec ses lobes. Il y a deux à cinq carpelles soudés en un ovaire infère uni- ou pluriloculaire avec un à plusieurs ovules unitegminés par loge. Ce sont surtout des herbes qui possèdent souvent de l'inuline (glucofructosanne).

Les *Campanulacées (Campanulaceae)* sont une importante famille de soixante-dix genres et environ mille espèces surtout répandues dans les régions tempérées et subtropicales. Ce sont essentiellement des plantes herbacées à feuilles alternes simples. Elles ont des laticifères articulés et forment de l'inuline. Leurs fleurs pentamères, souvent grandes, ont une corolle infundibuliforme, tubuleuse ou rotacée, actinomorphe ou parfois zygomorphe; les étamines ont des anthères libres ou réunies entre elles. L'ovaire est infère, à deux à cinq carpelles avec un disque nectarifère au sommet; les stigmates se déploient et deviennent réceptifs après la libération du pollen (protérandrie); c'est donc le pollen d'une fleur plus jeune qui assurera la fécondation. Les fruits sont des capsules et rarement des baies.

Chez les *Campanuloïdées*, en général, les fleurs sont actinomorphes et les anthères sont libres.

Les *Campanula* (campanules), au nombre d'environ trois cents dans l'hémisphère Nord, comptent de nombreux endémiques dans les montagnes européennes et la région méditerranéenne en particulier. La corolle a une forme caractéristique, dite justement campanulée, c'est-à-dire en cloche, avec des lobes plus ou moins prononcés et dressés, plus rarement étalés ou enroulés vers l'extérieur. Les fleurs blanches, jaunes, bleues ou violettes peuvent être solitaires ou réunies en capitules, épis ou panicules. Il y a trois carpelles, dans certains cas cinq *(C. medium)*. Les capsules des campanules sont poricides avec trois (ou cinq) pores latéraux. Leurs feuilles sont simples, non stipulées, alternes et parfois avec un dimorphisme très net entre les feuilles basales arrondies et les feuilles caulinaires qui sont lancéolées ou linéaires. La campanule raiponce *(C. rapunculus)* est une herbe bisannuelle à feuilles étroitement lancéolées et à inflorescence rameuse de petites fleurs bleues. Les lobes de la corolle sont dressés et courts. Elle habite les lieux secs de l'Europe et du nord-ouest de l'Asie. Chez *C. patula*, les lobes de la corolle sont plus étroits et étalés. Cette espèce est à peu près limitée à l'Europe et préfère les terrains siliceux. La gantelée *(C. trachelium)* est une herbe velue à grandes feuilles pétiolées, à limbe triangulaire cordé, fortement denté au bord. Les fleurs bleu-violet, en panicule spiciforme, ont 3 à 4 cm de long. La plante vit dans les bois d'Europe et de l'ouest de l'Asie. *C. persicifolia* a des feuilles lancéolées-linéaires et des fleurs par deux à six en grappes simples, à corolle évasée, de couleur bleue, de 3 à 4 cm de long. Elle vit dans les bois d'Europe, sur sol souvent calcaire. *C. glomerata* possède des feuilles ovales-lancéolées, les inférieures pétiolées, et des inflorescences en capitules entourées de feuilles sessiles. Les fleurs sont bleues. La plante habite les bois et les prés, surtout calcaires, en Europe et dans la moitié ouest de l'Asie. Le carillon *(C. medium)* appartient à un groupe d'espèces dont le calice présente entre les sépales des appendices recourbés vers l'extérieur, qui sont des stipules sépalaires unies deux à deux. Il est souvent cultivé dans des variétés à fleurs doubles. C'est une plante de l'ouest des Alpes et des Apennins, parfois naturalisée ailleurs.

Chez les *Phyteuma*, d'Europe centrale et méridionale, les fleurs, à corolle profondément lobée et aux lobes d'abord soudés (postgénitalement?) au sommet, sont groupées en épi ou en capitule dense. Ce sont surtout des plantes de montagne, s'élevant jusqu'à l'étage alpin. Il y a une trentaine de *Phyteuma* ou raiponces.

Dans le genre *Jasione*, les fleurs sont en capitules entourés de bractées imbriquées et les anthères sont soudées à la base. *J. montana* est commun dans les lieux secs à sol acide de la région méditerranéenne et de l'Europe de l'Ouest. *Legousia (Specularia) speculum*, enfin, peut servir de type aux treize espèces du genre. C'est le miroir de Vénus, petite herbe annuelle à fleurs violettes dont les lobes du calice, surmontant un long ovaire, sont aussi grands que les pétales libres.

Chez les *Lobélioïdées*, les fleurs sont zygomorphes et résupinées (le côté supérieur passe en bas par torsion du pédoncule). Les anthères sont unies et il n'y a que deux carpelles. Parmi les vingt-neuf genres, seuls quelques *Lobelia* (sur trois cent quatre-vingts) sont européens. La plupart sont tropicaux et subtropicaux. Le tube de la corolle bilabiée à lèvre inférieure plus grande et trilobée est fendu du côté supérieur (après résupination). Si l'on tient compte de la position originelle de la fleur, on voit que la lèvre trilobée (donc le pétale médian) est en fait supérieure. Cette disposition est l'inverse de celle des Labiées et de la plupart des autres familles, mais c'est celle des Légumineuses dont l'étendard médian est

▼ *Chez les* Lobelia, *la lèvre supérieure bien développée de la corolle devient inférieure à la suite d'une torsion du pédoncule floral Ici* L. cardinalis.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

M. Bavestrelli

▲ *Chez les Composées, l'inflorescence est le capitule. Ici* Centaurea cyanus, *le bleuet.*

▶ Tussilago farfara, *le pas-d'âne.*

▼ *Coupe longitudinale d'un capitule de Composée, montrant l'insertion des fleurs sur le réceptacle.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

supérieur. Les laticifères sont abondants. Certains *Lobelia* des hautes montagnes d'Afrique tropicale sont arborescents *(L. rhynchopetalum, L. giberroa). L. urens,* haut de 20 à 50 cm, à fleurs bleues de 10 à 15 mm, habite l'ouest et le centre de la France, ainsi que l'Angleterre et la péninsule Ibérique, dans les lieux humides sur sol acide. *L. dortmanna* est aquatique et submergé, sauf ses fleurs bleues, qui sont plus grandes que celles de l'espèce précédente. Il habite l'Europe de l'Ouest jusqu'en Scandinavie. Il ne s'avance pas à l'intérieur des terres en France. *L. splendens* et *cordigera,* du Mexique, sont des plantes de jardin à fleurs rouges. *L. inflata,* de l'est de l'Amérique du Nord, a des fleurs bleues dont le calice est muni d'un court tube renflé après la floraison. Son latex contient des alcaloïdes qui sont des dérivés de la pipéridine, à deux substituants. La lobéline est le plus important et le plus actif. C'est à dose convenable un excitant du centre respiratoire bulbaire, utilisé dans le traitement des axphyxies (noyades, poisons respiratoires). Une dose excessive (quelques grammes de plante) entraîne la mort.

L'immense famille des *Composées* ou *Astéracées (Compositae* ou *Asteraceae)* compte dix-neuf mille espèces dont trois cent cinquante environ sont présentes en France. Ce sont des plantes herbacées, arbustives ou rarement arborescentes. Leurs feuilles sont en général alternes. Il y a des laticifères articulés ou des canaux sécréteurs. Il se forme de l'inuline. Leur inflorescence est le capitule, sorte d'épi dense et aplati entouré d'un involucre bractéal qui fait fonction de calice commun, le capitule prenant l'allure d'une fleur (pseudanthe). Le réceptacle est plan, concave ou convexe, plein ou creux avec une surface nue ou pourvue de paillettes qui sont les bractées axillantes des fleurs, homologues des bractées de l'involucre et des feuilles de la plante. Les fleurs, gamopétales, sont sessiles, pentamères, actinomorphes ou zygomorphes et, dans le second cas, dites fleurs ligulées ou « ligules », car le tube de leur corolle est surmonté d'une languette unilatérale très développée par rapport au tube. Cette languette peut montrer cinq dents au sommet ou seulement trois, voire une seule, mais, même dans les deux derniers cas, on a des raisons de penser qu'elle correspond à cinq pétales soudés. Ces fleurs ligulées ou encore demi-fleurons forment tout le capitule ou bien sont localisées à sa périphérie. Elles peuvent être hermaphrodites, femelles ou stériles. Il y a parfois des fleurs à corolle bilabiée, la lèvre inférieure étant une grande languette à trois dents. Les fleurs en tube, ou fleurons, sont hermaphrodites. Elles forment tout le capitule ou sont localisées au centre et constituent le disque. Dans le premier cas, les fleurs périphériques peuvent être hypertrophiées, zygomorphes et stériles. Le calice est rarement normal. En général, il est remplacé par des soies ou des poils accrescents en un pappus qui aide à la dissémination du fruit. Les cinq étamines ont des filets libres en général, avec des anthères introrses toujours soudées postgénitalement en un tube, ce qui a fait donner le nom de *Synanthérées* à la famille. A l'intérieur, et tandis que s'ouvrent les anthères, le style s'allonge. Il porte le stigmate bifide dont les deux lobes ne s'écartent qu'après être sortis du manchon anthéral. Comme c'est leur face en regard qui est réceptrice, la fécondation n'est pas possible pendant le développement du style. Celui-ci possède des poils collecteurs qui se chargent du pollen du manchon anthéral. Ils sont au dos des stigmates ou en manchon sous le point de bifurcation du style. L'ovaire infère est bicarpellé, à carpelles médians, uniloculaire et uniovulé. Un disque entourant la base du style attire par son nectar les Insectes pollinisateurs. Le fruit est un akène garni le plus souvent de son pappus, avec une graine dépourvue d'albumen. La fécondation est généralement entomogame et croisée entre divers capitules ou entre fleurs du même capitule, celles-ci se trouvant à différents stades de développement ; elles sont d'autant plus jeunes qu'elles sont plus centrales. Dans une fleur donnée, c'est d'abord l'androcée qui mûrit (protérandrie). Le style traverse le manchon des anthères qui garnissent ses poils collecteurs de pollen, mais les stigmates sont appliqués l'un contre l'autre et non réceptifs. Puis ils s'écartent et peuvent recevoir le pollen qu'un Insecte aura prélevé sur le style ou le dos des stigmates d'une autre fleur plus jeune, à stigmates encore appliqués. Ce mécanisme se voit aussi chez les campanules. Il arrive que la fécondation croisée soit assurée par le vent (anémogamie). Les stigmates sont alors longuement exserts et flexueux. La fécondation peut parfois être autogame.

Certains genres (*Hieracium* ou épervières, *Taraxacum* ou pissenlits) sont extrêmement polymorphes et les lignées se reproduisent sans fécondation (apomixie).

Les Composées semblent récentes ; le plus ancien fossile est une sorte de fruit de pissenlit de l'Oligocène, quoiqu'on ait attribué à la famille un reste du Crétacé supérieur. Ces plantes sont remarquablement différenciées et ont colonisé toute la terre, spécialement hors des zones tropicales. Elles représentent l'aboutissement très fructueux d'un phylum de Gamopétales qui a sans doute fourni aussi les autres Campanulales.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Les Composées sont divisées en deux sous-familles : les *Astéroïdées* ou *Tubuliflores* et les *Cichorioïdées* ou *Liguliflores*. Chez les premières, toutes les fleurs peuvent être à corolle tubuleuse ; plus souvent, certaines sont à corolle tubuleuse et d'autres, à la périphérie, à corolle ligulée ou bien, enfin, la corolle est bilabiée ou tubuleuse et fendue. Il n'y a en général pas de laticifères mais des canaux ou poches sécrétrices. Chez les secondes, les fleurs sont toutes ligulées à cinq dents et hermaphrodites. Il y a presque toujours des laticifères et pas de canaux sécréteurs.

Nous étudierons les principales tribus des deux sous-familles de Composées en commençant par celles qui appartiennent aux Tubuliflores.

Les Eupatoriées ont des capitules à fleurs actinomorphes tubuleuses, toutes hermaphrodites, jamais jaunes. Il n'y a pas de paillettes. Les feuilles sont le plus souvent opposées et entières. La plupart des espèces sont américaines. L'unique espèce de nos régions est l'eupatoire *(Eupatorium cannabinum)*, d'Europe et d'Asie occidentale, seul représentant dans ces régions d'un genre de six cents espèces. C'est une plante atteignant 1,50 m, à feuilles opposées, composées palmées, avec de trois à cinq folioles dentées. Ces feuilles rappellent un peu celles du chanvre, d'où le nom spécifique. L'inflorescence forme un corymbe de capitules pauciflores avec de quatre à six fleurs tubuleuses. Les corolles sont roses, les styles longuement exserts à deux stigmates cylindriques.

Le genre *Ageratum* compte trente-cinq espèces surtout d'Amérique tropicale. *A. houstonianum (A. mexicanum)* est une plante vivace, mais seulement à demi rustique, souvent cultivée en bordure ou pour la mosaïculture, surtout ses formes naines (12 à 25 cm). Ses capitules sont d'un beau bleu. Les *Liatris* comprennent trente-deux espèces d'Amérique du Nord, à capitules groupés en épis. *L. spicata* est cultivé dans les jardins. Les capitules s'ouvrent de haut en bas sur l'épi.

Les Sénécionées ont généralement des capitules à fleurs hermaphrodites et femelles. Il y a presque toujours des fleurs ligulées périphériques. La corolle est le plus souvent jaune. Sur le disque, les paillettes sont dans la plupart des cas absentes. Les feuilles sont généralement alternes.

Le genre *Adenostyles* ne compte que quatre espèces des montagnes d'Europe et d'Asie Mineure. Elles ont des rhizomes traçants et de grandes feuilles réniformes ou cordiformes, essentiellement basales, et à dents aiguës ; leurs inflorescences corymbiformes sont rose pourpré. Les fleurs sont encore toutes tubuleuses et hermaphrodites, et roses ou lilas. Le plus répandu est *Adenostyles alliariae,* à feuilles pointues, cotonneuses en dessous, qui atteint 1,80 m et habite dans les montagnes d'Europe centro-méridionale, à l'étage subalpin, dans les forêts, les buissons, au bord des ruisseaux, particulièrement parmi les aulnes. *A. glabra* et *A. tomentosa* sont beaucoup plus petits ; le premier, haut de 80 cm, est basiphile et possède des feuilles réniformes non cotonneuses ; le second est acidiphile, haut de 40 cm, avec des feuilles pointues cotonneuses en dessous. Il se trouve à l'étage alpin tandis que le précédent est subalpin.

Les *Petasites* forment un groupe d'une vingtaine d'espèces de l'hémisphère Nord, en zone tempérée et subarctique, à capitules formés de nombreuses fleurs, souvent toutes tubuleuses. Les feuilles caulinaires sont réduites à des écailles. *P. hybridus* a des feuilles peu velues en dessous. Il atteint 1 m lorsqu'il est en fruit. C'est une plante d'Europe, qui croît en plaine et à l'étage montagnard. Les feuilles ont jusqu'à 50 cm de largeur ; elles paraissent vers la fin de la floraison. Les fleurs, toutes en tube, sont rougeâtres. *P. albus* est plus petit (60 cm), avec des feuilles tomenteuses en dessous sauf sur les nervures, de 40 cm seulement et paraissant après la floraison. Ses fleurs, toutes en tube, sont blanc jaunâtre. C'est une espèce de l'étage montagnard, surtout dans les lieux humides et ombreux d'Europe et de la moitié ouest de l'Asie.

Le pas-d'âne *(Tussilago farfara)* est la seule espèce du genre. Il occupe l'Europe et l'Asie du Nord-Ouest. C'est l'une des premières plantes à fleurir au printemps, dans les fossés, les terrains argileux humides et les éboulis. Les tiges florales n'ont pas de feuilles assimilatrices, mais seulement des écailles, et se terminent par un seul capitule de fleurs jaunes, tubuleuses au centre, ligulées autour. Ces dernières, femelles, sont très nombreuses (jusqu'à trois cents). Les fleurs centrales sont mâles. Les feuilles apparaissent plus tard et sont un peu succulentes, tomenteuses en dessous à l'état jeune, cordiformes à la base, polygonales et dentées.

Les séneçons *(Senecio)* comptent plus de mille cinq cents espèces. Il y a presque toujours à la périphérie des capitules des fleurs ligulées et femelles ; les fleurs centrales sont tubuleuses et hermaphrodites. Les corolles sont jaunes ou orangées. Un « calicule » de courtes bractées double en général à l'extérieur l'involucre des capitules. *S. vulgaris* est une herbe à feuilles pennatilobées et dentées, sessiles et embrassantes et à nombreux petits capitules jaunes, dont les fleurs sont toutes tubuleuses sauf exception. Il fleurit toute l'année dans les lieux incultes et dans les terres cultivées ; il atteint l'étage montagnard. Il est à peu près cosmopolite, mais d'origine sud-européenne. *S. viscosus* est voisin, mais glanduleux et à capitules munis de courtes ligules roulées en dehors. On le trouve dans la majeure partie de l'Europe. La jacobée *(S. jacobaea)* atteint 1 cm et a des feuilles glabres ou un peu pubescentes, pennatipartites à grand lobe terminal. Ses capitules ont de longues ligules jaunes. Elle habite les sols frais et humides de la plaine et de l'étage montagnard et occupe l'Europe et l'Asie occidentale. La cinéraire *(S. cineraria)* est une plante méditerranéenne des rochers et sables côtiers. Elle atteint 60 à 70 cm et est entièrement blanche, tomenteuse surtout en dessous. Les feuilles sont pennatipartites à lobes profondément dentés. Les capitules en corymbe dense ont un involucre tomenteux et des fleurs jaunes, les périphériques étant ligulées. La plante est utilisée en bordure des massifs. *S. cruentus,* des îles Canaries, a donné par sélection et probablement par hybridation les nombreuses formes cultivées en pot ou dans les jardins sous le nom de cinéraires, plantes basses à feuilles plus ou moins cordiformes et triangulaires, à nervures palmées, ressemblant à celles des *Petasites,* et à grands capitules formant des corymbes serrés ; les fleurs ont des ligules blanc-pourpre, roses ou bleues et un disque pourpre ou jaune. Les formes « doubles » ont presque toutes leurs fleurs ligulées, ce qui est le caractère distinctif des Composées « doubles ». Un autre groupe de séneçons a de grandes feuilles simples lancéolées, plus

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***La cinéraire :* *forme horticole de* Senecio cruentus.**

▼ **Bellis perennis, *la pâquerette, est une petite plante vivace très commune dans nos régions.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Ingegnoli

▲ *Les reines-marguerites,* **Callistephus sinensis,** *présentent une grande gamme de coloris.*

▼ *A gauche,* **Erigeron karwinskyanus,** *qui affectionne les murs. A droite,* **Solidago virga-aurea,** *la verge d'or.*

ou moins coriaces et luisantes, glabres, au-dessus du moins. *S. doria,* de 1,50 m, est tout à fait glabre et parfois cultivé. Il est originaire de la région méditerranéenne et atteint le centre-est de la France. Il existe des séneçons arborescents dans les hautes montagnes africaines. Ce sont des plantes non ou peu ramifiées, avec de grandes touffes sommitales de feuilles entières, comme *S. johnstonii,* qui atteint 7 m. Le sous-genre *Kleinia* est formé de Végétaux succulents d'Afrique (surtout du Sud) et de Madagascar. Plusieurs *(S. articulatus, S. haworthii)* sont cultivés comme « plantes grasses ».

Parmi la centaine d'espèces de *Ligularia* d'Eurasie qui n'ont pas de calicule et présentent des capitules en épi ou en grappe, *L. sibirica,* à disque et ligules jaunes, est souvent cultivé. Il est indigène en France, dans le Centre et dans l'Est.

Le genre *Doronicum* compte trente-cinq espèces en Europe et en Asie tempérée. Les capitules, à fleurs jaunes, ont un involucre à un seul rang de bractées, sur réceptacle bombé, et de longues ligules. Ces capitules sont grands, peu nombreux ou solitaires. *D. plantagineum* a des feuilles ovales-aiguës, allongées, les inférieures étant rétrécies en pétioles. Sa tige de 80 cm est terminée par un capitule généralement unique, à ligules presque dressées. Il habite les bois du sud-ouest de l'Europe, sans dépasser l'Angleterre au nord.

Dans la tribu des Astérées, les capitules ont toujours des fleurs hermaphrodites ou mâles au centre et femelles ou stériles à la périphérie. Toutes les corolles sont actinomorphes ou bien seulement celles du disque. Il n'y a généralement pas de paillettes. Les feuilles sont alternes.

Il y a une dizaine de pâquerettes *(Bellis)* en Europe et dans la région méditerranéenne. L'akène n'a pas de pappus, mais seulement une bordure saillante. *B. perennis,* plante vivace de 15 cm, a des feuilles spatulées glabrescentes et forme des capitules longuement pédonculés à disque jaune de fleurs tubuleuses et à ligules blanches teintées de rouge au sommet. Il occupe l'Europe et l'Asie Mineure. *B. annua* habite en compagnie de l'espèce précédente ou la remplace dans la zone méditerranéenne. Il est annuel, à feuilles pubescentes et à capitules plus petits. *B. perennis* est très cultivé en bordures. Il arrive que les capitules soient entourés de capitules plus petits, axillaires de bractées involucrales : c'est la pâquerette « mère de famille ».

Chez les *Aster*, au nombre de cinq cents environ, il y a un pappus de deux ou trois rangées de soies. Les fleurs périphériques ont des corolles ligulées de plus de 1 mm de large. L'aster des Alpes *(A. alpinus)* et *A. amellus* ont des ligules violettes ou bleues et un disque jaune. Le premier est basiphile, de petite taille (20 cm) et vit aux étages subalpin et alpin dans les montagnes de l'hémisphère Nord et dans les régions arctiques. Il a des capitules solitaires et des feuilles pubescentes, les basales obovales, les caulinaires lancéolées. Le second se rencontre en Europe centro-orientale et en Asie occidentale, en plaine et à l'étage montagnard. Ses capitules sont plus petits mais réunis au nombre de deux à six en corymbes. Les feuilles sont rudes, entières, obovales en bas, lancéolées sur la tige. *A tripolium* est une espèce halophile souvent rencontrée en grands peuplements dans les endroits côtiers humides et salés du littoral de l'Europe et de toute la Méditerranée, ainsi qu'à l'intérieur de ces terres jusqu'en Asie centrale. C'est une plante haute de 50 cm environ, à feuilles charnues lancéolées ou à peu près linéaires. La plupart des *Aster* croissent en Amérique du Nord. Beaucoup ont été introduits en horticulture et se sont plus ou moins naturalisés en Europe. (*A. novi-belgii, A. salignus, A. novae-angliae,* etc.). Ce sont des Végétaux très rameux, vivaces, à capitules roses, bleus ou violets, très nombreux, qui paraissent au début de l'automne.

Callistephus sinensis est la reine-marguerite, originaire de Chine et du Japon, proche des *Aster* et seule espèce du genre. C'est une plante herbacée annuelle, ramifiée, rugueuse ou hispide, atteignant 80 cm ; ses feuilles ovales

G.-P. Mondino

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

sont grossièrement dentées; ses capitules, solitaires au sommet des rameaux, sont grands avec un involucre de bractées foliacées, des ligules en plusieurs rangées, blanches, pourpres, roses, rouges, lilas, bleues ou violettes, et un disque de fleurs jaunes. Souvent toutes les fleurs sont ligulées chez les formes horticoles. Des deux rangées de soies du pappus, l'externe est formée d'éléments courts et soudés; ce caractère et l'involucre foliacé séparent la plante des *Aster*.

Chez les *Erigeron*, les ligules sont étroites (moins de 1 mm) et le pappus n'a qu'un rang de soies. Il y a deux cent cinquante espèces, surtout en Amérique du Nord. Dans les montagnes d'Europe, on rencontre néanmoins *E. uniflorus*, à capitule muni de ligules blanches ou roses qu'entoure un involucre laineux pourpre, et *E. alpinus*, à capitules solitaires ou au nombre de deux à six, avec des ligules violacées et entourés d'un involucre velu, qui est glanduleux chez *E. villarsii. E annuus (Stenactis annua)* à ligules blanches et disque jaune, est une plante d'Amérique du Nord souvent naturalisée (est de la France, région parisienne, etc.). Les *Conyza* ne sont pas aisés à séparer des *Erigeron* par leurs caractères; les capitules sont petits, nombreux, en panicules denses; les ligules sont courtes ou manquantes. *C. canadensis (E. canadense)* est une plante d'Amérique du Nord devenue cosmopolite; ses tiges rigides et hirsutes sont hautes de 20 à 80 cm; ses feuilles sont lancéolées et ciliées en bas, au niveau d'un pétiole mal défini. Les minuscules capitules cylindriques ont des fleurs tubuleuses jaunes et des ligules courtes d'un blanc sale.

Le genre *Baccharis* compte quatre cents espèces, toutes américaines. Ce sont des arbustes dioïques à capitules petits, oblongs, dont toutes les fleurs sont tubuleuses. *B. halimifolia* habite les dunes côtières de la côte atlantique des États-Unis; il atteint 4 m et est tout à fait glabre, à feuilles glauques et persistantes, obovales et grossièrement dentées en bas, entières et lancéolées vers le haut. Ses petits capitules sont blanchâtres. La plante est naturalisée en Gironde et dans les Pyrénées atlantiques.

Les représentants du genre *Solidago* sont une centaine d'herbes vivaces d'Amérique du Nord surtout, mais aussi d'Amérique du Sud et d'Eurasie, telle la verge d'or *(S. virga-aurea)*. Les *Solidago* ont des ligules et un disque jaune; les capitules sont groupés en panicules de cymes très fournies. Deux espèces d'Amérique du Nord, *S. canadensis*, à tige pubescente, et *S. gigantea*, à tige glabre à la base, sont cultivées et naturalisées en Europe.

Chez les Anthémidées, les fleurs forment en général des capitules à fleurs hermaphrodites et unisexuées. Les anthères ne sont pas en fer de flèche et les styles sont obtus. Le pappus manque ou est réduit. Les bractées de l'involucre ont un bord membraneux. Les feuilles sont généralement découpées de façon pennée. Un premier ensemble de genres n'a pas de paillettes.

Les Matricaires *(Matricaria)* sont une cinquantaine d'espèces de la région méditerranéenne, d'Afrique du Sud et surtout d'Asie subtropicale. *M. chamomilla* est la camomille allemande, plante aromatique annuelle de 15 à 45 cm, à feuilles divisées en lanières filiformes. Ses capitules à ligules blanches et disque jaune ont un réceptacle creux. Elle croît dans les lieux pierreux, sablonneux ou argileux jusqu'à l'étage subalpin. Originaire de l'est de la région méditerranéenne, elle est devenue cosmopolite. On obtient à partir de ses capitules diverses préparations à action antispasmodique et anti-inflammatoire. Son huile essentielle contient, notamment, de la matricine (lactone sesquiterpénique), qui se transforme au cours de l'extraction en une substance bleue, le chamazulène. Cette essence est responsable des propriétés anti-inflammatoires; des carbures terpéniques rendent compte de son odeur. *M. matricarioides (M. discoidea)* n'a pas de ligules. Originaire sans doute d'Asie nord-orientale, il s'est répandu un peu partout et en particulier en France depuis un siècle. Le genre *Tripleurosperum* est voisin, mais les akènes sont très différents. *T. inodorum (Matricaria inodora)* ressemble beaucoup à la camomille, mais ses réceptacles sont pleins. Originaire du nord-ouest de l'Europe, il est devenu cosmopolite.

Les chrysanthèmes *(Chrysanthemum)* comprennent environ deux cents espèces de l'hémisphère Nord et d'Afrique du Sud. *C. segetum* a des ligules jaunes comme le disque; il est haut de 20 à 60 cm, ses feuilles sont

M. Bavestrelli

Deux matricaires :
en haut, **Matricaria chamomilla,** ***à ligules blanches et à disque jaune;***
en bas, **M. matricarioides,** ***dépourvu de ligules.***

M. Bavestrelli

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Chez certaines formes cultivées de chrysanthèmes* (Chrysanthemum sp.), *les capitules présentent des fleurs tubulées très allongées et inégales.*

▼ *Chez la tanaisie* (Tanacetum vulgare), *toutes les fleurs sont tubulées et de couleur jaune.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

grossièrement lobées et dentées. Ses capitules sont solitaires au sommet des rameaux. Il est surtout méditerranéen, mais s'est naturalisé très au nord de l'Europe et ailleurs dans le monde. *C. leucanthemum* est la marguerite, aux ligules blanches et aux feuilles sessiles, lancéolées-spatulées, les supérieures étant auriculées et profondément dentées. Il existe de nombreuses espèces voisines en Europe méridionale et dans les Alpes en particulier. *C. maximum* est l'une d'elles; originaire des montagnes d'Europe centro-méridionale, il a des feuilles non auriculées et de grands capitules (6 à 8 cm). Il est souvent cultivé, fréquemment sous des formes « doubles », c'est-à-dire avec des capitules formés presque entièrement de fleurs ligulées. La tanaisie *(C.* ou *Tanacetum vulgare)* habite les lieux incultes et le bord des chemins en Eurasie. A la différence des espèces précédentes, ses capitules, petits et nombreux, forment un corymbe serré; ils n'ont pas de fleurs ligulées. Les fleurs du disque sont jaunes. Cette plante aromatique atteint 1,50 m, et ses feuilles sont pennatiséquées à segments dentés. Elle est vénéneuse à cause de son essence riche en thuyone, mais on peut s'en servir comme vermifuge. Le pyrèthre *(C. cinerariaefolium)* vit dans les régions côtières calcaires de Dalmatie. Il a des feuilles basales profondément divisées en segments dentés, tomenteuses sur les deux faces. Les capitules ont de 2 à 3 cm de diamètre avec des ligules blanches et un disque jaune. C'est une plante aromatique : ses capitules desséchés contiennent en effet des pyréthrines qui sont des esters d'acides et d'alcools cétones cycliques, à action paralysante, par simple contact, sur les Animaux à sang froid et en particulier sur les Insectes. Les capitules réduits en poudre ou leurs extraits diversement conditionnés sont des insecticides puissants d'action rapide, utilisés en association avec l'huile de sésame, la poudre de *Derris,* le lindane, etc. Les substances qu'ils renferment, très insaturées, sont malheureusement altérables. Les chrysanthèmes cultivés proviennent de *C. indicum* et de *C. morifolium*, d'Extrême-Orient.

Les armoises *(Artemisia)* forment un genre d'environ deux cent cinquante espèces de plantes, des steppes de l'hémisphère Nord surtout. Ce sont des Végétaux adaptés au climat sec. Leurs inflorescences sont composées de capitules petits et nombreux, à pollinisation anémophile. Il n'y a que des fleurs tubulées et la rangée périphérique est souvent femelle. Leurs feuilles sont généralement pennées et digitées. *A. alba (A. camphorata)* est un sous-arbrisseau méditerranéen qui remonte jusqu'en Alsace-Lorraine et en Belgique. Il est glabre ou pubescent, à feuilles en lanières, à odeur forte et camphrée. Ses petits capitules jaunes et pendants, à involucre pubescent, forment des panicules étroites unilatérales. *A. arborescens* dépasse 1,50 m ; c'est un arbrisseau ligneux, très ramifié, blanc, soyeux, à feuilles divisées en lanières plus nombreuses. Ses capitules, d'assez grande taille, jaunes, à involucre tomenteux, forment une panicule feuillue. L'espèce habite les lieux rocheux du littoral méditerranéen et des côtes atlantiques de la péninsule Ibérique. L'absinthe *(A. absinthium)* occupe la région méditerranéenne, l'Europe et l'Asie tempérée, les endroits secs et bien exposés; elle atteint l'étage subalpin. Elle ne dépasse pas 75 cm et demeure herbacée. Elle est blanchâtre et ses feuilles sont soyeuses sur la face inférieure. Les capitules, de 3 à 4 mm, sont jaunes, à involucre blanchâtre, penchés et disposés en panicule unilatérale feuillée. Elle est souvent naturalisée. C'est en effet une plante aromatique qui a été cultivée pour son utilisation comme tonique et stomachique; elle contient des principes amers (lactones sesquiterpéniques) et une essence riche en thuyone ainsi qu'en azulène, qui la colore en vert bleuté. Cette essence servait à la préparation des absinthes et des vermouths, mais elle est toxique et entraîne des troubles psychiques et sensoriels qui s'ajoutent aux effets de l'alcool. La préparation de l'absinthe a été prohibée en France, en Suisse, en Allemagne et en Belgique. L'armoise *(A. vulgaris)*, à odeur assez forte, est une espèce eurasiatique devenue cosmopolite. Elle envahit les décombres et les terrains incultes. Elle atteint 1,50 m, mais reste herbacée. Ses feuilles sont bipennatipartites, glabres au-dessus, tomenteuses en dessous. Ses petits capitules jaunes ou bruns, à involucre tomenteux, sont disposés en glomérules sur les rameaux étalés d'une grande panicule feuillée. *A. verlotorum*, très semblable, est aromatique. Il a des feuilles découpées seulement une fois dans la moitié supérieure de la tige, des capitules rougeâtres, et forme de longs stolons. Originaire d'Asie orientale, il a envahi toute l'Eurasie. On trouve dans les lieux rocheux des montagnes d'Europe centro-méridionale des armoises de petite taille, dont certaines servent à la préparation de liqueurs (génépis). Elles sont malheureusement récoltées inconsidérément et se raréfient : il faut lors de la cueillette respecter les souches qui permettront la repousse de ces plantes vivaces. Le vrai génépi *(A. genipi)*, calciphile, ne dépasse pas 15 cm; il est tomenteux et soyeux. Ses feuilles ont des lobes latéraux profonds. Ses capitules jaunes, à involucre peu velu, sont dressés en grappe simple et feuillée. La plante dégage une odeur d'absinthe. Elle se trouve dans les Pyrénées et les Alpes, à l'étage alpin. *A. glacialis,* acidiphile, et limité à l'étage alpin des Alpes occidentales, est aussi nommé génépi; il ne dépasse pas 15 cm, et est également velu et soyeux. Ses feuilles inférieures sont divisées en lanières; ses capitules jaunes, dressés, sont réunis en un corymbe dense, ombelliforme. *A. laxa,* le génépi blanc, est un peu plus élevé que les précédents. Ses tiges sont simples, avec des feuilles espacées, longuement pétiolées, divisées au sommet en courtes lanières et axillant des capitules solitaires à pédoncule assez développé. Ce génépi occupe les Alpes, les Apennins, les Pyrénées et la sierra Nevada, à l'étage alpin. *A. cina,* du Turkestan russe, fournit ses capitules non épanouis ou *« semen contra »* (sous-entendu *vermes :* « graine contre les Vers »), qui contiennent surtout de la santonine, lactone sesquiterpénique qui leur confère des propriétés vermifuges. La santonine pure est aussi extraite de la plante; elle agit sur les Vers ronds (ascaris, oxyures), mais peut causer des troubles nerveux, visuels et gastro-intestinaux et s'emploie maintenant relativement peu. *A. dracunculus* est l'estragon, originaire de Sibérie et de l'ouest de l'Amérique du Nord. Il est souvent cultivé et sert de condiment à cause de son essence riche en méthylchavicol. Il atteint 60 cm; ses feuilles supérieures sont entières, les inférieures trilobées. *A. pontica,* la petite absinthe d'Europe méridionale et d'Asie occidentale, est utilisé pour fabriquer des liqueurs.

Dans un second groupe de genres de cette tribu des Anthémidées, les capitules ont des paillettes. Le genre *Anthemis* lui-même comprend cent dix espèces de la région méditerranéenne au sens large et d'Asie Mineure. Les feuilles sont divisées de une à trois fois, de façon pennée. Les capitules ont le plus souvent des ligules

blanches ou jaunes, le disque est jaune; les paillettes se terminent en arête et l'akène n'a pas de pappus. La camomille puante ou maroute *(A. cotula)* ressemble beaucoup à la camomille, mais en diffère par l'odeur fétide qu'elle dégage. L'akène est très verruqueux. D'origine eurasiatique, la plante est à peu près cosmopolite et habite les lieux cultivés et incultes bien exposés. La fausse camomille *(A. arvensis)* est voisine mais inodore; son akène est lisse, ses paillettes sont brusquement rétrécies en arêtes. La camomille romaine *(A. nobilis)* est la plante vendue en général en herboristerie sous le nom de camomille. Elle ressemble aux autres espèces, mais ses fleurs tubuleuses ont une corolle prolongée vers le bas en coiffe autour du sommet de l'akène et ses paillettes sont obtuses. On constitue parfois pour cela, avec elle et deux autres *Anthemis*, un genre *Ormenis*. Elle est aromatique. Elle vit dans le sud-ouest de l'Europe, jusqu'en Angleterre. Elle se rencontre en France, surtout dans la moitié ouest.

Les Achillées *(Achillea)* sont plus de cent espèces dans l'hémisphère Nord. Les nombreux petits capitules sont groupés en corymbes denses, les ligules sont blanches, jaunes ou roses et les paillettes sont presque aussi grandes que les bractées de l'involucre. La millefeuille *(A. millefolium)*, d'Europe et de Sibérie, est haute de 15 à 60 cm. Elle doit son nom à ses feuilles à contour oblong, trois fois pennées en de très étroits et très nombreux segments. Ses capitules ont des ligules blanches, plus rarement roses, et un disque blanc jaunâtre. Cette plante est un tonique amer (lactones sesquiterpéniques); elle est douée de propriétés astringentes, antispasmodiques et anti-inflammatoires, ces dernières étant dues aux flavonoïdes et à l'azulène que contient aussi son essence. *A. macrophylla* habite l'étage subalpin de l'ouest des Alpes et les Apennins. Il atteint 1 m et possède de grandes feuilles pennatipartites à segments aigus et dentés. Ses inflorescences sont assez peu fournies, mais ont de grandes ligules blanches. *A. nobilis* ressemble à la millefeuille, mais ses feuilles sont moins divisées, à segments plus larges, et ses ligules sont toujours blanchâtres; c'est une plante thermophile du sud de l'Europe et de l'ouest de l'Asie qui préfère les zones arides et caillouteuses. Elle se rencontre dans l'est et le sud-est de la France. *A. tomentosa* se reconnaît facilement à sa petite taille (20 cm) et à son revêtement pubescent gris. Ses feuilles sont bipennatiséquées, ses ligules jaunes. C'est une espèce xérophile de plaine et de l'étage montagnard dans le sud-ouest de l'Europe. L'herbe à éternuer *(A. ptarmica)* habite les endroits frais de l'Europe et de l'ouest de l'Asie. Ses feuilles sont entières, lancéolées, simplement dentées. Elle montre des corymbes larges et peu fournis dont les capitules ont de grandes ligules. Sa poudre, si on la respire, provoque des éternuements, propriété utilisée dans l'ancienne médecine. Il existe un groupe d'espèces de haute montagne, tel *A. nana*, petite plante (15 cm) tomenteuse grisâtre, à feuilles oblongues pennatiséquées rassemblées à la base des courtes tiges.

Il y a huit *Santolina*, arbrisseaux répandus surtout dans l'ouest de la région méditerranéenne. Toutes les fleurs sont en tube, hermaphrodites, avec une corolle éperonnée à la base. La santoline cyprès *(S. chamaecyparissus)* est un sous-arbrisseau xérophyte, toujours vert, des régions méditerranéennes occidentales, à odeur forte et désagréable. Elle est très répandue dans les jardins pour border les massifs; elle se multiplie facilement par bouture. Elle est densément rameuse, tomenteuse et grise ou blanche, avec des tiges ne dépassant pas 50 cm. Ses feuilles sont petites, un peu succulentes et ont des lobes obtus de 2 mm. Les capitules sphéroïdaux sont solitaires au sommet de longs pédoncules. Les fleurs sont jaunes.

Chez les Inulées, les capitules ont des fleurs hermaphrodites et femelles. La corolle des fleurs du disque est actinomorphe. Les anthères sont appendiculées de chaque côté. Les stigmates aplatis, sans appendice stérile, obtus, ont un tissu récepteur sur deux lignes marginales.

Au genre *Inula* appartiennent environ cent vingt espèces de l'Ancien Monde, habituellement vivaces. Les feuilles sont simples et alternes. Le pappus est formé d'un rang de soies. Les fleurs ligulées sont femelles. *I. conyza* atteint 1 m. Il est rameux, à feuilles oblongues presque entières et brièvement pétiolées, tomenteuses en dessous comme la tige. Les petits capitules en corymbe dense ont un involucre à plusieurs rangs de bractées recourbées vers l'extérieur au sommet (bractées squarreuses). Les ligules, rougeâtres, sont très réduites, dressées et à peine plus longues que les fleurs en tube. *I. conyza* est répandu en Eurasie et en Afrique du Nord, dans les lieux incultes ensoleillés.

Dans le genre *Pulicaria*, qui compte quarante-cinq espèces de l'Ancien Monde, le pappus possède, extérieurement aux soies, une collerette dentée. *P. vulgaris* est une plante annuelle, rameuse, qui habite les bords des chemins et les lieux argileux de la région méditerranéenne, de l'Europe et de l'Asie tempérée jusqu'en Mongolie. Elle atteint 40 cm. Ses feuilles sont molles, entières, ondulées, pubescentes en dessous. Les capitules ont des ligules jaunes, dressées, très courtes, dépassant à peine l'involucre. Dans les lieux humides de la région méditerranéenne et d'Europe occidentale croît l'herbe Saint-Roch *(P. dysenterica)*, vivace, atteignant 60 cm, à feuilles ondulées mais dentées, laineuses en dessous, embrassant la tige, et à longues ligules jaunes rayonnantes.

M. et S. Prato

▲ ***Les capitules de la millefeuille* (Achillea millefolium) *sont petits, nombreux et regroupés en corymbe.***

▼ ***Deux représentants du vaste genre* Artemisia *: à gauche,* A. absinthium, *l'absinthe; à droite,* A. glacialis, *un génépi.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

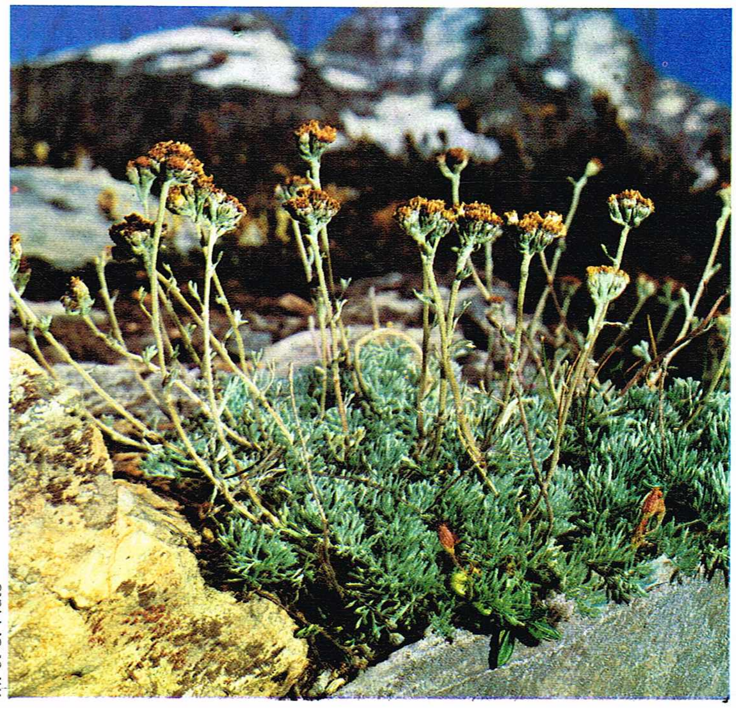

M. et S. Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Chez l'edelweiss* **(Leontopodium alpinum),** *plusieurs capitules sont groupés et entourés de grandes bractées laineuses; cette petite plante de l'étage alpin est bien trop cueillie.*

▼ *Le souci des champs,* **Calendula arvensis.**

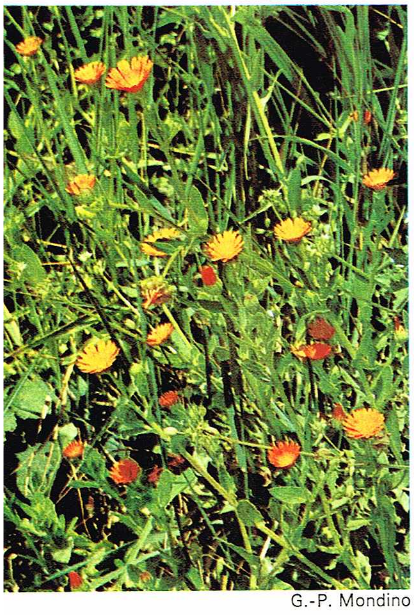

G.-P. Mondino

Les immortelles (*Helichrysum*) doivent leur nom vulgaire aux bractées de leur involucre qui sont scarieuses, souvent colorées et persistent longtemps, d'où l'utilisation de ces plantes pour la confection de bouquets perpétuels. Il n'y a pas de paillettes. Toutes les fleurs sont hermaphrodites et tubuleuses ou quelques-unes à l'extérieur sont femelles et filiformes. Il y a cinq cents espèces dans l'Ancien Monde, surtout en Afrique du Sud et à Madagascar. L'immortelle commune *(H. stoechas)* atteint 50 cm; elle est ligneuse à la base, très rameuse. Ses tiges sont blanches et tomenteuses comme ses feuilles linéaires et révolutées. L'involucre est jaune d'or. Les capitules forment un corymbe dense. C'est une plante du sud-ouest de l'Europe, présente en France dans le Midi (jusqu'à Lyon) et sur le littoral atlantique. Certaines espèces d'immortelles habitent les hauteurs, à l'horizon des bruyères et des grands *Lobelia*, dans les montagnes d'Afrique orientale.

Les *Leontopodium, Gnaphalium* et *Antennaria* n'ont pas de paillettes au réceptacle. Chez les *Leontopodium,* au nombre de cinquante en Eurasie, les capitules subsessiles sont eux-mêmes presque groupés en un capitule secondaire entouré ici de bractées rayonnantes, peu tomenteuses. L'edelweiss *(L. alpinum)* est recouvert d'une couche de poils blancs laineux. Les petits capitules possèdent des fleurs centrales tubuleuses jaunes, hermaphrodites en apparence, mais dont seul le pollen est fertile. Les fleurs périphériques ont une corolle filiforme et sont femelles. Cette plante vivace habite les pierrailles calcaires, à l'étage alpin, en milieu très sec et bien ensoleillé; l'indumentum laineux (à poils dont les cellules sont remplies d'air) constitue une couche isolante réduisant la transpiration et défendant la plante contre les écarts de température, qui sont très importants à cette altitude. On trouve l'edelweiss dans les Alpes, le sud du Jura, les Pyrénées, les Carpates et les Apennins ligures. Des espèces voisines existent dans l'Himalaya, jusqu'à 5 400 m d'altitude, dans l'Altaï, la Mongolie et la Sibérie. Dans les trois derniers cas, les *Leontopodium* sont des plantes steppiques. Les edelweiss sont souvent cultivés dans les jardins de rocaille, mais, à basse altitude, ils perdent en partie le revêtement laineux qui fait leur beauté. Ils sont exagérément cueillis dans leur milieu naturel et bien des stations ont été anéanties.

Chez les *Gnaphalium,* les capitules forment des épis plus ou moins lâches ou des glomérules, eux-mêmes en épis. Les fleurs sont réparties comme chez l'edelweiss, mais les hermaphrodites ont un ovaire fertile. *G. silvaticum* atteint 60 cm. Il a des feuilles lancéolées-linéaires, blanches en dessous. Ses inflorescences sont des épis de glomérules de un à cinq capitules cylindriques à bractées involucrales bordées de brun. Cette espèce habite les forêts et les fourrés, surtout sur sol acide, en Europe, dans le Caucase, en Sibérie et dans l'est de l'Amérique du Nord. *G. norvegicum* est voisin, mais plus petit; ses feuilles sont plus larges, ses épis contractés. Son aire est comparable à celle de *G. silvaticum* mais il est limité à l'étage subalpin. *G. supinum* ne dépasse pas 10 à 12 cm et croît à l'étage alpin dans les montagnes d'Europe, d'Asie centrale et de l'est de l'Amérique du Nord, ainsi que dans la zone arctique d'Europe et d'Amérique. Il est gazonnant, à la différence de *G. hoppeanum,* qui n'est guère plus haut et limité aux montagnes de l'Europe centrale et méridionale, à l'étage alpin.

Les *Antennaria,* au nombre de cinquante, répandus dans les régions tempérées et arctiques, sont tous dioïques. Les fleurs femelles ont une corolle filiforme, les mâles ont l'aspect de fleurs hermaphrodites, mais seules les étamines sont fertiles. Le pied-de-chat *(A. dioica)* est une espèce d'Europe, de Sibérie et d'Amérique du Nord. Vers le sud, comme en France, il est limité aux pâturages pauvres et acides des étages subalpin et alpin. Il atteint 25 cm et forme des stolons avec des rosettes de feuilles spatulées, aiguës au sommet, blanches et tomenteuses en dessous. Les tiges florifères ont des feuilles linéaires et portent de trois à huit capitules en corymbe dense, à involucre de bractées dressées blanches ou roses. *A. carpathica* n'a pas de stolons et ses capitules sont bruns ou noirâtres. Il n'est pas exigeant quant au pH du sol, mais est limité à l'étage alpin des montagnes d'Europe centro-méridionale.

Les cotonnières ou *Filago* sont voisines par le port des genres précédents mais ont des paillettes. Il existe une quarantaine d'espèces dans l'hémisphère Nord. *F. germanica,* plante méditerranéenne, mais qui remonte jusqu'au sud de la Scandinavie, ne dépasse pas 30 cm. Il est tomenteux, à feuilles linéaires-aiguës, et forme des glomérules d'une douzaine de capitules dont les bractées involucrales sont jaunâtres à la pointe. La tige se termine par un glomérule d'où partent, juste en dessous, les pédoncules feuillés de deux autres glomérules ou plus. Cette ramification cymeuse est générale dans le genre. Chez *F. gallica,* les glomérules de capitules sont entourés de feuilles et les akènes périphériques sont enveloppés par les bractées involucrales reployées en tube à leur base. C'est une plante d'Europe occidentale et méridionale et de la région méditerranéenne.

Les *Asteriscus* ou *Odontospermum* sont une quinzaine d'espèces méditerranéennes. *A. pygmaeus,* dont l'aire s'étend du Sahara au Beloutchistan, est la rose de Jéricho. Son nom est appliqué aussi à d'autres Végétaux. On signalera que cette tribu renferme deux genres arbustifs ou arborescents de Madagascar et d'Afrique du Sud. Ainsi, les *Brachyleana* sont des arbres atteignant 40 m. Les fleurs ligulées sont femelles et les fleurs du disque sont en tube et de morphologie hermaphrodite, mais à pollen seul fertile, sauf exception, et à style indivis. Les stigmates des fleurs fertiles sont obtus comme chez les Anthémidées. Les akènes, volumineux et souvent de forme bizarre, n'ont pas de pappus; les feuilles sont alternes.

Il y a une quinzaine de soucis *(Calendula)* dans la région méditerranéenne au sens large. Le souci des champs *(C. arvensis)* atteint au nord la Moselle et à l'est l'Himalaya. Il est cultivé et souvent naturalisé. Toutes ses feuilles sont lancéolées-aiguës. Ses capitules ont de 1 à 2 cm de diamètre. Leurs ligules sont jaune clair le plus souvent. Les akènes sont polymorphes : ceux de l'extérieur sont arqués, très épineux sur le dos, et plus ou moins ailés latéralement, ceux de l'intérieur sont enroulés en anneau. *C. officinalis,* le plus cultivé, a des feuilles généralement ovales et spatulées et des capitules plus grands (de 2 à 5 cm) à ligules jaune foncé ou orangées. Il est probablement d'origine méditerranéenne, mais a été répandu dans le monde entier par la culture.

Dans le groupe des Arctotées, on trouve surtout des espèces d'Afrique du Sud, dont les fleurs ligulées sont souvent stériles. Le style est épaissi supérieurement. Le pappus, s'il existe, est écailleux. Les *Gazania* sont une vingtaine de plantes d'Afrique du Sud. Les *Gazania* × *splendens* sont un groupe d'hybrides horticoles à feuilles lancéolées entières, grisâtres et à grands capitules à larges ligules jaunes ou diversement colorées; ils sont fréquemment cultivés.

Chez les Hélianthées, les capitules sont généralement hétérogames à ligules jaunes comme les fleurs tubuleuses du disque; il y a des paillettes; les stigmates sont variables, de même que les anthères. Le pappus est formé de quelques soies ou d'écailles qui sont parfois les vrais sépales,

au nombre de cinq. Les feuilles, au moins les inférieures, sont opposées et généralement rugueuses.

Il y a une centaine d'espèces de soleils *(Helianthus)*, toutes américaines. Les akènes sont aplatis latéralement et entourés par les paillettes; les ligules sont stériles. Le tournesol *(H. annuus)* semble provenir du Mexique et a été introduit en Europe dès 1596. Il est annuel et atteint 3 m. Toutes ses feuilles sont alternes, largement ovales, cordées en bas, à trois nervures principales longitudinales, très rudes. Les capitules, à grandes ligules jaunes et fleurs fertiles brunâtres, atteignent 30 cm de diamètre et sont penchés. Ils donnent des akènes noirs, gris, blancs ou striés qui dépassent 15 mm. Les graines contiennent de 28 à 50 % d'huile selon les variétés. C'est pour la production de cette huile, dont l'usage se répand en France depuis 1960 environ, qu'on cultive en grand le tournesol, avant tout en U.R.S.S., en Europe sud-orientale, en Argentine, etc. Des cultures ont aussi été entreprises en France. La plante affectionne les zones à faible pluviosité, elle résiste assez bien au froid et accomplit son cycle vital pendant l'été, parfois en soixante-dix jours seulement. Il lui faut alors de la chaleur; elle préfère les sols riches en azote et en potassium.

Il y a trente *Rudbeckia* dans la Prairie d'Amérique du Nord. Leur disque brun est porté par un réceptacle très bombé. *R. laciniata*, à feuilles plus ou moins pennées, et *R. hirta*, à feuilles simples, sont très cultivés; les ligules sont jaunes; chez *R. purpurea*, elles sont pourpres. Elles sont toujours stériles.

Les dahlias *(Dahlia)* sont une quinzaine de plantes des hauts plateaux du Mexique et du Guatemala. On cultive dans les jardins d'innombrables formes et hybrides de *D. pinnata (D. variabilis)*, *D. coccinea* et *D. juerzii*. Les dahlias sont des plantes vivaces, hautes de 0,50 à 1,50 m, très rameuses, à grosses racines fusiformes qui servent à leur reproduction végétative; elles sont riches en inuline. Leurs tiges creuses et succulentes portent des feuilles pennées à segments ovales-aigus et des capitules, longuement pédonculés, le plus souvent « doubles », c'est-à-dire ne renfermant que des ligules. Le disque, quand il existe, est jaune. Les ligules sont plates, parfois enroulées en tube, souvent courtes, repliées en gouttière et formant des alvéoles (dahlia pompon), ou bien longues et pointues et repliées en arrière (dahlia cactus). Elles peuvent présenter les tons les plus divers. Le groupe de racines, conservé pendant l'hiver au sec et au frais, est mis à « germer » dans une terre légère, à l'abri ou à l'air libre lorsque le printemps est avancé. Quand les bourgeons pointent, on divise les tubercules et on les replante à demeure. La multiplication par boutures, en faisant prendre racine aux rejets qui proviennent de la « germination » des tubercules, est aussi précieuse pour obtenir de nombreux pieds. Pour les hybridations des formes simples, il convient d'utiliser les fleurs externes du disque; les fleurs internes ont souvent un ovaire atrophié, et les fleurs ligulées sont stériles. Les graines germent aisément et c'est grâce à elles évidemment que sont obtenues les variétés nouvelles.

Les vingt-neuf *Cosmos* sont américains et surtout mexicains. *C. bipinnatus* est annuel, glabre, à tige dressée, ramifiée, dépassant 1 m. Ses feuilles opposées sont divisées en étroites lanières. Ses capitules sont longuement pédonculés, avec de grandes ligules ovales, blanches, roses ou pourpres, et un disque jaune. Il est fréquemment cultivé.

Le genre *Bidens* compte deux cent quarante espèces principalement dans les régions chaudes et surtout en Amérique. Le chanvre d'eau *(B. tripartita)* a des feuilles opposées entières ou divisées en trois segments lancéolés, sur une tige dressée et rameuse, atteignant 1 m; ses capitules discoïdaux et jaunes sont entourés par des bractées foliacées et lancéolées épanouies. Il est commun dans les lieux humides d'Eurasie et limité aux zones tempérées. Il n'a généralement pas de ligules, mais elles sont présentes chez beaucoup d'autres *Bidens*. Les akènes aplatis dorso-ventralement portent deux ou trois épines barbelées qui aident à leur dissémination. Plusieurs autres *Bidens* sont indigènes en Eurasie. Diverses espèces américaines se naturalisent en Europe.

Chez les *Zinnia*, d'Amérique et surtout du Mexique, il y a des paillettes, et les corolles des fleurs ligulées demeurent sur les akènes sous forme d'ailes. Le disque est fertile. *Z. elegans*, du Mexique, est souvent cultivé dans les jardins. Il est annuel, d'environ 80 cm, à larges feuilles opposées embrassant la tige. Les capitules sont souvent doubles ou semi-doubles.

La tribu des Ambrosiées est assimilée par certains auteurs à la précédente, qu'elle rappelle par ses feuilles rudes. Elle est très spécialisée et ses représentants ont été jadis placés dans d'autres familles ou bien on en a fait une famille des Ambrosiacées. Les capitules sont souvent unisexués et les fleurs femelles sont apétales ou à peu près. Ce sont des plantes anémophiles. Le genre *Xanthium* compte une vingtaine d'espèces d'Eurasie et d'Amérique. La lampourde *(X. strumarium)* est une plante buissonnante rugueuse, à tige couverte de petites taches linéaires pourprées. Ses feuilles sont triangulaires, irrégulièrement lobées et dentées. Ses petits capitules sont unisexués. Les mâles forment des glomérules en haut des tiges et tombent après la floraison. Leurs fleurs sont mêlées de paillettes et ont cinq étamines à anthères libres. Les capitules femelles, à deux fleurs sans corolle, sont réunis par deux ou trois aux aisselles des feuilles et ont un involucre terminé par deux crochets et portant des aiguillons courbes. Les infrutescences sont constituées par les involucres accrescents, de 12 à 18 mm de long, munis de leurs aiguillons et de leurs deux cornes au sommet, et contenant les deux graines. La plante est cosmopolite et habite les décombres, les bords des routes, etc. Elle est sans doute originaire d'Eurasie.

Archives P2

▲ *Parterre de soucis* (**Calendula officinalis**).

C. Bevilacqua

◀ **Helianthus annuus**, *le tournesol.*

▼ *En haut, dahlia « pompon »; en bas, dahlia à ligules flammées.*

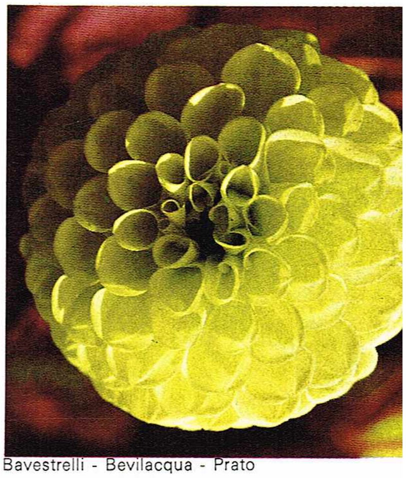

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

C. Bevilacqua

M. Pedone

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Chez les zinnias, les fleurs périphériques du disque sont munies d'anthères jaunes qui dépassent largement les petites corolles tubulées.***

▼ ***A gauche,* Ambrosia elatior *a un port qui ressemble à celui des armoises. A droite, quelques plants de gaillardes* (Gaillardia sp.).**

Les *Ambrosia* vivent surtout en Amérique, mais deux sont méditerranéens. Les capitules mâles, disposés en épis, ont un involucre à bractées soudées. Il y a des paillettes et les anthères des fleurs mâles sont libres. Les capitules femelles sont le plus souvent uniflores et sessiles à l'aisselle des feuilles. Les fleurs femelles n'ont pas de corolle. L'involucre a ses bractées soudées. Il entoure le fruit, qui n'a pas de pappus. *A. maritima* habite les côtes de la Méditerranée. Il est aussi présent en Corse. Son port est très semblable à celui des armoises et il est aromatique.

Les Héléniées sont voisines des Hélianthées, mais les paillettes sont absentes et les feuilles souvent alternes. Elles sont essentiellement américaines (zone équatoriale et côte Pacifique de l'Amérique du Nord).

Les *Gaillardia* (gaillardes), au nombre d'une vingtaine, ont fourni des plantes horticoles, *G. pulchella* et *G. aristata*. Seul le dernier est vivace. Le réceptacle est fortement convexe, les ligules sont jaunes chez le second, jaunes en haut et rouges en bas chez le premier, en coin et fortement tridentées; elles sont stériles. Ces deux espèces des États-Unis et du sud du Canada ainsi que d'autres ont été hybridées et les formes vivaces de l'hybride *(G. × hybrida)* à ligules jaunes et rouges diversement panachées sont les plus répandues.

Les œillets d'Inde *(Tagetes)* sont des herbes à odeur forte, à feuilles très divisées, à capitules assez grands, solitaires, fréquemment doubles chez les formes cultivées, portés par des pédoncules souvent épaissis au sommet. Les bractées involucrales sont en partie soudées. *T. patula* et *T. erecta* sont souvent cultivés. Le premier a des ligules brunes et veloutées, bordées de jaune; chez le second, elles sont jaune pâle ou orangées; ces deux espèces sont annuelles et d'origine mexicaine. Il y en a une trentaine d'autres.

Les *Helenium* ont des feuilles alternes, en général décurrentes. Le réceptacle est très bombé. Les ligules sont femelles et fertiles ou non, en coin, avec trois ou cinq dents. *H. autumnale,* des États-Unis et du sud-est du Canada, est très cultivé et parfois naturalisé.

Dans la tribu des Carduées (Cynarées), les capitules sont en général homogames. Si des fleurs périphériques

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

E.P.S.

femelles ou stériles existent, elles ne sont pas ligulées. Le style est gonflé ou possède de longs poils collecteurs sous le point de séparation des stigmates. Le pappus a généralement plusieurs rangs de soies. L'involucre a de nombreuses rangées de bractées.

Echinops sphaerocephalus est, comme les cent vingt autres espèces de ce genre, facilement reconnaissable à ses capitules secondaires sphériques. Ceux-ci sont formés de capitules primaires uniflores mais à involucre de plusieurs rangs de bractées. Les fleurs ont une corolle peu gamopétale. La plante atteint 1,50 m ; la tige et le dessous des feuilles sont cotonneux. Ces dernières sont pennatifides et un peu épineuses, glanduleuses au-dessus, de même que la tige. Les fleurs sont d'un bleu glauque caractéristique. La plante habite les lieux arides du centre et du sud de l'Europe et de l'Asie tempérée. Elle est cultivée et naturalisée en divers endroits.

Chez les *Carlina,* les capitules ont de nombreuses fleurs, les akènes sont soyeux et les bractées de l'involucre sont scarieuses et rayonnantes par temps sec ; elles se rapprochent si l'air est humide : les capitules des grandes espèces servent d'hygromètre. La carline acaule *(C. acaulis)* a un vaste capitule de 5 à 15 cm, à bractées involucrales internes blanc argenté, solitaire au sommet d'une tige généralement courte (parfois de 40 cm cependant). La sous-espèce *simplex,* à feuilles ondulées épineuses, est seule présente en France ; la sous-espèce *acaulis,* à feuilles planes, se trouve en Europe orientale. Elle croît de la plaine à l'étage subalpin, tandis que la forme française est limitée aux étages montagnard et subalpin. Plusieurs carlines ont le même port, mais sont moins décoratives car leurs bractées internes ne sont pas blanches. *C. vulgaris* a une tige atteignant 50 cm, simple ou rameuse au sommet, avec des feuilles fortement épineuses, sinuées, pubescentes et vert grisâtre en dessous. Ses capitules sont relativement petits (4 cm), avec des bractées involucrales internes rayonnantes jaunâtres, étroites et ciliées à la base. Il habite les lieux secs d'Europe, surtout sur sol calcaire. Il en existe deux espèces voisines moins épineuses ou à feuilles blanches et tomenteuses en dessous. Certaines carlines caulescentes de la région méditerranéenne ont des bractées internes pourpres.

Il n'y a que six *Arctium* ou bardanes, en Eurasie tempérée. Leur involucre a de nombreuses bractées plurisériées crochues au sommet. C'est l'ensemble du capitule qui est disséminé, les bractées assurant son accrochage aux toisons des Animaux. Toutes les fleurs sont hermaphrodites et tubuleuses, le plus souvent rouges. La grande bardane *(Arctium lappa [A. majus = Lappa major])* a des capitules peu velus (ils sont aranéeux chez *A. tomentosum*). Ils atteignent 4 à 5 cm de diamètre, et les pétioles sont pleins. Ils sont creux chez *A. vulgare,* qui a de gros capitules. Les capitules ne dépassent pas 2,5 cm chez *A. minus*. Toutes ces espèces sont bisannuelles, hautes de 1,50 m environ, avec des feuilles simples pubescentes, blanchâtres en dessous. Elles habitent les lieux secs.

Les *Serratula* sont au nombre de soixante-dix, surtout dans la région méditerranéenne et jusqu'en Asie centrale. Le pappus se détache facilement soie par soie. La sarrette des teinturiers *(S. tinctoria)* est fréquente en Europe et en Sibérie dans les prés et les bois surtout calcaires ; elle est vivace, glabre, avec une tige rigide atteignant 1 m. Ses feuilles sont pennatipartites et finement dentées-aristées, celles de la base parfois entières et ovales-lancéolées. Les capitules sont peu nombreux, oblongs, cylindriques, avec un involucre en plusieurs rangées de bractées rougeâtres triangulaires et des fleurs pourpres toutes en tube.

Le genre *Centaurea* compte plus de cinq cents espèces, surtout dans la région méditerranéenne et en Asie occidentale, mais aussi en Afrique du Nord, en Amérique du Nord et au Chili. Les fleurs sont toutes en tube, mais les marginales sont hypertrophiées et zygomorphes. Les bractées de l'involucre ont des appendices terminaux épineux ou diversement divisés, précieux pour la distinction des espèces. Le pappus à soies courtes n'est pas toujours présent. Les fleurs sont blanches, bleues, violettes, pourpres, roses ou jaunes. Le bleuet *(C. cyanus)* se rencontre dans les moissons, avec ses capitules de fleurs bleues. Originaire de l'est de la région méditerranéenne et répandu sur la terre entière, il est maintenant en voie de raréfaction comme les autres messicoles. Il est annuel ou bisannuel. Ses feuilles sont vert blanchâtre, lancéolées,

C. Bevilacqua

▲ *Les œillets d'Inde* **(Tagetes patula)** *sont très souvent employés pour les parterres ou les bordures fleuries.*

▼ *Chez* **Carlina acaulis subsp. simplex,** *la carline acaule, les bractées de l'involucre sont rayonnantes et argentées et les feuilles sont épineuses.*

M. Bavestrelli

M. et S. Prato

M. et S. Prato

▲ ***Deux chardons d'Europe que l'on rencontre jusqu'à l'étage subalpin : à gauche,* Cirsium eriophorum *;* *à droite,* Carduus nutans *; on peut remarquer les bractées très aiguës et piquantes.***

sauf les basales qui sont pennatipartites et un peu tomenteuses. Les bractées de l'involucre portent des écailles marginales argentées sur leur portion supérieure triangulaire. L'infusion de capitules de bleuets est anti-inflammatoire et peut être utilisée en collyre pour soigner les conjonctivites. Le pigment bleu est fort complexe et renferme du fer. *C. montana* croît aux étages montagnard et subalpin, en Europe centrale et méridionale. Ses capitules solitaires bleus, terminant une tige simple, rappellent ceux du bleuet. Ses bractées involucrales ont une bordure noire irrégulièrement et brièvement ciliée. Ses feuilles sont indivises et longuement décurrentes. La centaurée jacée *(C. jacea)* a des fleurs pourpres, et ses bractées involucrales ont un appendice clair orbiculaire irrégulièrement déchiqueté. Elle est commune en Europe.

Les vingt-cinq *Carthamus* se rencontrent de la région méditerranéenne à l'Asie centrale; ils sont raides et épineux. Les feuilles supérieures entourent le capitule dont les fleurs sont jaunes ou orange. Les paillettes ont la forme de soies. *C. lanatus (= Kentrophyllum lanatum)* est annuel, à feuilles cartilagineuses, pennatifides, sessiles et auriculées à la base. Les bractées involucrales portent des appendices épineux dentés. D'abord aranéeuse, la plante devient vite glabrescente, mais conserve des poils glanduleux. Elle est essentiellement méditerranéenne, mais atteint le centre de la France. Le safran bâtard *(C. tinctorius)* a des feuilles à peine moins épineuses; ses fleurs sont rouge-orangé et ses akènes n'ont généralement pas de pappus. Il est inconnu à l'état sauvage et était cultivé jadis pour ses fleurs qui fournissaient des colorants jaunes et rouges. Un pigment jaune qui est une chalcone (flavonoïde particulier) est oxydé enzymatiquement en un dérivé quinonique rouge. Les préparations contenant cette carthamone étaient utilisées pour la teinture des tissus et la préparation de cosmétiques (vermillon d'Espagne). Les akènes fournissent une huile alimentaire incorporée aux margarines et industrielle.

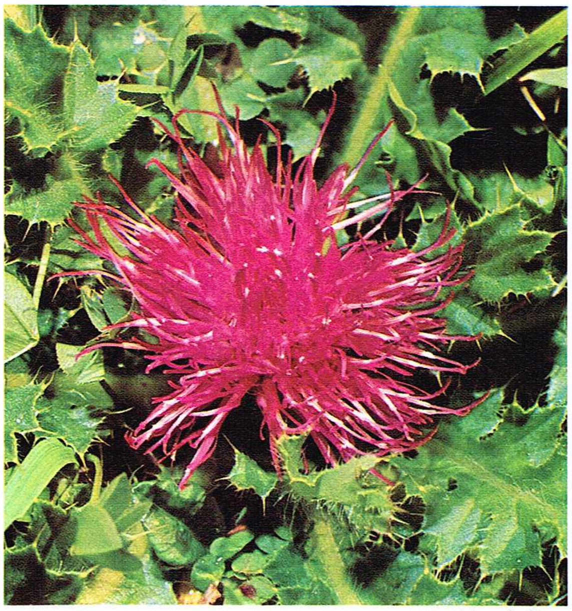

M. et S. Prato

▶ **Cirsium acaule *possède une tige très courte et des feuilles épineuses disposées en rosette.***

Les *Carduus* (cent cinquante espèces) et les *Cirsium* (deux cent cinquante espèces) sont les chardons, terme réservé surtout au premier genre. Ils se distinguent par un caractère assez subtil : le pappus est constitué par des soies simplement dentelées chez les premiers, plumeuses chez les seconds, où elles portent elles-mêmes de fines et longues soies latérales. *Carduus nutans* atteint 1 m et a de gros capitules pourpres inclinés. Il est largement répandu en Europe et dans la moitié ouest de l'Asie jusqu'à l'étage subalpin. Il est très épineux par ses feuilles pennatifides, aranéeuses en dessous, et sa tige ailée. Les bractées involucrales externes sont longuement triangulaires, repliées en dehors, très épineuses au sommet.

Cirsium vulgare (C. lanceolatum) a des feuilles épineuses au bord et à la face inférieure, décurrentes, pennatipartites et vertes sur les deux faces. Il atteint 1,50 m. Ses capitules sont rouge clair à bractées épineuses recourbées. C'est une plante bisannuelle très commune dans les terrains vagues et au bord des chemins d'Europe et de la moitié ouest de l'Asie. *C. eriophorum,* également bisannuel, a des feuilles épineuses sur le bord et au-dessus, mais elles ne sont pas décurrentes. Il possède de gros capitules à involucre aranéeux, formé de bractées spatulées, épineuses au sommet et assez polymorphes. Il croît en Europe surtout centro-méridionale, jusqu'à l'étage subalpin. *C. arvense* est dioïque, quoique les pieds mâles puissent donner quelques fruits. Il est vivace, atteint 1 m de hauteur, et ses feuilles caulinaires, pennatilobées et sessiles, sont munies de quantité d'épines et aranéeuses ou non en dessous. Sa tige est inerme et à peu près glabre ainsi que l'involucre des nombreux petits capitules qui sont formés de fleurs unisexuées à corolle lilas. Il croît en Europe, en région méditerranéenne et en Asie tempérée jusqu'à l'étage subalpin. *C. palustre* atteint 1,50 m. Il est dressé, simple ou ramifié. Ses feuilles pennatipartites sont hérissées d'épines et longuement décurrentes sur la tige, qui est ainsi ailée et épineuse. Les capitules, à bractées noires au sommet, forment un glomérule sommital. La plante habite les endroits marécageux d'Europe et de l'ouest de l'Asie. *C. acaule,* qui habite l'Europe centro-occidentale, croît dans les terrains plutôt calcaires et bien exposés. Ses capitules, solitaires ou groupés par deux ou trois, rouge pourpré, sont portés par une tige ne dépassant guère 15 cm et prolongeant une rosette de feuilles épineuses très divisées.

Les *Cynara* sont une douzaine d'espèces méditerranéennes. Le cardon sauvage *(C. cardunculus),* d'Europe méridionale et d'Afrique du Nord, a donné des formes cultivées de cardon, ainsi que l'artichaut, dont on peut faire une espèce *(C. scolymus)*. Les bractées involucrales ont une base charnue et le réceptacle des capitules l'est également. L'akène comporte quatre côtes longitudinales, à la différence de celui des cirses. Les feuilles basales atteignent 70 cm de long et sont pennatifides, épineuses ou non, aranéeuses en dessous. Les capitules atteignent 10 cm de diamètre. Leurs bractées sont épineuses chez le cardon, mais non chez l'artichaut. Les artichauts sont les

capitules floraux encore en bouton, dont la forme rappelle un peu une pomme de pin. Le « foin » est formé des boutons floraux qui deviennent des fleurs tubuleuses bleues si on laisse le capitule s'épanouir; la partie comestible est constituée par le réceptacle tendre et un peu amer. La feuille d'artichaut, surtout à cause de l'acide dicaféylquinique (cynarine) qu'elle contient, est diurétique, cholérétique et protectrice de la cellule hépatique.

Il y a dans la région méditerranéenne et l'Asie occidentale une quarantaine d'espèces d'*Onopordum*. Leur réceptacle est également charnu, mais possède des bandes sétifères membraneuses radiales. Il n'y a pas de paillettes. *Onopordum acanthium* atteint 2 m, et sa tige ailée est épineuse. Il est aranéeux avec de grandes feuilles pennatifides épineuses, blanches et tomenteuses en dessous. Ses gros capitules ont des bractées aranéeuses terminées en épines recourbées. Les fleurs sont purpurines. C'est essentiellement une plante du sud de l'Europe et de l'Asie occidentale, mais qui remonte jusqu'en Angleterre et au sud de la Scandinavie.

Dans la tribu des Mutisiées, les capitules sont hétérogames; les fleurs marginales ont une corolle généralement bilabiée avec une languette externe à trois dents et deux petites dents ventrales. Les fleurs du disque ont une corolle fendue d'un côté, ou sont zygomorphes et bilabiées. Ces plantes sont souvent des arbustes, et essentiellement de l'hémisphère austral. Les *Gerbera* (cinquante espèces d'Asie et d'Afrique) ont de grands capitules à disque jaune et à couronne rayonnante de nombreuses ligules légèrement courbées vers le bas, à teinte pastel délicate, jaune, orangée, rose, rouge ou lilas. Toutes les fleurs sont bilabiées. *G. jamesonii,* à longue tige florale partant d'une rosette de feuilles pennatilobées, est cultivé pour la production de fleurs coupées; il est originaire du Transvaal.

Chez la sous-famille des *Cichorioïdées* ou *Liguliflores,* toutes les fleurs ont une corolle en languette à cinq dents. Il y a des laticifères articulés et très rarement des poches à essence. Cette sous-famille est beaucoup plus homogène et ne comporte que la tribu des Cichoriées. La chicorée sauvage *(Cichorium intybus)* est l'une des dix espèces de ce genre surtout méditerranéen. Elle est vivace ou bisannuelle dans les variétés cultivées et atteint 1 m de hauteur; ses rameaux sont raides et divergents, à feuilles inférieures velues en dessous et profondément pennatifides alors que les supérieures sont lancéolées. Ses capitules sessiles, terminaux et axillaires, ont des ligules bleues rayonnantes et tronquées. Le pappus est réduit à de petites écailles. L'espèce croît sur le bord des chemins, dans les endroits herbeux, etc., en Europe et dans l'ouest de l'Asie. C'est d'elle que dérivent les formes cultivées comme salades (var. *indivisum*), à feuilles un peu allongées ou lancéolées, légèrement sinuées ou pennatifides, de saveur plus ou moins amère et qu'on consomme crues ou cuites. Les « endives » sont des chicorées étiolées par culture à l'obscurité. Les racines pivotantes, grillées et broyées, sont un succédané ou un complément du café. Des lactones sesquiterpéniques du latex lui confèrent une amertume agréable. La torréfaction dégrade l'inuline et caramélise les sucres; les dérivés du furfurol qui se forment contribuent à la genèse de l'arôme. Les feuilles et les racines contiennent en outre de l'acide chicorésique (ac. dicaféyltartrique) auquel elles doivent sans doute leurs propriétés diurétiques et cholérétiques. La véritable endive *(C. endivia)* est méditerranéenne. Elle a des feuilles basales à peu près glabres et un pappus développé (un quart de la longueur de l'akène). Les feuilles des formes cultivées sont crépues (var. *crispa*) ou entières, à bord ondulé et denté (var. *latifolia*), et forment des touffes serrées. La première variété est la chicorée frisée, la seconde la scarole. Toutes deux se consomment en salade.

Les *Leontodon* sont une soixantaine en Europe, et sont répandus jusqu'en Asie centrale. Le pappus comporte des soies externes courtes et simples et des soies internes plumeuses. *L. hispidus* est commun dans les prés et les pâturages d'Europe jusqu'à l'étage alpin. Ses feuilles sont sinuées ou pennatifides, glabres ou hispides, et toutes en rosette. Les capitules jaunes ou jaune-orangé sont solitaires sur des pédoncules atteignant 60 cm. *L. autumnalis* est ramifié, mais ses feuilles végétatives sont aussi toutes basales et glabres. Ses capitules ont des pédoncules munis de bractées; les ligules sont jaunes. La plante occupe les lieux assez humides d'Europe et de la moitié ouest de l'Asie.

Chez les soixante-dix *Hypochoeris,* présents surtout dans la région méditerranéenne et l'Amérique du Sud, il y a des paillettes aristées, dépassant et souvent enveloppant les akènes, qui ont deux rangées de soies plumeuses. La plupart des feuilles sont en rosette. *H. radicata,* vivace, atteint 60 cm et ses feuilles vert foncé sont pennatilobées. Les pédoncules à un seul capitule sont munis de quelques écailles. Il y a deux rangées de soies au pappus. La plante est très répandue en Europe ainsi que dans la région méditerranéenne.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Artichauts* (Cynara scolymus) *au stade de la récolte; on consomme la base des bractées et le réceptacle du capitule.***

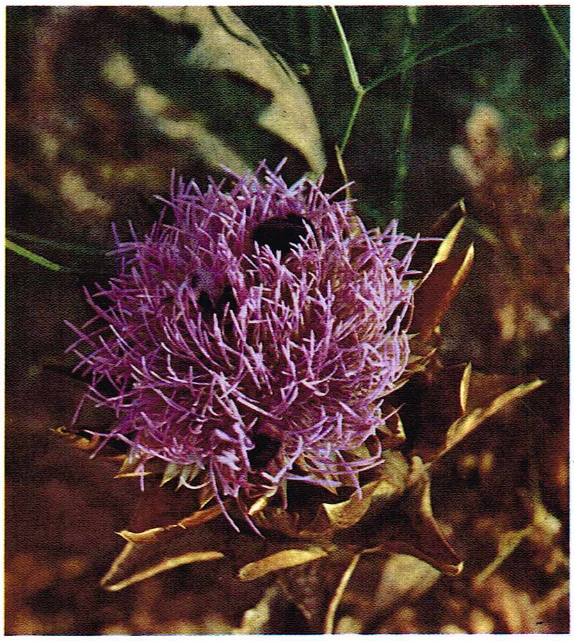

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ ***Inflorescence d'artichaut : les bractées s'écartent et laissent apparaître les fleurs tubuleuses bleu-violet.***

Archives B

▶ ***Chez les Liguliflores ou Cichorioïdées, les fleurs sont toutes ligulées et pourvues de cinq dents; à droite, capitule de*** **Cichorium intybus,** ***la chicorée sauvage.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***L'endive est une chicorée étiolée par la culture dans l'obscurité.***

Chez les *Picris,* au nombre d'une quarantaine en Eurasie et dans le nord de l'Afrique, la tige est ramifiée et feuillue et le pappus caduc n'a qu'un rang de soies plumeuses, qui peuvent être portées par un bec stérile. *P. hieracioides* est fort commun dans les lieux incultes d'Eurasie. Il atteint 90 cm et a des feuilles vert foncé oblongues et sinuées. Ses nombreux capitules ont des ligules jaunes bordées de rouge. La plante est rendue rugueuse par des poils raides ramifiés, ce qui est général dans le genre. *P. echioides* habite la région méditerranéenne et jusqu'en Arabie. Ses feuilles sont sessiles et embrassantes. Ses bractées involucrales extérieures ont l'apparence de trois à cinq petites feuilles cachant les bractées internes, ce qui a fait assez justement créer pour lui le genre *Helminthia*. Le fruit possède un bec. Cette plante s'est répandue vers le nord en Europe centrale et occidentale.

Les salsifis *(Tragopogon)* regroupent environ quarante-cinq espèces d'Eurasie et d'Afrique du Nord. Les feuilles sont linéaires, entières et glabres. Les grandes bractées involucrales sont uni- ou bisériées et soudées à la base (comme chez les *Tagetes*). Le pappus caduc est formé de soies plumeuses et porté par un bec. *T. pratensis* habite les prés jusqu'à l'étage montagnard dans une large partie de l'Eurasie. Il est bisannuel. Ses grands capitules jaunes sont portés par des tiges atteignant 70 cm et leurs fleurs sont aussi longues que les bractées. Chez *T. porrifolius,* les fleurs sont violettes, rougeâtres ou noirâtres et les pédoncules sont renflés sous le capitule. Cette plante méditerranéenne est cultivée parfois pour sa racine comestible à surface brun clair (salsifis). Elle est naturalisée dans l'ouest de la France, mais n'est pas indigène dans ce pays. Il existe une centaine d'espèces de scorsonères *(Scorzonera)* presque toutes aussi à longues feuilles entières, mais à bractées involucrales sur plusieurs rangs et libres entre elles et à fruit sans bec. On cultive souvent *S. hispanica,* à feuilles jaunes, originaire du sud de l'Europe et du sud de la Sibérie, pour ses racines pivotantes charnues, à surface noirâtre et à pulpe blanche, qu'on appelle vulgairement des scorsonères, mais aussi des salsifis, et qui sont très riches en inuline et d'un goût douceâtre.

Les *Lapsana* ont des fruits sans pappus qui restent enclos dans l'involucre. Il y en a une dizaine d'espèces en Eurasie et en Afrique du Nord. *L. communis* atteint 1,20 m et porte de petits capitules jaunes réunis en inflorescences corymbiformes lâches; ses feuilles basales ont un grand lobe terminal et quelques lobules latéraux pennés. Les feuilles caulinaires deviennent lancéolées et dentées. C'est une plante à tendance nitrophile qui croît dans les champs et lieux incultes de l'Europe et de l'ouest de l'Asie.

Les pissenlits *(Taraxacum)* ont un involucre bi- ou trisérié, les bractées extérieures formant un « calicule ». Les feuilles constituent une rosette d'où partent de grands pédoncules à un seul capitule. Les akènes, avec leur long bec qui porte le pappus de soies rudes, sont rayonnants autour du réceptacle avant la dissémination. Comme l'hybridation et l'apomixie sont très répandues, le nombre de formes, qu'on peut nommer espèces, est considérable. Il y en a plusieurs centaines en France. La plupart de ces formes appartiennent à *T. officinale,* qui est une herbe vivace, à grosse racine pivotante, avec une rosette de feuilles profondément découpées en bas et à grand lobe terminal. Le calicule atteint les trois quarts de la longueur des bractées internes. Le bec de l'akène est de deux à quatre fois plus long que lui. Les feuilles des pissenlits, agréablement amères à cause peut-être de la présence de lactucopicrine, sont consommées en salade. Comme les racines, ces feuilles ont des propriétés cholérétiques et évidemment diurétiques. *T. bicorne (T. kok-saghyz),* d'Asie centrale, et *T. megalorrhizon,* de la région méditerranéenne, sont cultivés en Asie centrale russe pour l'extraction de caoutchouc à partir du latex de leurs racines.

Les *Sonchus,* au nombre de soixante-dix dans l'Ancien Monde, ont une tige creuse et des capitules à involucres plurisériés. Le pappus est formé de plusieurs rangées de soies blanches. *S. oleraceus* est annuel, haut de 1 m, glabre ou un peu glanduleux en haut. Ses feuilles sont sessiles et embrassantes par des oreillettes aiguës, découpées en larges lobes. Ses fleurs sont jaunes. Il est répandu sur toute la terre, jusqu'à l'étage subalpin, mais son origine est méditerranéenne.

Cicerbita alpina (Mulgedium alpinum) est le type même des hautes herbes des endroits frais de l'étage subalpin.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ ***Chez*** **Leontodon hispidus,** ***les capitules sont solitaires à l'extrémité de longs pédoncules (à gauche); détail de l'inflorescence (à droite).***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ ***Capitules de pissenlits : en fleur, à gauche ; en fruit, à droite.***

C'est une plante glabre, vivace, à tige simple et creuse, atteignant 2 m. Ses grandes feuilles sont tendres, divisées en lobes triangulaires étroits, le terminal équilatéral, embrassant la tige par des oreillettes obtuses. Ses inflorescences sont glanduleuses ainsi que ses involucres. Ses fleurs sont bleues. C'est une plante des montagnes européennes cultivée pour l'ornement. On l'a placée aussi dans les genres *Sonchus* ou *Lactuca*. Son pappus a un seul rang de soies. L'akène n'a pas de bec, mais forme un anneau de poils sous l'insertion du pappus. Ces caractères définissent le genre *Cicerbita,* qui compte une vingtaine d'espèces des montagnes de l'hémisphère Nord. Les *Chondrilla,* au nombre de trente, répandus surtout en Asie centrale, ont un fruit brusquement rétréci en bec, avec au-dessus de la zone fertile des bourrelets et des écailles remarquables. Les capitules nombreux n'ont que de sept à quinze fleurs. Les feuilles sont en rosette. *C. juncea,* commun en Europe de l'Ouest, en région méditerranéenne et jusqu'en Iran, habite les sols sableux assez secs et bien exposés. *Prenanthes purpurea* est une herbe glabre atteignant 1,50 m. Ses feuilles sont simples, entières ou anguleuses, sessiles et embrassantes, glauques en dessous. Ses petits capitules sont pourpres ou violets, en inflorescences lâches. C'est une plante surtout montagnarde du centre et du sud de l'Europe.

Chez les *Lactuca,* la tige est blanche ou rougeâtre. Les bractées glabres sont disposées en un involucre de plusieurs rangs. Le fruit est aplati et rétréci en bec portant un pappus caduc de plusieurs rangs de soies rudes. *L. perennis* est une herbe vivace glabre à inflorescence très rameuse. Ses feuilles sont assez grandes, profondément pennatipartites, divisées en fines lanières, les feuilles caulinaires étant embrassantes. Les capitules sont violacés et longuement pédonculés. C'est une plante atteignant environ 1 m, xérophile et basiphile, surtout montagnarde, vivant dans le sud de l'Europe. *L. saligna,* des lieux incultes, possède quelques petits capitules jaunes en fascicules sessiles le long de la partie supérieure d'une tige ramifiée ou non ; ses feuilles entières sont étroitement triangulaires, sessiles, embrassantes à la base par deux oreillettes aiguës. C'est une plante bisannuelle de la région méditerranéenne et d'Asie occidentale, mais qui remonte jusqu'au sud de l'Angleterre et en Hollande. *L. virosa* se reconnaît à sa tige hispide à la base et à ses feuilles coriaces simples, dentées, larges et étalées, embrassantes par des oreillettes obtuses. Les capitules sont jaunes. C'est une espèce bisannuelle atteignant 1 m, d'aire comparable à celle de la précédente, mais ne dépassant pas la France au nord ; elle vit aussi dans les lieux pierreux. Son latex ou lactucarium est sédatif, de la toux en particulier, mais son usage s'est raréfié. Il contient de la lactucine, lactone sesquiterpénique, et son ester la lactucopicrine, qui sont amers. *L. serriola (L. scariola)* est très voisin, mais ses feuilles coriaces sont pennatifides ou pennatilobées, dentées et spinuleuses au bord et sur la nervure médiane, dressées et tordues de manière à présenter leur section en face de la tige qu'elles embrassent de deux oreillettes aiguës. Les capitules sont jaunes. Son latex a les mêmes propriétés que celui de la précédente espèce. La plante est méditerranéenne, européenne et d'Asie centro-occidentale, et naturalisée dans d'autres régions (Amérique du Nord). La laitue cultivée *(L. sativa),* qui n'est pas connue à l'état sauvage, et provient sans doute de *L. serriola,* a des feuilles vert clair, molles, non épineuses, denticulées et ondulées. Elle est cultivée sous de nombreuses variétés (laitues). La variété *capitata* comprend les formes à limbe large, concave et bulbeux, parfois de couleur bronzée, donnant un gros bourgeon (pomme) dense de feuilles. La variété *romana* ou *longifolia* (chicons) a des feuilles allongées dressées, qui forment une tête cylindro-conique. Les laitues sont des plantes annuelles qui doivent être cueillies avant que ne commence la pousse de la tige florifère, car c'est alors que débute la sécrétion du latex qui les rendrait amères.

Les *Mycelis* sont environ trente-cinq espèces d'Europe, d'Asie et d'Afrique, voisines des *Lactuca,* mais avec un involucre à deux rangées de bractées et un fruit muni d'un bec court portant un pappus à un seul rang de soies rudes et entouré d'un anneau de poils à la base.

Les *Crepis* comptent environ deux cents espèces de l'hémisphère Nord et d'Afrique tropicale. L'akène est rétréci au sommet ou bien a un bec très net ; le pappus est composé de plusieurs rangs de soies rudes. L'involucre est constitué de deux rangées de bractées, dont l'externe forme un « calicule ». *C. foetida* habite les lieux herbeux arides et incultes d'Europe sud-occidentale et d'Asie

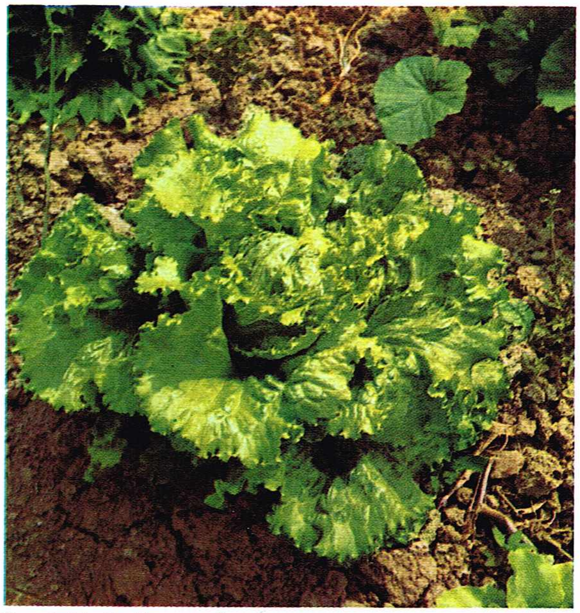

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ ***Un des nombreux cultivars de laitue*** **(Lactuca sativa).**

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Deux épervières ; les capitules sont jaunes et les feuilles disposées en rosette chez* **Hieracium pilosella** *(à droite).*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

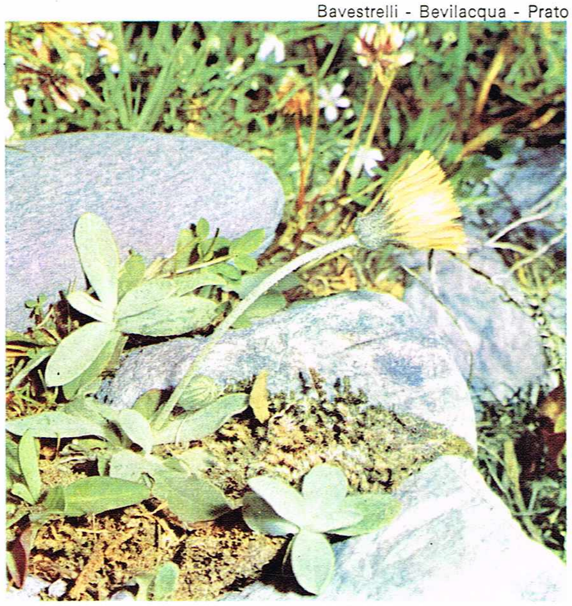

occidentale. On le reconnaît facilement à sa racine d'où émane une forte odeur d'iode. C'est une plante hirsute, de petite taille (10 à 40 cm), à tige peu rameuse. Ses feuilles sont pennatilobées et ses fleurs sont jaunes. *C. setosa,* des champs, bords des chemins, etc., est velu et ses pédoncules et involucres sont munis de soies jaunâtres raides très visibles. Il atteint 70 cm. Ses fleurs sont jaunes. Originaire de l'est de la région méditerranéenne, il est répandu maintenant en Europe centro-occidentale et ailleurs. *C. taraxacifolia* est voisin, mais sans soies raides et à feuilles profondément divisées comme celles des pissenlits. *C. capillaris (C. virens),* des prés et des bois d'Europe, maintenant répandu dans toutes les zones tempérées, est au contraire presque glabre et possède des capitules très petits. Il est polymorphe, parfois rampant, parfois haut de 90 cm. Tandis que les deux autres espèces ont des akènes à bec, son fruit est tronqué au sommet.

Les épervières *(Hieracium)* semblent être au nombre d'environ huit cents grandes espèces, mais l'hybridation et l'apomixie entraînent une multiplication des formes stables (plusieurs milliers) qu'on peut considérer comme espèces. Le pappus a une (ou deux) rangées de soies. La piloselle *(H. pilosella)* ne dépasse pas 30 cm et est très répandue en Europe et dans la moitié ouest de l'Asie. Elle est stolonifère et velue. Ses feuilles sont simples, entières, ovales, allongées, blanches et tomenteuses en dessous, toutes en rosette. Ses capitules solitaires sont de couleur jaune soufre, à involucre glanduleux. Cette plante habite les lieux assez secs jusqu'à l'étage alpin.

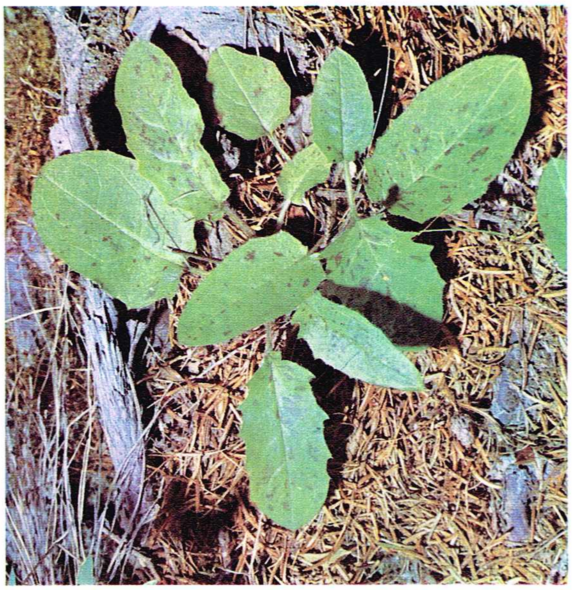

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ *Feuilles tachetées de* **Hieracium maculatum.**

MONOCOTYLÉDONOPSIDÉES OU MONOCOTYLÉDONES

Si la présence d'un seul cotylédon est le caractère longtemps considéré comme essentiel pour distinguer les Monocotylédones des Dicotylédones, il y a toute une série d'autres éléments justifiant la séparation des Angiospermes en ces deux groupes.

L'appareil radiculaire est constitué surtout de nombreuses racines adventives partant toutes de la base de la tige ; la radicule de l'embryon est vite détruite, quoiqu'il y ait des exceptions (maïs). Le rhizoderme des racines, qui forme les poils absorbants, est issu de la première couche corticale et non de la coiffe. L'endoderme a des cellules à parois latérales et internes lignifiées, ce qui fait apparaître des épaississements en U en coupe transversale. Les faisceaux conducteurs de la racine sont nombreux. Dans la tige, le bois tend à entourer le liber. Il n'y a pas de cambium entre le bois et le liber, et pas de croissance secondaire en diamètre. Parfois cependant (chez *Dracaena, Yucca, Aloe,* etc.), il existe une assise génératrice périphérique qui forme un tissu sclérifié où se différencient de nombreux faisceaux, de sorte que la croissance en épaisseur est possible. Les rhizomes et les bulbes sont très fréquents. Le bulbe que l'on observe chez de nombreuses familles des Liliiflores est formé par les bases des feuilles charnues, superposées de manière à protéger le bourgeon porté par une tige très raccourcie, ou plateau. L'endoderme des rhizomes, qui sont des tiges, possède souvent des épaississements lignifiés en U, comme celui des racines. Le rhizome peut se développer verticalement, mais il est le plus souvent horizontal et longuement traçant.

On note une certaine prédominance des tiges aériennes simples, mais il ne manque pas de tiges ramifiées. La ramification, qui n'est jamais très importante, peut être monopodiale ou sympodiale. Parfois il semble y avoir dichotomie, mais la signification du phénomène reste à préciser ; il est net chez le palmier *Hyphaene thebaica.* On trouve dans la tige de nombreux faisceaux tous foliaires qui, après un parcours à travers plusieurs nœuds, suivant un trajet courbe, passent dans les feuilles. C'est le type général. Dans le type *Commelina,* beaucoup plus rare, certains faisceaux sont foliaires, d'autres caulinaires ; les premiers se trouvent au centre alors que les autres sont situés extérieurement. Il existe aussi de grosses tiges sclérifiées chez les bambous, qui appartiennent à la famille des Graminées. Malgré leur grand développement, ces plantes ont une structure véritablement herbacée, et, en particulier, leur tige est semblable au chaume typique des Graminées ; ce dernier est caractérisé par de longues portions creuses appelées entre-nœuds, séparés par des couches de tissu formant ce qu'on nomme les nœuds où les faisceaux constituent des plexus et au niveau de chacun desquels est insérée une feuille.

Les feuilles des Monocotylédones sont généralement parallélinerves, c'est-à-dire que les nervures principales partent toutes de la base du limbe et le traversent longitudinalement, en étant plus ou moins parallèles entre elles ou en convergeant au sommet. Il y a en outre de fines nervures transversales. La morphologie de ces feuilles ne permet pas de les séparer fondamentalement de celles des Dicotylédones comme certains avaient tenté de le faire. Les Aracées, par exemple, montrent les rapports étroits entre les deux dispositions : les nervures parallèles à la base s'écartent successivement et on obtient une disposition dicotylédonoïde. La phyllotaxie alterne distique prédomine chez les Monocotylédones, et l'existence d'un seul cotylédon est sans doute liée à cette particularité : le second a la forme d'une feuille végétative située au-dessus. La base de la feuille est toujours pourvue d'une gaine ouverte ou fermée, qui embrasse la tige sur un trajet plus ou moins long. Les vraies stipules sont pratiquement inexistantes, mais la gaine peut s'élargir pour former deux appendices qui ont la même valeur et qui, si le pétiole est unifacial, s'unissent éventuellement en une stipule médiane. Une ligule peut aussi les joindre sans que le pétiole soit unifacial ; cette ligule est une production de la face ventrale de la feuille. Le limbe de la feuille a des bords presque toujours entiers. Il n'existe pas de feuilles réellement composées ; celles des Palmiers ne le sont qu'en

T. Poggio

▲ *Les Palmiers à troncs non ramifiés, terminés par un bouquet de longues feuilles, font partie de la classe des Monocotylédones.*

M. et D. Bailleau - Explorer

◀ *De nombreuses Monocotylédones sont cultivées : ici* Saccharum officinarum, *la canne à sucre.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

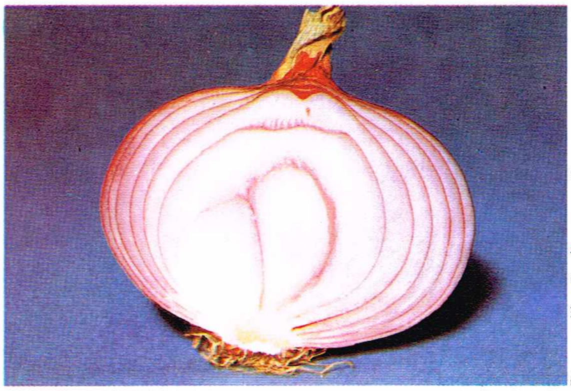

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

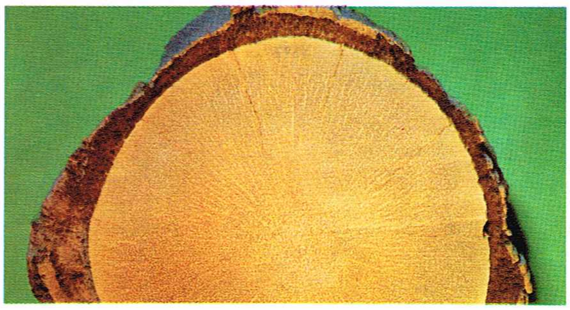

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Un palmier :* **Trachycarpus martiana.**

▶ ***En haut, coupe de bulbe d'oignon (Liliiflores) ; en bas, coupe de stipe de palmier.***

▼ ***Deux diagrammes floraux : celui de la tulipe (à gauche) montre bien le caractère généralement trimère des fleurs de Monocotylédones qui sont actinomorphes ou zygomorphes comme celle de cette orchidée (à droite).***

apparence : l'ébauche foliaire est entière mais plissée, et le limbe se divise par gélification ou par nécrose de régions particulières. Les feuilles de certaines Aracées sont plutôt lobées très profondément que composées. Beaucoup de feuilles sont unifaciales (sauf la base), surtout chez les Liliiflores ; la portion unifaciale est limitée tout autour par la face morphologiquement externe. La disposition des faisceaux simule celle des faisceaux d'une tige, mais l'organe conserve une symétrie bilatérale. Les inflorescences sont diverses, mais les cymes sont toujours unipares hélicoïdes.

Les fleurs sont généralement trimères, y compris leur gynécée. Elles sont actinomorphes ou zygomorphes. Les deux verticilles extérieurs forment souvent un périgone sans distinction de calice et de corolle, mais il y a des périanthes très différenciés. Le plan floral peut présenter des réductions du nombre des pièces de chaque verticille. La simplification peut être très profonde, ce qui montre que les Monocotylédones ont évolué parallèlement aux Dicotylédones depuis longtemps. Comme, par ailleurs, les fleurs sont pratiquement toujours à pièces verticillées, il semble que les Monocotylédones soient plus évoluées que les Dicotylédones primitives, à pièces florales spiralées, et c'est pourquoi il est normal de les étudier après les Dicotylédones.

L'androcée est généralement constitué par deux verticilles alternes trimères d'étamines, le premier alternant avec le second verticille de tépales. Ces étamines sont libres ou à filets plus ou moins longuement soudés au tépale opposé. Elles peuvent être multipliées secondairement, réduites à trois ou deux ou même à une. Les anthères sont insérées de différentes façons sur le filet. Les deux divisions de la méiose pollinique sont successives, une paroi se formant juste après la première. Il existe des cas de divisions simultanées, comme chez les Dioscoréacées. Chez les Cypéracées, les deux divisions fournissent les noyaux sans formation de parois. Trois noyaux dégénèrent et le quatrième forme ceux du grain de pollen.

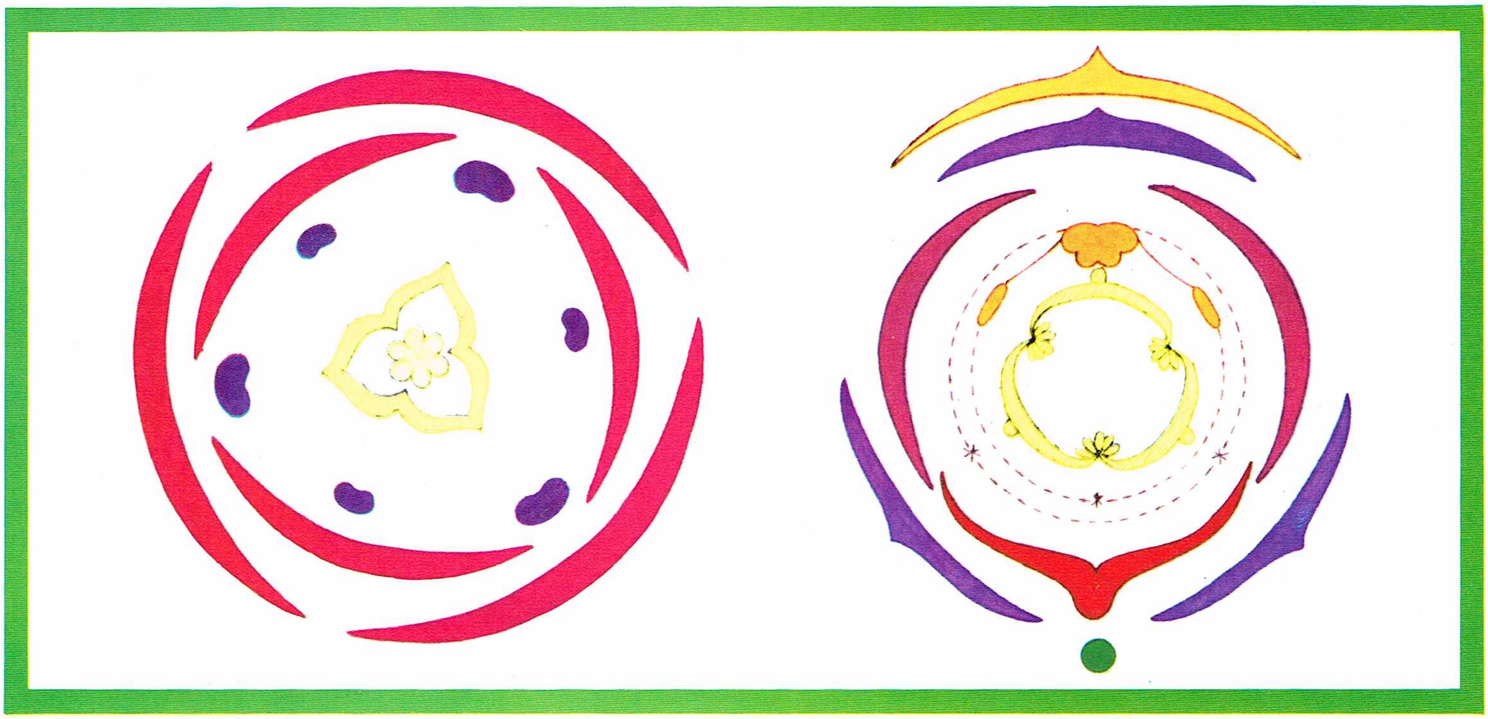

I.G.D.A.

Ce grain de pollen, généralement granulaire et muni d'une fente de germination, peut être filiforme si la pollinisation se fait dans l'eau. Chez les Orchidacées, les grains demeurent en tétrades plus ou moins unies; au maximum toutes celles d'une loge forment une pollinie. Le gynécée des ordres les plus primitifs, surtout celui des Hélobiales, peut être apocarpe et souvent à six carpelles ou plus (polycarpie). La polycarpie semble résulter d'une multiplication secondaire de trois carpelles et n'est pas alors un indice de primitivité. Le gynécée est ailleurs très généralement syncarpe et tricarpellé ou pseudo-monomère (un seul carpelle est alors fertile et uniovulé). Les carpelles alternent avec les étamines internes et sont par conséquent opposés aux tépales externes. Dans les gynécées apocarpes, la placentation est souvent laminale, mais il peut aussi n'y avoir qu'un seul ovule marginal par carpelle. Le gynécée syncarpe comporte souvent trois loges, qui contiennent des ovules en rangées marginales. Il peut aussi y avoir des placentas marginaux massifs, ou un seul ovule par loge. L'ovaire peut également être uniloculaire et la placentation pariétale.

L'entomogamie (pollinisation par les Insectes) est très fréquente, et on trouve alors un périgone développé attirant les Insectes, ainsi que des formations nectarifères, comme chez les Liliacées et les Orchidacées. L'anémogamie (pollinisation par le vent) existe en particulier chez les Graminées et les Cypéracées, dont les fleurs très petites, réunies en inflorescences discrètes plus ou moins denses, ont un périgone très réduit ou nul; les anthères (trois en général) donnent beaucoup de pollen, car une grande partie en est perdue; elles font saillie hors de l'inflorescence, soutenues par des filets qui s'allongent rapidement. Cette disposition facilite évidemment l'effet du vent. La pollinisation peut aussi se faire par l'eau (hydrogamie), les fleurs restant totalement immergées. L'albumen est nucléaire ou cellulaire comme chez les Dicotylédones suivant qu'une phase à noyaux libres précède ou non sa cellularisation. Il peut de plus être hélobial : il s'agit d'une variante dans laquelle un albumen nucléaire naît seulement du noyau situé du côté du micropyle, à la suite de la première division du noyau triploïde du sac embryonnaire, division suivie d'un cloisonnement. Ce type est très fréquent chez les Hélobiales, mais se voit aussi chez d'autres Monocotylédones. Chez les Orchidacées, il ne se forme pas d'albumen ou bien celui-ci est réduit à quelques noyaux libres. L'albumen subsiste très généralement dans la graine mûre, qui peut aussi contenir un périsperme, ou reste du nucelle. Il manque pourtant chez les Hélobiales, disparaissant lors de la formation de la graine. Les fruits des Monocotylédones peuvent être de différents types. Les ovaires apocarpes donnent des fruits composés d'akènes ou de follicules. Il existe très fréquemment des capsules, comme chez les Liliacées. Le caryopse des Graminées est un akène dont les parois sont concrescentes avec celles de la graine.

Les Monocotylédones sont herbacées puisqu'un véritable accroissement secondaire est impossible. Ces herbes

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

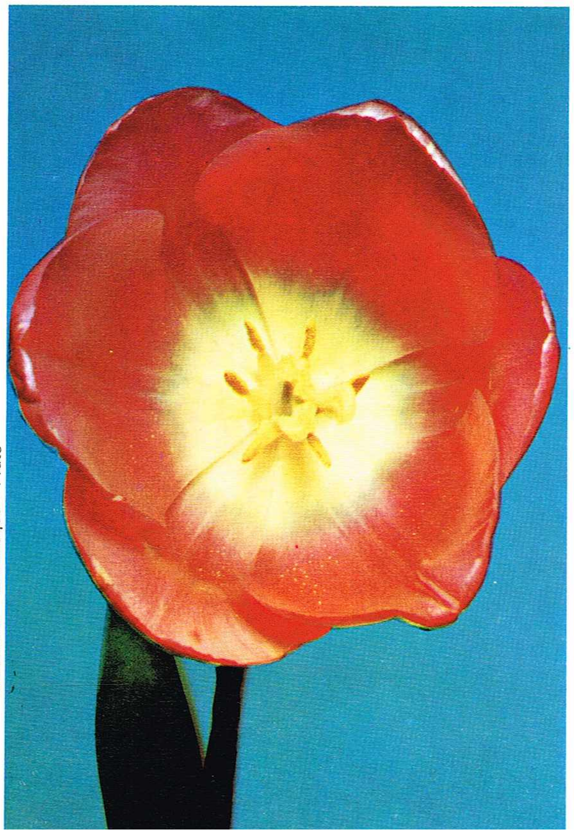

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

G.-P. Mondino

Le yucca, en haut, la tulipe, à gauche, et une Graminée, à droite, montrent la grande variété de formes que l'on peut rencontrer chez les Monocotylédones.

S.E.F.

Les Graminées sont très ubiquistes et peuvent se rencontrer aussi bien au bord des eaux en climat tempéré (ci-dessus, des roseaux) que dans les zones tropicales où les bambous (ci-dessous) constituent une partie de la flore de la jungle.

T. Sacco

sont très souvent vivaces et leurs tiges annuelles ne sont pas ramifiées sauf au niveau de l'inflorescence. Chez celles qui possèdent des assises génératrices périphériques, les dimensions d'un arbre peuvent être atteintes. Cependant il n'apparaît pas alors de pousses axillaires annuelles, et la ramification se produit rarement.

Le type graminoïde est caractérisé par des tiges où l'on distingue des nœuds et des entre-nœuds; ces tiges (ou chaumes) sont souvent portées par des rhizomes. La ramification est fréquemment intense à la base de la tige : c'est le tallage qui permet la multiplication végétative. Les feuilles, alternes distiques (Graminées) ou tristiques (Cypéracées), longues et étroites, ont une gaine souvent fermée (même chez les Graminées) qui embrasse la tige et porte intérieurement une ligule à la limite du limbe. Les entre-nœuds restent longtemps méristématiques à leur base. Ils s'allongent par cet endroit presque simultanément, de sorte que la croissance est très rapide. Les gaines emboîtées protègent les méristèmes encore fragiles des entre-nœuds. Il existe aussi de nombreuses plantes aquatiques chez qui les feuilles ou leurs segments sont linéaires ou rubanés lorsqu'elles sont immergées, les feuilles flottantes étant longuement pétiolées et à limbe arrondi. Il y a quelques types buissonnants et sarmenteux, notamment les *Smilax*, les *Ruscus* et les Dioscoréacées. C'est surtout dans les régions tropicales qu'on observe des épiphytes, comme la plupart des Broméliacées et de nombreuses Orchidacées. Chez les saprophytes, qui vivent sur des sols riches en matières en décomposition, la photosynthèse n'est plus possible par défaut de chlorophylle, notamment chez les Triuridacées (Hélobiales), les Burmanniacées (Liliiflores) et certaines Orchidacées.

Systématique et distribution des Monocotylédones

La position systématique des Monocotylédones a été très controversée. Certains les considéraient comme dérivant des Dicotylédones, d'autres pensaient qu'elles sont plus primitives qu'elles. On admet le plus souvent actuellement la première interprétation : les Monocotylédones seraient issues des Dicotylédones primitives (Magnoliales) ou plutôt des mêmes ancêtres qu'elles, et auraient rapidement acquis des caractères évolués, tels que la réduction de l'axe et la rareté de sa ramification, la disparition fréquente de la radicule, la présence d'un seul cotylédon et d'une seule préfeuille, l'absence de cambium intra-fasciculaire, et la prédominance du port herbacé. Parmi les Dicotylédones, certaines familles semblent avoir d'étroites affinités avec les Monocotylédones primitives et être proches, comme ces dernières, de la souche commune des deux groupes. Les Hélobiales se rapprochent ainsi des diverses Polycarpiques en ce qui concerne la structure du périanthe et de l'androcée, qui peuvent avoir chez ces dernières aussi un plan trimère (Berbéridacées, Lauracées), et celle du gynécée qui est apocarpe dans les deux cas; les fruits sont des agrégats d'akènes ou des follicules. La formation du pollen a lieu par divisions successives chez les Lauracées, Cératophyllacées, Nymphéacées, Cabomboïdées, etc.; la morphologie des grains de pollen est souvent « monocotylédonoïde » chez les Magnoliales, comme nous l'avons vu en étudiant ces plantes. Des fossiles de Monocotylédones considérées comme primitives datent du Crétacé moyen, époque à laquelle appartiennent aussi les plus anciens restes de Dicotylédones (Nymphéacées?), ce qui implique bien l'existence d'un ancêtre ou d'un groupe d'ancêtres communs (Proangiospermes) pour rendre compte des caractères d'Angiospermes des deux groupes. Comme pour les Dicotylédones, certains ont pensé que plusieurs lignées de Monocotylédones avaient évolué séparément dès le début à partir du « stock » ancestral de Proangiospermes (polyphylétisme), mais là aussi il est bien aléatoire de vouloir préciser ces lignées.

Les Monocotylédones sont cosmopolites. De nombreuses espèces forment de vastes paysages végétaux; les prairies, les steppes et les pâturages sont en effet principalement constitués de Graminées, de même que les savanes d'Afrique et d'Asie, alors que les savanes américaines sont largement peuplées de Cypéracées. Les bambous arrivent à former des forêts denses en Asie tropicale. Le bord des marais est occupé par des Cypéra-

cées, Joncacées et Graminées, qui sont des hélophytes. L'importance des Monocotylédones est immense au point de vue économique puisque cette classe comporte les céréales (riz, blé et maïs notamment) ainsi que la canne à sucre. Les Palmiers (cocotiers, dattiers) sont aussi très utiles.

Tous les auteurs n'ont évidemment pas adopté le même système de classification des Monocotylédones. Nous suivons ici celui de Wettstein, qui considère neuf ordres dans la classe des Monocotylédones : Hélobiales, Liliiflores, Énantioblastées, Cypérales, Glumiflores, Scitaminées, Gynandrées, Spadiciflores et Pandanales, tout en signalant diverses améliorations plus récemment proposées. Les caractères de ces ordres peuvent être ainsi résumés.

a) Herbes aquatiques, certaines étant marines ; généralement des squamules (petites écailles) intravaginales à l'aisselle des feuilles ; fleurs actinomorphes, hermaphrodites ou unisexuées, avec un périanthe trimère en général à un ou deux verticilles, parfois même manquant ; les étamines, parfois dédoublées, sont en nombre variable et souvent en verticilles trimères ; carpelles en nombre variable, souvent aussi en verticilles trimères ou multipliés secondairement, libres ou unis, et alors formant parfois un ovaire infère ; graines sans albumen : *Hélobiales (Alismatales)*.

b) Herbes terrestres ou plus rarement aquatiques, souvent bulbeuses ou rhizomateuses, ayant parfois l'aspect d'arbres ou d'arbustes ; les fleurs trimères (parfois dimères) sont généralement actinomorphes, hermaphrodites ou unisexuées, avec un périanthe double, homochlamydé ; les étamines sont au nombre de six, réparties en deux cycles ; parfois il n'y en a que trois ; carpelles très généralement soudés, ovaire supère ou infère généralement tricarpellaire et triloculaire avec souvent des nectaires septaux dans les cloisons ; graines à albumen charnu, cellulosique ou huileux, rarement amylacé : *Liliiflores*.

c) Herbes normalement terrestres, feuilles à gaine bien marquée ; fleurs actinomorphes ou zygomorphes, hermaphrodites ou unisexuées, généralement trimères, à périanthe double hétérochlamydé ; deux cycles trimères d'étamines, mais réductions fréquentes ; ovaire à un à trois carpelles, uniloculaire à triloculaire, supère ; ovules en nombre variable dans les loges, orthotropes le plus souvent, albumen amylacé : *Énantioblastées*.

d) Herbes terrestres ou aquatiques à feuilles étroites graminoïdes, tristiques, munies d'une gaine fermée le plus souvent ; fleurs unisexuées ou hermaphrodites, petites, en épillets cymeux ou racémeux, à périanthe très réduit ou manquant, jamais pétaloïde ; étamines en

M. Pedone

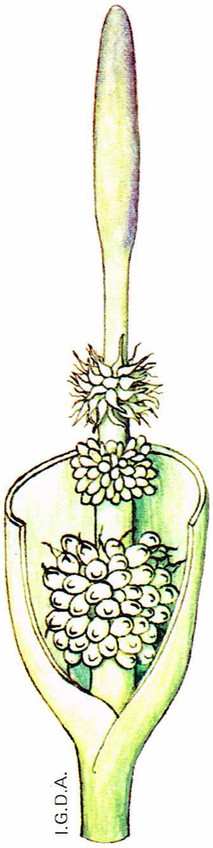

I.G.D.A.

***Une représentante des Spadiciflores :* Arum italicum, *plante herbacée à fleurs réunies en spadice protégé par une spathe ; schéma de l'inflorescence d'*Arum.**

Cedri

◀ ***Culture d'*Agave sisalana *(ordre des Liliiflores).***

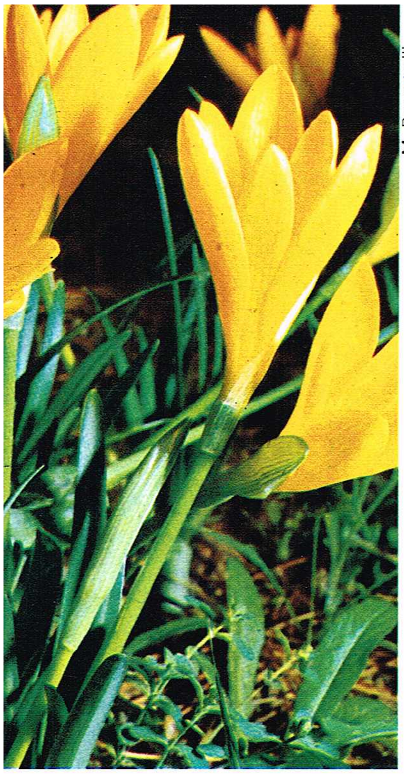

M. Bavestrelli

▲ ***Fleur actinomorphe avec six pièces périanthaires : une Liliiflore,*** ***le*** **Crocus aureus.**

général au nombre de trois; ovaire supère, tricarpellé, uniloculaire; un seul ovule basal, akènes parfois enveloppés d'une bractée accrescente; graines à albumen farineux : *Cypérales*.

e) Herbes terrestres ou aquatiques, à port graminoïde, à feuilles distiques à gaines souvent fermées en bas, ouvertes dans leur partie supérieure; fleurs hermaphrodites, rarement unisexuées, groupées en épillet racémeux, à périanthe très réduit, mais entourées de bractées bien développées (glumelles et glumes); trois étamines ou plus; ovaire supère, tricarpellé, uniloculaire, uniovulé, ovule apical ou basal; caryopses; graines à albumen farineux; cotylédon transformé en suçoir ou scutellum : *Glumiflores (Graminales)*.

f) Herbes tropicales ou subtropicales, le plus souvent terrestres, fleurs zygomorphes ou asymétriques, trimères, à périanthe homo- ou hétérochlamydé; parfois deux cycles d'étamines, mais généralement une seule étamine; ovaire infère, triloculaire; graine munie d'un arille et de périsperme : *Scitaminales (Zingibérales)*.

g) Herbes parfois épiphytes ou saprophytes souvent bulbeuses (bulbes caulinaires ou racinaires), fleurs zygomorphes trimères à périanthe de deux cycles pétaloïdes homochlamydés en général; parfois trois étamines, en général une ou deux; ovaire infère, tricarpellaire, à placentation pariétale (uniloculaire); style et filet staminal généralement unis en une colonne; pollen en tétrades unies elles-mêmes en massules ou pollinies; graines minuscules sans albumen, à embryon indifférencié ou presque : *Orchidales (Gynandrales)*.

h) Herbes ou plantes à aspect d'arbustes, terrestres ou aquatiques, parfois flottantes et très réduites; fleurs normalement petites, en général unisexuées, réunies en un épi dense (spadice) protégé par une bractée (spathe), qui peut manquer chez les espèces flottantes, souvent réduites au maximum à une étamine ou un carpelle; ovaire supère à un ou trois carpelles et une ou trois loges; loges munies d'ovules en nombre variable; graines plus ou moins albuminées, parfois sans albumen, souvent avec un tégument pulpeux : *Spadiciflores (Arales)*.

i) Herbes ou plantes à allure d'arbres et d'arbustes, à feuilles linéaires à base engainante; fleurs très réduites, à périanthe nul ou réduit à l'état d'écailles ou de soies; fleurs unisexuées; étamines et carpelles en nombre très variable, les carpelles unis diversement en phalange ou ovaire à placentation pariétale; parfois un seul carpelle; fleurs en inflorescences denses globuleuses ou cylindriques : *Pandanales*.

Hélobiales

Cet ordre, considéré comme le plus primitif des Monocotylédones, comprend neuf familles dont les représentants, sauf ceux des Triuridacées, d'ailleurs souvent placés maintenant dans un ordre spécial, sont tous des plantes aquatiques, vivant dans les eaux douces et salées du monde entier. Certaines sont complètement immergées en mer et sont les seules Archégoniates dans ce cas. Selon certains auteurs, il y aurait dans cet ordre au moins trois lignées évolutives parallèles représentées par les Alismatales, les Hydrocharitales et les Potamogetonales. Un plus grand morcellement a aussi été envisagé : ces groupes constituent alors des ordres. Dans les familles qui appartiennent au groupe des Alismatales (Alismatacées et Butomacées), les fleurs ont un périanthe généralement hétérochlamydé, un androcée à éléments nombreux dus à la multiplication secondaire ou au moins dédoublés et un gynécée supère souvent polycarpique. Chez les Potamogetonales (Potamogetonacées, Zanichelliacées, Juncaginacées, y compris les Scheuchzeriacées, Aponogetonacées et Naïadacées), les petites fleurs à périanthe homochlamydé, à un ou deux cycles, ou dépourvues de périanthe, ont un gynécée supère de un à quatre carpelles en un verticille, et un androcée de six étamines au moins, parfois une seule. Chez les Hydrocharitales enfin, l'ovaire est infère avec des carpelles en partie libres, et les étamines peuvent être dédoublées. Mais ce groupe est peut-être proche des Alismatales.

Les Hélobiales sont toutes herbacées, souvent portées par des rhizomes traçants qui en permettent la propagation végétative. Les tiges, souvent grêles, portent des feuilles basales ou caulinaires, pétiolées ou non et généralement pourvues d'une gaine bien distincte, qui peut se dilater au sommet en deux oreillettes stipuliformes. A la base de la gaine, du côté ventral du limbe se trouvent généralement de petites écailles (squamules) intravaginales. Le limbe foliaire peut avoir les formes les plus diverses, mais, chez les espèces qui vivent complètement immergées, il est très souvent linéaire ou rubané. Certaines espèces présentent le phénomène de l'hétérophyllie : à côté des feuilles rubanées ou linéaires immer-

C. Bevilacqua

▶ ***Fleur zygomorphe à périanthe en deux verticilles, à style et à filet staminal réunis en gynostème : une Orchidale*** **(Epidendrum).**

gées, il en existe d'autres, insérées plus haut sur la tige, qui sont larges, souvent arrondies, pétiolées, et flottantes, et d'autres encore qui sortent de l'eau et peuvent être d'une autre forme (en fer de flèche chez la sagittaire).

L'anatomie de l'appareil végétatif est simplifiée (réduction du bois), et cela en rapport avec le milieu. Le gynécée est généralement apocarpique ou à syncarpie peu avancée. Chaque carpelle contient souvent un seul ovule, en placentation basale ou ventrale. Souvent aussi les ovules sont nombreux. Les fruits sont de divers types; il existe fréquemment des akènes, mais on observe aussi des capsules, des follicules, et des fruits charnus drupacés. Les graines contiennent un embryon dépourvu d'albumen, celui qui s'était formé suivant le mode hélobial ou nucléaire disparaissant lors de la maturation. L'androcée est formé par des étamines libres, souvent disposées en un à quatre verticilles trimères, parfois tétramères; celles du verticille externe sont fréquemment dédoublées. Elles peuvent être en grand nombre, réparties sur deux verticilles, mais il peut aussi n'y en avoir qu'une seule *(Naias)*. Le pollen se forme par divisions successives, sauf chez les Aponogetonacées, où la division est simultanée. La pollinisation est souvent entomophile chez les espèces dont les fleurs émergent de l'eau, elle est anémophile chez les Juncaginacées; l'hydrogamie est obligatoire chez les plantes qui vivent entièrement immergées; les grains de pollen sont alors dénués de pores germinatifs et souvent arqués ou filiformes. Les carpelles sont fréquemment peltés (à marges soudées congénitalement) et portent leur ovule au fond de leur cavité, disposition qui se trouve aussi chez des Nymphéacées *(Brasenia, Cabomba)*. La placentation laminale des Butomacées rappelle beaucoup celle des *Nymphaea*. Elle n'est pas encore morphologiquement bien comprise. Comme on l'a vu, cet ordre a des affinités avec les Polycarpiques et surtout avec les Nymphéacées, les Cératophyllacées et certaines Renonculacées. Ces dernières ont une ressemblance avec les Alismatacées, mais celle-ci reste superficielle. Comme il a été dit, on ne peut parler d'une dérivation directe des Hélobiées à partir des Polycarpiques, mais plutôt d'une évolution parallèle à partir d'un groupe original commun, dont on ignore évidemment les caractères précis.

Les *Alismatacées (Alismataceae)* comprennent soixante-dix espèces en une dizaine de genres, vivant habituellement dans les eaux douces ou sur leurs berges, dans les zones tropicales et tempérées, surtout dans l'hémisphère Nord, et en Amérique en particulier. Les fleurs, généralement hermaphrodites, ont un périanthe composé de trois sépales et trois pétales. Il y a souvent six étamines en trois paires, correspondant à trois étamines épisépales dédoublées; parfois il y a trois étamines ou un grand nombre (neuf à douze ou plus) réparties en trois ou quatre verticilles; elles peuvent être dues à la multiplication secondaire des pièces de deux verticilles ou plus. Il y a trois carpelles libres ou davantage, mais alors, au moins chez *Alisma*, il s'agit de la multiplication secondaire de trois carpelles. Chaque carpelle contient un ovule en placentation basilaire, parfois plusieurs ovules marginaux. Les fruits sont des akènes uniséminés, ou, chez les *Damasonium*, des follicules bi- ou plurispermes, tardivement déhiscents sur la suture ventrale. Les fleurs sont le plus souvent réunies en inflorescences partielles cymeuses étagées en faux verticilles le long d'une hampe qui s'élève entre les feuilles. Celles-ci sont souvent basales, fréquemment flottantes, de plusieurs types sur une même plante suivant qu'elles se développent dans l'air, dans l'eau ou sont flottantes. Les individus complètement immergés ou complètement émergés d'une même espèce sont souvent bien distincts, ce qui complique la systématique du groupe, surtout chez les *Alisma*. La duplication des étamines et la multiplication secondaire des carpelles, ainsi que les caractères anatomiques et l'embryologie, montrent bien que la ressemblance des Alismatacées avec les Renonculacées est superficielle et qu'il s'agit au plus d'une évolution parallèle.

Les *Alisma* sont cosmopolites et comptent environ six espèces (ou pour certains une seule). Le plantain d'eau *(A. plantago-aquatica)* est lui-même à peu près cosmopolite et doit son nom à ce que ses feuilles ressemblent à celles de divers plantains. Elles sont longuement pétiolées, à limbe ovale et aigu, vert clair, avec cinq grosses nervures parallèles, convergentes au sommet. Le limbe atteint 25 cm de long, mais peut être beaucoup plus petit. Ces feuilles forment une rosette enracinée dans la vase, mais sortent de l'eau. De mai à septembre apparaît la hampe inflorescentielle qui atteint 1 m et porte des faux verticilles espacés de cymes ombelliformes de fleurs blanches ou rosées. Les pétales dépassent les sépales, et il y a six étamines, par paires en face de chaque sépale : il s'agit d'un seul verticille staminal à pièces dédoublées. Les nombreux carpelles uniovulés sont disposés en anneau sur le réceptacle et deviennent autant d'akènes. Le plantain d'eau est vivace et se propage grâce à son rhizome qui forme de nouvelles rosettes. *A. lanceolatum*, très voisin, a des feuilles étroitement lancéolées. Il est limité à l'Europe, l'Afrique du Nord et la moitié ouest de l'Asie.

Les *Caldesia*, au nombre de quatre, occupent les eaux chaudes et ne manquent guère qu'en Amérique. Ils ressemblent aux *Alisma*, mais leurs akènes sont renflés et les feuilles ont en fin de développement des limbes flottants, cordés ou en fer de flèche. *C. parnassifolia (Alisma p.)* est une plante aquatique européenne présente dans le centre et le sud-est de la France. Chez les vingt-cinq à trente *Echinodorus*, surtout américains mais présents en Europe, en Afrique et en Asie, les fleurs sont unisexuées, les étamines sont au nombre de six à vingt et les nombreux carpelles forment non plus un verticille, mais une tête arrondie. *E. ranunculoides* est une plante d'Europe de l'Ouest et de la région méditerranéenne occidentale, à feuilles étroitement lancéolées et généralement submergées. *Ranalisma humilis*, d'Afrique tropicale, et *R. ridleyi*, du Vietnam et de Malacca, sont en fait des *Echinodorus*. C'est surtout leur étude qui avait fait émettre l'hypothèse selon laquelle les Hélobiées, et en particulier les Alismatacées, dérivent des Polycarpiques. Les feuilles sont toutes en rosette, longuement pétiolées, à large limbe ovale muni de nombreuses nervures longitudinales. Les fleurs, solitaires ou groupées par trois, ont trois sépales, trois pétales et six étamines (verticille externe à pièces dédoublées). Le gynécée est formé par de nombreux carpelles libres en tête arrondie. Parmi les quatre *Damasonium*, qui ont de six à dix carpelles verticillés devenant des follicules imparfaitement déhiscents disposés en étoile, *D. alisma (D. stellatum)* habite la région méditerranéenne jusqu'en Iran, dans la moitié sud de la France et même en Grande-Bretagne. D'autres espèces sont australiennes.

Il y a une vingtaine de *Sagittaria* surtout américains. L'une des trois espèces européennes, la fléchière *(S. sagittifolia)*, dont l'aire s'étend jusqu'en Malaisie, est la plante la plus connue de la famille. Elle se trouve dans les mares et les cours d'eau lents peu profonds (50 cm) de l'étage collinéen et est souvent cultivée dans les bassins des jardins. Toutes ses feuilles forment une rosette enracinée dans la vase. Elle doit son nom à la forme de celles qui sortent de l'eau, et qui, longuement pétiolées, ont des limbes à trois branches étroites en fer de lance.

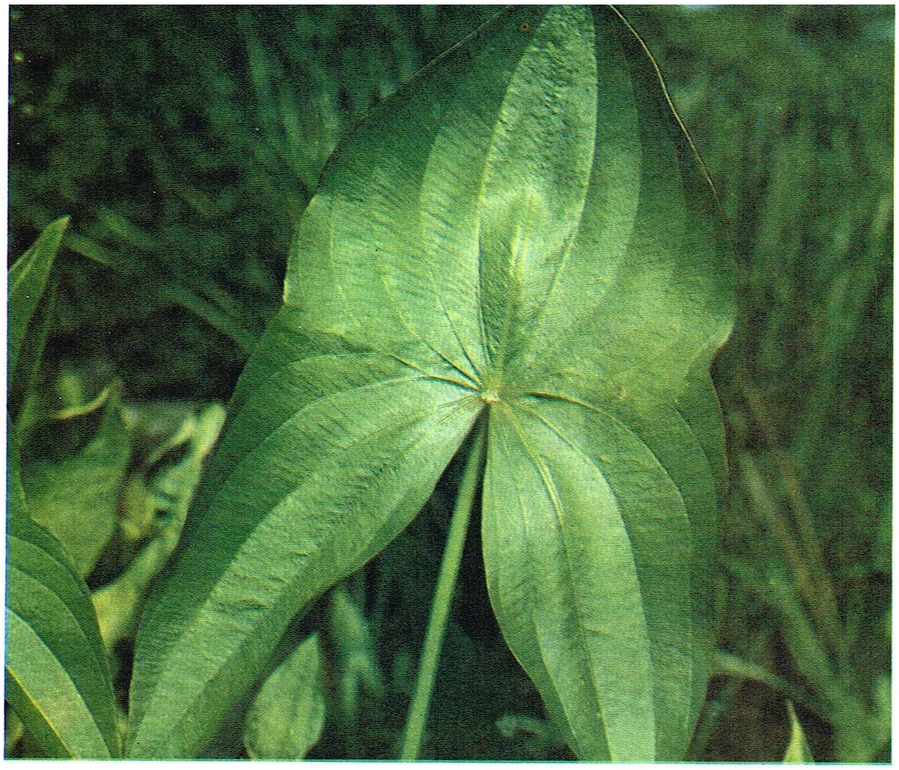

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Feuille en forme de flèche de* Sagittaria latifolia.**

▼ ***L'inflorescence d'*Alisma plantago-aquatica*, le plantain d'eau, peut atteindre 1 m de hauteur; les feuilles ovales sont émergées.***

G.-P. Mondino

Elle possède aussi des feuilles immergées longuement rubaniformes et obtuses au sommet, qui sont les premières formées, et des feuilles intermédiaires nageantes, à limbe aussi en fer de flèche, mais bien plus large que celui des feuilles émergées. De mai à août, l'inflorescence émerge de l'eau; elle est composée de nombreux verticilles de trois fleurs unisexuées à corolle blanche et rouge à la base. Les fleurs supérieures sont mâles et possèdent de nombreuses étamines; les fleurs inférieures femelles ont de nombreux carpelles en tête sphérique. Des stolons traçants permettent la propagation végétative de la plante. Quelques *Sagittaria* américains se sont naturalisés en Europe. Le genre *Luronium (Elisma)* ne compte qu'une espèce : *L. natans,* d'Europe centro-occidentale. C'est une plante en rosette qui émet des stolons, rampant sur la vase ou flottant à la surface de l'eau et produisant de nouvelles rosettes. Les premières feuilles sont immergées, étroitement linéaires et allongées, et les feuilles flottantes ont un petit limbe ovale de 2 à 3 cm avec trois nervures principales; le pétiole peut atteindre 70 cm. Les fleurs hermaphrodites solitaires et axillaires sont portées par des pédoncules de 5 à 10 cm et possèdent une corolle blanche, six étamines et six à neuf carpelles en un seul verticille.

Il y a de grandes affinités entre la famille des *Butomacées (Butomaceae)* et la précédente. Les Butomacées comptent quatre genres et treize espèces aquatiques surtout tropicales. Le périanthe n'est pas toujours différencié en calice et corolle. Il y a dédoublement des étamines du verticille externe *(Butomus)* ou interne *(Hydrocleis)*. On obtient neuf étamines dans les deux cas. Il peut y avoir de nombreuses étamines par augmentation du nombre des verticilles et des éléments de chacun d'eux; certaines étamines peuvent être staminodiales. Il y a de trois à six carpelles ou plus, unis à la base et aussi parfois à l'axe floral. De très nombreux ovules sont en placentation sur les parois latérales des loges carpellaires. Les fruits sont des follicules déhiscents. Les feuilles sont le plus souvent en rosette, et les fleurs groupées en inflorescences cymeuses denses simulant une ombelle. Les fleurs sont entomogames et ne peuvent être autofécondées.

Chez les *Limnocharitoïdées,* les feuilles ont un limbe différencié et la plante possède des canaux sécréteurs. Les *Hydrocleis* sont au nombre de neuf en Amérique du Sud et en Amérique centrale. Il y a un périanthe différencié. *H. nymphoides* est souvent cultivé comme plante d'aquarium.

Les *Butomoïdées* ne comprennent que le genre monospécifique *Butomus* dont les feuilles sont linéaires, dépourvues de canaux sécréteurs; le pollen a un sillon de germination, à la différence de celui des autres Butomacées, où il a des pores; ce caractère, comme son aspect général, le rapproche du pollen des Liliacées. En Europe, les Butomacées ne sont représentées que par le jonc fleuri *(B. umbellatus)*, que l'on rencontre aussi en Asie tempépérée; il a été introduit en Amérique du Nord où il est parfois une mauvaise herbe envahissante, comme dans l'Hudson River. Il est vivace et possède un fort rhizome qui vit dans la vase et émet des rosettes de feuilles linéaires et dures, entre lesquelles part une hampe florale nue qui peut atteindre 1,50 m. Elle porte une fausse ombelle d'une trentaine de fleurs à périanthe indifférencié, à la base de laquelle se trouvent trois bractées. Les pédoncules floraux sont de longueurs différentes et portent des fleurs à des degrés divers de développement, mais irrégulièrement disposées, les plus jeunes vers le haut comme dans une ombelle vraie. Ici, deux à quatre cymes unipares hélicoïdes condensées constituent en fait l'inflorescence. Les pièces externes du périanthe sont violettes à bord clair, les internes blanches ou roses; toutes tombent à la fructification. L'androcée est composé de neuf étamines, six externes, par dédoublement du verticille trimère, et trois internes. Le gynécée est formé de six carpelles libres sauf à la base, avec de très nombreux ovules en placentation laminale; les carpelles deviennent six follicules à nombreuses graines. Il est probable qu'ils forment deux verticilles trimères.

Les *Hydrocharitacées (Hydrocharitaceae)* comptent quinze genres et une centaine d'espèces surtout dans les régions chaudes; certaines sont marines, et occupent principalement les côtes de l'océan Indien, du Pacifique et des Antilles. L'ovaire y est infère et la placentation est pariétale laminale comme chez les Butomacées, ce qui peut conduire à rapprocher les deux familles. Ce sont des plantes aquatiques, herbacées, vivaces, immergées flottantes ou émergées en partie. Les feuilles sont la plupart du temps en rosette, et à phyllotaxie alterne ou verticillée. Elles peuvent porter des oreillettes stipulaires *(Hydrocharis)* et leur lame linguiforme peut être dentée au sommet *(Stratiotes, Vallisneria)*, ce qui est assez rare chez les Monocotylédones. La multiplication végétative est intense par émission de stolons. Les fleurs sont solitaires, ou en cymes scorpioïdes dans le cas des fleurs mâles. Une spathe constituée de deux bractées ou d'une bractée bifide les entoure jusqu'au moment de l'anthèse. Elles sont actinomorphes, en général, mais, chez *Vallisneria,* la fleur mâle tend à la zygomorphie par avortement de ses deux pétales supérieurs. Presque toutes les espèces ont un périanthe bisérié à calice et corolle, mais les *Halophila* manquent totalement de périanthe. Le plus souvent les fleurs sont unisexuées. Il y a dans les fleurs mâles de un à cinq verticilles d'étamines dont certaines sont dédoublées, d'autres pouvant être staminodiales. Il y a ou non des rudiments carpellaires stériles. Les fleurs femelles portent de deux à quinze carpelles en grande partie libres entre eux, mais soudés dorsalement à la coupe réceptaculaire. Leurs marges ne sont pas unies ventralement, elles font simplement protrusion sous forme de « placentas » pariétaux formés chacun des deux régions marginales de deux carpelles adjacents, portant des ovules sur la face carpellaire ventrale. La pollinisation est hydrogame chez les *Halophila,* qui vivent complètement sous l'eau, mais l'anémophilie et l'entomophilie se rencontrent aussi. Il existe parfois des fleurs cléistogames.

Dans la sous-famille des *Vallisnérioïdées,* il n'y a que trois carpelles, sauf exception, et les placentas sont peu proéminents.

Chez les vallisnéries et les élodées, au moment de la maturation, les fleurs mâles se détachent de l'inflorescence et se rendent à la surface de l'eau; elles flottent alors jusqu'à proximité des fleurs femelles qui affleurent; mais les fruits mûrissent toujours sous l'eau; ils sont généralement charnus et s'ouvrent irrégulièrement, ou parfois en étoile. Ils renferment quelques graines seulement ou un grand nombre.

Les *Elodea* comprennent une quinzaine d'espèces; plusieurs d'entre elles sont envahissantes et se sont naturalisées loin de leur aire d'origine. C'est le cas de l'élodée du Canada *(E. canadensis)* qui, originaire d'Amérique du Nord, apparut en Irlande vers 1836 et s'est depuis lors répandue d'abord en Écosse et en Grande-Bretagne dès 1842. Apportée ensuite dans de nombreux jardins botaniques d'Europe, elle se répandit à partir de ceux-ci d'abord en Europe centrale, puis dans toute l'Europe, jusqu'au cercle polaire, en Afrique du Nord et en Asie jusqu'à l'Ob. Devenue envahissante, elle mérita le nom de peste d'eau, mais elle semble plutôt en régression à l'heure actuelle. Il n'existe guère que des individus femelles dont la propagation se fait par voie végétative. Quelques pieds mâles ont été trouvés en Écosse; ils sont rares aussi en Amérique. C'est une herbe immergée, dont les tiges sont couvertes assez lâchement de feuilles lancéolées très finement dentées à une seule nervure. Elles sont réparties en verticilles dimères à la base et trimères dans la plus grande partie de la plante. A l'aisselle des feuilles se forme rarement une spathe bivalente contenant des fleurs mâles, qui, à l'état de bouton, se séparent et atteignent la surface de l'eau où elles s'ouvrent. Elles ont un périanthe de six pièces en deux verticilles et neuf étamines. Les fleurs femelles sont solitaires dans une spathe axillaire, bivalente à peu près sessile. Elles ont un tube floral très long, de manière à atteindre la surface. Leur périanthe possède aussi six pièces et elles ont trois staminodes. L'ovaire reste enclos dans la spathe où se formera le fruit. Il est uniloculaire, à plusieurs ovules insérés sur trois placentas pariétaux. Il y a un style aussi long que le tube floral et trois stigmates bifides. Pour la pollinisation, la fleur femelle s'allonge jusqu'à la surface de l'eau par croissance de son tube floral et reçoit le pollen qui a été libéré des anthères portées en surface par les fleurs mâles détachées. Les fruits ont une seule cavité et renferment de nombreuses graines. Dans ce cas, l'ovaire

n'a pas quitté l'aisselle foliaire pour la fécondation. Les *Lagarosiphon*, aussi au nombre d'une quinzaine, sont voisins des *Elodea*, mais toutes les feuilles sont alternes et les fleurs mâles n'ont que trois étamines. *L. major*, d'Afrique du Sud, est cultivé en aquarium et naturalisé en Italie; les *Lagarosiphon* vivent en Afrique tropicale et en Afrique du Sud, à Madagascar et en Asie tropicale.

Les *Vallisneria* comprennent de six à dix espèces immergées des régions chaudes; leurs feuilles rubanées, en rosette, à nombreuses nervures, sont obtuses et souvent dentées. *V. spiralis* est assez rare en Europe et surtout présent dans le Midi, mais il se répand localement dans l'ouest et le centre de la France, en Grande-Bretagne, et peut devenir envahissant. C'est une plante d'aquarium, dont il existe des formes à feuilles torsadées (cv. « Contortionist »). Les vallisnéries sont aussi dioïques. Les fleurs mâles sont petites, très nombreuses (plus de cent) et réunies en un glomérule entouré d'une spathe. L'ensemble est ici porté par un pédoncule d'une dizaine de centimètres. Elles possèdent un périanthe blanc de six pièces en deux verticilles, les trois pièces internes étant très réduites; des deux étamines du verticille externe, la supérieure est staminodiale. Les fleurs femelles sont par contre solitaires, au sommet d'un très long pédoncule, et entourées étroitement d'une spathe qui est leur préfeuille (comme la spathe de l'inflorescence mâle est la préfeuille de son axe porteur). Elles comprennent un périanthe blanc de six pièces, dont le verticille interne est très réduit ; les pièces externes sont unies en tube à la base ; un ovaire uniloculaire, tricarpellé et pluriovulé, à trois grands stigmates cordiformes, donne après fécondation un fruit d'une dizaine de centimètres. Pour la pollinisation, les fleurs mâles montent à la surface après s'être détachées de leur inflorescence. Elles s'ouvrent et leurs sépales se recourbent vers l'extérieur, leur permettant de flotter et de s'approcher des fleurs femelles qui ont émergé par suite de l'allongement de leur pédoncule. Les étamines sont alors dressées et libèrent leur pollen qui peut arriver sur les stigmates par l'effet du vent ; lorsque la fécondation a eu lieu, le périanthe ne tombe pas, et la fleur femelle retourne sous l'eau, car son long pédoncule s'enroule en spirale, tandis que le fruit s'allonge et mûrit. On remarquera qu'ici la fleur femelle atteint la surface de l'eau par allongement de son pédoncule en dessous de sa préfeuille, et non d'un tube floral comme chez les élodées. Le procédé adopté par ces dernières évite d'avoir à ramener le fruit sous l'eau après la fécondation. Chez les Dicotylédones, les cyclamens (Primulacées) ont également montré un enroulement en spirale du pédoncule fructifère.

Dans la sous-famille des *Hydrocharitoïdées*, il y a de six à quinze carpelles, et les placentas sont fort proéminents.

Le genre *Hydrocharis* ne compte que trois espèces dans l'Ancien Monde et en Australie. La morène *(H. morsus-ranae)* doit son nom au fait que ses feuilles ont un limbe dont la forme évoque la pièce qui serait emportée dans une lame par une « morsure » de grenouille. Elle porte le même nom en anglais et en allemand (frogbit, Froschbiß). C'est une plante vivace flottante des fossés et des étangs abrités et bien exposés. On voit à la surface des eaux ses limbes orbiculaires de 1,5 à 6 cm, échancrés à l'insertion du pétiole qui est accompagné à la base d'une stipule médiane (union des deux oreillettes stipulaires de la base du côté ventral en rapport avec l'unifacialité du pétiole). Des rosettes de feuilles flottantes sont reliées par des stolons. La plante est dioïque, sauf exception. Les fleurs mâles ont un périanthe de six pièces différenciées : trois sépales verts ou roses et trois pétales blancs, jaunes à la base. Il y a douze étamines, les trois internes étant staminodiales, avec encore un verticille rudimentaire apical (carpelles?). Ces fleurs sont portées par des pédoncules et réunies au nombre de une à quatre dans une spathe formée de deux préfeuilles elles-mêmes brièvement pédonculées. Les fleurs femelles sont solitaires à l'intérieur d'une spathe sessile qui est leur préfeuille. Elles-mêmes sont pédonculées et ont un calice et une corolle comme ceux des fleurs mâles, mais les pétales portent de petites languettes nectarifères ventrales à la manière de celles des renoncules. Il y a trois staminodes alternipétales qui peuvent être dédoublés. L'ovaire infère comporte six carpelles en deux verticilles dont les placentas (marges) font longuement saillie. Il y a six stigmates bifides. Les fruits charnus s'ouvrent irrégulièrement. L'espèce habite l'Eurasie jusque dans la région de l'Ob.

Stratiotes aloides, seule espèce du genre, habite l'Europe et le nord-ouest de l'Asie. Ses feuilles atteignant 40 cm sont groupées en rosettes submergées et sont rubanées et dentées-épineuses. Les fleurs sont aussi renfermées dans des spathes qui sont les deux préfeuilles du pédoncule inflorescentiel. C'est ici l'ensemble de la rosette qui s'élève à la surface de l'eau au moment de la floraison. Les fleurs peuvent alors s'ouvrir et la fécondation s'opère. Après quoi la rosette replonge et le fruit mûrit en une capsule avec quatre à six graines dans chacune des six loges imparfaites. Les feuilles se chargent plus ou moins de calcaire, et modifieraient ainsi leur densité, ce qui expliquerait le mouvement de la plante.

La sous-famille des *Thalassioïdées* groupe deux espèces marines du golfe du Mexique et de l'océan Pacifique qui appartiennent au genre *Thalassia*, dont le pollen gélatineux forme une sorte de réseau. Il y a de six à douze carpelles. Les *Halophiloïdées* sont aussi marines, mais n'ont que trois carpelles. Elles ne comptent que le genre *Halophila*, marin également et des régions chaudes. Le pollen est à grains en tétrades et attachés en réseau.

Les *Aponogetonacées (Aponogetonaceae)* ne comprennent que le genre *Aponogeton*, avec quarante espèces d'Afrique, de Madagascar, d'Indo-Malaisie et d'Australie. Certaines sont cultivées dans les bassins et les aquariums, leur introduction en Europe remontant à la fin du XVIIIe siècle. Ce sont des plantes aquatiques flottantes ou submergées, à rhizome muni de racines tubéreuses, qui produisent souvent des stolons, à fleurs

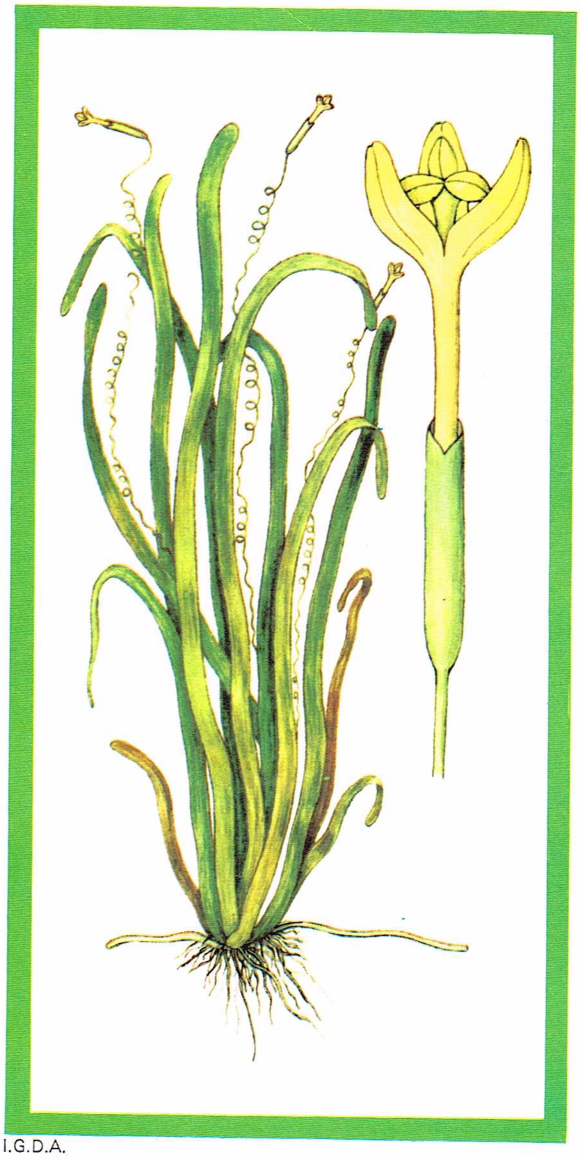

I.G.D.A.

◀ ***Schéma d'un pied femelle de* Vallisneria spiralis, *montrant les fleurs portées par de longs pédoncules ; elles parviennent à la surface au moment de la pollinisation puis retournent sous l'eau pour la maturation des fruits. A droite, détail d'une fleur femelle : le périanthe est uni en tube à la base, et entouré par une longue spathe.***

▶ *Étang recouvert de* Potamogeton natans*; on peut observer les feuilles flottantes ovales et les petites inflorescences dressées et verdâtres.*

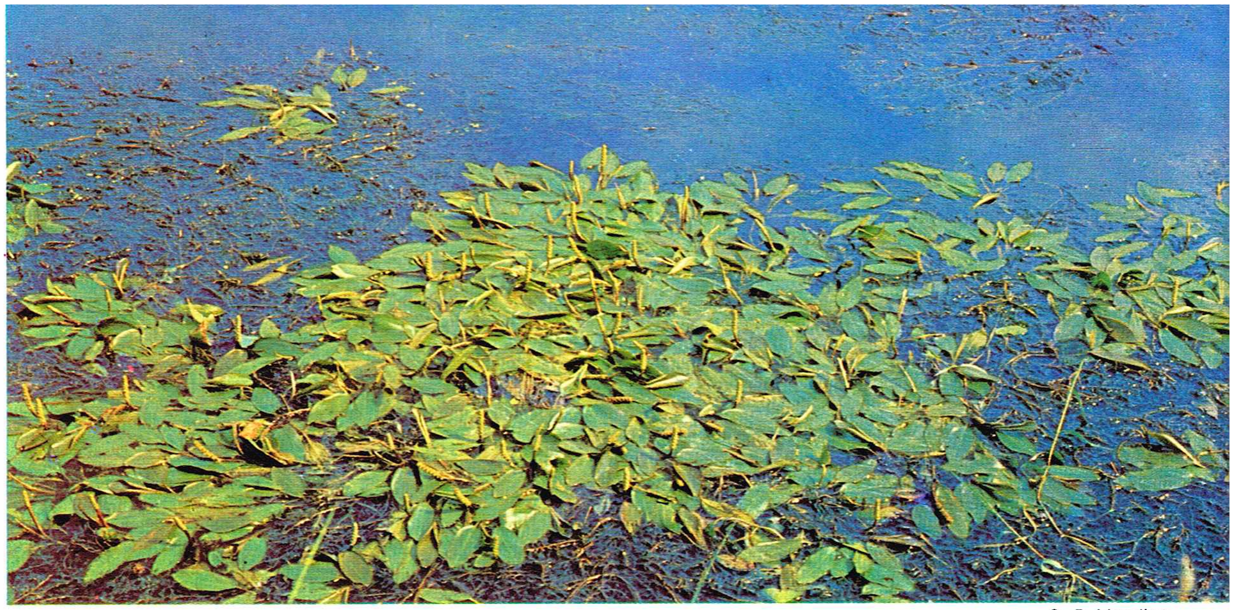

G.-P. Mondino

groupées en inflorescences simples, bi- ou trifurquées, entourées d'une spathe caduque. Il y a un appareil sécréteur sous forme de canaux oléifères ou de laticifères. Les fleurs sont généralement actinomorphes, et à un seul verticille périanthaire ; il y a en général deux tépales, parfois aucun, deux verticilles trimères d'étamines, ou parfois trois ou quatre, avec dédoublement des pièces. Le gynécée est constitué de trois à six carpelles libres, quelquefois plus, chacun ayant de deux à huit ovules submarginaux et donnant un follicule. Les grains de pollen ont des pores et leur formation se fait par divisions simultanées. Les feuilles ont un long pétiole et un large limbe ovale et oblong, avec des nervures principales longitudinales et parallèles, et d'autres transversales, également parallèles entre elles. C'est pour leurs feuilles que l'on cultive en particulier *A. distachyus* et *A. fenestralis*. Le premier, originaire d'Afrique du Sud, a un rhizome porteur de racines tubéreuses d'où partent les feuilles longuement pétiolées disposées en rosette. La hampe florale qui sort de cette dernière se termine par deux épis opposés de fleurs blanches, très odorantes, dont le périgone est réduit à un seul segment blanc (qui pourrait être aussi la bractée axillante d'une fleur apérianthée). Les fleurs sont alternes et situées à la face inférieure de l'axe de l'épi. L'androcée est constitué de six ou douze étamines libres à anthères purpurines. Le gynécée comporte six carpelles libres, contenant de nombreux ovules. Cette espèce s'est naturalisée en France.

La famille des *Juncaginacées (Juncaginaceae)* renferme des plantes jonciformes à fleurs tri- ou tétramères avec deux verticilles d'étamines presque sans filet, et deux verticilles de carpelles, l'un étant parfois stérile. Les carpelles sont plus ou moins soudés et renferment un ou deux ovules. Les fleurs anémogames sont en grappe ou en épi, avec une fleur terminale. Il y a cinq genres et dix-huit espèces sur toute la terre. *Triglochin maritimum,* l'une des quinze espèces du genre, est commun dans les zones littorales tempérées et froides de l'hémisphère Nord et d'Amérique du Sud. Il atteint 50 cm et présente un épi dense de fleurs à carpelles soudés, se libérant en partie sous forme de méricarpes allongés à la maturité. On le trouve aussi dans les terrains salés de l'intérieur.

La famille des *Potamogetonacées (Potamogetonaceae)* représente la plus grande famille des Hélobiales, avec cinq genres et cent cinq espèces des eaux douces réparties pratiquement dans le monde entier et pour certaines dans les eaux salées. Les fleurs sont encore à l'air libre chez les *Potamogeton,* mais sont immergées chez les autres genres. L'adaptation à la vie immergée a conduit alors à une extrême réduction de l'appareil floral, qui, en revanche, est généralement bien développé chez les autres familles, dont les représentants ont l'appareil végétatif dans le milieu aquatique, mais les fleurs dans l'air. Le périanthe est presque toujours absent, ainsi que les bractées, ou est représenté par de petites écailles verdâtres attachées aux étamines. Les fleurs, hermaphrodites ou unisexuées, sont réunies en épis simples ou ramifiés, et généralement entourées, tout au moins avant l'anthèse, par une spathe. Il y a fréquemment des inflorescences polygames où l'on trouve, à côté des fleurs unisexuées, également des fleurs hermaphrodites. L'androcée possède généralement de une à quatre étamines. Les grains de pollen n'ont pas de pores germinatifs ; ils sont arrondis, arqués ou filiformes. La pollinisation des *Potamogeton* est anémophile, mais ailleurs elle est hydrogame ou bien il y a cléistogamie. Le gynécée est apocarpique et constitué d'un nombre variable de carpelles munis le plus souvent d'un seul ovule orthotrope pendant, généralement hélobial (l'albumen est nucléaire chez *Zostera*). Les fruits peuvent être drupacés ou membraneux, parfois irrégulièrement déhiscents *(Zostera)*. Il s'agit de plantes vivaces. L'appareil foliaire est variable. Les espèces marines ont des feuilles rubanées ou filiformes ; chez les espèces d'eau douce, les feuilles peuvent être en partie flottantes et sont alors larges, ovales et longuement pétiolées. Les bases foliaires sont dans tous les cas formées d'une courte gaine éventuellement prolongée audessus et entre le pétiole et la tige en une « ligule » de signification encore douteuse. La plupart des espèces se propagent végétativement avec une grande facilité, en occupant des zones de plus en plus étendues. En particulier, les zostères et les posidonies forment de vastes prairies sous-marines qui ont une très grande importance pour la nourriture des Poissons.

Chez les Potamogetonées, les fleurs sont encore assez développées et actinomorphes, di- ou tétramères et disposées tout autour d'axes arrondis.

Il y a quatre-vingt-dix *Potamogeton* (potamots) dans les eaux douces (ou quelquefois saumâtres) de presque toutes les régions de la terre. Ce sont des herbes aquatiques qui s'implantent sur le fond des cours d'eau grâce à de gros rhizomes, d'où partent de longues tiges feuillées. Les feuilles sont alternes, distiques, mais, chez *P. densus,* surtout européen, méditerranéen et d'Asie Mineure, un entre-nœud sur deux ne se développe pas et les feuilles sont opposées et non décussées, disposition inconnue ailleurs. La base foliaire est une gaine très courte en général qui se prolonge en une « ligule » souvent plus longue que le pétiole, lorsque celui-ci existe, ce qui n'est pas le cas le plus fréquent. De l'aisselle des feuilles, certaines étant parfois immergées et d'autres flottantes, part l'épi, qui porte tout autour de petites fleurs le plus souvent hermaphrodites, avec quatre pièces sépaloïdes adnées extérieurement à quatre anthères sessiles. Le gynécée est constitué de quatre carpelles libres ou un peu unis à la base, à un seul ovule chacun, et prolongés d'un court style, qui demeure sur l'akène. La pollinisation se fait le plus souvent par le vent. Les fruits sont des drupes ou des akènes à une graine operculée dont l'embryon a un hypocotyle massif. La propagation se fait non seulement par dissémination, mais aussi, fréquemment, par voie végétative (formation comme chez beaucoup d'Hélobiales de bourgeons hivernaux ou turions qui se séparent). Dans le sous-genre *Coleogeton,* les feuilles sont linéaires, avec une gaine bien développée. *P. pectinatus,* cosmopolite, vit dans les cours d'eau lents ou rapides ou dans les marais. Il a des tiges grêles, de 1 mm de diamètre, portant de longues feuilles alternes, étroitement linéaires, non aplaties, pourvues à la base d'une gaine mesurant de 2 à 5 cm, embrassant la tige. *P. acutifolius* a des tiges aplaties à deux angles ; les feuilles sont presque toutes alternes (sauf celles qui sont situées près des fleurs),

minces, étroites, mais planes et munies de nombreuses nervures longitudinales. C'est une plante européenne ne s'étendant pas à la région méditerranéenne. Le sous-genre *Potamogeton* comprend des espèces à feuilles amples, ovales, souvent pétiolées et parfois en partie flottantes. *P. natans* est très fréquent dans les eaux stagnantes ou à courant lent du monde entier. C'est une plante pourvue de tiges robustes, non ramifiées en général, qui portent des feuilles longuement pétiolées à limbes ovales, légèrement cordiformes et ondulés à la base; les feuilles ont la consistance du cuir; elles sont vert foncé ou brunâtres et flottent sur l'eau. Auparavant, la tige a produit des feuilles submergées dont les premières sont des sortes de pétioles de 1 cm de diamètre et de 50 cm de long au maximum, et les suivantes allongées, aplaties et également sans limbe. Pendant l'été, des épis d'environ 8 cm de long, formés de petites fleurs verdâtres, et portés par des pédoncules d'une dizaine de centimètres, s'élèvent hors de l'eau. *P. crispus* habite les lacs et les cours d'eau d'Eurasie et d'Amérique du Nord. Ses feuilles ovales sessiles ont des bords crépus et finement dentés. Ses akènes sont unis à la base. La réduction de l'appareil floral est encore plus accentuée chez les genres et les espèces suivants, dont, à la différence des *Potamogeton,* tout le cycle vital se déroule sous l'eau, essentiellement dans la mer. On en a fait d'ailleurs des familles spéciales (Ruppiacées, Posidoniacées et Zostéracées).

Le genre *Ruppia* comprend deux espèces cosmopolites des eaux salées et saumâtres. Des rhizomes rampants et fins produisent des tiges ramifiées, filiformes, qui portent des feuilles linéaires, également filiformes (1 mm) et qui sont pourvues à la base d'une gaine membraneuse élargie. A l'aisselle des feuilles se trouve un type particulier d'inflorescences, groupées en ombelles longuement pédonculées. Chaque inflorescence est entourée d'une spathe et formée de deux fleurs comprenant un androcée de deux étamines à anthères subsessiles, dont les deux loges polliniques sont éloignées l'une de l'autre et présentent comme chez les potamots de minuscules pièces périanthaires dorsales. Dans l'une des fleurs se trouve un gynécée constitué de quatre carpelles uniovulés chez *R. maritima (R. rostellata)* et de huit environ chez *R. spiralis*. Les carpelles sont tout d'abord sessiles; par la suite, quand le fruit mûrit, ils deviennent longuement pédonculés. Les fruits sont des drupes ovoïdes dissymétriques chez la première espèce, presque droites chez la seconde. On voit que la disposition est très voisine de celle des potamots : aussi n'admettrons-nous pas une famille des Ruppiacées et placerons-nous les *Ruppia* parmi les Potamogetonacées.

Chez les Posidoniées, les fleurs sont modifiées et devenues zygomorphes. Il y a trois étamines et un seul carpelle. Le pollen est filamenteux et la pollinisation hydrogame. Le genre *Posidonia* est le seul de la tribu et comprend deux espèces marines immergées, parfois à une profondeur assez importante, près des côtes méditerranéennes et atlantiques de l'Espagne et du Portugal pour *P. oceanica,* et sur les côtes extratropicales d'Australie et de Tasmanie pour *P. australis.* Ces plantes ont un rhizome et la partie inférieure de la tige recouverts par les restes fibreux des bases de feuilles distiques, longitudinalement plurinervées, étroites (15 mm) et allongées (50 cm). Les restes fibreux de ces souches détachées par les vagues forment des pelotes grisâtres qui sont parfois récoltées sur les plages pour en faire des emballages. Au sommet d'un pédoncule aplati se trouve un épi de fleurs, ramifié plusieurs fois pseudo-dichotomiquement et muni de bractées plus ou moins foliacées. Les fleurs sont groupées par deux à quatre dans les spathes bivalentes au niveau des ramifications ultimes de l'inflorescence. Dans chaque groupe, certaines sont hermaphrodites et d'autres mâles. L'androcée est constitué par trois étamines à anthères subsessiles espacées mais réunies par un connectif qui, encore comme chez les potamots, porte de petits appendices périanthaires. Il y a un seul carpelle à stigmate sessile et étoilé, et un seul ovule. Les fruits, charnus, ovoïdes, uniséminés, ressemblent à des olives. *P. oceanica* forme souvent, avec les zostères, de vastes prairies ou herbiers sous-marins, qui sont très fréquentés par les Poissons. Cette espèce s'implante sur des fonds sableux.

Chez les Zostérées, les fleurs disposées sur un spadice aplati sont très zygomorphes et monomères : il y a seulement une étamine et un carpelle. Les étamines ont encore parfois un appendice du connectif, mais très modifié. Le pollen est filiforme et la fécondation hydrogame. On trouve très fréquemment immergées dans les zones côtières à

▼ *A gauche,* **Posidonia oceanica** *est une plante marine immergée aux feuilles rubanées. A droite, des Hélobiales accompagnées de Nymphéacées constituent la végétation aquatique flottante de cet étang.*

I.G.D.A.

N. Cirani

G.S. Giacomelli

▲ *Les herbiers à posidonies abritent de nombreux Animaux : ici des Poissons (syngnathes) se confondent plus ou moins aux feuilles.*

fond sableux des mers tempérées, jusqu'à une profondeur de 10 m, les onze espèces du genre *Zostera* (zostères), dont deux sont présentes sur nos côtes. Les feuilles sont étroites, rubanées, et atteignent 2 m. Souvent d'ailleurs, les vagues les détachent pour les rejeter sur les rivages. A marée basse, dans certaines régions où elles croissent en abondance, on les récolte et on s'en sert sous le nom de varech (nom appliqué aussi à des Algues brunes) comme engrais ou, une fois desséchées, comme matériau d'emballage. Les zostères possèdent des rhizomes ramifiés ou non d'où partent des rameaux à fines tiges aplaties, plusieurs fois ramifiées sympodialement et portant des

▶ *Les zostères (Zostera marina) sont immergées et enracinées sur les fonds sablonneux des mers tempérées.*

D. Wilson

feuilles alternes et embrassantes par leur gaine parfois auriculée au sommet. L'inflorescence qui termine chaque article du sympode est composée d'un axe aplati qui porte alternativement des fleurs mâles et femelles ; il est entouré avant la floraison par la base d'une feuille qui est la seule de l'article du sympode (muni d'une préfeuille plus réduite). Les fleurs sont extrêmement réduites, avec une seule étamine extrorse, sessile, dont le connectif possède souvent un appendice ou rétinacle qui semble être une écaille périanthaire correspondant à celle des potamots ; le carpelle, uniovulé, à un seul style, est terminé par deux stigmates. Ce carpelle est situé à côté de l'étamine ; l'ensemble des deux occupe la largeur de l'axe de l'inflorescence, et les fleurs superposées sur celui-ci ont leur étamine alternativement à droite et à gauche. Les fruits, uniséminés, sont membraneux, lisses ou couverts de stries longitudinales et s'ouvrent par déchirures irrégulières. Les feuilles de *Z. marina* atteignent 1 m ; celles qui n'abritent pas d'inflorescence ont une gaine fermée ; leur limbe parcouru par trois à sept nervures est arrondi au sommet. Les étamines n'ont pas de rétinacles. Les fruits sont blanchâtres, striés longitudinalement. *Z. nana* a des feuilles de 40 cm environ sur 1 ou 2 mm de large, avec de une à trois nervures ; l'inflorescence est courte et ne compte que trois à douze fleurs, mais leurs étamines ont un long rétinacle. Le fruit est lisse.

Les *Phyllopadix* sont deux ou trois espèces des côtes Pacifiques de l'Amérique du Nord et du Japon. Ils sont dioïques. Les fleurs femelles ont des staminodes et les mâles de volumineux rétinacles.

La famille des *Zanichelliacées (Zanichelliaceae)* a été rattachée aux Potamogetonacées, mais les fleurs sont en inflorescences cymeuses et non en épis, et elles sont unisexuées. Les mâles sont souvent apérianthées ou avec un périanthe à trois dents. Il y a de une à trois étamines. Les fleurs femelles ont un périanthe de trois pièces qui peuvent être soudées ou manquer, et de un à neuf carpelles uniovulés surmontés d'un style dilaté en stigmate infundibuliforme, spatulé, ou parfois divisé en deux ou trois branches. Les fruits sont drupacés. Les feuilles sont filiformes à base engainante généralement surmontée d'une ligule. Il y a cinq ou six genres et une vingtaine d'espèces entièrement submergées.

Les *Cymodocea,* avec six espèces, sont marins, à fleurs apérianthées.

C. nodosa occupe les côtes méditerranéennes et atlantiques de la péninsule Ibérique et de l'Afrique jusqu'au Sénégal. Il est vivace et ses rhizomes portent de nombreux rameaux courts, recouverts de longues feuilles distiques de 1 à 3 mm de large, denticulées au sommet. Les bases foliaires sont de longues gaines. La plante est dioïque. Les fleurs sont solitaires et protégées par les gaines des feuilles des rameaux, qui croissent sympodialement ; les mâles ont deux anthères soudées dorsalement ; les femelles possèdent deux carpelles surmontés par un style à deux longs stigmates linéaires. Chacun devient un fruit membraneux indéhiscent.

Les *Zanichellia,* au nombre de deux, ont une structure moins simplifiée. *Z. palustris* occupe les eaux douces du monde entier. Ses feuilles sont linéaires, filiformes, et la ramification est sympodiale. Les fleurs femelles terminent les articles du sympode et présentent quatre carpelles uniovulés à stigmate infundibuliforme, entourés d'un périanthe très réduit. Les mâles sont formées d'une étamine sessile, parfois deux, qui semblent terminer le rameau axillaire de la plus inférieure des deux feuilles situées sous la fleur femelle.

La famille des *Naïadacées (Naiadaceae)* enfin se réduit au genre *Naias,* avec trente-cinq espèces répandues dans les zones tropicales et tempérées du monde entier. Les fleurs sont très réduites, unisexuées, avec ou sans périanthe. La fleur mâle n'a qu'une étamine massive. Il semble qu'un périanthe soit soudé à elle (« étamine infère »). Elle ne s'ouvre pas normalement et le pollen sans pore est libéré par déchirure du sommet. La fleur femelle possède un carpelle sessile uniovulé, nu ou entouré d'une « spathe ». Le style compte deux branches stigmatiques. Le fruit est un akène. Les feuilles sont dentées, en faux verticilles dimères, et les fleurs semblent à l'aisselle de la préfeuille du rameau axillaire de chaque feuille, préfeuille inapparente toutefois ! *N. marina (N. major)* et *N. minor* sont assez répandus en France comme dans le monde entier.

R. Zardini

▲ *Tapis de* **Crocus vernus**, *une Liliiflore de nos montagnes à floraison précoce.*

Liliales ou Liliiflores

Cet ordre est l'un des plus riches en espèces de toutes les Monocotylédones, quoique l'accord ne soit pas fait sur sa circonscription. A côté de groupes qui présentent encore des éléments à caractères peut-être archaïques (division simultanée du pollen, carpelles libres) existent des formes plus évoluées et parfois même très spécialisées. Les fleurs sont hermaphrodites et trimères le plus souvent. Le périgone, à deux verticilles, est pétaloïde. La zygomorphie est rare. Il y a deux cycles d'étamines. L'ovaire est habituellement tricarpellaire et syncarpe, avec trois loges, dont chacune contient en général de nombreux ovules anatropes marginaux. Les zones d'union latérale des carpelles ménagent fréquemment des espaces nectarifères communiquant avec l'extérieur, qui sont limités par les épidermes carpellaires (glandes septales). L'ovaire est supère, mais parfois semi-infère ou infère. L'embryon est généralement petit et entouré d'un albumen abondant, charnu, huileux, cartilagineux, rarement farineux. Il y a encore quelques cas d'albumen hélobial, mais, en général, son développement est nucléaire. Le port est surtout herbacé, mais il y a des formes arbustives, sarmenteuses, et même à allure d'arbre.

La famille des *Liliacées (Liliaceae)* comprend environ deux cent vingt genres et trois mille cinq cents espèces, distribuées dans toutes les régions de la terre et très variables dans leur organisation. Il s'agit surtout de plantes herbacées, vivaces, géophytes, réduites à la mauvaise saison à des bourgeons portés par des bulbes ou des rhizomes. Il y a différents types de bulbes suivant que les parties tubérisées sont la tige (colchique), des écailles foliaires (lis) ou des gaines de feuilles entourant la tige très courte ou plateau (oignon). Ils peuvent laisser sortir les fleurs entourées de feuilles insérées sur la très courte tige du bulbe comme chez les colchiques, ou bien une hampe feuillée se terminant par une inflorescence en grappe comme chez le lis ou ombelliforme comme chez les ails (qui pour cela sont parfois rapportés aux Amaryllidacées), ou bien encore parfois une fleur isolée terminant une tige feuillée (tulipe). Les bulbes sont souvent sympodiaux : l'inflorescence (ou la fleur) termine un article et le bourgeon de l'année suivante est axillaire. Mais la croissance peut aussi être monopodiale : les hampes florales formées chaque année sont axillaires sur le bulbe dont les éléments sont toujours portés par le même axe.

Quelques genres ont un port arbustif ou arborescent *(Dracaena, Yucca)* : un cambium extérieur aux faisceaux entraîne une croissance diamétrale secondaire de la tige.

Les fleurs sont trimères, parfois di-, tétra- ou pentamères, très généralement actinomorphes et le plus souvent hermaphrodites. Les tépales sont souvent unis à la base. Les étamines, à filets insérés sur le réceptacle ou le tube du périgone, ont des anthères basifixes ou dorsifixes. Le pollen se forme par divisions successives, sauf exceptions, et les grains ont très généralement une fente germinative, parfois trois, ou aucune. Les carpelles sont quelquefois libres en partie, mais le gynécée est fondamentalement syncarpe et constitué de trois carpelles (parfois deux, quatre ou cinq) formant un ovaire supère, à trois loges renfermant un ou de nombreux ovules en placentation axile. Cet ovaire est surmonté de trois styles libres ou, surtout, d'un unique style avec trois stigmates plus ou moins distincts. Il arrive que l'ovaire soit uniloculaire et la placentation pariétale. Le fruit est une capsule loculicide ou septicide, mais parfois une baie ou un akène. La graine possède un albumen de type nucléaire. Quelquefois, comme chez les lis, on observe une certaine zygomorphie dans la disposition du style et des étamines. La pollinisation est entomogame : les Insectes sont attirés par les éléments colorés du périgone floral, mais aussi par l'odeur et par le nectar que sécrètent des nectaires situés en bas des tépales dans les formations assez comparables aux nectaires des Renoncules, et dans les glandes septales de l'ovaire.

Le genre *Yucca* présente un cas bien particulier : sa fécondation est autogame, mais impossible spontanément du fait de la position des anthères et de leur pollen pâteux peu susceptible d'être transporté. Elle est étroitement liée au cycle vital d'un Insecte, *Tegeticula (Pronuba) yuccasella*. La femelle ne semble pas s'alimenter et ne recherche pas le nectar. Elle récolte du pollen

M. Bavestrelli

▲ *L'hellébore blanc,* **Veratrum album,** *est une grande plante toxique qui vit dans les pâturages de montagne.*

G. P. Mondino

▶ **Asphodelus albus,** *l'asphodèle, peut atteindre 1,20 m de hauteur et donne une grappe de belles fleurs blanches ou roses.*

grâce à un appendice spécial et le transporte dans la cavité du stigmate. Elle va alors pondre ses œufs dans le gynécée et les larves se nourrissent de quelques ovules, puis percent des trous dans la capsule pour en sortir. Le phénomène rappelle la fécondation du *Trollius* (Renonculacées), mais ici il semble que l'Insecte assure « volontairement » la pollinisation pour fournir de la nourriture à ses larves.

On a essayé de scinder la famille en plusieurs autres, mais sans grand succès, tant les rapports entre les genres sont proches malgré le polymorphisme. Cependant les *Yucca, Cordyline, Dracaena, Agave, Nolina* et genres voisins pourraient constituer une famille des *Agavacées,* comme on le verra. Les Liliacées seront maintenues ici dans leur acception large et nous en étudierons les principales sous-familles.

Les *Mélanthoïdées* ont en général un rhizome. Les anthères sont le plus souvent extrorses, et le fruit est une capsule.

Les *Veratrum* et les *Schoenocaulon* ont un rhizome d'où s'élève une tige aérienne munie de feuilles alternes et se terminant par une grappe de fleurs dont le périgone est constitué par six segments brièvement soudés en bas. Chez les *Veratrum,* qui ont le port de *Gentiana lutea,* les feuilles ont une gaine entourant la tige; elles sont spiralées et non pas opposées et ont de fortes nervures longitudinales. Il y a trois styles courts. L'hellébore blanc *(V. album)* fleurit en été dans les pâturages des montagnes d'Europe centro-méridionale. Il dépasse 1,50 m, est velu et possède une grappe composée qui est formée de fleurs blanchâtres brièvement pédonculées et dont les segments du périgone sont veinés de vert. Son rhizome contient des alcaloïdes à plusieurs cycles condensés (en particulier les protovératrines A et B) qui sont hypotenseurs mais fort toxiques et peu maniables. Leur action se produit par excitation du sinus carotidien, qui, à son tour, abaisse la pression artérielle par action réflexe sur le cœur. On comprend qu'une dose suffisante entraîne un ralentissement cardiaque, puis respiratoire. La plante est par conséquent toxique. *V. nigrum* se trouve dans les montagnes d'Europe orientale et de Sibérie. Il n'existe en France qu'en quelques points des Alpes proches de la mer. Il atteint 1,20 m et possède une grappe terminale ramifiée de fleurs brunâtres longuement pédonculées, accompagnées de bractées elles aussi colorées. Il y a quarante-huit espèces de *Veratrum* dans l'hémisphère Nord; tous sont probablement toxiques. Aux États-Unis, on a constaté que leur consommation par le bétail pendant la gestation entraîne des malformations congénitales des jeunes Animaux.

Sur les dix-huit espèces du genre *Tofieldia,* qui habite les zones tempérées et arctiques de l'hémisphère Nord, deux se trouvent en France. Il y a souvent un petit « calicule » sous le périanthe de la fleur; il est constitué de la préfeuille de celle-ci, bien qu'il ait trois pointes. Le gynécée présente trois styles très courts. *T. pusilla* habite les marécages et les sables humides de la zone arctique et des montagnes d'Amérique du Nord et d'Europe. Il est très rare en France (Mont-Cenis, mont Viso). Il ne dépasse pas 20 cm et possède une hampe à peu près nue se terminant par un épi dense dont les fleurs ont un périgone blanc ou jaune verdâtre. Il n'y a pas de calicule. *T. calyculata,* qui possède un calicule, est répandu dans les marécages des montagnes d'Europe. Sa tige munie de quelques feuilles atteint 40 cm et se termine par un épi dense et court de fleurs à tépales jaune verdâtre ou blanchâtres, souvent à pointes rougeâtres.

Dans la sous-famille des *Asphodéloïdées,* on trouve très généralement un rhizome et les feuilles sont surtout basales. Les anthères sont introrses. Le fruit est capsulaire ou baccien.

Les asphodèles *(Asphodelus)* comptent une dizaine d'espèces distribuées essentiellement dans les régions méditerranéennes et jusqu'en Inde. Elles ont une tige annuelle terminée par une grappe de fleurs blanches et sont munies de feuilles radicales étroites, tandis que leur court rhizome présente souvent des racines tuberculeuses. Le périgone est constitué de segments égaux, libres ou à peine soudés entre eux, à une seule nervure colorée. Les étamines, qui s'insèrent directement sur le réceptacle, ont des filets élargis à la base, qui entourent l'ovaire contenant un ou deux ovules par loge. Ce dernier est surmonté par un style unique terminé par trois stigmates. Il se forme à

maturité des capsules anguleuses qui s'ouvrent par trois valves dont chacune porte deux ou quatre graines. *A. albus* est une plante du sud de l'Europe qui remonte jusqu'en Bretagne; elle atteint 1,20 m, possède des racines tubéreuses et des feuilles largement triquètres, raides à pointe noirâtre. Les fleurs, blanches ou roses, forment une grappe dense à bractées brunes au sommet de la tige. Elle habite les terrains assez secs, dans les prés et les bois. Les *Anthericum,* au nombre d'une centaine, sont proches des asphodèles, mais les tépales sont trinervés. *A. ramosum* habite les terrains calcaires arides d'une grande partie de l'Europe. Il a des grappes composées de fleurs blanches. La plupart des *Anthericum* sont d'Afrique tropicale, mais certains atteignent l'Eurasie et l'Afrique du Sud. Les *Asphodeline* sont également proches des asphodèles, mais en diffèrent surtout par la présence de feuilles sur toute la tige; leur inflorescence est une grappe très dense. Il y en a une vingtaine d'espèces dans la région méditerranéenne, parmi lesquelles *A. lutea,* des lieux arides et rocheux du sud de l'Europe, qui n'existe pas en France.

Le genre *Chlorophytum* comprend une centaine d'espèces surtout tropicales et subtropicales. *C. comosum,* d'Afrique du Sud, est cultivé pour ses feuilles souvent panachées et ses inflorescences éventuellement prolifères; les fleurs sont alors remplacées par des bourgeons végétatifs susceptibles de se marcotter. Les *Chlorophytum* ont des racines fasciculées sur un court rhizome. Les feuilles sont linéaires-lancéolées, toutes radicales. La hampe florale est ramifiée et les fleurs sont pendantes. Le périgone est persistant et la capsule est profondément lobée en trois ailes carpellaires aplaties.

Les *Hemerocallis* comprennent seize espèces d'Asie tempérée et s'étendent jusqu'au Japon. Aucun n'est indigène en France mais deux sont très cultivés, et on peut les trouver subspontanés dans la moitié sud du pays. On les a signalés aussi en Europe méridionale, où ils semblent être naturalisés. Ce sont des plantes vivaces par un rhizome très court à racines épaisses. Le périgone, infundibuliforme, constitué de six segments unis en tube à la base et recourbés vers l'extérieur au sommet, est précocement caduc. Six étamines à anthères dorsifixes s'insèrent à la gorge du tube. L'ovaire, à trois carpelles soudés, se prolonge par un style terminé par un petit stigmate divisé en trois lobes. Les fruits sont des capsules loculicides à nombreuses graines. *H. fulva* ou lis rouge possède des fleurs fauves, rougeâtres, inodores, subsessiles, réunies par cinq à quinze en thyrse lâche. Elles s'ouvrent de juin à août et leur périgone peut atteindre 10 cm de long et 6 cm de large. Les tépales internes sont ondulés au bord. La tige atteint 1 m et porte à la base des feuilles aiguës, carénées, de 1 à 2 cm de large et presque aussi longues qu'elle. La plante occupe l'Asie tempérée, mais ne semble pas indigène à l'ouest du Caucase. *H. flava* est proche du précédent, mais ses fleurs atteignent 12 cm de long et sont jaune pâle, à odeur de fleur d'oranger, à tépales non ondulés, et groupées par trois à neuf en grappes lâches. Les feuilles ne dépassent pas 1 cm de large et les racines sont dilatées au sommet en tubercules aigus. C'est le lis jaune, originaire d'Extrême-Orient, moins cultivé que le précédent.

Le genre *Phormium* est originaire de Nouvelle-Zélande et comprend deux espèces, dont *P. tenax,* cultivé sous le nom de lin de la Nouvelle-Zélande. Il a été importé en Europe en 1786. Cette plante des régions chaudes fournit à l'industrie textile les fibres corticales de ses longues feuilles basales distiques, raides et pliées longitudinalement. La hampe florale nue porte une grande grappe composée de fleurs blanches. La capsule libère de nombreuses graines aplaties. Ce phormium est aussi un Végétal ornemental de pleine terre. Ce genre a été parfois rattaché aux Agavacées.

Les *Hosta* sont une quarantaine de plantes d'Extrême-Orient qui présentent souvent des embryons surnuméraires d'origine nucellaire. *H. plantaginea* a des feuilles pétiolées largement ovales, aiguës, vert glauque, cordées à la base, à nervures parallèles-convergentes, et forme une hampe à fleurs blanches. C'est une plante très cultivée que l'on nomme également *Funkia. H. sieboldiana,* à fleurs bleu lilas, est souvent cultivé, dans une variété à feuilles panachées.

Les aloès *(Aloe)* forment un grand genre de deux cent cinquante espèces environ installées dans les régions sèches de l'Afrique jusqu'à Madagascar et à Socotora. Les feuilles sont épaisses, souvent succulentes, fréquemment épineuses, et persistantes. Elles sont spiralées et non pas distiques. Certaines espèces ont une tige ramifiée à accroissement secondaire. Les fleurs, groupées en inflorescences axillaires et pendantes, ont un périgone formé de six tépales soudés en tube et diversement colorés de rouge, jaune et blanc. Les fruits sont des capsules qui s'ouvrent par trois valves et renferment de nombreuses graines arillées aplaties. *A. vera,* originaire d'Afrique du Nord et naturalisé dans tout le bassin méditerranéen et sous les tropiques, est pourvu d'une grosse tige courte (30 à 50 cm) terminée par une touffe de feuilles charnues lancéolées de 40 cm environ, munies d'épines sur les bords. Vert pâle chez la plante adulte, elles sont tachées

P. Martini

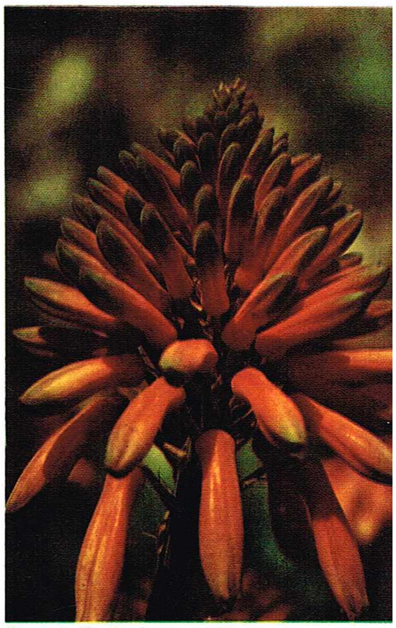

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *En haut,* **Hemerocallis fulva,** *avec six tépales recourbés, est bien caractéristique des* **Liliiflores.** *En bas, inflorescence d'aloès.*

I.G.D.A. - Archives B

◀ *Chez les aloès, les feuilles charnues et souvent épineuses forment de grosses touffes; certaines espèces sont cultivées comme plantes grasses.*

Archives P2

▲ *Chez* Kniphofia uvaria, *la corolle forme un long tube dépassé par les étamines.*

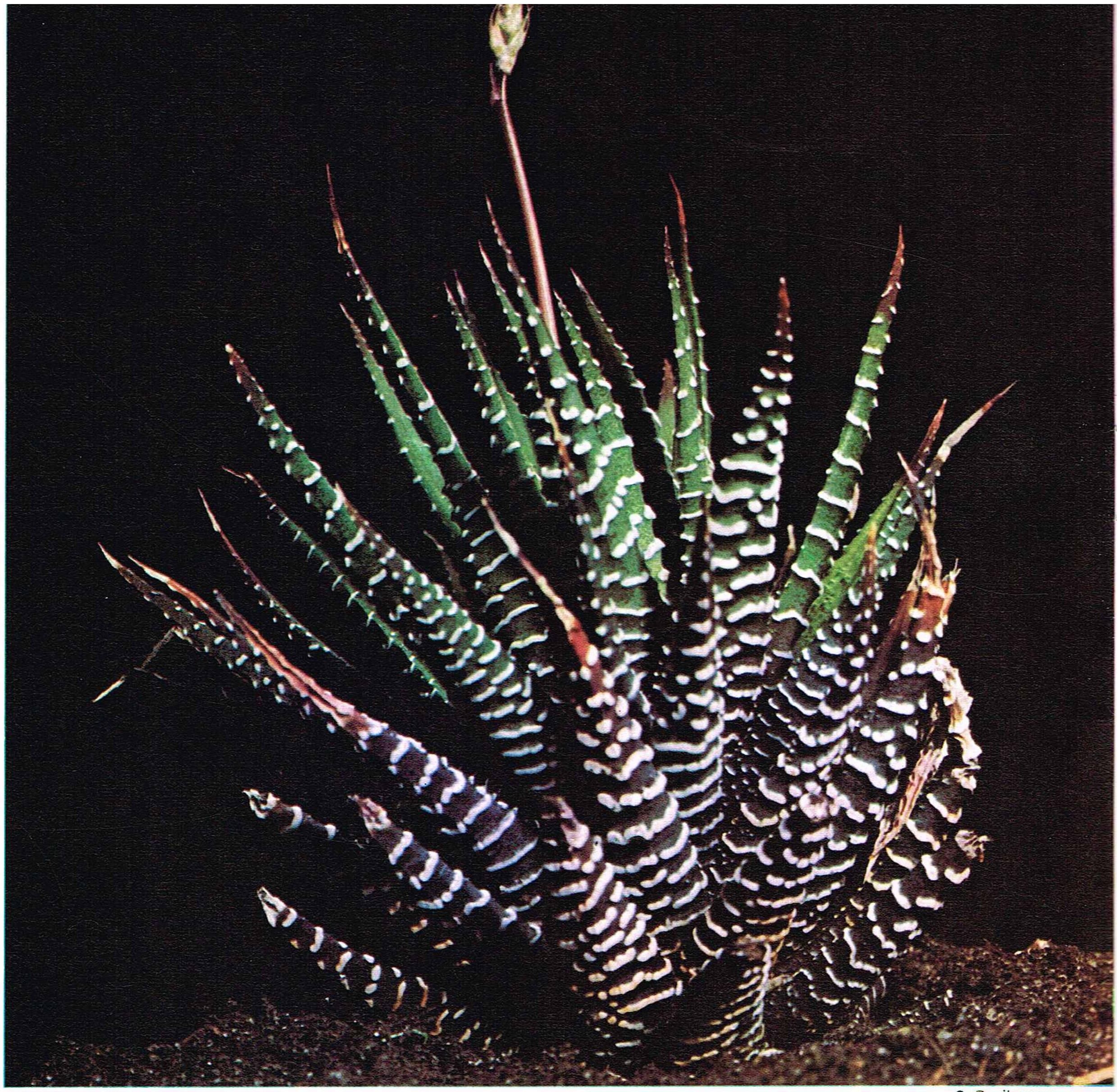

C. Bevilacqua

▶ *Les feuilles charnues ornées de tubercules blancs de* Haworthia fasciata *sont extrêmement décoratives.*

▼ *La floraison du colchique* (Colchicum autumnale) *a lieu en automne; il est alors dépourvu de feuilles, celles-ci n'apparaissant qu'au printemps suivant.*

M. Bavestrelli

de blanc chez les jeunes. La hampe florifère atteint 1 m et se continue par une grande grappe de fleurs jaunes pendantes. *A. ferox,* d'Afrique du Sud, à fleurs écarlates, est utilisé comme le précédent pour l'obtention du suc foliaire qui est aussi nommé « aloès » à l'état solidifié; il contient des principes anthracéniques, en particulier de l'aloïne, qui est un hétéroside particulier de l'aloë-émodol, anthracénique, et du glucose, celui-ci étant fixé sur un carbone du noyau (C-hétéroside). L'aloès est un laxatif et un cholagogue.

Les aloès sont très cultivés comme plantes grasses, de même que les genres voisins *Haworthia* et *Gasteria,* le premier ayant des fleurs nettement zygomorphes; tous deux sont originaires d'Afrique du Sud. Plusieurs espèces ont des pustules blanches sur les feuilles. Parmi les soixante-dix *Kniphofia, K. uvaria,* à fleurs tubuleuses, rouge brique puis jaunes, pendantes et en épis très fournis, est souvent cultivé et appelé parfois *Tritoma.* Il est originaire de la province du Cap.

Chez les *Wurmbéoïdées,* il y a un bulbe plein, constitué surtout de la tige tubérisée et muni du même côté de deux bourgeons : l'un, axillaire de la feuille située sous le bulbe et l'entourant, donnera la pousse de l'année, l'autre, porté par l'une des premières feuilles de cette dernière, deviendra la pousse de l'année suivante. Le bulbe lui-même est la base de la tige de l'année précédente; il est surmonté d'un reste de la tige aérienne et accompagné d'un reliquat du bulbe de l'année précédente; l'ensemble est enveloppé de résidus de la feuille axillante de ce bulbe ancien, qui portait la feuille entourant le bulbe de l'année.

Chez les *Colchicum* (colchiques), au nombre de soixante-cinq, répandus en Europe, dans la région méditerranéenne et jusqu'en Inde, les carpelles sont soudés (ils ne le sont pas entièrement chez les *Wurmbaea, Dipidax,* etc.) et la capsule est septicide. Il y a de une à trois fleurs latérales sur la tige souterraine et leurs tépales sont très longs, mais pas toujours soudés inférieurement. Le colchique *(C. autumnale)* est une espèce très répandue dans les prairies d'Europe surtout centrale, en parti-

culier dans toute la France, jusqu'à l'étage subalpin. La floraison a lieu en septembre-octobre. Les fleurs, généralement solitaires, roses ou lilas, paraissent les premières. Les onglets des tépales atteignent 25 mm et sont soudés entre eux. L'ovaire demeure en terre. Les feuilles d'une vingtaine de centimètres paraissent au printemps suivant, au moment où mûrit la capsule qui est alors seulement apparente à l'air libre. Les colchiques sont très vénéneux; leur toxicité est due principalement à la colchicine, abondante surtout dans les graines et le bulbe. C'est une substance tricyclique azotée, liée, du moins en partie, au glucose (colchicoside). Elle inhibe la séparation des deux stocks chromosomiques issus de la division des chromosomes lors de la mitose, en empêchant l'organisation du fuseau. Des cellules polyploïdes apparaissent ainsi. Ce pouvoir antimitotique a fait essayer la colchicine en cancérologie, mais les doses efficaces sont bien proches des doses toxiques. La colchicine, le colchicoside et le thiocolchicoside (de synthèse) sont utilisés pour leurs propriétés anti-inflammatoires et analgésiques dans le traitement de la goutte. *C. alpinum,* plus petit, vit dans les montagnes d'Europe centro-méridionale. Chez *C. bertolonii,* de la région méditerranéenne, les feuilles paraissent en même temps que les fleurs. Chez *C. bulbocodium (Bulbocodium vernum),* les tépales sont libres et leur limbe a deux dents basales. C'est une plante des montagnes d'Europe centro-méridionale. D'autres espèces ont les tépales libres, sans appendices.

Les *Gloriosa* forment un genre de six espèces vivant en Afrique et en Asie tropicale. Ce sont des plantes grimpantes à tiges feuillées, dont les feuilles ont un limbe prolongé en vrille. Les fleurs sont isolées à l'aisselle de ces feuilles. *G. superba* est une plante de serre et d'appartement à fleurs rouge-orangé à tépales ondulés et crispés.

La sous-famille des *Allioïdées* est surtout caractérisée par son inflorescence : à l'extrémité d'une hampe nue se trouve une fausse ombelle entourée de deux ou plusieurs bractées scarieuses, qui sont parfois soudées. Il s'agit le plus souvent de deux cymes unipares hélicoïdes très condensées, formées de part et d'autre d'une fleur terminale, à l'aisselle des deux pièces de la spathe (comme on s'en aperçoit en étudiant l'ordre d'ouverture des fleurs). Il arrive que l'inflorescence soit réduite à une fleur. En général, les fleurs des cymes n'ont pas de bractées axillantes. Les filets des anthères sont parfois stipulés. Les feuilles peuvent être aplaties ou cylindriques et creuses; elles sont toutes basales et entourent de leur gaine la hampe florifère. Il y a un bulbe formé éventuellement sur le rhizome ou seulement un rhizome. Le bulbe est constitué par les bases des feuilles transformées en organe de réserve; il est revêtu par des tuniques, bases foliaires plus anciennes, membraneuses ou cartilagineuses. Chez certaines espèces, le bulbe est composé, car il se développe des bourgeons bulbeux (caïeux) collatéraux aux aisselles des pièces du bulbe originel qui sont membraneuses. Il existe parfois des bulbilles adventives sur les pièces du bulbe, mais aussi à l'intérieur de l'inflorescence; dans ce dernier cas, il y a remplacement de tout ou partie des fleurs par ces bourgeons qui assurent la multiplication végétative. Les fleurs peuvent alors être rares et stériles chez certaines espèces. Hutchinson place cette sous-famille dans les Amaryllidacées en raison de son inflorescence. L'ovaire, infère chez les Amaryllidacées, pourrait en effet ne pas être un obstacle à ce rapprochement : aucune importance fondamentale ne doit lui être attribuée *a priori,* pas plus qu'à tout autre caractère.

Le principal genre est le genre *Allium* avec trois cents espèces essentiellement des zones tempérées de l'hémisphère Nord. Plusieurs sections doivent être distinguées pour plus de clarté.

La section *Mollium* comprend des espèces à feuilles planes non pétiolées, disposées en spirale. Les filets staminaux sont simples. La hampe florale se termine par une ombelle de fleurs nombreuses, entourée d'une spathe de deux à quatre bractées courtes et larges. Certaines espèces sont cultivées pour l'ornement, mais d'autres sont spontanées en France, comme *A. roseum,* de la région méditerranéenne, à tépales obtus, mucronés, rose vif, qui a parfois des fleurs mêlées de bulbilles.

La section *Ophioscordon* montre des feuilles planes et pétiolées, une spathe à deux bractées, et les filets des étamines sont simples. *A. ursinum,* de 15 à 35 cm, à tige présentant deux angles obtus, est muni à la base de deux

G. P. Mondino

▲ **Allium ursinum,** ***l'ail des ours, est commun dans les sous-bois humides.***

▼ ***L'ail*** **(Allium sativum)** ***forme des bulbes composés de caïeux (les gousses) recouverts par leurs feuilles axillantes blanches.***

M. Bavestrelli

C. Bevilacqua

▲ *On cultive de nombreuses espèces du genre* Allium *: ici* Allium porrum, *le poireau.*

feuilles largement ovales-lancéolées et longuement pétiolées. C'est une plante des terrains humides de l'Europe, formant souvent des peuplements en sous-bois de feuillus.

Dans la section *Briseis,* les feuilles sont planes et distiques, la tige est à section triangulaire et les filets staminaux sont simples; il y a trois stigmates libres, à la différence des précédentes sections. *A. triquetrum* est une plante méditerranéenne à fleurs blanches dont les tépales sont rapprochés après floraison. *A. neapolitanum* a une tige trigone, avec deux ou trois feuilles lancéolées et une ombelle de fleurs blanches, entourée d'une spathe à un seul lobe (par soudure). Les tépales sont ovales et obtus. C'est une plante méditerranéenne.

La section *Allium* renferme de nombreuses espèces cultivées pour l'alimentation. Les feuilles y sont planes et distiques, mais les filets des étamines internes sont aplatis et stipulés. La spathe a deux valves unies. L'ail *(A. sativum)* est utilisé comme condiment. Son odeur piquante est due essentiellement à la formation de disulfure d'allyle à partir d'un acide aminé particulier, l'alliine. L'alliine est le sulfoxyde d'allylcystéine, qui, par condensation de deux molécules et clivage enzymatique dans la plante blessée, donne naissance surtout à de l'acide pyruvique et à de l'allicine, qui comporte deux atomes de soufre. La réduction de celle-ci conduit au principe odorant, qui est antiseptique. La teinture d'ail est aussi préconisée comme hypotenseur, sans doute à cause de son action diurétique. Le bulbe est de type composé et constitué de caïeux axillaires collatéraux et sessiles (les « gousses »), recouverts par leurs feuilles axillantes blanches et papyracées. En devenant un vrai bulbe, chaque caïeu développera des caïeux axillaires tandis que ses écailles se dessécheront et deviendront papyracées. La hampe de 20 à 40 cm est feuillée jusqu'au milieu et se termine par une inflorescence de quelques fleurs blanchâtres mêlées de nombreuses bulbilles, et entourée d'une spathe se rétrécissant en une longue pointe qui dépasse l'inflorescence. L'ail est originaire d'Asie centrale, mais a été cultivé dans toutes les régions méditerranéennes depuis la plus haute antiquité. Actuellement, sa culture s'est étendue au monde entier. L'ail rocambole *(A. scorodoprasum)* a un bulbe composé de bulbilles. Les feuilles sont rugueuses sur la marge; la carène et les gaines masquent la moitié inférieure de la tige. L'ombelle portée par la tige de 30 à 80 cm est recouverte par une spathe à deux bractées obtuses et pointues. L'inflorescence comporte peu de fleurs, mais plusieurs bulbilles, qui sont recueillies comme condiment. La plante est européenne, mais surtout orientale; elle est parfois cultivée. Le poireau *(A. porrum)* a un bulbe simple assez peu marqué; sa saveur et son odeur sont bien moins fortes que celles des espèces précédentes, quoiqu'il contienne des traces des deux dérivés de l'alliine. Ses feuilles sont larges et rubanées, nombreuses, et l'emboîtement de leurs gaines forme une sorte de fausse tige comme chez un bananier. Sa hampe atteint 1 m, et se termine par une ombelle de fleurs blanches ou rosâtres à étamines saillantes. Il est cultivé pour l'alimentation; on utilise la partie basale des feuilles, blanche et tendre, et les bulbes. C'est aussi un diurétique. Il dérive probablement d'*A. ampeloprasum,* qui a des caïeux, des feuilles rugueuses sur les marges et la carène, et des étamines peu exsertes. C'est une plante surtout méditerranéenne, mais qui remonte jusqu'en Grande-Bretagne.

La section *Codonoprasum* se distingue par ses tépales, connivents sans être soudés. Les limbes des feuilles distiques sont le plus souvent épais et étroits, cylindriques ou semi-cylindriques, cannelés mais non fistuleux. Les bractées de la spathe sont longuement aiguës. Les filets ne sont pas stipulés. *A. oleraceum* atteint 60 cm, ses feuilles sont semi-cylindriques, à gaine fermée autour de la hampe; les fleurs rose sale sont peu nombreuses, tandis que les bulbilles rougeâtres sont relativement volumineuses. C'est une plante commune en Europe, surtout sur les terrains secs.

Les espèces de la section *Schoenoprasum* ont des bulbes rassemblés en groupes sur de courts rhizomes et elles croissent en touffes. Les feuilles sont à limbe fistuleux, cylindrique ou aplati et les filets staminaux n'ont pas de stipules. La ciboulette (civette, appétits), ou *A. schoenoprasum,* a des fleurs roses en ombelle globuleuse, à tépales étalés marqués de pourpre sur la carène. Les feuilles sont larges de 1 à 2 mm.

Dans la section *Cepa,* les bulbes sont isolés, mais attachés à un rhizome chez les espèces vivaces. Les limbes des feuilles distiques sont cylindriques et fistuleux. Les pédoncules floraux ont une préfeuille basale, les tépales sont étalés, les filets staminaux stipulés ou non. L'oignon *(A. cepa)* est originaire d'Asie centro-méridionale, et en particulier d'Iran; il a été introduit dès l'Antiquité dans toutes les régions méditerranéennes, et est maintenant répandu dans le monde entier. C'est une plante bisannuelle, qui possède un bulbe constitué par l'emboîtement de tuniques charnues qui sont les bases des feuilles de l'année précédente, et revêtu extérieurement par des tuniques fines qui sont celles des feuilles de l'année antérieure. Les limbes sont allongés, cylindriques et fistuleux. La tige, renflée à la partie inférieure, se termine par une ombelle de très nombreuses fleurs blanc verdâtre, à tépales étalés et étamines saillantes (celles de l'intérieur ayant de courtes stipules). Il n'y a pas de bulbilles inflorescentielles. De nombreuses variétés se distinguent par la forme du bulbe, rond, ovoïde ou aplati, petit ou gros. Ses tuniques papyracées sont souvent rouge foncé, tendant au violet, mais parfois vertes, jaunes ou blanches. L'odeur et la saveur typiques sont dues aux méthyl- et propylalliine susceptibles de former des disulfures d'allylméthyle et d'allylpropyle, comme il a été indiqué à propos de l'ail, qui renferme aussi un peu de propylalliine. L'oignon est un légume et un condiment. La médecine populaire, confirmée ensuite par des expé-

▼ Allium cepa, *l'oignon, est une plante bisannuelle dont la tige se termine par une ombelle de fleurs verdâtres (à gauche). Son bulbe est constitué par l'emboîtement de tuniques charnues qui sont les bases des feuilles de l'année précédente, recouvertes par les restes foliaires de l'année antérieure (à droite).*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

riences précises, lui a reconnu des propriétés diurétiques; son pouvoir bactériostatique est net à l'état frais et il est également hypoglycémiant. L'échalote *(A. ascalonicum)* est cultivée en Europe et surtout en France. Elle n'est pas connue à l'état sauvage. Voisine de l'oignon, mais vivace, elle en diffère surtout par le bulbe composé d'autres petits bulbes axillaires allongés, comme chez l'ail. Les étamines ne sont pas saillantes et il y a des bulbilles parmi les fleurs. *A. oschaninii,* d'Asie centrale, en est très voisin. La ciboule *(A. fistulosum)* semble originaire de l'est de la Sibérie. C'est un oignon à bulbe plus petit, à tige creuse, renflée au milieu, à feuilles persistantes cylindriques et à fleurs blanches en ombelles denses. Les étamines saillantes ont des filets non stipulés. Quelques ails sont cultivés pour l'ornement, certains à très grande ombelle globuleuse, comme *A. karataviense,* d'Asie centrale.

Parmi les dix espèces de *Brodiaea,* des États-Unis et de l'Amérique centrale et du Sud, *B. capitata* est souvent cultivé pour ses ombelles de fleurs bleuâtres sur une hampe de 15 à 25 cm. Il s'agit encore d'une plante à bulbe.

Les *Agapanthus* sont un genre de neuf espèces d'Afrique du Sud. Ils sont voisins des *Allium,* dont ils se distinguent surtout par leur gros rhizome et la soudure de leurs tépales à la base. La hampe se termine par une large ombelle entourée par une ou plusieurs bractées. Les étamines sont insérées sur le tube du périanthe. *A. africanus (A. umbellatus)* est souvent cultivé pour ses fleurs bleu clair. Les feuilles radicales sont distiques et rubanées. La hampe atteint 1 m et l'ombelle comporte plus de cent fleurs.

Les *Lilioïdées* sont des plantes à bulbe. La tige porte une feuille ou plus. Les fleurs sont isolées ou groupées en grappe ou en épi, parfois presque en ombelle, mais alors celle-ci n'est pas cymeuse et n'a pas de spathe. Elle est proche de l'ombelle vraie. Le périgone est constitué de six segments libres. Les étamines ont des anthères introrses. L'ovaire, tricarpellaire, contient de nombreux ovules dans chaque loge et mûrit ensuite en une capsule loculicide.

Chez les *Gagea,* au nombre de quatre-vingt-dix dans la région méditerranéenne au sens large et jusqu'en Iran, le bulbe est entouré d'une seule feuille charnue et se forme à l'aisselle d'une feuille basale munie d'un limbe. De ce bulbe sort la hampe à une à trois feuilles basales, se terminant par une ombelle ou un corymbe de quelques fleurs jaunes ou verdâtres — il y en a parfois une seule — à l'aisselle de bractées foliacées (différence avec les Allioïdées). Les pétales sont jaunes au-dedans, verdâtres au-dehors.

Gagea arvensis ne dépasse pas 15 cm. Il a deux feuilles basales étroites (4 mm) et une inflorescence de cinq à dix fleurs à tépales velus extérieurement et à style cotonneux. C'est essentiellement une plante méditerranéenne, mais qui atteint de façon disséminée le sud de la Scandinavie et les rives de la mer Baltique; on la rencontre dans les terrains pierreux de toute la France, mais en plaine seulement. *G. lutea* a des feuilles basales de 15 mm de large. Ses tépales sont glabres. Il atteint 30 cm et habite toute l'Eurasie, mais en France il est limité aux montagnes, dans les pâturages et les forêts jusqu'à l'étage subalpin.

Les *Lilium* ou lis sont dans leur sous-famille le genre le plus riche en espèces (soixante-quinze), distribuées dans les régions tempérées d'Eurasie. Il y a au moins autour du bulbe deux feuilles charnues qui ne l'entourent pas complètement (bulbe écailleux). Les tépales ont, près de leur insertion, des nectaires dont la morphologie se rapproche de celle des écailles nectarifères des renoncules. Leur présence n'empêche pas l'ovaire d'être aussi nectarifère par ses glandes septales. Le bulbe émet une tige feuillée sur une longue portion, avec des feuilles le plus souvent lancéolées, parfois en faux verticilles imparfaitement réalisés. Les feuilles peuvent abriter des bourgeons axillaires transformés en bulbilles. Au sommet de la tige, qui peut être ramifiée, se trouve l'inflorescence, en grappe ou en ombelle, ou bien réduite à une seule fleur. Les fleurs sont généralement étalées ou pendantes. Le périgone est constitué de six tépales libres disposés en entonnoir, mais recourbés à l'extérieur à leur partie apicale ou dès leur milieu, et souvent porteurs de filaments ou écailles, indépendamment des nectaires. Les six étamines ont des anthères dorsifixes particulièrement grandes et colorées. L'ovaire, supère et triloculaire, est surmonté d'un long style terminé par un stigmate à trois lobes. Il y a

M. Bavestrelli

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

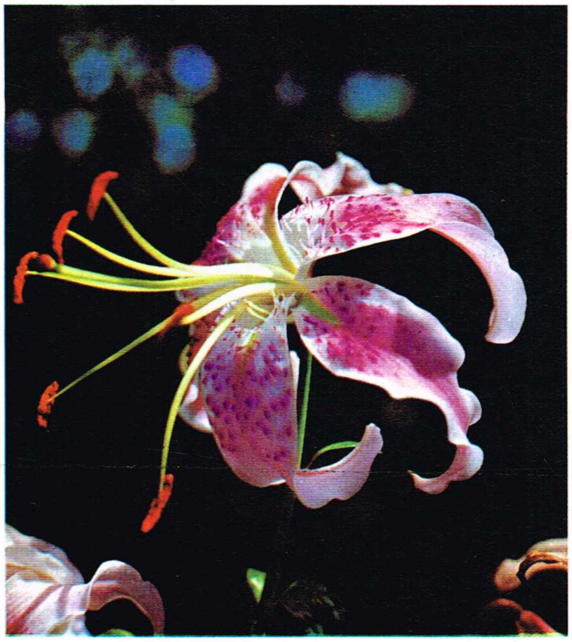

▲ *Les fleurs des lis ont de longs tépales recourbés vers l'extérieur, six étamines et un long style toujours bien visible; ici :* **Lilium pomponium.**

◀ **Lilium tigrinum,** *une des nombreuses espèces du genre* **Lilium.**

▼ *Les fleurs d'***Agapanthus africanus** *sont groupées en ombelles et leurs tépales sont soudés en tube à la base.*

G. P. Mondino

Archives P2

▲ ***Les tulipes sont abondamment cultivées, notamment en Hollande, qui en exporte les bulbes.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ ***Forme horticole de tulipe à fleurs doubles.***

trois espèces spontanées de lis en France, mais la plus connue y est seulement naturalisée dans le Midi. C'est le lis blanc *(L. candidum)*, originaire d'Asie Mineure et largement cultivé. C'est une plante robuste, dépassant 1 m, à feuilles alternes sur toute la tige, oblongues en bas, lancéolées en haut; les feuilles caulinaires sont ondulées au bord. La tige se termine par une grappe de trois à dix grandes fleurs blanches très odorantes, à tépales arqués en dehors et anthères dorsifixes jaunes. Le lis martagon *(L. martagon)* se rencontre dans les régions montagneuses de toute l'Europe centro-méridionale et de l'Asie tempérée jusqu'au lac Baïkal. On le trouve en France dans les prairies et les bois de montagne jusqu'à l'étage alpin, où il fleurit en juin-juillet. Au sommet de la tige de 1 m environ, qui porte des feuilles inférieures et moyennes en faux verticilles au nombre de cinq à dix, se trouve une grappe lâche de trois à huit fleurs pendantes inodores. Les tépales sont rose violacé, ponctués de pourpre, recourbés et dressés à partir du milieu, pubescents en dehors. C'est une plante trop cueillie qui doit être protégée. *L. bulbiferum (L. croceum)* a de grandes fleurs jaune-orangé, à peu près dressées, à tépales simplement incurvés, en fausses ombelles de une à cinq fleurs, entourées de leurs bractées foliacées, à pédoncule laineux. Sa tige simple porte de nombreuses feuilles alternes, à l'aisselle desquelles se trouvent une à trois bulbilles ovoïdes brunâtres. C'est une plante d'Europe centro-méridionale, dans les zones montagneuses, jusqu'à l'étage subalpin, et qui ne dépasse pas le Jura et les Alpes à l'ouest, et les Tatras à l'est.

Les *Fritillaria* forment un genre proche du précédent et regroupent une centaine d'espèces de l'hémisphère Nord. Ils sont pourvus de fleurs pendantes isolées ou en verticille, à périgone en cloche de six tépales égaux, libres, pourvus à la base d'une fosse nectarifère. Les étamines sont plus courtes que les tépales et ont un filet étroit qui supporte des anthères linéaires-oblongues, insérées à la base. L'ovaire triloculaire renferme de nombreux ovules et devient une capsule loculicide à trois angles saillants. *F. meleagris* ne dépasse pas 30 cm. Il possède de quatre à six feuilles et sa tige se termine par une fleur de 4 cm de long dont les tépales montrent, sauf en haut, un damier remarquable de carrés pourpres et clairs. C'est une plante des prés humides d'Europe, qui atteint le bassin de la Volga.

Le genre *Tulipa* est constitué d'environ soixante espèces des régions méditerranéennes et d'Asie tempérée, surtout centrale, où se trouvent la plupart d'entre elles. Le bulbe est parfois laineux sur la tunique externe. La hampe, haute de 15 à 70 cm, se termine, sauf exception, par une fleur unique et dressée, à périgone en cloche diversement coloré. Les feuilles, toutes basales la plupart du temps, sont linéaires ou ovales-lancéolées. Les six segments du périgone, égaux entre eux et étroitement rapprochés de manière à prendre un aspect campanulé ou dans certains cas infundibuliforme, n'ont pas de nectaire; il y a six étamines insérées sur le réceptacle. L'ovaire est triloculaire et surmonté d'un stigmate sessile. Le fruit est une capsule loculicide à nombreuses graines aplaties. On connaît sept espèces de *Tulipa* en France; *T. sylvestris* est probablement le plus répandu. On le rencontre dans les champs ou les vignes, où il fleurit en avril-mai. Son bulbe émet un « stolon » qui est un diverticule de la base foliaire « fertile » transportant le caïeu axillaire de remplacement à une certaine distance. La plante atteint 60 cm et possède des fleurs jaunes à tépales aigus portées par une hampe entourée à la base de trois feuilles linéaires-lancéolées, légèrement glauques. C'est une plante principalement méditerranéenne, mais qui remonte jusqu'en Grande-Bretagne, et dans le sud de la Scandinavie. Elle est d'ailleurs peut-être seulement naturalisée au nord. *T. oculus-solis* ne dépasse pas 30 cm. La hampe feuillée se termine par une fleur rouge à tépales aigus tachés de noir dans le tiers inférieur. Cette tache est bordée de jaune. La plante se rencontre en région méditerranéenne et dans le sud de la France jusqu'en Dordogne. *T. gesneriana* est la tulipe des fleuristes, qui atteint 50 cm et possède trois ou quatre feuilles largement lancéolées-aiguës. Les tépales sont obtus ou aigus, parfois lancéolés, rouges ou jaunes. Son bulbe forme des caïeux sessiles. La culture de la plante remonte au XVIe siècle et a pris un grand développement, en particulier au siècle suivant. C'est surtout en Hollande qu'on la cultive en grande quantité pour

M. et S. Prato

M. et S. Prato

▲ ***Deux représentants du genre* Scilla : *à gauche,* Scilla amoena *en fleur; à droite,* S. hyacinthoides *au début de la floraison.***

l'exportation des bulbes. Elle est originaire d'Asie centro-occidentale; en Savoie et dans le Valais, on trouve des plantes très voisines, sans qu'on sache si elles sont spontanées ou s'il s'agit de plantes cultivées anciennement et naturalisées, ce qui semble plus probable.

Chez les *Scilloïdées,* le bulbe est muni généralement de tuniques membraneuses; les feuilles sont basales, les anthères introrses et la capsule loculicide. Dans un premier groupe, les tépales sont libres ou à peu près.

Les scilles *(Scilla)* sont une centaine d'espèces de l'Ancien Monde. Leur bulbe persiste plusieurs années. Les fleurs pendantes, souvent bleues ou violacées, sont réunies en grappe. Le périgone a fréquemment le sommet de ses pièces étalé en étoile. Il y a une ou deux graines par loge dans la capsule globuleuse. *S. autumnalis* est commun en France, dans les pâturages et les lieux secs. Il est surtout méditerranéen, mais atteint le sud de la Grande-Bretagne et la région parisienne; il fleurit d'août à octobre. Il ne dépasse pas 25 cm et possède de cinq à dix feuilles linéaires en gouttière. Ses fleurs bleu lilas sont réunies en une petite grappe qui s'allonge après la fécondation. Elles n'ont pas de bractées axillantes. *S. bifolia* a deux feuilles lancéolées et des fleurs bleu vif ou roses, groupées par trois à huit en une grappe également dénuée de bractées. Cette plante vit dans les bois et fleurit de mars à mai, en Europe surtout méridionale (mais elle remonte jusqu'en Hollande et dans le sud de la Pologne), et en Asie Mineure. *S. peruviana,* qui, malgré son nom, est une plante méditerranéenne, atteint 50 cm et a de larges feuilles ciliées au bord. Sa hampe se termine par un corymbe dense de très nombreuses fleurs bleu violacé. Elle est spontanée en Corse, mais non en France continentale, et parfois cultivée dans les jardins.

Les *Urginea* sont une cinquantaine d'espèces d'Afrique et de la région méditerranéenne. Les fleurs blanches ou roses ont des tépales marcescents. Les filets staminaux ne sont pas élargis, à la différence de ceux des *Scilla. U. maritima* est la scille officinale, qui occupe l'aire générale du genre; elle est présente, mais rare, sur le littoral du sud-est de la France. Son bulbe contient des hétérosides (scillarène A surtout) qui en font un cardiotonique et principalement un diurétique. Une variété à bulbe rouge contient aussi un hétéroside voisin qui lui confère des propriétés raticides; il est convulsifiant pour les rats, mais pas pour les autres Animaux ou l'homme.

Les ornithogales ou *Ornithogalum* comprennent une centaine d'espèces de l'Ancien Monde. Il y a un fort bulbe d'où s'élève une hampe, à feuilles toutes basales, qui se termine par une grappe ou un corymbe de fleurs à l'aisselle de bractées scarieuses. Le périgone est constitué par six segments lancéolés, libres ou à peine soudés à la base, tendant à s'ouvrir en étoile, blancs ou jaunâtres, marqués souvent de vert sur la nervure médiane du côté dorsal. Les filets des étamines sont très larges sur toute leur longueur et généralement stipulés. Les capsules renferment de nombreuses graines. La dame-de-onze-heures *(O. umbellatum)* se trouve au printemps et en été dans les champs et les lieux herbeux. Elle mesure 30 cm au plus et ses feuilles canaliculées dépassent la tige et sont marquées d'une ligne blanche. La tige se termine par un corymbe de cinq à quinze fleurs blanches à tépales marqués de vert extérieurement. C'est une plante européenne. *O. pyrenaicum* atteint 1 m. Il est surtout méditerranéen, mais remonte jusqu'en Belgique. Il habite les prés et les bois, même dans les zones sèches; il fleurit de mai à juillet. Ses feuilles, assez larges et glauques, sont généralement disparues au moment de la floraison. Les fleurs sont disposées en grappes allongées; elles sont jaunes à l'intérieur, blanc verdâtre à l'extérieur, avec les nervures des tépales jaunâtres. Les filets de ces deux espèces sont élargis mais non stipulés.

Les *Eucomis* sont une dizaine de plantes d'Afrique du Sud dont la hampe nue, après avoir produit la grappe de fleurs, forme un « toupet » de bractées foliacées. *E. regia* est une petite plante parfois cultivée dans les jardins.

Un second groupe de genres a des tépales plus ou moins unis en cloche. Chez les *Endymion,* qui sont quelques espèces du sud de l'Europe et d'Afrique du Nord, l'union des tépales est encore faible, mais la fleur peut avoir déjà la forme de celles de la jacinthe et les étamines externes sont soudées aux pétales par le bas de leurs filets. *E. non-scriptus (E. nutans)* est la jacinthe des bois, qui atteint 50 cm et a des fleurs bleu azuré. Elle habite les îles Britanniques et l'Europe occidentale, jusqu'au centre de la France vers l'est. *E. hispanicus (Scilla campanulata)* et *E. cernuus,* ce dernier ressemblant à une grosse jacinthe des bois, sont souvent cultivés. Le premier est indigène dans l'ouest de la France et l'ouest de la région méditerranéenne, le second, d'Europe méridionale, manque en France. Les *Chinodoxa* sont six espèces du sud de l'Europe et de l'Asie occidentale, à tépales soudés également en bas. *C. luciliae,* à fleurs bleu blanchâtre à la gorge, qui est fermée par des écailles tépalaires comme dans tout le genre, est une petite plante de 12 à 15 cm, très précoce, à feuilles étroites, assez souvent cultivée.

Les jacinthes *(Hyacinthus)* comprennent de belles plantes ornementales très cultivées qui appartiennent à l'unique espèce *H. orientalis,* originaire de la région méditerranéenne et d'Asie occidentale, et qui n'est d'ailleurs peut-être vraiment indigène qu'en Asie. Elle a des grappes de fleurs très odorantes de couleurs diverses allant du blanc au bleu, au rose intense et au jaune. Il n'y a que quelques fleurs dans les formes sauvages, mais l'inflorescence est très dense chez les plantes cultivées. Les pédoncules floraux sont très courts, de même que les bractées. Le périanthe est renflé autour de l'ovaire. Les

▼ ***Inflorescence d'*Ornithogalum pyramidale, *plante que l'on rencontre dans les Balkans.***

G. P. Mondino

Etrusko

▲ *Les petites fleurs en forme de clochette de* Muscari botryoides *sont réunies en une inflorescence dense.*

C. Bevilacqua

▶ *La hampe de la jacinthe* Hyacinthus orientalis *porte des fleurs en grappe.*

▼ *Chez l'asperge* (Asparagus officinalis), *la partie consommée est constituée par les jeunes pousses.*

Archives « B »

tépales sont soudés aux trois quarts. La capsule n'est pas nettement trigone et les graines sont arillées. La Hollande est, comme on le sait, le plus gros producteur de jacinthes. Les *Hyacinthella* sont une dizaine de plantes du sud de l'Europe et de l'Asie qui diffèrent de la jacinthe par leurs feuilles linéaires (1 à 3 mm de large), leur pédoncule floral et leur bractée axillante aussi longs que la fleur. *H. amethystina,* du sud de l'Europe, qui n'existe en France que dans la zone centrale des Pyrénées, est parfois cultivé.

Chez les *Bellevalia,* qui sont une cinquantaine en région méditerranéenne et jusqu'en Asie centrale, le périanthe n'est pas renflé autour de l'ovaire, et la capsule est trigone, avec des loges comprimées ; les graines ne sont pas arillées. *B. romana,* à fleurs dressées blanc verdâtre, violacées en bas, est parfois cultivé. Il est indigène dans le Midi et jusque dans le Lot-et-Garonne. D'autres *Bellevalia* ont des fleurs pendantes et parfois très longuement pédonculées.

Le genre *Muscari* est constitué d'environ cinquante-cinq espèces toutes distribuées dans le bassin méditerranéen et jusqu'au Caucase. Les feuilles sont basales et lancéolées, parfois légèrement repliées en gouttière. La hampe nue se termine par une inflorescence en grappe dont les fleurs sont le plus souvent violacées et supportées par un court pédoncule. Les fleurs sommitales sont stériles et peuvent être réunies en une touffe qui sert d'organe d'attraction des Insectes pollinisateurs. Le périgone est formé de six tépales soudés en un tube renflé. Les étamines incluses sont insérées par un bref filet au milieu du tube. Le style se termine par un unique stigmate. Les fruits sont des capsules à trois ailes. Le muscari odorant *(M. moschatum),* d'Asie Mineure, est parfois cultivé pour ses fleurs jaune verdâtre ou violacées à odeur suave, réunies en une grappe de 8 cm environ portée par une hampe de 25 cm. *M. racemosum* et *M. comosum* sont des plantes surtout méditerranéennes, mais atteignant le nord de la France et l'Iran à l'est. Le premier a une grappe dense de fleurs bleu foncé. Le second possède une grappe lâche et allongée de fleurs roussâtres, les supérieures étant stériles, longuement pédonculées et réunies en une touffe assez dense formant un corymbe.

Les *Asparagoïdées* sont des plantes surtout herbacées ou suffrutescentes à rhizome sympodial ou monopodial. Certains rameaux sont souvent transformés en cladodes à aspect de feuilles (encore que l'interprétation de ceux-ci ne soit pas bien claire et qu'ils soient peut-être effectivement foliaires). Ils sont de toute façon souvent coriaces et piquants. Les fleurs, hermaphrodites ou unisexuées par avortement, ont un périgone constitué généralement par six pièces soudées les unes aux autres. Les étamines s'insèrent à la base du périgone et peuvent avoir leurs filets soudés. L'ovaire triloculaire donne un fruit bacciforme souvent vivement coloré.

Les asperges *(Asparagus)* sont au nombre de trois cents espèces dans l'Ancien Monde. La tige est pourvue de feuilles écailleuses en général éperonnées dorsalement, à l'aisselle desquelles se trouvent des cladodes étroits disposés en bouquets. Certaines ont une importance alimentaire, d'autres sont cultivées pour l'ornement. *A. officinalis* est notre asperge commune dont on cueille les jeunes pousses. Quand on laisse se développer complètement cette plante, elle a de longues tiges herbacées très ramifiées, hautes de plus de 1 m, portées par un gros rhizome. Les cladodes filiformes sont groupés par trois à six à l'aisselle des feuilles éperonnées et écailleuses. Les fleurs sont unisexuées et la plante est en général dioïque. Les fleurs sont solitaires ou géminées, à pédoncule articulé au milieu et à tépales libres ou presque. L'ovaire a trois loges dont chacune contient six ou huit ovules. Les baies rouges, renfermant six à huit graines, sont de la grosseur d'un pois. La plante est sans doute originaire de la région méditerranéenne orientale, mais elle a été répandue par la culture dans toutes les régions tempérées. *A. tenuifolius,* du sud de l'Europe et d'Asie Mineure, se rencontre aussi dans les Ardennes et en Champagne. Il a des baies rouges grosses comme une cerise et les pédoncules floraux sont articulés sous la fleur. *A. plumosus,* quant à lui, est souvent utilisé pour la confection des bouquets. Il est originaire d'Afrique du Sud et possède des rameaux très fins et très allongés, sur lesquels s'insèrent des cladodes filiformes vert foncé. Ses feuilles sont également réduites à de petites écailles éperonnées et

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

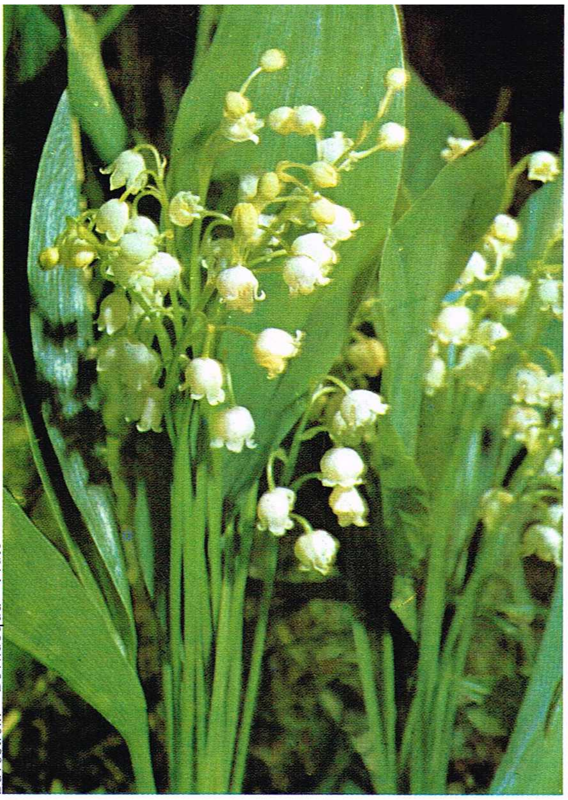

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

G. P. Mondino

▲ *A gauche,* **Ruscus aculeatus,** ***le petit houx, est un arbrisseau toujours vert dont les baies rouges sont portées par des sortes de rameaux aplatis et pointus, appelés cladodes.***

Chez le muguet, **Convallaria maialis,** ***les feuilles pétiolées sont insérées sur le rhizome et les fleurs sont portées par une hampe florale.***

La tige feuillée de **Polygonatum multiflorum** ***(à droite) porte des fleurs réunies en corymbes.***

piquantes. *A. sprengeri,* d'Afrique du Sud (Natal), a des cladodes aplatis vert clair et est souvent cultivé en appartement ; ses feuilles sont éperonnées et épineuses.

Le genre *Ruscus* ne comprend que deux ou trois espèces d'Europe et de la région méditerranéenne. Le fragon ou petit houx *(R. aculeatus)* vit dans les bois et les haies. C'est une plante surtout méditerranéenne qui atteint toutefois la Belgique et occupe toute la France, à l'étage collinéen. On le récolte en hiver pour en faire des bouquets. C'est un arbrisseau dioïque toujours vert qui ne dépasse guère 1 m. Ses tiges forment des touffes très rameuses dans le haut et porteuses de cladodes coriaces alternes, pointus et épineux, à l'aisselle d'écailles. Ces cladodes sont longs de 2 à 3,5 cm et vert intense. On les considère souvent comme des rameaux aplatis, mais il est parfaitement possible qu'ils correspondent à la préfeuille du rameau axillaire de l'écaille à l'aisselle de laquelle ils se trouvent. Les fleurs sont solitaires ou géminées et insérées à la face supérieure des cladodes, à l'aisselle d'une petite bractée lancéolée. Elles ont un périgone de six segments verdâtres libres, les pièces externes étant plus petites ; les fleurs mâles ont trois étamines à filets unis en tube ; les fleurs femelles ont un ovaire supère, triloculaire, portant un stigmate capité sessile. Le fruit est une baie rouge grosse comme un pois et contenant une ou deux graines. Le laurier d'Alexandrie *(R. hypoglossum)* est une plante méditerranéenne qui n'est pas indigène en France, mais est naturalisée dans le Var et les Alpes-Maritimes. Il est très peu ramifié et a des cladodes vert clair bien plus grands (6 à 12 cm sur 3 à 4), souples et non épineux, qui portent de deux à cinq fleurs sur leur face supérieure ou inférieure. La baie a 2 cm de diamètre. Ce *Ruscus* est cultivé pour l'ornement ; il sert parfois à la présentation de plats cuisinés.

Les Convallariées ont des tiges qui terminent un rhizome sympodial et leurs fleurs sont isolées ou forment des épis ou des grappes terminaux ou axillaires. Le muguet *(Convallaria maialis)* est la seule espèce du genre. Il est eurasiatique, seulement montagnard dans le sud, et naturalisé en Amérique du Nord. C'est une plante qui vit dans les lieux ombragés.

Le genre *Aspidistra* est originaire de l'est de l'Himalaya et d'Extrême-Orient. *A. elatior,* du sud du Japon, est cultivé en pot pour ses feuilles larges, coriaces, vert foncé et brillantes qui ressemblent à de très grandes feuilles de muguet, avec parfois des rayures blanches. Les feuilles sont directement portées par le rhizome. Occasionnellement en Europe apparaissent les fleurs, violet foncé, tétramères, qui sortent à peine de terre.

Les Polygonatées ont des tiges feuillées porteuses de fleurs axillaires ou s'achevant par des inflorescences botrytiques.

Il y a trois *Maianthemum* dans l'hémisphère Nord ; *M. bifolium* possède un rhizome traçant terminé par une pousse qui donne une tige aérienne avec des écailles basales et deux feuilles caulinaires alternes-distiques, brièvement pétiolées, à large limbe pubérulent et cordé à la base. Cette tige ne dépasse pas 20 cm et se termine par une grappe de nombreuses petites fleurs blanches géminées. Le périgone est constitué de quatre pièces libres (en deux verticilles dimères) et entoure quatre étamines et un ovaire à deux loges et à style court. Les fruits sont des baies rouge foncé avec deux à quatre graines. La plante vit dans les forêts d'Europe surtout centro-orientale et de Sibérie. Elle se rencontre dans le nord, le centre et l'est de la France.

Le genre *Polygonatum* comprend trente espèces largement répandues dans les zones tempérées de l'hémisphère boréal ; il en existe trois en France ; ce sont les sceaux de Salomon. *P. officinale* a un rhizome terminé par une tige oblique de 20 à 50 cm, écailleuse à la base, nue au-dessus, anguleuse, et qui porte ensuite de nombreuses feuilles alternes distiques rapprochées et sessiles. A leur aisselle se trouvent des fleurs ou des paires de fleurs blanc verdâtre, pendantes et brièvement pédonculées, qui sont inodores. Leur périgone est constitué par un long tube qui se termine par six dents droites. Il y a six étamines insérées sur ce tube. Le fruit est une baie noir bleuâtre, grosse comme un pois, contenant une quinzaine de graines. C'est une plante d'Europe, de la région méditerranéenne et d'Asie tempérée. *P. multiflorum,* très voisin, a des tiges rondes ; ses fleurs inodores, à tube périanthaire renflé autour de l'ovaire, sont réunies par deux à six en corymbe. C'est une espèce surtout européenne mais présente aussi en Afghanistan, dans l'ouest de l'Himalaya et au Japon. *P. verticillatum* a des tiges dressées avec de faux verticilles de trois à sept feuilles.

Chez les Paridées, les feuilles forment un seul verticille sur la tige aérienne que termine la fleur ou l'inflorescence en ombelle. Les deux verticilles du périanthe ont une morphologie distincte.

Le genre *Paris,* qui compte une vingtaine d'espèces en Eurasie, a des fleurs solitaires, au moins tétramères, et la tige porte un verticille d'au moins quatre feuilles. La parisette *(P. quadrifolia)* a une tige aérienne de 10 à 40 cm munie d'un verticille de quatre larges feuilles sessiles (parfois cinq ou six) et qui s'achève par une unique fleur, dont le périanthe est constitué de huit (parfois dix ou douze) segments verts en deux cycles. Les quatre (ou cinq ou six) pièces externes sont lancéolées alors que les internes sont linéaires. Il y a huit étamines (dix ou douze parfois) dont le connectif se prolonge en une longue crête. Le fruit est une baie noire à quatre loges biovulées (parfois cinq ou six). La plante occupe les forêts humides de l'Europe et de l'est de l'Asie. *P. yunnanensis,* à fleurs décamères, avec vingt pièces périanthaires, vingt étamines et dix carpelles, le verticille caulinaire ayant alors dix feuilles, appartient à un groupe d'espèces à fruit capsulaire ; on le trouve en Chine. Le genre *Trillium* est très proche du précédent ; il occupe l'Amérique du Nord et l'est

G. P. Mondino

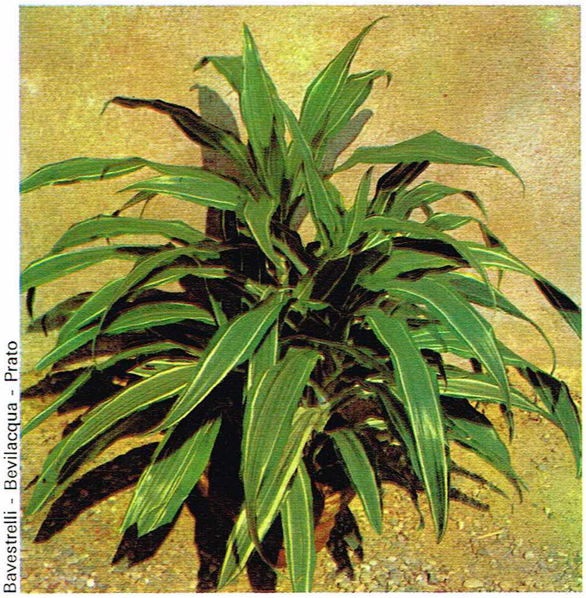

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *A gauche,* **Paris quadrifolia,** *la parisette, dont les feuilles sont réunies en verticilles et la fleur terminale. A droite,* **Dracaena fragrans,** *une plante ornementale facile à cultiver en appartement.*

▶ *Page ci-contre :* **Sansevieria trifasciata,** *aux longues feuilles soulignées de jaune, est très utilisé comme plante d'appartement.*

▼ *Culture en serre de* **Cordyline indivisa.**

de l'Asie. Il y a trois feuilles verticillées et le périanthe est trimère avec un verticille externe sépaloïde et un verticille interne à larges pièces pétaloïdes. La fleur est terminale. Plusieurs *Trillium* sont cultivés dans les jardins.

Les Convallariées et Polygonatées ne ressemblent guère aux Paridées par le port, et moins encore aux *Asparagus,* eux-mêmes bien distincts des *Ruscus.* C'est pourquoi on a proposé de constituer les familles des Convallariacées, Asparagacées et Ruscacées. Cette vue extrême n'a guère été suivie, mais on pourrait au moins faire de ces groupes des sous-familles de Liliacées.

La sous-famille des *Ophiopogonoïdées* est remarquable par la présence d'un ovaire parfois semi-infère ou infère, ce qui caractérise aussi la sous-famille des Alstroemérioïdées. Les Ophiopogonoïdées sont des herbes pourvues d'un rhizome parfois tuberculeux, d'où s'élève une tige à nombreuses feuilles basales étroites ou lancéolées se terminant en une grappe de fleurs dont le périgone est constitué par six segments libres ou unis. Les fruits sont des sortes de baies à péricarpe mince et renferment une à trois graines à tégument charnu. Les *Liriope* ont encore un ovaire supère. Ce sont cinq espèces d'Extrême-Orient parmi lesquelles *L. muscari,* à fleurs violettes, est parfois cultivé dans les jardins. Le genre *Ophiopogon* renferme trois espèces en Extrême-Orient et dans l'Himalaya. L'ovaire est semi-infère. Dans ces deux genres, les tépales sont libres. Mais chez les dix *Peliosanthes,* de l'Himalaya et d'Indo-Malaisie, ils sont unis en un tube au sommet duquel s'insère un autre tube formé par les filets staminaux. L'ovaire est infère.

C. Bevilacqua

La sous-famille des *Alstroemérioïdées,* des régions tropicales d'Amérique, comprend des plantes à rhizome sympodial et à racines souvent tubérisées. La tige est feuillée et peut être volubile. Les fleurs sont en cymes terminales le plus souvent, parfois solitaires ou en fausse ombelle cymeuse. L'ovaire est infère.

Des quatre genres, *Alstroemeria* est le plus important, avec environ soixante espèces d'Amérique du Sud. L'appareil radiculaire est bien développé et constitué de grosses racines fasciculées, parfois très longues mais non tubérisées. Les tiges feuillées se terminent en une inflorescence ombelliforme. Le périgone est presque bilabié par suite du développement irrégulier de ses pièces, qui sont libres. L'inflorescence est entourée à la base par un faux verticille de feuilles. Sur la tige, celles-ci sont elliptiques, sessiles ou pétiolées; elles peuvent être disposées en spirale ou de façon distique. Quelques espèces sont parfois cultivées pour l'ornement, tel *A. aurantiaca.*

Les représentants de la sous-famille des *Smilacoïdées* ont un port arbustif et le plus souvent sarmenteux. Les feuilles sont alternes-distiques, et au sommet de leur gaine on trouve souvent deux vrilles stipulaires. Les inflorescences sont axillaires et forment des ombelles ou des grappes, ou bien on trouve une panicule terminale. L'ovaire contient un ou deux ovules par loge et le fruit est une baie à une à trois graines. La plupart du temps, les fleurs sont unisexuées et la plante est dioïque ; c'est le cas des *Smilax* ou salsepareilles qui comptent trois cents espèces environ en Asie orientale, en Amérique subtropicale et dans les régions méditerranéennes. La salsepareille d'Europe *(S. aspera)* est l'unique espèce française. Elle se trouve dans tout le Midi, mais aussi dans l'Ouest.

La sous-famille des *Dracaenoïdées,* enfin, diffère beaucoup de tous les autres représentants de la famille des Liliacées. Elle compte une douzaine de genres et cinq cents espèces. Ce sont très souvent des plantes d'aspect arbustif ou même arborescent, qui peuvent atteindre jusqu'à 20 m de hauteur. Elles ont un appareil souterrain généralement rhizomateux. Leurs tiges ou troncs aériens sont simples ou ramifiés, nus sur une longue portion, et se terminent par une grosse touffe de feuilles. L'épaississement de la tige est dû à un cambium périphérique mettant en place un tissu qui se sclérenchymatise et où se différencient de nouveaux faisceaux. La croissance en longueur est très lente et les entre-nœuds sont très courts ; la tige nue montre les cicatrices étroitement superposées des feuilles tombées. Le même phénomène a déjà été rencontré chez les Ptéridophytes arborescentes et les Cycadacées, et nous le retrouverons chez les palmiers. Les Dracaenoïdées sont des plantes xérophiles que l'on rencontre surtout dans les régions arides tropicales et subtropicales de l'Ancien et du Nouveau Monde, et plus rarement en Australie; beaucoup ont été introduites en horticulture. Les inflorescences sont de volumineuses formations botrytiques axillaires. Après la floraison, l'inflorescence tombe et des bourgeons axillaires sous-

jacents se développent, assurant la survie et la ramification fréquemment pseudo-dichotome (c'est-à-dire que deux bourgeons se développent en rameaux). Les fleurs sont tout à fait comparables à celles des Liliacées ; le pollen est parfois en tétrades, et il arrive qu'il se forme par divisions simultanées. L'ovaire peut être infère. Hutchinson a proposé de rassembler ces plantes dans une famille des *Agavacées (Agavaceae)*, qui, pour lui, renfermerait aussi le *Phormium*, les agaves et les genres voisins à ovaire infère que l'on plaçait parmi les Amaryllidacées. La grande originalité de l'appareil végétatif peut en effet confirmer cette opinion.

Dans un premier groupe, qui seul correspond à la sous-famille des Dracaenoïdées proprement dites, l'ovaire est supère et les anthères sont dorsifixes.

Les quatre-vingts *Dracaena* ont un ovaire à loges uniovulées qui devient une baie. Les fleurs n'ont pas de préfeuilles. Ce sont des plantes de l'Ancien Monde. Les inflorescences sont terminales avec des bractées. Le dragonnier *(D. draco)* est un grand arbre des îles Canaries, à tronc ramifié et à rameaux portant au sommet une touffe de feuilles lancéolées, raides, coriaces et acuminées, épineuses au sommet. Il atteint une vingtaine de mètres de hauteur. Humboldt en mesura un exemplaire dont le tronc avait 15 m de circonférence. Les inflorescences sont des grappes ramifiées avec de nombreuses petites fleurs verdâtres. *D. cinnabari*, de Socotora, fournit une résine rouge utilisée pour la préparation de vernis : c'est le sang-dragon de Socotora ; le vrai sang-dragon est fourni par les fruits du palmier *Daemonorops draco*.

Divers *Dracaena* sont utilisés comme plantes d'appartement, souvent sous des formes à feuilles panachées. Comme ils sont stériles dans cet état, il est difficile de les distinguer des *Cordyline*, très cultivés eux aussi.

Les *Cordyline* ressemblent aux *Dracaena*, mais il y a au moins quatre ovules par loge et les fleurs ont souvent deux préfeuilles. Il en existe une vingtaine d'espèces dans les zones chaudes d'Asie et d'Afrique, en Polynésie et aux îles Hawaii. Seul *C. dracaenoides* habite l'Amérique du Sud. Plusieurs *Cordyline* sont cultivés comme plantes d'appartement, notamment *C. fruticosa (C. terminalis)*, d'Asie tropicale et du nord de l'Australie, qui existe sous de très nombreuses variétés aux feuilles diversement colorées ; celles-ci sont pétiolées, comme celles de *C.* × *rubra (C. stricta* × *C. fruticosa)*, à feuilles plus larges au sommet.

Les *Sansevieria* comprennent environ cinquante espèces distribuées en Afrique tropicale et au sud de l'Inde. Ce sont des plantes herbacées vivaces, pourvues d'un rhizome d'où s'élève une tige très courte, ou bien directement une rosette de feuilles lancéolées, coriaces, parfois tubuleuses et qui peuvent atteindre 1 m. Leurs marbrures caractéristiques les font rechercher comme plantes d'appartement. *S. trifasciata* est l'espèce la plus connue ; il est souvent confondu avec *S. zeylanica*, qui est une plante différente, absente des cultures. Ses feuilles longuement lancéolées sont bordées par une large bande jaune ; elles n'ont pas de vrai pétiole, mais, en vieillissant, leur région inférieure s'allonge et s'épaissit en un pétiole imparfait. Ces plantes ne fleurissent pas très fréquemment et les inflorescences n'ont pas d'intérêt ornemental. Une longue hampe sort de l'aisselle des feuilles, dont elle n'atteint pas la taille, et porte une grappe de fleurs parfumées étroites, blanc jaunâtre, à pièces du périgone longuement soudées en tube ; l'ovaire a trois loges uniovulées. Les feuilles de certaines espèces fournissent des fibres textiles (*S. zeylanica*, de Ceylan, *S. guineensis*, d'Afrique tropicale, etc.).

Chez les Yuccées, il y a de nombreux ovules par loge et le fruit est une capsule. Les chromosomes sont dimorphes ; il y en a cinquante petits et dix grands. Les trente-cinq *Yucca* sont originaires des zones arides du sud des États-Unis et d'Amérique centrale. Il existe des espèces acaules, arbustives et arborescentes, mais ne dépassant pas 6 m *(Y. aloifolia)*. Les deux dernières catégories ont de grosses touffes sommitales de feuilles étroites, acuminées, souvent dentées ou filamenteuses au bord. La tige se termine en une longue hampe qui se prolonge en panicule de grosses fleurs blanches, odorantes, pendantes, s'ouvrant la nuit. Le périgone est constitué de six segments libres, mais étroitement rapprochés en cloche ; les étamines sont bien plus petites et insérées sur le réceptacle. L'ovaire tricarpellaire est surmonté par un style court

Ruffier-Lanche - Jacana

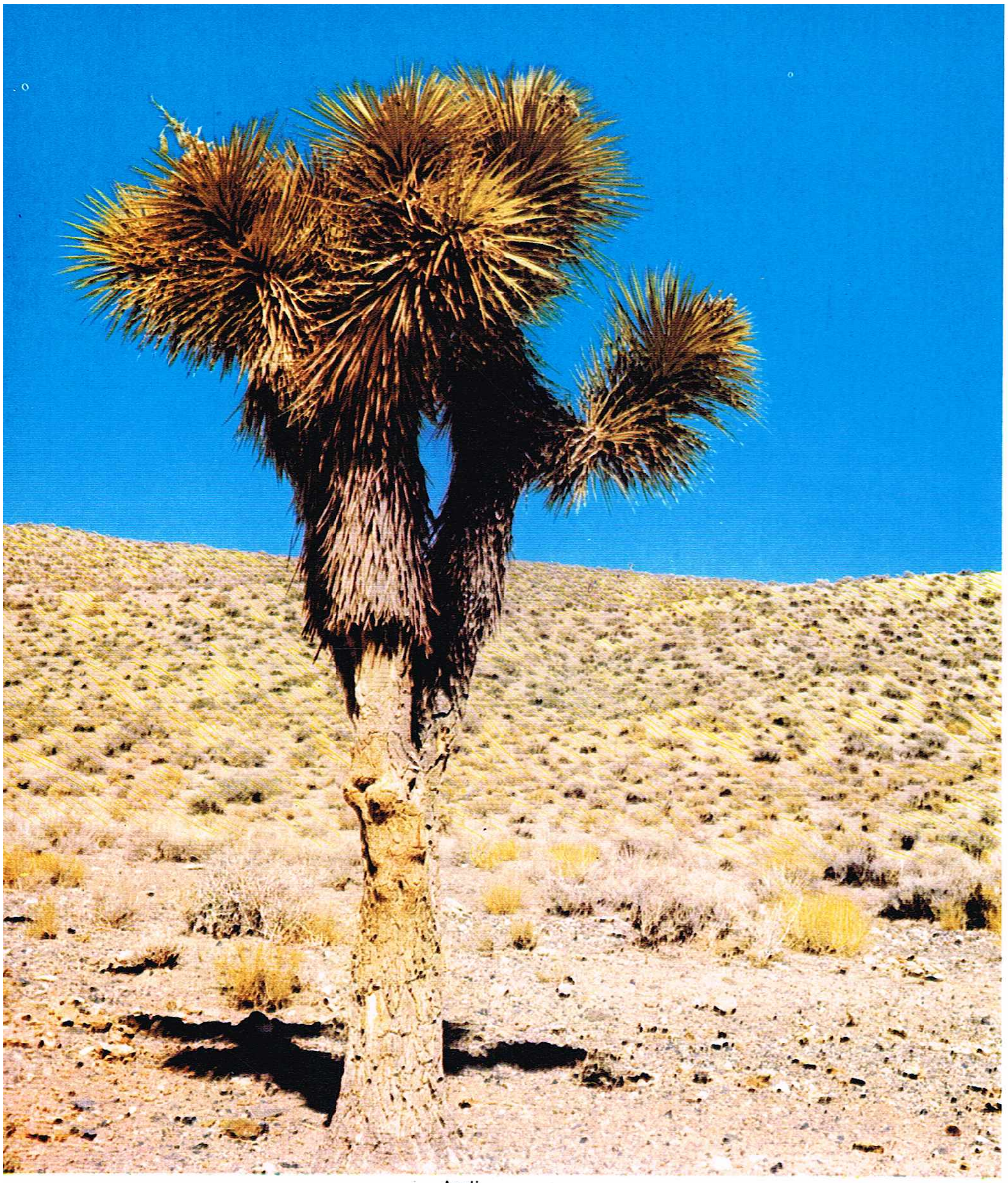

Andi

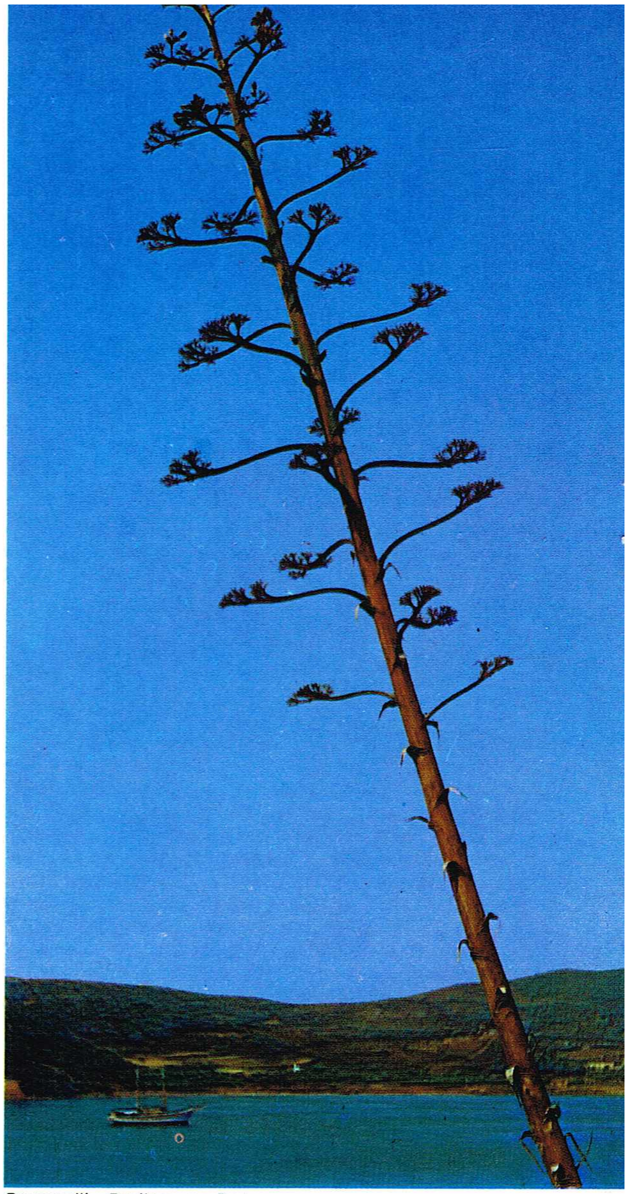

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *A gauche, une espèce arborescente de* Yucca, *plante originaire des zones arides d'Amérique centrale et du sud des États-Unis. A droite, hampe florale d'*Agave americana, *qui est naturalisé dans les régions méditerranéennes.*

terminé par trois lobes stigmatiques plus ou moins bifides. Les fruits sont des capsules loculicides ou des baies charnues ou spongieuses. Une ramification pseudo-dichotome se produit comme chez les *Dracaena*. *Y. gloriosa,* qui habite de la Caroline du Sud à la Floride, s'est naturalisé dans la région méditerranéenne. Il est caulescent et ses feuilles ne sont ni dentées ni filamenteuses au bord. Ses fleurs sont blanches, plus ou moins teintées de rouge à l'extérieur. Il ne dépasse pas 3 m. *Y. filamentosa* est acaule et ses feuilles sont filamenteuses au bord. Il est originaire du sud-est des États-Unis. Ces deux espèces sont assez souvent cultivées et sont très rustiques en France. Les feuilles de plusieurs *Yucca* sont recueillies pour en extraire les fibres, utilisées dans l'industrie textile.

Dans le second groupe, l'ovaire est infère, et les plantes qui vont suivre ont été placées pour cela dans les Amaryllidacées. On peut aussi les placer parmi les Agavacées. Nous les rapprochons ici des Liliacées Dracaenoïdées.

Chez les Agavées, les anthères sont dorsifixes (elles sont basifixes chez les Doryanthées, réduites au genre *Doryanthes,* de l'est de l'Australie). Les tépales sont soudés à la base et l'ovaire à nombreux ovules par loge donne une capsule charnue. Comme chez les Yuccées, il y a cinquante petits chromosomes et dix grands. Le genre *Agave* est américain, surtout mexicain, et comprend trois cents espèces. La plus nordique est *A. virginica,* qui atteint la Virginie et le Maryland. L'appareil souterrain émet des stolons qui assurent la multiplication végétative. La tige aérienne meurt après la floraison qui se produit au bout de cinq à cent ans de vie végétative. L'inflorescence atteint 15 m. *A. americana* est cultivé pour l'ornement et souvent nommé à tort aloès. Il s'est naturalisé en région méditerranéenne et est devenu là un élément caractéristique du paysage, mais il n'y existait pas avant le milieu du XVIe siècle. Il n'est pas connu à l'état sauvage. Ses grandes feuilles rigides se terminent par une épine de 3 cm et sont bordées d'aiguillons tous les 5 cm environ; elles atteignent 1,75 m, et sont parfois bordées de blanc, de jaune ou de rose, ou panachées longitudinalement de ces couleurs. De nombreuses autres espèces sont rustiques dans le Midi. Les feuilles de plusieurs agaves fournissent une fibre textile, le sisal. *A. sisalana, A. fourcroydes* et *A. cantalana* sont spécialement exploités pour cela, et le premier est cultivé à cet effet dans les régions tropicales. Un sous-produit très intéressant de l'industrie du sisal est l'hécogénine, saponine stéroïdique qu'on extrait des restes de feuilles d'*A. sisalana* et d'*A. fourcroydes*. Ce produit est important pour l'hémisynthèse d'autres stéroïdes, en particulier d'hormones sexuelles. D'autres saponines sont aussi extraites des agaves pour cet usage. Divers agaves enfin fournissent leur sève qui, fermentée, donne des boissons alcoolisées (pulque, tequila).

Chez les *Furcraea (Fourcroya),* les tépales ne sont presque pas soudés et les étamines ont un filet renflé. Le port est celui des agaves et le genre occupe une aire comparable, mais plus méridionale. Il n'y a que vingt espèces; quelques-unes sont cultivées et rustiques en région méditerranéenne. Il faut enfin citer le genre *Polianthes,* d'Amérique centrale. L'une de ses quinze espèces est la tubéreuse *(P. tuberosa),* plante herbacée à souche tubéreuse et tige annuelle atteignant 1,50 m, terminée par un épi de fleurs blanc rosé à long tube périanthaire courbé, dégageant un parfum remarquable, surtout la nuit. Elle est mexicaine et rustique dans le Midi et dans l'ouest de la France. Sa culture est délaissée de nos jours.

La famille des *Cyanastracées (Cyanastraceae)* est monogénérique et réduite aux quatre à six espèces de *Cyanastrum,* d'Afrique tropicale. Ce sont des plantes herbacées dont le bulbe souvent divisé en étages superposés porte la hampe florifère, munie de feuilles toujours basales, étroitement linéaires, arrondies ou cordiformes,

et parfois longuement pétiolées. Les fleurs, hermaphrodites, forment des inflorescences en grappes ou en panicules. Le périgone, qui est constitué par six segments toujours bleus, soudés inférieurement en un court tube, renferme six étamines unies à la base du tube périanthaire et dont les anthères s'ouvrent par des pores apicaux ou une fente très courte. Le pollen se forme par divisions simultanées. L'ovaire triloculaire est semi-infère et le style est à peu près gynobasique. Il y a des glandes septales. Chaque loge renferme deux ovules. Le fruit n'a qu'une graine et celle-ci est occupée à demi par un corps chalazien, qui est donc un peu comparable à un périsperme. L'albumen nucléaire est rapidement consommé et n'existe plus dans la graine. Cette famille est surtout caractérisée par l'organisation de sa graine, qui nous l'a fait signaler, en négligeant au contraire la famille plus vaste des Hémodoracées *(Haemodoraceae)*, dont l'ovaire est souvent infère et les étamines en partie staminodiales du fait de la zygomorphie des fleurs. Il y en a vingt-deux genres et cent vingt espèces dans l'hémisphère Sud et en Amérique du Nord.

Les soixante-cinq genres et les huit cent soixante espèces qui composent la grande famille des *Amaryllidacées (Amaryllidaceae)* se trouvent surtout dans les régions tropicales et subtropicales et particulièrement en Amérique. Ces plantes ont beaucoup d'affinités avec les Liliacées, dont elles diffèrent cependant, non seulement par la position de l'ovaire, qui est infère, mais aussi par leur inflorescence. Ce sont en général des plantes herbacées. Elles sont pourvues d'un bulbe ou d'un rhizome souvent tuberculeux. Les feuilles, fréquemment basales, sont linéaires ou lancéolées. L'inflorescence ressemble à une ombelle, mais elle est constituée de deux cymes unipares, entourées à la base par une « spathe » qui est formée de deux bractées. Elle est portée par une hampe terminée par une fleur incluse au centre de l'ombelle. Les Allioïdées ont une inflorescence du même type et, malgré leur ovaire supère, peuvent être jointes aux Amaryllidacées. Les fleurs, hermaphrodites, sont généralement régulières, bien qu'on note parfois une légère zygomorphie. Le périgone est constitué de six segments pétaloïdes souvent soudés sur une grande longueur et disposés en deux cycles. Chez le genre *Narcissus,* la fleur a une paracorolle, qui forme une couronne plus ou moins développée et diversement colorée à l'intérieur du périgone. Cette formation provient de l'union des régions ventrales des tépales, qui sont diplophylles; ses faisceaux libéro-ligneux sont donc inversés (bois vers l'extérieur). Les six étamines s'insèrent sur le périgone. Elles peuvent former une paracorolle d'un type différent *(Pancratium, Hymenocallis)*. Le pollen a souvent trois sillons; il se forme parfois par divisions simultanées. L'ovaire, typiquement infère, est divisé en trois loges dont chacune contient de nombreux ovules en placentation axile, rarement un ou deux seulement. Il arrive que les ovules n'aient qu'un seul tégument ou pas du tout *(Coinum)*. Il y a un style unique et un stigmate simple ou trilobé. Les fruits sont des capsules, ou rarement des baies, et contiennent de nombreuses graines à gros embryon et à albumen riche en amidon ou en substances hémicellulosiques, parfois les deux à la fois *(Galanthus)*. Cet albumen est nucléaire, mais parfois hélobial.

Chez les *Ixiolirioïdées,* qui comptent seulement deux genres et trois espèces, il y a un bulbe et la tige a des feuilles caulinaires; l'albumen est hélobial. *Ixiolirion montanum,* seule espèce du genre, est parfois cultivé. C'est une plante originaire de Sibérie et d'Asie Mineure, haute de 30 à 50 cm; il y a quatre à douze fleurs bleu-violet en ombelle terminale mais aussi axillaires.

Les *Amarylloïdées* sont également des plantes bulbeuses mais leur hampe est nue. Elles sont souvent toxiques, surtout leurs bulbes, et parfois utilisées pour obtenir des poisons pour les flèches. On en a extrait une centaine d'alcaloïdes, dont un, provenant des *Galanthus,* est utilisé en thérapeutique. Le genre *Amaryllis* ne compte qu'une seule espèce, *A. belladona,* originaire du Cap et fréquemment cultivé. Le bulbe est volumineux; les feuilles, distiques, sont linguiformes et paraissent avant la hampe. Celle-ci porte une ombelle de huit à douze fleurs roses ou blanches, entourée à la base par deux bractées; le périgone évasé est constitué de six segments un peu soudés à la base, les étamines étant insérées à la gorge du tube.

Il ne faut pas le confondre avec les *Hippeastrum,* souvent nommés à tort *Amaryllis* et qui sont une cinquantaine d'espèces du Mexique, des Antilles et du nord de l'Amérique du Sud. Les feuilles paraissent après les fleurs qui sont moins nombreuses et bien plus grandes. *H. vittatum* et diverses autres espèces et hybrides sont très cultivés

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***La tubéreuse* (Polianthes tuberosa) *est rustique dans le midi et l'ouest de la France.***

▼ ***Certaines espèces d'Agave sont cultivées pour la production d'une fibre textile : le sisal.***

Cirani

M. et S. Prato

▲ Leucojum aestivum *ressemble au perce-neige* (Galanthus), *mais il fleurit à partir du mois d'avril.*

E.P.S.

▶ *Groupe de narcisses* (Narcissus sp.) *à paracorolle bien développée.*

en appartement. Chez ces deux genres d'Amaryllidacées, les fleurs sont un peu zygomorphes et la spathe a deux bractées libres.

Les *Crinum* sont proches des précédents. Les cent cinquante espèces connues ont une vaste distribution dans les régions tropicales et subtropicales des deux hémisphères ; beaucoup sont cultivées. Les fleurs, généralement blanches ou diversement tachées de rose, sont sessiles ou brièvement pédonculées. Les six segments du périgone sont soudés en un long tube souvent courbé. Parmi les espèces les plus connues, nous signalerons *C. moorei* à tube périanthaire verdâtre et à étamines et styles très courts, ainsi que *C. longifolium,* à feuilles glauques et à fleurs roses extérieurement. Tous deux sont originaires d'Afrique du Sud.

Les *Brunsvigia,* à bulbe très volumineux, à larges feuilles et à nombreuses fleurs blanches ou rouges en ombelle paraissant souvent avant les feuilles, et les *Nerine,* à feuilles étroites et à fleurs rouges, sont aussi des plantes d'Afrique du Sud utilisées en horticulture.

Chez les *Galanthus,* les loges des anthères s'ouvrent au sommet seulement en deux valves et la spathe formée par l'union des deux bractées n'abrite qu'une seule fleur. Il y a une dizaine de *Galanthus* en Europe centro-orientale. *G. nivalis* est le perce-neige, qui doit son nom au fait qu'il produit ses fleurs dès le mois de février, dans les prés et les pâturages encore couverts de neige du sud de l'Europe (y compris toute la France).

Les *Leucojum,* également au nombre d'une dizaine, occupent l'Europe centro-méridionale, la région méditerranéenne et l'Asie occidentale jusqu'en Iran. Ils ressemblent aux *Galanthus,* mais on trouve souvent plusieurs fleurs par hampe et les tépales ont la même forme. Il y en a six espèces en France. *L. vernum,* à une seule fleur, est aussi un « perce-neige » et paraît dès février. Il occupe toute l'Europe centro-méridionale et, en France, se rencontre surtout dans l'est.

Les plantes précédentes forment des capsules, mais les Haemanthées forment des baies et ont souvent une spathe constituée de plusieurs bractées.

Il existe cinq espèces de *Clivia* originaires de la région du Cap. Leur bulbe est peu net (à la manière de celui du poireau) et formé par la base de nombreuses feuilles allongées, largement rubanées et distiques ; à l'aisselle de l'une d'entre elles se forme une hampe dressée, robuste et très aplatie qui se termine par une ample ombelle à nombreuses fleurs jaune foncé ou rouge-orangé. *C. miniata* est très cultivé et son inflorescence présente de dix à vingt fleurs entourées d'une spathe. Le périgone est constitué de six segments unis inférieurement en un court tube. La forme de ses feuilles obtuses le fait parfois nommer plaisamment « langue de belle-mère ».

Les *Haemanthus* sont voisins et comptent quatre-vingts espèces en Afrique tropicale et du Sud ; ils sont moins souvent cultivés, mais leur albumen est un matériel précieux pour l'étude de la mitose *in vivo.*

Les plantes précédentes n'ont pas de paracorolle, mais nous allons en trouver de deux types chez celles qui suivent. Les *Narcissus* ou narcisses comprennent vingt espèces des régions méditerranéennes, du sud des Alpes et d'Asie occidentale. Leur couronne est attachée au tube du périgone et formée des lames ventrales des six tépales diplophylles. La hampe, terminée par une inflorescence ombelliforme dont le nombre de fleurs est variable, est toujours accompagnée par deux bractées involucrales soudées en bas. Les feuilles sont basales, étroites, planes ou parfois tubuleuses. Chez *N. tazetta,* deux à douze fleurs à périgone blanc et à paracorolle courte et jaune sont groupées en fausse ombelle. Cette plante méditerranéenne est très cultivée. *N. poeticus* a des fleurs solitaires à tépales blancs mucronulés et à paracorolle très courte, jaune pâle, avec une marge rouge. Il vit en Europe centro-méridionale et dans une grande partie de la France et est aussi très cultivé. Le coucou *(N. pseudo-narcissus)* possède des fleurs solitaires jaunes, à paracorolle plus longue que les tépales et plus ou moins divisée en douze lobes au sommet. Il est aussi originaire d'Europe centro-méridionale et a donné de nombreuses variétés et hybrides, parfois à fleurs doubles et qui mettent bien alors en évidence la signification de la paracorolle. *N. incomparabilis* est voisin mais sa paracorolle est de moitié moins longue que les tépales. Originaire des régions de la Méditerranée occidentale et très cultivé, il a servi

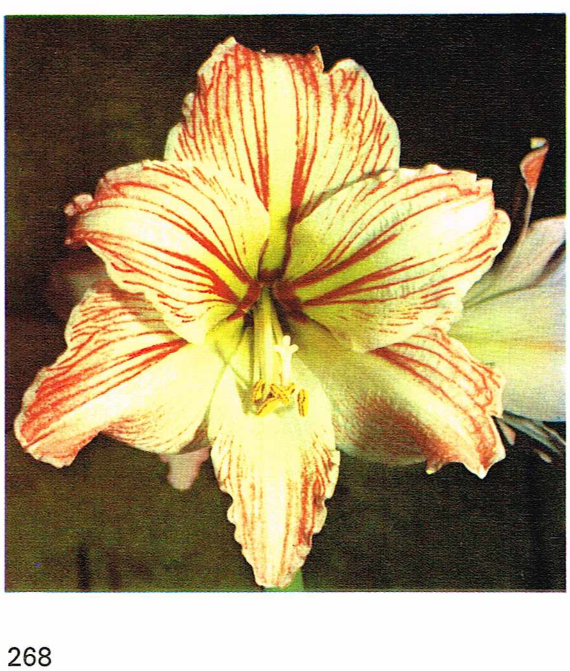

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ *Deux plantes ornementales : à gauche,* Hippeastrum sp., *souvent confondu avec l'amaryllis ; à droite,* Clivia miniata.

à l'obtention de nombreux hybrides. La jonquille *(N. jonquilla)* a de deux à cinq fleurs jaunes à paracorolle courte et évasée et ses feuilles sont subcylindriques. Elle est limitée à la région méditerranéenne occidentale au sens large (jusque dans l'ouest de la France) et très cultivée.

Dans trois autres tribus, la paracorolle est constituée par les stipules des étamines qui sont insérées en apparence entre ses lobes ou extérieurement à eux. Le genre *Pancratium* compte vingt espèces de la région méditerranéenne, d'Afrique et d'Asie tropicale; deux seulement habitent sur les sables maritimes de nos régions. L'inflorescence ombelliforme composée de quelques grandes fleurs est accompagnée de deux bractées formant une spathe. Le périgone comprend six segments blancs à l'intérieur et verdâtres à l'extérieur, souvent libres par eux-mêmes, mais unis tangentiellement à la paracorolle tubuleuse formée par les étamines. Il se constitue ainsi un tube floral. La paracorolle présente deux dents dans l'espace compris entre deux étamines : chacune est la pointe d'une stipule staminale. L'ovaire triloculaire donne une capsule loculicide qui s'ouvre par trois valves et qui contient de nombreuses graines dures et plates. *Pancratium maritimum* est commun en France le long des côtes de la Méditerranée et de l'Atlantique. Les feuilles glauques ont de 1 à 2 cm de large et dépassent la tige comprimée. Chez les trente-six espèces d'*Hymenocallis*, d'Amérique, les graines sont charnues. Plusieurs espèces sont cultivées en appartement.

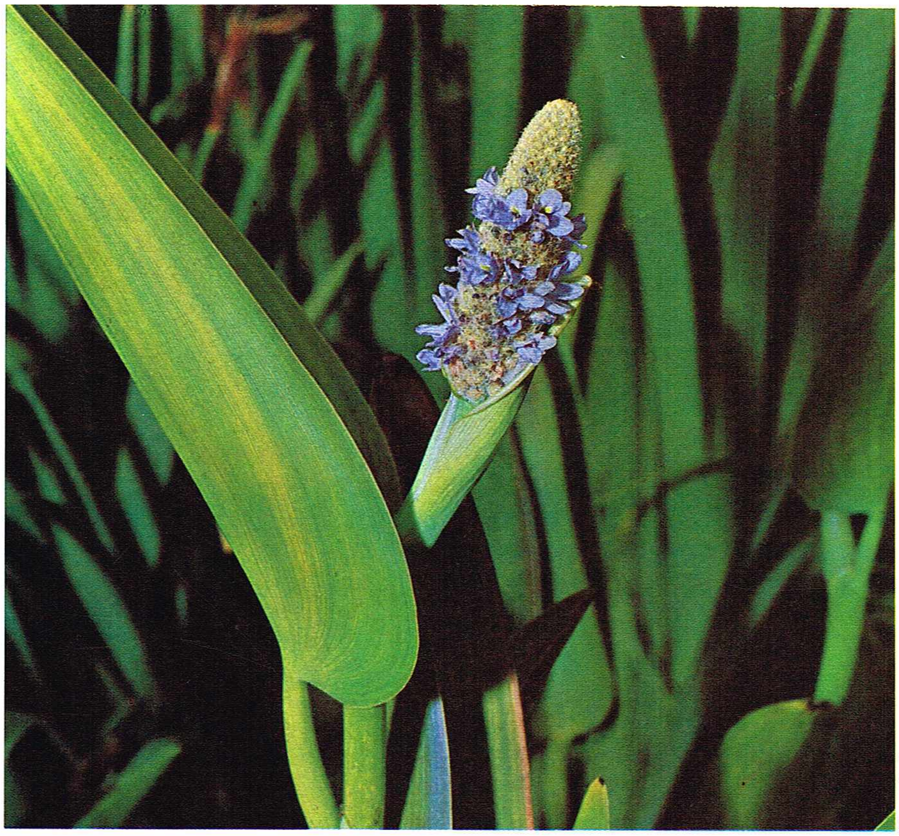

M. et S. Prato

▲ ***Inflorescence de* Pontederia cordata*, plante des marécages d'Amérique du Nord.***

Les *Hypoxidacées (Hypoxidaceae)* sont voisines des Amaryllidacées et leur ont été souvent jointes. Elles comprennent cinq genres et cent quarante espèces de plantes herbacées rhizomateuses à feuilles souvent velues. Les fleurs sont groupées en épis, grappes ou fausses ombelles au sommet de hampes nues. Elles sont actinomorphes, avec six tépales unis ou non en tube. Parfois il n'existe que les étamines internes. L'ovaire, infère, tricarpellé, est pluriovulé. Le fruit est une sorte de capsule qui s'ouvre au sommet par des fentes transversales ou longitudinales ou qui peut être indéhiscente.

La famille des *Pontédériacées (Pontederiaceae)* comprend sept genres et une trentaine d'espèces des régions intertropicales mais s'avançant en zone tempérée en Amérique. Ce sont des plantes aquatiques souvent en partie flottantes, généralement munies d'un rhizome sympodial. Les feuilles, très souvent radicales et distiques ou parfois spiralées, ont une gaine fermée qui se prolonge par une stipule médiane (pétiole unifacial). Les fleurs sont groupées en thyrse ou en grappe pourvus à la base d'une feuille en forme de spathe; elles sont quelquefois solitaires et parfois autogames et cléistogames, mais généralement entomogames. Elles sont zygomorphes et ont un périgone de six segments pétaloïdes, disposés en deux cycles souvent nettement dimorphes et unis en un tube qui peut être fendu. L'androcée est constitué en principe par six étamines, mais il y a souvent disparition des étamines dorsales, dont il reste au plus un staminode, et même réduction des étamines ventrales, si bien qu'il ne reste qu'une seule étamine fertile qu'accompagnent deux staminodes. L'ovaire, supère, peut être triloculaire et renfermer des ovules en placentation axile, ou bien être uniloculaire (le carpelle médian étant seul fertile) et ne contenir qu'un seul ovule. Il y a un seul style qui se termine par un stigmate simple ou trilobé. Les fleurs peuvent être trimorphes par hétérostylie. Les fruits sont des capsules qui s'ouvrent par trois valves ou des akènes uniséminés enveloppés par le périanthe. Les graines contiennent un embryon cylindrique, dans un albumen hélobial et le plus souvent farineux. C'est ce dernier caractère qui rapproche la famille du groupe des Énantioblastées (Commélinales), alors que d'autres caractères sont ceux des Liliiflores.

Les *Pontederia* ne sont que trois ou quatre espèces dans les zones tropicales et tempérées d'Amérique, de l'Argentine au Canada. Ce sont des plantes des marécages ou flottant sur les eaux douces stagnantes, dans les régions dont le climat ne présente pas d'importantes variations. *P. cordata*, d'Amérique du Nord, est l'espèce la mieux connue : on la cultive en Europe au bord des pièces d'eau. D'un rhizome souvent rampant s'élèvent quelques feuilles supportées par un long pétiole engainant à la base; l'ample limbe cordiforme ou sagitté de 10 à 20 cm sur 5 à 15 cm émerge de l'eau. La hampe florale haute de 0,30 m à 1,20 m sort entre les feuilles et se termine par une inflorescence unique en épi cylindrique et dense de fleurs bleu ciel. Le périgone forme un tube bilabié constitué de six segments pétaloïdes. Trois étamines dorsales à très court filet sont disposées à mi-hauteur sur le périgone, les trois autres, à longs filets, sont insérées à la gorge. L'ovaire, uniloculaire, est surmonté d'un seul style; le fruit est un akène.

Dans la tribu des Hétéranthérées, l'androcée peut être réduit à une seule étamine. Le genre *Eichhornia* comprend six espèces des zones tropicales d'Amérique et aussi d'Afrique *(E. diversifolia)*. Le périanthe forme un tube. Il y a encore six étamines, et le gynécée a trois carpelles fertiles et forme une capsule pluriséminée. *E. (Pontederia) crassipes* est une espèce américaine, qui infeste les cours d'eau, où elle arrive à empêcher la navigation. Ses feuilles, en rosette, sont réniformes et ont un pétiole renflé en flotteur; à leur aisselle se développent des stolons axillaires qui forment de nouvelles rosettes. La hampe florale prolonge l'axe de la rosette et porte des fleurs bleues rappelant celles de la jacinthe.

▼ **Eichhornia crassipes,** ***plante aquatique aux pétioles renflés en flotteurs (en haut); ses fleurs ressemblent à celles de la jacinthe (en bas).***

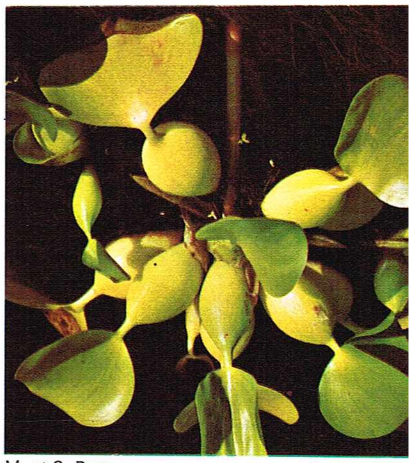

M. et S. Prato

M. et S. Prato

La famille des *Velloziacées (Velloziaceae)* se rapproche des Hypoxidacées, mais d'importants caractères justifient sa séparation. L'ovaire est à placentation axile; l'androcée est par ailleurs éventuellement formé de groupes composés de trois à onze éléments chacun : il y a multiplication secondaire des étamines et formation de faisceaux, comme chez les Hélobiales et beaucoup de Dicotylédones. Trois genres comprenant cent quatre-vingt-dix espèces sont répandus dans les zones tropicales et désertiques d'Amérique du Sud mais aussi d'Afrique et de Madagascar. Ce sont des plantes typiquement xérophytes qui possèdent une grosse tige ligneuse, parfois ramifiée, éventuellement de façon pseudo-dichotome et recouverte par les bases persistantes des feuilles tombées. Au sommet des rameaux se trouve généralement une touffe de feuilles linéaires souvent piquantes. Les stomates sont enfoncés dans des rainures longitudinales profondes. Au milieu de la touffe de feuilles se dresse une fleur terminale pédonculée. Le périgone, infundibuliforme, est constitué de six segments tous égaux, parfois réunis à la base en un court tube et colorés en blanc, jaune ou bleu. L'androcée est constitué de six étamines ou de six groupes de trois à onze étamines. L'ovaire, infère, est triloculaire et porte de nombreux ovules sur des placentas axiles, lamellaires et très saillants dans les loges. L'ovaire est garni de poils ou de glandes à l'extérieur. Les fruits sont des capsules septicides ou à déhiscence irrégulière. Il y a six étamines chez les *Barbacenia* d'Afrique, de Madagascar et d'Amérique du Sud et chez les *Xerophyta* de Madagascar. Le genre *Vellozia* comprend quatre-vingt-dix espèces répandues en Amérique du Sud et qui

M. Bavestrelli

▲ *Les tépales externes des iris sont recourbés, tandis que ceux de l'intérieur sont dressés.*

▼ **Iris pseudacorus** *se rencontre communément au bord des eaux.*

M. et S. Prato

sont typiques des campos brésiliens. Les étamines y ont formé des faisceaux. *V. aloifolia,* qui atteint 2 m, est le plus grand.

La grande famille des *Iridacées (Iridaceae)* comprend soixante-dix genres et mille cinq cents espèces surtout d'Afrique du Sud (province du Cap) et d'Amérique tropicale, mais aussi des régions chaudes des deux hémisphères et des régions tempérées de l'hémisphère Nord. La présence d'un ovaire généralement infère les rapproche des Amaryllidacées, mais d'autres caractères les rendent assez isolées parmi les Liliiflores. Les Iridacées sont le plus souvent des plantes herbacées, vivaces et géophytes ; elles sont en effet pourvues de rhizomes, de bulbes ou de tubercules (bulbes solides). Les tiges, simples ou ramifiées, se terminent par quelques fleurs réunies en inflorescences botrytiques ou cymeuses. Les feuilles sont fréquemment particulières : elles sont en effet distiques, linéaires, sessiles et repliées latéralement autour de la tige, c'est-à-dire « à cheval » sur elle, d'où le qualificatif d'« équitantes ». Les deux moitiés de ces feuilles sont simplement appliquées de part et d'autre de la tige au niveau de la gaine, mais au niveau du limbe elles sont soudées congénitalement l'une à l'autre. Il apparaît ainsi un limbe en sabre unifacial, aplati dans le plan médian des deux rangées de feuilles. Ce limbe peut être diversement canaliculé des deux côtés. L'ontogénie de ces feuilles est un peu particulière et a conduit à une interprétation hâtive et tout à fait inacceptable de leur morphologie : on a pensé que leur limbe n'est pas homologue des limbes ordinaires. Les fleurs sont souvent zygomorphes ; le périgone est constitué de six segments libres ou soudés en un tube plus ou moins long ; le verticille interne est souvent moins développé. L'androcée ne comprend que les trois étamines externes, éventuellement insérées sur le tube périgonial ; les anthères sont extrorses. L'ovaire est infère (sauf chez une espèce) et triloculaire avec de nombreux ovules en placentation axile, mais parfois avec seulement un à trois ovules par loge. Il y a un unique style qui se termine par trois stigmates tubuleux, divisés ou non en filaments ou quelquefois pétaloïdes, comme chez les iris. Les fruits sont des capsules loculicides contenant des graines parfois arillées, riches en albumen. Le pollen se forme par divisions simultanées.

La tribu des Isophysidées, réduite à *Isophysis tasmanica,* de Tasmanie, est intéressante parce que la fleur solitaire a un ovaire encore supère ; les tépales sont libres. Dans plusieurs tribus, l'ovaire est infère, mais les tépales sont encore libres ou à peu près.

Chez les Iridoïdées, les stigmates sont pétaloïdes ou au moins ailés. Ce sont des plantes munies d'un bulbe ou d'un rhizome ; les feuilles sont équitantes. La hampe se termine par une inflorescence de fleurs dont le périgone présente six segments disposés en deux verticilles souvent dimorphes. Les trois étamines s'insèrent à la base des pièces extérieures.

Le genre *Iris* est le plus important avec deux cents espèces d'Europe, d'Afrique du Nord, d'Asie et d'Amérique du Nord. Quatorze d'entre elles se rencontrent en France. Il y a un tubercule ou un rhizome. Les fleurs sont solitaires ou en inflorescences complexes, qui sont des grappes de cymes hélicoïdes ou réduites éventuellement à des grappes simples. La fleur terminale et les latérales qui commencent les cymes sont généralement entourées de deux bractées scarieuses dont la supérieure est « fertile » : le développement de son bourgeon axillaire en fleur permet la formation d'une cyme qui se continuera par ramification à l'aisselle des préfeuilles des fleurs successives. Les trois tépales externes, souvent très larges à la partie supérieure, recourbés en arrière et rétrécis brusquement en un onglet, sont souvent barbus ventralement ; on les appelle parfois les ailes. A leur base s'insèrent les trois étamines, à filets libres et à anthères extrorses basifixes. Les trois segments internes, dressés ou divergents au sommet, sont parfois nommés étendards ; intérieurement se trouvent les grands stigmates pétaloïdes auxquels sont opposées les étamines ; ils sont portés par un court style, et surmontent l'ovaire infère. Ces stigmates montrent ventralement deux côtes longitudinales qui sont les marges vraies du carpelle à ce niveau. Les iris sont autostériles, la fécondation croisée est obligatoire. Le pollen est déposé sur les tépales externes, d'où il peut être prélevé par un Insecte qui pollinisera un autre pied.

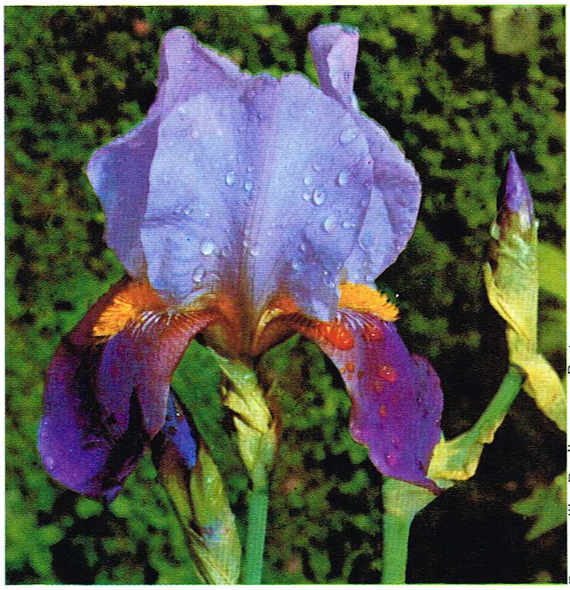

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ **Iris germanica** *(à gauche) est communément cultivé et naturalisé dans nos régions.* **Crocus vernus** *(à droite) : les fleurs sont violettes, blanches ou panachées.*

Le genre *Iris* a été divisé en de nombreuses sections et surtout en deux groupes en fonction de l'appareil souterrain. Certaines espèces ont un bulbe, d'autres un fort rhizome sympodial. Les rhizomes séchés de nombreuses espèces *(I. florentina, I. germanica, I. pallida)* servent en parfumerie, car il apparaît alors des cétones (irones A et B) à odeur de violette et l'extraction de ces corps est bien plus économique que celle de la véritable essence de violette. Par sélection et par hybridation, on a obtenu des milliers de variétés d'iris, avec une immense gamme de formes et de couleurs, souvent magnifiquement veinés. Cependant il n'y a pas de variété rouge vif. Les iris étaient déjà cultivés dans l'Antiquité et ont souvent figuré dans des blasons. La « fleur de lys » est en fait un iris.

Dans la section *Pogoniris,* caractérisée par la présence d'un gros rhizome et par les ailes pourvues de « barbes », on rencontre *I. florentina,* rhizomateux, à fleurs blanches ou bleuâtres, naturalisé en Provence et dans l'Hérault, ainsi qu'*I. germanica,* à fleurs bleu-violet et plus souvent naturalisé. Le premier est méditerranéen tandis que le second est originaire d'Europe centro-méridionale. Les espèces appartenant à cette section sont très souvent cultivées, car elles se prêtent bien à l'hybridation. On peut classer les iris selon leurs dimensions ; certains atteignent 1,20 m alors que les nains ne dépassent pas 60 cm. Parmi ces derniers, nous citerons *I. pumila (I. chamaeiris),* haut d'environ 20 cm au maximum, qui vit dans les lieux arides de la région méditerranéenne occidentale, et est commun dans le Midi. Sa hampe porte une seule fleur bleu-violet, jaune ou blanchâtre.

I. pseudacorus, ou iris des marais, vit au bord des eaux dans presque toute l'Eurasie et l'Afrique du Nord. Il appartient à la section *Apogon*. Il est aussi rhizomateux, mais ses fleurs ont des ailes non barbues.

I. xiphium, à fleur solitaire, violet-pourpre, appartient à la section *Xiphium* et possède un bulbe basal. C'est une plante méditerranéenne indigène dans le Midi.

Les quinze espèces de *Tigridia* vivent dans l'ouest de l'Amérique, du Mexique au Chili. Leurs filets staminaux sont soudés en tube et les stigmates sont divisés. Les *Tigridia* sont rustiques en France. Ils ont un bulbe d'où s'élève la tige simple à feuilles équitantes canaliculées-plissées, terminée par quelques fleurs entourées d'une spathe. Le périgone, large de 10 à 15 cm, est constitué de six segments libres, ceux de l'intérieur sont assez grands, rapprochés en bas, en une coupe, puis recourbés

M. et S. Prato

◀ **Crocus vernus,** *très répandu dans les prairies et les pâturages de montagne, fleurit au printemps dès la fonte des neiges.*

▶ *A gauche, une forme horticole de* Freesia refracta; *à droite, le glaïeul* (Gladiolus sp.), *dont la fleur a des tépales inégaux et trois étamines recourbées.*

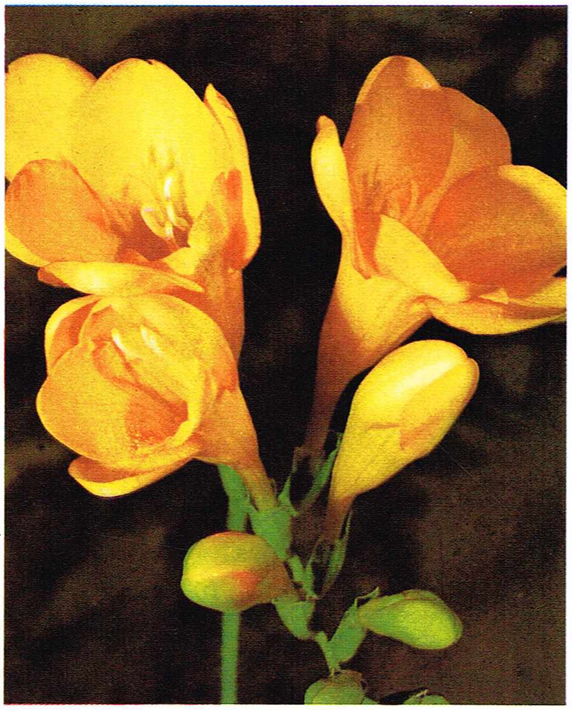

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

M. Pedone

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Chez* Tigridia pavonia, *les tépales forment à la base une coupe tachetée.*

brusquement : ils sont rouges et blancs à la base ou parfois entièrement jaunes, blancs, roses ou lilas. La base des tépales et les stigmates sont souvent tachetés.

Dans d'autres tribus, l'ovaire est encore infère, mais les tépales sont unis en tube inférieurement.

Les Crocées comprennent quatre genres de l'Ancien Monde. Ce sont des plantes bulbeuses ou tuberculeuses. Il se forme une fleur par pied, parfois deux à quatre.

Les *Crocus* comptent environ quatre-vingts espèces habitant essentiellement les régions méditerranéennes, et l'Asie occidentale jusqu'en Iran. Du bulbe sortent d'abord des écailles, puis les feuilles, révolutées, très étroites, canaliculées au-dessus en un sillon blanc. Les fleurs sont souvent entourées à la base de une ou deux bractées membraneuses. Le périgone est constitué de six segments réunis à la partie inférieure en un très long tube qui s'enfonce jusqu'en dessous du niveau du sol; les lobes s'élargissent et s'écartent plus haut, puis se rapprochent légèrement au sommet. Ils sont généralement violets, mais peuvent être aussi lilacés, jaunes ou panachés de ces teintes. A la gorge du tube s'insèrent les trois étamines, qui restent incluses. L'ovaire, infère, demeure dans le sol; il est triloculaire et contient de nombreux ovules; le style filiforme se termine par trois grands stigmates inclus vivement colorés et élargis en tube, dont la partie sommitale est souvent crénelée ou denticulée. *C. sativus* ou safran, qui atteint 30 cm, est l'espèce la plus connue. Originaire de l'est de la région méditerranéenne et naturalisé en Savoie, il est cultivé pour ses stigmates; ceux-ci sont infundibuliformes, crénelés en haut et sont recourbés en arrière. Les fleurs sont solitaires ou géminées. Les tépales sont violets avec des nervures plus claires ou plus foncées; la gorge du tube périgonial est velue. La plante croît dans les lieux herbeux et dans les forêts, et fleurit de septembre à novembre. Le safran récolté sert de condiment et de colorant histologique grâce à la crocine (caroténoïde lié à deux molécules de glucose à chaque extrémité de la chaîne). Il a aussi quelques propriétés médicinales (sédatif, emménagogue). La culture de *C. sativus,* pratiquée depuis la plus haute antiquité, occupe de grandes surfaces dans le sud de l'Europe, en particulier en Espagne, en Italie et dans les Balkans et aussi en Turquie, en Iran et en Inde. Quand les fleurs éclosent, vers la fin de septembre et en octobre, on les coupe pour en séparer soigneusement les stigmates. Un hectare donne environ 11 kg de safran sec, ce qui explique le prix élevé du produit. Cette culture est peu pratiquée en France (Gâtinais, Anjou). On trouve six *Crocus* en France. Le plus répandu est *C. vernus,* qui croît dans les prairies et dans les pâturages des hautes montagnes et fleurit de février à mai. Ses fleurs sont violacées, blanches ou panachées, solitaires ou géminées. Les stigmates, entiers ou frangés, sont courts. Certaines de nos espèces ont une floraison automnale comme *C. medius,* des Alpes-Maritimes et de Ligurie, à fleurs solitaires violettes et à stigmates fimbriés écarlates. D'autres ont une floraison printanière ou même hivernale, comme *C. versicolor,* à fleurs (de une à quatre) violet pâle ou blanches avec des nervures longitudinales foncées et de courts stigmates orangés. C'est une plante du Dauphiné, de Provence et de Ligurie.

Chez les Ixiées, il y a un bulbe ou un tubercule; les fleurs sont actinomorphes et le tube du périgone est à peu près droit. Les *Ixia* sont une quarantaine d'espèces d'Amérique du Sud; certaines sont souvent cultivées et vendues en fleurs coupées. Les fleurs sont infundibuliformes, réunies en épi simple ou rameux, et les feuilles sont équitantes. Les trois *Freesia* sont originaires d'Afrique du Sud. *F. refracta* a été introduit en horticulture en 1875 seulement. Il a un tubercule et a de fines hampes cylindriques qui portent des feuilles équitantes insérées sur deux rangs. L'inflorescence en épi est formée de quelques fleurs brièvement pédonculées et entourées à la base par une petite bractée. Elles sont disposées toutes du même côté de l'inflorescence; leur périgone, crème, blanc, jaune, souvent maculé, est constitué de six segments unis à la base en tube courbe et est légèrement bilabié; trois tépales tendent à se disposer en arrière, les trois autres se rapprochent en avant.

Chez les Gladiolées, il y a encore un tubercule ou un bulbe, et les fleurs sont zygomorphes, disposition déjà ébauchée chez les *Freesia.*

Les *Gladiolus* ou glaïeuls forment le genre le plus important avec deux cent cinquante espèces environ, dans la région méditerranéenne, en Afrique du Sud et en Asie occidentale jusqu'en Iran. Plusieurs sont cultivés, et quelques-uns sont spontanés en Europe. Ces plantes ont un bulbe solide entouré de fibres ou de membranes (restes de la feuille axillante de l'année précédente, dont il est le bourgeon). Les feuilles sont distiques, équitantes et semblables à des épées, d'où le nom de *gladiolus* (petite épée). Au sommet de la hampe se trouve une inflorescence en épi. D'abord distiques, les fleurs s'incurvent ensuite d'un même côté; leur préfeuille les enveloppe à la base. Le périanthe, infundibuliforme, élargi au sommet, est formé de six segments inégaux; les postérieurs sont rapprochés et recourbés de manière à former presque un petit capuchon, les inférieurs sont incurvés vers le bas à partir de leur milieu et rétrécis inférieurement, en une sorte de lèvre. Les tépales sont soudés en tube courbe à la base. Les étamines sont au nombre de trois et courbées comme le périanthe. L'ovaire, à trois loges,

F. Roux - Explorer

est infère et surmonté d'un style courbe à trois stigmates spatulés. Les fruits sont des capsules loculicides à nombreuses graines. *G. segetum* ne dépasse guère 60 cm ; il a des fleurs rouge bleuâtre qui paraissent en mai-juin. Le périgone est nettement zygomorphe ; les tépales inférieurs sont spatulés et étalés. Les étamines ont des anthères plus longues que les filets. La plante habite les champs bien exposés dans la région méditerranéenne et s'étend jusqu'en Vendée au nord et jusqu'en Iran à l'est. Cinq autres glaïeuls sont indigènes en France, mais les espèces, variétés et hybrides les plus connus sont ceux qui sont cultivés pour le commerce des fleurs coupées. Leur tube périanthaire est entouré par la spathe préfoliaire qui enveloppe d'abord l'ensemble du bouton floral, comme le fait un calice. La tige est souvent fistuleuse et les feuilles équitantes sont vert glauque, épaisses et sillonnées. On a obtenu toute une gamme de couleurs, du blanc au rouge, au jaune, à l'orangé et au bleu violacé. Ces formes dérivent surtout de *G. communis*, plante méditerranéenne et d'Asie occidentale, indigène dans le Midi, et de *G. cardinalis* et *G. psittacinus*, tous deux du Cap. D'autres espèces d'Afrique du Sud ont aussi été utilisées.

La famille des *Juncacées (Juncaceae)* comprend trois cents espèces en huit genres et est largement répandue dans toutes les régions tempérées et froides ; dans les zones tropicales, elle est limitée aux montagnes. Ce sont des plantes herbacées, à l'exception du genre monospécifique *Prionium*, du Cap et du Natal, qui est arborescent. L'appareil souterrain est souvent constitué par des rhizomes et les plantes peuvent former des coussinets. Les tiges sont grêles, et les feuilles, linéaires et acuminées, voire plus ou moins filiformes, sont pourvues d'une gaine ; leur limbe est souvent unifacial. Comme il y a fréquemment des oreillettes stipulaires, elles peuvent s'unir alors en une stipule médiane *(Oxychloe)*. Les hampes se terminent par des inflorescences cymeuses dont l'organisation (sinon l'apparence) rappelle celle des inflorescences d'iris. Les fleurs sont en général hermaphrodites et ont un périgone peu apparent à six tépales libres, bruns, verts ou membraneux, rarement blancs ou colorés. L'androcée est formé de six étamines ou, dans certains cas, de trois seulement, par avortement du verticille interne. L'ovaire, supère et tricarpellé, peut être tri- ou uniloculaire et est surmonté d'un style terminé par trois stigmates allongés et spiralés. Les ovules sont plus ou moins nombreux et ont une placentation axile, pariétale ou basale *(Luzula)*. L'albumen est hélobial et le pollen se forme par divisions simultanées. La conformation de l'appareil floral est en relation avec le type de pollinisation, qui est anémophile, quoique parfois il y ait cléistogamie. L'anémophilie rapproche les Juncacées des Cypéracées et des Graminées, dont elles diffèrent par leur structure florale bien plus proche de celle des Liliiflores. Des arguments embryologiques ont conduit à les rapprocher des Cypéracées, mais non des Graminées. Le plus simple est probablement de suivre de nombreux auteurs modernes et d'en faire un ordre des Juncales. Dans nos régions se rencontrent les deux plus importants genres, *Juncus* et *Luzula*.

Les *Juncus* ou joncs comprennent environ deux cent vingt espèces distribuées dans toutes les zones tempérées et froides de la terre et dans les montagnes tropicales ; il en existe en France une trentaine poussant principalement dans les lieux humides. Leur port caractéristique (junciforme) est dû à leurs tiges grêles et raides, cylindriques, vertes, se terminant par une inflorescence de fleurs insignifiantes, solitaires ou en petits glomérules. Le périgone est verdâtre ou brun. Les feuilles, à limbe étroit, souvent subcylindrique et parfois piquant, sont pourvues d'une gaine ouverte et peuvent être réduites à des écailles qui sont des gaines. L'une d'elles peut prolonger la tige, l'inflorescence paraissant alors latérale. Parmi les espèces les plus communes, nous citerons *J. conglomeratus*, qui vit dans les lieux humides ; ses petites inflorescences contractées sont en partie entourées à la base par la gaine foliaire de la seule feuille développée, dont le limbe subcylindrique se place dans le prolongement de la tige. Les autres feuilles sont réduites à des écailles à la base de la tige ; celle-ci est haute de 40 à 80 cm. C'est une plante européenne, mais présente aussi en Afrique du Nord et sur la côte atlantique de l'Amérique du Nord.

Les *Luzula* sont au nombre de soixante-dix ou quatre-vingts, occupant les mêmes régions que les joncs, mais habitant les forêts, les pâturages, les éboulis rocheux, etc. Les gaines foliaires sont toujours fermées et les limbes sont plats et souvent velus, surtout sur le bord, qui peut être longuement cilié. Comme chez les joncs, les inflorescences comptent des fleurs solitaires ou des glomérules. L'ovaire est uniloculaire et les trois ovules sont en placentation basale ; les fruits sont des capsules loculicides à graines pourvues de petits appendices chalaziens ou micropylaires. Il y a une quinzaine de luzules en France. *L. pilosa* atteint 30 cm et habite les bois de l'Europe et de Sibérie. Ses feuilles sont larges (1 cm) et longuement ciliées au bord ; l'inflorescence est formée de fleurs isolées.

Par certains caractères, les deux familles que nous allons étudier ensuite peuvent être rangées parmi les Liliiflores, mais elles sont particulières et on en fait maintenant des ordres spéciaux (Broméliales et Dioscoréales).

▲ ***Les bords des étangs sont souvent colonisés par des joncs, mais aussi par des Cypéracées.***

▼ **Luzula nivea**, ***aux longues feuilles étroites et ciliées, se rencontre dans les forêts et ravins des montagnes d'Europe centro-méridionale.***

C. Bevilacqua

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *Les Broméliacées (ici :* **Guzmania lingulata**) *sont caractérisées par une grande rosette de feuilles d'où part une inflorescence pourvue de bractées colorées.*

▶ **Aechmea fasciata,** *cultivé à des fins ornementales.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▼ *Inflorescence de* **Tillandsia sp.**, *à gauche, et d'***Aechmea chantinii**, *à droite.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

La première (Broméliacées) a été rapportée aussi aux Commélinales ou Énantioblastées, car elle présente un albumen riche en amidon.

La famille des *Broméliacées (Bromeliaceae)* est constituée par environ cinquante genres et mille sept cents espèces, distribués dans les régions chaudes d'Amérique, de la Virginie et du Texas jusqu'au centre de l'Argentine et du Chili. *Pitcairnia feliciana* habite l'Afrique tropicale occidentale. Beaucoup de ces plantes sont cultivées pour l'ornement ou bien pour leurs fruits (ananas). La plupart sont des plantes épiphytes des forêts tropicales, beaucoup aussi sont xérophytes et vivent sur les rochers; certaines occupent les régions élevées des Andes. L'appareil foliaire est toujours très développé, et les inflorescences ont de très belles couleurs qui attirent les Insectes pollinisateurs. Ce sont des herbes ou des arbustes avec une grosse touffe apicale de feuilles spiralées, rarement distiques, souvent larges, mais parfois filiformes, fréquemment un peu charnues et dont les bords et le sommet présentent souvent des piquants. Les gaines élargies forment des réservoirs où s'accumule l'eau de pluie que la plante absorbe en partie et où vivent divers Animaux planctoniques (larves d'anophèles entre autres). Il est bon d'alimenter ces réservoirs en eau non calcaire chez les plantes cultivées en appartement. Les racines des épiphytes sont généralement réduites; celles des types arbustifs sont développées et beaucoup sont insérées très haut sur la tige, puis traversent longitudinalement l'écorce de celle-ci, sortent à la base et servent à arrimer la plante au sol. De la rosette de feuilles sort une hampe terminée par une inflorescence en épi ou en grappe, simple ou composée. Les fleurs, le plus souvent hermaphrodites et protandres, sont accompagnées par des bractées de belle couleur. Le périanthe est constitué de deux verticilles de segments : les externes sont en général sépaloïdes, les internes pétaloïdes et souvent munis d'écailles nectarifères ventrales et basales; ils peuvent être unis en tube inférieurement. Les six étamines sont libres ou leurs filets sont unis aux pétales; le pollen se forme par divisions successives. L'ovaire, infère ou parfois supère, est tricarpellé et se termine par un style et trois stigmates spiralés. Il y a de nombreux ovules en placentation axile. Les fruits sont des capsules septicides ou parfois loculicides si l'ovaire est supère ou des baies s'il est infère; chez le genre *Ananas*, il s'agit de syncarpes constitués par la concrescence des baies avec les bractées florales et l'axe inflorescentiel qui sont eux-mêmes accrescents.

Les plantes de la sous-famille des *Tillandsioïdées* sont surtout épiphytes; leur ovaire est supère.

Les *Tillandsia,* avec trois cent cinquante espèces, forment le plus grand genre de la famille et occupent toute son aire. *T. usneoides* est épiphyte et forme des masses chevelues qui pendent des arbres; ses fleurs sont isolées. Il habite de l'Argentine à la Virginie. Les *Vriesia* et *Guzmania* sont cultivés en appartement.

Les *Broméliоïdées* ont un ovaire infère. Plusieurs genres ont fourni des plantes d'appartement *(Nidularium, Aechmea, Billbergia).*

Les *Ananas* sont cinq ou six espèces terrestres du Brésil, de Guyane et du Paraguay. Leur inflorescence dense est terminée par une rosette de bractées, comme chez les *Eucomis* (Liliacées). *Ananas comosus (A. sativus)* est cultivé dans toutes les zones chaudes où le cultivar « Cayenne » est le plus employé. Il est multiplié végétativement, car la plante est parthénocarpique et ne produit donc pas de graines. Dans la région de son origine présumée (bassin du Paraña, Paraguay) se rencontrent trois espèces voisines qui produisent des graines, ainsi que *Pseudananas sagenarius,* seule espèce du genre, qui n'a pas de rosette bractéale au-dessus de l'inflorescence. La domestication de l'ananas fut l'œuvre des Indiens d'Amérique du Sud avant la découverte de l'Amérique; il était déjà répandu jusqu'aux Antilles à l'arrivée des Européens. Certains ananas à feuilles panachées de blanc jaunâtre sont de belles plantes d'appartement.

Les *Dioscoréacées (Dioscoreaceae)* comptent onze genres et six cent cinquante espèces, essentiellement dans les régions tropicales et subtropicales. Peu d'espèces s'avancent en zone tempérée, sauf un *Tamus* et les deux *Bordera.* Le port des Dioscoréacées est un peu comparable

G. P. Mondino

S. Prato

▲ *Les fleurs d'ananas* (**Ananas comosus**) *sont entourées par une bractée et groupées en une inflorescence dense surmontée par une rosette de bractées vertes (à droite); l'ananas (à gauche) est formé par la concrescence des petites baies, des bractées et de l'axe de l'inflorescence.*

à celui des Liliacées Smilacoïdées; ce sont en effet des plantes herbacées ou arbustives sarmenteuses ou grimpantes, dont les tiges portent souvent de larges feuilles à limbe cordiforme et à fines nervures transversales réticulées autour des nervures principales palmées. Il y a un tubercule hypocotylaire riche en amidon et souvent des bourgeons axillaires tubérisés. Les fleurs sont actinomorphes et réunies le plus souvent en épis ou en grappes. Elles sont unisexuées sauf dans trois petits genres. Les tépales sont sépaloïdes et généralement unis en tube. Les fleurs mâles possèdent couramment six étamines en deux cycles, et les filets peuvent être unis en colonne. Les fleurs femelles ont un ovaire infère, triloculaire, à deux ovules par loge; leur placentation est axile et ils sont superposés. Les fruits sont des capsules fréquemment ailées ou des baies. L'organisation de l'embryon est plus facile à comprendre que chez bien d'autres Monocotylédones : son point végétatif est indiscutablement terminal et le cotylédon unique est latéral.

Le genre *Dioscorea* habite les zones intertropicales et tempérées chaudes et comprend environ six cent cinquante espèces. L'une d'entre elles se trouve dans la péninsule balkanique et six autres se rencontrent aux États-Unis et au Canada jusque dans l'Ontario et le Minnesota. Plusieurs sont cultivées pour la récolte de leurs tubercules amylacés appelés ignames. La plus connue est *D. batatas,* dont les tubercules peuvent atteindre 20 et même 50 kg. *D. elephantopus (Testudinaria)* a un tubercule qui émerge du sol et dont la surface globuleuse est divisée en facettes. C'est le « pain des Hottentots » d'Afrique du Sud.

Commélinales ou Énantioblastées

Cet ordre a des affinités avec les Liliiflores, particulièrement les Broméliacées, et avec les Graminées. On peut y placer huit familles, dont les principales seulement seront étudiées. La distribution géographique de ces plantes est très vaste, mais la plupart d'entre elles sont tropicales et subtropicales. Leur caractère essentiel est la présence d'un albumen farineux, c'est-à-dire riche en substances amylacées. L'embryon est situé latéralement par rapport à l'albumen (comme chez les Graminées), ou y est peu profondément inclus.

Les Commélinales sont toutes herbacées, parfois graminoïdes, à feuilles munies d'une gaine bien délimitée. Les fleurs, le plus souvent hermaphrodites, sont généralement trimères, mais parfois di- et même monomères. Le périanthe est formé de deux verticilles dimorphes. Il y a souvent une nette tendance à la réduction du nombre des pièces dans certains verticilles (fleurs hétéromères). L'androcée est aussi constitué par deux verticilles trimères d'étamines, mais souvent moins, et parfois il n'en reste qu'une fertile. L'ovaire, toujours supère, peut avoir de un à trois carpelles; il y a un ou deux ovules par loge, lesquels sont le plus souvent orthotropes. Chez les Restionacées, les fleurs tendent à devenir graminoïdes.

La famille des *Commélinacées (Commelinaceae)* est la plus importante de l'ordre et renferme quarante genres et environ six cents espèces, essentiellement des zones tropicales et subtropicales, surtout africaines et américaines. Elles sont rares dans les régions tempérées. Ce

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *La fleur de* Tradescantia virginiaca *est actinomorphe avec des sépales et des pétales bien distincts.*

M. et S. Prato

▲ Cyperus alternifolius, *souvent cultivé en appartement, est moins grand que le vrai papyrus.*

sont des plantes herbacées, annuelles ou vivaces, en général plus ou moins succulentes; leur tige est feuillée, parfois rampante ou très courte, souvent avec des nœuds marqués où s'insèrent des feuilles distiques ou spiralées, à gaines embrassantes fermées. Les fleurs sont en cymes hélicoïdes condensées, souvent elles-mêmes regroupées en grappes denses. Les fleurs, hermaphrodites, sont actinomorphes ou obliquement zygomorphes; leur périanthe comprend trois sépales et trois pétales. Il y a fondamentalement six étamines, mais souvent seul subsiste le verticille externe ou l'interne; il arrive qu'on ne trouve que les trois étamines situées d'un même côté et parfois il en reste une seule, ou quatre, ou cinq. Les filets portent fréquemment des poils formés d'une seule rangée de cellules. Les connectifs sont élargis, et les anthères d'une même fleur ont souvent une forme différente; le pollen naît par des cloisonnements successifs. Le gynécée comporte un ovaire supère tricarpellaire et triloculaire dont un carpelle peut être stérile. Dans chaque loge, il y a un ou plusieurs ovules orthotropes en placentation axile, mais ils sont parfois anatropes ou hémitropes. Le style unique se termine par un stigmate simple ou à trois languettes. Le fruit est une capsule loculicide, parfois un schizocarpe sec ou charnu. L'embryon est séparé de l'albumen farineux par un repli du tégument de la graine, dont la portion supra-embryonnaire forme un clapet qui s'ouvre à la germination. Les Commélinacées ont peu d'importance du point de vue économique, mais elles sont bien connues comme plantes ornementales.

Dans un premier groupe comprenant *Setcreasea, Zebrina, Rhoeo* et *Tradescantia*, il y a six étamines fertiles dans la fleur actinomorphe. *T. virginiaca (T. virginica)* a de nombreuses tiges dressées ou rampantes, sur lesquelles s'insèrent les feuilles, le plus souvent lancéolées et aiguës. Les fleurs, pourpre violacé ou bleues, parfois blanches, sont réunies en une inflorescence cymeuse. C'est une plante très rustique en France. *T. blosfeldiana*, d'Argentine, à tige velue succulente et à feuilles charnues vert foncé au-dessus, lie-de-vin en dessous, est souvent cultivé en appartement. Ses fleurs sont petites et à pétales blancs à la base et roses au sommet.

Dans un deuxième groupe, les fleurs sont obliquement zygomorphes et trois étamines antérieures ou postérieures appartenant aux deux verticilles sont plus volumineuses ou bien seules fertiles. Le genre *Commelina* comprend cent cinquante espèces tropicales et subtropicales.

La famille des *Ériocaulacées (Eriocaulaceae)* comprend une douzaine de genres, avec plus de onze cents espèces des régions tropicales et subtropicales, surtout d'Amérique du Sud. Il existe cependant quelques espèces des zones tempérées, dont une en Écosse et en Irlande, *Eriocaulon septangulare*, qui se trouve aussi en Amérique du Nord (dérive des continents!). Ces plantes habitent les lieux humides, les marais et le bord des cours d'eau. Ce sont des herbes annuelles ou vivaces à tiges très courtes, à la base ou au sommet desquelles sont insérées les feuilles spiralées, linéaires ou même capillaires, à gaine courte, et munies d'aérenchyme. La caractéristique essentielle de la famille est son inflorescence en capitule comparable à celui des Composées, mais où l'on trouve le plus souvent des fleurs mâles et femelles en mélange; cependant les femelles peuvent être à l'extérieur et les mâles au centre. Les capitules terminent des pédoncules solitaires ou sont réunis en ombelles terminales. Ils sont entourés par un involucre de bractées scarieuses souvent velues et blanches, rappelant celles des immortelles; aussi utilise-t-on parfois des Ériocaulacées pour la confection de bouquets perpétuels. Les fleurs sont très petites, trimères ou quelquefois dimères. Elles sont actinomorphes ou zygomorphes. Leur périanthe est constitué de sépales libres ou parfois unis en tube et de pétales souvent soudés en tube et séparés des sépales par un entre-nœud. Les fleurs mâles ont quatre ou six étamines libres dans la plupart des cas, parfois trois, deux ou une seule, et généralement un rudiment d'ovaire. Les fleurs femelles ont un ovaire supère, souvent pédicellé, avec deux ou trois loges contenant chacune un seul ovule. Il y a un seul style sur chaque ovaire, avec trois stigmates fréquemment bifides et parfois commissuraux (au-dessus des cloisons carpellaires), l'ovaire ayant alors trois appendices à la place des stigmates normaux. Les fruits sont des capsules loculicides contenant trois graines souvent hérissées de restes cellulaires, avec un embryon indifférencié adjacent à l'albumen amylacé. L'ensemble du capitule est disséminé.

La famille des *Restionacées (Restionaceae)* est considérée par certains comme proche des Graminées, et accessoirement des Juncacées et des Cypéracées. Ce sont une trentaine de genres et quatre cents espèces au moins, vivant presque exclusivement dans les zones tempérées de l'hémisphère Sud et surtout en Australie et dans le sud-ouest de l'Afrique. Les Restionacées sont des plantes de marécages à morphologie de xérophytes, phénomène assez répandu par ailleurs (Éricales). Il s'agit d'herbes à rhizome traçant duquel s'élèvent les tiges ramifiées, souvent articulées et porteuses de petites feuilles distiques pourvues d'une gaine ouverte et même parfois d'une ligule; le limbe est le plus souvent réduit et caduc, sauf si les feuilles sont radicales. Il y a souvent des corpuscules siliceux dans les cellules épidermiques. Au sommet se trouve l'inflorescence, épi ou panicule lâches, composée de plusieurs épillets parfois uniflores disposés à l'aisselle de bractées et constitués de fleurs unisexuées. Les plantes sont très généralement dioïques, et les inflorescences sont souvent de forme différente dans les deux sexes. Les fleurs sont fréquemment actinomorphes et trimères, parfois dimères. Le périanthe comporte six tépales écailleux semblables et libres dans la plupart des cas ou bien trois, ou encore ceux-ci manquent. Parfois il y a cinq tépales : deux externes et trois internes. Il y a au maximum trois étamines; leurs anthères n'ont le plus souvent que deux sacs polliniques : ce sont des demi-anthères. Les trois ou quatre genres d'Anarthriées ont des étamines à quatre sacs polliniques. Il y a des rudiments des organes de l'autre sexe dans chaque type de fleur. Les fleurs femelles ont un ovaire à un à trois carpelles, supère et pluriloculaire, et contenant un ovule par loge. Il y a de un à trois styles à longs stigmates souvent plumeux ou spiralés. La pollinisation est anémophile. Le fruit est une capsule loculicide ou un akène; l'embryon est extérieur à son albumen farineux. Le genre *Restio* est le plus important, avec cent trente espèces d'Australie et d'Afrique du Sud essentiellement. Il comprend les plus grandes espèces qui atteignent 1 m de hauteur.

Négligeant d'autres familles des Commélinales (*Flagellariacées* avec six espèces, *Centrolépidacées* avec une quarantaine, *Rapatéacées* avec quatre-vingts, *Xyridacées* avec deux cent soixante-dix et *Mayacacées* avec une seule), nous arrivons à l'ordre des Cypérales.

Cypérales

Ce groupe comprend l'unique famille des *Cypéracées (Cyperaceae)*, dont font partie soixante-dix genres et près de quatre mille espèces. C'est une famille cosmopolite, mais surtout présente dans les régions tempérées. Certains botanistes unissent les Cypérales aux Graminées, créant ainsi un ordre des Glumiflores au sens large; le port est en effet bien comparable dans les deux cas, mais les détails de l'organisation sont bien distincts et l'embryologie en particulier n'est pas en faveur de ce rapprochement. Les Juncacées et les Flagellariacées ainsi que les Restionacées au contraire semblent avoir plus d'affinités avec les Cypéracées. Il ne faut pas oublier que l'adaptation commune à l'anémophilie est la cause de convergences qui masquent les véritables parentés de ces familles. Ces affinités sont douteuses et il existe de nombreux caractères typiques des Cypérales, ce qui justifie leur séparation en un ordre à part. Les Cypérales sont toutes des plantes herbacées, sauf le genre monospécifique *Microdracoides*. Elles sont le plus souvent vivaces et pourvues de rhizomes d'où partent les tiges dépourvues de nœuds très marqués, fréquemment pleines et de section triangulaire. Les feuilles sont étroites, avec une gaine fermée embrassant la tige; elles peuvent avoir une ligule du type de celle des Graminées, mais cela n'est pas général. Les inflorescences sont terminales et de différentes formes, mais toujours botrytiques et composées d'épillets, c'est-à-dire de petites inflorescences élémentaires. Celles-ci peuvent être des épis comme chez les Graminées, mais aussi des cymules. Les fleurs sont très petites et hermaphrodites ou unisexuées et alors parfois réunies, pense-t-on, en pseudanthes hermaphrodites, qui seraient des épillets très condensés, ressemblant à

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ *A gauche,* **Schoenoplectus lacustris,** *le jonc des tonneliers, vit au bord des eaux. A droite, le grand papyrus, exploité dès l'Antiquité pour fabriquer une sorte de papier.*

une fleur (comme un cyathium d'euphorbe). Le périgone est absent ou représenté par de petites écailles ou soies. Les fleurs mâles possèdent de une à trois étamines, parfois plus, avec des filets libres. Les fleurs femelles ont un ovaire supère uniloculaire et à un seul ovule anatrope basal. Il y a deux ou trois carpelles et autant de stigmates. L'ovaire, dans certains cas, est entouré par un utricule, qui est la bractée de la fleur femelle qu'il représente. L'ensemble de l'utricule et du fruit qu'il contient est alors disséminé *(Carex)*. Les fruits sont des akènes; l'embryon est entouré par un abondant endosperme. Le pollen se forme par divisions simultanées et avortement de trois des quatre noyaux issus de la seconde division, si bien que la cellule mère ne donne qu'un seul grain de pollen. Les Cypéracées ont une prédilection pour les lieux humides. De nombreuses espèces tendent à occuper de vastes aires, en constituant de grands peuplements, comme ceux où prédominent les *Carex*. On divise la famille en deux sous-familles que nous examinerons maintenant.

Les *Scirpoïdées (Cypéroïdées)* semblent primitives; mais si l'on interprète leurs fleurs d'allure hermaphrodite comme des pseudanthes, elles paraissent alors fort évoluées! La présence des fleurs réellement hermaphrodites dans certains cas au moins n'est pas contestée.

Les scirpes *(Scirpus)* ne comptent qu'assez peu d'espèces dans l'acception restrictive du genre. Ce sont des herbes vivaces, à tige feuillée se terminant par une inflorescence ramifiée entourée de plusieurs grandes bractées qui ressemblent aux feuilles végétatives. Chaque épillet compte plus de cinq fleurs disposées en spirale sur son axe. Elles sont hermaphrodites (à moins qu'il ne s'agisse de pseudanthes) et munies de soies probablement périanthaires (ou bractéales et certaines axillantes des fleurs mâles monostaminées). Il y a trois étamines et le fruit n'est pas surmonté d'un épaississement apical. *S. silvaticus* atteint 1 m et possède de robustes tiges trigones à faces convexes, garnies de longues feuilles planes, rugueuses au bord et sur le dos, et terminées par une inflorescence lâche de glomérules de petits épillets. Les bractées de l'inflorescence, assez courtes dans ce cas, ne la dépassent pas. Il y a trois stigmates et six soies périanthaires. C'est une plante des lieux humides d'Eurasie tempérée.

Plusieurs genres voisins comportent des espèces placées jadis parmi les *Scirpus*. Les *Holoschoenus* ont des feuilles basales et des inflorescences formées de glomérules très denses; elles paraissent latérales du fait de l'existence d'une bractée prolongeant la tige, comme chez certains joncs. Le port de *H. vulgaris (Scirpus holoschoenus)*, dont les feuilles sont réduites à des gaines, rappelle ainsi un peu celui de *Juncus conglomeratus*. Les *Schoenoplectus* sont voisins mais leurs fleurs sont disposées en épillets ovoïdes volumineux. *S. lacustris* est le jonc des tonneliers, qui peut atteindre 3 m et vit au bord des eaux de toute la terre. Plusieurs autres genres groupent des espèces aquatiques parfois flottantes *(Eleocharis, Eleogiton, Trichophorum)*.

Les souchets ou *Cyperus* forment un genre important comprenant six cents espèces, surtout tropicales et subtropicales (une dizaine sont représentées en France). Ils constituent une tribu où les fleurs (pseudanthes) n'ont pas de périanthe et sont groupées en épillets, mais suivant deux rangées. Il y a au maximum une bractée stérile à l'aisselle des épillets. Les *Cyperus* peuvent être pourvus de tubercules radicaux qui sont quelquefois alimentaires. La tige, grêle et de section triangulaire, porte à la base (ou dans certains cas en une touffe sommitale) des feuilles gramminiformes. L'inflorescence est plus ou moins ombelliforme et constituée de nombreux épillets; elle est entourée à la base par de longues bractées foliacées. Les fleurs sont hermaphrodites avec de une à trois étamines et un ovaire uniloculaire surmonté par un style à deux ou trois stigmates. Les fruits sont des akènes comprimés ou trigones. *Cyperus esculentus* var. *aureus* habite la région méditerranéenne et son aire s'étend jusqu'en Inde. Il forme de petits tubercules souterrains bruns et amers. Ses épillets sont jaune d'or. La var. *esculentus*, à tubercules de la grosseur d'une noisette, comestibles et riches en huile et en sucre, est cultivée surtout en Espagne. Cette plante ne fleurit guère et est multipliée végétativement par ses tubercules et par la

▼ *Les carex poussent dans les lieux humides et peuvent être employés pour la décoration des bords d'étangs ou de bassins.*

M. et S. Prato

Ruffier - Lanche - Jacana

▲ ***Deux représentants du vaste genre* Carex *:***
***à gauche,* C. grayi *; à droite,* C. acutiformis.**

division de ses touffes. Le papyrus, d'Afrique tropicale, atteint au nord la Calabre et la Sicile. Il a été exploité et cultivé en Égypte dès 2500 avant J.-C. environ, car on préparait avec des lambeaux d'écorce de sa portion submergée une sorte de papier ou papyrus. Il vit dans les eaux tranquilles et ne peut être cultivé qu'en serre dans la plus grande partie de la France. Il atteint 2 m et plus, et sa tige se termine par une touffe dense de feuilles étroites, d'où sort l'inflorescence en ombelle légère. *C. alternifolius,* de Madagascar et des régions chaudes d'Afrique et d'Amérique, est très souvent cultivé en appartement sous le nom de papyrus ; il est moins élevé et ses feuilles sont assez larges.

Chez les Rhynchosporées, les fleurs ou pseudanthes ont ou non un périanthe de soies, et les épillets, qui n'ont que peu de fleurs, présentent inférieurement au moins deux bractées stériles, ou glumes. Les *Rhynchospora* sont au nombre de deux cent cinquante, surtout tropicaux et subtropicaux ; il en existe cependant deux espèces dans nos régions : *R. alba* et *R. fusca,* qui habitent les marais et les zones tourbeuses. Ils ont des soies périanthaires (une douzaine chez *R. alba,* sans doute deux par tépale) et leurs inflorescences sont des groupes d'épillets brun roussâtre chez *R. fusca* et blanchâtres chez *R. alba*.

Dans la sous-famille des *Caricoïdées,* les fleurs sont unisexuées. Il y a encore un périanthe d'écailles ou de soies à la fleur femelle, qui est terminale, dans une tribu à laquelle appartient *Microdracoides squamosus,* seule espèce du genre, qui vit dans les montagnes d'Afrique tropicale occidentale. Il est arbustif, atteint 1 m, et ses tiges robustes sont ramifiées. Elles sont garnies des restes des gaines foliaires. Le port rappelle celui d'un petit *Dracaena* avec des touffes de feuilles terminant les rameaux pseudo-dichotomes.

Chez les Caricées, les fleurs femelles sont latérales sur l'axe d'un épillet et n'ont pas de périanthe, mais elles sont entourées de l'utricule, qui est la préfeuille d'un axe, le plus souvent virtuel, lui-même situé à l'aisselle de la bractée portée par l'axe de l'épillet. La fleur femelle, nue, est axillaire de cet utricule préfoliaire. Il arrive que le même axe, à l'aisselle de la bractée située sur l'axe de l'épillet, porte d'abord une fleur femelle à l'aisselle de l'utricule-préfeuille, qui n'est alors pas clos, puis une fleur mâle à l'aisselle d'une bractée. C'est le cas des *Elyna,* genre comprenant six espèces arctiques et des montagnes d'Eurasie, surtout de l'Himalaya, mais dont l'une, *E. myosuroides,* est une petite plante présente dans les Alpes, aux étages alpin et subalpin, et caractérise une association *(Elynetum)* des crêtes exposées au vent.

Chez les *Carex* ou laîches, les fleurs des deux sexes ne sont pas portées par un même axe et chacune est à l'aisselle d'une bractée distincte de l'épillet. Les bractées femelles ont à leur aisselle un axe virtuel dont la préfeuille est un utricule clos. Le rameau axillaire des écailles mâles forme directement la fleur mâle, réduite à trois étamines. Il y a deux ou trois styles, donc deux ou trois carpelles dans la fleur femelle, qui est réduite à ceux-ci. Dans le sous-genre *Vignea,* les épillets sont groupés en épis denses et un même épillet a des écailles « femelles » et des écailles « mâles » ; il a ainsi une zone mâle soit apicale, soit basale. Il est « androgyn ». Il y a généralement deux styles. Dans le sous-genre *Carex,* les épillets sont unisexués, toutes leurs bractées sont « mâles » ou « femelles », et ils sont souvent fort distincts. Il y a deux ou trois stigmates. Les épillets, de grande taille (parfois 20 cm), sont groupés en épis ou grappes lâches. Enfin, dans le sous-genre *Primocarex,* on trouve un seul épillet terminal, androgyn ou non (la plante est alors dioïque).

Le genre *Carex* comprend environ onze cents espèces cosmopolites et qui sont surtout nombreuses dans les régions tempérées. Elles occupent essentiellement les lieux humides ou inondés, quoiqu'il y ait aussi des xérophytes. Beaucoup d'entre elles constituent les herbes communes des prairies de montagne *(C. curvula, C. firma)* ou tendent à former des peuplements en plaine, surtout au bord des eaux. On en rencontre en France environ cent vingt espèces, depuis le bord de la mer, où les *Carex* entrent dans la composition des « prés salés », jusqu'à la haute montagne. Dans les prairies, les *Carex* sont souvent nuisibles à cause de leurs feuilles à bords coupants.

Graminales, Poales ou Glumiflores

Les Graminales ne comprennent que les *Graminées* qui comptent environ huit mille espèces réparties en sept cents genres; on y trouve, entre autres, les céréales, ce qui en fait le groupe végétal le plus utile à l'homme.

Selon Wettstein, les Glumiflores ne comprennent que les Graminées, mais pour bien des auteurs elles renferment aussi les Cypéracées. Il est donc préférable de parler de Graminales pour désigner un ordre qui ne comprend que les Graminées. Celles-ci sont très généralement herbacées et comprennent la plupart des « herbes » communes des prés, des savanes et des steppes. Elles ont des tiges (ou chaumes) pourvues de nœuds caractéristiques. Les feuilles, distiques, ont une gaine le plus souvent ouverte au-dessus. Les fleurs, en général hermaphrodites, ont un périanthe réduit à quelques écailles (trois au maximum) nommées glumellules ou lodicules. Elles sont groupées en épillets distiques et protégées par leur bractéole ou préfeuille (glumelle supérieure ou palea) et leur bractée axillante (glumelle inférieure ou lemme). En bas de l'épillet, il y a très généralement deux bractées qui n'axillent pas de fleurs. Elles sont homologues des glumelles inférieures, mais reçoivent le nom de glumes, inférieure et supérieure; il est très rare qu'on en trouve plus de deux. Il y a parfois six étamines et même plus, ou deux ou une seule; mais le plus souvent il y en a trois, qui sont placées diversement de sorte qu'elles ne correspondent pas toujours aux mêmes pièces du type fondamental à six étamines. L'ovaire est supère et uniloculaire avec un seul ovule pendant ou basal. Comme il y a deux stigmates le plus souvent, il doit y avoir deux carpelles. La graine contient un albumen farineux; l'embryon est basal et séparé de l'albumen placé à côté de lui par son cotylédon ou scutellum. Celui-ci demeure dans la graine lors de la germination, comme d'ailleurs le cotylédon de bien d'autres Monocotylédones (Liliacées, Cypéracées, Palmiers). Les Graminées ont un appareil radical qualifié de fasciculé, c'est-à-dire formé par de nombreuses racines adventives de même dimension, portées par l'extrémité inférieure de la tige et dont la formation commence dès le moment de la germination. La radicule peut cependant persister longtemps, mais elle ne se ramifie pas puissamment. La tige est généralement cylindrique et le plus souvent creuse et noueuse. Sa nature tubuleuse et la structure de ses tissus lui confèrent à la fois robustesse et élasticité. Chez bien des espèces, la base du chaume se ramifie intensément et peut produire en une seule année de nouveaux chaumes très rapprochés les uns des autres (tallage), tandis que la portion supérieure des chaumes ne se ramifie pas, sauf pour former les rameaux de l'inflorescence.

Les feuilles, le plus souvent distiques, sont insérées au niveau des nœuds et constituées d'une gaine et d'un limbe; en général, il n'y a pas de pétiole. Les gaines entourent le chaume en se recouvrant parfois par leurs bords, généralement libres en haut mais très fréquemment unis en bas. Le limbe, linéaire ou lancéolé, a des nervures parallèles, des bords souvent rugueux et peut s'incurver en gouttière, ce qui permet de ralentir la transpiration. Dans la zone où la gaine se continue par le limbe, on observe du côté ventral un appendice de forme et de consistance variables, mais généralement membraneux, la ligule. Celle-ci manque très rarement; elle peut être représentée par une ligne de poils, portés alors par un soubassement ligulaire, bourrelet visible au moins par une étude microscopique. La ligule correspond à l'union d'une languette de la face ventrale de la feuille avec deux appendices « stipulaires » qui prolongent les marges de la gaine.

B. Mallet - Jacana

Marka

▲ *L'ordre des Graminales présente un grand intérêt économique puisqu'il comprend les Graminées fourragères mais aussi la canne à sucre et les céréales comme le maïs (ci-dessus).*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

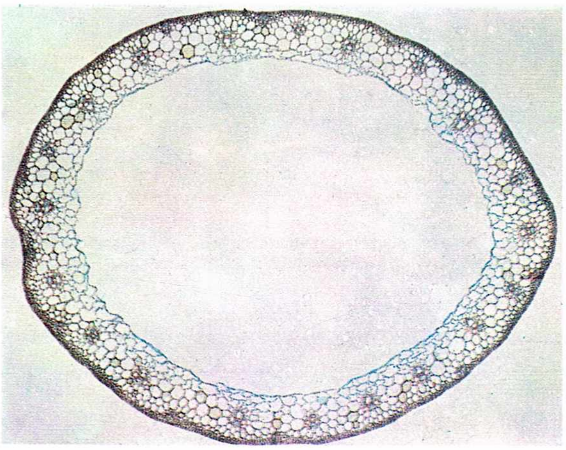

◀ *Au niveau des entre-nœuds, la tige des Graminées est creuse; ici une coupe transversale de chaume de blé vue au microscope.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ *Un épi femelle de Zea mays, le maïs; les filaments correspondent aux longs styles.*

S.E.F.

Les bambous peuvent atteindre des proportions arborescentes et constituer de véritables forêts (ci-dessus :* Dendrocalamus giganteus*) ; ils affectionnent aussi les lieux humides (ci-dessous).

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Les épillets forment une inflorescence en épi simple (blé) ou en faux épi lorsqu'une inflorescence plus complexe est simplement condensée, comme chez les orges, où il y a probablement un épi de cymules. Ils sont souvent groupés en panicules parfois très fournies.

Il est exceptionnel que les fleurs soient unisexuées, mais c'est le cas du maïs. Il est courant qu'une ou plusieurs fleurs d'un épillet soient stériles. Les glumes et les glumelles inférieures sont fréquemment aristées, l'arête étant terminale ou dorsale. La glumelle supérieure, beaucoup plus fine et transparente, est adossée à l'axe de l'épillet et possède deux nervures ; c'est la morphologie normale d'une préfeuille de Monocotylédone. Elle correspond à une seule feuille.

La fleur est protandre et la pollinisation anémogame. Le pollen, abondant dans nos régions de mai à juillet, provoque souvent des allergies, en particulier le « rhume des foins » ou coryza spasmodique.

Lors de la floraison, les glumellules se gonflent et provoquent l'ouverture de la fleur, de sorte que les étamines, dont les filets s'allongent brusquement, font saillie à l'extérieur. Les stigmates sortent plus tard. Les étamines sont formées par un filet et une anthère dorsifixe à deux loges (quatre sacs polliniques) qui, à la maturité, s'écartent en X. Le fruit est très généralement un caryopse, la graine étant soudée au péricarpe. L'albumen comporte extérieurement une couche protéique qui donne le gluten, et intérieurement une masse amylacée. La couche protéique contient des grains d'aleurone. Lors de la germination, elle produit des enzymes, surtout de l'α-amylase, qui hydrolyse l'amidon et permet son utilisation par l'embryon. C'est la gibbérelline que sécrète d'abord cet embryon qui déclenche dans la couche protéique la synthèse de ces enzymes. Les fruits sont rarement des baies ou des akènes chez quelques bambous. Ils sont déhiscents chez les *Sporobolus*, à graine libre.

La complexité et le nombre élevé des espèces de la famille des Graminées les ont fait diviser en une dizaine de sous-familles et en de nombreuses tribus. Nous examinerons les plus importantes.

La sous-famille des *Bambusoïdées* comprend une centaine de genres de bambous, qui peuvent être des herbes ou atteindre des proportions arborescentes, jusqu'à 20 ou 30 m avec un diamètre de 50 cm. Les chaumes sont alors très sclérifiés et, dans les espaces vides de la tige de certaines espèces, il se forme des concrétions siliceuses. Par bien des traits ce sont des plantes assez primitives. Les feuilles sont le plus souvent linéaires, lancéolées et pourvues d'un court pétiole entre la gaine et le limbe. Parfois elles sont élargies en bas du limbe. Les épillets, constitués par un nombre variable de fleurs, forment des fascicules eux-mêmes groupés en grappes ou en panicules. Il y a souvent plus de deux glumes, et les glumelles sont simples, sans arête dorsale. Il y a trois glumellules, parfois plus ou moins, et trois ou six étamines, quelquefois plus. Il peut y avoir deux ou trois styles. Au total, la fleur est proche du type liliiflore. Un fait curieux est que, pour des raisons inconnues, les fleurs paraissent sur les bambous à des époques espacées et assez régulières pour chaque espèce, parfois à des intervalles de cinquante à cent ans. Le moment venu, la floraison d'une espèce se produit simultanément en des points très éloignés, par exemple en Inde, dans son milieu naturel, et en Europe, où on l'a planté, quel que soit l'âge des plantes. Lorsque la floraison a eu lieu, le chaume meurt mais la reprise végétative de la plante est souvent assurée par le rhizome. Les bambous occupent surtout les zones tropicales sur sols humides. Par leurs rhizomes, ils se multiplient très rapidement et forment des peuplements purs. Certains peuvent être cultivés sous nos climats, pourvu qu'on les protège du froid pendant les premières années. Ceux qui réussissent sont fréquemment envahissants. La détermination des bambous est souvent difficile puisqu'on les rencontre très généralement à l'état stérile. Nombreuses sont les espèces utiles à l'homme : les chaumes servent à fabriquer du papier, des meubles, des cannes à pêche, des conduites d'eau, etc.

Chez les Bambusées, les épillets ont de nombreuses fleurs ; il y a six étamines et le fruit est un caryopse. Le genre *Bambusa* compte soixante-quinze espèces d'Asie et d'Amérique. *B. arundinacea* a des entre-nœuds riches en concrétions siliceuses qui sont exploitées dans les pays d'Extrême-Orient.

Chez les Arundinariées, il n'y a le plus souvent que trois étamines. Les *Arundinaria,* d'Amérique et d'Asie, comptent quatre-vingt-dix espèces. Quelques-unes sont cultivées, de même que des *Sasa,* qui sont une vingtaine d'espèces en Chine et au Japon. *S. variegata* est une petite plante assez souvent cultivée, à feuilles veloutées, panachées longitudinalement de bandes blanches. Mais les *Phyllostachys,* qui sont une trentaine dans l'est de l'Asie, sont les plus cultivés. *P. aurea* est particulièrement rustique. Ses entre-nœuds ont un côté déprimé et ceux de la base des tiges sont très courts. *P. viridi-glaucescens* est fréquent aussi ; ses entre-nœuds basaux sont normaux et ses feuilles ont de longues soies au niveau de la ligule. Ces deux espèces sont originaires de Chine et du Japon.

Chez les Dendrocalamées, il y a six étamines, et le fruit est une baie ou une drupe. Les épillets ont des glumelles supérieures bicarénées, normales. Le genre *Dendrocalamus* est représenté par vingt-cinq espèces des Indes et d'Extrême-Orient. *D. hamiltonii* fournit les « pousses de bambou », qui sont un légume très apprécié.

La tribu voisine des Mélocannées a aussi des baies, mais les glumelles supérieures ne sont pas bicarénées comme celles des autres Bambusoïdées et les épillets sont le plus souvent uniflores. L'un des deux *Melocannus,* de l'Inde, *M. bambusoides,* fournit des drupes comestibles grosses comme une pomme. Leur graine vivipare est aussi comestible et n'a pas d'albumen. Le genre voisin *Ochlandra,* d'Indo-Malaisie et de Madagascar, peut avoir des fleurs avec une centaine d'étamines.

Les *Oryzoïdées* sont des plantes herbacées à épillets uniflores unisexués ou hermaphrodites. Il y a trois ou six étamines, parfois beaucoup plus ou une seule. Il y a de deux à quatre glumes ou pas du tout. La glumelle supérieure n'est pas bicarénée, mais trinervée et par conséquent primitive. Le genre le plus important est le genre *Oryza* dont l'une des vingt-cinq espèces est le riz cultivé *(O. sativa),* aliment de base de la moitié au moins de la population mondiale. Il s'agit d'une plante annuelle, dont les tiges atteignent 2 m de hauteur. Les feuilles sont linéaires, longues et rugueuses. L'inflorescence en panicules est assez dense et pendante, et formée d'épillets à une fleur hermaphrodite, avec quatre glumes parfois aristées, deux glumelles de consistance papyracée et souvent aussi aristées, et deux glumellules. On peut dire que les deux glumes inférieures sont de vraies glumes et les supérieures des glumelles inférieures dont l'aisselle est stérile. Le riz, cultivé depuis des millénaires, a donné naissance à un grand nombre de formes, notamment la var. *japonica,* exploitée en Asie orientale et comprenant des plantes de haute productivité qui s'adaptent très bien à différents milieux et ont des caryopses de forme sphéroïdale. La var. *indica* est cultivée en Inde et donne de moins bons produits. Elle est moins résistante et ses caryopses sont allongés. Le riz est probablement originaire d'Asie orientale et d'Inde, où il existe toujours à l'état sauvage, et il est cultivé depuis fort longtemps comme en témoigne son emploi dans une cérémonie chinoise instaurée en 2800 avant J.-C. On a commencé à le cultiver en Italie vers 1465. On le cultive également en Espagne et en Camargue. Aujourd'hui, la surface totale des rizières dans le monde est d'environ 110 millions d'hectares et la production annuelle est de 2,5 milliards de quintaux, dont 95 % sont fournis par l'Asie, suivie par l'Amérique (Caroline du Sud, Louisiane), l'Afrique et l'Europe (la France produit 1 200 000 q). Le riz croît bien dans les pays chauds et humides, surtout sous les climats de mousson. On le cultive éventuellement en montagne ou sur les collines, sur des terrasses et grâce à une irrigation en eau courante. On peut élever parallèlement dans l'eau des rizières certaines espèces de Poissons. Des Cyanophycées y vivant aussi fixent l'azote

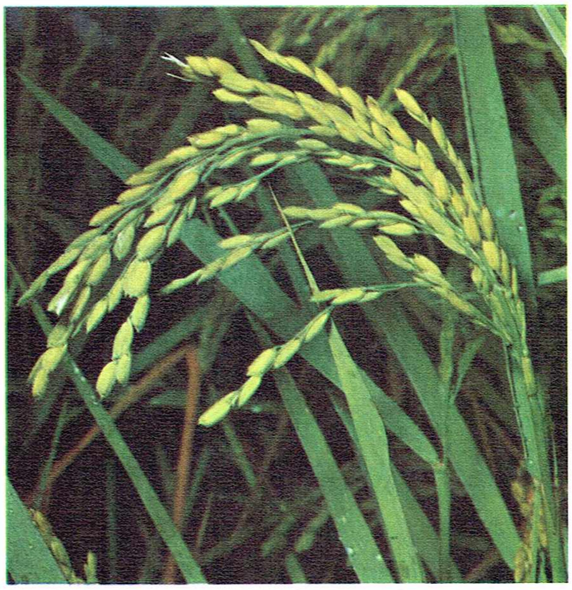
Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***L'inflorescence du riz* (Oryza sativa) *est une panicule d'épillets ; à droite, aspect au début de la floraison ; à gauche, à maturité.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ ***La culture du riz nécessite une bonne irrigation durant toute la période de croissance ; au moment de la moisson, on assèche la rizière.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

G.P. Mondino

▲ *Deux types d'inflorescences de Graminées : à gauche, épi d'épillets d'*Agropyrum caninum*; à droite, panicule d'épillets de* Festuca heterophylla.

▼ *Les roseaux* (Phragmites communis) *peuvent constituer au bord des eaux de grands peuplements appelés phragmitaies.*

atmosphérique et améliorent le sol. Les rizières d'Europe se peuplent de plantes adventives intéressantes qui ne se maintiennent généralement pas dans nos régions. Lorsque le sol a été labouré, on procède, au printemps, à la transplantation des jeunes plants, que l'on a d'abord élevés en pépinière pendant quarante à cinquante jours. Puis le terrain est recouvert de 10 cm d'eau environ; pendant tout l'été, on effectue des irrigations répétées avec de l'eau éventuellement préchauffée à 20 °C - 24 °C. Entre-temps, le sol est sarclé. En automne, on assèche la rizière et l'on procède à la moisson. On obtient, par battage, des caryopses qui constituent le riz brut (riz complet, riz *paddy*), auxquels adhèrent encore les glumelles, puis, par décorticage mécanique, on opère la séparation du grain : c'est le riz cargo. Par frottement, on enlève les téguments, l'embryon et une partie de la couche à aleurone et on obtient le riz poli. Enfin, par traitement au glucose et au talc, se prépare le riz glacé. Les glumelles séparées servent de combustible; les autres sous-produits sont utilisés pour l'alimentation de la volaille et du bétail. Un quintal de riz brut donne environ 66 kg de riz poli. Ce riz, utilisé dans l'alimentation, est constitué par 80 % d'amidon, 12 % d'eau, 7 % de protéines, et des traces de matières grasses. Pendant le « polissage », il a perdu une grande partie des protéines, des sels et des vitamines qu'il contenait. La consommation presque exclusive de riz poli était, on le sait, la cause du béribéri, maladie due à la carence en vitamine B_1. Le riz ne fournit pas de farine panifiable. On l'utilise donc cuit de la même façon que les pâtes. On s'en sert, après hydrolyse de l'amidon par des Champignons, pour fabriquer des boissons alcooliques comme le saké japonais ou le choum-choum de Chine et d'Indochine. En outre, on en extrait l'amidon de riz. Sa paille sert à la préparation de papier.

Parmi les quinze espèces du genre *Leersia,* dont l'aire est très vaste, *L. oryzoides* est indigène en France, comme ailleurs en Europe, en Asie et en Amérique du Nord. Il existe six étamines chez les *Leersia,* mais il n'y a pas de glumes.

Dans la sous-famille des *Festucoïdées,* les épillets comportent soit une, soit de nombreuses fleurs hermaphrodites. Souvent le rachis (axe) de l'épillet se prolonge après avoir porté la dernière fleur. Il y a deux glumes qui, comme la glumelle inférieure, peuvent être aristées. La glumelle supérieure est bicarénée, sauf de très rares exceptions. Nos plantes fourragères appartiennent à ce groupe.

Chez les Poées, les épillets sont hermaphrodites et tombent ensemble. Ils sont du type classique et les fleurs ont le plus souvent, et au maximum, trois étamines.

Le genre *Poa,* qui comprend trois cents espèces de pâturins, est très répandu dans toutes les régions extra-tropicales. Les épillets sont en panicules et ont au moins deux fleurs (parfois une seule chez *P. nemoralis*). Les glumelles inférieures ne sont pas aristées, mais sont fréquemment velues à la base, sur les bords et sur le dos, qui est caréné. *P. annua* est une herbe cosmopolite qui ne dépasse pas 30 cm et porte une panicule lâche. *P. pratensis* atteint 1 m et sa panicule est plus dense; sa couleur est vert sombre. Ses glumelles inférieures sont très longuement velues à la base et souvent violacées; la ligule est courte et tronquée. C'est une plante apomictique, vivace, à stolons souterrains et à pousses basales, et l'une des plus importantes plantes fourragères. Il habite l'Eurasie et l'Amérique du Nord.

Les *Festuca* (fétuques) sont aussi d'excellentes plantes fourragères. Au nombre de deux cents, ils sont annuels ou surtout vivaces. Les feuilles sont souvent de formes différentes, avec un limbe plat ou enroulé. Les épillets possèdent deux fleurs ou plus et sont réunis en panicules

C. Bevilacqua

assez serrées. Les glumes et glumelles inférieures ne sont ni carénées ni aristées, mais les glumelles peuvent avoir une arête terminale. Ces plantes très polymorphes font l'objet de nombreux travaux à l'heure actuelle. *F. pratensis* atteint 1,20 m et habite l'Eurasie. Il a des feuilles munies d'oreillettes glabres au niveau de la ligule, laquelle est très réduite. Ses épillets sont mutiques (sans arêtes). *F. rubra*, d'Eurasie et d'Amérique du Nord, est un peu plus petit et porte aussi des oreillettes, mais sa panicule est souvent rougeâtre, ses glumelles inférieures sont un peu aristées et ses feuilles basales sont enroulées. *F. ovina* est une plante d'Eurasie qui ne dépasse pas 50 cm. Ses feuilles sont toutes enroulées et souvent glauques. Les glumelles inférieures sont aristées. Elles ne le sont pas chez *F. capillata*, qui est voisin, mais limité à l'Europe occidentale.

Dans le genre voisin *Vulpia*, qui compte vingt-cinq espèces répandues sur une grande partie de la terre, les fleurs peuvent n'avoir qu'une seule étamine.

Le genre *Bromus* (bromes) comprend une centaine d'espèces. Certaines sont de médiocres plantes fourragères, d'autres sont infestantes. Elles affectionnent les sols maigres et secs, exposés au vent et au soleil. Ce sont des plantes assez élevées, à grands épillets, en panicule souvent lâche, dont les glumelles sont aristées au sommet ou en dessous, souvent très longuement. Il y a parfois deux étamines. Ce genre doit probablement être démembré en plusieurs autres.

Les brizes ou amourettes *(Briza)* sont une trentaine d'espèces d'Europe, de la moitié ouest de l'Asie et d'Amérique centrale et du Sud. Certaines sont de bonnes fourragères. Elles ont des grappes ou des panicules lâches formées de volumineux épillets aplatis pendants et tremblotants. Les glumelles mutiques sont presque à angle droit avec l'axe de l'épillet. Il y a trois espèces en France. *B. media* et *B. minor* ont une panicule ; chez le premier, les ligules sont courtes ; chez le second, elles sont allongées. Les épillets forment une simple grappe chez *B. maxima*.

Les huit espèces du genre *Cynosorus* ou crételles sont européennes et méditerranéennes, et se retrouvent jusqu'en Asie centrale. Certaines sont de bonnes fourragères. Les panicules compactes, dont les rameaux ont des épillets stériles basaux et les autres fertiles, ont l'aspect d'une queue velue, surtout chez *C. echinatus*, à glumelles inférieures longuement aristées. *C. cristatus* a des arêtes très courtes. Ce dernier occupe toute l'aire du genre, tandis que le premier est surtout méditerranéen, quoiqu'il soit présent dans toute la France.

Le genre *Dactylis* ne compte que six espèces. *D. glomerata* est une excellente plante fourragère atteignant 1,20 m, qui se trouve jusqu'à l'étage montagnard et a été répandue sur toute la terre. Les panicules sont formées de glomérules denses, vaguement triangulaires, d'épillets à glumelles inférieures un peu aristées et à glumes violacées munies de poils rudes sur la carène. Ces poils manquent chez *D. polygama (D. aschersoniana)*, à glumes blanchâtres, plante dont la distribution doit être précisée.

Chez les Arundinées, les panicules sont très fournies et les fleurs peuvent être unisexuées. Le rachis des épillets et parfois le bas des glumelles inférieures sont velus. Les glumelles inférieures sont aristées.

Six espèces d'*Arundo* sont réparties dans la région méditerranéenne et en Asie occidentale. Ce sont des plantes vivaces à rhizome tubéreux et à chaumes ligneux, à grandes feuilles et à panicules denses et élégantes de 50 cm environ, ondulant au vent. Les glumes sont égales et les glumelles inférieures velues en bas. La canne de Provence *(A. donax)* peut atteindre 6 à 7 m. Elle vit en peuplements dans les marécages et sur les berges, et possède des panicules violacées. Elle est cultivée et naturalisée en région méditerranéenne depuis l'Antiquité et provient sans doute d'Asie occidentale. Elle sert à constituer des clôtures vivantes qui protègent du vent et ses chaumes sont utilisés pour fabriquer des cannes à pêche, des tuteurs et pour extraire de la cellulose.

Les quatre espèces de *Phragmites* sont très semblables par le port aux *Arundo*, mais les glumes sont inégales et les glumelles inférieures glabres. Le roseau *(P. australis = P. communis)* est cosmopolite. Il peut atteindre 12 m sous les tropiques et en Allemagne du Nord *(subsp. pseudodonax)* ou bien n'avoir que 10 cm de haut. Sa taille habituelle est de 1 à 4 m.

T. Sacco

▲ ***Une Graminée du Brésil, l'herbe des pampas* (Gynerium argenteum = Cortaderia argentea) *souvent cultivée dans les jardins pour la beauté de ses grandes panicules.***

L'herbe des pampas *(Cortaderia argentea = Gynerium argenteum)*, du Brésil et du nord de la Patagonie, est cultivée dans les jardins pour ses grandes panicules blanches plumeuses, dont on fait aussi des bouquets perpétuels. C'est l'une des douze espèces de ce genre d'Amérique du Sud et de Nouvelle-Zélande.

Le genre *Lolium* comprend quarante espèces d'Eurasie et d'Afrique du Nord, à épis d'épillets sessiles, multiflores, présentant leur tranche du côté du rachis, et munies seulement de la glume externe (supérieure). L'hybridation est possible avec plusieurs *Festuca* ; il en résulte des × *Festulolium*. Certaines ivraies sont fourragères ou incorporées aux gazons, comme le ray-grass anglais *(L. perenne)*, eurasiatique, et le ray-grass d'Italie *(L. multiflorum)*, européen et atteignant l'Asie centrale. *L. temulentum* est

Archives P2

▲ *Le blé* **(Triticum sp.),** *déjà connu avant l'âge du bronze, compte actuellement environ trente mille formes cultivées.*

aussi eurasiatique ; ses glumes sont plus longues que les épillets. Il est devenu assez rare, mais se trouve encore dans les champs d'avoine. Il contient des alcaloïdes mal connus et abrite un Champignon symbiotique jusque dans ses fleurs et ses caryopses *(Chaetonium)*. Ces deux faits sont peut-être responsables de la toxicité de ses grains qui causent une somnolence et une démarche ébrieuse, d'où la nécessité de « séparer l'ivraie du bon grain ». Le fourrage est également toxique pour les Animaux.

Chez les Triticées ou Hordées, les inflorescences sont des épis vrais d'épillets ou en ont l'aspect. Les épillets sont sessiles, solitaires ou par deux ou trois aux nœuds de l'axe de l'épi, qui se fragmente parfois à la maturité. Il y a trois étamines. Glumes et glumelles inférieures sont souvent aristées.

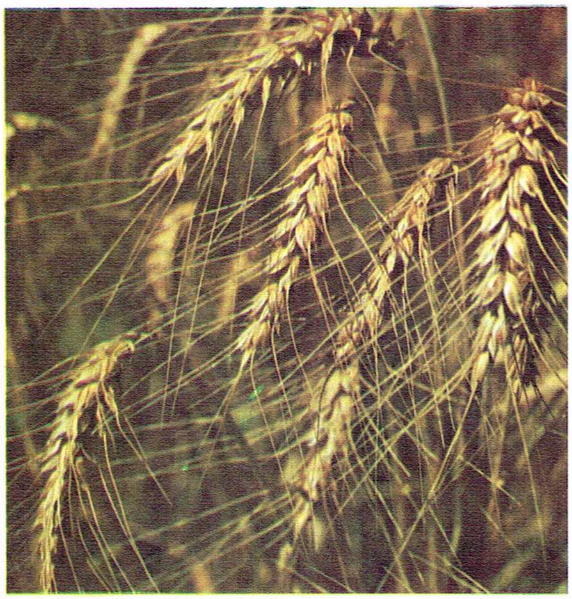

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ **Triticum turgidum,** *un blé à glumes munies d'une très longue arête.*

Le genre *Triticum* comprend le blé ou froment, dont la culture fort ancienne était déjà pratiquée avant l'âge du bronze. Il semble y avoir à peine une vingtaine d'espèces de blés. Ce sont des plantes annuelles qu'on sème à l'automne (blé d'hiver) ou au printemps (blé de printemps). Elles peuvent dépasser 1,50 m et leurs feuilles ont des oreillettes ciliées. L'épi est constitué de deux rangées d'épillets sessiles aplatis, avec de deux à cinq fleurs offrant leur face latérale du côté de l'axe de l'épi, comme chez les chiendents. Une ou deux fleurs terminales de l'épillet sont mâles ou stériles. L'axe de l'épi est cassant ou, chez les formes cultivées, tendre et résistant. Les glumes sont souvent longuement aristées près du sommet. Le grain tombe entouré de ses glumes supérieures et inférieures, ou bien à l'état nu, ces dernières restant sur l'épi. Il y a environ trente mille formes cultivées de blés, qui doivent être rassemblées en trois groupes d'espèces.

Les *Monococca* comprennent surtout *T. monococcum* ou engrain, originaire d'Asie Mineure et cultivé en Europe depuis l'époque préhistorique jusqu'à une date récente. Il a quatorze chromosomes. Son grain reste enveloppé par les glumelles.

Les *Dicoccoidea* ont vingt-huit chromosomes et proviennent d'Éthiopie, d'Afrique du Nord et d'Asie Mineure. Ils comprennent notamment *T. durum*, le blé dur, cultivé dans les pays méridionaux ; son chaume possède une moelle ; ses épis sont denses et ses grains libres sont riches en gluten (jusqu'à 15 %). Sa farine sert à la préparation des pâtes alimentaires. *T. turgidum* et *T. polonicum*, à grain libre, et *T. dicoccum*, à grain enveloppé, appartiennent aussi à ce groupe.

Mais la plupart des blés cultivés, ou blés tendres, ont quarante-deux chromosomes, des chaumes creux, des épis relativement lâches et des grains riches en amidon ; ils appartiennent au groupe des *Speltoidea* et proviennent probablement d'Asie centrale, du nord-ouest de l'Inde et aussi peut-être d'Europe. Ils ne sont pas connus à l'état sauvage. Chez *T. spelta* (épeautre), le grain est enveloppé ; il est le plus souvent libre dans les innombrables formes cultivées, qui appartiennent à l'espèce *T. aestivum (T. vulgare)*. Parmi celles-ci, les blés d'hiver ont des glumelles inférieures mutiques, tandis qu'elles sont aristées chez les blés de printemps. Dans les deux cas, l'axe de l'épi n'est pas cassant alors qu'il l'est chez *T. spelta*.

Le blé a besoin d'un sol profond, si possible argileux et calcaire à la fois, avec un climat où les pluies ne sont pas trop abondantes (moins de 1,10 m) ; mais il supporte bien le froid, les fortes chaleurs et les pluies de printemps. C'est la plante la plus cultivée sur la terre, et on en produit 260 millions de tonnes par an. Le blé croît dans la zone tempérée et froide, jusque vers 60° de latitude nord et entre 27° et 40° de latitude sud.

On sépare les grains de la paille par le battage, effectué aujourd'hui mécaniquement en même temps que la moisson. La paille est utilisée dans l'industrie du papier et comme litière pour le bétail. La farine sert avant tout à la fabrication du pain ; on l'obtient par tamisage après la mouture. Si le son est conservé, on a un produit comprenant plus de protides et de lipides, qui permet de faire du « pain complet », aliment plus nutritif que le pain blanc, contenant surtout de l'amidon. Avec une farine enrichie en gluten (75 %), on prépare du pain pour les diabétiques ; le son est employé pour l'alimentation animale. A partir des grains fermentés, on produit des boissons alcoolisées (vodka, whisky).

Dans les régions septentrionales (jusque vers 69,5° de latitude nord) et montagneuses (jusqu'à plus de 2 200 m) à climat froid et humide et où le blé a des difficultés à pousser, il est remplacé dans l'alimentation humaine par une céréale mineure, le seigle *(Secale cereale)*, originaire du sud-ouest de l'Asie. C'est l'une des cinq espèces de ce genre des régions de la Méditerranée orientale, d'Asie centro-occidentale et d'Afrique du Sud. Il mûrit en un court laps de temps et supporte bien les basses températures. Les oreillettes des feuilles sont glabres et les épillets ont deux fleurs seulement, avec des glumelles inférieures longuement aristées (jusqu'à 8 cm). Le seigle, qui comporte aussi diverses variétés, est utilisé, pur ou mélangé au blé, pour la panification et l'alimentation du bétail. Soumis à la fermentation et à la distillation, il donne, dit-on, le meilleur whisky. Il est attaqué par le Champignon *Claviceps purpurea* (ergot du seigle) qui envahit les fleurs

et qui produit des sclérotes dépassant des épis. Leur absorption cause une grave maladie assez répandue autrefois. Le Champignon, on l'a vu, produit des alcaloïdes indoliques vasoconstricteurs et antihémorragiques. Lorsqu'il se trouvait mélangé par accident à la farine, il provoquait des intoxications (mal des ardents).

Le genre *Agropyrum* comporte une centaine d'espèces qui diffèrent des blés par leur épi lâche et plat et leur caractère vivace. Certaines s'hybrident avec les blés. Le chiendent *(Agropyrum repens)* est une plante traçante parfois glauque que l'on rencontre en Eurasie. Les glumes atteignent les trois quarts de la longueur de l'épillet et les arêtes des glumelles sont courtes ou manquantes. Le rhizome très envahissant fournit un décocté diurétique.

Chez les orges *(Hordeum),* au nombre de vingt-cinq dans l'hémisphère Nord et dans les régions extratropicales de l'Amérique du Sud, les épillets sont uniflores et groupés par trois à chaque nœud de l'épi. S'ils sont fertiles, on aura six rangées de fleurs comme chez *H. vulgare* ou escourgeon ; si seule la fleur centrale de chaque trio est fertile, il n'y en aura que deux (*H. distichum* ou paumelle). Les glumelles sont en croix par rapport aux glumes aristées et sont elles-mêmes longuement aristées dans les espèces françaises. Les caryopses sont renfermés dans les glumelles, auxquelles ils sont soudés. Les deux espèces citées sont cultivées jusqu'à 70° de latitude nord et jusqu'à 2 000 m d'altitude dans les Alpes. Elles sont originaires d'Afrique orientale. Cultivée depuis la plus haute antiquité, l'orge est actuellement la quatrième céréale du monde, et on en produit annuellement cent millions de tonnes. *H. vulgare* se sème en automne, *H. distichum* au printemps. L'orge préfère les sols fertiles et meubles, surtout calcaires, et on la cultive de façon semblable au blé. Elle est utilisée pour l'alimentation du bétail et comme succédané du café. Le malt (orge germée tuée à assez basse température pour laisser actives les enzymes qui hydrolysent l'amidon, puis moulue) sert à la fabrication de la bière et de certains whiskies (une distillation suit alors la fermentation alcoolique). C'est aussi un aliment de régime, plus assimilable que la farine puisqu'en partie hydrolysé. *H. murinum,* dont les glumes sont ciliées, est indigène en France. C'est principalement une plante méditerranéenne ; elle est annuelle. *H. secalinum,* également indigène en France, est vivace et ses glumes ne sont pas ciliées.

Les Avénées forment des panicules dont les épillets peuvent posséder deux fleurs ou plus. Le rachis de l'épillet se casse en général à la maturité au-dessus des glumes et entre les glumelles inférieures, séparant ainsi les fleurs. Ces glumelles sont habituellement aristées, et l'arête est dorsale, genouillée et spiralée. L'amidon est formé de grains composés.

Les trente-cinq *Avena* (avoines) sont des plantes annuelles à panicules lâches, avec de grands épillets constitués de deux à six fleurs et pendants après la floraison. L'avoine *(A. sativa),* sans doute originaire d'Orient, est largement cultivée. Les rameaux de sa panicule sont étalés et pendants en tous sens ; les épillets ne se séparent pas spontanément à la maturité. L'avoine est utilisée comme fourrage vert, comme source de paille et pour son grain, dont on produit cinquante millions de tonnes par an et qui est spécialement recherché pour l'alimentation des chevaux. Le gruau d'avoine (grain dénudé superficiellement), éventuellement écrasé (flocons), sert aussi à l'alimentation humaine. *A. fatua* et *A. barbata,* d'origine méditerranéenne et ouest-asiatique, sont indigènes en France, et leurs épillets se fragmentent spontanément à la maturité. Chez le premier, maintenant répandu un peu partout, la panicule est radiée ; elle est unilatérale chez le second. Une vingtaine d'espèces vivaces à épillets non pendants, jadis placées dans le genre *Avena,* forment maintenant le genre *Helictotrichon,* qui occupe surtout l'Europe et la région méditerranéenne.

Le fromental ou fenasse *(Arrhenatherum elatius)* est l'une des cinquante espèces du genre. Il ressemble à l'avoine, mais possède de grandes panicules d'épillets à deux fleurs, l'inférieure étant mâle et la supérieure hermaphrodite. C'est une plante d'Europe et d'Asie occidentale très utilisée comme fourrage. Chez une forme de cette espèce, le rhizome est renflé en chapelet de petits tubercules correspondant à autant d'entre-nœuds.

Les *Agrostis* sont environ deux cents espèces vivaces répandues un peu partout. Les épillets uniflores atteignent rarement 4 mm. *A. stolonifera (A. alba)* a des panicules

G.P. Mondino

▲ **Hordeum murinum** ***est une orge indigène en France.***

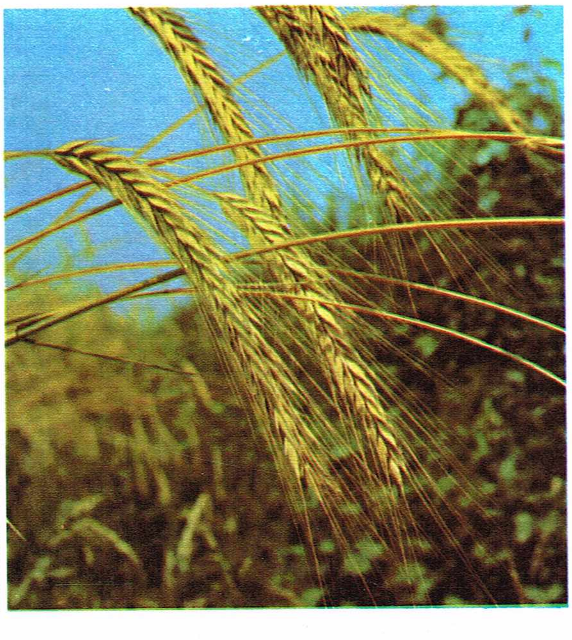

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

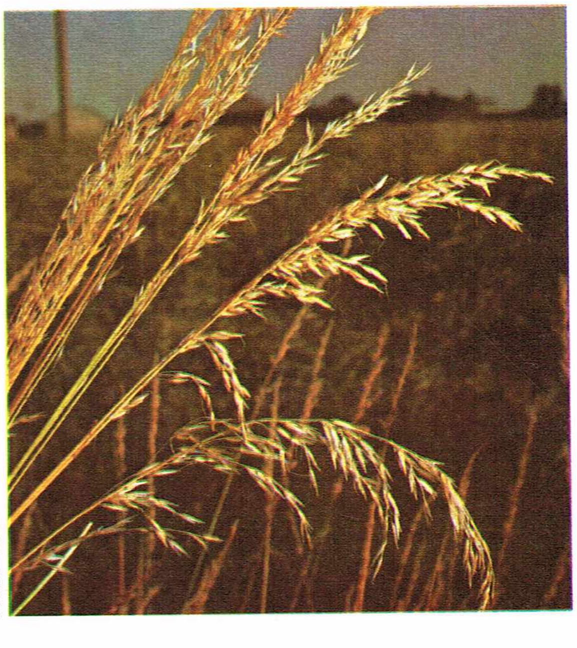

Archives P2

◀ ***L'épi du seigle,*** **Secale cereale,** ***est pourvu de longues arêtes (à gauche) ; chez*** **Agrostis stolonifera,** ***les fleurs sont regroupées en panicules blanchâtres ou rougeâtres.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Touffes d'oyat* (Psamma arenaria) ; *cette Graminée est utilisée pour fixer les dunes.***

blanchâtres ou rougeâtres et des ligules allongées et aiguës. Il occupe une grande partie de l'hémisphère Nord. C'est une plante pionnière des terrains humides. *A. tenuis (A. vulgaris)* a une ligule courte et tronquée. Il est surtout eurasiatique et se rencontre dans les bois et les prés jusqu'à l'étage subalpin.

Les trois espèces du genre *Apera* sont annuelles. *A. spica-venti* est une plante d'Europe et du centre-ouest de l'Asie qui aime les terrains sableux. Il a de grandes panicules violacées ou verdâtres à rameaux étalés à la floraison. Les épillets uniflores de 2 mm ont des glumelles inférieures à longue arête. Il y a chez cette espèce un prolongement de l'axe de l'épillet au-dessus de l'insertion de la fleur. Ce prolongement porte une seconde fleur chez *Aira,* et chez *Deschampsia* l'axe se continue au-dessus de la deuxième fleur pour en former encore une ou deux. Ces deux derniers genres sont bien représentés en France.

Chez les Phalaridées, il y a des épillets comprimés latéralement, avec éventuellement quatre glumes, les supérieures pouvant abriter des fleurs mâles. La fleur hermaphrodite a une glumelle supérieure avec en général une nervure. L'amidon est formé de grains composés.

Le genre *Phalaris* (alpistes) comprend quinze espèces surtout méditerranéennes, à panicule spiciforme et à quatre glumes, les externes ayant une carène ailée. *P. canariensis,* d'Afrique du Nord et des îles Canaries, donne des grains servant à l'alimentation des Oiseaux. Il est naturalisé en région méditerranéenne et souvent adventice ailleurs. Ses glumes sont rayées de blanc. *Typhoides arundinacea (Baldingera arundinacea)* a été placé dans le genre *Phalaris,* mais il a des glumes externes non ailées et une panicule formée de glomérules distincts. C'est le faux roseau, commun au bord des eaux en Eurasie et en Amérique du Nord.

Chez les Stipées, les épillets sont uniflores ; il n'y a que deux glumes et les glumelles se terminent par une arête souvent très importante (30 cm de long). Il y a généralement trois glumellules ; c'est un caractère primitif.

Stipa est le genre principal avec deux cent cinquante espèces à très longues arêtes plumeuses ou nues. L'alfa *(S. tenacissima),* de l'ouest de la région méditerranéenne et absent de France, fournit une fibre et de la paille utilisées pour la fabrication de papier et de « sparteries » (le véritable spart est toutefois *Lygeum spartum*). *S. pennata* ou plumet a des arêtes plumeuses de 15 à 30 cm. C'est une plante méditerranéenne, atteignant pourtant la région parisienne et s'étendant jusqu'en Asie occidentale. Elle affectionne les terrains secs. Les arêtes glabres de *S. capillata* ne dépassent pas 15 cm. Son aire, comparable à celle de la précédente espèce, s'étend toutefois moins au nord.

Dans la sous-famille des *Éragrostoïdées,* des épillets ont généralement plusieurs fleurs, parfois beaucoup (quarante et plus), et elles sont souvent unisexuées. Il arrive que la graine soit libre ; dans ce cas, il ne se forme pas de caryopse (ainsi pour les *Sporobolus,* à épillets uniflores). Le plus grand genre est le genre *Eragrostis,* qui groupe trois cents espèces des régions chaudes ; plusieurs d'entre elles sont indigènes ou naturalisées en France. Les épillets aplatis ont de nombreuses fleurs imbriquées.

Les Chloridées comprennent une seule espèce indigène, *Cynodon dactylon,* qui appartient à un genre constitué par une dizaine d'espèces des régions chaudes. Il est aussi appelé chiendent et est envahissant par ses rhizomes. Ses épillets uniflores, avec un prolongement du rachis, sont groupés en épis unilatéraux aplatis et sont situés à la face externe de ceux-ci. Les épis sont digités par quatre à sept au sommet des tiges, qui ne dépassent pas 40 cm ; les feuilles, glauques et velues, ont des ligules de poils. D'origine sans doute méditerranéenne, il est devenu très commun dans toutes les régions tempérées et chaudes. C'est une plante fourragère dans le sud des États-Unis. Le type d'inflorescence du *Cynodon* se retrouve chez toutes les Chloridées.

La sous-famille des *Panicoïdées* est caractérisée par la présence d'épillets à une ou deux fleurs, qui se détachent en bloc de l'axe de l'inflorescence ; il y a deux glumes et deux glumelles inférieures. La première glumelle abrite une fleur mâle souvent stérile ou manquante ; la seconde, indurée, recouvre la fleur hermaphrodite. Les grains d'amidon sont simples.

Le genre *Panicum* renferme cinq cent cinquante espèces, répandues surtout dans les zones chaudes. Le millet *(P. miliaceum),* probablement originaire de l'Inde, est cultivé en Europe depuis l'époque préhistorique ; il est naturalisé dans la moitié sud de la France ; ses feuilles sont rudes, larges et velues, et ses panicules allongées, penchées et très ramifiées, comportent de très nombreux épillets relativement gros (de 4 à 5 mm). Il n'a plus guère d'importance alimentaire, même en Afrique. *P. capillare,* à panicule diffuse, étalée en tous sens, dont les rameaux très fins se terminent par de tout petits épillets (2 mm), est originaire d'Amérique du Nord ; il est cultivé pour l'ornement et parfois naturalisé.

Chez les cent vingt espèces de *Setaria* (sétaires), les panicules sont spiciformes et certaines fleurs sont remplacées par des soies souvent barbelées. Ces plantes occupent surtout les régions chaudes, mais quelques-unes sont cosmopolites ; *S. viridis, S. verticillata* et *S. glauca* sont très communs en France ; *S. italica* est le millet des Oiseaux.

Deux des quatre-vingt-dix espèces du genre *Digitaria* sont indigènes en France. Les épillets sont disposés en faux épis unilatéraux eux-mêmes plus ou moins digités. *D. sanguinalis,* plante cosmopolite, ressemble un peu à *Cynodon dactylon.*

Les *Paspalum* forment un grand genre de deux cent cinquante espèces, essentiellement d'Amérique tropicale. Ils ont des épillets discoïdaux insérés par couples sur un seul côté d'axes aplatis. Les faux épis ainsi formés sont eux-mêmes disposés en épis. Plusieurs *Paspalum* sont naturalisés en France, notamment *P. distichum,* d'introduction récente (vers 1920), mais qui est devenu un élément essentiel de la végétation de la vallée de la Loire.

Les Graminées de la sous-famille des *Andropogonoïdées* ont des épillets par paires, l'un étant sessile, l'autre pédonculé et souvent réduit. Il y a une ou deux fleurs par épillet, la supérieure hermaphrodite, l'inférieure mâle. L'épillet pédonculé est souvent uniquement mâle ou ses deux fleurs sont stériles. Parfois toutes les fleurs fertiles sont unisexuées et les inflorescences peuvent être bi- ou unisexuées. Il y a deux glumes indurées ; les fleurs ont deux glumelles minces, l'inférieure souvent aristée. Si la fleur inférieure de l'épillet manque, sa glumelle inférieure existe pourtant. Fréquemment les épillets tombent avec

I.G.D.A.

▲ *Quatre Graminées particulièrement infestantes :*
A : Panicum crus-galli ;
B : Cynodon dactylon ;
C : Setaria viridis ;
D : Agrostis spica-venti.

des fragments de l'axe inflorescentiel. Le grain est entouré des glumes indurées.

Dans divers genres, les deux épillets ont une fleur hermaphrodite. Le genre *Saccharum* compte de trois à cinq espèces. La canne à sucre *(S. officinarum),* peut-être originaire de l'Inde, est cultivée dans toutes les zones tropicales, entre 30° de latitude sud et 37° de latitude nord. Cette plante vivace, que l'on récolte dix à douze mois après la plantation, est pourvue d'un robuste rhizome qui donne au niveau des nœuds de nombreuses racines fasciculées. Il en part aussi les chaumes cylindriques, de 4 à 6 cm de diamètre, porteurs de grandes feuilles cireuses et terminés par une panicule à épillets velus à la base. Les chaumes sont remplis de moelle et contiennent entre 15 et 20 % de saccharose.

On cultive sur des sols fertiles et perméables des variétés de canne à sucre riches en saccharose. La température optimale est située entre 20 °C et 25 °C, et elle ne doit jamais être inférieure à 4 °C ; les précipitations doivent atteindre au moins 1 000 mm par an. La multiplication se fait par boutures. Les chaumes, coupés avant la floraison, et débarrassés de leurs feuilles, sont rapidement envoyés aux sucreries afin d'empêcher l'hydrolyse du saccharose. Le jus (vesou) est traité par la chaux pour éliminer les acides et les protéines. Il est décoloré puis concentré ; la cassonade, sucre brut, précipite alors. Elle est ensuite raffinée en sucre blanc. La production annuelle de sucre est de plus de trente-cinq millions de tonnes. Après fermentation, les mélasses résiduelles donnent le rhum.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ *On extrait du chaume de la canne à sucre* **(Saccharum officinarum)** *un jus qui, après divers traitements, donnera le sucre.*

▶ ***Le sorgho ou mil* (Sorghum) *est une céréale très cultivée dans les pays chauds.***

Dans d'autres genres, l'épillet pédonculé de chaque paire est mâle ou stérile. Le genre *Sorghum* (sorgho ou mil) comprend vingt-cinq espèces des régions chaudes. La panicule est composée de faux verticilles d'épis de paires d'épillets. Les glumelles inférieures sont aristées; les grains sont diversement colorés. *S. halepense* est méditerranéen, mais répandu aussi dans les zones chaudes. *S. durrha*, originaire du nord-est de l'Afrique et de l'Inde, *S. caffrorum*, d'Afrique du Sud, *S. nervosum*, de l'est de l'Asie, *S. dochna*, de l'Inde, et *S. cernuum*, de l'ouest de l'Asie, sont également cultivés. Les sorghos sont des céréales importantes dans les pays chauds. Ce sont aussi des plantes fourragères, mais à l'état sec seulement, car la plante fraîche contient un hétéroside toxique (durrhoside). Le grain ne fournit pas de farine panifiable, mais on l'utilise pour préparer des bouillies, des gâteaux, etc. La tige de certaines formes est riche en sucre. La paille de riz provient de *S. dochna*.

Les genres *Bothriochloa, Chrysopogon* et *Heteropogon* sont surtout tropicaux, mais aussi représentés en France. *H. contortus*, plante de savanes, se rencontre dans les Alpes-Maritimes et les Pyrénées-Orientales.

Les Maydées sont des Andropogonoïdées dont les paires d'épillets unisexués sont réunies en inflorescences ou en portions d'inflorescences unisexuées. Il arrive que l'épillet pédonculé avorte. Le fruit est enveloppé par un utricule bractéal, sauf chez le maïs, tandis que les glumes restent minces.

Le genre *Zea* ne comprend que *Z. mays*, le maïs, plante herbacée annuelle, à fortes tiges atteignant 3 m. Ses feuilles sont larges et ses fleurs forment deux types d'inflorescences : les mâles en panicule terminale d'épis de paires d'épillets biflores, les femelles en épis massifs de paires d'épillets uniflores axillaires des feuilles inférieures. Il y a une ou deux inflorescences femelles par plante. Elles sont entourées par de grandes bractées, d'où font saillie les très longs styles. A maturité, l'axe des panicules devient ligneux et porte des caryopses en huit à vingt-quatre rangées longitudinales. Les grains sont jaunes, violacés ou brunâtres selon la race. Originaire d'Amérique centrale, le maïs n'est pas connu à l'état sauvage, mais est cultivé au Mexique depuis des millénaires et en Europe depuis le XVI[e] siècle (« blé de Turquie »).

Le genre *Coix* compte environ cinq espèces asiatiques, indo-malaisiennes et polynésiennes. Les *Coix* ont des inflorescences hermaphrodites dont le ou les nœuds femelles, inférieurs, possèdent des bractées axillantes, durcies, formant des sortes de perles utilisées localement comme parure. Les *Coix* servent comme plantes fourragères.

Scitaminales ou Zingibérales

Il s'agit de plantes le plus souvent herbacées, vivaces, à rhizome amylacé, parfois d'arbres ou d'arbustes portant fréquemment des feuilles dont les bases sont dressées et emboîtées en un faux tronc creux, au milieu duquel croîtra l'axe terminé en inflorescence. La fleur a une symétrie bilatérale ou bien est asymétrique; elle est trimère et possède cinq verticilles. Le périanthe de six pièces en deux cycles est pétaloïde ou différencié en calice et corolle. Les étamines sont parfois au nombre de six en deux cycles, ou de cinq avec un staminode; mais souvent il n'y en a qu'une seule fertile, et parfois à demi transformée en staminode; les autres manquent ou sont staminodiales. L'ovaire, infère, est syncarpe, tricarpellé avec trois loges ou parfois uniloculaire. Les fruits sont des baies, des capsules ou des schizocarpes. Les graines sont généralement munies d'un arille et renferment un périsperme (nucelle persistant).

La famille des *Musacées (Musaceae)* est fort importante au point de vue économique. Elle comprend six genres et deux cent vingt espèces d'herbes à gaines foliaires formant souvent un faux tronc; il y a aussi quelques formes à port arborescent. Les feuilles sont grandes, distiques ou spiralées, allongées, avec des nervures pennées, mais aussi avec deux nervures longitudinales marginales. Le bord des feuilles est souvent lacéré par le vent. Les fleurs forment des cymes ou des épis terminaux ou axillaires, avec souvent de grandes bractées, et sont pollinisées par les Oiseaux. Elles sont hermaphrodites ou unisexuées, zygomorphes, avec un périanthe pétaloïde ou différencié en calice et corolle. Il y a généralement cinq étamines fertiles et la sixième est staminodiale. L'ovaire infère et triloculaire a de nombreux ovules par loge ou un seul. Le fruit est une capsule loculicide, une baie charnue ou un schizocarpe à trois coques *(Heliconia)*; les graines sont à tégument dur.

▼ ***Le maïs* (Zea mays) *est une des rares Graminées à avoir des fleurs unisexuées; les mâles sont réunies en panicules terminales formées d'épis (à gauche), les femelles sont groupées en un ou deux épis massifs situés à l'aisselle des feuilles inférieures; elles sont entourées de bractées d'où dépassent les longs styles (au milieu); l'épi, à maturité, porte de nombreuses rangées de caryopses (à droite).***

Le genre *Musa* est le plus connu. Ses nombreuses variétés produisent les bananes. Ce sont des plantes herbacées, rhizomateuses, à faux troncs hauts de 2 à 6 m au sommet desquels s'épanouissent les limbes, qui atteignent 6 m de long et 1 m de large. Les feuilles sont insérées en spirale. Les fleurs, polygames ou toutes stériles dans les formes cultivées, ont un périanthe à cinq pièces soudées et la supérieure libre, et cinq étamines fertiles. L'inflorescence, ou « régime », est terminale et entourée de deux grandes spathes verdâtres. Elle est constituée d'un axe central, sur lequel sont insérés des groupes collatéraux de trois à huit fleurs, à l'aisselle de bractées vertes ou pourprées et spiralées. Les fruits sont des baies (bananes) à odeur agréable, due surtout à la présence d'acétate d'amyle. *M.* × *paradisiaca (M. sapientum)* est l'hybride *M. acuminata* × *M. balbisiana*. Il est originaire de l'Inde et donne des fruits sans graines, parfumés et sucrés (par hydrolyse de l'amidon), à consommer frais.

Les autres genres appartiennent à la sous-famille des *Strélitzioïdées* dont les feuilles sont distiques et les fleurs hermaphrodites.

Ravenala madagascariensis, seule espèce du genre, est l'arbre du voyageur, de Madagascar, souvent cultivé pour l'ornement. Il atteint 9 à 10 m de hauteur et porte au sommet de grandes feuilles laciniées avec de longs pétioles. Les feuilles accumulent de l'eau de pluie à leur aisselle, où le voyageur, disait-on, pouvait la recueillir. Les belles fleurs blanches sont en inflorescences latérales. Le fruit est une capsule loculicide.

Strelitzia reginae, nommé souvent oiseau de paradis, d'Afrique du Sud et de Madagascar, est l'une des quatre espèces de ce genre. Les fleurs très zygomorphes sont entourées d'une spathe. Le pétale médian interne et les deux latéraux forment une sorte de fer de flèche bleu et de grande taille, tandis que les sépales sont rouges. Le fruit est une capsule loculicide.

Le genre *Heliconia*, avec ses cent cinquante espèces, est le plus important de la famille. Il vit en Amérique. Certaines espèces sont cultivées en serre. Le fruit est un schizocarpe à cinq méricarpes uniséminés.

La famille des *Zingibéracées (Zingiberaceae)* comprend dans les régions chaudes quarante-neuf genres et quinze cents espèces de plantes herbacées vivaces ou de buissons volumineux et rhizomateux. Les feuilles, distiques ou spiralées, sont munies d'une longue gaine et d'une ligule ventrale membraneuse à la limite du pétiole et de la gaine ou du pétiole et du limbe. Les fleurs sont réunies en inflorescences terminales en épis, en têtes ou en cymes. Elles sont hermaphrodites, zygomorphes et possèdent un calice et une corolle constitués chacun de trois pièces, le pétale médian étant souvent plus grand. Seule l'étamine postérieure du verticille interne est fertile ; deux ou quatre autres sont staminodiales et pétaloïdes. Deux staminodes du verticille interne sont unis en un labelle qui entoure l'étamine par ses marges internes, et l'étamine antérieure du verticille externe manque. L'ovaire, infère, est triloculaire ou parfois uniloculaire ; son style est logé dans une rigole de l'étamine fertile et le stigmate forme souvent une coupe. Les fruits sont des capsules ou des baies.

La plupart des espèces appartiennent à la sous-famille des *Zingibéroïdées*, où les feuilles sont distiques et à gaine ouverte.

Le genre *Zingiber* comprend parmi ses quatre-vingt-cinq espèces le gingembre *(Z. officinale)*, cultivé dans les régions tropicales pour son rhizome utilisé comme condiment ; il contient notamment une essence riche en terpènes (phellandrène, citral, etc.) et une résine piquante par sa zingérone en particulier. Il a des propriétés stimulantes et stomachiques, mais n'est guère utilisé en France.

Les fruits d'*Amomum cardamon*, de Java, et d'*Elettaria cardamomum*, de l'Inde et de Ceylan, ont des emplois analogues : on s'en sert pour parfumer des aliments ou des liqueurs, de même que des graines d'*Aframomum meleguetta*, d'Afrique occidentale, et du rhizome d'*Alpinia officinarum* (galanga), du sud de la Chine.

Le genre *Curcuma* habite l'Asie tropicale, l'Indo-Malaisie et le nord de l'Australie. *C. longa* fournit son rhizome, qui contient des terpènes et des substances jaunes cétoniques (curcumines) qu'on utilise comme colorant textile et alimentaire et comme réactif. Il entre, avec bien d'autres condiments, dont le gingembre, dans la composition du curry. Les rhizomes de *C. leucorrhiza*,

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Les feuilles de* Ravenala madagascariensis *sont distiques et conservent l'eau de pluie à l'aisselle de leur pétiole, où le voyageur, dit-on, peut la recueillir.***

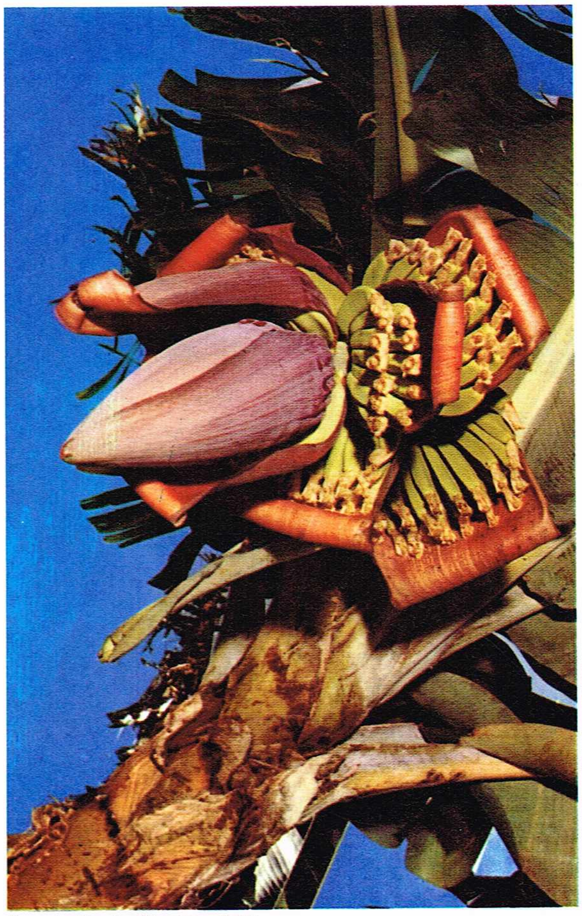

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ ***Les inflorescences de bananier (ici* Musa paradisiaca*) sont constituées de groupes de fleurs insérées autour d'un axe et protégées par des bractées enroulées ; sur ce cliché, on peut observer de jeunes bananes (baies provenant d'un ovaire infère) surmontées des restes de pièces florales.***

▶ *Le rhizome de cette plante* (Zingiber zerumbert) *fournit le gingembre de la Martinique.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

C. rubescens et *C. angustifolia* fournissent une fécule, l'arrow-root des Indes orientales. Quelques *Hedychium*, des mêmes régions, sont cultivés en serre.

La famille des *Cannacées (Cannaceae)* est constituée du seul genre *Canna*, d'Amérique tropicale, avec trente à soixante espèces, dont certaines sont naturalisées en Afrique et en Asie.

C. indica, le plus connu, est largement cultivé dans les jardins. C'est une plante rhizomateuse dont les tiges annuelles atteignent 1,50 m ; les feuilles sont penninervées et munies d'une gaine. Les fleurs, volumineuses, subsessiles, munies d'une préfeuille, sont rouges, jaunes ou mouchetées et réunies en cymes scorpioïdes, elles-mêmes rassemblées en grappes terminales. Le calice et la corolle sont formés chacun de trois pièces libres. Il y a une étamine unique à demi fertile (une moitié étant pétaloïde) et trois staminodes, dont un, opposé à l'anthère, est enroulé vers le bas et nommé labelle. L'ovaire, infère, est tricarpellaire et triloculaire, avec un style pétaloïde, et contient de nombreux ovules. Le fruit est une capsule verruqueuse. *C. edulis* est cultivé pour ses rhizomes qui sont consommés comme des pommes de terre et donnent une fécule appelée arrow-root du Queensland.

▼ *Les fleurs de* Canna *ont un calice et une corolle libres et richement colorés de rouge et de jaune.*

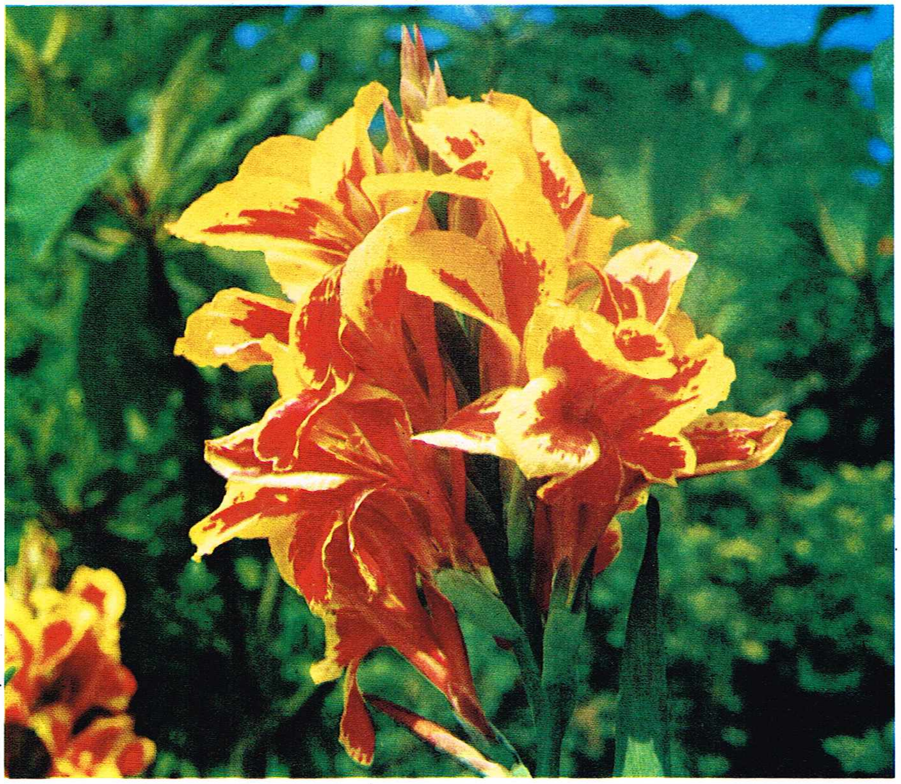

C. Bevilacqua

Les *Marantacées (Marantaceae)* comprennent trente-deux genres et trois cent cinquante espèces des régions chaudes. Ce sont des plantes herbacées, vivaces, à feuilles distiques, dissymétriques, à nervation pennée, avec une gaine et un pétiole renflé à la base du limbe. Les fleurs, hermaphrodites et dissymétriques, à calice et corolle, sont groupées en inflorescences botrytiques constituées de paires ou de grappes axillaires de fleurs. La corolle forme un tube, et l'un des pétales est plus développé. Sur les trois ou cinq étamines présentes, une seule est à demi fertile, les autres étant transformées en staminodes pétaloïdes parfois épaissis. L'ovaire, tricarpellé, est triloculaire, mais deux carpelles peuvent être réduits et stériles ; il y a un seul ovule par loge. Les fruits sont des baies, des capsules ou des akènes.

Chez les Phryniées, il y a trois carpelles fertiles et trois loges à l'ovaire. Le genre *Calathea*, d'Amérique, est le plus important avec cent cinquante espèces. *C. zebrina* est une plante d'appartement à feuilles tachées de sombre et généralement assez allongées.

Chez les Marantées, il n'y a qu'un carpelle fertile. Le genre *Maranta* est aussi originaire d'Amérique tropicale et compte une trentaine d'espèces. *M. arundinacea* fournit par ses rhizomes une fécule alimentaire (arrow-root des Antilles). Il habite du Brési! occidental à l'Amérique centrale et il est cultivé sous les tropiques. *M. bicolor*, des mêmes régions, est très cultivé en appartement pour ses feuilles suborbiculaires à taches foncées.

La famille des *Lowiacées*, qui comprend un seul genre, a une position systématique assez problématique.

Orchidales

Cet ordre ne comprend que l'immense famille des *Orchidacées* (Orchidées), la plus grande du règne végétal, qui comprend environ vingt mille espèces, souvent fort étranges, surtout tropicales et subtropicales, mais présentes un peu partout et avec des exigences écologiques diverses. Ce sont des plantes herbacées vivant sur le sol (Orchidées terrestres) ou croissant sur les arbres des forêts (Orchidées épiphytes) ou encore dépourvues de chlorophylle et vivant dans l'humus (Orchidées saprophytes). Les formes terrestres ont souvent des racines adventives tuberculeuses et leur tige se termine en inflorescence botrytique. A l'aisselle d'une écaille inférieure de cette tige se forme le bourgeon de l'année suivante, déjà muni de son tubercule de racines adventives (ramification sympodiale). Les épiphytes sont fréquemment pourvues d'une tige gonflée aux entre-nœuds ; si un seul d'entre eux est renflé, on a un pseudo-bulbe. La tige présente une ramification monopodiale ou sympodiale et porte des racines adventives éventuellement aériennes et pendantes. Ces dernières, grâce à une couche superficielle pluristratifiée formant manchon *(velamen)*, absorbent l'humidité atmosphérique ; leur extrémité est verte. Les feuilles alternes, distiques, à nervures parallèles, sont réduites chez les saprophytes à des écailles charnues. Il existe des Orchidées lianoïdes comme la vanille, qui ont des racines dans le sol, alors que leurs tiges volubiles s'attachent aux supports les plus divers, en émettant des racines aériennes. Les fleurs, hermaphrodites et zygomorphes, solitaires ou réunies en épis, en grappes ou en panicules, subissent très souvent une torsion caractéristique de 180° appelée résupination ; le côté initialement supérieur passe donc en bas. Cela se produit souvent par torsion de l'ovaire, qui se redresse en mûrissant, mais le pédoncule floral peut lui aussi être responsable de ce phénomène. Les deux cycles du périanthe sont formés de six pièces colorées mais de morphologie différente. Le plus souvent, le pétale supérieur (inférieur après résupination) est de forme et de couleur différentes, et parfois fort complexe ; c'est le labelle. Il peut être éperonné, sacciforme, porteur des lamelles, etc. Il y a parfois trois étamines : la médiane postérieure du cycle externe et les deux latérales postérieures du cycle interne (avant résupination) ; mais dans la plupart des cas seules existent à l'état fertile les deux dernières (Orchidées diandres), ou surtout la première (Orchidées monandres), l'autre ou les deux autres étant staminodiales. L'ovaire, infère, est constitué de trois carpelles ; il est parfois trilo-

I.G.D.A - Archives B

◀ *Les fleurs d'Orchidacées sont zygomorphes avec deux cycles périanthaires; la fleur subit une torsion de 180° appelée résupination, et le pétale supérieur devenu inférieur présente souvent une forme différente : c'est le labelle. Ici, fleur de* Cymbidium.

C. Bevilacqua

▲ *Fleur de* Laeliocattleya.

culaire, mais le plus souvent uniloculaire, ce qui est un caractère évolué. Les ovules sont très nombreux. Chez les monandres, le style est soudé au filet staminal en un appareil colonnaire, ou gynostème, tandis que l'un des stigmates, ou rostellum, est stérile et empêche l'autofécondation des deux autres. Les grains de pollen sont rarement libres; ils sont plus généralement en tétrades, elles-mêmes groupées en petites masses ou massules ou en pollinies, plus volumineuses, au nombre de quatre ou deux, parfois fragmentées. Il peut y avoir un ou deux pédoncules pour les pollinies, avec une partie basale (rétinacle) qui sert à faire adhérer le pollen au corps des Insectes pollinisateurs. C'est le rostellum qui produit ces formations. L'anthère elle-même forme une « queue » (caudicule) aux pollinies chez les Ophrydées. Les fruits sont des capsules uniloculaires à trois ou six valves remplies d'innombrables petites graines dont l'une pèse environ 0,005 mg. Il n'y a pas d'albumen, sauf parfois quelques noyaux. L'embryon est indifférencié ou presque et germe d'abord en un protocorme, sorte de tubercule indifférencié. Pour que cette germination ait lieu, il faut généralement que l'embryon soit envahi par les hyphes d'un Champignon symbiotique *(Rhizoctonia)* qui fournit à la plantule en formation des éléments énergétiques et, sans doute, vitaminiques. En l'absence de Champignon, on peut obtenir la germination de la graine en utilisant notamment des milieux sucrés et vitaminés; cette méthode

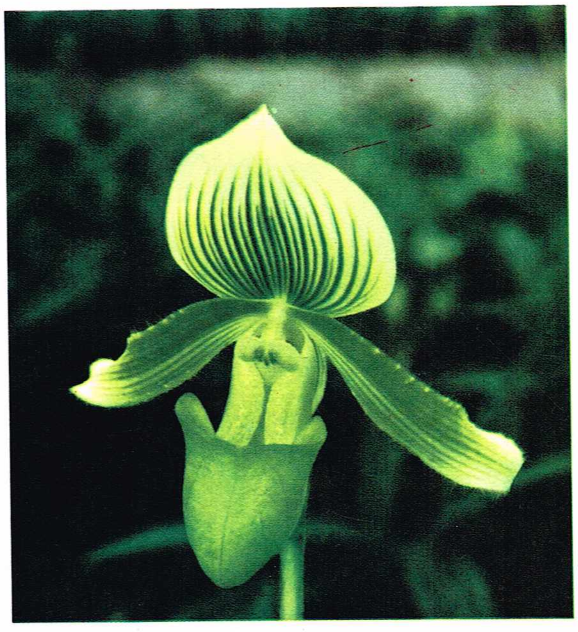

C. Bevilacqua

◀ *Chez* Cypripedium, *le labelle très développé forme une sorte de sabot.*

est utilisée pour l'obtention d'hybrides d'Orchidées. La plante adulte peut encore abriter le Champignon au moins de façon périodique, lorsqu'elle produit un nouveau tubercule. Chez les saprophytes *(Neottia, Limodorum)*, le Champignon est toujours présent dans les racines. Les racines parasitées des Orchidées sont des mycorrhizes endotrophes : le Champignon est intracellulaire et l'hôte résiste à sa pénétration excessive en le digérant. La pollinisation se fait très généralement grâce à des Insectes, parfois des colibris, mais il y a quelques cas d'autofécondation. Généralement, les pollinisateurs sont attirés par l'odeur, par la couleur et la forme du labelle et par la présence de nectar. Pour arriver aux nectaires, l'Insecte ou le petit Oiseau se frotte contre les pollinies qui adhèrent à lui directement ou par les disques de leurs pédoncules et s'attachent aux stigmates lorsque l'Animal visite une nouvelle fleur. Chaque ovule est fécondé par un tube pollinique et cela nécessite une grande quantité de pollen. La maturation de la capsule est souvent très longue.

Les Orchidées sont cosmopolites, avec une prépondérance de formes épiphytes dans les régions tropicales et de formes terrestres dans les zones tempérées et arctiques. Il existe une vingtaine de genres dans notre flore. Les espèces tropicales font l'objet d'un commerce actif en tant que plantes entières et fleurs coupées.

La sous-famille des *Cypripédioïdées* comprend des Orchidées à deux ou trois étamines et le style est libre au-dessus ; il n'y a pas de gynostème vrai, pas plus que de rostellum : les trois stigmates sont réceptifs. Ce sont des plantes à rhizome sympodial.

Chez les Apostasiées, dont on peut faire la famille des *Apostasiacées,* les fleurs sont presque actinomorphes et il y a deux ou trois étamines fertiles. L'ovaire est triloculaire. Il s'agit des genres *Apostasia,* à deux étamines, et *Neuwiedia,* à trois étamines, regroupant seize espèces d'Indo-Malaisie et d'Australie tropicale.

Chez les Cypripédiées, la zygomorphie est très prononcée et il y a deux étamines fertiles (les latérales antérieures du verticille interne). Le labelle a la forme d'un sac. Chez les *Selenipedium* et les *Phragmipedium* des régions chaudes d'Amérique, l'ovaire est encore triloculaire. *P. caudatum* doit sa célébrité à ses pétales latéraux qui atteignent 50 cm de longueur.

Dans les autres genres, l'ovaire est uniloculaire. Le genre *Cypripedium* comprend cinquante espèces d'Orchidées terrestres des régions tempérées et subtropicales de l'hémisphère Nord, dont une existe dans notre flore. Le sabot-de-Vénus *(C. calceolus)* fleurit de mai à juillet dans les forêts de montagne d'Eurasie tempérée, sur sol calcaire. C'est une plante très cueillie qui devient rare. Elle possède de deux à quatre feuilles ovales-aiguës, sessiles, alternes sur sa tige. Celle-ci atteint 50 cm et se termine par une grande fleur généralement unique, à labelle jaune en forme de sabot, avec des sépales et des pétales latéraux aigus et colorés de brun-rouge. Parmi les cinquante *Paphiopedilum* d'Indo-Malaisie et d'Extrême-Orient, certains sont cultivés et souvent confondus avec les *Cypripedium,* mais ils en diffèrent par les tépales caducs et leurs feuilles pliées et non pas roulées dans le bourgeon. *P. barbatum* et *P. callosum* sont particulièrement utilisés pour leurs fleurs solitaires et de longue durée. Ce sont aussi des plantes terrestres, rarement épiphytes, qui vivent dans les milieux les plus divers, de l'Himalaya à la forêt tropicale.

La sous-famille des *Orchidoïdées* ou *Monandrées* est composée de plantes à fleurs zygomorphes avec une seule étamine fertile et deux stigmates réceptifs, le troisième étant transformé en rostellum.

Les Ophrydées se rencontrent dans les régions tempérées. Les pollinies ont des caudicules et l'anthère est terminale et persistante. Il s'agit surtout d'Orchidées terrestres à tubercules racinaires. On les trouve généralement avec deux tubercules basaux ; l'un, en partie vidé de ses réserves, a servi à la croissance de la pousse de l'année ; l'autre est formé d'une ou plusieurs racines adventives et du bourgeon, axillaire d'une écaille de la pousse de l'année, qui donnera la pousse de l'année suivante.

Le genre *Orchis,* qui comprend une centaine d'espèces, est le plus important. Ses petites fleurs sont réunies en un épi ou en une grappe plus ou moins lâches terminant chaque pousse annuelle. Les fleurs sont à l'aisselle de bractées et ont un labelle éperonné, divisé en trois à cinq lobes et brièvement soudé au gynostème. Les autres pièces du périanthe sont partiellement rapprochées en casque. C'est le genre le plus abondant en Europe ; il se rencontre en Asie tempérée et en Afrique du Nord, et a quelques représentants en Amérique du Nord. Des tubercules de certaines espèces, comme *O. morio, O. mascula* et *O. saccifera,* on tire le salep, substance amylacée et mucilagineuse considérée comme reconstituante. Il est difficile de cultiver les *Orchis,* sans doute à cause de la nécessité du Champignon symbiotique pour la formation du nouveau tubercule annuel ; il faut les transplanter dans une grosse motte de leur terre d'origine, avec l'espoir d'« ensemencer » aussi le Champignon.

Le genre *Ophrys* est semblable aux *Orchis,* mais le labelle n'a pas d'éperon. Il y a une vingtaine d'espèces en Europe, dans la région méditerranéenne et dans l'ouest de l'Asie. Les labelles y ont des formes d'Insectes, d'où les noms d'*O. apifera, O. insectifera (O. muscifera)*, etc. Effectivement, on voit des Insectes mâles, attirés par des labelles, tenter des manœuvres de copulation, d'autant plus qu'ils sont aussi attirés par une odeur identique à celle de leur femelle. L'attraction des pollinisateurs est ici très raffinée.

Les *Serapias* comprennent une dizaine d'espèces terrestres des régions méditerranéennes et d'Asie occidentale, dont on connaît des hybrides avec le genre *Orchis*. Les pièces du périanthe, à part le labelle, sont conniventes ou dressées et il n'y a qu'un seul rétinacle. Les fleurs sont d'un rouge vineux chez *S. cordigera*, qui remonte jusqu'au Finistère, et chez bien d'autres espèces.

Les nigritelles *(Nigritella)* dégagent une forte odeur de vanille. Il n'y en a que deux espèces dans les pâturages alpins et subalpins des montagnes d'Europe, jusqu'à 2 500 m d'altitude. Leurs feuilles sont graminoïdes et passent progressivement aux bractées. Les petites fleurs forment des inflorescences coniques, denses et pourprées chez *N. nigra,* commun dans nos montagnes. Elles sont plus allongées, roses ou rouges chez *N. rubra,* qui n'existe pas en France ; c'est une plante de l'est des Alpes, de la Suisse et des Carpates. Les fleurs des nigritelles ne sont pas résupinées.

Les *Himantoglossum (Loroglossum)* ont un labelle à trois lobes, le médian étant en forme de lanière. Ce sont des plantes de l'Europe du Sud et de la région méditerranéenne. *H. hircinum,* commun en France (il remonte jusqu'en Hollande), est une très belle plante des prés secs et des sols calcaires, qui atteint 1 m, mais dégage malheureusement une odeur désagréable. Les *Epipogium* sont cinq espèces saprophytes de l'Ancien Monde. *E. aphyllus* vit en Europe.

Chez les Néottiées, il y a des massules ou des pollinies, mais sans pédoncules. Ce sont des plantes rhizomateuses terrestres ou parfois saprophytes.

Les *Epipactis* sont une vingtaine dans les régions tempérées de l'hémisphère Nord, dont quatre en France. La tige est feuillée et atteint 80 cm chez *E. latifolia*, à larges feuilles ovales. Les fleurs des *Epipactis* sont résupinées par torsion du pédoncule. Le labelle est divisé transversalement en deux zones par une échancrure ; la région antérieure est verruqueuse ou munie de lamelles longitudinales au centre.

Les *Cephalanthera* sont voisins, et le labelle y est encore divisé en deux zones ; l'une, antérieure, est lamelleuse et l'autre, postérieure, a des bords dressés. Il y a une quinzaine d'espèces en Eurasie, dont trois en France. L'ovaire tordu assure normalement la résupination.

Les néotties *(Neottia)* sont des saprophytes d'Eurasie. Elles sont représentées chez nous par *Neottia nidus-avis,* des forêts de feuillus, surtout sur sol calcaire, qui possède de grosses racines très ramifiées, ressemblant à des nids et abritant dans leurs cellules superficielles le Champignon symbiotique. Les feuilles sont réduites à des écailles jaunâtres. La tige, charnue, se termine en inflorescence de fleurs brunes ou violacées, à parfum de miel. Il arrive que ces inflorescences ne sortent pas de terre ; il y a alors autofécondation. Le genre *Listera* est chlorophyllien et muni de deux grandes feuilles.

Les *Spiranthes* ont des fleurs sessiles densément disposées sur la hampe florale selon une ou plusieurs spirales. Le labelle est simple et à marge frangée. On rencontre les cinquante espèces sur presque toute la terre. *S. aestivalis,* à fleurs blanches à l'intérieur, vertes à l'extérieur, habite les endroits marécageux de l'Europe et fleurit en été.

Page ci-contre :
▶ une belle Orchidée :
Vanda sp.

S. Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

R. Longo

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Toutes les Orchidées ne vivent pas dans les zones tropicales. On trouve dans nos régions un certain nombre de formes dont les fleurs sont généralement petites :* Orchis maculata, *à gauche,* *est commun en France.* Angraecum sesquipedale, *au milieu, et* Epidendrum sp., *à droite, sont tropicaux.***

▼ ***Une Orchidée épiphyte,* Epidendrum prismatocarpum.**

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

S. spiralis (S. autumnalis) lui ressemble, mais fleurit en automne et ses feuilles sont alors fanées ; un peu plus tard apparaît une rosette latérale qui représente l'appareil végétatif de la génération suivante. Il habite, lui, les sols secs de l'Europe, quoiqu'il s'accommode aussi des sols humides.

Chez les Épidendrées, il y a quatre pollinies sessiles ou des massules. La ramification est sympodiale, et les inflorescences sont le plus souvent terminales sur chaque article du sympode.

Les *Cattleya,* qui sont sans doute les Orchidées les plus connues, ont des pollinies. Le genre *Cattleya* est représenté par cinq espèces de plantes épiphytes d'Amérique tropicale et subtropicale, en particulier du Brésil et des Andes, qui ont été importées en Europe à partir de 1810 environ. Leurs rhizomes émettent des pseudo-bulbes de différentes formes, surmontés de une ou de deux feuilles coriaces et glauques. Leurs fleurs, solitaires ou réunies en grappes, portées généralement par le pseudo-bulbe, sont toujours décoratives et entourées par une spathe. Le labelle est souvent divisé en trois lobes ; le médian a la forme d'un cornet et les latéraux entourent le gynostème élancé. La plupart de ces plantes peuvent pousser en serre tempérée.

Le genre *Laelia,* avec environ soixante-quinze espèces, est voisin et s'hybride avec les *Cattleya.* Il habite de l'Argentine au Mexique, sur les rochers et les arbres. *L. autumnalis* et *L. furfuracea* vivent en haute altitude (de 2 000 à 3 000 m). Ils diffèrent des *Cattleya* par la présence dans leurs étamines de huit massules au lieu de quatre pollinies. Certains sont cultivés de la même manière que les cattleyas, en serre tempérée chaude. *L. furfuracea,* à labelle trilobé, et *L. peduncularis,* à labelle presque entier, sont rustiques en Europe.

Les quatre-vingt-huit *Epidendrum* sont américains. Ce sont des épiphytes dont certains peuvent croître en serre froide ou tempérée. Quelques-uns sont résistants en Europe. Leurs fleurs sont petites et réunies en grappes ou en panicules parfumées, mais plus grandes et plus belles chez les hybrides de culture. Il y a fusion partielle des marges de la région inférieure du labelle avec les bords du gynostème. L'étamine forme quatre pollinies. *E. cochleatum,* qui vit du sud de la Floride au Brésil, est particulièrement cultivé.

Dendrobium, avec ses mille cinq cents espèces d'Asie chaude, de Polynésie, d'Australie et d'Indonésie, est un des genres les plus importants. Les fleurs ont des pollinies sessiles. On peut répartir les *Dendrobium,* épiphytes, en deux groupes ; dans le premier sont comprises des espèces à tiges renflées aux entre-nœuds, à feuilles caduques et à fleurs réunies par deux ou trois en inflorescences axillaires qui paraissent après la chute des feuilles axillantes. Le second groupe comprend les plantes à feuilles persistantes et à fleurs en grappes terminales très fournies, dressées ou pendantes. Au premier groupe appartiennent *D. nobile,* de Chine, avec ses fleurs blanches et roses, et *D. falconeri,* dont les fleurs solitaires axillaires sont rose pâle teinté de violet, avec un grand labelle cilié, jaune, tacheté de pourpre et d'orangé. La culture de certaines de ces espèces *(D. nobile)* est assez facile en appartement. Celle des plantes de l'autre groupe, comme *D. densiflorum,* du Népal, est plus délicate. Certaines espèces peuvent être obtenues en serres chaudes ou tempérées. Quelques-unes sont même rustiques. De nombreux hybrides ont été réalisés.

On cultive aussi en serre chaude certaines des cent cinquante espèces du genre *Calanthe,* qui sont terrestres et habitent les régions chaudes de l'Ancien Monde, à une exception près. Elles possèdent des pseudo-bulbes basaux. Il n'y a en général pas de rhizome. Les feuilles en rosette sont le plus souvent allongées, larges et aplaties ; les fleurs forment des inflorescences pouvant atteindre 1 m. Il y a huit massules adhérentes au même rétinacle. *C. rosea,* de Burma, est particulièrement exploité. Quelques espèces sont rustiques sous nos climats.

Parmi les cent espèces du genre *Vanilla,* des forêts tropicales, la vanille *(V. planifolia)* est d'un grand intérêt économique. C'est une liane originaire du Mexique et cultivée dans toutes les régions tropicales. La tige porte des racines aériennes ; les feuilles sont ovoïdes et charnues. Il y a deux pollinies. La partie exploitée est la capsule, qui ne s'ouvre qu'en deux valves, car l'une des parois carpellaires ne se fend pas. Comme les pollinisateurs manquent là où on cultive la plante, il faut procéder à la fécondation artificielle des fleurs en écartant le rostellum et en appliquant les pollinies sur les lobes stigmatiques récepteurs. Le fruit frais possède surtout du vanilloside, dont l'aglycone est la vanilline, et on le traite afin que s'exhale le parfum de vanille. Le fruit devient noir et se garnit souvent de cristaux de vanilline. La vanille en « gousses » ou en poudre est un aromatisant très recherché, car son goût est plus fin que celui de la vanilline, facilement obtenue par synthèse.

Chez les Vandées, il y a deux ou quatre pollinies sur un seul pédoncule en général. La ramification est sympodiale et les inflorescences sont presque toujours latérales ou basales sur les articles du sympode.

Il existe une cinquantaine d'espèces de *Stanhopea* dans les régions chaudes d'Amérique. Leur bulbe correspond à un seul entre-nœud et il y a une seule feuille par pousse aérienne. Les inflorescences portent des fleurs pendantes souvent grandes, charnues, cireuses et très parfumées ; elles ont de splendides couleurs et sont fort curieuses du fait de la division transversale de leur labelle en trois parties munies d'appendices. Il y a deux pollinies. *S. insignis,* du Pérou, possède des fleurs blanches ou jaune pâle, avec des taches pourprées, et un labelle rouge foncé à la base. *S. hernandezii (S. tigrina),* du Mexique, est l'un des plus beaux, avec ses fleurs jaunes à taches pourpres.

Les *Cymbidium* habitent à Madagascar, en Australie, en Indo-Malaisie et au Japon. On les trouve jusqu'à 2 000 m dans l'Himalaya. Ce sont environ soixante-dix

N. Cirani

espèces de plantes à tiges allongées ou courtes, et renflées en bulbes entourés des bases de feuilles étroites, à la manière de la base de la tige de fenouil. De l'aisselle des feuilles inférieures partent de longues hampes florales dressées ou pendantes, avec des fleurs en épis ou en grappes; il y a également deux pollinies. Ce sont des plantes de serre tempérée ou froide. *C. insigne,* qui fleurit en hiver, a de longs épis formés d'une trentaine de fleurs blanc rosé. Il est cultivé fréquemment ainsi que de nombreux hybrides dont la couleur des fleurs va du rose au brun.

Le grand genre *Odontoglossum* compte trois cents espèces répandues dans les montagnes d'Amérique du Sud, entre 1 800 et 3 000 m d'altitude. Il y a un pseudobulbe dominé par quelques feuilles. L'inflorescence en grappe ou panicule est axillaire d'une feuille située en dessous de ce bulbe. Les fleurs sont blanches, jaunes avec parfois des taches brunes, ou encore roses, écarlates, etc. Le labelle courbé à angle droit possède au point de courbure deux tubercules allongés ressemblant à des dents. Il y a quatre pollinies. On cultive plusieurs *Odontoglossum* en serre froide *(O. crispum, O. nobile,* etc.), ainsi que beaucoup d'hybrides.

Les sept cent cinquante *Oncidium,* dont l'aire s'étend du sud de la Floride à l'Argentine, sont des Orchidées épiphytes ou parfois terrestres qui, en montagne, s'élèvent jusqu'à 4 000 m d'altitude. Leur port est semblable à celui des *Odontoglossum,* mais le bulbe peut manquer et les feuilles sont parfois torsadées. Les fleurs, en grappes ou en panicules, sont parfois très grandes et ornementales. Il y a quatre pollinies. Le labelle présente deux ailes latérales et sa base porte des verrues et des callosités. On cultive en particulier *O. crispum, O. tigrinum, O. grande,* etc. *O. papilio,* du Venezuela, est spécialement remarquable par la forme de son labelle dont les ailes rappellent celles d'un papillon.

Soixante-dix *Vanda* habitent de l'Indo-Malaisie à la Chine et dans les régions chaudes de l'Australie. Ce sont des plantes épiphytes des plaines chaudes et humides, et des pentes de l'Himalaya jusqu'à 1 000 m d'altitude environ. Elles ont une tige souvent très longue, portant des feuilles coriaces ou charnues, généralement planes ou recourbées en arrière. Les grandes fleurs forment des grappes axillaires. Les sépales et les pétales sont le plus souvent rétrécis en onglet; le labelle est trilobé, brièvement et largement éperonné et ses lobes latéraux sont très petits et dressés à l'entrée de l'éperon. Il y a deux pollinies. Les *Vanda* ont fourni de nombreux hybrides et sont particulièrement cultivés en Floride et à Hawaii.

Enfin, on doit mentionner que cette dernière tribu d'Orchidées possède en Europe *Corallorhiza trifida (C. innata),* l'une des quinze espèces d'un genre surtout nord-américain et mexicain. C'est un saprophyte de 10 à 30 cm, à rhizome coralloïde, sans racine, abritant un Champignon symbiotique. Les feuilles sont réduites à des écailles; il y a deux pollinies sessiles. Il habite les montagnes de l'hémisphère Nord, dans les forêts de hêtre en particulier.

Spadiciflores

L'ordre des Spadiciflores comprend les majestueux Palmiers, parfois hauts de plusieurs dizaines de mètres, et les minuscules lentilles d'eau, dont la taille ne dépasse pas quelques millimètres. Ces Végétaux ont pour caractéristique commune leurs fleurs fréquemment unisexuées, parfois fort réduites et réunies en inflorescences spiciformes, à axe souvent charnu, et enveloppées par une ou plusieurs grandes bractées ou spathes. Ces inflorescences peuvent être uni- ou bisexuées. Elles fonctionnent généralement comme une seule fleur et sont comparables, de ce fait, à celles des Ombellifères et des Composées.

▲ ***Les Palmiers peuvent avoir un port arborescent et atteindre un grand diamètre; leurs feuilles forment une couronne au sommet du stipe.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Certains Palmiers, tel* Trachycarpus fortunei, *s'adaptent bien en plein air dans une grande partie de la France.***

L'ovaire est supère, et en général triloculaire ; les fruits sont des baies, des drupes, des akènes ou des capsules.

On divise souvent cet ordre en plusieurs : les Principes renferment les Palmacées, les Cyclanthales les Cyclanthacées et les Arales les Aracées et les Lemnacées. L'ordre tel qu'il est compris ici rassemble plus de trois cent soixante genres et environ cinq mille quatre cents espèces, groupés en quatre familles. La plupart habitent les zones tropicales et subtropicales, mais il en est de cosmopolites et quelques-unes font partie de la flore des régions tempérées. Ce sont des plantes intéressantes du point de vue économique, puisqu'elles comprennent des arbres qui fournissent les noix de coco, l'huile de palme, les dattes, l'ivoire végétal, le raphia, etc. Beaucoup sont aussi ornementales.

La famille des *Palmacées* ou *Arécacées (Palmaceae, Arecaceae)* ou Palmiers est la plus importante de l'ordre, avec environ trois mille quatre cents espèces, en deux cent trente-cinq genres habitant surtout les régions tropicales humides. Il s'agit de Végétaux à port arborescent ou arbustif mais non ramifiés (sauf exception, comme chez *Hyphaene)* ou de lianes. Leur tige appelée stipe peut être brève ou haute et colonnaire. Elle atteint parfois un assez grand diamètre. Les feuilles (frondes) des espèces arborescentes constituent une couronne au sommet du tronc. La croissance est alors lente, car il ne se forme que de courts entre-nœuds. Dans les autres cas, les feuilles sont alternes-distiques et séparées par des entre-nœuds. Il y a un pétiole à large insertion sur la tige et sa région inférieure persiste souvent longtemps après la mort de la fronde, rendant ainsi la tige rugueuse. Le limbe des feuilles peut être simple et penninervé ou en éventail plus ou moins divisé en « folioles » palmées, ou encore « composé-penné ». En fait, toutes les feuilles sont originellement simples, mais elles se fragmentent en « folioles » au cours de leur développement complexe ; celles-ci sont pliées longitudinalement vers le haut ou vers le bas. Le pétiole est souvent épineux. Une ligule existe en haut ou en bas de celui-ci. Elle semble correspondre à la portion médiane de celle des Graminées. L'appareil végétatif possède diverses particularités remarquables. Chez quelques *Korthalsia,* de Malaisie, les bases des pétioles, renflées et excavées, abritent des fourmis. Chez *Hyphaene thebaica* et d'autres espèces du genre, le tronc est ramifié dichotomiquement, mais la signification morphologique de ce fait n'est pas encore élucidée.

Les petites fleurs sont réunies en volumineuses inflorescences, le plus souvent axillaires (épis ou panicules) et appelées ici spadices, car elles sont entourées par une ou plusieurs grandes bractées ou spathes. Les axes inflorescentiels sont souvent charnus ou ligneux, de même que les spathes. Les fleurs, sessiles ou même enfoncées dans l'axe, sont généralement unisexuées, actinomorphes et possèdent six tépales libres ou parfois soudés à la base, disposés en deux verticilles ou en spirale. Les fleurs mâles ont des tépales externes plus petits. Les tépales sont le plus souvent membraneux ou écailleux, la spathe assurant les fonctions de protection et d'attraction des pollinisateurs, mais ils peuvent être pétaloïdes. Les fleurs mâles et femelles peuvent se trouver dans le même spadice (spadice monoïque), ou bien dans des spadices différents (spadices dioïques) et parfois sur des individus différents. Il y a six étamines en deux verticilles, ou seulement trois, parfois neuf ou plus. Les filets sont unis à la base. Le pollen se forme par divisions simultanées. L'ovaire est supère et le plus souvent divisé en trois loges (qui correspondent à trois carpelles), chacune contenant un ovule en placentation axile. Il est rare que les carpelles soient libres ou que la placentation du gynécée syncarpe soit pariétale. Il arrive qu'un seul carpelle soit fertile. Les fruits sont des baies ou des drupes. Les graines, qui sont uniques dans chaque fruit par suite de la dégénérescence des deux autres ovules et qui sont souvent plus ou moins soudées au péricarpe, contiennent un albumen nucléaire abondant, corné par épaississement de ses parois cellulaires qui se chargent notamment de mannanes ; il est souvent ruminé, et parfois extrêmement dur. L'embryon est latéral par rapport à l'albumen, ce qui, joint à des arguments morphologiques et embryologiques, peut conduire à un rapprochement un peu surprenant entre les Palmacées et les Graminées. Le cotylédon fonctionne d'ailleurs comme un suçoir lors de la germination, ce qui n'est pas sans rappeler le scutellum des Graminées. La pollinisation peut se faire par le vent, et il y a alors abondante production de pollen, ou par l'intermédiaire des Insectes, attirés par les spathes odorantes.

Bien qu'elles paraissent très évoluées, les Palmacées sont très anciennes : elles existaient au Crétacé supérieur et s'étendaient alors jusqu'en Norvège et au Canada et jusqu'à une ligne allant de la mer Noire à la Corée. Aujourd'hui, elles habitent presque uniquement les régions tropicales et subtropicales, en particulier en Amazonie et en Indo-Malaisie. Quelques-unes s'étendent pourtant dans certaines zones tempérées de l'hémisphère Nord, et une espèce, *Chamaerops humilis,* existe dans le sud-ouest de l'Europe. L'importance économique de ces Végétaux est grande, surtout dans les pays chauds. Ils fournissent de nombreux produits nécessaires à l'homme, depuis la nourriture jusqu'aux matériaux de construction et aux fibres textiles. On en cultive en serre et en appartement ou en pleine terre, avec certaines précautions, dans des régions à climat doux (Côte d'Azur, Bretagne, etc.). Il leur faut un sol bien drainé, mais aussi bien irrigué. *Chamaerops humilis* est très rustique et facilement cultivable dans l'ouest de la France et le sud-ouest de l'Angleterre. *Trachycarpus robustus (T. fortunei)* est plus résistant encore. Il vit très bien aux environs de Londres et dans une grande partie du sud, du centre et de l'ouest de la France. On peut obtenir de nouveaux plants soit à

partir des rejets que forment parfois les plantes adultes, soit par germination de graines.

Il est probable que ces plantes se sont différenciées peu après leur séparation d'avec leurs ancêtres primitifs, à carpelles encore libres et à périanthe spiralé. Les autres Spadiciflores, les Commélinales et les Graminées se seraient développées séparément aussi à partir d'ancêtres identiques ou voisins, et quelques caractères communs, certains fort primitifs, se verraient ainsi dans ces groupes par ailleurs bien différents.

La classification des Palmacées est complexe du fait de leur grand nombre. On peut reconnaître entre six et neuf sous-familles.

La sous-famille des *Coryphoïdées* comprend trente-trois genres de Végétaux à feuilles en éventail dont les lobes sont pliés vers le haut. Les fleurs hermaphrodites ou polygames, rarement en spadices dioïques, sont pourvues de trois à douze étamines et de trois carpelles libres ou peu soudés, ou parfois de un ou deux seulement. Les spadices sont très ramifiés, avec une ou deux spathes inférieures les enveloppant totalement. Les fruits sont des baies uniséminées, rarement des drupes.

Il existe huit *Corypha,* en Asie tropicale et en Insulinde. Leur tronc, qui atteint une trentaine de mètres, est pourvu au sommet d'une touffe de feuilles relativement étroites. Le spadice est terminal et l'arbre est monocarpien ; il fleurit seulement vers l'âge de trente ans, en formant un énorme spadice extrêmement ramifié qui prolonge la tige, tandis que les feuilles tombent. Les fleurs sont hermaphrodites. Il y a six étamines et les carpelles sont unis. Le style est gynobasique dans le fruit. La fructification épuise la plante qui meurt alors. Les feuilles des *Corypha* servent aux travaux de « sparterie ». *C. umbraculifera,* de Ceylan, est un palmier à sagou : celui-ci est constitué par la fécule que l'on retire avant floraison de la partie centrale au tronc ; elle est alimentaire ; ses réserves amylacées auraient servi à nourrir l'inflorescence géante.

Dans l'ouest de la région méditerranéenne, on trouve le doum (palmier éventail ou nain) ou *Chamaerops humilis.* Pour certains, c'est l'unique représentant d'un genre où d'autres reconnaissent neuf espèces. Sa hauteur varie de quelques décimètres à 4 ou 5 m. C'est le seul Palmier européen. Il vit en Espagne, en Italie, en Sardaigne, en Sicile, en Algérie et au Maroc. Il n'existe pas actuellement à l'état spontané en France, mais il se rencontrait encore au milieu du siècle dernier à Nice et non loin de Monaco. Il est assez souvent cultivé. Sa forme arborescente (var. *arborescens*) n'a pas de rejets, à la différence du type normal. Il possède des touffes de feuilles palmatipartites à pétiole épineux, constituées de dix à quinze « folioles » en alène. Les spadices jaunes, à une seule spathe inférieure embrassante, sont latéraux et paraissent en été. Ils sont polygames dioïques (c'est-à-dire à fleurs hermaphrodites et mâles ou femelles). Les tépales externes sont très étroits, ceux de l'intérieur (pétales) sont larges et imbriqués. Il y a six étamines et les carpelles sont libres ; chacun devient une baie rouge à style terminal. Les feuilles, divisées en lanières par peignage, constituent le crin végétal. Le bourgeon terminal est un « chou-palmiste », très apprécié comme hors-d'œuvre. Ce palmier doum ne doit pas être confondu avec le doum d'Égypte et du Soudan *(Hyphaene thebaica).*

Les cinq *Trachycarpus* vivent dans l'Himalaya, en Chine et au Japon. Le palmier éventail *(Trachycarpus robustus = T. fortunei = T. excelsa),* souvent appelé *Chamaerops excelsa,* rustique, est le plus cultivé. Cette espèce a été introduite en Europe en 1844. Son tronc, qui peut atteindre 12 m, est garni de fibres brun foncé entourant les moignons des bases foliaires. Les feuilles ont des pétioles non épineux et des limbes orbiculaires profondément divisés en segments rigides, horizontaux ou pendants à l'extrémité. Les spadices sont polygames-monoïques (fleurs hermaphrodites, mâles et femelles sur le même spadice). Les pétales, différenciés aussi par leur plus grande largeur, sont valvaires. Les carpelles, libres en grande partie, deviennent des fruits bleu foncé ressemblant à des grains de raisin. *T. martianus* est voisin, mais son tronc est lisse sauf en dessous de la couronne de feuilles ou il est identique à celui du précédent. Il est aussi très rustique.

Certaines des vingt-deux espèces du genre *Sabal,* en particulier *S. palmetto,* qui est la plus nordique, sont assez rustiques et cultivées en plein air sur la Côte d'Azur. Les *Sabal,* originaires du sud-est des États-Unis, des Antilles et de l'Amérique du Sud jusqu'à la Colombie, sont voisins des *Corypha* par leur style qui devient gynobasique dans le fruit. Les fleurs sont hermaphrodites. Le tronc est écailleux (restes des feuilles) et les feuilles sont flabelliformes et divisées en folioles plus ou moins bifides ; elles atteignent 2,50 m de long chez *S. palmetto.* En Floride et en Caroline, on trouve en même temps que ce dernier un palmier bas et cespiteux, *Serenaea (Serenoa) serrulata,* à fleurs hermaphrodites munies de pétales valvaires. Les capsules, libres en bas, sont unies au niveau du style unique et allongé.

▲ **Chamaerops humilis** ***existe dans le sud-ouest de l'Europe et est assez souvent cultivé.***

Les quarante-cinq *Copernicia* sont des formes cultivées qui vivent des Antilles à l'Amérique du Sud tropicale. Les fleurs sont hermaphrodites, et les carpelles, libres à la base, sont unis au sommet. Les pétales sont valvaires. *C. cerifera,* du nord du Brésil, trouve de nombreux emplois. En effet, son stipe sert à construire des cases sur lesquelles on pose ses feuilles ; la moelle donne une fécule (sagou) qui, par fermentation, fournit une boisson alcoolique. Les feuilles jeunes, mais adultes cependant, sont recouvertes à la face supérieure d'écailles cireuses (cire de carnauba). Chaque pied fournit environ une vingtaine de feuilles, et il en faut deux mille à cinq mille pour obtenir 15 kg de cire. Celle-ci, inodore ou sentant un peu la coumarine, sert à fabriquer des bougies, des vernis et des cires à bois.

Dans la sous-famille des *Phœnicoïdées,* les plantes sont dioïques. Il y a des pétales différenciés, valvaires dans les fleurs mâles, imbriqués dans les femelles. Les trois carpelles sont encore libres et deviennent des baies très sucrées. Le groupe ne renferme que le genre *Phoenix* avec treize espèces habitant les zones chaudes depuis l'Afrique occidentale jusqu'à Formose.

Les *Phoenix* étaient le symbole de la fertilité pour les Égyptiens, et celui du triomphe pour les Grecs et les Hébreux. Les feuilles servent encore au cours des processions chrétiennes d'Orient, pour rappeler l'entrée de Jésus à Jérusalem. Les *Phoenix* sont des plantes généralement élevées, à stipe recouvert au sommet seulement par les bases des feuilles mortes. Les feuilles sont pennées, à segments entiers insérés obliquement sur le rachis. Les spadices, à l'aiselle des feuilles, ont un axe ramifié et sont entourés par une spathe coriace et brune.

▲ **Phoenix dactylifera,** ***le dattier, en pleine floraison.***

Chaque fleur donne une baie oblongue, issue d'un seul carpelle, à mésocarpe charnu, dont la graine unique a un sillon longitudinal sur la face ventrale. La plus importante espèce est le dattier *(P. dactylifera),* dont la culture, qui s'étend de l'Afrique du Nord au sud-ouest de l'Asie, est très ancienne. Pour les Chaldéens et les anciens Arabes, cette plante représentait l'arbre de vie ou l'arbre béni. Toutes ses parties sont mises à profit. L'arbre atteint 15 à 20 m. Ses fruits sont les dattes, qui contiennent 60 à 70 % de sucre et sont le principal aliment glucidique des Arabes du désert. On prépare avec elles des sirops et des alcools. Le stipe fournit du bois de construction et on peut recueillir sa sève douceâtre, qui, par fermentation, donne un vin de palme. Les feuilles sont largement utilisées pour couvrir les habitations, fabriquer des cordages, etc.

La sous-famille des *Borassoïdées* comprend des Palmacées à spadices dioïques, à feuilles en éventail, à lobes pliés vers le haut et à inflorescences simples ou peu ramifiées. Il y a six étamines ou plus aux fleurs mâles, réduites et enfoncées dans l'axe du spadice spiciforme, solitaires ou par groupes à l'aisselle des bractées. Les fleurs femelles ont un ovaire à trois carpelles soudés et six staminodes. Les fruits sont des drupes contenant de une à trois graines parfois unies à l'endocarpe.

Il y a sept genres en une seule tribu. Les *Borassus* sont au nombre de neuf. Ils ont six étamines aux fleurs mâles, qui sont nombreuses dans chaque alvéole du spadice. *B. flabellifer* ou rônier, dont l'aire s'étend du Soudan à l'Inde, est ornemental et important du point de vue économique. Il possède un tronc élancé, qui peut atteindre 35 m. Les feuilles ont un pétiole épineux sur lequel s'insèrent en éventail quatorze ou seize « folioles » sillonnées, pointues et bifides au sommet. Les inflorescences axillaires sont incomplètement entourées par plusieurs spathes. Les fruits, drupacés, ont de un à trois noyaux monospermes et un mince mésocarpe charnu. Un chou-palmiste est fourni par le bourgeon terminal. L'albumen très dur des graines (noix de Palmyre) est un « ivoire végétal » ou corozo du Soudan, qui sert à fabriquer des boutons. Par section ou incision des jeunes spadices, on extrait un liquide sucré, ou toddy, à partir duquel on prépare un vin de palme par fermentation et distillation. Enfin, la moelle de la plante avant floraison donne le sagou de Palmyre. Les *Borassus* fournissent en outre un bois dur et imputrescible, précieux pour la construction. Leurs feuilles servent à couvrir les habitations et fournissent une fibre dont on fait des nattes et des parasols.

Les trente-deux espèces du genre *Hyphaene* se rencontrent aussi de l'Afrique à l'Inde. Chez elles, on ne

trouve également que six étamines, mais les fleurs mâles sont solitaires dans leurs alvéoles. *H. thebaica* ou doum et quelques autres ont un tronc ramifié de façon apparemment dichotome. Les feuilles sont flabelliformes et laciniées, et les pétioles épineux. Le péricarpe des drupes est comestible.

L'unique espèce du genre *Lodoicea* est *L. sechellarum* ou cocotier des Seychelles, qui se rencontre dans deux de ces îles. Il est voisin des *Borassus* et peut atteindre 30 m de hauteur. Il possède un tronc annelé et de grandes feuilles flabelliformes à nombreux segments et à pétiole inerme. Les fleurs mâles sont abondantes dans chaque alvéole et ont beaucoup d'étamines. Le fruit est une énorme drupe de 9 à 13 kg et de 30 à 40 cm de long dont le mésocarpe est épais et coriace; l'endocarpe, ligneux, trilobé, limité par une couche superficielle fibreuse, contient une volumineuse graine, ovale, brune, à tégument mince et dur, échancrée jusqu'à la moitié en deux lobes. Ces fruits étaient connus des populations indiennes et malaises, qui les voyaient apportés par les courants marins, mais en ignoraient l'origine et leur attribuaient des vertus extraordinaires. Cet étrange Végétal se trouve confiné, en partie à cause des destructions dues à l'homme, dans les deux îlots de Praslin et Curieuse; plusieurs milliers de spécimens sont protégés dans les deux réserves de Praslin. Au XVIII[e] siècle, il existait encore sur une île voisine, mais il en a aujourd'hui disparu.

La sous-famille des *Arécoïdées* comprend cent vingt-neuf genres de Palmacées à spadices généralement monoïques et à feuilles pennées dont les « folioles » sont pliées vers le bas. Les fleurs, unisexuées, sont disposées en spadices monoïques simples ou ramifiés, à une ou plusieurs spathes, et sont fréquemment rassemblées en trios (cymules) constitués d'une fleur femelle accompagnée de deux fleurs mâles, ou bien encore les femelles sont basales. L'ovaire, uni- ou triloculaire, est formé de trois carpelles soudés. Les fruits sont des baies ou des drupes, à une ou trois graines libres ou unies à l'endocarpe.

Les quatre-vingt-dix espèces du genre *Areca* habitent de l'Indo-Malaisie à la Nouvelle-Guinée. Elles ne sont pas épineuses et possèdent des troncs élancés ou sont de petite taille. Les feuilles sont pennées, avec des folioles lancéolées; c'est aux aisselles des feuilles inférieures qu'apparaissent les spadices ramifiés, munis de trois spathes ou plus dont l'inférieure est plus développée et embrassante. Il y a trois ou six étamines. L'ovule est basilaire et solitaire dans l'ovaire uniloculaire. Les fruits sont des drupes ovoïdes et orangées à endocarpe mince adhérant à la graine dont l'albumen est ruminé. *A. catachu*, ou aréquier, est l'espèce la plus importante du point de vue économique. Originaire d'Indo-Malaisie, il peut atteindre 20 m. Son tronc blanchâtre est couronné d'une touffe de feuilles de 1 à 2 m de longueur. Les fruits, de la taille d'un œuf de poule, rouges à maturité, contiennent une graine ou noix d'arec, réticulée à la surface du fait de la rumination de son albumen. C'est un masticatoire très utilisé en Asie méridionale.

Le genre *Howeïa (Howea)* ne comprend que deux espèces de l'île Lord-Howe : *H. belmoreana*, à folioles dirigées vers la pointe de la feuille, et *H. forsteriana*, à folioles étalées. Sous le nom de *Kentia*, tous deux sont cultivés en plein air sur la Côte d'Azur. Les arbres atteignent 10 m. Les feuilles sont pennées, à folioles brusquement aiguës. Les spadices sont de simples épis creusés de cavités où sont insérées les fleurs, réunies en général par trois, la médiane étant femelle; il y a de trente à quarante étamines.

Il existe environ cent vingt espèces du genre *Chamaedorea*, petits Palmiers dioïques d'Amérique centrale et du Sud, dont quelques-uns sont très cultivés en appartement *(C. elegans, C. metallica)*. Ils sont inermes, ne dépassent pas 10 m et ressemblent parfois à des bambous. Les feuilles sont pennées *(C. elegans)* ou simples et bifides au sommet *(C. metallica)*. Il y a plusieurs spathes de petite taille. Les fleurs mâles ont six étamines. L'ovaire est triloculaire, et le fruit, petit et drupacé, contient de une à trois graines.

Les cinquante-quatre espèces du genre *Euterpe* croissent dans les régions tropicales américaines. Leurs spadices se forment à l'aisselle de feuilles tombées et sont munis de deux spathes inférieures égales. L'ovule unique est inséré latéralement. *E. oleracea* fournit des

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Plantation de dattiers.***

▼ **Lodoicea sechellarum**, ***le cocotier des Seychelles; sur cette photo représentant la partie apicale du stipe, on peut observer une feuille à long pétiole et trois gros fruits.***

I. Milani

fruits comestibles dont la pulpe sert à préparer une boisson. Il donne aussi, comme *E. edulis,* un chou-palmiste.

On cultive en serre le genre *Geonoma,* qui compte deux cent quarante espèces d'Amérique centrale et du Sud, à feuilles pennées, avec des folioles parfois blanchâtres ou argentées à la face inférieure. Les *Geonoma* sont souvent très bas. Les fleurs mâles, comprimées dorsalement, ont des pétales soudés à la base, et les filets staminaux sont unis en tube ou en cupule.

La sous-famille des *Lépidocaryoïdées* renferme vingt-cinq genres de plantes à feuilles pennées ou en éventail et à segments ployés vers le bas. Les spadices sont polygames-monoïques ou polygames-dioïques. Les fleurs sont enveloppées de leurs bractées axillantes et de leurs préfeuilles. Les carpelles forment un seul ovaire triloculaire recouvert d'écailles imbriquées; celles-ci entourent également les fruits, qui sont des sortes de drupes à graine unique et à endocarpe membraneux.

Le genre *Raphia* groupe une quarantaine d'espèces, qui habitent l'Afrique tropicale, Madagascar et les îles Mascareignes, mais aussi l'Amérique tropicale (dérive des continents). Leur stipe dressé, de hauteur moyenne, est couronné de très grandes feuilles allongées, régulièrement pennatiséquées, dont les folioles supérieures sont transformées en crochets récurvés. Les spadices sont terminaux et pendent entre les feuilles. Il y a de nombreuses spathes tubuleuses et souvent une grande quantité d'étamines. *R. taedigera* et *R. vinifera,* d'Afrique occidentale et d'Amérique tropicale, et *R. ruffia,* d'Afrique orientale et de Madagascar, donnent une sève sucrée par saignée en dessous des jeunes inflorescences. On la fait fermenter pour obtenir du vin de raphia. Des lambeaux de l'épiderme supérieur des feuilles fournissent le raphia, utilisé en horticulture et aussi pour la confection de sparteries. Par la macération notamment, les gaines foliaires produisent une autre fibre, ou piassave, utilisée pour fabriquer des cordages. Le bourgeon de *R. ruffia* est aussi consommé comme chou-palmiste.

Le genre *Metroxylon* ne compte qu'une trentaine d'espèces d'Indo-Malaisie, mais il est important au point de vue économique, car *M. rumphii* et *M. laeve* sont des Palmacées à sagou. Ce sont des plantes monocarpiques qui émettent des stolons. Les feuilles sont pennées avec de grandes inflorescences terminales. Abattu avant la floraison, un arbre de quinze ans donne 300 ou 400 kg de sagou, consommé généralement en potage, après une légère torréfaction.

Trois cent quarante espèces du genre *Calamus* sont les rotangs, qui croissent, pour certains, en Afrique tropicale, mais essentiellement en Indo-Malaisie et en Australie. Ils sont épineux, ont le plus souvent une très longue tige gracile et sont grimpants. Les feuilles sont alternes, éloignées les unes des autres le long de la tige et ont un limbe penné, souvent prolongé en flagelle, qui aide la plante à s'accrocher aux arbres environnants. Il en est de même des bractées des spadices. Les spathes sont nombreuses et les spadices polygames-dioïques. L'ovaire est imparfaitement triloculaire, et les fruits ont un péricarpe mince. *C. rotang* a des tiges atteignant 200 à 250 m, avec lesquelles on fabrique des ponts suspendus, des ustensiles de pêche, mais surtout des tapis et des sièges. En Europe, on en fait des meubles, des cannes, des manches de parapluies, etc. Le genre voisin *Daemonorops* compte cent vingt espèces en Indo-Malaisie. Les deux spathes inférieures sont plus grandes. *D. draco* fournit le vrai sang-dragon, résine qui exsude de son fruit et est utilisée surtout dans l'industrie des vernis.

La sous-famille des *Phytéléphantoïdées* comprend quatre genres à spadices dioïques; les mâles sont allongés et les femelles sont en forme de tête. Leurs fleurs mâles ont un périanthe réduit, mais de nombreuses étamines, tandis les femelles ont un ovaire avec quatre à neuf loges. Les fruits, rassemblés par six à neuf en syncarpe, ont un péricarpe charnu à l'intérieur, dur et verruqueux extérieurement, qui contient quatre à six graines à albumen extrêmement dur. Les *Phytelephas,* d'Amérique centrale et du nord de l'Amérique du Sud, sont au nombre de treize. Ce sont des espèces naines à longues feuilles terminales pennatiséquées. Les graines de *P. macrocarpa* et de *P. microcarpa* ont un albumen spécialement dur, qui est l'ivoire végétal ou corozo.

La sous-famille des *Caryotoïdées* renferme quatre genres d'Asie tropicale, d'Indo-Malaisie et d'Australie. Ce sont des Végétaux à feuilles pennées, dont les folioles sont pliées vers le haut. Les sépales sont parfois unis et les pétales le sont toujours dans les fleurs femelles. Il peut y avoir de nombreuses étamines; les fruits sont bacciens. Le genre *Caryota* comprend plus de vingt-cinq robustes Palmiers des zones tropicales d'Asie. Ils fournissent surtout du bois d'industrie *(C. urens),* du sagou de Malabar et un vin de palme. Ce sont des plantes de serre très appréciées à cause de leurs feuilles bipennées à folioles en forme de nageoire de Poisson et espacées sur le sommet de la tige.

Dans la sous-famille des *Cocosoïdées,* les feuilles sont pennées, avec des folioles pliées vers le bas. Les plantes sont monoïques, à fleurs unisexuées, avec souvent à la base du spadice des trios constitués d'une fleur femelle centrale et de deux mâles latérales, et, en haut de celui-ci, des fleurs mâles solitaires ou par paires. Il y a trois carpelles soudés, parfois six, dont un à trois constituent le fruit; son endocarpe est dur et plus ou moins soudé à la graine ou aux graines. Il y a un pore germinatif supérieur ou inférieur par carpelle, même si celui-ci est stérile. Il y a deux grandes spathes persistantes. Ce sont surtout des plantes d'Amérique tropicale.

Le cocotier *(Cocos nucifera),* unique espèce du genre *Cocos,* est cependant sans doute asiatique, puis a été

▼ **Howea forsteriana,** *encore appelé* **Kentia,** *est une belle plante ornementale qui est même cultivée en plein air sur la Côte d'Azur.*

C. Bevilacqua

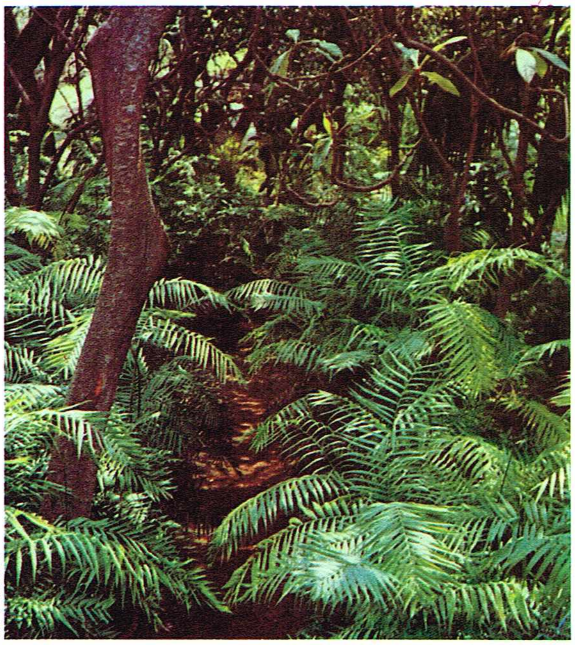

M. Pedone

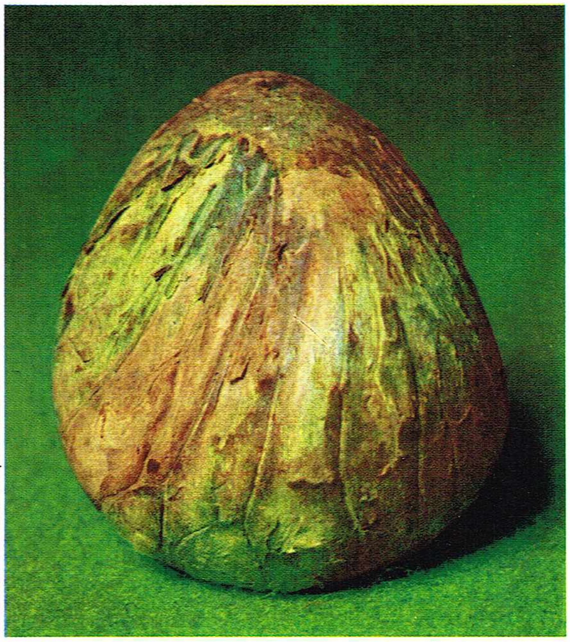

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ **Chamaedorea elegans,** *ici en sous-bois, est une espèce d'Amérique centrale et du Sud (à gauche). Graine de* **Phytelephas macrocarpa,** *à droite.*

Archives P2

◀ **Cocos nucifera,** ***le cocotier, ici en période de récolte, atteint de grandes dimensions ; il est surmonté d'une touffe de feuilles pennées.***

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***Noix de coco coupées montrant les trois parties de la drupe : épicarpe brun-vert, mésocarpe fibreux, endocarpe assez mince et dur soudé à la graine qui comprend un albumen comestible avec une partie dure et blanche et l'autre liquide (lait).***

répandu sous les tropiques de l'Ancien Monde et dans certaines régions d'Amérique (Floride, Brésil, etc.). Il s'accommode bien des sols salés. C'est un arbre atteignant 30 m, couronné d'une touffe de feuilles de 4 à 5 m, à longs pétioles et pennées. Les spadices, insérés à l'aisselle des feuilles, portent, près de la base des ramifications, des fleurs femelles qui peuvent être accompagnées de fleurs mâles ; en haut, toutes les fleurs sont mâles, solitaires ou par paires. Les fruits sont de grosses drupes ovoïdes atteignant 30 cm, avec une seule loge, une graine unique et trois pores germinatifs inférieurs. L'épicarpe vert ou violacé recouvre un mésocarpe épais et fibreux entourant à son tour l'endocarpe dur et ligneux, qui est la noix de coco. La cavité interne est occupée par une graine soudée à l'endocarpe et renfermant elle-même un albumen dont une grande partie est liquide et sucrée (lait de coco), tandis que la portion périphérique est blanche et oléagineuse. Cette partie, découpée et séchée au soleil, devient le coprah. Les Philippines, suivies par l'Indonésie, la Malaisie, etc., sont le plus important producteur de noix de coco.

On plaçait dans le genre *Cocos* diverses autres Palmacées, en fait bien distinctes. *Mirocoelum weddellianum (C. weddelliana)*, à feuilles pennées très fines et élégantes, est cultivé comme plante d'appartement. Il est originaire du Brésil oriental et son endocarpe est mince. *Jubaea spectabilis* est la seule espèce du genre et se trouve au Chili, entre 31 et 35° de latitude. Il rappelle le *Cocos,* mais ses fleurs mâles ont de nombreuses étamines. Le fruit ressemble à une petite noix de coco et la graine fournit une huile comestible. C'est une plante haute de 12 m environ, à tronc garni à la base de restes de gaines foliaires et portant une couronne de feuilles pennées ressemblant à celles du dattier, mais plus fines, vert vif au-dessus et bleuâtres au-dessous. C'est une plante très résistante, rustique dans les régions méditerranéennes et cultivée pour l'ornement. De sa sève sucrée, ou miel de palme, on peut faire un vin de palme.

Le grand genre *Bactris* comprend deux cent dix Palmiers épineux d'Amérique tropicale ; leurs pores germinatifs sont situés dans la région supérieure de l'endocarpe.

Chez *Elaeis*, qui compte huit espèces d'Afrique tropicale occidentale et d'Amérique du Sud (dérive des continents), le fruit a aussi des pores germinatifs dans sa partie supérieure. Les six étamines ont des filets longuement unis en tube et l'ovaire est triloculaire. Le palmier à huile *(E. guineensis)*, d'Afrique tropicale occidentale, pousse bien sur les sols riches et inondés périodiquement, et il parvient à former de véritables forêts. Il atteint 30 m et présente une touffe de longues feuilles pennées de 3 à 6 m de long. Les spadices sont dioïques. Les fruits sont des drupes de la taille d'une prune qui contiennent de une à trois graines et sont pourvues d'un mésocarpe oléagineux fibreux, orangé. Ils sont réunis en régimes de mille à deux mille pesant de 15 à 30 kg. Après la récolte, ils sont pressés ou mis à fermenter puis traités à l'eau

M. et S. Prato

▲ *Chez les Aracées, les fleurs très petites sont réunies en un spadice entouré d'une grande bractée souvent colorée et appelée spathe. Ici un* Calla.

▼ **Acorus calamus** *est une plante du bord des eaux; ses feuilles sont dépourvues de pétiole (à gauche) et sa longue spathe foliacée prolonge le pédoncule du spadice (à droite).*

M. et S. Prato

M. et S. Prato

bouillante; l'huile est récupérée par décantation : c'est l'huile de palme de couleur orangée et dont le point de fusion est de 30 °C. On tire de la graine l'huile de palmiste, qui est liquide à partir de 25 °C. Ces deux huiles servent essentiellement à fabriquer des savons et des bougies, mais aussi à préparer des margarines, surtout l'huile de palmiste.

La sous-famille des *Nypoïdées* ne compte que le genre *Nypa* avec le seul *N. fruticans,* Palmier halophile surtout littoral, d'Indo-Malaisie, où il compose des forêts denses. Ses fleurs mâles ont trois étamines réunies en colonne et forment des chatons, tandis que les femelles sont regroupées en une sorte de capitule à l'extrémité du même spadice. L'ovaire est uniloculaire et uniovulé. Le fruit est une drupe à mésocarpe fibreux et endocarpe spongieux. La plante fournit sa sève sucrée qui sert à préparer un vin de palme. Le genre existait dans nos régions à l'ère tertiaire.

La famille des *Aracées (Araceae)* renferme cent vingt genres et mille huit cents espèces tropicales et subtropicales avec peu de représentants dans les zones extra-tropicales. Ce sont essentiellement des plantes herbacées, vivaces, à rhizome plus ou moins tuberculeux, quelquefois grimpantes ou épiphytes, rarement arborescentes ou aquatiques. La ramification est souvent sympodiale. Les feuilles, habituellement grandes, distiques ou, surtout, spiralées, peuvent être simples ou composées, souvent pédalées, à limbe parfois fenêtré. Elles possèdent une gaine et la nervation rappelle celle des Dicotylédones, avec des nervures pennées et un réseau de nervilles. Les petites fleurs sont unisexuées, parfois hermaphrodites. Les spadices sont en général monoïques, avec les fleurs femelles à la base et les mâles en haut. Ils sont entourés d'une spathe souvent grande et vivement colorée; lorsque la pollinisation est effectuée par les mouches, ils deviennent fréquemment nauséabonds. L'appendice de l'axe du spadice porte alors des glandes sécrétant notamment des amines responsables de l'odeur. Les fleurs sont généralement di- ou trimères avec deux cycles de sépales et deux d'étamines, lesquelles sont quelquefois unies en synandres. Il y a parfois plus de six pétales et étamines, ou une ou deux étamines seulement. L'existence fréquente de staminodes dans les fleurs femelles (il peut aussi y en avoir dans les fleurs mâles) et de pistillodes dans les mâles montre qu'elles sont secondairement unisexuées. Le gynécée, pluri- ou uniloculaire, est formé de deux ou trois carpelles soudés, parfois plus. Les ovules sont en placentation axile ou pariétale, apicaux ou basaux, anatropes, amphitropes ou orthotropes. Le fruit est le plus souvent une baie, mais il peut s'ouvrir irrégulièrement. On trouve toujours des cristaux d'oxalate de calcium chez les Aracées et souvent des laticifères *(Arum, Calla),* des sclérites *(Monstera),* des cellules mucilagineuses ou à tanin ou encore des canaux résinifères.

Dans la sous-famille des *Calloïdées,* les fleurs sont généralement hermaphrodites. Il y a des laticifères articulés. Il s'agit de plantes des terrains humides de la zone tempérée de l'hémisphère Nord. Le genre *Calla* est constitué de l'unique espèce *C. palustris,* plante rhizomateuse monopodiale de 15 à 40 cm qui habite l'Eurasie et l'Amérique du Nord; vers l'ouest, elle ne dépasse pas les Vosges et la Lorraine. Les feuilles vert vif sont alternes, cordées et longuement pétiolées. La spathe axillaire est verdâtre extérieurement et blanche intérieurement. L'axe du spadice est muni jusqu'au sommet de fleurs hermaphrodites et quelquefois mâles en haut. Il n'y a pas de périanthe. Les fruits sont des baies rouge vif contenant de six à dix graines. On cultive parfois cette espèce des sols acides plus ou moins inondés, mais en fait les plantes cultivées nommées *Calla* sont souvent des *Zantedeschia aethiopica*.

Chez les *Pothoïdées,* qui sont des Végétaux terrestres, les fleurs sont aussi hermaphrodites en général, mais il n'y a pas de laticifères.

Les deux espèces d'*Acorus* sont rhizomateuses, et leurs feuilles ne sont pas divisées en pétiole et en limbe, mais comprennent seulement une gaine et une lame distale graminoïde. Les inflorescences forment des épis jaunâtres munis de fleurs jusqu'au sommet; la spathe foliacée prolonge le pédoncule du spadice et n'entoure pas ce dernier. Les fleurs, hermaphrodites, ont un périanthe à six pièces libres, six étamines et un ovaire à deux ou trois loges pluriovulées à ovules orthotropes apicaux. *A. calamus,* originaire de l'Asie orientale, s'est naturalisé dans les eaux douces tranquilles d'Europe et d'Amérique du Nord. La plante européenne est triploïde, stérile et ne se multiplie que végétativement. La forme asiatique est tétraploïde et celle d'Amérique diploïde. L'acore d'Europe atteint 1,50 m; sa spathe est de deux à dix fois plus longue que le spadice. Son rhizome, qui contient une huile essentielle à azarone, cinéol, aldéhyde acrylique, etc., a des propriétés toniques et entre dans la composition de certaines liqueurs. *A. gramineus,* du Japon, plus petit, est cultivé dans les bassins et utilisé pour le commerce des fleurs coupées.

Chez les *Pothos,* qui comprennent cinquante espèces en Indo-Malaisie (une pourtant est malgache), les feuilles ont un pétiole différencié et les ovules sont anatropes. Ce sont des plantes grimpantes ou arbustives; leurs feuilles sont charnues et luisantes, entières ou lobées. Leurs fleurs sont hermaphrodites avec un périanthe

G. Mazza

de six pièces. L'ovaire a trois loges uniovulées et le fruit est une baie rouge contenant de une à trois graines. *P. celatocaulis,* de Bornéo, peut être cultivé en appartement. Ses tiges ont deux côtes et ses feuilles ont de larges limbes cordés; les rameaux axillaires percent les gaines des feuilles axillantes, ce qui n'est pas rare chez les Monocotylédones (Graminées, Commélinacées).

Les cinq cents *Anthurium* sont propres aux zones chaudes et humides d'Amérique. On les a importés en Europe il y a environ un siècle; ce sont des plantes vivaces, souvent grimpantes, à feuilles généralement charnues, ovales, cordiformes, sagittées ou hastées, et parfois magnifiquement colorées; leur pétiole est en général pourvu d'un renflement à la limite du limbe. La spathe est grande, le plus souvent ovale, vert vif, jaune, rose ou rouge. Les fleurs hermaphrodites sont disposées jusqu'en haut de l'axe du spadice; elles sont périanthées. La ramification est sympodiale avec une feuille végétative par article; l'inflorescence est terminale. D'un point de vue horticole, on peut distinguer les *Anthurium* à spathes décoratives et ceux dont les feuilles lisses ou un peu bulleuses sont richement colorées.

La sous-famille des *Monstéroïdées* contient des plantes terrestres sans laticifères, mais on trouve des sclérites dans la tige et les feuilles. Les fleurs sont encore hermaphrodites, et souvent nues; elles garnissent l'axe du spadice jusqu'au sommet. Le genre *Monstera* compte trente espèces d'Amérique tropicale. Ce sont des plantes grimpantes, à racines adventives et à feuilles en deux rangées du même côté de la tige; celles-ci, portées par un long pétiole, sont souvent très grandes, oblongues ou suborbiculaires. Leur limbe est perforé par nécrose physiologique de plages du mésophylle. Les perforations latérales peuvent être assez vastes et le tissu qui les borde du côté de la marge se dessèche; la feuille paraît alors pennée. L'espèce la plus connue est *M. deliciosa (Philodendron pertusum),* du versant ouest de la cordillère mexicaine, qui est très cultivé en appartement. Il produit des spadices comestibles, dont la saveur rappelle celle de l'ananas et de la banane, mais qui sont riches en raphides piquants d'oxalate de calcium. La plante peut fleurir et fructifier en appartement, bien que ce soit assez rare; en effet, on utilise souvent des sujets jeunes, à feuilles minces, vert clair, peu perforées, et qui ne fleurissent pas encore.

Il existe trente-cinq espèces de *Spathiphyllum* en Amérique tropicale essentiellement; leurs fleurs sont périanthées. *S. floribundum,* de Colombie, à feuilles lancéolées, un peu ondulées transversalement et à spathe blanche, est une plante d'appartement bien connue.

Chez les *Philodendroïdées,* il y a des laticifères, et les fleurs sont unisexuées et nues. Les feuilles ont des nervures latérales parallèles, et des nervilles peu visibles. Les deux cent cinquante espèces du genre *Philodendron* habitent les forêts tropicales d'Amérique, où, grâce à leurs racines adventives embrassantes, elles s'installent sur les arbres. La ramification au niveau où se forment les spadices est sympodiale et en général chaque article n'a qu'une feuille végétative et se termine par un spadice. Les feuilles sont entières ou découpées; la spathe est blanche, rouge ou jaune. Plusieurs espèces sont cultivées en pot à la manière des *Monstera* et des *Anthurium. P. radiatum* est particulièrement répandu.

Chez les trente *Dieffenbachia,* originaires d'Amérique eux aussi, la tige est dressée et dans le spadice existe une zone inférieure à fleurs femelles, puis une zone de fleurs mâles stériles disposées lâchement et, dans la partie supérieure, des fleurs mâles fertiles. Les étamines sont unies en synandre tandis que les fleurs femelles ont des staminodes. Le limbe des feuilles est oblong. *D. picta,* du nord du Brésil, et *D. imperialis,* du Pérou, ainsi que des hybrides sont très cultivés en appartement. Leurs feuilles sont marquées de taches blanchâtres.

Le genre *Zantedeschia* renferme huit espèces des régions humides d'Afrique du Sud. Ses feuilles à long pétiole sortent d'un gros rhizome et ont un limbe sagitté ou lancéolé, avec des nervures en relief. Il y a une assez grande spathe tubuleuse à la base, de couleur jaune ou rose ou blanche. Les fleurs mâles ont deux ou trois étamines libres s'ouvrant par un pore, et l'ovaire a une à cinq loges contenant en général chacune quatre ovules. *Z. aethiopica,* souvent appelé *Calla* ou *Richardia,* est le plus commun. La spathe est blanche; les spadices sont vendus chez les fleuristes; le feuillage est décoratif lui aussi. C'est également une plante rustique dans une grande partie de la France.

Chez les *Colocasioïdées,* il y a encore des laticifères; les fleurs sont unisexuées et nues, et les étamines sont unies en synandres qui peuvent même être soudés les uns aux autres. Il existe parfois un appendice stérile terminal dans l'axe du spadice; les feuilles ont une nervation réticulée bien marquée.

Le genre *Caladium* comprend vingt espèces. Certaines sont sans doute les Phanérogames ayant les plus belles feuilles. Ce sont des plantes d'Amérique tropicale à rhizome tuberculeux. Leurs feuilles, sagittées et peltées, sont portées par un long pétiole. La spathe est blanche

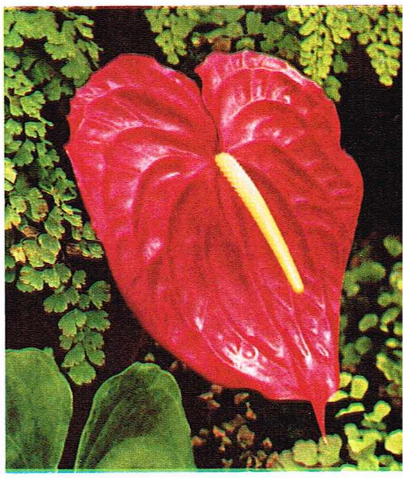

M. Pedone

C. Bevilacqua

▲ *A gauche,* **Anthurium scherzerianum,** *et, en haut,* **A. andreanum,** *deux Aracées très recherchées pour leur spathe vivement colorée. En bas,* **Monstera deliciosa,** *plante ornementale aux feuilles devenant pennées à la suite d'une nécrose physiologique des tissus.*

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

◀ *Une autre Aracée décorative :* **Scindapsus pictus.**

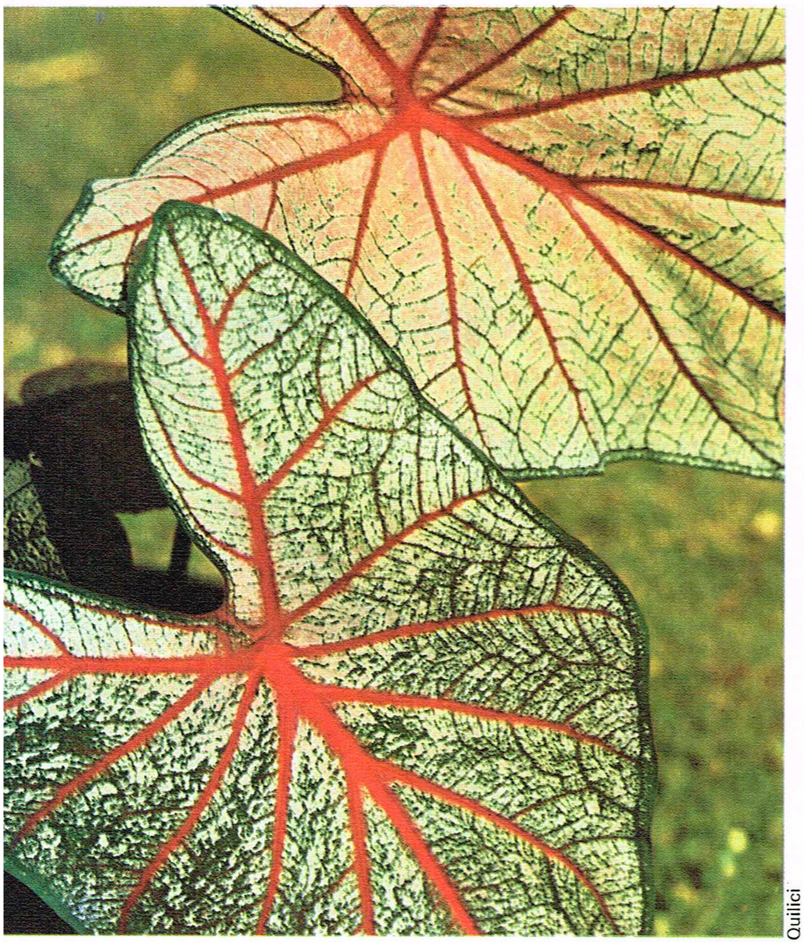

Quilici

▲ *Certaines Aracées sont cultivées pour la beauté de leurs feuilles : à gauche,* **Caladium hortulanum,** *à droite,* **Dieffenbachia picta** *var.* **superba.**

et molle en général. Une zone de fleurs stériles sépare les fleurs femelles inférieures des fleurs mâles. Ces plantes sont très recherchées, surtout *C. hortulanum (C. bicolor),* du Brésil (État de Para).

Dans la sous-famille des *Aroïdées,* les plantes possèdent généralement des tubercules ; il y a des laticifères. Les fleurs sont presque toujours unisexuées et nues. Les douze espèces du genre *Arum* se trouvent en Europe centro-occidentale et dans la région méditerranéenne jusqu'en Iran. *A. maculatum* est le gouet ou pied-de-veau. Il vit dans les lieux ombreux et caillouteux calcaires d'Europe jusqu'au Danemark et au Caucase. C'est une plante bulbeuse, à belles feuilles radicales, sagittées, paraissant au printemps, généralement entièrement vertes ou parfois tachées de sombre. Une longue spathe jaunâtre entoure le spadice, qui se termine en massue stérile violacée, riche en amidon. Les fleurs femelles sont inférieures, surmontées de fleurs stériles, puis de fleurs mâles, puis encore de fleurs stériles filiformes qui tendent à fermer l'orifice de la région inférieure de la spathe qui enveloppe toutes ces fleurs. Il n'y a pas de périanthe. L'ovaire est uniloculaire et pluriovulé. Il y a trois ou quatre étamines unies en synandre. En juin, la spathe, dont la température s'est élevée pendant la floraison, tombe et laisse paraître des baies rouges vénéneuses, qui font parfois donner à cette plante le nom de pain-de-serpent. Elles sont décoratives comme le feuillage, mais l'usage de la plante est limité à cause de l'odeur que dégage la spathe au moment de la pollinisation.

Les deux espèces du genre *Dracunculus* sont très voisines des *Arum,* mais leurs feuilles sont pédalées, c'est-à-dire avec une foliole médiane et deux folioles latérales partant de sa base, puis deux folioles plus externes partant de la base de la marge distale de celles-ci et ainsi de suite, comme chez les hellébores. La spathe, crêpelée au bord, est verte extérieurement et pourprée à l'intérieur. La massue est de couleur pourpre foncé. Il n'y a pas de fleurs stériles entre les fleurs mâles et femelles, et très peu au-dessus des fleurs mâles. Le spadice a une odeur nauséabonde comme chez les *Arum. D. vulgaris,* méditerranéen, mais naturalisé dans les régions ouest de la

M. Bavestrelli

▶ **Arum maculatum,** *le pied-de-veau, donne des baies rouges très toxiques.*

France, est cultivé pour sa feuille ; il ne s'en forme qu'une seule par an.

Parmi les six *Sauromatum,* d'Afrique tropicale et d'Indo-Malaisie, *S. guttatum,* de l'Himalaya, est célèbre parce que son bulbe donne naissance à la spathe très allongée sans nécessiter d'être planté et sans eau, mais en étant simplement placé à la chaleur. Il faut ensuite planter le bulbe et il donne naissance à une feuille pédalée ; malheureusement, le spadice a une odeur fétide.

Le genre *Arisarum,* avec trois espèces, est limité au bassin méditerranéen et à la Macaronésie. Ce sont de petites plantes à feuilles cordiformes-hastées et à spathes verdâtres ou brunes en forme de capuchon acuminé au sommet. La massue terminale du spadice est nue et courbée en avant ; il n'y a pas de fleurs stériles.

La sous-famille des *Pistioïdées* va faire transition avec la famille suivante. Ce sont des plantes en rosette, stolonifères, nageantes, sans laticifères. Les spadices sont portés par des rameaux latéraux. Chacun ne comprend qu'une fleur femelle nue, dont l'ovaire à nombreux ovules orthotropes est soudé à la spathe, et une fleur mâle fertile à deux étamines unies en synandre avec quelques rudiments d'autres fleurs mâles. Il n'y a qu'une seule espèce, *Pistia stratiotes,* plante pantropicale atteignant la Floride et le Texas, ainsi que l'Égypte, et parfois cultivée en aquarium. Elle existait déjà au Crétacé.

Les *Lemnacées (Lemnaceae)* accentuent la réduction et la simplification de toutes les parties de l'appareil végétatif et floral, déjà fort entamées chez *Pistia*. Ce sont quatre genres et vingt-cinq espèces de Végétaux aquatiques, flottants ou submergés, à racines adventives non ramifiées mais pourvues d'une coiffe bien développée ; parfois il n'y a pas de racines. L'appareil chlorophyllien est constitué d'une petite lame verte vascularisée et riche en tissu aérifère, qui produit par bourgeonnement dans les poches latérales ou terminales d'autres lames, qui, se détachant de la plante mère, donnent de nouveaux individus. Comme la libération est parfois tardive, on peut trouver des colonies de lames d'âge décroissant. Ces lames ou frondes sont ovales ou elliptiques, aplaties ou globuleuses, et leur face inférieure est parfois rougeâtre. Il semble que la fronde soit foliaire ; ce serait la préfeuille ou la première feuille d'un rameau. Près d'une fronde fille, dans la même poche ou non, se forment éventuellement un ou deux spadices entourés d'une spathe membraneuse ou nue et qui restent enfoncés dans la lame. Les fleurs sont nues, les mâles solitaires ou géminées à une seule étamine, les femelles toujours solitaires, à ovaire uniloculaire muni de un à sept ovules orthotropes ou anatropes. Le micropyle forme un couvercle, comme d'ailleurs chez *Pistia*.

Les Lemnacées habitent les eaux douces, et surtout stagnantes, sur toute la terre sauf dans les régions arctiques ; elles préfèrent les régions à climat tempéré ou tropical. Elles constituent fréquemment, à la surface des eaux, une couche continue qui se réalise par multiplication végétative, car la floraison est souvent rare chez ces plantes. Bien qu'elles semblent extrêmement évoluées dans le sens de la régression, les Lemnacées sont anciennes : on en a trouvé des fossiles au Tertiaire. Ce sont les Phanérogames les plus petites : *Wolffia arrhiza* ne dépasse guère 1 mm de diamètre. Les Lemnacées n'ont aucun intérêt économique et infestent souvent les étangs et les bassins des jardins.

Chez les *Lemnoïdées,* il y a encore des racines et une spathe ainsi que deux fleurs mâles par spadice. Les frondes filles apparaissent de part et d'autre de la mère. Il y a trois *Spirodela,* à plusieurs racines avec un faisceau de bois ; les frondes filles naissent près d'un appendice foliacé (préfeuille ?). La fronde est relativement grande (4 à 9 mm) et montre des nervures parallèles-convergentes nettes. Le genre fait transition avec *Pistia ; S. polyrrhiza,* cosmopolite, se trouve en France.

Le genre *Lemna* compte de sept à dix espèces de lentilles d'eau, dont trois en France : *L. minor,* à petites frondes à peu près rondes munies d'une racine chacune, *L. gibba,* à frondes renflées et à une seule racine, et *L. trisulca,* qui a des frondes étroites et lancéolées restant attachées en colonies. Tandis que les deux premières sont flottantes, cette dernière vit entre deux eaux. Chez les *Lemna,* il n'y a que deux ou trois nervures aux frondes et la racine n'est pas vascularisée.

C. Bevilacqua

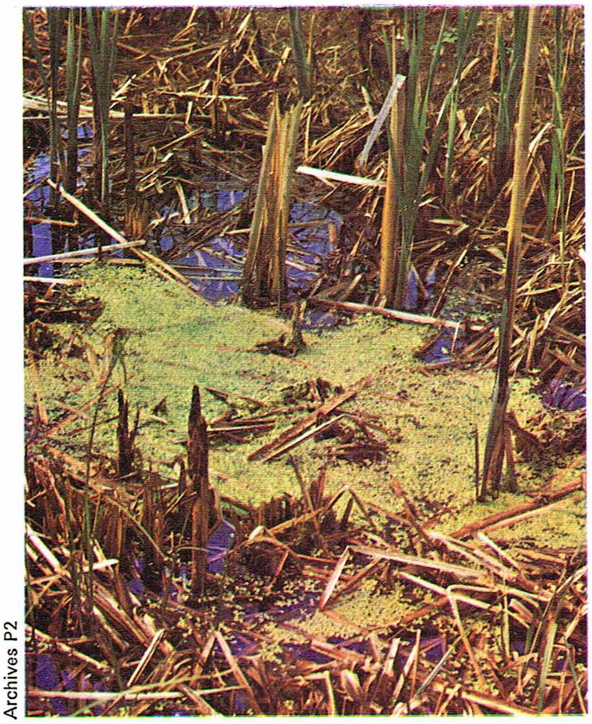

Archives P2

◀ *Les lentilles d'eau* (Lemna sp.) *forment de grandes plages vertes à la surface des eaux stagnantes des étangs et des mares.*

Chez les *Wolffioïdées,* il n'y a plus de racines et plus de spathe. Il n'y a qu'une seule fleur mâle par spadice, et l'ovaire n'a qu'un seul ovule. Chaque fronde ne forme qu'une fronde fille dans sa région postérieure. Il existe une douzaine de *Wolffia,* dont *W. arrhiza,* qu'on trouve en France ; c'est une plante des régions chaudes d'Asie et d'Afrique, qui s'avance jusqu'en Europe centro-orientale surtout, mais n'y fleurit pas.

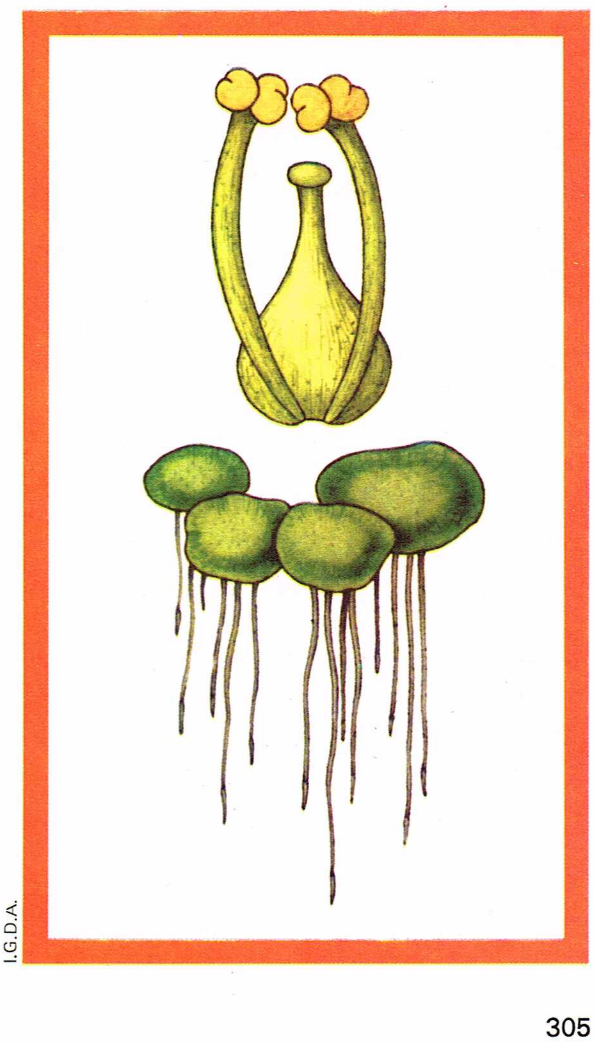

I.G.D.A.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Archives « B »

▼ *Dans le genre* Lemna *(à gauche, et à droite en haut), l'appareil chlorophyllien est réduit à une petite fronde flottante qui donne naissance à des frondes filles, lesquelles restent souvent groupées ; elles sont munies de petites racines. Le spadice est très réduit ; la fleur femelle ne comporte qu'un ovaire et les deux fleurs mâles qu'une étamine. Au-dessous,* Pistia stratiotes, *plante nageante aux feuilles en rosette, se reproduit par des stolons.*

Archives P2

▲ *Certaines espèces de* Pandanus *vivent près des côtes où leurs racines adventives formant des échasses sont découvertes à marée basse.*

Pandanales

Ce sont des Végétaux terrestres ou aquatiques peut-être proches des Spadiciflores, mais, à la différence de ces dernières, ils ont des feuilles toujours linéaires. Les fleurs ou inflorescences composées sont unisexuées, portées par des plantes monoïques ou dioïques, actinomorphes, hypogynes et à périanthe réduit ou nul. Dans les fleurs femelles, l'ovaire est constitué de un ou plusieurs carpelles; dans les mâles, il y a une ou plusieurs étamines. Les grains de pollen présentent un seul pore. Les graines sont riches en albumen avec parfois un peu de périsperme. Il y a souvent multiplication apparente des antipodes après la fécondation, par prolifération de cellules nucellaires du voisinage, ou bien il y a multiplication réelle des antipodes. Selon divers auteurs, l'ordre comprend trois familles, mais la première (Pandanacées) est en fait bien distincte des deux autres, dont on peut faire l'ordre des Typhales.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▶ *L'infrutescence de* Pandanus odoratissimus, *l'ananas de Chine, est formée par la réunion de nombreuses drupes comestibles.*

La famille des *Pandanacées (Pandanaceae)* comprend environ neuf cents espèces qui appartiennent à trois genres, *Pandanus, Freycinetia* et *Sararanga,* et s'étendent dans les régions tropicales de l'Ancien Monde jusqu'au Japon et même en Nouvelle-Zélande. Il s'agit d'arbres, d'arbustes ou de lianes avec fréquemment des racines échasses ou des racines aériennes. Les feuilles, condensées au sommet, sont disposées le plus souvent en trois hélices ou en une seule et cette disposition rend les plantes très décoratives; elles sont rarement insérées en deux ou quatre rangées. Elles sont étroites et allongées, souvent épineuses. Il peut y avoir ramification pseudodichotome. Le tronc acquiert une grande dimension par accroissement primaire diffus. Les fleurs sont unisexuées, dioïques et le plus souvent dépourvues de périanthe. Elles sont réunies en inflorescences composées, terminales, en général en tête ou en massue, ou en panicule chez *Sararanga.* Les inflorescences élémentaires sont en grappe dense à l'aisselle de bractées foliacées ou pétaloïdes qui rappellent les spathes des Spadiciflores. Les fleurs n'ont ni bractées ni préfeuilles. Les étamines sont parfois très nombreuses et plus ou moins distinctes. Les fleurs femelles sont disposées densément sur des axes charnus chez *Pandanus,* ou ligneux chez *Freycinetia;* elles sont pédonculées chez *Sararanga.* L'ovaire, supère, avec de nombreux ovules, peut être pluriloculaire et constitué de nombreux carpelles (quatre-vingts chez *Sararanga*) qui sont susceptibles de former des phanges (multiplication secondaire?). Il peut aussi être uniloculaire avec peu de carpelles ou même monocarpellé avec un seul ovule. Les fruits sont groupés en infrutescences à aspect d'ananas, composées de drupes *(Pandanus)* ou de baies *(Freycinetia).* Ils sont isolés chez *Sararanga.* Les *Pandanus* montrent une prolifération nucellaire au voisinage des antipodes.

Il existe six cent cinquante espèces de *Pandanus,* qui vivent en Afrique tropicale, à Madagascar, dans le sud-est de l'Asie et jusqu'en Australie et dans les îles du Pacifique. Ce sont des plantes arborescentes ou arbustives des forêts ou des côtes, à tronc annelé et à puissantes racines adventives formant des échasses; leurs feuilles sont coriaces, carénées et le plus souvent dentées et épineuses au bord et dorsalement sur les nervures. L'ovaire possède de un à quinze carpelles uniovulés. *P. odoratissimus* (ananas de Chine) donne des choux-palmistes. Ses feuilles servent à la fabrication de sparteries; leurs fibres sont utilisées pour faire des cordages, des paniers, des filets, etc. On tire des inflorescences mâles une essence odorante. Les fruits ont une pulpe comestible et la sève sucrée à odeur de pomme est aussi consommée. *P. odoratissimus* var. *laevis* et var. *pulposus* et *P. edulis* sont également cultivés pour les mêmes usages alimentaires. Dans nos régions, les *Pandanus* sont des plantes de serre chaude; leurs feuilles sont décoratives par leur disposition spiralée et parfois par leurs bandes marginales claires ou leurs stries jaunes.

Il y a deux cent cinquante *Freycinetia* environ, de Ceylan à Formose, à la Polynésie et au Queensland, l'Asie continentale étant exclue. Ce sont des lianes grimpantes par leurs racines. Leurs inflorescences ont des bractées souvent charnues et colorées; elles sont longuement pédonculées et groupées au sommet des pousses ou de courts rameaux latéraux. Certains fournissent leurs feuilles utilisées pour la sparterie, d'autres ont des bractées inflorescentielles comestibles *(F. banksii).* L'ovaire des *Freycinetia* est toujours pluricarpellé et possède de nombreux ovules dans chaque loge; le fruit est une baie.

Le genre *Sararanga* ne compte que deux espèces, des Philippines, des îles Salomon et de Nouvelle-Guinée. Par la présence d'un périgone réduit et le caractère pédonculé des fleurs, il semble être le plus primitif de la famille.

La famille des *Sparganiacées (Sparganiaceae)* est réduite aux vingt espèces du seul genre *Sparganium* (rubaniers). Ce sont des plantes herbacées et vivaces, avec des feuilles linéaires et engainantes à la base, à disposition distique. Il s'agit de Végétaux aquatiques à rhizome, dressés ou flottants. Les fleurs sont unisexuées

et réunies en inflorescences le plus souvent glomérulaires, les inférieures femelles, les supérieures mâles. Ces glomérules sont sessiles ou pédonculés et disposés en épis ou en panicules. Les fleurs mâles sont entourées de trois à six petites écailles périanthaires spatulées ; les femelles, qui seules ont des bractées bien nettes, ont trois sépales, mais parfois beaucoup plus. On compte de trois à six étamines à filets libres ou unis et à anthères extrorses. Le gynécée comporte généralement deux carpelles médians, mais un seul, l'adaxial, est fertile et uniovulé. Dans certaines espèces, les deux carpelles, et même un troisième, sont fertiles. Les fruits sont des drupes qui restent surmontées du style avec de longs stigmates. La graine a un albumen amylacé et un peu de périsperme. Il y a normalement protérogynie et anémogamie. La multiplication réelle des antipodes est intense après la fécondation.

Les *Sparganium* occupent les zones extra-tropicales de l'hémisphère Nord ; ils franchissent le tropique en Malaisie et se trouvent en Australie et en Nouvelle-Zélande. Il y en a quatre en France. *S. erectum* a de larges feuilles (15 mm) et des inflorescences en épi rameux et feuillé ; on trouve trois ou quatre variétés qui diffèrent par leur fruit ; *S. emersum (S. simplex)* a des feuilles étroites (5 mm) et un épi simple de glomérules. Ce sont des plantes dressées de l'hémisphère Nord ; la seconde occupe toute l'Asie jusqu'au nord de l'Inde ; la première ne dépasse pas vers l'est le centre de la Sibérie.

La famille des *Typhacées (Typhaceae)* comprend également le seul genre *Typha* (massettes) avec une quinzaine de plantes herbacées rhizomateuses, aquatiques ou des rivages. Leurs feuilles, allongées, linéaires, sont distiques et engainantes. Les fleurs, unisexuées et apérianthées, extrêmement nombreuses, sont groupées en inflorescences spadiciformes denses formant un manchon autour de la tige. Les deux sexes se succèdent au sommet de la même tige, l'inflorescence étant mâle dans sa partie terminale. A la base de chaque manchon, il y a une spathe rapidement caduque. Sous les fleurs se trouvent des soies qui représentent peut-être le périanthe. Il y a trois étamines (parfois une à sept) avec leurs filets libres ou soudés à la base. Le pollen peut être en tétrades. Les fleurs femelles ont parfois une bractée axillante. Leur ovaire, formé par un seul carpelle à un ovule pendant, est surmonté d'un style persistant à stigmate élargi et porté par un long gynophore sur lequel sont insérées des soies. Il y a protérandrie et la pollinisation se fait par le vent, qui, ensuite, dissémine les fruits. Ceux-ci sont de petits akènes dont les soies « périanthaires » forment le pappus. Ils finissent par se fendre et libèrent leur graine qui contient un mince périsperme et germe avec ouverture d'un couvercle tégumentaire. Il y a multiplication des antipodes après la fécondation.

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

Bavestrelli - Bevilacqua - Prato

▲ ***En haut,* Typha angustifolia, *la massette, est une plante aquatique aux longues feuilles rubanées.***
***A gauche, infrutescence de* Sparganium emersum.**
***A droite, inflorescence femelle de* Typha angustifolia.**

BIBLIOGRAPHIE

Principes et méthodes. LAWRENCE, G. H. M., *An Introduction to Plant Taxonomy,* New York, 1955. - MANN, P., *Systematics of Flowering Plants,* Londres, 1963 ; *International Code of Botanical Nomenclature,* Utrecht, 1973.
Bibliographie. *Annual Review of Ecology and Systematics,* Palo Alto, annuel depuis 1970. - KENT, D. H., *Index to Botanical Monographs,* Londres, 1967. - KENT, D., *et al.,* éd., *Index to European Taxonomic Literature,* annuel depuis 1965, Utrecht. Travaux concernant la flore d'Europe. - STAFLEU, F. A., *Taxonomic Literature,* Utrecht, 1967, Choix d'ouvrages classiques. - SWIFT, L. G., *Botanical Bibliographies,* Minneapolis, 1970.
Ouvrages généraux. *Ouvrages d'usage courant. A. Englers Syllabus der Pflanzenfamilien* (H. Melchior, éd.), 12e éd. 2. Berlin, 1964. - CRONQUIST, A., *The Evolution and Classification of Flowering Plants,* Londres, 1968. - EMBERGER, L., *les Végétaux vasculaires.* 2 vol. (CHADEFAUD, M., et EMBERGER, L., *Traité de botanique,* 2., Paris, 1961). - ENGLER, A., éd., *Die natürlichen Pflanzenfamilien,* 2e éd., Berlin. - HUTCHINSON, J., *The Families of Flowering Plants,* 2e éd., Oxford, 1959. - TAKHTAJAN, A., *Sistema i filogenija tsvetkovyk rastenii,* Leningrad, 1966 ; *Flowering Plants,* Édimbourg, 1969.
Ouvrages anciens essentiels. BENTHAM, G., et HOOKER, J. et D., *Genera plantarum,* 3 vol., Londres, 1862-1883, réimpr. Weinheim, 1965. - ENGLER, A., éd., *Das Pflanzenreich,* 107 vol., Leipzig, 1900-1953. - ENGLER, A., et PRANTL, K., éd., *Die natürlichen Pflanzenfamilien.* 1re éd., 33 volumes, Leipzig, 1887-1915. - RENDLE, A. B., *The Classification of Flowering Plants,* 2 vol., Cambridge, 1904-1925. - WETTSTEIN, R. von, *Handbuch der systematischen Botanik,* 4e éd., Leipzig, 1935, réimpr., Amsterdam, 1962.
Index alphabétiques. *Index Kewensis,* 2 vol. et suppl. quinquennaux, Oxford, 1895. - ROULEAU, E., *Guide to Index Kewensis.* Montreal, 1970. - WILLIS, J. C., *A Dictionary of the Flowering Plants and Ferns,* 8e éd. par H. K. Airy Shaw, Cambridge, 1973.
Dictionnaires terminologiques. DAVYDOV, N. N., *Botaniceskii slovar',* Moscou, 1962. - GATIN, C. L., *Dictionnaire de botanique,* Paris, 1924, réimpr. Nendeln, 1969. - JACKSON, B. D., *A Glossary of Botanic Terms,* 4e éd., Londres, 1905, réimpr. New York, 1965. - STEARN, W. T., *Botanical Latin,* 2e éd., Londres, 1973 (latin-anglais).
Disciplines de base de la systématique. *Morphologie.* EAMES, A. J., *Morphology of the Angiosperms,* New York, 1961. - EICHLER, A. W., *Blüthendiagramme,* 2 vol., Leipzig, 1875-1878, réimpr. Eppenheim, 1954. - RAUH, W., *Morphologie der Nutzpflanzen,* Heidelberg,

1950. - TROLL, W., *Praktische Einführung in die Pflanzenmorphologie,* 2 vol., Iéna, 1954-1957; *Vergleichende Morphologie der höheren Pflanzen I. Vegetationsorgane,* 3 vol., Berlin, 1937-1943, réimpr. Koenigstein, 1967-71; *Die Infloreszenzen,* en cours, 2 vol. parus, Stuttgart, 1964-1969.

Palynologie. ERDTMANN, G., *Pollen Morphology and Plant Taxonomy. Angiosperms,* Waltham, 1952, réimpr. New York, 1966; *Palynology, in* R. D. Preston, éd., *Adv. Bot. Res.,* **1**, 149-208. Londres, 1963; *Handbook of Palynology,* Copenhague, 1969.

Phytochimie. ALSTON, R. E., et TURNER, B. L., *Biochemical Systematics,* Englewood Cliffs, 1963. - FROHNE, D., et JENSEN, U., *Systematik des Pflanzenreichs unter besonderer Berücksichtigung chemischer Merkmale,* Stuttgart, 1973. - HEGNAUER, R., *Chemotaxonomie der Pflanzen,* 6 vol., Bâle, 1962-1973. Traité fondamental. - PARIS, R. R., et MOYSE, H., *Précis de matière médicale,* 3 vol., Paris, 1965-1971.

Embryologie systématique. DAVIS, G. L., *Systematic Embryology of the Angiosperms,* New York, 1966. - JOHRI, B. M., *Embryology and Taxonomy, in* P. Maheshweri, éd., *Recent Adv. Embryol. Angiosperms,* 395-444, Delhi, 1963. - MAHESHWARI, P., *Embryology in Relation to Taxonomy, in* W. B. Turrill, éd., *Vistas in Botany,* **4**, 55-97, Oxford, 1964.

Cytologie. DARLINGTON, C. D. et JANAKI AMMAL, E. K., *Chromosome Atlas of Cultivated Plants,* Londres, 1945. - DARLINGTON, C. D., et WYLIE, A. P., *Chromosome Atlas of Flowering Plants,* 2ᵉ éd., Londres, 1955. - FEDOROV, A. A., éd., *Kromosomnye cisla tsvetkovyk rastenii,* Leningrad, 1969. - MOORE, R. J., *Index to Plant Chromosome Numbers,* Utrecht, annuel depuis 1965. - SOLBRIG, O. T. et GADELLA, Th. W. J., *Biosystematic Literature,* 1945-1964, Utrecht, 1970.

Biologie florale. FAEGRI, K., et VAN DER PIJL, L., *The Principles of Pollination Ecology,* 2ᵉ éd., Oxford, 1971. - KNOLL, F., *Die Biologie der Blüte,* Berlin, 1956. - KÜGLER H., *Blütenökologie,* 2ᵉ éd., Stuttgart, 1970. - PERCIVAL, M., *Floral Biology,* Oxford, 1965. - PROCTOR, M., et YEO, P. F., *The Pollination of Flowers,* Londres, 1973. - RIDLEY, H. N., *The Dispersal of Plants throughout the World,* Ashford, 1930. - VAN DER PIJL, L., *Principles of Dispersal in Higher Plants,* 2ᵉ éd., Berlin, 1972.

Biogéographie. BIROT, P., *les Formations végétales du globe,* Paris, 1965. - GAUSSEN, H., *Géographie des plantes,* 2ᵉ éd., Paris, 1954. - GOOD, R., *The Geography of Flowering Plants,* 2ᵉ éd., Londres, 1964. - HULTEN, E., *The Amphi-atlantic Plants,* Stockholm, 1958; *The Circumpolar Plants,* 2 vol., Stockholm, 1964-1970; *Atlas of the Distribution of Plants in NW Europe,* Stockholm, 1971. - MEUSEL, H., *Vergleichende Chorologie der zentraleuropaischen Flora,* en cours, 2 vol. parus, Iéna, 1965. - OZENDA, P., *Biogéographie végétale,* Paris, 1964. - POLUNIN, N., *Introduction to Plant Geography,* Londres, 1960. - RICHARDS, P. W., *The Tropical Rain Forest,* Cambridge, 1964. - SCHNELL, R., *Introduction à la phytogéographie des pays tropicaux,* 2 vol., Paris, 1970. - STRAKA, H., *Arealkunde,* in H. Walter, *Einführung in die Phytologie,* 2ᵉ éd. 3-2, Stuttgart, 1970. - TRALAU, H., éd., *Index Holmensis. A World Phytogeographic Index,* en cours, Stockholm, depuis 1969.

Paléobotanique. EMBERGER, L., *les Plantes fossiles,* 2ᵉ éd., Paris, 1968. - GOTHAN, W., et WEYLAND, H., *Lehrbuch der Paläobotanik,* 3ᵉ éd., Munich, 1973.

Plantes utiles (y compris les plantes horticoles). BAILEY, L. H., éd., *Manual of Cultivated Plants,* 2ᵉ éd., New York, 1949. - BOIS, D., *les Plantes alimentaires,* 4 vol., Paris, 1927-1937. - BOOM, B. K., *Flora der cultuurgewassen van Nederland.* 1. *Nederlandse dendrologie;* 2. *Flora der gewekte, kruidachtige gewassen;* 3. *Flora van kamer- en kasplanten,* Wageningen, 1949, 1965, 1968. - FOURNIER, P., *Flore illustrée des jardins et des parcs. Arbres, arbustes et arbrisseaux de pleine terre,* 4 vol., Paris, 1951-1952. - GRAF, A. B., *Exotica III,* Rutherford, 1963. - HAY, R. H., et SYNGE, P. M., *The Dictionary of Garden Plants in Colour,* Londres, 1969. - HEDRICK, U. P., éd., *Sturtewant's Edible Plants of the World,* Albany, 1919, réimpr. New York, 1972. - MANSFELD, R., *Vorlaüfiges Verzeichnis landwirtschaftlich und gärtnerisch kultivierter Pflanzenarten,* 2ᵉ éd., Berlin, 1959. - NICHOLSON, B. E., *The Oxford Book of Food Plants,* Oxford, 1969; *The Oxford Book of Garden Plants,* Oxford, 1964. - PARDÉ, L., *les Feuillus,* Paris, 1943. - PURSEGLOVE, J. W., *Tropical Crops,* 4 vol., Londres, 1968-1972. - REHDER, A., *Manual of Cultivated Trees and Shrubs,* 2ᵉ éd., New York, 1940. - ROL, R., et JACAMON, M., *Flore des arbres,* 4 vol. et index, Paris, 1962-1969. - UPHOF, J. C. Th., *Dictionary of Economic Plants,* 2ᵉ éd., Lehre, 1968.

Flores. CLAPHAM, A. R., TUTIN, T. G., et WARBURG, E. F., *Flora of the British Isles,* 2ᵉ éd., Cambridge, 1962. - COSTE, H., *Flore de France,* 3 vol., Paris, 1900-1906, réimpr. 1965; Supplément par JOVET, P., et VILMORIN, R. de, en cours, 2 fasc. parus, Paris, 1972-1974. - GUINOCHET, M., et VILMORIN, R. de, *Flore de France,* en cours, 1 vol. paru, Paris, 1973. - HEGI, G., éd., *Illustrierte Flora von Mitteleuropa,* 2ᵉ éd. en cours, Munich. - HESS, D., LANDOLDT, H. E., et HIRZEL, R., *Flora der Schweiz,* 3 vol., Bâle, 1967-1972. - POLUNIN, O. *Flowers of Europe. A Field Guide,* Londres, 1969. - POLUNIN, O., et SMYTHIES, B. E., *Flowers of South-West Europe,* Londres, 1973. - TUTIN, T. G. *et al.,* éd., *Flora Europaea,* en cours, 3 vol. parus, Cambridge, 1964-1972. Révision essentielle.

Ouvrages généraux sur les Dicotylédones. HUTCHINSON, J., *Evolution and Phylogeny of Flowering Plants. Dicotyledons : Facts and Theory,* Londres, 1969. - METCALFE, C. R., et CHALK, L., *Anatomy of the Dicotyledons,* 2 vol., Oxford, 1950, nouvelle éd. en préparation. - SOLEREDER, H., *Systematische Anatomie der Dikotyledonen,* 2 vol, Stuttgart, 1899-1908.

Ouvrages généraux sur les Monocotylédones. METCALFE, C. R., éd., *Anatomy of the Monocotyledons,* en cours, 6 vol. parus, Oxford, 1960-1972. - SOLEREDER, H., et MEYER, J. J., *Systematische Anatomie der Monocotyledonen,* incomplet, 4 fasc. parus, Berlin, 1928-1933.

Quelques ouvrages spéciaux sur les Monocotylédones. DANESCH, O. et E., *Orchideen Europas,* 3 vol., Berne, 1961-1972. - GOULD, F. W., *Grass systematics,* New York, 1968. - RAUH W., *Bromelien für Zimmer und Gewachshaus,* 2 vol., Heidelberg, 1973. - SCHLECHTER, R., *Die Orchideen,* 3ᵉ éd., en cours depuis 1970, Berlin. - WITHNER, C. L., éd., *The Orchids,* New York, 1959.

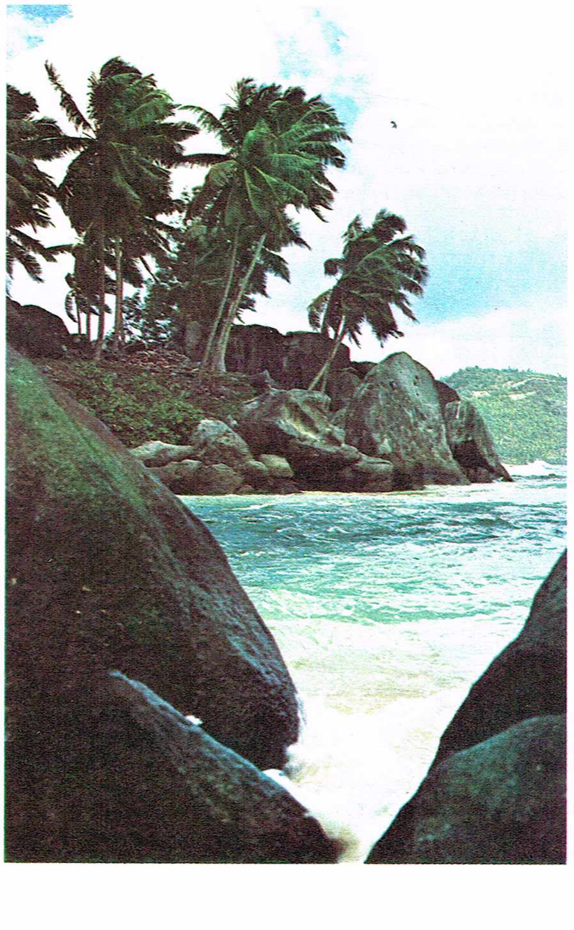

P. Walker - Explorer

▶ ***Palmiers évocateurs de longs voyages... ici aux îles Seychelles.***

LEXIQUE DE BOTANIQUE

SUPPLÉMENT AUX VOLUMES I ET II DE LA GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

ABRÉVIATIONS

		lat.	latin	*part.*	particulièrement
adj.	adjectif	*n.*	nom	*spécialt.*	spécialement
ex.	exemple	*par ext.*	par extension	syn.	synonyme

A

abaxial. *adj.* Se dit d'une partie d'organe dirigée du côté opposé à l'axe qui le porte. La face inférieure d'une feuille est abaxiale.

abiétoïde ou **abiétinéenne.** *adj.* Caractérise la disposition des ponctuations aréolées des faces latérales des trachéides, bien séparées les unes des autres, souvent par des bourrelets de la paroi.

acaule. *adj.* Littéralement, sans tige. En général, à tige très courte, les feuilles étant rassemblées en rosette basale.

accrescent. *adj.* Susceptible de se développer d'une manière importante. Se dit en particulier de certaines pièces florales autres que l'ovaire (calice, parfois corolle), qui peuvent prendre, après la fécondation, l'aspect d'un fruit.

acervule. *n.* Formation aplatie, formée par un mycélium de Champignon et portant des structures reproductrices (conidiophores).

acétaldéhyde. *n.* Aldéhyde correspondant à l'alcool éthylique et à l'acide acétique. On sait que les aldéhydes portent un groupe —CHO, les acides un groupe —COOH, et les alcools primaires comme l'éthanol un groupe —CH_2OH.

achlamydé. *adj.* Dépourvu de périanthe (calice et corolle).

aciculaire. *adj.* En forme d'aiguille. Se dit des feuilles de Conifères, étroites et pointues.

acide acétique. Acide organique correspondant à l'alcool ordinaire. De formule CH_3—COOH. Se forme lors de la fermentation acétique (qui, par exception, est aérobie) à partir de l'alcool du vin. Est responsable de l'acidité et de l'odeur du vinaigre.

acide adénosine-triphosphorique, adénosine triphosphate ou **ATP.** Substance organique constituée d'une base purique, l'adénine, d'un sucre à cinq atomes de carbone et de trois molécules d'acide phosphorique. Elle se forme à partir d'acide adénosine diphosphorique, ou ADP (dont la composition est identique, mais avec deux molécules d'acide phosphorique seulement), lors d'une réaction endergonique qui permet d'emmagasiner l'énergie issue de la dégradation d'un métabolite et qui sera récupérée par décomposition de l'ATP en ADP et phosphate.

acide alginique ou **algine.** Substance pectique présente chez les Algues brunes (Laminariales) et qui constitue l'essentiel de la paroi squelettique de leurs cellules.

acide aminé. Substance organique azotée, à la fois acide et basique. Liés les uns aux autres, les acides aminés forment les peptides.

acide ascorbique. Vitamine C. Substance à six atomes de carbone, avec une fonction alcool secondaire, voisine des sucres, mais présentant une double liaison. Abondante dans les légumes et les fruits (citrons) ; sa carence provoque le scorbut.

acide benzoïque. Acide organique dans lequel une fonction acide est fixée sur un noyau benzénique C_6H_5—COOH. Important constituant des baumes vrais.

acide cinnamique. Acide organique comportant un noyau benzénique et de formule C_6H_5—CH=CH —COOH. Important constituant des baumes vrais.

acide citrique. Acide organique à six atomes de carbone dont trois portent des fonctions acides (—COOH). Joue un rôle très important dans le métabolisme respiratoire de toutes les cellules. Abondant dans les citrons.

acide cyanhydrique. Substance toxique de formule H—C≡N. La formule de l'acide formique étant H—COOH et la fonction nitrile —C≡N, on voit qu'il s'agit du nitrile formique. Se forme, chez les Végétaux (amandes amères, laurier-cerise), à partir d'hétérosides contenant des nitriles.

acide désoxyribonucléique, ADN ou **DNA.** Substance organique complexe comportant des molécules de bases organiques et le même nombre de molécules d'un sucre à cinq atomes de carbone et d'acide phosphorique, liées les unes aux autres en longues chaînes. La molécule d'ADN est généralement formée de deux de ces chaînes unies de manière lâche. Présent dans les chromosomes et d'autres organites (mitochondries, plastes). Les bases sont disposées le long de la chaîne selon un ordre invariable qui sera reflété par celui des acides aminés des protéines de la cellule. Ces dernières sont responsables de toute l'édification de l'organisme (le métabolisme dépend des enzymes, qui sont des protéines). L'ADN représente l'information, le code génétique de l'organisme. L'ADN des chromosomes des gamètes assure donc la transmission de ce code d'une génération à l'autre.

acide ellagique. Depside de l'acide gallique, à trois fonctions phénol et une fonction acide. Des hétérosides de ce corps forment des tanins.

acide formique. Acide organique ne contenant qu'un atome d'hydrogène en plus de sa fonction acide (H—COOH). Produit par les fourmis ainsi que par les orties.

acide fumarprotocétrarique. L'une des depsidones des Lichens.

acide glycérique. Acide correspondant à la glycérine (glycérol) et dans lequel une fonction alcool primaire (—CH_2OH) est remplacée par une fonction acide (—COOH).

acide lactique. Acide organique à trois atomes de carbone, présentant une fonction alcool secondaire (CH_3—CHOH—COOH). Peut être formé par la fermentation du lactose présent dans le lait qui « caille » alors.

acide linoléique. Acide gras à dix-huit atomes de carbone avec deux doubles liaisons. Lié au glycérol dans l'huile de lin.

acide linolénique. Acide gras dont la molécule compte dix-huit atomes de carbone, avec trois doubles liaisons. Présent dans l'huile de lin (lié au glycérol), qu'il contribue à rendre siccative.

acide lysergique. Substance organique à quatre cycles, dont deux formant un noyau indole. C'est la portion fondamentale de la molécule des alcaloïdes contenus dans le sclérote de l'ergot du seigle et de diverses autres plantes. Possède des propriétés hallucinogènes.

acide malique. Acide organique à quatre atomes de carbone, dont deux portent des fonctions acides (—COOH). Joue un rôle très important dans le métabolisme respiratoire.

acide oléique. Acide gras formé d'une chaîne de dix-huit atomes de carbone, le dernier formant la fonction acide organique —COOH, avec une double liaison. Abondant dans les huiles d'arachide, de lin, d'olive, etc., où il est lié au glycérol.

acide organique. Substance organique présentant un ou plusieurs groupements —COOH dont l'hydrogène est remplaçable par un métal.

acide oxalique. Acide organique constitué de deux fonctions acide (COOH—COOH). Son sel de potassium est abondant dans l'oseille.

acide rhodocladonique. Substance présente dans divers Lichens du genre *Cladonia*. Elle présente trois cycles benzéniques condensés avec deux =O sur le cycle médian : c'est une anthraquinone. Les Insectes possèdent des pigments voisins de cet acide.

acide ribonucléique, ARN ou **RNA.** Molécule organique voisine de l'acide désoxyribonucléique mais dans laquelle le sucre à cinq atomes de carbone est différent. Il en existe plusieurs formes, dont le poids moléculaire est différent. Deux d'entre elles

au moins sont essentielles à la synthèse des protéines : l'*ARN messager* et l'*ARN de transfert*. Le premier est formé sur le modèle de l'ADN et passe dans le cytoplasme pour s'associer aux ribosomes. C'est à son contact que seront unis les acides aminés qui constitueront une protéine déterminée. Chaque acide aminé arrive fixé à une molécule d'ARN de transfert particulière, plus petite, qui s'unit transitoirement et spécifiquement à un point donné du premier ARN et place l'acide aminé au bon endroit.

acide tartrique. Acide organique à deux fonctions acide et deux fonctions alcool secondaire (COOH—CHOH—CHOH—COOH). Abondant dans les raisins et le vin.

acide uronique. Substance formée par une molécule de sucre dont une fonction alcool primaire est remplacée par une fonction acide organique.

acide usnique. Substance complexe présente dans beaucoup de Lichens, comportant deux noyaux benzéniques liés par un oxygène et une liaison entre deux carbones (noyau dibenzofurane).

acide vulpinique. Substance contenue dans divers Lichens. Elle présente deux noyaux benzéniques liés par une chaîne à quatre atomes de carbone, munie de deux doubles liaisons.

acidophile ou **acidiphile.** *adj.* **(Végétal).** Qui vit sur des milieux acides.

acido-résistance ou **acido-alcoolo-résistance.** Caractère de certaines Bactéries (Mycobactéries) qui conservent, malgré un traitement par l'alcool et un acide fort (méthode de Ziehl-Nielsen), la coloration acquise au contact de la fuschine basique.

acrasine. *n.* Substance émise par les Acrasiales (Myxomycètes) assurant l'agrégation de leurs cellules amiboïdes.

acrocarpe. *adj.* **(Mousse).** Dont les archégones, et, par conséquent, le ou parfois les sporogones se trouvent au sommet des tiges feuillées.

actinomorphe. *adj.* **(fleur).** A symétrie radiée (possédant un axe de symétrie).

acuminé. *adj.* Se terminant brusquement par une pointe allongée. Se dit du limbe d'une feuille.

acyclique. *adj.* **(fleur).** Dont les pièces sont disposées en spirale et non en verticilles.

adaxial. *adj.* Se dit d'une partie d'organe dirigée du côté de l'axe qui le porte. *Ex.* La face supérieure d'une feuille est adaxiale.

adhérent. *adj.* Soudé tangentiellement et congénitalement. Deux organes adhérents (tube floral et ovaire par exemple) naissent soudés.

ADN. Voir *acide désoxyribonucléique*.

adventice. *adj.* **(plante).** Introduite accidentellement dans un endroit où elle n'est pas indigène et qui ne s'y maintient généralement pas; sinon elle est dite *naturalisée*.

adventif. *adj.* **(organe).** Formé sur un autre organe de façon atypique. *Ex.* Un bourgeon sur une feuille, ou une racine sur la surface d'une tige et non dans son prolongement. Le phénomène peut être constant. *Ex.* Bourgeons adventifs sur les feuilles de *Bryophyllum* (Crassulacées); racines adventives sur d'innombrables tiges.

aérenchyme. *n.* Tissu où existent de vastes espaces intercellulaires remplis d'air. Commun chez les plantes aquatiques.

aériennes. *adj.* **(racines).** Racines adventives se développant dans l'air. Servent d'appareil d'accrochage (lierre) ou absorbent de l'eau (Orchidées épiphytes). Peuvent être vertes.

aérobie. *adj.* **(organisme).** Qui ne peut vivre qu'en présence d'oxygène.

aérobiose. *n.* Mode de vie des êtres aérobies, auxquels la présence d'oxygène est indispensable.

æthélie. *n.* Sporocarpe simple des Myxomycètes.

affine. *adj.* **(espèce).** Apparentée à une autre espèce soit parce qu'elle dérive d'elle au cours de l'évolution, soit parce qu'elles ont un ancêtre commun. On dit : espèce affine d'une autre, des espèces affines entre elles. Peut se dire d'autres groupes taxonomiques.

agar ou **agar-agar.** *n.* Voir *gélose*.

aglycone. *n.* Substance non glucidique entrant dans la composition d'un hétéroside.

agrume. *n.* 1° Fruit comestible des Rutacées Citroïdées (citrons, oranges, pamplemousses, etc.). 2° La plante elle-même.

aigrette ou **pappus.** *n.* Appendice de divers akènes, ceux des Composées en particulier.

aiguillon. *n.* Piquant superficiel non irrigué par l'appareil vasculaire de l'organe qui le porte, comme l'épine du rosier.

aile. *n.* 1° Appendice aplati de certains fruits (samares) facilitant leur transport par le vent. 2° Languette fixée longitudinalement à une tige, dite ailée, et prolongeant vers le bas les marges des feuilles (dites décurrentes) ou leurs nervures. 3° Chacun des pétales latéraux de la corolle des Papilionacées (haricot, pois).

aisselle. *n.* Angle formé par une feuille et la tige, et abritant un ou plusieurs bourgeons axillaires. *Par ext.* Angle formé par l'insertion d'une partie d'un organe sur une autre.

akène, achaine ou **achène.** *n.* Fruit sec ne s'ouvrant pas spontanément. Contient le plus souvent une seule graine, qui est libérée par décomposition de la paroi du fruit (péricarpe).

akinète. *n.* Cellule entière à paroi épaissie, assurant dans des conditions difficiles la survie et la reproduction asexuée chez des Cyanophycées et certaines Algues Zygophycées.

albedo. *n.* Couche interne blanche du péricarpe (« écorce ») des agrumes (oranges, citrons).

albumen. *n.* Tissu formé à partir d'une cellule issue de la fécondation de la cellule centrale à deux noyaux du sac embryonnaire et par conséquent triploïde. Subsiste ou non dans la graine mûre, qui est albuminée ou non. On distingue trois types d'albumen : a) l'*albumen nucléaire*, dans lequel les premières divisions du noyau triploïde se font sans qu'il y ait formation de cellules; b) l'*albumen cellulaire*, dans lequel il y a formation immédiate de cellules et pas de stade à noyaux libres; c) l'*albumen hélobial*, dans lequel il y a division en deux cellules dont l'une seulement subit par la suite des divisions selon le mode nucléaire.

albuminé. *adj.* Qui comporte un albumen.

alcaloïdes. *n.* Substances organiques, souvent complexes, azotées, de structure variable, de réaction alcaline. Présentent des réactions caractéristiques; par exemple, ils forment un précipité brun avec la solution iodo-iodurée et des précipités orangés ou rouges avec l'iodobismuthite de potassium, ou réactif de Dragendorff.

alcoolature. *n.* Produit de la macération d'une plante fraîche dans de l'alcool ordinaire.

alcool méthylique. *n.* La plus simple substance à fonction alcool primaire : $H—CH_2OH$. Son aldéhyde est l'aldéhyde formique (H—CHO). Présent dans les fruits de cerfeuil ou de berce.

aldéhyde. *n.* Substance organique possédant un groupe —CHO, comme l'aldéhyde formique (H—CHO).

aleuriospore. *n.* Conidie particulière des Actinomycètes, formée isolément.

alginate. *n.* Sel de l'acide alginique.

algologie. *n.* Etude des Algues.

aliphatique. *adj.* **(substance organique).** Dont le squelette carboné forme une chaîne et non un cycle.

allergique. *adj.* **(réaction).** Réaction, parfois très grave, à l'absorption ou à l'injection d'une substance en principe inoffensive (pollen, spores, etc.) à laquelle le sujet a été sensibilisé lors d'un apport antérieur. La production d'anticorps particuliers détermine alors divers symptômes dont l'urticaire, certains troubles digestifs ou éventuellement cardio-vasculaires, respiratoires et hémorragiques.

alluvionnaire. *adj.* Qui concerne les alluvions. Qui est constitué ou formé à partir des alluvions. Les alluvions sont les matériaux charriés par les fleuves et qui se déposent à la faveur des crues ou d'une baisse de la force du courant.

alpin. *adj.* **(étage).** Situé au-dessus de la zone des forêts. On y rencontre des Végétaux herbacés et des arbrisseaux.

alternance de générations. Existence d'un organisme sous deux formes : un *gamétophyte*, ou prothalle, qui forme les cellules sexuées, dont la fusion produit l'œuf, et un *sporophyte*, issu de l'œuf et formant des spores, qui engendreront à leur tour des gamétophytes. La Mousse feuillée est un gamétophyte, la Fougère un sporophyte. Le sporophyte de la Mousse est le sporogone, en forme d'urne portée par une soie. Le gamétophyte de la Fougère est une petite lame ou une masse peu apparente. Les plantes à fleurs sont des sporophytes et leur gamétophyte est réduit soit aux grains de pollen, soit au sacs embryonnaires des ovules qui forment les cellules sexuées mâles et femelles. Voir *alternance de phases*.

alternance de phases. Terme plus exact que celui d'*alternance de générations* mais pourtant moins utilisé que ce dernier. Il faut, en effet, deux phases (sporophyte et gamétophyte) pour constituer une génération, caractérisée par une seule reproduction sexuée. L'alternance du sporophyte et du gamétophyte représente donc une alternance de phases et non véritablement de générations.

alterne. *adj.* Qui est situé en face de l'espace séparant deux autres pièces. *Ex.* Etamines alternes avec les pétales; feuilles alternes, situées chacune à un niveau différent de la tige, à l'emplacement d'un nœud, et sur plus de deux rangées longitudinales (sinon, elles sont dites *distiques*).

alternipétale. *adj.* Qui alterne avec les pétales.

alternisépale. *adj.* Qui alterne avec les sépales.

amande. *n.* 1° En général, graine contenue dans le noyau d'une drupe. 2° Parfois, contenu d'une graine (albumen, endosperme ou embryon) renfermé dans le tégument dur de cette graine, en particulier chez les Gymnospermes.

ambisexué. *adj.* Qui présente les deux sexes.

améliorante. *adj.* **(plante).** Qui enrichit le sol en azote, qu'elle fixe à partir de l'atmosphère.

amentacé. *adj.* A fleurs disposées en chatons.

amibe. *n.* Animal unicellulaire à membrane déformable, progressant par mouvements amiboïdes et se nourrissant par phagocytose de minuscules proies. *Par ext.* Cellule végétale ou cœnocyte présentant des caractères analogues quant à la nutrition et à la locomotion.

amiboïde. *adj.* **(cellule, plasmode** ou **pseudoplasmode).** Qui a la forme d'une masse irrégulière émettant des digitations rétractiles, ou pseudopodes, qui permettent son déplacement et son alimentation (par phagocytose). On dit aussi d'un mouvement qu'il est amiboïde.

amidon. *n.* Polymère insoluble du glucose. Substance de réserve très répandue chez les plantes, formée dans des plastes spéciaux, qui deviennent alors des grains d'amidon de forme caractéristique. Les fécules (pomme de terre, maïs, manioc) sont des amidons.

amine. *n.* Substance possédant un groupe $—NH_2$.

aminé. *adj.* Qui renferme un ou des groupes amine, comme un acide aminé.

ammoniacal. *adj.* Qui concerne le gaz ammoniac (NH_3), l'ammoniaque (NH_4OH) ou l'ammonium ($—NH_4$).

ammonium. *n.* Groupement $—NH_4$, qui se comporte comme un métal et forme des sels dont les propriétés se rapprochent de celles des sels de sodium ou de potassium.

amphiatlantique. *adj.* Qui habite les régions européennes et d'Amérique du Nord riveraines de l'océan Atlantique.

amphicarpie. *n.* Présence de deux types de fruits : certains, normaux, aériens, et d'autres mûrissant dans le sol, et issus de fleurs cléistogames (géocarpie).

amphigastre. *n.* Chez de nombreuses Hépatiques, feuille réduite située ventralement.

amphithécium. *n.* ou **rebord thallin.** Paroi de l'apothécie de certains Lichens, formée par le thalle, et qui possède, à la différence du parathécium, des cellules vertes d'Algue (gonidies).

amphitrope. *adj.* **(ovule).** Ovule anatrope dont le nucelle est, de plus, fortement courbé du côté du raphé.

amplexicaule. *adj.* **(feuille, bractée).** Qui embrasse la tige.

amplitude thermique. Écart entre les températures les plus froides et les plus chaudes.

amylacé. *adj.* Constitué par ou contenant de l'amidon.

amylase. *n.* Enzyme susceptible de décomposer l'amidon en polymères plus petits (dextrines) et en maltose.

amylopectine. *n.* Variété d'amidon dont les chaines de polymères du glucose sont ramifiées et qui se rapproche ainsi du glycogène des Animaux et des Champignons.

amyloplaste. *n.* Plaste qui accumule de l'amidon et se réduit finalement à un grain d'amidon.

anaérobie. *adj.* 1° Qui peut vivre sans oxygène. Une forme anaérobie peut l'être de façon facultative ou « stricte »; dans ce dernier cas, l'oxygène est toxique pour elle. 2° Qui se produit sans oxygène (réaction du métabolisme).

anaérobiose. *n.* Mode de vie ne nécessitant pas la présence d'oxygène.

anastomose. *n.* Union de deux cellules ou vaisseaux, par un canal ou un orifice appelés anastomoses.

anastomosé. *adj.* Uni par une ou plusieurs anastomoses.

anatomie. *n.* Étude des organes internes des êtres et de leurs rapports. Les Végétaux n'ont pas, à proprement parler, de tels organes, et l'*anatomie végétale* des Cormophytes est, en fait, leur *histologie*.

anatomie comparée. Étude comparative de l'organisation des êtres qui a pour fonction de déterminer lesquelles de leurs parties sont homologues entre elles.

anatrope. *adj.* **(ovule).** Ovule pendant le long de son funicule et uni à lui en un raphé. Le micropyle se trouve donc non loin du hile, point d'insertion apparent du funicule.

androcée. *n.* Ensemble des étamines.

androspore. *n.* Zoospore émise par le gamétophyte de certains *Oedogonium* (Algues vertes), et qui se développe en un petit gamétophyte mâle de deuxième génération. Le cycle est alors trigénétique.

anémogamie. *n.* Voir *anémophilie*.

anémophilie ou **anémogamie.** *n.* Pollinisation avec transport du pollen par le vent.

aneuploïde. *adj.* Qui possède quelques chromosomes de plus ou de moins que les autres individus de la même espèce ou de groupes voisins. *N.* Un aneuploïde.

aneurine. *n.* Vitamine B_1, dont la carence cause le béri-béri. Substance azotée et soufrée, nécessaire au fonctionnement de certaines enzymes de la respiration cellulaire.

angiocarpique ou **angiocarpe.** *adj.* Dont l'hyménium n'apparaît à l'extérieur qu'après déchirement du carpophore.

angiosperme. *adj.* **(plante).** Dont les ovules sont enfermés dans une cavité close, un carpelle isolé ou encore dans un ovaire issu de plusieurs carpelles. *N.* Une Angiosperme.

anisogame ou **anisogamique.** *adj.* Voir *hétérogame*.

anisogamie. *n.* Voir *hétérogamie*.

anneau. *n.* 1° Inclusion colorable de la paroi de l'appareil apical des asques. 2° Sorte de collerette, qui peut être double, entourant la région supérieure du pied de certains Champignons. 3° Partie supérieure du sporogone de plusieurs Mousses, située sous l'opercule et dont la destruction partielle permet la chute de ce dernier. 4° Chez les Ptéridophytes, série de cellules à paroi partiellement lignifiée, entourant le sporange transversalement ou longitudinalement, et formant une assise mécanique qui contribue à sa déhiscence.

anneau annuel. Manchon de bois formé chaque année par le cambium. Le bois formé au printemps montre de grands vaisseaux (pores en section), alors que celui qui est formé plus tard est plus massif. L'ensemble forme un anneau, ou cerne, concentrique à un autre similaire, les plus jeunes étant situés le plus à l'extérieur.

annellascé. *adj.* Qui possède des asques munis d'un anneau au niveau de leur appareil apical.

anse d'anastomose. Tube joignant la base d'une cellule à la région supérieure de la cellule sous-jacente dans les mycéliums secondaires à dicaryons de Basidiomycètes.

antarctique. *adj.* Qui habite les régions entourant le pôle Sud, jusqu'au sud de la Nouvelle-Zélande et de la Patagonie.

anthelminthique. *adj.* Qui détruit les Vers intestinaux ou les paralyse, facilitant leur expulsion.

anthéraxanthine. *n.* Sorte de xantophylle présente chez certaines Algues mais aussi dans les anthères de lis (d'où son nom).

anthère. *n.* Partie terminale de l'étamine, où se forment les grains de pollen. Comprend généralement quatre sacs polliniques, qui s'ouvrent par deux fentes, après avoir confiué en deux loges.

anthéridie. *n.* Organe où sont élaborées les cellules mâles des Cormophytes lorsque le gamétophyte est suffisamment différencié (Mousses, Fougères). Le grain de pollen est un gamétophyte formant une seule anthéridie, l'ensemble étant très simplifié. Ce terme est parfois utilisé pour désigner les spermatocystes des Thallophytes.

anthéridiophore. *n.* Différenciation du thalle des Marchantiales (Hépatiques), qui porte les anthéridies.

anthérocyte, anthérocyste ou **androcyte.** *n.* Cellule destinée à se transformer en un ou deux anthérozoïdes.

anthérozoïde. *n.* Cellule sexuelle mâle, présente surtout chez les Cormophytes. On dit aussi spermatozoïde, par analogie avec les Animaux.

anthocyanes. *n.* Substances non azotées responsables des couleurs bleues, violettes ou rouges de beaucoup de fleurs. Les anthocyanes sont présentes principalement à l'état d'hétérosides.

anthracnose. *n.* Maladie de la vigne, des pommiers et des poiriers ainsi que de leurs fruits, se manifestant par de petites taches brunes à centre clair, due à un Champignon *(Elsinoe piri)*.

anthraquinone. *n.* Substance organique à trois cycles benzéniques condensés (liés deux à deux par deux carbones), le cycle médian étant porteur de deux fonctions cétone.

antibiotique. *n.* Substance de nature très variable susceptible de s'opposer au développement de divers microorganismes en inhibant leur métabolisme, celui de leur paroi ou de leurs acides nucléiques par exemple. *Adj.* Une substance antibiotique.

anticorps. *n.* Chez les Vertébrés, molécule protéique produite en réaction à l'introduction d'un antigène et susceptible d'immobiliser ce dernier et éventuellement de le détruire.

antigène. *n.* Substance à grosse molécule susceptible de déterminer chez un hôte vertébré la formation de molécules protéiques (anticorps) qui se fixent à elle et éventuellement la détruisent.

antigénique. *adj.* 1° Qui concerne les antigènes. 2° Qui a les propriétés d'un antigène et qui, injecté à un Mammifère, détermine la production d'anticorps.

antimitotique. *adj.* Qui empêche le déroulement de la mitose et, par voie de conséquence, la prolifération des tumeurs ou autres cellules néoplasiques; c'est pourquoi on utilise, en thérapeutique, des substances antimitotiques.

antipodes. *n.* Cellules (haploïdes), au nombre de trois, situées à l'extrémité du sac embryonnaire opposée à l'oosphère; se multiplient parfois intensément.

apérianthé ou **achlamydé.** *adj.* Qui ne possède ni calice ni corolle (donc pas de périanthe).

apétale. *adj.* Dépourvu de pétale.

apex. *n.* Pointe d'un organe, en particulier de la tige et de la racine. Contient des cellules se divisant activement.

aphanoplasmode. *adj.* Plasmode mince et adhérent de certains Myxomycètes.

aphlébie. *n.* Ramification de premier ordre (penne) de la feuille de certaines Fougères, située en bas du pétiole, nettement séparée des autres pennes et de taille réduite. Comparable à une stipule.

aphylle. *adj.* Dépourvu de feuilles.

apical. *adj.* Situé au sommet (apex).

apiculé. *adj.* Qui présente une petite pointe saillante (apicule).

aplanospore. *n.* Spore sans appareil locomoteur. Ne s'applique pas aux spores de résistance à paroi épaisse.

apogame. *adj.* 1° Qui manifeste l'apogamie (cellule apogame). 2° Qui possède des cellules gamétophytiques présentant ce phénomène (espèce apogame).

apogamie. *n.* Production, sans fécondation, d'un sporophyte à partir d'une cellule banale, en principe du gamétophyte. S'il s'agit d'une cellule sexuelle femelle (oosphère), on parlera plutôt de parthénogenèse, mais parfois aussi d'apogamie.

apoméiose. *n.* Méiose modifiée qui ne provoque pas de réduction de moitié du nombre des chromosomes. Les gamétophytes formés sont donc diploïdes, et les gamètes qu'ils produiront pourront se développer sans fécondation (parthénogenèse), en donnant des individus pourtant normalement diploïdes.

apophyse. *n.* Toute protrusion ou protubérance. Particulièrement, partie inférieure lacuneuse du sporogone des Mousses, parfois très renflée *(Splachnum)*.

aposporie. *n.* Formation de gamétophytes à partir du sporophyte, par voie végétative, sans réduction chromatique.

apothécie. *n.* Organe de certains Champignons Ascomycètes, en forme de coupe dans laquelle se trouve une couche d'asques mêlés de filaments stériles, ou paraphyses. Les pezizes sont des apothécies. Beaucoup de Lichens sont formés par des Champignons produisant des apothécies (Discolichens).

apotrope. *adj.* **(ovule).** Ovule anatrope dont le repliement se fait vers le bas, le funicule étant supposé horizontal. Peut être ensuite dressé ou pendant suivant que ce dernier se courbe en haut ou en bas.

appareil apical. Formation différenciée de la paroi du sommet des asques. Caractérise divers groupes de Champignons Ascomycètes.

appareil de Golgi. Élément cellulaire constitué de poches aplaties et superposées en piles, ou dictyosomes, et de vésicules de taille variable. Ces vésicules interviennent dans des sécrétions glucidiques et protéiques. En outre, le « Golgi » contribue probablement à former les vacuoles, selon un processus encore peu connu.

appareil parabasal. Appareil de Golgi volumineux et de forme définie, visible aisément au microscope optique. Présent surtout chez les Protozoaires flagellés, mais aussi chez certaines Algues flagellées.

appareil paravestibulaire. Chez certaines Euglènes, formation cytoplasmique, proche de la fosse vestibulaire, d'aspect vacuolisé et servant sans doute à la nutrition par phagocytose.

appressorium. *n.* Sorte de suçoir des Champignons parasites ou lichénisants qui s'applique sur les cellules sans les pénétrer, à la différence d'un haustorium.

apprimé. *adj.* Appliqué au support.

aranéeux. *adj.* Qui présente l'aspect d'une toile d'araignée du fait de l'existence de nombreux poils entremêlés.

araucarioïde. *adj.* Caractérise la disposition des ponctuations aréolées contiguës qui forment des réseaux sur les parois latérales des trachéides.

arbrisseau. *n.* Végétal ligneux de taille inférieure à celle de l'arbuste (de l'ordre du mètre), mais de port comparable.

arbusculaire. *adj.* En forme de petit arbre, mais à l'échelle cellulaire ou macroscopique.

arbuste. *n.* Végétal ligneux d'assez petite taille (quelques mètres), sans tronc, et de port buissonnant; de sa région inférieure partent de nombreuses branches.

arbutine. *n.* Hétéroside des Éricacées et des feuilles de poirier, constitué de glucose et d'hydroquinol (noyau benzénique portant deux fonctions phénol opposées). C'est l'oxydation de ce dernier, après la chute de la feuille, qui est responsable de son noircissement.

archæscé. *adj.* Qui possède des asques de type primitif, dont l'appareil apical présente à la fois un anneau apical et une nasse.

archégone. *n.* Organe reproducteur femelle des Cormophytes. Renferme l'oosphère, qui, après fécondation, deviendra l'œuf. Chez les Angiospermes, les archégones sont indistincts, l'oosphère étant présente dans un sac embryonnaire, qui comporte aussi, en général, six autres cellules, dont la centrale est binucléée.

archégoniophore. *n.* Chez les Marchantiales (Hépatiques), différenciation dressée du thalle, en forme de pédoncule et portant les archégones.

archésporium ou **archéspore.** *n.* Chez les Cormophytes, tissu dont les cellules sont destinées à subir la réduction chromatique pour donner des spores.

archéthalle. *n.* Thalle formé d'une simple masse de cellules se développant dans toutes les directions.

archicarpe. *n.* Élément femelle de certains Champignons Ascomycètes. Fécondé, il donnera des hyphes ascogènes, génératrices d'asques.

arctico-alpin. *adj.* Qui habite à la fois la région arctique (autour du pôle Nord) et les hautes montagnes de l'hémisphère Nord, qui ont pu être atteintes par l'espèce lors des périodes glaciaires.

arctique. *adj.* Qui habite les régions entourant le pôle Nord, jusqu'au nord du Canada et de la Sibérie.

aréole. *n.* En général, espace arrondi ou cavité délimités par des protubérances. *Ex.* Des nervures délimitent des aréoles sur un limbe de feuille. Surtout employé à propos des ponctuations aréolées des trachéides.

aréolé. *adj.* 1° Qui a la forme d'une aréole. 2° Qui constitue des aréoles. *Ex.* Nervation aréolée.

arête. *n.* Appendice filiforme et dur, présent en particulier au sommet ou au dos des glumes et des glumelles des Graminées.

arille. *n.* Expansion du funicule de l'ovule qui se transforme en une enveloppe souvent massive et colorée autour de la graine.

aristé. *adj.* Muni d'une arête.

ARN. Voir *acide ribonucléique.*

aromatique. *adj.* **(substance organique).** Dont les molécules ont un squelette carboné formant un ou plusieurs cycles.

arthroconidie ou **arthrospore.** *n.* Conidie formée par désarticulation du mycélium, sans condensation du cytoplasme, à la différence d'une chlamydospore. Peut être constituée de une ou plusieurs cellules.

article. *n.* 1° Segment ou élément d'une structure métamérisée (où une même formation élémentaire se répète successivement). *Ex.* Les entre-nœuds sont des articles de la tige. 2° Élément cytoplasmique tubulaire plurinucléé. Chez certaines Algues et chez de nombreux Champignons, la succession des articles forme un filament.

articulation. *n.* Point au niveau duquel un organe (qui est alors dit *articulé*) se sépare naturellement.

articulé. *adj.* Constitué d'articles.

ascidie. *n.* Formation en cornet, correspondant à une feuille entière repliée, ou à une portion de feuille.

ascocarpe. *n.* Formation abritant les asques des Champignons Ascomycètes.

ascogène. *adj.* Qui engendre des asques.

ascogone. *n.* Chez les Champignons Ascomycètes, cellule produisant les filaments (filaments ascogènes) qui donneront eux-mêmes les asques.

ascogonial. *adj.* Qui concerne le ou les ascogones.

ascohyménial. *adj.* Qui possède des asques disposés en hyménium, c'est-à-dire en couche régulière aplatie, mêlés à des filaments stériles (paraphyses), et qui est entouré d'une paroi issue du sous-hyménium.

ascoloculaire. *adj.* Qui présente des asques dans des loges (locules) entourées d'un faux tissu de mycélium provenant du stroma (et non du sous-hyménium), et qui forme donc une pseudothécie.

ascospore. *n.* Chez les Champignons Ascomycètes, spore haploïde, produite à l'intérieur d'un asque.

ascosporé. *adj.* Qui forme des spores dans des asques. Se dit des Levures qui sont des Ascomycètes, alors que d'autres ne sont que des formes levuroïdes de divers autres Champignons.

ascosporophyte. *n.* Mycélium à cellules munies de dicaryons, produit par l'ascogone fécondé des Champignons Ascomycètes, et destiné à produire les asques. Il correspond au mycélium secondaire des Basidiomycètes, mais il est tout entier enfermé dans le sous-hyménium de la fructification.

ascostroma. *n.* Chez certains Champignons Ascomycètes, masse de mycélium dans laquelle se forment les asques à l'intérieur de loges, ou locules.

ascothécie. *n.* Syn. de *périthèce.*

asexué. *adj.* Dépourvu d'organes sexuels ou s'effectuant sans recours aux organes sexuels.

asque. *n.* Sporocyste des Champignons Ascomycètes : une cellule mère forme, en général, huit spores situées les unes au-dessus des autres, et qui restent encloses dans sa paroi, ou asque. Ces spores sont formées avec réduction chromatique, après fusion (caryogamie) des deux noyaux du dicaryon que contenait initialement la cellule mère.

assimilateur. *adj.* Qui absorbe des éléments nutritifs, souvent du gaz carbonique aérien. Dans ce dernier cas, ce caractère est dû à la présence de chlorophylle.

assimilation chlorophyllienne. Voir *photosynthèse.*

assise. *n.* Couche, ou strate. En particulier, assise de cellules.

assise génératrice. Tissu méristématique formant un manchon autour du bois ou dans l'écorce. Se divise en produisant soit vers l'intérieur du nouveau bois et vers l'extérieur du liber, soit vers l'intérieur de l'écorce secondaire et vers l'extérieur du liège. Chez quelques Monocotylédones, une assise externe produit un parenchyme, dans lequel se différencient des faisceaux libéro-ligneux.

assise mécanique. Ensemble de cellules formant une couche, à paroi squelettique lignifiée d'une manière particulière. Les variations de l'humidité de l'air entraînent des mouvements de ces cellules, qui déforment et déchirent la paroi de l'organe auquel elles appartiennent, occasionnant ainsi la dispersion de son contenu. Se rencontre dans les anthères des étamines ou les sporanges des Ptéridophytes.

association végétale. Groupement de plantes vivant le plus souvent ensemble, et, suivant les cas, plus ou moins strictement limitées à une association donnée. Les associations végétales s'expliquent par les exigences écologiques des plantes qui les constituent et leurs rapports avec les conditions du milieu où se trouve l'association.

astaxanthine. *n.* Caroténoïde présent dans la carapace des écrevisses, mais aussi chez certaines Algues.

atlantique. *adj.* Qui habite les régions européennes riveraines de l'océan Atlantique.

ATP. Voir *acide adénosine-triphosphorique.*

aubier. *n.* Bois jeune, récemment issu du cambium. Plus tendre, moins coloré, plus riche en eau que le bois de cœur, qui est plus central et plus ancien. C'est essentiellement à travers l'aubier que circule la sève brute, qui vient des racines.

auricule. *n.* Oreillette. Appendice (d'un limbe foliaire en particulier) qui rappelle un lobule d'oreille.

auriculé. *adj.* **(limbe).** Muni d'auricules.

autodigestion ou **autolyse.** *n.* Digestion d'une structure réalisée grâce aux enzymes de ses propres cellules. Ne doit pas être confondue avec la putréfaction, qui, elle, est due à l'action des Bactéries.

autogame. *n.* Qui peut s'autoféconder. Les fleurs, mêmes celles qui présentent les organes des deux sexes, ne sont pas toujours autogames.

autogamie. *n.* 1° Fécondation qui se produit entre des gamètes formés dans un même gamétocyste. 2° Fécondation du pistil par le pollen de la même fleur.

autoïque. *adj.* 1° Qui accomplit tout son cycle de développement en parasitant un seul hôte. Syn. *autoxène.* Se dit de certaines rouilles. 2° Chez les Mousses, qui possède des organes mâles et femelles sur le même pied, mais groupés en ensembles distincts.

autolyse. *n.* Voir *autodigestion.*

autosporé. *adj.* Qui forme des autospores.

autospores. *n.* Spores volumineuses sans appareil locomoteur, formées sans réduction chromatique à l'intérieur de certaines cellules d'Algues unicellulaires, et assurant leur reproduction asexuée. Avant leur libération, elles ont déjà la forme de la cellule adulte qu'elles reproduiront.

autosporulation. *n.* Formation d'autospores.

autotrophe. *adj.* Susceptible d'incorporer dans sa propre substance vivante un élément emprunté au monde minéral. *N.* Un autotrophe. Un autotrophe pour le carbone (plante verte) incorpore le gaz carbonique de l'air.

autotrophe facultatif. Qui se comporte comme un autotrophe dans des conditions favorables, mais peut aussi vivre en hétérotrophe.

auxiblaste. *n.* Rameau de type usuel, à feuilles séparées par de longs entre-nœuds, et qui s'allonge notablement chaque année (parfois de plusieurs mètres).

auxospore. *n.* Œuf des Diatomées, constitué d'une cellule de grande taille. Sécrète une carapace et devient une Diatomée adulte.

auxotrophe. *adj.* Qui a besoin pour se développer de certaines molécules organiques, parce qu'une ou plusieurs mutations l'ont rendu incapable de synthétiser les substances en question.

avorté. *adj.* **(organe).** Qui manque dans une plante donnée alors qu'il est présent dans le groupe auquel elle appartient. Un rudiment indique souvent sa présence potentielle. Voir *avortement.*

avortement. *n.* Absence, chez un Végétal, d'un organe (susceptible de réapparaître à titre d' « anomalie ») qui se trouve chez des plantes voisines. Dans l'*avortement vrai,* l'organe se forme mais cesse très tôt de croître ; c'est pourquoi il est relativement minuscule à l'état adulte et peut même dégénérer et disparaître. En général, il ne se forme même pas *(avortement congénital).*

axe. *n.* Structure allongée, dont la section présente, en principe, une symétrie radiale, et s'accroissant soit par le sommet, soit par divers points intercalaires. Chez les Cormophytes, syn. de *tige.*

axe floral. Axe portant les pièces de la fleur. C'est simplement le prolongement du pédoncule floral.

axe hypocotylé ou **hypocotyle.** Portion de la plantule située entre la jeune racine (radicule) et le ou les cotylédons, qui sont les premières feuilles. L'axe hypocotylé ressemble à une tige, mais sa structure rappelle celle de la racine.

axillaire. *adj.* Situé dans une aisselle. Se dit surtout du bourgeon axillaire de la feuille.

B

baccien. *adj.* Qui a les caractères d'une baie.

bacciforme. *adj.* En forme de baie, sans être une vraie baie.

bacille. *n.* Bactérie en forme de bâtonnet.

bactériochlorophylles. *n.* Chlorophylles particulières, présentes chez certaines Bactéries. Permettent une photosynthèse ne s'accompagnant pas d'émission d'oxygène. Sont au nombre de quatre au moins.

bactériocine. *n.* Protéine synthétisée par certaines Bactéries et susceptible, à la différence des antibiotiques, de détruire des Bactéries de la même espèce.

bactériologie. *n.* Étude des Bactéries.

bactériophage. *n.* Virus qui attaque les Bactéries en injectant dans leur cytoplasme son ADN. Ce dernier s'y multiplie et produit la synthèse de protéines du virus en question.

baie. *n.* Fruit à mésocarpe charnu, à épicarpe et endocarpe membraneux, et pouvant contenir une ou plusieurs graines.

balai de sorcière. Production pathologique de très nombreux rameaux par une plante, lorsque cette dernière est parasitée par des virus ou des Champignons. Se forme par développement de nombreux bourgeons axillaires qui ordinairement restent au repos ou croissent peu. Provoqué sans doute par la production, soit par le parasite lui-même, soit par la plante sous son influence, de substances de croissance.

balauste. *n.* Fruit du grenadier. Formé à partir d'un ovaire infère à deux rangées superposées de carpelles.

ballistospore. *n.* Spore projetée, comme par une baliste, par un sporocyste à sa maturité. C'est le cas de la plupart des basidiospores. Certaines peuvent elles-mêmes produire une seconde ballistospore.

bandelette. *n.* Canal sécréteur du fruit des Ombellifères, disposé dans ses dépressions longitudinales, ou vallécules.

barbelé. *adj.* Muni de poils ou crochets durs et courts sur toute sa longueur. *Ex.* Poil barbelé.

bases puriques et **pyrimidiques.** Substances organiques azotées à molécule cyclique, à propriétés basiques. Entrent, en particulier, dans la composition des acides désoxyribonucléique et ribonucléique.

baside. *n.* Sporocyste de certains Champignons, formant, après réduction chromatique, quatre spores ou basidiospores situées à l'extrémité de petits pédoncules, ou stérigmates. La formation des spores est exogène, mais ces dernières n'en sont pas moins des sortes de hernies du sporocyste.

basidiocarpe. *n.* Fructification d'un Champignon porteuse de basides.

basidiogène. *adj.* Qui forme des basides.

basidiospore. *n.* Chez les Champignons Basidiomycètes, spore formée par une baside.

basifixe. *adj.* **(anthère).** Fixée par sa base au filet de l'étamine.

basophile. *adj.* **(Végétal).** Qui vit sur milieu basique (calcaire).

baume. *n.* Souvent, une oléo-résine (baume du Canada). Les vrais baumes (baume du Pérou, baume de Tolu) contiennent des acides benzoïque et cinnamique.

benthique. *adj.* Qui concerne le benthos.

benthos. *n.* Ensemble des êtres marins qui vivent au contact du fond, souvent même fixés à lui.

benzylisoquinoléine. *n.* Substance organique azotée à trois cycles dont dérivent de nombreux alcaloïdes, notamment ceux du pavot.

bêtacyanine. *n.* Substance organique colorant en rouge ou en bleu les organes végétaux, comme le font les anthocyanes, mais contenant de l'azote. Les bêtacyanines se rencontrent chez les Centrospermales.

bicilié. *adj.* A deux cils ou flagelles. C'est le cas d'anthérozoïdes et de spores.

bicaréné. *adj.* Muni de deux carènes, en général dorsalement.

bicollatéral. *adj.* Qui possède du liber tant à l'extérieur qu'à l'intérieur du bois, comme les faisceaux libéro-ligneux des tiges des Cucurbitacées.

bifide. *adj.* Qui se divise en deux vers la périphérie, en principe à partir de son milieu.

biflore. *adj.* Qui comporte deux fleurs.

bilabié. *adj.* Qui présente deux lèvres. *Ex.* Corolle, calice bilabiés, dont les éléments sont unis en grande partie les uns aux autres suivant deux lèvres aplaties.

biloculaire. *adj.* A deux loges ou locules. *Ex.* Ovaire biloculaire.

binaire. *adj.* Qui comprend deux éléments. Dans la nomenclature binaire, chaque plante porte deux noms : l'un, qui lui est propre, est celui de son espèce, l'autre est l'appellation commune de toutes les plantes du même genre.

biochimie. *n.* Étude des substances présentes dans les êtres vivants *(biochimie statique)* et de leurs transformations chimiques (métabolisme : *biochimie dynamique*).

biogenèse. *n.* 1° Naissance de la vie, à partir des substances chimiques organiques et minérales inertes. 2° Ensemble des relations alimentaires entre les êtres, nécessaires au maintien et à la propagation de la vie.

biogéographie. *n.* Étude de la distribution géographique des divers taxons d'êtres vivants. La biogéographie des plantes est la *phytogéographie.*

biomasse. *n.* Dans un endroit donné, masse d'êtres vivants par unité de surface ou parfois de volume.

biotope. *n.* Milieu défini où vit un organisme ou une population.

biovulé. *adj.* A deux ovules.

bipartition. *n.* Division par mitose d'une cellule en deux cellules filles semblables.

bipenné. *adj.* 1° Dont les pennes sont elles-mêmes pennées et dont les pinnules sont par conséquent de deuxième ordre (Ptéridophytes). 2° Dont les folioles sont divisées en foliolules de second ordre (plantes à fleurs).

bipolaire. *adj.* 1° Champignon dont il existe deux types de mycéliums haploïdes entre lesquels la fécondation est possible. Est par ailleurs monoïque ou dioïque. 2° Qui possède deux pôles de développement ou d'activité. *Part.* qui émet deux filaments, dont un rhizoïde (cas d'une spore qui germe).

biraphidée. *adj.* **(Diatomée).** Qui possède deux raphés, chaque valve de la carapace en ayant un.

bisannuel. *adj.* Qui vit deux ans, mais ne fleurit que la seconde année, puis meurt.

bisexué. *adj.* Voir *hermaphrodite.*

bitegminé. *adj.* A deux téguments. *Ex. Ovule bitegminé.*

bituniqué. *adj.* Muni de deux tuniques.

black-rot. *n.* Maladie de la vigne, causée par le Champignon *Guignardia bidwellii,* et qui se manifeste par des taches brunes sur les feuilles et un dessèchement des grains.

blastomycose. *n.* Maladie causée par des Levures.

blastospore. *n.* Spore formée par bourgeonnement du sporocyste.

blépharoplaste. *n.* Granule présent à la base d'un cil ou d'un flagelle, chez les Bactéries et les cellules munies d'un appareil locomoteur, comme les Péridiniens. Il est intracytoplasmique dans le second cas. Contient parfois de l'ADN.

bleu de crésyl. Colorant utilisé pour colorer les vacuoles de la cellule vivante sans la tuer.

bois de cœur. Bois secondaire formé anciennement par le cambium, et situé par conséquent au centre du tronc. Dur et non fonctionnel, il ne conduit plus la sève, mais contribue à assurer la résistance mécanique du tronc.

bois de fer. Bois très dur fourni par de nombreux arbres.

boîte de Pétri. Récipient plat à couvercle, en verre ou en matière plastique, en forme de boîte à camembert. Très utilisée pour cultiver les Bactéries.

bourgeon. *n.* 1° Cellule de petite taille libérée à la suite d'une division inégale d'une cellule mère. 2° Jeune pousse formée à l'aisselle d'une feuille (bourgeon axillaire), ou sur une racine, ou parfois une tige — hors de l'aisselle d'une feuille — (bourgeon adventif). 3° Sommet d'une pousse qui reprendra sa croissance l'année suivante (bourgeon terminal).

bourgeonnement. *n.* Émission d'un bourgeon. 1° En cytologie, division inégale d'une cellule, mais avec mitose normale. Le bourgeon, à cytoplasme de petite taille, donnera une cellule normale. 2° Chez les plantes supérieures, formation d'une pousse feuillée, soit typique (bourgeon axillaire des feuilles), soit atypique (bourgeon adventif).

brachyblaste. *n.* Rameau latéral très court, dont les feuilles ne sont pas ou sont à peine séparées par des entre-nœuds. Présent surtout chez les Gymnospermes. Le terme de *rameau court,* utilisé chez les Angiospermes, correspond plutôt au *mésoblaste.*

bractée. *n.* Feuille réduite, souvent écailleuse, à l'aisselle de laquelle se forme une fleur (bractée florale) ou un rameau d'inflorescence (bractée inflorescentielle).

bractéole. *n.* Petite bractée portée par le pédoncule d'une fleur, et dont l'aisselle est généralement vide.

Il y a une seule bractéole chez les Monocotylédones et deux chez les Dicotylédones. On dit plus fréquemment *préfeuilles*.

bryologie. *n.* Étude des Mousses et des plantes voisines (Bryophytes).

bulbe. *n.* En général, tout renflement. *Spécialt.* Renflement de la tige des Cormophytes dû à l'accumulation de matières de réserves (amidon surtout) dans celle-ci ou dans des feuilles densément disposées sur elle.

bulbe écailleux. Bulbe présentant des écailles gorgées de réserves, disposées comme les tuiles d'un toit (bulbe de lis).

bulbe solide. Bulbe dû au renflement de la tige elle-même. Voir *tubercule*.

bulbe tuniqué. Bulbe au niveau duquel la tige, ou plateau, porte des gaines foliaires charnues emboîtées les unes dans les autres (bulbe d'oignon).

bulbeux. *adj.* En forme de bulbe, ou porteur de bulbe.

bulbille. *n.* 1° Petit bulbe, ne constituant pas la base d'une tige, mais un bourgeon axillaire ou adventif de celle-ci, susceptible de se détacher et de se développer en une nouvelle plante. 2° Formation condensée du thalle de certains Champignons, très comparable aux sclérotes.

C

cactoïde. *adj.* En forme de cactus. Lat. *cactoides*.

caduc. *adj.* Qui tombe spontanément. *Ex.* Feuille ou écaille caduques.

caféine. *n.* Base purique présente dans le café. C'est la diméthylxanthine.

calcicole. *adj.* Qui affectionne les terrains calcaires.

calcifié ou **calcifère.** *adj.* Chargé de calcaire. On dit souvent *incrusté* ou *encroûté* de calcaire. Ce dernier est précipité au contact des cellules d'un thalle d'Algue rouge, d'une feuille, etc.

calice. *n.* Ensemble des sépales d'une fleur.

caliciforme. *adj.* En forme de coupe. Ne pas confondre avec *sépaloïde* (à morphologie de calice).

calicule. *n.* Sorte de petit calice. Comporte souvent autant de pièces vertes qu'il y a de sépales, situées juste en dessous de ces derniers et en alternance avec eux. Chacune de ces pièces est alors en général le produit de l'union (parfois imparfaite) des deux stipules des deux sépales voisins. D'autres calicules (œillet) sont formés de verticilles de bractées situées juste sous la fleur.

callose. *n.* Polymère du glucose, où les molécules sont liées autrement que dans l'amidon ou la cellulose, et qui se rencontre notamment dans les cellules du liber et dans les gamétanges des plantes vasculaires, ainsi que chez les Thallophytes.

cambium. *n.* Chez les Dicotylédones, assise génératrice qui se forme entre le massif libérien et le massif ligneux d'un faisceau libéro-ligneux. Produit du liber secondaire vers l'extérieur, et du bois secondaire vers l'intérieur (c'est ce processus qui détermine l'accroissement en diamètre de l'arbre).

cambium secondaire. Cambium se différenciant parfois après que le cambium normal a cessé son activité. Il fonctionne pendant un certain temps, puis est remplacé par un autre cambium. On obtient ainsi des anneaux libéro-ligneux concentriques surnuméraires, comme dans la betterave.

campanulé. *adj.* En forme de cloche. *Ex.* Corolle campanulée.

camphre. *n.* Terpène à deux cycles possédant une fonction cétone. Extrait du bois du camphrier *(Cinnamomum camphora)*.

canal carinal. Chez les Prêles, canal creusé dans la tige au niveau de chaque massif de bois par la disparition de la plus grande partie de ce dernier.

canal de conjugaison. Canal qui fait communiquer les deux cellules-gamètes lors de la conjugaison scalariforme (fécondation) des Algues Zygophycées.

canal résinifère. Canal creusé dans divers tissus (même dans le bois chez les pins) et limité par des cellules sécrétrices de résine ou d'oléo-résine.

canal sécréteur. Cavité cylindrique formée par écartement ou destruction des cellules d'un tissu préexistant, bordée de cellules sécrétrices qui y accumulent divers produits (huiles essentielles, résines).

canaliculé. *adj.* Creusé d'une ou de plusieurs rigoles longitudinales.

candidose. *n.* Maladie causée par un Champignon du genre *Candida. Ex.* Le « muguet ».

cannelé. *adj.* Présentant des côtes longitudinales, ou *cannelures*.

caoutchouc. *n.* Polymère de l'isoprène, dont la molécule comporte environ deux cents unités. Constituant essentiel des latex de diverses plantes.

capillitium. *n.* Filaments stériles des sporocarpes de Myxomycètes et de Gastéromycètes.

capité. *adj.* En forme de tête, dense et arrondi. *Ex.* Inflorescence capitée : qui porte un organe terminal en forme de tête; poil capité : terminé par une glande de cette forme.

capitule. *n.* Inflorescence de forme massive, renfermant, en principe, de nombreuses fleurs. Ressemble souvent à une fleur simple, parce qu'elle est entourée inférieurement d'un involucre de bractées semblable à un calice, et présente des fleurs inférieures à corolle hypertrophiée, dont l'ensemble offre l'aspect d'une corolle simple. Certains capitules sont groupés eux-mêmes en capitules secondaires. *Ex.* Capitule des Composées.

capitulum. *n.* Dans l'organe mâle des Charophytes, cellule placée à la base du manubrium et portant les filaments fertiles générateurs d'anthérozoïdes.

capsule. *n.* 1° Chez certaines Bactéries, enveloppe glucidique et protéique entourant la paroi squelettique. 2° Portion terminale du sporogone, ou sporophyte, des Bryophytes, renflée en forme d'urne, et libérant les spores par rupture de sa paroi ou par chute d'un couvercle (opercule). 3° Chez les Angiospermes, fruit sec déhiscent à plusieurs loges.

caractère. *n.* Particularité morphologique (au sens large, éventuellement cytologique) ou parfois physiologique ou biologique que possèdent les individus appartenant à un même taxon et contribuant à la définition de ce dernier.

carbonacé. *adj.* Qui a l'aspect du charbon de bois; s'applique en particulier aux spores de certains Champignons.

carbonisation. *n.* Réduction d'une substance organique au carbone qu'elle contient, par élimination des autres constituants. Obtenue en général par combustion ménagée ou action de l'acide sulfurique et d'un oxydant.

cardiotonique. *adj.* Qui ralentit, régularise et augmente la puissance des battements cardiaques.

carène. *n.* 1° Protrusion longitudinale étroite, comme la carène d'une coque de bateau, marquant en particulier l'emplacement de la nervure médiane au dos des feuilles et des bractées. 2° Pièce inférieure de la corolle papilionacée, formée de deux pétales unis le long de leur marge inférieure.

carie. *n.* Maladie du blé; sur les plants atteints le grain se transforme en sac plein de poussière brune. Due au Champignon *Tilletia caries* (Ustilaginales).

carinaux. *adj.* **(points).** Perforations faisant communiquer le raphé de certaines Diatomées avec l'intérieur de la carapace, ou frustule.

caroncule. *n.* Prolifération du tégument externe d'une graine, sans rapport avec son micropyle ou son funicule, et constituant une petite verrue, comme dans la graine de ricin.

caroténoïde. *n.* Substance constituée d'une longue chaîne, munie de doubles liaisons, formant ou non un cycle à chaque extrémité et portant des groupements méthyle ($—CH_3$) en plusieurs endroits. *Ex.* Le carotène des carottes et le lycopène des tomates. Les caroténoïdes sont des colorants solubles dans les graisses. Leur molécule possède quarante atomes de carbone en tout.

caroténoïdique. *adj.* Qui concerne les caroténoïdes ou en est formé.

carpelle. *n.* Pièce florale, homologue d'une feuille, et formant les ovules qui semblent correspondre à des sortes de folioles. Enroulés sur eux-mêmes lorsqu'ils sont libres, les carpelles sont parfois plats lorsqu'ils sont unis à leurs voisins en un gynécée. *Carpelle* s'appliquait originellement à un élément de fruit, mais ne s'emploie plus dans ce sens.

carpocentre. *n.* Région centrale de l'ébauche d'une fructification de Champignon Ascomycète qui comporte des hyphes en plexus; celles-ci entourent un ou plusieurs ascogones; l'ensemble est abrité par une enveloppe péricentrale.

carpogone. *n.* Gamétocyste femelle des Rhodophycées (Algues rouges).

carpophore. *n.* 1° Formation destinée à porter, sans les inclure, les sporocystes, spécialement les basides, chez beaucoup de Champignons dont elle constitue la partie comestible. En général, en forme de parapluie. 2° Chez les Hépatiques, portion différenciée du thalle portant les organes reproducteurs. 3° Chez les Ombellifères, couple de filaments centraux du fruit (schizocarpe) constitués par déchirure de la cloison des deux carpelles. Les parties libérées de ces derniers (méricarpes) leur demeurent un certain temps attachées.

carpospore. *n.* Spore formée par le carposporophyte des Rhodophycées (Algues rouges).

carposporocyste. *n.* Sporocyste formé par le carposporophyte des Rhodophycées (Algues rouges).

carposporophyte. *n.* L'une des deux phases du sporophyte des Algues Rhodophycées trigénétiques. Il provient du développement de l'œuf et forme des carpospores, qui seront à l'origine du tétrasporophyte. C'est ce dernier qui formera les spores haploïdes, sources du gamétophyte.

carpotétraspores. *n.* Carpospores particulières de certaines Algues rouges (Némalionales) qui ne produisent pas un tétrasporophyte, mais directement des gamétophytes, et qui se forment alors avec réduction chromatique.

carré. *adj.* De section carrée. *Ex.* Tige carrée des Labiées.

caryocinèse. *n.* Division du noyau avec formation de chromosomes. *Par ext.,* division de la cellule impliquant ce processus. Voir *mitose*.

caryopse. *n.* Fruit sec dans lequel une graine unique, à tégument très réduit, adhère étroitement à la paroi de l'ovaire, devenue le péricarpe. Cette soudure se fait après la naissance normale de l'ovule, et non congénitalement. Caractérise la grande majorité des Graminées.

catalase. *n.* Enzyme décomposant l'eau oxygénée (H_2O_2) qui se forme lors de certaines réactions du métabolisme.

caséine. *n.* Protéine présente dans le lait, mais aussi chez certaines plantes, notamment dans la graine de soja. Contient du phosphore lié sous forme d'acide phosphorique à l'un de ses acides aminés (lysine).

caudé. *adj.* En forme de queue ou muni d'un appendice de cette forme.

caudicule. *n.* Petite queue portant le contenu, ou pollinie, d'une demi-anthère, chez les Orchidées Ophrydées, et formée par l'anthère elle-même.

caule ou **caulidium.** *n.* Tige.

caulinaire. *adj.* Qui concerne la tige (caule), soit en général (rameaux compris), soit par opposition à ses rameaux.

caulonéma. *n.* Portion du protonéma de certaines Mousses (funaire) sur laquelle apparaissent des bourgeons se développant en tiges feuillées gamétophytiques. Formé à partir du chloronéma, plus ramifié que lui, et constitué de filaments rampants.

cellule. *n.* Structure de base des êtres vivants, entourée d'une paroi, ou membrane cytoplasmique, et formée d'un cytoplasme et d'un noyau ou parfois deux. Le *cytoplasme* comprend un hyaloplasme sans structure visible, même au microscope électronique, et divers organites : réticulum endoplasmique et ribosomes, appareil de Golgi, mitochondries, plastes, microtubules, vacuoles, centrosomes, etc. Le *noyau,* entouré par une membrane nucléaire qui n'est qu'une partie du réticulum endoplasmique, renferme un nucléole, des ribosomes et, surtout, de la chromatine fibrillaire susceptible de se condenser en chromosomes lors de la mitose et de la méiose. La cellule forme souvent une paroi squelettique et sécrète diverses autres substances appartenant au paraplasme.

cellule annexe ou **cellule compagne.** Cellule voisine des cellules allongées à noyau dégénéré qui conduisent la sève dans le liber.

cellule aquifère ou **hydrocyte.** Dans les feuilles de Sphaignes, cellule morte, réduite à sa paroi, accumulant de l'eau de façon purement physique.

celluline. *n.* Substance formant des masses qui obstruent les étranglements des filaments des Champignons Leptomitales.

cellulolytique. *adj.* Qui détruit la cellulose. Certaines Bactéries du sol produisent les enzymes nécessaires à cette dégradation.

cellulose. *n.* Polymère insoluble d'une forme de glucose, à longues molécules en forme de chaînes, elles-mêmes groupées en faisceaux. Constituant essentiel des parois squelettiques des Végétaux.

cénobe. *n.* Colonie d'Algues vertes unies entre elles par une substance mucilagineuse.

centre de dispersion. Région où les représentants d'un taxon (qui y est apparu ou s'y est intensément différencié en donnant naissance à de nombreux endémiques) sont particulièrement nombreux.

centrosome. *n.* Formation constituée de tubules et située aux extrémités du fuseau lors de la mitose des cellules animales et des cellules de Thallophytes.

céphalodie. *n.* Production de certains Lichens due à l'établissement d'une symbiose supplémentaire entre le Champignon spécifique du Lichen et une Algue bleue.

céracé. *adj.* Qui a l'aspect et la consistance de la cire.

chaîne alimentaire. Ensemble d'êtres qui vivent en se nourrissant les uns des autres. Le point de départ de toutes les chaînes alimentaires se trouve dans les Végétaux autotrophes qui, seuls, peuvent emprunter leur carbone et d'autres éléments au monde minéral.

chancre. *n.* Affection parasitaire se manifestant par une nécrose (mortification) d'organes ou de parties d'organes végétaux.

chapeau. *n.* Élément généralement aplati portant des lamelles, des tubes ou des aiguillons à la face inférieure et porté par un pied central ou excentrique, l'ensemble constituant l'appareil sporifère comestible de nombreux Champignons à basides.

chapparal. *n.* En Californie, formation comparable au maquis méditerranéen, constituant un fourré de quelques mètres de haut.

charbon. *n.* Chez les plantes à fleurs, maladie où les organes sexuels sont remplacés par une poussière noire due à des Champignons Ustilaginales.

chaume. *n.* Tige des Graminées, creuse, rude et résistante, à nœuds très marqués.

chélateur. *n.* Substance chimique susceptible de fixer des ions métalliques.

chimère. *n.* 1° *Chimère de greffe.* Végétal composite, formé des tissus de deux (ou dans certains cas de trois) plantes distinctes, qui provient de la région de soudure des deux parents au niveau d'une greffe. Le bourgeon adventif qui s'est formé à partir de leurs deux tissus a une morphologie normale et se développe en chimère où les tissus dérivés des deux parents maintiennent des relations plus ou moins stables, sans que la dominance de l'un ou de l'autre constituant menace la survie du rameau où elle se manifeste. 2° Végétal d'origine simple, mais dont certaines lignées cellulaires de l'apex sont modifiées (non chlorophyliennes, polypoïdes notamment). Les organes ou les parties d'organes formées à partir de ces cellules sont ainsi reconnaissables à l'état adulte. Un exemple de telles chimères est fourni par les plantes horticoles panachées, chez lesquelles tous les tissus, dérivés par exemple de l'épiderme de l'apex, sont blancs, ou dont un secteur est blanc parce que l'une des cellules initiales de l'apex est incapable de transmettre l'aptitude à synthétiser la chlorophylle.

chimiolithotrophe. *adj.* Organisme chimiotrophe qui décompose des substances inorganiques pour obtenir de l'énergie.

chimioorganotrophe. *adj.* Organisme chimiotrophe qui décompose des produits organiques pour obtenir de l'énergie.

chimiotactique. *adj.* Qui concerne le chimiotactisme.

chimiotactisme ou **chimiotaxie.** *n.* Tactisme où le stimulus est chimique.

chimiotrophe. *adj.* Chez lequel l'assimilation d'une substance minérale (gaz carbonique) sous forme organique s'effectue grâce à l'énergie fournie par une dégradation chimique auxiliaire. — *N.* Un chimiotrophe.

chitine. *n.* Polymère comparable à la cellulose, mais azoté, car formé de glucose aminé. Abondante dans le règne animal, en particulier dans la carapace des Insectes, la chitine se trouve aussi chez beaucoup de Champignons.

chitinoïde. *adj.* Constitué de chitine ou d'une substance voisine.

chlamyde. *n.* Paroi, spécialement celle qui entoure l'ovule des Gnétales (Chlamydospermes).

chlamydospore. *n.* Spore à paroi particulièrement épaisse, sorte de kyste formé par un mycélium. Désigne la spore charbonneuse (ustilagospore) des Ustilaginales.

chlorenchyme. *n.* Parenchyme chlorophyllien, présent dans des feuilles ou des tiges, où il forme des plages bien délimitées, séparées par du tissu non chlorophyllien.

chlorocyste ou **chlorocyte.** *n.* Cellule de petite taille des feuilles de Sphaignes, demeurée vivante et chlorophyllienne, intercalée entre des cellules mortes non pigmentées.

chloronéma. *n.* Portion verte, peu ramifiée et formée de filaments dressés, du protonéma de certaines Mousses (funaire). Cette portion est la première formée à la germination de la spore.

chlorophylles. *n.* Substances vertes, à noyau complexe, azoté et renfermant un atome de magnésium. Permettent la captation de l'énergie lumineuse lors de la photosynthèse. Il existe des chlorophylles a, b, c, d et e. Les Cormophytes possèdent seulement les deux premières, tandis que les divers groupes d'Algues sont caractérisés par la présence de deux ou trois des cinq chlorophylles.

chloroplaste. *n.* Organite des Végétaux eucaryotes possédant des lamelles sur lesquelles est fixée la chlorophylle qui permet la photosynthèse.

chlorose. *n.* Maladie qui se manifeste par un blanchissement ou un jaunissement d'organes normalement verts. Provoqué soit par un manque d'apport de fer, souvent dû à la présence de calcium, soit par des parasites.

choc osmotique. *n.* Atteinte d'une cellule lorsque la pression osmotique du milieu où elle se trouve est nettement plus faible que celle de son cytoplasme. Si la cellule n'est pas entourée d'une paroi mécaniquement résistante, l'afflux d'eau à l'intérieur va entraîner la rupture de sa membrane cytoplasmique, et les constituants du cytoplasme se répandront dans le milieu.

chromatine. *n.* Partie colorable du contenu du noyau. Présente la forme de filaments et de grains. Est constituée surtout d'acide désoxyribonucléique et de protéines.

chromatographie. *n.* Technique de séparation physique de substances organiques en mélange. On utilise l'aptitude différente de ces substances à migrer dans des colonnes de poudre de cellulose, d'alumine, etc., sur des feuilles de papier ou dans des couches de gel de silice, lorsqu'elles sont entraînées par divers solvants. On peut aussi *chromatographier* des mélanges gazeux, dont les constituants sont diversement entraînés par un gaz inerte à travers une colonne adsorbante.

chromatophore. *n.* Organite porteur de pigment; en particulier, chez les Bactéries, vésicule porteuse de bactériochlorophylles.

chromatoplasme. *n.* Portion périphérique du cytoplasme des Cyanophycées contenant des lamelles porteuses de chlorophylles.

chromophyte. *n.* Algue possédant, outre la chlorophylle, des pigments surnuméraires.

chromoplastes. *n.* Plastes ayant accumulé des pigments caroténoïdiques. Ce sont en général d'anciens chloroplastes (inclusions à chlorophylle).

chromosome. *n.* Élément allongé en général, formé par le noyau de la cellule lors de sa division. Les chromosomes sont en nombre constant, se divisent longitudinalement, et chaque moitié passe dans le noyau d'une des cellules filles.

chondriome. *n.* Ensemble des mitochondries.

chondroïde. *adj.* Qui a la consistance du cartilage.

chrysolaminarine, chrysose ou **leucosine.** *n.* Polyholoside analogue à la laminarine (voir ce mot) servant de réserve chez les Algues Chrysophycées.

cicatrice foliaire. *n.* Trace laissée sur la tige après la chute de la feuille.

cil. *n.* 1° Chez les Cormophytes, formation uni- ou pluricellulaire en forme de poil, située notamment au bord d'une feuille ou d'une bractée dont les marges sont alors dites ciliées. 2° Chez les êtres unicellulaires, élément vibratile servant à la locomotion. Dans ce cas, les cils sont généralement nombreux.

cingulum. *n.* Sillon équatorial dans la cellule des Algues Dinophycées.

circiné. *adj.* Enroulé en spirale.

cire. *n.* Substance solide à la température ordinaire, insoluble dans l'eau, soluble dans les solvants organiques. Résulte de l'union (estérification) d'acides organiques à longue chaîne (acides gras) non pas avec du glycérol, comme dans les graisses, mais avec des alcools à longue chaîne (jusqu'à trente-deux atomes de carbone). S'y ajoutent des hydrocarbures à longue chaîne. Les cires couvrent la cuticule des feuilles et de certaines tiges, y constituant souvent des aspérités régulières caractéristiques.

cladode. *n.* Rameau aplati en forme de feuille. Porte lui-même de petites feuilles qui peuvent abriter des fleurs ou des inflorescences, ce qui révèle sa vraie nature : celle de tige.

cladome. *n.* Thalle présentant un axe et des files cellulaires latérales, ou pleuridies.

cladomien. *adj.* Qui appartient aux cladomes. Qui est constitué d'un cladome.

cladomoïde. *adj.* Disposé en jet d'eau (hyphes).

classe. *n.* Ensemble d'ordres présentant des caractères d'organisation communs ; par exemple, les Monocotylédones et les Dicotylédones sont les deux classes des Angiospermes, caractérisées par le plan général de leur appareil végétatif et floral.

cléistocarpe. *adj.* Dont la capsule ne s'ouvre pas spontanément (Mousse). *N.* Une cléistocarpe. Chez les Champignons, syn. de *cléistothèce.*

cléistogame. *adj.* **(fleur).** Qui reste en bouton et subit une autofécondation.

cléistothèce. *n.* Formation close renfermant les asques de certains Champignons Ascomycètes.

climacique. *adj.* Qui concerne le climax ou qui le représente, *Ex.* Forêt climacique.

climacorhize. *adj.* Dont la coiffe de la racine est en continuité avec l'assise la plus externe (assise pilifère).

climax. *n.* État stable de la végétation lorsque, dans une zone donnée, le climat ne se modifie pas et que les êtres vivants, l'homme en particulier, n'interviennent pas. Par exemple, dans beaucoup de régions, une forêt de composition variable tend à s'installer si on abandonne la végétation à elle-même : c'est le climax du lieu.

cloche apicale. Chez les Champignons Ascomycètes, sorte de couvercle d'hyphes, formée par le stroma portant l'ébauche d'apothécie, recouvrant l'hyménium et susceptible d'émettre vers le bas, dans la direction de celui-ci, des pseudo-paraphyses.

coagulase. *n.* Enymze déterminant la coagulation de milieux protéiques, notamment celle du plasma sanguin.

coalescence. *n.* Soudure.

coccoïde. *adj.* En forme de coque. *Spécialt.* Cellule d'Algue s'entourant d'une coque plus ou moins gélifiée.

coccolithe. *n.* Appendice calcaire de la paroi de certaines Algues Chrysophycées. La craie est principalement constituée par l'accumulation de coccolithes fossiles.

coccospore. *n.* Spore libérée par une cellule de Cyanophycée fonctionnant comme sporocyste.

cochenilles. *n.* Insectes (nommés aussi poux des serres) voisins des pucerons, dont les femelles sécrètent une sorte de bouclier cireux sous lequel elles vivent. Parasites des Angiospermes dont elles puisent la sève, les cochenilles sont fort nuisibles, et sont difficiles à détruire.

cœnocyte. *n.* Filament contenant de nombreux noyaux, mais non divisé en cellules.

cœnocytique. *adj.* Concernant les cœnocytes ou constitué d'un cœnocyte.

cœnosore. *n.* Sore volumineux et allongé, formé par l'union de nombreux sores situés les uns à la suite des autres, comme le long de la marge d'une pinnule de *Pteris* ou de *Pteridium.*

coiffe. *n.* 1° Portion supérieure de l'archégone des Mousses, demeurant au-dessus de la capsule du sporogone issu de l'œuf que contenait cet archégone et se développant en éteignoir. Syn. *Calyptra.* 2° Sorte de capuchon de l'extrémité de la racine, formé de cellules continuellement renouvelées à partir du méristème apical radiculaire. Ces cellules sécrètent souvent des polyholosides mucilagineux qui agissent comme lubrifiant : la coiffe aide ainsi à la pénétration de la racine dans le sol.

coïr. *n.* Fibre végétale grossière fournie par le mésocarpe du fruit du cocotier. Il en reste des éléments à l'extérieur de l'endocarpe, vendu comme « noix de coco ».

col. *n.* Portion supérieure étroite et plus ou moins allongée de l'archégone, dominant le ventre. Sa ou ses cellules internes se gélifient pour laisser passer les anthérozoïdes.

coléoptile. *n.* Gaine enveloppant, lors de la germination, la plumule (bourgeon terminal) des Graminées et des Cypéracées. Il semble qu'il s'agisse d'une dépendance (ligule particulière) du cotylédon.

coléorhize. *n.* Gaine entourant la base de la radicule des plantules de Graminées et de quelques autres plantes (capucine). Sa valeur morphologique est mal connue.

collatéral. *adj.* **(faisceau).** Faisceau libéro-ligneux formé de bois à l'intérieur et de liber à l'extérieur seulement. C'est le type usuel.

collenchyme. *n.* Tissu de soutien, à parois cellulaires épaissies par le dépôt de couches de cellulose alternant avec des composés pectiques. Très fréquent dans les tiges et les feuilles.

collet. *n.* Chez les plantes supérieures, région souvent renflée, parfois indistincte, qui limite la radicule de la plantule par rapport à l'axe hypocotylé.

collinéen, *adj.* **(étage).** Souvent, étage de végétation englobant les plaines et les collines, donc situé en dessous de l'étage montagnard, jusque vers 800 ou 1 000 m. Désigne aussi un étage situé au-dessus des plaines, qui constituent alors l'*étage planitaire,* et en dessous de l'étage montagnard.

colloïde. *n.* ou **substance colloïdale.** Substance constituée de particules (micelles) relativement volumineuses (de l'ordre du dix-millième de millimètre) dispersées dans un milieu liquide, notamment l'eau.

columelle. *n.* Formation centrale en colonne de divers organes. *Ex.* Columelle du sporocarpe des Myxomycètes ou de la capsule du sporogone des Mousses.

commensal. *n.* Qui vit en association avec un autre organisme, sans en être parasite et, en général, sans s'y trouver fixé.

composée. *adj.* **(feuille).** Constituée de plusieurs folioles, ayant elles-mêmes la forme de petites feuilles avec leur pétiolule, et insérées soit sur un rachis qui prolonge le pétiole (disposition pennée), soit toutes au même point, au sommet de ce pétiole (disposition palmée). L'ensemble de la feuille composée occupe dans la phyllotaxie la place d'une seule feuille, et sur la même plante on observe très souvent des intermédiaires entre feuilles simples et composées. Chaque foliole peut elle-même être composée de foliolules qui peuvent être composées à leur tour.

concentrique ou **centrique.** *adj.* **(faisceau).** Qui comporte du liber tout autour d'un massif de bois.

conceptacle. *n.* Organe en forme d'outre abritant les organes reproducteurs de certaines Algues, notamment des Fucales (Phéophycées).

concrescent. *adj.* Soudé congénitalement. Deux structures concrescentes sont nées fusionnées à partir d'un primordium unique, et ont crû ensemble, sans jamais se séparer. Leur anatomie manifeste, malgré tout, leur dualité.

condupliqué. *adj.* Plié longitudinalement suivant une ligne médiane et vers l'intérieur (du côté adaxial). *Ex.* Feuille condupliquée.

cône. *n.* Toute formation fertile massive et allongée. *Ex.* Cône de houblon. Cône mâle des Conifères : fleur mâle à étamines aplaties. Cône femelle de ces plantes : inflorescence dans laquelle les bractées abritent un rameau axillaire virtuel produisant une, deux ou plusieurs feuilles fertiles modifiées, soudées les unes aux autres, et portant les ovules dorsalement. L'ensemble constitue l'écaille séminale, souvent soudée à la bractée correspondante, au moins en partie.

confrontation. *n.* Mise en présence de deux mycéliums haploïdes (primaires) de Champignons qui se féconderont s'ils sont compatibles.

conidie. *n.* 1° Chez les Champignons, cellule (conidiospore) reproduisant asexuellement le thalle qui l'a produite. 2° Désigne parfois une formation pluricellulaire qui est plutôt une sorte de propagule.

conidien. *adj.* 1° Qui concerne les conidies ou qui les porte. 2° Qui abrite la phase du cycle de développement d'un parasite producteur de conidies.

conidiogène. *adj.* **(cellule).** Qui produit des conidies, prises au sens de conidiospores.

conidioïde. *adj.* Qui a l'aspect d'une conidie (conidiospore).

conidiophore. *n.* Chez les Actinomycètes et les Champignons présentant un stade conidien, portion de filament formant une ou plusieurs conidies.

conidiospore. *n.* Spore assurant la reproduction asexuée des thalles de Champignons. Syn. *conidie.*

conjugaison. *n.* 1° Union de deux cellules fonctionnant comme gamètes. 2° Chez les Bactéries, union temporaire de deux cellules, au cours de laquelle l'une d'elles injecte à l'autre un segment de molécule d'acide désoxyribonucléique de son chromosome.

conné. *adj.* Soudé par ses bords, spécialement à la base. *Ex.* Feuilles connées, souvent dites à tort perfoliées.

connectif. *n.* 1° Ensemble des ceintures formant le rebord des valves de la carapace des Algues Diatomées. 2° Tissu de l'anthère reliant entre eux les quatre sacs polliniques que celle-ci comporte.

contorté. *adj.* Tordu en spirale. Dans la préfloraison contortée, ou tordue, chaque pièce (sépale ou pétale) recouvre sa voisine par un de ses bords et est recouverte sur son autre bord par son autre voisine.

convergence. *n.* Ressemblance superficielle entre des organismes ou des organes qui n'ont ni la même structure ni la même phylogénie. Souvent produite par une adaptation au même milieu.

convoluté. *adj.* A bords enroulés vers l'intérieur. *Ex.* Feuille convolutée.

coprophile. *adj.* Qui vit dans les excréments.

copulation. *n.* Fécondation.

coque. *n.* 1° Cellule bactérienne ou d'Algue, de forme subsphérique. 2° Portion globuleuse de certains fruits, libérée, et contenant une ou plusieurs graines. C'est une forme de méricarpe.

coralloïde. *adj.* Qui a l'aspect du corail.

cordé. *adj.* En forme de cœur, à bords latéraux arrondis. *Ex.* Base cordée d'un limbe.

cordiforme. *adj.* En forme de cœur.

corémie. *n.* Ensemble rayonnant pédonculé de conidiophores qui produisent des conidies par l'intermédiaire de leurs cellules conidiogènes terminales.

cormophyte ou **cormobionte.** *n.* Végétal présentant une racine, une tige et des feuilles, et, le plus souvent, un appareil conducteur formé de faisceaux libéro-ligneux.

cormus. *n.* Ensemble de la racine, de la tige et des feuilles, ou phyllomes.

corolle. *n.* Ensemble des pétales d'une fleur.

coronaro-dilatateur. *adj.* Qui entraîne une dilatation des artères coronaires, et, par conséquent, une meilleure irrigation du cœur.

coronule. *n.* Petite couronne, comme celle formée par les cellules terminales des filaments entourant les oogones (cellules femelles) des Charophytes.

cortex. *n.* Écorce. En général, portion externe résistante d'un organe. Plus particulièrement, écorce d'une tige ou d'une racine, c'est-à-dire tissu situé extérieurement aux tissus conducteurs (bois et liber). Peut être *primaire,* c'est-à-dire constitué lors de la formation de la tige ou de la racine jeune, à leur apex, ou *secondaire,* c'est-à-dire issu du fonctionnement d'une assise génératrice apparue dans l'écorce primaire.

cortical. *adj.* Qui concerne le cortex.

corticole ou **corticicole.** *adj.* Qui habite la surface et les interstices des écorces.

cortine. *n.* Filaments attachés sous le chapeau et au pied de certains Champignons (cortinaires).

cortiqué. *adj.* Muni d'une écorce, ou cortex.

corymbe. *n.* Grappe dont les pédoncules floraux sont de plus en plus courts vers le haut, de telle manière que les fleurs sont disposées suivant un plan. *Par ext.* Toute inflorescence hormis l'ombelle, notamment la grappe composée, ou grappe de cymes, dont les fleurs sont disposées suivant un plan (on dit aussi dans ce cas *fausse-ombelle*).

cosmopolitisation. *n.* Extension de l'aire d'une plante à une grande partie des terres émergées.

cotylédon. *n.* Première ou une des premières feuilles de la plante. De forme spéciale, les cotylédons sont souvent gorgés de réserves ou servent de suçoirs pour l'utilisation des réserves de l'albumen ou du périsperme. Dans les deux cas, ils permettent à la plantule de vivre pendant qu'elle s'enracine. Ils deviennent éventuellement, par la suite, chlorophylliens et fonctionnent comme des feuilles ordinaires. Il y a deux cotylédons chez les Dicotylédones, un chez les Monocotylédones; les Gymnospermes en ont deux ou un assez grand nombre.

coulant. *n.* Stolon se développant à la surface du sol et dont les bourgeons assureront la reproduction asexuée de la plante. *Ex.* Coulant du fraisier.

coumarine. *n.* Substance à fonction lactone, dérivée d'un acide cinnamique porteur d'une fonction phénol. D'odeur agréable, elle est répandue dans le règne végétal (flouve, aspérule, mélilot).

couronne. *n.* Syn. de *paracorolle*.

coussinet foliaire. Sur les troncs de Lépidophytes fossiles, renflement de la tige portant la cicatrice foliaire.

cratère flagellaire. Petite dépression cytoplasmique à la base d'un flagelle.

criblé. *adj.* Percé de trous fins et régulièrement disposés, comme un crible (passoire).

crochet dangeardien. Chez les Champignons Ascomycètes, formation résultant de la division d'une cellule terminale à couple de noyaux (dicaryon), dont la cellule fille supérieure va donner un asque. Cette division s'effectue avec l'intervention d'un processus comparable à la formation d'une anse d'anastomose.

croissance. *n.* Augmentation de la taille d'une cellule, d'un organe ou d'un organisme. Dans le dernier cas, il peut s'agir d'une croissance des cellules constitutives dont le nombre ne varie pas, ou d'une multiplication de celles-ci. La *croissance intercalaire* se fait par multiplication de cellules interposées parmi d'autres qui se sont différenciées et ont perdu l'aptitude à se diviser, par exemple la région inférieure des entre-nœuds des tiges des Graminées. La *croissance marginale* provient de l'activité de cellules situées au bord d'un organe plat (feuille, thalle). La *croissance apicale* est due aux divisions de cellules de la pointe (apex) d'une tige ou d'une racine. Dans la *croissance trichothallique,* la région subapicale d'un thalle comporte des cellules se divisant activement et produisant vers le bas la masse du thalle, tandis que vers le haut elles ne donnent qu'une sorte de « poil » pluricellulaire relativement peu développé. Les tissus constitués de cellules à divisions actives sont des *méristèmes*.

crustacé. *adj.* Qui forme une croûte. *Ex.* Thalle crustacé, appliqué sur son support, et souvent très difficile à détacher, comme celui de beaucoup de Lichens.

cucullé. *adj.* En forme de capuchon. *Ex.* Pétale ou sépale cucullés au sommet; feuilles cucullées des Mousses *(Trichostomum)*.

cultivar. *n.* (Abréviation *cv.*). Forme obtenue lors de la culture d'un Végétal, qui ne se maintiendrait pas spontanément par reproduction sexuée si on l'abandonnait à elle-même. Ce peut être un hybride qui subira une disjonction de ses caractères, ou le résultat d'une mutation végétative qui n'est inscrite que dans le génome de quelques-unes des cellules (cas de nombreuses chimères) et pas, ou pas toujours, dans celles des fleurs produites. *Ex. Pelargonium peltatum* cv. « Élégance ».

cunéiforme. *adj.* Dont les deux bords rectilignes forment un angle aigu.

cupressoïde. *adj.* En forme de cyprès. Lat. *cupressoides.*

cupule. *n.* En général, formation ressemblant à une petite coupe. *Spécialt.* Structure protectrice des fleurs femelles puis des fruits des arbres à chatons (chêne, châtaignier, etc.); elle peut correspondre à des préfeuilles ou à une excroissance de l'axe inflorescentiel porteuse de nombreuses petites bractées.

cuspidé. *adj.* Terminé en pointe longue et aiguë (cuspide).

cuticule. *n.* 1° Couche résistante et imperméable, dirigée vers l'extérieur, couvrant la paroi squelettique des cellules de l'épiderme des feuilles et des tiges. Contient notamment des cires. *Par ext.* Chez les Champignons, croûte dure de divers organes formée de plectenchyme. 2° Chez les Arthropodes (Insectes, Crustacés, etc.), production des cellules de l'épiderme, constituée surtout de chitine et formant une carapace éventuellement incrustée de calcaire.

cyathium. *n.* Inflorescence des Euphorbes, en forme de fleur (pseudanthe). Comporte cinq cymes unipares hélicoïdes de fleurs mâles réduites à une seule étamine (ou à un synandre), disposées à l'aisselle de cinq bractées en forme de calice, et entourant une fleur femelle pratiquement réduite à son ovaire.

cycle. *n.* Verticille.

cycle annuel d'une population. Fluctuation régulière de l'importance numérique ou de la composition qualitative d'une population, au cours d'une année, déterminée par les facteurs écologiques.

cycle d'un élément. Le cycle d'un élément (carbone, azote, soufre, etc.) est l'ensemble des échanges cycliques qui se produisent entre les combinaisons diverses auxquelles participe cet élément dans la nature. Le carbone, par exemple, existera sous forme pure et sous forme de gaz carbonique susceptible d'être incorporé dans des substances organiques végétales, qui, à leur tour, permettront de produire de la matière animale. Mais Animaux et Végétaux produiront du gaz carbonique par leur respiration, et par la décomposition de leurs cadavres. Par ailleurs, du gaz carbonique sera susceptible d'être fixé sous forme de carbonate (coquilles calcaires), qui pourra être solubilisé, avec libération de gaz carbonique et de bicarbonate, tous deux assimilables à nouveau par des plantes.

cyme. *n.* Inflorescence dont l'axe principal se termine par une fleur, tandis qu'une ou plusieurs bractées inférieures forment à leur aisselle des fleurs dont le pédoncule se ramifie éventuellement de la même façon. On distingue : les *cymes bipares,* dont les pédoncules floraux portent deux bractées presque opposées, formant elles-mêmes une fleur à leur aisselle, le processus se répétant un certain nombre de fois suivant des ordres successifs; les *cymes unipares,* dont les pédoncules floraux portent une seule bractée formant une fleur à son aisselle, le processus se répétant suivant des ordres successifs; les *cymes unipares hélicoïdes,* qui sont des cymes unipares dont les bractées « fertiles » des pédoncules d'ordres successifs sont disposées alternativement à gauche et à droite, de sorte que l'ensemble garde une forme rectiligne; enfin, les *cymes unipares scorpioïdes,* qui ont les bractées « fertiles » d'ordres successifs toujours disposées du même côté, l'ensemble offrant l'aspect d'une « queue » de scorpion.

cymeux. *adj.* Qui a la forme d'une cyme ou est constitué de cymes.

cynorrhodon. *n.* Pseudo-fruit du rosier, formé par un réceptacle creux et charnu, abritant les vrais fruits, qui sont des akènes.

cyste. *n.* Sac formé par la paroi squelettique d'une cellule qui s'est divisée en spores ou gamètes, et contenant ces derniers.

cystéine. *n.* Acide aminé dont le radical comporte le groupement —SH (sulfhydrile).

cystide. *n.* Vésicule terminale renflée et hyaline formée par les hyphes de certains Champignons. Dans l'hyménium des Basidiomycètes, notamment, les cystides se trouvent intercalées parmi les basides.

cystine. *n.* Acide aminé dont la molécule contient deux atomes de soufre. Résulte de l'union de deux molécules de cystéine, avec élimination de deux atomes d'hydrogène entre leurs deux groupes —SH. Lorsque ces molécules sont situées sur deux chaînes différentes de polypeptides, la cystine sert à l'attachage de ces chaînes; lorsqu'elles se trouvent dans une même chaîne, leur union détermine la manière particulière dont cette dernière se plie. Dans l'un et l'autre cas, la configuration obtenue est déterminante dans le fonctionnement des chaînes protéiques, en particulier lorsqu'elles forment une enzyme.

cystocarpe. *n.* Chez certaines Algues rouges, ensemble du carposporophyte et des tissus protecteurs élaborés par le gamétophyte dont il est parasite.

cytodiérèse. *n.* Division du cytoplasme d'une cellule. Suit souvent immédiatement celle du noyau, mais peut aussi être fort retardée.

cystolithe. *n.* Groupe de cristaux de calcaire portés par une excroissance interne de la paroi de cellules volumineuses (lithocytes), en général épidermiques.

cystospores. *n.* Spores se formant dans un sporocyste.

cytochrome. *n.* Pigment respiratoire constitué d'une protéine et d'une substance azotée renfermant du fer. Sert au transport d'électrons lors de la respiration cellulaire, permettant le stockage sous forme d'acide adénosine-triphosphorique (ATP) de l'énergie issue de la dégradation des aliments.

cytogamie. *n.* Union des cytoplasmes lors de la fécondation, les noyaux des cellules sexuelles restant libres.

cytopharynx. *n.* Dépression en entonnoir dans la paroi d'une cellule, qui présente l'aspect d'un gosier (pharynx).

cytoplasme. *n.* Ensemble des éléments d'une cellule enfermés dans la membrane cytoplasmique, à l'exclusion du noyau. Comprend le hyaloplasme et les divers organites qui s'y trouvent (notamment l'appareil de Golgi, les mitochondries, et le réticulum endoplasmique).

cytotype. *n.* Ensemble d'individus d'une espèce, caractérisés par un nombre déterminé de chromosomes, mais souvent indistincts morphologiquement d'autres cytotypes de la même espèce. Les cytotypes présentent parfois des particularités physiologiques, qui peuvent en partie expliquer leurs distributions géographiques différentes.

D

décidu. *adj.* 1° A feuilles caduques. 2° Formé d'arbres à feuilles caduques. *Ex.* Forêt décidue.

découpé. *adj.* Muni de dents profondes autour des pointes des nervures. *Ex.* Limbe découpé.

décurrent. *adj.* Qui se prolonge vers le bas sur la structure qui le porte, comme s'il lui était plus ou moins longuement uni. *Ex.* Feuille décurrente sur la tige.

dégénérescence. *n.* 1° Décomposition d'une structure, généralement par autodigestion. 2° Perte d'importance d'une structure au cours de la phylogénie.

déhiscent. *adj.* Qui s'ouvre spontanément suivant des lignes précises de moindre résistance. *Ex.* Fruit sec déhiscent.

deltoïde. *adj.* En forme de Δ, c'est-à-dire de triangle plus ou moins équilatéral.

demi-fleuron. *n.* Fleur des Composées à corolle formant, au-dessus d'un tube très court, une longue languette déjetée d'un seul côté et présentant à son sommet une, trois ou cinq dents.

déminéralisation. *n.* En analyse chimique, élimination des sels minéraux d'un mélange, par fixation de ceux-ci sur des résines particulières (échangeuses d'ions) ou par formation de sels insolubles qui sont précipités.

dendrogramme. *n.* Diagramme en forme d'arbre destiné à faire apparaître les degrés de ressemblance entre divers taxons : ceux-ci sont d'autant plus ressemblants qu'ils terminent des branches directement en rapport les unes avec les autres.

dent. *n.* Élément pointu formé par la marge d'un limbe, un péristome de Mousse, etc.

depside. *n.* Substance résultant de l'union par estérification de deux acides organiques (ou plus) munis de fonctions phénol. L'union a lieu, soit directement entre eux, une fonction acide de l'un estérifiant une fonction phénol de l'autre, soit, parfois, par l'intermédiaire d'une autre substance susceptible d'être estérifiée. Les Lichens contiennent de nombreux depsides : acides évernique et lécanorique.

depsidone. *n.* Depside dont les deux molécules à fonction phénol sont unies en plus par une liaison éther (—O—), formant ainsi un cycle fermé supplémentaire. Beaucoup de Lichens en contiennent (acide protocétrarique).

dérive des continents. Séparation et éloignement progressifs, depuis la fin de l'ère primaire, des continents actuels à partir d'une masse unique, ou pangée, encore continue. C'est par ce processus que les continents ont progressivement atteint leur position actuelle.

dermatophyte. *n.* Champignon parasite vivant dans la peau, comme ceux qui provoquent les teignes.

déshydrogénase. *n.* Enzyme qui arrache l'atome d'hydrogène de divers substrats et transmet soit l'atome tout entier, soit seulement son électron, à des transporteurs, qui sont réduits. Les déshydrogénases sont très importantes lors de la respiration cellulaire, l'hydrogène réduisant finalement l'oxygène pour produire de l'eau.

désoxyribonucléase. *n.* Enzyme détruisant l'acide désoxyribonucléique, en scindant ses chaînes en des points précis.

desquamation. *n.* Émission de squames, c'est-à-dire d'écailles. Beaucoup d' « écorces » d'arbres (rhytidomes) desquament, par exemple, celles des platanes.

dextrines. *n.* Polymères du glucose, issus de la dégradation partielle de l'amidon et dont les molécules sont moins volumineuses que celles de ce dernier.

diadelphe. *adj.* Dont les éléments sont répartis en deux groupes. *Ex.* L'androcée diadelphe des Papilionacées possède neuf étamines unies et une libre.

diagramme. *n.* Figure schématique d'une coupe de fleur ou de bourgeon représentant les positions relatives des constituants. *Par ext.*, schéma de la ramification d'une pousse (diagramme de ramification).

diakène. *n.* Groupe de deux akènes issus des deux carpelles d'une même fleur. Beaucoup de diakènes (Ombellifères) sont en fait des schizocarpes : seules deux portions (méricarpes) du fruit sont libérées, tandis que le centre demeure attaché à la fleur.

dialypétale. *adj.* 1° A pétales libres. 2° A corolle constituée de pétales libres.

dialysépale. *adj.* 1° A sépales libres. 2° A calice constitué de sépales libres.

diandre. *adj.* 1° A deux étamines. 2° A fleurs possédant deux étamines (Orchidées diandres).

diaphragme. *n.* Mince couche tissulaire séparant deux cavités, par exemple, celles qui remplacent la moelle au centre d'une tige.

diastase. *n.* Voir *enzyme*.

diastasique. *adj.* Voir *enzymatique*.

dicaryon. *n.* Couple de noyaux dans certaines cellules de Champignons. Voir *dicaryophase*.

dicaryophase. *n.* Phase du cycle de développement d'un Champignon au cours de laquelle ses cellules ou articles ont chacun un couple de noyaux, ou dicaryon (provenant de la fécondation et n'ayant pas encore subi de fusion).

dicaryotisation. *n.* Réalisation de l'état de mycélium à dicaryons, c'est-à-dire à deux noyaux par cellule.

dichasium. *n.* Ensemble ramifié en sympode dans lequel deux bourgeons axillaires végétatifs floraux se sont développés en dessous de l'apex du rameau père, qui a lui-même formé une fleur ou s'est arrêté de croître. Si l'ensemble demeure à l'état végétatif on parle aussi de *dichopode*, et la ramification est dite *pseudo-dichotome*.

dichogame. *adj.* 1° Dont les organes des deux sexes ne parviennent pas à maturité en même temps. 2° Qui possède des fleurs présentant cette particularité.

dichotomie. *n.* 1° Division d'un axe à son sommet en deux axes d'égale importance, qui pourront se diviser selon le même processus (se dichotomiser) à leur tour. 2° Etat résultant de ce phénomène.

dicline. *adj.* Qui présente des fleurs unisexuées, mais naissant sur le même pied.

dictyosomes. *n.* Éléments constitutifs de l'appareil de Golgi, formés d'une pile de saccules aplatis.

didyname. *adj.* 1° Qui possède des pièces de deux tailles différentes. *Ex.* Androcée (ensemble des étamines) didyname : à grandes et petites étamines. 2° Qui possède un tel androcée. *Ex.* Fleur didyname.

digénétique. *adj.* **(cycle de développement).** Cycle dans lequel l'individu se présente sous deux aspects successifs (sporophyte et gamétophyte), distincts du point de vue morphologique.

digité. *adj.* Dont les éléments (folioles, épis, etc.) sont disposés comme les doigts d'une main, donc insérés au même niveau. Pour les folioles, on préfère le terme *palmé*.

dimère. *adj.* Constitué de deux éléments.

dimorphe. *adj.* Qui présente un dimorphisme. *Ex.* Feuilles dimorphes : dont il existe deux types.

dimorphisme. *n.* 1° Possibilité, pour un organe ou un organisme, de se présenter sous deux formes différentes. 2° *Dimorphisme sexuel* : indépendamment des caractères sexuels primaires, les individus mâles et les femelles peuvent être d'aspect bien différent.

dinocaryon. *n.* Noyau particulier aux Algues Dinophycées, caractérisé par sa composition chimique (absence d'histones) et son mode de division.

dioécie. *n.* État d'un être dioïque.

dioïque. *adj.* Qui possède des pieds mâles et femelles séparés.

diplanétisme. *n.* Chez les Champignons Saprolégniales, existence de deux générations de zoospores successives.

diploïde. *adj.* Qui possède un nombre de chromosomes double de celui des noyaux des gamètes. C'est le cas de l'œuf et du sporophyte qui en dérive.

diplostélé. *adj.* 1° A deux faisceaux libéro-ligneux. 2° Qui possède des feuilles à deux faisceaux. Les deux faisceaux des feuilles de pins diplostélés proviennent en fait d'un faisceau unique qui s'est divisé.

diplostémone. *adj.* 1° Qui possède deux verticilles d'étamines, les étamines du premier alternant avec les pétales et celles du second alternant avec les précédentes. 2° Qui possède un androcée ainsi organisé.

disamare. *n.* Fruit constitué de deux samares, comme chez les érables.

discopode. *adj.* Formation, à allure de pied court, de la « fructification » en coupe (apothécie) de certains Champignons Ascomycètes.

disque. *n.* 1° Tout élément à forme discoïdale, servant en particulier à l'insertion de la plante ou à son accrochage à un support. 2° Dans la fleur, anneau situé en dessous ou au-dessus des étamines, généralement producteur de nectar, et, par conséquent, attracteur des Insectes pollinisateurs.

dissémination. *n.* Dispersion des semences des plantes, c'est-à-dire de leurs graines, fruits ou, parfois, de leurs infrutescences entières. Assure la conservation de l'espèce sur toute son aire et son expansion.

distal. *adj.* Situé du côté libre d'un organe, par opposition à proximal.

distique. *adj.* Disposé sur deux rangs. Les feuilles distiques sont également alternes (alternes-distiques), sauf dans certains cas rarissimes où elles sont opposées (mais non décussées !).

diurétique. *adj.* Qui favorise l'émission d'urine (diurèse).

division ségrégative. Formation, dans un siphon à nombreux noyaux, d'une ou de plusieurs parois. Isole deux ou plusieurs articles qui conservent chacun de nombreux noyaux et sont donc, non des cellules, mais des syncytiums.

dôme apical. Chez les Ascomycètes lichénisants, épaississement, au niveau de l'apex, de la paroi interne des asques. Contient éventuellement l'anneau apical.

dorsal. *adj.* La face dorsale d'une feuille est la face inférieure, ou abaxiale.

dorsifixe. *adj.* 1° Inséré sur le filet par le milieu de sa face dorsale (côté abaxial). *Ex.* Anthère ou étamine dorsifixes. 2° Dont l'anthère est ainsi insérée.

dorsiventral. *adj.* Qui présente une différenciation entre une face ventrale, inférieure, et une face dorsale, supérieure.

double. *adj.* Qui possède des éléments plus nombreux que les formes typiques. Une fleur double a de nombreux sépales, pétales surtout, étamines ou carpelles. La multiplication peut s'être faite par transformation d'un élément en un autre (multiplication des pétales aux dépens des étamines), sans que le nombre total des pièces soit changé. Mais généralement, il y a accroissement du nombre total, soit par augmentation du nombre d'éléments de chaque verticille, soit par augmentation du nombre des verticilles, ou encore par les deux processus à la fois.

drageon. *n.* ou **rejet de souche.** Pousse se développant à la base d'un arbre, à partir d'un bourgeon adventif d'une racine. Possède souvent de grandes feuilles de forme différente des feuilles normales.

drageonner ou **rejeter de souche.** Émettre des drageons.

drupacé. *adj.* Qui a le caractère d'une drupe.

drupe. *n.* Fruit formé d'une partie charnue (pulpe) limitée extérieurement par une membrane assez consistante (« peau ») et entourant un ou plusieurs noyaux, qui abritent eux-mêmes une ou plusieurs graines chacun.

drupéole. *n.* Petite drupe, formée par un carpelle isolé, et groupée avec les fruits résultant des autres carpelles de la même fleur, comme chez la ronce.

dulçaquicole ou **dulcicole.** *adj.* Qui vit dans l'eau douce.

duramen. *n.* Bois de cœur, ancien et non fonctionnel. Le plus dur de l'arbre. Par opposition à l'aubier.

dystrophe. *adj.* **(milieu).** Qui ne permet pas une bonne nutrition des êtres vivants qui l'occupent, notamment parce qu'il est trop acide et pas assez oxygéné.

E

écaille. *n.* Toute formation de petite taille, assez mince et plus ou moins circulaire ou ovoïde. En particulier, feuille réduite, notamment parce qu'elle vit sous terre. Chez les Gymnospermes, une *écaille séminale* est une pièce portant les ovules ; elle correspond à une ou plusieurs feuilles soudées.

écailleux. *adj.* 1° Concernant les écailles. 2° Constitué ou porteur d'écailles. *Ex.* Bulbe écailleux.

échancré. *adj.* Présentant sur la marge une dépression profonde. Se dit en particulier d'un pétale.

échinulé. *adj.* Garni de petites épines.

écie ou **écidie.** *n.* Chez les Urédinales, fructification produisant des spores à dicaryon propageant le mycélium secondaire, éventuellement sur un hôte différent de celui qui les porte.

éciospore ou **écidiospore.** *n.* Chez les Urédinales, spore à dicaryon produite par les écies.

éclaircissant. *n.* Liquide utilisé pour rendre transparentes des préparations d'objets opaques, de manière à pouvoir les examiner (en particulier, au microscope).

écologie. *n.* 1° Étude des rapports entre les êtres vivants et le milieu où ils vivent. 2° Étude des conditions de vie dans un milieu donné (écologie des landes), ou des conditions de vie d'un être ou d'un groupe d'êtres donnés (écologie de la fougère-aigle, des plantes halophiles).

écorce. *n.* En général, couche dure protectrice entourant un organe. Plus particulièrement, tissu entourant les éléments des tissus conducteurs (bois et liber) de la tige et de la racine. L'écorce des arbres, susceptible de se séparer de diverses façons, est formée de tissus secondaires repoussés par l'activité d'une assise génératrice plus interne, et qui fournira des tissus susceptibles d'être rejetés à leur tour. Une telle écorce est un *rhytidome*.

ectoparasite. *n.* Parasite vivant au contact de son hôte, mais aussi dans le milieu externe. *Ex.* Un pou ou une puce.

ectotrophe. *adj.* **(mycorrhize).** Racine autour de laquelle le mycélium d'un Champignon symbiotique forme un manchon périphérique sans envahir les cellules.

écusson. *n.* Formation aplatie, portée par un axe central. Se dit en particulier des éléments des organes mâles des Charophytes et de la partie terminale des écailles du cône de certains pins.

édaphique. *adj.* Qui concerne le sol.

élatère. *n.* 1° Cellule hygroscopique dont les mouvements aident à la dissémination des spores de nombreuses Hépatiques. 2° Chez les Prêles, languette formée par découpure de l'épispore et assurant, grâce à ses mouvements hygroscopiques, la dissémination des spores, qui comptent chacune quatre élatères.

émarginé. *adj.* Échancré à l'extrémité.

embryon. *n.* Jeune être issu de l'œuf, enveloppé dans la paroi de ce dernier ou dans un organe maternel. Chez les plantes supérieures, on parle d'embryon seulement pour la très jeune plantule encore enfermée dans la graine. Après la germination, on considère que la plante n'est plus embryonnaire; cependant, c'est seulement à sa floraison que ses organes reproducteurs sont mis en place.

embryon adventif. Embryon formé par des cellules du nucelle de l'ovule et qui pénètre dans le sac embryonnaire et y évolue comme un embryon normal. Des embryons adventifs s'obtiennent artificiellement sur de nombreuses cultures de tissus ou d'organes végétaux.

emménagogue. *adj.* Qui favorise la menstruation.

encroûtant. *adj.* Qui s'étale sur son support comme une croûte.

endoascus. *n.* Paroi (tunique) interne des asques.

endobiotique. *adj.* **(parasite).** Qui vit à l'intérieur de son hôte.

endocarpe. *n.* Partie interne du péricarpe des fruits, ligneuse s'il s'agit de drupes, souvent membraneuse mais résistante dans les autres cas. On peut considérer que le noyau est une formation extérieure au véritable endocarpe membraneux et dépendant du mésocarpe.

endocellulaire. *adj.* **(parasite).** Qui vit dans les cellules de son hôte.

endocyanose. *n.* Symbiose d'une Cyanophycée (dite alors *cyanelle*) et d'une Algue ayant perdu ses propres chloroplastes, qui sont remplacés physiologiquement par la Cyanophycée, laquelle fixe le gaz carbonique (ou le bicarbonate) de l'eau.

endoderme. *n.* Assise de cellules entourant le cylindre central de la racine et de quelques rares tiges. Chaque cellule de l'endoderme possède un cadre lignifié.

endokyste. *n.* Kyste se formant à l'intérieur de la paroi d'une cellule, qui peut ensuite le libérer.

endopéridium. *n.* Couche interne du péridium (paroi de la fructification des Gastéromycètes), éventuellement mise à nu par la déhiscence de l'exopéridium, ou couche externe.

endophyte. *adj.* Se développant à l'intérieur d'une plante. *N.* Végétal symbiotique (Champignon, Algue) qui se développe dans les cellules d'un autre Végétal.

endoscopique. *adj.* Qui est inclus dans le tissu du prothalle. Se dit de certains embryons des Ptéridophytes.

endosperme. *n.* Tissu haploïde des Gymnospermes formé dans l'ovule à partir d'une cellule ayant subi la réduction chromatique. Forme la partie non sexualisée du gamétophyte, ou prothalle femelle. Sert de nourriture à l'embryon. Ne pas confondre avec l'albumen, qui, lui, est triploïde et résulte de la prolifération du produit de la fécondation d'un couple de noyaux du sac embryonnaire par un gamète mâle.

endospore. *n.* 1° Spore demeurant enclose dans le sporocyste où elle s'est formée. *Ex.* La spore bactérienne. 2° Paroi squelettique interne de diverses spores (Champignons, Ptéridophytes).

endostome. *n.* Cycle interne de dents du péristome des Mousses lorsque celui-ci en compte deux.

endotesta. *n.* Partie interne, membraneuse et mince, du tégument des graines de certaines Gymnospermes.

endotrophe. *adj.* **(mycorrhize).** Racine dont les cellules périphériques sont envahies par le Champignon symbiotique.

endozoïque. *adj.* Parasite vivant à l'intérieur d'un Animal, au moins dans sa cavité digestive.

engainant. *adj.* Qui possède une gaine bien développée entourant la tige ou les gaines des feuilles plus jeunes. *Ex.* Feuille engainante.

enkystement. *n.* Transformation d'une cellule ou d'un petit organisme en kyste.

entérotoxines. *n.* Substances protéiques toxiques produites par les Entérobactériacées qui vivent notamment dans l'intestin.

entier. *adj.* Dépourvu de tout accident (dents, divisions). *Ex.* Limbe entier.

entomogame ou **entomophile.** *adj.* Dont la pollinisation est effectuée par les Insectes.

entomogamie ou **entomophilie.** *n.* Pollinisation effectuée grâce aux Insectes qui transportent le pollen d'une fleur à l'autre.

entomophage. *adj.* Qui se nourrit d'Insectes.

entraînement à la vapeur. Opération consistant à faire bouillir une drogue contenant une substance volatile insoluble dans l'eau (huiles essentielles), puis à recueillir la vapeur pour la condenser comme dans une distillation. La vapeur « entraîne » le principe que l'on cherche à isoler et qui se sépare spontanément de l'eau de condensation puisqu'il y est insoluble.

entre-nœuds. *n.* Zone relativement étroite séparant deux nœuds. En particulier, chez les Cormophytes, zone plus mince de la tige séparant deux nœuds. Dit parfois *mérithalle*.

enveloppe péricentrale. Au début du développement de la fructification des Champignons Ascomycètes, formation d'hyphes constituant une paroi.

enzymatique ou **diastasique.** *adj.* Qui concerne les enzymes, ou diastases.

enzyme ou **diastase.** *n.* Molécule protéique permettant la réalisation, dans un organisme, de réactions chimiques (synthèses ou dégradations) qui n'auraient pas lieu spontanément dans les conditions propres à cet organisme.

éparse. *adj.* A phyllotaxie spiralée dans laquelle chaque tour de la spirale comporte de nombreuses pièces. *Ex.* Feuilles éparses.

éperon. *n.* Dilatation en forme de doigt de gant d'un sépale, d'un pétale ou d'un tube floral. Il amasse souvent du nectar consommé par les Insectes pollinisateurs.

épi. *n.* Inflorescence constituée d'un axe porteur de rameaux axillaires, réduits à des fleurs sessiles ou à des inflorescences secondaires, elles aussi sessiles.

épibiotique. *adj.* **(parasite).** Qui vit sur son hôte, à l'extérieur.

épicarpe. *n.* Partie externe membraneuse du péricarpe des fruits.

épigé. *adj.* Qui vit, au moins en grande partie, au-dessus du sol, mais éventuellement couché sur lui.

épigyne. *adj.* 1° Inséré au-dessus de l'ovaire. 2° Qui possède un périanthe ainsi inséré : fleur épigyne.

épillet. *n.* Groupe de fleurs des Graminées ou des Cypéracées, disposées en épi de petite taille à phyllotaxie distique. Les épillets sont eux-mêmes groupés en épis, panicules, etc.

épimatium. *n.* Chez les Podocarpacées, formation entourant l'ovule, devenant charnue, et comparable à l'ensemble de la bractée et de l'écaille séminale des cônes de Conifères, avec probablement des bractées supplémentaires.

épine. *n.* Formation pointue et piquante, qui peut être soit une simple protubérance des tissus superficiels d'une tige, d'une feuille ou de sa marge (on l'appelle alors aussi *aiguillon*, comme dans le cas d'une épine de rosiers), soit l'apex d'un rameau devenu ligneux et piquant (aubépine).

épipétale. *adj.* Situé en face de chaque pétale. *Ex.* Étamines épipétales.

épiphragme. *n.* Membrane recouvrant l'ouverture de la capsule de certaines Mousses (polytrics) après la chute de l'opercule.

épiphylle. *adj.* Qui est attaché à la feuille, comme des sores ou une inflorescence. Dans le dernier cas, le pédoncule de l'inflorescence est soudé à la feuille et, en fait, inséré sur la tige.

épiphyte. *adj.* Qui vit sur d'autres plantes, sans en être parasite.

épiplasme. *n.* Syn. de *périplasme*.

épisépale. *adj.* Situé en face de chaque sépale. *Ex.* Étamines épisépales.

épisome. *n.* Élément renfermant de l'acide désoxyribonucléique et susceptible de se fixer au chromosome bactérien. Peut être un élément normal, comme le facteur de fertilité F qui permet la reproduction sexuée des Bactéries, ou un parasite viral dont l'ADN s'associe, au moins transitoirement, à celui de la Bactérie (bactériophage tempéré).

épispore. *n.* Zone externe de la paroi de sporopollénine de certaines spores.

épithèque. *n.* Partie de la thèque (carapace interne) d'une Algue Dinophycée, située au-dessus du cingulum.

épixyle. *adj.* Qui vit sur le bois, sans le décomposer.

équationnelle. *adj.* **(spore).** Formée sans réduction chromatique, par simple mitose de la cellule mère, et possédant par conséquent le même nombre de chromosomes qu'elle.

équisétine ou **équisétoside**. *n.* Saponoside présent dans *Equisetum arvense*.

ergot. *n.* Sclérote fort toxique du Champignon *Claviceps purpurea* qui parasite les céréales, le seigle surtout.

érigé. *adj.* Dressé. S'élevant de terre.

érumpent. *adj.* Qui perce une paroi, un épiderme, etc., pour s'étaler à sa surface et y fructifier.

espèce. *n.* Ensemble des individus morphologiquement très comparables et susceptibles de se croiser entre eux en produisant des descendants fertiles. Des plantes que l'on peut croiser expérimentalement mais qui sont distinctes morphologiquement forment des espèces différentes mais ne se maintiennent naturellement que dans les cas d'isolement géographique.

espèce linnéenne ou **agrégat**. *n.* Espèce comportant des plantes assez différentes, qui semblent pouvoir être réparties en plusieurs taxons (parfois également appelés « espèces »).

étagé. *adj.* Disposé en niveaux superposés. *Ex.* Les rameaux d'un arbre, qui forment des pseudo-verticilles, et lui assurent un port étagé (ce dernier peut aussi provenir d'une ramification sympodiale).

étamine. *n.* Pièce mâle d'une fleur, productrice de pollen. Comme toutes les autres pièces florales, les étamines sont homologues de feuilles végétatives. Elles comportent fondamentalement quatre sacs polliniques parallèles, deux de chaque côté, qui confluent en deux loges polliniques. En général, ces dernières s'ouvrent chacune longitudinalement par une fente située entre les deux sacs de chaque couple.

étendard. *n.* Pétale supérieur (adaxial) de la fleur des Papilionacées, en général de grande taille.

éthanol. *n.* Alcool (éthylique) ordinaire.

eubaside. Voir *holobaside*.

euphylle. *n.* Feuille assez plate des Gymnospermes, plus proche de la forme typique des feuilles que les aiguilles, mais fondamentalement homologue de ces dernières.

eusporangié. *adj.* Qui possède des eusporanges, c'est-à-dire des sporanges massifs, enfouis dans le limbe, naissant en même temps dans le sore.

eustélique. *adj.* Qui présente une eustèle, c'est-à-dire un cylindre central normal, par opposition aux structures polystéliques, à plusieurs stèles dans la même tige. Voir *stèle*.

eutrophe. *adj.* **(milieu)**. Riche en éléments nutritifs, mais insuffisamment oxygéné.

évolution régressive. Simplification de la structure des membres d'un phylum au cours de l'évolution.

excipulum. *n.* Rebord entourant l'apothécie (fructification en coupe des Champignons Ascomycètes). En particulier, rebord externe, d'origine stromatique, lorsqu'il y en a deux concentriques. Le rebord interne est alors le parathécium.

exergonique. *adj.* **(réaction)**. Qui fournit de l'énergie susceptible, chez les êtres vivants, d'être dépensée en chaleur ou mise en réserve par la synthèse de composés phosphorés (acide adénosine-triphosphorique), qui est, elle, *endergonique* (nécessite de l'énergie). La décomposition de ces composés permettra plus tard la récupération de l'énergie emmagasinée.

exindusié. *adj.* Dépourvu d'indusie ou dont les sores en sont dépourvus.

exine. *n.* Couche externe de la paroi des spores et des grains de pollen, en particulier chez les Cormophytes. Constituée surtout de sporopollénine, elle est extrêmement résistante. Comporte elle-même plusieurs couches plus ou moins distinctes.

exoascus. *n.* Paroi (tunique) externe des asques.

exopéridium. *n.* Couche externe du péridium, ou paroi de la fructification des Gastéromycètes.

exoscopique. *adj.* Qui fait protrusion par rapport à la surface du prothalle. Se dit de certains embryons de Ptéridophytes.

exospore. *n.* 1° Spore rapidement expulsée de son sporocyste ou formée par hernie de la paroi cellulaire de celui-ci. 2° Partie externe de la paroi inerte de diverses spores (Champignons, Fougères, etc.).

exostome. *n.* Cycle externe de dents du péristome des Mousses lorsque celui-ci en compte deux.

exsert. *adj.* Qui dépasse l'orifice d'une structure dans laquelle sa base est enclose. Les étamines dépassent ou non le tube formé par les pétales : elles sont ou non exsertes. Formé de pièces exsertes : androcée exsert.

exsudat. *n.* Produit s'échappant lentement (par *exsudation*) d'une structure vivante, souvent malade.

extra-axillaire. *adj.* Qui est formé à l'extérieur de l'aisselle de la feuille axillante. Un rameau extra-axillaire peut être placé au-dessus ou à côté de l'aisselle. Il est en général initialement axillaire, et déplacé secondairement lors de la croissance.

extrafasciculaire. *adj.* Qui est localisé en dehors des faisceaux libéro-ligneux mais généralement entre eux. Le cambium extrafasciculaire joint les faisceaux libéro-ligneux auparavant isolés, et, par le bois et le liber qu'il forme, engendre avec eux un cylindre central continu.

extraplastidial. *adj.* Situé hors des plastes, en particulier des chloroplastes. Se dit de l'amidon ou des caroténoïdes.

extrorse. *adj.* 1° Qui s'ouvre vers l'extérieur de la fleur. *Ex.* Anthère extrorse. 2° Qui a une anthère s'ouvrant ainsi. *Ex.* Étamine extrorse.

F

faine. *n.* Cupule du hêtre, à quatre pièces hérissées de pointes molles, qui contient quatre akènes de section triangulaire.

faisceau fibro-vasculaire. Ensemble d'éléments de bois, de liber et de fibres (cellules vivantes allongées, à parois incrustées de lignine et servant au soutien et non à la conduction de la sève).

faisceau libéro-ligneux. Ensemble constitué par un faisceau libérien et un faisceau ligneux. Les *faisceaux libériens*, formés de vaisseaux, eux-mêmes constitués de cellules vivantes disposées bout à bout, conduisent surtout la sève élaborée, qui vient des feuilles et s'est enrichie en sucres formés à partir du gaz carbonique fixé par photosynthèse. Les *faisceaux ligneux* sont formés de vaisseaux de bois, constitués de cellules mortes réduites à leurs parois lignifiées, disposées bout à bout, avec de grandes perforations dans leurs parois transversales. Ils conduisent surtout l'eau et les sels minéraux absorbés par les racines.

faisceau staminal. Groupe d'étamines dont les filets sont unis à la base. Provient de la multiplication secondaire d'un primordium unique d'étamine.

falciforme. *adj.* En forme de faux.

famille. *n.* Ensemble de genres ayant en commun certains caractères morphologiques, chimiques, etc., qui les rapprochent plus ou moins. Les genres d'une famille ne sont qu'exceptionnellement interfertiles ; suivant les cas, ils sont plus ou moins ressemblants, et certains sont fréquemment considérés comme suffisamment distincts pour constituer des familles particulières. Certaines familles sont, au contraire, très homogènes (Crucifères, Ombellifères) et la distinction des genres y est souvent délicate, c'est-à-dire un peu arbitraire. Les familles portent un nom latin dérivé de celui d'un de leurs genres et terminé en *-aceae*, ou -acées en français.

fastigié. *adj.* A rameaux, dressés ou obliques, et rapprochés en faisceau.

fausse cloison. Lame qui sépare des loges dans divers ovaires, mais non formée par les parois des carpelles eux-mêmes, et ne portant par conséquent pas d'ovules sur ses bords. Présente par exemple dans les ovaires des Crucifères.

faux fruit. Structure contenant les graines d'une plante, mais ne provenant pas de la transformation d'un gynécée unique, ou pas seulement de celui-ci. S'il correspond au rapprochement des fruits de nombreuses fleurs très rapprochées, il s'agit d'un *fruit composé*.

fécondation. *n.* 1° Union de deux gamètes haploïdes mâle et femelle, tant au niveau de leur cytoplasme (plasmogamie ou cytogamie) que de leur noyau (caryogamie), pour former un zygote ou œuf, à un seul noyau diploïde. On parle aussi de copulation, par analogie avec les Animaux. 2° Arrivée d'une structure destinée à produire des gamètes mâles sur les structures contenant les gamètes femelles (fécondation du pistil par le pollen).

fenestré. *adj.* Présentant des ouvertures, comme le limbe des feuilles de *Monstera* (Aracées).

fente germinative. Dépression, en forme de fente, de la paroi épaisse d'une spore, par où s'effectuera la germination de celle-ci.

fermentation. *n.* Processus, très généralement anaérobie, au cours duquel un substrat (« aliment ») est partiellement décomposé avec production d'énergie qui est mise en réserve sous forme de composé phosphoré (ATP ou acide adénosine-triphosphorique) ; l'hydrogène arraché au substrat est fixé sur un accepteur différent de l'oxygène (qui est celui de la respiration). La fermentation remplace la respiration, mais son rendement est moins bon, car l'énergie du substrat n'est que très partiellement récupérée lors de sa dégradation imparfaite.

ferrédoxine. *n.* Protéine intervenant dans les transports d'électrons au cours de la photosynthèse et de la fixation d'azote gazeux.

fertilisation. *n.* Syn. de *fécondation*.

feuille. *n.* Appendice, ou phyllome, de la tige des Cormophytes, en principe chlorophyllien et dépourvu de spores. Sinon, devient une sporophylle ou une pièce florale (étamine ou carpelle). Dans sa forme typique chlorophyllienne, c'est la feuille végétative.

feuille axillante. Feuille dont l'aisselle abrite un rameau ou un pédoncule inflorescentiel ou floral.

feuille juvénile. Voir *feuille primaire*.

feuille primaire, primordiale ou **juvénile**. L'une des premières feuilles apparaissant, chez les Mousses, sur le protonéma ou formées par la tige lors de la germination chez les plantes à graines.

feuille primordiale. Voir *feuille primaire*.

fibre. *n.* Cellule morte allongée, à paroi épaisse, en général lignifiée, à cavité étroite, à la différence des trachéides et des composants des vaisseaux du bois. Contribue au soutien de la plante, et se trouve mêlée, ou non, aux éléments du bois. Parfois cloisonnée transversalement, et, par conséquent, pluricellulaire *(fibre septée)*.

fibrille. *n.* Fibre fine. En particulier, à l'échelle cellulaire, structure, à aspect de fibre, contenue dans le cytoplasme.

figuré. *adj.* **(thalle)**. Dont les limites sont bien définies. Ce n'est pas le cas de beaucoup de thalles crustacés.

filament paraphysoïde. Lors du développement de la fructification des Champignons Ascomycètes, filament plus ou moins rectiligne formé à partir du réseau paraphysoïde, et joignant la base (sous-hyménium) au toit (cloche sus-hyméniale).

filament parascogonial. Filament de mycélium se formant éventuellement au voisinage de l'ascogone (cellule femelle des Champignons Ascomycètes) et assurant sa fécondation.

filament récepteur. Filament de mycélium haploïde (primaire) de Basidiomycète Urédinale, apte à fixer les sporidies (éléments mâles) qui fusionneront avec lui et lui donneront leur noyau. Celui-ci, en se multipliant, assurera la dicaryotisation.

filet. *n.* Élément inférieur de l'étamine, généralement allongé, portant l'anthère.

filicofeuille. *n.* Feuille de grande taille (macrophylle) des Ptéridophytes. Rare.

filoplasmode. *n.* Pseudo-plasmode comportant des tubes muqueux dans lesquels glissent les cellules amiboïdes qui les ont sécrétés.

fimbrié. *adj.* A marge finement découpée comme une frange.

fimicole. *adj.* Coprophile.

fistuleux. *adj.* Cylindrique et creux; se dit de certaines tiges.

flagelle. *n.* 1° Organite contractile en forme de fouet à l'aide duquel certaines cellules se déplacent ou agitent le milieu environnant s'il s'agit de cellules fixes unies en un tissu. 2° Partie terminale de la tige d'une plante volubile, à feuilles encore très peu développées et qui recherche un support en effectuant d'amples mouvements rotatifs *(circumnutation)*.

flagelline. *n.* Protéine constitutive des flagelles simples des Bactéries.

flavedo. *n.* Couche externe du péricarpe (« écorce ») des agrumes (oranges, citrons).

fleur. *n.* Groupe de phyllomes (pièces du type des feuilles) sexués ou non, portés par un axe peu allongé, l'ensemble ayant l'aspect d'un bourgeon. Si la fleur est réduite à des phyllomes fertiles (étamines et/ou carpelles) disposés en spirale ou en verticille(s), elle est nue (ou apérianthée, ou achlamydée). Cependant, elle comporte souvent, en dessous des phyllomes fertiles, des phyllomes stériles (sépales verts à l'extérieur, pétales colorés à l'intérieur) formant le périanthe, qui protège les pièces sexuelles et attire les Insectes pollinisateurs. Toutes les pièces de la fleur sont portées par l'axe floral, mais des déformations de celui-ci et des soudures des pièces entre elles et avec l'axe rendent souvent la reconnaissance des rapports fondamentaux entre les éléments très difficile.

fleur d'eau. Population d'Algues occupant la zone superficielle d'une eau stagnante, et souvent étalée sur une vaste étendue. Il s'agit en général de Cyanophycées.

foliacé. *adj.* Qui a l'aspect d'une feuille.

foliicole. *adj.* Qui habite sur ou dans les feuilles.

foliole. *n.* Division de premier ordre d'une feuille composée. La foliole peut elle-même être simple ou composée de diverses manières. Le terme s'utilise surtout si l'élément considéré n'est pas découpé; chez les Fougères il peut s'employer pour désigner les pinnules de premier ordre.

foliolule. *n.* Élément constitutif d'une foliole elle-même composée. C'est une foliole de second ordre. Elle peut, elle-même, être divisée.

follicule. *n.* Fruit sec et déhiscent, à plusieurs graines, formé par la transformation d'un carpelle et s'ouvrant par une fente à l'endroit de la suture des marges carpellaires, donc ventralement. S'il s'ouvre aussi dorsalement, on a alors une gousse, ou légume. Si la fleur comporte plusieurs carpelles libres pluriovulés, elle peut donner autant de follicules.

fongicole. *adj.* Qui habite sur les Champignons ou les parasite.

fonte des semis. Mort des jeunes plantules due surtout à l'attaque de leurs racines par divers Champignons. La région du collet se flétrit et la partie aérienne de la plante bascule à ce niveau.

forme juvénile ou **forme de jeunesse.** Aspect que présentent les arbres, en particulier les Conifères, durant les premières années de leur existence. Peut être très différente de la forme adulte par l'absence de ramification, la morphologie des feuilles, etc. Les cultivars où la forme juvénile se conserve indéfiniment sont recherchés par les horticulteurs pour leur aspect original.

forme L. Chez les Bactéries, état résultant de l'action d'antibiotiques et caractérisé par le fait que les Bactéries perdent leur paroi squelettique sans toutefois mourir, si l'on prend les précautions nécessaires, notamment pour éviter le choc osmotique. Elles deviennent alors comparables à des mycoplasmes; elles sont polymorphes et leur taille peut être très réduite.

fosse vestibulaire ou **vestibule.** Dépression d'une cellule abritant les bases des flagelles.

fouet. *n.* Syn. de *flagelle.*

fovea. *n.* Dépression de la feuille d'*Isoetes* qui abrite le sporange.

fronde. *n.* Toute formation aplatie assez ample. En particulier, un thalle. Désigne aussi les feuilles des Fougères et des Palmiers, ainsi qu'une tige ramifiée à petites feuilles (microphylles), l'ensemble ayant l'allure d'une feuille.

fructosane. *n.* Polymère du fructose, sucre à six atomes de carbone.

fruit. *n.* Élément provenant de la transformation du gynécée et contenant la ou les graines destinées à assurer la propagation de l'espèce. Les carpelles séparés d'une même fleur peuvent donner des formations qui, prises dans leur ensemble, sont appelées *fruit multiple* ou qui sont considérées chacune comme un fruit. On distingue *des fruits charnus,* dont la paroi (péricarpe) est gorgée d'eau dans sa couche moyenne (mésocarpe) et qui ne sont généralement pas déhiscents, et des *fruits secs,* dont la paroi (péricarpe) est ordinairement sèche et lignifiée. Les *fruits composés* correspondent au rapprochement de nombreux fruits de fleurs distinctes, comme la mûre du mûrier.

frustule. *n.* Chez les Diatomées, sorte de boîte siliceuse sécrétée par l'appareil de Golgi de la cellule et dans laquelle cette dernière se trouve contenue.

frutescent. *adj.* Arbustif.

fruticuleux. *adj.* Qui a l'aspect d'un arbuste *(frutex)* de très petite taille. Se dit surtout de certains Lichens.

fucoxanthine. *n.* Sorte de xanthophylle.

fulcre. *n.* Filaments mycéliens, ramifiés ou non, émis par les fructifications (ascocarpes clos) de certains Champignons Ascomycètes.

fungicide ou **fongicide.** *adj.* Qui détruit les Champignons.

furano-chromone. *n.* Produit correspondant à la condensation d'un noyau furanne (quatre C et un O) et un noyau chromone, ou benzopyrone (un cycle benzénique condensé avec un cycle à cinq C et un O, ou pyranne, porteur d'un O, donc pyrone).

furqué. *adj.* Fourchu.

fuseau. *n.* (ou *fuseau achromatique,* car il ne prend pas les colorants.) Structure protéique transitoire qui se forme au moment de la division du noyau des cellules et qui permet, par un processus mal connu, le mouvement des chromosomes nécessaires à la constitution des noyaux des deux cellules filles.

fusoïde. *adj.* Fusiforme.

G

gaine. *n.* 1° Enveloppe épaisse de diverses Bactéries et Cyanophycées. 2° Portion inférieure d'une feuille, insérée sur la tige, et se continuant au-dessus par le pétiole. La gaine, très développée (Ombellifères, Graminées) ou fort réduite, porte les stipules, de part et d'autre de la région inférieure du pétiole. 3° Parfois, formation cylindrique entourant la tige et correspondant à l'union de plusieurs feuilles verticillées (Prêles).

galactanes. *n.* Polymères du galactose (sucre à six atomes de carbone).

galbule. *n.* Fruit des genévriers, à aspect de baie, mais correspondant en fait à un cône de Conifère à éléments charnus.

galle ou **cécidie.** *n.* Production de forme définie, déterminée par un Champignon ou par la piqûre d'un Insecte (qui pond en un point déterminé de la plante) et qui abritera alors la ponte et les larves.

gamétange. *n.* 1° Gamétocyste de certains Champignons (Moisissures). 2° Chez les Cormophytes, structure à paroi formée de plusieurs cellules abritant les gamètes.

gamétangie. *n.* Chez certains Champignons (Moisissures), fécondation mettant en cause des « gamétanges », c'est-à-dire des gamétocystes.

gamète. *n.* Cellule sexuée haploïde dont l'union avec un conjoint, ou fécondation, produit l'œuf, ou zygote. Les gamètes sont produits par le gamétophyte.

gamétocyste. *n.* Enveloppe contenant les gamètes des Thallophytes. Elle est formée par la paroi de la cellule mère, qui s'est divisée pour produire les gamètes.

gamétogamie. *n.* Fécondation mettant en cause des gamètes.

gamétophyte. *n.* L'une des deux phases de l'alternance de générations. Le gamétophyte porte les organes sexuels où se forment les gamètes.

gamétophytique. *adj.* Qui concerne le gamétophyte.

gamie. *n.* Syn. de *fécondation.*

gamopétale. *adj.* A pétales soudés par leurs marges, au moins en bas.

gamophylle. *adj.* A feuilles verticillées et unies par leurs marges, au moins inférieurement. Si le verticille est gamophylle, les feuilles sont connées.

gamosépale. *adj.* A sépales soudés par leurs marges, au moins en bas.

garniture chromosomique ou **caryotype.** Ensemble des chromosomes, considérés du point de vue de leur nombre et de leur forme.

garrigue. *n.* Formation végétale des régions méditerranéennes constituée de buissons établis sur sol calcaire ou marneux, plus ou moins disséminés et comprenant des romarins, des cistes, des chênes-kermès, etc.

gélifier (se). *v.* Se transformer en gelée. La gélification d'une cellule, comme celle du col d'un archégone, n'est pas un phénomène de décomposition, mais résulte d'une sécrétion active de mucilage, réalisée par l'appareil de Golgi.

géline ou **gélin.** *n.* Substance susceptible, en présence d'eau, de se transformer en gelée.

gélose ou **agar.** *n.* Polymère de galactose sulfaté produit par des Algues rouges et formant une gelée. Très utilisée comme milieu de culture de Bactéries, de Champignons ou de tissus végétaux. A aussi de nombreux usages industriels.

géminé. *adj.* Disposé par couples, mais non opposé: les deux éléments sont l'un près de l'autre et non dans le prolongement l'un de l'autre.

gemmifère. *adj.* Qui porte des bourgeons, spécialement des bourgeons adventifs ou des axillaires de grande taille. *Ex.* Chou de Bruxelles.

gène. *n.* Élément d'acide désoxyribonucléique, ou ADN, détenteur de l'information héréditaire concernant un caractère donné. Le gène est un segment plus ou moins long de la molécule d'ADN.

génécologie. *n.* Étude des aspects génétiques (apparition par mutation, mode de transmission à la descendance) des caractères responsables des particularités écologiques des êtres vivants, qui ont aussi un rôle important dans la genèse de taxons nouveaux.

génétique. *n.* Étude du mode de transmission des caractères héréditaires *(génétique formelle),* ainsi que de leur support biochimique et de leur mode de réalisation lors du développement de l'individu *(génétique moléculaire, biochimique et physiologique).*

génome. *n.* Information héréditaire des cellules d'un organisme, portée par leur acide désoxyribonucléique.

génotype. *n.* Ensemble des caractères pour lesquels l'information nécessaire se trouve stockée dans le code génétique (acide désoxyribonucléique) d'un être. Certains de ces caractères sont exprimés dans son phénotype, d'autres le seront dans celui de ses descendants, d'autres, encore, ne le seront probablement jamais, du moins normalement.

genouillé *ou* **géniculé.** *adj.* Courbé brusquement comme un genou.

genre. *n.* Ensemble d'espèces présentant entre elles des caractères communs qui leur donnent un port caractéristique : l'ensemble des violettes, des boutons d'or. Le plus souvent, les espèces d'un genre donné, si elles peuvent être croisées, ne donnent pas de produits fertiles. Des espèces appartenant à deux genres différents se croisent bien plus rarement encore et les produits sont alors très rarement fertiles; cependant, il y a des exceptions et certains genres semblent n'exister que du fait d'un isolement géographique.

géocarpie. *n.* Formation des fruits dans le sol.

géophile. *adj.* Qui habite sur le sol (Champignon).

géophyte. *n.* Plante herbacée vivace qui passe l'hiver à l'état d'organe (bulbe, tubercule) entièrement enfoui dans le sol.

germination. *n.* Reprise de la vie active d'une graine (et, par extension, de toute forme de dissémination à vie latente des Cryptogames, en particulier les spores) lorsque les conditions de milieu deviennent favorables.

gibbeux. *adj.* Pourvu de bosses (gibbosités), souvent creuses.

glande. *n.* Ensemble de cellules sécrétant un produit déterminé, qu'elles rejettent ou non à l'extérieur.

glande septale. Chez les Monocotylédones, écartement localisé entre les deux parois adjacentes des carpelles constituant un gynécée, au niveau duquel les épidermes sécrètent du nectar, qui s'écoule à l'extérieur par un orifice diversement placé.

glanduleux. *adj.* Qui présente des glandes, et plus spécialement des poils terminés par une glande (poils glanduleux).

glèbe. *n.* Faux tissu constitué de filaments de mycélium et entourant chez divers Champignons (truffes, vesses de loup) les éléments producteurs de spores.

globule. *n.* Organe reproducteur mâle des Charophytes, de forme sphérique (globuleuse).

glochidies. *n.* 1° Chez certains *Azolla* (Fougères aquatiques), aiguillons crochus portés par les massules à microspores, contribuant à les fixer aux massules contenant les macrospores. 2° Chez certaines Cactées, piquants barbelés appartenant au trichome et présents au niveau des aréoles parmi les grands piquants, qui sont des feuilles.

glomérule. *n.* Groupe de fleurs très dense et de forme subsphérique, parce que les pédoncules sont extrêmement courts. Il s'agit, en général, d'une cyme composée.

glucane. *n.* Polymère du glucose (sucre à six atomes de carbone présent dans les fruits).

glucide. *n.* Sucre ou substance apparentée, comprenant du carbone, de l'oxygène et de l'hydrogène, avec des fonctions alcool et aldéhyde ou cétone. Les glucides sont des sucres simples (glucose, etc.), leurs dérivés et leurs polymères (cellulose, amidon, etc.), dits parfois *hydrates de carbone*.

glucoside. *n.* Syn. d'*hétéroside*.

glume. *n.* Chez les Graminées, l'une des deux écailles inférieures (bractées) portées par l'axe de l'épillet. Les deux glumes sont situées en position alternedistique. Elles sont « stériles ». Elles correspondent aux glumelles inférieures qui les suivent et qui ont une fleur à leur aisselle.

glumelle. *n.* L'une des deux pièces écailleuses qui entourent la fleur des Graminées. La glumelle inférieure, ou *palea*, portée par l'axe de l'épillet, est la bractée de la fleur; elle correspond aux glumes. La glumelle supérieure, ou *lemme*, portée par l'axe de la fleur, est la préfeuille, ou bractéole, de celle-ci. Elle est très généralement mince et a deux côtes (carènes).

glumellule ou **lodicule.** *n.* L'une des deux, ou parfois trois, pièces du périanthe de la fleur des Graminées, le plus souvent extrêmement réduite. Le gonflement des glumellules contribue à l'entrebâillement des glumelles et des glumes, au moment de la sortie des étamines, puis des stigmates.

glycérol, *n.* Syn. de *glycérine*. Corps à trois fonctions alcool, deux primaires (— CH_2OH) et une secondaire (= CHOH).

glycogène. *n.* Polymère du glucose qui y est disposé en chaîne ramifiée, comme dans l'amylopectine. Présent surtout chez les Animaux (« amidon animal »), il se trouve aussi chez les Champignons. Il se colore en brun acajou par l'eau iodée.

gomme. *n.* Substance visqueuse, presque solide à la température ordinaire, mais, à la différence des résines, soluble dans l'eau. Constituée de polyosides divers renfermant des acides uroniques.

gonidie. *n.* Dans un Lichen, thalle d'Algue souvent unicellulaire.

gonophore carpogonial. Rameau adventif du gamétophyte des Algues rouges portant le carpogone, ou gamétocyste femelle.

gorge. *n.* Portion d'un calice ou d'une corolle à pièces soudées entre elles à la base, qui se trouve au niveau de passage entre le tube inférieur et les parties libres.

gousse ou **légume.** *n.* Fruit sec issu d'un carpelle séparé, déhiscent en deux valves suivant sa suture ventrale et sa ligne médiane longitudinale dorsale.

grain de pollen. Élément de la poussière jaune (pollen) produite par les étamines. C'est une spore contenant un prothalle mâle dont la partie non sexuée est réduite à un seul noyau, et dont l'autre formera ou a déjà formé les deux gamètes mâles.

graine. *n.* Organe issu de la transformation de l'ovule et contenant l'embryon de la plante à fleur. La graine, entourée de deux téguments, dont l'un est généralement très résistant, peut demeurer vivante pendant des mois, des décennies et même, dans certains cas, des siècles (jusqu'à 1 700 ans) en attendant les conditions favorables à sa germination.

Gram (méthode de). Technique de coloration utilisant le violet de gentiane et permettant de distinguer les Bactéries « Gram positives », colorables, des « Gram négatives », non colorables.

grappe. *n.* Inflorescence constituée de fleurs à pédoncule de longueur égale, insérées sur un axe qui peut ou non se terminer lui-même par une fleur (grappe définie ou indéfinie).

gymnocarpique. *adj.* Dont l'hyménium est, pendant tout le développement du carpophore, en contact avec l'extérieur.

gynécée. *n.* Organe femelle de la fleur des Angiospermes, constitué de carpelles en nombre variable, libres ou unis les uns aux autres de diverses manières et formant sur leurs bords les ovules qui deviendront les graines.

gynobasique. *adj.* Qui semble être inséré sur l'axe floral entre les carpelles, parce que ceux-ci sont reployés vers le bas dans leur région supérieure. Le style gynobasique prolonge en fait normalement l'ovaire.

gynostème. *n.* Colonne résultant de l'union du style et des filets staminaux chez les Orchidées.

gypseux. *adj.* Qui renferme du gypse, c'est-à-dire du sulfate de calcium hydraté (pierre à plâtre).

H

habitus. *n.* Port, aspect général d'une plante (lat.)

halophile. *n.* Qui vit en milieu salé (plantes des déserts salés et des plages).

hampe florale. *n.* Longue portion de tige ne portant pas de feuilles et terminée par une fleur ou une inflorescence. Fréquente chez les plantes à bulbes (tulipe, jacinthe).

haploïde. *adj.* Qui possède un nombre de chromosomes de moitié inférieur à celui des cellules du sporophyte. C'est le cas des gamètes, formés avec réduction chromatique ou méiose, et dont l'union (la fécondation) produira un œuf diploïde.

haplonte. *n.* 1° Mycélium haploïde de Champignon. 2° Être à cycle de développement monogénétique haploïde, qui se présente donc sous forme de gamétophyte, le sporophyte étant réduit à l'œuf.

haplostélé. *adj.* A un seul faisceau libéro-ligneux. Qui possède des feuilles à un seul faisceau.

haplostique. *adj.* **(filament).** Dans lequel toutes les divisions cellulaires sont transversales et dont la croissance ne s'effectue par conséquent qu'en longueur.

haptonéma. *n.* Sorte de flagelle de structure simplifiée, et fréquemment enroulé en spirale, qu'on trouve chez certaines Algues Chrysophycées.

hasté. *adj.* Muni de deux lobes inférieurs horizontaux ou obliques.

haustorium ou **haustorie.** *n.* Suçoir formé par un parasite et prélevant des substances nutritives dans les cellules ou les vaisseaux de l'hôte.

hélicoïdal. *adj.* Disposé en hélice; hélicoïdal et spiralé sont souvent employés l'un pour l'autre, bien qu'une spirale soit, au contraire d'une hélice, disposée dans un plan.

héliophile. *adj.* Qui vit au soleil.

hélophyte. *n.* Plante vivant en zone marécageuse et au bord des pièces d'eau, et dont la portion inférieure de la tige est immergée.

hématochrome. *n.* Caroténoïde rouge intense.

hématophage. *adj.* Qui se nourrit de sang.

hémiangiocarpique ou **hémiangiocarpe.** *adj.* Dont l'hyménium, d'abord masqué par une ou plusieurs membranes, apparaît ensuite librement à l'extérieur. Les lamelles du Champignon de couche sont hémiangiocarpiques.

hémicellulose. *n.* Substance mal définie, voisine de la cellulose, mais soluble dans des solutions alcalines. La molécule des hémicelluloses, assez petite, contient du glucose, du fructose, du xylose (sucre à cinq atomes de carbone), de l'acide glucuronique (acide uronique correspondant au glucose).

hémiparasite. *adj.* Qui parasite un hôte, mais ne lui emprunte qu'une partie de sa nourriture, étant apte, par la possession de chlorophylle, à fixer lui-même le gaz carbonique de l'air, assurant ainsi sa propre nutrition carbonée. *N.* Un *hémiparasite*.

hémisiphoné. *adj.* Constitué d'articles, séparés par des membranes cytoplasmiques et des parois squelettiques, mais qui ne sont pas de vraies cellules, car ils présentent de nombreux noyaux. Ce sont des syncytiums, ou siphons.

hémisomate. *n.* L'une des deux moitiés symétriques de la cellule des Algues Desmidiées.

hémolytique. *adj.* Qui provoque l'hémolyse, c'est-à-dire la désorganisation de la membrane cytoplasmique des globules rouges de telle manière que l'hémoglobine (pigment rouge du sang) qu'ils contiennent se répand dans le plasma du sang, ne peut plus assurer le transport de l'oxygène et est détruite avec formation de pigment jaune-vert.

hémostatique. *adj.* Qui arrête le saignement.

héparine. *n.* Substance complexe, comprenant des polymères de sucres sulfatés et aminés et des polypeptides. D'origine animale (foie, poumon), elle est douée d'une puissante activité anticoagulante.

herbe. *n.* Végétal dont la partie aérienne ne vit qu'une saison, ou du moins ne fleurit qu'une fois, même si elle doit exister auparavant à l'état végétatif deux années ou plus. Les herbes ne forment généralement pas beaucoup de bois, mais peuvent devenir un peu ligneuses à leur base. En général de petite taille, elles peuvent atteindre parfois plusieurs mètres.

herbicide. *n.* Substance utilisée pour détruire les mauvaises herbes. Un *herbicide sélectif* détruit les Dicotylédones et respecte les Monocotylédones.

hérissé. *adj.* Garni de poils droits et raides.

hermaphrodite ou **bisexué.** *adj.* Qui présente des organes des deux sexes. *Ex.* Fleur hermaphrodite. Le même organe n'est pas, normalement, mâle et femelle, mais il peut l'être tératologiquement, dans des fleurs normalement unisexuées ou hermaphrodites : c'est un *stamino-carpelle.*

hétérobaside. *n.* Baside de structure non typique, soit cloisonnée (phragmobaside), soit modifiée d'une autre façon.

hétérocaryose. *n.* État d'un mycélium comportant des noyaux de constitution génétique différente, à la suite des modes de fécondation propres aux Champignons.

hétéroconte ou **hétéroconté.** *adj.* Qui possède deux flagelles de taille différente.

hétérocyste. *n.* Cellule particulière de certaines Cyanophycées, intercalée parmi des cellules ordinaires et souvent apte à fixer l'azote de l'air.

hétérogame ou **hétérogamique** ou **anisogame.** *adj.* Où se manifeste l'hétérogamie.

hétérogamie ou **anisogamie.** *n.* Fécondation entre gamètes de forme et de taille différentes.

hétéroïque ou **hétéroxène.** *adj.* Qui doit, pour accomplir son cycle de développement, parasiter deux hôtes (Urédinales).

hétéromère, *adj.* **(Lichen ou thalle lichénique).** Différencié en une écorce et une moelle, dépourvue de cellules d'Algue.

hétéromorphe. *adj.* **(cycle de développement).** Dont les phases (sporophyte et gamétophyte) ont une morphologie différente.

hétérophylle. *adj.* Qui présente deux ou trois types de feuilles bien distincts.

hétéroplastie. *n.* État d'une cellule qui présente plusieurs sortes de plastes.

hétéropolaire. *adj.* Dont les deux extrémités (pôles) ne sont pas identiques.

hétéroside. *n.* Substance organique résultant de l'union d'un sucre (glucose le plus souvent) avec un corps différent qui est l'*aglycone.* On dit aussi *glucoside.*

hétérostylie. *n.* État d'une plante qui possède des fleurs à long style, à style court et parfois à style de longueur intermédiaire. Corrélativement, les étamines ont des filets courts, longs ou intermédiaires.

hétérothalle. *adj.* Qui appartient à deux thalles différents. Ne pas confondre avec *hétérothallique.*

hétérothallique. *adj.* Qui manifeste le phénomène d'hétérothallisme.

hétérothallisme ou **hétérothallie.** *n.* Existence, chez les Champignons, de deux (ou quatre) types de thalles gamétophytiques. La fécondation n'est possible qu'entre les deux types, ou un type et l'un des trois autres. Chaque thalle peut former des organes sexuels mâles *et* femelles, et l'espèce est alors monoïque, ou bien chaque thalle est mâle *ou* femelle, et l'espèce est, de plus, dioïque.

hétérotriche. *adj.* Qui possède des poils de longueurs différentes.

hétérotrophe. *adj.* Qui doit assimiler un élément déterminé sous forme déjà organique pour pouvoir l'incorporer dans sa propre substance.

hétérotypique. *adj.* Qui diffère du type usuel.

hétéroxylé. *adj.* **(bois).** Qui comporte des vaisseaux et d'autres éléments (fibres, trachéides, parenchyme à cellules lignifiées).

hexamère. *adj.* Constitué de six éléments.

hibernacle. *n.* Bourgeon des plantes aquatiques qui se détache du pied mère et assure la propagation végétative.

histologie. *n.* Étude des tissus. En botanique, reçoit souvent le nom d'anatomie.

histones. *n.* Protéines à fonction basique, abondantes dans les noyaux des Eucaryotes, et qui jouent sans doute un rôle important dans le processus de différenciation cellulaire.

holarctique. *adj.* Qui habite dans tout l'hémisphère Nord.

holobaside ou **eubaside.** *n.* Baside non cloisonnée.

holobasidié. *adj.* Qui possède des holobasides.

holocarpie. *n.* Formation d'un ou plusieurs gamètes ou d'une ou plusieurs spores en utilisant tout le protoplasme de la cellule mère ou du thalle cœnocytique. Dans d'autres cas (eucarpie), en particulier chez les Champignons, la formation des cellules que libérera le sporocyste ou le gamétocyste respecte une zone périphérique de cytoplasme, qui dégénère (périplasme).

homéomère. *adj.* **(Lichen ou thalle lichénique).** Dont la structure est homogène, sans écorce.

homobaside. *n.* Baside non cloisonnée (eubaside) typique, en principe à quatre stérigmates, portant les basidiospores.

homologation. *n.* Détermination de la ressemblance structurale qui existe entre des organes ou parties d'organes, afin de préciser lesquels sont homologues entre eux.

homologues. *adj.* **(organes).** Qui ont la même structure fondamentale, quoique leur aspect soit parfois très différent au premier abord, et entre lesquels existe une série d'intermédiaires normaux ou accidentels, mais bien définis (tératologiques).

homosporé ou **isosporé.** *adj.* Qui ne produit qu'une seule sorte de spores.

homothalle. *adj.* Qui appartient au même thalle. Ne pas confondre avec *homothallique.*

homothallique. *adj.* Qui manifeste le phénomène d'homothallisme.

homothallisme. *n.* Existence, chez les Champignons, d'un seul type de thalle gamétophytique. La fécondation est possible entre tout couple d'organes sexuels de sexes différents, qui sont par ailleurs portés par le même thalle (monoécie) ou par des thalles différents (dioécie).

homotypique. *adj.* Qui correspond au type usuel.

homoxylé. *adj.* **(bois).** Qui ne contient, en plus des rayons médullaires et d'un peu de parenchyme ligneux, que des trachéides.

hormogonie ou **hormospore.** *n.* Chez certaines Cyanophycées, portion de filament entourée d'une paroi épaisse qui se sépare des thalles et assure la reproduction.

hormone. *n.* Substance chimique émise à faible dose par un organe ou un organisme et modifiant, positivement ou négativement, le fonctionnement d'un autre organe du même individu ou d'un autre individu, et même, dans certains cas, leur comportement ou leur développement tout entier.

hormospore. *n.* Syn. d'*hormogonie.*

huiles essentielles. Substances insolubles dans l'eau, souvent sécrétées par les cellules végétales. Il ne s'agit pas de graisses (lipides) comme les huiles vraies, mais de substances organiques, terpéniques surtout (essence de menthe, de géranium, etc.).

humicole. *adj.* Qui vit sur ou dans l'humus (ensemble de substances complexes résultant de l'action des Bactéries, Champignons, Insectes, etc., sur les débris organiques, en particulier les feuilles mortes, qui forment la litière).

humifère. *adj.* Riche en humus.

hyalin. *adj.* Qui a l'aspect du verre.

hyaloplasme. *n.* Portion du cytoplasme dans laquelle aucune structure n'est décelable au microscope électronique. Les organites baignent dans le hyaloplasme.

hydrate de carbone. Voir *glucide.*

hydrocolloïde. *n.* Colloïde dont le milieu de dispersion est l'eau.

hydrocyte. *n.* Cellule aquifère.

hydrohalin. *adj.* Que baigne la mer à marée haute.

hydroïde. *n.* Cellule morte, présente dans la tige des Muscinées, ressemblant à des éléments de vaisseaux de bois. Les hydroïdes sont perforées à l'extrémité chez les Sphaignes, mais non chez les Mousses.

hygroscopique. *adj.* Qui change de forme ou d'état suivant l'humidité ou la sécheresse du milieu (son état hygrométrique).

hydroxylamine. *n.* Substance organique comportant une fonction amine liée à un groupement hydroxyle ($HO—NH_2$).

hyménium. *n.* Feutrage de filaments stériles et de sporocystes (basides ou asques) portés par les fructifications de Champignons Ascomycètes et Basidiomycètes.

hyperparasite. *n.* Parasitisme d'un être vivant lui-même parasite.

hyperplasie. *n.* Augmentation du volume d'un organe par multiplication du nombre de ses cellules.

hypertrophie. *n.* Augmentation anormale de la taille des cellules d'un organe sans augmentation de leur nombre.

hyphe. *n.* Filament cellulaire des Champignons, cœnocytique ou formé d'une seule série de cellules communiquant par des pores centraux. L'intrication des hyphes produit dans certains cas un faux tissu massif *(plectenchyme),* comme celui de l'appareil sporifère (carpophore) des Champignons comestibles. Dans l'autre cas, les hyphes constituent simplement un lacis de filaments, ou *mycélium.*

hyphe ascogène. Chez les Champignons Ascomycètes, hyphe destinée à produire un asque.

hypobasal. *adj.* Situé du côté du ventre de l'archégone. S'emploie pour les éléments de l'embryon des Ptéridophytes.

hypocotyle. *n.* Voir *axe hypocotylé,*

hypocratériforme. *adj.* En forme de tube étroit terminé en coupe brusquement évasée. *Ex.* Corolle gamopétale hypocratériforme.

hypogé. *adj.* Qui vit sous terre. *Ex.* Truffes.

hypogyne. *adj.* 1° Inséré en dessous de l'ovaire. 2° Qui possède un périanthe ainsi inséré. *Ex.* Fleur hypogyne.

hypopelté. *adj.* Pelté, mais dont le pédoncule s'insère sur la face supérieure, et non inférieure. C'est le cas des sépales appendiculés des violettes.

hypothalle. *n.* Portion inférieure d'un thalle, plus ou moins différenciée de l'ensemble.

hypothèque. *n.* Partie de la thèque (carapace interne) d'une Algue Dinophycée, située au-dessous du cingulum.

I-J

imbriqué. *adj.* 1° Se dit d'éléments qui se recouvrent comme les écailles d'un Poisson. 2° Préfloraison dans laquelle une pièce recouvre ses deux voisines, l'une de celle-ci étant recouverte des deux côtés, et les autres pièces recouvertes d'un côté et recouvrantes de l'autre.

imparipenné. *adj.* Qui possède une foliole terminale en plus des folioles latérales. Comme ces dernières sont toujours par paires, le nombre total des folioles est impair.

indéfini. *adj.* 1° Qui n'a pas de limite nette. *Ex.* Paroi, rebord, hyménium indéfinis. 2° Qui ne s'arrête que par accident. *Ex.* Croissance indéfinie. 3° Qui ne se termine pas par une fleur, mais conserve un méristème apical. *Ex.* Inflorescence indéfinie.

indéhiscent. *adj.* Qui ne s'ouvre pas spontanément. *Ex.* Un fruit sec indéhiscent.

induré. *adj.* Dur, coriace, ligneux.

indusie. *n.* Membrane recouvrant éventuellement le sore de sporanges chez les Filicopsides (Fougères).

infère. *adj.* Situé en apparence sous la fleur. *Ex.* Ovaire infère. En fait, l'ovaire est alors en position normale, mais enveloppé d'une coupe formée soit par la protrusion de l'axe, soit par l'union des régions inférieures des pièces du périanthe et de l'androcée.

inflorescence. *n.* Groupe de fleurs formé par la tige après que la plante ou le rameau concerné a atteint l'état reproducteur.

infralittoral. *adj.* **(étage).** Zone maritime peu profonde mais toujours immergée, juste en dessous du niveau des basses mers.

infrarouges. *adj.* **(rayons).** Rayons lumineux invisibles à l'œil et situés dans le spectre au-delà du rouge. Riches en énergie, apportant donc de la chaleur. Dangereux pour les êtres vivants à dose exagérée.

infrutescence. *n.* Groupe de fruits formés par une inflorescence ou une portion d'inflorescence et demeurant rassemblés, au moins provisoirement, comme l'étaient les fleurs. Si le rapprochement est très intime, on parle de fruit composé.

infundibuliforme. *adj.* En forme d'entonnoir.

initiale. *adj.* **(cellule).** Cellule qui se divise de telle manière que ses descendants donnent naissance à un organe particulier. Par exemple, l'ensemble de la tige de nombreuses Fougères résulte des divisions d'une seule cellule initiale située au sommet de cette tige. Disposées côte à côte, des cellules initiales peuvent donner une lame (limbe de feuille, thalle d'Algue).

inoperculé. *adj.* Qui n'a pas d'opercule.

interascal. *adj.* Situé entre les asques.

internodal. *adj.* Qui concerne les entre-nœuds.

interphase. *n.* Phase de la vie d'une cellule se déroulant entre deux divisions successives. C'est pendant cette phase que la cellule synthétise l'ADN qui lui permettra, à la division suivante, de cliver ses chromosomes.

interséminal. *adj.* Situé parmi les ovules ou les graines qui en proviennent.

intertidale. *adj.* **(zone).** Zone de balancement des marées.

intertropical ou **tropical.** *adj.* Qui concerne la zone comprise entre les tropiques ou qui y vit.

intine. *n.* Couche interne de la paroi des spores et des grains de pollen des Cormophytes. Constituée de cellulose, c'est la paroi normale de la cellule, à laquelle s'ajoute extérieurement l'exine.

inuline. *n.* Polymère du fructose (fructosane) dont chaque chaîne comporte en outre une molécule de glucose à une extrémité.

intracellulaire. *adj.* Syn. de *endocellulaire.*

intraépidermique. *adj.* Qui se trouve ou se développe à l'intérieur des cellules de l'épiderme, ou entre celles-ci.

intramembranaire. *adj.* Situé à l'intérieur de la paroi squelettique des cellules.

introrse. *adj.* Qui s'ouvre vers l'intérieur de la fleur. *Ex.* Une étamine introrse.

involucelle. *n.* Petit involucre situé en dessous de la base des rameaux des ombellules des ombelles composées. Ses pièces sont les bractées axillantes de ces rameaux.

involucre. *n.* 1° Différenciation foliacée du thalle des Marchantiales, entourant l'archégone et extérieure à son périgyne. 2° Ensemble de bractées, en spirale dense ou en un ou plusieurs verticelles très rapprochées, formant une coupe autour des capitules des Composés ou d'inflorescences comparables, ou au niveau d'insertion des rameaux des ombelles, ou encore en dessous du calice de certaines fleurs (nommé plutôt alors *calicule*).

involucré. *adj.* Muni d'un involucre.

involuté. *adj.* Roulé vers l'intérieur, ou à bords roulés vers l'intérieur. Se dit d'une marge ou d'une feuille.

iodo-ioduré *adj.* **(liquide).** Contenant de l'iode et de l'iodure de potassium.

ioduque. *n.* Cellule sécrétrice de certaines Algues marines, qui libère de l'iode.

isidie. *n.* Prolifération du thalle d'un Lichen, susceptible de se détacher et d'assurer la reproduction végétative.

isoconte ou **isoconté.** *adj.* Qui possède deux flagelles de même thalle.

isiodiamétrique. *adj.* Sphérique ou circulaire.

isogame ou **isogamique.** *adj.* Où se manifeste l'isogamie.

isogamie. *n.* Fécondation dans laquelle les gamètes mâle et femelle sont de même forme.

isolement géographique. Séparation de deux populations d'individus d'une espèce à la suite d'un accident géographique (effondrement d'une région, envahissement par un bras de mer). Les deux populations évoluent différemment et deviennent deux espèces distinctes, mais on peut souvent les croiser artificiellement. Si elles n'avaient pas été isolées, les deux populations n'auraient pas donné lieu à deux espèces distinctes, car le brassage génétique aurait constamment mêlé leurs caractères.

isolichénine. *n.* Polymère de glucose, voisin de l'amidon, et se colorant, comme ce dernier, en bleu par l'iode. Présent dans la paroi des hyphes de quelques Lichens. Contient sans doute aussi du galactose.

isomorphe *adj.* **(cycle de développement).** Dont les phases (sporophyte et gamétophyte) ont la même morphologie.

isoprène. *n.* Carbure d'hydrogène à cinq atomes de carbone, avec deux doubles liaisons. L'union de deux de ses molécules donne un terpène, de trois, un sesquiterpène, de six, un triterpène, et si de nombreuses molécules interviennent, le polymère obtenu est le caoutchouc ou la *gutta percha*, polyterpène dont la molécule contient respectivement environ deux cents et cent quarante molécules d'isoprène.

isosporé. *adj.* Syn. de *homosporé.*

jack-in-a-box. (*Angl.* Diablotin, diable à ressort.) Mécanisme de libération des ascospores de certains asques (bituniqués), dans lequel la tunique interne sort par le sommet de l'asque en emportant les ascospores, qu'elle libèrera ensuite.

K-L

kératine. *n.* Protéine animale contenant beaucoup de soufre et constituant les poils, ongles et cornes, c'est-à-dire les phanères, qui sont dits kératinisés.

kératinophile. *adj.* Qui habite et consomme les formations kératinisées (poils, ongles).

kyste. *n.* *Biologie :* forme de résistance par laquelle une cellule (Bactérie, Protozoaire) ou un petit organisme s'entoure d'une paroi épaisse et entre en vie ralentie.

labelle. *n.* Chez les Orchidées, pétale inférieur, devenant supérieur du fait de la torsion (résupination) de la fleur. Chez les Zingibérales, pièce pétaloïde de la fleur, de signification variable.

lacinié. *adj.* Divisé en nombreuses lanières (laciniures).

lactone. *n.* Substance renfermant une fonction alcool et une fonction acide organique, qui se sont estérifiées.

lactose. *n.* Sucre à douze atomes de carbone, résultant de la liaison d'une molécule de glucose et d'une molécule de galactose, chacune possédant six atomes de carbone.

lacune. *n.* Cavité située entre les cellules au sein de certains parenchymes dits lacuneux, ou présente au centre d'une tige par disparition de la moelle, ou, encore, à la place de faisceaux libéro-ligneux, également résorbés.

lagéniforme. *adj.* En forme de gourde, de bouteille.

laineux. *adj.* Chargé de poils longs, mous et crépus, dont l'ensemble évoque un tissu de laine.

lame ou **lamelle.** *n.* Formation rayonnante de faux tissu porteur de baside, située sous le chapeau de beaucoup de Champignons à basides.

laminaire. *adj.* De forme aplatie, comme une lame.

laminarine. *n.* Polyholoside de réserve des Algues brunes.

lancéolé. *adj.* En forme de fer de lance (ovale, étroit et pointu).

latérale *adj.* **(conjugaison).** Mode de conjugaison de certaines Algues Zygophycées dans lequel deux cellules successives du même filament s'unissent pour former l'œuf dans la cavité limitée par la paroi de l'une d'elles.

latérale. *adj.* **(déhiscence).** Qui se fait latéralement, en parlant des anthères de certaines étamines (renoncules) qui sont alors dites *latrorses.*

latex. *n.* Liquide produit dans les cellules laticifères. Les latex sont riches en caoutchouc, pour lequel certains d'entre eux sont exploités; ils contiennent aussi des enzymes, de l'amidon, éventuellement des alcaloïdes, etc.

laticifère. *n.* 1° Canal sécrétant du latex (caoutchouc, etc.). Peut être formé d'une seule cellule devenue géante et formant un syncytium par multiplication de ses noyaux *(laticifère vrai)*, ou bien d'une succession de cellules fusionnées par leurs parois contiguës *(laticifère articulé)*. 2° Chez les Champignons (lactaires), filament de mycélium sécrétant des substances comparables au latex. *Adj.* Cellule ou hyphe laticifère.

lécanorin. *adj.* Qui se trouve chez les Lichens du genre *Lecanora.* Apothécie lécanorine : qui est entourée d'un parathécium incolore et d'un amphithécium vert, du fait de la présence de cellules d'Algue.

lécidéin. *adj.* Qui concerne les Lichens du genre *Lecidea.* Apothécie lécidéine : qui est entourée seulement d'un parathécium incolore, ou rebord propre.

léghémoglobine. *n.* Substance fixatrice d'azote, présente dans les nodosités des racines de Légumineuses. Comporte un corps azoté complexe, identique à celui de l'hémoglobine, (pigment rouge du

sang) et une seule chaîne protéique. Est voisine de la *myoglobine*, qui colore les muscles en rouge.

légume. *n.* 1° Dans son sens usuel, toute production végétale végétative comestible. 2° Voir *gousse.*

lenticelle. *n.* Ouverture ménagée dans la couche de liège formée par l'assise génératrice externe d'une tige ou d'une racine, et permettant les échanges gazeux. Les fentes sombres d'un bouchon de liège sont des lenticelles.

lenticulaire. *adj.* Limité par deux surfaces convexes, comme une lentille.

leptoïde. *n.* Cellule présente dans la tige des Mousses, comparable à celles du liber des plantes à fleur. Les leptoïdes entourent des hydroïdes qui ressemblent à du bois, quoiqu'elles soient, le plus souvent, non lignifiées.

leptosporangié. *adj.* Qui possède des leptosporanges, sporanges élancés, pédicellés, à paroi mince, naissant successivement dans le sore.

leucoplaste. *n.* Plaste muni d'un faible nombre de lamelles internes, pas ou peu chlorophyllien, accumulant de l'amidon. Devient un amyloplaste si cette accumulation se poursuit.

leucosine. *n.* Syn. de *chrysolaminarine.*

lévulose. *n.* Syn. de *fructose.*

levuroïde. *n.* Qui ressemble à une Levure (Champignon Ascomycète unicellulaire).

lianiforme. *adj.* En forme de liane.

liber interne. *n.* Liber situé à l'intérieur du bois, qui se présente en massifs séparés de ce dernier par du parenchyme. Se rencontre surtout chez les Gamopétales et les Cucurbitacées.

lichénine. *n.* Polymère du glucose, voisin de l'amidon, mais ne se colorant pas, comme ce dernier, en bleu par l'iode. Présent dans les parois des hyphes et des asques des Lichens. Contient sans doute aussi du galactose. Se rapproche de la cellulose.

lichénisant. *adj.* Qui intervient dans la formation de Lichens (Algues ou Champignons).

lichénisation. *n.* Genèse d'un Lichen par établissement de la symbiose entre Champignon et Algue. L'un et l'autre sont alors *lichénisés,* en particulier le Champignon.

liège. *n.* Tissu constitué de cellules mortes, aplaties, à parois incrustées d'une substance légère et résistante, la subérine. Formé vers l'extérieur par une assise génératrice, née dans l'écorce de la tige ou de la racine, et qui produit vers l'intérieur une nouvelle écorce (écorce secondaire).

ligneux. *adj.* Qui contient une masse importante de bois. *Ex.* Végétal ligneux.

lignicole. *adj.* Qui vit sur le bois, et peut en général le décomposer (est alors lignivore).

lignifié. *adj.* Qui est incrusté de lignine (substance caractéristique du bois).

lignine. *n.* Substance s'incrustant dans les parois des cellules du bois, responsable de la lignification. Polymère de composés aromatiques à fonction aldéhyde. Difficilement attaquable, elle est pourtant décomposée par certains Champignons.

lignivore. *adj.* Qui peut se nourrir de lignine.

ligule. *n.* 1° Formation membraneuse ventrale de la surface de diverses feuilles et pièces florales (surtout les Lycopsides et les Angiospermes) de signification variable. Vascularisée ou non. 2° Voir *demi-fleuron.*

ligulé. *adj.* 1° Qui possède une ligule. *Ex.* Feuille ligulée. 2° Qui a une corolle en forme de languette. *Ex.* Un demi-fleuron de Composée est une fleur ligulée.

limbe. *n.* Partie plate d'une feuille, portée par la queue, ou pétiole.

linéaire. *adj.* Allongé en lanière et à bords à peu près parallèles.

liorhize. *adj.* Qui possède des racines dont la coiffe n'est pas en continuité avec l'assise externe de cellules entourant tout l'organe.

lipide. *n.* Corps gras, généralement non azoté, parfois phosphoré. Formé essentiellement de glycérol estérifié par trois acides gras.

lirelle. *n.* Chez certains Lichens, apothécie allongée, étroite et flexueuse.

lobe. *n.* Partie libre des sépales ou pétales, des calices ou corolles, à pièces soudées intérieurement.

loculicide. *adj.* **(déhiscence).** Qui se produit suivant une fente longitudinale au milieu du dos des carpelles constituant le fruit.

loge. *n.* Cavité d'un ovaire délimitée par les parois des carpelles unies deux à deux. Syn. *Locule.* Cavité de l'anthère des étamines résultant de la fusion des deux sacs polliniques situés d'un côté.

loge pollinique. *n.* Cavité résultant de la fusion des deux sacs polliniques situés d'un côté de l'anthère d'une étamine, par désorganisation de la cloison du connectif qui les sépare. Il y a donc deux loges par anthère. Chaque loge s'ouvre, en général, par une fente longitudinale, mais parfois par un pore.

lomasome. *n.* Chez les Champignons, masse de tubules abrités dans des invaginations de la membrane cytoplasmique, en continuité avec celle-ci, et situés entre elle et la paroi squelettique.

lomentacé. *adj.* Partagé transversalement en articles superposés susceptibles de se séparer. Certaines gousses et siliques sont lomentacées.

lophotriche. *adj.* **(Bactérie).** Qui possède un bouquet de fouets, ou flagelles, locomoteurs, à un de ses pôles.

lutéine. *n.* Substance voisine de la xanthophylle, c'est-à-dire caroténoïde possédant un groupe —OH sur chaque cycle terminal.

lutéine-époxyde. *n.* Sorte de xanthophylle.

lycofeuille. *n.* Voir *microphylle.*

lysigène. *adj.* Né par désorganisation de cellules préexistantes. *Ex.* Poche sécrétrice lysigène. S'oppose à *schizogène,* qui désigne une cavité qui se fait par simple écartement des cellules.

lysine. *n.* Acide aminé possédant deux fonctions basiques aminées.

lysozyme. *n.* Enzyme susceptible de dégrader la paroi squelettique des Bactéries. Présente dans les larmes, le blanc d'œuf, etc.

M

macis. *n.* Arille en réseau, surtout celui de la graine de noix muscade.

macrocyclique. *adj.* Qui présente un cycle de développement complexe, à quatre types d'appareils reproducteurs. Se dit d'un Champignon Urédinale.

macrocyste. *n.* Sorte de kyste des Myxomycètes. Les macrocystes se présentent en amas, ou sclérote.

macronémé. *adj.* A filament de grand diamètre.

macrophylle. *n.* Feuille ordinaire, d'assez grande taille et richement vascularisée.

macrosporange. *n.* Sporange fournissant des macrospores. En contient un petit nombre, quatre en général.

macrospore. *n.* Voir *mégaspore.*

macrosporophylle. *n.* Feuille porteuse de macrosporanges, dont les macrospores germeront en prothalles femelles.

macrothalle. *n.* Thalle de grande taille.

macrozoospore. *n.* Zoospore de grande taille, chez une espèce où les spores mobiles présentent un dimorphisme.

maculé. *adj.* Parsemé de taches.

maltose. *n.* Sucre à douze atomes de carbone dont la molécule est formée de l'union de deux molécules de glucose.

mamilles. *n.* Tubercules arrondis, en particulier ceux que porte la tige de certaines Cactées *(Mamillaria)* et au sommet desquels se trouve déplacée l'aréole.

mangrove. *n.* Groupement de Végétaux comprenant des arbres et habitant, en zone tropicale, au bord de la mer ou à l'embouchure des fleuves.

mannanes. *n.* Polymères insolubles d'un sucre (mannose) voisin du glucose. Constituent en partie les réserves de la graine de datte, à laquelle ils confèrent sa dureté.

manubrium. *n.* Dans l'organe reproducteur mâle des Charophytes, cellule en forme de manche, portant chaque écusson.

maquis. *n.* Formation végétale des régions méditerranéennes, constituée d'un fourré dense établi sur sol siliceux, qui comprend l'arbousier, l'olivier, le myrte, etc., et, souvent, des chênes-liège ou des pins.

marcescent. *adj.* Qui meurt et se dessèche, mais persiste longtemps en cet état, sans tomber, là où il a été formé. *Ex.* feuille, corolle, marcescentes.

marcottage. *n.* Technique de bouturage dans laquelle on courbe un rameau vers le sol, où on l'enterre au niveau d'un nœud, qui produira des racines adventives, tandis qu'un ou plusieurs bourgeons axillaires se développeront en une nouvelle plante qu'on pourra alors séparer de la mère. On peut aussi envelopper la région d'un nœud d'un rameau dressé, spécialement après avoir enlevé un anneau d'écorce à ce niveau. pour favoriser la formation de racines. Le marcottage se produit parfois naturellement chez des arbres à rameaux traînants *(Forsythia).*

marginal. *adj.* Qui se fait au niveau de la marge. *Ex.* Insertion marginale des ovules sur le carpelle.

marginé. *adj.* Pourvu d'une marge, bordure de cellules de forme différente de celle des autres cellules de l'organe. Se dit de la feuille, parfois *marginée* au bord du limbe, en particulier chez certaines Mousses.

marsupium. *n.* Poche constituée par la déformation d'un rameau fertile et entourant l'archégone fécondé chez certaines Hépatiques.

massule. *n.* Chez certains *Azolla* (Fougères aquatiques), masses arrondies qui peuvent soit contenir les microspores et être libérées par les microsporanges, soit contenir chacune une macrospore et être libérées par le macrosporange qui ne forme qu'une massule femelle fertile.

mastigonème. *n.* Appendice filiforme de certains flagelles.

mastigosome. *n.* Syn. de *blépharoplaste.*

mature. *adj.* Mûr (franglais).

méat. *n.* Petit espace, en particulier celui que laissent entre elles plusieurs cellules dont les parois sont imparfaitement soudées (méat intercellulaire). Un parenchyme lacuneux montre des méats relativement importants.

médifixe. *adj.* Qui est inséré sur le filet par le milieu de sa face dorsale. *Ex.* Anthère médifixe. Voir *dorsifixe.*

médullaire. *adj.* Qui concerne la moelle.

médulle. *n.* 1° Moelle. 2° Zone inférieure ou centrale du thalle de certains Lichens, ne comprenant que des hyphes, et pas de gonidies.

mégaspore. *n.* Spore volumineuse destinée à fournir un prothalle femelle.

mégasporophylle. *n.* Sporophylle (feuille porteuse de spores) formant des mégaspores. Chez les plantes à graines, les feuilles en question forment

alors des ovules ; chez les Angiospermes, ce sont des carpelles.

méiose. *n.* Ensemble de deux divisions cellulaires successives par lesquelles une cellule mère fournit quatre cellules filles possédant moitié moins de chromosomes qu'elle-même.

méiotique ou **réductionnelle.** *adj.* **(spore).** Formée lors d'une réduction chromatique.

mélanine. *n.* Pigment noir de la peau, des cheveux, etc.

membrane. *n.* 1° Couche limitant la cellule toute entière et ses organites. Peut s'étendre à l'intérieur de ceux-ci. Les membranes sont formées de molécules de lipides et de protides. Au niveau des membranes se trouvent certaines substances comme la chlorophylle, ou diverses enzymes (sur la membrane interne des mitochondries, par exemple). Les membranes remplissent une fonction primordiale dans la régulation des échanges entre la cellule et le milieu ou entre les organites eux-mêmes. 2° A l'échelle des organismes, le terme de membrane désigne un tissu en forme de lame mince.

membrane cytoplasmique ou **pellicule ectoplasmique** ou **membrane protoplasmique.** Membrane limitant le cytoplasme de la cellule. En première approximation, de même structure que les autres membranes cellulaires.

membrane nucléaire. Membrane entourant le noyau. Dépendance du réticulum endoplasmique avec lequel elle est en continuité.

ménisque basal. Ensemble de filaments situés sous l'hyménium des Champignons Ascomycètes, rassemblés en forme de verre de montre.

ménisque sous-hyménial. Formation de mycélium située sous l'hyménium des Champignons Ascomycètes des Lichens. Identique au ménisque basal.

méricarpe. *n.* Élément d'un type de fruit (schizocarpe), se séparant de celui-ci en emportant généralement une seule graine. Est disséminé comme un akène.

méristème. *n.* Ensemble de cellules se divisant activement et contribuant à la croissance d'un organe, soit dans un plan, soit dans les trois dimensions. On distingue : des *méristèmes apicaux,* situés au sommet d'une tige ou d'une racine ; des *méristèmes intercalaires,* situés entre deux zones de tissus plus âgés, dont les cellules ne se divisent plus et qu'ils ont précédemment engendrées ; des *méristèmes marginaux,* situés au bord d'un organe plan et dont l'activité engendre ce dernier, qui grandit alors par croissance marginale.

mésoblaste. *n.* Rameau peu allongé, à entre-nœuds très courts, qui se développe peu chaque année et se trouve situé latéralement sur un axe *(auxiblaste)* qui, lui, s'allonge beaucoup. Plus simplement, *rameau court.*

mésocarpe. *n.* Couche moyenne de la paroi du fruit. Parfois, en partie, charnu (Cas des drupes).

mésophylle. *n.* Parenchyme formant la masse principale du limbe de la feuille, par opposition à ses deux épidermes et aux faisceaux libéro-ligneux, éventuellement entourés de gaines qui le parcourent.

mésosome. *n.* Repli de la membrane cytoplasmique bactérienne vers l'intérieur de la cellule, qui remplit des fonctions respiratoires et sans doute aussi de transfert des « noyaux » fils lors de la division de la masse nucléaire centrale.

métabolie. *n.* Mouvement de déformation des Euglènes, au cours duquel elles passent de l'état allongé à un état subsphérique, qui permet leur progression (mouvement métabolique).

métaboliser. *v.* Absorber une substance du milieu extérieur et la transformer en un des produits du métabolisme, par lequel elle s'incorpore aux constituants de l'être vivant.

métabolisme. *n.* Ensemble des processus chimiques intervenant dans la vie d'un organisme.

métabolite. *n.* Substance formée lors des transformations chimiques intervenant dans l'organisme.

métachromatique. *adj.* **(substance organique).** Qui, mise en présence de certains colorants, donne une coloration différente de celle du colorant, par exemple rouge ou bleue avec un colorant violet (phénomène de métachromasie). Le colorant est dit aussi métachromatique.

métaphyte. *n.* Végétal pluricellulaire.

microclimat. *n.* Caractéristiques climatiques d'un milieu extrêmement limité : zone située sous une pierre, dans une anfractuosité de tronc d'arbre, etc. Souvent confondu avec *climat local,* qui s'applique à une zone plus vaste : espace abrité par une falaise, par un bouquet d'arbres, etc.

microconidie. *n.* Gamète mâle de certains Ascomycètes et Deutéromycètes, en forme de petites conidiospores. Aussi, petite conidiospore sans rôle sexuel.

microcyclique. *adj.* Qui présente un cycle de développement simplifié. Se dit d'une Urédinale.

microcyste. *n.* Kyste formé par une myxamibe ou un myxoflagellé de Myxomycète.

microfaune. *n.* Ensemble des Animaux microscopiques ou submicroscopiques d'un milieu.

microfibrille. *n.* Organite en forme de fibre.

microflore. *n.* Ensemble des Végétaux microscopiques et submicroscopiques d'un milieu.

micronémé. *adj.* A filament de petit diamètre.

microphylle ou **lycofeuille.** *n.* Feuille de petite taille, sans vascularisation ou à une seule nervure médiane, présente chez les Lycopsides. Il est probable qu'elle n'est pas fondamentalement différente des autres feuilles.

microprothalle. *n.* 1° Prothalle formé par une microspore, et sur lequel naîtront les gamètes mâles. 2° Prothalle constitué par les quelques cellules d'un grain de pollen de Gymnosperme. 3° Prothalle de petite taille, qui peut être femelle.

micropylaire. *adj.* Qui concerne le micropyle de l'ovule.

micropyle. *n.* Petit orifice, en particulier celui de l'ovule, percé dans un ou dans les deux téguments ; c'est en général par lui que le tube pollinique pénètre dans le nucelle pour atteindre le sac embryonnaire.

microsporange. *n.* Sporange produisant des microspores, qu'il contient en grand nombre.

microspore. *n.* Spore de petite taille destinée à fournir un prothalle mâle. S'emploie parfois au sens de pycnospores, ou sporidies.

microsporophylle. *n.* Feuille porteuse de microsporanges, dont les microspores germeront en prothalles mâles.

microthalle. *n.* Thalle de petite taille.

microtubule. *n.* Organite en forme de tube.

microzoospore. *n.* Zoospore de petite taille, chez une espèce où les spores mobiles présentent un dimorphosme.

mitochondrie. *n.* Organite cytoplasmique des Eucaryotes, formé de deux membranes concentriques, l'interne produisant des invaginations vers l'intérieur. Porteur d'une partie des enzymes nécessaires à la respiration cellulaire.

mitose. *n.* Division du noyau d'une cellule en deux noyaux fils, ces derniers conservant le même nombre de chromosomes que la mère. *Par ext.* Division de la cellule elle-même, ce qui implique celle de son cytoplasme, ou cytodiérèse.

moelle. *n.* 1° En général, tout tissu situé au cœur d'un organe et entouré de tissus différents. Le plus souvent de consistance molle. 2° *Particult.* Chez les plantes à fleurs, tissu situé à l'intérieur du cylindre central, donc entouré de bois, et dont les parois cellulaires demeurent le plus souvent cellulosiques.

monadelphe. *adj.* 1° Dont les étamines sont toutes unies au moins par leur filet. *Ex.* Androcée monadelphe d'une fleur. 2° Qui sont toutes unies à l'intérieur d'une fleur. *Ex.* Étamines monadelphes.

monandre. *adj.* Qui n'a qu'une seule étamine. Surtout, dont les fleurs n'ont qu'une seule étamine *Ex.* Orchidées monandres.

moniliforme. *adj.* En forme de collier de perles.

monocarpien. *adj.* Syn. de *monocarpique.*

monocarpique. *adj.* Qui ne fleurit qu'une seule fois, après avoir vécu de nombreuses années et avoir atteint parfois de grandes dimensions, puis meurt. Il y a alors production d'une inflorescence terminale, et aucun bourgeon axillaire ne se développe ultérieurement.

monocentrique. *adj.* Qui possède un seul centre de développement.

monochasium. *n.* Ensemble ramifié dans lequel un seul bourgeon axillaire s'est développé à l'état floral ou végétatif, tandis que l'apex du rameau père formait une fleur ou s'arrêtait de croître. Si l'ensemble est végétatif, on parle aussi de *monopode.*

monochlamydé. *adj.* 1° Dont le périanthe compte un seul verticille. 2° Qui possède des fleurs monochlamydées.

monocotylé. *adj.* Qui possède un seul cotylédon.

monoécie. *n.* État d'un être monoïque.

monogénérique. *adj.* Comporte un seul genre.

monogénétique. *adj.* **(cycle de développement).** Cycle dans lequel l'individu ne se présente pratiquement que sous un seul aspect. Par exemple, chez la plante supérieure, le gamétophyte est si réduit que seul le sporophyte est apparent.

monoïque. *adj.* Qui possède les deux sexes sur le même pied.

monophylétique. *adj.* Apparu par monophylétisme.

monophylétisme. *n.* Dérivation, au cours de l'évolution, d'un groupe d'êtres vivants à partir d'un seul groupe d'ancêtres.

monoraphidée. *adj.* **(Diatomée).** Qui ne possède qu'un seul raphé, l'une des deux valves de la carapace n'en possédant point.

monospécifique. *adj.* Qui ne comporte qu'une seule espèce.

monospore. *n.* Spore formée isolément dans son sporocyste.

monotriche. *adj.* **(Bactérie).** Qui ne possède qu'un seul fouet ou flagelle locomoteur.

montagnard. *adj.* **(étage).** Étage de végétation situé entre l'étage collinéen et l'étage subalpin, de 1 000-1 300 m à 1 600-1 700 m. Couverte par des forêts de feuillus (hêtres) ou de feuillus et Conifères (hêtres et sapins : forêts mixtes).

morainique. *adj.* Qui concerne les moraines. Qui est constitué à partir des moraines (sol morainique). Les moraines sont les matériaux charriés en avant, au bord ou au-dessus des glaciers, et restés en place après la fonte de ces derniers.

morchelloïde. *n.* Qui ressemble à une morille.

motile. *adj.* Mobile (franglais).

mucédie. *n.* Ensemble de filaments (conidiophores) producteurs de conidiospores, portés directement par le mycélium d'un Champignon et non par un stroma différencié.

mucifères. *adj.* **(corps).** Organites produisant de petites masses de mucus, susceptibles d'être projetées hors de la cellule et ayant une fonction plus ou moins nettement défensive.

mucilage. *n.* Substance visqueuse glucidique formant des gelées, sécrétés par l'appareil de Golgi de certaines cellules.

mucilagineux. *adj.* Qui concerne le mucilage ou en est constitué.

mucocomplexe. *n.* Ensemble de peptides et de glucides qui constitue la paroi squelettique des Bactéries.

mucron. *n.* Petite pointe, prolongeant le plus souvent l'extrémité d'une nervure, non munie de limbe de part et d'autre, de consistance en général sèche et dure.

mucroné. *adj.* Qui se termine par un mucron.

mucus. *n.* Substance visqueuse, glucidique et protéique. Chez les Végétaux, on parle parfois de mucus pour un simple *mucilage*, qui n'est que glucidique.

multiplication secondaire. Remplacement d'un organe, notamment une étamine, par un groupe d'organes semblables, qui se forment souvent sur un primordium unique, et qui sont en quelque sorte « jumeaux ».

multiplication végétative. Voir *reproduction asexuée*.

multipolaire. *adj.* Qui présente de nombreux points de croissance, de bourgeonnement, etc.

multisporé. *adj.* Qui comporte plusieurs spores.

multivalent. *adj.* Correspondant à plusieurs éléments qui, unis dans un cas, sont libres et manifestes dans d'autres. Ainsi, la corolle du liseron a la forme d'un entonnoir continu et naît sous cette forme, mais elle est homologue de cinq pétales soudés, qui sont libres en partie chez des plantes voisines (et parfois aussi, accidentellement, chez le liseron lui-même).

mûriforme. *adj.* En forme de mûre ou de framboise.

muscardine. *n.* Maladie des vers à soie, causée par le Champignon *Beauvaria bassiana*. D'abord amollis, souvent rosés, les Vers durcissent, se couvrent de mycélium et meurent en une dizaine de jours.

mutation. *n.* Modification brusque d'un être vivant, immédiatement héréditaire parce que sa cause première est une perturbation stable du patrimoine héréditaire (acide désoyribonucléique).

mutique. *adj.* Obtus.

mycélium. *n.* Corps des Champignons uniquement filamenteux, et formé d'hyphes cellulaires ou cœnocytiques. Un *mycélium primaire* est issu d'une basidiospore haploïde, et ses cellules sont uninucléées. Un *mycélium secondaire* est formé après fécondation de deux mycéliums primaires. Ses cellules ont deux noyaux (un dicaryon par cellule), dont l'union n'aura lieu que dans la baside.

mycelium sterile (plur. *mycelia sterilia*. Lat.). Mycélium stérile, auquel on ne connaît pas de fructification sexuée.

mycétome. *n.* Chez un Animal, formation destinée à abriter des Champignons symbiotiques.

mycocécidie. *n.* Galle, ou cécidie, c'est-à-dire excroissance de forme définie, d'un organe végétal, causée par un Champignon.

mycologie. *n.* Étude des Champignons.

mycoparasitisme. *n.* Parasitisme par un ou plusieurs Champignons.

mycoplasme. *n.* Parasite endocellulaire très simple, procaryote, et sans paroi squelettique, responsable de maladies chez les Animaux et les plantes (fleurs transformées en bourgeons de feuilles, balais de sorcière).

mycorrhize. *n.* Racine spécialisée, vivant en symbiose avec un Champignon dont le mycélium forme seulement un manchon autour d'elle ou bien s'enfonce dans ses cellules périphériques. S'emploie parfois pour une association entre un Champignon et des rhizoïdes ou même des prothalles de Ptéridophytes.

mycorrhizique. *adj.* Qui concerne les mycorrhizes.

mycosymbionte ou **mycosymbiote.** *n.* Champignon participant à une symbiose.

myrmécophile. *adj.* Qui est en rapport avec les fourmis, soit qu'il vive dans les fourmilières, soit qu'il offre un abri aux fourmis, comme le font diverses plantes tropicales.

myrosinase ou **myrosine.** *n.* Enzyme ou couple d'enzymes susceptibles de décomposer les sénevols en sucre, sulfate et isothiocyanate organique. Présente dans des cellules particulières.

myxamibe. *n.* Cellule amiboïde des Myxomycètes, susceptible de se déplacer. Comme elle contient en général de nombreux noyaux, il s'agit en fait d'un petit plasmode.

myxoflagellé. *n.* Cellule flagellée des Myxomycètes.

N

NAD ou **Nicotinamide - adénine - dinucléotide.** *n.* Transporteur d'hydrogène jouant un rôle dans la respiration cellulaire. Se charge d'un proton et d'un électron, qui proviennent d'une molécule d'hydrogène arrachée aux aliments.

nannandrique. *adj.* Dont les pieds mâles sont de très petite taille. Se dit de certains *Oedogonium* (Algues vertes).

nassascé. *adj.* Possédant des asques dont l'appareil apical est pourvu d'une nasse.

nasse. *n.* Différenciation, en forme de nasse, du périplasme au niveau de l'appareil apical de certains asques.

naturalisé. *adj.* D'origine étrangère, mais installé dans une région et s'y reproduisant spontanément, parfois seulement de façon asexuée.

nébulosité. *n.* Intensité de la couverture de nuages.

nécrose. *n.* Mortification d'un tissu vivant qui conduit à sa décomposition.

nectaire. *n.* Glande productrice de nectar, située en général en bas des pétales, sur le disque, dans les parois de l'ovaire ou sur la surface interne du tube floral. Peut également être formé par des feuilles ou des bractées (nectaires extrafloraux).

nectar. *n.* Liquide sucré sécrété par certaines glandes (nectaires), le plus souvent portées par des organes floraux, et qui est consommé par les Insectes qu'il attire.

nectarifère. *adj.* Qui porte un nectaire.

nématothalle ou **protothalle.** *n.* Thalle formé de filaments rampants et dressés, parfois groupés en faisceaux, et dans lesquels les cellules sont disposées les unes à la suite des autres. Les filaments peuvent également être constitués de siphons.

néo-baside. *n.* Syn. de *holobaside*.

néoplasique. *adj.* Qui concerne les néoplasmes, c'est-à-dire les proliférations anormales de cellules et de tissus (cancers).

néotropical. *adj.* Qui concerne ou habite la zone tropicale américaine.

néoxanthine. *n.* Sorte de xanthophylle.

nervation. *n.* Ensemble des nervures d'une feuille.

nervure. *n.* Zone renflée et allongée au niveau d'un limbe de feuille. Contient les faisceaux libéro-ligneux. de la feuille chez les plantes vasculaires.

neutrophile. *adj.* Qui vit sur des sols à peu près neutres, ni acides, ni basiques.

nitrile. *n.* Substance présentant le groupement —C≡N. Susceptible de donner de l'acide cyanhydrique H—CN.

nitrogénase. *n.* Enzyme intervenant dans la fixation de l'azote gazeux par les êtres vivants.

nitrophile. *adj.* Qui affectionne les sols riches en composés azotés, notamment l'ammoniaque et les nitrates, issus de la fermentation des débris organiques.

nœud. *n.* Toute formation renflée située entre deux zones allongées et plus fines, ou *entre-nœuds*. *Spécialt.* Zone un peu renflée de la tige des Cormophytes où s'insère une feuille ou un verticille de feuilles.

nodosité. *n.* 1° Renflement déterminé dans la racine de diverses plantes, en particulier les Légumineuses, par la présence de Bactéries symbiotiques. C'est au niveau des nodosités qu'est fixé l'azote atmosphérique. 2° En général, tout renflement d'une structure quelconque.

nodule. *n.* Formation en petite masse arrondie, ressemblant à un nœud. *Particult.* Renflement médiodorsal des valves des carapaces de Diatomées pennées.

noduleux. *adj.* En forme de nodule ou constitué de nodules (petites structures massives globuleuses).

noyau. *n.* Organite fondamental des cellules eucaryotes. Une membrane double, dont le feuillet externe est continu avec le réticulum endoplasmique, percée de pores, délimite un espace renfermant la chromatine, dont l'élément essentiel est l'acide désoxyribonucléique.

nucléoïde. *n.* Faux noyau des Procaryotes, formé seulement d'ADN et de polyamines, sans histones, et non entouré d'une membrane nucléaire.

nucléole. *n.* Formation globuleuse située à l'intérieur du noyau, produite par un ou plusieurs chromosomes, formée de granules et de fibrilles. C'est là que sont produits les ribosomes, qui passent ensuite dans le cytoplasme par les pores de la membrane nucléaire.

nucule. *n.* 1° Méricarpe (portion de fruit) indhéhiscent, généralement sec et ne comportant qu'une seule graine, disséminé comme un akène. 2° Œuf des Charophytes entouré de son cortex de filaments spiralés.

O

obdiplostémone. *adj.* Qui possède deux verticilles d'étamines, les étamines du premier étant opposées aux pétales et celles du second alternant avec les précédentes.

oblong. *adj.* Allongé mais assez large, et arrondi aux deux extrémités.

obovale. *adj.* En forme d'ovale dont la grande largeur est vers le haut.

ocelle. *n.* (en botanique). 1° Syn. *stigma*. 2° Tache ressemblant à un œil située sur une feuille, un pétale, etc.

octosporé. *adj.* Qui comporte huit spores.

œuf. *n.* Cellule diploïde résultant de l'union de deux cellules sexuelles, ou gamètes, et destinée à se développer en un nouvel individu, du moins en son sporophyte, qui à son tour formera des spores, génératrices du gamétophyte, source de nouveaux gamètes.

oïdie. *n.* Grosse conidiospore hyaline produite par certains Champignons parasites de plantes *(Érisyphales)* au niveau de plages mycéliennes, ou oïdiums. Voisine des phialospores. Sert à la reproduction asexuée, mais joue, parfois aussi, le rôle de gamète mâle.

oïdium. *n.* 1° Plage de mycélium produisant des conidies, ou *oïdies*, en chapelets sur des conidiophores dressés. 2° Maladie causée par un Champignon produisant ces conidies. (*Oïdium* était le nom donné à la forme conidienne du Champignon avant que son cycle de développement soit connu.)

oléocorps. *n.* Chez les Hépatiques, organite qui renferme des substances insolubles dans l'eau; formé probablement à partir du réticulum endoplasmique.

oléo-résine. *n.* Produit formé par un mélange de résine et d'huile essentielle.

oligotrophe. *adj.* **(milieu).** Peu riche en éléments nutritifs, mais fortement oxygéné.

ombelle. *n.* Inflorescence constituée de fleurs longuement pédonculées, à pédoncules en général à peu près égaux et insérés presque au même point sur le pédoncule inflorescentiel (faux verticille), qui, lui-même, se termine ou non par une fleur. L'ombelle peut être composée d'ombelles élémentaires, ou *ombellules*.

ombellule. *n.* Petite ombelle, élément constitutif d'une ombelle composée.

ombiliqué. *adj.* Muni d'une petite dépression ou d'un petit mamelon central (ombilic).

ombrophile. *adj.* 1° Très ombreux. *Ex.* La forêt dense tropicale est ombrophile. 2° Qui vit à l'ombre. Syn. *Sciaphile*.

onglet. *n.* Partie inférieure allongée et étroite d'un pétale.

ontogenèse. *n.* Voir *ontogénie*.

ontogénie ou **ontogenèse.** *n.* Développement des organismes ou des organes. Science qui étudie ce développement.

oogame. *adj.* Voir *oogamique*.

oogamie. *n.* Fécondation d'un gamète femelle volumineux, sphérique et immobile, et d'un gamète mâle petit, allongé et mobile. Cas extrême d'anisogamie.

oogamique ou **oogame.** *adj.* Qui se fait par oogamie (fécondation) ou qui résulte d'une oogamie. Qui se reproduit avec oogamie.

oosphère ou **oogone.** *n.* Cellule sexuelle (gamète) femelle des Cormophytes. Enclose en principe dans le ventre de l'archégone, qui est indifférencié chez les Angiospermes, où l'oosphère est simplement l'une des six cellules du sac embryonnaire.

oospore. *n.* Œuf de certains Champignons formé par hétérogamie et à paroi résistante.

opercule. *n.* Pièce en forme de couvercle, se séparant de la partie supérieure de la capsule des Mousses et assurant la libération des spores.

opposé. *adj.* 1° Qui est situé en face d'une autre pièce et contre elle. *Ex.* Etamine opposée à un pétale 2° Situé deux par deux en face l'un de l'autre. Des feuilles opposées forment un verticille de deux éléments, ou dimère, et deux verticilles superposés sont disposés à 90° l'un de l'autre (feuilles opposées, dites *décussées*).

oppositifolié. *adj.* Situé en face d'une feuille, de l'autre côté de la tige.

oppositipétale. *adj.* Qui est opposé aux pétales. Voir *épipétale*.

oppositisépale. *adj.* Qui est opposé aux sépales. Voir *épisépale*.

orbiculaire. *adj.* De forme arrondie.

ordre. *n.* 1° Dans la description d'une ramification : un élément porte d'autres éléments qui sont de *premier ordre*. Ceux-ci en portent à leur tour qui sont de *second ordre*, et ainsi de suite. 2° Chez les anciens botanistes, jusqu'au siècle dernier, synonyme de famille. 3° Actuellement, groupe de familles supposé naturel, de rang inférieur à la classe. La délimitation des ordres est fort délicate; leur nombre est donc variable, et tend, avec les progrès de la classification, à augmenter. Plus les ordres sont petits, plus ils sont « naturels », mais moins ils sont utiles, car beaucoup ne comprennent alors qu'une seule famille. Leur nom dérive de celui d'une de leurs familles et se termine en -ales.

organite ou **organelle.** *n.* Structure entrant dans la composition d'une cellule et fonctionnant comme un de ses « organes ».

organogenèse. *n.* 1° Mode de formation des organes lors du développement. 2° Étude du développement et de ses causes physiologiques.

ornithophile. *adj.* Dont les fleurs sont pollinisées par les Oiseaux, notamment par des colibris.

ornithophilie. *n.* Pollinisation par les Oiseaux, en particulier par des colibris.

ostiole. *n.* Petite ouverture plus ou moins arrondie, telle celle des stomates.

ouvert. *adj.* **(faisceau).** Faisceau libéro-ligneux dont le liber n'entoure pas le bois; c'est le type usuel.

ovaire. *n.* Partie inférieure du gynécée, formée d'un seul ou de plusieurs carpelles, qui portent les ovules. Ceux-ci abritent les cellules sexuelles femelles des Angiospermes.

ovoïde ou **ovoïdal.** *adj.* Presque ovale.

ovule. *n.* Organe porté par le carpelle et contenant au sein d'un nucelle (massif de cellules), entouré d'un ou deux téguments, le sac embryonnaire qui renferme lui-même l'oosphère, ou gamète femelle, de la plante à fleur. Fécondé par le tube pollinique, se transformera en graine.

oxydo-réduction. *n.* Processus chimique au cours duquel un corps est *réduit* par fixation d'électrons, arrachage d'oxygène ou fixation d'hydrogène, tandis qu'un autre est *oxydé* par arrachage d'électrons ou d'hydrogène ou fixation d'oxygène.

P

paillette. *n.* Bractée scarieuse d'une fleur de Composée, située sur le réceptacle du capitule.

paléobotanique. *n.* Étude des Végétaux fossiles.

paléotropical. *adj.* Qui concerne ou habite la zone tropicale de l'Ancien Monde.

palissadique. *adj.* Dont les éléments ressemblent aux planches constituant une palissade. *Ex.* Parenchyme palissadique.

palmatifide. *adj.* 1° A nervures palmées et à marge découpée, au niveau de chacune d'elles, en lobes atteignant le milieu de la largeur du limbe. 2° A limbe ainsi divisé.

palmatilobé. *adj.* 1° A nervures palmées et marge découpée en lobes peu marqués autour des extrémités de chaque nervure. 2° A limbe ainsi lobé.

palmatipartite. *adj.* 1° A nervures palmées et marge découpée entre elles en lobes profonds dépassant le milieu de la largeur du limbe. 2° A limbe ainsi divisé.

palmatiséqué. *adj.* 1° A limbe divisé en segments atteignant le pétiole et disposés de façon palmée. 2° A limbe ainsi divisé. Une feuille palmatiséquée est, approximativement, une feuille composée palmée.

palmé. *adj.* A éléments disposés comme les doigts par rapport à la paume, tous insérés au même niveau. Nervation palmée, folioles palmées : à nervures ou folioles insérées au même point en haut du pétiole.

palmelloïde. *adj.* **(forme).** État de certaines Algues qui entrent en vie ralentie, perdent leur appareil locomoteur, acquièrent des parois épaisses et gélifiées, et s'agglomèrent ainsi en colonies aplaties.

palmette. *n.* Ensemble de filaments de mycélium agglomérés en faisceaux aplatis.

palustrine. *adj.* Alcaloïde fabriqué par une Prêle *(Equisetum palustre)*. Sans doute en partie responsable de la légère toxicité de cette plante. Cette substance entraîne l'amaigrissement, la chute de la production du lait et des paralysies chez le bétail qui absorbe la plante.

palynologie. *n.* Étude des grains de pollen et des spores.

palynologiste. *n.* Voir *palynologue*.

palynologue ou **palynologiste.** *n.* Spécialiste de la palynologie.

panaché. *adj.* Coloré diversement, soit en vert et blanc (feuille), soit en couleurs différentes (pétales). Le phénomène de la *panachure* peut être provoqué par une infection virale, ou bien provenir de ce que la plante est une chimère dont certaines parties sont issues de cellules initiales qui ont perdu l'aptitude à synthétiser la chlorophylle ou les anthocyanes.

panicule. *n.* Grappe composée de fleurs ou d'épillets. Comporte plusieurs ordres de ramification; Ainsi on peut avoir, par exemple, une grappe de grappes de grappes d'épillets. *Par ext.* Toute inflorescence en grappe de grande taille, même s'il s'agit, par exemple, d'une grappe de cymes (thyrse).

pantropical. *adj.* Qui habite l'ensemble de la zone tropicale, tout autour de la terre.

papilionacée. *adj.* **(corolle).** Appelée ainsi à cause de sa ressemblance avec un papillon; comprend un grand étendard au-dessus, deux ailes latérales recouvertes par celui-ci, et deux petits pétales recouverts par les ailes et unis le long de leurs marges inférieures, qui forment la carène.

papille. *n.* Petite protubérance, parfois susceptible de s'ouvrir pour laisser passer des cellules mobiles, ou donnant accès à un flagelle. Une papille flagellaire est une petite protubérance cytoplasmique à la base d'un flagelle.

pappus ou **aigrette.** *n.* Ensemble d'appendices en forme de poils ou d'écailles portés par des akènes (fruits secs indéhiscents) et contribuant à leur dissémination, surtout chez les Composées.

papyracé. *adj.* Qui a la consistance du papier.

paracorolle ou **couronne.** *n.* Ensemble d'appendices ressemblant à des pétales et disposés intérieurement à la corolle d'une fleur.

paraffines. *n.* Substances organiques simples constituées de carbone et d'hydrogène, à molécules en longues chaînes et par conséquent insolubles.

parallelinerve. *adj.* A nervures parallèles.

paramylon. *n.* Substance voisine de l'amidon, mais qui ne se colore pas en bleu par l'iode. Constitué, comme l'amidon, de molécules de glucose, mais liées de façon différente. Se trouve chez les Euglènes.

paraplasme. *n.* Éléments inertes sécrétés par la cellule vivante, par opposition au protoplasme, qui est la matière vivante elle-même. *Ex.* La paroi squelettique de cellulose.

paraphyse. *n.* 1° Filament stérile mêlé aux éléments reproducteurs dans les structures fertiles de Champignons Ascomycètes et de Mousses. 2° Chez les Polypodiacées (Fougères), filaments parfois mêlés aux sporanges et correspondant à un sporange stérile.

parasexualité. *n.* Reproduction sexuée rudimentaire, sans fusion de gamètes, mais s'effectuant par l'injection, dans une cellule, d'un segment d'acide désoxyribonucléique d'une autre cellule. Existe chez les Bactéries et peut-être chez les Cyanophycées. Processus mal connu chez les Champignons inférieurs. Permet l'acquisition des caractères des individus fécondateurs.

parasite. *n.* Qui vit aux dépens d'un autre être vivant en lui empruntant tous les éléments nécessaires à son entretien. On distingue les *parasites facultatifs*, qui peuvent vivre soit en parasite, soit à l'état libre, indifféremment ou, surtout, suivant leur degré de développement, les *parasites obligatoires*, qui ne peuvent vivre qu'en parasites, et les *parasites stricts*, parasites obligatoires qui ne peuvent pas être cultivés sur milieu artificiel. Il faut noter que beaucoup de parasites considérés comme stricts finissent cependant par être cultivés, même les mycoplasmes qui sont endocellulaires à l'état spontané.

parasitisme réciproque. Association de deux êtres dont chacun parasite l'autre. C'est en fait une *symbiose*.

parasymbiose. *n.* Association entre un Lichen, déjà symbiotique, et un second Champignon. Parfois, ce dernier est plutôt parasite, mais il arrive que, très bien toléré, il permette la réalisation d'un Lichen triple, propagé par des sorédies triples.

parathécial. *adj.* Qui concerne le parathécium.

parathécium. *n.* Rebord interne propre de l'apothécie des Champignons Discomycètes des Lichens, lorsque celle-ci comporte deux rebords concentriques. Il ne comporte pas de gonidies. Voir *amphithécium*.

parenchymateux. *adj.* Concernant le parenchyme ou formé de parenchyme.

parenchyme. *n.* Tissu végétal constitué de cellules, assez peu différenciées, disposées dans les trois dimensions, et plus ou moins solidement unies les unes aux autres de tous côtés. Peut aussi désigner des tissus animaux (parenchyme hépatique).

parichnos. *n.* Cicatrice de cordons parenchymateux apparaissant au niveau des cicatrices foliaires des *Lepidodendron* (quatre par feuille).

pariétal. *adj.* Appliqué contre la paroi. *Ex.* Un *plaste pariétal* est un plaste aplati contre la membrane cytoplasmique.

paripenné. *adj.* Penné, mais dépourvu de foliole terminale sur le rachis. Comme les folioles sont disposées par couples de part et d'autre du rachis, le nombre de folioles est pair.

paroi plasmique. Syn. de *membrane cytoplasmique*.

paroi squelettique ou **paroi.** *n.* Enveloppe cellulaire non vivante et mécaniquement résistante. Extérieure à la cellule mais sécrétée par elle. Formée surtout de cellulose chez beaucoup de plantes, elle renferme aussi d'autres polyosides et également des protéines, notamment des enzymes. Parfois nommée *membrane*, mais ce terme doit être réservé à la membrane cytoplasmique, pellicule limitant le cytoplasme vivant, et au niveau de laquelle, précisément, est sécrétée la paroi.

parthénocarpie. *n.* Développement du fruit sans fécondation des ovules et par conséquent sans formation de graines.

parthénogenèse. *n.* Développement d'un gamète (le plus souvent femelle) sans fécondation. Si ses premières divisions sont normales, l'individu qui en résulte est haploïde; mais, souvent, des phénomènes de régulation se produisent et il est diploïde, comme s'il y avait eu fécondation. Si le gamète est déjà diploïde (cas d'apoméiose), le nombre diploïde est conservé sans régulation particulière. Voir *apogamie* ou *aposporie*.

pectinase. *n.* Enzyme détruisant les composés pectiques.

pectiné. *adj.* 1° Disposé comme les dents d'un peigne. *Ex.* Feuilles pectinées, c'est-à-dire raides et disposées en fait sur deux rangs; cils pectinés au bord d'une feuille 2° Qui possède des feuilles ainsi disposées. *Ex.* Sapin pectiné.

pectines ou **composés pectiques.** *n.* Polymères de sucres, munis de fonctions acide organique méthylées. Bien moins longs que la cellulose, ils sont solubles dans certaines conditions. Forment souvent des gelées (mucilages).

pecto-cellulosique. *adj.* Constitué de composés pectiques dans lesquels sont disposées des fibres de cellulose.

pédalé. *adj.* Formé de deux ensembles d'éléments (nervures, folioles) d'ordres successifs, l'élément d'un ordre donné étant inséré vers l'extérieur à la base du précédent. Ensembles disposés de part et d'autre d'une nervure ou foliole médianes. Les points d'insertion sont proches les uns des autres et l'ensemble est disposé en éventail.

pédicelle. *n.* Fin pédoncule, à valeur de tige. *Par ext.* Toute formation en forme de tige fine.

pédicellé. *adj.* Porté par un pédicelle.

pédoncule. *n.* 1° Portion de tige portant une inflorescence, une fleur ou le fruit qui provient de cette dernière. 2° Toute formation allongée portant une structure plus ample qu'elle.

pélagique. *adj.* 1° Qui vit en mer au sein de l'eau. 2° Qui concerne le milieu correspondant.

pelté. *adj.* Inséré sur un pédoncule par sa surface et non par son bord. Une feuille peltée (capucine) a un pétiole fixé à la surface inférieure (abaxiale) de son limbe. Un poil pelté comporte un disque horizontal de cellules fixé par sa surface inférieure à un pédoncule dressé.

pénicilline. *n.* Antibiotique produit par un Champignon *(Penicillium notatum)* qui empêche la synthèse de la paroi squelettique de nombreuses Bactéries, s'opposant ainsi à leur prolifération : sans paroi, elles meurent par choc osmotique.

pennatifide. *adj.* 1° A divisions pennées, c'est-à-dire séparées par des échancrures, qui atteignent environ le milieu de la largeur du limbe de chaque côté de la nervure. 2° Qui possède un limbe ainsi divisé. *Ex.* Feuille pennatifide.

pennatilobé. *adj.* 1° Qui présente des divisions pennées peu profondes et formant de simples lobes. 2° Qui possède un limbe ainsi lobé. *Ex.* Feuille pennatilobée.

pennatipartite. *adj.* 1° Divisé en folioles pennées. 2° Qui possède un limbe ainsi divisé. *Ex.* Feuille pennatipartite.

pennatiséqué. *adj.* 1° Divisé de façon penné, les échancrures atteignant presque la nervure médiane. 2° Qui possède un limbe ainsi divisé. *Ex.* Feuille pennatiséquée.

penne. *n.* Division de premier ordre d'une feuille de Ptéridophyte. Peut être elle-même divisée et redivisée.

penné. *adj.* Qui ressemble à une plume. *Ex.* Les valves de tout un ensemble de Diatomées sont pennées, le raphé simulant l'axe de la plume et des sillons latéraux imitant ses barbes.

penninerve. *adj.* A nervures pennées.

pentacyclique. *adj.* A cinq cycles, ou verticilles. Une fleur pentacyclique comporte un calice, une corolle, deux verticilles d'étamines et un de carpelles.

pentamère. *adj.* Constitué de cinq éléments.

pérennant ou **pérenne.** *adj.* Qui vit plusieurs années à l'air libre : un arbre est pérennant. Une plante peut être *vivace* sans être pérennante, si seule une partie souterraine (bulbe, rhizome) survit l'hiver et engendre une ou plusieurs pousses annuelles chaque année.

perfoliée. *adj.* **(feuille).** Sessile, à gaine entourant la tige, et dont le limbe, forme un cornet évasé en une lame que la tige semble traverser.

périanthe. *n.* 1° Chez les Hépatiques, verticille de feuilles entourant le périchétium, qui abrite lui-même les organes femelles. 2° Ensemble des éléments floraux suivants : sépales formant le calice et les pétales constituant la corolle.

péricarpe. *n.* Paroi d'un fruit sec.

péricentral. *adj.* Disposé à la périphérie. Se dit surtout des cellules périphériques d'un organe massif (thalle de Charophyte, gamétange).

périchétium. *n.* Verticille de feuilles particulières entourant les archégones des Muscinées.

péricycle. *n.* Tissu situé autour du cylindre central des tiges et racines et constitué de quelques couches de cellules, où se différencient souvent des fibres. Aussi, tissu comparable entourant le faisceau d'hydroïdes et de leptoïdes des Muscinées.

péridiole. *n.* Chez certains Champignons Gastéromycètes, masse de glèbe (faux parenchyme de la fructification) comportant un ensemble de basides.

péridium. *n.* Chez les Champignons, paroi résistante faite de faux tissu (plectenchyme). Désigne aussi la paroi de la fructification des Gastéromycètes (vesse de loups) et de certains Ascomycètes (truffes).

périgone. *n.* Chez les fleurs de beaucoup de Monocotylédones (tulipe, narcisse), ensemble des pièces non différenciées en calice et corolle et à aspect de pétale. Constitué de deux verticilles de tépales. Chez les Mousses, ensemble de feuilles entourant les anthéridies (organes sexuels mâles).

périgyne. *adj.* Inséré au niveau de la base de l'ovaire. Qui possède un périanthe ainsi inséré. *Ex.* Fleur périgyne. *N.* Formation du thalle des Marchantiales qui entoure le ventre de l'archégone.

périne. *n.* Membrane entourant les spores de certaines Ptéridophytes.

périphyse. *n.* Filament de mycélium entourant l'orifice (ostiole) des fructifications des Ascomycètes Pyrénomycètes.

périplasme ou **épiplasme.** *n.* Cytoplasme qui n'est pas utilisé lors de la formation de spores ou de gamètes dans une cellule mère (cyste), et destiné à disparaître.

péristome. *n.* Formation constituée d'un ou deux cycles de dents entourant l'ouverture de la capsule des Mousses et aidant à la dissémination des spores.

périthèce. *n.* Formation abritant des asques, en forme de carafe, avec un étroit orifice.

périthécioïde. *adj.* Qui ressemble à un périthèce.

péritriche. *adj.* **(Bactérie).** Qui possède des fouets en flagelles locomoteurs sur toute la surface de sa cellule.

persistant. *adj.* 1° Qui reste en place durant plus d'une période de végétation sans mourir. *Ex.* Feuille persistante. 2° Qui reste en place plus longtemps que les organes comparables dans le cas habituel. *Ex.* Calice ou corolle demeurants lorsque la fleur est passée.

personé. *adj.* En forme de masque, avec une lèvre supérieure et une lèvre inférieure, la gorge étant plus ou moins fermée. Se dit de certaines corolles.

pétaloïde. *adj.* Qui ressemble à un pétale par sa coloration et sa forme.

pétiolé. *adj.* Muni d'un pétiole.

pétiolule. *n.* Pétiole d'une foliole, inséré par conséquent sur un rachis et non sur la tige.

pH. Indice permettant de noter l'acidité ou la basicité d'une solution. Celle-ci est neutre à pH 7, acide en dessous, et basique de pH 7 à pH 14.

phagocytose. *n.* Processus d'englobement, de destruction et de digestion, par une cellule, de particules, ou d'autres cellules, qu'elle trouve dans son milieu.

phagotrophe. *adj.* Qui se nourrit d'éléments qu'il absorbe par phagocytose.

phellogène. *n.* Dans la tige, assise génératrice externe produisant du liège vers l'extérieur et de l'écorce secondaire, ou phelloderme, vers l'intérieur.

phénolique. *adj.* Concernant les phénols ou constitué de phénols.

phénol. *n.* Substance organique comportant un noyau benzénique porteur d'un groupe — OH. Particulièrement, la substance la plus simple de ce type : C_6H_5—OH.

phénotype. *n.* Ensemble des caractères apparents d'un être. Voir *génotype*. Tous les phénotypes expriment une partie du génotype, mais ce dernier comprend des caractères qui n'apparaissent pas dans le phénotype.

phialide. *n.* Élément de mycélium, allongé en ampoule, au sommet duquel se forment par bourgeonnement des coniodiospores. Une collerette formée par la partie externe de la paroi de la phialide entoure souvent le point d'émission des conidiospores.

phialospore. *n.* Conidiospore émise par une phialide.

phialosporé ou **phialidé.** *adj.* Qui produit des phialospores.

phloème. Syn. de *liber.*

phosphatase. *n.* Enzyme détruisant les phosphates et libérant ainsi de l'acide phosphorique.

photorécepteur. *n.* Organe ou organite sensible à la lumière. *Adj.* Syn. de *photosensible.*

photosensible. *adj.* Sensible à la lumière.

photosynthèse. *n.* Processus par lequel les Végétaux autotrophes pour le carbone fixent celui du gaz carbonique de l'air. L'énergie nécessaire à cette réaction est fournie par la lumière; elle est captée grâce aux chlorophylles.

phototactisme ou **phototaxie.** *n.* Tactisme où l'élément excitateur est la lumière.

phototrophe. *adj.* Chez lequel l'incorporation d'un élément minéral (gaz carbonique) sous forme organique (photosynthèse) s'effectue grâce à l'énergie lumineuse, utilisée elle-même au moyen d'un pigment photosynthétique (chlorophylle).

phragmobaside. *n.* Baside qui se cloisonne après la division en quatre, avec réduction chromatique, du noyau, issu lui-même de l'union (caryogamie) des deux noyaux du dicaryon. Chaque loge résultante développera un petit tube (stérigmate) porteur d'une basidiospore. Le cloisonnement est transversal ou longitudinal.

phragmobasidié. *adj.* Qui possède des phragmobasides.

phycobiline. *n.* Pigment des Algues bleues et rouges chimiquement apparenté au pigment rouge de l'hémoglobine, au noyau des chlorophylles et aux pigments de la bile.

phycobiliprotéine. *n.* Protéine présente chez les Algues bleues et rouges, et associée à une phycobiline.

phycobionte, phycosymbionte ou **phycosymbiote.** *n.* Élément algal d'un Lichen ou d'une autre association symbiotique où intervient une Algue.

phyllidie. *n.* Syn. de *feuille.*

phyllode. *n.* Pétiole élargi et épanoui en lame ressemblant à un limbe. La présence sur certaines feuilles du véritable limbe réduit révèle la vraie nature du phyllode. Si le rachis d'une feuille composée est élargi tandis que les folioles manquent, ou sont réduites, on parle parfois aussi de *phyllode.*

phyllome. *n.* Terme général qui désigne l'ensemble des appendices de l'axe des plantes à fleurs (et en général des Cormophytes), que ce soient des feuilles végétatives (y compris les cotylédons) ou des pièces inflorescentielles et florales (bractées, préfeuilles, sépales, pétales, étamines et carpelles).

phyllotaxie. *n.* 1° Disposition des feuilles sur la tige. 2° Étude de cette disposition.

phylogenèse. *n.* Syn. de *phylogénie.*

phylogénie. *n.* 1° Cours de l'évolution d'un groupe. 2° Son étude.

phylum. *n.* Succession d'êtres vivants dérivés les uns des autres au cours de l'évolution.

physociocologie. *n.* Étude des modes de groupement naturels des plantes. La composition des groupements rencontrés s'explique par l'écologie de ces dernières et leur biogéographie.

physodes. *n.* Organites de réserve de certaines Algues, renfermant des substances phénoliques.

phytogéographie. *n.* Géographie des plantes : étude de leur répartition à la surface de la terre.

phytoparasite. *adj.* ou *n.* Parasite des plantes.

phytopathogène. *adj.* Qui détermine des maladies des plantes.

phytopathologie. *n.* Étude des maladies des plantes.

phytophage. *adj.* Qui s'attaque aux plantes (parasite). Qui se nourrit de plantes.

pied. *n.* Chez les Champignons, formation massive dressée, portant le chapeau. Chez les Muscinées et les Ptéridophytes, organe du sporophyte par lequel celui-ci s'enfonce dans le gamétophyte dont il est parasite, au moins au début de son développement.

piétin. *n.* Maladie des Graminées causée par des *Leptosphaeria,* qui s'attaquent au pied des chaumes.

pinède. *n.* Peuplement naturel ou plantation de pins.

pinnatifide. *adj.* Syn. de *pennatifide.*

pinnule. *n.* Division (segment) de dernier ordre d'une feuille de Ptéridophyte. Peut être lobée, incisée, etc., mais non divisée. Porte éventuellement les sporanges.

pistil. *n.* Syn. de *gynécée.*

placentation. *n.* Disposition des ovules dans l'ovaire. On distingue : la *placentation axile,* caractérisée par le fait que les ovules sont au centre de l'ovaire et donnent l'impression qu'ils sont portés par l'axe de la fleur (en fait, ils sont insérés sur les marges des carpelles repliées vers l'intérieur et plus ou moins unies les unes aux autres) ; la *placentation laminale,* dans laquelle les ovules sont disposés sur la surface interne d'une grande partie de la paroi des carpelles et non sur leurs marges; la *placentation pariétale,* où les ovules sont disposés sur la paroi ovarienne (il ne se forme pas de cloisons car les marges ovulifères ne se replient pas vers l'intérieur).

plancton. *n.* Ensemble des êtres vivants animaux (zooplancton) ou Végétaux (phytoplancton) vivant en suspension dans les eaux douces ou salées, à faible profondeur. On qualifie de *nannoplancton* la partie du plancton comprenant les organismes de taille microscopique.

plantule. *n.* Jeune plante en train de germer, et n'ayant encore formé que quelques feuilles au-dessus du ou des cotylédons.

plasmalemme. *n.* Syn. de *membrane cytoplasmique.*

plasmide. *n.* Syn. de *épisome.*

plasmode. *n.* Structure contenant de nombreux noyaux dans un seul cytoplasme. Peut être considéré comme correspondant à plusieurs cellules fusionnées, et se forme effectivement, parfois, par union de nombreuses cellules. Dit aussi *syncytium,* surtout chez les Animaux.

plasmodiocarpe. *n.* Sporocarpe des Myxomycètes, sans pédoncule, appliqué sur le substrat.

plasmogamie. *n.* Union des cytoplasmes des cellules sexuelles, ou gamètes, lors de la fécondation, dont elle constitue la première phase. L'union des noyaux (caryogamie) suit plus ou moins rapidement.

plasmozygote. *n.* Œuf à structure de plasmode, produisant des pseudopodes et possédant plus d'un noyau.

plaste. *n.* Organite formé d'un sac limité par une double membrane et renfermant des formations membranaires plus ou moins abondantes. Susceptible de se charger de chlorophylles, de caroténoïdes et d'amidon (en grains simples ou composés : *amyloplaste*).

plastidial. *adj.* Qui concerne les plastes.

plectascé. *adj.* Dont les asques sont disposés sans ordre au sein de la fructification, et non selon un hyménium régulier.

plectenchyme. *n.* Agrégat de filaments de mycélium de Champignon formant un faux tissu massif, comme celui qui constitue la partie comestible des Champignons. *Adj. Plectenchymateux.*

pléiomère. *adj.* Syn. de *polymère.*

pleuridie. *n.* Rameau latéral porté par certains thalles ou cladomes.

pleuridien. *adj.* Qui appartient aux pleuridies ou qui est constitué de pleuridies.

pleuronématé. *adj.* **(flagelle).** Dont les mastigonèmes (appendices filiformes) sont disposés d'un même côté.

plexiforme. *adj.* En forme de plexus, c'est-à-dire qui se présente comme un enchevêtrement d'éléments allongés (filaments de mycélium, faisceaux vasculaires, etc.).

plumule. *n.* Bourgeon terminal de la plantule, situé soit entre les cotylédons soit au-dessus du cotylédon unique. Elle donnera toute la tige de la plante. Avant la germination, elle peut comprendre déjà quelques feuilles (haricot), mais est généralement très réduite ou manquante.

pluriannuel. *adj.* Qui vit plusieurs années, mais ne fleurit qu'une fois, la dernière année, puis meurt.

pluriloculaire. *adj.* Qui présente plusieurs cavités de loges, qu'il s'agisse d'un sporocyste, d'un gamétocyste ou d'un ovaire de plante à fleurs.

pluripenné. *adj.* Divisé de façon pennée suivant plusieurs ordres successifs (c'est-à-dire en folioles divisées en folioles secondaires, elles-mêmes divisées en folioles tertiaires, etc.).

pluriséminé. *n.* Qui porte de nombreuses graines.

plurisepté. *adj.* Qui présente de nombreuses cloisons, ou *septums.*

plurisérié. *adj.* **(filament).** Formé de plusieurs séries de cellules parallèles.

pluristrate. *adj.* Qui comporte plusieurs couches de cellules.

pneumatophore. *n.* Appendice dressé émis par l'appareil radiculaire de certains arbres. Un pneumatophore qui sort du sol, peut être constitué de racines particulières ou d'excroissances latérales volumineuses de racines restées horizontales dans le substrat. Semble aider à la respiration des racines de certains arbres qui croissent dans des sols marécageux, donc asphyxiques (mangrove).

podétion. *n.* Formation en colonne du thalle de certains Lichens qui porte les fructifications.

podzol. *n.* Sol très acide, pauvre en éléments nutritifs parce que l'acidité empêche la libération des éléments minéraux (minéralisation) de l'humus par les microorganismes et que l'eau entraîne l'humus en profondeur. Il en résulte une couche (« horizon ») cendrée superficielle (sol cendré), tandis que des couches plus riches se forment inférieurement. Surtout occupé par des landes; cependant, des bouleaux et certains chênes peuvent y pousser.

poil. *n.* Production de l'épiderme qui ressemble à un poil animal. Peut être formé d'une ou de plusieurs cellules. Les poils sont purement *tecteurs,* ou bien sécréteurs d'eau, d'essence, de mucilage, ou de produits irritants (poils urticants). Les *poils absorbants* sont des poils unicellulaires formés par protrusion de cellules de l'assise externe des racines (assise pilifère) peu au-dessus de l'apex et servant à l'absorption de la plus grande partie de l'eau et des substances minérales.

point de compensation pour le gaz carbonique. Intensité lumineuse pour laquelle le gaz carbonique produit par la respiration est absorbé par la photosynthèse, de telle façon que l'assimilation de carbone est nulle. La plante a intérêt à abaisser son point de compensation, de manière à assimiler du carbone dès que l'intensité lumineuse est un peu élevée.

polariloculaire. *adj.* A deux cavités jointes par un canal étroit. Se dit de l'ascospore de certains Lichens.

pollen. *n.* Poussière, en général jaune, émise par les sacs polliniques des étamines des plantes à fleurs. Voir *grain de pollen.*

pollinie. *n.* Ensemble des grains de pollen d'une loge de l'anthère demeurés en tétrades, elles-mêmes réunies en une masse unique par gélification de leurs parois.

pollinisation. *n.* 1° Apport de pollen sur le stigmate où il pourra germer. 2° Mode de transport du pollen.

polyakène. *n.* Ensemble d'akènes provenant des carpelles libres d'une seule fleur. Il s'agit donc d'un *fruit multiple.*

polyamine. *n.* Substance organique polymère à nombreuses fonctions amines (— NH_2).

polyandrie. *n.* Possession de nombreuses étamines dans chaque fleur.

polycarpique. *adj.* Dont la fleur possède de nombreux carpelles, le plus souvent disposés en spirale.

polycentrique. *adj.* Qui possède plusieurs centres de développement, formés à partir d'une origine unique. C'est le cas d'un mycélium qui forme plusieurs structures reproductrices.

polycilié. *adj.* A nombreux cils ou flagelles.

polyembryonie. *n.* Existence dans une même graine de plusieurs embryons, dont certains peuvent être des embryons adventifs.

polygame. *adj.* 1° Qui a des représentants mâles, femelles ou hermaphrodites (fleurs polygames). 2° Qui forme des fleurs polygames (plante polygame).

polyholoside, polyoside ou **polysaccharide.** *n.* Substance à haut poids moléculaire formée par la polymérisation de sucres simples, ou oses. *Ex.* Amidon, cellulose.

polymère. *n.* Substance de haut poids moléculaire produite par polymérisation. *Adj.* Constitué d'éléments nombreux (verticille, corolle polymères).

polymérisation. *n.* Liaison chimique entre de nombreux éléments identiques, ou monomères, pour obtenir un polymère.

polymorphe. *adj.* **(espèce).** Qui peut se présenter sous des formes très diverses. Cependant, les formes ne sont pas constantes en cultures, soit parce qu'elles sont dues à l'influence du milieu, soit parce que des hybridations constantes avec d'autres individus empêchent la transmission héréditaire de leurs caractères. C'est pourquoi les formes en question ne reçoivent pas de nom en taxonomie. Par contre, si elles ont une base génétique et s'il n'y a pas d'hybridation, elles ont droit à une appellation et on peut même les considérer comme autant d' « espèces ». dont l'ensemble est une espèce linnéenne.

polyol. *n.* Substance à nombreuses fonctions alcool (— CH_2 OH, = CH OH, ≡ C-OH).

polyphage. *adj.* Qui se nourrit de diverses substances, ou surtout qui parasite divers hôtes.

polyphylétique. *adj.* Apparu par polyphylétisme.

polyphylétisme. *n.* Dérivation, au cours de l'évolution, d'un groupe d'êtres vivants apparemment semblables, à partir de plusieurs ancêtres distincts.

polyploïde. *adj.* Qui comporte un nombre de chromosomes multiple du nombre diploïde d'autres individus de la même espèce ou de groupes voisins. *N.* Un polyploïde.

polysaccharide. *n.* Syn. de *polyholoside.*

polystique. *adj.* **(filament).** Dans lequel les divisions cellulaires sont transversales et longitudinales, et dont la croissance s'effectue par conséquent en longueur et en largeur.

ponctuation. *n.* Dans une paroi cellulaire lignifiée ou épaissie d'une autre façon, zone au niveau de laquelle la lignine fait défaut ou qui présente un épaississement moindre, sans être perforée dans ces deux cas.

pore germinatif. Dépression arrondie, localisée dans la paroi épaisse d'une spore, par laquelle se fera la germination.

poricide. *adj.* **(déhiscence).** Qui se fait par un ou plusieurs pores, permettant la sortie des graines ou du pollen.

port. *n.* **(d'une plante).** Aspect général.

pourriture. *n.* 1° En général, putréfaction causée par des Bactéries anaérobies. 2° En pathologie végétale, maladie des bois, déterminée par l'attaque de Champignons divers, qui consomment seulement la cellulose (pourriture brune ou rouge) ou aussi la lignine (pourriture blanche).

précurseur. *n.* 1° Être qui se transforme en un autre au cours de la phylogénie. 2° Substance qui se transforme en une autre au cours du métabolisme.

prédateur. *n.* Qui capture et dévore des Animaux. Une plante (Champignon, Angiosperme carnivore) peut être prédatrice de petits Vers ou Insectes.

préfeuille. *n.* La première ou l'une des deux premières petites feuilles de tout rameau auxillaire, en général très distincte des suivantes. Dans le cas d'un rameau formant une fleur, et qui est donc son pédoncule. les préfeuilles sont aussi nommées bractéoles, la feuille axillante étant la bractée de la fleur en question.

préfloraison. *n.* Disposition, dans le bouton, des pièces de la fleur, surtout du périanthe.

préfoliaison ou **préfoliation.** *n.* Disposition des feuilles dans le bourgeon.

préparathécial. *adj.* Qui concerne le préparathécium.

préparathécium. *n.* Chez les Lichens, enveloppe propre à l'apothécie. Ses hyphes ne sont pas épanouis en jet d'eau, comme dans un parathécium, mais rassemblés en coupe. Issu, comme le parathécium, soit du primordium contenant les ascogones, soit, partiellement au moins, du thalle.

présulcus. *n.* Sillon longitudinal antérieur dans la cellule des Algues Dinophycées.

primaire. *adj.* **(faisceau libéro-ligneux).** Qui est issu directement du méristème du sommet de la tige ou de la racine, Comporte du bois et du liber primaires. Entre ces derniers, se place, chez les Dicotylédones et les Gymnospermes, un cambium. Ce dernier ne fonctionne pas encore. Il fournira les formations libéro-ligneuses *secondaires*, qui, le plus souvent, s'étendront entre les faisceaux et les joindront en un cylindre central continu à proprement parler. A noter que ce dernier est parfois continu dès l'état primaire.

primordium. *n.* Ébauche d'une structure quelconque (phyllome, fleur, carpophore de Basidiomycète).

probaside. *n.* Cellule comportant un couple de noyaux (dicaryon) qui vont s'unir. Le noyau diploïde résultant demeurera dans la même cellule, devenue alors métabaside, ou passera dans une métabaside propre, bourgeonnée par la probaside, et subira alors la méiose pour donner les noyaux des quatre basidiospores.

procarpe. *n.* Chez certaines Algues rouges, ensemble de filaments issus de la germination du zygote et de cellules du gamétophyte, dans lesquelles sont déversés des noyaux diploïdes provenant de la division du noyau du zygote (cellules auxiliaires). C'est à partir de ces dernières que se développeront des carposporocystes.

proécie ou **proécidie.** *n.* Chez les Urédinales, ébauche d'écie, qui, après dicaryotisation, donnera une écie vraie.

progamétange. *n.* Chez les Moisissures (Champignons Zygomycètes), filament destiné à donner un « gamétange », c'est-à-dire en fait un gamétocyste.

promycélium. *n.* Filament produit lors de la germination des téleutospores des Champignons des rouilles, à partir de chacune de leurs cellules, ou issu de la spore charbonneuse des Champignons des charbons.

propagation végétative. Voir *reproduction asexuée.*

propagule. *n.* Bouture spontanée assurant la reproduction végétative, ou asexuée.

prosporange. *n.* Élément du mycélium destiné à donner un sporocyste, ou « sporange », chez certains Champignons.

prosporophyte. *n.* Filament cloisonné ou non, issu de l'ascogone après sa fécondation, et qui produira lui-même des ascosporophytes à dicaryons.

prostré. *adj.* Appliqué contre le support.

protandre. *adj.* Dont les anthères sont mûres et libèrent leur pollen avant la maturité du pistil, ce qui empêche l'autofécondation.

protéine ou **protide.** *n.* Substance formée de l'union de nombreux acides aminés. Éléments essentiels des êtres vivants, les protéines constituent toutes les enzymes et forment avec des lipides les membranes cellulaires.

protéique ou **protidique.** *adj.* Qui concerne les protéines.

protéolyse. *n.* Destruction des protéines par les enzymes (protéases) produites par des êtres vivants.

protérogyne. *adj.* Dont le pistil est mûr avant les anthères. La protérogynie est beaucoup plus rare que le phénomène inverse (protandrie) ; elle rend aussi impossible l'autofécondation.

prothalle. *n.* Gamétophyte en forme de lame ou de massif cellulaire. Se dit surtout du gamétophyte des Ptéridophytes.

prothallien ou **prothallique.** *adj.* Qui concerne le prothalle.

protide. *adj.* Voir *protéine.*

protocorme. *n.* Masse tissulaire indifférenciée issue de la germination de la graine des Orchidées.

protonéma. *n.* Filament rampant, notamment celui sur lequel se développent les tiges feuillées des Mousses. Désigne aussi une espèce de filament comparable au thalle de certaines Algues.

protophyte. *n.* Végétal unicellulaire.

protoplasme. *n.* Substance vivante, comprenant les organites des cellules et le hyaloplasme. Par opposition au *paraplasme*, constitué d'éléments inertes mais produits par les cellules vivantes (paroi squelettique des cellules, mucilages externes, etc.).

protoplasmode. *n.* Plasmode de petite taille des Myxomycètes.

protoplaste. *n.* Cellule bactérienne ou végétale privée de sa paroi squelettique et limitée simplement par sa membrane cytoplasmique, comme une cellule animale. Certaines cellules nageuses sont des protoplastes. Ceux-ci peuvent être obtenus à partir de nombreuses cellules en dissolvant leur paroi par des enzymes cellulolytiques et des pectinases.

protothalle. *n.* Syn. de *nématothalle.*

prototrophe. *adj.* Dont la croissance ne nécessite pas certains composés organiques, parce que l'organisme peut les synthétiser. Opposé à *auxotrophe.*

protoxylème. *n.* Premiers éléments de bois, formés avant que la tige ait atteint sa longueur définitive, et étirés ensuite au cours de sa croissance.

proximal. *adj.* Situé près de l'insertion d'un organe, par opposition à distal.

pruineux. *adj.* Qui est recouvert d'un enduit poudreux insoluble, cireux et blanchâtre qu'on peut enlever par un léger grattage.

psammophile. *adj.* Qui affectionne les milieux sableux.

pseudanthe ou **pseudanthium.** *n.* Inflorescence condensée ressemblant à une fleur, comme le cyathium des Euphorbes. Certaines fleurs sont peut-être en fait des pseudanthes (Cypéracées).

pseudo-æthélie. *n.* Sporocarpe composé des Myxomycètes, formé d'un amas de sporocarpes élémentaires sessiles.

pseudo-dichotomie. *n.* Production par un axe de deux rameaux latéraux, au-delà desquels l'extrémité de l'axe elle-même dégénère. L'ensemble ressemble à une dichotomie.

pseudo-mycélium. *n.* Cellules de Levures nées les unes des autres par bourgeonnement, mais demeurées fixées en une sorte de filament irrégulier.

pseudo-paraphyses. *n.* Filaments mycéliens accompagnant les asques, comme les paraphyses, mais dérivant du toit de la jeune fructification et non pas de la base (sous-hyménium).

pseudo-parenchyme. *n.* 1° Masse de cellules qui semble former un parenchyme mais qui est, en fait, constituée de cellules fondamentalement isolées et liées de façon secondaire et lâche. 2° Désigne parfois le faux tissu du carpophore des Champignons, qui est plutôt un plectenchyme.

pseudo-plasmode. *n.* Masse amiboïde qui ressemble à une seule structure à nombreux noyaux, mais est en fait formée de nombreuses cellules distinctes et éventuellement de leurs sécrétions.

pseudopode. *n.* 1° Digitations émises par certaines cellules et susceptibles d'engloutir des proies par phagocytose. Certains pseudopodes sont massifs et, en se rétractant, contribuent au mouvement amiboïde. D'autres sont fins, assez rigides, et reliés les uns aux autres par des ponts de protoplasme. 2° Chez les Sphaignes, pedicelle de la capsule, qui, à la différence de la soie des autres Muscinées, n'est pas formée par le sporophyte (sporogone) mais par le gamétophyte.

pseudothécie. *n.* Voir *pyrénosphère.*

pseudo verticille. *n.* Verticille dont les éléments constitutifs ne sont pas exactement insérés au même niveau.

ptéridologie. *n.* Étude des Fougères et plantes voisines (Ptéridophytes).

ptéridologue. *n.* Spécialiste de la ptéridologie (voir ce mot).

pulvinus. *n.* Renflement situé à la base du pétiole ou des pétiolules de certaines feuilles et assurant éventuellement la motricité de ces parties.

pusule. *n.* Vacuole particulière débouchant à l'extérieur chez les Algues Dinophycées.

putrescible. *adj.* Susceptible de pourrir, c'est-à-dire d'être décomposé par diverses Bactéries anaérobies.

pycnide ou **pycnie.** *n.* Chez les Champignons, formations en bouteille produisant des gamètes mâles.

pycniospore. *n.* Gamète produit par certains Champignons dans des formations en bouteille, ou *pycnides.*

pyrénoïde. *n.* Élément protéique présent dans les chloroplastes d'Algues, traversé par les lamelles plastidiales, et parfois entouré de grains d'amidon diversement disposés.

pyrénosphère. *n.* Formation subsphérique constituée de filaments de mycélium enchevêtrés, abritant le périthèce (fructification en bouteille) de certains Champignons Ascomycètes.

pyxide. *n.* Capsule s'ouvrant par un couvercle.

Q

quadrant. *n.* Groupe de quatre cellules situées dans le même plan et issues de deux divisions consécutives d'une cellule mère.

quiescence. *n.* État de repos d'un bourgeon pendant l'hiver, d'une graine avant la germination, etc.

quinconcial. *adj.* En quinconce. Dans la préfloraison quinconciale, deux pièces sont recouvertes par les marges de leurs voisines, celles-ci sont recouvrantes des deux côtés, la cinquième est recouverte d'un côté, et recouvrante de l'autre. Les éléments sont disposés en un faux verticille et couvrent en fait un tour de spirale et demi. C'est le type le plus fréquent de préfloraison.

quinone. *n.* Substance possédant deux fonctions cétone opposées et fixées à un noyau benzénique ($C_4 H_6 O_2$).

R

rachis. *n.* Élément étroit, central, qui porte les folioles d'une feuille composée pennée. Prolongement du pétiole, il correspond à la nervure médiane du limbe d'une feuille entière.

racine. *n.* Chez les Cormophytes, axe en principe enfoncé dans le sol, ne portant pas de phyllomes, ou appendices (feuilles, etc.). La racine principale prolonge la tige. Parfois elle disparaît et il n'existe que des racines adventives.

radiaire ou **radié.** *adj.* 1° Disposé à la façon des rayons d'une roue : rayonnant. 2° Chez les Lichens, dont le thalle est formé de zones concentriques.

radical. *adj.* 1° Qui naît près de la racine. *Ex.* Feuille radicale, opposée à feuille caulinaire (toutes les deux naissent en fait sur la tige). 2° Qui concerne les racines. *Ex.* Appareil radical.

radicant. *adj.* Qui émet des racines adventives au niveau des nœuds pour s'enraciner, ou parfois s'attacher à un support. *Ex.* Tige radicante.

radicule. *n.* Jeune racine principale de la plantule. Mise en place chez l'embryon, elle prolonge l'axe hypocotylé et la jeune tige. Elle se développera fortement en racine principale (telle la partie comestible de la carotte ou de la betterave), ou bien sera supplantée par des racines adventives chez les plantes à racines fasciculées, comme les Graminées.

raméal. *adj.* Qui concerne les rameaux d'une tige.

rameau d'allongement. Auxiblaste ou rameau long.

rameux. *adj.* Qui présente de nombreux rameaux.

raphé. *n.* 1° Chez les Diatomés pennées, dépression longitudinale médiane des valves de la carapace. 2° Dans les ovules anatropes des plantes à fleurs, zone d'union du funicule avec le tégument unique ou avec le tégument externe du nucelle. Le tégument externe d'un ovule à deux téguments ou le tégument unique d'un ovule unitegminé manquent souvent au niveau du raphé, qui, dans ce dernier cas, semble marquer l'union du funicule et du nucelle.

raphides. *n.* Cristaux d'oxalate de calcium [sel de l'acide oxalique : $(COO)_2$ Ca] en forme d'aiguilles groupées en faisceaux dans des cellules allongées particulières.

rayonnant. *adj.* Voir *radiaire.*

réceptacle. *n.* Axe renflé, portant en général des organes sexuels, qu'il s'agisse d'une portion de thalle, comme celle qui porte les conceptacles de certaines Algues brunes, ou, chez les Phanérogames, d'une dilatation de l'axe floral portant les différentes pièces de la fleur (réceptacle floral).

recombinaison. *n.* Lors de la reproduction sexuée, acquisition par le génome d'un être de caractères héréditaires de son conjoint, en échange de certains caractères qu'il possédait lui-même. Les couples de caractères susceptibles de s'échanger ainsi sont dits *allélomorphes* ou *alléliques.* Ce sont des *allèles.*

réductase. *n.* Enzyme permettant la réduction d'un métabolite (par fixation d'hydrogène ou capture d'électrons).

réductionnelle ou **méïotique.** *adj.* **(spore).** Qui est formée lors d'une réduction chromatique et contient donc moitié moins de chromosomes que la cellule mère.

réfléchi. *adj.* Recourbé en dehors.

réfringent. *adj.* Qui réfracte fortement la lumière.

régressif. *adj.* **(être vivant).** Qui dérive d'ancêtres plus complexes, mais dont la structure s'est simplifiée au cours d'une *évolution régressive.*

rejet de souche. Voir *drageon.*

relicte. *n.* Espèce devenue rare et disseminée. Une espèce peut être une relicte d'un groupe fossile jadis abondant. Une *relicte glaciaire* est une espèce qui survit dans quelques endroits, alors qu'elle occupait toute une aire dont ils étaient des portions, lors de la dernière glaciation.

réniforme. *adj.* En forme de rein ou de haricot.

replum. *n.* Cadre à deux carpelles (Bignoniacées) et auquel sont attachées les graines, restant après la chute des valves des siliques et de certaines capsules. Net surtout chez les Crucifères et la chélidoine.

reproduction asexuée. Qui s'effectue sans l'intervention de gamètes. *Ex.* Les cellules ordinaires d'un sporophyte ou d'un gamétophyte reproduisent un sporophyte ou un gamétophyte identique. Il n'y a pas d'alternance de générations. On parle aussi de multiplication végétative. Les cas où des cellules non sexuées de gamétophytes produisent des sphorophytes (aposporie) sont plutôt des phénomènes de dégradation de la sexualité.

reproduction sexuée. Qui met en cause des gamètes et implique par conséquent une alternance de générations.

réseau paraphysoïde. Dans l'ébauche de la fructification des Champignons Ascomycètes, réseau de filaments stériles joignant le sous-hyménium à la cloche sus-hyméniale et issus des hyphes entourant les ascogones.

réservoir. *n.* Dépression de la cellule des Euglènes abritant les bases des flagelles.

résine. *n.* Substance complexe, insoluble dans l'eau, soluble dans l'alcool, presque solide à la température ordinaire, translucide, non entraînable par la vapeur d'eau (au contraire des huiles essentielles), et contenant des alcools aromatiques ou triterpéniques et des acides aromatiques, terpéniques et aliphatiques.

résinoïde. *adj.* Qui a l'aspect de la résine, en particulier une surface lisse et luisante.

résupiné. *adj.* Retourné. *Ex.* Un carpophore résupiné de Basidiomycète présente son hyménium vers le haut, et, s'il y a un pied, celui-ci est inséré sur la face stérile du carpophore, à l'inverse de la normale.

réticulé. *adj.* Qui présente une ornementation en réseau ou en filet, ou qui est formé d'éléments disposés en réseau.

réticulum endoplasmique. Système de membranes parcourant le cytoplasme d'une cellule et délimitant des espaces qui font communiquer l'extérieur avec la partie contenue entre les deux feuillets de la membrane nucléaire. Lorsque le réticulum est abondant et dense, il devient un *ergastoplasme.*

rétinacle. *n.* Petite formation visqueuse située en bas des caudicules des pollinies des Orchidées Ophrydées, et susceptible de se coller à un Insecte qui transportera ainsi les pollinies.

retrait. *n.* Rétraction causée par la sécheresse. *Ex.* Retrait d'un bois.

reviviscent. *adj.* Susceptible d'entrer en vie ralentie et même suspendue lorsque les conditions sont défavorables (sécheresse, froid) et de recouvrer la vitalité lorsqu'elles redeviennent normales. Des Mousses reviviscentes peuvent ainsi être desséchées et portées à une température proche du zéro absolu (— 273 °C) sans être tuées.

révoluté. *adj.* 1° Enroulé vers l'arrière. *Ex.* Bord révoluté. 2° A bords ainsi enroulés. *Ex.* Feuille révolutée.

rhamnose. *n.* Sucre à cinq atomes de carbone dont l'un porte un groupe méthyl — CH_3. Présent dans divers hétérosides.

rhizine. *n.* Petite formation de mycélium à allure de racine, émise par le thalle des Lichens et fixant celui-ci à son support.

rhizoïde. *n.* Cellule allongée, qui s'enfonce dans le support pour y prélever des matériaux nutritifs. Fonctionne comme une racine (Thallophytes, Bryophytes).

rhizome. *n.* Formation souterraine, en général horizontale, à aspect de racine, mais qui est en fait une tige, portant vers l'apex un ou plusieurs bourgeons susceptibles de se développer en tiges aériennes ordinaires, et munie de feuilles écailleuses réduites et charnues.

rhizomorphe. *n.* Chez les Champignons, cordon de mycélium résultant de l'agglomération de nombreux filaments de celui-ci.

rhizomycélium. *n.* Mycélium d'un Champignon dont les filaments s'enfoncent et se ramifient dans le substrat, à la manière d'une racine.

rhizophore. *n.* Chez les Sélaginelles, axe particulier généralement dépourvu de feuilles, naissant entre les deux branches d'une ramification dichotome de la tige, et se terminant en racine.

rhizoplaste. *n.* Groupe de microtubules prolongeant un cil ou un flagelle dans le cytoplasme, en dessous du blépharoplaste, éventuellement jusqu'au noyau.

rhomboïdal. *adj.* En forme de losange.

rhytidome. *n.* Couche de tissu formée par une assise génératrice externe et repoussée extérieurement, lorsque se développe dans un arbre une nouvelle assise plus interne. Voir *écorce*.

ribitol. *n.* Substance dérivée d'un sucre à cinq atomes de carbone, le ribose, mais où une seconde fonction alcool remplace la fonction aldéhyde.

riboflavine. *n.* Vitamine B_2. Importante dans les réactions d'oxydo-réduction de la respiration cellulaire.

ribosomes. *n.* Organites cytoplasmiques constitués de protéines et d'acide ribonucléique (ARN), au niveau desquels s'effectue la synthèse des protéines à partir des acides aminés du cytoplasme et en fonction de l'information apportée par l'ARN messager, synthétisé dans le noyau.

rosette. *n.* 1° Ensemble des feuilles portées par une tige très courte, au ras du sol. 2° Col réduit de l'archégone des Gymnospermes.

rotacé. *adj.* Formé d'éléments étalés comme les moyeux d'une roue. Corolle rotacée : s'applique souvent à une corolle gamopétale dont les parties libres des pétales sont rotacées.

rouille. *n.* Maladie des plantes due aux Champignons de l'ordre des Urédinales, dont les urédospores sont couleur de rouille.

rouille blanche. Maladie des Crucifères due à un Champignon Oomycète formant des plaques de sporocystes blancs.

rouge neutre. Colorant qui, à concentration suffisamment faible, est absorbé par la cellule et s'accumule dans ses vacuoles. Ne la tue pas : c'est un *colorant vital*.

rudéral. *adj.* Qui habite les ruines. Il s'agit en général de plantes *nitrophiles*.

rupicole. *adj.* Qui vit sur les rochers.

rustique. *adj.* Qui vit sans aucune protection dans les conditions de climat existant en un point donné.

S

S. Abréviation de *Unité Svedberg*. Indique la plus ou moins grande aptitude de molécules ou autres structures à se déplacer vers le fond du tube lors d'une centrifugation. Plus le nombre d'unités S est grand, plus les éléments contenus dans le liquide du tube de centrifugation sont volumineux.

sac embryonnaire. Cavité formée entre les cellules du nucelle de l'ovule des Angiospermes et renfermant le gamète femelle, ou *oosphère*, ainsi que, le plus souvent, deux *synergides* au voisinage de cette dernière, trois *antipodes* à l'autre pôle, et une cellule à deux noyaux (cellule centrale). Les noyaux de la cellule centrale fusionneront entre eux et avec celui de l'un des gamètes mâles apportés par le tube pollinique pour fournir le noyau triploïde d'où sont issus les noyaux de l'albumen.

saccharose. *n.* Le sucre de table (de canne ou de betterave). Sa molécule comporte une molécule de glucose liée à une de fructose.

sagitté. *adj.* En forme de fer de flèche : allongé et aigu, avec deux lobes pointus inférieurs dirigés vers le bas.

sagou. *n.* 1° Fécule extraite de la région centrale de la tige de certains Palmiers et de certaines Cycadacées. 2° L'arbre lui-même.

samare. *n.* Fruit sec indéhiscent (akène) muni d'une aile qui facilite sa dissémination par le vent.

saponoside ou **saponine.** *n.* Hétéroside dont l'aglycone (partie non sucrée) est un triterpène ou un stéroïde et lui confère des propriétés comparables à celles du savon, mais aussi une certaine toxicité.

saprophyte. *adj.* Qui est hétérotrophe et vit sur les produits organiques en décomposition. Les êtres saprophytes tirent du substrat les éléments organiques simples à partir desquels ils synthétisent leur propre substance. *N.* Un *saprophyte*.

sarcotesta. *n.* Partie externe charnue du tégument des graines de certaines Gymnospermes.

savane. *n.* Formation végétale tropicale comportant de hautes herbes (80 cm au moins) et, parmi elles, des Végétaux plus bas et des arbres disséminés, isolés ou en bosquets.

saxicole. *adj.* Qui habite les pierres et les rochers.

scalariforme. *adj.* 1° **(conjugaison).** Mode de conjugaison de certaines Algues Zygophycées dans lequel les cellules de deux filaments différents s'unissent deux par deux grâce à un canal (canal de conjugaison), l'ensemble constituant une sorte d'échelle. 2° **(perforation).** Orifice situé entre deux cellules successives, formant un vaisseau de bois, barré partiellement par des barreaux ligneux parallèles, comparables à ceux d'une échelle. 3° **(trachéide).** Trachéide dont la paroi est imprégnée de lignine, excepté des bandes disposées très régulièrement comme les barreaux d'une échelle.

scarieux. *adj.* Mince, translucide, sec et assez résistant.

schizocarpe. *n.* Fruit dont certaines parties seulement (méricarpes) se séparent, emportent les graines, et sont disséminées comme des akènes. Le reste du fruit (région inférieure, région axiale et base de style) reste en place sur la fleur et disparaît avec elle.

schizogène. *adj.* **(formation sécrétrice).** Qui se forme par écartement des cellules sécrétrices. L'espace ainsi ménagé sert à l'accumulation des produits de sécrétion.

schizolysigène. *adj.* De formation d'abord shizogène puis lysigène.

sciaphile. *adj.* Qui vit à l'ombre.

sclérenchymateux. *adj.* Qui a les caractères du sclérenchyme.

sclérenchyme. *n.* Tissu constitué de cellules, mortes en général, à paroi lignifiée, conférant une certaine résistance mécanique à l'organe qui le possède.

sclérite. *n.* Cellule à paroi lignifiée placée au sein d'un parenchyme non lignifié, isolément ou par groupes (comme les îlots pierreux du parenchyme des poires).

sclérote. *n.* Formation de résistance chez les Champignons, à partie externe coriace. Simple ou multiple (macrocyste des Myxomycètes).

sclérotesta. *n.* Partie moyenne, dure comme un noyau, du tégument des graines de certaines Gymnospermes.

scrobiculation. *n.* État d'un organe scrobiculé ou de sa surface.

scrobiculé. *adj.* Dont la surface est creusée de petites dépressions.

scutellum. *n.* Cotylédon des Graminées, en forme de petit bouclier, séparant l'embryon de l'albumen.

secteur. *n.* Portion de la surface d'un organe circulaire limitée par deux rayons, comme une part de gâteau.

sédoïde. *adj.* En forme de *Sedum*, ou orpins (petites plantes de la famille des Crassulacées), du moins de ceux d'entre eux qui portent de petites feuilles charnues. Lat. *sedoides*.

segment. *n.* 1° Foliole d'une feuille ou pinnule d'une fronde (feuille) de Fougère. 2° Cellule issue de la division d'une cellule apicale de tige ou de racine et ensemble des cellules qui dérivent de sa propre division.

sélection. *n.* Choix d'individus présentant des caractères dont on désire la conservation dans une lignée. Parmi les individus choisis, croisés entre eux, certains ne transmettront pas ces caractères à tous leurs descendants, d'autres par contre, qu'on finira par isoler, le feront et produiront une lignée pure.

sélection naturelle. Théorie selon laquelle, au cours de l'évolution, les conditions de milieu et de compétition avec les autres êtres agissent comme un sélectionneur, et ne laissent survivre que les individus présentant, grâce à des mutations survenues par hasard, tel ou tel avantage. Certains affirment que toutes les nouveautés apparues au cours de l'évolution seraient nées ainsi, c'est-à-dire que tous les caractères seraient ou auraient été, à un moment donné, adaptatifs. Cette hypothèse néo-darwinienne ne semble pas entièrement acceptable.

semence. *n.* Toute formation apte à propager la plante et libérée par elle à cet effet : graine, fruit indéhiscent, infrutescence.

semi-lunaire. *adj.* En demi-cercle.

semi-parasite. *n.* Syn. de *hémiparasite*.

sénescence. *n.* Vieillissement. Phase de dégradation qui suit l'acquisition de l'état adulte et conduit à la mort de l'organisme ou de l'organe.

sénescent. *adj.* En voie de vieillissement.

sénevol. *n.* Hétéroside des Crucifères et des familles voisines, ainsi que des Tropéolacées, dans lequel le sucre (glucose) est lié à un atome de soufre (S-hétéroside), formant lui-même une molécule d'acide isothiocyanique (H-SCN), laquelle est liée, de son côté, à un radical organique (allyle, phényléthyle, benzyle, etc.), et à un sulfate de potassium ou de sinapine (substance azotée des moutardes).

septation. *n.* Formation de cloisons, ou septums. État d'un filament de Thallophyte ainsi septé.

septé. *n.* Qui présente des septums, ou cloisons, spécialement un filament de Thallophyte (hyphe de Champignon).

septicide. *adj.* **(déhiscence).** Qui se fait par déchirure radiale des cloisons du fruit, qui se trouve fendu en deux lames parallèles, de sorte que les carpelles sont séparés.

septifrage. *adj.* **(déhiscence).** Qui se fait par rupture tangentielle des cloisons du fruit. Cela isole les placentas au centre de l'ovaire, mais ne libère pas les graines. La paroi doit s'ouvrir par une autre méthode (loculicide surtout) pour permettre leur dissémination.

septum. *n.* Cloison. 1° En *cytologie* : cloison de séparation entre deux cellules filles formées de façon centripète à partir de la membrane cytoplasmique de la cellule mère, à la manière d'un diaphragme-iris qui se fermerait progressivement. 2° En *morphologie*

florale, cloison délimitant les loges d'un ovaire pluriloculaire.

série aliphatique. Syn. de *série grasse*.

série aromatique. Ensemble des substances organiques à molécule comportant un ou plusieurs cycles.

série de végétation. Suite de groupements végétaux qui, se succédant les uns les autres, mènent progressivement au climax correspondant aux données écologiques du milieu donné (sol, climat, actions des Animaux et de l'homme).

série grasse ou **aliphatique.** Ensemble des substances organiques à molécule non cyclique.

sérologie. *n.* Étude des phénomènes concernant la production, la constitution et le mode d'action des anticorps et des antigènes.

sesquiterpène. *n.* Substance formée de l'union de trois molécules d'isoprène. Les sesquiterpènes sont présents dans de nombreuses huiles essentielles et leur molécule peut former un, deux, ou trois cycles.

sessile. *adj.* Sans pédoncule ou sans pétiole. *Ex.* Feuille sessile.

seta. *n.* Chez les Muscinées, pédicelle du sporogone.

siccative. *adj.* **(huile).** Qui fait sécher les produits (couleurs) auxquels on l'a mêlée, propriété due à la fixation d'oxygène sur les doubles liaisons des molécules de ses acides gras. L'huile de lin est très siccative.

silicule. *n.* Silique très courte, guère plus longue que large.

silique. *n.* Fruit sec des Crucifères essentiellement formé par deux carpelles à placentation pariétale, dont les placentas sont unis par une fausse cloison. La déhiscence libère deux valves par rupture de la paroi de part et d'autre des placentas. Ces valves sont libérées à partir du bas et demeurent longtemps attachées en haut. Il reste un replum portant les graines et la fausse cloison, continuant le pédoncule floral et terminé par les stigmates sessiles.

sillon germinatif. Fente par laquelle germera une spore ou un grain de pollen (souvent *sulcus* dans le second cas).

sillon vestibulaire. Dépression abritant la base de chaque flagelle dans les cellules nageuses de certaines Algues.

sillonné. *adj.* Marqué de sillons, c'est-à-dire de dépressions allongées et étroites.

simple. *adj.* **(feuille).** Qui n'est formée que d'un seul élément comprenant gaine, pétiole et limbe, et non pas plusieurs folioles.

sinué. *adj.* Qui présente des lobes arrondis séparés par des dépressions, ou sinus. Dont la marge est sinuée. *Ex.* Feuille sinuée.

siphon. *n.* Structure présentant de nombreux noyaux, chloroplastes, etc., dans une seule membrane cytoplasmique. Il s'agit donc d'un *syncytium*, comparable à des cellules fusionnées. (*Ex.* Chez les Algues Chlorophycées).

siphonaxanthine. *n.* Sorte de xanthophylle.

siphoné. *adj.* Constitué d'un siphon. *Ex.* Algue siphonée.

siphonéine. *n.* Sorte de xanthophylle.

siphonogamie. *n.* Fécondation s'effectuant, chez la plupart des plantes à fleurs, grâce à un tube pollinique qui amène les cellules sexuées mâles formées par le grain de pollen jusqu'au contact des archégones (Gymnospermes) ou du sac embryonnaire (Angiospermes).

soie. *n.* 1° Élément fin, long et flexible. 2° Pédicule de la capsule du sporogone des Mousses.

sol brun. Sol neutre ou légèrement acide, qui n'est pas délavé comme les podzols, parce qu'il est riche en colloïdes immobiles, avec une zone moyenne brune bien minéralisée, aérée et humide sans excès. Ce sont des sols de régions tempérées sur lesquels poussent, en particulier, des forêts de feuillus et des forêts mixtes, qu sont propices à la culture et aux vergers.

somatogamie. *n.* Union de deux cellules d'apparence ordinaire, végétatives, mais fonctionnant comme gamètes.

soralie. *n.* Plage du thalle des Lichens au niveau de laquelle se forment des sorédies, petites boutures mixtes des deux symbiotes.

sorbitol. *n.* Substance voisine de glucose, mais avec deux fonctions alcool primaire au lieu d'une seule, la seconde remplaçant la fonction aldéhyde. Présent dans les baies de sorbier *(Sorbus aucuparia)*.

sore. *n.* Groupe dense de sporocystes, gamétocystes, ou particulièrement, de sporanges de Fougères.

sorédie. *n.* Bouture, ou propagule, des Lichens dans laquelle un peloton de filaments du Champignon abrite quelques cellules d'Algue. L'ensemble, dispersé, assure la reproduction végétative.

sous-cuticulaire. *adj.* Situé sous la cuticule de l'épiderme. Vivant sous cette cuticule (parasite).

sous-épidermique. *adj.* Situé sous l'épiderme des feuilles ou des tiges. Vivant sous lui (parasite).

sous-hyménium. *n.* Ensemble de filaments situés sous l'hyménium des Champignons Ascomycètes et issus de la prolifération d'hyphes inférieures contenues dans l'ébauche de la fructification. Parmi elles, se trouvent le ou les ascogones. Voir *ménisque sous-hyménial* ou *basal*.

spadice. *n.* Inflorescence entourée d'une ou plusieurs spathes.

spathe. *n.* Grande bractée entourant la base d'une inflorescence ou d'une portion d'inflorescence et la protégeant au moins au début. Caractéristique chez les Aracées et les Palmiers.

spatulé. *adj.* En forme de spatule : allongé inférieurement et dilaté à l'extrémité libre.

spéciation. *n.* Processus par lequel naissent de nouvelles espèces au cours de l'évolution. Les mutations, telles qu'elles sont connues actuellement, y jouent probablement un grand rôle.

spermaties. *n.* Petites cellules émises par des Cryptogames et jouant le rôle de gamètes mâles.

spermatique. *adj.* Chez les plantes supérieures, qui concerne les éléments reproducteurs mâles.

spermatisation. *n.* Fécondation de certains Champignons par des gamètes mâles, ou spermaties.

spermatocyste. *n.* Gamétocyste mâle.

spermogonie. *n.* Formation produisant des spermaties, ou gamètes mâles. Syn. de *pycnide*.

spicastre. *n.* Inflorescence des Labiées à l'aspect d'épi, en fait, épi de cymes complexes.

spiralé. *adj.* Disposé suivant une « spirale ». Feuillées spiralées : alternes et solitaires à chaque nœud, de sorte qu'on obtient une spirale en joignant les feuilles des nœuds successifs. La spirale des botanistes, qui n'est pas située dans un plan, est en fait une *hélice*.

spire. *n.* Spirale ou hélice suivant le cas.

sporal. *adj.* Qui concerne les spores.

sporange. *n.* Sac contenant des spores. Chez les Végétaux autres que les Cormophytes (Mousses, Fougères, plantes à fleurs), il vaut mieux dire *sporocyste*.

sporangiophore. *n.* 1° Filament portant un « sporange »; terme utilisé pour un sporocyste chez les Moisissures. 2° Élément à valeur de feuille, porteur de sporanges, chez les Prêles.

spore. *n.* 1° Cellule libre et éventuellement mobile assurant la reproduction asexuée (voir *spore de répétition*) ou la survie dans des conditions difficiles (spore de conservation). 2° Cellule formée par le sporophyte avec réduction chromatique et donnant naissance au gamétophyte. Dans ce sens, la spore est dite également *méiospore*, ou *spore réductionnelle* (les spores du type précédent étant *équationnelles*). Les cellules des spores (cellules sporales) comportent souvent une paroi gluante ou surtout dure et épaisse qui leur permet d'attendre en état de vie latente les conditions favorables à la germination. Les spores des Bactéries et les ascospores sont des endospores, formées à l'intérieur de la cellule mère et différenciant une paroi propre; en revanche, dans le cas de la plupart des autres spores, c'est la paroi de la cellule mère ou d'un bourgeon produit par elle qui s'épaissit par dépôt d'une substance résistante (sporopollénine). Il en est de même en ce qui concerne les grains de pollen.

spore de répétition. Spore dont le développement reproduit le thalle qui lui a donné naissance. Sa production ne marque donc pas un progrès dans le cycle de développement de la plante. Au contraire, les spores formées avec réduction chromatique donnent un gamétophyte bien différent du sporophyte qui les a engendrées.

sporidie. *n.* Basidiospore très particulière des Ustilaginales; les sporidies naissent en nombre indéterminé sur la métabaside (promycélium) et peuvent bourgeonner.

sporifère. *adj.* Qui produit et porte des spores.

sporocarpe. *n.* 1° Chez les Champignons imparfaits, structure à allure de fructification, mais qui produit des spores destinées simplement à la multiplication végétative. 2° Chez quelques Fougères aquatiques, structure abritant les sores de sporanges.

sporocyste. *n.* Sac contenant des spores. Constitué par la paroi de la cellule mère unique de ces dernières. Se rencontre chez les Thallophytes.

sporodochie. *n.* Syn. de *stroma*.

sporogène. *adj.* Producteur de spores.

sporogenèse. *n.* Formation des spores.

sporogone. *n.* Sporophyte des Mousses, formé d'une *soie* terminée par une *capsule* où se forment les *spores*, et enfoncée, en bas, par un *pied* dans le tissu du gamétophyte, dont le sporogone est parasite.

sporophore. *n.* Syn. de *carpophore*.

sporophylle. *n.* 1° Feuille portant des sores de sporanges. 2° Pièces sexuées de la fleur (étamines et carpelles).

sporophytique. *adj.* Qui concerne le sporophyte.

sporopollénine. *n.* Substance extrêmement résistante formant la paroi externe des grains de pollen et des spores. Produit de la polymérisation d'esters de divers caroténoïdes (carotène, anthéraxanthine, zéaxanthine) associée à une oxydation. L'acide estérifié est lui-même un acide gras, palmitique notamment, et le produit résultant est un polymère à quatre-vingt dix atomes de carbone.

sporulation. *n.* Formation de spores.

sporuler. *v.* Former des spores.

squamiforme. *adj.* En forme d'écaille.

squamule. *n.* Formation ressemblant à une petite écaille.

squamuleux. *adj.* Qui a la forme d'une squamule, ou qui présente des squamules.

statospore. *n.* Chez les Algues Chrysophycées, kyste, ou mieux endokyste, permettant le maintien des espèces dans des conditions de vie latente.

stégocarpe. *adj.* Dont la capsule s'ouvre spontanément (Mousse).

stèle. *n.* 1° Chez les plantes à fleurs, désigne le cylindre central. 2° Chez les Ptéridophytes, il peut y avoir

plusieurs stèles, pourvues chacune de bois, de liber et de péricycle (polystélie). Le phénomène est très rare chez les plantes à fleurs, et les faisceaux de bois et de liber n'ont pas les mêmes caractères dans les deux cas.

stellé. *adj.* Disposé comme les branches d'une étoile.

stéphanoconté. *adj.* Qui possède de nombreux flagelles ou cils formant un collier autour d'une extrémité (spore ou cellule sexuelle stéphanocontée).

steppe. *n.* Zone à végétation peu dense (« ouverte ») où dominent les herbes (Graminées) vivaces se desséchant l'été, mêlées à des plantes annuelles ou des buissons. A la différence de la savane, il n'y pousse pas d'arbres. C'est la *prairie* d'Amérique du Nord, la *pampa* d'Argentine, la *puszta* de Hongrie. Dans les zones chaudes, à longue saison sèche, la steppe forme une région intermédiaire entre la savane et le désert, comme au sud du Sahara; on y trouve alors des arbres, au fur et à mesure qu'on approche de la savane.

stérigmate. *n.* Chez les Champignons Basidiomycètes, petit pédoncule portant une baside et se rompant lors de la libération de cette dernière.

stéroïdes. *n.* Substances organiques à molécule comportant au moins quatre cycles et une fonction alcool secondaire. Le cholestérol est le plus connu; les Végétaux présentent des substances voisines, notamment l'ergostérol qui, sous l'action des rayons ultra-violets, devient la vitamine D_2. Les hétérosides cardiotoniques possèdent une molécule stéroïdique comportant, en plus, un cycle à fonction lactone.

stigma. *n.* Organite formé de gouttelettes huileuses contenant des pigments caroténoïdiques, qui lui donnent une coloration rouge. Situé dans un plaste ou près de ce dernier, rend la cellule sensible à la lumière. Se rencontre chez les Algues flagellées.

stigmate. *n.* Dilatation terminale d'un carpelle ou d'un gynécée, généralement portée par un style allongé et recevant les grains de pollen qui peuvent y germer.

stipe. *n.* 1° Pied d'un Champignon à chapeau. 2° Tronc d'un Palmier ou d'une Fougère arborescente. 3° En général, toute formation colonnaire dressée.

stipité. *adj.* Porté par un pédoncule (stipe).

stipule. *n.* Appendice supérieur de la gaine de la feuille, correspondant à une foliole insérée à cet endroit. Lorsque les stipules, généralement disposées une de chaque côté, semblent insérées directement sur la tige, c'est que la gaine ou base est très courte, mais elle est toujours reconnaissable, surtout sur les premières feuilles du rameau ou de la plante entière.

stipulé. *adj.* Qui possède des stipules. *Ex.* Feuille stipulée.

stolon. *n.* Tige horizontale, formée par un bourgeon axillaire du pied mère, s'allongeant à la surface du sol ou dans la terre. Après un parcours déterminé, il se redressera et formera une nouvelle pousse aérienne. Avant ou après ce développement, il se sépare du pied mère, et assure ainsi la multiplication végétative. Les « coulants » du fraisier sont des *stolons épigés;* la pomme de terre forme des *stolons hypogés* qui se terminent en tubercules.

stolonifère. *adj.* Qui forme des stolons.

stomachique. *adj.* Qui facilite le travail de l'estomac.

stomate ou **stomate aérifère.** Ouverture dans l'épiderme des feuilles et de la tige ménagée par l'écartement de deux cellules (cellules stomatiques). Les échanges de gaz peuvent s'effectuer plus facilement qu'à travers la cuticule des cellules épidermiques.

stomate aquifère. Stomate par lequel est émise de l'eau ou une solution aqueuse qui laisse cristalliser son contenu (calcaire, etc.) en s'évaporant. Les stomates aquifères sont situés à la pointe, aux marges du limbe ou sur la face supérieure de celui-ci, près de la marge. *Ex.* Certaines saxifrages.

strate. *n.* En général, toute couche. Spécialement, couche de cellules; l'épiderme, formé généralement d'une seule strate, en comporte parfois plusieurs.

stratifié. *adj.* Qui comporte plusieurs couches superposées (strates).

streptomycine. *n.* Antibiotique sécrété par un Actinomycète *(Streptomyces griseus)* et inhibant la synthèse des protéines des cellules.

strobile ou **cône.** *n.* Formation fertile dense à aspect d'épi, présente en particulier chez les Ptéridophytes et les Gymnospermes. Porte des éléments sporifères, pollinifères ou ovulifères.

stroma. *n.* 1° Formation massive produite par un mycélium de Champignon et abritant, sans les enclore, des structures reproductrices. Parfois nommée *tubercule*, ou *sporodochie*. 2° Substance fondamentale contenue dans les plastes ou les mitochondries, entourant leurs lamelles.

stromatique. *adj.* Qui concerne le stroma d'un Champignon.

stromatoïde. *adj.* Qui ressemble à un stroma mais est, en général, moins dense.

stylaire. *adj.* Qui concerne le style.

style. *n.* Partie allongée d'un carpelle ou d'un gynécée syncarpe, située entre le ou les stigmates, qui reçoivent le pollen, et l'ovaire, qui contient les ovules. S'il s'agit d'un carpelle isolé on peut parler de *stylode*.

subalpin. *adj.* **(étage).** Situé en altitude entre l'étage montagnard et l'étage alpin, On y trouve le pin à crochets et le mélèze.

subaérien. *adj.* **(Végétal).** Aquatique, mais susceptible d'être émergé une partie de sa vie sans en souffrir.

subclimacique. *adj.* Qui concerne le subclimax ou qui le représente.

subclimax. *n.* État de la végétation, proche du climax, c'est-à-dire stable si certaines conditions de milieu le demeurent elles-mêmes.

subéreux. *adj.* Qui concerne le liège, ou suber, ou qui présente l'aspect et la consistance du liège.

subiculum. *n.* Chez les Champignons, formation de mycélium en forme de disque constituant la base d'une pycnide, d'un périthèce ou surtout d'une apothécie et qui est, dans ce dernier cas, la paroi propre de cette dernière, ou parathécium. Il est essentiellement d'origine sous-hyméniale.

substance de croissance. Substance favorisant la croissance d'un organe ou d'un organisme, ou indispensable à celle-ci, mais qui n'a pas de rôle nutritif. C'est donc une hormone de croissance.

substrat. *n.* 1° Support d'un individu. 2° Substance sur laquelle peut agir une enzyme.

succulent. *adj.* Qui est riche en eau, accumulée dans un parenchyme particulier, et dont la perte est diminuée par l'absence ou la réduction des feuilles (diminution de la surface d'évaporation) et par l'épaississement de la cuticule (résistance à la diffusion). Les plantes succulentes les plus connues sont les Cactées, certaines Euphorbes et les Crassulacées. *N.* Un *succulent*.

sucre. *n.* Voir *glucide*. Le sucre de table est le saccharose, ou sucrose, à douze atomes de carbone et dont la molécule résulte de l'union d'une molécule de glucose et d'une de fructose. Les *sucres aminés* sont des glucides dans lesquels une fonction amine ($—NH_2$) remplace un groupement —OH de la fonction alcool secondaire ($—CH_2\,OH$).

suffrutescent. *adj.* Ligneux en bas et herbacé en haut, et dont seule la partie inférieure survivra à l'hiver. Syn. *sous-frutescent*.

sulcal. *adj.* Qui concerne le sulcus.

sulcus. *n.* Sillon longitudinal postérieur dans la cellule des Algues Dinophycées.

sulfate. *n.* Composé comportant du soufre, un métal et de l'oxygène. Sel de l'acide sulfurique.

sulfure. *n.* Composé ne comprenant que du soufre et un métal. Sel de l'acide sulfhydrique.

supère. *adj.* **(ovaire).** Situé au-dessus des étamines et du périanthe. C'est la position la plus typique.

supralittoral. *adj.* Situé tout à fait à la limite supérieure du niveau de la haute mer, et qui n'est atteint qu'occasionnellement par les flots.

suspenseur. *n.* 1° Chez les Moisissures (Champignons Zygomycètes), filament mycélien portant le gamétange (gamétocyste) et issu du cloisonnement du progamétange. 2° Chez les Phanérogames et certaines Ptéridophytes, filament issu de l'œuf et auquel est attaché l'embryon au début de son développement.

suture. *n.* Ligne d'union de deux régions différentes d'un même organe ou d'organes différents. Peut marquer une union post-génitale (les parties étaient libres puis se sont rapprochées lors de l'ontogénie) ou être congénitale (les parties sont nées unies).

sycone. *n.* Inflorescence et infrutescence du figuier, dont les fleurs des fruits sont logées dans un réceptacle en forme de bouteille.

symbiontes ou **symbiotes.** *n.* Êtres constitutifs d'une association symbiotique.

symbiose. *n.* Association étroite de deux êtres dont chacun bénéficie des produits de l'activité de l'autre. Les Lichens en sont l'exemple le plus connu.

symbiotique. *n.* Qui concerne la symbiose ou la vie en symbiose.

sympode. *n.* Système de ramification dans lequel un segment (article) d'axe cesse sa croissance en formant éventuellement une fleur et une inflorescence, tandis qu'un ou plusieurs bourgeons axillaires supérieurs se développent en autant de nouveaux articles, qui évolueront de la même façon. Lorsqu'il y a deux axillaires, on obtient un *dichasium (ramification pseudo-dichotome)*, lorsqu'il n'y en a qu'un, un *monochasium*, et s'il y en a plusieurs, un *pleiochasium*. Une ramification assez comparable est parfois présente chez les Thallophytes (articles de mycélium des Champignons).

sympodial. *adj.* Qui concerne le sympode. Qui se fait en réalisant un sympode. *Ex.* Ramification sympodiale.

synandre. *n.* Formation résultant de l'union congénitale de plusieurs étamines.

synange. *n.* Groupe de sporanges soudés, plus ou moins reconnaissables chez diverses Ptéridophytes.

synanthéré. *adj.* A anthères soudées post-génitalement.

synapse. *n.* Chez les Algues rouges, pore faisant communiquer deux cellules successives.

synasque. *n.* Formation résultant de l'union de plusieurs asques.

syncarpe. *n.* Fruit composé dont les parties constituantes sont soudées. *Ex.* Ananas.

syncytium. *n.* Structure vivante comportant de-nombreux noyaux dans un seul cytoplasme, enveloppé d'une seule membrane cytoplasmique, comme si plusieurs cellules avaient fusionné. Voir *cœnocyte* et *siphon*.

syngamie. *n.* Fusion de deux gamètes identiques. Voir *isogamie*.

synnema. *n.* Syn. de *corémie*.

synoïque. *adj.* Chez les Mousses, qui possède des organes mâles et femelles sur le même pied et groupés en un même ensemble (« inflorescence »).

systématique. *n.* Voir *système*.

système. *n.* Jadis désignait plutôt une classification artificielle des plantes. A l'heure actuelle, fait allusion à une classification aussi naturelle que possible, tenant compte de tous les caractères connus. La *systématique*, ou *taxonomie*, désigne à la fois la science qui tente d'effectuer cette classification, et le résultat qu'elle obtient ; en ce sens, systématique = système = taxonomie. *Ex.* Taxonomie des Ombellifères, système des Rubiacées, systématique des Monocotylédones.

T

tactisme. *n.* Mouvement automatique d'un être vivant dans son ensemble, en réponse à un stimulus (chimique, lumineux, etc.). Négatif ou positif suivant que l'individu s'éloigne ou s'approche de la source du stimulus. Syn. *Taxie.*

taïga. *n.* Forêt de Conifères des pays froids. Se trouve en Amérique et en Eurasie, au sud de la toundra et au nord des forêts de feuillus.

tallage. *n.* Production de nombreuses pousses par ramification intense dans la portion inférieure de la tige. Caractérise les Graminées.

talle. *n.* Pousse formée par tallage.

tanins. *n.* Ensemble de substances à fonctions phénol et éventuellement acide, liées ou non à des sucres. Abondants dans diverses écorces ; utilisés dans le tannage, c'est-à-dire dans la création, par leur intermédiaire, de liaisons entre les chaînes protéiques des peaux, de manière à augmenter leur résistance mécanique et à les rendre imputrescibles et moins perméables. En médecine, ils sont astringents, antidiarrhéiques et ont aussi des propriétés antiseptiques.

tapis. *n.* Assise de cellules situées dans les sporanges de Ptéridophytes ou dans les anthères de Spermaphytes et destinées à nourrir les spores ou les grains de pollen.

tavelure. *n.* Maladie due à deux Champignons Ascomycètes et se manifestant par des taches brunâtres veloutées sur le pommier.

taxine. *n.* Substance présente dans l'if et responsable de sa toxicité (paralysie, ralentissement du cœur et arrêt de la respiration), constituée, au moins en partie, d'un dérivé de l'acide cinnamique.

taxonomie. *n.* Classification des êtres vivants en groupes (*taxons*) rigoureusement hiérarchisés. Voir *système.*

taxonomique. *adj.* Qui concerne la taxonomie.

tégument. *n.* Enveloppe protectrice, en particulier d'un ovule ou d'une graine. Les téguments d'une graine proviennent de ceux de l'ovule lors de la maturation de l'ovule en graine.

teinture. *n.* 1° Produit de la macération d'une plante sèche dans l'alcool ordinaire ; peut aussi être obtenue à chaud. 2° Solution alcoolique d'une substance quelconque (teinture d'iode).

téleutospore ou **téliospore.** *n.* Spore pluricellulaire des Champignons des rouilles. Chacune de ses cellules est une probaside à dicaryon.

télie. *n.* Chez les Champignons des rouilles (Urédinales), formation produisant des téleutospores, ou téliospores.

téliospore. *n.* Voir *téleutospore.*

tépale. *n.* L'une des pièces du périgone chez les fleurs qui ne possèdent pas de calice et de corolle distincts.

terné. *adj.* Disposé par trois, spécialement en verticilles de trois éléments.

terpène. *n.* Substance résultant de l'union de deux molécules d'isoprène formant éventuellement un ou deux cycles porteurs ou non de fonctions alcool, aldéhyde, cétone ou éther. Les terpènes sont odorants et très importants dans les huiles essentielles de la rose, du géranium, de l'orange, de l'eucalyptus, de la menthe, etc.

terpinéol. *n.* Terpène à un cycle, porteur d'une fonction alcool, cétone ou éther. Les terpinéols se trouvent dans les huiles essentielles du citronnier, de l'eucalyptus, du camphrier, etc.

terricole. *n.* Qui vit sur la terre, ou en partie à l'intérieur.

tétracyclique. *adj.* Possédant quatre cycles, ou verticilles de pièces : une fleur tétracyclique compte deux verticilles de périanthe (calice et corolle), un seul d'étamines, et un de carpelles.

tétrade. *n.* Groupe de quatre cellules, en particulier celui qui est formé lors de deux divisions accompagnées d'une réduction chromatique.

tétragone. *adj.* A quatre angles ; en fait, cubique ou parallélépipédique.

tétrakène. *n.* Groupe de quatre akènes formés par une même fleur. S'applique surtout aux Labiées et aux Boraginacées, où il s'agit des méricarpes d'un schizocarpe.

tétraloculaire. *adj.* A quatre loges.

tétramètre. *adj.* Constitué de quatre éléments.

tétrapennatiséqué ou **tétrapennatipartite.** *adj.* Pennatiséqué ou pennatipartite suivant quatre ordres successifs.

tétrapolaire. *adj.* Champignon dont il existe quatre types de mycéliums haploïdes, chacun pouvant être fécondé par l'un des trois autres ; il y a alors quatre sexes.

tétraspore. *n.* Spore formée par le tétrasporophyte des Rhodophycées (Algues rouges).

tétrasporocyste. *n.* Sporocyste produisant et contenant ensuite des tétraspores (spores formées avec réduction chromatique). C'est le cas des asques et des basides des Champignons et des sporocystes des tétrasporophytes d'Algues rouges.

tétrasporophyte. *n.* L'une des deux phases du sporophyte des Algues Rhodophycées à cycle trigénétique qui produit les tétraspores haploïdes, dont sera issu le gamétophyte.

tétraverticillé. *adj.* Disposé en verticilles de quatre.

thalassothérapie. *n.* Actes thérapeutiques utilisant des produits marins (eau de mer et Algues).

thalle. *n.* Structure végétale ne présentant pas de différenciation en tige et feuille et dépourvue d'appareil vasculaire.

thallin. *adj.* Qui concerne le thalle.

thallophyte. *n.* Végétal constitué d'un thalle.

thèque. *n.* Carapace (lorica) des Algues Dinophycées, intérieure à la membrane cytoplasmique.

thermolabile. *n.* Qui est décomposé à une température plus ou moins élevée, à partir de 60-80 °C par exemple.

thermophile. *adj.* Qui vit à haute température.

thermostable. *adj.* Qui n'est pas décomposé à température élevée.

thiamine. *n.* Vitamine B_1.

thylacoïde. *n.* Vésicule formée à l'intérieur d'un chloroplaste par des invaginations de la membrane interne de ce dernier. Les thylacoïdes sont souvent empilés les uns sur les autres en *granums* plus ou moins développés. Portent la chlorophylle.

thyrse. *n.* Grappe de cymes simple ou composée (grappe de grappes de cymes).

tige. *n.* Axe, en principe aérien, de la plante Cormophyte. Porte des appendices, ou phyllomes, et se prolonge par la racine, qui ne porte pas de phyllomes. La racine vraie, qui prolonge la tige, peut disparaître, et l'appareil radical n'être représenté que par des racines adventives.

tissu. *n.* Ensemble de cellules différenciées de façon identique, unies les unes aux autres suivant un plan ou dans les trois dimensions, et assurant dans leur ensemble une fonction déterminée au sein d'un organisme.

tissu conducteur. Tissu (liber ou bois) assurant le transport de la sève chez les Cormophytes. 2° Tissu mou formé au centre du style, le long des parois internes de l'ovaire et à travers lequel passent les tubes polliniques qui assurent la fécondation des ovules. 3° Tissu spécial formé au centre des styles et sur les placentas, aidant mécaniquement, mais aussi chimiquement, le trajet des tubes polliniques qui, pour féconder les ovules, se déplacent dans son sein ou à sa surface, et qu'il nourrit et attire.

tomenteux. *adj.* Garni de longs poils blancs, mous et entremêlés.

tomentum. *n.* Revêtement de poils rendant l'organe tomenteux.

tordue. *adj.* **(préfloraison).** Dans laquelle chaque pièce recouvre sa voisine par un de ses bords, tandis que son autre bord est recouvert par l'un de ceux de son autre voisine. La corolle de l'ordre des Contortales est à préfloraison tordue. Syn. *contortée*, ou *contortéenne.*

toundra. *n.* Végétation croissant au nord de la limite des forêts (taïga), et correspondant, dans la zonation de la végétation en latitude, à l'étage alpin de la zonation en altitude.

toxine. *n.* Substance généralement protéique sécrétée par un organisme et susceptible de causer des phénomènes pathologiques chez un hôte réceptif.

trachée. *n.* Vaisseau. S'oppose à *trachéide.*

trachéide. *n.* Cellule morte, allongée, à paroi lignifiée, présente dans le bois. Ce dernier peut être entièrement constitué de telles cellules dont les extrémités ne sont pas perforées, à la différence des cellules (articles) des vaisseaux.

trachéomycose. *n.* Envahissement des vaisseaux d'une plante supérieure par les filaments d'un Champignon parasite, entraînant une gêne de la circulation de la sève.

trichoblaste. *n.* Rameau réduit en forme de poil, chez certaines Algues rouges.

trichocyste. *n.* Organite défensif apte à se dévider en un filament qui se détend hors de la cellule.

trichogamie. *n.* Chez certaines Algues rouges et quelques Champignons Ascomycètes, mode de fécondation dans lequel le gamète mâle est reçu par un trichogyne, sorte de poil gluant.

trichogyne. *n.* Poil remplissant une fonction dans la fécondation chez des Algues rouges (Rhodophycées) et des Champignons Ascomycètes. Capture les éléments mâles (spermaties).

trichome. *n.* Ensemble des poils et éléments voisins, surtout chez les Cormophytes.

trichospore. *n.* Spore munie de prolongements filiformes ou spore filiforme de certains Champignons.

trifide. *adj.* Divisé en trois au sommet.

trifoliolé. *adj.* A trois folioles. Est employé parfois, à tort, pour *trifolié.*

trigénétique. *adj.* **(cycle de développement).** Cycle dans lequel l'individu se présente sous trois formes successives dont deux, diploïdes, correspondent au sporophyte et la troisième au gamétophyte. Se rencontre chez les Algues rouges (Rhodophycées) et certains Champignons.

trigone. *adj.* A trois angles. Triangulaire.

trimère. *adj.* Constitué de trois éléments.

trioïque. *adj.* Qui possède des pieds mâles, des pieds femelles et d'autres à la fois mâles et femelles. Se dit de certaines Angiospermes (frêne).

triparti. *adj.* Divisé en trois.

tripennatiséqué ou **tripennatipartite.** *adj.* Pennatiséqué, ou pennatipartite, selon trois ordres successifs.

tripenné. *adj.* 1° Dont les pennes sont divisées en pennes de second ordre elles-mêmes divisées en pinnules de troisième ordre (Ptéridophytes). 2° Dont les folioles sont divisées en foliolules de second ordre elles-mêmes divisées en foliolules de troisième ordre (plantes à fleurs).

triphylétisme. *n.* Dérivation, au cours de l'évolution, d'un groupe à partir de trois ancêtres ou groupes d'ancêtres différents.

triradié. *adj.* Qui comporte trois éléments disposés de façon radiaire, comme trois rayons d'un cercle angulairement équidistants.

triterpène. *n.* Substance formée par l'union de six molécules d'isoprène. Parfois aliphatique, la molécule résultante forme en général quatre ou cinq cycles : triterpènes tétra- ou pentacycliques. Les premiers se trouvent dans des résines et les seconds sont l'aglycone de nombreux saponosides.

trollixanthine. *n.* Sorte de xanthophylle.

tronqué. *adj.* Coupé brusquement de façon transversale.

tropane. *n.* Substance organique à deux cycles avec sept atomes de carbone et un d'azote, dont sont dérivés de très importants alcaloïdes : l'atropine, l'hyoscyamine, la cocaïne.

trophophylle. *n.* Feuille verte ne formant pas de sporanges, et ne servant qu'à la photosynthèse.

tropisme. *n.* Mouvement automatique d'un organe en réponse à une excitation. Négatif ou positif suivant que l'organe s'approche ou s'éloigne de la source du stimulus.

tryptophane. *n.* Acide aminé dont la molécule contient un groupement cyclique azoté (indole).

tubercule. *n.* Toute portion renflée (*ex.* base d'un poil), toute formation tubérisée qui peut être formée par une racine ou une tige. Voir *bulbe solide*, s'il s'agit d'une tige.

tube. *n.* Chez certains Champignons à basides (bolets), faux tissu situé sous le chapeau, creusé de cavités tubuleuses et portant les basides. Semble produit par l'union de nombreuses lamelles.

tube floral. Structure en tube, terminée par les sépales et les pétales, souvent aussi les étamines, qu'elle porte au moins intérieurement. Uni ou non à l'ovaire. Formé par la soudure des régions inférieures des pièces qui le terminent, ou par une excroissance en tube de l'axe floral.

tube germinatif. Premier filament émis par une spore ou un grain de pollen au cours de leur germination.

tube pollinique. Tube produit par la protrusion du contenu du grain de pollen lors de sa germination. Circule dans ou sur le tissu conducteur. Contient les gamètes mâles et va les déposer jusque dans une synergide du sac embryonnaire des ovules, d'où ils pourront féconder l'oosphère et la cellule centrale de ce dernier.

tubérisation. *n.* Phénomène d'accumulation de réserves dans les cellules d'un organe qui est alors dit *tubérisé*.

tubérisé. *adj.* **(organe).** Renflé parce que ses cellules sont chargées de substances de réserves (amidon, inuline, etc.).

tubuleux. *adj.* A pièces soudées en tube, au moins vers le bas.

tuf. *n.* Roche calcaire constituée par précipitation du calcaire au contact des Mousses et d'autres Végétaux aquatiques ; en absorbant pour leur photosynthèse le gaz carbonique dissous, ceux-ci empêchent la solubilisation du carbonate de calcium sous forme de bicarbonate.

tuniqué. *adj.* Muni d'une tunique.

turgescence. *n.* Augmentation de volume d'une cellule due à la rétention d'une quantité d'eau qui dépend de la résistance de la paroi squelettique cellulaire. L'entrée de l'eau est due elle-même à la pression osmotique déterminée par la concentration du contenu de la cellule.

type sexuel. Caractère d'un mycélium haploïde de Champignon définissant son aptitude ou son inaptitude à être fécondé par le ou les autres types sexuels de la même espèce. Distinct du sexe du mycélium, qui peut par ailleurs être monoïque ou dioïque.

U

ubiquiste. *adj.* A aire très étendue, couvrant presque toutes les terres, les eaux douces ou les mers.

ultra-violets. *adj.* **(rayons).** Rayons lumineux invisibles à l'œil et situés dans le spectre au-delà du violet. Nocifs pour les cellules non protégées. Utilisés pour stériliser.

unilatéral. *adj.* Qui comporte des éléments disposés d'un même côté. *Ex.* Inflorescence unilatérale, c'est-à-dire dont les fleurs ne sont que d'un seul côté.

uniloculaire. *adj.* Qui possède une seule loge ou cavité, qu'il s'agisse d'un sporocyste, d'un gamétocyste ou d'un ovaire de plante à fleurs.

uninervié. *adj.* Qui possède une seule nervure.

uniovulé. *adj.* A un seul ovule.

unipolaire. *adj.* Qui possède un seul pôle de développement. *Particult.*, qui germe en émettant un seul filament (cas d'une spore).

uniséminé. *n.* Qui ne contient qu'une seule graine.

unisérié. *adj.* **(filament).** Formé d'une seule série de cellules.

unisexué. *adj.* Qui possède des organes appartenant à un seul sexe. *Ex.* Fleur unisexuée.

unistrate ou **unistratifié.** *adj.* Qui comporte une seule couche de cellules.

unitegminé. *adj.* Qui comporte un seul tégument (enveloppe protectrice) ; se dit surtout d'un ovule.

urcéolé. *adj.* En forme de grelot.

uréase. *n.* Enzyme décomposant l'urée [$CO\ (NH_2)_2$] en carbonate d'ammonium.

urédie. *n.* Formation du thalle des Urédinales, au niveau de laquelle sont libérées les spores jaunes (urédiospores) qui propagent le mycélium diploïde.

urédiospore. *n.* Chez les Urédinales, spore à dicaryon propageant le mycélium diploïde.

uricase. *n.* Enzyme décomposant l'acide urique, substance apparentée aux bases puriques.

ustilagospore. *n.* Spore des Champignons des charbons (Ustilaginales), à paroi noire. Correspond à l'une des cellules de la téleutospore des Champignons des rouilles : c'est une probaside qui produira une métabaside en forme de promycélium.

V

vacuole. *n.* Cavité cellulaire limitée par une membrane simple contenant un milieu aqueux, avec des enzymes, ou parfois gazeux.

vacuole contractile ou **vacuole** ou **vésicule pulsatile.** Vacuole animée de mouvements de rétraction rythmiques et qui rejette son contenu à l'extérieur. C'est une sorte d'organite excréteur.

vacuolisé. *adj.* Contenant des vacuoles.

vaisseau. *n.* Tube formé par la succession de cellules à paroi lignifiée dont les parois transversales sont perforées. Les vaisseaux sont l'élément essentiel du bois, du moins chez les Angiospermes. Dans une coupe transversale de tronc, ils apparaissent sous forme de pores, au niveau du bois formé chaque année au printemps, lors de la pousse des bourgeons (débourrement).

vallécule. *n.* Dépression longitudinale, en particulier dans le fruit des Ombellifères, et la tige des prêles.

valvaire. *adj.* **(préfloraison).** Dans laquelle les pièces se touchent bord à bord sans se recouvrir en aucune façon et sans se replier.

valve. *n.* 1° Élément de la paroi d'un péricarpe libéré en grande partie lors de la déhiscence. 2° Élément comparable de certaines anthères.

variation génétique. Apparition par mutations de caractères nouveaux. Mis à part les cas d'isolement géographique, ces mutations ne conduisent à la formation d'espèces nouvelles que si certaines d'entre elles empêchent l'hybridation des individus qui les présentent. Sinon, les caractères sont constamment recombinés et l'espèce reste unique, bien que polymorphe.

variété. *n.* Ensemble d'êtres appartenant à une espèce donnée mais présentant des caractéristiques propres qui se conservent parce que la plupart d'entre eux ne peuvent se croiser avec les autres individus de l'espèce. Un tel croisement est toutefois toujours expérimentalement possible. Il n'y a pas de limite tranchée entre une variété bien distincte du *type* de l'espèce et une autre espèce séparée de la première par le seul isolement géographique. Beaucoup de variétés sont ainsi des espèces en formation.

vascularisé. *adj.* Qui présente des vaisseaux ou des éléments comparables (trachéides) conduisant la sève, et constituant la *vascularisation* de l'organe.

vaso-constricteur. *adj.* Qui détermine une réduction du diamètre des vaisseaux sanguins, artériels surtout, et élève par là la tension artérielle et combat les hémorragies.

vaso-dilatateur. *adj.* Qui entraîne une augmentation du diamètre des vaisseaux sanguins, artériels surtout, et détermine ainsi une baisse de la tension artérielle.

veiné. *adj.* Marqué de nervures de couleur différente du reste de l'organe. *Ex.* Pétale blanc veiné de rouge. Les marques suivent en général les faisceaux libéro-ligneux.

velouté. *adj.* Qui a l'aspect du velours du fait de poils courts, denses et souples.

velu. *adj.* Couvert de poils longs et rapprochés, mais non emmêlés. Voir *tomenteux*.

velum. *n.* Membrane recouvrant la dépression *(fovea)* qui abrite le macro- ou le miscrosporange de la feuille d'*Isoetes*.

ventral. *adj.* La face ventrale d'une feuille est la face supérieure, ou adaxiale.

ventre. *n.* Portion inférieure renflée d'un archégone abritant le gamète femelle, ou oosphère.

verticillastre. *n.* Groupe de fleurs à allure de verticilles, en fait constituées de cymes.

verticille. *n.* Ensemble de pièces (feuilles, pièces florales en particulier) situées au même niveau et localisées autour d'une tige ou d'un thalle en forme de tige.

vésicule pulsatile. Voir *vacuole contractile*.

vestibule. *n.* Syn. de *fosse vestibulaire*.

vicariance. *n.* 1° Remplacement d'un Végétal par un autre, qui peut être systématiquement très différent, mais est biologiquement comparable. *Ex.* Le maquis de la région méditerranéenne et le chapparal de la Californie comportent des espèces fort différentes, mais biologiquement proches. Il s'agit de convergence dans l'évolution. 2° Existence de taxons (espèces) systématiquement voisins, soit dans deux

régions géographiques présentant les mêmes conditions écologiques, soit dans des zones d'écologie différente de la même région. La considération des différents types de vicariance est intéressante pour l'étude de la spéciation : dans les deux premiers cas, le même milieu a sélectionné des formes biologiquement comparables à partir de sources distinctes ou de la même source, dans le troisième cas, des milieux différents ont sélectionné des formes biologiquement différentes à partir de la même source.

vin de palme. Produit de la fermentation alcoolique de la sève de divers Palmiers, récolté avant l'ouverture des spadices et au niveau de leurs pédoncules lorsque la sève est très abondante.

violaxanthine. *n.* Sorte de xanthophylle.

vitamine A. Substance dérivée du carotène, qui donne deux molécules par rupture de la sienne au milieu de la chaîne. Cette réaction se fait dans le foie. Très importante dans le mécanisme de la vision.

vitamine. *n.* Substance organique nécessaire en très faible quantité à la vie de divers êtres vivants qui ne peuvent la synthétiser bien qu'elle soit indispensable à leur métabolisme.

vivace. *adj.* **(plante).** Qui vit plus de deux ans. Son appareil aérien ne vivant qu'une seule année, une espèce vivace subsiste pendant l'hiver grâce à un appareil souterrain dont les bourgeons forment de nouvelles pousses annuelles au printemps suivant. Un arbre n'est pas *vivace*, mais *pérennant*.

vivipare. *adj.* Qui germe tandis qu'il est encore en place dans le fruit. 2° Dont les fleurs sont rares et remplacées par des bulbilles.

viviparie. *n.* Germination des graines encore en place dans le fruit.

voile. *n.* Membrane constituée d'hyphes entremêlées, qui enveloppe l'ébauche des carpophores de Basidiomycètes.

voile général. Membrane entourant l'ensemble de l'ébauche du carpophore d'un Champignon Basidiomycète. La volve et les verrues sur le chapeau en sont, éventuellement, le résidu à l'état adulte.

voile partiel. Membrane reliant le bord du chapeau à la partie supérieure du pied dans l'ébauche d'un carpophore de Champignon Basidiomycète. L'anneau de l'adulte en est un reste.

voile universel. Membrane enveloppant l'ensemble du primordium du carpophore des Champignons Basidiomycètes. Peut laisser une *cortine* sur le pied avant de disparaître à l'état adulte.

volubile. *adj.* Qui s'enroule en hélice autour d'un support. *Ex.* Tige volubile. Qui possède des tiges présentant cette particularité. *Ex.* Plante volubile.

volutine. *n.* Substance de réserve à nombreux groupes phosphorés dans les cellules de Champignons.

volve. *n.* Chez quelques Champignons, en particulier des espèces mortelles, sorte de coupe membraneuse enveloppant la base renflée du pied.

vrille. *n.* Organe volubile en filament simple ou ramifié servant à certaines plantes pour s'attacher aux éléments du voisinage. La vrille peut correspondre à des feuilles, des folioles ou à des tiges, notamment dans les inflorescences stériles, comme chez la vigne.

X

xanthophylles. *n.* Pigments jaunes ou rougeâtres voisins du carotène mais contenant des groupements —OH sur les groupes terminaux de la chaîne carbonée. Apparaissent en abondance lorsque les feuilles jaunissent.

xérophile. *adj.* Qui affectionne les milieux secs. Se dit d'une plante.

xérophyte. *n.* Plante vivant dans les milieux secs. Voir *xérophile*.

xylanes. *n.* Polymères du xylose (sucre à cinq atomes de carbone).

xylème. *n.* Voir *bois*.

Z

zéaxanthine. *n.* Sorte de xanthophylle.

zoïde. *n.* Cellule libre qui se déplace grâce à un appareil locomoteur.

zoïdogamie. *n.* Fécondation s'effectuant, chez certaines Gymnospermes, par des gamètes mâles à nombreux cils, libérés par le grain de pollen retenu dans une cavité à l'entrée de l'ovule.

zoogamète. *n.* Gamète mobile à flagelles.

zoosporange. *n.* Syn. de *zoosporocyste* (sporocyste contenant des zoospores).

zoospore. *n.* Spore flagellée et par conséquent mobile, qui assure la reproduction asexuée. Certaines, produites par des gamétophytes, peuvent aussi fonctionner comme gamètes, parce qu'elles sont haploïdes.

zoosporocyste. *n.* Sporocyste produisant des zoospores (spores mobiles).

zoosporulation. *n.* Formation de zoospores.

zygomorphe. *adj.* **(fleur).** Symétrique par rapport à un plan, généralement vertical, mais parfois horizontal ou oblique.

zygospore. *n.* Œuf de certains Champignons (Moisissures) formé par gamétangie et à paroi résistante.

zygote ou **œuf.** *n.* Cellule résultant de l'union des deux gamètes, ou cellules sexuelles, produite au cours de la fécondation. Œuf fécondé.

BIBLIOGRAPHIE

CARPENTER, J. R., *An Ecological Glossary* (1938), réimpr., New York, 1962. - CHAMBERS, *Dictionary of Science and Technology*, Londres, 1971. - GATIN C. L., *Dictionnaire de botanique*, Paris, 1924, réimpr. Nendeln, 1969. - GRAY, P. A. éd., *Dictionary of the Biological Sciences*, New York, 1970 ; *id.*, *Encyclopedia of the Biological Sciences*, 2e éd., New York, 1970. - HAMPEL, C. A., éd., *Encyclopedia of Chemistry*, 3e éd. New York, 1972. - HENDERSON'S *Dictionary of Biological Terms*, Édimbourg, 1963. - JACKSON, B. D., *A Glossary of Botanic Terms*, 4e éd., Londres, 1905, réimpr. New York 1965. - KING, R. C., *Dictionary of Genetics*, 2e éd., Oxford, 1972. - SNELL, W. H. & A. DICK, *A Glossary of Mycology*, Cambridge, U.S.A., 1957. - STEEN, E. B., *Dictionary of Biology*, New York, 1973. - TALBOT, P. H. B., *Principal of Fungal Taxonomy*, Londres, 1971. - VAN NOSTRAND, *Scientific Encyclopedia*, 4e éd., New York, 1968.

INDEX DES NOMS CITÉS

L'index donne tous les noms d'espèces, de genres, de familles, d'ordres, et de groupements supérieurs qui figurent dans les volumes I et II (Botanique)

Les espèces et les genres — et exceptionnellement les groupes supérieurs — sont indiqués par leur nom latin (en italique), en général suivi du nom français (en caractères droits), lorsque ce dernier est expressément cité dans le texte. En ce cas, on trouvera le renvoi, par un astérisque, du nom français au nom latin. Des renvois ont également été utilisés pour toutes les variantes désignant un même groupe. *Ex. :*

Abies alba (= A. pectinata) [sapin pectiné] I - 263, **268**, 269 a, **269**; II - 38 b
Abies pectinata
* *Abies alba*
sapin pectiné
* *Abies alba*

Les familles, les ordres et les groupements supérieurs sont normalement mentionnés par leur nom français, suivi éventuellement par leur nom latin.

Figurent également dans l'index les noms de diverses maladies, suivis d'un renvoi aux noms latins des espèces qui les provoquent. *Ex. :*

gommose des agrumes
* *Phytophthora parasitica*

La référence est donnée par l'indication du volume I ou II en chiffres romains et du numéro de la page où se trouve la citation, suivi, le cas échéant, des lettres *a* ou *b*, indiquant respectivement la colonne de gauche et la colonne de droite de chaque page.

Les références sont données, pour les illustrations, par le numéro de la page en caractères gras, et, pour le texte, par le numéro de la page en caractères maigres pour une simple citation, et en italique pour un développement plus complet.

ABRÉVIATIONS

		embr.	embranchement	s/cl.	sous-classe	s/ord.	sous-ordre
		fam.	famille	sect.	section	s/sect.	sous-section
cl.	classe	gen.	genre (genus)	s/esp.	sous-espèce	s/var.	sous-variété
convar.	convariété	gr.	groupe	s/fam.	sous-famille	tr.	tribu
cv.	cultivar	ord.	ordre	s/gen.	sous-genre (subgenus)	var.	variété

A

C

E

H

M

Q

R

S

U

V

W

X-Y

Z

ERRATA

Page 191, volume I, lire le cycle d'alternance de générations des Bryophytes en inversant le sens des flèches.

Page 10, volume II, schéma A, lire « re » au lieu de « ri » et « et » au lieu de « st ».